



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2000–46
ОМВТ, ОАФ

В.Н.Ларин, В.В.Ежела

К СТОЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ КВАНТА ДЕЙСТВИЯ

Протвино 2000

Аннотация

Ларин В.Н., Ежела В.В. К столетию открытия кванта действия: Препринт ИФВЭ 2000–46. – Протвино, 2000. – 9 с., 4 рис., библиогр.: 35.

По случаю юбилея открытия кванта действия представлен обзор становления и стандартизации его современного численного выражения — постоянной Планка h . Отмечаются характерные и показательные особенности процедур согласования величины h , получаемой из разных экспериментов и разными методами.

Abstract

Larin V.N., Ezhela V.V. On the Quantum of Action Centenary : IHEP Preprint 2000–46. – Protvino, 2000. – p. 9, figs. 4, refs.: 35.

On the occasion of the centenary of the quantum of action discovery the review of the measurements and standardization of the Planck constant h is prepared. Some characteristic features of the procedures to make different estimates of h adjustment are outlined.

Работа выполнена при поддержке РФФИ — проект 98-07-90381 (БАФИЗ-98).

Квантовая эра нашей цивилизации началась в декабре 1900 года с открытием дискретной природы излучения в классических работах Макса Планка [1]. Для объяснения формы спектра излучения черного тела Макс Планк предположил, что энергия излучается порциями (квантами) ε , пропорциональными частоте излучения ν :

$$\varepsilon = h\nu.$$

Коэффициент пропорциональности h или “квант действия” он прозорливо отнес к ряду “мировых констант”. Позднее фундаментальная роль универсального кванта действия как величины, определяющей масштабы квантовых явлений и границы применимости *классической* и *квантовой* физики, подтвердилась в квантовой теории фотоэффекта, квантовой теории атома и квантовой механике. Точность знания численного значения этой константы (и других) в значительной мере определяет степень адекватности наших представлений о явлениях в микромире.

В этой заметке, написанной по случаю столетнего юбилея кванта действия, мы проследим в общих чертах эволюцию нашего знания численного выражения этой важнейшей физической постоянной за прошедшие сто лет.

Численное значение постоянной Планка определяется косвенно из соотношений, связывающих ее с другими константами (e, m_e, α, \dots), большинство из которых также не поддается прямому измерению. Таким образом, точность значения постоянной Планка зависит как от точности измерений, так и от корректности методов согласования значений связанных с ней констант.

Графики, представленные на рис. 1, характеризуют процесс уточнения численной величины h по мере развития экспериментальной техники, методов измерений и анализа получаемых экспериментальных данных. Показана “полоса неопределенности” в одно стандартное отклонение опубликованных средних значений постоянной Планка за прошедшее столетие (1900–2000 гг.), а также эволюция стандартных отклонений этих значений за тот же период.

Из графиков рис. 1 видно, что за столетие среднее значение h увеличилось приблизительно на 1%, а точность возросла на *четыре* порядка (в среднем один порядок за 25 лет!).

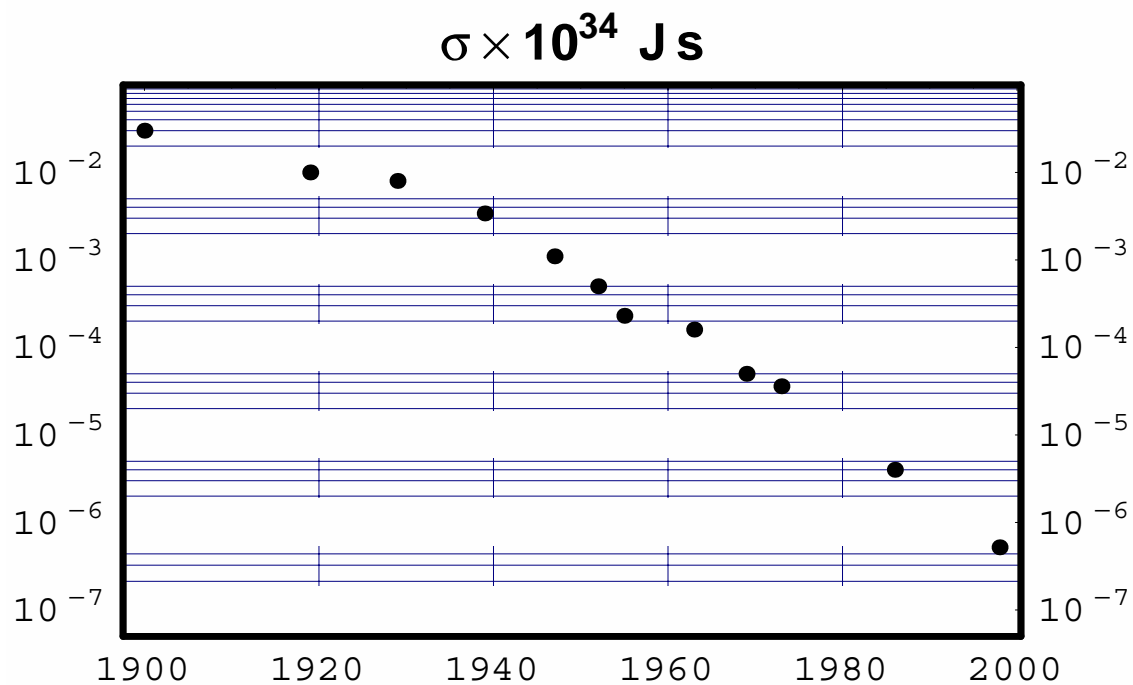
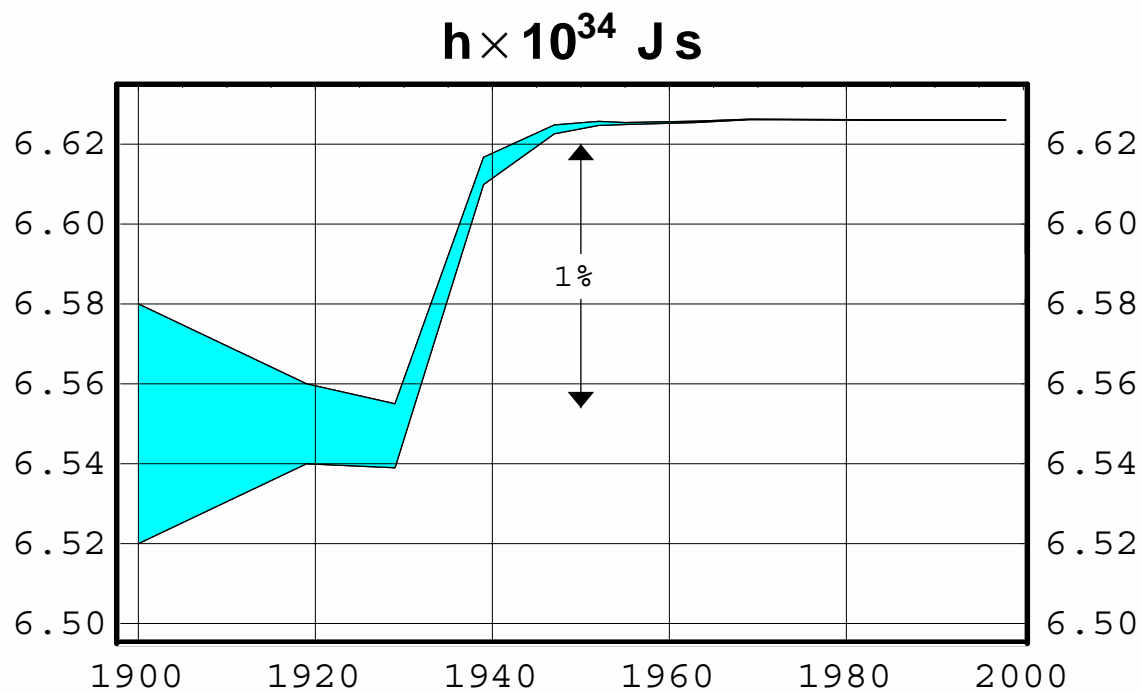


Рис. 1. Значения и стандартные отклонения (σ) постоянной Планка (1900–1998 гг.).

Первым численное значение h нашел М.Планк [1]. Опираясь на данные измерений характеристик излучения черного тела [2,3], он получил значение¹

$$h = 6.55 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (1)$$

Автор не привел оценку вероятной погрешности полученного значения и, так как корректно восстановить ее нам не удалось, мы для соблюдения единообразия представления данных оценили ее формально. Для этого найденным Планком на основе данных [2,3] величинам ($A = k^4/h^3 = 1.1682 \cdot 10^{15}$, $B = h/k = 4.866 \cdot 10^{-11}$), комбинация которых и давала значение h ($A \cdot B^4 = h$), были приписаны относительные ошибки $\simeq 0.1\%$. При этом условии абсолютная ошибка h составила $\simeq 0.03 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ или примерно 0.5% от ее значения. Теперь (1) можно представить в виде²

$$h = 6.55(3) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (1')$$

Более десяти последующих лет, пока роль постоянной Планка не была определена, ее значение не уточнялось. Однако неудачные попытки включить h в рамки классической физики, с одной стороны, и успехи квантовых теорий А.Эйнштейна [4] и Н.Бора [5] в объяснении накопленных экспериментальных фактов, с другой стороны, радикально изменили ситуацию — знание “точной” величины этой константы стало необходимым.

Одним из первых, кто взялся за уточнение численной величины постоянной Планка, был Р.Милликен. На основе исследования фотоэффекта он получил значение $h = 6.56 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ (“с ошибкой не более 0.5% ”) [6]. Спустя год, опираясь на теорию атома водорода Н.Бора [5] и собственные измерения заряда электрона методом капель, он получил значение [7] $h = (6.547 \pm 0.011) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Эти результаты находились в полном согласии со значением, полученным Планком, но, как выяснилось много позже (к 1939 г.), содержали систематическую ошибку. Она была связана с использованием неточного значения вязкости воздуха [8] при определении величины элементарного заряда методом масляных капель. (Впрочем, Милликен [7] отметил его хорошее согласие с собственным результатом определения вязкости, полученным в 1913 г.) Как следствие, величина h была занижена примерно на 1% .

Первый систематический анализ экспериментальных данных по определению “наиболее вероятного значения постоянной Планка” был выполнен в 1919 г. Берджем [9]. Анализ включал в себя семь способов получения значения h с оценкой вероятной ошибки каждого. Затем методом наименьших квадратов определялись взвешенное среднее постоянной Планка и его вероятная ошибка. Способы вычисления этой постоянной базировались на соотношениях, связывающих h с другими известными постоянными (Стефана-Больцмана, Вина, Ридберга), и экспериментально проверяемых соотношениях, описывающих квантовые эффекты (фотоэлектрический, фотоионизационный, ограничение сверху на частоту спектра X-лучей и др.).

Однако результат, полученный в этой пионерской с точки зрения статистической обработки данных работе, $h = (6.5543 \pm 0.0025) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$, имел заниженную ошибку. На это указал в 1920 г. Ладенбург [10], и позднее Бердж скорректировал приведенное в 1919 г. значение [11]:

$$h = 6.55(1) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (2)$$

¹Здесь и далее используются единицы СИ.

²В скобках указывается вероятная ошибка в последних значащих цифрах: $6.55(3) \equiv 6.55 \pm 0.03$.

В этой же работе, используя шесть из семи способов получения значения постоянной Планка³ и новые экспериментальные данные, он представил ее новое значение:

$$h = 6.547(8) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (3)$$

Здесь автор впервые обратил внимание на то, что значение h , вычисляемое на основе нескольких экспериментов, зависит от комбинации степеней этой постоянной и e (элементарного заряда). Он также указал на рассогласованность значений отношения e/m , найденных спектроскопическим способом и по отклонению в электрических и магнитных полях.

В следующее десятилетие это обусловило повышенное внимание к вопросу согласованности значений таких констант, как h , e и m_e , и выявлению источников относительно больших погрешностей. Так, были пересмотрены результаты опытов по измерению вязкости воздуха Харрингтона [8] и выявлены неучтенные им систематические погрешности порядка 0.4% [12]. Это потребовало корректировки значения e , полученного Милликемом [6,7], на 0.6% [13], что, в свою очередь, влекло за собой пересмотр значений большинства постоянных, в том числе и h .

Итоги подвел в 1939 г. Ф. Даннингтон в работе [14], где он приводит четыре значения постоянной Планка, полученных при анализе различных экспериментальных данных и их комбинаций, но не выделяет “рекомендованного” значения. Здесь мы приводим значение, полученное Даннингтоном в двух комбинациях для максимального числа экспериментальных данных:

$$h = 6.6133(34) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (4)$$

Сравнение значений h (3) и (4) показывает “скачок” величины постоянной Планка примерно на 1% — самый большой скачок за всю историю уточнения этой константы. Каждый следующий скачок оказывался приблизительно на порядок меньше предыдущего (см. рис. 1–4).

Таким образом, уже к началу 40-х годов значение постоянной Планка (4), найденное из анализа экспериментальных данных и согласования значений фундаментальных постоянных методом наименьших квадратов, существенно приблизилось к современному значению. Однако, по мнению Э. Козна [13], только в 50-е годы, когда было накоплено достаточно экспериментальных данных, возникла реальная база для такого анализа. Развивая эту мысль, он пишет: “Только располагая системой чрезвычайно переопределенных и, по-видимому, согласующихся данных, исследователи смогли обоснованно применять метод наименьших квадратов и получать на основании его результатов статистически значимые заключения”.

Тем не менее работа по согласованию фундаментальных постоянных и совершенствованию методов анализа данных активно велась и в 40-е годы (это подтверждает, например, цикл работ Берджа [15]–[19]). Приведем “рекомендованный” результат, полученный в 1947 г. Дюмоном и Коэном [20], скорректированный ими же в 1949 г. [21]:

$$h = 6.6237(11) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (5)$$

Следующее согласование атомных постоянных, выполненное теми же авторами в 1952 г. [22], дало результат

$$h = 6.6252(5) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (6)$$

³Была исключена “теория предельных рациональных единиц” Льюиса и Адама (Lewis and Adam’s theory of ultimate rational units. – Phys.Rev. **2**, 3, 92, 1914).

Сравнение значений (5), (6) со значением 1939 г. (4) дает скачок величины постоянной Планка порядка 0.2% (рис. 2).

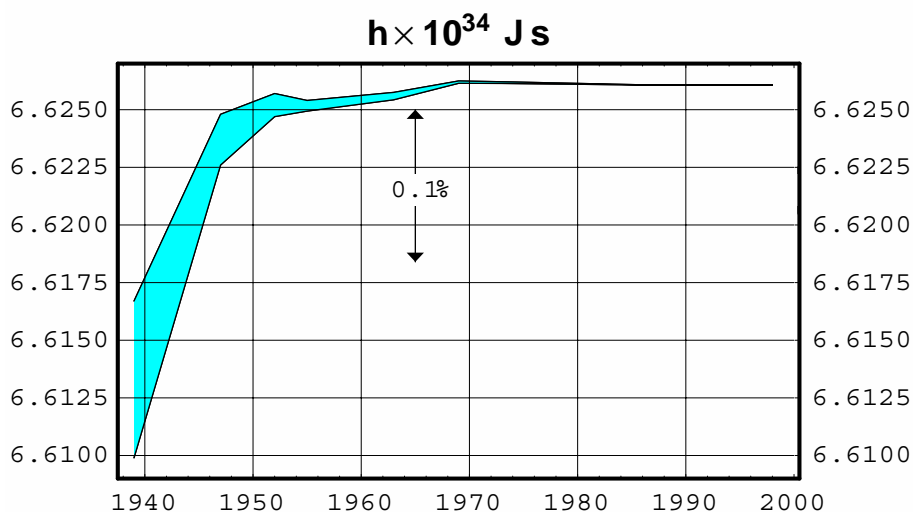


Рис. 2. Значения постоянной Планка (1939–1998 гг.).

Этот скачок связан, по-видимому, со значительным повышением точности прецизионных измерений в атомной физике, что, в свою очередь, было обусловлено развитием микроволновой техники в период второй мировой войны, а также широким внедрением электронной техники и развитием методов атомных пучков и магнитного резонанса в послевоенный период [13].

Отметим также, что в работе [22], видимо, впервые была рассмотрена процедура нахождения коэффициентов корреляции согласуемых констант и приведены результаты их вычисления.

Согласование 1955 г. [23], впервые выполненное с применением компьютера, что позволило увеличить число согласуемых констант и используемых экспериментальных данных, практически не изменило средневзвешенное значение постоянной Планка, но почти вдвое уменьшило стандартное отклонение:

$$h = 6.62517(23) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (7)$$

В то же время обнаружилось серьезные расхождения теоретических вычислений и экспериментальных данных при исследовании тонкой и сверхтонкой структуры основного состояния атома водорода, что сказалось на точности определяемого значения постоянной тонкой структуры (α) и, как следствие, согласуемых с ней фундаментальных констант, включая h .

К 1963 г. ситуация практически не изменилась. Тем не менее Коэн и Дюмон в 1963–1965 гг. предприняли очередную попытку согласования значений физических постоянных [24]. Как результат этой работы было “рекомендовано” следующее значение постоянной Планка:

$$h = 6.62559(16) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (8)$$

Однако вскоре измерения величины $2e/h$ с использованием эффекта Джозефсона [25] позволили определить α независимым от эффектов квантовой электродинамики способом [26]. Результаты этих и других исследований показали, что “рекомендованные” значения 1963 г. нуждались в серьезных поправках (так, для h необходимая поправка более чем в 3.5 раза превышала относительную погрешность, указанную в 1963 г.).

В 1969 г. Тейлор, Паркер и Лангенберг выполнили детальный анализ новых экспериментальных данных, впервые разделив их на две группы — данные, не требующие для анализа вычислений с использованием квантовой электродинамики (БКЭД) и данные, для анализа которых необходимо использовать квантовую электродинамику (КЭД) [27]. В результате, в первой группе было получено значение $h = 6.626186(57) \times 10^{-34}$ Дж·с, а в качестве “рекомендуемого” значения —

$$h = 6.626196(50) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (9)$$

Сравнение этого результата с (7) и (8) дает скачок значения постоянной Планка за период 1955–1969 гг. порядка 0.01% (рис. 3).

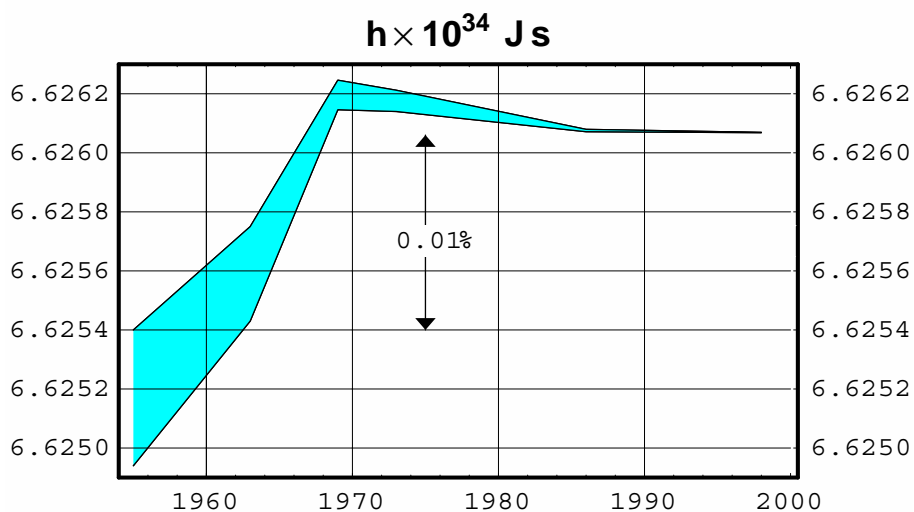


Рис. 3. Значения постоянной Планка (1955–1998 гг.).

К сожалению, анализ данных 1969 г. не был лишен недостатков. Так, имевшиеся на тот момент статистически несогласованные данные по магнитному моменту протона заставили авторов [27] принять неверное решение об исключении из анализа методом наименьших квадратов двух наибольших значений [13]. Это выяснилось уже в 1971 г., когда удалось повысить точность экспериментов по измерению этой величины [28,29].

Уже в 1973 г. Э.Коэн и Б.Тейлор провели новое согласование [30], по результатам которого был принят набор “рекомендованных” значений [31]. Хотя к этому времени согласие между КЭД и экспериментом достигло уже такого уровня, когда данные КЭД могли использоваться при анализе, авторы сочли полезным сохранить разбивку данных на две группы (БКЭД и КЭД). Для этого они видели две причины: 1) упрощение классификации большой по объему информации; 2) возможность использования констант БКЭД при сравнении квантовой электродинамики и эксперимента. Наилучшее БКЭД значение постоянной Планка в этом согласовании было $h = 6.626186(57) \times 10^{-34}$ Дж·с, а “рекомендованное” значение —

$$h = 6.626176(36) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (10)$$

Результаты следующего согласования 1986 г. [32,33,34] подтвердили наметившуюся тенденцию к некоторому снижению значения постоянной Планка, которое составило примерно 0.002% от значения 1969–1973 гг. (см. рис. 4). “Рекомендованное” значение постоянной Планка 1986 г. было

$$h = 6.6260755(40) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}. \quad (11)$$

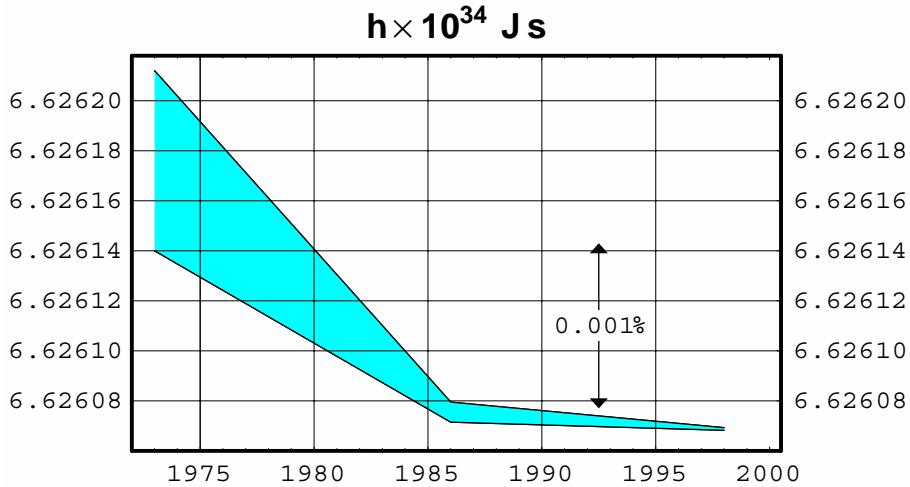


Рис. 4. Значения постоянной Планка (1973–1998 гг.).

Наконец, последнее согласование фундаментальных констант 1998 г. [35] дало значение

$$h = 6.62606876(52) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}, \quad (12)$$

которое также примерно на 0.0001% меньше предыдущего “рекомендованного” значения (1986 г.). (В настоящее время рекомендованные CODATA⁴ значения фундаментальных физических констант можно найти в Интернете [35].)

Наш беглый обзор 100-летней истории уточнения и стабилизации значения одной из важнейших фундаментальных констант физики — постоянной Планка — в ретроспективе демонстрирует удивительно быстрое и стабильное улучшение точности измерений и теоретических расчетов (см. рис.1 и табл. 1).

С другой стороны, нельзя не обратить внимание на не вполне удовлетворительное состояние дел с анализом получаемых данных. Об этом, в частности, говорит тот факт, что “скачки” в значениях постоянной Планка всякий раз оказывались выше, чем пределы “интервалов погрешностей” в одно стандартное отклонение – 1σ (см. рис. 1–4). Видимо, современные методы анализа и согласования разнородных данных требуют усовершенствования, а возможно, и поиска альтернативных методов [13,34]. Последнее замечание представляется важным предостережением исследователям, работающим вблизи границ применимости современного знания и в условиях, когда прямые экспериментальные наблюдения новых эффектов и явлений невозможны.

⁴Committee on Data for Science and Technology.

Таблица 1.

Год	Значен.(неопр.) ($h \times 10^{34}$ Дж·с)	Автор(ы)	Ссылка
1900	6.55(3) ^(*)	Planck	[1]
1919	6.55(1) ^(**)	Birge	[9,11]
1929	6.547(8)	Birge	[11]
1939	6.6133(34)	Dunnington	[14]
1947	6.6237(11) ^(***)	DuMond, Cohen	[20,21]
1953	6.6252(5)	DuMond, Cohen	[22]
1955	6.62517(23)	Cohen, DuMond, Layton, Rollett	[23]
1963	6.62559(16)	Cohen, DuMond	[24]
1969	6.626196(50)	Taylor, Parker, Langenberg	[27]
1973	6.626176(36)	Cohen, Taylor; CODATA	[30,31]
1986	6.6260755(40)	Cohen, Taylor; CODATA	[32,33]
1998	6.62606876(52)	Mohr, Taylor; CODATA	[35]

(*) Величина вероятной ошибки (± 0.03) найдена формально авторами настоящего обзора.

(**) Значение, полученное в [9] (6.5543 ± 0.0025), скорректировано в [10,11].

(***) Скорректированное авторами [20] значение [21].

Список литературы

- [1] M. Planck. *Verhandl.Dtsch.Phys.Ges.*, **2** (1900) 237;
M. Planck. *Ann.Phys.*, **4** (1901) 553.
- [2] F. Kurlbaum. *Wied.Ann.*, **65** (1898) 759.
- [3] O. Lummer, E. Pringsheim. *Verhandl.Dtsch.Phys.Ges.*, **2** (1900) 176.
- [4] A. Einstein. *Ann.Phys.*, **4**, 17 (1905) 132;
A. Einstein. *Ann.Phys.*, **4**, 22 (1907) 180.
- [5] N. Bohr, *Phil.Mag.*, **26** (1913) 1; 476; 875.
- [6] R.A. Millikan. *Phys.Rev.*, **7** (1916) 374.
- [7] R.A. Millikan. *Phil.Mag.*, **34** (1917) 1.
- [8] E.L. Harrington. *Phys.Rev.*, **8** (1916) 738.
- [9] R.T. Birge. *Phys.Rev.*, **4** (1919) 361.
- [10] R. Ladenburg. *Jahr.Radioak. und Elektr.*, **17** (1920) 93.
- [11] R.T. Birge. *Phys.Rev.Supl.*, **1** (1929) 1.
- [12] W.V. Houston. *Phys.Rev.*, **52** (1937) 75.
- [13] E.R. Cohen. *Preprint SC-PP-76-120*, (1976). (Имеется перевод в сборнике: *Квантовая метрология и фундаментальные константы.* – М.: Мир, 1981.)
- [14] F.G. Dunnington. *Rev.Mod.Phys.*, **11** (1939) 65.
- [15] R.T. Birge. *Phys.Rev.*, **57** (1940) 250.

- [16] R.T. Birge. *Phys.Rev.*, **58** (1940) 658.
- [17] R.T. Birge. *Phys.Rev.*, **60** (1941) 766.
- [18] R.T. Birge. *Repts.Progr.Phys.*, **8** (1942) 90.
- [19] R.T. Birge. *Am.J.Phys.*, **13** (1945) 63.
- [20] J.W.M. DuMond, E.R. Cohen. *Rev.Mod.Phys.*, **20** (1948) 82.
- [21] J.W.M. DuMond, E.R. Cohen. *Rev.Mod.Phys.*, **21** (1949) 651.
- [22] J.W.M. DuMond, E.R. Cohen. *Rev.Mod.Phys.*, **25** (1953) 691.
- [23] E.R. Cohen, J.W.M. DuMond, T.W. Layton, J.S. Rollett. *Rev.Mod.Phys.*, **27** (1955) 363.
- [24] E.R. Cohen, J.W.M. DuMond. *Rev.Mod.Phys.*, **37** (1965) 537.
- [25] B.D. Josephson. *Phys.Lett.*, **1** (1962) 251;
 B.D. Josephson. *Rev.Mod.Phys.*, **36** (1964) 216;
 B.D. Josephson. *Adv.Phys.*, **14** (1965) 419.
- [26] W.H. Parker, B.N. Taylor, D.N. Langenberg. *Phys.Rev.Lett.*, **18** (1967) 287.
- [27] B.N. Taylor, W.H. Parker, D.N. Langenberg. *Rev.Mod.Phys.*, **41** (1969) 375;
 B.N. Taylor, W.H. Parker, D.N. Langenberg. *The Fundamental Constants and Quantum Electrodynamics.*— Academ.Press. New York, London (1969). (Имеется перевод: Б. Тейлор, В. Паркер, Д. Лангенберг. *Фундаментальные константы и квантовая электродинамика.* — М.: Атомиздат, 1972.)
- [28] Б.А. Мамырин, А.А. Аруев, С.А. Алексеенко. *ЖЭТФ*, **63** (1972) 3.
- [29] B.W. Petley, K. Morris. *Nature.Phys.Sci.*, **240** (1972) 83.
- [30] E.R. Cohen, B.N. Taylor. *J.Phys.Chem.Ref.Data*, **2** (1973) 663. (Имеется перевод в сборнике: *Квантовая метрология и фундаментальные константы.* — М.: Мир, 1981.)
- [31] E.R. Cohen. *CODATA Bulletin*, **11** (1973) 1.
- [32] E.R. Cohen, B.N. Taylor. *CODATA Bulletin*, **63** (1986) 1.
- [33] E.R. Cohen, B.N. Taylor. *Rev.Mod.Phys.*, **59** (1987) 1121.
- [34] E.R. Cohen. In: *Units and Fundamental Constants in Physics and Chemistry.* Subvolume **b**, Eds: J.Bortfeldt and B.Kramer. Springer-Verlag, Berlin (1992) 3–285.
- [35] P.J. Mohr, B.N. Taylor. *J.Phys.Chem.Ref.Data*, **28** (1999) 6;
<http://physics.nist.gov/constants>
<http://physics.nist.gov/cuu>.

Рукопись поступила 25 октября 2000 г.

В.Н. Ларин, В.В. Ежела.
К столетию открытия кванта действия.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .
Редактор Н.В.Ежела. Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 26.10.2000. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.
Печ.л. 1,12. Уч.-изд.л. 0,9. Тираж 120. Заказ 217. Индекс 3649.
ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

