

Однако гипотеза Зелигера вместе с успехами теории Ньютона в объяснении других явлений убедила к 1911 г. Ньюкома в том, что нет необходимости менять закон гравитации [17].

Не известно, сильно ли повлияла на Эйнштейна в процессе создания общей теории относительности проблема смещения перигелия Меркурия. Несомненно одно, что первым подтверждением этой теории было точное предсказание избыточного смещения перигелия в $43''$ за столетие.

§ 3. История открытия принципа относительности

Механика Ньютона выделила семейство систем отсчета, так называемые *инерциальные системы*, в которых законы природы принимают форму, описанную в «Началах». Например, уравнения системы гравитационно-взаимодействующих точечных частиц записываются в виде

$$m_N \frac{d^2 \mathbf{x}_N}{dt^2} = G \sum_M \frac{m_N m_M (\mathbf{x}_M - \mathbf{x}_N)}{|\mathbf{x}_M - \mathbf{x}_N|^3}, \quad (1.3.1)$$

где m_N — масса N -й частицы, \mathbf{x}_N — ее декартов вектор положения в момент времени t . Достаточно просто проверить тот факт, что эти уравнения сохраняют свой вид при записи в новых пространственно-временных координатах:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' &= R\mathbf{x} + \mathbf{v}t + \mathbf{d}, \\ t' &= t + \tau, \end{aligned} \quad (1.3.2)$$

где \mathbf{v} , \mathbf{d} и τ — любые действительные постоянные, а R — произвольная действительная ортогональная матрица. (Если наблюдатели O и O' используют штрихованную и нештрихованную системы координат, то O' видит координатную систему O повернутой с помощью R , движущейся со скоростью \mathbf{v} и смещенной при $t = 0$ на величину \mathbf{d} , и к тому же часы у наблюдателя O отстают от часов у O' на величину τ .) Преобразование (1.3.2) образует 10-параметрическую группу (три угла Эйлера в R , по три компоненты векторов \mathbf{v} и \mathbf{d} и время τ), называемую теперь *группой Галилея*. Инвариантность законов движения относительно таких преобразований называют галилеевой инвариантностью, или *принципом относительности Галилея*.

Что действительно удивляло Ньютона, так это то, что существует великое множество других преобразований, относительно которых уравнения движения неинвариантны. Например, уравнения (1.3.1) не сохраняют свою форму, если перейти к ускоряющейся, замедляющейся или, наконец, вращающейся координатным системам, т. е. если допустить, что \mathbf{v} и R зависят от t . Уравнения движения сохраняют свою обычную форму только в огра-

ниченном классе координатных систем, называемых *инерциальными*. Как же определить, какие из систем отсчета являются инерциальными? Ньютон считал, что должно существовать абсолютное пространство, и из систем отсчета те являются инерциальными, которые находятся в состоянии покоя или равномерного движения относительно этого абсолютного пространства. Вот его слова (см. [7], стр. 30 русского издания):

«Абсолютное пространство по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным.

Относительное есть его мера или какая-либо ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению относительно некоторых тел и которое в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное».

Чтобы продемонстрировать то, что он трактовал как эффект вращения относительно абсолютного пространства, Ньютон описал также ряд экспериментов. Наиболее известным из них является эксперимент с вращающимся сосудом (см. [7], стр. 35 русского издания).

«Если на длинной нити подвесить сосуд и, вращая его, закрутить нить, пока она не станет совсем жесткой, затем наполнить сосуд водой и, удержав сперва вместе с водой в покое, пустить, то под действием появляющейся силы сосуд начнет вращаться, и это вращение будет поддерживаться достаточно долго закручиванием нити. Сперва поверхность воды будет оставаться плоской, как было до движения сосуда. Затем сосуд силой, постепенно действующей на воду, заставит и ее участвовать в своем вращении. По мере возрастания вращения вода будет постепенно отступать от середины сосуда и возвышаться по краям его, принимая впалюю форму поверхности (я сам это пробовал делать)... Вначале, когда *относительное* движение воды в сосуде было наибольшее, оно совершенно не вызывало стремления удалиться от оси — вода не стремилась к окружности и не повышалась у стенок сосуда, а ее поверхность оставалась плоской и истинное вращательное ее движение еще не начиналось. Затем, когда относительное движение уменьшилось, повышение ее у стенок сосуда обнаруживало ее стремление удалиться от оси, и это стремление показывало ее постепенно возрастающее истинное вращательное движение, и когда оно стало наибольшим, то вода установилась в покое относительно сосуда».

Ньютоновская концепция абсолютного пространства была отвергнута его знаменитым оппонентом Готфридом Вильгельмом фон Лейбницем (1646—1716), который считал, что не существует философской необходимости в какой бы то ни было концепции пространства, помимо той, что вытекает из связей материальных объектов. Эти положения обсуждались в известном цикле писем [18] (переписка 1715—1716 гг.) между Лейбницем и сторонником

Ньютона Самюэлем Кларком (1675—1729)¹⁾. Философы продолжили спор, причем позицию Ньютона защищали Леонард Эйлер (1707—1783) и Иммануил Кант (1724—1804), а критиковал ее епископ Джордж Беркли (1685—1753) в его «Трактате о началах человеческого знания» (1710) и «Аналитике» (1734). Конечно, ни один из этих высокоумудрых метафизиков не выдвинул никакой идеи относительно того, как же развить динамическую теорию, которая могла бы заменить ньютоновскую.

Первая конструктивная критика ньютоновского абсолютного пространства была высказана в 1880 г. австрийским философом Эрнстом Махом (1838—1916). В своей книге «Механика и ее развитие» [19] он замечает: «Опыт Ньютона с вращающимся сосудом с водой показывает только, что относительное вращение воды по отношению к стенкам сосуда не побуждает заметных центробежных сил, но что последние побуждаются относительным вращением по отношению к массе Земли и остальным небесным телам. Никто не может сказать, как протекал бы опыт, если бы стенки сосуда становились все толще и массивнее, пока, наконец, толщина их не достигла бы нескольких миль».

Гипотеза о том, что в определении инерциальных систем играют роль «массы Земли и остальных небесных тел», называется *принципом Маха*. Любому доступен в звездную ночь простой эксперимент, с помощью которого можно уяснить утверждение, называемое принципом Маха. Встанем прежде всего неподвижно и опустим свободно руки. Отметим, что звезды более или менее неподвижны, а наши руки направлены почти строго вниз. Теперь резко совершим полный оборот. Нам покажется, что звезды вращаются вокруг зенита, а руки за счет центробежной силы разойдутся в стороны. Если бы не существовало какой-нибудь взаимосвязи между звездами и нами, определяющей способ введения инерциальной системы, то было бы крайне удивительным совпадение системы, в которой руки висели свободно, и системы отсчета, в которой покоятся реперные звезды.

Аргументацию можно сделать более точной. Строго говоря, поверхность Земли не является инерциальной системой, и, конечно, орбитальное и суточное вращения Земли создают кажущееся вращение звезд, но этот эффект можно исключить в инерциальной системе отсчета, связанной со всей Солнечной системой в целом. В такой инерциальной системе отсчета среднее наблюдаемое вращение галактик относительно какой-либо оси, проходящей через Солнце, меньше 1'' за столетие [20, 21]!

Таким образом, мы сталкиваемся с неизбежным выбором: необходимо либо допустить существование ньютоновского абсо-

¹⁾ См. прежде всего пятое письмо Лейбница.

лютного пространства-времени, которое определяет инерциальные системы и относительно которых реперные галактики покоятся, либо верить, как и Мах, в то, что инерция обусловлена взаимодействием с усредненной массой всей Вселенной. И если Мах прав, то ускорение, сообщаемое частице любой заданной силой, должно зависеть не только от существования фиксированных звезд, но также, очень слабо, и от распределения материи в непосредственной близости от частицы.

Позже, в гл. 3, мы увидим, что принцип эквивалентности Эйнштейна обеспечивает такой подход к проблеме инерции, что она оказывается хотя и не связанной с ньютоновским абсолютным пространством, однако и не полностью согласованной с выводами Маха. Вопрос остался открытым.

Я до сих пор не упоминал специальный принцип относительности, так как, несмотря на свое название, он в действительности не имеет отношения к проблеме выбора между абсолютным и относительным пространством. Однако для того чтобы сформулировать принцип эквивалентности, нам понадобятся понятия специальной теории относительности, а потому подробный обзор специальной теории будет дан в следующей главе. Здесь же мы обратимся только к ее истории.

Теория электродинамики, развитая в 1864 г. Джеймсом Кларком Максвеллом (1831—1879), явно не удовлетворяет принципу галилеевой инвариантности. С одной стороны, уравнения Максвелла предсказывают, что скорость света в вакууме c является универсальной константой, однако, с другой стороны, если это утверждение верно в системе координат x^i, t , то оно не будет справедливым в «движущейся» системе координат x'^i, t' , определяемой преобразованием Галилея (1.3.2). Сам Максвелл думал, что электромагнитные волны переносит некоторая среда [22], светоносный эфир. При этом уравнения Максвелла должны быть справедливы только в ограниченном классе галилеевых инерциальных систем, т. е. систем, покоящихся относительно эфира.

Однако все попытки измерить скорость Земли относительно эфира потерпели неудачу (для ознакомления с этими экспериментами см. [23]), хотя было известно, что относительно Солнца Земля обладает скоростью 30 км/с, а относительно центра нашей Галактики — около 200 км/с. Наиболее важным был эксперимент Альберта Майкельсона (1852—1931) и Е. Морли [24], которые в 1887 г. показали, что с точностью до 5 км/с скорость света будет одной и той же независимо от того, распространяется ли свет по направлению орбитального движения Земли или ортогонально к нему. Не так давно точность этого результата была доведена до 1 км/с [25].

Постоянные неудачи экспериментаторов по обнаружению эффектов движения Земли относительно эфира заставили таких теоре-



Фиг. 1.3. Основоположники специальной теории относительности на Первом Сольвеевском конгрессе в 1911 г.

Слева направо: (сидят) Нернст, Бриллюэн, Сольвей, Лоренц, Варбург, Перрен, Вин, мадам Кюри, Пуанкаре; (стоят) Голдшмидт, Планк, Рубенс, Зоммерфельд, Линдемани, де Бройль, Кнудсен, Хазенрод, Хостелет, Херзен, Джинс, Резерфорд, Камерлинг-Оннес, Эйнштейн, Ланжевен.

гиков, как Георг Фицджеральд (1851—1901) [26, 27], Гендрик Лоренц (1853—1928) [28] и Анри Пуанкаре (1854—1912) [29], выдумывать причины, по которым эффект «эфирного ветра» мог бы стать в принципе ненаблюдаемым. В частности, Пуанкаре, по-видимому, предвидел революционное значение этой проблемы для механики, и Уиттекер [30] отдает должное вкладу Пуанкаре и Лоренца в специальную теорию относительности. Не вникая в суть полемики вокруг этих вопросов (см., например, [31]), можно с уверенностью сказать лишь, что подробное, всестороннее решение проблемы относительности в механике и электродинамике было впервые дано в 1905 г. Альбертом Эйнштейном (1879—1955) [32].

Эйнштейн исходил из предположения о том, что преобразования Галилея (1.3.2) необходимо заменить другими 10-параметрическими пространственно-временными преобразованиями, называемыми *преобразованиями Лоренца*, поскольку эти преобразования оставляют инвариантными уравнения Максвелла и скорость света. (Не ясно, повлиял ли непосредственно на Эйнштейна

результат эксперимента Майкельсона — Морли (см. [31] и [33]), но известно что в статье 1905 г. [32] он ссылаясь на «безуспешные попытки обнаружить хоть какое-нибудь движение Земли относительно эфирной среды». См. также [34].) Уравнения ньютоновской механики типа (1.3.1) не инвариантны относительно преобразований Лоренца; поэтому Эйнштейн пришел к необходимости модифицировать законы движения таким образом, чтобы они были лоренц-инвариантны. Новая физика, состоящая из электродинамики Максвелла и механики Эйнштейна, теперь уже удовлетворяла новому принципу относительности, а именно принципу специальной относительности, который утверждает, что все физические уравнения должны быть инвариантны относительно лоренцевых преобразований. Эти идеи будут детально обсуждаться в следующей главе.

Группа преобразований Лоренца никоим образом не шире группы Галилея, и, следовательно, принцип относительности не порожден теорией относительности, а скорее *восстановлен* ею. До Максвелла можно было считать, что вся физика инвариантна относительно группы Галилея. Уравнения Максвелла не были инвариантны относительно этой группы, и до середины столетия казалось, что только механика, но не электродинамика подчиняется принципу относительности. После Эйнштейна стало ясно, что как уравнения механики, так и уравнения электродинамики являются инвариантными относительно лоренцевых, а не галилеевых преобразований. Физические законы в той форме, которую им придали Максвелл и Эйнштейн, претендуют на справедливость все еще в ограниченном классе инерциальных систем отсчета, а вопрос о том, что выделяет эти инерциальные системы, оставался после 1905 г. таким же таинственным, как и в 1686 г.

Необходимо было построить релятивистскую теорию тяготения. Решающий шаг в этом направлении был сделан в 1907 г., когда Эйнштейн ввел принцип эквивалентности гравитации и инерции [35] и вычислил на его основании красное смещение света в гравитационном поле. В гл. 3 мы увидим, что этот принцип определяет гравитационное воздействие на произвольную физическую систему, но не определяет самих уравнений гравитационных полей. Эйнштейн в 1911 г. пытался вычислить с помощью принципа эквивалентности отклонение света в гравитационном поле Солнца [37], но тогда он еще не достиг корректного понимания структуры поля, и результат, полученный им, составлял лишь половину «правильного» релятивистского ¹⁾. Мы приведем этот результат в гл. 8. Эйнштейн [38], Абрахам [39] и Нордстрем [40] предприняли в 1911—1912 гг. ряд попыток сконструировать

¹⁾ В действительности такая формула была получена еще в 1801 г. Зандерлингом на основе ньютоновской теории [тяготения.— *Прим. ред.*

релятивистские уравнения скалярного гравитационного поля, однако вскоре Эйнштейна перестали удовлетворять все эти теории, главным образом по эстетическим соображениям. (Гравитационное отклонение света в поле Солнца тогда еще измерено не было.) Сотрудничество с математиком Марселем Гроссманом навело в 1913 г. Эйнштейна на мысль [41—43], что гравитационное поле необходимо отождествлять с 10-компонентным метрическим тензором пространственно-временной геометрии Римана. Как будет показано в гл. 4 и 5, принцип эквивалентности вводится в этот формализм в виде требования, чтобы физические уравнения были инвариантны относительно общих преобразований координат, а не только лоренцевых преобразований, хотя я не знаю, в какой мере этот «общий принцип относительности» играл самостоятельную роль в представлениях Эйнштейна наряду с принципом эквивалентности. В течение последующих двух лет Эйнштейн представил в Прусскую Академию наук серию статей [44, 45], в которых вывел полевые уравнения для метрического тензора и вычислил гравитационное отклонение света и смещение перигелия Меркурия. Эти блестящие достижения были окончательно суммированы Эйнштейном в 1916 г. в его работе, озаглавленной «Основы общей теории относительности» [1].

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Я цитирую в тексте работы Ньютона, Маха, Максвелла, Ньюкома и Эйнштейна, но, не будучи историком, широко использую, помимо этого, и не первоисточники. Список таких работ приведен ниже.

Неевклидова геометрия

- Bonola R.*, Non-Euclidean Geometry, Dover Publications, 1955.
Sarton G., Ancient Science and Modern Civilization, Yale University Press, 1951, Ch. I.
Weyl H., Raum, Zeit, Materien, 1 aufl., J. Springer, 1923.

Гравитация

- Cajori E.*, историческое и пояснительное приложение к книге Newton I., Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, University of California Press, 1966.
Guth E., в книге Relativity — Proceedings of the Relativity Conference in the Midwest, ed. M. Carmeli, S. I. Fickler, L. Witten, Plenum Press, 1970, p. 161.
Jammer M., Concepts of Force, Harper and Brothers, 1962, Ch. IV—VII.
Whittaker E., A History of the Theories of Aether and Electricity, Thomas Nelson and Sons, 1953, Vol. II, Ch. V.
Wightman W. P. D., The Growth of Scientific Ideas, Yale University Press, 1951, Ch. VIII, X.