

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## ЭКСПЕРИМЕНТ ЭТВЕША \*)

*P. Дике*

Около 350 лет назад Галилео Галилей выполнил один из наиболее известных в истории науки экспериментов: с высоты Пизанской башни он сбрасывал деревянные и свинцовые грузы и определял скорость их падения. Из этих и других экспериментов, а также на основании логических рассуждений Галилей сделал вывод, что все тела падают с одинаковым ускорением (если пренебречь сопротивлением воздуха). Постоянство ускорения силы тяжести многократно проверялось после Галилея. Кульминационным пунктом были исключительно точные эксперименты Роланда (Лоранда) Этвеша, выполненные между 1889 и 1908 гг.

Учитывая дату этих экспериментов, некоторые физики считали, что работы Этвеша оказали решающее влияние на Альберта Эйнштейна, создавшего общую теорию относительности в период между 1908 и 1915 гг. Однако сам Эйнштейн писал в 1934 г., что «не имел серьезных сомнений относительно постоянства ускорения силы тяжести, даже не зная об удивительных опытах Этвеша, о которых, если мне не изменяет память, я узнал позже». Тем не менее можно вполне определенно утверждать, что если бы результаты Этвеша не были отрицательны, все физики узнали бы о таком удивительном открытии буквально через несколько дней, и фундамент, на котором базируется общая теория относительности, был бы подорван до того, как теория была задумана.

Следовательно, любой эксперимент, позволяющий проверить постоянство ускорения силы тяжести с большей, чем достигнутая Этвешем, точностью, явился бы существенной проверкой теории Эйнштейна. Прибор Этвеша позволял проверить это постоянство с точностью  $5 \cdot 10^{-9}$  (пять миллиардных долей). Ниже описан новый эксперимент, поставленный в нашей лаборатории в Принстонском университете; в нашем опыте эта точность значительно превышена и может быть еще улучшена в дальнейшем. В статье также рассматривается значение этого эксперимента для современной физики.

Обычно при описании классического опыта Галилея не указывается, что этот опыт должен был дать ответ на два основных вопроса: 1) падают ли тела различной массы с одинаковой скоростью? 2) падают ли тела различного состава с одинаковой скоростью? Нас в данном случае интересует главным образом второй вопрос. Для решения этого вопроса можно осуществить опыт Галилея в грубом виде, сбрасывая шары одинаковых размеров и одинакового веса — один деревянный, другой пустотелый свинцовый (шары должны иметь одинаковые размеры для того, чтобы сопротивление воздуха для них было одинаково — во избежание необходимости проводить эксперименты в вакууме). Из таких опытов можно

\*) R. H. Dicke, The Eötvös Experiment, Scientific American 205 (6), 84 (1961). Сокращенный перевод С. А. Каменецкого.

узнать, реагируют ли на силу тяжести кислород и углерод (основные составляющие дерева) так же, как свинец, несмотря на то, что ядра атомов кислорода и углерода содержат одинаковое число протонов и нейтронов, а в ядрах атомов свинца число нейтронов превышает число протонов на 50%.

Из эксперимента, обнаружившего одинаковое ускорение падающих тел независимо от их состава, можно сделать по меньшей мере четыре существенных вывода: 1) следует ожидать, что единичные нейтроны и атомы водорода (или пары электрон—протон) будут падать с таким же ускорением; 2) большие ядерные силы, связывающие ядра атомов, не оказывают никакого влияния на ускорение силы тяжести, хотя эти силы количественно различны у легких и тяжелых элементов; 3) большая электростатическая энергия, связанная с ядрами тяжелых элементов, также не оказывает никакого влияния; 4) скорости электронов, занимающих внутренние оболочки тяжелых элементов, также не оказывают влияния на ускорение силы тяжести, хотя они и выше соответствующих скоростей в легких элементах.

Хотя Этвеш проводил свои эксперименты задолго до того, как была обнаружена вся сложность природы атомов, он, по-видимому, имел ясное представление о значении экспериментирования с различными веществами: среди испытанных им веществ были латунь, стекло, пробка, дерево, медь, вода и платина.

Роланд фон Этвеш, сын писателя и государственного деятеля, Иозефа фон Этвеш, родился в Будапеште 27 июля 1848 г. 21 года от роду он поступил в Гейдельбергский университет, где изучал физику у Г. Гельмгольца и Г. Кирхгофа и химию у Р. Бунзена. В начале его работы относились в основном к молекулярным явлениям, и только в 1889 г. он опубликовал первую из его известных работ по гравитации. Трудно сказать, что заставило его переключиться на новую область, столь далекую от той, в которой он работал в течение продолжительного времени.

Вслед за первоначальными исследованиями силы тяжести Этвеш, несколько видоизменив свой прибор, применил его к исследованию распределения масс в горных хребтах; это исследование прославило его среди геофизиков. Затем, пользуясь чувствительным прибором, разработанным им для геофизических целей, Этвеш повторил свой первоначальный эксперимент по измерению действия силы тяжести. За статью, в которой была описана эта работа, Этвеш был удостоен в 1909 г. премии Бенеке Геттингенского университета. По неизвестным причинам эта статья была опубликована только в 1922 г.— через три года после его смерти. В 1935 г. Реннер (Венгрия) повторил этот опыт, воспользовавшись старым прибором Этвеша, точность которого, по утверждению Реннера, была им повышена.

Основной прибор Этвеша исключительно прост (рис. 1). Он представляет собой легкий горизонтальный стержень (коромысло) длиной 40 см. подвешенный на тонкой платино-иридевой нити. К концам коромысла прикреплены два грузика, один из которых подведен на 65 см ниже другого. Хотя такое расположение грузиков очень выгодно для измерения небольших градиентов силы тяжести при геофизических исследованиях, оно затрудняло проведение основного эксперимента. Принцип, использованный Этвешем в его наиболее точных экспериментах, можно наглядно представить, вообразив отвесно висящий грузик. Приняв врачающуюся систему координат, относительно которой Земля покоятся, можно считать, что на массу действуют две силы: сила гравитационного притяжения (сила тяжести), заставляющая массу падать к центру Земли, и центробежная сила (одна из разновидностей сил инерции), стремящаяся отбро-

сить массу вовне (рис. 2). Если проводить опыты с грузиками различного состава, будет ли линия отвеса сохранять точно такое же направление, тем самым обнаруживая строгую пропорциональность между этими двумя силами совершен но различной природы? Фактически в осуществленном эксперименте коромысло с двумя прикрепленными к нему массами было подвешено в восточно-западном направлении. Незначительное нарушение пропорциональности между гравитационными и инерционными силами имело бы результатом возникновение пары, заставляющей коромысло поворачиваю щийся (рис. 2). Поскольку независимо от того, какие тела подвергались испытанию, Этвеш не мог обнаружить никакого поворота, который можно было бы бесспорно приписать нарушению пропорциональности, он сообщил о нулевом результате в пределах точности его эксперимента. (В некоторых опытах Этвеш применял несколько иной вариант своего прибора, который положен в основу наших пристонских исследований.)

Для того чтобы получить такую же точность в опытах со сбрасыванием грузиков в вакуумной камере, имеющей высоту «падающей башни» в Пизе, необходимо было засекать времена падения с точностью в одну миллионную секунды.

Глубокий смысл постоянства гравитационного ускорения сумел оценить Эйнштейн. По чистой случайности новый подход Эйнштейна возник в том же 1908 г., в котором Этвеш проводил эксперименты. Эйнштейн полагал, что если самые различные вещества испытывают одинаковое ускорение силы тяжести, то это ускорение скорее можно считать характерным для физического пространства, в котором падают тела, чем для самих веществ.

Поэтому Эйнштейн предложил интерпретировать ускорение силы тяжести как чисто геометрический эффект и рассматривать траектории падающих тел как геометрические кривые, описываемые вследствие

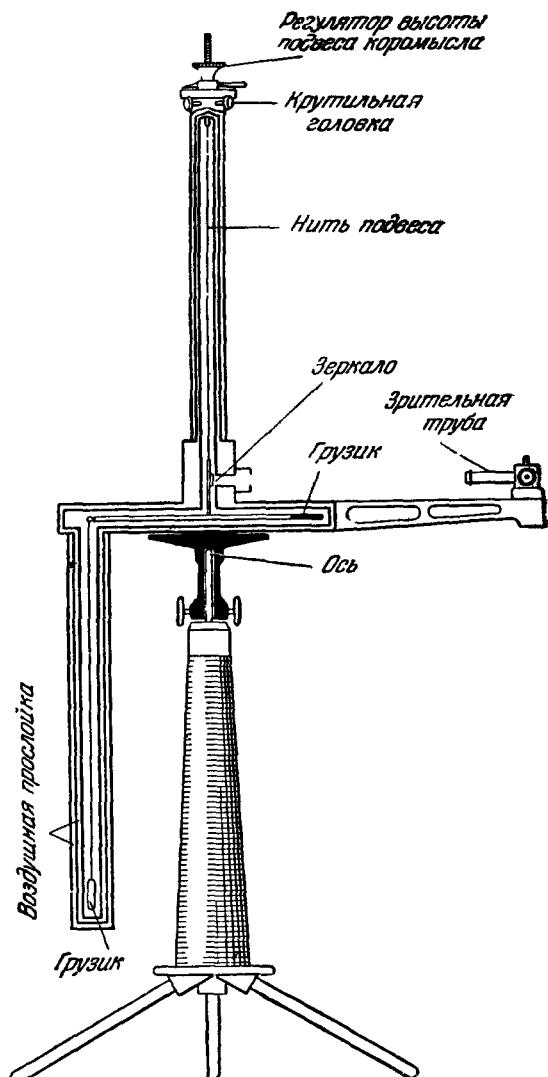


Рис. 1 Прибор Этвеша.

Основной частью прибора является легкое горизонтальное коромысло, подвешенное на тонкой платино-иридисовой проволоке. К коромыслу прикреплены два грузика, один из которых расположен на 20 см ниже другого. Следя за калиброванной шкалой при помощи зрительной трубы, можно обнаружить самый незначительный поворот коромысла.

«кривизны» пространства. Так как падающее тело движется в пространстве и во времени, его траектория определяется четырьмя переменными — тремя пространственными и одной временной. Получающаяся траектория представляет собой кривую в четырехмерном пространстве-времени.

Кривизну четырехмерного пространства-времени легче всего представить по аналогии с хорошо известными двумерными поверхностями. Какова бы ни была форма поверхности, всегда возможно соединить любые ее две точки кратчайшей линией, или, точнее, линией, длина которой является экстремумом. Такие линии называются геодезическими. На сферической поверхности геодезическими линиями являются дуги большого круга. Геодезическая линия на сферической поверхности получается при пересечении сферы плоскостью, проходящей через центр и выбранные две точки.

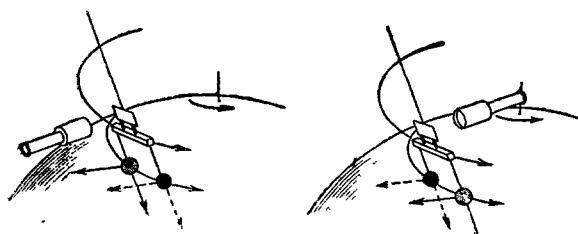


Рис. 2. Принципиальная схема эксперимента Эддингтона.

Эддингтоном были проведены две серии экспериментов: одна в 1899 г., другая — в 1908 г. Эксперименты с большой точностью доказали, что ускорение силы тяжести постоянно. В эксперименте наблюдалось действие силы тяжести на кругильные весы, к коромыслу которых были прикреплены два грузика, подвергавшиеся одновременному действию двух сил: силы притяжения Земли и центробежной силы, создаваемой вращением Земли. Если бы две массы различного состава различно реагировали на эти две силы, то они вызвали бы некоторый поворот коромысла. Наблюдая равновесие весов в различных азимутах, Эддингтон убедился, что никакого существенного поворота коромысла не происходит.

Пространство вокруг Солнца или другой звезды флюктуацией значительно меньшей кривизны, создаваемой всеми звездами нашей галактики, а кривизна вблизи галактики является в свою очередь местной флюктуацией общей кривизны Вселенной в целом.

Эйнштейн предположил, что эталон метра и часы обладают такими свойствами, что ими можно воспользоваться для определения тех же геодезических линий, что и линий, образуемых траекториями свободно падающих тел. В этом предположении подразумевается, что платиновый эталон будет сохранять «одну и ту же» длину, а точные часы будут сохранять «одно и то же» время независимо от того, где бы их ни поместить во Вселенной. В современных исследованиях отдаленных объектов платиновый эталон и точные часы заменены атомными эталонами длины и атомными часами. Следуя Эйнштейну, мы должны допустить, что атомы в наиболее отдаленных галактиках имеют те же самые размеры и излучают свет тех же частот, что и атомы на Земле или на Солнце. Допущение Эйнштейна по существу является определением единиц длины и времени всюду во Вселенной, и поскольку оно однозначно, можно сказать многое в пользу принятия такого определения.

К сожалению, всегда имеются лазейки для проникновения неоднозначности. Так, например, за единицу длины можно было бы принять диаметр водородного атома, радиус гелиевого ядра, длину волны электрона или «гравитационный радиус» элементарной частицы. Последний можно в данном случае определить как радиус электрически заряженной

В представлении Эйнштейна четырехмерное пространство является неискривленным, или евклидовым, только в отсутствие материи. Наличие массивного тела, например Солнца, оказывает влияние на окружающее пространство, искривляя его, так что планеты обращаются вокруг Солнца по естественным орбитам, представляющим геодезические линии для пространства с данной местной кривизной. Искривленное про-

элементарной частицы, в пределах которого частица удерживается гравитационными силами против действия электрических сил, стремящихся разрушить ее. Это — очень малая величина, равная приблизительно  $10^{-23}$  см. Если бы отношение этих различных величин друг к другу изменялось в различных точках пространства-времени во Вселенной, то мы были бы в большом затруднении при выборе стандартной единицы длины. Выбор любой из этих возможных единиц приводил бы к особой геометрической картине пространства.

Эксперимент Этвеша непосредственно не дает никакого ответа на вопрос о пригодности измерительных масштабов или часов для проверки геодезических линий, описываемых падающими телами при их движении в пространстве. Но можно воспользоваться косвенными аргументами, основанными на результатах этого эксперимента, для того чтобы показать, что по крайней мере некоторые из единиц длины и времени, основанные на атомных величинах, пригодны для этой цели. Эти аргументы имеют общий характер и очень сильны, но всегда имеется опасность, что, подобно всем сильно действующим лекарствам, они могут оказаться непригодными.

Один из аргументов основан на следующей воображаемой ситуации. Предположим, что мы тщательно изготовили два объекта из различных материалов, которые должны служить эталонами массы. Для того чтобы убедиться в равенстве их масс, мы их не взвешиваем (так как желаем избежать измерений, зависящих от силы тяжести), а определяем их инертную массу, подвергая их ускорению под действием стандартной силы. Мы добавляем или срезаем материал эталонов, пока они не приобретают одинаковой скорости под действием одинаковых сил. Тогда можно сказать, что они обладают одинаковой инертной массой. Поднимем теперь оба эталона на некоторую высоту, например на крышу здания, и снова сравним их массы, подвергая их ускорению. Теперь предположим, что их инертные массы уже не равны — масса одного эталона увеличилась.

Так как масса и энергия эквивалентны, мы делаем отсюда вывод, что для того, чтобы тело приобрело дополнительную массу, его внутренняя энергия должна возрасти. Мы знаем, что даже незначительное увеличение массы соответствует огромному приращению энергии. Это в свою очередь предполагает, что над телом была совершена огромная работа либо тем лицом, которое перенесло это тело в более высокое положение, либо некоторым внешним полем сил (но не гравитационным), которое сообщило телу энергию во время его подъема. Если эта работа была совершена человеком, то он должен был чувствовать, что переносимое им тело необычайно тяжело. Непосредственным результатом такого исключительного гравитационного притяжения должна была бы быть исключительно большая скорость свободного падения этого тела. С другой стороны, если бы работа над телом была совершена действием какого-то таинственного нового поля сил, способного сообщить энергию телу в процессе его подъема, поднимавший тело человек мог бы не заметить никакого увеличения веса. Кроме того, в этом случае нет необходимости в аномальном увеличении ускорения силы тяжести при свободном падении тела. Силовое поле, сообщившее телу энергию при его подъеме, так же таинственно отнимет эту энергию при его падении.

Наилучшим доказательством того, что первое из предположенных странных происшествий не может иметь место, является эксперимент такого типа, какой был проведен Этвешем. По крайней мере в пределах областей пространства, занимаемых Землей при ее обращении вокруг Солнца, нулевой результат эксперимента Этвеша доказывает, что гравитационные ускорения весьма близки к постоянству, независимо

от состава тел, и что возможны только ничтожно малые изменения инертной массы с высотой. Что же касается возможности существования таинственного нового силового поля, то она наталкивается на специфические трудности. Для того чтобы такое поле могло действовать, не проявляя себя в эксперименте Этвеша, необходимо, чтобы оно обладало в точности требуемой интенсивностью для всех случаев возможных конфигураций связанных частиц.

Таким образом, можно с достаточным основанием сделать из эксперимента Этвеша вывод, что любой обычный масштаб или часы, в том числе и атомные, пригодны в качестве единиц измерения для определения геометрии пространства. В этом и заключается смысл утверждения о силе аргументов, основанных на эксперименте Этвеша.

С другой стороны, легко представить себе весьма совершенные часы, которые отнюдь не пригодны для проверки геометрии пространства. В качестве примера подобных часов можно указать на период обращения по орбите спутника какого-нибудь астрономического тела. Если по какой-нибудь причине в течение некоторого интервала времени сила гравитационного взаимодействия (гравитационная постоянная) уменьшится, то период обращения спутника соответственно увеличится. Такое изменение гравитационной постоянной не окажет никакого измеримого влияния на атомные часы.

Оказывается, что именно постоянство гравитационного взаимодействия наиболее сомнительно с теоретической точки зрения. Представляется странным, что гравитационное взаимодействие исключительно слабо по сравнению с электрическими и ядерными силами. Гравитационное взаимодействие между электроном и протоном в атоме водорода составляет только  $1 \cdot 10^{-40}$  долю силы электрического взаимодействия между этими частицами. Следует ли рассматривать такую курьезно малую величину, как совершенно не имеющую отношения к другим безразмерным числам, получаемым при изучении природы?

В течение 20-х годов английский астроном А. Эддингтон с сомнительным успехом пытался доказать, что число  $10^{-40}$  можно вывести из некоторой сложной теории. В 1938 г. английский физик П. Дирак указывал, что возраст Вселенной, выведенный из скорости разбегания галактик, можно выразить в виде числа, приближенно равного  $10^{40}$ , — числа, которое получается, если выразить  $10$  миллиардов лет в единицах, представляющих время, затрачиваемое светом на прохождение расстояния, равного диаметру атомного ядра. Заметив, что Вселенная в пределах видимых границ содержит, по-видимому, около  $10^{80}$  атомов, Дирак указал, что  $10^{40}$ , деленные на  $10^{80}$ , дают  $10^{-40}$ . Он предположил, что по мере старения Вселенной эти три числа будут изменяться таким образом, что значение гравитационной постоянной будет уменьшаться, так как эта постоянная обратно пропорциональна возрасту Вселенной.

Недавно обнаружилось, что некоторые трудности, связанные с общей теорией относительности и вытекающие из понятия инерции, являются следствием допущения постоянства гравитационного взаимодействия. Карлом Брансом и мною было предложено некоторое изменение общей теории относительности, похожее на то, которое было предложено немецким физиком П. Иорданом несколько лет назад, позволяющее рассматривать силы инерции в некотором смысле в соответствии с так называемым принципом Маха. (Согласно одной интерпретации этот принцип утверждает, что силы инерции, действующие на тела, находящиеся в движущихся с ускорением лабораториях, например в лабораториях, связанных с Землей, можно рассматривать как гравитационные силы, генерируемые удаленной материей Вселенной.) В предложенной нами видоизмененной

теории гравитационное взаимодействие является переменной величиной. Эксперимент типа Этвеша не может пролить никакого света на столь глубокий вопрос теории потому, что гравитационная сила, стремящаяся удержать вместе малые массы прибора Этвеша, настолько мала, что интенсивность гравитационного взаимодействия может значительно изменяться от точки к точке, не вызывая аномального ускорения, которое могло бы быть обнаружено.

Но даже несмотря на такое ограничение, нам казалось важным повторить эксперимент Этвеша. За последние два года мы пытались улучшить прежний результат, пользуясь новым прибором в Принстоне. Трудности,



Рис. 3. Идеализированная схема принстонского эксперимента.

Два грузика, подвешенных на северном полюсе, врачаются вместе с Землей. В 6 час утра (надо) коромысло перенаправлено в направлению на Солнце, и грузы увлекаются Землей по направлению к Солнцу. Через 12 часов (направо) грузы увлекаются в противоположном направлении. Если светлый шарик стремится двигаться в направлении Солнца быстрее темного, то он заставит коромысло в первом случае вращаться в течение 12 часов несколько быстрее темного, во втором случае — в течение последующих 12 часов несколько медленнее. Гипотетический положительный результат привел бы к асимметрии, изображенной на рис. 4.

которые связаны со стремлением добиться точности порядка нескольких миллиардных долей, оказались весьма значительными.

Прежде всего мы заново поставили эксперимент так, что теперь прибор содержит в себе контрольное приспособление. В большинстве своих работ Этвеш сравнивал центробежное ускорение, создаваемое вращением Земли, с ускорением силы тяжести на Земле. Поскольку ни одно из этих ускорений нельзя выключить, такой эксперимент неуправляем (\*). В противоположность этому наш эксперимент зависит от ускорения Земли и связанных с ней объектов по отношению к Солнцу. В принципе эксперимент заключается в том, что мы подвешиваем два грузика к коромыслу так, что они свободно падают по направлению к Солнцу. Так как вращение Земли вокруг своей оси заставляет коромысло поворачиваться каждые 24 часа на  $360^\circ$ , любое различие в гравитационном ускорении, испытываемом обоими грузиками, должно обнаружиться в виде колебаний коромысла с периодом 24 часа (рис. 3 и 4).

Кроме того, мы сконструировали прибор совершенно нового типа. В приборе Этвеша один грузик подвешен ниже другого; благодаря этому прибор чувствителен к гравитационным градиентам, но в других отношениях это бесполезно. Представляется также довольно странным (если представить себе самого Этвеша, сидящего возле прибора), что возмущение крутильных весов, вызываемое массой тела наблюдателя, оказывается по крайней мере в 200 раз больше, чем принятая Этвешем

(\*). Это утверждение не совсем точно. В последних экспериментах Этвешу, воспользовавшемуся движущимся прибором, удалось в известной мере «управлять» центробежным ускорением, а именно он доказал, что на теле, движущемся в направлении с запада на восток (скорость движения которого складывается со скоростью вращения Земли), действует несколько меньшее ускорение, направленное к центру Земли, чем на теле, движущемся в противоположном направлении («эффект Этвеша»). (Прим. перев.)

вероятная ошибка. Поскольку Этвеш совершенно не упоминает об этом эффекте, мы не знаем, как он устранил его. Мы полагаем, что он находился на достаточном расстоянии от прибора до тех пор, пока прибор не успокаивался, а тогда он быстро подходил для отсчета по шкале, пока прибор не успевал реагировать на возмущающую силу.

Впринстонском приборе применены три способа уменьшения чувствительности к гравитационным градиентам. Во-первых, грузики подвешены на одной и той же высоте; во-вторых, вместо двух грузиков, подве-

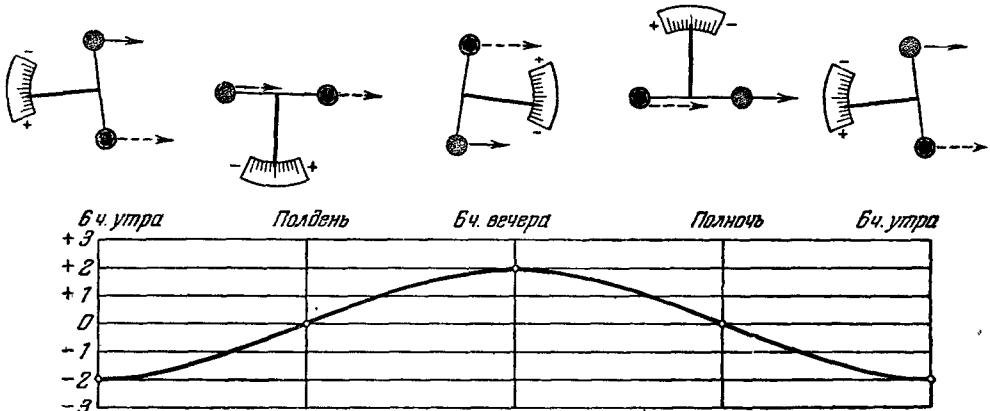


Рис. 4. Гипотетический положительный результат эксперимента приведет к изображенной на графике асимметрии. Подвешенные грузики, увлекаемые Землей, совершают (в плане) полный оборот каждые 24 часа. Если оба грузика испытывают одинаковое гравитационное ускорение к Солнцу, то их скорость вращения будет абсолютно равномерной. Если же один из грузиков (светлый) стремится к Солнцу несколько быстрее, то он увеличит скорость вращения при движении к Солнцу и замедлит эту скорость при движении от Солнца.

шенных к коромыслу, три грузика подвешены к углам кварцевой рамки, имеющей форму равностороннего треугольника; все три грузика имеют приблизительно одинаковую массу, причем два грузика сделаны из одинакового материала (меди), в третьем применен хлористый свинец. Такая конфигурация грузиков в высокой степени нечувствительна к гравитационным градиентам. Третье улучшение, которое еще более снижает влияние градиентов, заключается в малой величине треугольника — его стороны равны около 5 см (рис. 5).

Следующей задачей было уменьшение чувствительности прибора к температуре. Для уменьшения температурных градиентов Этвеш заключал крутильные весы в тройную металлическую оболочку. Однако при этом крутильные весы находились в камере, содержащей воздух при стандартном давлении, и можно полагать, что здесь создавались медленные конвекционные течения даже в случаях, когда нельзя было обнаружить различие температуры в различных частях прибора.

Трудности с конвекцией можно устранить, понижая давление воздуха в камере. Но при этом возникает новая проблема: в частичном вакууме молекулы воздуха могут проходить относительно длинные расстояния, не испытывая столкновений с другими молекулами. Вследствие этого движущиеся молекулы могут создавать «ветер» (динамическое давление), так как молекулы, ссылающиеся с нагретой поверхности, движутся быстрее молекул, ссылающихся с более холодной поверхности. Так, например, можно подсчитать, что если даже снизить давление воздуха до  $10^{-2}$  мм

рт. ст. ( $10^{-5}$  ат), разность температур между противоположными стенками способна создать такие движения воздуха, которые понизят точность эксперимента, указанную Этвешем.

В нашем эксперименте мы не только применили многослойную защиту от теплового излучения, но и поместили свободно подвешенные детали прибора в высокий вакуум. Первые опыты были проведены при давлении около  $10^{-6}$  мм рт. ст. В последнем варианте вакуумной камеры мы рассчитываем поддерживать давление менее  $10^{-8}$  мм в течение нескольких месяцев подряд. Проведение эксперимента в высоком вакууме уменьшает не только возмущения, создаваемые течениями газа, но и случайные возмущения грузиков под действием бомбардировки отдельными молекулами газа.

Другим источником затруднений, знакомым еще Этвешу, является загрязнение движущихся частей прибора магнитными материалами. Даже небольшие примеси магнитных материалов вызывают ощущимые крутящие моменты под действием земного магнитного поля. Если бы один из подвешенных грузиков в приборе Этвеша содержал кусочек сильно намагниченного железа весом только в несколько миллионных долей грамма, то он вызвал бы отклонение коромысла весов в тысячу раз большее, чем указанная Этвешем вероятная ошибка. Этвеш сообщает, что он преодолел это затруднение, скомпенсировав земное магнитное поле, но не объясняет, как он этого достиг и не указывает, какими критериями он пользовался для проверки того, что это поле скомпенсировано.

В нашем эксперименте только суточные вариации магнитного поля причиняют неприятности, а не поле в целом, так что магнитные примеси

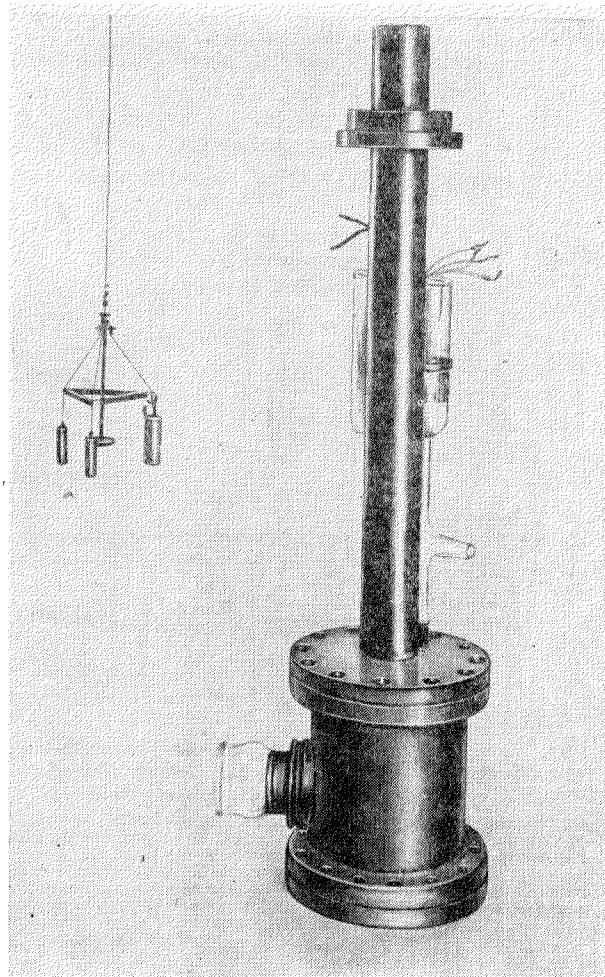


Рис. 5. Общий вид принстонского прибора.

В новом эксперименте Этвеша, выполняемом автором и его сотрудниками, применяются три грузика, изображенные отдельно вверху налево. Два одинаковые грузика — медные, третий — хлористый свинец — заключен в стеклянный сосуд. Треугольная рамка — кварцевая. При проведении эксперимента рамка с грузиками подвешивается в камере с высоким вакуумом, изображенной на рисунке, а сама камера помещается в герметический колодец под землей.

представляют для нас меньшую проблему, чем для Этвеша. Тем не менее, именно для разрешения этой «магнитной проблемы» мы сделали два грузика из меди, полагая, что в этом металле после электролитической очистки магнитные примеси могут остаться только в пренебрежимо малых количествах. К сожалению, оказалось, что это не так. Однако мы обнаружили, что при соответствующей термической обработке вредные примеси можно перевести в твердый раствор и обезвредить.

Атом меди содержит 29 протонов и 34 нейтрона, что представляет примерно то же малое отношение числа нейронов к числу протонов, которое наблюдается у любого легкого элемента, кроме водорода. Так

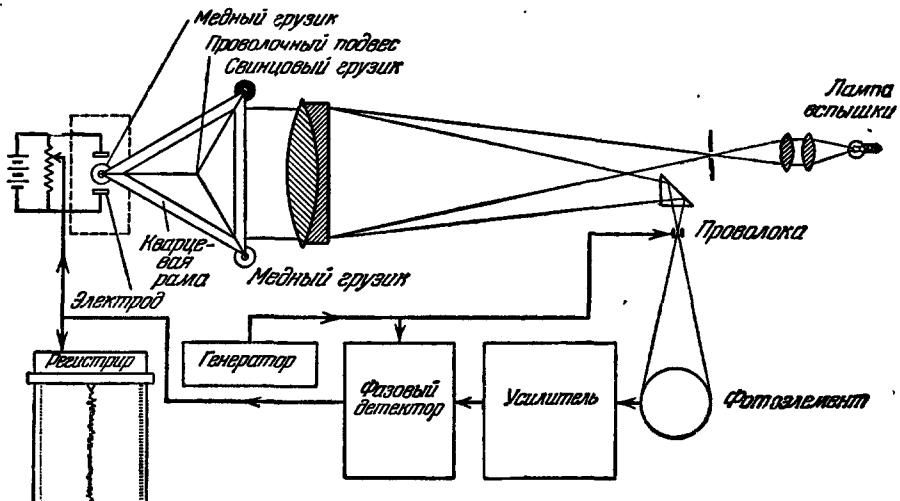


Рис. 6. Электрооптическая система, применяемая впринстонском приборе для обнаружения и регистрации любого незначительного вращения подвешенной треугольной рамки.

Одна сторона треугольной рамки посеребрена и служит зеркалом. Изображение щели, находящейся на пути пучка света от лампы-вспышки, отражается зеркалом и фокусируется на проволоке, совершающей колебания с частотой 3000  $\text{гц}$ . Вследствие этих колебаний интенсивность падающего на фотодиэлемент света изменяется во времени. При незначительном повороте рамки сигнал от фотодиэлемента возникает; в результате этого возникает постоянный ток, который служит восстанавливающей силой, действуя на один из медных грузиков. Величина этой силы регистрируется на непрерывно движущейся ленте.

как нам было необходимо, чтобы третий грузик имел большое значение отношения чисел нейтронов и протонов, мы выбрали свинец, в котором это отношение равно 125 : 82. Мы применяем не металлический, а хлористый свинец, так как это соединение можно довести повторной рекристаллизацией до высокой степени чистоты. Наконец, в качестве дополнительной меры предосторожности мы поместили вблизи прибора два чувствительных магнитометра для непрерывного учета обоих горизонтальных составляющих земного магнитного поля. Пользуясь записями этих магнитометров, можно в случае необходимости определять величину крутящих моментов, создаваемых магнитными возмущениями.

Последним ограничением в эксперименте, выполненном Этвешем, была оптическая дифракция в зрительной трубе, применявшейся для отсчета по шкале прибора. Вероятная ошибка, указываемая Этвешем и его сотрудниками, соответствует  $1/_{200}$  доле наименьшего деления шкалы, а она, в свою очередь, составляет  $1/_{40}$  часть полной ширины дифракционной картины в его трубе. Это дает точность отдельного отсчета в  $1/_{20}$  деления шкалы.

В нашем приборе глаз наблюдателя исключается, а вместе с ним отпадает и возможность личной ошибки, которую нельзя игнорировать. Комбинированная электрооптическая система непрерывно следит за углом поворота подвешенного треугольника и способна определить (за период наблюдения, равный 10 сек) любой поворот, вплоть до углов поворота  $\sim 10^{-7}$  дугового градуса. Один из трех грузиков подведен между двумя электродами, благодаря чему любой обнаруженный поворот может быть скомпенсирован очень малым крутящим моментом, создаваемым электрическими силами (рис. 6). Другими словами, система регулирования с обратной связью препятствует вращению прибора, а необходимый для этой цели крутящий момент регистрируется непрерывно. Во всех случаях будет действовать искусственное затухание, обеспечиваемое такой системой, так как отсутствие воздуха вокруг кривильных весов исключает возможность естественного затухания.

Вся аппаратура смонтирована на дне колодца глубиной 3,6 м. Во время проведения эксперимента отверстие колодца герметически закрыто 1,2-метровой пробкой с термической изоляцией.

Во время длившегося несколько месяцев эксперимента, результаты которого были проанализированы летом 1961 г., не было обнаружено никакого существенного вращения подвешенных грузов. Любопытно, что при всей современной технике мы смогли повысить точность результатов Этвеша только в 50 раз. С точностью приблизительно до  $10^{-10}$  мы можем утверждать, что гравитационное ускорение меди и свинца одинаково. В новой серии экспериментов, которую вскоре начнем, мы надеемся увеличить точность еще в 10 раз.

Принимая во внимание все возможные источники ошибок, присущие подобному эксперименту, представляется почти невероятным, что Этвеш мог добиться той точности, которую он указывает. Однако было бы ошибочным и недостойным недооценивать техническую споровку, которую может приобрести исследователь-специалист, проработавший в течение ряда лет с хорошо знакомой ему аппаратурой. Новый эксперимент мог обнаружить ошибочность результатов Этвеша, но этого не случилось.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. R. v. E ö t v ö s, D. Pek á r, E. Fekete, Ann. d. Phys. 68 (9), 11 (1922).
2. R. H. Dicke, Revs. Mod. Phys. 29 (3), 363 (1957).
3. A. Einstein, Ideas and Opinions, Crown Publ., 1954.
4. A. Einstein, The Meaning of Relativity, 5th ed., Princeton Univ. Press, 1955 (см. А. Эйнштейн, Сущность теории относительности. М., ИЛ, 1955).
5. R. H. Dicke, Revs. Mod. Phys. 29 (3), 355 (1957).

См. также R. v. E ö t v ö s, Wied. Ann. 59, 385 (1896); Прикладная геофизика вып. 1. М.—Л., ОНТИ, 1936, стр. 56 и след., 86 и след. (Перев.).

