

**ЭЙНШТЕЙНОВСКИЙ
СБОРНИК**

1972

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ЭЙНШТЕЙНОВСКИЙ КОМИТЕТ

ЭЙНШТЕЙНОВСКИЙ СБОРНИК

1972



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА

1974

УДК 530.12

Ответственные редакторы

В. Л. ГИНЗБУРГ, Г. И. НААН

Составитель

У. И. ФРАНКФУРТ

Э $\frac{20402-0021}{042(01)-74}$ 421-73

© Издательство «Наука», 1974 г.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Переписка А. Эйнштейна и М. Борна. (Перевод И. Л. Гандельсмана и В. Я. Френкеля)	7
Д. Х о л т о н (США)	
Эйнштейн, Майкельсон и «решающий» эксперимент. (Перевод С. Г. Суворова)	104
Б. М. Б о л о т о в с к и й, В. Л. Г и н з б у р г	
Эффект Вавилова — Черенкова и эффект Доплера при движении источников со скоростью больше скорости света в вакууме	212
Я. А. С м о р о д и н с к и й, В. А. У г а р о в	
Два парадокса специальной теории относительности	237
Д. Т е р Х а а р (Англия), Г. В е р г е л а н д (Норвегия)	
Термодинамика и статистическая механика в специальной теории относительности. (Перевод В. А. Угарова)	254
Ю. С. В л а д и м и р о в	
Квантовая теория гравитации	280
С. Г о л д б е р г (США)	
Молчание Пуанкаре и теория относительности Эйнштейна. (Перевод В. А. Угарова)	341
С. Г. С у в о р о в	
Опыт и физическая теория	359

4.12.26

Дорогой Борн!

Вам придется набраться немного терпения. Мой зять обязательно прочтет эту вещь и напишет Вам. Но бедняга должен очень экономить свои силы, так как сердце у него не в порядке. Я уже раз напоминал ему о том, чтобы он посмотрел ее побыстрее. Начало показалось мне отличным, и я думаю, что это впечатление не окажется ошибочным.

Квантовая механика заслуживает всяческого уважения, но внутренний голос подсказывает мне, что это не настоящий Иаков. Теория дает много, но к таинствам Старого ** она не подводит нас ближе. Во всяком случае я убежден, что он не играет в кости. Волны в пространстве $3n$ измерений, скорость которых регулируется потенциальной энергией (например, резиновыми лентами)?...

Я бьюсь над тем, чтобы вывести уравнения движения как сингулярности воспринятых материальных точек из дифференциальных уравнений общей теории относительности.

Горячо приветствую.

Ваш А. Эйнштейн.

* Окончание. Начало см.: «Эйнштейновский сборник, 1971». М., «Наука», 1972. Печатается с небольшими сокращениями.

** Т. е. Бога. (Прим. перев.).

Дорогой Эйнштейн!

После переговоров с Харальдом Бором, который находится в этом семестре в Геттингене, я хотел бы написать тебе об одном деле, которое, собственно говоря, меня не касается, но где-то в душе все же часто волнует и беспокоит. Оно связано с конфликтом между Гильбертом и Броуэром. До сих пор я следил за ним только издали, но недавно был посвящен в подробности Бором и Курантом. При этом я узнал, что относительно письма Гильберта Броуэру ты держался нейтрально, основываясь на том, что каждому нужно позволить вести себя глупо в той мере, в какой он этого хочет. Я, естественно, нахожу это в высшей степени благоразумным, но мне кажется, что некоторые детали сложившейся картины тебе недостаточно известны. Поэтому я и хотел бы тебе написать об этом несколько слов. Возможно, что вскоре по этому поводу у Шпрингера состоится совещание, и Бор говорил мне, что было бы очень хорошо, чтобы оно было проведено в узких рамках редакции. Поэтому я прошу тебя сохранять свой нейтралитет и не предпринимать ничего против Гильберта и его друзей. Если бы ты смог кратко написать мне об этом, то это успокоило бы не только меня, но и Бора и других.

Я хочу только сказать тебе, что это дело меня интересует постольку, поскольку я принимаю участие в Гильберте и озабочен его состоянием. Он очень тяжело болен и вряд ли ему осталось еще долго жить. Любое волнение связано для него с опасностью и потерей тех немногих часов, в течение которых он сможет работать и жить. При этом он еще полон желания жить, считает долгом изложить свои новые основы математики — задача, которой он и посвятил последние силы. Он мыслит яснее, чем когда-либо, и распространенный Броуэром слух о том, что Гильберт не во всем отдает себе отчет, — необычайно бессердечен. Курант и другие друзья Гильберта не раз повторяли, что больного человека надо оберегать от волнений, а Броуэр представил это так, что, мол, мнения и поступки Гильберта более не следует принимать всерьез.

Для Гильберта его выступление против Броуэра является очень серьезным делом. Он и со мной говорил об этом пару недель тому назад, правда, только в самых общих чертах, не вдаваясь в подробности. Он считает Броуэра эксцентричным и неуравновешенным человеком, в руки которого он не сможет передать руководство журналом «Mathematische Annalen». Я думаю, что последние шаги Броуэра как раз и показали, насколько правильна оценка, данная ему Гильбертом. И вообще, по моему опыту, суждения Гильберта не только в математических, но и в общечеловеческих вопросах всегда были меткими и верными.

Предысторию всего дела — спор о поездке на конгресс в Болонью — я знаю очень поверхностно. Мне известно только, что поездку на этот конгресс Гильберт рассматривал как тяжкую обязанность, так как из-за его болезни для этого требовалось неимоверное напряжение. В политических вопросах Гильберт вовсе не левого направления. Наоборот, с моих, а особенно с твоих позиций он был весьма реакционным. Но у него очень острый взгляд на то, чем нужно заниматься ученым различных стран для блага человечества в целом. Поведение в этом деле Броуэра, выступившего с еще более националистических позиций, чем сами немцы, было воспринято Гильбертом, как и всеми нами, как шутовство, но самое скверное заключалось как раз в том, что берлинские математики клюнули на броуэрские глупости. Я хотел бы добавить, что история с Болоньей не явилась окончательным аргументом при решении Гильберта отстранить Броуэра, — это был только повод. В случае Эрхарда Шмидта я могу это понять — в политике он всегда придерживался правых взглядов, и это действительно соответствует его исконным чувствам. У Бибербаха и Мизеса — это симптом, заслуживающий жалости. Я говорил об этом с Мизесом в августе, во время нашей поездки в Россию, и он в самом начале разговора заявил, что геттингенцы просто бегают за Гильбертом, а тот, по видимому, уже не совсем вменяем. Так что это утверждение об ослаблении умственных сил Гильберта возникло еще тогда. В ответ я сразу же прервал разговор с Мизесом, поскольку не считал его достаточно компетентным, чтобы он вообще имел право судить о Гильберте. Я прилагаю еще письмо господина Фердинанда Шпрингера, которое он направил Бору и Куранту. Из него следует, что

Броуэр и Бибербах угрожали Шпрингеру заподозрить его в отсутствии национальных чувств и повредить ему, если он примет сторону Гильберта. Мне, конечно, не следует ничего добавлять по поводу того, как я отношусь к такому поведению. Прости, что я утруждаю тебя моим длинным письмом. Мое единственное желание заключается только в том, чтобы помочь Гильберту в осуществлении его очень важных планов, оградив его от ненужных ему волнений. Если ты сочтешь целесообразным показать это письмо или выдержки из него Шмидту, то я был бы с этим совершенно согласен. Я, по опыту давней дружбы со Шмидтом, верю, что с ним всегда можно договориться, даже если он придерживается других взглядов.

Надеюсь, что и у тебя дела сейчас идут лучше. Я узнаю о тебе только иногда из писем Марго к моей жене. Они обе очень дружны и весьма подходят друг к другу. Сам я занят окончанием книги по квантовой механике, которую пишу уже в течение года. К сожалению, из-за этого я немного перетрудился, и мне придется в январе на некоторое время взять отпуск. В самом деле, не так-то просто выискать время и силы для такой работы из-за занятости лекциями и прочими делами.

Сердечный привет от меня и Хеди всем твоим.

Твой Макс Борн.

Харальд Бор, брат физика Нильса Бора, был выдающимся математиком, который часто приезжал к нам в Геттинген.

Давид Гильберт, мой почитаемый учитель и друг, был и остается сейчас первым математиком своего времени. В то время он был занят тем, что подводил под математику логический и прочный фундамент, чтобы, не жертвуя содержанием математических знаний, устранить внутренние противоречия, присущие области бесконечных множеств, открытых Бертраном Расселом и другими. При этом он исходил из того, что собственно математика должна рассматриваться как некий вид логической игры с символами, для которой установлены произвольные аксиомы. Из этого, однако, следовало выбрать некую «математику», которая покоилась бы на наглядных, действительных выводах. Броуэр отвергал это построение математики и выдвигал другое, которое было названо «интуитивизмом». Оба образа мышления различались в одном существенном заключении. Гильбертовское построение оправдывало так называемое доказательство существования, при котором существование определенного числа или математического факта следовало из того, что принятие противоположного приводило к противоречию. Броуэр же требовал, чтобы существование некоего математического образования (образа) могло быть признано, если только дан способ, с помощью которого его фактически можно было бы

сконструировать. Вместе с тем многие из великих гильбертовских математических работ, имевших характер абстрактных теорем существования, не только приняты математическим миром, но и причислены им к числу огромных достижений.

Поэтому не удивительно, что Гильберт выступлением Броуэра был приведен в состояние очень сильного возбуждения и его возражение звучало весьма резко. Броуэр, со своей стороны, ответил на него с еще большей грубостью. К этому научному спору добавился еще и другой — с политической подоплекой. После войны 1914—1918 гг. были организованы международные союзы, относящиеся ко всем отраслям науки. Однако немцы не допускались к участию в них. Ненависть по отношению к Германии стихала очень медленно, и ко времени, когда было написано это письмо (1928), немецкие математики должны были быть приняты в Международный союз математиков на большом интернациональном математическом конгрессе в Болонье. Но группа «националистически» настроенных немецких математиков выступила с протестом. Поскольку немцы были исключены из союза так долго, то и в дальнейшем безоговорочно следует в него не вступать, следовало заявить протест. К лидерам этого движения протеста относились три знаменитых немецких математика: Бибербах, очень хороший аналитик, Мизес, выдающийся исследователь, который занимался также и теоретической физикой, и Эрхард Шмидт, наиболее выдающийся из них. Я был дружен со Шмидтом еще со студенческих лет, и, хотя мы и были политическими антиподами, между нами сохранялась сердечная привязанность.

Голландец Броуэр вел себя как наиболее ярый немецкий националист. Несмотря на свою тяжелую болезнь, Гильберт поехал на конгресс в Болонью и выступил там против оппозиции. Насколько я припоминаю, он настоял на своем, и немцы вступили в союз. Но он был так рассержен, что отстранил Броуэра от руководства «Математическим журналом». Это вызвало новую бурю в среде немецких математиков. Однако в конце концов Гильберт одержал верх. Меня все это дело по существу не касалось, но, как видно из письма, забота о состоянии здоровья Гильберта побуждала меня вмешаться. Гильберт страдал от злокачественного малокровия и, вероятно, умер бы от него вскоре, если бы Мино незадолго до этого (1926) в США не открыл особое лекарство (экстракт печени). Его еще не было в продаже, но с помощью жены геттингенского математика Эдмунда Ландау, дочери Пауля Эрлиха, основателя химиотерапии, открывшего сальварсан, Гильберт регулярно получал медикаменты. Он прожил еще многие годы.

Мое письмо к Эйнштейну, вероятно, не оказало никакого действия на ссору математиков.

Что касается дальнейшего развития основных проблем математики, то Броуэр имел многих приверженцев и среди них таких выдающихся, как Герман Вейль. Но постепенно стало ясно, что абстрактный подход Гильберта оказался намного глубже. Такую перемену повлекло за собой открытие Геделя, в котором были даны математические теоремы, доказательство которых невозможно. Сегодня математика еще более абстрактна, и то же самое справедливо и для теоретической физики.

Упоминаемое в письме путешествие в Россию (во время которого я разговаривал с фон Мизесом о конфликте между Бро-

уэром и Гильбертом) представляло собой «подвижный» съезд русских физиков, который был организован упоминавшимся ранее Иоффе (Ленинград). Съезд начался в Ленинграде, продолжался в Москве, а потом и в Нижнем Новгороде. Здесь участники съезда сели на пароход и поплыли на нем вниз по течению, причем пароход останавливался во всех крупных городах, где проводились заседания конгресса. Все это было очень захватывающим и впечатляющим, но и исключительно утомительным. Я доехал до Саратова и оттуда железнодорожным путем — обратно в Германию. Но все это непосредственно сюда не относится.

Упомянутая мною в конце письма книга по квантовой механике была написана в результате многолетней совместной работы с Иорданом. Я вернусь к ней позднее.

*Институт теоретической физики
Университет
Геттинген
Бунзенштрассе, 9
13.11.29*

Дорогой Эйнштейн!

В суматохе начала семестра я так и не смог ответить на твое большое и милое письмо. Я хотел прежде всего обсудить твои замечания с Иорданом, а он только недавно приехал. Мы очень благодарны тебе за твою критику и в соответствии с ней изменили соответствующие места в нашей книге. Действительно, ты совершенно прав в том, что логически нельзя оправдать будущее принятие или отрицание детерминизма. Ведь всегда можно найти способы описания процессов, которые будут существенно глубже, чем те, что нам уже известны (как это и подчеркивает твой пример с кинетической теорией в сравнении с макроскопической теорией). Иордан и я не склонны верить в нечто такое, но, конечно, не следует утверждать больше того, что может быть строго доказано. Словом, соответствующий кусок мы изменили в этом духе.

Сейчас я читаю релятивистскую теорию, и не только для того, чтобы преподавать ее студентам, а также для того, чтобы самому почувствовать себя в этом предмете как дома. Я надеюсь успеть это сделать до появления твоих новых работ, которые также собираюсь тщательно изучить и сообщить тебе о своем мнении.

Господин Румер находится здесь, в Геттингене. От господина Варбурга из Гамбурга он получил поддержку с тем, чтобы иметь возможность некоторое время еще познакомиться.

У жены все хорошо, ей очень хочется только, чтобы сюда как-нибудь приехала Марго. Я хотел бы организовать некий заговор. У Хеди 14 декабря день рождения. Нельзя ли было бы сделать так, чтобы Марго неожиданно появилась? Это доставило бы ей огромную радость.

Сердечный привет твоей жене и Марго.

Твой Макс Борн.

Письмо Эйнштейна, содержащее его критику одного места из моей и Иордана книги, к сожалению, кажется, утеряно. Но суть его замечаний становится ясной из моего письма. Я хотел бы сказать несколько слов об этой книге. Вскоре после появления квантовой механики я опубликовал в сотрудничестве с Фридрихом Хундом (в то время моим аспирантом) книгу «Лекции по атомной механике» (Берлин, 1925), которая была основана на теории Бора и Зоммерфельда. Согласно этой теории, «квантовые условия» являются надстройкой на классические механические законы. Недавно она снова вышла в Америке в переводе на английский, выполненном Фишером и Хартри (Нью-Йорк, 1960). В предисловии к этой моей книге написано: «Я рассматриваю эту книгу как I том. II том будет содержать более высокое приближение к «окончательной» атомной механике. Я знаю, что обещание о подобном II томе является несколько смелым, поскольку пока что имеются еще мало-численные и неясные указания о характере отклонений, которые должны быть рассмотрены для объяснения атомных явлений на основе классических законов; но в этом году появились работы Гейзенберга, Иордана и мои, которыми было положено основание новой механике». Так что я мог вскоре начать этот упоминавшийся II том — в сотрудничестве с Иорданом. В предисловии к этому тому значится: «Надежда на то, что завеса, которой была в то время закрыта истинная структура атомных законов, должна вскоре исчезнуть; исполняется все убыстряющимся и все более основательным темпом». Работа над II томом продолжалась несколько лет. Между тем появилась волновая механика Шредингера, которая завоевала симпатии физиков-теоретиков в такой степени, что наш матричный метод совершенно отошел на задний план — особенно после того, как сам Шредингер доказал математическую эквивалентность волновой и матричной механики.

Иордан и я, однако, были убеждены, что наш путь был лучше и что предпочтение, оказываемое волновому уравнению Шредингера, покоится только на том, что это уравнение связано с привычными представлениями математической физики (проблема собственных значений колеблющихся систем). Сам Шредингер даже утверждал — и всю свою жизнь твердо придерживался этого, — что он своей теорией квантово-теоретических особенностей устранил квантовые скачки и т. п. Мы же придерживались того мнения, что открытый Гейзенбергом путь глубже проникает в суть вещей. Волновые уравнения в пространстве более чем трех измерений не означали возврата к классическому объяснению.

Хотя я в своем статистическом толковании квантовой механики (1926) опирался, помимо прочего, на то, что соударение одних частиц с другими рассматривал как рассеяние волн, но это было только простейшим предельным условием, в пределах которого еще допускалось трехмерное наглядное представление. Иордан и я видели в квантовой механике, которая была развита нами в Геттингене и независимо — Дираком в Кембридже, развитие боровского принципа соответствия, — именно поэтому наша книга и была посвящена Нильсу Бору. Мы предполагали написать еще один — III том всей этой работы, посвященный волновой механике, в котором хотели подчеркнуть ее значение, но он так и не был написан. Работа по подготовке второго тома продолжалась гораздо дольше, чем мы думали, а затем наши пути разошлись.

Общее настроение в пользу соответствующих шредингеровских идей привело к тому, что второй том не встретил благоприятного приема. Я особенно вспоминаю критику, которую опубликовал Паули и которая была прямо-таки уничтожающей.

Сегодня положение представляется иным. На конференции нобелевских лауреатов по физике в Линдау этим летом (конец июня 1965 г.) Дирак в своем докладе сообщил, что причину больших трудностей в квантовой теории поля, которые приводят почти к гротескным искусственным приемам типа перенормировок и т. п., он видит в том, что при этом исходят из шредингеровских, а не из гейзенберговских идей. Он зашел при этом настолько далеко, что сказал: «из двух приближений шредингеровское представляет собой плохую теорию, а гейзенберговское — хорошую*». Я думаю, что Дирак был прав и что предпочтение, оказывавшееся Шредингеру, покоилось только на том, что он работал в рамках привычных представлений.

Поэтому наша старая книга, вероятно, еще доживет до новых идей нового Ренессанса. Между тем почти все появившиеся тем временем учебники обращались в первую очередь к волновой механике.

После этого физического отступления я снова возвращаюсь к эйнштейновскому письму. Иордан и я, очевидно, посылали ему корректуры нашей книги, — вероятно, в надежде на то, что нам удастся склонить его с отрицательных по отношению к квантовой механике позиций на свою сторону. Но этого не случилось. Особенно вызвало протест с его стороны то место (по-видимому, в предисловии), в котором мы указывали на статистическое понимание физики как на окончательное. Мы поддались на его желание изменить это место, хотя наше мнение и оставалось неизменным. И оно сегодня, вероятно, разделяется большинством физиков.

В последующих письмах речь пойдет еще о многих дискуссиях с Эйнштейном.

* Высказывание Дирака процитировано на английском языке, (Прим. перев.).

14.12.29

Дорогой Борн!

Твое ясное письмо меня очень обрадовало. В большом и малом проявляется все же, кто представляет собой цельную натуру.

Господин Румер мне очень понравился. Его идея привлечения многомерных множеств оригинальна и формально хорошо осуществлена. Слабость коренится в том, что найденные таким образом законы не полны и пути для логического обеспечения и полноты не предвидятся.

Во всяком случае было бы хорошо, если этому человеку будет предоставлена возможность для научной работы. Самым лучшим, конечно, было бы просить о должности, которая оставила бы достаточно досуга для свободных занятий.

К сожалению, у нас ничего такого нет. Нельзя ли было бы для таких случаев получить место преподавателя в гимназии или другие должности с уменьшенной нагрузкой и оплатой? Это, безусловно, лучше, чем выданная на срок стипендия, так как аист, приносящий духовного новорожденного, является чересчур вольной птицей, не признающей сроков выполнения поставок.

Сердечный привет

твоей

(без подписи).

Институт теоретической физики,

Университет

Геттинген

Бунзенштрассе, 9

19.12.29

Дорогой Эйнштейн!

Я очень рад тому, что ты хочешь принять г-на Румера. Идея направить его на какую-либо должность, которая оставила бы ему время для научной работы, теоретически, конечно, очень хороша, но практически трудно выполняема. Очень желательным было бы обеспечение местом преподавателя гимназии с уменьшенным количеством часов и оплатой, но, конечно, и осуществить это очень трудно и, наверное, возможно только после многолетней подготовки. Мои собственные отношения с Министерством чересчур

слабы для того, чтобы пробить что-либо в этом отношении. Но, может быть, понадобится твое влияние. Мне это в самом деле представляется практической задачей, при решении которой можно будет обратить на пользу молодым людям весомость твоего имени. Не мог ли бы ты попроситься на прием к Министерскому директору Рихтеру и изложить ему это дело?

Но в настоящее время господина Румера эти песни на будущее (Zukunftsmusik) не устраивают.

У него, кстати, есть практическое образование — техникум в Ольденбурге, где он сдал выпускной экзамен. Он мог бы найти место на практической службе, но при царящей сейчас безработице иностранцу найти работу в Германии — дело абсолютно безнадежное.

В настоящее время, как мне кажется, действительно ничего не остается, как обеспечить ему, по крайней мере на год, стипендию. Моя жена говорила мне, что ты собираешься сделать это вместе с Эренфестом, и именно из Рокфеллеровского фонда. Лично я не хотел бы обращаться туда сейчас ни при каких обстоятельствах, поскольку со мной они обошлись скверно. Весной у нас был Тисдаль, и когда он увидел, что у меня тяжелое нервное переутомление, то предложил попробовать направить меня на пару месяцев в Калифорнию за счет Рокфеллеровского фонда. Сначала я от этого отказался, так как надеялся отдохнуть в течение больших каникул. Но когда после этих больших каникул я почувствовал себя неважно, то снова написал Тисдалю, вернувшись к вопросу о его предложении.

В ответ на это он в довольно резкой форме отказался ходатайствовать перед центральными органами. Я могу себе это объяснить только тем, что рокфеллеровцы что-то имеют против Геттингена. Может быть, что-то произошло при основании Математического института, но мне это неизвестно. Поэтому как раз сейчас мне не хотелось бы туда обращаться с ходатайством.

Будь, пожалуйста, добр, и напиши господину Тисдалю (Рокфеллеровский фонд, 20, rue de ля Бом, Париж) ходатайство о стипендии г-ну Румеру на 1 год пребывания у тебя, или же у меня, или где-либо еще и добавь, что Эренфест и я поддерживаем эту просьбу. Но я не хочу скрывать от тебя трудности: в общем случае у этих попечителей фонда железный принцип — давать стипендии только тем людям, которые способны показать, что по

окончании срока выплаты стипендии они будут в своей стране обеспечены оплачиваемой должностью, а Румер не из таких. Но, возможно, твое имя в этом случае приведет к исключению из такого правила.

Лауэ прислал мне милое приглашение прочитать в январе доклад в Физическом обществе, в Берлине. Я принял его очень охотно, так как не видел всех вас с незапамятных времен. Правда, у меня нет никаких физически красивых проблем, о которых можно было бы рассказать.

Привет вам всем, особенно Марго, от Хеди.

Твой Макс Борн.

Эйнштейн все чаще и чаще высказывал мысли о том, что стремление к познанию не должно быть связано с практической работой, дающей средства для жизни, но что исследования должны являться чем-то самостоятельным. Сам он написал свою первую большую статью, когда зарабатывал себе на хлеб работой в качестве служащего в швейцарском бюро патентов в Берне. Только так, полагал он, можно утвердить свою духовную независимость. Его предложение о том, чтобы Румер подыскал себе место учителя в гимназии с сокращенным (по сравнению с нормой) числом преподавательских часов, имело непосредственное отношение к этому кругу людей.

Но он не принял во внимание то, что почти в каждой профессии имеется организационная косность, и ту важность, которую каждый приписывает своей деятельности, без чего, конечно, не могло бы развиваться и служебное рвение.

Чтобы с успехом заниматься наукой в виде побочного труда, нужно было быть Эйнштейном.

Тисдаль был, как видно из текста письма, представителем Рокфеллеровского фонда в Европе. Из поездки в Америку ничего не получилось: после 1926 года я никогда больше там не был.

22.2.31

*Проф. д-р Макс Борн
Геттинген,
Виль Веберштрассе, 42*

Дорогой Эйнштейн!

После того как Хеди видела в киножурнале твой приезд в Калифорнию, мы решили, что вы совсем пропали в суматохе и сутолоке американской жизни. Тем большую радость доставила нам ваша открытка, которая пришла сегодня. Так приятно сознавать, что вы иногда о нас думаете. Наверное, ты сейчас размышляешь о космологии, расширяющейся Вселенной и тому подобном. Эти вещи

мы слушали на астрономическом семинаре, причем с разъяснениями выступил Вейль. Вейль вообще удивительно оживил круг наших физиков. Он часто приходит на физический коллоквиум и регулярно на мой теоретический семинар, часто берет слово, и все, что он рассказывает, необычайно живо, умно, остроумно. Мои молодые ребята многому научились у него, но и он сам, благодаря семинару, сделал две маленькие работы о применении теории групп к молекулам и валентностям (появятся в Геттингенских Изв.). Очень приятно и личное общение с супругами Вейль, оба они очень интересуются литературой, благодаря чему у них установился контакт с Хеди.

Я рад тому, что семинар скоро кончится, так как ужасно много работал. Я мучаюсь с квантовой электродинамикой и верю, что здесь у меня есть некоторые перспективы, но все это чудовищно трудно. Проблема заключается в исключении бесконечной собственной энергии электрона и всего, что с этим связано. Наряду с этим я обрабатываю свои лекции по оптике, которые хотел бы издать с целью заработка. В остальном о Геттингене мне рассказать нечего. Иногда можно сходить в кино и увидеть, как хорошо в других местах, а ваша открытка с апельсиновым деревом пробудила в нас тоску по дальним странам. Несколько лет тому назад, кажется, в Комо, меня спросил Милликен, не хотел ли бы я на полгода приехать в Пасадену. Тогда я ответил, что, пока мои дети еще так малы, мне не хотелось бы разлучаться с ними надолго. Теперь девчужки почти взрослые, и мы легко могли бы уехать на пару лет. Не мог ли бы ты при случае спросить у Милликена, не понадобится ли я ему через $1\frac{3}{4}$ —2 года? Раньше я не смогу и по другим причинам, мне придется как раз с октября пробыть в течение года на должности декана. Полных 10 лет я отбивался от этого места, частично правдой, частично надуманными трюками, а теперь уже больше ничего не выходит... Но надеюсь пережить и этот год. Мой сотрудник Румер, о делах которого я тебе как-то писал, может остаться у меня еще на один год. Мой ассистент Гейтлер уезжает летом в Америку (Колумбия, Огайо), и Румер будет его замещать, а на зиму я денег накланчил. На рождественских каникулах я в течение 12-ти дней гостил у одного приятеля — промышленника в Швейцарии (Ароза), а на обратном пути был в Цюрихе. Там, по приглашению студенческого общества,

прочел доклад, а после этого мы продолжили беседу в пивном баре, где я познакомился с твоим сыном. Он мне очень понравился — у него изящный и острый ум и точно такой же великолепный смех, как у тебя.

Ну, что еще осталось рассказать?

В Европе все выглядит как-то неуютно и политически, и экономически.

У нас есть и личные заботы об «отделившихся» родственниках, так же как и у большинства людей. Но надеюсь на лучшее, несмотря на Гитлера и его компанию.

О Калифорнии я хорошо осведомлен; как раз читаю удивительно живые путевые письма Эренфеста, которые он прислал Хеди. Как этот парень умеет все переживать, видеть, изображать! Читая, я совершенно отчетливо вижу калифорнийский ландшафт и милых тамошних людей, особенно Толменов, Эпштейна, Милликенов! Передай им всем от меня привет! Хеди сама припишет еще несколько слов.

Письмо будет тебе заодно и поздравлением с наилучшими пожеланиями ко дню рождения. Оно должно поспеть как раз вовремя.

Передай сердечный привет жене!

О Марго, молодой супруге, мы почти ничего не знаем.

Твой Макс Борн.

Намек о космологии и расширении Вселенной, сделанный в письме, связан с произведшим сенсацию открытием американского астронома Хаббла. Оказалось, что далекие звездные системы, которые называют галактиками, — каждая из которых такова же, как Млечный путь (галактическая система в прежнем понимании этого слова), разбегаются друг от друга со скоростями тем большими, чем на большем расстоянии друг от друга они находятся. С этого начался новый подъем в космологии, стимулированный эйнштейновской общей теорией относительности.

Герман Вейль, который одновременно со мною был в Геттингене сначала студентом, а позднее приват-доцентом, был преемником Гильберта. Вейль был одним из последних крупных математиков, которые также занимались теоретической физикой и астрономией и внесли в них важный вклад. Когда Гитлер пришел к власти, Вейль уехал в Принстон, в Институт теоретических исследований, где работал также и Эйнштейн.

В чем заключалась моя попытка продвинуться в области квантовой электродинамики, я совершенно не помню. Вероятно, она оказалась несостоятельной.

Год, в течение которого я был деканом (1932), был одним из самых неудачных во всей моей академической карьере. Кризис, возникший в Европе из-за краха американской финансовой системы,

принудил немецкий кабинет, возглавляемый канцлером Брюнингом, к крайним мерам экономии. Благодаря этому университеты должны были сократить свой значительный процент младших ассистентов и других оплачиваемых сотрудников. Многие из членов нашего факультета естествознания сочли это возмутительным. В первых, было ужасным выгонять за порог молодых и устремленных к знанию людей, многие из которых уже имели семьи, и тем самым ставить под удар их и без того трудное финансовое положение. Затем это парализовало деятельность института, которая быстро скатывалась к застою. Мы создали Комитет и решили предложить факультету, чтобы оплата большинства тех, кого коснулось сокращение, производилась за счет добровольного сбора — он составлял менее чем 10% нашего жалования. Мне до сих пор страшно вспомнить те битвы, которые это предложение вызвало на факультете. Оно бесконечно затянувшимся заседанием мы добились принятия этого предложения большинством голосов. Однако эта победа выявила и злопыхателей, о которых мы никогда ранее не подозревали. Это было несколько историков, а главным образом специалистов по сельскому и лесному хозяйству. Спустя полгода мы узнали, кем они были на самом деле: заклетыми нацистами, которые, будучи деятелями научного института, считали заботу об отдельных людях излишней.

Единственным светлым пятном был тот момент, когда я осведомил лично куратора факультета, тайного советника Валентинера, о решении факультета. Он был настолько растроган, что на глазах у него появились слезы. Вот что он примерно сказал: «Если бы все корпорации были настолько бескорыстны, как ваш факультет, тогда наша страна была бы освобождена от забот».

Вальтер Гейтлер в течение многих лет был моим ассистентом, одновременно с Лотаром Нордхеймом. Когда Нордхейм во времена гитлеризма уехал в Америку (Калифорнию), Гейтлер сначала эмигрировал в Англию, где он был профессором в Дублине (Ирландия), в Институте перспективных исследований, и, в конце концов, — профессором в Цюрихе; этой профессурой он обязан своим выдающимся работам по квантовой теории химической связи (совместных с Ф. Лондоном), по космическому излучению и своей превосходной книге по квантовой теории излучения.

Упомянутый в моем письме мой друг — промышленник — это Карл Штиль из Рекламсхауза, о котором я уже упоминал ранее.

Что касается моего оптимизма относительно политического положения, то следует сказать, что письмо это написано в момент, когда появился проблеск надежды. Я точно вспоминаю, что у меня были также и моменты отчаяния. Часто упоминаемое в моих письмах тяжелое состояние моих нервов вызывалось не только тем, что я был крайне переутомлен работой, но и другими заботами, прежде всего — политическими. Я был, кажется, с начала 1929 г. отправлен в санаторий в Констанце на берегу Бодензее. Там я был поначалу уложен в постель, позднее я смог по вечерам бывать в холле и беседовать с отдыхающими. Но разговоры этих фабрикантов, врачей, адвокатов — все это были во всяком случае люди из «хорошего круга» — вращались только вокруг Гитлера и надежды, которые они с ним связывали, и сопровождались явными антисемитскими выпадами. Это заставляло меня вновь удалиться в мою комнату. Настоящий отдых я нашел только после того, как сбежал из санатория и отправился в Кёнигсфельд в Шварцвальде. Только в одиноких лыжных

прогулках я привел свои мысли в порядок. Прежде всего надо сказать о том, что я познакомился там с Альбертом Швейцером. Я услышал, проходя мимо одной из кирх, замечательную игру на органе. В кирхе я и нашел д-ра Швейцера, которого я хорошо знал по фотографиям и который сидел за красивым органом. Воспользовавшись паузой, я заговорил с ним. Потом он рассказывал мне о своей жизни и работе в Ламбарене во время наших многочисленных и длительных прогулок. Все это помогло мне снова обрести душевное равновесие. Именно с этим, вероятно, и связан тот оптимизм в оценке политических перспектив, который виден из моего письма.

Американские друзья, упомянутые в связи с эренфестовскими письмами из США, — все это физики высокого ранга: Толмен, наиболее известный своими работами по теории относительности и космологии; Эпштейн, внесший существенный вклад в боровскую теорию строения атома, и Милликен, известность которого связана с решающим подтверждением корпускулярной природы электричества и точным изменением заряда электрона.

*Институт теоретической физики
при Университете
Геттинген
Бунзенштрассе, 9
6.10.31*

Дорогой Эйнштейн!

Этой же почтой я отправляю тебе новую работу Румера, в которой он, как мне кажется, сделал действительный шаг вперед в том направлении, к которому стремился несколько лет. Я знаю, конечно, ты весь в мыслях о совсем другом, но, может быть, найдешь время, чтобы хотя бы посмотреть работу Румера. Я думаю, что его утверждение вполне правильно: допущение римановского пространства влечет за собой как следствие необходимость определенных допущений относительно тензора материи и с необходимостью приводит к своеобразной и новой полевой теории материи. Теперь остается только вопрос, следует ли идти в этом направлении дальше и сформировать эту теорию, или же переходить, как ты это пробовал, к совершенно новой геометрии — об этом я не могу судить. Но думаю, однако, что нужно идти обоими путями.

Сердечный привет от меня и жены.

Твой Макс Борн.

Об этой работе Румера я ничего не могу припомнить.

Мое письмо от 6.10.31 и следующее письмо Эйнштейна отделяют друг от друга около полутора лет, которые вместили в себя столько событий, что научные проблемы отодвинулись на задний план. Это было уже упомянутое время моего деканства. Имело место несколько выборов в Рейхстаг, в процессе которых возросло число нацистских депутатов и усилилось влияние Гитлера. Толпы коричневорубашечников терроризировали страну; затем наступил нацистский переворот, и однажды, в конце апреля 1933 г., я нашел свое имя в газете, в списке лиц, которые, согласно «новым законам» о служащих, были отнесены к числу неугодных. Среди них не было Франка, поскольку он рассматривался как фронтвик периода первой мировой войны.

В это время Эйнштейн находился в США. Он вернулся в Европу в начале 1933 г., но направился в Бельгию и Англию, а не в Германию, так как его безопасность там не была гарантирована.

После моего «отпуска» мы решили тут же покинуть Германию. На летние каникулы у нас было арендовано жилище у крестьянина по имени Ператонер, проживавшего в Волькенштейне в долине Гроднера (Итальянская Сельва). Он сразу же высказал готовность принять нас. Так что в начале мая 1933 г. мы выехали в Южный Тироль, взяв с собой двенадцатилетнего сына Густава; более взрослых дочерей мы оставили в их немецких школах. Из Сельвы я написал Эйнштейну через Эрэнфеста (Голландия); последующее письмо представляет его ответ.

Оксфорд
30.5.33

Дорогой Борн!

Эрэнфест переслал мне твое письмо. Я рад, что вы (ты и Франк) оставили свои посты. Это для вас обоих, слава Богу, не связано с риском. Но сердце мое обливается кровью, когда я думаю о молодых [ученых]. Линдемман поехал в Геттинген и Берлин (на неделю). Может быть, ты напишешь ему сюда относительно Теллера. Я слышал, что подумывают о том, чтобы создать хороший физический институт в Палестине (Иерусалиме). До настоящего времени там было настоящее свинство — чистое шарлатанство. Если же у меня сложится впечатление, что дело сможет принять серьезный характер, то я сразу же напишу тебе подробности. Ведь было бы превосходно, если бы там удалось создать что-то приличное; это мог бы стать институт мирового значения. Но пока я в это дело не верю.

Два года тому назад я взывал к совести Рокфеллера относительно бессмысленной практики при распределе-

нии стипендии, но, к сожалению, без успеха. Сейчас к нему поехал Бор — для того, чтобы побудить его сделать что-нибудь для изгнанных немецких ученых. Может быть, ему что-нибудь удастся! Линдеман думал об Оксфорде для Лондона и Гейтлера. Он создал для этой цели организацию, связывающую все высшие учебные заведения Англии. Я почти убежден, что позаботятся обо всех, кто создал себе имя. Но вот другие — молодежь, — у них нет возможностей для развития.

Сначала я преследовал цель создать университет для изгнанников. Но сразу же выяснилось, что трудности будут непреодолимыми и что такие усилия повлияют на стремления отдельных стран.

Надеюсь, что вскоре смогу написать тебе поконкретнее. А пока желаю тебе и твоим провести некоторое время в горах.

Твой Эйнштейн.

В Германии меня объявили свирепым зверем и отняли все деньги. Утешаюсь тем, что последние все равно бы вскоре исчезли.

*Принстон,
Нью-Джерси, 22.3.34*

Дорогой Борн!

С огромной радостью вижу снова твой почерк, хотя главный повод для этого письма столь печален. К сожалению, я не вижу возможности, как и в прошлом году, содействовать прямому оздоровлению английского фонда помощи. Разъезжать с докладами по Америке мне по различным причинам, к сожалению, невозможно.

<...> Твоя попытка по-новому рассмотреть квантовые вопросы теории поля меня очень заинтересовала, но сходу не убедила. Я все еще считаю, что вероятностная интерпретация, несмотря на ее большой успех, не создает мыслимой возможности для релятивистского обобщения.

Обоснование выбора функции Гамильтона для электромагнитного поля по аналогии со специальной теорией относительности также не убедило меня. Боюсь, что до

настоящего решения этой трудной проблемы всем нам не удастся дожить.

Если представится возможность, то этим летом мне бы хотелось как-нибудь поколесить по Америке. Почему бы такому старику тоже разок не воспользоваться относительным покоем?

Надеюсь, что по крайней мере твоя должность в Англии обеспечена тебе надолго. Здесь очень тяжело, поскольку университеты, прозябающие большей частью на средства из частных взносов и наполовину подтаявшем капитале, должны бороться за свое существование, из-за чего многие дельные молодые местные силы остаются без мест.

Сердечно приветствую тебя.

Твой А. Эйнштейн.

Эйнштейн по двум пунктам выступает против моей идеи. Первый из них основывается на его отказе от вероятностной интерпретации квантовой механики. При этом он исходит из принципиального вопроса теории познания, о котором далее речи не будет.

Он не принял набросанной Инфельдом и мною теории, поскольку мы сами не справились с подготовкой ее к квантовой механике; но наши попытки в этом направлении он осуждал как принципиально неправильные. Второе возражение Эйнштейна относится к нашей первоначальной «классической» теории поля, которая получилась замкнутой и свободной от противоречий. Она основывалась на следующей аналогии. В специальной теории относительности кинетическая энергия частицы, выражаемая в классической механике как величина, пропорциональная квадрату скорости, выглядит более сложно; для скоростей, малых по сравнению со скоростью света, это выражение переходит в классическое, но отличается от него, если скорость приближается к световой, в максвелловской электродинамике. Плотность энергии квадратична по отношению к напряженности поля. Я заменяю ее через общее выражение, которое переходит в классическое представление, если напряженности становятся малыми по сравнению с «абсолютной напряженностью поля», но отличается от него, если это не так. И тогда из этого само по себе получится, что полная энергия поля, создаваемого точечным зарядом, конечно, в то время как в максвелловском поле она бесконечна. А напряженность поля нужно принять как некую новую мировую константу.

Это аналоговое построение Эйнштейн не посчитал убедительным. Инфельда и меня оно привлекало долго. Мы оставили эту теорию совсем по другим причинам, а именно из-за того, что нам не удалось привести ее в соответствии с принципами квантовой теории поля.

Во всяком случае эта статья была первой попыткой обойти сложности в физике микромира с помощью нелинейной теории.

Гейзенберговская теория элементарных частиц, о которой сегодня все говорят, тоже нелинейна. Но это уже сюда не относится.

Без даты

Дорогой Борн!

У — это какой-то патологический случай. Он самостоятельный человек, но, к сожалению, в голове у него путаница. В его работах о поверхностях, может быть, и есть кое-что приемлемое, хотя, к сожалению, оно нигде не приведено в упорядоченную и ясную форму. Человек он довольно трудный. Он, например, обратил в деньги мое с ним многолетнее, но очень частное знакомство, выпустив обо мне биографическую книгу, хотя я это ему категорически запрещал. Но ему было очень тяжело, и всегда он находился в каком-либо бедственном положении, постоянно или почти постоянно без должности. Его неоправданно высокое мнение о себе делает затруднительным оказание ему помощи, хотя я даже не знаю, сможет ли он хорошо работать в подчинении. Но, возможно, что после такого тяжелого опыта он стал податливее. Итак: помоги ему, если ты можешь, но будь осторожен с рекомендациями, с тем, чтобы избежать потом упреков. Он разбирается в экспериментальной работе, даже в чисто технических делах, и, кажется, таким образом уже некоторое время существовал.

Я недавно — и очень осторожно — позондировал почву у Д. Франка относительно его устройства. Но тот резко отказался, объясняя это тем, что ценного человека так просто теперь не найдешь. Мне кажется, что это позиция по отношению к человеку в годах, находящемуся в большой нужде и имеющему некоторые заслуги, является чересчур жестокой.

Я чрезвычайно (курсив А. Э.) рад тому, что ты нашел в Эдинбурге основательную и почетную кафедру и что у тебя и у всех твоих все в порядке.

Жена моя, к сожалению, тяжело больна; лично я чувствую себя здесь очень счастливым и наслаждаюсь неописуемо тем, что могу вести но-настоящему спокойную жизнь. Пожелать это можно любому из представителей старшего поколения.

В следующем семестре здесь, в Принстоне, будет Инфельд, с которым ты одно время сотрудничал, и я заранее радуюсь беседам с ним.

Я вместе с одним молодым сотрудником получил интересный результат относительно того, что не существует волн гравитации, хотя в первом приближении все в этом были уверены. Это свидетельствует о том, что нелинейные общие релятивистские уравнения поля выражают или, наоборот, ограничивают значительно большее, чем об этом думали раньше. Если бы только не было столь гнусно искать строгие решения!

Я все еще не верю в окончательность статистических методов квантовой теории, но пока со своим мнением пребываю в гордом одиночестве (*allein auf weiter Flur*).

С наилучшими пожеланиями и приветом

твой А. Эйнштейн.

Случай с Y представляется повторением ситуации, имевшей место с X; я ничего здесь не могу вспомнить об этом человеке.

В заключение этого письма снова содержится отказ Эйнштейна от статистической трактовки квантовой теории, сопровождающийся признанием, что он в гордом одиночестве. К этому времени я сам был уже совершенно уверен, что прав в данном вопросе, поскольку практически вся теоретическая физика оперировала статистической трактовкой, в частности, сказанное относится к Нильсу Бору и его школе. Этот подход составлял суть понимания ее принципов. То, что этот подход связывают с копенгагенской школой, представляется мне, однако, несправедливым.

*Кафедра натуральной философии
Эдинбургского университета,
Друммонд-стрит.*

10.4.1940

Дорогой Эйнштейн!

В начале войны я написал письмо Бору, надеясь получить от него сведения о Гейзенберге. Теперь для получения новостей, если это возможно, — о самом Нильсе, — я пишу тебе. Я страшно волнуюсь. Год назад Нильс был здесь — он получил медаль Копли (Copley) от Королевского общества, нашу самую высокую награду, и приехал в Эдинбург, где провел некоторое время и читал лекции.

Он был чрезвычайно удивлен и потрясен безразличием большинства англичан перед лицом неминуемой войны, и он старался убедить всех тех, с кем он общался (естественно, он встречался с влиятельными людьми), в масштабах этой опасности. Он сказал мне конфиденциально, что думает, что его собственная маленькая страна находится под еще большей угрозой, чем Великобритания, поскольку она так невелика и беспомощна, но что никто не пощадит своей жизни в битве за свое существование, хотя многие люди здесь (в Великобритании) и отрицают это и верят в «умиротворение». Да, он был прав! Может быть, до тебя дошли вести о нем и его семье? Дай мне знать, если что-нибудь слышал.

Мы пока что благополучны. Хеди очень много работает в качестве акушерки в трущобных кварталах — по утрам, а днем — в комитетах беженцев и квакеров. Сейчас она ненадолго уехала отдыхать за город. Обе наши дочери сейчас приехали к нам довольно надолго, одна из них с мужем (М. Прайсом, которого ты знаешь), другая — со своим толстым и веселым малышом. Мой сын изучает здесь медицину. Я продолжаю работать — ничем не отвлекаясь; скоро моя кафедра будет единственной в Великобритании, где все еще ведется работа по теоретической физике. Область главных моих интересов концентрируется вокруг моей идеи об «обращении» («reciprocity»-idea). Фукс и я добились радующего нас прогресса, и Паули, этот «суперкритик», написал мне недавно: «Я думаю, Вы на правильном пути». Целый ряд работ появится в печати в июне и июле, но мы воздерживаемся от публикации коротких заметок, в отличие от Ландэ, который работает в том же направлении (хотя и с довольно примитивными методами и довольно смутными идеями). Я уверен, что ты заинтересуешься этими вещами, потому что в них содержится правильный путь к объединению волновой механики и теории относительности. Имеется целый ряд интересных математических соображений, но одним из главных пунктов работы является открытие представления группы Лоренца бесконечными (а не конечными) матрицами, которые тем не менее принадлежат к гильбертову пространству (интегрируются в квадратурах). Я думаю, что Вигнер получил подобные же результаты очень абстрактным путем. Мы же стараемся показать, что такие представления связаны со «структурой» элементарных частиц.

Письмо, однако, не позволяет, будучи ограниченным по объему, — даже поверхностно рассказать обо всех этих вещах. В течение летнего семестра, который начинается на следующей неделе, я собираюсь читать своим аспирантам лекции по общей теории относительности, уделяя особое внимание чрезвычайно интересной работе Фока (русский физик), в которой уравнения движения тел конечных размеров выводятся из уравнений поля.

Далее, мы получили весьма интересные результаты по термодинамике кристаллов, растворов и т. д. Фюрт (из Праги), который находится здесь в качестве моего гостя, обнаружил совершенно неожиданное соответствие между прочностью на разрыв твердых тел и теплотой плавления. Соответствие его формулы с экспериментальными данными — превосходное; ее теоретический вывод забавен, но его следует подвергнуть критике.

Иногда — в трудных условиях войны — работать бывает не просто, но в работе — лучшая возможность избежать смятения.

Мы мало что знаем об американских друзьях. Мне иногда кажется, что они считают нас находящимися на последних аванпостах цивилизации. Но я думаю, что это мнение совершенно ошибочно. Англичане и в равной степени французы удивительно сильны и внутренне собраны, но большинство из того, что мы узнаем об американской точке зрения, — представляется нам странным. Я убежден, что ты оцениваешь сегодняшнюю борьбу с тех же позиций, что и я.

Напомни обо мне всем друзьям в Принстоне: Вейлям, Вебленам, Ладенбургу, фон Нейману и другим.

Всегда твой Макс Борн.

Паули пишет: «Я как раз сейчас получил письмо от Гвидо Бека. Он в лагере (Лагерь Шамбери, Кампань, 27, Изер, Франция). Он потерял место в июне (как и Тибанд) и страшно нуждается в деньгах. Может быть, кто-нибудь может собрать их для него, это очень облегчит его положение. Я постараюсь сделать это здесь, в Цюрихе». Я ничего не могу предпринять — посылка денег за границу не разрешается, да у нас к тому же бесконечные долги. А ты не мог бы?

М. Б.

*Кафедра натуральной философии
Эдинбургского университета,
Друммонд-стрит, Эдинбург
10 мая 1943 г.*

Дорогой Эйнштейн!

Мой коллега, географ, д-р Артур Геддес, попросил меня написать тебе вот по какому поводу.

Он прочел твою короткое эссе «Причины образования извилин в руслах рек и так называемый закон Бэра» («Жизнь, какой я ее вижу», Library Ed.). Он глубоко интересуется этой проблемой и хотел бы знать, опубликовал ли ты полный отчет о своем исследовании или же твои идеи развил кто-либо другой. Он не сумел обнаружить каких-либо ссылок в (довольно скудной) литературе на французском, английском и немецком языках, которая доступна ему здесь. Ты очень обяжешь меня, дав знать все, что тебе по этому поводу известно.

Я хочу воспользоваться случаем, чтобы сообщить тебе о всех нас. Хеди в порядке, в минувшем году она перенесла серьезную операцию и поправлялась чрезвычайно медленно. Но сейчас она почти здорова. Наш сын работает сейчас в качестве врача в госпитале и присоединится к армии в августе. Каждая из наших дочерей имеет по два ребенка; мужья их на военной службе: один — в авиации, а другой — в морском министерстве. Так что мы четырехкратные дедушка и бабушка. На моей кафедре сейчас работает один Фюрт и два студента-исследователя, но у меня очень много времени занято обычным преподаванием.

Сам я сделал в научном плане довольно мало, но слежу с огромным интересом за тем, что сделал Шредингер. Он пишет мне регулярно и я надеюсь приехать к нему в Дублин этим летом. Он занимается твоей старой статьей 1923 г. и вдохнул в нее новую жизнь, развив и унифицировав полевую теорию в случае гравитации, электродинамики и мезонов; все это представляется мне очень многообещающим. Но, думаю, он тебе об этом сам написал.

Мне недавно сказали, что Д. фон Нейман сейчас в Англии и собирается приехать ко мне на следующей неделе вместе с работником Морского министерства, для которого он собирается проводить какую-то оборонную работу.

Как поживает Марго? Скажи, что мы любим ее! Мы оба сердечно приветствуем Вас!

Военная ситуация представляется мне сейчас гораздо более благоприятной; я надеюсь, что война закончится прежде чем Европа будет полностью уничтожена.

Только что я получил письмо от Бриллиуэна из США
Твой всегда Макс Борн.

2.6.43

Дорогой Борн!

Замечания относительно влияния искривления потока, а также и кориолисовых сил на эрозию речных русел были сделаны походя.

Я ничего, кроме этого, по данному поводу не публиковал, будучи убежденным, что эта идея давно известна. Но я никогда не изучал литературу по этому вопросу.

Но то, что ты написал о себе и своей семье, было мне очень интересно. Пестрота наших судеб поистине примечательна!

Шредингер был настолько любезен, что сам написал мне о своей работе. В свое время я с большим энтузиазмом относился к этому направлению идей. Слабость их заключается в том, что конструкция с точки зрения аффинного пространства чересчур искусственна и натянута. Увязывание асимметричного искривления с электрическими пространственными состояниями также приводит к тому, что электрические поля линейно связаны с плотностями зарядов. Шредингеру я об этом, естественно, подробно написал.

После такого множества неудавшихся попыток добраться до настоящей физики я сам занялся сейчас кое-чем очень смелым.

Во всяком случае настоящий шаг вперед потребует могучего скачка мысли.

Сердечный привет тебе и всем твоим от твоего

А. Эйнштейна.

15.7.44

Грендж-Лээн, Эдинбург

Дорогой Эйнштейн!

Наша газета «Шотландец» («Scotsman») упомянула о тебе в связи с тем, что ты призываешь работников умственного труда объединиться и предпринять организо-

ванные меры против новых агрессивных войн и укреплять влияние, оказываемое ими (на правительство) в области политики. Я был очень обрадован, прочитав об этом, потому что считаю, что ты — единственный человек, который может что-либо сделать в этом направлении, поскольку твое имя известно всем во всем мире. Конечно, все мы становимся старыми и хотим уйти на отдых, хотим, чтобы нас оставили в покое, но молодых коллег не очень-то много. Что касается меня, то этой зимой я перенес какой-то полный упадок сил, от которого и сейчас не оправился полностью. Он явился следствием многих причин: небольшого переутомления от работы, общего напряжения, связанного с войной и уничтожением евреев в Европе, переездом моего сына на Дальний Восток — после многих приключений он находится сейчас в безопасности и читает курс патологии в Пуне (Индия), и т. д.

Но повергающая меня в уныние мысль всегда была связана с ощущением, что наша наука, столь прекрасная сама по себе, наука, которая могла бы быть такой благотворной для человеческого общества, деградировала и превратилась в не что иное, как орудие разрушения и смерти. Большинство немецких ученых сотрудничали с нацистами. Здесь имеется только несколько исключений из правила, например, в лице фон Лауэ и Тана. Английские, американские и русские ученые также целиком мобилизовали свои силы, и это правильно. Я не обвиняю никого. Потому что при сложившихся обстоятельствах ничего иного сделать нельзя, чтобы сохранить остатки нашей цивилизации. Но я думаю, что нам следовало бы иметь международную организацию и — что еще более важно — некую общую наднациональную линию поведения, этику (подобно тому, как английские хирурги в пределах своей профессии следуют весьма строгим правилам поведения). Тогда наше сообщество ученых могло бы играть в мире роль стабилизирующей и регулирующей силы, не будучи, как это имеет место сейчас, не чем иным, как инструментом промышленников и правительств. Я сам, конечно, совершенно чист, не считая того, что верой и правдой обучаю людей наблюдению и расчетам. Имеется сравнительно немного этических стандартов, общих для людей разных религий — христианской, иудейской, мусульманской и индульской (Hindu). Но некоторые области биологической науки, логически отсталые и основываю-

щиеся на скудных доказательствах, являются орудиями в руках преступных политиканов и могут быть использованы для того, чтобы отбросить нас в первобытные джунгли. Должны быть найдены средства, которые бы гарантировали невозможность повторения подобных вещей. Мы, ученые, должны объединиться, чтобы помочь образованию разумного порядка в мире. Если у тебя есть по этому поводу какие-либо определенные планы, — дай мне знать, я довольно беспомощен, живя в этом славном, но провинциальном месте. Но я буду стараться сделать все, что только в моих силах. Фаулер, кто мог бы явиться подходящим человеком для того, чтобы выступить с такой инициативой здесь, в Англии, к сожалению, очень болен, его здоровье гораздо в более плохом состоянии, чем мое. Я не знаю, где сейчас находится Нильс Бор. Мне бы хотелось связаться с ним. Здесь, в Великобритании, мне трудно взаимодействовать с людьми. Поездки возможны лишь в самых необходимых случаях, а какие-либо встречи на юге страны теперь ограничены из-за управляемых фау-снарядов (flying bombs).

Но военное положение превосходно, и мы надеемся, что война в Европе скоро закончится.

Хеди чувствует себя хорошо и шлет свои наилучшие пожелания тебе и Марго. Мой сын — военный врач и много повидал в Индии. Мои дочери и их семьи в полном порядке, хотя одна из них и проживает в районе, над которым пролетают фау-снаряды, — иногда они сбрасываются непосредственно на него.

Я пытался, совместно с моим учеником из Китая, Пенгом, превосходным человеком, усовершенствовать теорию полей, и я думаю, что мы идем по правильному пути. Шредингер, с другой стороны, занимается усовершенствованием твоих — и других ученых — попыток создания единой теории полей в рамках классической теории.

Я думаю, что следующий шаг вперед будет заключаться в комбинировании и слиянии этих двух подходов. Но я уже очень стар и не чувствую себя в силах пытаться это сделать.

С сердечными приветами и наилучшими пожеланиями

всегда твой Макс Борч.

Дорогой Борн!

Я настолько обрадовался твоему письму, что к своему удовольствию сам почувствовал потребность тебе написать, без того, чтобы кто-нибудь указующим перстом меня к этому принудил. Но я не смогу из-за коварной орфографии писать тебе по-английски. Когда я читаю, то слышу, но не могу запомнить, как это должно выглядеть написанным. Не припоминаешь ли ты, как лет двадцать пять тому назад мы с тобой ехали трамваем к зданию рейхстага, убежденные в том, что и в самом деле поможем сделать из тех парней честных демократов? Насколько мы были наивны для людей сорокалетнего возраста! Я не могу не улыбаться, вспоминая об этом. Мы оба не понимали, в какой мере люди скорее думают спинным мозгом и насколько там все сидит прочнее, чем в головном. Обо всем этом приходится сейчас думать для того, чтобы не повторились трагические ошибки тех времен. Поэтому не нужно удивляться тому, что *ученые не являются* (в подавляющем большинстве) *исключением* (курсив А. Э.), и если они и отличаются от других, то это проистекает не от их способности понять, а от человеческой незаурядности, как, например, в случае Лауэ.

Интересно было наблюдать, как он постепенно отрывался от традиций стада под влиянием обостренного чувства справедливости. С помощью этического кодекса медикам удалось достичь удивительно мало; еще меньшего этического влияния можно было ожидать на настоящих ученых с их механизированным и специализированным образом мышления. И, собственно говоря, совершенно правильно, что ты считаешь Бора подходящим кандидатом на пост жреца. Ведь тут хоть есть надежда на то, что он таким образом стащит с физики ее жреческую сторону и применит ее широко по-иному. Ничего другого от такого мероприятия я и не ожидаю. Ощущение того, что должно случиться, а чего быть не должно, растет и отмирает, подобно дереву, и никакие удобрения не могут здесь сколько-нибудь существенно помочь. Каждому в отдельности остается только послужить чистым примером и иметь мужество серьезно защищать этические убеждения в окружении циников. Издавна я стремился к тому, чтобы вести себя подобающим образом (но с переменным успехом).

Твое «чувствую себя слишком старым...» я не очень-то принимаю всерьез, так как сужу по себе. Иногда это прорывается (причем все чаще и чаще), а затем снова прячется в глубину. Мы можем спокойно предоставить природе постепенно превращать нас в прах, если только она не предпочтет более быстрый способ.

Я с большим интересом перечитал твой доклад против тех фокусов, которые нас, теоретиков, превращают в донкихотов или, может, скорее в соблазнительей. Но там, где это зло, вернее порок, совершенно отсутствует, налицо безнадежнейшее филистерство.

Я должен даже признаться, что твои высказывания, особенно, если я представляю себе живого Макса Борна, напоминают мне прекрасную поговорку: «молодые блудницы, но ханжи старые»; вот я только не совсем убежден в том, что ты честно и целиком заслужил то, чтобы отнести тебя к последней категории.

В наших научных ожиданиях мы стали антиподами. Ты веришь в Бога, играющего в кости, а я в Совершенную Закономерность чего-то объективно должного существовать в мире, закономерность, которую я грубо спекулятивным образом пытаюсь ухватить.

Я твердо верю и надеюсь, что кто-нибудь найдет более реалистичный путь или более реальную основу, чем это удалось мне. Большие первоначальные успехи квантовой теории не заставят меня поверить в фундаментальность игры в кости, хотя я хорошо знаю, что более молодые коллеги считают это следствием моего склероза. Но когда-нибудь выяснится, какая из инстинктивных позиций была правильной.

Сердечный привет тебе и всем твоим.

Твой Альберт.

Приключение 25-летней давности, о котором напоминает мне Эйнштейн, заключалось в следующем.

В конце 1918 г. командование немецкой армии неожиданно капитулировало, и повсюду в Германии вспыхнула революция. В это время я лежал в постели, больной гриппом, и наблюдал за событиями только издалека. Когда я поправился, Эйнштейн позвонил мне (телефон работал в эти бурные дни) и сообщил, что по образу и подобию рабочих и солдатских советов (немецких «Sowjets») в университете создан студенческий совет. Одним из первых его действий было отстранение и арест ректора и других сановников высшей школы. Поскольку считалось, что Эйнштейн, благодаря своим левым взглядам, может оказать влияние на экстремистски настроенных

студентов, его попросили вступить в переговоры с советом и добиться освобождения арестованных и восстановления благоразумия и порядка. Эйнштейн сказал, что студенческий совет заседает в здании рейхстага, и спросил меня, не могу ли я пойти туда вместе с ним. Несмотря на слабость, которую я ощущал после перенесенного гриппа, я согласился. Поначалу я совершил довольно длинное пешее путешествие (трамваи и автобусы в наш район не ходили) от моего дома в Грюневальде до дома Эйнштейна в Баварском квартале. Оттуда мы доехали на трамвае до места, расположенного неподалеку от рейхстага; ехали мы вторым, потому что, кроме меня, Эйнштейн пригласил приехать к себе еще и психолога Макса Верхаймера.

Я не согласился идти дальше из-за того, что было очень трудно пробираться через толпу людей, окружавших рейхстаг, а также через кордон вооруженных революционных бойцов с красными бантами на одежде. Наконец, кто-то узнал Эйнштейна, и все пути были нам открыты.

В рейхстаге нас провели в какой-то конференц-зал, где заседал студенческий совет. Председательствующий вежливо приветствовал нас, попросил нас сесть и подождать, когда будет закончено обсуждение одного важного пункта нового положения об университете.

Мы терпеливо стали ожидать и слушать. Наконец, этот пункт был улажен, и председательствующий сказал: «Прежде чем я перейду к вашей просьбе, профессор Эйнштейн, я позволю себе спросить вас, что вы думаете о новых предписаниях для студентов?». Эйнштейн подумал несколько минут, а потом сказал примерно следующее: «Я всегда полагал, что самым драгоценным в положении о немецких университетах является академическая свобода, которая не указывает доцентам, чему именно они должны учить, а за студентами оставляет право выбора посещаемых ими лекций, без надзора и контроля. Ваше новое положение, кажется, все это отменяет и заменяет определенными предписаниями. Мне это кажется огорчительным, когда отменяется старая свобода». После этого среди молодых людей наступило молчание. Затем речь пошла о нашем деле, но студенческий совет заявил нам о своей некомпетентности и отослал нас к новому правительству, находившемуся на Вильгельмштрассе, выдав нам туда пропуск. Мы снова двинулись к дворцу государственного канцлера. Там царило большое оживление. Лакеи кайзеровских времен стояли на углах коридоров и лестниц, но больше там было стремительно сновавших людей в более или менее потертой одежде с папками и бумагами, социалистических депутатов и делегатов рабочих и солдатских советов. Актный зал был полон громко разговаривающих возбужденных людей. Но Эйнштейна сразу же узнали, и мы без всяких трудностей были препровождены к новому президенту — Эберту, который мог с нами поговорить в небольшой комнате и сказал, что мы должны понять, что сегодня, когда только что создано новое государство, нет возможности разбираться в существовании незначительных просьб. Он снабдил нас короткой запиской к соответствующему новому министру, и наше дело было мигом разрешено.

Мы покинули дворец государственного канцлера в превосходном настроении с ощущением, что принимали участие в историческом событии, и с надеждой на то, что с этих пор пришел конец прусской надменности, юнкерству, господству дворянства, чинов-

ничьей клики, военщины и что на этот раз победила немецкая демократия. Даже мое возвращение домой в Грюневальд, большей частью пешком, не могло подавить этого настроения.

Пожалуй, в последнем письме Эйнштейн не без усмешки упоминает вот о чем. Мы верили тогда в победу разума, «великого ума». Мы еще не знали тогда, что люди управляются «не головным, а спинным мозгом», центром побуждений и слепых страстей. И ученые не составляют здесь исключения. Но вот появляется суждение Эйнштейна о Максе Лауэ, которого он до этого ставил не очень высоко.

Теперь он приветствует его мужественную позицию против нацистов.

«Этическому ходу» Эйнштейн особого значения не придавал. Слова этого письма о Боре, о «предчувствии того, что должно произойти, а что нет», о роли единичных личностей в обществе циников преисполнены глубокой мудрости.

В заключение Эйнштейн упоминает о моем докладе «Эксперимент и теория в физике» (Нью-Йорк, 1956 г.), который, к сожалению, на немецком языке не опубликован *.

Мы и в самом деле в вопросах науки далеко отошли друг от друга. Он сосредоточился на рассуждениях в связи со своей единой теорией поля. Я же пытался сдерживать свои склонности к умозерцанию. Моя маленькая книжка представляет собой резкий выпад на известные работы астрономов Эддингтона и Милна, которые пытались, хотя и различными способами, разрешить загадку атомного мира и космоса чисто умозрительным способом. И даже сегодня я продолжаю считать свои аргументы разумными, но Эйнштейн, конечно, совершенно прав, говоря, что опыт, сам по себе, без смелой мысли ни к чему не приведет. И велик тот, кто найдет правильную меру тому и другому.

Последний абзац письма снова посвящен фундаментальной игре в кости применительно к квантовой механике и представляет собой наиболее ясную и изящную формулировку позиций Эйнштейна. Я подробно рассмотрел ее в другом месте (в моей книге «Натуральная философия причины и случая», Оксфорд, 1949, стр. 12), и поэтому нет надобности здесь еще раз на этом останавливаться.

10.10.44

Дорогой Эйнштейн!

Твое письмо доставило мне и Хеди большую радость, а Хеди была настолько возбуждена и взволнована, что сразу же ответила. У меня же так быстро не получается.

Три четверти года я не читал лекций, так как в январе меня скрутило, приходил в себя очень медленно, и только сегодня была первая, после длительного перерыва, лекция. Поэтому я должен был готовиться, а в итоге пришел всего один-единственный студент, с которым я занимался

* Публикация появилась позже: М. Б о р н. «Эксперимент и теория в физике». Мосбих, 1969. (Прим. перев.).

индивидуально. Все остальные парни либо в армии, либо во флоте, либо на трудовой повинности. Наша экспедиция к зданию рейхстага очень свежа в моей памяти (Вертхаймер ведь тоже был с нами?). В то время мы очень неправильно оценивали соотношение сил в немецкой политике — это я признаю. Но ведь то, что все пошло вкривь и вкось, определялось мелочью. Конечно, я полностью разделяю твое мнение относительно того, что действия людей — это результат прорыва из глубин их этических чувств, которые являются первичными и почти независимыми от рассудка. Но от этого единства взглядов я сразу должен перескочить к нашей размолвке в области физики. И это потому, что я не могу разделять эти вещи и не могу понять, как это ты можешь объединять совершенно механический мир со свободой этических чувств индивидуумов. Хеди, ничего не понимающая в физике, превосходно сформулировала это в прилагаемом письме. Я рассматриваю детерминистский мир как нечто совершенно отвратительное — и это первичное чувство. Может быть, ты и прав, и он такой и есть. Но в данное время физика такой вовсе не кажется, да и в остальной части мира не так. Кроме того, я нахожу твои выражения с Богом, «играющим в кости», совсем не адекватными. Бросать кости нужно тебе в твоем детерминистском мире — различие не в этом. Но ведь ты это знаешь не хуже меня, и если у тебя не все аргументы под руками, то подай Паули затравку, а он уже все это раздраконит. Мне кажется, что ты недооцениваешь, во-первых, эмпирическую основу квантовой механики (я не придаю большого значения массе «доказательств», но ведь есть такие отдельные броские вещи, как, например, парадокс Гиббса или опыт Штерна и Герлаха), а во-вторых, у тебя философия, которая кое-как приводит в соответствие мертвые вещи-автоматы с существованием справедливости, совести, и с этим я не согласен. Что же касается моей статьи против Эддингтона и Милна, то она написана в стиле британской вежливости. Если выражаться собственными словами, то можно сказать короче: «чепуха!» Но написать так, как я это сделал, было необходимо, поскольку Эддингтон здесь воспринимается как своего рода пророк. Получается, что ты имеешь право на спекуляцию, а другие — нет, и я тоже нет. Неужели я раньше так нагрешил (или «наблудил», если следовать твоей поговорке)?

Я всегда с достаточным пониманием относился к твоей физике и получал от нее много удовольствия; но сам действовал в таком духе только один раз: нелинейная электродинамика, а она-то оказалась не особенно большим достижением. Я совершенно честно считаю, что если средние люди захотят отыскивать законы природы посредством одного только размышления, то кроме дерьма ничего не получится. Шредингеру, по-видимому, это доступно. Хотелось бы узнать, что думаешь ты о его аффинной теории поля. Я нахожу, что все сделано красиво и талантливо, но верно ли это? Он опубликовал сейчас свои лекции по статистической термодинамике; я считаю, что они получились, во всяком случае, лучше и солиднее.

Здесь у меня всегда есть — несмотря на войну — маленькая группа людей, занятых наукой. Фюрт немного даже экспериментировал, он сделал фотоэлектрический микрофотометр и — также фотоэлектрический — гармонический анализатор. Теперь он изготавливает придуманный мной трансформатор Фурье; он будет мгновенно воспроизводить на осциллографе разложение любой заданной кривой на Фурье-составляющие. Это тебе бы понравилось. Далее, мы занимаемся кристаллами и рентгеновскими лучами, однако, главным образом, улучшением теории квантования поля. Ты, конечно, совершенно прав, относясь к ним в их нынешнем состоянии с отвращением. Но я думаю, что мы (т. е. мой помощник китаец Пенг и я) уже существенно ее улучшили, и мы довольно-таки уверены, что сможем выкинуть все неприятное (расходящиеся интегралы и т. п.). Надеюсь, что она станет такой же красивой, как порядочная классическая теория.

К сожалению, я не могу еще помногу работать. Мое сердце не выдерживает ни малейшего напряжения. Поэтому по вопросу, который был поводом моего предыдущего письма и твоего ответа, я предпринимать ничего далее не буду — тем более, что твой ответ не воодушевляет. Я также не знаю, где сейчас Нильс Бор, и не могу поэтому сделать его жрецом этих вещей. Ты, пожалуй, прав: ученым тяжелее, чем другим людям, проявлять совесть и чувство справедливости. Что же касается Лауэ, то я тоже слышал о том, что он вел себя как мужественный и порядочный человек. Будем надеяться, что он переживет последний и, наверное, самый ужасный период войны. Надеюсь, что ты при случае напишешь мне снова. Мы

очень радуемся, когда приходит твое письмо. Оно вызывает длинные дискуссии, так как Хеди, будучи квакершей, часто придает твоим высказываниям другой, не такой, как я — старый язычник, — смысл (я хочу сказать, что вовсе и не являюсь язычником и вполне благочестив, но кажусь им только в сравнении с Хеди).

Передай привет нашим друзьям в Принстоне — Нейману, Лиденбургу, Вейлю и зубастому Паули.

*Остаюсь старым другом,
твой Макс Борн.*

Только одна из экспериментальных работ моего сотрудника Фюрта исходила из моей идеи — это фотоэлектрический Фурье-преобразователь. Позднее он получил развитие в Эдинбургском филиале фирмы Ферранти, но так и не был внедрен в практику.

3.3.47

Дорогой Борн!

Если бы я не был продувным старым мошенником с закостенелой нечистой совестью, то не выдержал бы так долго без того, чтобы не написать тебе. Итак, во-первых, стихотворение твоей жены об индийском идеале жизни произвело на меня глубокое впечатление, и я бы не удивился, окажись оно написанным стариком Гете; во-вторых, я был под сильным впечатлением от того выпада, который ты сделал этому чудаковатому педанту Шилпну для посвящаемой мне книги. В твоей статье так много тепла и такое отчетливое свидетельство того, насколько странным и косным ты считаешь мое отношение к статистической квантовой теории. Наконец, мне особенно понравилась твоя забота о переезде твоего китайского подопечного, который, к счастью, без моего вмешательства, счастливым и тихоньким образом от тебя ускользнул. Я обсуждал этот случай с Вейлем, и мы сошлись на том, что не сможем решить эту проблему предложенным тобою образом, и я должен буду обратиться к английскому послу, который доведет это дело до удовлетворительного конца. К счастью, я с этим упустил несколько дней, пока не пришло твое снимающее вопрос письмо.

Мою точку зрения на физику я не могу тебе обосновать так, чтобы ты нашел ее в какой-то степени разумной.

Естественно, я считаю, что в принципе статистический метод, необходимость которого в рамках существующего формализма впервые была ясно осознана тобой, содержит в себе правильную суть. Но не могу же я по той причине, что теория несовместима с принципом, серьезно верить в то, что физика должна представлять реальность в пространстве и времени без призрачного дальнего действия. Во всяком случае, я не твердо убежден в том, что действительно что-либо можно сделать с теорией непрерывного поля, хотя я и нашел для этого некую, до сих пор представлявшуюся мне разумной, возможность. Но математические трудности настолько велики, что я умру, прежде чем сам приду к твердому убеждению. Но я твердо уверен в том, что в конце концов придут к теории, в рамках которой закономерно связанные вещи будут не вероятностями, а упомянутыми фактами, так же, как это рассматривалось недавно, как само собой разумеющееся. Для обоснования этой уверенности у меня нет логических аргументов, могу только привести в свидетели свой мизинец, который нигде не пользуется авторитетом, кроме как на моей руке.

Я рад тому, что твоя жизнь и твоя работа плодотворны и удовлетворяют тебя. Это может помочь преодолеть безумства людей, определяющих в общем судьбу так называемого *Homo sapiens*. Может, никогда и не бывало лучших времен, но люди в своем жалком положении этого не видели, и результаты шарлатанства не были настолько катастрофичны, как это имеет место при нынешних обстоятельствах.

Сердечный привет тебе и твоим

от А. Эйнштейна.

«Индийские сонеты» моей жены вышли в Бад-Пирмонте, в одном издании вместе с ее поэмой «Тихие дороги».

Книга «педанта Шилппа» — это один из томов издававшейся в США серии «Библиотека здравствующих философов»; том вышел под названием «Альберт Эйнштейн — ученый, философ». Каждый том этой серии начинается короткой автобиографией соответствующего философа, за нею следуют подробные статьи различных авторов из той области работы, в которой трудится данный философ, а в заключение помещаются его ответы. Я взялся написать статью об эйнштейновских «статистических теориях»; эту статью на немецком языке можно найти в моей книге «Физика в жизни моего поко-

ления»*. В конце статьи я обращаюсь к оригиналу Эйнштейна и квантовой механике и противопоставляю эмпирическое кредо периода молодости его склонности к умозрительным рассуждениям в последующее время.

В некрологе, посвященном Эрнсту Маху (*Physikalische Zeitschrift*, 17, 1916, S. 101), Эйнштейн пишет:

«Понятия, которые оказываются полезными при упорядочении вещей, легко завоевывают у нас такой авторитет, что мы забываем об их земном происхождении и воспринимаем их как нечто неизменно данное. В этом случае их называют «логически необходимыми», «априорно данными» и т. д. Подобные заблуждения часто надолго преграждают путь научному прогрессу. Поэтому анализ давно используемых нами понятий и выявление обстоятельств, от которых зависит их обоснованность, пригодность, и того, как они возникают из данных опыта, не является праздною забавой. Такой анализ позволяет подорвать излишне большой авторитет этих понятий. Они будут отброшены, если их не удастся узаконить должным образом, исправлены, если они не вполне точно соответствуют данным вещам, заменены другими, если необходимо создать какую-нибудь новую, в каких-то отношениях более предпочтительную систему». Этому признанию я противопоставил в своей статье для шиллшовского сборника эйнштейновскую позицию по отношению к квантовой механике, причем привел там цитаты из более ранних писем Эйнштейна.

Комментируемое письмо Эйнштейна может в такой же степени служить примером, особенно в той его части, которая начинается словами: «Мою точку зрения на физику я не могу тебе обосновать так, чтобы ты нашел ее в какой-то степени разумной». Решающая фраза — это та, где он говорит, что физика должна представлять собой «реальность в пространстве и времени без призрачного дальнего действия». Я тоже рассматривал это в качестве постулата, который мог бы претендовать на безусловную законность. Однако факты, относящиеся к опытным основаниям физики, приучили меня считать, что и это требование также не представляет собой априорного принципа, а является обусловленным временем правилом, которое может и должно быть заменено неким более общим. Об этом много говорится в последующих письмах.

В книге Шилппа моя статья, впрочем, отнюдь не единственная из обращенных к этой теме, в ней опубликована работа Нильса Бора, в которой он рассказывает об обстоятельных дискуссиях с Эйнштейном, где камня на камне не оставляет от его изобретательных мысленных экспериментов, имеющих целью опровергнуть квантовую механику.

Этот опубликованный в печати материал, свидетельствующий о различии наших мнений, также ни в малейшей степени не поколебал нашу дружбу. Эйнштейн оценил, безусловно, теплый тон, в котором была написана моя статья.

Что же касается поездки моего китайского подопечного, тут я ничего не могу припомнить. У меня был целый ряд высокоодарен-

* См. русский перевод: «Статистические теории Эйнштейна» в книге: М. Б о р н. «Физика в жизни моего поколения». М., ИЛ, 1963. (*Прим. перев.*).

ных сотрудников, которые, вероятно, из-за существовавшей опасности войны стремились совершить путешествие домой не через Германию или Россию, а через Америку.

Последний абзац письма — это безропотная жалоба на безумие и ничтожество Homo sapiens, которые в те времена (конец 1947 г.) были очень заметными.

*Магделин-колледж,
Оксфорд*

Дорогой Эйнштейн!

Несколько дней тому назад я видел здесь кинофильм об атомной энергии, в котором и ты появляешься, такой живой, и говоришь ты своим столь нам хорошо знакомым и родным голосом, и улыбаешься своей ласковой иронической и серьезной улыбкой. Я был по-настоящему взволнован: ведь прошло 20 лет с тех пор, как мы тебя видели! Хеди, которой я написал в Эдинбург об этих своих переживаниях, сразу же ответила, что тоже хочет посмотреть этот фильм, и я собираюсь уговорить здешних физиков-атомщиков послать его туда. В фильме были также хорошие кадры с Д. Д. Томсоном и Резерфордом, но, хотя я их и очень почитаю, они не так близки моему сердцу.

... Сегодня у меня была последняя лекция из серии «Waynflet Lectures», где я, между прочим, процитировал отдельные места из твоих писем — я думаю, что ты не будешь ничего иметь против и не вернешь мне в знак протеста мою рукопись. Это время в великолепном Оксфордском колледже было прекрасным. Относительно хорошее питание большого значения для меня не имеет; но многие беседы с разносторонними, умными людьми, красивый старый город с его серыми стенами, визиты к моей дочери Гритли (ее муж, Мориц Прайс, был, к сожалению, почти все время болен) и игры с моими внуками, при случае — музыка, игра на двух фортепиано — все это исключительно прекрасные вещи. Доклады я подготовил для печати в виде книги. Хеди осталась дома для того, чтобы переоборудовать нашу квартиру: кухню перенесем наверх, так, чтобы нам, старикам, не лазить высоко по лестницам. Она счастлива, так как в индийском журнале появилась ее (очень хорошая) статья на религиозную тему. Не мог ли бы ты напечатать в Америке в немецком журнале ее стихи? Они совершенно прекрасны, но здесь, в Англии,

никто не знает немецкого, в Германии же достаточно поэтов, даже больше, чем она в состоянии прокормить. У Хеди много дел такого рода — отправка посылок голодающим в Германию. Сейчас снова особенно страдают антифашисты. Но мы и сами находимся на пайке, и наши возможности в оказании помощи ограничены.

То, чем мы занимаемся в области физики, тебя не очень заинтересует. Нашу кинетическую теорию жидкостей мы закончили работой о сумасшедшем гелии-II (она еще не появилась). Один из моих сотрудников-китайцев работает над сверхпроводимостью, и я считаю, что его теория (основанная на нескольких моих предположениях) лучше гейзенберговской. Мой сотрудник Грин трудится над элементарными частицами; это блестящий человек, лучший из всех после Прайса. Все это, в какой-то степени, дает мне ощущение молодости.

Мне предстоит прослужить еще пять лет, затем я получу пенсию, на которую прожить не смогу (это род пенсионного обеспечения, размер которого зависит от количества проработанных лет), — поэтому буду, наверное, работать дальше, до самой смерти. Не такой уж и плохой выход.

Хоть я и очень радуюсь твоим письмам, но все же не считай себя обязанным отвечать мне, если тебе не до этого.

Всего хорошего и много приветов Марго,

твой Макс Борн.

Это письмо я написал из Оксфорда. Вице-канцлер университета проф. Тизард, известный своим конфликтом с Линдманом (Чируэллом) по поводу технических аспектов войны, во время своего посещения Эдинбурга сделал мне персональное приглашение, чтобы прочесть «Вайнелетовские лекции» — лестное предложение, которое я сразу же принял, хотя это и было связано с очень существенной подготовкой. Мои лекции были изданы потом в виде книги «Натуральная философия причинности и случайности», Оксфорд, 1949. В нее входила статья о проникновении понятия вероятности, которая господствует в квантовой механике, в каузальную физику. Туда входят цитаты из эйнштейновских писем, о которых еще не раз будет идти речь. Статистическая механика конденсированных систем, которая была намечена мною и Грином и которая должна была вести к кинетической теории жидкостей, вошла в небольшую книжечку «Общая кинетическая теории жидкостей» (1949) и внесла некоторый вклад в развитие данной области. Применение ее к случаю жидкого гелия, который является очень странно (по-сумасшедшему) ведущей себя гладкой фазой, оказалось, однако, не таким

успешным, как мы надеялись. Признанная ныне теория разработана русским физиком Л. Д. Ландау — лауреатом Нобелевской премии 1962 г.

18.3.48

Дорогой Борн!

Сегодня я что-то разыскивал в своей эскимосской пещере, т. е. на своем рабочем столе в институте. Я не нашел того, что искал, но вот обнаружил твое декабрьское письмо, которое принял за какой-то оттиск (оно было послано тобой в большом конверте), а поэтому — вместе со многими другими — оно оставалось нераспечатанным. Я сразу же его, конечно, прочел, — и с таким интересом, что опоздал на целый час к обеду.

В цитатах из моих писем, которые ты приводишь, есть некоторые искажения, связанные, по-видимому, с моим нечетким почерком; ты увидишь это по моим замечаниям на полях. Не беда, даже если это успело уже попасть в печать, так как бумага, безусловно, и в этом случае все стерпит. Я отыгрался отдельными колкими замечаниями на полях, которые тебя позабавят; я ведь полагаю, что тебе нравятся крепкие обороты речи, которые наверняка гармонируют с шотландским климатом.

До чего досадно, на самом деле, что мы не можем уделить некоторое время для совместного досуга. Я очень хорошо понимаю, почему ты считаешь меня закоренелым старым грешником. Но я ясно чувствую, что ты не понимаешь, что приводит меня на этот мой собственный и уединенный путь; тебя это наверняка развлечет, хотя и совершенно исключено, что ты одобришь мою позицию. Я был бы очень рад пощипать твою позитивистскую философскую позицию, но вряд ли я успею реализовать такого рода планы в этой жизни!

Я был очень рад твоему и ффрау Хеди письму, — хотя и получил их с опозданием.

С сердечным приветом

твой А. Э.

Из числа «колких замечаний» я хотел бы здесь сказать о нескольких. В тексте последней моей книги («Метафизические заключения», стр. 122) я сопоставляю несколько фундаментальных физических идей, которые не могут быть объяснены чем-то более глубоким, а должны быть приняты на веру, и продолжаю: «Причинность является таким принципом, если она определена как вера в существование взаимной физической зависимости наблюдаемых явлений. Од-

нако все детали этой зависимости по отношению к пространству и времени (смежность, предшествование) и к бесконечной точности наблюдения (детерминизм) представляются мне не имеющими фундаментального характера и являются следствиями действительных эмпирических законов».

На полях Эйнштейн написал:

«Я хорошо знаю, что по отношению к наблюдаемости не существует никакой причинности; я придерживаюсь этого положения окончательно. Отсюда, однако, по моему мнению, не должно следовать, что также и теория могла бы покоиться на фундаменте статистических законов. Но может случиться, что (молекулярная) структура средств наблюдения отражает статистический характер наблюдаемого, однако в конце концов выяснится, что целесообразным было ограждать основы теории от статистических понятий».

Далее в моем тексте идет:

«Другой метафизический принцип вводится определением вероятности. Суждение о том, что предсказания, даваемые статистическими расчетами, являются чем-то бóльшим простой игры ума, что на них можно полагаться в реальной действительности, — все это вопрос веры».

К этому Эйнштейн кратко замечает:

«С этим я, само собой разумеется, согласен».

Это — спокойные деловые комментарии, но есть также и короткие, резкие замечания. Мой текст содержит вопрос, имеет ли значение красота и простота той или иной теории. Там написано следующее:

(Стр. 124, снизу). «В отношении простоты точки зрения могут во многих случаях расходиться. Является ли эйнштейновский закон гравитации более простым, чем ньютоновский? Подготовленные математики ответят на этот вопрос утвердительно, имея в виду логическую простоту его основ, в то время как другие эмоционально будут отрицать такую оценку из-за указанной сложности соответствующего формализма».

По этому поводу Эйнштейн просто замечает:

«Это зависит все же от *логической* простоты основ».

С этим, поскольку я был образованным математиком, я согласился, хотя и не мог не рассматривать противоположную точку зрения непригодной. В конце концов, это определяется тем, являются ли ньютоновские или эйнштейновские формулы более удобными для наблюдений.

Я дискутировал тогда и то, что назвал «принципом объективности», и утверждал (стр. 124, снизу): «Это предусматривает критерий для различения субъективных впечатлений от объективных факторов, а именно — заменой одних данных ощущений другими, которые могут быть проверены другими наблюдателями».

Эту свою любимую идею я недавно подробно обсуждал в статье «Символ и действительность» («Physik. Blätter», 20, 1964, S. 554; 21, 1965, S. 53). Эйнштейн высказался по этому поводу кратко и просто: «Но, Борн! Стыдись!»

В другом месте, где я на примере произведения искусства (фуги Баха) разъяснял, что введение принципа объективности не всегда имеет место, на полях стоит просто: «Ой—Ой!».

В заключение он добавляет своим изящным почерком довольно длинный раздел, который я приведу здесь целиком.

Замечание. Ты не должен истолковывать отсутствие моих письменных пометок на полях последней части твоей статьи как знак моего согласия. Вся эта вещь довольно небрежно продумана и по этой причине я должен со всем почтением потрепать тебя за ухо. Я только хочу пояснить, что я имею в виду, когда говорю — нам надо стараться придерживаться физической реальности. У всех нас имеется представление о том, какими должны быть аксиомы, лежащие в основе физики. Понятие о кванте или частице, разумеется, не находится в их числе; возможно, туда входит поле — в понимании Фарадея и Максвелла, но я в этом не уверен. Но что бы мы ни считали существующим (реальным), должно быть каким-то образом локализовано во времени и в пространстве. Это значит, что в части пространства A должно (по теории) что-то «существовать» независимо от того, что полагается реальным в пространстве B . Когда физическая система охватывает собой какие-то части как A , так и B , тогда то, что существует в B , должно существовать как-то независимо от того, что существует в A . То, что действительно существует в B , не должно поэтому зависеть от того, какие измерения производятся в области пространства A ; оно также не должно зависеть от того, будут ли или нет в пространстве A произведены какие-либо измерения. Если твердо придерживаться этой программы, то трудно рассматривать квантово-теоретическое описание как полное представление физической реальности. Если, несмотря на сказанное, все же попытаться это сделать, то придется признать, что физическая реальность в B испытывает неожиданное изменение в результате измерений, предпринятых в A . Мой инстинкт физика восстает против этого. Однако, если отказаться от предположения о том, что нечто, существующее в разных частях пространства, имеет свое собственное, независимое, реальное существование, тогда я просто не могу понять, что же физика вообще призвана описывать. Ибо то, что мыслится как «система», является, в конце концов, всего лишь соглашением, и я не вижу, как объективным образом подразделить мир так, чтобы можно было бы делать утверждения об его частях.

В соответствии с этим письмом Эйнштейн думал, что я не одобряю эту позицию, даже если мы будем иметь возможность продискутировать ее в разговоре. Он называл мои философские идеи «пози-

тивистскими» и был бы рад буквально разнести их в клочья. Сам я, разумеется, не считаю свою философию неким вариантом позитивизма, если под ним подразумевается, что только чувственные впечатления могут иметь какое-то отношение к реальности, а что все остальное — и не только научные теории, но и идеи о реальных объектах каждодневной действительности — скорее сконструированы, созданы в целях установления разумных соотношений между различными впечатлениями, воспринимаемыми сознанием. Мой ответ на замечания Эйнштейна содержится в следующем письме.

Грендж-Лоэн, Эдинбург
31.3.48

Дорогой Эйнштейн!

Большое спасибо за пересылку моей рукописи с замечаниями на полях и за твое письмо. С изданием дело здесь идет очень быстро. Пока что рукопись далеко еще не закончена, и, если я отправлю ее в мае, то вряд ли она появится раньше января 1949 года. Так что я могу поправить все, что мне покажется нужным. Я очень благодарен за то, что ты позволил мне процитировать оба места из твоего письма. Я исправлю корректуру текста в соответствии с твоими предложениями, хотя, если в первом случае твое первоначальное изложение воспринимается совершенно однозначно, то во втором оно столь же двусмысленно. Я тщательно перерисовал твои слова; вот результат:

1) Я твердо *верю* (курсив *М. Б.*), но все же надеюсь, что...

Эти слова курьезны, я с этим согласен. Но «верю» — подчеркнуто тобой. В соответствии с пожеланием я его уберу и заменю на «надеюсь»...

2) Кожа (*Haut*).

Поскольку далее ты говоришь о мизинце, то я прочитал «рука» (*Hand*). Но и оборот со словом *Haut* тоже правомочен, поскольку он соответствует интерпретации писавшего.

Что же касается остального, то все твое оттаскивание за уши и всю ругань я смиренно включил. С этим уж ничего не поделаешь. Конечно, все, что ты подверг критике, понятно только в том случае, если известны и 6 предшествующих лекций. Но я уверен, что и они не обратили тебя в сторонника моего понимания вопроса. Я попытаюсь использовать твои замечания, если мне удастся выбрать время для того, чтобы улучшить мой стиль.

Мне очень жаль, что тебе не нравятся «наблюдаемые инварианты» («Observational invariants»).

Это наследие «Образов» («Gestalten») Вертхеймера в новой форме. И я дорожу здесь кое-чем. Но я сержусь за то, что ты упрекаешь меня в позитивистских идеях; этого как раз мне только не хватало. Этих парней я терпеть не могу.

Еще раз: сердечное спасибо! Послезавтра мы с Хеди выезжаем во Францию. Сначала в Бордо, где состоится конгресс по рассеянию света и эффекту Рамана. Там Рамана и меня собираются избрать почетными докторами. Это ужасно смешно, так как мы с ним уже три года отчаянно спорим по вопросам теории кристаллов. То есть он напустил на меня своих учеников в «Nature», а я при случае что-то весьма резкое дал в ответ. А теперь нам предстоит заключить мир и дать возможность почтить нас. Он к этому привык, а я нет. В области квантовой механики, которую ты не жалуешь, все славопочитание перешло на Гейзенберга и Шредингера. При этом Гейзенберг даже не знал, что такое матрица (он был моим ассистентом, и я об этом могу судить). Кроме того, он был у нас в декабре — милый и умный, как когда-то, но заметно «нацистски» настроенный*. Недавно я снова разговаривал с ним в Оксфорде. Мы снова вышли на тот же след: сверхпроводимость. Он опубликовал теорию, которую мы считаем полной бессмыслицей. Мы сначала вывели очень тщательно кинетическую теорию плотной материи (жидкости и твердые тела), затем — очень здорово объяснили гелий II, а теперь заняты тем, чтобы создать приличную теорию сверхпроводимости. Похоже, что получается очень здорово. Неужели ты и вправду думаешь, что вся эта квантовая механика является заблуждением?

Приезжай же как-нибудь в Европу.

В Англии и Шотландии разрушений немного, да и во Франции кое-что еще цело. Как прекрасны эти старые города, церкви, замки, созданные в доброе старое время!

Мы с Хеди прошлым летом были в Швейцарии и были ошеломлены не только прелестью ландшафта, но и маленькими городишками — Берном, Люцерном, Туном и т. п. Да и Оксфордом не стоит пренебрегать. Или ты в

* Это замечание, как выяснилось, было несправедливым (см. комментарий к письму). (Прим. М. Борна).

своим пуританизмом потерял способность радоваться от таких впечатлений?

С сердечным приветом от нас с Хеди

твой Макс Борн.

Выражению «наблюдаемые инварианты» я придавал в своей книге следующий смысл. Если некто видит улетающую птицу, то это означает (как это и воспринимается в действительности), что чаще всего это поначалу легко различаемая птица будет становиться меньше, еще меньше, так что, наконец, мы не сможем различать в ней никаких деталей, а увидим только точку. Все же можно думать, что мы видим ту же самую птицу. Но существует — в совершенно различных восприятиях — нечто постоянное, инвариантное, которое нашим мозгом бессознательно препарируется. Вот как раз это я и называю «наблюдаемыми инвариантами».

Вертхаймер — это тот самый человек, который в дни революции 1918 г. пробирался с Эйнштейном и со мной к рейхстагу. Он — вместе с Келером, Хорнбостелем и другими был одним из основоположников психологической теории образов («Gestalttheorie»), согласно которой ощущение состоит не из набора чувственных впечатлений, а из осознания целого осмысленного образа.

Встреча с сэром Ч. В. Раманом в Бордо протекала очень драматично. Зимой 1935/36 года мы были по его приглашению в «Индийском научном институте» («Indian Institute of Science») в Бангалоре (Индия, штат Мизор), где я читал лекции. Мы, с поправкой на небольшие шероховатости, хорошо друг с другом ладили и должны были, как я полагал, стать друзьями. Он даже пытался достать там для меня место на более продолжительное время, но этот план провалился из-за несколько неудачных маневров. Хотя он довольно регулярно посещал мои лекции по динамике кристаллической решетки, он развил собственную очень примитивную теорию колебаний решетки и побудил своих учеников выступить против меня на страницах «Nature». В Бордо, после дружеских приветствий, сразу же произошло столкновение: он обругал теоретиков, которые хотели бы заниматься экспериментом, на что я возразил: «А как обстоит дело с экспериментаторами, которые пробуют свои силы в теории?» Это привело его в ужасную ярость. На банкете моя жена оказалась его соседкой по столу; он объяснил ей, что я его так обидел, что он должен будет уехать. Жене только с большим трудом удалось его отговорить. В течение всего конгресса продолжалось это напряжение. Да и позднее, на одном из заседаний съезда нобелевских лауреатов в Линдау, он старался нас по возможности избегать.

Мое суждение о Гейзенберге было, вероятно, неправильным. Он разъяснил мне однажды, какими были его работы в годы гитлеризма и каковы были следовавшие из них отношения с правительством. Тем временем в 1969 г. появилось объективное изложение немецких работ по расщеплению ядра в годы войны, прежде всего книга английского историка Давида Ирвинга*, в которой находят под-

* См. русский перевод: Д. Ирвинг. Вирусный флигель. М., ИЛ, 1969. (Прим. перев.)

тверждение высказывания Гейзенберга и оправдывается его поведение.

О нашей теории сверхтекучести жидкого гелия и сверхпроводимости металлов я уже говорил: из них ничего путного не вышло.

5.4.48

Дорогой Борн!

Посылаю тебе при этом коротенькую статью, которую под воздействием Паули я направил для публикации в Швейцарию. Я в данном случае прошу тебя преодолеть свою антипатию настолько, чтобы ты смог эту коротенькую вещичку прочесть так, как будто у тебя нет еще собственных взглядов и вообще ты только что прибыл с Марса. Я прошу тебя об этом не потому, что возмнил возможным повлиять на твое мнение, а только полагая, что из этого ты сможешь понять главные побуждающие меня причины лучше, чем из всего того, что тебе обо мне известно. Во всяком случае там находит свое выражение только негативная сторона, а не то доверие, которое я в группе релятивистских вопросов выдвигаю как эвристический ограничивающий принцип. Но в любом случае мне очень интересно будет узнать твои контраргументы, не считаясь, конечно, с тем фактом, что до сих пор только квантовая механика была в состоянии рассматривать свет и материю с позиции волн и частиц.

С сердечным приветом

*твой Альберт Эйнштейн *.*

Грендж-Лоэн, Эдинбург
9.5.48

Дорогой Эйнштейн!

Я должен очень извиниться за то, что не сразу ответил на твое письмо с рукописью от 5 апреля. Я провел два месяца в Оксфорде, потом только 14 дней дома и снова мы уехали с Хеди во Францию для участия в двух конгрес-

* К этому письму Эйнштейн приложил текст своей статьи, опубликованной позднее в журнале «Диалектика». Борн воспроизводит в «Переписке» эту статью. Перевод ее опубликован в 3-м томе «Собрания научных трудов» А. Эйнштейна. М., «Наука», 1966, стр. 612—616. (Прим. перев.).

сах — в Бордо и Париже. По возвращении мне нужно было заняться со своими давно заброшенными учениками, подготовить к печати оксфордские доклады и написать официальный некролог о Планке для Royal Society — это трудная задача, с которой я должен справиться до середины июня. Так что только сегодня я выбрался ответить на твое письмо.

Меня радует, что ты в определенной степени считаешься с моим мнением. У меня такое чувство, что я вряд ли этого заслуживаю. Но поскольку ты этого хочешь, то поспушай, что пришло мне на ум при чтении твоей рукописи.

Позволь мне начать с одного примера. На пластинку кристалла, обладающего свойством двойного лучепреломления, падает луч света, который разлагается на два луча. Измерением установили направление поляризации одного из этих лучей, тогда можно заключить, что для другого оно будет перпендикулярным первому. Таким образом, измерениями системы в одном месте пространства кое-что установили для системы в другом месте пространства. Такая возможность основана на знании того, что оба луча возникли после прохождения одного луча через кристалл; говоря языком оптики, — что они когерентны.

Этот случай кажется мне очень родственным твоему примеру, который, очевидно, связан с теорией столкновений. Но он проще и показывает, что такие вещи происходят в пределах обычной оптики. Квантовая механика только обобщила это дело.

Мне представляется, что твой принцип «независимости» пространственно удаленных объектов A и B является не настолько обязательным, как ты это декларируешь. Он не согласуется с фактом когерентности; пространственно удаленные объекты, имеющие общую первопричину, вовсе не должны быть независимыми. Я думаю, что этого нельзя отрицать и нужно просто принять это. Дирак целиком на этом построил всю свою книгу.

Ты говоришь: «Методы квантовой механики позволяют определить ψ_2 подсистемы S_2 из ψ_{12} , если к тому же имеется в смысле квантовой механики полное измерение подсистемы S_1 ». Очевидно, ты при этом заранее допускаешь, что известно ψ_{12} . Но ведь это совсем не то, что утверждать, будто измерение S_1 что-то говорит о происходящем в удаленной от S_1 подсистеме S_2 . Это верно только в связи со знанием ψ_{12} , т. е. в связи с другими ранее проведенными

измерениями. В оптическом примере это соответствует установлению того, что оба луча возникли при прохождении первоначального луча через кристалл.

Твой пример чересчур для меня абстрактен и, вместе с тем, недостаточно уточнен для того, чтобы из него что-либо извлечь. «Измерение» в квантовой механике, к сожалению, часто определяется неаккуратно. Иногда под ним понимают установление возможных собственных значений некоторой величины, в другой раз это установление возможности для системы находиться в таком состоянии, которое удовлетворяет какому-то собственному значению, или, в более общем виде, установление весов $|a_n|^2$, с которыми различные собственные значения $n = 1, 2 \dots$ существуют в состоянии, описываемом суммой
$$\psi(x) = \sum_n a_n \psi_n(x).$$
 Мне не ясно, что ты понимаешь под этим «измерением» в своем письме.

Мне было бы удобнее рассматривать настоящий процесс соударения, в котором две поначалу независимые частицы сталкиваются друг с другом и отклоняются. Волновые функции после соударения будут тогда соответствовать твоим ψ_1 и ψ_2 . Далее важно знать, считаешь ли ты, что имеет место стационарный поток падающих частиц обоих сортов или есть только две частицы обоих сортов, или есть только две частицы, по одной каждого сорта. В последнем случае вообще ничего не должно произойти; нужно точно знать не только направление удара, но и времена, и если эти последние так точно подобраны, что произойдет отклонение, то мне кажется, что после соударения частицы не останутся «независимыми». Для того чтобы вообще что-либо произошло, нужно знать и устроить очень многое, относящееся к состоянию до соударения. Если же дело касается стационарного потока частиц, в случае которого поступление их к месту соударения оказывается статистическим, то совершенно ясно, что эта статистика проявится в распределении после соударения, т. е. что оба партнера снова не будут независимыми. Я не вижу, чтобы здесь крылись какие-либо действительные трудности.

Но я чувствую, что выражаюсь не так ясно, как того бы очень хотел. В принципе я снова возвращаюсь к факту когерентности, который невозможно отрицать. Но так как нельзя также отрицать и полезность механических моделей, то нужно довольствоваться формализмом, приводящим

и то и другое к общему знаменателю. Он не вызывает в моей душе ничего такого, что бы меня раздражало. Поэтому я склонен применять его и в известном смысле «веровать» в него, пока не появится что-либо «лучшее». В своих оксфордских лекциях я это довольно обстоятельно рассмотрел, может быть, тебе как-нибудь они попадутся.

Что же касается моего ожидания чего-либо «лучшего», то здесь я придерживаюсь мнения, совершенно отличного от твоего. Прогресс в физике всегда был однозначно связан с переходом от наглядного к абстрактному. По-видимому, так оно и останется. Квантовая механика и квантовая теория поля оказываются несостоятельными в решающих вопросах. Но мне кажется, что есть все признаки того, что все стали заниматься такими вещами, которые не устраивают нас, стариков. Похоже, что дни релятивистской группы в созданной тобою форме уже сочтены; возможность переноса линейного элемента в математику очень хороша, но, на мой взгляд, физически неудовлетворительна. И вот, расхождения в квантовой механике указывают на то, что в мире есть абсолютная длина. Я предполагаю, что ее как-то можно включить в общую группу преобразования. Мы с этим много помучились. Мой ученик Грин, высокоодаренный человек (которого я в будущем году направлю в Принстон), может быть, продвинется дальше; у него есть хорошие идеи и большая математическая сноровка.

Мы работаем сейчас над сверхпроводимостью, и я думаю, что наша теория правильна. И она не так уж страшно запутана.

Сердечный привет от нас с Хеди.

Твой Макс Борн.

Расхождение во мнениях между Эйнштейном и мною лежит в его аксиоме, что события, имеющие место в различных точках A и B , независимы друг от друга в том смысле, что наблюдение состояния в B не может дать нам сведений о том, каково состояние в A . Мой аргумент против этого предположения взят из оптики и покоится на понятии когерентности. Когда луч света после отражения, двойного преломления и т. п. разделяется на два луча, которые идут по различным путям, можно из наблюдения за одним лучом в точке A сделать заключение о состоянии другого, проходящего через удаленную от A точку B . Странно, что Эйнштейн, который был одним из первых теоретиков, увидевших значение де-бройлевской работы по волновой механике и обративший на нее внимание остальных,

не обратил внимания на эти возражения против его аксиомы. Для случая света это, конечно, незаконно; когда, однако, движение материи можно описывать в терминах распространения волн (а в пользу этого сам Эйнштейн выдвинул важные аргументы), тогда понятие когерентности волн материи оказывается применимым. Отсюда получается, точно так же, как и в случае света, что при определенных обстоятельствах из определения состояния в *A* можно будет сделать вывод о состоянии в *B*. Эйнштейн считал теорию, которая вела к подобным выводам, несовершенной. В его представлении, таким образом, теория света равным образом считалась несовершенной. Он надеялся на построение более глубокой теории, которая должна была бы устранить такое несовершенное состояние. До сих пор эта его надежда не осуществлялась, и физики имеют веские основания (покоящиеся в основном на исследованиях Д. фон Неймана) думать, что это вообще невозможно.

Грендж-Лоэн, Эдинбург
23.1.49

Дорогой Эйнштейн!

Это послание является главным образом ответом на письмо Марго к Хеди, передай ей, пожалуйста, мое вложенное сюда письмо. Ты можешь его прочитать. Мы очень и очень рады, что тебе лучше (подчеркнул *М. Б.*). Побереги себя и дай за собой смотреть как следует!

Что же, собственно, произошло с книгой Шилппа? Свою статью я направил ему более чем два года тому назад, и она все еще не появилась.

В последнем семестре я очень интенсивно работал и, думается, с успехом. Грин и я развили теорию элементарных частиц, которая, как я убежден, правильна, хотя при публикации я выражаюсь осторожнее. Ты, конечно, в нее не поверишь, так как мы используем квантово-механическое «привидение», которого ты не выносишь. Две наши заметки появятся в следующем выпуске «Nature». Идея состоит в следующем. Для каждого сорта частиц (фотонов, электронов, протонов, мезонов и т. д.) до сих пор писали, как умели, функцию Лагранжа, причем массу вводили произвольно как характеристическую константу. По нашему мнению, эту отправную позицию надо полностью изменить, ведь кажется точно установленным, что есть различные по массе мезоны, и их, предположительно, много. Сама же функция Лагранжа, а не решение механической задачи, является истинной неизвестной. Мы определяем ее из очень общего принципа: законы природы ин-

вариантны не только по отношению к релятивистским преобразованиям, но также и к подстановке $x^\alpha \rightarrow p_\alpha$; $p_\alpha \rightarrow -x^\alpha$, где x^α означает пространственно-временные координаты, а p_α — координаты энергии-импульса.

С классических позиций это, конечно, бессмысленно, а вот с квантово-механических смысл есть, так как теперь

$$p_\alpha = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x^\alpha}.$$
 Из этого получается, что вместо твоего нового фундаментального инварианта $x^\alpha x_\alpha = R$ появляется симметричная величина $S = R + P$, где $P = p^\alpha p_\alpha$. S является оператором, целочисленные собственные значения которого представляют собой промежутки, собственные функции которых в основном представляют собой функции Лагранжа L (конечно, x_α и p_α следует измерять «натуральными» единицами). Это даст в действительности бесконечно большое количество L , и массы известных мезонов отсюда получаются правильными.

Сказано не в обиду!

Сердечный привет

твой Макс Борн.

Письмо Марго содержало известие о серьезном заболевании Эйнштейна.

Книга Шилппа вышла из печати только лишь в 1949 году, т. е. в год, когда писалось письмо. Физическая часть, составляющая основное содержание письма, покоилась на той же идее, которую изложил я в более раннем письме к Эйнштейну и которую мы назвали «принципом взаимности» («Reziprozität Prinzip»). Но сейчас осуществился новый поворот в мышлении, и это как раз важно, как мы уже указывали ранее, для теории элементарных частиц.

Без даты

Дорогой Борн!

Спасибо за твои дружеские строки. Я уже совсем бодро ползаю, но мотор мой уже не очень многого стоит.

Связанные с Шилппом дела на время заглохли, поскольку сам Шилпп сейчас функционирует в Германии. Когда он вернется, дело сдвинется. Я с искренним сожалением узнал, что у твоей жены неполадки с нервами. Ее стихотворение об индийской философии произвело на меня тогда огромное впечатление. В нем есть благородный настрой и истинное поэтическое дарование. Мне очень

жаль, что у вас заботы с этой несчастной пенсией. Это положение во всяком случае — своего рода исполнение долга Шотландией, о которой рассказывают массу анекдотов, связанных со скупостью этой нации. Здесь с пенсионным обеспечением тоже дело дрянь из-за инфляции. Твои теоретические положения я в какой-то степени уловил, но наши коньки безжалостно разбежались в разные стороны — всегда только, понятно, радуется то, что твой пользуется более широкой популярностью вследствие огромных практических достижений, в то время как мой воспринимается как донкихотство, и сам я не облакою его безусловным доверием.

По крайней мере это не игра в жмурки в собственном смысле с релятивистскими идеями, против которой мой инстинкт непреодолимо бунтует.

Моя надежда на то, чтобы еще раз по этому поводу поболтать с тобой в этой жизни, вряд ли сможет быть осуществлена. Может быть, мне удастся добиться того, чтобы Институт пригласил тебя сюда.

Сердечные приветы и пожелания

твой А. Э.

Почерк Эйнштейна в этом письме определенно свидетельствует о болезни. Местами его письмо прочесть не просто! Но он, несмотря на чувство приближающейся смерти, прожил еще шесть лет.

Его замечание о пенсиях является шуткой, не имеющей под собой основы. Во всей Великобритании отсутствует определенное пенсионное обеспечение университетских профессоров, а имеется только обязательное страхование, причем университет существенно способствует выдаче страховых премий. Проработавший долгое время получает также до некоторой степени достаточную пенсию по старости. Поскольку я стал профессором поздно, по достижении мною 50-летнего возраста, я мог надеяться лишь на маленькую пенсию. Университет не мог, конечно, осуществить персональное ее повышение, чтобы не создавать прецедента. Что касается шотландской скупости, то мы с ней нигде никогда не сталкивались, она является лишь предметом шуток, относящихся к тому времени, когда Шотландия была очень бедна в сравнении с Англией и вынуждена была экономить.

Надежда Эйнштейна, что мы еще раз сможем увидеться и поговорить перед «уходом» (Abreise) из этой жизни, так и не осуществилась.

Дорогой Борн!

Я очень рад чудесной фотографии, твоей работе о вопросах причинности и вероятности и интересной статье о преодолении моральных убытков нашего времени.

Ты, дорогой Борн, выставил на обозрение мои легкомысленные замечания, сделанные в письмах. Все, что ты рассказываешь в книге, очень здорово представлено в развитии, и я твою позицию понимаю очень хорошо. Но я все же убежден, что та принципиальная отправная позиция, которая в настоящее время разделяется очень многими, не сможет удержаться долгое время.

Ты был совершенно прав, высказав в своем письме пожелание быть приглашенным Институтом на длительный срок. Я тоже выступал за это; но я не имею большого влияния, так как меня рассматривают как своего рода ископаемое, которого годы сделали слепым и глухим. Я не нахожу эту роль такой уж плохой, тем более, что она вполне соответствует моему темпераменту.

Ваш тезис, дорогая фрау Борн, предлагающий освобождение от оков собственного Я, как единственный путь к освобождению, я считаю совершенно правильным. Но ведь бывает еще и так, что не все можно свести к индивидууму, поскольку в обществе, основанном на бессовестной конкуренции, социальные задатки индивидуума хиреют. Попытки улучшения должны поэтому распространяться на оба источника человеческого поведения.

Вот Вы спрашиваете меня, как я отношусь к повседневной жизни. Я просто испытываю большую радость давая, чем получая — в любом отношении, не важничая, так же отношусь к поведению толпы, не стыжусь своих слабостей и пороков и принимаю от природы все с юмором и смирением. Многие ведут себя так же, и я не могу понять, почему из меня сделали какого-то идола. Это так же трудно понять, как и то, почему лавина начинается от *одной* (курсив А. Э.) пылинки и движется по определенному пути.

Сердечные привет и пожелания

от *Вашего* А. Э.

Эйнштейн объясняет тщетность своих попыток добиться моего приглашения в Институт тем, что его рассматривают как некое ископаемое. Я уверен, что и ко мне относились, как к окаменелому обломку канувшей в прошлое эпохи. Два ископаемых — это показалось слишком много для современных хозяев Института.

Институт
Принстон, Нью-Джерси
8.1.50

Дорогой Борн!

Безобразие в прессе по поводу моей последней работы очень досадно. У меня нет копий рукописи, которая будет напечатана на следующей неделе, как приложение к моей книжце «Значение относительности» («Meaning of Relativity»).

А пока сердечно приветствую тебя — моего дорогого антипода.

Твой А. Эйнштейн.

Американские газеты, а вслед за ними и многие европейские, в то время много писали о том, будто бы Эйнштейн в своей статье сказал, что представленная в ней «единая теория поля», по его мнению, является удовлетворительной и окончательной. Я получил вырезку из газеты с открыткой (датированной 12 января 1950 г.), на которой с несколькими (написанными по-английски) непонятными разъяснениями стояло четыре основных уравнения

$$g_{ik} = 1; \quad \Gamma_1 = 0; \quad R_{ik} = 0; \quad g^{is} = 0.$$

+—

Это типичный пример превращения Эйнштейна в идола, о чем он писал в конце предыдущего письма, отвергая эти попытки словами, в которых звучало отчаяние.

3.9.50
На бланке
Профессор Борн
Королевское Физическое общество,
Отделение математической физики,
(Прикладная математика)
Университет
Друммонд-стрит, Эдинбург, 8

Дорогой Эйнштейн!

Журнал «Nature» прислал мне твою книгу «Out of my later years» («Из моих последних лет») для обсуждения. Я собирался тебе об этом написать уже после того, как

прочту ее до конца. Но все же мне хотелось бы лучше сразу сказать тебе, с какой радостью я читаю эту прекрасную, лаконичную, четкую статью! Хеди надеется, что, может быть, она будет издана на немецком; она думает, что ты наверняка сначала писал по-немецки и никакой перевод не в состоянии передать твоих характерных выражений. Мир в настоящее время выглядит так, что это доводит до отчаяния. Но, может быть, это кризис болезни, за которым последует выздоровление. Черчилль в одной из своих последних предостерегающих речей сказал: «Чудо, что огромная Красная Армия еще не захватила Европу, несмотря на наличие атомной бомбы». А я думаю, что в этом нет никакого «чуда», мне кажется, что русские в самом деле не хотят великой войны. Их призывы к миру не являются мистификацией.

Мне очень хотелось бы узнать, что ты скажешь о происходящем в мире.

Физические статьи в твоей книге я тоже прочитал и очень был рад, несмотря на наши давно известные расхождения во взглядах на вопросы квантовой механики. Относительно аргумента о «неполном описании» я высказался в одной из статей, которую пошлю тебе. Там я набрался дерзости сослаться на тебя в том, что неполнота иногда необходима, например в релятивистской теории.

Хеди и я были три недели в Англии, сначала в маленьком городке Льюисе, оттуда мы ездили в Глинборн, где смогли быть на репетиции «Фигаро», а затем в Гюрнсей, на одном из островов, образованном каналами, где было по-южному тепло. Сейчас мы снова в холодной Шотландии, но у нас согревающий нас театральным музыкальным фестивалем. Здесь мы уже посмотрели «Фигаро» в постановке Глинборнской оперы, а также разные другие вещи.

В июле наш сын Густав женился на девушке-католичке из Хайленда. Возникли всякие трудности с ее чрезвычайно религиозными и снобистски настроенными родителями, которые удалось преодолеть благодаря уму и такту Хеди.

Мой зять, Морис Прайс, в октябре придет в Принстон на целый год со всем семейством, кроме сына. Надеюсь, что ты познакомишься с ним и моей дочерью Гритли.

Сейчас я с сотрудником-китайцем работаю над окон-

чанием давно начатой книги «Квантовая механика кристаллической решетки». Материал этот давно уже меня перерос, и я рад, когда понимаю, что пишет молодой Кун Хуанг от имени нас обоих. Идеи, однако, в большинстве своем возникли у меня еще в ранние годы.

Из газет я узнал, что Блеккет, выступая перед Британской Ассоциацией в Бирмингеме, снова сообщил об открытии пары новых короткоживущих мезонов. В посвященном тебе номере «Rev. of Modern Physics» есть работа, в которой я говорил о вероятности существования множества таких короткоживущих частиц. Детали в этих расчетах может быть и неверны, но принцип, вроде бы, подтверждается.

Привет от Хеди тебе и Марго.

Еще раз спасибо за книгу.

Твой Макс Борн.

4.9.50

Перед тем, как отослать тебе это письмо, хочу добавить еще два замечания. Одно касается того места в книге, где ты заявляешь об ответственности всего немецкого народа за зверства нацистов. Я тоже в свое время разделял это мнение, но сейчас изменил его в другую сторону. Мне кажется, что не может быть коллективной ответственности в высоком смысле; это относится только к отдельным индивидуумам.

Я встречал достаточно порядочных немцев, может быть, количественно немного, но настоящих. Предполагаю, что и ты несколько изменил взгляды военных лет.

Другое замечание относится к интерпретации ψ -функции: мне она кажется точно согласующейся с тем, что я представлял себе с самого начала и о чем, наверное, сегодня думают все благоразумные физики. То, что ψ описывает состояние *некой* (курсив *М. Б.*) системы — это только обиход речи, как бывает в обиходной жизни: «Я (человек в возрасте 67 лет) ожидаю, что проживу 4—3 года». То же самое и высказывание об отдельной системе, однако бессмысленное с точки зрения эксперимента. Ведь подразумевается, конечно, другое: возьми множество индивидуумов, каждому из которых 67 лет,

и подсчитай, какой процент из них проживет заданный срок. Именно таким образом я всегда понимаю интерпретацию $|\psi|^2$. Ты же, напротив, предлагаешь вместо системы многих одинаковых индивидуумов говорить о статистическом множестве. Различие кажется мне несущественным, только фразеологическим. Или, может быть, я неправильно тебя понял, и ты вкладывал в свое высказывание более глубокий смысл? Если мы здесь придем к единому мнению, то возникнет надежда достигнуть того же и в вопросе о «полноте», но об этом позже.

М. Б.

Книгу о кристаллах я начал писать перед войной 1939 г. Я хотел в ней систематически и на основе квантовой механики построить теорию кристаллической решетки. Но у меня не хватило на это сил; я вынужден был отложить рукопись. Позднее я дал ее прочесть моему одаренному сотруднику, д-ру Кун Хуангу, и он выразил готовность помочь мне закончить ее. Это привело к тому, — как указано в моем письме, — что он принял на себя основную тяжесть этой работы. Только в конце часть работы снова выпала на мою долю. Подготовка большой рукописи, проверка всех формул, чтение корректур и т. д. — все это я должен был делать один, что в моем возрасте, приближавшемся к 70, было нелегко.

Ныне эта книга — «Динамическая теория кристаллических решеток» (Оксфорд, 1954) широко известна и отвечает поставленной цели.

Известие о существовании многих короткоживущих частиц очень меня обрадовало, поскольку наша теория взаимности в какой-то мере их предсказывала. Теперь дело представляется таким, что она была также определенным вкладом в их классификацию и вела к пониманию их свойств.

Постскриптум содержит прежде всего обсуждение проблемы ответственности. Ответ Эйнштейна на это содержится в следующем письме. Далее следует попытка вновь обсудить наше расхождение в мнениях, касающееся толкования квантовой механики, исходя из того, что в основе его лежит неточность и сжатость словесного выражения [ее идей]. Но это рассмотрение не затронуло основы размышлений Эйнштейна, как это будет отчетливо видно из дальнейшего.

15.9.50

Дорогой Борн!

Мне очень жаль, что на тебя взвалили мой сборник статей. Среди них нет ничего претендующего на оригинальность, это только высказывания, написанные не по собственной инициативе, а в ответ на поставленные предомной требования.

То, что я в квантовой теории называю неполнотой описания, не имеет в релятивистской теории никакого аналога. Коротко говоря, это такое обстоятельство, которое при описании с помощью ψ -функции не выражает свойств индивидуальной системы, хотя в «реальности» ее мы все вместе не сомневаемся (в том случае, когда это касается «макроскопических» параметров).

Представь себе (макроскопическое) тело, свободно вращающееся вокруг некой оси. Состояние его определяется только одним углом. Начальное состояние (вращающийся момент) задано так точно, как это позволяет квантовая теория. Уравнение Шредингера дает тогда ψ -функцию для каждого последующего момента времени. Если временной интервал велик, то достижение всех значений углов (практически) будет равновероятным. Если же провести наблюдение (например, с помощью мгновенных вспышек фонарем), то можно (достаточно точно) найти определенное значение угла. Но из этого совсем не вытекает, что это значение угла имелось уже до начала наблюдения, но так считают, поскольку в макрослучае решено придерживаться требований реальности. В этом случае ψ -функция выражает реальное состояние, но только неполно. Вот это именно я и подразумевал под «неполным описанием».

Вероятно, против этого тебе нечего возразить. Но ты, видимо, станешь на такую точку зрения, что полное описание бесполезно, поскольку для него не существует закономерностей. Я не утверждаю, что смогу решительным образом опровергнуть такой взгляд, но мой инстинкт подсказывает мне, что полная формулировка закономерностей связана с полным описанием состояния дел. В этом я убежден, хотя *успех* квантовой механики (курсив А. Э.) свидетельствует против этого (пока). Я верю также, что нынешняя формулировка правильна в том смысле, как, например, утверждения термодинамики — а именно, пока применяемые термины остаются адекватными. Это не должно восприниматься как (бесперспективная) попытка убеждать тебя (или кого-нибудь еще). Я хочу только, чтобы ты понял ход моих мыслей.

Из конца твоего письма я понял, что и ты считаешь квантово-теоретическое описание *неполным* (курсив А. Э.) (ансамбли). Но ты-то убежден, что для полного описания нет (полных) законов, что находится в соответствии с по-

зитивистским принципом *esse est percipi*. Что ж, это программная установка, а не знание. Вот здесь-то и кроется главное различие наших позиций. Пока что я один в своем убеждении (как некогда Лейбниц против абсолютного пространства ньютоновской теории).

Ну, вот, я снова попрыгал перед тобой на моем старом коньке. Но ты сам виноват, так как спровоцировал меня на это.

Сердечный привет

твой А. Э.

Здесь, вероятно, содержится самое ясное изложение «реальной философии» (*Realitäts Philosophie*) Эйнштейна. Особенно красноречив предпоследний абзац. Он называл мой способ описания физического мира «неполным», но он видит в этом недостаток, на упразднение которого он надеялся, в то время как я был им удовлетворен. Фактически я рассматривал это даже более как шаг вперед, поскольку точное описание состояния некоторой физической системы предполагает, что в нем получены бесконечно точные данные; мне же это казалось бессмысленным. Мне думается, что здесь я следую по пути, который был указан эйнштейновской теорией относительности. Там он показал невозможность абсолютного установления (местоположения) точки в пространстве и времени, и сделал отсюда вывод, что понятие абсолютного определения места и времени не имеет смысла. Именно на этом покоится все великолепное здание его теории. Но аналогии, которая имеет место в ситуации с квантовой механикой, он не хотел признавать.

4.5.52

Дорогой Эйнштейн!

Я, как ты, конечно, понимаешь, принял очень близко к сердцу смерть Ладенбурга. Он был моим старшим другом, и пока судьба не разбросала нас по разным странам, — моим ближайшим другом, с которым я постоянно переписывался.

С тех пор как мы в Шотландии, я видел его бегло только один раз в Лондоне. Эльза Л[аденбург] писала мне, что при захоронении праха ты произнес трогательные слова прощания. Мне больно, что я не смог там быть. Я надеюсь, что Эльза будет материально обеспечена. Может быть, при случае ты мне что-нибудь об этом сообщишь? На днях пришло еще одно траурное извещение —

о кончине Крамерса. Он долго болел и был не таким крепким и цветущим мужчиной, как Ладенбург. Мы с ним тоже были дружны, хотя и не так близко. Последний раз я видел его на конгрессе во Флоренции, года три тому назад, где он плохо себя чувствовал, и в основном лежал в постели. Я надеялся встретить его в июне в Париже на конференции по термодинамике. Вот так мы, старые парни, становимся все более одинокими, и я пишу тебе, чтобы поддержать те несколько ниточек, которые еще целы.

Мы с Хеди хорошо перенесли зиму. Уже во второй раз мы провели рождественские праздники в Баварских Альпах (Оберсдорф), и солнце, снег, хорошее питание и баварское пиво подействовали как источник молодости. Мы и летом собираемся туда. Я снова в Германии получил пенсию (как профессор Эмиритус), и поэтому могу позволить себе такие каникулы. Там мы живем исключительно для себя и встречаемся только с хорошими друзьями и простыми людьми — горничными, кельнершами, крестьянами, которые, как и везде, милы и не испорчены.

Я занят окончанием двух книг, одна из них посвящена теории кристаллов (с китайцем, д-ром Кун Хуангом), а другая — оптике (с чехом, д-ром Е. Вольфом).

Американский «Комитет опеки иностранной собственности», который присвоил мою книгу по оптике без возмещения, действительно поднял вопрос о том, что мы должны запросить у них лицензию для *новой* (курсив *М. Б.*) книги (которая будет более полной и современной). Но британское посольство вступилось за мои права, и с его помощью мой издатель (д-р Розбауд, которого ты, наверное, помнишь) надеется это дело пробить.

Вчера здесь был Фрейндлих и сделал четкий доклад по вопросу отклонения лучей света Солнцем. И впрямь, дело выглядит так, как будто твоя формула не совсем верна. При красном смещении получается еще хуже; внутри солнечного диска оно намного меньше, а на краю больше, чем теоретическое значение. Что же тут случилось? Не является ли это намеком на нелинейность (рассеяние света светом)? Занимался ли ты этим? Шредингер следит за этими вещами, я же бросил.

Сердечный привет от Хеди тебе и Марго.

Остаюсь старым другом

твой Макс Борн.

С тех пор, как я скорбел в этом письме о двух моих дорогих друзьях, снова прошло 13 лет. За это время еще очень многие умерли, умер и сам Эйнштейн. Работа над этой перепиской помогала мне в преодолении все возрастающего одиночества.

О книге по кристаллам, которую я писал с Кун Хуангом, я уже говорил. Новая книга по оптике возникла под влиянием главы Эдинбургского университета профессора Эдварда Эшплтона, который сам был физиком. Он завоевал мировую известность исследованиями высоких слоев атмосферы с помощью радиоволн и получил за эти работы Нобелевскую премию. Он рассказал мне, что моя старая (1933 г.) книга по оптике была переиздана фотомеханическим способом в Соединенных Штатах и во время войны получила там широкое распространение, так как имела «военное значение», связанное, например, с распространением радиоволн вдоль земной поверхности. Его предположение осуществить ее перевод на английский язык я не мог принять, так как книга казалась мне устаревшей. Тогда было решено написать новую, английскую книгу на основе старой, и мне удалось найти в д-ре Е. Вольфе (ныне, в 1965 г., профессоре в Рочестере, США) превосходного сотрудника для этой работы. Книга «Принципы оптики» (Оксфорд, 1959) оказалась очень удачной. Первое издание, тиражом в 8000 экземпляров, было распродано в течение года. Сейчас готовится третье ее издание.

С комитетом «Опеки иностранной собственности» в Вашингтоне пришлось иметь дело еще около года. Я принял английское гражданство вскоре после начала войны, был единственным обладателем авторского права. Конфискация книги была поэтому совершенно невозможна. Но прошло довольно много лет, прежде чем я отстоял свои права и получил компенсацию.

Астроном Фрейндлих поначалу трудился над доказательством справедливости эйнштейновской теории гравитации с помощью астрономических наблюдений. Он работал в Потсдаме с башенным телескопом Эйнштейна, а потом, после своей вынужденной эмиграции (в 1933 г.), в маленьком университете св. Андрея, недалеко от Эдинбурга. В то время (1952 г.) действительно казалось, что предсказания теории об отклонении света Солнцем и о красном смещении спектральных линий подтверждаются не полностью. Новые наблюдения, однако, устранили эти трудности. Здесь нет места входить в эти детали. Краткий отчет обо всем этом можно найти в самом последнем издании моей книги «Теория относительности Эйнштейна» (4 изд., Берлин, 1964).

Дорогой Борн!

Прежде всего — мое огромное восхищение стихами твоей жены. Большинство из них относится к числу самых прекрасных из того, что мне известно. Я просто преклоняюсь. Ты был прав. Иногда кажешься себе ихтиозавром, каким-то образом — по недосмотру — оставшимся в живых. Большинство дорогих друзей и, слава Богу, не столь дорогих, уже ушли. Ладенбург погиб как-то очень скоропостижно, по-видимому, вирусная инфекция внутренних органов. Он был хорошим человеком, воспринимавшим все окружающее тяжело. В последние годы он даже избегал газетного чтения, так как не мог больше выносить всего лицемерия и лжи. У вас там ведь в основном почище и не так дико.

Очень мило, что немцы платят тебе пенсию, которую Вы там на месте можете превратить в колбаску с пивом. Радует также победа над ловкими издателями. Обобщение гравитации — это теперь окончательно с формальных позиций убедительно и однозначно — если только Господь Бог не избрал совершенно другого пути, о котором невозможно создать себе никакого представления. Проверка теории для меня, к сожалению, чересчур тяжела. По существу, человек ведь всего лишь жалкий червь! Фрейндлих, однако, меня ни капельки не трогает. Ведь если бы вообще не знали ни о каком отклонении луча света, ни о движении перигелия и ни о каком смещении линий, то все же уравнения гравитации оставались бы убедительными, так как обходятся без инерциальной системы (этого призрака, оказывающего влияние на все и не испытывающего обратного влияния ни от чего). Собственно говоря, ведь это странно, что люди в большинстве остаются глухими по отношению к сильнейшим аргументам, а вот переоценивать точность измерений они готовы всегда. Видел ли ты, как Бом (как, впрочем, и де Бройль 25 лет тому назад) верит в то, что квантовую теорию можно детерминистски истолковать по-другому? Это, по-моему, дешевые рассуждения, но тебе, конечно, лучше судить.

Сердечный привет Вам обоим.

Твой А. Э.

Мое сообщение о сомнениях Фрейндлиха относительно астрономических подтверждений теории относительности совершенно не тронуло Эйнштейна. Он считал логические основы своей теории гравитации незыблемыми. Новейшие наблюдения показывают, что он был прав.

Удивительно, что он не усматривает здесь аналогии с квантовой механикой. Он отвергал понятие «инерциальной системы» как призрак, который на все действует, но на который, однако, ничего не оказывает обратного влияния, что означало: это придуманная *ad hoc* никак не контролируемая гипотеза. Он не хотел, однако, соглашаться, что то же самое имеет место и с предположением о том, что события в атомном мире могут описываться в пространстве и времени при фиксированных обстоятельствах, которые по образцу обычных представлений [о мире] действительно имеются, подчиняясь детерминистским законам.

В связи с этим находится и его замечание о теории Давида Бома. Хотя она полностью соответствует его образу мышления, ему казалось, что простое детерминистское истолкование квантово-механических формул является «несостоятельным». Сегодня об этих попытках Бома (а равно и близких к ним — де Бройля) едва ли и говорят.

28.10.52

Дорогой Эйнштейн!

Несколько дней тому назад я получил книгу д-ра Карла Зеелига о тебе. А так как в это время я лежал простуженный в постели, то располагал досугом, чтобы ее прочесть, и нашел, что она очень хороша. Д-р Зеелиг в письме ко мне просил меня что-нибудь дать для этой книги, и после того, как он заверил меня в том, что ты не будешь возражать, я переписал несколько характерных фраз из твоих писем, которые он теперь напечатал. Я надеюсь, что ты и в самом деле с этим согласен. На некоторые неточности я обратил его внимание в письме (например, он приписывает мне почетные титулы, которых у меня нет, или называет Макса Вертгеймера Паулем и т. д.). Книга перенесла меня в прежние времена и возбудила желание снова повидать тебя.

На следующей неделе мне предстоит в Лондоне сделать ряд докладов в университете. При этом должна была бы состояться публичная дискуссия с Шредингером, который, совсем как ты, не согласен со статистическим представлением квантовой механики, а убежден, что его волны являются окончательным «детерминистским» решением. Все обстоит не так-то уж просто, и я полагаю, что смогу с ним хорошенько разделаться, когда до того дойдет.

Но он, к сожалению, перенес тяжелую операцию, аппендицит с прободением, его жизнь была в большой опасности, и он еще недостаточно окреп для того, чтобы ехать в Лондон. Вместо этого будет только дискуссия с несколькими философами, что обещает быть весьма жиденкой забавой. Затем мы отпразднуем в Кембридже с детьми и внуками мое семидесятилетие. А каникулы мы с Хеди снова хотим провести в Оберсдорфе. После аустерити * здесь, в деревне, жизнь в Германии очень приятна (для того, кто имеет немножко денег, — я получаю свою пенсию). Приятные, милые, хорошие люди есть и здесь; они, как правило, ужасно перестрадали в гитлеровские времена.

Через $\frac{3}{4}$ года я должен буду оставить кафедру, и мы будем тогда жить по полгода здесь и в Германии — по финансовым соображениям. К тому времени мне хочется закончить еще две книги. Одна из них — по кристаллам (с китайским соавтором) как раз теперь сдана в издательство Оксфорд-Пресс. Другая, по оптике, в таком же положении окажется через год. Может быть, это безумие тратить столь много труда на такие вещи, но для более солидных проблем я уже слишком стар и глуп. Кстати, мне пришлось очень по душе, что Гейзенберг подхватил мою старую идею относительно нелинейной электродинамики и *mutatis mutandis*, применяя ее к мезонным полям.

Дай знать о том, что ты делаешь?

С сердечным приветом от меня и Хеди

твой Макс Борн.

Дискуссия с философами в Лондоне действительно состоялась и, в отсутствие Шредингера, протекала, как и предвиделось, очень вяло. Содержание дискуссии приведено в опубликованных нами статьях: Э. Ш р е д и н г е р. «Существуют ли квантовые скачки?» (Британский журнал философии науки, ч. I, август, 1952, стр. 109; ч. II, ноябрь 1952, стр. 233) и М. Б о р н. «Интерпретация квантовой механики» (там же, август, 1953, стр. 95).

Шредингер был, по меньшей мере, столь же, как и Эйнштейн, упрям в своем консервативном отношении к квантовой механике: ведь он отвергал не только статистическое ее толкование, но и настаивал на том, что его волновая механика означает возврат к классическому мышлению. Он не допускал никаких возражений, вклю-

* Аустерити (лат.) — строгость, серьезность, мрачность. (Прим. перев.).

чая и такое, отнюдь не самое тяжелое: волна в $3n$ -мерном пространстве, которая используется для описания системы n частиц, не является классическим понятием и недоступна человеческому пониманию.

Нелинейная теория Гейзенберга предназначалась не только для мезонного поля, но и для всех элементарных частиц. Сегодня она находится в центре внимания.

Грендж-Лоэн, Эдинбург

26.9.53

Дорогой Эйнштейн!

Я очень часто испытываю потребность написать тебе, но обычно подавляю ее для того, чтобы не затруднять тебя необходимостью отвечать. Но сегодня у меня есть определенная причина, а именно: старый математик, профессор Уиттекер, проживающий здесь после выхода на пенсию и являющийся моим большим другом, написал новое издание своей старой книги: «История теоретических воззрений на эфир», второй том которой уже вышел в свет. В нем, между прочим, содержится также и история релятивистской теории с той только особенностью, что открытие приписывается Лоренцу и Пуанкаре, в то время как твои работы упоминаются попутно. И хотя книга издана в Эдинбурге, я все же не опасаясь того, что тебе может прийти в голову связать мое имя с этим делом. Я и вправду вот уже три года предпринимал все мыслимое для того, чтобы отговорить Уиттекера от его плана, который он вынашивал уже давно и любил о нем повсюду рассказывать. Я вновь перечитал старые оригинальные статьи, особенно некоторые *необычные* Пуанкаре, и приносил Уиттекеру переводы немецких работ (мы, например, с преподавателем моей кафедры, д-ром Шлаппом, перевели много страниц из статьи Паули для энциклопедии, для того, чтобы облегчить Уиттекеру его суждение). Но все было напрасно. Он настаивал на том, что все существенное есть уже у Пуанкаре и что Лоренц дал очень четкое физическое толкование. Но я-то точно знаю, как скептически Лоренц относится к этому и сколько потребовалось времени, пока он не стал «релятивистом». Все это я рассказывал Уиттекеру, но безрезультатно. Но это дело меня очень разозлило, так как он считается большим авторитетом в странах, где говорят по-английски, и многие ему поверят. Особенно неприятно мне еще и то,

что он впледел в квантовую механику всяческие личные моменты и таким образом очень сильно выпятил мое участие в этом деле. В результате многие (если и не ты сам) смогут продумать, что я в этом деле принял *неприличное* участие. Ведь известно, что по вопросу о детерминизме наши с тобой взгляды не совпадают. К тому же я написал маленькую статейку, которая вот-вот появится, в которой я даю теоретическое толкование идее Фрейндлиха относительно красного смещения, и если оно правильно, то возникнут затруднения для релятивистского толкования.

Вот я и чувствую себя по отношению к тебе, как некий нахальный постреленок, который может выйти сухим из воды, позволяя себе такого рода вольности и не рискуя вызвать у тебя раздражения. Но другие, может быть, посмотрят на эти дела как не на такие безобидные.

Ну вот, это я должен был написать тебе для облегчения собственной совести.

Хеди и я только что вернулись из Германии. Сначала мы были в Геттингене на праздновании тысячелетия города, где Поля, Франка, Куранта и меня избрали почетными гражданами.

Это был красивый праздник. Франк и Курант расскажут тебе об этом.

Потом мы были в Бад-Пирмонте, где мы строим домик для того, чтобы поселиться там на старости лет.

Преподавание я вскоре оставлю. Жизнь в Германии снова будет достаточно приятной, народ там основательно перетасовался — во всяком случае есть много милых хороших людей. Выбора у нас нет, ведь там у меня есть пенсия, а здесь ее нет.

Сердечный привет тебе и Марго от Хеди.

Остаюсь старым другом

твой Макс Борн.

Книга сэра Эдварда Уиттекера представляет собой блестящее историко-философское изложение, которое очень много дало мне в мои молодые годы.

Помимо этого, я с ним близко сдружился в течение того времени, что жил в Эдинбурге. Тем более меня опечалило то, что он оспаривал заслуги Эйнштейна в создании специальной теории относительности. Что касается Лоренца, то мое утверждение в письме даже

слишком мягко, он, вероятно, никогда не стал «релятивистом», и лишь временами, во избежание дискуссий, признавал Эйнштейна, но только на словах.

Праздник в Геттингене, о котором я здесь рассказал, поначалу поставил перед нами много головомных вопросов. Я расскажу об этом в связи со следующим письмом Эйнштейна.

Наш выбор Бад-Пирмонта для того, чтобы поселиться там на старости лет, основан, в конце концов, на сентиментальных воспоминаниях. Когда мы с женой были помолвлены, моя невеста (ее родителями, жившими в Лейпциге) была послана вместе с двумя подружками на отдых в Бад-Пирмонт, который в те времена ценился прежде всего как женский курорт, где успешно лечили малокровие и т. п. Я в то время был приват-доцентом в Геттингене и в конце недели приезжал в Бад-Пирмонт. Там мы провели прекрасные и счастливые дни, о которых позднее с теплотой вспоминали. Когда мы в 1953 г. решили вернуться в Германию, мы подыскивали спокойный и красивый уголок в Шварцвальде или где-либо в другой местности. В конце концов нам вспомнились времена нашей помолвки в Бад-Пирмонте. Мы провели там несколько недель во время летних каникул, и так как нам понравилось там, — начали искать и нашли земельный участок, на котором и построили небольшой домик.

12.10.53

Дорогой Борн!

Не беспокойся ты из-за книги этого твоего приятеля! Каждый ведет себя так, как ему представляется правильным, или, выражаясь детерминистски, — как он должен. Если ему удастся убедить других, то это их дело. Сам я, во всяком случае, получил удовлетворение от своих трудов, но не считаю разумным защищать пару результатов как «свою собственность», — подобно тому, как некий старый скряга оберегает пару медяков, которые он с трудом собрал. Я не обижаюсь на Уиттекера, и тебе этого, конечно, делать не следует. Я вообще совсем не вижу необходимости читать эту штуку.

Если и вообще существует кто-либо, кого можно было бы сделать ответственным за твое переселение в страну организаторов массового убийства наших соплеменников, то это только известное своей скупостью твое приемное отечество.

Для задуманного в твою честь юбилейного сборника я написал «физическую» детскую песенку, которая немножко смутила Бома и де Бройля. Она имеет целью показать ненужность твоей статистической интерпретации

квантовой механики, которую и Шредингер недавно тоже попытался обойти. Может быть, это доставит тебе удовольствие. Нам всем, видимо, суждено отвечать за свои мыльные пузыри. Именно этот «не играющий в кости Бог» предопределил, что на меня очень обижены не только «квантовые теоретики», но и верующие *атеистической церкви*.

Сердечный привет тебе и твоей жене

твой А. Э.

Реакция Эйнштейна на мою жалобу по поводу изложения релятивистской теории Уиттекером показывает полное его безразличие к славе и у современников и у потомков.

Затем речь идет о резком наименовании «страна массовых убийц». Это его мнение, которое он никогда не менял. Мое возвращение в Германию он не понял и никогда не одобрял.

Поэтому, пожалуй, мне будет уместно высказаться по этому поводу здесь. Во время войны, а также некоторое время после ее окончания, особенно когда стали известны ужасы Освенцима, Бухенвальда, Бельзена и др., мы тоже были того же мнения [что и Эйнштейн], но потом, когда мы возобновили связи с родственниками и друзьями в Германии, дело стало представляться по-иному. Многие из них ужасно много пережили и перестрадали. Моя жена пыталась оказать им помощь из Англии, в меру своих весьма скудных возможностей.

В 1953 году истек срок моей службы в Эдинбурге. Тот факт, что мне нечего было рассчитывать на достаточную пенсию, не является, как думал Эйнштейн, следствием «шотландской бережливости». Во всей Англии, так же как и в Шотландии, не предусмотрено пенсии профессорам, есть только некоторые страховое обеспечение, размер которого зависит от стажа. Последний же в моем случае был очень мал; мне причиталось бы получать меньше, чем неквалифицированному рабочему. К тому же суровый климат Шотландии очень тяжел для тех, кто не вырос в нем.

В это же время (1947 г.) мне предложили руководить Дублинским институтом перспективных исследований в качестве преемника Шредингера, который вернулся на родину, в Вену. После длительных переговоров я отказался, потому что не был уверен, что для новой работы у меня хватит сил и еще потому, что через пять лет и здесь достиг бы возрастного предела и оказался бы перед той же проблемой.

Тем временем в Геттингене я снова был определен как профессор в отставке с полным окладом. Только потом было решено, что оклад этот может выплачиваться также и за границу.

Первую поездку в Германию должна была совершить моя жена. По приглашению философа Германа Ноля в Геттингене она должна была сделать доклад о британской демократии по собственным впечатлениям и опыту. Эта поездка, поддержанная внешними ведомствами, однако, не состоялась, так как, когда жена прибыла в Лондон, на вокзал Кинг-Кромм, у нее украли весь багаж.

В январе 1948 года Немецкое физическое общество присудило мне медаль Макса Планка. Эта медаль была учреждена по инициативе Макса фон Лауэ и моей незадолго до нашей эмиграции. Ежегодное собрание общества в 1948 году происходило в сентябре в Клаушталь-Целлерфельде. Мы приняли в нем участие и встретили дружественный прием, но, будучи приглашенными из Англии, находились под опекой и на обеспечении оккупационных властей.

Нас глубоко тронуло впечатление от ландшафта в Гарце и маленьких неразрушенных городков, таких, как Клозар. В последующие годы мы проводили каникулы в Оберсдорфе, Альгауе — как летом, так и зимой.

В 1953 г. в Геттингене начались празднества по поводу его тысячелетия. Франк, Курант и я были среди тех, кто в этой связи названы почетными гражданами. Франк сначала хотел отказаться, но после длительной переписки мы решили не отвергать этого жеста примирения. Празднество прошло торжественно и дружелюбно, даже скептически настроенный Франк не мог найти повода к недовольству. Позднее он часто возвращался в Геттинген, и во время своего последнего визита в прошлом (1964) году там же и скончался.

После этих впечатлений мы решили остаться в Германии. О причинах, которые привели нас к выбору Бад-Пирмонта, я уже сообщал, но были еще и объективные соображения: прекрасное его месторасположение между покрытыми лесом холмами, спокойная и ухоженная обстановка курорта, близость от Геттингена, а также и прежде всего «дом квакеров» — центр «религиозного сообщества друзей (квакеров)» в Германии. Моя жена вступила в это сообщество в Эдинбурге и была там с ним тесно связана. В течение веков квакеры придерживались строжайших пацифистских взглядов, и поэтому в фашистские времена им досталось. Мы были уверены, что среди них нет места «массовым убийцам».

Нам хотелось вести умеренную жизнь в доме с книгами и музыкой, в саду, курортном парке и лесах. Но получилось несколько иначе, так как еще в год нашего переезда я получил Нобелевскую премию. Поэтому имя мое стало известно по всей Германии, и к голосу моему стали прислушиваться. Отсюда возникла новая задача в моей жизни. Среди немецких коллег было много таких, которые разделяли мое беспокойство об угрозе существования человечества из-за атомной бомбы; в первую очередь в их числе был Отто Ган, открывший расщепление ядра, затем Лауэ, Вайцзеккер, Герлах и др. Они создали известное «Обращение 18 геттингенцев», направленное против атомного вооружения Федеративной Республики [Германии]. Мое имя также фигурирует среди подписей под этим документом, в создании которого, хотя и не в самой формулировке, я принял определенное участие. Продолжение такой деятельности я воспринимал как свою задачу и долг: необходимо разъяснить опасности ядерной войны и других технических достижений, вести борьбу против войны и милитаризма. Я пытался оказывать воздействие на положение вещей докладами, выступлениями по радио, телевизионными диспутами и книгами. В Англии такая деятельность была бы бессмысленной. Британский народ является политически зрелым и не нуждается в поучениях иммигранта. В то же время немцы двумя проигранными войнами и злодеяниями преступного правительства разрушили свои национальные традиции. Здесь имелась возможность оказать какое-то влияние. Эту деятель-

ность я воспринял как свой долг и она доставляла мне радость. Но была ли она успешной — вот в этом сейчас (в конце 1965 года) я более чем сомневаюсь. Нежелающие извлечь урока [из прошлого] снова поднимают голову.

С юбилейным сборником, о котором упоминает Эйнштейн, дело было в следующем. В связи с моим уходом с эдинбургской кафедры Университет устроил небольшие торжественные проводы, где мне были вручены «Ученые записки, подаренные Максу Борну при оставлении им Тэйт-кафедры (Tait Chair) натуральной философии Эдинбургского университета» (Эдинбург — Лондон, 1953 год). Том этот содержит статьи моих друзей и учеников. Но среди них были не только приверженцы моей статистической интерпретации квантовой механики, но также и четверо ее заядлых противников. Я в первую очередь назову Шредингера, который писал там по другому вопросу; разногласия с ним возникли, начиная с цитированной уже (в примечаниях к другому письму) статьи из британского журнала («British Journal for the Philosophy of Science»).

Есть там и статьи де Бройля, Давида Бома и Эйнштейна, относящиеся к толкованию квантовой механики. Мне хотелось бы тут же затронуть эти вопросы, имевшие значение для нашей последующей переписки с Эйнштейном, для того чтобы сделать краткое резюме.

Позиция Шредингера была самой простой. Он придерживался того мнения, что всю квантовую проблему с ее парадоксами можно разрешить, продолжая развитие волновой механики де Бройля: нет, мол, никаких частиц, никаких «квантовых скачков», есть только волны с хорошо известными свойствами им собственными частотами, характеризующиеся целочисленными параметрами (квантовыми числами); частицы представляют собой узкие волновые пакеты. Но против этого можно возразить, что в общем случае (для процессов, классически описываемых с помощью многих частиц) потребуются волны многомерного пространства, которые являются чем-то отличающимся от волн классической физики и недоступны для наглядного представления; волновые пакеты, которые получаются как решения шредингеровских уравнений, не могут распространяться, не меняя формы, они расползаются и т. п.

Таким образом, от позиции Шредингера окончательно ничего не остается.

Де Бройль, создатель волновой механики, а также Бом принимают, подобно Шредингеру, результаты самой квантовой механики, но не ее статистического толкования. Они пытаются разработать представления, которые сохраняли бы детерминистский характер элементарных процессов, для чего они допускают скрытые механизмы, «прячущиеся» за волнами, или переписывают формулы так, чтобы придать им такой вид, который подчиняется детерминистско-механическим законам. Но эти попытки дело далеко не продвинули; мне кажется, что сегодня (1965 г.) они почти забыты. Да и Эйнштейн считал эту точку зрения слишком дешевой.

Его идеи были радикальнее, но представляли собой некую «музыку будущего».

В сегодняшней квантовой механике он видел полезную промежуточную ступень от классической физики к еще совершенно неизвестной, воздвигаемой на базе общей релятивистской теории физике будущего, в которой — он это считает из философских соображений

обязательным — переносные понятия физической относительности и причинной определенности снова будут звучать в полную силу. Поэтому он считает статистическую квантовую механику не ошибочной, а только «неполноценной». Его доводы носили в основном философский характер, и поэтому было трудно оспаривать их, поскольку прежде всего нельзя было пользоваться чисто физическими аргументами.

Я все же попытался ему ответить, и это послужило началом острой, но всегда дружеской полемики, которая нашла свое отражение в последующих письмах.

В конце предыдущего письма Эйнштейн говорил о роли «не играющего в кости бога» и использовал при этом типичное для себя выражение «церковь атеистов». У него не было церковью веры, но веру, как таковую, он не считал признаком глупости, равно как и отсутствие веры — признаком интеллигентности; подобно Сократу, он знал, что мы ничего не знаем.

*Департамент математической физики
(прикладная математика)
Университет
Друммонд-стрит, Эдинбург, 8
8.11.53*

Дорогой Эйнштейн!

Твое милое письмо от 12.10.53 г. успокоило меня в том смысле, что странные выходки старого Уиттекера тебя ни в какой мере не трогают. Ты говоришь, что это уму непостижимое дело, как старый честолюбец защищает, как свою собственность, несчастную пару медяков, собранных им с таким трудом. Я согласен в этом с тобой всей душой и даже пытался придержать язык, когда пара моих медяков пропадала в чужих карманах. Но вот в последнее время я немножко против такой хорошей системы согрешил. Я посылаю тебе несколько статей на общие темы, в том числе и мою «Guthrie Lecture» (читанную в Физическом обществе, в Лондоне), в которых я скромно, в той степени, как это сделал сам, изложил свой вклад в развитие квантовой механики, но не только в плане статистического ее толкования, но и в самой теории.

Гейзенберговские матрицы названы так без полного на то права, так как именно тогда он даже не знал, что такое матрица. Он собрал урожай от совместной работы — в смысле внешнего успеха — Нобелевской премией и тому подобными вещами. Я от души радовался за него, но все же в течение последних 20 лет не могу отделаться от

ощущения некоторой несправедливости. Вопрос касается при этом весьма практических вещей, как, например, мое возвращение в Германию, на которое ты смотришь с очевидным недоверием. Ты подозреваешь моих милых шотландцев в несправедливости; плохое пенсионное обеспечение учителей и профессоров является характерной британской чертой, и в Оксфорде или Кембридже дела обстоят так же плачевно. Тут скорее нужно было бы обвинить шведов, которые могли бы разобраться в том, каков был мой вклад в квантовую механику. Но это было при «Хайль Гитлер!» в 1934 г. Теперь, очевидно, они это поняли, так как полгода тому назад избрали меня членом своей Академии. Но это никак не может мне помочь в таких практических делах, как мое местожительство, но и в этом вопросе я хочу быть абсолютно честным и сказать тебе, что в Германию я поехал бы, наверное, и тогда, когда имел бы возможность оставаться здесь. Хеди все более тоскует по родине, по горам у озера Везер, а я тоже люблю прекрасные места в Пирмонте, где бы мы построили себе домик (конечно, с центральным отоплением, чего здесь не бывает, поскольку шотландцы — такие закаленные парни, что на обмороживание и артриты им наплевать). Что же касается людей, то могу тебе только сказать, что в Пирмонте находится главный штаб немецких квакеров. Они не являются убийцами, и некоторые из наших друзей при нацистах пострадали не меньше, чем мы с тобой. С такими ярлыками нужно быть поаккуратней. Американцы показали в Дрездене, Хиросиме и Нагасаки, что по скорости истребления они вполне превосходят нацистов*.

Получения юбилейного сборника, в котором и ты принял участие, мне еще придется обождать. Он будет мне торжественно вручен 24 ноября.

Я с огромным нетерпением жду твоего рассмотрения утверждений Шредингера и Бома. То, что мне хотелось высказать по этому поводу, ты найдешь в пачке статей, которая еще в пути. В какой мере меня радует воздаяние должного лучшему из сделанного мною, мне нет нужды снова рассказывать тебе после признания моей слабости, которое содержится в этом письме. В данный

* Первые ужасные налеты на Дрезден произведены английскими бомбардировщиками; американцы последовали за ними. Здесь же названы только американцы, поскольку Эйнштейн жил в Америке. (Прим. М. Борна).

момент Хеди находится в частной лечебнице. Ее здоровье несколько надломилось из-за всякого рода семейных забот и перегрузки домашним хозяйством и общественными обязанностями. В доме я совсем один и поэтому заверчен делами. Хеди уже лучше, через пару дней она, может быть, уже вернется. Если бы она знала, что я пишу тебе, то добавила бы от себя сердечный привет Марго и тебе.

Твой Макс Борн.

К этому признанию «моей слабости» мне нечего добавить, кроме пожелания, чтобы публикация моего письма сегодня, когда мне почти 83 года и когда я увенчан всяческими почестями, — не была бы поставлена мне в вину.

Под моими ответами на слова Эйнштейна об «организаторах массовых убийств» я подписываюсь и сегодня. Нужно быть воспитанным в «милитаристском духе», чтобы усмотреть разницу между Хиросимой и Нагасаки, с одной стороны, и Аушвицем и Берген-Бельзеном, — с другой. Обычно обоснование выглядит так: в первом случае действовали во имя победы, во втором — во имя убийства. Но неприкрашенная истина такова: в обоих случаях пытались достигнуть военно-политических целей за счет уничтожения беззащитных и непричастных к делу стариков, женщин и детей. Я уверен, что человечество воспрепятствует своей гибели, если только чувство отвращения к зверствам победит «рационалистические» расчеты.

26.11.53

Дорогой Эйнштейн!

Вчера на небольшом торжестве в Университете мне был вручен юбилейный сборник. Огромную радость доставило мне то, что в нем приняло участие так много моих старых друзей. Пока что я прочитал только несколько статей и, конечно, твою в первую очередь, и вот ты первый, кого я от всего сердца благодарю. Твои философские размышления по поводу статистического восприятия квантовой механики в этой статье представлены особенно четко и убедительно. Но я позволю себе утверждать, что твое рассмотрение примера (мяч, совершающий колебательное движение между двумя отражающими его стенками) доказывает совсем не то, что ты утверждаешь; а ты утверждаешь, что волново-механическое решение в предельном случае макроскопических размеров не переходит в классическое движение. А объясняется это тем, что ты — прости мою дерзость — выбрал неправильное, не соответствующее вопросу решение задачи. Если сделать все как поло-

жено, то получится решение, которое в предельном случае (масса $\rightarrow \infty$) точно переходит в классическое детерминистское движение, хотя это решение для конечных (больших) значений массы, естественно, всегда выдает только статистические результаты с огромной вероятностью. Если описывать движение, то нужно использовать зависящее от времени уравнение Шредингера,

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \hbar i \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0$$

(где \hbar — постоянная Планка, m — масса), а не рассматривать специальный случай, как это ты сделал, при котором ψ пропорционально $e^{i\omega t}$ ($\hbar\omega = E$): ведь он соответствует точному значению энергии, а значит, неопределенным координатам.

Правильным для интервала $0 < x < l$ будет решение

$$\psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{i\omega_n t} \sin b_n x,$$

где

$$\omega_n = \frac{\hbar \pi^2}{2m l^2} n^2, \quad b_n = \frac{\pi n}{l} \quad (m — масса),$$

$$A_n = \frac{1}{l} \int_0^l \psi(x, 0) \sin \frac{\pi n}{l} x dx,$$

$\psi(x, 0)$ соответствует произвольному начальному состоянию. Его нужно выбрать таким образом, чтобы оно означало, что в момент $t = 0$ мяч близок к точке x и имеет скорость, приблизительно равную v . Таким образом, $\psi(x, 0)$ всюду должна равняться нулю, за исключением маленького участка вблизи x_0 , а кроме того, она должна быть несимметричной относительно x_0 так, чтобы вероятное значение скорости

$$\frac{1}{m} \frac{\hbar}{i} \frac{\int_0^l \psi \frac{\partial \psi}{\partial x} dx}{\int_0^l \psi^2 dx}$$

имело заданную величину. Нетрудно написать такое $\psi(x, 0)$ с помощью трех произвольных констант: одной —

для нормировки, другой — для v , а третьей — для неопределенности вокруг x_0 . Например,

$$\psi(x, 0) = x(1-x)(\alpha + \beta x)e^{-\frac{1}{2\alpha}(x-x_0)^2}.$$

(Я не знаю только, удобна ли эта функция для расчетов.) Тогда станет ясно (и это можно понять качественно, без проведения расчетов), что волновой пакет $\psi(x, t)$ будет «болтаться» туда и сюда в точности как частица, причем он будет немножко увеличиваться в размерах, но эта неопределенность будет исчезать при $t \rightarrow \infty$.

Я убежден, что в этом смысле квантовая механика также представляет движение отдельных макроскопических систем в соответствии с детерминистскими законами. Я просчитаю эту задачу с одним моим сотрудником (формально это совсем не так просто), и после этого пришлю тебе ее решение.

Наверняка ты, в конце концов, согласишься с тем, что я прав, а затем это нужно будет как-то довести и до читателей юбилейного сборника.

Со всем, что ты говорил относительно де Бройля, Бома и Шредингера, я вполне согласен. Между прочим, Паули изложил свои соображения (в юбилейном сборнике, посвященном 50-летию де Бройля), которыми он разит Бома наповал не только по линии философии, но и по физике.

Еще одно письмо я направил обычной почтой.

С самой сердечной признательностью и искренними приветствиями от меня и Хеди

твой Макс Борн.

Мое возражение против примера, приведенного Эйнштейном, было, пожалуй, всеми теоретиками, занимающимися квантовой механикой, признано правильным. Оно послужило основой моего появившегося позднее в печати отчета, о котором пойдет речь далее. Но это расходится с основной идеей Эйнштейна, на что он указал в следующем письме.

3.12.53

Дорогой Борн!

Сегодня получил (и прочитал) твое письмо, а также и отгиски, которые собираюсь почитать основательно. Мне очень нравится то, что ты серьезно отнесся к моим

простым рассуждениям — и в отличие от того, как это сделало большинство, — не собираешься отрываться поверхностными замечаниями.

Прежде всего должен сказать, что твоя позиция меня поразила. Я как раз считал, что приблизительное соответствие с классической механикой следует ожидать именно тогда, когда рассматриваемые длины дебройлевских волн малы по сравнению с остальными, наиболее важными, пространственными измерениями. Но теперь я вижу, что ты намереваешься увязать классическую механику только с такими ψ -функциями, которые «сжаты» относительно координат и импульсов, но если это так воспринимать, то поневоле придешь к выводу о том, что в случае огромного большинства процессов в макросистемах, мыслимых с квантово-теоретических позиций, нечего и надеяться даже на их приближенное описание с помощью макромеханики. В этом случае следовало бы очень удивляться, например, тому, что какая-либо звезда или муха, с которой встречаешься впервые, представляется как нечто квазилокализованное.

Однако если все же, вопреки сказанному, стать на новую позицию, то следует, по меньшей мере, потребовать того, чтобы некая система, «квазилокализованная» к данному моменту времени, *оставалась* (курсив А. Э.), в соответствии с уравнением Шредингера, такой же и далее. Вопрос этот — чисто математический, и ты ожидаешь, что расчеты подтвердят это. Но мне кажется, что это исключено. И проще всего в этом убедиться, рассмотрев трехмерный случай (применительно к макротелу) с представлением его через место расположения (*ort*), скорость и направление с помощью «сжатой» функции Шредингера. Тут видно без всякого математического «микроскопа», что место его расположения со временем должно стать весьма размытым. Для одновременного случая все будет аналогичным, поскольку групповая скорость зависит от длины волны.

Я думаю, что следует пожалеть время твоего ассистента, так как результат представляется несомненным с самого начала. Но если тебе это не бросается в глаза, то, ради бога, пусть будет посчитано. Оппенгеймер уходил от разговора, ссылаясь на то, что процесс размывания будет продолжаться «космически» долго, и поэтому здесь не о чем беспокоиться. Но нетрудно привести совершенно

«умеренные» примеры, для которых время расплывания будет не таким уж и большим. Мне кажется, что свою научную совесть не следовало бы успокаивать такими дешевыми приемами. И при всем этом не так-то и трудно согласиться с тем, чтобы сделать последний шаг к вероятностной квантовой теории. Следует только допустить, что ψ -функция распространяется не на какой-то индивидуальный случай, а на некий ансамбль. Затем в моем примере с ожидаемым приближением (статистически справедливым) описывают то же, что говорится в классической механике, в то время как это обстоятельство по представлениям, даваемым в твоём письме, принимается как своего рода «случай».

Если ψ -функцию интерпретировать как относящуюся к ансамблю, то отпадает также парадокс о том, что измерение, сделанное в *одной* части пространства, предопределяет *характер* исследования для последующего измерения в *другой* части пространства (связь пространственно разделенных частей системы).

Можно вполне примириться с тем фактом, что при таком понимании описание получается неполным, если допустить, что для полного описания частной системы не существует никакой соответствующей полной закономерности, которая учитывала бы временную зависимость.

Не нужно только в этом случае связываться с боровской интерпретацией относительно того, что не существует реальности, не зависящей от вероятного субъекта.

Я ни в коей степени не верю в то, что все останется так же при таком (самом по себе достаточно прочном) восприятии. Но я утверждаю, что это единственное, что оправдывает механизм правдоподобной квантовой теории.

Я рад возможности прочесть другие твои принципиальные рассуждения. Ты называешь их «философскими», но, по моему мнению, делаешь это необоснованно. Меня не устраивает, если имеется некий агрегат (Maschinerie), позволяющий даже пророчествовать, но в устройстве которого сами мы не в состоянии разобраться (которому буквально не «можем придать смысла»).

С сердечным приветом

А. Э.

С этого письма начинается наша «взаимная перепалка». Соображения Эйнштейна и сегодня (1965) представляются мне покоящи-

мися на недостаточном понимании квантовой механики. Его фраза о том, что «приблизительное соответствие с классической механикой следует ожидать именно тогда, когда рассматриваемые длины дебройлевских волн малы по сравнению с остальными наиболее важными пространственными измерениями», естественно, совершенно правильна. Его пример, с помощью которого он хочет продемонстрировать уязвимую сторону квантовой механики, относится к частице, движущейся взад и вперед между двумя вертикальными стенками, упруго ее отражающими. Расстояние до стенки он рассматривает как единственную релевантную (существенную) длину, которую следует принимать во внимание, но это не так, поскольку нам ничего не известно о размерах частицы. Далее, Эйнштейн сравнивает квантово-механическое и классическое описание, причем в последнем случае знание о начальном положении представляется как нечто само собой разумеющееся. При аналогичной квантово-механической трактовке вопроса ситуация оказывается несколько иной из-за гейзенберговских соотношений неопределенности: начальные координаты и маленькая скорость, заданные с ограниченной этими соотношениями точностью. Но это и следует учитывать, когда сравнивается квантово-механическое и классическое описания. Поэтому можно и нужно указывать интервал значений начальных координат частицы, а это и есть второе «релевантное измерение».

Последующее рассмотрение вопроса о том, может ли оставаться точно локализованной частица, которая в какой-то момент была «квазилокализованной» и описывалась уравнением Шредингера, связано с простым недоразумением. Я его никак не ожидал. Начальная неопределенность значения скорости порождает увеличивающуюся со временем неопределенность координат (местоположения) частицы. Именно это обстоятельство с самого начала представлялось мне важным, потому что оно было действительно также и в классической механике и показывало, что обычное утверждение о том, что последняя является «детерминистской», справедливо лишь тогда, когда с бесконечной (абсолютной — unendlich) точностью заданы начальные положения и начальная скорость. Такую же возможность я считал метафизической бессмыслицей.

Эйнштейн соглашался с тем, что «вероятностная квантовая теория» может рассматриваться, как «окончательная», если принять, что « ψ -функция относится к ансамблю, а не к индивидуальному случаю». Таково же было и мое мнение, причем я считал, что частое повторение некоторого опыта и является реализацией ансамбля. Это в точности совпадало с действительным образом действий физика-экспериментатора, который добывает свои данные в атомной и субатомной областях всегда посредством целого ряда измерений, проводимых в одинаковых условиях.

К этому месту вновь относится разъяснение Эйнштейна, что это понимание является неполным описанием отдельной системы, и он отнюдь не думает, что оно таковым и останется, хотя и примет расуждение само по себе.

Последняя фраза характерна для Эйнштейна в его пожилые годы. «Не придавать смысла» — уже само по себе имеет только смысл в связи с какой-то определенной философской системой. Те же самые аргументы использовали противники молодого Эйнштейна, когда они называли бессмысленными выводы из общей теории относительности, согласно которой один из двух близнецов, совер-

шающих путешествие в мировом пространстве, в то время как другой остается дома, по возвращении оказывается моложе второго.

Следующее письмо не нуждается в каких-либо комментариях.

Кембридж
Отель Гольдсброу, Хил-Роуд
22.12.53

Дорогой Эйнштейн!

Очень мило с твоей стороны, что ты мне снова написал и вернулся к моему письму. Твоя статья в моем юбилейном сборнике произвела на меня действительно очень большое впечатление, и я не успокоюсь, пока не найду убедительный ответ на поднятый в ней вопрос.

Твой пример следовало бы как-нибудь основательно просчитать. Ученые господа в вашем институте и в других местах такими тривиальными требованиями себя не утруждают. Но здесь все не так уже и просто, и мне пришлось основательно поломать голову. К тому же получилось так, что в это же время нам пришлось ликвидировать свое хозяйство и заняться переездом, причем возникли значительные осложнения с немецкими и британскими финансовыми учреждениями и т. п. В конце концов работу я уже закончил здесь, в Кембридже, в замороженном отеле (как и все в этой стране), поджариваемый спереди огнем и промерзая сзади. Но все же я это закончил, к тому же сам, без помощи ассистентов. Как видишь, я принял к сердцу твое предостережение, но не из сострадания к человеку (для того, чтобы ему не делать напрасной работы), а потому, что тщеславно захотелось сделать это одному. Получилось все точно так, как я и думал и как набросал в своем последнем письме. Там все строго и неуязвимо, и это опровергает твои возражения, основанные только на том, что в институте эти простые проблемы не рассматривались. Тут ты ничего поделать не можешь. Я же надеюсь в конце концов убедить тебя в том, что квантовая механика настолько совершенна и реалистична, насколько это подтверждается фактами. Я дам напечатать эту работу и направлю в Королевское общество. Одну копию на тонкой бумаге я направлю тебе и попрошу сотрудника, занимающегося подготовкой публикаций, на случай, если ты захочешь что-либо добавить, чтобы он это принял. Его адрес: д-р Д. С. Мар-

тин, ассистент-секретарь Королевского общества, Бармингтон-Хауз, Пикадилли, Лондон-Зап., 1.

Я был бы очень рад, если бы ты добавил несколько строк или страниц, независимо от того, согласен ли ты или нашел новые соображения — полагаю что со старыми все окончательно разрешено. Я уже в течение нескольких лет считаю совершенно нетерпимым то, что ты критически отошел от всего того оживленного творчества, которое связано с квантовой теорией. Там есть много такого, что следовало бы поковырять, особенно в Принстоне; но основы, положенные Гейзенбергом и мною, в полном порядке, и другого пути нет. Возможно, что я вправе возражать тебе, так как ты не согласен и с Нильсом Бором. Но Бор часто допускает туман и нечеткие выражения. Я же более прост, наверное, выражаюсь яснее. Так что здесь нет ничего плохого.

Сердечный привет от Хеди тебе и Марго и наилучшие пожелания к рождеству и Новому году.

Твой старый Макс Борн.

1.1.54

Дорогой Борн!

Твой подход совершенно несостоятелен. Нельзя требовать согласия с принципами квантовой теории в том, чтобы ψ -функция «макро»-системы выдерживалась в «узком» диапазоне макрокоординат и импульсов. Такое требование несовместимо с принципом суперпозиции для ψ -функции *. Этому также имеется почти во всех случаях и другое действенное возражение второстепенного значения. Уравнение Шредингера показывает, что со временем происходит «расползание».

Ты утверждаешь, что последнее не имеет места в рассмотренной мной системе. Я же, однако, убежден, что этот результат вообще (не существенный с точки зрения общей постановки проблемы) основывается на ошибочном вы-

* ψ_1 и ψ_2 — два решения одного и того же уравнения Шредингера. Тогда $\psi = \psi_1 + \psi_2$ также является решением этого уравнения и с равным правом может описывать возможное реальное состояние.

Когда система — макроскопическая и если ψ_1 и ψ_2 «сжаты» по отношению к макрокоординатам, то это в подавляющем числе возможных случаев не может реализоваться для ψ .

воде. Принимать участие в дальнейшей дискуссии, как вроде бы ты намерен, я не желаю. Мне достаточно отчетливо выразить свои взгляды.

С наилучшими пожеланиями и приветствиями на 1954 год.

Твой А. Э.

*Хоунт-Роуд Вельсай-Парк,
Лондон, с.-з., 3
2.1.54*

Дорогой Эйнштейн!

Прилагаю к этому письму маленькую статейку, связанную с вопросами, поднятыми твоей статьей в юбилейном сборнике. Я тебе признателен за то, что ты вынудил меня продумать простенький пример по-своему. Но тебе следует принять и то, что я прихожу к результатам, отличным от твоих. Предполагаю, что ты останешься при своих взглядах. Я направляю работу для публикации в «Известия королевского общества» («Proceedings of the Royal Society») и сообщу, как тебе уже писал, секретарю, д-ру Мартину, что, возможно, ты пришлешь ответ. Я был бы этому очень рад, даже если ты будешь меня опровергать.

Эти размышления послужили стимулом к тому, чтобы сделать новый шаг в направлении элементарных частиц, с привлечением принципа взаимности, сформулированного мной несколько лет тому назад. Пока что из этого ничего не получилось, но на сей раз мне кажется, что дело пойдет благодаря простому сознанию того, что ты меня к этому побудил.

Я в Лондоне в гостях у своих племянников, но вскоре вернусь в Эдинбург, где у меня есть еще кое-какие дела. Буду жить у нашего врача, д-ра Сэма Липетца (13, Меншенхауз Роуд) в Эдинбурге. Хеди в Германии. Я направлюсь к ней через 4 недели. Наше хозяйство в Эдинбурге ликвидировано.

С наилучшими пожеланиями к хорошему Новому году и сердечным приветом.

Твой Макс Борн.

12.1.54

Дорогой Борн!

Благодарю тебя за присланную тобой статью для Королевского общества, из которой я понял, что ты даже не заметил, с чем я не согласен. Хотя меня никак не радует перспектива выступать перед публикой в роли циркового шпагоглотателя, я вместе с тем все же чувствую потребность тебе на это ответить и посылаю тебе здесь свой ответ в том виде, в каком он должен звучать. Таким образом, возникает большая надежда на то, что ты это дело продумаешь не сгоряча, надежда, которая во всяком случае уже достаточно назрела.

С наилучшими пожеланиями.

Твой А. Эйнштейн.

20.1.54

Дорогой Эйнштейн,

твое письмо от 12 января меня обрадовало и освободило от той заботы, причиной которой было предыдущее письмо. Оно звучало столь раздраженно и сердито, как если бы ты наши расхождения в мнениях воспринял как личный выпад. Я рад, что ты прислал мне теперь объективный ответ, несмотря на то, что я ни в коей мере не согласен с твоими взглядами и делаю ведь это, основываясь на объективных абсолютно «лишенных эмоций» причинах. Я хорошо понял твои рассуждения, но все же убежден, что ты выбрал несостоятельный отправной пункт: функция ψ , на которую ты опираешься, не соответствует той проблеме, которую тебе предстоит рассмотреть. Ведь она представляет собой решение уравнения Шредингера и удовлетворяет граничным, но *не* начальным условиям. Ей в самом деле не достает свойств, как ты об этом говорил, необходимых для описания индивидуальной системы. Но есть и *другие* решения, достигаемые суперпозицией, которые удовлетворяют начальным условиям и от которых можно потребовать, если из этого исходить, чтобы они соответствовали индивидуальной системе. Конечно, это возможно только приближенно, но получаться будет тем точнее, чем больше масса m . Я как раз просчитал этот переход при $m \rightarrow \infty$ в твоем примере и нашел, что он точно приводит к классическому описанию. Реше-

ние получается безупречным, и это подтверждено не только моими сотрудниками, но и моим преемником проф. Кеммером и критичным и скептическим Шредингером. Если ты сомневаешься, то дай прочесть мою рукопись Иоганну фон Нейману или Вейлю, который должен быть сейчас в Принстоне. Могу предполагать, что твое возражение вызвало то, что я воспользовался случаем и подмешал туда классическую детерминистику. Но я убежден, что в конце концов ты примешь даже и это, если прочитаешь все спокойно и обсудишь с Вейлем или Нейманом.

Во всяком случае ты не должен на меня сердиться. Я убежден в этом честно и объективно, а мое преклонение перед тобой отнюдь не уменьшается от того, что я не разделяю твоего мнения. Однако если ты считаешь меня безнадежно заблуждающимся, то тебе нет надобности мне больше писать. Адресуй твои письма в таком случае Хеди, которой доставляет огромную радость каждая твоя строчка. Она страдает от какого-то длительного шума в одном ухе и не может из-за этого спать; поехала лечиться в Гарц, куда я вскоре тоже направлюсь.

Я замешан еще в одной ереси совместно с Эрвином Фрейндлихом. Вещь эта уже напечатана, и я ее тебе направляю. Кстати, Фрейндлих был очень болен — тромбоз сердечной артерии.

В надежде на то, что ты на меня не сердись, с сердечным приветом.

Твой Макс Борн.

Предшествующее письмо показывает, как двое интеллигентных людей могут пикироваться друг с другом при обсуждении конкретного физического вопроса. Каждый убежден, что именно он прав, а другой заблуждается. Проистекает это из того, что каждый исходит из различной отправной точки, которую он считает в такой степени неуязвимой, что совершенно не может принять исходные взгляды другого.

В такой ситуации очень счастливым оказалось обстоятельство, включившее в обсуждение третье лицо — Вольфганга Паули, сыгравшего роль посредника. Его имя уже встречалось в этой переписке: он был моим ассистентом в Геттингене и возглавлял длинный ряд выдающихся молодых людей (работавших у меня). В то время ему едва минул 21 год, но он уже написал выдающуюся работу —

* Эта статья Паули уже в послевоенные годы была издана в русском переводе. В. П а у л и. «Теория относительности». Л.— М., ГТТИ, 1946. (Прим. перев.).

статью по теории относительности в «Энциклопедии чистой и прикладной математики» (1920) *. Эта работа в течение длительного времени представляла собой лучшее изложение теории относительности, да и сегодня она может считаться одной из ключевых. Паули был профессором в Цюрихе; во время второй мировой войны он переехал в Принстон, поскольку опасался, что Швейцария, как и другие малые страны (Бельгия, Голландия, Норвегия), окажется оккупированной. Он был близким другом Эйнштейна и рассматривал себя, — пожалуй, с основанием, — как одного из его преемников. И со мною он тоже поддерживал длительный контакт, хотя по преимуществу письменный.

*Принстон, Нью-Джерси,
Институт перспективных исследований*

Дорогой господин Борн,

я нахожусь здесь с кратковременным визитом, а в середине апреля снова буду в Цюрихе. В свободное время я много читал, в том числе и «Собрание научных работ», издание которых было приурочено к Вашему выходу в отставку. Там имеются интересные статьи. Вашу фотографию я нахожу очень удачной. Естественно, мое внимание привлекла статья Эйнштейна, тем более, что я мог с ним побеседовать о ней здесь, а это гораздо проще, чем письменная дискуссия. Он мне сказал, что Вы с ним начали по этому поводу обмениваться письмами, что же по этому поводу думает *он*, я надеюсь в какой-то мере узнать сам, — я ведь знаю как Эйнштейна, так и квантовую механику. Но вот что касается *Вашей* исходной точки зрения, то я никак не могу ее правильно уяснить из эйнштейновских разъяснений. Поскольку все это дело в целом, а равно и дискуссия между Эйнштейном и Вами, в особенности, меня интересует, я был бы благодарен, если бы Вы мне могли написать краткое резюме о Ваших исходных соображениях, — в том виде, в каком Вы сами их себе представляете (детали для меня не существенны).

Представляется ясным, что квантовая механика в принципе может претендовать также и на описание *макроскопических* шариков, которое не будет зависеть от их тонкой структуры (атомистического строения).

Ну вот, а в беседах с Эйнштейном я увидел, что он рассматривает в качестве характерного для квантовой механики и существенного затруднения то обстоятельство, что состояние некоторой системы определяется только через характеризующие условия эксперимента.

(*N. B.* Эйнштейн сказал вместо «данные, характеризующие условия эксперимента» («Angabe einer Versuchsanordnung»), что «состояние некоторой системы зависит от того, как на нее смотрят», но это по сути дела означает то же самое.— *М. Борн*). Ничего больше об этом Эйнштейн знать не хочет. Если бы можно было производить измерения достаточно точно, то это было бы, естественно, справедливо для макроскопических шариков, как и для электронов. Конечно, это может быть продемонстрировано данными мысленных экспериментов, и я подозреваю, что Вы в своей дискуссии с Эйнштейном представили и обсуждали такого рода эксперименты.

Но у Эйнштейна имеется «философское» предубеждение, что некоторое состояние (так называемое «реальное») в случае макроскопических тел при *всех* обстоятельствах может быть «объективно» определено, т. е. определено без данных, характеризующих условия эксперимента, с помощью которых исследуется система (макроскопическое тело) или которым система подчинена.

Мне кажется, что дискуссия с Эйнштейном может быть сведена к этой его предпосылке, которую я бы назвал идеей (или «идеалом») «независимого наблюдателя» («*losgelösten Beobachters*»). Мне и другим защитникам квантовой механики кажется, напротив, экспериментальная и теоретическая очевидность осуществимости этого идеала достаточной.

В конце концов, я думаю, правда, что он чистый логик. Теперь хотел бы я знать, что по этому поводу думаете Вы?

С приветом.

Ваш Паули.

Бад-Пирмонт
17.3.54

Дорогой Эйнштейн,

письмо, которым я был привлечен принять участие в сборе поздравлений к твоему семидесятипятилетию, застало меня здесь слишком поздно. Ты не пойми буквально так, как будто бы опоздает мое поздравление. Я желаю тебе здоровья, бодрости и творческих сил. Как хотелось

бы мне повидать тебя снова! Ведь на свете нет никого, кого бы я чтил больше, чем тебя, и кому бы я был больше, чем тебе, благодарен. И наше сегодняшнее разногласие здесь ничего не изменяет. В последние годы меня не раз приглашали в Америку, например в Корнелльский университет для чтения «Messenger Lecture». Но я не мог его принять. Мы как раз намеревались осесть здесь и поэтому сразу же ехать дальше не можем. Кроме того, у меня в работе две книги: одна из них, по теории кристаллов, находится в корректуре («Oxford Press»), другая, по оптике, представляет собой почти готовую рукопись («Pergamon Press»). Не могу же я брать на себя еще бóльшие обязательства, с которыми несомненно было бы связано приглашение в Корнелль. К тому же получается так, что родился я на немецкой земле и являюсь членом Русской академии. Это приведет к довольно отвратительному обращению в консульствах. Мой преемник, Кеммер, так и не получил визу даже на краткосрочный выезд в Америку, потому что более сорока лет тому назад родился в Санкт-Петербурге. Но все же, может быть, нам с Хеди удастся приехать в Соединенные Штаты и навестить тебя. Паули писал мне о том, что ты беседовал с ним по поводу нашей переписки. Но относительно того, что я утверждаю, он явного представления не имел и желал дополнительных справок. Не мог ли бы ты дать ему мою рукопись? Ты сэкономил бы массу хлопот.

С наилучшими пожеланиями и сердечным приветом.

Твой Макс Борн.

Это письмо написано из Бад-Пирмонта, куда мы переехали в начале 1954 г. Об обеих упоминаемых в нем книгах — «Принципах оптики», написанных совместно с Е. Вольфром, и «Динамической теории кристаллических решеток» (с Кун Хуангом) — я уже говорил ранее.

Среди приглашений в Америку имелось одно (возможно, полученное уже после отправки этого письма) из Беркли, университета в Калифорнии. Указанное приглашение привлекало меня, поскольку во время моих предыдущих посещений Америки мне полюбились эти места с их синим небом, фруктовыми плантациями, громадными горными грядами, великолепным побережьем и трудолюбием населяющих их людей. Причина, которая побудила меня к отказу, сводилась к тому, что там работал Эдвард Теллер, ранее работавший со мной в Геттингене и ставший тем временем «отцом водород-

ной бомбы». Я не хотел иметь с ним дела. Затем последовало второе письмо от Паули ко мне; я привожу его без сокращений, несмотря на то, что оно большое и что написано (частично) математическим языком, поскольку в нем дан ясный анализ хода мыслей Эйнштейна и оно содержит одновременно с этим его опровержение. Причины этого в том, что Паули, выступая против меня в качестве адвоката Эйнштейна, принимает все же мою сторону и пытается помочь мне сформулировать мои аргументы в возможно более ясном виде.

Принстон,
Институт перспективных исследований
31.3.54

Дорогой Борн!

Спасибо за Ваше письмо. Я пишу все еще отсюда, поскольку в Цюрихе, куда я вернусь 11 апреля, я буду завален работой и не смогу располагать временем. Я получил от Эйнштейна для прочтения Вашу рукопись, он совершенно не сердится на Вас, но говорит о Вас только, что Вы человек, который не способен выслушать других. Это полностью совпадает и с моим впечатлением, поскольку в Вашем письме, а равно и в Вашей рукописи, Эйнштейн совершенно не похож на самого себя. Мне кажется, Вы создали какое-то чучело Эйнштейна, которое с великой помпой и опровергаете. В особенности Эйнштейн не считает идею «детерминизма» (как он мне в категорической форме повторил) столь фундаментальной, как это часто кажется, а энергично отрицает, что он когда-либо выставлял подобный постулат в таком виде, что «последовательность подобных состояний тоже должна быть объективной, реальной, т. е. автоматической, механической, детерминистской». В такой же мере он *оспаривает*, что он рассматривал вопрос, «является ли теория строго детерминистской?» в качестве «критерия для допустимой теории».

Эйнштейновская отправная точка является скорее «реалистической», а не «детерминистской». Это значит, что его философская «предубежденность» (Präjudiz) является другой. Ход его рассуждений вкратце можно себе представить следующим образом.

Предварительный вопрос: реализуются ли в природе при некоторых обстоятельствах, также и в случае макрообъектов, все математически возможные решения уравнения Шредингера?

На этот вопрос, по моему мнению, безусловно должен быть дан утвердительный ответ — или же имеют место только такие специальные решения, которыми положение объекта определено «точно, резко».

З а м е ч а н и е. Если последний класс решений (для которых мы будем считать $(\Delta x)^2 < L_0^2$) обозначить через K^0 , то он обладает следующими свойствами:

1. Если $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$ принадлежат к решениям типа K^0 , но относятся к сильно различающимся средним значениям координат

$$\bar{x}_1 = \frac{\int x_1 |\varphi_1|^2 dx}{\int |\varphi_1|^2 dx},$$

$$\bar{x}_2 = \frac{\int x_2 |\varphi_2|^2 dx}{\int |\varphi_2|^2 dx}, \text{ т. е. } (x_2 - x_1) \gg L_0^2,$$

то выражение

$$C_1 \varphi_1(x) + C_2 \varphi_2(x) = \varphi_1(x) \quad (\text{A})$$

не принадлежит к K^0 .

2. Если $\varphi_1(x, t_0)$ принадлежит к K^0 в некоторый определенный момент времени t_0 , то $\varphi_1(x, t)$ при условии, что $|t - t_0|$ достаточно велико, более не принадлежит к K^0 . Мне представляется также невозможным и принципиально ограничивать решения уравнения Шредингера специальным классом K^0 , и это, вообще говоря, в случае макроскопических тел должно быть в той же мере справедливым, как и в случае атома водорода или отдельного электрона. Если, действительно, квантовая механика справедлива, то макроскопические тела в принципе должны демонстрировать (интерференционные) явления; их обнаружение представляет лишь *технические* трудности из-за малости длины волны.

Но тогда следует использовать и не относящиеся к K^0 суперпозиции типа (A) решений класса K^0 . Это имеет место, например, при интерференционных явлениях, сопровождающих прохождение частиц через два (или более) отверстия (причем совершенно безразлично, являются ли они «различимыми в микроскоп шариками» или «электронами»).

Мне представляется, что до сих пор имеется единство взглядов.

Теперь наступает очередь эйнштейновского вопроса: *Как следует физически интерпретировать те из решений уравнений Шредингера, которые не относятся к классу K^0 (например, в случае макрообъектов)?*

Здесь Эйнштейн выставляет следующие резонные соображения.

А. Если некоторое макроскопическое тело «наблюдается», оно имеет свое квазирезко определенное место, и неблагоприятно отыскивать некий каузальный механизм, в соответствии с которым «наблюдение создает» это фиксированное место.

З а м е ч а н и е. Я хотел бы вместо «наблюдать» сказать: «освещать с помощью узкого пучка света», а вместо дальнейшего «наблюдения» я сказал бы «некоторая подходящим образом выбранная экспериментальная установка».

В остальном я со всем согласен, так как считаю, что появление какого-то определенного местоположения или, что то же самое, его возникновение в *результате наблюдения* в этом случае не вытекает из законов природы.

Продолжение соображений Эйнштейна.

В. Из сказанного следует, что макроскопическое тело при «объективном описании» *всегда* будет иметь квазирезко определенное местоположение. Из-за того, что в принципе нельзя «отбрасывать» те ψ -функции, которые не относятся к классу K^0 , но вместе с тем не противоречат законам природы, *общую* ψ -функцию можно интерпретировать только как описание ансамбля. Если же хотят утверждать, что ψ -функция дает *полное* описание физической системы, то нужно встать на ту точку зрения, что законы природы принципиально допускают только ансамблевое описание, — во что Эйнштейн не верит (если иметь в виду не только те законы природы, которые нам до сих пор известны).

Так вот, я не согласен с эйнштейновским соображением В (обратите внимание: понятие «детерминизм» здесь вообще не фигурирует). Я не считаю правдоподобной возможность того, чтобы «макротело» имело всегда квазирезко определенное местоположение, поскольку не вижу принципиальной разницы между микро- и макротелами. По-моему, всегда в значительной степени надо считаться

с неопределенностью местоположения там, где в принципе проявляется волновая природа соответствующего физического объекта.

Появление определенного местоположения x_0 при последующем наблюдении (например, «при освещении пространства диафрагмируемым фонарем») над отверстием, находящимся на рисунке *, на передней стороне, и утверждение: частица находится тут — рассматривается затем как не укладывающийся в рамки законов природы «акт творения», даже если здесь и не было влияния наблюдения. Законы природы дают нам сведения только по статистике этих актов наблюдения.

Существует ли что-либо такое, чего мы не знаем, по этому поводу, — как недавно сказал О. Штерн, — следует ломать голову не больше, чем по старому вопросу о том, сколько ангелов уместится на острие иглы. Но мне кажется, что вопросы Эйнштейна, в конечном итоге, относятся к тому же типу.

С этим Эйнштейн не согласился бы и потребовал, чтобы уже *перед* наблюдением в «полное реальное описание» системы вводили элементы, которые каким-то образом должны соответствовать возможным различиям результатов наблюдений при «освещении диафрагмируемым фонарем». Я же, напротив, считаю, что этот постулат находится в противоречии со свободой экспериментатора выбирать взаимоисключающие условия эксперимента (например, освещение длинноволновыми параллельными лучами света!).

Резюмируя, я хотел бы, таким образом, сказать: Ваша рукопись — я ничего не могу возразить против формальных расчетов, которые мне, впрочем, были небезызвестны, — излагает вопросы, интересующие Эйнштейна совсем не так. Особенно мне представляется, что сюда ненадлежащим образом, в разногласии с Эйнштейном, притянута понятие «детерминизм».

Независимо от Эйнштейна, еще одно замечание для иллюстрации различия классической и квантовой механики «измерения траектории».

А. К л а с с и ч е с к а я м е х а н и к а. Обсудим, например, вопрос об определенности траектории какой-нибудь планеты: следует многократно измерять (в раз-

* В письмах этого рисунка не оказалось. (Прим. перев.).

личные моменты времени t_0, t_1, \dots) ее местоположение с одинаковой точностью Δx_0 . Если известны простые законы движения тела (например, ньютоновский закон тяготения), то с их помощью можно *рассчитать траекторию* (т. е. положение и скорость в любой момент) тела с *любой высокой* степенью точности (и проверить также справедливость принятого закона для последующих или предыдущих моментов).

Повторные измерения местоположения с ограниченной точностью могут с успехом заменить *одно* измерение высокой степени точности.

Принятие относительно простых законов действия сил — таких, как ньютоновские (а не каких-либо приводящих к сложным зигзагообразным движениям) в малых областях пространства представляется при этом дозволенной в смысле классической механики идеализацией.

В. К в а н т о в а я м е х а н и к а. Повторение измерений местоположения в следующие друг за другом моменты времени с одинаковой точностью Δx_0 не даст никакой пользы для предсказания последующих местоположений. Ведь каждое измерение с точностью Δx_0 в момент t_n привносит с собой неопределенность $\Delta x_{t_n} = \frac{h}{m\Delta x_0} (t_{n+1} - t_n)$ в последующий момент и *сводит на нет значимость всех предыдущих измерений в пределах этих ошибок.* (Если я не ошибаюсь, то этот пример Бор обсуждал со мной много лет тому назад.) Главное различие между теориями А и В, состоящее в том, что именно в случае В *одним* измерением уничтожаются сведения, полученные прежними измерениями, как раз в Вашей рукописи не было подчеркнуто достаточно полно!

Приветствую вас!

Всегда Ваш В. Паули.

Сегодня соображения Паули о принципиальном различии между классической и квантовой механикой стали достоянием всех физиков. Его формулировки, однако, настолько просты и метки, что заслуживают того, чтобы их помнить.

Его следующее короткое письмо из Цюриха было еще более «технично», чем это, но, по тем же соображениям, заслуживает, чтобы его воспроизвести.

Дорогой господин Борн!

Благополучно вернувшись домой, я застал Ваше письмо от 10-го апреля. Сомневаюсь, конечно, что можно многое добавить к дискутируемому вопросу.

1. Эйнштейн. Я полностью разделяю Вашу точку зрения на то, что Эйнштейн «одержим своей метафизикой». Я бы только назвал ее «реалистичной» метафизикой, а не «детерминистской». Речь идет о *все тех же* волновых функциях, которые не принадлежат к особому классу K^0 * и из которых он хочет подготовить петлю для квантовой механики: что эти не принадлежащие к K^0 решения (являющиеся *общим* случаем) представляют собой «только неполное» описание ансамбля «реальности», в то время как из его метафизики следует, что при «объективном реальном состоянии» местоположение макрообъекта должно быть всегда «определено квазирезко» (а в квантовой механике это имеет место только в случае специальных решений класса K^0 и в ограниченных интервалах времени).

В своем последнем письме я уже пытался изложить Вам позицию Эйнштейна, *которая совершенно* одинакова и в опубликованной его работе и в том, что он лично говорил мне. Во время моего прощального визита к нему он еще добавил, что, по его мнению, следовало бы говорить нам, сторонникам квантовой механики, для того, чтобы быть логически неуязвимыми (но что не совпадает с тем, во что он верит):

«Описание физических систем с помощью квантовой механики весьма неполно, но его бессмысленно совершенствовать, поскольку это совершенствование не увязывается с законами природы». Этой предложенной нам формулировкой я совсем не удовлетворен, поскольку своей метафизичностью она представляется мне схожей с рассуждениями об «ангелах на острие иглы» (как будто существует нечто, о чем никто ничего знать не может).

2. Независимо от Эйнштейна. Решения $C_1\varphi_1(x) + C_2\varphi_2(x)$, где $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$ не перекрывают

* К этому приведу его пример: $\psi = Ae^{iat} \cos bx$. «Класс K^0 » — это введенное мною сокращение.

друг друга: $\int f(x) \varphi_1(x) \varphi_2(x) dx \sim 0$ дают как раз не что иное, как классический механический ансамбль (описываемый плотностями P) в x -пространстве, а также и — после разложения в ряд Фурье — в p -пространстве, поскольку фаза α в $C_2 = C_1 e^{i\alpha}$ определена. И в этой точке зрения нет никакого затруднения, а наоборот, она может считаться вполне удовлетворительной. Только после усреднения α получают смесь (не с помощью отдельной волновой функции, а, согласно фон Нейману, с помощью матрицы плотности P); то же самое и в волновой механике, — смесь, которая ни в одном отношении неотличима от смеси в классической механике.

Эйнштейн, конечно, ничего не имеет против ансамблей в классической механике, поскольку они в допустимой мере в духе *классической* механики представляют в своем утверждении, что характеристика какого-либо состояния с помощью волновой функции («чистый случай» по фон Нейману) также «неполна», поскольку «истинное объективное реальное состояние» всегда имеет квази-резкое местоположение (даже если волновая функция его и не имеет).

Сердечно приветствую.

Ваш П.

Письма Паули ясно показали мне, что проект моего ответа на эйнштейновскую статью в посвященном мне юбилейном сборнике является совершенно неподходящим. Я не понимал, что было ему так важно. И когда я сейчас, через двенадцать лет, раздумываю, как это могло случиться, то нахожу только одно объяснение: я был непреклонным сторонником и апостолом молодого Эйнштейна и преклонялся перед его теориями; я не мог себе представить, что старый Эйнштейн думает иначе. Он основал релятивистскую теорию на принципе, по которому понятиям, связанным с ненаблюдаемыми, нет места в физике: фиксированная точка в пустом пространстве является таким понятием, так же как и одновременность двух событий в различных местах пространства. Квантовая теория возникла, однако, потому, что Гейзенберг этот принцип распространил на электронную структуру атомов. Это был отважный, фундаментальной важности шаг, который сразу же меня озарил и способствовал тому, что я все свои силы направил на служение этой идее. Для меня было потом совершенно неслыханно, как Эйнштейн отказывался признать действительным в квантовой теории этот с большим успехом применяемый им самим принцип; как он настаивал на том, что теория должна ответить на вопросы такого типа, как «сколько ангелов может уместиться на острие иглы». Ведь к этому, как ясно показал Паули, приводит требование Эйнштейна о том, что физическое состояние должно существовать объективно, реально, даже

если принципиально его невозможно определить, а теория, которая против этого грешит, является неполной.

В одном из предыдущих писем он это выразил так, что философию «*esse est percipi*» он не приемлет.

Анализ этих принципиальных различий во взглядах, проделанный Паули, был правильным ответом на статью Эйнштейна. Я должен был предоставить ему возможность опубликовать возражения. Насколько мне известно, он этого не проделал.

Моя собственная рукопись, как мне казалось, содержала также рассуждения, которых я еще нигде не видел. Я ее полностью переписал и только слегка коснулся статьи Эйнштейна, сославшись на его пример с упруго отражаемой двумя стенками частицей, колеблющейся между ними, развил ее полнее математически и разъяснил свои собственные философские идеи, касающиеся реальности и детерминизма. К этому времени я получил приглашение Датской академии направить материал в выпуск докладов этой Академии, которые должны были появиться к семидесятилетию Нильса Бора. Поэтому свою работу я направил не «*Royal Society*» в Лондон, как планировал ранее, а в Датскую академию в Копенгаген. Там она и появилась под названием «*Continuity, Determinism and Reality*» (*Kong. Dansk. Videnskabernes Selskab. Matematisk-fysiske Meddelelser*, vol. 30, N 2, 1955, S. 1).

В письме из Цюриха от 11 декабря 1955 г., где Паули прежде всего сообщил о внезапной смерти Германа Вейля, он писал мне затем:

«Вашу работу в датском юбилейном сборнике, посвященном Бору, очень приятно читать, познавательно-теоретическое содержание стало очень четким, и я со всем согласен. Математическую часть примера с материальной точкой между двумя стенками и соответствующими пакетами я использовал в своих лекциях так, что там появилась формула трансформации тета-функции. Но это только одна частность». Но это больше, чем одна частность. Это показывает, что Паули давно знал все, что я говорил. Но меня это не приижало. Ведь я еще со времени, когда он был моим ассистентом в Геттингене, знал, что он — гений, сравнимый только с самим Эйнштейном, даже что чисто научно он был более велик, чем Эйнштейн, хотя по человеческому складу характера это был совсем другой тип, не способный в моих глазах достигнуть величия Эйнштейна.

Замечание по поводу тета-функции побудило меня впоследствии, когда я уже жил в Бад-Пирмонте, снова вернуться к этому примеру. В совместной с В. Людвигом статье («*Ztschr. f. Phys*», 150, 1958, S. 106) движение колеблющейся частицы было представлено не только с помощью суперпозиции шредингеровских волн (волновое представление), а также и с помощью решения в интегральной форме, которое можно было понимать как суперпозицию гауссовых распределений с уменьшающейся резкостью (корпускулярное представление).

Первая форма соответствует настоящей квантовой области, вторая — почти классической области. Обе переходят друг в друга с помощью упомянутого Паули тета-преобразования. Наверное, это было Паули тоже известно.

Мы, однако, еще добавили и метод перевода обоих представлений в единое, справедливое и применимое, таким образом, для всех скоростей и всех масс.

Мне этот метод известен из теории кристаллов, где П. П. Эвальд применил его с большим успехом для расчета электростатических и электромагнитных потенциалов. Хотя рассмотренная проблема касается физически тривиального и практически незначительного случая, она дает ясное представление о связи классической и квантовой механики и кажется мне полезнее, чем философствование по этому поводу. Ее следует привлекать и обсуждать на каждой элементарной лекции о квантовой механике.

В последующих письмах описанный здесь спорный вопрос продолжает затрагиваться. Но, несмотря на случайную остроту, он ни в коей мере не омрачал наших отношений.

А. Эйнштейн
Мерсерстрит, 112, Принстон, Нью-Джерси, США
(без даты)

Дорогой Борн!

Я был очень рад тому, что ты хоть и с непостижимым опозданием получил Нобелевскую премию за твой фундаментальный вклад в современную квантовую теорию. Твоя последовательная статистическая интерпретация [квантово-механического] описания сыграла решающую роль в прояснении понимания. Сказанное представляется мне совершенно несомненным, несмотря на нашу безрезультатную переписку по этому вопросу.

Ну, а к тому же деньги в твердой валюте, они тоже не лишни, когда отправляешься на покой.

С сердечным приветом и пожеланиями тебе и твоей жене.

Твой А. Эйнштейн.

То, что мне не была присуждена Нобелевская премия одновременно с Гейзенбергом (1932 г.), причинило мне в то время боль, несмотря на получение прекрасного письма от Гейзенберга, но это чувство было преодолено, поскольку я понимал превосходство Гейзенберга надо мной.

Когда мы вернулись в Германию, эта рана давно затянулась. Тем более неожиданным и радостным было известие о присуждении премии еще и потому, что эта премия присуждена мне не за мой вклад в совместную с Гейзенбергом и Иорданом работу, а за предложенное и обоснованное мною статистическое толкование шредингеровской волновой функции. То обстоятельство, что это признание пришло с опозданием в 28 лет, не удивительно, поскольку все великие физики первого периода развития квантовой теории были противниками статистического толкования (Планк, де Бройль, Шредингер и — последний в их числе — сам Эйнштейн). Шведской академии было не просто выступить против этих влиятельных голосов, так что мне оставалось ждать до тех пор, пока мои идеи не станут

достоянием физиков, — не без помощи Нильса Бора и его копенгагенской школы, которой почти повсеместно сегодня приписывают созданное мною направление идей в физике.

*Санаторий д-ра Барнера,
Броунлак
28.11.54*

Дорогой Эйнштейн,

недавно я прочитал в газете, что ты сказал: «Если бы я заново появился на свет, то не стал бы физиком, а пошел бы в ремесленники». Эти слова были для меня большим утешением, поскольку такие же мысли одолевают и меня при виде того зла, которое во всем мире вторглось в нашу некогда столь прекрасную науку.

Ну, дали мне они теперь Нобелевскую премию, в основном за статистическое толкование ψ -функции, за работу 28-летней давности. Мне хотелось бы сделать одно разъяснение: они хотели отметить нечто такое, что не играет непосредственной практической роли, нечто чисто умозрительное. Одновременно премию в области химии получил Лайнус Полинг, парень, известный своими честными политическими взглядами и выступлениями против злоупотреблений научными открытиями. (Здесь даже ходил слух, что ему не давали выездной визы из США, но вроде бы это не подтвердилось.) Может, это случайное совпадение, но в этом усматривается умысел, и если так, то это радует. Поэтому я с удовольствием поеду в Стокгольм, хотя это тяжело и для Хеди и для меня. Мы оба жалуемся на сердце и чувствуем себя сносно только в условиях очень тихой жизни.

Сейчас Хеди в Геттингене для того, чтобы в одной из клиник немного подбодриться. По этим же соображениям я сейчас забрался в Гарц. Пожалуй, ничего более мне уж не создать в науке (кроме начатой 8 лет назад книги по оптике), и я предполагаю использовать мою сегодняшнюю популярность в двух областях (здесь я — «немецкий», а там — «английский» физик): для того, чтобы предостеречь совесть моих коллег относительно изготовления отвратительных бомб. Еще до того, как я узнал о Нобелевской премии, я написал в таком духе статью в журнал «Physikalische Blätter», который здесь широко читается.

Мне кто-то писал, что ты болеешь. Прими мои пожелания скорейшего выздоровления и можешь не отвечать. Мы в человеческих делах и так понимаем друг друга. Различия во мнениях о несовершенности квантовой механики в сравнении с этим — сущая мелочь.

Будь здесь Хеди, она бы присоединилась к моему сердечному привету.

Остаюсь старым другом

твой Макс Борн.

Правильна ли была моя догадка о том, что одновременное награждение Нобелевской премией Лайнуса Полинга и меня связывалось с тем, что оба мы не имели дела с практическим применением и злоупотреблением данными науки для политических целей, — я и сегодня не могу сказать. Одновременно с нами премия была присуждена еще одному ученому — физику Вальтеру Боте, в отношении которого такая догадка едва ли может считаться оправданной*.

Нобелевские торжества действительно были для нас очень напряженным, но и в высшей степени радостным событием. Здоровью нашему они не повредили. Нобелевская премия очень помогла мне — в плане публичных выступлений в защиту разумного применения научных открытий.

Следующее письмо, последнее, полученное мною от Эйнштейна, имеет отношение к началу моего предыдущего к нему письма, в нем я упоминал о газетной статье, в которой ему приписывались слова: «Если бы заново я появился на свет, то не стал бы физиком, а пошел бы в ремесленники». В то время я связывал их с атомной бомбой. Эйнштейн кратко отвечает мне на это (письмо напечатано на машинке, очевидно, он был уже сильно болен).

17.1.55

Дорогой Борн,

посылаю тебе при этом текст моего письма в «Reporter», которым ты интересовался. Хочу сделать одно к этому замечание. Наемные «писатели» бесхребетной прессы пытались ослабить впечатление от этой статьи, представляя ее так, как будто я сожалею, что занимался наукой, или пытаюсь создать впечатление, что я недооценивал упомянутые практические ее выходы. Я же хотел сказать только следующее: при нынешних условиях я выбрал бы

* Борн имеет в виду, что Вальтер Боте принимал участие в работах по проблеме урана, проводившихся в Германии. Впрочем, представленные им данные (относящиеся к сечению поглощения нейтронов углеродом) оказались, по мнению ряда специалистов, решающее действие на судьбу проекта, который на основе этих данных был направлен по ложному пути. (Прим. перев.).

только такое ремесло, которое давало бы мне возможность зарабатывать себе на хлеб, но не имело бы ничего общего со стремлением к познанию.

Дружески приветствую тебя.

Твой А. Э.

Письма в журнал «Reporter» у меня, к сожалению, сейчас нет. Когда я летом 1965 г. докладывал об эйнштейновских письмах (мои письма к нему в то время еще не поступили в мое распоряжение) съезду нобелевских лауреатов в Линдау, я все еще думал, как и в вышеприведенном письме, что высказывание Эйнштейна связано с атомной бомбой. Тем временем я узнал от душеприказчика Эйнштейна — г-на Отто Натана из Нью-Йорка, что это не так. Эйнштейновское пояснение относится к кризису буржуазной свободы, возникшему в то время в связи с выступлением сенатора Мак-Карти. Преподаватель или исследователь, который свободно и открыто отважился бы высказаться о своих политических убеждениях, рисковал вызовом в суд, т. е. в Комитет при американском Сенате, возглавлявшийся сенатором Мак-Карти, и терял свое место, если не более. Интересующиеся этим могут прочесть соответствующее примечание в книге Отто Натана «Эйнштейн и мир» (стр. 613), в ней же помещено и письмо в журнал «Reporter», содержащее ставшую с тех пор знаменитой из-за неправильного ее толкования фразу о том, что «лучше стать жестянщиком или продавцом-разносчиком, чем физиком».

*Бад-Пирмонт, ФРГ,
Маркерштрассе, 4
29.1.55*

Дорогой Эйнштейн!

Большое спасибо за то, что ты сразу же переслал мне текст своего письма в «Reporter». Представляю себе, как газетчики пытались ослабить впечатление от сказанного тобой. Я же должен признаться, что текст твой не однозначен по смыслу. Я его воспринял не совсем так, как ты его мне разъясняешь, но даже этого разъяснения мне недостаточно: ведь если даже выбрать способ зарабатывать на хлеб, не зависящий от стремления к познанию, то все же надо при этом еще решить, будешь ли сохранять это познание только для себя или частным образом будешь обмениваться им с друзьями, как это было принято в 17—18 веках. В противном случае достижения снова могут быть использованы для дурных целей, и мне кажется, что в этом случае ответственность с тебя не снимется. Я много размышлял об этом и вступил в обмен мнениями с Бертраном Расселом. Он дал полезное объяснение по британскому радио, которое было напечатано в «Liste-

пер». 30 декабря я извещу тебя, если только в результате этой дискуссии что-либо получится, будь то что-то личное или более широкозначительное. Один японский журнал попросил меня опубликовать переписку с Юкавой по вопросу об атомной бомбе и т. п. и направил мне письмо Ю[кавы]. Оно и в самом деле появилось в печати вместе с моим ответом (прочитать его я не смог, так как японского не знаю). Американцам, которые его прочтут, удовольствия оно не доставит. Но это только жалкое начало.

С сердечным приветом от меня и от Хеди.

Твой Макс Борн.

Это письмо содержит мою точку зрения на «plumber and rad-dler»-вопрос *. Оно относится к высказыванию Эйнштейна: «и тогда, когда ты зарабатываешь себе на хлеб, не занятый наукой, но публикуешь результаты научных исследований, ты все равно не освобождаешься от ответственности за их использование». Этой точки зрения я придерживаюсь и сегодня.

Хидеки Юкава — блестящий физик-теоретик, единственный среди японцев лауреат Нобелевской премии, которую он получил в 1949 г. за сделанное им предсказание частиц нового типа, названных мезонами (поскольку масса их лежит «между» массой электронов и протонов). Я нахожусь с ним в переписке, а также имел случай его видеть, например, во время сессии нобелевских лауреатов в Линдау в этом (1965) году. Нас с ним сближает не только физика (он признает мой принцип взаимности в качестве ведущей эвристической идеи в теории элементарных частиц), но также и наше отношение к злоупотреблению достижениями науки, поставленными на службу войны и разрушения.

Вскоре после того, как было написано это последнее в нашей переписке письмо, Эйнштейн умер (18 апреля 1955 г.).

Моя жена получила письмо от его падчерицы, Марго, в котором она описывает свое последнее свидание с Эйнштейном в больной палате.

«Знаешь ли ты, что я лежала в той же больнице, что и Альберт? Только дважды я смогла увидеть его в течение нескольких часов и поговорить с ним. Меня привезли к нему в палату на кресле. Сначала я его не узнала, так он изменился из-за болей, у него в лице не было ни кровинки, но его нрав оставался все тем же. Он обрадовался, что я выгляжу немного лучше, шутил со мной и казался совершенно преодолевшим свое (тяжелое) состояние. Он говорил со мной тихим голосом, но с легким юмором, о врачах и ждал приближающегося конца, как некоего естественного явления природы. Насколько бесстрашным он был в жизни, настолько тихим и скромным он был перед лицом смерти. Без сентиментов и без сожалений он ушел из этого мира».

С ним мы потеряли — моя жена и я — нашего лучшего друга.

* Т. е. на вопрос о профессии жестянщика или продавца-разносчика. (*Прим. перев.*)

Д. Холтон

ЭЙНШТЕЙН, МАЙКЕЛЬСОН И «РЕШАЮЩИЙ» ЭКСПЕРИМЕНТ*

I. Введение

Высочайшие достижения в науке бывают совершенно различных родов: чисто теоретическое обобщение, поражающее своей радикальной синтетической мощью, и острый эксперимент, иногда называемый «решающим», удивительный результат которого сигнализирует о поворотном пункте. Специальная теория относительности Эйнштейна, впервые опубликованная в 1905 году, является наилучшим примером первого рода, а эксперименты Майкельсона, проведенные в 1880-х годах с целью обнаружить с помощью света эфирный ветер, часто отмечались как типичные примеры достижений второго рода. Даже если бы оба эти достижения не имели никакого отношения друг к другу, каждый из них упоминался бы и изучался в силу собственных достоинств. Но оба эти случая фактически представляли дополнительный интерес для историков и философов науки; потому что, как мы увидим, на протяжении последнего полувека преобладало мнение, будто эксперименты Майкельсона и теория Эйнштейна имеют тесную *генетическую* связь, которая проще всего может быть выражена словами подписи под фотографией Майкельсона в недавней публикации научного общества:

* G. H o l t o n. Einstein, Michelson and the «Crucial» Experiment. Isis, 60, Part 2, N 212, 1969, стр. 133—197.

Я благодарю душеприказчиков и наследников Альберта Эйнштейна и особенно мисс Элен Джукс за помощь и разрешение цитировать публикации и документы Эйнштейна. Первые варианты этой статьи были обсуждены в моем семинаре по истории науки, а ее рукопись была представлена в качестве одной из лекций, читаемых по понедельникам в Чикагском университете в ноябре 1967 г. Я благодарен также Рокфеллеровскому фонду и директору Villa Serbelloni за дружественное отношение, обеспечившее выход в свет окончательного варианта.

Майкельсон «выполнил измерения, на которых базируется специальная теория относительности Эйнштейна».

Более подробное объяснение экспериментальных истоков теории относительности предпринято в очерке Р. А. Милликена «К семидесятилетию Альберта Эйнштейна» («Albert Einstein and his Seventieth Birthday»). Это была основная статья в специальном выпуске журнала «Reviews of Modern Physics», посвященном Эйнштейну; некоторые отрывки стоят того, чтобы их процитировать.

«Можно считать, что специальная теория относительности по существу исходит из обобщения опыта Майкельсона. Именно здесь проявилась характерная для Эйнштейна смелость подхода, ибо отличительной чертой современного научного мышления является тот факт, что оно начинает с отбрасывания всех априорных представлений о природе реальности (или о законченной картине строения Вселенной), характерных практически для всей греческой философии, а также для всего средневекового мышления; вместо этого современное научное мышление берет в качестве отправного пункта прочно установленные, тщательно проверенные *экспериментальные* факты, независимо от того, кажутся ли в данный момент эти факты разумными или нет. Короче говоря, современная наука является существенно эмпирической...

Однако этот эксперимент, после того как Майкельсон и Морли провели его с таким исключительным мастерством и изяществом, вполне определенно показал, что... не существует наблюдаемой скорости Земли по отношению к эфиру. Этот противоречивый здравому смыслу, казавшийся необъяснимым факт причинил много беспокойства физикам девятнадцатого века; на протяжении почти двадцати лет после того, как этот факт был обнаружен, физики предпринимали множество неуверенных попыток представить его приемлемым. Тогда Эйнштейн обратился ко всем нам: «Давайте просто примем это как установленный экспериментальный факт», и он сам взялся за эту задачу с энергией и способностью, которыми обладают очень немногие люди на земле. Так появилась специальная теория относительности»¹.

¹ R. A. Mill i c a n. Albert Einstein and his Seventieth Birthday. — Reviews of Modern Physics, 1949, 21: 343—344. (Курсив в оригинале.)

Рождение новой теории как отклик на загадочную эмпирическую находку! Подобные вещи случались, но это могло быть также и материалом для сказок. У историка науки сразу возникает несколько интригующих вопросов: сколь важны были эксперименты для формулировки Эйнштейном теории относительности в его статье 1905 года? Какую роль сыграли эксперименты Майкельсона? Насколько добротны те основания, которые имеются для решения этих вопросов? Какой свет проливают на этот случай документы, особенно те, которые дают, по-видимому, противоречивые данные? Если эксперименты Майкельсона не имеют решающего значения, то почему встречается много ученых, утверждающих обратное? А если они имеют такое значение, то почему некоторые отрицают это? Какими философскими (или иными) предпосылками руководствуются обе группы? Что может этот случай сказать нам об отношении между экспериментом и теорией в современной физике? И прежде всего, что может этот случай сообщить нам о конкурирующих претензиях сенсуализма и идеализма представить более правдоподобно акт современного научного творчества?

Таким образом, на первый взгляд кажется, что ограниченный случай раскрывает обширную область общераспространенной учености — не тот род истории, которая применяет широкоугольную лупу, чтобы нарисовать картину подъема и падения основных теорий, а тот, который изучает то, что фокусирует лупа, чтобы понять роль современной научной работы. Мы увидим, что нужно было бы рассмотреть так много документов и действующих лиц, что даже в обширном обзоре все вопросы невозможно изложить. Но я сконцентрирую внимание на тех вопросах, которые подробно освещены документами, включая некоторые вновь найденные и еще не опубликованные, и воспользуюсь случаем, чтобы собрать вместе и сравнить предшествующие статьи по этому вопросу, пока еще совместно не рассмотренные.

Многое в этих источниках покажется противоречивым или двусмысленным. Сам Эйнштейн делал различные заявления о влиянии опытов Майкельсона, начиная с такого: «несомненно, опыт Майкельсона оказал значительное влияние на мою работу», вплоть до следующего: «Опыт Майкельсона — Морли имел незначительное влияние на открытие теории относительности». Явная на первый

взгляд несовместимость утверждений не должна вызывать тревоги. Наоборот, если бы указывалось только бесспорное основание некоторой позиции по сложному предмету спора, это не принесло бы успокоения, потому что могло бы указывать на неполноту доводов.

Мы будем взвешивать эти противоречия. При этом мы должны стремиться оценить общую систему взглядов, мотивы или социальную цель, скрытые за формулировкой, призванной доказать обоснованность идеи. Исторические утверждения, подобные тем, которые встречаются в физике, имеют смысл только по отношению к специфической обстановке. Иногда контекстуальная связь нас будет интересовать так же, как и использование «релятивистской» части доводов; такое освещение специальной проблемы может помочь прояснить ту или иную главу в истории идей.

Другой целью такого исследования может явиться просто исправление распространенных заблуждений. Хотя это и заманчиво, но это — не главная моя цель; вероятно, она не имела бы успеха, потому что вера в то, что Эйнштейн в своей работе, приведшей его к публикации в 1905 году теории относительности, опирался на результаты опыта Майкельсона, уже длительное время является частью фольклора. Она считается столь же установленным событием в истории науки, как и широко известный и принимаемый за истину рассказ о падающем яблоке в саду у Ньютона или о двух предметах, сброшенных Галилеем с наклонной башни в Пизе, — два других случая, в которых предполагается, что экспериментальный факт обеспечил рождение синтетической теории. Если утверждение Милликена, как и многие другие подобные ему, справедливо, то должно наступить время, когда можно надеяться найти надежное доказательство их. Но если их нельзя подтвердить, то возможно, пока еще не слишком поздно, остановить распространение такой увлекательной басни.

II. Симбиоз загадок

Здесь может оказаться полезным краткий обзор существенных сторон хорошо известного опыта Майкельсона, хотя при этом и не будет выявлено главное основание, почему столь многие физические книги стремятся отме-

тить важность этого замечательного опыта. Несомненный факт, что это был один из наиболее чарующих экспериментов в физике. Его очарование, которое чувствуют как авторы учебников, так и физики-экспериментаторы, вытекает из его красоты и таинственности. Несмотря на то что в физике конца XIX века вопрос об эфирном ветре занимал центральное место, никто до Майкельсона не мог придумать и сконструировать прибор для измерения эффекта второго порядка, который доказывал бы наличие эфирного ветра. Интерферометр оказался таким прекрасным прибором. Изобретенный 28-летним Майкельсоном в ответ на призыв Максвелла, он мог обнаружить эффект порядка одной десятиллиардной. В то время это был наиболее точный научный прибор, а сам эксперимент являлся одним из тех, в котором была достигнута наивысшая степень точности. Позднее сам Эйнштейн тепло и искренне оценивал экспериментальный гений и артистическое чувство Майкельсона².

Как подробно рассказывает Майкельсон в описании своего эксперимента (в «*Studies in Optics*», 1927), одним из поводов, приведших к нему, был прежде всего эксперимент Джорджа Эйри по измерению угла абберации телескопа, через который рассматривалась звезда с движущейся Земли. Если исходить из представления о све-

² См. R. S. Shankland. *Conversations with Albert Einstein.*— *American Journal of Physics*, 1963, 31; 47—57. (Русск. перевод: Усп. физ. наук, 87, 711, 1965). Время от времени в текущих научных статьях физики возвращаются к эксперименту Майкельсона, рассматривая его в новом свете, см., например, P. P. Phillips. *Is the Graviton a Goldston Boson?* — *Physical Review*, 1966, 146: 966.

Следует заметить, что в этой статье, как и в большинстве физической литературы, термин «эксперимент (= опыт Майкельсона)» употреблялся более или менее равнозначно с терминами «эксперименты Майкельсона», «эксперименты Майкельсона — Морли» и т. п. Полезный обзор всей совокупности тесно связанных экспериментов Майкельсона совместно с его коллегой Е. Морли (опубл. в 1887 г.), Морли и Д. Миллера (1902—1904) и др. можно найти в работах R. S. Shankland et al. *A New Analysis of the Interferometer Observation of Dayton C. Miller.*— *Review of Mod. Phys.*, 1925, 27: 167 и след.; T. W. Chalmers. *Historic Reaserches.* (London: Morgan Brothers, 1949), а также более кратко в книге: W. K. Panofsky, M. Phillips. *Classical Electricity and Magnetism.* (Reading, Mass.: Adisson-Wesley, 1956), стр. 235.

те как волне, распространяющейся в эфире, то следует ожидать, что при наполнении телескопа водой угол аберрации возрастет; однако эксперимент показал, что угол при этом остается неизменным. Поэтому Огюст Френель предположил, что эфир частично переносится, или увлекается вдоль движения среды (такой, как вода), имеющей показатель преломления больший, чем единица. Эта гипотеза удовлетворительно объясняла результат Эйри в количественном отношении; она была убедительно проверена Арманом Физо в специальном опыте, в котором исследовалось действие движущейся воды на распространение светового луча; измерения проводились в лабораторной системе отсчета. В то же время такой эксперимент подразумевал, что среда с показателем преломления, равным единице (такая, как воздух), находясь в движении, не переносила бы никакой части эфира.

Гипотеза о том, что Земля движется сквозь эфир, который остается безучастным и инертным около Земли (позднее более четко развитая Г. А. Лоренцом), побудила к прямой экспериментальной проверке. Но эта проверка требовала невиданного до того искусства наблюдения чрезвычайно малого предполагаемого эффекта второго порядка, ибо относительное движение Земля — эфир («эфирный ветер») должно было проявиться в изменении эффективной скорости света посредством фактора, содержащего квадрат отношения скорости Земли к скорости света $(v/c)^2 = 10^{-8}$.

Остроумное решение Майкельсона состояло в том, чтобы заставить два луча света от одного и того же источника одновременно пробежать (и вернуться обратно) вдоль двух путей, имевших в лаборатории одинаковую длину, но повернутых относительно друг друга на 90 градусов; это приводило к тому, что относительное движение различным образом воздействовало на оба световых луча. Но когда для сравнения их относительных эффектов посредством интерференционной картины оба луча были соединены вместе, аппарат Майкельсона («интерферометр») неожиданно дал то, что обычно называется отрицательным или нулевым результатом. Говоря точнее, он дал, в пределах экспериментальной ошибки, такой результат, который можно было бы ожидать на основе совершенно иной гипотезы, а именно, что эфир не инертен, а каким-то образом увлекается вместе с Землей и таким образом не

имеет измеримого движения или ветра по отношению к Земле.

Красота замысла и выполнения эксперимента была в поразительном контрасте с непреодолимой трудностью его интерпретации. В одном аспекте возникает проблема досконального понимания принципа работы прибора в рамках эфирной теории, независимо от смысла получаемых с его помощью результатов. Сам Майкельсон, представляя в 1882 году отчет Академии наук о своем первом эксперименте, признал, что он сделал ошибку в своем прежнем докладе в 1881 году, когда не обратил внимания на влияние движения Земли при прохождении света в плече интерферометра, расположенного под прямым углом к направлению движения. А. Потье, отметивший ошибку Майкельсона в 1882 году, также впал в ошибку³. С другой стороны, вопрос о том, как движущийся рефлексор в интерферометре влияет на угол отражения, был предметом непрерывных споров на протяжении более тридцати лет. Чтобы ощутить длительную путаницу в этих вопросах, нужно изучить протокол конференции экспериментаторов, специалистов по эфирному ветру; эта конференция под названием «Конференция, посвященная эксперименту Майкельсона—Морли», состоялась 4—5 февраля 1927 года в обсерватории Маунт Вильсон в присутствии Майкельсона и Лоренца⁴. Хотя теперь находят много упрощенных расчетов эксперимента, фактически подробная правильная теория предполагаемого действия интерферометра Майкельсона, чтобы показать эфирный ветер, является весьма сложной и редко излагается полностью.

Но сверх того были трудности и в другом аспекте: для всех в то время сам результат эксперимента выступал как чрезвычайно загадочный, а для многих он оставался таким и много лет спустя. Знаменитое изобретение привело к разочаровывающему, даже непостижимому результату в свете общепринятой тогда теории. Сам Май-

³ R. S. Shankland. The Michelson-Morley Experiment. — Am. J. Phys., 1964, 32: 23. В 1886 г. (Neederland Archives, 1886, 21: 104—176) Лоренц также указывал, что анализ действия интерферометра, проведенный Майкельсоном в 1882 г., был ошибочен; например, он предсказывал двойное смещение полос.

⁴ Conference of the Michelson—Morley Experiment. — Astrophysical Journal, 1928, 68: 341.

Кельсон называл свой эксперимент «неудачей»⁵. Повторно полученные нулевые или почти нулевые результаты противоречили всем его ожиданиям. В отличие от общепринятого подхода, согласно которому настоящий ученый признает результаты экспериментальных исследований, опровергающих теорию, он отказывался признать значение своих собственных результатов, говоря: «Поскольку результат первоначального опыта был отрицательным, проблема все еще требует разрешения»⁶. Он даже пытался утешить себя замечательным рассуждением: «Эксперимент кажется мне исторически ценным уже тем, что для решения этой проблемы был изобретен интерферометр. Я думаю, будет признано, что изобретение интерферометра более чем скомпенсировало тот факт, что этот частный эксперимент дал отрицательный результат»⁷.

Другие были точно так же озадачены и разочарованы. Лоренц писал Рэлею 18 августа 1892 года:

«Я в чрезвычайном затруднении относительно того, как разрешить это противоречие, и тем не менее я думаю, что если бы нам пришлось отказаться от теории Френеля [теории эфира], у нас вообще не осталось бы приемлемой теории... Не может ли быть некоторого пункта в теории опыта мистера Майкельсона, который до сих пор не был замечен?»⁸.

Лорд Кельвин, видевший в результате этого эксперимента одно из облаков, затемнявших «красоту и ясность динамической теории, которая рассматривала теплоту и свет как виды движения», даже в 1900 году не мог примириться с этими отрицательными результатами⁹. Рэлей, подобно Кельвину, побуждал Майкельсона повторить его первый эксперимент, признавался, что он считал нулевой результат, полученный Майкельсоном и Морли,

⁵ Bernard J a f f e. Michelson and the Speed of Light. (New York: Doubleday, 1960) стр. 89. (См. русск. перевод: Бернард Д ж е ф ф. Майкельсон и скорость света. М., ИЛ, 1962).

⁶ Там же, стр. 90.

⁷ A. A. M i c h e l s o n. Light Waves and Their Uses. (Chicago: Univ. Chicago Press, 1903), стр. 159. (Русск. перевод: А. А. М а й к е л ь с о н. Световые волны и их применения. Под ред. и с дополн. статьями засл. проф. О. Д. Хвольсона. Mathesis, 1912).

⁸ R. S. S h a n k l a n d. The Michelson-Morley Experiment, стр. 32.

⁹ Там же.

«истинным разочарованием»¹⁰. Как отмечал С. Свенсон¹¹, Майкельсон и Морли настолько были обескуражены нулевыми результатами своего эксперимента в 1887 году, что они пренебрегли сделанным обещанием о том, что измерения, которые они проводили в течение только шести часов (в пятидневный период) «будут повторены с интервалом около трех месяцев, и таким образом всякая неопределенность будет исключена». Вместо этого Майкельсон прекратил свою работу над этим экспериментом и обратился к новому использованию интерферометра для измерения длин (оказалось, что именно эта работа привела его к Нобелевской премии).

Вскоре ко всеобщему, включая и Майкельсона, удивлению, эксперимент оказался одним из «критериев», а не просто «приложением», если воспользоваться терминологией Дюгема. Действительно, он угрожал стать для исследователей эфира даже *malgré lui* * решающим экспериментом в единственно правильном значении этого термина, а именно, как центральное событие, которое заставило значительную часть научной общественности пересмотреть свои прежние убеждения.

Мы можем подвести итог: для Майкельсона этот эксперимент был источником беспокойства и, может быть, настоящего несчастья на протяжении всей его жизни, и не только по причине нулевого результата, но также и по причине его различных объяснений. Вначале он полагал, что его открытия могли только означать, что гипотеза стационарного эфира неверна; но не было никаких лучших альтернатив. Идея о том, что эфир субстанциально переносится Землей, вступала в прямое противоречие с точно установленными результатами экспериментов по аберрации и по измерению френелевского коэффициента увлечения, проведенных Физо. А модификацию эфирной теории Стокса, которую Майкельсон поддерживал, лучшие теоретики, вроде Лоренца, нашли несостоятельной, опираясь на отрицательный результат Оливера Лоджа,

¹⁰ R. S. Shankland. Rayleigh and Michelson. Isis, 1967, 58: 87.

¹¹ Loyd S. Swenson, Jr. The Ethereal Aether: A History of the Michelson — Morley Aether-Drift Experiment, 1880—1930. Диссертация, Claremont Graduate School, 1962. Я благодарю д-ра Свенсона за позволение прочитать его тезисы и за некоторые полезные обсуждения.

* Вопреки желанию (франц.). (Прим. перев.).

предполагавшего увлечение эфира вблизи быстро движущихся дисков. Сам Лодж проявлял раздражительность в связи с беспокойными экспериментами Майкельсона, которые доставляли доказательства против существования в пространстве невозмущаемого движением эфира. Так, Лодж писал с единственным небольшим преувеличением, которое другие позднее использовали: «Единственным препятствием на пути простой доктрины о невозмущаемом движением эфире является эксперимент Майкельсона, т. е. отсутствие эффекта второго порядка, вызываемого движением Земли сквозь свободный эфир. Этот эксперимент должен быть разъяснен»¹².

Весной 1897 года в Чикаго Майкельсон проверил возможность различного сопротивления эфира на разных высотах и тем самым — применимость гипотезы Стокса, которой он продолжал сочувствовать. Но огромный вертикальный интерферометр также дал отрицательные результаты. Теперь Майкельсон несомненно был скорее раздражен: «Кое-кто склоняется к возврату к гипотезе Френеля и стремится согласовать каким-то иным путем отрицательные результаты прежних экспериментов по обнаружению эфирного ветра»¹³.

Гораздо позднее, когда Майкельсон приступил к написанию «*Studies in Optics*», опубликованной в 1927 году, когда ему было 75 лет, он закончил главу «Влияние движения среды на скорость света» (проблема, на решение которой он затратил немало труда в своей жизни) вопросом, на который он все еще не мог дать ответа: «Однако следует допустить, что эти эксперименты не являются достаточно убедительными, чтобы оправдать гипотезу об эфире, увлекаемом Землей в ее движении. Но в таком случае, как можно объяснить отрицательные результаты?»¹⁴.

К этому времени появились два других выбора. В следующей главе Майкельсон впервые обратился к попытке Лоренца и Фитцджеральда объяснить «нулевой эффект предположением о сжатии материала опор для

¹² Transaction of the Royal Society, July, 1893, 184: 753. Как мы увидим, два года спустя Лоренц мог сослаться на два других давно известных измерения, которые также не были в согласии с предсказаниями эфирной теории.

¹³ Л. С в е н с о н. Цит. произв., стр. 205, где приводится ссылка на Майкельсона: American Journal of Science, 1897, 3: 478.

¹⁴ A. A. M i c h e l s o n. Studies in Optics. (Chicago: Univ. Chicago Press, 1927), стр. 155.

интерферометра, как раз достаточным, чтобы скомпенсировать теоретическую разницу в пути». Но он немедленно добавил: «Такая гипотеза кажется довольно искусственной»¹⁵. Отметим мимоходом пункт, который позднее примет такие угрожающие размеры, что даже этому физику-экспериментатору, наиболее сильно нуждающемуся в объяснении, гипотеза Лоренца — Фитцджеральда представляется «искусственной», или, если использовать терминологию других, выражавших те же возражения, слишком очевидной гипотезой *ad hoc*¹⁶.

Что касается другого объяснения, — входившего в теорию относительности Эйнштейна, — то Майкельсон, долгое время выступавший против нее, теперь, в 1927 году, предложил «великодушное одобрение» этой теории, несмотря на многие «парадоксальные» следствия. Но это не было искреннее одобрение, поскольку «существование эфира оказывалось несовместимым с этой теорией», что представлялось ему непреодолимым дефектом: «Следует надеяться, что теория может быть согласована с существованием среды либо путем модификации теории, либо, что более вероятно, путем приписывания необходимых свойств эфиру»¹⁷. В другом случае, также в 1927 году, Майкельсон в последней, опубликованной перед кончиной статье обращался к эфиру со следующими грустными словами: «Говоря в терминах излюбленного старого эфира (который теперь отвергается, хотя я лично все еще остаюсь ему верным)...»¹⁸

Если результат опыта Майкельсона представляется непостижимым на протяжении долгого времени (Свенсон показал, что он оставался неубедительным вплоть до 1920 года¹⁹), то теория относительности для большинства физиков казалась еще более непостижимой при ее выдвижении в 1905 году и в течение некоторого времени спустя. Запоздание признания теории относительности является предметом особого исследования. Прошло несколько лет,

¹⁵ A. A. Michelson. *Studies in Optics*. (Chicago: Univ. Chicago Press, 1927), стр. 156.

¹⁶ Более того, как это было вскоре понято, контракция Лоренца — Фитцджеральда ни в коем случае не была достаточной, чтобы обеспечить необходимую релятивистскую основу электромагнитных явлений. Мы вернемся к этому вопросу в должном месте.

¹⁷ Там же, стр. 161.

¹⁸ Conference on the Michelson — Morley Experiment, стр. 342.

¹⁹ *The Ethereal Aether*.

прежде чем можно было сказать, что даже у немецких ученых стало преобладать мнение в пользу этой теории. Поворотным пунктом, по-видимому, явилась публикация в 1909 году речи Минковского «Raum und Zeit»²⁰. В самом деле, самым первым откликом ученого мира на статью Эйнштейна по теории относительности было опубликованное в том же журнале категорическое экспериментальное опровержение этой теории В. Кауфманом²¹. В течение нескольких лет после первой публикации Эйнштейна не было получено никаких новых экспериментальных результатов, которые можно было бы использовать для «подтверждения» его теории и с которыми считалось бы большинство физиков; только в 1915 году было показано, что экспериментальная установка Кауфмана была дефектной. Как отметил Макс Планк в 1907 году, опыт Майкельсона тогда еще рассматривался как единственная экспериментальная опора²². Дальновидный физик В. Вин заблаговременно опубликовал свое несогласие с теорией относительности, в справедливости которой он не был убежден вплоть до 1909 года; последующее же признание было связано не с каким-либо определенным экспериментальным доказательством, а скорее с эстетическими соображениями, выраженными в словах, которые Эйнштейн должен был оценить: «Однако, что больше всего говорит в пользу теории, так это внутренняя согласованность, которая позволяет заложить непротиворечивый фундамент, относящийся ко всей совокупности физических явлений, хотя при этом привычные представления испытывают трансформацию»²³.

²⁰ Phys. Zs., 10, 104, 1909. (Русск. перевод опубликован: 1) Сб. «Классики естествознания. Принцип относительности». ОНТИ, 1936; 2) Усп. физ. наук, 69, в. 2, 1959).

²¹ G. H o l t o n. On the Origins of the Special Theory of Relativity.— Am. J. Phys., 1960, 28: 634. (Русск. перевод: «Эйнштейновский сборник, 1966». Изд-во «Наука», 1966).

²² M. P l a n c k. Zur Dynamik bewegter Systeme.— Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Berlin, 1907, 29: 542.

²³ W. W i e n. Über Elektronen. (2nd ed., Leipzig: Teubner, 1909), стр. 32. Я благодарю С. Голдберга за то, что он обратил мое внимание на эту и предыдущую ссылки. Подобные же ссылки приведены также в полезной статье К. Ф. Шефнера. The Lorentz Electron Theory and Relativity (в печати), которого я благодарю за препринт его статьи, полученной незадолго до завершения этой работы.

Макс Лауэ в своем учебнике по теории относительности в 1911

Поэтому при обзоре прошлого кажется неизбежным то, что произошло на протяжении десятилетия, следующего за опубликованием статьи Эйнштейна 1905 года, — особенно в дидактической литературе, — а именно, взаимно полезное соединение загадочного эксперимента Майкельсона и почти неправдоподобной теории относительности. Можно было думать, что однозначный результат опытов Майкельсона является экспериментальной основой для понимания теории относительности, которая в противном случае казалась противоречащей здравому смыслу. В свою очередь, теория относительности могла объяснить результат опыта Майкельсона не так «искусственно» или не *ad hoc*, как это явно ощущалось в предложенной Лоренцом и Фитцджеральдом гипотезе сжатия. Это обеспечило их долговременный союз.

III. Подразумеваемая история в дидактических трудах

Взгляд на побочный материал — на ту «систему отсчета», в которой каждый получает свою первую ориентацию, — покажет нам, как связывались работы Эйнштейна и Майкельсона и каковы были дополнительные педагогические основания этой тенденции.

году еще должен был признать, что «экспериментальное решение в пользу теории Лоренца или теории относительности фактически не было получено, и то, что первая отошла на задний план, главным образом обязано тому факту, что эта теория нуждается еще в большем и простом универсальном принципе, обладание которым с самого начала придает теории относительности внушительный вид» (*Das Relativitätsprinzip*. Braunschweig: Vieweg, 1911, стр. 19—20). И мы скоро увидим, сколь краток был данный самим Эйнштейном перечень результатов, достигнутый теорией относительности до 1915 года.

Окончательно специальная теория относительности была принята во всем ученом мире как фундаментальная часть физики благодаря событиям, вышедшим далеко за рамки самой статьи Эйнштейна 1905 года. Прежде всего среди этих событий были такие *экспериментальные* достижения, как экспедиция по исследованию затмения в 1919 году, приведшая к успешной проверке предсказаний общей теории относительности, применение релятивистских расчетов для объяснения тонкой структуры спектральных линий, эффекта Комптона и т. д. Тем временем для интересующейся публики и для многих физиков результат Майкельсона оставался той опорой, которая поддерживала теорию относительности, особенно перед лицом ее вызывающих парадоксов и иконоборствующих требований.

Еще задолго до того, как мы смогли прочесть специальную литературу того же рода, как и та, в которой опубликовано утверждающее мнение Милликена, многим из нас первые учебные курсы уже сообщили о том, какие отношения существовали по общему мнению между экспериментами Майкельсона и теорией Эйнштейна. Конечно, обучать истории науки или даже подразумевать ее в неявном виде не является задачей обычных учебников по физике, но они все же это делают с самыми лучшими намерениями. В результате существует широко распространенная, популярная, «подразумеваемая» история науки. Фактически, поскольку лишь немногие студенты берут bona fide * курсы по истории науки, подразумеваемая история является версией, наиболее распространенной; в силу ее распространенности, она, в свою очередь, является той версией, которая успешно служит будущим историкам в качестве оправдания.

По вопросу, который здесь обсуждается (как и по многим другим), учебники, по существу, единодушны. Взяв с книжной полки практически наугад какую-нибудь из современных книг, мы найдем в ней такое же типичное изложение, какое содержится в превосходном учебнике Роберта Лейтона «Principles of Modern Physics». Эта книга начинает изложение теории относительности в первой главе, описывает опыт Майкельсона — Морли в разделе 1 и находит, что «в конце концов Эйнштейн предложил радикально отличающийся подход к проблеме, поставленной экспериментом Майкельсона — Морли. Он объяснил его нулевой результат просто обращением к принципу относительности...»²¹. Многие утверждения с тем же самым подтекстом легко можно найти в других учебниках, включая и мои любимые²⁵.

* По доброй воле (лат.) (*Прим. перев.*).

²⁴ R. B. L e i g h t o n. Principle of Modern Physics. (New York: McGraw-Hill, 1959), стр. 5: курсив наш.

²⁵ «[Эксперимент Майкельсона — Морли] был одним из самых замечательных в девятнадцатом веке. Простой по своему принципу, этот эксперимент привел к научной революции с далеко идущими следствиями». Charles Kittel, Walter D. Knight and Melvin A. Ruderman. Mechanics. (New York: McGraw-Hill, 1965), стр. 332; курсив наш.

«Как упоминалось выше, были сделаны попытки определить абсолютную скорость Земли сквозь гипотетический «эфир», ко-

Хотя ни один из этих авторов фактически не связывал себя однозначно формулировкой о причине и действии, отрывки создают общее впечатление, что была непосредственная генетическая связь. Почему это так? Простейшая гипотеза состояла бы в том, что такова была истина. Но даже прежде чем мы проверим эту возможность, мы должны отметить два подозрительных обстоятельства. В первую очередь эксперименты Майкельсона не влекут за собой с необходимостью теории относительности Эйнштейна. В своей тщательной обзорной статье «Postulat versus Observation in the Special Theory of Relativity»

торый, как предполагалось, заполнял собой все пространство. Наиболее известный из этих экспериментов был выполнен Майкельсоном и Морли в 1887 году. Прошло 18 лет, прежде чем отрицательные результаты этого эксперимента были объяснены Эйнштейном». Richard Feynman, Robert B. Leighton and Matthew Sands. The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1. (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1963), p. 15.

«Майкельсон и Морли обнаружили, что скорость Земли в пространстве не влияет на скорость света относительно их. Вывод ясен, либо Земля как-то движется сквозь пространство, наполненное эфиром, медленнее, чем она движется вокруг Солнца, либо все наблюдатели должны установить, что их движение в пространстве не влияет на скорость света относительно их. Упомянутый вывод был ясен, по крайней мере для Эйнштейна, который знал о «неудачных попытках обнаружить какое-либо движение Земли относительно «световой среды». James A. Richards, Frances W. Sears, M. Russell Wehr and Mark W. Zemansky. Modern College Physics. (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1962), стр. 769; курсив наш.

«После некоторого периода приспособления и размышления, протекавших с различной степенью успеха, этот знаменитый экспериментальный результат [Майкельсона и Морли] привел к более всеобъемлющему постулату, одной из основных опор теории относительности Эйнштейна». G. Holton. Introduction to Concepts and Theories of Physical Science. (Cambridge, Mass.: Addison-Wesley, 1952), стр. 506; курсив наш.

Мы не должны забывать, что некоторые авторы учебников, хотя они и в меньшинстве, не имеют в виду генетическую связь между экспериментами Майкельсона и теорией относительности Эйнштейна, а немногие даже специально отрицают такую связь. Примерами этого меньшинства являются: R. B. Lindsay and H. Margenau. Foundations of Physics. (New York: John Wiley, 1936); R. A. Tricker. The Assessment of Scientific Speculation. (London: Mills & Boon, 1965); A. P. French. Special Relativity. (New York: Norton, 1968), и R. Resnick. Introduction to Special Relativity. (New York: John Wiley, 1968).

Робертсон пишет: «Кинематическая предпосылка для этой теории — операциональное истолкование преобразования Лоренца — была получена Эйнштейном дедуктивно из общего постулата, касающегося относительности движения, и более специфического постулата, касающегося скорости света. Когда эта работа выполнялась, индуктивный подход не мог однозначно привести к предложенной теории, ибо основные, относящиеся к делу наблюдения, имевшиеся в то время в распоряжении физиков, особенно эксперимент Майкельсона и Морли по обнаружению «эфирного ветра», могли быть объяснены и другими, хотя и менее привлекательными путями»²⁶.

Второй пункт состоит в том, что в учебнике трудно излагать когда-то данное обоснование того, что подразумевается под генетической связью; а при отсутствии ясного обоснования того или иного пути а priori велика вероятность того, что в педагогическом изложении любого предмета науки будет внушаться мысль о наличии генетической связи, ведущей от эксперимента к теории. Почти каждый учебник по необходимости придает большое значение ясной, недвусмысленной индуктивной аргументации. Если бы учебник иногда допускал возможность корректных обобщений и без опоры на такое однозначное экспериментальное обоснование, то вся система преподавания была бы поставлена под угрозу.

Более того, в учебнике или в обзорном курсе, в которых должен быть изложен большой материал, вероятнее всего (по причинам объема или каким-либо другим) автор выберет один подходящий эксперимент, который может быть убедительно представлен, а не ряд различных экспериментов, которые с исторической точки зрения являются такими же хорошими или даже лучшими аргументами. Конечно, драматическая особенность эксперимента Майкельсона увеличила его шансы как подходящего аргумента.

Но в случае теории относительности у автора дидактического очерка есть еще дополнительный мотив — сократить период сомнений в научной среде, который последовал за публикацией Эйнштейна в 1905 году. Можно было ожидать, что студент легче воспримет такую выходящую за рамки обычных представлений теорию, как

²⁶ Rev. Mod. Phys., 1949, 21; 378.

теория Эйнштейна, если он увидит, что Эйнштейн, или по крайней мере читатели Эйнштейна, убедились в ее справедливости благодаря некоторому четкому эксперименту.

Поэтому в учебниках мало говорится о временах драматической борьбе, которая иногда требовалась для постепенного принятия новой теории. Этот недостаток хорошо согласуется с другой, моральной функцией учебников, которая заключается в том, чтобы умышленно ослабить роль личных побуждений и борьбы при выполнении ученым его научной работы; это помогает подвести студента к тому, что автор учебника, возможно, бессознательно, обычно понимает под общепринятыми нормами профессионального поведения.

Авторы учебников, вероятно, не могут и определенно не хотят иметь дела с личным аспектом в развитии науки, аспектом, который может сильно различаться от одного ученого к другому и который в любом случае очень далек от полного понимания. Оказывается проще иметь дело с общественным аспектом науки, относительно которого существует некоторое (хотя, возможно, и ложное) согласие. Внимание историка привлекают элементы, которые позволяют изучать классический случай различия между личным и общественным аспектами науки, или вопрос об относительной роли теории и эксперимента в современном научном новаторстве, или квазиэстетические критерии для выбора между конкурирующими системами понятий, охватывающих одни и те же «факты» различными способами. Но в учебниках все это уступает место другим, более простым целям.

Педагогическая полезность указания на эксперимент Майкельсона как на специфический исходный пункт для теории относительности в немногих случаях была сформулирована правильно. Так, в книге «Duration and Simultaneity», в главе 1 «Неполная относительность» Анри Бергсон пишет следующее:

«Теория относительности, даже «специальная», говоря строго, не основана на результате эксперимента Майкельсона—Морли, так как она выражает в самой общей форме необходимость сохранения постоянной формы для законов электромагнетизма при переходе от одной системы отсчета к другой. Но эксперимент Майкельсона—Морли имеет большое преимущество, так как,

формулируя эту проблему на конкретном языке, он тем самым расширяет ее значение в наших собственных глазах. Он, так сказать, материализует [претворяет в жизнь] трудности. Философ должен от нее отпавляться; к ней он будет непрерывно возвращаться, если он желает осознать истинный смысл времени в теории относительности»²⁷.

В защиту авторов учебников следует указать, что они редко противоречат тому, что выражают сами выдающиеся ученые в своих собственных популярных и дидактических работах. В этом случае среди физиков было такое же поразительное согласие, как и среди авторов учебников, — они следуют мнению Милликена. Более ранний пример физика, который был также и автором первого серьезного учебника по теории относительности (1911), являет Макс фон Лауэ, который дает такую оценку:

«Однако отрицательный результат опыта Майкельсона вынудил перейти [от лоренцовской теории инертного эфира] к новой гипотезе, приведшей к теории относительности. Таким образом, этот эксперимент стал, как это и было, фундаментальным экспериментом для теории относительности именно потому, что, отправляясь от него

²⁷ Henri Bergson. Duration and Simultaneity (в оригинале — *Durée et Simultanéité*, Paris, Alsin, 1922; перевод напечатан: New York: Bobbs-Merrill, 1965), стр. 9; курсив наш. Заметим, что здесь, как и в приведенной выше цитате из труда Лауэ, слишком большое значение приписывается тому, что уравнения преобразования могут быть выведены из эксперимента. Но эти отрывки были написаны до получения результатов опытов Кеннеди — Торндайка (1932) и Айвса — Стивелла (1938).

Другая правдивая оценка полезности обрисованного подхода Бергсона дана в книге: Mary B. Hesse. Forces and Fields. The Concept of Action at a Distance in the History of Physics. (London: Thomas Nelson, 1961), стр. 226: «В качестве экспериментальной базы специальной теории относительности обычно указывается эксперимент Майкельсона — Морли. Но он не был единственным экспериментом, обосновывающим наиболее удобное объяснение на языке этой теории, потому что были и другие, относящиеся к оптическим и электромагнитным свойствам движущихся тел, которые вели в том же направлении, но так как эксперимент Майкельсона — Морли наиболее известен и сравнительно прост, то его удобно использовать для анализа логической структуры этой теории».

См. также: E. Meyerson. La Deduction Relativiste. (Paris: Payot 1924), стр. 110—113 и E. Cassirer. Einstein's Theory of Relativity in Substance and Function, and Einstein's Theory of Relativity. (New York: Dover, 1953), стр. 375.

[этого эксперимента], почти непосредственно получают вывод преобразований Лоренца, которые содержат принцип относительности»²⁸.

Самое замечательное то, что сам Эйнштейн в своих откровенно дидактических публикациях оставлял у некоторых своих читателей подобное же впечатление об отношении своей теории к работе Майкельсона. Например, в своей ранней *gemeinverständlich* (общедоступной, популярной) книге «Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie» дается изложение, которое стало обычным для учебников:

«Приходилось предполагать, что такой эфирный ветер должен существовать и относительно Земли, и физики стремились обнаружить этот ветер. Майкельсон нашел для этого путь, который, казалось, должен был привести к цели... К большому смущению физиков, эксперимент дал отрицательный результат. Лоренц и Фитцджеральд вывели теорию из этого затруднительного положения, предположив, что движение тела относительно эфира вызывает сокращение тела в направлении движения... Но истолкование, предлагаемое теорией относительности, несравненно более удовлетворительно»²⁹.

²⁸ Von L a u e. Das Relativitätsprinzip, стр. 13 (все переводы из немецких источников выполнены автором, если нет иных указаний).

Другой характерный пример дает Артур Холли Комптон, лауреат Нобелевской премии и бывший коллега Майкельсона: «Этот эксперимент более чем что-либо другое явился поводом для развития теории относительности...» Цитировано по книге: Marjorie Johnston, ed. The Cosmos of Arthur Holly Compton. (New York: A. A. Knopf, 1937), стр. 196, из обзора, впервые опубликованного в 1937 г.).

²⁹ Albert E i n s t e i n. Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie. (Braunschweig: Vieweg, 1917). [См.: Альберт Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. I, стр. 557].

Более раннее обсуждение этих проблем содержалось в работе Эйнштейна «Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen», опубликованной в 1908 году в «Jahrbuch der Radiaktivität und Elektronik», 4 : 411—462 [см.: А. Эйнштейн. Собр. научн. трудов, т. I, стр. 65—114]. Сначала статья была заказана издателем журнала, Дж. Штарком; предполагалось, что она будет обзорной. Статья не содержала точного исторического очерка. Эйнштейн говорит: «Ниже делается попытка свести в единое целое [zu einem Ganzen] работы, которые возникли до настоящего времени путем объеди-

В то время Эйнштейн не мог что-либо сказать о своем собственном историческом пути, и его ссылки на эксперимент Майкельсона в этой и в других дидактических работах в течение первого десятилетия теории относительности не могли ни повлиять, ни подкрепить дидактические сочинения других. Это влияние сказалось даже после совершенно иных, явно исторических высказываний, обсуждаемых позднее.

Одной из наиболее интересных ранних работ Эйнштейна, которая иногда цитировалась как исторический документ, доказывающий влияние эксперимента Майкельсона, является его статья «Теория относительности» в сборнике, состоящем из тридцати шести обзоров выдающихся физиков, имевшем целью отразить «состояние физики в наше время»³⁰. Эйнштейн начинает эту статью так: «Вряд ли можно выработать самостоятельное суждение о правильности теории относительности, не познакомившись хотя бы вкратце с опытами и идеями, предшествовавшими этой теории. Поэтому с них и надо здесь начинать». Затем следует обсуждение опыта Физо, приведшего к теории Лоренца, базирующейся на гипотезе инерт-

нения теории Лоренца и принципа относительности..., при этом я следовал работам Лоренца (1904) и своей (1905)». Здесь мы снова находим последовательность формулировок, которую можно рассматривать как то, под чем подразумевают историю:

«Однако отрицательный результат опытов Майкельсона и Морли показал, что по крайней мере в этом случае отсутствует также эффект второго порядка (пропорциональный v^2/c^2), хотя, согласно основам теории Лоренца, он должен был бы проявиться на опыте. Известно, что это противоречие между теорией и опытом формально было устранено гипотезой Г. А. Лоренца и Фитцджеральда, согласно которой движущиеся тела испытывают определенное сокращение в направлении своего движения. Но эта гипотеза, введенная *ad hoc*, кажется всего лишь искусственным средством спасения теории».

Продолжая далее, в еще нейтральном и пассивном тоне, Эйнштейн говорит, что «неожиданно» оказалось, что для преодоления трудности необходимо достаточно точно сформулировать понятие времени, т. е. осознать, что введенная Лоренцем вспомогательная величина *Ortszeit* (местное время) должна быть определена как само время. Только идея о световом эфире должна быть отброшена.

³⁰ *Die Physik*. Ed. E. Warburg. (Leipzig: Teubner, 1915), стр 703—713 (А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. I, стр. 410—424).

ного эфира. Несмотря на успех «одна сторона этой теории не могла не вызвать подозрения среди физиков»³¹. Кажалось, что она противоречит принципу относительности, справедливому в механике, а также, «насколько простирается наш опыт, вообще» — за пределами механики. Согласно этому принципу, все инерциальные системы равноправны. Но не так в теории Лоренца: система, покоящаяся относительно эфира, имеет специфические свойства, например, скорость света постоянна только относительно этой единственной системы. «Успехи теории Лоренца были настолько большими, что физики, не задумываясь, отказались бы от принципа относительности, если бы не был получен один важный результат, о котором мы должны теперь сказать, а именно, результат опыта Майкельсона». Далее следует описание этого опыта и противоречивой гипотезы сжатия, привлеченной Лоренцом и Фитцджеральдом. К этому Эйнштейн резко добавляет: «Способ действия, когда добиваются согласия теории с отрицательным результатом эксперимента с помощью выдвинутой специально для этого гипотезы, выглядит крайне неестественным»³². Предпочтительно придерживаться принципа относительности и признать принципиальную невозможность обнаружения относительного движения *. Но как же в конце концов совместить принцип постоянства скорости света с принципом относительности? «Однако каждый, кто попытался бы заменить теорию Лоренца какой-либо другой теорией, удовлетворяющей экспериментальным фактам, должен был бы признать, что это занятие при современном состоянии наших знаний является абсолютно бесперспективным»³³.

Скорее, продолжает Эйнштейн, можно согласовать эти два кажущихся противоречивыми принципа, пересмотрев понятия пространства и времени и отказавшись от эфира. Остальная часть краткой статьи Эйнштейна касается введения относительности одновременности и времени, уравнений преобразований и измерений длины стержня, движущегося по отношению к наблюдателю.

³¹ Там же, стр. 705. [Русск. изд., стр. 414].

³² Там же, стр. 707. [Русск. изд., стр. 415].

* По-видимому, здесь описка: речь идет о невозможности обнаружения движения Земли относительно эфира, т. е. об абсолютном ее движении. (Прим. перев.).

³³ Там же, стр. 707—708. [Русск. изд., стр. 415—416].

«Легко видеть, что упомянутая выше гипотеза Г. А. Лоренца и Фитцджеральда, выдвинутая для объяснения опыта Майкельсона, получается как следствие теории относительности»³⁴. Однако этот результат оказывается не настолько ценным, чтобы считать его одним из достижений теории относительности, которые суммированы ниже: «Перечислим кратко отдельные результаты, полученные до настоящего времени благодаря теории относительности». Как и в 1915 году, список не был длинным: «простая теория» эффекта Доплера, аберрации, эксперимента Физо; возможность применения уравнений Максвелла к электродинамике движущихся тел, и, в частности, к движению электронов (катодные, или β -лучи) «без привлечения особых дополнительных гипотез» и «важнейший результат» — связь между массой и энергией, хотя для нее в то время еще не существовало прямого экспериментального подтверждения.

Такая последовательность идей в этом обзоре имеет характер разъяснения. Но весьма опасно цитировать только два вводных предложения и упоминание эксперимента Майкельсона и называть это «исторической оценкой», как это делают, чтобы намекнуть на то, что Эйнштейн сам следовал этому пути. Очерк в целом представлен как некое «оправдание» теории относительности и не обсуждает вопроса о ее происхождении. Эйнштейн говорит, что «физики», а не сам Эйнштейн, отказались бы от принципа относительности, если бы не опыт Майкельсона. Антони Руган из Чикагского университета в неопубликованном наброске обзора так комментирует этот отрывок: «Обычное толкование этого текста таково, что Эйнштейн считал эксперимент Майкельсона и Морли необходимым аргументом, чтобы убедить большинство физиков в справедливости теории относительности. Это совершенно отличается от рассмотрения его как базы для личного открытия им самим ключа к теории относительности»³⁵.

³⁴ Там же, стр. 712. [Русск. изд., стр. 420].

³⁵ A. R u h a n, частное сообщение, рукопись, стр. 138. Существуют другие рассуждения того же типа в рукописях и статьях Эйнштейна. Интересно заглянуть в записную книжку Эйнштейна, в которой он набрасывал конспекты лекций по теории относительности, читанных в Берлине, и особое внимание обратить на использование им экспериментов. Эти конспекты, озаглавленные

Подводя итог проведенному до сих пор обсуждению, мы отметили сильные давления в одном и том же направлении, исходящие из двух главных источников: 1) специфической истории, связанной с трудностями принятия результатов Майкельсона и публикации Эйнштейна, и 2) специфической миссии педагогического характера, поддержанной популярными писаниями различных физиков. Эти давления стремились к одному и тому же результату — объявить существование генетической связи между работами Майкельсона и Эйнштейна.

Конечно, мы пока не доказали, существует ли такая историческая связь или нет. Чтобы это сделать, мы должны будем найти в разделе V ответ в документах, более подходящих, чем дидактические сочинения. Но

«Relativitäts Vorlesungen, Winter 1914—1915» (ныне хранятся в архиве Эйнштейна в Институте перспективных исследований (The Institute for Advanced Study в Принстоне), были составлены почти в то же время, как и его статья в книге *Die Physik*, и структура их одинакова. Опыты Физо и аберрация упомянуты на первых страницах записной книжки, а позднее подробно описываются и приводятся «Erfahrungs—Resultat» (результаты опытов). Затем упоминается опыт Майкельсона, который сопровождается замечанием: «Оказывается неверным. Вводится укорочение в направлении движения. Неудовлетворительно, ибо это — гипотеза *ad hoc*».

По другому поводу педагогического характера, в лекции «О теории относительности», прочитанной в Королевском колледже в Лондоне в 1921 году, Эйнштейн сказал:

«... Мне хотелось бы подчеркнуть тот факт, что эта теория возникла не умозрительным путем, а в результате стремления как можно лучше удовлетворить данным опыта... Закон постоянства скорости света в пустоте, подтвержденный развитием электродинамики и оптики, вместе с равноправностью всех инерционных систем отсчета (специальный принцип относительности), с особой резкостью подчеркнутый в известном опыте Майкельсона, привел прежде всего к тому, что понятию времени пришлось придать относительный смысл, причем каждой инерциальной системе должно соответствовать свое особое время» (*Ideas and Opinions*, New York: Crown Publishers, 1954, стр. 246) [см.: А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. II, стр. 109].

Эта лекция была прочитана в конце того периода, в котором Эйнштейн все еще пользовался языком эмпирической интерпретации науки, и как раз накануне посмертной публикации маховских атак на теорию относительности, которая привела к поворотному пункту в работах Эйнштейна. Я рассматривал этот поворот, включая также и позицию, занятую им в его лекции, в статье «Mach, Einstein, and the Search for Reality», *Daedalus*, 1968, 97: 649—650.

прежде чем мы обратимся к таким документам и к подлинно историческим сочинениям, мы должны будем, по крайней мере кратко, отметить другой ряд влияний на решение стоящего перед нами вопроса: речь идет о влиянии философских взглядов на науку в целом, которых придерживается шумливая группа философов в Соединенных Штатах и в Европе, и широкое течение, особенно после побед эмпирических школ на пороге нашего века.

IV. Экспериментистская философия науки

Существует взгляд, будто в науке огромное преимущество имеют традиции эмпиризма, взгляд, который, за неимением лучшего названия, будет назван здесь *экспериментизмом*. Его самой характерной чертой является признание безусловной главенствующей роли экспериментов и экспериментальных данных при анализе того, каким образом ученые выполняют свою собственную работу и как их работа совмещается с общественным проявлением науки. Несколько примеров будет достаточно, чтобы показать широкую распространенность такой позиции. С особым упором на теорию относительности ее хорошо показал последователь Эрнста Маха Иосиф Петцольд, идейный руководитель «Gesellschaft für positivistische Philosophie» в Берлине и его журнала «Zeitschrift für positivistische Philosophie».

В качестве вводной статьи первого выпуска журнала (1, 1913) он напечатал текст речи, которую произнес 11 ноября 1912 года при открытии сессии Общества. Он сказал, что вместе с теорией относительности пришла «победа над метафизикой абсолютов в понятиях пространства и времени» и произошло «слияние математики и естественных наук, которое, наконец, бесповоротно уводит от старых рационалистических платано-кантианских предрассудков»³⁶. А отправным пунктом, от которого произошел этот желанный поворот событий, снова был указан опыт Майкельсона:

«Ясность мышления неотделима от знания достаточного числа индивидуальных случаев для каждого из понятий,

³⁶ J. P e t z o l d t. Positivistische Philosophie.— Zeitschrift für positivistische Philosophie, 1913, 1: 3—4.

которые используются в исследовании. Поэтому главное требование позитивистской философии — это величайшее уважение к фактам. Типичным примером может служить новейшая фаза теоретической физики. В ней *ради единственного эксперимента* была без колебаний принята полная реконструкция. Опыт Майкельсона является причиной и главной опорой этой реконструкции, т. е. электродинамической теории относительности. Чтобы объяснить этот опыт, без всяких сомнений подвергают глубокому преобразованию ту основу теоретической физики, которая существовала до сих пор, а именно, механику Ньютона»³⁷.

Настоящая враждебность и претенциозность этой группы проявились еще раз в следующем томе за 1914 год, в котором Петцольд писал: «Теория Лоренца по своей концепции является чисто метафизической и ничем не отличается от *натурфилософии* Шеллинга или Гегеля». Снова опыт Майкельсона упоминается как один-единственный эксперимент, которому доверяется быть проводником в новую эру: «...Теория Эйнштейна всецело связана с результатом опыта Майкельсона и может быть выведена из него». Сам Эйнштейн «с самого начала воспринимал результат опыта Майкельсона с релятивистских позиций. Здесь мы имеем дело с принципом, основным постулатом, особым способом понимания физических фактов, взглядом на природу и, наконец, с *Weltanschauung** ... Философская концепция, развиваемая последовательно Беркли, Юмом и Махом, указывает нам наше направление и дает нам в руки образец эпистемологии»³⁸.

За несколько лет до этого, в 1907 году, Майкельсону была присуждена Нобелевская премия по физике «за точные оптические приборы и за исследования, которые он провел с их помощью в области точной метрологии и спектроскопии». Теория относительности была, конечно, еще слишком новой и считалась еще слишком умозрительной для того, чтобы быть упомянутой в перечислениях или в откликах; действительно, в то время, когда Пет-

³⁷ J. Petzoldt. *Positivistische Philosophie*. Z. posit. Phil., 1913, 1, стр. 8; курсив наш.

* Мирозрением [нем.].

³⁸ J. Petzoldt. *Z. posit. Phil.*, 1914, 2: 10—11.

цольд воздавал ей свою похвалу, теория стала слишком умозрительной для самого Маха. Нобелевский комитет не присуждал премии Эйнштейну вплоть до 1922 года, и затем, специально вспомнив о нем, Комитет присудил ему премию за вклад в развитие математической физики и особенно за открытие хорошо экспериментально подтвержденного закона фотоэлектрического эффекта³⁹. Во всяком случае теория относительности не привлекала внимания в те дни 1907 года. Как следовало из представления К. Б. Хассельберга, премирование Майкельсона было ясно мотивировано той же самой экспериментистской философией науки:

«Что касается физики, то она развивалась как замечательно точная наука: таким образом, справедливо утверждение, что большинство величайших открытий в физике в очень большой степени обязаны высокой точности измерений, которую можно достигнуть теперь при изучении физических явлений. Точность измерений — это тот самый корень, необходимое условие нашего более углубленного проникновения в законы физики — *наш единственный путь к новым открытиям*. Достижение именно такого рода Академия выдвигает на Нобелевскую премию этого года в область физики». (Курсив наш).

Почему-то все ухитрились хранить пристойное молчание об эксперименте, который Петцольд и другие его единомышленники вскоре после этого приветствовали как решающий поворотный пункт для физики и *Weltanschauung*. Никто здесь не упомянул об эксперименте Майкельсона по обнаружению эфирного ветра — ни шведские хозяева, ни сам Майкельсон в его ответной лекции («Recent Advances in Spectroscopy»). Тогда это был настолько же запутанный опыт для экспериментистов — сторонников эфирной теории, насколько позднее он сделался желанным для экспериментистов с релятивистскими убеждениями.

³⁹ Официальный документ Шведской королевской академии наук, датированный 10 декабря 1922 года, ныне хранящийся в архиве Эйнштейна, специально формулировал, что Академия «независимо от значения, которое может быть приписано теории относительности и гравитационной теории, после соответствующего подтверждения присуждает премию... Альберту Эйнштейну, имеющему большие заслуги в области теоретической физики, особенно за его открытие закона, относящегося к фотоэлектрическому эффекту».

Милликен в своей автобиографии защищал даже более крайний взгляд, будто весь прогресс науки возникает в результате применения приборов; в автобиографии он объяснял, что он перешел из Чикагского университета в Калифорнийский технологический институт по той причине, что «наука и инженерия слились в разумной пропорции». Милликен следующим образом излагал свой идеологический базис:

«Опираясь на историю, можно утверждать, что фундаментальный прогресс осуществлялся скорее как побочный результат инструментального (т. е. технического) усовершенствования, чем через непосредственные и сознательные поиски новых законов. Доказательства: 1) относительность и опыт Майкельсона—Морли, сначала появился интерферометр Майкельсона, а не наоборот; 2) спектроскоп, новый инструмент, создавший спектроскопию; 3) трехэлектродная вакуумная трубка, изобретение которой создало дюжину новых наук; 4) циклотрон, установка, которая вместе с линейным ускорителем Лоуренса породила ядерную физику; 5) камера Вильсона — источник большинства наших сведений о космических лучах; 6) работа Роуланда с дифракционными решетками подсказала идею об атоме Бора; 7) магнетрон — предшественник радара; 8) счетчик Гейгера — наиболее плодотворная из всех установок; 9) спектрогелиограф — творец астрофизики; 10) реверсивная паровая машина Карно связана со всей термодинамикой»⁴⁰.

В работах философов науки обсуждение теории относительности часто очень тесно связывается с опытом Майкельсона, хотя редко с большей восторженностью, чем это сделано в очерке Гастона Башеляра «The Philosophical Dialectic of the Concepts of Relativity» в сборнике, изданном П. А. Шилппом «Albert Einstein: Philosopher-Scientist».

«Как мы знаем, и как тысячу раз повторялось, относительность родилась из эпистемологического шокового состояния, она родилась из «неудачи» опыта Майкельсона... Перефразируя Канта, можно сказать, что благодаря опы-

⁴⁰ The Autobiography of Robert A. Millikan (New York: Prentice-Hall, 1950), стр. 219.

ту Майкельсона классическая механика пробудилась от догматического сна... Неужели так мало нужно, чтобы «поколебать» мир пространства? Мог ли единственный эксперимент двадцатого [sic!] века уничтожить — сартрианец сказал бы «néantiser»* — два или три века рационального мышления? Да, одной десятой достаточно, чтобы, как сказал бы наш поэт Анри де Ренье, «заставить природу петь»⁴¹. И так далее в том же духе. Эйнштейн предпочел не отвечать на этот апофеоз опыта Майкельсона в своем ответе на критику, который был опубликован в конце этого же сборника. Но он дает пространственный и тонко разящий ответ на другой очерк в этом сборнике, написанный Гансом Рейхенбахом с тех же позиций экспериментизма.

Рейхенбах, знавший Эйнштейна и одно время находившийся в переписке с ним, на протяжении многих лет был одним из наиболее упорных и интересных философов-аналитиков, выяснявших философское значение теории относительности (например, он опубликовал несколько попыток представить эту теорию в аксиоматической форме. Отзываясь на одну из этих попыток, Эйнштейн сказал, что он не находит ее убедительной, даже если исходить из собственной позиции; он писал Рейхенбаху 19 октября 1929 г.: «По моему мнению, то логическое представление, какое вы даете моей теории, конечно, возможно, но оно не является простейшим»). Но эмпирическая убежденность Рейхенбаха никогда не ослабевала. Например, он писал, что работа Эйнштейна «была отмечена сильнейшей приверженностью к экспериментальным фактам... Эйнштейн построил свою теорию на необычайном доверии к точности экспериментирования»⁴². Единственный исторический эксперимент, который Рейхенбах связывает с генезисом теории Эйнштейна, — это, конечно, опыт Майкельсона; так, он пишет: «Теория относительности высказывает некоторое утверждение о поведении твердых стержней и то же — о поведении часов... Это

* Обратить в ничто (франц.).

⁴¹ В сборнике П. А. Шилппа: Albert Einstein: Philosopher-Scientist. (Evanston Ill. : Library of Living Philosophers, 1949), стр. 566—568.

⁴² H. R e i c h e n b a c h. From Copernicus to Einstein (New York: Philosophical Library, 1942), стр. 51.

утверждение теории относительности основывается главным образом на эксперименте Майкельсона»⁴³.

В его очерке, который вошел в сборник Шилппа, Рейхенбах возвращается к тем же вопросам⁴⁴, однако они являются лишь прелюдией к выводу о том, что, «следовательно, теория относительности Эйнштейна принадлежит именно к философии эмпиризма... Несмотря на огромный математический аппарат, теория пространства и времени Эйнштейна является триумфом такого радикального эмпиризма в области, всегда считавшейся заповедной для открытий чистого разума»⁴⁵.

В своем ответе на этот очерк, помещенном в конце тома, Эйнштейн наибольшее внимание уделил опровержению этого утверждения. Он предпочел твердо придерживаться основного различия в понятиях «чувственные восприятия» и «чистые идеи» — несмотря на возможный упрек в том, что, «поступая таким образом, мы совершаем «первород-

⁴³ H. R e i c h e n b a c h. The Philosophy of Space and Time. (New York: Dover, 1957; перевод: Die Philosophie der Raum-Zeit Lehre. Berlin: Walter de Gruyter, 1928), стр. 195. В подстрочном замечании Рейхенбах добавляет, что это утверждение «не вытекает из одного только этого эксперимента», но никаких других он не указывает. Рейхенбах и его последователи вынуждены отвести большую роль опыту Майкельсона в предполагаемом развитии теории относительности отчасти в силу претензии, что эксперимент логически независим от теории:

«Высказывалось мнение, что сжатие одного плеча в установке является «гипотезой ad hoc», между тем как гипотеза Эйнштейна [о том, что в любой инерциальной системе оба плеча одинаковы по длине] естественно вытекает как следствие относительности одновременности. Оба эти объяснения неверны. Относительность одновременности не имеет отношения к сжатию в опыте Майкельсона, а теория Эйнштейна так же мало объясняет этот опыт, как и теория Лоренца...» (стр. 195—196).

«Было бы ошибочным доказывать, что теория Эйнштейна объясняет опыт Майкельсона, так как она этого не делает. Опыт Майкельсона просто принят за аксиому» (стр. 201).

Та же точка зрения повторяется А. Грюнбаумом, который пишет: «Задолго до объяснения отрицательного результата опыта Майкельсона — Морли Эйнштейн в своем освещении принципа принял его нулевой результат как физическую аксиому» («Logical and Philosophical Foundations of the Special Theory of Relativity» в книге: A. D a n t o and S. M o r g e n b e s s e r. Philosophy of Science (New York: Meridian Books, 1960), стр. 419).

⁴⁴ H. R e i c h e n b a c h. The Philosophical Significance of the Theory of Relativity. В сб. Шилппа Albert Einstein, например, стр. 301.

⁴⁵ Там же, стр. 309—310.

ный грех»⁴⁶. Эйнштейн ссылается на то, что нужно принять основные положения не только эмпиризма, но и рационализма, что «колебания между этими двумя крайностями оказываются неизбежными»⁴⁷. В воображаемом диалоге с Рейхенбахом он выступает в роли «не-позитивиста» и обращается к полезному уроку Канта о том, что существуют понятия, «которые играют в нашем мышлении доминирующую роль и которые тем не менее нельзя вывести посредством логического процесса из эмпирических данных (факт, который некоторые эмпирики хотя и признают, — но всегда вновь забывают)»⁴⁸.

⁴⁶ A. E i n s t e i n. Remarks concerning the Essays brought together in this Cooperative Volume [Reply to Criticisms], в сб. Шилппа, стр. 673.

⁴⁷ Там же, стр. 680.

⁴⁸ Там же, стр. 678. Несколькими страницами дальше Эйнштейн в незабываемом отрывке подводит итог своему эклектическому подходу:

«Замечательный характер имеет взаимосвязь, существующая между наукой и теорией познания. Они зависят друг от друга. Теория познания без соприкосновения с наукой вырождается в пустую схему. Наука без теории познания (насколько это вообще мыслимо) становится примитивной и путаной. Однако, если философу, занимающемуся поисками стройной системы, удастся разработать такую систему, он тотчас же начинает интерпретировать содержание науки в духе своей системы и отвергать все, что выходит за рамки этой системы. Ученый же не может позволить себе зайти столь далеко в своем стремлении к теоретико-познавательной систематике. Он с благодарностью принимает гносеологический анализ понятий, но внешние условия, поставленные перед ним опытными фактами, не позволяют ему чрезмерно ограничивать себя принадлежностью к некоторой философской системе при построении понятий. Поэтому в глазах последовательно мыслящего философа он предстает как оппортунист, бросающийся из одной крайности в другую. Как человек, пытающийся описать мир, не зависящий от актов восприятия, он кажется *реалистом*. Как человек, считающий понятия и теории свободными (не выводимыми логическим путем из эмпирических данных) творениями человеческого разума, он кажется *идеалистом*. Как человек, считающий свои понятия и теории обоснованными *лишь* в той степени, в какой они позволяют логически интерпретировать соотношения между чувственными восприятиями, он является *позитивистом*. Он может казаться точно так же и *платонистом* и *пифагорейцем*, ибо он считает логическую простоту непреложным и эффективным средством своих исследований» (стр. 683—684).

(К сносам 46, 47 и 48. См. русский перевод: Альберт Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. IV, стр. 301, 307, 306 и 310—311 соответственно. *Прим. перев.*).

Конечно, существует различие в научном вкусе или стиле. Для Рейхенбаха интерес к научной теории не сосредоточен ни на ее подробном историческом развитии, ни на работе реальной личности. Как честно признался Рейхенбах, «философа науки не очень интересуют те процессы в мышлении, которые приводят к научным открытиям; он стремится к логическому анализу завершенной теории, включая и те связи, которые устанавливают ее реальность. Иными словами, его интересует не самый ход открытия, а то, что оправдывает его»⁴⁹.

К сожалению, Рейхенбах и его последователи не всегда помнили о его похвальной попытке провести четкое различие между личным и общественным аспектами науки и не всегда оставались верными его мудрому отказу от интереса к процессу мышления, приводящему к открытию. Желание видеть теорию в виде логически завершенной структуры, которая возникает из эмпирических наблюдений и может быть подтверждена или опровергнута последующим экспериментом, в конце концов застывает их принять предполагаемую историческую последовательность на пути, ведущем к открытию. Так в конце концов создаются маловероятные истории, примером которых является история о том, что «Эйнштейн принял его [опыта Майкельсона] нулевой результат в качестве физической аксиомы в своем освещении принципа»⁵⁰, а также аналогичные попытки «разгадывания истории» теории относительности.

Когда экспериментистам указывают на прямые факты (мы приведем их ниже), которые свидетельствуют против того, что опыт Майкельсона имел приоритет и значение для мышления Эйнштейна, реакция оказывается следующей: без учета генетической роли этого особого эксперимента понимание факта возникновения теории стало бы «весьма проблематичным», и мы были бы «удивлены тем, что только логические (в отличие от психологических) основания, без какой-либо опоры на опыт Майкельсона—Морли, могли сразу убедить Эйнштейна в справедливости принципа относительности...»⁵¹

⁴⁹ H. R e i c h e n b a c h. The Philosophical Significance of the Theory of Relativity, стр. 292.

⁵⁰ A. G r ü n b a u m. Logical and Philosophical Foundations of the Special Theory of Relativity, стр. 419.

⁵¹ A. G r ü n b a u m. Philosophical Problems of Space and Time (New York: Knopf, 1963), стр. 380—381.

В качестве курьезного постскриптума к этому разделу можно было бы напомнить, что экспериментистское толкование относительности отстаивалось при совершенно иных обстоятельствах в 1920-х, но еще не самых мрачных годах; мы имеем в виду попытки некоторых немецких ученых, например В. Вина, указать на предполагаемый экспериментальный источник теории относительности с целью увести теорию от нападков опрометчивой возбужденной оппозиции в некоторых кругах Германии, направленных лично против Эйнштейна и против его работы ⁵². В книге, опубликованной в 1921 г., Вин писал, что он хотел «... дать объективное представление как за, так и против теории относительности, о которой широкая публика много рассуждает, однако далеко не научным образом. Я надеюсь обсудить эти вопросы *sine ira et studio* *, и я хотел бы посоветовать каждому, кто имеет отношение к теории относительности, не объявлять себя сторонником или противником этой теории, а рассматривать ее так, как это и соответствует науке, а именно, как один из способов открыть особенности законов природы, которые могут оказаться в равной мере как верными, так и ложными. Решение этого вопроса нельзя получить догматическим путем, его следует предоставить опыту» ⁵³.

Затем Вин убеждал своих читателей, что «теория относительности, подобно всем физическим теориям, является результатом опыта». Теперь нетрудно догадаться, о каком частном опыте пойдет речь: «Отрицательный результат эксперимента Майкельсона есть тот опытный факт, на котором покоится теория относительности. Этот эксперимент для этой теории имеет такое же значение,

⁵² Детали этого бурного периода (1921—1923) описаны в книге: P. F r a n k. Einstein: Sein Leben und seine Zeit. (Munich: Paul List, 1949), особенно в главах 7 и 8. (Вариант этой книги на немецком языке предпочтительнее гораздо менее подробного варианта на английском). Нацистской террористической группой в ходе подготовки путча 1923 года было даже опубликовано черносотенное заявление против теории относительности. Среди убитых ею был друг Эйнштейна Ратенау; Эйнштейну сообщили, что ему тоже грозит опасность, и он, естественно, покинул в это время Германию.

* Без гнева и пристрастия; без предвзятого мнения (лат.).

⁵³ W. W i e n. Die Relativitätstheorie vom Standpunkt der Physik und Erkenntnislehre. (Berlin: J. A. Barth, 1921), стр. 3.

как и перпетуум-мобиле для закона сохранения энергии...»⁵⁴ К сожалению, эта попытка опереть теорию относительности на эксперимент не получила достаточного одобрения, и не могла в период господства нацизма спасти теорию относительности от позора, когда ее называли в то время (и даже недавно, в 1954 г.) «формальным рационализмом еврейского мышления»⁵⁵.

У. Явно исторические обзоры

После того как мы увидели почти полное единодушие и самоуверенность, содержащиеся в учебниках и в гносеологических работах экспериментистов, мы подготовлены к тому, чтобы отметить большие расхождения и более осторожный подход в работах ученых, которые берутся писать явно исторические обзоры. Это в самом деле так; здесь гораздо меньше согласия. Существование целого спектра различно документированных исторических исследований само по себе есть интересная проблема.

Чтобы проанализировать этот спектр и приблизительно расположить работы в возрастающем порядке серьезности их именно как исторических исследований, мы можем исходить из труда «Мир атома», опубликованного в 1966 году. В кратких разделах, опирающихся в значительной степени на вторичный материал, дополненный выдержками из оригинальных статей, издатели стремились реализовать некоторую направляющую историческую линию. По интересующему нас вопросу мы находим здесь обычный комментарий, но теперь курьезно обставленный: «Наследие эксперимента Майкельсона — Морли для атомной теории было огромным, хотя и косвенным. Именно отрицательный результат этого эксперимента отчасти привел Эйнштейна к одной из фундаментальных идей, на которой покоится теория относительности, а именно, что скорость света одна и та же для всех наблюдателей, независимо от того, в каком движении они могут находиться»⁵⁶.

⁵⁴ Там же, стр. 7.

⁵⁵ Heinrich Lange. Geschichte der Grundlagen der Physik, В. I. (Freiburg/Munich: Karl Albert, 1954), стр. 301.

⁵⁶ Henry A. Boorse and Lloyd Motz, eds. The World of the Atom. (New York: Basic Books, 1966), стр. 373.

Другая оценка, оставляющая открытым вопрос о степени или непосредственности влияния, дана в полезной биографии «Michelson and the Speed of Light», написанной главным образом для студентов высшей школы автором удачного учебника и научно-популярных книг Бернардом Джеффом. Касаясь оригинальной работы по теории относительности, Джефф пишет, что Эйнштейн «считал, что результат опыта Майкельсона—Морли по обнаружению эфирного ветра совершенно правилен, так как никакого эфирного ветра при условиях эксперимента не следовало ожидать»⁵⁷. «В таком большом переломе в физике классический опыт Майкельсона по обнаружению эфирного ветра должен приобрести фундаментальное значение. Оспаривать, как это делают некоторые, что специальная теория относительности Эйнштейна по существу была обобщением опыта Майкельсона и что без этого опыта она не могла бы появиться, значит, преувеличивать эти доводы»⁵⁸.

Между прочим, в биографии Джеффа прозвучала, хотя и слабо, новая нотка, имеющая некоторое значение для понимания вопроса. Он пишет: «Как оказалось, Майкельсон представил сырой материал для построения большой науки, — синтез которой был выполнен за морем. Это был один из немногих примеров, когда основное открытие было сделано в Америке, а использовано оно в Европе. Почти всегда путь был обратным»⁵⁹. Несомненно, чувство гордости у американского ученого возросло, раз теория относительности стала принятой, благодаря тому, что его собственная работа рассматривается как источник теории относительности⁶⁰.

⁵⁷ B. J a f f e. Michelson and the Speed of Light. (Doubleday & Co, Inc., Garden City, New York, 1960), стр. 99. (см. перевод: Бернард Джефф. Майкельсон и скорость света, 1962).

⁵⁸ Там же, стр. 100. Джефф воспроизводит также письмо Эйнштейна, о котором мы расскажем позднее, когда покажем другие прямые ответы Эйнштейна на тот же вопрос.

⁵⁹ Там же, стр. 90.

⁶⁰ Майкельсон был первым американским физиком, удостоенным Нобелевской премии (в 1907 году единственным американским лауреатом был Теодор Рузвельт, получивший премию мира в 1906 году). Следующим американским физиком, удостоенным премии, был Милликен (1923 г.). Некоторые данные указывают, что присуждение Нобелевской премии Майкельсону имело для американской науки, с точки зрения роста ее самоуважения, почти

Более подробный анализ, сопровождаемый новой документацией, был дан на протяжении нескольких последних лет в серии проникновенных статей Шэнклендом, профессором физики в Case Western Reserve University (первоначально Case Institute of Technology, где эксперимент Майкельсона—Морли был повторен перед уходом Майкельсона сначала в Clark University, а затем, в 1894 году, в Чикагский университет). Особая заслуга Шэнкленда состоит в публикации им его переписки с Майкельсоном и его обзора бесед с Эйнштейном в 1950—1954 годах.

По тому важному вопросу, который мы обсуждаем, сочинения Шэнкленда обнаруживают развитие его точки зрения. Его самая ранняя статья представляет собой краткую заметку о Майкельсоне для сборника «Les Inventeurs célèbres — sciences physique et applications»⁶¹. Эта статья, озаглавленная «Expérience de base de la relativité», описывает эксперимент и теорию как тесно связанные, подобно тому, как это описывается в большинстве вышеприведенных версий⁶². В следующем обзоре Шэнкленда по этому предмету, появившемся спустя десяток лет, «Conversations with Albert Einstein», начинается появляться другой аспект этого вопроса. Его обзор основывается на пяти встречах с Эйнштейном в Принстоне; их беседы касались главным образом работы Майкельсона, особенно экспериментов Майкельсона—Морли и Миллера и позднейших исследований, приведших к объяснению результатов Миллера (в которых сам Шэнкленд принимал руководящее участие). Эта статья —

такое же значение, как это сделала Нобелевская премия по физике, присужденная Юкаве (1949 г.), для японской науки.

⁶¹ R. S. Shankland. Michelson 1852—1931, Expérience de base de la relativité. В сб. «Les Inventeurs célèbres—sciences physique et applications». (Paris: Lucien Mazénod, 1950), стр. 254—255.

⁶² Там же, стр. 255.

«Против всех ожиданий, окончательное наблюдение, выполненное в июле 1887 года, не позволило установить никакого ощущения о смещения интерференционных полос. Этот поразительный результат не был полностью оценен эпохой, но после пионерских работ Фитцджеральда и Г. А. Лоренца Эйнштейн обобщил его в своей грандиозной специальной теории относительности 1905 г., и опыт Майкельсона—Морли получил свое настоящее место, как один из решающих опытов в истории науки. Позднейшие повторения опыта подтвердили его результат и его значение для теории относительности». (Перев. с франц.).

ценный и богатый источник, в котором следует использовать все, что можно.

Почти в самом начале обзора Шэнкленда, идущего от первого лица, изложена основная причина его визита и ответ Эйнштейна, к которому нас ничто не подготовило из того, что мы читали раньше:

«Мой первый визит [4 февраля 1950 г.] к Эйнштейну в Принстон имел главной целью услышать от него о его действительном отношении к эксперименту Майкельсона—Морли и о том, в какой степени этот эксперимент влиял на него, когда он создавал специальную теорию относительности... Он начал с того, что просил меня напомнить о цели визита, и улыбнулся с истинным интересом, узнав, что я хотел бы обсудить опыт Майкельсона—Морли, выполненный в Кливленде в 1887 г. ... На мой вопрос, как он познакомился с опытом Майкельсона—Морли, он ответил, что узнал о нем из работ Г. А. Лоренца (Arch. Neerl., 2, 168 [1887] и многих более поздних), но он обратил на него внимание *только после* 1905 года! «В противном случае,— сказал он,— я упомянул бы о нем в своей статье». Продолжая мысль, он сказал, что экспериментальными результатами, которые оказали на него наибольшее влияние, были наблюдения звездной аберрации и изменения скорости света в движущейся воде, выполненные Физо. «Этих опытов было достаточно»,— сказал он»⁶³.

Возможно, Шэнкленд был очень удивлен отказом Эйнштейна признать прямую генетическую роль эксперимента Майкельсона—Морли в создании теории относительности. Как бы для того, чтобы убедиться в том, что он понял ответ должным образом, Шэнкленд разумно задал вопрос снова во время другого визита два с половиной года спустя, 24 октября 1952 года.

«Я спросил у Эйнштейна, где он впервые услышал о Майкельсоне и его опыте. Он ответил: «Это не так легко, я не могу с уверенностью сказать, когда я впервые узнал об опыте Майкельсона. У меня не было ощущения, что он непосредственно влиял на меня в течение семи лет, когда теория относительности была моей жизнью. Я предполагаю, что я воспринял его результат как нечто само

⁶³ R. S. Shankland. Conversations, стр. 47—48. Курсив в оригинале. [См. перевод: УФН, 87, 711, 1965].

собой разумеющееся». Однако Эйнштейн сказал, что в 1905—1909 годах он много думал о результате Майкельсона в ходе дискуссий, которые он вел с Лоренцом и другими, в своих размышлениях над общей теорией относительности. Тогда он ясно понимал (так он сказал мне), что результаты Майкельсона вошли в его сознание до 1905 года, отчасти благодаря чтению статей Лоренца, а больше потому, что он уже полагал, что этот результат Майкельсона должен быть верным»⁶⁴.

Оба эти утверждения должны быть сопоставлены. Их аутентичность нельзя преуменьшить. Приведенные выдержки, как и другие положения, высказанные в этих беседах, производят впечатление своей последовательностью и анализом Эйнштейна, так же, как и очевидным согласием и восхищением, с какими он думал об этом эксперименте и о Майкельсоне как личности. (Так, Шэнкленд сообщает, что он несколько раз сказал ему: «Я действительно любил Майкельсона»). Конечно, как под черкивает и сам Шэнкленд, многие события, обсуждавшиеся между ними, произошли почти за пятьдесят лет до их встречи. В то время, когда состоялись эти две беседы, Эйнштейн уже был в возрасте семидесяти одного и семидесяти трех лет, а в ходе другой беседы произошли два грустных эпизода — выяснилось, что его память не служила ему с абсолютной точностью (Шэнкленд сообщает, что Эйнштейн забыл о речи, которую он произнес в Берлине в 1931 году по поводу смерти Майкельсона, а также о работе Иооса). Но было бы слишком непросто отделаться от повторных прямых ответов Шэнкленду по предмету, о котором на протяжении всей жизни Эйнштейн имел поводы размышлять, писать, читать лекции и о которых ему, несомненно, часто задавали вопросы.

Тот факт, что этот ответ так противоречит практически всем другим оценкам, делает обязательным пересмотр всего вопроса в целом, чтобы согласовать утверждения Эйнштейна: 1) что эксперимент Майкельсона занимал его внимание только после 1905 года (хотя он был осведомлен о его результате раньше); 2) что другие, более ранние эксперименты по исследованию звездной абберрации и определению френелевского коэффициента увлечения эфира образуют наиболее важную эксперименталь-

⁶⁴ Там же, стр. 55.

ную базу для его статьи 1905 года и 3) что Эйнштейн был осведомлен о результате Майкельсона из статьи Лоренца, но этот результат явно не произвел на него особого впечатления потому, что он и по другим основаниям допускал его справедливость.

Мы увидим, насколько ответ Эйнштейна согласуется с самой его статьей 1905 года, внимательно прочитанной, и со всеми другими относящимися к делу сообщениями и документами Эйнштейна, которые я был в состоянии отыскать. Но уже из сравнения приведенных выше самоуверенных заявлений ясно, что ответы Эйнштейна смутны и неопределенны. Это выглядит так, как если бы мы имели заранее подготовленную урну с ограниченными ответами «да» или «нет», и, наконец, когда допрашиваемое лицо окончательно запуталось, мы получили неожиданный ответ «Никогда! Это не так происходило, и во всяком случае это не было для меня действительно важным вопросом». Ответы Эйнштейна создают определенное впечатление, что обсуждаемый вопрос может быть тривиальным или не относящимся к делу для него, и в то же время важным для нас или Шэнкланда, который предпринял серию визитов к Эйнштейну с «главной целью услышать от него о его действительном отношении к эксперименту Майкельсона — Морли...». Вдвойне иронически звучит вывод, что ни Майкельсон, ни Эйнштейн не считали знаменитый эксперимент для себя «решающим», чтобы не сказать «критическим».

В двух более поздних статьях Шэнклэнд занял такую позицию, что проблема, поставленная опытом Майкельсона — Морли, «непосредственно привела к специальной теории относительности Эйнштейна»⁶⁵ и что «оба постулата [в статье 1905 года], конечно, можно рассматривать как тесно связанные с опытом Майкельсона — Морли, но фактически Эйнштейн добился успеха в своей теории менее прямым путем, ознакомившись с материалами наблюдений главным образом из статей Лоренца, которые он начал изучать еще будучи студентом в 1895 году»⁶⁶. Но, быть может, наиболее важная часть этих двух статей заключается в публикации в них письма, которое Эйн-

⁶⁵ R. A. Shankland. The Michelson—Morley Experiment.—Scientific American, 1964, 211, N 5: 107.

⁶⁶ R. A. Shankland. The Michelson—Morley Experiment.—Am. J. Phys., 1964, 32: 34.

штейн написал, очевидно, по просьбе Шэнкленда, для специального собрания Кливлендского физического общества 19 декабря 1952 года, отмечавшего столетие со дня рождения Майкельсона. Это письмо — результат более внимательного и вдумчивого рассмотрения, чем это могло быть в его *viva voce* * ответах, поэтому оно имеет даже большее значение. Более строго, чем в несколько отрывочных замечаниях в интервью, Эйнштейн предлагает точку зрения для получения более ясного понимания его работы 1905 года по теории относительности. Следующее представляет собой опубликованный Шэнклендом документ, в который я включил в скобках альтернативное прочтение некоторых фраз или слов, чтобы показать перевод, более соответствующий копии оригинального немецкого текста ⁶⁷:

«Я всегда думал о Майкельсоне как об артисте в науке. Его величайший восторг, кажется, исходит от красоты самого эксперимента и от изящества применяемого метода.

Но он обнаружил также исключительное понимание трудностей фундаментальных вопросов физики. Это очевидно из того острого интереса, который он проявил с самого начала к проблеме зависимости света от движения.

Влияние решающего [знаменитого] эксперимента Майкельсона — Морли на мои собственные усилия [размышления] было довольно косвенным. Я узнал о нем из убедительного исследования Лоренца по электродинамике движущихся тел (1895), с которым я познакомился

* Устных (лат.).

⁶⁷ Шэнкленд опубликовал английский перевод, присланный ему Эйнштейном; он сообщает, что он получил также и немецкий текст; в обоих случаях имеется собственноручно написанный автором черновик и копия последнего под копирку (оба эти варианта в настоящее время находятся в архиве Эйнштейна в Принстоне). Первые два предложения написаны по-английски, они появились для того, чтобы показать, что Эйнштейн одобрил тезисы, представленные Шэнклендом по данному поводу, составленные на основе бесед с Эйнштейном. Ввиду большого различия между немецким и английским вариантами, которые следуют за первыми двумя предложениями, было бы интересно установить, кто сделал английский перевод немецкого оригинала. На протяжении многих лет друзья Эйнштейна и его ассистенты помогали ему в английских переводах, но в данном случае, как полагает мисс Элен Дюкас, мы можем быть уверены, что перевод принадлежит самому Эйнштейну. Она сообщила мне, что в последние годы он иногда делал переводы сам.

перед развитием [изложением] специальной теории относительности. Основная гипотеза Лоренца о покоящемся эфире казалась мне сама по себе неубедительной, а также [заменить *также* на *именно*] потому, что она приводила к истолкованию результата [опустить *результата*] эксперимента Майкельсона — Морли, которое казалось мне искусственным. К специальной теории относительности меня более или менее [опустить *более или менее*] привело убеждение, что электродвижущая сила, действующая на тело, перемещающееся в магнитном поле, есть не что иное, как электрическое поле. Но я руководствовался также результатами опытов Физо и явлением абберрации.

Конечно, нет логического пути, приводящего к созданию теории; существуют лишь осуществляемые на ощупь конструктивные попытки, контролируемые посредством тщательного анализа познанных фактов»⁶⁸.

Отметим сначала некоторое различие текстов в важных пунктах. Так, эксперимент Майкельсона — Морли в английском переводе называется «решающим» («*crucial*») (как это часто встречается в дидактической литературе), а в немецком оригинале — знаменитым (*berühmt*).

⁶⁸ В архиве Эйнштейна имеется следующий оригинальный текст: «I always think of Michelson as the Artist in Science. His greatest joy seemed to come from the beauty of the experiment itself and the elegance of the method employed.

Aber er hat auch ein aussergewöhnliches Verständnis gezeigt für die fundamentalen Rätsel in der Physik. Disc sieht man aus dem Interesse, das er von Anfang an dem Problem der Abhängigkeit des Lichtes von dem Bewegung entgegenbrachte.

Mein eigenes Nachdenken wurde mehr indirekt durch das berühmte Michelson-Morley Experiment beeinflusst. Ich erfuhr von diesem durch Lorentz' bahnbrechende Untersuchung über die Elektrodynamik bewegter Körper (1895), von der ich vor Aufstellung der speziellen Relativität Kenntnis hatte. Lorentz' Grundannahme vom ruhenden Aether schien mir gerade deshalb nicht überzeugend, weil sie zu einer Interpretation des Michelson — Morley Experimentes führte, die mir unnatürlich erschien. Mein direkter Weg zur Speziellen Relativitäts-Theorie wurde hauptsächlich durch die Überzeugung bestimmt, dass die in einem im Magnetfelde bewegten Leiter induzierte elektromotorische Kraft nichts anderes sie als ein elektrisches Feld. Aber auch das Ergebnis des Fizeauschen Versuches und das Phänomen der Aberration führten mich.

Es führt ja kein logischer Weg zur Aufstellung einer Theorie, sondern nur tastendes Konstruieren mit sorgfältiger Berücksichtigung des Thatsachen-Wissens».

Но наиболее значительный аспект этого документа состоит в определении порядка важности, который Эйнштейн придает четырем идентичным экспериментам. Один «эксперимент» цитировался здесь как такой, который привел Эйнштейна «непосредственно» (в немецком тексте) или «более или менее непосредственно» (в английском тексте) к специальной теории относительности; это именно тот мысленный эксперимент, который появился на первой странице его статьи 1905 года, — движение проводника в магнитном поле. Три других эксперимента имели дополнительное значение: опыты Физо и аберрация, которыми «также руководствовался» Эйнштейн, и эксперимент Майкельсона в той форме, в какой он изложен Лоренцом в 1895 году. Но даже в этом послании по поводу столетия со дня рождения Майкельсона Эйнштейн приписывает эксперименту Майкельсона только четвертое место в ряду других исторических стимулов: он сообщает, что этот эксперимент имел «довольно косвенное влияние» на его собственную работу 1905 года; характерно, что этот эксперимент (или скорее его результат) подчеркивал «искусственный» характер контракционной гипотезы, которая казалась ему необходимой лишь для того, чтобы спасти концепцию неподвижного эфира — искусственный характер, о котором, как мы увидим, сожалели многие физики, включая и самого Лоренца.

Следовательно, этот документ представляет собой вероятную схему того, какую роль играли эксперименты в генезисе статьи Эйнштейна 1905 года. Сама по себе эта схема правдоподобна, если учесть авторитетность утверждений. И мы найдем, что она соответствует всем другим прямым и косвенным данным, исходящим от Эйнштейна, включая и его письма, его ответы на вопросы и его оригинальные статьи.

Последний раздел документа довольно удивителен. Здесь Эйнштейн, выполнив свой долг ответом на специальный вопрос, выходит за его пределы и бегло излагает свою методологическую позицию, которую он уже выдвигал в интервью с Шэнклендом: «Конечно, нет логического пути, приводящего к созданию теории; существуют лишь осуществляемые на ощупь конструктивные попытки, контролируемые посредством тщательного анализа познанных фактов». Будучи честной самокритикой творческого ученого, откровенное признание Эйнштейна

все же очень противоречит широкому потоку мифов, согласно которым научная работа представляется как непреклонное следование логически правильным заключениям из несомненных экспериментальных посылок. Систематики, аксиоматики, авторы учебников и другие тоскуют по прямолинейной последовательности как в самой научной работе, так и в отчетах о ней; увы, истина состоит в другом. Эйнштейн часто напоминал об этом, например, беседуя с Шэнклендом об истоках своей работы 1905 года. Шэнкленд сообщает в «Conversations»: «Это привело его к довольно длинному замечанию о природе мыслительных процессов, о том, что они вовсе не являются продвижением к решению шаг за шагом; он особенно подчеркнул, как извилист путь нашего мышления к решению... Только в конечном счете выясняется, какая последовательность в проблеме вообще оказывается возможной»⁶⁹. Точно так же, обсуждая вопрос о правильном взгляде, который историк должен иметь на работу физиков, Эйнштейн сказал ему: «Преодоление трудностей проблем, постоянное стремление найти решение, которое, наконец, приходит, но часто благодаря очень косвенным методам, — вот истинная картина»⁷⁰.

Этот взгляд Эйнштейн выражал неоднократно, хотя и не в таком контексте, начиная примерно с 1918 года и более настойчиво — с начала 30-х годов. Примеры можно найти в его очерке, написанном к 60-летию Макса Планка в 1918 году («Не существует логического пути к открытию этих элементарных законов. Есть только путь интуиции», основанный на проникновении в суть опыта); в его спенсеровской лекции 1933 года (относительно «чисто воображаемого характера оснований научной теории»); в его «Автобиографических заметках», написанных в 1946 году («На опыте можно проверить теорию, но нет пути от опыта к построению теории»⁷¹); в его ответе Д. Адамару, просившему Эйнштейна проанализировать его собственный процесс мышления («Слова или язык в том виде, как они пишутся или произносятся, вряд ли играют какую-нибудь роль в механизме моего мышления. Пси-

⁶⁹ R. S. Shankland. Conversations, стр. 48.

⁷⁰ Там же, стр. 50.

⁷¹ A. Einstein. Autobiographical Notes, у Шилппа: Albert Einstein, стр. 89. [См.: Альберт Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. IV, стр. 291].

хические сущности, которые, по-видимому, служат элементами мышления, — это некоторые знаки и более или менее ясные образы, которые можно «произвольно» воспроизводить и сочетать друг с другом»⁷² и во многих других случаях⁷³.

В своем убеждении относительно того, что между опытом и логически упорядоченной теорией может быть существенный разрыв, а также в том, что существует связанное с этим различие между «чувственным восприятием», с одной стороны, и «чистыми идеями», с другой (которые, как мы уже отмечали, он рассматривал как возможный повод для обвинения его в «метафизическом первородном грехе»)⁷⁴, Эйнштейн отошел от своих ранних позитивистских привязанностей и разошелся с большинством известных философий науки его времени. О том, что для него это было не легко, видно из того, как часто он возвращался к этим вопросам на протяжении многих лет. В этой связи документ Эйнштейна по поводу столетия со дня рождения Майкельсона будет ключом к окончательной оценке обсуждаемой проблемы.

Завершая этот раздел о действительно исторических оценках, мы вернемся к относительно немногим другим источникам, имевшим серьезные исторические цели. Здесь у авторов мы встречаем большее разнообразие мнений. На одном конце ряда находится Э. Уиттекер; в своей «Истории теорий эфира и электричества»⁷⁵, в известной и широко обсуждавшейся главе, многозначительно озаглавленной «Теория относительности Пуанкаре и Лоренца», автор отсылает к «эксперименту Майкельсона — Морли и к другим данным, которые положили начало теории относительности». На другом конце находятся «Исторические исследования» Чалмерса. Он пишет: «...Следовало бы уяснить, что, несмотря на частые утверждения обратного, теория относительности не обя-

⁷² Jacques Hadamard. An Essay on the Psychology of Invention in the Mathematical Field. (New York: Dover, 1954; первоначально Princeton: Princeton Univ. Press, 1945), стр. 142—143.

⁷³ G. Holton. Mach, Einstein, and the Search for Reality, стр. 636—637.

⁷⁴ A. Einstein. Reply to Criticism, у Шилппа: Albert Einstein, стр. 637.

⁷⁵ E. Whittaker. A History of Theories of Aether and Electricity, Vol. II: The Modern Theories, 1900—1926. (London: Thomas Nelson, 1953), стр. 38.

зана своим происхождением нулевому результату экспериментов по обнаружению эфирного ветра, они не стимулировали ее, ... если бы эти эксперименты никогда не были выполнены, теория относительности возникла бы тем же путем, каким она и появилась, но только отсутствовал бы один из многих источников ее экспериментального подтверждения»⁷⁶.

Наиболее обстоятельное историческое исследование опыта Майкельсона было недавно выполнено Лойдом Свенсоном в его диссертации, упомянутой раньше: «The Ethereal Aether: A History of the Michelson — Morley Aether-Drift Experiments, 1880—1930». Свенсон в своем очерке главным образом заботился не о специальной стороне рассматриваемого вопроса, а скорее об историческом анализе идеи *experimentum crucis* (решающего эксперимента), и особенно рассмотрел вопрос о том, как воспринимался эксперимент Майкельсона накануне 1905 года и после. Ряд моментов, полезных для нашего анализа, был уже отмечен в разделе II. Свенсон привел дополнительный материал, характеризующий тот ужас, который был вызван статьей Эйнштейна о теории относительности в первое время. Так, он цитирует послание Вильяма Маги от 28 декабря 1911 года Американскому физическому обществу, президентом которого он только что был избран. Маги утверждал, что «безусловно можно сказать, что теория относительности обосновывается необходимостью объяснить отрицательный результат известного эксперимента Майкельсона — Морли и удобством, которое дается возможностью применять уравнения электромагнитного поля Максвелла в подвижной системе координат без изменения их формы»⁷⁷. Далее Свенсон продолжает: «Маги настаивает на контраргументах, будто принцип относительности не давал объяснения ни экспериментов Физо, Маскарта, Брэса, ни экспериментов Кауфмана и Бухерера. В таком случае, почему, спрашивал он [Маги], мы должны позволить эксперименту Майкельсона — Морли опрокинуть все наши исходные понятия физики?» И снова цитируется Маги: «Принцип относительности объясняет отрицательный результат эксперимента Май-

⁷⁶ T. W. Chalmers. Historic Researches, стр. 81; курсив в оригинале.

⁷⁷ L. Swenson. The Ethereal Aether, стр. 280—281 (цитируется по Science, 1912, 35 : 287).

Кельсона — Морли, но как можем мы объяснить явление интерференции без эфира, который только и делает возможным этот эксперимент?»⁷⁸. Ясно, что Маги, как и Оливер Лодж, не думал много о попытке сделать теорию относительности и работу Майкельсона опорой друг друга⁷⁹.

В итоге, из явно исторических очерков, включая и беседы Эйнштейна с Шэнклендом, выясняется, что рассказы, которые мы находили раньше в дидактических или философских сочинениях, в лучшем случае являются сомнительными, и они нуждаются в серьезной критике. Настоящий очерк до сих пор имел целью внести ясность в тот отбор, который проявится из прямых документальных данных и прежде всего из основной статьи Эйнштейна 1905 года.

VI. Прямые данные в статье Эйнштейна 1905 года

Статья по теории относительности Эйнштейна 1905 annus mirabilis* — эта столь свежая и ясная вдохновенная работа гения так часто обсуждалась, что нам нужно здесь только напомнить некоторые ее главные моменты⁸⁰.

⁷⁸ Там же, стр. 281.

⁷⁹ Свенсон приводил также новые данные о том, что Майкельсоном владел страх: «В ответ на просьбу дать оценку своего наиболее значительного достижения Майкельсон сказал: «Я думаю, что большинство людей сказала бы, что это был эксперимент, который положил начало теории относительности Эйнштейна. Этот эксперимент является опорой Эйнштейна. Но я хотел бы думать о нем, как об одном из дюжины моих экспериментов по интерференции световых волн» (там же, стр. 317—318, цитируется по статье Джемса О'Доннел Беннета, опубликованной в связи с 70-летием А. А. Майкельсона в «The Chicago Tribune», ротогравюрный отдел, 1923, стр. 22). В этой же связи уместно напомнить отрывок из «Бесед» Шэнкленда: «Майкельсон сказал Эйнштейну, что он немного сожалел о том, что его собственная работа положила начало этому «монстру» (стр. 56).

* Удивительного года (лат.).

⁸¹ Приведенные в тексте переводы взяты из статьи А. Эйнштейна «On the Electrodynamics of Moving Bodies», стр. 37—65 в сб. «The Principle of Relativity», Н. А. Lorentz et al., перевод Перрота и Джеффри (New York: Dover, без даты [1951]); сборник, впервые опубликованный в 1923 г., включает статью А. Эйнштейна «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», Annalen der Physik, 1905, 17 (с подстрочными замечаниями А. Зоммерфельда). Хотя я исправил перевод в нескольких пунктах, ни одно из этих исправлений существенно не изменяет смысла перевода Перрота и Джеффри.

Цель этой статьи, как указывается в заглавии и в первых строках введения, построить электродинамику движущихся тел, базирующуюся на законах, первоначально сформулированных в электродинамике Максвелла для покоящихся тел. Как сказал Эйнштейн почти сорок лет спустя в своих «Автобиографических заметках», «специальная теория относительности обязана своим возникновением уравнениям Максвелла для электромагнитного поля. И обратно, только специальная теория относительности дает уравнениям Максвелла удовлетворительное формальное толкование»⁸¹.

Первое основание для этой работы указывается Эйнштейном в первой же фразе: «Известно, что электродинамика Максвелла, как ее в настоящее время обыкновенно толкуют, в применении к движущимся телам приводит к асимметрии, которая, по-видимому, несвойственна самим явлениям». Это — неудовлетворенность эстетического рода, показывающая, между прочим, сколь современна эта работа до сих пор. Более того, как теперь уже можно сказать, асимметрия была выявлена, хотя другие физики не считали ее большим дефектом, который следует устранить. Во всяком случае, мы отмечаем, что Эйнштейн начал не с указания на какое-либо противоречие между теорией и известными фактами. К первой фразе он добавил хорошо известный пример о том, что «обычное представление проводит резкое различие» между обоснованиями появления тока в проводнике в двух случаях, с одной стороны, когда проводник находится в покое, в то время как магнит движется (в этом случае говорят, что ток вызван электрическим полем, возникшим вблизи магнита); с другой стороны, когда проводник движется в поле покоящегося магнита (в этом случае электрическое поле вблизи магнита не возникает, но, согласно Герцу, в проводнике появляется электродвижущая сила, которая и вызывает электрический ток). Однако величина и направление токов, созданных одним и тем же относительным движением, в обоих случаях одни и те же. Молодой ученый заключил, что эта теория, «как она обычно толкуется в настоящее время», несовершенна в силу асимметрии описания указанных случаев, и поэтому необходима переформулировка электродинамики, чтобы изменить «понимание» путем

⁸¹ A. E i n s t e i n. Autobiographic Notes, стр. 63.

устранения асимметрии (как это сделано позднее в статье)⁸². Конечно, обычная научная статья, особенно в наше время, началась бы с описания некоторых новых экспериментальных результатов или наблюдений, которые упорствуют, сопротивляются их обобщению в существующей теоретической системе.

Избранный Эйнштейном, внешне скорее прозаичный и совсем не новый, пример обращается к работе Фарадея. Но, конечно, в этом признак его оригинальности. Предлагая переформулировку наиболее фундаментальных понятий пространства и времени, Эйнштейн не рассчитывал на софистический эффект или на новую или даже древнюю экспериментальную загадку. Он обращается к давно известным наблюдениям, которые, как он убежден, хорошо понятны каждому. Это было так же, как в споре, который Галилей описал в своем «Dialogue Concerning of Two Chief Systems». Следовательно, это было не так, как у Коперника в его «De revolutionibus» или у Ньютона в «Principia», теории которых базировались на новых, имевшихся в их распоряжении фактах, и не как это было в других трудах, призванных объяснить наблюдения, которые предшествующая теория не сумела должным образом согласовать.

Вслед за этими подробностями, которые Эйнштейн привел, обсуждая эксперименты с возбуждением инду-

⁸² A. Einstein. On the Electrodynamics of Moving Bodies, стр. 51—55. [см. А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. I, стр. 7, 24—25]. Выполняя требование, чтобы уравнения Максвелла были инвариантны, Эйнштейн показывает, что чисто электрическая (или чисто магнитная) напряженность поля в какой-либо одной системе будет восприниматься как электромагнитное поле в другой системе, движущейся относительно первой. Отсюда, «если единичный точечный заряд движется в электромагнитном поле, то действующая на него сила равна напряженности электрического поля в месте нахождения этого заряда, получающейся в результате преобразования поля к координатной системе, покоящейся относительно этого заряда... Мы видим, что в изложенной теории электромоторная сила играет роль вспомогательного понятия, которое своим введением обязано тому обстоятельству, что электрические и магнитные поля не существуют независимо от состояния движения координатной системы».

Напомним то, что сказал Эйнштейн в своем послании по поводу столетия со дня рождения Майкельсона: «Что привело меня более или менее непосредственно к специальной теории относительности, — это убеждение, что электромоторная сила, действующая на тело, движущееся в магнитном поле, есть не что иное, как электрическое поле».

цированного тока, проводниками и магнитами, следуют два предложения, удивительные как по своей общей формулировке, так и по связи внешне не связанных вопросов:

«Примеры подобного рода, как и неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно «светоносной среды», ведут к предположению, что не только в механике, но и в электродинамике никакие свойства явлений не соответствуют понятию абсолютного покоя, и даже, более того, — к предположению, что для всех координатных систем, для которых справедливы уравнения механики, справедливы те же самые электродинамические и оптические законы, как это уже доказано для величин первого порядка»⁸³.

Остановимся кратко на этом важном месте: именно к нему опыт Майкельсона мог бы иметь отношение. В конечном счете, именно этот эксперимент указывается в наших учебниках главным среди экспериментов по обнаружению влияния движения Земли на наблюдаемую скорость света. Однако, какие бы догадки мы ни строили о том, думал ли о нем Эйнштейн или нет, в его статье нет подтверждений таким догадкам. Кроме того, позднее, когда Эйнштейн в своих «Автобиографических записках» специально говорил о происхождении теории относительности, он нигде не упомянул опыт Майкельсона. Некоторых это обстоятельство разочаровывает, но было бы самонадеянным думать, что Эйнштейн обязан был объясниться по этому поводу либо в 1905 году, либо позднее. Как это будет дальше выяснено, он оставил для историков более чем достаточный материал, чтобы решить эту проблему однозначно.

Что во всяком случае ясно, так это то, что нет именно ссылки ни на этот знаменитый эксперимент, ни на какие-либо другие эксперименты по обнаружению предполагаемого эффекта движения Земли относительно эфира. Таким образом, эксперименты, которые можно подразумевать в предложении, касающемся неназванных неудачных попыток обнаружить эфирный ветер, нельзя отнести к «решающим» (crucial). По-видимому, они играют роль опоры следующего рода: результаты упоминаемых экспериментов с магнитом и проводником и не упоминаемых оптических экспериментов вступают в противоречие с

⁸³ Там же, стр. 37. [Русск. изд., стр. 7].

понятиями абсолютного пространства и с другими идеями абсолютистской физики. Кроме того, на языке электромагнитной теории Максвелла существуют тесно связанные эксперименты. Эти факты приводят к тому, что гораздо более резонно ухватиться за теорию Максвелла, как за такое звено, путем релятивизации которого и оптика и электродинамика должны быть заново истолкованы совместно.

В последнем предложении Эйнштейна содержится идея, которую он называет «принципом относительности»; без дальнейшего обсуждения она возводится в положение первого из двух постулатов, образующих исходный базис его статьи. Второй постулат (постоянство скорости света в вакууме) добавляется в том же высказывании без ссылки на какие-либо данные, которые могли бы увеличить его вероятность. Читатель должен найти их оправдание в успехе теории, базирующейся на этих постулатах.

Ни здесь, ни позднее в этой статье не приводится фундаментальных положений, изложенных логически, связанных в хорошо упорядоченный ряд фактов и экспериментов, подкрепленных подробными обоснованиями и примерами (см. таблицу 1, как попытку схематически представить структуру, лежащую в основании этих страниц статьи 1905 года). Напротив, в статье ощущалась свежесть излияния гения, который сделал вероятным то, что было написано в пределах «пяти или шести недель» (как писал Эйнштейн 11 марта 1952 года одному из своих биографов Карлу Зеелигу). В тот же год он послал в печать три основополагающих статьи с интервалами менее чем восемь недель и в то же время выполнял свою работу в Патентном бюро в Берне⁸⁴. Это находится также в согласии с утверждением Эйнштейна, что он уже тогда ясно видел, что «нет логического пути к построению теории», что он должен был перепрыгнуть через пропасть «к открытию универсального формального принципа»⁸⁵.

Таким образом, мы можем эти высказывания из статьи 1905 года сопоставить с хорошо известным отрывком из

⁸⁴ M. Klein. Thermodynamics in Einstein's Thought. (Science, 1967, 157 : 513). Здесь Клейн пишет об этой деятельности Эйнштейна: «... в противоположность тому, что иногда сообщают, эта работа сильно загружала его — по восемь часов изнурительного труда ежедневно».

⁸⁵ A. Einstein. Autobiographical Notes, стр. 53.

Таблица 1

Краткая схематическая структура вводного раздела статьи Эйнштейна по теории относительности 1905 года

Утверждения в их последовательности	Примеры или обоснования
<p>A. Максвелловская электродинамика для покоящихся тел ведет к асимметрии, которая не принадлежит самим явлениям</p>	<p>1. Мысленные эксперименты á la Фарадей по электродинамическому взаимодействию между магнитом и проводником</p>
<p>B. Попытки обнаружить движение Земли относительно «светоносного эфира» потерпели неудачу</p>	<p>2. Другие (примеры того же рода) (не уточнены) (Не приводятся никаких примеров)</p>
<p>C. Постулирование «принципа относительности» для механики, оптики и электродинамики</p>	<p>1. A + B «ведет» к предположению (постулату) C (как — не указано)</p> <p>2. Это уже испытанная полезная теория для первого порядка (v/c)</p>
<p>D. Постулирование принципа постоянства скорости света</p>	<p>(Никаких оснований не дано)</p>
<p>E. C + D будут иметь следствия</p>	<p>1. Результатом будет простая непротиворечивая электродинамика, базирующаяся на теории Максвелла</p> <p>2. «Светоносный эфир» будет излишним</p>

«Автобиографических заметок» Эйнштейна (написанных в 1946 г., опубликованных в 1949 г.), в котором он сообщал о том, что он в своих собственных размышлениях считал источником теории относительности:

«Благодаря такого рода рассуждениям уже вскоре после 1900 г., т. е. вскоре после основополагающей работы Планка, мне стало ясно, что ни механика, ни термодинамика не могут претендовать на полную точность (за исключением предельных случаев). Постепенно я стал отчаиваться в возможности докопаться до истинных законов путем конструктивных обобщений известных фактов. Чем дольше и отчаяннее я старался, тем больше я приходил к заключению, что только открытие общего формального принципа может привести нас к надежным результа-

там. Образцом представлялась мне термодинамика. Там общий принцип был дан в предложении: законы природы таковы, что построить вечный двигатель (первого и второго рода) невозможно. Но как же найти общий принцип, подобный этому? Такой принцип я получил после десяти лет размышлений из парадокса, на который я натолкнулся уже в 16 лет. Парадокс заключается в следующем. Если бы я стал двигаться вслед за лучом света со скоростью c (скорость света в пустоте), то я должен был бы воспринимать такой луч света как покоящееся, переменное в пространстве электромагнитное поле. Но ничего подобного не существует; это видно как на основании опыта, так и из уравнений Максвелла. Интуитивно мне казалось ясным с самого начала, что с точки зрения такого наблюдателя все должно совершаться по тем же законам, как и для наблюдателя, неподвижного относительно Земли. В самом деле, как же первый наблюдатель может знать или установить, что он находится в состоянии быстрого равномерного движения?

Можно видеть, что в этом парадоксе уже содержится зародыш специальной теории относительности»⁸⁶.

Этот отрывок имеет свою точную параллель в статье 1905 года в концептуальном скачке от простого эксперимента (на самом деле это также род *мысленного* эксперимента — относительное движение проводника и магнита) к общему принципу, из которого будет выведена суть теории относительности. Более того, нельзя не отметить, что плодотворный парадокс, над которым он задумывался в дни своей юности, и эксперимент, которым начинается статья 1905 года, имеют один и тот же физический характер: в одном случае вопрос касается электрического и магнитного полей, которые движущийся наблюдатель находит связанными со световым лучом; в другом случае вопрос касается электрического и магнитного полей, которые действуют на движущийся проводник; в обоих случаях решения вытекают из одних и тех же уравнений преобразования. Поэтому кажется вполне возможным, что Эйнштейн мог держать в уме этот юношеский мысленный эксперимент со световым лучом, когда он в 1905 году написал довольно туманную в другом отно-

⁸⁶ Там же, стр. 51—52. [А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. IV, стр. 277—278].

шении фразу о «примерах подобного рода». В самом деле, парадокс о световом луче мог бы быть естественным мостом к непосредственно следующему в статье 1905 года упоминанию об экспериментальных попытках «обнаружить движение Земли относительно «светоносной среды»».

В следующем предложении, как раз почти заканчивая введение статьи 1905 года, Эйнштейн без всякого повода указывает на результат, который можно ожидать от его подхода. «Введение «светового эфира» окажется при этом излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится «абсолютно покоящееся пространство», наделенное особыми свойствами...» Затем он сразу переходит к «Кинематической части», в которой исследуются понятия пространства и времени. Уравнения преобразований Лоренца выводятся из постулатов, они приводят к преобразованиям уравнений Максвелла — Герца, которые включают в себе все электродинамические явления, охватывая, с одной стороны, движущиеся магниты, а с другой — движущиеся световые лучи. Все остальное следует из этого же: релятивистский доплер-эффект, абберация и давление излучения, испытываемое рефлектором. Существенно, что абберация и изменение частоты световой волны являются двумя наистарейшими известными оптическими эффектами, которые вызываются движением Земли относительно звезд, — известными задолго до эксперимента Майкельсона, — и что проблема давления излучения есть одна из тех проблем, о которой Эйнштейн позднее говорил, что она очень рано заинтересовала его как обоснование предела применимости теории Максвелла.

Но на этом вопросе Эйнштейн останавливается сам: «Примененным здесь методом могут быть решены все задачи оптики движущихся тел. Существо дела заключается в том, что электрическое и магнитное поля в световой волне, подвергающейся воздействию со стороны движущегося тела, преобразуются к координатной системе, покоящейся относительно этого тела». (Здесь этот эксперимент с магнитом и индуцированным током опять связывается с экспериментом о движении светового луча). «Благодаря этому каждая задача оптики движущихся тел сводится к задачам оптики покоящихся тел»⁸⁷.

⁸⁷ A. E i n - s t e i n. On Electrodynamics of Moving Bodies, стр. 59. [А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. I, стр. 30.]

Для других ординарных физиков, особенно для молодежи, стремящихся с гордостью продемонстрировать мощь своей новой теории, кажется неправдоподобным поступать так, как в то время поступал (или не поступал) Эйнштейн: он не пытался объяснить, что его положения содержат новое толкование нулевого результата опыта Майкельсона, релятивистский эквивалент контракции Лоренца — Фитцджеральда, а также решение других проблем, которые занимали многих лучших физиков на протяжении двух предыдущих десятилетий. В зависимости от склонности человека, последнее приведенное выше предложение может быть истолковано как выражение кокетства, или высокомерия, или игнорирования экспериментальных деталей в «оптике движущихся тел», или отсутствия серьезного отношения к грязным деталям экспериментальной физики, или даже просто как результат отсутствия времени для вхождения в более отдаленные детали в статье, размером в 31 страницу, которая писалась в чрезвычайно продуктивный период его жизни.

Я склонен думать, что действовали все эти элементы, но первый из них наиболее бросается в глаза. Например, отказываясь повторно упомянуть эксперимент Майкельсона, Эйнштейн учитывает только тот факт, что с точки зрения релятивистской физики в этом эксперименте *ничего существенного вовсе не происходит*. Его результат является «естественной», вполне предвиденной и тривиальной истиной. Отказ от эфира и принятие уравнений преобразования означает исчезновение как самого объекта, так и языка, на котором с позиции эфирной теории обсуждаются такие вопросы, как нулевой результат, так и возможные причины контракции. Таким образом, оба взгляда на этот эксперимент были различны и несовместимы в главном, что и вызвало нескончаемые дебаты между двумя противоборствующими группами на протяжении долгого времени после того, как эта статья была опубликована; так это было, например, в 1927 году на конференции, посвященной эксперименту Майкельсона. Релятивисты просто не могли усмотреть сложных проблем, которые, очевидно, были важными для защитников эфира, для которых, по удачному выражению Дюга, эфирное безмолвие образовало «субстрат мышления в физике».

Это признание должно подготовить нас к возможности того, что в аналогичных философских спорах выделяются

две точки зрения на избитый вопрос о том, как понимать историю развития теории относительности. С одной стороны, налицо подход самого Эйнштейна, в значительной степени интуитивный, с элементами эмпиризма и рационализма; с другой стороны, имеются аксиоматический и экспериментистский подходы, о которых мы говорили раньше. Для первой группы кажется естественным, что эксперимент, не игравший никакой роли, не должен быть упомянут, однако для второй группы отсутствие в статье Эйнштейна специального признания роли эксперимента Майкельсона становится проблемой, и Эйнштейна считали уклонившимся от «обязательства» объясниться⁸⁸.

Вернемся к статье Эйнштейна 1905 года. В конце статьи мы находим краткий раздел о динамике движущихся электронов, которые представляют собой хорошо известный пример движущихся тел, открытых за восемь лет до того; одновременно электроны явились предметом широко обсуждавшихся экспериментов, таких, как эксперименты Кауфмана. Однако в статье ни один из экспериментов не упоминается. Она заканчивается тремя предложениями, одно из которых «может быть проверено экспериментально»; они смело обобщаются как «законы, по которым, согласно предложенной теории, должны двигаться электроны»⁸⁹. Действительно, это единственное место в статье, где новые экспериментальные результаты предсказываются явным образом, хотя в других местах имеется несколько подразумеваемых, например, что объект, движущийся с огромной относительной скоростью, «будет казаться укороченным» и что находящемуся в покое наблюдателю движущиеся часы покажутся идущими более медленно. В нескольких случаях о результате сказано, что он находится в согласии с установленными экспериментами (например, о давлении света). Однако в то время как Эйнштейн выводит уравнения, которые с поразительной легкостью могут объяс-

⁸⁸ G r ü n b a u m. Philosophical Problems of Space and Time, стр. 380. Если руководящим началом является сама история теории эфира, то можно сказать, что в этом споре, как и в других, лишь немногие поборники изменят свое мнение, происходящее из стабильности «субстрата мышления» и целенаправленных предположений.

⁸⁹ E i n s t e i n. On the Electrodynamics of Moving Bodies, стр. 65. [А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. I, стр. 35].

нить такие исторические эксперименты, как проверка френелевской теории увлечения эфира, выполненная Физо, или наблюдения абберации, эти уравнения в статье явно к ним не применяются.

Статья, предназначенная для обсуждения ее научной общественностью, обычно излагает экспериментальные подтверждения новых теорий; упрочению теории относительности очень помогло бы, если бы в ней имелся, так сказать, педагогический раздел, развивающий следствия основной работы. Можно только полагать, что это удивительное упущение может служить добавочным аргументом в пользу того, что автор считал обычным то, что другим казалось замечательным открытием, и что он простодушно заботился о своей главной цели — заново формулировать электродинамику, базирующуюся на уравнениях Максвелла, а также преобразовать понятия пространства и времени, что неизбежно вытекает из этой работы ⁹⁰.

Исходя из собственных, более поздних критериев Эйнштейна для логической теории — «внутреннее совершенство» и «внешнее оправдание» ⁹¹, — можно было бы ожидать немного более подробного обсуждения их обоих. Однако небольшое число упоминаемых «фактов» и экспериментов соответствует изречению Эйнштейна о том, что составляет «внешнее оправдание»: дело не в том, что теория может быть построена на несомненно очевидных опытных фактах, не в том, что теория может быть подтверждена постановкой решающих экспериментов, а скорее дело в том, что «теория не должна противоречить опытным фактам» ⁹². Этот критерий даже связывается

⁹⁰ Как сообщал Эйнштейн (цитирую по Максу Борну: *Physics and Relativity, in Helvetica Physica Acta, Supplementum IV. 1956, 248* [см. также: Макс Б о р н. Физика в жизни моего поколения. М., ИЛ, 1963, стр. 322]:

«Что было при этом нового [в статье 1905 г.], так это признание того, что значение лоренцовых преобразований выходит за пределы связи с уравнениями Максвелла: они затрагивают сущность пространства и времени вообще. Новым был также и взгляд, что «лоренц-инвариантность» есть общее условие для любой физической теории. Это представляло для меня особую важность, ибо уже ранее я осознал, что теория Максвелла не выражает микроструктуры излучения и потому не имеет общего смысла».

⁹¹ A. E i n s t e i n. *Autobiographical Notes*, стр. 23. [А. Э й н ш т е й н. Собр. науч. трудов, т. IV, стр. 267.]

⁹² Там же, стр. 23. [А. Э й н ш т е й н, т. IV, стр. 266.] Курсив наш.

с предупреждением против стремления обеспечить «приспособление теории к фактам при помощи более или менее искусственных дополнительных предположений», которые «часто, если не всегда, возможны»⁹³. Это замечание заставило Эйнштейна обсуждать критерии, касающиеся предпосылок теории, которые «можно было бы кратко, хотя и не вполне ясно, назвать «естественностью» или «логической простотой» предпосылок». Он соглашается с тем, что «точная формулировка... представляет большие трудности», потому что она включает в себя «своего рода взвешивание и сравнение несоизмеримых качеств». Хотя он и не мог формулировать более точно, все же «между «авгурами» большею частью наблюдается полное согласие в суждении о «внутреннем совершенстве» теорий...»⁹⁴ Здесь перед нами опять встает вопрос о роли того, что может быть названо только научным вкусом в решении проблемы, какую теорию или гипотезу принять, а какую отвергнуть. Мы вернемся к этому важному вопросу позднее.

Подведем итог. Стил мышления, выявляемый путем непосредственного анализа статьи 1905 года, находится в полном соответствии с докладом Эйнштейна, который он сделал спустя столетия по поводу столетия со дня рождения Майкельсона. Речь идет не о теории обычного рода, цель которой описать одно или даже несколько явлений, а о теории, «предметом которой является вся совокупность физических явлений»⁹⁵. В этой статье нет ничего, что поддержало бы ту идею, будто Эйнштейн должен был рассматривать эксперимент Майкельсона как «решающий» или даже как эксперимент первостепенного значения, или даже что он знал или должен был знать о его существовании. Нулевой результат Майкельсона очевиден «по другим основаниям», если признается общее господство теории Максвелла во всей области электродинамики и оптики и к ней применяется принцип относительности. Такие основные экспериментальные результаты, которые предполагаются в этой статье, могли быть также результатами Фарадея, Физо и экспериментов по наблюдению абберации. С самого начала и до конца статья Эйнштейна является работой грандиозного масштаба, специаль-

⁹³ Там же, стр. 21—23. [А. Эйнштейн, т. IV, стр. 266.]

⁹⁴ Там же, стр. 23—25. [А. Эйнштейн, т. IV, стр. 266—267.]

⁹⁵ Там же, стр. 23. [А. Эйнштейн, т. IV, стр. 267.]

но направленной на то, чтобы преобразовать электродинамическую теорию как ее тогда понимали. И в этом процессе подразумеваются своя собственная методология и своя собственная метафизика, являющиеся философской основой обновленной науки. Это и объясняет, почему мы до сих пор считаем ее такой яркой работой.

VII. Косвенные данные: от 1905 года и раньше

Мы видим, что в самой статье 1905 года нет прямых данных, которые поддерживали бы общепринятую историю, излагаемую в учебниках; напротив, мы обнаружили более вероятные данные противоположного характера. Однако это не может полностью исчерпать наш источник, потому что существует ряд косвенных данных, которые следует проанализировать, включая данные из одновременных работ Эйнштейна 1905 года и из его более ранних работ, комментариев и писем.

Можно ожидать, что в другой работе Эйнштейна 1905 года мы найдем дополнительную оценку отношения между экспериментальными фактами и теорией. Как я уже писал в другом месте ⁹⁶, в 1905 году были опубликованы три статьи Эйнштейна, статьи эпохального значения, посвященные самым различным областям физики — квантовой теории света, броуновскому движению, теории относительности, — которые объединены двумя важными качествами. Они возникли из одной и той же общей проблемы, а именно, из проблемы флуктуаций давления излучения; оказывается, как уже в 1905 году знал Эйнштейн, теория Максвелла приводит к неверному предсказанию движения зеркала, подвешенного в «полости излучения»*. И для них характерен один и тот же стиль построения: «Каждая из этих статей начинается с констатации формальной асимметрии или других несоответствий, преимущественно эстетического характера... далее предлагается принцип (предпочтительно общий, скажем, второй закон термоди-

⁹⁶ N o l t o n. On the Origins of the Special Theory of Relativity, стр. 629—630. [Перев. см.: «Эйнштейновский сборник, 1966», «Наука», 1966, стр. 177—194].

* Теория Максвелла не учитывает части флуктуации давления излучения, соответствующей предположению, что энергия излучения состоит из неделимых квантов энергии $h\nu$. (Прим. перев.).

намики, если привести пример Эйнштейна), одним из следствий которого является устранение асимметрии, и в заключение выдвигается одно из нескольких предсказаний, допускающих экспериментальную проверку»⁹⁷.

Экспериментальная часть в каждой из трех статей несомненно наименее развита и для многих наиболее неубедительна. Так, Милликен, Нобелевская премия по физике которому была присуждена отчасти за его экспериментальное подтверждение эйнштейновской теории фотоэлектрического эффекта, заметил позднее, что объяснение этого эффекта, которое Эйнштейн дал в 1905 году, «в то же время игнорировало и фактически казалось противоречащим всем многочисленным фактам интерференции и, таким образом, прямым возвратом к корпускулярной теории света, которая полностью отрицалась со времен Юнга и Френеля (около 1800 г.) до наших дней. Десять лет своей жизни после 1905 года я посвятил проверке уравнения Эйнштейна и, вопреки моему ожиданию, я был вынужден в 1915 году заявить о его однозначном экспериментальном подтверждении, несмотря на всю его бессмысленность, поскольку он казался нарушающим все, что мы знали об интерференции света»⁹⁸.

Мы приходим к заключению, что другие работы Эйнштейна 1905 года вполне согласуются со статьей об относительности и что, в частности, его отношение к экспериментам было тем же самым: опора на очень небольшое число экспериментов либо как на базис теории, либо как на поддержку ее требования на серьезное внимание.

В другом месте я показал, что, по крайней мере начиная с 1907 года и дальше, мы имели данные, что даже в случае «неподтверждающихся фактов», вроде кауфмановского самоуверенного «экспериментального ниспровержения» теории относительности в 1906 году, Эйнштейн продолжал верить в теорию, которая, как ему казалось, имеет все «большую вероятность», по той причине, что она охватывала «все больший комплекс явлений»⁹⁹. Теперь я изложу в приблизительно хронологическом порядке дру-

⁹⁷ Там же, стр. 629. [«Эйнштейновский сборник, 1966», стр. 180—181.]

⁹⁸ Millikan. Albert Einstein on his Seventieth Birthday, стр. 344.

⁹⁹ Holton. Mach, Einstein, and the Search for Reality, стр. 651—653.

гие документы, которые я был в состоянии найти и которые имеют отношение к взглядам Эйнштейна на значение экспериментирования, особенно что касается эксперимента Майкельсона.

Имеются достаточные данные, что еще будучи юным студентом Эйнштейн считал себя эмпирицистом. Позднейшее приобретение более сложной концепции датировано самим Эйнштейном в его «Автобиографических заметках»; он указывает, что «вскоре после 1900 года», после публикаций Планка, он нашел, что ни механика, ни термодинамика не могут претендовать на полную точность. «Постепенно я стал отчаиваться в возможности докопаться до истинных законов путем конструктивных обобщений известных фактов»¹⁰⁰. Но перед этим, будучи студентом в Политехническом институте в Цюрихе с 1896 по 1900 год, он стремился к практическому экспериментированию. «Там у меня были прекрасные преподаватели (например, Гурвиц, Минковский), так что, собственно говоря, я мог бы получить солидное математическое образование. Я же большую часть времени работал в физической лаборатории, увлеченный непосредственным соприкосновением с опытом»¹⁰¹. Это датирование совпадает с данными, которые указал биограф Эйнштейна Антон Рейзер¹⁰², настоящее имя которого, как я уже отмечал в другом месте¹⁰³, Рудольф Кайзер, работавший с молчаливого согласия Эйнштейна над его биографией. Интересное место в этой биографии относится к юному Эйнштейну, который рано, в то время когда он находился под влиянием «чистого эмпиризма», проявил интерес к созданию эксперимента того типа, который мы здесь обсуждали:

«На втором году обучения в колледже он сразу столкнулся с проблемой свет — эфир — движение Земли. Эта проблема никогда не оставляла его. Он хотел построить аппарат, который мог бы точно измерить движение Земли относительно эфира. Что его намерение совпадало с на-

¹⁰⁰ Einstein. *Autobiographical Notes*, стр. 53. [А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. IV, стр. 277.]

¹⁰¹ Там же, стр. 15. [А. Эйнштейн, т. IV, стр. 264.]

¹⁰² Anton Reiser. *Albert Einstein*. (New York: Albert and Charles Boni, 1930.)

¹⁰³ G. Holton. *Influences on Einstein's Early Work in Relativity Theory*. *American Scholar*, Winter, 1968—1969, 37: 59—79.

мерениями других видных теоретиков, Эйнштейн еще не знал. В это время он был знаком с положительным вкладом, сделанным за несколько лет до этого великим датским физиком Гендриком Лоренцом, и со ставшей впоследствии знаменитой попыткой Майкельсона. Он хотел действовать совершенно эмпирически, приспособить свое научное осознание времени, и он был убежден, что такой аппарат, какой он отыскал бы, привел бы его к решению проблемы, далекие перспективы которой он уже ощущал.

Однако шансов построить такой аппарат не было. Скептицизм его учителей был слишком велик, а дух предприимчивости слишком мал. Он еще надеялся подойти к главным вопросам физики путем наблюдения и эксперимента. Его мысль была связана с реальностью. Как ученый-естественник, он был чистым эмпириком. Он не был полностью убежден в исследовательской силе математических символов. Спустя несколько лет это положение дел полностью изменилось»¹⁰⁴.

Рассказ фиксирует дату (академический год 1897—1898), до которой Эйнштейн, вероятно, не слышал об эксперименте Майкельсона, и это помогает нам также понять то, что иначе может казаться загадочным и противоречивым в эйнштейновской ссылке на состояние его осведомленности об эксперименте Майкельсона перед публикацией его статьи 1905 года. Это делает более вероятным то, что Эйнштейн мог воспринять результат опыта Майкельсона без удивления, когда он стал ему известен, потому что он уже размышлял о своем собственном эксперименте по обнаружению эфирного ветра; и во всяком случае эмпирический характер его подхода позднее «изменился полностью». Как мы уже отмечали, Шэнклэнд писал о своей первой беседе с Эйнштейном в 1950 г.: «Я спросил его, когда он познакомился с опытом Майкельсона — Морли, он сказал, что узнал о нем из работ Г. А. Лоренца, но *только после 1905 года* он вошел в его сознание»¹⁰⁵. А в 1952 году Эйнштейн сказал Шэнклэнду: «Я не могу с уверенностью сказать, когда я впервые услышал об опыте Майкельсона. У меня не было ощущения, что он непосредственно влиял на меня в течение семи лет,

¹⁰⁴ Reiser. Albert Einstein, стр. 52—53.

¹⁰⁵ Shanksland. Conversations, стр. 48; курсив в оригинале.

когда теория относительности была моей жизнью. Я полагаю, что я как раз воспринял его результат как нечто само собою разумеющееся»¹⁰⁶. Тут же Шэнкленд добавляет: «Однако Эйнштейн сказал, что в годы 1905—1909 он много думал о результате Майкельсона во время своих дискуссий с Лоренцом и другими и в своих размышлениях об общей теории относительности. В то время он представлял себе (так он сказал мне), что он отдавал себе отчет о результате Майкельсона до 1905 года отчасти благодаря статьям Лоренца, а еще больше потому, что просто считал этот результат Майкельсона справедливым».

Сообщение Шэнкленда о том, что Эйнштейн читал «статьи Лоренца» до 1905 года, следует теперь разъяснить. Мы знаем, что это чтение фактически не включало известной статьи Лоренца 1904 года¹⁰⁷, в которой он дал электромагнитную теорию для движущихся тел с точностью до величин второго порядка (v^2/c^2), а, вероятно, также и большинство других статей, которые отчасти подготавливали к ней¹⁰⁸. У нас есть положительные данные о том, что Эйнштейн читал только одну статью и одну книгу Лоренца — статью от 1892 года (опубликованную на французском) и книгу от 1895 года (опубликованную на немецком), в которой эта теория дается с точностью до величин первого порядка (v/c). Это полностью совпадает с замечанием Эйнштейна в статье 1905 года: «как уже было показано с точностью до величин первого порядка малости...». Кроме того, Эйнштейн писал, в частности, по этому вопросу своему биографу Карлу Зеелигу: «Что касается меня, то я знал только замечательные работы Лоренца 1895 года — «La théorie électromagnétique de Maxwell» [фактически опубликована в 1892 г.] и «Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern», — но не знал ни более поздних его работ, ни последующего исследования Пуанкаре. В этом

¹⁰⁶ Там же, стр. 55.

¹⁰⁷ H. A. L o r e n t z. Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity Smaller than that of Light.— Proceedings of the Academy of Sciences. Amsterdam, 1904, 6 : 809. [Русский перевод см.: сб. «Принцип относительности», ОНТИ, Гл. ред. общетехн. л-ры, 1935, стр. 16—50.]

¹⁰⁸ Следует учесть тот факт, что большинство из этих статей, по видимому, было трудно получать, а роль могли здесь играть опубликованные по-датски или по-английски.

смысле моя работа 1905 года была самостоятельной»¹⁰⁹. Мы можем разумно использовать приведенное письмо Эйнштейна Зеелигу; даже если бы он читал другие статьи Лоренца, опубликованные до его статьи 1904 года, он не нашел бы в них более широкого обсуждения опыта Майкельсона, чем Лоренц дал в своей книге 1895 года. Поэтому будет полезно кратко рассмотреть эту работу Лоренца¹¹⁰.

В этой работе Лоренц еще удовлетворялся построением теории, которая объясняла эффекты первого порядка, соответственно отношению v/c . Поэтому на первой же странице сильно подчеркнута значимость эфирной теории Френеля и опыта по наблюдению абберрации, а дальше они рассматриваются и в тексте. Что касается экспериментов

¹⁰⁹ Цитировано по Борну — *Physics and Relativity*, стр. 248 [см.: Макс Борн. Физика в жизни моего поколения. ИЛ, 1963; статья «Физика и относительность», стр. 316, ссылка на стр. 322]. Книга Лоренца «*Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*» была опубликована Е. Бриллемом в Лейпциге в 1895 г. (перепечатана без изменений в 1906 г. Тойбнером в Лейпциге).

Как я показал в другом месте («*Influences on Einstein's Early Work in Relativity Theory*»), почти во всех книгах, по которым Эйнштейн мог изучать теорию Максвелла, эксперимент Майкельсона даже не был упомянут — ни в лекциях по теоретической физике Гельмгольца, хотя именно в его лаборатории был начат первый опыт Майкельсона, ни в очерках Герца, ни в «*Maxwells Theorie der Elektrizität*» Августа Фёшля. В самом деле, наиболее существенной чертой немецких научных трудов является чрезвычайно малое количество ссылок на фактические экспериментальные обстоятельства, и не только на опыт Майкельсона, но и на все другие эксперименты по обнаружению эфирного ветра. Явное исключение составляет только книга П. Друде «*Lehrbuch der Optik*» (Leipzig: S Hirzel, 1900; в 1901 г. она вышла под названием «*The Theory of Optics*» в переводе Манна и Р. А. Милликена с предисловием А. А. Майкельсона, London: Longmans & Green). Однако обсуждение оптических свойств движущихся тел базировалось целиком на книге Лоренца «*Versuch...*» 1895 г., которая «развивала законченную и изящную теорию. Это именно та теория, которая здесь изложена» (английский перевод, стр. 457). Таким образом, в изложении толкования опыта Майкельсона на языке контракционной гипотезы Друде почти дословно копировал соответствующие предложения из книги Лоренца «*Versuch...*».

¹¹⁰ Краткое изложение следующих нескольких страниц было опубликовано в *Proceedings of the International Conference on Relativistic Theories of Gravitation*, Vol. I. (London, 1965), стр. 14—18 (mimeографическое издание).

Майкельсона по обнаружению эфирного ветра, то они были только кратко упомянуты (на стр. 2) и было указано, что они найдут свое объяснение в рамках теории первого порядка только при помощи того, что он называет *Hilfshypothese* *. Этот вопрос не поднимается вновь вплоть до 120-й страницы, до краткого раздела, уже близкого к концу книги, имеющей 139 страниц. Но случилось так, что эта часть книги, которую каждый работающий физик знает по отдельному оттиску со своим подзаголовком «Интерференционный опыт Майкельсона», впоследствии использованному в качестве главного титула, была включена как первая статья в известный специальный сборник работ Лоренца, Эйнштейна, Минковского и Вейля, опубликованного Тойбнером в 1913 году ¹¹¹. (Так с помощью ножниц и комбинаций издатели в действительности искажают историю!)

В книге Лоренца этот раздел появляется в последней главе, посвященной оставшимся неразъясненными трудностям лоренцевской теории первого порядка, во всех других отношениях вполне удачной; эта глава называется «Эксперименты, результаты которых неясны без дальнейших размышлений». Он обсуждает три таких эксперимента, приводящих исследователя в замешательство. Изложение первого занимает около пяти страниц, он посвящен неожиданному отсутствию вращения плоскости поляризации (Маскерт, 1872), которое Лоренц пытается очень неуверенно объяснить с помощью особой гипотезы *ad hoc*. Затем идет (примерно также на пяти страницах) изложение экспериментов Майкельсона 1881 и 1887 годов по обнаружению эфирного ветра. Здесь «на основе [эфирной] теории Френеля предсказывается эффект второго порядка относительно v^2/c^2 ». Чтобы объяснить, почему он не наблюдался, Лоренц сперва отверг исходную теорию аберрации Стокса, как теорию, которая порождает слишком много трудностей; в качестве альтернативы он попытался сместить загадку «посредством одной гипотезы, которую я уже высказал некоторое время тому назад [в 1892—1893 гг.] и к которой, как я позже узнал, пришел и

* Вспомогательной гипотезы (нем.). (*Прим. перев.*).

¹¹¹ Das Relativitätsprinzip. (Leipzig — Berlin: Teubner, 1913.) Сборник часто перепечатывался, имеется английский перевод под названием «The Principle of Relativity», см. ссылку выше. [О русском переводе см. выше].

Фитцджеральд». Эта спасительная вспомогательная гипотеза [Hülfsypothese] введена совершенно ad hoc: «если принять, что плечо [интерферометра], лежащее в направлении движения Земли, короче другого плеча в отношении $L (v^2/c^2)$. . . , то результат опыта Майкельсона будет вполне объяснен»¹¹². Он признает, что «эта гипотеза на первый взгляд может показаться чуждой, но тем не менее нужно признать, что она не так уж неестественна», если связать ее с другими предположениями, а именно, что молекулярные силы, определяющие размеры тела, под влиянием движения относительно эфира изменяются «подобно тому, как мы можем теперь утверждать это относительно электрических и магнитных сил».

Автор не дает никаких подробных объяснений, которые связали бы эту гипотезу с преобразованиями Лоренца в их еще примитивной форме, опубликованными раньше в этой книге. А на протяжении всего этого раздела Лоренц подчеркивает, что этот аргумент имеет природу ad hoc. Так, когда он обращается к сравнению трансформационных свойств, которые он предположил как в молекулярных, так и в электростатических силах, он признает, что «нет никакого основания» для этого предположения¹¹³. У читателя остается впечатление, что результаты этого эксперимента «sich nicht ohne Weiteres erklären lassen», как об этом предупреждает название главы (см. выше). Поэтому кажется, что вся эта работа не потерпела бы ущерба, если бы опыт Майкельсона вовсе не был осуществлен!

Третьим опытом, который Лоренц привел в своей книге 1895 года, является поляризационный опыт Физо со стеклянным стержнем, с помощью которого Физо надеялся обнаружить эффект движения Земли в плоскости поляризации света. Этому опыту отведены последние тринадцать страниц книги, больше, чем другим. Этот опыт выделен замечанием Лоренца о том, что его результаты «заслуживают большого внимания»¹¹⁴.

¹¹² L o r e n t z. «Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern», стр. 123.

¹¹³ «Wozu freilich kein Grund vorliegt» (там же, стр. 124).

¹¹⁴ Оказалось, что экспериментальные результаты Физо были ошибочны, как это уже начал подозревать Лоренц (там же, стр. 2, 127).

Таким образом, когда в 1905 году Эйнштейн в статье по теории относительности после вводного раздела упоминает «неудачные попытки обнаружить движение Земли относительно „световой среды“», не называя специально какую-либо одну из них, он мог иметь в виду любые два или более по крайней мере из *семи* экспериментов, — первых два, приводившихся в последней главе лоренцевской работы 1895 года, и еще пять дополнительных, которые стали известны к 1905 году: эксперименты Рэля 1902 года по вращению плоскости поляризации и двойному преломлению; опыты Брэса по двойному преломлению в 1904 году, и повторение, с отрицательным результатом, опыта Физо со стеклянным стержнем в 1905 году, а также опыты Трутона и Нобля в 1903 году о вращающем магнитном моменте заряженного конденсатора *. (Можно было бы также добавить другие эксперименты по обнаружению эфирного ветра, которые производились до того времени: например, опыт Араго, 1810 год; Физо — 1851, Лоджа — 1832.) Обратив внимание на то, что Эйнштейн имел весь этот выбор, каждый, кто читал доступную литературу, поймет, что из этого еще не вытекает, что опыт Майкельсона не играл вдохновляющей роли. С другой стороны, нельзя также твердо считать, что фраза Эйнштейна о «неудачных попытках» должна непосредственно указывать на какой-либо один из этих опытов, в том числе и на опыт Майкельсона. В действительности вполне возможно, что он читал и слышал о любых двух из этих «неудачных попыток» и сделал правильный вывод, что все они должны быть неудачными.

Вернемся теперь к основной статье Лоренца 1904 года, которую каждый, включая и Эйнштейна после 1905 года, читал и цитировал. Здесь Лоренц возглавил работу по усовершенствованию теории первого порядка 1895 года и особенно стремился достичь теории, охватывающей явления второго порядка. Поэтому опыт Майкельсона стал теперь гораздо более важен для аргументов Лоренца, чем это было в 1895 году. Теперь этот опыт появляется в самом начале статьи, следуя за некоторыми другими, более современными, запутанными экспериментами (Рэля, Брэса, Трутона и Нобля и Кауфмана), а объяс-

* Ожидалось, что такой момент должен появиться под влиянием движения Земли относительно эфира. (*Прим. перев.*)

нение результата Майкельсона дается в двух различных местах ¹¹⁵. Эта статья — произведение большого мастера. По моему мнению она, вместе со статьей Пуанкаре 1905 года, представляет собой лучшую работу, которую только могла достигнуть электродинамика до появления теории относительности Эйнштейна. Но существенно, что в этом высшем достижении классической физики мы обнаруживаем два поразительно слабых места, что признавал позднее и сам Лоренц.

Первое состоит в том, что выведенные в статье уравнения преобразования Лоренца в конце концов не дают то, на что он надеялся: уравнения Максвелла не вполне инвариантны даже при малых скоростях. В 1912 году, при переиздании своей статьи 1904 года в сборнике Тойбнера (1913 г.), Лоренц великодушно добавил подстрочное замечание, которое, к сожалению, опущено в английском переиздании сборника:

«Можно заметить, что в этой статье мне не удалось в полной мере получить формулы преобразования теории относительности Эйнштейна. Ни равенство (7), ни формулы (8) не имеют того вида, который дан Эйнштейном, вследствие чего мне не удалось уничтожить член $— wu_x/c^2$ из первой формулы (9) и таким образом привести уравнения (9) точно к виду, справедливому для покоящейся системы. С этим обстоятельством связана беспомощность [Unbeholfene] некоторых дальнейших рассуждений в этой работе. Заслуга Эйнштейна состоит в том, что он первый высказал принцип относительности в виде всеобщего строго и точно действующего закона» ¹¹⁶.

В «The Theory of Electrons» Лоренца мы находим подобное же заявление ¹¹⁷. Лоренц указывает, что «наряду с захватывающей смелостью своего отправного пункта, теория относительности Эйнштейна имеет еще и другое значительное преимущество по сравнению с моей теорией». Эйнштейн получил точную ковариантность «при помощи

¹¹⁵ «The Principle of Relativity», стр. 22, 29. [«Принцип относительности», стр. 32, 40.]

¹¹⁶ «Das Relativitätsprinzip», стр. 10. [«Принцип относительности», стр. 22—23.]

¹¹⁷ H. A. L o r e n t z. The Theory of Electrons. (Leipzig: Teubner; New York: Stechert, 1909); 2-е изд. (Teubner, 1915), стр. 230. [См.: Г. А. Л о р е н ц. Теория электронов. Гос. изд. технико-теорет. лит-ры, 2-е изд. под ред. Т. П. Кравца, 1956, стр. 333.]

системы новых переменных, весьма, впрочем, мало отличающихся от тех, которые были введены мной». И Лоренц выразительно добавляет: «Я не пользовался этими подстановками только по той причине, что формулы представляются довольно сложными и имеют несколько искусственный смысл, если только не выводить их из самого принципа относительности». К сожалению, это замечание привело к выдвиганию новой темы — об «искусственных» предпосылках в теории относительности, что более подробно будет рассмотрено ниже¹¹⁸.

Признание второго недостатка в работе Лоренца, которое поражает нас как даже более серьезное, чем первое, выражено в другом типично благородном комментарии Лоренца в его «The Theory of Electrons» в 1909 году. Здесь он намекает на следующий аспект расхождения между «беспомощностью» своей собственной сковывающей гипотезы и построенной на ней теории и «изумительной смелостью» эйнштейновского подхода, отбрасывающего весь сложный механизм эфирной электродинамики, теории, в которой Эйнштейн отправляется от общих принципов и где по возможности устраняет любые гипотезы, даже те,

¹¹⁸ Профессор Киттель обратил мое внимание на то, что в книге Иосифа Лармора «Aether and Matter». (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1900), в которой не цитируются ни Эйнштейн, ни Лоренц, излагаются полные и точные уравнения преобразований Лоренца для x , t , E и B . Лармор относил их только к порядку $(v/c)^2$, что ему только и было нужно; он применил их для объяснения нулевого результата опыта Майкельсона, но поскольку он стремился получить инвариантность величины $x^2 - c^2t^2$, как это мы делаем теперь, Лармор получил точно все преобразования.

Один из бывших студентов Лармора, Е. Куннинге́м, в письме Киттелю от 14 декабря 1963 г. объяснял, что в 1903—1904 годах он не обращал внимания на точность преобразования, но полагал, как и Лоренц, что он получил его только для величин второго порядка. Поэтому он говорил о нем как о преобразовании Лармора — Лоренца. В 1904 г. он переехал из Кембриджа в Ливерпуль, здесь установил точные преобразования и написал о них Лармору, который кратко ответил, что он знал, хотя никогда не ссылался на это в своих публикациях или лекциях. Куннинге́м просто добавляет: «Лармор вовсе не приходил в восторг от идеи, что алгебраические преобразования оказались точными». Таким же по характеру было известное нежелание Лоренца придать более общий смысл понятию Ortszeit [местного времени]. Это интересное побочное свидетельство об ограничении, которое может быть наложено на теорию, если она рассматривается как теория, призванная обслужить только ближайшие цели.

которые для современной ему физики были столь же драгоценны, как и световой эфир. Результаты Эйнштейна, касающиеся электромагнитных и оптических явлений, пишет Лоренц, «в основных чертах совпадают с теми результатами, которые мы получили на предыдущих страницах, причем главное различие заключается в том, что Эйнштейн просто постулирует то, что мы старались с некоторыми затруднениями и не всегда вполне удовлетворительно вывести из основных уравнений электромагнитного поля. При этом он, конечно, требует от нас, чтобы мы заранее верили, что отрицательный результат опытов, подобных опытам Майкельсона, Рэля и Брэса, является не случайной компенсацией противоположных эффектов, но выражением общего и основного принципа»¹¹⁹.

В примечании, добавленном в издании 1915 года, Лоренц идет дальше: «Теория относительности Эйнштейна ... получает такую простоту, какой мне достигнуть не удалось»¹²⁰. В последовавшей вскоре публикации Эйнштейн согласился с утверждением, что теория относительности выросла из электродинамики Максвелла — Лоренца «как поразительно простое обобщение и объединение ряда независимых друг от друга гипотез, на которых была основана электродинамика»¹²¹.

Осознание того, что представлявшиеся ранее в виде разрозненных процессы, явления, структуры теперь оказываются взаимосвязанными, всегда было в науке квазиэстетическим, наиболее ценным доказательством. Следует вспомнить о торжествующей гордости Коперника в его «De revolutionibus» за то, что из его гелиоцентрической системы «не только следуют все их [планет] явления, но что эта корреляция столь тесно связывает вместе порядок и размеры планет и их сфер, или орбитальных кругов, и сами небеса, что ничто не может быть смещено в какой-либо их части без нарушения остальных частей и вселенной в целом».

¹¹⁹ Lorentz. The Theory of Electrons (1909), стр. 230. [Г. А. Лоренц. Теория электронов, 2-е изд., 1956, стр. 332—333]. Лоренц и Эйнштейн установили тесную дружбу, каждый из них восхищался научным вкладом другого, несмотря на их фундаментально различные подходы к электродинамике.

¹²⁰ Там же (1915), стр. 321. [См. русск. изд. (1956), стр. 438.]

¹²¹ Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, стр. 28. [А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. I, стр. 551.]

VIII. Против физики ad hoc

Осознание того, что речь идет о раскрытии обобщенной системы, столь превосходно связанной, что из нее все можно вывести, опираясь на небольшое число постулатов,— это именно то, чего недостает в теории Лоренца. Хотя Пуанкаре был предан Лоренцу, он приберет для него некоторые из своих наиболее язвительных критических шпилек за тот метод, благодаря которому в этой работе все больше появлялось новых гипотез:

«On a fait des expériences qui auraient dû déceler les termes du premier ordre; les résultats ont été négatif; cela pouvait il être par hasard? Personne ne l'a admis; on a cherché une explication générale, et Lorentz l'a trouvée; il a montré que les termes du premier ordre devaient se détruire, mais il n'en était pas de même de ceux du second. Alors on a fait des expériences plus précises; elles ont aussi été négatives; ce ne pouvait non plus être l'effet du hasard; il fallait une explication; on en trouve toujours; les hypothèses, c'est le fonds qui manque le moins.

Mais ce n'est pas assez ... »¹²².

Конечно, Лоренц не получил удовольствия от того, что его теория имеет характер ad hoc. По его мнению, положение было очень ясным, когда он писал эту статью 1904 года. На второй странице Лоренц приводит главные основания для публикации новой разработки:

«Описанные опыты не являются единственным основанием желательности новой обработки проблем, связанных с движением Земли. Пуанкаре, возражая против прежней теории оптических и электрических явлений в движущихся телах, указывал, что для объяснения отрицательного результата опыта Майкельсона оказалось нужным ввести новую гипотезу, и что в этом может встре-

¹²² H. Poincaré. Congrès de physique de 1900, Paris, I : 22. «Производились эксперименты, которые должны обнаружить члены первого порядка; результаты оказались отрицательными; неужели это могло быть случайным? Лично я не допускаю. Искали общее объяснение, и Лоренц нашел его; он показал, что члены первого порядка должны исчезать, но он не мог предположить того же для членов второго порядка. Тогда произвели более точные опыты; оказалось, что и они дали отрицательный результат; это уже нельзя было считать случайным; это требовало объяснения; его всегда находят; гипотезы, вот та почва, которой меньше всего не хватает.

Но этого недостаточно...».

таться необходимость всякий раз, когда станут известны новые факты. Подобному введению особых гипотез для каждого нового опытного результата присуща, конечно, некоторая искусственность. Положение вещей было бы удовлетворительнее, если бы можно было с помощью определенных основных допущений показать, что многие электромагнитные явления строго, т. е. без какого-либо пренебрежения членами высших порядков, не зависят от движения системы. Несколько лет назад [1899] я уже сделал попытку создать подобную теорию. Теперь я надеюсь рассмотреть этот вопрос с большим успехом»¹²³.

Существует сомнение в том, что надежды Лоренца на более удовлетворительную теорию были не вполне напрасны. Так, он мог сказать: «На скорость налагается только то ограничение, что она должна быть меньше скорости света»¹²⁴. Но эта работа была далека от того, чтобы она могла обойтись без выдвигания «специальных гипотез», чтобы объяснить новые экспериментальные результаты, и Лоренц должен был, явно или скрыто, ввести по крайней мере одиннадцать предположений, или гипотез *ad hoc* (оба термина взаимозаменяемы в его статье), как я уже

¹²³ «The Principle of Relativity», стр. 12—13, [«Принцип относительности», стр. 18—19]. Насколько чувствительно Лоренц относился к этому спору, видно из его статьи в *Acta Mathematica*, 1912—38, напечатанной в конце тома IX Трудов Пуанкаре «Oeuvres» (Paris: Gauthier-Villars, 1954), в которой Лоренц дал оценку вклада Пуанкаре в физику, особенно в теорию относительности и квантовую теорию. В связи с этим Лоренц позволил себе выразить сожаление относительно своего собственного метода работы (стр. 684):

«Чтобы объяснить опыт Майкельсона 1881 года гипотеза о неподвижном эфире была недостаточна. Я был вынужден сделать новое предположение, допускающее, что перенос тела сквозь эфир вызывает слабое сжатие тела в направлении движения. Эта гипотеза была единственно возможной. Она была изложена Фитцджеральдом и получила одобрение Пуанкаре, но тем не менее Пуанкаре не скрывал того, как мало удовлетворяли его теории, в которых размножаются специальные гипотезы, изобретенные для объяснения частных явлений. Эта критика была для меня дополнительной причиной поисков общей теории».

Дополнительно о том, что Пуанкаре был неудовлетворен теми гипотезами, которые в то время были необходимы, см. C. S c r i b n e r. Henri Poincaré and the Principle of Relativity.— *Am. J. Phys.*, 1964, 32 : 672, и S. G o l d b e r g. Henri Poincaré and Einstein's Theory of Relativity.— *Am. J. Phys.*, 1967, 35: 934—944.

¹²⁴ «The Principle of Relativity», стр. 13 [«Принцип относительности», стр. 19].

отмечал ранее ¹²⁵. Для статьи, которая имеет дело с физикой, с фундаментальной точки зрения это по-настоящему навязчивые гипотезы. Я произвел беглый подсчет, сколько раз встречается термин «гипотеза», или «предположение», и их явные эквиваленты («теперь я предположу»): на этих страницах это случается по меньшей мере тридцать раз и даже больше, если добавить иносказания и скрытые намеки (например, «скорость будет ограничена...»). Все ли введенные гипотезы имеют характер *ad hoc* в одном и том же смысле или в одной и той же степени, различается ли критерий этого *ad hoc* для теорий различных типов, или имеет ли существенное значение это различие для физиков или философов,— спор здесь не об этом. Что здесь более уместно для понимания работы Эйнштейна,— это прочесть статью Лоренца глазами такого же мыслителя, как и Эйнштейн, чей стиль работы состоит в том, чтобы как можно меньше создавать гипотез.

С другой стороны, чтобы полностью понять цель и задачу Лоренца, мы должны помнить, что он видел кризис физики с 1890 и в 1900 годах совсем иначе, чем Эйнштейн. Лоренц, с его обширными познаниями фактически во всех областях физики, в то время был особенно сильно увлечен постепенным, шаг за шагом, построением жизнеспособной теории электродинамики, основанной по возможности на существующих принципах и структурах, покоящейся на экспериментальных результатах, которые выступают в качестве проводников, ведущих к детальной модификации существующей теории. Поэтому, как показывает внимательное чтение статьи Лоренца, обвинение Пуанкаре было вполне оправданно. Но Лоренц пользовался конвенциональным инструментом, заботясь о решении самых трудных проблем, а мы знаем, что и в наше время в некоторых областях физики существуют значительно менее изящные работы с более крикливыми гипотезами *ad hoc*. Вероятно, ничего лучшего нельзя было сделать, поскольку в основе самой физики сохранялся эфир, и это казалось Лоренцу, как и Пуанкаре, Майкельсону и многим другим, предопределенной неизбежностью до конца его жизни ¹²⁶.

¹²⁵ H o l t o n. On the Origins of the Special Theory of Relativity, стр. 630.

¹²⁶ См. G. H o l t o n. On the Thematic Analysis of Science: The Case of Poincaré and Relativity. *Mélanges Alexandre Koyré* (Paris: Hermann, 1964), стр. 797—800.

Простоту введенного Эйнштейном подхода гораздо легче разглядеть ретроспективно. В этом отношении проблема выбора пути в начале развития современной науки — принять или отклонить систему Коперника в шестнадцатом веке — была совершенно аналогична проблеме выбора пути при его раздвоении в науке нашего времени. Известный отрывок из книги Герберта Баттерфильда «The Origins of Modern Science» относится как к поворотным пунктам двадцатого века, так и к более ранним:

«. . . По крайней мере некоторые положения системы Коперника являются скорее оптической иллюзией более поздних веков. В наши дни мы можем сказать, что меньше усилий требуется, чтобы привести в движение Землю вокруг ее оси, чем поворачивать всю Вселенную вокруг Земли в двадцать четыре часа. Но в аристотелевской физике требовалось нечто колоссальное, чтобы переместить тяжесть и инертную Землю, в то время как все небеса состояли из тонкой субстанции, которая, как предполагалось, не имела тяжести, и потому ее сравнительно легко было вращать, так как вращение согласовалось с ее природой. Кроме того, если вы отдаете Копернику преимущество в отношении геометрической простоты, жертва, которую нужно было принести ради этого, была огромна. Вы теряли всю космологию, связанную с аристотелианством, — всю сложную увязанную систему, в которой величие различных элементов и иерархическая классификация их была так великолепно объединена. В самом деле, вы должны выбросить за борт саму структуру существующей науки, и здесь структура Коперника потерпела неудачу в раскрытии удовлетворительной альтернативы. Он создал более точную геометрию небес, но это был человек, допустивший нелепость в обоснованиях и объяснениях, которые были даны в расчете на движение в небесах»¹²⁷.

Здесь опять нужно было сделать мучительный выбор: чтобы распространить принцип относительности, перенеся его с механики (где он до того работал) на всю физику, и в то же время объяснить нулевые результаты всех оптиче-

¹²⁷ Herbert Butterfield. The Origins of Modern Science. (New York: Free Press, 1957), стр. 42. Коперника рассматривали по-разному, — как безумца, глупца или гения. Анализ логического процесса, усматриваемого в его публикациях, не дает основания для такой оценки.

ских и электромагнитных экспериментов по обнаружению эфира, нужно было «только» отказаться от понятия абсолютной системы отсчета и от понятия эфира. Но без этих понятий обычная картина изменилась внезапно, решительно и в каждой детали. Физика была лишена своей старой надежды, уже частично и иногда удовлетворительно выполненной, а именно, объяснить все явления с помощью одной последовательной, механистической теории.

В пределах этой работы мы не можем в полной мере обсуждать вопрос о том, что представляет собой гипотеза *ad hoc*, как она влияла на работу таких ученых, как Лоренц или Эйнштейн. Но мы должны по меньшей мере сделать несколько замечаний по этому вопросу, ибо он является важным предметом спора для двух близких умов. Что касается направления истории в учебниках, то немногие философы эмпиристического убеждения, по-видимому, думают, что теория Лоренца и теория Эйнштейна в целом удовлетворительны (например, они согласны, что не все гипотезы имели характер *ad hoc* в одном и том же смысле, или что теория Эйнштейна не уменьшала решительным образом число и искусственность гипотез); таким образом, опыт Майкельсона становится более вероятным «критическим» событием, которое вынуждает радикальный пересмотр. Для наших целей более важным является другое основание разъяснения смысла *ad hoc* в фактической работе ученых: чтобы уметь оценить различие стиля главных деятелей, а в действительности различие между классической физикой девятнадцатого века и современной физикой двадцатого века.

Начнем с того, что практически не имеет значения, получает ли гипотеза *ad hoc* какую-либо опору в теории (так, из статей Лоренца легко видеть, что он стремится связать контракционную гипотезу с аналогичным, как он предполагает, поведением «молекулярных сил», с одной стороны, и с поведением электрических и магнитных сил, с другой, хотя он и не был в состоянии сказать о каких-либо открытиях, относящихся к этим предполагаемым молекулярным силам). Не имеет также большого значения, что контракционная гипотеза была полностью самостоятельной; Лоренц сам выяснил, что его гипотезы *ad hoc* могли бы быть использованы не только для объяснения тех экспериментов, которые привели к их формулировке (например, предсказание отрицательного результата опыта Майкельсона

для световых лучей, проходящих сквозь прозрачные предметы) ¹²⁸. Эти и другие применения гипотезы *ad hoc* во всех случаях не представляют действительного интереса; они были неубедительны в качестве критерия, который решал бы вопрос о приемлемости гипотезы, и даже если бы такое испытание было проведено успешно, оно вряд ли увеличило бы привлекательность гипотезы для Эйнштейна.

Усовершенствование понятия *ad hoc*, включая подразделения на такие категории, как «логическое *ad hoc*» и «психологическое *ad hoc*», возможно, может представлять интерес для эпистемологических дискуссий. Однако такое занятие все же не имеет существенного значения, и во всяком случае мы не должны отвлекать внимание от того, что действительно является важным, а именно, от ощущения ученого, что гипотезе присущ характер *ad hoc*, независимо от того, идет ли речь о своей собственной гипотезе или нет, — например, отвращение к контракционной гипотезе выражали Эйнштейн, Пуанкаре, Майкельсон и даже сам Лоренц. Понять, что чувствует почти каждый ученый, когда он оценивает гипотезу, оказывается делом трудным для тех, кто фактически не вовлечен в творческую научную работу. Отсюда следует, что будет полезно развивать область, которую безусловно можно назвать эстетикой науки. Потому что эти вопросы по-прежнему практически решаются на той же, внешне неопределимой и все же правильной основе, из которой исходил и Коперник, и которая, возможно, привела его к решению не признавать

¹²⁸ Некоторые полагают также, что контракционная гипотеза не могла не иметь других применений. Некоторые применения, как, например, в эксперименте Трутона — Нобля, хорошо известны. Другие же — нет. Так, когда Газенёрль обнаружил, что его вычисления показали возрастание температуры в заполненной радиацией полости, прошедшей через замкнутый цикл скоростей при адиабатических условиях, он заметил, что «наше противоречие [со вторым законом термодинамики] находит разрешение, если плотность истинной радиации не остается постоянной... Простое предположение состоит в том, что возможно размеры «изменились фактором $(1 - 1/2\beta^2)$ » в полном согласии с предположением Лоренца и Фитцджеральда». F. Hasenöhrl. Zur Theorie der Strahlungen in bewegten Körpern. — Annalen der Physik, 1904, 15: 369. У Газенёрля были и другие применения контракционной гипотезы Лоренца — Фитцджеральда, например, в Sitz. Ak. Wiss., 1907, 116 : 1391, и 1908, 117 : 207. Я благодарю С. Гольдберга за то, что он обратил мое внимание на эти места.

«планетарную теорию Птолемея и большинства других астрономов, несмотря на ее совместимость с числовыми данными»: одно из его главных возражений состояло в том, что он нашел этот род системы «недостаточно привлекательным для разума». Другой взгляд на критерий отбора [теорий], хорошо знакомый каждому работающему ученому, можно найти в письме Гейзенберга к Паули, в котором он дал выход своему чувству относительно подхода Шредингера к квантовой механике: «Чем больше я размышляю над физической частью теории Шредингера, тем более отвратительной [desto abscheulicher] она мне кажется». Шредингер был не менее откровенен в своих чувствах по отношению к теории Гейзенберга, когда писал: «Я был обескуражен [abgeschreckt], если не сказать оттолкнут [abgestossen] тем, что казалось мне довольно трудным методом трансцендентальной алгебры... »¹²⁹

Существенное различие между тем, как применяет гипотезу *ad hoc* ученый и как применяет ее логик, состоит в том, что первый рассматривает ее в значительной степени как вопрос, касающийся науки в личном плане или науки в процессе ее созидания (мы обозначим такой подход к

¹²⁹ См. Max Jammer. The Conceptual Development of Quantum Mechanics. (New York: McGraw-Hill, 1966), стр. 272. Подобные критерии направляют личное решение, на основании которого ученый выбирает наиболее возможную теорию как тогда, когда аргументы за и против обеих теорий кажутся ему одинаково уравновешенными, так и тогда, когда фактически данные кажутся направленными против той теории, которая тем не менее предпочитается. Случай первого рода относится к Галилею, который в книге «Dialogues Concerning the Two Chief World Systems» [русск. перев.: Галилео Галилей. Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой. Гос. изд. техн.-теорет. л-ры, 1948] указал, что гораздо более вероятно, что суточное движение принадлежит только одной Земле, чем всей остальной Вселенной за исключением Земли. Случай второго рода относится к Эйнштейну. Вопреки внешне авторитетному экспериментальному доказательству Кауфмана в 1906 году в пользу теорий Абрагама и Бухерера о движении электрона и тем самым против теории Эйнштейна, последний отказался считать вопрос решенным с помощью таких «фактов» и отклонил конкурирующие теории, заявив: «По моему мнению, обе теории имеют довольно небольшую вероятность по той причине, что их фундаментальные предположения, касающиеся массы движущихся электронов, необъяснимы в понятиях теоретических систем, которые охватывают большую совокупность явлений». (Jb. Radioakt., 1907, 4: 28).

гипотезе через $S - 1$), в то время как второй рассматривает ее как вопрос, касающийся науки в общественном аспекте ($S - 2$). Было бы ошибочным думать об аспектах ($S - 1$) и ($S - 2$) как о всегда резко разделенных, но еще большей ошибкой было бы не заметить глубокого различия между этими двумя значениями науки. В рассматриваемом случае они имеют отношение к различию между двумя правильными, но разными применениями «ad hoc», которые могут быть обозначены как «ad hoc ($S - 1$)» и «ad hoc ($S - 2$)». Для ученого, поглощенного творческой деятельностью, его определение «ad hoc» (или эквивалентного термина) является существенно эстетическим суждением, находящимся в пределах ($S - 1$), в то время как он представляет себе, рассматривает, вводит в употребление или же отклоняет гипотезу. Ad hoc ($S - 1$) в смысле действия индивидуального, как первичное приватное мнение ученого, который может быть очень глубоко и не только рационалистически увлечен, фундаментально отличается от ad hoc ($S - 2$) в смысле общественной категории, с постоянными более или менее ясными эпистемологическими свойствами, которые были обнаружены и стали частью науки как общественного института (science-as-an-institution)¹³⁰.

Нет сомнения, что гипотезы ad hoc ($S - 1$) имеют логические свойства; дело в том, что они не являются господствующими при фактическом применении таких гипотез. Ученый, заимствующий чью-то гипотезу или создающий свою собственную для специальных целей, «чтобы объяснить» беспокоящий результат или особенности теории, рассматривает ее как гипотезу ad hoc — не обязательно в умаляющем смысле, — независимо от ее «логического» статуса. Это помогает объяснить вспыльчивый и задевающий личности «ненаучный язык», широко применяемый при описании таких гипотез, и к тому же указывает на градации эстетической или «психологической» приемлемости. Так, мы нашли в научной литературе следующие характеристики для принятия гипотезы ad hoc: «не невозможная», «разумная», «правдоподобная», «фундаментальная», «естественная», «привлекательная», «изящная»,

¹³⁰ Я рассматривал некоторые различия в значениях ($S - 1$) и ($S - 2$) в статье «On the Duality and Growth of Physical Science» — American Scientist, 153, 41: 89—99.

«подходящая», «априори допустимая для получения желательных результатов», «вспомогательная», или «работающая гипотеза». С другой стороны, когда гипотеза *ad hoc* отклоняется, мы находим следующее ее описание: «искусственная», «сложная», «надуманная», «неправдоподобная», «беспокойная», «неразумная», «невероятная», «непривлекательная», «не необходимая», «вздорная». Иногда само «*ad hoc*» употребляется в уничижительном смысле и тогда *ad hoc* получает такие значения. Или утверждение индивидуума переносится на саму природу, как в древней идее, которую Ньютон выразил так: «Природа любит простоту, она избегает пышности излишних причин» (Заметим, что во всех этих случаях мы не рассматриваем теперь совершенно другой вопрос, что будет выявлено позднее, — была ли гипотеза «верной» или «ложной»).

Унизительные характеристики вызывают поправки, которые вносит автор гипотезы *ad hoc*, чтобы улучшить ее. Так, в 1892 году в публикации на французском языке, о которой Эйнштейн говорил, что он ее читал, Лоренц выдвинул контракционную гипотезу со значительно ограниченной квалификацией: «Итак, некоторые такие изменения в плечах в первом опыте Майкельсона и в размере плиты во втором, насколько я могу видеть, не являются физически невозможными... влияние порядка $\rho^2 : v^2$ не исключено и это как раз то, что нам необходимо»¹³¹. А в 1899 году, описывая влияние движения на массы заряженных частиц, Лоренц говорил: «На первый взгляд такая гипотеза кажется потрясающей. Тем не менее нам не следует полностью отклонять ее».

Язык, применявшийся в то время, когда вводилась контракционная гипотеза, даст нам ключ к раскрытию некоторых свойств гипотезы *ad hoc*, которая не может быть приспособлена к аксиоматической трактовке теории. Вот документ от 10 ноября 1894 года — Лоренц посылает

¹³¹ H. A. Lorentz. The Relative Motion of the Earth and the Aether. Verhandelingen der Konink. Akademie van Wetenschappen, Amsterdam, 1892, 1: 74; также: H. A. Lorentz. Collected Papers. (The Hague: Martinus Nijhoff, 1937), Vol. IV, стр. 219—223; курсив наш. Некоторые из этих и подобных отрывков находятся в статье: A. M. Borg. The «Fitz-Gerald» Contraction.— Isis, 1966, 57: 199—207. См. также обсуждение, изложенное выше в примечаниях 112 и 113.

письмо Фитцджеральду: «Дорогой сэръ, в своей «Aberration Problems» профессор Оливер Лодж упомянул гипотезу, которую вы сформулировали для того, чтобы объяснить отрицательный результат опыта м-ра Майкельсона»¹³². Точно так же, упоминая идею Фитцджеральда в публикации от 27 мая 1892 года, Лодж сказал: «Профессор Фитцджеральд указал *выход из трудности*, предположив, что размер тел является функцией их скорости по отношению к эфиру»¹³³.

Верно, что контракционная гипотеза была вначале радушно встречена теоретиками эфира потому, что она «объясняла» результат Майкельсона; позднее обнаружилась ее неприемлемость ввиду того, что она предсказывала несимметричное изменение размеров для различных инерциальных систем. Но мы должны обратить внимание на тот факт, иллюстрированный этими примерами, что в то время, когда контракционная гипотеза была сформулирована, она была ясно и совершенно очевидно гипотезой *ad hoc*, — или, если предпочитают применять лабораторный жаргон, — гипотезой, остроумно «состряпанной» для ограниченной цели, которую она должна обслужить. В самом деле, в статье А. М. Борка¹³⁴ приводятся две цитаты из более поздних воспоминаний Лоджа; в них описывается доверительная обстановка, в которой протекала деловая беседа между Лоджем и Фитцджеральдом, в ходе которой эта гипотеза, по-видимому, впервые обсуждалась между друзьями, как деликатная, построенная на догадках идея. Точно в такой же ситуации были достигнуты наилучшие успехи — например, Гаудсмитом и Уленбеком был сформулирован постулат о спине электрона¹³⁵. Но в случае этой частной гипотезы всегда сохранялся каузальный, не вероятностный характер, даже когда Лоренц пытался предложить ее в несколько иной форме,

¹³² Черновик рукописи в Algemeen Rijksarchief, The Hague, опубликован С. Г. Брушем в статье «Note on the History of the Fitz-Gerald — Lorentz Contraction». — *Isis*, 1967, 58: 231; курсив наш.

¹³³ O. L o d g e. On the Present State of Knowledge of the Connection Between Ether and Matter: An Historical Summary. — *Nature*, 1892, 46: 164—165; курсив наш.

¹³⁴ А. М. B o r k. The «Fitz-Gerald» Contraction, там же.

¹³⁵ Эта история кратко рассматривается в книге: M a x J a m m e r. The Conceptual Development of Quantum Mechanics, стр. 149—150, а более подробно — в тех источниках, которые он там цитирует.

беспечно полагаясь на объясняющую ее схему, которая базируется на гипотетической аналогии между молекулярными силами (вообще, они могут быть) и электрическими и магнитными силами. Я вовсе не нахожу удивительным, что сам Фитцджеральд был удовлетворен тем, что заставил других обсуждать ту гипотезу, которую Эйнштейн и другие называли гипотезой *ad hoc* в явно умаляющем смысле или которая обычно называлась настоящим образцом гипотезы *ad hoc*.

Этот действующий смысл «*ad hoc*» не является, конечно, единственным смыслом этой фразы, кроме того, имеется смысл, который в этой стадии понимания гипотез является важным для любого исторического анализа, претендующего на выяснение действительного вклада в науку индивидуальной личности. И это есть смысл, который не может быть отклонен как «просто психологический» или «только психологический». Независимо от того, может ли эпистемологический анализ установить другой, возможно, «в широком масштабе не замеченный» смысл, эта фраза остается ясной. Хемпель ясно показал, что «фактически, нет точного критерия для гипотезы *ad hoc*»¹³⁶. Затем эпистемологическое различие между разными значениями гипотезы *ad hoc* оказывается делом более трудным, чем в свое время думали; недавний анализ эпистемолога А. Грюнбаума, который доверительно объявил ясным различие между «логическим *ad hoc*» и «психологическим *ad hoc*», вскоре был изъят его автором, после того как Хемпель показал, что в этой работе были серьезные несоответствия¹³⁷. Можно надеяться на возможный прогресс, но необходимо, не ожидая его, показать оперативный смысл гипотезы *ad hoc*, который все же существует в среде ученых. Джиллиспи сказал правильно: «Специальная теория относительности была скорее ограничением, наложенным на науку, чем выводом из положительных явлений. Своим стремлением к «внутреннему совершенству» в теории Эйнштейн отвечал на требование эстетики, которую логики науки все же не сводят к эмпирической области,

¹³⁶ C. G. Hempel. *Philosophy of Natural Science*. (New York, Prentice Hall, 1966), стр. 30.

¹³⁷ A. Grünbaum. *The Bearing of Philosophy on the History of Science: Philosophical Mastery of the Special Theory of Relativity is Required for Unraveling its History*. — *Science*, 1964, 143: 1406, 1410, 1412.

или на требование взаимной согласованности восприятий»¹³⁸.

Возникают некоторые вопросы, которые мы можем осветить в другом месте, а здесь затронем только очень кратко. Все ли гипотезы являются гипотезами *ad hoc*? Краткий ответ — нет. В специальном примере контракционной гипотезы были, по меньшей мере, альтернативы двух родов. Отрицательный результат опыта Майкельсона можно было объяснить, показав, что заключения, эквивалентные лоренц-фитцджеральдовской контракции, могли быть выведены из гипотез или постулатов, которые не предполагались бы специально для того, чтобы объяснить это явление, например из уравнений преобразований Лоренца, хотя последние в начальной стадии могли полностью иметь характер *ad hoc что касается их собственной исходной цели* — обеспечения инвариантности уравнений Максвелла¹³⁹. В самом деле, когда Лоренц предложил уравнения преобразования, это имело тот же смысл *ad hoc* в отношении их целей; он поэтому отказался признать одно из возможных следствий уравнений преобразования, а именно физическое значение понятия *Ortszeit* — «местного времени»; он полагал, что это понятие было изобретено для более узких целей. Другая возможность состояла в том, чтобы вывести положение, которое было бы эквивалентно контракционной гипотезе, из положений, которые были бы даже более далеки от какой-либо специальной работы об экспериментальных результатах Майкельсона, например, из двух основных постулатов, изложенных в статье Эйнштейна о теории относительности 1905 года. Это было столь просто сделать, что Эйнштейн, как мы знаем, в своей статье 1905 года не соблаговолил тща-

¹³⁸ C. G. Gillispie. *The Edge of Objectivity*. (Princeton: Princeton Univ. Press, 1960), стр. 516.

¹³⁹ Что требование инвариантности уравнений Максвелла было основным побуждением к выводу уравнений преобразований Лоренца, скорее чем объяснение экспериментов по обнаружению эфира, — это не всегда признается доказанным; например, в книге S. J. Prokhorov *The Logic of Special Relativity*. (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1967, стр. 6) написано: «Однако их [Лоренца и Пуанкаре] метод спасения понятия эфира имел определенно искусственный характер. Их преобразование было придумано исключительно с целью объяснить нулевой результат, связанный с необнаруживаемостью среды. Это была тень призрака нулевого измерения».

тельно, пункт за пунктом, рассмотреть вывод, а просто на-мекнул, что читатель может сам сделать для себя этот вы-вод в отношении всех оптических экспериментов.

Существенный момент состоит здесь в том, что «ad hoc» является не абсолютным, а относительным понятием. О постулатах 1 и 2 можно сказать, что они были введены ad hoc в отношении теории относительности 1905 года в целом; Эйнштейн мало ссылаясь на обоснование даже *Vermutung* [предположения] постулата 1 и фактически не приводил ничего в обоснование *Vermutung* постулата 2. Но оба эти принципа не были ad hoc в отношении к опыту Майкельсона, ибо они не были специально «сформулированы для того, чтобы объяснить» его результат.

Таким образом, какое-либо положение может быть ad hoc относительно одного контекста, но не быть ad hoc относительно другого. Как показал Бруш¹⁴⁰, Фитцджеральд пытался опубликовать свою контракционную гипотезу в письме в журнал «Science» в 1889 году, но он никогда не видел отпечатанного оттиска и думал, что письмо не появилось потому, что журнал приостановил печатание примерно в это время. Это первоначальное предложение было полностью предложением ad hoc относительно эксперимента по обнаружению эфирного ветра:

«Я хотел бы подсказать мысль, что почти единственной гипотезой, которая может согласовать это противоречие [между экспериментом Майкельсона и френелевским эфиром], является гипотеза о том, что длина материальных тел изменяется соответственно тому, как они движутся сквозь эфир, на величину, зависящую от квадрата отношения их скоростей к скорости света»¹⁴¹.

Чтобы подкрепить эту гипотезу, он сослался на «правдоподобное предположение, что движение воздействует на молекулярные силы и что соответственно изменяется объем тел». До некоторой степени, подобно Лоренцу, Фитцджеральд сам основывался на качественной аналогии: «Мы знаем, что движение заряженных тел относительно эфира воздействует на электрические силы». Однако позднее Фитцджеральд, по-видимому, не считал свое предложение чем-то большим, чем гипотезой ad

¹⁴⁰ «Note on the History of the Fitz-Gerald — Lorentz Contraction», цит. выше.

¹⁴¹ G. F. Fitz-Gerald. The Ether and the Earth's Atmosphere. — Science, 1889, 13: 390.

нос, и его ответ Лоренцу от 14 ноября 1894 года подчеркивает отличие от взгляда Лоренца, выраженного в его собственном первом письме. Фитцджеральд писал: «Дорогой сэр, я пропагандировал доктрину, которую доказывает опыт Майкельсона, и являюсь одним из тех, кто видит единственный путь в доказательстве, что длина тела зависит от того, как оно движется сквозь эфир... Теперь, когда я слушаю вас как защитника и авторитета, я начну смеяться над другими за поддержку какого-либо иного взгляда». То, что Фитцджеральд в публикации 1889 года характеризовал более скромно как «почти единственную гипотезу, которая может согласовать это противоречие», которая поддерживалась «правдоподобным предположением», — полезная идея, как показала работа Лоренца, когда он применил свою собственную, очень сходную идею, — стала в 1894 году для Фитцджеральда «доктриной», «доказанной» экспериментом Майкельсона, и в этом контексте уже больше не является гипотезой *ad hoc*. Отсюда мы видим, что понятие *ad hoc* является относительным в более глубоком смысле, чем мы могли полагать: оно относительно для одного лица по отношению ко времени (то, что для Фитцджеральда было *ad hoc* в 1889 году, уже не является *ad hoc* в 1894 году), и относительно в одно и то же время для разных лиц (то, что было в 1894 году *ad hoc* для Лоренца, не было *ad hoc* для Фитцджеральда в том же году).

Как можно решить, является ли гипотеза гипотезой *ad hoc* или нет? И более того, является ли она отвергающей гипотезой *ad hoc* или же утверждающей? И тут мы находим связь с эйнштейновским критерием «внутреннего совершенства» теории. Этот критерий есть ощущение «естественности» или «логической простоты» предпосылок. И мы снова вспоминаем, что Эйнштейн отмечает непосредственно два пункта: один — это то, что эта точка зрения «всегда играла большую роль при выборе между теориями и при их оценке», и второй, — что «точная формулировка его представляет большие трудности», потому что «речь идет здесь не просто о каком-то перечислении логически независимых предпосылок (если таковое вообще возможно однозначным образом), а о своего рода взвешивании и сравнении несоизмеримых качеств»¹⁴².

¹⁴² «Autobiographical Notes», стр. 23. [А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. IV, стр. 266.]

В поисках других аспектов самой науки, лучших критериев для решения вопроса о том, имеет ли какая-либо гипотеза характер *ad hoc*, выступает не один только логический анализ. На это, что бы там ни произошло, обращает внимание авторитетное заявление Эйнштейна: «Конечно, нет логического пути, ведущего к установлению теории, существуют только нащупывающие конструктивные попытки...». Вероятно, нет ученого, кому бы сильно не помог такой критерий, как тот, какой сформулирован Карлом Поппером: «Что касается вспомогательных гипотез, то мы считаем нужным установить правило, согласно которому только те из них приемлемы, введение которых не уменьшает степень, с какой опровергается или подтверждается рассматриваемая система, и, напротив, эту степень увеличивает»¹⁴³. Что требуется, так это нащупывание состояния дел — *Fingerspitzengefühl*, — тонкое чутье, которое не только характеризует проницательность различных ученых, но и вынуждает их высказывать совершенно различные взгляды на одну и ту же гипотезу. Я умышленно применяю рискованное слово «нащупывание», потому что оно точно указывает на трудность определения пути, которым формируются взгляды о научной ценности гипотез. Так, Макс Вертхеймер записал высказывание Эйнштейна о контракционной гипотезе Лоренца: «Он воспринял эту вспомогательную гипотезу как гипотезу *ad hoc*, которая не доходит до сути дела... Он чувствовал, что действительные трудности лежат глубже, чем противоречие между ожидаемыми фактическими результатами опыта Майкельсона»¹⁴⁴.

Главная трудность, какую я встречал при более абстрактных обсуждениях, состоит в том, что в некоторых случаях этого важного *Fingerspitzengefühl* не хватает. При отсутствии идущего из первых рук ощущения стиля науки историческая или философская ученость, в особенности когда речь идет о случаях, относящихся к переднему краю главного направления науки, подвергается опасности, вероятно, потому, что ее мнение, по существу, будет неинтересным или беспомощным перед масштабом личности, приватным ($S - 1$) аспектом науки, независимо от того,

¹⁴³ К. Поппер. *The Logic of Scientific Discovery*. (New York: Basic Books, 1959), стр. 82.

¹⁴⁴ М. Вертхеймер. *Productive Thinking*. (New York: Harper Brothers, 1945), стр. 173—174.

будет ли некоторый подход «доходить до сути дела» или нет. Так называемое «философское мастерство» должно быть пополнено пониманием вопросов, связанным с научным вкусом и мироощущением. С другой стороны, оно может быть отнесено к бессодержательному случаю, или хуже того, к случаю, который существует только как наглядная модель, построенная с целью отобразить собственную завуалированную теорию науки данного автора. Это может привести к тому, что такое лицо будет распекают Эйнштейна за то, что он не вел себя подобно послушному студенту в классной комнате логики, за то, что он не применял «правильной» терминологии, за то, что он не взял на себя каких-то «обязательств» по отношению к его философским произведениям^{51, 137}. Это может привести к тому, что это лицо не обратит внимания на полезность (неполного) определения гипотезы *ad hoc*, которое заключается в весьма свободомыслящем четвертом правиле умозаключения Ньютона: гипотеза принимается «за строго или почти строго истинную, несмотря на то, что могут быть предположены некоторые противоположные ей гипотезы», до тех пор, пока мы не получим некоторые дополнительные данные, благодаря которым эта гипотеза может быть пересмотрена или сформулирована более точно¹⁴⁵.

¹⁴⁵ Именно в этом духе Планк в докладе «Zur Dynamik bewegter Systeme» (Sitz. Ak. Wiss., 1907, 29: 542—570) доказывал, что принцип относительности следует принять, так как до сих пор еще не встречалось ничего, что вынуждало бы считать его *неверным*. В этом аргументе тот же смысл, что и в первом критерии надежной теории Эйнштейна, в котором он требовал, что «теория не должна *противоречить* фактам».

Естественно, что подобная точка зрения появилась в различных публикациях Поланьи, например, в «Current Issues in the Philosophy of Science» (под ред. H. Feigl и G. Maxwell, New York: Holt, Rinehart & Wiston, 1961, стр. 53—55), а также в публикациях С. Дрэка, например, в «The Scientific Personality of Galileo» (в печати, стр. 22 мимеографического издания):

«В последнее время я читал много ученых,— лучше бы сказать «схоластических», — дискуссий по вопросу о том, имел ли Галилей право, как ученый, сделать вывод в пользу Коперника на основе тех данных, которые были в его распоряжении... Решающий пункт не в том, имел ли Галилей или не имел наглядные данные решительно в пользу Коперника [благодаря более поздним наблюдениям], а именно как он поступал, когда он считал, что у него были такие данные».

Конечно, имеются полезные суждения о гипотезах *ad hoc* у философов, например у Мэри В. Гэсс в «Forces and Fields», стр.

Я полагаю, что задача эпистемолога является трудной потому, что самый характер его работы отличается от эпистемологии работающего ученого, по необходимости более неопределенного. Эйнштейн предупреждал об этом в известном отрывке в «Ответе на критику», который мы цитировали и в котором он сравнивает отношение профессионалов к этим дисциплинам и замечает, что ученый не может позволить себе «ограничиваться в построении своего концептуального мира приверженностью к какой-либо эпистемологической системе»¹⁴⁶, Ганс Рейхенбах благо-разумно признавал эту опасность, когда он писал в том же томе отрывок, которого мы уже касались:

«Физик, который надеется на новое открытие, не должен быть слишком критическим; в начальной стадии он зависит от отгадывания, и он найдет свой путь, если будет придерживаться определенной веры, которая направляет его догадки. Когда я по определенному поводу спросил Эйнштейна, как он обосновал свою теорию относительности, он ответил, что он обосновал ее потому, что был сильно убежден в гармонии Вселенной. Нет сомнения в том, что его теория дает очень удачную демонстрацию полезности такого убеждения. Но убеждение еще не фило-

226—235. Она поднимает также важный, не обсуждавшийся выше, вопрос о том, что контракционная гипотеза была «отчасти *ad hoc* потому, что она вызывала [мысль], что движение в эфире принципиально ненаблюдаемо» (стр. 228).

По этому поводу мы можем заметить, что гипотеза *ad hoc*, в особенности малоплодотворная [*a poor one*], создает впечатление, что процессы природы сокращаются или ограничиваются произвольным вмешательством человека. С другой стороны, огромные масштабы обобщения вызывают ощущение, что она *расширяет* область применения и показывает, где лежат «естественные» границы: например, первый принцип теории относительности распространяет равенство инерциальных систем с механики на всю физику. Точно так же и другие успехи науки характеризовались утверждением гипотез, которые обобщают предельные ситуации; таковы: ньютоновское предложение о всеобщем тяготении; галилеевское распространение земной физики на небесные явления; максвелловское обобщение, которое уничтожает границы между электрическими, магнитными и оптическими явлениями, а также и другие гипотезы, которые легко можно дополнить из работ Гельмгольца, Дарвина и Фрейда. Своевременное философское обоснование этого метода гипотез было дано в третьем правиле умозаключений Ньютона.

¹⁴⁶ E i n s t e i n. Reply to Criticism, стр. 684. [А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. IV, стр. 310].

софия; оно называется так только при упрощенном толковании этого термина. Философ науки не очень интересуется процессами мышления, которые приводят к научным открытиям; он обращает внимание на логический анализ завершенной теории, включая соотношения, устанавливающие ее ценность. Иначе говоря, он *заинтересован не в том, какая ситуация привела к открытию, а в том, какие взаимосвязи оправдывают его*¹⁴⁷.

Конечно, у самих ученых иногда проявляются зеркально-симметричные «зоны молчания», или отсутствие интереса или подготовки. Но ничто не кончается на мертвой точке. Напротив, можно надеяться, что дальнейшие исследования структуры и смысла свойств гипотезы *ad hoc* могут принести пользу в результате работы такого рода, какая будет плодотворной для научных поисков вообще,— в результате сотрудничества между историками, философами и специалистами [естествоиспытателями], между теми, кто разделяет убеждение, что проблема стоит труда, и кто желает соединить свои разносторонние усилия для совместной работы над ней.

Возвращаясь из этой краткой экскурсии в область, которая нуждается в дальнейшей разработке, мы должны теперь усовершенствовать и подвести итог нашей оценке возможной роли эксперимента Майкельсона в работе Эйнштейна, приведшей к статье 1905 года. При чтении книги Лоренца 1895 года Эйнштейн обнаружил, что этот эксперимент не мыслился как решающее событие, на основе которого должна быть построена новая физика; он был лишь одним из нескольких экспериментов с точностью до величин второго порядка, которые в это время могли быть объяснены только путем привлечения еще других неудачных гипотез *ad hoc*; их нужно было присоединить ко всем другим, на которых была построена очередная теория. Лоренц сам открыто называл контракционную гипотезу *Hülfs-hypothese* [вспомогательной гипотезой] и позднее считал необходимым сделать (по существу, напрасную) попытку объяснить результат Майкельсона более привлекательными гипотезами. После 1905 года Эйнштейн по разным поводам характеризовал контракционную гипотезу как неудовлетворительную. Майкельсон был с

¹⁴⁷ H. R e i c h e n b a c h. The Philosophical Significance of the Theory of Relativity, стр. 292; курсив наш.

этим согласен («такая гипотеза казалась довольно искусственной»¹⁴⁸). То же и Пуанкаре. Были согласны с этим и другие, те, перед которыми вставал вопрос, можно ли с нею работать. А это и есть то, что следует учитывать в характеристике свойств *ad hoc*.

Мы приходим к выводу, что главный урок из опыта Майкельсона для Эйнштейна был второстепенным: в пространенном в то время объединении результата этого опыта с гипотезой сжатия тел он ощущал ее непривлекательный характер *ad hoc* и ее компромисс с теорией электродинамики, построенной на гипотезе стационарного эфира, которую Эйнштейн уже и ранее признавал неадекватной по многим другим, и в значительной степени по эстетическим, основаниям. Этой проблемой, как считал Эйнштейн, была не логическая структура контракционной гипотезы, не сам результат опыта Майкельсона, потому что он *мог* быть приспособлен, даже если и не «ohne Weiteres» [без дальнейшего], а только неспособность теории Лоренца удовлетворить критерию «внутреннего совершенства» теории.

В другом месте я уже обращал внимание на то, что Эйнштейн делал различие между «конструктивными теориями» и «теориями принципов»¹⁴⁹. Теории последнего рода, такие же, как теория относительности и термодинамика, исходят из «эмпирически наблюдаемых общих свойств явлений». Ударение не на каком-либо одном свойстве или явлении, а на творческом обобщении или синтезе *gesamten Erfahrunstatsachen* [опытных фактов в целом], всего объема физического опыта в какой-либо области в целом. Было бы неудачной карикатурой думать, что какой-либо один эксперимент мог быть главным основанием для перестройки всей электродинамики.

Этим мы завершаем наш анализ данных, относящихся к более раннему периоду работы Эйнштейна. Теперь мы обратимся к более позднему периоду, к 1920—1950 годам.

¹⁴⁸ A. Michelson. *Studies in Optics*, стр 156.

¹⁴⁹ См. A. Einstein. *Time, Experience and Gravitation* (1948) в «*Out of May Later Years*». (New York: Philosophical Library, 1950). Это было рассмотрено в книге: H o l t o n: *Mach, Einstein and the Search for Reality*, стр. 647, 667.

IX. Косвенные данные: после 1905 года

Сначала мы вернемся к беседам Шэнкленда, чтобы рассмотреть итог развития взглядов Эйнштейна на экспериментирование вообще. Итак, Шэнкленд спросил Эйнштейна в 1952 году относительно незадолго до того опубликованного подхода к относительности Синга, который предсказал небольшой положительный эффект в эксперименте майкельсоновского типа. «Эйнштейн решительно заявил, что он считает, что подход Синга не имеет значения. Он полагает, что даже если бы Синг осуществил эксперимент и *были бы получены положительные результаты*, они совершенно не имели бы отношения к делу... [Позднее] он повторил снова, что нет необходимости в новых экспериментах и что результаты, которые Синг мог бы получить, «не имели бы отношения к делу». Он предостерег меня от опытов такого рода»¹⁵⁰.

Этот взгляд был характерен не только для позднего периода. При просмотре документов в архиве Эйнштейна обнаруживаются обильные данные из самого раннего периода, показывающие, что Эйнштейн чувствовал, что было необходимостью или последовательностью в законе природы, понимание которого, после того как он нашел его даже только на основе намеков, полученных благодаря немногим избранным экспериментальным фактам, позволяло ему оценить значение дальнейших экспериментов. Отклики Эйнштейна на результаты Д. Миллера, повторившего опыт Майкельсона — Морли, довольно типичны.

Во время рождественских каникул 1925 года Эйнштейн получил от газетного агентства в Соединенных Штатах телеграмму: «Президент Американского физического обще-

¹⁵⁰ R. S. Shankland. Conversation, стр. 53—54. [УФН, 87, 1965, стр. 717—718]; курсив наш. Эксперимент с этой целью был осуществлен позднее, он дал нулевой результат, как и предсказывал Эйнштейн. В той же самой беседе Эйнштейн выразил сожаление о тогдашнем состоянии ядерной теории и вновь добавил предостережение того же рода: «он считает, что простое увеличение фактов и экспериментальных данных в ядерной физике не способно прояснить ситуацию или привести к окончательной правильной теории. Это находится в сильном противоречии с господствующим взглядом, что экспериментальные факты в конечном счете раскроют закономерности и тем самым дадут нить, которая приведет к теоретическому решению. Он совершенно не согласен с этим взглядом...» (там же, стр. 54).

ства Миллер объявил об открытии эфирного ветра. Он утверждает: «Моя работа аннулирует второй постулат теории Эйнштейна». Пожалуйста, телеграфируйте мнение для прессы. Ответ 200 слов оплачен...» По-видимому, Эйнштейн не дал ответа, но в эти же дни он написал своему старому другу Мипелю Бессо: «Я думаю, что эксперименты Миллера покоятся на ошибке в температуре, Я не принимаю их всерьез ни на минуту». Кроме того, 14 марта 1926 года в письме А. Паккарду Эйнштейн писал: «Я убежден, что в случае Миллера все привидение вызвано температурными влияниями (воздух)»¹⁵¹. Как это и оказалось, интуитивный ответ Эйнштейна был правилен. В самом деле, именно Шэнкленд и его коллеги¹⁵², старательно и превосходно проанализировав данные Миллера, нашли, что разность «эфирного ветра» на различных высотах, о которой сообщал Миллер, «была фактически вызвана различием температурных условий в фундаментах лабораторий в Институте Кэйза и на Маунт-Вильсон»¹⁵³.

¹⁵¹ Копии переписки находятся в архиве Эйнштейна. Мисс Дюкас сообщает, что известное замечание: «Raffinert ist der Herr Gott, aber boshaft ist Er nicht» [Господь Бог изощрен, но не злобен] — было высказано Эйнштейном в 1921 году на приеме после лекции в Принстоне в связи с вопросом о его отношении к эксперименту Миллера 1921 года, когда было доложено о получении им положительных результатов, доказывающих наличие эфирного ветра на разных высотах.

¹⁵² R. S. Shankland, S. W. McCuskey, F. C. Leone and G. Kuersti. New Analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller.— Rev. Mod. Phys., 1955, 27: 167.

¹⁵³ Shankland. Conversations, стр. 52. В этой истории имеется многозначная ирония. Группа Шэнкленда вначале полагала, что наиболее вероятное решение загадочных результатов Миллера лежит в другом пункте, и на поиски этих решений затратила три года. Шэнкленд писал: «Это было только до начала 1954 года, когда после тщательного анализа разброса результатов мы убедились, что периодические эффекты, обнаруженные Д. С. Миллером, вызываются не статистическими флуктуациями или его методом анализа. Только после этого мы глубоко погрузились в изучение температурных эффектов, чтобы найти действительную причину результатов Миллера» (там же, стр. 51).

Ирония состоит еще и в том, что задолго до Эйнштейна другой гениальный ученый дал аналогичный интуитивный ответ на вопрос о возможном источнике ошибки в эксперименте майкельсоновского типа. В недавно обнаруженном письме Майкельсон, писавший Симону Ньюкомбу о своем визите в Берлин 22 ноября 1880 года и о своем плане постановки самого первого опыта с интерферометром, сообщил ответ выдающегося руководителя

Теперь мы переходим к самому важному документу, который следует понять совместно с обстановкой, в которой он появился. Мы имеем в виду речь Эйнштейна, которую он произнес в начале 1931 года во время своего посещения Пасадины (штат Калифорния), когда он в первый и последний раз встретился лицом к лицу с Майкельсоном. Случай, должно быть, волнующий. Майкельсон, который был на двадцать семь лет старше, заочно восхищался Эйнштейном, как мы уже отмечали. Позднее Шэнкленд рассказывал, что Эйнштейн особенно ценил в Майкельсоне «артистическое восприятие и подход к науке, особенно его чувство симметрии и формы. Эйнштейн улыбался от удовольствия всякий раз, когда он вспоминал артистическую натуру Майкельсона — это были родственные натуры»¹⁵⁴.

Но известно, что Майкельсон не был сторонником теории относительности, которая разрушила представление об

лаборатории — Германа фон Гельмгольца: «Я имел очень продолжительную беседу с Гельмгольцем о предложенном мною методе обнаружения движения Земли относительно эфира, и он сказал, что не видит возражений против этого опыта, кроме трудности сохранения постоянной температуры». Это письмо было впервые приведено в тезисах Свенсона «The Ethereal Aether»; см. также: S h a n k l a n d. The Michelson—Morley Experiment.— Am. J. Phys., 1964, 32: 19.

Но ирония заключается и в собственной интерпретации Миллера эйнштейновского интереса и отклика на его работу. В письме к Т. Менденгаллу от 2 июня 1921 года Миллер писал: «На прошлой неделе меня посетил Эйнштейн и полтора часа беседовал об экспериментах по обнаружению эфирного ветра. Я нашел его чрезвычайно любезным, он вовсе не требовал внимания к теории относительности и явно более интересовался результатами этих экспериментов и менее всего чем-либо другим, и был вполне готов признать результаты, независимо от того, будут ли они за или против теории. По крайней мере, он был довольно искренен и сердечен, чтобы оставить такое впечатление» (из письма, находящегося в «the Archive of the Center of History and the Philosophy of Physics», American Institute of Physics, New York. Я благодарю доктора Чарльза Вейнера, его директора, за сообщение мне этого письма). Правдоподобность объяснения того впечатления, которое получил Миллер, несколько уменьшается сообщением Шэнкленда; он задал Эйнштейну вопрос по поводу этого визита к Д. С. Миллеру в Институт Кэйза в 1921 году: «... он сказал мне, что когда он приехал в Соединенные Штаты в этом году, он не знал по-английски ни слова. Во время путешествия кое-что выучил на слух» (S h a n k l a n d. Conversations, стр. 50).

¹⁵⁴ S h a n k l a n d. Conversations, стр. 49.

эфире. Подобно многим другим, Майкельсон был убежден, что его собственные злополучные опыты служили основой этой теории; в беседе, состоявшейся в 1927 году, он так объяснял ход развития физики: эксперимент Майкельсона заставил Лоренца предположить преобразования, а «они содержали по существу всю теорию относительности»¹⁵⁵. Позднее Эйнштейн вспомнил, что Майкельсон «не один раз сказал мне, что ему не нравятся теории, которые вытекали из его работы»¹⁵⁶, он сказал также, что немного огорчен тем, что его собственная работа породила это «чудовище»¹⁵⁷.

Майкельсону было тогда семьдесят девять лет; за неделю до этого у него был серьезный удар. С фотографии, снятой по случаю встречи, смотрит болезненный старик, стоящий на этом последнем публичном выступлении рядом с Эйнштейном, с обычным для него выражением достоинства; но он уже был отмечен знаком смерти, которая последовала три месяца спустя.

Среди других присутствовавших на большом обеде в новом Атенее, в Пасадене, 15 января 1931 года были выдающиеся физики и астрономы: У. С. Адамс, У. У. Кэмпбелл, Д. Э. Хэйл, Э. П. Хаббл, К. Э. Сент-Джонс, Р. Э. Милликен, Р. Ч. Толмэн, а также миссис Эйнштейн и двести членов Калифорнийского институтского объединения¹⁵⁸. Милликен открыл выступления несколькими замечаниями о тех характерных чертах, которые он усматривал в современном научном мышлении (он берет «в качестве ее исходного пункта хорошо удостоверенные, тщательно опробованные экспериментальные факты, независимо от того, кажутся ли эти факты соответствующими какому-либо общему философскому направлению или нет... Короче говоря, современная наука есть наука существенно эмпирическая, и чтобы она стала таковой, никто не сделал больше, чем физик-теоретик Альберт Эйнштейн»). В сущности это в значительной степени был тот же самый материал,

¹⁵⁵ Michelson. В сб. «Conference on the Michelson — Morley Experiment», стр. 344.

¹⁵⁶ Shankland. Conversations, стр. 57.

¹⁵⁷ Там же, стр. 56.

¹⁵⁸ Труды были опубликованы в Science, 1931, 73 : 375—381. Все приведенные ниже цитаты взяты из этого источника, если не указаны другие.

который Милликен опубликовал еще раз через восемнадцать лет как часть своей вводной статьи в выпуске журнала «Review of Modern Physics», посвященном Эйнштейну. Но в 1931 году после предложения — «Так родилась специальная теория относительности» — Милликен продолжал: «Сейчас я хочу представить человека, который заложил ее экспериментальные основы, — профессора Альберта А. Майкельсона...».

Майкельсон отвечал кратко в духе Милликена: «Я особенно счастлив тем, что имею возможность выразить доктору Эйнштейну мою признательность за уважение и особое внимание, которыми он наградил меня за результат, так щедро приписанный им экспериментам полувековой давности, выполненным мной в сотрудничестве с профессором Морли, и который он с такой щедростью признает вкладом в экспериментальное обоснование, приведшее к его знаменитой теории относительности».

Эйнштейн ничего на это не ответил. Затем Милликен пригласил высказаться Кэмпбелла, одного из блестящей группы астрономов-экспериментаторов, сказав: «Тем самым я ставлю перед ним задачу обрисовать развитие экспериментальных оснований теории относительности». Кэмпбелл перечислил успешные результаты трех основных контрольных исследований, в которых ведущую роль играли калифорнийские астрономы.

Затем Милликен перешел к представлению Эйнштейна, но предварительно еще раз подчеркнул философскую концепцию, которую он развивал. На этот раз он сослался на собственную «экспериментальную проверку» предсказаний, содержавшихся в ранних статьях Эйнштейна. В свете высказываний Милликена, его оценка статьи Эйнштейна по квантованию световой энергии (1905 года) не была неожиданной: «Чрезвычайную проникаемость и смелость проявил Эйнштейн в 1905 году, проанализировав новую группу экспериментальных фактов и проследовав за ними вплоть до следствий, казавшихся ему неизбежными, — независимо от того, были ли они разумными или нет с точки зрения господствовавших в то время представлений. Никогда эти качества не проявлялись более разительно».

Наконец наступил момент, когда все ждали ответа Эйнштейна. То, что происходило затем — или, точнее, то, что считают за происходившее, — широко известно из

отчета, приведенного в единственной имеющейся в настоящее время биографии Майкельсона — «Майкельсон и скорость света», написанной Б. Джеффом. Джефф пишет: «Эйнштейн произнес краткую речь. Рядом с ним сидели Майкельсон, Милликен, Хэйл и другие известные ученые. «Я нахожусь среди людей, — начал Эйнштейн, — которые на протяжении многих лет были моими настоящими товарищами в моем труде». Затем, обратившись к тому, кто измерял скорость света, он продолжал: «Мой distinguished доктор Майкельсон, Вы начали эту работу, когда я был еще маленьким мальчиком, ростом едва ли трех футов. Именно Вы повели физиков по новому направлению и своей изумительной экспериментальной работой проложили путь развитию теории относительности. Вы обнаружили скрытый дефект в существовавшей тогда эфирной теории света и стимулировали идеи Г. А. Лоренца и Фитцджеральда, из которых развилась специальная теория относительности. Без Вашей работы эта теория была бы и сегодня не более чем интересным умозрением; именно Ваше подтверждение впервые поставило теорию на реальную почву».

Майкельсон был глубоко тронут. Более высокой похвалы для любого человека не могло быть»¹⁵⁹.

Все описание происшедшего события подготовило читателя к ответу именно такого рода, и Джефф дает естественный и четкий ответ на вопрос о возможной генетической связи между опытом Майкельсона и работой Эйнштейна, ответ, находящийся в полном согласии со всеми учебниками, которые мы цитировали раньше: «В 1931 году, как раз перед смертью Майкельсона, Эйнштейн публично связывает свою теорию с опытом Майкельсона»¹⁶⁰.

Однако при внимательном чтении изложения Джеффа нам не нужно идти так далеко. Майкельсон «стимулировал» идеи Лоренца и Фитцджеральда, из которых, в свою очередь, «развилась» специальная теория относительности — эта схема не противоречит вероятной цепи событий, рассмотренной выше. В свое время опыт Майкельсона объяснялся посредством гипотезы сжатия, выдвинутой Лоренцом и Фитцджеральдом и изложенной в работах Лоренца 1892 и 1895 годов, которые, как мы знаем,

¹⁵⁹ J a f f e. Michelson and the Speed of Light, стр. 167—168.

¹⁶⁰ Там же, стр. 101.

Эйнштейн читал. Это объяснение вследствие своего непривлекательного характера *ad hoc* окончательно скомпрометировало эфирную теорию электродинамики, которую Эйнштейн уже по многим другим причинам считал неадекватной реальности. В изложении краткого ответа Эйнштейна было определенно выпущено упоминание о вкладе других, кроме тех, кого он здесь называет; но ясно, что для этого не было оснований.

Труднее для нас согласовать последнее приведенное выше высказывание с идеями, которые мы развиваем. Как это верно для подобных замечаний в другое время, может быть, их действительно можно отнести скорее к восприятию теории относительности общественностью, чем к собственному развитию идей Эйнштейна, ведущему к его статье 1905 года. А замечания — «без Вашей работы . . .», «. . . именно Ваше подтверждение. . .» — звучат, конечно, как личная признательность Майкельсону, публичное признание той связи, которую ясно увидел в них Джефф. И в этом случае мы должны признаться, как это сделал Кеплер в середине «*Astronomia Nova*»: «Дорогой читатель, наша гипотеза обращается в дым».

Но оказывается, что широко толкуемая Джеффом версия выступления Эйнштейна попала в ловушку предвзятого мнения, и она была выдвинута против желания Эйнштейна. Заголовок, небольшое высказывание и длинное заключение из речи Эйнштейна, которое было опущено Джеффом, — все это сильно изменило выступление. Немецкий оригинал текста речи Эйнштейна был опубликован в 1949 году ¹⁶¹ вместе с довольно неточным переводом, который был использован в отчете «*Science*», а также с пропусками в книге Джеффа. Речь начинается словами «*Liebe Freunde!*» [«Дорогие друзья!»]; это обращение адресовано, конечно, ко всем присутствующим, среди которых были те, чья научная деятельность была тесно связана с его собственной. И как раз между двумя последними предложениями, цитированными Джеффом, мы находим другое предложение, которое внезапно уводит обсуждение от Майкельсона и специальной теории относительности к собравшимся астрономам и общей теории относительности. Точное изложение читается так: «До-

¹⁶¹ Proceedings of the American Philosophical Society, 1949, 93: 544—545.

рогие друзья! Вы обнаружили скрытый дефект в существовавшей тогда эфирной теории света и стимулировали идеи Г. А. Лоренца и Фитцджеральда, из которых развилась специальная теория относительности. *В свою очередь, последняя открыла путь к общей теории относительности и теории гравитации.* Без вашей работы эта теория была бы и сегодня не более чем интересным умозрением; именно ваше подтверждение впервые поставило теорию на реальную почву» (курсив наш). Немедленно вслед за этим следует признательность за экспериментальные достижения калифорнийским астрономам, «которые создали реальную почву для [общей] теории», — Кэмпбеллу, Сент-Джонсу, Адамсу и Хабблу¹⁶².

То, что произошло, является все же уточненным комплиментом Майкельсону. Однако даже стоя рядом с ним и под усугубляющим давлением драматического события, Эйнштейн не соглашался ни с милликеновской, ни с майкельсоновской версиями генетической связи (и, конечно же, это не совпадает с версией Джеффа). Он не воспользовался возможностью высказать прямо то, что, казалось, все были готовы услышать, вроде: «Решающий эксперимент Майкельсона явился основой моей собственной работы». Создается впечатление, что он смотрит на Майкельсона скорее как на одну из фигур на непрерыв-

¹⁶² Английские переводы, только слегка отличающиеся друг от друга, опубликованы в журналах *Science* (1931) и *Proc. Am. Phil. Soc.* (1949). Но ради полноты я дам здесь более точный перевод первой части немецкого текста (см. ссылку 161):

«Дорогие друзья! Я пришел к вам издалека, но не к чужим, а к людям, которые на протяжении многих лет были верными товарищами в моей работе. Вы, distinguished господин Майкельсон, начали, когда я был только маленьким мальчиком, даже и не в метр ростом. Именно Вы повели физиков по новому направлению и своим изумительным экспериментальным трудом подготовили развитие теории относительности. Вы обнаружили опасный дефект в существовавшей тогда эфирной теории света и стимулировали идеи Г. А. Лоренца и Фитцджеральда, из которых возникла специальная теория относительности. В свою очередь, последняя открыла путь к общей теории относительности и к теории гравитации. Без вашей работы эта теория была бы и сегодня не более чем интересным умозрением; ваше подтверждение обеспечило реальную [или реалистическую] основу этой теории. Определение Кэмпбеллом отклонения светового луча, проходящего около Солнца; определение Сент-Джонсом красного смещения спектральных линий благодаря гравитационному потенциалу, существующему на поверхности Солнца; ...».

ном и долгом пути, ведущем к теории относительности. Ибо даже в процессе работы над теорией весной 1905 года Эйнштейн заявлял, что он рассматривал свой труд не как резкий разрыв с прошлым, а более скромно, как продолжение и совершенствование существующих тенденций¹⁶³.

Что касается досадного пропуса указанного предложения в очень полезной в других отношениях книге Джеффа, то известно, как такие вещи случаются в самый щекотливый момент. Объяснение заключается в следующем: когда в чем-то твердо убеждены, в пользу того и излагают ситуацию. Хуже всего то, что не по вине Джеффа его оценку много раз повторно публиковали другие, которые явно подошли без научной проверки к существующему оригинальному тексту, но нашли его оценку удобной для своей собственной цели — проведения тесной генетической связи от Майкельсона к Эйнштейну.

Следующий подлежащий рассмотрению документ был опубликован после возвращения Эйнштейна из Пасадены. Он представляет собой написанный в третьем лице конспект замечаний Эйнштейна, представленный 17 июля 1931 года Физическому обществу в Берлине в связи с тем, что отмечалось память Майкельсона, скончавшегося 9 мая 1931 года. Еще раз Эйнштейну представился случай сказать о том, о чем уже долгое время твердили все учебники, и сделать это при наиболее естественных обстоятельствах. Но, как и в Пасадене, этого не случилось. Об Эйнштейне сообщается, что он сказал (без прямого цитирования), что величайшей идеей Майкельсона «было изобретение его знаменитого интерферометра, который приобрел большое значение как для теории относительности, так и для наблюдения спектральных линий», и «этот отрицательный результат [опыта Майкельсона] сильно укрепил веру в справедливость общей теории относительности»¹⁶⁴. Фраза в лучшем случае внушает некоторое сомнение в точности информации, так как опыт Майкель-

¹⁶³ В письме к своему другу Конраду Габахту Эйнштейн писал: «Четвертая статья, лежащая передо мной в черновом наброске, по электродинамике движущихся тел, применяет *модификацию* теории пространства и времени». В книге: Carl Seelig. Albert Einstein. (Zürich: Europa Verlag, 1954), стр. 89, 97; курсив наш. [Русск. перевод: К. З е л и г. Альберт Эйнштейн. Атомиздат. Изд. 2-е, стр. 72—73.]

¹⁶⁴ «Gedenkworte auf Albert A. Michelson». — Zeitschrift für Angewandte Chemie, 1931, 44: 685.

сона мог быть истолкован раньше, чем появилась общая теория относительности. Но даже в этой сомнительной форме сообщение больше согласуется с более ранними утверждениями Эйнштейна, указывающими на полезность эксперимента для убеждения других физиков в ценности теории относительности.

Последовало затишье на несколько лет, в течение которых вопрос о возможном долге по отношению к Майкельсону, по-видимому, не возникал. Затем в ответном письме к Джеффу от 17 марта 1942 года Эйнштейн снова сделал заявление по этому вопросу. Оно имело наиболее характерные черты ответов, данных Шэнкленду спустя восемь—двенадцать лет, т. е. речь идет о влиянии, которое усиливало полученные ранее убеждения и устранило сомнения (возникшие у других):

«Несомненно, что опыт Майкельсона имел значительное влияние на мою работу, поскольку он усиливал мое убеждение в справедливости принципа специальной теории относительности. С другой стороны, я был очень твердо убежден в справедливости этого принципа еще до того, как я узнал об этом эксперименте и о его результатах. Во всяком случае эксперимент Майкельсона практически устранил какое-либо сомнение в справедливости этого принципа в оптике и показал, что глубокое изменение основных понятий в физике неизбежно»¹⁶⁵.

В 1946 году Эйнштейн по просьбе Шилппа написал «Автобиографические заметки», из которых мы уже цитировали все места, относящиеся к обсуждаемому вопросу. Часто отмечали, особенно те, кто верил в «связующее звено», что Эйнштейн разрушил их надежды, даже по

¹⁶⁵ В. J a f f e. Men of Science in America. (New York: Simon & Schuster, 1944), стр. 372. Напечатано также в книге: В. J a f f e. Michelson and the Speed of Light, стр. 100—101. Такие же рассуждения без подробностей приводятся в хорошо известной и держащей в некотором напряжении книге психолога Макса Вертхаймера «Productive Thinking». Вертхаймер сообщает, что начиная с 1916 года он проводил многие часы с Эйнштейном, «чтобы услышать от него историю драматического развития, которое достигло кульминационного пункта в теории относительности» (стр. 168). «Когда Эйнштейн читал об этих критических экспериментах, произведенных физиками, и о тончайшем эксперименте, выполненном Майкельсоном, их результаты не были для него сюрпризом, хотя они были очень важными и убедительными. По-видимому, они скорее подтверждают, чем подрывают его идеи» (стр. 172).

этому поводу не дав им то, что они ожидали. Но он не упомянул ни имени, ни эксперимента.

Начиная с 1950 года, в течение оставшихся пяти лет жизни Эйнштейна, этот вопрос стали задавать даже гораздо чаще, чем раньше. Многие просьбы относятся ко времени интервью Шэнкленда, которые мы уже разбирали, и ответы в целом совершенно совпадают с ними.

8 июля 1953 года интервью у Эйнштейна взял физик Н. Балаш, отчет которого был затем опубликован М. Поланьи в 1958 году. Балаш сообщал:

«... Опыт Майкельсона — Морли не играл роли в обосновании этой теории. Он ознакомился с ним во время чтения статьи Лоренца о теории этого эксперимента (он, конечно, не помнит точно когда, хотя это было до его статей), но в дальнейшем он не оказал влияния на рассуждения Эйнштейна, и теория относительности вовсе не была обоснована с целью объяснить его результаты»¹⁶⁶.

Поланьи, выдающийся физико-химик, в продолжение долгого времени знакомый с Эйнштейном, опубликовал также второе заявление, «одобренное для публикации Эйнштейном в начале 1954 года»: «Эксперимент Майкельсона — Морли имел незначительное влияние на открытие теории относительности»¹⁶⁷.

Почти в то же самое время на Эйнштейна пала священная обязанность отдать долг одному из выдающихся ученых и наставников. Это было сделано в кратком обзоре «Г. А. Лоренц как творец и человек», датированном 27 февраля 1953 года, составленном для прочтения в Лей-

¹⁶⁶ В книге: M. P o l a n y i. *Personal Knowledge*. (Chicago: Univ. Chicago Press, 1958), стр. 11.

¹⁶⁷ Там же, стр. 10. Поланьи предпочел использовать это заявление, чтобы подкрепить свои собственные заключения:

«То, что обычный учебник считает теорию относительности откликом на эксперимент Майкельсона — Морли, есть выдумка. Это — продукт философского предубеждения. Когда Эйнштейн открыл рациональность в природе без помощи какого-либо наблюдения, которого не было в распоряжении физиков по крайней мере на 50 лет раньше, наши позитивистские учебники сразу прикрыли скандал соответствующе приукрашенным изложением о его открытии».

Это замечание привело к исключительно ругательским нападкам на него со стороны крайней позитивистской школы. Последующая дискуссия показала его справедливость, но ее рассмотрение должно быть отложено до другого повода.

дене в ознаменование столетия со дня рождения Лоренца¹⁶⁸. После великолепной дани Лоренцу за его руководство и выдающуюся роль в физике на повороте века Эйнштейн приводит (неполное) перечисление гипотез, на которых Лоренц базировал свою реконструкцию электродинамики, и добавляет: «Его работа обладает последовательностью, ясностью и красотой, которые очень редко достигаются в эмпирической науке».

Но эта эмпирически обоснованная конструктивная теория имеет свои ограничения, и в описании их Эйнштейн отмечает две совершенно различные черты электродинамики конца XIX и начала XX веков, которые, как он намекает, создали арену для эйнштейновской теории относительности. Одна из них — главным образом эстетическая:

«Для него [Лоренца] уравнения Максвелла в пустом пространстве были справедливы только в определенной системе координат, которая казалась преимущественной благодаря своей неподвижности относительно всех остальных систем координат. Это было поистине парадоксальное положение, потому что теория, казалось, ограничивает инерциальную систему сильнее, чем классическая механика. Это обстоятельство, которое с эмпирической точки зрения представлялось совершенно необоснованным, *должно было* привести к специальной теории относительности».

Это замечание полностью совпадает с давно существующим преданием о том, что первичным толчком для Эйнштейна было существенное требование отыскания симметрии и универсальности в действиях природы.

Другая проблема в теории Лоренца, к которой Эйнштейн привлекает внимание, касается экспериментальной стороны: неспособность теории охватить в изящной форме все относящиеся к делу явления. В части абзаца, посвященного этому недостатку, Эйнштейн набрасывает несколько сокращенную версию, значительно менее адекватную, чем собственное признание Лоренца. Вместо перечисления всех трудных для понимания экспериментов, обсуждаемых у Лоренца в его «Versuch» 1895 года, или еще большего числа их, ставших известными к 1905 году,

¹⁶⁸ Перевод см.: A. E i n s t e i n. Ideas and Opinions, стр. 73—76, под названием: H. A. L o r e n t z. Creator and Personality. [См.: А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. IV, стр. 334].

Эйнштейн напоминает только один, для которого Лоренц и Фитцджеральд приспособили знаменитую спасительную гипотезу, а именно, эксперимент Майкельсона; затем Эйнштейн добавляет еще два высказывания, менее известных, чем большинство других, которые мы читали по этому вопросу, и, по-видимому, более отличающихся от них:

«Единственное явление, объяснение которого на этом пути не удалось полностью, т. е. без дополнительных допущений, был знаменитый опыт Майкельсона — Морли. Что этот опыт приводил [или направлял, *hinführte*] к специальной теории относительности, было бы немислимо понять без локализации электромагнитного поля в пустом пространстве. Фактически существенный шаг состоял в любом случае в прослеживании [явлений?] до уравнений Максвелла в пустоте, или — как тогда ее называли — в эфире»¹⁶⁹.

Средняя фраза представляет для нас, конечно, особый интерес; но ее вдвойне отрицательная довольно неясная конструкция не дает нам оснований заменять ее каким-либо другим утверждением, вроде: «Этот эксперимент привел меня к специальной теории относительности». В ходе обсуждения этого вопроса на протяжении почти пятидесяти лет Эйнштейн не проявлял никакого колебания, и когда он этого хотел, он говорил от имени первого лица в единственном числе; и всегда, когда он так делал, он соединял воспоминания о своих собственных достижениях и об эксперименте, в лучшем случае говоря, как в ответе Джеффу в 1942 году, что эксперимент «имел боль-

¹⁶⁹ Как это бывает нередко, нельзя положиться на опубликованные переводы; в данном случае мы установили текст, используя немецкий оригинал, находящийся в архиве Эйнштейна: «Das einzige Phänomen, dessen Erklärung auf diesem Wege nicht restlos, d. h. nicht ohne zusätzliche Annahmen, gelang war das berühmte Michelson — Morley-Experiment. Dass dies Experiment zur speziellen Relativitätstheorie hinführte, wäre ohne die Lokalisierung des elektromagnetischen Feldes im leeren Raume undenkbar gewesen. Der wesentliche Schritt war eben überhaupt die Zurückführung auf die Maxwell'schen Gleichungen in leeren Raume oder — wie man damals sagte — im Aether».

Два других перевода, слегка отличающихся друг от друга, приведены в «Ideas and Opinions», стр. 75, и в сборнике: H. A. Lorentz. Impressions of his Life and Work. Ed. G. L. DeHaas — Lorentz. (Amsterdam: North Holland Publishing Co., 1957), стр. 8. [Имеется небольшое разночтение с русским переводом, см.: А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов, т. IV, стр. 335].

шое влияние на мою работу, поскольку он укреплял мое убеждение относительно обоснованности принципа специальной теории относительности».

Наиболее близким к идеям Эйнштейна мне представляется следующее понимание: в статье, посвященной ознаменованию памяти Лоренца, он хотел дать краткое указание на то, что опыт дополняет эстетико-теоретическую направляющую линию, что мы отмечали несколько ранее, и он направляет удар по тем пояснениям роли опыта, которые наиболее часто применяют для целей всех дидактических изложений (включая и собственные изложения Эйнштейна)¹⁷⁰. Мы узнали раньше, что когда Эйнштейн писал в пассивной форме, отвечая на вопросы, или по обязанности, он говорил о важности эксперимента Майкельсона для дальнейшего развития и признания теории *другими* физиками. Когда он явно упоминал о влиянии эксперимента на него самого, в явном виде и в первом лице, он говорил, что эффект был «незначительным», «косвенным», «довольно косвенным», «не решающим» или самое большое «значительным» в том ограничительном смысле, в каком был дан ответ Джеффу. Поэтому мы научились различать между эйнштейновскими оценками влияния опыта на научную общественность и его влиянием на отдельного ученого.

Эти рассуждения привели нас непосредственно к последнему документу по этому вопросу, к последнему из ответов Эйнштейна, данному примерно за год до его смерти. 2 февраля 1954 года Ф. Давенпорт (с исторического факультета Монмаутского колледжа, штат Иллинойс) написал Эйнштейну, что в связи с обдумыванием монографии «Scientific Interests in Illinois, 1865—1900» он изучал доказательства того, что Майкельсон «повлиял на Ваше мышление и, возможно, помог Вам разработать Вашу теорию относительности». Не являясь специалистом, Давенпорт просил «кратко изложить в неспециальных терминах, каким образом Майкельсон помог проложить путь Вашей теории, если это действительно было так».

Эйнштейн ответил вскоре после того, как получил это письмо, 9 февраля 1954 года¹⁷¹. Возможно, извлеки

¹⁷⁰ См. выше сноски 29 и 30.

¹⁷¹ Копия его до сих пор не опубликованного ответа находится в картотеке архива Эйнштейна в Принстоне.

пользу от вопросов, повторявшихся на протяжении нескольких предыдущих лет, и обдумав снова свои ответы, он теперь, кажется, очень охотно и подробно отвечал незнакомому человеку, разрешил опубликовать письмо, а также пригласил продолжить переписку. Этот глубокомысленно составленный ответ, который мы можем считать сам по себе как обобщающий итог всего, что мы изучали из других документов, заставляет привести четкую дифференциацию между влиянием обсуждаемого эксперимента на развитие физики и его влиянием на развитие собственного мышления Эйнштейна, между красотой бесмертного эксперимента и его вспомогательным местом в теории, между утверждениями, которые ученый может делать в непосредственном ответе на повторяющиеся вопросы, и утверждениями, когда он выступает по собственному желанию (в последнем случае Эйнштейн предпочитал не говорить об отдельных экспериментах, за исключением опыта Физо и аберрации), и между большим интересом всего вопроса, занимающего многих людей, и малым интересом, который, по-видимому, занимал Эйнштейна.

«Дорогой мистер Давенпорт!

Уже до работы Майкельсона было хорошо известно, что в пределах точности эксперимента не наблюдалось влияния состояния движения координатной системы на физические явления, и соответственно на их законы. Г. А. Лоренц показал, что это может быть объяснено на основе его формулировки максвелловской теории во всех случаях, когда можно пренебречь вторыми степенями скорости системы (т. е. в эффектах первого порядка).

Однако из свойств теории было естественно ожидать, что такая независимость не будет иметь места для эффектов второго и более высоких порядков. Величайшей заслугой Майкельсона было то, что в одном решающем случае он сумел показать, что ожидаемого эффекта второго порядка *de facto* не существует. Эта работа Майкельсона, — замечательная в равной степени как по смелости и ясности постановки задачи, так и по той изобретательности, с какой была достигнута необходимая, крайне высокая точность измерений, — составляет непреходящий вклад в науку. Этот вклад явился новым сильным аргументом за то, что «абсолютного движения» не существует, т. е. в пользу принципа относительности, который

никогда со времени Ньютона не подвергался сомнению в механике, но казался несовместимым с электродинамикой.

Когда я развивал свою теорию, результат Майкельсона не оказал на меня заметного влияния. Я даже не могу припомнить, знал ли я о нем вообще, когда я писал свою первую работу по специальной теории относительности (1905 г.). Объяснить это можно тем, что из общих соображений я был твердо убежден в том *, что никакого абсолютного движения не существует, и моя задача состояла только в том, чтобы сочетать это обстоятельство с тем, что известно из электродинамики. Отсюда можно понять, почему в моих исследованиях опыт Майкельсона не играл никакой роли или, по крайней мере, не играл решающей роли.

Я не возражаю против опубликования этого письма. Я готов также дать дополнительные разъяснения, если они потребуются.

С искренним уважением Альберт Эйнштейн».

Но если такое отношение Эйнштейна было искренним, то почему он по собственной инициативе не сделал какого-либо заявления, чтобы остановить миф, который, как он видел, распространяется вокруг него? Ведь были же многие благоприятные возможности. Почему он ждал, когда ему зададут вопросы, вроде Джеффа, Балаша, Шэнкланда, Поланьи и Давенпорта, чтобы выдвинуть ранее отрицавшиеся разногласия, которые почти каждому представлялись решенными? Ответ на этот вопрос можно, конечно, найти в общем характере ответного письма Эйнштейна. Даже в чисто научных спорах он только очень редко публиковал поправки ко многим ошибочным толкованиям его работ (не говоря уже об ответных атаках); еще менее мыслимо, чтобы он по собственному желанию опубликовал что-либо, что могло бы казаться возвышением степени оригинальности его собственной работы или намеком на более низкое положение другого ученого. Сюда же относится и то, что он с удивительным юмором и терпением встречал даже наи-

* В этом месте в публикации «Isis», вероятно, по недосмотру пропущена часть фразы: *that there does not exist absolute motion and my problem was only ...* (см. статью Холтона с текстом этого письма в *Am. Journ. of Phys.*, 37, N 10, 1969, стр. 969). (Прим. перев.).

более злобные нападки в прессе на его работу и на его личность со стороны нацистских ученых (и не-ученых).

В самом деле, с точки зрения историка, характерный недостаток Эйнштейна состоял в том, что он был слишком терпелив. Это показывает следующий примечательный эпизод. Когда Уиттекер составлял второй том своей «A History of the Theories of Aether and Electricity» (1953), в котором он открыто приписал главную оригинальную работу по специальной теории относительности Лоренцу и Пуанкаре, старый друг Эйнштейна Макс Борн, живший тогда в Эдинбурге, увидел рукопись Уиттекера. Наблюдая за появлением теории относительности практически с самого начала, Борн был удивлен и в некоторой мере рассержен по поводу этой, вводящей в заблуждение версии. В тревоге он написал Эйнштейну, что Уиттекер продолжал упорствовать в намерении опубликовать свою версию, несмотря на противоречащие ей данные, которые Борн представил ему на рассмотрение (включая переводы с немецких оригиналов некоторых относящихся к делу статей, которые он подготовил для Уиттекера). Хотя Эйнштейн был несколько удивлен, он написал 12 октября 1953 года письмо Борну, чтобы его успокоить:

«Не беспокойся ты из-за книги этого своего приятеля! Каждый ведет себя так, как ему представляется правильным или, выражаясь детерминистски, — как он должен. Если ему удастся убедить других, то это их дело. Сам я, во всяком случае, получил удовлетворение от своих трудов, но не считаю разумным защищать пару результатов как «свою собственность», — подобно тому, как некий старый скряга оберегает пару медяков, которые он с трудом собрал. Я не обижаюсь на Уиттекера ... я вообще совсем не вижу необходимости читать эту штуку»¹⁷².

Х. Заключительные замечания

Историки часто обнаруживают большие расхождения между документальной историей науки, с одной стороны, и популярной историей науки в учебниках и очерках некоторых выдающихся ученых и философов-аналитиков, с

¹⁷² Копия в архиве Эйнштейна в Принстоне. См. наст. сборник, стр. 71. (Прим. ред.).

другой. Собрав вместе все известные в настоящее время, полученные из первых рук, документы,— и среди них статью 1905 года, интервью Шэнкленда, «Автобиографические заметки» и письма,— мы видим, что они соответствуют друг другу и рисуют историю, которую вторичные источники нам не показали. Это — схема, в которой мы не можем, соответственно природе случая, быть уверенными, но схема в высокой степени вероятная. В действительности роль опыта Майкельсона в генезисе теории Эйнштейна, по-видимому, была столь небольшой и косвенной, что можно было бы сделать предположение, что для теории Эйнштейна ничего не изменилось бы, если бы этот опыт вовсе никогда не был выполнен. Конечно, общественное признание теории могло бы сильно задержаться. Но благодаря чтению работ Лоренца Эйнштейн имел в своем распоряжении достаточно других «неудачных попыток» установить движение Земли относительно «световой среды» и достаточно других свидетельств о том, что сам Лоренц называл «неуклюжестью» общепринятой тогда теории.

Этот специальный случай может навести и на более широко применимые выводы. Прежде всего мы вынуждены снова спросить, какие стили и функции больше всего соответствуют сегодня исторической эрудиции, особенно на фоне преобладающей доктрины экспериментизма. Собственная точка зрения Эйнштейна разъясняет этот вопрос. Шэнкленд спросил Эйнштейна во время их первой беседы в 1950 году, «считает ли он, что стоит описать историю эксперимента Майкельсона — Морли».

«Он сказал: «Да, конечно, но вы должны написать ее так же, как Мах написал свою «Механику»». Затем он высказал мне свои идеи о том, как следует писать историю науки. «Почти все историки науки — филологи, которые не понимают, к чему стремятся физики, как протекает процесс мышления и к чему сводятся их усилия в разрешении проблем. Даже большинство работ о Галилее выполнены слабо». Нужно найти такой способ изложения, который показал бы процесс мышления, приводящий к открытиям. В этом вопросе физики мало могут помочь, так как большинство из них не обладает «историческим чутьем». Однако он считал, что «Механика» Маха — это одна из действительно замечательных книг, которая является образцом литературы по истории науки. Он сказал: «Мах не знал реальных фактов о том, каким путем ран-

ние исследователи разрешали свои проблемы», но он, Эйнштейн, чувствует, что Мах обладал достаточной интуицией, и то, что он сказал, по-видимому, весьма правдоподобно. Преодоление трудностей проблем, стремление любыми средствами найти решение, которое наконец приходит, но часто благодаря очень косвенным методам — вот истинная картина»¹⁷³.

При обсуждении подхода «почти всех историков» (возможно, это сказано слишком сильно) Эйнштейн подчеркивает, что историческая работа должна касаться личной сферы труда ученого, показывая, как человек мыслит и преодолевает трудности при решении проблемы. Оценивая самих физиков (возможно, также несколько резко), Эйнштейн подчеркивает необходимость особого исторического чутья, которое подсказывает, каким образом мог действовать ученый, даже при отсутствии «действительных фактов», в ходе творческого процесса. Это претенциозное заявление — не что иное, как рекомендация принять для исследования в области истории науки тот урок, который Эйнштейн получил в процессе своего исследования физики: *так же, как и при создании самой физики*, Эйнштейн советует здесь историку перешагнуть через неминуемый разрыв между неизбежно слишком ограниченными «фактами» и теми умственными построениями, которые необходимы для того, чтобы трактовать факты. В таком историческом исследовании, *как и в самой физике*, решение приходит часто «благодаря очень косвенным методам», и лучший исход, на который можно надеяться, заключается не в достоверности, а лишь в вероятности того, что результат «так или иначе правилен».

Можно вполне согласиться с этим призывом к новым методам описания тех процессов мышления, которые привели к большим открытиям, не соглашаясь, однако, задним числом с выбором в качестве конкретного образца «Механики» Маха. Наиболее очевидная трудность, которая встречается, если следовать совету Эйнштейна, — это, конечно, неопределенность термина «достаточная интуиция». Другая трудность заключается в том, что любое исследование процесса открытия — этого мимолетного, отчасти бессознательного, недоступного для наблюдения,

¹⁷³ S h a n k l a n d. Conversations, стр. 50. [УФН, 87, в. 4, 1965, стр. 714.]

непередаваемого словами и невозстановимого вида деятельности — по определению должно привести к результату с явно неопределенными и противоречивыми элементами. Еще одна трудность связана с тем, что предложение «смело перешагивать» может привести к тому, что даже некоторые из наиболее подходящих и легко доступных документов (исторических «фактов») будут упущены. И четвертое затруднение обусловлено существованием некоторых проблем, которые в настоящее время кажутся почти неразрешимыми ни одним из существующих методов: проблемы одаренности, причин тематического и эстетического выбора, взаимодействие между личным и общественным аспектом наук, не говоря уже о проблеме индукции.

Сам Эрнст Мах, возможно, возразил бы против данной Эйнштейном характеристики его работы по истории науки, какой бы хвалебной она ни была. Тем не менее Эйнштейн был прав, приписывая Маху и рекомендуя другим необычный метод несмотря на трудности и опасности, которые он может повлечь. Ибо таким путем можно по крайней мере надеяться проникнуть за пределы прозаических или тривиальных аспектов важных исторических событий, более полно осознать проявление интеллектуальной смелости и великолепного вкуса, который был необходим для создания теории.

Конечно, эксперименты существенны для исторического прогресса. Конечно, построение цепи от нового загадочного эксперимента к теоретической схеме, которая его объясняет, — это обычный процесс, особенно в повседневной работе большинства ученых. Конечно, эксперименты оказывали влияние и на мышление молодого Эйнштейна, стремившегося по-новому осмыслить проблемы электродинамики, проникнуть в «сердце материи». Конечно, эксперимент Майкельсона играл в этом косвенную роль, хотя бы потому, что Эйнштейн нашел одно несоответствие электродинамической теории Г. А. Лоренца, заключавшееся в том, что «она приводила к интерпретации результата эксперимента Майкельсона — Морли, которая казалась искусственной», как писал Эйнштейн в своем послании к столетию Майкельсона, или* как слишком явное *ad hoc*, как он писал по другим поводам.

И тем не менее следует противостоять заблуждению экспериментистов, внушающих идею о строго логическом

следовании от эксперимента к теории, по учебнику. Это неверно не только в отношении к реальному развитию исторических процессов мышления, которые привели к большим научным открытиям. Эта доктрина, если говорить серьезно, не только может мешать творческой работе в науке. Но хуже то, что, обращая внимание в первую очередь на внешне зримые моменты, которые создают фактическую опору и оперативную действенность развитой теории, она не воздает должного всему величию теории. Основное достижение теории Эйнштейна состояло не в сохранении освященных традицией представлений или конструкций и не в построении логически строгого хода размышлений; она не была основана на превосходном и убедительном с педагогической точки зрения эксперименте. Скорее основным достижением теории было то, что даже ценой пожертвования всем этим она дала нам новую гармонию в объяснении природы.

ЭФФЕКТ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА
И ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА
ПРИ ДВИЖЕНИИ ИСТОЧНИКОВ СО СКОРОСТЬЮ
БОЛЬШЕ СКОРОСТИ СВЕТА В ВАКУУМЕ*

Введение

При равномерном и прямолинейном движении некоторого «источника» в однородной среде излучение возникает только при условии, что скорость источника v больше фазовой скорости c_Φ рассматриваемых волн в данной среде. При этом волновой вектор в излучаемых волнах k составляет со скоростью источника v угол θ_0 , где

$$\cos \theta_0 = \frac{c_\Phi}{v}. \quad (1)$$

В акустике подобное излучение источника, движущегося со скоростью больше скорости звука, давно известно (волны Маха); то же можно сказать о различных волнах на поверхности жидкости. В электродинамике же излучение равномерно движущегося источника (например заряда) известно как эффект Вавилова — Черенкова и было открыто только в 1934 г. Теория этого эффекта, построенная в 1937 г. Таммом и Франком [1], приводит, естественно, к условию излучения (1), а для энергии, испускаемой зарядом q в единицу времени, дает выражение

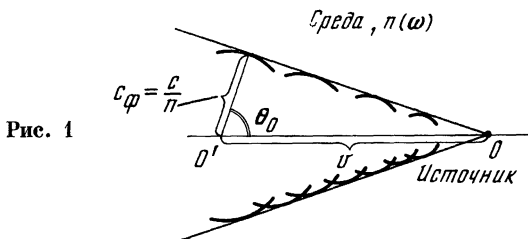
$$\frac{dW}{dt} = \frac{q^2 v}{c^2} \int_c^{\frac{c}{n(\omega)v} \ll 1} \left(1 - \frac{c^2}{n^2(\omega) v^2} \right) \omega d\omega, \quad (2)$$

где $n(\omega)$ — показатель преломления на частоте ω для рассматриваемой прозрачной изотропной среды (как известно, фазовая скорость волн $c_\Phi = c/n(\omega)$).

Поскольку условие излучения (1) справедливо для волн любой природы, ясно, что оно носит кинематический

* В основу статьи положен доклад, сделанный на научной сессии ООФА и ОЯФ АН СССР 25 ноября 1971 г. Оpubл. в УФН, 106, в. 4, 1972.

(интерференционный) характер. Действительно, согласно принципу Гюйгенса каждая точка среды на пути излучателя служит источником вторичных волн. Огибающая этих волн имеет характер конуса, раствор которого определяется углом $\theta_0 = \arccos(c_\Phi/v)$ (см. рис. 1, на котором расстояние $O'O$ равно v — пути, проходимому источником за единицу времени; за это же время волновой фронт проходит путь $c_\Phi = c/n$). Известно, что именно использование принципа Гюйгенса и привело к получению условия (1) для черенковского излучения [2]. Разумеется, соответствующее условие интерференции автоматически



учитывается при электродинамическом расчете, в котором используются выражения для поля излучения [1]. Условие излучения (1) или, конкретно, условие черенковского излучения

$$\cos \theta_0 = \frac{c}{n(\omega)v} \quad (3)$$

можно получить и другими способами: как условие резонанса $\mathbf{k}\mathbf{v} = \frac{\omega}{c} n(\omega)v \cos \theta = \omega$ между действующей «силой», связанной с наличием источника, и осцилляторами поля [3], а также из законов сохранения энергии импульса (в последнем случае удобна квантовая формулировка) [4,5]. Условие (1) или (3) сохраняется не только в случае безграничной среды, но и при движении источника в каналах и щелях, а также параллельно границе раздела двух сред. В анизотропной среде это условие относится к каждой из нормальных волн в отдельности, причем показатель преломления для нормальной волны $n_e(\omega)$ зависит также от углов между волновым вектором \mathbf{k} и, например, осями кристалла. Что касается интенсивности излучения, то она может вычисляться разными методами [1—5] и, главное, за-

висит от характера источника, причем формула (2) относится только к случаю заряда, движущегося в безграничной изотропной среде. Ряд выражений для интенсивности излучения для диполей и других мультиполей, а также при наличии границ можно найти в обзорах [5—8].

Из условия излучения (3) ясно, что эффект Вавилова — Черенкова возможен лишь, если

$$v \geq \frac{c}{n(\omega)} = c_{\Phi}, \quad (4)$$

т. е., как это уже подчеркивалось, для появления излучения необходимо, чтобы скорость источника превосходила фазовую скорость света. То же условие необходимо для появления аномального эффекта Доплера, для которого

$$\frac{vn(\omega)}{c} \cos \theta > 1. \quad (5)$$

Собственно, неравенство (5) является определением аномального эффекта Доплера, при котором волны излучаются внутри черенковского конуса, т. е. с волновым вектором \mathbf{k} , составляющим со скоростью источника v угол

$\theta < \theta_0 = \arccos \frac{c}{n(\omega)v}$. Сказанное очевидно из формулы для эффекта Доплера в среде

$$\omega = \frac{\omega_{00} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{\left| 1 - \frac{v}{c} n(\omega) \cos \theta \right|}, \quad (6)$$

где ω_{00} — частота в системе отсчета, связанной с источником, а частота ω и угол θ относятся к «лабораторной» системе отсчета (в этой системе источник имеет скорость v). Из условия (4) обычно делают вывод, что излучение Вавилова — Черенкова и аномальный эффект Доплера возможны лишь в средах с положительным показателем преломления

$$n(\omega) > 1. \quad (7)$$

Подобное ограничение весьма существенно. Достаточно сказать, что в изотропной плазме в широко используемом приближении

$$n(\omega) = \sqrt{1 - \frac{\omega_e^2}{\omega^2}}, \quad \omega_e^2 = \frac{4\pi e^2 N}{m}. \quad (8)$$

Поэтому считается, что в такой плазме черенковское излучение поперечных волн (именно для этих волн $c_{\text{ф}} = \frac{c}{n(\omega)} > c$) невозможно.

Требование (7) в качестве условия, допускающего появление излучения Вавилова — Черенкова и аномального эффекта Доплера, связано с предположением, что скорость источника меньше скорости света в вакууме, т. е.

$$v < c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек.} \quad (9)$$

Именно в силу такого требования была в свое время признана не относящейся к реальности, а затем на долгие годы забыта работа Зоммерфельда, еще в 1904 г. пришедшего к выводу о наличии излучения у электрона, движущегося в вакууме равномерно, но со скоростью $v > c$ (см. [10,11]). Фактически Зоммерфельд рассмотрел эффект Вавилова — Черенкова в недиспергирующей среде — вакууме. Соответствующий расчет формально корректен, поскольку уравнения электромагнитного поля и, в частности, уравнение

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \rho \mathbf{v} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (10)$$

справедливо и при $v > c$. Не нарушается при этом и релятивистская инвариантность теории в противоположность довольно распространенному ошибочному мнению. Действительно, как подчеркивалось Эйнштейном еще в 1907 г. (см. [12], а также [13]), условие $v < c$ для скорости материального «тела» или какого-то «действия» связано не с вопросом о релятивистской инвариантности, а с требованием причинности: ни в одной системе отсчета следствие не должно опережать причину.

Из релятивистского выражения для массы $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ и уравнения движения $\frac{d(mv)}{dt} = \mathbf{F}$ ясно, правда, что никакое тело (частица) не может быть ускорено до скорости $v \geq c$. Но и это само по себе еще не закрывает возможности существования гипотетических частиц, получивших название тахионов и всегда движущихся со скоростью $v > c$. Тахионы можно было бы считать частицами с мнимой массой $m^* = im$, энергией

$$E = \sqrt{m^{*2}c^4 + c^2p^2} = \sqrt{-m^2c^4 + c^2p^2}, \quad \text{импульсом}$$

$p = m^*v / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ и скоростью

$$v = \frac{dE}{dp} = \frac{c^2 p}{E} = c^2 p / \sqrt{-m^2 c^4 + c^2 p^2}.$$

Очевидно, для тахионов импульс p является вещественным, если $v > c$ и, следовательно, $p > mc$; скорость тахионов $v \rightarrow c$ при $p \rightarrow \infty$, и наоборот, $v \rightarrow \infty$ при $p \rightarrow mc$. Величина $E^2 - c^2 p^2 = m^{*2} c^4 = -m^2 c^4$ остается инвариантной при преобразованиях Лоренца, и «закрыть» возможность существования тахионов удается [14], в частности, из условия причинности. Впрочем, быть может, не все еще согласится с тем, что существование тахионов невозможно, хотя нам такой вывод и представляется достаточно надежным. Подчеркнем поэтому, что тахионы во всяком случае не обнаружены и, таким образом, условие $v \leq c$ для всех известных частиц заведомо отвечает действительности.

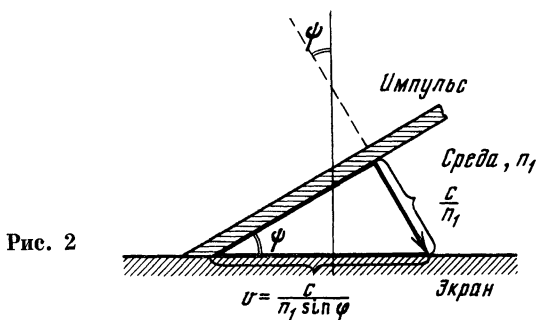
Тем не менее столь же несомненно, что источники электромагнитных (да и всяких других) волн могут двигаться со скоростями $v > c$! Речь при этом идет, однако, не об отдельных частицах (фотонах, электронах, протонах и т. д.), а об их совокупностях или сгустках (точнее см. ниже). Поэтому требование $v < c$ (см. (9)), как условие на скорость источника волн, является неправильным или, иными словами, такого требования выдвигать нельзя. Тем самым эффект Вавилова — Черенкова и аномальный эффект Доплера могут существовать и в средах с показателем преломления $n(\omega) < 1$, когда $c_{\text{ф}} = c/n > c$. В известном смысле то же можно сказать и о вакууме, где $c_{\text{ф}} = c$.

Насколько нам известно, излучение источников, движущихся со скоростью $v > c$ (если не говорить о работах Зоммерфельда [10,11] и о статье Франка [9]), до последнего времени не рассматривалось. Между тем соответствующие возможности [15—17] довольно любопытны, их освещение и составляет тему настоящей статьи.

§ 1. Об источниках, движущихся со скоростью больше скорости света в вакууме

Тот факт, что в физике и астрономии возможны и фактически встречаются скорости, превосходящие скорость света в вакууме, конечно, давно и хорошо известен. Не

говоря уже о фазовой скорости волн при $n(\omega) < 1$ или относительной скорости двух разлетающихся в данной системе отсчета частиц (эта скорость может достигать значения $2c$), скоростью больше c могут обладать сечения волновых фронтов и вообще различные «зайчики». Конкретно, представим себе вращающийся прожектор, или



«маяк». Если угловая скорость «маяка» равна Ω , то по экрану, удаленному от источника на расстояние R , световое пятно («зайчик») будет бежать со скоростью (см. также ниже)

$$v = \Omega R. \quad (11)$$

Модель «маяка» является сейчас общепринятой для пульсаров (см., например, [18]), причем в этом случае скорость «зайчика» на Земле для всех известных пульсаров превосходит скорость света c . Конкретно, для пульсара NP 0532 в Крабовидной туманности $\Omega \simeq 200$ и $R \simeq 2000 \text{ пс} \simeq \simeq 6 \cdot 10^{21} \text{ см}$, откуда $v = \Omega R \simeq 1,2 \cdot 10^{24} \text{ см/сек}$. Если обеспечить вращение луча от лазера или вращение электронного пучка, например со скоростью $\Omega = 10^5$, то $v > c$ уже для расстояния $R > 3 \cdot 10^5 \text{ см}$.

Самой простой в известном отношении моделью или примером движения со сверхсветовой скоростью может служить световой импульс из плоских волн, наклонно падающий на некоторую плоскую границу раздела (экран) [9]. Если угол падения волны на экран обозначить через ψ (очевидно, что ψ есть угол между волновым вектором в импульсе \mathbf{k} и нормалью к экрану; см. рис. 2), то сечение импульса экраном (т. е. световое пятно на экране —

«зайчик») перемещается по этому экрану со скоростью

$$v = \frac{c}{n_1 \sin \psi}, \quad (12)$$

где $n_1 > 1$ — показатель преломления в среде над экраном, которая для простоты считается недиспергирующей (по сути дела, для нас существенно лишь, что скорость светового импульса считается равной c/n_1). Очевидно, скорость светового пятна (или, точнее, полоски) при уменьшении угла падения ψ всегда может быть сделана больше c , а в вакууме последнее вообще имеет место при всех углах ψ , так как в этом случае

$$v = \frac{c}{\sin \psi}. \quad (13)$$

Роль светового импульса может, конечно, играть поток электронов, движущихся нормально фронту потока со скоростью $u < c$; при этом

$$v = \frac{u}{\sin \psi}, \quad (14)$$

и сверхсветовая скорость пятна также всегда в принципе достижима. Более того, скорость v во всех случаях (12)—(14) может быть сделана сколь угодно большой — при приближении к нормальному падению (при $\psi \rightarrow 0$) скорость $v \rightarrow \infty$. Последнее вполне понятно, так как при нормальном падении импульс пересекает экран одновременно по всей его поверхности. Механическим аналогом импульса, падающего на экран, служат ножницы (роль «зайчика» в этом случае играет точка пересечения образующих ножницы двух лезвий).

Для вращающегося источника, упомянутого выше, большая скорость «зайчика», как и для пересекающего экран импульса, достигается за счет уменьшения угла между поверхностью постоянной фазы (волновым фронтом) и экраном. В самом деле, рассматривая для простоты цилиндрический источник в вакууме, вращающийся с угловой скоростью Ω , запишем поле в волновой зоне в виде

$$E = \sum_{s=1}^{\infty} E_s \frac{\exp is \left\{ \frac{\Omega}{c} r + \varphi - \Omega t \right\}}{\sqrt{r}}. \quad (15)$$

Поверхность постоянной фазы определяется уравнением

$$\frac{\Omega}{c} r + \varphi - \Omega t = \text{const}, \quad (16)$$

или

$$r = \text{const} + c(t - \varphi/\Omega). \quad (17)$$

Уравнение (17) есть уравнение спирали. На удаленном цилиндрическом экране радиуса R поверхность равной фазы пересекается с экраном по образующей цилиндра, для которой

$$R = \text{const} + c \left(t - \frac{\varphi_0}{\Omega} \right), \quad (18)$$

причем угол φ_0 , определяющий рассматриваемую образующую, меняется со временем по закону $d\varphi_0/dt = \Omega$. Иными словами, линия пересечения («зайчик») бежит по экрану со скоростью

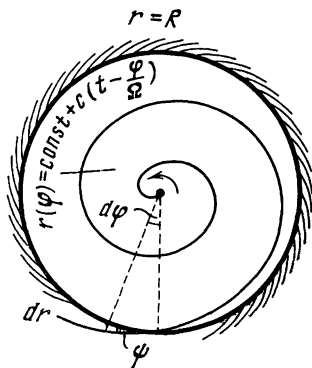


Рис. 3

$$v = R \frac{d\varphi_0}{dt} = \Omega R. \quad (19)$$

Таким образом, мы более формальным путем получили очевидный (или во всяком случае, хорошо известный) результат (11). Существенно, что угол ψ между поверхностью равной фазы и экраном равен (рис. 3)

$$\text{tg } \psi = - \frac{dr}{R d\varphi} = \frac{c}{\Omega R} = \frac{c}{v}. \quad (20)$$

Для малых углов ψ , разумеется, $\text{tg } \psi \simeq \sin \psi \simeq \psi$ и $v \simeq c / \sin \psi$ в согласии с (13). Другими словами, как это и отмечалось выше, большая скорость «зайчика» обусловлена (например, при $v \gg c$) малостью угла ψ между волновым фронтом и экраном.

Выше фактически не делалось предположений о природе рассматриваемого поля и лишь (да и то для простоты) скорость его распространения считалась равной c . Отсюда ясно, что «зайчики» со скоростью $v > c$ можно получить не только в случае электромагнитных волн, но

и для гравитационных волн. Пользуясь лучевой трактовкой, приходим к возможности иметь «зайчики» произвольной скорости как для нейтрино (скорость c), так и для любых других частиц (скорость $u < c$)*. То обстоятельство, что появление скоростей $v > c$ для «зайчиков» не противоречит теории относительности, не может вызывать и тени сомнений. Достаточно сказать, что этот результат получается для вполне реальных примеров, например при падении импульса света или электронов на экран (см. рис. 2).

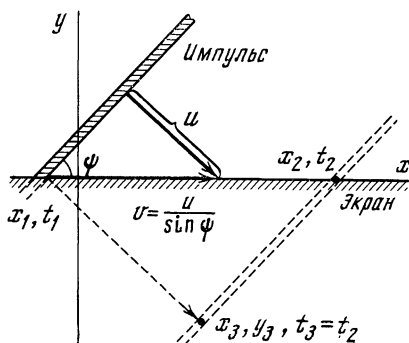


Рис. 4

В качестве дополнения все же отметим, что применение скорости света для синхронизации часов, обычно используемое при изложении теории относительности, во-первых, является не единственным, а лишь одним из возможных методов; во-вторых, этот метод действительно в большинстве случаев наиболее удобен и целесообразен не в связи с тем, что скорость света является максимально возможной, а потому, что эта скорость универсальна — одинакова во всех инерциальных системах отсчета (разумеется, при условии выбора в этих системах одинаковых масштабов и часов). Наконец, когда все же говорят о скорости света в вакууме c как о максимально возможной, то имеют в виду скорость передачи возмущений, взаимодействий или «сигналов». Подобное утверждение действительно справедливо (по крайней мере, в рамках теории относительности и всей известной нам физики). Световые

* При испускании вращающимся источником частиц со скоростью u траектория частиц такова: $r = r_0 + u(t - t_0)$, $\varphi = \Omega t_0$, откуда $r = r_0 + u(t - \varphi/\Omega)$, причем выше t_0 — время испускания.

и иные «пятна» и «зайчики», о которых мы говорили, хотя и могут двигаться со скоростью $v > c$, но никак не нарушают сделанного утверждения, т. е. они не могут быть использованы для передачи сигнала со скоростью $v > c$. В самом деле, рассмотрим импульс (света, электронов), сечение которого экраном («зайчик») движется по экрану вдоль оси x со скоростью $v > c$ и достигает точек x_1 и x_2 соответственно в моменты t_1 и t_2 (рис. 4). Очевидно, $x_2 = x_1 + v(t_2 - t_1)$ и при $v = u/\sin\psi > c$ события 1 и 2 разделены пространственно подобным интервалом, т. е. $(x_2 - x_1)^2 > c^2(t_2 - t_1)^2$. Возмущение («зарубка»), которое в точке 1 «наносится» на движущийся импульс в момент t_1 , окажется в точке 2 с координатами $x_3 = x_1 + u \sin\psi(t_2 - t_1)$, $y_3 = -u \cos\psi(t_2 - t_1)$, причем $(x_3 - x_1)^2 + y_3^2 = u^2(t_2 - t_1)^2 \leq c^2(t_2 - t_1)^2$. В точку же 2 это возмущение не попадает.

Лишь сравнительно недавно была со всей определенностью выяснена и подчеркнута необходимость различать форму и скорость движущихся объектов, которые они имеют в данной системе отсчета в данный момент времени, от их формы и скорости, фиксируемых в какой-либо определенной точке в один и тот же момент времени прихода (но не времени излучения) испускаемых объектом световых лучей (см., например, [19—22]). Одним из важных для астрофизики следствий этого обстоятельства является тот факт, что расширяющийся со скоростью u объект (скажем, оболочка взорвавшегося ядра галактики или квазара) при наблюдении из удаленной точки представляется на небе расширяющимся со скоростью (подробнее см. [20, 22])

$$u' = \frac{u}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (21)$$

Обсуждаемый эффект, как и эффект Доплера, связан с конечностью скорости распространения света, в силу чего свет от различных частей объекта приходит в точку наблюдения, вообще говоря, в разное время. «Кажущаяся» (наблюдаемая в фиксированной точке) скорость объектов (например, скорость u' в (21)) может превосходить скорость света c . Но мы хотим подчеркнуть, во-первых, что такая сверхсветовая скорость имеет другую природу, чем рассмотренная выше сверхсветовая скорость «зайчиков». Во-вторых, учет запаздывания, обусловленного конечностью скорости распространения света, существенно

сказывается и на «поведении» «зайчиков» при их наблюдении в какой-либо точке (на это обстоятельство обратил наше внимание А. А. Любушин). В качестве простейшего примера ограничимся здесь случаем светового «зайчика», бегущего с постоянной скоростью v по плоскому экрану и наблюдаемому в точке O' (рис. 5). Под наблюдением здесь понимается прием света, испускаемого «зайчиком» в результате шероховатости экрана (т. е. в результате рассеяния) или в силу люминесценции экрана при его освещении. Если $v \leq c$, то зайчик будет наблюдаться «обычным» образом, как бегущее по экрану сверху вниз пятно. Допустим теперь, что $v \rightarrow \infty$, т. е. весь след «зайчика» прочерчивается мгновенно. Тогда «зайчик» раньше всего будет замечен в точке O , ближайшей к O' (прямая OO' перпендикулярна к экрану). Затем наблюдатель увидит, очевидно, два «зайчика», разбегающихся от точки O в противоположных направлениях. При $c < v < \infty$ определенное время также могут наблюдаться два «зайчика».

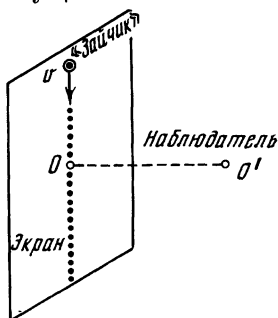


Рис. 5

да «зайчик» раньше всего будет замечен в точке O , ближайшей к O' (прямая OO' перпендикулярна к экрану). Затем наблюдатель увидит, очевидно, два «зайчика», разбегающихся от точки O в противоположных направлениях. При $c < v < \infty$ определенное время также могут наблюдаться два «зайчика».

§ 2. Излучение сверхсветовых источников

Существование сверхсветовых скоростей и сверхсветовых источников (так для краткости мы будем в дальнейшем называть источники, движущиеся со скоростью $v > c$)*, как уже отмечалось, давно и хорошо известно. В тени оставался лишь тот факт, что такие источники в рамках макроскопической теории и всего макроскопического подхода «ничем не хуже» досветовых источников. Макроскопичность здесь понимается в том смысле, что сверхсветовой

* Сверхсветовыми источниками, вообще говоря, называют источники, движущиеся со скоростью $v > c_{\text{ф}} = c/n$. Такая терминология разумна, но, называя в настоящей статье сверхсветовыми лишь источники, скорость которых $v > c$, мы вряд ли внесем путаницу, особенно после того, как это оговорено.

источник не является одной точечной (сколь угодно малой) частицей, а всегда должен быть связан с совокупностью таких (микроскопических) частиц *. Более того, в сколько-нибудь реальной постановке задачи число частиц, ответственных за движение сверхсветового источника («зайчика»), оказывается очень большим. Адекватным теоретическим аппаратом для рассмотрения излучения сверх-

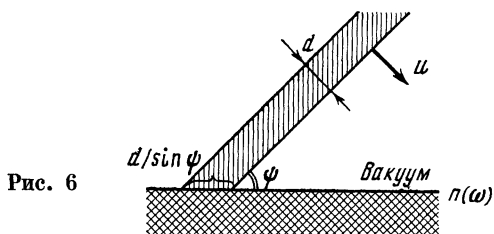


Рис. 6

световых источников служит обычная теория поля, и, в частности, уравнение (10), где плотность тока $j = \rho v$ может, в принципе, изменяться и перемещаться с любыми частотой и скоростью.

Рассмотрим заряженную нить, падающую со скоростью u под углом ψ к границе некоторой прозрачной среды с показателем преломления $n(\omega)$. Другими словами, мы имеем ситуацию, схематически изображенную на рис. 6 и аналогичную представленной на рис. 2. До пересечения границы среды составляющие нить заряды (скажем, электроны или протоны) движутся равномерно. Но после пересечения границы заряды тормозятся, в силу чего появляется некоторый ток (поляризация), бегущий со скоростью $v = u/\sin \psi$, отвечающей скорости перемещения сечения нити границей среды. Такой ток появляется и без

* Макроскопичность, о которой здесь идет речь, довольно относительна и значительно «слабее» условий, связанных с переходом к макроскопической электродинамике от уравнений микроскопической электродинамики (или, по старой терминологии, от уравнений электронной теории). В самом деле, из уравнений электродинамики следует лишь уравнение непрерывности, а в остальном движение зарядов может быть задано «извне» (совместимо ли такое движение с уравнением движения для частиц — это другой вопрос). Отсюда ясно, что уже в рамках электронной теории можно непротиворечивым образом считать плотность тока $j = \rho v$ в широких пределах произвольной и, в частности, полагать $v > c$ (в этом смысле расчеты Зоммерфельда [10] были вполне корректны).

учета торможения зарядов в силу переходного эффекта (изменения параметров среды на пути заряда), приводящего к переходному излучению [23]. Наглядно можно представить себе дело так, что, достигая среды, заряды останавливаются, а затем, например, нейтрализуются токами в среде [15]. В результате по поверхности среды бежит со скоростью v некоторый заряд q . Будем, для простоты, считать, что нить имеет квадратное сечение (сторона квадрата d) и состоит из зарядов e с концентрацией N . Тогда площадь сечения нити границей среды, т. е. площадь «зайчика», равна $S = d^2/\sin \psi$, и на эту площадь приходится заряд $q = eNd^2 \cos \psi$ (границу среды за единицу времени пересекает заряд $eNd^2v \cos \psi$, на единицу длины вдоль скорости приходится заряд $eNd^2 \cos \psi$ и, следовательно, длине «зайчика» $d/\sin \psi$ отвечает как раз заряд q). Решение задачи об излучении заряда, движущегося на границе вакуума и среды, известно [6]. Результат для излучаемой энергии можно записать в виде

$$\frac{dW}{dt} = \frac{q^2 v}{c^2} \int \left(1 - \frac{c^2}{n^2(\omega) v^2} \right) F \omega d\omega. \quad (22)$$

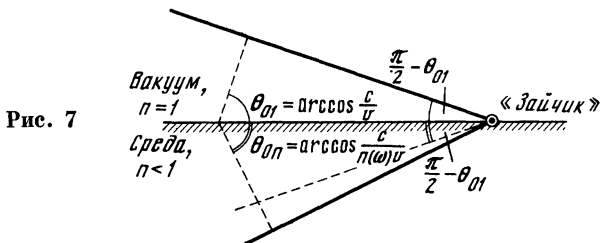
Очевидно, при $F = 1$ эта формула переходит в выражение (2) для однородной среды. Фактор $F(\omega, \dots)$ учитывает влияние границы, размер источника и т. д. Из общих соображений можно думать, что и для сверхсветового источника с $v > c$ применима та же формула, причем $F = F(\omega, \psi, d, \dots)$, а также зависит от распределения заряда в вакууме*. Конкретизировать вид фактора F можно лишь в результате точного расчета, а также, конечно, использования вполне определенной модели источника. Это будет сделано ниже. Сейчас же заметим, что в любом случае интегрирование в (22) проводится по области частот, удовлетворяющих условию (3). При этом в вакууме, разумеется, нужно положить $n = 1$ (выше предполагалось,

* Точнее было бы записать правую часть выражения (22) в виде суммы двух членов

$$\int \left(1 - \frac{c^2}{v^2} \right) F_1 \omega d\omega + \int \left(1 - \frac{c^2}{n^2(\omega) v^2} \right) F_2 \omega d\omega,$$

где первый член отвечает мощности излучения в вакууме, а второй член — мощности излучения в среде. Однако до тех пор, пока фактор F не конкретизируется, выражение (22) носит символический характер и поэтому может быть сохранено.

что среда граничит с вакуумом). Поэтому при $v > c$ в вакууме (над средой) излучение происходит всегда, если только $F \neq 0$. Практически же фактор F заведомо должен быть весьма мал для волн с длиной $\lambda = 2\pi c/\omega$, меньшей проекции размеров «зайчика» на направление волнового вектора \mathbf{k} . В среде при $n(\omega) < 1$ ситуация такая же, но при $n(\omega) > 1$ роль обрезывающего фактора может играть также условие (4) — излучение в среде возможно только



при его соблюдении. В общем случае можно также утверждать, что излучение характеризуется углом $\theta_{01} = \arccos c/v$ в вакууме и углом $\theta_{02} = \arccos \frac{c}{n(\omega)v}$ в среде (угол θ есть угол между \mathbf{k} и \mathbf{v} ; рис. 7). Поскольку скорость переднего фронта электромагнитных волн в любой среде при учете дисперсии равна c , излучение сверхсветового источника в среде характеризуется не только углом θ_{02} , но и углом $\theta_{01} = \arccos c/v$, который в этом случае определяет раствор конуса, соответствующего переднему фронту волны. Таким образом, при $\theta > \theta_{01}$ поле в среде равно нулю. Если говорить об основной части излучения, а не о переднем фронте, то аналогичная ситуация имеет место и для эффекта Вавилова — Черенкова в диспергирующей среде, где групповая скорость $c_{гр} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{d(\omega n)/d\omega}$ меньше фазовой скорости $c_{ф} = c/n$. Здесь нет поэтому особой необходимости специально останавливаться на этой стороне проблемы (см. [1,24]).

Остановимся теперь на точном решении задачи о падении нити на идеально проводящую плоскость [16]. Геометрия задачи такая же, как на рис. 6, но среда с показателем $n(\omega)$ заменена идеальным проводником. Попадая на проводник (пересекая его границу), заряд для внешнего наблюдателя исчезает, т. е. в смысле механизма из-

лучения речь идет о переходном излучении; нас, однако, интересует результат интерференции такого излучения от движущейся нити, причем заранее известно, что результирующее излучение будет направлено под углом $\theta_{01} = \arccos c/v$. Поле нити в вакууме представляет собой сумму полей самой нити и ее изображения, т. е. генерируется током с плотностью

$$j = Q\delta(z) \{ u_1\delta(s_1r - ut) - u_2\delta(s_2r - ut) \}. \quad (23)$$

Здесь Q — заряд единицы длины нити, $u_1 = us_1$ и $u_2 = us_2$ — скорости нити и ее изображения ($s_1 = s_2 = 1$, $s_{1x} = s_{2x}$, $s_{1y} = -s_{2y}$, $s_{1z} = s_{2z} = 0$; нить лежит в плоскости x, y и для простоты считается бесконечно тонкой). Кроме того, в (23) нужно, разумеется, считать первое слагаемое отличным от нуля в вакууме, а второе — в металле. Компонента Фурье

$$j_\omega = \frac{1}{2\pi} \int j e^{i\omega t} dt = \frac{Q\delta(z)}{2\pi} \left\{ s_1 e^{i\frac{\omega}{u} s_1 r} - s_2 e^{i\frac{\omega}{u} s_2 r} \right\}.$$

На больших расстояниях от экрана для Фурье-компоненты векторного потенциала имеем

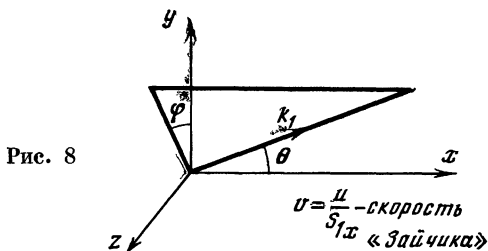
$$\begin{aligned} A_\omega &= \frac{e^{ikr}}{cr} \int j_\omega(r') e^{-i\kappa r'} dr' = \\ &= i \frac{Q e^{ikr}}{cr} \left\{ \frac{s_1}{\frac{\omega}{u} s_{1y} - k_y} - \frac{s_2}{\frac{\omega}{u} s_{2y} - k_y} \right\} \delta\left(\frac{\omega}{u} s_{1x} - k_x\right), \end{aligned} \quad (24)$$

где $k = \frac{\omega}{c} k_1 = k k_1$ — волновой вектор излучаемой волны (очевидно, $k_1^2 = 1$, $k = \omega/c$). Далее легко найти магнитное поле $H_\omega = i [k A_\omega]$, а затем интеграл

$$\begin{aligned} \frac{c}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H^2 dt &= \frac{c}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dt \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega' H_\omega H_{\omega'} \times \\ &\times e^{i(\omega + \omega')t} = \frac{c}{2} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} d\omega' H_\omega H_{\omega'} \delta(\omega + \omega') = \\ &= \frac{c}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |H_\omega|^2 d\omega = c \int_0^{\infty} |H_\omega|^2 d\omega. \end{aligned}$$

Выберем ось x , по которой бежит «зайчик», за полярную ось; пусть волновой вектор излучения $\mathbf{k} = \frac{\omega}{c} \mathbf{k}_1$ составляет с полярной осью угол θ ; азимутальный угол обозначим через φ (рис. 8), причем в вакууме $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$.

Из формулы (24) видно, что A_ω пропорционально дельта-функции от аргумента $\frac{\omega}{u} s_{1x} - k_x$. Очевидно, что и магнитное поле \mathbf{H}_ω будет пропорционально дельта-функции, а энергия излучения — квадрату дельта-функции.



Интеграл от квадрата дельта-функции расходится, что указывает на бесконечную энергию излучения. Эта бесконечность физически легко объяснима — мы считаем, что нить пересекает экран в течение бесконечно большого времени. Чтобы получить конечный результат, можно рассмотреть движение нити в течение большого, хотя и конечного времени T . Очевидно, энергия излучения будет пропорциональна T . К той же цели ведет следующая формальная процедура. Запишем

$$\delta^2 \left(\frac{\omega}{u} s_{1x} - k_x \right) = \frac{u}{s_{1x}} \delta \left(\omega - \frac{k_x u}{s_{1x}} \right) \delta \left(\frac{\omega}{u} s_{1x} - k_x \right).$$

Теперь первый сомножитель разложим в интеграл Фурье

$$\delta \left(\frac{\omega}{u} s_{1x} - k_x \right) = \frac{u}{2\pi s_{1x}} \delta \left(\frac{\omega}{u} s_{1x} - k_x \right) \int_{-\infty}^{\infty} e^{i \left(\omega - \frac{k_x u}{s_{1x}} \right) t} dt.$$

Из-за наличия в этом произведении дельта-функции мы можем показатель степени под интегралом положить равным нулю, в силу чего имеем

$$\delta^2 \left(\frac{\omega}{u} s_{1x} - k_x \right) = \frac{vT}{2\pi} \delta \left(\frac{\omega}{u} s_{1x} - k_x \right),$$

где T — полное время движения нити и $v = u/s_{1x}$ — скорость источника («зайчика»). Действуя таким образом, получаем для энергии, излученной в телесный угол $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$, в интервале частот $d\omega$ за единицу времени следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{dW_{\omega, \theta, \varphi}}{dt} &= \frac{1}{T} c |H_{\omega}|^2 r^2 \sin \theta d\theta d\varphi d\omega = \\ &= \frac{Q^2 v}{2\pi\omega} \left\{ \frac{[k_1 s_1]}{\frac{c}{u} s_{1y} - k_{1y}} + \frac{[k_1 s_2]}{\frac{c}{u} s_{1y} + k_{1y}} \right\}^2 \delta \left(\frac{c}{v} - k_{1x} \right) \sin \theta d\theta d\varphi d\omega. \end{aligned}$$

В связи с присутствием дельта-функции, отсюда ясно, что излучение происходит только с волновым вектором k , удовлетворяющим условию $k_{1x} = \cos \theta = c/v = \cos \theta_0$, как это и должно быть. После интегрирования по θ

$$\left. \begin{aligned} \frac{dW_{\omega, \varphi}}{dt} &= \frac{Q^2 v}{2\pi\omega} \left\{ \frac{[k_1, s_1]}{\frac{c}{u} s_{1y} - k_{1y}} + \frac{[k_1, s_2]}{\frac{c}{u} s_{1y} + k_{1y}} \right\}^2 d\varphi d\omega \\ k_1 &= \{ \cos \theta_{01}, \sin \theta_{01} \cos \varphi, \sin \theta_{01} \sin \varphi \}, \\ s_1 &= \{ \sin \psi, -\cos \psi, 0 \}, \quad s_2 = \{ \sin \psi, \cos \psi, 0 \} \\ \cos \theta_{01} &= \frac{c}{v}; \quad v = \frac{u}{\sin \psi}, \end{aligned} \right\} (25)$$

где ψ — угол между скоростью частиц u и осью y .

Наконец, получаем

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt} &= \frac{2Q^2 v}{\pi} \frac{c^2}{u^2} \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{\omega} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} d\varphi \times \\ &\times \frac{\left[1 - \frac{u^2}{v^2} - \left(1 - \frac{c^2}{v^2} \right) \left(1 - \frac{u^4}{c^2 v^2} \right) \cos^2 \varphi \right]}{\left[\frac{c^2}{u^2} \cos^2 \psi - \left(1 - \frac{c^2}{v^2} \right) \cos^2 \varphi \right]^2}. \end{aligned} \quad (26)$$

Заряд q , движущийся в однородной среде, как ясно из (2), излучал бы на интервал $d\omega d\varphi$ с мощностью

$$\frac{dW_{\omega, \varphi}}{dt} = \frac{q^2 v}{2\pi c^2} \left(1 - \frac{c^2}{v^2} \right) \omega d\omega d\varphi,$$

где положено $n = 1$. Сравнивая это выражение с (26),

мы видим, что нить эквивалентна заряду

$$q = Q \left| \frac{[k_1 s_1]}{\frac{c}{u} s_{1y} - k_{1y}} - \frac{[k_1 s_2]}{\frac{c}{u} s_{1y} + k_{1y}} \right| \frac{c}{\omega} \quad (27)$$

(множитель $1 - c^2/v^2$ считаем по порядку величины равным единице).

Поскольку Q — заряд единицы длины нити, то множитель при Q в (27) представляет эффективную длину нити, ответственную за излучение в направлении k_1 . Эта длина есть не что иное, как длина формирования переходного излучения в направлении k_1 .

Интегралы (25), (26) расходятся при $\omega \rightarrow 0$, но это просто связано с предположением о бесконечной протяженности нити. Излучение падает с ростом ω , очевидно, в силу происходящего при этом уменьшения длины формирования переходного излучения. В других задачах аналогичного типа частотная зависимость может быть иной (см. ниже).

Как отмечалось, механизмом излучения отдельных частиц или нити как целого при пересечении границы проводника можно считать переходное излучение. Однако с таким же успехом (и конечным результатом) можно предполагать, что происходит тормозное излучение в результате мгновенной остановки зарядов на границе (в случае идеального проводника обе эти возможности неразличимы при вычислении поля в вакууме [23]). Вообще, механизм «элементарного акта» излучения, приводящего в конечном счете к черенковскому излучению, в известном отношении несуществен — характер черенковского излучения [в первую очередь речь идет об условии излучения (3)] определяется интерференцией волн, излучаемых вдоль пути источника. Сказанное находится, разумеется, в полном соответствии с принципом Гюйгенса. Таким образом, рассмотренное излучение заряженной нити, падающей на экран, представляет собой именно эффект Вавилова — Черенкова при $v > c$, и к тому же еще в вакууме (правда, наличие какой-то границы со средой здесь необходимо). Интенсивность излучения и его угловое распределение по ϕ будут изменяться в зависимости от свойств сред 1 и 2 (разумеется, для наблюдения черенковского излучения по крайней мере одна из этих сред должна быть прозрачной; выше сред 1 мы считали вакуумом). Для анизотроп-

ной среды в условии излучения (3) показатель $n(\omega)$ нужно брать для каждой нормальной волны в отдельности, причем значение n зависит также от углов с осями симметрии (осями кристалла, направлением внешнего магнитного поля и т. д.). Особо отметим излучение волн в волноводах [25]*. В общем, здесь возникает большое число задач, аналогичных тем, которые встречаются в теории черенковского излучения при $v < c$ (см. [5,8]). Очевидно также, что рассматриваемые источники («зайчики») излучают и в «досветовом» режиме, т. е. когда $c/n < v < c$. Такие источники представляют интерес также для возбуждения, например, поверхностных волн разных типов в результате эффекта Вавилова — Черенкова или переходного излучения на неоднородной поверхности (в последнем случае требование $v > c/n$, конечно, отпадает). Сказанное справедливо и в случае волн неэлектромагнитной природы; в качестве примера укажем на возможность генерации второго звука в гелии II движущимся источником тепла (скажем, движущимся по поверхности гелия лучом лазера).

Излучение сверхсветового источника ни в коей мере не ограничивается эффектом Вавилова — Черенкова. Так, уже при равномерном движении, но с «модуляцией» источника некоторой частотой ω_0 будет наблюдаться излучение с доплеровской частотой

$$\omega = \frac{\omega_0}{\left| 1 - \frac{v}{c} n \cos \theta \right|}.$$

Отличие этой формулы от (6) связано лишь с тем обстоятельством, что частота ω_0 определена в той же лабораторной системе, что и частота излучения ω . Модуляцию можно осуществлять разными способами: дополнительным качанием луча, изменением его плотности (вдоль луча), нанесением «решетки» (периодических неоднородностей) на экран и т. д. Наконец, особенности сверхсветового излучения с $v > c$, как и в случае $c/n < v < c$, проявляются и при неравномерном движении источника. Примером может служить синхротронное (или, лучше, — квазисинхро-

* Отметим, что еще несколько лет назад Л. Г. Ломизе обратил внимание на возможность возбуждения волн в волноводе, близкую к обсуждаемой в работе [25].

тронное) излучение, возникающее при движении источника по окружности. Такой случай реализуется, когда частицы или фотоны, испускаемые вращающимся источником, падают на сферический или цилиндрический экран. Более конкретная модель такова [17]: вращающийся источник (скажем, пульсар) испускает направленный поток γ -лучей, которые падают на «экран», состоящий из более или менее плотного вещества (плазмы), находящийся на расстоянии R от источника. Попадая на экран, γ -лучи рассеиваются на электронах, которые в силу отдачи создают некоторую радиальную поляризацию, бегущую по экрану со скоростью $v = \Omega R$. В результате по экрану бежит ток с плотностью

$$\begin{aligned}
 \mathbf{j} &= \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{p}(t) \delta [r - R(t)], \\
 \mathbf{p}(t) &= p \{ \cos \Omega t, \sin \Omega t, 0 \}, \\
 \mathbf{R}(t) &= R (\cos \Omega t, \sin \Omega t, 0),
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

где \mathbf{p} — электрический дипольный момент, отвечающий созданной поляризации, которая считается точечной; последнее возможно, если рассматривать излучение волн с длиной волны λ , значительно превосходящей размеры источника l . Возникающее излучение при $v = \Omega R > c$ по своему характеру аналогично синхротронному излучению в среде при условиях, когда $v > c/n$ (см. [5]); полная излучаемая мощность

$$\frac{dW}{dt} \simeq \frac{p^2 \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right)}{2v^3} \int_{\Omega \ll \omega \ll \frac{c}{l}} \omega^3 d\omega.
 \tag{29}$$

Интеграл обрезается на высоких частотах в связи с конечными размерами диполя, что не было учтено в (28), (29); кстати, в расчете [17] диполь \mathbf{p} в (28) считался направленным не по радиусу, а по оси z (т. е. полагалось $\mathbf{p} = p \{0, 0, 1\}$), что в формуле (29), вероятно, сказывается лишь на численном коэффициенте. В моделях пульсаров бегущее со скоростью $v > c$ возмущение в плазме может быть создано также магнитодипольным излучением или токами частиц, исходящими от пульсара.

В связи с развитием лазерной техники приобретает особый интерес возможность создания сверхсветового источника с помощью света. Использование вращающегося лу-

ча и с помощью лазера не так уж легко, если требовать, чтобы напряженность поля в «зайчике» при $v = \Omega R > c$ была достаточно большой. Поэтому проще осуществить падение импульса на экран (границу раздела), как это обсуждалось в § 1 [см. рис. 2 и формулы (12) (13)]. Если экран является идеально плоской границей раздела двух сред, а задача может рассматриваться в линейном приближении (слабое поле), то мы имеем дело с обычной задачей об отражении и преломлении света. Поэтому сразу

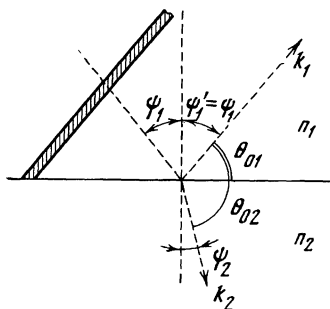


Рис. 9

ясно (и, конечно, следует из уравнения поля), что импульс, падающий под углом ψ_1 , отразится также под углом $\psi'_1 = \psi_1$, а угол преломления ψ_2 определится из закона преломления (рис. 9)

$$\frac{\sin \psi_2}{\sin \psi_1} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \psi'_1 = \psi_1. \quad (30)$$

Любопытно, как это было давно отмечено Франком [9], что условия (30) совпадают с условиями появления эффекта

Вавилова — Черенкова для рассматриваемого импульса, сечение которого экраном движется со скоростью

$v = \frac{c}{n_1 \sin \psi_1}$ [см. (12)]. В самом деле, черенковский угол в среде 1 определяется условием $\cos \theta_{01} = c/n_1 v = \sin \psi_1$, откуда $\psi_1 = \psi'_1 = \pi/2 - \theta_{01}$, как это и должно быть (рис. 9). Для среды 2 имеем $\cos \theta_{02} = \frac{c}{n_2 v} = \frac{n_1}{n_2} \sin \psi_2$,

что совпадает с (30), поскольку $\cos \theta_{02} = \sin \psi_2$. Можно буквально сказать, что мы очень долго «не знали, что говорим прозой» и что сверхсветовое (и более общее при $n_1 > 1$) черенковское условие известно уже несколько столетий. Сказанное о соответствии между законами отражения и преломления и черенковским условием вместе с тем естественно, поскольку все эти соотношения получаются из принципа Гюйгенса одинаковым образом. Для получения каких-либо новых результатов нужно рассмотреть задачу с учетом нелинейности для различных сред (в частности, для пьезоэлектриков).

Последнее замечание, которое мы хотим здесь сделать, касается световых пятен и «зайчиков» в случае шероховатых или люминесцирующих экранов. В последнем случае излучение, исходящее от зайчика, вообще говоря, некогерентно. То же практически имеет место для шероховатых экранов, поскольку речь идет при этом обычно о достаточно больших световых пятнах (размеры значительно больше длины волны света). Если излучение некогерентно, то интерференция невозможна и такие специфические черты, как резкая направленность черенковского излучения, пропадают.

Заключение

Историческая судьба исследований излучения источников, движущихся со скоростью больше фазовой скорости света, весьма своеобразна. Речь идет о классических эффектах, качественно ясных уже в рамках простейших оптических представлений (принцип Гюйгенса, интерференция), а количественно описываемых с помощью уравнений Максвелла. Как мы видели, элементарные законы отражения и преломления света на плоской границе раздела двух сред по сути дела совпадают с условием излучения Вавилова — Черенкова от бегущего вдоль границы источника. Черенковское условие для заряда — сверхсветового источника (скорость $v > c$) было получено в 1904 г. Тем не менее эффект Вавилова — Черенкова оказался экспериментально обнаруженным лишь в 1934 г., да и то случайно (в том смысле, что исследовался совсем другой вопрос), а создание теории этого эффекта потребовало больших и довольно длительных усилий [2]. Любопытно также, что на первом этапе возможности применения эффекта Вавилова — Черенкова в физике, как для измерительных целей, так и для понимания различных явлений, казались весьма скромными. В действительности же эффект Вавилова — Черенкова и родственные явления сейчас во всех отношениях широко используются, и можно сказать, что их изучение составляет целую главу физики, которой посвящено огромное число статей и ряд обзоров [5—8]. Казалось бы, проблема, если не исчерпана, то во всяком случае уже достаточно полно и всесторонне исследована. Но и это оказалось не вполне верным, как об этом свиде-

тельствует настоящая статья. В самом деле, широко было распространено мнение (в частности, мы сами его придерживались), что эффект Вавилова — Черенкова и аномальный эффект Доплера могут наблюдаться лишь для волн, которым отвечает показатель преломления $n(\omega) > 1$ (условие $c/n < v < c$). В согласии с этим в вакууме соответствующие явления считались невозможными. Между тем существуют сверхсветовые источники, движущиеся со скоростью $v > c$. Эти источники в широких пределах могут рассматриваться на тех же основаниях, как и «обычные» источники, движущиеся со скоростью $v < c$. Конкретно, сверхсветовые источники способны порождать излучение Вавилова — Черенкова в любой среде, в том числе в вакууме или при условии $n(\omega) < 1$. Сверхсветовые источники общего типа обладают, в целом, теми же особенностями, которые известны для источников, движущихся со скоростью $c/n < v < c$ (аномальный эффект Доплера и т. д.). С точки зрения теории излучения существенное отличие сверхсветовых источников ($v > c$) от досветовых ($v < c$) заключается в том, что сверхсветовой источник не может состоять из отдельной «элементарной» частицы и поэтому всегда является протяженным. Именно размеры сверхсветового источника в первую очередь и определяют, особенно при излучении в вакууме, коротковолновую границу излучаемого спектра частот. В этой связи трудно надеяться на использование сверхсветовых источников, например, для генерации рентгеновских лучей (подобная возможность могла бы показаться соблазнительной, поскольку стремление на высоких частотах показателя $n(\omega)$ к единице, препятствующее для источников с $v < c$ использованию эффекта Вавилова — Черенкова в рентгеновской области, не играет столь критической роли при $v > c$). Мы не были бы удивлены, однако, если бы в будущем нашлись те или иные интересные применения и для сверхсветовых источников. Кроме того, сверхсветовые источники могут встретиться в астрономии. Независимо от таких возможностей излучение сверхсветовых источников ($v > c$) электромагнитных и гравитационных волн (а, возможно, и нейтрино) и вся совокупность связанных с ними вопросов представляет, по нашему мнению, несомненный физический интерес.

Примечание. М. А. Исакович и Б. В. Чириков независимо обратили наше внимание на следующий аналог

«сверхсветовых» излучателей, используемый в радиотехнике и акустике. Представим себе сложную антенну в виде линейной цепочки диполей и будем подавать на эти диполи гармонический сигнал частоты ω , причем на каждый последующий диполь сигнал подается с некоторым сдвигом фазы φ относительно предыдущего. Тогда колебания в цепочке диполей можно рассматривать как волну с волновым вектором $k = \varphi/d$ (d — период цепочки). Фазовая скорость этой волны $v_\varphi = \omega/k = (\omega/\varphi) d$, и эта величина выбирается обычно так, чтобы она превышала скорость света c . Такая цепочка будет излучать под углом θ , который удовлетворяет черенковскому условию

$$\cos \theta = \frac{\varphi \lambda}{2\pi d} = \frac{c}{v_\varphi}.$$

Аналогично, если имеется цепочка приемных антенн и сигналы на суммирующее устройство поступают с некоторым сдвигом фаз φ , то антенна принимает сигнал, проходящий под углом θ , удовлетворяющий тому же черенковскому условию.

Те же соображения можно привести и для дифракционных решеток.

Т. А. Давыдова любезно обратила наше внимание на ряд работ, в которых рассматриваются условия излучения волн из плоского плазменного слоя в пустоту (*J. Dawson, C. Oberman. Phys. Fluids, 2, 103, 1959; G. Schmidt. Phys. Fluids, 7, 915, 1964; G. Schmidt, G. Halpern. Phys. Rev., 131, 217, 1963*). Об этих работах упоминается также в монографии Д. Бекефи «Радиационные процессы в плазме» («Мир», 1971). По существу задача о выходе волн из плоского слоя очень близка к задаче об отражении и преломлении волн на плоской границе раздела, и условие излучения волны можно связать с условием излучения Вавилова — Черенкова, как это было впервые сделано в [8].

Отметим еще, что после того как была написана эта статья, нам стала известна работа Л. А. Ривлина (Труды Научно-исследовательского института, вып. 4 (33), стр. 3, Министерство радиотехнической промышленности СССР, 1956). В этой работе автор, создав сверхсветовой источник в волноводе, получил генерацию трехсантиметровых радиоволн.

Литература

1. *И. Е. Тамм, И. М. Франк.* ДАН, **14**, 107 (1937), см. также: *I. E. Tamm.* Journ. Phys. USSR, **1**, 439 (1939).
2. *И. М. Франк.* Сборник памяти И. Е. Тамма. М., «Наука» (1972), препринт ОИЯИ Р4—5954 (1971).
3. *В. Л. Гинзбург.* ДАН, **24**, 130 (1939).
4. *В. Л. Гинзбург.* ЖЭТФ, **10**, 589 (1940).
5. *В. Л. Гинзбург.* УФН, **69**, 537 (1959).
6. *Б. М. Болотовский.* УФН, **62**, 201 (1957); **75**, 296 (1961).
7. *Дж. Джелли.* Черенковское излучение и его применения. М., ИЛ (1960).
8. *П. В. Зрелов.* Излучение Вавилова — Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М., Атомиздат (1968).
9. *И. М. Франк.* Изв. АН СССР, серия физич., **6**, 3 (1942).
10. *A. Sommerfeld.* Göttingen Nachrichten, **99**, 368 (1904); **201** (1905).
11. *A. Зоммерфельд.* Оптика. М., ИЛ (1958), § 47.
12. *A. Einstein.* Ann. d. Phys., **23**, 371 (1907); см. также: Собр. науч. трудов, т. I. М., «Наука», 53 (1965).
13. *В. Паули.* Теория относительности. М., Гостехиздат, 1947, § 6.
14. *F. A. E. Pirani.* Phys. Rev., D **1**, 3224 (1970).
15. *В. Л. Гинзбург.* ЖЭТФ, **62**, 173 (1972).
16. *Б. М. Болотовский.* Краткие сообщения по физике. ФИАН СССР (1972), № 7, стр. 34.
17. *В. Я. Эйрман.* Изв. ВУЗов (Радиофизика), № 4 (1972).
18. *В. Л. Гинзбург.* УФН, **103**, 393 (1971).
19. *В. Вайскопф.* УФН, **84**, 183 (1964); *C. McGill.* Contemp. Phys., **9**, 33 (1968).
20. *M. Rees.* Mon. Not., **135**, 345 (1967).
21. *V. L. Ginzburg, C. I. Syrovatskii.* Annual Rev. Astron. and Astrophys., **7**, 375 (1969).
22. *A. Cavaliere, P. Morrison, L. Sartori.* Science, **173**, 625 (1971).
23. *В. Л. Гинзбург, И. М. Франк.* ЖЭТФ, **16**, 15 (1946). Journ. Phys. USSR, **9**, 353 (1945).
24. *H. Motz, L. Schiff.* Amer. Journ. Phys., **21**, 258 (1953). Русский перевод в сб. «Миллиметровые и субмиллиметровые волны». М., ИЛ (1959), стр. 171.
25. *С. В. Афанасьев, Б. М. Болотовский.* Краткие сообщения по физике. ФИАН СССР (1972), № 10, стр. 29.

Я. А. Смородинский, В. А. Угаров

ДВА ПАРАДОКСА СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

This was sometime a paradox
But now the time gives it proof.
Shakespeare

В истории любой науки наряду с фундаментальными вопросами, определяющими существенное продвижение науки, возникают порой задачи или вопросы, отнюдь не первостепенного и не фундаментального характера. Сначала на эти вопросы просто не обращают внимания, но в один прекрасный день они неожиданно вызывают интерес, появляется серия работ, разные авторы дают на них разные ответы, причем иногда ответы оказываются диаметрально противоположными. Это вызывает немалое удивление, поскольку вопросы такого сорта давно уже остались за передним краем науки и лежат в той области, где, по убеждению многих, все ясно. Таким образом, возникают своеобразные парадоксы. Как и во всяком парадоксе, разгадка и решение кроется в обнаружении некорректности постановки вопроса. О двух вопросах такого типа, породивших немало статей в различных физических журналах (число таких статей продолжает расти), будет рассказано в этой статье.

1. Видимая форма быстродвижущихся тел*

В 1892 г. Лоренцом было сформулировано неожиданное утверждение, позволявшее объяснить результат опыта Майкельсона. Лоренц предположил, что все тела, движущиеся относительно мирового эфира, который рассматривался как некая среда, испытывают сокращение в направлении движения. Аналогичное высказывание принадлежит и Фитцджеральду, так что в литературе часто

* Всюду речь идет об относительном движении с релятивистскими скоростями, т. е. со скоростями порядка скорости света в пустоте. Все рассматриваемые системы отсчета — инерциальные.

пишут о лоренц-фитцджеральдовском сокращении (см., однако, [1]).

После того как была сформулирована специальная теория относительности, сокращение длины масштаба в направлении его движения стало прямым следствием постулатов Эйнштейна, в частности, оно является элементарным следствием преобразования Лоренца. Сокращение должно обнаруживаться, когда измеряется длина масштаба, движущегося относительно наблюдателя, производящего измерение длины этого масштаба.

В первой работе Эйнштейна ([2], стр. 18) написано в связи с этим следующее:

«тело, которое в состоянии покоя имеет форму шара, в движущемся состоянии — при наблюдении из покоящейся системы — принимает форму эллипсоида, с полуосями $R\sqrt{1-\beta^2}$, R , R ». Очевидно, Эйнштейн имеет в виду лоренцово сокращение в направлении движения и неизменность поперечных размеров. Шесть лет спустя в полемике с Варичаком Эйнштейн отвечает сразу на два вопроса (см. [2], стр. 187).

1. «Вопрос о том, реально лоренцово сокращение или нет, не имеет смысла. Сокращение не является реальным, поскольку оно не существует для наблюдателя, движущегося вместе с телом; однако оно реально, так как оно может быть принципиально доказано физическими средствами для наблюдателя, не движущегося вместе с телом».

2. «Мы получаем в системе отсчета K форму тела, движущегося относительно этой системы, определяя точки в системе K , с которыми в определенное время t совпадают материальные точки движущегося тела. Поскольку используемое при этом понятие одновременности определено так, что на основании этого определения принципиально возможна констатация одновременности экспериментальным путем, то и лоренцово сокращение принципиально наблюдаемо».

Этим принципиальная сторона вопроса исчерпана.

Возвращаясь же к вопросу об измерении лоренцова сокращения стержня, следует сказать, что если проводить измерение длины согласно правилам теории, т. е. отмечать координаты обоих концов движущегося стержня *одновременно* в системе, относительно которой измеряется длина (для этого нужны два прибора, находящихся в двух

точках системы отсчета), то ожидаемый результат опыта (сокращение) не вызывает сомнений.

Но вот спустя пятьдесят лет после создания теории относительности возник несколько иной вопрос: можно ли, фотографируя быстродвижущееся тело или визуально наблюдая его, обнаружить лоренцово сокращение. До сих пор речь шла лишь о мысленных опытах. Однако в самое последнее время появились фотографии релятивистски движущихся объектов [3].

Отвлекаясь от физиологии зрения, можно не разделять визуальное наблюдение от фотографирования. Поставленный выше вопрос, конечно, не затрагивает основ теории, но на него полезно иметь ясный и недвусмысленный ответ, потому что фотография, на которой можно было бы качественно и количественно показать лоренцово сокращение, была бы прямым доказательством реальности сокращения (в смысле, о котором говорил Эйнштейн, стр. 238). Однако ответ на поставленный вопрос оказался не столь простым, тогда как прямое доказательство сокращения временных интервалов между событиями известно уже давно: возрастание времени жизни нестабильных частиц (например, π - и μ -мезонов) в системе, относительно которой они находятся в движении, установлено опытным путем.

Слово «наблюдение» в цитированной выше статье Эйнштейна могло быть интерпретировано как визуальное наблюдение или, быть может, фотографирование. Такая интерпретация, по-видимому, и привела к единодушному убеждению, что, наблюдая (фотографируя) движущуюся сферу, мы обнаружим на фотографии эллипсоид. Довольно долго упускалось из вида то обстоятельство, что определение формы размеров тела как одновременного положения всех точек его поверхности и полученное на фотографии изображение тела — это, вообще говоря, вовсе не одно и то же. Здесь следует отметить два обстоятельства. Допустим, что мы фотографируем с бесконечно малой выдержкой. Тогда на пластинку попадут лучи, одновременно пришедшие к объективу. Но если различные точки тела будут находиться на разном расстоянии от объектива, лучам, идущим от этих точек, — из-за конечности скорости распространения света, — нужно разное время, чтобы дойти до объектива. Следовательно, если тело непрерывно светится, то на пластинке одновременно окажутся лучи,

испущенные разными точками тела в различные моменты времени. Для неподвижного относительно фотоаппарата тела это обстоятельство на полученном изображении не скажется. В случае движущегося тела получаемое изображение будет отличаться от изображения, полученного при фотографировании неподвижного тела. Этот эффект обусловлен просто конечностью скорости распространения света и не имеет отношения к собственно релятивистским эффектам. Это — первое обстоятельство. Второе же состоит в том, что когда говорят о видимой форме объекта, обычно имеют в виду изображение, получаемое на плоскости фотопластины или (с некоторыми оговорками) на сетчатке глаза. Но такое изображение представляет собой проекцию тела на плоскость. Если вернуться к вопросу о фотографировании тела, лоренцово сокращение которого хотят обнаружить, то требуется уловить это сокращение на двумерной проекции тела. Упомянутые обстоятельства показывают источники неоднозначного истолкования полученного изображения на фотографии. Прежде всего ясно, что по одному снимку без дополнительной информации вообще невозможно что-либо определить. Например, имея одну фотографию движущегося на однородном фоне стержня (одномерного тела), ничего сказать о его длине нельзя, а по одной фотографии трехмерного объемного тела невозможно воспроизвести его форму. Следует подчеркнуть, что и второе обстоятельство не связано с «релятивистскими эффектами», однако на них было обращено внимание в связи с обсуждением вопроса о том, как выглядит быстродвижущееся тело, причем наибольший интерес привлекал вопрос о том, как влияет лоренцово сокращение на видимую форму.

Дискуссия началась с опубликованной в 1959 г. статьи Пенроуза [5] «Видимая форма релятивистски движущегося тела». Работа Пенроуза была отнюдь не тривиальной; в ней впервые рассмотрены конформные свойства преобразования Лоренца. В этой работе, в частности, показано, что движущаяся сфера по своей двумерной проекции на фотографии, а точнее — по форме контура, не будет отличаться от неподвижной. В том же 1959 г. С. М. Рытов, независимо, в докладе, прочитанном в Институте физических проблем, обратил внимание на весь этот круг вопросов [4]. Ясное физическое объяснение этого результата вытекает из известной работы Терелла [6]. Терелл ре-

шает вопрос вполне радикально, о чем свидетельствует название его статьи «Невидимость лоренцова сокращения». Именно после этих работ и возник вопрос о том, можно ли вообще каким-либо способом увидеть или сфотографировать изменение размеров тела вследствие лоренцова сокращения*. Во избежание недоразумений, повторим, что физиология зрения делает фотографирование объекта и его визуальное наблюдение существенно различными процедурами. Говоря о визуальном наблюдении, мы будем иметь в виду глаз, наделенный идеальными свойствами, близкими к свойствам фотопластинки.

Поясним результат Терелла. Если наблюдается движущееся тело со светящейся поверхностью, фотопластинка при бесконечно малой выдержке фиксирует одновременно приходящие к ней сигналы (фотоны), испущенные различными точками поверхности тела. Так как разные точки поверхности тела, вообще говоря, отстоят на различном расстоянии от фотопластинки, то пластинка фиксирует их положение в разные моменты времени. То, что пластинка фиксирует или наблюдатель «видит» в данный момент времени разные участки поверхности движущегося тела в тех положениях, которые они занимали в разное время, приводит к любопытному результату, который можно иллюстрировать простым примером.

Допустим, что светящийся куб, движущийся вдоль прямой, параллельной одной из его граней, пролетает мимо фотоаппарата или наблюдателя. Фотографирование или наблюдение производится в тот момент, когда центр куба попадает на нормаль, опущенную из точки, где находится фотоаппарат, на направление движения. Конечно, мы заранее должны знать, что движущееся тело имеет форму куба в собственной системе отсчета.

В определенный момент времени к пластинке придут все фотоны, испущенные одновременно в системе пластинки на линии AD , и фотоны, испущенные точкой B раньше на интервал времени l/c (l — длина ребра куба). Но в этот момент времени точка B находилась в положении B' . Одновременное определение положений точек A и D в системе пластинки ведет, согласно обычному правилу

* Советские читатели знакомы с изложением результатов Терелла по статье В. Вайскопфа [7] «Видимая форма быстродвижущихся тел», перевод которой был опубликован в УФН, 84, 183, сентябрь 1964.

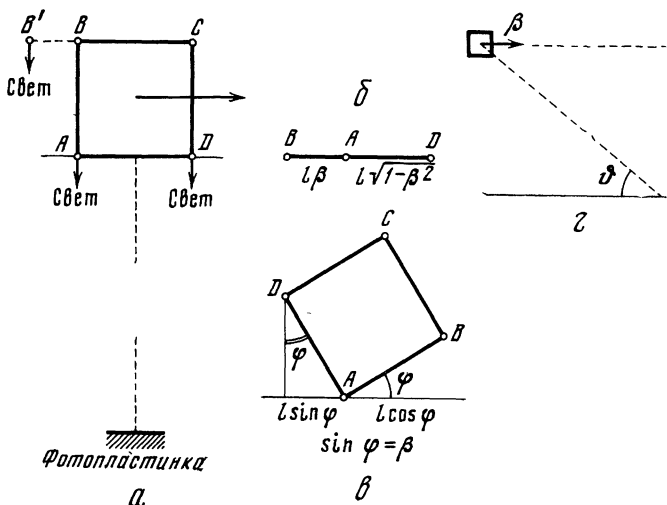


Рис. 1. Визуальное наблюдение куба, пролетающего мимо наблюдателя

a — взаимное расположение наблюдателя и куба при $\vartheta = 0$; *b* — видимая картина летящего куба; *c* — возможная интерпретация видимой картины одним наблюдателем: поворот куба на угол $\varphi = \arcsin \beta$; *d* — наблюдение летящего куба под углом ϑ

измерения длины, к лоренцову сокращению: $l' = l\sqrt{1 - \beta^2}$. С другой стороны, $BB' = (l/c)v = \beta l$. Из рис. 1, *c* можно понять, что картина, которую увидел бы неподвижный наблюдатель (идеализированный) при наблюдении движущегося куба, совпадает с той, когда рассматривается неподвижный, но повернутый на угол φ куб. Угол определяется соотношением $\sin \varphi = \beta$. Это — частный случай более общего результата Терелла: всякое трехмерное движущееся тело видно в данный момент повернутым. Угол поворота для расположения, приведенного на рис. 1, определяется из равенства $\varphi = \arcsin \beta$. Если же куб находится относительно наблюдателя так, что он в состоянии покоя был бы виден под углом ϑ' относительно оси x' , то угол поворота будет другой. Если куб достаточно удален от наблюдателя, то идущий от него свет можно принять за параллельный пучок. Когда этот пучок наблюдается в системе K , то для наблюдателя в K он распространяется под углом ϑ к оси x , причем

углы ϑ и ϑ' связаны соотношением

$$\cos \vartheta = \frac{\cos \vartheta' + \beta}{1 + \beta \cos \vartheta'}.$$

Изменение направления фронта плоской волны при переходе от одной системы отсчета к другой (находящихся в относительном движении) — это абберация света. Что касается изображения, получаемого на пластинке (или идеализированного видимого изображения), то оно соответствует кубу, рассматриваемому в K под углом ϑ , повернутому на угол $\vartheta - \vartheta'$. Теперь уже нетрудно понять результат Пенроуза — поворот сферы не меняет формы ее контура. Центральным пунктом в рассмотрении Терелла является то, что фактически он впервые рассмотрел видимую форму трехмерного тела.

Таким образом, сочетание «сокращения» с конечностью скорости света может привести к кажущемуся повороту. Поэтому возник вопрос о том, можно ли вообще отличить сокращение от поворота по видимой картине [8]. Такая постановка вопроса просто некорректна. Реконструкция трехмерного тела по плоской фотографии требует дополнительной информации, и это обстоятельство не имеет никакого отношения к лоренцову сокращению.

В примере с кубом ясно, что, зная, как движется куб, всегда можно установить «прямым наблюдением» или фотографированием, что происходит именно сокращение, а не поворот. Для этого нужно просто иметь двух наблюдателей или две фотографии, сделанные с двух мест, находящихся на нормалях к двум перпендикулярным граням куба (параллельным движению). Если изменение формы куба на фотографиях интерпретировать как поворот, то обнаружатся две различные оси вращения куба. Но оба наблюдателя без противоречий истолкуют полученную картину как сокращение размеров в направлении движения.

И все же, можно ли сфотографировать тело, испытывавшее лоренцово сокращение? Как мы убедились, наблюдение движущихся трехмерных тел ставит определенные трудности при интерпретации полученной фотографии. Но лоренцово сокращение может быть обнаружено при наблюдении одномерного объекта, и этим можно воспользоваться. Сокращение станет наглядным и очевидным при сравнении длины движущегося одномерного стержня с его собственной длиной. В уже упоминавшемся рассужде-

нии Эйнштейна со сферой роль эталона сравнения играл диаметр сферы, перпендикулярный направлению движения. Было бы очень убедительно сфотографировать летящий стержень на фоне его собственной длины, отложенной в системе наблюдателя.

Для этого наблюдатель в K (стержень покоится в K') должен знать заранее, что стержень движется вдоль заданного направления и собственную длину стержня. Тогда у себя в системе K он строит двойник движущегося стержня и фотографирует движущийся стержень на фоне его собственной длины. Прежде чем обсуждать, как это можно — хотя бы мысленно — осуществить, заметим, что мы используем еще одно предположение.

Нельзя взять два одинаковых эталона, выверенных в одной системе, и передать один из них в движущуюся систему отсчета, потому что всегда может возникнуть вопрос об изменении длины эталона при его ускорении. Однако тождественные эталоны в системах, находящихся в относительном движении, можно получать и без переброски эталонов. Следует лишь воспользоваться квантовыми идеями о тождественности микрочастиц. Мы считаем, что длина волны, излучаемая атомами данного сорта, скажем, атомами кадмия, в любой системе, где они покоятся, или точнее, где они движутся с нерелятивистскими скоростями, всегда одна и та же. Это означает, что в любой инерциальной системе могут быть выбраны тождественные длины в качестве эталонов. Это же относится, разумеется, и к эталонам времени. Таким образом, при желании можно обеспечить все инерциальные системы стержнями строго одинаковой собственной длины.

Простейшая схема для фотографирования стержня, испытавшего лоренцово сокращение; могла бы быть такой (рис. 2). Стержень параллелен оси x и движется вдоль этой оси. Наблюдатель находится на нормали к оси x , причем эта нормаль проходит через середину двойника стержня, покоящегося в системе K . Когда середина движущегося самосветящегося стержня оказывается на нормали, срабатывает механизм, открывающий затвор фотоаппарата в момент, совпадающий с приходом к нему света, испущенного стержнем. Сфотографировать неподвижный двойник можно, конечно, когда угодно.

Более подробное рассмотрение этого вопроса проведено в работе [9]. Там показано, в частности, что можно сфо-

тографировать, скажем, метровый стержень, движущийся с релятивистской скоростью, вмещающимся в спичечную коробку, если фотоаппарат покоится в системе коробки K . В этой же работе рассмотрен интересный (если не забывать о равноправии систем) вопрос о том, что обнаружится на фотографии, сделанной в той же самой точке и в тот же самый момент, где находился фотоаппарат из K , фотоаппаратом из системы стержня K' . Оказывается, что на этой фотографии стержень уже не вмещается в коробку. Это связано с искажением длин из-за косо́й перспективы. Тем не менее во всякой системе отсчета найдется одна точка, фотография из которой в подходящий момент покажет, что стержень целиком умещается в коробке.

Видимой форме движущегося тела с разнообразными возможностями относительного расположения тел и объектива фотоаппарата, характера освещения тела посвящена обширная литература. Последняя обзорная статья «Видимая форма быстро движущихся объектов согласно теории относительности» принадлежит Мак-Гиллу [10] (там же приведен довольно подробный список литературы). В этой статье, кроме подробного рассмотрения вопроса об измерении и фотографировании движущегося стержня, описаны аналитические способы построения видимой поверхности движущихся тел, проанализированы возможности стереоскопического фотографирования и фотографирования при освещении объекта мгновенной вспышкой.

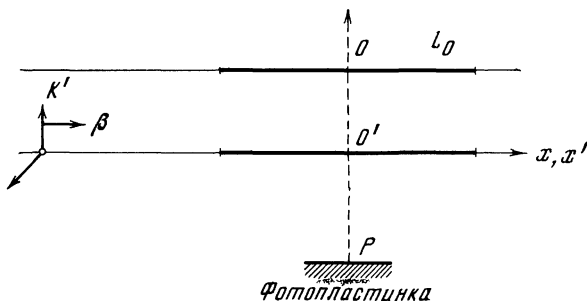


Рис. 2. Принципиальная схема, позволяющая сфотографировать лоренцово сокращение движущегося стержня. Когда середина стержня O' оказывается на линии PO , срабатывает устройство, открывающее (на мгновение) затвор в P , так, чтобы он пропустил лучи, испущенные точками стержня в момент пересечения точкой O' линии PO

Из последних статей, посвященных форме движущихся тел, укажем на работу [11], в которой рассматривается видимая форма движущейся вертикальной прямой, когда наблюдение ведется на нормали к прямой. Видимая картина получается как геометрическое место точек, свет от которых одновременно доходит до точки наблюдения. Эта картина меняется по мере перемещения прямой. В работе [12] тем же самым методом с использованием счетных машин были рассмотрены видимые картины для следующих случаев: а) для небесной сферы с некоторыми созвездиями; б) для сферы, на которой нанесены параллели и меридианы, если ее центр проходит от наблюдателя на расстоянии, равном диаметру сферы; в) движение ряда кубиков.

Конечная скорость распространения света при наблюдении небесных объектов может приводить к тому, что видимая скорость движения космических объектов, например оболочки после взрыва небесного тела, может оказаться больше, чем скорость света [13].

Итак, определение истинной формы движущегося предмета требует, кроме фотоснимка, еще и дополнительной информации для однозначностей интерпретации, безотносительно к релятивистским эффектам. Заметим, однако, что наблюдатель, обладающий способностью рассуждать физически, все равно не может согласиться с тем, что движущийся объект поворачивается *. Из рис. 1, а следует, что угловая скорость вращения куба, $d\theta/dt$, а следовательно $d\theta'/dt'$, меняется со временем, и к тому же неравномерно. Но если объект поворачивается, и к тому же еще с переменной угловой скоростью, на него должен действовать переменный момент сил — рассуждал бы неподвижный наблюдатель. Но откуда могут взяться силы, действующие на свободно движущееся тело, если все рассмотрение проводится в инерциальной системе отсчета **? Поэтому наблюдатель должен был бы признать, что объяснение видимой формы тела поворотом просто порочно. Следовательно, постановка вопроса «сокращение

* Довольно странно, что мы не обнаружили никаких упоминаний в литературе по этому поводу.

** Отметим, однако, что само понятие «момент сил» не ковариантно с релятивистской точки зрения. Поэтому появление момента в K при отсутствии его в K' , строго говоря, ничему не противоречит.

или поворот» является скорее логической ловушкой, чем физическим вопросом.

Существенно, что пример, рассмотренный Пенроузом, свободен от указанной трудности — вращение однородной сферы ненаблюдаемо. Если пометить сферу, нарисовав на ней, например, параллели и меридианы, то наблюдатель сразу же убедится, что никакого вращения нет [9]. Поэтому, выдвигая парадоксы и разбирая их, не следует лишать наблюдателя разума.

Вместе с тем вопрос о вращении движущегося тела и об уравнении, описывающем такое вращение, совсем уж не так прост. Известно уравнение Эйлера в системе, где центр инерции тела покоится. Можно написать уравнения Эйлера, если тело движется с нерелятивистской скоростью. Однако распространение тех же самых рассуждений на релятивистские скорости ведет к новым парадоксам, один из которых будет изложен ниже.

II. Преобразование сил и моментов сил, действующих на тела, находящиеся в равновесии, при переходе от одной системы отсчета к другой

Хотя закон преобразования вектора трехмерной силы непосредственно вытекает из определения четырехмерной силы Минковского, этот закон недавно оказался предметом дискуссии [14—17]. Дискуссия возникла в связи со следующим примером. Пусть в системе K^0 (собственная система задачи) покоится прямоугольная плоская рамка $ABCD$, по диагонали AC которой натянута упругая нить, с двух сторон растягивающая шарик, масса покоя которого равна m (рис. 3, a). В системе K^0 направление нити определяется из треугольника ABC ; если ввести обозначения $AB = a_0$, а $BC = b_0$, то $\operatorname{tg} \alpha_0 = b_0/a_0$. В системе K^0 упругие силы направлены вдоль нити, поэтому можно написать еще, что

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{b_0}{a_0} = \frac{F_{1x}^0}{F_{1y}^0}, \quad (1)$$

где через F_1 обозначена сила, направленная к вершине C ; такие же соотношения имеют место и для F_2 .

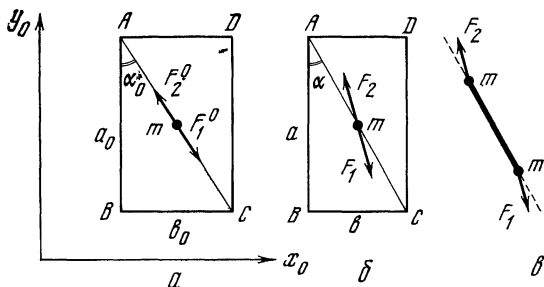


Рис. 3. Прямоугольная рамка, по диагонали которой натянута упругая нить, растягивающая шарик m

a — картина в «собственной системе отсчета» K^0 ; b — как выглядит та же картина с точки зрения системы K ; c — если вместо шарика взять гантель, то на нее, с точки зрения K , действует пара сил

Перейдем теперь к системе K , относительно которой система K^0 движется со скоростью V . Мы принимаем, как обычно, что оси x^0 и x совпадают, а оси y^0 , y ; z^0 , z соответственно параллельны. Согласно формулам преобразования длин и сил, получим, если воспользоваться обозначением* $B = V/c$:

$$a = a_0, \quad b = b_0 \sqrt{1 - B^2}. \quad (2)$$

$$F_{1x} = F_{1x}^0, \quad F_{1y} = F_{1y}^0 \sqrt{1 - B^2}. \quad (3)$$

Отсюда видно, что равенство (1) уже несправедливо; в системе K угол, определяющий направление нити, и угол, определяющий направление сил, вовсе не равны друг другу:

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{b}{a} = \frac{b_0}{a_0} \sqrt{1 - B^2} = \frac{1}{\Gamma} \frac{b_0}{a_0} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{\Gamma}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \alpha'' = \frac{F_{1x}}{F_{1y}} = \frac{F_{1x}^0}{F_{1y}^0} \frac{1}{\sqrt{1 - B^2}} = \Gamma \frac{F_{1x}^0}{F_{1y}^0} = \Gamma \operatorname{tg} \alpha_0. \quad (5)$$

Хотя сумма сил по-прежнему остается равной нулю, однако силы в системе K направлены под углом к нити (см. рис. 3, б). Это обстоятельство кажется на первый

* Мы обозначим через V (и соответственно $B = V/c$) относительную скорость инерциальных систем, а через v (и соответственно $\beta = v/c$) скорость тела.

взгляд удивительным. Действительно, что произойдет, например, если перерезать шнур на участке 2? В системе K^0 ускорение в начальный момент должно быть параллельно направлению силы (это явно нерелятивистский случай, и обычный закон Ньютона вполне применим), т. е. оно направлено вдоль нити. В системе K , казалось бы, ускорение должно быть направлено под углом к нити, так как направление нити и направление силы F_1 не совпадают. В связи с этим примером предлагалось даже [14] отказаться от правила преобразования сил (3). Однако парадокс разрешается просто: в релятивистской динамике ускорение, вообще говоря, не совпадает по направлению с действующей силой, и хотя сила направлена под углом к направлению нити, ускорение направлено вдоль нити. Сам парадокс представляет собой полезную иллюстрацию особенностей релятивистского уравнения динамики.

Убедимся, что в обеих системах ускорение шарика направлено вдоль нити. Удобно записать релятивистское уравнение движения в виде [18]

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{\gamma} \left\{ F - \frac{v}{c^2} (F v) \right\};$$

здесь m — масса покоя, F — действующая на шарик трехмерная обычная сила, v — скорость тела, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, где $\beta = v/c$.

В системе K^0 в момент $t = 0$, когда обрезают нить 2, имеем:

$$m \frac{dv_x^0}{dt} = F_1^0$$

или в проекциях

$$m \frac{dv_x^0}{dt} = F_{1x}^0, \quad m \frac{dv_y^0}{dt} = F_{1y}^0.$$

Направление движения в начальный момент (делим почленно первое соотношение на второе) определяется соотношением

$$\frac{dv_x^0}{dv_y^0} = \frac{F_{1x}^0}{F_{1y}^0} = \operatorname{tg} \alpha_0.$$

Согласно (1), это направление — направление ускорения — совпадает с направлением нити, как это и долж-

но быть. Итак, в K^0 силы и ускорение параллельны, и движение в начальный момент направлено вдоль нити.

Теперь перейдем к системе K . В этой системе тело уже движется со скоростью, совпадающей со скоростью системы отсчета K^0 , т. е. V . Поэтому $\gamma = \Gamma$, и проекции ускорения здесь запишутся уже так:

$$m \frac{dv_x}{dt} = \frac{1}{\Gamma} \left\{ F_{1x} - \frac{V}{c^2} (F_{1x} V) \right\} = F_{1x} \frac{1}{\Gamma^3}, \quad (6)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = \frac{1}{\Gamma} F_{1y}. \quad (7)$$

Здесь учтено, что скорость шарика совпадает со скоростью системы K , т. е. равна V и имеет компоненты $(V, 0, 0)$. F_{1x} и F_{1y} — это компоненты силы в системе K^* . Чтобы найти направление ускорения в K , разделим почленно (6) на (7):

$$\frac{dv_x}{dv_y} = \frac{F_{1x}}{F_{1y}} \frac{1}{\Gamma^2} = \Gamma \operatorname{tg} \alpha_0 \frac{1}{\Gamma^2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{\Gamma} = \operatorname{tg} \alpha', \quad (8)$$

где мы воспользовались в третьем звене цепи равенств соотношением (5), а в последнем — соотношением (4). Но из (8) видно, что ускорение в K в начальный момент тоже направлено вдоль нитей, и никакого парадокса не возникает.

Однако представим себе, что вместо шарика, который подразумевается точечным, нити растягивали бы твердое тело, например, гантель. Тогда в системе K на шарики гантели действовала бы пара сил (см. рис. 3, ϵ), и гантель повернулась бы относительно диагонали рамки**.

Но в собственной системе очевидно, что ось гантели совпадает с диагональю рамки. Здесь мы, конечно, сталкиваемся с парадоксом. И мы знаем, что парадокс возникает потому, что мы пытались описать с точки зрения систе-

* Нетрудно заметить, что соотношения (6) и (7) соответствуют двум исключительным случаям релятивистского уравнения, когда сила и ускорение параллельны, а соответствующие массы в этом случае называли раньше «поперечной» и «продольной». От этих, в общем неудачных, терминов сейчас практически отказались, хотя они неплохо передают тензорный характер связи между силой и ускорением в релятивистской механике.

** Конечно, нельзя говорить о том, что гантель повернулась в одной системе и осталась в покое в другой. Действительно, поставим около гантели стакан с водой. Если при повороте гантели стакан с водой разобьется, то этот факт не может быть относительным.

мы K явление, о котором точно известно, как оно происходит в собственной системе K^0 . Ясно, что ошибка скрыта в наших рассуждениях относительно системы K . Этот парадокс представляет собой вариант хорошо известного парадокса рычага [19]. Напомним вкратце этот парадокс. Пусть в K^0 покоится коленчатый рычаг, изготовленный из двух жестких стержней, скрепленных в точке O , которая служит осью вращения рычага. Стержни перпендикулярны друг другу (рис. 4).

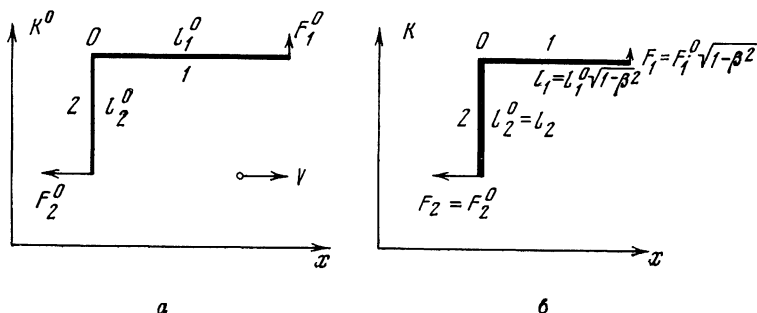


Рис. 4. Парадокс рычага

a — в системе K^0 , где $F_2^0 l_2^0 = F_1^0 l_1^0$, рычаг находится в равновесии; b — этот же рычаг, если рассматривать его с точки зрения системы K^0 : моменты сил, действующих на плечи рычага 1 и 2, явно не равны

К концу первого стержня приложена сила F_1^0 (длина стержня l_1^0), к концу второго — с длиной l_2^0 — сила F_2^0 . По условию рычаг находится в равновесии, что означает равенство моментов сил в K^0 :

$$F_1^0 l_1^0 = F_2^0 l_2^0.$$

Если эту же систему рассматривать в системе K и определять момент сил как произведение силы на плечо, мы приходим к парадоксальному результату. Длины сокращаются только в направлении движения, так что $l_1 = l_1^0 \sqrt{1 - V^2}$, а силы преобразуются только в направлении, перпендикулярном движению: $F_1 = F_1^0 \sqrt{1 - V^2}$, но $l_2 = l_2^0$, а $F_2 = F_2^0$. По отдельности эти формулы преобразования длин и сил сомнений не вызывают. Но суммарный момент сил в системе K уже не равен нулю:

$$F_1 l_1 - F_2 l_2 = F_1^0 l_1^0 (1 - V^2) - F_2^0 l_2^0 = -V^2 F_1^0 l_1^0 = -V^2 F_2^0 l_2^0.$$

Парадокс состоит в том, что хотя заведомо известно, что рычаг неподвижен, с точки зрения системы K на рычаг действует момент сил и, следовательно, рычаг должен поворачиваться.

Лауэ [19,20] разрешал этот парадокс весьма остроумным способом. Рычаг движется в системе K со скоростью V , поэтому сила F_2 совершает в единицу времени работу F_2V . Таким образом, в конец рычага 2 «втекает» энергия — F_2V , увеличивающая в единицу времени массу на конце рычага Δm , так что $\Delta m = F_2V/c^2$. Приращение импульса на конце рычага в единицу времени $\Delta p = \Delta mV = F_2V^2/c^2$, а следовательно, изменение момента импульса в единицу времени равно $F_2V^2l_2^0/c^2 = F_2^0V^2l_2^0/c^2$. Приращение момента импульса в K точно компенсируется моментом силы, и вращение не возникает.

Возникновение парадокса в действительности связано с тем, что момент сил нельзя преобразовывать путем независимого преобразования плеч и сил. Момент сил представляет собой трехмерное векторное произведение, а его четырехмерное обобщение не может быть проведено однозначно. Особенностью задачи о рычаге является то, что суммарный момент определяется двумя силами, приложенными в разных пространственных точках. Релятивистская механика всегда сталкивается с трудностями, когда переходит к описанию системы, состоящей из многих тел.

В таких системах вычисления следует всегда проводить в случае статических задач в системе покоя среды (для нашего примера — в системе, где рычаг покоится). Переход же в систему отсчета, относительно которой среда движется, требует уже преобразования величин, используемых в теории упругости, и мы фактически оказываемся в области неопределенности и произвола. Впрочем, попытка произвести такие преобразования для элементарного случая содержится в [17].

Обратим внимание еще на один результат. Допустим, что рычаг до момента $t = 0$ силы просто не действуют, а в момент $t = 0$ одновременно в K_0 «включаются» силы F_1^0 и F_2^0 . В каждый момент времени в K_0 равновесие будет соблюдено. Но в K силы будут включены уже не одновременно, и будет промежуток времени, когда сила F_1 уже действует, а сила F_2 еще нет. Снова возникает момент

силы. То, что здесь существенны именно силы, приложенные в разных точках тела (парадоксы возникают, разумеется, при рассмотрении твердых тел), видно из совсем простого примера. Пусть в K^0 на оси x^0 лежит твердое тело длиной l_0 . До момента $t = 0$ на него силы не действуют, а в момент $t = 0$ с обеих сторон включаются равные, но противоположно направленные силы. В K^0 равновесие всегда есть, а в K есть промежуток времени, в котором силы не уравниваются, и, следовательно, тело «должно прийти в движение».

Литература

1. А. Борк. Физика перед возникновением СТО. УФН, 94, 167 (1968), стр. 178.
2. А. Эйнштейн. К электродинамике движущихся тел. Собр. науч. трудов, т. I. М., «Наука» (1965).
3. Дюге. Свет, сфотографированный на лету. УФН, 108, вып. 1 (1973). В. А. Угаров. «Наука и жизнь», № 6, 49 (1973).
4. С. М. Рытов. «Природа», № 4 (1960).
5. R. Penrose. Proc. Camb. Phil. Society, 55, 137 (1959).
6. J. Terrell. Phys. Rev., 116, 1041 (1959).
7. V. Weisskopf. Phys. to Day, 13, (9), 24 (1960).
8. Э. Тейлор, Дж. Уилер. Физика пространства — времени. «Мир», (1969), (1971), стр. 131.
9. D. Long. Am. J. Phys., 38, 1181.
10. Mc Gill. Contemp. Phys., 9, 33 (1968).
11. R. Bhandal. Am. J. Phys., 38, 1200.
12. G. Scott, H. van Driel. Am. J. Phys., 38, 971; см. также предыдущую работу — там же, 33, 534 (1965).
13. В. Л. Гинзбург С. И. Сыроватский. Развитие теории синхротронного излучения и его реабсорбции. Препринт № 94. ФИАН, 1969.
14. L. Karlov. Lettere al Nuovo Cimento, III, N 2, Serie prima, 8 Gennaio 1970.
15. W. Rindler. Lettere al Nuovo Cimento, III, N 24, Serie prima, 13 Giugno 1970.
16. J. Ray. Lettere al Nuovo Cimento, III, N 24, Serie prima, 13 Giugno 1970.
17. K. Johns. Lettere al Nuovo Cimento, IV, N 8, Serie prima, 22 Agosto, 1970.
18. В. А. Угаров. Специальная теория относительности. Физматгиз (1969), стр. 107.
19. М. Лауэ. Статьи и речи. «Наука» (1969), стр. 59.
20. В. Пановский, М. Филиппс. Классическая электродинамика. Физматгиз (1963), § 16, 5.

ТЕРМОДИНАМИКА И СТАТИСТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА В СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ *

§ 1. Введение

1.1. Необходимость релятивистской формулировки

Если электродинамика движущихся тел была неотложной задачей физики уже до того, как появились результаты Эйнштейна, соответствующее обобщение «Теории теплоты» было в том же самом смысле ни неизбежным, ни даже возможным. То, что именно так и должно быть, интуитивно ясно из следующих соображений. Термодинамическим равновесием по определению называется такое состояние, при котором всякие относительные движения отдельных частей системы прекращаются. Если такие движения не прекратились, они влекут за собой диссипацию энергии, а это означает неравновесное состояние. Поэтому совсем не удивительно, что появляются парадоксы, когда пытаются считать тела, находящиеся в относительном движении, в качестве частей одной и той же термодинамической системы.

Конечно, для некоторых систем, у которых существует внутреннее движение, возможно приписать локальные значения температуре и другим термодинамическим переменным, но тогда не может быть и речи о равновесии между смежными частями, которые движутся с конечными относительными скоростями.

Есть необходимость в теории движущихся систем в более широком смысле для тех случаев, когда следует рассматривать полный (линейный или угловой) импульс в качестве термодинамической переменной в том же самом смысле, в каком рассматривается энергия. Таким случаем является, например, термодинамика вращающегося

* D. T e r H a a r, H. W e r g e l a n d. Thermodynamics and statistical mechanics in the special theory of relativity. Phys. Reports, 1, N 2, 31—54 (1971).

тела (Ландау и Лифшиц); можно привести также другие примеры, относящиеся к не совсем обычным ситуациям.

Релятивистские эффекты при крайне высоких температурах могут играть, конечно, очень важную роль. Но тогда вещество ведет себя как смесь идеальных газов, и этот предельный случай не вызывает затруднений. В общем, релятивистская теория теплоты существенной практической роли не играет.

И все же физическая теория не может считаться удовлетворительной, если она не устанавливает однозначно соответствия между описаниями, которые различные наблюдатели, движущиеся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, получают для определенной термодинамической системы. И именно это представляется нам насущной задачей релятивистской формулировки термодинамики в настоящее время*.

1.2. История вопроса

Релятивистская формулировка термодинамики интересовала как самого Эйнштейна, так и некоторых других физиков, среди которых следует отметить Планка и Лауэ, начиная примерно с 1907 г. ** Основные результаты того времени можно привести в виде формул ***

$$\delta Q_{\text{рел}}/T = \delta S \text{ — инвариант.} \quad (1)$$

$$\delta Q = \delta Q^0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (2)$$

$$T = T^0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (3)$$

Здесь приняты следующие обозначения: T — абсолютная температура, отсчитанная в системе отсчета, движущейся со скоростью v относительно собственной системы термодинамической системы (которая обозна-

* Мы отсылаем к статье Ван-Кампена [1], где обсуждаются и другие соображения. Можем указать также обзорную статью Ландсберга, содержащую подробную библиографию.

** Литературу можно найти в статьях Мёллера [3] и Ландсберга [2].

*** В оригинальную работу Эйнштейна [4] вкралась опечатка, которая вызвала большое число недоразумений [см. его уравнение (23)]. Эйнштейн вовсе не предполагал произвольного скелинка фактора. (Здесь имеется в виду формула (2). — Прим. перев.).

чается значком 0), S — энтропия, Q — количество тепла и, наконец, c — скорость света.

Статистическая механика идеального газа рассматривалась Юттнером [5], который интерпретировал полученные им выражения таким образом, что они согласовались с написанными выше формулами преобразования, полученными Планком и другими авторами.

Вплоть до самого последнего времени вопрос о релятивистской термодинамике считался вполне законченным почти что в момент появления теории относительности, шестьдесят лет назад.

Однако посмертная работа Отта [6] поставила под сомнение традиционную формулировку. Вместо формулы (2) преобразования количества тепла и формулы (3) для преобразования температуры Отт получил

$$\delta Q = \frac{\delta Q^0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{и} \quad T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (4)$$

Когда некоторое время спустя это явное расхождение с классическими формулами стало известно, началась оживленная дискуссия, которая до сих пор не привела ни к каким определенным выводам.

Сейчас, судя по всему, можно отметить по крайней мере три различные точки зрения по этому вопросу:

а) релятивистская термодинамика Планка и других правильна,

б) правильна релятивистская термодинамика Отта,

в) обе формулировки термодинамики — Отта и Планка — допустимы.

Четвертая точка зрения, которую, быть может, стоит привести, высказана Ландсбергом и его сотрудниками. Она состоит в том, что физическое значение имеют только термодинамические параметры, взятые в собственной системе отсчета. Хотя такая исходная точка зрения кажется весьма ограниченной, она тем не менее может служить основой лоренц-инвариантной теории.

Вопрос состоит в том, чтобы понять, откуда проистекает возможность возникновения столь противоречивых мнений? Действительно ли классики, предложившие соотношения (1), (2) и (3), ошиблись при подсчете изменений энергии и импульса термодинамической системы, как это следовало из рассуждений Отта?

Все авторы соглашаются относительно соотношения [4]:

энтропия инвариантна. Это фундаментальное предположение, которое остается справедливым и в общей теории относительности, обычно обосновывают больцмановским соотношением между энтропией и «термодинамической вероятностью» *. Поскольку последняя очевидным образом инвариантна, отсюда и следует утверждение.

Количество тепла Q , с другой стороны, — это величина, законы преобразования которой непосредственно не даны. В правой части равенства, определяющего первое начало термодинамики, однако,

$$\delta Q = \delta U + \delta L, \quad (5)$$

где δL представляет собой «работу», стоят величины, законы преобразования которых однозначно определены механикой системы, и Мёллер [3] показал, как это можно фактически сделать. Самая тонкая часть здесь — это преобразование члена, описывающего «работу» δL , поскольку «работа, совершаемая телом над окружающими его телами», не имеет прямого физического смысла, за исключением того случая, когда тело рассматривается в собственной системе. Мёллер провел преобразование со всеми подробностями для одного конкретного случая, и его результат был подтвержден другими примерами Бревиком [7] и Седерхольмом [8].

В настоящей статье, однако, мы будем избегать величин, преобразования для которых сложны или противоречивы, — в частности величины «работы», которая была принципиальным источником расхождения во мнениях.

Как мы увидим, такой подход открывает свободную дорогу дедукции и приводит к формулировке релятивистской теории тепла в форме, предложенной Оттом.

Вместе с тем, поскольку наша аргументация носит чисто формальный характер, она не может опровергнуть альтернативные формулировки с другими соотношениями между символами и физическими величинами. Относительные достоинства различных формулировок могут быть выявлены в конечном счете их применением к результатам экспериментов; однако предложить подходящие эксперименты для такого сравнения весьма трудно.

* Поскольку этот аргумент выходит за рамки феноменологической термодинамики, следует указать, что инвариантность энтропии может быть установлена и без ссылки на ее статистическую интерпретацию; мы еще вернемся к этому вопросу.

§ 2. Термодинамика

2.1. Замкнутые системы

Если тело, не имеющее механического взаимодействия с окружающей средой, приобретает энергию в форме тепла в количестве ΔQ^0 (в собственной системе), его масса покоя (M) возрастает на величину $\Delta Q^0/c^2$. Соответственно этому, первое начало термодинамики принимает форму

$$\Delta Q^0 = \Delta (Mc^2); \quad (6)$$

если к тому же процесс обратимый и изотермический, энтропия системы возрастает на величину $\Delta S^0 = \Delta(Mc^2)/T^0$.

Для отклонений от состояний равновесия, согласно второму началу,

$$(\delta S^0)_{M, v^0, \dots} < 0 \quad \text{или} \quad (\delta M)_{S^0, v^0, \dots} > 0; \quad (7)$$

эти соотношения представляют собой условия равновесия Гиббса, записанные в инвариантной форме.

Чтобы придать им вид, который не был бы жестко привязан к собственной системе отсчета, мы заметим следующее.

а) Полная энергия тела

$$E = Mc^2 / \sqrt{1 - \beta^2} \quad (8)$$

представляет собой положительную монотонную функцию лоренцовского инварианта M .

б) Скорость $v = \beta c$ служит только для выделения определенной лоренцовской системы отсчета и остается, следовательно, постоянной * во время протекания всех термодинамических процессов, которые происходят с телом.

в) Если объем тела в собственной системе (V^0) выдерживается неизменным во время термодинамического про-

* Обратите внимание на то, что мы не рассматриваем ускорение или замедление всего тела как термодинамический процесс. Так как оба эти процесса осуществляются как точно определенная механическая процедура, их можно отнести формально к адиабатическим процессам. Но хотя полная энергия тела зависит от лоренцовской относительной скорости, не существует никакого функционального соотношения между энтропией и лоренцовской скоростью; поэтому мы и не рассматриваем ее в качестве термодинамической переменной.

цесса, соответствующий объем

$$V = V^0 \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (9)$$

который определяется *одновременно* в другой лоренцовой системе отсчета, также остается постоянным.

Таким образом, возвращаясь к отклонениям от состояния равновесия (7), рассматриваемого из инерциальной системы, относительно которой тело имеет постоянную скорость v , из $\delta M > 0$ следует $\delta E > 0$, и, поскольку энтропия инвариантна, из $\delta S^0 = 0$ следует $\delta S = 0$.

Из обычных рассуждений (например, Гиббса [9]) мы получим, что

$$(\delta E)_{S, V, \beta, \dots} > 0, \quad (\delta S)_{E, V, \beta, \dots} < 0. \quad (10)$$

Это означает, что исходные условия Гиббса для определения состояния равновесия могут быть перенесены в специальную теорию относительности без каких-либо существенных оговорок*.

Если выбрать максимум энтропии, как это и подразумевается соотношениями (7) или (10), в качестве критерия равновесия, его инвариантный характер становится очевидным даже без ссылок на соотношение Больцмана: равновесие — т. е. состояние, в котором не обнаруживается никаких видимых перемен, — должно представляться одинаково всем эквивалентным наблюдателям.

Теперь перейдем к определению температуры: как было указано Линдхартом (частное сообщение), альтернатива, отраженная равенствами (3) и (4), может быть весьма просто разъяснена путем рассмотрения лоренц-инвариантного соотношения, связывающего массу покоя M и 4-вектор энергии-импульса $\{E, \mathbf{G}\}$ замкнутой (в механическом смысле) системы,

$$M^2 = E^2/c^2 - G^2. \quad (11)$$

Это инвариантное соотношение подразумевает, что для произвольного изменения массы покоя при постоянной скорости должно быть:

$$dE = d(Mc^2)/\sqrt{1 - \beta^2}, \quad (12)$$

* Инвариантность их формы вовсе не означает, что все термодинамические соотношения обладают этим свойством, и, действительно, как это будет ясно из дальнейшего, на самом деле это так и есть.

при постоянном же импульсе

$$dE = \sqrt{1 - \beta^2} d(Mc^2). \quad (13)$$

Для обратимого поглощения тепла получим

$$d(Mc^2) = T^0 dS^0, \quad (14)$$

и, далее, используя инвариантность энтропии:

$$(\partial E / \partial S)_v, \dots = T^0 / \sqrt{1 - \beta^2} = T_{\text{Отт}}, \quad (15)$$

$$(\partial E / \partial S)_G, \dots = T^0 \sqrt{1 - \beta^2} = T_{\text{Планк}}. \quad (16)$$

Следовательно, если производные берутся при постоянной скорости, мы получаем определение температуры согласно Отту. Так поступать вполне естественно, если мы рассматриваем лоренцовскую скорость исключительно как параметр, характеризующий наблюдателя.

Как мы уже подчеркивали, мы не допускаем изменения поступательной скорости при рассмотрении термодинамических процессов в нашем понимании. Точно так же мы воздержимся от использования циклов Карно между двумя движущимися тепловыми резервуарами. В этом нет необходимости, если речь идет о расширении термодинамики в том смысле, который понимается здесь.

Когда скорость v постоянна, полный импульс должен, вообще говоря, во время термодинамического процесса изменяться. Мы сделаем также еще одно важное ограничение в нашей термодинамике: будут рассматриваться только такие процессы, при которых тело в собственной системе отсчета не принимает на себя импульс; это значит, что всегда будет считаться справедливым

$$\delta G = (\delta Q^0 / c^2) v / \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (17)$$

Такое ограничение не является существенным (его можно даже включить в определение собственной системы); более того, оно молчаливо предполагается в обычной нерелятивистской термодинамике, обобщение которой и является нашей главной задачей.

Чтобы определить полную энергию замкнутой термодинамической системы, мы должны точно задать G или v . Поскольку при термодинамических процессах, как они понимаются здесь, v постоянно, а G нет, термодинамические величины и их производные должны рассматриваться

при постоянной скорости, а именно, при скорости $v = \beta c$, соответствующей скорости рассматриваемой инерциальной системы. Как мы уже видели из соотношения (16), это ведет к определению температуры по Отту.

2.2. Незамкнутые системы

Для простоты мы не рассматриваем никаких других способов механического взаимодействия системы с ее окружением, кроме изотропного давления (P) на поверхности тела. В этом случае можно приписать телу полную энергию (E) и полный импульс (G), но хорошо известно, что они не образуют компонент 4-вектора, хотя законы их преобразования достаточно просты. (Для изотропной жидкости $E = \gamma (E^0 + \beta^2 P^0 V^0)$, где $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$).

С другой стороны, энтальпия $H = E + PV$ и импульс G , который теперь уже выражается как

$$G = (E + PV) v/c^2, \quad (18)$$

могут быть скомбинированы в 4-вектор (см. Паули [12], стр. 196):

$$H^\mu = u^\mu H^0/c, \quad \mu = 0, 1, 2, 3, \quad (19)$$

где

$$u = \{c, v\}/\sqrt{1 - \beta^2} \text{ (4-скорость),}$$

$$H^0 = Mc^2 + PV^0$$

и $P = P^0$ (инвариант).

Совершенно ясно, что H^μ преобразуется как 4-вектор. Это — хорошо известный результат релятивистской механики сплошных сред, который совершенно не зависит от термодинамических представлений.

Наша аргументация может быть в точности такой же, как и в случае замкнутых систем: во-первых, мы образуем инвариант

$$H^2 - G^2 = (Mc^2 + P^0 V^0)^2 = H^{0^2}. \quad (20)$$

Если дифференцировать при постоянной скорости $v = \beta c$, мы получим

$$dH^0 = dH\sqrt{1 - \beta^2} \quad \text{или} \\ dE^0 + P^0 dV^0 = dH\sqrt{1 - \beta^2} - V^0 dP^0. \quad (21)$$

Возвращаясь обратно к собственной системе, мы получим в правой части dQ^0 или — если процесс обратимый, $T^0 dS^0 (= T^0 dS)$, откуда вытекает следующее дифференциальное соотношение между S , H и $P (= P^0)$:

$$dS = \frac{dH}{T^0} \sqrt{1 - \beta^2} - \frac{V^0}{T^0} dP, \quad (22)$$

в котором еще фигурирует инвариантная температура T^0 в собственной системе отсчета.

Определяя по-прежнему температуру как производную при постоянной скорости v

$$T = (\partial H / \partial S)_{T, \beta, \dots}, \quad (23)$$

мы снова получим, что $T = T^0 / \sqrt{1 - \beta^2}$. Однако теперь мы обнаруживаем, что определение температуры согласно (16) или (23) влечет за собой соотношения

$$\begin{aligned} T dS &= dH - \gamma^2 V dP = \gamma dE^0 + \gamma^2 P dV, \\ \gamma &= 1 / \sqrt{1 - \beta^2}, \end{aligned} \quad (24)$$

форма которых не является инвариантной*, если преобразование всех других переменных производить по обычным правилам релятивистской механики.

Поэтому, как это будет видно из дальнейшего, следует быть очень осторожными, применяя инвариантность формы в качестве эвристического принципа. Многие соотношения обычной термодинамики не сохраняют своего вида при преобразованиях Отта. Однако нет никаких фундаментальных причин, чтобы они должны были ее сохранять.

Необратимые процессы требуют специального обсуждения (см. Мёллер [3, 10]), но мы не станем здесь на них останавливаться, а перейдем к релятивистской статистической механике,

* Здесь использованы только определения (18) и (19): $H = \gamma H^0 = \gamma (E^0 + P V^0) = \gamma E^0 + \gamma^2 P V$ и результат, заимствованный из релятивистской механики сплошной среды [12]: $\gamma H^0 = E + P V$. Из последнего соотношения вытекает равенство, которым мы не пользовались в явном виде: $E = \gamma (E^0 + \beta^2 P V^0) = \gamma E^0 + \beta^2 \gamma^2 P V$. Стоит заметить в качестве предупреждения, что отождествлять γE^0 с E нельзя; это верно для тела постоянного объема, но неверно для тела, находящегося под постоянным давлением.

§ 3. Статистическая механика

3.1. Фазовое пространство

Уравнение Больцмана $S = k \ln \Gamma$ и инвариантность энтропии очевидным образом приводят к требованию, чтобы фазовый объем $\int d\Gamma$ трактовался в определенном смысле инвариантным способом. Как это можно осуществить в системах, состоящих из свободных частиц, было недавно показано Тошеком [11]. Но как это было уже выяснено в старых работах Ютнера, Планка и других авторов (см. Паули [12]), посвященных идеальному газу и черному излучению, именно в этих частных случаях мы не сталкиваемся со сколько-нибудь серьезными проблемами. (Хотя не исключено, что как раз эти системы наиболее удобны для установления связи между релятивистской термодинамикой и экспериментом). Реальные трудности появляются только тогда, когда мы переходим к взаимодействующим частицам.

Глубокий анализ возникающих здесь трудностей был проведен Гавашем [13] на конференции по статистической механике в Аахене в 1963 г. По его словам, «до того, как мы сможем построить релятивистскую статистическую механику, нам придется несколько развить обычную механику». Можно вкратце обрисовать ситуацию следующим образом: если мы попытаемся получить инвариантный фазовый объем, перед нами открываются две возможности.

1) Либо мы делаем из Γ точный инвариант, расширяя его от $6N$ -мерного до $8N$ -мерного. Это означает введение многовременного формализма в исходной динамике. По крайней мере для равновесной теории такой подход не представляется подходящим.

2) Либо мы сохраняем (в классическом предельном случае) обычное фазовое пространство и рассматриваем лоренцово преобразование как каноническое. Таким образом, будет достигнута желаемая инвариантность, однако это потребует дополнительной реинтерпретации по многим пунктам. Привлекая квантовую механику, часть реинтерпретации может быть упрощена, используя инвариантное свойство стационарных состояний, и мы рассчитываем вернуться к этому вопросу. Здесь же мы останемся в рамках классики.

Было известно — даже до того, как были сформулированы теоремы Нетер, — что группа Лоренца может быть порождена бесконечно малыми каноническими преобразованиями, а ее генераторами служат десять главных интегралов движения [14]. Однако, чтобы реализовать эту программу, следует развить гамильтоновскую релятивистскую механику системы. Известно, что большая часть трактовок релятивистской механики относится лишь к задаче одной частицы. Чрезвычайно трудно (если не невозможно) найти формулировку *одновременного* (т. е. для единого времени) *действия на расстоянии* в динамике многих (и даже для двух!) взаимодействующих частиц.

Дирак [15] выяснил некоторые необходимые условия для того, чтобы такая теория стала возможной. Бакамян и Томас [16] и Фолди [17] сумели найти такие типы взаимодействий, которые удовлетворяли поставленным условиям, но за счет таких условий, на которые трудно пойти с физической точки зрения. Все следствия этих шагов на пути к построению релятивистской динамики многих частиц в гамильтоновой форме, быть может ярче всего отражены в так называемой «теореме об отсутствии взаимодействия», принадлежащей Кюри (см. Кюри, Иордан и Сударшан [18]). Эта теорема показывает, что такая каноническая реализация преобразования Лоренца согласуется с инвариантностью мировой линии системы только в том случае, если эта линия прямая, но это означает отсутствие взаимодействия. В связи с этим некоторые авторы предлагали отказаться от физической интерпретации канонических координат частиц q_i как положений этих частиц. Есть, конечно, и другая дорога для отступления, несколько менее решительная — заменить систему частиц системой частиц плюс поле с билинейными и локальными взаимодействиями между частицей и полем. Дирак [15] выработал соответствующие генераторы для случая электродинамики, а Балеску [19, 20] отметил, что в этом случае фундаментальное условие Кюри* для лоренцовского преобразования точек мировой линии и алгебры Ли, перекрываемые каноническими генераторами, определено совместимы. Поэтому Балеску предложил разрубить гордиев узел двумя решительными ударами.

* Условие Кюри обсуждается в Дополнении А; в русском переводе Дополнения, содержащие математические выкладки, опущены.

Во-первых, отказаться от любого действия на расстоянии — запаздывающего, опережающего или симметричного четырехмерного — и рассматривать систему как состоящую из частиц плюс поле с ковариантным точечным взаимодействием. Этот шаг позволяет удовлетворить каноническому условию Кюри. В качестве платы за это система увеличивает число степеней свободы на непрерывную бесконечность степеней свободы, связанную с полем.

Во-вторых, Балеску предлагает осуществление лоренц-инвариантности через каноническую инвариантность, взяв за исходный пункт теорию Дирака [15]. Это означает, что фазовое пространство уже не является фиксированной системой отсчета, в которой движутся точки, но как движущееся многообразие координат и импульсов подчиняется гамильтониану системы. Тогда преобразования Лоренца становятся каноническими преобразованиями, особым образом зависящими от динамики системы, совершенно не похожими на кинематические преобразования, связывающие четырехмерные координаты, используемые различными наблюдателями.

Такой подход представляет совершенно новую основу для релятивистской статистической механики. С одной стороны, замечательно, что фазовое пространство рассматривается в смысле движущегося многообразия (метод Лагранжа), а не в смысле фиксированной координатной системы (метод Эйлера). В нерелятивистской теории допустимы обе точки зрения, хотя большинство из нас привыкло действовать в понятиях фиксированного фазового пространства (например, в связи с эргодической гипотезой).

Далее, бесконечное число степеней свободы приводит к тому, что фазовый объем системы представляет собой произведение обычного интеграла для частиц и интеграла в функциональном пространстве для поля. Это приводит к ряду технических трудностей — по мнению Балеску, не более серьезных, чем известные трудности в электродинамике. Конечно, довольно странно подчинить бесконечное число степеней свободы, которые в нерелятивистском приближении обращаются в функции расстояний между частицами — температурному распределению; такому, например, как черное излучение. Тем не менее это может быть оправдано, поскольку в статистической

механике мы вовсе не обязаны знать точное движение, другими словами, мы вовсе не нуждаемся в решении механических задач. Нам нужно знать только одно из возможных выражений для функции Гамильтона, и нам в принципе не обязательно исключать координаты и импульсы поля посредством запаздывающих или опережающих потенциалов частиц; последняя процедура представляет собой разновидность частичного решения бесконечной системы уравнений движения.

До сих пор Балеску удалось осуществить свою программу только для кинетического уравнения электрически заряженных точечных частиц. Ее разработка для равновесной теории может вызвать интересные технические проблемы. Хотя подход Балеску к вопросам релятивистской статистической механики весьма радикален, он не противоречив, и, возможно, никакого другого выхода вообще нет. Во всяком случае, его подход приводит к главному шагу: он делает фазовый объем лоренц-инвариантным, хотя и для бесконечного числа степеней свободы, которое возникает при наличии взаимодействия между частицами.

В последующем мы будем предполагать, что фазовый объем лоренц-инвариантен, и будем соответственно выбирать функции распределения.

3.2. Замкнутые системы

Точно так же, как статистическая интерпретация термодинамических дифференциальных соотношений:

$$dF = -dL - SdT \rightleftharpoons d\psi = \bar{dE} - \bar{\eta}d\Theta, \quad (25)$$

$$TdS = dE + PdV \rightleftharpoons \Theta d\bar{\eta} = \bar{dE} + \bar{P} dV, \quad (26)$$

столь скромно названная Гиббсом «термодинамическими аналогиями», привела его к каноническому распределению, она послужит нам отправной точкой для релятивистских обобщений.

Очень поучительное следствие (25) и (26) было впервые установлено Крамерсом [21]; оно имеет вид

$$\delta \bar{E} - \bar{\delta E} = \delta Q. \quad (27)$$

Оно выражает количество тепла как кажущуюся нехват-

ку в законе сохранения энергии, связанную с механической неопределенностью термодинамического процесса.

Очевидным обобщением (27) для замкнутых систем будет

$$\delta \bar{G}_\mu - \delta \bar{G}_\mu = \delta Q_\mu; \quad \mu = 0, 1, 2, 3. \quad (28)$$

Здесь Q_μ должны, очевидно, преобразовываться как 4-вектор, поскольку нам следует предположить, что фазовое усреднение (инвариантная операция), производимое в левой части (28), не нарушает характера преобразования механических величин.

Для того чтобы соблюсти соответствие с обычной термодинамикой в собственной системе отсчета, где

$$\delta G_\mu^0 = \{\delta E^0, 0, 0, 0\}, \quad \delta Q_\mu^0 = \{\delta Q^0, 0, 0, 0\}, \quad (29)$$

мы должны поставить условие (см. замечания в конце 2.1), что для всех процессов, которые мы намерены описывать нашей теорией, должно быть

$$\delta G_\mu = u_\mu \delta E^0/c^2 \quad \text{и} \quad \delta Q_\mu = u_\mu \delta Q^0/c^2, \quad (30)$$

где u — соответствующая 4-скорость системы относительно наблюдателя: $u^\mu = \gamma \{c, \mathbf{v}\}$, $u^\mu u_\mu = c^2$. Чтобы упростить наши обозначения, впредь мы используем систему единиц, где $c = 1$.

Выпишем теперь функцию распределения. Ее вид следует, конечно, подобрать; мы начнем с некоторого предположения и будем по ходу дела вносить новые. Дискуссионной является, конечно, интерпретация параметров распределения.

В силу инвариантности энтропии и элемента фазового объема плотность в фазовом пространстве должна быть лоренц-инвариантной функцией полного 4-импульса G^μ :

$$\rho = \exp(\Phi - \theta_\mu G^\mu), \quad (31)$$

где множители Лагранжа θ_μ обеспечивают выполнение условия, что энтропия $-k \ln \rho$ — принимает максимальное значение при дополнительных условиях $\bar{G}^\mu = \text{const}$. Функция Φ , которая определена подходящей нормализацией, например, $\int \rho d[\text{Фазы}] = 1$, должна быть, очевидно, также инвариантом.

Из сохранения вероятности и непрерывности канонического распределения при бесконечно малых обратимых

вариациях параметров можно снова подметить «аналогии», в точности так же, как это сделал Гиббс [22]. В релятивистской форме они выглядят даже еще проще:

$$d\Phi = \theta_\mu d\bar{G}^\mu + \bar{G}^\mu d\theta_\mu. \quad (32)$$

Связывая энтропию, как это делал Гиббс, с индексом вероятности $\eta = -\ln \rho$

$$\bar{\eta} = \theta_\mu \bar{G}^\mu - \Phi \quad (33)$$

и исключая $d\Phi$ из (32), мы получим

$$\theta_\mu (d\bar{G}^\mu - \bar{dG}^\mu) = d\bar{\eta} = dQ_{\text{рел}}^0 / \kappa T^0 = \text{Inv}, \quad (34)$$

и в точности так же, поскольку Φ — инвариант:

$$\Phi = \theta_\mu \bar{G}^\mu - \bar{\eta} = (\bar{E}^0 - T^0 S^0) / \kappa T^0 = F^0 / \kappa T^0. \quad (35)$$

Далее мы используем единицы, в которых постоянная Больцмана $\kappa = 1$.

Как это видно из соотношения (35), функция Φ тождественно равна (с точностью до постоянного множителя κ) потенциалу Массье:

$$\Phi = F^0 / T^0, \quad (36)$$

который имеет поэтому инвариантное значение.

Инвариантность потенциала Массье — это полезный побочный продукт релятивистской статистической механики, вывод которого средствами обычной термодинамики потребовал бы куда больших усилий. Используем этот потенциал, чтобы сделать некоторые замечания, касающиеся форм-инвариантности термодинамических уравнений. Возьмем, например, для проверки соотношение

$$dF^0 = -S^0 dT^0 - P^0 dV^0 \quad (37)$$

и посмотрим, не сводится ли оно в собственной системе к соотношению

$$dF = -SdT - PdV$$

и не является ли, следовательно, подходящей формой с точки зрения движущегося наблюдателя. Конечно, никаких очевидных оснований для этого предположения нет, без экспериментального определения «свободной» энергии для наблюдателя, не сопутствующего термодинамической системе. Поскольку определение F должно зависеть от

преобразования работы, мы должны — согласно нашей программе — на время обойти этот момент. В собственной системе $P^0 dV^0$ будет правильным выражением для работы в первом начале. Соответствующий член PdV , однако, не имеет такого же физического смысла для движущейся системы.

Но чтобы сказать нечто большее, мы можем взглянуть на интерпретацию множителей Лагранжа θ_μ . Длина 4-вектора θ (названная Тоушеком «вектором Синга» и Мёллером, вслед за Трусделлом, «вектором холодности») определяется соотношением

$$u^\mu \theta_\mu = 1/T^0. \quad (38)$$

Это можно понять, если применить (34) в собственной системе механически изолированного тела ($\delta \bar{G}^\mu = 0$), где $\theta_0^0 \delta E^0 - 0 = \delta \bar{\eta}^0 = \delta Q^0/T^0$ (инвариант), причем $\theta_0^0 = 1/T^0$, т. е. $\theta_\mu = u_\mu \theta_0^0$.

Используем те же аргументы, что и в § 3, а именно

а) $\delta Q^0/T^0 = \delta S^0 = \delta S$ — инвариант,

б) $\delta E = \delta E^0/\sqrt{1 - \beta^2}$ при постоянной скорости и внешних параметрах. Определив затем температуру как

$$(\partial E/\partial S)_{\beta v, \dots} = T, \quad (39)$$

увидим, что обобщение статистики Гиббса, следующее из представлений Балеску об инвариантном фазовом объеме, также приводит к формуле Отта для температуры движущейся системы. Теперь мы уже можем дать другой (по-видимому) независимый аргумент в пользу определения температуры по Отту.

Инвариантность Φ и ее равенство F^0/T^0 может быть удовлетворено предположением, что преобразованные по Лоренцу величины F и T , соответствующие величинам F^0 и T^0 соответственно, получаются умножением каждой из них на один и тот же множитель.

Предполагая далее, что свободная энергия Гельмгольца F преобразуется как полная энергия E замкнутой системы, можно принять этот постоянный множитель равным

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}, \quad (40)$$

что подразумевает использование температуры Отта.

Эта схема рассуждений отнюдь не обязательна. Прежде всего, до сих пор мы не установили физический смысл F , который представляет собой один из центральных пунктов расхождения во всей проблеме. Этот вопрос можно, однако, обойти, используя тот факт, что у нас уже имеются два надежных инварианта: энтропия $\bar{\eta}$ и потенциал Массье Φ . Их сумма

$$\theta_{\mu} \bar{G}_{\mu} = E^0/T^0 \quad (41)$$

также представляет собой инвариант. Поскольку

$$\theta_{\mu} = (\gamma/T^0)\{1, -\beta\}, \quad G^{\mu} = \{E, G\},$$

мы получим

$$\theta_{\mu} G^{\mu} = (\gamma/T^0)\{E - vG\},$$

и поскольку $G = \gamma E^0 v$, где $E = \gamma E^0$, мы получим также

$$(\gamma^2/T^0) E^0 (1 - \beta^2) = E/T^0 \gamma.$$

Если затем *потребовать*, чтобы из преобразования Лоренца следовало преобразование

$$E^0/T^0 \rightarrow E/T \quad (42)$$

полной энергии и температуры, определение температуры по Отту окажется единственно возможным.

Запишем еще несколько формальных соотношений: в соответствии с обычным соотношением между энтропией, энергией и температурой $(\partial S^0/\partial E^0)_V = 1/T^0$ мы имеем теперь инвариантное дифференциальное соотношение $(\partial S/\partial G^{\mu})_V = \theta_{\mu}$ для вектора холодности. И в соответствии с уравнениями Гиббса — Гельмгольца

$$E^0 = \frac{\partial(F^0/T^0)}{\partial(1/T^0)}, \quad H^0 = \frac{\partial(G^0/T^0)}{\partial(1/T^0)}, \quad (43)$$

мы можем записать ковариантные соотношения

$$G^{\mu} = \partial\Phi/\partial\theta_{\mu}, \quad H = \partial\Psi/\partial\theta_{\mu}, \quad (44)$$

где планковский потенциал Ψ играет ту же самую роль при постоянном давлении, что и потенциал Массье при постоянном объеме:

$$\bar{\Psi} = H^0/T^0 = \gamma (E^0 + P^0 V^0)/T^0 \gamma = (E + PV)/T_{\text{Отт}}. \quad (45)$$

(В статье «Термодинамические потенциалы в теории относительности и их статистическая интерпретация» Мёллер [10] приходит к таким же выводам.)

3.3. Незамкнутые системы

Ансамбли под постоянным давлением, представляющие подходящую статистическую основу для рассмотрения открытых систем, рассмотренных в 2.2, приписывают Льюису и Зигерту [23] или Ван-Хову [24]. Мёллер, однако, выдвигал эту идею лет на двадцать раньше в своих лекциях в Копенгагенском университете. Мёллеровское построение ансамблей под постоянным давлением имеет то преимущество, что оно опирается на точную механическую модель; это построение было изложено лишь в конспекте его лекций, изданном в Дании, поэтому мы воспроизведем его здесь: система, к примеру газ, заключена в вертикальный цилиндр поперечного сечения A и прикрыта сверху поршнем с массой M (весом Mg) (рис. 1).

Когда поршень закреплен, а система помещена в тепловую баню, статистика системы — это статистика обычного канонического ансамбля системы N -частиц; объем системы — это механический внешний параметр:

$$\exp(-\Phi) = \frac{1}{N!} \int \left(\frac{d^3p d^3q}{h^3} \right)^{3N} \exp(-E^0(q, p; V^0, \dots)) / \Theta^0. \quad (46)$$

Если же, например, поршень свободно движется под постоянным давлением P (которое и является заданным внешним параметром), то объем (или, иначе, положение поршня q_M) будет новой механической степенью свободы, которую следует включить в фазу вместе с ее сопряженным импульсом p_M . Ее вклад в энергию системы состоит из: 1) кинетической энергии, связанной со скоростью поршня, и 2) потенциальной энергии, обусловленной положением массы поршня в поле тяжести, т. е.

$$p_M^2/2M + Mgq_M$$

в ньютоновском приближении. Как это было подчеркнуто Мёллером, можно принять это выражение с пренебрежимой ошибкой также и для релятивистской механики, поскольку масса M бесконечно велика по молекулярным масштабам.

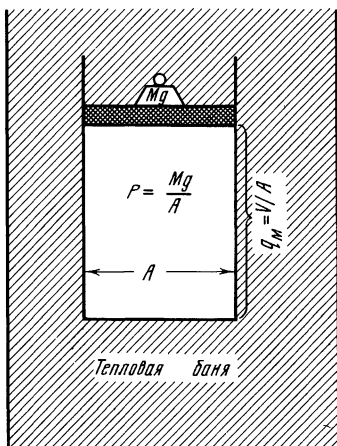


Рис. 1

Следовательно, энергию в том виде, который удобен для ансамбля, находящегося под постоянным давлением, можно записать в собственной системе так:

$$H^0(q, p, V, p_M, \dots) = E^0(q, p) + (p_M^0)^2/2M + PV^0, \quad (47)$$

поскольку $P = Mg/A$, а $q_M = V/A$. Каноническое-среднее от этого выражения — это как раз энтальпия, а потенциал Планка записывается в виде

$$\begin{aligned} \exp(-\Psi) &= \frac{1}{N!} \int \left(\frac{dpdq}{h} \right)^{3N} \exp\{-E^0(q, p)/\Theta^0\} dV \times \\ &\times \exp(-PV^0/\Theta^0), \end{aligned} \quad (48)$$

где опущен несущественный множитель $*(1/A)(2\pi m\Theta^0/h^2)^{1/2}$.

Используя следующее обозначение для фазового интеграла:

$$e^{-\Psi} = Z(P, \Theta^0) \quad \text{и} \quad e^{-\Phi} = (V^0, \Theta^0), \quad (49)$$

* Множитель $1/A$ появляется из-за того, что канонической координатой поршня является не объем V , а координата $q_M = V/A$. В выражении (51), полученном ниже, множитель $(2\pi M\Theta/h^2 A^2)^{1/2}$, сочетаясь с дополнительным множителем Θ/P , дает $\Theta/PAl = \Theta/Mgl$, где $l = (h^2/2\pi M\Theta)^{1/2}$ — тепловая волна де Бройля для поршня.

мы получим окончательно

$$Z(P, \Theta^0) = \int_0^{\infty} dV^0 Z(V^0, \Theta^0) \exp(-PV^0/\Theta^0). \quad (50)$$

Для идеального газа можно получить, оценивая эти выражения в собственной системе:

$$Z(V^0, \Theta^0) = \left[\frac{4\pi\Theta^0 m^2}{h^3} V^0 K_2 \left(\frac{m}{\Theta^0} \right) \right]^N / N!, \quad (51)$$

$$Z(P, \Theta^0) = [4\pi\Theta^0 m^2 h^{-3} V^0 K_2 \left(\frac{m}{\Theta^0} \right)]^N \left(\frac{\Theta^0}{PV^0} \right)^N,$$

где K_2 — функция Ганкеля, а множитель Θ/Mgl в $Z(P, \Theta^0)$ опущен [см. примечание к соотношению (48)].

Предполагая, что энергия в собственной системе

$$H_0^0 = \sum V \sqrt{(p^0)^2 + m^2} + PV^0 \quad (52)$$

является нулевой компонентой 4-вектора, который в движущейся системе имеет компоненты

$$H^\mu = H_0^0 u^\mu,$$

мы можем написать также

$$\theta_\mu \overline{H^\mu} = \theta_0^0 \overline{H^{00}} = \frac{\theta_0^0}{\gamma} \gamma \overline{H^{00}}. \quad (53)$$

Здесь $H^{00} = E^0 + PV^0$, а $\gamma H^{00} = E + PV$, другими словами, это энтальпия в собственной системе и в произвольной инерциальной системе соответственно; что касается величины $\gamma/\theta_0^0 = T^0 \sqrt{1 - \beta^2}$, то это (оттовская) температура. Казалось бы, что отсюда следует форм-инвариантность $Z(V, \Theta)$ и $Z(P, \Theta)$. Однако если предполагаемые свойства для преобразования энергии (47) могут быть доказаны [см. 2.2] для фазовых средних, то это не справедливо для макроскопической динамики. Для полноты следует в этом пункте разобраться, и простая модель Мёллера (см. рис. 1) допускает точный анализ, очень сходный с его же преобразованиями «выражения для работы», приведенными в его первой статье по релятивистской термодинамике.

Пытаясь дать физическую интерпретацию ансамблю под постоянным давлением, Мёллер обратил внимание на

замечание Бора, сделанное в Фарадеевской лекции 1930 года, о дополнительной пар термодинамических переменных. Ансамбли под постоянным давлением и обычные канонические ансамбли при постоянном объеме представляют собой дополнительное описание в том смысле, что если *давление* точно определено (вес, деленный на площадь поршня в модели Мёллера), *объем* (высота, умноженная на площадь поршня) должен быть статистической переменной *и*, следовательно, определенным только с точностью до тепловых флуктуаций (положения поршня). Наоборот, точно определенный объем влечет за собой флуктуацию давления. Розенфельд [25] написал соответствующие соотношения неопределенности, а именно для объема и давления

$$\Delta V^0 \Delta P \approx \kappa T^0, \quad (54)$$

из которых следует, что если одна из флуктуаций «нормальная» (т. е. относительного порядка $1/\sqrt{N}$), то и другая также является нормальной. Без сомнения, все это верно, хотя здесь еще остается место для обсуждения определения и порядка величины флуктуации давления. Мы не станем на этом останавливаться. Соотношения неопределенностей Розенфельда являются типичным примером соотношений, которые не являются форм-инвариантными при преобразованиях Отта, однако — по крайней мере для (54) — не возникает вопроса о физическом смысле лоренцовых преобразований.

Следует также иметь в виду, что в статистической термодинамике «сопряженные» пары $(V, P), (E, T), (N, \mu) \dots$ всегда состоят из одной *экстенсивной* V, E, N, \dots и одной *интенсивной* переменной $P, T, \mu \dots$ и что статистика для интенсивных переменных отличается от статистики экстенсивных переменных. Это можно понять, например, из следующего.

Согласно выражениям (48) и (50), плотность вероятности обнаружить объем термодинамической системы в интервале вблизи V^0 при заданных температуре и давлении, равна

$$w(V^0 | P) = \frac{Z(V^0, \Theta^0)}{Z(P, \Theta^0)} \exp \left\{ - \left(\frac{PV^0}{\Theta^0} \right) \right\}. \quad (55)$$

Функция $Z(V, \Theta)$ всегда положительна и, грубо говоря, пропорциональна V^N , поэтому соотношение (55) определя-

есть острый пик обычной функции распределения возможных значений объема. Согласно (50), она соответствующим образом нормирована

$$\int_0^{\infty} w(V^0 | P) dV^0 = 1. \quad (56)$$

Среднее значение и флуктуации около V^0 определяются поэтому через

$$\overline{V^0} = - \frac{d \ln Z(P)}{d(P/\theta^0)}, \quad \overline{(V - \overline{V^0})^2} = \frac{d^2 \ln Z(P)}{d(P/\theta^0)^2}. \quad (57)$$

Для идеального газа мы получим

$$\overline{V^0} = N\theta^0/P, \quad \overline{(V - \overline{V^0})^2} = (\overline{V^0})^2/N. \quad (58)$$

Флуктуации давления при заданном объеме, конечно, не могут быть определены столь прямым путем из соответствующего (постоянный объем!) ансамбля. Вместо того чтобы приводить полный вывод, который, скорее всего, хорошо известен, мы привлечем формальную аналогию с соотношением (55), аналогию несколько искусственную, но ведущую тем не менее к правильному ответу.

Инверсией лапласовского преобразования (50) мы можем построить следующую функцию:

$$w(P | V^0) = \frac{1}{2\pi} \frac{Z(P, -i\theta^0)}{Z(V, \theta^0)} \exp(iPV^0/\theta^0), \quad (59)$$

удовлетворяющую условию «нормировки»:

$$\int_{-\infty - i\varepsilon}^{\infty - i\varepsilon} w(P | V^0) d\left(\frac{P}{\theta^2}\right) = 1.$$

Нет сомнений, что $w(P | V^0)$ не является настоящей функцией распределения, поскольку она комплексная и распространяется в область отрицательных значений P/θ^0 . Однако выражения, которые вытекают из формальных преобразований, а именно:

$$\frac{\overline{P}}{\theta^0} = \frac{d \ln Z(V^0, \theta^0)}{dV^0} \quad \text{и} \quad \Delta\left(\frac{\overline{P}}{\theta}\right)^2 = \frac{d^2 \ln Z(V^0, \theta^0)}{dV^2} \quad (60)$$

остаются всегда или почти всегда справедливыми. Более точно, первое из выражений (60) хорошо известно и абсолютно верно. Второе соотношение (60) всегда верно опре-

деляет порядок величины $O(N)$, однако в некоторых случаях, зависящих от экспериментальной ситуации, отличается от точного на некоторый множитель порядка единицы. Это обстоятельство может быть оправдано только внимательным обсуждением физического смысла флуктуации интенсивных переменных.

Как можно усмотреть из выражений (55) и (59), дополнительные соотношения между сопряженными величинами не могут быть выражены в столь идеально симметричной математической форме, как это возможно в квантовой механике. Причина этого, конечно, состоит в том, что в теории тепла дополнительные описания связаны между собой преобразованиями Лапласа, а не преобразованиями Фурье.

Посмотрим теперь на соответствующие соотношения в произвольной лоренцевской системе $G \neq 0$. Можно написать в фазовом интеграле (46)

$$E^0/\Theta^0 = \theta_\mu G^\mu,$$

где

$$\theta_\mu = \gamma \{1, -v\}/\Theta^0, \quad G^\mu = \{E, G\}, \quad E = \gamma [E^0 + (vG)].$$

Появляется искушение сделать вывод, что $E^0(q^0, p^0)/\Theta^0$ следует положить равной $E(q, p)/\gamma\Theta^0 = E/\Theta_{\text{отт}}$; поступив так, мы добьемся того, что фазовый интеграл $Z(V^0, \Theta^0)$ станет инвариантом — и не только по своей величине, но даже и по форме, как функция $V = V^0/\gamma$ и $\Theta = \gamma\Theta^0$. Но это будет ошибкой: ни планковское, ни оттовское и никакое другое определение температуры не могут придать Z инвариантной формы.

Чтобы оценить выражение (46) в произвольной системе, мы должны ввести в экспоненту $E^0 = \gamma [E - vG]$, фактически подставить и проинтегрировать по фазам $q \subset V$ и всем p . Но здесь нельзя упрощать выражения, используя соотношения

$$G = Ev \quad \text{или} \quad G^0 = 0, \quad (61)$$

которые, будучи правильными в механическом понимании, тем не менее не могут быть применены к фазовому объему, доступному для рассматриваемой термодинамической системы. Другими словами: для правильного соответствия с обычной теорией тепла — центр тяжести должен иметь возможность участвовать в тепловом движении. Таким

образом, соотношения (61), подразумевающие равенства $E^0(g^0, p^0)/\Theta^0$ и $E(q, p)/\Theta_{\text{Отт}}$, могут быть использованы только для канонических средних. В результате вычислений фазовый интеграл инвариантен в следующем смысле:

$$Z(V^0, \Theta^0) = Z(\gamma V, \Theta^0), \quad Z(P^0, \Theta^0) = Z(P, \Theta^0),$$

где механические параметры системы подчиняются очевидным релятивистским преобразованиям $V^0 \rightarrow \gamma V, P^0 \rightarrow P$. В этом контексте вопрос о том, какой температурой нужно пользоваться (оттовской $\Theta = \gamma\Theta^0$ или какой-либо иной), становится просто делом вкуса. И быть может, только выражение для флуктуации энергии

$$\overline{(\Delta E)^2} = \Theta^2 \partial \bar{E} / \partial \Theta,$$

остающееся форм-инвариантным относительно преобразований $E = \gamma E^0, \Theta = \gamma\Theta^0$, на самом деле указывает некоторую предпочтительность определения температуры по Отту.

Но такой вид форм-инвариантности представляет мало интереса, поскольку уравнение состояния и т. д., вытекающие из Z , уже не форм-инвариантны (при определении температуры по Отту). Например, уравнение (60) $P/\Theta^0 = (d/dV^0) \ln Z(V^0, \Theta^0)$ приобретает вид

$$\frac{\bar{P}}{\Theta} = \frac{1}{\gamma^2} \frac{d \ln Z(V^0, \Theta^0)}{dV}. \quad (62)$$

Точно так же уравнение состояния (57) запишется уже в виде

$$\bar{V} = - \frac{\Theta}{\gamma^2} \frac{d \ln Z(P, \Theta^0)}{dP}. \quad (63)$$

Чтобы выяснить смысл последнего уравнения, рассмотрим снова систему идеального газа, на этот раз считая давление заданным, а объем—статистической переменной.

Предполагая, как и раньше, для фазовой плотности ансамбля при заданном давлении выражение $\rho = \exp(-\theta_\mu \bar{H}^\mu)$, можно показать, что среднее значение экспоненты (которое всегда берется с оттовской температурой) может быть представлено в виде

$$\theta_\mu \bar{H}^\mu = (\bar{E} + P\bar{V})/\Theta, \quad (64)$$

куда входит лоренцовский сжатый объем $V = V^0 \sqrt{1 - \beta^2}$. Это не означает, однако, что распределение вероятности для объема при заданных давлении и температуре $w(V|P)$ должно быть пропорционально $\exp(-PV/\Theta)$. Правильное распределение вероятностей должно, очевидно, получаться из его выражения в собственной системе простой заменой переменных

$$w(V^0(V)) dV^0/dV = w(V), \quad (65)$$

соответствующей преобразованию Лоренца, т. е.

$$V^0 = \gamma V, \quad \gamma \Theta^0 = \Theta \quad (\text{Отт}). \quad (66)$$

Тогда мы приходим к следующему распределению вероятностей:

$$w(V|P) = \gamma \frac{Z(V^0, \Theta^0)}{Z(P, \Theta^0)} \exp(-\gamma^2 PV/\Theta), \quad (67)$$

согласующемуся с выражением (63).

Ковариантные соотношения, подобные (31) и (32), могут быть обобщены в векторную и тензорную термодинамику, пригодную для всех инерциальных систем. Однако, судя по всему, мы не очень-то нуждаемся в подобных конструкциях, поскольку все эти векторы и тензоры получаются довольно тривиальным образом как произведения их значений в собственной системе на некоторые одночлены, содержащие компоненты 4-вектора.

Литература

1. *N. G. van Kampen*. Phys. Rev., **173** (1968), 295.
2. *P. T. Landsberg*. Essays in Physics, 2 (1970).
3. *C. Møller*. Dan. Vid. Selsk. Mat.-Fys. Medd., **36**, N 1 (1967).
Русск. перев.: «Эйнштейновский сборник, 1970—1971». М., «Наука», 1971.
4. *A. Einstein*. Hand u. Jahrb. Elektronik (1908), 451, eq. (23).
5. *F. Jüttner*. Ann. Phys., **34** (1911), 856; **35** (1911), 145.
6. *H. Ott*. Z. Phys., **175** (1963), 70.
7. *I. Brevik*. Dan Vid. Selsk. Mat.-Fys. Medd., **36**, N 3 (1967).
8. *L. Söderholm*. Nuovo Cimento, **57B** (1968), 173.
9. *J. W. Gibbs*. Collected Works. Longmans Green, London (1928), vol. 1, p. 56.
10. *C. Møller*. Dan. Vid. Selsk. Mat.-Fys. Medd., **37**, N 1 (1969).
Русск. перев.: «Эйнштейновский сборник, 1970—1971». М., «Наука», 1971.

11. *B. Touschek*. Nuovo Cimento, **58** (1968), 295.
12. *W. Pauli*. Relativitätstheorie, reprint. Torino (1963).
13. *P. Havas*. In: «Statistical mechanics of equilibrium and non-equilibrium». Ed. *J. Meixner*. North-Holland. Amsterdam (1965), p. 1.
14. *G. Herglotz*. Ann. Phys., **36**, (1911), 493.
15. *P. A. Dirac*. Revs. Mod. Phys., **21** (1949), 392.
16. *B. Bakamjian* a. *L. H. Thomas*. Phys. Rev., **92** (1952), 1300.
17. *L. Foldy*. Phys. Rev., **122** (1961), 275.
18. *D. G. Currie*, *T. F. Jordan* a. *E. C. Sudarshan*. Revs. Mod. Phys., **35** (1965), 350.
19. *R. Balescu*, *T. Kotera*. Physica, **33** (1967), 558.
20. *R. Balescu*, *T. Kotera* a. *E. Pina*. Physica, **33** (1967), 581.
21. *H. A. Kramers*. Verslagen Kon Akad. Wetensch. Amsterdam, **41** (1938), 1.
22. *J. W. Gibbs*. Collected Works. Longmans Green. London (1928), vol. II, p. 164.
23. *M. B. Lewis* a. *A. J. F. Stegert*. Phys. Rev., **101** (1956), 1227.
24. *L. Van Hove*. Physics, **16** (1950), 137.
25. *L. Rosenfeld*. Lectures on the foundations of statistical mechanics. Les Houches (1952).
26. *C. Møller*. Comm. Dublin Inst. of Adv. Studies Ses. A, N 5 (1949).
27. *A. Schild*. Phys. Rev., **95** (1954), 1057.
28. *D. ter Haar* a. *H. Wergeland*. Elements of thermodynamics. Addison Wesley, Reading Mass. (1966), p. 65. Русск. перев.: *Д. Тер Хаар*, *Г. Вергеланд*. Элементы термодинамики. М., «Мир», 1968
29. *P. Havas*. Phys. Rev., **185** (1969), 185.
30. *J. Linhard*. Physica, **38** (1968), 635.

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ГРАВИТАЦИИ

Глава I

Что такое квантовая теория гравитации

§ 1. Необходимость квантовой теории гравитации

Интерес к проблеме построения квантовой теории гравитации растет с каждым годом. Резко возрастает число научных публикаций по этой и примыкающим к ней проблемам. На международных и национальных гравитационных конференциях этот вопрос неизменно оказывается в центре внимания. В чем же причина такого интереса?

1. *Сингулярности в классической общей теории относительности.* Сейчас стало ясно, что общее космологическое решение или, по крайней мере, решения, рассматриваемые сейчас как возможные приближения мира, имеют особенности. Другими словами, метрика пространственно-временного многообразия регулярна лишь в течение ограниченного с той или иной стороны (или с обеих сторон) промежутка времени. В окрестностях особенности классическая общая теория относительности (ОТО) теряет силу — необходимо учитывать закономерности квантовой теории.

Дж. Уилер *, например, считает, что ситуация в ОТО начала семидесятых годов напоминает положение в классической электродинамике 1910 г., когда было установлено, что атом состоит из ядра и вращающихся электронов, но с точки зрения классической электродинамики неизбежно падение электронов на ядро — коллапс. Выход из противоречия состоял в квантовании атома. Сейчас кажется, что решение проблемы коллапса Вселенной — квантование ОТО. Более того, если квантовая механика строилась в обычном плоском пространстве, то квантовать Вселенную предлагается в суперпространстве (см. § 6).

* Эту мысль Дж. Уилер высказал во время посещения МГУ в июне 1971 г.

2. *Основные принципы физики требуют квантовой гравитации.* Во-первых, непоколебима вера в единство природы. Если все физические поля квантовые, то почему же гравитационное поле является исключением?

Во-вторых, если предполагать лишь классический характер гравитационного поля, то это допускало бы принципиальную возможность определения координат и импульсов частиц при помощи гравитационных взаимодействий более точно, чем это следует из соотношения неопределенностей, что ведет к несостоятельности всей квантовой теории.

В-третьих, никем не найдено непротиворечивого пути совмещения неквантованной левой части уравнений Эйнштейна

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -\kappa T_{\mu\nu}$$

с квантованными источниками справа. Квантовое поведение материи с необходимостью влечет за собой описание порожденного этой материей гравитационного поля также посредством амплитуд вероятностей.

В-четвертых, современное научное общественное мнение и ряд теоретических соображений говорят, что у гравитационного поля должны быть собственные степени свободы. А если так, то они должны обмениваться энергией с прочей материей. Допущение, что эти степени свободы лишены квантовых свойств, представляется сейчас безумным.

3. *Параллельное существование квантовой теории и ОТО ставит ряд вопросов о сути основных понятий классической физики.* В частности, возникает необходимость ограничения области применения таких понятий, как расстояние и время [4, 24, 93]. Действительно, из квантовой механики следует $\Delta x \geq \hbar/\Delta p$. При очень малых Δx имеем большое $\Delta p \sim \Delta E/c \sim \Delta mc$, т. е. $\Delta x \geq \hbar/\Delta mc$. Пусть мы измеряем расстояние с помощью пробной массы. Тогда, согласно ОТО, вблизи этой массы метрика близка к метрике Шварцшильда (т. е. $g_{00} = 1 - \frac{2mk}{c^2 r}$). Расстояния остаются расстояниями, а время — временем лишь до тех пор, пока $g_{00} > 0$. Отсюда следует, что $r \sim \Delta x > mk/c^2 \simeq \Delta mk/c^2$. Умножая друг на друга оба неравен-

ства, находим для Δx

$$\Delta x > \sqrt{\frac{\hbar k}{c^3}} \equiv l_0 = 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см.}$$

К этому результату можно было бы прийти с помощью иных мысленных экспериментов [86]. Таким образом, невозможны расстояния, меньшие планковской длины l_0 . Аналогично, можно сделать вывод о бессмысленности промежутков времени, меньших 10^{-43} сек. Точность определения таких геометрических величин, как символы Кристоффеля или метрический тензор, ограничивается коллективными соотношениями неопределенностей, например

$$\Delta \Gamma (\Delta x)^2 \Delta t > \frac{l_0^2}{c}.$$

Данные рассуждения проведены грубо, буквально «на пальцах». Но тем более интересно, как все это будет выглядеть в квантовой теории гравитации.

4. Неоднократно высказывалась надежда, что построение квантовой теории гравитации прольет свет на основные трудности современной квантовой электродинамики и мезодинамики, в частности, позволит корректно избавиться от ультрафиолетовых расходимостей [97]. В связи с этим следует отметить работы А. Салама с соавторами [56, 89], где предлагается использовать неполиномиальный характер плотности лагранжиана взаимодействия спинорного, электромагнитного и гравитационного полей

$$\sqrt{-g} L_{\text{вз}} = \frac{1}{\sqrt{-\|g^{\mu\nu}\|}} e \bar{\Psi} \gamma_\alpha \Psi A^\alpha, \quad g^{\mu\nu} = \varepsilon^{\mu\nu} - \sqrt{\hbar} \gamma^{\mu\nu}$$

Вычисление собственной энергии электрона с использованием теории возмущений в любых конечных порядках по $\sqrt{\hbar}$ приводит, как известно, к ряду дополнительных расходимостей. Однако авторы отмеченных работ утверждают, что использование гравитационного суперпропагатора, учитывающего сразу бесконечное число гравитонных линий (без усечений), не только не дает новых, но и устраняет все известные в электродинамике расходимости.

5. Имеются достаточно обоснованные надежды с помощью квантовой гравитации построить теорию элементарных частиц. Так, Дж. Уилер считает, что «не может

быть теории элементарных частиц, имеющей дело только с элементарными частицами» *. Конечно, здесь имелась в виду гравитация. К попыткам реализации такой надежды можно отнести поиски частицеподобных решений уравнений Эйнштейна, геометродинамику Уилера [95], работы П. Дирака по протяженным частицам в ОТО [45] или работы М. А. Маркова [69], К. П. Станюковича [91] и других по введению «планкелнов», «фридмонов» и тому подобным геометрических образований.

6. Наконец, имеется ряд *смутных надежд*. Например, П. Бергманн [12] считает, что «...любой опыт, который мы получаем в попытках объединить принципы общей ковариантности и универсальной дополнителности, может научить нас чему-то важному о границах обеих теорий».

7. Ко всему сказанному еще следует добавить широко распространенную уверенность в тесной связи данной проблемы с проблемами гравитационных волн и энергии в ОТО.

Таким образом, с самых различных точек зрения видно, насколько многообещающе решение проблемы квантования гравитации.

§ 2. Гносеологический аспект проблемы квантования гравитации

Известно, что возникновению почти всех физических теорий предшествовало накопление экспериментального материала. В данном же случае долгое время существует лишь принципиальная необходимость теории, охватывающей закономерности двух уже известных теорий. До сих пор не известно, как далеко можно переносить методы квантовой электродинамики на случай гравитации. Следует ли доводить дело до введения гравитонов? Только в последние три года в связи с экспериментами Дж. Вебера [27] появилась робкая надежда на обнаружение гравитационных волн. Теоретически ожидаемые эффекты гравитационного излучения очень слабы, так что необходимая точность измерений в основном лежит за пределами возможностей современного эксперимента.

* Фраза написана Дж. Уилером на стене кабинета теоретической физики физфака МГУ над словами Н. Бора: «Противоположности не противоречат, но дополняют друг друга».

В этих условиях теоретику пока не остается ничего другого, как придерживаться тех или иных соображений логического или даже философского характера.

Прежде всего следует различать три направления, связанные с различным пониманием природы *гравитации* [100]:

1. *Гравитация — лишь свойство пространства-времени*, а пространство-время — совокупность отношений, в которые вступают отдельные части материи. Очевидно, что в таком понимании гравитации бессмысленно выделять из свойств отношений, в которые вступает материя, самое матерью, т. е. вводить кванты гравитационного поля.

При данном подходе наиболее существенны такие вопросы: как сказываются закономерности ОТО на поведении квантовых объектов? Приводит ли совмещение принципов ОТО и квантовой теории к более глубокому пониманию основных понятий пространства и времени? Можно ли понимать квантовую теорию как отражение того факта, что микрочастицы вступают друг с другом в отношения, отличающиеся от описываемых классическим пространством-временем? Если да, то можно ли сформулировать их на основе более глубоких понятий, и каких? Как сосуществуют и переходят друг в друга различные отношения между частями материи в разных масштабах? Связана ли проблема квантования гравитации с проблемой квантования пространства-времени? И так далее. Здесь открывается широкий простор для принципиально новых идей.

2. *Гравитация — вид материи*. Это следует понимать так, что существует фон из единой материи, описываемой пространственно-временными характеристиками. Все другие виды материи, известные и неизвестные, — проявления этой «первичной» материи в виде различных геометрических особенностей метрического, топологического или какого-либо иного характера.

При таком понимании сущности ОТО проблема квантования гравитации прежде всего сводится к получению из геометрических характеристик таких объектов, которые можно было бы отождествить с наблюдаемыми видами материи. Сюда относятся попытки получения частицеподобных решений уравнений Эйнштейна, введение «фридмонов», геонов и тому подобных образований. Наиболее яркими представителями этого направления следует считать Дж.

Уилера [95] и его школу, провозгласивших программу построения «массы без массы», «заряда без заряда», «поля без поля». Если в их программе-минимум ОТО и электродинамика рассматриваются на равной ноге, то в дальнейшем Уилер [22] хочет видеть сам фотон как некую особенность квантовой геометрии.

При таком подходе разумно ставить вопрос о получении не только известных видов материи, но и еще не открытых, которые могли бы описываться пространственно-временными характеристиками более непосредственным образом. Таким видом материи могут быть и гипотетические гравитоны.

Данный подход обычно связывается с именем Клиффорда, тогда как первый стоит ближе к точке зрения Э. Маха.

3. *Гравитация — частично материя, частично — свойство пространства-времени.* Эта точка зрения в значительной степени навеяна часто проводимой аналогией между гравитацией и теорией электромагнитного поля. В последней, как известно, компоненты электромагнитного потенциала можно разделить на продольную и поперечную части. Продольная часть описывает кулоновское поле, а поперечная часть — электромагнитные волны (фотоны).

Здесь основная задача состоит в выделении из всех гравитационных характеристик таких, которые описывают кванты гравитационного поля — гравитоны. По аналогии с электромагнитным полем гравитонам стараются сопоставить поперечно-поперечные компоненты, например, метрического тензора, тогда как остальные компоненты описывают отношения частей материи друг к другу.

Большая часть современных физиков придерживается именно этого взгляда.

С другой стороны, нет достаточного единства и в понимании сущности *квантовой теории*. Общеизвестна продолжающаяся дискуссия по интерпретации квантовой механики. Физиков-теоретиков в этом вопросе можно разделить на несколько групп: 1) последовательные сторонники копенгагенской интерпретации (большинство); 2) принимающие аппарат, но неудовлетворенные используемым языком или философскими основами; 3) стремящиеся изменить не только язык, но и кое-что в аппарате квантовой теории; 4) вообще неудовлетворенные, но не предлагающие ничего конкретно нового. Если это раз-

личие во взглядах малосущественно, когда мы остаемся в установившемся круге квантово-механических явлений, то оно серьезно при выходе за ее пределы. Таким выходом, например, является попытка квантования гравитации.

Наконец, следует отметить, что, приступая непосредственно к квантованию гравитационного поля, мы игнорируем чрезвычайно опасный подводный камень. Имеется в виду соотношение между классическими понятиями пространства-времени и теорией микромира. Так, Луи де Бройль отмечал [23]: «...понятия пространства и времени взяты из нашего повседневного опыта и справедливы лишь для явлений большого масштаба. Нужно было бы заменить их другими понятиями, играющими фундаментальную роль в микропроцессах, которые бы асимптотически переходили при переходе от элементарных процессов к наблюдаемым явлениям обычного масштаба в привычные понятия пространства и времени. Стоит ли говорить, что это очень трудная задача?»... «Однако, пока мы не добились успеха в распространении наших представлений в указанном направлении, мы должны стараться с большими или меньшими трудностями втиснуть микроскопические явления в рамки понятий пространства и времени, хотя нас все время будет беспокоить чувство, что мы пытаемся втиснуть алмаз в оправу, которая ему не подходит».

А. Эйнштейн [109] писал аналогично: «...конечно, введение пространственно-временного континуума может считаться противоестественным, если иметь в виду молекулярную структуру всего происходящего в микромире». Однако и исключение из физики непрерывных величин в тот момент ему казалось похожим «на попытку дышать в безвоздушном пространстве».

К этим замечаниям примыкает и так называемая микроскопическая интерпретация пространства-времени [103], согласно которой классические пространство и время неприменимы к отдельным микроскопическим системам. Последние должны описываться такими абстрактными концепциями, как заряд, спин, квантовые числа и др. Пространственно-временная решетка является наиболее фундаментальным результатом взаимодействия огромного числа микросистем. Согласно этому подходу, понятия расстояние и время имеют такой же характер, как температура или давление в термодинамике.

Во всяком случае, нам представляется несомненным тот факт, что то дискретное реальное, которое, как ожидал Б. Риман [87], ответственно за метрические свойства пространства, является квантово-механическими закономерностями атома и молекулы. Окончательное выяснение этого обстоятельства, казалось бы, должно предшествовать (или являться составной частью) осуществлению программы квантования гравитационного поля.

В связи со всем сказанным, а также из-за ряда математических трудностей, произошло разделение мнений относительно понимания проблемы, оценки ее состояния и перспектив решения.

Некоторые склонны считать, что одна из синтезируемых теорий должна быть частью завершенной другой. Так, А. Эйнштейн одно время считал общую теорию относительности более подходящей основой для создания теории, объемлющей и квантовую теорию. А, может быть, в каком-то смысле наоборот, ОТО следует из развитой квантовой теории?

Другие считают (большинство), что обе теории уже достаточно развиты и содержат весь необходимый для синтеза материал. Однако все трудности следуют из того, что современное расположение материала в теориях неудачно. Перед синтезом его следует перетасовать. Возможно, в теориях имеется даже фальшивый материал, который не нужен для синтеза и даже затрудняет его.

В результате мы имеем большое количество эквивалентных в классических масштабах формулировок ОТО [33]. Их можно классифицировать по двум признакам. Во-первых, по типу величин, выбранных в качестве основных гравитационных характеристик. Это мировая скалярная двухточечная функция, 10 компонент метрического тензора (наиболее традиционный случай), одновременно 10 компонент метрического тензора и 40 компонент символов Кристоффеля [6] (метод Палатини), 16 компонент тетрад, 4 квадратных 4-рядных γ -матрицы [77], 20 компонент тензора кривизны, компоненты спиноров и т. д. Во-вторых, формулировки различаются по типу формализма, который используется для построения теории. Это может быть или чисто геометрический подход, или симметричный лагранжев формализм, или несимметричный дираковский формализм, или компенсирующая трактовка гравитации [58, 96] и т. д. Перемножая названные возможности,

находим уже 28 различных формулировок ОТО. Следует учесть, что возможны вариации внутри одной и той же формулировки, кроме того, наверное, мы не все учли.

Аналогичную картину имеем и в квантовой теории. Без труда можем назвать около десятка различных способов квантования: каноническое квантование с помощью скобок Пуассона для основных динамических переменных, каноническое квантование с помощью уравнения Гейзенберга, симметричное ковариантное квантование, ковариантное квантование методом Пайерлса [39, 81], квантование с помощью фейнмановского суммирования по историям, техника векторов-историй [22], швингеровская теория источника. Вряд ли здесь перечислены все возможности.

Полный обзор исследований по квантованию гравитации в этом направлении должен бы был содержать сопоставление всех формулировок ОТО и методов квантования, что в разумных рамках, конечно, невыполнимо.

Третьи считают, что синтезируемые теории следует в какой-то степени ревизовать, обобщить (но не слишком существенно) и только после этого стараться их объединить. Сюда относятся предложения перейти к линейной теории гравитации или рассматривать только слабое гравитационное поле (С. Гупта [36, 37]). В обоих этих случаях синтезируемые теории сводятся к одной основе — рассматриваются на фоне плоского пространства-времени, где хорошо работают методы квантовой электродинамики. К этому же направлению следует отнести формулировку гравитации на основе фейнман-уилеровского действия на расстоянии и другие.

Наконец, четвертые считают, что необходим еще важный дополнительный материал в теориях (одной или обеих). А пока следует подождать с решением проблемы. Так, считают, в ОТО нужны новые эксперименты по ее проверке, в частности, необходимо сначала обнаружить и изучить гравитационные волны. В квантовой теории, полагают, также необходимы новые эксперименты по обнаружению границы применимости квантовой электродинамики. Иногда предлагают подождать завершения построения аксиоматики квантовой теории поля. Однако пример построения Эйнштейном общей теории относительности, опиравшейся при возникновении только на логические соображения, разве не является достаточным опровержением этой точки зрения?

§ 3. Математические трудности

Допустим, что мы встали на точку зрения большинства физиков — гравитация — частично материя, частично — свойство пространства-времени. Тогда на нашем пути встает ряд математических трудностей, возникающих из некоторых особенностей ОТО. Наиболее существенными из них являются две.

1. *Ковариантность теории.* Дело в том, что геометрические характеристики зависят от выбора координатной системы. Соответствующим выбором последней мы можем некоторые величины (например, символы Кристоффеля в отдельной точке или линии) обратить в нуль, а некоторые (например, компоненты метрического тензора) привести к широкому классу наперед заданных значений. Это может соответствовать тому, что при описании гравитонов такими характеристиками, формальной операцией перехода к новой координатной системе можно в одной точке «уничтожить» или «рождать» гравитоны. Есть ли выход из такого положения? Может быть, следует сопоставлять гравитонам более сложные характеристики (например, $R^{\mu}_{\nu\alpha\beta}$ [67, 68] или другие)? Или, может быть, следует отказаться от определения гравитона в отдельной точке? Тогда это будет нелокальная теория поля. А, может быть, следует отказаться от равноправности всех координатных систем и ввести одну (или целый класс) преимущественную? Большинство исследователей предпочитают последний путь.

2. *Нелинейность теории.* В обычной квантовой теории уравнения свободного поля линейны, и, следовательно, общее решение является суммой частных решений, каждое из которых соответствует отдельному кванту поля — частице. В случае нелинейных уравнений, как известно, общее решение не будет суммой частных. Это создает трудности в выделении квантов гравитационного поля. Однако эта трудность физически необходима с точки зрения данного понимания сущности гравитации. Ведь гравитоны должны вступать в такие же отношения друг с другом, как и остальные виды материи, но эти отношения также описываются с помощью гравитационных характеристик. Как же следует поступать?

Квантование произвольного гравитационного поля

§ 4. О преодолении трудностей квантовой теории гравитации на классическом уровне

Направление, связанное с дираковским несимметричным каноническим формализмом, представляется сейчас наиболее перспективным для решения проблемы квантования произвольного гравитационного поля. Основная привлекательность формализма состоит в содержащемся в нем рецепте исключения части характеристик поля. Можно надеяться, что таким способом в конце концов удастся выделить именно те геометрические компоненты или их комбинации, которые описывают гравитационную материю. Из общих соображений [2] следует, что должны остаться только две пары канонически сопряженных величин, соответствующих двум поляризациям гравитационных волн (гравитонов).

Основную идею дираковского канонического формализма поясним на примере механической системы [42—44]. Пусть для некоторой системы можно построить функцию Лагранжа $L(q_i, \dot{q}_i)$. В большинстве практических задач возможно однозначно перейти от $2n$ переменных q_i и \dot{q}_i к $2n$ канонически сопряженным переменным q_i и $p_i = \partial L / \partial \dot{q}_i$. Однако иногда этого нельзя сделать однозначно. В последнем случае часть уравнений $p_i = \partial L / \partial \dot{q}_i$ представляет собой некоторые соотношения только между p_i и q_i :

$$\Phi_m(p, q) \approx 0, \quad (1)$$

называемые первичными связями. В случае связей вида $p_i - f_i(q) = 0$ соответствующим выбором дивергентного добавка в лагранжиан их можно привести к виду $p_k \approx 0$.

Уравнения движения следуют из условия равенства нулю вариации действия, что, как обычно, приводит к выражению

$$\delta p_i \dot{q}_i - \dot{p}_i \delta q_i - \frac{\partial H}{\partial p_i} \delta p_i - \frac{\partial H}{\partial q_i} \delta q_i = 0. \quad (2)$$

При этом, однако, должны выполняться соотношения, вытекающие из уравнений связей,

$$\frac{\partial \Phi_m}{\partial q_i} \delta q_i + \frac{\partial \Phi_m}{\partial p_i} \delta p_i = 0.$$

Умножая эти выражения на множители $\lambda_m(p, q)$ и прибавляя к (2), получаем канонические уравнения в виде

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} + \lambda_m \frac{\partial \Phi_m}{\partial p_i}; \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i} - \lambda_m \frac{\partial \Phi_m}{\partial q_i}. \quad (3)$$

Производная по времени от любой величины $A(q, p)$ имеет вид

$$\dot{A} = \frac{\partial A}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial A}{\partial p_i} \dot{p}_i = \{A, H\} + \lambda_m \{A, \Phi_m\}, \quad (4)$$

где $\{\dots\}$ — классические скобки Пуассона. Подставляя сюда вместо A выражения Φ_m , находим

$$\{\Phi_n, H\} + \lambda_m \{\Phi_n, \Phi_m\} = 0. \quad (5)$$

Может оказаться, что все эти выражения не обращаются тождественно в нуль, тогда либо их можно использовать для определения хотя бы части λ_m (когда $\{\Phi_n, \Phi_m\} \neq 0$), либо (когда $\{\Phi_n, \Phi_m\} \equiv 0$) часть этих уравнений приводит к новым соотношениям только между p и q . Последние соотношения назовем вторичными связями и будем их обозначать $\chi_j(p, q) \approx 0$.

Подставляя теперь $\chi_j(p, q)$ вместо A в (4), получаем новые уравнения

$$\{\chi_j, H\} + \lambda_m \{\chi_j, \Phi_m\} = 0, \quad (6)$$

которые опять либо дают тождественный нуль, либо используются для нахождения λ_m , либо приводят к новым уравнениям связей и т. д. до тех пор, пока не будут найдены все величины $\lambda_m(p, q)$.

Общее решение для $\lambda_m(p, q)$ будет иметь вид

$$\lambda_m(p, q) = \Lambda_m(p, q) + k_a(t) \Lambda_{am}(p, q),$$

где $\Lambda_m(p, q)$ — частное решение неоднородных уравнений (5), (6); $\Lambda_{am}(p, q)$ — система независимых решений однородных уравнений $\lambda_m \{\Phi_n, \Phi_m\} = 0$; $\lambda_m \{\chi_j, \Phi_m\} = 0$; . . . ; $k_a(t)$ — произвольные коэффициенты, в общем случае зависящие от времени. Пользуясь произвольностью k_a , можно их подобрать так, чтобы исключить часть величин λ_m , считая их физически несущественными. Число исключенных λ_m равно числу независимых решений однородных уравнений и равно числу первичных связей первого класса. (Функциями первого класса Дирак предложил назы-

вать такие функции, для которых все скобки Пуассона с H и $\chi_j(p, q)$ обращаются в нуль.) Тогда окончательные канонические уравнения имеют вид (5), где суммирование по m учитывает только те первичные связи, которые не являются функциями первого класса.

Для нашей цели особо интересным является случай первичных связей вида $p_i - f_i(q) \approx 0$. Здесь исключение λ_m означает устранение из теории части импульсов. Сопряженные им обобщенные координаты соответствуют произвольным функциям в общем решении конкретных задач.

Перейдем к случаю *общей теории относительности*. В качестве обобщенных координат примем компоненты $g_{\mu\nu}$. Дираковский формализм предполагает отказ от пространственно-временной симметрии — явное выделение координаты времени. Известны два метода корректного разделения физического 4-мерного многообразия на время и ортогональное к нему пространство — метод хронометрических инвариантов (х. и.) и метод кинеметрических инвариантов (к. и.). Оба метода предложены А. Л. Зельмановым [5, 52]. В первом методе за основу разделения принимается конгруэнция линий времени системы отсчета, во втором — множество пространственноподобных сечений. Если в методе (х. и.) разделение производится в каждой точке, причем в общем случае не существует огибающей к пространственным ортогональным времени сечениям, то в методе (к. и.) пространственные сечения уже заданы, а непрерывные ортогональные к ним линии времени можно построить всегда. Оказывается, дираковская каноническая формулировка ОТО тесно связана именно с последним обстоятельством и осуществляется с помощью метода кинеметрических инвариантов [5, 117].

Но прежде всего несколько слов о методе кинеметрических инвариантов. Из произвольных преобразований координат $x^{\mu'} = x^{\mu'}(x^0, x^1, x^2, x^3)$ выделяются преобразования

$$x^{0'} = x^{0'}(x^0); \quad (7)$$

$$x^{i'} = x^{i'}(x^0, x^1, x^2, x^3). \quad (8)$$

Последние являются дополнительными к преобразованиям в методе (х. и.) кинеметрически инвариантными (к. и.) будем называть величины, инвариантные относительно преобразований (7) и пространственно-ковариантные при

преобразованиях (8). Таким свойством обладают следующие компоненты произвольного тензора $B_{\mu\nu\sigma\dots}$:

$$B_{ijk\dots}^{\overbrace{000\dots}^n} \cdot \frac{1}{(g^{00})^{n/2}}.$$

Представим метрический тензор в виде [78] $g_{\mu\nu} = \tau_\mu \tau_\nu - h_{\mu\nu}$, где

$$\tau_\mu = \frac{g_{\mu}^0}{\sqrt{g^{00}}}; \quad \tau^\mu \tau_\mu = 1; \quad \tau^\mu h_{\mu\nu} = 0; \quad h^{\mu\nu} h_{\alpha\nu} = -h_{\alpha}^{\mu}.$$

Тензор $h^{\mu\nu} = \frac{g^{0\mu} g^{0\nu}}{g^{00}} - g^{\mu\nu}$ имеет отличные от нуля только пространственные компоненты и имеет смысл метрического тензора пространственного сечения. Из компонент метрического тензора и их первых производных можно образовать следующие (к.и.) выражения

$$h_{ik} = -g_{ik}; \quad h^{ik} = \frac{g^{0i} g^{0k}}{g^{00}} - g^{ik}; \quad F_i = \tau_\alpha \frac{\partial \tau^\alpha}{\partial x^i};$$

$$S^{ik} = \tau^\mu \frac{\partial h^{ik}}{\partial x^\mu} - h^{sk} \frac{\partial \tau^i}{\partial x^s} - h^{is} \frac{\partial \tau^k}{\partial x^s} + F^k \tau^i + F^i \tau^k.$$

Обычным производным по временной координате соответствуют следующие (к.и.) операторы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{ikl\dots}}{\partial x^0} &\rightarrow \partial_T^* A_{ikl\dots} \equiv \tau^\mu \frac{\partial A_{ikl\dots}}{\partial x^\mu} + \\ &+ N_i^s A_{skl\dots} + N_k^s A_{is\dots} + \dots; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A^{ikl\dots}}{\partial x^0} &\rightarrow \partial_T^* A^{ikl\dots} \equiv \tau^\mu \frac{\partial A^{ikl\dots}}{\partial x^\mu} - \\ &- N_s^i A^{skl\dots} - N_s^k A^{isl\dots} - \dots, \end{aligned} \quad (10)$$

где $N_i^s = \partial_i \tau^s - F_i \tau^s$. Пространственным производным соответствуют ковариантные пространственные производные относительно (к.и.) коэффициентов связности

$$E_{sk}^j = \frac{1}{2} h^{jr} \left(\frac{\partial h_{rs}}{\partial x^k} + \frac{\partial h_{rk}}{\partial x^s} - \frac{\partial h_{sk}}{\partial x^r} \right).$$

Обобщение на смешанные (к.и.) тензоры очевидно.

Запишем нужные нам в дальнейшем (к.и.) компоненты тензора Риччи и тензора Эйнштейна $G_{\mu\nu}$ через (к.и.) величины:

$$\frac{R_i^0}{\sqrt{g^{00}}} = \frac{G_i^0}{\sqrt{g^{00}}} = -\frac{1}{2} \partial^{*k} (S_{ik} - h_{ik}S); \quad (11)$$

$$R_{ik} = -\frac{1}{2} \partial_T^* S_{ik} - \frac{1}{2} S_{il} S_k^l + \frac{1}{4} S S_{ik} - F_i F_k + \\ + \frac{1}{2} (\partial_i^* F_k + \partial_k^* F_i) + M_{ik}; \quad (12)$$

$$\frac{G^{00}}{g^{00}} = \frac{1}{2} M - \frac{1}{8} (S_{ik} S^{ik} - S^2), \quad (13)$$

где M_{ik} — 3-мерный тензор кривизны, построенный обычным образом из E_{sk}^j .

В качестве плотности лагранжиана гравитационного поля выберем усеченную скалярную кривизну (без дивергентного члена, содержащего вторые производные):

$$L = \sqrt{-g} g^{\alpha\nu} (\Gamma_{\alpha\nu}^\lambda \Gamma_{\lambda\beta}^\beta - \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \Gamma_{\mu\nu}^\beta). \quad (14)$$

Добавляя дивергентный член

$$\Delta L = [(\sqrt{-g} h_x^\sigma \tau^\rho)_{,\rho} \tau^x]_{,\sigma} - [(\sqrt{-g} h_x^\sigma \tau^\rho)_{,\sigma} \tau^x]_{,\rho},$$

находим

$$L' = \frac{1}{4} \sqrt{-g} \partial_T^* h^{ik} \partial_T^* h^{rs} (h_{ir} h_{ks} - h_{ik} h_{rs}) - \\ - \sqrt{-g} F_i (h^{is} h^{kl} - h^{ks} h^{il}) \frac{\partial h_{kl}}{\partial x^s} - \\ - \sqrt{-g} h^{ik} (E_{ik}^r E_{rs}^s - E_{ir}^s E_{ks}^r). \quad (15)$$

Назовем величины $\tau_0 \partial_T^* h^{ik} = \tau_0 S^{ik}$ скоростями, соответствующими h^{ik} . Легко видеть, что в полученной плотности лагранжиана отсутствуют скорости, соответствующие компонентам τ^μ .

Импульсы вводятся обычным образом:

$$p_{ik} = \frac{\partial L'}{\partial (\tau_0 \partial_T^* h^{ik})} = \frac{1}{2} \sqrt{\bar{h}} (S_{ik} - h_{ik}S), \quad (16)$$

где $\sqrt{-g} = \tau_0 \sqrt{\bar{h}}$. Очевидно, четыре первичных уравнения связи имеют вид

$$p_\mu = 0.$$

Плотность гамильтониана гравитационного поля можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 H &= p_{ik} \tau_0 \partial_T^* h^{ik} - L' + (\text{дивергентный член}) = \\
 &= \frac{\tau_0}{\sqrt{h}} p_{ik} p_{rs} \left(h^{ir} h^{sk} - \frac{1}{2} h^{ik} h^{rs} \right) - \sqrt{-g} M = \\
 &= -2 \sqrt{-g} \frac{G^{00}}{g^{00}}.
 \end{aligned} \tag{17}$$

Вторичное уравнение связи находим по рецепту Дирака:

$$\{p_0, H\} = 2 \sqrt{h} \frac{G^{00}}{g^{00}} = 0. \tag{18}$$

Это уравнение связи с точностью до коэффициента совпадает с (13) и называется вторичной гамильтоновой связью. Дираковские вторичные продольные связи в пустом пространстве соответствуют равным нулю компонентам смешанного (к.и.) тензора Эйнштейна (11):

$$\frac{G_i^0}{\sqrt{g^{00}}} = \partial^{*k} \left(\frac{p_{ik}}{\sqrt{h}} \right) = 0. \tag{19}$$

Шесть оставшихся уравнений Эйнштейна в пустом пространстве (12) соответствуют каноническим уравнениям

$$\tau_0 \partial_T^* p_{ik} + \frac{\delta H}{\delta h^{ik}} = -\sqrt{-g} \left(R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R \right) = 0. \tag{20}$$

Вторая часть канонических уравнений следует из определения обобщенных импульсов (16)

$$\tau_0 \partial_T^* h^{ik} = \frac{\delta H}{\delta p_{ik}}. \tag{21}$$

Вторичные связи (18), (19) означают, что оставшиеся 6 пар канонически-сопряженных величин h^{ik} и p_{ik} не являются независимыми, а связаны четырьмя соотношениями.

О физической интерпретации полученных результатов (как и вообще всех геометрических величин) можно говорить лишь на основе метода хронометрических инвариантов Зельманова [52]. Согласно методу (х.и.) метод кинеметрических инвариантов (разбиение многообразия на множество пространственных сечений) соответствует использованию

только таких систем отсчета, в которых отсутствует тензор угловой скорости вращения A_{ik} . В таких системах отсчета кинематически инвариантные величины F_i и S_{ik} однозначно связаны с хронометрически инвариантными величинами F_i и D_{ik} , соответственно имеющими смысл вектора ускорения (с обратным знаком) и тензора скоростей деформаций системы отсчета относительно локально-геодезической координатной системы с временной осью, касательной к линии времени системы отсчета. Таким образом, p_{ik} соответствует плотности тензора скоростей деформаций, а вторичные уравнения связи (18), (19) представляют собой условия на компоненты 3-мерного метрического тензора h_{ik} и тензора скоростей деформаций.

Дальнейшая задача состоит в том, чтобы, не меняя набора пространственноподобных сечений, выбрать такие системы отсчета, в которых остаются только две пары динамических канонически-сопряженных величин. Это можно сделать с помощью повторного расщепления уже полученных трехмерных пространственноподобных гиперповерхностей на семейство двумерных поверхностей и конгруэнцию ортогональных им пространственноподобных линий (метод дважды кинематически инвариантных величин). Такое расщепление имеет физический смысл в случае наличия гравитационной волны. Семейство двумерных поверхностей может быть сопоставлено фронтам гравитационной волны, а геометрическая сумма времениподобного единичного вектора τ^a (касательного времениподобным линиям при первом расщеплении) и пространственноподобного единичного вектора l^a (касательного линиям второго расщепления) определяет в каждой точке изотропный волновой вектор гравитационной волны.

Назовем дважды кинематически-инвариантными (2к.и.) величины, инвариантные при преобразованиях

$$x^{0'} = x^{0'}(x^0); \quad x^{1'} = x^{1'}(x^0, x^1) \quad (21)$$

и ковариантные относительно преобразований

$$x^{A'} = x^{A'}(x^0, x^1, x^B), \quad \text{где } A, B = 2, 3. \quad (22)$$

Из компонент произвольного тензора $B_{\alpha\beta\dots}^{\mu\nu\dots}$ и метрического тензора можно образовать следующие (2к.и.) вы-

ражения:

$$\frac{\overbrace{B_A^{00\dots 0}}^m \overbrace{B_{ij\dots}}^n}{(g^{00})^{\frac{m}{2}} (h^{11})^{\frac{n}{2}}} \cdot \underbrace{h^{i_1 h^{j_1} \dots}}_n.$$

Метрический тензор теперь можно представить в виде

$$g^{\alpha\beta} = \tau^\alpha \tau^\beta - l^\alpha l^\beta - \gamma^{\alpha\beta},$$

где $\tau_\mu = \frac{g_\mu^0}{\sqrt{g^{00}}}$, $l^\alpha = \frac{h^{\alpha 1}}{\sqrt{h^{11}}}$, $\gamma_{\alpha\beta}$ — метрический тензор двумерных пространственноподобных поверхностей волнового фронта.

Аналогично изложенному методу (к.и.) величин вводятся операторы (2к.и.) дифференцирования по времени, по выделенному пространственноподобному направлению и на двумерных поверхностях фронта. Возникает несколько новых фундаментальных (2к.и.) величин (аналогичных F_i и S_{ik}). Уравнения Эйнштейна и дираковский канонический формализм записываются в (2к.и.) виде [118].

Гравитационное поле теперь описывается тремя величинами l^i (продольные компоненты) и тремя (поперечными) компонентами γ^{AB} . Для реализации программы выделения динамических гравитационных величин необходимо исключить динамический характер продольных компонент l^i , не нарушая при этом волнового характера уравнений Эйнштейна по поперечным переменным γ^{AB} . (Под волновым характером мы понимаем наличие (2к.и.) даламбертиана в плоскости (τ^α , l^α)).

Это можно сделать многими способами. В нашей совместной с В. Н. Ефремовым работе [118], например, предложено два способа задания систем отсчета с волновым гравитационным полем: 1) с помощью сильного критерия гравитационных волн (обращение в нуль импульсов, соответствующих величинам l^i) и 2) с помощью слабого критерия гравитационных волн (обращение в нуль (2к. и.) временных производных от продольных импульсов). Эти критерии проверены на нескольких точных волновых решениях уравнений Эйнштейна и на случае слабого гравитационного поля. Однако предстоит еще тщательный анализ и сопоставление различных критериев.

В работе Дирака [44] такая задача доводится до конца для случая слабого гравитационного поля. «Абсолютная» система отсчета в этой работе фиксируется условиями

$$p_i^i = 0; \quad \left(h^{ik} \sqrt{\bar{h}} \right)_{,k} = 0.$$

Однако условие слабости гравитационного поля существенно понижает ценность результата, так как в этом случае исключение «лишних» переменных может быть осуществлено более простыми методами.

§ 5. Квантование произвольного гравитационного поля

Квантовую теорию гравитационного поля можно строить несколькими способами. Первый способ состоит в том, что выделение двух пар канонически-сопряженных величин, соответствующих динамическим переменным, производится на классическом уровне (содержание § 4). Затем следует ввести функционал состояния системы, зависящий от выделенных переменных, сопоставить динамическим величинам операторы, ввести перестановочные соотношения и далее разработать технику вычисления эффектов взаимных превращений обычной и гравитационной материи. Этот путь пока окончательно не реализован из-за трудностей выделения динамических переменных.

Второй способ квантования гравитации переносит задачу выделения динамических переменных с классического на квантовый уровень. Он представляется следующим образом.

а) Всем каноническим переменным гравитационного поля сопоставляются операторы, действующие в линейном векторном пространстве функционалов состояния, зависящих от всех переменных. Функционалы пока не образуют гильбертово пространство, так как из-за произвола в определении переменных пространство не поддается нормировке.

б) Для введенных операторов задаются перестановочные соотношения обычного типа

$$\begin{aligned} [\hat{h}^{ik}, \hat{p}_{jl}]_- &= i l^2 \delta_{jl}^{ik} \delta^3(x - x'), \\ [\hat{\tau}^\mu, \hat{p}_\nu]_- &= i l^2 \delta_\nu^\mu \delta^3(x - x'), \end{aligned} \quad (24)$$

где $l = \sqrt{\hbar k/c^3} \simeq 10^{-33}$ см — планковская длина. Остальные коммутаторы равны нулю.

в) Следуя Уилеру и де Витту [22, 40], можно ввести координатное представление функционалов состояния $\Psi(\tau^\mu, h^{ik})$. Тогда операторы можно записать в виде

$$\begin{aligned} \hat{h}^{ik} |\Psi\rangle &= h^{ik} |\Psi\rangle; & \hat{p}_{ik} |\Psi\rangle &= -i l^2 \frac{\delta}{\delta h^{ik}} |\Psi\rangle; \\ \hat{\tau}^\mu |\Psi\rangle &= \tau^\mu |\Psi\rangle; & \hat{p}_\mu |\Psi\rangle &= -i l^2 \frac{\delta}{\delta \tau^\mu} |\Psi\rangle. \end{aligned} \quad (25)$$

г) Классическим уравнениям первичных и вторичных связей (18), (19) следует сопоставить квантовые аналоги. Их нельзя рассматривать как операторные уравнения, так как они в общем случае противоречат введенным перестановочным соотношениям. Действительно, например первичные связи $\hat{p}_\mu = 0$, противоречат $[\hat{\tau}^\mu, \hat{p}_\nu] = i l^2 \delta_\nu^\mu \delta^3(x - x')$. Здесь следует поступать аналогично случаю квантовой электродинамики — понимать уравнения связи как условия на функционалы состояния $|\Psi\rangle$.

Тогда первичные уравнения связи $p^\mu |\Psi\rangle = i l^2 \frac{\delta}{\delta \tau^\mu} |\Psi\rangle = 0$ соответствуют независимости функционала состояния от переменных τ^μ . Операторы \hat{H}_k и \hat{H}_L следует понимать как квантовые генераторы соответственно пространственных смещений и сдвигов во времени, т. е. переходов от одного сечения к другому [11].

д) На этом этапе возникает дополнительная (по сравнению с классическим случаем) трудность установления порядка операторов в квантовых связях [46]. Каковы критерии порядка? Из классической теории известно $\{H_L, H_k\} = 0$, а в квантовой теории следует ожидать $[\hat{H}_L, \hat{H}_k] = 0$. Однако этого недостаточно. Андерсон [3] установил два конкретных упорядочивания операторов, удовлетворяющих этим условиям, но ими далеко не исчерпываются все возможности.

Так, Б. де Витт [22], используя третий вид упорядочивания, в координатном представлении записывает вторичную гамильтонову связь следующим образом (уравнение де Витта):

$$\left\{ G^{iklj} \left(\frac{\delta}{\delta h^{ik}} \right) \left(\frac{\delta}{\delta h^{lj}} \right) - \sqrt{\hbar} M \right\} |\Psi\rangle = 0, \quad (26)$$

где $G^{iklj} = \frac{1}{\sqrt{\hbar}} \left(h^{il} h^{kj} - \frac{1}{2} h^{ik} h^{lj} \right)$ — аналог метрики

четвертого ранга. Написанное уравнение сильно напоминает (и играет роль) уравнение Клейна — Гордона в обычной квантовой теории.

е) Наличие квантовых связей

$$H_k | \Psi \rangle = 0; H_L | \Psi \rangle = 0 \quad (27)$$

означает необходимость дополнительных условий на функционал состояния. Условия, соответствующие выбору «абсолютной» системы отсчета на классическом уровне, записываются в виде

$$x_L | \Psi \rangle = 0; x_k | \Psi \rangle = 0. \quad (28)$$

Далее предстоит не менее трудная, чем на классическом уровне, задача — с помощью квантовых условий (27), (28) выделить операторы, соответствующие динамическим переменным. В общем случае эта задача еще не решена.

Большого прогресса удастся достичь с помощью способа квантования на основе фейнмановского суммирования по историям. Основное преимущество этого способа состоит в том, что в континуальных интегралах все величины являются C -числами, не нужно заботиться о порядке операторов, а самое главное — в этом методе не обязательно доводить до конца выделение динамических переменных — метод позволяет работать с неразделенным набором переменных [122, 123].

Широко известен фейнмановский интеграл по траекториям в координатном пространстве системы [98], однако для сопоставления с каноническим методом более удобна формулировка континуальных интегралов в фазовом пространстве [121]. Так, для механической системы с конечным числом степеней свободы без связей матричный элемент перехода между двумя состояниями записывается в виде

$$\begin{aligned} \langle q^n | \exp \left\{ -\frac{i}{\hbar} H(t'' - t') \right\} | q' \rangle &= \\ &= \int \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} \int_{t'}^{t''} \left(\sum_{i=1}^n p_i \dot{q}_i - H(q, p) \right) dt \right\} \prod_{i,i} \frac{dp_i(t) dq_i(t)}{(2\pi\hbar)^n}. \end{aligned} \quad (29)$$

Время ($t'' - t'$) разбивается на n равных частей. Интеграл справа понимается как предел при $n \rightarrow \infty$ конечномерного интеграла по кусочно-линейным траекториям.

В случае наличия m связей $\varphi_a(p, q) = 0$, как уже отмечалось, система определена на гиперповерхности связей неоднозначно — необходимы m дополнительных условий $f_a(p, q) = 0$. В таких случаях матричный элемент перехода системы определяется выражением (Л. Д. Фаддеев [121])

$$\langle \text{out} | S | \text{in} \rangle = \int \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} \int_{-\infty}^{\infty} (\sum p_i \dot{q}_i - H) dt \right\} \times \\ \times \prod_t \left(\prod_a \delta(f_a) \delta(\varphi_a) \det \{f_a, \varphi^b\} \prod_i \frac{dp_i dq_i}{(2\pi\hbar)^{n-m}} \right), \quad (30)$$

где $\delta(f_a) \delta(\varphi_a)$ обеспечивают интегрирование только по переменным, удовлетворяющим связям и дополнительным условиям; $\det \{f_a, \varphi^b\} \neq 0$ — определитель от скобок Пуассона для связей и дополнительных условий. Можно показать, что интеграл не зависит от выбора дополнительных условий, хотя подынтегральное выражение зависит от них.

В случае ОТО формальное определение амплитуды перехода с помощью континуальных интегралов в координатном пространстве

$$\int \exp \left\{ \frac{i}{2\kappa} \int V \sqrt{-g} R d^4x \right\} \prod_x g^{5/2} \prod_{\mu \leq \nu} dg^{\mu\nu} \quad (31)$$

некорректно, так как содержит интегрирование по бесконечному числу физически эквивалентных ситуаций, различающихся координатными преобразованиями. Это можно устранить, введя координатную систему $f_\mu(g) = 0$ и интегрируя лишь по одному представителю эквивалентных ситуаций, удовлетворяющему этим условиям. Для этого соотношением

$$\Delta_f(g) \int \prod_x \delta(f(g^\Omega(x))) d\Omega(x) = 1$$

вводится функционал $\Delta_f(g)$. Здесь Ω означает совокупность произвольных преобразований координат. Умножая (31) на левую часть этого выражения (равную единице), получаем выражение для амплитуды перехода

$$\int \exp \left\{ \frac{i}{2\kappa} \int V \sqrt{-g} R d^4x \right\} \Delta_f(g) \prod_x \left(\prod_\mu \delta(f_\mu(g)) g^{5/2} \prod_{\mu \leq \nu} dg^{\mu\nu} \right), \quad (32)$$

отличающееся от (31) бесконечным множителем («объемом координатных преобразований»).

Переход к каноническому формализму может быть осуществлен с помощью использования метода типа Палатини. Амплитуду (32) можно переписать в виде

$$\int \exp \left\{ \frac{i}{2\kappa} \int \left[\sqrt{-g} g^{\mu\nu} (\partial_\nu \Gamma_{\mu\rho}^\rho - \partial_\rho \Gamma_{\mu\nu}^\rho + \Gamma_{\mu\sigma}^\rho \Gamma_{\rho\nu}^\sigma - \Gamma_{\mu\nu}^\rho \Gamma_{\rho\sigma}^\sigma) \right] d^4x \right\} \times \\ \times \Delta_f(g) \prod_x \left(\prod_{\mu} \delta(f_\mu(g)) g^{5/2} \prod_{\mu \leq \nu} d(\sqrt{-g} g^{\mu\nu}) \prod_{\rho, \mu \leq \nu} d\Gamma_{\mu\nu}^\rho \right), \quad (33)$$

где интегрирование во всех точках производится по $(\sqrt{-g} g^{\mu\nu})$ и $\Gamma_{\mu\nu}^\rho$ как независимым переменным. Выделив явно временные компоненты и переходя к набору канонически сопряженных переменных, например, $q^{ik} = (-g) \cdot (g^{i0} g^{k0} - g^{00} g^{ik})$ и $\pi_{ik} = -\frac{1}{\sqrt{-g} g^{00}} \Gamma_{ik}^0$ (Л. Д. Фаддеев [120]), после интегрирования по пространственным компонентам связности получаем

$$\int \exp \left\{ \frac{i}{2\kappa} \int \left[\pi_{ik} \partial_0 q^{ik} - H - \left(\frac{1}{\sqrt{-g} g^{00}} - 1 \right) H_0 - \frac{g^{i0}}{g^{00}} H_i \right] d^4x \right\} \times \\ \times \Delta_f(g) \prod_x \left(\prod_{\mu} \delta(f_\mu(g)) \prod_{i \leq k} d\pi_{ik} dq^{ik} d\left(\frac{1}{\sqrt{-g} g^{00}} \right) \prod_i d\left(\frac{g^{i0}}{g^{00}} \right) \right), \quad (34)$$

что после интегрирования по $\left(\frac{1}{\sqrt{-g} g^{00}} \right)$ и $\frac{g^{i0}}{g^{00}}$ приводится к виду [123, 124]

$$\int \exp \left\{ \frac{i}{2\kappa} \int (\pi_{ik} \partial_0 q^{ik} - H) d^4x \right\} \times \\ \times \Delta_f(g) \prod_x \left(\prod_{\mu} \delta(f_\mu(g)) \delta(H_\mu(g)) \prod_{i \leq k} dq^{ik} d\pi_{ik} \right), \quad (35)$$

где $H_\mu(g)$ — дираковские вторичные связи (18), (19), $\Delta_f(g) = \det \{H_\mu, f^\nu\}$. Легко видеть, что это выражение соответствует (30) для механической системы со связями. Интеграл (35) не зависит от конкретного выбора координатных условий $f^\mu(g) = 0$.

Для островного распределения материи в асимптотически плоском пространстве-времени при помощи фейнмановского континуального интегрирования довольно естественно строится диаграммная теория возмущений. В качестве дополнительных условий удобнее всего выбрать гармонические координатные условия $\partial_\nu (\sqrt{-g} g^{\mu\nu}) = 0$. Все гравитационные величины в подынтегральном выражении разлагаются в ряды при помощи формулы

$$\sqrt{-g} g^{\mu\nu} = \varepsilon^{\mu\nu} - \gamma^{\mu\nu},$$

где $\varepsilon^{\mu\nu}$ — асимптотическая (минковская) метрика. Множитель $\Delta_f(g)$ можно записать в виде дополнительного члена в гравитационном действии. Это оказывается эквивалентным появлению в диаграммах фиктивных частиц — векторных фермионов, обеспечивающих унитарность теории. Более подробно теория возмущений гравитационного поля (без обсуждения роли фиктивных частиц) изложена в § 9.

Таким образом, комбинация метода фейнмановского континуального интегрирования и классического дираковского канонического формализма позволяет значительно продвинуть решение проблемы квантования гравитации для частного случая асимптотически плоского пространства-времени (не считая проблему устранения расходимостей).

Наконец, отметим формализм векторов-историй Брилла и Гоуди [22], позволяющий объединить квантовый канонический подход и фейнмановский метод суммирования по историям. Имеется еще ряд подходов к данной проблеме, однако их результаты значительно скромнее.

§ 6. Суперпространства

Сложившиеся представления о степенях свободы гравитационного поля, истинных динамических переменных, можно изложить на языке теории суперпространства [41]. В основе этой теории опять лежит разбиение 4-мерного пространственно-временного многообразия на 3-мерные пространственные сечения и ортогональное им время.

Обозначим через M компактное хаусдорфово 3-мерное многообразие. В этом пространстве можно задать бесконечно дифференцируемую метрику (C^∞), причем бесконечным числом способов. Пусть $\text{Riem}(M)$ — пространство, каждой точкой которого является риманова

метрика (C^∞), которую можно приписать данному многообразию.

Одному и тому же риманову 3-мерному пространству соответствует подмножество точек в $\text{Riem}(M)$. Дело в том, что разными точками в $\text{Riem}(M)$ обозначаются метрики одного и того же пространства, связанные допустимыми преобразованиями координат. Пусть $\text{Diff}(M)$ означает группу таких допустимых преобразований. отождествим все точки в $\text{Riem}(M)$, которые связаны преобразованиями из $\text{Diff}(M)$. В результате получим первичное суперпространство $S(M)$ многообразия M :

$$S(M) = \frac{\text{Riem}(M)}{\text{Diff}(M)}.$$

Все точки в $\text{Riem}(M)$, полученные из одной h координатными преобразованиями $\text{Diff}(M)$, называются орбитой этой точки ($\text{orb } h$).

В пространстве $\text{Riem}(M)$, аналогично обычному риманову пространству, можно инфинитезимальным образом задать метрику

$$d\sigma^2 = \iint \tilde{G}_{ijk'l'} \delta h^{ij} \delta h^{k'l'} d^3x d^3x'. \quad (36)$$

По определению, $d\sigma^2$ задается для двух близких 3-пространств, метрики которых мало отличаются (δh^{kl} мало). Из общих соображений следует, что суперметрический тензор $\tilde{G}_{ijk'l'}$ должен удовлетворять следующим условиям: 1) быть битензором (чтобы $d\sigma^2$ было инвариантно относительно преобразований из $\text{Diff}(M)$); 2) содержать $\delta^3(x - x')$, т. е. связывать сопоставленные точки; 3) быть тензорной плотностью веса 1 (для обеспечения интегрирования по x); 4) быть симметричным тензором относительно перестановки первой и второй пар индексов. Всем этим требованиям удовлетворяет выражение

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{ijk'l'} &= \frac{1}{2} \frac{\sqrt{h}}{w} \delta^3(x - x') (h_{ik} h_{jl} + h_{il} h_{jk} - 2h_{ij} h_{kl}) \equiv \\ &\equiv G_{ijkl} \delta^3(x - x'), \end{aligned} \quad (37)$$

где w — произвольная скалярная функция, построенная из метрики h_{ik} и ее производных.

Контравариантные компоненты суперметрического тензора определяются из условия

$$\int \tilde{G}_{ijm'n'} \tilde{G}^{m'n'k'l'} d^3x'' = \frac{1}{2} (\delta_i^k \delta_j^l + \delta_i^l \delta_j^k) \delta^3(x - x'). \quad (38)$$

Используя (37), отсюда находим

$$\begin{aligned} \tilde{G}^{ijk'l'} &= \frac{1}{2} \frac{w}{\sqrt{h}} \delta^3(x - x') (h^{ik} h^{jl} + h^{il} h^{kj} - h^{ij} h^{kl}) \equiv \\ &\equiv G^{ijk'l'} \delta^3(x - x'). \end{aligned} \quad (39)$$

Обобщенные импульсы и плотность гамильтониана можно записать более просто через суперметрический тензор ($w = 1$):

$$P_{ik} = \frac{1}{2} G_{ikjl} S^{jl}; \quad (40)$$

$$H = \tau_0 (G^{ikrs} P_{ik} P_{rs} - \sqrt{h} M), \quad (41)$$

где $\sqrt{-g}M$ принято называть плотностью суперпотенциала.

§ 7. Модельные квантовые теории закрытых миров

Как мы уже видели, имеются большие трудности при квантовании произвольного гравитационного поля. Сопоставим этому факт, что в классической теории гравитации также нет общего решения уравнений Эйнштейна, однако имеются точные решения, соответствующие некоторым симметриям. Возникает мысль: построить квантовые теории гравитации для известных точных моделей закрытых миров, отдавая себе отчет в том, что это будут предварительные теории, игнорирующие отклонения от взятых симметрий. Но тем не менее можно надеяться, что такие теории все-таки вскроют некоторые закономерности общей квантовой теории гравитации. Каждая такая квантовая теория с симметриями называется *модельной* теорией. Окончательная квантовая теория в таком подходе понимается как предел последовательности модельных теорий со все меньшей и меньшей симметрией. Первые две такие теории: модель де Витта (сферическая симметрия) и модель Мизнера (миксмастерная модель Вселенной) уже показали существенную разницу в квантовании открытых и закрытых миров.

Кратко рассмотрим модель Мизнера [22, 41, 71]. За основу берется метрика

$$ds^2 = g_{00}(t) dt^2 - e^{-2\lambda(t)} [\exp(2\beta(t))]_{ij} \sigma_i \sigma_j, \quad (42)$$

где $\sigma_1 = \sin \psi d\theta - \cos \psi \sin \theta d\varphi$; $\sigma_2 = \cos \psi d\theta + \sin \psi \sin \theta d\varphi$; $\sigma_3 = -(d\psi + \cos \theta d\varphi)$; β_{ij} — матрица с нулевым следом, определяющая анизотропию мира. Возьмем β_{ij} в диагональном виде:)

$$\beta_{ij} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_+ + \sqrt{3}\beta_- & 0 & 0 \\ 0 & \beta_+ - \sqrt{3}\beta_- & 0 \\ 0 & 0 & -2\beta_+ \end{pmatrix}.$$

Параметры β_+ и β_- имеют следующий геометрический смысл: $l = \sqrt{\beta_+^2 + \beta_-^2}$ — характеризует суммарную анизотропию мира; $\kappa = \arccos \frac{\beta_+}{\sqrt{\beta_+^2 + \beta_-^2}}$ — измеряет отклонение от аксиальной симметрии.

Подпространство $\text{Riem}'(M)$ (на многообразии с топологией сферы M), характеризующееся метриками (42), определяется всего тремя параметрами λ , β_+ , β_- (рис. 1, а). Как видно из рис. 1, б, первичное суперпространство рассматриваемых метрик описывается 1/6 плоскости (β_-, β_+) . Каждое пространство изображается на этой плоскости 6 точками. По ряду соображений, однако, удобнее использовать расширенное суперпространство, состоящее из всей плоскости (β_-, β_+) .

Метрический тензор в пространстве σ_1 , σ_2 , σ_3 имеет компоненты

$$h_{11} = -g_{11} = e^{-2\lambda + 2\beta_{11}}; \quad h_{22} = e^{-2\lambda + 2\beta_{22}}; \\ h_{33} = e^{-2\lambda + 2\beta_{33}}; \quad \sqrt{h} = e^{-3\lambda}.$$

Импульсы, сопряженные h_{ik} , находятся в виде

$$p^{ii} = -\tau^0 e^{-\lambda - 2\beta_{ii}} (2\dot{\lambda} + \dot{\beta}_{ii}),$$

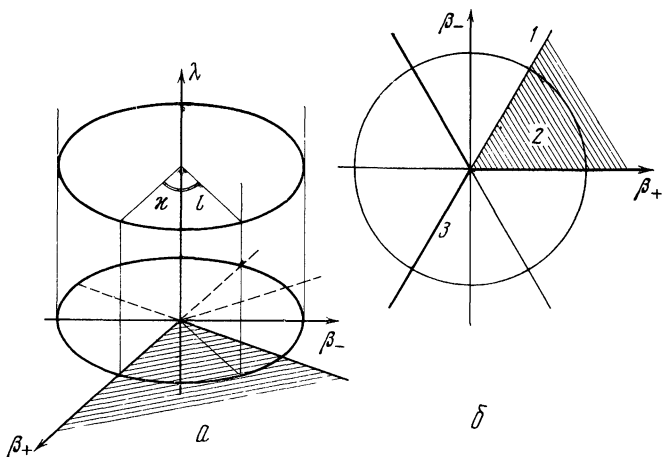


Рис. 1. Подпространство $Riem'(M)$ пространств с метриками (42) (а) и расширенное суперпространство $S'(M)$ (б) на матрицах вида (42):

1 — пространства с вытянутой аксиальной симметрией; 2 — первичное суперпространство на метриках вида (42); 3 — пространства со сплюснутой аксиальной симметрией

а плотность гамильтониана записывается в виде

$$H = e^{-3\lambda\tau^0} [6 (\dot{\beta}_+^2 + \dot{\beta}_-^2 - \dot{\lambda}^2) - \tau_0^2 V], \quad (43)$$

где $\sqrt{-g}M = \tau_0 e^{-3\lambda} V$ — плотность суперпотенциала. Этой плотности гамильтониана соответствует плотность лагранжиана

$$L = \tau^0 e^{-3\lambda} [6 (\dot{\beta}_+^2 + \dot{\beta}_-^2 - \dot{\lambda}^2) + \tau_0^2 V]. \quad (44)$$

Мизнер предложил в качестве новых переменных взять величины β_+ , β_- , λ . Им будут соответствовать импульсы

$$p_{\pm} = \frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}_{\pm}} = 12\tau^0 e^{-3\lambda} \dot{\beta}_{\pm}; \quad p_{\lambda} = -12\tau^0 \dot{\lambda}.$$

В этих переменных плотность гамильтониана выглядит просто

$$H = \tau^0 e^{-3\lambda} \left[\frac{e^{6\lambda}}{24} (p_+^2 + p_-^2 - p_{\lambda}^2) - V \right]. \quad (45)$$

Для перехода к квантовой теории вводится функционал состояния Вселенной $\Psi(\beta_+, \beta_-, \lambda)$, а импульсы заменяются на операторы

$$p_\lambda = \frac{1}{i} \frac{\partial}{\partial \lambda}; \quad p_+ = \frac{1}{i} \frac{\partial}{\partial \beta_+}; \quad p_- = \frac{1}{i} \frac{\partial}{\partial \beta_-},$$

тогда вторичная гамильтонова связь приводит к уравнению Мизнера

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} - \frac{\partial^2}{\partial \beta_+^2} - \frac{\partial^2}{\partial \beta_-^2} - e^{-\epsilon \lambda} \tilde{V} \right] \Psi = 0. \quad (46)$$

Это уравнение отличается от уравнения де Витта тем, что здесь основные переменные не h_{ik} , а β_+ , β_- , λ . Параметр λ можно рассматривать как время.

Основная особенность решений уравнения Мизнера состоит в том, что в закрытых мирах следует ожидать не распространение волновых пакетов в пространстве и времени, а колебания мира как единого целого (типа стоячих волн). Неучтенные (отброшенные) степени свободы соответствуют более высоким модам колебания Вселенной. В общем случае они ответственны за меньшую симметрию мира. Существенный дефект данной программы состоит в том, что уже построенные модельные теории не дают непосредственного рецепта для дальнейших обобщений.

На данной стадии возникает много специфичных принципиальных вопросов. Ведь общая теория относительности — единственная теория, рассматривающая мир как единое целое. В квантовой ОТО вектор состояния Ψ описывает весь мир. Каков физический смысл такого вектора, когда не существуют внешние классические измерительные приборы? Как понимать «начальное» и «конечное» состояния мира? Что было «до» и что будет «после»? Например, Б. де Витт и Дж. Уилер считают, что смысл «до» и «после» расплывется. Квантовое состояние Вселенной должно содержать много компонент сжимающегося и расширяющегося мира. Мир возникает как отскакивание назад от сингулярного состояния. Ожидается [22, 55], что даже физические константы и свойства элементарных частиц могут быть различными в разных компонентах Вселенной.

Глава III

Квантовая теория слабого гравитационного поля

§ 8. Квантование слабого гравитационного поля

Вернемся к случаю открытого мира и используем предположение о слабости гравитационного поля. Это означает, что компоненты метрического тензора мало отличаются от метрики плоского пространства-времени. Строго говоря, такое предположение запрещает рассмотрение очень близких пространственных сечений, так как из общих квантово-механических соображений малая разность значений 3-мерного метрического тензора на таких поверхностях должна приводить к большой неопределенности сопряженных импульсов, что в дальнейшем приведет к значительному отклонению метрики от плоской. Существующие попытки обоснования правомерности работы только со слабым гравитационным полем, честно говоря, используют положения, лежащие за пределами общепринятой ОТО и квантовой теории. Если закрыть глаза на этот дефект, то можно многими способами проквантовать слабое гравитационное поле.

Например, это можно сделать с помощью дираковского канонического формализма. Покажем, как можно исключить лишние компоненты гравитационного поля на классическом уровне. Положим $g_{\mu\nu} = \varepsilon_{\mu\nu} + b_{\mu\nu}$, где $|b_{\mu\nu}| \ll 1$. Тогда плотность лагранжиана (14) с точностью до величин 2-го порядка малости (лагранжиан «свободного» гравитационного поля) имеет вид

$$L = \frac{1}{4\kappa'} \left(-2 \frac{\partial b_{\sigma\nu}}{\partial x^\lambda} \frac{\partial b_{\lambda\nu}}{\partial x^\sigma} + \frac{\partial b_{\lambda\nu}}{\partial x^\sigma} \frac{\partial b_{\lambda\nu}}{\partial x^\sigma} + 2 \frac{\partial b_{\sigma\nu}}{\partial x^\nu} \frac{\partial b_{\lambda\lambda}}{\partial x^\sigma} - \frac{\partial b_{\lambda\lambda}}{\partial x^\sigma} \frac{\partial b_{\nu\nu}}{\partial x^\sigma} \right). \quad (47)$$

Здесь отсутствуют квадратичные скорости $(b_{0\mu,0})^2$. Добавляя дивергентный член, (47) можно привести к виду, не содержащему вообще скоростей от смешанных компонент:

$$L' = \frac{1}{4\kappa'} [(b_{ik,0} b_{ik,0} - b_{ii,0} b_{kk,0}) - 4(b_{ik,0} b_{0k,i} - b_{0k,k} b_{ii,0}) + (-2b_{iv,k} b_{kv,i} + b_{\lambda\nu,k} b_{\lambda\nu,k} + b_{ik,k} b_{jj,i} - b_{ii,k} b_{jj,k})]. \quad (48)$$

Отсюда легко находятся импульсы

$$p_{ik} = \frac{\partial L'}{\partial b_{ik,0}} = \frac{1}{\kappa'} \left(-b_{0k,i} + \frac{1}{2} b_{ik,0} + \varepsilon_{ik} b_{0j,j} - \frac{1}{2} \varepsilon_{ik} b_{jj,0} \right) \quad (49)$$

и первичные уравнения связи $p_{0\mu} = 0$. Введя гамильтониан, находим уравнения вторичных связей, соответственно гамильтоновой и продольной [44]:

$$b_{ii,k,k} - b_{ik,k,i} = 0; \quad (50)$$

$$p_{il,i} = 0. \quad (51)$$

В качестве дополнительного условия используем выбор направления распространения гравитационной волны, например вдоль x_3 . Тогда, используя разложения Фурье,

$$b_{ik}(x) = \int e^{ikx} b_{ik}(\mathbf{k}) d^3k; \quad p_{ik}(x) = \int e^{ikx} p_{ik}(\mathbf{k}) d^3k,$$

находим вторичные уравнения связи (50), (51) в импульсном представлении:

$$\begin{aligned} k^2 [b_{11}(\mathbf{k}) + b_{22}(\mathbf{k})] &= 0; & p_{13}(\mathbf{k}) &= 0; \\ p_{23}(\mathbf{k}) &= 0; & p_{33}(\mathbf{k}) &= 0. \end{aligned} \quad (52)$$

С помощью этих соотношений гамильтониан слабого гравитационного поля записывается в виде

$$\begin{aligned} H = \int d^3k \left\{ \kappa' \left[2p_{12}(\mathbf{k}) p_{12}(-\mathbf{k}) + \frac{1}{2} (p_{11}(\mathbf{k}) - p_{22}(\mathbf{k})) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (p_{11}(-\mathbf{k}) - p_{22}(-\mathbf{k})) \right] + \frac{k^2}{4\kappa'} [2b_{12}(\mathbf{k}) b_{12}(-\mathbf{k}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} (b_{11}(\mathbf{k}) - b_{22}(\mathbf{k})) (b_{11}(-\mathbf{k}) - b_{22}(-\mathbf{k})) \right] \}. \end{aligned} \quad (53)$$

Здесь вклад в гравитационную энергию дают только две пары канонических переменных: p_{12} , b_{12} и $(p_{11} - p_{22})$, $(b_{11} - b_{22})$, соответствующие двум поляризациям гравитационных волн. Остальные компоненты оказались исключенными.

Однако чаще для квантования слабого гравитационного поля используют более привычные методы квантования [38, 80]. Обычно предпочитают пользоваться дополнительными гармоническими координатными условиями $\partial(\sqrt{-gg^{\mu\nu}})/\partial x^\nu = 0$. Тогда удобнее брать за исходное

разложение плотности контравариантного метрического тензора [36, 37]

$$\sqrt{-g} g^{\mu\nu} = \varepsilon^{\mu\nu} - \gamma^{\mu\nu}. \quad (54)$$

В этом случае в плотности лагранжиана слабого гравитационного поля

$$L = \frac{1}{4\kappa'} \left(\frac{\partial\gamma_{\lambda\nu}}{\partial x^\sigma} \frac{\partial\gamma_{\lambda\nu}}{\partial x^\sigma} - 2 \frac{\partial\gamma_{\sigma\nu}}{\partial x^\lambda} \frac{\partial\gamma_{\lambda\nu}}{\partial x^\sigma} - \frac{1}{2} \frac{\partial\gamma_{\lambda\lambda}}{\partial x^\sigma} \frac{\partial\gamma_{\nu\nu}}{\partial x^\sigma} \right) \quad (55)$$

второй член справа может быть отброшен, так как его можно записать в виде

$$- 2 \frac{\partial}{\partial x^\sigma} \left(\gamma_{\lambda\nu} \frac{\partial\gamma_{\sigma\nu}}{\partial x^\lambda} \right) + 2\gamma_{\lambda\nu} \frac{\partial}{\partial x^\lambda} \left(\frac{\partial\gamma_{\sigma\nu}}{\partial x^\sigma} \right).$$

Отбрасывание этого члена эквивалентно добавлению в плотность лагранжиана квадратичных скоростей от смешанных компонент $\gamma_{0\lambda}$. Далее можно действовать различными способами. Можно сначала на классическом уровне исключить с помощью гармонических условий (и еще остающегося произвола) 8 лишних компонент, а затем квантовать, а можно сначала ковариантным или каноническим методом найти перестановочные соотношения, а потом исключить лишние переменные на квантовом уровне. В последнем случае в координатном представлении перестановочные соотношения для 10 компонент находятся в виде *

$$\left. \begin{aligned} [\gamma_{\alpha\beta}(x), \gamma_{\mu\nu}(x')] &= -i l^2 (\varepsilon_{\alpha\mu}\varepsilon_{\beta\nu} + \varepsilon_{\alpha\nu}\varepsilon_{\beta\mu} - \varepsilon_{\alpha\beta}\varepsilon_{\mu\nu}) \times \\ &\times D_0(x-x'), \\ [\gamma_{\alpha\beta}(x), \gamma_{\mu\mu}(x')] &= 2i l^2 \varepsilon_{\alpha\beta} D_0(x-x'), \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

где $D_0(x) = \frac{1}{i(2\pi)^3} \int d^4k e^{ikx} \delta(k^2) \varepsilon(k_0)$. В импульсном представлении это соответствует выражениям

$$\left. \begin{aligned} [a_{\alpha\beta}^-(\mathbf{k}), a_{\mu\nu}^+(\mathbf{k}')] &= \kappa' (\varepsilon_{\alpha\mu}\varepsilon_{\beta\nu} + \varepsilon_{\alpha\nu}\varepsilon_{\beta\mu} - \varepsilon_{\alpha\beta}\varepsilon_{\mu\nu}) \times \\ &\times \delta(\mathbf{k} - \mathbf{k}'); \\ [a_{\alpha\beta}^-(\mathbf{k}), a_{\mu\nu}^-(\mathbf{k}')] &= [a_{\alpha\beta}^+(\mathbf{k}), a_{\mu\nu}^+(\mathbf{k}')] = 0, \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

* В работе С. Гупта [37] в качестве технического приема используется гипотеза об 11 типах гравитонов: $\gamma_{\alpha\beta}, \gamma = \varepsilon^{\alpha\beta} \gamma_{\alpha\beta}$.

где

$$\gamma_{\alpha\beta}^{\pm}(x) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int \frac{e^{\pm ikx}}{\sqrt{2k_0}} e_{\alpha\beta} a_{\alpha\beta}^{\pm}(\mathbf{k}) d^3k;$$

$e_{\alpha\beta}$ — коэффициенты поляризации.

Дополнительные координатные условия следует рассматривать как условия на функционалы состояния, причем их следует брать в «ослабленном» виде, т. е.

$$\frac{\partial \gamma_{\mu\nu}^-}{\partial x^\nu} | \Psi \rangle = 0; \quad \langle \Psi | \frac{\partial \gamma_{\mu\nu}^+}{\partial x^\nu} = 0. \quad (58)$$

(Условие $\partial \gamma_{\mu\nu} / \partial x^\nu | \Psi \rangle = 0$, как и в электродинамике, приводит к противоречивости определения вакуума.)

Выбирая распространение гравитонов вдоль оси x_3 , дополнительные условия получаем в виде

$$\left. \begin{aligned} (a_{00}^- (\mathbf{k}) + a_{30}^- (\mathbf{k})) | \Psi \rangle &= 0; \\ (a_{02}^- (\mathbf{k}) + a_{32}^- (\mathbf{k})) | \Psi \rangle &= 0; \\ (a_{01}^- (\mathbf{k}) + a_{31}^- (\mathbf{k})) | \Psi \rangle &= 0; \\ (a_{03}^- (\mathbf{k}) + a_{33}^- (\mathbf{k})) | \Psi \rangle &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

плюс сопряженные им. Эти условия приводят к исключению вклада 8 лишних компонент в ожидаемые значения энергии «свободного» гравитационного поля:

$$\langle P_0 \rangle = \langle \Psi | \frac{1}{x'} \int k_0 d^3k \left\{ a_{12}^+ (\mathbf{k}) a_{12}^- (\mathbf{k}) + \frac{1}{4} (a_{11}^+ (\mathbf{k}) - a_{22}^+ (\mathbf{k})) (a_{11}^- (\mathbf{k}) - a_{22}^- (\mathbf{k})) \right\} | \Psi \rangle, \quad (60)$$

т. е. опять остаются только две поперечно-поперечные компоненты a_{12} и $1/2 (a_{11} - a_{22})$. Эти две степени свободы соответствуют двум типам гравитонов с двумя возможными проекциями спина ± 2 на направление движения.

§ 9. Гипотеза гравитационных трансмутаций

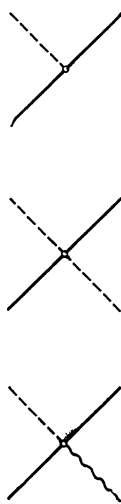
а) *Взаимодействие гравитационного поля с другими полями.* Для описания взаимодействия гравитационного поля с другими полями к плотности лагранжиана гравитационного поля (14) следует добавить плотности лагранжианов соответствующих полей, записанных в искривленном пространстве [31]:

$$\sqrt{-g} L_{\text{общ}} = \frac{\sqrt{-g} g^{\mu\nu}}{x'} (\Gamma_{\mu\nu}^\rho \Gamma_{\rho\sigma}^\sigma - \Gamma_{\mu\rho}^\sigma \Gamma_{\nu\sigma}^\rho) - \frac{1}{4} \sqrt{-g} \times$$

$$\begin{aligned}
& \times g^{\mu\lambda} g^{\nu\rho} F_{\lambda\rho} F_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \sqrt{-g} \left[-i \bar{\Psi} \gamma(\alpha) h^\mu(\alpha) \frac{\partial \Psi}{\partial x^\mu} + \right. \\
& + i \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial x^\mu} \gamma(\alpha) h^\mu(\alpha) \Psi + 2m \bar{\Psi} \Psi - 2e \bar{\Psi} \gamma(\alpha) h^\mu(\alpha) \times \\
& \times A_\mu \Psi \left. \right] - i \frac{\sqrt{-g}}{8} \bar{\Psi} [\gamma(\lambda) \gamma(\alpha) \gamma(\beta) - \gamma(\beta) \gamma(\alpha) \gamma(\lambda)] \times \\
& \times h^\mu(\lambda) h^\nu(\alpha) h^\sigma(\beta) \Delta_{\mu,\nu\sigma} \left. \right] \Psi - \sqrt{-g} \left[g^{\mu\nu} \frac{\partial \Phi^*}{\partial x^\mu} \frac{\partial \Phi}{\partial x^\nu} - \right. \\
& - m^2 \Phi^* \Phi - i e g^{\mu\nu} \frac{\partial \Phi^*}{\partial x^\mu} A_\nu \Phi + i e g^{\mu\nu} \Phi^* A_\mu \frac{\partial \Phi}{\partial x^\nu} + \\
& \left. + g^{\mu\nu} e^2 A_\mu A_\nu \Phi^* \Phi \right], \tag{61}
\end{aligned}$$

где A_μ , $F_{\mu\nu}$ — соответственно векторный потенциал и тензор электромагнитного поля; $\bar{\Psi}$, Ψ — компоненты спинорного поля; $h^\mu(\alpha)$ — компоненты тетрады; $\Delta_{\mu,\nu\sigma}$ — коэффициенты вращения Риччи; Φ^* , Φ — компоненты комплексного скалярного поля.

Для случая слабого гравитационного поля плотность лагранжианов (61) следует разложить в ряд по малым величинам $\gamma^{\mu\nu} = \varepsilon^{\mu\nu} - \sqrt{-g} g^{\mu\nu}$. Тогда лагранжиан взаимодействия, например, спинорного поля с гравитационным и электромагнитным, с точностью до величин второго порядка малости по $\gamma^{\mu\nu}$ можно записать в виде



$$\begin{aligned}
\sqrt{-g} L = & \frac{1}{4} \left(\gamma_{\mu\nu} + \frac{1}{2} \varepsilon_{\mu\nu} \gamma \right) \left(-i \bar{\Psi} \gamma_\mu \frac{\partial \Psi}{\partial x^\nu} + \right. \\
& + i \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial x^\nu} \gamma_\mu \Psi \left. \right) + \frac{1}{2} m \gamma \bar{\Psi} \Psi + \frac{1}{16} \left(\gamma_{\mu\alpha} \gamma_{\nu\alpha} - \right. \\
& - \varepsilon_{\mu\nu} \gamma_{\alpha\beta} \gamma_{\alpha\beta} \left. \right) \left(-i \bar{\Psi} \gamma_\mu \frac{\partial \Psi}{\partial x^\nu} + i \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial x^\nu} \gamma_\mu \Psi \right) + \\
& + \frac{m}{4} \gamma_{\mu\nu} \gamma_{\mu\nu} \bar{\Psi} \Psi - \frac{i}{16} \bar{\Psi} \left(\gamma_\mu \gamma_{\nu\rho} \frac{\partial \gamma_{\nu\rho}}{\partial x^\mu} - \right. \\
& - \gamma_\nu \gamma_{\mu\rho} \frac{\partial \gamma_{\nu\rho}}{\partial x^\mu} - \gamma_\nu \gamma_{\sigma\mu} \gamma_{\mu\sigma} \frac{\partial \gamma_{\nu\rho}}{\partial x^\mu} \left. \right) \Psi + f(\gamma^2) - \\
& - \frac{e}{4} \left[2 \bar{\Psi} A_\mu \gamma_{\mu\nu} \gamma_\nu \Psi + \bar{\Psi} A_\mu \gamma_\mu \gamma \Psi \right], \tag{62}
\end{aligned}$$

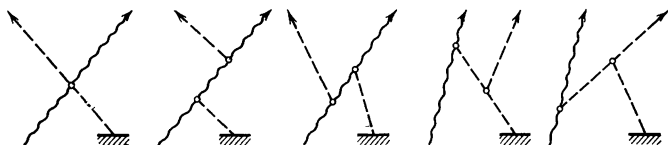
где в диаграммах типа Фейнмана, иллюстрирующих соответствующие вершины взаимодействия, использованы условные обозначения:

- линия спинорной частицы;
- гравитонная линия;
- ~~~~~ фотонная линия.

Зная плотность лагранжиана взаимодействия, стандартными методами квантовой теории поля (для открытых пространств) можно строить S -матрицу и, следовательно, рассчитывать конкретные процессы взаимных превращений различных частиц, включая гипотетические гравитоны. При этом члены третьего порядка и выше разложения плотности лагранжиана гравитационного поля описывают превращения только между самими гравитонами.

Впервые гипотеза о возможности взаимных превращений гравитонов и квантов известных видов материи была высказана в 1947 г. Д. Иваненко [53]. В том же году Д. Иваненко с А. Соколовым [54] оценили вероятность превращения пары скалярных частиц в два гравитона. Было найдено, что сечение процесса в ультрарелятивистском случае растет пропорционально квадрату энергии сталкивающихся частиц. Впоследствии гравитационные превращения изучались в работах И. Р. Пийра [82] (1957 г.), Дж. Уилера [21] (1957 г.), Н. В. Мицкевича [74, 75] (1959 г.), Р. Фейнмана [99] (1963 г.) и других.

б) *Процессы гравитационного тормозного излучения элементарных частиц.* 1) *Гравитационное тормозное излучение фотонов* в статическом гравитационном поле изучалось в работах И. Р. Пийра [82], Н. В. Мицкевича [74], М. П. Коркиной [61, 62], В. де Саббата и др. [14,



Диаграммы 1

15]. Матричному элементу процесса соответствуют диаграммы 1. Дифференциальное эффективное сечение процесса $d\sigma$ пропорционально $k^3 M^2$. Для реальных условий вероятность процесса ничтожна, однако, если существуют

сверхмассивные объекты малых размеров, можно надеяться на катализирующую роль массы.

Так, в работе [15] этот процесс рассматривался на гипотетическом квазаре с параметрами: масса $M \sim 10^{41}$ г, внутренняя температура $T \sim 10^7$ К, радиус $R \sim 10^{16}$ см, мощность излучения фотонов $N \simeq 10^{46}$ эрг/сек. Оценки показывают, что мощность гравитационного излучения квазара, обязанная данному эффекту, должна быть порядка $N \sim 10^{19} \div 10^{26}$ эрг/сек. Заметим, что общее количество квазаров в наблюдаемой части Вселенной авторами оценивается $n \sim 10^7$.

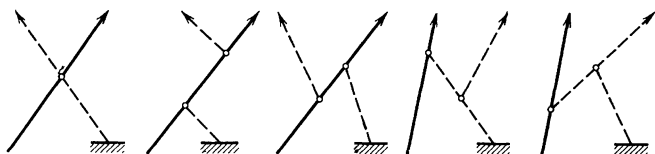
Для фотонов, испущенных далекими объектами, должен иметь место эффект красного смещения, обязанный гравитационному тормозному излучению в поле попутных галактик. Средняя энергия, теряемая на излучение, оценивается формулой [61]

$$\Delta k_0 \simeq 10^4 \frac{k^3 M^2}{\hbar c^3} k_0^3 n L, \quad (63)$$

где $M \simeq 10^{44}$ г — средняя масса галактик; $n \simeq 10^{-69}$ см $^{-3}$ — плотность галактик в наблюдаемой части Вселенной; k_0 — начальная энергия фотона; L — расстояние, пройденное фотоном. Для видимого света ($k_0 \simeq 10^{-12}$ эрг) имеем

$$\frac{dk_0}{k_0} \sim L \cdot 10^{-33}. \quad (64)$$

Напомним, что красное смещение, обусловленное фридмановским разбеганием галактик, определяется соотношением $dk_0/k_0 \sim L \cdot 10^{-28}$ и не зависит от начальной энергии фотона.



Диаграммы 2

2) Гравитационное тормозное излучение скалярных частиц в статическом гравитационном поле изучалось в работе [9] (Б. М. Баркер, С. Гупта, Дж. Каскас). Матричный элемент процесса описывается диаграммами 2.

Для нерелятивистских скалярных частиц дифференциальное эффективное сечение найдено в виде

$$d\sigma = \frac{64}{5} \left(\frac{kMm}{c\hbar} \right)^2 \left(\frac{k\hbar}{c^3} \right) \frac{dk_0}{k_0} \left(5 \frac{|p_1|}{|p|} + 3 \frac{(p^2 + p_1^2)}{2p^2} \ln \frac{|p| + |p_1|}{|p| - |p_1|} \right) d\Omega, \quad (65)$$

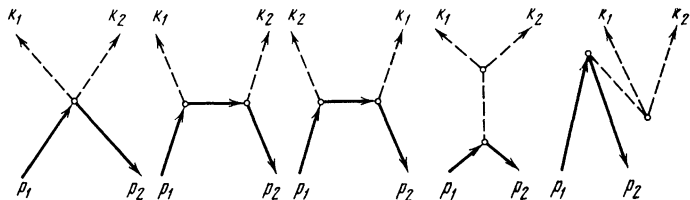
где M — масса центрального тела; p , p_1 , m — соответственно импульс до рассеяния, после рассеяния и масса скалярной частицы; k_0 — энергия испущенного гравитона. Эффект чрезвычайно мал из-за множителя k^3 , однако, как и в предыдущем случае, можно надеяться на катализирующую роль массы центрального тела.

3) *Гравитационное тормозное излучение электронов в электромагнитном поле* изучалось многими авторами. Так, для нерелятивистских электронов, рассеивающихся на кулоновском поле ядра с зарядом Ze , дифференциальное эффективное сечение процесса определяется формулой (65) (Э. А. Асланян [7]), где следует заменить \sqrt{kM} на Ze и \sqrt{km} на e . Это соответствует сечениям порядка $\sigma \sim 10^{-68} \text{ см}^2$. Подробный анализ данного процесса содержится в работах С. Вайнберга [29] и М. Кармели [57].

Согласно оценкам Г. М. Гандельмана и В. С. Пинаева [34], мощность гравитационного излучения всего Солнца, обязанная тормозному излучению электронов на ядрах полностью ионизованных атомов, равна $N \simeq 10^{15} \text{ эрг/сек}$, что соответствует потоку гравитонов на Земле порядка нескольких гравитонов на 1 м^2 за секунду. Основная часть гравитационного излучения лежит в диапазоне 1 кэв .

Аналогичный эффект гравитационного тормозного излучения должен быть при движении электронов в магнитных полях (гравитационное синхротронное излучение). По оценкам В. И. Пустовойта и М. Е. Герценштейна [85], мощность этого излучения от Солнца имеет порядок $N \simeq 10^9 \div 10^{10} \text{ эрг/сек}$. Для ультрарелятивистского случая те же авторы нашли отношение мощности электромагнитного тормозного излучения к гравитационному $\sim 10^{42}$.

в) *Гравитационные аннигиляции элементарных частиц.* 1) *Двухгравитонная аннигиляция пары фермионов* описывается с помощью диаграмм 3. Сечение процесса ничтожно мало; так, для электронов со скоростью $c/100$



Диаграммы 3

оно равно $\sigma \sim 10^{-110} \text{ см}^2$. В ультрарелятивистском случае ($k_0 \sim pc \gg mc^2$) полное сечение процесса (Ю. С. Владимиров [31]), имеет вид

$$\sigma_{\text{у.р}} \simeq r_g^2 \left(\frac{k_0}{mc^2} \right)^2, \quad (66)$$

где $r_g = 2km/c^2$. Сечение растет пропорционально квадрату энергии сталкивающихся частиц. Это согласуется с результатами Д. Иваненко и А. Соколова [54, 90] для случая аннигиляции скалярных частиц.

Напомним, что сечение двухфотонной аннигиляции пары фермионов в ультрарелятивистском случае убывает с ростом энергии $\sim 1/k_0^2$ [13]. При энергии электронов и позитронов $k_0 \simeq 10^{21} mc^2$ сечения процессов двухгравитонной и двухфотонной аннигиляций имеют одинаковый порядок. В работе Б. М. Баркера, М. С. Батья, С. Гупта [8] анализировались сечения процесса для разных поляризаций образовавшихся гравитонов.

В реальных физических условиях этот эффект ничтожен, однако его следует учитывать при разработке гипотезы «начального» состояния Вселенной в виде равновесного котла из элементарных частиц или гипотезы о существовании сколлапсировавших объектов.

2) Более существенным может быть процесс смешанной фотон-гравитонной аннигиляции фермионов (диаграммы 4).



Диаграммы 4

Сечение этого процесса пропорционально первой степени k . Для нерелятивистских частиц сечение определяется величиной (Ю. С. Владимиров [31])

$$\sigma_{н.р} \simeq r_e r_g \left(\frac{v}{c}\right)^3, \quad (67)$$

где $r_e = e^2/mc^2$. Так, при скоростях сталкивающихся частиц $v = c/100$ сечение имеет порядок $\sim 10^{-75} \text{ см}^2$. В ультрарелятивистском случае сечение приближается к постоянному значению

$$\sigma_{у.р} \simeq \frac{1}{12} r_e r_g \approx 0,3 \cdot 10^{-68} \text{ см}^2. \quad (68)$$

На рис. 2 произведено качественное сравнение сечений процессов двухфотонной ($\sigma_{2\gamma}$), двухгравитонной (σ_{2g}) и фотон-гравитонной ($\sigma_{g\gamma}$) аннигиляций в зависимости от энергии сталкивающихся частиц. Все кривые пересекаются в одной точке, соответствующей сечению $\sigma \simeq 10^{-68} \text{ см}^2$.

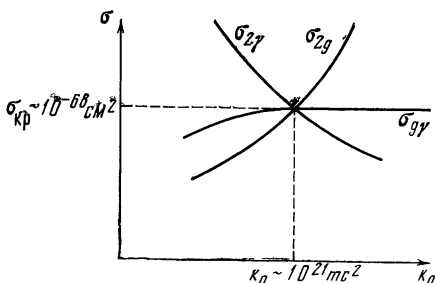


Рис. 2. Сравнение зависимости от энергии сечений двухфотонной, двухгравитонной и фотон-гравитонной аннигиляций пары фермионов

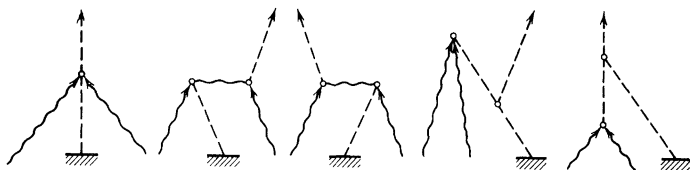
Внутри сверхновых звезд, где согласно модели Чью [104] температура вещества превышает $10^9 \text{ }^\circ\text{К}$, данный эффект может привести к образованию заметного количества жестких гравитонов. По оценкам В. де Саббата с сотрудниками [15], в одной такой сверхзвезде за 1 секунду образуется $\sim 10^{22}$ гравитонов со средней энергией порядка 1 Мэв ($\lambda \sim 10^{-11} \text{ см}$), что соответствует гравитационному излучению $N \simeq 10^{16} \text{ эрг/сек}$. Если число сверхновых звезд во Вселенной составляет $\sim 10^9$, то полное излучение жестких гравитонов, обязанное указанным процессам, оценивается 10^{25} эрг/сек . Однако при оценке общего количества гравитонов во Вселенной необходимо учитывать довольно быстрое поглощение таких гравитонов.

3) Двухгравитонная аннигиляция пары фотонов изучалась в работах М. П. Коркиной [61] (на основе теории гравитации Биркгофа — Боргардта) и Л. Ф. Владимировой [30]. Полное сечение процесса

$$\sigma \simeq 10^{-43} k^2 k_0^2$$

растет пропорционально квадрату энергии, соответствующая ультрарелятивистскому случаю двухгравитонной аннигиляции пары спинорных или скалярных частиц. Для фотонов видимого света ($\lambda \sim 5000 \text{ \AA}$) имеем $\sigma \simeq 10^{-124} \text{ см}^2$.

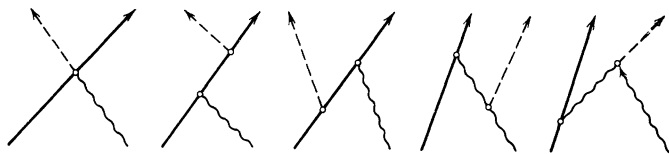
4) Превращение двух фотонов в один гравитон во внешнем гравитационном поле (диаграммы 5) изучалось в работах В. де Саббата с группой авторов [14, 15]. Сечение процесса так же, как и в случае тормозного гравитационного излучения фотонами во внешнем гравитационном поле, пропорционально $k^3 M^2$, т. е. масса опять является катализатором.



Диаграммы 5

Этими авторами было оценено гравитационное излучение квазара (см. параметры на стр. 315), обусловленное этим эффектом. Найдено, что в квазаре может происходить $n \sim 10^{34} \div 10^{40}$ процессов в секунду. Это соответствует мощности гравитационного излучения $N \simeq 10^{28} \text{ эрг/сек}$ в диапазоне энергий $\sim 1 \text{ эв} \div 1 \text{ кэв}$.

5) Эффект фоторождения гравитонов на спинорных частицах (диаграммы 6) изучался в работах Ю. С. Вла-



Диаграммы 6

димирова [31] и В. Н. Мироновского [72]. Дифференциальное эффективное сечение в системе покоящейся спинорной частицы найдено в виде [72]

$$d\sigma = \frac{e^2 k}{32\pi c^6} \frac{k_2^2}{m^2 k_1} \left[k_1 \sin^2 \theta - 2k_1 \sin^4 \theta - 2k_2 \sin^2 \theta \cos \theta + \right. \\ \left. + 2k_2 \sin^2 \theta + \frac{2mc}{k_1} (k_1 - k_2)(1 + \cos^2 \theta) + \frac{\sin^2 \theta}{mc} (k_1^2 \sin^2 \theta - \right. \\ \left. - k_1 k_2 (1 - \cos \theta)) \right] d\Omega, \quad (69)$$

где k_1, k_2 — соответственно импульс падающего фотона и рожденного гравитона; m — масса спинорной частицы; θ — угол между направлениями импульсов фотона и гравитона.

В случае $k_{01} \sim k_{02} \ll mc^2$ имеем $\sigma \simeq 10^{-70} (k_0/mc^2)^2$. Если положить $k_0 \sim 10^{-10}$ эрг, то $\sigma \sim 10^{-78}$ см². В случае $k_0 \gg mc^2$ имеем

$$d\sigma = \frac{e^2 k}{32\pi c^7} \frac{k_1 k_2^2}{m^3} \sin^4 \theta d\Omega. \quad (70)$$

Излучение гравитонов отсутствует в направлении движения фотонов.

В. Н. Мироновский [72] оценил гравитационную светимость звезды, вызванную этим эффектом. Для Солнца имеем $N = 10^8$ эрг/сек. Частота испущенных гравитонов лежит в диапазоне мягкого рентгеновского излучения ($k_0 \sim 1$ кэв).

г) *Превращение фотона в гравитон на внешнем электромагнитном поле.* Этот процесс (диаграмма 7) рассмат-

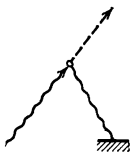


Диаграмма 7

ривался многими авторами [16, 35, 76, 83, 101], что естественно, так как это эффект первого порядка, наиболее существенный среди прочих трансмутаций фотонов.

1) Для случая *кулоновского поля точечного заряда* дифференциальное эффективное сечение процесса определя-

ется формулой [76]

$$d\sigma = \frac{kZ^2e^2}{2c^4} (1 + \cos^2 \theta) \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta}{2} d\Omega, \quad (71)$$

где θ — угол между импульсами фотона и гравитона. Можно ожидать, что суммарное количество гравитонов, образующихся на Солнце за счет этого эффекта, $n \simeq 10^{28} \text{ сек}^{-1}$. Отметим, что из-за независимости сечения от энергии спектр гравитонов, испущенных Солнцем, должен полностью повторять спектр фотонов внутри Солнца. Суммарная мощность такого гравитационного излучения Солнца оценивается величиной $N \simeq 10^6 \text{ эрг/сек}$.

2) Для случая фотонов, распространяющихся перпендикулярно однородному электростатическому полю плоского конденсатора или однородному магнитному полю (размеры области $A \times B \times C$), дифференциальное эффективное сечение процесса имеет вид [76]

$$d\sigma = \frac{4kF_{\perp}^2 \hbar^2 A^2}{\pi c^4 k_0^2} \sin^2 \frac{Bk_0}{2\hbar c} \sin^2 \frac{Ck_0}{2\hbar c} d\Omega, \quad (72)$$

где F_{\perp} — напряженность поля, перпендикулярного импульсу фотона (фотон распространяется в направлении A). Когда линейные размеры рассеивателя значительно превышают длину волны фотонов ($\lambda \ll V^{1/2}$), полное сечение принимает вид (Г. А. Лупанов [66], М. Е. Герценштейн [35], Дж. Вебер [26], П. Л. Познанин [83]):

$$\sigma = \frac{2\pi k}{c^4} L F_{\perp}^2 V, \quad (73)$$

где L — длина пролета в поле, сосредоточенном в объеме V . Сечение процесса равно нулю, когда фотон распространяется вдоль поля.

В лаборатории можно создать условия, при которых $\sigma \simeq 10^{-30} \text{ см}^2$. Данный эффект может иметь место в космическом пространстве при прохождении фотонов в магнитных полях галактик. Для галактики, имеющей магнитное поле $\sim 10^{-5} \text{ эрстед}$, следует ожидать $\sigma \simeq 10^{-30} \text{ см}^2$.

3) Рассеяние фотона на магнитном поле диполя [83]. Когда фотон движется вдоль магнитного момента, сечение процесса равно

$$\sigma = \frac{16}{5} \cdot \frac{\pi^2 k \mathcal{M}^2 k_0^2}{\hbar^2 c^6}. \quad (74)$$

Если же скорость фотона перпендикулярна \mathfrak{M} , то

$$\sigma = \frac{58 \pi k \mathfrak{M}^2 k_0^2}{15 \hbar^2 c^6}. \quad (75)$$

При рассеянии фотона с энергией $k_0 \sim 10^9$ эв на магнитном поле отдельного электрона следует ожидать $\sigma \simeq \simeq 10^{-60}$ см². Если в лабораторных условиях создать магнитный диполь $\mathfrak{M} \simeq 10^4$ ед. СГСМ, то $\sigma \simeq 10^{-13}$ см² для фотонов с $k_0 \simeq 10^9$ эв и $\sigma \simeq 10^{-32}$ см² для фотонов с $k_0 \simeq 1$ эв.

д) *Излучение гравитонов ядрами.* В настоящее время хорошо изучено явление электромагнитного γ -излучения ядер при переходе из возбужденного состояния в основное (или менее возбужденное). Обычно считается, что единственным способом снятия возбуждения является испускание высокоэнергичных квантов электромагнитного поля. Однако можно предположить, что возбуждение снимается также испусканием жестких гравитонов.

В работе Л. Хальперна и Б. Лорента [102] исследовалось гравитационное излучение Солнца, обязанное таким процессам. Известно, что внутри Солнца температура достигает $T = 10^7$ °К. При такой температуре часть ядер может находиться в возбужденном состоянии. Так, например, будут возбужденные состояния ядер изотопа железа ⁵⁷Fe с энергией возбуждения 14,4 кэв. По оценкам упомянутых авторов, ядра всего Солнца испускают $n \sim 10^{11}$ гравитонов в секунду, что соответствует гравитационной мощности $N \simeq 10^3$ эрг/сек. Это создает на Земле поток, равный одному гравитону на 1 км² за сутки.

Предполагается, что в центре сверхновых звезд температура достигает $T = 10^{10}$ °К. При этих температурах возбуждаются более высокие ядерные уровни, в частности уровень углерода ¹²C, с энергией 16,1 Мэв. Гравитационное излучение сверхновых за счет данных процессов оценивается величиной $N \simeq 10^{25}$ эрг/сек. Полагая расстояние от Земли до сверхновой ~ 300 парсек, от них можно ожидать около 10 гравитонов на 1 км² за сутки.

е) Наконец, следует отметить большое количество работ, основанных на квантовой теории гравитационного поля, однако в которых изучаются процессы с участием лишь *виртуальных гравитонов* (см., например, [10, 32]). Можно считать, что работы этого направления не затрагивают проблемы введения гравитонов, а сам квантовый метод вычисления можно понимать как вычислительный прием, не претендующий на более глубокое содержание.

§ 10. Излучение длинноволновых гравитонов

Проблема квантования гравитационного поля теснейшим образом связана с проблемой гравитационных волн. Как уже отмечалось, первый рассмотренный нами способ квантования произвольного гравитационного поля (исключение лишних степеней свободы на классическом уровне) фактически означает предварительное решение проблемы гравитационных волн. Пока такого решения нет, приходится довольствоваться случаем слабого гравитационного поля.

Мощность гравитационного излучения классической системой определяется формулой [63]

$$N = \frac{k}{45c^5} \dot{D}_{ik}^2, \quad (76)$$

где D_{ik} — квадрупольный момент системы. Отсылая за подробным изложением конкретных случаев к оригинальным статьям или содержательным обзорам В. Б. Брагинского [17, 20] и К. Торна [84], перечислим в виде таблицы (см. табл. 1) основные рассматривавшиеся космические источники длинноволнового гравитационного излучения.

Для гравитационного излучения системы из двух точечных масс m_1 и m_2 , вращающихся по относительной круговой орбите, из (76) получаем формулу

$$N = \frac{32k}{5c^5} \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right)^2 r^4 \omega^6 = \frac{32k^{7/3}}{5c^5} \frac{(m_1 m_2)^2}{(m_1 + m_2)^{2/3}} \omega^{10/3}, \quad (77)$$

где $r = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|$ — расстояние между массами; ω — частота вращения. Различные более общие случаи движения системы двух тел изучались в работе [48].

Мощность гравитационного излучения вращающейся коллапсирующей сверхзвезды (источник 13 в таблице 1) оценивалась с помощью моделирования ее однородным вращающимся стержнем длины l [108]:

$$N = \frac{2kM^2 l^4 \omega^6}{45c^5}, \quad (78)$$

где M — масса сверхзвезды.

Оценка гравитационного излучения при анизотропных взрывных процессах (7) — (10) производилась Л. М. Озер-

ным [79] на основе формулы

$$N \simeq \frac{256}{15c^5} \frac{k(3\gamma - 1)^4 E^2}{(\gamma^2 - 1)^2 \tau^2}, \quad (79)$$

где E — полная энергия взрыва; τ — время взрыва; $\gamma = \frac{5}{3}$ — показатель адиабаты.

При падении звезды массы m на сколлапсировавший объект массы M , как показали Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков [50, 51], следует ожидать гравитационное излучение порядка

$$\left. \begin{aligned} \Delta E &\sim 0,01c^2 \frac{m^2}{M} \text{ — для радиального падения;} \\ \Delta E &\sim 0,1c^2 \frac{m^2}{M} \text{ — для падения по спирали (за 1 оборот).} \end{aligned} \right\} (80)$$

§ 11. Замечания о предполагаемом количестве и спектре гравитонов в наблюдаемой части Вселенной

Мощности источников гравитационного излучения, упомянутых в § 9, 10, для наглядности изображены на одном графике [119] (рис. 3). По горизонтали графика отложены десятичные логарифмы длин волн испускаемых гравитонов (гравитационных волн). Для удобства приведена также соответствующая шкала десятичных логарифмов частот. По вертикали отложены десятичные логарифмы мощности гравитационного излучения (*эрг/сек*).

Вся шкала рассмотренных частот гравитационного излучения разбита на 10 диапазонов:

- 1) ультранизкие частоты (УНЧ): $\nu = 10^{-13} \div 10^{-9}$ гц;
- 2) сверхнизкие частоты (СНЧ): $\nu = 10^{-9} \div 10^{-5}$ гц;
- 3) очень низкие частоты (ОНЧ): $\nu = 10^{-5} \div 10^{-1}$ гц;
- 4) низкие частоты (НЧ): $\nu = 10^{-1} \div 10^2$ гц;
- 5) средние частоты (СЧ): $\nu = 10^2 \div 10^5$ гц;
- 6) высокие частоты (ВЧ): $\nu = 10^5 \div 10^8$ гц;
- 7) очень высокие частоты (ОВЧ): $\nu = 10^8 \div 10^{12}$ гц;
- 8) сверхвысокие частоты (СВЧ): $\nu = 10^{12} \div 10^{15}$ гц;
- 9) ультравысокие частоты I (УВЧ I): $\nu = 10^{15} \div 10^{18}$ гц;
- 10) ультравысокие частоты II (УВЧ II): $\nu > 10^{18}$ гц.

Как видно из графика, большая часть гравитационной энергии во Вселенной должна приходиться на длинноволновые гравитоны (диапазоны СЧ — УНЧ). Кратко рассмотрим отдельные диапазоны.

УНЧ. Неоднократно высказывалась мысль, что во Вселенной может существовать значительное количество гравитационных волн, образовавшихся на ранних стадиях развития Вселенной ($\nu \sim 10^{-12} \div 10^{-13}$ гц). Наличие таких реликтовых гравитонов должно влиять на более поздние стадии расширения Вселенной. Дж. Уилер [94], а также Я. Б. Зельдович и Я. А. Смородинский [49] показали, что для сохранения наблюдаемого характера расширения Вселенной плотность гравитонов должна быть

$$\rho_{\text{гр}} < 3\rho_k \simeq 5 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3.$$

Однако реликтовые гравитоны влияли также и на более ранние стадии эволюции, что должно было отразиться на наблюдаемом содержании различных элементов в звездах. По оценкам В. Ф. Шварцмана [105], процентное содержание гелия в ряде звезд накладывает более сильное ограничение на возможную плотность реликтовых гравитонов:

$$\rho_{\text{гр}} < 5 \quad \rho_{\gamma} \simeq 2 \cdot 10^{-33} \text{ г/см}^3,$$

где ρ_{γ} — плотность фонового радиоизлучения с $T = 2,7^\circ \text{ К}$.

В этом же диапазоне находится гравитационное излучение эволюционирующих галактик [84].

СНЧ. Здесь максимальная интенсивность приходится на взрывы галактик или магнитно-гидродинамических квазаров. Однако эти явления кратковременны и сравнительно редки. Этому диапазону принадлежит также гравитационное излучение кратных звезд, а также планетных систем типа солнечной.

ОНЧ. Наибольшая мощность излучения в этом диапазоне ожидается от гипотетических объектов (гравитационный коллапс квазаров, падение звезд на черные дыры). Взрывы сверхновых — редкое явление, остаются короткопериодные кратные звездные системы. В настоящий момент следует признать, что из «реальных» источников основную часть гравитационного излучения должны давать именно такие кратные звездные системы. Суммарная энергия гравитационных волн от них в наблюдаемой части Вселенной оценивается величиной $E \sim 10^{65}$ эрг ($\rho_{\text{гр}} \sim 10^{-40}$ г/см³).

НЧ — СЧ. Ведущиеся эксперименты по поиску гравитационного излучения приходятся на диапазон средних частот. Этим определяется то, что на этих частотах

предложено максимальное число механизмов источников гравитационных волн. Это главным образом колебания, быстрые вращения или столкновения нейтронных звезд, падения звезд на черные дыры.

ВЧ — ОВЧ. Эти диапазоны частот мало анализировались. Основными источниками излучения здесь могут быть тепловые колебания различных объектов (В. Н. Митроновский [115]).

СВЧ. Основным механизмом гравитационного излучения в этом диапазоне является гравитационное тормозное излучение а) фотонов в гравитационном поле черной дыры (гипотетический источник) и б) электронов в магнитных полях звезд.

УВЧ I. Основными источниками являются процессы тормозного гравитационного излучения электронов и фотонов на кулоновском поле ядер элементов в звездах, а также процессы превращения фотонов в гравитоны на ядрах ионизованного вещества. Суммарная энергия гравитационного излучения от этих источников в наблюдаемой части Вселенной ожидается порядка $E \sim 10^{53}$ эрг ($\rho_{\text{гр}} \sim 10^{-52}$ г/см³).

УВЧ II. Наконец, наиболее высокочастотное гравитационное излучение следует ожидать от процессов фотон-гравитонной аннигиляции электронно-позитронных пар и гравитационного излучения от возбужденных ядер элементов внутри сверхновых.

§ 12. Обнаружение гравитационного излучения

Как можно обнаружить предполагаемое гравитационное излучение? В литературе обсуждалось несколько принципиально различных способов. Кратко остановимся на некоторых из них.

1. *Превращение гравитационной волны в электромагнитную во внешнем электромагнитном поле плоского конденсатора* рассматривалось в работах Г. А. Лупанова [66] и В. де Саббата с сотрудниками [16]. Было найдено, что при пороговой напряженности электростатического конденсатора $E \simeq 3,33 \cdot 10^4$ ед. СГСЕ получаемая мощность N_3 электромагнитного сигнала определяется формулой

$$N_3 = \frac{175k}{4v^4(2\pi)^3} P \sin^2 \frac{lv}{c}, \quad (81)$$

где ν — частота падающих гравитационных волн (частота принимаемого электромагнитного сигнала); l — расстояние в см между пластинами конденсатора; P — падающий поток гравитационной энергии в $\text{эрг}/\text{см}^2\text{сек}$. Рассмотрим частные случаи.

а) Пусть расстояние между пластинами конденсатора сравнимо с длиной гравитационной волны ($\lambda \sim l$), тогда принимаемая мощность $N_0 \sim 1/\nu^4 \cdot kP$ обратно пропорциональна четвертой степени частоты детектируемого излучения.

б) Расстояние между пластинами много меньше длины гравитационной волны, тогда $N_0 \simeq 5 \cdot 10^{-20} l^2/\nu^2 kP$, т. е. наиболее выгодно детектировать ультранизкочастотные гравитационные волны. Минимальный поток гравитационной энергии, принимаемый такой системой, определяется через предельную чувствительность приемника N формулой

$$P_m \simeq \frac{10^{20}}{5k} \frac{\nu^2}{l^2} N. \quad (82)$$

2. Гравитационную волну можно обнаружить по разности гравитационных сил $\Delta F^{\mu\alpha}$, действующих на разнесенные пробные массы,

$$\Delta F^{\mu\alpha} \simeq -tc^2 R^{\mu}_{\alpha 00} l^\alpha, \quad (83)$$

где m — масса пробного тела (массы полагаются одинаковыми); l — расстояние между массами, малое по сравнению с длиной гравитационной волны; $R^{\mu}_{\alpha 00}$ — компоненты тензора кривизны, характеризующие градиент гравитационного поля.

Минимальный обнаружимый поток мощности синусоидального гравитационного излучения при помощи двух «свободных» масс определяется через минимальное экспериментально фиксируемое ΔF_m [17]:

$$P_m \simeq \frac{c^3(\Delta F_m)^2}{8\pi k m^2 l^2 \omega^2} \simeq \frac{c^3 \omega^2}{8\pi k} \left(\frac{\Delta l}{l} \right)_m^2, \quad (84)$$

где ω рад/сек — частота принимаемого гравитационного излучения; $\Delta l/l$ — относительное изменение расстояния между пробными телами. В настоящее время в земных условиях можно рассчитывать [17] на $\Delta l/l \simeq 10^{-16}$ (полагая $l \sim 10^3$ см), т. е.

$$P_m \simeq 10^3 \nu^2. \quad (85)$$

Если в качестве пробных тел брать систему Земля—звезда, то, используя современные оптические методы измерения относительного движения звезд, можно надеяться на $\Delta l/l \sim 10^{-8}$, что дает

$$P'_m \simeq 10^{19} \nu^2. \quad (86)$$

Примерно такая же относительная точность измерения может быть получена и при радиолокации планет (пробные массы: Земля—другая планета).

3. Более обнадеживающие оценки имеют приемники, использующие в качестве квадруполя *протяженное твердое тело*. В этом случае чувствительность приемника ограничена тепловыми флуктуациями, а минимальный обнаружимый гравитационный поток определяется выражением [20]

$$P_m \simeq \frac{c^3}{2\pi k} \frac{bT}{Qm\omega l^2} \Delta f, \quad (87)$$

где T — температура (по Кельвину); Q — добротность; m — масса квадруполя; Δf — полоса пропускания. На этом принципе основан приемник гравитационного излучения Дж. Вебера *. Различные оценки чувствительности его установки колеблются в пределах

$$2 \cdot 10^4 \text{ эрг/см}^2\text{сек} < P_m < 3 \cdot 10^6 \text{ эрг/см}^2\text{сек}.$$

В качестве приемника гравитационного излучения (как протяженное твердое тело) можно использовать космические тела, например, Землю [25, 47]. Подсчитано, что самые низкочастотные колебания Земли ($T \sim 54$ мин) могли бы возбуждаться гравитационным потоком $P \sim 10^2 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$. В. де Саббата с сотрудниками [88] предлагает использовать в качестве детектора гравитационных волн (в диапазоне ~ 1 гц) лунные масконы (локальные неоднородности на поверхности Луны).

* Приемник Вебера представляет собой дюралюминиевый цилиндр длиной $\sim 1,5$ м и весом около тонны, подвешенный специальным образом в вакууме. Возбуждаемые гравитационной волной собственные колебания цилиндра (~ 1660 гц) преобразуются системой пьезоэлектрических датчиков в электрические сигналы, которые затем усиливаются. Сигналы регистрируются по совпадению показаний нескольких приемников, разнесенных на расстояние ~ 1000 км. Приняты меры для устранения различных помех.

4. В работе В. Б. Брагинского и В. Н. Руденко [20] предложен проект *маятникового детектора*, состоящего из двух масс, подвешенных в вакууме на кварцевых лентах. Согласно оценкам авторов, такой приемник в диапазоне частот ~ 1 *гц* может регистрировать поток

$$P_m \sim 30 \Delta f \text{ эрг/см}^2\text{сек.} \quad (88)$$

Так, для $\Delta f \simeq 10^{-5}$, имеем $P < 3 \cdot 10^{-4}$ *эрг/см}^2\text{сек.}*

Иные принципы детектирования гравитационного излучения предлагались в работах [59, 60].

При оценке возможности детектирования гравитационных сигналов от разных ожидаемых источников следует иметь в виду квантовые ограничения на минимальную мощность регистрируемого излучения [18]:

$$P_{m,q} \simeq \frac{c^3}{2\pi k} \frac{\hbar}{m\omega l^2 \hat{\tau}^2}, \quad (89)$$

где $\hat{\tau}$ — длительность синусоидального дуга; \hbar — постоянная Планка. Полагая здесь $\hat{\tau} \simeq 10^6$ *сек*, $m \simeq 10^6$ *г*, $l \simeq 10^3$ *см*, находим

$$P'_{m,q} \simeq \frac{1}{v} 10^{-14} \text{ эрг/см}^2\text{сек.} \quad (90)$$

Ожидаемые на Земле потоки гравитационного излучения от различных возможных источников изображены на графике (рис. 4). По горизонтали отложены десятичные логарифмы длин волн (частот), по вертикали — десятичные логарифмы ожидаемых потоков гравитационного излучения (*эрг/см}^2\text{сек}*). На этом же графике указана квантовомеханическая граница регистрируемых потоков [согласно формуле (90)], возможности детекторов из двух «свободных» масс в земных и астрономических масштабах и области экспериментальных поисков Вебера и других исследователей.

Анализ графика показывает, что обнаружение излучения от «надежных» источников пока лежит за пределами современных возможностей. Надежды могут возлагаться только на существование гипотетических источников,

Заключение

После десяти лет напряженной работы в мае 1969 г. Дж. Вебер объявил [27] о регулярном приеме сигналов (порядка двух в месяц), которые он интерпретирует как регистрацию гравитационных волн.

Затем Вебер сообщил [28], что его установки значительно усовершенствованы, производятся магнитная запись сигналов и машинный анализ результатов, используются дополнительные детекторы, настроенные на другую частоту. Им объявлено, что уже есть совпадения сигналов на детекторах с частотами 1581 и 1661 *гц*, но отсутствуют совпадения на частотах 1661 и 5000 *гц*, обнаружена направленность излучения, источником которого якобы является центр нашей Галактики. Смонтирован вариант установки для работы при температуре жидкого гелия.

Более десяти лабораторий в разных странах уже заявили о начале работ по проверке результатов Дж. Вебера. И вот недавно стали известны результаты первой серии экспериментов В. Б. Брагинского на двух установках типа веберовских [110]: на частоте ~ 1640 *гц* при достигнутом уровне чувствительности $P \sim 10^7$ *эрг/см²сек* за 20 суток наблюдений не обнаружено совпадающих всплесков на обеих антеннах с точностью 0,5 *сек*. С огромным интересом гравитационисты всего мира ожидают сообщений от других экспериментальных групп. Пожалуй, нет оснований сомневаться, что Вебер действительно принимает какие-то сигналы. Но какие?

Скорее всего, Веберу не удалось изолировать установку от каких-либо помех, например, таких, как широкие космические ливни, воздействие динамических гравитационных полей в зоне индукции [19] или солнечной и геомагнитной активности [1].

Но, допустим, что принимаемые Вебером сигналы действительно обязаны гравитационному излучению. Тогда возникает вопрос об источниках этого излучения. Как уже отмечалось, приходится рассчитывать только на гипотетические источники и при этом предполагать, что они находятся в пределах нашей Галактики. Более всего подходят явления с участием нейтронных звезд [19]. Но тогда из-за большой частоты событий и огромной мощности излучения время жизни ядра Галактики сочтено ($10^6 \div 10^7$ лет).

Сейчас теоретики — сторонники открытия Вебером гравитационных волн — возлагают большие надежды на синхротронный механизм гравитационного излучения. Предполагается [111, 112], что в центре нашей Галактики имеется массивная черная дыра, на которую ежедневно падает порядка одной звезды. При этом полагается, что звезда падает по слабо закручивающейся спирали, лежащей в плоскости эклиптики. В результате почти кругового движения звезды возникает гравитационное синхротронное излучение. Оно характерно тем, что, во-первых, сконцентрировано в пределах узкого угла вблизи плоскости вращения и, во-вторых, максимум излучения приходится на более высокие по сравнению с частотой вращения гармоник. Эти особенности позволяют выиграть 3—4 порядка, необходимые для согласования времени жизни Галактики с возрастом Вселенной (1—10 млрд. лет). Однако следует заметить, что гипотеза синхротронного происхождения гравитационного излучения ставит ряд новых существенных проблем (устойчивость орбит, вопросы поляризации излучения [113, 116] и др.).

Таким образом, оказывается, если эксперименты Вебера — открытие гравитационных волн, то это двойное открытие — самих волн и довольно экзотических новых источников.

Наконец, может случиться, что открыто принципиально новое излучение. Это было бы не менее интересно. Природа уже неоднократно ставила человека перед новыми фактами, когда все мироздание представлялось построенным, по крайней мере, в общих чертах.

Независимо от того, открыл ли Вебер гравитационные волны или нет, сейчас уже можно констатировать, что исследования по проблемам квантования общей теории относительности и волнам получили (не без помощи его экспериментов) настолько существенный импульс, что в ближайшие годы станут одним из важнейших направлений теории гравитации. Грядущая квантовая теория гравитации несомненно будет чем-то более значительным, нежели простым повторением квантовой теории обычных полей. Если хотя бы часть отмеченных в первой главе надежд, возлагаемых на квантовую ОТО, осуществится, то значение такой теории в данный момент трудно переоценить.

Литература

1. *Адьяниц Р. А., Алексеев А. Д., Колосницын Н. И.* Письма в ЖЭТФ, 15, (5), 277, 1972 (Корреляция «гравитационных сигналов» в опытах Вебера с солнечной и земной магнитной активностью).
2. *Андерсон (J. L. Anderson).* Phys. Rev., 110, 1197, 1958 (Число истинных наблюдаемых в ОТО).
3. *Андерсон (J. L. Anderson).* Phys. Rev., 114, 1182, 1959 (Порядок операторов в квантованной ОТО).
4. *Андерсон Дж.* Статья в сб. «Гравитация и относительность». Изд-во «Мир», 1965 (Квантование общей теории относительности).
5. *Антонов В. И., Владимиров Ю. С.* Тезисы докладов III Советской гравитационной конференции. Ереван, 1972 (Дираковский канонический формализм и метод кинеметрических инвариантов).
6. *Арновитт, Дезер (R. Arnowitt, S. Deser).* Phys. Rev., 113, 745, 1959 (Квантовая теория гравитации. Общая формулировка и линеаризованная теория).
7. *Асламян Э. А.* Вестник МГУ, Физика и астрономия, № 2, 1972 (Некоторые квантово-гравитационные эффекты в центральных классических полях).
8. *Баркер, Батья, Гупта (B. M. Barker, M. S. Bhatia, S. N. Gupta).* Phys. Rev., 182, 1387, 1969 (Калибровочные условия в гравитационных взаимодействиях).
9. *Баркер, Гупта, Каскас (B. M. Barker, S. N. Gupta, J. Kaskas).* Phys. Rev., 182, 1391, 1969 (Гравитационное тормозное излучение и инфракрасная расходимость).
10. *Баркер, О'Коннелл (B. M. Barker, R. F. O'Connell).* Phys. Rev. D, 2, 1428, 1970 (Вывод уравнений движения гироскопа из квантовой теории гравитации).
11. *Бергманн П., Комар А.* Статья в сб. «Новейшие проблемы гравитации». ИИЛ, 1961 (О квантовании гравитационного поля).
12. *Бергманн (P. G. Bergmann).* Preprint. Syracuse, New York, 13210, 1969 (Состояние канонического квантования ОТО).
13. *Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В.* Введение в теорию квантованных полей. Гостехиздат, 1957.
14. *Боккалетти, де Саббата, Гуалди, Фортини (D. Boccaletti, V. De Sabbata, C. Gualdi, P. Fortini).* Nuovo Cim., A—48, 58, 1967 (Излучение гравитона фотоном в гравитационном поле).
15. *Боккалетти, де Саббата, Гуалди, Фортини (D. Boccaletti, V. De Sabbata, C. Gualdi, P. Fortini).* Nuovo Cim., 54B, 134, 1968 (Гравитоны во Вселенной).
16. *Боккалетти, де Саббата, Фортини, Гуалди (D. Boccaletti, V. De Sabbata, P. Fortini, C. Gualdi).* Nuovo Cim., B—70, 129, 1970 (Превращение фотонов в гравитоны и обратно в статическом электромагнитном поле).
17. *Брагинский В. Б.* УФН, 86, 433, 1965 (Гравитационное излучение и перспективы его экспериментального обнаружения).
18. *Брагинский В. Б.* ЖЭТФ, 53, 1434, 1967 (Классические и квантовые ограничения при обнаружении слабых воздействий на макроскопический осциллятор).

19. Брагинский В. Б., Зельдович Я. Б., Руденко В. П. Письма в ЖЭТФ, **10**, 437, 1969 (О приеме гравитационного излучения внесемного происхождения).
20. Брагинский В. Б., Руденко В. Н. УФН, **100**, 395, 1970 (Релятивистские гравитационные эксперименты).
21. Брилл, Уилер (D. Brill, J. Wheeler). Rev. Mod. Phys., **29**, 465, 1957 (сб. «Новейшие проблемы гравитации». ИИЛ, 1961), (Взаимодействие нейтрино с гравитационным полем).
22. Брилл, Гоуди (D. R. Brill, R. H. Gowdy). Repts. Progr. Phys., **33**, 413, 1970 (Квантование общей теории относительности).
23. Де Бройль Л. Революция в физике. Госатомиздат, 1963, стр. 187.
24. Бронштейн М. П. ЖЭТФ, **6**, 195, 1936 (Квантование гравитационных волн).
25. Вебер, Форвард (J. Weber, R. L. Forward). Nature, **189**, 473, 1961 (Земля как детектор гравитационных волн).
26. Вебер Дж. Общая теория относительности и гравитационные волны. ИИЛ, 1962.
27. Вебер (J. Weber). Phys. Rev. Lett., **22**, 1320, 1969 (Доказательство открытия гравитационного излучения).
28. Вебер Дж. Доклад на VI Международной гравитационной конференции. Копенгаген, 1971 (Успехи в обнаружении гравитационного излучения).
29. Вайнберг (S. Weinberg). Phys. Rev., **140**, 2B, 516, 1965 (Инфракрасные фотоны и гравитоны).
30. Владимиров Л. Ф. Известия ВУЗов, Физика, № 1, 134, 1971 (Двухгравитонная аннигиляция пары фотонов).
31. Владимиров Ю. С. ЖЭТФ, **45**, 251, 1963 (Гравитационные трансмутации фермионов).
32. Владимиров Ю. С., Исхаков И. Ф. Известия ВУЗов, Физика, № 8, 45, 1970 (Поляризация фотонов при рассеянии в сферически-симметричном гравитационном поле).
33. Владимиров Ю. С. Статья в сб. «Теория относительности и гравитация». М., 1971, стр. 40 (Различные формулировки ОТО).
34. Гандельман Г. М., Пинаев В. С. ЖЭТФ, **37**, 1572, 1959 (Испускание нейтринных пар и его роль в звездах).
35. Герценштейн М. Е. ЖЭТФ, **41**, 113, 1961 (Волновой резонанс световых и гравитационных волн).
36. Гупта (S. Gupta). Proc. Phys. Soc., A — **65**, 161, 1952 (сб. «Новейшие проблемы гравитации». ИИЛ, 1961), (Квантование гравитационного поля в линейном приближении).
37. Гупта (S. Gupta). Proc. Phys. Soc., A — **65**, 608, 1952 (сб. «Новейшие проблемы гравитации». ИИЛ, 1961), (Квантование гравитационного поля. Общая теория).
38. Гутман И. И. Тезисы докладов I Советской гравитационной конференции. Изд. МГУ, 1961, стр. 93 (Общековариантные перестановочные соотношения для гравитационных потенциалов во втором приближении).
39. Де Витт (B. DeWitt). Journ. Math. Phys., **2**, 151, 1961 (Инвариантные коммутаторы для квантованного гравитационного поля).
40. Де Витт (B. DeWitt). Phys. Rev., **160**, 1113, 1967 (Квантовая теория гравитации. Каноническое квантование).

41. *Де Витт Б.* Доклад на VI Международной гравитационной конференции. Копенгаген, 1971 (Теория суперпространства).
42. *Дирак (P. A. M. Dirac).* Proc. Roy. Soc., A—246, 326, 1958 (сб. «Новейшие проблемы гравитации». ИИЛ, 1961), (Обобщенная динамика в гамильтоновой форме).
43. *Дирак (P. A. M. Dirac).* Proc. Roy. Soc., A—246, 333, 1958 (сб. «Новейшие проблемы гравитации». ИИЛ, 1961), (Теория гравитации в гамильтоновой форме).
44. *Дирак (P. A. M. Dirac).* Phys. Rev., 114, 924, 1959 (Фиксация координат в гамильтоновой теории гравитации).
45. *Дирак П. А. М.* Доклад на III Международной гравитационной конференции. Варшава, 1962 (Движение протяженной частицы в гравитационном поле).
46. *Дирак (P. A. M. Dirac).* Contemporary Phys. Trieste Sympos., 1968, Vol. 1. Vienna, 1969, 539 (Квантование гравитационного поля).
47. *Дайсон (F. J. Dyson).* Astrophys. J., 156 (1), 529, 1969 (Земля и гравитационные волны).
48. *Езава, Ямагучи (F. Ezawa Zyun, Yamaguchi Yoshio).* J. Phys. Soc. Jap., 28, 1083, 1970 (Гравитационные волны, излучаемые системой 2 тел).
49. *Зельдович Я. Б., Смородинский Я. А.* ЖЭТФ, 41, 907, 1961 (О верхнем пределе плотности нейтрино, гравитонов и барионов во Вселенной).
50. *Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.* ДАН СССР, 155, 1033, 1964 (Излучение гравитационных волн телами, движущимися в поле коллапсирующей звезды).
51. *Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.* Релятивистская астрофизика. Изд-во «Наука», 1967.
52. *Зельманов А. Л.* ДАН СССР, 107, 815, 1956 (Метод хронометрических инвариантов).
53. *Иваненко Д.* УФН, 32, (3), 149, 1947 (Введение в теорию элементарных частиц).
54. *Иваненко Д., Соколов А.* Вестник МГУ, № 8, 103, 1947 (Квантовая теория гравитации).
55. *Иваненко Д., Курдгеллаидзе Д. Ф.* Препринт Ужгородского гос. ун-та, 1965 (Симметрия элементарных частиц и космология).
56. *Ишам, Салам, Стрэдди (C. J. Isham, A. Salam, J. Strathdee).* Phys. Rev. D, 3, 1805, 1971 (Устранение расходимостей в квантовой электродинамике учетом гравитации).
57. *Кармели (M. Carmeli).* Phys. Rev., 158, 1243, 1967 (Гравитационное тормозное излучение при нерелятивистских столкновениях).
58. *Киббл Т.* УФН, 96, (3), 497, 1968 (Квантовая теория гравитации).
59. *Копвиллем У. Х., Нагибаров В. Р.* Тезисы докладов V Международной гравитационной конференции. Тбилиси, 1968, стр. 208 (Перспективы экспериментов по генерации и приему когерентных гравитационных волн оптического диапазона).
60. *Копвиллем У. Х., Нагибаров В. Р.* Статья в сб. «Гравитация и теория относительности». Казань, № 4—5, 1968, стр. 60 (Апериодическое возбуждение сверхизлучательного гравитационного состояния вещества).

61. *Коркина М. П.* Укр. физ. журнал, 5, 763, 1960 (Процессы взаимодействия фотонов и гравитонов в квантовой теории поля).
62. *Коркина М. П.* Укр. физ. журнал, 7, 157, 1962 (К феноменологической теории взаимодействия электромагнитного и гравитационного полей).
63. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. Физматгиз, 1960.
64. *Лорент (В. Е. Laurent).* Nuovo Cim., 4, 1445, 1956 (О ковариантном квантовании с приложением к рассеянию гравитирующих фермионов).
65. *Леутвилер (Н. Leutwyler).* Phys. Rev., 134B, 1155, 1964 (Гравитационное поле: эквивалентность фейнмановского и дираковского квантования).
66. *Лупанов Г. А.* ЖЭТФ, 52, 118, 1967 (Конденсатор в поле гравитационной волны).
67. *Манделстам (S. Mandelstam).* Proc. Roy. Soc., 270, 346, 1962 (Квантование гравитационного поля).
68. *Манделстам (S. Mandelstam).* Ann of Phys., 19, 25, 1962 (Квантование гравитационного поля в путезависимой формулировке).
69. *Марков М. А.* Ann Phys. (USA). 59, 109, 1970 (Замкнутая Вселенная и законы сохранения электрич., барионного и лептон. зарядов).
70. *Мизнер (С. W. Misner).* Rev. Mod. Phys., 29, 497, 1957 (Фейнмановское квантование ОТО).
71. *Мизнер (С. W. Misner).* Phys. Rev., 186, 1319, 1969 (Квантовая космология, часть I).
72. *Мироновский, В. Н.* ЖЭТФ, 48, 358, 1965 (Фоторождение гравитонов на спиновых частицах).
73. *Мироновский В. Н.* Астроном. журнал, 42, 977, 1965 (Гравитационное излучение двойных звезд).
74. *Мицкевич Н. В.* ЖЭТФ, 36, 1207, 1959 (Вакуумный нелинейный эффект в теории гравитации).
75. *Мицкевич (N. V. Mizkjewitsch).* Wiss. Zs. Fr. Schiller-Univ. Jena, Heft 4/5, 344, 1959 (К квантованию гравитационного поля).
76. *Мицкевич Н. В.* Тезисы докладов V Международной гравитационной конференции. Тбилиси, 1968, стр. 261 (Эффекты фермионно-электромагнитно-гравитационного взаимодействия).
77. *Мицкевич Н. В.* Физические поля в общей теории относительности. Изд-во «Наука», 1969.
78. *Мицкевич Н. В.* Эйнштейновский сборник, 1971. Изд-во «Наука», 1972 (Системы отсчета и конструктивный подход к наблюдаемому в ОТО).
79. *Озерной Л. М.* Письма в ЖЭТФ, 2, (2), 83, 1965 (О гравитационном излучении взрывного происхождения).
80. *Пантюшин А. А., Ливенцов Ю. В.* Статья в сб. «Гравитация и теория относительности», № 7. Казань, 1970, стр. 19 (Квантование свободного гравитационного поля).
81. *Пайерлас (R. E. Peierls).* Proc. Roy. Soc., A—214, 142, 1952 (Законы коммутации релятивистской теории поля).
82. *Пийр И. Р.* Труды Института физики и астрономии АН ЭССР, № 5, 41, 1957 (Квантовые гравитационные эффекты).
83. *Познанин П. Л.* Известия ВУЗов, Физика, № 10, 78, 1969 (Преобразование фотона в гравитон во внешнем магнитном поле и

- распад гравитона на пару фотонов во внешнем гравитационном поле).
84. *Пресс, Торн (W. H. Press, K. S. Thorne)*. Preprint. California, Inst. of Technology, Pasad, OAP-273, 1972 (Гравитационная волновая астрономия).
 85. *Пустовойт В. И., Герценштейн М. Е.* ЖЭТФ, **42**, 163, 1962 (Гравитационное излучение релятивистской частицы).
 86. *Редже (T. Regge)*. Nuovo Cim., **7**, 215, 1958 (Гравитационное поле и квантовая механика).
 87. *Риман Б.* Сборник «Об основаниях геометрии». Гостехиздат, 1956, стр. 324 (О гипотезах, лежащих в основании геометрии).
 88. *Де Саббата (V. De Sabbata)*. Mem. Soc. astron. ital., **41**, (1), 65, 1970 (Использование лунных масконов в качестве детектора гравитационных волн).
 89. *Салам, Стреду (A. Salam, J. Strathdee)*. Preprint, Internat. Centre for theoret. Physics, 1970. Miramare.— Trieste (Квантовая гравитация и расходимости в квантовой электродинамике).
 90. *Соколов А., Иваненко Д.* Квантовая теория поля. Гостехиздат, 1952.
 91. *Станюкович К. П.* Статья в сб. «Теория относительности и гравитация». М., 1971, стр. 3 (К вопросу о теории связи космологических и квантовых констант).
 92. *Торн К. С.* Тезисы докладов V Международной гравитационной конференции. Тбилиси 1968, стр. 175 (Теория относительности в астрофизике).
 93. *Тредер (H. Tredner)*. Fofnschritte der Physik, **11**, 81, 1963 (Гравитоны).
 94. *Уилер (J. A. Wheeler)*. La structure et l'Evolution de l'Univers. Editions Stoops. Brussels, 1958, p. 112.
 95. *Уилер Дж.* Гравитация, нейтрино и Вселенная. ИИЛ, 1962.
 96. *Утияма (R. Utiyama)*. Preprint. Departm. of Phys. Osaka University. (Квантовая теория и общая теория относительности).
 97. *Фаддеев Л. Д.* Тезисы докладов V Международной гравитационной конференции. Тбилиси, 1968, стр. 229 (Гамильтонова формулировка тяготения).
 98. *Фейнман (R. Feynman)*. Rev. Mod. Phys., **20**, 367, 1948 (сб. «Вопросы причинности в квантовой механике». ИИЛ, 1955), (Пространственно-временной подход к нерелятивистской квантовой механике).
 99. *Фейнман (R. Feynman)*. Acta Phys. Polon., **24**, 697, 1963 (Квантовая теория гравитационного поля).
 100. «Философские проблемы теории тяготения Эйнштейна и релятивистской космологии». Сборник. Изд-во «Наукова думка». Киев, 1964 (статьи М. Ф. Широкова, А. З. Петрова, Д. Д. Иваненко).
 101. *Хальперн (L. E. Halpern)*. Nuovo Cim., **27**, 894, 1963 (О роли гравитац. полей в некоторых процессах элементарных частиц).
 102. *Хальперн, Лорент (L. Halpern, V. Laurent)*. Nuovo Cim., **33**, 728, 1964 (О гравитационном излучении микроскопических систем).
 103. *Циммерман (E. J. Zimmerman)*. Amer. J. Phys., **30**, 97, 1962 (Макроскопическая интерпретация пространства-времени).

104. Чью (H. Y. Chew). Phys. Rev., 123, 1040, 1961.
105. Шварцман В. Ф. Письма в ЖЭТФ, 9, (5), 315, 1969 (О плотности реликтовых частиц с нулевой массой покоя во Вселенной).
106. Шкловский И. С., Кардашев Н. С. ДАН СССР, 155, 1039, 1964 (Гравитационные волны и «сверхзвезды»).
107. Шкловский И. С. Астрон. журнал, 46, 715, 1969 (Гравитационное излучение пульсара в Крабовидной туманности).
108. Эддингтон А. С. Теория относительности. ОНТИ, 1934.
109. Эйнштейн А. Собрание научных трудов, т. IV. Изд-во «Наука», 1967, стр. 223 (Физика и реальность, 1936).
110. Брагинский В. Б., Манукин А. Б., Попов Е. И., Руденко В. Н., Хорев А. А. Письма в ЖЭТФ, 16, № 3, 157, 1972 (Поиски гравитационного излучения веземного происхождения).
111. Мизнер (C. W. Misner). Phys. Rev. Lett., 28, № 15, 994, 1972 (Интерпретация наблюдений гравитационных волн).
112. Мизнер, Брауэр, Брилл, Хрцановский, Хагс, Перейра (C. W. Misner, R. A. Breuer, D. R. Brill, P. L. Chrzanowski, H. G. Hughes, C. M. Pereira). Phys. Rev. Lett., 28, № 15, 998, 1972 (Гравитационное синхротронное излучение в шварцшильдовской геометрии).
113. Тайсон, Дугласс (J. A. Tyson, D. H. Douglass). Phys. Rev. Lett., 28, № 15, 991, 1972 (Реакция гравитационной антенны на поляризованную гравитационную волну).
114. Цыган А. И. Письма в ЖЭТФ, 14, № 8, 465, 1971 (Гипотеза о гравитационном излучении быстро вращающейся нейтронной звезды).
115. Мироновский В. Н. Вестник МГУ, № 4, 20, 1965 (Гравитационное излучение твердых тел, связанное с тепловым движением решетчи).
116. Халилов В. Р., Лоскутов Ю. М., Соколов А. А., Тернов И. М. Phys. Lett., 42A, 43, 1972 (Поляризационные свойства гравитационного излучения).
117. Владимиров Ю. С., Антонов В. И. Препринт ИТФ—72—137 Р. Киев, 1972 (Метод кинематрических инвариантов и дираковский канонический формализм теории поля).
118. Владимиров Ю. С., Ефремов В. Н. В сб. «Гравитация и элементарные частицы». Атомиздат, 1973 г. (Метод дважды кинематрически инвариантных величин и гравитационные волны).
119. Владимирова Л. Ф., Владимиров Ю. С. Тезисы докладов III Советской гравитационной конференции. Ереван, 1972 г., стр. 379 (Возможные источники и ожидаемые потоки гравитонов вблизи Земли).
120. Фаддеев Л. Д. Теорет. и матем. физика, 1, 3, 1969 (Интеграл Фейнмана для сингулярных лагранжианов).
121. Фаддеев Л. Д. Сб. пленарных докладов III Советской гравитационной конференции. Ереван, 1973 г. (Метод континуальных интегралов и квантование гравитационного поля).
122. Де Витт (B. DeWitt). Phys. Rev., 162, 1195, 1239, 1967 (Квантовая теория гравитации).
123. Фаддеев, Попов (L. D. Faddeev, V. N. Popov), Phys. Lett., 25B, 30, 1967 (Квантование гравитации с помощью фейнмановских континуальных интегралов).
124. Коноплева Н. П., Попов В. Н. Калибровочные поля. Атомиздат, 1972.

Таблица 1

Возможные источники длинноволнового гравитационного излучения

№	Источники излучения	Литература	Параметры системы	Энергия излучения, эрг	Мощность излучения, эрг/сек	Расстояние до Земли, см	Поток на Земле, $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$	Длина волны, см	Длительность сигнала, сек
1	Двойная система Земля — Луна		$m_1 = 6 \cdot 10^{27}$ г $m_2 = 7 \cdot 10^{23}$ г $T \approx 27$ суток		$3, 2 \cdot 10^{10}$			$\sim 10^{16}$	Непрерывн.
2	Двойная система Солнце — Земля		$m_1 = 6 \cdot 10^{27}$ г $m_2 = 10^{33}$ г $T \approx 365$ суток		$5, 6 \cdot 10^5$			$\sim 10^{17}$	Непрерывн.
3	Двойная система Солнце — Юпитер		$m_1 = 10^{33}$ г $m_2 = 2 \cdot 10^{30}$ г $T \approx 12$ лет		$7, 6 \cdot 10^{11}$			$\sim 10^{13}$	Непрерывн.
4	Двойная звезда WZ созвездия Стрела	[17]	$m_1 = 0,6 M_{\odot}$ $m_2 = 0,03 M_{\odot}$ $T \approx 81$ мин		$3, 5 \cdot 10^{29}$	$3 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$\sim 10^{14}$	Непрерывн.
5	Двойная звезда iBoo	[17]	$m_1 = 1,35 M_{\odot}$ $m_2 = 0,68 M_{\odot}$ $T \approx 6,4$ часа		$1, 9 \cdot 10^{30}$	$3, 8 \cdot 10^{19}$	10^{-10}	$\sim 10^{14}$	Непрерывн.
6	Кратные системы всей нашей Галактики	[73]	Основной вклад дают системы типа WUMa		10^{38}	Произвед. усредн. $\sim 10^{25}$	10^{-9}	$3, 9 \cdot 10^{14}$ $T \approx 3, 6$ ч.	Непрерывн.
7	Столкновения звезд в ядрах радиогалактик	[79]	Полная энергия взрыва $\sim 10^{51}$ эрг	$\sim 10^{39}$	$4 \cdot 10^{40}$		10^{-11}	$\sim 10^9$	$3 \cdot 10^{-2}$ 1 столкнов. за 100 лет

Таблица 1 (продолжение)

№	Источники излучения	Литература	Параметры системы	Энергия излучения, эрг	Мощность излучения, эрг/сек	Расстояние до Земли, см.	Поток на Земле, эрг/см ² сек	Длина волны, см	Длительность сигнала, сек
8	Взрывы сверхновых и новых звезд (II тип)	[79]	Полная энергия взрыва $\sim 10^{52}$ эрг	$\sim 10^{44}$	$4 \cdot 10^{41}$	$\sim 10^{25}$	10^{-10}	$\sim 10^{13}$	$\sim 10^3$
9	Взрыв (магнитно-гидродин.) квазара ЗС 273	[79]	Полная энергия взрыва $\sim 10^{55}$ эрг	$\sim 10^{53}$	$4 \cdot 10^{45}$	$\sim 10^{28}$	10^{-10}	$\sim 10^{18}$	10^8
10	Взрыв галактики М 82 (NG С 3034)	[79]	Полная энергия взрыва $\sim 10^{55}$ эрг	$\sim 10^{45}$	$4 \cdot 10^{37}$	$\sim 10^{25}$	10^{-13}	$\sim 10^{18}$	10^8
11	Превращения галактик	[84]						$\sim 10^{23}$	Непрерывн.
12	Пульсар в Крабовидной туманности	[407]	$R \simeq 10^3$ см $M \sim M_{\odot}$		$\sim 10^{38}$		10^{-7}	60 эц	Непрерывн.
13	Вращающаяся коллапс. сверхзвезда	[406]	$M \simeq 10^8 M_{\odot} = 10^{41} M_{\oplus}$ $l \simeq 10^{14}$ см $\omega \simeq 3 \cdot 10^{-4}$ сек ⁻¹		$10^{54} \div 10^{53}$	$\sim 10^{27}$	$1 \div 100$	$\sim 10^{14}$	
14	Анизотропный коллапс сверхзвезды	[406]			$7,5 \cdot 10^{57}$	$\sim 10^{27}$	10^3	$\sim 10^{14}$	
15	Радиальное падение звезды на скопление спир. квазар	[50, 51]	$m \simeq 1 M_{\odot}$ $M \simeq 100 M_{\odot}$	$\sim 10^{50}$		$\sim 10^{27}$	0,7	$\sim 10^6$	$\sim 10^{-4}$
16	Падение звезды по спирали на скопление спир. объект	[50, 51]	$m \simeq 1 M_{\odot}$ $M \simeq 100 M_{\odot}$	За 1 оборот		$\sim 10^{27}$	10	$\sim 10^6$	

Таблица 1 (окончание)

№	Источники излучения	Литература	Параметры системы	Энергия излучения, эрг	Мощность излучения, эрг сек	Расстояние до Земли, с.м	Поток на Земле эрг / с.м ² сек	Длина волны, с.м	Длительность сигнала, сек.
17	Черная дыра в центре нашей Галактики	[84]	$M \simeq 10^5 \div 10^8 M_{\odot}$ падает звезда $1 M_{\odot}$	10^{51} 10^{45}		$2,5 \cdot 10^{22}$	10^{-8}	$10^{11} \div 10^{13}$	$10 \div 10^4$
18	Двойная нейтронная звезда	[19, 47]	$M_{1,2} \simeq 1 M_{\odot}$; $R \simeq 10^6$ с.м		За несколько сек до столкновения $10^{52} \div 10^{55}$	В центре нашей Галактики	$10^6 \div 10^9$	10^3 эц	~ 2
19	Лобовое столкновение нейтронных звезд	[19]	$M_1 \sim M_2 \sim 10 M_{\odot}$ $R \sim 3 \cdot 10^6$ с.м $M \gtrsim 0,5 M_{\odot}$	$3 \cdot 10^{53}$		В центре нашей Галактики	10^{11}	10^3 эц	10^{-4}
20	Несферическое колебание нейтронной звезды	[19, 92]		В импульсе 10^{52}		В центре нашей Галактики	10^6	10^3 эц	~ 2
21	Быстровращающаяся нейтронная звезда при переходе от одной тессеральной фигуры к другой	[114]	$M \sim 11 \cdot 10^{33}$ г $\omega \sim 4,7 \cdot 10^3$ сек ⁻¹	$2 \cdot 10^{51}$	10^{55}	В центре нашей Галактики	10^{10}	1500 ± 300 эц	$3 \cdot 10^{-8}$

**МОЛЧАНИЕ ПУАНКАРЕ
И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА*
Роль теории и эксперимента в физике Пуанкаре**

Введение

Документы свидетельствуют [1], что Анри Пуанкаре никогда не высказывался публично по поводу специальной теории относительности (СТО). Так как большинство материалов личного архива Пуанкаре недоступно, его отношение к работам Эйнштейна и его молчание по этому поводу остаются довольно загадочными. Почти наверняка Пуанкаре был знаком с работами Эйнштейна по СТО.

Во-первых, он очень хорошо владел немецким языком; он обучился ему еще юношей, когда в 1870 г. его родной город Нанси был оккупирован немцами [2]. Во-вторых, ему часто приходилось докладывать членам Academie des Sciences о новых работах по электродинамике, выполненных в Германии [3]. В высшей степени невероятно, что он не заметил резюме первой работы Эйнштейна по СТО [4] или последующих статей Эйнштейна по тому же вопросу, в особенности же тех из них, которые были переведены на французский язык: ведь все эти статьи попадали прямо в области его собственных интересов в теоретической физике [5].

В предыдущей статье [6] я высказал мнение, отличное от мнения многих специалистов, о том, что Пуанкаре не только не предвосхитил Эйнштейна в развитии СТО, но что фактически Пуанкаре был вовсе не заинтересован в развитии теории относительности; его помыслы были направлены на развитие электронной теории материи и излучения. В настоящей статье я намерен углубить и обосновать эти утверждения, предложив возможное объяс-

* S. Goldberg. Poincaré's Silence and Einstein's Relativity. The role of Theory and Experiment in Poincaré's Physics. The British Journal for the History of Science, vol. V, No 17, 73 (1970).

нение молчанию Пуанкаре по поводу работ Эйнштейна. С этой целью я хочу проанализировать три основных требования, которые Пуанкаре предъявил к любой «добротной» научной теории: простоту, гибкость и естественность.

I. Требования, предъявляемые Пуанкаре к научной теории

A. Простота и индуктивность

Как и большинство ученых любого поколения, Пуанкаре считал, что природа должна описываться простыми законами. Само представление о простоте в применении к науке почти всегда оказывается расплывчатым [7], и применение этого термина Пуанкаре лишь подтверждает это правило. Будучи конвенционалистом, Пуанкаре не верил в однозначное решение физических проблем. Свидетельством этому является, без всякого сомнения, примечание при корректуре, которым он сопровождает Введение к *Electricité et Optique*; там написано, что любая механическая система, к которой применим принцип сохранения энергии, допуская одно теоретическое объяснение, допускает также бесчисленное множество таких объяснений, из которых можно выбрать любое [8].

Именно здесь простота должна была играть определенную роль для отделения «хороших» теоретических объяснений от «плохих».

«Быть может, придет день, когда физики потеряют всякий интерес к этим вопросам [выбора], которые, по-видимому, недоступны для позитивных методов, и оставят их метафизикам. Этот день еще не пришел: человеку не такто просто отказаться навсегда от возможности понимания сущности вещей... Таким образом, выбор обуславливается соображениями, в которых идиосинкрзия * индивидуума является высшим судьей. Некоторые решения будут отвергнуты всеми, как слишком сложные, тогда как другие привлекут всех своей простотой» [9].

* Идиосинкрзия — повышенная чувствительность отдельных лиц к определенным веществам, воздействиям, а также интеллектуальное отвращение. (*Прим. перев.*).

Из высказывания Пуанкаре можно понять, что он допускает минимальную степень простоты, присущую теории, которая делает конкретные теории приемлемыми для всех.

Но не просто эстетическая привлекательность простоты придавала этому требованию особую ценность в глазах Пуанкаре. Когда он отрицал, что природа обязательно должна быть простой [10], предположение о том, что законы природы должны быть простыми, рассматривалось им как необходимость, от которой невозможно полностью отказаться, так как иначе научные исследования оказались бы невозможными [11]. Фактически Пуанкаре утверждал почти что в качестве рабочего правила, что каждый закон должен оказаться простым, если только противоположное утверждение не обнаружит такого свойства [12]. Такая позиция по отношению к научным теориям и законам полностью совместима с той точкой зрения, что научные теории представляют собой конвенции; и действительно, Пуанкаре защищал именно эту точку зрения, рассматривая евклидову геометрию и ее использование в физическом мире [13].

Однако, с точки зрения Пуанкаре, простота возникает не только как следствие деятельности человеческого разума. Она навязывается нам самой природой. Законы природы, подчеркивает он, основаны на фактах, которые имеют большую вероятность своего повторения, а из всех возможных фактов интересными являются те, которые повторяются. Но такие факты имеют большую вероятность быть простыми, потому что, чем проще факт, тем более вероятно его повторение. Это просто вопрос статистической вероятности.

Хотя Пуанкаре признавал наличие отдельного вопроса об определении «простоты», он говорил о том, что сама природа, действуя по закону случая, достаточно проста. У него, однако, не было математической модели для подкрепления своих рассуждений [14]. Его мысль можно понять следующим образом. Для Пуанкаре некоторые факты представляли интерес именно потому, что они повторяются снова и снова, потому что как раз на таких фактах основаны законы и научные теории. Но эти факты будут наиболее простыми, потому что — из всех возможных фактов — простейшие факты имеют наибольшую статистическую вероятность для повторения.

Слово «факт» осталось у Пуанкаре не определенным. Наиболее вероятными интерпретациями этого слова будут

«явление», «событие» или «ощущение». Примеры использования этого слова у Пуанкаре иллюстрируют неотчетливость его значения: «Мы не можем знать всех фактов, поскольку практически число их бесконечно...».

«Наиболее интересными фактами являются те, которые могут быть использованы неоднократно». «Именно с повторяющихся фактов нам следует начать...» [15].

Несмотря на свою конвенциалистскую позицию, Пуанкаре верил, что законы природы возникают как следствие того, что говорит нам природа; или скорее — чтобы быть более точными — законы природы — как результат того, что мы предпочитаем услышать от природы. Единственная конвенция, которая здесь возникает, относится к личной идиосинкразии в понимании «простого». Мы уже имели возможность указать [16], что, касаясь физики, Пуанкаре вовсе не придерживается своих конвенциалистских воззрений. Но фактически можно обнаружить отступления от позиций конвенциализма даже в его сочинениях более философского толка и — вполне в духе физики Пуанкаре — эти отклонения показывают, что время от времени в нем пробуждается философ-реалист.

Пуанкаре различает три вида гипотез:

«Некоторые из них поддаются проверке и, будучи однажды подтвержденными опытом, становятся весьма плодотворной истиной; другие могут быть полезными для нас, воплощая в себе некоторые идеи; и наконец... некоторые представляют собой только кажущиеся гипотезы и сводятся просто к замаскированным определениям или конвенциям. Гипотезы последнего типа особенно часто встречаются в математике и тех науках, в которых она используется» [17].

Наука, которую особенно выделял Пуанкаре и в которой математика играла особую роль, — это механика. Хотя он и понимал, что механика куда более тесно связана с экспериментом, чем чистая математика, он все же думал, что она носит в себе «конвенциальный характер геометрических постулатов» [18].

«Но теперь мы обращаемся к физическим наукам, названным вполне подходящим образом, и здесь картина меняется. Мы сталкиваемся уже с гипотезами иного рода и полностью осознаем, насколько они плодотворны... Метод физических наук опирается на индукцию, которая

научила нас ожидать повторения явления, если обстоятельства, обуславливающие его появление, воспроизводятся» [19].

Если роль простоты сводилась к тому, чтобы отфильтровывать наиболее вероятные явления, то роль обобщения, согласно Пуанкаре, также не вызывает сомнения:

«Эксперимент — это единственный источник истины. Только он один способен открыть нам нечто новое: только на него можно положиться. Эти два обстоятельства не вызывают сомнений. Но если эксперимент — это все, то какая же роль остается математической физике? Что общего у экспериментальной физики с таким помощником — мало того, помощником, который представляется бесполезным и даже опасным?»

«Но вовсе недостаточно просто наблюдать; нужно использовать наши наблюдения, и для этой цели мы должны делать обобщения».

«Всякое обобщение представляет собой гипотезу. Поэтому гипотезы играют существенную роль, которую никто никогда не оспаривал. Единственное, что здесь важно, так это подвергнуть гипотезу проверке, как можно скорее. Стоит ли говорить о том, что если гипотеза не выдерживает такой проверки, ее следует оставить без колебаний» [20].

Поэтому не вызывает удивления следующий факт. Когда Кауфман сообщил в 1906 г., что его эксперименты по измерению массы быстро движущихся электронов не соответствуют теории Лоренца, Пуанкаре тотчас уже усомнился в справедливости принципа относительности [21]. Если и существовали какие-либо сомнения относительно роли эксперимента в физике и — в частности — относительно роли экспериментов Кауфмана, Пуанкаре пытается рассеять их в следующих строках, относящихся к 1908 г.: «Один только эксперимент Кауфмана с лучами радия революционизировал сразу механику, оптику и астрономию» [22].

Было бы чрезмерным упрощением, однако, без оговорок записать Пуанкаре в чистые эмпирики, которые целиком полагаются на индукцию, чтобы перекинуть мост между экспериментальными данными и теорией. Пуанкаре ясно осознавал, например, что предвзятое мнение каждого отдельного ученого весьма важно для построения теоретического объяснения [23]. И он продолжает ту

же мысль, в тех же самых местах, где он настаивает на первенствующей роли опыта, что теории возникают как свободные творения человеческого разума и что экспериментальные свидетельства могут направить нас тем вернее, чем меньше возможностей выбора у нас будет.

В связи с этим очень трудно понять, как мог Пуанкаре утверждать, что один-единственный эксперимент оказался способным революционизировать какую-то науку. Я беру на себя смелость утверждать, что все это представляет нам еще один пример блужданий Пуанкаре между конвенционализмом и реализмом. Но такая позиция Пуанкаре становится еще более загадочной в свете его убеждения в том, что наука всегда развивалась и должна развиваться только постепенно.

В. Гибкость и постепенность

Холтон определяет постепенность как явную тенденцию в мышлении Пуанкаре, когда он сталкивался с проблемами, которые привели физиков в конечном счете к построению СТО [24].

«Постепенность Пуанкаре очень подходила ему и вела к успеху, в особенности в той работе, которую он предпочитал... Есть люди, которым удается поднять фундаментальные проблемы, долго не сходявшие с повестки дня, на более высокую ступень совершенства. Работы Пуанкаре в физике носили... именно такой характер. Его сила состояла в том, что он снова и снова спасал физику Ньютона, Максвелла, Лоренца» [25].

Примеры такой постепенности разбросаны по сочинениям Пуанкаре. Холтон приводит два примера, один из которых представляет особый интерес. В одной из своих речей в 1904 г. Пуанкаре предлагает свою программу построения приемлемой электродинамики движущихся тел:

«Следовательно, начнем с теории Лоренца, поворошим ее хорошенько и, мало-помалу видоизменяя ее, быть может, приведем все в порядок» [26].

Такая позиция по отношению к изменениям, вносимым в физические теории, несовместима с любой мыслью о решающем эксперименте (*experimentum crucis*), и все же Пуанкаре, судя по всему, хочет сохранить и то и другое одновременно, не чувствуя, по-видимому, никаких

затруднений. С другой стороны, в ранних размышлениях Пуанкаре можно найти корни и мотивы для его требования постепенного изменения теорий. «Хорошие теории», писал Пуанкаре в 1900 г., «гибки».

«Те из них, которым придана жесткая форма и которые не могут быть подвергнуты исследованиям без их разрушения, фактически мало жизнеспособны. Но если теория представляет нам лишь определенные важные связи, ей можно придать тысячи различных форм, и она сможет противостоять всем испытаниям, тогда как то, что составляет ее сущность, останется неизменным...

Лучшие теории сохраняют свою силу, несмотря на все возражения; они добиваются триумфа даже над самыми серьезными возражениями, но этот триумф заставляет их претерпевать некоторые изменения.

Таким образом, возражения скорее идут на пользу теории, чем во вред ей, потому что позволяют раскрыть всю внутреннюю истину, заложенную в теории. Такой теорией является и теория Лоренца...» [27].

Едва ли стоит сомневаться в том, что Пуанкаре включил бы в свой список «хороших» теорий и ньютоновскую теорию. Не кто иной, как Пуанкаре, как это было отмечено Холтоном, в 1889 г. занялся проблемой трех тел и считал весьма вероятным, что ньютоновская теория сама по себе может объяснить все астрономические явления. Именно за эту работу Пуанкаре получил свою первую большую премию [28]. Холтон цитирует Чарльза Нордмана, характеризующего результат Пуанкаре 1889 г. как «кульминацию всех исследований за последние три столетия». Холтон указывает также, что много лет спустя ученик и друг Пуанкаре — Ланжевен — вспоминал о том, как был обеспокоен Пуанкаре в 1904 г. возможностью отказа от ньютоновской физики в пользу новой теории [29]. В 1908 г., даже после того как он затратил столько лет на совершенствование теории Лоренца, которая должна была дать объяснение всем физическим явлениям, Пуанкаре совсем не хотелось признаться, что ньютоновскую схему следует оставить.

«Следует ли нам сейчас отказаться от общих принципов динамики, которые со времен Ньютона служили основой физической науки и казались непреложными, или по крайней мере значительно изменить их? Именно этот вопрос задают многие в последние годы. Если слушать

этих людей, открытие радия пошатнуло то, что рассматривалось в качестве наиболее обоснованных доктрин — невозможность трансмутации металлов, с одной стороны, и, с другой стороны, — фундаментальные постулаты механики. Возможно, что в слишком большой спешке они считают последние открытия надежно установленными и пошатнувшими наших вчерашних идолов; быть может, стоит немного обождать и дожждаться большего числа более убедительных экспериментов. Ниоткуда не следует, что мы можем сразу приобретать новые доктрины и аргументы настолько весомые, что на них можно без колебаний опереться» [30].

Этот отрывок иллюстрирует не только «постепенный» подход Пуанкаре, но также и то значение, которое он придает индукции. Изменения, если уже в них возникает необходимость, должны быть основаны «на большем числе более убедительных экспериментов».

Развивая эту тему в следующем году [31], Пуанкаре пишет, что было бы преждевременным, по его мнению, рассматривать классическую механику как окончательно непригодную. Во всяком случае, замечает он, эта механика останется правильной для тех явлений, в которых участвуют тела со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света. Может случиться, что соперник классической механики (теория Лоренца) «одержит триумф в ближайшие годы». Если такое случится, то Пуанкаре опасается, что дело научного образования во Франции столкнется с серьезными трудностями, потому что многие преподаватели не захотят больше знакомить своих учеников с элементарной механикой. Они заменят классическую механику на новую механику, в которой масса и время уже не имеют такого смысла, который им придавали длительное время. Опасения Пуанкаре по этому поводу оказались беспочвенными; а может быть, именно его опасения были приняты во внимание в последующие годы. Лемере жаловался в 1924 г. на то, что нет даже никаких признаков СТО в системе французского образования на каком-либо уровне [32]. И не далее как в 1955 г. Арцели мог написать:

«Во Франции есть несколько более или менее общих вариантов изложения релятивистской теории, и большинство из них обращено к очень ограниченной аудитории (элементарное изложение или — напротив — крайне математизированное). За очень редким и очень похваль-

ным исключением преподавание основ показывает невежество наших Faculties в том, что касается теории относительности. Программа по механике не предусматривает, вообще говоря, ни одного специального урока на механику больших скоростей (а квантовой механике не передается почти ничего). Все излагается так, как излагалось в начале нашего столетия, злой гений заморозил французскую механику (ту, которой обучают) в статую из тематической магмы...» [33].

Так или иначе даже в 1909 г. Пуанкаре не хотел признать, что «новая механика» получила «надежные» обоснования*. Его колебания, вне всякого сомнения, — большие, чем это было в 1905 г., — были навеяны заявлениями Кауфмана в 1906 г. о том, что его данные не подтверждают теорию Лоренца. Настойчивые требования Пуанкаре о проверке и та серьезность, с которой он воспринял результаты Кауфмана, являются лишними доказательствами индуктивного подхода Пуанкаре — подхода, в котором конвенционализм играл столь малую активную роль для физики. (По поводу экспериментов Кауфмана Эйнштейн отозвался только год спустя. Почти мимоходом он замечает, что ничего не видит порочного в технике экспериментов Кауфмана или его расчетах; тем не менее он отвергает результаты, поскольку только его теория является всеобъемлющей. Как это неоднократно случалось, инстинкт Эйнштейна его не обманывал, см. стр. 355.)

С. Естественность и нарастание гипотез

Когда Пуанкаре подчеркивал важность требования, чтобы всякая «хорошая» научная теория была в высшей степени гибкой — настолько гибкой, чтобы она могла быть легко видоизменена при столкновении с противоречащими ей случаями, — он придавал также немалое значение качеству, которое могло служить противовесом стремлению к гибкости, именно — естественности. Почти все без исключения из числа тех, кто оценивал вклад Пуанкаре в электродинамику, отмечали, что он фактически с самого начала настаивал на том, чтобы Лоренц изъясился

* Холтон указывает, что подобного рода утверждения Пуанкаре повторял и в последний год своей жизни, т. е. в 1912 г. См. [1], стр. 262, 263.

своей теории все то, что Пуанкаре считал *ad hoc* гипотезами [34]. Но что почти во всех случаях осталось незамеченным, так это то, что столь внимательное отношение Пуанкаре к *ad hoc* гипотезам непосредственно вытекало из его убеждения в том, что физические теории должны быть естественны. Говоря о силе теории Лоренца, сумевшей объяснить зееман-эффект, Пуанкаре уже в 1899 г. замечает, что некоторые аспекты теории довольно искусственны.

«Каким бы искусственным ни казался нам характер всех этих гипотез, нам следует сейчас до поры до времени придерживаться обобщенной теории Лоренца, которая только одна в настоящее время позволяет установить связи между наблюдаемыми фактами» [35].

В этом отрывке Пуанкаре имел в виду тот факт, что невозможно объяснить все тонкости эффекта Зеемана, предполагая, что электрон представляет собой точечную массу, независимую от всех других электронов. К 1900 г. внимание Пуанкаре стало концентрироваться на предположениях, которые нужно было ввести, чтобы сделать теорию Лоренца совместимой с опытами второго порядка по обнаружению движения эфира (лоренцово сокращение).

«Должно ли быть новое правило левой или правой руки, новые гипотезы для каждой аппроксимации? Очевидно, нет: хорошая теория должна открывать возможность для проявления принципа относительности с первого толчка, во всей его строгости. Теория Лоренца пока этого не дает... Остается только надеяться на полностью удовлетворительное выполнение этого принципа без слишком глубокой модификации» [36].

Как мы уже говорили, Пуанкаре повторил эту программу в 1904 г., в том самом году, когда Лоренц опубликовал то, что могло рассматриваться как последнее слово в теории электронов, — теорию, описывающую явления в системах, движущихся относительно друг друга [37]. Во введении к этой работе Лоренц уделяет особое внимание критическим замечаниям Пуанкаре.

«Пуанкаре возражал против существующей теории электрических и магнитных явлений в движущихся телах потому, что для объяснения отрицательного результата опыта Майкельсона требуется введение новых гипотез и что подобная необходимость может возникнуть каждый раз, когда появятся новые факты. Слов нет, необходи-

мость изобретения специальных гипотез для каждого нового экспериментального результата представляется несколько искусственной... Я думаю, что сейчас уже можно рассматривать весь вопрос с лучшими результатами» [38].

Но, оказывается, Лоренц не только сохранил в качестве гипотезы лоренцово сокращение, но, — как заметил Холтон, — ввел еще по крайней мере десять других ad hoc гипотез [39].

Замечательно то, что теперь Пуанкаре был удовлетворен. В 1905 г. Пуанкаре, припоминая свои прежние возражения по поводу лоренц-фитцджеральдовского сокращения, говорит уже о том, что работа Лоренца 1904 г., цитата из которой была только что приведена, преодолела все выставленные им возражения [40]. Почему он не остановился конкретно на тех пунктах, которые его удовлетворили? Это, по-видимому, объясняется тем, что Лоренц счел уместным: 1) распространить гипотезу о лоренцовом сокращении на все тела, движущиеся относительно мирового эфира, 2) перенести уравнения преобразования на случаи, выходящие за рамки электродинамики [41]. То, что Лоренц сделал оба эти шага «декретным путем», кажется, нимало не встревожило Пуанкаре.

Ключ к пониманию чувства удовлетворенности у Пуанкаре, по-видимому, заключен в том, что безотносительно к тому, как он это сделал, Лоренц фактически сумел обобщить теорию. Пуанкаре почувствовал, что теперь уже теория стала естественной, в том смысле, что она стала применима ко всем явлениям. Можно даже обнаружить, что после 1905 г. Пуанкаре неизменно трактует лоренцово сокращение как один из фундаментальных постулатов теории.

Мы уже говорили о том, что Пуанкаре рассматривал теорию Лоренца как достаточно гибкую, чтобы удовлетворить его требованиям к хорошей теории. Без сомнения, Пуанкаре должен был считать эту теорию также простой. Допустив, что теория гибка и естественна, и считая сверх того, что она описывает явления, которые регулярно повторяются, — Пуанкаре, по всей вероятности, должен был считать, что эта теория удовлетворяет его требованию простоты.

II. Молчание Пуанкаре по поводу специальной теории относительности Эйнштейна

Я перехожу теперь к загадочному молчанию Пуанкаре по поводу вклада Эйнштейна в электродинамику движущихся тел. Одно и единственное замечание Пуанкаре в литературе в связи с работами Эйнштейна представляет собой ничем не вызванную реплику относительно эйнштейновской теории фотоэффекта: Пуанкаре показалось, что это был не очень простой метод анализа экспериментальной ситуации [42].

А. Зависть в качестве мотива поведения Пуанкаре

Можно подумать, что Пуанкаре действовал из зависти, считая, что Эйнштейн получил признание за ту самую работу, которая была им, т. е. Пуанкаре, уже сделана раньше. По-видимому, Кешвани развивает ту точку зрения, что Пуанкаре действительно должен был бы получить признание, по крайней мере за обобщение принципа относительности, если не больше [43]. Он не доверяет заявлению Эйнштейна о том, что тот не видел работу Лоренца 1904 г. или последующих работ Пуанкаре и говорит, с одной стороны, что по отношению к Лоренцу Эйнштейн просто спутал, а — с другой стороны, — по отношению к Пуанкаре, что сам Эйнштейн признал, что он еще судентом прочел «Science and Hypothesis» [44].

Заглянув в прошлое, можно сейчас утверждать, что если бы Пуанкаре в свое время разделял бы взгляды, которых придерживается сейчас Кешвани, то он ошибался бы. Обстоятельства говорят довольно определенно в пользу того, что Эйнштейн мог и не видеть работы Лоренца 1904 г. Кроме того, читать книгу Пуанкаре «Science and Hypothesis» 1902 г. и «последующие работы Пуанкаре» — это существенно разные вещи [45]. Относительно того, что Эйнштейн был знаком с работой Лоренца, можно привести два соображения, чтобы опровергнуть утверждение Кешвани о том, что Эйнштейн перепутал: во-первых, как я уже подчеркивал в другой работе [46], Эйнштейн и Лоренц занимались построением двух различных теорий. Эйнштейну было вовсе не обязательно читать работу Лоренца, чтобы развивать свою теорию. Во-вторых, работа Лоренца 1904 г. получила — в лучшем случае — не очень

широкое распространение. Так, например, год спустя после ее публикации Лауэ, находившийся в мировом физическом центре (Институт кайзера Вильгельма в Берлине), с большим трудом получил оттиск этой работы [47]. Поэтому более чем вероятно, что Эйнштейн, работавший в Патентном бюро в Берне, в 1905 г. не видел работы Лоренца 1904 г. вплоть до публикации своей собственной статьи по СТО.

Но даже и не занимаясь историческими изысканиями, мало вероятно, что Пуанкаре овладело чувство ревности к Эйнштейну. Все, что нам известно о характере Пуанкаре, противоречит столь мелким мотивам, как зависть. Снова и снова люди, которые знали его в качестве коллеги [48], учителя [49] или, наконец, как великого ученого издали [50] — говорят о нем, как о человеке высокой интеллектуальной целостности, как о человеке с необыкновенным великодушием по отношению к другим и, наконец, как о человеке, весьма мало интересующемся вопросами приоритета.

В. Главный мотив — тривиальность теории Эйнштейна

Кешвани, по-видимому, убежден в том, что лоренцовские формулы преобразования сами по себе уже и есть теория относительности [51], что Пуанкаре — в противоположность Лоренцу — отнюдь не сочувствовал эфиру и что главный новый вклад Эйнштейна состоял в том, что он «недвусмысленно утверждал, что представление об эфире излишне, если справедлив принцип относительности... Однако он мог поступить так потому, что он пренебрег трудностями, с которыми столкнется принцип относительности (или, возможно, просто их недооценил), когда рассматривается неравномерное и вращательное движение» [52].

В отличие от Кешвани, я не придерживаюсь тезиса о том, что формальные аспекты научной теории как раз и есть суть самой теории. То, что Лоренц и Эйнштейн пришли к одним и тем же формулам преобразования, вовсе не говорит о том, что их теории совпадали. Не имеет особого значения также и то, что Пуанкаре обнаружил групповые свойства преобразований Лоренца, или то, что из формул преобразования следует, что скорость света является предельной скоростью [53]. Пуанкаре (и Лоренц) и Эйнштейн делали разные вещи, разрабатывали

различные теории, исходя из различных исходных точек зрения [54].

В действительности эфир составлял одно целое с электронной теорией материи, как это ясно понимал Пуанкаре [55], а электронная теория ставила своей целью охватить всю физику. После 1904 г. в обзоре работ Лоренца Пуанкаре отметил, что, по его мнению, поставленная цель в сущности достигнута [56]. Имея в виду интерес Пуанкаре к всеобъемлющей электронной теории, которая использовала бы индуктивный принцип относительности, вполне разумно допустить, что он мог рассматривать теорию относительности Эйнштейна как тривиальную и неполную — как несущественно малую часть большей теории, которую он и Лоренц уже завершили.

Вероятно не только то, что Пуанкаре считал вклад Эйнштейна тривиальным [57]; возможно, что он не рассматривал теорию Эйнштейна как хорошую теорию. Пуанкаре придерживался в своих работах представления об абсолютном пространстве, независимо от того, доступно оно для наблюдения или нет. И хотя он понимал, что наблюдатели в различных системах отсчета найдут одно и то же значение для скорости света, это соглашение, эта инвариантность были для Пуанкаре всего лишь искусством измерения. По мнению Пуанкаре, была одна привилегированная система отсчета, в которой скорость света действительно была постоянной; такая система отсчета была единственной [58]. Такая точка зрения гармонировала с верой Пуанкаре в постепенность, потому что она означала, что классический закон сложения скоростей (получаемый на основе ньютоновских представлений) был бы справедливым, если бы не было лоренцова сокращения. Эйнштейн же, с другой стороны, сразу же отказался от классического закона сложения скоростей. Каким же искусственным должен был показаться Пуанкаре второй постулат Эйнштейна (инвариантность скорости света) с его исходных точек зрения о естественности теории и *ad hoc* гипотезах!

Логическая жесткость работы Эйнштейна, без сомнения, была вызовом представлениям Пуанкаре о гибкости научных теорий. Кроме всего прочего, в теорию относительности входили всего лишь два постулата, причем ни один из них нельзя было существенно изменить без того, чтобы фундаментально не изменить выводы теории,

И, наконец, Пуанкаре не оставлял надежды на то, что такие эксперименты, как опыт Майкельсона—Морли и опыты Кауфмана, можно будет совместить с ньютоновскими представлениями. Если это случится, то вся эйнштейновская схема, которая отвергает ньютоновские представления о пространстве и времени (чего теория Лоренца не делала), будет оставлена. Это была как раз такая теория, которой не хватало гибкости, чтобы пережить столь яростные атаки. Именно такие теории Пуанкаре всегда отвергал.

Возможно также, что Пуанкаре считал, что работе Эйнштейна не хватает простоты. Она не начиналась с обобщения простых «фактов» (в том смысле, какой придавал Пуанкаре слову «факт»), как это было в теории Лоренца. Лоренц, например, начинал с результата опыта Майкельсона—Морли, предполагая далее лоренцовское сокращение. Эйнштейн начинает с пересмотра понятия одновременности, отмечает некоторые странные симметрии в природе и очень редко прибегает к каким-либо экспериментальным данным и совсем не касается эксперимента Майкельсона — Морли. Эйнштейн иногда даже идет настолько далеко, что просто игнорирует подобные «факты». В 1907 г. Эйнштейн, с одной стороны, говорит о том, что он не видит ничего ошибочного в расчетах Кауфмана, и далее указывает на то, что он не знает, были ли полученные Кауфманом результаты для массы движущегося электрона следствием систематических экспериментальных ошибок работы Кауфмана или же следствием дефектов теории относительности. С другой стороны, Эйнштейн не хочет допустить, чтобы «факты» экспериментов Кауфмана оказали на него воздействие; в конце концов он отвергает результаты Кауфмана, поскольку они означали бы принятие менее удовлетворительной теории [59]. Как мы уже видели, — в противоположность этому, — Пуанкаре размышлял над тем, не означают ли результаты Кауфмана, что принцип относительности должен быть исключен из теории Лоренца.

По всем трем статьям, а именно — простоте, гибкости и естественности, — теория относительности Эйнштейна выглядела в глазах Пуанкаре явно недостаточной, причем в такой степени, что он просто не счел нужным о ней упомянуть. Теория Лоренца тщательно строилась в период с 1892 по 1904 г. под мягкой направляющей критикой со

стороны Пуанкаре. Для Пуанкаре теория Эйнштейна казалась лишь слабой попыткой объяснить небольшую часть явлений, полностью охватываемых теорией Лоренца.

Литература и примечания

1. *G. Holton*. On the Thematic Analysis of Science: The Case of Poincaré and Relativity, in *Mélanges Alexandre Koyré* (Paris, Hermann, 1964), 267.
2. *G. Darboux*. Éloge historique d'Henri Poincaré, *Oeuvres d'Henri Poincaré* (II vols, Paris: Gauthier-Villars, 1934—54), vol. II, pp. VII—LXX, XV.
3. *Ibid.*, XIII.
4. *Journal de physique*, V (1906), 493.
5. *A. Einstein*. Sur la théorie des quantités lumineuses et la question de la localisation de l'énergie électromagnétique. *Arch. des sci. phys. et nat.* XXIX (1910), 525—528; *A. Einstein*. Le principe de la relativité et ses conséquences dans la physique moderne. *Ibid.*, 5—28, 125—144.
6. *S. Goldberg*. Henri Poincaré and Einstein's Theory of Relativity. *Amer. J. Phys.*, XXXV (1967), 934—944.
7. *Ch. P. Frank*. *Philosophy of Science* (Englewood-Cliffs: Prentice Hall, 1957), 350 ff. Франк великолепно показал причудливые ловушки, в которых оказываются все те, кому хочется воспользоваться понятием простоты применительно к науке. *M. R. Cohen*. Reason and Nature (2nd edn., New York: Harcourt Brace, 1931), 177 ff; *M. Bunge*. The Myth of Simplicity (Englewood-Cliffs: Prentice Hall, 1963), chaps. VI—VII.
8. *H. Poincaré*. *Électricité et Optique* (Paris, 1901), V — IX.
9. Poincaré, quoted in T. Dantzig, *Henri Poincaré: Critic of Crisis* (New York: Charles Scribner's Sons, 1954), 10.
10. *H. Poincaré*. *Science and Hypothesis* (New York: Dover Publications, 1952), 145.
11. *Ibid.* Cf. *Carolyn Eisele-Halpern*. Poincaré's Positivism in the Light of C. S. Pierce's Realism. *Actes du IX congrés international d'histoire des sciences* (Paris: Hermann, 1960), vol. I, 461—465.
12. *Poincaré*. *Science and Hypothesis*, 146.
13. *Ibid.*, chaps 4, 5. Cf. *Cohen*, loc. cit.
14. *H. Poincaré*. *Science and Method* (New York: Dover Publications, n. d.), 17—19.
15. *Ibid.*, 16—20.
16. *Goldberg*, loc. cit.
17. *Poincaré*. *Science and Hypothesis*, XXII.
18. *Ibid.*, XXIII—XXVI.
19. *Ibid.*, XXVI. Следует заметить, что в то время механику (по-французски *mécanique rationnelle*) изучали только на математических факультетах. Cf. *Rapports* (University of Paris, 1905—1906), 155—165.
20. *Poincaré*. *Science and Hypothesis*, 140, 150.
21. *Holton*, loc. cit. (1). Cf. *Goldberg*, loc. cit. (6).
22. *Poincaré*. *Science and Method*, 286.
23. *Poincaré*. *Science and Hypothesis*, 143.

24. *Holton*, loc. cit., 262, Cf. *R. McCormach*. Henri Poincaré and the Quantum Theory, *Isis*, LVIII (1967), -37—55. В работе Мак-Кормака предполагается, что Пуанкаре, по-видимому, не был так осторожен, когда речь шла о квантовых явлениях.
25. *Holton*, loc. cit. (1), 262.
26. *Poincaré*, цитируется у Холтона, loc cit. (1).
27. *H. Poincaré*. La théorie de Lorentz et la principe de reaction. *Arch. Néerl.*, V (1900), 252—278.
28. *Holton*, loc. cit. (1), 262—263.
29. *Ibid.*, fn. 9, 263.
30. *Poincaré*. Science and Method, 199.
31. *Poincaré*. La mecanique nouvelle [an address delivered at the French Association for the Advancement of Science, 1909]. (Paris: Gauthier-Villars, 1924), 16—17.
32. *E. M. Lémeray*. L'éther actuel (Paris, 1924), 124—127.
33. *H. Arzelies*. La cinématique relativiste (Paris: Gauthier-Villars, 1955), VII.
34. Cf. *C. Scribner, Jr.*, Henri Poincaré and the Principle of Relativity. *Amer. J. Phys.* XXXII (1964), 672—678, 677. *G. H. Keswani*. Origin and Concept of Relativity. *Brit. J. Phil. Sci.*, XV (1965), 286—306. *G. H. Keswani*. Origin and Concept of Relativity II. *Brit. J. Phil. Sci.*, XVI(1965), 19—32. *Holton*, loc. cit. (1), 262.
35. *H. Poincaré*. La théorie de Lorentz et la phénomène de Zeeman. L'éclairage électrique, XIX (1899), 5—15. Reprinted in *Oeuvres d'Henri Poincaré*, IX, 454—460.
36. *Poincaré*. Électricité et Optique, 536.
37. *H. Lorentz*. Electrical Phenomena In a System Moving with any Velocity less than that of Light. *Proc. Acad. Sci. Amst.*, VI (1904). Перепечатано в *Lorentz et al. The principle of Relativity* (New York: Dover Publications, n. d.) 11—34. Все цитаты согласно Dover Publication.
38. *Ibid.*, 13.
39. *G. Holton*. On the Origin of the Special Theory of Relativity. *Am. J. Phys.*, XXXIII (1960), 627—636.
40. *H. Poincaré*. Sur la dunamique de l'électron. *Rend. d. Circolo Mat. di Palermo*, XXI (1906), 129—179. Перепечатано в *Oeuvres*, IX, 494—550, 495.
41. *Ibid.*, 496.
42. *H. Poincaré*. Les rapports de la matiere et de l'éther. *Journal de phys. the et app.* II. 347—360 (1912). Переп. в *Oeuvres*, IX, 669—682, 680.
43. *Keswani*, loc. cit. (36, II).
44. *Ibid.*, 27.
45. *Einstein*, цитировано в *Ibid.* 25.
46. *Goldberg*, loc. cit. (6).
47. *G. Holton*. Influences on Einstein's Early Work in Relativity Theory. *The American Scholar*, XXXVII (1967—68), 59—79 (68—69).
48. Cf. *Darboux*, loc. cit., passim.
49. Cf. *P. Langevin*. The Scientific Work. *Volterra et al. Henri Poincaré* (Paris, 1914) passim.
50. Cf. *Dantzig*, loc. cit. (9), chap. I.

51. *Keswani*, loc. cit. (36) passim, loc. cit. (36,II) 23.
52. *Ibid.*, 28.
53. *Ibid.*, 30—31.
54. *Goldberg*, loc. cit. (6).
55. *Ibid.*
56. Сравнить с *H. Poincaré*. La dynamique de l'électron (Paris, 1913) passim. На самом деле, если бы Пуанкаре был жив, есть все основания думать, что он попытался бы включить последние по тому времени квантовые явления в рамки теории Лоренца. Сравните *H. Poincaré*. Sur la theorie des quanta. Comptes Rendus, CLIII, (1911), 1103—1108. *H. Poincaré*. Sur la theorie des quanta. Journal de phys. thé. et app. II (1912), 5—34. «В одном из своих критических очерков по логике и методологии науки Пуанкаре писал, что целью науки является раскрытие единства, а не механизма. Кванты были для него «чарующими» в их унифицирующем смысле: они очень подходили для его попыток свести все явления к их атомной интерпретации». (McCommach, loc. cit. (24), 39).
57. Кешвани ставил вопрос о том, не показалась ли работа Эйнштейна Пуанкаре тривиальной, но уклонился от его обсуждения. *Keswani*, loc. cit. (38,II); 31.
58. *Goldberg*, loc. cit. (6), 940.
59. *A. Einstein*. Über Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogene Folgerungen. Tahr. Rad. u. Elek. IV (1907), 411—462. (436—439). *G. Holton*. Mach, Einstein and the Search for Reality, Daedalus, LXXXVII (1968); 636—673, (651—652).

ОПЫТ И ФИЗИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

1. Проф. Дж. Холтон о соотношении между опытом и теорией

1. *О роли опыта Майкельсона в становлении теории относительности.* В этом выпуске «Эйнштейновского сборника» читатель найдет статью видного американского историка физики, профессора Гарвардского университета Дж. Холтона — «Эйнштейн, Майкельсон и „решающий“ эксперимент». Статья эта представляет интерес уже тем, что в ней обрисована историческая обстановка, в которой развивалась экспериментальная и теоретическая физика в один из важнейших периодов, когда во весь рост встали проблемы электродинамики движущихся тел. Привлекая огромный документальный материал, иногда впервые публикуемый в печати, автор убедительно показывает, в какой сложной драматической обстановке рождаются и развиваются новые идеи в науке. Ничто не утверждается без борьбы, иногда длящейся долгие годы. Отрицательный результат остроумного и точнейшего эксперимента Майкельсона, от которого ожидали подтверждения гипотезы стационарного эфира, был воспринят научной общественностью с разочарованием и недоумением. Опыт пришел в противоречие с установившимися взглядами, расстаться с которыми было нелегко. Сам экспериментатор был удручен результатом и пугался возможных выводов. Лоренц искал выход в специальных гипотезах, которые вызвали неудовлетворенность и недоверие своим явно приспособляющимся характером *ad hoc*. Но и теория относительности, по-новому решавшая стоявшие в физике проблемы, была встречена осторожно и с недоверием: столь необычна она была по своим выводам, по своей разрушительной силе, ниспровергающей априористические представления классической физики. Не случайно Эйнштейн не был представлен к Нобелевской премии за разви-

тие теории относительности. Новые идеи лишь постепенно завоевывали себе признание. Но и до нашего времени многие проблемы, связанные с теорией относительности, ее обоснованием, ее трактовкой, являются предметом дискуссий в научных кругах.

Однако, рисуя общую картину развития идей, связанных с теорией относительности, Холтон главное внимание сосредоточивает на обсуждении вопроса о связи эксперимента Майкельсона с теорией Эйнштейна. В статье обстоятельно показано, как широко распространен взгляд, будто теория относительности является прямым и непреложным следствием отрицательного результата известного эксперимента Майкельсона — Морли по обнаружению эфирного ветра, будто этот эксперимент оказал решающее влияние на мышление самого Эйнштейна. Такой взгляд на протяжении полувека активно пропагандировали известные физики, историки и философы, экспериментаторы и авторы учебников и популярных книг.

Утверждение о прямой генетической связи теории относительности и опыта Майкельсона Холтон считает таким же мифом, как и миф о том, что теория тяготения Ньютона является прямым следствием его наблюдения за падением яблока. Он вскрывает побудительные причины распространения этого мифа; главная из них состоит в том, что многие физики считали, что принять столь «странную», крайне абстрактную теорию, какой казалась теория относительности, возможно было лишь признав, что это принятие неизбежно, поскольку она прямо вытекает из опыта Майкельсона. Такая опора на непреложный опыт, даже если бы она и была неправомерной, облегчает восприятие теории и в педагогической практике. Холтон указывает также и на поддержку этого мифа позитивистской философией, которая использовала его как обоснование своей идеи: поскольку восприятие одного только «факта» способно опрокинуть любую, казалось бы, прочно утвердившуюся теорию, последняя не имеет объективного смысла. Крупный американский физик, лауреат Нобелевской премии Р. Милликен, защищал даже идею, будто одно только изобретение нового прибора кладет начало развитию новой области физики: интерферометр Майкельсона, электронно-вакуумная трубка, камера Вильсона, счетчик Гейгера, дифракционная решетка Роуланда, — каждый из подобных приборов стал родоначаль-

ником новой теории или новой области физики (интерферометр породил теорию относительности, «спектрогелиограф — творец астрофизики», пишет Милликен в автобиографии, оправдывая свой переход из Чикагского университета в Калифорнийский технологический институт). Это направление мысли Холтон называет экспериментистским.

Холтон проанализировал огромное количество различных документов, выступлений, интервью, писем, статей Эйнштейна, показав, что высокая оценка майкельсоновского эксперимента Эйнштейном все же не идет дальше признания его изящества, огромной, впервые достигнутой, точности, остроумия лежащей в его основе идеи, что результат опыта Майкельсона, когда Эйнштейн о нем узнал, лишь укрепил в его сознании убеждение в отсутствии абсолютной «светоносной среды» — эфира, но не дал логической основы для теории. Таким образом, опыт Майкельсона «не играл никакой роли, или, по крайней мере, не играл решающей роли». Этой формулировкой, данной в письме Давенпорту, — в последнем документе по этому вопросу, написанном за год до кончины, — Эйнштейн подводит итог всем своим суждениям о связи теории относительности с опытом Майкельсона. Письмо это, найденное в архиве Эйнштейна и впервые опубликованное Холтоном, венчает исследования самого Холтона.

Таким образом, все исследование Холтон ведет в том плане, что есть два аспекта оценки значения опыта Майкельсона; один из них — личный: опыт Майкельсона не имел или почти не имел значения для самого Эйнштейна при создании теории, поскольку он ничего не добавил к уже сложившимся у него представлениям; другой аспект — общественный: ссылка на опыт Майкельсона облегчила принятие теории относительности *другими* — научной общественностью, студентами. Эти аспекты можно расшифровать так: опыт Майкельсона в *создании* теории не играл *логической* роли, но в *принятии* уже созданной теории он играл *психологическую* роль.

2. *Общая проблема о соотношении между опытом и теорией.* Ясно, что при рассмотрении частной проблемы о роли опыта Майкельсона для формулировки теории относительности встает вопрос *об истоках теории вообще, о логических основаниях теории.*

И здесь, обсуждая общий вопрос о связи теории и эксперимента, Холтон выступает с той же позиции — позиции отрицания роли эксперимента в становлении теории. Он говорит о «широком потоке мифов, согласно которым научная работа представляется как непреклонное следование логически правильным заключениям из несомненных экспериментальных посылок. Систематики, аксиоматики, авторы учебников и другие тоскуют по прямой последовательности как в самой научной работе, так и в отчетах о ней; увы, истина состоит в другом» (стр. 145).

Для нас, конечно, представляет большой интерес узнать, в чем же «в другом» состоит истина познания, как понимает процесс познания видный историк физики, который тщательно анализирует исторические документы, не чурается гносеологических проблем, критически относится к позитивистам и их попыткам причислить Эйнштейна к последователям эмпирической философии (см. его критику Рейхенбаха). Отвечая на этот вопрос, Холтон опирается на высказывания Эйнштейна по вопросам познания. Основные из них мы напомним.

В «Автобиографических заметках» (1946—1949) Эйнштейн обсуждает вопрос о критериях, играющих роль «при выборе между теориями» *. Он назвал два таких критерия: «внутреннее совершенство» и «внешнее оправдание» теории. Оба эти критерия, по Эйнштейну, довольно неопределенны (хотя между «авгурами» «большой частью наблюдается полное согласие» по поводу их). Так, критерий «внутреннего совершенства» не имеет какой-либо соизмеримой меры для разных теорий одних и тех же явлений. Этот критерий характеризуется такими малоопределенными понятиями, как «естественность», «простота», «завершенность» и т. п., которые Холтон относит к области эстетики.

Применение же критерия «внешнего оправдания» теории также включает в себе трудности: «Дело в том, — писал Эйнштейн, — что часто, если не всегда, можно сохранить данную общую теоретическую основу, если только приспособлять ее к фактам при помощи более или менее искусственных дополнительных предположений». Дру-

* См.: А. Эйнштейн. Собр. науч. трудов (в дальнейшем — СНТ), т. IV. «Наука», стр. 266—267.

гое дело, признавал ли сам Эйнштейн правильным такой путь, шел ли он сам этим путем, но существенно, что он видел такую возможность — возможность сохранения теоретических основ за счет искусственных дополнительных гипотез: таким путем шла классическая физика, таким путем шел Лоренц.

Критерий «внешнего оправдания» теории сводится к требованию, чтобы теория не противоречила опыту. Заметим, что в этом критерии Эйнштейна речь идет о теории уже созданной, и опыт здесь рассматривается не как исходный пункт *построения* теории, а как эталон для отбраковки уже готовых теорий. Именно так толкует эти суждения Эйнштейна и Холтон; излагая их, он пишет: «Дело не в том, что теория может быть *построена* на несомненно очевидных опытных фактах, не в том, что теория может быть *подтверждена* постановкой решающих экспериментов, а скорее дело в том, что „теория *не должна противоречить опытным фактам*“» (стр. 158; курсив наш). Активное влияние опыта на создание теории Эйнштейн отрицал в принципе; читатель может найти в статье Холтона соответствующие ссылки на многочисленные и относящиеся к самым различным периодам его деятельности высказывания Эйнштейна в том духе, что нет логического пути от опыта к построению теории.

Именно этой позиции Эйнштейна держится и Холтон: теория не может быть выведена логически из эксперимента. Как же создаются теории? Эйнштейн полагает, что теории и понятия суть свободные творения мышления; после же создания теории действуют критерии отбора. Видимо, так думает и Холтон. Правда, он не может исключить роль эксперимента нацело, он пишет: «Конечно, эксперименты существенны для исторического прогресса. Конечно, построение цепи от нового загадочного эксперимента к теоретической схеме, которая его объясняет, — это обычный процесс, особенно в повседневной работе большинства ученых» (стр. 210). Но он ограничивается таким общим ни к чему не обязывающим замечанием, не вскрывает конкретной роли эксперимента в познании. Более того, высказав мимоходом общее замечание, он делает далее оговорки: «И тем не менее следует противостоять заблуждению экспериментистов, внушающих идею о строго логическом следовании от эксперимента к теории, по учебнику». Холтон боится, что «обращая внимание в пер-

вую очередь на внешне зримые моменты» (т. е. на роль экспериментов), эта доктрина «не воздаст должного всему величию науки».

Для ясности скажем сразу: мы согласны с критикой Холтоном позитивистов, мы за воздание должного всему величию науки, т. е. за высокую оценку роли не только экспериментов, но и теории. Точно так же мы считаем правильным утверждение Холтона, что теория относительности не выведена Эйнштейном непосредственно из опыта Майкельсона. Однако мы считаем необходимым рассмотреть обоснования высказанным взглядам по существу, и это приведет нас к выводам, отчасти совпадающим (хотя и иначе обоснованным) и отчасти не совпадающим со взглядами Холтона. Мы должны, следовательно, поставить вопрос о правомерности метода, которым ищутся ответы на подобные вопросы, в частности, на вопрос о том, была ли теория относительности (специальная) выведена непосредственно из опыта Майкельсона.

Ответ на этот вопрос Холтон составляет в плане выяснения, что по этому поводу думал сам Эйнштейн, делал ли он решающие выводы из этого опыта. Конечно, это представляет известный психологический интерес. Мы видим, что этот путь ведет к необходимости кропотливого выяснения таких исторических деталей, как знал ли Эйнштейн об опыте Майкельсона до своей статьи 1905 г. или не знал, если знал, то что он мог знать и из каких источников, какие источники существовали к тому времени, как они толковали этот опыт, все ли они могли быть доступны Эйнштейну и т.д. Затем в этом плане приходится обсуждать различные противоположные трактовки высказываний Эйнштейна; как признает и Холтон, Эйнштейн иногда и сам давал повод к различным трактовкам его высказываний; к счастью, в последнем, найденном Холтоном письме, Эйнштейн высказался более определенно. Но законен вопрос: а что если бы такого письма не было написано, изменило ли бы это реальную ситуацию, или этот вопрос о роли эксперимента Майкельсона навсегда остался бы спорным?

Нам представляется, что ответ на вопрос о роли опыта Майкельсона в становлении теории относительности следует искать в исследованиях не психологического плана (конечно, по-своему интересных и нужных), а гносеологического, точнее, историко-логического плана.

Это позволит увидеть, что, формулируя теорию относительности, Эйнштейн и не отрывался от опыта, вопреки своей более поздней декларации общеносеологического характера. Но его подход к построению теории был своеобразен.

II. Два метода построения теорий.

Лоренц

3. *Классический метод — усложнение теории с каждым новым опытом.* То, что из результата опыта Майкельсона непосредственно, с логической необходимостью не вытекает теории относительности, следует уже из того исторического факта, что Лоренц дал ему *другое* объяснение. Сам результат опыта Майкельсона должен был для Лоренца, в свете его представлений, играть другую и более решающую роль; чем для Эйнштейна. И, пожалуй, нет лучшего способа яснее изложить особенности практического подхода Эйнштейна к созданию теории, как сопоставив его с подходом Лоренца.

Когда Лоренц приступил к физическим исследованиям, новой и прогрессивной (далеко еще не всеми признанной) была теория электромагнитного поля Максвелла. Сам Максвелл полагал, что электромагнитные колебания суть особые состояния некоторой мировой среды — эфира, и пытался выяснить особые свойства этой среды. Идея о наличии особой среды — носителя электромагнитных колебаний — несомненно появилась под влиянием успехов гидродинамики, получившей блестящее развитие в трудах механиков и математиков первой половины XIX века — Навье, Коши, Пуассона, Остроградского и других. Споры шли лишь о свойствах эфира, в частности, о том, является ли эфир стационарным, или же он увлекается движущимися телами. Лоренц принял концепцию стационарного эфира: она хорошо согласовывалась с достоверно установленным явлением аберрации звезд (видимое годичное смещение звезды). Абберрация рассматривалась как простой результат геометрического сложения двух скоростей — абсолютной (относительно стационарного эфира) скорости света, идущего от звезды, и абсолютной скорости Земли.

Итак, исходной посылкой всех последующих рассуждений Лоренца явились стационарный эфир и связанная с ним

абсолютная система отсчета. В этой исходной схеме инерциальные системы отсчета были заведомо неравноправны. Тем самым относительность электромагнитных явлений в природе исключалась.

Пока эта схема опиралась на базу оптических явлений, в ней находили непосредственное объяснение только явления типа аберрации. Сложнее дело обстояло с объяснением опытов Френеля—Физо, в которых измерялась скорость света в движущихся прозрачных средах. В них не получалось векторного сложения скоростей света и среды, выявилось наличие «коэффициента частичного увлечения эфира» движущейся средой, имеющего вид: $\varphi = v(1 - 1/n^2)$, где v — скорость движущейся среды, а n — показатель преломления света для этой среды. Формула Френеля поражала своей загадочностью: неясно было, как понимать «частичное увлечение», а появление в формуле коэффициента оптического преломления среды неизмеримо усложняло всю проблему, вело к представлению о множестве «световых сред» и т. п. В круге оптических представлений этот результат не получал удовлетворительного объяснения. Только развитие электродинамики Максвелла и ее дальнейшее углубление Лоренцом позволили преодолеть возникшие трудности.

После открытия элементарных зарядов естественно было считать их источником элементарных электромагнитных полей. Лоренц связал эти поля с электромагнитным макроскопическим полем Максвелла. Переменные макрполя Лоренц рассматривал как результат усреднения соответствующих переменных элементарных полей.

Такой подход позволил Лоренцу связать поля со свойствами вещества, что явилось крупным вкладом в развитие электродинамики. В этом подходе эфир характеризовался теми же электродинамическими характеристиками, что и вещество, с тем отличием, что для него диэлектрическая постоянная ϵ и магнитная проницаемость μ принимали предельное значение, равное единице. По Лоренцу, возбуждаемые электронами поля распространяются в том же стационарном эфире, и уравнения их имеют тот же вид, что и уравнения Максвелла для макрполя, в них лишь учитывается наличие зарядов, конвекционного тока, а также поляризация вещества. Существенно, что последняя в уравнениях электронной теории составляется из двух компонент: одна из них — поляризация вещества

P_1 в диэлектрике, пропорциональная диэлектрической постоянной вещества ϵ и напряженности поля $P_1 = \epsilon E'$; другая — поляризация относительно стационарного эфира, пропорциональная напряженности поля: $P_2 = -E'$ (для эфира $\epsilon = 1$). Таким образом, полная поляризация $P = P_1 + P_2 = (\epsilon - 1)E'$. Следовательно, полное электрическое поле $E = P/\epsilon = (1 - 1/\epsilon)E'$, а так как в электромагнитной теории Максвелла $\epsilon\mu = n^2$ и для диэлектрика $\mu = 1$, то $E = (1 - 1/n^2)E'$. Эта формула находит подтверждение в электродинамических экспериментах (опыты Эйхенвальда и других).

Таким образом, загадочный и противоречивый, в оптическом аспекте, эксперимент Френеля — Физо нашел непротиворечивое объяснение в электродинамической теории Лоренца. Это обстоятельство укрепило уверенность Лоренца в правоте его исходной концепции о стационарном эфире.

Однако на пути успешного развития идей Лоренца стоял эксперимент нового типа — интерференционный опыт Майкельсона. Ожидалось, что в этом опыте будет обнаружен эфирный ветер, чем и подтвердилась бы непосредственным образом исходная концепция Лоренца; результат опыта показал отсутствие эфирного ветра. Казалось, что опыт Майкельсона стал «решающим» для концепции стационарного эфира. Тем не менее Лоренц удержал эту концепцию; он объяснил результат Майкельсона *в духе своей исходной посылки* (абсолютная система, стационарный эфир). Это было возможно при условии принятия дополнительной гипотезы, утверждающей, что тела сокращаются в направлении движения в отношении $k = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$.

Контракционная гипотеза Лоренца критикуется как гипотеза *ad hoc*. Но что такое гипотеза *ad hoc*? Существует обширная литература, обсуждающая вопрос о правомерности гипотез *ad hoc*. Холтон посвятил этому понятию целый раздел в статье; рассмотрев его с разных сторон (*ad hoc* психологический и *ad hoc* логический; *ad hoc* для одного исследователя не есть *ad hoc* для другого; *ad hoc* вчера — уже не *ad hoc* сегодня и т. д.), Холтон пришел к выводу о его неопределенности и относительности. Но сами по себе эти суждения не могут опровергнуть контракционной гипотезы: ее защитники могут утверждать, что сам опыт Майкельсона можно рассматривать

как экспериментальное обоснование ее. На это позднее указывал и Лоренц *. Очевидно, что оценить роль гипотезы и ее характера можно лишь в свете оценки метода в целом.

Контракционная гипотеза привела к некоторым следствиям. Контракция Лоренца представляет собой анизотропное изменение размеров движущегося тела. Анизотропность должна была бы вызвать некоторые электромагнитные явления, например двойное лучепреломление, возникновение момента импульса при движении заряженного конденсатора. Но таких явлений не наблюдается. Ситуация вновь повторилась: ожидалось определенных результаты экспериментов, а они не появились.

Теперь перед Лоренцом встала еще более сложная проблема: как можно сохранить прежние исходные предпосылки об абсолютной системе отсчета, а также объяснение отрицательного результата опыта Майкельсона с помощью контракционной гипотезы, и вместе с тем объяснить отсутствие ожидаемых на основе предпосылок электродинамических явлений в движущихся телах? Лоренц сделал новое предположение: в телах — абсолютно неподвижном и движущемся (относительно стационарного эфира) — существуют «соответственные состояния» **. В «соответственных состояниях» одноименные электродинамические переменные различны: в покоящемся теле они абсолютны, в движущемся — они принимают «местное» значение. Но связь между переменными в движущемся теле должна сохраняться та же, что и между абсолютными значениями переменных, иначе говоря, уравнения поля для соответственных состояний должны быть инвариантны. Только

* См.: Г. А. Л о р е н ц. Теория электронов, гл. V, п. 168.

** В статье 1904 г. Лоренц так формулировал «теорему о соответственных состояниях» (не называя ее): «Когда в системе без поступательного движения возникает состояние движения, для которого в определенном месте компоненты векторов p , d и h являются определенными функциями времени, тогда в той же системе, после того, как она приведена в движение (и, следовательно, деформирована), может возникнуть состояние движения, при котором в соответствующем месте компоненты векторов p' , d' , h' будут теми же функциями местного времени» [см.: «Принцип относительности», Сборник работ классиков релятивизма. М., ОНТИ, 1935, стр. 39].

Название теоремы дано Лоренцом в книге «Теория электронов» (1909 г., гл. V, п. 162), в которой она почти дословно повторяется.

это требование приводит к тому, что в движущемся и анизотропно меняющем свои линейные размеры теле изменения дадут один и тот же результат, т. е. не будет наблюдаться никаких новых электродинамических явлений. Потребовалось найти связь переменных в движущемся теле с абсолютными, т. е. найти «формулы преобразования». Оказалось, что инвариантной формы уравнений нельзя достигнуть ни при каких условиях, если сохраняется непреобразованным время. Так появилось *Ortszeit* — «местное», или локальное время.

Следуя своему методу, Лоренц искал физические причины для перехода к преобразованным перемечным, отправляясь опять-таки от очевидного с его точки зрения сжатия движущегося тела; раз изменяется конфигурация движущегося тела, значит изменяются соответствующим образом и уравнивающие новую конфигурацию молекулярные силы, а равно и силы электростатические, меняются и напряженности полей и другие величины; во всех этих изменениях играет роль фактор k , характеризующий анизотропность в движущемся теле.

Что касается *Ortszeit*, то связь этой переменной с изменением конфигурации движущегося тела нельзя было усмотреть, поскольку время в классической физике рассматривалось как независимая переменная; поэтому Лоренц считал *Ortszeit* чисто вспомогательной величиной.

Как бы то ни было, идея о «соответственных состояниях» и привела Лоренца к «формулам преобразования», которые сохранились в последующем развитии физики и даже получили наименование «лоренцовых». К ним же пришел и Эйнштейн. Может быть путь Лоренца и есть правильный путь построения теории?

4. Метод Лоренца и его противоречия. Уже из краткого обзора видна суть метода Лоренца. Создается исходная система представлений — признание стационарного эфира и связанной с ним абсолютной системой отсчета. Эта система представлений, с одной стороны, перенесена из гидродинамики — другой области явлений, а с другой — опирается на объяснение самого раннего результата наблюдения оптического явления — видимой аберрации звезд. Таким образом, опыт в новой области явлений еще не был охвачен полностью во всем его многообразии, а уже были созданы представления о материальной

структуре, в которой протекают новые явления. Эти представления заранее исключают возможности раскрытия новых свойств природы, например, возможности принципа относительности, т. е. ограничивают будущие возможные выводы. В дальнейшем каждый новый опыт по мере его возникновения рассматривается *независимо от других*, притом рассматривается *в свете исходной системы представлений*, сохраняя ее неизменной. Если результат нового опыта не укладывался в исходную систему представлений, создавалась гипотеза о причинах, объясняющих отклонение результата от ожидаемого. В этом проявлялась полная аналогия тому методу, который применялся в классической механике, в которой всякое отклонение от инерциального движения объяснялось наличием отклоняющей силы — причины отклонения. Хотя эксперименты рассматриваются в этом методе накопления все новых гипотез как *experimentum crucis*, т. е. «решающими», они не затрагивают исходных представлений и фактически решающими для них не являлись.

Теоретические возражения против такого метода, который «понимает и толкует опыт не во всей его конкретности, а как пример, и притом с благоприятной для гипотез и теорий стороны», были выдвинуты еще Гегелем, и В. И. Ленин поддержал эти возражения*.

Лоренц не отступил от этого метода, по-видимому, до конца своей жизни. Но нельзя не заметить, что логика развития познания взрывала его изнутри. В своих объяснениях Лоренц проделал замкнутый круг. Отрицательный результат опыта Майкельсона он объясняет механическими причинами — анизотропным изменением размеров движущегося тела; но это анизотропное изменение должно было вызвать определенные электромагнитные и оптические эффекты; отсутствие их Лоренц объясняет наличием «соответственных электромагнитных состояний» в двух системах — абсолютной и инерциально движущейся. Но допущение наличия таких «соответственных состояний», — которые и введены-то были как раз для оправдания того, почему в обеих инерциальных системах никакие измерения не в состоянии установить существ-

* См.: В. И. Ленин. Полное собрание сочинений, т. 29. Философские тетради, стр. 192; подробнее этот вопрос освещается в статье: С. Г. Суворов. Ленинская теория познания и физика. Усп. физ. наук, т. 100, в. 4, 1970.

вования новых «ожидаемых» эффектов, — по сути дела означает обращение к «принципу относительности»; именно это обстоятельство и позволило Лоренцу подойти к проблеме преобразования переменных.

Естественно возникает вопрос: если, проделав вышеописанный круг, исследователь в конечном счете пришел к гипотезе о «соответственных состояниях», не естественнее ли было сразу признать факт независимости электродинамических законов от инерциального движения систем отсчета? И не означает ли признание «соответственных состояний», описываемых инвариантными уравнениями, что исходные предпосылки — абсолютная система отсчета и стационарный эфир — неадекватны природе?

Но Лоренц не сделал такого вывода и не вскрыл противоречия своих исходных положений с конечными результатами, к которым его толкали непреложные следствия физических опытов.

) Непоследовательность метода Лоренца отомстила за себя нарушением логики еще и в другом отношении. Как известно, Лоренц рассматривал *Ortszeit* как чисто вспомогательную величину. Но в таком случае и все другие переменные поля, преобразованные совокупно с «местным временем», не должны рассматриваться как реальные, измеряемые в эксперименте величины, и потому они не могли привлекаться для объяснения отрицательных результатов упомянутых выше оптических и электродинамических опытов.

Сказанное не должно быть понято как умаление роли Лоренца как крупного ученого. Он сделал большой вклад в физику созданием электронной теории, которая связала электродинамику со свойствами вещества и послужила одним из важнейших подтверждений ее адекватности. Классический путь развития теории, примененный Лоренцом, обусловлен исторически и психологически. Практически каждое новое явление, по мере его открытия, *немедленно* оценивается, и оно не может оцениваться иначе, как в свете существующих представлений. Только когда накапливается достаточное число все новых приспособительных гипотез, становится ясной неприемлемость всей структуры и отыскивается новый путь.

Эти замечания, разумеется, необходимы для уточнения исторической перспективы. Но, с другой стороны, они не могут исключить правомерности анализа логического процесса познания.

III. Два метода построения теорий. Эйнштейн

5.⁵ *Вычленение предпосылок из накопленного физического опыта.* Эйнштейн шел другим путем. Ему представлялось важным отыскать некоторые исходные для построения теории принципы (предпосылки, постулаты), которые *должны быть обобщены из всей совокупности известных опытных фактов.* Это прямо следует из структуры основоположительной статьи 1905 г. Впрочем, Эйнштейн и сам дал ясное толкование методу теоретической физики, которого он практически держался. Во «Вступительной речи» при избрании его в Прусскую академию наук в 1914 г. Эйнштейн объяснял, почему физик-теоретик часто не в состоянии дать экспериментатору совет по какому-либо возникшему у него вопросу. Единичный опыт ничего не говорит теоретику: нужно установить принципы, могущие служить основой для последующих выводов. В установлении этих принципов лежит основная трудность. «Здесь не существует метода, который можно было бы выучить и систематически применять для достижения цели. Исследователь должен, скорее, выведать у природы четко формулируемые общие принципы, *отражающие определенные общие черты огромного множества экспериментально установленных фактов.* Если такая формулировка удалась, начинается развитие следствий, которые часто дают непредвиденные соотношения, ведущие далеко за пределы области фактов, из которых были получены принципы. Но до тех пор, пока принципы, могущие служить основой для дедукции, не найдены, *отдельные опытные факты теоретику бесполезны*, ибо он не в состоянии ничего предпринять с отдельными эмпирически установленными общими закономерностями. Наоборот, он застывает в беспомощном состоянии перед единичными результатами эмпирического исследования до тех пор, пока не раскроются принципы, которые он может сделать основой для своих дедуктивных построений» *.

Обратим внимание на то, что исходные принципы, о которых говорит здесь Эйнштейн, это не некие априорные, рационалистические категории: это широкого класса соотношения, «отражающие определенные общие черты

* А. Эйнштейн. СНТ, т. IV, стр. 14—15. Курсив наш.

огромного множества экспериментально установленных фактов».

И действительно, без экспериментально установленных фактов невозможно никакое движение познания. Это гносеологическое положение проверено всей историей познания, оно справедливо для любой ступени познания, — и для того времени, когда человек только что поднимался над миром животных, и для современной цивилизации, в которой теория играет существенную роль. Это положение пробивало себе путь на протяжении многих веков развития философской мысли, и оно лежит в основе теории познания современной научной материалистической философии. И если мы привели длинную цитату из выступления Эйнштейна, то вовсе не потому, что его высказывание рассматриваем как *доказательство* этой истины. Важно было подчеркнуть, что Эйнштейн фактически шел по этому пути при построении специальной теории относительности; этим объясняется успех его теории, и, независимо от его высказывания, эту связь с обобщением «огромного множества экспериментальных фактов» можно проследить в его исследованиях.

Заметим сразу же, что говоря об обобщениях опыта, лежащего в основе теории, мы оперируем некоторым абстрагированным понятием. История и теория познания показывают, что на каждом отрезке пути познания опыт не отделен от теории непроходимой стеной и он сам может быть сформулирован и понят лишь на основе *существующей* теории. Однако здесь речь идет о формулировке *новой* теории, охватывающей новый круг явлений; в этом случае теория появляется в результате вычленения и формулировки общих черт «огромного множества экспериментальных фактов», которые выступают в виде предпосылок новой теории; последняя же должна показать их совместность. К этому вопросу мы еще вернемся.

Рассмотрим кратко обоснование и значение тех положений, из которых исходил Эйнштейн в своей основополагающей статье 1905 г.

6. *Электродинамика Максвелла как предпосылка.* Как известно, теория относительности появилась в результате поисков формы электродинамики движущихся тел, которая волновала физиков после работ Максвелла. Этот факт отразился в названиях многих работ, в том числе

и в названии статьи Эйнштейна, в которой сформулированы основы теории относительности: «К электродинамике движущихся тел».

В преамбуле этой статьи Эйнштейн называет два исходных постулата, положенных в основу разрабатываемой далее теории — принцип относительности и принцип постоянства скорости света. В числе исходных постулатов он не называет в этой преамбуле электродинамику Максвелла, так как в его номенклатуре теория не относится к разряду постулатов. Но в этой же преамбуле он указывает, что простую, свободную от противоречий электродинамику движущихся тел можно построить при учете двух исходных постулатов, «*положив в основу теорию Максвелла для покоящихся тел*»*. И позднее Эйнштейн неоднократно подчеркивал связь теории относительности с электродинамикой Максвелла. Так, в 1917 г. в статье «О специальной и общей теории относительности» он писал: «Можно сказать, что теория относительности выросла из электродинамики как поразительно простое обобщение и объединение ряда независимых гипотез, на которых была основана электродинамика»**. А в 1934 г. Эйнштейн ясно формулировал: «Специальная теория относительности возникла из максвелловых уравнений электромагнитного поля»***.

Электродинамическая теория Максвелла в дальнейшем развитии, после Максвелла, прошла большую проверку. Были сделаны попытки развить ее в двух направлениях. Одно из них связано с определением формы уравнений электродинамики в движущихся телах. Проблема эта занимала и самого Максвелла и особенно Генриха Герца, экспериментальные исследования которого много способствовали утверждению максвелловой электродинамики.

* А. Эйнштейн. СНТ. т. I, стр. 8. Курсив наш.

** Там же, т. I, стр. 551.

*** Там же, т. II, стр. 416. Нас не должен смущать тот факт, что в качестве одной из предпосылок новой теории называется *теория* (предшествующая), а не «единичный факт», не отдельное экспериментальное соотношение. В самом деле, ведь и сама электродинамическая теория при своем становлении имела свои предпосылки, «экспериментально установленные факты», обобщением которых она и является: мы только не можем здесь идти далеко в глубь истории и рассматривать те основания, которые привели к формулировке теории Максвелла. В роли предпосылки теория выступает как концентрация огромного опыта.

Поскольку считалось, что максвелловы уравнения справедливы в системе, покоящейся относительно «неподвижных звезд», Герц пытался видоизменить их применительно к системе, *движущейся* относительно «неподвижных звезд». Новые уравнения электродинамики он вывел, по существу, тем же методом, которому следовал и Максвелл, — исследуя поток через замкнутую поверхность, находящуюся в поле. Но поскольку в его случае эта поверхность, жестко связанная с телом, двигалась, Герц полагал, что изменение потока через нее зависело не только от изменения самого поля в данном месте, но также и от того, что замкнутая поверхность переходит из одного места поля в другое. В результате учета этого обстоятельства в первом уравнении Максвелла (для $\text{rot } \mathbf{H}$) появились дополнительные члены: $\text{rot } [\mathbf{D}, \mathbf{u}] + \mathbf{u} \text{div } \mathbf{D}$, а во втором (для $\text{rot } \mathbf{E}$) — член $\text{rot } [\mathbf{B}, \mathbf{u}]$ (здесь \mathbf{u} — скорость движущегося тела). При $\mathbf{u} = 0$ уравнения Герца превращаются в уравнения Максвелла.

Однако уравнения Герца привели к неправомерным выводам. Так, из опыта известно, что электромагнитное поле существует и в вакууме, и для него справедливы уравнения Максвелла. Но уравнения Герца для вакуума не превращаются в уравнения Максвелла*. Тем самым нарушался естественный принцип связи двух вытекающих одна из другой теорий, который на примере другой области исследований получил позднее, у Бора, наименование принципа соответствия. По существу, попытка Герца означала построение новой электродинамики, в которой с самого начала учитывалась некоторая скорость \mathbf{u} , не встречавшаяся в уравнениях Максвелла. Уже это поставило уравнения Герца в противоречие с опытом. Кроме того, возник вопрос о том, как толковать скорость \mathbf{u} в случае отсутствия тела. Мы не можем подробно излагать соображения Герца, укажем лишь, что он пришел к выводу, что \mathbf{u} есть не только скорость тела, но и скорость эфира, который, следовательно, движется вместе с телом, увлекается им. Такая концепция стала в противоречие как с оптическими явлениями, так и с результатами новых

* Для вакуума исчезает только добавочный член $\mathbf{u} \text{div } \mathbf{D}$, поскольку он равен $\mathbf{u} \rho$, а в отсутствии зарядов (их, ведь, несет тело) $\rho = 0$; члены же $\text{rot } [\mathbf{D}, \mathbf{u}]$ и $\text{rot } [\mathbf{B}, \mathbf{u}]$ не исчезают. См.: Л. И. М а н д е л ь ш т а м. Полное собрание трудов, т. V. Изд-во АН СССР, стр. 130—131, 132—133.

электромагнитных исследований (Рентгена, Уилсона, Эйхенвальда и других).

Ввиду сказанного теория Герца отпала. Вместе с тем отпал метод выведения электродинамических уравнений, опирающийся на предположение об изменении потока через замкнутую поверхность при *передвижении* тела из одного места в другое, отпала попытка решить проблему электродинамики движущихся тел путем изменения формы уравнений Максвелла для предельного случая — вакуума.

О другом направлении обобщения электродинамики Максвелла мы уже говорили в разделе о методе Лоренца. Электронная теория Лоренца была правомерным обобщением теории Максвелла: как и система уравнений Максвелла, уравнения Лоренца не содержали каких-либо абсолютных скоростей тел и при определенных значениях характеристических параметров ($\rho = 0$; $\epsilon = 1$; $\mu = 1$) система лоренцовых уравнений превращается в систему уравнений Максвелла. Поэтому успехи электронной теории Лоренца, охватывающей электромагнитные явления в вещественных средах, следует также считать подтверждением электромагнитной теории Максвелла.

Формулировка теории в математической форме — существенная ступень познания. Она в корне изменила дальнейшие методы исследования. До создания электродинамической теории Максвелла исследовали главным образом единичные оптические явления. По результатам единичного эксперимента судили о свойствах света или о «свойствах среды», в которой явление протекает; результаты отдельных экспериментов суммировались и приспособлялись друг к другу и к исходным представлениям.

После появления электродинамической теории произошли существенные изменения.

Во-первых, большую роль играло уже то, что чрезвычайно расширился круг наблюдаемых явлений. Теперь уже тот же круг проблем — исследования электромагнитного поля и его взаимодействия с веществом — опирался на исследования не только оптических, но и электромагнитных явлений. Чрезвычайно расширились экспериментальные возможности, при этом электромагнитные эксперименты, помимо их большего разнообразия, во многих случаях оказывались легче воспроизводимыми. В последней четверти XIX и в начале XX века появилось множество электромагнитных исследований —

Рентгена, Роуланда, Уилсона, Эйхенвальда, Троутона, Нобля и других. Различные гипотезы получали быструю и многостороннюю проверку.

Во-вторых, охват электромагнитных явлений единой теорией выражал тот факт, что найдены такие характеристики исследуемых объектов, которые взаимосвязаны между собой и изменяются совокупно. Это в корне меняет саму постановку задач исследования. Все больше стала утверждаться идея о том, что гораздо важнее исследовать, как те или иные условия влияют на форму уравнений поля, а это, по существу, означало установление влияния условий на всю совокупность взаимосвязанных в объекте и отраженных в уравнениях теории электродинамических переменных. Забегая вперед, скажем, что физика нащупывала возможность связать принцип относительности в электродинамике с анализом условий, при которых уравнения электродинамики остаются инвариантными при переходе к новой системе отсчета, инерциально движущейся относительно исходной. Естественно, что на эту задачу наталкивался не один физик, а многие, вопреки даже тому, что исходные взгляды каждого из них не всегда совпадали.

Таким образом, появление теории в математической форме, на которую можно было опираться, обогащало представления о взаимосвязях в природе и расширяло методы исследования.

Итак, вслед за Эйнштейном, мы отмечаем, что электродинамика Максвелла явилась одной из исторических и логических предпосылок, сыгравших существенную роль при становлении теории относительности. К началу XX века она выступала как адекватная природе теория, завоеванная человеком *ступень* познания, которая служила отправным пунктом, одной из предпосылок для последующего развития знания.

7. *Принцип относительности как предпосылка.* Рассмотрим вопрос о том, как Эйнштейн использует электродинамику Максвелла.

Основную статью 1905 г. он начинает предложением: «Dass die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefasst zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt».

(«Известно, что электродинамика Максвелла, как ее в настоящее время обыкновенно толкуют, в применении к движущимся телам приводит к асимметрии, которая, по видимому, несвойственна самим явлениям» *).

Дж. Холтон считает, что в этом предложении Эйнштейн выдвинул эстетический критерий истинности теории — требование симметрии (см. стр. 149). Однако нельзя согласиться с тем, что эйнштейновская критика асимметричности трактовки максвелловской электродинамики исходит из соображения эстетического характера: он прямо указывает, что эта трактовка «несвойственна самим явлениям». Это уже вопрос не эстетический, а гносеологический — о том, насколько трактовка отражает реальные отношения в природе.

Что же имеет в виду Эйнштейн, говоря о толковании электродинамики, приводящей к асимметрии, не свойственной самим явлениям?

Речь идет о толковании, которое связывает электродинамику Максвелла с некой абсолютной системой отсчета. Именно с таким толкованием связан рассмотренный далее Эйнштейном пример объяснения причин появления тока в замкнутом проводнике при взаимодействии его с магнитом: обычно указывают одну причину, когда «движется магнит», и другую, когда «движется проводник». Эйнштейн отмечает важность простого наблюдения: в обоих случаях результат — сила и направление тока — получается одинаковый, если одинаково относительное движение, стало быть, существенно не то, что движется, а только *относительное* движение проводника и магнита, налицо не два случая, а один.

Этот простой, повседневно наблюдающийся в электротехнике факт, Эйнштейн вполне обоснованно ставит в один ряд с широко обсуждавшимися в среде физиков

* В Собрании научных трудов Эйнштейна это важное место переведено неточно: вместо подчеркнутого в тексте определения в переводе говорится об электродинамике Максвелла «в современном ее виде» (т. I, стр. 7). Между тем в оригинале речь идет именно о *трактовке* электродинамики Максвелла; несколькими строками ниже Эйнштейн пишет, что в основу электродинамики движущихся тел он кладет электродинамику Максвелла (с учетом двух постулатов). Эйнштейн не считал, что электродинамика Максвелла может привести к противоречию с явлениями, и не ставил себе целью менять ее; напротив, он искал условие ее инвариантности.

«неудачными попытками обнаружить движение Земли относительно светонесущей среды», которые физики называли «решающими»; хотя Эйнштейн и не называет эти попытки, но ясно, что среди них мог подразумеваться и опыт Майкельсона — Морли, но и не только он, а также и ряд однотипных электромагнитных опытов (например, опыт Трутона и Нобля по обнаружению момента импульса, действующего на заряженный движущийся конденсатор).

Обобщение, которое делает Эйнштейн из этих результатов, состоит в том, что «не только в механике, но и в электродинамике никакие свойства явлений не соответствуют понятию абсолютного покоя», и что для всех инерциальных систем «справедливы те же самые электродинамические и оптические законы, как это уже доказано для величин первого порядка». Это положение Эйнштейн именует в дальнейшем «принципом относительности», который являет собой одну из предпосылок теории относительности. Вычленив этот принцип, Эйнштейн как раз и выполнял задачу «вывести у природы... общие принципы, отражающие общие черты огромного множества экспериментально установленных фактов» (см. выше). Это вычленение из множества экспериментально установленных фактов принципа относительности представляет собой большой прогресс в науке.

Справедливость тех же самых электродинамических и оптических законов должна была найти свое естественное выражение в теории, а именно: во всех инерциальных системах связь между электродинамическими переменными должна быть одной и той же, т. е. уравнения Максвелла для предельного случая (вакуума) должны быть инвариантными. Это значит, что, находясь в другой инерциальной системе, мы открыли бы ту же электродинамику Максвелла и не установили бы никакого «абсолютного» движения нашей системы — факт, имеющий огромное теоретико-познавательное значение! И это произошло бы потому, что все измерения переменных мы производили бы в пределах нашей системы, считая ее покоящейся, т. е. мы оперировали бы в каждой системе *собственным* масштабом переменных.

Переход от одной системы к другой, инерциально движущейся относительно первой, должен быть связан с переходом к переменным новой системы, т. е. с отысканием «формулы преобразования» переменных. Важнейшим усло-

вием отыскания формул преобразования является требование инвариантности формы законов. При этом оказывается необходимым преобразовать также и время.

8. *Проблема преобразования времени. Постулат о независимости скорости света от движения источника.* Как мы уже отмечали, после того как законы электродинамики получили математическое выражение в виде системы уравнений, вопрос о форме преобразования переменных, оставляющих систему уравнений инвариантной, стал предметом многих исследований. Более того, математическая форма теории наглядно показала, что теория связывает определенным образом охватываемые ею переменные. Эта связь являет собой некую целостность. В силу этого требование инвариантности математической формы теории (закона или определенного соотношения) не может быть выполнено при преобразовании только какой-то части переменных: в общем случае преобразование одной части переменных неразрывно связано с преобразованием остальных. История электродинамики показывает замечательный пример, доказывающий эту неразрывную взаимосвязь переменных: вопреки собственному убеждению, пронесенному через всю жизнь, Лоренц *вынужден* был преобразовывать и *время*, чтобы перейти к «соответственному состоянию» в другой инерциальной системе. Как бы ни толковал Лоренц введенное им *Ortszeit* как чисто вспомогательную величину, реальность состояла в том, — и это показала теория, выступая как целостность, — что в отношении преобразования время встало в один ряд с другими переменными, связанными в теории; в противном случае инвариантность законов в разных инерциальных системах, подтвержденная «множеством экспериментальных фактов», не получила бы отражения в теории.

Можно сказать, что преобразование времени вытекало как следствие принципа относительности, и то, что Эйнштейн понимал эту связь и не боялся ее, показывает его как глубокого мыслителя.

В уравнения электродинамики входит также скорость света как некоторая константа. Вначале она характеризовала отношение электродинамических единиц к электростатическим; лишь позднее выяснилось, что эта константа имеет размерность скорости, а ее абсолютная величина того же порядка, что и скорость света. Естественен вопрос,

как изменяется скорость света при переходе к другой инерциальной системе, не складывается ли она со скоростью системы по известному геометрическому закону? Такой закон сложения скоростей означал бы признание наличия системы, в которой скорость света имела бы абсолютное значение.

Однако справедливость уравнений Максвелла во всех инерциальных системах выражала тот факт, что в природе нет выделенной системы, по отношению к которой скорость света только и оставалась бы постоянной, меняясь во всех других системах. Такой системой не может быть и система, связанная с источником света. Если бы скорость света в других системах получила другое значение, например геометрически складывалась бы со скоростью системы, это вставало бы в противоречие с принципом относительности, уравнения электродинамики не были бы инвариантными. Эйнштейн хорошо осознавал связь независимости скорости света от движения источника с фактом справедливости уравнений Максвелла во всех инерциальных системах и сам на эту связь указывал. Так, уже во второй статье (об инерции тел), опубликованной в том же 1905 г., он возвращается ко второму постулату: «Использованный там (в первой статье.—С.С.) принцип постоянства скорости света содержится, конечно, в уравнениях Максвелла»*. Реализация этого постулата в природе обуславливает факт изотропности пространства, уже тогда хорошо известный физикам; Эйнштейн использовал его в первой статье 1905 г., а о его достоверности и значении для исследования физических законов говорит в докладе «Теория относительности», прочитанном в 1911 г.**

Конечно, по отношению к этому постулату даже после публикации статьи Эйнштейна 1905 г. высказывалось немало сомнений***. Были сделаны попытки освободить-

* А. Эйнштейн. СНТ, т. I, стр. 36. На этот источник Эйнштейн указывал и позднее, уже после того, как был опубликован ряд попыток отвергнуть этот постулат (см. ниже). Так, в статье «К проблеме относительности» (1914 г.) он также писал, что принцип постоянства скорости света следует «из электродинамики Максвелла — Лоренца» (там же, т. I, стр. 387).

** Там же, т. I, стр. 178—179.

*** В. Паули называет работы Толмэна (1910), Кунца (1910), Комптона (1910) и особенно Рица (1908). См.: В. Паули. Теория относительности. Гостехиздат, 1947, § 3.

ся от постулата о независимости скорости света от движения его источника; они имели целью избежать коренной ломки понятия времени, с которой связана теория относительности Эйнштейна. Однако при построении таких теорий («теорий истечения») оказалось необходимым отбросить не только существование эфира, но, как это и понимал Эйнштейн, также и уравнения Максвелла для вакуума, и заново перестроить всю электродинамику, адекватность которой не вызывала сомнений*.

Таким образом, Эйнштейн имел основание уже в 1905 г., опираясь на электродинамику Максвелла, сформулировать постулат о постоянстве скорости света. То, что правомерность этого постулата не всем физикам была в то время очевидной, говорит лишь о логической прозорливости Эйнштейна, глубоко провидевшего взаимосвязь достигнутых физикой результатов и выводов из них.

Анализ «огромного множества экспериментально установленных фактов» привел Эйнштейна к выяснению основных предпосылок для построения электродинамики движущихся тел. После этого можно было найти формулы преобразования электродинамических величин при переходе к другой инерциальной системе. Для этого достаточно было решить математическую задачу: при каких условиях преобразования переменных, связанных в электродинамической теории Максвелла, математическое выражение электродинамических законов остаются инвариантными. Эти условия дают также формулы преобразования пространственно-временных координат**.

* Позднее теории истечения отпали уже потому, что они стали в противоречие с рядом других физических результатов, в частности, — с объяснением явлений отражения и преломления света, а также с результатами исследования движения двойных звезд (Де Ситтер, 1913), непосредственно доказавшими независимость скорости света от движения его источника.

** Практически в первой статье Эйнштейн сначала обосновывал преобразования, а затем показывал, что эти преобразования отвечают требованию инвариантности уравнения шаровой волны света в разных инерциальных системах, если скорость света в обеих системах есть величина постоянная; для рассмотрения связи идей в данном аспекте этот порядок не имеет значения. Впрочем, указанный в тексте порядок Эйнштейн намечал в статье «Теория относительности» (1911 г.).

Таков круг идей, который привел к формулировке теории относительности.

Мы должны к этому добавить, что если становление теории относительности генетически связано с электродинамикой, это отнюдь не означает, что ее выводы относятся лишь к области электромагнитных явлений. Как показало дальнейшее развитие физики, скорость c имеет более широкое значение, она является скоростью распространения не только световых, но и других, например гравитационных, волн: точно так же оказалось, что релятивистское соотношение массы и энергии справедливо для любого вида энергии. Однако из этого не следует, что при анализе путей становления теории относительности можно игнорировать роль теоретического и экспериментального материала, который доставила электродинамика. Без этого материала было бы невозможно обоснование теории относительности.

IV. Заключение.

Некоторые теоретические выводы

Вернемся к основному предмету этой статьи — об отношении между опытом и теорией. Можно ли при построении теории обойтись без опоры на эксперименты, без учета результатов наблюдений, без опыта? Ответ может быть только отрицательным. Связи внешнего мира познаются только во взаимодействии с ним, а не в сфере чистого мышления. И при построении теории относительности (специальной) Эйнштейн действительно опирался на множество экспериментально установленных фактов, обобщенных в его исходных принципах или постулатах, которые неизбежно вели к новой теории.

Конечно, мы только в абстракции можем выделить отдельные моменты познания и сказать, что вот это — результаты *опыта*, а это — вытекающая из них *теория*. На каждом этапе познания новый опыт не выступает как некий «голый факт»: он определенным образом формулирован в понятиях. Откуда они берутся? Ясно, что «увидеть» их в «голом факте», например при рассмотрении туманного следа в камере Вильсона, невозможно: они возникли при реализации *предыдущего* знания, в самом описании опыта уже аккумулярованы проверенные адекватные миру (пусть в первом приближении) понятия и тео-

рии. Тот факт, что они сформулированы на уровне предшествующего знания и, быть может, полностью неадекватны искомому, более глубокому знанию, не должен смущать исследователя; мы вернемся к этому вопросу ниже.

Связь между опытом и теорией признается почти всеми. Однако эта связь сложна, и оценка ее сущности даже крупными естествоиспытателями крайне неоднородна. Холтон с полным основанием утверждает, что, обсуждая вопросы познания, Эйнштейн отрицал существование логического пути от опыта к теории. Последнюю он считал свободным творением ума, а опыту отводил только функцию отбраковки теорий. Эйнштейн указывал, что существующие теоретические представления могут даже дозвлет над опытом: новый опыт может получить толкование в духе старых теорий — для этого потребуется лишь дополнительная гипотеза. Конечно, он мог бы при этом сослаться на Лоренца.

Зато Милликен прямо связывал рождение теории с осуществлением того или иного эксперимента, а изобретению нового прибора приписывал развитие новой области науки.

Своеобразную роль опыту отводил Макс Лауэ; в «Истории физики» он писал: «Таким образом, история опыта Физо является поучительным примером того, какую большую роль в объяснении опыта играют элементы теории; их нельзя даже отделить от него. И если потом теории меняются, то опыт превращается из поразительного доказательства для одной теории в такой же сильный аргумент для противоположной теории» *.

Таким образом, согласно этому утверждению Лауэ, опыт выступает лишь как *аргумент* в пользу теории; сама же теория создается («меняется») где-то вне связи с опытом, и лишь после того как теория создана, опыт привлекается в качестве аргумента, причем один и тот же опыт может быть использован в резко противоположных целях. Конечно, в этом утверждении верно лишь то, что эксперимент Физо, как и другие электромагнитные эксперименты, разными физиками по-разному толковались, в соответствии с их исходными концепциями.

* М. Л а у э. История физики. М., ГИТТЛ, 1956, стр. 83.

Однако во всех этих случаях дело, по существу, идет не о теории, охватывающей *все явления* данного класса, и не о связи такой теории со всем многообразием опыта, а о *толковании* данного, единичного эксперимента или ряда однородных экспериментов. Но когда речь идет о единичном эксперименте, неизбежен вывод, что нет однозначного логического пути от опыта к теории. Именно поэтому теория относительности непосредственно не вытекает из опыта Майкельсона. И это — самый существенный аргумент против взглядов Милликена, аргумент, независимый от того, было ли обнаружено в архиве Эйнштейна его письмо, в котором отрицается прямое влияние опыта Майкельсона на его исследования, и от того, что вообще думал по этому поводу сам Эйнштейн в разное время.

Но однозначный логический путь от опыта к теории существует, если в многообразном опыте отбирается некоторая *совокупность* разнородных экспериментально обоснованных предпосылок и *отыскиваются условия их логической совместности*. Это и есть логический процесс создания теории. Именно этот метод построения теории относительности (специальной), в противоположность методу Лоренца, практически применил сам Эйнштейн, и он привел к решающему прогрессу физики *.

Анализ процесса становления другой обобщающей теории — квантовой механики — показывает, что и в этом случае он осуществлялся так же: из множества экспериментально подтвержденных фактов вычленялась совокупность разнородных предпосылок и отыскивались условия их логической совместности. Таков общий путь становления теорий.

Итак, мы приходим к выводу, что между совокупностью экспериментально подтвержденных предпосылок и тео-

* Мы должны здесь кратко пояснить терминологию, чтобы избежать недоразумений. *Разнородными* экспериментами или предпосылками (которыми могут быть и экспериментально подтвержденные теории) мы называем такие, которые вносят *свой вклад* в логическую структуру теории; требование специфического вклада при включении в набор исходных предпосылок обязательно. «Однозначный логический путь» не исключает различных форм теории одного и того же круга явлений; в таких случаях различные по форме теории эквивалентны друг другу и выражают одни и те же логические связи объектов.

рией или короче, между опытом и теорией существует однозначная логическая связь. Но это — не та фигура формальной логики, согласно которой в выводе не заключается никакого нового содержания, которого не было бы в посылке. Отыскание и формулировка условий логической совместности некоторой совокупности разнородных предпосылок, т. е. формулировка теории, *ведет к новому знанию*, которое непосредственно в каждом единичном эксперименте не усматривается. Именно через теорию раскрываются объективные связи, существующие в природе, и в этом ее непреходящее гносеологическое значение*.

Становлением теории процесс познания не заканчивается: теория проверяется последующей практикой, основанной на теоретических выводах, а результаты практики оказывают обратное воздействие на теорию, внося в нее, если необходимо, поправки. Практическая деятельность, в которой устанавливаются разрозненные связи объективного мира — вычленение из них совокупности экспериментально обоснованных предпосылок — отыскание условий их логической совместности (формулировка теории) — проверка теории практической деятельностью, осуществляемой на основе новой теории, — воздействие результатов этой деятельности на формулировку теории (обратная связь), — таковы основные звенья процесса познания, которые представляют собой *целостный гносеологический цикл*. В этом цикле выявляются черты *диалектической логики познания*, которая отражает логику объективного мира.

Развитию познания не препятствует тот факт, что аккумулярованный в посылках опыт формулируется в

* Иногда утверждают, что теория относительности была создана еще до Эйнштейна; например, у Пуанкаре имелись все ее элементы (отрицание абсолютного движения, идеи об универсализации принципа относительности, о постоянстве скорости света и т. п.). Несомненно, предпосылки, легшие в основу теории относительности, в ходе разработки проблем электродинамики возникали в голове не только одного Эйнштейна, и этот факт указывает на обоснованность и наличие объективных оснований для этих предпосылок. Однако отыскание и формулировка условий логической совместности этих предпосылок, т. е. создание *теории*, есть существенный шаг, ведущий к новому знанию, значение которого нельзя недооценивать. Этот шаг и сделал Эйнштейн.

понятиях на уровне предшествующего знания. Опора на результаты предшествующего знания, включая и понятия, и неизбежна, и необходима. Познание есть процесс *историко-логический*, это обосновывается современной материалистической гносеологией. Развитие физических теорий хорошо иллюстрирует суть этого процесса. Отыскание условий логической совместности экспериментально обоснованных посылок ведет к изменению тех понятий, в которых формулировался опыт на прежнем уровне, на котором совместность посылок не учитывалась. Требование совместности посылок жестко определяет условие их совместности, т. е. определяет характер и границы изменения понятий. Понятия получают свое содержание в соответствии с той ролью, которую они играют в целостной теории. С логической стороны теория есть целостность понятий, и их содержание получает развитие и проверку в целостном завершенном гносеологическом цикле. Отношение между понятиями, охватываемыми теорией, и самой теорией аналогично тому, которое существует в природе между элементами системы и самой целостной системой.

Вся эта диалектика развития понятий находит прекрасную иллюстрацию на примере становления теории относительности.

Но оставляет ли признание логической связи между опытом и теорией место для творческой изобретательности, умения охватывать умственным взором всю совокупность опыта, прозорливо предугадывать еще только намечающиеся линии развития науки, для интуиции, покоящейся на накопленном опыте, роли широкого обобщенного взгляда на природу, — словом, для всех тех качеств, которые характеризуют индивидуальность ученого, высоко ценятся их почитателями и ревниво отстаиваются ими самими?

Безусловно, роль этих качеств никогда не потеряет значения, даже тогда, когда к анализу условий логической совместности предпосылок будут привлечены электронно-вычислительные машины, что в перспективе естественно ожидать. Роль субъективных качеств велика уже в процессе вычленения предпосылок теории («обобщающих принципов») из множества экспериментальных фактов; ученый с большей логической прозорливостью, пониманием законов познания, накопленным опытом может предвидеть и отыскивать связи там, где другой нуждается в предъявлении осязаемых «наглядных фактов».

Но роль этих субъективных факторов не отменяет наличия логической связи между принудительным для нас опытом и вытекающей из него теорией. Уже и сам факт признания, что такая логическая связь существует, играет положительную роль в развитии познания, так как ясно определяет задачи исследователя, нацеливает его сознательную деятельность.

Все это нам кажется полезным отметить, рассматривая вопрос об опытных основаниях теории относительности в связи с интересной статьей профессора Дж. Холтона.

УДК 530.12

Переписка А. Эйнштейна и М. Борна. «Эйнштейновский сборник, 1972». Изд-во «Наука», 1973, стр. 7.

Окончание переписки. Начало опубликовано в предыдущем «Эйнштейновском сборнике».

УДК 530.12

Эйнштейн, Майкельсон и «решающий» эксперимент. Холтон Д. «Эйнштейновский сборник, 1972». Изд-во «Наука», 1973, стр. 104.

На основании исторического исследования автор показывает, что опыт Майкельсона не мог быть «решающим» при создании Эйнштейном специальной теории относительности.

УДК 530.12

Эффект Вавилова — Черенкова и эффект Доплера при движении источников со скоростью больше скорости света в вакууме. Болотовский Б. М., Гинзбург В. Л. «Эйнштейновский сборник, 1972». Изд-во «Наука», 1973, стр. 212.

Рассматривается интерференция излучения от многих точечных источников, сфазированных таким образом, что результирующее излучение может быть приписано источнику, скорость которого превышает скорость света в вакууме. Илл. 9. Библ. 25 назв.

УДК 530.12

Два парадокса специальной теории относительности. Смородинский Я. А., Угаров В. А. «Эйнштейновский сборник, 1972». Изд-во «Наука», 1973, стр. 237.

Рассматривается вопрос о видимой форме тел, движущихся с релятивистскими скоростями, и преобразование сил и моментов сил, действующих на находящиеся в равновесии тела, при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Илл. 4. Библ. 20 назв.

УДК 530.12

Термодинамика и статистическая механика в специальной теории относительности. Тер Хаар Д., Вергеланд Г. «Эйнштейновский сборник, 1972». Изд-во «Наука», 1973, стр. 254.

Исходя из соображений о том, что должно существовать однозначное соответствие между описаниями термодинамической системы, сделанными различными инерциальными наблюдателями, авторы приходят к термодинамике в форме, предложенной Оттом. Однако их выводы отнюдь не исключают другие формулировки. Показано, как можно получить оттовскую формулировку на основе статистической механики. Илл. 1. Библ. 30 назв.

УДК 530.12

Квантовая теория гравитации. Владимиров Ю. С. «Эйнштейновский сборник, 1972». Изд-во «Наука», 1973, стр. 280.

Дается обзор различных подходов к проблеме квантования гравитации. Излагается состояние проблемы квантования произвольного гравитационного поля, квантования закрытых миров, теория квантования слабого гравитационного поля и обзор подсчитывающихся на ее основе эффектов гравитационных трансмутаций материи. Сделан анализ возможных источников и ожидаемых от них потоков гравитационного излучения в окрестности Земли. Илл. 11. Библ. 124 назв.

УДК 530.12

Молчание Пуанкаре и теория относительности Эйнштейна. Голдберг С. «Эйнштейновский сборник, 1972». Изд-во «Наука», 1973, стр. 341.

Причиной, по которой А. Пуанкаре ни разу публично не обмолвился о теории относительности Эйнштейна, автор считает общий подход Пуанкаре к построению физической теории. Рассматривая иные возможности, автор приходит к выводу, что тривиальность теории Эйнштейна с точки зрения Пуанкаре вызвала полное умолчание им работ Эйнштейна. Библ. 59 назв.

УДК 530.12

Опыт и физическая теория. Суворов С. Г. «Эйнштейновский сборник, 1972». Изд-во «Наука», 1973, стр. 359.

Показано, что теория относительности действительно не вытекает непосредственно из опыта Майкельсона, как полагает и проф. Дж. Холтон, однако это следует не из толкования тех или иных высказываний или писем Эйнштейна, а из анализа логической связи, которая существует между совокупностью опытных предпосылок и соответствующей теорией.

Эйнштейновский сборник, 1972

Утверждено к печати

Эйнштейновским комитетом АН СССР

Редактор *В. А. Никифоровский*

Художественный редактор *Н. Н. Власик*

Технические редакторы *Р. М. Демисова, Н. П. Кузнецова*

Сдано в набор 13/VI 1972 г.

Подписано к печати 26/XII 1973 г.

Формат 84×108^{1/2}. Бумага № 2

Усл. печ. л. 20,72. Уч.-изд. л. 22,2

Тираж 10000 экз., Т-17064 Тип. зак. 2524

Цена 1 р. 80 к.

Издательство «Наука»

103717 ГСП Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука»,

121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

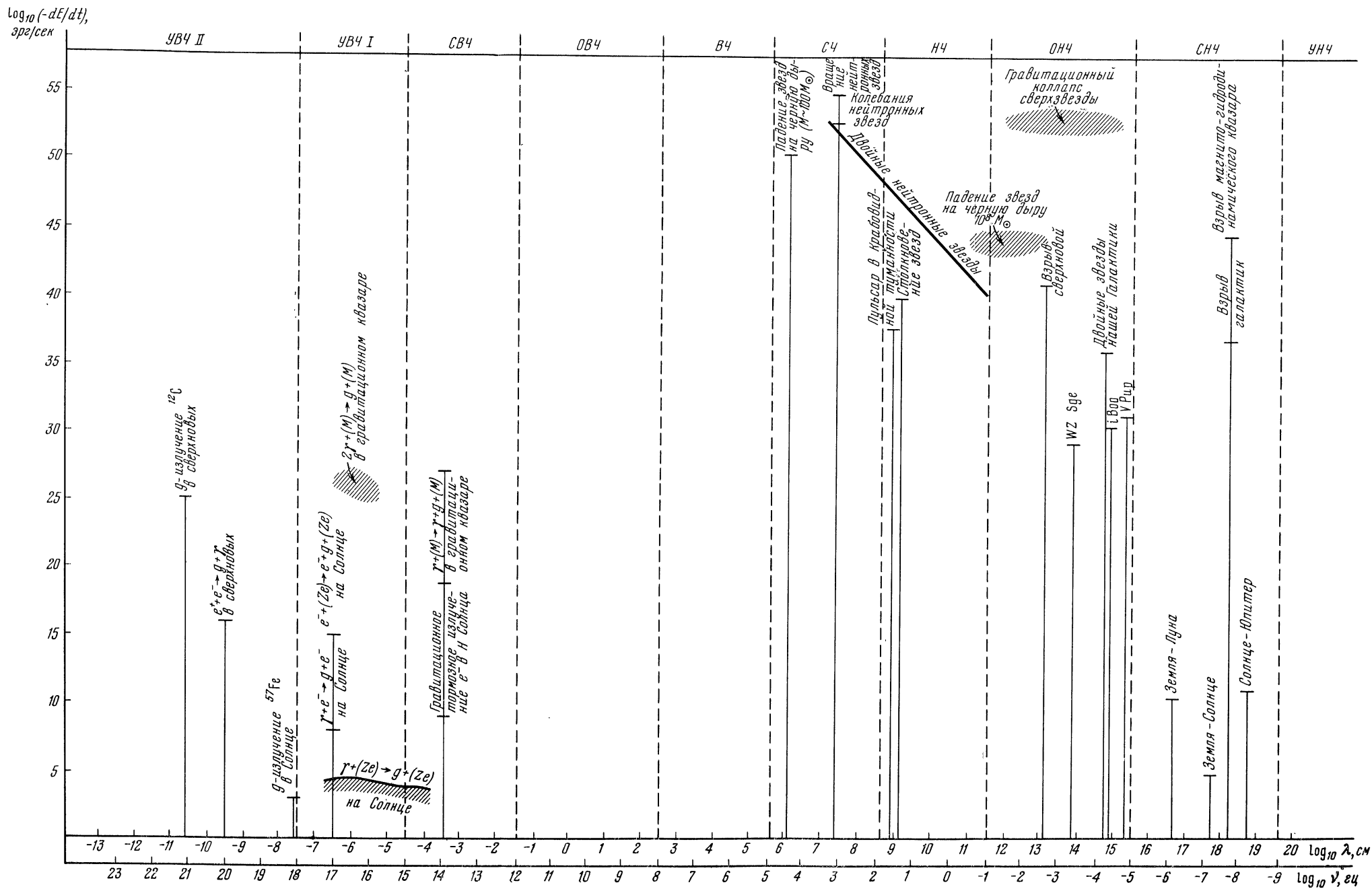


Рис. 3. Возможные источники гравитационного излучения

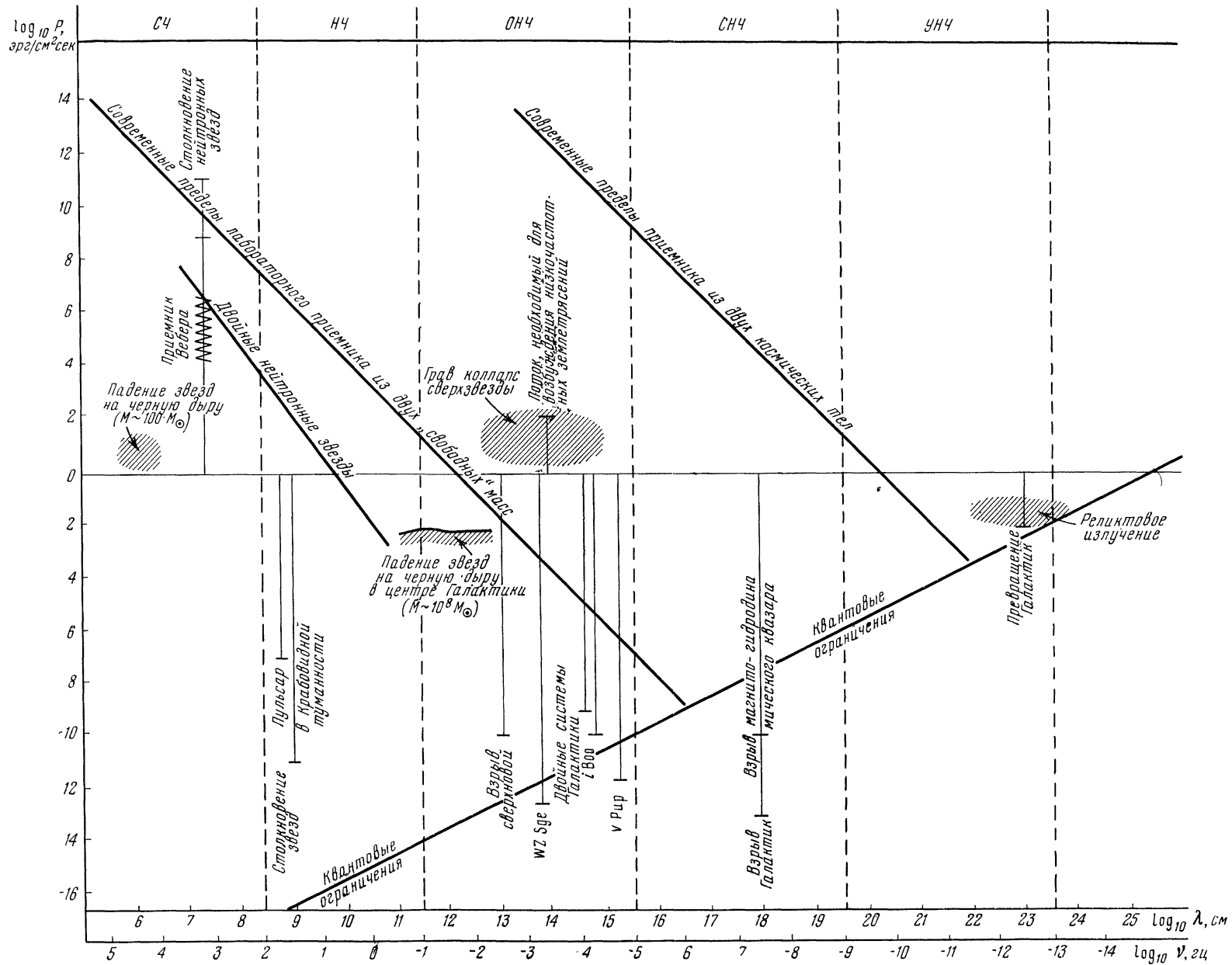


Рис. 4. Ожидаемые потоки гравитационных волн вблизи Земли