

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБ ОСНОВНЫХ КОНСТАНТАХ ФИЗИКИ
И ХИМИИ НА ЯНВАРЬ 1959 г.*)

Дж. Дю-Монд

Если желательно иметь для какой-либо эпохи взаимно согласованную систему значений основных констант физики и химии, другими словами, систему, согласованную со всеми установленными законами, связывающими эти константы, и по возможности со всеми надежными и точными данными, имеющимися к данному времени, то нельзя подходить к этой проблеме по частям, т. е. рассматривать константы порознь, а необходим полный анализ и синтез всех данных одновременно. В качестве примера кратко рассмотрено согласование данных методом наименьших квадратов, выполненное в 1955 г. Коэном, Дю-Мондом, Лэйтоном и Роллетом. Со времени этого согласования уже накопилось большое количество новых данных. В статье описаны и обсуждаются двадцать шесть новых определений, либо полностью законченных, либо проводимых в настоящее время. Можно полагать, что когда станут известными окончательные результаты этих работ, в порядке дня будет поставлен вопрос об их новом согласовании методом наименьших квадратов. Обсуждается вопрос о желательности периодического пересмотра данных, а также о неизбежных его недостатках. Графическое представление результатов предыдущих определений показывает, что получаемые таким способом «наилучшие значения» достаточно удовлетворительно стягиваются внутрь все более тесного интервала ошибок, причем интервал ошибок для каждой последующей эпохи достаточно близок к интервалам ошибок предшествующих согласований (фактически обычно лежит внутри них).

С улучшением нашего знания законов природы и совершенствованием технических возможностей проведения точных физических и химических измерений обнаруживалась все большая и большая взаимосвязь между основными константами физики и химии; наконец, в настоящее время весь комплекс наших сведений об основных константах подобен огромной паутине, каждая часть которой в какой-то степени зависит от всей остальной сети так, что если коснуться одной части или изменить что-либо, то вся сеть в целом подвергнется изменению. Мы хотим подчеркнуть, что если желательно иметь полностью согласованную систему значений основных констант с минимальной степенью произвола в их выборе (т. е. систему, согласующуюся со всеми известными и принятыми законами, связывающими эти константы между собой и со всеми надежными точными измерениями, имеющими отношение к определению этих констант), то нельзя рассматривать проблему их определения «кусочно», по частям, т. е. рассматривать отдельные константы порознь; необходим единый подход, заключающийся в полном анализе и синтезе всех известных данных относительно целого ряда констант одновременно. Мне неизвестен более удовлетворительный путь к этой цели, чем применение теории и метода наименьших квадратов.

Метод наименьших квадратов дает критерии и определенную технику для достижения объективного компромисса между различными расходо-

*J. W. M. DuMond, Annals of Physics 7, 365 (1959). Перевод С. А. Каменецкого.

дящимися источниками информации. В случае универсальных констант одновременно разыскивается ряд «неизвестных» (констант), а источниками информации, обеспечивающими то, что называется «исходными данными», являются обычно экспериментально определенные численные значения *функций* этих неизвестных. Но в каждый данный момент времени имеется значительно больше известных функций от этих неизвестных, чем самих неизвестных, и получающаяся система уравнений (по одному уравнению для каждой экспериментально определенной функции) оказывается в значительной степени «переопределенной».

Отыскание синтетическим путем компромисса для определения «наилучших значений» неизвестных в случае такого переопределения является только одним из применений теории и метода наименьших квадратов. Было бы неправильным, закрыв глаза, бросить в перешлавку с помощью метода наименьших квадратов отдельные данные или все данные вместе без всякого различия между ними и некритически принять те компромиссные значения неизвестных, которые получатся в результате этого,— без тщательного анализа взаимной согласованности (совместности) имеющихся в данную эпоху несогласованных исходных данных для такого синтеза.

Согласование, результаты которого были опубликованы в 1955 г. Коэном и др.¹, позволило выбрать в качестве «неизвестных» для применения метода наименьших квадратов четыре основные константы, после чего оказалось возможным подобрать семь различных типов уравнений, охватывающих всего 13 уравнений, выраждающих алгебраические соотношения между этими четырьмя неизвестными и полученными в результате точных измерений численными данными, заслуживавшими серьезного внимания в данную эпоху. Таким образом, эта система оказалась заведомо переопределенной. Эти 13 уравнений, распределенные по семи типам, приведены в табл. I с указанием источников, откуда они заимствованы.

Поскольку нельзя ожидать, что какие-либо из этих измерений, как бы точно и тщательно они ни были выполнены, совершенно свободны от систематических ошибок, нельзя и предполагать, что такая переопределенная система уравнений вполне совместна. Тем не менее эти данные представляют, по существу, всю ту информацию, которой мы располагаем в данное время относительно основных констант физики и химии, относительно размерностей, относительно природы и поведения того физического мира, в котором мы живем и работаем. Поэтому чрезвычайно важно исследовать вопрос о том, как наилучшим образом добиться компромисса между этими несколько несовместными данными, чтобы найти ответ на вопросы, подобные нижеследующим:

1. Отклоняется ли какое-то незначительное меньшинство данных от совместности с большинством остальных данных настолько, что можно заподозрить серьезную систематическую ошибку в определении этого меньшинства и без ущерба исключить его из согласования?

2. Достаточно ли велика несовместность определенной величины с согласующимися остальными данными, чтобы оправдать исключение ее только на этом основании, или необходимо тщательное исследование для получения соответствующих физических оснований, оправдывающих подозрение в систематической ошибке в определении этой величины?

3. Какой статистический критерий следует применить после отбора данных к анализу окончательно согласованных результативных значений этих четырех неизвестных, учитывая: а) неточность исходных данных; б) малые остаточные расхождения переопределенной системы уравнений, выбранной для использования при согласовании.

Для ответа на подобные вопросы разработаны тонкие математические методы, основанные на теории метода наименьших квадратов, и

Таблица I

Экспериментальные данные, использованные Дю-Мондом и Коэном в 1955 г.
для вычисления согласованных значений основных констант

Четыре первичные неизвестные, согласованные значения которых вычислялись методом наименьших квадратов:

a ($= 2\pi e^2 h^{-1} c^{-1}$) — постоянная тонкой структуры Зоммерфельда;
 e — заряд электрона (в абс. эл.-стат. ед.);
 N — число Авогадро;
 Λ ($= \lambda_g/\lambda_s$) — переводный множитель от миллиангстремов к X -единицам (Зигбана).

Функция и измеренное числовое значение	Оценка точности	Описание эксперимента
Первая группа — семь типов экспериментальных данных, относящихся к указанным неизвестным		
1. $\begin{cases} Ne/c & = 9652,15 \\ Ne/c & = 9651,29 \end{cases}$	$13 \cdot 10^{-6}$ $20 \cdot 10^{-6}$	Йод, Серебро $\left. \begin{array}{l} \text{электрохимическое} \\ \text{определение числа} \\ \text{Фараdea} \end{array} \right\}$
2. $\Lambda = 1,002020$	$30 \cdot 10^{-6}$	Измерение линий рентгеновского спектра штриховой дифракционной решеткой
3. $N/\Lambda^3 = 0,606179 \cdot 10^{24}$	$38 \cdot 10^{-6}$	Измерение плотности кристалла и постоянной решетки в X -единицах
4. $a^3 c/e = 2,425517 \cdot 10^{13}$	$23 \cdot 10^{-6}$	Гиromагнитное отношение для протона (Томас, Дрисколл и Хипп)
$Ne^2/a^3 c^2 = 3,979879 \cdot 10^{-10}$	$36 \cdot 10^{-6}$	Блох и Джейфрис, «обратный циклотрон»
$Ne^2/a^3 c^2 = 3,979423 \cdot 10^{-10}$	$11 \cdot 10^{-6}$	Соммер, Томас и Хипп, «омегатрон»
5. $Ne^2/a^3 c^2 = 3,979359 \cdot 10^{-10}$	$14 \cdot 10^{-6}$	Коллингтон, Деллис, Сандерс и Терберфилд
$Ne^2/a^3 c^2 = 3,979444 \cdot 10^{-10}$	$36 \cdot 10^{-6}$	Поправка Кеннета и Триггела к работе Блоха и Джейфриса
6. $a^2 c = 1,596412 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^{-6}$	Микроволновое определение расщепления тонкой структуры в дейтерии—Лэмб с сотрудниками Фелт, Гаррис и
$ec/\Lambda a = 1968,750$	$51 \cdot 10^{-6}$	Определение коротковолновой границы непрерывного рентгеновского спектра
7. $ec/\Lambda a = 1968,911$	$40 \cdot 10^{-6}$	Бирден, Джонсон и Уоттс
$ec/\Lambda a = 1968,869$	$83 \cdot 10^{-6}$	Бирден и Шварц
Вторая группа — значения величин, принятых в качестве констант		
$H = 1,008142 \pm 0,000003$ (физ. шк.)	$3 \cdot 10^{-6}$	Определение атомных весов методом измерения энергии ядерных реакций
$H/M_p = 1,00054461$		
$D = 2,014735 \pm 0,000006$ (физ. шк.)	$3 \cdot 10^{-6}$	
$D/M_d = 1,00027244$		
$R_\infty = 109737,309 \pm 0,012 \text{ см}^{-1}$	$0,11 \cdot 10^{-6}$	Спектроскопические определения R_∞
$\mu_e/\mu_p = 658,2288 \pm 0,0004$	$0,6 \cdot 10^{-6}$	Отношение магнитных моментов электрона и протона
$\mu_e/\mu_0 = 1,00114536$	$< 0,01 \times 10^{-6}$	Отношение магнитного момента электрона к магнетону Бора
$c = 299793,0 \pm 0,3 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-6}$	Скорость света

используются электронные цифровые счетные машины. Подробности этих методов опубликованы в ряде статей¹⁻¹⁶.

Четыре неизвестные, выбранные для согласования в работе Коэна и Дю-Монда 1955 г., это — постоянная тонкой структуры Зоммерфельда $\alpha = 2\pi e^2 h^{-1} c^{-1}$, заряд электрона e , число Авогадро N и переводный множитель $\Lambda = \lambda_g / \lambda_s$ от шкалы оптических длин волн в миллиангстремах к произвольной шкале Зигбана (или кристаллической шкале) длин волн рентгеновских лучей в X -единицах.

После исключения четырех из намеченных 13 уравнений, не только вследствие их несовместности с остальными, но и по физическим причинам, заставляющим усомниться в их надежности, удалось определить из оставшихся данных согласованные значения неизвестных так, что им можно было приписать ошибки лишь в пределах от $4,1 \cdot 10^{-6}$ (в случае α) до $27 \cdot 10^{-6}$ (в случае N). После вычисления наилучших согласованных значений этих четырех неизвестных оказалось возможным путем соответствующего комбинирования их с некоторыми очень точно измеренными фиксированными вспомогательными константами (см. табл. I), а именно: постоянной Ридберга, отношением магнитного момента электрона к магнитному моменту протона, скоростью света в вакууме, отношением магнитного момента электрона к магнетону Бора ($eh/4\pi m_e c$), — и с некоторыми очень точно известными значениями атомных масс и отношений масс — вычислить весьма обширную таблицу, включающую почти все наиболее значительные константы и переводные множители физики и химии; такая таблица занимает много страниц печатного текста.

Со времени упомянутого выше согласования 1955 г. накопились новые сведения и новые данные, так что, по-видимому, скоро в порядок дня встанет вопрос о новом согласовании, которое, как можно надеяться, даст новые, более точные сведения относительно констант. Многие из новейших работ по уточнению данных были, конечно, стимулированы прежними попытками согласования констант, например работой Дю-Монда и Коэна 1955 г. и, в особенности, расхождением некоторых данных с большинством остальных, которое обнаружилось в прежних работах по согласованию. Не все новейшие, более тонкие поверочные исследования и измерения уже закончены, но можно полагать, что пожалуй, через год наступит время для нового полного согласования. В табл. II в сокращенном виде приведены различные новые сведения о законченных или заканчивающихся работах.

Перехожу теперь к рассмотрению некоторых наиболее интересных пунктов, касающихся новых источников информации, в порядке их расположения в таблице.

НОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЧИСЛА ФАРАДЕЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Начиная с 1940 г., когда я впервые осознал, что работы по определению числа Фарадея, выполненные до 1916 г. при помощи кулонометра с серебром¹⁷⁻²¹, могли быть ошибочными, я старался побудить компетентных физико-химиков произвести переопределение этой исключительно важной константы. Усомниться в более ранних работах по определению числа Фарадея заставило меня прежде всего то обстоятельство, что Бердж, начиная с 1929 г., систематически получал существенно различные значения e/m , в зависимости от того, вычислял ли он эту константу непосредственно из экспериментов с отклонением электронного пучка или так называемым спектроскопическим методом, в котором для вычисления e/m приходится комбинировать спектроскопические определения отношения масс электрона и протона с числом Фарадея. Теперь я с удовлетворением

Таблица II

Новые данные, относящиеся к основным константам, полученные или ожидаемые в результате работ, выполненных в основном после 1955 г.

Измеряемая величина, исправленная или проверенная		Применявшийся метод	Автор работы	Место выполнения	Закончена (З) или не-закончена (Н) работа
символ	название				
F	Число Фарадея	1. Вольтаметр с перхлоратом серебра (измерение потенциального анодом серебра) 2. Иодный кулонометр	Крейг (D. N. Craig), Хамер (W. J. Hamer) Мас-Иннес (D. A. Mac-Innes)	Бюро стандартов США	Н
		3. Вогнутая решетка, вакуум-спектрометр 4. Плоская решетка с абсолютным измерением углов 5. Непосредственное измерение 6. Три независимых теоретических вычисления, приведение к полному соглашению	Киркпатрик (H. A. Kirkpatrick), Дю-Монд (J. W. M. DuMond) Бирден и сын (J. A. и A. J. Bearden) Крейн (Crane) и Пидд (Pidd) Кроль (N. M. Kroll) Питерман (A. Petermann)	Рокфеллеровский ин-т медиц. исследований Калифорнийский технол. ин-т и Висконсинский ун-т Ун-т Джона Гопкинса	Н Н Н
$\Lambda = \lambda_g / \lambda_s$	Переводный множитель от миллиангстремов к X -единицам	7. Помехи в измерении 8. Согласование с теоретическими вычислениями	Соммерфильд (C. M. Sommerfield) Фрум (K. D. Froome)	Мичиганский ун-т Колумбийский ун-т Европейский центр. ядерн. исследований	З (?) З З
		9. Микроволновый интерферометр в свободном пространстве 10. Геодиметр; модулированное ячейкой Керра оптическое излучение на длинных путях в воздухе	Бергстранд (E. Bergstrand) Мак-Кензи (McKenzie)	Массачусетский техн. институт Национал. физич. лаборатория, Англия	З З
c	Отношение магнитного момента электрона к магнетону Бора	11. Микроволновый интерферометр	Ричардсон (J. M. Richardson) Кэлшоу (W. Culshaw)	Стокгольм	З
	Скорость света	12. Соленоид с определенной измеренной геометрией	Бендер (P. L. Bender) и Дрисколл (R. L. Driscoll)	Нац. бюро стандартов (США) Боулдер, Колорадо Нац. бюро стандартов США, Вашингтон	З З
γ_p	Гиromагнитное отношение для протона				

Продолжение таблицы II

Измеряемая величина, исправленная или проверенная		Применившийся метод	Автор работы	Место выполнения	Закончена (З) или не закончена (Н) работа
символ	название				
g	Ускорение силы тяже-сти	13. Маятник из плавленого кварца	Хейл (P. R. Heyl) и Кук (G. S. Cook) (1936)*	Нац. бюро стандартов США, Вашингтон	3
		14. Поворотный маятник в вакууме	Кларк (J. S. Clark) (1939)	Нац. физ. лаборатория, Англия	3
		15—17. Тремя методами **)	П. Н. Агалецкий, К. Н. Егоров, А. И. Маркиньяк	ВНИИМ СССР	3
Vλ _s	Переводный множи-тель от вольт к дли-нам волн	18. Свободно падающий стер-жень	Волé (C. Volet) (1952)	Франция	3
		19. Свободно падающий стер-жень	Престон-Томас (H. Preston-Thomas) (1958)	Канада	Н
		20. Свободно падающий стер-жень	Тэйт (D. R. Tate) и Пэйдж (C. H. Page)	Нац. бюро стандартов, США, Вашингтон	Н
R _∞	Постоянная Ридберга для бесконечной мас-сы	21. Квантовая граница непре-рывного рентгеновского спектра	Меррилл (J. A. Merrill) и Дю-Монд (J. W. M. DuMond)	Калифорнийский тех-нологический ин-т	Н
		22. Новое измерение линии Не 5015	Филд (J. C. Field) и Сириес (J. W. Series)	Оксфорд, Англия	3
		23.	Уильям Мартин (William Martin)	Нац. бюро стандартов США, Вашингтон	Н
g-фактор	g-фактор электрона *)	24. На, ориентированный «оп-тической перекачкой»	Демельт (H. G. Dehmelt)	Вашингтонский ун-т	Н (?)
		25. Объемный резонатор в H ₂ + O ₂	Лэмб (Ed. Lambe)	Принстоун	3 (?)
μ _e /μ _p	Отношение магнитных моментов электрона и протона	26. Циклотронная частота электрона	Харди (W. A. Hardy) и Пер-сэлл (E. M. Purcell)	Гарвард	3 (?)
		Резонансная частота про-тона (отношение)			

*) Автор получил от Терриена (J. Terrien) статью о линии Не 5015. Все три новых значения этой линии Не находятся в хорошем согласии и показывают, что значение, полученное для R_∞ Коэном в 1952 г., не нуждается в изменении. Мы также только что получили результаты очень точного измерения g-фактора электрона, сделанного в Аин-Арбре Шуппом (A. Schupp), Пиддом и Крейном, вероятно, самого точного на сегодняшний день.

**) 1) Метод «поворотных маятников», 2) метод «совмещенного свободного и несвободного падения тел», 3) метод «регистрации па-дения жезла в вакууме».

могу сказать, что переопределение числа Фарадея производится в настоящее время в двух местах. В Национальном бюро стандартов США Д. Н. Крэйг и У. Дж. Хамер переопределяют число Фарадея, пользуясь вольтаметром с перхлоратом серебра, в котором, в отличие от прежних экспериментов Роза, Вайнэл и др., измеряемой величиной является количество серебра, потерянное анодом, а не количество серебра, отложившееся на катоде; в Рокфеллеровском институте⁴ медицинских исследований в Нью-Йорке Мак-Иннес и Прей переопределяют число Фарадея при помощи йодного кулонометра, разработанного в начале текущего столетия Уошборном и Бейтсом.

В работах по определению числа Фарадея до 1916 г. главное внимание обращалось на получение воспроизводимых значений электрохимического эквивалента, и гораздо меньшее внимание, чем это было бы желательно нам теперь, уделялось исключительно важному значению этих работ для определения числа Фарадея. Фактически целью этих работ в то время было получить спецификацию для рабочего метода эмпирического определения ампера с возможно большей воспроизводимостью. Если же выдвинуть на первое место абсолютную значимость работ, то можно указать три возможных источника ошибок в этих работах:

1) измеренное увеличение веса катода могло произойти не только за счет отложившегося серебра — отложившееся серебро могло содержать «включения» или какие-либо другие вещества, проникшие в электролит;

2) некоторое количество отложившегося вещества могло быть вновь растворено в электролите или каким-либо другим путем отделиться от катода до взвешивания;

3) отложившееся серебро могло иметь не тот изотопный состав, что «природное» серебро, на котором основано принятное (химическое) значение его атомного веса (значение, которое было использовано при вычислении числа Фарадея). В то время, когда производились эти ранние работы с вольтаметром, изотопы еще не были открыты и атомный вес элемента, встречающегося в природе, например серебра, рассматривался как неизменная величина. Теперь известно, что электролиз заведомо может внести заметные изменения в изотопный состав и тем самым повлиять на средний атомный вес. Серебро, имеющее два изотопа с почти одинаковой распространенностью, но отличающихся по массе приблизительно на 2%, дает отношение распространеностей, в максимальной степени способствующее внесению систематической ошибки при селективном электролитическом разделении. Если в отложившемся на катоде слое содержание легкого изотопа по отношению к более тяжелому на 1% больше, чем в растворе, то осадок будет на $46 \cdot 10^{-6}$ легче, чем в случае, если бы такого селективного разделения не происходило.

Хотя ни группа Рокфеллеровского института, ни группа Бюро стандартов еще не могут сообщить окончательных результатов, получено большое количество интересных сведений относительно источников ошибок и предложено много новых усовершенствований техники эксперимента. Бюро стандартов до настоящего времени не производило работ с такими изотопно обогащенными или изотопно чистыми образцами серебра, какие могут быть изготовлены в Ок-Ридже методами магнитного разделения, главным образом вследствие больших расходов, связанных с получением таких образцов даже в весьма малых количествах. Существенные вариации в значении, получаемом для числа Фарадея методом учета потерянного анодом серебра, наблюдались в зависимости от ничтожного количества химических примесей в серебре, например, кислорода или водорода, от обработки металла до электролиза (горячая обработка в атмосфере воздуха, в вакууме, в атмосфере водорода, гелия, отжиг в воздухе или

в атмосфере других газов или в вакууме, резкое быстрое охлаждение и др.), а также в зависимости от того, был ли образец серебра монокристаллическим или поликристаллическим.

Все эти расхождения, казалось, достаточны для того, чтобы оправдать необходимость тщательного их изучения и исключения, прежде чем задумываться о неопределенности, возникающей в связи с различием изотопного состава. Тем не менее Бюро стандартов очень серьезно относится к этому последнему обстоятельству и в настоящее время рассматривает различные средства устранения этой неточности.

Оказалось, что не все потерянное анодом серебро теряется путем электролиза. Значительная часть его, по-видимому, отслаивается от анода в виде мелких частиц или хлопьев вследствие того, что процесс электролитического травления происходит неравномерно; такое отслаивающееся вещество выпадает в раствор и образует шлам, который может быть отделен, высушен и взвешен для внесения поправки на потерю веса анода в целом. При применении монокристаллического серебра количество этого шлама значительно уменьшается.

Тщательно изучается возможность повторного растворения серебра в электролите независимо от процесса электролиза. Рассматривается также вопрос о других типах электрической проводимости в электролитической ванне, отличных от проводимости путем переноса ионов серебра. Ответы на многие такие вопросы можно получить, применяя вольтампер с серебром в широком диапазоне плотностей тока и сравнивая значения числа Фарадея, полученные в результате таких экспериментов. Остроумное приспособление в виде помещенного в ванне добавочного электрода для измерения потенциала позволяет изменять плотности тока так, что можно производить измерения в широком диапазоне потенциалов — в пределах от 0,04 до 0,4 в.

Работа Мак-Иннеса и Прея с йодным кулонометром не встречает таких трудностей и неопределенностей из-за влияния изотопного состава, как работа с вольтампером с серебром, так как йод встречается только в одной нуклидной форме. Отсутствуют здесь также и некоторые другие неясности, влияющие на работу с вольтампером; тем не менее и этот метод имеет свои специфические трудности, равные или даже большие, чем указанные выше. Одной из таких трудностей является точное взвешивание йода (вследствие его большой летучести). В настоящее время эта трудность находится на пути к разрешению благодаря применению специальной техники, основанной на замораживании образца.

Не приходится сомневаться, что работы по определению числа Фарадея обоими этими точными методами следует всячески поощрять и поддерживать. Остается только пожалеть об отсутствии других точных электрохимических методов измерения этой весьма важной константы, так как единственным методом обнаружения систематической ошибки является переопределение.

ПЕРЕВОДНЫЙ МНОЖИТЕЛЬ ОТ Х-ЕДИНИЦ ЗИГБАНА К МИЛЛИАНГСТРЕМАМ

Длины волн спектральных линий рентгеновского излучения, измеренные по отношению друг к другу высокоточными методами дифракции в кристаллах, известны с точностью до $1 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-5}$. Это точное изучение и табулирование рентгеновских спектральных линий было впервые доведено до высокой степени совершенства Зигбаном²² и его школой. Позже применение таких усовершенствований, как спектрометр с двумя кристаллами и спектрометр с изогнутым кристаллом, позволило другим

исследователям еще повысить достигнутую точность^{23, 24}. Было протабулировано около 3000 таких высокоточных результатов измерений длин волн²⁵. Они представляют собой хорошо воспроизводимую и хорошо определенную шкалу длин в интервале от $1 \cdot 10^{-9}$ до $4 \cdot 10^{-6}$ см. Для выражения этих длин волн в сантиметрах или ангстремах Брэгг²⁶ первым применил метод, в котором число Авогадро рассматривалось как частное от деления числа Фарадея на значение e , полученное из опыта Милликена с падением масляной капли. Из числа Авогадро и атомных весов составных элементов можно было вычислить абсолютный вес в граммах единичной ячейки кристалла. Этот вес вместе с макроскопической плотностью и геометрией кристалла позволил вычислить постоянную решетки кристалла. Базируясь на результатах прецизионных работ Комптона и др. с кальцитом²⁷, Зигбан принял за основу для вычислений длин волн рентгеновских лучей «эффективную»*) постоянную решетки кальцита при 18°C при отражении в первом порядке

$$d''_{18} = 3029,040 \text{ } X\text{-ед.}$$

Зигбан имел в виду приравнять X -единицу 1 миллиангстрему. Однако он весьма предусмотрительно предпочел присвоить этой единице длины особое название несомненно потому, что он представлял себе, что абсолютное значение этой единицы может когда-нибудь потребовать пересмотра. Теперь мы знаем, что значение, полученное Милликеном из его опыта с масляной каплей, было ошибочным главным образом вследствие принятого им в вычислениях ошибочного значения для вязкости воздуха. Эта ошибка вошла в вычисления, при помощи которых определялась постоянная решетки кальцита. Поэтому лучше всего рассматривать систему Зигбана представления длин волн в X -единицах как чисто произвольную систему.

Расхождение между X -единицами Зигбана и миллиангстремами первым заметил Беклин²⁸, как мне кажется, тогда, когда длины волн некоторых линий мягких рентгеновских лучей, измеренные в X -единицах методом дифракции в кристаллах, были так же точно измерены при помощи штриховой дифракционной решетки, прокалиброванной по известным длинам волн оптического спектра.

За исключением случая очень длинных волн рентгеновского излучения, основная масса измерений рентгеновских длин волн на штриховых решетках была произведена с плоскими решетками и при скользящем падении. Первыми применили этот метод Комптон и Доон²⁹ и вскоре затем Тибо³⁰. На рис. 1 показана геометрия для случая скользящего падения

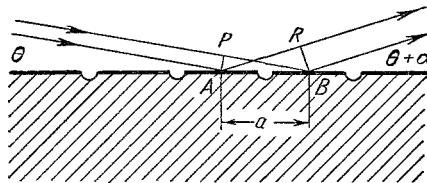


Рис. 1. Иллюстрация применения дифракционной решетки и геометрии разности хода для случая скользящего падения под весьма малым углом, необходимым для получения дифракции линий рентгеновского спектра при помощи штриховых решеток.

Приравнивая разность хода $PB - AR$ целому числу длии воли, получаем

$$PB - AR = n\lambda = a [\cos\theta - \cos(\theta + \alpha)].$$

Таким образом, дисперсия для скользящего падения

$$\left(\frac{da}{d\lambda}\right)_g = \left(\frac{n}{2a\lambda}\right)^{1/2}.$$

Дисперсия для нормального падения

$$\left(\frac{da}{d\lambda}\right)_n \approx \frac{n}{a} \text{ (для малых } \alpha\text{)}$$

*) Эффективная постоянная решетки d_n включает определенный поправочный член на показатель преломления и, строго говоря, не является постоянной, а представляет собой функцию порядка интерференции в брэгговском отражении. Для плоскостей спайности кальцита, например, d_n связано с истинной постоянной решетки d соотношением $d_n = d(1 - 135 \cdot 10^{-6}/n^2)$, и исправленное уравнение Брэгга будет иметь вид $n\lambda = 2d_n \sin \theta_n$.

и приведено сравнение получаемой дисперсии для скользящего и нормального падения. Для получения дифракционного спектра достаточной интенсивности необходимо, чтобы угол скользящего падения был меньше критического угла полного отражения рентгеновских лучей.

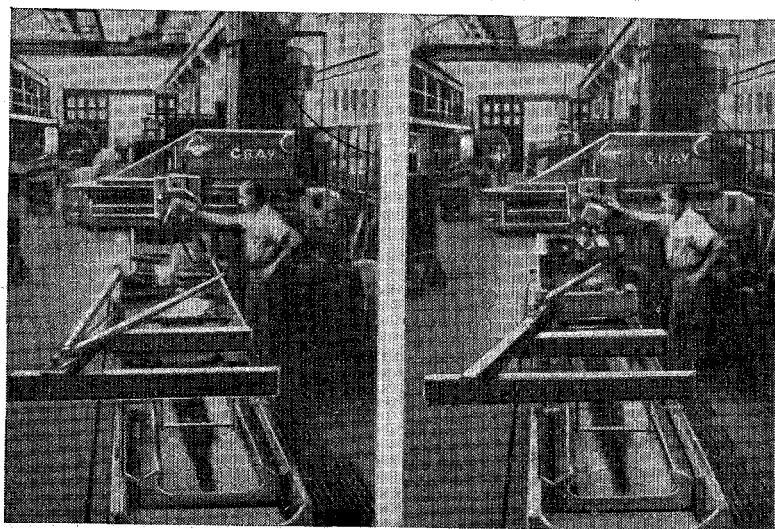


Рис. 2. Специальный метод обработки цилиндрической поверхности радиуса кривизны 6,3 м для держателя пластиинки, предназначенного для применения при спектроскопическом определении переводного множителя $\Delta = \lambda_g / \lambda_s$.

Работа производится на поворотном столе; деталь закреплена на суппорте большого строгального станка астрофизической мастерской Калифорнийского технологического института; при помощи косой направляющей деталь по мере продвижения суппорта поворачивается с точно рассчитанной скоростью так, чтобы получился большой радиус.

Выдающиеся экспериментальные работы по сравнению длин волн линий рентгеновского спектра, полученных при помощи дифракционной

Таблица III

Сравнение длии волн рентгеновских лучей, определенных при помощи дифракционной решетки и методом Зигбана (по Берджу, 1945 г.)

Автор	Линия рентгеновского спектра	Значение $(\Lambda - 1) \cdot 10^{-6}$. Вероятная ошибка основана только на случайных ошибках	Принятая Берджем вероятная ошибка
Бирден	$\text{Cu}K\alpha_{1,2}$	1980 ± 31	± 52
Бирден	$\text{Cu}K\beta_{1,3}$	2079 ± 28	± 50
Бирден	$\text{Cr}K\alpha_{1,2}$	2036 ± 21	± 48
Бирден	$\text{Cr}K\beta_{1,3}$	2017 ± 28	± 48
Зёдерман	$\text{Al}K\alpha_{1,2}$	2070 ± 37	± 84
Беклин	$\text{Al}K\alpha_{1,2}$	2000 ± 14	± 60
Бирден	$\text{Cu}K\alpha_{1,2}$	2087 ± 55	± 130
Тирен	$\text{Al}K\alpha_{1,2}$	2024 ± 5	± 48

Принятое Берджем в 1945 г. среднее $\Lambda = 1,002030 \pm 0,000020$. Л. Брэгг (1947 г.) после консультаций с Зигбаном, Уорреном и Липсоном и учета приведенного выше перечня данных, составленного Берджем, рекомендовал принять $\Lambda = 1,002020 \pm 0,000030$.

решетки и методом Зигбана на кристалле, были проделаны Бирденом³¹, Беклином³², Зёдерманом³³ и Тиреном³⁴. Результаты этих работ подытожены Берджем³⁵ в 1945 г.; они приведены в табл. III вместе со средневзвешенным значением переводного множителя Λ , которое в то время Бердж принял равным

$$\Lambda = 1,002030 \pm 0,000020.$$

Однако в 1947 г. Брэгг, после консультации с Зигбаном, Уорреном и Липсоном и соответствующего учета приведенных выше данных Берджа, рекомендовал значение

$$\Lambda = 1,002020 \pm 0,000030.$$

Основным доводом в пользу такого пересмотра в 1947 г. были некоторые соображения, связанные с диссертацией Тирела³⁶. В этой работе Тирен при помощи вакуум-спектрометра с вогнутой решеткой тщательно сравнил на тех же самых пластинках положение четырех линий рентгеновского спектра с положением нескольких искровых линий серии Лаймана, испускаемых сильно ионизованными одноэлектронными атомами. Длины волн этих калибровочных линий он вычислил по формуле, основанной на теории Зоммерфельда—Дирака. В то время считали, что эта теория дает строго точное описание атома с одним электроном. Однако в 1950 г. открытие Лэмбом и Резерфордом смещения Лэмба нарушило это представление, и теперь мы знаем, что использованная Тиреном формула для вычисления длии волн его калибровочных линий нуждается в поправке на «смещение Лэмба», значение которого составляет от $100 \cdot 10^{-6}$ для линии O^{III} серии Лаймана α до $27 \cdot 10^{-6}$ для линии Be^{IV} серии Лаймана δ . Соответствующие значения поправок на смещение Лэмба, на которые должны быть увеличены значения калибровочных длин волн, использованные Тиреном, приведены в табл. IV (в миллионных долях).

К сожалению, в диссертации Тирена не указано точно, каким образом его различные калибровочные линии связаны по различным порядкам отражения с другими линиями рентгеновского спектра, так что можно дать только грубую оценку того изменения, которое вносит смещение Лэмба в опубликованные Тиреном результаты. Мой коллега Э. Р. Коэн предложил такую оценку, основанную на предположении, что каждая рентгеновская линия в каждом случае связана с той калибровочной линией, которая ближе всего прилегает к ней по длине волн. Таким образом он получил следующее исправленное средневзвешенное значение Λ в диссертации Тирена:

$$\Lambda = 1,002026 \pm 0,000016 \text{ (исправленное на смещение Лэмба).}$$

Первоначальное значение Тирена было

$$\Lambda = 1,00199 \text{ (неисправленное).}$$

Следует отметить, что это — только попытки оценки, и неопределенность в вопросе о том, как следует вносить поправки в результаты Тирена, позволяет в настоящее время установить только далеко отстоящие друг от друга верхний и нижний пределы для величины поправки (между $27 \cdot 10^{-6}$ и $100 \cdot 10^{-6}$).

Λ является чрезвычайно важной константой, так как представляет одно из немногих средств, которые имеются в нашем распоряжении, для преодоления разрыва между величинами порядка атомных расстояний и хорошо известными нам величинами длин в метрической системе.

Изменение в исходном значении Λ , принятом для вычислений методом наименьших квадратов, оказывает в большей или меньшей степени

Таблица IV

Измерение Λ Тиреном и его поправка на смещение Лэмба

Калибровочные длины волн Тирена, а именно линии O^{VIII} , N^{VII} , C^{VI} , B^V , Be^{IV} серии Лаймана, были вычислены по формуле, основанной на теории однозарядного атома Зоммерфельда—Дирака. Поправки на смещение Лэмба $\Delta E/E$ для значений, полученных по этой формуле, составляют n

n	O^{VIII}	N^{VII}	C^{VI}	B^V	Be^{IV}
1 Лайман α	$98,5 \cdot 10^{-6}$	$81,5 \cdot 10^{-6}$	$64,5 \cdot 10^{-6}$	$49,0 \cdot 10^{-6}$	$34,5 \cdot 10^{-6}$
2 Лайман β	$84,0 \cdot 10^{-6}$	$69,0 \cdot 10^{-6}$	$54,7 \cdot 10^{-6}$	$41,0 \cdot 10^{-6}$	$29,0 \cdot 10^{-6}$
3 Лайман γ	$79,0 \cdot 10^{-6}$	$65,5 \cdot 10^{-6}$	$52,0 \cdot 10^{-6}$	$39,1 \cdot 10^{-6}$	$27,5 \cdot 10^{-6}$
4 Лайман δ	$77,5 \cdot 10^{-6}$	$63,5 \cdot 10^{-6}$	$50,4 \cdot 10^{-6}$	$38,3 \cdot 10^{-6}$	$26,8 \cdot 10^{-6}$

Для переходов $np - 1s$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{8n^2}{3\pi(n^2-1)} \left(7,723 - 2 \ln Z - \frac{0,0439}{n^3} \right).$$

Первоначальное неисправленное значение Тирена было $\Lambda = 1,00199$ (диссертация, Упсала, 1940).

После оцененной поправки (основанной на предположении, что калибровочные линии связаны с ближайшими к ним по длине волны рентгеновскими линиями):

Значение Тирена, исправленное на смещение Лэмба,

$$\Lambda = 1,002026 + 0,000016 \quad (\text{Коэн, 1956});$$

предположенное среднее из значений Бирдена (1,00208), Тирена (исправленное) (1,002026) и Беклина (исправленное) (1,00203)

$$\Lambda = 1,002045 \quad (\text{Коэн, 1956}).$$

$$\left(\frac{\Delta C_i}{C_i} \right)$$

Пусть $\Gamma_{\Lambda_i} = \frac{(\Delta C_i)}{(\Delta \Lambda / \Lambda)}$ — относительное изменение атомной константы C_i на

единицу относительного изменения Λ . Для нашего последнего (1955 г.) согласования методом наименьших квадратов мы определили следующие относительные изменения в окончательных значениях восьми различных атомных констант на одну миллионную долю изменения в исходном значении Λ :

C_i	e	m	h	α	Λ	N	F	$\frac{hc^2}{e\Lambda}$
Γ_{Λ_i}	0,14	0,22	0,26	0,02	0,21	-0,21	-0,07	-0,08

$\left(\frac{hc^2}{e\Lambda} \right)$ — переводный множитель $V\lambda$ от вольт к длинам волн (киловольты— X -единицы).

Если изменение нашего исходного значения Λ окажется равным $25 \cdot 10^{-6}$ (вместо 1,00202—значение 1,002045), то едва ли какая-нибудь из протабулированных констант, кроме Λ , изменится на величину, равную указанному в таблице стандартному отклонению.

влияние на согласованные этим методом значения каждой константы и каждого переводного множителя, помещенных в наших окончательных таблицах. Так, например, увеличение на $1 \cdot 10^{-6}$, как показывают расчеты, вызывает изменение Γ_{Λ} в каждой из констант табл. IV на указанное там число миллионных долей.

Вследствие этой неопределенности и большого значения этого переводного множителя в настоящее время две различные группы производят переопределение Λ . Первая из этих групп (Х. А. Киркпатрик и автор данной статьи) пользуется в основном методом вакуум-спектрографа с вогнутой решеткой Тирена. Мы проводим эту работу в спектрографической лаборатории проф. Мака из Висконсинского университета.

Мы сочли необходимым изменить его прибор, первоначально предназначенный для диска Роуланда диаметром в 21 фут (6,3 м), приспособив его

для диска диаметром в 42 фута (12,6 м) так, чтобы можно было получить необходимые малые скользящие углы падения на решетку и обеспечить хорошую дисперсию. На рис. 2 изображен специальный процесс машинной обработки, предложенный автором этой статьи и инженером Хенриксоном, для точной обработки на плоскошлифовальном станке мастерской Калифорнийского технологического института цилиндрической поверхности с радиусом кривизны в 21 фут (6,3 м) для нового держателя пластиинок Шумана.

Вторая группа, работающая над определением Λ , находится в университете Джона Гопкинса (проф. Дж. Бирден и его сын). Насколько я понимаю, их метод подобен методу, применявшемуся Бирденом в прошлом, — в том отношении, что используется плоская решетка и производится абсолютное измерение углов падения и дифракции. Однако в этом случае излучение должно быть монохроматизировано отражением от кристалла до падения на решетку.

ПЕРЕСМОТР ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ μ_e/μ_0

В теоретических вычислениях Карплуса и Кроля³⁷ «аномального» магнитного момента электрона μ_e/μ_0 (отношения μ_e к магнетону Бора μ_0) была обнаружена ошибка. Эти расчеты были повторены независимо Кролем (сообщено А. Питерманом), Саммерфильдом³⁸ и Питерманом³⁹. Все трое пришли к согласию относительно исправленного значения численного коэффициента — 0,328 α^2/π^2 в квантовоэлектродинамическом поправочном члене. В связи с этим соответствующая формула должна иметь вид

$$\frac{\mu_e}{\mu_0} = 1 + \frac{\alpha}{2\pi} - 0,328 \frac{\alpha^2}{\pi^2},$$

и если положить $\alpha^{-1} = 137,039$, то для μ_e/μ_0 получится

$$\frac{\mu_e}{\mu_0} = 1,0011596.$$

Очевидно, μ_e/μ_0 нечувствительно к малым изменениям α^{-1} ; изменение на одну единицу третьего десятичного знака в α^{-1} меняет значение μ_e/μ_0 только на 0,83 единицы восьмого десятичного знака. Поскольку в настоящее время едва ли имеются сомнения в значении α^{-1} с точностью до трех десятичных знаков, указанное выше значение μ_e/μ_0 можно считать вполне надежным до седьмого десятичного знака. Теоретическое значение μ_e/μ_0 в результате этой поправки увеличилось на $14,3 \cdot 10^{-6}$ по сравнению со значением, получавшимся из прежней теоретической формулы, в которой численный коэффициент последнего члена был равен — 2,973.

В вычислениях по методу наименьших квадратов, проведенных Коэном и др. в 1955 г., μ_e/μ_0 было существенной исходной величиной (как одна из вспомогательных постоянных). Изменение на $14,3 \cdot 10^{-6}$ оказывает влияние на три исходных уравнения, принятых в этих вычислениях (табл. II, ссылка 1), а именно: число 4,0 в третьем уравнении изменяется на 2,6, число —2,3 в четвертом уравнении — на —3,7, а коэффициент 13,5 в восьмом уравнении изменяется на 14,9 (напомним, что в результате анализа 1955 г. из 11 приведенных в табл. II уравнений четыре уравнения (6-е, 7-е, 9-е и 10-е) были исключены из окончательных вычислений из-за явных систематических ошибок).

Изменения в значениях семи из наиболее важных констант, согласованных в 1955 г., являющиеся результатом этого увеличения исходного значения μ_e/μ_0 , приведены в табл. V, в которой даны также пересмотренные

Таблица V

Ожидаемые изменения (в миллионных долях) семи важных выходных значений констант в результате изменения на $14,3 \cdot 10^{-6}$ значения аномального магнитного момента электрона μ_e/μ_0

Константы	e	m	h	a	Λ	N	F
Изменения	-27,0	-12,1	-40,0	-14,0	-7,6	26,3	-1,0
Значения, исправленные после изменения μ_e/μ_0 на $14,3 \cdot 10^{-6}$:							
$e = 4,80273 \cdot 10^{-10}$ эл.-стат. ед.							
$m = 9,1082 \cdot 10^{-28}$ г							
$h = 6,62491 \cdot 10^{-27}$ эрг.сек							
$a = 7,29719 \cdot 10^{-3}$							
$a^{-1} = 137,0391$							
$\Lambda = 4,002031$							
$N = 6,02502 \cdot 10^{-23}$ (г.моль) $^{-1}$ (физ. шкала атом. весов)							
$F = 2,89366 \cdot 10^{-14}$ эл.-стат. ед. (г.моль) $^{-1}$ (физ. шкала атом. весов)							
$F = 9652,18$ эл.-магн. ед. (г.моль) $^{-1}$ (физ. шкала атом. весов)							

значения ряда констант. Из таблицы видно, что наименьшее влияние это изменение оказало на число Фарадея F и на $\Lambda = \lambda_g/\lambda_s$ — переводный множитель от миллиангстремов к X -единицам. Стоит отметить, что эта поправка ошибки в μ_e/μ_0 сделала исправленное выходное значение Λ , полученное методом наименьших квадратов, гораздо более близким к тому значению, которое мы считаем наиболее вероятным непосредственно измеренным значением. Однако нужно иметь в виду, что в табл. V даны только те изменения, которые вызваны изменением значения μ_e/μ_0 на $14,3 \cdot 10^{-6}$, все же остальные исходные данные принятые такими, какими они были получены в результате вычислений 1955 г.

Недавно я узнал, что Крэйн и Пидд в Анн-Арборе (Мичиган) изменили отношение μ_e/μ_0 весьма остроумным способом, в котором первона-чально поляризованный пучок электронов заставляют совершить много полных оборотов по винтовой траектории в почти однородном магнитном поле соленоида. Так как отношение μ_e/μ_0 отличается от единицы, направление спина электронов медленно поворачивается относительно направления траектории, и это расхождение направлений после точно измеренного числа оборотов дает искомое значение. К сожалению, к моменту написания настоящей статьи я не успел получить запрошенных мной сведений относительно деталей методики выполнения этого эксперимента и его результатов.

Экспериментальная работа Демельта в Сиэттле по определению μ_e/μ_0 описана ниже.

НОВЕЙШИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ СВЕТА

В табл. VI приведены результаты 12 независимых определений скорости света (или скорости распространения радиоволн), выполненных начиная с 1949 г. и позднее. Все новейшие методы измерения совершенно согласованно показывают, что полученное ранее Берджем средневзвешенное значение, основанное главным образом на прежних измерениях Майкельсона и др.⁴⁰ методом врачающегося зеркала в эвакуированной трубе и Андерсона⁴¹, применившего модуляцию ячейкой Керра, а именно — 299,776 км/сек, было занижено приблизительно на 16—17 км/сек. Ноевые значения (полученные после 1948 г.) не все одинаково надежны или точны и не все согласуются между собой. В частности, результат Хансена и Боля⁴² отличается от других приблизительно на 3 км/сек. Хотя это расхождение и мало, если придерживаться прежних стандартов, оно слиш-

Таблица VI

Новейшие измерения скорости света

Автор	Дата	Метод	$c, \text{км.сек}^{-1}$
Аслаксон ^а	1949	Шоран	299 792 $\pm 3,5$
Хансен и Болль ^б . .	1950	Объемный резонатор фиксированной длины	299 789,3 $\pm 1,2$
Эссен ^в	1950	Объемный резонатор переменной длины	299 792,5 $\pm 1,0$
Бергстранд ^г	1951	Геодиметр	299 793,1 $\pm 0,32$
Фрум ^д	1952	Микроволновый интерферометр в свободном пространстве	299 792,6 $\pm 0,7$
Макензи ^е	1953	Геодиметр	299 792,4 $\pm 0,5$
Фрум ^д	1954	Микроволновый интерферометр в свободном пространстве	299 793,0 $\pm 0,3$
Плайлер и др. ^ж	1955	ИК-спектрометр	299 792 ± 6
Флорман ^з	1955	Микроволновый интерферометр в свободном пространстве	299 795,1 $\pm 1,9$
Бергстранд ^и	1957	Геодиметр	299 792,75 $\pm 0,34$ (среднее для первого прибора) 299 792,85 $\pm 0,16$ (среднее для более позднего варианта прибора)
Фрум ^к	1958	Микроволновый интерферометр в свободном пространстве	299 792,50 $\pm 0,10$

а) C. I. Aslakson, Nature 164, 711 (1949).

б) K. Bol, Phys. Rev. 80, 298 (1950).

в) См. цит. лит. ⁴⁵.

г) E. Bergstrand, Ark. fysik 2, 119 (1950); 3, 479 (1951).

д) K. D. Froome, Proc. Roy. Soc. A243, 123 (1952); A223, 195 (1954).

е) См. цит. лит. ⁴⁴.

ж) E. K. Plyler, L. R. Blaine and W. S. Connor, J. Opt. Soc. Amer. 45, 102 (1955); U. S. Nat. Bureau Stand. Techn. News Bull. 39, 1 (1955).

з) E. F. Florman, U. S. Nat. Bureau Stand. Techn. News Bull. 39, 1 (1955).

и) E. Bergstrand, Ann. franç. chronom. II, 97 (1957).

к) K. D. Froome, Proc. Roy. Soc. A247, 109 (1958).

ком велико по сравнению с указанными авторами вероятными ошибками. Дэйгоф предложил возможное объяснение *) этого расхождения.

Из перечисленных в табл. VI измерений, пожалуй, наиболее точными и надежными являются: 1) измерения Бергстранда ⁴³ в Норвегии и Макензи ⁴⁴ в Шотландии; тот и другой применяли модулированный ячейкой Керра видимый свет на длинных путях и пользовались весьма остроум-

*) В этом эксперименте истинный электрический диаметр полого резонатора больше механического диаметра на величину порядка глубины скин-эффекта стенок; эта глубина, разумеется, зависит от частоты возбуждаемого типа колебаний. Возможное наличие цепочки сульфидов серебра неизвестной толщины с проводимостью и диэлектрической постоянной, отличающимися от соответствующих значений этих параметров для всей массы серебра, оказывает влияние на наблюдаемую резонансную частоту резонатора. Поправка на этот эффект несколько увеличила бы значение скорости, полученное Хансеном и Болем. В частном сообщении Дэйгоф высказывает предположение, что механический эффект полировки покрытой серебром поверхности может состоять в изменении свойств металла, приводящем к значительному уменьшению его проводимости в очень тонком слое. К сожалению, Хансен и Болль проводили измерения только на частотах, достаточных для определения c в отсутствие таких аномальных поверхностных эффектов. В точных измерениях наилучшим методом всегда является перекрытие диапазона с тем, чтобы обнаружить возможные неожиданные систематические ошибки.

ным геодиметром Бергстрранда; 2) измерения Эссена⁴⁵ и Фрума⁴⁶; Эссен *) применял микроволновый объемный резонатор, а Фрум — микроволновый интерферометр в свободном пространстве. Все эти результаты находятся в прекрасном согласии между собой.

Я опишу только один из этих методов — метод Фрума (Национальная физическая лаборатория, Англия).

На рис. 3 схематически представлен первый четырехрупорный микроволновый дифракционный интерферометр Фрума. Источником микроволны

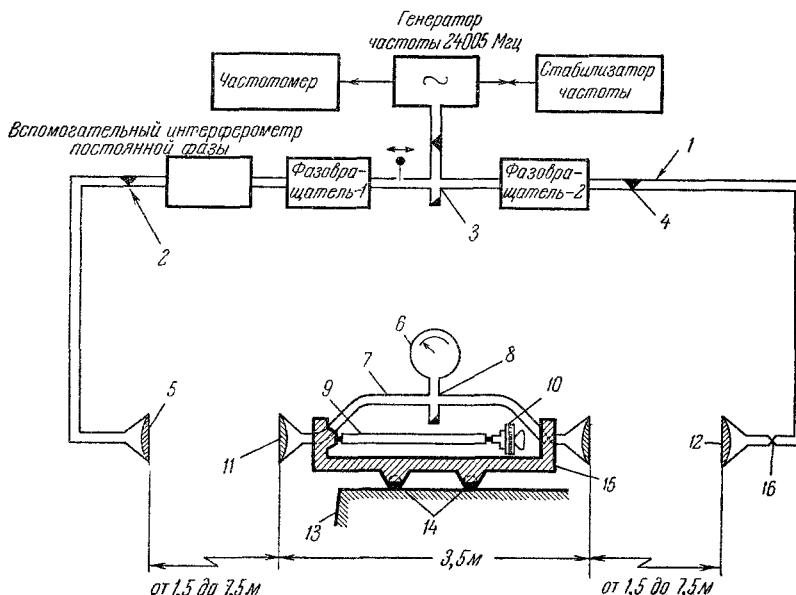


Рис. 3. Первый четырехрупорный дифракционный микроволновый интерферометр Фрума (Национальная физическая лаборатория, Теддингтон, Англия).

1 — волновод; 2 — аттенюатор (постоянный); 3 — гибридная схема (делитель пучка); 4 — аттенюатор (переменный); 5 — передающий рупор, 6 — детектор и индикатор, 7 — волновод; 8 — гибридная схема (смеситель), 9 — настройка длины, 10 — микрометрическая головка (скрепленная со станиной), 11 — приемный рупор; 12 — линза, 13 — станина; 14 — ролики; 15 — подвижная приемная каретка, 16 — скручивание волновода на 90°.

служил стабилизованный генератор с отражательным кристаллоном частотой 24 005 $M\mu$, что соответствует длине волны около 1,25 см. Точность измерения частоты составляла около $1 \cdot 10^{-8}$. Энергия от генератора направлялась к гибридной схеме («магическое Т»), которая служила в качестве делителя пучка, а отсюда через две длинные ветви волновода к паре передающих рупоров. Согласующий шлейф и фазовращатель-1 налево от делителя пучка вместе с «вспомогательным интерферометром постоянной фазы» образуют приспособление**) для изменения амплитуды энергии, пере-

*) Недавно Эссен информировал меня, что в оценке стандартного отклонения ± 1 км/сек в его определении 1950 г. учитывается возможная систематическая ошибка и что стандартное отклонение, вычисленное только из статистической дисперсии его результатов, должно было бы составлять около $\pm 0,3$ км/сек.

**) Это остроумное приспособление расщепляет входную волну на две составляющие одинаковой амплитуды, направляемые по двум различным путям. Эти составляющие затем вновь соединяются после изменения фазы от увеличения длины пути для одной составляющей и точно соответствующего ему уменьшения длины пути для другой. Таким образом, два равных вектора, представляющих фазы обеих составляющих, поворачиваются в противоположных направлениях на один и тот же угол так, что направление результирующей не изменяется, но ее амплитуда уменьшается.

даваемой по этой ветви, без изменения фазы. Фазовращатель-2 направо от делителя пучка вместе с регулируемым аттенюатором необходим для того, чтобы регулировать положение первого интерференционного минимума.

Подвижная часть интерферометра, расположенная между передающими рупорами, состояла из пары приемных рупоров, смонтированных на каретке, сконструированной почти целиком из кварцевых трубок (для термической устойчивости) и могущей передвигаться по направляющим на расстояние около 1 м. Оба приходящих сигнала смешивались для получения интерференции и детектировались при помощи простой супергетеродинной схемы. Выход выпрямлялся и считывался на миллиамперметре. Интерференционный минимум проявлялся как минимум тока, протекающего через прибор; каретку можно было устанавливать на минимум с точностью, превышающей 1 мк.

Для того чтобы измерить длину волны, перемещение каретки, соответствующее 81 длине волны (162 минимума), измерялось концевыми калибрами с точностью до 0,25 мк.

Фрум утверждал, что аппаратура для частоты 24 005 Мгц представляла собой прототип для исследования источников ошибок, присущих методу. Поэтому условия были специально подобраны так, чтобы создавать ошибки, например случайные эффекты, возникающие в результате отражений в довольно ограниченном пространстве. Тем не менее, оказалось, что аппаратура позволяет получать при измерении скорости точность $1 \cdot 10^{-6}$. После приведения результатов 10 наблюдений с этим прототипом было получено предварительное значение для скорости электромагнитных волн в вакууме в свободном пространстве

$$c = (299793 \pm 0,3) \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}.$$

Мы не можем описывать многие детали и усовершенствования, в частности исследование поправок на коэффициент преломления воздуха и водяного пара (см. две статьи Эссена и Фрума^{47, 48}).

С последним вариантом аппаратуры Фрума, работающим на частоте 72 006 Мгц (соответствующей длине волны около 4 мм), в котором вместо кварцевой подвижной каретки применяется алюминиевая, в настоящее время получен окончательный результат⁴⁹ для скорости в вакууме, а именно:

$$c = (299792,50 \pm 0,10) \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}.$$

Это значение очень близко к результатам, полученным Бергстрандом и др., пользовавшимися геодиметром (табл. VI) — прибором, в котором для измерения групповой скорости видимого света на длинном пути порядка 10 км применяется модуляция света ячейкой Керра. В последней статье Бергстранд⁵⁰ суммирует все результаты, полученные с геодиметром, и дает два значения для c , а именно:

$$(299792,75 \pm 0,34) \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1} \text{ и } (299792,85 \pm 0,16) \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1};$$

каждое из этих значений является средним взвешенным результатов, полученных на целом ряде базисных линий, но второе значение получено с усовершенствованным типом прибора. В частном сообщении Бергстранд указывает, что, принимая во внимание как его собственные результаты, так и результаты Фрума, он считает «наилучшим» значение

$$c = (299792,7 \pm 0,2) \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}.$$

Недавно XII Генеральная ассамблея Международного научного союза по радиосвязи рекомендовала принять $c = (299792,5 \pm 0,4) \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$. Это

же значение было принято Международным союзом геодезии и геофизики.

Исследования по определению скорости света продолжаются в Национальном бюро стандартов США (лаборатория Боулдер, Колорадо) под руководством Ричардсона, Кирнса и Кэлшоу. В их методе применяется подвижное зеркало для радиоволн, которые передаются и принимаются одним и тем же рупором. Перемещение зеркала измеряется прецизионными калибрами и сравнивается со стандартными длинами волн.

ГИРОМАГНИТНОЕ ОТНОШЕНИЕ ДЛЯ ПРОТОНА γ_p

Хорошо известно, что атомные ядра обладают моментом количества движения («спином») и магнитным дипольным моментом; при этом ось диполя совпадает с осью спина. Если поместить протон в магнитное поле, то можно было бы, казалось, воспользоваться классическим представлением о крутящем моменте, приложенном к протонным диполям и стремящемся направить их вдоль линий поля. Однако ввиду наличия у них спина диполи реагируют на приложенный извне крутящий момент прецессированием вокруг оси, параллельной внешнему полю; частота прецессии пропорциональна приложенному внешнему магнитному полю.

Эксперименты, проведенные в Гарварде⁵¹ и Стэнфорде⁵², показали, что эту «частоту прецессии» протонов легко измерить, поместив образец из воды или минерального масла, запаянный в стеклянном баллоне, в постоянное однородное магнитное поле. Образец помещается внутрь проволочной катушки, по которой пропускается ток радиочастоты; ось катушки перпендикулярна к магнитному полю. Когда магнитное поле приложенной радиочастоты резонирует с частотой прецессии протонов, происходит обмен энергией и возникающее возмущение прецессирующих протонов заставляет их возбуждать обнаруживаемый «сигнал» либо в самой катушке радиочастоты (изменяя кажущийся импеданс), либо в специальной детектирующей катушке, расположенной перпендикулярно к первой. В Гарварде применяют одну катушку, в Стэнфорде — две.

Отношение γ_p частоты протонной прецессии ω_p к интенсивности магнитного поля B является чрезвычайно важной постоянной, или переводным множителем, так как метод протонного резонанса оказался наиболее удобным и точным абсолютным методом для измерения интенсивностей магнитных полей, превышающих несколько сотен гауссов.

В молекуле водорода внешнее приложенное магнитное поле B_a несколько отличается от магнитного поля B для протона вследствие диамагнитного эффекта электронов. Измеренная частота прецессии ω_p , кажущееся гиromагнитное отношение γ'_p (до поправки на диамагнитный эффект) и внешнее приложенное магнитное поле B_a связаны соотношением

$$\omega_p = \gamma'_p B_a.$$

Рамсей⁵³ вычислил поправку на диамагнетизм к значению поля для молекулы водорода и получил $2,7 \cdot 10^{-5} B$.

Гиromагнитное отношение для протона было измерено Томасом и др.⁵⁴ в Национальном бюро стандартов США с точностью $22 \cdot 10^{-6}$. В его экспериментах распределение поля между полюсами электромагнита было впервые тщательно изучено при помощи небольшого детектора, использующего протонный резонанс. Затем средняя интенсивность поля B_a была измерена путем определения при помощи взвешивания силы, действующей на несущую ток прямоугольную катушку точно определенных размеров, нижний конец которой висел между полюсными наконечниками. В результате

было получено значение

$$\gamma'_p = \frac{\omega_p}{B_a} = (2,67523 \pm 0,00006) \cdot 10^4 \text{ рад} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} (\pm 23 \cdot 10^{-6}).$$

Недавно гиromагнитное отношение для протона было вновь измерено в Национальном бюро стандартов США Бендером и Дрисколлом, которые применяли совершенно иной метод для создания и измерения магнитного поля. В этом случае значительно более слабое поле — порядка всего 12 гс — создавалось током, проходившим в однослоином соленоиде из свежетянутой медной проволоки, уложенной в V-образной тщательно выточенной винтовой канавке на цилиндрической керамической форме. Все геометрические размеры этого соленоида, и в частности его шаг, были определены с точностью до микрона. Таким образом, достаточно было точно измерить ток, чтобы получить интенсивность поля в абсолютных единицах. Такое слабое поле потребовало также несколько иного метода измерения частоты пререссии. Образец воды поляризовался в сильном магнитном поле, а затем выстреливался сквозь резиновую трубку в прецизионный соленоид. После попадания ориентация протонов изменялась импульсом радиочастоты на угол около 90° по отношению к полю соленоида, и затем наблюдался возбужденный в приемной катушке сигнал *свободной пререссии*. Флуктуации остаточного земного поля (тщательно нейтрализованного) и флуктуации тока в соленоиде дали разброс отдельных замеров частоты приблизительно в $1 \cdot 10^{-6}$. Результат Бендера и Дрисколла (без поправки на диамагнетизм)⁵⁵ равен

$$\gamma = (2,67513 \pm 0,00002) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1} \times \times \text{сек}^{-1} (\pm 4 \cdot 10^{-6}).$$

Большой интерес представляет анализ (подобный проведенному Хантоном и Мак-Нишем⁵⁶) той роли, которую играет в этих двух типах экспериментов важная «постоянная переноса» g — ускорение силы тяжести. В результаты экспериментов Томаса и др. g входит в силу следующих двух обстоятельств:

- 1) сила, действующая на прямоугольную катушку, подвешенную между полюсами магнита, измеряется путем *взвешивания* на весах; поэтому значение, получающееся для интенсивности поля B , пропорционально принятому местному значению g , а $\gamma = \omega/B$ обратно пропорционально g ;
- 2) абсолютный ампер также зависит от g , так как он определяется в эксперименте с так называемыми «токовыми весами», в котором сила, действующая между двумя катушками точно определенной геометрии, несущими один и тот же ток, измеряется взвешиванием. Так как в этом

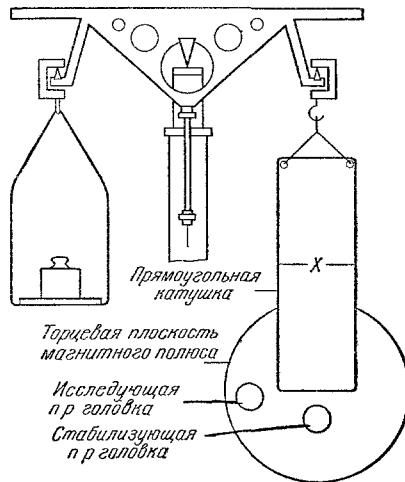


Рис. 4. Измерение гиromагнитного отношения для протона γ'_p методом Томаса и др.

Поле между полюсами электромагнита было сначала тщательно исследовано при помощи протонно-резонансной (п-р) головки. Затем средняя напряженность поля B_a была измерена в абсолютных единицах путем определения взвешиванием силы, действующей на несущую ток прямоугольную катушку точно определенных размеров, нижняя часть которой была подвешена между полюсами. Таким методом Томас и др. в Национальном бюро стандартов получили для гиromагнитного отношения для протона γ'_p (без поправки на диамагнетизм) следующий результат:

$$\gamma'_p = \frac{\omega_p}{B_a} = \frac{\mu' N e}{M_p c} = \\ = (2,67523 \pm 0,00006) \cdot 10^4 \text{ рад} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

эксперименте применяются *две* катушки, величина ампера пропорциональна $g^{1/2}$, поэтому увеличение g приведет к *увеличению* γ пропорционально $g^{1/2}$. Суммарный эффект обоих факторов, действующих в экспериментах Томаса и др., состоит в изменении значения, получаемого для γ , пропорционально $g^{-1/2}$.

В опыте Бендера и Дрисколла g оказывает влияние только посредством стандартного ампера, определяемого из указанного эксперимента с токовыми весами; поэтому значение γ , получаемое в этом случае, изменяется также пропорционально $g^{1/2}$, но только обратно изменению γ в опытах Томаса и др.

Относительные значения g для различных точек земной поверхности вполне воспроизводимы и известны со значительной точностью. Но проведение экспериментов с целью приведения этих значений к абсолютным значениям в *см/сек²* представляет значительные трудности. В течение многих лет абсолютное определение g при помощи поворотного маятника Катера, проведенное в 1906 г. в Потсдаме Куненом и Фуртванглером под руководством Гельмерта, не подвергалось никакому сомнению. Однако с некоторых пор стали накапливаться свидетельства того, что это значение для Потсдама завышено от 10 до $20 \cdot 10^{-6}$. Маятниковый метод измерения g , предложенный для того, чтобы обойти трудности измерения малых промежутков времени, в настоящее время, когда этих трудностей не существует, заменяется измерениями перемещений свободно падающего тела при помощи стrobоскопического освещения или световых сигналов при прохождении падающим телом определенных фиксированных точек или путем прерывания неподвижного светового пучка специальными рамами, расположеннымными в отверстиях падающего стержня. Последний метод применялся Тэйтом и Пэйджем в Национальном бюро стандартов США. В этих опытах можно получить точность порядка нескольких миллионных долей.

Таблица VII

Новейшие абсолютные определения ускорения силы тяжести g , выраженные в отклонениях от потсдамского определения (миллионные доли)

Метод	Автор	Дата	Место	Результат
Маятник из плавленого кварца	Хейль и Кук ⁵⁷	1936	Национальное бюро стандартов США	—18
Оборотный маятник в вакууме	Кларк ⁵⁸	1939	Национальная физическая лаб., Англия	—14
Свободно падающий стержень	»	1939	Там же	—15
Свободно падающий стержень	П. Н. Агальецкий, К. Н. Егоров, А. И. Марциньяк	1947—1956	ВНИИМ	—4
Маятник	—	—		—7
Свободно падающий стержень («Строборама») . . .	Воле ⁵⁹	1952	Франция	—24
Свободно падающий стержень	Престон-Томас ⁶⁰	1958	Национальный исследовательский совет, Канада	—16
Свободно падающий стержень	Тэйт и Пэйдж	В наст. время	Национальное бюро стандартов США	не закончено

Результаты некоторых новейших определений g , выраженные в миллионных долях по отношению к потсдамскому значению⁵⁷⁻⁶⁰, приведены в табл. VII. Как можно видеть, все эти определения, без исключения, указывают на то, что потсдамское значение g было завышено приблизительно на $10 \div 20 \cdot 10^{-6}$.

Интересно подчеркнуть, что оба метода определения γ , гиromагнитного отношения для протона, поскольку их зависимость от g взаимно противоположна, дают согласное свидетельство ошибки в потсдамском значении g , в общем того же самого порядка величины.

Хотя мы и не знаем g с той точностью, которая была бы желательна, значение γ Бендера и Дрисколла, по-видимому, отличается от значения γ , полученного Томасом и др., по какой-то другой причине, отличной от поправки к значению g . Некоторая неопределенность все еще связана с поправкой на диамагнетизм для использованных образцов из минерального масла и воды; кроме того, Мак-Ниш (Национальное бюро стандартов) недавно предположил возможность одного источника ошибки в определении Томаса и др., который в случае Бендера и Дрисколла мог отсутствовать. Этим источником ошибки могло быть то, что линии сил в эксперименте Томаса и др. не были строго перпендикулярны к плоскостям магнитных полюсов в применявшемся ими магните; между тем они исходили из допущения такой перпендикулярности при ориентировании прямоугольной катушки для измерения поля. Такое незначительное отклонение от перпендикулярности могло бы получиться в случае, если бы обе торцовые плоскости магнитных полюсов слегка сместились относительно друг друга. Частота ядерного протонного резонанса всегда измеряет имеющееся поле, независимо от его направления, но прямоугольная катушка, несущая ток, измеряет только ту компоненту поля, которая перпендикулярна к плоскости катушки. Таким образом, если бы вследствие значительного разногласия между результатами этих двух экспериментов нам пришлось игнорировать результаты одного из них, то мы, пожалуй, отвергли бы эксперимент Томаса и др.

**ПЕРЕВОДНЫЙ МНОЖИТЕЛЬ $V\lambda_s$ ОТ ВОЛЬТ К ДЛИНАМ ВОЛН
РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ В X -ЕДИНИЦАХ ЗИГБАНА, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЙ
МЕТОДОМ КВАНТОВОЙ ГРАНИЦЫ НЕПРЕРЫВНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО
СПЕКТРА**

Переводный множитель $V\lambda_s$ от вольт к длинам волн, измеренным в X -единицах, связан с основными константами соотношением: $V\lambda_s = hc^2/e\Lambda$, где e — заряд электрона в а.е. единицах, $\Lambda = \lambda_g/\lambda_s$ — переводный множитель от миллиангстремов к X -единицам (причем последние определяются по шкале Зигбана, или кристаллической шкале, для длин волн). Поэтому этот переводный множитель имеет важное значение для определения постоянной Планка \hbar . Этот множитель тщательно и многократно определялся со все возрастающей точностью в течение примерно 40 лет — с момента открытия так называемого «обратного фотоэлектрического эффекта» приблизительно в 1920 г. в лаборатории Дьюэна в Гарварде. Новейшие определения сделаны Бирденом с сотрудниками в университете Джона Гопкинса и автором с сотрудниками в Калифорнийском технологическом институте. В принципе методика заключается в том, что к рентгеновской трубке прикладывается весьма стабильное высокое напряжение постоянного тока, которое измеряется с большой точностью при помощи «умножителя» с очень точным отношением сопротивлений; измеряется (также с максимально возможной точностью) значение длины волны, соответствующее коротковолновой квантовой границе

непрерывного спектра испускания рентгеновской трубы. Этот эксперимент и необходимые поправки, а также возможные источники систематических ошибок подробно обсуждались в современной литературе^{61-67,4}. Здесь мы только отметим, что в настоящее время, по-видимому, еще остается расхождение между результатами этого эксперимента и общепринятыми значениями констант, по крайней мере значениями, принятыми ко времени нашего последнего согласования в 1955 г. Расхождение таково, что значение $h\nu_{\max}$, испускаемого рентгеновской трубкой, по-видимому, немного, но заметно *больше*, чем можно было бы ожидать (после внесения всех поправок), учитывая количество подводимой энергии (eV). Одна из трудностей этого эксперимента, возникающая вследствие малой разрешающей способности даже лучших применяемых в настоящее время рентгеновских трубок, вносит неопределенность в истолкование «изохромат», или инструментальных кривых интенсивности, имеющее целью найти точный порог квантовой границы. Для истолкования этих кривых применяются различные методы в зависимости от того, допускается ли в собственно непрерывном спектре, разумеется, в соседстве с границей, разрыв второго порядка или нечто более подобное смеси разрывов первого и второго порядков. В настоящее время Меррилл и автор настоящей статьи работают в Калифорнийском технологическом институте над устранением некоторых из указанных неясностей.

**ПОСТОЯННАЯ РИДБЕРГА ДЛЯ БЕСКОНЕЧНОЙ МАССЫ R_{∞}
(С УЧЕТОМ СМЕЩЕНИЯ ЛЭМБА)**

Проанализировав спектроскопические данные Хоустона⁶⁶, Дринкуотера и др.⁶⁹ и Чу⁷⁰ в свете современных сведений о смещении Лэмба, Коэн³ получил

$$R_{\infty} = (109737,309 \pm 0,012) \text{ см}^{-1} \quad (\pm 0,11 \cdot 10^{-6}).$$

Постоянная Ридберга — вспомогательная постоянная, имеющая большое значение, так как она определяет с большой точностью существенную функцию двух из наших неизвестных α и e :

$$R_{\infty} = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3 c} = \frac{mc^2 \alpha^3}{4\pi e^2}.$$

После определения согласованных значений α и e можно использовать эти значения вместе со значением R_{∞} для вычисления постоянной Планка h и массы электрона m из соотношений:

$$h = \frac{2\pi e^2}{\alpha c}, \quad m = \frac{4\pi e^2 R_{\infty}}{\alpha^3 c^2}.$$

Коэн в его анализе данных³ отметил одно обстоятельство, ранее, видимо, остававшееся без внимания, а именно: в то время как данные по R_{∞} , полученные Дринкуотером и др., непосредственно связаны с первичными спектроскопическими эталонами длины, данные Хоустона и Чу не обладают этим свойством. Последние выражали определяемые ими значения через определенную зеленую линию 5015 спектра гелия, которая была ранее определена Мерриллом; но так как точность экспериментов Хоустона и Чу была выше точности Меррилла, то они отнесли полученные ими значения к некоторому условно принятому значению для зеленой линии гелия, которое они получили, просто дописав незначащий нуль к десятичным знакам полученного Мерриллом численного значения. Это указано ими самими с пояснением, что при этом легко будет внести соответствующую поправку в их данные, если будет сделано лучшее определение-

линии 5015. Приходится с сожалением отметить, что просмотр столь важного пункта, касающегося существенной константы, а именно R_∞ , в течение такого большого промежутка времени является лишней иллюстрацией поверхностного чтения большинства научных статей.

Кроме этих трех измерений длины волны, имеющих непосредственное отношение к определению R_∞ , измерения эффекта изотопического смещения массы (названного Зоммерфельдом «Mitbewegung des Kerns»), хотя они и не дают непосредственно значения R_∞ , все же полезны при определении атомной массы электрона — вспомогательной постоянной, имеющей отношение к вычислению R_∞ из спектроскопических данных. Сравнив три измерения этого смещения (Робинсона, Вильямса и Шейна и Спединга) с результатами Дринкуотера и др., а также с результатами Хоустона и Чу (причем последним был придан некоторый неопределенный нормализующий множитель для учета неточности в длине волны исходной зеленой линии гелия), Коэн сумел получить методом наименьших квадратов «наилучшие» значения R_∞ , атомной массы электрона и длины волны линии гелия 5015.

Вследствие указанных обстоятельств мы все время, начиная с 1952 г., когда были выполнены работы Коэна, агитировали спектроскопистов, побуждая их вновь проделать точное определение линии Не 5015. Теперь мы можем с удовольствием объявить, что такое переопределение было сделано Филдом и Сириесом в Кларендонской лаборатории в Оксфорде. Они получили следующий результат:

$$5015,6775 \pm 0,0004 \text{ \AA} \text{ (1958 г.)},$$

отличающийся от результата Меррилла:

$$5015,6750 \text{ \AA} \text{ (1917 г.)}.$$

Коэн обнаружил, что если ввести это новое значение Филда и Сириеса для линии 5015 и перенормировать результаты Хоустона и Чу, то его значение R_∞ , полученное методом наименьших квадратов в октябре 1952 г., увеличится на ничтожную величину $0,002 \text{ см}^{-1}$ и будет равно

$$R_\infty = 109737,328 \pm 0,014 \text{ см}^{-1}.$$

Переопределение зеленой линии гелия производится также У. Мартином в Национальном бюро стандартов США; наконец, Террье из Международного бюро по мерам и весам в Севре также обещает произвести переопределение *).

НОВЕЙШИЕ ДАННЫЕ ОТНОСИТЕЛЬНО g -ФАКТОРА ЭЛЕКТРОНА И μ_e/μ_0

Э. Лэмб, ныне работающий в университете им. Вашингтона в Сент-Луисе, еще будучи дипломником в Принстоне, выполнил точный эксперимент по микроволновому поглощению для определения g -фактора электрона. Эта работа остается не опубликованной до сих пор. Эксперимент этот подобен ранее выполненному эксперименту Берингера и Хилда⁷¹, но почти на порядок повышает точность последних. Молекулы H_2 , находящиеся в сферическом тефлоновом сосуде диаметром около 1 см при

*.) Добавление в корректуре. Только что получены результаты Мартина и Террье:

$$5015,6782 \pm 0,0003 \text{ (Мартин),}$$

$$5015,6778 \pm 0,0001 \text{ (Террье).}$$

Эти результаты не требуют существенного изменения приведенного выше значения Коэна.

давлении около 1 мм, были помещены в объемный резонатор, находящийся в магнитном поле; многократно измерялась частота так называемых линий π_1 и π_2 для получения значения g_J/g_P — отношения магнитного момента электрона в основном состоянии атома водорода к магнитному моменту протона в образце дистиллированной воды (не исправленному на диамагнетизм). При этом приходилось подмешивать к водороду небольшое количество O_2 для того, чтобы обеспечить надлежащий перенос момента количества движения к молекулам водорода при их столкновениях с кислородом. Результат эксперимента, дающий g_J для электронов, связанных в водороде, без возможной (хотя и неопределенной) поправки на влияние примеси кислорода, был

$$\frac{g_J}{g_P} = 658,2159088 \pm 0,000022.$$

Это дает средневзвешенное и стандартное (среднеквадратичное) отклонение для 35 измерений линий π_1 и π_2 . Доля кислорода варьировалась с тем, чтобы обнаружить корреляцию между ней и небольшими изменениями в значении g_J/g_P . Для π_2 не удалось обнаружить явной корреляции, но обнаружилась вероятность наличия такой корреляции для π_1 .

После внесения релятивистской поправки в этот результат для получения значения g_J/g_P для свободного электрона Лэмб получил

$$\frac{g_S}{g_P} = 658,22759 \pm 0,00004 \text{ (для свободных электронов);}$$

здесь стандартное отклонение произвольно удвоено по сравнению с фактическим разбросом результатов исходного эксперимента ввиду неопределенности возможного влияния добавленного кислорода.

Демельт⁷² в университете им. Вашингтона в Сиэтле выполнил несколько видоизмененный эксперимент, преследуя ту же основную цель, что и Лэмб. Тепловые электроны ($t_e \approx 400^\circ$ К) поляризуются при обменных столкновениях с ориентированными атомами натрия; при этом ориентация атомов переносится на электроны. Равновесная доля атомов натрия сохраняется поляризованной при помощи оптической перекачки. Когда в дальнейшем электроны искусственно дезориентируются при помощи гиromагнитного спинового резонанса, происходит добавочное уменьшение поляризации натрия, которое обнаруживается оптической контрольной аппаратурой; тем самым создается возможность определения спинового g -фактора свободного электрона, g_S . Демельт определил только отношение $g_J(\text{Na})/g_S$, для которого он получил значение

$$\frac{g_J(\text{Na})}{g_S} = 1,000026 \pm 0,00003 (\pm 30 \cdot 10^{-6}).$$

Сопоставляя это значение со значением $g_J(\text{Na})$ Куша и Тауба⁷³, полученным из экспериментов с атомным пучком, Демельт получил для g_S , измеренного на свободных тепловых электронах,

$$g_S = (1,00111 \pm 0,00005) \cdot 2.$$

Это дает *меньшее* экспериментальное значение для μ_e/μ_0 — «аномального» магнитного момента электрона, чем недавно исправленное теоретическое значение^{38,39} и чем два нижеприведенных экспериментально наблюдавшихся значения.

Было бы очень желательно, чтобы эти работы были продолжены (как это и предполагает автор) с целью повысить точность метода и более полно исследовать возмущающее влияние буферного газа аргона.

Харди и Перселл⁷⁴ в Гарварде тем же методом, который ранее применялся Гарднером и Перселлом, измерили циклотронную частоту

свободного электрона относительно резонансной частоты протона в том же магнитном поле и получили $\mu_e/\mu_0 = 657,4676 \pm 0,0010$. Сопоставляя этот результат с результатом Берингера и Хилда для g_J/g_P , они получили для аномального отношения магнитного момента электрона

$$\frac{\mu_e}{\mu_0} = 1,0011561 \pm 0,0000015 \quad (\pm 1,5 \cdot 10^{-6}).$$

Этот результат, вероятно, самый точный в настоящее время, очень хорошо согласуется с прямым измерением Крейна и Пидда, которые частным образом сообщили, что их результат равен

$$\frac{\mu_e}{\mu_0} = 1,0011612 \pm 0,0000024 \quad (\pm 2,4 \cdot 10^{-6});$$

однако он отличается на величину, несколько более, чем вдвое, превышающую оценку стандартного отклонения, от исправленного теоретического значения

$$\frac{\mu_e}{\mu_0 \text{ (теорет.)}} = 1,00115961.$$

Этот обзор новых экспериментальных данных, относящихся к основным константам и представляющих лишь небольшую часть всей массы данных, на которых должно базироваться вычисление методом наименьших квадратов, показывает, между прочим, какое множество обходных и иногда неожиданных путей может связывать между собой эти величины. Кто бы мог подумать, что ошибка в значении ускорения силы тяжести может быть обнаружена путем измерения гиromагнитного отношения для протона двумя различными методами! В связи с этим нам хотелось бы вновь подчеркнуть выдвиннутое в начале этой статьи положение, о том, что весь комплекс основных констант подобен паутине, вся ткань которой в целом испытывает влияние прикосновения в любой ее точке. Поэтому-то никакой «кусочный» подход к проблеме физических констант неэффективен — эту проблему следует время от времени подвергать критическому анализу методом наименьших квадратов, чтобы обнаружить несогласованность во всей системе констант. Сами по себе константы могут, конечно, быть постоянными (мы верим и надеемся, что это так), но *наше знание* этих констант не является чем-то статичным, так как с течением времени в каждую эпоху проверки констант появляются новые данные, полученные новыми, лучшими методами и при помощи лучшей аппаратуры; часто эти новые данные настолько превосходят некоторые из прежних данных по точности, что прежние данные оказываются слишком устаревшими, так что им нельзя придать никакого веса при новом вычислении методом наименьших квадратов.

Другой важный урок, который следует извлечь из приведенного примера, это — необходимость выполнять каждое определение любой константы возможно большим количеством различных методов. Даже если применяется, по существу, одинаковая методика, повторение определений различными исследователями в различных местах и с независимо собранной аппаратурой следует всячески приветствовать. Другими словами, чем более переопределенной удастся сделать задачу, тем больше шансов обнаружить и исключить источники систематических ошибок. Таким способом удалось не только вскрыть экспериментальные ошибки, но и обнаружить ошибки в теоретических рассуждениях. Мы уже рассмотрели прекрасный пример обнаружения ошибки в теоретически вычисленном значении μ_e/μ_0 .

Время от времени кто-нибудь вновь высказывает прекрасную идею о том, что было бы значительно проще отказаться от нашей современной произвольной, установленной человеком, условной системы единиц,

основанной на метре, килограмме и секунде, и принять систему, основанную на природных константах, принятых за единицы. Такие люди иногда настолько наивны, что думают, будто таким способом мы избавимся от необходимости измерять основные природные константы!

В такой системе, пожалуй, можно будет измерять электрический заряд в электронах как единицах, но это, вероятно, единственная физическая величина, которой можно дать единое согласованное определение. На самом деле мы еще недостаточно знаем физическую природу нашего мира, чтобы можно было разумно выбрать совокупность природных констант, которые были бы пригодны в качестве единиц, хотя, конечно, это было бы удобно и позволило бы получить необходимую точность определений. Что могло бы служить единицей массы? Массы электрона, протона, нейтрона, μ^- - и μ^+ -мезонов или π^+ , π^0 , π^- -мезонов и любой из большого числа «*K*-частиц», или «гиперонов», имеют, вероятно, одинаковое право претендовать на «фундаментальность». Любая из четырех фундаментальных длин — ридберговская длина волн, боровский радиус, комптоновская длина волны и лоренцовский радиус электрона оказались бы равноправными кандидатами на единицу длины. Скорость света в комбинации с одной из этих длин могла бы дать одну из четырех единиц времени. Однако наша современная произвольная система единиц все еще представляет большее удобство и дает значительно большую точность воспроизведения, чем можно было бы получить с любыми из этих природных единиц.

Отсюда, однако, не следует, что мы должны противиться принятию для повышения точности и воспроизводимости стандартного метрового стержня (эталона метра) таких эталонов длины, как определенная спектроскопически длина волны света, например, длина волны красной линии кадмия или более резкой линии Hg^{198} , предложенной Меггерсом, или Kr^{86} , в зависимости от того, какая из этих линий обеспечит большую точность и воспроизводимость при определении единицы длины *). Аналогично, когда атомные часы, например «цезиевые часы» Эссена, окажутся удобнее и точнее для установления эталона времени, чем вращение Земли, единица времени должна быть всяческими методами переопределена через новый атомный эталон. Но такие изменения будут сделаны не потому, что выбранные природные единицы обладают фундаментальным характером, и не вследствие теоретических упрощений в физике, которые могут явиться результатом принятия таких единиц, а только потому, что они дают большую точность, удобство и воспроизводимость при определении соответствующей единицы. Такие изменения, хотя они и очень желательны, никоим образом не упрощают проблему определения наилучших значений основных констант.

Улучшением такого рода, которое я горячо рекомендую, было бы принятие, с общего согласия, некоторой стандартной линии спектра испускания рентгеновских лучей, например линии $K\alpha_1$ молибдена, для определения *X*-единицы — спектроскопической единицы длины волны, приблизительно равной миллиангстрему, через которую выражены таблицы длин волн около 3000 линий рентгеновского спектра. Длины волн этих линий можно измерять относительно друг друга методом дифракции в кристаллах с очень высокой степенью точности, в лучших случаях приближающейся к $1 \cdot 10^{-6}$, но переводный множитель $\Lambda = \lambda_0 / \lambda_s$ для превращения длин этих волн в миллиангстремы известен с гораздо меньшей точностью. В настоящее время в учебниках *X*-единица определяется почти исключительно через постоянную решетки идеального кристалла кальцита; между тем практи-

*) XI Генеральная конференция по мерам и весам приняла в качестве эталона длину волны линии Kr^{86} . (Прим. перев.)

чески единственным методом для выяснения того, что данный кристалл отвечает этому требованию, является измерение какой-либо хорошо известной и часто измеряемой линии рентгеновского спектра, например $Mo K\alpha_1$, при помощи этого кристалла. Таким образом на практике, когда стоит вопрос о наивысшей точности, X -единица оказывается связанный с линиями испускания, а не с кальцием. Я бы хотел, чтобы меня правильно поняли: ни в одном из вышеприведенных случаев я не предлагаю существенно изменить принятую величину стандартной единицы, а предлагаю только уточнить ее определение в пределах существующих рамок неопределенности.

Однако в настоящее время предлагается реформа, включающая действительное изменение величины единицы, которую я горячо поддерживаю. Это — изменение двух существующих в настоящее время шкал атомных весов, так называемой химической и физической, с тем, чтобы объединить эти шкалы и в то же время повысить точность, с которой можно выражать атомные веса нуклидов. Относительная распространенность изотопов кислорода в природе такова:

$$O^{16} : O^{18} : O^{17} = (506 \pm 10) : 1 : (0,204 \pm 0,008).$$

Масс-спектроскопическим методом Нир показал, что если кислород известняка согласуется с таким изотопным составом, то кислород образцов железной руды или морской воды часто имеет другой состав, в котором содержание O^{18} на 4% ниже. Возможно, что на уровне наивысшей точности никакая так называемая относительная распространенность изотопов не может рассматриваться как надежная, воспроизводимая природная константа.

Между тем так называемая химическая шкала атомных весов, установленная до открытия изотопов, основана на соглашении о том, что средний атомный вес смеси изотопов кислорода с таким изотопным составом, который соответствует относительной распространенности их в природе, должен быть принят равным точно 16. Наоборот, физическая шкала атомных весов определена так, что в ней изотоп O^{16} имеет атомный вес, в точности равный 16, и поэтому на его вес не может повлиять никакая неопределенность в относительной распространенности изотопов. Переход от одной шкалы к другой осуществляется при помощи переводного множителя r , значение которого обычно принимается равным $r=1,000275$, но вследствие неоднозначности химической шкалы, связанной с колебаниями в относительной распространенности изотопов кислорода, этот множитель может быть фактически равен только $r=1,000268$.

Для того чтобы избежать этой неоднозначности химической шкалы, а также чтобы устранить неясности, возникающие из-за наличия двух почти, но не вполне одинаковых шкал, группа компетентных масс-спектропиcтов предлагает в настоящее время принять новую физическую шкалу атомных весов, в которой вес изотопа C^{12} будет, по определению, принят равным 12. Эта шкала должна обозначаться ($C^{12} = 12$)-шкала. По счастливой случайности атомные веса в этой шкале будут столь незначительно отличаться от значений атомных весов в принятой в настоящее время химической шкале, что при достигаемой в химических определениях точности это различие не будет иметь значения. Поэтому можно думать, что предлагаемая шкала окажется приемлемой как для физиков, так и для химиков *). Для физиков новая шкала будет иметь определенные преимущества

*) Новая шкала ($C^{12} = 12$) принята Международным союзом химиков и рекомендована им для утверждения на XI Генеральной конференции по мерам и весам.
Прим. перев.)

перед шкалой, в которой $O^{16}=16$ (как отмечают Маттаух (Майнц) и Нир (Миннесота)), так как методы масс-спектроскопии предоставляют гораздо лучшие возможности для высокоточного сравнения других масс изотопов с массой C^{12} , чем с массой O^{16} ; при принятии за основу C^{12} , получится также выигрыш в точности при определении масс путем измерения энергий ядерных реакций.

Подведем итоги. В любую эпоху единственным источником информации, которым ученые обладают и при помощи которого они могут получить надежные значения физических и химических констант, является перечень точных данных, полученных в результате всех наиболее надежных измерений указанных констант или функций от них, которые можно получить в данное время. Чем более переопределены данные, приводимые в таком перечне, тем больше возможность проверки и тем больше шансов обнаружить ошибки. Если мы хотим иметь *непротиворечивую* систему констант (а мы, безусловно, не нуждаемся в противоречивой системе!), т. е. систему, согласующуюся со всеми принятыми теоретическими соотношениями между константами и по возможности согласующуюся со всеми надежными данными измерений, то, по мнению автора этих строк, нет другого метода аналитической проверки, кроме метода наименьших квадратов.

Нужно откровенно сказать, что даже при помощи метода наименьших квадратов невозможно сохранить полную объективность или избежать некоторого произвола исследователя при получении им окончательных данных. *Необходимо* приписать *априорные веса* исходным данным. Эта проблема не разрешается путем приписывания равных весов или путем отбрасывания некоторых данных и сохранения остальных. Такое *приписание* весов исходным данным совершенно неизбежно. Если имеются надежные априорные оценки ошибок (разброс среднеквадратичной ошибки) исходных данных и если нет никаких систематических ошибок, то, по теории метода наименьших квадратов, следует приписать данным веса, обратно пропорциональные квадратам априорных оценок их среднеквадратичных ошибок. Но часто мы не имеем таких надежных априорных измерений ошибок, а систематические ошибки, к сожалению, весьма распространены. Все, что может сделать исследователь, работающий над анализом и согласованием, это честно и со всей возможной для него четкостью выявить, что, собственно, сделано им, в частности, в тех пунктах согласования, в которых необходимо было принять произвольное решение. При таких вычислениях выход из положения дает переопределение данных, и чем оно больше, тем лучше, так как даже в том случае, если включены данные, обладающие систематическими ошибками, можно надеяться, как это обычно и бывает, что при достаточном переопределении такие ошибки будут, по крайней мере частично, скомпенсированы путем усреднения или же будут «разбавлены»; если же эти систематические ошибки слишком велики, то переопределение данных приведет к их обнаружению вследствие бросающегося в глаза несоответствия ничтожного меньшинства данных с согласованными значениями остальных.

Одна теоретическая школа утверждает, что не следует пытаться получать «наилучшие (т. е. компромиссные) значения» констант для какой-либо эпохи, а нужно дожидаться, пока будут возможны лучшие измерения, так что не останется никакой несогласованности. Неприятная сторона этого заключается в том, что придется ждать вечно, а пока что каждый исследователь будет пользоваться излюбленными им значениями констант, полученными не на базе всего комплекса данных, имеющихся в данное время, а на основании некоторой малой части этих данных; таким образом, используемые значения будут обладать гораздо большей

долей произвола, чем тот неизбежный минимум, который вводится при вычислениях методом наименьших квадратов. Неизбежным результатом этого будет большая путаница в литературе по физическим наукам. Указанная школа не учитывает, что по мере того, как расхождения постепенно устраняются благодаря обнаружению источников ошибок и улучшению техники измерений, остающиеся более мелкие расхождения выступают явственнее, и возникает стремление к еще большей точности и устранению этих малых расхождений. Этот процесс бесконечен, но в каждую данную эпоху необходимо определенное согласие относительно вероятных

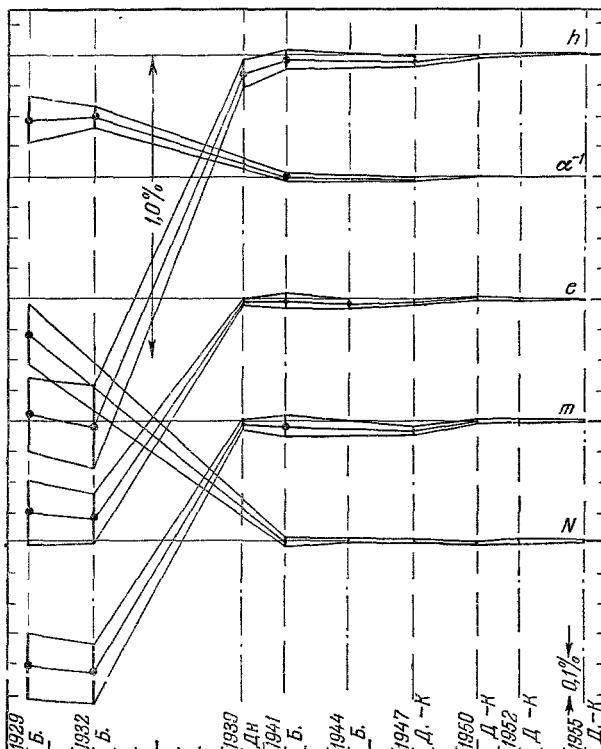


Рис. 5. История флюктуаций «наилучших согласованных» значений пяти основных констант за последние 30 лет, в течение которых было проведено девять согласований.

Деления вертикальной шкалы соответствуют отклонениям на тысячные доли. Обозначения: Д.н. — Даннингтон, Б. — Бердик, Д.-К. — Дю-Монд — Коэн.

«наилучших» компромиссных значений констант, которые вытекают из всей суммы имеющихся в эту эпоху данных с тем, чтобы можно было обеспечить определенное единство в использовании этих значений.

На рис. 5 и 6 схематически представлена история флюктуаций «наилучших согласованных» значений пяти основных констант за последние 30 лет, в течение которых было выполнено девять согласований. На рис. 5 деления вертикальной шкалы соответствуют флюктуациям в одну тысячную долю, на рис. 6 — в одну десятитысячную. Линия, соответствующая центральному значению каждой из этих пяти констант, охвачена с обеих сторон линиями, соответствующими приписанному им разбросу оцененной ошибки (стандартной или среднеквадратичной ошибки принятого значения) для данной эпохи. Как можно видеть, после резких флюктуаций

в течение первого десятилетия эти значения стабилизовались, так что каждое новое согласование, повышая точность, давало значения, вполне удовлетворительно сохраняющиеся в пределах ошибок предшествующего вычисления. Такой удовлетворительный результат, вероятно, в значительной степени обязан консервативной политике, в силу которой в качестве меры ошибки согласованного значения каждый раз используется критерий, фиксирующий шкалу ошибок через так называемое «внешнее

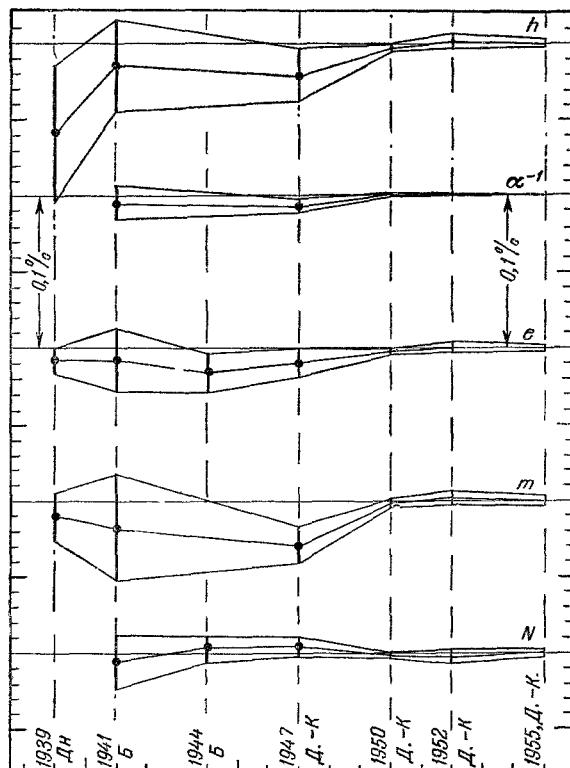


Рис. 6. Те же флуктуации, что на рис. 5, в большем масштабе (охвачен период с 1939 г. по настоящее время).

Здесь деления вертикальной шкалы соответствуют отклонениям на десятитысячные доли. Обозначения: Дн.—Данингтон, Б.—Бердж, А.—К.—Дю-Монд—Кози.

согласие» исходных данных, а не через их «внутреннее согласие». Другими словами, например, в вычислениях 1955 г., для установления шкалы ошибок была использована величина χ^2 — мера несогласованности девяти уравнений, полученных из наблюдений и выбранных для согласования, а не такой метод, при котором ошибки, ожидаемые на основании априорных оценок ошибок, приписываются самим исходным данным. Как можно понять, это некоторым образом позволяет учесть систематические ошибки по крайней мере в той степени, в какой эти ошибки делают несовместными переопределенные данные.

Мы искренне надеемся, что согласованные данные, которые мы сможем предложить в качестве результата наших будущих вычислений и в которых будут учтены все новые сведения, уже полученные или ожидаемые, как это указано в табл. II, представят собой существенное улучшение по сравнению со значениями, полученными в результате вычислений 1955 г.

Но действительно гарантировать мы можем только то, что мы приложим все усилия для того, чтобы обеспечить совокупность непротиворечивых компромиссных значений, которые будут обладать возможно малой степенью произвола и возможно меньше нарушать всю имеющуюся информацию.

**ЖЕЛАТЕЛЬНОСТЬ СОХРАНЕНИЯ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ ПОСТОЯННЫХ
И ЕДИНИЦ В ФИЗИЧЕСКИХ НАУКАХ. ВРЕДНОЕ ВЛИЯНИЕ
СПЕЦИАЛИЗАЦИИ**

Те, кому не приходилось заниматься той проблемой, которой мы занимались на протяжении последних двух десятилетий, вероятно, не могут иметь представления о тесном переплетении и взаимозависимости многочисленных основных констант физики и химии. Необходимость пересмотра какой-нибудь величины, входящей в эту систему констант (μ_e/μ_0 , λ_g/λ_s и даже ускорения силы тяжести g), влияет в какой-то степени на все другие величины, как я пытался показать в настоящей работе.

Физика и химия, как хорошо известно, имеющие дело в настоящее время с одним и тем же объектом и, по существу, применяющие одинаковые методы, фактически едва отличимы друг от друга, если не обращаться к историческому развитию, приведшему их к настоящему состоянию, и не обращать внимания на то, что они все еще находятся в различных помещениях одного и того же университета. Однако специализация достигла такого уровня, что даже в пределах одной только физики наблюдается достойная сожаления тенденция к разбиению на отдельные разделы вследствие огромной массы и объема материала. Специалисты по физике твердого тела уделяют мало внимания физике нестабильных частиц, которые ранее изучались путем наблюдений космического излучения, а в настоящее время — при помощи ускорителей на много миллионов эв. Специалисты по ядерной физике, как правило, плохо знают физику рентгеновских лучей, а специалисты по рентгеновской кристаллографии, которые в настоящее время во все возрастающей степени проводят свои исследования под вывеской химии, удивительно мало осведомлены о происхождении, природе и неточности основных единиц, в которых они измеряют параметры кристаллов. Фактически наблюдается опасная тенденция превращения нашего великолепного здания науки в вавилонскую башню, в которой каждый будет говорить на своем языке!

Бесспорна также наблюдаемая тенденция специализации функциональной, а не только по объектам изучения. Явным симптомом такой специализации служит появление физика — научного администратора (он может быть как физиком, так и химиком) — физика-дельца, который ворочает многомилицонными контрактами на исследования, а также возникновение близкого родственника последнего — ученого-политика, который упоминается при публичных выступлениях и в отчетах, консультирует высоких государственных чиновников или организует международные совещания, и, боюсь, часто имеет решающий голос в таких технических вопросах, в которых его компетенция, может быть, чрезвычайно ограничена именно в силу его специальной функции. Я не знаю, что можно сделать в этом отношении; моя цель — только привлечь внимание к этой проблеме, а не решить ее. Несколько специфичных примеров послужат этой цели лучше, чем обобщение.

Один крупный физико-химик, например, серьезно настаивал на том, чтобы химическая шкала атомных весов — это наследие прежних времен, когда еще не было известно существование изотопов, — шкала, определяемая в настоящее время с сомнительной точностью вследствие

приписывания атомного веса 16 смеси изотопов кислорода в их *относительной распространенности*, «стремящейся в природе», — была установлена заново путем приписывания определенного численного значения числу Фарадея! Тот факт, что относительные значения масс изотопов можно в настоящее время определять с гораздо большей точностью, чем методами электрохимии, либо масс-спектроскопическим методом, либо путем измерения энергий ядерных реакций, нисколько не смущает этого ученого, так как, учитывая весьма ограниченную заинтересованность подавляющего большинства химиков в вопросах точности, он рассматривает область химии как совершенно независимую от физики. Ему было указано на два факта: 1) различные электрохимические методы определения числа Фарадея при использовании современной шкалы атомных весов дают сильно расходящиеся результаты; 2) между физически наблюдаемыми электрохимическими величинами и их истолкованием в терминах истинных электрохимических эквивалентов наблюдаются неприятные расхождения и неопределенности, свидетельствующие о заведомых систематических ошибках. Однако это нисколько не беспокоит упомянутого физико-химика, так как эти расхождения имеют порядок десятитысячных долей и, как он заявляет, «представляют интерес только для составителей таблиц значений физических констант».

Наблюдается широко распространенная плачевная тенденция со стороны части таких высокоспециализированных работников — рекомендовать обойти трудную задачу точных измерений простым способом — приписывания по соглашению определенного значения величине, которая должна быть измерена. В настоящее время предложение такого именно типа выдвигают кристаллографы, большинство которых, по-видимому, лишь недавно узнало о различии между шкалой длин волн в миллиангстремах и в единицах шкалы Зигбана для рентгеновских лучей, иногда называемых *X-единицами*. В этих *X-единицах* измерено и протабулировано около 3000 линий рентгеновского спектра, причем многие линии измерены с точностью, приближающейся к нескольким миллионным долям. Сомнительно, чтобы наше знание переводного множителя λ_g/λ_s между этими двумя шкалами в настоящее время обладало точностью, большей чем $\pm 100 \cdot 10^{-6}$; однако кристаллографы так расстроены наличием двойной шкалы, что предлагают пересоставить таблицы всех длин волн рентгеновских лучей, пользуясь принятим по соглашению значением λ_g/λ_s для того, чтобы превратить протабулированные в *X-единицах* значения эмиссионных линий рентгеновского спектра — во что? конечно, не в миллиангстремы, как они думают (если только не пойти на значительное снижение точности, с которой в настоящее время известны значения многих из этих длин волн относительно друг друга). В действительности сторонники такого перерасчета, прилагая усилия для уничтожения двойственности шкалы, устанавливают третью шкалу, вводя тем самым худшую путаницу, так как они предлагают назвать эту новую шкалу не каким-то третьим именем, а неправильно называют ее шкалой в миллиангстремах. Это их нисколько не беспокоит, так как они рассматривают благоприятный эффект этого перерасчета только в очень ограниченной, интересующей их области, а не в свете всей системы физики и химии как единого целого.

Автор твердо убежден, что выбор определения фундаментальной физической единицы или эталона, на которых должна базироваться система измерений, диктуется исключительно соображениями точности и воспроизведимости. Физику-теоретику удобно применять для рассуждений подходящие системы, в которых такие константы, как h , c и т. д., равны единице. Это вполне законно, так как упрощает написание мате-

матических выражений. Однако, пока в силу недостаточности теории физика и химия остаются науками, зависящими в значительной степени от наблюдений и измерений, мы вынуждены выбирать в качестве основных эталонов и определений основных единиц такие и только такие процессы, которые дают наивысшую точность и воспроизводимость. Было бы очень жаль, если бы эти основные эталоны, определения и единицы не составляли однозначной системы измерений, общей для всех разделов физики и химии.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. E. R. Cohen, J. W. M. Du Mond, T. W. Layton and J. S. Rollett, *Rev. Mod. Phys.* 27, 363 (1955).
2. J. S. Rollett and T. W. Layton, Datatron digital computer program for least-squares analyses of variance. Atomic Energy Comm. Special Tech., Rept. No. 18 to Contract AT (04-3)-63 at California Institute of Technology, Pasadena, California.
3. E. R. Cohen, *Phys. Rev.* 88, 353 (1952).
4. J. W. M. Du Mond and E. R. Cohen, *Rev. Mod. Phys.* 25, 691 (1953).
5. R. T. Birge, *Repts. Progr. Phys.* 8, 90 (1944).
6. W. N. Bond, *Philos. Mag.* 10, 994 (1930); 12, 632 (1931).
7. R. T. Birge, *Phys. Rev.* 40, 228 (1932).
8. R. A. Beth, *Phys. Rev.* 53, 681 (1938).
9. J. W. Du Mond, *Phys. Rev.* 56, 153 (1939).
10. E. R. Cohen, *Rev. Mod. Phys.* 25, 705 (1953).
11. E. R. Cohen, *Phys. Rev.* 101, 1641 (1956).
12. E. R. Cohen, Minutes of Turin Conference on the Fundamental Constants in Honor of Amadeo Avogadro, *Suppl. Nuovo cimento*, Ser. 10, 6, 43 (1957).
13. E. R. Cohen and J. W. M. Du Mond, в «Handbuch der Physik» (S. Flügge, ed) Part 35., Springer, Berlin, 1957.
14. E. R. Cohen, K. Crowe and J. W. Du Mond, *Fundamental Constants of Physics*, Interscience, New York, 1958.
15. J. W. M. Du Mond and E. R. Cohen, in «Handbook of Physics» (Condon and Odishaw, eds.), Part 7, Chapter 10, McGraw-Hill, New York, 1958.
16. J. W. M. Du Mond, Minutes of Conference on Electronic and Measurements of August 13, 1958 at Boulder Laboratories of the U. S. National Bureau of Standards, *IRE Trans. on Instrumentation* 1-7, No. 3, 4 (1958).
17. S. J. Bates, Doctorate thesis, University of Illinois, 1912.
18. G. W. Vinall and S. J. Bates, *Bull. Bur. Standards* 10, 425 (1914).
19. S. J. Bates and G. W. Vinall, *J. Amer. Chem. Soc.* 36, 916 (1914).
20. G. W. Vinall and W. M. Bouvard, *Bull. Bur. Standards* 13, 147 (1916).
21. E. B. Rosa and G. W. Vinall, *Bull. Bur. Standards* 13, 479 (1916).
22. M. Siegbahn, *Spektroskopie der Röntgenstrahlen*, Springer, Berlin, 1931.
23. A. H. Compton and S. K. Allison, *X-Rays in Theory and Experiment*, Van Nostrand, New York, 1934.
24. E. Ingelstam, *Dissertation*, Upsala, 1937.
25. Y. Cauchois and H. Hulubei, *Longueurs d'Onde des Emissions X et des Discontinuités d'Absorption X*, Paris, 1947.
26. W. Bragg, *Proc. Roy. Soc. A88*, 428 (1913); *A89*, 246, 430 (1914).
27. A. H. Compton, H. N. Beets and O. K. De Foe, *Phys. Rev.* 25, 625 (1925).
28. E. Bäcklin, Thesis, Uppsala, 1928.
29. A. H. Compton and R. L. Doan, *Proc. Nat. Acad. Sci. (U.S.)* 11, 598 (1926).
30. J. Thibaud, *J. phys. et radium* 8, 13, 447 (1927).
31. J. A. Bearden, *Phys. Rev.* 37, 1210 (1931); 48, 385 (1935).
32. E. Bäcklin, *Z. Phys.* 93, 450 (1935).
33. M. Söderman, *Nature* 135, 67 (1935); *Dissertation*, Uppsala, 1934.
34. F. Tyren, *Z. Phys.* 109, 722 (1938).
35. R. T. Birge, *Amer. J. Phys.* 13, 69 (1945).
36. F. Tyren, *Dissertation*, Uppsala, 1940.
37. M. Karpilus and N. M. Kroll, *Phys. Rev.* 81, 73 (1951).
38. C. M. Sommerfield, *Phys. Rev.* 107, 328 (1957).
39. A. Petermann, *Helv. Phys. Acta* 30, 407 (1957).
40. A. A. Michelson, F. G. Pease and F. Pearson, *Astrophys. J.* 82, 26 (1935).
41. W. C. Anderson, *Rev. Sci. Instr.* 8, 239 (1937); *J. Opt. Soc. Amer.* 31, 187 (1941).
42. K. Bol, Thesis, Stanford University, 1950; *Phys. Rev.* 80, 298 (1950).
43. E. Bergstrand, *Nature* 163, 338 (1949); 165, 405 (1950); *Ark. fysik.* 2, 119 (1950); 3, 479 (1951); *Ann. franç. chronom.* 11, 97 (1951).

44. I. C. C. Mackenzie, Ordnance Survey Professional Paper, No. 19, H.M.S.O., London, 1954.
45. L. Essen, Proc. Roy. Soc. A204, 260 (1950); Nature 167, 758 (1951).
46. K. D. Froome, Proc. Roy. Soc. A213, 123 (1952); A223, 195 (1954); A247, 109 (1958).
47. L. Essen and K. D. Froome, Nature 167, 512 (1951).
48. L. Essen and K. D. Froome, Proc. Phys. Soc. B64, 862 (1951).
49. K. D. Froome, Proc. Roy. Soc. A247, 109 (1958).
50. E. Bergstrand, Ann. franç. chronom. 11, 97 (1957).
51. E. M. Purcell, H. Torgay and R. V. Pound, Phys. Rev. 69, 37 (1946).
52. F. Block, Phys. Rev. 70, 460 (1946); F. Block, W. W. Hansen and M. Packard, Phys. Rev. 70, 474 (1946).
53. N. F. Ramsey, Phys. Rev. 78, 699 (1950).
54. H. A. Thomas, R. L. Driscoll and J. A. Hippel, J. Research Natl. Bur. Standards 44, 569 (1950); Phys. Rev. 78, 787 (1950).
55. R. L. Driscoll and P. L. Bender, Phys. Rev. Letters 1, 413 (1958); см. так же: Minutes of the August 13, 1958 Conference on Electronic Standards and Measurements at Boulder Laboratories of the U. S. National Bureau of Standards IRE Trans. on Instrumentation 1-7, No. 3, 4 (1958).
56. R. D. Huntress and A. G. nuclear, Meters of the Turin Conference on the Fundamental Constants in Honor of Amadeo Avogadro, Suppl. Nuovo cimento, Ser. 10, 6, 146 (1957).
57. P. R. Heyl and G. S. Cook, J. Research Natl. Bur. Standards 17, 805 (1936).
58. J. S. Clark, Trans. Roy. Soc. A238, 65 (1938).
59. C. Völett, Compt. rend. 222, 373 (1946); 235, 442 (1952).
60. H. Preston-Thomas, Minutes of the August 13, 1958 Conference on Electronic Standards and Measurements at Boulder Laboratories of the U. S. National Bureau of Standards. IRE Trans. on Instrumentation 1-7, No. 3, 4 (1958).
61. J. W. DuMond and V. L. Bollman, Phys. Rev. 51, 400 (1937).
62. W. K. H. Panofsky, A. E. S. Green, and J. W. M. DuMond, Phys. Rev. 62, 214 (1942).
63. J. A. Bearden, F. T. Johnson and H. M. Watts, Phys. Rev. 81, 70 (1951).
64. A. Nilsson, Ark. fys. 6, No. 49, 544 (1953).
65. J. A. Bearden and G. Schawartz, Phys. Rev. 79, 674 (1950).
66. G. F. Field, J. N. Harris and J. W. M. DuMond, Phys. Rev. 92, 1160 (1953).
67. J. W. M. DuMond, Minutes of the Turin Conference of Fundamental Constants in Honor of Amadeo Avogadro, Suppl. Nuovo cimento, Ser. 10, 6, 22 (1957).
68. W. V. Houston, Phys. Rev. 30, 608 (1927).
69. J. W. Drinkwater, O. Richardson and W. E. Williams, Proc. Roy. Soc. 174, 164 (1940).
70. D. Y. Chu, Phys. Rev. 55, 175 (1939).
71. R. Beringer and M. A. Heald, Phys. Rev. 95, 1744 (1954).
72. H. G. Dehmelt, Phys. Rev. 109, 381 (1958).
73. P. Kusch and H. Taub, Phys. Rev. 75, 1477 (1949).
74. W. A. Hardy and E. Purcell, Bull. Amer. Phys. Soc., Ser. II, 4, 37 (1959); Session NA3 of New York meeting, Jan. 30 (1959).