

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

681.2.081

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ *)*Б. Тейлор, Д. Лангенберг, У. Паркер*

Эксперименты по повторному определению численных значений фундаментальных постоянных со все более высокой точностью позволяют получить сведения о степени справедливости основных физических теорий.

Вопреки распространенному мнению, физика во многих своих областях — не особенно точная наука. Физики зачастую вполне удовлетворяются измерением какой-либо величины с точностью до нескольких процентов и такой же степенью совпадения экспериментального результата с его теоретическим предсказанием. В некоторых случаях большим достижением считается совпадение обоих результатов даже только по порядку величины (т. е. их расхождение менее чем в 10 раз). Столь невысокая точность имеет в основном двойное происхождение. Во-первых, в большинстве экспериментов физики имеют дело со сложными системами, и в опытах одновременно фигурирует несколько взаимосвязанных, но часто плохо понятых явлений. Во-вторых, существующие теории обычно дают лишь приближенное описание, основывающееся на упрощенной качественной модели системы.

Вместе с тем в физике существует ряд особых величин, которые можно — и нужно — знать с очень высокой точностью. Это — фундаментальные физические постоянные. К их числу, в частности, относятся скорость света в пустоте c , постоянная Планка h , заряд электрона e , масса электрона m_e и постоянная тонкой структуры α . Мы выбрали именно эти пять фундаментальных постоянных с целью проиллюстрировать совершенно различное их «происхождение».

Скорость света и постоянная Планка суть примеры постоянных, которые естественно фигурируют в математических формулировках основных физических теорий. Например, в теории относительности Эйнштейна энергия E и масса m атома связаны знаменитым соотношением $E = mc^2$; в квантовой теории энергия E и частота ν фотона связаны соотношением $E = h\nu$.

Заряд и масса электрона являются примерами постоянных, характеризующих не только эту элементарную частицу, но и все прочие частицы, из которых построено вещество (тогда к этим постоянным добавляются численные множители). Например, заряд α -частицы вдвое больше фундаментальной единицы электрического заряда (и равен $2e$), а масса

*) B. N. T a y l o r, D. N. L a n g e n b e r g, W. H. P a r k e r, The Fundamental Physical Constants, Scientific American 223 (4), 62 (1970). Перевод В. И. Рядника, под редакцией Я. А. Смородинского.

нейтрального μ -мезона в 264,1 раза больше фундаментальной единицы массы (и равна 264,1 m_e).

Постоянная тонкой структуры представляет пример фундаментальной постоянной, «сконструированной» из других величин того же рода ($\alpha = 2\pi e^2/hc$). Такие комбинации фундаментальных постоянных появляются всегда в неизменном виде, поэтому они сами имеют право называться фундаментальными постоянными. Постоянная тонкой структуры является основной постоянной в квантовой электродинамике — теории, описывающей квантовые взаимодействия элементарных частиц с электромагнитным полем (α есть мера силы этих взаимодействий). Другим примером фундаментальной постоянной подобного рода может служить постоянная Ридберга R_∞ , равная $2\pi^2 m_e e^4/h^3 c$. Она устанавливает шкалу уровней дозволенной энергии электрона в атоме водорода.

Разумеется, в природе существует много других величин, которые могут быть измерены с высокой точностью, например плотность кусочка золота или расстояние от Земли до Солнца. Такие величины, однако, в общем не считаются фундаментальными постоянными. Они слишком тесно связаны с частными свойствами того материала или системы, над которыми производится измерение. Другой кусочек золота даст другую плотность; вместе с тем марсианин мог бы совершенно справедливо заметить, что расстояние от Марса до Солнца ничуть не менее «фундаментально», чем расстояние от Солнца до Земли. В сущности, эти величины не универсальны; они не фигурируют в основных уравнениях теоретической физики и не отражают свойств частиц, рассматриваемых в физике как фундаментальные. По своей природе эти величины имеют макроскопический и тем самым частный характер, тогда как фундаментальные постоянные имеют микроскопическую, а потому и универсальную природу.

(Некоторые физики-теоретики допускают возможность, что фундаментальные постоянные меняются во времени, так что, например, значение e в 1970 г. может отличаться от его значения, скажем, в 1870 г. На сегодняшний день, однако, нет каких-либо экспериментальных свидетельств того, что фундаментальные постоянные меняются, и мы не будем останавливаться на этом вопросе.)

ПОЧЕМУ ВАЖНА ТОЧНОСТЬ?

Почему важно знать численные значения фундаментальных постоянных с высокой точностью? Прежде всего потому, что количественные предсказания основных физических теорий зависят от численных значений постоянных, входящих в эти теории. Для получения точного количественного описания физического мира существенно располагать точным знанием этих численных значений. Точное определение фундаментальных постоянных в разного рода физических экспериментах даже еще более важно по той причине, что оно позволяет проверить согласованность и правильность самих основных физических теорий.

Если бросить взгляд на структуру физической науки, то можно заметить, что физика состоит из ряда как будто разнородных областей — физики твердого тела, атомной физики, ядерной физики, физики элементарных частиц и т. д. Фактором, связывающим воедино все эти области, является физическая теория; все они имеют единую основу, все они опираются на представления квантовой механики, теории электромагнетизма, специальной теории относительности, статистической механики и т. п. Фундаментальные постоянные — как бы звенья в теоретической цепи, связывающей воедино всю физику. Измерения этих постоянных на все более высоком уровне точности нужны поэтому не только для того, чтобы

узнать новый лишний «знак после запятой», но и потому, что этот новый знак может привести к обнаружению ранее не известной несогласованности или, напротив, может устранить имеющуюся несогласованность в нашем описании физического мира.

Относительная точность, с которой сегодня измеряются многие фундаментальные постоянные, достигает миллионных долей. Под нею здесь понимается та относительная неопределенность, которую мы должны приписать нашему знанию численного значения какой-либо величины; эта неопределенность указывает те пределы, в которых результат может отличаться от истинного значения величины. Она есть количественная мера нашего сомнения в численном значении данной величины.

Общепринято в качестве такой меры использовать стандартное отклонение σ ; принято считать, что мы можем говорить с уверенностью 68%, что истинное значение величины заключено в пределах $\pm\sigma$, отсчитанных от измеренного ее значения. Например, если мы 10 раз измерили длину стола и получили среднее значение 100 ± 3 сантиметра, где ± 3 сантиметра и соответствует σ , то с вероятностью 68% истинная длина стола заключена между 97 и 103 сантиметрами. С вероятностью 95% истинное значение заключено в пределах $\pm 2\sigma$, отсчитанных от среднего значения (в случае длины стола — между 94 и 106 сантиметрами), и с вероятностью 99,7% — в пределах $\pm 3\sigma$ (между 91 и 109 сантиметрами).

Для практических целей относительная точность в одну миллионную может считаться весьма высокой. Такая точность соответствует определению длины футбольного поля с погрешностью, равной толщине одной страницы этого журнала. Существует несколько величин, значения которых были измерены с точностью, еще в тысячу раз более высокой. Это отвечает погрешности в толщину этой страницы уже при измерении расстояния от Нью-Йорка до Сан-Франциско! В нашем мире, где на каждом шагу встречаются неопределенности и ошибки, измерение величины с такой точностью уже само по себе должно доставлять настоящее эстетическое удовлетворение.

УРОКИ ПРОШЛОГО

Яркий пример того, как тщательное повторное определение фундаментальных постоянных усовершенствованными методами может привести к лучшему пониманию связанных с ними физических явлений, представляют определения численного значения фундаментальной единицы электрического заряда e . Эти определения в период с 1907 по 1917 г. предпринял Р. Милликен с помощью своего знаменитого метода падающей масляной капли. В методе Милликена изучалось движение маленьких несущих небольшой заряд масляных капель в воздухе между двумя параллельными горизонтальными металлическими пластинами. Вначале определялось время, за которое капля опускалась на определенную высоту под действием одной лишь силы тяжести. Затем между обеими пластинами создавалась некоторая определенная разность потенциалов, заставлявшая каплю подниматься (т. е. двигаться против силы тяжести), и вновь измерялось время, за которое капля проходила заданное расстояние. Из многих наблюдений за движением различных капель вычислялось значение e (это вычисление требовало предварительного определения других величин, фигурирующих в опыте, — местного значения ускорения силы тяжести, расстояния между пластинами, давления и вязкости воздуха и плотности масла). Окончательное опубликованное Милликеном в 1917 г. значение e составило $4,774 \pm 0,002$ (в некоторой системе единиц, по поводу которой мы здесь ничего не будем говорить).

В 30-х годах в связи с появлением нового метода определения e выяснилось, что в милликеновское значение e вкралась существенная ошибка. Новый метод заключался в раздельном определении двух других физических постоянных — числа Авогадро N и числа Фарадея F (ныне называемого фарадеем). Число Авогадро равно количеству атомов или молекул, содержащихся в 1 моле вещества; моль определяется как масса в граммах, равная атомному или молекулярному весу вещества. Фарадей есть количество электричества, которое должно протечь через раствор электролита, чтобы на электроде выделился 1 моль элемента, находящегося в растворе. Число Фарадея (фарадей) и число Авогадро связаны простым соотношением $F = Ne$. Отсюда следует, что $e = F/N$, т. е. e легко получить из известных значений F и N . Число Авогадро определялось путем тщательного измерения плотности, атомного веса и постоянной решетки (расстояния между атомными плоскостями) кристаллических веществ рентгеноструктурным методом. Фарадей определялся измерением массы элемента, электролитически выделившегося на электроде при пропускании через раствор электролита, содержащего этот элемент, известного тока в течение известного времени.

Полученное таким путем значение e оказалось равным $4,8021 \pm 0,0009$, что существенно отличается от найденного Милликеном. Главный источник ошибки, как впоследствии выяснилось, заключался в том, что Милликен использовал неправильное значение вязкости воздуха. Он взял значение, основываясь почти целиком на измерениях одного из своих студентов, но впоследствии оказалось, что этот студент допустил незамеченную ошибку. Для определения модуля кручения проволоки, используемой в опыте по определению вязкости воздуха, он взял значение массы, которое сильно отличалось от той массы проволоки с подвешенным на ней грузом, который использовался в реальном опыте. Только позже выяснилось, что модуль кручения проволоки изменяется как с изменением подвешенной на ней массы, так и с изменением геометрии подвески. После того, как данные Милликена были пересчитаны с учетом правильного значения вязкости воздуха, оказалось, что найденное значение e согласуется с полученными косвенным путем из измерений чисел Авогадро и Фарадея.

Этот случай хорошо иллюстрирует тот общий факт, что экспериментально найденное значение постоянной меняется с каждым новым ее определением. Причина заключается в том, что трудно измерить все фигурирующие в опыте величины с высокой точностью; любой мыслимый эффект, который мог бы повлиять на результат, требует тщательного и длительного изучения. И даже при этом случается «прозевать» существенный эффект.

Вместе с тем иногда проявляется и тенденция совсем противоположного характера. Проводимые в течение какого-то времени разные экспериментальные определения какой-либо величины приводят к удивительно хорошо согласующимся друг с другом результатам. Выполненная позже новая серия измерений более совершенными методами, однако, показывает, что прежнее значение величины ошибочно и что новое ее значение отличается от старого «общепринятого» на величину, во много раз превышающую погрешность, приписанную прежнему значению. (Почему-то получается, что такое встречается чаще, когда прежнее значение величины было получено выдающимся, а не малоизвестным ученым.) Хороший пример такой тенденции предоставляют последовательные измерения скорости света c . Примерно до 1950 г. было проведено несколько казавшихся вполне надежными измерений значения c разными методами, и все результаты этих измерений находились в хорошем взаим-

ном согласии. Затем в 50-х годах были выполнены более точные измерения; они неожиданно показали, что результаты прежних измерений с неправильны, причем ошибка чуть ли не в четыре раза превышает погрешность, приписанную старым результатам.

Возможное объяснение этому явлению, которое можно назвать «интеллектуальным конформизмом» (а в некоторых случаях являющемуся просто плодом недобросовестности), предложил Э. Лоуренс, изобретатель циклотрона. Он отметил, что при изготовлении и опробовании аппаратуры, применяемой в любом прецизионном методе, всегда действует много инструментальных и методических факторов, которые могут привести к тому, что измеренное значение величины будет сильно отличаться от принятого в то время значения (либо же от того значения, которое должна иметь величина по предвзятому мнению экспериментатора). Тогда исследователь начинает искать источники расхождения («разбирая по косточкам» свою аппаратуру) и не успокаивается до тех пор, пока не получит результата, близкого к общепринятому или ожидаемому им значению. Но на этом заканчивает работу!

На самом же деле он мог и проглядеть источники дополнительных погрешностей. Такое стечение обстоятельств вполне может объяснить хорошее совпадение ряда полученных разными методами результатов, хотя впоследствии все они оказываются в значительной мере ошибочными. Однако именно эти изменения измеренных численных значений постоянных нередко позволяют обнаружить ошибки в эксперименте и в теории.

НОВОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ e/h

Вероятно, наилучший пример тех важных следствий, которые может иметь исключительно точное повторное определение фундаментальных постоянных, дает проведенное в последние годы измерение величины e/h группой ученых из Пенсильванского университета; в состав этой группы входили авторы настоящей статьи и Э. Дененстайн. Это измерение, осуществленное благодаря открытию явления, наблюдающегося в твердых телах при низких температурах, привело к результату, который оказал существенное влияние на такие далекие от физики твердого тела области, как физика элементарных частиц, квантовая электродинамика, физика рентгеновских лучей и атомная физика. Используемое в этом опыте замечательное явление, наблюдаемое в сверхпроводящих материалах, известно под названием эффекта Джозефсона (для переменного тока).

Оно было впервые предсказано студентом Кембриджского университета Б. Джозефсоном в 1962 г. Он теоретически показал, что если «неплотно» соединить два сверхпроводника (т. е. вещества, которые полностью утрачивают сопротивление электрическому току при температурах вблизи абсолютного нуля) и поддерживать между ними постоянную разность потенциалов V , то через зазор между сверхпроводниками потечет переменный ток, не испытывающий сопротивления, — «переменный сверхпроводящий ток».

На фотографии рис. 1 показано устройство, осуществляющее такое «неплотное» соединение сверхпроводников. На ней виден сверхпроводящий контакт типа «бутерброда» из двух сверхпроводящих пленок, разделенных слоем изолятора толщиной около 10^{-7} см. Джозефсон нашел, что частота ν переменного сверхпроводящего тока должна быть пропорциональна приложенной к контакту постоянной разности потенциалов V с множителем пропорциональности $2e/h$, или что $\nu = (2e/h) V$. Эта частота при разности потенциалов 1 мкв составляет примерно 484 Мгц. Соотношение Джозефсона, вытекающее из некоторых общих предположений о природе

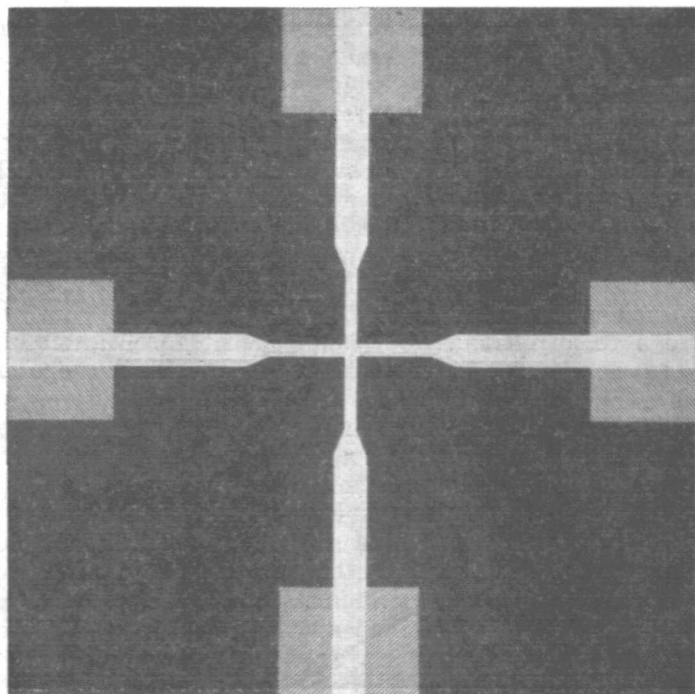


Рис. 1. Фотография джозефсоновского перехода (контакта).

Он представляет собой квадратную стеклянную пластинку размерами примерно 2,5 см, на которую «внахлест» нанесены две тонкие металлические пленки (полоски, декорированные серебром), разделенные изолирующим окисным слоем толщиной около 10^{-7} см. Декорированные золотом прямоугольники служат для подведения контактов к пленкам. Металлы наносятся на стекло путем испарения в вакууме через специальные маски. Окисный слой образуется после напыления нижней полоски при впуске в вакуумную камеру небольшого количества кислорода.

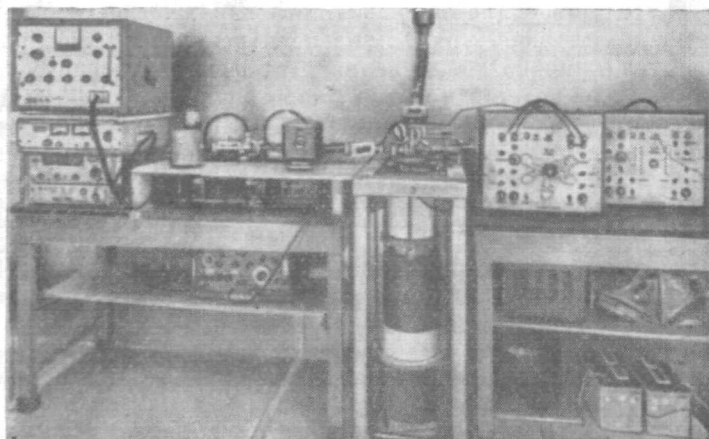


Рис. 2. Экспериментальная аппаратура в физической лаборатории Пенсильванского университета.

Это — последний вариант установки, использованной авторами статьи и Дененстайном для измерения отношения двух фундаментальных постоянных — заряда электрона e и постоянной Планка h — в эксперименте по эффекту Джозефсона. Джозефсоновский переход расположен в дьюаре (в центре снимка), наполненном жидким гелием для охлаждения контакта до температуры на 1—2 градуса выше абсолютного нуля, при которой металлические пленки в контакте становятся сверхпроводящими. Слева — шкафы с электронной аппаратурой для измерения частоты переменного сверхпроводящего тока, идущего через контакт. Аппаратура в шкафах справа используется для измерения напряжения, приложенного к контакту. Между дьюаром и аппаратурой для измерения частоты расположена установка для подвода ультракоротких радиоволн к контакту по прямоугольной трубе, называемой волноводом.

сверхпроводимости, является, по-видимому, точным и не зависит от типа сверхпроводника и таких условий опыта, как температура, напряженность магнитного поля, и многих других.

Благодаря этому опыт по определению отношения e/h оказался весьма простым по сравнению с большинством экспериментов для измерения других фундаментальных постоянных (рис. 2). В этом опыте необходимо

лишь измерить разность потенциалов между двумя сверхпроводниками и частоту переменного сверхпроводящего тока (рис. 3). На практике измерение очень малых напряжений (обычно порядка лишь тысячных долей вольта), подводимых к контакту, с точностью до миллионных долей представляет собой нелегкую, но технически разрешимую задачу. Что же касается частоты, то современная электронная техника позволяет измерять ее с

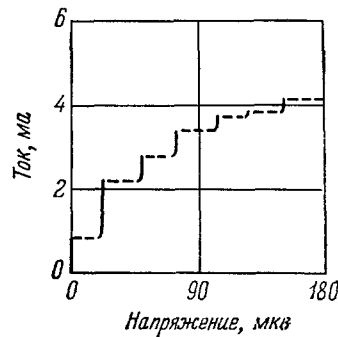
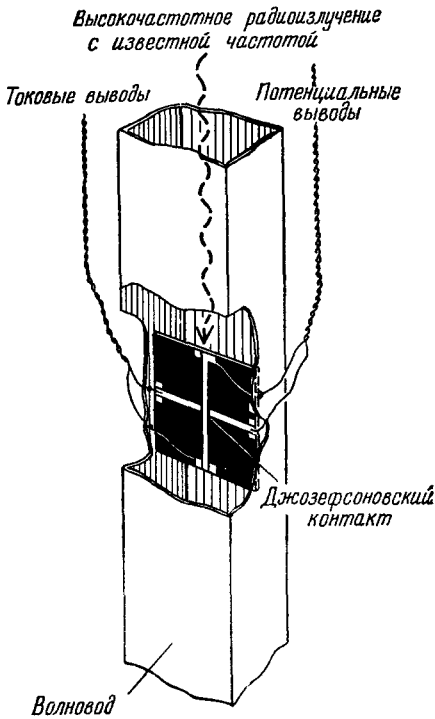


Рис. 3. Значение отношения e/h определяется путем облучения джозефсоновского перехода ультракороткими радиоволнами известной частоты; с этой целью контакт располагается внутри волновода, погруженного в жидкий гелий (схема слева). При облучении возникает ряд ступенек на графике зависимости тока от напряжения, характеризующем контакт (кривая справа). На переход подается «смещение» (через токовые выводы), и его «сажают» на одну из ступенек кривой, регулируя величину тока (посредством батареи и нескольких переменных резисторов); напряжение «смещения» измеряется через потенциальные выводы с помощью потенциометра. Частота ультракоротких радиоволн и напряжение, отвечающее ступеньке, пропорциональны друг другу; коэффициент пропорциональности равен $2e/h$.

точностью до стомиллионных долей и даже еще лучшей. Окончательный результат измерения дал для $2e/h$ значение $483,5976 \pm 0,0012$ Мгц/мкв, где абсолютная погрешность $0,0012$ Мгц/мкв отвечает относительной точности $2,4 \cdot 10^{-6}$. Это значение e/h примерно в 20 раз более точно, чем наилучшее найденное ранее значение этого отношения из эксперимента с рентгеновскими лучами.

ЛУЧШЕЕ ЗНАЧЕНИЕ e/h ПРИВОДИТ К БОЛЕЕ ТОЧНОМУ ЗНАЧЕНИЮ α

Измерение значения отношения e/h с помощью эффекта Джозефсона имело очень большое значение для квантовой электродинамики. Как уже говорилось, это — квантовая теория, описывающая взаимодействие элементарных частиц с электромагнитным полем; постоянная тонкой струк-

туры α является мерой интенсивности такого взаимодействия. Квантовая электродинамика — одна из наиболее важных современных физических теорий, и вместе с тем она — одна из немногих теорий, способных давать очень точные количественные предсказания. Такие предсказания, однако, возможны, только если известно точное значение α , поскольку теоретические выражения, описывающие различные представляющие интерес физические величины (например, разности между определенными

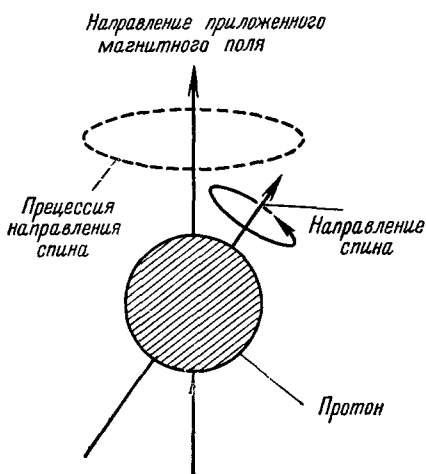


Рис. 4. Направление спина протона прецессирует вокруг направления приложенного магнитного поля примерно так, как описывает круги ось вращающегося волчка. Отношение частоты прецессии спина протона к напряженности приложенного поля называется гиромангнитным отношением для протона γ_p .

возможным косвенным путем, но без использования квантовой электродинамики, получить очень точное значение α . Так что появилась возможность произвести непосредственное сравнение этой теории с экспериментом, приводящее к однозначным результатам.

Для получения значения α из измеренного отношения e/h косвенным путем можно использовать различные математические соотношения. Один из способов заключается в комбинировании e/h с некоторыми очень точно известными постоянными (такими, как R_∞ и c) и со значением гиромангнитного отношения для протона γ_p . Эта последняя величина, значение которой измерено с точностью, сравнимой с точностью e/h , определяет, как быстро направление спина протона прецессирует в магнитном поле (рис. 4). Для измерения значения γ_p используется прецизионный соленоид (магнит со спиральной катушкой) с обмоткой в один слой проволоки и весьма точно определенными размерами (рис. 5). Этот соленоид нужен для создания очень точно известного магнитного поля, напряженность которого вычисляют, зная силу протекающего через обмотку электрического тока и размеры соленоида. Затем с помощью стандартных электронных методов измеряют частоту прецессии протонных спинов в небольшом объеме воды, внесенном внутрь соленоида. Это — так называемый метод слабого поля для определения γ_p ; в нем магнитное поле примерно в 20 раз сильнее магнитного поля Земли. В методе сильного поля для создания магнитного поля используется большой электромагнит; поле

уровнями энергии в атоме водорода), имеют вид математических соотношений, в которые входит величина α . Поэтому для сравнения с экспериментом теоретических предсказаний квантовой электродинамики важно знать точное значение α .

Наиболее точные до недавнего времени значения α были получены из экспериментов с использованием теоретических соотношений, которые сами в существенной степени базировались на квантовой электродинамике. Это затрудняло прямое сравнение теоретических и экспериментальных результатов, поскольку саму теорию можно было проверить, только зная значения α , вычисленные с ее же помощью по данным эксперимента. В результате приходилось ограничиваться проверкой согласованности данных, получаемых в различных экспериментах подобного типа. Ныне, однако, комбинируя значение e/h , полученное в опыте по эффекту Джозефсона, с измеренными значениями некоторых других постоянных, стало

может уже в 10 000 раз превышать земное; его напряженность определяют, измеряя силу, действующую на катушку, по которой протекает ток известной величины (рис. 6).

Другой метод получения значения α , пока менее точный, чем только что описанный, состоит в комбинировании значения e/h с экспериментальным значением фарадея, некоторыми другими очень точно известными постоянными и значением магнитного момента протона в ядерных магнетонах ($\mu_p/\mu_{яд}^*$). Эта величина представляет собой отношение частоты прецессии протонного спина в магнитном поле к частоте орбитального движения протона в том же поле.

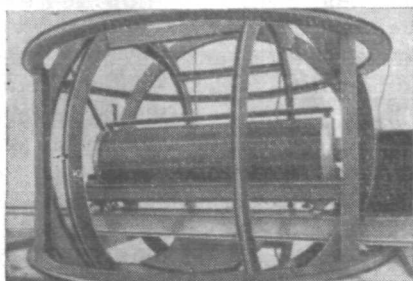


Рис. 5. Этот прибор используется в Национальном бюро стандартов США для определения γ_p методом слабого поля. Размеры прецизионного соленоида (магнита со спиральной катушкой) тщательно измеряются, и напряженность магнитного поля в центре соленоида вычисляется по значению силы тока, проходящего через катушку. Затем с помощью стандартных электронных методов измеряется соответствующая частота прецессии протонных спинов в образце воды, помещенном в центре соленоида. Показанный на снимке соленоид имеет длину примерно 1 м; на него в один слой навито 1000 витков проволоки. Большие катушки, навитые на фанерный каркас, окружающий соленоид, предназначены для исключения влияния земного магнитного поля.

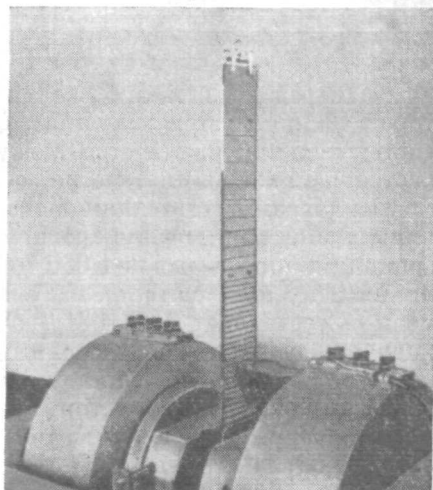


Рис. 6. В методе сильного поля для измерения γ_p магнитное поле создается с помощью большого электромагнита. Напряженность этого поля между полюсами электромагнита определяется путем измерения силы, действующей на прямоугольную токонесущую катушку. На фотографии показана установка для метода сильного поля, использовавшаяся в Национальном бюро стандартов США примерно в 1950 г. Катушка навита проволокой по краям длинной стеклянной пластинки (горизонтальные линии поперек пластинки — прорезы для закрепления обмотки).

Новое значение отношения e/h , измеренное с помощью эффекта Джексона, привело к важному пересмотру численных значений не только α , но и других фундаментальных постоянных. Дело в том, что лишь несколько таких постоянных можно измерить непосредственно и притом с высокой точностью. Значения же остальных приходится вычислять, соответствующим образом комбинируя эти постоянные. Существенно, что такие комбинации имеют примерно ту же точность, что и входящие в них непосредственно измеренные постоянные. Для получения «наилучшего» значения какой-либо постоянной используют своего рода усреднение значений ее, полученных прямым и косвенным путями.

*) Ядерный магнетон — единица измерения магнитных моментов тяжелых частиц и ядер; он равен примерно $5,05 \cdot 10^{-27}$ дж/тл. (Прим. перев.)

К сожалению, вопрос о методе нахождения наилучшего значения α , который не требовал бы привлечения квантовой электродинамики, как и вопрос о наилучших значениях других фундаментальных постоянных более сложен, чем можно было бы полагать на основе уже изложенного. Это усложнение связано с необходимостью перевода значений величин из «абсолютных» в «эталонные» единицы измерений. Ввиду важности этого вопроса мы остановимся на нем несколько подробнее.

ПРОБЛЕМА ЭТАЛОНОВ

Измерение какой-либо величины заключается в сравнении ее с некоторой единицей этой величины. Основная принятая сейчас во всем мире система единиц называется Международной системой (СИ). Она основывается на килограмме, метре, секунде и ампере.

Килограмм есть единица массы; международный прототип этой единицы хранится в Международном бюро мер и весов во Франции. Метр — единица длины — равен 1 650 763,73 длинам волн (в вакууме) оранжевой линии испускания атомов изотопа криптона-86. Секунда — единица времени — составляет 9 192 631 770 периодов излучения, отвечающего переходу между двумя определенными уровнями энергии в атомах изотопа цезия-133. Наконец, единица силы тока — ампер — определяется как такой постоянный ток, который, протекая по двум определенным образом расположенным друг относительно друга гипотетическим проводникам, создает определенную силу, действующую между этими проводниками.

Эталоны массы, длины и времени для работы в повседневных практических условиях можно сконструировать так, чтобы их без труда можно было бы сопоставлять с прототипами и чтобы они имели точность, сравнимую с точностью изготовления прототипов или же с той, что заложена в самом их определении. Например, можно изготовить набор масс из сплава платины с иридием и кварцевые эталоны длины, которые с точностью до миллиардных долей совпадут с прототипом килограмма и с определенным метром; можно также создать такие кварцевые и «атомные» часы, которые с точностью около $5 \cdot 10^{-13}$ совпадут с определением секунды.

Для ампера, однако, столь удовлетворительного положения не существует. Поскольку ток есть движение зарядов, то создать эталон тока, стабильно сохраняющий свою величину, нелегко. Вместо этого приходится порознь создавать эталоны электрического напряжения и сопротивления, а эталон тока определять на основе закона Ома (ток равен напряжению, деленному на сопротивление). Поэтому национальные лаборатории стандартов во всем мире каждая эталонируют свою собственную систему электрических единиц с помощью групп очень стабильных батарей, называемых стандартными элементами, и групп прецизионных проволочных резисторов (рис. 7, 8). Среднее напряжение таких элементов, например, в Национальном бюро стандартов определяет эталонный вольт США, а среднее сопротивление резисторов — эталонный ом США. Их отношение и дает эталонный ампер США.

С помощью эталонного ампера силу электрического тока обычно можно измерять с относительной точностью примерно 10^{-7} . Однако до сих пор никто еще не предложил такого эксперимента, который позволил бы измерить данный ток в абсолютных единицах с точностью по крайней мере 10^{-8} , с какой определен международный, или абсолютный, ампер. Современные токовые весы (которые измеряют силу, действующую между двумя токонесущими катушками) в наилучшем случае могут давать результаты с точностью $(0,5 - 1) \cdot 10^{-5}$. Это означает, что погрешности при переводе значений тока из различных эталонных в абсолютный ампер могут

достигать 0,5—1 стотысячной доли. Поскольку многие эксперименты по определению фундаментальных постоянных требуют точных измерений тока или напряжения (например, определения фарадея F , гироманнитного отношения γ_p и отношения e/h с помощью эффекта Джозефсона), становится существенной довольно большая неопределенность в значениях переводных множителей.

В результате точное определение переводных множителей приобретает не меньшее значение, чем точное измерение самих фундаментальных

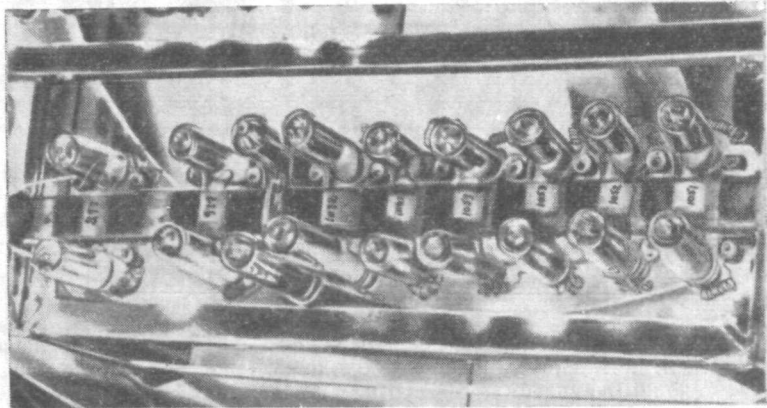


Рис. 7. Эталон вольта, находящийся в Национальном бюро стандартов США. Он представляет собой батарею стандартных электрохимических элементов. Элементы помещены в масляную баню с мешалкой и регулятором температуры для уменьшения колебаний выходного напряжения, вызываемых флуктуациями температуры. Изменение температуры на 1°C вызывает изменение напряжения примерно на $55 \cdot 10^{-6}$ часть его значения.

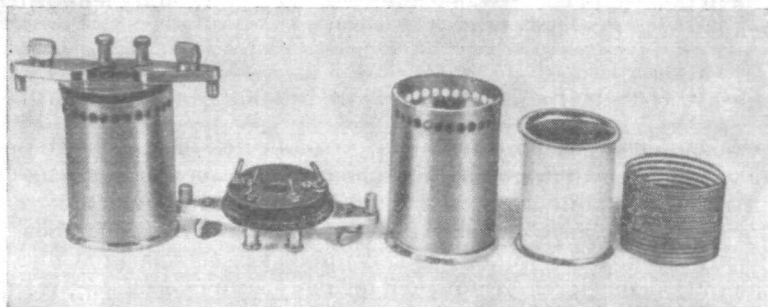


Рис. 8. Эталон ома, хранящийся в Национальном бюро стандартов США. Он состоит из группы одноомных резисторов. Полностью собранный резистор показан слева, а его детали — справа. Основным элементом резистора является проволочная спираль (на снимке — крайняя справа). Эталонный ампер США определяется с помощью закона Ома (ток равен напряжению, деленному на сопротивление).

постоянных, и для этой цели ставятся специальные исследования. Именно для подобных определений и используются показанные на рис. 9 упоминавшиеся выше токовые весы. Токи и напряжения до сих пор почти во всех случаях измеряются с помощью эталонов и переводятся в абсолютные единицы с использованием измеренных значений переводных множителей. (Отметим тот удивительный факт, что, комбинируя значения γ_p ,

определенные методами слабого и сильного поля, удалось получить несколько более точное косвенное значение переводного множителя.

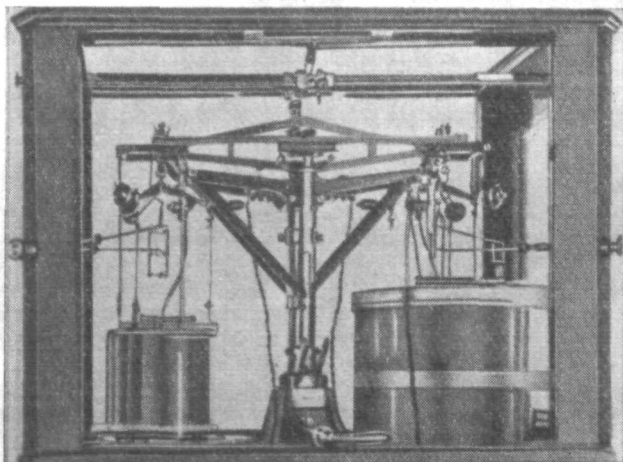


Рис. 9. Токовые весы, установленные в Национальной физической лаборатории в Теддингтоне, Англия. Эти весы используются для установления соотношения между британским эталонным ампером и абсолютным ампером. С их помощью измеряется сила, действующая между парой концентрических катушек с известными размерами при протекании через них тока, выраженного в единицах эталонного ампера. В показанных на снимке токовых весах используются две пары концентрических катушек, что удваивает величину действующей силы. Неподвижная внешняя катушка одной из пар слева снята, и видна подвижная внутренняя катушка. Большие внешние катушки имеют диаметр примерно 32 см.

Окончательное наилучшее значение этого множителя затем было найдено усреднением косвенного его значения и значения, полученного прямым определением с помощью токовых весов.)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Из сказанного должно быть ясно, что для получения сведений о значении какой-либо величины можно использовать ряд различных экспериментов. Иными словами, значение какой-либо постоянной можно определить многими различными способами (как прямыми, так и косвенными). В общем случае каждый такой способ приводит к значению постоянной, несколько отличающемуся от полученного другими способами. Наилучшим средством обработать всю подобную информацию является математический метод, называемый методом наименьших квадратов. Он представляет собой самосогласованную процедуру вычисления «наилучших» компромиссных значений постоянных по результатам проведенных экспериментов. Для данной совокупности результатов этот метод автоматически учитывает все использованные способы получения значений каждой из рассчитываемых постоянных. Затем он выдает единственное окончательное значение каждой постоянной, автоматически «взвешивая» значения постоянной, определенные в разных экспериментах, в соответствии с надежностью или погрешностью этих экспериментов. Погрешность каждого экспериментального метода определяется исходя из ошибок отдельных измерений, в которых получается совокупность исходных данных.

Определение значений постоянных методом наименьших квадратов было начато Бёрджем в Калифорнийском университете в Беркли в конце 20-х годов нашего века и проводилось им до середины 40-х годов. Аналогичные исследования были затем продолжены рядом ученых, среди которых можно назвать Дюмонда и Коэна из Калифорнийского технологического института и компании «Норт америкэн рокуэлл» соответственно, а также Бёрдена, Уоттса и Томсена из университета Джона Гопкинса в Балтиморе. Последний критический анализ и установление наилучших значений фундаментальных постоянных методом наименьших квадратов были осуществлены авторами настоящей статьи в 1969 г. Поскольку метод наименьших квадратов является сегодня одной из основ определения точных значений фундаментальных постоянных, мы остановимся на этом вопросе более подробно.

Для этой цели прежде всего имеющиеся экспериментальные результаты, как правило, подразделяют на две группы. В одну из групп входят так называемые вспомогательные постоянные — величины, которые определены со столь малыми ошибками, что их значения можно считать точно известными. К числу таких величин относятся, например постоянная Ридберга R_∞ , известная с точностью примерно 10^{-8} , и скорость света c , неопределенность в значении которой составляет $3 \cdot 10^{-7}$. Во вторую группу входят менее точные исходные данные, например отношение e/h , известное с относительной погрешностью $2,4 \cdot 10^{-6}$, и величина γ_p , известная с относительной точностью примерно $4 \cdot 10^{-6}$.

Затем выбирается такая совокупность постоянных, с помощью которой можно выразить все постоянные, входящие во вторую группу; для этого могут также потребоваться и вспомогательные постоянные. Сначала взаимно согласовываются значения постоянных в такой совокупности, поэтому полученные их значения называются согласованными. Для согласования, выполненного авторами этой статьи в 1969 г., были отобраны следующие величины: постоянная тонкой структуры α , единичный заряд e , переводной множитель K из эталонного в абсолютный ампер и число Авогадро N . Эти четыре величины и некоторые вспомогательные величины вошли в систему уравнений, записанных для всех неточных исходных данных, причем каждое из уравнений содержало, как того требует метод наименьших квадратов, только одну неточную величину (табл. I). Следует напомнить, что указанные в этой таблице неточные

Таблица I

Значения сравнительно неточных исходных данных

Величина	Обозначение	Год опубликования результата измерения	Метод измерения	Относительная погрешность, 10^{-6}
Отношение заряда электрона к постоянной Планка	e/h	1969 г.	Эффект Джозефсона	2,4
Переводной множитель из эталонного ампера США в абсолютный ампер	K	1958 г.	Токовые весы	7,7
		1966 г.	» »	6
		1968 г.	Электродинамометр Пелла *)	9,7

*) Электродинамометр Пелла аналогичен по принципу действия токовым весам, только измеряет не силу, действующую между двумя катушками с током, а закручивающий момент.

Продолжение табл. I

Величина	Обозначение	Год опубликования результата измерения	Метод измерения	Относительная погрешность, 10^{-6}
Фарадей	F	1960 г.	Серебряно-перхлоратный вольтметр *)	6,8
Гиромангнитное отношение для протона	γ_p	1962 г.	Метод слабого поля	5,8
		1968 г.	» » »	3,7
		1966 г.	Метод сильного поля	7,4
Магнитный момент протона в ядерных магнетонах	$\mu_p/\mu_{яд}$	1951 г.	Омегатрон	11
		1961 г.	Циклотрон	20
		1963 г.	Обращенный циклотрон	26
		1965 г.	Масс-спектрометр	6,2
		1967 г.	Омегатрон	19

В таблице приведено 13 сравнительно неточных исходных данных для согласования методом наименьших квадратов с целью получить наилучшие значения соответствующих фундаментальных постоянных без привлечения квантовой электродинамики. Различные методы измерения $\mu_p/\mu_{яд}$ имеют то общее, что во всех них для изменения движения протонов (и других ионов) в постоянном магнитном поле используются высокочастотные электромагнитные поля.

*) В серебряно-перхлоратном вольтметре электролит представляет собой серебро, растворенное в перхлорной кислоте.

исходные данные получены без привлечения в какой-либо мере квантовой электродинамики. Поэтому, как уже говорилось, окончательное значение α (найденное прежде всего из отношения e/h , измеренного с помощью эффекта Джозефсона) можно использовать для прямого сопоставления квантовой электродинамики с экспериментом.

После того как составлены все необходимые уравнения и в них подставлены численные значения вспомогательных величин и неточные данные, довольно несложно (с помощью вычислительной машины) решить все эти уравнения и получить согласованные методом наименьших квадратов значения четырех постоянных α , e , K и N . В действительности же такая процедура дает еще оптимальные значения всех других постоянных, поскольку значение любой из них, не входящей в согласованный набор, легко вычислить, комбинируя значения согласованных постоянных. Так, значение массы электрона можно получить из соотношения $m_e = 4\pi R_\infty e^2/\alpha^3 c^2$, фарадей — по уравнению $F = Ne$, а постоянную Планка — с помощью равенства $h = 2\pi e^2/\alpha c$.

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ДРУГИЕ ПРОБЛЕМЫ

Наиболее трудной задачей при согласовании значений методом наименьших квадратов является критический анализ исходных данных с тем, чтобы решить, какую погрешность следует приписать результату каждого измерения. Этот этап имеет исключительную важность, поскольку «вес», с которым результат каждого эксперимента участвует в согласовании, обратно пропорционален квадрату его погрешности. Иначе говоря, если погрешность измерения какой-либо величины в одном опыте вдвое меньше, чем в другом, то результат первого опыта будет «весить» вчетверо больше, чем результат второго.

Оценка погрешностей вырастает в проблему, в частности, по следующей причине. В большинстве экспериментов стремятся набрать как можно больше данных с тем, чтобы свести до пренебрежимо малой величины случайную, или статистическую, ошибку измерения. Тогда окончательная погрешность, приписываемая результату измерения, определяется только исходя из оценки систематических ошибок. Эти ошибки связаны с эффектами, в отношении которых мало что известно; поэтому соответствующие оценки несколько субъективны и обычно получаются по существу интуитивно. Причиной систематической ошибки может оказаться, например, изменение температуры помещения или неверное значение известной поправки, которую следует вводить в результаты данного эксперимента.

Не менее существенной стороной проблемы погрешностей является и то обстоятельство, что разные экспериментаторы подходят к оценке систематических ошибок с совершенно различных позиций. Некоторые из них из осторожности приписывают своим данным завышенную погрешность в надежде на то, что последующие измерения не отвергнут их результаты как неверные. Другие, напротив, недооценивают источники систематических ошибок в своих опытах, исходя, видимо, из неосознанного (а может быть, и умышленного) желания провести «наилучший эксперимент». Такие факторы, сколь далекими от научной объективности они ни казались бы, все же неизбежны, поскольку в конечном итоге науку делают люди со всеми их слабостями. Однако вследствие этого приводимые различными исследователями погрешности их измерений совсем не просто сравнивать друг с другом.

Чтобы обойти эти затруднения, вдумчивый ученый, занявшийся согласованием значений постоянных, должен войти в непосредственный контакт с экспериментаторами и выпытать у них максимум возможного, чтобы получить четкое представление обо всех этапах опыта. Только после этого ученый может с уверенностью поручиться за окончательные итоги согласования. Из опубликованных статей лишь в редких случаях удается получить достаточную информацию для заключения о том, что эксперимент проведен достаточно надежно.

Другая сложная проблема при согласовании данных заключается в том, что делать с «выскакивающими» данными, т. е. такими, которым вроде бы приписана правильная погрешность, а они отличаются друг от друга сильнее, чем «должно было бы быть». Примером таких расходящихся данных при нашем согласовании 1969 г. можно назвать пять результатов различных измерений магнитного момента протона $\mu_p/\mu_{\text{н.д}}$ (см. табл. I). Два из этих результатов высоки и согласуются друг с другом; два других также близки друг к другу, но низки. Разность между взвешенными средними для каждой пары значений, однако, столь велика, что вероятность встретить ее равна всего лишь 1/400. (Пятый результат лежит точно посередине между остальными, но ошибка его определения столь значительна, что он не противоречит ни первой, ни второй паре значений.)

Мы заново рассмотрели, как были получены эти данные, с целью получить какое-нибудь объяснение их расхождению. Мы пришли к выводу, что одно из высоких значений достаточно обоснованно с точки зрения проведения эксперимента, так что его, вероятно, не следовало бы отбрасывать; вместе с тем в отношении получения второго из высоких значений информация была явно недостаточна, и мы решили не включать его в процедуру согласования. Два низких значения получили дополнительную поддержку «со стороны» косвенного расчета этой величины по непосредственно измеренным значениям F и γ_p . После этого мы сняли два высоких значения в пользу оставшихся трех.

Однако согласно «закону Мерфи», если существует хоть какая-нибудь вероятность того, что сделанный выбор ошибочен, то он и окажется в конце концов ошибочным. По полученным совсем недавно сведениям и по результатам новейших измерений более правильными, по-видимому, оказываются именно высокие, а не низкие значения $\mu_p/\mu_{яд}$. Для окончательного решения этого вопроса нужны дальнейшие эксперименты. (По счастью, пересмотр этих значений не «задевает» значения α .)

Значение α , полученное из отношения e/h , измеренного в эффекте Джозефсона непосредственно (т. е. до согласования с квантовой электродинамикой), позволило разрешить аналогичную трудность, связанную с оценкой погрешности прежних значений α , а также и вопрос о точности количественных предсказаний квантовой электродинамики. Последнее согласованное значение $1/\alpha$ принято равным $137,03608$ с погрешностью $\pm 0,00026$ (с относительной ошибкой $1,9 \cdot 10^{-6}$). (Вместо α чаще используется обратная ей величина $1/\alpha$, значение которой выражается более удобным для обозрения числом.) До экспериментов по эффекту Джозефсона принято значение $1/\alpha$ составляло $137,0388 \pm 0,0006$ (относительная погрешность $4,4 \cdot 10^{-6}$). Эти два значения явно не согласуются друг с другом: разность между ними превышает суммарную погрешность их определения более чем в четыре раза. Вероятность того, что такое различие может иметь место, меньше $1/15\ 000$.

Принятое ранее значение α было получено путем подстановки экспериментально найденной разности определенных уровней энергии в атоме дейтерия (тонкая структура) в теоретическое выражение для тонкого расщепления уровней. (Электронная оболочка в атоме дейтерия такая же, как в атоме водорода, но ядро дейтерия дополнительно к водородному протону содержит еще нейтрон.) Вычисление α таким путем возможно потому, что теоретическое выражение содержит только точно известные вспомогательные постоянные и величину α . Это «дейтериевое» значение α было включено Козном и Дюмондом в набор исходных данных для согласования, выполненного ими в 1963 г., и с тех пор играло важную роль в определении принятых значений других фундаментальных постоянных, таких, как e и m_e . Новое значение α положило также конец положению, которое в течение нескольких лет считалось главной нерешенной проблемой квантовой электродинамики.

Проблема эта заключалась в большом расхождении между теоретически вычисленным и экспериментально измеренным значениями разности двух уровней энергии в атоме водорода, отвечающих так называемому сверхтонкому расщеплению. Это расщепление представляет собой разницу в энергиях водородного атома в случаях, когда спины электрона и протона направлены в одну и в противоположные стороны. Эту разницу энергий можно измерить с феноменальной точностью около 10^{-12} с помощью лазера на водороде (рис. 10). В теоретическое уравнение для сверхтонкого расщепления в атоме водорода, полученное из квантовой электродинамики, входят только вспомогательные постоянные и величина α , однако точность ее значения ограничивается величиной порядка 10^{-6} вследствие трудности расчета некоторых членов в уравнении.

Один из таких членов называется поправкой на поляризуемость протона, δ_N . Эта поправка связана с тем, что протон в атоме водорода нельзя рассматривать просто как заряженный вращающийся шарик. Протон имеет некую внутреннюю структуру и может возбуждаться в различные энергетические состояния. Существование таких состояний и влияет на величину сверхтонкого расщепления. Теоретические расчеты показывали, что поправка δ_N по относительной величине чрезвычайно мала — максимум $(1 - 2) \cdot 10^{-6}$.

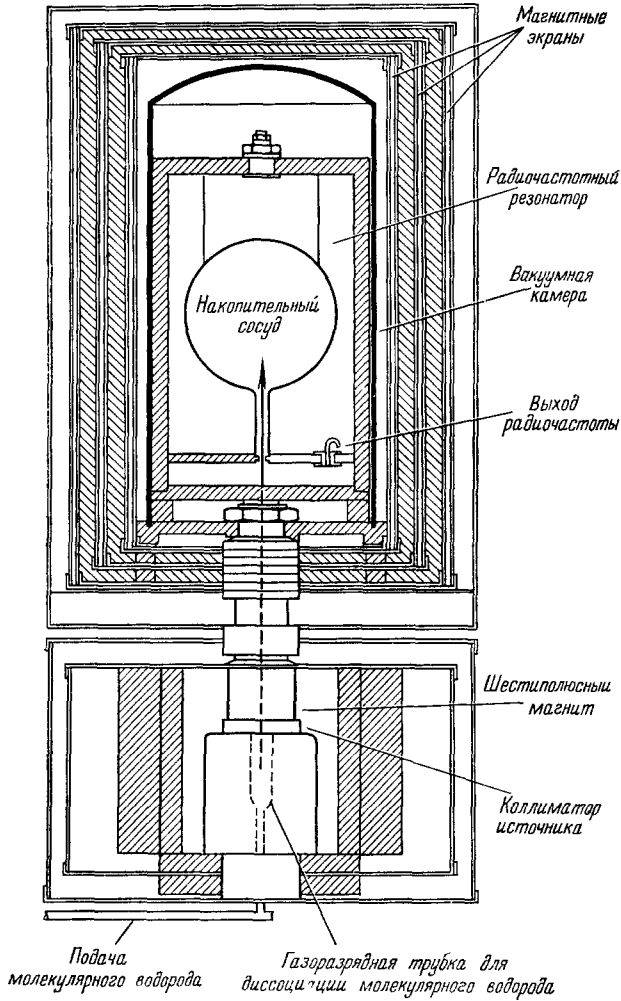


Рис. 10. Схема водородного мазера, использованного для измерения сверхтонкого расщепления низшего уровня энергии в атоме водорода. Водородные атомы получают в радиочастотном газоразрядном источнике (внизу) и затем проходят через коллиматор и шестиполосный магнит, с помощью которых отбираются те из атомов, что находятся в нужных энергетических состояниях. Атомы затем влетают в облицованный тефлоном накопительный сосуд из кварца, находящийся внутри радиочастотного резонатора (вверху). Они пребывают в этом сосуде примерно секунду; за это время часть атомов меняет свое энергетическое состояние и излучает частоту, отвечающую переходу с верхнего на нижний уровень сверхтонкой структуры. Если атомы излучают достаточную мощность, превышающую мощность потерь энергии в настроенном на данную частоту резонаторе, то в мазере возникают незатухающие электромагнитные колебания. Измеряя частоту этих колебаний, можно определить величину сверхтонкого расщепления. Поскольку эта величина весьма чувствительна к магнитному полю, в котором находятся атомы, накопительный сосуд и резонатор экранированы от влияния земного магнитного поля. Для того чтобы резонатор был все время настроен на частоту сверхтонкого расщепления, требуется также поддерживать неизменной его температуру.

Малая теоретическая величина δ_N резко расходилась с той, к которой приводило «дейтериевое» значение α . Если использовать это значение α для вычисления сверхтонкого расщепления в водороде, сравнить результат с экспериментальным значением, полученным на водородном лазере, и приписать различие между обоими результатами только наличию поправки на поляризуемость протона, то оказывается, что $\delta_N = (43 \pm 9) \cdot 10^{-6}$. Это означает, что вероятность правильности теоретического значения δ_N (т. е. $(1 - 2) \cdot 10^{-6}$) составляет всего лишь 1/20 000. Налицо явное расхождение, бросающее вызов квантовой электродинамике.

Совсем иная картина получается, если использовать значение α , полученное из отношения e/h , измеренного в эффекте Джозефсона. В этом случае поправка δ_N оказывается равной $(2,5 - 4) \cdot 10^{-6}$, что уже вполне согласуется с теоретическим предсказанием; это и сняло описанную проблему. (К сказанному можно добавить, что недавние измерения сверхтонкого расщепления в водороде весьма веско подтвердили «джозефсоновское» значение α . Причина ошибки в «дейтериевом» значении α до сих пор не установлена.)

Описанный случай служит отличным примером того, как результат определения фундаментальной постоянной с помощью эксперимента в одной области физики может найти важные применения в других ее областях. Так, недавно было показано, что эксперимент, проведенный с твердым телом, охлажденным до низких температур, может дать сведения о возбужденных (т. е. с более высокой энергией) состояниях протона. До той поры считалось, что этот вопрос находится только в компетенции физики высоких энергий, изучающей свойства и взаимодействия элементарных частиц. Трудно представить себе две более далекие друг от друга области физики! (До открытия эффекта Джозефсона даже сама мысль о том, что значение фундаментальной постоянной можно измерять на образце, содержащем 10^{22} взаимодействующих атомов, могла бы считаться полнейшим абсурдом.) Приведенные примеры хорошо иллюстрируют глубокое единство физической науки и то важное значение, которое имеют прецизионные измерения фундаментальных постоянных для выявления несогласованностей в физическом описании природы.

ОКОНЧАТЕЛЬНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ

Теперь мы обратимся к вопросу о получении окончательной наилучшей совокупности фундаментальных постоянных (табл. II) из всех имеющихся данных, а не только из экспериментальных результатов, не требующих привлечения квантовой электродинамики для их анализа. В принципе такую совокупность можно легко найти, комбинируя наиболее надежные результаты экспериментов по тонкой и сверхтонкой структуре с данными, полученными на неквантовоэлектродинамических эффектах, и вновь проводя их согласование методом наименьших квадратов. Именно так и поступили авторы статьи в своей работе 1969 г., но на этом пути встретили некоторые трудности.

Трудности были вызваны тем, что большинство «квантовоэлектродинамических» данных, представлявших собой несколько значений постоянной тонкой структуры, полученных из соответствующих теоретических уравнений по результатам измерений, либо имело большую погрешность и не согласовывалось друг с другом, либо же имело сомнительную надежность с точки зрения как теории, так и эксперимента. После тщательного и детального анализа этих данных мы пришли к выводу, что одно из значений α достаточно надежно для того, чтобы его можно было включить в окончательное согласование, а именно — значение, теоретически вычисленное из измеренного на опыте сверхтонкого расщепления в водороде.

Таблица II

Наилучшие современные значения фундаментальных постоянных

Название постоянной	Обозначение	Единица измерения	Значение	Относительная погрешность, 10 ⁻⁶
Скорость света в пустоте	<i>c</i>	10 ⁸ м/сек	2,9979250 (10)	0,33
Заряд электрона	<i>e</i>	10 ⁻¹⁹ κ	1,6021917 (70)	4,4
Постоянная Планка	<i>h</i>	10 ⁻³⁴ дж·сек	6,626196 (50)	7,6
Масса электрона	<i>m_e</i>	10 ⁻³¹ кг	9,109558 (54)	6,0
Обратная величина постоянной тонкой структуры	1/α		137,03602 (21)	1,5
Постоянная Ридберга	<i>R_∞</i>	10 ⁷ м ⁻¹	1,09737312 (11)	0,10

В таблице вместо постоянной тонкой структуры приведена обратная ей величина 1/α, представляющая более удобное для обозначения число. В третьем столбце приведены единицы измерения каждой из величин (1/α является безразмерным числом и поэтому не имеет единиц измерения). Числа в скобках в четвертом столбце указывают неопределенность в последних двух цифрах значения постоянной.

Значения некоторых важнейших постоянных, полученные в результате такого согласования, приведены в табл. III, там же приведены принятые ранее значения согласованного набора постоянных, полученные

Таблица III

Новые значения пяти важных физических постоянных

Название постоянной	Обозначение	Единица измерения	Согласованное значение 1969 г.	Относительная погрешность, 10 ⁻⁶	Согласованное значение 1963 г.	Относительная погрешность, 10 ⁻⁶	Относительное изменение, 10 ⁻⁶
Обратная величина постоянной тонкой структуры	1/α		137,03602 (21)	1,5	137,0338 (6)	4,4	-20
Заряд электрона	<i>e</i>	10 ⁻¹⁹ κ	1,6021917 (70)	4,4	1,60210 (2)	12	+57
Постоянная Планка	<i>h</i>	10 ⁻³⁴ дж·сек	6,626196 (50)	7,6	6,62559 (16)	24	+91
Масса электрона	<i>m_e</i>	10 ⁻³¹ кг	9,109558 (54)	6	9,10908 (13)	14	+52
Число Авогадро	<i>N</i>	10 ²⁶ κ.моль ⁻¹	6,022169 (40)	6,6	6,02252 (9)	15	-58

Новые значения постоянных получены авторами статьи в 1969 г. с помощью согласования, основанного на вновь определенном значении отношения *e/h*. Для сравнения в таблице приведены прежние согласованные значения тех же постоянных, определенные в 1963 г. Коэном и Дюмондом. В последнем столбце приведены разности между обоими согласованными значениями; видно, что эти разности в 3—5 раз превышают погрешности, приписанные значениям 1963 г.

Коэном и Дюмондом в 1963 г. Видно, что новые значения изменились по сравнению со старыми на величину, в несколько раз превышающую погрешность, приписанную старым результатам; видно также, что

погрешности в согласованном наборе 1969 г. значительно меньше, чем в согласованных значениях 1963 г.

Эти отличия в основном связаны с новыми значениями α , определенными из отношения e/h , измеренного с помощью эффекта Джозефсона и из сверхтонкого расщепления в водороде. Новые значения α больше по величине и имеют меньшую неопределенность, чем прежнее значение α , найденное из тонкого расщепления в дейтерии и включенное Коэном и Дюмондом в их согласованный набор 1963 г. Эти изменения хорошо иллюстрируют ту тесную связь, которая существует между значениями

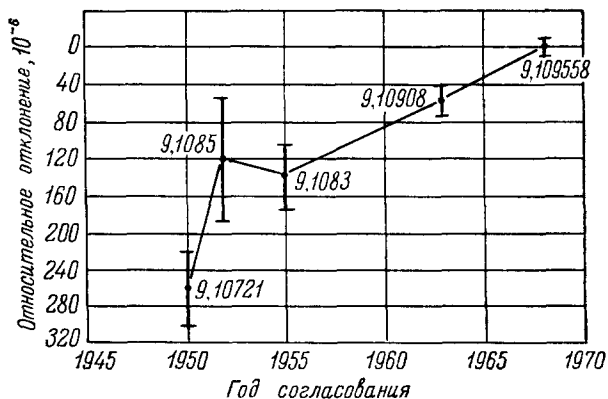


Рис. 11. Изменение принятого значения массы электрона m_e в результате согласования значений постоянных методом наименьших квадратов в различные годы. На графике приведены относительные отклонения этих значений от согласованного значения, полученного авторами статьи в 1969 г. (крайнего справа). Около каждой точки также указаны сами согласованные значения m_e (в единицах 10^{-31} кг). Вертикальными черточками показаны погрешности, приписываемые этим значениям. Существенные изменения m_e от одного согласования к другому иллюстрируют ту тесную связь, которая существует между значениями постоянных; большое изменение в значении одной из них в общем вызывает заметное изменение в значениях других постоянных.

фундаментальных постоянных: существенное изменение значения одной из них влечет за собой в общем заметные изменения значений остальных величин.

Интересно также наблюдать, как меняется наше знание фундаментальных постоянных по мере развития физики. В качестве характерного примера мы приводим на рис. 11 изменение значения массы электрона, принятого после ряда согласований, выполненных в период после 1950 г. Этот график наглядно показывает, что ни одну совокупность фундаментальных постоянных нельзя принимать за истину в последней инстанции. Мы можем надеяться, что согласованный набор 1969 г. ближе к истине, чем предшествующие. Однако, будучи реалистами, мы не можем отвергнуть возможность того, что в будущем могут потребоваться дальнейшие существенные изменения численных значений постоянных. Здесь вполне уместно привести слова Гете: «Не ошибается лишь тот, кто ни к чему не стремится». Всегда следует помнить, что стремление ко все более точным измерениям составляет один из краеугольных камней физики. Разработка методов измерения высокой точности, особенно для определения значений фундаментальных постоянных, вызывает прогресс всей физики в целом.

Чего же следует ожидать в будущем? Можно ли непрерывно совершенствовать измерения, чтобы с их помощью удалось получить все более точные значения постоянных? Будут ли в дальнейшем совершенствоваться и теории, извлекая пользу из уточненных значений постоянных, так что можно будет производить все более строгие сопоставления теории и опыта? Все эти вопросы получают без сомнения положительный ответ. Можно считать общим правилом, что когда существующие методы достигают своего предела возможностей, открываются новые явления и получают новый толчок эксперимент и физическая теория. Нет оснований думать, что когда-нибудь этот процесс может завершиться.

Так, сейчас в ряде лабораторий ведутся эксперименты, в которых физики пытаются использовать уникальные свойства сверхпроводников для определения других постоянных, помимо отношения e/h . Новые эксперименты с использованием рентгеновских лучей обещают уточнить значения нескольких постоянных. Если в этих опытах удастся достигнуть успеха, то физики получат в свое распоряжение два новых источника информации о значениях постоянных. Будущее согласованных постоянных можно считать «обеспеченным», пока в этой области трудится достаточное число людей, по-настоящему влюбленных в «романтику следующего десятичного знака».

ЛИТЕРАТУРА

1. D. N. Langenberg, D. J. Scalapino, B. N. Taylor, *Scientific American* 214 (5), 30 (1966).
 2. B. N. Taylor, W. H. Parker, D. N. Langenberg, *The Fundamental Constants and Quantum Electrodynamics*, Academic Press, N. Y., 1969.
 3. W. H. Parker, D. N. Langenberg, A. Denenstein, B. N. Taylor, *Phys. Rev.* 177 (2), 639 (1969).
-