

НОВЫЯ ИДЕИ ВЪ ФИЗИКЪ.

Неперіодическое изданіе,
выходящее подъ редакціей заслуженнаго профессора

И. И. Боргмана.

СБОРНИКЪ ТРЕТІЙ.

ПРИНЦИПЪ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.



Издательство „ОБРАЗОВАНИЕ“, СПБ.

1912.



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія „Т-ва В. Андерсона и Г. Лойцянскаго“, Вознес. 53.

О Г Л А В Л Е Н І Е.

	стр.
Опытныя изслѣдованія по вопросу о вліяніи движенія вещества на эфиръ. <i>В. Бурсіана.</i>	1
Принципъ относительности въ современной физикѣ. Проф. <i>И. Классена.</i>	37
Принципъ относительности и его слѣдствія въ современной физикѣ. <i>А. Эйнштейна.</i>	62
Принципъ относительности и не-Ньютоновская механика. <i>Джилльберта Н. Льюиса и Ричарда Толмэна</i>	104
Принципъ относительности и изображеніе физическихъ явленій въ четырехмѣрномъ пространствѣ. <i>Ф. Франка.</i>	126
Литература.	173

Опытныя изслѣдованія по вопросу о вліяніи движенія вещества на эфиръ.

В. Бурсіанъ.

Волновая теорія свѣта считаетъ явленіе свѣта обусловленнымъ колебаніями, распространяющимися въ видѣ волнъ въ пространствѣ, окружающемъ свѣтящіяся тѣла; такъ какъ очень скоро выяснилось, что это не могутъ быть колебанія тѣхъ матеріальныхъ средъ, чрезъ которыя распространяется свѣтъ, то необходимо было предположить существованіе особаго „свѣтоноснаго“ эфиръ, проникающаго всѣ тѣла и являющагося носителемъ этихъ пертурбацій. Дальнѣйшее развитіе науки позволило объединить въ одну группу представленій явленія свѣтовые (т. е. лучистую энергію) электрическія и магнитныя. Въ электро-магнитной теоріи Максвелля, главу которой составляетъ электромагнитная теорія свѣта, всѣ эти явленія описываются какъ статическія и стационарныя состоянія или же различнаго рода возмущенія въ эфирѣ, окружающемъ всѣ тѣла и проникающемъ ихъ. Причиной всѣхъ этихъ состояній являются покоющіеся или движущіеся электрическіе заряды: покоющіеся заряды вызываютъ статическія напряжения въ эфирѣ, электростатическое поле, тогда какъ движеніе электричества относительно окружающаго эфиръ вызываетъ магнитное поле и въ случаѣ неравномѣрнаго движенія — электромагнитныя возмущенія, распространяющіяся со скоростью свѣта.

Наконецъ, новѣйшая, электронная теорія учитъ, что электрическіе заряды состоятъ изъ чрезвычайно малыхъ элементарныхъ зарядовъ, электроновъ. Эти атомы электричества имѣютъ реальное, отдѣльное отъ матеріи существованіе и сами матеріальной массой не обладаютъ, какъ это выяснено было на катодныхъ лучахъ, β -лучахъ радія и нѣкоторыхъ другихъ явленіяхъ; однако, за исключеніемъ перечисленныхъ явленій, электроны такъ или иначе связаны съ матеріей, такъ что во всѣхъ случаяхъ, когда мы имѣемъ взаимодѣйствіе матеріи и ээира, т. е. электромагнитныя явленія внутри или въ сосѣдствѣ матеріальныхъ тѣлъ, мы приписываемъ это взаимодѣйствіе находящимся въ матеріи электронамъ.

Съ этой точки зрѣнія изслѣдованія электромагнитныхъ (въ частномъ случаѣ оптическихъ) явленій въ движущихся тѣлахъ имѣютъ большой интересъ; центральный вопросъ, возникающій въ данномъ случаѣ, есть вопросъ, участвуетъ ли, и въ какой мѣрѣ, ээиръ, находящійся въ тѣлахъ и окружающій ихъ, въ ихъ движеніи. Въ самомъ дѣлѣ, если все сводится къ взаимодѣйствію электроновъ и ээира, и если мы предположимъ, что при движеніи матеріи ээиръ остается въ покоѣ, то мы можемъ ожидать, что электромагнитныя явленія въ движущихся тѣлахъ существенно отличаются отъ явленій въ тѣлахъ, покоящихся относительно ээира.

Приступая къ обзору опытныхъ изслѣдованій, посвященныхъ этому вопросу, мы раздѣлимъ ихъ на двѣ группы. Къ первой мы отнесемъ такіе случаи, гдѣ дѣйствительно имѣетъ мѣсто *относительное движеніе* источника свѣта, заряженныхъ тѣлъ и т. п. съ одной стороны и наблюдателя съ его измѣрительными приборами съ другой; ко второй — тѣ изслѣдованія, въ которыхъ все находится въ *относительномъ покоѣ* и цѣлью которыхъ было обнаруженіе *со-вмѣстнаго движенія* всѣхъ приборовъ лабораторіи.

Первое оптическое явленіе, связанное съ движеніемъ,

было открыто *Брадлеем* (1728) въ поискахъ за параллаксомъ неподвижныхъ звѣздъ. Послѣ долгихъ и тщательныхъ наблюдений онъ дѣйствительно нашелъ кажущееся смѣщеніе звѣзды γ Draconis, заключающееся въ томъ, что звѣзда описываетъ въ теченіи года эллипсъ съ большою осью приблизительно въ $20''$ (наиболѣе точнымъ числомъ въ настоящее время можно считать $20'',445$); внослѣдствіи оказалось, что подобное кажущееся движеніе одновременно совершаютъ всѣ звѣзды. Но такъ какъ наибольшую элонгацію звѣзды имѣютъ какъ разъ тогда, когда параллактическое смѣщеніе должно равняться нулю, то пришлось искать другое объясненіе. Оно было вскорѣ найдено самимъ *Брадлеемъ* на основаніи Ньютоновской теоріи свѣта; аналогичное объясненіе дастъ волновая теорія,

и заключается оно въ слѣдующемъ. Пусть отъ весьма удаленной звѣзды къ наблюдателю доходятъ плоскія волны, движущіяся въ зоріѣ по направленію своей нормали, которое и есть истинное направленіе на звѣзду. Наблюдатель движется перпендикулярно къ этому направленію и опредѣляетъ видимое направленіе на звѣзду прямой, соединяющей соответственныя точки (напр. *a* и *d*, рис. 1) двухъ одинаковыхъ отверстій, поставленныхъ такъ, чтобы отрѣзки волновыхъ поверхностей, проходящія первое, цѣликомъ проходили черезъ второе. Очевидно, что для этого нужно помѣстить второе отверстіе нѣсколько

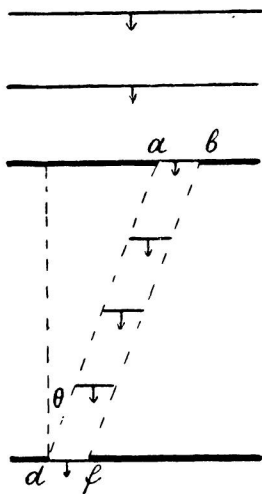


Рис. 1.

позади первого (въ направленіи движенія земли), причемъ настолько, чтобы оно за время, потребное волнѣ для прохожденія разстоянія между отверстіями, пере-

двинулось какъ разъ настолько, чтобы отрѣзокъ волны, прошедшій черезъ первое отверстіе, могъ цѣликомъ пройти черезъ него. Видимое направленіе будетъ уклонено отъ истиннаго въ направленіи движенія земли на нѣкоторый уголъ θ впередъ. Простое разсужденіе показываетъ, что въ нашемъ случаѣ $\text{tang } \theta = \frac{v}{c}$, гдѣ v есть скорость земли на ея орбитѣ, а c — скорость свѣта въ телескопѣ, упрощенную схему котораго представляетъ нашъ чертежъ; при всякомъ другомъ углѣ между направленіемъ на звѣзду и движеніемъ земли уголъ „*абераціи*“ найдется соотвѣтственнымъ построеніемъ геометрической разности скоростей наблюдателя и свѣта. Для всѣхъ звѣздъ аберація имѣетъ наибольшую величину, когда онѣ находятся въ соединеніи или противустояніи съ солнцемъ, такъ какъ тогда направленіе на звѣзду и направленіе движенія составляютъ прямой уголъ. Наименьшее значеніе уголъ абераціи имѣетъ четверть года спустя; для звѣздъ, находящихся въ плоскости эклиптики аберація тогда равна нулю, такъ какъ направленіе движенія земли и направленіе на звѣзду совпадаютъ или прямо противоположны. Параллактическія же смѣщенія (открытыя лишь впоследствии) должны происходить какъ разъ въ обратномъ смыслѣ.

Такъ какъ скорость свѣта въ воздухѣ и скорость земли на ея орбитѣ извѣстны, то уголъ θ (постоянная абераціи) можно вычислить; оказывается, что онъ въ предѣлахъ точности совпадаетъ съ наблюденнымъ. Этотъ результатъ показываетъ, что, если изложенное объясненіе абераціи вѣрно, то необходимо допустить, что свѣтотворныя волны въ своемъ движеніи черезъ движущуюся трубу, а слѣдовательно и находящійся въ ней эфиръ — нисколько не увлекаются этимъ движеніемъ.

Къ вопросу объ увлеченіи свѣтовыхъ волнъ при движеніи вещества относится опытъ, произведенный *Физо* (1853).

Приборъ Физо изображенъ на рисункѣ 2: пучекъ свѣта отъ щели S при помощи полупрозрачной отражающей пластинки P направляется на линзу и попадетъ въ двѣ трубы, наполненныя водою; находящаяся позади трубъ линза собираетъ оба пучка въ фокусъ, гдѣ установлено зеркало;

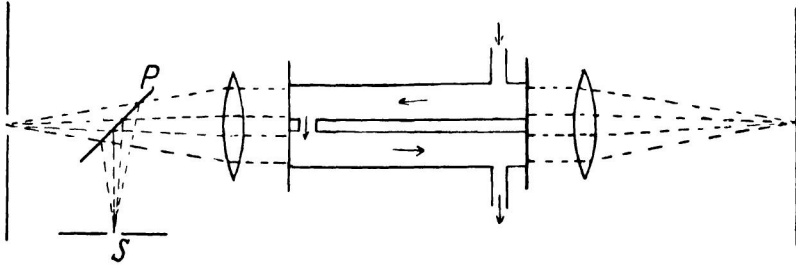


Рис. 2.

отразившись отъ него пучки идутъ обратно, обмѣнявшись путями, и собираются въ F, гдѣ наблюдается интерференція. Положеніе центральной интерференціонной полосы, указывающей на нулевую разность хода обоихъ пучковъ, отмѣчалось, а затѣмъ вода приводилась въ движеніе такъ, какъ указано на чертежѣ стрѣлками; распространеніе свѣтовыхъ волнъ въ одномъ пучкѣ происходитъ въ обѣихъ трубахъ по теченію воды, а въ другомъ противъ теченія. При скорости воды 7 метровъ въ секунду наблюдалось смѣщеніе полосъ на 0.46 ширины полосы; эта возникающая вслѣдствіе движенія разность фазъ указываетъ на то, что лучъ, идущій по теченію, распространяется скорѣе, чѣмъ идущій противъ теченія. Изъ полученнаго смѣщенія можно вычислить скорость увлеченія свѣтовыхъ волнъ; оказалось, что эта скорость (u) не равна скорости воды (v) въ трубахъ, а удовлетворяетъ формулѣ выведенной Френелемъ:

$$u = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) v$$

гдѣ n есть показатель преломленія воды. Тотъ же самый

опытъ былъ сдѣланъ съ воздухомъ; никакого смѣщенія интерференціонныхъ полосъ нельзя было замѣтить.

Майкельсонъ и *Морлей* (1886) повторили опытъ Физо съ большей точностью и получили тотъ же самый результатъ. Трубы ихъ были длиною въ 6 метровъ и оптическая установка была усовершенствована. Смѣщенія, наблюдаемыя ими, были вдвое больше чѣмъ у Физо, кромѣ того они тщательно опредѣляли среднюю скорость движенія воды въ трубахъ (такъ какъ скорость по оси трубы вообще больше чѣмъ по краямъ). Окончательный результатъ выражается соотношеніемъ:

$$u = (0,434 \pm 0,02) v,$$

тогда какъ для воды величина $1 - \frac{1}{n^2}$, называемая „коэффициентомъ увлеченія“, равняется 0,437. Замѣнивъ воду воздухомъ, Майкельсонъ и Морлей такъ же, какъ и Физо, не могли замѣтить смѣщенія полосъ, изъ чего, въ согласіи съ формулой Френеля, слѣдуетъ, что въ слѣдствіе того, что показатель преломленія воздуха очень близокъ къ единицѣ, коэффициентъ увлеченія близокъ къ нулю, и замѣтнаго увлеченія свѣтовыхъ волнъ движущимся воздухомъ не происходитъ.

Въ согласіи съ этими фактами находится и то обстоятельство, что на наблюдаемую величину угла абераціи не вліяетъ вещество заполняющее трубу. Въ самомъ дѣлѣ, разъ въ воздухѣ не происходитъ увлеченія свѣтовыхъ волнъ, то изложенное выше объясненіе абераціи правильно; если же труба заполнена водою, какъ напримѣръ въ опытѣ *Эри* (1871), то казалось бы, что уголъ абераціи долженъ получиться иной, такъ какъ скорость v останется та же самая, а скорость свѣта въ водѣ уже не c , а $\frac{c}{n}$. Но, съ другой стороны, частичное увлеченіе волнъ водою компенсируетъ этотъ эффектъ, причемъ теорія

показываетъ, что если увлеченіе происходитъ въ такой мѣрѣ, какъ это слѣдуетъ изъ формулы Френеля, то какъ разъ должно получиться прежнее значеніе для угла абераціи. Такъ это и оказалось на самомъ дѣлѣ въ опытѣ Эри, который наблюдалъ аберацію черезъ телескопъ, наполненный водою, и получилъ то же самое значеніе, т. е. примѣрно $20''$ для угла абераціи.

Въ какомъ отношеніи стоить фактически наблюденное увлеченіе свѣтовыхъ волнъ къ интересующему насъ вопросу объ увлеченіи эфирѣ? Прежде всего отпадаетъ предположеніе, что движущіяся тѣла вполне увлекаютъ содержащійся въ нихъ эфиръ. Построенная на этомъ предположеніи электромагнитная теорія *Герца* не въ состояніи объяснить результатъ опыта Физо, такъ же какъ и изложенные ниже электрическіе опыты, кромѣ того, явленіе абераціи представляетъ тогда большія трудности. Точка зрѣнія теоріи *Френеля* нѣсколько иная; по этой теоріи эфиръ является исключительнымъ носителемъ свѣтовыхъ явленій; присутствіе матеріи измѣняетъ состояніе эфирѣ въ томъ смыслѣ, что увеличиваетъ его плотность, чѣмъ и объясняется тотъ фактъ, что скорость свѣта въ различныхъ тѣлахъ различна и во всѣхъ отличается отъ скорости свѣта въ пустотѣ. При движеніи тѣлъ окружающій эфиръ считается неподвижнымъ. Чтобы разсмотрѣть, что происходитъ въ движущемся тѣлѣ, представимъ себѣ обратный случай: пластинка какого нибудь вещества ABCD (рис. 3) находится въ покоѣ, а окружающій эфиръ движется какъ цѣлое въ направленіи ея нормали со скоростью v . Принимая плотность свободнаго эфирѣ за единицу, мы находимъ, что количество эфирѣ, вошедшаго внутрь пластинки въ единицу времени черезъ площадку S , равно vS ; это количество займетъ внутри пластинки объемъ $\frac{vS}{d}$, если d обозначаетъ плотность эфирѣ внутри пластинки. Точно такъ

же сквозь заднюю поверхность должно выйти через со-
 отвѣтственное сѣченіе количество эѳира vS , которое зани-
 мало внутри пластинки объемъ $\frac{vS}{d}$; ясно, что за единицу
 времени всѣ межлежащіе объемы эѳира перемѣстятся на $\frac{v}{d}$,
 такъ какъ сѣченіе у нихъ всѣхъ общее (S). Но въ дѣй-
 ствительности эѳиръ находится въ покоѣ, а пластинка
 движется со скоростью v въ противоположномъ направленіи;

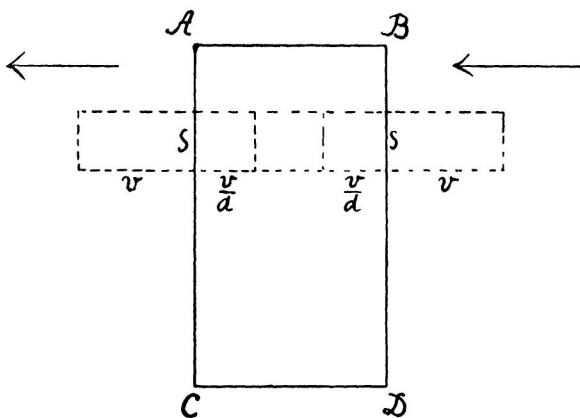


Рис. 3.

слѣдовательно внутри ея уплотненный эѳиръ будетъ дви-
 гаться со скоростью $v - \frac{v}{d} = v \left(1 - \frac{1}{d} \right)$, а такъ какъ
 по теоріи Френеля плотность эѳира равна квадрату по-
 казателя преломленія, то мы такимъ образомъ и получили
 коэффициентъ увлеченія $1 - \frac{1}{n^2}$, встрѣчающійся въ выше-
 приведенной формулѣ Френеля. Итакъ, въ этой теоріи ча-
 стичное увлеченіе свѣтовыхъ волнъ отождествляется съ
 частичнымъ увлеченіемъ эѳира внутри вещества; внѣтѣль
 эѳиръ находится въ покоѣ.

Въ подтвержденіе послѣдняго взгляда можно привести еще опытъ *Лоджа* (1893), показывающій, что вблизи тѣль, движущихся съ большой скоростью, эфиръ не увлекается замѣтнымъ образомъ. Лоджъ приводилъ въ вращеніе два стальныхъ диска, насаженныхъ горизонтально и параллельно другъ другу на вертикальную ось электрическаго мотора; число оборотовъ въ минуту могло достигать нѣсколькихъ тысячъ. Между дисками помѣщалась неподвижно слѣдующая оптическая установка (рис. 4): пучекъ лучей падалъ на полупрозрачно посеребренную пластинку P ; раздѣленные такимъ образомъ отраженный и прошедшій сквозь пластинку пучки должны были, отражаясь отъ четырехъ зеркалъ $S_1 S_2 S_3 S_4$, по три раза обѣжать во взаимно противоположныхъ направленіяхъ периметръ этого квадрата прежде чѣмъ они попадали обратно на пластинку P ,

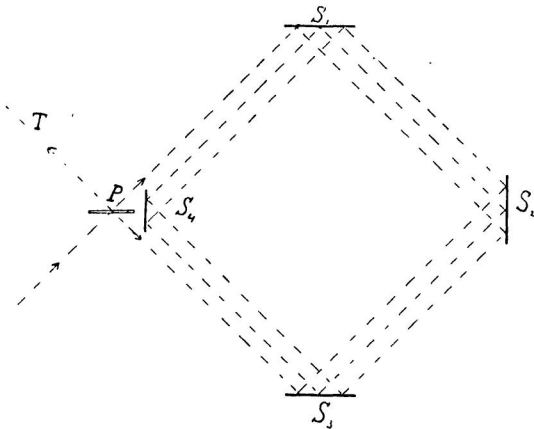


Рис. 4.

гдѣ они вновь соединялись и давали въ трубѣ T интерференціонную картину сложнаго характера. Если бы эфиръ, находящійся между дисками, увлекался ихъ движеніемъ.

то одинъ пучекъ былъ бы замедленъ, тогда какъ другой ускоренъ, что должно было бы дать смѣщеніе интерференціонныхъ полосъ. Однако наблюденныя смѣщенія были очень малы; изъ ихъ величинъ можно вывести, что эфиръ между дисками увлекался со скоростью навѣрно меньшей чѣмъ $1/800$ скорости дисковъ, причемъ даже и эти смѣщенія по мнѣнію Лоджа нужно приписать несовершенству установки.

Электронная теорія *Лорентца* (1895) основывается также на представленіи покоящагося эфиръ, но въ отличіе отъ теоріи Френеля она предполагаетъ, что эфиръ нисколько не измѣняется присутствіемъ или движеніемъ вещества; всѣ же оптическія и электрическія свойства тѣлъ, отличающія ихъ отъ пустого пространства, обусловлены находящимся въ нихъ и связанными съ ними электронами. Теорія эта приходитъ къ тому же самому выраженію для „коэффициента увлеченія“ свѣтовыхъ волнъ, но происходитъ это частичное увлеченіе не вслѣдствіе движенія эфиръ, а вслѣдствіе того, что принимающіе участіе въ передачѣ свѣтовыхъ волнъ электроны движутся съ полной скоростью матеріи, эфиръ же остается въ покоѣ.

Слѣдствія изъ этихъ основныхъ положеній электронной теоріи хорошо согласуются съ результатами электро-динамическихъ опытовъ съ движущимися тѣлами.

Роуландъ (1876) показалъ экспериментально, что движеніе заряженнаго проводника вызываетъ въ окружающемъ пространствѣ магнитное поле. Онъ имѣлъ эбонитовый дискъ, покрытый съ обѣихъ сторонъ проводящимъ слоемъ и находившійся между двумя проводящими плоскостями, отведенными къ землѣ. Эбонитовый дискъ — внутренняя обкладка этого конденсатора — приводился въ быстрое вращеніе, причемъ зарядъ его поддерживался постояннымъ соединеніемъ съ источникомъ электричества высокаго потенциала. Чувствительная астатическая магнитная система

подвѣшенная въ латунной коробкѣ, отведенной къ землѣ (для защиты отъ электростатическихъ дѣйствій), показала ясное отклоненіе. Результатъ этотъ многократно былъ провѣренъ какъ качественно, такъ и количественно; надъ этимъ вопросомъ работали Рѣнтгенъ, Химстедтъ, Роулэндъ и Хѣтчинсонъ, Кремье (сначала съ отрицательнымъ результатомъ), Пендеръ, Адамсъ и проф. А. А. Эйхенвальдъ. Интересенъ методъ Кремье: если постоянный, равномерно движущійся зарядъ эквивалентенъ постоянному току, то движущійся переменный зарядъ долженъ быть эквивалентенъ переменному току и слѣдовательно давать индуктированные токи въ подходяще расположенныхъ сосѣднихъ проводникахъ. Это заключеніе послѣ ряда неудачъ въ концѣ концовъ оправдалось на опытѣ. Во всѣхъ этихъ опытахъ оказалось, что сила магнитнаго поля возникающаго при движеніи заряда, вокругъ „конвекціоннаго“ тока, какъ разъ равна той величинѣ, которая получается вычисленіемъ согласно электромагнитной теоріи изъ величины электрическаго заряда и сообщенной ему скорости, а именно, зарядъ въ e электростатическихъ единицъ, движущійся со скоростью v , эквивалентенъ элементу тока, сила котораго равна $\frac{e \cdot v}{c}$ электромагнитныхъ единицъ, гдѣ c есть отношеніе электромагнитныхъ и электростатическихъ единицъ, равное, какъ извѣстно, скорости свѣта въ эфирѣ. Однако эффектъ Роуланда не даетъ отвѣта на вопросъ о движеніи эфиря, такъ какъ внутри проводника, какъ извѣстно, электрическое поле равно нулю и, слѣдовательно, для дѣйствія въ окружающей средѣ безразлично, принимаетъ ли эфиръ внутри проводника участіе въ движеніи или нѣтъ; весь эффектъ обусловленъ движеніемъ истиннаго заряда, сосредоточеннаго на поверхности проводника, по отношенію къ покоящейся окружающей средѣ.

Рѣшающими являются опыты надъ конвекціоннымъ то-

комъ въ случаѣ движенія незаряженнаго діэлектрика въ электростатическомъ полѣ. Представимъ себѣ заряженный плоскій конденсаторъ съ прослойкой изолятора. Діэлектрикъ, находящійся въ электрическомъ полѣ, поляризованъ; по представленіямъ электронной теоріи всѣ электроны (представляющіе собой отрицательные заряды) подъ вліяніемъ возбужденнаго поля сдвинуты изъ положенія своего равновѣсія въ направленіи силовыхъ линій, вслѣдствіе чего съ одной стороны діэлектрика получится поверхностный слой съ избыткомъ электроновъ—отрицательный зарядъ, а съ другой уменьшеніе количества ихъ—положительный зарядъ. Если вращать діэлектрикъ между пластинками конденсатора, то это должно быть эквивалентно двумъ круговымъ токамъ, идущимъ по поверхностямъ діэлектрической пластинки въ взаимно противоположныхъ направленіяхъ. Если ϵ есть діэлектрическая постоянная діэлектрика, то токи эти, какъ показываетъ теорія, должны быть пропорціональны величинѣ $\epsilon - 1$. По теоріи Герца въ данномъ случаѣ вращается не только вещество діэлектрика, но и все поле, содержащееся въ немъ, такъ какъ увлекается весь эфиръ; по этой теоріи должны получиться токи пропорціональные ϵ .

Впервые разсматриваемый эффектъ удалось обнаружить *Рентгену* (1885). Вращая стеклянную или эбонитовую пластинку между двумя металлическими пластинками конденсатора, изъ которыхъ одна заряжалась до высокаго потенциала, а другая была отведена къ землѣ, Рентгенъ могъ замѣтить отклоненіе подвѣшенной вблизи одной изъ поверхностей вращающагося діэлектрика аstaticкой магнитной стрѣлки. Направленіе отклоненія измѣнялось при коммутированіи заряда и соответствовало знаку заряда и направленію движенія; количественныя наблюденія однако не могли быть произведены по причинѣ малости наблю-

денныхъ отклоненій (отъ 2 до 3 миллиметровъ при разстояніи зеркала отъ шкалы свыше двухъ метровъ).

Окончательный отвѣтъ дали опыты А. А. Эйхенвальда (1903). Въ одномъ изъ его опытовъ вертикальная круглая пластинка діэлектрика могла вращаться въ плоскости магнитнаго меридіана вокругъ горизонтальной оси между неподвижными пластинками заряженнаго конденсатора. Астатическій магнитометръ (*M*) находился вблизи края конденсатора, будучи подвѣшенъ внутри металлической коробки для защиты отъ электростатическихъ дѣйствій. Для точности количественныхъ результатовъ необходимо было имѣть діэлектрикъ въ возможно однородномъ полѣ; для этого служило охранное кольцо *D* (черт. 5) такой же толщины какъ и вращающаяся часть діэлектрика. Были испытаны различныя видоизмѣненія этой схемы; такъ, въ нѣкоторыхъ опытахъ діэлектрикъ вращался съ одной обкладкой, въ другихъ—съ обѣими обкладками вмѣстѣ, такъ что конденсаторъ вращался какъ цѣлое.

Этотъ опытъ особенно важенъ потому, что въ этомъ случаѣ по теоріи Герца не должно возбуждаться магнитное поле; по электронной теоріи Лорентца такое должно было наблюдаться, какъ это и было на самомъ дѣлѣ. Во всѣхъ опытахъ количественная прѣвѣрка теоріи производилась такимъ образомъ, что на мѣсто вращавшихся поверхностей помѣщались поверхности, оклеенныя спиральными полосками станіоля, черезъ которыя пропускаясь токъ известной силы. Такимъ образомъ сравнивалось дѣйствіе геометрически одинаковыхъ токовъ, конвекціоннаго въ одномъ

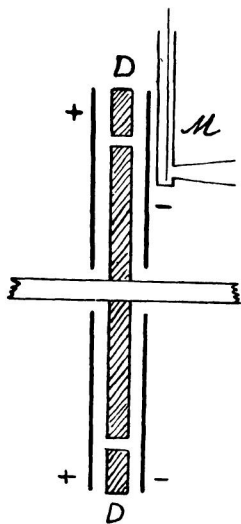


Рис. 5.

случаѣ, и обыкновеннаго, „кондукціоннаго“, въ другомъ. Результаты всѣхъ опытовъ находятся въ полномъ согласіи съ слѣдствіями электронной теоріи и опровергаютъ теорію Герца

Въ связи съ изложенными опытами *Рентгенъ* и *Дикенвилль* наблюдали еще магнитное дѣйствіе тока смѣщенія въ движущемся діэлектрикѣ. Приборъ былъ устроенъ такимъ образомъ, что параллельно другъ другу на 2 пластинкахъ были наклеены два кольца одинаковыхъ размѣровъ изъ стальноя, одно сплошное и отведенное къ землѣ, а другое раздѣленное діаметральнымъ разрѣзомъ на двѣ половины, которымъ сообщались противоположные по знаку заряды. Между этими двумя кольцами была помѣщена діэлектрическая пластинка, которая приводилась во вращеніе. Приборъ этотъ представляетъ собой два рядомъ лежащіе конденсатора съ противоположнымъ направлениемъ линий силъ въ нихъ. При вращеніи части діэлектрика непрерывно попадаютъ изъ одного конденсатора въ другой; при этомъ поляризація діэлектрика мѣняетъ свое направленіе, отчего возникаетъ токъ смѣщенія въ направленіи перпендикулярномъ къ поверхности пластинки. Одно изъ центральныхъ положеній электромагнитной теоріи гласитъ, что въ свободномъ эфирѣ при измѣненіи напряженія электрическаго поля также возникаетъ токъ смѣщенія, возбуждающій такое же магнитное поле, какъ численно равный ему кондукціонный токъ. Если предположить, что содержащійся въ пластинкѣ эфиръ движется вмѣстѣ съ ней, то придется заключить, что и въ немъ будетъ имѣть мѣсто токъ смѣщенія, такъ какъ въ промежуткѣ между двумя конденсаторами поле мѣняетъ свой знакъ. Если же эфиръ остается въ покоѣ, то этого не будетъ, такъ какъ тогда поле въ эфирѣ статическое и во всѣхъ точкахъ пространства остается неизмѣннымъ. Количественно эта разница выражается тѣмъ, что въ первомъ случаѣ токъ долженъ быть пропорціональ-

нымъ діэлектрической постоянной ϵ , тогда какъ во второмъ онъ долженъ бытъ пропорціональнымъ величинѣ $\epsilon - 1$. Опыты Рѳнтгена обнаружили существованіе этого эффекта, а точныя измѣренія Эйхенвальда показали справедливость второго предположенія.

Наконецъ, *Вильсонъ* (1904) изслѣдовалъ поляризацию діэлектрика, возбуждаемую въ немъ движеніемъ въ магнитномъ полѣ. Въ полости соленоида, возбуждавшаго магнитное поле, вращался вокругъ оси соленоида діэлектрической цилиндръ. Внутренняя и внѣшняя стороны этого цилиндра были покрыты проводящимъ слоемъ, причемъ внутренняя обкладка соединялась съ землей, а внѣшняя съ электрометромъ. Вслѣдствіе возникающей въ діэлектрикѣ поляризации, направленной радіально, на внѣшней обкладкѣ получается свободный зарядъ, измѣряемый электрометромъ. И здѣсь теорія Гертца и теорія Лорентца даютъ различныя предсказанія; измѣренія Вильсона рѣшаютъ въ пользу послѣдней.

Резюмируя описанныя изслѣдованія, мы можемъ сказать, что во всѣхъ тѣхъ случаяхъ, когда дѣйствительно наблюдается относительное движеніе приборовъ, наблюдаются также и ожидаемые электромагнитной теоріей эффекты, причемъ результаты вполне соотвѣтствуютъ представленіямъ электронной теоріи, предполагающей, что эфиръ не принимаетъ участія въ движеніи тѣлъ. Прибавимъ еще, что въ разсмотрѣнныхъ опытахъ, какъ и въ теоретическихъ формулахъ, съ которыми они находятся въ согласіи, принимаются во вниманіе величины только *перваго порядка* по отношенію къ малой величинѣ $\frac{v}{c}$, т. е. зависяція только отъ *первой степени* отношенія скорости, имѣющей мѣсто въ опытахъ, скорости свѣта. Все экспериментально осуществимыя скорости очень малы по сравненію со скоростью свѣта; понятно, что подобные опыты ставятъ большія затрудненія искусству экспериментаторовъ.

Самая большая скорость, имѣющаяся въ нашемъ распоряженіи—это скорость земли на ея орбитѣ; эта скорость равняется круглымъ числомъ $3 \cdot 10^6 \frac{\text{см.}}{\text{сек.}}$ и составляетъ одну десяти-тысячную скорости свѣта ($3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см.}}{\text{сек.}}$). Разсмотрѣнное выше явленіе абераціи неподвижныхъ звѣздъ приводитъ къ заключенію, что эфиръ, окружающій землю и находящійся у ея поверхности, не принимаетъ участія въ ея движеніи, и что, слѣдовательно, наши приборы движутся относительно эфира какъ разъ съ этой громадной скоростью; возникаетъ вопросъ, нельзя ли надѣяться замѣтить какое-нибудь вліяніе этого движенія на электрическія или оптическія явленія, происходящія на поверхности земли, т. е. въ нашихъ лабораторіяхъ. Этому вопросу посвящены изслѣдованія, отнесенныя нами ко второй группѣ, къ разсмотрѣнію которыхъ мы теперь и переходимъ.

Не трудно видѣть однако, что совмѣстное движеніе всѣхъ приборовъ вмѣстѣ съ наблюдателемъ вноситъ значительныя видоизмѣненія въ условія опыта; разсмотримъ это на самомъ простомъ примѣрѣ—на абераціи свѣта, получаемого отъ земныхъ источниковъ.

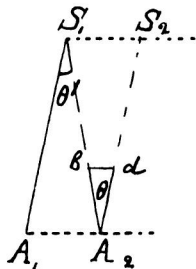


Рис. 6.

Пусть S и A (рис. 6) — связанные между собой источникъ и наблюдатель; ихъ общая скорость равна v . Свѣтъ вышедшій изъ источника въ моментъ 1, когда S находится въ S_1 а A въ A_1 , дойдетъ до наблюдателя въ какой нибудь моментъ 2, когда онъ находится въ A_2 . Истинный путь луча въ эфирѣ есть S_1A_2 ; онъ составляетъ съ направлениемъ прямой соединяющей одновременныя положенія S и A, нѣкоторый уголъ θ' , который опредѣлится

изъ треугольника $S_1A_2A_1$, въ которомъ

$$\frac{A_1A_2}{S_1A_2} = \frac{v}{c}$$

Но такъ какъ наблюдатель движется со скоростью v , то вслѣдствіе абераціи видимое направленіе луча будетъ ему казаться уклоненнымъ впередъ на уголь θ . Для того, чтобы найти видимое направленіе, надо построить треугольникъ bA_2d , въ которомъ

$$\frac{bd}{bA_2} = \frac{v}{c} \text{ и } bd \parallel A_1A_2.$$

Изъ подобія треугольниковъ $S_1A_1A_2$ и bA_2d слѣдуетъ $\theta = \theta'$, вслѣдствіе чего кажущееся направленіе луча совпадаетъ съ дѣйствительнымъ направленіемъ на источникъ, который въ разсматриваемый моментъ находится въ S_2 . Слѣдовательно, такимъ путемъ нельзя обнаружить никакой *анизотропности*, въ которой направленіе истиннаго движенія черезъ эфиръ было бы чѣмъ-нибудь особеннымъ.

Вообще теорія Лорентца, хотя и основывается на представленіи покоящагося эфиря, но приводитъ къ заключенію, что въ случаѣ относительнаго покоя всѣхъ приборовъ никакими опытами нельзя обнаружить эффектовъ перваго порядка и опредѣлить величину и направленіе истиннаго движенія лабораторіи черезъ эфиръ. Цѣлый рядъ экспериментальныхъ изслѣдованій подтверждаетъ этотъ результатъ теоріи.

Такъ *Респиги*, *Гукъ* (Ноек 1868) и *Кеттелеръ* (1872) устанавливали трубу, наполненную водой, на источникъ свѣта, неподвижно связанный съ трубой; никакого измѣненія установки не требовалось при любомъ положеніи всего прибора.

Маскаръ (1873) измѣрялъ уголь отклоненія фраунгоферовыхъ линій солнечнаго спектра въ диффракціонномъ спектрѣ рѣшетки, поворачивая весь приборъ такъ, чтобы коллиматоръ одинъ разъ получалъ солнечный свѣтъ съ

востока, а другой разъ съ запада, что достигалось при помощи соотвѣтственно поставленныхъ зеркаль. Въ полдень первый случай соотвѣтствуетъ движенію рѣшетки въ направленіи падающихъ на нее лучей, а второй—движенію навстрѣчу лучамъ. Здѣсь нужно замѣтить, что хотя Маскаръ и пользовался солнечнымъ свѣтомъ, т. е. не земнымъ источникомъ, но такъ какъ разстояніе земли отъ солнца не мѣняется, то въ данномъ случаѣ это обстоятельство не вноситъ никакого измѣненія.

Смисъ (1902) установилъ, что никакого смѣщенія спектральныхъ линій паровъ натрія не происходитъ, если помѣщать весь спектрометръ вмѣстѣ съ источникомъ свѣта въ различныя положенія относительно направленія движенія земли.

Никакого вліянія движенія на опыты съ интерференціей свѣта не могъ обнаружить *Маскаръ*, наблюдавшій различныя интерференціонныя явленія съ приспособленіемъ, позволявшимъ поворачивать всю установку въ любое положеніе.

Кеттелеръ заставлялъ интерферировать два пучка лучей, прошедшихъ черезъ трубки съ водой почти въ противоположныхъ направленіяхъ. И здѣсь различная оріентировка прибора не вносила никакого измѣненія, несмотря на то, что приборъ можно было привести между прочимъ и въ такое положеніе, что въ одной трубкѣ свѣтъ распространялся по направленію движенія, тогда какъ въ другой—противъ движенія земли.

Опытъ *Гука* заключается въ слѣдующемъ (рис. 7): свѣтъ, исходящій изъ щели, превращается въ параллельный пучекъ линзой, затѣмъ проходитъ частью черезъ трубку съ преломляющимъ веществомъ (водой), частью черезъ воздухъ помимо трубки; затѣмъ оба пучка собираются линзой, въ фокусѣ которой помѣщено зеркало. Отражаясь отъ него, они обмѣниваются путями, и послѣ отраженія

отъ стеклянной пластинки P собираются въ F , гдѣ даютъ изображеніе щели. Эта схема почти совпадаетъ съ описанной выше схемой опыта Физо, но съ той существенной разницею, что здѣсь кромѣ тѣла M движутся и источникъ

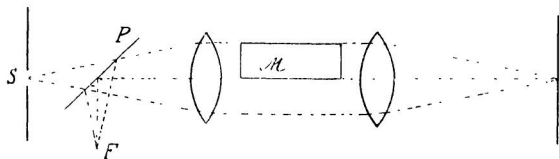


Рис. 7.

свѣта, и всѣ остальные приборы. Несмотря на то, что оба пучка проходятъ преломляющее тѣло M въ противоположныхъ направленіяхъ, и слѣдовательно, при различныхъ положеніяхъ прибора испытываютъ казалось бы различное дѣйствіе движенія, Гукъ не замѣтилъ никакого эффекта при различныхъ поворотахъ аппарата.

Такой же результатъ дали опыты *Маскара* и *Кеттислера* съ интерференціей поляризованныхъ лучей въ двухъ преломляющихъ тѣлахъ.

Опытъ *Клинкерфюса* (1870) состоялъ въ слѣдующемъ: свѣтъ, выходящій изъ коллиматора въ направленіи меридіана, разлагался системой пяти призмъ à vision directe и посылался попеременно на востокъ и на западъ при помощи призмы съ полнымъ внутреннимъ отраженіемъ въ двѣ зрительныя трубы, черезъ которыя наблюдался спектръ. Между призмой съ полнымъ внутреннимъ отраженіемъ и трубами находились двѣ трубки съ парами брома. Употребленный источникъ свѣта давалъ сплошной спектръ, а также двѣ свѣтлыя желтыя линіи паровъ натрія, D_1 и D_2 . На фонѣ сплошного спектра были видны полосы поглощенія паровъ брома. Въ полдень въ одну трубу попадаютъ лучи свѣта, прошедшаго черезъ пары брома по

направленію движенія земли, а въ другую-- въ обратномъ направленіи; въ полночь имѣеть мѣсто какъ разъ обратное. Клинкерфюсъ измѣрялъ микрометромъ разстояніе одной определенной полосы поглощенія до линій D_1 и D_2 ; разстояніе это было въ 27 разъ больше разстоянія между D_1 и D_2 . Онъ нашелъ смѣщеніе этой полосы, соответствующее измѣненію длины волны на 0,455 единицъ Ангстрема (0.0455 миллионныхъ миллиметра). Хага (1902) повторилъ этотъ опытъ съ лучшими средствами; его рѣшетка раздѣляла все 18 линій поглощенія паровъ брома, находящихся между D_1 и D_2 . При помощи трехъ призмъ съ полнымъ внутреннимъ отраженіемъ (рис. 8) свѣтъ

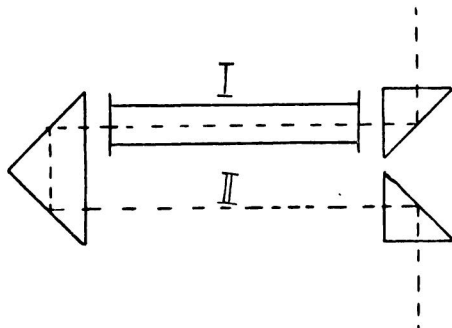


Рис.-8.

посылался черезъ трубку съ парами брома, которая помещалась попеременно въ положеніи I или II. Никакой разницы въ микрометренныхъ отчетахъ разстоянія D_1 и D_2 отъ трехъ промежуточныхъ линій брома, выбранныхъ для этой цѣли, нельзя было замѣтить, такъ что результатъ Клинкерфюса нужно считать обусловленнымъ ошибками наблюденій.

Нордмейеръ (1903) выполнилъ опытъ, предложенный Физо: по обѣ стороны источника лучистой энергіи были поставлены два одинаковыхъ термо-элемента, соединенныхъ

другъ противъ друга, такъ что при равенствѣ поглощаемой энергіи они взаимно компенсировались и гальванометръ, включенный въ цѣпь, не показывалъ тока. Эта компенсація сохранялась при любой ориентировкѣ прибора относительно движенія земли; соотвѣтственно чувствительности своихъ приборовъ Нордмейеръ заключилъ, что количество лучистой энергіи, попадающей изъ земного источника на совмѣстно движущуюся поверхность, не измѣняется въ зависимости отъ направленія даже на $\frac{1}{300000}$ своей величины.

Въ 1861 году *Физо*, казалось, установилъ вліяніе движенія на вращеніе плоскости поляризаціи при преломленіи. Извѣстно, что если поляризованный лучъ падаетъ подъ нѣкоторымъ угломъ на стеклянную пластинку, то послѣ преломленія уголъ плоскости поляризаціи съ плоскостью паденія иной, чѣмъ у падающаго луча; уголъ поворота зависитъ между прочимъ отъ показателя преломленія, т. е. отъ отношенія скоростей свѣта въ эфирѣ и стеклѣ. Вслѣдствіе частичнаго увлеченія свѣтовыхъ волнъ (по формулѣ Френеля) въ случаѣ движенія это отношеніе измѣняется, поэтому Физо ожидалъ измѣненія угла вращенія на величину перваго порядка. При помощи двухъ зеркалъ Физо могъ въ полдень пускать солнечные лучи съ востока на западъ или наоборотъ, черезъ поляризаторъ, рядъ наклонно установленныхъ стеклянныхъ пластинокъ, нѣкоторые добавочные приборы и анализаторъ. Всѣ эти части находились на вращающейся въ горизонтальной плоскости доскѣ и могли быть такимъ образомъ попеременно направлены на восточное или западное зеркало. Удовлетворительная установка приборовъ представила много затрудненій; многократныя отраженія въ стеклянныхъ пластинкахъ были устранены тѣмъ, что пластинки были взяты не параллельныя, а слегка клинообразныя; для компенсаціи дисперсіи вращенія плоскости поляризаціи Физо употреб-

для слоя естественно вращающихся эфирных масс съ дисперсіей въ обратномъ направленіи, наконецъ случайныя неоднородности и слѣды двойного лучепреломленія стекла деполаризовывали свѣтъ, что приходилось компенсировать особо подобранными и поставленными стеклянными пластинками. Въ концѣ концовъ Физо нашелъ, что искомый эффектъ существуетъ, такъ какъ, поворачивая приборъ попеременно на западъ и на востокъ, онъ получалъ разность отсчетовъ анализатора ожидаемаго направленія. По вычислениямъ Лорентца такого эффекта не должно быть, и хотя Физо внослѣдствіи не считалъ свой результатъ достовѣрнымъ, но всетаки повтореніе этого опыта было весьма желательнымъ.

Бросъ (1905) повторилъ этотъ опытъ въ нѣсколько измѣненномъ видѣ, основываясь на слѣдующемъ соображеніи: при прохожденіи луча черезъ наклонную пластинку стекла плоскость поляризаціи поворачивается на нѣкоторый уголъ; допустимъ, что при данной конфигураціи предполагаемый эффектъ движенія земли увеличиваетъ этотъ уголъ на нѣкоторую малую величину. Отразивъ лучъ подъ очень острымъ угломъ отъ зеркала, можно его пропустить почти въ противоположномъ направленіи черезъ вторую пластинку, вращающую (въ случаѣ покоя) плоскость поляризаціи въ обратномъ направленіи на ту же самую величину, какъ и первая. Но при обратномъ ходѣ лучей движеніе земли будетъ имѣть обратное дѣйствіе (если этотъ эффектъ зависитъ отъ первой степени $\frac{v}{c}$), т. е. уголъ второго вращенія будетъ уменьшенъ, а слѣдовательно плоскость поляризаціи не вернется въ прежнее положеніе; окончательный эффектъ будетъ равенъ удвоенному эффекту одной пластинки. Очевидно, что при этомъ методѣ дисперсія вращенія исключается, что даетъ возможность пользоваться интенсивнымъ бѣлымъ свѣтомъ и чувствительнымъ полутьневымъ анализаторомъ

Брэса. Въ окончателъной установкѣ Брэса поляризованный свѣтъ проходилъ черезъ двѣ пластинки, отражался отъ зеркала и шелъ обратно черезъ двѣ другія. Если бы эффектъ Физо существовалъ, то измѣненіе положенія плоскости поляризаціи при поворотѣ всей установки на 180° должно было быть $0,024^\circ$; вмѣсто этого у Брэса получилось $0,0033^\circ$, величина въ семь разъ меньше ожидаемой и лежащая въ предѣлахъ возможныхъ ошибокъ.

Установка *Штрассера* (1907), также повторявшая этотъ опытъ, болѣе близко подходитъ къ схемѣ Физо; его результатъ тоже вполне отрицательный, причемъ точность достигала одного процента ожидаемаго эффекта.

Относительно естественнаго вращенія первоначальная теорія Лорентца не дастъ рѣшительнаго отвѣта. По измѣреніямъ *Маскара*, при переходѣ отъ направленія движенія земли къ перпендикулярному, вращеніе не измѣняется на $\frac{1}{15000}$ своей величины. *Ваксмутъ* и *Шенрокъ* высказали сомнѣніе въ томъ, что измѣренія Маскара достигаютъ такой точности, но тщательныя измѣренія *Рэлей* (1902) показали, что измѣненіе вращенія вслѣдствіе движенія навѣрно меньше $\frac{1}{100000}$ всего вращенія. Рэлей пользовался пятью кусками кварца по 5 см. толщиной, дававшими для употребленнаго свѣта—желтой линіи гелія—вращеніе плоскости поляризаціи на 5500° . Неизбѣжныя оптическія неоднородности кварца въ столь большихъ кускахъ весьма затрудняютъ точныя измѣренія; кромѣ того, вслѣдствіе значительной, при такомъ большомъ общемъ вращенія, дисперсіи вращенія, приходится пользоваться однороднымъ свѣтомъ, что влечетъ за собой неудобство слишкомъ малой его интенсивности. Въ опытѣ *Брэса* (1905) оба эти недостатка были устранены; онъ наблюдалъ вращеніе плоскости поляризаціи въ жидкости — тминномъ маслѣ; удѣльное вращеніе ее гораздо меньше

чѣмъ у кварца, но вслѣдствіе однородности матеріала можно было употреблять весьма длинныя пути (до 16 метровъ). Дисперсію вращенія плоскости поляризаціи Брэсъ устранилъ такимъ же точно пріемомъ, какъ и въ описанномъ уже повтореніи опыта Физо. Извѣстно, что если послѣ прохожденія поляризованнаго свѣта черезъ вещество, обладающее естественнымъ вращеніемъ, отразить его отъ зеркала и пропустить обратно черезъ ту же самую толщю вещества, то плоскость поляризаціи возвращается въ свое первоначальное положеніе; предполагаемое же вліяніе движенія земли должно оба раза имѣть противоположный эффектъ, въ одномъ направленіи, скажемъ, увеличивая, а въ другомъ уменьшая уголъ поворота. Въ установкѣ Брэса поляризованный свѣтъ отражался въ чанѣ съ тминнымъ масломъ взадъ и впередъ четыре раза; согласно изложенному, несмотря на компенсацію естественнаго вращенія, могло бы появиться нѣкоторое остаточное вращеніе, обусловленное движеніемъ земли и мѣняющее свой знакъ при поворотѣ всего прибора на 180°. Результатъ былъ таковъ, что это вращеніе, если оно существуетъ, то навѣрно меньше $\frac{1}{5000000}$ всего вращенія.

Въ отрицательному результату привели также предпринятые нѣкоторыми изслѣдователями электродинамическіе опыты. *Рентгенъ* помѣщалъ магнитную стрѣлку вблизи конденсатора, думая обнаружить магнитное поле, которое должно возникнуть въ эфирѣ вокругъ зарядовъ его обкладокъ, движущихся со скоростью земли. Это поле должно мѣнять свое направленіе при пере мѣнѣ знака заряда. Однако, перезаряжая конденсаторъ, Рентгенъ не могъ замѣтить измѣненія въ положеніи стрѣлки.

Декурдръ (1889) помѣстилъ вторичную катушку между двумя равноотстоящими первичными, намотанными въ взаимно противоположныхъ направленіяхъ. Добившись пол-

ной компенсаці индуктивнихъ дѣйствій первичныхъ катушекъ на вторичную въ какомъ нибудь одномъ положеніи прибора, онъ не могъ замѣтить никакого дѣйствія, поворачивая весь приборъ въ другія направленія.

Кенигсбергеръ (1905) помѣстилъ горизонтальный конденсаторъ между полюсами электромагнита, поле котораго было параллельно плоскости конденсатора и перпендикулярно къ направленію движенія. Считая эфиръ неподвижнымъ, можно на первый взглядъ ожидать, что конденсаторъ зарядится, такъ какъ этотъ опытъ можно разсматривать какъ аналогію къ опыту Вильсона, съ той разницей, что здѣсь діэлектрикъ остается въ покоѣ, а магнитное поле движется. Однако отрицательный результатъ этого опыта, также какъ и всѣхъ описанныхъ до сихъ поръ, вполне соотвѣтствуетъ выводамъ электронной теоріи Лорентца, именно съ точки зрѣнія покоящагося эфира. Теорія эта, какъ уже упомянуто было выше, приводитъ къ конечному результату, что если принимаются во вниманіе величины порядка первой степени отношенія $\frac{v}{c}$ (10^{-4}), то всѣ наблюдаемыя явленія въ движущейся системѣ приборовъ, источниковъ свѣта и т. п., нисколько не отличаются отъ тѣхъ же явленій, наблюдаемыхъ въ системѣ, покоящейся относительно эфира.

Однако первоначальная теорія Лорентца предвидитъ возможность обнаружить вліяніе движенія на оптическія и электрическія явленія, если сдѣлать доступными наблюденію величины второго порядка малости, то есть зависящія отъ второй степени отношенія $\frac{v}{c}$ ($\frac{v^2}{c^2} = 10^{-8}$).

Сюда относится знаменитый опытъ *Майкельсона*, впоследствии нѣсколько разъ повторенный. Въ виду большой важности его для дальнѣйшаго развитія теоріи, мы разберемъ его нѣсколько подробнѣе.

По теоріи неподвижнаго ээира время, потребное свѣту для того, чтобы пройти въ движущейся лабораторіи путь опредѣленной длины взадъ и впередъ, отличается отъ времени потребнаго на это въ случаѣ покоя, и кромѣ того зависитъ отъ угла между направлениемъ этого пути и направлениемъ движенія.

Пусть свѣтъ долженъ пройти между совмѣстно движущимися точками S и A туда и обратно, (направленіе SA совпадаетъ съ направлениемъ движенія); въ теченіи времени t_1 , пока вышедшій изъ S_0 свѣтъ идетъ до A, A перейдетъ въ положеніе A_1 , перемѣстившись на длину vt_1 ; это можно выразить уравненіемъ:

$$ct_1 = L + vt_1,$$

гдѣ L есть расстояние между S и A. Отсюда получается:

$$t_1 = \frac{L}{c - v}.$$

На обратный путь требуется нѣкоторое время t_2 ; за это время точка S пройдетъ навстрѣчу свѣту путь vt_2

$$ct_2 = L - vt_2,$$

$$t_2 = \frac{L}{c + v}.$$

Слѣдовательно все время будетъ

$$T_1 = t_1 + t_2 = \frac{2Lc}{c^2 - v^2},$$

или

$$T_1 = \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right),$$

если ограничиться величинами второго порядка малости.

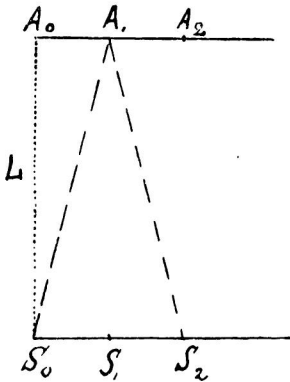


Рис. 9.

Если же свѣтъ проходить путь L перпендикулярно къ направлению движенія, то въ дѣйствительности онъ долженъ пройти путь $S_0 A_1$ (рис. 9), длина котораго есть

$$\sqrt{L^2 + v^2 t^2},$$

а слѣдовательно время t найдется изъ уравненія

$$ct = \sqrt{L^2 + v^2 t^2}$$

$$t = \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{L}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right)$$

(съ этой же степенью приближенія). На обратный путь потребуется то же самое время; слѣдовательно, все время для прохожденія отъ S къ A и обратно будетъ

$$T_2 = \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right).$$

Разность временъ

$$\Delta T = T - T_2 = \frac{L}{c} \frac{v^2}{c^2}$$

по принятому нами обозначенію есть величина второго порядка; эту разность Майкельсонъ и хотѣлъ обнаружить при помощи своего интерферометра.

Приборъ Майкельсона схематически представленъ на рисункѣ 10. Свѣтъ падаетъ на полупрозрачно посеребренную пластинку P , частью отражается, частью проходитъ далѣе. Послѣ отраженія отъ зеркалъ S_1 и S_2 лучи возвращаются къ P и опять частью отражаются, частью проходятъ сквозь серебряный слой. Въ T находится зрительная труба, въ которую наблюдается интерференція. Лучи будутъ интерферировать такъ, какъ будто свѣтъ, прошедшій путь PS_2P отразился не отъ S_2 , а отъ изображенія S_2 въ плоскости P_1 т. е. отъ S_2' . Если S_2' окажется не параллельнымъ къ плоскости S_1 , то наблюдатель видитъ интер-

ференціонное явленіе, получающееся при отраженіи свѣта отъ передней и задней поверхности воздушнаго клина, ограниченнаго плоскостями S_1 и S'_2 . Какъ извѣстно, въ такомъ случаѣ получаютъ интерференціонныя полосы,

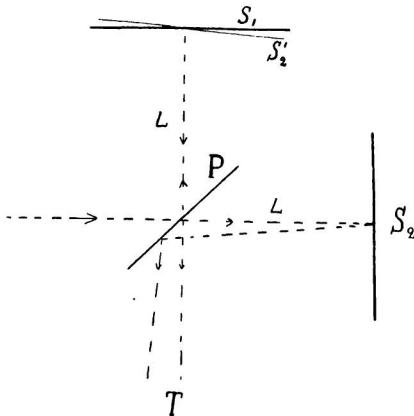


Рис. 10.

такъ называемыя „кривыя одинаковой толщины“, въ данномъ случаѣ прямыя, параллельныя пересѣченію плоскостей S_1 и S'_2 . На этомъ мѣстѣ при употребленіи бѣлаго свѣта появляется центральная ахроматическая полоса.

Пусть зеркала прибора установлены такъ, что эта полоса находится въ серединѣ поля зрѣнія трубы;—это означаетъ, что пути PS_1 и PS_2 , обозначенныя на чертежѣ черезъ L , одинаковы.

Если мы искусственно замедлимъ распространеніе лучей въ одномъ изъ интерферирующихъ пучковъ,—напримѣръ помещеніемъ стеклянной пластинки, то интерференціонное явленіе смѣстится, такъ какъ появится разность хода лучей; тамъ, гдѣ была темнота, можетъ оказаться свѣтъ, и наоборотъ. Смѣщеніе полосъ „на одну

полосу“ соотвѣтствуетъ запозданію одного пучка на цѣлый періодъ колебаній употребленнаго свѣта (при бѣломъ свѣтѣ — на періодъ колебаній въ средней части спектра).

Когда приборъ находится въ движеніи, направленіе котораго параллельно одному изъ интерферирующихъ пучковъ, то, какъ мы видѣли, этотъ пучекъ будетъ замедленъ по сравненію съ другимъ; при поворотѣ на 90° на ту же величину будетъ замедленъ второй пучекъ противъ перваго; слѣдовательно, при такомъ поворотѣ можно ожидать смѣщеніе полосъ на такую долю ширины одной полосы, какую долю періода колебаній составляетъ удвоенная разность

$$2\Delta T = \frac{2L}{c} \cdot \frac{v^2}{c^2}.$$

Раздѣливъ на періодъ колебаній τ получимъ:

$$\frac{2\Delta T}{\tau} = \frac{2L}{c\tau} \cdot \frac{v^2}{c^2}.$$

а замѣтивъ, что произведеніе $c\tau$ равно длинѣ волны λ , получимъ для смѣщенія, выраженнаго въ доляхъ ширины полосъ, величину

$$\frac{2L}{\lambda} \cdot \frac{v^2}{c^2}.$$

Такъ какъ употреблялся бѣлый свѣтъ, то длину волны нужно взять для средней части видимаго спектра, $\lambda = 5.10^{-5}$ см.

Въ первомъ приборѣ Майкельсона (1881) длина L была 1,2 метра, и приборъ вращался на штативѣ, причемъ неизбежны сотрясенія и температурныя вліянія очень затрудняли наблюденія, а подчасъ дѣлали ихъ невозможными. Никакого смѣщенія Майкельсонъ съ увѣренностью не могъ констатировать; но въ данномъ случаѣ несовершенство прибора могло замаскировать ожидаемое явленіе. Слѣ-

дуетъ замѣтить, что Майкельсонъ ожидалъ смѣщеніе вдвое большее, чѣмъ слѣдуетъ по нашей формулѣ, такъ какъ онъ упустилъ изъ виду, что время T для луча, идущаго взадъ и впередъ перпендикулярно къ направленію движенія прибора, также увеличено. (На это указалъ Лоренцъ).

Въ 1887 году *Майкельсонъ* и *Морлей* повторили этотъ опытъ при гораздо болѣе совершенной установкѣ. Многократными отраженіями путь L былъ увеличенъ до 11 метровъ; всѣ зеркала были укрѣплены на массивной каменной плитѣ, плававшей на ртути; во избѣжаніе сотрясеній приборъ приводился въ медленное вращеніе и вращался во все время опыта непрерывно; одинъ наблюдатель отмѣчалъ положеніе прибора, а другой слѣдилъ за положеніемъ интерференціонныхъ полосъ. Было произведено большое число наблюденій, но вмѣсто ожидаемаго періодическаго смѣщенія на

$$\frac{2 \cdot 11 \cdot 10^2 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 10^{-5}} = 0,4 \text{ полосы,}$$

смѣщенія носили случайный характеръ, были не больше 0,02 полосы и находились въ предѣлахъ возможныхъ ошибокъ наблюденій.

Этотъ неожиданный результатъ повелъ къ дальнѣйшей разработкѣ этого вопроса.

Подробный теоретическій разборъ всѣхъ условій опыта приводитъ къ тому же результату, какъ и данная выше элементарная теорія этого опыта; слѣдовательно, необходимо было измѣнить что нибудь въ исходныхъ, фундаментальныхъ предположеніяхъ теоріи.

Проще всего было бы считать этотъ опытъ доказывающимъ, что земля увлекаетъ въ своемъ движеніи окружающій ее эфиръ, и что въ опытахъ на поверхности земли приборы и окружающій ихъ эфиръ находятся въ покоѣ относительно другъ друга; въ такомъ случаѣ конечно

нельзя ожидать какихъ либо измѣненій въ оптическихъ явленіяхъ въ зависимости отъ ориентировки прибора, и все причисленные ко второй группѣ опыты объяснялись бы еще проще, чѣмъ при допущеніи абсолютно покоящагося эфиря. Но тогда возникаютъ серьезныя затрудненія въ объясненіи тѣхъ опытовъ, которые мы отнесли къ первой группѣ, главнымъ образомъ въ теоріи абераціи. Поэтому *Лорентцъ* и *Фицъ-Джеральдъ* предложили иную гипотезу. Для объясненія отрицательнаго результата опыта Майкельсона они вводятъ въ теорію предположеніе, что при движеніи все тѣла сокращаются въ направленіи движенія такъ, что все длины, бывшія въ состояніи покоя равными L , становятся равными

$$L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ или } L \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right)$$

съ точностью до величинъ второго порядка. Какъ нетрудно видѣть, путь свѣтового пучка, идущаго въ интерферометрѣ Майкельсона взадъ и впередъ по направленію движенія земли, по этой гипотезѣ укоротится на

$$2 \cdot \frac{1}{2} L \cdot \frac{v^2}{c^2} = L \cdot \frac{v^2}{c^2},$$

а слѣдовательно время T_1 на $\frac{L}{c} \cdot \frac{v^2}{c^2}$; такъ какъ время T_2 останется безъ измѣненія, то разность $T_1 - T_2$ пропадетъ, а съ ней и эффектъ, который стремился обнаружить Майкельсонъ.

Сокращеніе это, конечно, остается совершенно незамѣтнымъ движущемуся наблюдателю, такъ какъ все его масштабы сокращаются вмѣстѣ съ измѣряемыми тѣлами въ одинаковой мѣрѣ.

Гипотеза эта на первый взглядъ кажется очень странной и выдуманной ad hoc для объясненія только одного

опыта; но нижеслѣдующими соображеніями Лорентцъ показалъ, что она не противорѣчитъ теоретическимъ слѣдствіямъ электромагнитной теоріи. Дѣло въ томъ, что если распространить выводы электронной теоріи до величинъ второго порядка, то получается результатъ, что если покоящаяся *чисто электродинамическая* система (напримѣръ, состоящая изъ однихъ электроновъ) находится въ равновѣсіи при какой-нибудь конфигураціи, то она будетъ въ случаѣ движенія находиться въ равновѣсіи, если приметъ конфигурацію происшедшую изъ первоначальной именно такимъ сокращеніемъ размѣровъ, лежащихъ въ направленіи движенія, какое требуется приписать *всѣмъ вообще тѣламъ* для объясненія отрицательнаго результата опыта Майкельсона. Такимъ образомъ, гипотеза сокращенія становится правдоподобной, если только допустить, что молекулярныя силы, отъ которыхъ въ концѣ концовъ зависятъ размѣры и форма «твердыхъ» тѣлъ, — тоже электродинамическаго характера; конечно, это предположеніе пока еще вполне гипотетическое.

На основаніи этого предположенія легко объясняется отрицательный результатъ, полученный въ опытѣ *Трутона* (1902), повторенномъ затѣмъ *Трутономъ* и *Ноблемъ* (1903). Они подвѣшивали плоскій конденсаторъ такъ, чтобы онъ могъ свободно вращаться около оси, лежащей въ его плоскости. Последняя составляла нѣкоторый уголъ съ направленіемъ движенія. Магнитное поле, возникающее вокругъ движущихся зарядовъ обкладокъ, должно давать всему прибору нѣкоторый моментъ вращенія, измѣряемый величиной второго порядка. Несмотря на достаточную чувствительность, нельзя было замѣтить никакого отклоненія при зарядѣ и разрядѣ конденсатора.

Согласно предположенію Лорентца это объясняется слѣдующимъ образомъ: въ состояніи покоя обѣ обкладки, имѣя заряды противоположнаго знака, притягиваются съ

нѣкоторой силой, но удерживаются въ своемъ положеніи эластическими силами противоположнаго направленія, возникающими въ „твердыхъ“ частяхъ прибора. Если теперь вслѣдствіе движенія электрическая сила взаимодѣйствія между зарядами измѣняется такъ, что получается моментъ вращенія, то по той же самой причинѣ эластическія молекулярныя силы должны измѣниться какъ разъ такъ, чтобы дать обратный моментъ вращенія.

Высказывая свое предположеніе, Лорентцъ ничего не говоритъ относительно того, измѣняется ли при движеніи форма самихъ электроновъ. Если предположить, что она не измѣняется, но допустить продольное сокращеніе тѣлъ, то, какъ показываетъ теорія, въ тѣлахъ изотропныхъ, напирѣмъ, въ жидкостяхъ, въ случаѣ движенія должно появиться двойное лучепреломленіе; скорость распространенія лучей, въ плоскости поляризаціи которыхъ лежатъ направленіе движенія, должна отличаться отъ скорости лучей, поляризованныхъ въ плоскости перпендикулярной къ этому направленію.

Для рѣшенія этого вопроса былъ произведенъ опытъ *Рэлея* (1902); онъ пропускалъ лучи, поляризованные подъ угломъ въ 45° къ направленію движенія, перпендикулярно къ этому направленію черезъ столбъ воды или сѣроуглерода; никакого двойкаго лучепреломленія онъ не могъ замѣтить, хотя въ этихъ опытахъ чувствительность была такова, что ожидаемый эффектъ долженъ былъ бы проявиться отчетливо. Съ такимъ же отрицательнымъ результатомъ остались опыты со стекломъ.

Бросъ въ 1904 году повторилъ опыты *Рэлея*, находя, что ожидаемый эффектъ долженъ быть меньше, чѣмъ по вычисленіямъ *Рэлея*; въ особенности для опыта со стекломъ онъ находитъ, что точность измѣреній была недостаточна. Въ его опытахъ солнечный свѣтъ проходилъ черезъ поляризаторъ, отражался семь разъ отъ зеркалъ, поставленныхъ на

концахъ желоба, наполненнаго водой и затѣмъ анализировался полутѣневымъ анализаторомъ. Весь путь въ водѣ былъ около 28 метровъ. Брѣсъ могъ бы замѣтить двоякое лучепреломленіе порядка $7,8 \cdot 10^{-13}$, однако опытъ далъ совершенно отрицательный результатъ, и тоже самое произошло при повтореніи опыта со стекломъ.

Приведемъ еще опытъ *Трутона и Рэнкина*, которые пытались обнаружить зависимость сопротивленія проводниковъ отъ ориентировки ихъ по отношенію къ направленію движенія, полагая, что если цилиндрическій проводникъ расположенъ длиной по направленію движенія, то сокращеніе по Лорентцу и Фицъ-Джеральду должно уменьшить его сопротивленіе, тогда какъ въ положеніи, перпендикулярномъ къ направленію движенія, это же сокращеніе уменьшаетъ его сѣченіе и, казалось бы, должно увеличить его сопротивленіе.

Морлей и Миллеръ (1904, 1909) при повтореніи опыта Майкельсона монтировали зеркала на деревѣ, въ предположеніи, что можетъ быть величина предположеннаго Лорентцемъ сокращенія зависитъ отъ природы вещества. Благодаря увеличенному размѣрамъ прибора и точной установкѣ, они могли только съ бѣльшей точностью (до одной сотой) констатировать отсутствіе какого-либо эффекта.

Для того, чтобы объединить все эти отрицательные результаты и объяснить ихъ съ помощью немногихъ гипотезъ, *Лорентцъ* въ 1904 году далъ теорію электромагнитныхъ явленій въ движущихся тѣлахъ, опирающуюся на слѣдующія основныя положенія.

Все силы между матеріальными атомами и между атомами и электронами зависятъ отъ скорости движенія совершенно такъ же, какъ и чисто электродинамическія силы между электронами.

Электроны, въ состояніи покоя шарообразные, при дви-

женіи превращаются въ сплюснутые въ направленіи движенія эллипсоиды съ отношеніемъ осей $1 : \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$; поперечные размѣры ихъ не измѣняются.

Матеріальная масса атомовъ зависитъ отъ скорости движенія такъ, какъ зависитъ отъ нея кажущаяся, электромагнитная масса электроновъ.

Эта теорія приводитъ къ окончательному результату, что въ движущейся лабораторіи никакія оптическія и электромагнитныя величины, доступныя наблюденію, не даютъ возможности обнаружить направленіе движенія черезъ эфиръ или измѣрить его величину.

Мы изложили богатый экспериментальный матеріалъ, посвященный вопросу объ электромагнитныхъ и оптическихъ явленіяхъ въ движущихся тѣлахъ, связавъ его съ развитіемъ теоріи Лорентца, придерживающейся существованія эфиря и рассматривающей движенія тѣлъ по отношенію къ нему. Мы видѣли, какимъ образомъ, слѣдуя прогрессу экспериментальнаго искусства чисто индуктивнымъ путемъ, теорія эта была приведена къ важному результату, вполне аналогичному извѣстному принципу классической механики, а именно къ утвержденію, что во всѣхъ электромагнитныхъ явленіяхъ такъ же, какъ и въ чисто механическихъ, всѣ явленія зависятъ только отъ *относительнаго* движенія; что же касается абсолютнаго движенія, или движенія по отношенію къ гипотетическому носителю этихъ явленій, то оно само по себѣ совершенно недоступно наблюденію.

Въ статьяхъ предыдущаго сборника *) читатель най-

*) П. Ленардъ, Эфиръ и матерія; Норманъ Кэмпблль, Эфиръ; Максъ Планкъ, Положеніе новѣйшей физики по отношенію къ механическому міровоззрѣнію.

детъ различныя точки зрѣнія, которыя приняла научная мысль въ оцѣнкѣ этого фундаментальнаго результата.

Математическая форма, въ которую облеченъ конечный результатъ теоріи Лорентца, подготовила почву для развитія одной изъ наиболѣе интересныхъ разработокъ этого результата: *теоріи относительности*; теорія эта, основанная трудами *Эйнштейна* и *Минковского*, не задается вопросомъ объ эфирѣ, а непосредственно исходитъ изъ возведеннаго въ постулатъ результата всей совокупности описанныхъ опытовъ, изъ постулата о принципиальной невозможности для движущагося наблюдателя обнаружить общее равномерное и прямолинейное движеніе совместно съ нимъ движущихся тѣлъ, наблюдая теченіе въ нихъ какихъ-либо физическихъ процессовъ.

Принципъ относительности въ современной физикѣ.

*Проф. I. Классена *).*

Тотъ, кто внимательно слѣдитъ за современной физической литературой, не можетъ не замѣтить, что въ настоящее время въ нѣкоторыхъ основныхъ представленіяхъ физики подготавливается колоссальный переворотъ, который распространится далеко за предѣлы физики, какъ это всегда случалось, когда развитіе какой-либо науки достигало великихъ поворотныхъ пунктовъ. Какъ на внѣшній признакъ чего-то приближающагося новаго, укажемъ только на нѣсколько мнѣній, высказанныхъ въ самое послѣднее время.

О. Д. Хвольсонъ¹⁾ уже въ предисловіи къ своему обширному курсу физики говоритъ, какъ о существованіи матеріи, такъ и о существованіи ээира и считаетъ ихъ принадлежащими къ тѣмъ наиболѣе достовѣрнымъ реальностямъ, о которыхъ можно разсуждать научно. Этимъ проф. О. Д. Хвольсонъ, безъ сомнѣнія, выражаетъ взглядъ того большинства физиковъ, которое принадлежитъ къ старой школѣ. Свой недавно изданный курсъ электричества Ми (Mie)²⁾ называетъ «экспериментальной физикой мірового ээира» и приводитъ въ немъ свойства и физическія

*). I. Classen. Zeitschrift für den physik. und chem. Unterricht Sept. 1910, s. 257.

¹⁾ О. Д. Хвольсонъ, Курсъ физики, т. I, стр. 6. Спб. 1900.

²⁾ Mie, Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus. Stuttgart 1910.

постоянный эфира. Новѣйшее направленіе физики, съ Эйнштейномъ и Планкомъ во главѣ, напротивъ того, намѣрено совершенно вычеркнуть эфиръ изъ физической картины міра.

Въ своей рѣчи, произнесенной на съѣздѣ естествоиспытателей въ Зальцбургѣ, Эйнштейнъ прямо говоритъ: «Мірового эфиръ въ современной физикѣ болѣе не существуетъ, и всѣ представленія, связанные съ его существованіемъ, нужно разсматривать, какъ устраненныя». Еще опредѣленнѣе выражается Планкъ ³⁾ въ послѣдней изъ своихъ лекцій, читанныхъ въ Колумбійскомъ Университетѣ. Онъ высказываетъ тамъ слѣдующее: «Общій принципъ относительности требуетъ, прежде всего, отречься отъ допущенія, введеннаго Г. А. Лорентцомъ, съ цѣлью обосновать свою теорію неподвижнаго эфиръ—допущенія матеріальнаго носителя электромагнитныхъ волнъ... Благодаря этому, свѣтовой эфиръ совершенно исчезаетъ изъ физической теоріи, а вмѣстѣ съ нимъ окончательно уничтожается и возможность понять электромагнитные процессы съ точки зрѣнія механики, т. е. возможность свести ихъ къ движеніямъ... Вмѣсто, такъ называемаго, свободнаго эфиръ, появляется абсолютная пустота, въ которой электромагнитная энергія движется такъ же самостоятельно, какъ и матеріальные атомы. Я полагаю, что будетъ вполне послѣдовательно не надѣлять абсолютной пустоты никакими вообще физическими свойствами»...

Принципъ относительности, вызвавшій этотъ переворотъ, можетъ выполнить свою роль только при условіи кореннаго измѣненія нашего понятія о времени, и по этому поводу Планкъ далѣе говоритъ: „Едва ли нужно подчеркивать, что это новое пониманіе идеи времени предъявляетъ самыя высокія требованія къ способности абстракціи и къ

3) Планкъ, Теоретическая физика. Восемь лекцій. Перев. проф. И. М. Занчевскаго. Спб. Изд. „Образованіе“. 1911.

илѣ воображенія физиковъ. Оно превосходитъ по своей смѣлости все, что до сихъ поръ было сдѣлано въ спекулятивномъ естествознаніи и даже въ философской теоріи познанія. Неэвклидова геометрія есть дѣтская игра въ сравненіи съ нимъ. И, все же, принципъ относительности въ противоположность Неэвклидовой геометріи, привлекавшей до сихъ поръ вниманіе только въ области чистой математики, съ полнымъ правомъ требуетъ для себя реального физическаго объясненія. Съ революціей, произведенной этимъ принципомъ въ области физическаго міропониманія, по своей глубинѣ и широтѣ можетъ сравниться только переворотъ, который произошелъ благодаря введенію міровой системы Коперника“.

Въ виду такихъ утвержденій, краткій обзоръ возникновенія и развитія принципа относительности, навѣрное, будетъ охотно принятъ читателями этого журнала.

Еще до середины прошлаго столѣтія духовный міръ физика былъ заполненъ представленіями Ньютоновской механики. Конечною цѣлью изслѣдованія считалось сведеніе всѣхъ процессовъ къ движеніямъ элементарныхъ частицъ, опредѣляющимся дѣйствующими между этими частицами силами дальнодѣйствія. Полагали, что съ установленіемъ особенностей этихъ частицъ и съ опредѣленіемъ ихъ силъ, быть можетъ, будетъ объяснена и связь между явленіями природы. Но, конечно, нельзя было ограничиться предположеніемъ, что существуютъ только частицы осязаемой матеріи; электрическіе и магнитные процессы настоятельно требовали допущенія, такъ называемыхъ, невѣсомыхъ, т.-е. субстанцій несравненно болѣе тонкихъ, чѣмъ инертная матерія, во всемъ же остальномъ сходныхъ съ ней. Прогрессъ науки привелъ въ заключеніе къ тому, что можно было ограничиться только одной субстанціей, и, такимъ образомъ, стали отличать матерію и эфиръ.

Но затѣмъ постепенно завоевали себѣ общее признаніе

идеи Фарадея и Максвелла. Это были идеи, которыя видѣли въ Ньютоновскихъ силахъ дальнодѣйствія нѣчто противорѣчащее разумному объясненію природы, и которыя замѣнили эти силы дѣйствіями полей. Согласно такому пониманію, всѣ силы нуждаются въ существованіи нѣкотораго носителя и должны представляться умственному оку естествоиспытателя только, какъ напряженія въ нѣкоторой непрерывной средѣ. При такомъ воззрѣніи слѣдуетъ отличать атомы инертной матеріи отъ непрерывнаго ээира, заполняющаго всѣ промежуточные пространства между этими атомами. Всѣ силы представляютъ собою состоянія напряженія въ ээирѣ, т.-е. нѣчто такое, что является слѣдствіемъ движеній внутри ээира; матерія обладаетъ только свойствомъ инерціи.

Отъ этого представленія достаточно сдѣлать небольшой шагъ впередъ, чтобы прійти къ теоріи Лорентца. Математическія операціи показали, что элементарные источники (Quellenpunkte) электрическихъ напряженій въ ээирѣ, существованіе которыхъ подъ видомъ электроновъ было признано и экспериментальной физикой, должны, при данныхъ скоростяхъ, обладать свойствомъ инерціи. Отсюда уже близко къ тому, чтобы оставшееся еще отъ стараго воззрѣнія самое существенное свойство матеріальныхъ атомовъ—свойство инерціи разсматривать, какъ электродинамическую инерцію, и, такимъ образомъ, считать эти матеріальные атомы скопленіями и своеобразными группировками безконечнаго множества электроновъ. Итакъ, полное объясненіе природы было сведено къ опредѣленію свойствъ ээира, состояній его напряженія и къ установленію тѣхъ явленій, которыя должны наступить, когда узловыя точки линій напряженія (или линій силъ) начинаютъ двигаться подъ вліяніемъ взаимодѣйствій. Благодаря этому, вся физика достигла такого единства, которое, какъ казалось, уже не могло сдѣлаться болѣе совершеннымъ.

Если, однако, мѣсто прежней атомистической механики въ физической картинѣ міра заняла физика ээира, созданная Лорентцомъ, то это вовсе еще не влечетъ за собою необходимости окончательно отказаться отъ механическаго объясненія всѣхъ явленій природы. Напротивъ того, новое міровоззрѣніе чрезвычайно близко къ тому, чтобы разсматривать ээиръ, какъ сплошную жидкость, къ которой должны быть примѣнены гидродинамическія уравненія классической механики. Все, что происходитъ въ ээирѣ, должно вытекать, согласно этому, изъ потоковъ, вихревыхъ движеній и изъ силъ сопротивленія, возникающихъ вслѣдствіе деформаций въ немъ; и не было недостатка въ многочисленныхъ попыткахъ построить, согласно этимъ идеямъ, физику ээира, положивъ въ основаніи ея механику такой непрерывной среды; вихревые атомы лорда Кельвина и силы, получающіяся по Бьеркнесу изъ пульсацій въ жидкостяхъ,—вотъ величественнѣйшія попытки, сдѣланныя въ этомъ направленіи.

Осуществима ли, какъ монистическое объясненіе природы, физика ээира въ томъ видѣ, въ какомъ она предложена Лорентцомъ, и можетъ ли она быть сведена къ принципамъ механики — это вопросы, которые могъ разрѣшить только опытъ. По поводу послѣдняго пункта уже имѣется, повидимому, окончательное рѣшеніе, такъ какъ изслѣдованія Витте *) доказали математически, что тѣ особая распредѣленія энергіи, которыя, въ силу опытныхъ данныхъ, должны существовать въ ээирѣ Лорентца, никоимъ образомъ не могутъ быть выведены на основаніи принциповъ механики непрерывной среды. Поэтому надежда на достиженіе монистической картины міра кажется разрушен-

*) Hans Witte, Ueber den gegenwärtigen Stand der Frage nach einer mechanischen Erklärung der elektrischen Erscheinungen, Berlin, 1906.

ной навсегда, и, вмѣстѣ съ тѣмъ, чистая физика эѳира приобрѣтаетъ самостоятельное значеніе. Если Лорентцъ могъ разсматривать матеріальные атомы, какъ конгломераты электроновъ, а инерцію массъ исключительно, какъ электродинамическое дѣйствіе, то невозможно отказаться отъ мысли, что въ такомъ случаѣ и вся прежняя механика, которая была скроена только изъ описанія инертныхъ массъ, быть можетъ, вытекаетъ, какъ частный случай, изъ всеобъемлющей физики эѳира или электродинамики. Въ настоящее время, послѣ появленія работы В. Вина *), къ такому пониманію склоняется большинство извѣстныхъ физиковъ; и вышеупомянутый курсъ электричества Ми стоитъ всецѣло на этой точкѣ зрѣнія.

Эта общая физика эѳира, въ основѣ своей, является только самымъ простымъ и непосредственнымъ въ настоящее время описаніемъ всего извѣстнаго намъ въ области электричества, магнетизма и оптики; и только идеѣ, что, быть можетъ, эта физика эѳира призвана служить опорой механикѣ и ученію о теплотѣ, обязана она своимъ основнымъ значеніемъ для всей физической картины міра. Но, чтобы удовлетворить всѣмъ требованіямъ, вытекающимъ изъ данныхъ опыта, физика эѳира должна выдержать еще одно, самое трудное, испытаніе. Весь логическій ходъ мыслей Лорентца приводитъ къ тому, чтобы разсматривать эѳиръ, какъ непрерывную субстанцію, заполняющую все пространство. Эѳиръ—это физическій объектъ пустого пространства, какъ опредѣляетъ его Ми. Но въ виду того, что представленіе пустого пространства, движущагося какъ цѣлое или въ своихъ частяхъ, лишено всякаго смысла, то и эѳиръ представляетъ собою то, что въ пространствѣ находится въ состояніи покоя. Движенія эѳира мы не наблю-

*) W. Wien, Ueber die Möglichkeit einer electromagnetischen Begründung der Mechanik. *Drudes Annalen* 5 (1901). S. 501.

даемъ; но, подобно тому, какъ въ водѣ мы замѣчаемъ распространеніе волнъ, хотя сама вода и остается въ покоѣ, такъ и въ эфирѣ мы наблюдаемъ движеніе узловыхъ пунктовъ линій напряженія, т.-е. движеніе электроновъ, хотя эфиръ, какъ таковой, неподвиженъ. Особенность построенія теоріи Лорентца въ томъ и заключается, что силы, подъ влияніемъ которыхъ пришелъ бы въ движеніе самъ эфиръ, никогда не могутъ быть обнаружены; всѣ силы вызываетъ только движеніе электроновъ.

Представленіе абсолютно неподвижнаго ээира является неизбѣжнымъ для всего этого умозрѣнія; только одно это представленіе находится въ соотвѣтствіи съ нѣкоторыми всѣмъ извѣстными явленіями. Мы замѣчаемъ, что лучи свѣта, исходящіе изъ всѣхъ неподвижныхъ звѣздъ, всегда на нѣкоторый уголъ отклоняются отъ своего направленія въ сторону движенія земли. Это — явленіе абераціи неподвижныхъ звѣздъ; оно объясняется безъ всякихъ затрудненій, если свѣтъ состоитъ изъ колебаній, распространяющихся въ абсолютно неподвижномъ ээирѣ. Но объясненіе абераціи натолкнулось бы на непреодолимые трудности, если бы самъ ээиръ двигался и, вслѣдствіе этого, колебанія увлекались бы имъ. Если космическое тѣло съ большою скоростью приближается къ намъ, то оказывается, что свѣтовые волны испускаемыхъ имъ лучей укорочены. Мы вычисляемъ, на основаніи принципа Доплера-Физо, скорость этого тѣла. Примѣненіе принципа Доплера-Физо также предполагаетъ неподвижность ээира, и мы должны были бы совершенно отказаться отъ его примѣненія, если бы ээиръ, какъ таковой, принималъ участіе въ движеніи свѣтовыхъ волнъ.

Если же теорія Лорентца требуетъ существованія въ абсолютномъ пространствѣ покоящагося ээира, какъ объекта, по отношенію къ которому происходятъ всѣ

явленія природы, то этимъ она открываетъ широкіе горизонты для изслѣдованій, которыя окончательно выходятъ изъ области старой механики, такъ какъ она—эта теорія,—какъ будто, даетъ возможность опредѣлить и абсолютное движеніе тѣлъ въ пространствѣ. Средства, бывшія въ распоряженіи классической механики, позволяли всегда говорить только объ относительныхъ скоростяхъ тѣлъ, и невозможно было придумать опытъ, который могъ бы какимъ-нибудь способомъ выяснить, обладаютъ ли всѣ тѣла, участвующія въ опытѣ, равномерной скоростью относительно даннаго третьяго тѣла или не обладаютъ. Наблюдая какія-либо движенія въ пространствѣ, заключенномъ внутри корабля, скользящаго спокойно по поверхности воды, мы никогда не будемъ въ состояніи заключить, на основаніи этихъ движеній, какъ двигается самъ корабль. Если же движеніе корабля мѣняется, если это движеніе получаетъ ускореніе или замедляется, или, наконецъ, измѣняетъ свое направленіе, то мы получаемъ возможность судить объ этомъ по движенію тѣлъ внутри корабля; но равномерное движеніе всей системы этихъ тѣлъ внутри самой системы не можетъ быть доказано. Равномерное движеніе мы можемъ, вообще говоря, представить лишь несовершенно.

Мы можемъ, на примѣръ, представить скорость корабля относительно воды или же относительно морского берега; объ скорости въ большинствѣ случаевъ будутъ различны. Принявъ во вниманіе движеніе земли, мы можемъ представить скорость корабля относительно солнца или относительно неподвижныхъ звѣздъ; но во всѣхъ этихъ случаяхъ мы не приходимъ ни къ одному дѣйствительно неподвижному предмету, по отношенію къ которому мы могли бы говорить объ истинной скорости корабля. Въ механикѣ это положеніе вещей выражается въ томъ, что въ уравненія движенія, данныя Лагранжемъ, входятъ

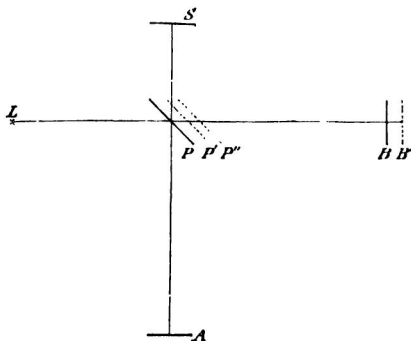
только ускоренія; поэтому при всякомъ опредѣленіи скорости одна постоянная интегрированія всегда остается неопредѣленной.

Совершенно иначе обстоитъ этотъ вопросъ въ Лорентцовой физикѣ ээира. Послѣдній является, такъ сказать, носителемъ свѣтовыхъ волнъ. Эти волны распространяются съ опредѣленной скоростью, которая представляетъ существенное свойство ээира. При измѣреніи скорости распространенія свѣтовыхъ волнъ, должны получиться различныя числа, въ зависимости отъ того, будетъ ли это измѣреніе произведено на поверхности тѣла неподвижнаго относительно ээира или двигающагося въ немъ. Если абсолютная величина скорости свѣта извѣстна, то по отступленію величины, найденной путемъ опыта отъ этой абсолютной величины, можно вычислить абсолютную скорость того тѣла, на поверхности котораго былъ сдѣланъ опытъ. Но измѣренія скорости свѣта, производимыя на поверхности одного и того же двигающагося тѣла, должны дать различныя величины, смотря по тому, наблюдается ли свѣтъ въ направленіи движенія, противоположно этому направленію, или перпендикулярно къ нему. Для доказательства существованія этой разницы въ скоростяхъ свѣта Майкельсонъ (Michelson) придумалъ опытъ, который съ тѣхъ поръ съ величайшей тщательностью былъ неоднократно повторенъ какъ имъ самимъ, такъ и другими физиками. Установка этого знаменитаго опыта, въ главныхъ чертахъ, сводилась къ слѣдующему:

Одна часть свѣтовыхъ лучей, идущихъ отъ источника *L*, отражается отъ полупрозрачнаго стекла *P* по направленію къ зеркалу *A* и отсюда, пройдя обратно черезъ стекло *P*, направляется къ экрану *S*, служащему для наблюденій. Другая часть лучей проникаетъ черезъ *P*, отражается отъ зеркала *B* и на обратномъ пути снова отражается по направленію къ экрану *S*. Если вся система покоится въ ээирѣ,

и пути PA и PB равны между собой, то оба пучка лучей пройдут равные пути, прежде чѣмъ встрѣтятся другъ съ другомъ у экрана S . Тогда, при помощи соотвѣтствующей оптической установки, можно заставить ихъ образовать на экранѣ опредѣленную систему интерференціонныхъ полосъ. Если этотъ опытъ въ дѣйствительности осуществляется на землѣ, то можно линію PB направить въ сторону поступательнаго движенія земли. Пока свѣтъ распространяется отъ стекла P къ зеркалу B , послѣднее успѣваетъ занять положеніе B' , а P переходитъ въ P' . Слѣдовательно, теперь отраженіе свѣта отъ B' послѣдуетъ позднѣе. Но зато на обратномъ пути пучокъ лучей прійдетъ уже не въ P' , а въ P'' . Такъ какъ, однако, продолжительность пути свѣта отъ P къ B' болѣе продолжительности пути отъ B' къ P'' то $P'P''$ менѣе, чѣмъ BB' , и, слѣдовательно, весь путь $PB'P''$ лучей больше въ томъ случаѣ, когда опытъ происходитъ на землѣ, чѣмъ въ томъ случаѣ, когда установка покоилась бы относительно ээира. Но лучъ, направляющійся къ A не испытываетъ подобнаго измѣненія своего пути; отсюда слѣдуетъ, что въ случаѣ опыта на землѣ пучки свѣтовыхъ лучей, достигшіе экрана S , находятся въ иныхъ фазахъ, чѣмъ въ идеальномъ опытѣ, производимомъ въ покоящемся ээирѣ, т.-е. они должны вызвать смѣщеніе интерференціонныхъ полосъ. Такъ какъ идеальный опытъ осуществить нельзя, то можно весь приборъ различно ориентировать относительно поступательнаго движенія земли, и, въ зависимости отъ того, будутъ ли отрѣзки PA и PB направлены въ сторону движенія земли или же въ противоположную сторону, должна измѣняться картина интерференціонныхъ полосъ на экранѣ S . Далѣе, такъ какъ невозможно узнать, какое именно направленіе есть направленіе абсолютнаго движенія земли, то Майкельсонъ устроилъ такъ, что весь приборъ имѣлъ возможность вращаться вокругъ вертикальной оси, проходящей черезъ середину

стекла P , и затѣмъ наблюдалъ интерференціонныя полосы, въ то время, какъ приборъ постепенно поворачивался вокругъ этой оси. Опытъ былъ продѣланъ нѣсколько разъ въ различное время дня и года, но, несмотря на это, ре-



зультатъ его всегда оказывался отрицательнымъ: никакого смѣщенія интерференціонныхъ полосъ нельзя было замѣтить. Опытъ противорѣчитъ теоріи абсолютно неподвижнаго ээира, въ той ея формѣ, которая принималась до сихъ поръ; слѣдовательно, эта теорія еще нуждается въ дополненіи.

Лорентцъ и Фитцджеральдъ (Fitzgerald) предложили дополненіе къ теоріи покоющагося ээира, въ силу котораго и результаты опыта Майкельсона оказываются справедливыми. Такъ какъ путь $PB'P''$ свѣтовыхъ лучей слишкомъ великъ, чтобы можно было допустить неизмѣнность положенія интерференціонныхъ полосъ на экранѣ, то результаты наблюдений могутъ быть объяснены, если предположить, что, двигаясь сквозь ээиръ, отрѣзокъ PB , а вмѣстѣ съ нимъ и всѣ вообще линейныя размѣры тѣлъ, расположенныя въ направленіи движенія земли, укорачиваются. Такъ какъ скорость свѣта весьма велика, то предполагаемое въ силу необходи-

мости укорачиваніе какой-нибудь линейной величины будетъ весьма мало, и если при томъ всё безъ исключенія тѣла подвергнутся одинаковому укорачиванію, то существованіе послѣдняго должно будетъ ускользнуть отъ всякаго непосредственнаго наблюденія, тогда какъ результатомъ опыта Майкельсона оно, наоборотъ, будетъ косвеннымъ образомъ доказано.

Съ перваго взгляда такое измѣненіе размѣровъ всѣхъ тѣлъ при абсолютномъ движеніи ихъ представляется совершенною целѣностью. Но если вникнуть въ теорію неподвижнаго зэора глубже, то это предположеніе вскорѣ теряетъ свой обликъ целѣности. Вычисленіе показываетъ, что, при движеніи электрона черезъ зэиръ, исходящія изъ него силовыя линіи непремѣнно претерпѣваютъ деформацію; вдоль по оси движенія силовыя линіи распредѣляются въ маломъ количествѣ, но въ плоскости, перпендикулярной къ направленію движенія, по мѣрѣ возрастанія скорости, онѣ стгущаются все болѣе и болѣе. Если вся матерія состоитъ исключительно изъ электронныхъ группъ, то естественно предположить, что вмѣстѣ съ этой деформаціей силовыхъ линій сами электронныя группы также претерпѣваютъ сдвигъ, вслѣдствіе чего и получается измѣненіе въ размѣрахъ тѣлъ. Какъ бы то ни было, эта гипотеза изумляетъ своею смѣлостью и величіемъ и, какъ будто, не вполне соотвѣтствуетъ той цѣли, ради которой она была придумана — истолковать результаты только одного опыта. И дѣйствительно, самъ по себѣ, этотъ опытъ едва ли привелъ бы къ столь необычайной гипотезѣ, если бы между нею и нами рѣшающимъ посредникомъ не выступило нѣкое неопредѣленное чувство. Почему именно — въ точности трудно сказать,—но давно уже мы привыкли считать фантазіей идею доказательства абсолютнаго движенія въ пространствѣ, и если, поэтому, какая-нибудь физическая теорія въ своемъ простѣйшемъ видѣ обнаружить способность

доказать существованіе абсолютнаго движенія, то мы легко склоняемся къ тому, чтобы въ этомъ именно и видѣть уязвимое мѣсто теоріи. Вотъ почему въ расширеніи теоріи ээира, предложенномъ Лорентцомъ и Фитцджеральдомъ, самое существенное заключается, собственно, не въ идеѣ измѣненія размѣровъ всѣхъ тѣлъ, но въ томъ, что свойства ээира должны быть таковы, что доказать существованіе абсолютнаго движенія, вообще говоря, невозможно. Всѣ явленія, которыя мы въ состояніи прослѣдить, находятся всегда въ тѣсной зависимости только отъ относительныхъ движеній тѣлъ, участвующихъ въ этихъ явленіяхъ; поэтому-то разсматриваемый принципъ былъ названъ принципомъ относительности. Въ своемъ курсѣ электричества Ми далъ слѣдующую формулировку этому принципу: „Всѣ дѣйствія ээира подчиняются такимъ законамъ, что наблюденія, производимыя изъ нѣкоторой системы, движущейся поступательно съ постоянной и равномерной скоростью, наблюдателемъ, участвующимъ въ этомъ движеніи, математически абсолютно совпадаютъ съ тѣми наблюденіями, которыя были бы продѣланы изъ системы, составленной изъ тѣхъ же элементарныхъ частицъ, если бы и система и наблюдатель находились въ абсолютномъ покоѣ».

Вотъ это и есть принципъ относительности; мы видимъ, что, по своей сущности и по своему происхожденію, онъ является ничѣмъ инымъ, какъ выраженіемъ нѣкотораго неопредѣленнаго и глубоко заложеннаго въ насъ чувства, которое переносится на внѣшній міръ, и которое должно найти свое оправданіе въ законмѣрныхъ свойствахъ ээира, служащаго всему объясненіемъ.

Здѣсь выступаютъ на сцену работы Эйнштейна. Эйнштейнъ обратилъ вниманіе на то, что теорія Лорентца имѣетъ дѣло не только съ абсолютнымъ пространствомъ, но и съ абсолютнымъ временемъ. Если, однако мы считаемъ необходимымъ исключить изъ нашихъ вычисленій величины, отно-

сящіяся къ абсолютному пространству, то подобное же требованіе можно предъявить и по отношенію къ абсолютному опредѣленію времени. Это ведетъ къ болѣе точному опредѣленію относительнаго измѣренія времени. Если выполнить это измѣреніе, то уравненія, относящіяся къ принципу относительности, получаются, какъ нѣчто само собою разумѣющееся. Итакъ, вмѣсто того, чтобы представленіе объ абсолютномъ пространствѣ согласовать при помощи свойствъ гипотетическаго ээира съ экспериментальными данными, Эйнштейнъ, напротивъ того, дополняетъ прежнее представленіе, согласно которому абсолютное пространство никоимъ образомъ не можетъ являться *основною системою* (*Bezugssystem*), т. е. системою, съ которою неизмѣнно связаны оси координатъ, соотвѣтствующимъ новымъ представленіемъ, согласно которому мы не можемъ также никогда имѣть дѣло съ абсолютнымъ опредѣленіемъ времени. Благодаря этому, онъ приходитъ къ такимъ же математическимъ выраженіямъ, какія были получены Лорентцомъ и Фитцджеральдомъ. Слѣдующія разсужденія пояснятъ намъ это.

Если положеніе отдѣльныхъ частей данной матеріальной системы отнести къ какой-нибудь системѣ координатъ, то одновременность событій въ двухъ различныхъ мѣстахъ этой матеріальной системы можно установить только въ томъ случаѣ, если въ этихъ двухъ мѣстахъ въ нашемъ распоряженіи будутъ приборы, измѣряющіе время, т.-е. часы, и если мы будемъ наблюдать, одинаковое ли время показываютъ часы въ моментъ наступленія событій. Но всякіе часы являются такимъ физическимъ приборомъ, которому предварительно долженъ быть данъ правильный ходъ; поэтому предыдущее опредѣленіе предполагаетъ еще, что часы предварительно были свѣрены другъ съ другомъ, и что они показываютъ одинаковое время. Для того, чтобы въ каждомъ мѣстѣ системы имѣть возможность опредѣлить время наступ-

нающаго событія, мы должны въ каждомъ мѣстѣ имѣть часы, которые должны быть сравнены съ нормальными часами.

Сравненіе двухъ часовъ, находящихся въ различныхъ мѣстахъ, можетъ быть осуществлено двумя способами. Можно перенести часы въ то мѣсто, гдѣ находятся нормальные часы, сравнить ихъ здѣсь и снова унести на прежнее мѣсто; при этомъ, само собою понятно, предполагается, что перенесеніе часовъ туда и обратно не вліяетъ на показаніе ихъ. Такимъ образомъ, можно въ каждомъ мѣстѣ основной системы установить часы и тѣмъ дать возможность опредѣлять время. Но пару часовъ, имѣющихся въ двухъ различныхъ мѣстахъ, можно сравнить другъ съ другомъ еще инымъ образомъ, а именно, можно изъ одного мѣста, въ которомъ находятся одни часы, наблюдать показанія часовъ, находящихся въ другомъ мѣстѣ. Если тѣ и другіе часы, согласно сравненію по первому способу, даютъ одно и то же время, то отдаленные часы, при сравненіи часовъ по второму способу, должны показывать болѣе раннее время, такъ какъ свѣтъ требуетъ времени, чтобы пройти разстояніе отъ нихъ до наблюдателя. Зная скорость свѣта и это разстояніе, можно воспользоваться ими для вычисленій и затѣмъ произвести сравненіе часовъ. До тѣхъ поръ, пока система съ неизмѣнно связанными съ нею координатами и часы находятся въ покоѣ въ пространствѣ, оба способа сравненія часовъ однозначущи по отношенію другъ къ другу и даютъ одинаковые результаты. Но если мы представимъ себѣ, что наша система и часы на ней двигаются въ пространствѣ, то результаты второго способа сравненія часовъ должны зависѣть также и отъ отношенія предполагаемой скорости движенія къ скорости свѣта; первый же способъ не находится ни въ какой зависимости отъ этого движенія. Такимъ образомъ, оба способа сравненія часовъ теперь уже болѣе не дадутъ согласныхъ результатовъ, если не будетъ извѣстно абсолютное движеніе осей координатъ, неизмѣнно связанныхъ съ данной матеріальной

системой. Какой же изъ способовъ сравненія часовъ является правильнымъ?

Первый способъ, очевидно, предполагаетъ, что существуетъ абсолютное время, независящее отъ мѣста, и что мы можемъ воспользоваться этимъ временемъ при нашихъ вычисленіяхъ и установить его для каждаго мѣста въ отдѣльности. Часы—это такое орудіе человѣка, цѣлью котораго является опредѣлить время, и которое можетъ быть переносимо съ мѣста на мѣсто. Мы не затрагиваемъ вопроса, возможно ли изготавить такое орудіе и затѣмъ примѣнять его во всѣхъ случаяхъ. До тѣхъ поръ, пока мы ограничиваемся тѣмъ небольшимъ пространствомъ, которое мы люди переступить не можемъ, въ такомъ представленіи нѣтъ, повидимому, ничего несообразнаго, въ особенности, если принять во вниманіе, что внутри этого замкнутаго пространства при колоссальной величинѣ скорости свѣта не обнаруживается замѣтная разница между обоими способами измѣренія времени. Но получаютъ совершенно другія соотношенія, какъ только мы распространимъ сказанное на міровое пространство.

Предположимъ, что на поверхности солнца мы наблюдаемъ протуберанецъ, когда наши часы показываютъ 1 ч. 15 мин. Съ какимъ событіемъ вблизи насъ совпадаетъ по времени появленіе протуберанца? Конечно, не, съ тѣмъ моментомъ, когда наши часы показывали 1 ч. 15 мин., ибо, принимая во вниманіе разстояніе между солнцемъ и землей, мы должны считаться съ тѣмъ обстоятельствомъ, что свѣтовому лучу нужно 8 мин. для прохожденія разстоянія отъ солнца до земли. Слѣдовательно, выводимъ мы заключеніе, въ дѣйствительности протуберанецъ появился въ 1 ч. 7 м. Но это заключеніе допустимо только при томъ условіи, если мы предполагаемъ, что земля и солнце, по отношенію къ пространству, передающему свѣтотыя волны, неподвижны. Но если мы вспомнимъ, что солнце и земля участвуютъ въ одномъ общемъ движеніи черезъ

міровое пространство, то это движеніе должно отражаться на опредѣленіи времени солнечнаго событія. Если бы опытъ Майкельсона привелъ къ положительному результату, то можно было бы опредѣлить абсолютное движеніе въ космическомъ пространствѣ, а затѣмъ мы могли бы при помощи вычисленій установить и абсолютную одновременность солнечнаго и земнаго событій. Но такъ какъ мы признаемъ, что опытъ Майкельсона далъ отрицательный результатъ, и считаемъ, что опредѣленіе абсолютнаго движенія въ міровомъ пространствѣ принципиально невозможно, то и абсолютное сравненіе времени для мѣстъ, удаленныхъ другъ отъ друга, выходитъ за предѣлы возможнаго. Если бы первый способъ сравненія часовъ, независащій до нѣкоторой степени отъ времени, можно было примѣнить здѣсь, то мы могли бы воспользоваться имъ въ нашемъ случаѣ для опредѣленія абсолютнаго движенія, что противорѣчитъ теперь нашему предположенію. Итакъ, остается только второй способъ сравненія часовъ, какъ единственный способъ опредѣленія времени событій на удаленныхъ другъ отъ друга мѣстахъ. Слѣдовательно, представленія абсолютнаго пространства и абсолютнаго времени, какъ допускаемыхъ основныхъ системъ, непремѣнно связаны другъ съ другомъ; съ паденіемъ перваго представленія исчезаетъ изъ нашего кругозора и второе, а въ такомъ случаѣ возникаетъ необходимость новаго опредѣленія понятія «одновременно». Это опредѣленіе выразится теперь въ слѣдующей формѣ: «Два событія, наступившія въ двухъ различныхъ мѣстахъ A и B , наблюдатель назоветъ одновременными въ томъ случаѣ, если оптический сигналъ, сообщающій мѣсту A о событіи происшедшемъ въ B , будетъ виденъ настолько позднѣ наступленія событія въ A , насколько этому соответствуетъ отношеніе разстоянія AB къ скорости свѣта». Въ силу этого опредѣленія, наблюдатель устанавливаетъ въ различныхъ мѣстахъ своей основной системы времена

однозначно по отношенію другъ къ другу, онъ предварительно долженъ только установить величину скорости свѣта. Но установить скорость свѣта возможно; для этого наблюдателю достаточно послать оптическій сигналъ по направленію къ зеркалу, отстоящему отъ наблюдателя на данномъ разстояніи и измѣрить то время, которое протечетъ между отправленіемъ оптическаго сигнала и его возвращеніемъ. (Опытъ Физо для опредѣленія скорости свѣта).

Однако не только одинъ наблюдатель, согласно приведенному опредѣленію, создаетъ для самого себя общую мѣру времени, но два различныхъ наблюдателя также могутъ привести полученныя ими времена въ однозначное соотвѣтствіе одно къ другому. Опытъ Майкельсона учить прежде всего тому, что опредѣленіе скорости свѣта даетъ одному наблюдателю одно и то же значеніе, независимо отъ того, по какому направленію этотъ наблюдатель производитъ свои наблюденія. Предположимъ, что два наблюдателя *A* и *B*, находящіеся въ двухъ различныхъ мѣстахъ, двигаются другъ относительно друга; пусть наблюдатель *A* находитъ для скорости свѣта величину c , а *B*—величину c' . Если бы мы сказали, что c' можетъ быть больше c , то съ такимъ же точно правомъ мы могли бы доказывать, что c должно быть больше c' , потому что величина c' для всѣхъ направленій движенія наблюдателя *B* совершенно одинакова, а мы знаемъ только одно относительное движеніе между *A* и *B*. Слѣдовательно, не остается ничего другого, какъ принять, что $c=c'$, т.-е. что оба наблюдателя обладаютъ одинаковой мѣрой времени внутри ихъ основной системы. Несмотря на это, два событія, представляющіяся наблюдателю *A* одновременными, съ точки зрѣнія наблюдателя *B* могутъ быть и неодновременными. Чтобы выяснить послѣдствія, вытекающія изъ этого пониманія, попытаемся сначала математически формулировать счетъ времени при новомъ его понятіи и примѣнить этотъ счетъ на нѣкоторыхъ примѣрахъ.

Предположимъ, что наблюдатель A разсматриваетъ всѣ событія относительно координатной системы x, y, z и пользуется временемъ t , а наблюдатель B для тѣхъ же событій употребляетъ систему x', y', z', t' . Не нанося никакого ущерба общности разсужденій, мы можемъ предположить, что соотвѣтственно обозначенныя оси координатъ обѣихъ системъ параллельны другъ другу, и что, оси x и x' совпадаютъ одна съ другою. Пусть наблюдатель B движется относительно наблюдателя A по направлению x и со скоростью v . Тогда точка $x = 0, y = 0, z = 0$ съ точки зрѣнія наблюдателя B будетъ имѣть координаты $x' = x - vt, y' = 0, z' = 0$; отсюда мы можемъ заключить, что уравненія преобразованія, дающія возможность перейти отъ системы A къ системѣ B , въ общемъ случаѣ, должны имѣть слѣдующій видъ:

$$x' = a(x - vt), y = by, z = cz;$$

обратное преобразование будетъ выполнено при помощи уравненій:

$$x = a'(x' - vt'), y = y'b', z = c'z'.$$

Такъ какъ $b = \frac{1}{b'}$ и $c = \frac{1}{c'}$ и такъ какъ системы A и B другъ относительно друга совершенно равноцѣнны, то, прежде всего, мы можемъ заключить, что непремѣнно $b = b' = c = c' = 1$. Чтобы опредѣлить еще коэффициенты a и a' , мы должны обратить вниманіе на то, что для обоихъ наблюдателей скорость свѣта должна имѣть одно и то же значеніе c . Поэтому, взявъ выраженіе $x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2$ и преобразовывая его при помощи вышеприведенныхъ уравненій къ координатамъ со значками, мы должны получить уравненіе $x'^2 + z'^2 + y'^2 = c^2t'^2$.

Но выполняя подстановку мы получаемъ:

$$a'^2(x' - vt')^2 + y'^2 + z'^2 = c^2t'^2,$$

или

$$a'^2x'^2 - 2a'^2x'vt' + a'^2v^2t'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2t'^2$$

Это уравненіе можетъ сдѣлаться тождественнымъ съ требуемымъ только при томъ условіи, если исчезнуть члены, содержащіе $x't'$, если коэффициентъ при x'^2 будетъ равенъ 1, и если коэффициентъ при t'^2 окажется равнымъ c^2 . Полагая поэтому $t = mt' - nx'$, мы получимъ три слѣдующихъ уравненія, выражающія наши условія:

$$a'^2v = c^2mn, \quad a'^2 - c^2n^2 = 1, \quad c^2m^2 - a'^2v^2 = c^2.$$

Рѣшеніе этихъ уравненій показываетъ, что должно быть:

$$a' = m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad \text{— эту величину мы будемъ впредь}$$

обозначать черезъ β —и что

$$n = \beta \frac{v}{c^2}.$$

Вслѣдствіе этого мы получаемъ уравненія преобразованія:

$$x = \beta (x - vt); \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = \beta \left(t - \frac{v}{c^2} x \right).$$

и обратныя уравненія:

$$x' = \beta (x' + vt'); \quad y = y'; \quad z = z'; \quad t = \beta \left(t' + \frac{v}{c^2} x' \right).$$

Обѣ системы формулъ имѣютъ одинаковые коэффициенты и отличаются только знакомъ при v , какъ это слѣдовало ожидать вслѣдствіе полной равноцѣнности системъ A и B . Благодаря этимъ уравненіямъ, переходъ отъ одной относительной системы къ другой теперь вполне обезпеченъ.

Въ видѣ примѣра примѣненія этихъ уравненій, представимъ себѣ, что каждый изъ наблюдателей A и B наблюдаетъ одну и ту же систему плоскихъ свѣтовыхъ волнъ. Тогда, если косинусы угловъ между направленіями лучей (нормалей къ поверхностямъ волнъ) и направленіями координатныхъ осей будутъ соответственно l , m , n , наблюдатель A будетъ полагать, что свѣтовой векторъ пропорционаленъ

$$\sin 2\pi\nu \left(t - \frac{lx + my + nz}{c} \right);$$

а съ точки зрѣнія наблюдателя *B* эта величина будетъ пропорціональна

$$\sin 2\pi\nu' \left(t - \frac{lx' + my' + nz'}{c} \right),$$

здѣсь ν и ν' обозначаютъ частоты колебаній. Если мы приведемъ съ помощью нашихъ уравненій преобразованія первое выраженіе къ виду второго, то получится, что должны удовлетворяться слѣдующія равенства:

$$\nu' = \nu\beta \left(1 - l\frac{v}{c} \right), \quad l' = \frac{l - \frac{v}{c}}{1 - l\frac{v}{c}},$$

къ этимъ равенствамъ присоединяются еще подобныя же выраженія для m' и n' . Первое изъ этихъ равенствъ показываетъ, какую частоту замѣчаетъ наблюдатель *B*, если наблюдатель *A* наблюдаетъ частоту ν . Если мы предположимъ, что источникъ свѣта въ системѣ *B*, неподвиженъ и что вся система удаляется отъ *A* съ относительною скоростью v , то наблюдатель *A* обнаружитъ, что частота

$$\nu = \frac{\nu'}{\beta \left(1 - l\frac{v}{c} \right)}; \text{ здѣсь величина } l \text{ обозначаетъ коси-}$$

нусъ угла между направлениемъ луча и направлениемъ движенія (v). Въ этой формѣ уравненіе полностью выражаетъ принципъ Допплера-Физо. Отъ обычной формулы для этого принципа наше уравненіе отличается только множителемъ β , который будетъ равенъ единицѣ, если пренебrecь дробью $\frac{v^2}{c^2}$. Если свѣтовая волна удаляется отъ наблюдателя *B* по линіи, соединяющей этого наблюдателя съ источникомъ свѣта, то $l = 1$.

Если же, наоборотъ, мы представимъ себѣ, что наблюдатель В и его система двигаются, а источникъ свѣта въ системѣ А неподвиженъ, то уравненіе для l' показываетъ въ какомъ направленіи источникъ свѣта виденъ изъ нѣкотораго мѣста системы В, если другой наблюдатель, не принимающій никакого участія въ движеніи (v), видитъ этотъ источникъ свѣта по направленію l , т.-е. $l' - l$ измѣряетъ собою ту величину аберраціи, которую мы наблюдаемъ для неподвижныхъ звѣздъ; мы имѣемъ

$$l' - l = \frac{\frac{v}{c} (l^2 - 1)}{1 - l \frac{v}{c}} .$$

Если звѣзда находится въ зенитѣ, то $l = 0$, и слѣдовательно,
 $l' - l = - \frac{v}{c} .$

Итакъ мы видимъ, что уравненія преобразованія, данныя Эйнштейномъ, съ такимъ же успѣхомъ удовлетворяютъ принципу Доплера - Физо и аберраціи неподвижныхъ звѣздъ, какъ и результату опыта Майкельсона, на значеніи котораго они, впрочемъ, сами основываются. Разсматривая еще величину разстоянія между двумя точками въ обѣихъ системахъ, неизмѣнно связанныхъ съ осями координатъ, мы найдемъ, что проекціи $x_1 - x_2$, $y_1 - y_2$, $z_1 - z_2$ этого разстоянія, въ силу нашихъ уравненій преобразованія, превращаются въ величины: $\frac{1}{\beta} (x'_1 - x'_2)$, $y'_1 - y'_2$, $z'_1 - z'_2$.

Но это обозначаетъ, что линейные размѣры тѣла, находящагося въ состояніи покоя въ системѣ А, если наблюдать изъ системы В, кажутся укороченными въ направленіи движенія въ $\frac{1}{\beta}$ разъ. Но это какъ разъ та величина укорачиванія, которую должны были предположить Лорентцъ и

Фитцджеральдъ, чтобы привести свою теорію въ соотвѣтствіе съ опытомъ Майкельсона; это укорачиваніе, по Лорентцу и Фитцджеральду, является слѣдствіемъ движенія тѣла черезъ неподвижный эфиръ, тогда какъ здѣсь оно получается, какъ результатъ измѣненнаго опредѣленія времени.

Уравненія преобразования, данныя Эйнштейномъ, выражаютъ принципъ относительности въ кратчайшей и самой послѣдовательной формѣ и рѣшаютъ въ наиболѣе общемъ видѣ слѣдующую задачу: воспроизвести законы природы въ такой формѣ, чтобы преобразование найденныхъ закономѣрныхъ соотношеній къ системѣ координатъ, неизмѣнно связанной съ данной матеріальной, равномерно движущейся системой, не оказало никакого вліянія на форму этихъ законовъ, и чтобы всѣ независящія отъ движенія универсальныя постоянныя, какъ, на примѣръ, скорость свѣта, въ новой координатной системѣ сохранили свои величины.

Тотъ, кто впервые знакомится съ выводами Эйнштейна и вмѣстѣ съ тѣмъ видитъ многочисленныя, въ высшей степени изящныя и многообъщающія примѣненія ихъ, тотъ сначала можетъ счесть все это какимъ-то удивительнымъ математическимъ фокусомъ. Кажется совершенно непонятнымъ, какимъ образомъ отрицательный результатъ опыта Майкельсона, будучи независимымъ отъ того, движется ли наблюдатель вмѣстѣ съ своимъ приборомъ въ пространствѣ или не движется, долженъ быть объясненъ только тѣмъ, что въ данномъ случаѣ мы понимаемъ опредѣленіе времени иначе, чѣмъ привыкли дѣлать это.

Затрудненіе устраняется лишь благодаря слѣдующему: при старомъ мышленіи мы всегда стремимся давать абсолютныя объясненія, мы стремимся раскрыть до нѣкоторой степени истинную связь событій, но согласно этому новому методу мышленія, физика можетъ и хочетъ установить только относительную, свободную отъ внутреннихъ противорѣчій, общую математическую связь между всѣми событіями. Са-

мое замѣчательное въ новомъ умозрѣніи — это роль, которую играетъ въ ней скорость свѣта. Свѣтъ есть процессъ, посредствомъ котораго другія отдаленныя событія извѣщаютъ различныя мѣста о своемъ существованіи; съ этой точки зрѣнія свѣтъ становится, такъ сказать, носителемъ измѣреній времени. Этотъ процессъ опредѣляется тѣмъ, какъ распространяются въ природѣ силы, если онѣ не подвергаются вліянію различныхъ матеріальныхъ субстанцій, т.-е. если онѣ распространяются черезъ пустое пространство. Что скорость распространенія этихъ силъ конечна, есть результатъ опыта; если бы эта скорость была бесконечно велика, то характеръ распространенія этихъ силъ можно было бы изслѣдовать не на много глубже, чѣмъ въ случаѣ силъ тяготѣнія. Существеннымъ оказывается то, что скорость распространенія ихъ въ абсолютной пустотѣ есть наибольшая скорость, которую мы можемъ указать въ природѣ и вотъ почему: если въ основаніи всякаго опредѣленія скорости лежитъ измѣреніе времени, то, какъ показываетъ простое вычисленіе, подобное предыдущему, самый методъ опредѣленія времени обнаруживаетъ, что высшимъ, повидимому, предѣломъ произвольно возрастающей скорости является скорость свѣта.

Слѣдовательно, при такомъ пониманіи обнаруживается фактъ, что распространеніе въ пустомъ пространствѣ наблюдаемыхъ нами въ природѣ силъ — и это относится прежде всего къ электромагнитнымъ силамъ — съ конечною скоростью есть свойство этихъ силъ, а не пустого пространства или воображаемаго въ немъ ээира. Но если мы представимъ себѣ въ пустомъ пространствѣ ээирную субстанцію, то получается возможность опредѣленія движенія относительно ээира, т.-е. опредѣленія абсолютнаго движенія. Но тогда принципъ относительности не оправдывается вполне, а только въ той искусственной формулировкѣ, которую даетъ Ми. Вотъ какимъ образомъ слѣдуетъ пони-

мать Планка и Эйнштейна, когда они говорятъ, что эфиръ есть представленіе, которое нужно совершенно вычеркнуть изъ нашей картины міра.

Революціонизирующее, новое въ физической системѣ Планка и Эйнштейна, какъ это подчеркиваетъ и самъ Планкъ въ вышеприведенной цитатѣ, выражается въ новомъ обозначеніи величинъ, относящихся ко времени. Каждый наблюдатель получаетъ свою собственную мѣру времени, когда онъ, рассматривая свою систему неподвижной, представляетъ себѣ данныя явленія свободными отъ противорѣчій. Другой наблюдатель отсчитываетъ другое, также свое собственное время; объ мѣры времени не совпадаютъ и не могутъ быть выражены въ абсолютномъ времени. Но если намъ извѣстно движеніе наблюдателей другъ относительно друга, то объ мѣры времени мы можемъ однозначно преобразовать одну къ другой, и тогда оба наблюдателя будутъ однозначно сноситься другъ съ другомъ. А въ этомъ и заключается все, что намъ необходимо для физики. Только въ такомъ смыслѣ и возможно осуществленіе принципа относительности безъ всякихъ противорѣчій. Въ самомъ дѣлѣ, если попытаться объяснить, почему невозможно доказать существованіе абсолютнаго движенія и для этого вмѣстѣ съ Ми приписать эфиру такія общія свойства, что какъ разъ тѣ дѣйствія, которыя могли бы это доказать устраняются, то нѣтъ болѣе никакого смысла говорить и объ абсолютномъ времени, такъ какъ имъ болѣе уже нельзя пользоваться для измѣреній. Но вѣдь въ такомъ случаѣ гораздо проще принять новое опредѣленіе времени и, такимъ образомъ, сдѣлать излишнимъ эфиръ со всѣми его свойствами, а тѣмъ болѣе такими его свойствами, которыя оказываютъ поддержку принципу относительности.

Перевелъ съ нѣмецкаго *Б. Абрамсонъ*.

Принципъ относительности и его слѣдствія въ современной физикѣ.

А. Эйнштейна *).

1. Эфиръ.

Когда обнаружилось, что между упругими колебаніями вѣсомой матеріи и явленіями интерференціи и дифракціи свѣтовыхъ лучей существуетъ глубокая аналогія, явилась увѣренность, что свѣтъ слѣдуетъ разсматривать, какъ колебательное состояніе какой-то особой матеріи. Такъ какъ свѣтъ можетъ распространяться въ пространствѣ, гдѣ вѣсомая матерія отсутствуетъ, то, чтобы объяснить это, пришлось допустить существованіе особенной субстанціи, отличающейся отъ вѣсомой матеріи; эту субстанцію назвали эфиромъ. А такъ какъ въ тѣлахъ, отличающихся малой плотностью, какъ, напримѣръ, въ газахъ, скорость распространенія свѣта приблизительно равна скорости въ пустотѣ, то пришлось предположить, что и въ этихъ тѣлахъ эфиръ также является главнымъ носителемъ свѣтовыхъ явленій. Наконецъ, гипотеза, согласно которой эфиръ находится внутри жидкихъ и твердыхъ тѣлъ, въ свою очередь сдѣлалась необходимой, чтобы понять распространеніе свѣта внутри этихъ тѣлъ, ибо при помощи однихъ только упругихъ свойствъ вѣсомой

*) A. Einstein. „Archives des sciences et naturelles“. p. 29, (1910).

матеріи невозможно было объяснить громадную скорость распространенія свѣтовыхъ лучей.

Въ виду всѣхъ этихъ соображеній, существованіе особой среды, проникающей всякую матерію, казалось несомнѣннымъ, и гипотеза ээира составила существенную часть той картины вселенной, которая представлялась глазамъ физиковъ прошлаго столѣтія.

Введеніе электромагнитной теоріи свѣта принесло съ собою и нѣкоторыя видоизмѣненія гипотезы ээира. Сначала физики не сомнѣвались въ необходимости свести электромагнитныя явленія къ особенностямъ движенія этой среды. Но, убѣдившись мало-по-малу, что ни одна механическая теорія ээира не даетъ полной картины электромагнитныхъ явленій, физики стали разсматривать электрическія и магнитныя поля, какъ такія сущности, механическое объясненіе которыхъ было излишнимъ. Такимъ путемъ дошли до пониманія этихъ полей въ пустотѣ, какъ особыхъ состояній ээира, не требующихъ для себя болѣе глубокаго анализа.

Механическое и чисто электромагнитное объясненія оптическихъ и электромагнитныхъ явленій имѣютъ между собою ту общую имъ обоимъ черту, что оба разсматриваютъ электромагнитное поле, какъ особое состояніе гипотетической среды, заполняющей собою все пространство. Этимъ-то оба объясненія существенно и отличаются отъ теоріи истеченія, предложенной Ньютономъ, согласно которой свѣтовой лучъ долженъ состоять изъ двигающихся частицъ. Слѣдуя этой послѣдней теоріи, мы должны разсматривать пространство, которое не содержитъ ни невѣсомой матеріи, ни свѣтового луча, какъ пространство абсолютно пустое, тогда какъ, согласно механической и электромагнитной теоріямъ, такое пространство слѣдуетъ считать заполненнымъ ээиромъ.

2. Оптика движущихся тѣлъ и эѳира.

Если принять гипотезу эѳира, то тотчасъ возникаетъ вопросъ, каковы тѣ механическія связи, которыя соединяють эѳиръ съ матеріей. Участвуетъ эѳиръ вполне въ движеніи матеріи или же только отчасти увлекается ею? Или, наконецъ, эѳиръ абсолютно неподвиженъ? Эти вопросы являются основными въ оптикѣ и электродинамикѣ движущихся тѣлъ.

Наиболѣе простая гипотеза заключается въ предположеніи, что двигающіяся тѣла вполне увлекають съ собою содержащійся въ нихъ эѳиръ. Съ помощью этой гипотезы Гертцъ построилъ, не заключающую въ себѣ никакихъ противорѣчій, электродинамику двигающихся тѣлъ. Однако эта гипотеза несостоятельна. Что она неприемлема, вытекаетъ изъ знаменитаго опыта Физо. Этотъ опытъ, который можно разсматривать, какъ „*experimentum crucis*“, основывается на слѣдующихъ соображеніяхъ: предположимъ, что u' обозначаетъ скорость распространенія свѣта въ прозрачной и неподвижной средѣ. Приведемъ эту среду въ состояніе прямолинейнаго и равномернаго поступательнаго движенія со скоростью v . Если среда вполне увлекаетъ за собою эѳиръ, содержащійся въ ней, то свѣтъ будетъ распространяться *по отношенію къ средѣ* точно такъ, какъ будто она находится въ состояніи покоя, иными словами, u' будетъ также и скоростью распространенія свѣта *относительно* двигающейся среды. Для того, чтобы найти эту скорость по отношенію къ наблюдателю, *не принимающему участія въ движеніи среды*, достаточно по правилу сложенія скоростей, геометрически прибавить къ скорости u' скорость v . Въ томъ частномъ случаѣ, когда u' и v имѣють одинаковое направленіе, мы получаемъ для искомой суммы или $u' + v$, или $u' - v$ въ зависимости отъ того, одинаковаго или различнаго знака величины u' и v . Но тѣ най-

болѣе значительныя скорости, которыя могутъ быть сооб- щены какому нибудь-тѣлу, слишкомъ малы по сравненію со скоростью свѣта; поэтому нужна была очень деликатная метода наблюденія, чтобы обнаружить вліяніе движенія среды на эту скорость. Физо придумалъ слѣдующій опытъ: представимъ себѣ два свѣтовыхъ луча, способныхъ интер- ферировать другъ съ другомъ, и двѣ трубы, наполненныя одною и тою же жидкостью; заставимъ черезъ одну изъ трубъ пройти, параллельно оси, одинъ лучъ, чрезъ другую трубу другой лучъ, причемъ направимъ эти лучи такъ, чтобы они, выйдя изъ трубъ, интерферировали; положеніе полосъ должно измѣниться, если жидкость будетъ приве- дена въ движеніе въ трубахъ параллельно осямъ этихъ трубъ ¹⁾.

Изучая различныя положенія, занимаемыя полосами ин- терференціи, когда скорость теченія жидкости мѣняется, можно будетъ узнать, какова скорость распространенія свѣта ²⁾, относительно внутреннихъ стѣнокъ трубы, въ жид- кости, т. е. въ движущейся средѣ. Примѣняя этотъ методъ, Физо нашелъ для искомой скорости не величину $u' \pm v$, какъ это можно было бы ожидать послѣ всего сказаннаго нами выше, а величину $u' \pm \alpha v$; гдѣ α есть число, заключаю- щееся между 0 и 1 и зависящее отъ показателя прело- мленія n слѣдующимъ образомъ: ³⁾

$$\alpha = 1 - \frac{1}{n^2}$$

Итакъ, свѣтъ дѣйствительно увлекается жидкостью, но увлекается только отчасти.

¹⁾ Болѣе подробное описаніе этого опыта дано въ статьѣ В. Бурсіана (прим. пер.).

²⁾ Точнѣе, скорость движенія плоскостей, содержащихъ одина- ковыя фазы пучка лучей.

³⁾ Въ выраженіи для α не приняты во вниманіе явленія, вы- зываемыя дисперсією.

Благодаря этому опыту, гипотеза, утверждающая, что эфиръ полностью увлекается движущейся матеріей, сдѣлалась непріемлемой, такъ что остались только двѣ возможности:

1) Эфиръ совершенно неподвиженъ, т.-е. не принимаетъ абсолютно никакого участія въ движеніи матеріи.

2) Эфиръ, заключенный въ нѣдрахъ двигающейся матеріи, подвиженъ, но онъ движется со скоростію, отличною отъ скорости матеріи.

Развить очень далеко вторую гипотезу невозможно, не вводя при этомъ произвольныхъ допущеній по поводу отношенія эфирѣ къ матеріи во время движенія. Но первая гипотеза, напротивъ того, отличается своей простотой и, для своего развитія при помощи теоріи Максвелла, не нуждается ни въ какихъ произвольныхъ допущеніяхъ; могущихъ усложнить основанія этой теоріи.

И дѣйствительно, въ 1895 году Лорентцъ¹⁾, предположивъ, что эфиръ абсолютно неподвиженъ, придумалъ теорію, хорошо удовлетворяющую электромагнитнымъ явленіямъ, теорію, которая не только позволила предвидѣть количественные результаты опыта Физо, но и весьма просто объяснила почти всѣ опыты, которые можно вообразить въ этой области.

По Лорентцу, матерія состоитъ изъ элементарныхъ частицъ, но крайней мѣрѣ частью, заряженныхъ электричествомъ. Двигающаяся относительно эфирѣ заряженная частица уподобляется элементу тока; дѣйствія электромагнитнаго поля на частицу и реакціи послѣдней на поле представляютъ собою единственные связи между матеріей и эфиромъ. Напряженія электрическаго и магнитнаго полей

¹⁾ Н.-А. Lorentz, *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*. Leyden, 1895. Новое издание, Leipzig 1906.

въ эфирѣ въ тѣхъ частяхъ пространства, гдѣ нѣтъ частицъ, выражаются уравненіями Максвелла для свободного эфира, если при этомъ предположить, что названныя уравненія отнесены къ системѣ координатныхъ осей, неподвижной относительно эфира. Необыкновенная плодотворность теоріи Лорентца обуславливается тѣмъ, что состоянія матеріи, играющія важную роль въ явленіяхъ оптики и электромагнитизма, объяснены исключительно относительными положеніями и движеніями заряженныхъ частицъ.

3. Опыты и умозаключенія, не согласующіеся съ теоріей.

Изъ опыта Физо слѣдовало заключить, что эфиръ не увлекается двигающеюся матеріей полностью, но что при этомъ происходитъ только относительное смѣщеніе эфира и матеріи. Сама земля представляетъ собою тѣло, которое, обладая вращательнымъ движеніемъ вокругъ своей оси, вмѣстѣ съ тѣмъ совершаетъ въ теченіе года полный оборотъ вокругъ солнца со скоростями, направленія которыхъ въ теченіе этого промежутка времени весьма различны; нужно было думать, что эфиръ, находящійся въ нашихъ лабораторіяхъ, принимаетъ такъ же мало участія въ движеніи земли, какъ и въ движеніи жидкости въ изслѣдованіяхъ Физо. Отсюда слѣдовало, что по отношенію къ нашимъ приборамъ должна имѣть мѣсто нѣкоторая относительная скорость эфира, измѣняющаяся съ теченіемъ времени, поэтому можно ожидать, что въ оптическихъ явленіяхъ можно замѣтить кажущуюся анизотропію пространства; иначе говоря, можно было надѣяться, что оптическія явленія должны зависѣть отъ ориентировки приборовъ. Такъ, въ пустотѣ или даже въ атмосферномъ воздухѣ свѣтъ долженъ былъ бы распространяться въ направленіи движенія земли быстрѣе, чѣмъ въ противоположномъ направленіи. Но нельзя было и думать непосредственно подтвердить эти теоретическіе

выводы экспериментальнымъ путемъ, ибо порядокъ поправочнаго члена равенъ порядку величины отношенія скорости земли къ скорости свѣта, т.-е. равенъ величинѣ 10^{-4} , но такой точности при непосредственномъ опредѣленіи скорости свѣта нельзя было надѣяться достигъ. Кромѣ того, — и это самое главное—при всѣхъ способахъ опредѣленія скорости свѣта на поверхности земли пользуются свѣтовыми лучами, распространяющимися впередъ и назадъ, т. е. описывающими замкнутые пути, а не пути простые. Это происходитъ оттого, что моменты отправленія и прибытія лучей наблюдатель вынужденъ опредѣлять посредствомъ одной и той же установки, напимѣръ, посредствомъ зубчатого колеса.

Извѣстно было множество оптическихъ явленій, въ которыхъ можно было бы замѣтить въ скорости свѣта измѣненія порядка 10^{-4} ; наблюдая эти явленія, слѣдовало, согласно теоріи, ожидать, что получатся различные результаты въ зависимости отъ расположенія приборовъ относительно движенія земли. Не распространяясь о самихъ этихъ опытахъ, скажемъ, что всѣ они дали отрицательные результаты. Итакъ, опытъ Физо приводилъ къ гипотезѣ движенія ээира относительно двигающихся тѣлъ, но всѣ остальные опыты не подтвердили этой гипотезы. Теорія Лорентца ¹⁾ пыталась, но крайней мѣрѣ, отчасти разрѣшить эту загадку: равномерное и прямолинейное поступательное движеніе прибора со скоростью v , относительно ээира дѣйствительно оказываетъ вліяніе на рассматриваемыя явленія, но вліяніе это отражается на распредѣленіи наблюдаемыхъ интенсивностей свѣта, только начиная съ чле-

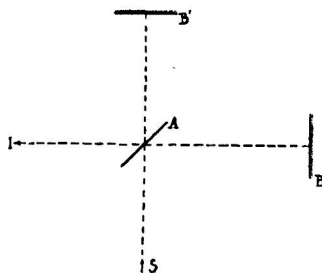
¹⁾ Упомянемъ еще, для полноты, что Лорентцъ не рассматривалъ тѣлъ, обладающихъ способностью вращать плоскость поляризаціи свѣта, при отсутствіи магнитнаго поля (естественныя, оптически-дѣятельныя тѣла).

новъ порядка $\left(\frac{v}{c}\right)^2$, входящихъ въ тѣ уравненія Лорентца, которыя выражаютъ это распредѣленіе, (величина c обозначаетъ скорость свѣта въ пустотѣ). Такимъ образомъ, казалось, что отрицательные результаты опытовъ, цѣлью которыхъ было обнаружить относительное движеніе земли по отношенію къ эйру, объяснены. Однако отрицательный результатъ одного изъ этихъ опытовъ оказался для теоретиковъ вполне загадочнымъ: мы говоримъ о знаменитомъ опытѣ Майкельсона и Морлея¹⁾. Эти физики основывались на слѣдующемъ замѣчаніи: Обозначимъ черезъ M и N двѣ точки какого-нибудь твердаго тѣла; свѣтовой лучъ выходитъ изъ M , направляется къ N , гдѣ онъ отражается и приходитъ обратно въ M . Въ этомъ случаѣ теорія доказываетъ, что когда тѣло двигается прямолинейно и равномерно относительно эйра, время t , употребляемое свѣтомъ на прохожденіе замкнутого пути MNM , будетъ имѣть неодинаковыя величины, смотря по тому, происходитъ ли движеніе тѣла по направленію MN , или перпендикулярно къ этому направленію. Правда, разница весьма мала, такъ какъ эта разница получается порядка величины $\left(\frac{v}{c}\right)_2$

т.-е., если принять v равною скорости земли, порядка дроби 10^{-8} . Но Майкельсонъ и Морлей сдумѣли придумать интереснѣйшій опытъ, въ которомъ эта малая разница должна была бы обнаружиться. Вотъ основная схема ихъ установки. Свѣтовые лучи, выходящіе изъ источника S (см. рис.), въ точкѣ A при помощи прозрачнаго зеркала раздѣляются на два пучка. Одинъ изъ этихъ пучковъ отразившись отъ B , возвращается къ стеклу A , гдѣ онъ раздѣляется и даетъ, между прочимъ, лучъ, направляющійся къ экрану I . Другой

¹⁾ А.-А. Michelson and E. Morley, *Amer. Journ. of Science* (3), 34, p. 333, 1887.

пучекъ проходитъ черезъ стекло, идетъ къ зеркалу В' и здѣсь отражается по направленію къ А. Въ точкѣ А онъ раздѣляется и въ свою очередь даетъ лучъ, идущій къ экрану I. На этомъ экранѣ оба луча интерферируютъ. Поло-



женіе на экранѣ интерференціонныхъ полосъ зависитъ отъ той разности хода, которая пріобрѣтена двумя пучками лучей при прохожденіи ими путей, соответственно равныхъ АВА и АВ'А. Но эта разность хода должна зависѣть отъ ориентировки установки; Майкельсонъ и Морлей должны были бы замѣтить смѣщеніе полосъ при измѣненіи положеній линій АВ и АВ' относительно направленію движенія земли, т. е. когда вмѣсто того, чтобы совпала съ направлениемъ движенія земли линія АВ, по направленію движенія земли устанавливалась линія АВ'. На самомъ дѣлѣ никакого смѣщенія не было обнаружено. Такимъ образомъ основанія теоріи Лорентца, какъ казалось, были серьезно поколеблены этимъ. Для того, чтобы спасти теорію, Лорентцъ и Фитцджеральдъ прибѣгли къ весьма странной гипотезѣ: они предположили, что *всѣ тѣла* при движеніи относительно ээира укорачиваются по направленію движенія на часть, равную $\frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2$, т. е. что длина тѣлъ по этому

направленію уменьшается въ отношеніи $1 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Эта гипотеза действительно уничтожила разногласіе между теоріей и опытомъ. Но сама теорія не представила собою совокупности, достаточно удовлетворяющей нашъ умъ. Она основывалась на допущеніи существованія ээира, который нужно было разсматривать движущимся относительно земли, причемъ слѣдствія такого движенія никогда не могутъ быть замѣчены наблюденіями. Такое странное заключеніе можетъ быть объяснено только тѣмъ, что въ теорію введены гипотезы а ргіогі мало вѣроятныя. Можно ли въ самомъ дѣлѣ повѣрить тому, что благодаря какой-то курьезной случайности, законы природы представляются намъ такимъ необыкновеннымъ образомъ, что ничто не позволяетъ намъ замѣтить быстрое движеніе нашей планеты сквозь ээиръ? Не будетъ ли болѣе правдоподобно предположить, что какое-либо неправильное или же несовершенное соображеніе завело насъ въ этотъ тупикъ?

Прежде чѣмъ говорить о томъ, какимъ образомъ удалось выйти изъ этихъ затрудненій, покажемъ, что даже въ частныхъ случаяхъ, теорія, покоящаяся на существованіи ээира, не всегда даетъ описаніе явленій, удовлетворяющее нашъ умъ, хотя это описаніе непосредственно и не противорѣчитъ опыту.

Представимъ себѣ, напримѣръ, магнитный полюсъ, движущійся относительно замкнутой цѣпи. Въ цѣпи возникаетъ токъ, когда число силовыхъ линій, проходящихъ черезъ поверхность, ограниченную этою цѣпью, мѣняется съ теченіемъ времени. Извѣстно, что сила получающагося такимъ образомъ, тока, зависитъ только отъ скорости измѣненія потока силовыхъ линій, пронизывающаго контуръ цѣпи. Эта скорость зависитъ исключительно отъ *относительнаго движенія полюса и замкнутой цѣпи*, иначе говоря, совершенно безразлично, съ точки зрѣнія производимаго результата, будетъ ли двигаться проводникъ въ то время, когда полюсъ остается въ покоѣ, или же будетъ имѣть

мѣсто обратное явленіе. Но, чтобы понять это явленіе съ точки зрѣнія теоріи ээира, приходится приписывать послѣднему состоянію существенно различныя въ зависимости отъ того, что будетъ двигаться относительно ээира, полюсъ или цѣпь. Въ первомъ случаѣ надо рассуждать слѣдующимъ образомъ: движеніе полюса въ каждый моментъ измѣняетъ напряженіе магнитнаго поля въ различныхъ точкахъ ээира; вызванное такимъ путемъ измѣненіе въ свою очередь возбуждаетъ электрическое поле, силовыя линіи котораго замкнуты и существованіе котораго вовсе не зависитъ отъ присутствія цѣпи; это поле, какъ, впрочемъ, и всякое поле электрическихъ силъ, обладаетъ опредѣленнымъ запасомъ энергіи; она-то и возбуждаетъ электрическій токъ въ проводникѣ. Наоборотъ, если проводникъ двигается, а магнитный полюсъ находится въ покоѣ, то никакого электрическаго поля не будетъ; въ этомъ случаѣ электроны, присутствующіе въ проводникѣ, подчинены дѣйствію пондеромоторныхъ силъ, возникающихъ вслѣдствіе движенія этихъ электроновъ въ магнитномъ полѣ, силъ, отъ которыхъ электроны приходятъ въ движеніе и, такимъ образомъ, вызываютъ индуктированный электрическій токъ.

Итакъ, два опыта, которые ничѣмъ существеннымъ другъ отъ друга не отличаются, требуютъ для своего разъясненія при помощи теоріи ээира приписыванія послѣднему двухъ существенно различныхъ состояній. Впрочемъ, такое раздвоеніе, чуждое природѣ вещей, вводится всякій разъ, когда апшелируютъ къ существованію ээира съ цѣлью объяснить явленія, обязанныя своимъ происхожденіемъ движенію двухъ тѣлъ другъ по отношенію къ другу.

4. Принципъ относительности и ээиръ.

Отъ чего же возникаютъ тѣ трудности, съ которыми мы только что имѣли дѣло?

Теорія Лорентца противорѣчитъ тѣмъ чисто механистическимъ картинамъ—представленіямъ, къ которымъ физики надѣялись свести всѣ процессы, совершающіеся во вселенной. Въ самомъ дѣлѣ, въ то время, какъ въ механикѣ нѣтъ абсолютнаго движенія, но имѣютъ мѣсто только относительныя движенія, т. е. движенія однихъ тѣлъ по отношенію къ другимъ, въ теоріи Лорентца имѣется особенное состояніе, которое, физически соотвѣтствуетъ состоянію *абсолютнаго покоя*; это—состояніе тѣла, не движущагося относительно ээира.

Если основныя уравненія Ньютоновской механики, отнесенныя къ системѣ координатныхъ осей, не находящейся въ движеніи, претерпѣвающемъ ускореніе, будутъ отнесены при помощи соотношеній:

$$(1). \quad \dots \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} t' = t \\ x' = x - vt. \\ y' = y \\ z' = z \end{array} \right.$$

къ новой системѣ осей, движущейся равномерно по отношенію къ первой системѣ, то получатся уравненія, которыя будутъ содержать t' , x' , y' , z' и которыя будутъ одинаковы съ первоначальными уравненіями, содержащими t , x , z , y . Иными словами, законы Ньютоновскаго движенія преобразуются въ законы, выраженные въ той же математической формѣ, если отъ одной системы осей перейти къ другой, движущейся прямолинейно и равномерно относительно первой; это и есть то свойство, которое выражаютъ, говоря, что въ классической механикѣ принципъ относительности удовлетворенъ.

Въ болѣе общей формѣ мы будемъ высказывать принципъ относительности слѣдующимъ образомъ;

Законы, управляющіе явленіями природы, не зависятъ отъ состоянія движенія той координатной системы, отно-

сительно которой эти явления наблюдаются, если эта система не обладает ускореннымъ движеніемъ ¹⁾).

Если преобразовать основныя уравненія теоріи Лорентца посредствомъ уравненій преобразованія (1), то получаются уравненія другого вида и притомъ такія, въ которыя величины x' , y' , z' уже не входятъ симметрично. Въдѣ теорія Лорентца, основанная на гипотезѣ ээира, не допускаетъ принципа относительности. Затрудненія, встрѣтившіяся до сихъ поръ, изъ этого факта главнымъ образомъ и вытекаютъ; болѣе глубокія причины ихъ будутъ выяснены ниже. Какъ бы то ни было, принимать теорію, не признающую принципа относительности тѣмъ болѣе неприятно, что нѣтъ ни одного факта, который показывалъ бы ошибочность этого принципа.

5. О двухъ произвольныхъ гипотезахъ, содержащихся не-равно въ обычныхъ понятіяхъ времени и пространства.

Мы видѣли, что допуская существованіе ээира, мы были вынуждены результатами опытовъ разсматривать эту среду неподвижной. Далѣе мы видѣли, что теорія, основанная на этомъ, позволяетъ предвидѣть главные экспериментальныя факты, но что она построена неудовлетворительно въ одномъ пунктѣ; она не признаетъ принципа относительности вопреки всему тому, чему учатъ насъ опытыя изслѣдованія. Поэтому всплываетъ вопросъ: *въ самомъ ли дѣлѣ невозможно примирить основныя идеи Лорентца съ принципомъ относительности?*

¹⁾ Во всей этой формулировкѣ мы предполагаемъ, что понятіе ускоренія обладаетъ объективнымъ смысломъ, т. е., что наблюдатель неизмѣнно связанный съ координатной системой, имѣетъ возможность посредствомъ опыта установить—обладаетъ ли его система ускореннымъ движеніемъ, или не обладаетъ. *Впредь мы будемъ разсматривать только такія системы, которыя не движутся съ ускореніемъ*

Первый шагъ, который мы должны сдѣлать, желая осуществить такое примиреніе—это *устранить эфиръ*. И дѣйствительно, съ одной стороны мы были вынуждены допустить неподвижность эфиря; а съ другой стороны, принципъ относительности требуетъ, чтобы законы явленій природы, отнесенныхъ къ координатной системѣ S' , движущейся прямолинейно и равномерно, были тождественны законамъ тѣхъ же явленій, рассматриваемыхъ по отношенію къ системѣ S , неподвижной относительно эфиря. Но нѣтъ никакого основанія принимать неподвижность эфиря,—неизбѣжную съ точки зрѣнія опыта и теоріи,—предпочтительнѣе по отношенію къ системѣ S' , чѣмъ по отношенію къ системѣ S ; невозможно отличить одну систему отъ другой; поэтому весьма неприятно поражаетъ то, что одну изъ этихъ системъ заставляютъ играть какую-то особенную роль, говоря, что она, эта система, неподвижна относительно эфиря. Отсюда слѣдуетъ, что достигнуть удовлетворительной теоріи можно только при томъ условіи, если отречься отъ среды, заполняющей все пространство.

Въ такомъ направленіи слѣдуетъ сдѣлать первый шагъ. Чтобы пойти далѣе, мы должны примирить принципъ относительности съ однимъ важнымъ слѣдствіемъ изъ теоріи Лорентца, такъ какъ отречься отъ этого слѣдствія значило бы отказаться отъ формальныхъ, наиболѣе фундаментальныхъ свойствъ теоріи. Вотъ это слѣдствіе:

Свѣтовой лучъ распространяется въ пустотѣ всегда съ одною и тою же скоростью c ; эта скорость не зависитъ отъ движенія тѣла, испускающаго свѣтъ.

Въ параграфѣ шестомъ мы увидимъ, что это слѣдствіе будетъ возведено въ принципъ. Отнынѣ мы будемъ обозначать его для краткости *принципомъ постоянства скорости свѣта*.

Въ теоріи Лорентца этотъ принципъ оправдывается только для системы, находящейся въ особомъ состояніи

движенія: необходимо, чтобы система была неподвижна относительно ээира. Желая сохранить принцип относительности, мы принуждены допустить примѣняемость принципа постоянства скорости свѣта къ какой-бы то ни было системѣ, не двигающейся ускорено. Съ перваго взгляда это кажется немнслимымъ. Въ самомъ дѣлѣ, рассмотримъ лучъ свѣта, который распространяется относительно системы S со скоростью c и предположимъ, что требуется опредѣлить скорость распространенія свѣта относительно системы S' , двигающейся поступательно, равномерно и прямолинейно по отношенію къ первой системѣ. Примѣняя правило сложения скоростей (правило параллелограмма скоростей) мы найдемъ нѣкоторую скорость, отличную отъ первой. Такимъ образомъ принципъ постоянства скорости свѣта, оправдывающійся по отношенію къ системѣ S , окажется недѣйствительнымъ по отношенію къ системѣ S' .

Для того, чтобы теорія, основанная на этихъ двухъ принципахъ не приводила къ противорѣчивымъ результатамъ, надо отказаться отъ обычнаго правила сложения скоростей или—вѣрнѣе—замѣнить это правило другимъ. Какъ ни прочно обоснованнымъ представляется съ перваго взгляда правило параллелограмма скоростей, оно, однако, содержитъ въ себѣ по крайней мѣрѣ двѣ произвольныя гипотезы, которыя, слѣдовательно, господствуютъ, какъ мы увидимъ, надъ всей кинематикой. Эти гипотезы и заставили думать, что съ помощью уравненій преобразованія (1), можно показать несовмѣстимость теоріи Лорентца съ принципомъ относительности.

Первая гипотеза, о которой мы хотимъ теперь говорить, касается физическаго понятія измѣренія времени. Для измѣренія времени мы пользуемся часами. Что представляютъ собою часы? Подъ часами мы разумѣемъ что-либо, что характеризуетъ явленіе, повторяющееся периодически съ однѣми и тѣми же фазами, и при томъ

такимъ образомъ, что мы должны—въ силу принципа достаточнаго основанія—предположить, что всё происходящее во время даннаго періода, будетъ одинаково съ тѣмъ, что происходитъ во время какого угодно періода ¹⁾. Если часы представляются намъ подъ видомъ механизма, вооруженнаго стрѣлками, то отмѣтитъ положеніе стрѣлокъ—это значитъ отсчитывать число прошедшихъ періодовъ. Согласно опредѣленію, измѣрять промежутокъ времени, въ теченіе котораго продолжается событіе, это—сосчитать число періодовъ, указанныхъ часами отъ момента возникновенія событія до конца его.

Смысль этого опредѣленія совершенно ясенъ, пока часы находятся настолько близко къ той мѣстности, гдѣ протекаетъ событіе, что можно одновременно наблюдать и часы и событіе. Предположимъ однако, что послѣднее имѣетъ мѣсто вдали отъ часовъ, тогда невозможно непосредственно сличать различныя положенія стрѣлокъ часовъ, съ различными фазами событія. Въ такомъ случаѣ наше опредѣленіе окажется недостаточнымъ: прійдется его дополнить. До настоящаго времени его дополняли безсознательно.

Чтобы узнавать время въ каждой точкѣ пространства, мы можемъ вообразить себѣ, что въ этомъ пространствѣ разсѣяны въ огромномъ числѣ часы и что *всѣ они имѣютъ одинаковую конструкцію*. Будемъ разсматривать точки А, В, С, въ каждой изъ которыхъ находятся часы, и которыя отнесены при помощи координатъ, независящихъ отъ времени, къ нѣкоторой системѣ, не двигающейся ускоренно. Тогда

¹⁾ Мы, стало быть, высказываемъ постулатъ, согласно которому два тождественныхъ явленія имѣютъ одинаковую продолжительность. Совершенные часы, по смыслу этого опредѣленія, играютъ при измѣреніи временъ роль, аналогичную роли абсолютно твердаго тѣла при измѣреніи длинъ.

мы получимъ возможность узнавать время повсюду, гдѣ только мы позаботимся помѣстить часы. Выбирая число часовъ настолько большимъ, чтобы каждыя изъ нихъ приходились на весьма ограниченное пространство, мы получимъ возможность опредѣлить какое угодно мгновеніе во всякомъ мѣстѣ пространства, съ любую точностью. Но этимъ способомъ мы не можемъ получить такого опредѣленія времени, которое было бы полезно для физика, ибо мы не сказали, каково должно быть, въ различныхъ точкахъ пространства, положеніе часовыхъ стрѣлокъ въ какой-нибудь одинъ, данный моментъ; мы забыли дать нашимъ часамъ одинаковый ходъ, и поэтому ясно, что тѣ интерваллы времени, которые протекаютъ въ продолженіи событія, имѣющаго вполне опредѣленное теченіе, будутъ совершенно различны въ зависимости отъ того, происходитъ ли это событіе въ той, или другой точкѣ пространства. Какъ обстоитъ, на примѣръ, дѣло при изученіи движенія матеріальной точки, которой траекторія проходитъ черезъ точки А, В, С, ...? Въ моментъ прохожденія матеріальной точки черезъ точку А обозначимъ чрезъ t_A то время, которое указываютъ часы, находящіеся въ этой точкѣ; совершенно такимъ же образомъ обозначимъ чрезъ t_B , t_C , ... времена прохожденія матеріальной точки черезъ точки В, С, ... Такъ какъ, кромѣ того, координаты точекъ А, В, С ... получаютъ непосредственно на осяхъ координатной системы S съ помощью измѣреній, выполненныхъ посредствомъ, на примѣръ, масштаба, то можно будетъ опредѣлить координаты x_A , y_A , z_A , ... точекъ А, В, С, ..., соответствующіе моментамъ t_A , t_B , t_C , ... и получить координаты x , y , z движущейся матеріальной точки въ функціяхъ нѣкоторой перемѣнной величины t ; эта перемѣнная величина и будетъ называться временемъ. Видъ этой функціи, очевидно, будетъ зависеть главнымъ образомъ отъ того, какъ будутъ регулированы

часы послѣ того, какъ каждыя изъ нихъ будутъ установлены въ соотвѣтствующемъ мѣстѣ.

Чтобы имѣть въ своемъ распоряженіи полное физическое опредѣленіе времени, нужно сдѣлать еще одинъ шагъ впередъ: слѣдуетъ упомянуть, какъ были регулированы всѣ часы въ началѣ наблюдений. Мы будемъ поступать слѣдующимъ образомъ: вооружимся сначала средствами послать сигналы какъ изъ А въ В, такъ и изъ В въ А. Эти средства не должны давать намъ ни малѣйшаго основанія подозрѣвать, что явленія, сопровождающія передачу сигнала въ направленіи АВ чѣмъ-либо отличаются отъ явленій, сопутствующихъ сигнализациі по направленію ВА. Въ такомъ случаѣ, очевидно, существуетъ только одинъ способъ регулированія часовъ В по часамъ А, а именно: сигналъ, направляющійся изъ А въ В, долженъ употребить для прохожденія этого разстоянія такой же промежутокъ времени—измѣряемый при помощи каждаго изъ упомянутыхъ часовъ—какой необходимъ сигналу, посланному изъ В въ А. Если обозначить черезъ:

t_A	показ. час. въ А	въ тотъ мом., когда сигн. АВ пос. изъ А,
t_B	"	В " АВ прих. въ В,
$t_{B'}$	"	В " ВА пос. изъ В,
$t_{A'}$	"	А " ВА прих. въ А,

то часы, находящіеся въ В, прійдется свѣрять съ часами въ А при помощи слѣдующей формулы:

$$t_B - t_A = t_{A'} - t_{B'}$$

Для этихъ сигнализаций могли бы служить, на примѣръ, звуковыя волны, которыя распространялись бы между точками А и В черезъ среду, неподвижную ¹⁾ относительно

¹⁾ Среда должна быть неподвижна—или во всякомъ случаѣ она не должна имѣть никакой составляющей скорости по направленію АВ—для того, чтобы пути АВ и ВА были другъ другу эквивалентны.

этихъ точекъ. Съ такимъ же успѣхомъ можно воспользо-ваться и свѣтовыми лучами, распространяющимися въ пустотѣ или же въ однородной средѣ, неподвижной по отношенію къ точкамъ А и В. Совершенно безразлично, какому изъ этихъ способовъ сигнализациі отдать преимуще-ство. Если бы оба способа сигнализациі давали несоглас-ные результаты, то отсюда слѣдовало бы, что, по крайней мѣрѣ, для одного изъ этихъ способовъ условіе эквивалентности путей АВ и ВА не удовлетворяется.

Однако, между всѣми видами сигнализациі, которые могутъ быть примѣнены, мы отдадимъ предпочтеніе тѣмъ, въ которыхъ употребляются свѣтовые лучи, распространяю-щіеся въ пустотѣ. Дѣло въ томъ, что регулированіе тре-буетъ эквивалентность прямого и обратнаго путей, а въ случаѣ свѣтовыхъ лучей мы получимъ эту эквивалентность на основаніи опредѣленія, ибо въ силу принципа постоянства скорости свѣта, лучъ распространяется въ пустотѣ, всегда со скоростью c .

Слѣдовательно, мы должны будемъ регулировать наши часы такъ, чтобы промежутокъ времени, употребляемый опти-ческимъ сигналомъ на прохожденіе отъ А къ В, рав-нялся промежутку времени, потребному для такого же сиг-нала, чтобы прійти изъ В въ А.

Теперь въ нашемъ распоряженіи имѣется вполне опре-дѣленный методъ регулированія пары часовъ между собою. Разъ это регулированіе произведено, мы будемъ говорить, что часы находятся *въ одинаковыхъ фазахъ*. Регулируя одни за другими часы В по часамъ А, часы С по часамъ В и т. д., мы получимъ такой рядъ часовъ, что каждыя изъ нихъ будутъ находиться въ одной и той же фазѣ съ преды-дущими. Болѣе того, пара какихъ угодно часовъ этого ряда, не слѣдующихъ непосредственно другъ за другомъ

въ ряду, должны быть въ одинаковыхъ фазахъ, въ силу принципа постоянства скорости свѣта.

Совокупность показаній всѣхъ этихъ часовъ, находящихся другъ съ другомъ въ одинаковыхъ фазахъ, и представляетъ собою то, что мы будемъ называть *физическимъ временемъ*.

Подъ *элементарнымъ событіемъ* мы будемъ подразумѣвать такое гипотетическое событіе, которое сосредоточено въ одной точкѣ и продолжительность котораго бесконечно мала. *Координатой времени* элементарнаго событія мы будемъ называть показаніе часовъ въ моментъ возникновенія этого событія, если при этомъ часы находятся на бесконечно близкомъ разстояніи отъ той точки, гдѣ событіе имѣетъ мѣсто. Итакъ, элементарное событіе опредѣляется четырьмя координатами: координатой времени и тремя координатами, устанавливающими положеніе въ пространствѣ той точки, въ которой по допущенію сосредоточивается это событіе.

Благодаря нашему физическому опредѣленію времени, мы можемъ установить точный смыслъ понятій „одновременности“ и „неодновременности“ двухъ событій, протекающихъ въ мѣстахъ, удаленныхъ другъ отъ друга; такимъ же образомъ, введеніе координатъ x , y , z какой-нибудь точки въ пространствѣ сообщаетъ совершенно опредѣленный смыслъ понятію „положеніе“. Сказать, на примѣръ, что абсцисса точки P , находящейся на какой-либо оси, равна x , это все равно, что сказать, что нанося при помощи линейки по этой оси отъ начала координатъ x разъ длину, равную единицѣ, мы непременно прійдемъ въ точку P . Такимъ же образомъ поступаютъ и при установленіи положенія точки, когда всѣ три координаты x , y , z отличны отъ нуля; только въ этомъ случаѣ операція немного сложнее. Какъ бы то ни было, указаніе отдѣльныхъ координатъ

всегда содержать въ себѣ идею исполнѣ опредѣленныхъ опытовъ, относящихся къ положенію твердаго тѣла ¹⁾).

Стѣлаемъ теперь одно важное замѣчаніе: для опредѣленія физическаго времени по отношенію къ системѣ координатныхъ осей мы воспользовались *группой часовъ, неподвижныхъ относительно этой системы*. Согласно этому опредѣленію, обозначенія времени или констатированіе одновременности двухъ событій будутъ имѣть смыслъ только при томъ условіи, если намъ извѣстно или движеніе группы часовъ, или же движеніе системы координатныхъ осей.

Пусть даны двѣ системы координатъ S и S' , не испытывающихъ ускореній при своемъ движеніи, но двигающихся прямолинейно и равномерно другъ относительно друга. Предположимъ, что съ каждой изъ этихъ системъ неизмѣнно связана группа часовъ, причемъ всѣ часы, принадлежащіе къ одной и той же системѣ, находятся въ одной и той же фазѣ. При такомъ условіи, показанія часовъ группы, связанной съ S , опредѣляютъ физическое время по отношенію къ S ; точно также, показанія группы часовъ, связанной съ S' , устанавливаютъ физическое время относительно S' . *Но мы не въ правѣ à priori предположить, что часы обѣихъ группъ можно урегулировать такъ, чтобы обѣ координаты времени элементарнаго событія были одинаковы, т. е., чтобы $t = t'$* . Предположить это, все равно, что сдѣ-

¹⁾ Мы не претендуемъ на то, что координаты пространства и времени слѣдуетъ опредѣлять непремѣнно такимъ образомъ, чтобы эти ихъ опредѣленія могли обосновать собою (какъ приведенныя выше опредѣленія) экспериментальные методы, позволяющіе измѣрить координаты на самомъ дѣлѣ. Но всякій разъ, когда величины x , y , z , t вводятся въ уравненія физики въ качествѣ переменныхъ чисто математическихъ, эти уравненія только въ томъ случаѣ имѣютъ смыслъ, если они допускаютъ исключеніе упомянутыхъ величинъ.

латъ произвольную гипотезу. Однако, до настоящаго времени эта гипотеза вводилась въ кинематику.

Вторая произвольная гипотеза, существующая въ кинематикѣ, относится къ конфигураціи движущихся тѣлъ. Разсмотримъ стержень АВ, двигающійся въ направленіи своей оси со скоростію v относительно координатной системы S , не находящейся въ движеніи съ ускореніемъ. Что нужно понимать подъ «длиною стержня»? Прежде думали, что это понятіе не нуждается въ спеціальному опредѣленіи. Но мы сейчасъ увидимъ, что это вовсе не такъ, если рассмотримъ два слѣдующихъ метода опредѣленія длины стержня.

1) Движеніе наблюдателя, въ рукахъ котораго находится масштабъ, ускоряютъ до тѣхъ поръ, пока скорость этого движенія не сдѣлается равной v , т. е. до тѣхъ поръ, пока онъ не будетъ находиться въ состояніи покоя относительно разсматриваемаго стержня. Тогда наблюдатель измѣряетъ длину АВ, послѣдовательно прилагая свой масштабъ къ стержню.

2) При помощи группы часовъ, находящихся другъ съ другомъ въ одинаковыхъ фазахъ и неподвижныхъ относительно системы S , опредѣляютъ тѣ точки P_1 и P_2 этой системы, въ которыхъ въ моментъ t находятся концы А и В стержня. Затѣмъ опредѣляютъ длину прямой линіи, соединяющей точки P_1 и P_2 , прилагая послѣдовательно измѣрительную линейку къ линіи $P_1 P_2$, (предполагая, что эта линія матеріализована).

Чувствуется, что съ нѣкоторымъ правомъ можно называть „длиною стержня“ тѣ результаты, которые получены въ томъ и другомъ случаѣ. Но à priori вовсе нельзя утверждать, что обѣ эти операціи должны непременно привести къ одинаковымъ численнымъ выраженіямъ длины стержня. Все, что можно вывести изъ принципа относительности — и это легко показать — сводится къ тому, что оба метода не приводятъ къ тѣмъ численнымъ значеніямъ

длины, которыя имѣли бы мѣсто, если бы стержень АВ покоился относительно системы S. Но никоимъ образомъ нельзя утверждать, что второй методъ даетъ численное выраженіе длины, независящее отъ его скорости v .

Вообще, если опредѣлять конфигурацію тѣла, двигающагося поступательно, прямолинейно и равномерно по отношенію къ системѣ S, и пользоваться для этого обычными геометрическими методами, т. е. измѣрительными линейками или другими твердыми тѣлами, двигающимися такимъ же образомъ, то результаты измѣреній не будутъ зависѣть отъ скорости v этого поступательнаго движенія. Эти результаты даютъ намъ то, что мы будемъ называть *геометрической конфигураціей* тѣла. Если же, наоборотъ, отмѣтить въ системѣ S положенія различныхъ точекъ тѣла въ данный моментъ и геометрическими измѣреніями, съ помощію масштабовъ, неподвижныхъ относительно системы S, опредѣлить конфигурацію образованную этими точками, то, какъ результатъ, получается то, что мы будемъ называть *кинематической конфигураціей тѣла по отношенію къ системѣ S*.

И вотъ, вторая гипотеза, безсознательно допускаемая въ кинематикѣ, выражается такъ: конфигурація кинематическая и конфигурація геометрическая тождественны другъ другу.

6. Новыя уравненія преобразования (преобразования Лорентца) и значеніе ихъ для физики.

Исходя изъ соображеній, изложенныхъ въ предыдущемъ параграфѣ, нетрудно видѣть, что правило параллелограмма скоростей, заставлявшее считать невозможнымъ примиреніе теоріи Лорентца съ принципомъ относительности, основывается на произвольныхъ и, притомъ, неприемлемыхъ гипотезахъ. Въ самомъ дѣлѣ, это правило приводитъ къ слѣдующимъ уравненіямъ преобразования:

$$t' = t, \quad x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z,$$

или, въ болѣе общей формѣ,

$$t' = t, \quad x' = x - v_x t, \quad y' = y - v_y t, \quad z' = z - v_z t.$$

Первое изъ этихъ уравненій, какъ мы видѣли, выражаетъ, мало обоснованную гипотезу о координатахъ времени элементарнаго событія, взятыхъ относительно двухъ системъ S и S' , движущихся прямолинейно и равномерно другъ по отношенію къ другу. Остальные три уравненія выражаютъ собою гипотезу, согласно которой кинематическая конфигурація системы S' по отношенію къ системѣ S тождественна геометрической конфигураціи системы S'

Если оставить обыкновенную кинематику и на новыхъ основаніяхъ построить другую кинематику, то получатся уравненія преобразованія, отличныя отъ вышеприведенныхъ. Итакъ покажемъ ¹⁾, что принявъ за основаніе:

1°. *Принципъ относительности,*

2°. *Принципъ постоянства скорости свѣта*

мы прійдемъ къ уравненіямъ преобразованія, которыя воочію убѣдятъ насъ, что теорія Лорентца совмѣстима съ принципомъ относительности:

Мы будемъ называть теорію, основанную на этихъ принципахъ *теоріей относительности*.

Предположимъ, что S и S' представляютъ собою двѣ эквивалентныя другъ другу системы координатныхъ осей, т. е. системы, въ которыхъ длины измѣрены одинаковыми единицами, и которыя обладаютъ по группѣ часовъ, идущихъ синхронно, когда обѣ системы неподвижны одна относительно другой ²⁾. Согласно принципу относитель-

¹⁾ A. Einstein, *Ann. der Phys.*, 16, 1905; *Jarbuch der Radioaktivität und Elektronik*. IV Bd., Heft 4, 1907.

²⁾ Необходимо замѣтить, что въ скрытой формѣ мы всегда принимаемъ, что приводя въ движеніе измѣрительную линейку или часы, или же останавливая ихъ, мы не измѣняемъ ни длины линейки, ни хода часовъ.

ности законы природы должны быть одинаковыми для обѣихъ системъ, будутъ ли они находиться въ состояніи относительнаго покоя, или же будутъ двигаться прямолинейно и равномерно по отношенію другъ къ другу. Въ частности, скорость свѣта въ пустотѣ должна быть выражена однимъ и тѣмъ же числомъ въ обѣихъ системахъ. Пусть t, x, y, z обозначаетъ координаты относительно системы S какого-нибудь элементарнаго событія, а t', x', y', z' — координаты относительно S' того же событія, Зададимся цѣлью отыскать соотношенія, связывающія эти обѣ группы координатъ. Можно показать, что эти соотношенія, вслѣдствіе свойствъ однородности времени и пространства ¹⁾, должны быть линейными, т. е. что времена t и t' должны быть связаны другъ съ другомъ посредствомъ соотношенія слѣдующаго вида:

$$(2) \dots\dots\dots t' = At + Bx + Cy + Dz.$$

Кромѣ того, для наблюдателя неизмѣнно связаннаго съ координатной системой S , въ частности будетъ ясно, что три координатныя плоскости системы S' двигаются прямолинейно и равномерно; но прямоугольнаго тріэдра, эти три плоскости, вообще говоря, не составляютъ, хотя мы и предполагаемъ, что система S' представляется прямоугольной наблюдателю, неизмѣнно связанному съ ней. Если, однако, отнеся себя къ системѣ S , мы примемъ за ось x' прямую, параллельную направленію движенія системы S' , то на основаніи симетріи будетъ слѣдовать, что и система S' представится намъ, какъ система прямоугольная. Далѣе мы можемъ выбрать относительное положеніе обѣихъ координатныхъ системъ такимъ образомъ, чтобы ось x' постоянно совпадала съ осью x , а ось y' оставалась параллельною оси y и, кромѣ того, чтобы для наблюдателя, неизмѣнно связаннаго съ координатной систе-

¹⁾ См. примѣчаніе къ стр. 95.

мой S, одноименныя оси имѣли одно и тоже направленіе. Мы будемъ отсчитывать времена, начиная съ того момента, когда начала обѣихъ координатныхъ системъ совпадаютъ. При этихъ условіяхъ искомыя соотношенія оказываются однородными, и уравненія

$$\begin{array}{lcl} x' = 0 & \text{и} & x - vt = 0 \\ y' = 0 & \text{и} & y = 0 \\ z' = 0 & \text{и} & z = 0 \end{array}$$

эквивалентными, т. е. координаты x, y, z, x', y', z' связаны другъ съ другомъ слѣдующими соотношеніями:

$$(3) \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} x' = E(x - vt) \\ y' = Fy \\ z' = Gz \end{array} \right.$$

Для опредѣленія постоянныхъ A, B, C, D, E, F, G, входящихъ въ уравненія (2) и (3), выразимъ, на основаніи принципа постоянства скорости свѣта, что эта скорость имѣетъ одну и ту же величину относительно обѣихъ системъ, иначе говоря, выразимъ, что два уравненія

$$(4) \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \\ x'^2 + y'^2 + z'^2 = c'^2 t'^2 \end{array} \right.$$

другъ другу, эквивалентны. Подставляя во второе изъ этихъ уравненій вмѣсто t', x', y', z' ихъ значенія, взятая изъ уравненій (2) и (3), и сравнивая полученное съ первымъ изъ этихъ уравненій, мы легко найдемъ слѣдующія уравненія преобразованія:

$$(5) \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} t' = \varphi(v) \cdot \beta \cdot (t - v/c^2 x) \\ x' = \varphi(v) \cdot \beta \cdot (x - vt) \\ y' = \varphi(v) \cdot y \\ z' = \varphi(v) \cdot z \end{array} \right.$$

здѣсь

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

и гдѣ $\varphi(v)$ есть функция отъ v , которую надо опредѣлить. Видъ этой функции мы найдемъ легко, вволя для этого третью систему S'' эквивалентную первымъ двумъ, двигающуюся относительно S' съ равномерной скоростью $-v$ и расположенную относительно S' , такъ же, какъ S' расположена относительно S . Тогда, применяя два раза уравненія (5), найдемъ:

$$\begin{aligned} t'' &= \varphi(v) \cdot \varphi(-v) \cdot t \\ x'' &= \varphi(v) \cdot \varphi(-v) \cdot x \\ y'' &= \varphi(v) \cdot \varphi(-v) \cdot y \\ z'' &= \varphi(v) \cdot \varphi(-v) \cdot z \end{aligned}$$

Такъ какъ начала координатъ въ системахъ S и S'' постоянно совпадаютъ, то для того, чтобы оси были одинаково расположены и чтобы сами системы были другъ другу эквивалентны, необходимо слѣдующее условіе:

$$\varphi(v) \cdot \varphi(-v) = 1.$$

Такъ какъ, кромѣ того, связь между y и y' (такъ же какъ и связь между z и z') не зависитъ отъ знака при v , то имѣемъ:

$$\varphi(v) = \varphi(-v).$$

Отсюда слѣдуетъ, что

$$\varphi(v) = 1,$$

(ибо $\varphi(v) = -1$ здѣсь не подходитъ), и что уравненія преобразования имѣютъ слѣдующій видъ:

$$(I) \dots \dots \begin{cases} t' = \beta(t - v/c^2x) \\ x' = \beta(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

если

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Эти уравненія преобразованія весьма удачно были введены въ электродинамику Г. А. Лорентцомъ. Мы будемъ называть ихъ *преобразованіями Лорентца*.

Рѣшая эти уравненія относительно t, x, y, z , мы прийдёмъ къ уравненію того же вида, но въ которыхъ буквы со значками замѣнены соотвѣтствующими буквами безъ значковъ, а величина v — величиною $-v$. Впрочемъ, этотъ результатъ является очевиднымъ слѣдствіемъ принципа относительности: система S движется относительно системы S' со скоростью $-v$ и по направленію, параллельному осямъ x и x' .

Комбинируя уравненія преобразованія съ уравненіями, опредѣляющими вращеніе одной системы по отношенію къ другой, можно получить уравненія для общаго случая преобразованія координатъ.

7. Физическія интерпретаціи уравненій преобразованія.

1. Разсмотримъ тѣло, неизмѣнно связанное съ системой S' . Положимъ, что x'_1, y'_1, z'_1 , и x'_2, y'_2, z'_2 представляютъ собою координаты двухъ точекъ какого-нибудь тѣла. Между этими координатами, во всякій моментъ t , отнесенный къ координатной системѣ S , мы будемъ имѣть слѣдующія соотношенія:

$$(6) \dots \begin{cases} x_2 - x_1 = \sqrt{1 - v^2/c^2} (x'_2 - x'_1) \\ y_2 - y_1 = y'_2 - y'_1 \\ z_2 - z_1 = z'_2 - z'_1 \end{cases}^1$$

Эти уравненія показываютъ, что кинематическая конфигурація тѣла, двигающагося поступательно и равномерно относительно какой-либо системы осей, зависитъ отъ скорости v этого движенія. Кромѣ того, кинематическая конфигурація отличается отъ геометрической лишь укороче-

¹) x, y, z , и x_2, y_2, z_2 представляютъ собою координаты данныхъ двухъ точекъ въ системѣ S (прим. пер.).

ніемъ въ направленіи движенія, укороченіемъ въ отношеніи $1 : \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Движеніе двухъ координатныхъ системъ относительно другъ друга со скоростью v , превосходящею скорость свѣта въ пустотѣ, несовмѣстимо съ принципами, принятыми здѣсь.

Въ этихъ уравненіяхъ мы сейчасъ же узнаемъ гипотезу Лорентца и Фитцджеральда (§ 3), ту гипотезу, которая казалась намъ странной, и которую пришлось ввести, чтобы объяснить отрицательный результатъ опыта Майкельсона и Морлей. Здѣсь же эта гипотеза представляется вполне естественной, будучи непосредственнымъ слѣдствіемъ принятыхъ нами принциповъ.

2. Разсмотримъ часы H' , покоющіеся въ началѣ координатъ системы S' и идущіе въ p_0 разъ скорѣе, чѣмъ какіе-либо изъ часовъ, служащихъ для опредѣленія физическаго времени въ системѣ S , или въ системѣ S' . Иными словами, сравнивая другъ съ другомъ пару этихъ часовъ въ томъ случаѣ, когда оба они находятся въ относительномъ покоѣ, мы увидимъ, что часы H' покажутъ p_0 періодовъ въ то время, какъ другіе часы укажутъ одну единицу времени. Сколько періодовъ укажутъ часы H' въ теченіи единицы времени, если наблюдать это время изъ системы S ?

Часы H' будутъ отмѣчать конецъ періода въ моменты:

$$t'_1 = \frac{1}{p_0}, \quad t'_2 = \frac{2}{p_0}, \quad t'_3 = \frac{3}{p_0}, \dots, \quad t'_n = \frac{n}{p_0}$$

Такъ какъ мы ищемъ время по отношенію къ системѣ S , то первое изъ уравненій преобразованія (I) придется переписать въ такомъ видѣ:

$$t = \beta \left[t' - \frac{v}{c^2} x' \right].$$

а такъ какъ часы H' находятся въ началѣ координатъ системы S' , то всегда должно быть:

$$x' = 0$$

Поэтому,

$$t_n = \beta t'_n = \frac{\beta}{\rho_0} n.$$

Итакъ, если наблюдать часы H' изъ системы S , то въ продолженіи единицы времени получится

$$p = \frac{\rho_0}{\beta} = \rho_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

періодовъ. Иными словами, оказывается, что часы, двигающіеся равномерно и прямолинейно со скоростью v относительно какой-либо системы, подвергаясь наблю-

денію изъ этой системы, идутъ въ $1 : \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ разъ медленнѣе, чѣмъ тѣ же часы, но находящіеся въ состояніи покоя относительно разсматриваемой системы.

Приведемъ интересное примѣненіе предыдущей формулы. Г. Штаркъ ¹⁾ замѣтилъ въ 1907 году, что іоны каналовыхъ лучей даютъ спектральныя линіи, которыя въ свою очередь обнаруживаютъ родъ явленія Допплера-Физо, т. е. явленіе смѣщенія спектральныхъ линій, вызываемое движеніемъ источника. Такъ какъ колебанія, создающія спектральныя линіи, слѣдуетъ разсматривать, какъ такія внутри-атомныя колебанія, частота которыхъ опредѣляется исключительно природою іоновъ, то мы можемъ принять эти іоны за часы; частота ρ_0 колебательнаго движенія іоновъ дастъ намъ возможность измѣрять время; эта частота будетъ извѣстна, если наблюсти спектръ, обусловленный іонами той же природы, неподвижныхъ, однако, по отношенію къ наблюдателю. Но въ такомъ случаѣ предыдущая формула пока-

¹⁾ J. Starck, *Ann. der Phys.*, 21, 40₁, 1907.

зываетъ, что помимо явленія, извѣстнаго подъ именемъ явленія Допплера-Физо, существуетъ еще и такое вліяніе движенія источника, которое выражается въ уменьшеніи частоты колебанія іона.

3. Изслѣдуемъ уравненія, соотвѣтствующія прямолинейному и равномерному поступательному движенію точки со скоростью u' по отношенію къ S' , т. е. уравненія:

$$\begin{aligned}x' &= u'_z t' \\y' &= u'_y t' \\z' &= u'_z t'.\end{aligned}$$

Если при помощи уравненій (I) замѣнить x', y', z', t' , ихъ величинами, выраженными въ функціяхъ отъ x, y, z, t , то получатся величины x, y, z , какъ функціи отъ t , и, слѣдовательно, составляющія u_x, u_y, u_z скорости u нашей точки относительно системы S . Такимъ образомъ можно было бы найти формулу, выражающую теорему сложенія скоростей въ ея обобщенномъ видѣ, и вмѣстѣ съ тѣмъ тотчасъ же убѣдиться, что законъ параллелограмма скоростей оправдывается лишь въ первомъ приближеніи. Въ томъ частномъ случаѣ, когда скорость u' имѣетъ такое же направленіе, какъ и скорость v поступательнаго, равномернаго и прямолинейнаго движенія системы S' относительно S , нетрудно найти, что

$$(7) \quad \dots u = \frac{v + u'}{1 + \frac{vu'}{c^2}}$$

Это уравненіе позволяетъ убѣдиться въ томъ, что, если геометрически сложить двѣ скорости, меньшія чѣмъ скорость свѣта въ пустотѣ, то всегда получается результирующая скорость, также не достигающая скорости свѣта. Въ самомъ дѣлѣ, полагая $v = c - \lambda$, $u' = c - \mu$, гдѣ обѣ ве-

личины λ и μ положительныя и меньшія, чѣмъ c , --мы получаемъ:

$$u = c \frac{2c - \lambda - \mu}{2c - \lambda - \mu - \frac{\lambda\mu}{c}} < c$$

Отсюда, кромѣ того, слѣдуетъ, что складывая геометрически скорость c свѣта со скоростію, меньшею c , мы будемъ всегда получать скорость свѣта. Теперь понятно, почему Физо не могъ найти величины $u' + v$ для суммы, составленной изъ скорости u' свѣта въ жидкости и скорости v теченія самой жидкости внутри трубы (§ 2). Дѣйствительно, пренебрегая членами порядка выше перваго и замѣняя отношеніе $\frac{c}{u'}$ величиною n , т. е. показателемъ преломленія жидкости ¹⁾, мы можемъ написать уравненіе (7) слѣдующимъ образомъ:

$$u = u' + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right).$$

Это уравненіе тождественно тому, которое Физо нашелъ экспериментальнымъ путемъ.

Другое слѣдствіе настолько же странное насколько интересное, вытекаетъ непосредственно изъ теоремы сложенія. Можно показать, что не существуетъ никакой возможности отправить сигналъ, который распространялся бы со скоростію, превосходящею скорость свѣта въ пустотѣ. Разсмотримъ стержень, двигающійся равномерно вдоль по оси x системы S со скоростію равною v ($v < c$), и предположимъ, что пользуясь этимъ стержнемъ можно отправить сигналъ, распространяющійся относительно самого стержня со скоро-

¹⁾ Показатель преломленія n не соотвѣтствуетъ, строго говоря, показателю преломленія жидкости для той частоты колебанія, которая существуетъ въ источникѣ свѣта, служившемъ во время опыта, но соотвѣтствуетъ величинѣ n при частотѣ, которую констатировалъ бы наблюдатель, движущійся вмѣстѣ съ жидкостью.

стью u' . Допустимъ, что въ точкѣ $x = 0$ оси x находится наблюдатель А, а въ точкѣ $x = x_1$ той же оси — наблюдатель В, и что оба наблюдателя неподвижны относительно системы S. Если наблюдатель А отправитъ къ наблюдателю В сигналъ при помощи стержня, то этотъ сигналъ будетъ переданъ со скоростію

$$\frac{v - u'}{1 - \frac{vu'}{c^2}}$$

по отношенію къ обоимъ наблюдателямъ. Слѣдовательно, время необходимое для передачи сигнала, выразится черезъ

$$T = x_1 \frac{1 - \frac{vu'}{c^2}}{v - u'}$$

причемъ v можетъ принимать всевозможныя значенія, меньшія c . Слѣдовательно, если мы предположимъ, что u' по своей величинѣ превосходить c , то мы будемъ всегда имѣть возможность выбрать v такимъ образомъ, чтобы T сдѣлалось отрицательнымъ. Итакъ, долженъ существовать такой процессъ передачи сигнала, что послѣдній достигнетъ намѣченной цѣли раньше, чѣмъ будетъ отправленъ: дѣйствіе предшествуетъ причинѣ. Хотя бы этотъ результатъ логически и не оказался неприемлемымъ, однако онъ слишкомъ явно противорѣчитъ всѣмъ нашимъ знаніямъ, основаннымъ на опытѣ, чтобы мы невозможность неравенства $u' > c$, не разсматривали, какъ нѣчто вполне доказанное.

4. Теорія относительности, основанная на принятыхъ здѣсь принципахъ, позволяетъ еще отыскать въ общемъ видѣ формулы, выражающія явленіе Допплера—Физо и явленіе абераціи. Для этого достаточно сравнить векторъ, пропорціональный величинѣ

$$\sin \omega \left\{ t - \frac{lx + my + nz}{c} \right\}.$$

т. е. векторъ плоской свѣтовой волны, распространяющейся въ пустотѣ по отношенію къ системѣ S , съ векторомъ, пропорціональнымъ

$$\sin \omega' \left(t' - \frac{l'x' + m'y' + n'z'}{c} \right)$$

той же волны, распространяющейся относительно S' . Замѣняя въ послѣднемъ выраженіи величины t' , x' , y' , z' ихъ значеніями, взятыми изъ уравненій преобразованія (I) и сравнивая полученное съ первымъ выраженіемъ, мы найдемъ связи между ω' , l' , m' , n' , съ одной стороны, и ω , l , m , n — съ другой. Съ помощью этихъ связей мы легко установимъ формулы для абераціи и явленія Доплера-Физо.

Фундаментальное значеніе уравненій преобразованія (I), вытекаетъ, во первыхъ, изъ того, что они доставляютъ критерій, позволяющій намъ контролировать, насколько данная физическая теорія соотвѣтствуетъ истинѣ. Въ самомъ дѣлѣ, необходимо, чтобы всякое уравненіе, выражающее физическій законъ, преобразовывалось къ уравненію того же вида, если вмѣсто переменныхъ t, x, y, z подставить, при помощи уравненій преобразованія, переменныя t', x', y', z' . Во вторыхъ, уравненія преобразованія даютъ возможность найти законы, приложимые къ тѣлу, двигающемуся съ большою скоростью, если уже извѣстны законы, примѣнимые, къ тому же тѣлу, но когда оно неподвижно или же движется бесконечно медленно ¹⁾.

¹⁾ Теперь легко понять, что мы разумѣли въ § 6 подъ однородностію времени и пространства, иначе говоря, почему мы допускаемъ а priori, что уравненія преобразованія должны быть линейными. Дѣйствительно, если изъ системы S наблюдать ходъ часовъ, неподвижныхъ относительно S' , то этотъ ходъ не долженъ будетъ зависеть ни отъ мѣстоположенія часовъ въ системѣ S' , ни отъ значенія времени системы S' вблизи этихъ часовъ. Аналогичное замѣчаніе примѣнимо къ положенію и длинѣ стержня неизмѣнно связаннаго съ системой S' и наблюдаемаго изъ S . Эти условія выполняются только тогда, когда уравненія преобразованія линейны.

8. Замѣчаніе относительно нѣкоторыхъ формальныхъ свойствъ уравненій преобразованія.

Разсмотримъ двѣ координатныя системы Σ и Σ' , начала которыхъ совпадаютъ, и которыя одинаково расположены.

Въ ньютоновской механикѣ существуетъ два рода преобразованій координатъ, не измѣняющихъ законовъ движенія. Это:

1^o. Измѣненіе ориентировки системы Σ' относительно системы Σ около ихъ общаго начала. Это первое преобразование характеризуется линейными уравненіями, содержащими x' , y' , z' и x , y , z , между коэффициентами которыхъ существуетъ такое соотношеніе, что условіе

$$(1) \dots x'^2 + y'^2 + z'^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

удовлетворяется, какъ тождество.

2^o. Равномѣрное и прямолинейное (переносное) движеніе системы Σ' по отношенію къ системѣ Σ . Это второе преобразование характеризуется уравненіями.

$$(2) \dots \begin{cases} x' = x + \alpha t \\ y' = y + \beta t \\ z' = z + \gamma t \end{cases}$$

гдѣ α , β , γ представляютъ собою постоянныя величины.

Для этихъ обоихъ родовъ преобразованій должно быть удовлетворено условіе:

$$(3) \dots t' = t.$$

Иначе говоря, время является инвариантомъ (величиною неизмѣняющеюся) при обоихъ преобразованіяхъ.

Комбинируя преобразованія (1) и (2) другъ съ другомъ, мы получаемъ наиболѣе общее преобразование, которое можно примѣнять къ уравненіямъ механики, не измѣняя при этомъ ихъ вида. Это преобразование характеризуется уравненіемъ (3) и тремя уравненіями, выражающими линейную зависимость между величинами x' , y' , z' и величинами

x , y , z , и t , при чемъ коэффициенты этихъ трехъ уравненій связаны между собою соотношеніями, которыя, для $t = 0$, тождественно удовлетворяютъ условію (1).

Разсмотримъ теперь самое общее преобразование координатъ, которое должно быть совмѣстнымъ съ теоріей относительности. Согласно всему сказанному раньше, это преобразование характеризуется тѣмъ обстоятельствомъ, что x' , y' , z' , t' должны быть такими линейными функціями отъ x , y , z , t , чтобы условіе

$$(a) \quad x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2.t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2.t^2$$

было удовлетворено тождественно. Замѣтимъ, что преобразования, совмѣстныя съ Ньютоновской механикой получаются непосредственно изъ равенства (а), если въ немъ положить $c = \infty$. Итакъ, слѣдуя такимъ же путемъ, какимъ мы шли раньше, мы пришли бы къ уравненіямъ обычной кинематики, если бы вмѣсто принципа постоянства скорости свѣта, предположили существованіе сигнализаци, не требующей никакого промежутка времени для своего распространенія.

Въ группѣ, характеризующейся уравненіемъ (а) заключаются преобразования, которыя соответствуютъ измѣненію ориентировки системы. Это тѣ преобразования, которыя совмѣстимы съ условіемъ

$$t' = t.$$

Наиболѣе простымъ изъ совмѣстныхъ съ условіемъ (а) являются тѣ преобразования, при которыхъ двѣ изъ четырехъ координатъ элементарнаго событія остаются безъ измѣненія. Разсмотримъ, на примѣръ, преобразования, при которыхъ не измѣняются x и t ; вмѣсто общаго условія (а), мы пользуемся частнымъ условіемъ

$$(a_1) \quad . \quad . \quad . \quad \left\{ \begin{array}{l} t' = t \\ x' = x \\ y'^2 + z'^2 = y^2 + z^2. \end{array} \right.$$

Этому условію соотвѣтствуетъ вращеніе всей координатной системы вокругъ оси x .

Исслѣдуемъ теперь преобразованія, при которыхъ не измѣняются двѣ пространственныя координаты, напимѣръ, y и z ; вмѣсто общаго условія (а), мы получимъ частное условіе

$$(a_2) \dots \begin{cases} y' = y \\ z' = z \\ x'^2 - c^2t'^2 = x^2 - c^2t^2 \end{cases}$$

Это тѣ преобразованія, съ которыми мы встрѣтились въ одномъ изъ предыдущихъ параграфовъ, изучая систему, двигающуюся равномерно и параллельно оси x неподвижной системы, расположенной такимъ же образомъ.

Формальная аналогія преобразованій (а₁) и (а₂) прямо бросается въ глаза. Обѣ системы уравненій отличаются лишь переменнѣй знака въ третьемъ условіи. Но даже и эта разница можетъ исчезнуть, если, вмѣстѣ съ Минковскимъ, принять за переменную вмѣсто t величину ict гдѣ $i = \sqrt{-1}$ ¹⁾. Въ такомъ случаѣ, эта мнимая координата времени будетъ играть въ уравненіяхъ преобразованія ту же роль, что и пространственныя координаты. Если положить

$$\begin{aligned} x &= x_1 \\ y &= x_2 \\ z &= x_3 \\ ict &= x_4 \end{aligned}$$

и разсматривать x_1, x_2, x_3, x_4 , какъ координаты нѣкоторой точки въ пространствѣ четырехъ измѣреній, и притомъ такъ, чтобы каждому элементарному событію соотвѣтствовала одна точка этого пространства, то все происходящее

¹⁾ Германъ Минковскій, *Пространство и время*, переводъ проф. Васильева, Казань, 1911.

въ физическомъ мірѣ будетъ сведено къ опредѣленному состоянію четырехмѣрнаго пространства. Въ этомъ случаѣ условіе (а) напишется слѣдующимъ образомъ:

$$x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 + x_4'^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2.$$

Это условіе соотвѣтствуетъ вращенію—безъ относительнаго перемѣщенія—системы координатъ въ четырехмѣрномъ пространствѣ.

Принципъ относительности требуетъ, чтобы законы физики не претерпѣвали никакого видоизмѣненія, когда вращается вокругъ своего начала та система координатъ четырехмѣрнаго пространства, къ которой эти законы отнесены. Всѣ четыре координаты x_1, x_2, x_3, x_4 должны входить симметрично въ выраженія физическихъ законовъ. Для того, чтобы выразить физическія состоянія, можно будетъ пользоваться четырехмѣрными векторами, надъ которыми можно будетъ производить вычисленія аналогичныя тѣмъ, которыя производятся надъ обыкновенными векторами пространства трехъ измѣреній.

9. Нѣкоторыя примѣненія теоріи относительности.

Примѣнимъ уравненія преобразования (I) къ уравненіямъ Максвелла--Лорентца для магнитнаго поля. Положимъ, что E_x, E_y, E_z , представляютъ собою векторіальныя составляющія электрическаго поля, а M_x, M_y, M_z —векторіальныя составляющія магнитнаго поля по отношенію къ системѣ S . Вычисленіе показываетъ, что преобразованныя уравненія будутъ имѣть видъ, тождественный виду исходныхъ уравненій, если положить, что

$$(1) \dots \begin{cases} E'_x = E_x & M'_x = M_x \\ E'_y = \beta (E_y - v/c M_z) & M'_y = \beta (M_y + v/c E_z) \\ E'_z = \beta (E_z + v/c M_y) & M'_z = \beta (M_z - v/c E_y) \end{cases}$$

Векторы (E'_x, E'_y, E'_z) и (M'_x, M'_y, M'_z) играютъ въ уравненіяхъ отнесенныхъ къ системѣ S' такую же роль, какъ

векторы (E_x, E_y, E_z) и (M_x, M_y, M_z) въ уравненіяхъ отнесенныхъ къ системѣ S . Отсюда слѣдуетъ важный результатъ:

Существованіе электрическаго поля, какъ и существованіе магнитнаго поля, зависитъ отъ состоянія движенія координатной системы.

Преобразованія уравненія даютъ возможность знать электромагнитное поле относительно какой угодно системы S' , не двигающейся ускоренно, когда извѣстно поле относительно другой системы S , того же характера.

Эти преобразованія оказались бы невозможными, если бы въ опредѣленіи векторовъ состояніе движенія координатной системы не играло никакой роли. Въ этомъ можно тотчасъ же убѣдиться, если разобрать опредѣленіе напряженія электрическаго поля: величина, направленіе и знакъ напряженія поля вполне опредѣляются той пондеромоторной силой, которая дѣйствуетъ на единицу количества электричества, сосредоточеннаго въ разсматриваемой точкѣ и неподвижнаго по отношенію къ системѣ координатныхъ осей.

Уравненія преобразованія позволяютъ убѣдиться въ томъ, что затрудненія, съ которыми мы встрѣтились въ § 3, и которыя касаются явленій, возникающихъ при относительныхъ движеніяхъ замкнутаго тока и магнитнаго полюса, совершенно устранены въ новой теоріи.

Въ самомъ дѣлѣ, разсмотримъ электрическій зарядъ, двигающійся равномерно по отношенію къ магнитному полюсу. Мы можемъ наблюдать происходящее при этомъ явленіе, или изъ системы S осей, неизмѣнно связанныхъ съ магнитомъ, или изъ системы S' осей, неизмѣнно связанныхъ съ электрическимъ зарядомъ. Относительно S существуетъ только магнитное поле (M_x, M_y, M_z) , но не существуетъ электрическое поле. Относительно S' , напротивъ того — какъ это можно видѣть изъ выраженій для E'_y и E'_z —

существуетъ электрическое поле, дѣйствующее на неподвижный относительно S' электрической зарядъ. Способъ разсмотрѣнія явленій мѣняется, слѣдовательно, съ измѣненіемъ состоянія движенія системы: все зависитъ отъ точки зрѣнія, но въ этомъ случаѣ измѣненія точки зрѣнія не играютъ никакой существенной роли, не соотвѣтствуютъ ничему такому, что могло бы вызвать возраженія, чего однако нельзя было сказать, когда эти процессы приписывались измѣненіямъ состоянія какой-то среды, заполняющей все пространство.

Какъ мы уже замѣтили, мы могли бы непосредственно найти законы, примѣнимые къ тѣлу, двигающемуся съ большою скоростью, если намъ извѣстны законы неподвижнаго тѣла. Можно, на примѣръ, получить, такимъ образомъ, уравненія движенія матеріальной точки, обладающей массой m и электрическимъ зарядомъ e (на примѣръ, электрона) и подчиненной дѣйствию электромагнитнаго поля. И дѣйствительно, уравненія движенія матеріальной точки для того момента, когда ея скорость равна нулю, намъ извѣстны.

Согласно уравненіямъ Ньютоновской механики и по опредѣленію напряженія электрическаго поля, имѣемъ:

$$(2) \dots m \frac{d^2x}{dt^2} = eE_x,$$

и еще два такихъ же уравненія, относящихся къ осямъ y и z . Тогда, примѣняя уравненія преобразованія (1) и приведенныя въ этомъ параграфѣ уравненія (1), мы найдемъ для точки движущейся какъ-угодно:

$$(3) \dots \frac{d}{dt} \left\{ \frac{m \frac{dx}{dt}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \right\} = F_x,$$

если

$$u = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2},$$

а

$$F_x = e \left\{ E_x + \frac{1}{c} \left\{ \frac{dy}{dt} M_z - \frac{dz}{dt} M_y \right\} \right\}$$

и еще два таких же уравненія для другихъ осей. Эти уравненія даютъ возможность прослѣдить въ электромагнитномъ полѣ ходъ катодныхъ лучей и β -лучей. Точность этихъ уравненій приблизительно настолько же внѣ всякаго сомнѣнія, какъ и опыты Бухерера и Хунка (Bucherer et Hupka).

Если мы хотимъ сохранить связь между силою, механическою работою и теоремою моментовъ количества движенія, мы должны разсматривать входящія въ эти уравненія векторы F_x , F_y , F_z , какъ векторіальныя составляющія поперомоторной силы, дѣйствующей на двигающуюся матеріальную точку. При такихъ условіяхъ мы должны разсматривать уравненія (3), *какъ наиболее общія уравненія движенія матеріальной точки, совмѣстимаго съ принятыми здѣсь принципами, и притомъ какова бы ни была природа силы (F_x , F_y , F_z).*

Если въ математической формѣ выразить, сначала относительно системы S , а затѣмъ по отношенію къ системѣ S' , что, во время процессовъ испусканія и поглощенія даннымъ тѣломъ лучистой энергіи, принципъ сохраненія энергіи и принципъ сохраненія количества движенія оправдываются, то получается весьма важное заключеніе, что *масса какого угодно тѣла зависитъ отъ того запаса энергіи, который въ немъ содержится.* Если обозначить чрезъ m массу тѣла, соответствующую количеству энергіи, содержащемуся въ немъ, то въ томъ случаѣ, когда энергія этого тѣла увеличится на количество W ,

масса тѣла дѣлается равной $m + \frac{W}{c^2}$; какъ всегда c обозначаетъ собою скорость свѣта въ пустотѣ. Итакъ, оказывается, что принципъ сохраненія массы, принятый въ механикѣ Ньютона оправдывается только для такой матеріальной системы, энергія которой остается постоянной. Масса и энергія становятся такими же эквивалентными другъ другу величинами, какъ, на примѣръ, теплота и механическая работа, и достаточно сдѣлать только одинъ шагъ, чтобы разсматривать массу, какъ концентрацію колоссальныхъ количествъ энергіи. Къ сожалѣнію измѣненіе $\frac{W}{c^2}$ массы настолько мало, что въ настоящій моментъ нѣтъ никакой надежды констатировать это измѣненіе при помощи опытовъ.

Перев. съ французскаго *Б. Абрамсона.*

Принципъ относительности и не-Ньютоновская механика.

*Джилльберта Н. Льюиса и Ричарда Толмэна *)*.

Еще немного лѣтъ тому назадъ всѣ извѣстные факты въ области свѣта, электричества и магнетизма были въ полномъ согласіи съ теоріей покоящейся среды, или „эфира“, наполняющаго все пространство, но не оказывающаго никакого сопротивленія движенію вѣсомой матеріи. Эта теорія неподвижнаго эѳира привела къ мнѣнію, что абсолютная скорость движенія земли сквозь эту среду можетъ быть опредѣлена оптическими или электрическими измѣреніями. Такъ, предсказывали, что время, которое необходимо для прохожденія пучка свѣта отъ опредѣленной точки къ зеркалу и обратно, должно быть неодинаково въ двухъ случаяхъ: когда путь, по которому распространяется свѣтъ къ зеркалу, совпадаетъ съ направленіемъ движенія земли, и когда этотъ путь перпендикуляренъ этому движенію. Такое предсказаніе было провѣрено на опытѣ Майкельсономъ и Мордеемъ **). Однако, несмотря на крайнюю чувствительность метода эти ученые не нашли ни малѣйшей разницы для двухъ различныхъ направленій свѣта.

Теорія эѳира предсказывала также, что заряженный конденсаторъ, подвѣшенный на проволоку, долженъ, вслѣдствіе движенія земли, подвергаться нѣкоторому закручивающему

*) Gilbert N. Lewis and Richard C. Tolman. Phil. Mag. 18 p. 510 (1909).

***) Michelson and Morley. Amer Jour. Sc. 34 p. 333 (1887)

дѣйствию. Но Трутономъ и Ноблемъ *) было экспериментально доказано отсутствіе такого явленія.

Умѣнье, съ которымъ эти опыты были намѣчены и выполнены, не допускаетъ сомнѣній въ вѣрности ихъ результатовъ, и мы поэтому принуждены принять нѣкоторые новые взгляды, значеніе которыхъ весьма велико.

Правда, результаты Майкельсона и Морлея можно объяснить просто, принявъ, что скорость свѣта зависитъ отъ скорости его источника. Возможно, что раньше не было достаточныхъ основаній упускать изъ виду это предположеніе, но новыя опытыя данныя, къ которымъ мы еще вернемся, доказываютъ, повидимому, его полную несостоятельность.

Послѣ исключенія этой возможности, — единственнымъ удовлетворительнымъ изъ всѣхъ предложенныхъ для опыта Майкельсона-Морлея объясненій является гипотеза, данная Лорентцомъ **). Лорентцъ предположилъ, что всѣ тѣла, находящіяся въ движеніи, укорачиваются въ направленіи своего движенія на величину, представляющую простую функцію скорости. Это укорачиваніе производитъ компенсацію, какъ разъ достаточную для устраненія предсказываемаго эфирной теоріей положительнаго эффекта въ опытѣ Майкельсона-Морлея, это укорачиваніе объясняетъ также результатъ, полученный Трутономъ и Ноблемъ. Оно, однако, не уничтожаетъ возможности опредѣленія абсолютнаго движенія при помощи другихъ аналогичныхъ опытовъ, которые еще не были произведены.

Эйнштейнъ ***) сдѣлалъ шагъ впередъ. На основаніи

*) Trouton and Noble Phil. Trans. Roy. Soc. (A) 202 p. 165 (1904).

**) Lorentz, Abhandl. über theoret. Physik. Leipzig. 1907. p. 443.

***) Превосходный обзоръ заключеній, выведенныхъ изъ принципа относительности Эйнштейномъ, Планкомъ и др., данъ Эйнштейномъ въ *Jahrbuch der Radioaktivität*, 4 s. 411 (1907). Интересную обработку нѣкоторыхъ фазъ этой проблемы можно найти въ статьѣ *Bumstead Jour. Sc.* 26. p. 493 (1908).

приведенныхъ опытовъ и на основаніи неудачи всѣхъ другихъ попытокъ, которыя были сдѣланы для опредѣленія абсолютной скорости движенія въ пространствѣ, онъ заключилъ, что и въ дальнѣйшемъ подобныя попытки будутъ терпѣть неудачу; и онъ установилъ, какъ законъ природы, что *абсолютное равномерное поступательное движеніе не можетъ быть ни измѣрено, ни даже открыто.*

Второе основное обобщеніе, сдѣланное Эйнштейномъ, названо имъ «закономъ постоянства скорости свѣта». Этотъ законъ говоритъ, что *скорость свѣта въ свободномъ пространствѣ одна и та же для всѣхъ наблюдателей, независимо отъ движенія источника свѣта или самого наблюдателя.*

Эти два закона, взятые вмѣстѣ, и составляютъ принципъ относительности. Они обобщаютъ цѣлый рядъ опытныхъ фактовъ и не противорѣчатъ ни одному. Поскольку эти обобщенія выходятъ за предѣлы существующихъ фактовъ, они требуютъ дальнѣйшей провѣрки. Мы имѣемъ, однако, основаніе взирать на эту провѣрку съ полнымъ довѣріемъ: дѣйствительно, Эйнштейнъ вывелъ изъ принципа относительности въ связи съ электромагнитной теоріей нѣсколько поразительныхъ слѣдствій, которыя замѣчательны сами по себѣ; но, кромѣ того, система механики, которую онъ получаетъ, тождественна съ не-Ньютоновской механикой, развитой на основаніи совершенно иныхъ предпосылокъ однимъ изъ авторовъ настоящей статьи *); наконецъ, одно изъ самыхъ важныхъ уравненій этой не-Ньютоновской механики было въ этомъ году (1909) подтверждено опытомъ Бухерера надъ массой В—частицы; къ этому опыту мы ниже еще вернемся **).

*) Lewis. Phil. Mag. 16 p. 705. (1908).

***) Bucherer. Ber. Phys. Ges. 6 s. 1 p. 688 (1908). Ann. Phys. 28 s. 513 (1909).

Поэтому, въ предѣлахъ современныхъ нашихъ знаній, мы можемъ считать принципъ относительности основаннымъ на довольно прочномъ фундаментѣ опытныхъ фактовъ. Принимая этотъ принципъ, мы должны принять и всѣ слѣдствія, къ которымъ онъ приводитъ, какъ бы необычны они ни были, если только они не противорѣчатъ другъ другу или установленнымъ опытнымъ фактамъ.

Слѣдствія, которыя одинъ изъ насъ получилъ, исходя изъ простаго предположенія относительно *массы пучка свѣта* и изъ *законовъ сохраненія* массы, энергіи и количества движенія, Эйнштейнъ вывелъ изъ „*принципа относительности*“ и электромагнитной теоріи. Въ настоящей статьѣ мы предполагаемъ показать, что эти же выводы можно получить, исключительно на основаніи *законовъ сохраненія* и *принципа относительности*, совершенно не прибѣгая къ электромагнетизму.

Когда мы имѣемъ дѣло съ такими фундаментальными вопросами, какъ тѣ, съ которыми мы встрѣчаемся здѣсь, представляется особенно желательнымъ избѣгнуть, насколько это возможно, всего технического. Мы старались найти для каждой изъ изложенныхъ теоремъ самое простое и очевидное доказательство и пользовались математикою только въ предѣлахъ элементарной алгебры и геометріи.

Единицы пространства и времени.

Все послѣдующее изложеніе будетъ основано исключительно на законахъ сохраненія и на обоихъ постулатахъ принципа относительности.

Первый изъ этихъ постулатовъ говорить, что нѣтъ никакихъ средствъ обнаружить абсолютное поступательное движеніе черезъ пространство или черезъ какой-либо эфиръ, который, по предположенію, заполняетъ пространство. Единственное движеніе, имѣющее физическое значеніе, это движеніе одной системы относительно другой. Такимъ обра-

зомъ, два подобныхъ тѣла, имѣющія относительныя движенія по параллельнымъ троекторіямъ, образуютъ совершенно симметричную систему: если мы вправѣ разсматривать первое тѣло, какъ покоящееся, а второе, какъ движущееся, то мы столь-же вправѣ принять, что второе въ покоѣ, а первое движется.

Второй постулатъ утверждаетъ, что скорость свѣта, измѣряемая какимъ-либо наблюдателемъ, не зависитъ отъ скорости наблюдателя относительно источника свѣта *). Эта идея—что скорость свѣта окажется одной и той-же для двухъ различныхъ наблюдателей, даже если одинъ движется къ источнику свѣта, а другой отъ него—эта идея представляетъ самую замѣчательную черту принципа относительности, и она-то заставляетъ насъ сдѣлать тѣ поразительные выводы, которые мы получимъ ниже.

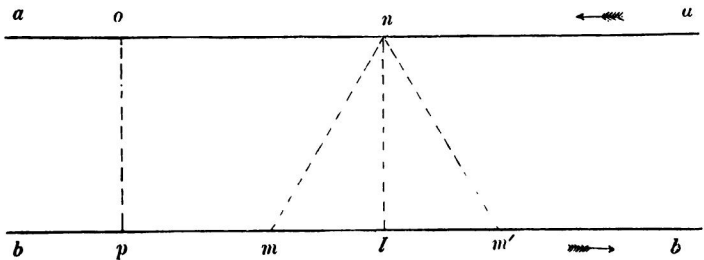


Рис. 1.

Разсмотримъ двѣ системы, движущіяся одна относительно другой съ постоянной относительною скоростью и снабженныя плоскими зеркалами aa и bb , расположенными параллельно другъ другу и параллельно линіи движенія (рис. 1). Наблюдатель А въ первой системѣ посылаетъ къ противо-

*) Мы вообразимъ, что наблюдатель измѣряетъ скорость свѣта посредствомъ двухъ часовъ, помѣщенныхъ на концахъ метроваго стержня, расположеннаго вдоль пути свѣта.

лежащему зеркалу пучекъ свѣта, который отражается обратно къ исходной точкѣ. Наблюдатель *A* измѣряетъ время, въ теченіе котораго свѣтъ проходитъ туда и обратно.

Наблюдатель *A*, принимая, что его система въ покоѣ (а другая движется), полагаетъ, что свѣтъ проходитъ по пути *oro*; съ другой стороны, онъ думаетъ, что если подобный опытъ выполняется наблюдателемъ въ движущейся системѣ *B*, то свѣтъ для того, чтобы вернуться къ исходной точкѣ, долженъ совершить болѣе длинный путь *mnt'*: дѣйствительно, за то время, въ теченіе котораго свѣтъ проходитъ отъ наблюдателя *B* къ зеркалу *aa* и обратно къ наблюдателю *B*, точка *m* передвинется въ положеніе *m'*; ввиду этого наблюдатель *A* предсказываетъ, что для наблюдателя *B* время, необходимое для возвращенія отраженнаго пучка свѣта, будетъ больше, чѣмъ въ его собственномъ опытѣ. Однако, вступивъ въ сношеніе съ *B*, *A* узнаетъ, что время, измѣренное наблюдателемъ *B* то же самое, что и въ его собственномъ опытѣ *).

Единственное объясненіе, которое *A* можетъ дать этому поразительному обстоятельству это то, что часы, которыми пользуется для своихъ измѣреній *B*, не идутъ такъ, какъ его часы, а отстаютъ отъ нихъ, и именно настолько, что время, показываемое ими, относится къ времени, которое въ равный промежутокъ показывали бы часы *A*, какъ разстояніе *oro* къ *mnt'*.

Наблюдатель *B*, однако, въ равной мѣрѣ вправѣ разсматривать свою систему какъ покоящуюся, а систему *A*, какъ движущуюся, и, разсуждая точно такъ, онъ придетъ къ за-

*) Это, очевидно, требуется принципомъ относительности, ибо въ противоположность предположенію *A*, разсматриваемыя двѣ системы совершенно симметричны. Всякая разница въ наблюденіяхъ *A* и *B*, должна была бы зависѣть отъ разницы въ абсолютныхъ скоростяхъ двухъ системъ, и давала бы, такимъ образомъ, средство для опредѣленія абсолютной скорости.

ключенію, что часы A не ходятъ правильно. И такъ, каждому наблюдателю кажется, что часы другого идутъ слишкомъ медленно.

Это расхожденіе въ мнѣніяхъ, очевидно, зависитъ не столько отъ того факта, что обѣ системы находятся въ относительномъ движеніи, сколько отъ того, что каждый наблюдатель произвольно принимаетъ, что его собственная система въ покоѣ. Если, однако, они оба согласятся считать систему A неподвижной, то они оба сойдутся на томъ, что въ указанныхъ двухъ опытахъ свѣтъ совершаетъ соответственно пути oro и mnt' , и что часы B идутъ медленнѣе, чѣмъ часы A . Вообще, какая бы точка ни была произвольно избрана за точку покоя, мы всегда придемъ къ заключенію, что всякіе часы, находящіеся въ движеніи относительно этой точки, идутъ слишкомъ медленно.

Обратимся опять къ рис. 1, предполагая, что система a въ покоѣ. Какъ мы показали, необходимо принять, что часы B идутъ медленнѣе часовъ A во столько разъ, во сколько путь oro короче пути mnt' ; другими словами, секунда часовъ B продолжительнѣе секунды часовъ A въ отношеніи mnt' къ oro . Это отношеніе между двумя путями будетъ, очевидно, зависѣть отъ относительной скорости данныхъ двухъ системъ v и отъ скорости свѣта c .

Изъ рисунка видно, что

$$(or)^2 = (ln)^2 = (mn)^2 - (ml)^2.$$

Раздѣливъ на $(mn)^2$, получимъ:

$$\frac{(or)^2}{(mn)^2} = 1 - \frac{(ml)^2}{(mn)^2}.$$

Но разстояніе ml относится къ разстоянію mn , какъ v къ c .

Отсюда

$$\frac{or}{mn} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Обозначивъ важное отношеніе $\frac{v}{c}$ буквою β , мы видимъ, что, въ общемъ, секунда, измѣренная движущимися часами относится къ секундѣ, измѣренной находящимися въ покоѣ часами, какъ 1 къ $\sqrt{1 - \beta^2}$.

Какое бы предположеніе наблюдатели A и B ни дѣлали относительно своего движенія, очевидно, ихъ измѣренія длинъ, въ направленіи перпендикулярномъ линіи ихъ относительнаго движенія, не будутъ расходиться. Дѣйствительно, если каждый наблюдатель опредѣлитъ масштабомъ разстояніе отъ его системы до другой, то оба опредѣленія должны совпасть; иначе, условія симметріи, требуемая принципомъ относительности не были бы выполнены.

Но рассмотримъ теперь разстоянія, параллельныя направленію относительнаго движенія.

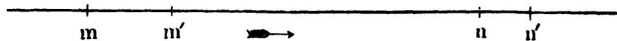


Рис. 2.

Пусть нѣкоторая система имѣетъ источникъ свѣта въ точкѣ m и отражающее зеркало въ точкѣ n (рис. 2). Если мы рассматриваемъ всю систему, какъ находящуюся въ абсолютномъ покоѣ, то, очевидно, свѣтовой сигналъ, отправленный изъ m совершитъ путь mn . Если же мы принимаемъ, что вся система обладаетъ абсолютнымъ движеніемъ, скорость котораго равна v , то свѣтъ долженъ пройти иной путь $mn't'$, гдѣ nn' представляетъ разстояніе, на которое передвинулось зеркало до того момента, когда свѣтъ дошелъ до него, а mm' — разстояніе, пройденное источникомъ до того момента, когда свѣтъ вернулся къ нему.

Тогда мы, очевидно, имѣемъ:

$$\frac{nn'}{mn'} = \frac{v}{c}$$

и

$$\frac{mm'}{mn'm'} = \frac{v}{c}$$

Изъ рисунка видно также, что

$$\begin{aligned} mn' &= mn + nn' \\ mn'm' &= mnm + 2nn' - mm' \end{aligned}$$

Отсюда *), получимъ:

$$\frac{mn'm'}{mnm} = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{1 - \beta^2}$$

Итакъ, для движущейся системы путь пройденный свѣтомъ больше, чѣмъ если бы система была въ покоѣ въ $\frac{1}{1 - \beta^2}$ раза.

Но скорость свѣта должна оказываться одинаковой для всякаго наблюдателя независимо отъ того, въ покоѣ ли онъ, или движется. Измѣренія скорости, произведенныя наблюдателемъ зависятъ отъ единицъ длины и времени, которыя принялъ этотъ наблюдатель. Мы выше видѣли, что секунда движущихся часовъ увеличена въ $\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ раза,

*) Изъ первой пропорціи получимъ $\frac{mn' - nn'}{mn'} = \frac{c - v}{c}$
или $\frac{mn}{mn'} = \frac{c - v}{c}$; обернувъ и помноживъ числителя и знаменатель лѣвой части на 2, имѣемъ $\frac{2mn'}{mnm} = \frac{c}{c - v}$ (а). Изъ второй пропорціи получаемъ $\frac{mn'm' + mm'}{mn'm'} = \frac{c + v}{c}$ или $\frac{2mn'}{mn'm'} = \frac{c + v}{c}$ (б).

Раздѣливъ пропорцію (а) на (б), мы и получимъ искомый результатъ. (Прим. пер.).

и если поэтому путь пучка свѣта былъ бы во столько же разъ больше, мы должны были бы ожидать, что движущійся наблюдатель не наткнется ни на какое противорѣчіе при опредѣленіи скорости свѣта. Однако, съ точки зрѣнія лица, которое мы считаемъ неподвижнымъ, этотъ путь, какъ мы только что видѣли, представляется нѣсколько болѣе удлиненнымъ, а именно въ $\frac{1}{1 - \beta^2}$ разъ. Чтобы объяснить

эту бѣольшую разницу, мы должны принять, что единица длины въ движущейся системѣ укорочена въ отношеніи $\sqrt{1 - \beta^2}$.

Итакъ, мы видимъ, что метровый стержень, расположенный перпендикулярно направленію своего движенія, имѣетъ ту же длину, что и метръ находящійся въ покоѣ, а будучи направленъ параллельно линіи движенія, укорачивается въ

$\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ раза; слѣдовательно, и всякое тѣло должно быть

укорочено въ направленіи своего движенія во столько же разъ *).

*) Нѣкоторые изъ другихъ выводовъ Эйнштейна изъ принципа относительности не нужны для того, что излагается въ этой статьѣ, но они могутъ быть непосредственно получены примѣненными здѣсь методами. Напримѣръ, принципъ относительности приводитъ къ нѣкоторымъ любопытнымъ заключеніямъ относительно сравнительныхъ показаній часовъ въ системѣ, принимаемой за движущуюся. Разсмотримъ двѣ системы въ относительномъ движеніи. Наблюдатель въ системѣ *a* помѣщаетъ двое тщательно провѣренныхъ часовъ на линіи движенія, въ разстояніи единицы длины другъ отъ друга и замѣчаетъ показанія каждаго часовъ, когда мимо нихъ проходитъ опредѣленная точка второй системы. Наблюдатель въ системѣ *b* производитъ такой же опытъ. Разницы между отсчетами обоихъ часовъ въ одной системѣ должны равняться разницамъ между отсчетами въ другой: дѣйствительно, согласно принципу относительности, относительная скорость *v* одной системы

Подчеркнемъ еще разъ, что эти измѣненія въ единицахъ времени и длины, такъ же, какъ измѣненія въ единицахъ массы, силы и энергiи, которыя мы рассмотримъ ниже, имѣють въ извѣстномъ смыслѣ лишь искусственное значеніе; но, какъ мы увидимъ, это въ равной мѣрѣ справедливо для другихъ всѣми признанныхъ физическихъ понятій. Мы лишь тогда вправѣ говорить о движеніи тѣла, когда мы имѣемъ ввиду нѣкоторую опредѣленную точку, хотя бы выбранную произвольно, которую мы принимаемъ за точку покоя. Деформація движущагося тѣла является не физическимъ измѣненіемъ въ самомъ тѣлѣ, а представляетъ собою научную фикцію.

относительно другой должна быть одинакова для каждого изъ двухъ наблюдателей. Однако, наблюдатель *A*, принимая, что онъ самъ въ покоѣ, и знакомый съ выведенными нами выше измѣненіями единицъ длины и времени въ движущейся системѣ, ожидаетъ, что скорость, опредѣленная наблюдателемъ *B*, будетъ больше той, которую наблюдалъ онъ самъ, въ $\frac{1}{1 - \beta^2}$ раза, такъ какъ онъ заключилъ, что единица времени *B* больше его собственной, а единица длины короче, каждая въ $\sqrt{1 - \beta^2}$ разъ. Единственный возможный для *A* способъ объяснить такое противорѣчіе это принять, что часы, которые, по утверженію *B*, регулированы такъ, что даютъ одинаковыя показанія, въ дѣйствительности не даютъ таковыхъ. Другими словами, онъ долженъ заключить, что часы, которые въ движущейся системѣ кажутся идущими одинаково, въ дѣйствительности въ какой-либо данный моментъ (по стационарному времени) показываютъ различное время, и что данные часы „медленнѣе“, чѣмъ непосредственно предшествующіе имъ на величину, пропорціональную разстоянію. На основаніи предыдущаго легко показать, что если въ движущейся системѣ установлены одни за другими въ разстояніи *l* (въ единицахъ этой системы) двое часовъ, то разница между ихъ показаніями будетъ равна $\frac{lv}{c^2}$.

Изъ этихъ рассужденій непосредственно вытекають также уравненія Эйнштейна для сложения скоростей.

Когда Лорентцъ въпервые выдвинулъ идею, что электронъ, или вѣрнѣе, всякое движущееся тѣло укорачивается въ направленіи своего движенія, онъ рисовалъ себѣ дѣйствительную деформацію тѣла, какъ слѣдствіе дѣйствительнаго движенія сквозь неподвижный эфиръ; эта теорія вызвала значительныя пренія относительно природы силъ, которыя необходимы, чтобы произвести такую деформацію. Точка зрѣнія, впервые выдвинутая Эйнштейномъ, которую мы приняли здѣсь, совершенно иная. Абсолютное движеніе не имѣетъ никакого значенія. Представимъ себѣ электронъ и нѣсколько наблюдателей, движущихся по различнымъ направленіямъ относительно него. Каждому наблюдателю, навивно думающему, что онъ самъ въ покоѣ, электронъ покажется укороченнымъ въ различномъ направленіи и на различную величину; но физическое состояніе электрона, очевидно, не зависитъ отъ мнѣнія наблюдателей.

Хотя эти измѣненія въ единицахъ пространства и времени представляются въ извѣстномъ смыслѣ психологическими, всё же лучше принять этотъ взглядъ, чѣмъ совершенно отказаться отъ основныхъ понятій пространства, времени и скорости, на которыхъ построена современная физика. Въ настоящее время другого выбора нѣтъ.

Не-Ньютоновская механика.

Получивъ вышеуказанныя соотношенія для единицъ пространства и времени, мы можемъ обратиться къ нѣкоторымъ другимъ важнымъ величинамъ, встрѣчающимся въ механикѣ.

Разсмотримъ опять двѣ системы a и b , находящіяся въ относительномъ движеніи со скоростью v . Наблюдатель A въ первой системѣ приготовляетъ шарикъ изъ какого либо твердаго упругаго матеріала, одного кубическаго сантиметра объемомъ, и приводитъ его въ движеніе со скоростью сантиметръ въ секунду по направленію къ си-

стемъ b (т. е. по направленію перпендикулярному къ линіи относительнаго движенія двухъ системъ). Съ другой стороны, наблюдатель B изъ того же матеріала дѣлаеть такой же шарикъ, объемомъ въ одинъ куб. см. въ своихъ единицахъ, и сообщаетъ ему скорость сантиметръ въ секунду (также въ его собственныхъ единицахъ) по направленію къ a . Опытъ расчитанъ такъ, что шарики столкнутся и полетятъ обратно по ихъ первоначальнымъ путямъ. Такъ какъ обѣ системы совершенно симметричны, то на основаніи принципа относительности очевидно, что (алгебраическое) измѣненіе скорости одного шарика, измѣренное наблюдателемъ A , то же самое, что и измѣненіе скорости другого шарика, измѣренное B . Но въ такомъ случаѣ наблюдатель A , считая, что онъ самъ въ покоѣ, заключаетъ, что дѣйствительное измѣненіе скорости шарика b отличается отъ измѣненія скорости его собственнаго шарика, ибо онъ помнитъ, что въ то время какъ для этого поперечнаго направленія единицы пространства однѣ и тѣ же въ той и другой системѣ, единица времени въ движущейся системѣ больше.

Скорость измѣняется въ сантиметрахъ въ секунду, и такъ какъ секунда въ движущейся системѣ длиннѣе, а сантиметръ въ разсматриваемомъ направленіи остается тѣмъ же самымъ въ обѣихъ системахъ, то наблюдатель A , все время пользуясь единицами своей собственной системы, заключаетъ, что измѣненіе скорости шарика b меньше,

чѣмъ измѣненіе скорости шарика a , въ отношеніи $\frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1}$

Это измѣненіе скорости каждаго шарика, помноженное на его массу, даетъ измѣненіе его количества движенія. На основаніи закона сохраненія количества движенія, наблюдатель A принимаетъ, что каждый шарикъ испытываетъ то же самое измѣненіе количества движенія, и поэтому, такъ какъ онъ

раньше рѣшилъ, что шаръ b подвергся измѣненію скорости меньшему въ $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ раза, чѣмъ a , то онъ долженъ заключить, что масса шарика въ системѣ b больше, чѣмъ въ его собственной въ $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ раза. Мы должны поэтому принять, вообще, что масса тѣла увеличивается съ его скоростью. Мы должны, однако, имѣть въ виду, какъ и во всѣхъ другихъ случаяхъ, что движеніе опредѣляется по отношенію къ некоторой точкѣ, которая произвольно принимается за точку покоя.

Если m масса тѣла въ движеніи, а m_0 его масса въ покоѣ, то мы имѣемъ ¹⁾;

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \dots \dots \dots (1).$$

Единственный удобный случай провѣрить экспериментально измѣненіе массы тѣла съ его скоростью представился въ опытахъ надъ массой движущагося электрона, или β -частицы. На самомъ дѣлѣ, измѣрялась не масса электрона, а отношеніе заряда къ массѣ $\left\{ \frac{e}{m} \right\}$. Но всѣми признается, что зарядъ e постояненъ, другими словами, что сила, дѣйствующая на электронъ въ однородномъ электростатическомъ полѣ не зависитъ отъ его скорости относительно поля. Поэтому наблюдаемое измѣненіе отношенія $\frac{e}{m}$

¹⁾ Это равенство и другія, выведенныя въ этомъ отдѣлѣ, тождественны съ равенствами, полученными совершенно другимъ ходомъ разсужденій Льюисомъ (Phil. 16. XVI p 705, 1908). Тамъ равенства были получены для системъ, движущихся по отношенію къ точкѣ, находящейся въ абсолютномъ покоѣ. Здѣсь же мы покажемъ, что эти равенства вѣрны, какая бы произвольная точка ни была избрана за точку покоя.

приписывается исключительно измѣненію массы. Было бы хорошо подвергнуть этотъ взглядъ болѣе тщательному анализу, чѣмъ это дѣлалось до сихъ поръ. Въ настоящее время, однако, мы примемъ его безъ дальнѣйшаго изслѣдованія.

Первоначальные опыты Кауфмана ¹⁾ дали лишь качественное совпаденіе съ равенствомъ (1). Однако, недавно Бухереръ ²⁾ исключительно остроумнымъ методомъ произвелъ новыя опредѣленія массы электроновъ, двигавшихся съ различными скоростями, и его результаты находятся въ замѣчательномъ согласіи съ нашимъ равенствомъ, полученнымъ изъ принципа относительности.

Это весьма удовлетворительное подтвержденіе основного равенства не-Ньютоновской механики слѣдуетъ въ будущемъ разсматривать, какъ весьма важную часть опытнаго матеріала, оправдывающаго принципъ относительности. При помощи маленькой экстраноляціи, мы можемъ изъ результатовъ Бухерера съ точностью найти ту предѣльную скорость, при которой масса дѣлается безконечной, другими словами, такое численное значеніе скорости c , которая никоимъ образомъ не зависитъ отъ свойствъ свѣта. Итакъ, исключительно, на основаніи перваго постулата принципа относительности и указанныхъ опытовъ Бухерера, можно вывести второй постулатъ и всѣ дальнѣйшія слѣдствія, полученные въ этой статьѣ. Едва ли можно достаточно сильно подчеркнуть этотъ фактъ.

Оставимъ теперь массу и посмотримъ, зависитъ ли и единица силы отъ выбора точки покоя. Наблюдатель на данной системѣ заставляетъ дѣйствовать на единицу массы такую силу, которая сообщила бы ей ускореніе $\frac{\text{см.}}{\text{сек.}^2}$, и называетъ эту силу—диною. Если мы теперь примемъ, что

¹⁾ См. Lewis, *loc. cit.*

²⁾ Bucherer, *loc. cit.*

система движется со скоростью v въ направленіи перпендикулярномъ къ направленію силы, то мы должны заключить, что ускореніе, въ дѣйствительности, менѣе единицы, ибо въ

движущейся системѣ секунда длиннѣе въ отношеніи $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$,

а сантиметръ въ этомъ поперечномъ направленіи тотъ же, что и при покоѣ системы. Съ другой стороны, масса увеличена, благодаря движенію системы, множителемъ

$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$. Такъ какъ время входитъ во второй степени,

то произведеніе изъ массы и ускоренія въ $\frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1}$,

меньше, чѣмъ въ томъ случаѣ, если бы система была въ покоѣ. И мы заключаемъ, поэтому, что единица силы, или

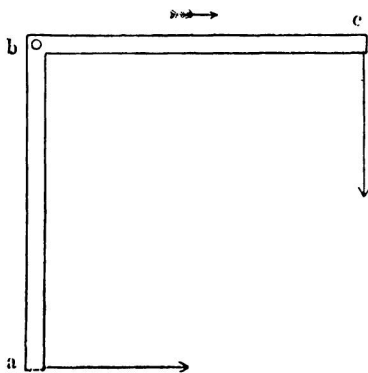


Рис. 3.

дина, въ направленіи поперечномъ къ линіи движенія

также въ $\frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1}$ раза меньше въ движущейся системѣ, чѣмъ въ покоящейся.

Для того же, чтобы получить значеніе для силы, направленной вдоль движенія системы, рассмотримъ (рис. 3) твердый рычагъ abc , плечи котораго равны и перпендикулярны другъ другу, и къ концамъ a и c котораго приложены по направлениямъ параллельнымъ bc и ba равныя силы. Въ этомъ случаѣ система находится въ равновѣсіи.

Примемъ теперь, что вся система движется со скоростью v въ направленіи bc . Конечно, только тѣмъ, что мы сдѣлали такое предположеніе, мы не заставимъ рычагъ повернуться; тѣмъ не менѣе мы должны считатьъ длину bc укороченной въ

$\frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1}$ раза, въ то время, какъ ab сохранить ту же

длину, какъ когда система была въ покоѣ. Мы должны по-этому заключить, что для того, чтобы удержать рычагъ въ равновѣсіи, сила, приложенная къ a , должна быть меньше силы, приложенной къ c , во столько же разъ. Такимъ образомъ, мы видимъ, что въ движущейся системѣ единица силы, дѣйствующая въ продольномъ направленіи меньше

поперечной единицы силы въ $\frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1}$ раза и, слѣдова-

тельно, на основаніи предыдущаго параграфа, меньше находящейся въ покоѣ единицы силы въ $\frac{1 - \beta^2}{1}$ раза. Ин-

тересно указать на одно обстоятельство, на которое уже до насъ обратилъ вниманіе Бёмстэдъ*), а именно на то, что отталкиваніе между двумя одинаковыми электронами, какъ вычи-

слено изъ электромагнитной теоріи, уменьшается въ $\frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1}$

раза, если они движутся перпендикулярно къ линіи, со-

*) Bumstead, loc. cit.

единяющей ихъ; и въ $\frac{1 - \beta^2}{1}$ раза, если они движутся параллельно линіи соединенія.

Съ точки зрѣнія принципа относительности, одною изъ самыхъ интересныхъ величинъ въ механикѣ является, такъ называемая, кинетическая энергія, которая представляетъ собою приростъ энергіи тѣла, когда оно приведено въ движеніе относительно произвольно избранной точки покоя. Зная измѣненіе массы со скоростью, даваемое равенствомъ (1), легко показать, что общимъ выраженіемъ для кинетической энергіи *) E' является слѣдующее:

$$E' = m_0 c^2 \left\{ \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^2}} - 1 \right\} . . . (2)$$

Изъ равенствъ (1) и (2) можно вывести одно изъ самыхъ интересныхъ слѣдствій принципа относительности. Если E представляетъ полную энергію (включая и внутреннюю энергію) движущагося тѣла, а E_0 —его энергію въ состояніи покоя, то кинетическая энергія E' равна $E - E_0$, и равенство (2) можетъ быть написано такъ:

$$E - E_0 = m_0 c^2 \left\{ \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^2}} - 1 \right\} . . . (3)$$

Далѣе равенство (1) мы можемъ написать въ формѣ:

$$m - m_0 = m_0 \left\{ \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^2}} - 1 \right\}; . . . (4)$$

*) Разсмотримъ тѣло, движущееся со скоростью v и подверженное дѣйствию силы f въ направленіи движенія. Количество движенія M и кинетическая энергія E' этого тѣла измѣнятся на величины $dM \cdot f dt$ и $dE' = f dl = f v dt$. Отсюда $dE' = v dM$ или, послѣ подстановки mv на мѣсто M , $dE' = m v dv + v^2 dm$. Исключивъ m изъ послѣдняго равенства и равенства (1) и проинтегрировавъ, мы получимъ вышенаписанное равенство (2).

раздѣливъ (3) на (4), мы получимъ:

$$\frac{E - E_0}{m - m_0} = c^2 \dots \dots \dots (5).$$

Другими словами, если тѣло въ движеніи, то, какъ его энергія, такъ и его масса увеличены, и увеличеніе энергіи равно увеличенію массы, помноженному на квадратъ скорости свѣта. Изъ законовъ сохраненія мы знаемъ, что если тѣло приведено въ движеніе и такимъ образомъ приобрѣтаетъ приращенія массы и энергіи, то послѣднія получаютъ отъ окружающаго *). Точно такъ же, когда движущееся тѣло останавливаютъ, оно должно отдать окружающему приобрѣтенная, какъ энергію, такъ и массу. Масса, такимъ путемъ приобрѣтенная окружающимъ не зависитъ отъ того, какой особый видъ приняла энергія, и мы, такимъ образомъ, приходимъ къ важному заключенію, что *когда система приобрѣтаетъ энергію въ какой бы то ни было формѣ, она всегда приобрѣтаетъ пропорціональное количество массы*; отношеніе приобрѣтаемой энергіи къ приобрѣтаемой массѣ равно квадрату скорости свѣта. Мы можемъ пойти дальше и принять, что если система потеряетъ всю свою энергію, она потеряетъ и всю свою массу. Если мы допускаемъ справедливость этого правдоподобнаго, но не доказаннаго предположенія, то мы можемъ считать массу всякаго тѣла мѣрою его полной энергіи, согласно равенству:

$$m = \frac{E}{c^2} \dots \dots \dots (6)$$

*) Мы переводимъ англійское слово envelopment терминомъ окружающее, ибо авторы несомнѣнно намѣренно пользуются столь общимъ выраженіемъ, означающимъ дословно „то, что окружаетъ“ для того, чтобы показать, что масса и энергія не должны быть обязательно связаны съ тѣломъ.

(Прим. пер.).

А для тѣла, находящагося въ покоѣ:

$$m_0 = \frac{E_0}{c^2}$$

Комбинація этихъ двухъ равенствъ съ (3) даетъ

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Такимъ образомъ мы видимъ, что энергія измѣняется со скоростью въ той же пропорціи, какъ масса, и что, такъ называемая, кинетическая энергія есть лишь вторичное явленіе того же характера, какъ и измѣненія длины и массы. Единственною причиною того, что этотъ эффектъ легко измѣрить, и что онъ сталъ обиходнымъ понятіемъ въ механикѣ, въ то время, какъ остальные указанныя явленія можно обнаружить лишь при помощи самыхъ точныхъ измѣреній, является то обстоятельство, что мы въ состояніи измѣрять количества энергіи, которыя крайне малы въ сравненіи съ полною энергіею изслѣдуемыхъ системъ.

Заключеніе.

Мы показали, какъ наблюдатели, расположенные на системахъ, находящихся въ относительномъ другъ къ другу движеніи, могутъ сохранить свои основные принципы механики, принявъ извѣстныя новыя заключенія. Эти заключенія цѣнны и сами по себѣ; въ единственномъ случаѣ, когда они были провѣрены опытомъ, они оказались въ полномъ согласіи съ нимъ; и они даютъ намъ возможность снасти всѣ фундаментальныя физическія понятія, которыя оказались полезными раньше. Мы, однако,

разсматривали до сихъ поръ лишь системы, которыя съ самаго начала находятся въ равномерномъ относительномъ движеніи. Можно ли будетъ удержать наши заключенія, когда мы станемъ разсматривать процессы, въ которыхъ относительное движеніе еще только устанавливается, или, другими словами, процессы, въ которыхъ имѣеть мѣсто ускореніе? Рѣшить это не входитъ въ задачу настоящей статьи.

Идеи, предложенныя здѣсь, представляются нѣсколько искусственными по своему характеру, и мы не можемъ не подозрѣвать, что это объясняется тѣмъ произвольнымъ способомъ, которымъ мы принимали ту или другую точку за точку покоя, въ то время какъ мы увѣряли, что положеніе покоя въ абсолютномъ смыслѣ не имѣеть никакого значенія.

Если наши идеи и обладаютъ извѣстной степенью искусственности, то вѣдь это также справедливо для другихъ идей, которыя уже давно приняты въ механикѣ. Кажущееся измѣненіе въ показаніяхъ движущихся часовъ, кажущееся измѣненіе въ длинѣ и массѣ движущагося тѣла совершенно аналогичны тому кажущемуся измѣненію энергіи движущагося тѣла, которое мы давно привыкли называть его кинетической энергіей. Мы можемъ съ тѣмъ же правомъ говорить о кинетической массѣ, найденной Кауфманомъ и Бухереромъ, или о кинетической длинѣ, гипотезированной Лорентцомъ. Мы говоримъ, что тепло, развивающееся, когда движущееся тѣло останавливается, идетъ отъ кинетической энергіи, которою оно обладало. Такимъ образомъ, мы сохраняемъ въ силѣ законъ сохраненія энергіи. Принципы не-Ньютоновской механики мы приняли съ тою цѣлью, чтобы удержать въ силѣ столь фундаментальные законы, какъ „законы сохраненія“ и для того, чтобы привести ихъ въ соотвѣтствіе съ принципомъ относительности.

Эти принципы не-Ньютоновской механики, какими бы они

ни казались странными, представляют единственный способ сохранить науку механики существенно въ прежнемъ видѣ. Если впоследствии, когда будутъ разсмотрѣны болѣе сложныя системы и въ частности, когда мы будемъ имѣть дѣло съ ускореніемъ, окажется, что эти взгляды удержать нельзя,—то придется уже тогда произвести полный переворотъ въ механикѣ.

Съ англійскаго перевелъ *М. Я. Якобсонъ*.

Принципъ относительности и изображеніе физическихъ явленій въ четырехмѣрномъ пространствѣ.

Ф. Франка *)

О движеніи какой-либо матеріальной точки въ плоскости мы можемъ составить себѣ геометрической образъ двумя способами. Во первыхъ, мы можемъ мысленно фиксировать ту совокупность точекъ въ пространствѣ, которую съ теченіемъ времени проходитъ движущійся объектъ, т. е. мы можемъ мысленно вычертить нѣкоторую плоскую кривую. Видъ этой кривой, однако, еще не указываетъ намъ всѣхъ характерныхъ чертъ даннаго движенія; мы должны еще, кромѣ того, знать, въ какой моментъ времени двигающійся объектъ находится въ каждой точкѣ кривой. Слѣдовательно, для каждой точки кривой должно быть еще дано значеніе нѣкотораго вещественнаго параметра—времени,—иначе говоря, вдоль кривой должно существовать распределеніе этого параметра. Назовемъ такое представленіе движенія *представленіемъ при помощи траекторіи и распределенія параметровъ*.

Во вторыхъ, мы можемъ выяснитъ движеніе, представивъ себѣ время, какъ третью координатную ось, возставленную перпендикулярно къ плоскости движенія; мы получимъ тогда пространственную кривую, геометрическія свойства которой полностью воспроизведутъ процессъ движенія и въ пространствѣ и во времени, т. е. мы получимъ представленіе движенія, которое мы будемъ обозначать, какъ

*) P. Frank „*Zeitschrift für physikal. Chemie*“ B. 74 g. 466, 1910.

представленіе при помощи пространственно - временной кривой.

Оба эти способа представленія могутъ быть перенесены также и на движеніе матеріальной точки въ пространствѣ. Мы получимъ тогда: 1) Представленіе движенія при помощи траекторіи, построенной въ трехмѣрномъ пространствѣ и распредѣленія параметровъ вдоль этой траекторіи. 2) Представленіе только при помощи пространственно-временной кривой, построенной въ четырехмѣрномъ пространствѣ.

До настоящаго времени пользовались и тѣмъ, и другимъ методомъ; и все же первый методъ считался вполне естественнымъ и отвѣчающимъ сущности дѣла; второй же методъ, разсматривался, какъ искусственный математическій приемъ, который связывалъ въ единый, да и то лишь символическій образъ два столь различныя понятія какъ пространство и время. Но Минковскій въ своей знаменитой рѣчи ¹⁾, произнесенной на Кельнскомъ съѣздѣ естествоиспытателей въ 1908 году, показалъ, что въ примѣненіи къ современнымъ теоріямъ оптическихъ явленій въ двигающихся тѣлахъ, теоріямъ, предложеннымъ Г. А. Лорентцомъ и А. Эйнштейномъ, представленіе съ помощью пространственно-временной кривой, построенной въ четырехмѣрномъ пространствѣ, гораздо отчетливѣе выражаетъ то, что происходитъ на самомъ дѣлѣ, чѣмъ первое представленіе, вносящее множество произвольныхъ свойствъ, которыя относятся вовсе не къ движенію въ томъ видѣ, какъ оно обнаруживается на опытѣ, но, исключительно, къ самому методу представленія.

Цѣлью предлагаемой статьи будетъ—разъяснить въ популярной формѣ эти идеи Минковского даже такому чи-

¹⁾ Г. Минковскій, *Пространство и время*, перев. проф. А. В. Васильева, Казань, 1911 г.

тателю, который не освоился съ современными математическими приёмами. Для бôльшей наглядности мы будемъ часто пользоваться вспомогательнымъ средствомъ, а именно, мы будемъ понижать на одну единицу величину измѣренія.

§1. Геометрическая аналогія.

Если намъ дана кривая въ пространствѣ, то мы можемъ изучить ея геометрическія свойства, или посредствомъ измѣреній, т. е. посредствомъ собиранія опытныхъ данныхъ, относящихся къ этой кривой, или же математическимъ путемъ, исходя изъ ея уравненій

$$y = \eta(x), z = \psi(x) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (1).$$

Геометрически эти уравненія могутъ быть объяснены двоякимъ образомъ. Во первыхъ: если въ нашемъ распоряженіи находится только одна координатная плоскость (напримѣръ, плоскость xy), то мы можемъ представить себѣ, что проведена кривая $y = \eta(x)$, т. е. плоская кривая, находящаяся въ этой плоскости; кромѣ того, въ силу уравненія $z = \psi(x)$, каждой точкѣ кривой будетъ тогда соотвѣтствовать вещественное значеніе параметра z . Итакъ, у насъ имѣется плоская кривая и на ней распредѣленіе параметровъ. Во вторыхъ: если мы будемъ имѣть въ нашемъ распоряженіи трехмѣрное пространство, то мы можемъ мысленно отмѣтить въ немъ каждую точку, удовлетворяющую уравненіямъ (1). Всѣ опытные данныя, собранныя нами относительно эмпирической кривой въ пространствѣ, мы сѣумѣемъ формулировать подъ видомъ геометрическихъ теоремъ объ этомъ геометрическомъ мѣстѣ точекъ, и каждая такая теорема будетъ соотвѣтствовать определенному свойству пространственной кривой, устанавливаемому эмпирически.

Но это теряетъ свою силу для перваго представленія. Вѣдь плоская кривая $y = \eta(x)$ является ничѣмъ

инымъ, какъ проекціей пространственной кривой на плоскость xy . Но послѣдняя плоскость есть плоскость, выбранная совершенно произвольно и не имѣющая ничего общаго съ эмпирическими свойствами пространственной кривой. Проектируя эту кривую на какую-либо другую плоскость, напримѣръ, на плоскость $x'y'$, я получу плоскую кривую совершенно иного вида и вмѣстѣ съ тѣмъ совершенно иное распредѣленіе параметровъ вдоль нея.

Поэтому не всякое свойство плоской кривой и не всякое свойство распредѣленія параметровъ даетъ намъ указанія на геометрическія свойства пространственной кривой, подлежащей изслѣдованію. Многое тутъ зависитъ исключительно отъ особенностей проектированія, отъ плоскости, выбираемой совершенно произвольно. Иными словами: интерпретація при помощи плоской кривой и распредѣленія на ней параметровъ даетъ намъ односторонне-окрашенную картину эмпирически установленныхъ свойствъ пространственной кривой; эта интерпретація не соотвѣтствуетъ сущности дѣла; она говоритъ болѣе, чѣмъ можетъ объяснить. *Только въ пространствѣ же возможно вполне соотвѣтственное представленіе пространственной кривой.*

Гдѣ же кроется причина того, что несмотря на столь различныя представленія, несмотря на многообразныя способы проектированія всякій разъ можно возстановить геометрическія свойства пространственной кривой? Каковы тѣ именно свойства проекціи и распредѣленія параметровъ, которыя мы имѣемъ право разсматривать, какъ изображеніе геометрическихъ свойствъ кривой въ пространствѣ? Обозначимъ черезъ S исходную, основную систему координатъ x, y, z и введемъ вторую координатную систему съ тѣмъ же началомъ координатъ, которую назовемъ системой S' ; пусть координаты ея будутъ равны соотвѣтственно x', y', z' . Тѣ уравненія (1), которыя опредѣляютъ пространственную

кривую, выразятся по отношенію къ системѣ S' слѣдующимъ образомъ:

$$y' = \varphi_1(x'), \quad z' = \psi_1(x') \dots \dots (1').$$

Уравненія, которыя связываютъ координаты системы S' съ координатами системы S , выразятся черезъ:

$$x' = f_1(x, y, z), \quad y' = f_2(x, y, z), \quad z' = f_3(x, y, z) \dots (2).$$

Каждое геометрическое свойство пространственной кривой математически представляется выраженіемъ, зависящимъ отъ координатъ точекъ этой кривой или ея линейныхъ элементовъ. Такъ, на примѣръ, разстояніе отъ начала координатъ любой точки кривой P съ координатами x, y, z равняется квадратному корню изъ суммы квадратовъ этихъ координатъ. Я могу примѣнить здѣсь координаты, какъ системы S , такъ и системы S' . Указанное разстояніе выразится тогда соотвѣтственно черезъ:

или
$$d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \dots \dots (3).$$

$$d' = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2} \dots \dots (3').$$

При помощи уравненій (2) я могу узнать, имѣютъ ли выраженія для d и d' различное или одинаковое значенія. И на самомъ дѣлѣ, оказывается, что, когда уравненія (2), выражаютъ вращеніе системы координатныхъ осей, сохраняется равенство:

$$d = d' \dots \dots (4).$$

На языкѣ современной математики это равенство формулируется такъ: выраженіе $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ остается неизмѣненнымъ (является инвариантомъ) при выполненіи преобразованія (2). Поэтому рассматриваемое выраженіе называется *инвариантомъ по отношенію къ преобразованію (2)*. Далѣе оказывается, что всѣ алгебраическія выраженія, представляющія геометрическія свойства пространственной кривой, инвариантны по отношенію къ пре-

образованію (2), т. е. я получу одинъ и тотъ же результатъ, независимо отъ того, буду ли я для отысканія геометрическихъ свойствъ пространственной кривой исходить изъ уравненій (1) или же изъ уравненій (1') этой кривой. И эта инвариантность выраженій, представляющихъ геометрическія свойства кривой, инвариантность по отношенію къ преобразованію (2) координатъ, и является причиной того, что при всевозможныхъ методахъ проектированія и различныхъ распредѣленіяхъ параметровъ все-таки получаются одни и тѣ же свойства пространственной кривой.

Но отсюда мы заключаемъ также, что не все свойства плоской кривой и распредѣленій параметровъ даютъ намъ право судить о свойствахъ пространственной кривой, а только такія, которыя могутъ быть представлены при помощи инвариантныхъ выраженій. Такъ, на примѣръ, распредѣленіе параметровъ $z = \varphi(x)$, т. е. болѣе или менѣе быстрое возрастаніе или убываніе распредѣленія параметровъ вдоль плоской кривой, само по себѣ ровно ничего не говоритъ мнѣ о свойствахъ пространственной кривой, такъ какъ и совершенно другое распредѣленіе параметровъ $z' = \varphi_1(x)$ играетъ точно такую же роль.

Итакъ, представленіе при помощи плоской кривой и распредѣленія параметра привноситъ произвольные элементы, и поэтому не является наиболѣе соотвѣтственнымъ представленіемъ геометрическихъ свойствъ пространственной кривой.

Все сказанное сохраняетъ свою силу и для кривыхъ въ пространствѣ четырехъ измѣреній. Положимъ, что группа уравненій

$$y = \varphi(x), \quad z = \psi(x), \quad u = \chi(x) \dots (5)$$

выражаетъ такую кривую. Мы можемъ представить ее геометрически при помощи кривой

$$y = \varphi(x), \quad z = \psi(x),$$

построенной въ трехмѣрномъ пространствѣ и распредѣленія параметровъ $u = \chi(x)$ вдоль этой кривой. Но это представлѣнiе, въ свою очередь, оказывается одностороннимъ, такъ какъ вполне равноправными были бы и тѣ представлѣнiя, которыя получаются при помощи преобразованiя координатъ, какъ, на примѣръ, кривая

$$y' = \varphi_1(x), \quad z' = \psi_1(x),$$

построенная въ трехмѣрномъ пространствѣ, и распредѣленiе параметровъ $u' = \chi_1(x)$ вдоль нея.

Такимъ образомъ, всякую кривую трехмѣрнаго пространства, вдоль которой дано распредѣленiе параметровъ, можно разсматривать, какъ изображенiе кривой четырехмѣрнаго пространства. Однако, множество разнообразныхъ кривыхъ трехмѣрнаго пространства принадлежитъ одной и той же кривой четырехмѣрнаго; поэтому каждая отдѣльная кривая помимо свойствъ, заимствованныхъ ею отъ кривой четырехмѣрнаго пространства, обладаетъ еще множествомъ собственныхъ свойствъ, которыя не могутъ быть перенесены на кривую пространства четырехъ измѣренiй.

Вотъ почему геометрическiя свойства кривой въ четырехмѣрномъ пространствѣ никоимъ образомъ не могутъ быть соотвѣтственно представлѣны съ помощью кривыхъ трехмѣрнаго пространства и распредѣленiя параметровъ на нихъ.

То обстоятельство, что одной и той же кривой пространства четырехъ измѣренiй соотвѣтствуетъ множество изображенiй въ трехмѣрномъ пространствѣ, объясняется тѣмъ, что математическiя выраженiя, представляющiя геометрическiя свойства кривой, не измѣняются своей величиной, если эти выраженiя писать въ координатахъ той или другой системы.

§ 2. Классическая механика и принцип относительности.

Основной законъ Ньютоновской механики гласить:

$$\text{масса} \times \text{ускореніе} = \text{силѣ} \dots \dots \dots (6).$$

Этотъ законъ имѣеть точный смыслъ, конечно, только въ томъ случаѣ, если ускореніе разсматривается относительно вполнѣ опредѣленнаго предполагаемаго неподвижнымъ тѣла. Но, ясно, что не всякое произвольно взятое тѣло можно принять за такое основное, т. е. за неизмѣнно связанное съ осями координатъ тѣло—если только мы желаемъ сохранить въ силѣ основной законъ механики. Уже въ простѣйшемъ случаѣ движенія, не зависящаго ни отъ какихъ силъ, т. е. въ случаѣ равномернаго движенія, мы видимъ, что если такимъ тѣломъ, неизмѣнно связаннымъ съ осями координатъ, мы выберемъ, напримѣръ, вращающуюся карусель, то основной законъ: „тѣло неподвергающееся дѣйствию внѣшнихъ силъ, движется прямолинейно и равномерно“ не можетъ прилагаться. Въ самомъ дѣлѣ, тѣло, получившее при помощи толчка нѣкоторую начальную скорость и послѣ этого уже не подвергающееся вліянію никакихъ силъ, не будетъ описывать прямую линію по отношенію къ вращающейся карусели. Тѣло, которое для основного уравненія Ньютоновской механики можетъ быть принято тѣломъ, неизмѣнно связаннымъ съ осями координатъ, называется *основнымъ*, а неизмѣнно связанная съ нимъ система координатныхъ осей— *основной системой*. Основнымъ тѣломъ можетъ служить, напримѣръ, звѣздное небо. Но оно не является единственнымъ; всякое тѣло, движущееся относительно неподвижныхъ звѣздъ прямолинейно и равномерно, есть также основное тѣло, ибо ускореніе относительно, какого-либо тѣла S равно, очевидно, ускоренію относительно другого тѣла S' , двигающагося по отношенію къ тѣлу S равномерно и прямолинейно. Движеніе какого-либо тѣла относительно основной системы называется

„истиннымъ“ движеніемъ этого тѣла, всякое же другое относительное движеніе — „кажущимся“. Поэтому можно установить различіе между „истиннымъ“ и „кажущимся“ ускореніями, между „истинною“ и „кажущеюся“ вращательною скоростью. Напротивъ, нельзя установить истинныя скорости поступательнаго движенія (т. е. скорости прямолинейныхъ движеній). Въ самомъ дѣлѣ, если тѣло движется относительно основной системы S со скоростью v , то, оно относительно другой основной системы S' , которая сама движется относительно S также со скоростью v , не движется вовсе. Слѣдовательно, если я хочу описать истинное движеніе тѣла, то я могу это сдѣлать только такъ, что одна составляющая скорости, остающаяся постоянною во время движенія, будетъ вполнѣ произвольною. Отсюда слѣдуетъ, что всю матеріальную систему, какъ цѣлое, я могу разсматривать съ одинаковымъ правомъ и какъ неподвижную, и какъ движущуюся съ произвольно взятою и постоянною скоростью; при этомъ внутри системы въ относительномъ движеніи тѣлъ другъ по отношенію къ другу не произойдетъ никакихъ измѣненій, такъ какъ въ обоихъ случаяхъ движенія будутъ совершаться относительно основныхъ системъ, подчиняющихся однимъ и тѣмъ же законамъ Ньютоновской кинетики. Это положеніе было установлено еще Ньютономъ и называется *принципомъ относительности механики*. Замѣтимъ, однако, что этотъ принципъ вовсе не утверждаетъ, что въ вопросахъ механики (какъ, на примѣръ, при вычисленіи центробѣжныхъ силъ) имѣетъ значеніе исключительно движеніе тѣлъ относительно другъ друга; что касается ускореній и вращательныхъ скоростей, механической принципъ относительности оставляетъ этотъ вопросъ совершенно открытымъ и только для случая прямолинейныхъ и равномерныхъ поступательныхъ движеній онъ говоритъ, что послѣднія не оказываютъ ровно никакого вліянія на доступныя наблюденія, т. е. относительныя движенія системы такъ какъ законы Ньютона вполнѣ одинаковы для всѣхъ

тѣхъ матеріальныхъ системъ, которыя двигаются другъ относительно друга прямолинейно и равномерно. Такимъ образомъ, формулировка этой теоремы, названной механическимъ принципомъ относительности, является болѣе узкой, чѣмъ формулировка высказываемаго нерѣдко положенія объ „относительности *всѣхъ* движеній“.

Если мы захотимъ представить движеніе матеріальной точки на плоскости при помощи траекторіи и распредѣленія параметровъ, то опытные данныя, относящіяся къ движенію, окажутся недостаточными, чтобы однозначно выразить это представленіе. Дѣйствительно, распредѣленіе параметровъ вдоль кривой даетъ намъ ни что иное, какъ только моментъ времени, въ который двигающійся объектъ достигаетъ данной точки. Тѣмъ самымъ вполне опредѣляется скорость въ каждой точкѣ траекторіи. Но такъ какъ сейчасъ мы видѣли, что опытъ не можетъ дать намъ никакихъ указаній на то, какова истинная скорость даннаго тѣла, ибо всегда можетъ существовать произвольная составляющая скорости, то представленіе при помощи траекторіи и распредѣленія параметровъ даетъ болѣе точныя показанія, чѣмъ они могутъ быть установлены на основаніи эмпирическаго изслѣдованія обстоятельствъ; слѣдовательно, — въ такомъ представленіи должны содержаться произвольные элементы. Разберемъ теперь прежде всего, какимъ же образомъ получаютъ эти различныя представленія одного и того же эмпирическаго положенія вещей.

Положимъ, что дано движеніе, траекторіей котораго служитъ сама ось x , а теченіе этого движенія во времени выражается посредствомъ распредѣленія параметровъ:

$$t = \frac{1}{v} x,$$

гдѣ v обозначаетъ постоянную величину. Мы этимъ представили прямолинейное и равномерное движеніе, совершающееся со скоростью v . Это же самое движеніе мы можемъ

разсматривать такъ же, какъ прямолинейное и равномерное, но обладающее скоростью $v + a$, гдѣ a обозначаетъ произвольную постоянную, ибо законами механики опредѣляется только характеръ движенія, устанавливается, что оно равномерное и прямолинейное относительно какой-либо основной системы, но не опредѣляется абсолютная величина скорости движенія. Согласно другому воззрѣнiю, распределеніе параметровъ вдоль кривой выразится черезъ

$$t = \frac{1}{v + a} x.$$

Представимъ еще точнѣе связь между этими двумя понятіями объ одномъ и томъ же движеніи. Пусть S представляетъ собою основную систему, неизмѣнно связанную съ матеріальною плоскостью xy , и пусть величины координатъ относительно этой системы равны x и y . Тогда разсматриваемое движеніе выразится слѣдующими уравненіями:

$$y = c, t = \frac{x}{v}, \text{ или } x = vt.$$

Но такъ какъ нѣтъ никакой необходимости отдавать особое преимущество именно системѣ S , то мы можемъ въ основаніе нашихъ разсужденій положить также и систему S' .двигающуюся относительно S прямолинейно и равномерно въ положительномъ направленіи оси x , со скоростью a , такъ какъ эта система S' также является „основной“. Положимъ, что нѣкоторая точка, координаты которой относительно системы S равны x и y , обладаетъ по отношенію къ системѣ S' соответственными координатами x' и y' . Вообразимъ себѣ, что S' есть дирижабль, скользящій надъ неподвижною плоскостью xy и надъ системою S . Величина координаты y остается, очевидно, одинаковою, въ обѣихъ системахъ, такъ что

$$y' = y;$$

но скорость разсматриваемаго движенія, имѣвшая отно-

сительно S величину v , относительно S' получится равною $v - a$. Слѣдовательно, съ этой точки зрѣнія, движеніе будетъ представлено при помощи плоской кривой

$$y' = 0$$

и распределенія вдоль нея параметровъ

$$t = \frac{x'}{v - a} \text{ или } x' = (v - a)t \quad \dots \dots (7).$$

Изъ формуль

$$x' = (v - a)t \text{ и } x = vt$$

вытекаетъ слѣдующая связь между x' и x :

$$x' = x - at \quad \dots \dots (7a).$$

Итакъ, различное представленіе одного и того же эмпирическаго факта, напริมѣръ, прямолинейнаго и равномернаго движенія по направленію оси x , математически соотвѣтствуетъ преобразованію движенія отъ системы S къ системѣ S' , которое и осуществляется съ помощью уравненій

$$x' = x - at, \quad y' = y.$$

Что движеніе, получающееся въ силу этого преобразованія, соотвѣтствуетъ тому жу эмпирическому факту, слѣдуетъ изъ механическаго принципа относительности, согласно которому обнаружить вліяніе равномернаго и прямолинейнаго переноснаго движенія абсолютно невозможно.

При выводѣ формуль преобразованія (7a) было сдѣлано еще одно только предположеніе, которое на первый взглядъ, быть можетъ, покажется само собою понятнымъ, но которое мы непремѣнно должны подчеркнуть, такъ какъ дальнѣйшее изложеніе будетъ связано какъ разъ съ тѣмъ, что мы это предположеніе отвергнемъ.

Именно: когда мы при помощи формуль (7) выражали тотъ фактъ, что въ движущейся системѣ S' скорость имѣетъ величину, равную только $v - a$, то мы молчаливо допускали, что въ данной точкѣ двигающейся системы S' часы

показываютъ такое же время, какъ и въ совпадающей съ ней точкѣ системы S ; т. е., что часы, находящіеся на дирижаблѣ, мы регулируемъ по тѣмъ башеннымъ часамъ, мимо которыхъ пролетаемъ. Вѣдь, въ противномъ случаѣ, мы должны были бы ввести свое собственное время t' , и уравненіе (7) имѣло бы тогда видъ

$$t' = \frac{x'}{v - a},$$

но это уравненіе преобразуется къ (7) только при томъ предположеніи, что $t' = t$. Къ формуламъ преобразованія для x' и y' мы должны присоединить еще равенство $t' = t$, которое показываетъ намъ, какъ мы мысленно регулируемъ часы въ движущейся системѣ S' . Что это регулированіе не является единственно возможнымъ, мы увидимъ въ слѣдующемъ параграфѣ. Пока же только составимъ слѣдующую полную группу формулъ преобразованія величинъ пространства и времени отъ системы S къ системѣ S' :

$$x' = x - at, \quad y' = y, \quad t' = t \dots \dots (8).$$

Все, что мы сказали по поводу прямолинейныхъ и равномерныхъ движеній, относится и къ любому движенію матеріальной точки. Положимъ, что въ плоскости xy относительно основной системы S задано движеніе нѣкоторой матеріальной точки, обладающей массой m . Тогда движеніе этой точки въ силу уравненія (6) удовлетворяетъ уравненіямъ:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = X, \quad m \frac{d^2y}{dt^2} = Y \dots \dots (9),$$

гдѣ $\frac{d^2x}{dt^2}$ и $\frac{d^2y}{dt^2}$ обозначаютъ собою составляющія ускоренія, а X и Y —составляющія силы; послѣднія представляютъ собою функціи только отъ разностей между координатами двигающейся точки m и координатами другихъ двигающихся или же неподвижныхъ точекъ. Такимъ обра-

зомъ, я могу представить себѣ движеніе въ плоскости xu при помощи траекторіи и распредѣленія параметровъ вдоль этой траекторіи.

Но то же самое движеніе я могу разсматривать и относительно системы S' , двигающейся по отношенію къ системѣ S равномерно и прямолинейно, по направленію оси x , со скоростью a , и являющейся также основной системой. Наблюденный процессъ движенія вовсе не заставляетъ меня выбрать одну опредѣленную основную систему. Уравненія движенія относительно системы S' я получу, преобразовывая уравненія (9) посредствомъ формулъ (8). Дифференцируя обѣ части равенствъ (8), я получаю:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx'}{dt'} &= \frac{dx}{dt} - a, & \frac{dy'}{dt'} &= \frac{dy}{dt} \\ \frac{d^2x'}{dt'^2} &= \frac{d^2x}{dt^2} & \frac{d^2y'}{dt'^2} &= \frac{d^2y}{dt^2} \end{aligned} \right\} \dots (10),$$

т. е. ускоренія имѣютъ одинаковыя величины, какъ относительно системы S , такъ и относительно системы S' , но составляющая скорости по оси x измѣняется на постоянную величину a . Составляющія силы, зависящія только отъ разностей между координатами, остаются послѣ преобразованія такими же функціями отъ $x_1' - x_2'$ и т. д., какими раньше были отъ $x_1 - x_2$ и т. д., ибо если

$$x'_1 = x_1 - at \text{ и } x'_2 = x_2 - at,$$

то

$$x'_1 - x'_2 = x_1 - x_2 \dots \dots \dots (11).$$

Преобразованныя уравненія (9) имѣютъ, такимъ образомъ, слѣдующій видъ:

$$m \frac{d^2x'}{dt'^2} = X, \quad m \frac{d^2y'}{dt'^2} = Y \dots \dots \dots (12).$$

Эти уравненія формально совершенно тождественны первымъ, только написаны они въ зависимости отъ координатъ системы S' ; это и есть математическое выраженіе того

факта, что эмпирическія явленія движенія не связаны ни съ какою опредѣленною основною системою. Но представляя это движеніе при помощи траекторіи и распредѣленія параметровъ, я долженъ остановиться на опредѣленной основ- ной системѣ и, такимъ образомъ, ввести произвольный элементъ, подобно тому, какъ при геометрической аналогіи, данной въ § 1, было произвольно отдано преимущество одной опредѣленной проэкции пространственной кривой.

Покажемъ теперь, что этотъ произволь отпадаетъ, какъ только мы представимъ движеніе при помощи временно- пространственной кривой. Съ этой цѣлью мысленно проведемъ ось t перпендикулярно къ плоскости xy . Тогда уравненія

$$y = \varphi(x), \quad t = \psi(x) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (13)$$

опредѣляютъ собою пространственную кривую, которую можно будетъ разсматривать, какъ представленіе того, какъ протекаетъ во времени движеніе матеріальной точки вдоль плоской кривой $y = \varphi(x)$. Геометрическій ходъ простран- ственно-временной кривой только потому однозначно выра- жаетъ процессъ движенія, что эта кривая связана съ одной координатной системою; въ самомъ дѣлѣ, при какой-либо другой координатной системѣ функція $t = \psi(x)$ имѣла бы иной видъ, и слѣдовательно, та же самая простран- ственная кривая представляла бы собою уже другое теченіе движенія со временемъ.

Въ частности посредствомъ уравненій преобразованія (8), вмѣсто системы x, y, t — назову ее черезъ S — я могу ввести другую координатную систему S' ; послѣдняя, очевидно, будетъ косоугольной. Въ силу равенства $t = t'$ плоскость xy совпадаетъ съ плоскостью $x'y'$; точно также въ виду равенства $y' = y$, ось x сольется съ осью x' , а ось y со- впадаетъ съ y' ; только ось t повернется въ плоскости xt на нѣкоторый уголъ, тангенсъ котораго равняется a , и займетъ новое положеніе t' . Уравненія разсматриваемой

пространственной кривой относительно системы S' получаются преобразованиемъ уравненій (13) посредствомъ формуль (8). Но, какъ мы видѣли раньше, совершенно также получаются уравненія движенія относительно основной системы, движущейся въ свою очередь со скоростью a относительно исходной основной системы. Итакъ, мѣняя косоугольную систему координатныхъ осей, мѣняя наклонъ оси t къ оси t' , я могу разсматривать одну и ту же пространственно-временную кривую, какъ представленіе движенія относительно *всякой произвольно взятой* основной системы, а это вполне согласуется съ эмпирическимъ положеніемъ вещей, которое не связано ни съ какой основной системой. Такимъ образомъ, это представленіе болѣе соотвѣтствуетъ содержанію опыта, чѣмъ представленіе при помощи траекторіи и распределенія параметровъ.

Точно также обстоитъ дѣло и при изслѣдованіи движенія матеріальной точки въ пространствѣ. Опытъ не даетъ намъ истинныхъ скоростей, и поэтому онъ представляетъ намъ полную свободу выбора между безчисленнымъ множествомъ интерпретацій одного и того же движенія. Всѣ эти интерпретаціи въ совокупности можно представить при помощи пространственно-временной кривой четырехмѣрнаго пространства; мѣняя направленіе оси t , но сохраняя неизмѣненными положенія осей x, y, z , мы получимъ каждую изъ этихъ интерпретацій въ отдѣльности.

Такимъ образомъ, представленіе при помощи кривой въ четырехмѣрномъ пространствѣ является точнымъ воспроизведеніемъ нашего опытнаго познанаія движенія, а представленіе при помощи траекторіи и распределенія параметровъ—произвольнымъ разрывомъ четырехмѣрнаго пространственно-временнаго многообразія.

Если, однако, классическая механика никогда не обнаруживала намѣренія перейти къ воспроизведенію явленій въ четырехмѣрномъ пространствѣ, то причина этого заклю-

чается въ слѣдующемъ: пространство и время въ четырехмѣрномъ пространствѣ все-таки кажутся не вполнѣ равноправными категоріями, ибо пространство (т. е. координатная система x, y, z) остается неизмѣннымъ при всякой интерпретаціи, тогда какъ ось t мѣняетъ свое положеніе. Мы увидимъ, что только изслѣдованія оптическихъ и электромагнитныхъ процессовъ въ движущихся тѣлахъ обнаружили необходимость перейти къ изображенію этихъ процессовъ въ четырехмѣрномъ пространствѣ, ибо здѣсь система x, y, z и величина t , т.-е. пространство и время, становятся абсолютно равноправными категоріями.

§ 3. Оптическія явленія въ движущихся тѣлахъ и принципъ относительности.

Основной законъ оптики гласитъ слѣдующее: Въ пустомъ пространствѣ свѣтъ распространяется по всѣмъ направленіямъ съ одною и тою же постоянною скоростью. Подобно основному закону механики, и основной законъ оптики, чтобы имѣть точный смыслъ, нуждается въ опредѣленной системѣ, ибо слово „скорость“, играющее здѣсь доминирующую роль, имѣетъ смыслъ только относительно вполнѣ опредѣленнаго тѣла, неизмѣнно связаннаго съ осями координатъ. Нѣкоторое тѣло, по отношенію къ которому основной законъ оптики сохраняетъ свою силу, снова назовемъ основнымъ тѣломъ и при томъ *оптическимъ основнымъ тѣломъ*, а координатную систему осей, неизмѣнно связанныхъ съ такимъ тѣломъ — *оптической основною системою*. Согласно всему тому, что намъ извѣстно, солнце представляетъ собою не только механическое, но и оптическое основное тѣло.

Если S есть оптическая основная система, то какая-либо система S' , двигающаяся относительно S прямолинейно, съ постоянною скоростію a , очевидно, не можетъ служить основнымъ тѣломъ. Пояснимъ себѣ это наглядно. Положимъ,

что система S неизмѣнно связана со стѣнами дома, въ которомъ мы находимся, и который по нашему допущенію является, слѣдовательно, основнымъ тѣломъ. Пусть система S' неизмѣнно связана съ дирижаблемъ жесткой системы, пролетающимъ надъ домомъ. На крышѣ этого дома находится источникъ свѣта, испускающій лучи по всемъ направленіямъ, съ одинаковою скоростью. Въ то время, какъ я улетаю на своемъ дирижаблѣ отъ источника свѣта по прямой линіи и при томъ со скоростью меньшей скорости свѣта, одна часть свѣтовыхъ лучей слѣдуетъ за мной, а другая распространяется въ направленіи прямопротивоположномъ моему полету. Двигающаяся вслѣдъ за мною часть лучей, очевидно, будетъ обладать меньшею скоростью по отношенію къ дирижаблю, чѣмъ по отношенію къ дому; напротивъ того, свѣтъ, распространяющійся въ противоположномъ направленіи, будетъ обладать большею скоростью относительно дирижабля, чѣмъ относительно дома. Итакъ, свѣтъ, распространяющійся относительно дома S по всемъ направленіямъ съ одинаковою скоростью (или, какъ говорятъ, распространяющійся изотропно), относительно дирижабля S' въ одномъ направленіи будетъ распространяться наиболѣе быстро, въ противоположномъ направленіи наиболѣе медленно, а въ промежуточномъ между ними съ нѣкоторою среднею скоростью. Поэтому, если S представляетъ собою оптически основное тѣло, то S' таковымъ быть не можетъ. Слѣдовательно, въ оптикѣ, какъ будто, существуютъ не только истинныя ускоренія, но и истинныя скорости, такъ какъ ни одно тѣло, движущееся относительно основного тѣла, не можетъ быть тоже основнымъ.

Представимъ себѣ теперь, что въ гондолѣ нашего дирижабля находится опредѣленная масса воздуха, окруженная прозрачными стѣнками и двигающаяся вмѣстѣ съ дирижаблемъ, и будемъ изучать оптическія явленія, происходяшія въ этой массѣ воздуха. Мы знаемъ, что свѣтъ, испускаемый источ-

никомъ, находящимся на крышѣ дома, не распространяется по отношенію къ нашему дирижаблю изотропно (т.-е. не распространяется по всѣмъ направленіямъ съ одинаковою скоростью). При этомъ, однако, предполагается, что мы наблюдаемъ это распространеніе свѣта изъ нашего дирижабля, но что движеніе дирижабля не оказываетъ на него никакого вліянія. Если же наблюдать распространеніе свѣта внутри нашей двигающейся массы воздуха, то прежде всего возникаетъ вопросъ: увлекается ли свѣтъ двигающеюся массою воздуха, или же эта масса воздуха проходитъ съвозъ свѣтъ подобно тому, какъ призрачный корабль Летучаго Голландца проникаетъ черезъ обыкновенный корабль, не нарушая при этомъ пути послѣдняго и не сообщая ему ни малѣйшаго толчка?

Знаменитый Генрихъ Гертцъ, открывшій электрическія волны, допустилъ, что свѣтъ уносится движущейся массою воздуха; это можно уяснить себѣ слѣдующимъ нагляднымъ образомъ: по палубѣ неподвижнаго корабля, выбѣжавъ изъ нѣкоторой его точки по всѣмъ направленіямъ съ одинаковыми скоростями, бѣгутъ люди. Эти скорости имѣютъ одну и ту же величину, какъ относительно корабля, такъ и относительно морского берега. Пусть въ это время корабль отъправляется въ путь: люди не испытаютъ отъ этого ни малѣйшаго нарушенія своего занятія. Однако теперь всѣ они бѣгутъ съ одинаковою скоростью только по отношенію къ кораблю, относительно же берега бѣгушіе по направленію движенія корабля обладаютъ большею скоростью, чѣмъ всѣ остальные. Это и есть точка зрѣнія Г. Гертца. Бѣгушіе люди представляютъ собою свѣтовые лучи, корабль — это заключенная въ дирижаблѣ масса воздуха, морской берегъ — неподвижный домъ.

Итакъ, по Гертцу, также и внутри движущейся массы воздуха свѣтовые лучи распространяются изотропно относительно системы, связанной съ этой массою, тогда какъ тѣ лучи, которые распространяются въ неподвижной массѣ

воздуха, лишены своей изотропности относительно дирижабля.

Экспериментальные данные, однако, не подтвердили допущения Гертца. Уже всѣмъ извѣстный фактъ абераціи свѣта неподвижныхъ звѣздъ, происходящей вслѣдствіе движенія земли, допускаетъ безъ натяжки лишь слѣдующее объясненіе. Свѣтовые лучи, проникающіе черезъ воздухъ, находящійся внутри зрительной трубы, не увлекаются этимъ воздухомъ, участвующимъ въ движеніи земли, а распространяются независимо отъ этого движенія по прямой линіи, выходящей изъ неподвижной звѣзды. Поэтому свѣтовые лучи, попавшіе въ трубу черезъ центръ объектива, вслѣдствіе движенія трубы выходятъ не черезъ центръ окуляра: такимъ образомъ, получается смѣщеніе видимаго направленія звѣзды. Но если явленіе абераціи можно еще было объяснить при помощи нѣсколько искусственныхъ гипотезъ, основанныхъ на допущеніи «увлекаемаго ээира»—какъ выражается гипотетическая физика—то ужъ опытъ Физо, позволяющій измѣрить скорость свѣта въ потокѣ воды, допускаетъ только одно объясненіе, заключающееся въ томъ, что свѣтовые лучи не вполне увлекаются двигающимися тѣлами, и что въ частности массы воздуха никакого вообще вліянія на распространеніе свѣта не оказываютъ.

Такимъ образомъ, противъ Гертцовскаго допущенія „увлекаемаго ээира“ снова было выдвинуто прямо-противуположное допущеніе Френеля, согласно которому „свѣтъ распространяется изотропно относительно основнаго твердаго тѣла, и эта изотропія не нарушается движущеюся массою воздуха“. Внутри этой массы свѣтъ распространяется по отношенію къ неподвижной основной системѣ также изотропно—таково предположеніе, которое въ гипотетической физикѣ была названа гипотезой „покоющагося ээира“, и которое благодаря голландскому физику Г. А. Лорентцу, творцу электронной теоріи, сдѣлалось господствующей.

Слѣдовательно, согласно этой гипотезѣ, свѣтъ и внутри воздушной массы, заключенной въ дирижаблѣ, распространяется изотропно по отношенію къ неподвижному дому. Но отсюда слѣдуетъ, что по отношенію къ дирижаблю свѣтъ не можетъ распространяться изотропно; въ направленіи полета дирижабля онъ долженъ обладать меньшею скоростью, чѣмъ въ противоположномъ направленіи. Поэтому, сравнивая скорость свѣта внутри двигающагося дирижабля по различнымъ направленіямъ, можно было бы опредѣлить величину истинной скорости дирижабля по отношенію къ дому, т.-е. по отношенію къ основной системѣ. Явленія, происходящія внутри какого-либо тѣла, двигающагося относительно основной системы прямолинейно и съ равномерною скоростью, зависѣли бы отъ скорости этого тѣла, т. е. механическій принципъ относительности не оправдывался бы въ области оптических явленій.

Были придуманы опыты съ цѣлью на самомъ дѣлѣ доказать существованіе этихъ различныхъ скоростей распространенія свѣта относительно того движущагося тѣла, внутри котораго оно имѣетъ мѣсто. Самымъ важнымъ изъ такихъ опытовъ является опытъ Майкельсона. За основное тѣло Майкельсонъ принялъ (вмѣсто дома въ нашемъ примѣрѣ) солнце, вмѣсто дирижабля, онъ воспользовался землею и, наконецъ, вмѣсто массы воздуха, сопровождающей все время дирижабль — земною атмосферою. Заставляя лучи свѣта интерферировать другъ съ другомъ, онъ пытался обнаружить разницу въ скоростяхъ этихъ лучей. Мы не входимъ здѣсь въ описаніе самого эксперимента, такъ какъ касаемся лишь принципиальной стороны дѣла; поэтому мы сообщимъ только результатъ эксперимента: искомой разницы въ скоростяхъ свѣта нельзя было констатировать; согласно опыту свѣтъ распространяется изотропно и относительно движущагося

тѣла. Итакъ, принципъ относительности сохраняетъ свою силу.

Здѣсь, повидимому, кроется нѣкоторое противорѣчіе. На основаніи вышеизложеннаго приходится предположить, что свѣтъ и въ движущихся тѣлахъ распространяется относительно основного тѣла (дома) изотропно; но, согласно опыту Майкельсона, свѣтъ распространяется изотропно также и по отношенію къ дирижаблю, и кажется, что оба положенія другъ съ другомъ несовмѣстны. Вѣдь если свѣтъ распространяется относительно основного тѣла со скоростью c , а дирижабль летитъ относительно того же тѣла со скоростью a , то свѣтъ долженъ обладать по направленію траекторіи дирижабля скоростью $c - a$ относительно послѣдняго. Слѣдовательно, — и это мы будемъ твердо помнить, — когда дирижабль летитъ, свѣтъ распространяется относительно него съ меньшею скоростью, чѣмъ когда онъ находится въ покоѣ, ибо

$$c - a < c, \text{ если } a \text{ не равно } 0.$$

Но, согласно опыту Майкельсона, скорость свѣта въ движущемся дирижаблѣ такова же, какъ и въ неподвижномъ.

Для разрѣшенія этого противорѣчія, Эйнштейнъ, опираясь на упомянутыя уже выше работы Г. А. Лорентца, построилъ теорію относительности оптическихъ явленій въ движущихся тѣлахъ, получившую свое названіе отъ того, что она кладетъ въ основаніе подтвержденный опытомъ Майкельсона принципъ относительности и ставитъ своей задачей разрѣшить упомянутое противорѣчіе. Представимъ здѣсь соображенія Эйнштейна.

Съ этой цѣлью проанализируемъ прежде всего смыслъ положенія: въ движущемся дирижаблѣ свѣтъ распространяется (по направленію движенія) медленнѣе, чѣмъ въ неподвижномъ.

Предположимъ, что точка A неподвижнаго дирижабля

совпадаетъ съ той башней дома, на которой находятся источникъ свѣта и часы. Пусть лучъ свѣта выйдетъ изъ точки A въ тотъ моментъ, когда часы показываютъ ровно 12. Будемъ наблюдать прибытіе этого луча во вторую точку B дирижабля, отстоящую отъ точки A на разстояніи r , опредѣляя время прибытія по часамъ, находящимся въ B . Положимъ, что это время равно 12 ч. и τ сек.; тогда скорость свѣта, которую мы будемъ обозначать черезъ v , выразится черезъ

$$v = \frac{r}{\tau}.$$

Такое же значеніе для v мы получимъ, если вмѣсто точки B выберемъ какую-нибудь другую точку на дирижаблѣ. Предположимъ далѣе, что точки A и B неподвижнаго дирижабля совпадаютъ съ точками A' и B' дома. Въ 12 часовъ дирижабль отправляется въ путь со скоростью a по направленію $A'B'$, и одновременно съ нимъ изъ точки A' со скоростью v выходитъ лучъ свѣта. Послѣдній придетъ въ точку B' опять таки черезъ $\tau = \frac{r}{v}$ секундъ, но къ этому времени точка B дирижабля оставитъ уже точку B' позади себя; слѣдовательно, когда свѣтъ достигнетъ точки B , находящіяся въ ней часы покажутъ время, большее, чѣмъ 12 ч. и τ сек. Теперь уже точка B находится надъ тою точкою дома, которая отстоитъ отъ башни A не на разстояніи r , а на разстояніи, равномъ $r + a\tau'$, если τ' обозначаетъ тотъ промежутокъ времени, который необходимъ свѣтовому лучу, чтобы въ движущемся дирижаблѣ пройти путь отъ точки A до точки B . Полагая

$$r' = r + a\tau'$$

и принимая во вниманіе скорость v свѣта, мы получимъ:

$$\frac{r'}{\tau'} = v, \quad \text{т.-е. } \tau' = \tau \frac{v}{v - a};$$

слѣдовательно, $\tau' > \tau$, ибо $a < v$. Обозначимъ черезъ B'' ту точку дома, надъ которой находится точка B , когда свѣтовой лучъ доходить до этой послѣдней точки. Положеніе: „Въ движущемся дирижаблѣ свѣтъ распространяется медленнѣе, чѣмъ въ неподвижномъ“ означаетъ ни что иное, какъ слѣдующее: „Въ моментъ прибытія свѣтового луча часы въ точкѣ B показываютъ меньшее время, если дирижабль съ 12 часовъ находится въ состояніи покоя, чѣмъ въ томъ случаѣ, если онъ съ того же часа непрерывно движется“. Что такъ именно обстоитъ дѣло, мы заключаемъ изъ того, что точка B совпадаетъ теперь не съ точкой B' , но съ болѣе удаленной отъ A' точкой B'' . Но чтобы отсюда можно было заключить, что часы показываютъ болѣе позднее время, мы молчаливо предположили, что часы, находящіеся въ точкѣ B дирижабля, всегда показываютъ такое же время, какъ и тѣ башенные часы, надъ которыми въ данный моментъ пролетаетъ дирижабль. Вѣдь только въ этомъ случаѣ мы и можемъ утверждать, что часы въ точкѣ B показываютъ такое же время, какъ и часы въ точкѣ B'' ; но часы B'' , очевидно, показываютъ большее время, чѣмъ показывали часы B' , когда свѣтовой лучъ доходилъ до этой точки B' , ибо часы B'' удалены отъ A' на большее разстояніе, чѣмъ часы B' . Но если дирижабль неподвиженъ, то ко времени наблюденія, точка B совпадаетъ съ точкой B' , если же дирижабль движется, то точка B совпадаетъ съ B'' . Отсюда слѣдуетъ, что для прохожденія одного и того же отрѣзка AB свѣтовой лучъ долженъ въ движущейся системѣ затратить большее время, чѣмъ если бы эта система находилась въ покоѣ.

Итакъ, оказывается, что вышеупомянутое положеніе зависитъ отъ того, какимъ образомъ часы на дирижаблѣ регулируются по башеннымъ часамъ. Поэтому скажемъ нѣсколько словъ о регулированіи часовъ.

Когда мы говоримъ: „Свѣтъ распространяется относи-

тельно дома изотропно“, это значить, что если между двумя произвольно взятыми точками A' и B' дома проходить свѣтовой лучъ, то отношеніе разстоянія $A'B'$ къ времени распространенія свѣта есть величина постоянная и равная v . Для того, чтобы этой теоремѣ можно было приписать опредѣленный смыслъ, необходимо въ каждой точкѣ того дома, гдѣ ведутся наблюденія, помѣстить часы. Но этого еще недостаточно: всѣ часы должны быть регулированы синхронно (имѣть одинаковый ходъ). Въ самомъ дѣлѣ, если, напримѣръ, въ Вѣнѣ часы показываютъ Вѣнское время, а въ Будапештѣ—Будапештское, и если я пошлю свѣтовой лучъ изъ Вѣны въ Будапештъ, то получу слишкомъ большую величину для времени распространенія свѣта, такъ какъ въ Будапештѣ часы идутъ впередъ. Самымъ простымъ будетъ слѣдующій способъ регулированія часовъ на нашемъ зданіи: отправимъ изъ башни A' свѣтовой лучъ; въ то время поставимъ башенные часы на 12; пусть этотъ лучъ достигнетъ нѣкоторой точки P' , отстоящей отъ A' на разстояніи ρ' , въ опредѣленный моментъ времени; въ этотъ моментъ къ точкѣ P' поставимъ часы на 12 ч. и $\frac{\rho'}{v}$ сек., тогда въ точкахъ A' и P' часы будутъ регулированы синхронно. Изотропія распространенія свѣта и состоитъ въ томъ, что указаннымъ способомъ мы можемъ свободно безъ всякихъ противорѣчій регулировать часы въ каждой произвольно взятой парѣ точекъ.

Но регулированіе часовъ на дирижаблѣ въ приведенномъ нами разсужденіи производилось слѣдующимъ образомъ: мы попросту ставили наши часы всегда по тѣмъ башеннымъ часамъ, надъ которыми въ данный моментъ пролеталъ дирижабль.

Итакъ, регулированіе часовъ на основномъ тѣлѣ (на

домѣ) и на движущемся тѣлѣ (на дирижаблѣ) производилось неодинаковыми приемами. Часы на домѣ регулировались оптически, часы въ дирижаблѣ регулировались по башеннымъ часамъ. Такимъ образомъ, дому было отдано преимущество передъ дирижаблемъ. Но если при такомъ регулированіи часовъ получается результатъ, что движеніе дирижабля относительно дома—даже равномерное и прямолинейное—отражается на оптическихъ явленіяхъ, происходящихъ внутри массы воздуха, увлекаемаго дирижаблемъ, то это вовсе еще не доказываетъ, что въ данномъ случаѣ принципъ относительности болѣе ужъ не имѣетъ мѣста, ибо то, что мы наблюдаемъ, не представляетъ собою только свойство свѣта, но оно представляетъ результаты свойства свѣта и способа регулированія часовъ. Прекращеніе изотропіи распространенія свѣта при движеніи, т. е. замедленіе распространенія свѣта, обусловливается тѣмъ,—гласить теорія относительности—что на дирижаблѣ мы регулировали часы инымъ способомъ, чѣмъ на башнѣ. Слѣдовательно, здѣсь мы имѣемъ дѣло съ измѣненіемъ, внесеннымъ совершенно произвольно, и нѣтъ поэтому ничего удивительнаго, что если мы регулируемъ по башеннымъ часамъ все часы на всехъ двигающихся тѣлахъ, то эта башня успѣшно выполняетъ роль тѣла, неизмѣнно связаннаго съ осями координатъ, также и при такихъ оптическихъ явленіяхъ, о которыхъ мы судимъ по часамъ. Однако, эта роль тотчасъ же отпадаетъ, если мы будемъ регулировать и часы, находящіеся на дирижаблѣ, и при томъ регулировать слѣдующимъ образомъ:

Положимъ, что, подобно предыдущему, дирижабль движется со скоростью α . Въ 12 часовъ мы посылаемъ изъ точки A лучъ свѣта; когда этотъ лучъ въ опредѣленный моментъ придетъ въ нѣкоторую точку P дирижабля, разстояніе которой отъ точки A равно ρ , мы поставимъ часы, находящіеся въ этой точкѣ P на 12 ч. и $\frac{\rho}{\alpha}$ сек. Опытъ

показываетъ, что это несомнѣнно осуществимо для всякой пары точекъ дирижабля. Въ такомъ случаѣ свѣтъ также и по отношенію къ дирижаблю будетъ распространяться изотропно, и при томъ по всеѣмъ направленіямъ съ одною и тою же скоростью v . Въ частности, если мы будемъ разсматривать вышеупомянутыя точки A и B , разстояніе между которыми равно r , то свѣтовой лучъ, вышедшій изъ

A прійдетъ въ точку B черезъ $\frac{r}{v}$ секундъ, если слѣ-

диль за временемъ по часамъ, находящимся въ точкѣ B дирижабля; но тотъ же лучъ прійдетъ позднѣе, если отсчитывать время по башеннымъ часамъ въ точкѣ B'' , расположенной подъ точкой B . Слѣдовательно, всякая матеріальная система имѣетъ свою собственную систему часовъ, показывающихъ неодинаковое время въ однѣхъ и тѣхъ же точкахъ пространства. Такимъ образомъ, если при всеѣхъ физическихъ явленіяхъ для выраженія законовъ, управляющихъ этими явленіями, пользоваться тѣми часами, которые принадлежатъ данной матеріальной системѣ и которые регулированы по распространенію свѣта въ системѣ, то принципъ относительности механики продолжаетъ сохранять свою силу; ни одной матеріальной системѣ, неизмѣнно связанной съ осями координатъ и двигающейся относительно основной системы равномерно и прямолинейно, не отдается преимущество; всякая система подобнаго рода можетъ быть принята за основную.

Посмотримъ теперь, какъ этотъ фактъ выражается математически. Дѣло въ томъ, что, воспользовавшись прежними примѣняемыми въ механикѣ формулами, устанавливающими связь между опредѣленіями длины и времени въ неподвижной и въ движущейся системахъ, очевидно, будетъ невозможно; даже формула $t = t'$ не можетъ здѣсь имѣть мѣсто, такъ какъ время въ какой-нибудь точкѣ движущейся си-

стемы не согласуется съ временемъ въ совпадающей съ ней точкѣ неподвижной системы.

Для установленія этихъ новыхъ уравненій попытаемся облечь въ точныя формулы способъ регулированія часовъ. Положимъ, что въ моментъ $t = 0$ неподвижная система (S) и движущаяся система (S') совпадаютъ другъ съ другомъ. Пусть въ покоящейся системѣ координаты разны x, y, z , время равняется t , а начало координатъ находится въ точкѣ O . Въ двигающейся системѣ соответствующія величины будутъ выражены черезъ x', y', z', t', O' . Въ моментъ $t=0$ изъ начала координатъ O выходитъ лучъ, который въ моментъ достигнетъ точки P , принадлежащей той неподвижной системѣ, которой координаты равны x, y, z . Такъ какъ v обозначаетъ собою скорость свѣта, и такъ какъ, согласно элементарнымъ основаніямъ аналитической геометріи, разстояніе точки P отъ начала координатъ выражается черезъ

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

то должно существовать соотношеніе

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = vt,$$

или, будучи написано въ другой формѣ,

$$x^2 + y^2 + z^2 - v^2 t^2 = 0 \dots (14).$$

Допустимъ теперь, что система S' (дирижабль), совпадающая въ моментъ $t = 0$ съ системою S , начинаетъ двигаться равномерно и прямолинейно по направленію оси x со скоростью a , и что при этомъ оси y' и z' остаются параллельными осямъ y и z , а ось x' скользитъ по оси x . Тогда координаты точки P дирижабля относительно системы координатныхъ осей, неизмѣнно связанныхъ съ этимъ дирижаблемъ, будутъ равны x', y', z' . Пусть часы, находящіеся на дирижаблѣ, показываютъ время t' , когда часы въ системѣ S (на неподвижномъ зданіи), надъ которой паритъ

этотъ дирижабль, показывають время t . Разсмотримъ теперь относительно S' то событіе, которое раньше мы разсматривали по отношенію къ S . А именно: въ моментъ $t = 0$ изъ начала O координатъ (и изъ O' , которое въ этотъ моментъ совпадаетъ съ O) выходитъ свѣтовой лучъ и достигаетъ точки P въ моментъ t' . То обстоятельство, что часы, находящіеся въ S' , регулированы такимъ образомъ, что и они указываютъ на изотропное со скоростью v распространеніе свѣта, мы выразимъ слѣдующимъ уравненіемъ:

$$\sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2} = vt',$$

которое перенишемъ въ такой формѣ:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - v^2 t'^2 = 0 \quad . . . (15).$$

Уравненія (14) и (15), будучи взяты вмѣстѣ, представляютъ собою математическое выраженіе способа регулированія часовъ въ двигающейся системѣ. Если въ точкѣ x, y, z въ моментъ t возникаетъ нѣкоторое событіе, то это обстоятельство мы будемъ называть пространственно-временной точкой x, y, z, t , а величины x, y, z, t —координатами этой пространственно-временной точки. Если, на примѣръ, три ребра дома, сходящіяся въ одной точкѣ, разсматривать, какъ систему координатныхъ осей, то называть «пространственно-временную точку 0,0,0,12 часовъ дня», это все равно, что сказать: «въ этомъ нижнемъ углу дома въ 12 часовъ дня произошло нѣкоторое событіе». Такимъ образомъ, одно и то же событіе, происходящее на дирижаблѣ S' , я могу опредѣлить, или задавъ его пространственно—временныя координаты по отношенію къ дому — это будутъ три разстоянія отъ реберъ дома и время t тѣхъ часовъ этого дома, надъ которыми въ разсматриваемый моментъ паритъ дирижабль — или же установивъ пространственные координаты точки x', y', z' относительно дирижабля и время t' часовъ, находящихся на дирижаблѣ въ этой точкѣ.

Уравненія (14) и (15) говорятъ намъ: если четыре пространственно-временныя координаты связаны между собой относительно системы S соотношеніемъ (14), то координаты того же событія должны быть связаны относительно системы S' уравненіемъ (15). Ибо только тогда свѣтъ можетъ распространяться въ обѣихъ системахъ, какъ того требуетъ теорія относительности, изотропно, со скоростью v , потому что уравненія (14) и (15) выражаютъ ни что иное, какъ эту двойную изотропію.

Мы видѣли, что уравненіе (15) должно быть слѣдствіемъ уравненія (14). Эта зависимость осуществляется, благодаря, конечно, тѣмъ уравненіямъ преобразованія, которыя приводятъ координаты x, y, z, t къ координатамъ x', y', z', t' и которыя играютъ здѣсь роль уравненія (8) классической механики. Видъ разсматриваемыхъ уравненій преобразованія вытекаетъ изъ того условія, что въ силу этихъ уравненій изъ равенства (14) всегда должно получаться равенство (15). Въ такомъ случаѣ можно строго математически вывести, что эти уравненія должны имѣть слѣдующій видъ:

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - at}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}}, y' = y, z' = z \\ t' &= \frac{t - \frac{a}{v^2}x}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}} \end{aligned} \right\} \dots \dots (16).$$

При $v = \infty$, какъ это тотчасъ же обнаруживается, они переходятъ въ уравненія классической механики. Выводъ уравненій (16) изъ указаннаго условія приведенъ въ работѣ Эйнштейна и особенно обстоятельно—въ статьѣ ав-

тора „Die Stellung des Relativitäts-prinzips im System der Mechanik und Elektrodynamik“ 1).

Однако, въ данной популярной статьѣ мы не можемъ входить въ разсмотрѣніе этого вывода, а потому попытаемся уяснить себѣ только смыслъ полученныхъ указаннымъ способомъ уравненій (16). Для всякаго событія (пространственно-временной точки), заданнаго при помощи пространственныхъ координатъ и показанія часовъ системы S (неподвижнаго зданія), они указываютъ пространственныя координаты системы S' (дирижабля) и время, опредѣляемое по часамъ этой системы. И, какъ это вытекаетъ изъ предположенія, лежащаго въ основаніи ихъ вывода, они выражаютъ единственно возможную зависимость, согласную съ тѣмъ результатомъ опыта, по которому въ обѣихъ системахъ свѣтъ распространяется изотропно и при томъ со скоростью v . Опредѣляемое уравненіями (16) преобразование называется, обыкновенно, *преобразованиемъ Лорентца*, по имени голландскаго физика Г. А. Лорентца, который впервые примѣнилъ его, но не разсмотрѣлъ съ указанной нами простѣйшей точки зрѣнія. Принять за базисъ всѣхъ дальнѣйшихъ разсужденій эту элементарную и зависящую отъ основаній измѣренія пространства и времени точку зрѣнія это дѣло А. Эйнштейна.

Разсмотримъ сначала формулу, выражающую связь между показаніями часовъ въ системахъ S и S' , т. е. послѣднюю формулу группы (16). Эту формулу мы можемъ написать нѣсколько проще, если примемъ въ расчетъ, что скорость дирижабля весьма мала сравнительно со скоростью свѣта; это, навѣрное, будетъ соответствовать почти всѣмъ случаямъ, поддающимся опытному изслѣдованію. Если бы даже a равнялось, напримѣръ, 30 км. въ секунду, что

1) P. Frank. Sitzungsberichte der K. K. Akademie der Wissenschaft in Wien, 118, (1909).

приблизительно соответствовало бы скорости движения земли по ея орбитѣ, т. е. если бы въ абсолютной системѣ единиц $a = 3 \times 10^7$ см./сек., то и тогда, въ силу равенства $v = 3 \times 10^{10}$ см./сек., получилось бы $\frac{a}{v} = 10^{-3}$ и $\frac{a^2}{v^2} = 10^{-6}$; поэтому въ знаменателѣ величиною $\frac{a^2}{v^2}$ можно, по сравненію съ 1, пренебречь и переписать рассматриваемую формулу слѣдующимъ образомъ:

$$t' = t - \frac{a}{v^2} x \dots \dots \dots (17).$$

Это значитъ: если башенные часы на неподвижномъ зданіи S , отстоящіе отъ начала координатъ на разстояніи x , измѣренномъ въ направленіи движенія, показываютъ время t , то находящіеся въ этотъ моментъ надъ башней часы дирижабля S' , несущагося со скоростью a , покажутъ время t' , которое получится, если изъ t вычестъ произведеніе разстоянія башенныхъ часовъ отъ начала O координатъ на отношеніе $\frac{a}{v^2}$.

Такимъ образомъ, время уменьшается для положительнаго направленія оси x и увеличивается для отрицательнаго, т. е. чѣмъ дальше расположены часы по направленію движенія на дирижаблѣ, тѣмъ болѣе отстаютъ они отъ соответствующихъ башенныхъ часовъ. Часы въ точкѣ O ($x = 0$) идутъ совершенно такъ же, какъ и тѣ часы дирижабля, которые находятся какъ разъ надъ точкой O ; но часы на дирижаблѣ, находящіеся позади точки O ($x < 0$), идутъ впереди башенныхъ часовъ. Это, впрочемъ, слѣдуетъ также ожидать и отъ всего метода регулированія часовъ, которое для того и предпринято, чтобы устранить по отношенію.

къ дирижаблю кажущееся замедленіе относительной скорости свѣта. За точку O можно, конечно, выбрать всякую точку на зданіи; но послѣ произведеннаго выбора эта точка отличается уже отъ всѣхъ другихъ указаніемъ часовъ: это та точка, по отношенію къ которой часы на дирижаблѣ не идутъ впередъ и не отстаютъ. Только выбравъ точку O , мы вполне опредѣляемъ регулированіе часовъ. Какъ мы видимъ, разница въ обозначеніи времени по часамъ S и S' не для всѣхъ точекъ дирижабля является одинаковой; поэтому время, измѣренное такимъ образомъ, мы вмѣстѣ съ Лорентцомъ назовемъ „мѣстнымъ временемъ“ по аналогіи съ географическимъ мѣстнымъ временемъ, которое также измѣняется отъ одной мѣстности до другой, но регулируется совершенно иначе.

Дальнѣйшую особенность такого регулированія часовъ составляетъ то измѣненіе, которому подвергается понятіе одновременности двухъ событій. Предположимъ, что въ точкахъ A и B , расположенныхъ на оси x , одновременно протекаютъ два событія. Что означаетъ слово „одновременно“? Очевидно, слѣдующее: когда въ точкѣ A протекаетъ событіе, то показаніе находящихся въ ней часовъ совершенно тождественно показанію часовъ въ точкѣ B , когда въ этой послѣдней также протекаетъ событіе. Но непосредственно ясно, что если для опредѣленія времени воспользоваться часами, регулированными въ системѣ S (на крышѣ дома) и если при этомъ констатировать одновременность двухъ событій, то часы, регулированные въ системѣ S' (въ дирижаблѣ), для тѣхъ же двухъ событій не дадутъ одного и того же значенія времени; дѣло въ томъ, что часы S' , какъ мы будемъ кратко выражаться, въ своихъ показаніяхъ въ точкахъ A и B различнымъ образомъ отстаютъ отъ показаній часовъ S , благодаря чему изъ одинаковыхъ положеній стрѣлокъ на первыхъ часахъ слѣдуютъ неодинаковыя положенія ихъ на послѣднихъ. Наши формулы преобразо-

ванія позволяютъ намъ установить вполнѣ точно, какъ велика разниа въ положеніи стрѣлокъ на часахъ S' , когда въ двухъ точкахъ A и B протекаютъ одновременныя, согласно часамъ S , событія. Пусть въ системѣ S величина x_1 представляетъ собою абсциссу точки A , а величина x_2 — абсциссу точки B . Разсматриваемыя нами событія оба имѣютъ мѣсто, когда каждыя изъ часовъ показываютъ одно и то же время $t = t_0$. Спрашивается: который часъ будетъ тогда по часамъ какъ въ точкѣ A , такъ и въ точкѣ B ? Обозначимъ искомыя времена соотвѣтственно черезъ t'_1 и t'_2 ; согласно равенству (16), они выражаются, очевидно, черезъ

$$t'_1 = \frac{t_0 - \frac{a}{v^2} x_1}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}} \quad t'_2 = \frac{t_0 - \frac{a}{v^2} x_2}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}}$$

Для разности этихъ двухъ значеній мы получимъ:

$$t'_1 - t'_2 = (x_2 - x_1) \frac{\frac{a}{v^2}}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}}$$

Но $x_2 - x_1$ есть не что иное, какъ разстояніе между точками A и B ; слѣдовательно, мы можемъ написать

$$t'_1 - t'_2 = \overline{AB} \frac{\frac{a}{v^2}}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}} \dots \dots (18).$$

Итакъ, если два событія, протекаютъ, согласно часамъ S , одновременно, то согласно часамъ S' , между временами наступленія этихъ двухъ событій существуетъ разность, пропорціональная разстоянію между мѣстами, въ которыхъ

эти событія происходят, и зависящая, кромѣ того, отъ скорости a системы S' . Поэтому можно сказать, что выраженіе, „разница между временами наступленія двухъ событій, протекающихъ въ различныхъ точкахъ“, лишено своего абсолютнаго смысла; этотъ абсолютный смыслъ оно получаетъ только тогда, когда оговорено, относительно какой системы координатныхъ осей регулированы тѣ неизмѣнно связанные съ нею часы, при помощи которыхъ мы судимъ объ этой разницѣ; тогда кратко говорятъ о разницѣ между временами наступленія обоихъ событій въ системѣ S или же въ системѣ S' . Въ частности, два событія, протекающія въ системѣ S не въ одно и то же время, можно разсматривать, какъ одновременныя, если выбрать соотвѣтствующую систему S' , т. е. систему, обладающую соотвѣтствующей скоростью a . Если, напримѣръ, τ представляетъ разность временъ двухъ событій въ системѣ S , то разность ихъ въ системѣ S' , очевидно, выразится черезъ:

$$t'_2 - t'_1 = \frac{\tau - \frac{a}{v^2} (x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}},$$

гдѣ снова $x_2 - x_1 = \overline{AB}$. Ясно, что $t'_2 - t'_1 = 0$, т. е. оба событія въ системѣ S' будутъ разсматриваться, какъ одновременныя, если

$$a = \frac{\tau v^2}{\overline{AB}} \dots \dots \dots (19).$$

Но, согласно нашимъ формуламъ, скорость a какого-либо тѣла не можетъ превзойти скорость свѣта, такъ какъ въ противномъ случаѣ разность $1 - \frac{a^2}{v^2}$ сдѣлалась бы отрицательной, корень квадратный изъ нея былъ бы вели-

чиной мнимой, и наши формулы (16), перестали бы давать для времени действительныя значенія. Поэтому величина a , опредѣляемая уравненіемъ (19), только въ томъ случаѣ выражаетъ возможную скорость системы, если $a < v$. Итакъ,

$$\frac{\tau v^2}{AB} < v,$$

откуда слѣдуетъ, что

$$v\tau < \overline{AB} \dots \dots \dots (20).$$

Въ силу этого два событія, которыя въ S отстоятъ другъ отъ друга на разстояніи \overline{AB} , и для которыхъ разность временъ возникновенія равна τ , въ соответствующей координатной системѣ можно разсматривать, какъ одновременныя, если разстояніе \overline{AB} больше пути, проходимаго свѣтомъ за промежутокъ времени τ .

Далѣе, не только понятіе разницы временъ наступленія двухъ событій, но и понятіе разстоянія между двумя матеріальными точками лишается своего абсолютнаго смысла. Сейчасъ же становится ясно, что это разстояніе \overline{AB} измѣняется въ зависимости отъ того, какая система координатныхъ осей принята за основную. Представимъ себѣ, на примѣръ, свѣтовой лучъ; идущій отъ одной точки до другой. Выходъ этого луча изъ точки A и прибытіе его въ точку B представляютъ собою два событія, разница временъ возникновенія которыхъ зависитъ отъ того, какая система координатныхъ осей положена въ основаніе нашихъ расчетовъ. Слѣдовательно, время распространенія свѣта зависитъ отъ выбора координатной системы; но такъ какъ скорость свѣта, въ силу всего нашего метода регулированія часовъ, не должна зависѣть отъ системы координатныхъ осей, то большому времени распространенія свѣта долженъ

соотвѣтствовать и болѣе длинный путь свѣтового луча, т. е. разстояніе между двумя точками также должно зависѣть отъ той системы координатныхъ осей, въ которой эти точки отнесены. Однако, это ясно также и изъ другихъ соображеній. Представимъ себѣ движеніе двухъ матеріальныхъ точекъ. Разстояніе между этими точками въ опредѣленный моментъ мы найдемъ, если отмѣтимъ тѣ мѣста пространства, въ которыхъ онѣ находятся въ этотъ моментъ, и затѣмъ измѣримъ разстояніе между ними. Но когда мы говоримъ—„мѣста, въ которыхъ эти точки находятся въ одинъ и тотъ же моментъ“,—то это выраженіе, какъ мы видѣли, не является однозначимъ; вѣдь въ немъ содержится понятіе одновременности двухъ событій. Мы должны еще оговорить, относительно какой координатной системы въ одно и то же время должно быть отмѣчено положеніе этихъ точекъ; тутъ-то и могутъ получиться весьма различныя положенія.

Формулы (16) позволяютъ намъ точно формулировать зависимость разстоянія между двумя точками отъ основной системы координатныхъ осей. Предположимъ, что x_1 и x_2 представляютъ собою тѣ мѣста, въ которыхъ находятся обѣ матеріальныя точки въ моментъ t_0 времени, соотвѣтствующаго системѣ S . Тогда координаты x'_1 и x'_2 этихъ точекъ относительно системы S' , соотвѣтствующія тому же моменту t_0 , выразятся черезъ

$$x'_1 = \frac{x_1 - at_0}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}}, \quad x'_2 = \frac{x_2 - at_0}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}},$$

откуда посредствомъ вычитанія получается

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}} \dots \dots \dots (21).$$

Эту формулу можно наглядно пояснить безъ всякихъ затрудненій и весьма простымъ образомъ. Предположимъ, что A и B представляютъ собою концы твердаго стержня, въ начальный моментъ неподвижнаго относительно системы S , но вслѣдъ затѣмъ начинающаго двигаться вмѣстѣ съ дирижаблемъ S' , на которомъ онъ все время находится. Положимъ, что когда этотъ стержень былъ неподвиженъ, то при помощи масштаба, принадлежащаго системѣ S' , мы нашли длину его равною l . Если теперь стержень движется вмѣстѣ съ дирижаблемъ, и если мы будемъ опредѣлять его длину посредствомъ масштаба, находящагося на дирижаблѣ, то должны будемъ обнаружить то же самое значеніе для длины, ибо мы предположили, что если два тѣла (стержень и масштабъ) участвуютъ въ одномъ и томъ же прямолинейномъ и равномерномъ движеніи, то взаимодѣйствія ихъ остаются безъ перемѣны, или выражаясь иначе: на основаніи явленій, происходящихъ на дирижаблѣ, невозможно вывести никакихъ заключеній о скорости самого дирижабля. Слѣдовательно, длину стержня мы снова должны принять равною l , а это значить, что на дирижаблѣ разность между координатами концовъ стержня равняется l , т. е.

$$x_2' - x_1' = l \dots \dots \dots (22).$$

Мы спрашиваемъ теперь, каково въ системѣ S разстояніе между тѣми двумя точками, въ которыхъ концы стержня находятся одновременно, т. е. въ опредѣленный моментъ t_0 времени, регулированнаго въ системѣ S ; отвѣтъ на этотъ вопросъ даетъ намъ, очевидно, формула (21). Такъ какъ x_1 и x_2 являются абсциссами разсматриваемыхъ точекъ, то для разстоянія между ними мы имѣемъ формулу

$$x_2 - x_1 = l_0 \dots \dots \dots (23);$$

поэтому формулу (21) мы можемъ переписать слѣдующимъ образомъ:

$$l_0 = l \sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}} \dots \dots \dots (24).$$

Такъ какъ квадратный корень здѣсь менѣе единицы, то

$$l_0 < l \dots \dots \dots (24),$$

т. е., если я буду искать разстояніе между двумя точками, движущимися вмѣстѣ съ дирижаблемъ, въ моментъ времени, опредѣляемый по часамъ на неподвижной башнѣ, то найду меньшую величину, чѣмъ въ томъ случаѣ, если буду измѣрять это разстояніе посредствомъ масштаба, движущагося вмѣстѣ съ дирижаблемъ, или что то же самое, если я буду опредѣлять это разстояніе въ моментъ, указываемый часами, регулированными на дирижаблѣ S' . Итакъ, все разстоянія между точками кажутся укороченными, если «разсматривать ихъ изъ нѣкоторой системы», какъ выражаются сокращенно, движущейся относительно той системы, въ движеніи которой участвуютъ разсматриваемыя точки. Множитель укорачиванія (Der Verkürzungsfaktor) равняется

$$\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}; \text{ при } a = v \text{ онъ обращается въ нуль; это озна-}$$

чаетъ, что стержень, движущійся со скоростью свѣта и разсматриваемый изъ неподвижной системы S , вообще говоря, не имѣетъ никакой длины. Конечно, получается то же самое, если изъ системы S' наблюдать за стержнемъ, покоящимся въ системѣ S .

Г. А. Лорентцъ разсматривалъ это укорачиваніе, какъ дѣйствительно существующее. Для объясненія того факта, что въ движущейся системѣ свѣтъ распространяется по направленію движенія системы не медленнѣе, чѣмъ въ неподвижной, онъ допустилъ, что тѣла сокращаются въ направленіи движенія просто въ силу самого этого движенія. Такова знаменитая, предложенная Лорентцомъ *гипотеза сжатія тѣлъ*. А. Эйнштейнъ первый высказалъ мысль, что это укорачиваніе не является физически-реальнымъ, а основывается на различныхъ способахъ измѣренія разстоянія между двумя точками, и что при физическихъ явленіяхъ въ двигающихся

системахъ слѣдуетъ считаться лишь съ тѣми означеніями времени, которыя производятся при помощи часовъ, провѣренныхъ въ этой же самой системѣ. Такимъ образомъ, теорія сжиманія, привлекающая для объясненія относительности распространенія свѣта физическую гипотезу, переходитъ въ теорію относительности, которая выставляетъ на первомъ планѣ относительность оптическихъ явленій, и которая, вводя относительное регулированіе часовъ, освобождаетъ эти явленія отъ противорѣчій со стороны другихъ результатовъ опыта.

§ 4. Принципъ относительности въ электродинамикѣ и представленіе физическихъ явленій въ четырехмѣрномъ пространствѣ.

Благодаря изложеннымъ въ предыдущемъ параграфѣ особенностямъ измѣренія длины и времени въ движущихся тѣлахъ, становится возможнымъ и въ области оптики движущихся тѣлъ прямо сохранить положеніе: „Явленія, происходящія въ тѣлѣ, движущемся равномерно и прямолинейно по отношенію къ какому-нибудь основному тѣлу, не зависятъ отъ скорости этого движенія“, или: „Не существуетъ истинной скорости; всякое тѣло, двигающееся равномерно и прямолинейно относительно какого-либо основного тѣла, въ свою очередь является основнымъ тѣломъ“. Но съ математической точки зрѣнія принципъ относительности въ оптикѣ движущихся тѣлъ обозначаетъ нѣчто иное, чѣмъ въ механикѣ. Въ области механики онъ утверждаетъ, что уравненія движенія сохраняютъ свой видъ, если ихъ преобразовать при помощи уравненій (8); между тѣмъ уравненія, обнимающія собою оптическія явленія, очевидно, должны сохранить свою форму, если посредствомъ уравненій (16) вмѣсто величинъ x, y, z, t ввести величины x', y', z', t' , ибо только при этомъ условіи свѣтъ можетъ распростра-

няться въ движущейся системѣ согласно такимъ же законамъ, какъ и въ неподвижной. Но уравненіями, обнимающими собою оптическіе процессы, являются Максвелловы уравненія электродинамики. Что уравненія Максвелла не измѣняютъ своего вида, если при помощи уравненій (16) ввести въ нихъ новыя координаты, показалъ уже Г. А. Лорентцъ; эта «инвариантность» (= неизмѣняемость) электродинамическихъ уравненій и служитъ математическимъ основаніемъ того, что принципъ относительности сохраняетъ свою силу и въ области оптики движущихся тѣлъ. Вотъ почему въ такой формѣ онъ называется *электродинамическимъ принципомъ относительности*; отъ механическаго принципа относительности онъ отличается только видомъ уравненій преобразования.

Поэтому здѣсь придется повторить все то, что въ § 2 было сказано по поводу произвольности представленія движеній при помощи траекторій и распредѣленія параметровъ, но здѣсь эта произвольность является еще болѣе грубой.

Разъ уже мы перешли къ способамъ измѣренія времени и длины въ движущихся системахъ, способамъ, разсмотрѣннымъ въ предыдущемъ параграфѣ, то Ньютоновскія уравненія движенія не могутъ быть сохранены, ибо эти уравненія измѣняютъ свой видъ, если примѣнить къ нимъ преобразование Лорентца, выражающееся группою уравненій (16). Отсюда слѣдуетъ, что въ уравненіяхъ движенія мы должны были бы удержать старый способъ измѣренія времени, а въ уравненія электродинамики и оптики ввести новый способъ, предложенный Эйнштейномъ; но такимъ путемъ мы построили бы далеко не удовлетворительную физику. Если же, сверхъ всего этого, мы вспомнимъ, что уравненія (16) тѣмъ менѣе отличаются отъ примѣняемыхъ въ механикѣ уравненій (8), чѣмъ меньше скорость a въ выраженіи $\frac{a}{v}$, и что они переходятъ окончательно въ уравненія (8), когда это отношеніе

$\frac{a}{v}$ обращается въ нуль, то мы придемъ къ тому, что

Ньютоновскія уравненія движенія, вообще говоря, оправдываются только для такихъ движеній — сюда относятся всё наблюдаемая движенія тѣлъ,—скорость которыхъ мала сравнительно со скоростью свѣта. Поэтому ничто не мѣшаетъ намъ предположить, что къ болѣе быстрымъ движеніямъ относятся другія уравненія; эти уравненія должны лишь имѣть такой видъ, чтобы для движеній, совершающихся со скоростью значительно меньшею, чѣмъ скорость свѣта, они превращались въ уравненія Ньютона. Такія новыя уравненія движенія были предложены Планкомъ, Эйнштейномъ и Минковскимъ. Отъ уравненій Ньютона они отличаются, главнымъ образомъ, тѣмъ, что вмѣсто постоянной массы m въ нихъ входитъ нѣкоторая функція скорости a , которая, однако, переходитъ въ массу m при $\frac{a}{v} = 0$. Движенія

выбрасываемыхъ радіемъ и несущихся съ огромными скоростями частицъ совершаются согласно этимъ законамъ.

Эти новыя уравненія движенія сохраняютъ свой видъ, если къ нимъ примѣнить формулы преобразованія (16). Слѣдовательно, и для движеній, подчиняющихся этимъ уравненіямъ, электродинамическій принципъ относительности сохраняетъ свою силу. Если S обозначаетъ собою основное тѣло, т.-е. тѣло, относительно котораго двигаются остальные тѣла, слѣдуя новымъ уравненіямъ Планка и Эйнштейна, то всякое тѣло S' , движущееся относительно S прямолинейно и равномерно со скоростью a , также является основнымъ тѣломъ, по отношенію къ которому оправдываются тѣ же самые данныя Планкомъ и Эйнштейномъ законы движенія. Поэтому, имѣя дѣло съ какимъ-нибудь изслѣдуемымъ движеніемъ, я могу безчисленнымъ множествомъ способовъ представить это движеніе при помощи траекторіи и рас-

предѣленія параметровъ, относя его при этомъ къ желаемой основной системѣ.

Только здѣсь, какъ уже было упомянуто, существуетъ гораздо большій произволъ, чѣмъ въ классической механикѣ. Дѣло въ томъ, что теперь два событія, происходящія въ двухъ разныхъ мѣстахъ въ различное время, какъ мы видѣли въ предыдущемъ параграфѣ, можно разсматривать, какъ одновременныя, или какъ конечные моменты любого промежутка времени (*Zeitstrecke*), если только выбрана соотвѣтствующая координатная система. Кромѣ того, разстоянія между точками можно считать большими, малыми или, наконецъ, исчезающими по своей малости, въ зависимости отъ того, къ какой системѣ координатныхъ осей мы относимъ эти разстоянія, къ системѣ, движущейся относительно ихъ съ большей скоростью или же съ меньшей. Поэтому, если, напримѣръ, мы захотимъ представить движеніе матеріальной точки, совершающееся въ плоскости xy , при помощи траекторіи и распредѣленія параметра t вдоль нея, то такое представленіе будетъ совершенно произвольнымъ; если я отнесу движеніе матеріальной точки къ другой системѣ координатныхъ осей, неизмѣнно связанной съ этой точкой, то весь характеръ этого движенія измѣнится.

Но подобно тому, какъ мы сдѣлали это въ § 2 по отношенію къ классической механикѣ, мы можемъ и здѣсь дать представленіе, вполне соотвѣтствующее изслѣдуемому процессу движенія, если воспроизведемъ его при помощи пространственно-временной кривой, построенной въ трехмѣрномъ пространствѣ.

Разсмотримъ, напримѣръ, движенія двухъ матеріальныхъ точекъ въ плоскости xy . Эти движенія мы представимъ при помощи двухъ пространственныхъ кривыхъ въ пространствѣ x, y, t , при чемъ ось t мы проведемъ нормально къ плоскости x, y . Если мы выразимъ уравненія

этихъ пространственныхъ кривыхъ въ зависимости отъ координатной системы x, y, t , т. е., если первая кривая выразится чрезъ:

$$x_1 = \varphi_1(t), \quad y_1 = \varphi_1(t), \quad (25),$$

а вторая кривая—чрезъ:

$$x_2 = \varphi_2(t), \quad y_2 = \varphi_2(t), \quad (25'),$$

то это и будутъ уравненія движенія обѣихъ точекъ въ плоскости xy , если ось t мы снова примемъ за время. Но эти движенія въ плоскости xy мы можемъ интерпретировать и совершенно иначе, если отнесемъ ихъ къ другой координатной системѣ, двигающейся относительно первой со скоростью a . При такомъ условіи уравненія (25) посредствомъ формулъ (16) преобразуются къ уравненіямъ совершенно иного вида. Если, наприимѣръ, согласно исходному представленію, обѣ матеріальныя точки въ теченіе одного опредѣленнаго промежутка времени двигались съ одинаково направленными скоростями, то съ новой точки зрѣнія оба эти событія могутъ лишиться своего характера одновременности и т. под.

Однако, всѣ эти разнообразныя представленія я могу мысленно воспроизвести при помощи одной и той же пространственной кривой. Для этого достаточно только вмѣсто координатной системы x, y, t ввести посредствомъ формулъ (16) новую систему x', y', t' и переписать уравненія пространственной кривой въ координатахъ новой системы; а эти послѣднія уравненія я получу, преобразовывая уравненія (25) при помощи формулъ (16), т. е. совершенно такъ же, какъ и уравненія движенія обѣихъ матеріальныхъ точекъ относительно системы координатныхъ осей, двигающейся съ нѣкоторой скоростью a . Такимъ образомъ, одна пространственная кривая, благодаря тому, что я рассматриваю ее относительно различныхъ координатныхъ системъ, точно такъ же, какъ и въ классической механикѣ даетъ всевозможныя представленія даннаго движенія.

Сравнимъ еще ближе положеніе координатной системы x', y', t' , принадлежащей скорости a , съ исходной системой x, y, t . Если мы примемъ въ соображеніе только три координаты x, y, t , то уравненія (16) преобразования дадутъ намъ:

$$x' = \frac{x - at}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}}, \quad y' = y, \quad t' = \frac{t - \frac{a}{v^2}x}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{v^2}}} \dots \dots \dots (16).$$

Старыя координатныя плоскости будутъ $x = 0, y = 0, t = 0$, новыя—будутъ $x' = 0, y' = 0, t' = 0$, или же въ старыхъ координатахъ:

$$x - at = 0, \quad y = 0, \quad t - \frac{a}{v^2}x = 0 \dots \dots \dots (26).$$

Слѣдовательно, плоскость xt ($y = 0$) сохраняетъ свое положеніе, она совпадаетъ съ плоскостью $x't'$; въ классической механикѣ также и плоскость xy сохраняла свое положеніе, и лишь ось t поворачивалась въ этой плоскости на нѣкоторый уголъ и занимала положеніе t' ; здѣсь же, наоборотъ, плоскость xy ($t = 0$), поворачиваясь на нѣкоторый уголъ вокругъ неизмѣняемой оси y , получаетъ новое положеніе $x'y'$; кромѣ того, какъ и въ классической механикѣ, ось t поворачивается на нѣкоторый уголъ. Оба угла вращенія какъ для оси t , такъ и для плоскости xy , вполне опредѣленнымъ образомъ связаны другъ съ другомъ и являются функціями только a .

Всѣ точки *временнопутевыхъ кривыхъ* (Zeitwegkurven), расположенныя въ плоскости xy , обозначаютъ событія, совершающіяся въ моментъ $t = 0$, т. е. одновременныя событія; и вообще, точки, лежащія въ одной и той же плоскости ($t = \text{const.}$), параллельной плоскости xy , обозначаютъ собою одновременныя событія. Но непосредственно ясно,

что точки, находящіяся въ одной и той же плоскости $t = 0$, все таки не будутъ лежать въ одной и той же плоскости $t' = 0$. Итакъ, два событія, представленныя при помощи двухъ точекъ, принадлежащихъ двумъ временнопутьевымъ кривымъ, я могу сдѣлать одновременными, если поверну плоскость xu на такой уголъ, чтобы она сдѣлалась параллельной той линіи, которая соединяетъ эти двѣ точки. Каждому такому углу вращенія соотвѣтствуетъ только одно опредѣленное значеніе величины α , но данное вращеніе только въ томъ случаѣ соотвѣтствуетъ реально существующей скорости α нѣкоторой системы координатныхъ осей, если эта, принадлежащая вращенію, величина α менѣе скорости v свѣта. Такимъ образомъ, возможность разсматривать два событія, какъ одновременныя, ограничена, въ чемъ мы уже раньше убѣдились на основаніи математическихъ соображеній. Вращенія плоскости xu являются возможными тогда, когда тангенсъ угла поворота этой плоскости меньше v , что нетрудно вывести изъ формуль (26).

Такимъ образомъ, мы видимъ, что представленіе при помощи временнопутьевой кривой совершенно соотвѣтственно эмпирическому познанию движенія, такъ какъ это представленіе объединяетъ всевозможныя точки зрѣнія.

Тоже самое можно, конечно, показать и въ случаѣ движенія въ пространствѣ. Назовемъ вмѣстѣ съ Минковскимъ совокупность всѣхъ міровыхъ системъ x, y, z, t *міромъ*, а каждую точку этого четырехмѣрнаго многообразія—*мировою точкою*; постулатъ, согласно которому выраженія всѣхъ законовъ природы въ этомъ мірѣ сохраняютъ свою форму, если примѣнить къ нимъ преобразование (16), Минковскій называетъ *мировымъ постулатомъ*. Въ мірѣ четырехъ измѣреній опытные факты могутъ быть представлены болѣе соотвѣтственно, чѣмъ въ пространствѣ трехъ измѣреній, гдѣ всегда воспроизводится лишь произвольная

и односторонняя проэкція; къ этому четырехмѣрному міру и относились слова Минковскаго, которыя онъ произнесъ въ началѣ своей рѣчи, „Пространство и время“, и которыми я желалъ бы закончить эту статью: „Отнынѣ пространство и время, рассматриваемыя отдѣльно и независимо, обращаются въ тѣни, и только ихъ соединеніе сохраняетъ самостоятельность“.

Перевелъ съ нѣмецкаго

Б. Абрамсонъ.

Литература ¹⁾.

Экспериментальная проверка принципа относительности ²⁾.

A. Einstein. Über die Möglichkeit einer neuen Prüfung des Relativitätsprinzips. *Ann. d. Phys.* (4) 23 S. 197, 1907.

A. H. Bucherer. Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips. *Ann. d. Phys.* (4) 28, S. 513, 1909.

E. Hupka. Die träge Masse bewegter Elektronen. *Verh. D. Phys. Ges.* 11, 1909.

J. Laub. Über die experimentellen Grundlagen des Relativitätsprinzips. *Jahrb. d. Rad. u. Elektr.* 7, S. 405, 1911.

F. Grünbaum. Über einige ideelle Versuche zum Relativitätsprinzip: *Phys. ZS.* 12, S. 500, 1911.

Принцип относительности и механика ³⁾.

A. Einstein. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Ann. d. Phys.* (4) 18 S. 637, 1905.

A. Einstein. Das Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktbewegung und die Trägheit der Energie. *Ann. d. Phys.* (4) 20 S. 627, 1906.

Max. Planck. Das Prinzip der Relativität und die Grundgleichungen der Mechanik. *Verh. D. Phys. Ges.* 8. S. 136, 1906.

¹⁾ Здѣсь указаны далеко не всѣ работы по принципу относительности, а лишь самыя важныя: приведены работы, содержащія, либо развитие этого принципа въ какомъ-нибудь направленіи, либо какую-нибудь новую точку зрѣнія, либо важныя возраженія.

²⁾ Работы, произведенныя до 1905 г. и легшія въ основу принципа относительности, перечислены и описаны въ статьѣ В. Бурсіана, а потому здѣсь приведены лишь тѣ работы, которыя были произведены уже послѣ установленія этого принципа.

³⁾ Недостатокъ мѣста не позволяетъ намъ привести многочисленныя работы, относящіяся къ кинематикѣ твердыхъ тѣлъ (*starre Körper*)—и въ частности къ равноѣрному вращенію ихъ—съ точки зрѣнія принципа относительности.

A. Einstein. Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie. *Ann. d. Phys.* (4) 23 S. 371, 1907.

Max. Planck. Zur Dynamik bewegter Systeme. *Berl. Ber.* S. 542, 1907.

D. F. Comstock. The Relation of Mass to Energy. *Phil. Mag.* 15, p. 1, 1908.

G. N. Lewis. On a Revision of the Fundamental Laws of Matter and Energie. *Phil. Mag.* 16. p. 705, 1908.

Louis. T. More. Theories of Matter and Mass *Phil. Mag.* 18 p. 17, 1909.

(Возражение противъ предыдущей работы).

H. A. Bumstead. Application of the Lorentz-Fitzgerald Hypothesis on the Problems of Dynamics and Gravitation. *Journ. Sc.* 26, p. 493, 1908.

Max. Born. Die träge Masse und das Relativitätsprinzip. *Ann. d. Phys.* 28. S. 571, 1909.

A. Sommerfeld. Über die Zusammensetzung der Geschwindigkeiten in der Relativtheorie. *Verh. D. Phys. Ges.* 11 S. 577. 1909.

Philipp Frank. Die Stellung des Relativitätsprinzips im System der Mechanik und Elektrodynamik *Wien. Ber.* 118 (2a) S. 373, 1909.

Philipp Frank und Hermann Rothe. Über eine Verallgemeinerung des Relativitätsprinzips und die dazugehörige Mechanik. *Wien Ber.* 119 (2a) S. 615, 1910.

Harold A. Wilson. The Relative Motion of the Earth and the Aether. *Phil. Mag.* (6) 19 p. 869, 1910.

(Отрицание правильности результатовъ опыта Мейхельсона)

M. Abraham. Die Bewegung eines Massenteilchens in der Relativtheorie. *Phys. Zeitschr.* 11. S. 527, 1910.

N. Campbell. Relativity and the Conservation of Momentum *Phil. Mag.* 21. p. 626, 1911.

Lémeray. Le principe de relativité et les forces qui s'exercent entre corps en mouvement. *C. R.* 152. p. 1465, 1911.

Принципъ относительности и теорія электромагнитныхъ явленій.

A. Einstein. Zur Elektrodynamik bewegter Körper *Ann. d. Phys.* (4) 17. S. 811, 1905.

A. H. Bucherer. Ein Versuch den Elektromagnetismus auf

Grund der Relativbewegung darzustellen. *Phys. Zeitschr.* 7. S. 553, 1906.

A. Sommerfeld. Ein Einwand gegen die Relativtheorie der Elektrodynamik und seine Beseitigung. *Verh. D. Phys. Ges.* 9. S. 642, 1907.

Ph. Frank. Das Relativitätsprinzip der Mechanik und die Gleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern. *Ann. d. Phys.* 27. S. 897, 1908.

Ph. Frank. Relativitätstheorie und Elektronentheorie in ihrer Anwendung zur Ableitung der Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten ponderablen Körpern *Ann. d. Phys.* 27. S. 1059, 1908.

A. Einstein und J. Laub. Über die elektromagn. Grundgleichungen für bewegte Körper. *Ann. d. Phys.* 28. S. 445, 1908.

H. Minkowski. Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern. *Göttinger Nachr. Math. phys. Klasse* S. 1, 1908.

H. Minkowski. Zwei Abhandl. über die Grundgleichungen der Elektrodynamik. Leipzig und Berlin. Verlag B. G. Teubner 1910.

(Содержитъ и предыдущую работу).

M. Abraham. Über die Minkowskische Elektrodynamik. *Rend. Circolo Matematico di Palermo* 30 (2) 1910.

R. C. Tolman. Note on the Derivation of the Principle of Relativity of the Fifth Fundamental Equation of the Maxwell-Lorentz-Theorie *Phil. Mag.* 21. p. 236, 1911.

Принципъ относительности и оптическія явленія.

M. Laue. Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip. *Ann. d. Phys.* 23. S. 989, 1907.

I. Laub. Zur Optik der bewegten Körper *Ann. d. Phys.* 23. S. 738, 1907.

M. Laue. Die Wellenstrahlung einer bewegten Punktladung nach dem Relativitätsprinzip. *Ann. d. Phys.* 28. S. 436, 1909.

W. v. Ignatowsky. Einige allgemeine Bemerkungen zum Relativitätsprinzip. *Verh. D. Phys. Ges.* 12. S. 788, 1910.

(Постоянство скорости свѣта выводится изъ перваго закона принц. отн. См. стр. 106 этого сборн.).

D. F. Comstock. A. Neglecteel Type of Relativity *Phys. Rev.* 30. p. 267, 1910.

Richard. C. Tolman. The Second Postulate of Relativity Phys. Rev. 31, p. 26, 1910.

(Объ послѣднія статьи разсматриваютъ и отвергаютъ возраженіе противъ принц. относ. заключающееся въ томъ, что скорость свѣта должна зависѣть отъ скорости источника.

Luigi Giuganico. Action de la translation terrestre sur les phénomènes lumineux C. R. 152. p. 1662, 1911.

Математическая сторона принципа относительности.

H. Minkowski. Raum und Zeit. Vortrag auf d. 80 Naturforscherversammlung zu Köln am 21 Sept. 1908.

(Есть русскій переводъ подъ ред. проф. А. В. Васильева, Казань, 1911)

A. Sommerfeld. Zur Relativitätstheorie. I. Vierdimensionale Vectoranalysis. Ann. d. Phys. 32. S. 749, 1910.

V. Varicák. Anwend. der Lobatschewskyschen Geometrie in der Relativitätstheorie. Phys. Zeitschr. 11. S. 93, 1910.

V. Varicák. Die Relativtheorie und die Lobatschewskysche Geometrie. Phys. Zeitschr. 11. p, 287, 1910.

Th. Kaluza. Zur Relativitätstheorie. Phys. ZS. 11. S. 977.

(По тому же вопросу, что и 2 предыд. работы).

Ph. Frank und H. Rothe. Über die Transformation der Raumzeitkoordinaten von ruhende auf bewegte Systeme. Ann. d. Phys. 34. S. 825, 1911.

Монографіи.

A. Einstein. Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. Jahrb. der Radioaktivität und Elektronik 4, 1907. 4 Heft.

M. Laue. Das Relativitätsprinzip. Braunschweig. Friedr. Vieweg und Sohn, 1911.