

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

538.3+530.145

ИЗМЕРЕНИЕ $2e/h$ С ПОМОЩЬЮ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭФФЕКТА ДЖОЗЕФСОНА И ПОПРАВКИ К КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ *)*У. Паркер, Б. Тэйлор, Д. Лангенберг*

В этом письме мы сообщаем о прецизионном измерении постоянной $2e/h$ с помощью нестационарного эффекта Джозефсона (здесь e — заряд электрона, h — постоянная Планка). В комбинации с другими измеренными ранее фундаментальными константами это приводит к новой величине постоянной тонкой структуры α , которая отличается на 0,0021% от общепринятой величины. Такое изменение постоянной α решает одну из основных проблем современной квантовой электродинамики, ликвидируя расхождение между теоретическим и экспериментальным значениями сверхтонкого расщепления в основном состоянии атома водорода. Мы обсудим также влияние этого измерения на величины других фундаментальных физических констант, принятых в настоящее время.

Наши эксперименты основаны на явлении, впервые предсказанном Джозефсоном в 1962 г.¹ Джозефсон показал теоретически, что между двумя слегка раздвинутыми сверхпроводниками, к которым приложена разность потенциалов V , возникает переменный сверхпроводящий ток с частотой

$$\nu = \frac{2e}{h} V. \quad (1)$$

Это уравнение, известное как соотношение Джозефсона между напряжением и частотой, может быть выведено из совершенно общих предположений относительно сверхпроводимости^{1, 2}. Поэтому оно считается точным. В прошлой статье³ мы сообщали, что экспериментальная проверка подтвердила правильность (1) с точностью до 0,006%. Соотношение Джозефсона не зависит от экспериментальных условий, и указанная неопределенность возникает только из-за ошибок эксперимента. В той же статье было показано, что главная экспериментальная трудность при использовании нестационарного эффекта Джозефсона состояла в калибровке системы, измеряющей напряжение. С тех пор мы освоили полностью самокалибрующуюся систему и выполнили новую серию экспериментов с улучшением точности на порядок.

*) W. H. Parker, B. N. Taylor, D. N. Langenberg, Measurement of $2e/h$ Using the ac Josephson Effect and its Implications for Quantum Electrodynamics, Phys. Rev. Lett. 18, 287 (1967). Перевод В. К. Игнатовича.

В оригинале — аннотация: «С помощью нестационарного эффекта Джозефсона была измерена константа $2e/h$. Она оказалась равной $483, 5912 \pm 0,0030$ МГц/мкВ. Обсуждается значение этого результата для квантовой электродинамики и влияние его на величины других фундаментальных физических констант».

В этих новых экспериментах измерения были проведены на двух типах джозефсоновских образцов: выпаренных тонкопленочных и точечных туннельных образцах³. Метод измерения был основан на микроволновой индукции токовых ступенек постоянного напряжения^{1, 2}. Это явление было впервые замечено Шапиро⁴. Такие ступеньки появляются на вольт-амперной характеристике джозефсоновских переходов, подвергающихся микроволновому облучению частотой ν . Высота ступеньки равна разности полного и стационарного джозефсоновского токов. Физически этот эффект возникает из-за микроволнового переменного напряжения, которое индуцируется на концах перехода и модулирует переменный ток Джозефсона. Ступеньки тока постоянного напряжения соответствуют просто гармоникам нулевой частоты. Соотношение между напряжением V_n , при котором возникают ступеньки, и частотой падающего облучения описывается уравнением: $2eV_n = nh\nu$, где n — номер ступеньки. Таким образом, величина $2e/h$ может быть найдена просто путем измерения частоты падающего микроволнового облучения и абсолютного напряжения, при котором возникают ступеньки. Никаких других измерений, кроме тех, которые необходимы для калибровки установки, производить не нужно. Это означает, что опыт дает замечательный метод прямого измерения фундаментальной константы.

Микроволновое облучение создавалось генератором с полосой рентгеновских частот (8—14,4 ГГц) и со стабильностью $10^{-6}\%$ за час. Генератор был привязан по фазе к колебаниям кварцевого кристалла. Частота облучения измерялась с помощью электронного счетчика с точностью $10^{-6}\%$. Точка начала отсчета счетчика устанавливалась с точностью, лучшей, чем $10^{-6}\%$, путем регулярных фазовых сравнений с частотным стандартом Соединенных Штатов. Стандарт передается радиостанцией WWVB из форта Коллинз в штате Колорадо. Таким образом, частотные измерения давали ничтожную ошибку $10^{-6}\%$ к измеренной величине $2e/h$. Общая ошибка эксперимента определялась системой, измеряющей напряжение, т. е. потенциометром и батареями стандартного напряжения.

В качестве сравнительного напряжения употреблялось среднее напряжение шести стандартных батарей, прокалиброванных Национальным Бюро стандартов (НБС) Соединенных Штатов. Батареи были помещены в воздушную ванну с постоянной температурой. Их напряжение было известно с точностью до $10^{-4}\%$ указанного НБС. При этом неопределенность оценивалась исходя из возможных изменений э. д. с. стандартных батарей из-за транспортировки их из НБС в нашу лабораторию. Чтобы получить $2e/h$ в абсолютных единицах, необходимо стандартные вольты переводить в абсолютные вольты. Современная самая надежная величина коэффициента перевода дает для одного НБС-вольта значение $1,000012 \pm 0,000004$ абсолютного вольта, где неопределенность $4 \cdot 10^{-6}$ соответствует доверительному интервалу с коэффициентом достоверности 50%.

Потенциометром служил PVP из исследовательской лаборатории им. Джули (Julie Research Laboratory). Этот нановольтный прибор является самокалибрующимся в том смысле, что он имеет приспособление, позволяющее оператору измерять все факторы, влияющие на измерение напряжения, и вносить все необходимые поправки. Пользуясь методами, разработанными в этой исследовательской лаборатории⁷ и в НБС⁸, можно было прокалибровать весь диапазон одного милливольты со среднеквадратичной неопределенностью от 3 до $4 \cdot 10^{-6}$. (Диапазон одного милливольты был нормально используемым диапазоном, так как напряжение ступенек индуцированного тока редко превышало 1 Мкэ.) Нуль-детектор, употреблявшийся вместе с потенциометром, состоял из фотоумножителя и гальванометра и имел разрешающую способность 1 нв.

При измерении таких малых напряжений приходится потратить много сил для исключения или учета побочных напряжений, возникающих в измерительных цепях. В наших экспериментах влияние напряжений, которые не меняют знака при изменении направления тока (например, термо-э. д. с.), было устранено путем измерения токовых ступенек постоянного напряжения обеих полярностей. Напряжения, которые меняют знак с током (например, возникающие на омическом сопротивлении), пренебрежимо малы, так как оказалось, что при стационарном эффекте Джозефсона напряжение в измерительной цепи было постоянным во всем диапазоне изменения тока. Побочные напряжения, возникающие из-за возможного детектирования, также оказались незначительными, так как величина $2e/h$ не зависела от мощности микроволны. Мощность микроволны менялась в диапазоне 10 дБ для каждого данного образца и в диапазоне 20 дБ от образца к образцу.

Результаты измерений на нескольких туннельных тонкопленочных и точечных переходах приведены в табл. I. Стандартная ошибка нескольких измерений, полученных в течение одного цикла на одном переходе,

Таблица I

Сводка результатов

Переходы типа Sn—SnO—X—выпаренные тонкопленочные переходы, остальные—точечные. Строки в таблице расположены в хронологическом порядке, и ошибка в калибровке потенциометра уменьшается по мере улучшения методики эксперимента

Переходы	nV/V без поправки, но со стандартным отклонением, МГц/мкВ	Поправки на потенциометр со среднеквадратичной ошибкой, 10^{-6}	Поправки на температуру камеры, 10^{-6}	Исправленное значение со среднеквадратичной ошибкой, МГц/мкВ
Sn—SnO—Sn	$483,610 \pm 0,002$	-30 ± 10	—	$483,596 \pm 0,005$
Sn—Sn	$483,6126 \pm 0,0011$	-29 ± 7	—	$483,5986 \pm 0,0032$
Ta—Ta	$483,6164 \pm 0,0009$	-39 ± 4	$-0,5$	$483,5973 \pm 0,0021$
Sn—SnO—Sn	$483,6156 \pm 0,0008$	-39 ± 4	$-0,5$	$483,5965 \pm 0,0021$
Sn—SnO—Sn	$483,6158 \pm 0,0007$	-42 ± 4	$-0,3$	$483,5955 \pm 0,0021$
Sn—SnO—Pb	$483,6174 \pm 0,0013$	-43 ± 4	$-1,0$	$483,5962 \pm 0,0023$
Nb—Ta*	$483,6195 \pm 0,0007$	-42 ± 4	$-1,0$	$483,5987 \pm 0,0021$
Ta—Nb ₃ —Sn*	$483,6185 \pm 0,0011$	-44 ± 4	$-0,5$	$483,5975 \pm 0,0022$
Ta—Ta*	$483,6185 \pm 0,0016$	-46 ± 4	$-0,4$	$483,5961 \pm 0,0025$
Sn—SnO—Sn	$483,6194 \pm 0,0005$	-45 ± 4	$-0,0$	$483,5976 \pm 0,0020$
Взвешенное среднее всех данных, МГц/мкВ НБС				$483,5971 \pm 0,0022$
Поправка на переход от НБС-вольт к абсолютным вольтам				$-0,0058 \pm 0,0019$
Окончательная величина $2e/h$, МГц/мкВ абс.				$483,5912 \pm 0,0030$

составляет обычно $2 \cdot 10^{-6}$ от абсолютной величины. Ошибка зависит от разрешающей способности нуль-детектора (1 нВ), стабильности и линейности фотометра и стабильности термо-э. д. с. в измерительных цепях (обычно 100 нВ). В пределах этого стандартного отклонения ($2 \cdot 10^{-6}$) измеренная величина $2e/h$ не зависела от всего разнообразия экспериментальных параметров, включая номер ступеньки (вплоть до $n = 40$), магнитного поля (от 0 до 10 Гс), частоты микроволн (от 8 до 12 ГГц) и мощности микроволнового облучения. Все измерения были проведены в диапазоне температур 1,2 и 1,6 °К.

У большинства токовых ступенек, по которым были получены результаты, напряжение оставалось постоянным с точностью до 1 нВ (разрешающая способность нуль-детектора) во всем диапазоне тока ступеньки.

Однако у трех точечных переходов (отмеченных звездочкой в табл. I) напряжение увеличивалось на 3—10 нВ, по мере того как рос ток в диапазоне ступеньки. Было замечено, что в точечных переходах с высоким сопротивлением (несколько десятых вместо нескольких сотых ома), где изменение напряжения было порядка 200 нВ, напряжение в середине токовой ступеньки давало величину $2e/h$, равную средней величине всех значений, полученных на ступеньках с постоянным напряжением (идеальных ступеньках). По мере того как сопротивление уменьшалось, вариация напряжения также уменьшалась, но средняя точка продолжала давать величину $2e/h$, такую же, как и идеальные ступеньки. Считая, что такое поведение свойственно и низкоомным переходам с вариацией напряжения 5—10 нВ, мы предполагаем, что средняя точка соответствует тому напряжению, при котором ступенька возникала бы, если бы она была идеальной. Таким образом, все эксперименты с неидеальными ступеньками были проведены в средней точке.

Усреднение всех данных табл. I с весами, обратно пропорциональными квадрату среднеквадратичной ошибки, приводит к значению

$$\frac{2e}{h} = 483,5912 \pm 0,0030 \text{ Мгц/мкВ},$$

или, в более привычных единицах,

$$\begin{aligned} \frac{h}{e} &= (4,135725 \pm 0,000026) \cdot 10^{-15} \text{ Дж} \cdot \text{сек/к} = \\ &= (1,379526 \pm 0,000008) \cdot 10^{-17} \text{ эрг} \cdot \text{сек/CGSE ед. заряда}. \end{aligned}$$

Указанная неопределенность $6 \cdot 10^{-6}$ (коэффициент достоверности 70%) является среднеквадратичной суммой всех возможных источников ошибок, либо систематических, либо случайных, и включает неопределенность в калибровке потенциометра, стандартную ошибку многих измерений, неопределенность в абсолютной величине стандартного вольты НБС и неопределенность, возникшую при транспортировке вольты НБС в нашу лабораторию. Следует заметить, что стандартное отклонение восьми наиболее аккуратных измерений, производившихся с периодом в несколько месяцев, составляет только $2 \cdot 10^{-6}$, что указывает на высокую точность измерений. В пределах точности $2 \cdot 10^{-6}$ измеренная величина $2e/h$ не зависит от материала и типа переходов.

Постоянную тонкой структуры можно вычислить с помощью уравнения, в которое входят только непосредственно измеряемые величины:

$$(\alpha^{-1})_1 = \left(\frac{c}{4R_\infty \gamma_p} \frac{\mu_p}{\mu_0} \cdot \frac{2e}{h} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Здесь c — скорость света, R_∞ — постоянная Ридберга для бесконечной массы, γ_p — гиромагнитное отношение протона, μ_p/μ_0 — магнитный момент протона в магнетонах Бора. Взяв лучшие значения для этих величин ¹⁰ $c = 2,997925(1 \pm 0,3 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^8 \text{ м/сек}$, $R_\infty = 1,0973731 \times (1 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$, $\gamma_p = 2,675192(1 \pm 3 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^8 \text{ рад/Т} \cdot \text{сек}$, $\mu_p/\mu_0 = 1,5210325(1 \pm 0,5 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^{-3}$, $2e/h = 4,835912(1 \pm 5 \cdot 10^{-6}) \times 10^{14} \text{ гц/в}$, получаем ¹¹ с помощью уравнения (2) $(\alpha^{-1})_1 = 137,0359 \pm \pm 0,0004$. Эта величина на $(21 \pm 5) \cdot 10^{-4}\%$ меньше, чем принятая в настоящее время. Константа α , известная до сих пор, получена из тонкого расщепления в дейтерии, которое было измерено Трибвассером, Дайхоффом и Лэмбом ^{12, 13}: $(\alpha^{-1}) = 137,0388 \pm 0,0006$. Новая величина α_1 , полученная здесь, полностью устраняет расхождение между теоретическим и экс-

периментальным значением сверхтонкого расщепления в основном состоянии атома водорода. Это расщепление было измерено с великолепной точностью $2 \cdot 10^{-11}$ Крэмптоном, Клеппером и Рэмзи ¹⁴. Квантовоэлектродинамическое выражение для расщепления, которое включает все теоретические эффекты, за исключением динамической поляризуемости протона, можно считать точным до нескольких десятитысячных долей процента ¹⁸. Если это выражение вычислить, используя α_0 , то получится

$$\frac{v_{\text{эксп}} - v_{\text{теор}}}{v_{\text{эксп}}} = (43 \pm 12) \cdot 10^{-6}$$

(указанная ошибка включает неопределенность $2 \cdot 10^{-6}$ в оценке факторов и $5 \cdot 10^{-6}$ в (α^{-1})). Если теоретическое выражение вычисляется с помощью $(\alpha^{-1})_1$, то получаем

$$\frac{v_{\text{эксп}} - v_{\text{теор}}}{v_{\text{эксп}}} = (0 \pm 8) \cdot 10^{-6}.$$

Хотя в настоящее время невозможно вычислить протонную поляризуемость точно, лучшие оценки указывают, что она не могла бы увеличить $v_{\text{теор}}$ более чем на 10^{-5} ¹⁵. Таким образом, если протонная поляризуемость не окажется много больше, чем это предполагается в настоящее время, то $(\alpha^{-1})_0$ свидетельствует о нарушении квантовой электродинамики, в то время как значение $(\alpha^{-1})_1$ согласуется и с квантовой электродинамикой, и с малой протонной поляризуемостью.

Изменение в значении α , которое следует из наших опытов, важно еще и потому, что в 1963 г. Коэн и Дюмонд при обработке фундаментальных физических констант использовали $(\alpha^{-1})_0$ в качестве основной. Из-за той важной роли, которую играла α в этой обработке, любое изменение α должно привести к значительным изменениям других фундаментальных

Таблица II

Сравнение некоторых фундаментальных физических констант, вычисленных с помощью $(\alpha^{-1})_0$ и $(\alpha^{-1})_1$ (N —число Авогадро, m —масса покоя электрона). Числа в скобках, умноженные на 10^{-6} , означают одну стандартную ошибку

Константа	Единицы	Значение 1963 г.	Значение, вытекающее из данного эксперимента	Изменение, 10^{-6}
α^{-1}	—	137,0388 (4)	137,0359 (3)	—21
e	10^{-19} к	1,60210 (13)	1,60220 (13)	+63
CGSE	10^{-10}	4,80298 (13)	4,80328 (13)	
h	10^{-34} дж·сек	6,62559 (24)	6,62628 (24)	+105
me	10^{-31} кг	9,10908 (14)	9,10965 (14)	+63
N	10^{26} (кг·моль) ⁻¹	6,02252 (15)	6,02214 (15)	—63

постоянных. В табл. II мы приводим величины некоторых наиболее важных констант, которые получаются, если в обработке 1963 г. в качестве основной величины взять $(\alpha^{-1})_1$.

Мы хотели бы также обратить внимание на то, что с помощью этой новой экспериментальной величины $2e/h$ можно получить новое, более надежное значение коэффициента перевода для длин волн рентгеновских лучей. Основываясь на новом определении Бирденом рентгеновской единицы X ¹⁸ и пользуясь последними экспериментальными данными Шпийкермана и Бирдена ¹⁷ по определению коэффициента перевода вольта

в длины волн $V\lambda_s$, мы находим, что

$$\Lambda = (1.002067 \pm 0.000023) \text{ \AA}/kX \text{ и.}$$

Хотя мы полагаем, что результаты, проведенные здесь, в высокой степени надежны, тем не менее работа не прекращается. Мы хотим быть уверены, что в измерениях больше нет никаких неизвестных систематических ошибок. Для этого, во-первых, проводятся эксперименты описанного типа при высоких частотах (70 Гц) и, во-вторых, эксперименты по измерению частоты излучения, испускаемого джозефсоновскими туннельными образцами под действием постоянного приложенного напряжения. Уже получены предварительные данные. Они находятся в полном согласии с результатами, приведенными здесь.

Нам хочется поблагодарить Лебе Джули за плодотворные дискуссии, касающиеся потенциометра, А. Мак-Ниша за калибровку стандартных элементов, д-ра Рихарда Козна и д-ра Джесси М. Дюмонд за их интерес и поддержку, проф. С. Блудмана и проф. Скальпано за плодотворные дискуссии и А. Денстайна за бесценную техническую помощь.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. B. D. Josephson, Phys. Lett. **1**, 251 (1962); Adv. Phys. **14**, 419 (1965).
2. P. W. Anderson, Rev. Mod. Phys. **38**, 298 (1966); Progress in Low Energy Phys., ed. by C. J. Gorter, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1964, vol. 4.
3. D. N. Langenberg, W. H. Parker, B. N. Taylor, Phys. Rev. **150**, 186 (1966).
4. S. Shapiro, Phys. Rev. Lett. **11**, 80 (1963); S. Shapiro, A. R. Janus, S. Holly, Rev. Mod. Phys. **36**, 223 (1964).
5. F. K. Harris, Electronics (будет опубликовано) и частное сообщение.
6. L. Julie, An Unusually Accurate Universal Potentiometer for the Range from 1 Nanovolt to 10 Volts (не опубликовано).
7. L. Julie, A Ratiometric Method for Precise Calibration of Volt of Boxes (будет опубликовано).
8. R. F. Dziuba, T. M. Souder, A Method for Calibrating Volt Boxes with Analysis of Volt-Box Self-Heating Characteristics, IEEE International Convention Record, March 1966, Pt. 10.
9. Типичный цикл может состоять из 40 отдельных измерений на примерно восьми различных ступенках.
10. E. R. Cohen, J. W. M. Du Mond, Rev. Mod. Phys. **37**, 537 (1965).
11. Всюду в тексте этого письма (пока не оговорено особо) все неопределенности соответствуют одному стандартному отклонению. Неопределенности в γ_p и $2e/h$ не включают неопределенностей в коэффициенте пересчета от «установленных» электрических единиц НБС к абсолютным единицам, так как коэффициент пересчета для каждой из этих величин один и тот же и в уравнении (2) сокращается. Таким образом, мы можем полностью обойти проблему перехода от НБС-стандартных единиц к абсолютным единицам.
12. S. Triebwasser, E. S. Dayhoff, W. E. Lamb, Jr., Phys. Rev. **89**, 98 (1953).
13. Недавние измерения сверхтонкого расщепления мюония: W. E. Celland et al., Phys. Rev. Lett. **13**, 202 (1964); M. A. Ruderman, Phys. Rev. Lett. **17**, 794 (1966), так же как и измерения R. T. Robiscoe и B. L. Cosen's'ом ламбовского сдвига в водороде: Phys. Rev. Lett. **17**, 69 (1966), указывают на то, что значение $(\alpha^{-1})_0$ может быть ошибочно (см. также ¹⁶).
14. S. B. Crampton, D. Kleppner, N. Ramsey, Phys. Rev. Lett. **11**, 338 (1963).
15. Обзор современного состояния теории и оригинальные ссылки см. S. D. Drell and J. D. Sullivan, Phys. Rev. **154**, 1477 (1967).
16. J. M. W. Du Mond, Zs. Naturforsch. **21a**, 70 (1966).
17. J. J. Spijkerman, J. A. Bearden, Phys. Rev. **134**, A871 (1964).
18. J. A. Bearden et al., X-Ray Wave-lengths, Report No. NYO-10586 (Clearing House for Federal Scientific and Technical Information, Springfield, Virginia, 1964)

538.3+530.145

ГРАНИЦЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ТОЧНОСТЬ МИРОВЫХ ПОСТОЯННЫХ

Новое измерение постоянной тонкой структуры — большой успех экспериментаторов. Описанные опыты очень красивы по идее и великолепны по выполнению. Эти опыты преподали физикам поучительный и, в каком-то смысле, жестокий урок.

Сначала, однако, несколько замечаний о методе. Эффект Джозефсона, использованный в этих опытах, описан в статье У. Паркера, Б. Тэйлора, Д. Лангенберга «Измерение $2e/h$ с помощью нестационарного эффекта Джозефсона и поправки к квантовой электродинамике», перевод которой опубликован в этом выпуске УФН (стр. 353) (см. девятый выпуск «Фейнмановских лекций по физике», гл. 19). Этот эффект основан на замечательном факте, что состояние сверхпроводника описывается волновой функцией (комплексной, как это и должно быть для квантового состояния с током). Волновая функция задана на макроскопических расстояниях, так что разные области образца жестко коррелированы друг с другом. Когда два сверхпроводника разделены друг от друга узким промежутком и находятся под разными потенциалами V_1 и V_2 , их состояние можно описывать подобно тому, как в квантовой механике описывается система с двумя уровнями $2eV_1$ и $2eV_2$ ($2e$ — так как в сверхпроводимости участвуют пары электронов). Поскольку разность потенциалов поддерживается внешним источником, в такой двухуровневой системе будут происходить переходы с частотой, определяемой условием Бора $\hbar\omega = 2eV$, где V — разность потенциалов. Если «освещать» место перехода между двумя сверхпроводниками микроволновым излучением и измерять величину тока при заданной разности потенциалов, задача сведется к измерению постоянной слагающей в системе с фазовой модуляцией. Если излучение, которым мы облучаем образец, имеет частоту ω_1 , то через промежуток будет протекать переменный ток. Фаза этого тока будет складываться из двух частей:

$$\frac{2e}{\hbar} \int V dt = \frac{2eV}{\hbar} t, \quad (1)$$

связанной с переходами между уровнями и

$$\frac{2ev}{\hbar} \int \cos \omega_1 t dt = \frac{2ev}{\hbar\omega_1} \sin \omega_1 t, \quad (2)$$

связанной с излучением (v — амплитуда).

Ток будет пропорционален

$$\cos \frac{2e}{\hbar} (Vt + \frac{v}{\omega_1} \sin \omega_1 t).$$

Прибор регистрирует среднее значение от этого тока (нулевую компоненту Фурье). Это значение отлично от нуля при условии (n — целое)

$$n\omega_1 = \frac{2eV}{\hbar}$$

и равно

$$\frac{1}{\omega_1} J_n \left(\frac{2ev}{\hbar\omega_1} \right).$$

Если изменять V , то при выполнении написанного условия ток скачком возрастет. Мы, так сказать, добавили еще один квант в сверхпроводник. Это и есть ступеньки, наблюдаемые на опыте.

Новое значение постоянной тонкой структуры $1/\alpha = 137,0359$ ликвидировало расхождение между теорией и опытом в значении лэмбовского расщепления. Теоретическое значение этого расщепления при новом α равно (в Мгц)

$$1057,57 \pm 0,08;$$

в эксперименте имеем

$$1057,77 \pm 0,10.$$

Недавние опыты Робиску дали для лэмбовского смещения несколько большие значения. Однако по последним данным обработка результатов Робиску не вполне достоверна.

Наиболее интересным является положение со сверхтонким расщеплением основного состояния водорода. Водород может иметь спин, равный 0 или 1. Переходы между

этими двумя уровнями порождают линию 21 см, которая хорошо известна радиоастрономам. Триплетное состояние очень устойчиво, в вакууме его время жизни составляет около 30 лет. Поэтому водородная линия 21 см имеет рекордно малую естественную ширину. В условиях лаборатории ширина линии определяется столкновениями атомов водорода со стенками сосуда. Это обуславливает высокую точность измерения частоты этой линии. Она измерена с о д и н а д ц а т ь ю (!) верными знаками:

$$\nu = 1420\,405\,751,800 \pm 0,028 \text{ гц.}$$

Подчеркнутые шесть знаков—это то значение, которое может вычислить современная теория (в этих знаках есть полное согласие). Вызовом теоретикам являются еще пять знаков, о которых никто не может сказать, согласуются ли они или противоречат современной теории. Чтобы рассчитать эффект точно, надо знать поле «внутри» протона, надо уметь точно рассчитывать эффект отдачи.

Урок, о котором мы говорили вначале, состоит в том, что экспериментаторы по требованию теоретиков искали возможные границы применимости квантовой электродинамики (к.э.-д.). Много раз в последние годы появлялись сообщения о том, что расхождение между опытом и к.э.-д. наконец-то обнаружено; но каждый раз после уточнений (или опыта, или теорий) все становилось на свое место *). Встало на место и значение сверхтонкого расщепления в водороде. Но опыт здесь оказался намного точнее теории, и экспериментатор вправе теперь спросить, как же надо поставить опыт для проверки к.э.-д., чтобы он был эффективным? Что делать с пятью лишними знаками в водородной линии, которые содержат, в принципе, информацию о взаимодействиях на расстояниях, в миллион раз меньших тех, на которых к.э.-д. считается сейчас проверенной ($\sim 0,1 \text{ ф}$). Есть ли вообще сейчас возможность правильно поставить сам вопрос о проверке к.э.-д? Я этого не знаю.

*) Хороший обзор таких проверок был сделан в докладе Йенни (D. R. Jenpie) на Международной конференции по электромагнитным процессам в Дубне (февраль 1967).

И. А. Смородинский