

ЭЙНШТЕЙНОВСКИЙ
СБОРНИК

1977

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОТДЕЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
ЭЙНШТЕЙНОВСКИЙ КОМИТЕТ

ЭЙНШТЕЙНОВСКИЙ СБОРНИК

1977



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА

1980

Эйнштейновский сборник 1977 г. открывается перепиской А. Эйнштейна и М. Бессо, часть которой была опубликована в Эйнштейновских сборниках 1974, 1975—1976 гг. В сборник 1977 г. вошли статьи советских и зарубежных авторов по общей и специальной теории относительности, а также по сверхпроводимости, электродинамике движущихся тел и другие статьи.

Издание рассчитано на широкие круги читателей, интересующихся современной физикой и историей физики.

Редакционная коллегия:

академик В. Л. ГИЦЗБУРГ,

академик А. А. ЛОГУНОВ,

академик М. А. МАРКОВ,

академик АН ЭССР Г. И. ПЛАИ,

доктор экономич. наук Б. Г. КУЗНЕЦОВ

Ответственные редакторы

В. Л. Гинзбург, Б. Г. Кузнецов

Составитель У. И. ФРАНКФУРТ

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Перепишка А. Эйнштейна и М. Бессо, 1903—1955	5
<i>Б. М. Болотовский, С. Н. Столяров</i>	
Усиление электромагнитных волн в присутствии движущихся сред	73
<i>Ф. Нестер</i>	
К вопросу о кинематике абсолютно твердого тела в теории относительности	131
<i>Б. Е. Явелов</i>	
Эйнштейн и проблема сверхпроводимости	158
<i>Е. Л. Фейнберг</i>	
Взаимосвязь науки и искусства в мировоззрении Эйнштейна	187
<i>В. Я. Френкель, Б. Е. Явелов</i>	
Изобретательская деятельность А. Эйнштейна	214
<i>У. И. Франкфурт</i>	
Оптика движущихся сред и специальная теория относительности	257

107. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Берлин, 30.10.1931

Дорогой Мишель!

Единственное, что удалось в нашем исследовании, — объединить гравитацию и электричество, причем уравнения последнего в точности совпадают с уравнениями Максвелла для пустого пространства (записанными в релятивистском виде). Никакого физического прогресса при этом не достигается, разве что становится ясно, что уравнения Максвелла — не только первое приближение, но и рационально обоснованы столь же хорошо, как и уравнения гравитации для пустого пространства ^(а). Ни плотности заряда, ни плотности массы не существует, и все великолепие рухнет, мы имеем дело уже с квантовой проблемой, которую до сих пор еще никому не удавалось разрешить с позиций теории поля (так же, как никому не удавалось построить теории относительности, исходя из квантовой механики). Вся хитрость — во введении 5-векторов a^σ в четырехмерном пространстве, связанных с пространством некоторым линейным механизмом. Пусть a^s — 4-вектор, соответствующий a^σ , тогда существует следующая зависимость:

$$a^s = \gamma_\sigma^s a^\sigma.$$

Следовательно, в нашей теории имеют смысл лишь такие уравнения, которые выполняются независимо от соотношений, вводимых с помощью γ_σ . Далее мы определяем бесконечно малый сдвиг 5-векторов a^σ в четырехмерном

* Окончание. Начало см. в «Эйнштейновских сборниках, 1974, 1975—1976» (М.: Наука, 1977, 1978)/Пер. И. М. Гандельсмана, Ю. А. Данилова, В. Я. Френкеля. Арабскими цифрами в тексте помечены примечания издателя переписки П. Специалли. Буквой ^(а) — примечания М.-А. Тоннела. Они приводятся в конце писем. Письма даны в сокращении.

пространстве, а также соответствующую 5-кривизну и отсюда получаем уравнение поля. Все это — лишь для того, чтобы ты мог составить общее представление о нашем методе * <...>.

Сердечный привет тебе и твоей Анне

от твоего А. Э.

(а) Речь идет о единой пятимерной теории поля, известной под названием теории Эйнштейна — Майера. Следует заметить, что, согласно Эйнштейну, пятимерное риманово пространство позволяет записать уравнения единой теории поля, но не является «истинно физическим пространством». Именно поэтому теория Эйнштейна — Майера позволяет осуществить «методологический синтез», но не приводит к «подлинному физическому прогрессу».

108. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Берлин, 19.11.1931

Дорогой Мишель!

Мне придется вернуться в Пасадену, и я не смогу приехать в Швейцарию, что отрадно для моего кошелька, но не радостно для нас с тобой. Поэтому отвечаю тебе в письме, хотя до отъезда осталось 2 дня и мне еще предстоит разделаться с огромным ворохом корреспонденции <...>.

Новая работа по гравитации и электричеству ** еще не вышла из печати. Тебе непременно нужно пополнить свои познания по этому интересному вопросу, писать же о нем слишком долго. Когда придут отдельные оттиски, я буду уже на борту судна.

С искренним приветом

твой Альберт.

109. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Канум, 21.10.1932

Дорогой Мишель!

Как я могу на тебя сердиться? Не помню случая, чтобы ты высказался или поступил не с добрыми намерениями. Так было и с Тете. Я также пригласил его на следующий год в Америку (Принстон). Его приезд в этом году был нежелателен, поскольку обстановка в

* См.: Единая теория гравитации и электричества (совместно с В. Майером). — В кн.: *Эйнштейн А. Собр. науч. трудов*. М.: Наука, 1966, т. 2, с. 366. — *Прим. ред.*

** Там же.

Калифорнии и мои обязанности носят довольно деликатный характер. Для Тете пребывание там было бы скорее опасной нагрузкой, чем отдыхом. К сожалению, все указывает на то, что тяжелая наследственность проявляется у него весьма отчетливо. Я наблюдал, как она наступает, медленно, но неотвратимо, с юных лет Тете. Внешние обстоятельства и воздействия извне играют в таких случаях ничтожно малую роль по сравнению с внутренней секрецией, воздействовать на которую не дано никому (...).

Твои статьи * показались мне интересными, но несколько отрывочными и логически не вполне продуманными. Жаль, что ты не даешь себе труда излагать свои разумные идеи в ясной и отчетливой форме. Что касается кризиса, то, по моему мнению, нашей экономике присущ один фундаментальный недостаток: она всегда, а сейчас более чем когда-либо, страдает от чрезмерного предложения неквалифицированного труда. Я не социалист и не коммунист. Здоровая продуктивность планового хозяйства вызывает у меня сомнения. Однако я считаю, что общество путем введения ограничительных мер должно устанавливать надлежащие пределы для предложения неквалифицированного труда с тем, чтобы поддержать столь высокий уровень заработной платы, который позволил бы массе покупать производимые товары. Без таких регулирующих мер большая часть людей (а именно все неквалифицированные рабочие) будет низведена на недостойный уровень существования, и, кроме того, немалая доля вообще окажется выброшенной из экономического цикла и тем самым обреченной на уничтожение.

Вместе с моим д-ром Майером я работаю над теорией спиноров**. Мы уже в состоянии объяснить математические зависимости. До понимания физической стороны дела еще далеко, гораздо дальше, чем сейчас думают. Как и прежде, я особенно убежден в том, что попытка создания существенно статистической теории обречена на провал.

С искренним приветом

твой Альберт.

* В «Technische Rundschau» от 23 сентября 1932 г. были опубликованы две небольшие статьи М. Бессо.— *Прим. ред.*

** См.: Полувекторы и спиноры (совместно с Майером).— В кн.: *Эйнштейн А.* Собр. науч. трудов. М.: Наука, т. 3, с. 535.— *Прим. ред.*

Ле Кок-сюр-Мер, 5 мая 1933

Дорогой Мишель!

Признаться, я не был ничуть удивлен, но почти все, с кем я поддерживаю более или менее близкие отношения, потрясены. Пагубное влияние бисмарковской муштры в очередной раз сказывается на немцах.

Твоему совету относительно Вейля я охотно последую, как только для этого представится возможность, хотя сейчас я по уши погряз во взятых на себя обязательствах. Однако малейшее вмешательство с моей стороны, направленное на то, чтобы заменить в Испании мою персону кем-нибудь другим, несомненно, было бы воспринято как вопиющая бестактность. Разве ты сам не говорил так?

Тороплюсь. С приветом

Альберт.

Р. С. Передай мой привет Анне и скажи ей, что об обстановке в Германии она может лучше всего судить по событиям на выдуманном ею острове ученых.

111. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 16.2.1936

Дорогой Мишель!

Твой последний призыв, наконец, умягчил мою изрядно огрубевшую совесть. Сегодня же я написал и бедняге Тете, у которого дела плохи. Мое молчание, длившееся так долго, проистекало из того, что математический гном упорно сидит у меня на шее и, невзирая на мои седины, не дает мне ни минуты покоя. И это хорошо, поскольку в наше время человеческие отношения радуют менее, чем когда либо, не говоря уже о дураках в Германии. Лишь теперь наконец, выяснилось, каким пророческим духом наделен проф. Винтелер, распознавший смертельную опасность во всем ее размере с такой отчетливостью и столь рано. Я не верю более в серьезную моральную угрозу Швейцарии — если экономическое обнищание не продлится слишком долго или не перейдет в хроническое. Несмотря на все природные богатства, перспективы здесь не из лучших. Вместе с тем я убежден, что американцы сумеют найти путь к экономическому обеспечению индивидуума прежде, чем будет слишком поздно •. Люди здесь в гораздо меньшей степени скованы жесткими традициями и сословными

предрассудками, чем в Европе, и привыкли к тому, что собственность и положение лишены стабильности.

Статистическую физику, несмотря на все ее успехи, я считаю промежуточной фазой и надеюсь получить по-настоящему удовлетворительную теорию материи. Высылаю тебе одновременно небольшую работу *, представляющую собой первый шаг в этом направлении. Нейтральная и заряженная частица возникает как своего рода дыра в пространстве, так что метрическое поле переходит в себя. Само пространство становится двулистным. В шварцшильдовском решении с его строгой центральной симметрией частица возникает в обычном пространстве как сингулярность типа $1 - 2m/r$. Подстановкой $r - 2m = u^2$ поле можно сделать регулярным в u -пространстве. Когда u пробегает все значения от $-\infty$ до $+\infty$, r принимает все значения от $+\infty$ до $r - 2m$ и от него снова до $r = +\infty$. Так появляются два «листа» в смысле Римана, которые непрерывно сшиваются вдоль «мостика» при $r = 2m$, или $u = 0$. Аналогично обстоит дело и с электричеством.

Задача, над которой я беспрерывно бьюсь с одним молодым коллегой, состоит в рассмотрении на этой основе задачи многих тел **. Однако нам уже удалось преодолеть серьезные трудности в том смысле, что теперь уже ясно, в чем они состоят. Во всяком случае это — превосходная математическая задача.

Сердечно приветствую тебя и твоих близких.

Твой А. Э.

● Слово «социализм» здесь табу, но все идеи и попытки улучшить положение имеют именно это направление

* Проблема частиц в общей теории относительности (совместно с Н. Розеном). — В кн.: Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1966, т. 2, с. 424.— Прим. ред.

** Работа, о которой идет речь, легла в основу статьи о задаче n , а двух тел: Проблема двух тел в общей теории относительности (совместно с Н. Розеном).— В кн.: Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1966, т. 2, с. 434.— Прим. ред.

Принстон, 9 июня 1937

Дорогой Мишель!

Рад, что нынешние печальные обстоятельства дают мне основания вновь приветствовать тебя. Я живу теперь, как старый отшельник в милом домике, утопающем в зелени, и с прежним удовольствием бьюсь над проблемами. Самое прекрасное здесь то, что я могу работать вместе с молодыми коллегами.

После долгих усилий мы обнаружили, что релятивистские уравнения, полученные прямым переносом уравнений Максвелла в теорию относительности, не позволяют решить проблему частиц. Однако недавно я нашел, что существует весьма естественное видоизменение теории Максвелла, в котором потенциалы не входят в вариационный принцип. Интересно, сумеем ли мы достичь цели*.

Хорошо, когда с любимым «пунктиком» сживаешься настолько, что это позволяет в какой-то мере держаться вдали от людей, иначе трудно было бы сохранять жизнерадостность. Через несколько дней я снова отправлюсь на побережье, чтобы таким старым Адамом отдохнуть за летние месяцы под парусом. Природа в этой стране удивительно красива.

Посылаю тебе в письме ответ названного Витцем коллеги, хотя звучит он не слишком обнадеживающе. В Америке шанс имеет каждый, кто, так сказать, разбирается в сапожном ремесле. Тем же, кто просто надеется на удачу, здесь, как правило, делать нечего (я — счастливое исключение).

Я часто и с удовольствием размышляю о наших стародавних временах в патентном бюро, и у меня в голове не укладывается, что я ушел оттуда почти 30 лет назад. Как-никак это составляет 10^9 секунд, и следует лишь удивляться тому, что за такое время удается создать не так уж много хорошего.

Сердечный привет тебе и твоей Анне от твоего

Альберта.

* См.: Гравитационные уравнения и проблема движения (совместно с Л. Инфельдом и Б. Гоффманом).—В кн.: *Эйнштейн А.* Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1966, т. 2, с. 450.—Прим. ред.

Принстон, 8.8.1938

Дорогой Мишель!

Твои письма напоминают мне японский подарок. Его обычно искусно заворачивают в разноцветные бумажки и перевязывают хитроумно переплетенными веревочками, поэтому разворачивать такой подарок приятно, но долго.

Что касается твоего племянника, то, как мне представляется, дело обстоит следующим образом. Проживающими в США считаются лишь те, кто там действительно находится. Однако при должной настойчивости, удаче и личных связях иногда все же удается устроиться. Всякого рода тонкие материи обычно ценятся мало, зато бизнесмен считается национальным святым. Этим я хочу сказать, что новая подвязка значит здесь больше, чем новая философская теория. И все же мне здесь очень хорошо, и редко можно найти человека, который хотел бы вернуться в утонченную Европу. Я знаю, что ты питаешь к своей Италии неизлечимую слабость <...>.

Вероятно, я не смогу особенно помочь с устройством твоего племянника на приличное место. Хотя я здесь белая ворона и меня все знают, мне все же удастся вести совершенно замкнутый образ жизни и свести до нуля контакты с людьми, если не считать обширной корреспонденции, в силу необходимости остающейся по большей части односторонней. Тем не менее моя рекомендация может вызвать личное доверие.

Что касается моих научных занятий, то я провожу время очень интересно. Тебе хорошо известно, что, несмотря на успехи квантовой теории, я никогда не верил в существенно статистические основы физики. В этом году после двадцатилетних тщетных поисков мне удалось найти многообещающую теорию поля, представляющую весьма естественное продолжение релятивистской теории гравитации. Она выдержана в духе идеи Калуцы о сущности электрического поля. Когда моя работа будет напечатана, пошлю ее тебе.

Я все время работаю с одним или двумя молодыми людьми, освобождающими меня от вычислений. Годы берут свое, поэтому и в работе мне приходится соблюдать меру <...>.

Искренний привет тебе и твоей Анне.

Твой Альберт.

Р. С. Я снова неоднократно оказывал поддержку детям, которых Матиас оставил в Канаде в крайне бедственном положении.

114. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 10.10.1938

Дорогой Мишель!

Я не могу более давать поручительства и подверг бы опасности тех, кто все еще находится на подозрении, если бы выдал новое поручительство. К тому же несколько моих знакомых, людей довольно состоятельных, задержаны почти у самой границы. Давление неимущих там на нас столь сильно, что, представив себе массу бедняков и ограниченные возможности помочь им, трудно удержаться, чтобы не впасть в сомнение. Коммерсантам здесь устроиться чертовски трудно, для рабочих ситуация складывается более благоприятно: это как нельзя на руку твоей подопечной. Однако тем, у кого здесь нет родственников, приходится очень трудно. Поручительство родственников принимается во внимание в первую очередь, а это означает, что все остальные все более и более остаются за чертой.

Ты веришь англичанам и даже Чемберлену? О святая простота! Он пожертвовал Восточной Европой в надежде, что Гитлер обратит свою ярость против России. Но мы видим, что и здесь у хитрости короткие ноги. Во Франции он загнал левых в угол, и во Франции в седле оказались люди, которые избрали своим девизом: «Лучше Гитлер, чем красные!» Это отчетливо проявилось еще в политике уничтожения, проводимой против Испании. А совсем недавно он спасает Гитлера, водрузив ему на голову венок миротворца и спровоцировав Францию на предательство по отношению к чехам. И все это он проделал столь ловко, что ему удалось ввести в заблуждение многих, в том числе (к сожалению) и тебя. Единственное, чего он опасался, отправляясь в свой унижительный полет, — как бы Гитлер не потерял почву под ногами. За будущее Европы я не дам теперь и ломаного гроша. Америка храбро приняла участие в удушающем маневре против Испании, ибо здесь фактически царят деньги и страх перед большевиками и вообще страх имущих за свои привилегии. Мне бы не хотелось жить, если бы у меня не было работы. Во всяком случае, хорошо быть

старым и, следовательно, не строить личных планов относительно далекого будущего.

Посылаю тебе свою последнюю работу *, на продолжение ее я возлагаю большие надежды. Как и прежде, я твердо убежден, что придание вероятностного характера законам природы с более глубокой точки зрения является ошибочным путем, несмотря на все практические успехи статистического метода. Из этой работы ты не сможешь извлечь физических следствий. Но ее чисто логическая сторона несомненно понравится тебе независимо от того, позволяет ли работа достичь чего-нибудь с физической точки зрения.

Рад за тебя, что ты ушел на пенсию. Ты достаточно долго тянул постылую ляжку без чьей-либо помощи и с полным правом можешь посвятить последние годы жизни размышлениям. Платон желал этого для всех своих привилегированных классов, число которых доходило до 50.

У Милевы большие трудности с ипотечными процентами. Я бы хотел перевести дом, в котором она живет, на свое имя, хотя это сопряжено с определенной опасностью.

Передай привет от меня Анне.

Альберт.

115. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 11 ноября 1940

Дорогой Мишель!

Разумеется, я узнаю стиль моего мальчика и высоко ценю его афоризмы, столь ясные и точные. Коллекция такого рода попадалась мне в руки и раньше, но автор не был известен, и бесчисленные посвящения произвели на меня впечатление своим качеством. Мне бесконечно жаль мальчика, вынужденного влачить существование без малейшей надежды на нормальную жизнь. С тех пор, как окончательно выяснилось, что лечение инсулином не приводит к желательным результатам, я утратил веру в медицинскую помощь. Я вообще не слишком доверяю этой корпорации и предпочитаю полагаться на природу.

Я рад частым известиям о тебе, доходящим до меня из твоих писем и от Майи, и надеюсь, что существующее ныне положение сохранится для Швейцарии и впредь.

* Обобщение теории электричества Калуцы (совместно с П. Бурманом).— В кн.: *Эйнштейн А. Собр. науч. трудов.* М.: Наука, 1966, т. 2, с. 492.— *Прим. ред.*

Сам я неуклонно и упорно следую своей научной цели, придерживаясь того пути, который указывает мне мой инстинкт. Я считаю, что чисто статистический путь, несмотря на его значительные успехи, все же неверен <...>.

Твой Альберт.

116. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, август 1942

Дорогой Мишель!

Моя задолженность перед тобой по письмам смердит до небес. Но на этот раз я отвечаю тебе незамедлительно, поскольку ты погладил моего «конька». Речь идет о старой проблеме единого описания общего поля (гравитации и электричества). Ты, конечно, знаешь, что до сих пор все попытки (предпринятые главным образом Вейлем и Калуцой) оказались безуспешными. Моя новая попытка имеет с прежними попытками то общее, что в качестве уравнений общего поля я хочу найти нечто такое, что было бы в каком-то смысле аналогично уравнениям гравитации для пустого пространства, но в то же время относилось к полному полю.

Калуца поступал следующим образом. Вместо четырехмерного пространства с метрикой

$$\begin{aligned} g_{11} \dots g_{14} \\ \dots \dots \dots \\ \dots \dots \dots \\ g_{41} \dots g_{44} \end{aligned}$$

он взял пятимерное пространство с метрикой

$$\begin{aligned} g_{11} \dots g_{14}g_{15} \\ g_{21} \dots g_{24}g_{25} \\ \dots \dots \dots \\ g_{41} \dots g_{44}g_{45} \\ g_{51} \dots g_{54} \quad 1, \end{aligned}$$

причем все g зависели только от x^1, \dots, x^4 , а не от x^5 .

Моя новая попытка исходит из того, что в римановой геометрии образование нормированных миноров g_{ik} (g^{ik}) имеет фундаментальное значение. Ведь именно образование таких миноров позволяет получать из кова-

риантных векторов A_s контравариантные векторы $A^r = \delta^{rs} A_s$. У Римана тензор g_{ik} симметричен. Но составление нормированных миноров само по себе не приводит к такому симметричному объекту. Это наводит на мысль ввести вместо симметричного тензора g_{ik} несимметричный тензор g_{ik} . Однако такая замена была бы неразумной, поскольку любой несимметричный тензор допускает разложение в сумму симметричного и антисимметричного тензора:

$$g_{ik}^r = s_{ik} + a_{ik}, \quad \begin{aligned} s_{ik} &= s_{ki}, \\ a_{ik} &= -a_{ki}. \end{aligned}$$

Следовательно, в итоге мы снова получили бы два поля, преобразующихся независимо, а не одно единое поле.

То, что я делаю дальше, покажется тебе безумием, и вполне возможно, что так оно и есть. Однако не следует упускать из виду, что дуализм волна-частица требует какого-то отчаянного шага, если мы не хотим, как обычно, скатиться к статистическому подходу, который я, как и прежде, не считаю окончательным методом.

Я рассматриваю пространство, четыре координаты которого x^1, \dots, x^4 комплексны, в силу чего оно, по существу, является восьмимерным пространством. Каждой координате x^i соответствует комплексно-сопряженная координата \bar{x}^i . Каждый вектор A^i обладает четырьмя комплексными компонентами, и ему соответствует комплексно-сопряженный вектор \bar{A}^i . Вместо римановой метрики у меня фигурирует метрика вида

$$g_{ik} dx^i d\bar{x}^k. \quad \dagger$$

Она должна быть вещественной, поэтому $g_{ik} = \bar{g}_{ki}$ (эрмитова метрика). Величины g_{ik} — аналитические функции координат x^i и \bar{x}^i .

Вопрос теперь стоит совершенно так же, как у Римана: какие дифференциальные уравнения второго порядка следует записать для g_{ik} ? Вместо ковариантности относительно произвольных непрерывных преобразований вещественных координат x^i мы (по существу) получаем ковариантность относительно преобразований вида

$$x^i = f^i(x^s), \quad \bar{x}^i = \bar{f}^i(\bar{x}^s).$$

Трудность заключается в том, что, во-первых, существует много систем уравнений, удовлетворяющих этим условиям.

Однако я нашел, что эта трудность исчезает при правильном подходе и что все происходит почти в точности так же, как у Римана.

Интегрирование сложно, и не так-то быстро можно сказать, имеют ли прекрасные воздушные замки какое-нибудь отношение к творению господа бога. Как только у меня появится хоть сколько-нибудь обоснованное убеждение в этом, я охотно сообщу тебе.

А пока искренний привет тебе и твоим.

Твой А. Эйнштейн.

(Я считаю, что фамилию следует писать полностью).

117. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 21 апреля 1946

Дорогой Мишель!

Муки моей нечистой совести из-за столь долгого молчания почти непереносимы. Дело просто в том, что демон исследований не оставляет мне ни одной свободной минутки, и я теряю последние зубы, пытаюсь преодолеть математические трудности <...>.

Майя собирается домой после того, как мы вместе читали Геродота, Аристотеля, «Историю западной философии» Рассела и много других интересных книг. Со здоровьем у меня все в порядке, хотя, судя по всему, старый ящик скоро совсем расклеится, как и следует ожидать в его возрасте.

С искренним приветом

твой Альберт.

118. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 14 декабря 1946

Дорогой Мишель!

Я отчетливо вижу, что этот Ден тянет из тебя твою добрую душу. Его работа, может быть, и заслуживает всяческих похвал, но я не вижу ни малейшего основания вступаться за него, поскольку просто не знаю, что ценного он предложил. О педагогических идеях относительно электротехников я не имею ни малейшего представления. Я бы злоупотребил своим именем, если бы высказался в его пользу по вопросу, о котором никоим образом не могу судить. Что же касается здешних институтов, то я

в силу своего замкнутого образа жизни не пользуюсь никаким влиянием и вряд ли могу сделать что-нибудь даже для тех, кого могу оценить по заслугам. Единственный, с кем мне приходится иметь дело де факто, — это мой ассистент, вместе с которым я тружусь над приложениями теории относительности, — тихая, плодотворная работа, значение которой будет со временем признано.

Твою статью о наших давних временах вместе с примечаниями доброго д-ра Заутера я прочитал с большим интересом, хотя, насколько мне помнится, они не соответствуют действительности. Впрочем, я не усматриваю ничего дурного в том, что в нашем бюро иной раз обсуждались разумные вопросы, далекие от того, за что государство платило нам жалованье. Он может утешаться тем, что даже для бога сотворение мира было, по-видимому, бесцельной роскошью, и тем не менее бог не отказался от своей затеи. Во всяком случае, я заметил, что то, за что люди получают плату, редко бывает сколько-нибудь разумным, и из этого редко выходит что-нибудь путное.

Оставь меня в покое с Моруа. Он краснобай и прекрасно знает, с какой стороны намазано масло. Когда человек храбр, как ты, видеть некоторые вещи тяжело, но зато так легче.

С искренним приветом и наилучшими пожеланиями по случаю Нового года

твой Альберт Эйнштейн.

119. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 6 января 1948

Дорогой Мишель!

Твое письмо очень интересно, и ответить на него не так-то просто. Что касается Маха, то я считаю необходимым провести различие между влиянием, которое Мах оказал вообще, и влиянием, которое он оказал на меня. Мах выполнил важные научные работы (например, на основе поистине гениального оптического метода открыл ударные волны). Однако мы будем говорить не об этом, а о его влиянии на общее отношение к основам физики. Я усматриваю его великую заслугу в том, что он сумел порвать с догматизмом, который царил в 18-м и в 19-м веках в вопросах, связанных с основами физики. В частности, в механике и в теории теплоты он особенно отчетливо

показал, как понятия возникают из опыта. Он с полным убеждением отстаивал точку зрения, согласно которой эти понятия, даже самые фундаментальные, могут быть обоснованы лишь исходя из эмпирики и отнюдь не являются логически необходимыми. Он внес здоровую струю, отчетливо показав, что важнейшие физические проблемы не носят математическо-дедуктивный характер, а связаны с фундаментальными понятиями. Его слабость я усматриваю в том, что он в той или иной степени сводил науку лишь к «упорядочению» эмпирического материала, т. е. признавал существование свободного конструктивного элемента в формировании понятий. В какой-то мере он считал, что теории возникают путем открытия, а не изобретения. Он зашел настолько далеко, что в «ощущениях» видел не только познаваемый материал, но и в какой-то мере строительные камни реального мира. Так он надеялся преодолеть различие между психологией и физикой. Если бы он был вполне последовательным, то ему пришлось бы отказаться не только от атомизма, но и от идеи физической реальности.

Что же касается влияния Маха на меня, то оно, несомненно, велико. Я хорошо помню, как ты указал мне на его «Механику» и «Теорию теплоты» во время моего первого учебного года и что обе книги произвели на меня сильное впечатление. Сколь далеко простиралось их воздействие на мою собственную работу, мне самому часто не очень ясно. Насколько я могу судить, непосредственное влияние Д. Юма на меня сильнее. Юма я прочитал вместе с Конрадом Габихтом и Соловиным в Берне. Но, как уже говорилось, я не в состоянии проанализировать то, что глубоко укоренилось в подсознательном мышлении. Впрочем, интересно отметить, что Мах отвергал специальную теорию относительности. (До общей теории относительности он не дожил.) Эта теория казалась ему невыносимо спекулятивной. Он не сознавал, что тот же спекулятивный характер присущ и ньютоновской механике и вообще любой мыслимой теории. Различие той или иной степени возникает между теориями лишь постольку, поскольку пути, проходимые мыслью от основных понятий до эмпирически проверяемых следствий, различаются по длине и сложности.

Заслуга Минковского состоит в том, что он ввел в теорию относительности теорию тензоров в четырехмерном пространстве, без которой математическая формулиров-

ка) общей теории относительности была бы невозможна. Эта была не «игра», а важный формальный вклад.

Неверно, будто броуновскому движению было суждено произвести переворот в основах механики. Я вывел его именно из механики (не ведая о том, что оно уже было наблюдаено). Неверно и то, будто условия Бора для орбит электронов следуют из моих работ по квантам. Единственный вывод, к которому можно прийти, состоит в том, что при сохранении механической картины атома такие правила должны выполняться. (Как ты хорошо знаешь, современную статистическую квантовую теорию, несмотря на ее большие практические успехи, я не считаю правильным путем.)

Я согласен с твоим замечанием о любви к врагам в том, что касается отношения к действию. Но духовную основу доверия я вижу в неограниченной причинности: «Я не могу ненавидеть его потому, что он должен поступать так, как он поступает». Следовательно, я стою ближе к Спинозе, чем к пророкам. Поэтому для меня также не существует «грехов».

Я по-прежнему считаю, что ты произвел бы на свет нечто ценное в научном отношении, если бы в достаточной мере был мономаном. Бабочка — не крот, но зато о бабочке не следует сожалеть.

Искренне твой А. Э.

120. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Женева, 7.7.1949

Дорогой друг.

28.IV я отправил тебе набросок письма Анны, относящийся еще к 1931 г., который я недавно нашел в ее бумагах. С тех пор мы с тобой ничего друг о друге не слышали; я не знаю даже, получил ли ты его. И хотя 50 лет, считая с 1898 г., включая те 10 лет, которые я провел в Женеве, пролетели как сон, — эти два месяца показались мне очень долгими. Не только потому, что я почувствовал себя поверенным тех мыслей 1931 г. и ответственным за них, — ведь я даже не знаю, отправила ли тебе тогда Анна задуманное ею письмо. А также и не потому, что я — по странной случайности — нашел недавно (и именно в таком месте, где он всегда был под руками!) выпуск *Dialectica*¹, в котором были опубликованы твои размышления относительно принятой сегодня теории. Нет,

эти два месяца показались такими долгими прежде всего, вероятно, также и потому ², что я не мог избавиться от мысли, которую я денно и ночью облакал каждый раз во все новые формы и которая была бы своевременной в равной степени как сто, так и тридцать лет тому назад. И только сейчас я увидел, что речь идет о чрезмерно высокой оценке уже готовых результатов, возникших так же, как и твои, сами по себе, из требования к ясности <...>. Ты спросишь, наверное, что меня так терзало и почему для избавления от этих терзаний я не мог обратиться к тебе. Последнее, наверное, связано с тем, что дело не касалось сколько-нибудь принципиального вопроса. И все же, в чем тут дело?

Элементы, которые по своим атомным номерам предшествуют неону, имеют тенденции присоединять к себе электроны, т. е. образовывать отрицательные ионы; элементы же, расположенные после неона, — отторгать электроны; это правило справедливо в общем и для последующих благородных газов. Если поинтересоваться причиной этого (в первую очередь — для случая неона), то можно обнаружить, ориентируясь на электроны, окружающие атом гелия, число 8, которое уже Фехнер ³, исходя из сходных соображений, связывал с кубом. Если обратиться к напрашивающимся доводам, то можно прийти к представлению о симметрии, обеспечивающей устойчивое равновесие. Если задаться вопросом о других возможных симметриях, то можно рассмотреть точку, которую допустимо трактовать как электрически насыщенную только при нулевом заряде; далее — отрезок вида $0-0$, как это имеет место для двойного заряда, — это соответствует гелию; после чего затем немедленно сразу же * следует метил. А потом — тетраэдр. Как я узнал вчера, Бор еще в 1920 г. придавал значение четырехэлектронной оболочке. Я хотел бы пойти дальше и при определенных обстоятельствах предположить существование стабильного благородного газа — углерода; а также странных, достижимых с помощью высоких давлений и достаточно низких температур стабильных молекул, подобных Li_4 , Be_2 и LiB , имеющих совместную четырехэлектронную оболочку... Аналогично тому, как имеется подобная гелию H_2 -молекула, с ее общей К-оболочкой, а также многое другое, вытекающее из принципа симметрии... Вот бен-

* См. примеч. 2.

зол: различные «атомные изомеры» углерода; вообще: аллотропы и изомеры, различающиеся атомными обочками.

До следующих возбуждающих мечтаний!

От всех нас вам обоим наилучшие пожелания.

Твой Мишель.

1. *Dialectica*, 2, № 3—4 (15.8 и 15.11.1948). Это двойной номер, посвященный принципу дополненности. Вводная статья к сборнику написана Паули, в него входят статьи Бора, Эйнштейна, Луи де Бройля, В. Гейзенберга, Х. Рейхенбаха, Ж. Л. Детуша, мадам П. Детуш, Ф. Гонзета.

Статья Эйнштейна «Квантовая механика и действительность» помещена на с. 320—324 журнала. На с. 324 читаем следующий вывод: «Представление о том, что в квантовой механике функция ψ дает полное (в принципе) описание реальности, влечет за собой малоудовлетворительное предположение о действии на расстоянии. Если же, напротив, считать, что функция дает неполное описание реальности, то трудно утверждать, что это неполное описание подчиняется строгим законам в отношении зависимости от времени».

Этот двойной номер «*Dialectica*» — журнала, основанного в 1947 г. Фердинандом Гонзетом, Гастоном Башеляром и Полем Берне, стал известен как номер пяти нобелевских лауреатов. С ним связан следующий курьез, рассказанный нам самим Гонзетом. В 1947 г. Гонзет зашел к Паули в гостиницу (Паули, будучи холостяком, предпочитал не снимать квартиру, а жить в гостинице) и сказал ему: «Я хочу издать номер *Dialectica* о принципе дополненности. Не можете ли Вы взять на себя руководство этим делом?» Паули заметил, что будет нелегко заставить сотрудничать вместе Бора и Эйнштейна. Сначала он отказался, но потом изменил свое решение и сказал: «Я напишу Бору, что Эйнштейн согласился, а Эйнштейну, — что согласился Бор». Благодаря этому ему и удалось получить обе статьи.

2. Нечего сказать — отличное нагромождение наречий и союзов! Во второй половине письма мы находим еще одно такое же (*wogauf dann auch gleich*).

3. Густав Теодор Фехнер (1801—1887) преподавал физику в Лейпцигском университете (с 1834 по 1844).

121. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 24.7.1949

Дорогой Мишель!

Моя совесть по отношению к тебе печиста — из-за непростительно долгого молчания. Чувствовал же я себя так же, как и многие другие преступники, которые, продолжая заниматься своими делами, готовы мириться с этой нечистой совестью, как с небольшим злом.

Мне кажется, что письмо Анны я получил еще тогда. В то время я тешил себя старой иллюзией, что человека

можно исправить разумными наставлениями; подобная надежда не иллюзорна до тех пор, пока вокруг содержания соответствующей проповеди не разгорятся страсти — условие, которое в действительности, коль скоро речь идет о чем-то существенном, никогда не выполняется. Хотя я это знаю, но всегда пользуюсь удобным случаем, чтобы высказать свои убеждения, относящиеся к неким общим вопросам. Дело в том, что, по моему мнению, гораздо хуже, если молчат те, у кого вообще имеются собственные убеждения.

Твои замечания относительно того, что природа отдает предпочтение симметричным «оболочкам», пожалуй, могут быть справедливыми. Тебе следовало бы это как-нибудь обсудить со склонным к математическим расчетам специалистом в области квантовой механики, так как подобные вопросы входят в область, на которую распространяется современная квантовая механика, даже в тех случаях, когда приходится ограничиваться грубыми приближениями, приистекающими из-за математических трудностей.

Мое неприятие статистической квантовой теории связано не с количественной ее стороной, а с тем, что к настоящему времени полагают, будто бы такой подход является окончательным в своей основе для фундамента физики. Меня радует, что ты прочитал мою маленькую статью¹. Заметил ли ты, как нелогично ответил на нее Паули? Он отрицает, что такой способ описания не является полным, но на том же дыхании заявляет, что ψ -функция представляет собой *статистическое* описание системы, описание некоторой совокупности систем. Но ведь это просто другая форма высказывания: описание (индивидуальной) отдельной системы — не является полным! Сиюминутный успех имеет для всех людей большую убедительную силу, чем принципиальное размышление, а мода делает их глухими! — хотя бы на некоторое время. Я написал еще и нечто другое по данному же вопросу. Это — ответ на критические замечания моих коллег; все эти статьи появятся одновременно в посвященном мне сборнике, выходящем в серии «Современные философы». Так пусть хоть те, которые ∇ будут жить позже, узнают, что я об этом думал.

После нескольких лет работы я, наконец, нашел естественное обобщение уравнений гравитационного поля²; я полагаю, что оно окажется пригодным для единой тео-

рии поля. Однако из-за того, что вычислить соответствующие интегралы очень трудно, я не располагаю вескими аргументами ни за, ни против. Аргументы сходятся на том, что современной математике с этим не справиться. Но я не прекратил борьбу и мучительно занимаюсь этим денно и нощно.

Завидная судьба, когда до последнего вздоха ты захвачен работой! В противном случае страдания, порожденные глупостью и безумием людей, были бы столь тяжкими! — а ведь это как раз то, что несет с собой политика.

Сердечный привет от твоего

А. Э.

1. См. статью «Квантовая механика и действительность». — *Dialectica*, 1948, 2, p. 320—324. См. примеч. 1 к предыдущему письму.

2. Ср., например, работу Эйнштейна предыдущего года «Обобщенная теория тяготения». — *Rev. Mod. Phys.*, 1948, 20, p. 35—39.

122. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Женева, 22/29.7.1949

Дорогой Альберт.

В течение двух дней мне не представилось случая встретиться с Паулем, у которого я хотел бы спросить, не писала ли ему Майя о получении тобой двух моих последних писем *. К последнему моему письму я кое-что хочу добавить ¹. «Новые» атомы, за которые я высказываюсь (всех их можно было бы назвать виртуальными, причем большинство из них не могут существовать или для их существования требуются взаимно исключаящие значения давления, температуры, энтропии и нулевой энергии), представляются мне обладающими каким-то свойством, соответствующим джоулевскому принципу эквивалентности теплоты и работы, или массы и энергии, — до того, как ты определил существующую между ними связь, и здесь также, или даже здесь особенно, решающее значение имеет новое понимание по сравнению со старым. К этому следует добавить эстетическое удовлетворение, испытываемое от ощущения, что евклидова общая теория относительности становится неевклидовой и квантово-атомистической, от ощущения своеобразной «тройной точки» в физике. Любая симметрия (не только в области, близко примыкающей к порядку-

* Я и до сих пор не получил подтверждения этого от Пауля.

вому номеру благородного газа) является «формирующей силой». При этом такая сила, или соответственно устойчивость, является, по существу, электростатической. Что касается нарушения симметрии схемы за счет спина, или соответственно магнетизма электрона, то, как мне сейчас представляется, тетраэдр и октаэдр при более внимательном рассмотрении исключаются. Может быть, это реализуется, прежде всего, в космическом вакууме, а может быть, уже и в короне.

Как оправдание данному изложению: «виртуальные» конструкции атомов, «тройная точка» в физике, «квази-симметрия».

Эти «фантомные атомы» можно будет обнаружить только после того, как будет указан ясный путь к определению атомного объема и теплоты преобразования аллотропно-изомерных форм атомных оболочек; и путь к сравнению с опытом; до тех пор они будут оставаться только виртуальными, так же как и миллионное простое число ².

Сердечный привет Вам обоим.

Мишель.

1. Эйнштейн признается в том, что ничего не понял из того, что Бессо пишет по поводу некоей новой атомной теории. Мысли эти высказаны в этом и в предыдущем письмах. Эйнштейн попросит, чтобы Бессо изложил ему все это так, как он разъяснил бы «младенческому студенту, который еще вообще ничего не знает».

2. Однако я знаю, что простое миллионное число существует, в то время как ничто не гарантирует существования этих «призрачных атомов».

123. ЭЙНШТЕЙН -- БЕССО

Принстон, 8.8.1949

Дорогой Мишель!

Из твоего последнего письма мне ясно только одно, а именно то, что я твою идею совершенно не понял.

Может быть, ты говоришь о возможности существования атомов с одним и тем же ядром, но различающихся друг от друга расположением своих электронов? В том смысле, что на внутренних их оболочках могут быть не по 2, а по 4 или по 8 электронов? Но это опровергается так называемым рентгеновским спектром *K*-излучения, который совершенно одинаков и квазинепрерывен вплоть до высоких атомных номеров.

Более вероятно, что я вообще ничего не понял в твоей идее. В этом случае единственно плодотворным будет, если ты мне изложишь эту идею как молоденькому студенту, который еще вообще ничего не знает.

Я и в самом деле основательно не осведомлен. Происходит это из-за моего неприятия полуэмпирического теоретизирования, которое очень пригодно для практики, но мало что дает для глубокого понимания. Эта моя позиция привела к тому, что я стал в глазах специалистов каким-то упрямым еретиком.

У меня уже построена теория, строго последовательная и достаточно разумная, но моих математических методов не хватает для разработки ощутимых следствий.

Так что я жду доступного для меня изложения твоей идеи.

А пока — сердечный привет.

Твой А. Э.

124. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Женева, 9.8.1949

Дорогой Альберт.

Очень мило и трогательно с твоей стороны, что ты взял на себя труд, несмотря на такую ужасную жару, мне так подробно написать! Я же не могу ничего другого, как написать снова ¹... Разве не было бы чудесно, если бы я остаток своей духовной свежести смог посвятить попытке понять твои обобщенные гравитационные уравнения? Если бы ты разъяснил их одному «уважаемому слушателю» ², то это в будущем послужило бы проблемам познания.

Разве сущность искомых уравнений не относится в некоторой степени к «нуль-полихроно-топам» пространства-времени специальной теории относительности (может быть, состоящим из ритмичных колебаний между полиэдральными структурами, в первую очередь дуально соответствующими друг другу): естественное расширение полиэдров, которое как раз и мучит меня в связи с новыми атомными структурами?

Сердечный привет вам обоим от вашего

Мишеля.

1. Сохранился черновик этого письма с многочисленными пометками и несколько другим заключением.

2. Бессо намекает на то время, когда в Берне он был прилежным слушателем лекций приват-доцента Эйнштейна.

Принстон, 16.8.1949

Дорогой Мишель!

Ты выразил желание, чтобы я покатал тебя немножко на своем «коньке». Вот это я сейчас и сделаю ¹.

Я убежден в том, что принципиальная статистическая теория, несмотря на ее большие успехи, сути вещей глубоко не затрагивает и что необходимо опираться на общий принцип относительности: обобщение гравитационных уравнений пустого пространства.

Вместо симметричного тензора g_{ik} за основу принимается несимметричный тензор, а также «смещение» Γ_{ik}^l , которое по нижним индексам несимметрично. Антисимметричная составляющая g_{ik} должна приблизительно соответствовать максвелловскому тензору электромагнитного поля.

g и Γ должны удовлетворять соотношению:

$$g_{ik, l} - g_{s; i} \Gamma_{il}^s - g_{is} \Gamma_{ik}^s = 0. \quad (1)$$

Вместо симметрии величин выступает общее свойство: уравнения остаются неизменными, если заменить g_{ik} на g_{ki} ($= \tilde{g}_{ik}$), а Γ_{ik}^l на Γ_{ki}^l ($= \tilde{\Gamma}_{ik}^l$). Ты легко можешь проверить это из (1).

Введение несимметричного тензора g_{ik} удобно потому, что становится возможным, так же как и в симметричной теории, определить контравариантные g^{ik} :

$$g_{is} g^{ls} = g_{si} g^{sl} = \delta_i^l,$$

что имеет фундаментальное значение для свертывания тензора.

Обычное дифференциальное исчисление осложняется здесь тем, что возникают различные ковариантные производные, например в зависимости от того, будут ли использованы Γ_{ik}^l или $\tilde{\Gamma}_{ik}^l$.

С помощью Γ_{ik}^l можно найти кривизну R_{klm}^i , если проследить за изменением вектора при его «параллельном перемещении» вдоль границы (R_{klm}^i) элемента поверхности.

Свертывая по индексам i и m , получают тензор R_{kl} , не являющийся, однако, полностью «эрмитовым», т. е. таким, который нужно сначала несколько модифицировать —

с тем, чтобы он удовлетворял условию $R_{ik} = \tilde{R}_{ki}$. Значок \sim означает здесь, что Γ заменяется на $\tilde{\Gamma}$.

Теперь можно было бы ожидать, что уравнения поля примут простой вид

$$R_{ik} = 0,$$

если R_{ik} представляет собой «эрмитизированный» тензор кривизны.

Но дело обстоит не так просто. Выясняется следующее. Прежде всего Γ'_{ik} (антисимметричная часть) является тензором, а $\Gamma^s_{i\cdot}$ — вектором. Этот последний нужно постулировать равным нулю

$$\Gamma^s_{i\cdot} = 0 \quad (2) \quad (4 \text{ уравнения})$$

для того, чтобы R_{ik} стало эрмитовым ^(а).

Вместо $R_{ik} = 0$ следует написать

$$R_{ik} = \frac{1}{2} (R_{ik} + R_{ki}) \quad R_{ik} = 0 \quad (3) \quad (10 \text{ уравнений}),$$

$$R_{ik,l} + R_{kl,i} + R_{li,k} = 0 \quad (4) \quad (4 \text{ уравнения}).$$

Ты можешь спросить: не бог ли тебе это нашептал на ухо? К сожалению, нет.

Но есть один способ: среди уравнений должны иметься тождества и именно такие, чтобы сделать эти уравнения совместными.

Если предположить, что в (1) Γ можно выразить через g , то в этом случае придется определять 16 переменных поля. Для того чтобы уравнения были совместными, нужно, чтобы из 18 написанных выше уравнений только 12 были независимыми друг от друга (16—4).

Таким образом, для того, чтобы уравнения были совместными (т. е. чтобы их можно было продолжать от одного сечения), они должны содержать 6 (18—12) тождеств. Эти тождества и представляют собой средство для нахождения уравнений («само по себе» так не получается).

Вот это-то и является каркасом всего дела. Через некоторое время я пришлю тебе одну работу (которая пока находится в печати), где все изложено без обиняков ².

Имеется ли в этой теории что-нибудь истинное — я не знаю, поскольку мне не удалось отыскать нетривиальные решения, свободные от сингулярностей. Это ужасно труд-

но, так как решение линейных уравнений (1) относительно Γ невозможно.

Это какое-то проклятье, что логически простые вещи так сложны для расчета.

Сердечный привет.

Твой А. Э.

1. Эйнштейн в прекрасной и сжатой форме излагает Бессо свою работу об обращении уравнений тяготения на случай пустого пространства.

2. См. статью (совместную с Л. Инфельдом) «О движении частиц в общей теории относительности» (Canad. J. Math., 1949, 3, p. 209—241).

(a) Условие

$$\Gamma_{is}^s = 0 \quad (2)$$

не является необходимым. Эйнштейн согласился с этим в 1952 г. в процессе переписки с автором настоящих комментариев. Решение (1), или, иначе говоря, выражение величин Γ в функции g и ее производных, не «невозможно», однако очень сложно. В своем письме Шредингеру в 1947 г. Эйнштейн называет эти 64 линейных уравнения «уравнениями чертовой бабушки».

126. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Женева, 17.8.1949

Дорогой Альберт.

С ожидаемым тобой систематическим изложением, к сожалению, ничего не получится.

Я усматриваю только три серии проблем — с моделью Резерфорда — Бора в качестве «предисловия», периодической системой элементов в качестве «заднего фона» и с «цезурами» благородных газов; даже с упорядочением по четырем квантовым числам.

Первая серия проблем чисто геометрическая: она включает построение симметричных фигур из двух сортов «элементов»; в каждой фигуре только один [элемент] данного сорта, каждый из них способен «уравновесить» некое определенное целое число «элементов» другого сорта; и каждый определяет координатную систему $\langle \dots \rangle$.

Сначала эти «элементы» рассматриваются как точки; затем как симметричные построения: многоугольники и правильные полиэдры; каждый с одним «элементом» первого сорта в центре и n «элементами» второго сорта по углам. Для $n = 2$ получается отрезок с центральной и двумя крайними точками. Если центральную точку

рассматривать как место расположения n -кратного электрического заряда, а углы — как места одинарных зарядов противоположного знака, то эти симметричные системы удовлетворяют условиям равновесия... (которое можно представить себе дополненным условием квантования — об этом дополнении, которое для многоугольников достигается механически, путем вращения, я подумал только сейчас, в процессе писания этого письма; пожалуй, это можно выразить так, что уже здесь геометрическое все более и более следует понимать в смысле симметрий. Для моих рассуждений представления о симметрии являются решающими независимо от ее механического значения).

Если я уже теперь перейду к сравнению с данными периодической системы, то в первую очередь обнаружу, соответственно первому благородному газу, жесткую симметрию с $n = 2$, которая, как ты можешь видеть, сохраняется и далее. Ядро с двумя первыми электронами (Паулинг называет его остовом — «Kernel») может служить в качестве новой базы; надстройка к ней $n = 8$ дает второй благородный газ; при $n = 7$ или $n = 6$ имеем вещества, атомы которых склонны за счет присоединения электронов образовывать электроотрицательные ионы; при $n = 9$ или $n = 10$ — вещества, склонные отдавать электроны, т. е., таким образом, химически и физически вести себя как металлы.

Может показаться, что в соответствии со сказанным для случаев $n = 4$ и $n = 6$ (сверх остова) соответственно также должно быть по одному благородному газу; но мы находим там только С и О (особенно углерод является довольно-таки удивительным веществом, пассивное поведение которого в иных случаях напоминает благородные газы). В случае $n = 12$ (симметрия икосаэдра) и $n = 20$ (додекаэдр) ничего, по крайней мере на первый взгляд, похожего на благородные газы не замечается.

Но дополнительное рассмотрение вопроса с позиций симметрии дает все же некую информацию¹ в том случае, если элементам приписывается, кроме точечных характеристик, еще и свойство направленности, которое требовало бы уравнивания: ведь только в случае куба можно пометить вершины буквами « a » или « b » так, что они сменяют друг друга на каждом ребре. Эти свойства направленности могут потерять свое значение при наличии для каждого атома достаточного пространства, так что, напри-

мер в короне, можно будет ожидать для случая С и О наблюдения линий благородных газов; и, наоборот, при больших давлениях (солнечные извержения, газы в глубинах Земли) снова смогут проявиться симметрии порядков 0 и 2.

И только для неона снова можно ожидать, что он, будучи полностью уравновешенным, останется благородным газом, а вблизи конфигураций с 4 и 6 электронами (над остовом) будет наблюдаться тяготение к этим конфигурациям (например, для бора).

Для одного и того же заряда ядра получаются, в соответствии со сказанным выше, различные «допустимые» конфигурации внешних электронных оболочек. Необходимо только рассмотреть совокупность механически представленных или соответственно должных быть представленными воздействий, для того чтобы иметь возможность эти различные конфигурации обследовать с точки зрения стабильности и метастабильности при различных условиях (имеющиеся в распоряжении объем и давление, в зависимости от физической природы: давление электронов, давление фотонов; тепловые параметры, в особенности нулевая энергия), пока и поскольку действительна еще евклидова геометрия.

Исследования математические, которые можно было бы проводить с помощью центрирования (простые зависимости у больших лун Юпитера) и с помощью наглядных симметрий, и в частности с учетом зависимых от направления свойств элементов, представляются менее безнадежными.

Для обоих, 18-го и 32-го, разрядов периодической системы поначалу не видно никакого истолкования. Я долго пытался использовать полуправильные многогранники, но здесь наталкиваешься на другие числа; и всегда здесь возникают химические и спектроскопические наложения, которые, может быть, и доступны истолкованию за счет увязывания их каким-то образом с рассуждениями о симметриях².

Представления и исследования Эмилио Сегре (вместе с Гельмгольцем), касающиеся таких одновременно изотопных и изобарных ядер с различными условиями стабильности, приводят к тому заключению, поскольку аллотропия-изомерия в промежуточном диапазоне электронных оболочек как раз и отсутствует, что все это оказывается особенно неправдоподобным. Как ни странно, во

всяком случае кажется, что даже в случае ядер для евклидовой геометрии найдется поле деятельности.

Все ли я уже сказал из того, что на нынешнем этапе моих рассуждений можно и нужно было сказать? Уже одно это сомнение и кое-что еще другое в моей писанине, подобное длинным вставкам-скобкам на второй странице первого листа, должно обратить твое внимание на возраст твоего друга... педантично и все же неточно; бедно в смысле изобретательности; вряд ли я когда-то был другим...

Вам обоим сердечные приветы от всех нас —

твой Мишель.

1. Бессо занят работой над статьей по этому вопросу под названием «Геометрическое строение электронных К- и L-оболочек легких атомов» для «Helvetica Physica Acta». Она будет опубликована в XXII т. (1949, с. 619—621). «Цель настоящего сообщения, — пишет он в начале статьи, — прояснить вопросы квантовой теории электронного облака атомов с помощью геометрического представления о симметрии. Их нетрудно дополнить, чтобы учесть векторную компоненту составных частей атома, в частности электронов».

2. В конце своей статьи Бессо пишет: «Вне оболочек с совершенной кубической симметрией мы вынуждены искать аналогий в области не полностью симметричных тел. Усеченный восьмигранник обладает спиновой (вращательной) симметрией, но имеет 24 вершины вместо 18, как это должно быть для оболочек M и N < ...».

127. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Женева, 21.8.1949

Дорогой Альберт!

С изумительной ясностью и четкостью выполнил ты мое пожелание. Сейчас можно было бы сосредоточить внимание на том значении, которое придается шести тождествам. Столь давно разыскиваемое место для электромагнитного тензора могло бы оказаться здесь в антисимметричной части $g_{ik} \neq g_{ki}$. (1).

Формально я хотел бы еще знать:

Является ли соотношение (1) определением трехиндексного g ? Или, если это не так, то откуда оно получается?

Что означает общее свойство, которое введено вместо симметрии величин по их индексам?

Из (1) прежде всего видно, что

$$g_{ik, l} - g_{sk} \Gamma_{il}^s - g_{is} \Gamma_{lk}^s = 0 \equiv g_{ki, l} - g_{ks} \Gamma_{li}^s - g_{si} \Gamma_{kl}^s = 0$$

с перестановкой четырех индексов.

Имеется ли аппарат для эрмитизации тензора R_{kl} или соответственно для выполнения условий $R_{klm}^i = R_{lkm}^i$ еще до составления шести тождеств?

Что можно сказать уже сейчас, т. е. на основе того, чем ты располагаешь, относительно последнего ¹? <...>.

Сердечно твой и ваш

Мишель.

1. Эйнштейн отвечает на эти вопросы в письме от 30 ноября.

128. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 30.11.1949

Дорогой Мишель!

Только теперь, из твоего последнего письма я понял, о чем идет речь в твоих рассуждениях о симметрии. Некоторые свойства, которыми не обладает тетраэдр, могут иметь место для куба, например закономерное распределение «меток» «+» и «-» на вершинах.

Это в самом деле красивая и естественная идея, конечно немножко «пифагорейская», пригодная на время, пока нет более глубокого обоснования. Но ведь то же самое можно было бы сказать и относительно «принципа Паули», который вполне подтвердился.

Все, что я тебе пишу, ты можешь показывать, кому захочешь. Я давно махнул рукой на всякое засекречивание. Да я к тому же не поп, который несчастен, если ему не удастся «обратить» других в свою веру [букв.: в свое барахло].

Дифференциальные уравнения ни в коей мере нельзя рассматривать как сеть железных дорог, состоящую сплошь из ответвлений, — это жесткие определяющие уравнения, даже более жесткие, чем уравнения гравитации, и даже сверхопределяющие; это значит, что в некотором сечении $x_4 = \text{const}$ (независимо от свободного выбора координат) можно произвольно выбирать *не одно* число функций трех координат. Уравнения выглядят тогда следующим образом:

$$g_{ik, l} = 0$$

$$\Gamma_{is}^s = 0 \quad \Big| = \frac{1}{2} (\Gamma_{is}^s - \Gamma_{si}^s).$$

$$R_{ik} = 0$$

Я недавно нашел один очень убедительный вывод для этой системы ^(а); он показывает, что эти уравнения таким же естественным образом вытекают из обобщенного поля, как и гравитационные уравнения из предпосылки симметричности поля g_{ik} . Проверка теории, однако, все еще наталкивается на непреодолимые математические трудности.

В ее основе нет места для понятия о вероятности, так что реакция современников сведется к «всеобщему покачиванию головой», т. е. будет такой же, как в прекрасном старом стихотворении о кандидате Джобсе ¹.

Скоро должна появиться книга из серии «Современные философы» ². В ней я защищаю милого господа бога против обвинения в его неизменном пристрастии метать кости.

Я перешлю ее тебе, как только удастся.

А пока что сердечный привет.

Твой Альберт.

И еще выходит одна книжица, содержащая всякие шутки, которыми я грешил в последние годы; ее я тоже тебе пошлю ³.

1. См. *Буш Вильгельм*. Иовсиада в картинках — полная юмора история о Иеронимусе, сыне Иовса. Там есть припев, повторяющийся восемь раз:

«Этот ответ кандидата Иовса
Вызвал повсеместное покачивание голов.
Инспектор сперва сказал хм, хм!
После чего другие *secundum ordinum*».

2. «Альберт Эйнштейн — философ-ученый», издано Паулем Артуром Шилшом, редактором т. 7 издания «Библиотека современных философов» (*The Library of Living Philosophers*, 1-е изд., 1949. 781 с.; 2-е изд., 1951 г.).

3. «Из моих последних лет» (*Out of my later years*, 1950). Эта книга переведена на французский язык Соловиным под названием «Научные, моральные и социальные понятия».

^(а) В действительности «сильная система» не может быть получена из вариационного принципа, хотя Эйнштейн, по-видимому, это и утверждает.

129. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 2 января 1950 года

Дорогой Мишель!

Сегодня я отправляю тебе книгу, которая с некоторым запозданием вышла в связи с моим семидесятилетием¹. Я посылаю тебе ее прежде всего из-за того, что в ней со-

держатся разногласия, касающиеся основ квантовой теории. Я довел сейчас теорию поля до удовлетворительного конца (но не до сравнения с опытными данными). Теория появится как приложение к моей книжице о теории относительности, и я пошлю тебе книгу или, в крайнем случае, приложение, как только будет отпечатано новое издание ².

А пока что сердечные приветы и пожелания вам к Новому году.

Твой А. Э.

1. Это упомянутый выше коллективный труд «Альберт Эйнштейн — философ-ученый», изданный Паулем Артуром Шилппом в 1949 г. в серии «Библиотека современных философов». Двадцать пять ученых и философов пожелали принять в нем участие и таким образом почтить труд Эйнштейна. Назовем в их числе Бора, Борна, де Бройля, Франка, Гёделя, Инфельда, фон Лауэ, Леметра, Паули, Рейхенбаха, Зоммерфельда. Сам Эйнштейн в книге представлен «Автобиографическими заметками» (с. 1—9) и «Замечаниями к статьям» (с. 665—688).

2. Относительность; частная и общая теория. Лондон, 1952. Это 16-е издание книги «О специальной и общей теории относительности в общедоступном переложении», впервые опубликованной в 1917 г., но дополненное главой об относительности и проблеме пространства. Соловин выпустил ее французский перевод в 1956 г.

130. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Женева, 1. 2. 1950

Дорогой Альберт!

<...>. За то, что ты побеспокоился обо мне и потратился на пересылку этого прекрасного тома ¹, который наверняка до конца дней моих задаст работу моему умению здраво мыслить, само собой разумеется, большое тебе спасибо!

Но, прежде всего, нужно заняться задачей, которую я вымолил для себя твоими письмами:

Формула (A), с. 92²: что означает значок $g_{ik,l}$? Поскольку я (читатель) этого не знаю, то я (читатель) не могу сведением к (A) и к (C₁)³ установить случай $g_{ik,l} = g_{ki}$.

(Вопрос о формальном значении $g_{ik,l}$ я уже в свое время задавал.)

Несмотря на этот пробел (для меня), я убежден в том, что гравитационные уравнения создают заданный отправной пункт в рамках некоторой теории континуума, и в том, что $g_{ik} \neq g_{ki}$ представляет собой естественное обобщение.

То, что это «не возникло само по себе» и ты сам себе задал огромный труд добраться с помощью эрмитизации к «внутренне законной» системе уравнений, является залогом того, что более простого пути не было (...).

Вероятностная трактовка тоже имеет доводы в свою пользу: *conservatio est continua creatione*⁴, что для жизни и сознания все же недопустимо.

Я занимаюсь в настоящее время элементарной физикой, надеясь быть способным помочь моему внуку-химику⁵ в подготовке к его экзамену. При этом меня смущает то, что я не могу отделаться от вопроса, как это чисто кинематическое понятие $a = dv/dt$ приобретает смысл величины, определяющей энергию и количество движения; насколько все это ясно, когда дело касается формальных соотношений между интегралами по x_{1-3} и x_4 как в релятивистской, так и нерелятивистской механике, настолько мало я могу сказать о том, что я подразумеваю под своим вопросом, кроме, может быть, «маховского», где *дерево* тоже уже теория, требующая чувственного подтверждения... на что Гонзет заметил, что непосредственно данное скорее является самими деревьями и маховские элементарные ощущения — теорией к ним...

От всей души

твой Мишель.

Р. С. Читая книгу дальше, я нашел, что я ребячески забавляюсь фундаментальными трудностями, которые и тебя, и других тоже занимают... тем, что можно назвать собственным содержанием всякой философии, которой Веро посвящает себя намного оригинальнее и самостоятельнее, чем это делаю я.

1. «Альберт Эйнштейн — философ-ученый». Нью-Йорк, 1949 (1-е изд.).

2. Уравнение (A) имеет вид $g_{ik,l} - g_{sk}\Gamma_{il}^s = 0$.

3. Уравнение (C₁) имеет вид $R_{kl} = 0$.

4. «Сохранение (мира) происходит путем непрерывного созидания». Непрерывное созидание, схоластическое картезианское понятие, — действие, посредством которого бог «сохраняет» мир в его существовании. Это действие — «то же, посредством которого он его создал» (*Декарт. Рассуждения о методе*, ч. V, § 3; см. также: *Размышления*, III, § 33; *Принципы философии*, т. I, с. 21).

5. Марк Бессо, сын Веро.

Дорогой Мишель.

Читая твоё последнее письмо, я не мог удержаться от смеха, хотя сам я виноват в этой неясности¹.

Просто широко принято обычное дифференцирование обозначать запятой; $g_{ik,l}$ означает $\partial g_{ik}/\partial x_l$ в отличие от способа обозначения

$$g_{ik;l} = g_{ik,l} - g_{sk}\Gamma_{il}^s - g_{is}\Gamma_{lk}^s$$

(в случае несимметричных тензоров это значит $g_{ik;l}$).

Это связано с тем, что здесь следует различать Γ_{ik}^l и Γ_{ki}^l .

Ну вот, теперь скоро я смогу прислать тебе работу о несимметричном поле тензоров. Эта логическая возможность настолько естественна, что просто не верится, что она не реализована. Но проверка ее на опыте наталкивается пока что на непреодолимые трудности.

Ты сам вскоре это увидишь, когда поближе познакомишься с формальной стороной.

К сожалению, в сборнике мой ответ на критические замечания, содержащиеся в научных трудах моих коллег, переведен на английский язык неудачно². Но ты, несмотря на это, все поймешь (хотя, может быть, и не одобришь). Успех ослепляет, даже если куплен он за счет *sacrificium intellectus*.

Сердечные приветы.

Твой А. Э.

1. У Бессо уже много лет тому назад были затруднения с пониманием обозначений теории относительности. И в самом деле, на его экземпляре «Единой теории гравитации и электричества» (пер. Соловина. Париж: Изд-во Германна, 1933) против некоторых обозначений сохранились карандашные вопросительные знаки.

2. Это замечание Эйнштейна должно заинтересовать каждого, занимающегося историей теории относительности. Поэтому было бы желательно, чтобы оригинальный текст Эйнштейна был когда-нибудь опубликован. Отметим, что оригинал «Автобиографических заметок» написан на немецком языке, а «Замечания к статьям» — на английском.

Женева, 8.3.1950

Дорогой Альберт.

Я даже не успел поблагодарить тебя за письмо от 9.II! За это время прибыла и книга с таким богатым содержанием: от дорелятивистской физики до окончательного представления обобщенной гравитационной теории.

Над этой последней мне еще долго придется поработать, «*se Dio mi da vita... e cervello*»¹. Кое-что мне уже бросилось в глаза: зачем требовать свободные от сингулярностей решения (за исключением тех случаев, которые являются или могли бы быть самыми очевидными), когда действительность — начиная от морозных узоров на окнах и примитивных живых организмов вплоть до движения капли в конденсаторе Милликена — кажется столь впечатляюще свидетельствующей о необычайности? Не является ли проблемой (одним из требований отсутствия сингулярности) или по меньшей мере параллельной задачей для твоего вспомогательного математического аппарата следующая: необходимо развить разновидности мыслимых сингулярностей в рамках системы уравнений? Не является ли условие совместности, выводимости из одного сечения чересчур сильным? <...>.

Еще раз спасибо, спасибо и спасибо от твоего

Мишеля.

1. «Если бог дарует мне жизнь... и разум».

133. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 15.4.1950

Дорогой Мишель!

Вопросы, которые ты задаешь в письме от 11/IV, вполне естественны, но пока ответить на них нельзя. Это связано с тем, что в последовательной теории поля нет реального определения самого поля. Это верно, что при таких обстоятельствах оказываешься в положении Дон Кихота, поскольку нет никакой уверенности в том, что когда-либо будет возможно узнать, «истинна» ли теория или нет. Здесь а priori отсутствует какой-либо мост к эмпирике. Не существует, например, никаких «частиц» в строгом смысле этого слова, поскольку они не соответствуют той программе, которая представляет реальность с помощью функций, которые всюду непрерывны и даже,

более того, являются аналитическими. В теории существует, например, симметричный тензор g_{ik} ($\equiv g_{ik} + g_{ki}$). Также имеется и геодезическая линия. Но с самого начала уже нет никакого отправного момента, чтобы этой линии соответствовал какой-либо физический смысл, даже аппроксимированно ^(a).

Отсюда получается, что возможность сравнения с чем-то известным из опыта следует ожидать только в том случае, когда найдены строгие решения системы уравнений, в которых «отразятся» «известные» из опыта образы и их переменные воздействия. Но так как это чудовищно трудно, то можно понять и скептическую позицию современных физиков. Пока что они имеют полное право считать мой путь неплодотворным. Но долго это продолжаться не будет. Постепенно они увидят, что с помощью квазиэмпирического метода в сути вещей не разобраться. Для того чтобы действительно понять это мое убеждение, тебе следует еще и еще раз пережевать мой ответ в сборнике ¹ и коротенькую статью в Scientia ². Центральным является вопрос не о «причинности», а о реальном существовании и о том, имеется ли какая-либо форма строго справедливых (не статистических) законов для теоретически представленной действительности. Совершенно ясно, что для наблюдаемых фактов таких законов нет. Но вопрос ставится так: имеется ли какая-либо замена «реальности» в виде теоретической программы? Говоря такими словами, я сказал бы так: если «облако» не является выражением «одноразового» состояния, а только «вероятностным облаком», то за этим облаком должно стоять нечто с большими признаками. И думать, что это несущественно для теории, мне кажется просто абсурдным. Поэтому люди обычно утверждают, что ψ -функция полностью описывает индивидуальное состояние, и отказываются от этого только тогда, когда их на этой почве загоняют в тупик.

В последнее время меня очень занимал один математический вопрос. Из соответствующего вариационного принципа следует совместность системы уравнений

$$g_{:l}^{ik} = 0; \quad \Gamma_i = 0 \left\{ \begin{array}{l} R_{ik} = 0 \\ R_{ik, l} + R_{kl, i} + R_{li, k} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (10 \text{ уравнений}), \\ (4 \text{ уравнения}). \end{array}$$

С другой стороны, путем формальных рассуждений необходимо перейти к более сильной системе, в которой два

последних уравнения заменяются на

$$R_{ik} = 0 \quad (16 \text{ уравнений}).$$

Для этой более сильной системы совместность проблематична; т. е. поначалу неизвестно, достаточно ли велико разнообразие ее решений. После долгих заблуждений и усилий мне удалось доказать эту совместность. Это, конечно, еще не является доказательством «истинности» теории, но устраняет важнейший формальный довод против нее.

За свою долгую жизнь я научился одному: подобраться к «Нему» поближе чертовски трудно, если только стремиться проникнуть вглубь.

Сердечный привет.

Твой А. Э.

1. «Альберт Эйнштейн — философ-ученый».

2. См. статью Дж. Джорджи, опубликованную в «Scientia» (1949, 84, p. 77—81. Милан). Ее французский перевод помещен в «Дополнении» к этому тому (с. 37—47) и называется «По поводу недавних споров об эйнштейновской теории относительности». Автор — член Академии наук в Ватикане; его статья, в которой содержится положительная оценка теории Эйнштейна, заканчивается следующим утверждением: «Большое количество полученных результатов говорит в пользу построения Эйнштейна».

(а) Существует, пишет Эйнштейн, «геодезическая линия». В действительности геодезические линии определяются как кратчайшие линии, при движении по которым исчезает абсолютное ускорение, и прямые линии, для которых $\delta \int ds = 0$ не совпадают друг с другом, как только соответствующий тензор перестает быть симметричным.

Кроме того, элементарный интервал ds не обязательно определяется метрикой $g_{\mu\nu}$. Эйнштейн уже здесь чувствует, что трудности его теории имеют не только математический характер, но в значительной степени относятся к основным понятиям физики.

134. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 15.6.1950

Дорогой Мишель!

В твоём письме легче всего понять вопрос о значении нелинейности уравнений для объяснения взаимодействия и ответить на него. Для линейных уравнений характерно существование суперпозиции решений. Пусть, например, имеются два различных решения, каждое из которых представляет покоящуюся частицу; тогда сумма решений представит две покоящиеся частицы, и теория не дает никакого способа, позволяющего вывести из уравнений поля вза-

имно ускоряющее воздействие частиц. Но в случае гравитационных уравнений дело обстоит по-другому. Их нелинейность приводит к тому, что решения для поля второй частицы только тогда могут быть свободными от сингулярности вне этих частиц, когда эти последние некоторым определенным образом ускоряют друг друга. Тем самым возникает фактическая замена понятия силы законом поля. В линейной максвелловской теории выход из затруднения нашли за счет введения нелинейной плотности энергии, которая в действительности из уравнений поля не вытекает. Кроме того, инерцию вводят независимо от силы.

И вот ты говоришь, что не можешь понять многих утверждений относительно классической теории и упрека, который мне делают за то, что я ее придерживаюсь. Однако из твоего письма нельзя понять, что же тебе осталось неясным? Далее: мое утверждение, что различие между чувственным опытом и галлюцинацией является чисто гипотетическим (условным) различием, имеющим характер одной из созданных нами категорий без самостоятельного логического содержания и обоснованным только целесообразностью. Это же тривиальность. Я упомянул об этом для того, чтобы показать, что свободное построение понятий конструктивных элементов, вводимых произвольно и также не выводимых эмпирически, берет начало не собственно в науке, а характеризует мышление так называемого «здравого смысла».

Теперь относительно рассуждений Веро о чувственном различии самих по себе неразличимых жемчужин. То, что дает здесь различимость, — это воспринимаемое взаимное расположение, которое зафиксировано специально. Эта фиксация должна основываться на каком-то жестком каркасе, к которому жемчужины прочно прикреплены. Различимость жемчужин, таким образом, связана не с ними самими, а с неодинаковостью частей каркаса. Я не вижу здесь ничего, что имело бы отношение к однородности предмета и свойствам в логической схеме положения¹.

Сердечные приветы.

Твой Альберт.

1. В следующем письме Бессо дополняет изложение задачи, существенные подробности которой он забыл изложить. Предмет изысканий Веро Бессо — исследование изменения структур, которые можно построить с помощью двух разных, но совершенно эквивалентных факторов — элемента и связи. Эта логическая задача может быть обобщена на все процессы коммуникации, такие, например, как язык или письмо.

Принстон, 12.12.1951

Дорогой Мишель!

⟨...⟩. Целых 50 лет сознательного поиска ничуть не приблизили меня к ответу на вопрос: что такое кванты света? Сегодня же любой проходимец считает, что ему это известно, но он заблуждается. В возможности естественного обобщения гравитационных уравнений я теперь уверен, но не могу выяснить, кроется ли за этим что-либо физически истинное. Все здесь основывается на несимметричном тензоре $g_{ik} (\neq g_{ki})$ ⟨...⟩.

Картины Пауля Винтелера мне очень понравились. Он иногда пишет и вообще, видно, привязан к Майе, чего я от него не ожидал. Мне ее тоже очень не хватает. В годы ее страданий мы вместе прочитали бóльшую часть лучших книг, написанных во все времена. Но больше всего она любила Бертрана Рассела, и я, кстати, тоже. Стилль его достоин восхищения, и до глубокой старости он так и остался каким-то озорником.

Время от времени я пытаюсь обратиться к совести здешних людей, поскольку они находятся на пути к тому, чтобы превзойти даже немцев в своих милитаристских убеждениях². Чернь легко склонить к плохому, проповеди же о благоразумии она слушает неохотно. Я и так уже снискал себе дурную славу; но это и утешает меня в том плане, что я не очень пренебрегаю своим долгом (как некогда в блаженной памяти патентном бюро). Я с удовольствием вспоминаю те времена.

Сердечный привет.

Твой Альберт.

1. Майя Винтелер-Эйнштейн скончалась в Принстоне 25 июня 1951 г. Она родилась в Ульме 18 ноября 1881 г.

2. См.: Натан О., Норден Г. Эйнштейн и мир / Предисл. Бертрана Рассела. Нью-Йорк, 1960.

Женева, 20. 2. 1952

Дорогой добрый старый друг.

Некий писатель — Карл Зелиг¹ — пишет об Эйнштейне в Швейцарии; д-р Заутер сообщил ему кое-какие сведения и адресовал его ко мне ⟨...⟩.

Зелиг спрашивает, кто из профессоров физики в Берне выступал против назначения тебя доцентом. Это мог

быть только Грюнер², который, несмотря на это, стал *amende honorable*, благодаря наглядному геометрическому разъяснению специальной теории относительности (на самом-то деле это сделал Саутерс).

Может быть, ты помнишь, как звали профессора анатомии, который долгое время отвергал теорию относительности, как нелогичную, а еще раньше выступал против твоей доцентуры? Не нашел я также и имени цюрихского университетского профессора, который забрал тебя из Берна.

А как звали учившегося вместе с нами студента, который благодаря своему прилежному и точному конспектированию лекций облегчал тебе сложности с экзаменами³?

Извини за мои высказанные и невысказанные желания и прими от всех нас сердечные приветствия.

Твой Мишель.

1. 11 февраля Зелиг пишет Бессо длинное письмо, в котором содержится много вопросов об Эйнштейне. Он представляется Бессо как редактор «Новой Цюрихской Газеты» (*Neue Zürische Zeitschrift*) и автор ряда биографий (Свифта, Новалиса, Бюхнера). 19 февраля Бессо отвечает на его письмо. 24 февраля и 11 марта последовал снова список вопросов, на которые Бессо подробно ответил той же почтой.

2. Пауль Грюнер (1869—1957), доктор философии (1892) в Цюрихе, в 1903 г. читал курс лекций и затем стал ординарным профессором теоретической физики в университете в Берне. См. некролог в *Actes de la Soc. Helv. sc. nat.* (1957, 137, p. 363—369), написанный А. Марсье. Пауль Грюнер был преемником Альбрехта де Халлера. После Гонзета Грюнер прочитал в Берне курс по общей теории относительности. См. его «Элементы теории относительности» (Берн, 1922). Однако его основные работы относятся к оптике, радиоактивности, кинетической теории и теории электронов.

Против назначения Эйнштейна на должность приват-доцента Бернского университета выступил не Грюнер. См. ответ Эйнштейна (на письмо Бессо) от 6 марта 1952 г.

3. См. письмо Эйнштейна от 6.3.1952 г., в котором он отвечает на все вопросы Бессо.

137. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 6.3.1952

Дорогой Мишель!

Я уже слышал об этом «бездушном» Зелиге*, занимающемся моим детским труппом. Но эта деятельность

* Здесь каламбур, основанный на созвучии фамилии Зелига (*Seelig*) со словом *unseelig* (бездушный).

чем-то оправдана, поскольку о последующих годах бытия уже с некоторой подробностью сообщалось, а вот о швейцарском периоде ничего нет. Это может привести к неправильным выводам, ну, например, будто я родился прямо в Берлине!

Следует рассказать о том, что мы ежедневно, возвращаясь домой со службы, обсуждали научные проблемы. Нужно также упомянуть о дружбе с Морисом Соловиным (сейчас он в Париже) и с братьями Конрадом и Паулем Габихтами, с которыми я познакомился во время обучения в Шафхаузене. Пауль Габихт недавно умер. Он конструировал для меня электрофоры, используемые для статических измерений малых напряжений методом умножения. С К. Габихтом и Соловиным мы регулярно встречались по вечерам в Берне, посвящая их чтению и дискуссиям; занимались мы главным образом Д. Юмом (в достаточно хорошем немецком издании). Эти занятия оказали довольно значительное влияние на мое развитие — наряду с Пуанкаре и Махом. Последнего ты рекомендовал мне в мои студенческие годы, после чего мы познакомились с ним лично у фрау Капротти.

А теперь твои вопросы. Против доцентуры выступал не Грюнер, а тогдашний ординарный профессор физики, некий Форстер, о некомпетентности которого среди молодых людей циркулировали злые истории (Грюнер всегда относился ко мне дружелюбно). О каком-либо профессоре анатомии в этой связи я ничего не припоминаю. Так уж часто случается, что на маленьких факультетах парочка старых хрычей (таких, как мы сейчас), держась друг за друга, всем верховодят.

Цюрихский профессор, который забрал меня тогда в Цюрих, — это профессор Клейнер (университетский физик), у которого я затем выполнил докторскую диссертацию. Он специально приехал в Берн, чтобы послушать меня — новоиспеченного приват-доцента. (Ты и Шаван были моими единственными слушателями.) А потом он справедливо заметил, что лекция моя была не очень и хороша. Я согласился, но сказал — не без лукавства, — что они и не обязаны приглашать меня к себе. Но он все же сделал это.

Наш сокурсник, чьи отличные конспекты для меня явились спасением на экзаменах для получения диплома, впоследствии стал преемником Фидлера в Политехникуме. Его имя Марсель Гроссман; вместе с ним я позднее

работал в Цюрихе над общей теорией относительности, в те времена еще мало кому известной. Он умер еще в молодые годы из-за рассеянного склероза. Он был моим близким другом. Его отец рекомендовал меня Галлеру, с которым был дружен. Случись иначе, я оказался бы, по всей видимости, в плачевном положении.

Должен тебе сказать, что мне при обобщении общей теории относительности удалось добиться весьма решительного успеха (пару недель тому назад). До сих пор уравнения для несимметричного поля не были однозначно определены. Теперь этот недостаток преодолен расширением групповых свойств поля. Кроме инвариантности преобразования, должно быть инвариантным несимметричное «поле смещения» Γ_{ik}^l :

$$\Gamma_{ik}^{l*} = \Gamma_{ik}^l + \delta_i^l \lambda_k,$$

где λ_k — любой вектор.

В этой обобщенной группе старые уравнения гравитации более не ковариантны, хотя каждое решение их есть решение новой системы. Общая теория поля будет так же убедительна, как и старая теория гравитации.

Физическая проверка теории вне поля зрения и современная вера в существенно статистический характер закономерности делают, наоборот, физиков глухими.

Сердечный привет тебе и твоим.

А. Эйнштейн.

138. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 20.3.1952

Дорогой Мишель!

Философия, которую ты приписываешь мне на первой странице твоего письма от 28/II, совсем такая же пестрая, как наш . . .*, но на наш век достаточно дельная.

Замечанием на с. 88 имелось в виду следующее¹. Обилие фактического материала незаменимо для построения перспективной теории. Этот материал сам по себе не дает отправного момента для дедуктивной теории; под влиянием этого материала может оказаться возможным «построить» некий общий принцип, который в свою очередь сможет послужить отправным моментом для логической (дедуктивной) теории.

* Слово написано неразборчиво.

Не существует логического пути, который привел бы от эмпирического материала к общему принципу, на который потом могла бы опереться логическая дедукция.

Итак, я не верю, что существует путь Миллса ² к познанию через индукцию; во всяком случае, это никак не логический метод. Так, я думаю, что нет никаких опытов, из которых можно было бы на основе дедукции вывести понятие числа.

И чем дальше продвигается теория, тем отчетливее становится ясным, что индуктивным путем нельзя найти основные законы, на основе одних опытных фактов (например, уравнения поля тяготения или уравнения Шредингера в квантовой механике).

В общем можно сказать так. Путь от частного к общему интуитивен, путь от общего к частному — логичен.

Я все же не знаю, ухватил ли я здесь то, что тебя интересует. В твоих письмах никогда нет четкого «или — или». Стремление к большей точности приводит часто как раз к верхоглядству, но кое для кого это бывает более удобным.

Наилучшие приветы Вам обоим.

Твой А. Э.

1. «Автобиографические заметки». — В кн.: «Альберт Эйнштейн — философ-ученый». Нью-Йорк, 1949.

2. Индуктивный метод Джона Стюарта Миллса (1806—1873), изложенный в его трактате по логике в 1843 г., основывается на справедливости закона причинности. Миллс исходит из представления о числе и возможности исчисления.

139. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 17 июля 1952

Дорогой Мишель.

Я все еще помню, как много спорил с Заутером о содержании работ, которые ты назвал статистическими работами по теории теплоты. Однако я совершенно забыл, какие именно положения составляли предмет дискуссии.

Я не могу понять вопроса, который ты поставил. Ты говоришь о «принужденном течении времени». Слово «принужденный» указывает на субъективные переживания, связанные с сознанием и порядком, в котором на основе воспоминаний они представляются нам «неизбежными». При этом «сейчас» играет доминирующую роль, но оно в равной мере исключено из концептуальной конструк-

ции объективного мира (именно это так огорчает Бергсона).

Когда ты говоришь об «остатках * сходным образом устроенных миров», то, наверное, имеешь в виду последовательность во времени пространственноподобных сечений, т. е. соотношения, присущие постижимому (сконструированному) миру.

А потом ты спрашиваешь, если я правильно понял, как нам перейти от пережитого опыта к объективности. Ты утверждаешь, что переход сопровождается страданием, которое — если интерпретировать его с позиций физики — связано с необратимыми процессами (как и вообще всякое воспоминание; здесь я полностью присоединяюсь к тебе). Но потом ты спрашиваешь: а помогает ли нам в этом проекция на луч прошлого, который продолжается по «прямой»? Этого я не понимаю. Что это — образное описание порядка, царящего в нашем сознании ¹?

Я не понимаю, что ты подразумеваешь на второй странице своего письма под «проекцией». Во втором абзаце ты говоришь о «точках» и «областях», о «многомерности». Это представляется относящимся к абстрактной действительности. Но я не знаю, что ты здесь имеешь в виду.

В этом как раз и заключается присущая тебе особенность. Ты никогда не формулируешь четко проблему, которую хочешь разъяснить. Пропасть между «я» и «ты» оценивается тобой неадекватно, и я, таким образом, остаюсь в неведении, что же, собственно, тебя занимает.

Твой уже тоже порядочно заплесневелый

Альберт.

1. Действительно, вопросы, поставленные Бессо, сформулированы им весьма неясно. Вот почему Эйнштейн отослал обратно Бессо его письмо от 13 июня, имея в виду получение дополнительной информации. Эйнштейну часто случалось критиковать своего друга за недостаточную ясность некоторых его писем. Но данный случай был первым (и последним), когда он просто вернул Бессо его письмо. Благодаря найденным черновикам, мы можем сказать, что научные занятия Бессо соприкасались с психологией; некоторые его работы больше относятся к этой науке, чем к физике. Когда

* Слово «остаток» дает повод подозревать, что ты не принимаешь всерьез четырехмерность относительности, а рассматриваешь настоящее время как единственно реальное. То, что ты понимаешь под «мирами», на физическом жаргоне является «пространственноподобными сечениями», которым теория относительности (даже специальная) отказывает в объективной реальности.

Бессо говорит о необратимости, он прибегает к субъективному и личному опыту; его мучает то обстоятельство, что ему не удастся включить этот опыт в объективную систему. Бессо вернется, впрочем, к понятию проходящего времени, которое в состоянии удержать только наша память. См., например, стихи, приведенные в его письме от 3.3.1953 г.

140. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 17.7.1952

Дорогой Мишель!

Сердечно благодарю тебя и всех твоих за то, что ты известил меня о печальном событии¹. От нас ушел по-настоящему оригинальный человек, который в полном одиночестве шел своей дорогой и никому не давал ввести себя в заблуждение. В его картинах было что-то захватывающее своей горечью.

С его историческими исследованиями я познакомился очень поверхностно, по случайным отрывкам в письмах. Я был ему очень благодарен за неизменную привязанность, которая проявлялась в его регулярной переписке с моей сестрой в годы ее страданий, когда он знал, что уже никогда ее не увидит. Это было нелегко, тем более, что в последний год жизни моя сестра уже не в состоянии была ему отвечать.

И все-таки хорошо, что каждая отдельная жизнь со всеми своими трудностями и проблемами имеет конец. Инстинкт отталкивает это неизбежное решение всех проблем, а разум его приемлет. Жалкие люди те, кто придумал, что индивидуальная жизнь продолжается и после смерти.

Хорошо, что свои последние недели Пауль был у вас и вы смогли облегчить ему этот трудный путь.

Сердечный привет всем вам

Твой Эйнштейн.

1. Пауль Винтелер, муж Майи Эйнштейн, умер в доме Бессо в возрасте 70 лет. Его жена умерла 25 июня 1951 г. в Принстоне. Винтелер похоронен на кладбище Пти-Саконе. О П. Винтелере см. введение к этой книге: «Жизнь М. А. Бессо».

Дорогой старый друг.

Ты так много помогаешь построению моста между «я» и «ты», в то время как я скорее тружусь над углублением пропасти, вооружившись детским инструментом. Это мне сейчас стало особенно заметно благодаря сравнению со строгими требованиями в принципиальных статьях из «Out of my later years»¹, которые несколько дней тому назад я держал в руках <...>.

Твою «действительность» я вижу теперь в столь все-сторонне и строго обоснованном и со всех сторон связанном поле $g_{\mu\nu} \neq g_{\nu\mu}$.

Вот четверостишие Курта Хейнике², которое я люблю:

«Жизнь трижды принадлежит тебе —
в упоенном взгляде на синюю даль,
в тихом взоре, обращенном к звездам,
и в созерцании самого себя».

И его же — из сонета «Любовники»:

«Вот пары, заслужившие милость,
любовью лечащие свою печаль,
и боги любят устремлять на них долгий взор
и видеть в них самих себя».

То, что автор 445 публикаций, помещенных в библиографии М. Шилдс³ (умершей два с половиной года тому назад), с трудом может понять, что кто-то принимает за действительную жизнь только мгновения, когда он может смотреть в голубые глаза ...

Я припоминаю, как некогда, когда младшему Альберту было 10 или 12 лет, ты рассказывал ему по его просьбе о теории относительности, а я тихонечко прислушивался и думал, что этот рассказ мог бы быть настоящим введением для каждого (в том числе и для будущих твоих со-трудников).

И верно ли, что номер 102 этой библиографии, относящийся к 1917 г., был первым исполнением этого намерения?⁴ У меня было впечатление, что это должно было произойти намного раньше, еще во времена специальной теории относительности, и мне даже казалось, что я бы мог уже тогда находиться у истоков этой волны популярности, которая всегда была источником твоих неудобств.

Из другой сказочки: как я мог бы, по моему представ-

лению, участвовать в разработке специальной теории относительности. Поскольку я, будучи электротехником, должен был отдавать себе отчет в том, что в теории Максвелла возникает некая индукция в физике электродвижущей или электростатической силы, в зависимости от того, движется ли или покоится индуктор, это практически можно было бы считать предвосхищением релятивистской концепции. Спиноза и Фрейд постоянно предостерегают меня против меня самого.

Твой Мишель.

1. Книга Эйнштейна («Из моих последних лет»), переведенная на французский язык Соловным под названием «Научные, моральные и социальные понятия».

2. Немецкий лирический поэт, драматург и автор романов, насыщенных юмором. Родился в Лейпциге в 1891 г. Из его многочисленных произведений отметим «Вокруг падают звезды» (1917), «Безмясное лицо» (1920), «Жизнь говорит „Да“» (1936), «Избранные стихотворения» (1952), «Улыбка апостола» (1957).

3. Маргарет С. Шилдс составила полный список публикаций Эйнштейна. Он помещен в конце книги «Альберт Эйнштейн — философ-ученый», изданной П. А. Шиллом в 1949 г.

4. Под № 102 в списке М. Шилдс значится книга Эйнштейна «О специальной и общей теории относительности (общедоступное изложение)»*.

142. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Женева, 18.8.1952

Дорогой старый друг.

Разве не верно, что для тебя «время» обозначается мнимой координатой Минковского и что этим подчеркивается отличие его от пространственных координат в бесконечно малом вплоть до геометрии $g_{\mu\nu} \neq g_{\nu\mu}$?

Своеобразие заключается в том, что только оно может рассматриваться как независимое переменное, и связано это с тем, что $-dt$ есть существенно отличное от $+dt$.

Нижеследующее соображение я рассматриваю как ребяческое (по сравнению со строгостью всех твоих рассуждений): события являются реализациями внутри поля вероятностей или им обусловлены. Поле вероятностей излучает каждую реализацию, закон этого излучения сохраняется, аналогично максвелловскому — из каждой

* Перевод см. в кн.: *Эйнштейн А. Собр. науч. трудов*, т. 1. М.: Наука, 1965, с. 531—600.— *Прим. пер.*

возникающей «световой точки» (в трехмерном континууме; или, лучше, в бесконечно малом, соответствующего порядка, элементе четырехмерного континуума). Там сохраняется «предотнесенность», такая же, как требуется для квантовой теории.

Твой Мишель.

1. Похоже, что Бессо стремится установить четкую разницу между координатой $x_4 = ict$ и тремя остальными, иначе говоря, между понятиями времени и пространства. См. ответ, данный Эйнштейном в начале его письма от 10.8.1952.

143. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 10.8.1952

Дорогой Мишель!

В специальной теории относительности с особым характером пространства-времени можно справиться с помощью мнимой координаты времени, введенной Минковским. Однако в общей теории относительности четвертая координата не имеет ничего общего с времениподобными расстояниями. До тех пор, пока поле $\Gamma_{\mu\nu}$ симметрично, «времениподобная» близость, в противоположность «пространственноподобной», выражается в том, что $g_{\mu\nu}A^\mu A^\nu = 1$ представляет собой однополостный гиперболоид в каждой точке пространства. В случае несимметричного поля особая природа пространственно- и времениподобной близости представляется менее ясной.

Если в некоторой точке рассмотреть два противоположных времениподобных направления, то можно, пожалуй, говорить, что одно из них устремлено в будущее, а другое — в прошлое. Но законы поля не отдают ни одному из этих двух направлений никакого предпочтения. Ситуация сходна с той, которая имеет место в классической теории с положительным и отрицательным направлениями времени. Такое различие имеет смысл только из-за второго закона термодинамики и основано, таким образом, не на форме элементарных законов, а только на граничных условиях (вероятность, или упорядоченность в отрицательном направлении времени возрастают).

Далее ты говоришь: поле вероятности излучает из каждой *реализации*. Так получается, например, в классической теории броуновского движения. Но по квантовой теории дело обстоит совсем не так. Она через уравнение Шредингера определяет временное продолжение

ψ -функции. Однако последнюю не следует воспринимать ни как описание реального состояния, ни как относящуюся к определенному значению времени. Здесь легко впасть в заблуждение, так как описание, которое дается с помощью ψ -функции, называют «состоянием». То обстоятельство, что его нельзя интерпретировать и рассматривать как «реальное состояние», должно быть понятным уже из того, что суперпозиция двух ψ -функций одной и той же системы снова представляет собой ψ -функцию. А суперпозиция реальных состояний — это бессмыслица, что непосредственно видно в случае «макросистем».

В современной квантовой теории вообще нельзя описать реальное состояние; можно только составить (неполное) представление, относящееся к реальному состоянию. Квантовые теоретики — «ортодоксы» — вообще отказываются от понятия реального состояния*. Таким образом, ситуация оказывается с довольно-таки большой точностью схожей с той, которая имела место у старого доброго епископа Беркли.

Естественно, что многими эта ситуация воспринимается как в высшей степени неприятная. Но до настоящего времени это единственный способ привести квантовые состояния и вероятности переходов между ними в соответствие с опытом. Я твердо убежден в том, что истина еще далека от современных учений. Может быть даже, что моя общая релятивистская теория несимметричного поля как раз и является этой истиной. Но пока что математические трудности, стоящие на пути к сравнению с опытом, непреодолимы.

И, как ни говори, сегодня столь же далеки мы во всяком случае от действительно разумной теории (двойственной природы квантов света и частиц), как и 50 лет тому назад!

Сердечный привет.

Твой Альберт.

P. S. Действительно разумная теория должна была бы элементарные образования (электрон и т. п.) *дедуплицировать*, а не *предполагать* заранее.

* Основываясь на позитивистских соображениях.

Женева, 21.9.1952

Дорогой Альберт.

Ты поступил удивительно: крошечному зародышу моей теории своим письмом (датированным 10/VIII, но написанным 10/IX и отправленным 11-го) помог подняться на ноги. Ты достиг этого тем, что — и это позитивная сторона — связал мою идею с теорией броуновского движения и — это негативная сторона — с уравнением Шредингера. Но в определенной степени здесь должна бы пойти речь о «новом начале»: «реализации» в поле вероятности не должны быть идентичны реальным состояниям (которых для квантовых теоретиков вообще не существует), но являться сущностями *quid per se** (совершенно бессовестным образом!), которые непосредственно связаны с точно так же существующими *quid per se* «полями вероятности» ...Однако здесь получается примерно так: один дурак, «il signor 10», может задавать больше вопросов, больше напустить пыли, чем может понять сотня мудрецов... даже если бы у них появилось к тому желание.

Мой энтузиазм покоится на двух отправных положениях: 1) наш друг Заутер расхваливал мое письмо как особенно ясное; 2) к тому же еще: ты по-прежнему придерживаешься того мнения, что единственной основой для различения прошлого и будущего может быть только второй закон термодинамики; хотя может показаться очевидным, что представление о направлении распространения светового луча должно покоиться на более глубоком фундаменте, вопреки общей теории относительности, так блестяще себя оправдавшей, но внутри которой для этого представления, вроде бы, не находится никакого подходящего места.

В моем упорстве меня немного утешает то соображение, что «в случае несимметричного поля особая природа пространственного или временного совпадения представляется менее ясной». Разве здесь не проявляется следствие «смысла в луче света», который отсутствует в фундаменте теории?

Ты, наверное, подумал: не знал я, что на старика Бессо из-за парочки слабеньких исходных положений может напасть столь наглая мания величия! Ну так не сердись на старого осла!

Твой Мишель.

* Сами по себе (лат.).

Принстон, 8 октября 1952 г.

Дорогой Мишель!

Твое письмо от 21/IX состоит, как мне кажется, из двух частей, которые еле связаны между собой. Тема первой части: квантовая теория — физическая реальность. Как взаимосвязано описываемое с помощью ψ -функции «состояние» («квантовое состояние») с определенным реальным положением вещей (назовем его «реальным состоянием»)? Характеризуется ли квантовым описанием реальное состояние полностью (1) или только неполностью (2)?

На этот вопрос так просто ответить нельзя, поскольку каждое измерение означает неконтролируемое реальное вмешательство в систему (Гейзенберг). Таким образом, реальное состояние не является непосредственно доступным опыту, и суждение о нем всегда остается гипотетическим. (Ситуация сравнима с понятием силы в классической механике, если в ней не принимать а priori закона движения.)

Оба предположения (1) и (2) в принципе имеют право на существование. Решение в пользу какого-то одного из них может быть достигнуто только путем исследования и сравнения убедительности вытекающих из них следствий.

Я отвергаю предположение (1), поскольку согласие с ним вынуждает принять, что существуют жесткие связи между частями систем, пространственно удаленных друг от друга на любое расстояние (непосредственное дальнее действие, не уменьшающееся с возрастанием расстояния). Вот доказательство.

Пусть система S_{12} , для которой известна функция ψ_{12} , состоит из подсистем S_1 и S_2 , которые в данный момент t отдалены друг от друга. Если проводить в системе S_1 «полное» измерение, то оно может быть осуществлено различными способами (в зависимости, например, от того, будут ли измеряться импульсы или координаты). По результатам измерения и по ψ -функции ψ_{12} можно, в соответствии с общепринятыми методами квантовой теории, определить ψ -функцию ψ_2 второй системы. Но окажется, что она будет по-разному выражаться — в зависимости от способа измерения, выполненного в S_1 . А это противоречит предположению (1), если исключить дальнее действие. Тогда, значит, измерение S_1 не может влиять на реальное

состояние S_2 и, таким образом, в соответствии с (1) влиять на квантовое состояние S_2 , описываемое через ψ_2 .

Я вынужден поэтому исходить из точки зрения (2), в соответствии с которой реальное состояние системы, хотя и неполно, описывается ψ -функцией.

Если метод современной квантовой теории в принципе рассматривается как окончательный, то это означает отказ от полного описания реальных состояний. Этот отказ можно обосновать тем, что предполагается, что как раз для реальных состояний и не существует никаких законов и что полное их описание нецелесообразно. А это означает, говоря другими словами, что законы относятся не к вещам, а к тому, что мы, благодаря наблюдению над ними, можем узнать (однако законы для временной последовательности этого частичного знания строго детерминированны).

Ну, а на это я решиться не могу. Я полагаю поэтому, что статистический характер современной теории просто обусловлен выбором неполного описания.

Вторая часть твоего письма посвящена вопросу о том, есть ли с точки зрения фундаментальной закономерности смысл в направленности (стрелки) для «течения времени». В эмпирических законах, относящихся к элементарным частицам, такое свойство стрелки находит себе столь же малое подтверждение, как и в классической механике. Остается идея, что испущенная сферическая волна содержит в себе большую «реальность», чем сходящаяся.

Реальность квантов света показывает, что эта идея необоснованна. И мы как раз весьма далеки от существования разумной и согласующейся с фактами теории света и материи! Мне кажется, что продвинуть этот вопрос дальше смогут только смелые умозрительные заключения, а не аккумуляция опытных данных. Имеется более чем достаточно непонятного экспериментального материала. А о «стрелке» я определенно думаю, что она имеет отношение только к «начальным условиям».

Сердечный привет!

Твой Альберт.

На 8-й день моего 81-го года жизни ¹ (2.6.1953)

Дорогой Альберт.

Когда я в последний раз был во Флоренции — в марте этого года — до меня доходили слухи об успехах, которых ты достиг на пути к общей теории тяготения. Как раз сегодня я увидел несомненно интересную работу Марии Пастори ² (в Rendiconti, с. 302/7). Не о ней ли шла речь?

Некий Роберт Судан ³ написал в 1950 г. статью в Archives des Sciences: «La théorie de la relativité et l'électromagnétisme» (Теория относительности и электромагнетизм). Он — милый человек, и его теория начинается интересно, ты ее посмотришь: я приложил ее к письму, но вряд ли продвинешься дальше начала <...>.

От имени всех я сердечно приветствую тебя.

Твой Мишель Confusius *

1. Напомним, что Бессо родился 25 мая 1873 г. Сохранился черновик этого письма от 28 мая, слегка отличающийся от окончательного текста.

2. Статья Марии Пастори в Rendiconti dell' Accademia Nazionale dei Lincei, serie VIII, v. XII (март 1952 г.). Другие статьи этого же автора (профессора механики в Миланском университете): «Тензорное интегрирование», опубликована в Rendiconti del Seminario Mat. e Fisico di Milano (1950, XXI, 17 с.), и «Приложения тензорного исчисления» (Le Matematico, 1952, VII, с. 21—54).

3. Роберт Судан много лет подряд читает курс тензорного исчисления на факультете естественных наук в Женевском университете.

Пти-Саконе, 29.6.1953

Дорогой Альберт.

На послезавтра я обещал в Société de Physique et d'Historie naturelle de Geneve сделать сообщение, названное так: Essai de visualisation de la structure de l'espace-temps ¹.

Исходный пункт этой серии идей, сущностью которых является субъективное время, я тебе уже не раз излагал, на что ты мне возражал примерно так: продолжай, мол,

* Confusius — запутавшийся; здесь имеет место очевидная игра слов.

сам. Но я как раз не могу этого сделать, поскольку я не математик, о чем и указывается в сообщении.

Мне представляется, что некоторое значение имеет обозначение многообразия естественными для него фигурами: окружность — для шаровой поверхности, прямая — для плоскости. Для пространства-времени специальной теории относительности — синхронизированное с точечным событием пространство... *

Я получил удовольствие от многочисленной редакционной работы, связанной, в частности, с выбором способов такого обозначения структуры. Но прежде всего — от сердечных контактов с доктором Заутером и профессором Вейглем² <...>.

Твой Мишель.

1. Бессо пишет Эйнштейну за три дня до того, как представит свой доклад Физическому обществу, и отрывки из доклада приводит в своем письме. Потом он спохватывается и откладывает отправление письма до получения оттисков текста доклада. Так как оттиски опаздывают, он посылает письмо 24 июня вместе с экземпляром корректуры. Она представляет собой две большие страницы, на которых Эйнштейн сделал несколько карандашных пометок, относящихся к теме, обсуждаемой Бессо.

2. Жан Вейгль (1901—1968), с 1931 до 1948 г. преподавал экспериментальную физику в Женевском университете, где был директором Физического института. Его наиболее важные труды относятся к дифракции рентгеновских лучей. Привлеченный идеей применения электронного микроскопа в молекулярной биологии, он ввел этот предмет в программу курса. В дальнейшем он доверил его проведение проф. С. Келленбергеру. В 1948 г. Вейгль вышел в отставку в Женеве, чтобы посвятить свое время изучению биологии в Калифорнийском технологическом институте в Пасадене, сохраняя в то же время связь со своими женевскими коллегами. В области биологии мы обязаны ему точными данными о поведении и молекулярном механизме бактериофага. Он был прекрасным педагогом, первоклассным экспериментатором и преданным другом. Подобно гиганту Антею, Вейгль черпал новые силы, соприкасаясь с природой, в частности с горами. См. статью В. Арбара в *Actes de la Soc. Helv. des Sc. nat.* (1969, с. 292—297), содержащую список работ Ж. Вейгля. Добавим также, что Вейгль часто писал Бессо со времени своего переезда в Пасадену.

* Далее в письме приводится отрывок из доклада, который здесь опущен.

Дорогой Мишель.

Из твоего письма от 29/VI я увидел, что ты весьма основательно решился двинуться по гололедице — я имею в виду физическую. Вопрос в том, откуда появилась стрелка, которая представляется присущей физическому времени. Ты считаешь то обстоятельство, что эту стрелкообразность, определяющую поведение вещей во времени, сваливают на второй закон термодинамики, своего рода уверткой; ты указываешь, что все дело в том, что теория относительности до сих пор не была в состоянии найти объяснение квантовым явлениям.

Вся проблема объяснения стрелки времени не имеет, однако, ничего общего с теорией относительности. Представь себе заснятое на киноплёнку броуновское движение частицы и соответствующие картинки, расположенные точно во временной их последовательности, рядом друг с другом; пусть только не будет зафиксировано, какая из образовавшихся последовательностей во времени действительно имела место: ведущая от A к Z или от Z к A . Даже самый большой хитрец на основе всего этого материала не сможет определить стрелку времени. Следовательно: все, что происходит в состоянии термодинамического равновесия, вообще не содержит в себе стрелки времени ¹.

Броуновское движение, однако, физически идентично диффузии, с той только разницей, что в первом случае имеется много броуновских частиц, которые не замечают друг друга, коль скоро речь идет о слабо концентрированном растворе. Но стрелка времени здесь становится заметной, и уравнение диффузии $A \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial y}{\partial t}$ содержит линейную производную $\partial/\partial t$.

Что же в процессе диффузии приводит к тому, что броуновское движение становится бесстрелочным? Это то единственное обстоятельство, что диффузия связана только с начальным состоянием, которое — если его рассматривать *sub specie aeternitatis* * — безумно невероятно, т. е. это начальное состояние характеризуется малой величиной энтропии.

Я думаю, что так оно и происходит во всех случаях,

* С точки зрения вечности (лат.).

т. е. что стрелка времени всегда связана с термодинамическими условиями.

Если бы элементарное событие зависело от стрелки времени, то переход в состояние термодинамического равновесия был бы вообще непонятен.

Статистическая квантовая механика также полностью соответствует бесстрелочности элементарных процессов. Пока существует наше главным образом непосредственное знание элементарных процессов, для каждого из них имеется соответствующий обратный процесс.

Излучение не составляет исключения из этого правила. Каждому элементарному процессу соответствует обратный (инверсный) процесс. Значит, горе теории относительности, если бы она согрешила против этого основного принципа, касающегося стрелки времени.

Ты дал понять, как ты впал в свой грех. Ты не можешь свыкнуться с мыслью, что субъективное время со своим «сейчас» не должно иметь никакого объективного значения. Посмотри об этом Бергсона!

Если в общей теории относительности есть что-либо истинное, то не должно быть никаких «естественных фигур», принадлежащих некоему пространству. Нечто похожее может иметь место только в совершенно тривиальных случаях $\langle \dots \rangle$. Это верно, что ансамбль производит хаотический эффект и, насколько мне известно, отсутствуют какие-либо серьезные попытки представить все существенное с единых позиций. Быть может, еще наступит такое время, которое принесет больше надежд найти решение, чем это имеет место в наши дни, когда переживают кризис основные понятия.

В ходе мыслей Эддингтона, возможно, и есть что-то правильное. Мне он всегда казался необычайно остроумным, но не критически мыслящим человеком. (Согласись, не то я тебя сожру...) Я никого не хотел бы заставлять тратить столько усилий и времени. Самоотверженность должна иметь разумные пределы. Со своей философией он напоминает мне прима-балерину, которая сама не верит в обоснованность выполняемых ею элегантных пируэтов. Сердечный привет.

Твой Альберт.

1. Очень жаль, что Бессо не показал Эйнштейну текст своего сообщения перед тем, как передавать его в Физическое общество.

Женева, 3.8.1953

Дорогой, добрый старый друг.

Ты приложил невыразимое усилие, чтобы вылечить меня от безумства, пребывая в котором я мог думать, что ход времени *также* может быть чем-то иным, кроме как переходом от невероятных состояний к вероятным. То, что это с ним связано, представляется очевидным; но то, что он *только* это и означает, для меня и во мне не звучит убедительно, так же, как и для любого человека, который еще не подготовлен к символическому преобразению.

В этом для нас как раз и состоит нечто *фундаментальное*. Но оно присутствует также и в остальном — в молекулярной картине, поскольку молекулы представляются движущимися и обладающими чем-то вроде скоростей — как раз стрелкообразным.

То обстоятельство, что броуновское движение, как и уравнение диффузии, не позволяет заглянуть в будущее, в этой связи не удивляет. Позволим себе далее сделать скачок: четырехмерность, являющаяся не только неким красивым образом, а, напротив, материалом, составляющим сущность общей теории относительности и ее дитятей. Сущность, по отношению к которой наши вещи — только тени...

Поскольку с тем, что могучие релятивистские уравнения не являются ее сущностью, естественно, согласен и ты, а мне ясно, что противоречие между *прежде* и *после* принадлежит к этой сущности. Даже если это имеет в той же мере малое отношение как к Шредингеру, так и к Эйнштейну. А может быть, к старой, тысячелетней формулировке, как причина и действие <...>.

С сердечной благодарностью.

Твой старый Мишель.

Пти-Саконе, 31.8.—2.9.1953

Дорогой добрый старый друг.

Веро принес мне книгу Колеруса¹, нечто вроде руководства по языку волапук², из-за которого вавилонская башня строилась вечно. Я прочитал там, в частности, о Пифагоре и Галуа... и об ужасной жизни Абея, и о

том, как горький опыт в Париже удержал его в конце концов от того, чтобы встретиться с Гауссом.

Мы должны быть благодарны вавилонскому столпотворению за то, что оно сохранило нам физика Эйнштейна и тем самым дало нам ориентир в нынешнем запутанном мире.

Рассказывал ли я тебе уже о здешнем доценте Судане, принесшем мне книгу Шредингера «Space. Time. Structure»; я ее взял почитать потому, что название моего сообщения, звучащее по-детски, совпадает с ней по теме.

Книгу Шредингера, несмотря на язык (английский) и математику, я читал с радостью. Она разочаровала меня в том отношении, что я надеялся в ней найти особые случаи обобщенной теории гравитации. А у тебя подобные вещи не разработаны? Ведь они были бы очень ценны: прекрасная и единственно обнадеживающая теория обрела ли плоть и кровь?

Я снова обращаюсь к Колерусу, который вместе с «Les grands courants de la pensée mathématique» ле Лионе (ожидается выход второго тома) составляет мое математическое общество <...>.

Сердечно твой Мишель.

1. Книга Эгмонта Колеруса «От Пифагора до Гильберта; математика и ее творцы» была издана в Берлине в 1937 г. Вероятно, Бессо видел более позднее издание этой работы.

2. Волапюк (название, составленное из слов world и speak) — система всемирного языка, изобретенного в Германии Иоганном Мартином Шейлером в 1879 г. Этот искусственный язык уступил место эсперанто.

151. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 22 сентября 1953

Дорогой Мишель.

Твое лестное замечание о моей скромной персоне напоминает мне классическое изречение моего венского коллеги Эренгафта, который писал мне еще в догитлеровские времена: «Я единственный оставшийся оплот в центральной Европе».

С твоим замечанием относительно обобщенной теории гравитации ты совершенно прав. В разумности этой теории никаких сомнений нет. Но в пользу ее справедливости до сих пор еще ничего не говорит. Причина здесь в том, что эта теория должна *везде* ограничиваться решения-

ми, в которых отсутствуют сингулярности, для того, чтобы быть достаточно определенной. Что-либо выяснить о существовании или несуществовании таких решений находится за пределами возможностей современной математики.

Мы, наверное, не доживем до решения этого вопроса.

С необратимостью законов природы эта теория ничего общего не имеет. Я тебе уже разъяснял, почему я в это не верю.

Сердечно приветствую тебя.

Твой Альберт.

152. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Женева, 2.10.1953

Дорогой Альберт, дорогой добрый старый друг.

⟨...⟩. Мы здесь виделись с двоюродным братом Лидии¹ — оригинальным человеком, несмотря на его молчаливость в том, что касается его личных дел. Можно думать, что он сам построил себе маленький, для одного человека, домик. Он приходит к Веро и Лидии, чтобы поработать в саду и т. д. Он изучал юриспруденцию (несколько десятков лет тому назад) и боится злоупотребления властью со стороны государства. Я с ним прочитал то место твоих записок, где предметом рассуждений была твоя боязнь распространения государством неправды, а он переживал, подобно тебе, то же и с такими же немедленными следствиями.

Побуждаемый тем местом твоих записок, которое относится к пониманию этих неприятных обстоятельств, в рамках принципа причинности, я на днях попытался в общих чертах (следуя, кажется, сотруднику Дарвина — Гексли, а, может, Максу Мюллеру), так же как и в беседе с создателем швейцарского гражданского кодекса Ойгеном Губером, заново продумать связь, существующую между нормами поведения и причинностью. Эта связь реализуется принципом выживания приспособленного. Такова устойчивость идиомы с ее словарным составом и формой. Таков точный образ мышления, помогающий избежать противоречивых практических указаний. Таково соответствие между сформулировавшимся государственным образцом с его правовыми учреждениями и господством Рима в бассейне Средиземного моря. Это, пожалуй, пережиток тех времен, когда, вслед за Ньютоном

и Дарвином, считалось, что уже все известно. Что ты по этому поводу скажешь?

Но я все же не понял, по каким соображениям ты так решительно сводишь «течение времени» ко второму закону термодинамики, вопреки психологическому восприятию, которое вообще согласуется с образованием понятия причина-следствие в старых физике и образе мышления.

Не сердись на меня!

Твой Мишель.

1. Лидия Бессо, урожденная Бренниман, жена Веро Бессо.

153. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Женева, 4.4.1954

Дорогой Альберт.

Все дальнейшее вызывает у меня ощущение нуждающегося в уговорах ребенка. Но все же имеет смысл спросить о непосредственном применении основных принципов.

Изотропия: эквивалентность направлений при рассмотрении твердого тела.

Однородность: эквивалентность тех «мест», куда оно переносится; относительность: зависимость результатов воздействий на рассматриваемую вещь только тех вещей, которые считают ее окружающими, в особенности от ускорений, от расстояний и от их первой и второй производных.

Передо мной лежит Кенигсбергское изложение предложенных Гельмгольцем опытов по изучению свойств ускоряющих сил, которые должны быть выполнены для того, чтобы «получился результат» (т. 1, с. 82); в нем также говорится о том, что в ряду всех естественных процессов не существует замкнутого цикла, результатом которого было бы получение механической энергии («силы») без соответствующих затрат.

Количество механической энергии теряется лишь с точки зрения работы наших машин, но не в масштабе всей природы: «в целом природа содержит запас способной к действию энергии, которая никоим образом не может быть ни увеличена, ни уменьшена; количество способной к действию энергии в неорганической природе так же вечно и неизменно, как и количество материи», а сохранение последней уже *полвека* тому назад было

сформулировано Лавуазье в качестве основного принципа химии.

С.88: «...что как бы часто природные тела ни воздействовали друг на друга, проявляя притягивающие или отталкивающие силы, которые не зависят от времени и от скорости, сумма живых сил и сил напряжений остается постоянной; что, однако...»

К тому, что в случае этих элементарных сил имеют дело с «консервативными» силами, достаточно, пожалуй, этого свойства, и свойство относительности здесь не при чем — во всяком случае для общей картины. Но не в этом кроется мой сегодняшний вопрос, а как раз в виде некоторого интеграционного принципа: с преимуществом наглядности...

1. Это письмо отсутствует в архиве в Принстоне. Можно предположить, что Бессо его не отправил, поскольку он не упоминает о нем в следующем письме от 22 апреля.

154. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Пти-Саконе, 22.4.1954

Дорогой старый друг.

Я не стыжусь написать тебе нижеследующее, даже если ты можешь предложить ответить на это математику-лаборанту.

Мне не удастся справиться с проблемой возникновения движения при $T = 0$, после того как для $T \leq 0$ имело место состояние покоя, — в рамках общей теории относительности.

Моя комната как материальная координатная система включает с точностью до экспериментального материала «гладкую» часть пространства-времени.

Эксперимент 1. Под потолком висит груз; он неподвижен при $T \leq 0$; при $T = 0$ нить подвески перерезается.

Эксперимент 2. Массы (1) и (2) связаны друг с другом с помощью невесомой напряженной пружины и нити, которые до $T = 0$, т. е. при $T \leq 0$, позволяют массам оставаться в покое (расстояние $x = \text{const}$). При $T = 0$ нить перерезается.

Задача: представить эксперименты 1 и 2 в рамках общей теории относительности.

Дидактически пример возникновения движения важен, поскольку он воплощает в себе некие произвольные действия, которые всегда предполагаются возможными в

процессе эксперимента, и мой второй случай и кажется мне особенно простым — как раз из-за *математически* неудобной прерывности.

Но, но и еще раз но...

Сердечно твой Мишель.

155. ЭЙНШТЕЙН -- БЕССО

Принстон, 14.5.1954

Дорогой Мишель!

На твой вопрос я хотел бы ответить так.

Мы исходим из системы координат, в которой имеется однородное поле тяжести. В нем свободные тела падают одинаково. Гравитационное поле, которое мы предполагаем слабым, мы определяем по ускорению свободного падения.

В общем случае падение определяется с помощью уравнения геодезической линии

$$\frac{d^2x_i}{ds^2} + \Gamma_{ab}^i \frac{dx_a}{ds} \cdot \frac{dx_b}{ds} = 0.$$

Поскольку мы близки к евклидову случаю, мы можем ds заменить на dx_4 ($= dt$).

$$\frac{d^2x_1}{dt^2} = 0, \quad \frac{d^2x_2}{dt^2} = 0, \quad \frac{d^2x_3}{dt^2} = -\gamma$$

(γ — интенсивность поля тяжести).

$\frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} = 0$, $\frac{dx_3}{dt}$ по сравнению с $\frac{dx_4}{dt}$ пренебрежимо мало (в выражении $c^2 dt_{\mu k}^2 + dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$ основным является член с c^2); dx_4/dt мы можем считать равным 1.

Третье уравнение движения, которое для нас наиболее существенно, выразится так:

$$\frac{d^2x_3}{dt^2} + \Gamma_{44}^3 = 0.$$

Мы предположим, что гравитационное поле статическое, т. е. что g_{ik} не будет зависеть от t , и метрика будет мало отличаться от евклидовой. По определению Γ представляет собой $\Gamma_{44}^3 = g^{3s} \left[\begin{smallmatrix} s \\ 44 \end{smallmatrix} \right]$ (из-за статического характера поля) — $\frac{1}{2} g^{3s} \cdot g_{44,s}$; мы можем положить равными нулю все g^{3s} , кроме g^{33} , которое из-за квазистатического характера можно аппроксимировать (-1).

Таким образом, получается

$$\Gamma_{44}^3 = \frac{1}{2} g_{44,3}.$$

Уравнение движения, следовательно, с хорошим приближением принимает вид

$$\frac{d^2 x_3}{dt^2} + \frac{1}{2} g_{44,3} = 0,$$

$\frac{1}{2} g_{44}$ играет роль гравитационного потенциала.

Гравитационное поле с достаточным приближением можно записать так:

$$\begin{array}{cccc} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{44}, \end{array} \quad (1)$$

где g_{44} приблизительно линейно зависит от x_3 .

На это гравитационное поле пренебрежимо мало влияют материальная точка подвеса и напряжение нити. Если нить перерезать, то она начнет двигаться в соответствии с написанным выше уравнением движения.

Систему можно выбрать и так, что свободно падающие тела не будут испытывать ускорения.

Тогда гравитационное поле будет евклидовым, т. е. (в простейшем случае) иметь следующий вид:

$$\begin{array}{cccc} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \quad (2)$$

Разумеется, поле, соответствующее первому описанию, тоже будет евклидовым, но это не сразу видно. Математически его евклидовость выражается через исчезновение тензора Римана R_{klm}^i , что при достигнутой здесь точности имеет место в обоих представлениях.

И вот только теперь я прихожу к тому пункту, из-за которого у тебя и болит голова. Ты хочешь, очевидно, выбрать систему координат как раз так, чтобы твоя сначала неподвижная материальная точка оставалась в покое и после того, как перерезана нить.

Это можно устроить, если до того, как перережут нить ($t < 0$), выбрать представление поля в виде (1), а после того ($t > 0$) — представление поля (2). При этом g_{44} не

останется неизменным; то же верно и для $g_{44, 3}$, что, вообще говоря, должна бы потребовать теория. Но этого легко достигнуть с помощью граничного перехода с постоянным изменением g_{ik} (т. е. «ускорения» системы), как ты наверняка инстинктивно почувствовал.

Конечно, этот смешанный выбор системы координат искусствен, непрозрачен, но логически правомерен.

Да, если бы все было так же прозрачно! Но в случае обобщенной теории поля дело настолько запутано, что мне и самому не ясно, следует ли верить в ее истинность или нет. Над этим еще многие поломают себе голову и после того, как меня не станет.

А пока сердечный привет

от твоего Альберта.

156. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Женева, 18.5.1954

Дорогой Альберт.

Сердечное спасибо за математически ясное письмо от 14-го.

Можно ли мне представить себе непрерывность (конечно, это «металогически» — недопустимо) в виде нити из вязкой жидкости?

Какие физические аксиомы кроются за математической ясностью?

Гомогенность }
Изотропия } в бесконечно малом.

Являются ли они достаточными предпосылками для существования требуемых производных?

Можно ли эту замысловатость полевой теории раскрыть для меня? А для Марии Пастори ¹?

Связано ли это с тем, что (до сих пор?) не сформулированы никакие специальные случаи?

Прости! Иост Винтелер обращал внимание на то, что это еще не прощение; «наказание» отложено для меня «в расчете на хорошее поведение до следующего письма».

Твой Мишель.

То, что мне пришлось постулировать, было бы заменой для каждого особого случая математической производной на принятые для использования постулаты.

Один дурак может задать так много вопросов, что весь Принстон не сможет на них ответить.

1. См. письмо Бессо от 2 июня 1953 г. Заметим, что Бессо переписывался с проф. М. Пастори.

157. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Женева, 12.7.1954

Дорогой Альберт.

<...> 2. Веро спросил меня сегодня, нет ли у меня ощущения того, что я понял единую теорию поля. Я, по неосторожности, ответил утвердительно. С ощущением этой неосторожности я попытался дать сжатое представление общей теории относительности. Это пространство-время, четырехмерный континуум, получается так, что специальная теория относительности справедлива и в каждом данном месте: система координат в специальной теории относительности в каждом месте, исходя из масштабов и ориентировки «моего здесь-сейчас», задается как линейная функция четырех координат. Коэффициенты этих функций положения зависят от того, что происходит в этой пространственно-временной области, а у нас в основном от солнечной массы с учетом ее вращения. То есть не от наличия зарядов, токов, а также электромагнитных колебаний. Учет этих последних является задачей единой теории поля, возникающей из-за того, что в линейных функциях четырех координат точки один из коэффициентов — отрицательный. Но всегда ли это тот самый коэффициент, который связан со временем?

Там, где в общей теории относительности находится точечная масса, в единой теории поля находится вращающийся электрический заряд или какой-либо круговой ток, который мог бы вызывать соответствующие индукционные эффекты. И тогда, может быть, система уравнений, соответствующих специальной теории относительности, распалась бы на две системы уравнений: симметричную и антисимметричную, влияющие друг на друга различным образом в зависимости от характера дифференцирования^{1???}

Я пока еще не нашел практического пути для сравнения теории с экспериментальными данными.

Тензор $g_{ik} = \underline{g}_{ik} + \underset{\sim}{g}_{ik}$. Если в центре имеются масса

и вращающиеся электрические заряды, то, может быть, g_{ik} соответствует одному, а g_{ik} — другому!

Прости! Всего наилучшего.

Твой Мишель.

1. Эйнштейн вскоре ответит на вопросы Бессо в своем «длинном письме» от 10 августа 1954 г.

158. ЭЙНШТЕЙН — БЕССО

Принстон, 10 августа 1954

Дорогой Мишель!

Твое определение общей теории относительности очень хорошо характеризует ее генетическую сторону. Но очень важно вслед за этим все дело проанализировать формально логически. Ведь до тех пор, пока из-за временно непреодолимых математических трудностей не будет установлена эмпирическая суть теории, логическая простота является единственным, хотя, конечно, и недостаточным, критерием ценности теории.

Специальная теория относительности является собственно не чем иным, как приложением идеи инерциальной системы к эмпирически подкрепленному убеждению о постоянстве скорости света относительно любой инерциальной системы. Она преодолевает несостоятельное с точки зрения познавательного-теоретического понятие инерциальной системы. (Несостоятельность этого понятия была с особенной очевидностью показана Махом, но с несколько меньшей ясностью была понята еще Гюйгенсом и Лейбницем.)

Суть этого возражения против ньютоновских принципов лучше всего можно объяснить сравнением с аристотелевской физикой с ее «центром мироздания»: имеется некий центр мироздания, к которому стремятся все тяжелые тела. Так, например, объясняется шаровая форма Земли. Самое отвратительное здесь кроется в том, что этот центр мироздания действует на все другие тела, а все другие (тела) не оказывают обратного действия на центр Земли (односторонняя причинная связь).

С инерциальной системой дело как раз так и обстоит. Она повсеместно определяет инертность предметов, не испытывая на себе их влияния. (Собственно, здесь лучше было бы сказать о совокупности всех инерциальных систем, но это несущественно.) Суть общей теории отно-

сительности состоит в преодолении понятия инерциальной системы. (При построении общей теории относительности это еще не было ясным, и было понятно только потом — благодаря Леви-Чивита.)

При построении теории я в качестве отправного понятия выбрал симметричный тензор g_{ik} . С его помощью оказалось возможным определить «поле смещения» Γ_{ik}^l , которое для любого вектора в точке P определяет некий вектор в любой бесконечно мало удаленной точке P' ($\delta A^\nu = -\Gamma_{\sigma\tau}^\nu A^\sigma dx_\tau$).

Это понятие поля смещения само по себе не зависит от существования метрического поля g_{ik} ; то, что его ввели прежде всего в связи с метрическим полем, объясняется тем, что Риман исходил из гауссовой теории кривизны поверхностей, причем поверхность обретала метрику потому, что она укладывалась в евклидово пространство.

Как же так получается, что как раз поле смещения и привело к преодолению понятия инерциальной системы? Если в инерциальной системе в двух точках P и Q , находящихся на любом расстоянии друг от друга, иметь векторы с одинаковыми компонентами, то это будет объективным (инвариантным) соотношением: они равны и параллельны. На этом и основано то, что в инерциальной системе при дифференцировании тензора по координате снова получают тензор, и что, например, волновое уравнение в инерциальной системе представляет собой объективное выражение. Поле смещения разрешает теперь только такое образование тензора путем дифференцирования с учетом любой системы координат. Таким образом, это инвариантная замена для инерциальной системы и тем самым (как это представляется) основа для любой релятивистской теории поля.

Если поле смещения введено как фундаментальная переменная, характеризующая поле, то оно определяет тензор кривизны при инвариантном акте перемещения вектора вдоль замкнутого пути, окружающего бесконечно малый элемент поверхности. В результате оказывается, что тензоры кривизны R_{klm}^i и R_{kl} принадлежат Γ -полю (которое само не имеет тензорного характера).

Ну а теперь, чтобы получить уравнения поля, лучше всего применить вариационный метод, поскольку он всегда дает 4 тождества для уравнений поля, необходимых для совместности релятивистской системы уравнений.

Для получения скалярных величин, необходимых для написания вариационного интеграла, нужно иметь тензор g_{kl} (или g^{kl}), который вместе с R_{kl} приводит к скаляру $g^{kl}R_{kl}$. Это является формальным основанием к тому, что помимо Γ_{ik}^l нужно иметь еще один тензор.

Теорию чистого гравитационного поля можно получить, таким образом, если выбрать как Γ_{ik}^l , так и g_{ik} (первый — по нижним индексам) симметричными, что имеет инвариантно-теоретический смысл.

С другой стороны, из определения бесконечно малого смещения видно, что основания для выбора Γ -поля симметричным по нижним индексам отсутствуют. Подобная общая предпосылка предполагает, таким образом, необходимость выбора g_{ik} -поля несимметричным. В дальнейшем это уже без всякого произвола приводит к теории несимметричного поля.

То обстоятельство, что я не знаю, справедлива ли физически эта теория, объясняется тем, что не удастся что-либо сказать о существовании и структуре всюду не-сингулярных решений таких систем нелинейных уравнений.

Не следует считать, что эта теория определяется только релятивистскими требованиями. Например, в уравнениях обычной гравитационной теории имеется некоторая правая часть, которая представляет создающее поле и находящиеся под его влиянием массы. Этому по теории поля соответствовало бы утверждение о существовании дополнительного второго инварианта поля.

Такой метод привел бы к необходимости введения новых видов полей, которые не зависят от Γ . Можно было бы также произвольно выбирать знак перед дополнительным инвариантом таким образом, чтобы, например, никогда нельзя было понять, почему все гравитирующие массы имеют одинаковый знак. Короче, нужно было бы собрать выражения, ничего логически общего между собой не имеющие. Я достаточно верующий человек, чтобы быть убежденным в том, что этот мир сварганили не так.

И в этом смысле теория все же, благодаря релятивистским требованиям, определена достаточно однозначно.

Но я считаю вполне возможным, что физика может быть обоснована не только с помощью понятия поля, т. е. непрерывной структуры. Тогда из всего моего воздушного

замка, включая и теорию гравитации, да и всю остальную нынешнюю физику, *ничего* не останется.

Сердечный привет.

Твой А. Э.

159. БЕССО — ЭЙНШТЕЙНУ

Женева, 1/4.10.1954

Дорогой добрый старый друг.

Твое последнее подробное письмо, которое я сразу же по получении переписал для того, чтобы иметь один экземпляр, где можно было делать пометки на полях, я прочитал позавчера с Росье, профессором общей математики здешнего университета: наслаждались вместе. И снова я оценил, какое огромное счастье мне выпало встретить тебя <...>.

Твое письмо — это грандиозное резюме твоей грандиозной жизненной задачи.

Некоторые пункты в твоей книге «Из моих последних лет», получившие такое прекрасное обобщение... вот они в твоём письме.

I. Специальная теория относительности является, собственно, не чем иным, как подгонкой идеи инерциальной системы к эмпирически подкреплённому убеждению в постоянстве скорости света относительно любой инерциальной системы. Она не преодолевает несостоятельное с точки зрения познавательного-теоретического понятие инерциальной системы.

II. С инерциальной системой дело обстоит как раз так же, как и с центром у Аристотеля: она повсеместно определяет инертность предметов, не будучи определяемой с их стороны*.

III. Суть общей теории относительности состоит в преодолении этой несимметрии для инерциальной системы.

IV. Симметричный тензор g_{ik} даёт возможность определить поле смещения Γ_{ik}^l .

V. Это понятие поля смещения само по себе не зависит от существования метрического поля.

VI. То, что это с самого начала было общеизвестным, объясняется тем, что Риман исходил из гауссовой теории кривизны поверхностей, причём поверхность обретала метрику потому, что она укладывалась в евклидово (метрическое) пространство.

* Здесь и в следующих пунктах Бессо не совсем точно цитирует соответствующие места из письма Эйнштейна.

VII. Векторы с одинаковыми компонентами равны и параллельны. (Это справедливо только для случая предположения инерциальной системы.)

Пишу в постели из-за легкого недомогания; это кое-что объясняет, также и то, что я не затрагиваю замечания в конце относительно предположения дополнительного второго инварианта поля и отрицательной гравитационной массы, хотя он мне очень по душе — благодаря роману Жюль Верна...

Твой Мишель.

160. ЭЙНШТЕЙН — СЫНУ И СЕСТРЕ БЕССО

Принстон, 21.3.1955

Дорогой Веро и дорогая г-жа Биче!

Я вам очень благодарен за то, что вы мне в эти тяжелые дни сообщили так точно и подробно о том, как себя чувствовал Мишель. Кончина его была столь же гармонична, как и вся жизнь его и окружающих его близких. Подобный талант к гармонической жизни редко сочетается со столь пронизательным интеллектом, а у него это соединилось именно таким редким образом. Но больше всего в нем, как в человеке, меня удивляло то обстоятельство, что ему удалось в течение долгих лет прожить с одной женщиной не только в мире, но, более того, непрекращающемся согласии — предприятие, в котором я дважды довольно постыдно потерпел неудачу.

Наша дружба возникла в студенческие годы в Цюрихе, где мы регулярно встречались на музыкальных вечерах. Он, самый старший и самый знающий из нас, был заводилой. Круг его интересов, казалось, не имел границ. Но наиболее сильным представлялись его критически-философские интересы.

Позднее нас свело вместе бюро патентов. Наши разговоры, когда мы вместе возвращались домой, были полны ни с чем не сравнимого обаяния — казалось, словно ничего «слишком человеческого» не существует. С этим не могла сравниться наступившая потом переписка. Его перо не поспевало за подвижным умом, так что его адресату в большинстве случаев не удалось восполнить возникающие пробелы.

И теперь своим прощанием с этим удивительным миром он также меня немного опередил. Но это ничего не значит (...).

А. Эйнштейн

Б. М. Болотовский, С. Н. Столяров

УСИЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПРИСУТСТВИИ ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД

Введение

Один из постулатов специальной теории относительности, сформулированных А. Эйнштейном в известной работе 1905 г. [1], состоит в том, что все физические явления происходят одинаковым образом независимо от того, движется рассматриваемая система отсчета с постоянной скоростью или нет. Это значит, что все инерциальные системы равноправны, т. е. среди них нет ни одной привилегированной системы отсчета. На языке уравнений, описывающих какое-либо явление, равноправность всех инерциальных систем отсчета означает, что эти уравнения имеют одинаковый вид во всех системах отсчета. Говорят, что они инвариантны (ковариантны) относительно преобразований Лоренца [2—3]. В частности, можно записать в релятивистски инвариантном (ковариантном) виде уравнения электромагнитного поля (уравнения Максвелла) в вакууме. Если к ним добавить материальные соотношения между полями и индукциями в покоящейся среде (соотношения Минковского), то уравнения электромагнитного поля в изотропной и однородной среде также можно записать в ковариантном виде [3—5]. В этом смысле, казалось бы, уравнения поля в движущейся среде не должны принципиально (если не считать их более сложный вид [6]) отличаться от уравнений поля в вакууме. Однако между ними есть существенная разница. Дело в том, что в отличие от уравнений электромагнитного поля в вакууме для полей в среде (несмотря на их ковариантную форму) всегда есть выделенная система отсчета, в которой данная среда покоится. В любой другой инерциальной системе отсчета рассматриваемая среда уже движется, т. е. она обладает вполне определенной кинетической энергией поступательного движения. Эту энергию движущаяся среда получила от внешних по отношению к ней источников. Поэтому в

электродинамике движущихся сред формальный переход от одной инерциальной системы отсчета к другой, по существу, связан с реальным изменением количества кинетической энергии, запасаемой в движущейся среде. Отсюда ясно, что равномерно движущаяся среда уже не является равновесной системой. Эта неравновесность может проявляться в том, что энергия поступательного движения может быть отдана в любой другой форме, в частности и в виде реального излучения. Тогда уже имеющееся в такой среде излучение в некоторых условиях может усиливаться. Именно об этом и пойдет речь в данной статье.

Прежде чем переходить к изложению конкретных ситуаций, в которых возможно усиление волн и другие проявления неравновесности состояний электромагнитных волн в движущейся среде, укажем ряд уже хорошо известных и даже используемых на практике примеров, в которых усиление или рождение волн осуществляется за счет направленного движения электронов, плазмы или других материальных носителей.

Так, например, в широко используемых в настоящее время излучателях СВЧ-диапазона (магнетронах, клистронах, лампе бегущей волны и в лампе обратной волны) усиление или генерация электромагнитных волн происходит за счет отбора энергии от направленных пучков электронов в замедляющих системах [7]. Здесь усиление и генерация волн осуществляются только тогда, когда направленная скорость электронов больше фазовой скорости рассматриваемых волн. Только при выполнении этого условия возможно усиление волн в потоковых системах. Оно эквивалентно известному условию, при котором возникает излучение Вавилова — Черенкова в электродинамике. В акустике оно известно под именем условия Маха.

Другим примером движущейся среды, в которой возможно усиление электромагнитных волн, являются потоковые системы типа плазма — пучок, когда через покоящуюся плазму движется направленный поток электронов или плазмы. Для таких систем подробно изучены всевозможные неустойчивости, приводящие к нарастанию амплитуды волн различного вида во времени или в пространстве [8, 9]. При этом энергия излучения опять черпается из кинетической энергии направленного движения электронов.

Направленное движение вещества может приводить к возбуждению других видов колебаний и волн. В частности, движение сверхтекучего гелия при некоторых скоростях приводит к появлению ротоннов (квантов вихревых возбуждений) и к соответствующему нарушению сверхтекучести гелия [10]. Самопроизвольное возбуждение звуковых и электромагнитных волн и усиление внешнего сигнала возможно на границе раздела двух сред, когда одна из них покоится, а другая перемещается вдоль этой границы со скоростью, большей фазовой скорости распространения этих волн в движущейся среде [11, 12].

Указанные выше неустойчивости, как правило, имеют место при отсутствии потерь в среде. Однако и при наличии потерь перекачка кинетической энергии поступательного движения среды в энергию излучения может быть столь сильной, что среда из поглощающей (в системе покоя) может стать усиливающей. Для движущихся проводящих сред на это было недавно обращено внимание в работах [13—15].

В данной работе мы покажем, что некоторые из указанных выше явлений усиления или неустойчивости можно описать в рамках единого и достаточно простого аппарата электродинамики движущихся сред, который исходит только из уравнений Максвелла и материальных соотношений Минковского [3, 6]. Для этого сначала в первой части выводятся уравнения для потенциалов в движущейся проводящей среде. С их помощью рассматривается распространение свободных электромагнитных волн в такой среде и выясняются условия, при которых возможно их усиление. Затем с помощью уравнений для потенциалов в движущейся среде с потерями изучается рассеяние плоской монохроматической волны на вращающемся диэлектрическом цилиндре с учетом его проводимости. В последнем разделе данной статьи рассматриваются энергетические особенности распространения волн в движущейся непоглощающей среде с учетом дисперсии. Обсуждается роль состояний с отрицательной энергией в движущейся среде и их влияние на явление обращения потерь энергии на излучение Вавилова — Черенкова и на возбуждение ленгмюровских колебаний, а также на усиление волн при отражении от сверхсветового тангенциального разрыва.

1. Электромагнитные волны в движущейся проводящей безграничной среде

Рассмотрим, какой вид имеют уравнения для потенциалов электромагнитного поля в движущейся проводящей среде. Как известно, в покоящейся проводящей среде между током проводимости $\mathbf{j}_{\text{пров}}$ и электрическим полем \mathbf{E} существует соотношение

$$\mathbf{j}_{\text{пров}} = \sigma \mathbf{E}. \quad (1)$$

При переходе к четырехмерным обозначениям мы должны считать, что компоненты тока образуют четырехмерный вектор, а электрическое поле выражается через компоненты тензора второго ранга $F_{ik} = (\mathbf{B}, -i\mathbf{E})$. Поэтому в релятивистски инвариантной записи величина $j_{i, \text{пров}}$ должна выражаться через элементы некоторого тензора третьего ранга:

$$j_{i, \text{пров}} = \sigma_{ikl} F_{kl}. \quad (2)$$

Нетрудно проверить, что для тензора третьего ранга σ_{ikl} можно принять следующее выражение:

$$\sigma_{ikl} = \frac{\sigma}{2} (\delta_{ik} v_l - \delta_{il} v_k), \quad (3)$$

где δ_{ik} — символ Кронекера, v_k — компоненты четырехмерной скорости перемещения среды, имеющие вид

$$v_{1, 2, 3} = \frac{v_{x, y, z}}{c} \gamma; \quad v_4 = i\gamma; \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (4)$$

а v — трехмерная скорость движения среды.

Если выражение (3) для σ_{ikl} подставить в соотношение (2), то в системе покоя среды ($v_1 = v_2 = v_3 = 0, v_4 = i$) получим соотношение (1). Если же среда движется со скоростью \mathbf{v} , то из (2) — (4) получаем

$$j_{i, \text{пров}} = \sigma v_k F_{ik}, \quad (5)$$

где была использована асимметрия тензора F_{ik} : $F_{ik} = -F_{ki}$. Соотношение (5) в соответствии с выражением для F_{ik} через \mathbf{E} и \mathbf{B} (см. [3, 4]) эквивалентно следующим формулам:

$$\mathbf{j}_{\text{пров}} = \sigma \frac{\mathbf{E} + \left[\frac{\mathbf{v}}{c}, \mathbf{B} \right]}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad \rho_{\text{пров}} = \sigma \frac{\left(\frac{\mathbf{v}}{c}, \mathbf{E} \right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (6)$$

Первое из этих соотношений имеет простой физический смысл. Это закон Ома для движущегося проводника. Множитель при σ в первом равенстве (6) дает электрическое поле в системе покоя среды. Второе соотношение в (6) говорит о том, что если покоящийся проводник с током электрически нейтрален, то при его движении со скоростью v на нем появляется электрический заряд.

В случае движущейся проводящей среды уравнение для компонент тензора индукций $H_{ik} = (\mathbf{H}, -i\mathbf{D})$ следует переписать в виде [16]

$$\frac{\partial H_{ik}}{\partial x_k} = \frac{4\pi}{c} (j_i + j_{i, \text{пров}}), \quad (7)$$

где $j_{i, \text{пров}}$ определяется формулами (2) — (5). С учетом (5) получаем из (7)

$$\frac{\partial H_{ik}}{\partial x_k} - \frac{4\pi}{c} \sigma F_{ik} v_k = \frac{4\pi}{c} j_i. \quad (8)$$

Тензор индукций H_{ik} связан с тензором полей F_{ik} соотношением [17]

$$H_{ik} = \varepsilon_{ikst} F_{st}, \quad (9)$$

где для равномерно движущейся изотропной среды тензор четвертого ранга ε_{ikst} имеет вид [6]

$$\varepsilon_{ikst} = \frac{1}{\mu} (\delta_{is} - \kappa v_i v_s) (\delta_{kt} - \kappa v_k v_t) \quad (10)$$

при $\kappa = \varepsilon\mu - 1$. Если подставить все эти соотношения в уравнение (8) и выразить тензор F_{st} через потенциалы поля

$$F_{st} = \left(\frac{\partial A_t}{\partial x_s} - \frac{\partial A_s}{\partial x_t} \right), \quad (11)$$

то получим уравнения для потенциалов поля в движущейся проводящей среде

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x_k^2} - \kappa \left(v_k \frac{\partial}{\partial x_k} \right)^2 - \frac{4\pi\mu\sigma}{c} \left(v_k \frac{\partial}{\partial x_k} \right) \right\} A_i = \\ & = - \frac{4\pi\mu}{c} \left(\delta_{is} + \frac{\kappa}{1 + \kappa} v_i v_s \right) j_s. \end{aligned} \quad (12)$$

При этом потенциалы A_i удовлетворяют следующему дополнительному условию:

$$\frac{\partial A_k}{\partial x_k} - \kappa v_k v_t \frac{\partial A_t}{\partial x_k} - \frac{4\pi\mu\sigma}{c} v_k A_k = 0. \quad (13)$$

Это условие является обобщением условия поперечности на случай среды с проводимостью.

Если в среде отсутствуют источники j_k , то из (12) получаем систему однородных уравнений

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x_k^2} - \kappa \left(v_k \frac{\partial}{\partial x_k} \right)^2 - \frac{4\pi\mu\sigma}{c} \left(v_k \frac{\partial}{\partial x_k} \right) \right\} A_i = 0. \quad (14)$$

Эти уравнения определяют распространение свободных электромагнитных волн в движущейся среде, которая в системе покоя характеризуется диэлектрической проницаемостью ϵ , магнитной проницаемостью μ и проводимостью σ .

Если через такую среду распространяется плоская электромагнитная волна вида

$$A_i(\mathbf{r}, t) = A_{0i} \exp\{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)\}, \quad (15)$$

то соотношение между частотой ω и волновым вектором \mathbf{k} в этой волне, как следует из (14), имеет вид

$$\mathbf{k}^2 - \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\kappa}{c^2} \frac{(\omega - \mathbf{k}\mathbf{v})^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - i \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} \frac{\omega - \mathbf{k}\mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 0. \quad (16)$$

Это дисперсионное уравнение получается из (14), если учесть, что в применении к плоской волне вида (15) оператор градиента $\nabla = \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}$ равносильен умножению на $(i\mathbf{k})$, а оператор дифференцирования по времени $\partial/\partial t$ равносильен умножению на $(-i\omega)$. Если проводимость среды σ обращается в нуль, то уравнение (16) переходит в уравнение

$$\mathbf{k}^2 - \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\kappa}{c^2} \frac{(\omega - \mathbf{k}\mathbf{v})^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0. \quad (17)$$

Из (16) мы можем, задав частоту электромагнитной волны ω и направление ее распространения, определить величину волнового вектора \mathbf{k} (и тем самым длину волны $\lambda = 2\pi/k$). И, наоборот, задав величину и направление

волнового вектора \mathbf{k} , можем определить частоту волны ω . Если одну из величин \mathbf{k} или ω считать заданной, то (16) является квадратным уравнением относительно другой из этих величин. Это квадратное уравнение имеет комплексные коэффициенты, и поэтому его решения являются комплексными. Из вида волны (15) следует, что если частота ее комплексна, то волна уже не является монохроматической и либо нарастает, либо затухает во времени по экспоненциальному закону. При этом показатель затухания (или нарастания) равен мнимой части ω'' частоты ω . Если мнимая часть ω'' частоты ω положительна, то волна нарастает во времени, а если мнимая часть ω'' отрицательна, то волна затухает со временем.

Если в уравнении (16) данной величиной является частота волны ω и направление ее распространения (угол θ между \mathbf{v} и \mathbf{k}), то мы получаем квадратное уравнение для абсолютной величины волнового вектора k . Решение этого уравнения также дает для k , вообще говоря, комплексные значения. Два комплексно-сопряженных корня уравнения (16) для этого случая соответствуют тому, что волна нарастает или затухает в пространстве по экспоненциальному закону.

В дальнейшем мы ограничимся случаем малого затухания, когда можно считать мнимую часть решения уравнения (16) для k малой по сравнению с его вещественной частью. Для этого случая знак мнимой части k не определяет того, нарастает или затухает волна в пространстве. Действительно, пусть одно из решений уравнения (16) при заданных ω и θ равно $k' + ik''$, где k' — действительная часть k , а k'' — мнимая. Направление волнового вектора определяем единичным вектором \mathbf{n} , так что

$$\mathbf{k} = k\mathbf{n} = (k' + ik'')\mathbf{n}. \quad (18)$$

Направим ось z декартовой системы координат по вектору \mathbf{n} . Тогда волна (15) запишется в виде

$$A(\mathbf{r}, t) = A_0 \exp\{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)\} = A_0 e^{-k''z} e^{i(k'z - \omega t)}. \quad (19)$$

При малом затухании ($k'' \ll k'$) мы можем считать, что выражение (19) определяет волну с волновым вектором k' и частотой ω , причем амплитуда этой волны меняется по экспоненциальному закону $\exp(-k''z)$. Пусть k'' есть положительная величина, тогда волна затухает с ростом z . Однако, для того чтобы сделать какие-либо заключения

о поведении волны, надо знать направление распространения волны, т. е. знак ее фазовой скорости. Фазовая скорость волны равна отношению ω/k' . Действительно, плоскость постоянной фазы волны (19) определяется равенством $(k'z - \omega t) = \text{const}$, откуда $z = \frac{\omega}{k'} t + \frac{\text{const}}{k'}$. Из последнего соотношения видно, что плоскость постоянной фазы перемещается со скоростью ω/k' . Если $\frac{\omega}{k'} > 0$, то волна (19) распространяется в положительном направлении оси z . Тогда при $k'' < 0$ волна нарастает, а при $k'' > 0$ волна затухает в пространстве. Если же $\frac{\omega}{k'} < 0$, то волна распространяется в отрицательном направлении оси z . Тогда при $k'' < 0$ волна затухает в направлении своего распространения (хотя амплитуда ее и нарастает в положительном направлении оси z). Таким образом, для того чтобы решить вопрос о том, затухает или нарастает волна, мало знать закон изменения ее амплитуды в пространстве, нужно еще знать направление ее распространения.

Существует простой способ, позволяющий судить о том, затухает или нарастает волна в направлении своего распространения. Составим выражение $\Gamma = \frac{\omega}{k'} k''$. Если это произведение положительно, то волна затухает в направлении своего распространения. В противном случае (при $\Gamma < 0$) волна нарастает. Нетрудно видеть, что выражение $\Gamma = \frac{\omega}{k'} k''$ есть произведение фазовой скорости волны на декремент затухания волны в пространстве.

Рассмотрим теперь решение дисперсионного уравнения (16).

Пусть волновой вектор волны равен по величине k и составляет с вектором скорости среды v угол ϑ . В этом случае $(\mathbf{k}, \mathbf{v}) = kv \cos \vartheta$. Дисперсионное уравнение (16) является квадратным уравнением относительно частоты ω . Решая его при малой проводимости σ и отбрасывая все степени σ выше первой, получаем

$$\omega_{1,2} = (1 + \kappa\gamma^2)^{-1} \left\{ [\kappa\gamma^2 kv \cos \vartheta \pm ck \sqrt{\Delta}] - i2\pi\mu\sigma\gamma \left[1 \mp \frac{\beta \cos \vartheta}{\sqrt{\Delta}} \right] \right\}, \quad (20)$$

где

$$\kappa = (\epsilon\mu - 1); \quad \beta = \frac{v}{c}; \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2};$$

$$\Delta = [1 + \kappa\gamma^2 (1 - \beta^2 \cos^2 \vartheta)].$$

Как видно из выражения (20), в случае, когда в системе покоя среды $\epsilon\mu > 1$, т. е. при $\kappa = \epsilon\mu - 1 > 0$, мнимая часть частоты в обоих решениях (20) всегда отрицательна, какова бы ни была скорость движения среды v . А это значит, что при заданном волновом векторе \mathbf{k} волна (15) всегда затухает во времени. Декремент затухания пропорционален проводимости σ .

Рассмотрим теперь случай, когда заданными величинами в волне (15) являются частота ω и направление распространения волны, определяемое углом ϑ . Тогда из дисперсионного уравнения (16) можно определить величину волнового вектора \mathbf{k} , отвечающую заданным значениям ω и ϑ . Решения этого уравнения имеют вид

$$k_{1,2} = k'_{1,2} + ik''_{1,2}. \quad (21)$$

При малых σ после небольших преобразований получаем

$$\begin{aligned} ck'_1 &= \omega (1 + \kappa\gamma^2) (\kappa\beta\gamma^2 \cos \vartheta + \sqrt{\Delta})^{-1}; \\ ck''_1 &= 2\pi\sigma\mu\gamma (1 - \beta^2 \cos^2 \vartheta) (1 + \beta \cos \vartheta \sqrt{\Delta})^{-1}; \\ ck'_2 &= -\omega (\kappa\beta\gamma^2 \cos \vartheta + \sqrt{\Delta}) (1 - \kappa\beta^2\gamma^2 \cos^2 \vartheta)^{-1}; \\ ck''_2 &= -2\pi\sigma\mu\gamma (1 + \beta \sqrt{\Delta} \cos \vartheta) (1 - \kappa\beta^2\gamma^2 \cos^2 \vartheta)^{-1} \Delta^{-1/2}. \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь величина

$$\Delta = 1 + \kappa\gamma^2 (1 - \beta^2 \cos^2 \vartheta) \quad (23)$$

в принятых нами предположениях всегда положительна. С помощью выражений (22) можно найти формулы для произведений $\Gamma_{1,2} = \frac{\omega}{k'_{1,2}} k''_{1,2}$. Они имеют вид

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \frac{\omega}{k'_1} k''_1 = \frac{2\pi\sigma\mu\gamma (1 - \beta^2 \cos^2 \vartheta) (\kappa\beta\gamma^2 \cos \vartheta + \sqrt{\Delta})}{(1 + \kappa\gamma^2) (1 + \beta \cos \vartheta \sqrt{\Delta})}; \\ \Gamma_2 &= \frac{\omega}{k'_2} k''_2 = \frac{2\pi\sigma\mu\gamma (1 + \beta \cos \vartheta \sqrt{\Delta})}{(\kappa\beta\gamma^2 \cos \vartheta + \sqrt{\Delta}) \sqrt{\Delta}}. \end{aligned} \quad (24)$$

Отсюда сразу видно, что при условии $\epsilon\mu > 1$ произведе-

ния $\Gamma_{1,2} = \frac{\omega}{k_{1,2}'} k_{1,2}''$ при любой скорости движения среды всегда положительны. Это значит, что в движущейся проводящей среде волна (19) всегда затухает в направлении своего распространения. Единственная особенность движущейся среды заключается в том, что при скорости движения среды, удовлетворяющей условию

$$1 - \kappa\beta^2\gamma^2 \cos^2 \vartheta = 0, \quad \text{или} \quad \beta^2 = \frac{1}{\epsilon\mu - \kappa \sin^2 \vartheta}, \quad (25)$$

вещественная и мнимая части второго решения в (22) одновременно меняют знак.

Таким образом, мы видим, что в движущейся безграничной среде с проводимостью (потерями в системе покоя) волны всегда затухают в направлении своего распространения при любой скорости движения среды. Из уравнения (16) можно определить глубину скин-слоя в движущейся среде.

2. Об условиях усиления волн в движущейся среде

Иная ситуация может наблюдаться в том случае, когда компонента волнового вектора \mathbf{k} в направлении движения среды задана извне, т. е. величина

$$k_{\parallel} = \frac{(\mathbf{k}, \mathbf{v})}{v} \quad (26)$$

известна и может меняться в заметных пределах. Тогда из уравнения (16) следует, что компонента k_{\perp} волнового вектора \mathbf{k} , перпендикулярная скорости \mathbf{v} , равна

$$\begin{aligned} k_{\perp} &= \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_{\parallel}^2 + \frac{\kappa(\omega - k_{\parallel}v)^2}{c^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}} \dots \\ &\dots \rightarrow -i \frac{4\pi\epsilon\mu}{c^2} \frac{(\omega - k_{\parallel}v)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \simeq \\ &\simeq \pm \left\{ \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_{\parallel}^2 + \frac{\kappa(\omega - k_{\parallel}v)^2}{c^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}} \right. \end{aligned}$$

$$-i \left. \frac{\frac{2\pi\tau\mu}{c^2} \frac{(\omega - k_{\parallel} v)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}}{\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_{\parallel}^2 + \kappa \frac{(\omega - k_{\parallel} v)^2}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}} \right\}. \quad (27)$$

В последнем равенстве проводимость σ считается малой величиной. Из этой формулы, в частности, видно, что мнимая часть волнового вектора меняет знак при изменении знака величины $(\omega - k_{\parallel} v)$. Напомним, что k_{\parallel} здесь задается извне и, вообще говоря, может принимать любые значения. В этом случае волны в движущейся среде с потерями могут не затухать, а нарастать в пространстве и во времени. Критерием нарастания является условие

$$v > \frac{\omega}{k_{\parallel}}, \quad (28)$$

т. е. скорость движения среды больше фазовой скорости волн в направлении v . Именно таким условием характеризуются различного рода неустойчивости в потоковых системах [7—9]. Для ленгмюровских колебаний в системах типа плазма — пучок условие неустойчивости волн (28) тесно связано с волнами с отрицательной энергией [11, 18, 19]. Как мы увидим ниже (см. § 4), неустойчивость обычных электромагнитных волн в движущейся среде также связана с их отрицательной энергией.

Предварительно приведем простые качественные соображения, помогающие яснее представить механизм усиления электромагнитных волн при их отражении от движущейся среды. Будем считать, что граница раздела неподвижна, а скорость среды лежит в плоскости границы раздела.

Рассмотрим сначала плоскую границу раздела. Пусть ее уравнение $z = 0$ (рис. 1), а полупространство $z < 0$ заполнено движущейся средой, скорость перемещения которой равна по величине v и направлена по оси x . Область $z > 0$ представляет собой свободное пространство (вакуум). Пусть из вакуума на движущуюся среду падает плоская электромагнитная волна, зависимость которой от координат и времени определяется множителем

$$\exp \{i (k_x x + k_z z - \omega t)\}. \quad (29)$$

На границе ($z = 0$) падающая волна создает бегущее возмущение, распространяющееся вдоль оси x . Зависимость этого возмущения от координаты x и времени t можно получить, положив в (29) $z = 0$:

$$\exp \{i (k_x x - \omega t)\}. \quad (30)$$

Возмущение (30) имеет вид бегущей гармонической волны, причем фазовую скорость этой волны можно определить, если приравнять фазу волны (30) некоторой постоянной величине:

$$k_x x - \omega t = \text{const.} \quad (31)$$

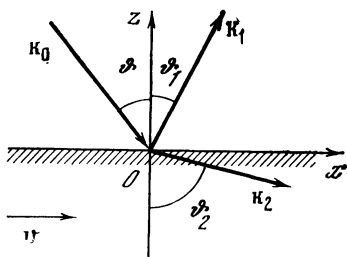


Рис. 1

Отсюда получаем скорость перемещения v_ϕ точки постоянной фазы волны вдоль границы раздела:

$$v_\phi = \omega/k_x. \quad (32)$$

Обратимся теперь к критерию (28) возможного усиления волны. Сравнивая (28) с (32), мы видим, что условие усиления волн сводится к требованию, чтобы скорость перемещения среды v превышала фазовую скорость $v_\phi = \omega/k_x$, с которой распространяется вдоль границы раздела возмущение, вызванное падающей волной (29):

$$v > v_\phi = \omega/k_x. \quad (33)$$

Введем угол падения волны на границу раздела (см. рис. 1) как угол между нормалью к границе и волновым вектором $\mathbf{k} = (k_x, k_z)$. Если этот угол равен ϑ_0 , то

$$k_x = k \sin \vartheta_0 = \frac{\omega}{c} \sin \vartheta_0. \quad (34)$$

В этом случае условие (33) принимает вид

$$v > \frac{c}{\sin \vartheta_0}. \quad (35)$$

Из последнего неравенства видно, что оно никогда не выполняется, ибо скорость материальных тел не может превосходить скорости света в вакууме. Поэтому отражение света, падающего из вакуума на плоскую границу раздела с движущейся средой, не может сопровождаться усилением. Однако, если верхнее полупространство, из которого падает волна, заполнено покоящейся преломляющей

средой с показателем преломления n , усиление оказывается возможным. Действительно, в этом случае в неравенстве (35) можно заменить скорость света в пустоте c на фазовую скорость света в среде c/n . Это дает условие усиления в виде

$$v > \frac{c}{n \sin \theta_0}. \quad (36)$$

Если $n > 1$ и $v > c/n$, имеется область углов падения ν_0 , в которой возможно усиление. Однако при этом скорость перемещения v среды в нижнем полупространстве ($z < 0$) должна превышать фазовую скорость распространения волн в верхнем полупространстве.

Напомним, что здесь мы рассматриваем картину явления с чисто качественной стороны. Подробный количественный расчет будет произведен в § 4.

Рассмотрим теперь, также качественно, другой возможный случай усиления электромагнитных волн при отражении от тангенциального разрыва скорости. На рис. 2 изображен цилиндр радиуса a , заполненный преломляющей средой. Этот цилиндр вращается вокруг своей оси (ось z), перпендикулярной плоскости чертежа, с угловой скоростью Ω .

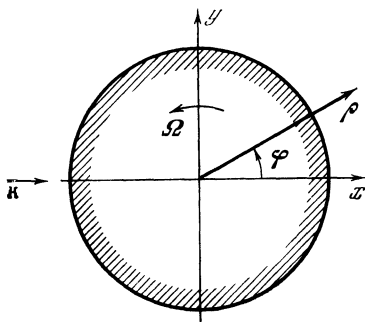


Рис. 2

Пусть на этот цилиндр падает из вакуума плоская волна, волновой вектор \mathbf{k} которой перпендикулярен оси цилиндра и направлен по оси x . Поскольку задача обладает круговой симметрией, удобно разложить падающую плоскую волну по цилиндрическим волнам вида

$$A_m = f_m(\rho) \exp \{i(m\varphi - \omega t)\}. \quad (37)$$

Здесь φ и ρ — полярные координаты в плоскости x, y ; ω — частота падающей волны, а m — целое положительное или отрицательное число, включая $m = 0$. Функция $f_m(\rho)$ — некоторая функция радиуса ρ , вид которой будет определен ниже, в § 3.

Рассмотрим поле волны (37) на поверхности цилиндра, т. е. при $\rho = a$. Это поле представляет собой бегущее

по поверхности цилиндра возмущение, пропорциональное множителю

$$\exp \{i (m\varphi - \omega t)\}. \quad (38)$$

Уравнение постоянной фазы

$$m\varphi - \omega t = \text{const} \quad (39)$$

дает

$$\varphi = \frac{\omega}{m} t + \text{const}. \quad (40)$$

Соотношение (40) показывает, что точка постоянной фазы бежит по поверхности цилиндра с угловой скоростью

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\omega}{m}. \quad (41)$$

Отсюда легко найти линейную скорость, с которой фаза падающей волны (37) перемещается по поверхности цилиндра:

$$v_{\varphi} = a \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\omega}{m} a. \quad (42)$$

В то же время линейная скорость материальных точек на поверхности цилиндра равна

$$v = \Omega a. \quad (43)$$

Условие (28) возможного усиления волн при отражении от поверхности вращающегося диэлектрического цилиндра принимает вид (см. также неравенство (33))

$$\Omega a > \frac{\omega}{m} a, \quad (44)$$

или

$$\Omega > \frac{\omega}{m}. \quad (45)$$

Здесь Ω — угловая частота вращения цилиндра, ω — частота падающей волны, m — номер азимутальной гармоники.

Как и в случае плоской границы, неравенства (44), (45) требуют, чтобы скорость v_{φ} , с которой перемещается возбуждение по поверхности раздела, была меньше, чем скорость движения среды на границе.

В отличие от случая плоской границы раздела для вращающегося цилиндра условие усиления может быть

выполнено даже в вакууме. Действительно, из (45) видно, что при любом соотношении между частотой падающей волны ω и угловой скоростью вращения цилиндра Ω всегда существует гармоника такого номера m , при котором неравенство (45) выполняется.

Следует иметь в виду, что если некоторые гармоники, входящие в разложение падающей на цилиндр волны, при отражении усиливаются, то существуют и такие гармоники, которые отражаются с потерей энергии. Именно, приводимый ниже расчет показывает, что потеря энергии при отражении имеет место при выполнении неравенства

$$\Omega < \frac{\omega}{m}, \quad (46)$$

которое получается из (45) при замене знака неравенства на противоположный. Поэтому полный баланс энергии при отражении может быть получен только при учете отражения на всех гармониках.

3. Расчет усиления электромагнитных волн при их рассеянии на вращающемся диэлектрическом цилиндре с учетом его проводимости

Полученные в § 1 уравнения для потенциалов и соответствующие выражения для полей электромагнитных волн в равномерно движущихся средах оказывается возможным применить для решения ряда задач даже в довольно сложных случаях. Одним из них является отмеченный выше случай среды, вращающейся с постоянной угловой скоростью вокруг некоторой оси. Простейшим примером может служить однородный диэлектрический цилиндр конечного радиуса, вращающийся вокруг своей оси. Интерес к этой задаче определяется также тем, что при отражении электромагнитных волн от такого цилиндра возможно их усиление [13—15]. Как показали расчеты, усиление осуществляется только при наличии конечной проводимости и для таких азимутальных гармоник поля, у которых угловая скорость меньше скорости вращения цилиндра. Можно сказать, что усиливаются только те гармоники, которые вращаются медленнее среды, т. е. мы имеем случай сверхсветового тангенциального разрыва скорости движения, хотя линейная скорость точек цилиндра много меньше скорости света в вакууме. Сверхсветовое движение обеспечивается здесь кривой геометрией задачи.

Задачи отражения волн от равномерно движущихся сред можно решать двояким способом: в системе покоя среды с последующим переходом в лабораторную систему координат или прямо в лабораторной системе. Запись уравнений Максвелла и материальных соотношений Минковского в ковариантном виде позволяет решать любые задачи в обеих инерциальных системах координат. Поэтому все определяется методическими удобствами — простотой расчета.

В рассматриваемой задаче о рассеянии электромагнитных волн на вращающемся диэлектрическом цилиндре все значительно сложнее, ибо система покоя каждого из элементов вращающегося цилиндра является сугубо неинерциальной системой. Поэтому для решения поставленной задачи нужно или использовать запись уравнений Максвелла в неинерциальной системе координат [5] с простыми материальными соотношениями, или исходить из обычных уравнений Максвелла в лабораторной системе координат, но искать соответствующие материальные уравнения для вращающейся среды. Последняя программа в какой-то мере изложена в обзоре [20]. Однако эти трудности исчезают в том случае, когда все линейные скорости элементов вращающегося цилиндра оказываются много меньше скорости света в вакууме. В этом случае можно считать инерциальной каждую из систем координат, связанную с произвольным элементом вращающегося цилиндра. Поскольку линейная скорость элементов цилиндра пропорциональна расстоянию до начала координат, то мы имеем специфический случай неоднородно движущейся среды, для которой можно применить уравнения Максвелла — Минковского. К решению уравнений для потенциалов мы и переходим. При этом получим и исследуем точные формулы для задачи рассеяния плоской монохроматической волны на вращающемся цилиндре, когда линейная скорость точек на поверхности цилиндра много меньше скорости света.

Пусть плоская монохроматическая электромагнитная волна вида (15) падает из вакуума на вращающийся диэлектрический цилиндр (см. рис. 2). Волновой вектор \mathbf{k} падающей волны направлен вдоль оси x по нормали к оси вращения цилиндра. Электрический вектор \mathbf{E}_0 падающей волны параллелен оси цилиндра, которую выберем за ось z . Для свободных электромагнитных волн можно ввести векторный потенциал $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t)$, связанный с электрическим

полем известным соотношением $\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$. Тогда в нашем случае имеем

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = E_z(\mathbf{r}, t) \mathbf{e}_z = -\frac{1}{c} \frac{\partial A(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \mathbf{e}_z. \quad (47)$$

Для величины $A(\mathbf{r}, t)$ в медленно движущейся проводящей среде имеем уравнение (14)

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\kappa}{c^2} \left(\mathbf{v} \nabla + \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 - \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} \left(\mathbf{v} \nabla + \frac{\partial}{\partial t} \right) \right\} A(\mathbf{r}, t) = 0, \quad (48)$$

где $\kappa = \epsilon\mu - 1$, а при $v \ll c$ величина $\gamma = 1$. В вакууме нужно в уравнении (48) положить $\kappa = 0$ и $\sigma = 0$.

Выберем цилиндрическую систему координат (ρ, φ, z) с осью z , направленной вдоль оси вращения. Азимутальный угол φ в этой системе отсчитывается от направления распространения падающей волны (ось x), а двумерный вектор ρ лежит в плоскости (x, y) , перпендикулярной оси вращения (см. рис. 2). В этой системе координат векторы и операторы, входящие в уравнение (48), имеют вид

$$\begin{aligned} \nabla &= \mathbf{e}_\rho \frac{\partial}{\partial \rho} + \mathbf{e}_\varphi \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \mathbf{e}_z \frac{\partial}{\partial z}; & v_\rho &= v_z = 0; & \mathbf{v} &= v \mathbf{e}_\varphi; \\ \Delta &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}; & v &= \rho \Omega; \\ \mathbf{v} \nabla &= v_\varphi \nabla_\varphi = \Omega \frac{\partial}{\partial \varphi}, \end{aligned} \quad (49)$$

так что уравнение (48) для $A = A(\rho, z, \varphi, t)$ переписывается в виде

$$\left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\kappa}{c^2} \left(\Omega \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 - \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} \left(\Omega \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \right\} \times A(\rho, \varphi, z, t) = 0. \quad (50)$$

Коэффициенты этого уравнения не зависят от переменных z, t и φ . Поэтому его решение при $\mathbf{k} \perp z$ удобнее всего искать в виде набора азимутальных волн

$$A(\rho, \varphi, z, t) = e^{-i\omega t} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m f_m(\rho) e^{im\varphi}. \quad (51)$$

Угловая скорость вращения $d\varphi/dt$ каждой m -й азимутальной гармоники поля равна ω/m , в то время как угловая

скорость вращения точек цилиндра равна Ω . Обе эти величины не зависят от радиуса ρ . Поэтому даже при медленном движении точек цилиндра гармоники поля с номерами $m < \omega/\Omega$ будут опережать диэлектрическую среду в азимутальном направлении, а гармоники поля с $m > \omega/\Omega$ отставать от цилиндра. Иными словами, вследствие кривой геометрии задачи даже при нерелятивистской линейной скорости движения среды возможно в азимутальном направлении осуществление «досветового» и «сверхсветового» движения среды. То, что такое возможно в силу кривой геометрии, видно из следующего. Обозначим радиус цилиндра через a . Тогда линейная скорость точек цилиндра заключена в интервале

$$0 \leq v \leq v_{\max} = a\Omega. \quad (52)$$

Для реальных движений $a\Omega \leq c$. С другой стороны, величина a равна радиусу кривизны цилиндрической поверхности. Если мы хотим от кривой геометрии перейти к плоской, то должны устремить a к бесконечности. Тогда, так как $\Omega \leq c/a$, при $a \rightarrow \infty$ $\Omega \leq 0$. Это значит, что реальные движения могут осуществляться только с $\Omega \leq 0$, т. е. на самом деле такой цилиндр должен покоиться. Одновременно с этим при $a \rightarrow \infty$ номер гармоник поля m , для которых возможно «сверхсветовое» угловое перемещение точек цилиндра, также устремится к бесконечности, ибо $m > \omega/\Omega > \omega a/c$ и при $a \rightarrow \infty$ $m > \infty$. Иными словами, это означает, что все точки плоской поверхности перемещаются вдоль нее только с досветовыми скоростями.

Рассматриваемая нами задача рассеяния волн на вращающемся диэлектрике аналогична задаче отражения и преломления волн на тангенциальном разрыве скорости движения среды в плоской геометрии, ибо скорость движения среды касательна поверхности раздела. Как видим, кривая геометрия позволяет реализовать «сверхсветовой» тангенциальный разрыв скорости (при $m > \omega/\Omega$) даже при нерелятивистских скоростях перемещения среды. В этой же ситуации мы сможем учесть и проводимость движущейся среды. Более подробный анализ отражения и преломления волн на сверхсветовом тангенциальном разрыве скорости движения сред в плоской геометрии будет дан в § 4.

Перейдем теперь к решению задачи. Запишем падающую волну в виде, аналогичном (51). Для этого нужно

воспользоваться известным представлением экспоненты через цилиндрические функции

$$\exp(iz \cos \varphi) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m J_m(z) e^{im\varphi}, \quad (53)$$

где $J_m(z)$ — функция Бесселя m -го порядка. Тогда для падающей из вакуума волны имеем разложение

$$\begin{aligned} A_0(\mathbf{r}, t) &= A_0 \exp\{i(kx - \omega t)\} = A_0 e^{-i\omega t} e^{ik\rho \cos \varphi} = \\ &= A_0 e^{-i\omega t} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m J_m(k\rho) e^{im\varphi}, \end{aligned} \quad (54)$$

где $k = \omega/c$ — величина волнового вектора волны в вакууме. Мы разложили падающую плоскую электромагнитную волну по цилиндрическим волнам m -х азимутальных гармоник. Если ввести функции Ганкеля $H_m^{(1,2)}(k\rho)$ первого $H_m^{(1)}$ и второго $H_m^{(2)}$ рода, то с помощью соотношения $J_m(z) = \frac{1}{2} \{H_m^{(1)}(z) + H_m^{(2)}(z)\}$ ту же волну можно представить в виде

$$A_0(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} A_0 e^{-i\omega t} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m \{H_m^{(1)}(k\rho) + H_m^{(2)}(k\rho)\} e^{im\varphi}. \quad (55)$$

Вдали от начала координат, когда $k\rho = 2\pi r/\lambda \gg 1$, функции Ганкеля представимы в виде

$$\begin{aligned} H_m^{(1)}(z) &\simeq \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \exp\left\{i\left(z - \frac{\pi m}{2} - \frac{\pi}{4}\right)\right\}, \\ H_m^{(2)}(z) &\simeq \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \exp\left\{-i\left(z - \frac{\pi m}{2} - \frac{\pi}{4}\right)\right\}. \end{aligned} \quad (56)$$

Это значит, что монохроматическая волна (54) разлагается в плоскости (x, y) по расходящимся $H_m^{(1)}$ и сходящимся $H_m^{(2)}$ цилиндрическим волнам. Коэффициент перед $H_m^{(1)}(k\rho)$ дает амплитуду расходящейся волны, а коэффициент перед $H_m^{(2)}(k\rho)$ — амплитуду сходящейся волны. Потоки энергии в волнах пропорциональны квадратам модулей этих коэффициентов. Нетрудно видеть, что для падающей волны (54) модули этих коэффициентов в разложении (55) равны друг другу, т. е. для плоской волны в вакууме поток энергии сходящихся волн в точности равен потоку энергии расходящихся волн.

Это равенство потоков энергии в сходящейся и расходящейся волнах выполняется для каждой азимутальной гармоники номера m в сумме (55). Однако если в поле плоской волны поместить рассеивающее тело, то потоки энергии в сходящейся и расходящейся азимутальных гармониках в общем случае могут оказаться не равны друг другу. Если, например, поток энергии в сходящейся волне номера m оказывается больше, чем поток энергии в расходящейся волне того же номера, то будем говорить, что имеет место поглощение энергии для гармоники с азимутальной зависимостью $e^{im\varphi}$. В противном случае будем говорить, что имеет место усиление. Следует подчеркнуть, что усиление на одной гармонике может сопровождаться поглощением на другой, так что интегральный эффект может быть определен лишь после суммирования по всем гармоникам.

Пусть рассеивающим телом является вращающийся диэлектрический цилиндр с проводимостью. Векторный потенциал полного поля вне цилиндра (при $\rho > a$) можно представить аналогично (55)

$$A(\rho, \varphi, t) = A_0 e^{-i\omega t} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m \left\{ \frac{1}{2} H_m^{(2)}(k\rho) + \left(\frac{1}{2} + \beta_m \right) H_m^{(1)}(k\rho) \right\} e^{im\varphi}. \quad (57)$$

Если рассеивающий цилиндр отсутствует, коэффициент β_m при расходящейся волне равен нулю, и формула (57) переходит в (55). Величина β_m зависит от параметров цилиндра и определяется из граничных условий на поверхности его.

Вектор-потенциал $A(\rho, \varphi, t)$ поля внутри цилиндра можно найти, если подставить в уравнение (50) разложение (51). Тогда для функции $f_m(\rho)$ получим уравнение

$$\frac{d^2 f_m(\rho)}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{df_m(\rho)}{d\rho} + \left(k_m^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right) f_m(\rho) = 0, \quad (58)$$

где

$$k_m^2 = \frac{\omega^2}{c^2} + \frac{\kappa}{c^2} (\omega - m\Omega)^2 + i \frac{4\pi\tau\mu}{c^2} (\omega - m\Omega). \quad (59)$$

Уравнение (58) есть уравнение для цилиндрических функций. Условие ограниченности амплитуды полей в начале координат (при $\rho = 0$) однозначно определяет решение

внутри цилиндра. При $\rho < a$ оно имеет вид

$$f_m(k_m\rho) = \alpha_m J_m(k_m\rho) A_0. \quad (60)$$

Искомый коэффициент α_m должен обращаться в нуль в отсутствие цилиндра.

Два неизвестных коэффициента α_m и β_m определяются из условий при $\rho = a$. Поскольку среда не перемещается в направлении нормали к поверхности раздела ($v_\rho = v_z = 0$, а $v_\phi = v = \rho\Omega \neq 0$) (см. (49)), то граничные условия для полей и индукций совпадают с граничными условиями на поверхности тангенциального разрыва скоростей движения сред, т. е. остаются такими же, как и на покоящейся границе раздела. В нашем случае они принимают известный вид непрерывности тангенциальных компонент полей \mathbf{E} и \mathbf{H} и нормальных компонент индукций \mathbf{B} и \mathbf{D} на поверхности цилиндра при $\rho = a$:

$$\begin{aligned} E_{1z} &= E_{2z}; & E_{1\phi} &= E_{2\phi}; & H_{1z} &= H_{2z}; \\ H_{1\phi} &= H_{2\phi}; & B_{1\rho} &= B_{2\rho}; & D_{1\rho} &= D_{2\rho}. \end{aligned} \quad (61)$$

Здесь индекс «1» обозначает величины внутри вращающегося диэлектрика, а индекс «2» — величины вне его (в вакууме). Равенства (61) должны выполняться в любой точке цилиндрической поверхности раздела и в любой момент времени. Для этого достаточно, чтобы условия (61) выполнялись для каждой гармоники с угловой зависимостью $e^{im\phi}$. Поскольку в рассматриваемом случае скорость границы раздела не имеет радиальной компоненты, частоты всех волн — и падающих, и отраженных — одинаковы. Именно поэтому мы выбрали решения внутри и вне цилиндра с одинаковой зависимостью от времени.

Для того чтобы с помощью условий (61) определить коэффициенты α_m и β_m , нужно выразить компоненты полей и индукций через одну компоненту векторного потенциала. В вакууме это сделать просто, ибо там эти формулы имеют вид

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}; \quad \mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}; \quad \mathbf{V} = \mathbf{H}; \quad \mathbf{D} = \mathbf{E}. \quad (62)$$

В движущейся среде для этого нужно использовать материальные соотношения Минковского [6]

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \tilde{\epsilon} \mathbf{E} + \frac{\tilde{\kappa} \gamma^2}{\mu} \{ \beta^2 \mathbf{E} - \beta (\beta, \mathbf{E}) + [\beta, \mathbf{B}] \}; \\ \mathbf{H} &= \frac{\mathbf{B}}{\mu} - \frac{\tilde{\kappa} \gamma^2}{\mu} \{ \beta^2 \mathbf{B} - \beta (\beta, \mathbf{B}) - [\beta, \mathbf{E}] \}. \end{aligned} \quad (63)$$

При нерелятивистских скоростях они принимают вид

$$\mathbf{D} \simeq \tilde{\epsilon} \mathbf{E} + \frac{\tilde{\kappa}}{\mu} [\boldsymbol{\beta}, \mathbf{V}]; \quad \mathbf{H} \simeq \frac{1}{\mu} \{ \mathbf{V} + \tilde{\kappa} [\boldsymbol{\beta}, \mathbf{E}] \}, \quad (64)$$

где $\tilde{\kappa} = (\tilde{\epsilon}\mu - 1)$. Здесь под величиной $\tilde{\epsilon}$ понимается комплексная диэлектрическая проницаемость среды при наличии потерь, или эквивалентной проводимости σ . Она имеет вид

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon + i \frac{4\pi\sigma}{\gamma(\omega - \mathbf{k}\mathbf{v})} \simeq \epsilon + i \frac{4\pi\sigma}{\omega - \mathbf{k}\mathbf{v}}, \quad (65)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость прозрачной среды, а σ — проводимость в этой среде.

С помощью соотношений (62) и (64) и выражения (51) для $A(\mathbf{r}, t)$ мы можем записать выражения для отличных от нуля компонент полей и индукций, соответствующих заданной частоте ω :

$$\begin{aligned} E_{\omega z} &= \frac{i\omega}{c} A_{\omega} = \frac{i\omega}{c} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m f_m(\rho) e^{im\varphi}; & E_{\omega\varphi} &= E_{\omega\rho} = 0; \\ B_{\omega z} &= 0; & B_{\omega\rho} &= \frac{c}{i\omega\rho} \frac{\partial E_{\omega z}}{\partial\varphi} = \frac{i}{\rho} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m m f_m(\rho) e^{im\varphi}; \\ B_{\omega\varphi} &= -\frac{c}{i\omega} \frac{\partial E_{\omega z}}{\partial\rho} = -\sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m \frac{df_m(\rho)}{d\rho} e^{im\varphi}; \\ A_{\omega} &= \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m f_m(\rho) e^{im\varphi}; \\ H_{\omega\rho} &= \frac{1}{\mu\rho} \left\{ \frac{\partial A_{\omega}}{\partial\varphi} + i\tilde{\kappa} \frac{\omega\Omega}{c^2} \rho^2 A_{\omega} \right\} = \\ &= \frac{i}{\mu\rho} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \left(m + \tilde{\kappa} \frac{\omega\Omega}{c^2} \rho^2 \right) i^m f_m(\rho) e^{im\varphi}; \\ D_{\omega z} &= \frac{i\omega}{c} \left(\tilde{\epsilon} A_{\omega} - \frac{\tilde{\kappa}}{i\omega\mu} \Omega \frac{\partial A_{\omega}}{\partial\varphi} \right) = \\ &= \frac{i\omega}{c} \tilde{\epsilon} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m \left(1 - \frac{\tilde{\kappa}}{\mu\tilde{\epsilon}} \frac{m\Omega}{\omega} \right) f_m(\rho) e^{im\varphi}; \\ H_{\omega\varphi} &= -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_{\omega}}{\partial\rho} = -\sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \frac{i^m}{\mu} \frac{df_m(\rho)}{d\rho} e^{im\varphi}; \\ H_{\omega z} &= D_{\omega\varphi} = D_{\omega\rho} = 0. \end{aligned} \quad (66)$$

Сопоставляя эти выражения с граничными условиями (61), нетрудно видеть, что эти граничные условия удовлетворяются при выполнении следующих двух равенств:

$$\begin{aligned} f_{1m}(\rho)|_{\rho=a} &= f_{2m}(\rho)|_{\rho=a}; & \frac{1}{\mu_1} \frac{df_{1m}(\rho)}{d\rho} \Big|_{\rho=a} &= \\ &= \frac{1}{\mu_2} \frac{df_{2m}(\rho)}{d\rho} \Big|_{\rho=a}. \end{aligned} \quad (67)$$

Функции $f_{1m}(\rho)$ и $f_{2m}(\rho)$ согласно (57) и (60) имеют вид

$$\begin{aligned} f_{1m}(\rho) &= \alpha_m J_m(k_m \rho) A_0; & f_{2m}(\rho) &= \\ &= \{J_m(k_2 \rho) + \beta_m H_m^{(1)}(k_2 \rho)\} A_0. \end{aligned} \quad (68)$$

В нашем случае, когда $k_2 = k = \omega/c$, $\epsilon_2 = \mu_2 = 1$, $\mu_1 = \mu$, $\epsilon_1 = \epsilon$, а k_m определяется формулой (59), получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \alpha_m J_m(k_m a) &= J_m(ka) + \beta_m H_m^{(1)}(ka); \\ \frac{\alpha_m}{\mu} \frac{dJ_m(k_m \rho)}{d\rho} \Big|_{\rho=a} &= \frac{dJ_m(k\rho)}{d\rho} \Big|_{\rho=a} + \beta_m \frac{dH_m^{(1)}(k\rho)}{d\rho} \Big|_{\rho=a}. \end{aligned} \quad (69)$$

Если ввести обозначения

$$\begin{aligned} y &= ka = \frac{\omega a}{c}; & \tilde{z}_m &= y \sqrt{1 + \tilde{\Delta}_m}; \\ \tilde{\Delta}_m &= \frac{c^2 k_m^2}{\omega^2} - 1 = \kappa \frac{(\omega - m\Omega)^2}{\omega^2} + i \frac{4\pi\sigma}{\omega} \frac{\omega - m\Omega}{\omega}, \end{aligned} \quad (70)$$

где $\kappa = \epsilon\mu - 1$, то решения системы (69) запишутся в виде

$$\alpha_m = \frac{Q_{1m}}{Q_m}; \quad \beta_m = \frac{Q_{2m}}{Q_m}, \quad (71)$$

где

$$\begin{aligned} Q_m &= \mu J_m(\tilde{z}_m) \frac{dH_m^{(1)}(y)}{dy} - \sqrt{1 + \tilde{\Delta}_m} H_m^{(1)}(y) \frac{dJ_m(\tilde{z}_m)}{d\tilde{z}_m}; \\ Q_{1m} &= \mu \left\{ J_m(y) \frac{dH_m^{(1)}(y)}{dy} - H_m^{(1)}(y) \frac{dJ_m(y)}{dy} \right\}; \\ Q_{2m} &= \sqrt{1 + \tilde{\Delta}_m} J_m(y) \frac{dJ_m(\tilde{z}_m)}{d\tilde{z}_m} - \mu J_m(\tilde{z}_m) \frac{dJ_m(y)}{dy}. \end{aligned} \quad (72)$$

Здесь величины \tilde{z}_m и $\tilde{\Delta}_m$ комплексны из-за наличия проводимости σ . При $\sigma = 0$ $\tilde{z}_m = z_m$ и $\tilde{\Delta}_m = \Delta_m = \kappa \frac{(\omega - m\Omega)^2}{\omega^2}$.

Следует иметь в виду, что в последнем выражении, как и в выражении (70) для $\tilde{\Delta}_m$, нужно учитывать, что мы рассматриваем вращение цилиндра с нерелятивистскими линейными скоростями, т. е. случай $a\Omega \ll c$.

Мы получили все необходимые формулы для расчета полей внутри и вне диэлектрического цилиндра, вращающегося в свободном пространстве. Если внешнее пространство заполнено покоящейся средой с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 и магнитной проницаемостью μ_2 , то в формулах для α_m и β_m нужно сделать следующие замены: $y = \frac{\omega a}{c} \rightarrow y_2 = \frac{\omega a}{c} \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}$, а $\tilde{\Delta}_m$ в (70) на $\tilde{\Delta}_m = \frac{1}{\epsilon_2 \mu_2} \left\{ \kappa \frac{(\omega - m\Omega)^2}{\omega^2} + i \frac{4\pi\sigma\mu}{\omega} \frac{\omega - m\Omega}{\omega} - (\epsilon_2 \mu_2 - 1) \right\}$. Можно также исследовать случай, когда область внутри цилиндра состоит из смеси покоящейся и вращающейся среды.

Изучим формулы для полей вне рассеивающего диэлектрического цилиндра, вращающегося в свободном пространстве. Они определяются через формулу (57) для векторного потенциала, в которую нужно подставить выражение для коэффициента β_m из (71) и (72).

Вычислим, например, поток электромагнитного поля $dS(\omega)$ на частоте ω через элемент соосной цилиндрической поверхности радиуса $r > a$, окружающей вращающийся цилиндр. Поскольку плотность потока энергии в радиальном направлении равна $S_\rho = \frac{c}{4\pi} [\mathbf{E}, \mathbf{H}]_\rho$, то полный поток энергии за все время равен $S = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\rho(t) dt = \int_0^\infty dS(\omega)$. Пользуясь разложением Фурье по частотам для полей \mathbf{E} и \mathbf{H} , их вещественностью ($\mathbf{E}_\omega^* = \mathbf{E}_{-\omega}$, $\mathbf{H}_\omega^* = \mathbf{H}_{-\omega}$) и определением δ -функции $\delta(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ixt} dt$, получим для $dS(\omega)$ следующее выражение:

$$dS(\omega) = -c \operatorname{Re} \{ [\mathbf{E}_\omega, \mathbf{H}_\omega^*] \} \rho d\varphi dz. \quad (73)$$

В нашем случае (66)

$$dS(\omega) = -c \operatorname{Re} (E_{\omega z} H_{\omega\varphi}^*) \rho d\varphi dz, \quad (74)$$

где компоненты $E_{\omega z}$ и $H_{\omega\varphi}$ в вакууме имеют вид

$$E_{\omega z}(\rho, \varphi) = \frac{i\omega}{c} A_0 \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m e^{im\varphi} \left\{ \frac{1}{2} H_m^{(2)}(k\rho) + \right.$$

$$+ \left(\frac{1}{2} + \beta_m \right) H_m^{(1)}(k\rho) \Big\} = \frac{i\omega}{c} A_0 \left\{ \exp(ik\rho \cos \varphi) + \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m \beta_m H_m^{(1)}(k\rho) e^{im\varphi} \right\}; \quad (75)$$

$$H_{\omega\varphi}(\rho, \varphi) = \frac{ic}{\omega} \frac{\partial E_{\omega z}}{\partial \rho} = -A_0 \left\{ \cos \varphi e^{ik\rho \cos \varphi} + \frac{\omega}{ic} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m e^{im\varphi} \beta_m \frac{dH_m^{(1)}(k\rho)}{d\rho} \right\}.$$

Если подставить эти формулы для полей в выражение для плотности потока $dS(\omega)$ через элемент соосной цилиндрической поверхности и проинтегрировать по углу φ от 0 до 2π , то получим поток энергии W_ω на частоте ω через цилиндрическую поверхность единичной высоты (вдоль оси z):

$$W_\omega = 4\omega |A_0|^2 \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} (\beta'_m + \beta_m'^2 + \beta_m''^2), \quad (76)$$

где

$$W_{m, \omega} = 4\omega (\beta'_m + \beta_m'^2 + \beta_m''^2) |A_0|^2. \quad (77)$$

Здесь

$$\beta'_m = \operatorname{Re} \beta_m; \quad \beta_m'' = \operatorname{Im} \beta_m, \quad (78)$$

где выражения для комплексного коэффициента β_m приведены в (71) и (72). При выводе этих формул были использованы известные соотношения из теории цилиндрических функций

$$H_m^{(1)}(z) = J_m(z) + iN_m(z); \quad H_m^{(2)}(z) = J_m(z) - iN_m(z); \quad (79)$$

$$J'_m(z) N_m(z) - J_m(z) N'_m(z) = -\frac{2}{\pi z};$$

$$H_m^{(1)*}(z) = H_m^{(2)}(z^*).$$

Проанализируем выражение (76) для полного потока энергии через цилиндрическую поверхность, окружающую вращающееся тело, и выражение (75) для полей.

1. Пусть в диэлектрическом цилиндре отсутствует поглощение, т. е. его проводимость σ равна нулю. Тогда величина $\tilde{\Delta}_m$ в (70) становится вещественной и, следовательно

но, становятся вещественными аргументы цилиндрических функций в формулах (72). В результате этого явные выражения для β'_m и β''_m примут вид

$$\beta'_m = -\frac{a_m^2}{a_m^2 + b_m^2}; \quad \beta''_m = \frac{a_m b_m}{a_m^2 + b_m^2}, \quad (80)$$

где

$$a_m = [\mu J_m(z_m) J'_m(y) - \sqrt{1 + \Delta_m} J_m(y) J'_m(z_m)]; \quad (81)$$

$$b_m = [\mu J_m(z_m) N'_m(y) - \sqrt{1 + \Delta_m} J'_m(z_m) N_m(y)]$$

при $y = \frac{\omega a}{c}$, $z_m = y \sqrt{1 + \Delta_m}$ и $\Delta_m = \kappa \frac{(\omega - m\Omega)^2}{\omega^2}$. Здесь $J'_m(z)$ и $N'_m(z)$ — производные цилиндрических функций первого $J_m(z)$ и второго $N_m(z)$ рода: $J'_m(z) = \frac{dJ_m(z)}{dz}$ и $N'_m(z) = \frac{dN_m(z)}{dz}$.

Нетрудно видеть, что в рассматриваемом случае вращающегося прозрачного диэлектрического цилиндра суммарный поток энергии W_ω тождественно равен нулю, ибо при β'_m и β''_m вида (80) $\beta'_m + \beta_m'^2 + \beta_m''^2 = 0$. Этот результат естествен, ибо в отсутствие поглощения и источников поля полный поток излучения через замкнутую поверхность всегда равен нулю. Действительно, напишем закон сохранения энергии для электромагнитного поля в отсутствие внешних источников, но при наличии тока проводимости $\mathbf{j}_{\text{пров}}$. Из уравнений Максвелла следует, что [21]

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div } \mathbf{S} + (\mathbf{j}_{\text{пров}}, \mathbf{E}) = 0, \quad (82)$$

где W — плотность энергии электромагнитного поля, а \mathbf{S} — плотность потока энергии. Для монохроматических волн эти величины усреднены по периоду колебаний и не зависят от времени. Поэтому в нашем случае $\partial W / \partial t = 0$. Интегрируя по замкнутому объему, содержащему внутри себя проводящий диэлектрик, и используя теорему Гаусса, получим

$$\oint_{\Sigma} S_\rho dE = - \int_{V_T} (\mathbf{j}_{\text{пров}}, \mathbf{E}) dV. \quad (83)$$

В левой части равенства стоит интеграл по замкнутой поверхности Σ , окружающей рассеивающее тело, от нор-

мальной к ней компоненты потока энергии S_ρ . В правой части равенства стоит интеграл по объему V_T , занятому проводящими телом (вне этого объема $\mathbf{j}_{\text{пров}} = 0$), дающий работу поля \mathbf{E} над токами проводимости $\mathbf{j}_{\text{пров}}$. В отсутствие токов проводимости

$$\oint S_\rho d\Sigma = 0, \quad (84)$$

что и было подтверждено в нашем конкретном случае прямым расчетом.

2. Введем теперь во вращающемся диэлектрическом немагнитном ($\mu = 1$) цилиндре малую проводимость. Это значит, что аргумент цилиндрических функций в (81) становится комплексным с малой мнимой частью

$$\tilde{z}_m = z_m (1 + i\xi_m), \quad (85)$$

где $z_m = y \sqrt{1 + \Delta_m}$; $y = \frac{\omega a}{c}$; $\Delta_m = \kappa \frac{(\omega - m\Omega)^2}{\omega^2}$; $\kappa = (\varepsilon - 1)$ и $\xi_m = \frac{2\pi\sigma(\omega - m\Omega)}{\omega^2(1 + \Delta_m)}$. Мнимая добавка ξ_m мала тогда, когда проводимость цилиндра удовлетворяет неравенству

$$\xi_m \ll 1, \quad \text{т. е.} \quad \sigma \ll \frac{\omega^2(1 + \Delta_m)}{2\pi(\omega - m\Omega)}. \quad (86)$$

В этом случае можно упростить выражения для мнимой и действительной частей коэффициента β_m в (80), если разложить все цилиндрические функции по малому параметру ξ_m :

$$\begin{aligned} J_m(\tilde{z}_m) &\simeq J_m(z_m) + i\xi_m z_m \frac{dJ_m(z_m)}{dz_m}; \\ \frac{dJ_m(\tilde{z}_m)}{d\tilde{z}_m} &\simeq \frac{dJ_m(z_m)}{dz_m} + i\xi_m z_m \frac{d^2J_m(z_m)}{dz_m^2}. \end{aligned} \quad (87)$$

Подставляя эти разложения в формулы (72) для Q_m и Q_{2m} и оставляя везде члены с ξ_m не выше первого порядка, получим после громоздких выкладок

$$\begin{aligned} \beta'_m &\simeq -\frac{a_m^2}{a_m^2 + b_m^2} \left(1 + \xi_m \frac{b_m^2 - a_m^2}{b_m^2 + a_m^2} \frac{b_m g_m - a_m d_m}{a_m^2} \right); \\ \beta''_m &\simeq \frac{a_m b_m}{a_m^2 + b_m^2} \left(1 - 2\xi_m \frac{b_m g_m - a_m d_m}{a_m^2 + b_m^2} \right), \end{aligned} \quad (88)$$

где

$$\begin{aligned}
 a_m &= J_m(z_m) J'_m(y) - \sqrt{1 + \Delta_m} J_m(y) J'_m(z_m); \\
 b_m &= J_m(z_m) N'_m(y) - \sqrt{1 + \Delta_m} N_m(y) J'_m(z_m); \\
 g_m &= z_m J'_m(y) J'_m(z_m) - \\
 &\quad - \sqrt{1 + \Delta_m} J_m(y) [J'_m(z_m) + z_m J''_m(z_m)]; \\
 d_m &= z_m N'_m(y) J'_m(z_m) - \\
 &\quad - \sqrt{1 + \Delta_m} N_m(y) [J'_m(z_m) + z_m J''_m(z_m)]
 \end{aligned} \tag{89}$$

и $J'_m(z_m) = \frac{dJ_m(z_m)}{dz_m}$, а $J''_m(z_m) = \frac{d^2J_m(z_m)}{dz_m^2}$. Подставляя выражения β'_m и β''_m в формулу для потока энергии $W_{m,\omega}$ на m -й азимутальной гармонике, получим

$$W_{m,\omega} = 4\omega |A_0|^2 \xi_m \frac{b_m g_m - a_m d_m}{a_m^2 + b_m^2}. \tag{90}$$

Коэффициент $(b_m g_m - a_m d_m)$ при подстановке в него явных выражений из (89) и использовании вронскиана из (79) сильно упрощается:

$$\begin{aligned}
 (b_m g_m - a_m d_m) &= \frac{2\sqrt{1 + \Delta_m}}{\pi y} \{z_m J_m{}^2(z_m) - \\
 &\quad - z_m J_m(z_m) J''_m(z_m) - J_m(z_m) J'_m(z_m)\}.
 \end{aligned} \tag{91}$$

Выражение в фигурных скобках можно упростить, используя уравнение Бесселя и рекуррентные соотношения для функций Бесселя

$$\begin{aligned}
 J''_m(z_m) + \frac{1}{z_m} J'_m(z_m) + \left(1 - \frac{m^2}{z_m^2}\right) J_m(z_m) &= 0; \\
 J'_m(z_m) = \frac{m}{z_m} J_m(z_m) - J_{m+1}(z_m) &= J_{m-1}(z_m) - \\
 - \frac{m}{z_m} J_m(z_m),
 \end{aligned} \tag{92}$$

так что

$$\begin{aligned}
 z_m [J_m{}^2(z_m) - J_m(z_m) J''_m(z_m)] - J_m(z_m) J'_m(z_m) &= \\
 = z_m [J_m^2(z_m) - J_{m+1}(z_m) J_{m-1}(z_m)].
 \end{aligned} \tag{93}$$

В результате получим

$$W_{m, \omega} = - \frac{16 (\omega - m\Omega)}{\omega} \sigma \frac{J_m^2(z_m) - J_{m+1}(z_m) J_{m-1}(z_m)}{a_m^2 + b_m^2} |A_0|^2. \quad (94)$$

Здесь комбинация бесселевых функций $(J_m^2 - J_{m+1}J_{m-1})$ от аргумента $z_m = \frac{\omega a}{c} \sqrt{1 + \Delta_m}$ пропорциональна нормировочному множителю для этих функций

$$\begin{aligned} M_m &= \int_0^a J_m^2 \left(\frac{\omega}{c} \sqrt{1 + \Delta_m} \rho \right) \rho d\rho = \\ &= \frac{a^2}{2} \{J_m^2(z_m) - J_{m+1}(z_m) J_{m-1}(z_m)\} \end{aligned} \quad (95)$$

и поэтому всегда положительна.

Величина $W_{m, \omega}$ имеет следующий физический смысл. Рассмотрим ту часть полного поля (75), у которой зависимость от азимутального угла φ определяется множителем $\exp(im\varphi)$ (т. е. азимутальную гармонику номера m). Для этой слагаемой полного поля разность между потоком энергии, уходящим от тела, и потоком энергии, падающим на тело, как раз и определяется величиной $W_{m, \omega}$. Очевидно, если $W_{m, \omega} = 0$, то внутри тела отсутствует поглощение, что имеет место при $\sigma = 0$. Если $W_{m, \omega} < 0$, то уходящая от тела энергия меньше приходящей, т. е. происходит поглощение этой азимутальной гармоники рассеиваемым телом. Если же $W_{m, \omega} > 0$, то происходит усиление гармоники номера m . В нашем случае это имеет место для номеров $m \geq \omega/\Omega$. Как указывалось в начале данного параграфа, рассматриваемая задача является примером отражения волн от тангенциального разрыва скоростей движения сред с учетом проводимости. Как и при отражении волн от тангенциального разрыва с прозрачной средой, возможно усиление тех волн, у которых скорость распространения вдоль поверхности раздела меньше скорости перемещения среды. При этом усиление возможно только при наличии проводимости, и для этого не требуется сверхсветовое макроскопическое перемещение среды. Кривая геометрия для некоторых азимутальных гармоник всегда обеспечивает сверхсветовое движение среды даже при нерелятивистских скоростях ее макроскопического перемещения. Иными словами, учет проводимости может

приводить к усилению волн в случае, когда скорость перемещения среды превышает фазовую скорость волны в направлении ее распространения. Это было уже отмечено в предыдущем параграфе. В данном случае падающая извне волна задает азимутальную компоненту волнового вектора, так что разность $(\omega - k_\varphi v_\varphi) = (\omega - m\Omega)$ может иметь любой знак.

Для покоящегося цилиндра $\mathbf{j}_{\text{пров}} = \sigma \mathbf{E}$, и поэтому рассеяние волн на таком цилиндре всегда сопровождается их поглощением, ибо

$$W_\omega = - \int_{V_T} (\mathbf{j}_{\text{пров}}, \mathbf{E}) dV = - \sigma \int_{V_T} |\mathbf{E}_\omega|^2 dV < 0. \quad (96)$$

Однако если цилиндр вращается, то ток проводимости в этом случае принимает (согласно (66)) вид

$$\begin{aligned} \mathbf{j}_{\text{пров}} &= \sigma \left\{ \mathbf{E}_\omega + \left[\frac{\mathbf{v}}{c}, \mathbf{B}_\omega \right] \right\} = \sigma \left(E_{\omega z} - \frac{v_\varphi}{c} B_{\omega\varphi} \right) \mathbf{e}_z = \\ &= \sigma \frac{m}{\rho} \left(\frac{\omega}{k_\varphi} - v_\varphi \right) E_{\omega z} \mathbf{e}_z = \sigma \frac{\omega - m\Omega}{\omega} E_{\omega z} \mathbf{e}_z, \end{aligned} \quad (97)$$

где $v_\varphi = \rho\Omega$, а $k_\varphi = \frac{1}{i\rho} \frac{\partial}{\partial\varphi} = \frac{m}{\rho}$.

Поэтому в последнем случае $W_{m,\omega} = -\sigma \frac{\omega - m\Omega}{\omega} \times$
 $\times \int_{V_T} |\mathbf{E}_\omega|^2 dV$, так что величина $W_{m,\omega}$ может менять знак.

Действительно, когда линейная скорость перемещения точек вращающегося цилиндра $v_\varphi = \rho\Omega$ становится больше фазовой скорости $\frac{\omega}{k_\varphi} = \rho \frac{\omega}{m}$ m -й гармоники поля в азимутальном направлении, ток проводимости оказывается в противофазе с действующим на него электрическим полем E . Поэтому вращающееся тело начинает не поглощать энергию падающих на него волн, а отдавать энергию своего вращения в поле излучения. Происходит усиление волн с азимутальными номерами $m > \omega/\Omega$. Это видно из точного расчета величины $W_{m,\omega}$. Согласно формуле (94) при $m < \omega/\Omega$ $W_{m,\omega} < 0$, и тело поглощает энергию азимутальной гармоники поля излучения с такими номерами. При $m > \omega/\Omega$ $W_{m,\omega} > 0$, и азимутальные гармоники с такими номерами m усиливаются за счет энергии вращения тела.

Это ясно также и из термодинамических соображений [13—15].

Пусть E и M — полная энергия и полный момент вращения цилиндра на единицу длины. Тогда изменение полной энергии равно разности потоков энергии в сходящейся и расходящейся волне:

$$\frac{dE}{dt} = J^{(-)} - J^{(+)}, \quad (98)$$

где $J^{(-)}$ — поток энергии в сходящейся электромагнитной волне, $J^{(+)}$ — аналогичная величина для расходящейся волны. Следуя [13—15], будем предполагать, что на вращающийся цилиндр падает азимутальная гармоника (т. е. поле зависит от азимутального угла по закону $e^{im\varphi}$). Тогда и отраженная волна будет азимутальной гармоникой того же номера. Предыдущее равенство с учетом сказанного может быть переписано в виде

$$\frac{dE}{dt} = J_m^{(-)} - J_m^{(+)}, \quad (99)$$

где $J_m^{(\pm)}$ — потоки энергии соответственно в сходящейся (—) и расходящейся (+) гармониках номера m . Учтем также закон сохранения момента количества движения. Пусть $L_z^{(+)}$ и $L_z^{(-)}$ представляют собой проекции на ось вращения цилиндра векторов момента количества движения поля в расходящейся и сходящейся волнах

$$\mathbf{L} = \frac{c}{4\pi} \int [\mathbf{r}, [\mathbf{E}, \mathbf{H}]] dV. \quad (100)$$

Тогда закон изменения момента количества движения цилиндра M может быть записан в виде

$$\frac{dM}{dt} = L_z^{(-)} - L_z^{(+)} = \frac{m}{\omega} (J_m^{(-)} - J_m^{(+)}). \quad (101)$$

В справедливости этого соотношения можно убедиться с помощью определения (100) и из того факта, что гармоники поля имеют вид (66).

Из термодинамического тождества

$$dE = TdS + \Omega dM \quad (102)$$

(T — абсолютная температура, S — энтропия) с учетом (99) и (101) получим

$$T \frac{dS}{dt} = \frac{dE}{dt} - \Omega \frac{dM}{dt} = \left(1 - \frac{m\Omega}{\omega}\right) (J_m^{(-)} - J_m^{(+)}) \geq 0. \quad (103)$$

Справедливость этого неравенства следует из закона возрастания энтропии.

Из неравенства (103) видно, что, когда $m\Omega/\omega < 1$, получается $J_m^{(+)} < J_m^{(-)}$, т. е. гармоника номера m при отражении ослабляется (поток энергии в сходящейся волне больше, чем в расходящейся). Наоборот, когда $m\Omega/\omega > 1$, гармоника номера m при отражении усиливается. Таким образом, усиливаются гармоники, номера которых удовлетворяют неравенству

$$m > \omega/\Omega. \quad (104)$$

Из неравенства (104) следует, что, каково бы ни было соотношение между частотой падающей волны ω и частотой вращения цилиндра Ω , всегда найдутся такие гармоники, на которых возможно усиление. Конечно, основной вклад в интегральный эффект усиления или ослабления дают гармоники малых номеров.

Можно вычислить полный поток энергии W_ω на частоте ω , если просуммировать величину $W_{m,\omega}$ в (94) по всем азимутальным гармоникам. Особенно просто это сделать в случае, когда диэлектрическая проницаемость вращающегося тела мало отличается от единицы, точнее, когда

$$\Delta_m = (\varepsilon - 1) \frac{(\omega - m\Omega)^2}{\omega^2} \ll 1. \quad (105)$$

В этом случае величины a_m^2 , b_m^2 и комбинация из бесселевых функций в числителе (94) принимают вид

$$a_m^2 \simeq \frac{\Delta_m^2 y^2}{4} [J_m^2(y) - J_{m+1}(y) J_{m-1}(y)]^2 + O(\Delta_m^3);$$

$$[J_m^2(z_m) - J_{m+1}(z_m) J_{m-1}(z_m)] \simeq$$

$$\simeq [J_m^2(y) - J_{m+1}(y) J_{m-1}(y)] +$$

$$+ \Delta_m [2J_m(y) J'_m(y) - J_{m+1}(y) J_{m-1}(y)] + O(\Delta_m^2); \quad (106)$$

$$b_m^2 \simeq \frac{4}{\pi^2 y^2} \left\{ 1 + \frac{\pi y \Delta_m}{2} [y (N'_m(y) J'_m(y) - N_m(y) J''_m(y)) - \right.$$

$$\left. - N_m(y) J'_m(y)] + O(\Delta_m^2) \right\} =$$

$$= \frac{4}{\pi^2 y^2} \left\{ 1 + \frac{\pi y^2}{2} \Delta_m [N'_m(y) J'_m(y) + \right.$$

$$\left. + \left(1 - \frac{m^2}{y^2} \right) N_m(y) J_m(y) \right] + O(\Delta_m^2) \right\},$$

где $y = \frac{\omega a}{c}$.

Здесь были использованы соотношения (92) и (93) для цилиндрических функций.

Поскольку величина σ мала, при малых Δ_m в этих выражениях можно оставить только члены, не зависящие от Δ_m . В результате получим

$$W_{m, \omega} \simeq - \frac{4\pi^2 a^2 \omega \sigma}{c^2} (\omega - m\Omega) |A_0|^2 \{ J_m^2(y) - J_{m+1}(y) J_{m-1}(y) \} = - \frac{8\pi^2 \omega \sigma}{c^2} (\omega - m\Omega) \int_0^a J_m^2\left(\frac{\omega \rho}{c}\right) \times \rho d\rho |A_0|^2. \quad (107)$$

Это выражение совпадает с формулами работы [22], в которой она была выведена другим способом, с помощью теории возмущений прямо из уравнения (48).

Последнее выражение в (107) удобно тем, что позволяет довольно просто просуммировать выражения (76) по всем гармоникам излучения. Воспользовавшись формулами [23]

$$\sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} J_m^2(z) = 1; \quad \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} m J_m^2(z) = 0, \quad (108)$$

получаем

$$W_\omega = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} W_{m, \omega} = - \frac{4\pi^2 a^2 \omega^2 \sigma}{c^2} |A_0|^2. \quad (109)$$

При выводе этой формулы считалось, что проводимость σ не зависит от частоты ω (отсутствие дисперсии). Учет проводимости для простейшей дисперсионной зависимости был проведен в работе [22].

Формулы (107) и (109) показывают следующее. Хотя на некоторых азимутальных гармониках $m > \omega/\Omega$ происходит усиление при отражении от вращающегося цилиндра, в целом энергия падающей плоской волны поглощается этим телом. Такой результат понятен уже из выражения для $W_{m, \omega}$. Действительно, поскольку [23]

$$J_{-m}(z) = (-1)^m J_m(z), \quad (110)$$

то из формулы (107) следует, что

$$W_{0, \omega} = - \frac{8\pi^2 \omega \varepsilon}{c^2} |A_0|^2 \int_0^a J_0^2 \left(\frac{\omega}{c} \rho \right) \rho d\rho < 0; \quad (111)$$

$$W_{-m, \omega} + W_{m, \omega} = - \frac{8\pi^2 \omega \varepsilon}{c^2} |A_0|^2 \int_0^a J_m^2 \left(\frac{\omega \rho}{c} \right) \rho d\rho < 0.$$

Это значит, что сложение двух гармоник с номерами m и $(-m)$ приводит к исчезновению того члена, который пропорционален частоте вращения Ω и может приводить к усилению. Таким образом, энергия падающей плоской волны всегда поглощается вращающимся телом. Такой вывод кажется вполне естественным, ибо поглощение энергии проводящим телом связано с джоулевыми потерями и с последующим нагревом этого тела.

Отметим еще, что в выражение (109) для просуммированных по всем гармоникам потерь энергии не входит частота вращения цилиндра Ω , т. е. полные потери энергии при рассеянии плоской монохроматической волны на вращающемся цилиндре не зависят от угловой скорости вращения цилиндра. Это утверждение, как видно из приведенного выше расчета, справедливо с точностью до v^2/c^2 , где $v \sim \Omega a$ — линейные скорости элементов цилиндра.

Факт независимости потерь от частоты вращения цилиндра можно понять из следующих простых качественных соображений. Изменим направление вращения цилиндра на противоположное, сохранив абсолютную величину угловой скорости вращения (т. е. произведем замену Ω на $-\Omega$). Тогда из выражений (66) — (72) для полей видно, что, например, после изменения знака Ω поле E под углом наблюдения $(-\varphi)$ имеет такое же значение, как и поле E до изменения знака вращения под углом $(+\varphi)$. Это означает, что угловая зависимость рассеянных полей после изменения направления вращения цилиндра симметрична угловой зависимости, которая была до изменения знака Ω . Плоскость симметрии проходит через ось цилиндра и волновой вектор падающей плоской волны. Симметрия углового распределения говорит о том, что полный баланс энергии поля при рассеянии на вращающемся цилиндре зависит только от величины угловой скорости Ω , но не зависит от ее знака. Поэтому величина $W_{\omega,}$

т. е. разность полных потоков энергии в падающем и рассеянном полях, не должна зависеть от знака Ω . Разложение величины W_ω по скорости вращения цилиндра Ω должно содержать только четные степени Ω . Первый член разложения вообще не зависит от Ω и выражается полученной нами формулой (109). Второй член в нашем приближении отсутствует, поскольку он дает поправку, пропорциональную v^2/c^2 , которая не учитывается в наших расчетах.

Представляет интерес оценка зависимости величины потерь $W_{m,\omega}$ в (107) от номера гармоники m . Выражение для $W_{m,\omega}$ может быть упрощено в двух предельных случаях. В первом случае считаем, что номер гармоники m достаточно велик ($m \rightarrow \infty$), а аргумент функции Бесселя удовлетворяет неравенству: $\omega a/c < m$. Тогда можно пользоваться следующими асимптотическими формулами [23]:

$$J_m(y) \simeq \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sqrt{m^2-y^2}}} \exp \left[- \left(m \ln \frac{m + \sqrt{m^2-y^2}}{y} - \sqrt{m^2-y^2} \right) \right] & \text{при } m > y, \\ \frac{2}{\sqrt{2\pi\sqrt{y^2-m^2}}} \cos \left(\sqrt{y^2-m^2} - m \arccos \frac{m}{y} - \frac{\pi}{4} \right) & \text{при } m < y, \end{cases} \quad (112)$$

где $y = \omega a/c$. При $m < y$ функция $J_m(y)$ медленно меняется с изменением номера m , а при $m > y$ в силу положительности величины $\left(m \ln \frac{m + \sqrt{m^2-y^2}}{y} - \sqrt{m^2-y^2} \right)$ она убывает быстрее экспоненты. Подставляя выражение для $J_m(y)$ из (112) в случае $m > y$ в формулу (107), после некоторых преобразований получим

$$W_{m,\omega} \simeq - \frac{4\pi^2 a^2 \omega^5}{c^2} (\omega - m\Omega) \left(\frac{\omega a}{2c} \right)^{2m} \left(\frac{1}{m!} \right)^2 \frac{1}{m+1} |A_0|^2. \quad (113)$$

Во втором случае, когда радиус вращающегося цилиндра меньше, чем длина волны излучения в свободном пространстве: $\omega a/c < 1$, можно воспользоваться разложением функций Бесселя в ряд

$$J_m(y) \simeq \frac{y^m}{2^m} \left\{ 1 - \frac{y^2}{(m+1)!} \right\}. \quad (114)$$

Подставляя ряды в формулу (107), мы опять приходим к выражению (113) для $W_{m, \omega}$. Из него следует, что с ростом номера гармоники m ряд (109) сходится быстро. Поэтому для оценки суммы этого ряда достаточно учесть небольшое число членов с номерами $m = 0, \pm 1, \pm 2$.

Таким образом, энергия плоской монохроматической волны, падающей на вращающийся проводящий цилиндр, частично поглощается в нем, хотя отдельные азимутальные гармоники в разложении этой плоской волны (с $m > \omega/\Omega$) усиливаются при отражении. Отсюда ясно, что суммарный эффект усиления можно обеспечить либо выбором конфигурации падающего поля (падает только одна гармоника с $m > \omega/\Omega$), либо выбором соответствующей азимутальной конфигурации вращающегося тела так, чтобы наиболее сильное рассеяние происходило для m -й азимутальной гармоники падающей плоской волны. Очевидно, что последнего можно добиться специальной периодической азимутальной гофрировкой поверхности вращающегося тела так, чтобы на полном обороте укладывалось m периодов гофрировки с $m > \omega/\Omega$.

3. Мы видим, что потери энергии падающей волны во вращающемся теле при малой проводимости пропорциональны этой проводимости, а для гармоник поля излучения зависят также от угловой скорости вращения этого тела. Представляет интерес проследить зависимость потерь энергии волны от проводимости σ особенно в предельном случае очень большой проводимости, когда мы будем иметь дело практически с вращающимся металлическим цилиндром ($\sigma = \infty$). Для этого нужно вычислить мнимую β_m'' и действительную β_m' части коэффициента β_m в (71) и подставить эти выражения в формулы (76).

Представим точное выражение для β_m (71) в случае немагнитной среды ($\mu = 1$) в виде

$$\beta_m = - \frac{J_m(y)}{H_m^{(1)}(y)} \frac{1 - \frac{J_m'(y)}{J_m(y)} \frac{1}{\sqrt{1 + \tilde{\Delta}_m}} \frac{J_m(\tilde{z}_m)}{J_m'(z_m)}}{1 - \frac{H_m^{(1)'}(y)}{H_m^{(1)}(y)} \frac{1}{\sqrt{1 + \tilde{\Delta}_m}} \frac{J_m(\tilde{z}_m)}{J_m'(z_m)}}} \quad (115)$$

Здесь от проводимости σ зависит только аргумент $\tilde{z}_m = y\sqrt{1 + \tilde{\Delta}_m}$ через величину $\tilde{\Delta}_m = \kappa \frac{(\omega - m\Omega)^2}{\omega^2} + i \frac{4\pi\sigma}{\omega^2} (\omega - m\Omega)$, ибо $y = \frac{\omega a}{c}$, а $\kappa = \varepsilon - 1$.

Нас интересуется случай сильно проводящего вращающегося цилиндра, когда мнимая часть $\tilde{\Delta}_m$ существенно больше действительной (при $\Omega = 0$ это условие эквивалентно известному условию $|\varepsilon''| \gg |\varepsilon'|$ [4]). Если при этом предположим, что величина z_m также много больше единицы, то будем иметь известные ограничения на границе раздела вакуума с сильно проводящей поверхностью

$$\frac{4\pi\tau}{\omega^2} |\omega - m\Omega| \gg \kappa \frac{(\omega - m\Omega)^2}{\omega^2}, \text{ или } |\varepsilon''| \gg |\varepsilon'|, \quad (116)$$

и

$$|\tilde{z}_m| = y \sqrt{1 + \tilde{\Delta}_m} \gg 1, \text{ или } y \sqrt{\frac{4\pi\tau}{\omega} \frac{|\omega - m\Omega|}{\omega}} \gg 1,$$

т. е. $\delta_S = \frac{c}{\sqrt{2\pi\omega\tau}} \ll a \sqrt{\frac{|\omega - m\Omega|}{\omega}}$. Последнее неравенство означает, что глубина скин-слоя должна быть существенно меньше размера цилиндра. Только в этом случае цилиндр можно считать сильно проводящим.

Используя разложение величины $\sqrt{1 + \tilde{\Delta}_m}$

$$\begin{aligned} \sqrt{1 + \tilde{\Delta}_m} &\simeq \sqrt{\frac{|\gamma_m|}{2}} \left(1 + \frac{1 + \Delta_m}{2|\gamma_m|} \right) + \\ &+ i \operatorname{sgn} \gamma_m \left(1 - \frac{1 + \Delta_m}{2|\gamma_m|} \right) \end{aligned} \quad (117)$$

при $(1 + \Delta_m) = 1 + \kappa \frac{(\omega - m\Omega)^2}{\omega^2} \ll 2|\gamma_m| = \frac{8\pi\tau}{\omega^2} |\omega - m\Omega|$, а

$$\operatorname{sgn} \gamma_m = \operatorname{sgn} (\omega - m\Omega) = \frac{\omega - m\Omega}{|\omega - m\Omega|} = \begin{cases} +1 & \text{при } \omega > m\Omega, \\ -1 & \text{при } \omega < m\Omega, \end{cases} \quad (118)$$

а также асимптотики функций Бесселя $J_m(\tilde{z}_m)$ при $|\tilde{z}_m| \gg 1$ [23]

$$J_m(\tilde{z}_m) \simeq \sqrt{\frac{2}{\pi\tilde{z}_m}} \left\{ \cos\left(\tilde{z}_m - \frac{\pi m}{2} - \frac{\pi}{4}\right) + O\left(\frac{1}{\tilde{z}_m}\right) \right\}, \quad (119)$$

$$J'_m(\tilde{z}_m) \simeq \sqrt{\frac{2}{\pi\tilde{z}_m}} \left\{ -\sin\left(\tilde{z}_m - \frac{\pi m}{2} - \frac{\pi}{4}\right) + O\left(\frac{1}{\tilde{z}_m}\right) \right\},$$

можно показать, что с точностью до $1/\tilde{z}_m$ отношение

$J_m(z_m)/J'_m(\tilde{z}_m)$ принимает вид

$$\frac{J_m(\tilde{z}_m)}{J'_m(\tilde{z}_m)} \simeq i \operatorname{sgn} \gamma_m + O\left(\frac{1}{z_m}\right). \quad (120)$$

Подставляя это выражение в формулу (115) для β_m и оставляя в разложении для $\sqrt{1 + \tilde{\Delta}_m}$ только старшие члены, пропорциональные $\sqrt{|\gamma_m|}$, получим

$$\begin{aligned} \beta'_m \simeq & -\frac{J_m^2(y)}{J_m^2(y) + N_m^2(y)} + \\ & + \operatorname{sgn} \gamma_m \frac{[J_m^2(y) - N_m^2(y)] - 2 \operatorname{sgn} \gamma_m J_m(y) N_m(y)}{\pi y \sqrt{\frac{|\gamma_m|}{2}} [J_m^2(y) + N_m^2(y)]^2} + \\ & + O\left(\frac{1}{\gamma_m^2}\right); \end{aligned} \quad (121)$$

$$\begin{aligned} \beta''_m \simeq & \frac{J_m(y) N_m(y)}{J_m^2(y) + N_m^2(y)} - \\ & - \frac{\operatorname{sgn} \gamma_m}{\pi y \sqrt{\frac{|\gamma_m|}{2}}} \frac{2J_m(y) N_m(y) + \operatorname{sgn} \gamma_m [J_m^2(y) - N_m^2(y)]}{[J_m^2(y) + N_m^2(y)]^2} + \\ & + O\left(\frac{1}{\gamma_m^2}\right), \end{aligned}$$

где

$$y = \frac{\omega a}{c}, \quad \text{а } \gamma_m = \frac{4\pi z}{\omega^2} (\omega - m\Omega).$$

Вычисляя $\beta_m'^2$ и $\beta_m''^2$ и оставляя при этом только члены, не зависящие от γ_m и пропорциональные $\frac{1}{|\gamma_m|}$, получим

$$(\beta'_m + \beta_m'^2 + \beta_m''^2) \simeq -\frac{\operatorname{sgn} \gamma_m}{\pi y \sqrt{\frac{|\gamma_m|}{2}} [J_m^2(y) + N_m^2(y)]}. \quad (122)$$

В результате полные потери энергии для m -й азимутальной гармоники плоской монохроматической волны, падающей на вращающийся сильно проводящий цилиндр,

равны

$$W_{m, \omega} = \frac{1}{4} \omega (\beta'_m + \beta_m'^2 + \beta_m''^2) |A_0|^2 \simeq \simeq - \frac{4\omega \operatorname{sgn}(\omega - m\Omega) |A_0|^2}{\pi y \sqrt{\frac{2\pi\gamma}{\omega^2} |\omega - m\Omega| [J_m^2(y) + N_m^2(y)]}}. \quad (123)$$

Мы видим, что и в случае сильно проводящего цилиндра знак полных потерь энергии для азимутальных гармоник таков, что при $(\omega - m\Omega) > 0$ $W_{m, \omega} < 0$ и происходит поглощение энергии падающей волны, а при $(\omega - m\Omega) < 0$ $W_{m, \omega} > 0$, т. е. падающая азимутальная гармоника с $m > \omega/\Omega$ усиливается. Для цилиндра с бесконечной проводимостью ($\sigma = \infty$) $W_{m, \omega} = 0$ и $W_\omega = 0$, т. е. поток энергии сходящихся к цилиндру волн равен потоку энергии уходящих от него волн независимо от того, вращается цилиндр или нет. Это находится в полном согласии с тем фактом, что отражение волн от перемещающегося вдоль своей поверхности металлического зеркала не зависит от скорости его движения и всегда происходит так же, как отражение от покоящегося зеркала.

Выражение для полных потерь энергии пропорционально σ , и на первый взгляд кажется, что при $\sigma \rightarrow \infty$ поглощение должно быть бесконечно большим. Однако это не так, что и показывают приведенные выше расчеты. Связано это с тем, что при $\sigma \rightarrow \infty$ амплитуды полей внутри поглощающего тела экспоненциально убывают вглубь этого тела при удалении от поверхности: «скин-эффект». В нашем случае это видно из формул (66) и (68) для полей внутри цилиндра и из выражения для коэффициента α_m в (71) при $|\hat{z}_m| \gg 1$. Это экспоненциальное убывание поля вглубь поглощающего тела и приводит к обращению в нуль величины $W_{m, \omega} = -\sigma \frac{\omega - m\Omega}{\omega} \int_{V_T} |E_\omega|^2 dV$.

Полученные формулы для $W_{m, \omega}$ позволяют установить, какая часть полной энергии падающей на цилиндр волны поглотилась (или усилилась) в цилиндре в виде m -й азимутальной гармоники. Эта доля энергии характеризуется величиной коэффициента

$$h_m = \frac{W_{m, \omega}}{2aS_0}, \quad (124)$$

где $S_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c}{4\pi} [E_0, H_0]_x dt = c \operatorname{Re} ([E_{0\omega}, H_{0\omega}^*]_x)$ — полная

энергия падающей волны частоты ω , прошедшая через единицу площади осевого сечения цилиндра в направлении своего распространения (ось x) (см. формулу (73)). В нашем случае $S_0 = \frac{\omega^2}{c^2} |A_0|^2$. Тогда согласно (107) и (123) (для простоты считаем $\Delta_m = \kappa \frac{(\omega - m\Omega)^2}{\omega^2} \ll 1$):

а) при $\frac{4\pi\sigma}{\omega} \frac{|\omega - m\Omega|}{\omega} \ll 1$, или

$$\delta_S \sqrt{\frac{|\omega - m\Omega|}{\omega}} \gg \frac{\lambda}{2\pi}, \quad (125a)$$

$$\begin{aligned} h_m &= -\operatorname{sgn}(\omega - m\Omega) \frac{|\omega - m\Omega|}{\omega} \frac{a\sigma}{c} 2\pi^2 f_{1m}(y) = \\ &= -\operatorname{sgn}(\omega - m\Omega) \frac{|\omega - m\Omega|}{\omega} \frac{a\lambda}{2\delta_S^2} f_{1m}(y); \end{aligned}$$

б) при $\frac{4\pi\sigma}{\omega} \frac{|\omega - m\Omega|}{\omega} \gg 1$, или $\delta_S \sqrt{\frac{|\omega - m\Omega|}{\omega}} \ll \frac{\lambda}{2\pi}$

$$\text{и } \delta_S \ll a \sqrt{\frac{|\omega - m\Omega|}{\omega}},$$

$$\begin{aligned} h_m &\simeq -\operatorname{sgn}(\omega - m\Omega) \sqrt{\frac{\omega}{|\omega - m\Omega|}} \frac{2c}{\pi a \omega} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\sigma}} f_{2m}(y) = \\ &= \operatorname{sgn}(\omega - m\Omega) \sqrt{\frac{\omega}{|\omega - m\Omega|}} \frac{2\delta_S^2}{\pi a} f_{2m}(y), \quad (125b) \end{aligned}$$

где $\delta_S = \frac{c}{\sqrt{2\pi\omega\sigma}}$, $f_{1m}(y) = [J_m^2(y) - J_{m+1}(y)J_{m-1}(y)]$ и

$f_{2m} = \frac{1}{J_m^2(y) + N_m^2(y)}$. Отсюда видно, что при малой проводимости тела степень поглощения m -й гармоники пропорциональна потерям в среде, а при большой проводимости степень поглощения гармоники уменьшается обратно пропорционально $\sqrt{\sigma/\omega}$. Очевидно, что наибольшее поглощение будет осуществляться в таком цилиндре, у которого $\delta_S \sim \lambda \sim a$. Эти рассуждения относятся к тем гармоникам, у которых $m < \omega/\Omega$. Остальные гармоники с $m > \omega/\Omega$ будут усиливаться, причем максимальное усиление будет для цилиндра с $\delta_S \sim \lambda \sim a$.

В заключение этого раздела приведем выражение для $E_{\omega z}$ и $H_{\omega\phi}$ вне рассеивающего идеально проводящего цилиндра. Поскольку $\sigma = \infty$, то выражения (415) для коэф-

коэффициента β_m в этом случае примут вид

$$\beta_m = -\frac{J_m(y)}{H_m^{(1)}(y)} = -\frac{J_m^2(y)}{J_m^2(y) + N_m^2(y)} + \\ + i \frac{J_m(y) N_m(y)}{J_m^2(y) + N_m^2(y)}, \quad (126)$$

где $y = \omega a/c$. Это выражение не зависит от угловой скорости вращения цилиндра и совпадает с аналогичными формулами для покоящегося цилиндра. Особенно хорошо это видно из соответствующего этому случаю выражения для компонент полей вне цилиндра. Согласно (126) и (75) они имеют вид

$$E_{\omega z} = \frac{i\omega}{c} A_0 \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} i^m e^{im\varphi} \times \\ \times \frac{J_m\left(\frac{\omega}{c}\rho\right) H_m^{(1)}\left(\frac{\omega a}{c}\right) - J_m\left(\frac{\omega a}{c}\right) H_m^{(1)}\left(\frac{\omega}{c}\rho\right)}{H_m^{(1)}\left(\frac{\omega}{c}a\right)}; \quad (127)$$

$$H_{\omega\varphi} = \frac{ic}{\omega} \frac{\partial E_{\omega z}}{\partial \rho}.$$

Поскольку эти компоненты удовлетворяют волновому уравнению в вакууме и граничному условию $E_{\omega z}(\rho, \varphi)|_{\rho=a} = 0$, то это и есть искомые решения.

Выражение для $E_{\omega z}(\rho, \varphi)$ можно записать также в виде

$$E_{\omega z}(\rho, \varphi) = \frac{i\omega}{c} A_0 \left\{ \exp\left(\frac{i\omega}{c}\rho \cos\varphi\right) + \beta_0 H_0^{(1)}\left(\frac{\omega}{c\rho}\right) + \right. \\ \left. + 2 \sum_{m=1}^{m=\infty} i^m \beta_m H_m^{(1)}\left(\frac{\omega}{c}\rho\right) \cos m\varphi \right\}, \quad (128)$$

где были использованы соотношений $J_{-m} = (-1)^m J_m$ и $H_{-m}^{(1)} = (-1)^m H_m^{(1)}$. Амплитуда полного поля $E_{\omega z}(\rho, \varphi)$ симметрична относительно направления распространения падающей волны $\varphi = 0$: $E_{\omega z}(\rho, -\varphi) = E_{\omega z}(\rho, \varphi)$. Это означает, что диаграмма направленности излучения, рассеянного идеально проводящим цилиндром (вращающимся!), симметрична относительно направления распространения падающей волны и не зависит от угловой скорости его вращения.

4. Исследуем теперь вопрос о влиянии вращения цилиндра на диаграмму направленности рассеянного излучения в случае, когда диэлектрический цилиндр немагнитный и его проводимость равна нулю, т. е. $\mu = 1$ и $\sigma = 0$. Тогда с помощью формул (75), (80) и (81) можно найти поля вне цилиндра и рассчитать диаграмму направленности рассеянного излучения. Однако получающиеся при этом формулы оказываются довольно громоздкими, и их заметное упрощение осуществляется только при использовании различных приближений.

Поэтому задачу об угловом распределении рассеянного поля будем рассматривать качественно в следующих упрощающих предположениях.

1. Величина коэффициента преломления среды $\sqrt{\epsilon\mu}$ близка к единице, т. е. $|\epsilon\mu - 1| \ll 1$, и проводимость среды σ мала. Количественный критерий малости величины σ можно получить, потребовав, чтобы радиус цилиндра был много меньше толщины скин-слоя $l = c / \sqrt{2\pi\omega\sigma}$, т. е. $a \ll l$, или $\frac{2\pi\sigma}{\omega} \ll \left(\frac{\lambda}{2\pi a}\right)^2$. Выполнение этих условий позволяет пренебречь отражением и преломлением света на поверхности цилиндра и поглощением света внутри цилиндра. Указанные условия требуют, чтобы преломляющие свойства цилиндра мало отличались от свойств окружающего пространства.

2. Угловая скорость Ω , с которой вращается цилиндр, такова, что соответствующие линейные скорости элементов цилиндра малы в сравнении со скоростью света, т. е. выполнено неравенство $v = \Omega a \ll c$. В этом случае можно учитывать только эффекты первого порядка по v/c .

3. Размеры цилиндра много больше, чем длина волны падающего излучения, т. е. $a \gg \lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$. В этом случае распространение света внутри вращающегося цилиндра можно рассматривать как распространение плоской волны.

Элементы объема вращающегося цилиндра движутся с линейными скоростями, различными как по величине, так и по направлению. Пусть скорость элемента объема равна v , причем вектор v составляет с волновым вектором падающей волны угол θ_0 (рис. 3). Тогда фазовая скорость света в указанном элементе объема равна [4]

$$v_{\text{ф}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} + \left(1 - \frac{1}{\epsilon\mu}\right)v \cos \theta_0. \quad (129)$$

Первое слагаемое в (129) дает фазовую скорость света в покоящейся среде. Второе слагаемое обусловлено эффектом увлечения света движущейся средой. Величина второго слагаемого пропорциональна скорости среды $v = \Omega r$. Множитель $\left(1 - \frac{1}{\epsilon\mu}\right)$ называется коэффициентом увлечения Френеля.

Скорость v для элементов вращающегося цилиндра имеет порядок величины $a\Omega$, угол θ_0 меняется от 0 до 2π .

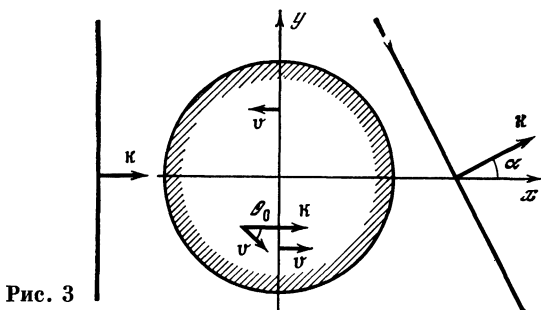


Рис. 3

Из формулы (129) видно, что при $\theta_0 = \pm\pi/2$ эффект увлечения отсутствует. При $\theta_0 = 0$ и π эффект увлечения является наибольшим, причем фазовая скорость света в той части цилиндра, где среда и волна движутся в одну сторону, имеет порядок величины

$$v_{\Phi}^{(+)} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} + v \left(1 - \frac{1}{\epsilon\mu}\right), \quad (130)$$

а фазовая скорость света в той части цилиндра, где среда и волна движутся навстречу друг другу, имеет порядок величины

$$v_{\Phi}^{(-)} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} - v \left(1 - \frac{1}{\epsilon\mu}\right). \quad (131)$$

В силу различия этих фазовых скоростей фронт волны повернется в направлении вращения цилиндра. Волна, вышедшая из цилиндра, будет распространяться в направлении, которое составляет с первоначальным некоторый угол α . Считая угол α малым, мы можем оценить его величину из простых геометрических соображений:

$$\operatorname{tg} \alpha \simeq \alpha \simeq \frac{v_{\Phi}^{(+)} - v_{\Phi}^{(-)}}{c/\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{2a\Omega}{c} \left(1 - \frac{1}{\epsilon\mu}\right) \sqrt{\epsilon\mu}. \quad (132)$$

Таким образом, выходя из цилиндра, рассеянная волна отклоняется от направления распространения падающей волны на угол α в ту же сторону, в которую вращается цилиндр.

Эти простые соображения и качественные оценки можно подкрепить более аккуратным расчетом углового распределения рассеянного излучения, основанным на приближении Кирхгофа в теории дифракции.

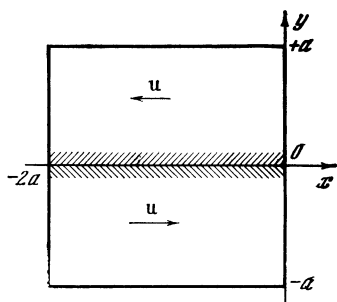


Рис. 4

Представим себе бесконечный стержень квадратного сечения, ребра которого параллельны оси z . Внутренняя часть стержня определяется соотношениями $0 > x > -2a$, $|y| < a$. Пусть при этом область стержня $a > y > 0$ заполнена средой, движущейся со скоростью $u_x = -u$ ($u > 0$), а в области стержня $0 > y > -a$ среда перемещается с той же скоростью в противоположном направлении ($u_x = +u$) (рис. 4). Волновой вектор падающей на стержень волны направлен в положительном направлении оси x . В этой модели учитывается движение среды только по направлению волнового вектора падающей волны и в противоположном направлении. Эта приближенная модель физически оправдана тем, что, как видно из предыдущих качественных рассуждений (см. формулы (129) — (131)), движение среды в направлениях, близких к поперечному, вносит малый вклад в изменение фазы.

В принятых предположениях легко определить значение поля в плоскости $x = 0$:

$$E(x=0) =$$

$$= \begin{cases} E_0 \text{ при } y > a \text{ и при } y < -a, & (133) \\ E_1 = E_0 \exp \left\{ -\frac{i\omega}{c} 2a + \frac{i\omega}{c} 2a [\sqrt{\epsilon\mu} + (\epsilon\mu - 1)\beta] \right\} - \\ - \frac{4\pi\sigma}{c} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} (1 + \beta \sqrt{\epsilon\mu}) a \} \text{ при } 0 < y < a, \\ E_2 = E_0 \exp \left\{ -\frac{i\omega}{c} 2a + \frac{i\omega}{c} 2a [\sqrt{\epsilon\mu} - (\epsilon\mu - 1)\beta] \right\} - \\ - \frac{4\pi\sigma}{c} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} (1 - \beta \sqrt{\epsilon\mu}) a \} \text{ при } 0 > y > -a. \end{cases}$$

Здесь использовано, что в медленно движущейся и слабопоглощающей среде волновой вектор для волны, распространяющейся под углом θ_0 к скорости среды, записывается в виде

$$k = \frac{\omega}{c} \left[\sqrt{\epsilon\mu} - (\epsilon\mu - 1) \frac{u}{c} \cos \theta_0 \right] + \frac{2\pi i \gamma}{c} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \left(1 - \frac{u}{c} \cos \theta_0 \sqrt{\epsilon\mu} \right), \quad \beta u = c. \quad (134)$$

Рассеянное поле E_p можно определить с помощью известной формулы Гюйгенса — Кирхгофа [2]:

$$E_p = \frac{\omega}{2\pi i c} \int \frac{\exp(ikR)}{R} E df, \quad (135)$$

где df — элемент поверхности на плоскости $x = 0$, E — значение поля на этой плоскости, определяемое формулой (133), R — расстояние от элемента поверхности df до точки наблюдения. В случае, когда расстояние до точки наблюдения велико по сравнению с характерным размером a , формула (135) упрощается:

$$E_p = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi i c R_0}} e^{i \frac{\omega}{c} R_0} \int E e^{-i(\mathbf{k}', \mathbf{r})} df, \quad (136)$$

где R_0 — расстояние от начала координат до точки наблюдения, \mathbf{r} — радиус-вектор, определяющий положение элемента поверхности df , \mathbf{k}' — волновой вектор рассеянной волны; вектор \mathbf{k}' составляет угол ϑ с осью x (с направлением падающей волны).

Подставив в (136) значение E в виде (133) и проведя интегрирование по df , получим выражение для рассеянного поля как функции от угла рассеяния ϑ :

$$E_p(\vartheta) = \sqrt{\frac{2k_0}{\pi i R_0}} E_0 e^{i k_0 R_0} \left\{ \delta(k_0 \sin \vartheta) - \frac{\sin(k_0 a \sin \vartheta)}{k_0 \sin \vartheta} + \frac{\sin\left(\frac{1}{2} k_0 a \sin \vartheta\right)}{k_0 \sin \vartheta} \exp \left[2i k_0 a (\sqrt{\epsilon\mu} - 1) - \frac{4\pi\gamma a}{c} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \right] \left[\exp\left(\frac{1}{2} \frac{\pi\gamma}{c} \beta \mu a + \frac{i}{2} k_0 a \sin \vartheta - 2i k_0 a (\epsilon\mu - 1) \beta\right) + \exp\left(-\frac{4\pi\gamma}{c} \beta \mu a - \frac{i}{2} k_0 a \sin \vartheta + 2i k_0 a (\epsilon\mu - 1) \beta\right) \right] \right\}, \quad (137)$$

где $k_0 = \omega/c$.

Интенсивность $I(\vartheta)$ рассеянного излучения в интервале углов $d\vartheta$ пропорциональна величине

$$I(\vartheta) = |E_p(\vartheta)|^2 R_0 d\vartheta. \quad (138)$$

Оценим характер углового распределения, полагая для простоты, что проводимость σ равна нулю. Как можно видеть из (137) и (138), угловое распределение имеет максимум при $\vartheta = 0$ (неотклоненная волна, описываемая членом с дельта-функцией в выражении (137)) и при

$$\vartheta_{\max} = 4 \frac{\Omega a}{c} \varepsilon \mu \left(1 - \frac{1}{\varepsilon \mu}\right). \quad (139)$$

Эта величина пропорциональна угловой скорости вращения и по порядку величины хорошо согласуется с оценкой (132). Учет проводимости приводит к тому, что с ростом проводимости максимум под углом ϑ_{\max} становится все меньше по величине и шире по углу и при $\sigma \rightarrow \infty$ исчезает.

Отклонение световой волны приводит к возникновению боковой силы, действующей на цилиндр. Величину этой силы на единицу длины цилиндра можно оценить следующим образом. Поток импульса электромагнитного поля, падающий на единицу длины цилиндра, равен

$$P_0 = \frac{2a}{4\pi c} E_0^2 = 2aI_0, \quad (140)$$

где I_0 — интенсивность падающей волны. При отклонении луча на угол ϑ_{\max} поток импульса приобретает боковую составляющую, равную по величине

$$\Delta P_0 = P_0 \vartheta_{\max}. \quad (141)$$

Последняя величина, где ϑ_{\max} определяется формулой (139), и дает величину отклоняющей силы F , действующей на единицу длины цилиндра. С учетом направления вращения, выражение для вектора \mathbf{F} записывается в виде

$$\mathbf{F} = - [\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{n}] \frac{8I_0 a^2}{c} (\varepsilon \mu - 1). \quad (142)$$

Здесь \mathbf{n} — вектор в направлении падающей волны.

Формула (141) показывает, что боковая сила, действующая на рассеивающее тело, возникает всегда, когда имеет место асимметричная индикатриса рассеяния. Для этого вращение тела совсем не обязательно. В качестве примера можно указать на отклонение света покоящейся треугольной призмой.

В заключение кратко сформулируем основные выводы, полученные в этом параграфе. Мы рассматривали взаимодействие электромагнитных волн с вращающимся цилиндром. Пусть на такой цилиндр, угловая скорость вращения которого равна Ω , падает электромагнитная волна частоты ω , причем зависимость поля падающей волны от азимутального угла φ выражается множителем $e^{im\varphi}$. Тогда, если выполнено неравенство $(\omega - kv) = (\omega - m\Omega) < < 0$, то волна при отражении усиливается. Если же выполняется противоположное неравенство, то волна отражается с ослаблением. Эффекты усиления или ослабления наблюдаются только при наличии проводимости. Получается так, что движение проводящей среды со скоростью, большей фазовой скорости волн в направлении движения, приводит к смене затухания этих волн их усилением. Это еще раз подчеркивает физическую неэквивалентность инерциальных систем при наличии среды.

Если на вращающийся цилиндр падает плоская волна, то имеет место лишь поглощение, обусловленное конечной проводимостью цилиндра. С точностью до членов, пропорциональных квадрату угловой скорости вращения цилиндра, суммарный баланс энергии с учетом всех угловых гармоник оказывается таким же, как и для покоящегося цилиндра.

Если проводимость цилиндра равна нулю, то рассеянная энергия в точности равна падающей, однако угловое распределение рассеянного поля оказывается несимметричным по отношению к направлению падающей волны. Максимум углового распределения смещается в направлении вращения цилиндра.

Усиление электромагнитных волн при отражении от движущейся среды может происходить и в отсутствие проводимости. Но для этого требуется, чтобы среда перемещалась со сверхсветовой скоростью. К рассмотрению этой задачи мы сейчас и переходим. При этом вопрос об усилении оказывается тесным образом связанным с неустойчивостью состояний с отрицательной энергией электромагнитных волн в движущихся средах.

4. Различные проявления состояний волн с отрицательной энергией в движущихся средах

Движущаяся среда, примером которой могут служить потоки плазмы или пучки заряженных частиц, является средой неравновесной, ибо в ней запасена определенная

кинетическая энергия поступательного движения. В силу такой неравновесности в потоковых системах могут возникать различного рода неустойчивости. Наиболее интересными среди них являются неустойчивости волн с отрицательной энергией [10, 11, 18, 19, 30—35], сопровождающиеся, как правило, их усилением. В настоящем разделе мы хотим отметить существенную роль состояний с отрицательной энергией в известном явлении обращения потерь энергии заряженных частиц в движущихся средах [17, 25] и в связанном с ним явлении усиления волн при их отражении от сверхсветового тангенциального разрыва скорости [12].

Если в лабораторной системе координат безграничная однородная среда перемещается с постоянной скоростью u , то плоская монохроматическая волна, имеющая в этой системе частоту ω и волновой вектор \mathbf{k} , в системе покоя среды имеет частоту $\omega' = \gamma(\omega - \mathbf{k}\mathbf{u})$, где $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, $u = c\beta$. Видно, что при сверхсветовой скорости перемещения среды, когда $\omega < (\mathbf{k}, \mathbf{u})$, энергия квантов в системе покоя становится отрицательной. Такой сверхсветовой среде энергетически выгоднее перейти в новое состояние с самопроизвольно испущенным квантом. Ситуация здесь аналогична явлению нарушения сверхтекучести гелия [10]. Однако при таком переходе должны быть еще выполнены законы сохранения энергии и импульса. В безграничной однородной движущейся среде такой процесс невозможен, ибо кванту возбуждения «некому отдать» свой импульс. Поэтому кванты с отрицательной энергией могут самопроизвольно испускаться в сверхсветовой среде только при наличии различных неоднородностей. Простейшим примером могут служить заряженные частицы или границы раздела. О них и пойдет ниже речь.

Будем рассматривать электромагнитные волны в движущейся среде без дисперсии и потерь, подчиняющиеся уравнению

$$L(\omega, \mathbf{k}) = \mathbf{k}^2 - \frac{\omega^2}{c^2} - \kappa\gamma^2 c^{-2} (\omega - \mathbf{k}\mathbf{u})^2 = 0, \quad (143)$$

где $\kappa = n_0^2 - 1$, а $n_0 = \sqrt{\epsilon\mu}$. Ленгмюровские колебания в таких диспергирующих средах рассмотрены в обзоре [18]. Пусть частица с зарядом q перемещается с постоянной скоростью v вдоль оси z , совпадающей с направлением движения среды. В этом случае потери ее энергии E_0 на излучение Вавилова — Черенкова (В.—Ч.) равны [26]

$$\frac{dE_0}{dz} = - \operatorname{sgn} \beta_{\text{отн}} \frac{q^2}{c^2} \int \mu \left(1 - \frac{1}{\varepsilon \mu \beta_{\text{отн}}^2} \right) \omega' d\omega', \quad (144)$$

причем интегрирование ведется по области частот, для которой

$$\varepsilon (\omega') \mu (\omega') \beta_{\text{отн}}^2 = n_0^2 (\omega') \beta_{\text{отн}}^2 > 1. \quad (145)$$

Здесь

$$v_{\text{отн}} = c\beta_{\text{отн}} = \frac{v - u}{1 - \frac{uv}{c^2}} \quad (146)$$

— скорость перемещения заряда относительно среды, а ω' — частота волны в системе покоя среды. Знаковая функция $\operatorname{sgn} \beta_{\text{отн}}$, равная $(+1)$ при $\beta_{\text{отн}} > 0$ и (-1) при $\beta_{\text{отн}} < 0$, показывает, что при $v > u$ частица тормозится, испуская кванты излучения В.—Ч., а при $v < u$ испускание таких квантов сопровождается ускорением частицы. В обоих случаях волна испускается под углом θ , определяемым известным условием: $\cos \theta = \frac{c}{vn(\theta)}$, где $n(\theta) = \frac{ck(\theta)}{\omega}$ — зависящий от угла θ показатель преломления для волн в движущейся среде, который можно найти из уравнения (143).

Напомним, что в выражении (146) для $v_{\text{отн}}$ скорость заряда v и скорость среды u положительны, если соответствующие векторы направлены в положительном направлении оси z . Если же, например, заряд движется в положительном направлении оси z , а среда движется навстречу заряду со скоростью $(-u)$, то выражение для $v_{\text{отн}}$ принимает вид

$$v_{\text{отн}} = \frac{v + u}{1 + \frac{vu}{c^2}}. \quad (147)$$

Это выражение положительно при любых абсолютных значениях u и v , и, следовательно, заряд в этом случае всегда теряет энергию на излучение, как видно из (144).

Явление ускорения частицы с одновременным испусканием квантов можно понять, если перейти к энергетическим соотношениям и принципам излучения в движущейся среде. Для волн (143) энергетические соотношения

имеют вид

$$S = W \mathbf{v}_g; \quad \mathbf{v}_g = \frac{c}{\Delta(\omega, \mathbf{k})} \left\{ \frac{c\mathbf{k}}{\omega} + \kappa\gamma^2\beta \left(1 - \frac{c}{\omega} \mathbf{k}\beta \right) \right\}; \quad (148)$$

$$W = \frac{\Delta(\omega, \mathbf{k})}{4\pi\mu} \{ \mathbf{E}^2 - \kappa\gamma^2 (\beta, \mathbf{E})^2 \}; \quad \Delta(\omega, \mathbf{k}) =$$

$$= 1 + \kappa\gamma^2 \left(1 - \frac{c}{\omega} \mathbf{k}\beta \right).$$

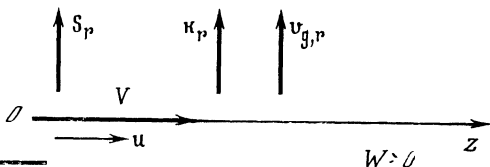
Здесь W и S — соответственно плотность энергии и поток энергии для волн с амплитудой E и групповой скоростью \mathbf{v}_g . Используя структуру полей в движущихся средах [6], можно показать, что последний множитель в выражении для W в нашем случае положителен, а величина $\left(\beta, \frac{c\mathbf{k}}{\omega} \right) = \frac{u}{v}$. Тогда множитель $\Delta = \left\{ 1 + \kappa\gamma^2 \left(1 - \frac{u}{v} \right) \right\}$ определяет знак плотности энергии W излучаемых волн. Если среда обгоняет заряд ($u > v$) и выполнено условие (145), то величина Δ , а вместе с ней и W , становится отрицательной. В этих условиях заряженная частица ускоряется одновременно с испусканием волн излучения В.—Ч. Этот процесс аналогичен явлению возбуждения сверхсветового осциллятора при испускании им аномальных доплеровских частот [21]. В обоих случаях энергия черпается из кинетической энергии поступательного движения.

В равновесных средах энергия W положительна и всегда отводится от источника в направлении групповой скорости \mathbf{v}_g . Именно такие решения выбираются в средах, где фазовая и групповая скорости могут иметь разные знаки [6]. В движущихся средах аналогичному правилу отбора, соответствующему принципу причинности, удовлетворяют только те волны, у которых проекция групповой скорости на направление отвода энергии положительна [6]. Проекция потока энергии при этом может иметь любой знак. При равномерном движении заряда вдоль оси z энергия излучения В.—Ч. отводится в радиальном направлении, перпендикулярном направлению скорости движения заряда \mathbf{v} и среды \mathbf{u} ($\mathbf{v} \parallel \mathbf{u}$). Следовательно, радиальная компонента $v_{g,r}$ групповой скорости излучаемых волн в (148)

$$v_{g,r} = \frac{c}{\Delta} \frac{ck_r}{\omega} \quad (149)$$

должна быть всегда положительной: $v_{g,r} > 0$. Поэтому там, где $\Delta > 0$, положительными будут компонента k_r и плотность энергии W . Излучение отводится от заряда расходящимися волнами, так как $S_r = Wv_{g,r} > 0$. Если же $\Delta < 0$, то из положительности величины $v_{g,r}$ в (149) следует, что компонента k_r отрицательна. Это значит, что излучаются сходящиеся волны с отрицательной плотностью энергии, у которых поток энергии направлен

$$a \quad \frac{v-u}{c(1-\frac{vu}{c^2})} > \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu}}$$



$$b \quad \frac{u-v}{c(1-\frac{uv}{c^2})} > \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu}}$$

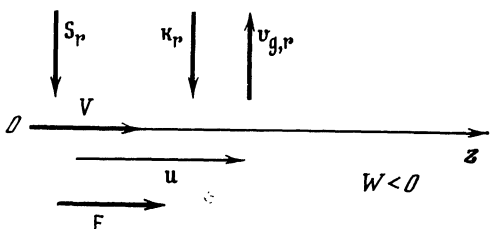


Рис. 5

к заряженной частице: $S_r = Wv_{g,r} < 0$. Пакет волн, уходя от источника, ускоряет заряд за счет «притока» энергии к нему от волн с отрицательной плотностью энергии W . Конечно, амплитуды этих волн в среде с потерями затухают по мере удаления от источника [6].

Полученные результаты можно свести воедино с помощью рис. 5. На рис. 5 изображено относительное расположение волнового вектора \mathbf{k} , вектора групповой скорости \mathbf{v}_g и вектора потока излучаемой энергии \mathbf{S} . Предполагается, что заряженная частица движется со скоростью v в преломляющей среде, скорость движения которой равна u . Обе скорости — и скорость заряда и скорость среды — считаются параллельными и направленными вдоль оси z . На рисунке показано направление только радиальных составляющих векторов \mathbf{k} , \mathbf{v}_g и \mathbf{S} — соответственно

k_r , $v_{g,r}$ и S_r . Эти величины позволяют сказать, является ли излучаемая волна сходящейся или расходящейся, а также подводит ли волна энергию к заряду или энергия отводится от заряда. Излучение равномерно движущегося заряда в движущейся среде имеет место при выполнении неравенства (145), которое мы запишем следующим образом:

$$\frac{1}{c} \left| \frac{v-u}{1-\frac{uv}{c^2}} \right| > \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}. \quad (150)$$

Предположим для определенности, что скорость заряда v положительна. Если скорость среды u отрицательна, т. е. если среда движется навстречу заряду, то величина $\beta_{\text{отн}}$ всегда положительна и, как видно из (144), всегда имеют место только потери энергии заряда — заряд тормозится. Если же скорость среды u положительна (среда движется в ту же сторону, что и заряд), то величина $\beta_{\text{отн}}$, стоящая под знаком модуля в последнем неравенстве, может быть как положительной, так и отрицательной. Именно случай, когда скорости заряда и среды направлены в одну сторону, мы ниже и рассмотрим.

Пусть $u > 0$, $v > 0$. Тогда неравенство (150) может выполняться в двух случаях.

1. Среда отстает от заряда. В этом случае скорость заряда v для выполнения неравенства (145) должна быть больше, чем фазовая скорость света $c/\sqrt{\epsilon\mu}$.

2. Среда обгоняет заряд. В этом случае для выполнения неравенства (145) скорость среды u должна быть больше чем $c/\sqrt{\epsilon\mu}$.

В первом случае заряд обгоняет среду, теряет энергию на излучение и при этом тормозится. Во втором случае среда, двигаясь со сверхсветовой скоростью, обгоняет заряд. При этом на заряд действует ускоряющая сила. Рис. 5, а и 5, б иллюстрируют эти два случая. На рис. 5, а изображен случай, когда заряд обгоняет среду, так что при этом выполняется условие излучения Вавилова — Черенкова (150). Как видно из рисунка, в этом случае фазовая скорость излучаемых волн, их групповая скорость и поток излучаемой энергии направлены от траектории заряда. Сила F , действующая на заряд со стороны поля, направлена против скорости заряда.

На рис. 5, б изображен случай, когда среда, двигаясь со сверхсветовой скоростью, обгоняет заряд, так что при этом выполняется условие (150). В этом случае групповая

скорость направлена от траектории заряда, фазовая скорость и поток энергии направлены к траектории. Плотность энергии излучаемых волн в этом случае отрицательна. Сила \mathbf{F} , действующая на заряд со стороны его собственного поля, направлена так же, как и скорость \mathbf{v} , т. е. заряд ускоряется.

Эти результаты позволяют понять и наглядно представить еще одно интересное проявление состояний волн

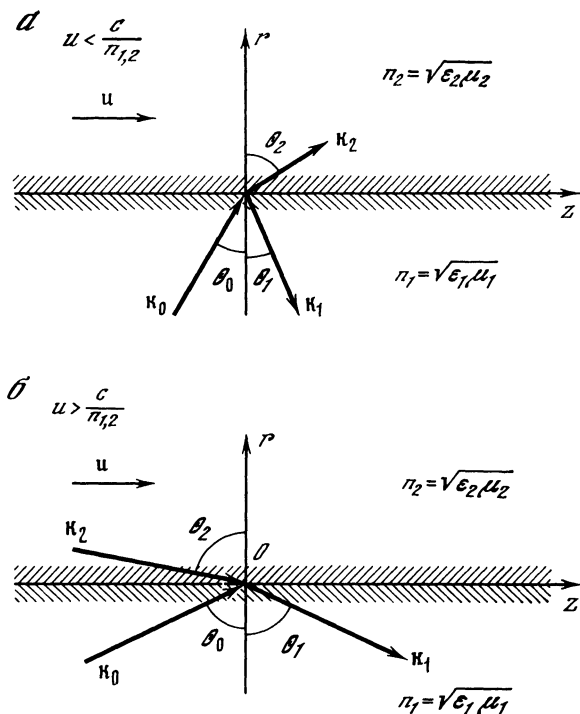


Рис. 6

с отрицательной энергией в движущихся средах. Речь пойдет об усилении волн при отражении от сверхсветового тангенциального разрыва покоящейся и движущейся сред. Пусть волна частоты ω падает в плоскости (z, r) из покоящейся среды с показателем преломления n_1 , расположенной в области $r < 0$, под углом θ_0 к оси r (рис. 6). Среда позади поверхности раздела в области $r > 0$ перемещается вдоль оси z со скоростью u и имеет показатель преломления в системе ее покоя, равный n_2 . Отражение и преломление волн на такой границе раздела проис-

ходит точно так же, как и на границе раздела покоящихся сред [26, 27]. Для волн с электрическим вектором, перпендикулярным плоскости падения, коэффициенты отражения R и прохождения T по мощности имеют вид [27]

$$R = \left| \frac{k_{0r} - k_{2r}}{k_{0r} + k_{2r}} \right|^2; \quad T = \frac{4 |k_{0r}| |k_{2r}|}{|k_{0r} + k_{2r}|^2}, \quad (151)$$

где $k_{0r} = \frac{\omega}{c} n_1 \cos \theta_0$; $k_{0z} = k_{1z} = k_{2z} = \frac{\omega}{c} n_1 \sin \theta_0$, а компонента k_{2r} преломленной волны определяется из (143)

$$k_{2r} = \pm \frac{\omega}{c} \{ (n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_0) - \beta (n_2^2 - 1) \gamma^2 \times \\ \times [2n_1 \sin \theta_0 - \beta (1 + n_1^2 \sin^2 \theta_0)]^{1/2} \}. \quad (152)$$

В этих формулах определено все, кроме знака перед корнем для k_{2r} . Для выбора правильного знака используем то обстоятельство, что отражение и преломление волн можно рассматривать как излучение В.—Ч. от источника — «зайчика» [28], движущегося вдоль границы раздела (вдоль оси z) со скоростью

$$v_3 = \frac{\omega}{k_{0z}} = \frac{c}{n_1 \sin \theta_0}, \quad (153)$$

равной скорости, с которой перемещается по поверхности раздела точка пересечения фазового фронта падающей волны. Тогда преломленная волна является волной излучения В.—Ч. от этого источника в движущуюся среду, и к ней мы можем применить все полученные выше формулы, заменив в них « v » на v_3 и n на n_2 . Отсюда сразу следует, что, когда скорость «зайчика» больше скорости перемещения среды, излучение (преломленные волны) отводится от этого источника в движущуюся среду уходящими от границы раздела волнами с $k_{2r} > 0$ (см. рис. 6, а). В этом случае коэффициент отражения в (151) $R \leq 1$, ибо часть энергии падающей волны уходит в движущуюся среду: $S_{2r} = W_2 v_{2g,r} > 0$. Если же среда обгоняет «зайчик», то из-за отрицательности плотности энергии W и величины Δ в (148) и (149) в качестве преломленных волн нужно брать приходящие к границе раздела волны с $k_{2r} < 0$ (см. рис. 6, б), удовлетворяющие условию (145). В этом случае коэффициент отражения R в (151) будет всегда больше единицы, ибо поток энергии прелом-

ленных волн S_{2r} отрицателен и направлен к границе раздела. Отраженная волна усиливается в конечном итоге за счет энергии поступательного движения среды.

Подробный анализ формул (151) показывает, что такое усиление имеет место только при сверхсветовом движении среды, когда $u > c/n_{1,2}$. При этом в интервале углов падения $0 \leq \theta_0 \leq \theta_{01}$, где $\sin \theta_{01} = (n_2 + \beta)/n_1 (1 + \beta n_2)$, $R \leq 1$, ибо «зайчик» обгоняет среду. В интервале $\theta_{01} \leq \theta_0 \leq \theta_{02}$, где $\sin \theta_{02} = (n_2 - \beta)/n_1 (\beta n_2 - 1)$, условие излучения (145) не выполняется, и мы имеем полное внутреннее отражение. При $\frac{\pi}{2} \geq \theta_0 \geq \theta_{02}$ условие излучения опять становится выполнимым, но поскольку среда обгоняет «зайчик» ($u > v_3$), то $R \geq 1$ и происходит усиление отраженного сигнала. В этом же интервале углов при $\theta_0 = \theta_{0\infty}$, где

$$\sin \theta_{0\infty} = \frac{\sqrt{n_2^2 - 1} - \sqrt{n_1^2 - 1} \sqrt{1 - \beta^2}}{\beta n_1 \sqrt{n_2^2 - 1}}, \quad R = T = \infty. \quad (154)$$

Последнее означает, что отраженная и преломленная волны могут существовать даже в отсутствие падающей волны: происходит аналогичный [11] самопроизвольный «развал» состояния с отрицательной плотностью энергии на два черенковских кванта с одинаковыми волновыми векторами $\mathbf{k}_1 = \mathbf{k}_2$. Для случая $n_1 = n_2$ аналогичные результаты получены в [12]. Нормальные к границе раздела потоки энергии S_{jr} , где индексы $j = 0, 1$ и 2 относятся к падающей, отраженной и преломленной волнам, соответственно удовлетворяют следующим законам сохранения: $|S_{0r}| = |S_{1r}| + |S_{2r}|$ для досветовой среды, когда $u < c/n_{1,2}$ и $R \leq 1$, и $|S_{0r}| = |S_{1r}| - |S_{2r}|$ для сверхсветовой среды, когда $u > c/n_{1,2}$ и $R \geq 1$. В последнем случае, как и в аномальном эффекте Доплера [21], имеет место рождение новых квантов, ибо их число N_j удовлетворяет соотношению $N_2 = N_0 + N_1$.

Отражение и преломление волн на границе с тангенциальным сверхсветовым разрывом скорости может быть проиллюстрировано с помощью рисунков, подобных 5, а и 5, б. При этом под u следует понимать скорость перемещения среды с показателем преломления $n_2 = \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}$ (среда с показателем преломления n_1 покоится). Тогда за величину v следует принять проекцию фазовой скорости

падающей волны на плоскость границы раздела:

$$v = \frac{\omega}{k_{0z}} = \frac{c}{n_1 \sin \theta_0}, \quad (155)$$

где θ_0 — угол падения (см. рис. 6). Относительное расположение векторов фазовой и групповой скоростей и потока энергии в прошедшей волне оказывается таким же, как и в случае движения заряда.

Отметим, что неустойчивость состояний с отрицательной энергией теснейшим образом связана с критерием нарастания волн во времени. Если в среде с малыми потерями распространяются волны с заданным волновым вектором \mathbf{k} , то частоты этих волн комплексны $\omega = \omega(\mathbf{k}) + i\gamma(\mathbf{k})$ и определяются из дисперсионного уравнения $L(\omega, \mathbf{k}) = 0$. Мнимая часть частоты в этом случае равна [29]

$$\gamma(\mathbf{k}) = - \frac{\text{Im } L(\omega, \mathbf{k})}{\frac{\partial}{\partial \omega} \{\text{Re } L(\omega, \mathbf{k})\}}, \quad (156)$$

где величина $\text{Im } L(\omega, \mathbf{k})$ пропорциональна потерям в среде. Величина $\frac{\partial}{\partial \omega} \{\text{Re } L(\omega, \mathbf{k})\}$ в большинстве потоковых систем пропорциональна плотности энергии соответствующих волн, что следует из формул (143) и (148), а для ленгмюровских колебаний это видно из формул, приведенных в [18]. Поэтому возможные области усиления волн и ускорения частиц можно определять только по знаку величины $\frac{\partial}{\partial \omega} (\text{Re } L)$.

В заключение еще раз подчеркнем, что движение среды с постоянной скоростью может приводить к усилению и даже генерации различного типа электромагнитных волн. В этом смысле инерциальные системы отсчета при наличии среды не являются физически эквивалентными, хотя уравнения электромагнитного поля в них могут быть записаны в ковариантной форме. Все эти особенности могут проявляться и для волн другой природы, например для акустических волн в потоках газа и жидкости, гравитационных волн на поверхности воды и т. д. Это следует иметь в виду при изучении волновых явлений в различных потоковых системах.

Литература

1. *Эйнштейн А.* Собр. науч. трудов, т. 1. М.: Наука, 1965, с. 7.
2. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. М.: Наука, 1973.
3. *Паули В.* Теория относительности. М.; Л.: Гостехиздат, 1947.
4. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1957.
5. *Мёллер К.* Теория относительности. М.: Атомиздат, 1975.
6. *Болотовский Б. М., Столяров С. Н.* Эйнштейновский сборник, 1974. М.: Наука, 1976, с. 179.
7. *Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973.
8. *Силин В. П., Рухадзе А. А.* Электромагнитные свойства плазмы и плазмоподобных сред. М.: Госатомиздат, 1961.
9. *Ахиезер А. И., Ахиезер И. А., Половин Р. В.* и др. Электродинамика плазмы/Под ред. А. И. Ахиезера. М.: Наука, 1974.
10. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Статистическая физика. М.: Наука, 1964.
11. *Кадомцев Б. Б., Михайловский А. Б., Тимофеев А. В.*— ЖЭТФ, 1964, 47, вып. 6(12), с. 2266.
12. *Лупанов Г. А.*— Изв. вузов. Радиофизика, 1975, 18, № 11, с. 1711.
13. *Зельдович Я. Б.*— Письма в ЖЭТФ, 1971, 14, с. 270.
14. *Зельдович Я. Б.*— ЖЭТФ, 1972, 62, с. 2076.
15. *Зельдович Я. Б., Старобинский А. А.* Вопросы математической физики: Сборник к 75-летию Г. А. Гринберга. Л.: Наука, 1976.
16. *Угаров В. А.* Специальная теория относительности. М.: Наука, 1977.
17. *Тамм И. Е.* Сборник научных трудов, т. 1. М.: Наука, 1975.
18. *Незлин М. В.*— УФН, 1976, 120, вып. 3, с. 481—495.
19. *Кадомцев Б. Б.* Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1976.
20. *Vladel J. van.*— Proc. IEEE, 1976, 64, N 3, p. 301—318. Рус. пер. ТИИЭР, 1976, 64, № 3, с. 14—33.
21. *Гинзбург В. Л.* Теоретическая физика и астрофизика. М.: Наука, 1975.
22. *Болотовский Б. М., Столяров С. Н.*— ЖЭТФ, 1976, 71, вып. 3(9), с. 1003.
23. *Градштейн И. С., Рыжик И. М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Наука, 1971.
24. *Болотовский Б. М., Столяров С. Н.*— Письма в ЖЭТФ, 1977, 25, вып. 3, с. 148.
25. *Векслер В. И.*— Атомная энергия, 1957, 2, вып. 5, с. 427.
26. *Столяров С. Н.* Некоторые вопросы электродинамики движущихся сред. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., ФИАН СССР, 1963.
27. *Столяров С. Н.*— Изв. АН АрмССР. Физика, 1975, 10, вып. 1, с. 22.
28. *Болотовский Б. М., Гинзбург В. Л.*— Эйнштейновский сборник, 1972. М.: Наука, с. 212; УФН, 1972, 106, вып. 4, с. 577.

29. Гинзбург В. Л., Рухадзе А. А. Волны в магнитоактивной плазме. М.: Наука, 1970.
30. Пикулин В. Д., Степанов Н. С.— ЖТФ, 1975, 45, № 11, с. 2288.
31. Пикулин В. Д., Степанов Н. С.— Изв. вузов. Радиофизика, 1976, 19, № 10, с. 1564.
32. Гавриленко В. Г., Зелексон Л. А.— Изв. вузов. Радиофизика, 1977, 20, № 7, с. 982.
33. Пикулин В. Д., Степанов Н. С.— ЖТФ, 1978, 48, № 4, с. 648.
34. Зелексон Л. А., Степанов Н. С.— Изв. вузов. Радиофизика, 1979, 22, № 9, с. 1070.
35. Гавриленко В. Г., Зелексон Л. А., Пикулин В. Д.— Физика плазмы, 1979, 5, вып. 4, с. 849.

Ф. Нетер¹

К ВОПРОСУ О КИНЕМАТИКЕ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО ТЕЛА В ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ *

1. Дифференциальные условия Борна и поступательное движение абсолютно твердого тела

В ньютоновской механике понятие абсолютно твердого тела базируется на том основном принципе, что одновременность двух событий есть свойство, которое не нарушается при равномерном поступательном движении системы отсчета, и в соответствии с этим тело рассматривается как абсолютно твердое, если одновременно измеренные расстояния между любыми парами точек не меняются во времени. Однако это требование неприменимо к теории относительности, обоснованной Лоренцем, Эйнштейном и Минковским в связи с развитием электродинамики. В этой теории постулируется инвариантность законов природы по отношению к тем линейным преобразованиям пространственных и временных координат, которые оставляют неизменной скорость света в вакууме (преобразования Лоренца).

Поэтому Борн² сделал попытку дать новое определение понятию движения тела, рассматриваемого как абсолютно твердое, удовлетворяющее требованию инвариантности относительно преобразований Лоренца. Как известно, с точки зрения теории относительности смысл имеет только такой «образ» (равномерно движущегося) тела, каким он нам представляется при наблюдении из системы координат, неподвижной относительно этого тела, т. е.

¹ Настоящее исследование выполнено мною независимо от Герлотца на аналогичную тему (Ann. Physik, 1910, 31, S. 393), о публикации которого я узнал к моменту окончания работы над рукописью этой статьи.

* Noether F. Zur Kinematik des starren Körpers in der Relativtheorie.— Ann. Physik, 1910, 31, S. 919—944/Пер. Л. З. Позниовского.

² Born M.— Ann. Physik, 1909, 30, S. 1; Phys. Z., 1909, 10, S. 814.

«покоящийся образ» тела. При наблюдении же из другой системы отсчета эта форма зависит от движения тела относительно данной системы отсчета. Соответственно при квазистационарном движении форма тела, наблюдаемая из неподвижной системы отсчета, должна изменяться в зависимости от мгновенной скорости. Таким образом, борновское определение распространяет понятие теории относительности на ускоренные движения, так что оно позволяет рассматривать любое тело как абсолютно твердое, если при наблюдении из неподвижной системы отсчета независимо от ускорения тела деформированное состояние каждого элемента его объема соответствует мгновенной скорости. Формулируя точнее, можно сказать: при движении абсолютно твердого тела «покоящийся образ» бесконечно малой окрестности, взятой около любой точки тела, должен оставаться неизменным в течение конечного отрезка времени.

Это определение прежде всего приспособлено для поступательного движения, поскольку принцип относительности позволяет сделать некоторое заключение только по поводу квазистационарных *перемещений*, а определение требует включения сюда ускоренных движений. Для случая прямолинейного поступательного движения, когда, следовательно, все мировые линии идут параллельно неподвижной поверхности в x, y, z, t -пространстве, Борн проинтегрировал записанное в дифференциальной форме условие абсолютной твердости и пришел к такой формулировке, которую можно считать окончательным определением условия абсолютной твердости для прямолинейного поступательного движения³.

Движение системы точек абсолютно твердого тела является прямолинейным поступательным в том случае, когда состояние покоя одной из точек тела означает одновременно состояние покоя всех других точек в движущейся вместе с телом лоренцевой системе координат. «Образ» покоящегося тела, измеренный в такой системе, остается неизменным в течение длительного времени. Очевидно, что в этой формулировке определение абсолютной твердости дословно совпадает с определением, даваемым в старой кинематике, и так же, как и там, движение имеет то свойство, что, задавая движение одной точки, мы опреде-

³ Ibid., S. 24.

ляем движение всего тела. Следовательно, общее представление содержит *единственную* произвольную функцию.

Эта формулировка, очевидно, может быть непосредственно перенесена на случай, когда задано любое *криволинейное движение* одной из точек системы: *движение является поступательным движением абсолютно твердого тела, когда преобразование Лоренца, переводящее одну из его точек в состояние покоя, одновременно переводит в состояние покоя все точки тела.*

Картину мировых линий этого движения можно описать следующим образом: мировые линии образуют ортогональные траектории ⁴ *простой бесконечной системы линейных пространств*, а именно x' , y' , z' -пространств следующих друг за другом покоящихся координатных систем, соответствующих каждому моменту движения. Такая картина полностью определена заданием одной из мировых линий и, следовательно, в общем случае пространственное движение, как и поступательное движение в ньютоновской кинематике, содержит три произвольные функции, а пространства одинаковых направлений мировой линии и есть указанные выше x' , y' , z' -пространства следующих друг за другом покоящихся систем. Покоящийся образ тела, т. е. «образ» *тела*, измеренный в данной системе отсчета, также остается неизменным. Так как мировые линии в этих пространствах ортогональны, то движение в данный момент можно рассматривать как бесконечно малое *вращение вокруг линии пересечения двух соседних пространств*, причем под вращением, естественно, понимается такое линейное преобразование x, y, z, t -пространства, которое оставляет неизменным расстояние между двумя точками в четырехмерном пространстве, т. е. величину

$$r_{12}^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 - c^2 (t_1 - t_2)^2.$$

Однако при таком вращении первое пространство конгруэнтно переводится в соседнее. В этом случае «покоящийся образ» остается неизменным. Из специального рассмотрения следует, что определенные таким образом перемещения удовлетворяют условию Борна, требующему инва-

⁴ Согласно Минковскому мы в дальнейшем будем считать «ортогональными» такие два вектора, для которых соблюдается условие

$$x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2 - c^2t_1t_2 = 0.$$

риантности бесконечно малых частей формы покоящегося тела.

Таким образом, оказывается, что перемещения, удовлетворяющие дифференциальным условиям, могут быть весьма простым образом выражены через граничные условия. Ответ на вопрос о наиболее общих решениях дифференциальных условий, который Борн оставил пока открытым, т. е. о решениях, охватывающих перемещения и повороты, внесет существенный вклад в установление области применимости дифференциальной формулировки. В дальнейшем я покажу, что описанные выше *перемещения и представляют собой наиболее общие искомые решения, за исключением случая равномерного вращения, которое следует рассматривать как особое решение*. Какие-либо вращения с ускорением, или вращения вокруг точек, движущихся с ускорением, несовместимы с условием Борна.

2. Эйлеровская форма дифференциальных уравнений для условия Борна

Движение абсолютно твердого тела можно представить себе как течение в x, y, z, t -пространстве, и в соответствии с задачами гидромеханики оно может быть описано системой дифференциальных уравнений в форме Лагранжа или Эйлера. Борн выбрал первую форму. Однако при этом он пришел к сложной системе уравнений. Поэтому в рассмотренном выше случае прямолинейного поступательного движения он с помощью преобразований перешел к эйлеровской форме. В дальнейшем я буду исходить из эйлеровской формы дифференциальных уравнений, т. е. искать вектор скорости как функцию единичных векторов в x, y, z, t -пространстве.

Координаты x, y, z, t относятся к каким-либо образом выбранной «покоящейся» системе; пусть τ — «собственное время», отсчитанное от произвольного начального момента на каждой мировой линии. Пусть вектор скорости в обозначении Борна имеет координаты

$$x_\tau = \frac{\partial x}{\partial \tau}, \quad y_\tau = \frac{\partial y}{\partial \tau}, \quad z_\tau = \frac{\partial z}{\partial \tau}, \quad t_\tau = \frac{\partial t}{\partial \tau},$$

так что соблюдается тождество

$$x_\tau^2 + y_\tau^2 + z_\tau^2 - c^2 t_\tau^2 = -c^2. \quad (1)$$

Пусть далее

$$x_{\tau\tau} = \frac{\partial^2 x}{\partial \tau^2}, \quad y_{\tau\tau} = \frac{\partial^2 y}{\partial \tau^2}, \quad z_{\tau\tau} = \frac{\partial^2 z}{\partial \tau^2}, \quad t_{\tau\tau} = \frac{\partial^2 t}{\partial \tau^2}.$$

Пусть на произвольно выбранной мировой линии I в покоящейся системе координаты точки будут

$$\xi, \eta, \zeta, t,$$

и пусть в произвольно заданном направлении r на расстоянии dr от нее находится точка

$$x, y, z, t.$$

Пусть к моменту собственного времени τ_0 мировой линии I нормальное пространство, проходящее через ξ, η, ζ, t , вырезает на мировой линии II точку с координатами x_1, y_1, z_1, t_1 , с собственным временем $d\tau_1$, отсчитанным от точки (x, y, z, t) . Пусть соответственно к моменту собственного времени $\tau_0 + d\tau_0$ нормальное пространство, проходящее через точку с координатами $\xi_2, \eta_2, \zeta_2, t_2$ на мировой линии I, вырезает на мировой линии II точку с координатами x_2, y_2, z_2, t_2 , с собственным временем $d\tau_2$, отсчитанным от точки с координатами x, y, z, t . Пусть разность собственного времени на мировой линии II

$$d\tau = d\tau_2 - d\tau_1.$$

Теперь следует сделать подстановку:

$$\begin{aligned} x_1 &= x + x_\tau d\tau_1 + \frac{1}{2} x_{\tau\tau} d\tau_1^2 \dots, \\ x_2 &= x + x_\tau d\tau_2 + \frac{1}{2} x_{\tau\tau} d\tau_2^2 \dots, \\ \xi_2 &= \xi + \xi_\tau d\tau_0 + \frac{1}{2} \xi_{\tau\tau} d\tau_0^2 \dots, \end{aligned} \quad (2)$$

далее

$$\xi_\tau = x_\tau - \frac{\partial x_\tau}{\partial r} dr \dots$$

и соответственно для остальных трех координат.

Собственное время $d\tau_1$ определено из условия, что точка с координатами x_1, y_1, z_1, t_1 в нормальном пространстве должна совпадать с точкой ξ, η, ζ, t , так что

$$(x_1 - \xi) \xi_\tau + (y_1 - \eta) \eta_\tau + (z_1 - \zeta) \zeta_\tau - c^2 (t_1 - t) t_\tau = 0.$$

Используя равенство (2) и тождества (1) и пренебрегая

квадратами $d\tau_1$ и dr , получим отсюда

$$c^2 d\tau_1 = (x - \xi) \xi_\tau + (y - \eta) \eta_\tau + (z - \zeta) \zeta_\tau - c^2 (t - \mathfrak{t}) \mathfrak{t}_\tau. \quad (3)$$

Следовательно, $d\tau_1$ имеет тот же порядок величины, что и dr (см. (3а), с. 137).

Нам нет необходимости рассчитывать аналогичным образом величину интервала собственного времени $d\tau_2$, достаточно будет знать, что, во всяком случае, разность

$$d\tau - d\tau_0 = d\tau_2 - d\tau_1 - d\tau_0$$

стремится к 0 при $dr \rightarrow 0$ и $d\tau_0 \rightarrow 0$, следовательно, по порядку величины разность должна быть равна

$$dr \cdot d\tau_0.$$

Таким образом, дифференциальное условие абсолютной твердости заключается в том, что

$$\begin{aligned} (x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \zeta)^2 - c^2 (t_1 - \mathfrak{t})^2 = \\ = (x_2 - \xi_2)^2 + (y_2 - \eta_2)^2 + (z_2 - \zeta_2)^2 - c^2 (t_2 - \mathfrak{t}_2)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Если в это равенство подставить выражения (2), то получим

$$\begin{aligned} \Sigma \left(x + x_\tau d\tau_1 + \frac{1}{2} x_{\tau\tau} d\tau_1^2 \dots - \xi \right)^2 = \Sigma \left(x + x_\tau d\tau_2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} x_{\tau\tau} d\tau_2^2 \dots - \xi - \xi_\tau d\tau_0 - \frac{1}{2} \xi_{\tau\tau} d\tau_0^2 \dots \right)^2. \end{aligned} \quad (4a)$$

Знаки Σ относятся к комбинации

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2.$$

С учетом тождества (1) из (4а) следует

$$\begin{aligned} 2\Sigma (x - \xi) x_\tau d\tau - 2\Sigma (x - \xi) \xi_\tau d\tau_0 + \\ + c^2 (d\tau_1^2 - d\tau_2^2 - d\tau_0^2) - 2\Sigma x_\tau \xi_\tau d\tau_2 d\tau_0 + \\ + \Sigma (x - \xi) x_{\tau\tau} (d\tau_2^2 - d\tau_1^2) - \Sigma (x - \xi) \xi_{\tau\tau} d\tau_0^2 = 0. \end{aligned} \quad (4б)$$

Теперь следует определить компоненты r_1, r_2, r_3, r_4 вектора направления r :

$$(x - \xi)/dr, (y - \eta)/dr, (z - \zeta)/dr, (t - \mathfrak{t})/dr,$$

компоненты вектора скорости $x_\tau, y_\tau, z_\tau, \mathfrak{t}_\tau$ в точке $x, y, z,$

t в направлении r :

$$r_\tau = r_1 x_\tau + r_2 y_\tau + r_3 z_\tau - c^2 r_4 t_\tau$$

и компоненты вектора скорости $\xi_\tau, \eta_\tau, \zeta_\tau, t_\tau$ в точке ξ, η, ζ, t :

$$\mathbf{r}_\tau = r_1 \xi_\tau + r_2 \eta_\tau + r_3 \zeta_\tau - c^2 r_4 t_\tau.$$

Пусть соответственно компоненты вектора ускорения в заданном направлении r будут

$$r_{\tau\tau} = dr/d\tau = r_1 x_{\tau\tau} + r_2 y_{\tau\tau} + r_3 z_{\tau\tau} - c^2 r_4 t_{\tau\tau},$$

$$\mathbf{r}_{\tau\tau} = d\mathbf{r}/d\tau = r_1 \xi_{\tau\tau} + r_2 \eta_{\tau\tau} + r_3 \zeta_{\tau\tau} - c^2 r_4 t_{\tau\tau},$$

так что уравнение (4б) переходит в следующее:

$$2(r_\tau d\tau - \mathbf{r}_\tau d\tau_0) + r_{\tau\tau}(d\tau_2^2 - d\tau_1^2) - \mathbf{r}_{\tau\tau} d\tau_0^2 + \frac{c^2(d\tau_1^2 - d\tau_2^2 - d\tau_0^2 + 2d\tau^2 d\tau_0)}{dr} = 0. \quad (5)$$

При этом следует еще учесть, что согласно (1)

$$x_\tau \frac{\partial x_\tau}{\partial r} + y_\tau \frac{\partial y_\tau}{\partial r} + z_\tau \frac{\partial z_\tau}{\partial r} - c^2 t_\tau \frac{\partial t_\tau}{\partial r} = 0.$$

В уравнении (5) можно заменить $d\tau_2$ на $d\tau + d\tau_1$. Если рассматривать dr и $d\tau_0$ как независимые друг от друга величины первого порядка малости, то в отношении порядка величины выступающих здесь дифференциалов справедливо следующее утверждение: $d\tau_1$ на основании (3) имеет тот же порядок величины, что и dr , а именно: выражение (3) в принятой нами форме записи будет иметь вид

$$c^2 d\tau_1 = \mathbf{r}_\tau dr. \quad (3a)$$

Как уже было отмечено, разность $d\tau - d\tau_0$ имеет порядок величины $dr \cdot d\tau_0$. Учитывая это и оставляя в уравнении (5) только члены порядка $dr \cdot d\tau_0$, получим из уравнения (5)

$$r_\tau d\tau - \mathbf{r}_\tau d\tau_0 + r_{\tau\tau} d\tau d\tau_1 - c^2 \frac{d\tau}{dr} (d\tau - d\tau_0) = 0. \quad (6)$$

С учетом (3a) можно (6) записать в виде

$$(r_\tau - \mathbf{r}_\tau) d\tau + \mathbf{r}_\tau (d\tau - d\tau_0) + r_{\tau\tau} r_\tau d\tau \frac{dr}{c^2} - \mathbf{r}_\tau (d\tau - d\tau_0) = 0.$$

Итак, переходя к пределу при $dr = 0$, $d\tau = 0$, получим окончательно

$$c^2 \frac{\partial r_\tau}{\partial r} + r_\tau r_{\tau\tau} = 0. \quad (7)$$

При этом выводе мы приняли в качестве r произвольное направление в четырехмерном пространстве. Следовательно, соотношение (7) представляет собой векторное выражение искомым дифференциальных условий в форме Эйлера.

Из системы дифференциальных уравнений (7) сразу может быть получено важное интегральное свойство. А именно, если речь идет об области регулярного движения, то $r_{\tau\tau}$ -компонента ускорения в заданном направлении r всюду конечная аналитическая функция. Но из (7) следует, что при $r_\tau = 0$ $\partial r_\tau / \partial r = 0$. И далее, беря уравнение, имеющее ту же форму, что и (7):

$$\frac{\partial r_\tau}{\partial r} + r_\tau f = 0,$$

где f обозначает конечную аналитическую функцию, можно путем разложения в степенной ряд строго вывести, что функция $r_\tau = 0$ при любом значении r , если она в произвольной точке равна в конце концов нулю. Поскольку r_τ — это компонента вектора скорости в направлении r , то отсюда следует закон: *прямая линия, перпендикулярная какой-либо мировой линии в какой-либо точке, должна быть перпендикулярна всем остальным мировым линиям.*

3. Многообразие форм дифференциальных условий

В дальнейшем ради симметрии следует ввести координату

$$l = ict$$

и элемент длины

$$ds = icd\tau = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2 + dt^2},$$

так что система уравнений (7) примет форму

$$\frac{\partial r_s}{\partial r} - r_s r_{s3} = 0. \quad (8)$$

При этом в соответствии с введенными выше обозначениями

$$r_s = \frac{\partial r}{\partial s}, \quad r_{ss} = \frac{\partial^2 r}{\partial s^2},$$

а из (1) вытекает

$$x_s^2 + y_s^2 + z_s^2 + l_s^2 = 1. \quad (1a)$$

а) Прямолинейное движение. В случае только двух координат x, l уравнение (8) будет справедливо для любого направления r , если оно справедливо хотя бы для одного направления. В то же время оно идентично условию несжимаемости

$$\frac{\partial x_s}{\partial x} + \frac{\partial l_s}{\partial l} = 0.$$

Поскольку теперь вследствие условия $x_s^2 + l_s^2 = 1$

$$x_s \frac{\partial x_s}{\partial x} + l_s \frac{\partial l_s}{\partial x} = 0, \quad x_s \frac{\partial x_s}{\partial l} + l_s \frac{\partial l_s}{\partial l} = 0,$$

и далее по определению

$$x_{ss} = x_s \frac{\partial x_s}{\partial x} + l_s \frac{\partial x_s}{\partial l}.$$

Итак:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_s}{\partial x} - x_s x_{ss} &= \frac{\partial x_s}{\partial x} - x_s \left(x_s \frac{\partial x_s}{\partial x} + l_s \frac{\partial x_s}{\partial l} \right) = \\ &= (1 - x_s^2) \frac{\partial x_s}{\partial x} + l_s^2 \frac{\partial l_s}{\partial l}, \end{aligned}$$

т. е.

$$\frac{1}{1 - x_s^2} \left(\frac{\partial x_s}{\partial x} - x_s x_{ss} \right) = \frac{\partial x_s}{\partial x} + \frac{\partial l_s}{\partial l}.$$

Обозначая через \mathfrak{B} вектор скорости и учитывая, что величина дивергенции

$$\frac{\partial x_s}{\partial x} + \frac{\partial l_s}{\partial l} = \operatorname{div} \mathfrak{B}$$

не зависит от выбора системы координат, соответственно получаем для произвольного направления r

$$\frac{1}{1 - r_s^2} \left(\frac{\partial r_s}{\partial r} - r_s r_{ss} \right) = \frac{\partial x_s}{\partial x} + \frac{\partial l_s}{\partial l}.$$

Таким образом, для случая прямолинейного поступательного движения система (8) может быть заменена на условия несжимаемости

$$\frac{\partial x_s}{\partial x} + \frac{\partial l_s}{\partial i} = 0$$

с дополнительным условием ⁵

$$x_s^2 + l_s^2 = 1,$$

общее решение которого должно содержать *одну* произвольную функцию.

б) Плоское движение. Пусть r_1, r_2, r_3 — направляющие косинусы любого направления r . Тогда получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_s}{\partial r} - r_s r_{ss} &= r_1^2 \left(\frac{\partial x_s}{\partial x} - x_s x_{ss} \right) + r_2^2 \left(\frac{\partial y_s}{\partial y} - y_s y_{ss} \right) + \\ &+ r_3^2 \left(\frac{\partial l_s}{\partial l} - l_s l_{ss} \right) + r_1 r_2 \left(\frac{\partial x_s}{\partial y} + \frac{\partial y_s}{\partial x} - x_s y_{ss} - y_s x_{ss} \right) + \\ &+ r_2 r_3 \left(\frac{\partial y_s}{\partial z} + \frac{\partial z_s}{\partial y} - y_s z_{ss} - z_s y_{ss} \right) + \\ &+ r_3 r_1 \left(\frac{\partial x_s}{\partial z} + \frac{\partial z_s}{\partial x} - z_s x_{ss} - x_s z_{ss} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Из соотношения

$$r_{ss} = x_s \frac{\partial r_s}{\partial x} + y_s \frac{\partial r_s}{\partial y} + l_s \frac{\partial r_s}{\partial l} \quad (10a)$$

и уравнения (1a) вытекает следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} x_s \frac{\partial x_s}{\partial x} + y_s \frac{\partial y_s}{\partial x} + l_s \frac{\partial l_s}{\partial x} &= 0, \\ x_s \frac{\partial x_s}{\partial y} + y_s \frac{\partial y_s}{\partial y} + l_s \frac{\partial l_s}{\partial y} &= 0, \\ x_s \frac{\partial x_s}{\partial z} + y_s \frac{\partial y_s}{\partial z} + l_s \frac{\partial l_s}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Принимая во внимание (10a), (10) и (1a), легко теперь получить такое тождество:

$$\begin{aligned} x_s y_s \left(\frac{\partial x_s}{\partial y} + \frac{\partial y_s}{\partial x} - x_s y_{ss} - y_s x_{ss} \right) &= \{xy\} = \\ &= -x_s^2 \left(\frac{\partial x_s}{\partial x} - x_s x_{ss} \right) - y_s^2 \left(\frac{\partial y_s}{\partial y} - y_s y_{ss} \right) + \\ &+ l_s^2 \left(\frac{\partial l_s}{\partial l} - l_s l_{ss} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

⁵ Из этого же исходил и Борн при рассмотрении прямолинейного поступательного движения (Указ. соч., с. 20).

Соответствующие уравнения справедливы для величин $\{yl\}$ и $\{lx\}$, полученных из $\{xy\}$ циклической перестановкой. Тогда из (9) и (11) следует также, что уравнение

$$\frac{\partial r_s}{\partial r} - r_s r_{ss} = 0$$

справедливо для любого направления r , если оно выполняется для трех направлений, например x, y, l .

Однако эти три уравнения независимы друг от друга. Это видно, если записать их с учетом (10а) в следующей форме:

$$\begin{aligned} (1 - x_s^2) \frac{\partial x_s}{\partial x} - x_s y_s \frac{\partial x_s}{\partial y} - x_s l_s \frac{\partial x_s}{\partial l} &= 0, \\ -y_s x_s \frac{\partial y_s}{\partial x} + (1 - y_s^2) \frac{\partial y_s}{\partial y} - y_s l_s \frac{\partial y_s}{\partial l} &= 0, \\ -l_s x_s \frac{\partial l_s}{\partial x} - l_s y_s \frac{\partial l_s}{\partial y} + (1 - l_s^2) \frac{\partial l_s}{\partial l} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Вместе с тремя уравнениями (10) получается система из шести линейных уравнений с девятью переменными

$$\frac{\partial x_s}{\partial x}, \quad \frac{\partial x_s}{\partial y} \quad \text{и т. д.}$$

Если они не независимы, то все детерминанты шестого порядка этой системы, получаемые из матрицы

$$\begin{array}{ccccccccc} 1 - x_s^2 & -x_s y_s & -x_s l_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -y_s x_s & 1 - y_s^2 & -y_s l_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l_s x_s & -l_s y_s & 1 - l_s^2 \\ x_s & 0 & 0 & y_s & 0 & 0 & l_s & 0 & 0 \\ 0 & x_s & 0 & 0 & y_s & 0 & 0 & l_s & 0 \\ 0 & 0 & x_s & 0 & 0 & y_s & 0 & 0 & l_s, \end{array}$$

должны быть тождественно равны 0. Однако легко вычислить, что, например, детерминанты, образованные из столбцов с № 1, 5, 9, 2, 6, 7,

$$\Delta_{(318)} = x_s y_s l_s [x_s^2 y_s^2 + y_s^2 l_s^2 + l_s^2 x_s^2] \neq 0.$$

Следовательно, три уравнения (12) вместе с соотношением

$$x_s^2 + y_s^2 + l_s^2 = 1 \quad (1а)$$

образуют систему независимых дифференциальных уравнений. При этом не следует ожидать, что общее решение системы, как и в старой кинематике, будет содержать три произвольные функции, поскольку речь идет о трех уравнениях в частных производных с тремя независимыми и только двумя зависимыми переменными, а именно функциями x_s, y_s, l_s , которые связаны соотношениями (1а). В случае такой переопределенной системы заранее нельзя сделать никаких заключений о множественности решений этой системы.

Полагая $c = \infty$, мы можем включить в наше рассмотрение как частный случай ньютоновскую кинематику. Для этого нам необходимо вернуться к уравнению (7). Прежде всего заметим, что соотношение (1) переходит в

$$l_\tau = 1 \quad (16)$$

и, следовательно, то уравнение системы (7), которое соответствует направлению t :

$$c^2 \frac{\partial ct_\tau}{\partial ct} + ct_\tau ct_{\tau\tau} = c^2 \left(\frac{\partial t_\tau}{\partial t} + t_\tau t_{\tau\tau} \right) = 0,$$

удовлетворяется тождественно. Остальные переходят в форму

$$\frac{\partial r_\tau}{\partial r} = 0,$$

представляющую собой векторное уравнение, которое можно заменить тремя теперь уже независимыми уравнениями:

$$\frac{\partial x_\tau}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial y_\tau}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial x_\tau}{\partial y} + \frac{\partial y_\tau}{\partial x} = 0. \quad (12a)$$

Они получаются, если точно так же, как и в (9), подставить в векторное уравнение произвольное направление $r = r_1x + r_2y$. Третье из этих уравнений соответствует следующему из (11) равенству $\{xy\} = 0$, где оно является следствием четырех независимых уравнений (1а) и (12), в то время как здесь четырьмя независимыми уравнениями являются (16) и (12а).

Поскольку здесь условия независимости не такие, как в общем случае, нет никакого противоречия в том, что мы можем в этом специальном случае получить множественность решений более высокого порядка.

Разумеется, что и в случае четырех измерений, т. е. для пространственного движения, существуют совершенно аналогичные соотношения, однако ради простоты мы ограничимся пока рассмотрением плоских движений.

4. Вращение в плоскости вокруг неподвижной точки

В случае вращения в плоскости вокруг неподвижной или равномерно движущейся точки O мировая линия такого движения является осью l в покоящейся координатной системе. Согласно закону, выведенному на с. 138, все лучи, перпендикулярные этой оси, должны быть всегда перпендикулярны мировым линиям. Однако равенство нулю компонент скорости в направлении такого луча

$$\rho_s = \frac{x}{\rho} x_s + \frac{y}{\rho} y_s,$$

где $\rho^2 = x^2 + y^2$, означает, что все мировые линии должны проходить по поверхности *круговых цилиндров* с общей осью l , т. е. что все точки, наблюдаемые из точки O , находящейся в неподвижной системе отсчета, будут двигаться по окружностям с центром в точке O .

Мне кажется, что это свойство вращательного движения принято бездоказательно в недавно опубликованной заметке П. Эренфеста⁶ по поводу противоречий в дифференциальных условиях Борна. Что касается интегрируемости дифференциальных уравнений, то уже из возражений, выдвинутых Эренфестом, следует, что переход от покоя к равномерному вращению вокруг неподвижной точки не может быть представлен при помощи решения, остающегося однозначным при повороте вокруг мировой линии, проходящей через неподвижную точку.

При помощи следующих ниже геометрических соображений теперь легко вывести, в какой мере возможны вращения вокруг неподвижной точки. В любой точке P поверхности данного кругового цилиндра, имеющего ось l , может быть задан любой наклон элемента мировой линии, т. е. скорость вращения точки P . Пусть плоскость, перпендикулярная к этому элементу, вырезает из цилиндра эллипс E_P . Если под Q понимать произвольную точку этого эллипса, то прямая, соединяющая точки P и Q , долж-

⁶ *Ehrenfest P.* — *Phys. Z.*, 1909, 10, S. 918.

на везде пересекать мировые линии под прямым углом, поскольку в точке P мировая линия перпендикулярна PQ . Следовательно, элемент мировой линии в точке Q должен удовлетворять двум условиям:

1) он должен лежать в плоскости, касательной к цилиндру в точке Q ;

2) он должен лежать в плоскости, перпендикулярной к PQ и проходящей через точку Q .

Эти два условия полностью определяют направление данного элемента как линии пересечения плоскости, касательной к цилиндру, и плоскости, перпендикулярной к прямой PQ . Меняя местами точки P и Q , получаем очевидный результат: элемент, взятый в первоначально выбранной точке P , удовлетворяет указанным двум условиям. Что касается направлений элементов мировых линий, то вся картина симметрична относительно плоскости, проходящей параллельно прямой PQ и делящей пополам внешние углы, образованные плоскостями, касательными к поверхности цилиндра в точках P, Q . На основании соображений симметрии теперь ясно, что наклон элемента траектории в точке Q будет тем же самым, что и для элемента в точке P , а именно оба элемента могут быть переведены один в другой путем вращения цилиндра и перемещения его вдоль оси. В соответствии с этим мы получаем, что по всей длине эллипса E_P элементы траекторий будут иметь тот же наклон, что и в точке P . Плоскость, перпендикулярная к определенному таким образом элементу траектории в точке Q , проходит через точку P , и так как прямая PQ перпендикулярна элементу траектории в точке Q , то плоскость, как правило, вырезает из цилиндра другой эллипс E_Q , за исключением случая, когда направление элемента траектории в точке P берется параллельно оси цилиндра и, следовательно, точка P неподвижна. Продолжая это построение, мы получаем, что все элементы вдоль эллипса E_Q имеют одинаковый наклон, а если двигать точку Q по всей длине эллипса E_P , то придем сначала к некоторой области на цилиндре, а расширяя ее,— и ко всей поверхности цилиндра, покрытой элементами, имеющими одинаковый наклон. Но ведь это и есть картина мировых линий для случая равномерного вращения вокруг неподвижной точки. Следовательно, если принять, что одна из точек тела является неподвижной, то движением, удовлетворяющим дифференциальным условиям, может быть только *равномерное* вращение. В этом случае картина мировых

линий будет аналогична траекториям, изображающим трехмерное бесконечно малое винтовое движение x, y, l -пространства, при котором, как известно, действительно соблюдается условие, что прямая, перпендикулярная к траекториям в одном месте, будет повсюду им перпендикулярна.

Следующее ниже аналитическое доказательство может быть легко распространено на случай вращения вокруг произвольной движущейся точки (ср. § 5).

Пусть мировая линия неподвижной точки имеет координаты

$$x = y = 0,$$

а для произвольной точки положим:

$$x = \rho \cos \varphi; \quad y = \rho \sin \varphi; \quad l = l. \quad (13)$$

Согласно с. 143 $\rho_s = 0$, т. е. вдоль мировой линии радиус ρ постоянен, следовательно,

$$x_s = -\rho \sin \varphi \varphi_s; \quad y_s = \rho \cos \varphi \varphi_s. \quad (13a)$$

Мы должны подставить (13) и (13a) в уравнение (12). Прежде всего чтобы получить зависимость хода мировой линии от φ и l на поверхности цилиндра $\rho = \text{const}$, целесообразно, как и в случае прямолинейного поступательного движения, использовать комбинацию уравнений (12), соответствующую уравнению несжимаемости. Складывая три независимых уравнения (12)

$$\frac{\partial x_s}{\partial x} - x_s x_{ss} = 0, \quad \frac{\partial y_s}{\partial y} - y_s y_{ss} = 0, \quad \frac{\partial l_s}{\partial l} - l_s l_{ss} = 0 \quad (12)$$

и принимая во внимание тождество (1a), получим

$$\frac{\partial x_s}{\partial x} + \frac{\partial y_s}{\partial y} + \frac{\partial l_s}{\partial l} = 0. \quad (14)$$

После подстановки выражений для x, x_s, y, y_s из (13) и (13a) уравнение (14) приведет к следующему виду:

$$\frac{\partial \varphi_s}{\partial \varphi} + \frac{\partial l_s}{\partial l} = 0.$$

И, наконец, принимая во внимание (1a), которое в этом случае имеет вид

$$\rho^2 \varphi_s^2 + l_s^2 = 1,$$

получим

$$l_s \frac{\partial \varphi_s}{\partial \varphi} - \rho^2 \varphi_s \frac{\partial \varphi_s}{\partial l} = 0. \quad (14a)$$

Геометрический смысл уравнения (14) заключается теперь в том, что кривые постоянного наклона, для которых также и $\varphi_s = \text{const}$, идут по поверхности цилиндра радиуса ρ , перпендикулярно мировым линиям, и что мировые линии также являются ортогональными траекториями для системы кривых одинакового наклона к образующим цилиндра. Разворачивая цилиндр в плоскость, можно было бы перевести эту картину мировых линий в картину, соответствующую прямолинейному поступательному движению (ср. с. 132).

Будет, по-видимому, целесообразно вывести зависимость наклона $\rho \varphi_s$ от радиуса ρ из другой комбинации уравнений (12), а именно из соотношения $\{xy\} = 0$, следующего из (11) и (12) (ср. с. 141), т. е.

$$\frac{\partial x_s}{\partial y} + \frac{\partial y_s}{\partial x} - x_s y_{ss} - y_s x_{ss} = 0, \quad (11a)$$

причем в этом уравнении выбирают направления x и y таким образом, чтобы они совпадали с касательной в плоскости xy и с нормалью к поверхности цилиндра в непосредственно рассматриваемой точке, т. е. в такой точке, азимут которой позволяет выбрать в качестве произвольной начальной точки, задаваемой равенствами (13), точку с $\varphi = 0$. Поскольку в этом случае $(y_s)_{\varphi=0} = 0$ и $(\partial y_s / \partial l)_{\varphi=0} = 0$, то с учетом (13) уравнение (11a) упрощается:

$$\frac{\partial \rho \varphi_s}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial y_s}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=0} - \rho \varphi_s^2 \left(\frac{\partial y_s}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=0} = 0. \quad (15a)$$

Здесь

$$\left(\frac{\partial y_s}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=0} = -\rho \varphi_s.$$

Следовательно, уравнение (15a) примет вид

$$\frac{\partial \rho \varphi_s}{\partial \rho} + \rho \varphi_s^3 = 0. \quad (15)$$

После его интегрирования получаем

$$\varphi_s = \frac{1}{\sqrt{\rho^2 + c}}, \quad (16)$$

а также

$$l_s = \frac{c}{\sqrt{\rho^2 + c^2}},$$

где $c = c(\varphi, l)$ следует считать не зависящей от ρ . Смысл уравнения (16) заключается в том, что наклон $\rho\varphi_s$ вдоль луча ρ должен меняться так, как будто все точки этого луча имеют одинаковую угловую скорость $\partial\varphi/\partial l$.

Если подставить соотношение (16) в (14а), то для определения $c(\varphi, l)$ получим дифференциальное уравнение

$$c \frac{\partial c}{\partial \varphi} - \rho^2 \frac{\partial c}{\partial l} = 0, \quad (14б)$$

из которого, как очевидно, можно получить не зависящую от φ величину c только в случае, когда

$$\frac{\partial c}{\partial \varphi} = \frac{\partial c}{\partial l} = 0.$$

Следовательно, $c = \text{const}$ и вместе с ней $\varphi_s = \text{const}$ и $l_s = \text{const}$ на всей поверхности цилиндра.

Таким образом, равномерное вращение — единственно возможное решение уравнений (14а) и (15).

Естественно, что этот результат совершенно неприменим в случае $c_0 = \infty$, для которого из системы уравнений $\partial r_\tau / \partial r = 0$, эквивалентной системе (12), вследствие $t_\tau = 1$ полностью выпадает координата t , и поэтому нельзя установить, каким моментам времени соответствуют различные состояния движения.

5. Вращение в плоскости вокруг точки, движущейся с ускорением

Пусть координаты произвольно заданной мировой линии будут

$$\xi, \eta, \lambda,$$

а элемент ее длины

$$d\sigma = \sqrt{d\xi^2 + d\eta^2 + d\lambda^2}.$$

Так же как и в случае движения вокруг неподвижной точки, построим все плоскости, перпендикулярные этой кривой, и в каждой из них проведем лучи через точку ξ, η, λ .

Поскольку эти лучи перпендикулярны мировой линии, то повсюду компоненты скорости, направления которых

совпадают с направлением лучей, должны быть равны 0. Следовательно, и в этом случае все мировые линии должны проходить по «цилиндрическим поверхностям» вокруг данной кривой. Эти цилиндрические поверхности характеризуются тем, что при их пересечении с каждой из плоскостей, перпендикулярных мировым линиям, получаются окружности одинакового радиуса. Теперь для задания произвольной точки выберем:

1) параметр σ нормальной плоскости, в которой лежит данная точка, причем σ необходимо отсчитывать от произвольной точки;

2) полярные координаты ρ , φ на этой нормальной плоскости, причем в качестве полюса выбирается точка пересечения нормальной плоскости с кривой ξ , η , λ , при этом φ следует отсчитывать от соприкасающейся плоскости. Далее, пусть R — радиус кривизны, а T — радиус кручения этой кривой.

Направление мировых линий на такой цилиндрической поверхности будет тогда характеризоваться компонентами

$$\frac{\partial \varphi}{\partial s} = \varphi_s; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial s} = \sigma_s.$$

Линейные компоненты движения будут: u — перпендикулярна к указанной плоскости, т. е. параллельна данной кривой ξ , η , λ :

$$u = \left(1 + \frac{\rho}{R} \cos \varphi\right) \sigma_s;$$

v , лежащая в перпендикулярной плоскости, а именно перпендикулярно лучу ρ :

$$v = \rho \left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T}\right);$$

ρ_s , лежащая в перпендикулярной плоскости в направлении луча ρ :

$$\rho_s = 0.$$

В этом случае, так же как и в случае покоящейся точки, картину мировых линий на цилиндрической поверхности проще всего описать уравнением несжимаемости

$$\frac{\partial x_s}{\partial x} + \frac{\partial y_s}{\partial y} + \frac{\partial l_s}{\partial l} = 0,$$

полученным при сложении уравнений (12) и записанным в криволинейных координатах σ , ρ , φ . Для проведения

такого преобразования наиболее естествен выбор в качестве направлений x, y, l тройки прямолинейных осей, совпадающей с направлением координат u, v, ρ_s для рассматриваемой точки; эти оси являются касательными к координатной системе σ, ρ, φ . В результате получается следующее уравнение ⁷:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right) - \frac{R}{T(R + \rho \cos \varphi)} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\left(1 + \frac{\rho}{R} \cos \varphi \right) \sigma_s \right] + \\ + \frac{R}{R + \rho \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\left(1 + \frac{\rho}{R} \cos \varphi \right) \sigma_s \right] - \\ - \rho \left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right) \frac{\sin \varphi}{R + \rho \cos \varphi} = 0. \end{aligned}$$

С помощью равенства (1а), имеющего в данном случае вид

$$u^2 + v^2 = \left(1 + \frac{\rho}{R} \cos \varphi \right)^2 \sigma_s^2 + \rho^2 \left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right)^2 = 1,$$

получаем

$$\begin{aligned} \left[\left(1 + \frac{\rho}{R} \cos \varphi \right)^2 \sigma_s + \frac{\rho^2}{T} \left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right) \right] \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right) - \\ - \rho^2 \left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right) - \left(\frac{\rho}{R} \cos \varphi \right) \frac{\rho}{R} \times \\ \times \sin \varphi \left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right) \sigma_s = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

В соответствии с геометрическими соображениями, аналогичными тем, которые изложены на с. 143, уравнение (17) может быть истолковано следующим образом.

Мировые линии образуют на цилиндрической поверхности ортогональные траектории бесконечной системы геодезических линий.

Для получения зависимости хода мировых линий от радиуса цилиндра ρ вновь, как на с. 144, можно применить

⁷ В рассматриваемой точке (P) справедливо

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi}; \quad \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial \rho}; \quad \frac{\partial}{\partial l} = \frac{R}{R \cos \varphi} \left(\frac{\partial}{\partial \sigma} + \frac{1}{T} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right), \\ (x_s)_p = v; \quad (y_s)_p = \rho_s = 0; \quad (l_s)_p = u. \end{aligned}$$

Так как $y_s = 0$, то, несмотря на кривизну координатной системы, $\partial x_s / \partial x$ из этих формул получается непосредственно, а в $\partial l_s / \partial l$, напротив, появляется добавочный член типа центробежных членов:

$$\frac{\partial l_s}{\partial l} = \frac{\partial (l_s)_p}{\partial l} - x_s \frac{\sin \varphi}{R + \rho \cos \varphi}.$$

уравнение (11а)

$$\frac{\partial x_s}{\partial y} + \frac{\partial y_s}{\partial x} - x_s y_{ss} - y_s x_{ss} = 0, \quad (11a)$$

в котором мы полагаем координату x совпадающей с тангенциальным направлением v , а координату y — с радиальным направлением ρ . Следовательно, тогда $x_s = v$ (см. с. 148), далее, в рассматриваемой точке $y_s = 0$ и $\partial y_s / \partial y = 0$; напротив, вследствие криволинейности координатной системы

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_s}{\partial x} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial y_s}{\partial \varphi} = -\rho \left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right), \\ \frac{\partial y_s}{\partial \sigma} &= - \left(1 + \frac{\rho}{R} \cos \varphi \right) \frac{\cos \varphi}{R} \sigma_s - \frac{\rho}{T} \left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right). \end{aligned}$$

Подставляя эти значения в (11а) и учитывая, что

$$y_{ss} = \sigma_s \frac{\partial y_s}{\partial \sigma} + \varphi_s \frac{\partial y_s}{\partial \varphi},$$

получаем уравнение, аналогичное уравнению (15):

$$\frac{\partial \left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right)}{\partial \rho} + R \frac{\left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right)^3}{R + \rho \cos \varphi} - \frac{\left(\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} \right) \cos \varphi}{R + \rho \cos \varphi} = 0. \quad (18)$$

Интеграл уравнения (18) аналогичен интегралу (16):

$$\varphi_s + \frac{\sigma_s}{T} = \frac{1}{\sqrt{\rho^2 + \left(1 + \frac{\rho}{R} \cos \varphi \right)^2 c^2}}, \quad (19)$$

следовательно,

$$\sigma_s = \frac{c}{\sqrt{\rho^2 + \left(1 + \frac{\rho}{R} \cos \varphi \right)^2 c^2}}.$$

Этот интеграл имеет тот же геометрический смысл, а именно, что вдоль направления луча ρ угловая скорость $\partial \varphi / \partial \sigma + 1/T$ остается постоянной. Величина c должна быть не зависящей от ρ функцией $c(\sigma, \varphi)$. Однако, подставляя (19) в (17), можно получить для ее определения уравнение

$$\begin{aligned} &\left[\left(1 + \frac{\rho}{R} \cos \varphi \right) - \frac{\rho^2}{T} \right] \left(1 + \frac{\rho}{R} \cos \varphi \right) c^2 \frac{\partial c}{\partial \varphi} - \\ &- \rho^2 \left(1 + \frac{\rho}{R} \cos \varphi \right) c \frac{\partial c}{\partial \varphi} + \\ &+ \frac{\rho^2}{R} \sin \varphi \left(1 - \frac{c^2}{T} \right) c + \rho^3 \cos \varphi c \frac{\partial \frac{1}{R}}{\partial \sigma} = 0. \quad (20) \end{aligned}$$

Из этого уравнения следует, что c не будет зависеть от ρ только при следующих предположениях.

1. $c = 0$. При этом $\sigma_s = 0$, следовательно, такой случай соответствует бесконечно быстрому вращению и должен быть исключен из рассмотрения.

2. $c = \infty$. В этом случае $\varphi_s + \sigma_s/T = 0$, следовательно, $v = 0$ (см. с. 148) и совершенно очевидно, что при этом предположении уравнения (17) и (18) действительно удовлетворяются. Все мировые линии идут параллельно заданной линии (с координатами ξ, η, λ), следовательно, речь идет об уже описанном на с. 133 случае перемещения, когда мировые линии являются ортогональными траекториями плоской системы.

3. Если

$$\left(1 - \frac{c^2}{T}\right) \sin \varphi + R \frac{\partial \frac{1}{R}}{\partial \sigma} \cos \varphi = 0, \quad (21)$$

то возможно решение

$$\frac{\partial c}{\partial \varphi} = \frac{\partial c}{\partial \sigma} = 0.$$

Однако величина c , получаемая из (21), только в том случае не будет зависеть от σ и φ , когда

$$\frac{\partial \frac{1}{R}}{\partial \sigma} = 0$$

и

$$c^2 = T = \text{const}$$

и когда, следовательно, заданная мировая линия является пространственной кривой с постоянной кривизной и кручением, т. е. винтовой линией с постоянным шагом. При этом угловая скорость однозначно определяется через кручение. Но в таком случае заданная кривая как раз является одной из мировых линий, соответствующих равномерному вращению вокруг неподвижной точки.

Следовательно, за исключением поступательного движения и равномерного вращения вокруг неподвижной точки, не существует плоских движений, которые могли бы удовлетворять дифференциальным условиям.

6. Пространственное движение

В случае четырех измерений x, y, z, l проведение аналогичного доказательства не представило бы существенных трудностей, однако привело бы к пространственным вычислениям. Поэтому мы ограничимся следующим геометрическим наброском такого доказательства.

При равномерном вращении вокруг равномерно движущейся точки мировые линии представляют собой траектории, соответствующие бесконечно малому винтовому движению x, y, z, l -пространства. Следовательно, если u, v, w, k обозначают вектор скорости в произвольно выбранной точке O , принимаемой за начало координат, то направление мировых линий может быть представлено в следующей форме:

$$\begin{aligned} \mu x_\tau &= u + f_{12}y + f_{13}z + f_{14}l, \\ \mu y_\tau &= v + f_{21}x + f_{23}z + f_{24}l, \\ \mu z_\tau &= w + f_{31}x + f_{32}y + f_{34}l, \\ \mu l_\tau &= k + f_{41}x + f_{42}y + f_{43}z, \end{aligned} \quad (22)$$

где f_{ik} — константы, являющиеся компонентами шестивектора вращения, которые удовлетворяют условию

$$f_{ik} = -f_{ki}.$$

Теперь винтовое движение можно определить, скажем, *следующим образом*: направление траектории в точке O следует выбрать в качестве оси l и поэтому положить

$$u = v = w = 0.$$

Далее, нам известно направление вектора ускорения в данной точке, и, следовательно, в соседней с точкой O точке O' с координатами $0, 0, 0, dl$ система (22) имеет вид

$$\mu x_\tau = f_{14}dl, \quad \mu y_\tau = f_{24}dl, \quad \mu z_\tau = f_{34}dl, \quad \mu l_\tau = k.$$

Этим прежде всего определяются f_{14}, f_{24}, f_{34} .

Пусть далее в точке P $x = y = l = 0, z = z_1$ заданное направление будет

$$\mu x_\tau = f_{13}z_1, \quad \mu y_\tau = f_{23}z_1, \quad \mu z_\tau = 0, \quad \mu l_\tau = k + f_{43}z_1,$$

так что можно установить f_{13} и f_{23} . Тогда в произвольной точке Q для направления движения остается степень свободы, определяемая коэффициентом f_{12} .

Теперь мы желаем найти минимальное число определяющих условий для картины мировых линий, подчиняю-

щейся условию Борна. Это условие может быть заменено следующим окончательным требованием, которому, очевидно, подчиняется и рассмотренное выше винтовое движение: если прямая перпендикулярна одной из мировых линий, то она будет перпендикулярна ко всем мировым линиям.

Мы вновь можем произвольно выбрать направление мировой линии в точке O в качестве оси l и ускорение, т. е. направление мировой линии в точке O' с координатами $0, 0, 0, dl$. Для произвольной точки P пространства с $l = 0$ направление мировой линии имеет две степени свободы, так как подчиняется единственному условию — быть перпендикулярным к соединяющей эти точки прямой PO . Если выбрать направление PO в качестве оси $x = y = 0$, то эти степени свободы будут идентичны тем, которые существовали для описанного выше винтового движения в точке P . Для другой точки Q , лежащей в нормальном пространстве элемента в точке P и в пространстве $l = 0$, остается только одна степень свободы, поскольку проходящий через нее элемент траектории должен удовлетворять двум условиям: быть перпендикулярным QP и QO . Но эта степень свободы в точке Q должна быть той же самой, что и определяемая коэффициентами f_{12} в случае винтового движения, поскольку там выполняются те же геометрические условия, что и лежащие в основе только что описанного построения.

Исходя из элементов в точках O, O', P, Q , удастся теперь последовательно определить элементы во всем пространстве x, y, z, l . Сначала следует произвести сечение нормальных пространств в точках P, Q и O' и получить для каждой точки R на линии разреза элемент мировой линии как направление, перпендикулярное одновременно прямым RP, RQ и RO' . Исходя из элемента в точке R , связанного с любыми двумя элементами в точках P, Q, O или O' , можно в конце концов сплошь заполнить пространство элементами мировых линий, так что с помощью наперед заданного способа определения удастся полностью описать весь процесс движения. Мы приходим к заключению, что в общем случае степени свободы для движения, задаваемого борновским условием, в точности те же самые, что и при четырехмерном винтовом движении. Так как для последнего соблюдается условие Борна, то картины мировых линий для обоих движений, вообще, должны совпадать.

Исключением является случай, когда все элементы в пространстве $l = 0$ не только расположены на лучах, исходящих из точки O , но и сами перпендикулярны пространству $l = 0$, так что все их нормальные пространства попадают в пространство $l = 0$. Тогда при помощи указанного построения нельзя определить направление элементов вне этого пространства. Однако в этом случае мировые линии — ортогональные траектории системы линейных пространств. Следовательно, речь идет о поступательном движении, уже описанном ранее на с. 133. Согласно проведенному доказательству для пространственного движения также справедливо следующее утверждение.

Наиболее общее движение, удовлетворяющее дифференциальному условию, — это поступательное движение и равномерное вращение.

Заключение

Итак, наше рассмотрение вращательных движений привело к отрицательному результату, из которого следует, что условия Борна сформулированы слишком узко, чтобы описать движение абсолютно твердого тела. Это условие неприменимо для случая рассмотренного вращения, из данного условия следует только простой случай равномерного вращения; с другой стороны, нет необходимости применять его в дифференциальной форме для поступательного движения, которое можно охарактеризовать при помощи конечной формулы, приведенной на с. 132 и находящейся в более тесной связи с ньютоновской релятивистской теорией. Открытым остается вопрос о существовании инвариантного определения, которое в предельном случае $c = \infty$ переходит в классическое. А именно, об определении, содержащем, по крайней мере, такое число степеней свободы, как в предельном случае $c = \infty$, и тем самым в случае конечного c и малых скоростей приближенно представляющем движение абсолютно твердого тела в классической кинематике.

Для обобщения борновских перемещений на случай движения с $c = \infty$ больше всего напрашивалось бы представление об абсолютно твердом теле как о трехмерной поверхностной системе, которая в произвольно меняющейся лоренцевой координатной системе, содержащей $x'y'z'$ -пространство, не изменяет своего «образа». Дру-

гими словами, это означает, что при условии неизменности расстояния между двумя произвольными точками

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 - c^2 (t_1 - t_2)^2$$

система может совершать такое число движений, зависящих от одного параметра, которое в конечном пределе составит ∞ ¹⁰. Из полученного таким образом параметрического представления движения можно исключить параметр так, чтобы его значение стало несущественным и осталось только *девять* главных степеней свободы. Однако кажется весьма проблематичным, чтобы из этой группы в ∞ ⁹ движений при помощи соответствующих ограничений можно было отобрать инвариантно определяемую группу из ∞ ⁶ движений, которая при $c = \infty$ переходит в ∞ ⁶ движений абсолютно твердого тела ньютоновской кинематики и при этом им полностью соответствует⁸.

Во всяком случае маловероятно, чтобы при помощи какой-либо подходящим образом выбранной дифференциальной формулировки условий абсолютной твердости получилось такое же число степеней свободы, как в классической кинематике, поскольку в ней эти условия выражены в конечной форме, тогда как соответствующее дифференциальное условие приводит к переопределенности системы дифференциальных уравнений. Однако только что выделенное требование все же может служить заменой определению абсолютно твердого тела, даваемому классической кинематикой, причем большее число степеней свободы в случае абсолютно твердого тела не следует рассматривать как непреодолимое препятствие⁹. Дело в том, что здесь, так же как и в классической кинематике, обобщенное движение может быть представлено в виде суперпозиции поступательного движения и вращательного. Ради большей наглядности мы ограничимся случаем только трех координат x, y, t . За основу возьмем борновские перемещения, при которых (см. с. 133) переход изменяющейся системы координат $x'y't'$ из одного положения в соседнее представляет собой бесконечно малый поворот (в смысле, указанном на с. 133) вокруг оси, которая сама лежит в плоскости $x'y'$. На это перемещение

⁸ Дальнейшие рассуждения добавлены при корректуре как ответ на вопрос, поставленный В. Вином.

⁹ Я не могу не упомянуть, что имел неоднократную возможность обсуждать этот вопрос с Зоммерфельдом.

мы накладываем вращение, т. е. поворот плоскости $x'y'$ в самой себе. Однако в то время как в классической кинематике изменение центра этого вращения означает добавление еще только одного перемещения, в нашем случае вращение вокруг произвольной точки нельзя заменить вращением вокруг другой точки и перемещением, поскольку результатом двух вращений не может быть борновское перемещение. Поэтому теперь наложение перемещения и вращения приведет к большему числу степеней свободы. Если предположить, что движение происходит с субсветовыми скоростями, то борновское перемещение можно отличить от классического только при помощи очень тонких измерительных методов, поскольку при этом плоскости $x'y'$ всегда лежат между плоскостью $t = 0$ и конусом $x^2 + y^2 - c^2t^2 = 0$ и тем самым возникающие три добавочные степени свободы настолько ограничены, что практически незаметны. И, наконец, для $c = \infty$ все девять степеней свободы стягиваются в шесть, соответствующих классической кинематике.

Если строить динамику на основе этой кинематики и соответствующих динамических принципов, то в такой динамике невозможно, как в классической (для граничного случая $c = \infty$), свести систему сил, действующих на абсолютно твердое тело, к одной-единственной силе, приложенной в «центре тяжести», и вращающему моменту вокруг центра тяжести. Однако если такой динамический принцип позволяет получать борновские перемещения с помощью единичных сил, то существуют также системы сил, при помощи которых осуществляются вращения и вместе с ними ∞^9 движений абсолютно твердого тела.

К доказательству невозможности существования ускоренных вращений, подчиняющихся требованиям Борна, можно добавить еще замечание, касающееся постановки опытов Майкельсона (о которых также можно сказать, что при их проведении играет роль вращение Земли). Согласно условиям Борна движение элементов объема внутри Земли было бы аналогично движению аппарата Майкельсона, если бы их движение было свободным, поскольку только в этом случае наши выводы можно перенести на этот аппарат. Такая тенденция должна проявиться в упругом поведении элементов объема Земли. Однако поскольку уже доказано, что совокупность элементов, образующих абсолютно твердое тело, с кинематической точки зрения не может двигаться подобным обра-

зом, то, если рассматривать Землю как абсолютно твердое тело, состояние ее движения вследствие реакции внутренних объемов будет другим. Поскольку поведение находящихся на поверхности Земли свободных тел противоположно поведению аппарата Майкельсона, то следует сделать вывод, что теоретически из сравнения их поведения и поведения поверхности Земли можно было бы даже доказать ее вращение. Естественно, в этом не следует усматривать никакого противоречия с теорией относительности.

Б. Е. Явелов

ЭЙНШТЕЙН И ПРОБЛЕМА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Хорошо известны слова А. Эйнштейна: «Вряд ли можно позавидовать теоретику-исследователю природы. Его труд судит неумолимый и не очень-то дружелюбный судья — опыт. Опыт никогда не скажет теории «да», но говорит в лучшем случае «может быть», большей же частью просто «нет». Когда опыт согласуется с теорией, для нее это означает «может быть», когда же он противоречит ей, объявляется приговор: «нет». Наверное, почти каждая теория сразу после появления получает свое «нет»»¹. (Заметим, кстати, что эти слова были взяты в качестве эпиграфа в известной монографии Я. Г. Дорфмана и И. К. Кикоина по физике металлов².) Менее широко известно, что этим высказыванием начинается небольшая статья Эйнштейна «Теоретические замечания к сверхпроводимости металлов», опубликованная им в марте 1922 г. в юбилейном сборнике, посвященном сорокалетию профессорской деятельности голландского физика Г. Камерлинга-Оннеса, лауреата Нобелевской премии за 1913 г., ученого, пользовавшегося в начале нынешнего столетия всемирной известностью и огромным авторитетом. К наиболее крупным научным заслугам Камерлинга-Оннеса относятся ожижение гелия в 1908 г., открытие сверхпроводимости в 1911 г., а также создание знаменитой Лейденской криогенной лаборатории (впоследствии Лаборатория им. Камерлинга-Оннеса) — лаборатории, которую бесспорно следует считать исторически первым (в современном понимании) центром физических исследований. Лаборатория была богато оснащена оборудованием; в ней была налажена система подготовки научного

¹ Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1966, т. 3, с. 432.

² Дорфман Я. Г., Кикоин И. К. Физика металлов. М.; Л.: ГТТИ, 1933, с. 408.

и технического персонала, исследования проводились широким фронтом, планомерно и в контакте с теоретиками, имелись прочные международные связи, результаты исследований без промедлений публиковались в основанном Камерлингом-Оннесом журнале «Communications from the Physical Laboratory of the University of Leiden», рассылавшемся по всему миру. Заметим попутно, что до 1923 г. Лейденская лаборатория была единственным в мире научным центром, располагавшим жидким гелием.

Эйнштейн и сверхпроводимость. Это сочетание выглядит на первый взгляд неожиданным. Действительно, что общего может быть у крупнейшего физика-теоретика нашего столетия, поглощенного фундаментальными основами мироздания, с этим явлением, пусть удивительным и замечательным, но, казалось бы (особенно на заре современной физики), представляющим интерес лишь для узкого круга специалистов в области электропроводности и физики низких температур. И тем не менее между деятельностью Эйнштейна и ранними исследованиями сверхпроводимости прослеживаются небезынересные связи.

Хотя история распорядилась по-другому, любопытно, что и Эйнштейн мог в начале своего творческого пути оказаться в Лейдене в числе сотрудников Камерлинга-Оннеса. Окончив в августе 1900 г. Цюрихский политехникум (кстати, в то время это было одно из лучших в мире высших учебных заведений), молодой Эйнштейн в течение двух лет (т. е. до поступления в Бернское патентное бюро) не мог получить сколько-нибудь приемлемой постоянной работы, что в значительной мере было следствием натянутости отношений, сложившихся у него с преподавательским составом Политехникума, и в особенности с профессором физики Г. Ф. Вебером. Поиски места, однако, не помешали Эйнштейну приступить к самостоятельной научной деятельности, и в 1900 г. в «Annalen der Physik» появляется его первая статья «Следствия из явлений капиллярности». 12 апреля 1901 г. Эйнштейн отправляет копию этой статьи в Лейден Камерлингу-Оннесу, сопровождая ее открыткой с бланком оплаченного ответа, в которой описывает свою квалификацию и выражает желание получить место ассистента в Лейденском университете (к которому относилась Криогенная лаборатория Камерлинга-Оннеса). Эта открытка с неиспользованным бланком оплаченного ответа, самоадре-

сованным А. Эйнштейну, улица Бильи, 21, Милан, сейчас хранится в Лейденском музее истории науки ³.

Конечно, едва ли было можно ожидать, что маститый Камерлинг-Оннес «заметит» Эйнштейна без принятых в то время надлежащих рекомендаций от коллег. Но работа по капиллярным явлениям, входившим в сферу давних интересов голландского ученого, не должна была остаться без внимания. Может быть, дело было в том, что незадолго перед этим вакансию ассистента, которую Эйнштейн упомянул в своей открытке («я слышал от товарища по институту о том, что в Вашем университете имеется вакансия ассистента»), занял ученик Ван дер Ваальса В. Г. Кеезом ⁴, теоретические познания которого Камерлинг-Оннес расценивал как выдающиеся ⁵. С другой стороны, как впоследствии сам Эйнштейн замечал в письме М. Борну: «Ужасно трудно теперь с устройством теоретиков. Голландия страдает от перепроизводства... Там есть превосходные теоретики, например Фоккер, которые работают на скромной должности учителей гимназии» ⁶.

Вспоминая о своей учебе в Политехникуме, Эйнштейн пишет, что, имея таких превосходных преподавателей, как Г. Минковский и А. Гурвиц, «...собственно говоря, я мог бы получить солидное математическое образование. Я же большую часть времени работал в физической лаборатории, увлеченный непосредственным соприкосновением с опытом» ⁷. Существует еще множество свидетельств о склонности Эйнштейна к практической, изобретательской и экспериментальной деятельности. Однако обстоятельства (не слишком благоприятные) начала творческой биографии великого физика сложились так, что единственными возможными орудиями познания природы

³ *Rooseboom M.* — *Janus*, 1958, 47, N 3, p. 198.

⁴ Кеезом, ставший преемником Камерлинга-Оннеса в Криогенной лаборатории, внес значительный вклад в физику низких температур, в частности он первым получил твердый гелий, открыл скачки теплоемкости при переходах в сверхпроводящее и сверхтекучее состояния, первым экспериментально подтвердил линейный закон А. Зоммерфельда для температурного хода электронной теплоемкости металлов.

⁵ См., например, нобелевскую лекцию Камерлинга-Оннеса, опубликованную в русском переводе в *ЖРФХО*, 1914, 46, с. 219.

⁶ Эйнштейновский сборник, 1971. М.: Наука, 1972, с. 37.

⁷ *Эйнштейн А.* Физика и реальность. М.: Наука, 1965, с. 137.

стали для него перо и бумага ⁸ — только в тридцатилетнем возрасте Эйнштейн смог оставить должность патентного эксперта. Можно полагать, что, если бы Камерлинг-Оннес внял просьбе молодого ученого и приобщил его к проводившимся широким фронтом низкотемпературным исследованиям, мощный поток творческой энергии Эйнштейна мог устремиться по руслу экспериментальной физики. (Заметим, что Кеезом, поступивший к Камерлинг-Оннесу больше как теоретик, со временем полностью переключился на экспериментальную деятельность.) Не исключено, что пути развития всей физики вообще и физики низких температур в частности претерпели бы при этом существенные изменения.

Впоследствии Камерлинг-Оннес, видимо, не раз имел случай пожалеть, что не «заполучил» Эйнштейна для своей лаборатории, но так или иначе первый контакт с Лейденом оказался для Эйнштейна неудачным. Проходит около 20 лет, слава Эйнштейна становится всемирной, и из Лейдена уже следуют настойчивые приглашения. Сначала письмо от П. Эренфеста с предложением профессорского места на «сказочных» (выражение Эйнштейна) условиях — максимальное вознаграждение, отсутствие лекционных обязанностей; единственное, что требуется, — это обосноваться в Лейдене или близ него. «Ты сможешь проводить сколько захочешь времени в Швейцарии или где-нибудь еще, работая, читая лекции, путешествуя и т. д., лишь бы можно было сказать: Эйнштейн в Лейдене, в Лейдене Эйнштейн». Но Эйнштейн не принимает этого предложения, мотивируя свой отказ невозможностью пренебречь своими моральными обязательствами перед берлинскими коллегами-учеными. Затем Эйнштейн получает от Камерлинга-Оннеса предложение стать экстраординарным профессором на три года с единственной обязанностью посещать (без ущерба для работы в Берлине) Лейден один-два раза в год по нескольку недель. Эйнштейн принял это предложение лишь после настойчивых доводов П. Эренфеста и Г. Лоренца, сообщившего, что Камер-

⁸ Так, свою вторую статью «О термодинамической теории разности потенциалов» (*Эйнштейн А.* Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1966, т. 3, с. 32), написанную в апреле 1902 г., Эйнштейн заканчивает следующими словами: «В заключение я хотел бы извиниться за то, что предлагаю здесь лишь общий план трудоемкого исследования и сам не занимаюсь экспериментом; для этого у меня нет возможностей».

линг-Оннес «будет считать для себя большой честью возможность обсуждать с Вами исследования, проводимые в его Криогенной лаборатории»⁹. Таким образом, начиная с 1920 г. размышления над низкотемпературными проблемами, и в частности над сверхпроводимостью, по существу, вменяются Эйнштейну в обязанность. Однако уже задолго до этого между ним и Камерлингом-Оннесом устанавливаются довольно тесные профессиональные отношения в рамках деятельности первых Сольвеевских конгрессов и работ Первой международной комиссии (впоследствии комиссия Камерлинга-Оннеса) Международного института холода. Эйнштейн неоднократно подчеркивает фундаментальность проводящихся в Лейденской лаборатории низкотемпературных исследований. участвует в обсуждении их результатов. Хотелось бы отметить еще одно довольно любопытное обстоятельство. Сотни раз в книгах и статьях по сверхпроводимости повторена фраза: «Сверхпроводимость была открыта голландским физиком Камерлингом-Оннесом в 1911 г.» И действительно, это бесспорно. Но нельзя ли датировать это несомненно великое открытие точнее? Детальный анализ первой публикации Камерлинга-Оннеса, в которой сообщается о сверхпроводимости¹⁰, показывает (хотя и не вполне отчетливо), что открытие, вероятнее всего, было сделано в феврале 1911 г. Интересно, что как раз в это же самое время, т. е. в феврале 1911 г. (и, быть может, в самый день открытия), Эйнштейн был в самом центре событий — он вместе со своей первой женой Милевой были гостями семьи Лоренцев в Лейдене¹¹. Думается, однако, что вряд ли тогда Эйнштейн сразу же узнал об открытии, и притом, что называется, из первых рук... Хотя, впрочем, руководитель Криогенной лаборатории наверняка был бы не прочь обсудить результаты своих последних экспериментов со стремительно восходящей звездой теоретической физики; и в первой «сверхпроводящей» публикации, и в непосредственно ей предшествовавших Камерлинг-Оннес ссылается на основополагающие работы Эйнштейна по квантовой теории теплоемкости твердых тел. Более того, как это ни неожиданно, но Эйнштейна можно в какой-то мере считать косвенно

⁹ Френкель В. Я. Пауль Эрэнфест. М.: Атомиздат, 1977, с. 97.

¹⁰ Kamerlingh-Onnes H.— Leiden communications, 1911, N 120b.

¹¹ Mehra J. The Solvay conferences on physics. Dordrecht, 1975, p. XXI.

причастным к открытию. Как известно, впервые сверхпроводимость была зарегистрирована у ртути. Почему был выбран именно этот металл, жидкий при комнатной температуре и в силу этого довольно неудобный¹² для измерения электрического сопротивления? Тут было две причины. Во-первых, Камерлинг-Оннес стремился к чистоте металла (что для сверхпроводимости оказалось довольно несущественным), а путем перегонки можно было получить ртуть гораздо более чистую, чем самое чистое золото, которое тогда можно было достать.

Вторая и, возможно, более важная причина состояла в следующем. До ртути Камерлинг-Оннес исследовал золото и платину. Оба эти металла вели себя в общем одинаковым, но довольно удивительным для физиков того времени образом — при понижении температуры ниже точки кипения жидкого водорода (20 К) удельное электросопротивление, обычно монотонно уменьшающееся по мере охлаждения, переставало изменяться с температурой и принимало постоянное значение, тем меньшее, чем чище образец. Впечатление было такое, что сопротивление металла складывается из двух частей — не зависящее от температуры «примесное» сопротивление и «идеальное» сопротивление (т. е. сопротивление того же металла, полностью очищенного от загрязнений), спадающее до нуля еще за несколько градусов до абсолютного нуля температуры. Такое поведение «идеального» сопротивления никак не согласовалось с бытовавшими в то время «классическими» представлениями, скорее оно напоминало температурную зависимость теплоемкости твердых тел (это сходство в определенной мере усугублялось тогдашней довольно низкой точностью обоих измерений при низких температурах), полученную Эйнштейном в его знаменитой работе 1907 г. «Теория излучения Планка и теория удельной теплоемкости»¹³, в которой твердое тело было впервые рассмотрено как совокупность квантовых осцилляторов. Эта эйнштейновская работа (можно сказать, что с нее-то и началась теоретическая физика твердого тела в современном понимании этого термина), выводы которой были подтверждены низкотемпературными измерениями теплоемкости, проведенными школой В. Нерн-

¹² Измерять сопротивление металлов с хорошей электропроводностью, естественно, удобнее всего на образцах в виде кусков проволоки большой длины.

¹³ Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1966, т. 3, с. 134.

ста в Германии, сыграла едва ли не решающую роль в принятии физической общественностью того времени квантовых представлений.

Теплоемкость, по Эйнштейну, так же, как «идеальное» сопротивление Камерлинг-Оннеса, становилась исчезающе малой еще до подхода к абсолютному нулю температуры. Вдохновленный этим сходством, голландский физик, следуя идеям Эйнштейна, развил концепцию¹⁴, которую, несомненно, можно считать исторически первым вариантом квантовой теории электропроводности металлов (факт, почти забытый в настоящее время). Согласно формуле, выведенной Камерлингом-Оннесом, температурный ход сопротивления металла определяется одним параметром (некий аналог современной температуры Дебая), задающим в духе закона соответственных состояний присущую данному металлу температурную шкалу. Для ртути, температура плавления которой гораздо ниже, чем у золота или платины, гелиевые температуры значительно «теплее», и соответственно этому формула Камерлинг-Оннеса предсказывала, что при понижении температуры от 4,2 до 3 К сопротивление ртути упадет от вполне измеримой величины до нуля (ведь ртуть тщательнейшим образом очищена!). Таким образом, в компенсацию за большие неудобства работы со ртутью Камерлинг-Оннес надеялся получить два заманчивых результата: зарегистрировать падение до нуля реального (а не пересчитываемого «идеального») сопротивления и подтвердить свою «квантовую теорию электропроводности металлов».

Мы привели выше аргументы о некоторой идейной причастности Эйнштейна к открытию сверхпроводимости. А Эйнштейн, сколь интересны для него были в то время вопросы, связанные со сверхпроводимостью?

Первые работы, посвященные сверхпроводимости, были опубликованы Камерлингом-Оннесом в апреле—мае 1911 г., а затем состоялся его доклад на эту тему на первом Сольвеевском конгрессе, проходившем в Брюсселе с 30 октября по 3 ноября того же года. Среди приглашенных на конгресс был и Эйнштейн, который, правда, в дискуссии по докладу Камерлинг-Оннеса участия не принял (в действительности «дискуссия» ограничилась замечанием, причем весьма существенным, П. Ланжевена и ответом докладчика). Однако еще до конгресса свос

¹⁴ *Kamerlingh-Onnes H.*— Leiden communications, 1911, N 119.

письмо М. Бессо из Праги от 11 сентября Эйнштейн заключает красноречивым призывом: «Думай о металлах! Там должно быть вскрыто нечто удобопонятное. Нынешнее положение невыносимо»¹⁵. Из более раннего письма Бессо Эйнштейну, датированного летом 1911 г., можно с уверенностью заключить, что Эйнштейн обсуждал со своим другом проблемы электропроводности металлов и что особое внимание было при этом уделено электропроводности при температурах вблизи абсолютного нуля температуры и «примесному» сопротивлению (по-видимому, попытки интерпретации его независимости от температуры). Из письма¹⁶ видно, что Эйнштейн знаком с ранними (1905—1907 гг.) работами А. Зоммерфельда по электронной теории. Другие письма и Эйнштейна и Бессо, относящиеся к этому периоду, также свидетельствуют о том, что Эйнштейн сохраняет интерес к проблемам электропроводности, даже участвует в постановке соответствующих опытов¹⁷, однако другие замыслы и многочисленные обязанности не оставляют ему времени для глубоких размышлений над этими вопросами. Кроме того, ясно, что Эйнштейн не видит никакой «зацепки», или, по выражению П. Эренфеста, «освещающей идеи», позволяющей связать многочисленные экспериментальные факты в сколько-нибудь единую гармоническую концепцию. Другой вывод, который можно сделать, проанализировав эту переписку, состоит в том, что до первого Сольвеевского конгресса Эйнштейну не были известны или не вызвали у него сочувствия попытки Камерлинг-Оннеса и Нернста с сотрудниками применить развитые им квантовые представления для развития электронной теории металлов.

Дипломная работа Эйнштейна в Цюрихском политехникуме была посвящена теплопроводности¹⁸, явлению, во многом родственному электропроводности и долго занимавшему Эйнштейна. Интересно, что и у Н. Бора дипломная работа и диссертация были посвящены электронной теории металлов. Однако оба великих физика, по-видимому, четко ощущали, что для прогресса в этой области необходимы какие-то принципиально новые идеи; действительно, первые успехи были достигнуты только

¹⁵ Эйнштейновский сборник, 1974. М.: Наука, 1976, с. 23.

¹⁶ Там же, с. 18.

¹⁷ Там же, с. 27, 29.

¹⁸ *Зелиг К.* Альберт Эйнштейн. М.: Атомиздат, 1965, с. 31.

в 1927 г., после создания квантовой механики. Великие ученые, как об этом лишний раз свидетельствует сказанное выше, велики не только своим творческим и интеллектуальным потенциалом, но также и умением правильно выбирать направления приложения своего таланта.

Первые результаты опытов со ртутью Камерлинг-Оннес расценил как блестящее подтверждение теории, развитой им по образцу эйнштейновской. Однако уже скоро стало ясно, что с понижением температуры сопротивление падает гораздо быстрее, чем предсказывала его формула, — фактически скачком и сразу до нуля (т. е. ртуть переходила в сверхпроводящее состояние). В своем докладе на первом Сольвеевском конгрессе Камерлинг-Оннес по этому поводу замечает: «Я пока еще не могу полностью объяснить себе это обстоятельство»¹⁹. Как известно, это «пока» растянулось почти на столетия. В 1956 г. Р. Фейнман, выступая на Международной конференции по теоретической физике в Сиэтле, говорил: «Квантовая механика была создана в 1926 г. и в течение следующего десятилетия с огромным качественным успехом была быстро применена ко всевозможным явлениям. Получились хорошие теории металлов, других твердых тел, жидкостей, химических явлений. Однако, продолжая продвигать фронтальную линию нашего знания, мы оставили в тылу под осадой два города, полностью окруженные знанием, но сами по себе изолированные и неприступные»²⁰. Под «осажденными городами» Фейнман имел в виду сверхпроводимость и сверхтекучесть. Свое выступление американский теоретик закончил так: «Единственная причина того, что мы не можем справиться с проблемой сверхпроводимости, состоит в отсутствии у нас достаточного воображения». Доклад состоялся 18 сентября, а 21 сентября редакцией журнала «Physical Review» было получено письмо²¹ молодого теоретика Л. Купера, у которого оказалось достаточно воображения для того, чтобы ввести концепцию электронных пар (знаменитые «куперовские» пары)²² — последнее недостаю-

¹⁹ La Théorie du Rayonnement et les Quanta. Paris:Gautier-Villars, 1912, p. 304.

²⁰ *Feinman R.* — Rev. Mod. Phys., 1957, 19, p. 205.

²¹ *Cooper L.* — Phys. Rev., 1956, 104, p. 1189.

²² Следует сказать, что Купер работал в это время под руководством Дж. Бардина, «атаковавшего» проблему сверхпроводимости на протяжении более чем пятнадцати лет. Можно пола-

щее звено в построении микроскопической теории сверхпроводимости, завершенной американцами Дж. Бардином, Л. Купером и Дж. Шриффером к середине 1957 г. Примерно в это же время независимо от американских авторов Н. Н. Боголюбов, воспользовавшись лишь идеей куперовских пар, построил аналогичную, но значительно более последовательную теорию.

Современное понимание сверхпроводимости, этого исторически первого макроскопического квантового эффекта, явилось, как это, впрочем, неоднократно подчеркивали сами авторы теории, плодом полувекового коллективного труда большого числа физиков, в том числе самых выдающихся. Так, в частности, над этой загадкой трудились такие корифеи физики, как Г. Лоренц, Дж. Дж. Томсон, Н. Бор, Э. Шредингер, В. Гейзенберг, М. Борн, А. Зоммерфельд, Л. Д. Ландау, Ф. Блох, Л. Бриллюэн, Р. Фейнман. Всех захватывала красота и необычность (с самого начала было ясно, что речь идет о движении электронов через металл «без трения») явления. Не удивительно, что в этой коллективной деятельности принял участие и Эйнштейн.

Решение проблемы сверхпроводимости, явившееся, по выражению Фейнмана, «триумфом современной науки»²³, стало возможным после выявления всех фундаментальных черт явления: отсутствие электросопротивления (1911 г.), скачок теплоемкости в точке перехода (1932 г.), непроницаемость сверхпроводника по отношению к магнитному полю — эффект Мейснера (1933 г.), изотопический эффект (1950 г.), существование энергетической щели в спектре возбуждений (1953 г.); кроме того, важную роль сыграло открытие глубоко родственного явления — сверхтекучести жидкого гелия (1938 г.). До создания этой экспериментальной базы достигнуть понимания едва ли было возможно, хотя с теоретической стороны ничего, кроме квантовой электронной теории металлов на уровне 1928 г., в принципе не требовалось. Как отметил в своей нобелевской лекции Бардин, «даже

гать, что Бардин направил Купера на поиск механизма спаривания электронов под влиянием работ В. Л. Гинзбурга и М. Шафрота, в которых было показано, что сверхпроводимость может быть связана с переходом от электронов, подчиняющихся статистике Ферми — Дирака, к электронным образованиям (в частности, парным), описываемым статистикой Бозе—Эйнштейна.

²³ Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1967, т. 9, с. 236.

если бы кому-то это (построение теории сверхпроводимости. — *Б. Я.*) и удалось, никто не поверил бы, что такие замечательные свойства действительно могут встречаться в природе»²⁴. Не приходится поэтому удивляться, что и Эйнштейн, в работах которого слово «сверхпроводимость» встречается лишь до 1925 г., не внес прямого вклада в решение этой задачи. До того как он полностью отдался попыткам построения единой теории поля, эта проблема неизменно привлекала его внимание. Но не в духе великого физика было придумывать теории для объяснения отдельного экспериментального факта, пусть даже удивительного, и участвовать в своеобразном конкурсе на быстроту решения задачи. Отправными моментами эйнштейновских построений были поиск фундаментальных общих принципов, стремление к отвечающей его философско-эстетическим взглядам единой гармоничной картине природы. При этом в качестве экспериментальной базы им привлекались чаще всего давно известные, ставшие классическими результаты, данные же новейших исследований он использовал скорее в качестве аргументов, возможно подтверждающих различные следствия развиваемых им представлений. В этой связи, видимо, уместно привести высказывание Эйнштейна, относящееся еще к 1914 г.: «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 единичными эмпирически установленными общими закономерностями. Наоборот, он застывает в беспомощном состоянии перед единичными результатами эмпирического исследования до тех пор, пока не раскроются принципы, которые он сможет сделать основой для дедуктивных построений»²⁵.

Свою небольшую статью «Теоретические замечания к сверхпроводимости металлов» Эйнштейн начинает кратким критическим обзором классической электронной теории металлов Рикке—Друде—Лоренца²⁶, распространяющей на электроны металла газокинетические представления Максвелла—Больцмана. «Эта теория добилась поразительного успеха,— пишет Эйнштейн,— вызвав

²⁴ Физики о физике. Сверхпроводимость. М.: Знание, 1975, с. 3.

²⁵ *Эйнштейн А.* Физика и реальность. М.: Наука, 1965, с. 6.

²⁶ Теперь эту теорию именуют теорией Друде—Лоренца, довольно несправедливо предавая забвению вклад немецкого физика Э. Рикке.

с замечательной точностью коэффициенты закона Видемана—Франца через отношение механической массы электрона к его заряду. Она также качественно объяснила термоэлектрические явления, эффект Холла и т. д. И какие бы изменения ни произошли с теорией электропроводности в будущем, всегда, по-видимому, сохранится основа ее основ — гипотеза о том, что электрическая проводимость определяется движением электронов». Большинство физиков той эпохи, учитывая те же достижения классической электронной теории, относились к ней значительно более благожелательно. Эйнштейн же, хотя и в осторожных выражениях, по существу, высказывает довольно еретическую по тем временам мысль: единственное, что неоспоримо в этой теории, это положение о переносе тока электронами. Эйнштейн обосновывает свою точку зрения известными аргументами — «катастрофа» с электронной теплоемкостью (т. е. тот факт, что электроны, обилием и подвижностью которых теория объясняет высокие электропроводность и теплопроводность металла, не дают существенного вклада в его теплоемкость) и трудность интерпретации известной из опытов температурной зависимости сопротивления с помощью следующей с необходимостью из этой теории формулы:

$$\rho = \frac{2m}{e^2} \frac{u}{nl}, \quad (1)$$

где ρ — удельное сопротивление, а m , e , u , n и l соответственно масса, электрический заряд, скорость теплового движения, плотность и длина свободного пробега электронов, для которой классическое («геометрическое») рассмотрение дает выражение $l = \frac{1}{\pi N R^2}$ (N — число атомов в единице объема, R — их эффективный радиус). Из этой формулы в разительном противоречии с опытом следует, что с ростом температуры проводимость должна улучшаться, поскольку число свободных электронов за счет процессов типа диссоциации должно увеличиваться быстрее, чем их средняя скорость теплового движения, пропорциональная согласно классической статистике \sqrt{T} (T — абсолютная температура). Эти трудности выявились давно, но общее мнение было таково, что они не принципиальны и их можно устранить, слегка подправив формулу (1). Такой «подправочной» деятельностью, в ходе которой удалось, впрочем, нащупать некоторые подтвер-

Дившиеся впоследствии принципы, занимались тогда многие, благо наличие в формуле трех не определяемых экспериментально параметров u , n и l представляло для этого широкие возможности.

Но помимо этих известных и часто обсуждавшихся трудностей Эйнштейн упоминает еще один в «высшей степени примечательный факт, который никак не поддается объяснению» с помощью формулы (1). Речь здесь идет о выявленном четко впервые Камерлингом-Оннесом факте наличия у металлов (по крайней мере, несверхпроводящих) двух слагающих электросопротивления — «идеальной части», исчезающей при приближении к абсолютному нулю температуры, и «примесной» компоненты, которая не зависит от температуры и тем больше, чем грязнее металл. Из высказывания Эйнштейна по этому вопросу видно, что он предпринимал попытки объяснения влияния примесей на сопротивление (отголоски этих попыток, как уже говорилось выше, явно прослеживаются в переписке с Бессо), однако никаких определенных результатов получить ему не удалось.

Рассмотрев эти трудности, Эйнштейн делает вывод о том, что «теория теплового движения электронов оказывается несостоятельной уже в области обычной проводимости, даже без учета сверхпроводимости».

Эйнштейн кратко останавливается и на камерлингоннесовской попытке построения квантовой теории электропроводности. Как уже говорилось выше, голландский физик исходил из эйнштейновской квантовой теории теплоемкости твердых тел. Он предположил, что в формуле для удельного сопротивления n от температуры не зависит (что согласуется с современными представлениями), а l обратно пропорциональна квадратному корню из величины тепловой энергии металла (путем дифференцирования которой по температуре получается знаменитая эйнштейновская температурная зависимость теплоемкости). По этому поводу Эйнштейн пишет следующее: «Видоизменив таким образом формулу (1), Камерлингоннес сумел представить свойства металлов в несверхпроводящем состоянии с замечательной точностью (разумеется, с учетом довольно низкой точности тогдашних измерений. — *Б. Я.*). Гипотеза о зависимости длины свободного пробега от теплового возбуждения выглядит не очень странной; можно представить себе, что в невозбужденном металле электрон движется, как в пустоте,

но что неоднородности, обусловленные тепловыми колебаниями, создают электрические поля, которые отклоняют электроны... успех рассуждений Камерлинг-Оннеса показывает, по-видимому, что сопротивление определяется тепловым возбуждением металла (не электронов). Только таким образом можно объяснить... что сопротивление несверхпроводящих металлов при низких температурах перестает зависеть от температуры. Кривизна кривой сопротивления при низких температурах благодаря этому оказывается косвенно связанной с квантовой теорией». Таким образом, Эйнштейн впервые высказывает полную глубокого смысла, не лишенную парадоксальности и едва ли не основную для современной электронной теории металлов идею о «тесно набитом» атомами металле как о вакууме для электронов.

Этот вывод, находящийся в разительном контрасте с бытовавшими до середины 20-х годов представлениями об электронах в металле как о дроби в ящике с бильярдными шарами, наряду с другими полученными Эйнштейном указаниями на корпускулярно-волновой дуализм, возможно, сыграл определенную роль в его быстром восприятии концепции де Бройля. Следует, однако, сказать, что основоположником этой плодотворной идеи все-таки является Камерлинг-Оннес, который выдвинул ее еще в 1910 г., правда, в весьма сыром виде. Когда голландский ученый приступал к измерениям электропроводности при гелиевых температурах, никто не знал, как поведет себя электро-сопротивление при приближении к абсолютному нулю. Полагали, что, скорее всего, начиная с достаточно низкой температуры, сопротивление станет быстро возрастать в результате «конденсации» свободных электронов на атомах, т. е. металл станет диэлектриком. Опыт, как уже говорилось, продемонстрировал совершенно другое поведение. В своем наброске теории Камерлинг-Оннес вслед за Эйнштейном представил металл в виде совокупности вибраторов (так он называет планковские квантовые осцилляторы), которые, поскольку они имеют отношение к сопротивлению металлов, он иногда именуется «резистивными» вибраторами. На основании того, что сопротивление, по крайней мере «идеальное», исчезает при самых низких температурах, и исходя из своей формулы, Камерлинг-Оннес делает следующий вывод: «Представляется, что свободные электроны остаются в основном свободными, и кажется, что замирают именно движущиеся части вибра-

торов, движение которых при обычной температуре создает препятствия проводимости; эти движения исчезают при достаточном понижении температуры, когда вибраторы становятся практически неподвижными». На Сольвеевском конгрессе Камерлинг-Оннес снова возвращается к этой мысли: «Достаточно допустить (для объяснения низкотемпературного хода сопротивления.— *Б. Я.*), что препятствия движению электронов в чистом металле возникают из-за возбуждения осцилляторов Планка».

Что касается собственно сверхпроводимости, то Эйнштейн набрасывает такую картину: «...при современном состоянии наших знаний дело выглядит так, как будто свободных электронов в металлах нет вообще. Тогда проводимость металла должна заключаться в том, что атомы обмениваются периферийными электронами. Но если какой-нибудь атом получит от соседнего атома электрон, не отдавая приблизительно в то же время свой электрон соседнему атому, то энергия нашего атома должна претерпевать сильные изменения, чего, конечно, не происходит в случае токов в сверхпроводнике, циркулирующих без затраты энергии. Таким образом, представляется неизбежным, что сверхпроводящие токи переносятся замкнутыми цепочками молекул (проводящими цепочками), электроны которых беспрестанно совершают циклический обмен». Эта идея сверхпроводящих токов по «атомным цепочкам» активно обсуждалась экспериментаторами и теоретиками до середины 30-х годов ²⁷.

Конечно, с позиций сегодняшнего дня набрасываемая Эйнштейном картина выглядит достаточно наивной и механистической, да и сам он относится к ней скептически: «При нашем явно недостаточном знании законов поведения сложных систем мы очень далеки от того, чтобы воплотить эту довольно неопределенную идею в теорию». Согласно Эйнштейну участвующие в сверхпроводящем токе электроны непрерывно переходят с квантовой орбиты одного атома на квантовую орбиту другого. Поэтому можно было ожидать, что разрыв цепочек одинаковых атомов окажется губительным для сверхпроводимости. Камерлинг-Оннес и другие исследователи подвергли это предположение экспериментальной проверке и показали, что оно не соответствует истине — сверхпроводимость была зарегистрирована как у сплавов, так и у спаев и контактов между одинако-

²⁷ *Мейсснер В.* — УФН, 1933, 13, с. 639.

выми и различными сверхпроводниками. Впрочем, сам Эйнштейн в постскрипуме к своим «Замечаниям» указывает, что его соображения «частично опровергаются» последними экспериментами Камерлинг-Оннеса.

Кроме того, Эйнштейн предлагает экспериментаторам еще одну задачу: «...необходимо иметь в виду, что проводящие цепочки могут пропускать не сколь угодно слабые, а только конечные токи определенной величины, что также можно проверить опытом». И это предположение не подтвердилось в экспериментах. Тем не менее представляется, что высказанные Эйнштейном соображения, которые находились в поле зрения физиков до конца 20-х годов, принесли ранним исследованиям сверхпроводимости определенную пользу — в них по крайней мере содержались хоть какие-то конструктивные положения, экспериментальная проверка которых позволила отсеять некоторые из непродуктивных путей в поисках ключа к разгадке природы явления.

В своих работах по сверхпроводимости Камерлинг-Оннес останавливается и на других суждениях Эйнштейна. Так, в 1924 г. в докладе на четвертом Сольвеевском конгрессе, отметив неопределенность данных по сверхпроводимости галлия, он говорит: «Что касается галлия, то мы все еще находимся под впечатлением замечания Эйнштейна о том, что в металлах с очень низкой температурой плавления примеси присутствуют лишь в комплексах, отделенных от самого металла»²⁸. В устах такого крупного мастера физического эксперимента, каким был Камерлинг-Оннес, такая фраза представляется довольно примечательной.

К Эйнштейну восходит еще одна важная идея о природе сверхпроводимости. По авторитетному свидетельству Я. Г. Дорфмана и И. К. Кикоина, которые в 30-х годах активно занимались изучением этого явления, Эйнштейн в 1920 г. впервые²⁹ выдвинул предположение о том, что сверхпроводимость аналогична до некоторой степени ферромагнетизму. Как при ферромагнетизме «спонтанное намагничивание» объединяет магнетики в целые комплексы, сопротивляющиеся тепловому движению, так и при сверхпроводимости, согласно этому представлению, какие-то взаимные силы заставляют электроны двигаться без

²⁸ *Kamerlingh-Onnes H.* — Leiden communications, Suppl., N 50a, p. 12.

²⁹ Заметим, правда, что нечто подобное предполагал еще Дж. Дж. Томсон (*Thomson J. J.* — *Phil. Mag.*, 1915, (6)30, p. 192).

трения совместно целыми «цепочками» или «тучами». Блох и Ландау называли их затем «спонтанными токами», не рассеивающимися от теплового движения³⁰. С тех пор эта действительно далеко не прямая, но очень глубокая аналогия многократно рассматривалась множеством авторов, но ее истинный смысл стал выявляться лишь после создания в 1950 г. В. Л. Гипзбургом и Л. Д. Ландау феноменологической теории сверхпроводимости. В этой теории, базирующейся на разработанной Л. Д. Ландау общей трактовке фазовых переходов второго рода, переход из нормального в сверхпроводящее состояние, подобно переходу из парамагнитного в ферромагнитное состояние, описывается путем введения параметра упорядочения, равного нулю для менее упорядоченной фазы (нормальный металл, парамагнетик) и имеющего конечное значение для более упорядоченной фазы (сверхпроводник, ферромагнетик). В случае ферромагнитного перехода роль параметра упорядочения играет спонтанная намагниченность, а в случае перехода в сверхпроводящее состояние — «концентрация сверхпроводящих электронов», т. е. приходящееся на единицу объема металла число электронов, «участвующих» в сверхпроводимости. Уже после создания Дж. Бардином, Л. Купером и Дж. Шриффером, а также Н. Н. Боголюбовым современной микроскопической теории сверхпроводимости было понятно, что сверхпроводимость и ферромагнетизм, по существу, являются взаимно противоположными явлениями в том смысле, что «обусловленное фононами межэлектронное притяжение (а именно оно, как известно, и ответственно за сверхпроводимость.— *Б. Я.*) исключает ферромагнетизм, а взаимодействия, приводящие к ферромагнетизму, соответственно исключают сверхпроводимость»³¹.

Конечно, вряд ли в 20-х годах можно было помышлять о чем-то подобном, но тот факт, что уже тогда Эйнштейн ощущал важнейшую особенность явления сверхпроводимости — его, как теперь говорят, коллективный характер, лишний раз подчеркивает силу его интуиции.

О том, сколь принципиальное значение придавал Эйнштейн проблеме сверхпроводимости, свидетельствует его замечание, высказанное в 1913 г. на втором Сольвеевском

³⁰ Дорфман Я. Г., Кикоин И. К. Физика металлов. М.; Л.: ГТТИ, 1933, с. 408.

³¹ Андерсон Ф. Теория сверхпроводимости. М.: Изд-во иностр. лит., 1960, с. 285.

конгрессе в дискуссии по докладу М. Лауэ о дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке. В. Нернст поднял вопрос о том, можно ли на основании рентгеновских данных сделать какие-либо определенные выводы относительно «нулевой» энергии кристаллической решетки, т. е. энергии ее колебательных движений при абсолютном нуле температуры. Эти «нулевые» колебания, являющиеся, как выяснилось после создания квантовой механики, простым следствием соотношения неопределенностей В. Гейзенберга, были введены М. Планком в 1909 г., но их реальность долго оставалась дискуссионной. В выполненной Эйнштейном совместно с О. Штерном в 1912 г. работе «Некоторые аргументы в пользу гипотезы о молекулярном возбуждении при абсолютном нуле» было показано, что результаты измерений А. Эйкена (ученик Нернста) температурной зависимости теплоемкости водорода свидетельствуют о существовании нулевых колебаний. Вопрос Нернста, по существу, сводился к следующему: столь же реальны нулевые колебания, как обычные упругие колебания атомов кристаллической решетки? По этому поводу Эйнштейн выразил самое серьезное сомнение. «Действительно, если энергия (тепловая) упругих колебаний при понижении температуры стремится не к нулю, а к конечной величине, то можно ожидать, что все температурно зависящие свойства твердого тела будут иметь аналогичный (температурный.— *Б. Я.*) ход, а именно будет иметь место тенденция к постоянным и конечным значениям. Но это противоречит важному открытию Камерлинга-Оннеса, который обнаружил, что чистые металлы ³² при приближении к абсолютному нулю становятся сверхпроводящими» ³³. Ввиду этого Эйнштейн считает необходимым отказаться от аргументов, приведенных им и Штерном в пользу существования нулевой энергии ³⁴, несмотря на хорошее согласие выводов с экспериментальными результатами. Эйнштейн также объявляет некорректным содержащийся в этой работе вывод планковского закона излучения черного тела, основанный на предположении о существовании нулевой энергии и не требующий «никаких предположений о дискретности каких-либо величин» ³⁵. Дальнейшее развитие квантовой механики и электронной теории металлов

³² О сверхпроводимости сплавов тогда еще не было известно.

³³ *La Structure de la Matière*. Paris: Gautier-Villars, 1921, p. 105.

³⁴ *Ibid.*, p. 108.

³⁵ *Эйнштейн А.* Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1966, т. 3, с. 319.

позволило устранить возражение, выдвинутое Эйнштейном, и тем самым реабилитировать его работу, «забракованную» им же самим.

Интересно, что вопросы, связанные со сверхпроводимостью и нулевой энергией, послужили стимулом к постановке в 1915 г. опытов, которые привели к открытию эффекта Эйнштейна—де Гааза, заключающемуся, как известно, в закручивании свободно подвешенного ферромагнитного стержня при перемагничивании. Еще Ампер предположил, что магнитные свойства пара- и ферромагнитных материалов объясняются замкнутыми токами, циркулирующими в их молекулах. «Предположение о токах, текущих без сопротивления (т. е. фактически о сверхпроводящих токах.— *Б. Я.*),— пишут Эйнштейн и де Гааз ³⁶,— должно было вызвать сомнения уже во времена Ампера (...). Поскольку, кроме того, из закона Кюри—Ланжевена следует, что магнитный момент молекулы не зависит от температуры и, следовательно, существует также при $T = 0$ ³⁷ (T — абсолютная температура.— *Б. Я.*), то энергия кругового движения электронов (т. е. круговых молекулярных токов Ампера.— *Б. Я.*) должна быть так называемой нулевой энергией— представление, которое у многих физиков вызывает вполне понятное сопротивление». В другой статье ³⁸ о тех же опытах Эйнштейн замечает: «Сегодня (т. е. на уровне 1915 г.— *Б. Я.*) ни один теоретик не скажет слова «нулевая энергия» без полусмущенной, полуиронической усмешки. Эти трудности присущи также и взглядам Ампера». Под последними Эйнштейн имеет в виду то, что, согласно уравнениям Максвелла, вращающийся электрон должен терять свою кинетическую энергию вследствие излучения. В результате этого круговой ток должен затухать, и, следовательно, магнитный момент молекулы будет уменьшаться. Эксперименты Эйнштейна и де Гааза непосредственно подтвердили существование молекулярных токов Ампера и тем самым дали Эйнштейну аргументы в пользу реальности движений при температуре абсолютного нуля и возможности протекания незатухающих токов. Стоит заметить, что ни то ни другое не совместимо с классическими представлениями. Кстати, в своих «Теоретических замечаниях к сверхпроводимости металлов» Эйнштейн не забывает упомянуть, что

³⁶ Там же, с. 363.

³⁷ Это было впервые подтверждено работами Камерлинг-Оннеса.

³⁸ *Эйнштейн А.* Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1966, т. 3, с. 359.

«Камерлинг-Оннес сравнивает замкнутые токи в сверхпроводниках с молекулярными токами Ампера». Таким образом, имеются все основания полагать, что Эйнштейн уже в 1915 г. понимал, что сверхпроводимость есть явление сугубо квантовое и что сверхпроводящий ток в значительной мере аналогичен электронным движениям в молекулах и атомах (эти представления вполне согласуются с современными). Довольно удивительно, что от первых квантовых работ Бора, появившихся в середине 1913 г., до опытов Эйнштейна — де Гааза прошло менее двух лет, а Камерлинг-Оннес уже в марте — апреле 1914 г. выполнил «сенсационный»³⁹ опыт, продемонстрировавший существование в замкнутой сверхпроводящей катушке незатухающего, «вечного» тока⁴⁰ — макроскопического аналога стационарной квантовой орбиты Бора.

Насколько можно судить, в последний раз к сверхпроводимости Эйнштейн возвращается в написанной в декабре 1924 г. статье «Квантовая теория одноатомного идеального газа. Второе сообщение»⁴¹, статье, являющейся, по мнению известного историка науки М. Клейна, «еще одним из его (Эйнштейна.— *Б. Я.*) шедевров, который содержит на своих двенадцати страницах столько же идей, сколько годичный том физического журнала»⁴². Развивая статистику идеального одноатомного газа, состоящего из неизменного числа частиц, в духе предложенного индийским физиком Ш. Бозе статистического метода описания излучения как фотонного газа с переменным числом частиц, Эйнштейн показал, что при определенной, достаточно низкой температуре, определяемой соотношением

$$T_0 = 3,31 \frac{\hbar^2}{k} \cdot \frac{n^{2/3}}{m} \quad (2)$$

(здесь \hbar и k — соответственно постоянные Планка и Больцмана, m — масса атомов газа, n — их плотность, т. е. число в единице объема), возникает весьма своеобразное явление, получившее название конденсации Бозе — Эйнштейна. Это явление заключается в том, что начиная с температуры T_0 при дальнейшем понижении температуры

³⁹ Хвольсон О. Д. Курс физики: Том дополнительный. М.; Л.: Госиздат, 1926, с. 219.

⁴⁰ Kamerlingh-Onnes H.— Leiden communications, 1914, N 140b, 140c, 141b.

⁴¹ Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. М.: Наука, т. 3, с. 489.

⁴² Эйнштейновский сборник, 1966. М.: Наука, 1966, с. 243.

все больше частиц накапливается, «конденсируется» в наименьшем квантовом состоянии с равными нулю энергией и импульсом (при $T = 0$ в этом состоянии оказываются все частицы). Речь идет, конечно, о конденсации не в реальном, а в импульсном пространстве — все больше частиц попадают в одну и ту же ячейку импульсного пространства⁴³; доля частиц, попадающих в бозе-эйнштейновский «конденсат», пропорциональна $[1 - (T/T_0)^{3/2}]$. Отсюда следует, что наличие конденсата будет сказываться тем сильнее, чем ниже температура системы по сравнению с T_0 . Как нетрудно убедиться прямой подстановкой в (2) соответствующих значений n и m , температура T_0 для обычных газов чрезвычайно мала, так что нет никакой надежды обнаружить эффекты бозе-эйнштейновской конденсации. Поэтому Эйнштейн обращается к «газу» свободных электронов металла — ведь масса электрона по крайней мере на три порядка меньше, чем атомов и молекул газов. Таким образом, для отношения T/T_0 , характеризующего число электронов, находящихся не в конденсате, а в возбужденном состоянии, получается оценка $5,5 \cdot 10^{-5}$ (при комнатной температуре). Эйнштейн полагает, что в этом заключено объяснение того, почему электроны не вносят заметного вклада в теплоемкость металла, т. е. он устраняет серьезнейшее противоречие классической электронной теории металлов. Сейчас мы знаем, что это заключение неправильно, ибо электроны подчиняются не статистике Бозе — Эйнштейна, а статистике Ферми — Дирака, но ведь до появления последней оставалось еще два месяца. И тем не менее можно утверждать, что Эйнштейну удалось, наконец, нащупать путь к устранению «катастрофы с электронной теплоемкостью», борьба с которой безуспешно велась физиками около четверти столетия. Эйнштейн первым понял, что малость электронного вклада в теплоемкость металла является следствием вырождения электронного газа, т. е. обусловленного квантовыми эффектами отклонения от поведения, предписываемого статистикой Максвелла — Больцмана. О значении этих идей Эйнштейна можно судить по следующему отрывку из письма А. Зоммерфельда от 1 ноября 1927 г.:

⁴³ Здесь, естественно, имеются в виду частицы с целочисленным спином, на которые принцип запрета Паули не распространяется.

«Дорогой Эйнштейн!

Прилагаемая заметка, может быть, заинтересует Вас, потому что Вы в Берлинской академии высказали нечто подобное в связи со своей статистикой (несомненно, что имеются в виду изложенные выше соображения Эйнштейна относительно электронов в металлах. — *Б. Я.*). Собственно говоря, я хочу Вас просить прочитать не эту заметку, а полную работу в «*Zeitschrift für Physik*»⁴⁴, которую как раз заканчиваю».

Примечателен и ответ Эйнштейна:

«Дорогой Зоммерфельд!

Я с большим интересом прочитал Вашу теорию, и у меня сложилось впечатление, что по существу это спасение того, что в принципе было верным в первоначальной теории металлов»⁴⁵.

В качестве еще одного аргумента, подкрепляющего тезис о влиянии эйнштейновской работы на Зоммерфельда, можно сослаться на его «Беглые воспоминания о моей преподавательской деятельности», где говорится, что именно в 1927 г. Зоммерфельд впервые обратился к электронной теории металлов⁴⁶.

Что касается сверхпроводимости, то в свете нового развитого Эйнштейном представления о «конденсации» электронного газа ему рисуется, что возможно, имеются какие-то удерживающие электронный конденсат в покое слабые связи, которые исчезают при достаточно низких температурах, в результате чего число электронов, участвующих в проводимости, резко возрастает. Однако Эйнштейн снова не настаивает на своем подходе и сам указывает на значительные трудности, к которым он приводит.

В первой половине 1926 г. Э. Шредингер выполняет свой знаменитый цикл основополагающих работ по квантовой механике, первая статья которого поступила в редакцию «*Annalen der Physik*» 27 января, вторая — 23 февраля, третья — 10 мая и четвертая — 21 июня. В статье «Об отношении квантовой механики Гейзенберга — Борна — Иордана к моей» (поступила в редакцию того же журнала 18 марта 1926 г.) Шредингер отмечает: «Моя теория была стимулирована работой Л. де Бройля... и короткими, но

⁴⁴ Эта работа, первоначально доложенная Зоммерфельдом в сентябре 1927 г. на Конгрессе памяти А. Вольты в Комо (Италия), лежит в основе современной электронной теории металлов. В ней впервые для расчета электронных свойств применена статистика Ферми—Дирака.

⁴⁵ *Зоммерфельд А.* Пути познания в физике. М.: Наука, 1973, с. 238.

⁴⁶ Там же, с. 186.

в высшей степени прозорливыми замечаниями Эйнштейна» (следует ссылка на «Второе сообщение» по квантовому идеальному газу)⁴⁷. Еще более определенно Шредингер высказывается по этому поводу в письме Эйнштейну от 23 апреля 1926 г.: «Благодарю Вас сердечно за Ваше в высшей степени любезное письмо от 16-го. Ваше и Планка одобрение больше значат для меня, чем одобрение полсвета. Впрочем, все это дело (имеется в виду шредингеровская волновая механика.— *Б. Я.*) не возникло бы ни теперь, ни когда-либо позже (я имею в виду свое участие), если бы Вы в Вашей второй статье о квантовой теории газов не щелкнули меня по носу, указав на важность идей де Бройля»⁴⁸.

Да и мог ли Эйнштейн не оценить «важность идей де Бройля»? Ведь представления о двойственной, корпускулярно-волновой природе вещества и излучения вызревали у него с самого начала его научной деятельности, даже размышления над электропроводностью металлов, как было отмечено ранее, также наводили его на размышления в этом направлении. Результат эксперимента А. Комптона, непосредственно продемонстрировавшего в 1923 г., «что излучение ведет себя так, как если бы оно состояло из дискретных корпускул, не только в смысле передачи энергии, но и в смысле передачи количества движения»⁴⁹, по существу, не открыл для Эйнштейна ничего нового. Основной задачей работ Эйнштейна по квантовой теории идеального газа было как можно глубже проследить аналогию между частицами (атомы газа) и электромагнитными волнами (кванты излучения); по словам Эйнштейна, «аналогия должна быть полной». Уже осенью 1924 г., как раз перед знакомством с диссертацией де Бройля (которую в своем «Втором сообщении» Эйнштейн характеризует как «заслуживающую всяческого внимания»), Эйнштейн утверждает в справедливости своих выводов⁵⁰ о специфическом «конденсационном» явлении и о том, что «каждому движению (атома газа.— *Б. Я.*) соответствует волновое поле».

За полтора месяца до своей первой работы по волновому уравнению Шредингер написал статью «К эйнштейнов-

⁴⁷ Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике. М.: Наука, 1976, с. 56.

⁴⁸ Там же, с. 331.

⁴⁹ Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1966, т. 3, с. 58.

⁵⁰ Клейн М. Эйнштейновский сборник, 1966. М.: Наука, 1966, с. 241.

ской теории газа»⁵¹, посвященную в основном обоснованию новой статистики на базе «волновой теории де Бройля — Эйнштейна» (выражение Шредингера). Выводы Шредингера в целом подтверждают и развивают идеи Эйнштейна, однако против бозе-эйнштейновской конденсации выдвигается возражение — наименьшее квантовое состояние, в которое по Эйнштейну с понижением температуры конденсируется все больше и больше частиц, не может характеризоваться равными нулю энергией и импульсом.

«Я мог бы, отвлекаясь на мгновение от подробностей, недвусмысленно подчеркнуть,— пишет по этому поводу Шредингер,— что допущение состояния покоя несовместимо с основами теории, потому что, как было указано выше, ему соответствует бесконечно длинная фазовая волна (на современном языке, волна де Бройля.— *Б. Я.*)». Действительно, длина ассоциированной с частицей волны не должна превышать размеры содержащего газ сосуда. Однако, как выяснилось в дальнейшем, это возражение несущественно, в особенности, если имеются в виду макроскопические системы, характерные размеры которых чрезвычайно велики по сравнению с атомными параметрами.

Другое возражение против бозе-эйнштейновской конденсации было выдвинуто учеником П. Эренфеста, молодым голландским теоретиком Дж. Уленбеком в его диссертации «О статистических методах в квантовой теории», защищенной в Лейдене в 1927 г. Уленбек утверждал, что конденсационное явление получилось у Эйнштейна в результате математически некорректного перехода от суммирования к интегрированию (стандартный прием в расчетах по статистической физике). Этот вывод Уленбека (прославившегося в 1925 г. открытием совместно с С. Гаудсмитом спина электрона), подкрепленный авторитетом такого ревнителя чистоты физических теорий, как П. Эренфест, получил всеобщее признание. В 1932 г. на «несостоятельность» концепции указал Л. Бриллюэн в своем классическом труде «Квантовая статистика»⁵².

Неясность в поведении эйнштейновского газа при низких температурах отмечает в 1933 г. П. Иордан⁵³, как

⁵¹ Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике. М.: Наука, 1976, с. 172.

⁵² Бриллюэн Л. Квантовая статистика. Харьков; Киев: ГНТИ Украины, 1934, с. 142.

⁵³ Иордан П. Статистическая механика на основе квантовой теории. Харьков; Киев: ОНТИ НКТП, 1935, с. 86.

математически некорректный расценивает вывод Эйнштейна Р. Толмен в своей обширной монографии по статистике ⁵⁴, вышедшей в 1938 г. Таким образом, удивительное и, как оказалось впоследствии, весьма фундаментальное явление бозе-эйнштейновской конденсации было на тринадцать лет предано теоретиками забвению, пока его в 1938 г. не реабилитировал Ф. Лондон. В этой связи интересно привести строки из письма М. Борна (который, кстати, тоже относился к этому явлению скептически) Эйнштейну, написанного в июле 1925 г.: «Видит бог, твой мозг куда более пронизателен. Его творения ясны, просты и захватывают самую суть. Мы доходим до этого с трудом только через несколько лет. Вот так оно и было с твоим вырожденным газом и со статистикой Бозе. К счастью, здесь (в Геттингене. — *Б. Я.*) появился Эренфест, который нам все это представил в должном свете. После этого я читал работу Луи де Бройля и понемножку только смог раскусить твои уловки. Теперь я полагаю, что «волновая теория материи» будет очень существенной вещью» ⁵⁵.

Хотя уже в 1938 г. стало ясно, что в отношении конденсации Эйнштейн был прав (в частности, это признал и Уленбек), рафинирование соответствующего математического вывода продолжалось еще лет пятнадцать.

На первых порах физики отнеслись к бозе-эйнштейновской конденсации недостаточно внимательно, и это довольно понятно — представлялось, что вся проблема имеет в лучшем случае лишь академический интерес. Действительно, ведь необходимые условия этого квантового конденсационного явления — высокие плотности и низкие температуры. О каком же идеальном газе можно говорить, когда эти условия на практике отвечают если не затвердеванию, то уж обычной конденсации, т. е. обращению газа в жидкость?!

Почему же в 1938 г. Ф. Лондон вспомнил о бозе-эйнштейновской конденсации? Дело в том, что в этом же году П. Л. Капица открыл еще одно удивительное низкотемпературное явление — сверхтекучесть жидкого гелия, явление, заключающееся в том, что при температурах ниже 2,17 К жидкий гелий протекает через узкие щели и капилляры, не испытывая вязкого сопротивления. Довольно скоро стало ясно, что сверхпроводимость и сверхтекуче-

⁵⁴ Tolman R. The Principles of Statistical Mechanics. Oxford: Univ. Press, 1938, p. 387.

⁵⁵ Эйнштейновский сборник, 1971. М.: Наука, 1972, с. 48.

честь — явления глубоко родственные; можно сказать, что сверхпроводимость — это сверхтекучесть «электронной жидкости» в металле. В 1935 г. ранний период наивных попыток понять сверхпроводимость заканчивается — Ф. Лондон (частично совместно со своим братом Г. Лондоном) формулирует правильные (и по современным понятиям) уравнения электродинамики сверхпроводников и набрасывает схему построения микроскопической теории сверхпроводимости, схему, которая в конечном счете фактически вылилась в программу, приведшую в 1957 г. к решающему успеху⁵⁶. Лондон уподобил сверхпроводник «одному гигантскому диамагнитному атому» и предположил, что электроны сосредоточены в одном наименьшем по энергии состоянии, волновая функция которого имеет длину волны макроскопических масштабов. Все это довольно тесно соотносится с содержанием эйнштейновского «Второго сообщения» по идеальному газу. Более того, в этой работе Эйнштейна, в ее § 9 с подзаголовком «Замечания о вязкости газов при низких температурах», содержится прямо-таки пророческий вывод. «Следовательно, вблизи такой температуры (когда длина λ ассоциированной с молекулой газа дебройлевской волны, соответствующей скорости теплового движения, сравнивается по порядку величины с диаметром молекулы σ . — *Б. Я.*) внезапно наступает довольно резкое падение вязкости с уменьшением температуры. Оценка этой температуры по условию $\lambda \simeq \sigma$ дает для H_2 и He соответственно 56 и 40 К. Конечно, это очень грубые оценки, но их можно уточнить»⁵⁷.

Эта мысль появляется у Эйнштейна, когда он изыскивает экспериментальные возможности наблюдения дифракционных явлений, связанных с введенными им и де Бройлем волновыми полями («пока еще неизвестной физической природы») материальных частиц. Поскольку для молекул, движущихся с тепловыми скоростями, λ очень мала, обычно существенно меньше σ , то «нечего и думать о наблюдении этой дифракции на реальных отверстиях или экранах». В случае же взаимных столкновений молекул при условии, что λ одного порядка или больше σ , помимо отклонений, описываемых обычной механикой, в результате дифракционных эффектов будут происходить почти так же часто и необъяснимые пока механически отклонения молекул,

⁵⁶ Нобелевская лекция Дж. Шриффера (Физики о физике. Сверхпроводимость. М.: Знание, 1975, с. 16).

⁵⁷ *London F.* — Proc. Roy. Soc., 1935, 152, p. 32.

уменьшающие длину свободного пробега, а следовательно, и вязкость⁵⁸.

Было бы непозволительной натяжкой считать это заключение предвосхищением сверхтекучести — речь ведь идет о явлениях в газах или молекулярных пучках, но нельзя не признать, что созидательная мысль Эйнштейна, невзирая на пробелы в фактическом материале, неуклонно развивается в продуктивном направлении.

Итак, в 1938 г. Лондон выдвигает весьма смелую гипотезу, отождествляя переход жидкого гелия в сверхтекучее состояние с бозе-эйнштейновской конденсацией вырожденного газа⁵⁹. Подставляя в эйнштейновскую формулу (2) плотность реального жидкого гелия, Лондон для T_0 получает значение 3,13 К, что впечатляюще близко к температуре 2,17 К, при которой происходит переход в сверхтекучее состояние.

С экспериментальными данными согласуются также найденные Лондоном значения энтропии и аномалия в температурной зависимости теплоемкости. Кроме того, Лондон анализирует эйнштейновский вывод конденсационного явления и приходит к заключению, что «утверждение Эйнштейна было дискредитировано ошибочно; более того, можно подкрепить некоторыми аргументами идею о том, что фазовый переход, который жидкий гелий претерпевает при температуре 2,17 К, возможно, следует рассматривать как конденсационное явление статистики Бозе—Эйнштейна, искаженное, конечно, наличием молекулярных сил, и тем фактом, что оно само проявляется не в газе, а в жидком состоянии».

Микроскопическая теория сверхтекучести была построена в 1947 г. (т. е. десятилетием раньше теории сверхпроводимости) Н. Н. Боголюбовым, описавшим это явление как конденсацию неидеального газа Бозе — Эйнштейна со слабым взаимодействием между частицами. Разгадка природы сверхтекучести в значительной мере способствовала достижению понимания сверхпроводимости.

Лондоновская идея уподобления жидкого гелия идеальному бозе-эйнштейновскому газу, имевшая скорей эвристическое значение, в течение долгого времени наталкивалась

⁵⁸ Согласно кинетической теории вязкость газа пропорциональна произведению mvl^n , где m , v и n соответственно масса, средняя скорость теплового движения и плотность молекул, а l — средняя длина свободного пробега.

⁵⁹ *London F.* — *Phys. Rev.*, 1938, 54, p. 947.

на ожесточенную критику. Надо сказать, что полная ясность в вопрос о роли бозе-эйнштейновской конденсации в сверхпроводимости, сверхтекучести и других явлениях не внесена и по сей день.

Представляется почти несомненным, что плодотворная идея Лондона была в значительной мере стимулирована «Вторым сообщением» Эйнштейна: там помимо вывода конденсационного явления, как уже говорилось выше, содержались замечания и о сверхпроводимости, и о макроскопических квантовых эффектах, и о возможном падении вязкости гелия при низких температурах.

Интересно, что в конце 40-х годов сверхтекучестью и сверхпроводимостью начинают заниматься М. Борн и В. Гейзенберг. Вот о чем сообщает Эйнштейну Борн в нескольких письмах этого периода.

«То, чем мы занимаемся в области физики, тебя не очень заинтересует. Нашу кинетическую теорию жидкости мы заключили работой о сумасшедшем гелии-II (сверхтекучий гелий.— *Б. Я.*)... Один из моих сотрудников-китайцев (Кай Шиа Шенг.— *Б. Я.*) работает над сверхпроводимостью, и я считаю, что его теория (основанная на нескольких моих предположениях) лучше гейзенберговской»⁶⁰.

«Недавно я снова разговаривал с ним (Гейзенбергом.— *Б. Я.*) 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 (в примечании при публикации этих писем сам Борн пишет, что из этих теорий сверхтекучести и сверхпроводимости «ничего путного не вышло». — *Б. Я.*). Похоже, что получается очень здорово. Неужели ты и вправду думаешь, что вся эта квантовая механика является заблуждением?»⁶¹

Второе из этих писем написано после опубликования Борном (совместно с Г. Грином) статьи «Квантовая теория жидкости». В этой статье было выражено согласие с напечатанным в журнале сразу же после нее письмом коллеги Борна физика Р. Фюрта, который писал: «Некоторое время тому назад мне пришло в голову, что явление сверх-

⁶⁰ Эйнштейновский сборник, 1972. М.: Наука, 1973, с. 43.

⁶¹ Там же, с. 48.

текучести может быть интерпретировано на основе концепции волн де Бройля...»⁶².

Следуют рассуждения, аналогичные воспроизведенным ранее Эйнштейновским аргументам более чем двадцатилетней давности относительно возможного падения вязкости гелия при низких температурах в результате дифракции.

Но ни Фюрт⁶³, ни Борн, который, как это было отмечено, с восторгом отнесся к работам Эйнштейна по квантовой статистике, об Эйнштейне не вспоминают и на него не ссылаются. Это же письмо разбирает в своей «Статистической физике» Я. И. Френкель⁶⁴, и опять ссылка на Эйнштейна отсутствует, хотя непосредственно перед этим излагается содержание «Второго сообщения».

Но Эйнштейн уже далек от «земной» физики, и «спровоцировать» его на размышления о сверхпроводимости или сверхтекучести Борну не удается.

Последние 30 лет своей жизни Эйнштейн посвятил тщетным, но тем не менее, по выражению Гейзенберга, «великолепным в своей основе»⁶⁵ попыткам построения единой теории поля, теории, которая, как отметил опять же Гейзенберг, «по сути дела, должна быть тождественна последовательной теории элементарных частиц». В этой связи небезынтересным представляется, что между современными представлениями квантовой теории поля, теории атомного ядра и космологии, с одной стороны, и фундаментальными концепциями теорий сверхпроводимости и сверхтекучести — с другой, существует «глубокая и далеко идущая аналогия»⁶⁶. Таким образом, эти разделы квантовой физики конденсированного состояния, в развитии которых Эйнштейн участвовал лишь косвенно, в настоящее время оказываются все более полезными для реализации программы, которая стала делом его жизни.

⁶² *Born M., Green H.* — *Nature*, 1947, 159, p. 738.

⁶³ Р. Фюрт, приехавший в Англию перед началом второй мировой войны, был до этого профессором Немецкого университета в Праге, того самого университета, где в 1911—1912 гг. (на той же кафедре) работал Эйнштейн. Любопытно, что Фюрта можно в какой-то степени причислить к знатокам творчества Эйнштейна, поскольку в 1926 г. под его редакцией и с его примечаниями вышел сборник эйнштейновских работ по броуновскому движению (*Einstein A. Investigations on the theory of the Brown motion.* London, 1926).

⁶⁴ *Френкель Я. И.* Статистическая физика. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948, с. 750.

⁶⁵ Труды ИИЕиТ АН СССР. М., 1960, т. 34, с. 3.

⁶⁶ *Киржниц Д. А., Линде А. Д.* — УФН, 1975, 115, с. 534.

Е. Л. Фейнберг

ВЗАИМОСВЯЗЬ НАУКИ И ИСКУССТВА В МИРОВОЗЗРЕНИИ ЭЙНШТЕЙНА¹

1. Введение

Эйнштейн не анализировал искусство. Он жил в нем и наслаждался им. И все же он не мог не задумываться о его назначении. В немногих опубликованных высказываниях искусство и наука у Эйнштейна неизменно стоят вместе и нераздельно.

Он видел два побуждения к искусству и науке. «Одно из наиболее сильных... желание уйти от будничной жизни с ее мучительной жестокостью и безутешной пустотой». Второе — «каким-то адекватным способом создать в себе простую и ясную картину мира... Этим занимается художник, поэт, теоретизирующий философ и естествоиспытатель, каждый по-своему» [3]. Можно сказать, что Эйнштейн выделял здесь в качестве важнейших функций искусства *внесение гармонии во внутренний мир личности и усмотрение гармонии в постигаемом мироздании*².

Но позже он говорил и о том, что чувство прекрасного принадлежит к числу «разных способов постижения жизни», которые «вносят свой вклад, помогая нашей мыслительной способности прийти к ее наивысшим достижениям» [4]. Картина мира, которую может создать своими методами физик-теоретик один, обладает «высшей аккуратностью, ясностью и уверенностью», однако «за счет полноты», «за счет ограничения предмета» [3]. Здесь, по существу, говорится о *познавательной* роли искусства, и это будет для нас важно.

¹ Ранее в незначительно сокращенном виде опубликовано в журнале «Вопросы философии» № 3 за 1979 г. Настоящая статья существенно опирается на статью того же автора [1] (см. также [2]).

² Как разъяснялось в [1, § 6], в действительности, говоря о способности искусства вносить гармонию, подразумевают по крайней мере три разные функции. Две из них соответствуют этим словам Эйнштейна.

Наконец, все это увенчивается высказыванием о том, что «в первую очередь великие художники, а во вторую — ученые» больше чем кто-либо заслуживают признательности человечества за то, что они побуждают людей к облагораживающей духовной деятельности, «и это верно в отношении как творчества, так и восприятия» [5]. По словам А. Мошковского (которым нет основания не доверять), Эйнштейн говорил ему («с особым ударением»): «Достоевский дает мне больше, чем любой научный мыслитель, больше, чем Гаусс!» И объяснял значение искусства для него тем, что оно дает ему этический стимул [6].

Таким образом, Эйнштейн едва ли не выше всего ценил *этическую, духовно возвышающую* функцию искусства.

Не противоречат ли эти высказывания друг другу? Чем они связаны между собой и с прочими функциями искусства, которые считали важнейшими другие мыслители? Как они связаны с гносеологическими воззрениями Эйнштейна?

Ведь функции искусства многообразны и практически неисчислимы — от творческого отражения (и «преобразования») мира до гедонистической функции, от нравоучения до очищающего катарсиса древних и т. д. Все они эффективно осуществляются искусством, и все они — благо. Почему Эйнштейн особенно выделяет «возвышающую духовно» роль искусства и по этому признаку неразрывно объединяет искусство с наукой?

В [I, § 4, 5] мы попытались понять, какова единая основа всех этих многочисленных и столь непохожих друг на друга функций. В качестве такой основы, того свойства искусства, которое присуще именно ему как методу безотносительно к наполняющему его конкретному содержанию, была названа способность искусства «как такового» противопоставить авторитету формально-логического мышления авторитет *интуитивного синтетического суждения*, его способность «доказывать недоказуемое формально-логически», сбалансировать в сознании познающего субъекта авторитет формально-логического, разрушить монополию этого последнего и тем самым помочь познанию преодолеть тупик, в который заводит использование одной лишь формальной логики. В науке (об этом будет еще сказано ниже), конечно, тоже нельзя ограничиться только формальной логикой. Внелогический элемент в ней необходим. Это верно даже в отношении «точных» наук, например физики. Однако здесь *принципаль-*

ную роль играет лишь суждение о достаточности опыта. Искусство же способно утверждать авторитет самых разнообразных интуитивных суждений. В то же время в отличие от религии авторитетность интуитивного суждения в искусстве утверждается не сведением к авторитету высшего существа, абсолютного духа и т. п., а опирается на внутренние свойства искусства, несущего критерий убедительности в себе самом (см. [1], а также ниже, § 2).

Мы попробуем показать, что именно эта особенность искусства объясняет его выдающееся значение для мировоззрения Эйнштейна. Однако прежде чем приступить к этому, нам придется вновь уделить особое внимание вопросу о том, что такое интуиция. Он уже обсуждался в [1, § 3, 4], и все же необходимы дальнейшие разъяснения.

2. Еще раз о понятии интуиции

Вопрос о роли интуиции в процессе познания и в творчестве — старый вопрос философии и психологии. В нашей литературе он обсуждается особенно интенсивно в течение последних примерно 15 лет. Однако, по крайней мере во многих случаях, слово «интуиция» используется в различных смыслах, без опоры на четкое определение. Поэтому прежде всего оговорим: мы возьмем за основу, как и в [1], определение, согласно которому интуиция есть «прямое усмотрение истины, то есть усмотрение объективной связи вещей, не опирающееся на доказательство» [7]³. Если это «усмотрение истины» (пусть относительной) впоследствии можно будет обосновать, опосредовать (доказать) формально-логически, т. е. свести к другому интуитивному суждению, играющему в познании более фундаментальную роль (аксиомы или постулаты), или опосредовать практикой, т. е. свести к суждению о достаточности (неизбежно ограниченного) опыта для утверждения истинности суждения, то такую интуицию мы называем «интуицией-догадкой», «предвосхищением». Она играет лишь эвристическую роль. Так, мы интуитивно догадываемся, что, может быть, верна некоторая теорема. Затем мы строго логически либо опровергаем нашу догадку, либо дока-

³ Очевидна тесная связь этого определения с другим: «Интуиция есть *способность* (подчеркнуто мною. — Е. Ф.) постижения истины путем прямого ее усмотрения без обоснования с помощью доказательства» [8].

зываем ее справедливость. После такого доказательства о самом интуитивном предвосхищении можно забыть, оно уже не входит в окончательное научное построение. Подобная эвристическая интуиция играет огромную роль в творческом процессе, ее анализ важен для психологии, в особенности для психологии творчества, но не для философии, не для теории познания. Здесь существенно такое «усмотрение объективной связи вещей», которое не только *не требует доказательства, но, быть может, и не допускает его*. Подобное интуитивное суждение возникает в результате синтеза многообразного чувственного и интеллектуального знания, накопленного личностью и обществом, и в качестве элементов может содержать формально-логическую аргументацию. Поясним это примерами.

Слово «суждение» происходит от слова «суд». Действительно, судья опирается на установленные законы, нормы («постулаты»), на многочисленные фактические данные, свидетельства. Он оценивает их весомость, учитывает логические связи, учитывает даже психологические обстоятельства, но почти никогда отсюда нельзя сделать логически неопровержимый вывод. Решение выносится, *как синтетическое, подлинно интуитивное суждение* и — подчеркнем это! — *на основе внутреннего убеждения*, когда судья вполне удовлетворен тем, что все элементы хорошо сложились в целое, что из многих частных суждений выведено общее. Можно сказать, что здесь высказывается «рефлектирующее суждение» по Канту. А от присяжных даже не требуют «мотивировки», они должны сказать «да» или «нет».

В средние века была сделана попытка избавиться от этого внелогического суждения, взяв за основу «Божий суд», ордалии. Появление незаживающих ран при испытании водой, огнем, железом, поражение в поединке и т. п. принимались как неопровержимое *логическое* доказательство вины. Другими словами, суждение достигалось логическим сведением к немногим постулатам. В наше время при таком подходе можно было бы возложить вынесение решения на автоматическую установку с хорошим компьютером и вообще устранить судей, народных заседателей и присяжных. К счастью, человечество не пошло по этому пути.

Но и в науке любой рядовой экспериментатор, как бы он ни менял условия опыта, сколько бы он ни повторял

его, учитывая все свои и общие накопленные знания, какие бы логические доводы он ни привлекал, — в конце концов должен остановиться и сказать: «Достаточно, я теперь убежден, что закономерность, которую я ищу, такая-то». При этом речь может идти о самом простом вопросе, например о зависимости электропроводности от температуры. Это суждение о достаточности опыта — внелогический акт, формально-логически недоказуемое интуитивное суждение, и оно опирается тоже на внутреннее убеждение. Оно неотъемлемый элемент всей науки после Галилея.

Науку можно даже определить как *метод познания, в котором весь интуитивный элемент сводится (или в принципе может быть сведен) к единственному роду подлинно интуитивного суждения — о достаточности опыта* (см. [1, § 4]). Практически, однако, выгодно в некоторых науках по ходу исследования вводить дополнительные элементы в виде интуиции-догадки, по существу эвристические, возлагая задачу последующего их опосредования — доказательства — на будущее. Так, в физике, в кинетической теории материи вводится гипотеза молекулярного хаоса. В принципе она должна быть излишней, если известны законы движения и взаимодействия молекул. Однако только через столетие после формулировки этой гипотезы физика подошла к такому опосредованию, которое, по видимому, позволит ее устранить.

Но и в более глубоком принципиальном вопросе — о каком-либо законе природы или вообще о существовании объективного мира вещей — вывод делается на основании интуиции. Если бы Ньютон наблюдал мифическое падение яблока не один, а миллион раз, сколь угодно варьируя условия опыта, это укрепило бы убедительность его вывода, но не сделало бы сам вывод *логически* доказательным (формально-логически миллион первый опыт мог бы дать другой результат, хотя бы потому, что ранее, быть может, действовал какой-то фактор — дул ветер и т. п., — который затем исчез). Ньютон преодолел эту бездоказательность великим актом обобщающего интуитивного суждения, сформулировав свои законы движения и гравитации. Когда он успешно применил эти же законы к движению Луны и планет, т. е. к явлениям, где масштаб длины в 10^{10} раз больше, то и такой триумф его теории формально-логически не дал абсолютного доказательства всеобщности закона. Это катастрофически обнаружи-

лось через двести лет, когда те же законы попытались применить к атому, т. е. к объекту, в 10^{10} раз *меньшему*, и они оказались неверными. Триумф Ньютона, таким образом, был в известном смысле несчастьем: он надолго закрепил ложное убеждение в *неограниченной* верности его законов. Потребовалось два века плюс Эйнштейн, чтобы избавиться от этой ошибки. Логическая же бездоказательность этих законов оказалась благом: именно благодаря ей законы «имели право» быть неверными в новой области опыта.

Эйнштейн, хотя он и не произносил точно таких слов, прекрасно понимал, что именно поэтому возможен процесс постепенного постижения истины, что именно из-за ограниченности нашего опыта «... наши представления о физической реальности никогда не могут быть окончательными. Мы всегда должны быть готовы изменить эти представления, то есть изменить аксиоматическую базу физики, чтобы обосновать факты восприятия логически наиболее совершенным образом. И действительно, беглый взгляд на развитие физики показывает, что ее аксиоматическая основа с течением времени испытывает глубокие изменения», — говорит он, иллюстрируя затем свои слова сравнением физики Ньютона и физики Фарадея — Максвелла [9].

Необходимость интуиции понимали все философские школы, как материалистические, так и идеалистические. Объединение формальной логики с интуитивным синтетическим суждением входит в основы диалектической логики. Если сюда органически, онтологически включается (также интуитивное, синтетическое) суждение о существовании вне нас, назависимого от нашего сознания объективного, упорядоченного, познаваемого мира вещей, то это — диалектический материализм. Но без этого включения сама по себе диалектическая логика может вести к идеализму и даже религии, если ввести иное дополнительное интуитивное суждение — суждение о первичности «абсолютного духа» (Гегель) или об антропоморфном высшем существе. По сути, даже сами используемые в этих формулировках понятия («существование» и т. п.) не могут быть обоснованы внеинтуитивно. («Понятия никогда нельзя логически вывести из опыта безупречным образом», — говорил и Эйнштейн [10].)

Только позитивизм стремился обойтись без интуиции. Эйнштейн в течение всей жизни избавлялся от его влияния (он и с самого начала расходился с Махом). Он признавал,

что в конце XIX в. позитивизм помог расшатать веру в незыблемость закона Ньютона и механистического материализма вообще. Но уже в 1938 г. он говорил: «Если во времена Маха вред наносила господствовавшая тогда точка зрения догматического материализма⁴, то в наши дни преобладает субъективистская и позитивистская точка зрения. Сторонники этой точки зрения провозглашают, что рассмотрение природы как объективной реальности — это устаревший предрассудок... В любую эпоху господствует какая-нибудь одна мода, причем большая часть людей даже не замечает господствующего тирана» [11].

Что же касается его собственных воззрений, то о них мы еще будем говорить в дальнейшем. Пока же отметим, что уже в 1918 г. Эйнштейн говорил: «Высшим долгом физика является поиск тех элементарных законов, из которых путем чистой дедукции можно получить картину мира. К этим законам ведет не логический путь, а только основанная на проникновении в суть опыта интуиция» [12].

Вернемся, однако, к пояснению понятия интуиции. Здесь необходимо сделать два замечания.

Во-первых, интуицию-догадку и интуицию, не допускающую логического доказательства и не требующую его, часто рассматривают как два аспекта одного и того же понятия. Действительно, психологические процессы, ведущие к каждому из этих суждений, имеют много общего. Более того, различие между ними в ряде случаев может быть условным. Так, в научной системе, например в теоретической физике или в математике, можно выбирать за основу разные сочетания аксиом. То, что в одном сочетании является аксиомой и формулируется в результате подлинно интуитивного суждения, в другом варианте построения той же науки может быть логически выводимым следствием, теоремой. Предвосхищение этой теоремы (т. е. того утверждения, которое в прежней системе было подлинно интуитивным) при ее доказательстве превращается в интуицию-догадку.

Наконец (как уже отмечалось на примере гипотезы молекулярного хаоса), временно вводимая интуиция-до-

⁴ Вряд ли стоит все время оговаривать, что под догматическим материализмом Эйнштейн понимал механистический материализм, а под логикой — формальную логику.

гадка может оставаться непосредственной в течение веков. На протяжении всего этого длительного времени ее трудно отличить от философской интуиции.

И все же принципиальное различие между этими двумя видами интуиции в гносеологическом плане так велико, что мы склонны рассматривать их не как два аспекта одного и того же понятия, а как *два разных понятия*. Несколько гиперболизируя, можно сказать, что различие здесь почти столь же велико, как между всепроникающим эфиром классической физики и химическим понятием эфира.

Во-вторых, придают особое значение факту «озарения». В обоих видах интуиции синтетическое усмотрение возникает в процессе оценки и переработки широкого набора чувственных и интеллектуальных элементов, в процессе, который всегда протекает в значительной мере бессознательно или подсознательно (некоторые авторы предпочитают говорить «сверхсознательно»), притом иногда чрезвычайно быстро, как «озарение». Однако, когда мы говорим о подлинной — философской — интуиции, это «озарение» отнюдь не является определяющим или необходимым признаком. Такое интуитивное суждение может возникать в результате длительной взаимосвязанной работы сознания и подсознания, в лучшем случае использующей метод множества последовательных проб и ошибок. Побудительной причиной для каждой «пробы» может служить догадка, для которой слово «озарение» является слишком высокопарным. В частности, в приведенных выше примерах ни для судьбы, ни для экспериментатора в лаборатории этот термин не кажется адекватным. Взвешивание, упорное размышление, внелогическая оценка и отдельные догадки сложно переплетаются, так что выделить одно определенное озарение, которое было бы центральным в этом процессе и определяло его, вряд ли возможно. Вместе с тем, конечно, иногда мгновенное «озарение» как центральный момент постижения действительно имеет место.

В основной проблеме философии — о существовании вне нас объективного, закономерно упорядоченного и познаваемого мира вещей, — решаемой сугубо внелогично, интуитивно, на основе учета опыта личности и человечества, неадекватность критерия «озарения» особенно наглядна.

Быть может, более подходящим признаком подлинно

интуитивного суждения является невозможность осуществить его на компьютере с конечным, ограниченным числом элементов ⁵ без привлечения каких-либо внелогических элементов, например без использования числовой оценки факторов, не несущих в себе числовой меры. Ими могут быть настроение, удовольствие, темперамент и т. п. Самый выбор числовой шкалы для этих факторов — действие принципиально интуитивной природы и лежит вне формальной логики.

Было бы ошибкой думать, что подлинная интуиция в философском смысле слова встречается только в фундаментальных проблемах бытия и познания. Вся наша повседневная бытовая, производственная, научная, общественная деятельность, наша эстетическая и этическая жизнь пронизаны, наполнены, насыщены интуитивными, принципиально недоказуемыми суждениями. Они различны по обобщающей силе, по очевидности их справедливости, по их убедительности для индивидуума, для коллектива и для всего человечества, по их значимости для нашей судьбы. Они простираются от утверждения, что физические свойства материального мира основываются на закономерностях, сформулированных квантовой механикой и теорией относительности, до выбора расстановки мебели в комнате. От решения Кутузова дать бой на Бородинском поле до прекращения бесполезного спора с неправым оппонентом («... и не оспаривай глупца»). От определения меры наказания судом (расстрелять? оставить жить?) до готовности простить напроказившего ребенка. От трудной оценки творчества нового, необычного художника до выбора цветов в подарок. Они в разной мере могут подкрепляться разумными доводами, частичным привлечением критерия практики, доверием к традиции, к моде, опорой на установленные нормы поведения (кодекс

⁵ Строго говоря, слово «ограниченный» не обязательно понимать буквально математически. Так, сам мозг состоит из конечного числа элементов. Вычислительное устройство такой же сложности и способное поэтому ко всем доступным мозгу действиям просто воспроизводило бы его во всех деталях. Но, кроме того, в это устройство нужно было бы заложить всю информацию, которая содержится в реальном мозге субъекта, выносящего суждение, т. е. весь накопленный опыт личности, в частности и воспринятый ею опыт человечества. Между тем, это эквивалентно выходу за пределы мозга и подключению к нему все новых элементов, описывающих лежащий вне его мир.

законов, религиозные догмы, этика профессии и т. п.). Но все равно при формулировке каждого суждения пужно сделать выбор между доводами «за» и «против». *Так как речь идет об аргументах, значимость которых нельзя измерить числом*, то нет и строгого логического основания для решения вопроса о том, который из доводов перевешивает. Этот выбор и есть предмет синтетического, целостного интуитивного суждения. Конечно, некоторые из аргументов могут быть всеобщие или почти всеобщие признаны, «очевидны». Тогда подобное «опосредованное суждение» воспринимается как «доказанное» и включение недоказуемых интуитивных элементов в цепь умозаключений проходит незамеченным. Но при внимательном разборе их всегда можно обнаружить.

В последние годы все большее распространение приобретают методы решения сложных практических проблем на основе широкого использования синтетического, по существу интуитивного подхода («метод мозговой атаки» и др.). Так, когда возникает необходимость дать прогноз в области научной, технической, социальной или политической стратегии или дать рекомендацию по подобным сложным вопросам, в которых число существенных факторов чрезвычайно велико, то вместо применения электронно-вычислительных машин иногда используются принципиально иные методы. Например, вопрос формулируется перед группой высококвалифицированных экспертов, которые дают решение на основе прямого синтетического «усмотрения истины», без каких-либо расчетов, а иногда даже и без высказывания аргументов в пользу своего решения. Полезность такого подхода по сравнению с использованием расчетов связана с тем, что неизбежно некоторые важные факторы (например, психологические) не поддаются количественному учету или могут быть при расчете неоправданно отброшены. Этот метод особенно развился в США, в стране, обладающей огромным парком вычислительных машин.

Существуют специальные руководства, в которых подобные методы систематизируются, например, применительно к задачам инженерного проектирования. Примером может служить книга [13], где говорится: «...при принятии решений многое определяется вкусом. Это справедливо даже в теории принятия решений, так как критерий (математическое ожидание потерь, минимакс

или какой-либо другой) выбирается субъективно»⁶. «Среди качеств, необходимых проектировщику, решающую роль играет способность принимать решения». «Принятие решений является одновременно и искусством, и наукой». В другой книге в качестве «5-го этапа» процесса инженерного проектирования называется «Выбор окончательного решения. Оптимизация». О нем сказано: «Пересмотр (конструкции.— *Е. Ф.*) приводит к принятию интуитивного решения, близкого к оптимальному» [14].

Неудивительно, что Эйнштейн придавал интуиции чрезвычайно большое значение. Но это особый вопрос, к которому мы и перейдем.

3. Понимание интуиции у Эйнштейна

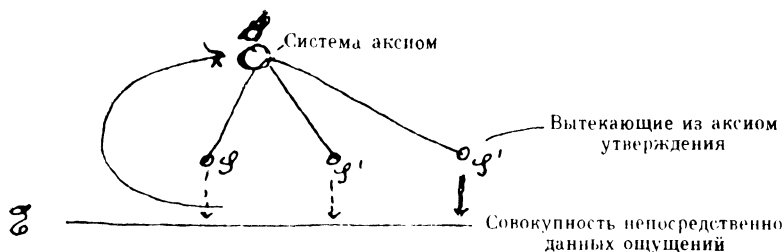
Эйнштейн тоже различал два вида внелогических суждений, но по-другому. Прежде всего это интуиция, которую он превозносил, многократно привлекал и использовал, но так и не определил, по-видимому, ни разу, что он под этим понимает в эпистемологическом смысле. Мы все же увидим, что в большинстве случаев это подлинная интуиция.

Эйнштейн говорил, что интуиции «помогает ощущение порядка, кроющегося за внешними проявлениями различных процессов» [15], что он верит «в интуицию и вдохновение» [16] и т. п. Здесь он подчеркивал, следовательно, психологическое и эвристическое значение интуиции. Подобные слова подошли бы и для интуиции-догадки.

Но Эйнштейн использовал термин «интуиция» и в развернутом изложении своего понимания процесса познания. В письме к Соловину от 7 мая 1952 г. он писал [17]:⁷ «Схематически я представляю себе эти вещи так:

⁶ Конечно, установление числовой шкалы для факторов, не содержащих внутри себя количественной меры, можно рассматривать как попытку формализовать интуитивную оценку. Важно, однако, что интуитивная основа здесь неустранима.

⁷ Мы приводим здесь не оригинал схемы Эйнштейна [18], а его воспроизведение с переводом выписанных слов из [17]. Перевод сделан несколько вольно и распространенно. Особые трудности для перевода представляет слово «Erlebnis», буквально означающее «событие», «явление», «переживание», «наблюдаемое», «опыт». Глагол «erleben» означает «переживать», «испытывать». Поэтому речь идет об опыте (в смысле, явно близком тому, который это слово имеет, например, во фразе «весь наш опыт учит, что...»). По контексту использованный в [17] несколько чрезмерно детализированный перевод — «посредственный чув-



(1) Нам даны E — непосредственные данные нашего чувственного опыта (Erlebnisse. — $E. \Phi.$).

(2) A — это аксиомы, из которых мы выводим заключения (следствия, Folgerungen. — $E. \Phi.$). Психологически A основаны на E . Но никакого логического пути, ведущего от E к A , не существует. Существует лишь интуитивная (психологическая) связь, от которой всегда нужно быть готовым отказаться (auf Widerruf ist; быть может, лучше сказать «должна подправляться»; эти слова имеют и несколько иной смысл, — готовность к изменению, что позволило Соловину переводить их на французский словами: «jusqu'à nouvel ordre». — $E. \Phi.$).

(3) Из аксиом A логически выводятся частные утверждения S (Aussagen. — $E. \Phi.$), которые могут претендовать на то, чтобы быть правильными.

(4) S сопоставляются с E (проверка опытом). Эта процедура, строго говоря, также относится к внелогической (интуитивной) сфере, ибо отношение понятий, содержащихся в S , к непосредственным данным чувственного опыта E по своей природе не является логическим. Но это отношение между S и E (с прагматической точки зрения) гораздо менее ненадежно, чем отношение A к E (пример: понятие собака и соответствующие ему данные чувственного опыта E). Если бы подобные соответствия нельзя было устанавливать с высокой степенью надежности (хотя сделать это логическим путем нельзя), то весь аппарат логики не имел бы никакой ценности для «постижения действительности» (пример — теология).

Квинтэссенцией всего этого является вечно сомнительная взаимосвязь всего мыслимого и ощущаемого (чувственных восприятий) (alles Gedanklicher mit dem Erleb-baren (sinnen-Erlebnisse). — $E. \Phi.$).

ственный опыт» допустим. Поэтому мы используем этот перевод [17] (правда, внося некоторые уточнения в дальнейшем тексте).

В этом рассуждении не только четко указаны внелогические, подлинно интуитивные элементы, но даже оценена относительная надежность интуиции при обобщающем выводе аксиоматического базиса, с одной стороны, при проверке теории данными опытами — с другой. Стоит подчеркнуть одну замечательную деталь: по мере сопоставления выводов S с опытом E аксиоматический базис должен все время проверяться и подправляться. Это, в частности, выражено на рисунке тем, что E представлено не двумя точками — в начале и в конце, — а бесконечной прямой, в разные точки которой устремляются теоретические выводы S, S', \dots , и из всех этих точек исходит искривленная стрелка, указывающая на необходимость проверять и «подправлять» аксиоматический базис. Поэтому связи опытно-чувственного и логического, как и связи аксиоматически-интуитивного с логически-дедуктивным, не являются простыми линейными цепями типа аксиома-дедукция, но гораздо более сложны и существенно включают многообразные обратные связи.

С точки зрения нашего деления на интуицию-догадку и подлинную (философскую) интуицию стоит заметить, что связь $E \rightarrow A$ следует рассматривать как интуицию-догадку, а связь $S \rightarrow E$ (или, точнее, $S \rightarrow (E + A)$), когда опытно подтверждаются следствия из аксиом (и при необходимости «подправляется» A) — как подлинную интуицию, содержащую основное суждение о достаточности опыта для убедительного опосредования интуиции-догадки. Отсюда видно, что «подчиненное», в эпистемологическом смысле, положение интуиции-догадки по отношению к подлинной интуиции отнюдь не означает, что она менее существенна или «проще» в творческом процессе. Выведение обобщающих аксиом A из хаотического на первый взгляд, многообразного опыта E — великий акт творчества. Но после опосредования опытом они становятся исходным пунктом научного построения и история их возникновения забывается.

В этой схеме есть, однако, одна важная особенность. Она исходит только из данных чувственного опыта и ничего не говорит о том, что стоит за ним, не предпринимает вопроса о существовании объективной реальности, являющейся источником этих данных и познаваемой с их помощью. Поэтому такая схема может в значительной мере удовлетворить и позитивиста. Наличие интуитивных элементов (переход от E к A и от S к проверке $E + A$ с корректиров-

кой аксиоматического базиса А) его вряд ли смутит. Оно может быть интерпретировано просто как наиболее «экономное», наиболее целесообразное упорядочение, вносимое нашим разумом в данные чувственного опыта (типа упоминаемого ниже упорядочения с помощью алфавитного расположения слов в словаре).

Однако *Эйнштейн не останавливается на этом* и позволяет своему разуму идти дальше. Мы говорили до сих пор только об одном из двух внелогических видов знания, которые он допускает, — об интуиции. Но Эйнштейн говорит также: «Я не могу доказать, что научную истину следует считать истиной, справедливой независимо от человечества, но в этом я твердо убежден. Теорема Пифагора устанавливает нечто приблизительно верное, независимо от существования человека». «Этот стол останется на своем месте, даже если в доме никого не будет». «Мы приписываем истине сверхчеловеческую объективность. Эта реальность, не зависящая от нашего существования, нашего опыта, нашего разума, необходима нам, хотя мы и не можем сказать, что она означает» [19] (видимо, последние слова надо понимать как: «мы не можем дать ей формально-логическое или конструктивное определение». — *Е. Ф.*). Такого рода высказываний у Эйнштейна множество, и здесь он использует другую терминологию: «Основой всей научной работы служит убеждение, что мир представляет собой упорядоченную и познаваемую сущность. Это убеждение зиждется на религиозном чувстве. Мое религиозное чувство — это почтительное восхищение тем порядком, который царит в небольшой части реальности, доступной нашему слабому разуму» [16].

Концепции «космического религиозного чувства» Эйнштейн посвятил немало страниц, и на этом стоит задержаться. В истории религии Эйнштейн различал три стадии. Первые две антропоморфны и вызваны одна — чувством страха перед непонятными силами природы, другая — необходимостью опереться на высший авторитет при установлении моральных норм. Третья стадия — космическая религия Эйнштейна, суть которой понятна уже из приведенных выше строк. Это «космическое религиозное чувство, не ведающее ни догм, ни бога, сотворенного по образу и подобию человека». «Оно не приводит ни к сколько-нибудь завершенной концепции бога, ни к теологии». Оно «является сильнейшей и благороднейшей из пружин научного исследования». Космическая религия противо-

положна религии страха, потому что «для того, кто всецело убежден в универсальности действия закона причинности, идея о существовании, способном вмешиваться в ход мировых событий, абсолютно невозможна». «Для него бог, вознаграждающий за заслуги и карающий за грехи, немислим по той простой причине, что поступки людей определяются внешней и внутренней необходимостью, вследствие чего перед богом люди могут отвечать за свои деяния не более, чем неодушевленный предмет за то движение, в которое он оказывается вовлеченным». «Космическая религия», таким образом, противостоит и антропоморфной религии морали, ибо «этическое поведение человека должно основываться на сочувствии, образовании и общественных связях. Никакой религиозной основы для этого не требуется» (все эти цитаты — из [20])⁸.

Мы видим, что у Эйнштейна «религиозное космическое чувство» есть, по существу, лишь возвышенная формулировка для фундаментального обобщающего внелогического суждения, не допускающего формально-логического доказательства, для убежденности «в существовании внешнего мира, независимого от воспринимающего субъекта», мира упорядоченного и познаваемого, причем эта убежденность «лежит в основе всего естествознания» [9].

Каждый элемент эйнштейновской формулы представляет собой внелогическое интуитивное синтетическое суждение.

Не может быть *формально-логически* выведено из данных нам в опыте ощущений само понятие независимого от восприятия «существования», «вещи». В рамках концепции позитивизма это — «метафизика». Столь же возможно было бы (тоже *формально-логически* незаконное) обратное интуитивное утверждение о существо-

⁸ Конечно, здесь можно усмотреть слабый пункт: откуда мы знаем, что нужно основываться на сочувствии? Если не привлекать «религию морали», то следует саму эту догму обусловить «общественными связями», т. е. социально. Это видно уже из того, что этические нормы совершенно различны в разных социальных, исторических и национальных условиях (например, вместо «сочувствия» реализуется эгоизм вплоть до «своя рубашка ближе к телу» или «человек человеку — волк»). Эйнштейн сам был личностью выдающихся моральных качеств и принимал «постулаты» типа постулата «сочувствия» как самоочевидные и абсолютные, не требующие ни привлечения божественного авторитета, ни обоснования «общественными связями».

вании мира вещей только в нашем воображении. Свободы от необходимости выбирать между этими двумя (и другими воображимыми) возможностями хочет достичь только позитивизм с его требованием ограничиваться признанием реальности лишь наших ощущений (и по нашему произволу устанавливаемых связей между ними). Но синтетическое суждение, основанное на всех доступных данных опыта личности и человечества, как чувственной, так и мыслительной деятельности, приводит Эйнштейна к выводу о невозможности уклониться от выбора, о необходимости переступить через эту трудность, сделать выбор, и притом вполне определенный.

«Я не вижу никакой „метафизической“ опасности в том, чтобы включить в систему в качестве независимого понятия вещь (объект в смысле физики), хотя даже употребление понятия „объективный мир“ в глазах философской полиции... подозрительно» [21], — иронизирует Эйнштейн по адресу позитивистов. «Это в природе вещей, что мы не можем говорить об этих вопросах иначе, чем с помощью созданных нами понятий, которые недоступны определению» [22, с. 205]. Он считает «несостоятельной» «основную позитивистскую установку», которая, по его мнению, совпадает с принципом Беркли «esse est percipi» (быть — значит быть воспринимаемым. — *Е. Ф.*) [23].

Понятие «упорядоченности» допускает два понимания, и в течение своей жизни Эйнштейн в этом отношении эволюционировал. В 1923 г. он еще писал, что, поскольку «здание... науки покоится и должно покоиться на принципах, которые сами не вытекают из опыта», «они являются чистой условностью, вроде принципа расположения слов в словаре» [24]. Условна, следовательно, и упорядоченность⁹.

Но через тридцать лет он говорил совершенно иное: «Можно (и должно) было бы... ожидать, что... мир лишь в той мере подчинен закону, в какой мы можем упорядочить его своим разумом. Это было бы упорядочивание, подобное алфавитному упорядочиванию слов какого-нибудь

⁹ Правда, уже здесь он не был последовательным позитивистом. Ведь еще за шесть лет до этого высказывания, в [3], Эйнштейн говорил: «Никто из тех, кто действительно углублялся в предмет, не станет отрицать, что теоретическая система практически однозначно определяется миром наблюдений, хотя никакой логический путь не ведет от наблюдений к основным принципам теории» (см. [3, с. 41]).

языка. Напротив, упорядочение, вносимое, например, ньютоновской теорией гравитации, носит совсем иной характер. Хотя аксиомы этой теории и созданы человеком, успех этого предприятия предполагает существенную упорядоченность объективного мира. В этом и состоит „чудо“, и чем дальше развиваются наши знания, тем волшебнее оно становится» [10, с. 568].

Наконец, и самую *познаваемость* этого мира Эйнштейн считал величайшим чудом. Афористически он выразил это известной фразой: «Самое непостижимое в мире то, что он постижим» [25].

Все эти эпитеты «чудесности», «волшебности», «непостижимой постижимости» и сводятся в единую религиозную терминологию, которую Эйнштейн использовал для характеристики своей убежденности в реальности мира.

Гносеологически, однако, эта его убежденность есть лишь частный случай доверия к подлинной интуиции, о которой мы говорили все время, но отнесенный к наиболее фундаментальной проблеме познания. Это та самая интуиция, которую использует каждый ученый при каждом синтетическом суждении о достаточности, об убедительности данного (неизбежно ограниченного) опыта. Религиозная терминология Эйнштейна может быть понята как результат, во-первых, его возвышенного эмоционального отношения к этому всеобъемлющему великому суждению; во-вторых, как следствие того, что он не проанализировал гносеологически понятие синтетического интуитивного суждения. Когда его друг, философ Соловин, упрекал его за использование такой терминологии, он в ответном, сугубо личном письме оправдывался тем, что не мог подобрать лучшего слова: «Я не могу найти выражения лучше, чем „религия“, для обозначения веры в рациональную природу реальности... Какое мне дело до того, что попы наживают капитал, играя на этом чувстве? Ведь беда от этого не слишком велика» [18, с. 102].

В действительности, однако, нет никакой необходимости в том, чтобы называть религиозной «верой» убежденность в правильности интуитивного суждения о рациональной и объективной природе реальности, убеждение, не доходящее до признания «высшего существа» или абсолюта. Это суждение (и эта убежденность) с эпистемологической точки зрения отличается от суждения (и убежденности) о достаточности опыта в каждом отдельном эксперименте только, так сказать, «масштабом» объ-

екта суждения. Оно, в этом смысле, имеет ту же природу, как переход от E к A , подтверждаемый сопоставлением выводов с опытом $S \rightarrow E + A$ на схеме из письма к Соловину, помещенной выше на с. 198.

С точки зрения позитивизма, как уже говорилось, можно (и даже необходимо) принять эту схему познания, обосновывая внелогические связи (E с A , а также S с E и затем снова с A) принципом экономии мысли, прагматически полезной условности, максимальной простоты и стройности общей картины и т. д. (эти соображения в более ранних работах приводил и Эйнштейн). Но все подобные доводы как бы, говорит Эйнштейн, имеют силу и для суждения о реальности объективного мира, выводящего за пределы этой схемы. Что может быть стройнее, проще, экономнее допущения о том, что многообразные E — непосредственно чувственные восприятия — обусловлены единой стоящей за ними основой, — объективно существующей реальностью? Допустив схему на с. 198, можно лишь сомневаться в необходимости выхода за ее пределы, который осуществляет Эйнштейн, признавая существование объективной реальности. Эйнштейн считает, что это необходимо.

Отстаивание необходимости подлинной интуиции, выходящей за рамки чистой эмпирики, и тем самым противопоставление своей философии господствовавшему вокруг него позитивизму требовало от Эйнштейна незаурядной — но столь характерной для него — независимости мышления. Неизменно корректный в публичных выступлениях, он позволял себе резкости или иронию лишь в личных письмах.

В одном из них он писал: «...Сегодня я читал... любопытные аргументы, которые Птоломей выдвинул против мнения Аристарха о том, что Земля вращается вокруг Солнца. При этом я невольно подумал о некоторых аргументах современных физиков: высокоученых и утонченных, но лишенных чутья (*instinktlos*). Определение веса (*abwägen*) аргументов в теоретических вещах остается все же делом интуиции» [10, с. 561; 18, с. 88].

Знай Эйнштейн меткое замечание Пушкина по этому поводу, он, вероятно, процитировал бы его здесь: «Тонкость не доказывает еще ума. Глупцы и даже сумасшедшие бывают удивительно тонки. Можно прибавить, что тонкость редко соединяется с гением, обыкновенно простодушным, и с великим характером, всегда откровенным»

[26]. «Простодушие» Эйнштейна и состояло в том, что он пренебрег логической бездоказательностью своего суждения о реальности мира и решился провозгласить это интуитивное суждение в отношении фундаментальной проблемы познания. Здесь проявилось, конечно, и величие характера, которое, впрочем, раскрывается всей историей его жизни.

4. Значение искусства для научного мировоззрения Эйнштейна

Теперь мы можем перейти к основному нашему вопросу, сформулированному в начале статьи, — почему Эйнштейн всегда называл вместе науку и искусство, когда говорил о побуждениях к этим видам творчества, об их общей роли для духовной деятельности человечества; почему заслуги великих художников он ставил выше заслуг великих ученых; почему, наконец, Достоевский давал ему «больше, чем Гаусс», давал «этический стимул».

Мы видели, что в процессе научного познания, как его понимал и Эйнштейн, необходимым элементом является подлинно интуитивное суждение, не требующее строго логического доказательства и не допускающее его. Тем не менее оно претендует на достоверность. Оно действительно нужно и экспериментатору, изучающему узко конкретное явление, и великому ученому, находящему фундаментальные законы, и философу, который утверждает, что существует объективный закономерно упорядоченный и доступный познанию мир (или, наоборот, приходит к выводу о божественном управлении этим миром).

Но это суждение опирается на шаткую основу «внутреннего убеждения», которое может привести к ошибке, если синтетическое суждение исходит из недостаточного охвата фактов и логических доводов или идей. Отелло убил Дездемону только потому, что вынес ошибочное суждение о достаточности логических доказательств ее вины (платок у Кассио и т. д.). С менее трагическим исходом (впрочем, известны и трагические случаи) неправильное суждение о достаточности доказательств является причиной ошибочных выводов в науке (а также, конечно, в суде, если здесь нет прямой недобросовестности).

Поэтому синтетическое суждение может претендовать на достоверность только если оно охватывает достаточно обширный материал, и чем сложнее вопрос — тем необъ-

ятнее (для последовательного рассуждения) становится необходимый круг воспринимаемых фактов, ассоциаций, идей и логических связей. Для осуществления этого, вообще говоря, необходимо особое душевное состояние, которое можно назвать вдохновением. Оно равно необходимо в науке и в искусстве. Часто цитируемое определение вдохновения, которое дал Пушкин, сохраняет свою значимость и теперь благодаря точности, достойной подлинного ученого: «Вдохновение есть расположение души к живейшему принятию впечатлений и соображению понятий, следственно и к объяснению опых. Вдохновение нужно в геометрии, как и в поэзии» [26, с. 43].

Таким образом, Пушкин подчеркивает важность сочетания обоих основных элементов познания: чувственного (расположение души к живейшему — т. е. активному, творчески перерабатывающему — принятию впечатлений, E на схеме, с. 198) и дискурсивного («соображение понятий» A и S на той же схеме). Сочетание этих двух элементов только и позволяет достичь объяснения «впечатлений» ($S \rightarrow E$) и понятий ($(E + S) \rightarrow A$). Мы можем воспринимать пушкинские слова как определение условий, при которых возможно возникновение того, что мы называем (употребляя угнетающе сухо звучащую на пушкинском фоне терминологию) синтетическим интуитивным суждением.

Конечно, если экспериментатор просто тщательно измеряет более или менее известными методами характеристики некоторого процесса или объекта и получает окончательные числовые данные, то для характеристики его состояния, когда он считает работу завершённой, слово «вдохновение» кажется слишком громким (оно могло бы, однако, быть уместным, если в процессе работы был найден особенно удачный, оригинальный и неожиданный метод). Но если он заметил при этом некоторую странность, не пренебрег ею, а выделил и стал напряженно исследовать и обдумывать, сопоставляя разные возможности; если в конце концов он, убежденный совокупностью своих исследований, пришел к парадоксальному выводу (в который почти никто другой сначала не верит); если затем все же находятся коллеги, которые в результате огромного напряжения своих духовных сил усматривают то, что другие упустили, «соображают понятия» и приходят к неожиданной теории, объясняющей опыты, то каждый, кто когда-либо занимался научной работой, понимает,

что это открытие можно было сделать, только пройдя через особое душевное состояние, для которого слово «вдохновение» вполне подходит.

Каких же высот вдохновения должен достигнуть великий ученый, чтобы высказать новый фундаментальный закон огромной общности, как это сделали, например, Ньютон и Эйнштейн, опираясь только на «внутреннее удовлетворение» от того, что все синтезированные чувственные и мыслительные данные, сложные связи и опосредствования согласно сливаются в этом суждении!

В то же время такое суждение должно быть правильным, надежным. Кант требовал поэтому, чтобы «внутреннее убеждение», чувство удовлетворения, — он называл его *Wohlgefallen*, — было всеобщим или, по крайней мере, претендовало на всеобщность (а также называл и другие условия). При этом, конечно, он исходил из идеи априоризма и абсолютной истинности суждения. Но априоризм, например в отношении пространства и времени, был опровергнут Эйнштейном, неприемлем он и в других «истинах». Соответственно нет необходимости и в абсолютной всеобщности этого чувства в отношении любых суждений, — научных, эстетических, нравственных и т. п. Все они в действительности ограничены либо исторически, либо социально, национально и т. д., а вскрываемая ими «истина» соответственно относительна¹⁰. Необходимо лишь, чтобы чувство убежденности, внутреннего удовлетворения, *Wohlgefallen*, было *достаточно* всеобщим для данного сообщества. И это действительно осуществляется. Так, на конкурсе пианистов члены жюри выставляют оценки в баллах, т. е. оценивают исполнение числом. Передоверить эту функцию компьютеру с конечным числом элементов невозможно. Это подлинно интуитивное синтетическое суждение. Тем не менее оценки никогда не расходятся очень сильно, потому что члены жюри принадлежат одной культуре, связаны близостью «мировоззрения». Иногда (например, это принято на Московских конкурсах имени П. И. Чайковского) вводят правило: если оценка сильно расходится со средней из всех остальных оценок, то она вообще не принимается во внимание. Это значит, что она либо выставлена недобросовестно, либо

¹⁰ То, что безусловно морально в одном сообществе (например, полигамия), может считаться безусловно аморальным в другом; верность законов Ньютона ограничена исторически доступным до XIX в. опытом и т. п.

отражает «мировоззрение», отличное от условно принятого за общее.

Даже математика, основанная на четком наборе аксиом и определений, создается как свободно мыслимое построение по определенным правилам, но остается, можно сказать, гениальной игрой до тех пор, пока эмпирически (и, значит, с использованием интуитивного суждения) из всех возможных, вполне последовательных систем не отобраны те, для которых может быть установлено то или иное соответствие миру вещей (т. е. логический синтаксис дополняется логической семантикой).

«Например, евклидова геометрия,— говорит Эйнштейн,— если ее рассматривать как математическую систему, является лишь игрой пустых понятий (прямые, плоскости, отрезки и т. д.— все это лишь «призраки»). Если же к этому добавить, что прямая заменяется твердым стержнем, то геометрия превращается в физическую теорию и ее теоремы, например, теорема Пифагора, наполняются реальным содержанием... Геометрия может быть истинной или ложной в зависимости от того, насколько верно она отражает проверяемые соотношения между данными нашего опыта» [27].

Искусство, как мы говорили в § 1 (подробнее см. [1]), утверждает авторитет интуиции, уравновешивая тем самым авторитет формальной логики.

Следовательно, необходимость искусства для человечества, независимо от многообразных индивидуальных побуждений, движущих и художниками, отдающими искусству свою жизнь, и теми, кто «потребляет» искусство, жертвуя ради него — в целом огромными — материальными ресурсами, объективно обуславливается необходимостью максимально расширить методы постижения мира, его закономерностей. Это утверждение звучит, конечно, несколько абстрактно. Более того, возникает вопрос, не странно ли, что эта потребность в искусстве успела генетически закрепиться в человеке за столь небольшое время его духовного развития? Ответ на этот вопрос, видимо, можно дать.

Духовному и эмоциональному миру человека присущи многие «фундаментальные страсти» и пристрастия. Для всех них можно разгадать объективную основу, совершенно непохожую на ту возвышенную форму, которую они принимают, хотя и коренятся в инстинктах, присущих животному миру вообще. Вряд ли можно сомневаться в том,

что самая возвышенная любовь мужчины и женщины, любовь Ромео и Джульетты, Элоизы и Абеляра, в кошечном счете может быть соотнесена с необходимостью продолжения человеческого рода. Что высокое материнское чувство, находящее столь облагороженное выражение в искусстве, есть лишь очеловеченное и одухотворенное стремление каждой живородящей особи сохранить детеныша от обрушивающейся на него страшной опасности, когда он покидает тело матери. Что благородное самопожертвование ради высокой цели человечества имеет прямых предшественников в инстинктах животных. Почему человечеству необходима такая сублимация, такое духовное облагораживание животных инстинктов — особый вопрос, и мы его здесь касаться не будем. Но в том, что подобное соответствие животных инстинктов, с одной стороны, и человеческих «фундаментальных страстей и пристрастий» — с другой, существует, трудно сомневаться, особенно после недавних огромных успехов этологии и зоопсихологии. Имеет оно место и в отношении синтетического суждения.

В самом деле, нечто вроде такого «первичного» суждения имеет место во всем животном мире. Притаившаяся кошка выбирает момент, когда следует броситься на мышь. Прибежавшее к незнакомой реке стадо отыскивает место для переправы. Вожак в стае решает, до каких пор можно разрешать членам стаи удаляться друг от друга. Все эти решения возникают на основе переработки многих элементов информации и опираются на разнообразные генетически закрепленные реакции, сводя их вместе. Синтетическое суждение человека представляет собой тот же самый — в основе — процесс, который в огромной степени обогащен и усложнен. Прежде всего он обогащен интеллектуально, как в смысле учета интеллектуального опыта личности и рода, в смысле включения в число учитываемых элементов логических кусков и т. п., так и в том отношении, что *суждение переводится в сознание*. Как любовь Ромео и Джульетты отличается от животного соединения полов; как материнская любовь Сикстинской мадонны или мадонны Литта отличается от заботы курицы о своих цыплятах; как подвиг воинов при Фермопилах отличается от боя петухов, — так же постановка диагноза врачом, решение судьбы, формулировка законов движения Ньютоном, выбор инструментовки композитором и создание этических основ поведения человека в

обществе отличаются от выбора полезной травы на пастбище заболевшим животным; от наказания, которому подвергает волчица волчонка, схватившего не полагающийся ему кусок; от решимости собаки, осторожно переходящей по качающемуся мосту через пропасть; от чередования разнообразных рулад у певчей птицы; от обращения галок с галкой, стоящей на низшей ступени иерархии в галочьей стае.

Таким образом, основное генетическое закрепление способности к синтетическому суждению происходит уже на животной стадии, а его «одухотворение» и сублимирование происходит при «очеловечении человека», так же, как это происходит и с другими «фундаментальными страстями». Именно на этой стадии появляется искусство и закрепляется та его роль в духовном мире человечества, которую мы считаем наиболее общей и лежащей в основе всех остальных функций, осуществляемых искусством, — способность искусства «доказывать логически недоказуемое», утверждать доверие к синтетическому интуитивному суждению, укрепляя его авторитет так, чтобы в сознании и в познавательной деятельности был сбалансирован авторитет формальной логики.

Главный прием, которым это достигается в искусстве, — убедительная демонстрация превосходства интуитивного над логическим, осуществляемая на разных уровнях. Так, преодолевается привычная «логика материала» и, например, камень, символ безжизненности, «оживает» в скульптуре и становится то женственно мягким, то страдающим. Преодолевается «логика образа», и убедительным становится условное изображение у Пикассо или Шагала («совершенно непохожее» на буквально понимаемую действительность). Побеждает «нелогичное», становящееся предельно убедительным, и в конкретном содержании художественного произведения. То, что с логической, рациональной точки зрения нелепо и неправильно, становится убедительным благодаря силе воздействия искусства. Евгений Онегин ведет себя, по существу, умно, заботливо, благородно, когда отвечает Татьяне на ее письмо. Татьяна же поступает легкомысленно, когда бросается к духовно опустошенному столичному денди. Но читатель осуждает Онегина, и никто не порицает Татьяну. Король Лир действует, мягко говоря, наивно, когда отдает все свое состояние дочерям. Но сила гения драматурга и актеров заставляет нас поверить, что он мудрый и

великий король. Гамлет, как заметил один английский историк искусства, ведет себя невыносимо грубо, даже жестоко по отношению ко всем персонажам, кроме Горацио. Но мы уверены, что это подлинный джентльмен и тонкая страдающая душа. Примеры этого неисчислимы (см., в частности, в [1]). Это неоднократно давало основание для несправедливых нападков, когда эстетически невосприимчивые или принципиально несогласные с художником критики высмеивали «нелогичности», «нелепости», не замечая, что все они преодолеваются силой художественного гения.

Когда Эйнштейн играл на скрипке свою любимую «Чаконну» Баха, построенную как конфликтное противопоставление вариаций на одну тему, он, конечно, прежде всего испытывал непосредственное наслаждение. Но что лежало в основе этого наслаждения? Только ли красота звучаний и сочетаний звуков? Подобную красоту можно найти и без искусства, в природе (красота красок заката и т. п.). Искусство же, кроме того (и на этой основе), утверждает и некоторую идею. Так, в «Чаконне», говорит Альберт Швейцер, «как чародей, Бах создает целый мир из одной-единственной темы. Словно скорбь столкнулась с радостью и под конец они объединяются в едином великом самоотречении» [28]. Совершенно нелогичное объединение скорби и радости (некоторые авторы говорят даже «жизни и смерти») оказывается убедительным. Единство достигается там, где его невозможно было ожидать. Вызванное этим фактом переживание сродни чувству удовлетворения от усмотрения общего в разных частных явлениях, которое Кант называл рефлектирующим суждением. Представляется несомненным, что это переживание может расширить горизонт и даже придать смелости исследователю в науке, которому нужно, например, решиться на парадоксальное интуитивное суждение.

Быть может, именно в этом нужно искать и объяснение высказывания Эйнштейна о Достоевском. Мало у кого из писателей того времени творчество так было насыщено интуитивными, «внелогическими» суждениями, ходами сюжета, поступками персонажей. Но все подобные нелогичности оказываются у него удивительно естественно совмещенными. Достоевский «достигал достоверности самых парадоксальных поворотов», и это было созвучно «объективной достоверности немислимого парадокса в трудах самого Эйнштейна» [29].

Таким образом, искусство действительно повышает духовный потенциал познающего субъекта, освобождая его от рабства формальной логики, придавая уверенность в том, что «недоказуемое» может быть, хотя бы в ограниченном смысле, надежно справедливо.

Поэтому, несколько упрощая и огрубляя, мы можем сказать, что искусство учит вдохновению [1].

«Оправдание и возвеличение интуитивного», которое дает искусство, относится к более высокому разделу познавательной способности человека, чем формальная логика. По мнению Эйнштейна, как мы цитировали выше, признательности человечества заслуживают в первую очередь великие художники и лишь во вторую — великие ученые. Это высказывание сливается с убеждением философов-рационалистов XVII—XVIII вв. о том, что интуитивное суждение является высшей формой познавательной способности человека (декартовское *Cogito ergo sum* относилось именно к ней, см. [7, с. 5]). В самом деле, в формально-логическом процессе человека может заменить компьютер.

Другие функции искусства, как было частично показано в [1], возникают именно благодаря этой основной способности искусства, являются ее следствиями. В частности, внесение гармонии во внутренний мир личности — врачующая сила искусства, — как и усмотрение гармонии в постигаемом мироздании, о которых говорил Эйнштейн, возникают на той же основе (подробнее см. [1]).

Следовательно, Эйнштейн был прав, говоря, что искусство «вносит свой вклад, помогая нашей мыслительной способности прийти к ее наивысшим достижениям» [4].

Таким образом, искусство не просто доставляло Эйнштейну наслаждение. Оно помогало ему в науке сближать «несовместимое», «доказывать недоказуемое», предвосхищать истинность того, что при обыденном знании казалось нелепым. Оно помогало ему и в философии отстаивать свое мировоззрение, существенно опиравшееся на интуитивное усмотрение истины. Наука и искусство совместно были опорой для его духовного бытия.

Л и т е р а т у р а

1. *Фейнберг Е. Л.* Искусство и познание. — Вопросы философии, 1976, № 7, с. 93—108.
2. *Фейнберг Е. Л.* Роль интуиции: Круглый стол «Вопросов философии» и «Вопросов литературы». — Вопросы философии, 1976, № 12, с. 122—125.

3. *Эйнштейн А.* Мотивы научного исследования.— Собр. науч. трудов, М.: Наука, 1967, т. 4, с. 39—40.
4. *Эйнштейн А.* Наука и бог; диалог.— Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1967, т. 4, с. 166.
5. *Einstein A.* Gut und Böse.— In: *Mein Weltbild.* Berlin, 1964, S. 14.
6. *Мошковский А.* Альберт Эйнштейн. М., 1922, с. 162.
7. *Асмус В. Ф.* Проблема интуиции в философии и математике. М.: Мысль, 1965, с. 3.
8. Интуиция.— В кн.: Большая советская энциклопедия. 3-е изд., т. 10, 1972.
9. *Эйнштейн А.* Влияние Максвелла на развитие представлений о физической реальности.— Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1967, т. 4, с. 136.
10. *Эйнштейн А.* Письма к Морису Соловину.— Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1967, т. 4, с. 572.
11. Там же, с. 555.
12. *Эйнштейн А.* Мотивы научного исследования.— Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1967, т. 4, с. 40 (ср. [5], S. 109).
13. *Диксон Дж.* Проектирование систем: изобретательство, анализ, принятие решений. М.: Мир, 1969, с. 410, 435, 502.
14. *Хилл П.* Наука и искусство проектирования. М.: Мир, 1973, с. 76.
15. *Einstein A.* Preface.— In: *Planck M.* Where is Science Going? London, 1933, p. 9.
16. *Эйнштейн А.* О науке.— Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1967, т. 4, с. 142.
17. См. [10], с. 570.
18. *Einstein A.* Les Lettres à Maurice Solovine. Paris, 1956, p. 120.
19. *Эйнштейн А.* Природа реальности. Беседа с Рабиндранатом Тагором.— Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1967, т. 4, с. 130—133 (беседа состоялась в 1930 г.).
20. *Эйнштейн А.* Наука и религия.— Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1967, т. 4, с. 126—129.
21. *Эйнштейн А.* Замечания о теории познания Бертрана Рассела.— Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1967, т. 4, с. 248—252.
22. *Эйнштейн А.* Физика и реальность.— Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1967, т. 4, с. 200—227.
23. *Einstein A.*— In: *Albert Einstein: Philosopher-Scientist.* Evanston, 1949, p. 669.
24. *Эйнштейн А.* Рецензия на книгу И. Винтерница.— Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1967, т. 4, с. 67—68.
25. *Frank Philipp.* Einstein. N. Y., 1947, p. 1.
26. *Пушкин А. С.* Отрывки из писем, мысли и замечания.— Собр. соч. в 10-ти т. Л: Наука, 1978, т. 7, с. 43.
27. *Эйнштейн А.* Письмо Г. Сэмьюэлу 13.X.1950.— Собр. науч. трудов. М.: Наука, 1967, т. 4, с. 328—329.
28. *Швейцер А.* Иоганн Себастьян Бах. М.: Музыка, 1964, с. 286.
29. *Кузнецов Б. Г.* Эйнштейн. М., 1962, с. 90.

В. Я. Френкель, Б. Е. Явелов

ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ А. ЭЙНШТЕЙНА

Довольно мало известно о том, что А. Эйнштейн всю жизнь был в той или иной степени причастен к изобретательской, конструкторской деятельности, интересовался техникой, занимался физическими экспериментами. Первые документальные свидетельства об этом относятся еще к его студенческим годам, а последние — к 1952 г. В настоящей статье будет рассказано об Эйнштейне как о патентном эксперте, о его технических начинаниях и интересах. Можно полагать, что освещение этих вопросов дополнит представление о творческом характере великого физика.

Работа в Патентном бюро

Широко распространилась легенда о том, что работа Эйнштейна в Патентном бюро была совсем не обременительной и оставляла много свободного времени. Так, В. Паули рассказывал: «В бернском патентном бюро можно было наблюдать любопытную сцену. Стоило только директору Галлеру появиться в дверях, как молодой человек (речь идет об Эйнштейне.— *Авт.*) поспешно прятал в ящик письменного стола одну пачку бумаг и извлекал оттуда другую — со своими заключениями по поводу патентных заявок» [1, с. 176]. Думается, однако, что рассказ этот скорее носит характер анекдота и довольно далек от реальной ситуации.

В 1900 г. Эйнштейн окончил Цюрихский политехникум. Получить место в Федеральном ведомстве духовной собственности (так несколько напыщенно именовалось официально Патентное бюро в г. Берне¹) ему удалось лишь спустя два года мытарств в поисках работы, и то

¹ Многие сведения по бернскому периоду жизни А. Эйнштейна почерпнуты в книге М. Флюккигера «Эйнштейн в Берне» [2].

благодаря протекции отца М. Гроссмана (сокурсника Эйнштейна по Политехникуму и будущего его соавтора в нескольких работах по общей теории относительности). Надо сказать, что организованное и возглавлявшееся (до 1921 г.) Ф. Галлером (он был доктором-инженером по специальности машиностроение) ведомство было учреждением весьма высокого класса, оно, видимо, в немалой степени способствовало значительным успехам швейцарской промышленности в освоении новой техники и технологии. Персонал Бюро (около 30 человек) состоял из высококвалифицированных специалистов, получавших жалование на уровне университетских профессоров. Служащие работали в просторных, светлых помещениях, оборудованных по последнему слову тогдашней оргтехники. Многие из подчиненных Галлера получили прекрасное образование. Например, Х. Шенк, поступивший в Бюро одновременно с Эйнштейном, и его старший коллега Й. Заутер, работавший там с 1898 г., также окончили Цюрихский политехникум (в то время одно из лучших в мире высших учебных заведений). Заутер, рабочий стол которого стоял рядом со столом Эйнштейна, уже имел на своем счету две публикации в солиднейшем журнале «Annalen der Physik» и был членом Бернского общества естествоиспытателей. Он вовлек в это Общество и Эйнштейна, выступившего там с несколькими докладами, в том числе с первым изложением своей теории относительности.

Ближайшим другом Эйнштейна стал М. Бессо, человек широко эрудированный в вопросах искусства, гуманитарных и точных наук. Он закончил Цюрихский политехникум за год до поступления туда Эйнштейна. Бессо был тем единственным человеком, которому Эйнштейн в своей первой статье по теории относительности выразил благодарность за помощь и «ряд ценных указаний». Позже Эйнштейн говорил, что во всей Европе он не мог бы найти «лучшего резонатора для новых идей». Бессо стал одним из первых учеников Эйнштейна, а в 1926 г. сын великого физика Альберт Эйнштейн-младший, также учившийся в Политехникуме в Цюрихе, прослушал у Бессо курс патентоведения.

Доктор Галлер подвергал поступающих под его начало строгим экзаменам — устному и письменному. Не миновало это испытание и будущего великого теоретика. На устном экзамене, продолжавшемся два часа, директор,

выложив перед Эйнштейном свежие патентные заявки, предложил ему «с ходу» изложить свое мнение о них. Эйнштейн не был инженером (он закончил Политехникум с дипломом преподавателя физики и математики), и экзамен выявил серьезные пробелы в его технической эрудиции. Тем не менее молодой человек произвел на экзаменатора хорошее впечатление (существует мнение, что немалую роль тут играли обширные познания Эйнштейна в электродинамике Максвелла, которая в то время считалась верхом сложности и не была еще освоена большинством физиков) и был зачислен в Бюро техническим экспертом III класса. Но зачисление было условным — в течение годового испытательного срока Эйнштейн был обязан научиться свободно ориентироваться в машиностроительном черчении и пополнить свои познания в технических дисциплинах.

Таким образом, можно полагать, что в Бюро, особенно на первых порах, когда нужно было срочно «подтягивать хвосты», Эйнштейну вообще пришлось довольно туго. Служащие Бюро работали шесть дней в неделю по восемь часов в день. Но Эйнштейн не унывал — ведь, как писал он одному из друзей в 1905 г., после восьми часов работы остается еще восемь часов на сон и восемь часов на всякую всячину, да еще есть воскресенья! И все же вряд ли тут можно говорить об избытке свободного времени — неспроста Эйнштейн именовал себя тогда «патентным рабом». Видимо, именно с трудностью совмещения двух родов деятельности — патентной работы и физики — связано признание Эйнштейна, сделанное им в беседе с его первым биографом А. Мошковским. Ученый сообщил, что в период работы над теорией относительности он находился на грани нервного истощения: «Это было неизбежно в ту пору ранней молодости» [3, с. 17].

Галлер был превосходным логиком, методистом и вместе с тем строгим патроном. Он требовал от своих подчиненных, у которых пользовался безграничным авторитетом, добросовестности и прилежания в работе. Ежедневно по несколько часов он уделял повышению квалификации персонала в технических дисциплинах, учил «раскусывать» патентные заявки и (уж совсем по-школьному) занимался со своими экспертами отработкой стиля письменной речи. Эйнштейн говорил: «Этот человек научил меня правильно выражать свои мысли» [2, с. 154].

После нескольких лет службы в Бюро Эйнштейн при-

обрел репутацию «патентного аса», и коллеги все чаще стали обращаться к нему за советом в самых сложных и запутанных ситуациях. Уже упоминавшийся выше Заутер, мнение которого как «очевидца событий» очень ценно, говорил, что у Эйнштейна «...было то преимущество, что *он сам был изобретателем*. Он легко выявлял суть изобретения, описанного неудовлетворительным образом, и сразу же улавливал, как нужно дополнить, исправить или раскритиковать это описание» [2, с. 154].

Судя по высказываниям самого Эйнштейна и его современников, патентная деятельность даже в тот период необычайного творческого взлета не стала для Эйнштейна чем-то вроде необходимой, но тяжелой повинности, она была для него отнюдь не безынтересна и, несомненно, принесла ему пользу, развив и отточив его врожденную способность мгновенно схватывать существо физических и технических идей и адекватно, предельно сжато формулировать их. Кроме того, повысив «производительность» своего труда, молодой эксперт, видимо, действительно получил возможность выкраивать какое-то время для размышления над фундаментальными физическими проблемами.

М. Планк, когда ему однажды задали какой-то «хитрый» научный вопрос, сказал: «Я должен подумать об этом и напишу ответ. Я не могу ответить сразу. Эйнштейн может. А я не могу» [4, с. 390]. Думается, что семь лет «школы Галлера» сыграли тут свою роль.

Можно полагать, что работа в Патентном бюро была не только косвенно, но и непосредственно полезной для научной деятельности Эйнштейна. «Составление патентных формул было для меня благословением. Оно заставляло много думать о физике и давало для этого повод», — писал он впоследствии [5, с. 22]. Тому же Мошковскому Эйнштейн говорил, что для него самого связь между знаниями, приобретенными в Бюро патентов, и теми результатами, к которым он пришел в это самое время, несомненна [3, с. 197].

По мнению Дж. Уиллера, такая работа — это наилучший для молодого человека способ почувствовать, что такое физика и как она «работает» [6].

Чем же конкретно занимался в Бюро Эйнштейн, ставший в 1906 г. уже техническим экспертом II класса и представлявший на проходивших через него бумагах свой личный номер 42? К сожалению, сведения на этот счет

крайне скудны. Технические эксперты должны были выявлять суть изобретения, оценивать его реальность, исправлять авторское описание в соответствии с принятыми нормами, вести переписку с авторами по вопросам, требующим уточнений, и, наконец, выписывать изобретателям сертификаты о получении патента. Эйнштейна, видимо, как знатока максвелловской электродинамики, загрузили в первую очередь «электрическими» патентами. В книге М. Флюккигера «Альберт Эйнштейн в Берне» воспроизведено факсимиле эйнштейновского экспертного заключения от 11 декабря 1907 г. по заявке «Коллекторная машина постоянного тока», поданной германским электротехническим концерном АЭГ. Без малейшей робости перед влиятельным заявителем Эйнштейн «зарубил» заявку, указав на ее бессодержательность.

Но заниматься приходилось не только «электрическими» патентами. Как-то в Бюро зашел швейцарский крестьянин и рассказал, что придумал специальную пробку для бутылок, позволяющую точно дозировать количество выливаемой жидкости. Эксперты никак не могли взять в толк, как же работает эта пробка. Эйнштейн понял все с первых слов: использовался специфический капиллярный эффект, а капиллярными явлениями он в это время детально интересовался — капиллярности была посвящена первая научная статья Эйнштейна, опубликованная в 1901 г. Все же, чтобы окончательно убедить коллег, молодой теоретик предложил прибегнуть к эксперименту. Через несколько дней крестьянин вновь явился в Бюро, но на этот раз уже со своей чудо-пробкой, закупоривавшей бутылку с вином. Дозирующая способность пробки, а заодно и достоинства напитка были надежно удостоверены, и труды умельца-изобретателя увенчало патентное свидетельство.

В декабре 1904 г. к Эйнштейну обратился Юлиус Рис, выходец из России, получивший в Швейцарии медицинское образование. Широко эрудированный молодой врач, большой любитель наук и искусств, изобрел «Устройство для отбора проб крови в целях медицинских исследований» (это был шприц специальной конструкции) и вознамерился получить патент. Эйнштейн прочел составленное автором пространное описание изобретения. Его реакция была мгновенной: заразительно расхохотавшись, он сказал, что изобретение дельное, но описание никуда не годится — в море слов потонули и существенные черты

устройства, и принцип его действия. Тут, же, практически под диктовку Эйнштейна, было составлено новое короткое — всего на полстраницы — патентное описание. Вскоре Рису был выдан патент № 32371, датированный 9 ч утра 12 декабря 1904 г., а спустя некоторое время шприц Риса уже фигурировал в каталоге медицинских инструментов, поставлявшихся одной европейской фирмой.

Деловое знакомство переросло в дружбу, молодые люди вместе занимались музыкой, вели споры на философские темы, Эйнштейн просвещал Риса в области точных наук, а тот в свою очередь приобщал физика к проблемам медицины и физиологии.

Работа в Патентном бюро, в этом, по выражению Эйнштейна, «светском монастыре» была приятной и спокойной, отношения с сослуживцами простые и дружеские, директор — «чудесный человек и светлая голова». Но перед Эйнштейном открывались уже другие перспективы, и 6 июля 1909 г., после семи лет патентной службы, он вручил Галлеру заявление об уходе (как сказали бы сейчас, по собственному желанию) в связи с получением места профессора теоретической физики в Цюрихском университете. Рассказывают, что, ознакомившись с этим документом, суровый директор воскликнул: «Это неправда, господин Эйнштейн, я вам не верю, это просто скверная шутка!» Патриоту своего заведения никак не хотелось расставаться со столь ценным работником.

Потенциал-мультипликатор и флуктуации

Вся серия первых термодинамико-статистических работ молодого Эйнштейна, как он сам отмечал это в своих биографических заметках, была посвящена основной цели — поискам таких фактов, «которые возможно надежнее устанавливали бы существование атомов определенной конечной величины» [7, с. 148]. Целеустремленно продвигаясь в этом направлении, Эйнштейн уже в 1904 г. в статье «К общей молекулярной теории теплоты» [8, с. 67—74] обращается к анализу флуктуационных явлений. В том, что согласно кинетической теории материи термодинамические величины должны флуктуировать, т. е. испытывать хаотические отклонения от равновесных значений, отдавали себе отчет и Л. Больцман, и Дж. Гиббс (а еще ранее Р. Клаузиус и В. Томсон). Однако как тот, так и другой, стремясь продемонстрировать полное сог-

ласие выводов статистической механики с положениями термодинамики, доказывали, что эти флуктуации столь малы, что для реальных, наблюдаемых объектов и явлений никакого значения не имеют. Эйнштейн же подошел к этой проблеме с противоположной стороны — он стал изыскивать как раз те ситуации, в которых флуктуации могли бы быть наблюдаемы и измерены. Такие наблюдения дали бы возможность непосредственно «увидеть» элементарные атомные процессы, а соответствующие измерения позволили бы без введения каких-либо модельных представлений получить точное значение константы Больцмана k , а с ней и числа Авогадро N , задающего всю шкалу атомных величин. Следует заметить, что в то время число Авогадро было известно лишь с точностью около 50% [8, с. 158].

Как результат эйнштейновских поисков доступных экспериментальному исследованию флуктуационных явлений, в 1905 г. появляется его знаменитая статья «О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты» [8, с. 108—117], по поводу которой Эйнштейн впоследствии писал: «Не зная, что наблюдения над „броуновским движением“ давно известны, я открыл, что атомистическая теория приводит к существованию доступного наблюдению движения взвешенных микроскопических частиц» [7, с. 149]. Как известно, экспериментальное подтверждение выводов этой работы Ж. Перреном сыграло решающую роль в окончательной победе атомизма.

Это произошло только в 1908 г., а пока Эйнштейн продолжал искать альтернативные пути наблюдения флуктуаций. В написанной в декабре 1906 г. статье «О границе применимости теоремы о термодинамическом равновесии и возможности нового определения элементарных квантов» [8, с. 145—151] он рассчитал величину «флуктуационного напряжения» на электрическом конденсаторе:

$$\bar{u}^2 = \frac{kT}{c} \quad (c \text{ — электростатическая емкость конденсатора, } T \text{ — абсолютная температура}).$$
 Таким образом, открывался путь «электрического» определения константы Больцмана.

Но как измерить это напряжение, которое беспрестанно и очень быстро изменяет не только свою величину, но и знак? Способ, предлагаемый Эйнштейном, прост и остроумен. Возьмем обычный воздушный конденсатор с двумя

вдвигаемыми один в другой наборами пластин (такие конденсаторы переменной емкости широко используются в радиоприемниках). Емкость такого конденсатора при полностью вдвинутых пластинах c_1 может быть в сотни раз больше его емкости c_2 в положении, когда пластины раздвинуты. Заключим накоротко наборы пластин в полностью вдвинутом состоянии, а затем быстро их разомкнем и раздвинем. Пусть в момент замыкания флюктуа-

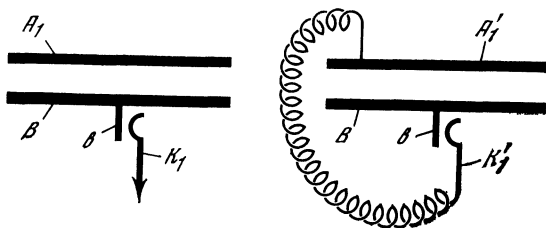


Рис. 1

ционное напряжение было $\sqrt{u_1^2} \approx \frac{\sqrt{kT}}{\sqrt{c_1}}$. После того, как пластины раздвинуты, поскольку заряд конденсатора не изменяется, это напряжение возрастет в c_1/c_2 раз и станет равным $\sqrt{kT} \frac{\sqrt{c_1}}{c_2}$. В то же время флюктуационное напряжение на уже раздвинутом конденсаторе будет $\sqrt{u_2^2} = \frac{\sqrt{kT}}{\sqrt{c_2}}$. Таким образом, «замороженное» постоянное напряжение в $\sqrt{c_1/c_2}$ раз превысит быстро меняющееся «фоновое» напряжение.

Эйнштейн показывает, что нетрудно сделать обычный многопластинчатый воздушный конденсатор, в котором величина «замороженного» флюктуационного напряжения составит 0,0005 В и будет в несколько десятков раз больше хаотических флюктуаций напряжения.

Как результат размышлений над тем, как измерять такие напряжения, в 1908 г. в журнале «Physikalische Zeitschrift» появляется короткая заметка Эйнштейна «Новый электростатический метод измерения малых количеств электричества» [8, с. 152—154]. Существо метода поясняется с помощью рис. 1 (этот рисунок заимствован из оригинальной работы), на котором схематически изображена простая электростатическая «машинка», задуманная Эйнштейном.

Мимо двух металлических пластин A_1 , A_1' движутся жестко связанные (например, укрепленные на непроводящем вращающемся диске) металлические листочки B . Пусть на пластину A_1 подан малый электрический потенциал, подлежащий измерению. Когда листочек B проходит под пластиной A_1 , его контактный штифт касается неподвижной контактной пружины K_1 , соединенной с землей. При этом электрический заряд на пластине индуцирует на листочке B заряд, равный ему по величине и противоположный по знаку. Когда этот листок подходит под пластину A_1' , он передает ей заряд, касаясь пружины K_1' . Если таких листочков много, каждый, проходя под пластиной A_1' , будет увеличивать ее заряд до тех пор, пока не наступит стационарное состояние, определяемое равновесием процессов зарядки и утечки. Если придать пластинам A_1 форму скобы, охватывающей листочки с обеих сторон, стационарный потенциал пластины A_1' будет во много раз превышать исходный потенциал пластины A_1 , равный измеряемому потенциалу (по тем же причинам, по которым достигают огромных потенциалов шаровых электродов в известных электростатических генераторах Ван де Граафа).

Пусть теперь n одинаковых элементов типа, показанного на рис. 1, включены последовательно. Если коэффициент усиления, или, как тогда говорили, коэффициент мультипликации одного элемента равен a , то конечный стационарный потенциал будет a^n .

Из этого следует, что уже при скромных значениях a и n можно получить очень большое усиление, а значит, и высокую чувствительность по измерению малых количеств электричества и потенциалов.

Эйнштейн указывает на основное преимущество электростатического прибора подобного типа по сравнению с широко использовавшимися физиками в то время квадратными электрометрами с чувствительностью до 10^{-6} В. В предлагаемом приборе требующаяся для измерения энергия черпается не из той цепи, в которой производятся измерения, а из внешнего источника — это работа, затрачиваемая механическим приводом, перемещающим листочки против сил электростатического отталкивания. Как бы сказали сейчас, эйнштейновский потенциал-мультипликатор практически не нагружает цепь, в которой производятся измерения.

Короткая заметка заканчивается скромным призывом: «...я надеюсь, что кто-нибудь из физиков заинтересуется этим предложением. Я охотно сообщу ему свои дальнейшие соображения по этому вопросу» [8, с. 154].

Такой энтузиаст вскоре нашелся. Правда, это был не физик, а скорее изобретатель — Пауль Габихт, младший брат одного из ближайших швейцарских друзей Эйнштейна — математика Конрада Габихта. Некоторое время спустя старший брат также подключился к работе над потенциал-мультипликатором.

В ноябре 1909 г. Эйнштейн пишет Бессо о том, что дела с «машиной» продвигаются, чувствительность $0,0001$ В достижима, но «пока еще не в порядке контакты» [9, с. 14]. В мае 1910 г. братья Габихты публикуют в «Physikalische Zeitschrift» статью «Электростатический потенциал-мультипликатор по Эйнштейну» [10], в которой описывают конструктивную реализацию эйнштейновской идеи и сообщают данные испытаний.

Устройство прибора показано на рис. 2. Электродвигатель вращает вал C , на котором через изоляторы R укреплены металлические секторообразные листочки F . Эти листочки поочередно касаются контактных пружин H и K таким образом, что разрыв обоих контактов происходит в момент, когда каждый из листочков F находится между парами входных E и выходных A пластин. Машина состоит из шести включенных последовательно ступеней. Подлежащий измерению малый потенциал подается на входную клемму E_1 , а усиленный снимается с выходной клеммы A_6 . Видно, что устройство совершенно аналогично предложенному Эйнштейном. Прибор снабжен еще клеммами для измерения потенциалов последовательных ступеней и дополнительным устройством O для компенсации паразитных разностей потенциалов.

Испытания прибора, в которых, как сообщают авторы, принимал участие и Эйнштейн, проводились в лаборатории Цюрихского университета. Было показано, что коэффициент усиления (мультипликации) потенциала составляет $3,6 \cdot 10^5$, а чувствительность прибора, ограниченная «плаванием нуля», — около $5 \cdot 10^{-4}$ В. Оказалось также, что небольшие вариации скорости вращения вала заметного влияния на показания прибора не оказывают.

Габихты перечисляют следующие преимущества нового прибора по сравнению с популярным в то время квадратным электрометром: низкая входная емкость, что

ку на конструкцию прибора и приступить к его фабричному производству.

Таким образом, перед потенциал-мультипликатором открывались, казалось бы, самые радужные перспективы. В декабре 1911 г. Эйнштейн пишет Бессо: «Габихт продемонстрировал машинку в Берлинском физическом обществе и имел колоссальный успех. Им намного превзойден струнный электромметр, и будущее его обеспечено. Меня это очень радует. У Габихта уже довольно много заказов» [9, с. 31]. В письме от 4 февраля 1912 г. Эйнштейн снова вспоминает о берлинской демонстрации прибора: «Там чуть ли не прыгали от восторга» [9, с. 36].

Есть упоминание об электростатической машинке и в «Курсе физики» О. Д. Хвольсона: «Особенно интересен мультипликатор, построенный Габихтом по идее Эйнштейна; в этом приборе потенциал повышается последовательно 6 ступенями, причем n (коэффициент мультипликации.— *Авт.*) между первой и последней ступенью равно 360 000. Благодаря столь огромному коэффициенту мультипликации при помощи этого прибора могут быть замечены и измерены на обыкновенном калиброванном электроскопе (напряжения.— *Авт.*) порядка десяти тысячных долей вольта» [11, с. 132].

Однако в последующие годы о подававшем столь большие надежды приборе никто уже не вспоминает, причем интерес к нему угас, видимо, еще до начала войны.

В чем тут дело? Имеются две главные причины. Во-первых, прибор все-таки, что называется, «не пошел». Как это видно из ряда писем Эйнштейна к Бессо [9, с. 2, 9, 28, 36], разработчики мультипликатора постоянно испытывали трудности с контактами к вращающимся листочкам: эти контакты истирались, загрязнялись, давали паразитные ЭДС.

Удовлетворительным образом преодолеть эти трудности, видимо, не удалось; для современного физика вполне очевидно, что прибор для измерения столь малых напряжений не должен содержать трущиеся контакты. И, во-вторых, в это время в измерительных схемах уже начинают использовать новый усилительный прибор — вакуумный триод (запатентованный Ли де Форестом в 1907 г.), конкурировать с которым механическая контактная машинка, конечно, была не в состоянии.

Достигнутая Габихтами чувствительность все же была недостаточна для выполнения поставленной Эйнштейном

задачи точного измерения электростатических напряжений порядка $5 \cdot 10^{-4}$ В. Да и сама эта задача уже утратила былую актуальность, поскольку к этому времени Ж. Перреном и рядом других исследователей разными способами удалось провести точные измерения константы Больцмана и числа Авогадро.

Патентная заявка на потенциал-мультипликатор была составлена. Но был ли выдан ее авторам патент? Отыскать его среди швейцарских и германских патентов того времени авторам настоящей статьи не удалось, нет упоминаний о нем и в «эйнштейновской» литературе. Аналогичный поиск исследователя Х. Мельхера [12, с. 23] из ГДР также не дал результатов. Скорее всего изобретение все-таки не было запатентовано. На первый взгляд, это довольно странно. П. Габихт был, видимо, деловым человеком с предпринимательской жилкой и имел на своем счету ряд патентов (правда, полученных впоследствии), а что касается Эйнштейна, то уж лучшего помощника по патентованию вряд ли можно было пожелать; кроме того, как об этом будет говориться дальше, в последующие годы Эйнштейн и сам получал патенты, и не раз, «тряхнув стариной», оказывал помощь как патентный эксперт.

Может быть, дело тут в том, что при ближайшем рассмотрении идея и конструкция прибора оказались в общем-то не новыми. Не в духе Эйнштейна было перед решением какой-либо задачи изучать сначала всю имеющуюся информацию по данному вопросу: создавая специальную теорию относительности, он имел неясное представление об опыте Майкельсона; разрабатывая теорию флуктуаций, он «открыл» для себя известное к тому времени уже около ста лет броуновское движение. Нечто подобное произошло и с потенциал-мультипликатором. По существу, этот прибор есть не что иное, как одна из разновидностей электростатической машины влияния. Подобную машину сконструировал еще в 1865 г. профессор Рижского политехнического института А. Тёплер [13]. Правда, Тёплер решал задачу, обратную той, которой занимались Эйнштейн и его друзья, — в его статье речь идет об использовании электрометра влияния в качестве источника высокого напряжения.

Какова же дальнейшая судьба впервые рассмотренных Эйнштейном «электрических» флуктуаций, для измерения которых и был-то задуман потенциал-мультипликатор? Теоретические изыскания Эйнштейна были продолжены

дочерью Г. А. Лоренца Г. де Гааз-Лоренц (носившей в кругу друзей за интерес к флуктуациям шутливое прозвище «броуновское движение»), которая получила к 1913 г. несколько важных результатов, в том числе касающихся «броуновского» движения подвижной части чувствительного электроизмерительного прибора, например рамки гальванометра. Однако в последующее десятилетие работы основоположников учения об электрических флуктуациях были практиками фактически забыты. Эйнштейн взялся за разработку чувствительного прибора с целью обнаружения флуктуаций. Исторический же путь развития оказался обратным — экспериментаторы непосредственно столкнулись с флуктуациями в период освоения слаботочной техники, когда были созданы измерительные приборы с чувствительностью 10^{-8} — 10^{-10} А по току и 10^{-4} — 10^{-6} В по напряжению, а также усилители на электронных лампах, обладающие огромными коэффициентами усиления.

Оказалось, что возможности всех этих приборов, несмотря на все технические ухищрения, ограничены какими-то неустранимыми дрожаниями, колебаниями и шумами. Лишь постепенно пришло понимание того, что причина тут в казавшихся ранее столь «теоретическими» и далекими от практики электрических флуктуациях. К 30-м годам была решена и сама поставленная Эйнштейном в 1906 г. задача — из измерений электрических флуктуаций удалось с хорошей точностью определить константу Больцмана k [14].

Эйнштейн, Сцилард, холодильные машины и МГД-насос

Широко известна роль выдающегося физика Л. Сциларда в работах, приведших к созданию атомной бомбы и атомного реактора: он стимулировал эти работы, сам плодотворно в них участвовал, был инициатором их засекречения и, наконец, был главным инициатором знаменитого письма Эйнштейна президенту США Ф. Рузвельту от 9 августа 1939 г., в котором указывалось на зловещую возможность разработки в фашистской Германии атомного оружия огромной разрушительной силы и содержался призыв незамедлительно приступить к осуществлению такой программы в США. Успеху сцилардовского замысла с письмом великого физика президенту, видимо, во мно-

гом способствовала его давняя дружба с Эйнштейном (несмотря на внушительную разницу в возрасте — Сцилард был почти на двадцать лет моложе). Они познакомились в начале 20-х годов в Берлине — Сцилард посещал университетские семинары, которые проводил Эйнштейн. У молодого физика были все данные, чтобы завоевать симпатии своего прославленного коллеги: он был теоретиком, интересовался фундаментальными проблемами физики, прекрасно чувствовал ее красоты, в его диссертационной работе милые сердцу Эйнштейна флуктуации рассматривались с новой, неожиданной стороны. Кроме того, как это ярко проявилось в последующие годы, Сцилард оказался настоящим генератором идей¹. И было еще одно обстоятельство, которое, может быть, больше всего сблизило двух физиков, — они оба тяготели к изобретательству.

С 1928 по 1930 г. они подали 19 патентных заявок, причем почти по всем были выданы патенты. Правда, примерно аналогичные заявки они подавали в патентные ведомства различных стран: Германии, Англии, США, Голландии и Швейцарии, так что в действительности число их изобретений было меньше — 7.

Что же изобретали два физика-теоретика? Ответ несколько удивительный — холодильники, причем главным образом домашние. Теперь, когда холодильник стал необходимым атрибутом каждой кухни, это может показаться довольно странным. Но тогда, в конце 20-х годов, домашние холодильники находились в самом центре внимания и массовое вселение этих весьма полезных аппаратов в частные квартиры только начиналось. Казалось, что открывались широкие возможности для ново-

¹ Трудно удержаться, чтобы не привести хотя бы неполный список мощных, но, как правило, опережающих свое время сцилардовских идей: продолжая размышлять о флуктуациях, он в 1929 г. приходит к формулировке связи между информацией и энтропией (за 20 лет до появления теории информации!); в конце 20-х — начале 30-х годов Сцилард разрабатывает принципы линейного резонансного ускорителя, циклотрона и синхрофазотрона; в 1934 г. (за пять лет до открытия деления урана!) Сцилард подал патентную заявку на ядерный реактор с цепной реакцией на нейтронах, ввел понятие критической массы и дал ее оценку (заявка была засекречена, ее опубликовали только в 1972 г.); Сцилард был одним из пионеров биофизики — изучал регуляцию клеточного метаболизма, образование антител, процессы старения центральной нервной системы, молекулярные основы человеческой памяти.

введений. Вдохновлял также пример шведских изобретателей Б. Платена и К. Мунтерса, запатентовавших в это время исключительно удачный абсорбционный холодильный аппарат, который практически в неизменном виде выпускается и сейчас¹. На базе этого изобретения предприимчивые шведы достигли большого финансового успеха, основав процветающую (и в наши дни) фирму «Elektrolux». Впечатляющей особенностью этих аппаратов является полное отсутствие каких-либо движущихся частей — для получения холода непосредственно используется тепловая энергия. Это может быть и тепло электронагревателя, и тепло от сгорания природного газа, и солнечный нагрев.

Отправной точкой в изобретательской деятельности Эйнштейна и Сциларда по холодильным аппаратам послужило именно это шведское новшество. В одной из патентных заявок они вносят некоторое усовершенствование в схему Платена—Мунтерса, в другой предлагают использовать хладагент нового типа. В ряде заявок они уже отходят от классической шведской схемы абсорбционного холодильника, стремясь сохранить, однако, ее важнейшее достоинство — отсутствие движущихся частей, а с ними шума, вибраций, износа, необходимости смазки, т. е. всего того, что присуще работе обычных компрессоров и насосов.

Так они приходят к изобретению «Насос, особо предназначенный для холодильных машин», на которое в Англии по поданной 3 декабря 1929 г. заявке 3 марта 1931 г. выдан патент № 344881 (это же изобретение запатентовано в Германии — заявка от 3 декабря 1928 г., в Швейцарии и Голландии).

Начало патентного описания в соответствии с принятыми традициями звучит весьма торжественно: «Мы, профессор Альберт Эйнштейн, швейцарский подданный, проживающий в Германии, Берлин, Хаберландштрассе, 5, и д-р Лео Сцилард, венгерский подданный, проживающий в Германии, Берлин, Принцгергентштрассе, 95, настоящим заявляем сущность данного изобретения и то, каким образом оно может быть реализовано...»

Сначала описывается схема (рис. 3) холодильной машины, в которой используется предложенный физиками насос. В принципе она устроена аналогично известным

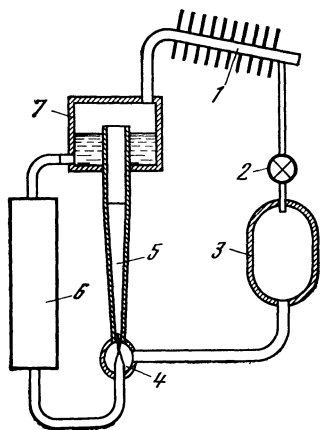
¹ К аппаратам этого типа относятся, например, отечественные холодильники «Север-6» и «Морозко».

компрессионным холодильникам, в частности бытовым. Сжатый газообразный хладагент (это может быть пропан, бутан, различные эфиры или фреоны) сжимается в снабженном радиаторными пластинами конденсаторе 1. Получающаяся жидкость понижает свое давление, проходя через регулировочный вентиль или капилляр 2, и поступает в испаритель 3, который и охлаждает холодильную камеру, «отсасывая» из нее тепло и расходуя его на испарение жидкого хладагента.

Однако по сравнению с обычной схемой компрессионного холодильника имеется существенное отличие: компрессор отсутствует, и для осуществления циркуляции, а также сжатия паров хладагента используется струйный насос 4, в котором, проходя через зауженный участок, струя жидкости засасывает пар из испарителя и сжимает его в трубе 5. (К насосам такого типа относится, например, известный по школьным урокам физики водоструйный насос, который резиновым шлангом присоединяют к водопроводному крану.)

Следует отметить, что этот насос механически движущихся частей — крыльчаток, лопастей, роторов и т. п. — не содержит.

Рис. 3



Таким образом, задача состоит в том, чтобы создать поток жидкости через струйный насос. И существо изобретения Эйнштейна и Сциларда именно в красивом и своеобразном решении этой задачи — вместо обычных механических компрессоров или насосов (которые, нужно сказать, в те времена были очень далеки от того совершенства, которого достигли в наши дни) они предлагают использовать опять же не имеющий механически движущихся частей электромагнитный насос 6. Все, что еще требуется, — это сепаратор 7, отделяющий газообразный хладагент от рабочей жидкости струйного насоса 4 и возвращающий эту жидкость снова на вход электромагнитного насоса 6.

Ясно, что электромагнитными средствами можно эффективно приводить в движение только электропроводную жидкость. Эйнштейн и Сцилард предлагают в качестве такой жидкости использовать натрий-калиевые сплавы (при определенной пропорции компонентов сплав не твердеет даже при температуре -10°C), имеющие высокую электропроводность и низкий удельный вес.

В патентном описании представлены два варианта электромагнитного насоса. Устройство одного из них показано на рис. 4.

Жидкий металл проходит по кольцевому зазору 3 между выполненными из железа трубой 1 и цилиндрическим сердечником 2. Переменные токи в последовательных обмотках 4—7 сдвинуты по фазе таким образом, что возникает магнитное поле, бегущее вдоль вертикальной оси насоса. Для лучшей концентрации магнитного поля внешнее пространство вокруг обмоток заполнено пакетами пластин 8, 9 из трансформаторной стали. Возбуждаемая обмоткой магнитное поле наводит в жидком металле кольцевой ток. В результате взаимодействия взаимно перпендикулярных магнитного поля и тока возникает действующая на жидкий металл объемная сила, направленная вдоль оси насоса. При надлежащей фазировке подключения обмоток жидкий металл, выталкиваемый из зоны одной обмотки, сразу же подхватывается и подгоняется дальше соседней обмоткой.

Эйнштейн и Сцилард описывают также другой вариант электромагнитного насоса, в котором взаимодействующий с магнитным полем электрический ток создается в жидком металле не индукционным образом, а непосредственно с помощью электродов.

В запатентованных Эйнштейном и Сцилардом устройствах трудно не узнать современных магнитогидродинамических (МГД) насосов индукционного типа (первый вариант) и кондукционного типа — второй вариант. Действительно, конструкции современных МГД-насосов достаточно близки к описанным выше.

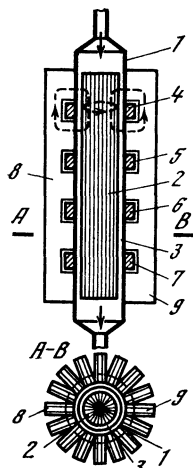


Рис. 4

Интересно, что Эйнштейн и Сцилард не только придумали свою холодильную машину с жидким металлом и электромагнитным насосом, но и построили ее. Однако революции в холодильной технике она не произвела, более того, она оказалась не очень практичной и шумела сильнее, чем холодильник с компрессором [15, с. 16] (по-видимому, шум создавала струя жидкого металла).

Как это часто бывает, сфера применения изобретения оказалась совсем не такой, как первоначально полагали изобретатели. Еще до запуска Э. Ферми в 1942 г. первого атомного реактора Сцилард уже начал размышлять о различных типах реакторов для мирного времени, в том числе о реакторе-размножителе на быстрых нейтронах, в котором параллельно с производством энергии происходила бы наработка ядерного топлива. В качестве теплоносителя для такого реактора лучше всего подходил жидкий металл. И тут, как вспоминает ученик и сотрудник Сциларда по этим работам Б. Фельд, ученый вспомнил о совместном с Эйнштейном изобретении и попросил своих помощников приспособить его для новой конкретной задачи [16]. В настоящее время электромагнитные насосы эйнштейн-сцилардовского типа являются неотъемлемой частью оборудования реакторов-размножителей на быстрых нейтронах, реакторов, которым, вероятно, принадлежит завтрашний день энергетики. Примечательно, что в качестве теплоносителя в таких реакторах, как правило, используется натрий-калиевый расплав, т. е. именно та система, которую использовали в своем холодильнике Эйнштейн и Сцилард. Но ядерные реакторы — далеко не единственная область применения МГД-насосов — их используют при литье и дозировании металлов, при изготовлении радиотехнических схем и в других производственных операциях.

Можно ли Эйнштейна и Сциларда считать изобретателями МГД-насосов? Исторические обзоры по этому вопросу содержатся в ряде монографий (см., например, [17]). Однако, как обычно, в вопросах приоритета полная определенность отсутствует. Необходимо упомянуть кондукционный электромагнитный насос с постоянным магнитным полем, построенный в 1918 г. Д. Гартманом для перекачки ртути. В 1927 г. наш соотечественник П. Е. Тряпцын получил авторское свидетельство на «Электрический насос для подъема металлов, находящихся в жидком состоянии, и электролитов». Это был индукционный насос

с бегущим магнитным полем. В общем можно утверждать только следующее: 1) Эйнштейн и Сцилард пришли к своему изобретению самостоятельно; 2) во всяком случае их с полным правом можно считать одними из нескольких творцов МГД-насосов, и, наконец, 3) предложенные ими конструктивные схемы наиболее близки к устройствам, взятым на вооружение техникой.

В заключение этого раздела следует сказать, что холодильная деятельность непосредственных практических выгод физикам-изобретателям, видимо, не принесла. Хотя, впрочем, один их патент, как раз тот, который непосредственно касался усовершенствования абсорбционного холодильника шведов Платена и Мунтерса, был приобретен их фирмой «Elektrolux». Думается, однако, что Эйнштейн и Сциларда вряд ли так уж прельщали лавры предприимчивых шведов, они, наверное, «вволю изобретали», с удовольствием пообщались друг с другом, а Эйнштейн к тому же, составляя патентные описания, не без приятности припомнил свои бернские годы. Кстати, сам Сцилард вспоминает: «Почему бы Вам не поступить на работу в Бюро патентов?— спросил меня Эйнштейн сразу после того, как я окончил университет.— Научному работнику не следует жить так, чтобы его благополучие зависело от того, удастся ли ему нести золотые яички. Годы, когда я работал в патентном бюро, были лучшим временем в моей жизни» [12, 15].

Магнитострикционный громкоговоритель

10 января 1934 г. Германское патентное ведомство по заявке, поданной 25 апреля 1929 г., выдало патент № 590783 на «Устройство, в частности, для звуковоспроизводящей системы, в котором изменения электрического тока вследствие магнитострикции вызывают движения магнитного тела». Вторым автором изобретения значился доктор Рудольф Гольдшмидт из Берлина, а первый был записан так: «Доктор Альберт Эйнштейн, ранее проживавший в Берлине, теперешнее местожительство неизвестно».

Магнитострикцией, как известно, называют эффект сокращения размеров магнитных тел (обычно имеются в виду ферромагнетики) при их намагничивании. В преамбуле к патентному описанию изобретатели пишут, что обычно этот эффект мал вследствие того, что силам магнит-

ного сжатия препятствует жесткость ферромагнетика. Чтобы магнитострикцию «заставить работать» — в данном случае сообщить звуковые колебания диффузору громкоговорителя, — эту жесткость нужно как-то нейтрализовать, скомпенсировать. Эйнштейн и Гольдшмидт предлагают три варианта решения такой, казалось бы, неразрешимой задачи.

Первый вариант проиллюстрирован на рис. 5, вверху. Несущий иглу с диффузором ферромагнитный (железный) стержень B ввинчен в прочное U -образное магнитное ярмо A таким образом, что сжимающие стержень осевые усилия очень близки к критической величине, при которой имеет место эйлеровская потеря устойчивости — выгиб стержня в ту или другую сторону. На ярмо надеты обмотки D , по которым проходит электрический ток, модулированный звуковым сигналом. Таким образом, чем сильнее звук, тем сильнее намагничивается и, следовательно, сжимается железный стержень B . Поскольку стержень поставлен на самую грань неустойчивости, эти малые вариации его длины приводят к сильным колебаниям в вертикальном направлении; при этом прикрепленный к середине стержня диффузор C генерирует громкий звук.

Во втором варианте (рис. 5, внизу) используется неустойчивость системы: сжатая тугая пружина H — шток G , упирающийся острием в лунку S . Модулированный звуковым сигналом ток проходит по обмотке D . Переменная во времени намагниченность железного стержня приводит к микроскопическим колебаниям его длины, которые в огромной степени усиливаются энергией теряющей устойчивость мощной пружины.

В третьем варианте магнитострикционного громкоговорителя (рис. 5, справа) применена схема с двумя железными стержнями B_1, B_2 , обмотки D которых подключены таким образом, что, когда намагниченность одного стержня увеличивается, намагниченность другого уменьшается. Тягами C_1, C_2 стержни соединены с коромыслом G , подвешенным на штанге M и прикрепленным растяжками F к боковинам магнитного ярма A . Коромысло жестко связано с диффузором W . Завинчивая гайку P на штанге M , систему переводят в состояние неустойчивого равновесия. Вследствие противофазного намагничивания стержней B_1, B_2 током звуковой частоты их деформации также противофазны — один стержень сжимается, другой удлиняется (сжатие ослабляется); коромысло в соответствии со звуко-

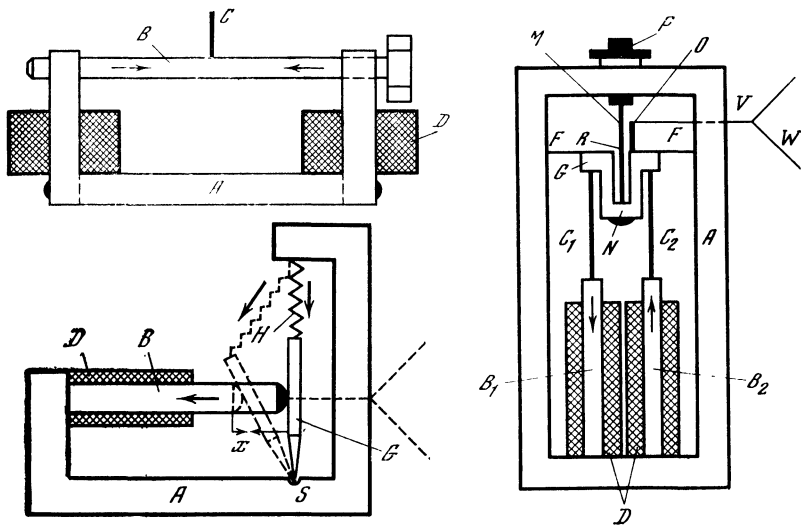


Рис. 5

вым сигналом перекашивается, поворачиваясь относительно точки R . В этом случае также за счет использования «скрытой» неустойчивости происходит огромное усиление амплитуды магнестрикционных колебаний.

Х. Мельхер, знакомившийся с документами семьи Р. Гольдшмидта и беседовавший с его сыном, излагает историю появления этого изобретения следующим образом [12, с. 26]. Р. Гольдшмидт¹ был хорошим знакомым Эйнштейна. Их общими друзьями были музыканты супруги Ольга и Бруно Айзнер — известная певица и знаменитый в то время пианист. Ольга Айзнер плохо слышала, что, учитывая ее профессию, было особенно досадно. Гольдшмидт, как специалист по звуковоспроизводящей аппаратуре, взялся ей помочь — он решил сконструировать слуховой аппарат (действительный прогресс в разра-

¹ Р. Гольдшмидт (1876—1950) — доктор-инженер по специальности электротехника, на заре эры радио руководил важными работами по установлению первой линии беспроводной телеграфной связи между Европой и Америкой (1914 г.), автор множества изобретений по усовершенствованию звуковоспроизводящих устройств (главным образом для телефонных аппаратов), высокочастотным резонаторам и др.

ботках этих аппаратов в то время только начинался). В этой деятельности принял участие и Эйнштейн.

Был ли в конечном счете сконструирован действующий слуховой аппарат, неизвестно. Как видно из патентного описания, изобретателей увлекла идея использования не находившего ранее применения эффекта магнитострикции, и они разработали базирующийся на этом эффекте громкоговоритель.

Для ф́рау Ольги, как сообщает Мельхер, планировался слуховой аппарат на так называемой «костной проводимости», т. е. возбуждающий звуковые колебания не воздушного столба в ухе, а непосредственно черепных костей¹, ввиду чего требовалась более высокая мощность. Представляется, что устройство Эйнштейна — Гольдшмидта вполне отвечало этому требованию.

Автоматическая фотокамера

Беседуя в 1930 г. с Рабиндранатом Тагором, Эйнштейн припомнил свои «счастливые бернские годы» и признался, что, работая в Патентном бюро, «сам смастерил» несколько изобретений, в том числе чувствительный электрометр (о нем речь уже шла выше) и еще одно устройство, автоматически определяющее время экспозиции при фотосъемке [18]. По-современному, как это знает всякий, кому приходилось фотографировать, такое устройство называется фотоэкспонетром. Почти нет сомнений, что эйнштейновский фотоэкспонетр был основан на фотоэлектрическом эффекте. И, как знать, может быть, это изобретение было побочным продуктом размышлений, завершившихся знаменитой статьей 1905 г. «Об одной эвристической точке зрения...», в которой введены световые кванты и с их помощью объяснен фотоэлектрический эффект.

Любопытно, что интерес к устройствам подобного рода сохранился у Эйнштейна надолго, хотя, насколько известно, фотолителем он никогда не был. Так, его авторитетный биограф Ф. Франк сообщает, что где-то во второй половине 40-х годов Эйнштейн в компании с одним из своих ближайших друзей по Америке, доктором медицины

¹ Таким способом еще пользовался глухнувший Бетховен: играя, он держал в зубах жесткую палочку, которую другим концом прижимал к роялю.

Г. Букки¹, «изобретал механизм для автоматической регулировки времени экспозиции фотопленки в зависимости от освещенности» [19, с. 24], т. е. опять же фотоэкспонетр.

Но мало того, оказывается, что 27 октября 1936 г. Букки и Эйнштейн получили американский патент № 2058562 на фотокамеру, автоматически подстраивающуюся под уровень освещенности. Устроена эта автоматическая камера достаточно просто. В ее передней стенке, помимо объектива, имеется еще окно, через которое свет попадает на фотоэлемент. Электрический ток, вырабатываемый фотоэлементом, поворачивает находящийся между линзами легкий кольцевой сегмент (например, целлулоидный), зачерненный так, что прозрачность его плавно изменяется от максимальной на одном конце до минимальной на другом. Как пишут Букки и Эйнштейн, блок с фотоэлементом аналогичен известным конструкциям фотоэкспонетров с тем только отличием, что в данном случае поворачивается кольцевой сегмент, а не указывающая экспозицию стрелка. Поворот сегмента тем больше, а следовательно, затемнение объектива тем сильнее, чем ярче освещен объект съемки. Таким образом, будучи раз отъюстированным, устройство при любой освещенности будет само регулировать количество света, попадающего на фотопленку или пластинку.

Но что делать, если фотографу захочется изменить диафрагму? Для этого изобретатели предлагают несколько усложненный вариант своей фотокамеры. В этом варианте на ее передней стенке устанавливается поворотный диск с набором отверстий нескольких диаметров. При поворотах диска одно из таких отверстий приходится на объектив, а диаметрально противоположное — на окно фотоэлемента. Диаметры этих отверстий меньше диаметров объек-

¹ Необходимо сказать несколько слов о друге Эйнштейна. Г. Букки родился в 1880 г. в Лейпциге, там же закончил медицинский факультет университета. Сначала в Германии, а потом в США он приобрел известность как крупный рентгенолог, но помимо рентгеновских лучей проявлял живой интерес к терапевтическому использованию новых достижений физики и техники; так, Букки был одним из пионеров УВЧ-прогрева. Букки активно трудился как изобретатель. Еще в 1912 г. им была изобретена так называемая «диафрагма Букки», повышающая контраст рентгеновских снимков человеческих органов. На счету Букки множество и других изобретений, относящихся к рентгеновской технике, фотоаппаратам, электроизмерительным приборам и звуковоспроизводящим устройствам.

тива и окна, так что, поворачивая диск на фиксированные углы, фотограф одновременно диафрагмирует и объектив и окно. Таким образом, и для различных диафрагм достигается автоматическая подстройка пропускания света под освещенность объекта съемки.

Достоинства изобретения ясны: 1) автоматически регулируется световой поток, падающий на фотопленку или фотопластинку; 2) поскольку используется фотоэлемент, отсутствует опасность, что по истечении некоторого, пусть длительного, времени регулировочное устройство перестанет работать, как было бы, если бы для его питания использовалась батарейка (впрочем, авторы не исключают возможности использования в качестве светочувствительного элемента и селенового фоторезистора, подсоединенного к внешнему источнику тока).

Прочие технические интересы

В известной книге об Эйнштейне К. Зелиг рассказывает о том, что Эйнштейн в 1915 г. занимался конструированием самолетов [20, с. 139] и что великий теоретик в этом своем начинании потерпел сокрушительное фиаско. Достоверность этого эпизода оспаривает (правда, не приводя фактической аргументации) другой эйнштейновский биограф, Ф. Гернек: «Сообщение... о том, что Эйнштейн в 1916 (? — *Авт.*) безуспешно пытался усовершенствовать конструкцию несущих плоскостей военных самолетов, выглядит маловероятным» [21, с. 129].

В 1916 г. Эйнштейн опубликовал статью «Элементарная теория полета и волн на воде», начинавшуюся следующим образом: «Откуда берется подъемная сила крыльев наших самолетов и птиц, парящих в воздухе? В этих вопросах царит полная неясность. Должен признаться, что и в специальной литературе я не мог найти на них даже простейшего ответа» [22, с. 22]. Этот отрывок представляется довольно многозначительным: видно, что Эйнштейн заинтересовался физикой самолетов, причем даже в такой степени, что обратился к специальной литературе, что было совершенно на него не похоже, — как известно, Эйнштейн обычно «мало читал и много думал».

А. Ф. Иоффе вспоминает: «Когда в 20-х годах я узнал его (Эйнштейна. — *Авт.*) ближе, оказалось, что в нем сильны тенденции изобретательства. Вместе с художником

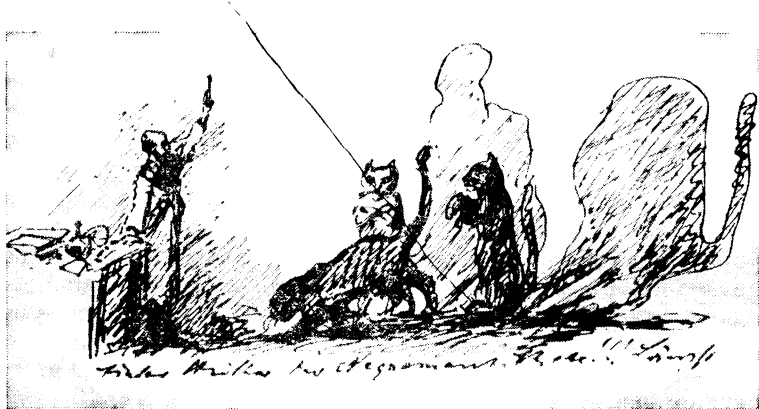


Рис. 6

Орликом¹ и зубным врачом Гринбергом Эйнштейн разрабатывал новый тип полиграфической машины для художественной графики» [23, с. 225]. В архиве А. Ф. Иоффе среди карандашных зарисовок, выполненных Орликом, отыскался один — шарж доктора Гринберга (рис. 6), отпечатанный именно на этой «полиграфической машине».

Все знают, что Эйнштейн любил музыку и прекрасно играл на скрипке. Менее известно, что и тут у него были свои идеи технического плана. Советский физик Ю. Б. Румер рассказывает, что, когда он в 1929 г. в Берлине был у Эйнштейна дома, их беседа неожиданно прервалась: вошел человек с длинной седой бородой, скрипичный мастер. Начался совершенно профессиональный разговор: Эйнштейн говорил, что деку надо делать так-то, а мастер, что так-то. Когда мастер ушел, Эйнштейн сказал со вздохом: «Ах, вы не знаете, сколько этот человек отнимает у меня времени» [24, с. 434].

Другой общеизвестной привязанностью Эйнштейна была парусная яхта. Как-то у Эйнштейна побывал видный конструктор яхт В. Бургесс и продемонстрировал чертежи, относящиеся к новейшим разработкам в этой области.

¹ Э. Орлик (1870—1932) — чешский график, гравер и прикладник постимпрессионистского и символистского толка. Был широко известен в первые десятилетия нашего века. Тяготел к экспериментированию и изобретательству в области технических средств, в частности разработал оригинальную технику цветной гравюры на дереве.

Эйнштейн увлеченно рассматривал чертежи, попутно высказывая свои идеи и внося коррективы [24, с. 522].

Живой интерес проявил Эйнштейн также к «ветроходу» нового типа — роторному судну, построенному в 1924 г. на верфи в г. Киле немецким инженером-изобретателем А. Флеттнером. Над палубой этого судна возвышались два цилиндра высотой 26 м и диаметром 3 м. Когда специальный механизм приводил эти роторы во вращение, обтекающий их ветер с одной их сторон создавал зону повышенного, а с другой — зону пониженного давления (эффект Магнуса). В результате судно послушно следовало заданным курсом, разворачивалось и даже двигалось задним ходом. Эйнштейн посвятил физике этого судна специальную популярную статью [25, с. 16—17]. В первое время на судно Флеттнера возлагали большие надежды, однако экономически оно все-таки оказалось невыгодным, и ныне о нем вспоминают лишь как о ярком примере в высшей степени красивого и оригинального, по тем не менее неудачного конструктивного решения.

Из переписки Эйнштейна с М. Бессо, А. Зоммерфельдом, М. Планком видно, что, по крайней мере в промежутке между 1920 и 1926 гг., Эйнштейн очень часто бывал в Киле. Научных дел у него там в общем не было. Чем же занимался в Киле Эйнштейн? Намек на ответ на этот вопрос содержится в его письме Бессо в мае 1925 г.: «...веду тихую жизнь без внешних событий. Единственные перемены — мои поездки в Киль, где я понемногу освежаю свои технические навыки» [26, с. 7].

В Киле находилась фирма, занимавшаяся разработкой и производством морских гироскопических компасов (и других гироскопических приборов). Возглавлял фирму хороший знакомый Эйнштейна и Зоммерфельда Г. Аншютц-Кемпфе (1872—1931) — талантливый, но не имевший специального технического образования изобретатель, который в 1908 г. сконструировал первый надежно работавший навигационный гироскопический компас, сразу же получивший практическое применение. Аншютц был страстным энтузиастом гироскопов, непрерывно работал над их усовершенствованием, привлекая к этим работам видных физиков и инженеров. К 1926 г. фирмой Аншютца был построен после десятилетних трудов весьма сложный и совершенный двухроторный артиллерийско-навигационный гироскопический компас, обладавший прецизионными характери-

стиками; на флоте за ним закрепилось название «новый Аншютц». Видный советский механик Б. В. Булгаков отмечал, что недостатки предшествующих вариантов гироскопов сходного типа удалось устранить «путем радикальной перестройки всей конструкции компаса и ряда чрезвычайно смелых и оригинальных нововведений и отступлений от установившейся практики» [27, с. 169]. Этот прибор в свое время послужил одним из отправных для развития техники гироскопов в нашей стране.

Почти во всех монографиях по гироскопическому делу (и по новейшей истории механики) отмечается, что над «новым Аншютцем» трудился и Эйнштейн. Крупный советский специалист по гироскопам Б. И. Кудревич, который в 1928 г. побывал на фирме Аншютца, писал, что «в разработке идеи его (гироскопа. — *Авт.*) конструкции принимал участие автор теории относительности Эйнштейн» [28, с. 39]. Как сообщил одному из авторов проф. И. И. Гуревич, наши моряки даже называли эти приборы гироскопами Эйнштейна—Аншютца. К сожалению, однако, не известно, каков же конкретный вклад великого физика в эти разработки.

Советский физик и радиоинженер Л. С. Термен, один из пионеров «электронной» музыки, вспоминает, что на демонстрации в Нью-Йорке изобретенного им «терменвокса» (на этом инструменте музыкальные произведения исполняются без касания — плавные движения рук изменяют распределение электромагнитного поля, и возникает то звук, схожий с человеческим голосом, то со звучанием виолончели или скрипки) присутствовал Эйнштейн, который затем с большой похвалой отозвался о новом инструменте американским газетчиком. Затем он не раз приходил в студию Термена в Нью-Йорке, играл с изобретателем дуэтом, пробовал играть на терменвоксе один под аккомпанемент жены, Эльзы Эйнштейн, хорошей пианистки. Термен в то время увлекался и цветомужкой, которая также вызвала энтузиазм Эйнштейна. Для занятий цветомужкой Эйнштейну выделили специальную комнату в квартире нью-йоркского знакомого Термена.

Аналогичный интерес вызвал у Эйнштейна еще один ранний электромузыкальный инструмент, электророяль, разработанный его берлинским коллегой, крупным физиком и химиком В. Нернстом совместно со знаменитой фир-

мой «Бехштейн»; в этом инструменте звуки струн усиливались не деревянной декой, как у обычного рояля, а радиоусилителями. Эйнштейн даже просил М. Лауэ, который тогда руководил знаменитым физическим коллоквиумом Берлинского университета, предоставить возможность Нернсту выступить перед высокочтимой аудиторией с докладом о своем рояле [29, с. 54].

Кстати, будучи необычайно деятельным человеком, Нернст в немалой степени тяготел к изобретательству, имел патенты. В частности, он изобрел так называемую лампу «Нернста» со стерженьком из смеси окислов, которая, хотя и имела основательный коммерческий успех, все-таки в технике не «прижилась».

В декабре 1919 г. Эйнштейн пишет Бессо: «Пока не могу сказать почти ничего о науке (...). Но одну веселую техническую затею выполняю по-братски вместе с Нернстом» [9, с. 93]. Что это за «затея», к сожалению, неизвестно.

Выдающийся советский физик Я. И. Френкель, который в 1925 г. дважды посетил Эйнштейна в Берлине, рассказывал, что тот с необыкновенным увлечением демонстрировал ему различные хитроумные приспособления, которыми была оснащена кухня его квартиры.

Следует остановиться еще на одной стороне технической деятельности Эйнштейна. Пацифистская позиция ученого в годы первой мировой войны хорошо известна. Однако с приходом к власти в Германии фашистов эта позиция претерпела радикальные изменения. О письме Эйнштейна президенту США Рузвельту с призывом развернуть работы по атомному оружию уже говорилось. Но Эйнштейн считал своим долгом внести в борьбу с фашистской Германией не только, так сказать, словесный, но и реальный, практический вклад¹.

Как известно, наиболее сложным аспектом атомной программы, по крайней мере на первых порах, было разделение изотопов урана, тут было множество неясностей, требовались идеи и расчеты. В. Буш, возглавлявший тогда в США Управление научных исследований и разработок, поручил Эйнштейну рассмотреть эту проблему.

¹ Сведения о связанной с военными разработками деятельности Эйнштейна в годы второй мировой войны почерпнуты из книги Р. Кларка [4].

Отсылая отчет о проделанной работе, Эйнштейн известил Буша о том, что готов продолжить эти расчеты и вообще сделать все от него зависящее, чтобы способствовать прогрессу разработок. Передавая это пожелание Эйнштейна, Ф. Эйделотт, тогда директор принстонского Института высших исследований, написал Бушу: «Я очень надеюсь, что Вы воспользуетесь его предложением, так как знаю, насколько глубоко он удовлетворен тем, что делает нечто полезное для национальной обороны». В ответном письме от 30 декабря 1941 г. Буш отклонил предложение о привлечении Эйнштейна к работам по урановому проекту из опасений, что часто «витающий в облаках» великий ученый окажется не в состоянии соблюдать надлежащие нормы секретности. Но Эйнштейн не оставляет мысли об участии в оборонных работах. Его желание было удовлетворено, и в течение ряда лет, начиная с середины 1943 г., он работает для министерства военно-морского флота — последовательно в качестве научного специалиста (с 31 мая 1943 по 30 июня 1944), технического эксперта (с 1 июля 1944 по 30 июня 1945) и консультанта — еще в течение года. Деятельность его была двух родов. Во-первых, он проводил расчеты по повышению эффективности подводных взрывов и фокусировке ударных волн от большого количества донных мин. А во-вторых, в его функции входило давать оценку изобретений военного характера, поступающих в министерство.

Ездить из Принстона в Вашингтон в министерство ученому было уже не под силу, поэтому материалы ему привозили домой — два раза в месяц. Доставка была поручена известному физическому Г. Гамову, которого Эйнштейн знал еще с довоенных времен. По воспоминаниям Гамова, Эйнштейн внимательно просматривал бумаги, которых за две недели набирался целый портфель. Работа ему нравилась и приносила удовлетворение. Почти в каждом предложении он находил интересную мысль и практически все одобрял, говоря: «О, да, это очень интересно, очень, очень изобретательно». Подробные комментарии Эйнштейна Гамов уже на следующий день сообщал в Вашингтоне, где они котирировались очень высоко.

И опять патентный эксперт

В мае 1916 г. Эйнштейн пишет Бессо: «У меня сейчас снова весьма забавная экспертиза в одном патентном процессе» [39, с. 53]. В этой цитате обращают на себя внима-

ние слова «снова» и «забавная». Первое свидетельствует, видимо, о том, что и после бернского Ведомства духовной собственности Эйнштейн не раз выступал в качестве патентного эксперта. А по второму создается впечатление, что такая деятельность не была лишена для него некоторой приятности. Подтверждения этому можно найти и в других эйнштейновских материалах.

Доктор Плеш, друг Эйнштейна по берлинскому периоду и его лечащий врач в то время, рассказывает о поездке ученого на заводы фирмы Осрам в связи с разбиравшейся им патентной тяжбой между концерном АЭГ и компанией Сименс [30, с. 216].

Выше уже шла речь о дружбе Эйнштейна с врачом-рентгенологом и изобретателем Г. Букки. В 1952 г., т. е. в возрасте 73 лет, Эйнштейн выступил в качестве свидетеля на процессе, на котором Букки обвинил бывшего сотрудника в присвоении идеи одного своего изобретения, касавшегося медицинской аппаратуры. Эйнштейн выступил блестяще, и можно думать, что опыт, приобретенный при разборе патентных тяжб, сослужил свою службу [20, с. 198].

Также говорилось уже о дружбе Эйнштейна с Аншютцем и о его участии в разработках гироскопического компаса. Но оказывается, что Эйнштейн помогал Аншютцу и как патентный эксперт.

Действительно, в письме Зоммерфельду 1918 г., предположительно датированном сентябрем, Эйнштейн сообщает: «Я точно осведомлен об этом деле, поскольку сделал для Аншютца небольшое частное экспертное заключение...» [31, с. 202].

Из двух также относящихся к 1918 г. коротких замечок Зоммерфельда, касающихся вопросов приоритета в изобретении гироскопа (надо сказать, что Зоммерфельд в то время считался крупнейшим авторитетом по гироскопам), явствует, что не позже 1914 г. Эйнштейн выступал в качестве патентного эксперта, защищавшего интересы фирмы Аншютца в патентном процессе против американской фирмы «Сперри-гироскоп» (обе фирмы ожесточенно конкурировали) [32]. Скорей всего, у Эйнштейна и Зоммерфельда речь идет об одной и той же патентной экспертизе. Почему Аншютц уже тогда обратился за помощью к Эйнштейну? Оказывается, немецкий энтузиаст гироскопов патентовал свои устройства и в Швейцарии, в бернском Патентном бюро, причем несколько

из них как раз в годы службы там молодого Эйнштейна. Вполне может быть, что Эйнштейн и занимался аншютцевскими заявками и изобретатель остался вполне доволен сообразительным патентным чиновником.

Отметим еще вот что. Первая из упомянутых выше коротких заметок Зоммерфельда написана в довольно резких тонах и уличает Г. Узенера, из конкурирующей с Аншютцем гироскопной фирмы, за нарочитое преуменьшение роли Аншютца в выпущенной им объемистой монографии. Однако у Узенера оказались довольно веские аргументы, и Зоммерфельд попадал в неловкое положение. Видно, что Эйнштейн своим уже цитировавшимся выше письмом [31, с. 202] демонстрирует высокий профессионализм как патентный эксперт и выручает своего коллегу — ни в коей мере не греша тенденциозностью, он находит четкую формулировку заслуги Аншютца, как первой практически реализованной комбинации двух нововведений (пусть порознь предложенных и ранее). Именно этот аргумент выставляет Зоммерфельд в своей второй полемической заметке (а сомнений в том, что она написана им после получения письма от Эйнштейна, нет), и его оппоненту не остается ничего, как признать решающий вклад главы соперничающей фирмы.

Создается впечатление, что в патентном деле советы Эйнштейна были столь же квалифицированы, как в области теории относительности или квантовой теории. Тот же Р. Гольдшмидт, который вместе с Эйнштейном изобретал магнестрикционный громкоговоритель, пишет ему в мае 1928 г.: «Хорошо я написал эту патентную формулу для английского патента?» [12, с. 26]. И речь здесь идет не об их совместном патенте, а о собственном гольдшмидтовском: одобрит Эйнштейн — Гольдшмидт пошлет описание в Англию, забракует — будет переделывать.

Как специалист-патентовед со стажем выступил Эйнштейн в 1929 г. в своей единственной статье (вернее, короткой заметке), написанной специально для советского журнала [33]. Это был первый номер начинавшегося издаваться в 1929 г. Центральным бюро реализации изобретений и содействия изобретательству ВСИХ СССР журнала «Изобретатель», предшественника теперешнего «Изобретателя и рационализатора». Заметка называлась «Массы вместо единиц», и речь в ней шла не о каких-то единицах для измерения массы и не о релятивистском из-

менении массы, а о рациональной постановке изобретательского дела. Эйнштейн начинает с формулировки: «Изобретателем я считаю человека, нашедшего новую комбинацию уже известных оборудований для наиболее экономного удовлетворения потребностей общества». Несмотря на очевидную «корявость» перевода (оригинал утерян), мысль ясна; более того, видно, что Эйнштейн выражает свое глубоко продуманное отношение к изобретательству. Его подход очень благожелательный и терпимый: изобретатель не обязан придумывать нечто сверхъестественное, ошеломлять фокусами, ему достаточно рациональным образом скомпоновать уже известное. В таком подходе Эйнштейна убеждают и описанные выше его собственные изобретения (со Сцилардом, Букки и Гольдшмидтом), и его отношение к изобретениям Флетнера, Аншютца, американским техническим идеям оборонного направления.

Далее Эйнштейн сопоставляет положение изобретателей в капиталистических странах и в нашей стране, стране планового хозяйства. Он отмечает, что крупные и богатые частные организации нередко тормозят технический прогресс из-за отсутствия заинтересованности в реализации «вновь изобретенных технических усовершенствований». Кроме того, видимо, опираясь и на свой собственный опыт патентной работы, Эйнштейн справедливо утверждает, что при капитализме отстаивание монопольного права на изобретение нередко отнимает у его автора все силы, время и средства, полностью лишая возможности отдаваться своему призванию. В условиях социалистического общества монопольное право должно заменяться систематическими поощрениями и стимулированием, заботы об изобретателях берет на себя государство. Эйнштейн не обходит вопроса и о возможных в этом случае «издержках», к которым могут привести недостаточно гибкое управление и бюрократические барьеры.

«Образовывать коллектив изобретателей я бы не советовал ввиду трудности определения настоящего изобретателя. Я думаю, что из этого может получиться только общество укрывающихся от работы бездельников. Гораздо целесообразней образование небольшой комиссии по испытанию изобретений. Я думаю, что в стране, где народ сам управляет своим хозяйством, это вполне возможно».

В заключение Эйнштейн говорит о том, что прогресс в организации производства может в принципе привести

к такой постановке дела, при которой изобретателей удастся освободить от всех обязанностей, кроме «обязанности» творить новое. Согласованными творческими усилиями массы изобретателей в конце концов, как полагает Эйнштейн, оттеснят гениальных одиночек; единицы будут заменены массами изобретателей. Хотя Эйнштейн считает, что истинная способность к изобретательству, как и любой другой талант, является врожденной, по его убеждению, без систематического образования реализовать эту способность невозможно: без знания невозможно изобретать, как нельзя слагать стихи, не зная языка. «Важно выделить настоящего изобретателя из толпы фанатиков-иллюзионистов и дать ему возможность реализовать именно те идеи, которые этого стоят», — так формулирует ученый задачу государства по отношению к изобретателям.

Эйнштейн — экспериментатор

С изобретательской технической деятельностью Эйнштейна в определенной мере тематически связан его интерес и к физическому экспериментированию.

Этот интерес проявился уже в студенческие годы. В автобиографических заметках Эйнштейн вспоминает, что в Цюрихском политехникуме, пренебрегая теоретическими дисциплинами, большую часть времени работал в физической лаборатории, увлеченный непосредственным соприкосновением с опытом [7, с. 137].

А. Рейзер, который работал над биографией Эйнштейна с молчаливого согласия ученого [4, с. 162], сообщает, что в это время он собирался построить прибор, который мог бы точно измерить движение Земли относительно эфира (т. е. было задумано нечто вроде опыта Майкельсона).

«Он еще надеялся подойти к главным вопросам физики путем наблюдения и эксперимента. Он не был полностью убежден в силе математических символов как средства раскрытия тайн природы» [35, с. 52].

Судьба Эйнштейна сложилась так, что после получения высшего образования единственно возможными для него инструментами исследования природы на долгое время стали перо и бумага. Об этом он не без сожаления пишет в 1902 г. в конце своей второй научной статьи: «В заключение я хотел бы извиниться за то, что предлагаю здесь лишь общий план трудоемкого исследования и сам не

занимаюсь экспериментом; для этого у меня нет возможностей» [8, с. 33].

В книге М. Флюккингера приведены свидетельства того, что в 1910 г. Эйнштейн, уже профессор Цюрихского университета, строит какое-то радиотехническое устройство и увлеченно экспериментирует с ним [2, с. 149, 172].

С вопросами физического эксперимента Эйнштейн соприкасался и в 1911—1912 гг. в пражском Немецком университете [9, с. 27].

В период с конца 1914 г. до весны 1915 г. Эйнштейн выступает как настоящий физик-экспериментатор и совместно с голландским физиком, зятем Г. Лоренца, В. де Гаазом открывает фундаментальный физический эффект, эффект Эйнштейна — де Гааза, заключающийся, как известно, в закручивании подвешенного на тонкой нити ферромагнитного стерженька при его перемагничивании [8, с. 359—381]. Несомненно, что, занимаясь этими исследованиями, Эйнштейн испытывал большой эмоциональный подъем. В феврале 1915 г. он писал об этом опыте Бессо: «Чудеснейший эксперимент, жаль, что ты его не сможешь увидеть. А как коварна природа, когда хотят к ней подступиться с экспериментом! Я на старости лет „заболеваю“ экспериментом» [9, с. 44].

Поясняя физику эффекта, Эйнштейн и де Гааз уподобляют атом с вращающимся вокруг ядра электроном волчку, используют представления и термины теории гироскопов. Не говорит ли это о том, что идея постановки экспериментов в какой-то мере была навеяна упомянутой в предыдущем разделе деятельностью Эйнштейна в связи с компасными патентами?

Обнаружить и измерить тонкий гиромагнитный эффект было весьма непросто. Успех был достигнут только за счет применения высокочувствительной резонансной методики (надо сказать, что она тогда еще не стала стандартной) и высокой точности в изготовлении экспериментальной установки. К совершавшему при перемагничивании крутильные колебания с собственной частотой около 50 Гц (что совпадало с частотой перемагничивающего поля) стерженьку из мягкого железа было прикреплено зеркалальце. Измерялась амплитуда угла, на который отклоняло световой луч зеркальце при своих колебаниях.

Знак фазового сдвига между крутильными колебаниями стерженька и переменным током, возбуждающим перемагничивающее магнитное поле, определяет знак носите-

лей тока, создающих при своем вращении как магнитный, так и вращательный моменты. Знак фазового сдвига находили следующим остроумным способом. К лампочке, освещавшей колеблющееся зеркальце, подносили постоянный магнит. Через лампочку проходил тот же переменный ток, что и через намагничивающие катушки, поэтому ее раскаленная нить начинала колебаться синхронно с колебаниями зеркальца. Таким образом, угловые вибрации светового луча имели две составляющие — одну, обусловленную крутильными колебаниями стерженька, и другую, связанную с дрожанием нити лампочки. О знаке фазового сдвига можно было судить по тому, увеличивается или уменьшается амплитуда угловых колебаний светового луча при поднесении к лампочке магнита.

Экспериментаторы получили количественный результат, прекрасно согласовавшийся с теорией, — отношение магнитного момента к механическому вращательному моменту с точностью до нескольких процентов равнялось $e/2m$, где e и m соответственно заряд и масса электронов. Беда только в том, что теория эта была неправильной: тогда не знали, что магнетизм железа обусловлен не орбитальным движением электронов, а их спинами. Для спинового же магнетизма отношение магнитного момента к вращательному вдвое больше, т. е. e/m . Таким образом, Эйнштейн с де Гаазом ошиблись ни много ни мало, как в два раза! Из-за чего произошла ошибка, так и осталось неясным. Тем не менее кажется, что, временно переквалифицировавшись в экспериментатора, Эйнштейн поддался распространенному среди экспериментаторов греху, — считать опыты удавшимися и законченными, когда они подтверждают теорию.

Наряду с совместными с де Гаазом гиромангнитными опытами Эйнштейн выполнил и самостоятельную экспериментальную работу, построив простой прибор для лекционной качественной демонстрации нового эффекта [8, с. 382—385]. Этот прибор основан уже не на резонансном, а на импульсном принципе — стерженек «подкручивают» толчками, перемагничивая его за время порядка 1 миллисекунды, которое гораздо короче периода собственных крутильных колебаний. Основной трудностью при создании прибора была точная центровка подвеса железного стерженька (диаметром 1,4 мм и длиной 10 см) на кварцевой нити диаметром около 10 мкм и длиной в несколько сантиметров. Эту трудность Эйнштейн преодолел

(с помощью одного из коллег-экспериментаторов) следующим простым и остроумным способом. Железный стерженек перевертывали прикрепляемым к нити торцом вниз и прилепляли к этому торцу кусочек канифоли. Затем в канифоль вводился конец кварцевой нити. Далее канифоль расплавляли, и кварцевая нить, смачиваемая канифолью, силами поверхностного натяжения втягивалась в каплю до предела, т. е. автоматически идеально центрировалась (рис. 7).

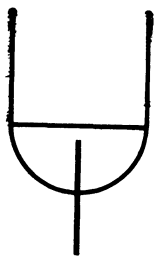


Рис. 7

Эйнштейн пишет, что, обдумывая специфическое поведение стерженька при магнитных толчках, он поначалу «поломал голову». Учитывая, о какой голове тут идет речь, можно считать это признание лишним раз свидетельствующим о том, что экспериментальные проблемы подчас не проще теоретических.

С тех пор как в 1909 г., рассмотрев флуктуации энергии теплового излучения в замкнутой плоскости, Эйнштейн пришел к выводу о том, что свет одновременно обладает и корпускулярными и волновыми свойствами [8, с. 164—172], этот корпускулярно-волновой дуализм, лежащий в основе современной квантовой механики, постоянно не давал ему покоя; он считал этот вывод не окончательным, пытался найти средства произвести все-таки выбор между корпускулярной и волновой концепциями. Большие надежды он возлагал на эксперименты.

В мощном тепловом излучении средняя напряженность электрического поля достигает 160 В/см . Эйнштейн полагал, что если справедлива волновая картина, то на всех атомах будет небольшой, но доступный регистрации эффект Штарка. Если же правильно корпускулярно-статистическое представление, то воздействию подвергнется лишь небольшая часть атомов, зато штарк-эффект будет очень сильным. «Я хочу это дело исследовать вместе с Принсгеймом, дело это нелегкое», — писал он М. Борну в январе 1921 г. [36, с. 24].

Неизвестно, были ли поставлены эксперименты такого рода, но через полгода Эйнштейн с огромным энтузиазмом включился в другой «решающий» эксперимент. Ставилась задача определить, отклонится ли в среде с оптической дисперсией свет, испускаемый в элементарном акте излучения движущейся частицей и регистрируемый под

углом к направлению ее скорости. В случае справедливости волнового подхода вследствие эффекта Доплера частота света, распространяющегося под острым углом к направлению скорости, будет увеличиваться, а под тупым — уменьшаться. В таком случае, считал Эйнштейн, проходя через среду с дисперсией, т. е. с показателем преломления, зависящим от частоты, луч света, испущенный в элементарном акте, будет отклоняться, подобно тому как это имеет место для света, проходящего через земную атмосферу. Если же элементарный акт излучения происходит мгновенно и определяется только квантовым условием частот Бора $E_2 - E_1 = h\nu$, излучение будет монохроматическим и никакого отклонения не возникнет, независимо от того, движется излучающая частица или нет. «К экспериментальному решению поставленного здесь вопроса я приступаю вместе с Гейгером», — заключает Эйнштейн небольшую статью, в которой описана постановка опыта [8, с. 431—432].

К концу 1921 г. эксперименты (в них принял участие и В. Боте) были закончены. Результат получился отрицательный — свет не отклоняется, следовательно, излучение движущихся частиц строго монохроматично. «Гем самым надежно доказано, что волнового поля не существует, и боровская эмиссия является мгновенным процессом в собственном смысле этого слова. Это мое самое сильное научное потрясение за многие годы», — с подъемом сообщает Эйнштейн Борну в письме с поздравлениями с наступающим 1922 г. [36, с. 33].

Однако уже в письме от 18 января чувствуются сомнения: «Лауэ отчаянно борется с моим экспериментом и соответственно с моей интерпретацией его. Он утверждает, что волновая теория вообще никакого отклонения лучей не обуславливает» [36, с. 35]. А в следующем письме Эйнштейн красноречиво признается в том, что в опытах с излучением он сел в лужу — в буквальном переводе «подстрелил монументального козла» [36, с. 38]. Лауэ, которого поддерживал также П. Эренфест, оказался прав, и 27 февраля редакция «Доклады Прусской академии наук» получает статью Эйнштейна, где он признается в ошибке и показывает, что результаты точного расчета находятся в противоречии с проведенным им ранее элементарным рассмотрением [8, с. 437—440].

К вопросам о постановке решающего опыта, позволившего бы произвести выбор между корпускулярным и вол-

новым представлениями о свете, Эйнштейн возвращается еще раз в 1926 г. в двух статьях, в которых высказаны соображения о возможных различиях между «корпускулярной» и «волновой» интерференционными картинами. Однако и такой опыт, как было впоследствии показано Н. Бором и Л. И. Маделъштамом, ни к чему бы не привел; открытый им самим корпускулярно-волновой дуализм преодолеть Эйнштейну не удалось, несмотря на упорное стремление.

Чисто экспериментальную работу выполнил Эйнштейн в 1923 г. совместно со своим другом, врачом Г. Мюзамом. Они разработали методику определения размеров каналов в пористых фильтрах (речь, в частности, идет о фильтрах, применяемых в медицинских и бактериологических целях) [8, с. 447—449]. Проницаемость такого фильтра определяется самым узким участком канала. Эйнштейн и Мюзам предлагают находить величину этого диаметра из значения давления, начиная

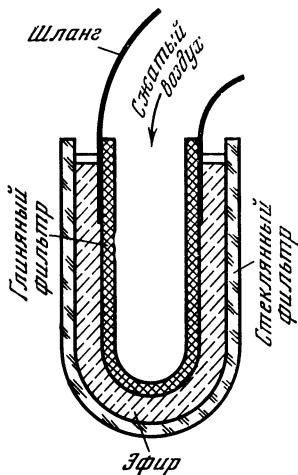


Рис. 8

с которого воздух оказывается способным преодолеть капиллярные силы и пройти через фильтр, каналы которого первоначально заполнены жидкостью. Действительно, в соответствии с формулой Лапласа избыточное давление, необходимое для преодоления капиллярных сил, равно $4\sigma/d_0$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения, а d_0 — диаметр самого узкого места канала.

В статье описан эксперимент по определению диаметра каналов в пористом глиняном фильтре. Схема опыта пояснена на рис. 8. В качестве жидкости, окружающей фильтр снаружи, был взят эфир, который, как предварительно убедились, хорошо смачивает материал фильтра и обладает коэффициентом поверхностного натяжения, в 4 раза меньшим, чем вода. Критическое давление, определенное по появлению в эфире воздушных пузырьков, составило 1 атм. Найденный таким путем минимальный диаметр канала составил около 6,7 мкм.

Важно, что этим способом измеряется диаметр как раз того участка канала, который и определяет фильтрационные свойства.

Следует упомянуть еще об одном эксперименте, проведенном Эйнштейном самостоятельно и без помощи каких-либо специальных приборов. Этот эксперимент, бесспорно, проделывали многие и до Эйнштейна, и после него, но, видимо, только он задумался над неизменно получающимся результатом. Речь идет о том, что после перемешивания чая чайники быстро собираются в центре дна стакана. Дав простую гидродинамическую интерпретацию этому явлению, Эйнштейн использует развитую «теорию» для объяснения причин образования извилин в руслах рек [22, с. 74—75].

В письме Эйнштейну Э. Шредингер называет это объяснение «очаровательным» и добавляет: «Случайно несколько дней тому назад моя жена расспрашивала меня „о феномене чашки чая“, но я не сумел дать разумного объяснения. Она говорит, что теперь никогда не сможет перемешивать чай, не вспоминая о Вас» [37, с. 331].

Свидетельство еще одной вспышки экспериментаторского энтузиазма Эйнштейна содержится в переписке П. Эренфеста и А. Ф. Иоффе.

В письме из Голландии от 9 октября 1924 г. Эренфест наряду с прочим сообщает своему ближайшему другу следующее: «Эйнштейн сейчас как раз у нас <...>. Эйнштейн и я ежедневно по многу часов углубляемся в одну экспериментальную работу, чтобы установить, действительно ли существует предполагаемый им совершенно сумасшедший электростатический эффект. В данный момент мы, к сожалению, пока еще не справились с капризами струнного электрометра, которым выпущены были воспользоваться» [38, с. 181]. Но проходит 10 дней, и энтузиазм сходит на нет — Эренфест пишет Иоффе: «Эксперимент, который мы начали совместно с Эйнштейном, в настоящее время, к моей радости, мы бросили. Выяснилось, что отклонения, связанные с ионизацией воздуха, оказываются намного бóльшими, чем сам мистический эффект, который он искал» [38, с. 184].

Заключение

Представляется, что приведенные многочисленные фактические материалы достаточно убедительно опровергают ходячий миф об Эйнштейне как о совершенно оторванном

от реальной жизни абстрактном теоретике. Напротив, видно, что Эйнштейн живо интересовался новейшими техническими достижениями, занимался изобретательством и техническим конструированием, был великолепным знатоком патентного дела, увлекался физическим экспериментированием. Все это вместе с широко известной любовью к музыке и обширной эрудицией в литературе и философии лишний раз свидетельствует о широте диапазона этой выдающейся творческой личности. Как знать, может быть, эпохальные достижения Эйнштейна в какой-то мере связаны с этой широтой интересов, непредвзятостью мышления, его способностью увлекаться самыми неожиданными вопросами, с полным отсутствием какого бы то ни было интеллектуального снобизма.

В своих технических начинаниях Эйнштейн все-таки в основном оставался «теоретиком» — он больше работал головой, «золотыми руками» он, видимо, не обладал. «Я с трудом доверяю себе взять какой-либо прибор в руки из боязни, что он может взорваться», — самокритично заметил как-то он сам по этому поводу [21, с. 58]. Среди титанов теоретической физики не один Эйнштейн был причастен к практической деятельности. Известно, что настоящим «мастером-золотые руки» был И. Ньютон, собственноручно экспериментировал Дж. Максвелл, для свей жены изобрел оригинальную швейную машинку Л. Больцман, даже такой абстрактный теоретик, как Дж. Гиббс, труды которого как раз из-за этой абстрактности с большим трудом и с запаздыванием осваивались современниками, посвятил свою диссертацию зубчатым передачам и имел несколько патентов на железнодорожные тормоза.

Любопытно, как схожи с эйнштейновскими практические интересы еще одного классика физической науки В. Томсона — лорда Кельвина. Так же как Эйнштейн, он занимался конструированием электроизмерительных приборов (Кельвин преуспел в этом деле значительно больше), гироскопических устройств (в том числе гироскопов), разрабатывал холодильные машины.

В своих теоретических изысканиях Эйнштейн всецело придерживался дедуктивного метода — от общих принципов он шел к теоретической картине и уже на заключительном этапе выявлял возможные наблюдаемые следствия. Так было и с фотоэффектом, и с броуновским движением, и с отклонением света гравитационным полем. Эйнштейн старался не вводить гипотез *ad hoc*, не строил

моделей «механизмов» для объяснения единичных, пусть даже удивительных явлений. В то же время, как видно из настоящей статьи, придумывание конкретных технических устройств и механизмов было для него достаточно интересным занятием.

И сын Эйнштейна, и хорошо знавший его биограф Ф. Франк сходятся в том, что изобретательство для великого физика было родом интеллектуального отдыха (вроде любимого им решения головоломок и нестандартных задач), от которого он получал удовольствие, аналогичное получаемому многими от игры в шахматы или чтения детективов [19, с. 141; 39, с. 61].

Можно думать, что даже распутывание патентных споров было для него чем-то вроде решения логической задачи. Кроме того, техническая деятельность была для Эйнштейна средством интеллектуального общения с духовно близкими ему людьми (многие из которых явно тяготели к изобретательству) — он, например, никогда не изобретал в одиночку.

Беседа с Мошковским, Эйнштейн сделал следующее характерное признание: «...я достаточно тесно связан с практикой, и до сих пор меня со всех сторон осаждают практики... И моя связь с практическим миром отнюдь не недавнего происхождения. По желанию моих родителей я сам должен был стать техником, и профессия эта понималась исключительно как хлебная, источник заработка. Меня это не привлекало, потому что в ранней юности вся эта деятельность казалась мне печальной и неинтересной. Мое представление о человеческой культуре не совпадало с обычным взглядом, что прогресс культуры измеряется успехами техники. Я сомневался даже в том, могут ли вообще эти успехи увеличить счастье человечества. Впрочем, я должен прибавить, что впоследствии, когда я познакомился с техникой на деле, я отчасти изменил свои взгляды на нее, и именно потому, что ведь и *техническая деятельность полна „теоретических наслаждений“*» [3, с. 153].

Л и т е р а т у р а

1. Паули В. Физические очерки. М.: Наука, 1975.
2. Flückiger M. Albert Einstein in Bern. Bern, 1974.
3. Мошковский А. Альберт Эйнштейн. М., 1922.
4. Clark R. Einstein. The Life and Times. N. Y., 1971.
5. Кузнецов Б. Г. Эйнштейн. М.: Изд-во АН СССР, 1963.

6. *Wheeler J. A.*— Physics Today, 1979, 32, N 3, p. 44.
7. *Эйнштейн А.* Творческая автобиография.— В кн.: *Эйнштейн А.* Физика и реальность. М.: Наука, 1965, с. 131—166.
8. *Эйнштейн А.* Собр. науч. трудов, т. 3. М.: Наука, 1966.
9. Переписка А. Эйнштейна и М. Бессо, 1903—1955.— *Эйнштейновский сборник*, 1974. М.: Наука, 1976, с. 5—112.
10. *Habicht P. und Habicht C.*— Phys. Z., 1911, 11, S. 532—535.
11. *Хвольсон О. Д.* Курс физики, т. 4. СПб., 1914.
12. *Melcher H.*— Spektrum, 1978, N 9, S. 23—26.
13. *Toepler A.*—Ann. Phys. und Chem., 1865, 5^e sér, V. 5, S. 469—473.
14. *Грановский В. Л.* Электрические флюктуации. М.; Л.: ОНТИ, 1936.
15. *Feld V. T., Weiss-Szilard G.* The Collected Works of Leo Szilard. London (England) and Cambridge (Massachusetts), 1972, v. 2.
16. *Feld V. T.*— Physics Today, 1975, 28, N 7, p. 25.
17. *Курко И. М.* Жидкий металл в электромагнитном поле. М.; Л.: Энергия, 1964.
Васильев Л. Г., Хожжаинов А. И. Магнитная гидродинамика в судовой технике. Л.: Судостроение, 1962.
18. *Tagor Talks with Einstein.*— Asia, 31 march 1931, p. 138—142.
19. *Frank Ph.* Einstein. His Life and Times. N. Y., 1947.
20. *Зелиг К.* Альберт Эйнштейн. М.: Атомиздат, 1965.
21. *Гернек Ф.* Альберт Эйнштейн. М.: Прогресс, 1966.
22. *Эйнштейн А.* Собр. науч. трудов, т. 4. М.: Наука, 1967.
23. *Иоффе А. Ф.* О физике и физиках. Л.: Наука, 1977.
24. *Ливанова А.* Физики о физиках.— В кн.: Пути в незнание, сб. 3. М.: Сов. писатель, 1964.
25. *Эйнштейн А.*— Изобретатель и рационализатор, 1965, № 6,
26. Переписка А. Эйнштейна и М. Бессо, 1903—1955.— В кн.: *Эйнштейновский сборник*, 1975—1976. М.: Наука, 1978, с. 5—42.
27. *Булгаков Б. В.* Прикладная теория гироскопов. М.: ГИТТЛ, 1955.
28. *Кудревич Б. И.* Теория гироскопических приборов: Избранные труды, т. 2. Л.: Судостроение, 1965.
29. *Ромпе Р.*— Природа, 1975, № 3, с. 52—55.
30. *Plesh J.* The Story of a Doctor. London, 1947.
31. Из переписки Зоммерфельда и Эйнштейна.— В кн.: *Зоммерфельд А.* Пути познания в физике. М.: Наука, 1973, с. 191—246.
32. *Sommerfeld A.*— Phys. Z., 1918, 19, S. 343—344; 487.
33. *Эйнштейн А.*— Изобретатель, 1929, № 1, с. 4.
34. *Холтон Д.* Эйнштейн, Майкельсон и «решающий» эксперимент.— В кн.: *Эйнштейновский сборник*, 1972. М.: Наука, 1974, с. 104—1211.
35. *Reiser A.* Albert Einstein. N. Y., 1930.
36. Переписка А. Эйнштейна и М. Борна.— В кн.: *Эйнштейновский сборник*, 1971. М.: Наука, 1971, с. 7—54.
37. Переписка Э. Шредингера. Избранные труды по квантовой механике. М.: Наука, 1976.
38. Эренфест — Иоффе. Научная переписка (1907—1933). Л.: Наука, 1973.
39. Einstein. The Man and His Achievement/Ed. by G. J. Whitron. N. Y., 1947.

У. И. Франкфурт

ОПТИКА ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД И СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Введение

Появлению специальной теории относительности (СТО) способствовало развитие двух областей физики — электродинамики и оптики движущихся сред. В них рассматривался один и тот же вопрос: влияет ли движение системы отсчета на характер наблюдаемых электромагнитных и оптических явлений? Для каждой из этих областей были характерны особые экспериментальные и теоретические методы, в каждой были свои традиционные проблемы, и представляется возможным рассмотреть отдельно их вклад в зарождение и развитие СТО ^{1,2}.

Изучение работ XVIII—XIX вв. приводит к следующим выводам.

1. Основной целью оптики движущихся сред (ОДС) были поиски способа обнаружения абсолютного движения Земли, т. е. ее движения относительно эфира.

2. Вопрос о влиянии движения источника на скорость испускаемого им света решался чисто теоретически в зависимости от принятой теории света: положительно — в эмиссионной (корпускулярной) теории и отрицательно — в волновой. Проверить эти гипотезы экспериментально было невозможно.

3. Для решения проблем оптики и электродинамики движущихся сред Эйнштейн ³ предложил теорию, отличающуюся внутренней стройностью и логической непротиворечивостью и опирающуюся на принципиально новые для этой эпохи постулаты. Для устранения кажущегося противоречия между постулатами своей теории Эйнштейн

¹ Франкфурт У. И. Очерки по истории специальной теории относительности. М.: Изд-во АН СССР, 1961.

² Франкфурт У. И., Френк А. М. Оптика движущихся тел. М.: Наука, 1972.

³ Einstein A. Zur Elektrodynamik der bewegter Körper. — Ann. Physik, 1905, 17, S. 891—921. Рус. пер. в кн.: Эйнштейн А. Собр. науч. трудов. Т. 1. М.: Наука, 1965, с. 7—35.

тщательно проанализировал считавшиеся ранее очевидными понятия одновременности, длины тел, длительности событий и другие и показал, что новые пространственно-временные представления не противоречат, а расширяют пределы классической физики.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИКИ ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД В XVIII—XIX ВВ.

1. Открытие аберрации и ее объяснение в эмиссионной и волновой теориях света

Вопрос о том, влияет ли движение источника или наблюдателя на характер воспринимаемых явлений, мог быть поставлен только после открытия конечности скорости света. Хотя это открытие было сделано Рёмером на основе наблюдений затмений спутников Юпитера в 1675 г., но большой разброс результатов наблюдений вызывал немало сомнений даже в начале XVIII в. Только открытие аберрации звезд, сделанное Брэдли в 1728 г., убедило всех в конечности скорости света и положило начало оптике движущихся сред.

Первоначальной целью наблюдений Брэдли⁴, начатых им совместно с Молине, было открытие годичного параллакса звезд, т. е. их видимого смещения на небесной сфере, обусловленного движением Земли вокруг Солнца. Он действительно обнаружил годичное движение ряда звезд вблизи полюса эклиптики по кругу или эллипсу. Однако искомое параллактическое смещение в период наблюдения должно было происходить в направлении, противоположном наблюдаемому. Кроме того, оно должно было отличаться для звезд, удаленных на разные расстояния от Земли, в то время как Брэдли получил, что угловая величина большой полуоси эллипса для всех наблюдавшихся звезд лежит в пределах от 20 до 20,5". Отсюда Брэдли сделал вывод, что новое явление не связано с годичным параллаксом и величина последнего должна быть менее 1". Проверив возможность влияния атмосферной рефракции, нутации земной оси и других при-

⁴ *Bradley J. A new apparent motion discovered in the fixed stars; its cause assigned; the velocity and equable motion of light deduced.*— *Phil. Trans.*, 1728, 35, p. 637—653.

чин, Брэдли в конце концов пришел к выводу, что единственно возможное объяснение видимого годовичного движения звезд состоит в сочетании конечной скорости света и движения наблюдателя. Суть его объяснения такова.

Пусть свет распространяется от звезды C к наблюдателю A со скоростью c . Если наблюдатель неподвижен, его телескоп направлен по AC . Если наблюдатель движется по направлению AB со скоростью v , он увидит звезду только при условии, что направит телескоп по направлению AB , образуя с AC угол аберрации φ такой, что

$$\sin \varphi = v/c. \quad (1)$$

Максимальный угол аберрации получил название «постоянной аберрации».

Из своих наблюдений Брэдли сделал важный вывод о равенстве скорости света от различных звезд. Сопоставив найденную им скорость света со скоростью, измеренной по методу Рёмера, где наблюдался свет Солнца, отраженный от спутника, Брэдли пришел к заключению о том, что при отражении света его скорость не меняется (он допустил, что скорость прямого света от Солнца такая же, как от звезд). Последний вывод был обоснован плохо из-за большой неточности измерений в ту эпоху по методу Рёмера.

Убеждение Брэдли в постоянстве скорости света от различных источников было для XVIII в. скорее исключением, чем правилом. В господствовавшей в тот период в оптике эмиссионной теории свет уподоблялся поступательному движению твердых тел, и на него переносились законы механики. Явно или неявно все объяснения аберрации включают в себя сложение скорости света и скорости источника относительно наблюдателя.

Возможность подобного сложения скоростей неизбежно должна была привести к мысли о неравенстве скоростей света от различных источников. Для проверки этой гипотезы Блэйр предлагал измерить скорость света от противоположных краев Юпитера, быстро вращающегося вокруг своей оси. Подобную идею высказывал и Робинсон ⁵.

⁵ *Robinson J.* On the motion of light, as affected by refracting and reflecting substances, which are also in motion.— *Trans. Roy. Soc. Edinb.*, 1790, 2, p. 83—111.

Мичелл ⁶ полагал, что возможны и физические причины, изменяющие скорость света. Допуская, что световые частицы подчиняются закону всемирного тяготения, он вывел, что звезды, более массивные, чем Солнце, могут заметно уменьшить скорость испускаемого ими света, а если звезда в 500 раз больше Солнца, то свет ее будет возвращаться назад — звезда будет невидимой. Полагая очень важным измерение скорости света звезд для возможного определения массы звезд и их расстояния от Солнца, Мичелл предложил для сравнения скорости света от разных источников измерять его преломление в призме, поскольку показатель преломления n зависит от скорости света ($n = c/v$).

Наряду с практическим применением в астрономии явление аберрации нашло неожиданное применение при разрешении спора между эмиссионной и волновой теориями света. С точки зрения эмиссионной теории при переходе света из оптически менее плотной среды в более плотную его скорость должна увеличиваться, а согласно волновой теории — уменьшаться.

В 1766 г. Боскович ⁷ и несколько позднее независимо от него П. Вильсон ⁸ предложили для экспериментального решения этого спора наблюдать аберрацию звезд или земных источников с помощью телескопов, заполненных водой. Боскович рассуждал так: если в воде скорость света больше, чем в воздухе, то наблюдаемая аберрация должна быть меньше, чем в обычном телескопе. В противоположность Босковичу Вильсон доказывал, что, если аберрация в водяном телескопе будет такой же, как в воздушном, именно это будет свидетельством увеличения скорости света в воде. Робинсон полагал, что водяной телескоп дает ту же аберрацию, что и воздушный, он отрицал су-

⁶ *Michell J.* On the means of discovering the distance, magnitude of the fixed stars, in consequence of the diminution of the velocity of their Light, in case such a diminution should be found to take place in any of them, and such other data should be procured from observations, as would be further necessary for that purpose.— *Phil. Trans.*, 1784, 74, p. 35—49.

⁷ *Lalande J.* *Astronomie*, v. 4. Paris, 1784, p. 687.

⁸ *Wilson P.* An experiment proposed for determining, by the aberration of the fixed stars, whether the rays of light, in pervading different media, change their velocity according to the Law which results from Sir Isaac Newton's ideas concerning the cause of refraction; and for ascertaining their velocity in every medium whose refractive density is known.— *Phil. Trans.*, 1872, 72, p. 58—68.

ществование суточной аберрации земных объектов. В своих рассуждениях Робинсон исходил из исследований влияния движения источника света на распространение света, в частности он рассмотрел отражение и преломление света на движущейся поверхности.

Первым опытом, специально поставленным для сравнения скоростей света от разных источников (звезд, планет), был опыт Араго 1810 г. Для этой цели Араго использовал идею Мичелла: в телескоп, снабженный призмой, наблюдались звезды, расположенные в направлении движения Земли вокруг Солнца и в противоположном направлении. Араго ожидал, что в самом худшем случае, когда звезды испускают свет с одинаковой скоростью (Араго верил в зависимость скорости света от массы звезды и ее скорости), различие преломления позволит обнаружить изменение скорости от $c - v$ до $c + v$ (c — скорость света, v — скорость движения Земли вокруг Солнца).

Опыт дал отрицательный результат, и Араго был так удивлен этим, что даже не опубликовал отчет о нем, ограничившись кратким сообщением в Академии наук⁹. Полное описание опыта было опубликовано только в 1853 г.¹⁰ Чтобы примирить полученный результат с эмиссионной теорией, Араго предложил следующую гипотезу: звезды испускают свет с различными скоростями, но глаз способен воспринимать свет только в очень узком диапазоне скоростей. Впоследствии, перейдя на сторону волновой теории, Араго предложил в 1818 г. Френелю дать волновое объяснение своего опыта.

Френель¹¹ рассмотрел проблему под совершенно иным углом зрения: влияние движения Земли на характер наблюдаемых на ней оптических явлений. В такой трактовке опыт Араго и вошел в историю. Работа Френеля положила начало новому этапу в развитии ОДС.

Объяснить аберрацию и другие оптические явления в движущихся телах оказалось гораздо труднее в волновой теории, чем в эмиссионной. Согласно волновой теории свет — это волны в особой среде, эфире. Эфир заполняет как пустоту, так и все тела, но с различной плот-

⁹ Mém. de l'Inst., 1811, p. 12.

¹⁰ Arago F. D. Mémoire sur la vitesse de la lumière.— Ann. Chim., (3), 1853, 37, p. 180—196.

¹¹ Френель О. Письмо к Ф. Араго относительно влияния движения Земли на некоторые оптические явления, 1818.— В кн.: Френель О. Избранные труды по оптике. М.: ГТТИ, 1955, с. 516—526.

ностью или упругостью (по гипотезе Френеля, изменялась только плотность эфира). Скорость света V в некоторой среде зависит от упругости эфира k и его плотности в этой среде ρ :

$$V = \sqrt{k/\rho}. \quad (2)$$

Межзвездный эфир считается неподвижным и образует систему отсчета для измерения скорости света. Скорость света в движущемся теле зависит от того, увлекает ли оно свой внутренний эфир, а явление аберрации от того, увлекает ли движущаяся Земля окружающий эфир.

Наиболее простой представлялась гипотеза полного увлечения: тела увлекают за собой эфир подобно тому, как Земля увлекает все находящиеся на ней тела и атмосферу. В этом случае все оптические явления при движении тел происходят точно так же, как в покое, и опыт Араго легко объясним. Однако аберрацию звезд объяснить нельзя.

Это обстоятельство послужило причиной того, что Юнг отверг гипотезу полного увлечения и допустил, что движущаяся Земля не влияет на состояние эфира, который проходит через нее так же легко, как ветер сквозь рощу¹².

Тогда аберрация объяснима. Пусть Земля покоится, а эфирный ветер дует в направлении MP со скоростью v . Он смещает световые волны в этом направлении, и для того, чтобы они попали в глаз наблюдателя, телескоп нужно наклонить на угол φ такой, что $\sin \varphi = v/c$. При этом нормаль к волновому фронту будет наклоняться к лучу и образует с ним угол, равный углу аберрации.

Объяснить одновременно опыт Араго и аберрацию на основе рассмотренных гипотез полностью увлекающегося или неподвижного эфира не представлялось возможным. Френель показал, что это можно сделать, если угол поворота фронта преломленной волны, вызванного движением призмы, равен углу аберрации. По мнению Френеля, это реализуется в случае, когда скорость света в движущейся прозрачной среде V определяется следующим образом:

$$V = V' + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right), \quad (3)$$

¹² Young T. Experiments and calculations relative to physical optics.— Phil. Trans., 1804, p. 1—16.

где V' — скорость света в неподвижной среде, v — скорость среды относительно неподвижного эфира, n — показатель преломления. Все происходит так, как будто эфир внутри тела движется относительно внешнего эфира со скоростью $v(1 - 1/n^2)$, т. е. медленнее, чем само тело. Гипотеза Френеля получила название «гипотезы частичного увлечения эфира», а множитель $1 - 1/n^2$ получил название «коэффициента увлечения».

Частичное увлечение эфира Френель понимал в том смысле, что движущееся тело увлекает с собой не весь содержащийся в нем эфир, а только ту часть, которая соответствует превышению плотности эфира в теле над его плотностью в окружающей среде. Эта трактовка частичного увлечения нередко подвергалась критике. Стокс¹³, Беер¹⁴, Буссинеск¹⁵, Кеттелер¹⁶, Фойгт¹⁷ предлагали свои интерпретации, но все они не посягали на справедливость формулы Френеля (3).

В рассмотренной теории Френеля можно выделить следующие основные положения: 1) внешний эфир совершенно не увлекается неподвижными телами; 2) внутренний эфир почти не увлекается непрозрачными телами; 3) внутренний эфир частично увлекается прозрачными телами. Эта теория получила в истории название «теории неподвижного эфира». В 30—40-х годах XIX в. при изучении дисперсии света и других явлений накопилось немало фактов, которые свидетельствовали о наличии взаимодействия между частицами тел и эфира.

В связи с этим Коши¹⁸ считал маловероятным отсутствие влияния движущихся тел на внешний эфир. Более перспективной он считал гипотезу полного увлечения эфира. Чтобы эта гипотеза не противоречила явлению абберации, Коши предположил, что плотность эфирной

¹³ *Stokes G.* On Fresnel's theory of the aberration of light.— *Phil. Mag.*, 1845, 28 (3), p. 76—81.

¹⁴ *Beer A.* Über die Vorstellungen vom Verhalten des Aethers in Bewegten Mitteln.— *Ann. Physik*, 1855, 94, S. 428—434.

¹⁵ *Boussinesq J.* Théorie nouvelle des ondes lumineuses.— *J. Math.*, 1868, 13 (2), p. 313—339, 425—438.

¹⁶ *Ketteler E.* Astronomische Undulationstheorie oder die Lehre von der Aberration des Lichtes. Bonn, 1873.

¹⁷ *Voigt W.* Theorie des Lichtes für bewegte Medien.— *Gött. Nachr.*, 1887, S. 177—237.

¹⁸ *Cauchy A.* Note sur l'égalité des réfractions de deux rayons lumineux qui émanent de deux étoiles situées dans deux portions opposées de l'écliptique.— *C. r.*, 1839, 8, p. 327—329.

атмосферы, окружающей тела, убывает по мере удаления от тел, и соответственно этому изменяется скорость света.

Первую математическую теорию аберрации на основе полного увлечения эфира дал Стокс ¹⁹. Скорость эфира вблизи поверхности Земли принималась равной скорости Земли. По мере удаления от Земли она убывает до нуля. Допустив, что движение эфира, увлекаемого Землей, безвихревое, Стокс получил правильное выражение для угла аберрации. Он отметил, что поступательное движение Солнечной системы вместе с заполняющим ее эфиром не повлияет на годичную аберрацию звезд.

Челлис ²⁰ возражал Стоксу. По его мнению, волновая теория должна обосновать закон аберрации при любом движении эфира, а не только при том специальном, которое предложил Стокс. Челлис предпочитал исходить в объяснении аберрации из прямолинейности распространения света от звезды до наблюдателя, как обоснованного экспериментально.

Со временем Стокс ²¹ пришел к выводу, что существования потенциала скоростей достаточно для объяснения аберрации и без допущения о равенстве скорости эфира вблизи Земли и скорости Земли, однако он не развил эту теорию. Для прозрачных тел Стокс ²² принял гипотезу Френеля о частичном увлечении эфира и на ее основе показал в более общем виде, чем Френель, что законы отражения и преломления света в первом порядке по v/c выполняются на движущейся поверхности. Теория Стокса получила название «теории увлекаемого эфира».

Стокс считал слабым местом теории Френеля движение эфира сквозь массивные непрозрачные тела и полагал, что только эксперимент может решить спор между двумя теориями.

¹⁹ *Stokes G.* On the aberration of light.— *Phil. Mag.*, 1845, 27 (3), p. 9—15.

²⁰ *Challis Z.* A theoretical explanation of the aberration of light.— *Phil. Mag.*, 1845, 27 (3), p. 321—327.

²¹ *Stokes G.* On the constitution of the luminiferous aether, viewed with reference to the phenomenon of the aberration of light.— *Phil. Mag.*, 1846, 29 (3), p. 6—10.

²² См. ссылку 13.

2. Экспериментальная проверка теории частичного увлечения

Эпоха экспериментальной проверки началась в 1851 г. с опыта Физо²³. Физо поставил целью выяснить, какая из гипотез об увлечении эфира справедлива для движущихся преломляющих тел. Интерференционным методом он измерял скорость света, распространявшегося в движущейся воде вдоль течения и против течения (описание опыта см. в²⁴). Аналогичный опыт он провел с движущимся воздухом. С точностью до 15% была подтверждена формула Френеля для коэффициента увлечения.

Опыт Физо сыграл очень важную роль в развитии ОДС. В теоретическом плане он продемонстрировал справедливость теории частичного увлечения. В экспериментальном плане он продемонстрировал значение для ОДС интерферометра как очень чувствительного прибора. Опыт Физо открыл эпоху опытов первого порядка по v/c , в которых выяснялось в рамках волновой теории влияние движения источника света, наблюдателя или прибора. Во всех этих опытах сравнивались эффекты, создаваемые в различных приборах лучами света, падающими на прибор в направлении, совпадающем с направлением движения Земли или в противоположном направлении.

Рассмотрим, какие цели преследовались в этих опытах. В одной группе опытов ставилась задача выбора между теориями неподвижного и увлекаемого эфира. К ним относятся интерференционные опыты Бабиня²⁵ и Физо, исследования Хэггинса²⁶ по изучению преломления в призме и др. Продолжением опыта Физо 1851 г. явился его опыт 1859 г. Установив справедливость теории частичного увлечения для жидких и газообразных сред, Физо решил проверить ее для твердых тел. Для этой цели он использовал явление поворота плоскости поляризации при преломлении поляризованного света на границе двух сред. Угол поворота зависит от показателя преломления среды,

²³ *Fizeau H.* Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux et sur un experiment qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse, avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur.— С. r., 1851, 33, p. 349—355.

²⁴ *Франкфурт У. И., Френк А. М.* Оптика движущихся сред. М.: Наука, 1972, с. 31—35.

²⁵ *Babinet J.* Sur l'aberration de la lumière.— С. r., 1839, 8, p. 774.

²⁶ *Huggins W.* Observations on the spectra of some of the stars and nebulae.— Phil. Trans., 1868, 158, p. 529—564.

а последний — от скорости света в данной среде. По мнению Физо, изменение ориентации прибора относительно направления поступательного движения Земли должно было изменить относительную скорость света в среде. Проанализировав результаты 2000 опытов, Физо ²⁷ в 1859 г. объявил о подтверждении формулы Френеля и о наличии влияния движения Земли на поворот плоскости поляризации. Никто не мог обнаружить ошибку в этих опытах, а трудность их постановки была столь велика, что только через 43 года они были повторены и дали отрицательный результат.

Другая группа опытов стимулировалась потребностями астрономии, в частности необходимостью уточнения постоянной аберрации.

По этому поводу вновь вспыхнула дискуссия о возможных результатах опыта Босковича. Хотя Френель показал, что и в эмиссионной, и в волновой теории результат опыта должен быть отрицательным независимо от используемого источника света, Клинкерфус ²⁸ в 1867 г. предложил новую волновую теорию распространения света в преломляющей среде, согласно которой наблюдаемая постоянная аберрации тем больше, чем больше величина задержки, которую испытывает свет в водяном телескопе по сравнению с воздушным. Поводом для создания этой теории послужило сопоставление постоянных аберрации, опубликованных Деламбром и В. Струве. Деламбр обработал около тысячи наблюдений затмений спутников Юпитера за 150 лет и вывел постоянную аберрации в $20,255''$. В. Струве на основе наблюдений в Пулковской обсерватории в 1840—1842 гг. получил постоянную, равную $20,445'' \pm 0,011''$. Различие в $0,19''$ выходило далеко за пределы ошибок эксперимента, и Клинкерфус объяснил его тем, что телескопы XIX в. имеют более толстые объективы, чем телескопы XVIII в.

Хук ²⁹ возражал ему, ссылаясь на неточность метода Рёмера. Клинкерфус настаивал на опытной проверке, и

²⁷ *Fizeau H.* Sur une méthode propre à rechercher sur l'azimut de polarisation du rayon réfracté est influencé par le mouvement du corps réfringent.— C. r., 1859, 49, p. 717—723.

²⁸ *Klinkerfues W.* Untersuchungen aus der analytischen Optik, insbesondere über den Einfluss der Bewegung der Lichtquelle auf die Brechung.— Astr. Nachr., 1866, 66, S. 337—366.

²⁹ *Hoek M.* Sur la différence entre les valeurs de la constante de l'aberration d'après Delambre et Struve.— Astr. Nachr., 1867, 70, p. 193—194; 1869, 73, p. 193—200.

в 1868 г. Хук³⁰ поставил опыт, в котором наблюдал земной источник света в телескоп через двухметровый столб воды. Отсутствие предполагаемого сдвига изображения, обусловленного суточным вращением Земли, Хук объяснил на основе теории Френеля. Он пришел к выводу, что френелевский коэффициент увлечения справедлив с точностью до 2%.

Для уточнения величины коэффициента увлечения Хук³¹ поставил интерференционный опыт (см. описание в³²). Отрицательный результат этого опыта он интерпретировал как доказательство истинности коэффициента увлечения с точностью до 1,5%.

В свою очередь Клинкерфус³³ поставил аналогичный опыт с 8-дюймовым столбом воды и получил увеличение постоянной аберрации на 7,1" (по его теории ожидалось увеличение на 8").

Для разрешения этого противоречия серию точных опытов провел в 1871—1872 гг. Эйри³⁴. Он наблюдал звезду вблизи зенита с помощью вертикально установленного телескопа высотой 35,3 дюйма, заполненного водой. По теории Клинкерфуса за полгода угловое смещение звезды должно было составить около 30", в то время как на опыте смещение не превышало 1" и лежало в пределах ошибок эксперимента.

Третья группа опытов была связана с попытками измерить скорость движения Земли относительно эфира. Перспективным в этом отношении казались дифракционные опыты. Например, Бабине³⁵ показал, что за счет движения дифракционной решетки дифрагированный луч

³⁰ *Hoek M.* Détermination de la vitesse avec laquelle est entraînée une onde lumineuse traversant un milieu en mouvement.— Arch. Néerl., 1868, 3, p. 180—185.

³¹ *Hoek M.* Détermination de la vitesse avec laquelle est entraînée un rayon lumineux, traversant un milieu en mouvement.— Arch. Néerl., 1869, 4, p. 443—450.

³² *Франкфурт У. И., Френк А. М.* Указ. соч., с. 29—30.

³³ *Klinkerfues W.* Versuche über die Bewegung der Erde und der Sonne im Aether.— Astr. Nachr., 1870, 76, N 1803, S. 33—38.

³⁴ *Airy G. B.* On a supposed alteration in the amount of astronomical aberration of light, produced by the passage of the light through a considerable thickness of refracting medium.— Proc. Roy. Soc., 1871, 20, p. 35—39.

³⁵ *Babinet J.* Sur la paragénie ou propagation latérale de la lumière et sur la deviation que les rayons paragéniques éprouvent sous l'influence du mouvement de la terre.— Cosmos, 1864, 25, p. 421—429.

отклоняется, и это отклонение происходит в том же направлении, что и за счет аберрации. По расчетам Бабинс, отклонение дифрагированного луча при изменении направления падающего луча относительно направления движения Земли на противоположное достигало 12,6". Бабине надеялся этим методом уточнить направление и скорость движения Солнечной системы, однако осуществить задуманные опыты ему не довелось.

Ангстрем³⁶ на основе теории, аналогичной теории Бабине, пришел к выводу, что для его решетки смещение дифрагированного луча за счет движения Земли вокруг Солнца должно составлять 7". На опыте Ангстрем получил большие смещения, которые он объяснил влиянием движения Солнечной системы к созвездию Геркулеса со скоростью, примерно равной $\frac{1}{3}$ орбитальной скорости Земли.

Однако в опытах Клинкерфуса 1870 г. не обнаружилось влияния движения Земли на дифракцию света. В спор вступил Маскар, утверждая, что ошибка теорий Бабине и Ангстрема состояла в отсутствии учета изменения длины волны согласно принципу Доплера.

3. Принцип Доплера

В 1842 г. профессор из Праги Х. Доплер³⁷ задался целью выяснить, почему среди двойных звезд часто обе звезды окрашены во взаимно дополнительные цвета. Он предположил, что обе звезды — белые, но одна из них кажется нам голубоватой, потому что движется к нам, а другая — красноватой, потому что движется от нас. По терминологии Доплера, наблюдатель, покоящийся относительно источника, воспринимает «абсолютный» цвет, а движущийся наблюдатель воспринимает «кажущийся» цвет. Исходя из гипотезы неподвижного эфира, он получил, что период колебаний T , воспринимаемый движущимся наблюдателем, и период колебаний T_0 , воспринимаемый неподвижным наблюдателем, связаны для случая движущегося наблюдателя и покоящегося источника

³⁶ *Angström A. J.* On a new determination of the lengths of waves of light, and on a method of determining, by optics, the translatory motion of the Solar system. — *Phil. Mag.*, 1865, 29 (4), p. 489—504.

³⁷ *Doppler Ch.* Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger andern Gestirne des Himmels. — *Abh. Böhm. Ges.*, 1842, 2, S. 465—482.

соотношением

$$T = \frac{T_0}{1 \pm \beta}, \quad \beta = \frac{v}{c},$$

а для случая движущегося источника и покоящегося наблюдателя

$$T = T_0 (1 \mp \beta).$$

Верхний знак соответствует взаимному сближению, нижний — взаимному удалению. Если направление волны образует с направлением движения угол φ , то вместо v следует брать $v \cos \varphi$.

Доплер распространил свой принцип на все виды волн. Для звука он был проверен экспериментально в 1845—1848 гг. Бейс-Баллотом, Скоттом, Расселом и Физо. Применение этого принципа к объяснению цветов двойных звезд вызвало возражения астрономов, особенно изменение вида сплошного спектра.

Физо³⁸ в 1848 г. высказал мысль, что движение небесных тел относительно Земли можно обнаружить с помощью линейчатого, а не сплошного спектра, наблюдая смещение спектральных линий. Эта идея, сыгравшая важнейшую роль в астрономии, была признана не сразу. Только в 60-х годах, после открытия спектрального анализа, когда изучение спектров звезд и других небесных тел становится актуальным, принцип Доплера начинают применять для определения радиальных скоростей небесных тел. В 1868 г. Хаггинс определил смещение водородной линии в спектре Сириуса относительно той же линии в гейслеровской трубке и нашел, что скорость Сириуса относительно Земли составляет 41,4 миль/с.

Первые попытки экспериментальной проверки применимости принципа Доплера в оптике были сделаны Секки и Фогелем в 1870—1871 гг. Они показали, что линейная скорость краев солнечного диска, определенная спектральным путем, равна 2 км/с, что совпадало со значением, найденным из движения солнечных пятен. Точность опытов была невелика, но это не помешало физикам и астрономам широко использовать принцип Доплера. Первое убедительное подтверждение принципа Доплера в земных условиях было дано только в 1898—1900 гг. А. Белопольским.

³⁸ Fizeau H. Extraites des proces-verbaux de séances de Soc. Philom. de Paris, 1848, p. 81—83.

Не следует преувеличивать роль экспериментальной проверки принципа Доплера. При этой проверке исходили из некоторых положений, истинность которых была недостаточно проверена. Например, и в астрономических наблюдениях, и в лабораторных опытах исходили из теории отражения света от движущихся зеркал. Но теория эта дает однозначные результаты только при определенных допущениях об увлечении эфира, что само являлось предметом исследования. Многие рассматривали принцип Доплера как эвристический, справедливость которого можно проверить по всей совокупности результатов его применения. Теоретическая интерпретация принципа зависела от конкретной теории: в СТО, например, смысл принципа Доплера не такой, как в теории неподвижного эфира. Неправильная интерпретация принципа Доплера была причиной многих ошибок в истолковании результатов экспериментов. Одну из них допустил Маскар³⁹.

Маскар писал: «С точки зрения влияния, которое может оказать движение Земли на оптические явления, солнечный свет, отраженный в произвольном направлении, ведет себя точно так, как свет земного источника того же периода»⁴⁰.

Вывод Маскара был верен, но длины волн, воспринимаемые решеткой, он указал неверно. В действительности свет земного источника, покоящегося относительно наблюдателя, воспринимается с длиной волны λ_0 , а солнечный свет после отражения от неподвижного зеркала также сохраняет длину волны λ_0 .

Маскар полагал, что если в расчеты Бабине ввести измененную длину волны света, падающего на решетку, то получится независимость угла дифракции от движения Земли. Однако Маскар ошибался. Позднее Лодж⁴¹ показал, что зависимость угла дифракции от движения решетки появляется только во втором порядке по β . Следовательно, теория Бабине ошибочна и все дифракцион-

³⁹ Mascart E. Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuses et du mouvement de l'observateur. — Ann. l'Ecole Normale, 1872, 1 (2), p. 155—214; 1874, 3, p. 363—420.

⁴⁰ Ibid., p. 180.

⁴¹ Lodge O. Aberration problems. — A discussion concerning the motion of the ether near the Earth, and concerning the connexion between ether and gross matter; with some new experiments. — Phil. Trans., 1893, 184A, p. 749—804.

ные опыты первого порядка по β не могут обнаружить абсолютного движения Земли.

Впоследствии Маскар⁴² пришел к правильному выводу о том, что доплер-эффект обусловлен не абсолютным движением источника света, а относительным движением источника и наблюдателя.

Ошибка Маскара была характерной для той эпохи. Клинкерфус⁴³ повторил ее в интерпретации спектра поглощения. Он полагал, что если излучение D -линии натрия проходит кювету с парами брома поочередно по направлению движения Земли или в противоположном направлении, это должно изменить наблюдаемую длину волны. Хотя Клинкерфус получил сдвиг в 5 раз меньше предполагаемого, он считал его реальным, ибо он лежал за пределами ошибок измерения. С выводом Клинкерфуса соглашался Кеттелер⁴⁴. Ошибка в этом опыте была обнаружена только через 30 лет.

4. Интерпретация опытов первого порядка в 60—70-е годы XIX в.

Положительные результаты опытов Физо (1859), Ангстрема и Клинкерфуса были исключением среди всех опытов 60—70-х годов, отрицавших влияние движения Земли на оптические явления. Кроме уже упоминавшихся, следует отметить интерференционный опыт Кеттелера⁴⁵ и Зельмейера и Кеттелера⁴⁶ по двойному преломлению.

Новые результаты, полученные Маскаром, побудили Парижскую академию наук избрать для очередного математического конкурса 1872 г. тему: «Экспериментально обнаружить изменения, испытываемые светом при его распространении, и его свойства, вытекающие из движения источника света и движения наблюдателя». Премия была присуждена в 1873 г. Маскару. В отчете об итогах конкурса Физо отметил, что премия присуждается Маскару, «несмотря на то, что автор не получил всего, что искал, а именно — проявления движения Земли в пространстве»⁴⁷.

⁴² Mascart E. *Traité d'Optique*, v. 3. Paris, 1893, p. 91.

⁴³ См. ссылку 33.

⁴⁴ Ketteler E. *Op. cit.*

⁴⁵ *Ibid.*, p. 67.

⁴⁶ Ketteler E. *Theoretische Optik*. Braunschweig, 1885, S. 534.

⁴⁷ Fizeau H. *Grand Prix des Sciences Mathématiques*. — C. r., 1874, 79, p. 1534.

Маскар сформулировал итоги своих наблюдений так: «...поступательное движение Земли не оказывает никакого заметного влияния на оптические явления, производимые с земным источником или с солнечным светом ...эти явления не дают нам средства обнаружить абсолютное движение тел ...относительные движения — единственные, которые мы способны обнаружить»⁴⁸.

Отрицательные результаты большинства опытов по изучению влияния движения Земли на оптические явления к концу 70-х годов сформировали среди физиков убеждение в том, что обнаружить абсолютное движение Земли невозможно, хотя не все отваживались делать столь решительные заключения, как Маскар. Чтобы перейти от констатации невозможности обнаружить абсолютное движение Земли к принципу относительности для оптических явлений, нужно было сделать один, но очень трудный шаг. В рассматриваемую эпоху этот шаг не был сделан. Никто не оперировал такими понятиями, как «независимость оптических явлений от движения системы отсчета», даже в ограниченном смысле, т. е. в первом порядке по β .

На этом фоне интересным выглядит следующее заявление Физо, сделанное в упоминавшемся выше отчете по поводу оптических явлений, используемых для обнаружения движения Земли: «...для каждого явления этого рода, которое первоначально кажется дающим положительный результат, находятся компенсирующие причины, аннулирующие его. И в самом деле (кроме одного из двух исключений, результаты которых остаются сомнительными) все опыты этого рода приводят к полностью отрицательным результатам, *как будто некий общий закон природы всегда препятствует их успеху*»⁴⁹.

Выделенные слова как будто предвосхищают путь Эйнштейна, отказавшегося от понятия «абсолютное движение». Однако, если учесть первую часть цитаты, представляется, что все-таки Физо был ближе к Лоренцу, считавшему, что абсолютное движение существует, но оно не обнаружимо из-за действия компенсирующих факторов.

Интересно сопоставить мнение теоретиков в связи с отрицательными результатами опытов по обнаружению абсолютного движения Земли.

⁴⁸ Mascart E. Sur les modifications..., p. 420.

⁴⁹ Fizeau H. Grand Prix..., p. 1533.

Большая часть из них считала независимость оптических явлений от движения Земли доказанной экспериментально и выводила отсюда, например, формулу увлечения Френеля.

Другие решали обратную задачу: исходя из справедливости формулы Френеля, доказанной экспериментально, вывести независимость оптических явлений от движения Земли. Все расчеты при этом велись только в первом порядке по β ; видимо, никто не предполагал, что вскоре станут реальностью опыты второго порядка.

В 1873 г. Фельтман⁵⁰ предложил следующее доказательство независимости любых интерференционных явлений от движения Земли.

Элемент волнового фронта, испытывая многократные отражения и преломления,

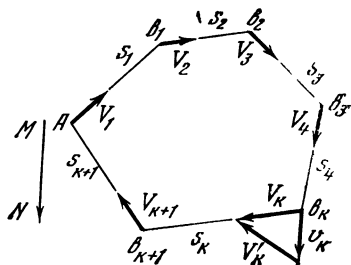


Рис. 1

замкнутый многоугольник $Ab_1b_2 \dots b_{k+1}$ (рис. 1). Обозначим соответствующие пути и скорости на отдельных участках s_1, s_2, \dots ; V_1, V_2, \dots . Пусть вся среда движется в направлении MN и каждая точка приобретает за счет движения среды скорость v_k , образующую угол φ_k со скоростью V_k . Скорость этой точки V'_k относительно неподвижного эфира является результирующей скоростей V_k и v_k . С точностью до второго порядка по v_k/V_k получим

$$V'_k = V_k + v_k \cos \varphi_k.$$

Отсюда

$$t_k = \frac{s_k}{V'_k} = \frac{s_k}{V_k + v_k \cos \varphi_k} \simeq \frac{s_k}{V_k} \left(1 - \frac{v_k}{V_k} \cos \varphi_k \right).$$

Полное время распространения света по замкнутому пути равно

$$T = \sum t_k = \sum \frac{s_k}{V_k} - \sum \frac{v_k}{V_k^2} s_k \cos \varphi_k.$$

⁵⁰ *Veltmann W.* Über die Fortpflanzung des Lichtes in bewegten Medien.— *Ann. Physik*, 1873, **150**, S. 497—535.

Покажем, что

$$\frac{v_k}{V_k^2} = \text{const.}$$

Из неразрывности струн эфира на границе двух сред следует (ρ — плотность эфира)

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2.$$

При постоянной упругости эфира из формулы (2) имеем

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{V_2^2}{V_1^2}.$$

Отсюда

$$\frac{v_1}{V_1^2} = \frac{v_2}{V_2^2} = \text{const.}$$

Учитывая, что

$$\sum s_k \cos \varphi_k = 0,$$

получим

$$\sum \frac{s_k}{V_k'} = \sum \frac{s_k}{V_k},$$

т. е. время распространения света по замкнутому пути не зависит от движения системы отсчета.

Позднее это доказали на основе тех же предпосылок Потье⁵¹ и Лоренц⁵², причем оба указывали на приоритет Фельтмана. В связи с этим выглядит странной попытка некоторых современных авторов присвоить этой теореме название «принцип Потье»⁵³.

⁵¹ *Potier A.* Conséquences de la formule de Fresnel relative à l'entraînement de l'éther par les milieux transparents.— *J. Phys.*, 1874, **3**, p. 201—204.

⁵² *Lorentz H. A.* De l'influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes lumineux.— *Arch. Néere*, 1887, **21**, p. 103—176.

⁵³ *Newburgh R., Costa O. de Beauregard.* Experimental search for anisotropy in the speed of light.— *Amer. J. Phys.*, 1975, **43**, N 6, p. 528—530.

ОПТИКА ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД В КОНЦЕ XIX И НАЧАЛЕ XX В.

1. Опыт Майкельсона второго порядка и его повторения. Контракционная гипотеза

Новая эпоха в истории ОДС — эпоха опытов второго порядка — началась с опыта Майкельсона 1881 г. Майкельсон ставил цель обнаружить абсолютное движение Земли. Поскольку было ясно, что опыты первого порядка для этого не пригодны, он решил попытаться поставить опыт второго порядка. О реальности подобных опытов никто не думал. Об этом достаточно красноречиво говорит письмо Максвелла к Тодду, опубликованное в 1880 г.: «Лабораторные методы определения скорости света связаны с возвращением света назад по тому же пути, так что скорость Земли относительно эфира меняет время двойного прохождения на величину, зависящую от квадрата отношения скорости Земли к скорости света, а эта величина слишком мала, чтобы ее наблюдать»⁵⁴.

Между тем интерферометрические методы, способные в принципе измерить столь малый эффект ($\beta^2 = 10^{-8}$), применялись давно, но многочисленные трудности подобных опытов способны были отпугнуть любого. Майкельсон дерзнул на постановку такого опыта. Первый свой интерферометр он собрал в апреле 1881 г. в период работы в лаборатории Гельмгольца.

Тонкий пучок света от источника света максимально монохроматического падает на плоскопараллельную пластинку M с полупосеребренной задней поверхностью (рис. 2). При этом часть света (примерно половина) отражается, направляясь к плоскому зеркалу S_1 , вторая часть проходит к такому же зеркалу S_2 . Отражаясь от зеркал, оба луча возвращаются к пластинке M , откуда по общему пути попадают в трубу F . Когерентность лучей обеспечивает образование интерференционной картины, вид которой зависит от разности оптических путей, приобретаемой лучами при прохождении плеч интерферометра MS_1M и соответственно MS_2M . Пластинка P , одинаковая с M , служит просто компенсатором (оба луча трижды прохо-

⁵⁴ *Maxwell J.* Letter to Dr. Todd.— *Nature*, 1880, 21, p. 317.

дят толщю пластинки). Зеркало S_1 , установленное на салазках, может перемещаться параллельно самому себе по очень аккуратно сделанным рельсам. Движение осуществляется с помощью червячной передачи. Неподвижное зеркало S_2 снабжено винтами для установки относительно вертикальной и горизонтальной осей. Если зеркала S_1 и S_2 можно было бы установить точно перпендикулярно, то при интерференции получились бы полосы равного на-

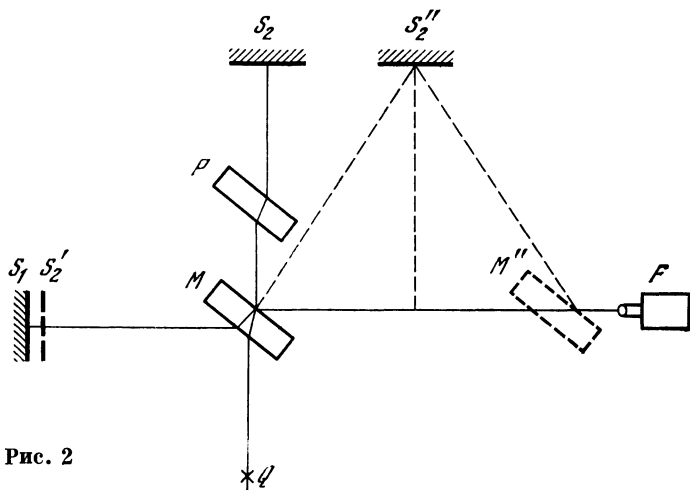


Рис. 2

клона (концентрические окружности), соответствующие воздушной пластинке S_1S_2' , где S_2' — изображение S_2 в зеркале M . Толщина зазора равна разности длин плеч. Однако подобная точная установка затруднительна, S_1 и S_2 не строго параллельны, и получаются полосы равной толщины. Любое изменение в разности хода лучей приведет к смещению полос в интерференционной картине.

Поскольку в формулы, определяющие ширину интерференционных полос и их смещение, входит длина световой волны λ ($6 \cdot 10^{-5}$ см), можно было бы надеяться наблюдать даже очень тонкие эффекты порядка $(v/c)^2 = \beta^2$.

Идея Майкельсона заключалась в том, чтобы обнаружить смещение интерференционных полос, обусловленное движением Земли относительно эфира. Для этого прибор устанавливался таким образом, чтобы одно плечо (например, L_1) располагалось в момент опыта точно вдоль направления орбитального движения Земли, а второе — соответ-

ственно перпендикулярно. Тогда нетрудно вычислить запаздывание одного луча по сравнению с другим (вычисления производятся в системе, связанной с предполагаемым неподвижным эфиром).

Время t' , необходимое лучу для прохождения пути MS_1 и обратно (t''), будет

$$t' = \frac{L_1}{c - v}, \quad t'' = \frac{L_1}{c + v},$$

а общее время

$$t_1 = t' + t'' = \frac{L_1}{c - v} + \frac{L_1}{c + v} = \frac{2L_1}{c} \cdot \frac{1}{1 - \beta^2}.$$

Луч, идущий перпендикулярно направлению движения Земли, пройдет путь $MS_2''M''$ (S_2'' и M'' — положения зеркала и пластинки в момент, когда от них отражается луч). Если обозначить t_2 общее время, затраченное вторым лучом, то общий путь

$$MS_2'' + S_2''M'' = 2\sqrt{L_2^2 + \left(\frac{vt_2}{2}\right)^2} = \sqrt{4L_2^2 + v^2t_2^2},$$

откуда

$$t_2 = \frac{\sqrt{4L_2^2 + v^2t_2^2}}{c}, \quad t_2 = \sqrt{\frac{4L_2^2}{c^2 - v^2}} \approx \frac{2L_2}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Разность времен

$$\Delta_1 t = t_1 - t_2 = \frac{2}{c} \left(\frac{L_1}{1 - \beta^2} - \frac{L_2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right).$$

Но полученная вследствие этой разности интерференционная картина ни о чем не говорит, ибо ее нельзя сравнить с картиной, которая получилась бы при отсутствии эфирного ветра (если допустить, что последний действительно существует, — а именно из этого исходил Майкельсон, — то его никак нельзя устранить). Поэтому в реальном опыте вся установка поворачивалась на 90° , так что плечи менялись местами. Во втором положении разность времен

$$\Delta_2 t = \frac{2}{c} \left(\frac{L_2}{1 - \beta^2} - \frac{L_1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right),$$

так что общее смещение полос будет соответствовать раз-

ности времен

$$\Delta t = \Delta_1 t + \Delta_2 t = \frac{2}{c} (L_1 + L_2) \left(\frac{1}{1 - \beta^2} - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \approx \frac{L_1 + L_2}{c} \beta^2$$

(с точностью до членов второго порядка). Расстояние между двумя интерференционными полосами соответствует разности времен в один период $T = \lambda/c$, поэтому в долях ширины полосы смещение составит

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{L_1 + L_2}{\lambda} \beta^2.$$

Нетрудно оценить эту величину. В основных опытах Майкельсона длина плеч доходила до 11 м, а $\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$ см. Значит,

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{2 \cdot 11 \cdot 10^2}{6 \cdot 10^{-5}} 10^{-8} \approx 0,36^{55}.$$

Такую величину можно было уже обнаружить.

В первых опытах, проведенных Майкельсоном в Берлине, установка оказалась слишком чувствительной к внешним источникам вибраций. Например, движение городского транспорта или смена караула императорской гвардии вызывали смещения, перекрывающие искомые. Поэтому установка была перенесена в подвал Потсдамской обсерватории, где и были получены первые результаты. Хотя Майкельсону они позволили сделать вывод, что эфирный ветер не обнаружен, на самом деле серия опытов 1881 г. не может считаться убедительной. Ошибки измерений были того же порядка, что и ожидаемое значение величины. Вывод Майкельсона об отсутствии «эфирного ветра», т. е. о том, что теория неподвижного эфира неверна, был скорее угадан, чем обоснован.

Вскоре после публикации опыта Майкельсон зимой 1881/82 г. провел несколько месяцев в Париже, где Потье обратил его внимание на то, что в опыте не учтено движение зеркала вместе с Землей. Майкельсон внес исправления и получил результат в 2 раза меньше.

Заметку Майкельсона с исправленным результатом Корню представил в «Comptes rendus»⁵⁶. В этой же заметке

⁵⁵ *Michelson A.* The relative motion of the Earth and the luminiferous aether. — Amer. J. Phys., 1881, 22, p. 120—129.

⁵⁶ *Michelson A.* Sur le mouvement relatif de la Terre et de l'éther. — C. r., 1882, 94, p. 520—523.

содержались ценные сведения об особенностях опыта, в частности о том, что в зависимости от установки зеркал можно наблюдать либо прямолинейные полосы, либо круговые, эллиптические, параболические и гиперболические.

Майкельсон демонстрировал свой интерферометр выходящимся французским экспериментаторам — Маскару, Корню, Липману, но не произвел на них впечатления. Бросалась в глаза чувствительность прибора к различным помехам, обусловленная, в частности, тем, что оба луча шли различными путями и на них могли оказывать влияние местные флуктуации температуры, упругости и т. д. Французы привыкли к схеме Физо, многократно повторенной потом, где лучи шли одинаковыми путями и действие неоднородностей уничтожалось. Подобное отношение встретил Майкельсон и в Америке. Так как новый прибор и полученный в опыте результат оказались непризнанными, Майкельсон утратил интерес к повторным опытам ⁵⁷.

Вывод Майкельсона о том, что теория неподвижного эфира неверна, должен был прозвучать как гром с ясного неба. Гипотеза Френеля о частичном увлечении эфира так хорошо вписывалась в теорию ОДС, что никто не сомневался в справедливости и второй части этой гипотезы — о неподвижности внешнего эфира. Усомниться в справедливости гипотезы Френеля означало усомниться в справедливости опыта Физо. И Майкельсон в 1886 г. повторяет опыт Физо, измеряя скорость света в движущейся среде. Опыт подтвердил формулу Френеля с точностью до 5% ⁵⁸.

Как же совместить частичное увлечение эфира внутри тел и полное снаружи? Этой проблеме посвятил свою работу «Влияние движения Земли на световые явления» Лоренц в 1886 г. ⁵⁹

Лоренц критикует теорию Стокса о полном увлечении эфира. Он указывает, что из уравнений гидродинамики несжимаемой жидкости следует, что, если задан потенциал скоростей и нормальная компонента скорости, то тангенциальные компоненты скорости эфира и Земли не могут быть равными. Следует заметить, что ссылка Лоренца на гидродинамику не очень убедительна, ибо свойства эфира

⁵⁷ *Shankland R. S.* Michelson — Morley experiment.— Amer. J. Phys., 1964, 32, N 1, 16—35.

⁵⁸ *Michelson A. A.* Influence of motion of the medium on the velocity of light.— Amer. J. Sci., 1886, 31 (3), p. 377—386.

⁵⁹ *Lorentz H.* Op. cit.

значительно больше походили на свойства твердого тела и трактовались теоретиками, как правило, на основе теории упругости. Лоренц предлагает свою модификацию теории Стокса: 1) существует потенциал скоростей, 2) скорость эфира вне тела убывает с расстоянием, но у поверхности Земли скорости Земли и эфира не равны (это тоже одна из идей Стокса), 3) сохраняется частичное увлечение эфира внутри тел по Френелю. На основе этой теории Лоренц показывает, что в первом приближении движение Земли не должно оказывать влияния на оптические явления. Лоренц считает, что опыт Майкельсона не опровергает его теорию. Он показывает, что действительное значение смещения должно быть вдвое меньшим, чем было указано, и попадало бы в область ошибок, а это значит, что если бы и был эфирный ветер меньше 30 км/с (как следует по Лоренцу), то Майкельсон его бы не обнаружил.

На работу Майкельсона откликнулся Фойгт⁶⁰, но он допустил ошибку, оставшуюся незамеченной.

В 1887 г. лорд Рэлей обратил внимание Майкельсона на статью Лоренца и предложил повторить эксперимент. Воодушевленный этой поддержкой, Майкельсон в сотрудничестве с Морли⁶¹ за 3 месяца собрали усовершенствованную установку и повторили опыт в Кливленде. Для увеличения чувствительности интерферометра путь лучей был увеличен в 4 раза за счет четырехкратного отражения от зеркал. Для уменьшения влияния вибраций основание было сделано весьма массивным и плавало в ртути. Малое трение позволило привести прибор в очень медленное непрерывное вращение и считывать показания на ходу, чтобы повторяющимися толчками не создавать деформаций плеч интерферометра. В опыте было $L = 2 \cdot 10^7 \lambda$, ожидаемое смещение — 0,4 полосы. Наблюдаемое смещение было, по оценке Майкельсона, в 20 раз меньше, что соответствовало скорости эфирного ветра не более 5—7 км/с. Майкельсон сделал вывод об ошибочности и теории Френеля, и теории Лоренца. Он допускал, что движение Солнечной системы может частично компенсировать движение Земли относительно эфира, и для получения достоверного результата считал желательным повторить опыт через 3 месяца.

⁶⁰ Voigt W. Op. cit., S. 239.

⁶¹ Michelson A. A. On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether.— Amer. J. Sci., 1887, 34 (3), p. 333—345; Phil. Mag., 1887, 24 (5), p. 449—463.

Майкельсон был разочарован результатами своего опыта. Хотя ему удалось показать неудовлетворительность существующей теории эфира, он не достиг основной своей цели: обнаружить с помощью интерферометра абсолютное движение Земли, или, иными словами, движение Солнечной системы относительно эфира. В дополнении к статье видно, что Майкельсон отныне возлагает свои надежды на иные способы, связанные с астрономическими наблюдениями. Разочарование Майкельсона в результатах своих опытов по обнаружению эфирного ветра нашло характерное отражение в его докладе на заседании Американской академии искусств и наук в 1906 г.⁶²: рассказывая о многочисленных применениях своего интерферометра в науке и технике, Майкельсон даже не упомянул о своих опытах по обнаружению эфирного ветра.

В 1887 г. у Майкельсона еще оставалась надежда на то, что если эфир полностью увлекается у поверхности Земли, то, быть может, он отстаёт на некоторой высоте над Землей. В 1897 г. Майкельсон⁶³ провел опыт с вертикально расположенным интерферометром, в котором луч света часть пути проходил на высоте 50 футов над Землей. При допущении некоторого экспоненциального убывания скорости эфира с высотой ожидалось смещение в 7,2 полосы, а наблюдалось смещение около 0,05 полосы. Если считать, что этот эффект был связан с эфирным ветром, то приходилось допустить, что влияние Земли на эфир простирается на расстояние порядка диаметра Земли. Это выглядело столь невероятным, что многие предпочли вернуться к теории Френеля, пытаясь согласовать ее иным способом с отрицательными результатами прежних опытов. Майкельсон отдавал себе отчет, что для более достоверного установления закона убывания скорости эфира с высотой нужны дополнительные опыты. Он намеревался повторить их, но эти намерения не осуществились.

Не видя иного способа согласования теории Френеля с отсутствием эфирного ветра, Лоренц⁶⁴ предложил в 1892 г. новую гипотезу, получившую название «контрак-

⁶² *Michelson A. A.* A plea for light waves. — Proc. Amer. Acad. Arts a. Sci., 1906, 41, p. 67—78.

⁶³ *Michelson A. A.* The relative motion of the Earth and the ether. — Amer. J. Sci., 1897, 3 (4), p. 475—478.

⁶⁴ *Lorentz H. A.* The relative motion of the Earth and the Ether. — Versl. K. Akad. W. Amsterdam, 1892, 1, p. 74; Coll. Papers, v. 4. Hague, 1935, p. 219—223.

ционной». Он полагал, что движение Земли относительно эфира может влиять на величину сил молекулярного взаимодействия, а через них — на длину тел. Чтобы объяснить нулевую разность хода в опыте Майкельсона, пришлось допустить, что длина любого тела (в том числе плеча интерферометра) в направлении движения уменьшается сравнительно с истинной величиной по следующему закону:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \simeq l_0 \left(1 - \frac{v^2}{2c^2}\right).$$

В дальнейшем Лоренц обосновал свою гипотезу на основе электронной теории. Как сообщил в 1893 г. Лодж ⁶⁵, подобную гипотезу излагал несколько лет на своих лекциях в Дублине Фитцджеральд.

Результат опыта Майкельсона — Морли лорд Кельвин оценил на Международном физическом конгрессе в Париже в 1900 г. как «очень густое облако» над динамической теорией тепла и света. Спасение он видел в контракционной гипотезе. Лорд Кельвин предложил Морли и Миллеру повторить опыт с более чувствительным интерферометром.

Морли и Миллер построили новый интерферометр, у которого за счет увеличения оптического пути чувствительность была увеличена в 3 раза. В 1902—1904 гг. они проверяли зависимость лоренцевского сокращения от материала, из которого изготовлены плечи интерферометра. Интерференционный сдвиг оказался практически одинаковым при применении сосны и песчаника, эфирный ветер не превышал 3,5 км/с⁶⁶. В 1905 г. был получен тот же результат для стали. Поскольку об увлечении эфира непрозрачными телами ничего не было известно, можно было предположить, что большая толщина вещества (стен здания, например) может быть причиной увлечения эфира. Подобную гипотезу высказывал еще в 1887 г. Майкельсон в письме Рэлею как возможное объяснение результатов своего опыта. Он допускал, что эфир может задерживаться во впадинах между холмами и т. д. Поэтому Морли и Мил-

⁶⁵ *Lodge O.* Op. cit., p. 749.

⁶⁶ *Morley E. W., Miller D. C.* Extract from a letter dated Cleveland, Ohio, August 5th, 1904, to Lord Kelvin. — *Phil. Mag.*, 1904, 8 (6), p. 753—754.

лер ⁶⁷ решили повторить свой опыт на вершине холма и в таком помещении, где имеются большие окна в нужных направлениях. Опыты дали скорость эфирного ветра до 8,7 км/с, но результаты эти были опубликованы гораздо позже.

2. Опыты первого порядка на рубеже XX в.

Опыты Майкельсона—Морли оставили открытым вопрос: только ли Земля увлекает за собой эфир или это свойственно всем движущимся телам? Лодж ⁶⁸ полагал, что при вращении тел эффект должен наблюдаться уже в первом порядке по β .

В опыте Лоджа два стальных одинаковых диска, разделенных небольшим промежутком, вращались с большой скоростью вокруг вертикальной оси (до 300 об/мин). Луч света расщеплялся на два луча, которые пробегали вблизи периферии дисков замкнутые пути в противоположных направлениях, отражаясь от трех зеркал и затем интерферируя. Вся оптическая система была неподвижна. Если бы вращающиеся диски увлекали за собой эфир, то должен был наблюдаться сдвиг интерференционных полос, величина и направление которого должны зависеть от направления и скорости вращения. Наблюдались очень малые смещения полос, соответствовавшие скорости эфира в $1/200$ окружной скорости дисков. Лодж сделал вывод о неподвижности эфира, а смещение объяснил температурным и другими эффектами.

Попытки значительного увеличения массы вращающегося тела (до 700 кг), намагничивания и электризации не дали результатов: эфир по-прежнему не увлекался.

Тогда Лодж предложил для обнаружения эфирного ветра иной вариант: установить свой интерферометр вместе с наблюдателем на вращающуюся площадку. По его расчетам, даже при скорости вращения 4 об/мин уже можно было бы обнаружить сдвиг полос ⁶⁹.

Опыт Лоджа показал, что небольшие вращающиеся тела не увлекают эфир. Но, может быть, очень массивные

⁶⁷ *Morley E. W., Miller D. C.* Report of an experiment to detect the Fitzgerald — Lorentz effect.— *Phil. Mag.*, 1905, 9 (6), p. 680—685; *Proc. Amer. Acad. Sci.*, 1905, 41, p. 321—327.

⁶⁸ *Lodge O.* *Op. cit.*

⁶⁹ *Lodge O.* Experiments on the absence of mechanical connexion between Ether and matter.— *Phil. Trans.*, 1897, A, p. 149—166.

вращающиеся тела, такие, как Земля, все же увлекают эфир? Лодж⁷⁰ рассчитал, что за счет вращения Земли с помощью квадратного интерферометра со стороной в 1 км можно получить на средних широтах сдвиг более чем в одну полосу. Но как обнаружить этот сдвиг? Лодж этого не знал.

Проблему решил в 1904 г. Майкельсон⁷¹. Он предложил ввести дополнительный контур, размеры которого были бы столь малы, чтобы смещением его интерференционных полос можно было пренебречь. Теперь стало возможным рассматривать искомый сдвиг как расстояние между центральными полосами обеих интерференционных систем. Осуществлен опыт только через 20 лет.

В связи с тем, что опыт Майкельсона по проверке увлечения эфира противоречил предшествовавшим опытам, вновь были подвергнуты пересмотру опыты первого порядка.

В 1886 г. Лоренц⁷² теоретически показал, что большая часть оптических явлений в первом порядке не должна испытывать влияния движения Земли. Он исходил из теории движущегося относительно Земли эфира, в котором существует потенциал скоростей, и френелевского частичного увлечения эфира прозрачными телами. Поскольку частичное увлечение можно не везде применить (анизотропные тела, поглощение света и др.), вывод Лоренца не был всеобщим. В 1892 г. он обобщил свою теорию преломления на анизотропные тела и пришел к выводу, что вращение плоскости поляризации должно быть подвержено влиянию движения Земли⁷³. Лармор⁷⁴ возразил ему и предложил провести экспериментальную проверку. Лоренц продолжал отстаивать свою точку зрения⁷⁵.

В этот же период Вахсмут и Шенрок⁷⁶ подвергли кри-

⁷⁰ *Lodge O.* Aberration problems...— *Phil. Trans.*, 1893, 184A, p. 773.

⁷¹ *Michelson A.* Relative motion of Earth and ether.— *Phil. Mag.*, 1904, 8 (6), p. 716—719.

⁷² *Lorentz H.* *Op. cit.*

⁷³ *Lorentz H. A.* On the influence of the Earth's motion on the propagation of light in doubly refracting bodies (1892).— *Coll. Papers*, v. 4. Hague, 1935, p. 232.

⁷⁴ *Larmor J.* *Aether and matter.* Cambridge, 1900, p. 214.

⁷⁵ *Lorentz H. A.* The rotation of the plane of polarization in moving media (1902).— *Coll. Papers*, v. 5. Hague, 1935, p. 156.

⁷⁶ *Wachsmuth R., Schönrock O.* Beiträge zu einer Wiederholung des Mascart'schen Versuches.— *Verh. Deutsch. Phys. Ges.*, 1902, N 8, S. 183—188.

тическому анализу опыты Маскара по вращению плоскости поляризации. По их мнению, точность опытов была недостаточной для уверенного отрицательного вывода. Подобного мнения придерживался и Рэлей ⁷⁷.

В 1902 г. Рэлей поставил эксперимент, в котором с точностью до 10^{-5} показал отсутствие влияния ориентации кристалла относительно направления движения Земли на вращение плоскости поляризации. Месяцем позже Рэлей ⁷⁸ поставил опыт второго порядка по двойному преломлению. Идея опыта заключалась в следующем: если справедлива контракционная гипотеза, то при некоторой ориентации твердых или жидких тел в них должна возникнуть искусственная анизотропия, как и при механической деформации. При этом изотропное тело должно приобретать способность к двойному преломлению. Опыт показал, что с точностью $1,2 \cdot 10^{-10}$ для бисульфида углерода и $0,3 \cdot 10^{-8}$ для стекла двойное преломление при движении сквозь эфир не возникает.

В связи с тем, что ожидаемый эффект лоренцевского сокращения был $0,5 \cdot 10^{-8}$, результаты, полученные для стекла Рэлеем, показались малоубедительными. В 1904 г. Брэйс ⁷⁹ значительно увеличил чувствительность поляриметра, но не обнаружил никакого сжатия ни у воды, ни у стекла. Он сделал вывод о том, что «контракционная гипотеза не может объяснить отрицательные результаты интерференционных опытов».

Брэйс ⁸⁰ повторил опыт Рэлея по вращению плоскости поляризации некоторых жидкостей и констатировал отсутствие влияния движения Земли с точностью до $2 \cdot 10^{-7}$.

В 1898 г. на заседании Немецкого общества естествоиспытателей и врачей в Дюссельдорфе в докладах В. Вина и Г. Лоренца ⁸¹ дан обзор проблемы увлечения эфира и высказано пожелание повторить опыт Физо по повороту

⁷⁷ *Lord Rayleigh*. Is rotatory polarization influenced by the Earth's motion? — *Phil. Mag.*, 1902, 4, p. 215—220.

⁷⁸ *Lord Rayleigh*. Does motion through the aether cause double refraction.— *Phil. Mag.*, 1902, 4 (6), p. 678—683.

⁷⁹ *Brace D. B.* On double refraction in matter moving through the aether.— *Phil. Mag.*, 1904, 7 (6), p. 317—328.

⁸⁰ *Brace D. B.* The aether «Drift» and rotatory polarization.— *Phil. Mag.*, 1905, 10 (6), p. 383—396.

⁸¹ *Wien W., Lorentz H. A.* Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen.— *Verh. Ges. Deutsch. Naturforsch.*, 1898, 2 Th., S. 49—65.

плоскости поляризации преломленного луча и опыт Клинкерфуса по сдвигу линий в спектре поглощения.

В 1905 г. Брэйс ⁸² повторил опыт Физо. При повороте прибора на 180° ожидаемое вращение составляло $0,024^\circ$, наблюдалось на опыте в среднем $-0,003^\circ$, что позволяло сделать вывод об отсутствии эффекта. Штрассер считал, что у Брэйса слишком велик разброс результатов и метод нуждается в совершенствовании. В 1907 г. Штрассер ⁸³ поставил последнюю точку в этом эксперименте: при ожидаемом вращении $1,4^\circ$ он наблюдал вращение в пределах от $-0,001$ до $+0,018^\circ$. Отрицательный вывод больше не вызывал сомнений.

Опыт Клинкерфуса повторил в 1901 г. Хага ⁸⁴. Наблюдаемый им сдвиг линий поглощения брома при изменении ориентации прибора составил $1/300$ ожидаемой величины и лежал в пределах экспериментальных ошибок. Таким образом, и в опыте Клинкерфуса эффект движения Земли отсутствовал.

Такова была ситуация в ОДС ко времени появления специальной теории относительности (СТО).

3. Отношение физиков к опыту Майкельсона до 1905 г.

В своей фундаментальной работе «К электродинамике движущихся тел» А. Эйнштейн указал, что распространению принципа относительности на оптику и электродинамику содействовали и «неудавшиеся попытки обнаружить движение Земли относительно „светоносной среды“»⁸⁵. Эйнштейн никогда не конкретизировал, какие именно опыты он имел в виду. Неоднократное обсуждение в литературе этого вопроса не привело к определенному выводу.

Представляет интерес уточнить, насколько же были обоснованы экспериментально в рамках ОДС выдвинутые Эйнштейном постулаты. В частности, особый интерес

⁸² *Brace D. B.* A repetition of Fizeau's experiment on the change produced by the Earth's motion on the rotation of a refracted ray. — *Phil. Mag.*, 1905, **10** (6), p. 591—599.

⁸³ *Strasser B.* Der Fizeausche Versuch über die Änderung des Polarisationsazimuts eines gebrochenen Strahles durch die Bewegung der Erde. — *Ann. Physik*, 1907, **24**, S. 137—144.

⁸⁴ *Haga H.* L'expérience de Klinkerfues. — *Arch. Néerl.*, 1902, **6** (2), p. 765—772.

⁸⁵ *Эйнштейн А.* Собр. науч. трудов, т. 1. М.: Наука, 1965, с. 7.

представляет оценка роли опыта Майкельсона в возникновении первого постулата — принципа относительности.

Вошло в традицию считать опыт Майкельсона основной причиной появления принципа относительности. Исследования Холтона ⁸⁶, основанные по преимуществу на анализе высказываний Эйнштейна, показали, что опыт Майкельсона не сыграл заметной роли в появлении СТО.

В 1898 г. Сазерленд ⁸⁷ выступил с критикой интерпретации опыта Майкельсона—Морли. По его мнению, заметное смещение полос можно наблюдать только при определенной юстировке зеркал интерферометра, в частности изображения источников в зеркалах не должны совпадать, а глаз должен находиться на оси симметрии этих изображений. При другой юстировке чувствительность прибора должна заметно уменьшиться. Именно неправильную юстировку Сазерленд считал причиной отрицательного результата опыта. Сазерленду возразил Лодж ⁸⁸.

Детальную теорию опыта Майкельсона дал в 1902 г. Хикс ⁸⁹. Хикс учитывал аберрацию света, изменение угла отражения при отражении от движущейся пластинки, изменение длины волны при отражении и т. п. Хикс пришел к выводу, что при некоторой величине и направлении скорости эфирного дрейфа смещение полос имеет характер, соответствующий не сжатию, а удлинению плеча интерферометра. По мнению Хикса, при наблюдении интерференционной картины изображение на сетчатке глаза, воспринимаемое как центральная полоса, может в действительности соответствовать боковой полосе. Хикс считал, что избежать подобных искажений можно только заменив глаз и зрительную трубу фотографическим методом регистрации. Хикс полагал статистический метод обработки результатов наблюдений в опыте Майкельсона—Морли некорректным. Из этих же данных можно было, по его мнению, получить и положительный резуль-

⁸⁶ Холтон Д. Эйнштейн, Майкельсон и «решающий» эксперимент.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1972. М.: Наука, 1974, с. 104—211.

⁸⁷ Sutherland W. Relative motion of the Earth and aether.— Phil. Mag., 1898, 45, p. 23—31.

⁸⁸ Lodge O. Note on Mr. Sutherland's objection to the conclusiveness of the Michelson — Morley aether experiment.— Phil. Mag., 46, p. 343—344.

⁸⁹ Hicks W. M. On the Michelson — Morley experiment of the drift of the aether.— Phil. Mag., 3 (6), p. 9—42, 556.

тат. Для уменьшения роли температурных флуктуаций он предлагал провести опыт в вакууме.

В дискуссии по статье Хикса выяснилось, что полученное им противоречие с контракционной гипотезой обусловлено математической ошибкой⁹⁰.

Картмел⁹¹ считал, что оптическая иллюзия, предсказанная Хиксом, не существует, ибо ее легко можно было бы обнаружить на опыте. С этой иллюзией у Хикса в математическом выражении для координат интерференционных полос был связан член первого порядка. Картмел категорически отрицал возможность присутствия такого члена, ссылаясь на то, что предшествующие экспериментальные и теоретические работы доказали отсутствие влияния движения Земли в первом порядке. Это высказывание весьма интересно, ибо было сделано до появления теории относительности, в рамках теории эфира.

Оказывается, появление члена первого порядка в формуле Хикса и его теории «оптической иллюзии» было обусловлено неверной трактовкой понятия длины волны в движущихся средах. У Хикса при отражении от каждого зеркала изменяется длина волны, и в итоге интерферируют волны разных длин. Отсюда следовало, что, проходя некоторое расстояние в оптической системе, лучи могут приобрести дополнительную разность фаз по сравнению с существующей в плоскости интерференции. Различие длин волн, по Хиксу, не служит препятствием для интерференции, ибо частоты обеих волн равны, различие длин волн обуславливается различием их скоростей. Причина ошибки, видимо, была в том, что Хикс измерял длину волны по нормали к волновому фронту вместо того, чтобы измерять ее вдоль луча.

В ответ на критику Хикса Морли и Миллер⁹² показали в 1905 г., что большая часть предлагаемых поправок дает члены третьего порядка, которые нельзя обнаружить на опыте, а во втором порядке обе теории совпадают.

Независимо от точности измерения скорости эфирного ветра было ясно, что эта скорость меньше 30 км/с, т. е. гипотезу неподвижного эфира — основу теории эфира — нужно оставить. Только Майкельсон, Морли и Миллер

⁹⁰ *Hicks W. M.* The Fitzgerald — Lorentz effect. — *Nature*, 1902, 65, N 1685, p. 343.

⁹¹ *Cartmel W. B.* On the Michelson — Morley experiment. — *Phil. Mag.*, 1902, 3 (6), p. 555—556.

⁹² См. ссылку 66.

занимались в этот период попытками обнаружить поступательное движение Земли относительно эфира. Все они были единомышленниками, сотрудниками, использовали одни и те же идеи, методы и частично даже оборудование. Опыты типа опыта Лоджа, связанные с вращением, имели свои особенности, и здесь мы их не рассматриваем. Единственным опытом, в котором был применен обычный интерферометр Майкельсона для обнаружения движения эфира, был опыт Трелфолла и Поллака⁹³ в 1896 г. В опыте проверялось, не связано ли рентгеновское излучение с движением эфира. Впрочем, этот опыт не имел никакого отношения к эфирному ветру.

Каковы могли быть причины подобного безразличия к контрольным опытам?

Можно допустить, что одной из причин была трудность работы с интерферометром Майкельсона. Но упоминавшиеся выше опыты начала века по двойному преломлению и вращению плоскости поляризации были тоже очень трудными, однако они ставились и тут же перепроверялись.

Можно допустить, что основной причиной доверия к результату, объявленному Майкельсоном, был его высокий авторитет экспериментатора. Но авторитет Физо был не менее высок, однако он не помешал поставить контрольные опыты в 1905—1906 гг. и показать, что опыты Физо 1859 г. были неточными.

Можно допустить, наконец, что основная причина была в том, что в известном смысле опыт Майкельсона не дал ничего нового, неожиданного, поэтому и перепроверять его не было нужды.

В самом деле, в чем состоял результат опыта с точки зрения экспериментатора? Прибор устанавливали в различных направлениях относительно направления поступательного движения Земли, но наблюдаемая картина не изменялась. Но то же самое десятки раз наблюдалось ранее в опытах первого порядка. К отсутствию влияния движения Земли экспериментаторы уже привыкли, и то, что этот вывод был подтвержден более чувствительным прибором, не должно было вызывать удивления. Удивление вызывал всякий положительный результат, например в опытах Физо или Клинкерфуса. Именно этим объясняется стремление перепроверить их. Полученные при перепро-

⁹³ *Threlfall R., Pollock J. On some experiments with Röntgen's radiation.— Phil. Mag., 1896, 42 (5), p. 453—463.*

верке отрицательные результаты никого не удивили, не вызвали возражений. Возражения вызывали только те отрицательные выводы, которые не были надежно обоснованы и которые можно было при желании толковать как положительные. Видимо, к 1905 г. представление о том, что движение Земли нельзя обнаружить оптическим путем, было общепринятым.

Возможно, именно этим объясняется отказ Морли и Миллера от публикации результатов опытов 1905 г., в которых был зафиксирован сравнительно большой эфирный ветер. Когда же Миллер подобный результат после тщательной проверки опубликовал в 1925 г., тогда и началась эпоха контрольных опытов.

Таким образом, достаточно вероятным является предположение, что опыт Майкельсона перед 1905 г. и не должен был произвести особого впечатления на Эйнштейна. Возможно, что Эйнштейн имел в виду в приведенной выше цитате опыты первого порядка. Появление СТО многими физиками было оценено как попытка объяснения отрицательного результата опыта Майкельсона: эту теорию ставили в один ряд с контракционной гипотезой. Подобная версия укоренилась в литературе, в частности в учебной: очень удобно методически выводить СТО из опыта Майкельсона.

4. Проблема постоянства скорости света

Перейдем к вопросу об экспериментальном обосновании второго постулата СТО — постоянства скорости света во всех инерциальных системах отсчета.

Что было известно о скорости света к 1905 г.? С точки зрения теории эфира скорость света определяется только упругостью и плотностью эфира, и в однородном и изотропном эфире она не должна зависеть ни от направления света, ни от движения источника света.

Казалось бы, теория эфира дает СТО второй постулат в готовом виде. В действительности дело обстояло значительно сложнее. Как узнать, обладает ли эфир свойствами однородности и изотропности? Проще всего об этом судить, измеряя скорость света в различных местах как на Земле, так и в космическом пространстве (в различных направлениях). Получается замкнутый круг. То, что в прозрачных телах эфир зачастую обладает неоднородностью и анизотропией, было основой многих эфирных теорий.

Эти отклонения состояния эфира от «нормального» объяснялись воздействием молекул тел. В межпланетном пространстве как будто не могло быть искажающих факторов, но их можно было ожидать в атмосфере звезд и планет.

У астрономов не было убежденности в необходимости постоянства скорости света от различных небесных тел. Публикуя результаты измерения постоянной абберации семи звезд, В. Струве указывал на одинаковость скорости света именно от этих звезд, воздерживаясь от обобщений. В 1872 г. Вилларсо⁹⁴ выдвинул гипотезу о том, что постоянная абберации для различных звезд неодинакова, по различие ее значений очень мало (менее 0,1"). Вилларсо предложил новую теорию абберации, в которой учитывается не относительное движение Солнечной системы (относительно нашей галактики), а ее абсолютное движение (относительно эфира). Постоянная абберации для звезд определяется так:

$$\alpha = \frac{k}{u \cos \varphi + \sqrt{c^2 - u^2 \sin^2 \varphi}},$$

где k — постоянная, зависящая от движения Земли вокруг Солнца, u — абсолютная скорость Солнечной системы, φ — угол между направлением на звезду и направлением абсолютного движения Солнца.

Определив постоянную абберации различных звезд, можно найти величину и направление абсолютной скорости Солнечной системы. Формула Вилларсо выведена им в предположении, что скорость света не зависит от направления в пространстве и от движения источника света.

С какой же точностью скорость света можно определить из наблюдений абберации? Длительное время считался образцовым результат В. Струве — (20,445 ± 0,011"). В 1853 г. он уточнил его: 20,463 ± 0,017". Новый анализ результатов измерений привел В. Струве в 1872 г. к величине 20,445 ± 0,017". Нирен в Пулкове получил различными методами величины 20,43"; 20,54"; 20,517" и сделал вывод о сезонной систематической ошибке. В 1885 г. Кюстнер в Берлине получил 20,313". В 1891 г. Леви в Пуизе новым методом вновь получил 20,445". Анализируя эти

⁹⁴ *Villarceau J.* Sur la constante de l'aberration et la vitesse de la lumière, considérées dans leurs rapports avec le mouvement absolu de translation du système solaire.— С. 1., 1872, 75, p. 854—860.

результаты, Маскар⁹⁵ пришел к выводу, что вероятная ошибка, видимо, не менее $0,1''$. Таким образом, абберационный метод позволял измерить скорость света с точностью не выше $5 \cdot 10^{-3}$.

Первые прямые эксперименты по измерению скорости света, сделанные Физо, Фуко, Корню, не отличались высокой точностью, погрешность составляла $200-500$ км/с. Более точными были измерения Майкельсона и Ньюкомба. В 1902 г. Майкельсон получил для скорости света величину $(299\,890 \pm 60)$ км/с. Относительная ошибка составляла $2 \cdot 10^{-4}$.

Таким образом, прямые и косвенные методы измерения скорости света имели точность ниже, чем в оптических опытах первого порядка. Поэтому нельзя считать, что второй постулат СТО был достаточно строго обоснован экспериментально, что Эйнштейн извлек его непосредственно из опыта. Эйнштейн и сам признавался в беседе с Шенкледом, что выбор между постоянством скорости света и баллистической гипотезой был сделан им на основе математических соображений: он не мог составить дифференциальное уравнение, решение которого давало бы волны со скоростью, зависящей от скорости источника.

Глава 3

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ОДС В РАМКАХ СТО. ДИСКУССИЯ ВОКРУГ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

1. Абберация и доплер-эффект в теории Эйнштейна

Уже в первой работе по теории относительности Эйнштейн показал, что явление абберации света и эффект Доплера являются следствиями релятивистской кинематики.

Пусть штрихованная система отсчета связана с Землей, а нештрихованная — со звездой, причем угол между лучом света и направлением движения Земли в обеих системах соответственно α и α' . Тогда, учитывая преобразования координат и времени, при переходе от одной системы от-

⁹⁵ Mascart E. — Traité d'optique, 1893, 3, p. 60.

счета к другой получим

$$\cos \alpha' = \frac{\cos \alpha - \beta}{1 - \beta \cos \alpha}.$$

Разлагая в ряд по β правую часть в первом порядке, получим классическую формулу aberrации. Таким образом, с точки зрения СТО явление aberrации — это результат преобразования углов при переходе от одной инерциальной системы к другой.

Следствием инвариантности фазы световой волны при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой является преобразование частоты света (φ — угол между лучом света и направлением движения)

$$\nu' = \nu \frac{1 - \beta \cos \varphi}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Из этой релятивистской формулы для эффекта Доплера разложением в ряд по степеням β с учетом только членов первого порядка можно получить классическое выражение.

Простота, с которой в СТО объяснялись aberrация света и эффект Доплера, была неоспоримым доводом в пользу новой теории, однако отказ от эфира и необычность новых концепций пространства и времени создали СТО определенную оппозицию среди физиков. Одной из тем для дискуссии явилась релятивистская aberrация.

Антирелятивисты выдвинули следующие доводы против СТО. При наблюдении двойных звезд выяснилось, что угловое расстояние между звездами равно нулю тогда, когда равно нулю доплеровское смещение их спектральных линий. Это соответствует такому расположению звезд, когда обе звезды и Земля оказываются на одной прямой. Однако в этот момент скорости звезд направлены в противоположные стороны и aberrационное смещение их максимально, т. е. визуально они должны четко разделяться. Получается, что движение светила не играет роли, играет роль только движение наблюдателя, что противоречит СТО⁹⁶.

⁹⁶ *Tomaschek R.* Über Aberration und Absolutbewegung.— *Ann. Physik*, 1924, 74, p. 136—145; *Osten H.* Aberration und Relativität.— *Astr. Nachr.*, 1925, 224, S. 65—68; *Lenard P.* Ueber Äther Bewegungen und Aberration.— *Astr. Nachr.*, 1925, 224, S. 345—356; *Thirring H.* Relativität und Aberration — *Naturwis.*, 1925, 13, S. 445—447; *Emden R.* Aberration und Relativitätstheorie.— *Naturwis.*, 1926, 14, S. 329—335.

Ошибка заключалась в том, что СТО приписывалось утверждение о зависимости аберрации от скорости светила. В действительности скорость движения источника не входит в формулы теории аберрации. При наблюдении в одной инерциальной системе аберрация вообще не обнаруживается, она появляется только при переходе из одной инерциальной системы в другую. В этом смысле в СТО вообще аберрации нет, а появляется она только в ОТО, ибо движение Земли вокруг Солнца, являющееся причиной аберрации, ускоренно.

Копф⁹⁷ считал, что только с помощью опыта можно сделать выбор между классической и релятивистской теориями аберрации.

В классической теории аберрации в первом порядке имеем

$$\sin(\alpha' - \alpha) = \frac{v_e}{c} \sin \alpha_e \sin \alpha_s \left(1 - \frac{v_s}{c} \cos \alpha_s\right),$$

где $\alpha' - \alpha$ — угол аберрации, в СТО α — угол между направлением на звезду и направлением движения Земли в системе, связанной со звездой, α' — тот же угол в системе, связанной с Землей.

Здесь α_e и v_e относятся к движению Земли относительно Солнца, а α_s и v_s — к движению Солнечной системы относительно эфира.

В СТО имеем

$$\sin(\alpha' - \alpha) = \frac{v_e}{c} \sin \alpha_e \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v_s}{c} \cos \alpha_s\right).$$

По мнению Копфа, различие может достигать 0,07", что можно обнаружить экспериментально.

Эпштейн⁹⁸ показал, что различие между этими формулами в первом порядке только кажущееся. Оно существует во втором порядке, но слишком мало, чтобы быть обнаруженным.

Одним из поводов для критики СТО послужило изменение в интерпретации опытов по измерению скорости света в движущихся средах. В опыте Майкельсона—Морли 1886 г. коэффициент увлечения эфира, пересчитанный для

⁹⁷ *Kopff A.* Über eine Möglichkeit der Prüfung der speziellen Relativitätstheorie auf astronomischen Wege.— *Phys. Z.*, 1922, 23, S. 120—122.

⁹⁸ *Epstein P.* Zur Aberrationstheorie.— *Phys. Z.*, 1923, 24, S. 64—65.

излучения D -линии натрия, был равен $k = 0,437$, что согласовалось с формулой Френеля $k = 1 - 1/n^2$. Лоренц в 1895 г. показал, что с учетом дисперсии коэффициент увлечения принимает вид

$$k = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}.$$

По этой формуле для D -линии Na $k = 0,451$, что заметно отличалось от результатов Майкельсона—Морли.

Лауэ⁹⁹ показал, что с точностью до второго порядка теория относительности ведет к формуле Лоренца. Однако в этот же период появились и иные выражения¹⁰⁰ для коэффициента увлечения, дававшие значения, близкие к френелевским для воды, но заметно отличавшиеся для других сред. Появилась необходимость в опытной проверке. Эту задачу решил в 1914 г. Зеeman¹⁰¹; он подтвердил формулу Лоренца для воды с точностью до 2%.

В этот же период (1909—1911 гг.) Харрес измерил коэффициент увлечения для стекла. Поскольку наиболее просто осуществить для твердого тела вращательное, а не поступательное движение, Харрес расположил 10 стеклянных призм в виде замкнутого многоугольника на горизонтальной площадке, которая могла вращаться вокруг вертикальной оси. Луч света входил в многоугольник и выходил из него вдоль радиуса (рис. 3).

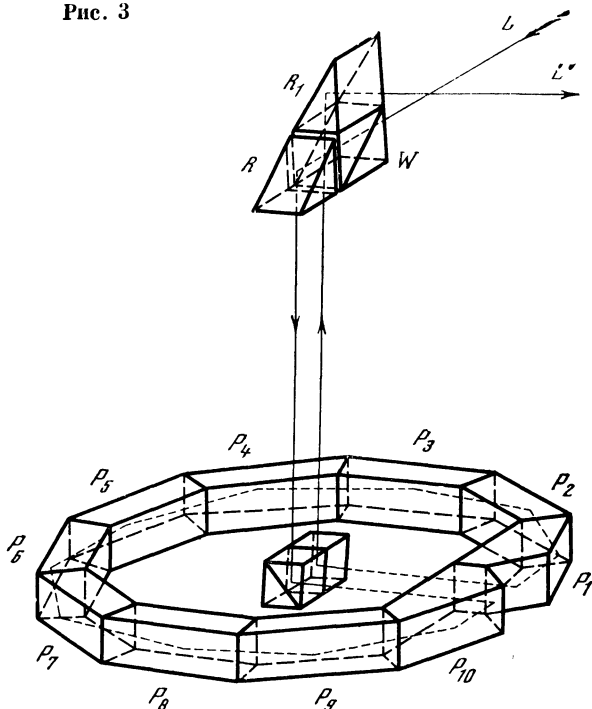
Результаты, сообщенные Харресом в его диссертации в 1912 г., не соответствовали ни формуле Френеля, ни формуле Лоренца. П. Харцер¹⁰² критически проанализировал теорию Харреса, внес изменения и показал, что экспериментальные результаты Харреса лучше удовлетворяют формуле Френеля, чем Лоренца. По его мнению, это было благом для астрономии, ибо наличие дисперсионного члена препятствовало правильному объяснению аберрации звезд.

⁹⁹ *Laue M.* Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip.— Ann. Physik, 1907, 23, S. 989—990; рус. пер. в кн.: *Лауэ М.* Статьи и речи. М.: Наука, 1969, с. 30—31.

¹⁰⁰ *Jaumann G.* Electromagnetische Theorie.— Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Math. Naturw. Kl., 1908, 117, S. 459.

¹⁰¹ *Zeeman P.* Fresnel's coefficient for light of different colours.— Proc. Kön. nederl. acad. wet. B, 1914—1915, 17, p. 445—451; 1915, 18, p. 398—408.

¹⁰² *Harzer P.* Über die Mitführung des Lichtes in Glas und die Aberration.— Astr. Nachr., 1914, 198, S. 377—392.



Результаты Харцера для зеленого и красного света соответственно $k_1 = 0,5802 \pm 0,0020$; $k_2 = 0,5964 \pm 0,0015$; по Френелю имеем $k_1 = 0,5977$ и $k_2 = 0,5952$; по Лоренцу $k_1 = 0,6210$ и $k_2 = 0,6120$.

Харцер полагал, что эти результаты не подтверждают СТО, ибо, по его мнению, из СТО получается формула увлечения, совпадающая с лоренцевской.

Ясность в эту дискуссию внес в 1914 г. Эйнштейн¹⁰³. Он показал, что вид дисперсионного члена в коэффициенте увлечения зависит от условий опыта, в частности от угла между входящим лучом и направлением света в среде.

Согласно СТО, с точностью до второго порядка

$$V = V' (v') + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right),$$

¹⁰³ Эйнштейн А. Замечания к статье П. Харцера «Об увлечении света в стекле и об aberrации». — В кн.: Эйнштейн А. Собр. науч. трудов, т. 1. М.: Наука, 1965, с. 313—315.

где V' — скорость света в среде для наблюдателя, покоящегося в этой среде, ν' — частота света для этого наблюдателя, V — скорость света для движущегося наблюдателя. Изменение частоты света можно определить по принципу Доплера

$$\nu' = \nu (1 - \beta \cos \varphi).$$

1. Если луч движется параллельно направлению движения среды, то

$$\varphi = 0, \quad \nu' = \nu \left(1 - \frac{v}{c}\right);$$

$$V'(\nu') = V'(\nu) - \frac{\nu v}{c} \frac{dV'}{d\nu} = V'(\nu) - \frac{\lambda}{n^2} \frac{dn}{d\lambda} \nu;$$

$$V = V'(\nu) + \left(1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n^2} \frac{dn}{d\lambda}\right) \nu.$$

Отсюда получаем формулу Лауба¹⁰⁴

$$k = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n^2} \frac{dn}{d\lambda}.$$

2. Свет входит в тело перпендикулярно направлению движения среды (опыт Харреса): $\varphi = \pi/2$; $\nu' = \nu$;

$$V = V'(\nu) + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \nu; \quad k = 1 - \frac{1}{n^2}.$$

3. Опыт Физо (этот случай уже был рассмотрен Лауэ в 1907 г.). Теперь

$$\nu' = \nu (1 - v/V):$$

$$V'(\nu') = V'(\nu) - \frac{\nu v}{V} \frac{dV'}{d\nu};$$

$$V = V'(\nu) + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \nu - \frac{\nu v}{V} \frac{dV'}{d\nu}.$$

Отсюда приходим к формуле Лоренца

$$k = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}.$$

Таким образом, вопреки мнению Харцера, опыт Харреса подтверждал СТО.

Первый из рассмотренных Эйнштейном случаев относится к поступательному движению твердых тел. Подобные очень трудные опыты осуществил в 1922 г. Зеeman

¹⁰⁴ Laub I. Zur Optik der bewegten Körper.— Ann. Physik, 1908, 25 (4), S. 175—184.

с сотрудниками¹⁰⁵. Он проверял формулу Лауба, к которой приводят и СТО, и теория Лоренца. В опыте стеклянные или кварцевые цилиндры приводили с помощью кривошипно-шатунного механизма в поступательное движение со скоростью около 10 м/с. Интерференционная картина фотографировалась, и сравнивались смещения полос при изменении направления движения. Для монохроматизации света применялись интерференционные фильтры. Отклонения экспериментальных результатов от теоретических не превышали 3%, точность была достаточной для суждения о справедливости формулы Лауба и анализа Эйнштейна.

2. Баллистическая теория

Часть физиков полагала, что можно избежать радикальных перемен, если заменить СТО баллистической теорией.

Баллистическая теория, выдвинутая впервые Ритцем¹⁰⁶, как и СТО, вводила принцип относительности и отвергала эфир, но вместо постоянства скорости света вводила зависимость скорости света от скорости источника. Скорость света относительно наблюдателя получалась сложением скорости света и скорости источника. Это позволяло легко объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона. В баллистической теории распространение света рассматривалось фактически в рамках эмиссионной теории, хотя Ритц говорил о фиктивном характере световых «частиц». Аберрация легко объяснялась этой теорией, но возникали многочисленные трудности: нужно было полностью перестраивать электродинамику, возникали трудности с интерпретацией опыта Физо и эффекта Доплера. При доплер-эффекте приходилось допускать изменение частоты и постоянство длины волны.

Чтобы постоянство длины волны не противоречило наблюдаемому сдвигу линий в дифференциальном спектре, Толман¹⁰⁷ допустил, что свет от движущегося небесного

¹⁰⁵ *Zeeman P.* Experiences sur la propagation de la lumière dans des milieux liquides ou solides en mouvement. — Arch. Néerl., 1927, 10 (3A), p. 131—220.

¹⁰⁶ *Ritz W.* Recherches critiques sur l'électrodynamique générale. — Ann. Chim., 1908, 13 (8), p. 145—275.

¹⁰⁷ *Tolman R.* The second postulate of relativity. — Phys. Rev., 1910, 30, p. 26—40.

источника, отраженный от зеркала, ведет себя так, как будто его источником является зеркало. Поскольку зеркало неподвижно относительно дифракционной решетки, то оно испускает свет со скоростью c , а поскольку частота при отражении не изменяется, то изменяется длина волны. Для проверки своей гипотезы Толмен произвел следующий опыт. Противоположные концы солнечного диаметра поочередно рассматривались в телескоп, с которым был соединен интерферометр Ллойда, состоящий из щели s , плоского зеркала m и окуляра f . Интерферировали между собой прямой луч 1 и луч 2 , отраженный от зеркала. Скорость луча 1 равнялась $c + v$, где v — линейная скорость точек на поверхности Солнца, а скорость луча 2 после отражения равнялась c . За счет разности скоростей возникала разность хода. При визиравании телескопа на противоположные края Солнца интерференционная картина должна была заметно сдвигаться. Поскольку никакого сдвига не наблюдалось, Толмен сделал вывод об ошибочности баллистической теории и справедливости второго постулата СТО.

Комсток ¹⁰⁸ указал, что различие в скорости света от приближающихся к нам и от удаляющихся от нас звезд должно было бы исказить орбитальное движение двойных звезд, но этого никто не наблюдал.

Подробно этот вопрос был рассмотрен в 1913 г. де Ситтером ¹⁰⁹. Пусть скорость света от звезды определяется выражением $c' = c + kv$, где v — скорость звезды, k — некоторый коэффициент (по Ритцу $k = 1$, по Лоренцу и Эйнштейну $k = 0$). Де Ситтер показал, что для двойной звезды β Возничего $k = 0,002$, а для других звезд, ве-

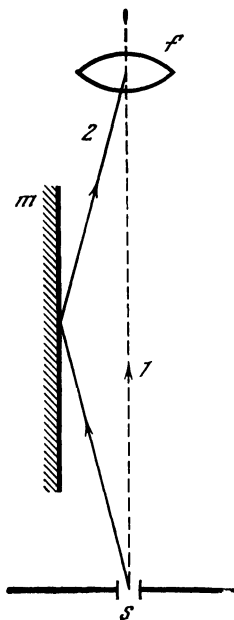


Рис. 4

¹⁰⁸ Comstock D. A neglected type of relativity.— Phys. Rev., 1910, 30, p. 267.

¹⁰⁹ Sitter W. de. A proof of the constancy of the velocity of light.— Proc. Kon. Akad. Wen. Amst., 1913, 15, p. 1297.

роятно, еще меньше. Это был довод в пользу постоянства скорости света.

В 1918 г. Майорана¹¹⁰ поставил прямой опыт по измерению скорости света от движущегося источника. Ртутная лампа двигалась по окружности со скоростью $v = 80$ м/ч. Наблюдалась зеленая линия ртути ($\lambda = 0,5461$ мк) с помощью интерферометра Майкельсона, у которого разность хода лучей $\Delta l = 232$ мм. Если скорость света постоянна, то вследствие доплер-эффекта должен наблюдаться сдвиг в x полос, причем

$$x = \frac{\Delta l}{\lambda} \frac{v}{c} .$$

Различие между теоретическим и наблюдаемым сдвигом оказалось порядка 5%. Майорана сделал вывод о постоянстве скорости света.

3. Анализ опыта Майкельсона и его повторения в 1909—1930 гг.

После появления СТО анализы опыта Майкельсона приняли другой оттенок. Противники СТО рассчитывали опровергнуть ее, доказав ошибочность интерпретации опыта Майкельсона.

В 1909 г. Кольт¹¹¹ заявил, что в опыте Майкельсона наблюдаются полосы равного наклона, а не равной толщины. За счет диафрагмирования зрительной трубы из всей системы колец видно только центральное пятно. Параллельные прямолинейные полосы, по мнению Коля, возникают от дифракции света на выходной щели осветителя, т. е. мы видим результат интерференции двух дифракционных картин. Если применяется монохроматический свет, то при вращении аппарата будет меняться интенсивность полос, а не их положение. При некоторых азимутах полосы исчезают, при дальнейшем вращении вновь появляются. В белом свете можно наблюдать иллюзию смещения полос, обусловленную тем, что интенсивность некоторой линии сильно уменьшается, а интенсивность линии с близкой длиной волны заметно возрастает.

¹¹⁰ *Majorana Q.* Experimental demonstration of the constancy of velocity of the light emitted by a moving source.— *Phil. Mag.*, 1919, 37 (6), p. 145—150.

¹¹¹ *Kohl B.* Über den Michelsonsche Versuch.— *Ann. Physik*, 1909, 28, S. 259—307, 662.

Развивая теорию отражения света на движущемся зеркале, Коль показывает (вслед за Лоджем), что угол отражения отличается от угла падения на величину второго порядка (в системе отсчета, связанной с прибором). Это приводит к раздвоению изображения источника — этот факт ранее не учитывался.

Колью возразил Лауэ¹¹². Приведем начало статьи Лауэ, ярко характеризующее дух дискуссии: «Так как интерференционный опыт Майкельсона, как основа теории относительности, приобрел исключительное значение для развития физики, необходимо устранить любые сомнения в его доказательности, в том числе высказанные недавно Колем». Ссылаясь на статью Морли и Миллера (1905 г.), Лауэ показал, что в опыте наблюдались полосы равной толщины, а не равного наклона. Возможно, Лауэ не знал, что еще в 1887 г. Майкельсон применил свой интерферометр для решения задачи о световом эталоне длины. Метод Майкельсона основывался на том, что сдвиг интерференционных полос прямо пропорционален смещению зеркала интерферометра, что возможно только для полос равной толщины. Дифракция, описываемая Колем, по мнению Лауэ, не имеет никакого отношения к наблюдаемым на опыте явлениям. Можно добавить к этому, что в опыте Майкельсона и Морли щели вообще не было, об этом упоминал Хикс со слов Морли. По поводу удвоения изображения Лауэ указал, что оно вытекает не только из теории эфира, но и из СТО, поэтому данное явление не могло бы служить критерием выбора между теориями, даже если бы оно легко наблюдалось. В действительности расстояние между изображениями слишком мало (10^{-5} см), чтобы его наблюдать.

В 1911 г. свои возражения против опыта Майкельсона выдвинул Будде¹¹³. Он считал, что разность фаз в опыте Майкельсона ранее рассчитывалась неверно. Кроме того, Будде считал необходимым учитывать влияние, оказываемое на разность фаз плоскопараллельной пластиной. По мнению Будде, в опыте Майкельсона не учитывалась компонента эфирного дрейфа, связанная с движением нашей галактики относительно эфира. Для устранения

¹¹² Лауэ М. Доказателен ли опыт Майкельсона? — В кн.: Лауэ М. Статьи и речи. М.: Наука, 1969, с. 32—36.

¹¹³ Budde E. Zur Theorie des Michelsonschen Versuches.— Phys. Z., 1911, 12, S. 979—991; 1912, 13, S. 825.

влияния этой компоненты необходимо производить измерения в разное время года.

Лауэ¹¹⁴ ответил Будде, что если учитывать все поставленные до сих пор опыты, выполненные в разное время года, то вероятность постоянной компенсации ожидаемого эффекта действием неизвестной компоненты чрезвычайно мала. Особенно подробно Лауэ рассмотрел подсчет разности фаз, с которой происходит интерференция. Он указал, что время прохождения света можно определить либо через отношение абсолютного пути l и абсолютной скорости c , либо через отношение относительного пути S и относительной скорости c_r :

$$t = \frac{l}{c} = \frac{S}{c_r}.$$

Для расчета разности фаз полученный промежуток времени нужно делить либо на абсолютный, либо на относительный период (различие во втором порядке несущественно). Можно непосредственно получить разность фаз, разделив относительный путь S на относительную длину волны в конце пути λ_r (изменение длины волны происходит вследствие эффекта Доплера).

Будде применил неверный метод: он делил абсолютный путь луча l_n на относительную длину волны λ_n . Лауэ считает, что эта величина не имеет отношения к разности фаз.

Представляется, что возражение в этом пункте можно сформулировать и так: Будде неверно применил принцип Доплера. Поскольку источник света, все детали установки и наблюдатель находятся в одной системе отсчета, при прохождении лучом света различных участков своего пути изменения длины волны не должно быть. У Будде же после каждого отражения длина волны изменяется. Фактически он повторил ошибку Фойгта: вместо относительной длины волны ввел абсолютную. Но последнее не имеет физического смысла: чтобы регистрировать абсолютную длину волны, наблюдатель должен покоиться относительно эфира.

После появления статьи Лауэ Будде признал, что применение принципа Доплера в опыте Майкельсона необоснованно. В вопросе о роли разделительной пластины

¹¹⁴ Лауэ М. К теории опыта Майкельсона. — В кн.: Лауэ М. Статьи и речи. М.: Наука, 1969, с. 37—46.

Лауэ не согласен с Будде. Лодж¹¹⁵ уже рассматривал этот вопрос и пришел к выводу, что учет прохождения света через разделительную пластинку не влияет на разность хода в опыте Майкельсона.

В опытах Майкельсона—Морли и Морли—Миллера в течение всего времени измерений интерферометр медленно вращался. Мог возникнуть вопрос о влиянии деформаций, возникающих при вращении, на величину наблюдаемого эффекта. Оказалось, что эти деформации заметной роли не играют¹¹⁶.

В связи с тем, что контракционная гипотеза на опытах не находила подтверждения, сторонники теории эфира искали иные способы для объяснения опыта Майкельсона.

Роуз-Инз¹¹⁷ и Биркеланд¹¹⁸ допустили, что движение Земли воздействует на ближайшие слои эфира так, что в нем возникает анизотропия, и что скорость света зависит от угла между лучом и направлением движения Земли. Формула изменения скорости подбиралась так, чтобы удовлетворить результату опыта Майкельсона. Биркеланд полагал, что эта гипотеза не противоречит постоянству скорости света, которое должно выполняться только в свободной среде, где не осуществляется влияние движения Земли.

Появление СТО стимулировало у сторонников теории эфира интерес к теории отражения и преломления света с учетом членов второго порядка, в частности изучаются квадратичная абберрация, квадратичный эффект Доплера. Попытки применить эту теорию к опыту Майкельсона сделал Харнак¹¹⁹, но не получил ничего нового. Риги¹²⁰ применил принцип Гюйгенса к распространению волн

¹¹⁵ *Lodge O.* Aberration problems, p. 792.

¹¹⁶ *Lüroth I.* Eine Bemerkung zum Michelsonschen Versuch.— Sitzber. Kön. Bayer. Akad. Wiss., Math. Phys. Kl., 1909, S. 3—10.

¹¹⁷ *Rose-Innes J.* On the physical interpretation of the Michelson-Morley experiment.— *Phil. Mag.*, 1914, 27, p. 150—153.

¹¹⁸ *Birkeland R.* An attempt to explain the Michelson interference-experiment.— *Phil. Mag.*, 1919, 37 (6), p. 150—156.

¹¹⁹ *Harnack A.* Der Dopplereffekt und die Gesetze der Spiegelung und Brechung an einer bewegten Grenzfläche.— *Ann. Physik*, 1914, 46 (4), S. 547—560.

¹²⁰ *Righi A.* L'expérience de Michelson et son interpretation.— *C. r.*, 1919, 168, p. 837—842; Sur les bases experimentales de la Théorie de la Relativité.— *C. r.*, 1920, 170, p. 497—501; Sur la Relativité et sur un projet d'expérience décisive.— *C. r.*, 1920, 170, p. 1550—1554; 1920, 171, p. 22—23.

в интерферометре. Он полагал, что разность хода волн, обусловленная эфирным ветром, компенсируется разностью хода с противоположным знаком, обусловленной взаимным наклоном волн при отражении. В итоге, по мнению Риги, при повороте интерферометра на 90° никакого изменения интерференционной картины не должно быть. Виллей ¹²¹ выступил с возражениями, он считал теорию Риги совместимой с опытом Майкельсона. Кеннет и Ричмонд ¹²² поддержали Виллея против Риги. Они показали, что изучавшаяся Риги квадратическая абберация практически не влияет на результаты наблюдений. В случае идеальной юстировки (угол между зеркалами 90° , угол между разделительной пластиной и зеркалами 45°) действительно, как отмечал Риги, в двух положениях интерферометра, отличающихся на 90° , освещенность в поле зрения одинакова. Однако в промежуточных положениях освещенность меняется, что можно обнаружить фотометрически при непрерывном вращении интерферометра.

Большую роль в дискуссии между сторонниками и противниками теории относительности сыграли интерферометрические опыты, в которых лучи света пробегали замкнутый путь. Опыты эти ставились в различных вариантах. Первым был описанный выше опыт Лоджа, в котором интерферометр покоился, а вращался (по предположению) относительно него эфир. В опыте Харреса вращались все детали интерферометра, кроме источника света и зрительной трубы. В опыте Саньяка ¹²³ 1913 г. вращался весь интерферометр, была применена фотографическая регистрация. Наконец, в 1925 г. Майкельсон повторил опыт Саньяка, используя в качестве вращающейся основы интерферометра саму Землю. Несмотря на это разнообразие, ожидаемое согласно теории эфира смещение полос всюду получалось одинаковым.

Рассмотрим, для примера, схему опыта Саньяка (рис. 5). Луч света от осветителя падает на разделитель-

¹²¹ *Villey J.* Sur la discussion de l'expérience de Michelson.— C. r., 1920, **170**, p. 1175—1178; Sur l'application de la méthode de Righi à la discussion de l'expérience de Michelson.— C. r., 1920, **171**, p. 298—301.

¹²² *Kennard E. H., Richmond D. E.* On reflection from a moving mirror and the Michelson-Morley experiment.— *Phys. Rev.*, 1922, **19** (2), p. 572—577.

¹²³ *Sagnac G.* Effect tourbillonnaire optique. La circulation de l'éther lumineux dans un interférographe tournant.— *J. phys. theor. appl.*, 1914, **4**, p. 177—195.

ную пластину и делится на два луча, причем луч T описывает замкнутый путь по часовой стрелке, луч R — против часовой стрелки. Выходя из пластины, лучи T и R проектируются объективом L на фотопластинку P . Рассмотрим время прохождения светом элемента пути mm' ; v — линейная скорость точки m . Разность времени про-

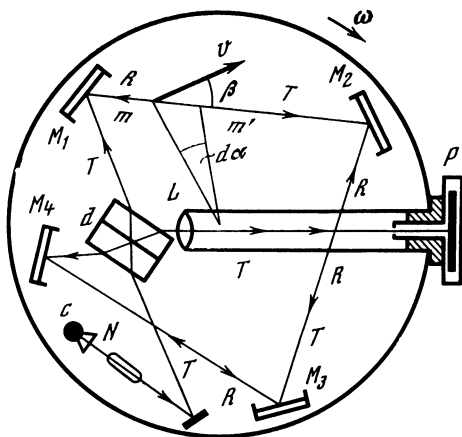


Рис. 5

хождения пути mm' лучом T при вращающемся и неподвижном интерферометре равна

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta l}{c-v} - \frac{\Delta l}{c} \approx \frac{v\Delta l}{c} + kv^2.$$

Для луча R имеем

$$\Delta t_2 = \frac{\Delta l}{c+v} - \frac{\Delta l}{c} \approx -\frac{v\Delta l}{c^2} + kv^2.$$

Разность времени, если пренебречь величинами выше второго порядка малости, будет

$$\Delta t = \frac{2\Delta lv}{c^2}.$$

Для полного пути задержка составит

$$\Delta T = \frac{2}{c^2} \int v dl.$$

Поскольку $v = \omega r \cos \beta$; $dl = r d\alpha / \cos \beta$;

$$\int v dl = 2\pi r^2 \omega = 2\omega S,$$

где S — площадь замкнутого контура, охватываемая лучом, ω — угловая скорость.

Разность хода в длинах волн $\Delta = 4\omega S/c\lambda$.

В опыте Саньяка отклонения экспериментальных данных от расчетных (при $S = 863$ см, $\lambda = 436$ мкм, $n = 1—2$ об/с) не превышали 2%. Исходя из этого результата, он рассчитал, что увеличение скорости света за счет движения источника (если допустить справедливость баллистической гипотезы) составляет менее 10^{-10} . Саньяк счел это подтверждением теории неподвижного эфира.

Важный вклад в интерпретацию опытов с вращающимся интерферометром внес Лауэ. Впервые он обратился к этой теме в связи с проектом опыта Майкельсона в 1911 г.¹²⁴ Лауэ показал, что если центр окружности покоится, то СТО дает тот же результат, что и теория эфира (данный опыт является фактически опытом первого порядка). Если центр окружности движется, то появляется различие в предсказаниях теорий, но оно лежит за пределами возможностей наблюдений. Лауэ пришел к выводу, что опыты с вращающимся интерферометром не могут быть использованы для выбора между СТО и теорией эфира.

Второй раз к этому вопросу Лауэ вернулся после того, как получила признание общая теория относительности (ОТО). В 1920 г., анализируя опыт Харреса, Лауэ¹²⁵ указал, что опыты с вращающимся интерферометром относятся к сфере ОТО, но, учитывая малую величину возникающих при вращении ускорений, можно их рассматривать на основе СТО. Лауэ показал, что с точки зрения СТО и в опыте Харреса, и в опыте Саньяка должны получаться те же результаты, что и с точки зрения теории эфира.

В 1923 г. к теории опытов с вращающимся интерферометром вернулся Зильберштейн¹²⁶. Он показал, что рассмотрение этой проблемы в ОТО приводит к тем же результатам, что и в теории неподвижного эфира. В этом же он видел возможность проверки теории относительности. Если опыт дает величину, соответствующую полностью неподвижному эфиру, то это будет доводом как в пользу теории эфира, так и в пользу ОТО. Но если смещение, наблюдаемое в опыте, будет соответствовать хотя бы

¹²⁴ *Laue M.* Об одном опыте оптики движущихся тел.— В кн.: *Laue M.* Статьи и речи. М.: Наука, 1969, с. 52—58.

¹²⁵ *Laue M.* Zum Versuch von Harress.— *Ann. Physik*, 1920, 62, S. 448—463.

¹²⁶ *Silberstein L.* The rotating Earth as a reference system for light propagation.— *Phil. Mag.*, 1924, 48 (6), p. 395—404.

частичному увлечению эфира, это будет доводом против ОТО. По настоянию Зильберштейна Майкельсон подготовил и осуществил совместно с Гейлем свой опыт, в котором использовалось вращение Земли вокруг оси.

Интерферометр Майкельсона—Гейля¹²⁷ представлял собой четырехугольник, составленный из труб общей длиной 1904 м. Большой контур охватывал площадь 0,208 км². Чтобы сохранить устойчивость интерференционных полос при столь большом оптическом пути, в трубах поддерживалось пониженное давление (10—20 мм рт. ст.). Использовался монохроматический свет с длиной волны 5700 Å. Ожидаемое смещение составляло $0,236 \pm 0,002$ полосы, наблюдалось же на опыте $0,230 \pm 0,005$. Для регистрации смещения был введен малый контур, площадь которого была столь мала, что сдвиг центральной полосы его интерференционной системы был ничтожен. В опыте измерялось смещение центральной полосы большого контура относительно центральной полосы малого контура при условии совпадения изображений источника света, даваемых каждой из систем зеркал. Результат опыта подтверждал и теорию неподвижного эфира, и теорию относительности.

20-е годы XX в. были отмечены оживлением в лагере антирелятивистов. Позиция СТО к этому времени достаточно окрепла, чему немало содействовало полученное в 1919 г. экспериментальное подтверждение ОТО.

Однако и противники СТО получили поддержку в опытах Миллера (1921—1926 гг.), обнаружившего ощутимый эфирный ветер. Если в теории эфира любой, даже небольшой, эфирный ветер мог найти объяснение, то СТО могла примириться только с нулевым результатом.

В феврале 1921 г. Миллер установил интерферометр, использовавшийся им еще в опытах 1905 г., на горе Маунт-Вильсон на высоте 6000 футов. В апреле 1921 г. было проведено 1300 измерений, объединенных в 117 серий. Был обнаружен дрейф эфира около 10 км/с в направлении на северо-запад. Чтобы устранить возможность неравномерного нагрева прибора, Миллер покрыл его слоем пробки толщиной в 1 дюйм, но это никак не отразилось на результатах. Возникло подозрение о том, что наблюдаемый эффект обязан происхождением магнитострикции.

¹²⁷ *Michelson A. A. The effect on the Earth rotation on the velocity of light. I. — Astrophys. J., 1925, 61, p. 137—139; Michelson A. A., Gale H. G. Idem. II, ibid, p. 140—145.*

Стальная основа, несущая зеркала, была заменена алюминиевой и деревянной. С немагнитным прибором в декабре 1921 г. Миллер провел еще 42 серии измерений. Результат был тот же, что и раньше. Условия опыта изменялись: менялась скорость вращения, наблюдатель находился то вблизи, то вдали от прибора, плечи интерферометра деформировались с помощью устанавливаемого груза — все это не влияло на результаты.

Миллер предположил, что наблюдаемый эффект обусловлен самим прибором, и в 1922—1923 гг. изучал его в лаборатории в Кливленде. Облучая интерферометр с помощью электрических спиралей, помещенных в фокусе рефлектора, Миллер обнаружил медленное смещение полос в одну сторону, но не получил периодических смещений, наблюдавшихся ранее, в опытах 1921 г. Он пытался применить фотографическую регистрацию, но большие размеры прибора обусловили недостаточную освещенность даже при использовании в качестве источника света электрической дуги. Наблюдался эфирный ветер порядка 2 км/с.

В сентябре 1924 г. прибор был вновь установлен на Маунт-Вильсон, были проведены 10 серий измерений. Результаты оказались те же, что в 1921 г. В марте — апреле 1925 г. было проведено еще 1600 измерений (35 серий). Благоприятные погодные условия содействовали тому, что температура в помещении изменялась очень мало ($0,1-0,4^\circ$), что должно было устранить возможные температурные «скачки», тем не менее снова наблюдался положительный эффект.

В своем отчете 1925 г. Миллер ¹²⁸ сделал вывод о существовании эфирного дрейфа со скоростью 9 км/с и о том, что опыт Майкельсона—Морли в действительности не дал нулевого результата.

Летом 1925 г. Миллер начал новый цикл опытов. Если раньше его целью была проверка нулевого результата опыта Майкельсона, то теперь он рассматривает свои опыты как способ измерения скорости и направления движения Земли относительно эфира. В 1925—1926 гг. Миллер провел измерения при 6400 оборотах интерферометра (каждому обороту соответствовали 16 измерений), в то время как все опыты до 1925 г. включали 1200 оборотов. Миллер истолковал результаты опы-

¹²⁸ *Miller D. Ether-drift experiments at Mount Wilson.— Proc. Nat. Acad. Sci., USA, 1925, 11, p. 306—314.*

тов так: обнаружен дрейф Земли относительно эфира со скоростью $10 \pm 0,5$ км/с. Его можно объяснить, допуская помимо движения Земли вокруг Солнца со скоростью 30 км/с движение Солнечной системы со скоростью 200 км/с относительно эфира по направлению к созвездию Дракона (прямое восхождение 255° , склонение $+68^\circ$).

Появление статьи Миллера в 1925 г. вызвало в печати оживленную полемику. Сторонникам СТО было ясно, что одними рассуждениями многочисленные и тщательные опыты Миллера не опровергнуть, нужны контрольные эксперименты.

В 1926 г. Кеннеди¹²⁹ построил интерферометр — копию первого неосуществленного проекта интерферометра Майкельсона, в котором для уменьшения температурных флуктуаций длина пути луча была уменьшена до 4 м. Оптическая часть прибора помещалась в герметический металлический кожух, заполненный гелием. У гелия показатель преломления значительно меньше, чем у воздуха, поэтому флуктуации давления и температуры в гелиевой атмосфере будут сказываться меньше. Поскольку чувствительность интерферометра была в 8 раз меньше, чем у Миллера, необходимо было разработать способ измерения малых смещений интерференционных полос. Для этой цели Кеннеди применил ступенчатое зеркало, у которого половина поверхности выступала над соседней на небольшую часть длины волны. Это приводило к тому, что в поле зрения трубы наблюдались две системы интерференционных полос. Если добиться равенства интенсивности этих систем при определенном положении полос, то в результате сдвига полос возникает пропорциональное ему изменение интенсивности одной системы относительно другой. Для улучшения видимости полос применялся монохроматический поляризованный свет. Практически можно было обнаружить сдвиг в 0,002 полосы. Время наблюдения и расположение прибора выбирались так, чтобы эфирный ветер, по предположению Миллера, был максимальным. Скорости 10 км/с соответствовал сдвиг 0,008 полосы. В действительности сдвиг обнаружить не удалось, т. е. он был меньше 0,002 полосы. Это означало, что скорость эфирного ветра не превышала 2 км/с.

¹²⁹ *Kennedy R. A refinement of the Michelson-Morley experiment.— Proc. Nat. Acad. Sci., USA, 1926, 12, p. 621—629.*

В 1927 г. Иллингворт¹³⁰ несколько усовершенствовал методику работы с интерферометром Кеннеди и сделал вывод о том, что верхняя граница скорости эфирного ветра не более 1 км/с. Большой разброс полученных им результатов не вызывает, впрочем, особого доверия к найденному им значению.

В 1926—1927 гг. с целью проверки зависимости скорости эфирного дрейфа от высоты Пикар и Стаэль¹³¹ подняли на воздушном шаре небольшой интерферометр с длиной оптического пути 280 см, помещенный в герметический термостатированный контейнер. Шар медленно равномерно вращался с помощью электромотора. Сдвиг интерференционных полос регистрировался автоматически на движущуюся фотопленку. На высоте 2500 м скорость эфирного ветра не превышала 9 км/с. В связи с тем, что в этом опыте случайные ошибки были велики из-за заметного температурного дрейфа, Пикар и Стаэль повторили опыт на горе Риги в Швейцарии на высоте 1800 м. Был зарегистрирован эфирный ветер со скоростью около 2,5 км/с.

Для обсуждения результатов опытов Миллера в феврале 1927 г. в обсерватории Маунт-Вильсон была проведена конференция¹³². В ней принимали участие Лоренц, Майкельсон, Эпштейн, Кеннеди, Миллер, Хедрик и др.

Майкельсон высказал мнение, что, видимо, Миллер получил положительный эффект. Этот эффект не может быть обусловлен орбитальным движением Земли. По всей вероятности, он объясняется движением Солнечной системы относительно звезд с очень большой скоростью. Майкельсон высоко оценил опыт Кеннеди и сообщил о своих предполагаемых опытах по проверке эффекта Миллера.

Миллер рассказал о результатах своих исследований. Он сообщил, что указанные им скорость и направление движения Солнечной системы, хотя и противоречат прежним представлениям астрономов, однако согласуются с некоторыми новыми результатами изысканий, в частности с результатами Штремберга и Лундмарка. Миллер заявил о своем намерении провести дополнительную серию

¹³⁰ *Illingworth K. K.* A repetition of the Michelson—Morley experiment using Kennedy's refinement.— *Phys. Rev.*, 1927, 30, p. 692—696.

¹³¹ *Piccard A., Stahel E.* Réalisation de l'expérience de Michelson en ballon et sur terre ferme.— *J. Phys.*, 1928, 9 (6), p. 49—60.

¹³² Conference on the Michelson—Morley experiments.— *Astrophys. J.*, 1928, 68, p. 341—402.

измерений в Кливленде для сравнения с полученными на Маунт-Вильсон.

Кеннеди сообщил о результатах своих опытов: измерения на уровне моря и в обсерватории Маунт-Вильсон не обнаружили дрейфа, найденного Миллером.

Хедрик вновь вернулся к теории опыта Майкельсона. Он получил иным способом формулы для разности хода лучей и изменения угла отражения лучей на движущейся поверхности с учетом членов второго порядка, выведенные Ригги. По мнению Хедрика, из этих формул вытекает, что измеряемая разность хода зависит от начальной юстировки прибора. Если эту юстировку не контролировать, то полученные результаты будут иметь случайное распределение и их нельзя усреднить.

Эпштейн указал, что предлагаемые Хедриком поправки на опыте необнаружимы, но что в целом теория Хедрика важна для интерпретации опыта Кеннеди.

Лоренц отметил, что различия между теорией Хедрика и общепринятой заметны в членах второго порядка и должны влиять на численные результаты в опыте Майкельсона. В то время как Хедрик оперирует с волновыми фронтами на основе принципа Гюйгенса, Лоренц применяет принцип Ферма к световым лучам. Лоренц считал свой подход более простым. Он допускал, что причина противоречия между теориями связана с путаницей между нормальными к волновым фронтам и лучам. По поводу опытов Миллера Лоренц указал, что вряд ли удастся избежать опасения, что весь эффект может происходить от какого-либо побочного лабораторного фактора.

Участники конференции не пришли к общему мнению о причинах эффекта Миллера. Была отмечена необходимость уточнения теории отражения и преломления света в движущихся телах.

В 1929 г. был опубликован краткий отчет об опытах, предпринятых в 1926—1928 гг. Майкельсоном совместно с Пизом и Пирсоном¹³³. Различные варианты опытов дали отрицательный результат. Один из них был осуществлен на Маунт-Вильсон для проверки гипотезы, высказанной Штрембергом и поддержанной Миллером, о том, что Солнечная система движется к точке в созвездии Дракона со скоростью около 300 км/с. Наблюдаемое смещение было в 15 раз меньше ожидаемого.

¹³³ *Michelson A. A., Pease F. G., Pearson F.* Repetition of the Michelson--Morley experiment.— *JOSA*, 1929, 18, p. 181—182.

Последним из серии контрольных опытов был опыт, поставленный Иосом¹³⁴ в 1930 г. в Иене. Интерферометр по размерам был подобен миллеровскому: длина плеча 3,5 м, длина оптического пути 21 м. Интерферометр, смонтированный на кварцевом основании, помещался в герметический металлический кожух, из которого откачивался воздух. Был применен монохроматический свет, интерференционные полосы фотографировались. Верхняя граница регистрируемого эфирного дрейфа составила 1,5 км/с.

Интересно, что в 1933 г. в большой статье об итогах своих работ Миллер¹³⁵ отказался признать, что эксперименты последних лет опровергают его результаты. По его мнению, во всех этих опытах, где интерферометр был заключен в металлический футляр или помещался в комнатах с массивными стенами, ниже уровня земли и т. д., были нарушены условия для свободного движения эфира. Это делает результаты этих опытов несопоставимыми с его собственными.

Глава 4

ОПЫТЫ ПО ПРОВЕРКЕ ПОСТУЛАТОВ СТО НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

1. Опыты по проверке первого постулата СТО

В 30-е годы СТО стала общепринятой. Тем не менее отдельные попытки противопоставить ей теорию эфира продолжались. Дискуссия перешла в иную плоскость: антирелятивисты пытались доказать, что все явления, объясняемые СТО, так же хорошо объяснимы и в теории эфира. Из эфирных теорий наиболее распространенной была теория Лоренца, включающая контракционную гипотезу. Лоренц еще в 1928 г. высказывался по поводу эффекта сокращения: «Оно так же реально, как все, что мы наблюдаем»¹³⁶.

Кеннеди и Торндайк¹³⁷ в 1932 г. пытались обнаружить с помощью неравноплечего интерферометра эфирный ве-

¹³⁴ Joos G. Wiederholungen des Michelson-Versuchs.— Naturwis., 1931, 19, S. 784—789.

¹³⁵ Miller D. C. The Ether-drift experiment.— Rev. Mod. Phys., 1933, 5, p. 203—242.

¹³⁶ Conference on the Michelson—Morley experiments, p. 351.

¹³⁷ Kennedy R., Thorndike E. Experimental establishment of the relativity of time.— Phys. Rev., 1932, 39 (2), p. 871.

тер, обусловленный суточным вращением Земли. Отрицательный результат опыта они истолковали так: плечо интерферометра действительно сокращается в направлении движения, но мы не замечаем этого сокращения, ибо одновременно изменяется ход часов.

В 1936 г. новый метод проверки лоренцевского сокращения предложили Вуд, Томлинсон и Эссен¹³⁸. Частота колебаний кварцевого генератора зависит от длины кварцевого стержня. Если при вращении генератора длина стержня периодически сокращается, это приведет к изменению частоты генератора. Изменение частоты генератора проверяется методом биений с помощью другого неподвижного генератора. Многократные повторения опыта в различное время суток и разное время года показали, что с точностью до $4 \cdot 10^{-11}$ частота генератора при его вращении остается неизменной. Отрицательный результат опыта был истолкован как подтверждение СТО. Интересно отметить, что авторы опыта приписывали СТО положение о реальном сокращении длины. В этом отношении они интерпретировали результат опыта так: изменение длины стержня компенсировалось изменением его упругости. В действительности такой вывод можно сделать с точки зрения теории эфира. Подобная гипотеза позволяет объяснить и неудачу прежних попыток обнаружить лоренцево сокращение.

В 30-е годы большой интерес вызывало изучение квадратичного доплер-эффекта. Этот эффект впервые был предсказан в 1907 г. Эйнштейном¹³⁹. Пусть φ — угол между направлением скорости источника и лучом, ν — частота света в системе, где покоится наблюдатель, ν_0 — частота света в системе, где покоится источник. Тогда

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \varphi}.$$

При наблюдении в направлении, перпендикулярном лучу света,

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2} \simeq \nu_0 \left(1 - \frac{1}{2} \beta^2\right).$$

Если рассматривать атом, излучающий волны с частотой

¹³⁸ Wood A., Tomlinson G., Essen L. The effect of the Fitzgerald—Lorentz contraction on the frequency of longitudinal vibration of a rod.— Proc. Roy. Soc., 1937, 158A, p. 606.

¹³⁹ Эйнштейн А. О принципе относительности и его следствиях.— В кн.: Эйнштейн А. Собр. науч. трудов, т. 1. М.: Наука, 1965, с. 74—78.

той ν_0 , как часы с периодом T_0 , то в системе наблюдателя период колебаний

$$T = T_0 / \sqrt{1 - \beta^2},$$

откуда $\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2} \simeq \nu_0 \left(1 - \frac{\beta^2}{2}\right)$.

Таким образом, квадратичный доплер-эффект можно рассматривать как подтверждение релятивистского эффекта сокращения времени.

На реальную возможность проведения подобных опытов с каналовыми лучами указал Эйнштейн, ознакомившись с работами Штарка по изучению линейного доплер-эффекта в каналовых лучах.

С другой стороны, приверженцы теории эфира считали, что квадратичный доплер-эффект позволяет измерить скорость Земли относительно эфира. В самом деле, если источник света и наблюдатель движутся с соответствующими скоростями u и v по одной линии, то воспринимаемая частота равна

$$\begin{aligned} \nu &= \nu_0 \frac{1 \pm \frac{u}{c}}{1 \pm \frac{v}{c}} = \nu_0 \left(1 \pm \frac{u}{c}\right) \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)^{-1} \cong \\ &\cong \nu_0 \left(1 \pm \frac{u - v}{c} - \frac{uv}{c^2}\right). \end{aligned}$$

Очевидно, что ν зависит не только от относительной скорости наблюдателя и источника, но и от их абсолютных скоростей.

Длительное время не удавалось достичь нужной чувствительности эксперимента. Начальное смещение спектральной линии маскировалось ее расширением, вызванным распределением скоростей в значительном интервале. Первоначально предполагалось наблюдать излучение под прямым углом к направлению движения частиц, однако выяснилось, что даже небольшое отклонение угла от прямого приводит к появлению продольной компоненты доплеровского смещения, перекрывающей поперечный эффект.

Первые опыты, в которых удалось решить проблему, были выполнены Айвсом и Стилуэллом¹⁴⁰ в 1938—1941 гг.

¹⁴⁰ *Ives H. E., Stilwell G. R.* An experimental study of the rate of a moving atomic clock.— *JOSA*, 1938, 28, p. 215—226; 1941, 31, p. 369—374.

Они наблюдали излучение, направленное вдоль пучка частиц. С помощью вогнутого зеркала, установленного под углом 7° к направлению движения частиц, можно было наблюдать одновременно излучение во взаимно противоположных направлениях. Скорость частиц вычислялась по приложенному напряжению, а также по продольному доплеровскому смещению. Совпадение экспериментальных и расчетных данных наблюдалось с точностью порядка 10%.

Айвс интерпретировал эффект замедления времени в духе теории эфира, приписывая этому эффекту такой же реальный характер, как эффекту сокращения длины. Формула, полученная им из теории Лоренца—Лармора, совпадала с релятивистской¹⁴¹.

Релятивистскую трактовку опытов дал Джонс¹⁴². Иным методом для измерения квадратического смещения воспользовался в 1939 г. Оттинг. Точность его опытов была на таком же уровне, как у Айвса и Стилуэлла. В 1962 г. Мандельберг и Уиттен¹⁴³ повторили опыт Айвса—Стилуэлла со значительно меньшей погрешностью.

Появление в послевоенный период новой техники позволило увеличить точность оптических опытов и значительно расширить диапазон применяемых электромагнитных волн.

В 50-е годы проводятся первые повторения опыта Майкельсона для радиоволн микроволнового диапазона. В 1954 г. Ф. Литтман¹⁴⁴ предложил осуществить следующий опыт. Полый резонатор длиной l питается от микроволнового генератора. Условие резонанса в отсутствие эфирного ветра

$$v = \frac{nc}{2l}.$$

¹⁴¹ *Ives H. E.* Light signals on moving bodies as measured by transported rods and clocks.— *JOSA*, 1937, 27, p. 263—273; Apparent lengths and times in system experiencing the Fitzgerald — Larmor — Lorentz contractions.— *JOSA*, 1937, 27, p. 310—313; The doppler-effect considered in relation to the Michelson—Morley experiment.— *JOSA*, 1937, 27, p. 389—392.

¹⁴² *Jones R. C.* On the relativistic doppler-effect.— *JOSA*, 1939, 29, p. 337—339.

¹⁴³ *Mandelberg H. I., Witten L.* Experimental verification of the relativistic doppler-effect.— *JOSA*, 1962, 52, p. 529—536.

¹⁴⁴ *Littman F.* Proposal for a new ether-drift experiment.— *Nature*, 1954, 173, p. 80—81; 174, p. 505—506.

При наличии эфирного ветра изменяется скорость радиоволн, поэтому при ориентации резонатора вдоль направления движения Земли резонансная частота равна

$$v_1 = v \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right),$$

а при повороте резонатора на 90° имеем частоту

$$v_2 = v \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = v \left(1 - \frac{v^2}{2c^2} \right).$$

Эссен ¹⁴⁵ предложил для увеличения точности включить резонатор в качестве стабилизатора в схему самого генератора. Это позволило бы сравнивать его частоту с частотой стандартного кварцевого генератора. Опыт был осуществлен Эссеном в 1955 г. Цилиндрический резонатор, настроенный на частоту 9200 МГц, вращался в горизонтальной плоскости со скоростью 1 об/мин. Частота генератора сравнивалась с частотой кварцевого стандарта через каждые 45° .

Кромби ¹⁴⁶ предложил усовершенствовать метод Эссена, применив метод фазового детектора. Возникающий при вращении резонатора сигнал низкой частоты усиливался узкополосным усилителем, исключавшим действие случайных помех. Затем сигнал выпрямлялся с помощью синхронного детектора и шел на регистратор. Кромби полагал таким образом увеличить чувствительность, достигнутую Эссеном, в 200 раз. Он полагал также, что с помощью его метода можно заметно увеличить точность опыта А. Вуда — Толлинсона — Эссена.

Новые возможности повышения точности опытов типа Майкельсона появились с созданием квантовых генераторов.

Среди опытов второго порядка отметим опыт, проведенный в 1964 г. Таунсом с сотрудниками ¹⁴⁷. Два газовых лазера были установлены взаимно перпендикулярно. Разделительная пластинка направляла оба луча на фотодетектор. Регистрировалась частота биений лазерных пучков $\Delta\nu$. При повороте установки на 90° должно про-

¹⁴⁵ *Essen L.* A new ether-drift experiment.— *Nature*, 1955, 175, p. 793—794.

¹⁴⁶ *Crombi D.* Proposal for a new aether-drift experiment.— *Nature*, 1955, 175, p. 350—351.

¹⁴⁷ *Jaseja T., Javan, A., Murray J., Townes C.* Test of special relativity or of the isotropy of space by use of infrared maser.— *Phys. Rev.*, 1964, 133A, p. 1221—1225.

изойти изменение частоты, обусловленное эфирным ветром, $\Delta\nu/\nu = 0,5 \beta^2$. При $\nu = 3 \cdot 10^{14}$ Гц $\Delta\nu = 3 \cdot 10^6$ Гц. На опыте наблюдалось изменение частоты $3 \cdot 10^3$ Гц, что соответствовало скорости эфирного ветра 30 м/с.

Шамир и Р. Фокс¹⁴⁸ повторили опыт Майкельсона с одним лазером. В оба плеча интерферометра были введены стеклянные стержни одинаковой длины. Опыт показал отсутствие эфирного ветра со скоростью, превышающей 6,6 км/с.

Наибольший интерес вызвали опыты первого порядка с двумя источниками. Возможность таких опытов была обусловлена высокой стабильностью мазеров и лазеров.

Мёллер¹⁴⁹ предложил осуществить следующий опыт. Пусть два лазера установлены на вращающейся рейке так, что их резонаторы горизонтальны, а возбужденные молекулы газа (аммиака) движутся навстречу друг другу. По теории неподвижного эфира для каждого пучка частота будет

$$\nu = \nu_0 \left[1 + \frac{eu}{c} + \frac{(eu)^2}{c^2} + \frac{\nu u}{c^2} \right],$$

где e — единичный вектор в направлении излучения, u — скорость молекул, v — скорость Земли относительно эфира, ν_0 — частота излучения при $v = 0$. Так как молекула излучает перпендикулярно направлению своего движения, то

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{\nu u}{c^2} \right).$$

Знак второго члена для двух пучков различен, поэтому при повороте на 180° изменение частоты равно

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{2uv}{c^2}.$$

В 1958 г. подобный опыт был поставлен Таунсом с сотрудниками¹⁵⁰. В опыте измерялась частота биений. При неподвижной установке выбиралась частота биений 20 Гц. За счет эфирного дрейфа изменение частоты бие-

¹⁴⁸ Shamir J., Fox R. A new experimental test of special relativity.— Nuov. Cim., 1969, 62B, p. 258—264.

¹⁴⁹ Möller C. On the possibility of terrestrial tests of theory of relativity.— Nuov. Cim., Suppl., 1957, 6, p. 381.

¹⁵⁰ Gedarholm J., Bland G., Havens B., Townes C. New experimental test of special relativity.— Phys. Rev. Letters, 1958, 1, p. 342—343.

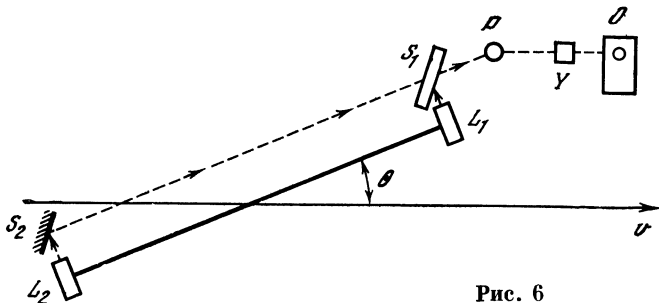


Рис. 6

ний, согласно расчетам, должно было составлять 20 Гц. При благоприятных условиях (низкий уровень помех) изменение частоты дрейфа составило 0,02 Гц, т. е. зафиксированная скорость дрейфа оказалась равной 0,03 км/с. В повторном опыте 1959 г. значение этой величины оказалось в 2 раза меньшим.

Г. М. Страховский¹⁵¹ в 1958 г. предложил опыт первого порядка, в котором можно было измерить разность фаз двух несинхронизированных мазеров. Мазеры следовало установить на поворотной станине на расстоянии L друг от друга. За счет эфирного ветра изменение времени распространения сигнала при повороте станины на 180° равно

$$\frac{\Delta t}{t} = \left(\frac{L}{c-v} - \frac{L}{c+v} \right) / t = \frac{2\beta}{1-\beta^2} \approx 2\beta.$$

Разность фаз можно определить с помощью вспомогательного мазера по фигуре Лиссажу на экране осциллографа. Требуется стабильность частоты порядка 10^{-12} .

В 1972 г. был поставлен подобный опыт с двумя гелий-неоновыми лазерами¹⁵². Лазеры устанавливали на поворотной оптической скамье. Оба пучка волн от лазеров L_1 и L_2 накладывались на полупрозрачном зеркале S_2 (рис. 6) и попадали на фотодетектор. Излучение лазеров содержало три гармоники, сдвинутые на 580 МГц. Разностные частоты усиливались усилителем $У$ и попадали

¹⁵¹ Басов Н. Г., Крохин О. Н., Ораевский А. Н. и др. О возможности исследования релятивистских эффектов с помощью молекулярных и атомных стандартов частоты. — УФН, 1961, 75, с. 3—60.

¹⁵² Cialdea R. A new test of the second postulate of special relativity sensitive first-order effects. — Nuov. Cim., 1972, 4, p. 821—825.

на осциллограф. По сдвигу картины модулированных колебаний на экране осциллографа определялась разность фаз при повороте оптической скамьи на 180° . Разность фаз связана со скоростью эфирного ветра формулой

$$\delta = \frac{8\pi}{3} \frac{lv}{\lambda c}.$$

В опыте было $l = 160$ см, $\lambda = 6328$ Å. Опыт зафиксировал отсутствие эфирного ветра со скоростью более $0,9$ м/с.

Серия опытов первого порядка была поставлена с кольцевыми лазерами. В кольцевом лазере два луча проходят одинаковые пути: один — по часовой стрелке, а другой — против часовой стрелки. Если лазер перемещается как целое или если движутся исследуемые тела, помещенные внутрь установки, то возникают биения, частота которых и регистрируется. Кольцевой лазер обычно имеет форму квадрата или треугольника.

Мачек и Дэвис¹⁵³ применили схему квадратного лазера для осуществления варианта опыта Саньяка (рис. 7). В данном опыте

$$\frac{\Delta v}{v} = \omega l/c,$$

где ω — угловая частота, l — сторона квадрата.

Заменив один из резонаторов исследуемым твердым телом или кюветой с жидкостью или газом, Мачек, Шнейдер и Саламон¹⁵⁴ измеряли френелевский коэффициент увлечения. Для воздуха и кварца они получили хорошее согласие с теорией, для жидкости (CCl_4) — худшее. Общая схема этих опытов соответствует схеме опытов Физо—Зеемана.

В 1971 г. Бильгер и Заводны¹⁵⁵ измерили коэффициент увлечения для кварца. Применялся гелий-неоновый лазер, собранный по треугольной схеме. Кварцевый диск, вращающийся со скоростью 100 — 2500 об/мин, пересекал лазерный луч. При этом получились биения частоты 1 — 50 кГц. По формуле Лоренца для $\lambda = 0,6328$ мм коэффициент увлечения равен $0,5423$. На опыте получилось

¹⁵³ Macek W., Davis D. Rotating note sensing with traveling wave ring lasers.— Appl. Phys. Lett., 1963, 2, p. 67—68.

¹⁵⁴ Macek W., Schneider J., Salamon R. Measurement of Fresnel drag with the ring laser.— J. Appl. Phys., 1964, 35, p. 2556—2557.

¹⁵⁵ Bilger H., Zavodny A. Fresnel drag in a ring laser: measurement of the dispersive term.— Phys. ev., 1972, 5A, p. 591—599.

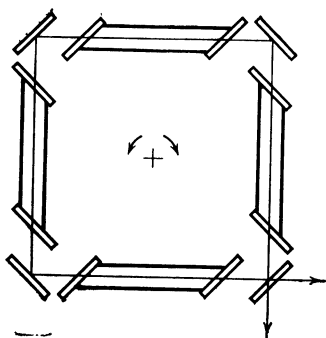


Рис. 7

$k = 0,541 \pm 0,003$, что рассматривалось как подтверждение формулы Лоренца.

Паркс и Доуэлл¹⁵⁶ подвергли критике этот вывод. По их мнению, точность опыта не позволяла сделать выбор между формулами Лоренца и Лауба (по формуле Лауба в этом опыте получается $k = 0,5381$). Они считали, что расположение вращающегося диска в опыте таково, что расчет следует проводить по формуле Лауба, а не Лоренца.

Большой интерес представляют опыты первого порядка с использованием эффекта Мессбауэра, позволяющего с очень большой точностью регистрировать изменения частоты резонансного поглощения γ -квантов.

В 1961 г. Чемпни и Мун¹⁵⁷ проделали следующий опыт. Источник γ -квантов (изотоп Co^{57} , введенный в фольгу Fe^{56}) и поглотитель размещались на противоположных концах ротора, вращающегося вокруг оси, проходящей через центр, и помещенного в вакуумную камеру. Счетчик γ -лучей ставился снаружи за специальным окном. Авторы предполагали обнаружить поперечный доплер-эффект $\Delta\nu/\nu = 2\beta^2$.

В условиях опыта скорость счета γ -квантов при скорости вращения 600 об/с должна быть на 9,4% больше, чем при 100 об/с. В действительности увеличение составило всего $(-0,8 \pm 2,0)\%$. С точки зрения ОТО

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{(R_2^2 - R_1^2)\omega^2}{2c^2},$$

где R_1 и R_2 — расстояния от центра до излучателя и поглотителя, ω — угловая скорость. Так как в опыте $R_1 = R_2$, то $\Delta\nu = 0$. Таким образом, данный опыт следует интерпретировать в рамках ОТО, а не СТО.

¹⁵⁶ Parks W., Dowell J. Fresnel drag in uniformly moving media.— Phys. Rev., 1974, 9 A, p. 565—566.

¹⁵⁷ Champney D., Moon P. Absence of Doppler shift for gamma ray source and detector on same circular orbit.— Proc. Phys. Soc., 1961, A77, p. 350—351.

С точки зрения Мёллера¹⁵⁸ этот опыт можно рассматривать, как вариант опыта Майкельсона. Мёллер считает, что в лабораторной системе излучаемая и поглощаемая частоты определяются формулами

$$\nu = \nu_0 \left[1 + \frac{\mathbf{e} \mathbf{u}_s}{c} + \frac{(\mathbf{e} \mathbf{u}_s)^2}{c^2} + \frac{\nu \mathbf{u}_s}{c^2} \right],$$

$$\nu = \nu_a \left[1 + \frac{\mathbf{e} \mathbf{u}_a}{c} + \frac{(\mathbf{e} \mathbf{u}_a)^2}{c^2} + \frac{\nu \mathbf{u}_a}{c^2} \right],$$

где ν_0 и ν_a — соответственно частота, излучаемая источником, и частота, воспринимаемая поглотителем, в системе отсчета, где они покоятся, \mathbf{u}_s и \mathbf{u}_a — скорости источника и поглотителя в лабораторной системе отсчета. Переходя от лабораторной системы к системе, связанной с ротором, и учитывая, что $\mathbf{u}_s = \mathbf{u}_a$, имеем

$$\nu_a = \nu_0 \left(1 + \frac{R\omega v \cos \theta}{c^2} \right),$$

где θ — угол между направлением эфирного дрейфа и скоростью поглотителя. При вращении ротора θ изменяется от 0 до 360° и соответственно изменяется частота, воспринимаемая поглотителем, что должно дать уменьшение скорости счета.

В 1963 г. Чемпни, Айзек и Хан¹⁵⁹ повторили этот опыт, введя некоторые усовершенствования. Они пришли к выводу, что если эфирный дрейф, обусловленный движением Земли, существует, то его скорость не превышает $(1,6 \pm 2,8)$ м/с.

2. Опыты по проверке второго постулата СТО

Особое внимание в последние годы было уделено проверке второго постулата СТО. Было показано, что начальный вариант баллистической теории, опиравшийся на гипотезу Ритца о том, что неподвижные тела не могут изменить скорость света, не соответствовал опытам де Ситтера, Майораны и др. Гипотезу Толмена о том, что после отражения и преломления на неподвижных телах свет от движущегося источника приобретает скорость c , распространили и на дифракцию. Поэтому прибор, в ко-

¹⁵⁸ *Moller C.* New experimental tests of the special principle of relativity.— Proc. Roy. Soc., 1962, 270A, p. 306—314.

¹⁵⁹ *Champney D., Isaac G., Khan M.* An ether-drift experiment based on the Mössbauer effect.— Phys. Lett., 1963, 7, p. 241—243.

тором происходит отражение, преломление или дифракция на неподвижных телах, непригоден для анализа изменений скорости света. Например, ни интерферометр Ллойда в опыте Толмена, ни интерферометр Майкельсона в опыте Майораны не могут обнаружить изменений скорости света, ибо после прохождения щели или разделительной пластинки скорость света становится равной c .

Этот фактор учел Кантор¹⁶⁰, поставивший в 1962 г. опыт по проверке баллистической теории. По мнению Кантора, движущиеся стеклянные пластинки должны изменить скорость проходившего сквозь них света как внутри стекла, так и в воздухе на пути до ближайшего неподвижного зеркала. В опыте Кантора (рис. 8) две тонкие стеклянные пластинки укреплялись на противоположных краях ротора. Изменение скорости света определялось с помощью интерферометра Майкельсона. Частично световой пучок проходил сквозь пластины, частично — мимо, поэтому в поле зрения наблюдались две интерференционные картины. Если на некоторых участках оптического пути скорость света изменяется при вращении ротора, то должен наблюдаться взаимный сдвиг интерференционных картин.

Пусть за счет увлечения телом скорость света изменяется так: $c' = c + kv$ (в баллистической теории $k = 1$, в СТО $k = 0$). Тогда в опыте Кантора должен был наблюдаться сдвиг в 0,74 полосы. На опыте наблюдался сдвиг в 0,5 полосы, что Кантор истолковал как доказательство увлечения света при $k = 2/3$.

Статья Кантора вызвала много откликов. Были сделаны попытки обоснования наблюдаемого сдвига на основе ОТО¹⁶¹. Опыт Кантора был повторен в 1963—1965 гг. в различных вариантах¹⁶²: применялся монохроматиче-

¹⁶⁰ *Kantor W.* Direct first-order experiment on the propagation of light from a moving source.— *JOSA*, 1962, 52, p. 978—984.

¹⁶¹ *Vysin V.* The possibility of an interpretation of Kantor's direct first order experiment on the propagation of light from a moving source.— *Phys. Lett.*, 1964, 8, p. 36—37.

¹⁶² *James J., Sternberg R.* Change in velocity of light emitted by a moving source.— *Nature*, 1963, 197, p. 1192; *Babcock G., Bergmann T. D.* Determination of the constancy of velocity of electromagnetic radiation.— *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1964, 68D, p. 1265—1268; Test of the constancy of velocity of electromagnetic radiation of high vacuum.— *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1965, 69D, p. 623—628; *Waddoups R., Edwards W., Merrill J.* Experimental investigation of the second postulate of special relativity.— *JOSA*, 1965, 55, p. 142—143,

ский свет, свет лазера, давление воздуха менялось от нормального атмосферного до 10^{-7} мм рт. ст. На роль воздуха обратил внимание Дж. Фокс¹⁶³. По его мнению, молекулы воздуха, как и других тел, являются ретрансляторами света, и при обычном давлении достаточно слоя воздуха толщиной в 1 мм, чтобы сообщить большей части фотонов постоянную скорость c . При уменьшении давле-

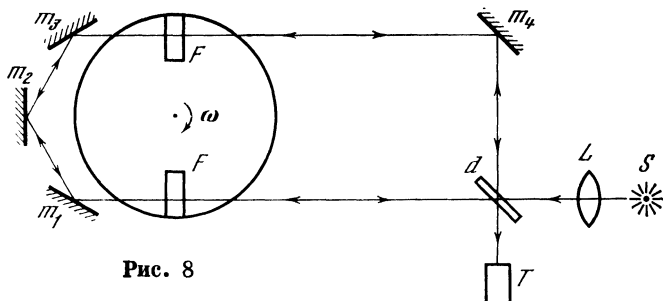


Рис. 8

ния воздуха толщина поглощающего слоя растет. Результаты всех контрольных опытов были истолкованы как опровержение опыта Кантора и как подтверждение постоянства скорости света (было высказано предположение, что положительный эффект у Кантора обусловлен тепловыми потоками воздуха)¹⁶⁴.

В 1963—1964 гг. была проведена серия опытов по проверке второго постулата для γ -лучей. В связи с тем, что γ -лучи очень слабо поглощаются воздухом, изменение их скорости из-за эффекта ретрансляции было маловероятным.

Альвегер, Нильссон и Кьеллман¹⁶⁵ измеряли скорость γ -лучей, испускаемых движущимися и покоящимися атомными ядрами. Возбужденные ядра C^{12*} с энергией 4,43 МэВ имеют период полураспада $6,5 \cdot 10^{-14}$ с и успевают излучить γ -квант до своей остановки, а возбужденные ядра O^{16*} с энергией 6,13 МэВ имеют сравнительно боль-

¹⁶³ Fox J. Experimental evidence for the second postulate of special relativity.— Amer. J. Phys., 1962, 30, p. 297—300; Evidence against emission theories.— Amer. J. Phys., 1965, 33, p. 1—17; Constancy of the velocity of light.— JOSA, 1967, 57, p. 967—968.

¹⁶⁴ Zahejsky J., Kolesnikov V. Optical experiment to verify the second. Postulate of the special theory of relativity.— Nature, 1966, N 5087, p. 1227.

¹⁶⁵ Alväger T., Nilsson A., Kjellmann J. A direct terrestrial test of the second postulate of special relativity.— Nature, 1963, 197, p. 1191.

шой период полураспада $1,2 \cdot 10^{-11}$ с и излучают γ -квант уже после остановки. Скорость ядер определялась по доплеровскому смещению. Углеродные и кислородные мишени, в которых получались возбужденные ядра при облучении γ -частицами, располагались на расстоянии 30 см друг от друга, и их можно было менять местами. Разность времен пролета γ -квантов измерялась с помощью двух приемников, один из которых находился в 1 м от мишеней, а другой — в 5 м. Если скорость γ -квантов не зависит от скорости ядер, то разница времен пролета квантов при перемене мишеней местами в обоих приемниках будет одинакова. Если же скорость ядер прибавляется к скорости γ -квантов, то разность времен пролета γ -квантов, испущенных ядрами C^{12*} и O^{16*} , в опыте должна была составить $\Delta\tau = 0,5 \cdot 10^{-9}$ с. Авторы сделали вывод, что результат подтверждает второй постулат (было получено $\Delta\tau = (-0,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-9}$ с).

Саде ¹⁶⁶ измерял время пролета двух γ -квантов, получаемых при аннигиляции летящего позитрона с электроном мишени. Энергия этих γ -квантов была порядка 0,5 МэВ.

Интерес представляли позитроны, аннигилирующие на лету. В этом случае центр масс системы электрон—позитрон перед аннигиляцией обладал определенной скоростью, от величины которой зависели углы разлета γ -квантов. В опыте счетчики γ -квантов устанавливали под углами $\theta = 20$ и $\theta = 135^\circ$ к направлению позитронного пучка на одинаковых расстояниях от мишеней. Если скорость γ -квантов не зависит от движения центра масс, то в условиях опыта должна наблюдаться разность времен пролета $2 \cdot 10^{-9}$ с. С точностью до 10% была зафиксирована нулевая разность, т. е. подтвержден второй постулат.

Филиппас и Дж. Фокс ¹⁶⁷ пришли к выводу, что результаты предыдущих опытов с γ -лучами недостоверны, поскольку не учитывалось поглощение. Чтобы уменьшить поглощение, они использовали γ -лучи большой энергии (68 МэВ), получающиеся при распаде Π^0 -мезонов.

Π^0 -мезоны образуются при бомбардировке жидкого

¹⁶⁶ Sadeh D. Experimental evidence for the constancy of the velocity of gamma rays, using annihilation in flight.— Phys. Rev. Lett., 1963, 10, p. 271—273.

¹⁶⁷ Filippas T., Fox J. Velocity of gamma rays from a moving source.— Phys. Rev., 1964, 135, p. 1071—1075.

водорода пучком Π^- -мезонов, вылетающих из ускорителя. Образующиеся в данной реакции Π^0 -мезоны всегда имеют постоянную скорость ($v = 0,2$ с). Счетчики устанавливаются так, чтобы регистрировать γ -кванты, разлетающиеся под углом 180° . В этом случае один квант летит в том же направлении, что и Π^0 -мезон, а другой — в противоположном. Если скорость γ -квантов зависит от скорости источника ($c' = c + kv$), то должна наблюдаться разность времен пролета. Достоверно авторам удалось показать только то, что $k < 0,5$, т. е. что простого сложения скоростей не происходит. Они сделали вывод о постоянстве скорости света в пределах ошибок измерений, но ошибки в их опыте велики. Была отмечена трудность учета степени поглощения γ -лучей.

Подобный опыт Альвегер с сотрудниками¹⁶⁸ провел на ускорителе в ЦЕРНе. Π^0 -мезоны, получающиеся при бомбардировке бериллия быстрыми протонами, давали при распаде γ -кванты очень высокой энергии (6 ГэВ). По мнению авторов, для таких квантов поглощением можно пренебречь. Они получили коэффициент увлечения равным $k = (-3 \pm 13)10^{-5}$, что можно рассматривать как убедительное подтверждение второго постулата.

Кантор¹⁶⁹ указал, что интерпретация опытов с γ -лучами отнюдь не так проста, как кажется с первого взгляда. Вывод о постоянстве скорости γ -квантов делается на основе некоторых недостаточно проверенных предпосылок. Так, измерение скорости частиц производится косвенными методами, разработанными на основе формул, учитывающих постоянство скорости света. Кантор считает, что теория поглощения Фокса, являющаяся экстраполяцией теории нормальной дисперсии для видимого спектра, не имеет экспериментального обоснования в области γ -лучей.

В 1969—1971 гг. были предприняты новые попытки опровергнуть второй постулат СТО. Материалом для этого послужили результаты радиолокационных измерений расстояния от Земли до Венеры, выполненных в 1961—1966 гг. Уоллес¹⁷⁰ пришел к выводу, что все труд-

¹⁶⁸ *Alväger T., Farley F., Kjellmann J., Wallin J.* Test of the second postulate of special relativity. — *Phys. Lett.*, 1964, 12, p. 260—262.

¹⁶⁹ *Kantor W.* Speed of gamma rays emitted by high speed particles. — *Spectr. Letters*, 1971, 4, p. 245—253.

¹⁷⁰ *Wallace B.* Radar testing of the relative velocity of light in space. — *Spectr. Lett.*, 1969, 2, p. 361—367; Radar-evidence that the velocity of light in space is not c . — *Spectr. Lett.*, 1971, 4, p. 79—84.

ности интерпретации полученных результатов можно устранить введением баллистической гипотезы. По мнению Уоллеса, только баллистическая гипотеза может объяснить аберрацию звезд в отдаленных галактиках, у которых радиальная скорость близка к c . Чтобы примирить с баллистической гипотезой излучение релятивистских протонов и поперечный доплер-эффект, Уоллес конструирует новую динамическую теорию эфира, призванную заодно объяснить структуру элементарных частиц ¹⁷¹.

Сторонником баллистической гипотезы выступил и Рапье ¹⁷². Он опирается на данные об угловом диаметре квазара 3С-279, полученные методом радиоинтерферометра с очень большой базой. По величине красного смещения расстояние до квазара определено в $3 \cdot 10^9$ световых лет. Тогда его угловой диаметр (1,5 мс) соответствует расстоянию 20 световых лет, причем за месяц это расстояние увеличилось на 10%. Рапье толкует это так: два радиоисточника удаляются друг от друга со скоростью, большей чем $6 c$.

Луазо ¹⁷³ сравнивает спектры небесных и земных источников, полученные на одних и тех же фотопластинках. Считая, что чувствительность пластинки определяется только частотой поглощаемого света, и сравнивая время экспозиции до нужной степени почернения, он получил, что скорость света от источника равна $1,5 c$.

Критический обзор некоторых подобных попыток опровергнуть второй постулат был дан в ¹⁷⁴. Авторы отметили, что многие попытки ревизии теории относительности опираются либо на неточные экспериментальные данные, либо на новые, недостаточно проверенные, представления астрофизики. Эти и другие попытки ревизии теории относительности не увенчались каким-либо успехом.

¹⁷¹ *Wallace B.* Cosmological implications of a $c + v$ relative velocity of light.— *Spectr. Lett.*, 1970, 3, p. 115—121.

¹⁷² *Rapier P.* A recent application of detection and estimation practices in radio and radar astronomy.— *Spectr. Lett.*, 1971, 4, p. 303—311.

¹⁷³ *Loiseau J.* Une expérience permettant de connaître que la vitesse de la lumière.— *Appl. Optics*, 1972, 11, p. 470—472.

¹⁷⁴ *Horedt G., Ruck H.* Constancy of the velocity of light in vacuum.— *Spectr. Lett.*, 1972, 5, p. 455—461.

УДК 530.12.

Переписка А. Эйнштейна и М. Бессо, 1903—1955.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1977. М.: Наука, 1980.

Публикуется окончание переписки, начало которой опубликовано в «Эйнштейновских сборниках, 1974 и 1975—1976».

УДК 530.12

Усиление электромагнитных волн в присутствии движущихся сред. Болотовский Б. М., Столяров С. Н.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1977. М.: Наука, 1980.

Обсуждаются вопросы усиления электромагнитных волн в присутствии движущихся сред. Указано, что в прозрачных или поглощающих средах могут усиливаться только те волны, плотность энергии которых отрицательна. Это иллюстрируется рядом примеров. В частности, с помощью аппарата электродинамики движущихся сред изучено распространение электромагнитных волн в движущихся проводящих средах; решена задача о рассеянии волн на медленно вращающемся диэлектрическом цилиндре с учетом потерь, а также обсуждаются результаты расчетов отражения и преломления волн на сверхсветовом тангенциальном разрыве скорости движения двух сред и ускорения заряженных частиц в потоковых системах.

Ил. 6. Библ. 29 назв.

УДК 530.12

К вопросу о кинематике абсолютно твердого тела в теории относительности. Нетер Ф.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1977. М.: Наука, 1980.

Обсуждаются различные виды движений абсолютно твердого тела. Получены дифференциальные уравнения для условий Борна в эйлеровской форме. Показано, что условия Борна неприменимы для ускоренного вращательного движения абсолютно твердого тела.

УДК 530.12

Эйнштейн и проблема сверхпроводимости. Явелов Б. Е.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1977. М.: Наука, 1980.

Прослежены своеобразные связи А. Эйнштейна с Лейденской криогенной лабораторией, ее руководителем Х. Камерлингом-Оннесом и с его ранними исследованиями по сверхпроводимости. Отмечен живой интерес Эйнштейна к вопросам электронной теории металлов. Проанализировано содержание его статьи «Теоретические замечания к сверхпроводимости металлов». Указано на связь проблематики сверхпроводимости с постановкой опытов, приведших к открытию эффекта Эйнштейна — де Гааза.

УДК 530.12

Взаимосвязь науки и искусства в мировоззрении Эйнштейна. Фейнберг Е. Л.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1977. М.: Наука, 1980.

Проанализирована взаимосвязь науки и искусства во взглядах Эйнштейна.

Ил. 1. Библ. 29 назв.

УДК 530.12

Изобретательская деятельность А. Эйнштейна. Френкель В. Я., Явелов Б. Е.— В кн.: Эйнштейновский сборник, 1977. М.: Наука, 1980.

Рассказывается о работе Эйнштейна в Бернском патентном бюро, его участии в разработках высокочувствительного электрометра, гироскопических компасов. Описаны технические изобретения, запатентованные Эйнштейном совместно с Л. Сцилардом, Р. Гольдшмидтом и Г. Бунки (холодильники, МГД-пасосы, магнитоотрицательный слуховой аппарат, автоматическая фотокамера); показана широта чисто технических интересов великого теоретика, изложены вопросы, касающиеся экспериментаторской деятельности, в частности опытов, приведших к открытию гидромагнитного эффекта Эйнштейна — де Гааза.

Ил. 8. Библ. 39 назв.

Эйнштейновский сборник, 1977

*Утверждено к печати
Отделением ядерной физики АН СССР*

Редактор В. А. Никифоровский
Редактор издательства Э. С. Павлинова
Художественный редактор Т. П. Поленова
Технический редактор Л. В. Каскова
Корректоры Л. В. Лукичева, П. А. Пирязев

ИБ № 17002

Сдано в набор 27.02.80
Подписано к печати 13.06.80
Т-09840. Формат 84×108¹/₃₂
Бумага № 1
Гарнитура обыкновенная
Печать высокая
Усл. печ. л. 17,22. Уч.-изд. л. 18,9
Тираж 7400 экз. Тип. зак. 2929
Цена 1 р. 60 к.

Издательство «Наука»
117864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90
2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10