

V. ИНЕРЦИЯ И ТЯГОТЕНИЕ

«Если бы эфир, или какое-либо иное тело, совершило бы лишь тяжесть или же тяготение, нежели соответственно массе его, тогда, не отличаясь от других тел ничем, разве только формою материи, он мог бы изменением формы быть постепенно переведен в тело таких же свойств, как и те, которые тяготеют в точности пропорционально своим массам, и наоборот, вполне тяжелые тела при постепенном изменении формы тогда могли бы постепенно утрачивать свой вес, и, следовательно, веса тел зависели бы от формы их, в противность доказанному».

И. Ньютона

В теории тяготения Ньютона система, находящаяся в однородном поле тяготения, совершенно эквивалентна в механическом отношении равнотяготения, совершенно ускоренной системе отсчета. Это обстоятельство, известное более двух веков, и послужило исходной точкой для Эйнштейна при обобщении частной теории относительности на случай ускоренных движений.

Гравитационное поле можно «создать», если сообщить ускоренное движение системе отсчета, и, наоборот, «уничтожить», если оно имеется, другим преобразованием¹. Ускоренное движение становится относительным, но одновременно общая теория относительности неразрывно связывается с теорией тяготения. Понятие о полях тяготения расширяется на случай любых ускоренных движений, и путем математического обобщения создается стройная универсальная теория.

В основе указанной эквивалентности гравитационного поля и равнотяготения ускоренной системы отсчета лежит замечательное свойство тяготения, отличающее его от прочих физических сил. Все тела независимо от формы, состава и физического состояния получают в однородном гравитационном поле одно и то же ускорение,—иными словами, инертная мас-

са в точности равна тяготеющей массе. Если бы существовало различие между массами, мы были бы в состоянии отличить ускоренное движение от действия поля. В первом случае все массы двигались бы с одинаковым ускорением, во втором — обнаружились бы индивидуальные отличия. Так же как положительный исход опыта Майкельсона означал бы ошибочность частной теории относительности, так неравенство инертной и тяготеющей массы устранило бы общий принцип относительности.

К счастью для теории, эквивалентность масс установлена с такою точностью, перед которой меркнет точность опытов, послуживших основой частного принципа.

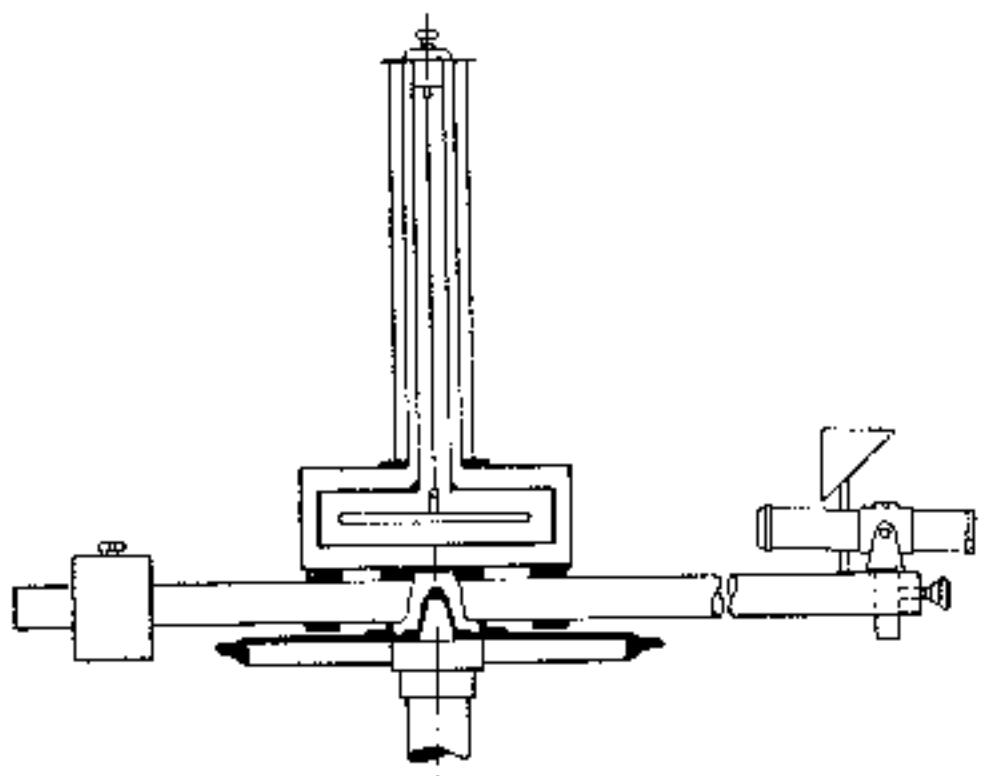
За три века со времен Галилея мы так свыкались с тем, что все тела в пустоте должны падать с одинаковой скоростью независимо от массы, формы, состава, что равенство инертной и тяжелой массы может казаться тривиальностью. Но стоит перечитать страницы «Discorsi» Галилея [56], чтобы факт предстал перед нами со всей первоначальной свежестью и удивительностью. Борьба Галилея с Аристотелем, происходящая в диалогах путем опыта и тонкой диалектики,— первый шаг в установлении общей относительности. Позднее Ньютона произвел более точные опыты над качанием маятников из разных веществ [57]. «Я произвел,— пишет он,— такое испытание для золота, серебра, свинца, стекла, песка, обыкновенной соли, дерева, воды, пленницы. Я заготовил две круглые деревянные кадочки, равные между собою; одну из них я заполнил деревом, в другой же я поместил такой же точно груз из золота (насколько мог точно) в центре качаний. Кадочки, подвешенные на равных пятах, одиннадцати футов длиною, образовали два маятника, совершенно одинаковых по весу, форме и сопротивлению воздуха; будучи помешаны рядом, они при равных качаниях шли взад и вперед вместе в продолжение долгого времени. Следовательно, количество вещества (масса) в золоте относилось к количеству вещества в дереве, как действие движущей силы на все золото к ее действию на все дерево, т. е. как вес одного к весу другого. То же самое было и для прочих тел. Для тел одинакового веса разность количеств вещества (масс), даже меньшая одной тысячной доли полной массы, могла бы быть с ясностью обнаружена этими опытами». Необычайность результата, иносказающее безразличие тяготения к химическому составу тела и его физическому состоянию заставляли стремиться к точности еще большей.

В 1828 г. Бессель по способу маятников исследовал золото, серебро, свинец, железо, цинк, латунь, мрамор, глину, кварц, вещество метеоритов с точностью до 1/60000 и не мог заметить никаких отклонений от пропорциональности инертной и тяжелой массы.

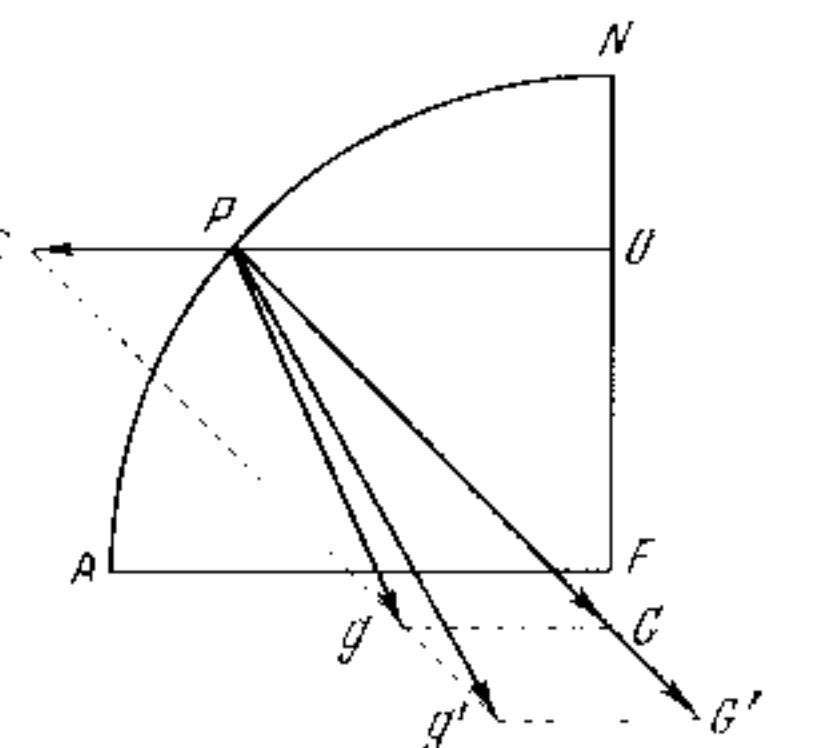
Однако эта точность ничтожна в сравнении с тем, что удалось получить венгерскому физику Р. Этвайну [58] и его сотрудникам при помощи крутильных весов и гравитационных вариометров. Схема крутильных весов

¹ Такое преобразование, как указывает Эйнштейн, возможно, вообще говоря, лишь в бесконечно малой, пространственно-временной области (см. например, Эйнштейн — «Основы теории относительности», лекц. III, перев. Н. Н. Андреева, 1923). — Ред.

изображена на фиг. 32; она очень проста, и только детали прибора, которых мы здесь не можем касаться, позволяют оценить его совершенство. На длинной тонкой крутильной нити подвешен стержень, к концам которого можно прикреплять исследуемые тела. Положим, что на одном конце подвешена платиновая, на другом медная палочка. Инструмент устанавливают так, что стержень с грузами направлен меридианально мерилиану данного места. Вес тела на земной поверхности слагается из двух сил (фиг. 33) — ньютоновского тяготения Pg , направленного к центру



Фиг. 32.



Фиг. 33.

земли, и центробежной силы Pg . Равнодействующая их Pg и есть вес тела. Она, как ясно из рисунка, отклонена от вертикали. Для Будапешта, где производились опыты Этвеша, угол между вертикальным направлением и отвесом составляет $5'5''$. Каждое из тел на стерженьке крутильных весов находится, следовательно, под действием двух сил. Центробежная сила — инерционная и определяется только инертной массой; ньютоновская сила, наоборот, зависит только от тяготеющей массы. Предположим, что ускорение силы тяжести несколько отличается для тел разного химического состава.

Для другого тела с той же инертной массой центробежная сила остается прежней, но притяжение изменится, станет, например, больше, Pg' , соответственно изменится величина и направление результирующего веса Pg' . Если, как сказано, установить стерженек крутильных весов с различными веществами на концах с востока на запад, точно определить его положение и затем повернуть весь прибор на 180° , то направление стерженька должно стать иным, если только ускорение силы тяжести для разных тел различно. В действительности перед опытом точным взвешиванием устанавливается весовое равенство двух масс и затем исследуются, будут ли эти массы также равными инертными массами. Для контроля на местные случайные влияния предварительно производится контроль-

ный опыт с массами из одинакового вещества на обоих концах стержня. В 1896 г. Этвеш так резюмировал результаты своих опытов: «Если вообще существует различие веса в телах одинаковой массы, но из различных веществ, то в случае латуни, стекла, антимонита и пробки оно во всяком случае меньше $5 \cdot 10^{-8}$ ». Впоследствии в опытах Этвеша, Некара и Фекете (1909—1910 гг.) чувствительность прибора была еще повышена. На одном конце стержня подвешивалась платина, на другом исследовались магнелий, дерево, медь, вода, медный купорос в растворе и в кристаллах, асбест и тальк. В результате никаких отклонений, превышающих $5 \cdot 10^{-8}$, не наблюдалось. В сравнении с опытами Ньютона точность была повышена в 5 млн. раз. «Чтобы достигнуть такой точности,— пишет Некар,— мы должны были с нашим прибором оценивать изменения направления веса в $1,5 \cdot 10^{-6}$ дуговой секунды. Под таким углом был бы виден земному наблюдателю предмет в 3 мм диаметром, лежащий на поверхности Земли».

Те же исследователи производили также дифференциальные опыты с солнечным притяжением, сравнивая магнелий и платину. Для этой цели стержень крутильных весов устанавливался в плоскости меридиана. Одно наблюдение производилось при восходе солнца, другое при закате. Если Солнце притягивает равные инертные массы магнелия и платины несколько различно, то, очевидно, положение стерженька при закате и восходе будет различным относительно плоскости земного меридиана. Результат снова был отрицательным.

Выбор веществ в подобных опытах от Ньютона до Этвеша был довольно случайным. Брали вещества по возможности с разными плотностями или различающимися молекулярными весами. С тех пор как стала выясняться зависимость массы от скорости ее движения, возникло представление об энергетической массе, и наконец теория относительности выдвинула общий принцип взаимосвязи⁴ энергии и массы. Гравитационные опыты приобрели новый интерес. Является ли добавочная, энергетическая инертная масса, нарастающая, например, при увеличении скорости электрона, также массой тяготеющей? В общей теории относительности ответ вполне ясен: никакого различия между той и другой массой не может быть, чистая энергетическая масса будет столь же тяготеющей, как и всякая другая. Опыты с отклонением световых лучей в поле тяготения (см. гл. 6) вполне подтверждают этот вывод. Без общей теории относительности вопрос может быть разрешен только эмпирически.

Впервые вопрос о тяготении добавочной массы был поставлен Дж. Дж. Томсоном [59]. По представлению Томсона, энергетическая масса соответствует массе эфира, увлекаемого наэлектризованным телом при движении. Ньютон (ср. эпиграф этой главы), основываясь на общей эквивалентности инертной и тяжелой массы, утверждал и весомость эфира,

если таковой существует в природе. По Томсону, независимо от того, весом эфир или нет, он не может увеличить веса материи, с которой связан. «Если эфир не подвержен силе тяжести, он наверное не может увеличить вес тела, с которым он соединен; если, наоборот, эфир тяготеет, нельзя ожидать, чтобы вес тела, плавающего в эфирном море, увеличился от того, что с ним связана эфирная масса». Таким образом, по Томсону, можно ожидать, что инертная масса тела, в котором достаточно много добавочной инертной массы, способной проявиться в виде энергии, будет больше тяготеющей массы. Один грамм радия за свою жизнь должен излучить огромную энергию в $6,7 \cdot 10^{16}$ эргов, эквивалентную сотням долей миллиграммма. То же относится и к другим радиоактивным веществам — урану и прочим. Томсон сделал малоизвестные опыты с маятником из радия, но определенного результата не получил. Его сотрудник Соутернс [60] произвел тщательное исследование колебаний тяжелого маятника из препарата урана, сравнивая его с маятником из нерадиоактивного сурика. Разница, превышающей $5 \cdot 10^{-6}$, не обнаружилось, в то время как, по предположению Томсона, можно было ожидать различие в $6 \cdot 10^{-5}$. Позднее Пекар и Фекете сравнивали бромистый радий с платиной при помощи крутильных весов Этвэша; различие инертной и тяжелой массы оказалось меньше $5 \cdot 10^{-7}$ [58]. В 1917 г. Зееман с весами Этвэша исследовал кристаллический азотокислый уран и снова не нашел никакого различия масс с точностью до $3 \cdot 10^{-8}$. Таким образом, энергетическая масса так же тяготеет, как и обыкновенная.

При образовании гелия¹ из водорода часть массы исчезает (ср. стр. 68). Эта «теплота соединения» настолько велика, что гелий можно считать крайне устойчивой системой, которая в виде целых единиц входит в состав ядер сложных элементов, выделяясь при распаде в виде α -частиц. По атомным весам элементов можно заключить, что ядра некоторых из них построены исключительно из ядер гелия, в других элементах есть и гелиевые и водородные ядра. Однакова ли гравитационная постоянная для гелиевых и водородных ядер? Такой вопрос недавно поставил Поттер [61] и для решения его изучал на крутильных весах Этвэша, с одной стороны, парафин и фтористый аммоний, в которых имеется от 15 до 24% ядер водорода (в весовом отношении), с другой — латунь, состоящую только из гелиевых ядер. С точностью до $3 \cdot 10^{-6}$ отношение инертной и тяготеющей масс во всех случаях оказалось одним и тем же.

¹ Конец гл. V написан, разумеется, в терминах, соответствующих состоянию науки четверть века назад, до открытия нейтронов. Но если внести соответствующие изменения, то сущность затронутых здесь вопросов останется неизменной.— Ред.

VI. ТЯГОТЕНИЕ СВЕТА

«Но действуют ли тела на свет на расстоянии и не изгибают ли этим действием его лучи, и не будет ли, *caeteris paribus*, это действие сильнее всего на наименьшем расстоянии?»

И. Ньютона

Общая теория относительности заключает в себе очень широкое математическое обобщение и экстраполяцию фактического содержания начала эквивалентности инертной и тяготеющей масс. Теория логически последовательна, но столь же последовательными и свободными от внутренних противоречий могут быть и другие математические обобщения, приводящие к другим следствиям [62]. У Эйнштейна идея общей относительности многократно видоизменялась почти в течение десятилетия и только в 1916 г. приняла почти окончательную форму. Поэтому следствия теории и сравнение их с опытом имеют для общей теории несравненно большее значение, чем для частной. Последняя, по крайней мере в формальном отношении, не только логически последовательна, но и необходима, если точны ее постулаты. Поэтому точное подтверждение ее следствий, поскольку предпосылки установлены, до некоторой степени — излишняя роскошь¹. Для общей же теории проверка следствий — жизненная необходимость.

Учение об относительности всякого движения, а не только прямолинейного и равномерного, основано на свойствах тяготения; обратно, гравитационные проблемы сводятся к общей относительности и при этом получают своеобразное изменение и обобщение. В полях тяготения большой силы, согласно теории Эйнштейна, должны наблюдаться новые, неожиданные явления. Но для осуществления таких феноменов в измеримом масштабе нужны поля необычайно большой силы, и физику приходится уступить роль судьи-наблюдателя астроному. Области около Солнца и звезд — вот самая скромная, минимальная установка, требующаяся для наблюдения эйнштейновских эффектов. В этой главе рассматривается

¹ В тексте «embarras de richesses».— Ред.