



ГЛАВА 6

СИСТЕМА ОТСЧЕТА В ФИЗИКЕ

Проблема, указанная в этом заглавии, уходит своими корнями в греческую древность. Она прошла три стадии развития: геометрическую, простиравшуюся до XVII столетия; динамическую, которая после победы волновой теории света (около 1800 г.) распространилась на всю физику, и, наконец, эпоху теории относительности Эйнштейна, начавшуюся в 1905 г.

В геометрическую эпоху вопрос о системе отсчета был непосредственно связан с вопросом о положении и движении тела. С самого начала было ясно, что оба эти понятия без задания чего-то, по отношению к чему они могут быть определены, теряют смысл. Аристотель (384—322 до н. э.) и вслед за ним вся схоластика относили положение тела к окружающей его материальной субстанции. Шел спор о том, касается ли эта субстанция тел непосредственно или допустимы конечные расстояния. При таком толковании были неразрешимы спорные вопросы, как, например, движется ли при наличии ветра корабль, стоящий на якоре, поскольку вода и воздух вблизи него постоянно обновляются, или же он покоится, так как с берега движение не констатируется. Более важным для физики было то, что согласно воззрениям Клавдия Птолемея (он жил во II столетии н. э. в Александрии) сфера неподвижных звезд, как наиболее отдаленная от окружающих Землю сфер, вообще не имеет положения. За ней нет ничего, что ее окружало бы, нет даже

пространства. Несмотря на это, она должна была, согласно учению Птолемея, иметь движение, а именно суточное вращение вокруг Земли.

Этой непоследовательности не избежал Николай Коперник (1473—1543) при обосновании системы, названной его именем. Когда он приписал покой сфере неподвижных звезд, а Земле, напротив, суточное вращение вокруг ее оси, то это было только логическим улучшением традиционного воззрения. Коперник еще придерживался взгляда, который нам так трудно понять, что за сферой неподвижных звезд ничего нет. От этого взгляда освободился лишь сильный противник Аристотеля — Джордано Бруно (род. в 1548 г.), который в 1600 г. был подвергнут в Риме сожжению за учение о бесконечном множестве миров, за свое выступление в пользу Коперника и т. п. «ереси». Кеплер не решился присоединиться к этому смелому и все же неизбежному дополнению системы Коперника.

При дальнейшем обосновании гелиоцентрической системы Коперник руководился своего рода телеологической точкой зрения простоты природы. «Природа не делает ничего лишнего или напрасного», — говорили еще греки. Коперник считал, что проще объяснить движение планет на небесном своде собственным движением Земли, т. е. движением одного тела вокруг Солнца, чем описанными Птолемеем сложными вращательными движениями всех планет. Как ни импонирует нам эта мысль теперь, но невозможно было дать причинное обоснование при тогдашнем состоянии физики.

Вполне понятно, что требование простоты, больше апеллирующее к чувству, чем к критическому разуму, не смогло убедить многих современников и потомков Коперника. Кроме того, представление о том, что все человечество находится в постоянном круговороте, не замечая этого, вовсе не было простым и к тому же в то время физически не было обосновано. Нельзя поэтому считать ни отсталостью, ни трусостью то, что

издатель великого труда Коперника «De revolutionibus» *) нюрнбергский ученый Осиандер, наблюдавший за печатанием книги вместо автора, охарактеризовал в предисловии систему Коперника как простую «гипотезу», оправданную благодаря своему соответствию с наблюдениями, но не являющуюся на этом основании истинной.

Страстная борьба, которая развернулась вокруг этой системы, меньше всего связана с недостаточностью причинного физического обоснования ее, как это было всегда в «геометрическую» эпоху. Надо добавить к этому, что представители церкви, как католической, так и протестантской, например доктор Мартин Лютер, не признавали движение Земли как противоречащее библии. Они повторяли при этом, собственно, только те обвинения, из-за которых уже в III столетии до н. э. пострадал, как «безбожник», Аристарх из Самоса, первый защитник подобной системы. Очень характерен факт, что от Аристарха до Эйнштейна ни одна физическая теория не смогла так всколыхнуть широкие круги общественности, как теория, касавшаяся привычных взглядов на пространство и время. Осуждение Галилея также относилось не к геометрическим основам системы Коперника и не к галилеевским астрономическим открытиям, а к «Диалогам о двух главных системах мира», в которых подробно и остроумно опровергались динамические аргументы против движения Земли.

Коперник сам не принимал участия в борьбе вокруг его системы. Он воздерживался до 1543 г. от опубликования начатой еще в 1507 г. книги. Только на смертном одре он увидел некоторые части ее в печати. Но намного раньше, вероятно в 1514 г., он послал своим друзьям нечто вроде предварительного резюме сочинения, позднее названного «Commentariolus». Около 1880 г. оно появилось в Венской библиотеке

*) В названии «De revolutionibus orbium coelestium» оба последних слова являются дополнением издателя.

после долгого забвения. Оттуда мы берем следующие предложения *).

1) Нет одного общего центра для всех небесных орбит или сфер.

2) Центр Земли не есть центр мира, а только центр тяжести и центр орбиты Луны.

3) Все орбиты окружают Солнце, как будто оно находится в их центре; поэтому центр мира лежит вблизи Солнца.

Очевидно, для того, чтобы избежать возражения, что в течение года должен меняться вид неба неподвижных звезд вследствие вращения Земли, дальше следует:

4) Отношение расстояния между Солнцем и Землей к высоте неба неподвижных звезд гораздо меньше, чем отношение радиуса Земли к ее расстоянию от Солнца. Это расстояние незначительно по сравнению с высотой неба неподвижных звезд.

5) Все движения, которые констатируются в небе, не существуют реально, а только представляются таковыми с Земли. Земля с принадлежащими ей элементами совершает суточное вращение вокруг ее неподвижных полюсов. При этом небо неподвижных звезд, как наиболее удаленное, остается неподвижным.

6) Видимое движение Солнца не присуще ему самому, а является следствием вращения Земли по ее орбите вокруг Солнца, как это свойственно всем планетам. Итак, Земля подвержена многим движениям.

7) То, что кажется у блуждающих звезд движением взад и вперед, не является на самом деле таковым, но связано с движением Земли. Последнее само по себе является достаточным для объяснения многочисленных и многообразных явлений, которые наблюдаются на небе.

Все это кажется нам вполне ясным и недвусмысленным. И все же подобная система представляла для

*) Цитируется по немецкому переводу д-ра Ф. Россмана, *Naturwissenschaften* 34, 65, 1947.

Коперника еще большие трудности. Как иначе можно объяснить, что он впоследствии приписал Земле, кроме ее суточного и годового движения, еще третье движение, при котором земная ось изменяет свое положение по отношению к Солнцу в течение года, что дает возможность объяснить изменение времен года? Однако достаточно того, что ось Земли сохраняет свое положение по отношению к небу неподвижных звезд (если применять терминологию Коперника)! Это заблуждение несколько напоминает поднявшийся во времена Ньютона спор о том, имеет ли собственное вращение Луна, поскольку мы всегда видим только одну ее сторону. Те, которые не могли вполне освободиться от геоцентрической точки зрения, отрицали это вращение. А у Коперника, вероятно, играло аналогичную роль определенное предпочтение в отношении Солнца.

Как бы то ни было, мы обязаны Копернику указанием на систему отсчета, начало которой находится в центре тяжести нашей солнечной системы, а оси ориентированы по небу неподвижных звезд. Физика относит к этой системе отсчета каждое место и каждое движение, если не даны дальнейшие уточнения. Три координаты, которыми определяется точка, согласно аналитической геометрии Декарта (1596—1650) тоже относятся к этой системе во всех случаях, когда нет дополнительных определений. Без Коперника не были бы установлены законы Кеплера и теория тяготения. Можно согласиться с тем, что его обоснование теории несовершенно, но не может только что родившаяся наука быть хорошо обоснованной. И величие ее основателей обнаруживается как раз в том, что они интуитивно уловили истину.

Иоганн Кеплер (1571—1630) способствовал укреплению системы Коперника. Действительно, на почве этой системы выросли его три закона движения планет, благодаря которым стали возможными более точные астрономические вычисления. Вряд ли эти законы смогли бы возникнуть на основе системы Птолемея. Но для более глубокого обоснования системы

Коперника Кеплер имел мало значения; его аргументы исходили из точки зрения простоты и красоты, которая не чужда была и Копернику. Кеплер, повидимому, не имел ясного понимания значения динамических открытий своего современника Галилея, астрономическими открытиями которого он восхищался. Но в борьбе Коперника и Птолемея основное значение имели именно эти динамические открытия. Уже тогда противники Коперника приводили динамические аргументы. Можно встретить у них, например, такое возражение: в силу суточного вращения Земли все предметы, которые не очень крепко связаны с ее поверхностью, должны быть отброшены в мировое пространство и, двигаясь вокруг Солнца, оставаться позади Земли. Лишь новая динамика могла с успехом опровергнуть такое возражение. Частично решение было дано Галилео Галилеем (1564—1642), затем окончательно Исааком Ньютоном (1643—1727).

В борьбе за систему Коперника первая заслуга Галилея, этого наиболее плодовитого, очень популярного и в то же время ненавидимого ученого-борца, заключается в его великих астрономических открытиях, ставших возможными благодаря применению нового вспомогательного средства — телескопа. В 1610 г. он показал, что спутники Юпитера образуют миниатюрную планетную систему, подобную системе Коперника. В 1611 г. на фазах Венеры он неоспоримо доказал, что эта планета совершает (приблизленно) круговое движение вокруг Солнца, а также то, что она, подобно Земле и Луне, не излучает собственного света, а только отбрасывает солнечный свет. Пепельно-серый свет части Луны, не освещаемой Солнцем, был для него доказательством того, что Земля, если смотреть на нее извне, подобно другим планетам кажется светящейся. Второй его заслугой было ясное понимание того, что законы движения относятся не к системе отсчета, связанной с Землей, а к коперниканской системе отсчета. Когда Галилей говорит о падении, или, более общо, о движении по направлению к Земле, то он уточняет,

что об этом можно говорить только приближенным образом, так как, строго говоря, свободно падающее тело вследствие вращения Земли отклоняется от вертикали. Даже теперь еще физика позволяет себе при обсуждении большинства опытов то же самое приближение, значение которого вполне известно. И в то же время Галилей не переставал опровергать динамические возражения против учения Коперника на основе полученных им новых результатов. Но лишь благодаря работе Ньютона стало совершенно ясно, что движение планет можно понять динамически только на основе системы отсчета Коперника.

Другие законы природы — оптические, электрические и т. д. — в этой системе находят простую формулировку; но это является, конечно, дальнейшим, чисто эмпирическим выводом.

Вопрос о системе отсчета был разрешен, таким образом, только практически, но не принципиально. Каковы физические основы преимущества системы отсчета Коперника над другими системами отсчета, например над системой, связанной с Землей? Ньютон, который вполне понимал трудность этого вопроса, искал помощи в допущении наряду с «абсолютным» временем также «абсолютного» пространства, которое давало верную систему отсчета. Но вместе с Людвигом Ланге (1863—1936) *) оба понятия надо охарактеризовать как не подлежащие восприятию, «призрачные»; несмотря на это, они еще и теперь продолжают существовать во многих головах.

Сомнительность этой идеи побуждала к размышлению всех великих философов эпохи Ньютона, например Лейбница и Канта. Лишь в 1886 г. было произнесено освобождающее слово Ланге в его работе «Историческое развитие понятия движения». Он пишет: «Физика определяет свою систему отсчета соответственно той функции, которую последняя должна выполнять,

*) Краткую биографию Людвига Ланге дал М. Лауэ в *Naturwissenschaften* 35, 193 (1948).

и, следовательно, исходит из той же точки зрения, которая лежит в основе определения времени». Ланге резюмирует результат своего рассуждения в двух определениях и двух теоремах *):

Определение I. Инерциальной системой называется любая координатная система, по отношению к которой траектории трех материальных точек, выходящих из одного пункта пространства и затем предоставленных самим себе, прямолинейны (точки не должны лежать на одной прямой).

Теорема I. Прямолинейной по отношению к инерциальной системе является также траектория любой четвертой, самой себе предоставленной точки.

Определение II. Инерциальной шкалой времени называется любая шкала времени, по отношению к которой свободная материальная точка проходит в своем движении по инерции в равные промежутки времени равные расстояния.

Теорема II. По отношению к инерциальной шкале времени любая материальная точка, движущаяся по инерции, в равные промежутки времени проходит равные расстояния.

Определения являются человеческими соглашениями, но теоремы — эмпирическими предложениями; лишь они сообщают определениям физическое значение. Истинность системы Коперника основана на эмпирической значимости теорем.

Конечно, нельзя из наблюдения движения материальных точек, не подверженных действию силы, сделать вывод о том, что система Коперника является инерциальной системой. Полноценным доказательством являются вычисление путей планет на основе содержащей закон инерции механики и достигнутое таким путем согласие с опытом. Мы уже упоминали в главе I, что для достижения этого соответствия с опытом надо сделать некоторые небольшие поправки к обычно упо-

*) Мы цитируем по работе Ланге в *Philosophische Studien* 3, 539 (1885—1886).

требуемой шкале времени, которые переводят ее в инерциальную шкалу времени.

Таким образом, через 350 лет после Коперника мы находим, наконец, у Людвиг Ланге определенное завершение линии развития, исходившей из учения Коперника.

Вышеуказанными определениями исключаются многие другие мыслимые системы отсчета, например любая система, которая вращается с постоянной скоростью по отношению к астрономической системе отсчета. Тело, покоящееся в подобной системе, будет испытывать, как указал еще Ньютон, центробежную силу, не содержащуюся в уравнениях движения. Эта сила фактически является лишь другим выражением стремления к прямолинейному движению по отношению к инерциальной системе. Для связанной с Землей, следовательно, вращающейся системы отсчета эта центробежная сила проявляется, например, в сплющивании Земли. Вращение плоскости колебания маятника в произведенном в 1851 г. опыте Фуко (1819—1868) также, несомненно, указывает на вращение Земли, т. е. на неоправданность земной системы отсчета. Вторым доказательством является установка вращающегося компаса в северно-южном направлении (в 1925 г. Майкельсон доказал то же самое посредством опыта с интерференцией света).

Но динамика дает возможность вывести из *одной* инерциальной системы другие. Равноправными являются все системы отсчета, которые по отношению к ней перемещаются с постоянной скоростью. Это было хорошо известно Ньютону; еще Галилей в своей защите учения Коперника против распространенных возражений ссылался на то, что в закрытом пространстве внутри движущегося корабля никаким механическим опытом нельзя обнаружить движение корабля.

Координаты, определяющие положение материальной точки в любой из инерциальных систем,

вычисляются по простой формуле из координат данной точки в одной из этих систем, причем, конечно, ввиду наличия относительного движения обеих систем требуется еще знать время для перехода от одной системы к другой. Оно остается непреобразованным и в этом смысле является «абсолютным». В подобных системах, правда, различаются скорости материальных точек, но ускорения — одни и те же. Поэтому закон движения имеет значение в обеих системах в одинаковой форме. Если дается единственная инерциальная система, то можно ее принять за абсолютную систему отсчета и движение относительно нее — за «абсолютное» движение. Но так как этого не бывает, то говорят о принципе относительности ньютоновской механики. Согласно этому принципу механические опыты не допускают никакого преимущества одной инерциальной системы перед другой.

Однако долгое время предполагали, что преимущество какой-либо системы будет возможно установить другими экспериментами и наблюдениями, а именно теми, в которых изучаются физические действия, распространяющиеся с конечной скоростью; ведь скорости в различных инерциальных системах различны. Эта мысль была важна прежде всего для оптики. Любая теория, которая считала эфир носителем света (сюда относится и электронная теория; гл. 4 и 5), должна была рассматривать систему отсчета, в которой эфир находится в покое, как предпочтительную перед всеми другими системами. Поэтому такая система отсчета определялась как абсолютная. Всегда неявно принималось, что это будет инерциальная система в смысле механики.

В самом деле, открытая в 1728 г. Дж. Брэдли (гл. 4) абберация звезд допускает простое объяснение, заключающееся в том, что свет в астрономической системе отсчета распространяется по всем направлениям с одной и той же скоростью, измеренной Олафом

* При этом же (наблюдениях в оптику) ускорения не зависят от скорости, т. е. все равно.

Рёмером. Скорость света относительно Земли получается векторным вычитанием скорости Земли. В 1818 г. О. Френель предсказал, а в 1871 г. Джордж Бидел Эйри (1801—1892) экспериментально подтвердил казавшееся прежде парадоксальным положение, что наполнение телескопа водой, следовательно, изменение скорости света внутри трубы телескопа, не влияет на аберрацию. Теория Френеля перестала быть спорной и привела к точному, экспериментально подтвержденному в 1851 г. Физо значению скорости распространения света в движущихся телах. Если распространение света и движение тела имеют одинаковое или противоположное направления, то скорость тела прибавляется или вычитается из скорости света не полностью. Ей приписывается уменьшающий ее величину множитель—френелевский коэффициент увлечения. Так был дан очень ценный пробный камень для всех последующих теорий оптики движущихся тел.

Опыт Физо долгое время рассматривался как поразительное доказательство существования эфира, проникающего все тела, но не принимающего участия в их движении. Только так можно было понять этот коэффициент Френеля. Теория относительности опровергла этот аргумент. Она доказала, что рассматривавшееся как само собой разумеющееся сложение или вычитание скоростей неправомерно при данных условиях. Таким образом, история опыта Физо является поучительным примером того, какую большую роль в объяснении каждого опыта играют элементы теории; их нельзя даже отделить от него. И если потом теории меняются, то опыт превращается из поразительного доказательства для одной теории в такой же сильный аргумент для противоположной теории.

Но старое представление об аддитивности скоростей света и тел, впрочем, все же сохранилось. Христиан Допплер (1803—1853) на основании волновой теории вывел в 1842 г. заключение, что приближение источника света к наблюдателю увеличивает наблюдаемую частоту, отдаление уменьшает ее. Трудный для

понимания эффект Допплера в течение нескольких десятилетий встречал ожесточенное сопротивление, несмотря на подтверждение, которое он получил в области акустики (гл. 2). Это сопротивление отчасти объясняется действительно спорными астрономическими применениями этого принципа Допплером. И все же Допплер был по существу прав, и астрономия первая дала экспериментальное подтверждение этого принципа. В 1860 г. Эрнст Мах (1838—1916) предсказал, что линии поглощения в спектрах звезд, связанные с самой звездой, должны обнаруживать эффект Допплера; но наряду с ними в этих спектрах существуют линии поглощения земного происхождения, не обнаруживающие эффекта Допплера. Первое соответствующее наблюдение удалось произвести в 1868 г. Вильяму Хюггинсу (1824—1910). В настоящее время точность таких наблюдений при благоприятных условиях так велика, что можно измерить лучевые скорости в $3 \cdot 10^4$ см/сек, в то время как эти скорости могут достигать величины до 10^7 см/сек. Лабораторное доказательство эффекта Допплера было дано в 1905 г. Иоганнесом Штарком, пользовавшимся в качестве источника света каналовыми лучами, т. е. светящимися атомами, которые в электрических газовых разрядах приобретают скорости до 10^8 см/сек; в этих опытах доплеровские смещения спектральных линий получаются гораздо большими, чем в астрономических наблюдениях. В 1919 г. К. Майорана проверил эффект Допплера на источниках света, механически движущихся со скоростью порядка $2 \cdot 10^4$ см/сек.

Как ни важны аберрация и эффект Допплера, но они не отвечают на вопрос, существуют ли несколько систем отсчета, равноправных с точки зрения оптики. Как показывает более точное рассмотрение, эти явления вообще не зависят от скоростей источника света и наблюдателя по отношению к системе отсчета, а за-

висят только, по крайней мере в первом приближении, от относительной скорости источника света и наблюдателя по отношению друг к другу. Если бы наблюдение смогло обнаружить влияние скорости, общей для всех участвующих тел, то было бы доказано существование привилегированной системы отсчета. Но в подобном опыте эта скорость вступает в конкуренцию со скоростью света; результат зависит от их отношения, которое является всегда маленьким числом. Поэтому такие наблюдения трудны уже тогда, когда занимаются эффектом первого порядка, т. е. величинами, пропорциональными этому отношению; тем более они трудны в случае эффекта второго порядка, при котором в рассмотрение входит квадрат этого отношения. Для случая движения Земли вокруг Солнца это отношение равно 10^{-4} . Подобными экспериментами пытались установить «эфирный ветер» по отношению к движущейся Земле. После 1839 г., когда Жак Бабинэ (1794—1872) исследовал влияние движения Земли на явления интерференции, было много других аналогичных попыток. Но все они давали отрицательные результаты. Большинство опытов касалось эффектов первого порядка и не давало возможности решить вопрос о системе отсчета, пока в 1895 г. Г. А. Лорентц не доказал на основе электронной теории, что вообще не может быть таких электромагнитных и оптических эффектов первого порядка. Тем большее значение получили немногие опыты, в которых исследовались эффекты второго порядка. Между ними теоретически самым простым и экспериментально точным является опыт Майкельсона. Он непосредственно сравнивает относительные скорости света по отношению к Земле в различных направлениях. «Эфирный ветер», если он существует, должен обусловить различия между ними.

Эту мысль и первое еще несовершенное опытное выполнение ее А. А. Майкельсон опубликовал в 1881 г. После того как в 1884 г. Г. А. Лорентц отметил недостатки этой работы, Майкельсон и Морли в 1887 г. выступили с повторным опытом, который имел уже

достаточную точность. Значительно дальше пошли в 1904 г. Морли и Миллер; они смогли ручаться, что наблюдаемый эффект не составлял $1/100$ предсказанного вычислением результата. Правда, после 1920 г. казалось, что Миллер на больших высотах над уровнем моря получил положительные результаты. Однако они были внутренне противоречивы и, кроме того, были опровергнуты в 1926 г. Кеннеди, а также в 1926—1927 гг. многочисленными повторными опытами, выполненными А. Пикаром и Э. Стахелем. В 1927 г. К. К. Иллингворт и в 1930 г. Г. Иоос достигли такой высокой точности, что «эфирный ветер» должен был бы быть заметным при скорости от 1 до 1,5 км/сек, если бы была правильна теория преимущественной системы отсчета.

Под влиянием опыта Майкельсона и других подобных опытов возникла специальная теория относительности, открывшая новую эпоху для проблемы системы отсчета. Она утверждает как закон природы существование бесконечного множества инерциальных систем, движущихся с постоянными скоростями друг относительно друга и эквивалентных для совокупности всех явлений природы. При переходе от одной системы к другой нельзя, конечно, поступать, как в ньютоновской механике, в которой время не преобразовывается и сохраняет свою величину для всех систем. Поэтому механика и нуждалась в упомянутом во второй главе изменении. Чтобы выразить тот факт, что согласно опыту Майкельсона свет в любой инерциальной системе распространяется по всем направлениям с одинаковой скоростью, применяется одновременное преобразование координат пространства и времени. Это «лорентцево преобразование» ведет, например, к закону, что всякое тело, которое движется по отношению к инерциальной системе, оказывается короче в направлении движения по сравнению с тем, каким оно было бы, если бы покоилось. Правда, это укорочение в слу-

чае малой скорости очень незначительно. Если же скорость приближается к скорости света, оно делается значительным. Длина тела в направлении движения должна становиться бесконечно малой, по мере того как скорость приближается к скорости света. Другое следствие этой теории: скорость света является высшим пределом не только для скоростей всех тел и для распространения всех физических действий в пространстве, но также для всех относительных скоростей инерциальных систем друг относительно друга. Тем самым скорость света выступает из рамок оптики и электродинамики и получает универсальное значение для всех явлений природы. Исторической случайностью является то, что человечество впервые встретилось с этой скоростью при изучении света.

В 1887 г. Вольдемар Фойгт (1850—1919) заметил в одной из своих работ, что вышеуказанное преобразование ведет от одной справедливой для оптики системы отсчета к другой, подобной же системе. В 1900 г. Анри Пуанкаре (1854—1912) пояснил это остроумным мысленным опытом. В 1904 г. эта мысль укрепилась под влиянием электродинамики Лорентца, который уже применял релятивистски измененную механику (гл. 2). Но исходным пунктом всех предшественников теории относительности было все же то, что электромагнитные и оптические процессы протекают так, как будто бы это преобразование ведет опять к приемлемой системе отсчета. Лорентц, например, установил различие *expressis verbis* между собственным временем, непосредственно применяющимся в привилегированной системе отсчета, абсолютным временем и «местным временем», которое вычисляется из абсолютного времени и пространственных координат для других систем отсчета. Решающий поворот, отказ от «как будто бы», совершил в 1905 г. А. Эйнштейн. На основе глубокого воззрения на сущность пространства и времени он высказал мнение о *полном* равноправии всех систем отсчета, полученных с помощью преобразования Лорентца из одной допустимой системы, и, следовательно,

равноправии всех относящихся к этим системам измерений пространства и времени. Чрезвычайно интенсивная полемика против теории относительности возникала зачастую из-за недостатка глубокого воззрения у оппонентов. Новая принципиальная установка привела Эйнштейна к вершине всего здания теории относительности — к закону инертности энергии (гл. 2).

Материальный носитель света, эфир, несовместим с теорией относительности. Он дал бы, как было сказано, предпочтение одной определенной системе отсчета. Взгляд Фарадея — Максвелла на электромагнитное поле как на изменение состояния эфира становится также неприемлемым. Не оставалось ничего иного, как усмотреть в электромагнитном поле самостоятельную физическую реальность.

Другое следствие из лорентцовского преобразования гласит, что движущиеся часы идут медленнее покоящихся. В качестве «часов» можно рассматривать периодические колебания в атомах, порождающие спектральные линии. Правда, этот эффект мал, второго порядка, и потому его трудно обнаружить. Скорости каналовых лучей оказались все же достаточными, чтобы его констатировать. «Квадратичный эффект Доплера» переплетается с классическим эффектом Доплера; его фактически наблюдали в 1938 г. Г. Айвс и Г. Р. Стивел, в 1939 г. Г. Отинг.

Специальная теория относительности, о которой здесь идет речь, явилась итогом продолжавшегося в течение столетия развития. Именно поэтому она не поставила перед экспериментальным исследованием новых проблем. Все опыты, произведенные с тех пор, являлись только улучшением прежних опытов. Мы выше уже упоминали о повторениях опыта Майкельсона. Укажем еще на электромеханический опыт, предложенный в 1903 г. Фр. Т. Трутоном и Г. Р. Ноблем, точность которого была поднята в 1926 г. Р. Томашеком до уровня точности опыта Майкельсона. Заряженный электростатический конденсатор, подвешенный так, чтобы он мог вращаться, должен был, согласно элек-

тронной теории, поворачиваться вследствие вращения Земли, но само собой разумеется, что согласно теории относительности такое вращение не должно было происходить. Вычисленный на основе электронной теории результат оказался малой величиной второго порядка. Несмотря на это, упомянутые исследователи убедились, что вращения действительно не было.

Перед математиками и теоретиками-физиками встала трудная задача. Они должны были приспособить к теории относительности все ветви физики, например, теорию упругости, гидродинамику, термодинамику и относящиеся к веществу части теории Максвелла. Изящную математическую формулировку теории относительности дал Герман Минковский (1864—1909), который незадолго до смерти ввел время как четвертую координату, равноправную с тремя пространственными координатами. Но это — только очень ценный и искусный математический прием; в противоположность существующему мнению, ничего более глубокого здесь не скрывается. В 1911 г. Макс Лауэ дал первое синтетическое изложение специальной теории относительности.

Но Эйнштейн не остановился на специальной теории относительности. С измерением пространства дело обстоит так же, как с измерением времени (гл. 1). Перед нашим созерцанием лежит континуум, и мы должны внести туда систему мер; но эта система в связи с трехмерностью пространства сложнее. В принципе существует бесконечно много равноправных методов измерения. Математики используют это многообразие, когда они свободно создают неевклидовы геометрии. Но физика должна это многообразие ограничить выбором той геометрии, которая даст возможность *простого* изложения законов природы. Смысл вопроса в том, какая геометрия *соответствует опыту*. Когда, например, Гаусс, с целью испытать значимость евклидовой геометрии, путем геодезических измерений

(следовательно, оптически) исследовал, действительно ли сумма углов в треугольнике Брокен — Инсельсберг — Высокий Гаген равна 180° , как утверждает эта геометрия в противоположность другим, он неявно допускал для простоты, что лучи света следуют по геодезическим («наикратчайшим») линиям. Если от этого отказаться, то невозможно будет вывести геометрическое заключение из результата опыта, подтверждающего эту сумму углов.

В то время как до сих пор физика была вполне удовлетворена евклидовой геометрией, общая теория относительности Эйнштейна, которая постепенно развивалась с 1913 г., утверждает, что для объяснения тяготения необходимо пользоваться неевклидовой, «римановой» геометрией. Отклонения от евклидовой геометрии минимальны даже вблизи таких больших масс, как Солнце, и проявляются только в очень немногих наблюдениях. Это, во-первых, не объясненный теорией движения планет остаток движения перигелия Меркурия (гл. 3); во-вторых, отклонение света Солнцем, которое, согласно наблюдениям Артура Стенли Эддингтона (1882—1944) во время солнечного затмения в 1919 г., точно соответствует предсказанию Эйнштейна. Последующие наблюдения затмений доставили, правда, несколько бóльшую величину. В-третьих, нужно усмотреть подтверждение теории в новых спектральных наблюдениях, особенно касающихся плотной звезды — спутника Сириуса, в спектре которой линии значительно смещены в красной части спектра по отношению к их положению в земном спектре.

Общая теория относительности еще не закончена; но за ней останется на все времена слава предсказания отклонения света без применения специальных *ad hoc* сделанных допущений *).

*) Посредством подобных допущений также предсказывали отклонение света.

