
ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ ГРАВИТАЦИИ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, КОНСТАНТЫ И ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ

В.Н. Мельников

*Центр гравитации и фундаментальной метрологии Всероссийского
научно-исследовательского института метрологической службы,
Институт гравитации и космологии
Российского университета дружбы народов*

Обсуждаются основные проблемы современной физики и метрологии, в частности гравитации и космологии: объединение физических взаимодействий и роль гравитации в этом объединении как одной из недостающих частей; современного ускоренного расширения Вселенной; вариаций фундаментальных констант и планируемого перехода на новые определения единиц СИ, основанные на фундаментальных константах. В решении этих проблем отмечена важная роль подхода построения интегрируемых многомерных моделей гравитации и космологии, развитого автором и его коллегами. Эти модели являются низкоэнергетическим пределом теорий объединения взаимодействий. Получены и проанализированы новые инфляционные решения, как с наблюдаемым ускоренным расширением Вселенной, так и с вариацией констант, а также несингулярные космологические решения. Описано сформулированное автором новое направление – гравитационно-релятивистская метрология, а также экспериментальные и наблюдательные данные по вариациям констант и проблемы перехода на новые определения единиц СИ, основанные на фиксированных значениях фундаментальных констант.

Ключевые слова: гравитация, космология, объединение взаимодействий, темная энергия, вариации констант, гравитационно-релятивистская метрология, новые определения единиц СИ.

Введение

Основными фундаментальными проблемами современной физики и метрологии, гравитации и космологии, в частности, являются:

- объединение всех известных физических взаимодействий и роль гравитации в этом объединении;
- наблюдаемое современное ускоренное расширение Вселенной, (Riess et al., 1998; Perlmutter et al., 1999); темная энергия и темная материя;
- возможные вариации фундаментальных физических констант (ФФК);
- переход на новые определения СИ, основанные на ФФК.

После периода изучения отдельных физических взаимодействий в предыдущем столетии в последние десятилетия основным направлением развития физики является тенденция к объединению четырех известных типов взаимодействий: гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного [1-3]. В настоящее время теория единых электрослабых взаимодействий имеет надежное экспериментальное подтверждение в многочисленных экспериментах с элементарными частицами на ускорителях, и существуют хорошо разработанные и в основном подтвержденные модели ее объединения с сильными взаимодействиями (так называемая Теория Большого Объединения). Основная проблема в объединении четырех взаимодействий связана именно с гравитационным взаимодействием. До сих пор, в отличие от других фундаментальных взаимодействий, нет адекватного варианта квантовой теории гравитации, существуют и другие проблемы – проблема сингулярного состояния в космологии, при коллапсе сверхмассивных объектов и др.

Когда было сделано революционное открытие (1998 г.) в успешно прогрессирующей благодаря космическим аппаратам наблюдательной космологии – ускоренное расширение Вселенной в современную эпоху [4; 5], возникла еще более серьезная проблема, связанная с существованием темной (невидимой) материи (ТМ) и темной энергии (ТЭ), обеспечивающей это ускоренное расширение. Прецизионные данные этих наблюдений неплохо описываются космологической моделью с трехмерным плоским пространством и с ускорением Вселенной в современную эпоху при наличии в ней ТМ (около 26 %) и ТЭ (около 70 %) от полной плотности энергии. Что такое ТМ и ТЭ (более 94 %), мы не знаем! Делаются многочисленные попытки их объяснения, пока не приведшие к успеху. Это введение:

- космологической постоянной Λ (вакуум, универсальное поле отталкивания, его природа неизвестна);
- особых, тоже неизвестных, скалярных полей, называемых квинтэссенцией, к-эссенцией и других с экзотическим эффективным уравнением состояния;
- введение дополнительных измерений и др.

Третья фундаментальная проблема, связанная с двумя предыдущими и связанная с фундаментальной метрологией – это проблема стабильности ФФК или их возможных вариаций во времени и пространстве [6–12].

Новые открытия 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, лазе-

ров, комб-генераторов), атомных интерферометров и использование современных релятивистских теорий (в частности ОТО) резко повысило точность пространственно-временных измерений как на очень малых масштабах, так и на масштабах Земли и космоса.

Гравитационно-релятивистская метрология

В результате сформировалось ещё одно направление – гравитационно-релятивистская метрология (ГРМ) [1]. Оно возникло благодаря быстрому росту точности измерений:

- эталонов времени-частоты, неопределённости которых 10^{-15} – 10^{-16} ,
- угловых измерений с помощью радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ) на уровне 10^{-4} – 10^{-5} угловой секунды,
- радарных измерений расстояний до планет с неопределённостью порядка метров,
- лазерной локации Луны (ЛЛЛ) на уровне долей сантиметра,
- детекторов гравитационных волн с чувствительностью 10^{-20} – 10^{-22} и др.,

а также благодаря:

- распространению прецизионных измерений на большие расстояния (вне Солнечной системы),
- тенденциям в современной физике к созданию теорий объединения (ТО) взаимодействий и, следовательно, возможной связи между ФФК.

Основными направлениями ГРМ являются:

1. Разработка гравитационно-релятивистских моделей пространственно-временных измерений для РСДБ, миллисекундных и двойных пульсаров, радарных и лазерных измерений спутников и планет в ближнем и дальнем космосе. Разработка пульсарной шкалы времени. Использование двойных пульсаров как лабораторий для проверки фундаментальных физических теорий.

2. Измерения абсолютного значения G , других ФФК и их возможных вариаций. Их использование для перехода на новые определения единиц СИ, основанные на ФФК, и для проверки обобщенных теорий гравитации и теорий объединения (ТО) взаимодействий [3; 6].

3. Теоретические исследования теорий гравитации и ТО физических взаимодействий с возможными вариациями ФФК, например, скалярно-тензорных теорий (СТТ) [3; 8], теорий с произвольной зависимостью от кривизны – $f(R)$ [7], где R – скалярная кривизна, многомерных теорий [13–15] и др.

4. Разработка гравитационных экспериментов нового поколения, в особенности космических, для проверки как теории гравитации Эйнштейна и ее обобщений, так и ТО [2; 16; 17] с использованием метрологических средств высшей точности, в частности исследование эффектов кручения, эффектов вращения и эффектов второго порядка по v/c . Это, например, прецессия

Лензе–Тирринга. Она проверена с помощью лазерной локации спутников Лагеос и спутника Gravity Probe B только на уровне 1 %. Это проверка:

– принципа эквивалентности (ПЭ), гравитационного закона обратных квадратов (Ньютона) в диапазоне м и порядка 10 нм, а также на расстояниях, превышающих размеры Солнечной системы;

– возможных временных вариаций G , α , m_e/m_p и других констант;

– применения эталонов времени-частоты и других высокоточных устройств (атомная, молекулярная, нейтронная интерферометрия, атомная спектроскопия) в фундаментальных гравитационных экспериментах, особенно в космосе;

– применения атомной интерферометрии для точного определения значения G , детектирования гравитационных волн, проверки возможного нарушения локальной лоренц-инвариантности (ЛЛИ) и слабого ПЭ, создания абсолютных гравиметров и др.;

– получения новых данных по постньютоновским параметрам γ и β , характеризующим возможные отклонения теорий гравитации от ОТО в центрально-симметричном гравитационном поле (пока, по данным КА «Кассини», они следующие: $\gamma - 1 \leq 2,3 \times 10^{-5}$, $\beta - 1 \leq 5 \times 10^{-4}$) и по параметру СТТ Бранса-Дикке, обобщающей ОТО ($\omega_{BD} > 40000$).

5. Исследование космологических моделей и измерение космологических параметров («констант» в современную эпоху) с целью изучения фундаментальных свойств материи и получения ограничений на классы фундаментальных теорий, в частности изучение проблем ТЭ и ТМ [10]. Наиболее точные данные по космологическим параметрам (данные спутника WMAP): полная средняя плотность $0,98 < \Omega_{tot} < 1,08$, параметр Хаббла сегодня $H_0 = 0,72$, плотность ТЭ $\Omega_{DE} \sim 0,7$, плотность ТМ $\Omega_{DM} \sim 0,26$, плотность барионов $\Omega_B \sim 0,04$, плотность излучения $\Omega_R \sim 5 \cdot 10^{-5}$, параметр уравнения состояния $w = p/\rho < -1$. Данные этих, как и других наблюдений, постоянно уточняются.

Все это делает актуальным исследование того, как современные проблемы фундаментальной физики и их решения могут отразиться на фундаментальной метрологии и ФФК и, конечно, наоборот.

Исследования предыдущего столетия в области гравитации были посвящены главным образом теоретическим исследованиям и экспериментальной проверке общей теории относительности и альтернативных теорий тяготения с сильным уклоном на связь между явлениями макро- и микромира, или, другими словами, между классическим тяготением и квантовой физикой.

Так как все попытки проквантовать общую теорию относительности обычным способом не дали результата, и было доказано, что она ненормируема, стало ясно, что наиболее адекватный путь – объединение всех физических взаимодействий. Это и произошло в 70-х гг. XX в. И приблизительно в это же время начались экспериментальные исследования в сильных полях и гравитационных волн, что дало новый импульс в теоретических ис-

следованиях таких объектов, как пульсары, черные дыры (ЧД), кротовые норы (КН), квазары, активные ядра галактик, ранняя Вселенная и т. д., которые продолжают и теперь.

В настоящее время, когда мы думаем о самых важных направлениях развития в физике, мы можем предвидеть, что исследования в области гравитации и космологии будут важны не только сами по себе, но и как недостающее звено в проблеме объединения всех существующих физических взаимодействий.

Следующее поколение гравитационных экспериментов, проверяющих предсказания объединенных теорий, необходимо и в экспериментальных областях.

Среди них: спутники MICROSCOPE и STEP для проверки краеугольного камня в основании ОТО – ПЭ, SEE (Satellite Energy Exchange) [16; 17] – для проверки закона тяготения Ньютона (или новых ньютоновых взаимодействий), возможных изменений ньютоновой постоянной G со временем и абсолютного значения G с беспрецедентной точностью, лазерная локация Луны (LLR), КА PLANCK и др. Все эти эксперименты станут тестами не только самой теории Эйнштейна, но и объединенных моделей физических взаимодействий [2]. Конечно, проблема гравитационных волн, проверка эффектов кручения и вращения 2-го порядка по v/c и в сильных гравитационных полях также остается важной.

Мы можем предсказать также, что тщательное исследование самой гравитации и в рамках объединенных моделей даст в следующем столетии и тысячелетии даже больше для нашей повседневной жизни, чем электромагнитная теория дала нам в двадцатом столетии после очень абстрактных фундаментальных исследований Максвелла, Пуанкаре, Эйнштейна и др., которые никогда не мечтали о таких огромных приложениях их работ [3].

Другая очень важная особенность, которую можно предвидеть, это увеличивающаяся роль фундаментальных исследований физики, гравитации, космологии и астрофизики, в частности, в космических экспериментах [2]. Уникальная окружающая среда – микрогравитация и современное бурное развитие технологий создают почти идеальное место для гравитационных экспериментов, которым мешают на Земле её относительно сильное поле тяготения и поля тяготения соседних объектов вследствие того, что нет способов экранировки гравитации.

В развитии релятивистского тяготения и динамической космологии после А. Эйнштейна и А. Фридмана мы можем выделить три стадии:

1) сначала исследование теорий и моделей с источниками в виде идеальной жидкости, как было первоначально сделано Эйнштейном и Фридманом;

2) исследования моделей с источниками в виде различных физических полей, начиная с электромагнитных и скалярных в классических и квантовых случаях, что актуально и теперь;

3) применение идей и результатов объединенных моделей для рассмотрения фундаментальных проблем космологии и физики ЧД, особенно при высоких энергиях, и для объяснения самого большого вызова современной физике – существующего ускорения Вселенной, проблем ТМ и ТЭ [13].

Многомерные гравитационные модели играют существенную роль в последнем подходе. Необходимость изучения многомерных моделей гравитации и космологии мотивирована несколькими причинами [14; 15].

Во-первых, главная тенденция современной физики – объединение всех известных фундаментальных физических взаимодействий: все они используют дополнительные измерения, но мы все ещё не имеем хорошей модели, объединяющей все четыре взаимодействия.

Во-вторых, многомерные гравитационные модели, так же как СТТ гравитации, являются теоретическими подходами для описания возможных временных и пространственных вариаций ФФК. Эти идеи идут от ранних работ Е. Милна (1935) и П. Дирака (1937) о связях между явлениями микро- и макромира, и до сих пор они тщательно исследуются как теоретически, так и экспериментально.

Наконец, применяя многомерные гравитационные модели к основным проблемам современной космологии и физики ЧД и КН, мы надеемся найти ответы на такие давние проблемы, как [10]:

- сингулярное или несингулярное начальное состояние Вселенной;
- рождение нашей Вселенной, её массы и энтропии;
- космологическая постоянная;
- совпадение ТМ и ТЭ одного порядка;
- происхождение инфляции и определенных скалярных полей, которые могут быть необходимыми для ее реализации, выход из неё;
- изотропизация;
- стабильность и природа фундаментальных констант;
- устойчивая компактификация дополнительных измерений и др.

Принимая во внимание, что многомерные гравитационные модели являются определенными обобщениями ОТО, которая проверена надежно в слабых полях на уровне 10^{-4} – 10^{-5} и частично в сильных полях (двойные пульсары), весьма естественно задаться вопросом об их возможных наблюдательных или экспериментальных проявлениях.

Из того, что мы уже знаем, среди них:

- возможные отклонения от закона Ньютона и закона Кулона или новые взаимодействия;
- возможные изменения эффективной гравитационной постоянной по времени со скоростью на 3 и более порядка меньшей, чем хаббловское;
- возможное существование монополярных мод в гравитационных волнах;
- различное поведение объектов в сильных гравитационных полях типа многомерных ЧД, КН и р-бран;
- изменения стандартных космологических тестов;

– возможное несохранение энергии в сильных полях и ускорителях, если идеи мира на бране верны и т.д.

Нами реализована программа получения точных решений многомерной гравитации и космологии с различными источниками, выделены инфляционные, несингулярные, с современным ускоренным расширением и др. [13–15].

Впервые получено сигма-модельное представление в многомерной модели гравитации с полями форм и цепочкой пространств Эйнштейна, открывшее новый метод получения решений в многомерной космологии и гравитации. Получено семейство космологических и сферически-симметричных решений с бранами в случае цепочки риччи-плоских пространств и одного пространства Эйнштейна, которые описываются уравнениями типа цепочек Тода. Для этой модели получено уравнение типа Уилера–Де Витта и найдены его точные решения для стандартных (ортогональных) правил пересечения бран. Развита бильярдная модель в многомерной космологии с многокомпонентной анизотропной жидкостью (в классическом и квантовом случаях).

Предложен квантовый бильярдный подход в D -мерной модели гравитации с m полями форм. В этом подходе рассмотрено уравнение Уилера–ДеВитта и получено его асимптотическое решение, которое определено с помощью спектральных функций для оператора Бельтрами–Лапласа на бильярде (с условиями Дирихле на границе) в многомерном пространстве Лобачевского. Рассмотрены примеры бильярдов при $D = 4$ ($m = 3$) и при $D = 11$ ($m = 120$).

Для класса многомерных теорий гравитации с действием, нелинейным по кривизне, сформулирован новый метод построения моделей космологических и локальных конфигураций, основанный на приближении медленных (в планковском масштабе длины и времени) изменений. С использованием этого метода описан механизм стабилизации размеров дополнительных измерений в ходе космологической эволюции; получены изотропные (в нашем пространстве) космологические модели, описывающие эволюцию Вселенной от ранней инфляционной стадии до современного ускоренного расширения в согласии с наблюдательными данными; предложен механизм появления поля Хиггса и других бозонных полей Стандартной модели из дополнительных пространственных измерений; получены примеры космологических моделей, описывающих одновременно ускоренное расширение Вселенной и наблюдаемые вариации постоянной тонкой структуры («австралийский диполь»).

Так как современная космология уже стала уникальной лабораторией для проверки объединенных моделей физических взаимодействий при энергиях, которые намного превышают энергии, достижимые существующими и будущими ускорителями и другими устройствами на Земле, существует возможность использования космологических и астрофизических данных для выбора между будущими теориями объединения.

Данные относительно возможных изменений G во времени или возможных отклонений от закона Ньютона как новые важные тесты должны также внести свой вклад в выбор объединенной теории и выбор жизнеспособных космологических моделей [10].

Фундаментальные физические константы

В физических теориях, физических законах мы встречаемся с константами, которые характеризуют стабильность различных типов процессов и видов материи. Эти константы важны, так как они проявляются независимо в разных ситуациях и имеют одно и то же значение, по крайней мере в пределах современных точностей измерения. Более того, на данный момент они не могут быть вычислены через другие величины. Именно поэтому они называются фундаментальные физические константы (ФФК) [6; 18].

Строго определить это понятие и набор ФФК не представляется возможным, потому что константы, в основном размерные, присутствуют в определенных физических теориях. В процессе научного прогресса некоторые из этих теорий заменяются более общими со своими константами. При этом возникают соотношения между старыми и новыми константами и получаются ограничения на область применения старых теорий. Поэтому мы можем говорить не об абсолютном наборе ФФК, а только о наборе, соответствующем современному уровню науки [2; 3].

Как уже отмечалось, в настоящее время основным направлением развития физики является тенденция к объединению четырех известных типов взаимодействий.

Действительно, до создания единой теории электромагнитного и слабого взаимодействий С. Вайнбергом и А. Саламом и разработки некоторых теорий Великого объединения – ТВО (электрослабого и сильного взаимодействий) в качестве набора ФФК рассматривались:

$$c, \hbar, \alpha, G_F, g_s, m_p \text{ (или } m_e), G, H, \rho \text{ (или } \Omega), A, k, I,$$

где c – скорость света в вакууме, \hbar – постоянная Планка, m_p и m_e – массы протона и электрона; α , G_F , g_s и G – константы электромагнитного, слабого (Ферми), сильного и гравитационного взаимодействий, а H , ρ и A – космологические параметры (постоянная Хаббла, средняя плотность материи во Вселенной и космологическая постоянная), k и I – постоянная Больцмана и механический эквивалент тепла. Последние две играют в основном роль переводных множителей между температурой, с одной стороны, и энергией и механическими величинами – с другой, хотя, например, постоянная Больцмана k играет также большую роль в теории информации, термодинамике, проблеме энтропии, ЧД и др.

После утверждения в 1983 г. нового определения метра, связанного с определенной длиной волны света λ (а не с платино-иридиевым стержнем, как это было ранее), эту роль частично играет также и скорость света c ($\lambda = ct$). Теперь ее можно также рассматривать и как переводной множитель

между единицами времени (частоты) и длины, так как она определяется с абсолютной (нулевой) погрешностью измерений (набор констант сложился до 1970-х гг.).

В настоящее время теория единых электрослабых взаимодействий имеет надежное экспериментальное подтверждение и существует в основном хорошо разработанная и подтвержденная теория ее объединения с сильными взаимодействиями – ТВО, или 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, или Λ CDM-модель с космологической постоянной и холодной материей). При этом наиболее предпочтительным является уже следующий набор ФФК [6]:

$$\hbar, c, e, m_e, \theta_W, G_F, \theta_C, A_{КХД}, G, H, \rho \text{ (или } \Omega \sim 1), \Lambda, k, I.$$

Здесь e – заряд электрона, θ_W – угол смешивания Вайнберга, θ_C – угол Кабиббо, $A_{КХД}$ – параметр обрезания в теории сильных взаимодействий – квантовой хромодинамике, Ω – отношение плотности энергии во Вселенной ρ к критической плотности, определяющей тип космологической модели Фридмана: $\Omega = 1$ для модели с плоским пространством, $\Omega < 1$, для открытой модели и $\Omega > 1$ – для закрытой, причем модель с $\Omega = 1$, по данным наблюдений, пока предпочтительна. Как мы видим, во втором наборе ФФК константы, связанные с макроскопическими явлениями (гравитационная, космологические), остаются такими же, как и в первом наборе.

Конечно, СМ, ОТО и 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, космологические), 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.) [13–15].

В последнее время появились экспериментальные факты, подтверждающие необходимость выхода за рамки СМ, ОТО и СКМ. К таким фактам относятся подтверждение существования нейтринных осцилляций и ненулевых масс нейтрино, а также в космологии, как мы уже говорили, – обнаружение новых видов физических субстанций – ТМ и ТЭ.

Необходимо отметить, что даже в рамках СМ остается нерешенным ряд проблем [19], таких как дальнейшее экспериментальное подтверждение существования хиггсовских частиц после открытия на Большом адронном коллайдере (БАК) бозона Хиггса, а также конфайнмента кварков и глюонов, суперсимметричных частиц и др. Возможно, часть этих проблем будет решена при помощи данных, полученных в дальнейших экспериментах на БАК в ЦЕРН (Швейцария) при активном участии российских ученых.

Конечно, если будет создана объединенная теория всех четырех известных сейчас взаимодействий, а на эту роль за последние десятилетия претендовали различные схемы: супергравитация, суперсимметрия, суперструны, а сейчас ещё не созданная М-теория, включающая модели супергравитации и суперструн, то, возможно, возникнет другой – третий набор, связанный 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 ТО – 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 [2; 9; 20], хотя простейшие модели типа Рендал–Сундрема не подтверждаются экспериментами на основе эффекта Казимира.

Точность определения ФФК весьма различна. Наиболее точно измеренной константой была и остается скорость света в вакууме. Когда существовали отдельные эталоны единицы времени и длины (до 1983 г.) она была измерена с неопределенностью 10^{-10} . Сейчас она считается (по определению) заданной с нулевой неопределенностью, а именно $c = 299792458$ м/с, относительная стандартная неопределенность $u_r = 0$ (точно). Микроскопические (атомные) константы e, \hbar, m известны с $u_r \sim 10^{-7} - 10^{-8}$; G – с $u_r \sim 10^{-4}$ (и даже более, см. далее); θ_W с $u_r \sim 10^{-3}$.

Еще более сложная ситуация сложилась с космологическими константами, которые стали определяться в последнее десятилетие намного точнее: H известно с точностью порядка 2 %, средняя плотность материи во Вселенной оценивается с точностью до процентов, а для космологической постоянной, значение которой в современную эпоху ранее считалось весьма малой или даже нулем, самые последние оценки дают значение (по эффективной плотности энергии), превышающее плотность материи во Вселенной, хотя и одного с ней порядка. Это так называемая проблема совпадений. Но осталась и другая проблема, связанная с космологической постоянной. Если она существует, то из квантовых соображений (модель физического вакуума) в ранней Вселенной она должна была быть очень большой, в 10^{120} раз больше, чем в настоящее время, и разумных механизмов такого её уменьшения пока нет.

Что касается природы ФФК, можно отметить несколько подходов к ее объяснению [1; 2]. Одна из первых гипотез принадлежит Дж.А. Уилеру: в каждом новом цикле развития Вселенной ФФК возникают заново вместе с новыми физическими законами, определяющими ее эволюцию в данном цикле. Тем самым ФФК и физические законы связаны с рождением и эволюцией Вселенной.

Менее глобальный подход к природе размерных ФФК предполагает, что они необходимы, чтобы сделать физические соотношения безразмерными или что они являются мерой асимптотических состояний. Действительно, в

релятивистских теориях скорость света обычно проявляется в виде отношения v/c , где v – скорость объекта. В то же время скорости всех тел не превышают скорости света c , так что она играет роль предельной скорости. Такой же смысл предельных величин имеют и ряд других ФФК: \hbar – минимальный квант действия в квантовой теории, e – минимально возможный наблюдаемый заряд (электрона) и т.п. G – наиболее универсальна, так как гравитация действует на все тела и она не экранируема.

Наконец, некоторые ФФК или их комбинации могут рассматриваться как естественные масштабы, характеризующие основные единицы физических величин: времени, длины, массы, которые в принципе достаточны для описания всех физических явлений. Такими масштабами (единицами) могут быть, например, планковские масштабы: длины $L \sim 10^{-33}$ см, массы $m_L \sim 10^{-5}$ г и времени $\tau_L \sim 10^{-43}$ сек, которые определяются как комбинации в некоторых степенях только из c , \hbar и G , связанных с основными физическими законами и теориями (Максвелла, квантовой теорией, Ньютона, Эйнштейна).

Другая интересная и широко обсуждаемая проблема, связанная с ФФК, – почему их значения лежат в весьма узком интервале, необходимом для возникновения и существования жизни на Земле (для стабильности атомов, времени жизни звезд главной последовательности, к которой принадлежит и Солнце, современной температуры Земли, существования океанов и т.п.). Есть несколько возможных и пока до конца не убедительных объяснений. Во-первых, это чисто случайно, что мы живем именно в таком мире и с такими ФФК, хотя вероятность этого факта ничтожна среди всех возможных наборов констант. Во-вторых, жизнь может существовать, по-видимому, и в других формах и для других наборов ФФК, о которых мы не знаем. В-третьих, любые другие наборы ФФК могут реализовываться в других вселенных, кроме нашей. Наконец, но, может быть, не в последнюю очередь, существует некоторый космический процесс тонкой настройки ФФК, приводящий к их современным значениям в течение долгой эволюции, возможно, через прохождение многих циклов развития Вселенной и т.п.

Что касается классификации ФФК, то их можно условно разделить на четыре группы по степени общности.

1. Универсальные ФФК, такие как постоянная Планка \hbar , которая разделяет все процессы и явления на квантовые и неквантовые (микро- и макромиры) и, до определенной степени, c , которая разделяет все движения и процессы на релятивистские (близкие к скорости света) и нерелятивистские (намного меньше c).

2. Константы различных физических взаимодействий, такие как α , θ_W , $A_{КХД}$, и G .

3. Константы элементарных составляющих материи, такие как m_e , m_p и т.п.

4. Переводные множители, такие как k , I и частично c .

Конечно, разделение на эти классы не является абсолютным. По мере развития науки многие ФФК переходили из одного класса в другой. Напри-

мер, e сначала был зарядом единичного объекта – электрона (класс 3), затем он стал характеризовать класс 2 (электромагнитное взаимодействие, $\alpha = e^2/\hbar c$ в комбинации с \hbar и c); скорость света c успела побывать почти во всех классах: из 3-го (скорость определенного объекта – света) перешла в класс 1 (предельная скорость всех типов движения), а затем частично и в 4-й (связь единицы времени-частоты с единицей длины). Некоторые константы перестали быть фундаментальными (например плотности, магнитные моменты и т. п.), так как они стали вычисляться через другие ФФК.

Что касается числа ФФК, то явно проступают две противоположные тенденции: число старых ФФК обычно уменьшается, когда возникают новые, более общие теории, но в то же время появляются новые области науки, новые процессы, виды материи, при которых появляются и новые константы. Тем не менее, возможно, мы придем к некоторому минимальному набору, характеризованному одной или несколькими ФФК, например связанному с так называемыми планковскими параметрами L , m_L , τ_L , составленными из c , \hbar и G . Роль этих параметров важна, так как $m_L c^2$ характеризует энергию объединения четырех известных типов фундаментальных взаимодействий: сильного, слабого, электромагнитного и гравитационного, а L характеризует масштаб, при котором классические понятия пространства и времени теряют свой смысл [9]. Существуют некоторые соображения в пользу того, что ТО взаимодействий приведут к уменьшению числа истинно фундаментальных констант до двух размерных констант – c и струнной длины λ_s (Veneziano, 2002) или ни одной (Duff, 2002), что на самом деле означает, что все они становятся переводными множителями.

Важную роль ФФК играют в создании системы единиц измерений и в их реализации – эталонах единиц основных физических величин, что, в свою очередь, составляет основу современной метрологии [19]. В 1832 г. Гаусс впервые измерил магнитное поле Земли, используя десятичную систему, основанную на трех единицах измерения в механике: сантиметре, грамме и секунде (СГС), которая и до сих пор часто используется физиками. Конечно, можно использовать разные системы единиц, что и делается на практике исходя из удобства. Так, в каждой области физики используют единицы, соизмеримые по величине с амплитудой описываемых ею эффектов; например, астрономия и астрофизика – световой год и массу Солнца вместо метра и килограмма системы СИ, атомная физика – нанометры, а не метры, ядерная физика – мегаэлектронвольты ($MэВ$), а не джоули и т.д. Хотя, как мы уже говорили, систему единиц, предложенную Планком и основанную на универсальных константах c , \hbar и G , можно считать привилегированной или естественной. Следует, правда, отметить, что еще до М. Планка (1899 г.) систему единиц, основанную на других фундаментальных константах c , e и G , предложил Стоуни (1881 г.)

Точное знание ФФК, прецизионные измерения и в целом метрология необходимы для проверки фундаментальных теорий, расширения наших знаний о природе и в конечном итоге для практических приложений этих

теорий [1]. В связи с этим возникают следующие теоретические проблемы: 1) развитие моделей, расчет эффектов для сравнения предсказаний фундаментальных теорий с экспериментальными данными в критических ситуациях (то есть для проверки ОТО и других обобщенных теорий гравитации, квантовой электродинамики, квантовой хромодинамики, ТО и т.п.); 2) установление более точных значений и пределов на возможные временные и пространственные вариации ФФК и 3) выбор будущих, более стабильных эталонов физических величин, основанных на ФФК, и способов их реализации.

Возможная переменность фундаментальных констант

Как мы уже говорили, помимо двух основных нерешенных проблем современной физики, указанных выше, – отсутствия ТО всех взаимодействий, включая гравитационное, и объяснения природы ТЭ и ТМ, составляющих в сумме около 95 % полной плотности материи во Вселенной, имеется еще и третья фундаментальная проблема, связанная и с фундаментальной метрологией, – стабильность или возможные вариации ФФК во времени и пространстве [7; 19–20].

Эта проблема возникла в связи с попытками объяснить связь между явлениями микро- и макромира. 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 из известных ФФК. В то же время экспериментальные данные, свидетельствующие о такой переменности ФФК, пока не всегда надежны. Это касается возможных вариаций целого ряда констант, в частности, гравитационной постоянной G и постоянной тонкой структуры α . Однако измерения продолжают, и в распоряжение исследователей поступают новые, все более точные данные.

Поскольку предполагается переход к новым определениям единиц СИ с фиксированными значениями ФФК, вопрос о возможных вариациях констант в пространстве, во времени и в зависимости от энергетического масштаба представляется одним из важнейших. Исторически первые, довольно неуверенные (и впоследствии не подтвердившиеся) указания на такую переменность были получены в отношении гравитационной постоянной G в 1960-е гг.

В настоящее время можно указать три основные проблемы, связанные с G :

1. **Абсолютные измерения G .** Недавние результаты, полученные различными группами, согласуются друг с другом в пределах неопределенности $1,2 \times 10^{-4}$, что на порядки меньше неопределенностей измерений атомных ФФК.

Нужны дальнейшие эксперименты с применением новых методов, возможно, в космосе. 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.

Это означает по существу, что либо пределы точностей измерения G в земных условиях достигнуты (невозможно устранить или учесть влияние окружающих объектов, нестабильность материала нитей и др.), либо в процессе измерения проявляется какая-то новая физика. Первое означает, что, может быть, следует перенести измерения G в более спокойный космос, а второе – следует более тщательно изучать теории, обобщающие ОТО или ТО взаимодействий.

Нами был разработан такой проект совместно с учеными США, основанный на рассмотрении ограниченной задачи трех тел – большого и малого тел, движущихся в капсуле на орбите Земли [21], который позволил бы снизить неопределенности на 2–3 порядка.

Существуют также спутниковые определения произведения $G M_3$, где M_3 – масса Земли, на уровне 10^{-9} , а также менее точные определения G в шахтах (использующие модели Земли). Но эти измерения не позволяют улучшить точность определения G из-за неопределенности с построением достаточно точной модели Земли.

2. **Возможные вариации G со временем,** предсказываемые обобщенными теориями гравитации и многомерными моделями объединения [20] (менее скорости расширения Вселенной), допускаются на уровне 10^{-13} – 10^{-15} в год и менее, поэтому существует необходимость в теоретических и экспериментальных разработках этой проблемы [22–23].

По многомерным моделям отметим наши исследования: многомерных теорий гравитации с нелинейными по кривизне лагранжианами [24–26]. Рассматривалось многомерное пространство-время, в котором в качестве подпространства выделено 4-мерное наблюдаемое пространство-время, а дополнительные измерения представляют собой прямое произведение некоторого количества фактор-пространств с высокой симметрией. Они могут быть сферами или компактными гиперболическими пространствами с радиусами кривизны (масштабными факторами), зависящими от точки в наблюдаемом пространстве-времени V_4 , и достаточно малыми, чтобы не наблюдаться в современных экспериментах. В теориях с геометрией этого класса (который обобщает пятимерную геометрию Калуцы–Клейна) эффективная постоянная тяготения зависит от точки (в однородных космологических моделях – только от времени) из-за переменности элемента многомерного объема, входящего в исходное многомерное действие.

В [24–26] рассматривались многомерные гравитационные лагранжианы достаточно общего вида

$$L_D = F(R) + c_1 R_{AB} R^{AB} + c_2 R_{ABCD} R^{ABCD}, \quad (1)$$

где $F(R)$ – произвольная функция скалярной кривизны R , c_1 и c_2 – исходные константы теории, R_{AB} и R_{ABCD} – соответственно тензор Риччи и тензор Римана D -мерного пространства-времени; латинские заглавные индексы отвечают всем его координатам и пробегают D значений. В [25; 26] некоторые варианты теории (1) применялись для построения космологических моделей, объясняющих наблюдательные данные по пространственно-временной переменности постоянной тонкой структуры α (так называемый австралийский диполь [27]) в предположении, что электромагнитное поле задается в многомерном пространстве-времени обычным максвелловским лагранжианом. В этом случае гравитационная постоянная меняется от точки к точке в точности по тому же закону, что и α . Согласно наблюдениям, вариации α на Земле ограничены 17-м знаком, а по космологическим наблюдениям [27] такие вариации находятся в пределах 10^{-15} в год. Поэтому можно заключить, что ограничение на вариации G в таких теориях выполнено автоматически, если построенная модель находится в согласии с наблюдениями по вариациям α . Данное рассуждение относится не только к конкретным моделям, построенным в [24, 25], но и к любым многомерным моделям с общими законами изменения параметров α и G .

Многомерные теории суперструнного происхождения и их обобщения. В данном направлении исследований [28–33], как и в других многомерных теориях, проблема тёмной энергии решается за счет свойств скалярных полей, возникающих из масштабных факторов дополнительных измерений при редукции теории к четырём измерениям; однако в данном классе теорий в общем случае имеются исходные скалярные поля, взаимодействующие с полями антисимметричных форм. Исходное действие задается формулой

$$S = \int d^D x \sqrt{|g|} \left\{ R[g] - h_{\alpha\beta} g^{MN} \partial_M \varphi^\alpha \partial_N \varphi^\beta - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^m \exp[2\lambda_s(\varphi)] (F^s)^2 \right\}, \quad (2)$$

где g_{MN} – D -мерная метрика с детерминантом g , $R[g]$ – скалярная кривизна, φ^α – набор из l скалярных полей, $(h_{\alpha\beta})$ – постоянная невырожденная симметричная $l \times l$ -матрица, $F^s = F_{MN\dots P} dz^1 \dots dz^P$ – абелевы калибровочные поля, λ_i – 1-форма вида $\lambda_i(\varphi) = \lambda_{i\alpha} \varphi^\alpha$, $s = 1, \dots, m$, $\alpha = 1, \dots, l$; кроме того, $(F^s)^2 = F_{MN\dots P} F^{MN\dots P}$. К моделям этого вида приводят различные теории супергравитации и теории суперструн в низкоэнергетическом пределе так называемой M-теории.

В [28–32] в ряде вариантов теории (2) рассмотрены пространственно-плоские космологические модели, описывающие ускоренное расширение наблюдаемого трехмерного пространства и вариации G . В каждой из полученных моделей выделен подкласс, в котором наблюдаемое пространство расширяется ускоренно, а вариация G достаточно мала и удовлетворяет ус-

ловию (1) на некотором интервале космологического времени. В данном классе моделей ускоренное расширение наблюдаемого пространства возможно только при наличии как минимум одного «фантомного» (то есть с аномальным знаком кинетической энергии) скалярного поля. Несингулярные решения в многомерной модели с идеальной жидкостью, описывающие ускорение в современную эпоху с малой вариацией G , получены в [32], решения с вариацией G или константы Янга–Миллса – в [33], а новые ограничения на поправки к закону Ньютона на сверхмалых расстояниях – в [34].

Что касается имеющихся на сегодня наблюдательных данных по вариациям G , то ни пространственные, ни временные вариации G пока не обнаружены, поэтому речь идет о различных ограничениях на возможность таких вариаций [35]. Часть ограничений относится к современной скорости изменений G , полученных из данных лазерной локации Луны, радиолокации планет и космических аппаратов, тайминга пульсаров. Другая часть – к возможным различиям между значениями G в настоящий момент и в прошлом (из исследований эволюции Земли, Солнца и звезд, из данных о древних затмениях и нуклеосинтеза в ранней Вселенной).

Наиболее жесткие ограничения на переменность G следуют из анализа планетных эфемерид, полученных с использованием локационных и доплеровских данных: от космических аппаратов Mars Global Surveyor (1998–2006), Mars Odyssey (2002–2008), Mars Reconnaissance Orbiter (2006–2008) и других, вместе с новейшими данными по возмущениям от небесных тел из пояса астероидов и пояса Койпера, см. [35].

Поскольку ограничения относятся по существу к произведению $GM\Theta$, при получении результатов по переменности G учитывались потери массы Солнца на электромагнитное излучение и нейтрино ($\sim 0,7 \times 10^{-13}$ /год) и на солнечный ветер ($\sim 0,2 \times 10^{-13}$ /год). Наиболее жесткое ограничение, полученное по совокупности эфемерид, которое можно, несколько огрубляя, записать как

$$G^{-1} dG/dt = (0,16 \pm 0,6) \times 10^{-13}/\text{год}. \quad (3)$$

Уровень неопределенности при этом оказывается на порядок меньше, чем наилучший результат, полученный с помощью лазерной локации Луны.

Ограничения по таймингу пульсаров можно рассматривать лишь как ориентировочные, так как их неопределенность гораздо больше, чем у результатов анализа планетных эфемерид. Они лишь косвенно подтверждают неизменность G на указанном уровне точности.

Для интерпретации ограничений, связанных с гелиосейсмологией и первичным нуклеосинтезом, в форме оценок величины dG/dt приходится привлекать какую-либо модельную зависимость $G(t)$; обычно используется степенная зависимость $G(t)$. Фактически данные по первичному нуклеосинтезу лёгких элементов говорят о том, что приблизительно через 3 минуты после начала расширения Вселенной значение G отличалось от нынешнего не более чем на 20 %. Это ограничение, наряду с ограничениями на скорость

изменения G в современную эпоху, должно учитываться при отборе жизнеспособных космологических моделей и теорий гравитации.

Будущие миссии космических аппаратов к Марсу и Венере, данные радиолокации спутников Земли, планет, а также лазерная локация Луны, несомненно, решат эту проблему, так как чем больше интервалы времени между измерениями и, конечно, чем они точнее, тем более строгие результаты будут получены. К сожалению, все попытки послать космические аппараты к Марсу (США, Япония) и к его спутнику Фобосу (Россия, Россия и КНР) с этой целью после американской программы «Викинг» не увенчались успехом.

3. *Возможные вариации G с расстоянием* (или появление новых ньютоновских взаимодействий), предсказанные скалярно-тензорными и многомерными моделями гравитации (например, моделями «мира на бране») на малых расстояниях. Пока в области более 10 нм ньютоновские силы не обнаружены. Ожидается, что в ближайшие годы будут получены оценки в диапазоне < 1 нм.

Стабильность постоянной α , являющейся основной характеристикой интенсивности электромагнитного взаимодействия, особенно важна при выборе единицы времени – секунды и определения основной электрической единицы СИ – ампера. В то же время недавно появились крайне интересные и неожиданные новые данные о возможной переменности α , 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 α на основе прямого сравнения оптических частот в часах на ионах алюминия и ртути получено следующее ограничение [36]:

$$d(\ln \alpha/dt) = (-1,6 \pm 2,3) \cdot 10^{-17} / \text{год}. \quad (4)$$

Это ограничение уже приближается к результатам, полученным из анализа 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 [37], и, в частности, наиболее жесткий результат для вариаций α [38]

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

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

В любом случае из (4) следует, что если α 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 превосходит 10^{-8} , очевидно, что (при энергиях много меньше энергии объе-

динения электромагнитного и слабого взаимодействий и менее) такие вариации, даже если они реально существуют, не могут оказать существенного влияния на практические измерения, и в обозримое время не следует ожидать каких-либо изменений этой ситуации [39].

Однако некоторая зависимость $G(t)$ весьма желательна для понимания процессов, происходящих на Земле, – это «парадокс слабого Солнца» (Sahni V. and Shtanov Yu., 2014, ArXiv: 1405.4369). Модели эволюции Солнца предсказывают, что примерно 4 миллиарда лет назад светимость Солнца была примерно на 30 % меньше, чем сейчас. Тогда океаны Земли должны были быть полностью ледяными и безжизненными. Геофизические данные говорят о том, что около 4 миллиардов лет назад уже существовал жидкий океан с древнейшими формами жизни. Разрешение парадокса – переменность G . Известно, что светимость звёзд (в т.ч. Солнца) $\sim G^7$. Расчет показывает, что приближенное постоянство потока солнечной энергии на Землю обеспечивается, если величина G уменьшилась на ~ 4 % за 4 миллиарда лет. Но если $(1/G)dG/dt \sim 10^{-13}$ в год, то $\Delta G/G$ за 4 миллиарда лет составит лишь 0,04 %, что на 2 порядка меньше требуемого. Чтобы совместить эти требования, нужна нелинейная эволюция G , причем в настоящий момент функция $G(t)$ должна меняться медленно, возможно, быть близкой к минимуму. Отметим, что этим свойством обладают некоторые многомерные модели, обсуждавшиеся выше.

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 [40], основанного на сопоставлении нескольких линий в различных выборках источников (сравниваются сдвиги линий, в разной степени чувствительных к вариациям α), к спектрам поглощения 128 источников в диапазоне красных смещений $0,5 < z < 3$ привело к следующему результату [41]:

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

где α_0 – современное значение α . Эта и ряд других аналогичных оценок указывают на более низкие значения α в прошлом по сравнению с α_0 .

С другой стороны, в ряде работ исследовались особенности спектров излучения, а не поглощения. В частности, измерения сильных эмиссионных линий в выборке из 165 спектров квазаров привели к оценке [42]:

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

но для сравнительно малых красных смещений. Эта и ряд других оценок дают $\alpha > \alpha_0$ в прошлом, в противоположность (5). Помимо объяснения этого противоречия наличием невыявленных систематических погрешностей, возможна и «оптимистическая» точка зрения, что таким образом проявляются пространственные вариации α , так как эмиссионный и абсорбционный методы чувствительны к значениям α в весьма различных физических условиях.

Ряд результатов 2010 г. подтверждает представление о пространственных вариациях α , теперь – в зависимости от направления, в котором ведутся наблюдения. Замечено [43], что ранее сделанные выводы о несколько меньших значениях α в прошлом по сравнению с α_0 , подобные оценке (4), опирались на наблюдения квазаров в северной части небесной сферы, например, при помощи телескопа Keck 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 [43] делают вывод об анизотропии дипольного характера в распределении значений α .

Данные по возможному изменению константы слабого взаимодействия позволяют сделать вывод о том, что она не меняется на уровне 10^{-12} , а сильных взаимодействий – 10^{-18} в год [37].

Задача теоретиков вместе с экспериментаторами объяснить или опровергнуть эти данные с учетом того, что они получены при разных удалениях объектов (разных красных смещениях z), а их интерпретация происходит в рамках определенной космологической модели.

Переход на новые определения единиц Международной системы СИ, основанных на фиксированных значениях ФФК

СИ основана на семи основных единицах: *м, кг, с, А, К, моль и кд*, которым соответствуют семь основных величин: длина, масса, время, сила электрического тока, термодинамическая температура, количество вещества и сила света.

В октябре 2005 г. Международный комитет мер и весов (МКМВ) принял рекомендацию о подготовительных мерах по переопределению килограмма, ампера, кельвина и моля таким образом, чтобы эти единицы были привязаны к точно известным значениям ФФК, а не к артефактам, как современный прототип килограмма (МПК).

Предполагается дать новые определения этим четырем основным единицам, связывая их с точно определенными значениями (нулевая неопределенность) постоянной Планка h , элементарного заряда e , постоянной Больцмана k и постоянной Авогадро N_A . Это будет означать, что шесть из семи основных единиц СИ будут определены через истинные природные инварианты. Кроме того, не только эти четыре фундаментальные константы будут

иметь точно определенные значения, но и неопределенности многих других фундаментальных физических констант будут либо устранены, либо значительно уменьшены. Даны варианты возможных формулировок четырех новых определений. Конечно, потребуются преодолеть большие трудности по повышению точности определения k_2 с помощью ватт-весов или числа Авогадро с помощью установок с кремниевыми шарами и др.

Переходя снова к прогрессу в измерении ФФК, отметим, что в 2010 г. опубликованы результаты второго этапа завершившегося проекта Авогадро, который является рекордным по точности [44]. В этом эксперименте постоянная Авогадро была измерена с относительной стандартной неопределенностью $3,0 \times 10^{-8}$.

Согласно решениям МКМВ, требуемая для замены МПК относительная стандартная неопределенность значений постоянных Планка и Авогадро должна быть на уровне $2 \cdot 10^{-8}$. В рекомендации Консультативного комитета по массе (ККМ), принятой в 2010 г., были сформулированы требования к новому определению килограмма следующим образом:

– как минимум три независимых эксперимента, включая эксперимент с ватт-весами и эксперимент Международного координационного проекта Авогадро, должны дать значения соответствующих констант с относительными стандартными неопределенностями, не превышающими $5 \cdot 10^{-8}$. По меньшей мере, один из этих результатов должен иметь относительную стандартную неопределенность, не превышающую $2 \cdot 10^{-8}$;

– для каждой из этих соответствующих констант согласие между значениями, полученными в различных экспериментах, должно быть на уровне достоверности 95 %;

– должна быть подтверждена согласованность новых прототипов МКМВ с Международным прототипом килограмма и др. Эти ограничения являются в некотором смысле предельными, поскольку дальнейшее увеличение вышеупомянутых относительных стандартных неопределенностей измерений постоянных Авогадро и Планка может нарушить сложившуюся практику высокоточных измерений масс. Согласованные между собой минимальные результаты требуемой точности для постоянных Авогадро и Планка были получены только в начале 2014 г., однако требуется выявление причин расхождения более ранних результатов, а также поиск путей дальнейшего повышения точности их определения. Более того, наши исследования приводят к выводу о предпочтительности определения k_2 на основе фиксации только постоянной Авогадро, а не постоянной Планка.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Melnikov V.N.* Gravitational Measurements, Fundamental Metrology and Constants / eds. V. de Sabbata and V. N. Melnikov. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ // 1988. – P. 283–297.
2. *Melnikov V.N.* Gravity as a Key Problem of the Millennium Proc. NASA/JPL Workshop on Fundamental Physics in Microgravity. NASA Document D-21522 // 2001. – P. 4.1–4.17.

3. *Melnikov V.N.* Gravity and Cosmology as Key Problems of the Millennium. A. Einstein Century Int. Conf., Paris. AIP Conf. Proc / eds. J.-M. Alimi, A. Fuzfa. 2006. – N 861. – P. 109.
4. *Riess A.G. et al.* Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // *A. J.* – 1998. – V. 116. – P. 1009.
5. *Perlmutter S. et al.* Measurements of Ω and Λ from 42 High Redshift Supernova // *Ap. J.* – 1999. – V. 517. – P. 565.
6. *Melnikov V.N.* Fundamental physical constants and their stability: a Review // *Int. J. Theor. Phys.* 1994. – V. 33. – N 7. – P. 1569–1579.
7. *Станюкович К.П., Мельников В.Н.* Гидродинамика, поля и константы в теории гравитации. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
8. *Melnikov V.N.* Fields and Constants in the Theory of Gravitation // CBPF-MO-002/02, Rio de Janeiro, 2002.
9. *Sabbata V. de, Melnikov V.N., Pronin P.I.* Theoretical Approach to Treatment of Non-Newtonian Forces // *Progr. Theor. Phys.* – 1992. – V. 88. – P. 623.
10. *Melnikov V.N.* Variations of Constants as a Test of Gravity, Cosmology and Unified Models // *Gravit. Cosm.* 2007. – V. 13. – N 2 (50). – P. 81.
11. *Зайцев Н.А., Мельников В.Н.* Теории гравитации с переменными массами и гравитационной постоянной // ПТГЭЧ. – 1979. – Т. 10. – С. 131.
12. *Bronnikov K.A., Melnikov V.N., Novello M.* Possible time variations of G in scalar-tensor theories of gravity // *Gravit. Cosm.* – 2002. – V. 8. – Suppl. – P. 18.
13. *Melnikov V.N.* Multidimensional Classical and Quantum Cosmology and Gravitation: Exact Solutions and Variations of Constants // *Cosmology and Gravitation I.* / ed. M. Novello, Edition Frontieres. – Singapore, 1994. – P. 147.
14. *Melnikov V.N.* Multidimensional Cosmology and Gravitation // *Cosmology and Gravitation II.* – 1996. – P. 465.
15. *Melnikov V.N.* Exact Solutions in Multidimensional Gravity and Cosmology III. CBPF-MO-003/02. – Rio de Janeiro, 2002.
16. *Sanders J., Melnikov V.N. et al.* Project SEE (Satellite Energy Exchange): an International Effort to Develop a Space-based Mission for Precise Measurements of Gravitation // *Class. Quant. Grav.* – 2000. – V. 17. – P. 2331.
17. *Kolosnitsyn N.I., Melnikov V.N.* Test of Inverse Square Law Through Precession of Orbits // *GRG.* – 2004. – V. 36. – N 7. – P. 1619.
18. *Кононогов С.А., Мельников В.Н.* Фундаментальные физические константы, гравитационная постоянная и проект космического эксперимента SEE // *Измерительная техника.* – 2005. – № 6. – С. 3.
19. *Кононогов С.А., Мельников В.Н., Хрущев В.В.* Вариации констант расширенной стандартной модели. I. Определение констант и оценки величин их возможных вариаций // *Измерительная техника.* – 2008. – № 8. – С. 3; II. Экспериментальные ограничения величин возможных вариаций // *Измерительная техника.* – 2008. – № 10. – С. 15.
20. *Bronnikov K.A., Kononogov S.A., Melnikov V.N.* Brane World Corrections to Newton's Law // *GRG.* 2006. – V. 38. – P. 1215.
21. *Alexeev A.D., Melnikov V.N. et al.* Measurement of the Gravitational Constant in Space (SEE Project): Sensitivity to orbital parameters and space charge effect // *Metrologia.* – 2001. – V. 38. – P. 397.
22. *Melnikov V.N.* FPC and Theoretical Models for Time Variation of G // *Progr. Theor. Phys., Suppl.* – 2008. – V. 172. – P. 182.
23. *Melnikov V. N.* Models of G Time Variations in Diverse Dimensions // *Frontiers of Physics.* – 2009. – V. 4. – P. 75.
24. *Бронников К.А., Кононогов С.А., Мельников В.Н.* Вариации постоянной тонкой структуры и многомерная гравитация // *Изм. техн.* – 2013. – № 1. – С. 7–12.

25. Bronnikov K.A., Skvortsova M.V. Modeling the Nonlinear Clustering in Modified Gravity Models // Grav. Cosmol. – 2013. – V. 19. – P. 114.
26. Бронников К.А., Кононогов С.А., Мельников В.Н. // Изм. техника. – 2014.
27. Webb J.K. et al. Evidence for time variation of the fine structure constant // Phys. Rev. Lett. – 2011. – V. 107. – P. 191101.
28. Dehnen H., Ivashchuk V.D., Kononogov S.A., Melnikov V.N. On Time Variation of G in Multidimensional Cosmology // Grav. Cosmol. – 2005. – V. 11. – No. 4. – P. 340–344.
29. Alimi J.-M., Ivashchuk V.D., Kononogov S.A., Melnikov V.N. Multidimensional Cosmology with Anisotropic Fluid: Acceleration and Variation of G // Grav. Cosmol. – 2006. – V. 12. – No. 2–3. – P. 173–178.
30. Ivashchuk V.D., Kononogov S.A. and Melnikov V.N. Electric S-brane Solutions Corresponding to Rank-2 Lie Algebras: Acceleration and Small Variation of G // Grav. Cosmol. – 2008. – V. 14. – No. 3. – P. 235–240.
31. Alimi J.-M., Ivashchuk V.D. and Melnikov V.N. S-brane Solution with Acceleration and Small Enough Variation of G // Grav. Cosmol. – 2007. – V. 13. – No. 2 – P. 137–141.
32. Ivashchuk V.D., Kononogov S.A., Melnikov V.N., Novello M. Non-singular Solutions in Multidimensional Cosmology with Perfect Fluid: Acceleration and Variation of G // Grav. Cosmol. – 2006. – V. 12. – P. 273–278.
33. Ivashchuk V.D. and Melnikov V.N. On time variations of gravitational and Yang-Mills constants in cosmological model of superstring origin // Grav. Cosmol. – 2014. – V. 20. – P. 26–29.
34. Klimchitskaya G.L., Mostepanenko V.M. New Constraints on Yukawa-type Corrections to Newtonian Gravity at Short Separations // Grav. Cosmol. – 2014. – V. 20. – N. 1 (77). – P. 3–9.
35. Pitjeva E.V. Updated IAA RAS Planetary Ephemerides-EPM2011 and Their Use in Scientific Research // Астрон. вестник. – 2013. – Т. 47. – № 5. – С. 419–435.
36. Rosenband T. et. al. Measurement of optical frequency ratios Al⁺/Hg⁺ // Science. – 2008. – V. 319. – P. 1808.
37. Shlyakhter A.I. Direct Test of the Time-Independence of Fundamental Constants // Nature. – 1976. – V. 264. – P. 340.
38. Fujii J. et. al. The nuclear interaction at Oklo 2 billion years ago // Nucl. Phys. B. – 2000. – V. 573. – P. 377.
39. Bronnikov K.A., Kononogov S.A. Possible variations of the fine structure Constant // Metrologia. – 2006. – V. 43. – P. R1.
40. Webb J.K. et. al. Indications of a spatial variation of the fine structure constant // Phys. Rev. Lett. – 1999. – V. 82. – P. 884.
41. Murphy M.T. et. al. Possible evidence for a variable fine-structure constant // Month. Not. R. Astron. Soc. – 2001. – V. 327. – P. 1208.
42. Bahcall J. et. al. Does the Fine-Structure Constant Vary with Cosmological Epoch? // Astroph. J. – 2004. – V. 600. – P. 520.
43. Webb J.K. et. al. Indications of a spatial variation of the fine structure constant // ArXiv: 1008.3907.
44. Leonard B.P. Why the dalton should be redefined exactly in terms of the Avogadro constant? // Metrologia. – 2010. – V. 47. – P. L5.

FUNDAMENTAL INTERACTIONS, CONSTANTS AND FUNDAMENTAL METROLOGY

V.N. Melnikov

Main problems of modern physics and metrology, gravitation and cosmology in particular, are discussed: unification of physical interactions and gravity role in this unification as one of missed parts; present accelerated expansion of the Earth; variation of fundamental constants and transition to new definitions of SI units based on fundamental constants. Important role in solving these problems of the multidimensional integrable models approach in gravitation and cosmology, developed by the author and his colleagues, is pointed out. These models are low energy limits of unification theories. Based on these models, new inflationary, with both present observed acceleration and variations of constants and non-singular cosmological solutions are singled out.

Gravitational-relativistic metrology as new field formulated by the author is described as well as experimental and observational data on variation of constants and transition to new definitions of SI units, based on fixed fundamental constants values.

Key words: gravitation, cosmology, unification of interactions, dark energy, variations of constants, gravitational-relativistic metrology, new SI units.