

1 октября 2010 г. исполнилось 110 лет Всероссийскому научно-исследовательскому институту метрологической службы (ВНИИМС), прошедшему сложный путь от Московской поверочной палатки при Московском окружном Пробирном управлении до Государственного научного метрологического института Госстандарта. История института изложена в статье его директора докт. техн. наук С. А. Кононова в специальном выпуске журнала «История науки и техники» (№ 9, 2010).

Как и раньше, ВНИИМС является главным научным метрологическим центром страны по законодательной метрологии, в рамках которой для обеспечения единства измерений при содействии компетентных органов устанавливаются комплексы взаимосвязанных и взаимообусловленных общих технических и юридических правил, требований и норм, подлежащих регламентации и контролю со стороны государства.

Вместе с тем, в последние несколько лет во ВНИИМС получили дальнейшее развитие работы по фундаментальной метрологии, например, исследования роли фундаментальных физических констант в метрологии, в частности, для подготовки к предстоящему переопределению некоторых основных единиц СИ. Ряд работ сегодня связан с выполнением заданий федеральной целевой программы «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008—2009 гг.», утвержденной Правительством РФ 2 августа 2007 г. ВНИИМС возглавил рабочую группу № 3 по направлению «Развитие методической составляющей инфраструктуры наноиндустрии», связанному, в первую очередь, с мероприятиями по обеспечению единства измерений, созданию новых измерительных возможностей.

ВНИИМС как координатор работ по метрологии в международных межправительственных (Международная организация законодательной метрологии, международные органы Метрической Конвенции) и региональных (КООМЕТ, НТКметр в СНГ, Азиатско-Тихоокеанский Форум по законодательной метрологии и др.) организациях по-прежнему занимает ключевую позицию, участвуя в разносторонней международной деятельности, особенно в области законодательной метрологии. Как участник «Договоренности о взаимном признании национальных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых Национальными метрологическими институтами» ВНИИМС проводит работы по гарантии качества и достоверности своих калибровочных и измерительных возможностей, участвуя таким образом в формировании международного рынка метрологических услуг.

ВНИИМС всегда оказывал действенную методическую помощь отраслям народного хозяйства страны. Спектр предлагаемых метрологических услуг достаточно широк — от испытаний, калибровок, консультаций, разработки документов, повышения квалификации специалистов до метрологической экспертизы сложнейших проектов (например, «Сахалин-2» и др.), создания документов для формирования сложных инфраструктур (ОАО «РЖД» и др.).

Сегодня основным документом, определяющим развитие фундаментальной и прикладной метрологии в стране на ближайшие годы, является «Стратегия обеспечения единства измерений в России до 2015 г.», утвержденная Минпромторгом РФ в июне 2009 г. Ряд статей, публикуемых в юбилейный для ВНИИМС год в журнале «Измерительная техника», связан с конкретными задачами, решаемыми коллективом института.

53.081

## **Фундаментальные константы и переход на новые определения единиц СИ**

**К. А. БРОННИКОВ, В. Н. МЕЛЬНИКОВ**

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, e-mail: kb20@yandex.ru

Рассмотрены вопросы фундаментальной метрологии, связанные с вариацией констант и планируемым переходом к новым определениям единиц СИ, основанным на фиксированных значениях фундаментальных физических констант. Отмечено, что пока не выполнены все необходимые условия для этого перехода.

**Ключевые слова:** фундаментальные взаимодействия, фундаментальные константы, вариации констант, единицы СИ, гравитационная постоянная, постоянная тонкой структуры.

The problems of fundamental metrology related to variations of constants and the planned transition to new definitions of the SI units, based on fixed values of the fundamental physical constants is considered. It is pointed out that all necessary conditions for such a transition are not yet fulfilled.

**Key words:** fundamental interactions, fundamental constants, variations of constants, SI units, gravitational constant, fine structure constant.

**Система фундаментальных констант в современной физике.** В физических законах и теориях встречаются константы, которые определяются экспериментально и харак-

теризуют стабильность различных типов процессов и видов материи. Они проявляются независимо в разных ситуациях и имеют одно и то же значение, по крайней мере, в преде-

лах достигнутой точности измерения. Более того, на данный момент их нельзя вычислить при помощи других величин. Именно поэтому их называют фундаментальными физическими константами (ФФК).

Строго определить это понятие и набор констант, в основном размерных, не представляется возможным. В процессе развития науки одни теории заменялись другими, более общими, со своими константами. При этом определялись границы применимости старых теорий и возникали соотношения между старыми и новыми константами. Поэтому можно говорить не об абсолютном наборе ФФК, а только о наборе, соответствующем современному уровню состояния науки [1—3].

В последние десятилетия, после периода изучения отдельных взаимодействий основным направлением развития физики стала тенденция к объединению четырех известных типов взаимодействий: гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного.

Так, теория единых электрослабых взаимодействий надежно подтверждена в экспериментах с элементарными частицами на ускорителях, и существуют хорошо разработанные и подтвержденные варианты ее объединения с сильными взаимодействиями — стандартная модель (СМ). Имеется также хорошо проверенная в масштабах Солнечной системы (на уровне  $10^{-4}$  —  $10^{-5}$ ) теория гравитации Эйнштейна (общая теория относительности — ОТО) и основанная на ней стандартная космологическая модель (СКМ). Наиболее предпочтителен основанный на этих теориях следующий набор ФФК:

$$h, c, e, m_e, \theta_W, G_F, \theta_C, \Lambda_{\text{КХД}}, G, H, \rho \text{ (или } \Omega), \Lambda, k, I,$$

где  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света;  $e, m_e$  — электрический заряд и масса электрона,  $\theta_W$  — угол смешивания Вайнберга;  $G_F$  — константа слабого взаимодействия;  $\theta_C$  — угол Кабиббо;  $\Lambda_{\text{КХД}}$  — параметр обрезания в теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамике (КХД),  $G$  — ньютоновская гравитационная постоянная;  $H$  — параметр Хаббла в современную эпоху;  $\rho$  — средняя плотность энергии во Вселенной;  $\Omega$  — отношение  $\rho$  к критической плотности, определяющее тип космологической модели Фридмана ( $\Omega = 1$  для модели с плоским пространством,  $\Omega < 1$  для открытой и  $\Omega > 1$  для закрытой моделей; согласно современным наблюдательным данным наиболее предпочтительна плоская модель);  $\Lambda$  — космологическая постоянная;  $k$  — постоянная Больцмана;  $I$  — механический эквивалент теплоты.

Конечно, ни СМ, ни ОТО, ни СКМ не лишены недостатков. В каждой из них имеются нерешенные проблемы, решение которых может привести к появлению соответствующих обобщенных теорий и, следовательно, других фундаментальных констант, а также к новым связям между ними. Так, константы, относящиеся к макроскопическим явлениям (гравитационная, космологическое), в некоторых теориях объединения взаимодействий (например, многомерных, использующих идеи существования дополнительных измерений пространства-времени помимо четырех стандартных), могут быть связаны друг с другом и с константами микрофизики ( $e, h, m$  и др.).

Ряд экспериментальных фактов подтверждает необходимость выхода за рамки СМ, ОТО и СКМ. К таким фактам относятся подтверждение существования нейтринных осцилляций и ненулевых масс нейтрино, а также данные наблю-

дений в астрофизике и космологии — обнаружение темной материи (невидимой распределенной массы в галактиках и скоплениях галактик, необходимой для объяснения их наблюдаемой динамики) и темной энергии (гипотетической субстанции, объясняющей ускоренное расширение Вселенной, открытое в 1998 г.). Остается не решенной до конца проблема направленного к Солнцу аномального ускорения космических аппаратов «Пионер-10» и «Пионер-11», которая также может привести к необходимости обобщения закона тяготения Ньютона и, следовательно, ОТО на масштаб, превышающий размеры Солнечной системы.

Даже в рамках СМ имеется ряд нерешенных проблем, таких как экспериментальное подтверждение существования хиггсовских частиц, спонтанного нарушения киральной симметрии, конфайнмента кварков и глюонов [4]. Возможно, часть этих проблем будет решена при помощи данных, полученных в экспериментах на Большом адронном коллайдере (LHC), ЦЕРН (Швейцария) при активном участии российских ученых.

Конечно, если будет создана объединенная теория (ОТ) всех четырех известных сейчас взаимодействий (на эту роль за последние десятилетия претендовали различные схемы: суперсимметрия, супергравитация, суперструны и так называемая М-теория, пока находящаяся в процессе разработки и включающая пять разных типов моделей суперструн), то, скорее всего, возникнет новый набор ФФК, связанных с этой теорией.

Фундаментальной константой может стать, например, число измерений  $D$ , необходимое для объединения всех взаимодействий (в струнных и суперструнных моделях используют  $D = 26, 11, 10$ , в других — 5, 6, 7, 8), а также само число фундаментальных взаимодействий (например, многомерные модели типа «мира на бране» предсказывают отклонения от закона Ньютона на малых масштабах порядка нескольких микрометров и менее, или новые неньютоновские взаимодействия [5]).

Относительно числа ФФК есть две взаимно противоположные тенденции: число старых ФФК обычно уменьшается при возникновении новых, более общих теорий, но в то же время появляются новые области науки, процессы, виды материи, при которых возникают и новые константы.

Тем не менее, возможно, придем к некоторому минимальному набору, характеризующему одной или несколькими ФФК, например, связанному с так называемыми планковскими параметрами  $L, m_L, \tau_L$ , составленными из  $c, h$  и  $G$ . Роль этих параметров важна, так как  $m_L c^2$  характеризует энергию объединения четырех известных типов фундаментальных взаимодействий. Параметр  $L \approx 10^{-35}$  м характеризует масштаб, при котором классические понятия пространства и времени теряют смысл вследствие квантовых флуктуаций (Д. И. Блохинцев), а  $G$  — наиболее универсальная константа взаимодействия, так как гравитация неэкранируема, она действует на все тела и на всех масштабах [2, 3].

Существуют некоторые соображения в пользу того, что теории объединения взаимодействий приведут к уменьшению числа истинно фундаментальных констант до двух размерных —  $c$  и струнной длины  $\lambda_s$  (Veneziano, 2002) — или к их отсутствию (Duff, 2002). Это на самом деле означает, что все они станут переводными множителями.

**Возможная переменность фундаментальных констант.** Помимо двух основных нерешенных проблем современной физики, указанных выше, — отсутствия теории объединения всех взаимодействий, включая гравитационное, и объясне-

ния природы темной энергии и темной материи, составляющих в сумме около 95 % полной плотности материи во Вселенной, — имеется еще и третья фундаментальная проблема, связанная с двумя предыдущими и с фундаментальной метрологией — стабильность или возможные вариации ФФК во времени и пространстве.

Эта проблема возникла в связи с попытками объяснить связь между явлениями микро- и макромиров. В 1937 г. П. А. М. Дирак первым предложил «Гипотезу больших чисел», согласно которой очень большие числа не могут естественно возникать в физических теориях, а должны быть связаны между собой и с возрастом Вселенной ( $T \approx 10^{17}$  с или, если его выразить через характерное ядерное время порядка  $10^{-23}$  с,  $T \approx 10^{40}$ ).

Общетеоретические соображения, связанные с центральной проблемой теоретической физики — объединением взаимодействий, а также и с требованием единства физической науки, по-видимому, неизбежно приводят к представлению о динамическом характере многих известных ФФК. В то же время экспериментальные данные, свидетельствующие о такой переменности ФФК, в настоящее время скудны и ненадежны. Это касается возможных вариаций целого ряда констант, в частности, гравитационной постоянной  $G$  и постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . Однако измерения продолжают, и в распоряжение исследователей поступают новые, все более точные данные.

Как известно, в настоящее время происходит интенсивная подготовка к реформе международной системы единиц измерений (СИ). В ближайшие годы предполагается переход к новым определениям единиц СИ, которые планируется связать с фиксированными значениями ФФК [6, 7]. По этой причине вопрос о возможных вариациях констант в пространстве, во времени и в зависимости от энергетического масштаба представляется одним из важнейших для формулирования новой СИ.

Исторически первые, довольно неуверенные (и впоследствии не подтвердившиеся) указания на такую переменность получены в отношении гравитационной постоянной  $G$  в 1960-е годы. В настоящее время можно указать три основные проблемы, связанные с константой  $G$ :

1. Абсолютные измерения  $G$ . Недавние результаты, полученные различными группами в России, США, Швейцарии, Китае и Новой Зеландии, не согласуются друг с другом в пределах неопределенностей их измерений и даже на уровне  $10^{-4}$ . Нужны дальнейшие эксперименты с применением новых методов, возможно, в космосе [8]. Однако имеющаяся несогласованность в измерениях  $G$  наводит на мысль, что эта «постоянная» действительно может меняться от точки к точке даже на поверхности Земли в зависимости от какого-то неизвестного физического поля.

2. Возможные вариации  $G$  со временем, предсказанные обобщенными теориями гравитации и многомерными моделями объединения [9] (порядка скорости расширения Вселенной и менее), допускаются на уровне  $5 \cdot 10^{-13}$  в год и менее, поэтому существует необходимость в дальнейших теоретических и экспериментальных разработках этой проблемы [10—13].

3. Возможные вариации  $G$  с расстоянием (или появлением новых ньютоновских взаимодействий), предсказанные скалярно-тензорными и многомерными моделями гравитации (например, «мир на бране» [5]) на малых расстояниях.

Пока в области более 10 мкм ньютоновские силы не обнаружены. Ожидается, что в ближайшие годы будут получены оценки в диапазоне  $\leq 1$  мкм [3]. Имеются также попытки объяснить наблюдаемые аномальные ускорения космических аппаратов «Пионер» путем модификации закона тяготения Ньютона на масштаб, превышающий размеры Солнечной системы (см. [14]).

Стабильность постоянной  $\alpha$ , являющейся основной характеристикой интенсивности электромагнитного взаимодействия, особенно важна при выборе определения основной электрической единицы СИ — ампера. В то же время в последние месяцы появились крайне интересные и неожиданные новые данные о возможной переменности  $\alpha$ , о которых пойдет речь ниже.

Самые жесткие и надежные ограничения на временные вариации констант связи и масс частиц в современной Вселенной следуют из измерений с использованием атомных часов. Для возможной эволюции  $\alpha$  на основе прямого сравнения оптических частот в часах на ионах алюминия и ртути недавно получено ограничение [15]:

$$d(\ln \alpha / dt) = (-1,6 \pm 2,3) \cdot 10^{-17} / \text{год}. \quad (1)$$

Это ограничение уже приближается к непревзойденным результатам, полученным при анализе изотопного состава продуктов реакций в естественном реакторе Окло (Габон), действовавшем около двух миллиардов лет назад, что соответствует космологическим красным смещениям  $z \sim 0,14$ . Однако, в отличие от лабораторных измерений, ограничения, полученные на материалах Окло [16], и, в частности, наиболее жесткий результат для вариаций  $\alpha$  [17]:

$$d(\ln \alpha / dt) = (-0,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-17} / \text{год},$$

содержат неявное дополнительное предположение о равномерном изменении константы за прошедшее с тех пор время. Это предположение выглядит довольно естественно, но, в принципе, ниоткуда не вытекает.

Но в любом случае из (1) следует, что если  $\alpha$  и меняется в современную эпоху, то не быстрее, чем в 17-м знаке в год. Так как точность определения значений ФФК, на которых должны базироваться новые единицы СИ, не превышает  $10^{-8}$ , очевидно, что (при энергиях много меньше энергии объединения электромагнитного и слабого взаимодействий) такие вариации, даже если они реально существуют, не могут оказать существенного влияния на практические измерения, и в обозримом будущем не следует ожидать каких-либо изменений этой ситуации [18].

Что же касается применения единиц СИ в научных исследованиях, в частности, в теориях объединения взаимодействий, астрофизике и космологии, оперирующих временными отрезками в миллиарды лет и расстояниями в сотни мегапарсек, важны даже столь малые вариации ФФК, и для правильной интерпретации данных наблюдений необходимо учитывать, каким именно образом определены те единицы, в которых эти данные выражены.

Результаты новейших наблюдений за наиболее удаленными объектами в космосе — квазарами — обнаруживают ряд весьма интересных особенностей. Так, применение многомультиплетного метода Уэбба и других [19], основанного на сопоставлении нескольких линий в различных выборках источников (сравниваются сдвиги линий, в разной степени

чувствительных к вариациям  $\alpha$ ), к спектрам поглощения 128 источников в диапазоне красных смещений  $0,5 < z < 3$  привело к следующему результату [20]:

$$\Delta\alpha / \alpha = (-0,54 \pm 0,12) \cdot 10^{-5}; \quad \Delta\alpha = \alpha - \alpha_0, \quad (2)$$

где  $\alpha_0$  — современное значение  $\alpha$ . Эта и ряд других аналогичных оценок указывают на более низкие значения  $\alpha$  в прошлом по сравнению с  $\alpha_0$ .

С другой стороны, в ряде работ исследовались особенности спектров излучения, а не поглощения. В частности, измерения сильных эмиссионных линий O III в выборке из 165 спектров квазаров привели к оценке [21]:

$$\Delta\alpha / \alpha = (1,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-4},$$

но для сравнительно малых красных смещений. Данная и некоторые другие оценки дают  $\alpha > \alpha_0$  в прошлом, в противоположность (2). Помимо объяснения этого противоречия наличием невыявленных систематических погрешностей, возможна и «оптимистическая» точка зрения, что таким образом проявляются пространственные вариации  $\alpha$ , так как эмиссионный и абсорбционный методы чувствительны к значениям  $\alpha$  в весьма различных физических условиях.

Результаты, полученные в 2010 г. подтверждают представление о пространственных вариациях  $\alpha$ , теперь — в зависимости от направления, в котором ведутся наблюдения. Замечено [22], что ранее сделанные выводы о несколько меньших значениях  $\alpha$  в прошлом по сравнению с  $\alpha_0$ , подобные оценке (2), опирались на наблюдения квазаров в северной части небесной сферы, например, при помощи телескопа Кеск на Гавайских островах. Наблюдения же в Южном полушарии, в частности, при помощи VLT (Very Large Telescope, Чили), охватывающие противоположное направление во Вселенной, при аналогичном анализе приводят, напротив, к значениям  $\alpha > \alpha_0$  в прошлом. На основании наблюдений авторы [22] делают вывод об анизотропии дипольного характера в распределении значений  $\alpha$ :

$$\Delta\alpha/\alpha = A \cos \Theta + m, \quad A = (0,97 \pm 0,21) \cdot 10^{-5},$$

$$m = (-0,18 \pm 0,08) \cdot 10^{-5},$$

где  $\Theta$  — угол от оси диполя наилучшего согласия, расположенной на прямом восхождении ( $17,3 \pm 0,6$ ) ч и склонении — ( $61 \pm 9$ )°. Происхождение такой анизотропии и ее интерпретация обсуждаются в текущей литературе.

Оценки, полученные при анализе эмиссионных спектров, а также выведенные из спектров поглощения, но противоречащие описанным выше, показывают, что астрофизические данные по вариациям  $\alpha$  пока достаточно противоречивы и нуждаются в дальнейшей разработке и уточнении.

Помимо вариаций постоянной  $\alpha$ , обсуждаются и возможные вариации отношений масс элементарных частиц; их изменения приблизительно на том же уровне, что и  $\alpha$ , в определенные эпохи были обнаружены в ряде наблюдений [19, 23]. Данные по возможному изменению константы слабого взаимодействия приводят к выводу, что она не меняется на уровне  $10^{-12}$  в год, а сильных взаимодействий —  $10^{-18}$  в год [16]. Задача теоретиков вместе с экспериментаторами объяснить или опровергнуть эти данные с учетом того, что они получены при разных удалениях объектов (разных красных смеще-

ниях  $z$ ), а их интерпретация происходит в рамках определенной космологической модели.

#### Измерение фундаментальных констант и реформа СИ.

Далее обсудим вопрос о том, как современная ситуация с измерением точных значений некоторых ФФК влияет на возможные сроки перехода к новым определениям основных единиц СИ.

Открытия второй половины XX века в квантовой физике (эффект Джозефсона и квантовый эффект Холла) позволили создать принципиально новые методы и средства измерений и сформировать новое направление в метрологии — квантовую метрологию. Применение приборов квантовой электроники (мазеров, лазеров, комб-генераторов, атомных интерферометров) и использование современных релятивистских теорий резко повысили точность пространственно-временных измерений как на очень малых масштабах, так и на масштабах Земли и в космосе. Рост точности последних дал начало еще одному направлению — гравитационно-релятивистской метрологии, которое, по-видимому, впервые сформулировано в [1].

Взаимное влияние физики и метрологии, тенденция к единому подходу к метрологическому обеспечению науки и практики проявляются и в предстоящих серьезных преобразованиях Международной системы единиц. В настоящее время Международный Комитет мер и весов (МКМВ) готовит реформу СИ, которая предполагает переопределение основных единиц системы на базе фиксации значений ряда ФФК — природных инвариантов с нулевой неопределенностью [6]. Это революционное для метрологии изменение основных представлений о единицах физических величин и их эталонах опирается на достижения в области физики, квантовой и гравитационно-релятивистской метрологии и современные технологии. Работа в этом направлении ведется совместными усилиями физиков и метрологов уже несколько десятилетий. Современные достижения и проблемы фундаментальной физики непосредственно отражаются и в фундаментальной метрологии.

Еще 3-4 года назад уверенно прогнозировалось, что указанный выше переход должен состояться в 2011 г., когда будут устранены существующие расхождения в экспериментах и удастся уменьшить неопределенности при определении ряда ФФК. Однако за это время не удалось получить необходимых экспериментальных результатов. Более того, при решении поставленных задач возникли дополнительные сложные фундаментальные, технологические и методические проблемы. Выявление, анализ и поиск путей их решения становится совершенно необходимым, без чего переход к новым определениям единиц СИ с требуемой точностью невозможен.

Работы теоретиков и экспериментаторов в различных странах выявили ранее не замеченные сложности. Так, в ряде исследований были указаны серьезные проблемы в реализации «электрического» килограмма, например, невозможность в настоящее время строго оценить влияние тепловых и массовых потоков, неоднородностей и нестабильности гравитационного поля на точность измерения постоянной Планка при помощи ватт-весов (работы METAS, LNE, NIST, BIPM). Остается открытым и вопрос о теоретической оценке точности, с которой выполняется квантовый закон Холла.

В работах специалистов ВНИИМС [24] показано, что по ряду параметров определение килограмма на основе про-

екта «Авогадро» имеет преимущество перед «электрическим» килограммом на основе ватт-весов. Это, прежде всего, относится к точности определения атомных масс. В свою очередь, появились новые трудности в реализации указанного проекта, такие как проблемы определения с высокой точностью постоянной кристаллической решетки. Не представлены окончательные данные проекта «Авогадро» с моноизотопными образцами, при помощи которых предполагается снять существующее расхождение на уровне  $10^{-6}$  по относительной стандартной неопределенности при определении постоянной Авогадро разными методами. Теоретический анализ точности определения постоянной Больцмана и точности газовых термометров, проведенный во ВНИИМС, показал, что в настоящее время нет предпосылок, позволяющих перейти к новому определению единицы температуры с заявленной точностью.

Планируемое переопределение ампера на основе постоянных Джозефсона и фон Клитцинга должно заменить устаревшее определение, привязанное к измерению сил между параллельными проводниками с током, и привести определение единицы СИ в соответствие с современной практикой измерений, которая в России уже с 1991 г. опирается на действующий ГОСТ 8.022—91. Проблема, однако, заключается в том, что соотношения Джозефсона и фон Клитцинга, позволяющие связать единицу силы тока с ФФК и до настоящего времени хорошо подтверждаемые экспериментом, обоснованы теорией лишь на полуклассическом уровне, т. е. для достаточно большого числа электронов, а это приближение уже неприемлемо для некоторых современных устройств, особенно нанотехнологического характера. Независимое подтверждение указанных соотношений могло бы появиться, если бы удалось построить эталон силы электрического тока на основе прямого подсчета числа электронов, проходящих через заданное сечение проводника в единицу времени.

Такие попытки делаются при помощи так называемых одноэлектронных транзисторов, которые активно разрабатываются и совершенствуются в ряде лабораторий мира, включая российские. Эти приборы содержат металлические «островки» субмикрометровых размеров на диэлектрической подложке и способны регистрировать прохождение отдельных электронов. При подаче периодического сигнала частотой  $f$  в каждый период через сечение прибора проходит фиксированное число электронов  $n$  (как правило,  $n = 1$ ), и соответствующая сила тока  $I = nef$ , где  $e$  — заряд электрона.

Сложившаяся ситуация получила условное название квантового метрологического треугольника, «сторонами» которого являются три упомянутых выше квантовых явления (эффект Джозефсона, квантовый эффект Холла и процессы в одноэлектронных транзисторах). О проверке взаимной согласованности единиц силы тока, напряжения и сопротивления, полученных тремя независимыми способами, говорят как о «замыкании квантового треугольника».

Точность такой проверки не должна уступать точности, с которой ожидается переход к новым определениям других основных единиц СИ — килограмма и моля, для чего, в свою очередь, необходимо знать с соответствующей точностью постоянные Планка и Авогадро. Как уже упоминалось, согласно решениям 23-й Генеральной Конференции по мерам и весам и комитетов МКМВ, для этого относительная

стандартная неопределенность значений постоянных Планка  $h$  и Авогадро  $N_A$  должна быть не более  $2 \cdot 10^{-8}$ . Аналогичная точность требуется и для независимого эталона ампера.

Известны две различные реализации одноэлектронных транзисторов. В одной из них (так называемый электронный турникет) управляющее напряжение приложено только к центральному «островку», в другой («одноэлектронный насос») последовательность управляющих напряжений подается на несколько отдельных «затворных» (gate) электродов, каждый из которых присоединен к своему «островку». Первый вариант проще в реализации, однако второй позволяет достичь более точных результатов. Соответствующие эксперименты проводятся в NIST (США), РТВ (Германия), Лаборатории низкотемпературной электроники МГУ (Россия) и в ряде других исследовательских центров.

Для практической реализации эталона тока с относительной стандартной неопределенностью на уровне  $10^{-8}$  необходимо иметь токи, по меньшей мере, в единицы микроампер (впрочем, в [25] говорится о достаточности наноамперных токов). Очевидно, число электронов, проходящих через прибор в единицу времени, возрастает с ростом частоты переключений. К настоящему времени построены одноэлектронные насосы, работающие на частотах порядка 3 ГГц, однако точность подсчета электронов и, следовательно, точность измерения тока падает с ростом частоты за счет неполной загрузки (разгрузки) заряженных областей и при 3 ГГц оказывается не более  $10^{-4}$ .

Среди подходов к повышению точности работы приборов следует отметить построение параллельных конструкций из одноэлектронных турникетов без потери точности подсчета электронов [26], применение перпендикулярных магнитных полей для стабилизации потока электронов [27], подавление процессов утечки за счет включения диссипативной среды в виде дополнительных микрорезисторов [28]. Для предотвращения влияния отдельных устройств друг на друга при их параллелизации применяется их пространственное разделение на расстояния порядка 100 мкм, тогда как их собственные размеры — порядка сотен нанометров.

Метрологическая точность подсчета электронов пока достигнута только для весьма малых токов (десятки пикоампер). Тем не менее, представляется весьма вероятным, что разрабатываемые методы в ближайшие годы приведут к построению квантового эталона ампера или даже нескольких его вариантов. Впрочем, исследователи пока воздерживаются от сколько-нибудь точных прогнозов времени его появления.

В отношении переопределения моля, как известно, есть два основных варианта. Первый вариант основан на переопределении килограмма путем фиксации постоянной Планка и заряда электрона. Вторым вариантом основан на фиксации числа Авогадро, что приводит к замене обычного выражения, связывающего молярную массу с относительной атомной массой, выражением с корректирующим коэффициентом  $(1 + k)$ , относительная неопределенность которого и само значение  $k$  не должны превышать  $2 \cdot 10^{-9}$ . Имеются два пути уменьшения относительной неопределенности коэффициента  $(1 + k)$ :

а) повышение точности измерения постоянной тонкой структуры  $\alpha$ ;

б) повышение точности измерения массы электрона, выраженной в атомных единицах массы. Для более точного определения молярной массы ряда веществ необходимо прежде всего увеличить точность измерения массы атомов, выраженную в атомных единицах.

Прогресс в определении числа Авогадро (проект «Авогадро») описан, в частности, в [29—31]. Наивысшие достижения проекта связаны с измерением параметра решетки кристалла гамма-спектрометром, включая пробные измерения на природном Si, изготовление рентгеновского интерферометра ( $^{28}\text{Si}$ ), измерения масс и объемов сфер и определение плотности оксидного слоя. Дальнейшие исследования касаются «узких мест» проекта «Авогадро», таких как очистка кремния; точные определения атомной массы изотопа кремния  $^{28}\text{Si}$ , параметра кристаллической решетки, радиуса сфер; учет шероховатостей, примесей, оксидов, неоднородностей решетки, влияния термодинамических факторов — температуры, давления и т. п.

Необходимо также исследовать возможности более точного определения относительной атомной массы электрона  $A_r(e)$  и постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . Вопросы, связанные с переопределением моля и постоянной Авогадро, широко обсуждаются. Так, в [32] показано, что предложения (см., например, [33]) независимо переопределить моль (при фиксированном числе Авогадро) и килограмм (при фиксированном значении постоянной Планка), сохраняя определение дальтона

$$Da = m_a(^{12}\text{C})/12, \quad (3)$$

нарушают основное условие совместности, вытекающее из концепции моля:

$$Da = (10^{-3}/N_A) \text{ кг}. \quad (4)$$

Если моль и килограмм определять независимо, то дальтон должен определяться из условия совместности (4) (точно). При фиксированном значении килограмма это не равно  $m_a(^{12}\text{C})/12$ , т. е. соотношение (3) в этом случае не будет выполняться. Предложенное авторами [33] введение явного или неявного корректирующего коэффициента  $1 + \kappa$  ( $\kappa \approx 1,4 \cdot 10^{-9}$ ) для компенсации условия совместности (4) приведет к неоправданным сложностям, даже если  $\kappa$  не будет учитываться в практических расчетах. При этом возникнет два разных определения дальтона (две совершенно разные физические величины). Это может вызвать раскол между квантово-физическим и химическим сообществами, а также привнести методические сложности в систему преподавания физики и химии (школьную и вузовскую).

Как отмечается многими авторами, имеются альтернативные варианты, основанные на фиксации  $N_A$  и либо  $m_e$ , либо  $h$ , или (более радикально) на фиксации  $m_e$  и  $h$  (во втором случае возможно также переопределение секунды [34]). Все эти возможности должны получить как можно более широкое рассмотрение в научном сообществе перед тем, как будет принято окончательное решение. Таким образом, необходимы дальнейшие исследования и постоянный мониторинг ситуации с переопределением моля, включая выбор варианта определения и достигнутые точности реализации.

Все эти соображения (и масса других) свидетельствуют о том, что пока нет необходимых условий для перехода к новым определениям единиц СИ, основанных на ФФК.

Следует согласиться с рекомендацией Консультативного комитета по массе (ККМ) G1 2010 г. [35], в которой говорится о том, что, поскольку эксперименты с ватт-весами и по проекту «Авогадро» представляют два разных пути определения постоянной Планка, «следующие условия должны быть выполнены до того, как килограмм будет переопределен через ФФК:

1. По крайней мере 3 независимых эксперимента, включая работы как с ватт-весами, так и по проекту «Международной кооперации «Авогадро», дадут значения нужных констант с относительной стандартной неопределенностью не более  $5 \cdot 10^{-8}$ . По крайней мере один из этих результатов должен иметь относительную стандартную неопределенность не более  $2 \cdot 10^{-8}$ .

2. Для каждой из нужных констант значения, даваемые различными экспериментами, должны быть согласованы на доверительном уровне 95 %.

3. Прослеживаемость от прототипов МБМВ к международным прототипам килограмма должна быть подтверждена».

Консультативный комитет по массе рекомендует также, чтобы:

«значения, даваемые КОДАТА, были приняты для ФФК; связанные с ними относительные стандартные неопределенности, даваемые КОДАТА, были должным образом рассмотрены при приписывании начальной неопределенности международному прототипу килограмма;

в МБМВ был создан набор эталонов сравнения для возможности распространения нового определения килограмма;

МБМВ и достаточное число Национальных метрологических институтов продолжали работу, развитие или улучшение возможностей или экспериментов, которые позволили бы реализовать килограмм с относительной стандартной неопределенностью не более  $2 \cdot 10^{-8}$ ;

компонента неопределенности, возникающая при практической реализации единицы, была надлежащим образом учтена».

Аналогичная позиция о преждевременности введения новых определений СИ до решения упомянутых проблем высказана и в [36]. Более того, там же отмечено, что введение фиксированного  $h$  на уровне  $3 \cdot 10^{-8}$  может привести к убыткам и потере аккредитации рядом калибровочных лабораторий, а также к падению качества научных исследований и коммерческих продуктов.

## Л и т е р а т у р а

1. **Melnikov V. N.** Gravitational Measurements, Fundamental Metrology and Constants / Eds. V. de Sabbata and V. N. Melnikov. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1988. P. 283—297.

2. **Melnikov V. N.** // Proc. NASA/JPL Workshop on Fundamental Physics in Microgravity. NASA Document D-21522. 2001. P. 4.1—4.17.

3. **Кононогов С. А., Мельников В. Н.** // Измерительная техника. 2005. № 6. С. 3—10.

4. **Кононогов С. А., Мельников В. Н., Хрущев В. В.** // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 3—7; Там же. № 9. — С. 15—19.

5. Bronnikov K. A., Kononogov S. A., Melnikov V. N. // GRG. 2006. V. 38. P. 1215—1232.
6. Mills I. M. e. a. // Metrologia. 2006. V.43. P. 227—246.
7. Кононогов С. А. Метрология и фундаментальные физические константы. М: Стандартинформ, 2008.
8. Alexeev A. D. e. a. // Metrologia. 2001. V. 38. P. 397—408.
9. Melnikov V. N. Cosmology and Gravitation / Ed. M. Novello. Singapore Edition Frontiers. 1994. V. I. P. 147—244; V. II. 1996. P. 463—574.
10. Melnikov V. N. // Progr. Theor. Phys., Suppl. 2008. V. 172. P. 182—191.
11. Melnikov V. N. // Frontiers of Physics. 2009. V. 4. P. 75—93.
12. Ivashchuk V. D., Kononogov S. A., Melnikov V. N. // Grav. Cosmol. 2008. V. 14. P. 235—240.
13. Alimi J.-M. e. a. // Grav. Cosmol. 2006. V. 12. P. 173—178.
14. Kolosnitsyn N. I., Melnikov V. N. // GRG. 2004. V. 36. P. 1619—1624.
15. Rosenband T. e. a. // Science. 2008. V. 319. P. 1808—1812.
16. Shlyakhter A. I. // Nature. 1976. V. 264. P. 340.
17. Fujii J. e. a. // Nucl. Phys. B. 2000. V. 573. P. 377—401.
18. Bronnikov K. A., Kononogov S. A. // Metrologia. 2006. V. 43. P. R1 —R9.
19. Webb J. K. e. a. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. P. 884—887.
20. Murphy M. T. e. a. // Month. Not. R. Astron. Soc. 2001. V. 327. P. 1208—1222.
21. Bahcall J. e. a. // Astroph. J. 2004. V. 600. P. 520—543.
22. Webb J. K. e. a. // ArXiv: 1008.3907.
23. Ivanchik A. e. a. // Astron. Astrophys. 2005. V. 440. P. 45—52.
24. Бронников К. А. и др. // Измерительная техника. 2010. № 4. С. 27—34.
25. Kaestner B. e. a. // Phys. Rev. B. 2008. V. 77, 153301.
26. Maisi V. F. e. a. // New J. Phys. 2009. V. 1, 113057.
27. Wright S. J. e. a. // Phys. Rev. B. 2009. V. 80, 113303.
28. Lotkhov S. V. e. a. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95, 112507.
29. Picard A. e. a. // Metrologia. 2009. V. 46. P. 1—10.
30. Becker P. e. a. // Meas. Sci. Technol. 2009. V. 20, 092002.
31. Mana G., Massa E., Valkiers S. // Int. J. Mass Spectrom. 2010. V. 289. P. 6—10.
32. Leonard B. P. // Metrologia. 2010. V. 47. P. L5—L8.
33. Milton M. J. T., Mills I. M. // Metrologia. 2009. V. 46. P. 332—338.
34. Cabiati F., Bich W. // Metrologia. 2009. V. 46. P. 457—466.
35. BIPM 2010 CCM Report of the 12<sup>th</sup> Meeting (2010) to the CIPM. Recommendation G1 (2010), <http://www.bipm.org>
36. Glaser M. e. a. // Metrologia. 2010. V. 47. P. 419—428.

Дата принятия 20.09.2010 г.

53.081:53.083

## Современное состояние работ по переопределению единицы термодинамической температуры

М. И. КАЛИНИН

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, e-mail: [kalinin@vniims.ru](mailto:kalinin@vniims.ru)

*Проанализировано современное состояние экспериментальных работ по переопределению единицы термодинамической температуры — кельвина. Рассмотрены данные об основных экспериментальных установках по определению постоянной Больцмана. Сделан вывод об отсутствии в настоящий момент предпосылок для перехода к новому определению кельвина на 24-й Генеральной Конференции по мерам и весам в 2011 г.*

**Ключевые слова:** кельвин, постоянная Больцмана, тройная точка воды, газовая термометрия, относительная стандартная неопределенность.

*The modern state of experimental investigations on redefinition of the thermodynamic temperature unit — kelvin is analyzed. The latest data on principal experimental devices for determination of the Boltzmann constant are considered. It is concluded that by now prerequisites for a transition to a new definition of the kelvin at the 24<sup>th</sup> General conference on weights and measures in 2011 have not yet been created.*

**Key words:** kelvin, Boltzmann constant, triple point of water, gas thermometry, relative standard uncertainty.

На 94-м заседании Международного Комитета мер и весов (МКМВ) в октябре 2005 г. была принята Рекомендация 1 (CI-2005) о подготовительных мерах к введению новых определений килограмма, ампера, кельвина и моля в терминах фундаментальных констант. В этой рекомендации были одобрены в принципе предложения Консультативных комитетов по массе, электричеству и магнетизму, количеству вещества, термометрии, единицам о возможности новых определений четырех указанных основных единиц Международной систе-

мы (СИ) на основе фиксации точных значений некоторых фундаментальных физических констант. МКМВ рекомендовал национальным метрологическим лабораториям продолжить и активизировать работы по получению наиболее точных значений фундаментальных констант, необходимых для планируемых переопределений.

Достаточно быстро стали появляться публикации с предложениями возможных новых определений [1, 2]. Единицу термодинамической температуры СИ — кельвин (K) — пред-