

Фундаментальные физические константы, их стабильность и переход на новые определения единиц СИ

В. Н. Мельников, С. А. Кононогов

*ВНИИМС, ул. Озерная, 46, г. Москва, Россия,
E-mail: melnikov@vniims.ru; kononogov@vniims.ru*

Обсуждаются основные тенденции в современной теории гравитации и космологии, проблемы выбора, классификации, числа, точности определения фундаментальных физических констант и новых направлений современной фундаментальной метрологии. Изложены основы гравитационно-релятивистской метрологии. Особое внимание уделено гравитационной постоянной: проблемам измерения ее абсолютного значения, возможных вариаций по времени и пространству. Обсуждается также планируемый в 2011 г. переход на новые определения единиц СИ через фиксацию ряда фундаментальных констант.

1. Введение

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 не перенормируема, стало ясно, что наиболее адекватный путь – объединение всех физических взаимодействий, что и началось в 70-х. Приблизительно в это же время начались экспериментальные исследования в сильных полях и гравитационных волн, что дало новый импульс в теоретических исследованиях таких объектов, как пульсары, черные дыры, квазары, активные ядра галактик, ранняя Вселенная и т. д., которые продолжают и теперь.

Но в настоящее время, когда мы думаем о самых важных направлениях развития в физике, мы можем предвидеть, что исследования в области гравитации будут важны не только сами по себе, но и как недостающее звено в проблеме объединения всех существующих физических взаимодействий: слабых, сильных, электромагнитных и гравитационных [1-3]. Даже в экспериментальных областях следующее поколение гравитационных экспериментов, проверяющих предсказания объединенных теорий, будут важны. Среди них: MICROSCOPE и STEP для проверки краеугольного камня в основании ОТО – принципа эквивалентности, SEE – для проверки закона тяготения Ньютона (или новых неньютоновых взаимодействий), возможных изменений ньютоновой постоянной G со временем и абсолютного значения G с беспрецедентной точностью, PLANCK и др. Все эти эксперименты станут тестами не только самой теории Эйнштейна, но и объединенных моделей физических взаимодействий. Конечно, проблема гравитационных волн, проверка эффектов кручения и вращения (GP-B) 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 20-м столетии после очень абстрактных фундаментальных исследований Фарадея, Максвелла, Пуанкаре, Эйнштейна и других, которые никогда не мечтали о таких огромных приложениях их работ.

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

В развитии релятивистского тяготения и динамической космологии после А. Эйнштейна и А. Фридмана мы можем выделить три стадии: сначала исследование моделей с источниками в виде идеальной жидкости, как было первоначально сделано Эйнштейном и Фридманом. Во-вторых, исследования моделей с источниками в виде различных физических полей, начиная с электромагнитных и скалярных в классических и квантовых случаях [4]. И в-третьих, что актуально теперь, применение идей и результатов объединенных моделей для рассмотрения фундаментальных проблем космологии и физики черных дыр, особенно при высоких энергиях, и для объяснения самого большого вызова современной физике – существующего ускорения Вселенной, проблем “темной материи” и “темной энергии”. Многомерные гравитационные модели играют существенную роль в последнем подходе.

Необходимость изучения многомерных моделей гравитации и космологии [1, 2] мотивирована несколькими причинами. Во-первых, главная тенденция современной физики – объединение всех известных фундаментальных физических взаимодействий. В течение последних десятилетий было существенное продвижение в объединении слабых и электромагнитных взаимодействий, некоторые более скромные достижения в стандартной модели, супергравитации, теории струн и суперструн. Но мы все еще не имеем хорошей модели, объединяющей все 4 взаимодействия.

Во-вторых, многомерные гравитационные модели, так же как скалярно-тензорные теории гравитации, являются теоретическими подходами для описания возможных временных и пространственных вариаций фундаментальных физических констант [4-9]. 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. Возможно открытие вариаций постоянной тонкой структуры при дальнейшем критическом исследовании в ближайшем будущем.

Наконец, применяя многомерные гравитационные модели к основным проблемам современной космологии и физики черных дыр, мы надеемся найти ответы на такие давние проблемы как сингулярное или несингулярное начальное состояние Вселенной, рождение нашей Вселенной, ее массы и энтропии, космологической постоянной, проблемы совпадения, происхождение инфляции и определенных скалярных полей, которые могут быть необходимыми для ее реализации, проблемы выхода из нее, изотропизации, стабильности и природы фундаментальных констант [5, 10-13], устойчивой компактификации, новые революционные данные относительно существующего ускорения Вселенной, темного вещества, темной энергии и т. д. Принимая во внимание, что многомерные гравитационные модели являются определенными обобщениями ОТО, которая проверена надежно в слабых полях на уровне 10^{-4} 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 меньшей, чем хаббловское; возможное существование монополярных мод в гравитационных волнах; различное поведение объектов в сильных гравитационных полях типа многомерных черных дыр, кротовых нор и р-бран; стандартные космологические тесты; возможное несохранение энергии в сильных полях и ускорителях, если идеи мира на бране верны и т. д.

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, то существует возможность использования космологических и астрофизических данных для

выбора между будущими теориями объединения [14-16]. 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.

Ниже мы остановимся на некоторых проблемах фундаментальных физических констант, гравитационной постоянной в частности, гравитационно-релятивистской метрологии и перехода на новые определения единиц СИ, основанных на фундаментальных константах.

2. 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 тех точностей измерения, которые достигнуты сегодня. Более того, на данный момент они не могут быть вычислены через другие величины. Именно поэтому они называются фундаментальными физическими константами (ФФК). Строго определить это понятие и набор констант 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 обычно возникают соотношения между старыми и новыми константами. Поэтому мы можем говорить не об абсолютном наборе ФФК, а только о наборе, соответствующем современному уровню науки [5, 17-20].

В последние десятилетия основным направлением развития физики является тенденция к объединению четырех известных типов взаимодействий: гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного [1, 2, 4].

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

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

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, сильного и гравитационного взаимодействий; H, ρ и Λ – космологические параметры (постоянная Хаббла, средняя плотность материи во Вселенной и космологическая постоянная); k и I – постоянная Больцмана и механический эквивалент тепла. Последние играют в основном роль переводных множителей между температурой с одной стороны и энергией и механическими величинами с другой, хотя, например, постоянная Больцмана k играет большую роль в теории информации, термодинамике, проблеме энтропии, теории черных дыр 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 тоже рассматривать и как переводной множитель между единицами времени (частоты) и длины, так как она определяется с абсолютной (нулевой) погрешностью измерений. Этот набор констант сложился до 70-х годов двадцатого века, когда основной тенденцией было всестороннее изучение отдельных фундаментальных физических взаимодействий.

В настоящее время, когда теория единых электрослабых взаимодействий имеет надежное экспериментальное подтверждение на ускорителях в многочисленных экспериментах с элементарными частицами и когда существуют в основном хорошо разработанные и подтвержденные модели ее объединения с сильными взаимодействиями стандартной модели (СМ), наиболее предпочтительным является следующий набор ФФК:

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

Здесь θ_W – угол смешивания Вайнберга, θ_C – угол Кабиббо, а $\Lambda_{\text{КХД}}$ – параметр обрезания в теории сильных взаимодействий – квантовой хромодинамике, Ω – отношение полной плотности энергии во Вселенной 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. Как мы видим, во втором наборе ФФК константы, связанные с макроскопическими явлениями (гравитационная, космологические), остаются такими же, как и в первом наборе, хотя в некоторых теориях объединения взаимодействий, например многомерных, использующих идеи существования более 4-х стандартных измерений, они могут быть связаны друг с другом и другими константами микрофизики (e, \hbar, m и др.).

В последнее время появились экспериментальные факты, подтверждающие необходимость выхода за рамки СМ. К таким фактам относятся подтверждение существования нейтринных осцилляций и ненулевых масс нейтрино [21], а также предсказание новых видов физических субстанций – темной материи и темной энергии. Необходимо отметить, что даже в рамках СМ остается нерешенным ряд проблем, таких, как экспериментальное подтверждение существования хиггсовских частиц, спонтанное нарушение киральной симметрии, конфайнмент кварков и глюонов [21].

Конечно, если будет создана объединенная теория (ОТ) всех четырех взаимодействий, а на эту роль за последние десятилетия претендовали различные схемы: супергравитация, суперсимметрия, суперструны, а сейчас так называемая еще не созданная М-теория, включающая 5 разных типов моделей суперструн и супергравитацию, – то, возможно, возникнет другой, третий набор ФФК, связанный с этой теорией.

Основная проблема в объединении четырех известных 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 [12], а именно проблема сингулярного состояния в космологии, при коллапсе сверхмассивных объектов и т. п., а также возникшие после 1998 г., в связи с открытием ускоренного расширения Вселенной в настоящую эпоху, проблемы темной (невидимой) материи и темной (невидимой) энергии. Данные наблюдений по взрывам сверхновых, по кривым вращения галактик и анизотропии реликтового фонового излучения могут быть хорошо описаны космологической моделью с трехмерным плоским пространством с современным ускорением Вселенной при наличии в ней обычного вещества (5 % от полной плотности энергии), темной материи (около 25 % от полной плотности энергии) и темной энергии (около 70 % от полной плотности энергии). Что такое темная материя и темная энергия мы пока не знаем, хотя делаются многочисленные попытки их объяснения, до сих пор не приведшие к успеху. Возможно, мы стоим на пороге новых открытий в физике, диктуемых поразительными успехами современных прецизионных измерений в наблюдательной космологии и астрофизике.

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 погрешностью 10^{-10} . Сейчас она считается (по определению) заданной с нулевой неопределенностью; ее значение – 299792458 м/с.

Микроскопические (атомные) константы e, \hbar, m известны с неопределенностью $10^{-7} \div 10^{-8}$, а именно:

значение e – $1.60217653 \cdot 10^{-19}$ Кл, относительная стандартная неопределенность – $8.5 \cdot 10^{-8}$;

значение \hbar – $6.6260693 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, относительная стандартная неопределенность – $1.7 \cdot 10^{-7}$;

значение m_e – $1.67262171 \cdot 10^{-27}$ кг, относительная стандартная неопределенность – $1.7 \cdot 10^{-7}$;

G – с неопределенностью 10^{-4} (и даже более, см. далее); θ_W – порядка 10^{-3} .

Космологические константы стали определяться в последнее десятилетие намного точнее: H известна с неопределенностью порядка 2 %, средняя плотность материи во Вселен-

ной Ω оценивается с точностью до процентов, а для космологической постоянной, современное значение которой ранее считалось весьма малой или даже нулем, последние оценки дают значение (по эффективной плотности энергии), превышающее плотность наблюдаемой материи во Вселенной, хотя и одного с ней порядка. Это так называемая проблема совпадений. Но осталась и другая проблема, связанная с космологической постоянной. Из квантовых соображений в ранней Вселенной она должна быть очень большой, в 10^{120} раз больше, чем в настоящее время, и разумных механизмов ее такого уменьшения пока нет. Прецизионные измерения в космологии и астрофизике с 1998 г. (сверхновых, кривых вращения галактик и анизотропии фонового микроволнового излучения) привели к настоящей революции в современной физике. Данные этих наблюдений лучше всего соответствуют плоской модели Фридмана с ускорением (а не замедлением, как всегда считалось ранее), а это, в свою очередь, требует либо наличия космологической постоянной, либо особого скалярного поля (называемого “квинтэссенция”) с экзотическим эффективным уравнением состояния, либо введения дополнительных измерений, либо еще чего-то, что получило название “темная энергия”, и это должно составлять 70 % общей энергии Вселенной. Но и это не все. Для реализации такой модели, соответствующей данным наблюдений, не хватает еще 25 % обычной материи. Что это такое, какие частицы, пока тоже не известно. Таким образом, мы видим и знаем только о 5 % всего состава Вселенной.

Что касается природы ФФК, то можно отметить несколько подходов к ее объяснению. Одна из первых гипотез (Дж. А. Уиллер): в каждом новом цикле развития Вселенной ФФК возникают 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.

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

Другая 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 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, 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, что существует некоторый космический процесс тонкой настройки ФФК, приводящий к их современным значениям в течение эволюции, возможно, через прохождение многих циклов развития Вселенной.

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 частично c , которая делит все

движения и процессы на релятивистские (близкие к скорости света) и нерелятивистские (намного меньше c).

2. Константы физических взаимодействий, как α , θ_W , $\Lambda_{\text{КХД}}$, и G .
3. Константы элементарных составляющих материи, 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 от одного класса в другой. Например, 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.), т. к. они стали вычисляться через другие ФФК. Фундаментальной константой может стать, например, число измерений, необходимое для объединения всех взаимодействий, само число фундаментальных взаимодействий и др.

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, характеризующему 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, т. к. $m_L c^2$ 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. Существуют некоторые соображения в пользу того, что теории объединения взаимодействий приведут к уменьшению числа истинно фундаментальных констант до двух размерных констант – c и струнной длины λ_s (G. Veneziano, 2002), или ни одной (M. 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 (кроме эталона k_2), что, в свою очередь, составляет основу современной метрологии. 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 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, в астрономии и астрофизике – световой год и массу Солнца вместо метра и килограмма системы СИ, в атомной физике – нанометры, а не метры, в ядерной физике – мегаэлектронвольты (МэВ), 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 систему единиц, основанных на других фундаментальных константах c , e и G , предложил Стоуни.

Международная система единиц (СИ) основана на семи основных единицах: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль и кандела. Им соответствуют семь основных величин: длина, масса, время, сила электрического тока, термодинамическая температура, количество вещества и сила света. В октябре 2005 года Международный комитет мер и весов (МКМВ) принял рекомендацию о подготовительных мерах по переопределению в 2011 г. килограмма, ампера, кельвина и моля таким образом, чтобы эти единицы были привязаны к точно известным значениям фундаментальных констант. Предполагается дать новые определения этим четырем основным единицам, связывая их с точ-

но 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, один из которых следующий [22]:

килограмм есть такая единица массы, что постоянная Планка равна точно $6.6260693 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

ампер есть такая единица силы электрического тока, что элементарный заряд равен точно $1.60217653 \cdot 10^{-19}$ К;

кельвин есть такая единица термодинамической температуры, что постоянная Больцмана равна точно $1.3806505 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

моль есть такая единица количества вещества, состоящего из данных структурных элементов (атомов, молекул, ионов, электронов, любых других частиц или точно обозначенных групп частиц), что постоянная Авогадро равна точно $6.0221415 \cdot 10^{23}$ в моле.

Предложен также новый способ введения всей системы единиц СИ, с явным использованием предлагаемых определений, без каких-либо различий между основными и производными единицами. Конечно, потребуются преодолеть большие трудности по повышению точности определения килограмма с помощью ватт-весов, числа Авогадро и др.

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

В связи с этим возникают следующие теоретические проблемы:

- 1) развитие моделей, расчет эффектов для сравнения предсказаний фундаментальных теорий с экспериментальными данными в критических ситуациях (т. е. для проверки ОТО или обобщенных теорий гравитации, квантовой электродинамики, квантовой хромодинамики, теорий объединения и т. п.);
- 2) установление более точных значений и пределов на возможные временные и пространственные вариации ФФК и соответствующих рекомендаций на выбор будущих более стабильных эталонов физических величин.

Это имеет не только фундаментальное, но и метрологическое значение. Современная система эталонов физических величин основана, главным образом, на стабильных (квантовых) физических явлениях. Поэтому стабильность ФФК играет кардинальную роль. Но физические законы были установлены и проверены в последние 2–3 столетия в экспериментах на Земле и в ближнем космосе, т. е. за сравнительно короткие временные и пространственные интервалы по сравнению с возрастом и размерами Вселенной. В связи с этим возможность медленных временных и пространственных вариаций констант (порядка скорости эволюции Вселенной или менее) не может быть исключена а priori и должна проверяться постоянно со все возрастающей точностью, и это одна из основных задач метрологии.

Предположение об абсолютном постоянстве констант такая же экстраполяция, как и обратное утверждение об их возможных медленных вариациях. Проблема вариаций констант связана также с выбором системы единиц и эталонов основных физических величин, реализующих эти единицы. Это можно проследить на примере зависимости эталонов длины или разных стандартов времени-частоты от постоянной тонкой структуры [17]. Так, платиново-иридиевый метр (до 1960 г.) пропорционален α^{-1} , а криптоновый метр (1960 – 1983 гг.) – α^{-2} . Поэтому их отношение будет меняться как α , и если она меняется, то это можно определить при их сравнении. Впервые такого типа сравнение было реализовано Н. И. Колосницким и др. (1976) при использовании не эталонов длины, а времени-частоты. Сравнялся “ход” группы цезиевых эталонов

с “ходом” группы молекулярных генераторов частоты за 5 лет, по разному зависящих от α . Было получено, что если она и меняется, то менее нескольких единиц 10^{-11} в год. Позднее с помощью других пар эталонов времени-частоты были получены более строгие лабораторные ограничения на вариации α (на уровне $5 \cdot 10^{-15}$ в год). Надо проверять возможные вариации безразмерных отношений констант, но иметь в виду, что они проверяются в определенной системе единиц измерения, основанной на системе констант, которые по определению считаются постоянными (соответствующие эталоны как объекты сравнения фиксированы).

2. Гравитационно-релятивистская метрология

Проблема точного измерения гравитационной постоянной и определения ее стабильности является одной из центральных проблем, связанных с ФФК, а также частью быстро развивающихся направлений – объединения фундаментальных физических взаимодействий (где центральную роль играет сейчас гравитационное взаимодействие) и гравитационно-релятивистской метрологии (ГРМ) [7], связанного с прецизионными пространственно-временными измерениями. ГРМ возникла благодаря быстрому росту точности этих измерений, (эталонные времени-частоты, погрешности которых на уровне $10^{-15} \div 10^{-16}$, угловые измерения с помощью РСДБ на уровне $10^{-4} \div 10^{-5}$ угловой секунды, радарные измерения расстояний до планет с неопределенностью порядка метров, лазерная локация Луны на уровне долей сантиметра, детекторы гравитационных волн с чувствительностью $10^{-20} \div 10^{-22}$ и др.), распространению прецизионных измерений на большие расстояния (вне Солнечной системы) и тенденции современной физики к объединению взаимодействий и, следовательно, возможной связи между ФФК.

Основными направлениями ГРМ являются:

1. Разработка гравитационно-релятивистских моделей пространственно-временных измерений для РСДБ, миллисекундных пульсаров, радарных и лазерных измерений спутников и планет в ближнем и дальнем космосе. Создание иерархических моделей таких измерений для нашей галактики, скопления галактик и далее всей Вселенной.
2. Измерения абсолютного значения гравитационной постоянной, других фундаментальных констант и их возможных вариаций во времени и по пространству [7, 23, 24].
3. Исследования альтернативных теорий гравитации и объединенных теорий физических взаимодействий, допускающих вариации ФФК (например, скалярно-тензорных [4], многомерных [1-3, 12, 13] и др.).
4. Разработка гравитационных экспериментов нового поколения, в особенности космических [10, 11], для проверки не только теории гравитации, но и объединенных теорий с использованием метрологических средств высшей точности (эталонных и др.), в частности:
 - эффектов торсионных и второго порядка, эффектов вращения (прецессия Лензе–Тирринга, или увлечение систем отсчета вблизи вращающегося тела, проверены с помощью лазерной локации спутников Лагос и спутника Gravity Probe B, запущенного в 2004 г., на уровне 1 %);
 - принципа эквивалентности и закона обратных квадратов в метровом диапазоне и порядка мкм, а также на расстояниях, превышающих размеры Солнечной системы (проблема аномального ускорения спутников “Пионер”) [7, 12, 14];
 - временных вариаций G , α , m_e/m_p и других констант [4, 7, 23, 24, 25].
5. Исследование космологических моделей и точное измерение космологических параметров с целью изучения фундаментальных свойств материи и получения ограничений на классы фундаментальных теорий, в частности изучение проблем темной энергии и темной материи [26].

Гравитационная постоянная G занимает видное место среди этих задач.

3. Проблема гравитационной постоянной G

Можно указать три основные проблемы, связанные с гравитационной постоянной G [17, 4, 5]:

- 1) абсолютные измерения значения G ,

- 2) возможные вариации G со временем (медленные, порядка скорости расширения Вселенной и менее),
 3) возможные вариации G с расстоянием (или появление новых, ньютоновских дополнительных взаимодействий).

Измерения абсолютного значения гравитационной постоянной G

До 1989 г. существовало множество лабораторных измерений значения G на основе весов Кавендиша с погрешностью 10^{-3} и только четыре (Франция – Facy и Pontikis (1972), СССР – М. У. Сагитов и др. (1979) и О. В. Карагиоз (1988), США – Luther and Towler (1982)) на уровне 10^{-4} . Но и эти четыре противоречили друг другу (значения не пересекаются) в пределах неопределенности измерений. Официальное значение G Международной комиссии по константам CODATA с 1986 г. по 1999 г.

$$G = (6.67259 \pm 0.00085) \cdot 10^{11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$$

было основано на измерении, проведенном Лютером и Фаулером в США в 1982 г. За последние несколько лет ситуация не улучшилась. Более десятка измерений G , проведенных в разных странах, расходятся со значением CODATA настолько, что можно говорить пока только о том, что G определена с погрешностью 10^{-3} , а не 10^{-4} , что и было рекомендовано CODATA, начиная с 1999 г., а именно: $G = (6.670 \pm 0.010) \cdot 10^{11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$. Измерения G последних лет в США, Новой Зеландии, Швейцарии, Китае, России и МБМВ также не согласуются полностью друг с другом (в единицах $G = (6.670 \pm 0.010) \cdot 10^{11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$):

Gundlach et al., USA – 2000: 6.674215 ± 0.000092 ;

Armstrong et al., NZ – 2000: 6.6742 ± 0.0007 ;

Luo Jun et al., China – 2001: 6.6699 ± 0.0007 ;

Quinn et al., BIPM (I) – 2001: 6.6693 ± 0.0009 ;

Quinn et al., BIPM (II) – 2001: 6.6689 ± 0.0014 ;

Schlaminger et al., (CH) – 2002: 6.67407 ± 0.00022 ;

Karagioz et al. (Russia) – 2003: 6.6729 ± 0.0005 .

Хотя CODATA и рекомендует с 2004 г. значение $G = 6.67428(67) \cdot 10^{11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$.

Это означает, 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 теорию гравитации Эйнштейна или объединенные теории взаимодействий.

Существуют также спутниковые определения произведения GM_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.

Точное знание G необходимо по многим причинам. Во-первых, потому что это фундаментальная константа, во-вторых, для точного определения значения масс Земли, планет, их средней плотности и, в конечном итоге, для уточнения их моделей; для перехода от механических к электромагнитным величинам и обратно; для вычисления одних констант через другие с помощью соотношений, даваемых объединенными теориями; для поиска новых физических взаимодействий, геофизических эффектов, калибровки градиентометров и т. п.

Возможные временные вариации G [17-20]

Эта проблема возникла в связи с попытками объяснения связи между явлениями микро- и макромира. П. Дирак ввел так называемую “гипотезу больших чисел”, согласно которой очень большие числа не могут естественно возникать в физических теориях, а должны быть связаны

друг с другом и с возрастом Вселенной – 10^{17} с, выраженным в характерном ядерном времени 10^{-23} с ($T = 10^{40}$). Он предположил, что отношение силы гравитационного взаимодействия к сильному, $Gm_p^2 / \hbar c \sim 10^{-40}$, обратно пропорционально возрасту Вселенной: $G \sim T^{-1}$. Тогда, поскольку возраст Вселенной все время меняется, то и комбинация констант тоже должна меняться. Атомные константы казались Дираку незыблемыми, и он выбрал вариант, что G меняется как T^{-1} . Поскольку возраст Вселенной оценивается сейчас как $1.4 \cdot 10^{10}$ лет, то скорость изменения \dot{G}/G порядка 10^{-11} в год.

После гипотезы Дирака появилось множество гипотез и теорий, допускающих вариации некоторых ФФК (G , α , G_F и др.), в частности предложенных Г. Гамовым и Э. Теллером. Ряд оригинальных схем обобщенных теорий гравитации был предложен К. П. Станюковичем [4], где впервые предполагалось изменение ряда констант. Конечно, предположения о возможных вариациях констант могут вести к важным астрофизическим, космологическим, геофизическим и др. следствиям и соответствующим новым эффектам. Такие эффекты рассчитывались и продолжают рассчитываться и сопоставляться с данными наблюдений и экспериментов.

Астрофизические данные, полученные в результате наблюдений за наиболее удаленными объектами в космосе – квазарами, (Д. А. Варшалович, А. Ю. Потехин, 1996) позволили сделать вывод о том, что постоянная тонкой структуры α не может меняться более, чем на 10^{-14} в год. Геофизические данные по скорости распада тяжелых элементов ограничивают средние изменения α на уровне 10^{-15} в год, по сравнению хода часов – на уровне 10^{-15} , а данные по древнему естественному ядерному реактору (А. Шляхтер) – на уровне 10^{-17} в год. Эти данные исключают многие гипотезы и теории о возможности изменения α со временем, хотя не исключено появление новых теорий, предсказывающих еще более медленные средние изменения α , или возможно ее неравномерное изменение в процессе эволюции Вселенной, что наиболее вероятно. Такие результаты об изменении постоянной тонкой структуры (Webb et al.) и отношения масс элементарных частиц (Д. А. Варшалович) в определенные эпохи уже обнаружены в некоторых наблюдениях на уровне 10^{-16} в год (хотя есть и отрицательные результаты), и проблема теоретиков и экспериментаторов – объяснить или опровергнуть эти факты.

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

В настоящее время мы не имеем удовлетворительной модели объединения четырех известных типов фундаментальных взаимодействий и соответственно надежных связей между ФФК. Поэтому можно выбирать системы измерений, основанные на любом из этих взаимодействий. Практически это делается на основе наиболее разработанной теории электромагнитного взаимодействия – квантовой электродинамики (КЭД).

Конечно, можно это делать и на основе гравитационного взаимодействия (как это делалось ранее до 1955 г.). Тогда, различные единицы основных физических величин возникают на основе динамики выбранного взаимодействия, например атомная (электромагнитная) секунда, определяемая по частоте атомных переходов, или гравитационная секунда, определяемая по среднему движению Земли вокруг Солнца (эфмеридное время).

Ниоткуда не следует, что определенные таким образом на разных, не связанных между собой взаимодействиях, в один момент две секунды будут синхронизованы и в дальнейшем во времени и пространстве. В принципе они могут меняться друг относительно друга, например со скоростью эволюции Вселенной или менее.

Вот почему в общем возможны вариации гравитационной постоянной во времени в атомной системе единиц (c , \hbar , m – постоянные) или масс всех частиц – в гравитационной (планковской) системе единиц (c , \hbar , G – постоянные). Практически мы можем проверять с большой точностью только первый вариант, так как современная система эталонов основана на атомной (электромагнитной) системе измерений. Возможные вариации ФФК должны проверяться экспериментально, но для этого должны быть теории, допускающие подобные вариации.

После ГБЧ Дирака появились многочисленные скалярно-тензорные теории гравитации, где наряду с гравитационным вводится одно или несколько скалярных полей, с помощью которых и объясняются возможные вариации эффективной гравитационной постоянной со временем. Один из таких вариантов был разработан в [24, 4] с конформным скалярным полем. Он позволил предсказать вариации эффективной гравитационной постоянной на уровне $10^{-12} \div 10^{-13}$ в год и построить один из сценариев происхождения и развития Вселенной. Более позднее исследование проблемы вариаций G со временем в рамках общей скалярно-тензорной модели было сделано в [20], где было показано, что эти вариации могут быть порядка $|\dot{G}/G| < 10^{-13} \div 10^{-14}$ год⁻¹ и менее.

Что касается экспериментальных данных по скорости изменения гравитационной постоянной со временем, то существуют следующие основные результаты:

- 1) достаточно грубые данные по росту кораллов, более надежные данные по скорости замедления периода пульсаров и т. п. на уровне $10^{-11} \div 10^{-12}$ в год;
- 2) ограничения сверху на вариации G на основе данных по движению орбитальных и посадочных модулей спутников Марса “Маринер” (проект Viking) на уровне $10^{-11} \div 10^{-12}$ в год (1992) и российские данные по анализу движения планет и спутников на порядок точнее (Пытьева, 1997);
- 3) достаточно надежные данные по лазерной локации Луны на уровне 10^{-12} в год (Мюллер и др., 1993; Вильямс, 1996; К. Нордтведт, 2002);
- 4) данные по первичному нуклеосинтезу на таком же уровне.

Отсюда можно сделать вывод, что вариации гравитационной постоянной допускаются на уровне 10^{-12} и менее в год, и что существует необходимость в дальнейших теоретических и экспериментальных разработках этой проблемы. Будущие миссии космических аппаратов к Марсу и Венере, данные спутников Земли, а также лазерная локация Луны могут решить эту проблему, так как чем больше интервалы времени между измерениями и, конечно, чем точнее они, тем более строгие результаты будут получены. Что касается теоретических схем, приводящих к вариациям эффективной гравитационной постоянной, то наряду со скалярно-тензорными теориями гравитации в последние десятилетия разрабатываются объединенные модели физических взаимодействий, среди которых доминируют многомерные гравитационные модели, несущие общую черту этих теорий – использование более 4-х стандартных измерений (трех пространственных и одного временного). Всестороннее теоретическое исследование многомерной гравитации и космологии, их экспериментальных и наблюдательных проявлений, в частности свойств дополнительных измерений, изложены в [1-3, 12, 13].

В этих теориях естественным образом возникают дополнительные скалярные поля, связанные с поведением дополнительных измерений и с другими взаимодействиями, помимо гравитационного. Эти поля позволяют также успешно решать основные проблемы современной космологии: рождение Вселенной из “ничего” (вакуума), проблему начального сингулярного состояния, рождения вещества во Вселенной, объяснения ее эволюции и ускоренного расширения в настоящее время, космологической постоянной, темной энергии и темной материи и др. Кроме того, многомерные модели устанавливают связь между вариациями гравитационной постоянной и фундаментальными космологическими параметрами (константами) ρ , H , Λ и параметром замедления q [14, 15]. Последний характеризует замедление или ускорение расширения вселенной. С другой стороны, поскольку возможные вариации ФФК связаны со свойствами дополнительных измерений, открывается возможность их зондирования, а заодно и тестирования теорий объединения взаимодействий. Следует отметить, что если многомерные теории объединения верны, то они с неизбежностью приводят к предсказанию вариаций ФФК, не противоречащим наблюдениям, и такие расчеты были сделаны в [25-30]. Случай их отсутствия является особым, для этого нужна весьма тонкая настройка – согласование всех констант.

Новые ньютоновские взаимодействия, или пространственные вариации G

Почти все обобщенные теории гравитации и объединенные теории взаимодействий предсказывают не только возможные временные, но и пространственные вариации гравитационной по-

стоянной, которые могут проявляться как дополнительное к закону Ньютона, $F = Gm_1m_2/r^2$, взаимодействие (тогда говорят о нарушении принципа эквивалентности – одинакового падения различных по составу тел в гравитационном поле), либо не зависящее от состава и проявляющееся как нарушение закона обратных квадратов для всех тел, или как появление новых частиц, передающих новые взаимодействия [7].

Данные как экспериментальных лабораторных, так и наблюдательных астрономических наблюдений за движением спутников и планет исключают с большой точностью существование новых массивных частиц – переносчиков новых взаимодействий почти во всех диапазонах нового взаимодействия, кроме диапазона менее миллиметров и от метров до сотен метров. Обычно это возможное отклонение от закона Ньютона задается дополнительным вкладом типа потенциала Юкавы:

$$V = -(Gm_1m_2/r^2)[1 + \alpha \exp(-r/\lambda)] -$$

экспоненциальным взаимодействием, быстро спадающим с расстоянием и характеризуемым силой взаимодействия α и определенным масштабом λ , связанным с массой переносчика взаимодействия. Что касается теоретических схем, то с общерелятивистской точки зрения, если мы допускаем возможность временных вариаций констант, то естественно рассмотреть и возможность пространственных, что и было сделано в [6].

В общей теории относительности Эйнштейна безмассовые гравитоны (при квантовании в слабом поле) являются переносчиками гравитационного взаимодействия, гравитационное поле описывается дифференциальными уравнениями 2-го порядка и взаимодействует с веществом с постоянной силой, пропорциональной G . Если хотя бы одна из этих характеристик будет нарушена, то в общем мы придем к отклонению от закона Ньютона с расстоянием (то есть к обобщению теории Эйнштейна). Можно выделить несколько классов обобщенных теорий, известных в научной литературе:

- 1) теории с массивными гравитонами, такие, как биметрические или теории с ненулевой космологической постоянной;
- 2) теории с эффективной гравитационной постоянной, возникающие в упомянутых ранее скалярно-тензорных теориях;
- 3) теории, в которых наряду со стандартным гравитационным полем присутствует кручение пространства – времени;
- 4) теории, в уравнения которых входят высшие производные (как следствие квантовых эффектов), то есть более чем второго порядка;
- 5) объединенные теории, в которых имеются и другие переносчики взаимодействий кроме гравитонов (так называемые партнеры) – супергравитация, суперструны, объединяющая их, но не созданная еще М-теория и др.;
- 6) нелинейные теории, индуцированные любым известным типом взаимодействия (в них также возникают эффективные ненулевые массы);
- 7) различные феноменологические теории, в которых детальный механизм нарушения закона Ньютона не известен (пятая сила и т. п.);
- 8) многомерные теории и модели мира на бране.

Во всех этих теориях возникают эффективные или реальные массы, приводящие к дополнительному взаимодействию типа Юкавы по отношению к закону Ньютона [31].

Существует ряд модельно зависимых оценок этих сил. Наиболее известные принадлежат Шерку (1979) на основе теории супергравитации, в которых гравитон сопровождается партнером, имеющим спин 1 (гравифотон), приводящие к дополнительному отталкиванию. Другая модель была предложена Муди и Вильчеком (1984) – введение в теорию псевдоскалярной частицы, которая обуславливает дополнительное притяжение между макротелами в диапазоне от $2 \cdot 10^{-4}$ до 20 см с силой от 1 до 10^{-10} . Суперсимметричная модель была разработана Файе (1986, 1990), в которой партнер массивного гравитона со спином 1 приводит к дополнительному от-

талкиванию на характерных размерах порядка 10 км с силой порядка 10^{-13} . Модель со скалярным полем была предложена С. Вайнбергом для объяснения генерации космологической постоянной. Она также предсказывает дополнительное взаимодействие в диапазоне менее 0.1 мм. Большинство других многомерных теорий, в частности разработанных в [15, 16], также показывает отклонение от закона Ньютона и дает предсказание постньютоновских параметров, отличных от значений, даваемых теорией Эйнштейна. В последние годы усиленно развиваются модели мира на бране, где наш мир это 4-поверхность, вложенная в 5-мерное пространство. В этой модели гравитация действует в пятимерном мире, а вся остальная материя – в четырехмерном, т. е. на бране, и здесь также предсказываются отклонения от закона Ньютона на масштабах менее миллиметра [32].

Сейчас в этом диапазоне ведутся весьма интенсивные теоретические и экспериментальные исследования в основном с применением эффекта Казимира и крутильных маятников.

Пока в области намного менее миллиметра почти до микрометра неньютоновские силы не обнаружены, что говорит не в пользу моделей типа моделей на бране. Ожидается, что в течение ближайших лет оценки в диапазоне от нанометра до сантиметра будут улучшены на несколько порядков.

В целом можно сделать вывод, что в связи с отсутствием хорошо разработанной объединенной теории всех взаимодействий предсказания вариаций как во времени, так и по пространству весьма различны. И это является большим стимулом для дальнейшего исследования как теоретического, так и экспериментального.

4. Проект космического эксперимента SEE по измерению параметров гравитационного взаимодействия

Решению всех этих проблем, связанных с гравитационной постоянной, посвящен проект SEE (“Satellite Energy Exchange” – “обмен энергией спутников”). Была проделана работа по теоретическому обоснованию проекта, численному моделированию траекторий, моделированию процедуры измерений с учетом всех возможных помех, в частности неоднородностей гравитационного поля, возникновению зарядов и т. п. [10, 11].

Идея эксперимента – запуск свободного от сноса спутника Земли на высоту около 1500 км над поверхностью Земли. Спутник представляет собой капсулу длиной 10÷20 м, диаметром 1 м в виде нескольких коаксиальных цилиндров, внутри которой свободно движутся два тела: большое – “пастух” – с массой около 500 кг и малое – “частица” – с массой около 100 г. Измеряется относительное расстояние между этими телами с большой точностью с помощью метода дифракции Френеля или интерферометрическими методами. Траектория малого тела относительно большого представляет собой часть подковы и, по существу, является одномерной. Более того, частица подходит к большому телу и затем начинает двигаться назад, как бы отталкиваясь от пастуха. На самом деле, никакого отталкивания нет. Оба тела движутся как спутники по близким орбитам. Малое тело движется с меньшим радиусом, получает дополнительную энергию от гравитационного притяжения большого тела, поднимается на больший радиус и начинает отставать от пастуха. Этот эффект для движения спутников Сатурна был предсказан еще в прошлом веке Джорджем Дарвиным (сыном Чарльза Дарвина) и доказан экспериментально совсем недавно.

Цель эксперимента SEE – измерение абсолютного значения гравитационной постоянной G с неопределенностью 10^{-6} , проверка закона обратных квадратов (ISL) и принципа эквивалентности (EP) в диапазоне метров и порядка радиуса Земли на 2–3 порядка лучше чем сейчас, проверка временных вариаций G на уровне 10^{-13} ÷ 10^{-14} в год.

Проведенные расчеты и моделирование эксперимента показали, что добиться этих целей вполне возможно на современном уровне точности. Это позволит не только решить принципиальные вопросы гравитационного взаимодействия, но и поможет в решении проблем объединения фундаментальных физических взаимодействий [10-12, 26].

Предложен также лабораторный эксперимент по обнаружению новых сил, описываемый потенциалом типа Юкавы: $U = a \exp(-r/\lambda)/r$ [33]. Установка представляет собой шар с вырезанной в нем сферической полостью, смещенной относительно центра шара. Шар устанавливается на поворотном столе, который приводится во вращение с равномерной скоростью. Внутри сферы помещается чувствительный элемент в виде крутильных весов. Однородное гравитационное поле шара не влияет на весы, тогда как негравитационные силы вызывают момент сил, который при вращении шара периодически воздействует на весы. Вычислен спектр гармоник. Измерения должны проводиться на первой гармонике, частота которой соответствует частоте вращения. Оценена чувствительность установки, ограниченная погрешностями изготовления и тепловыми флуктуациями чувствительного элемента. Получено, что в пространстве параметров (a, λ) чувствительность может быть на уровне $a \sim 10^{-10}$ в диапазоне значений $\lambda \sim 0.1 \div 10^7$ м [33].

Литература

1. Melnikov V. N. Multidimensional Classical and Quantum Cosmology and Gravitation. Exact Solutions and Variations of Constants." CBPF-NF-051/93, Rio de Janeiro, 1993; 110 pp. In: Cosmology and Gravitation, ed. M. Novello, Ed. Frontiers, Singapore, 1994, p. 147.
2. Melnikov V. N. Multidimensional Cosmology and Gravitation, CBPF-MO-002/95, Rio de Janeiro, 1995, 210 pp.; In: Cosmology and Gravitation. II, ed. M. Novello, Ed. Frontiers, Singapore, 1996, p. 465.
3. Melnikov V. N. Exact Solutions in Multidimensional Gravity and Cosmology III. CBPF-MO-03/02, Rio de Janeiro, 2002, 297 pp.
4. Станюкович К. П., Мельников В. Н. Гидродинамика, поля и константы в теории гравитации. Москва, Энергоатомиздат, 1983, 256 с. English translation of first 5 sections in: Melnikov V. N., Fields and Constraints in the Theory of Gravitation, CBPF MO-02/02, Rio de Janeiro, 2002, 145 pp.
5. Melnikov V. N. Int. J. Theor. Phys. 1994, Vol. 33, p. 1569.
6. de Sabbata V., Melnikov V. N. and Pronin P. I. Prog. Theor. Phys. 1992, p. 623.
7. Melnikov V. N.. In: "Gravitational Measurements, Fundamental Metrology and Constants", eds. V. de Sabbata and V. N. Melnikov. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 1988, p. 283.
8. Ivashchuk V. D. and Melnikov V. N. Nuovo Cimento B. 1988, Vol. 102, p. 131.
9. Bronnikov K. A., Ivashchuk V. D., Melnikov V. N. Nuovo Cimento. 1988, Vol. B 102, p. 209.
10. Sanders A., Deeds W. Phys. Rev. D. 1992, Vol. 46, p. 480.
11. Алексеев А. Д. и др. Измерит. Техника, 1993, № 8, с. 6; № 9, с. 3; № 10, с. 6; 1994, № 1, с. 3. Int. J. Mod. Phys. 1994, Vol. D 3, No. 4, p. 773.
12. Melnikov V. N. Proc.2000 NASA/JPL Conference on Fundamental Physics in Microgravity, NASA Document D-21522, 2001, pp. 4.1-4.17, Solvang, CA, USA.
13. Кононогов С. А., Мельников В. Н. Измерит. Техника, 2005, Т. 1, с. 3.
14. Melnikov V. N. Gravity and Cosmology as Key Problems of the Millennium. Albert Einstein Century International Conference. AIP Conference Proceedings. Eds. Jean-Michel Alimi, Andre Fuzfa, 2006, No. 861, p. 109.
15. Ivashchuk V. D., Melnikov V. N. Multidimensional cosmological and spherically symmetric solutions with intersecting p-branes. In: Lecture Notes in Physics, Vol. 537, Proc. Second Samos Meeting on Cosmology, Geometry and Relativity, Pythagoreon, Samos, Greece, 1998, eds: S. Cotsakis, G.W. Gibbons., Berlin, Springer, 2000, pp. 214 - 247.
16. Ivashchuk V. D. Melnikov V. N. Exact solutions in multidimensional gravity with antisymmetric forms, topical review, Class. Quantum Grav. R82-R157 (2001); hep-th/0110274.
17. Мельников В. Н. Проблемы теории гравитации и элементарных частиц. Атомиздат, Москва, 1976, вып. 7, с. 190-200.
18. Melnikov V. N. Proc. Rencontre de Moriond-99: Gravitational Waves and Experimental Gravity. Editions Frontiers, 1999.
19. Melnikov V. N., Ivashchuk V. D. In Proc.JGRG11, Eds. J. Koga et al., Waseda Univ., Tokyo, 2002, p. 405.
20. Bronnikov K. A., Melnikov V. N., Novello M. Grav. Cosm. 2002, Vol. 8, Suppl. II, p. 18.
21. Кононогов С. А., Мельников В. Н., Хрущев В. В. Измерит. техника, 2007, № 3, с. 3.
22. Mills I. et al. Metrologia. 2006, Vol. 43, pp. 227-246.

23. Мельников В. Н., Станюкович К. П. Проблемы теории гравитации и элементарных частиц. Атомиздат, Москва, 1978, Т. 9, с. 3.
24. Зайцев Н. А., Мельников В. Н. Проблемы теории гравитации и элементарных частиц. Атомиздат, Москва, 1979, Т. 10, с. 131.
25. Melnikov V. N. Time Variations of G in Different Models. Proc. 5 Int. Friedmann Seminar, Joao Pessoa, Brazil. Int. J. Mod. Phys. A, 2002, Vol. 17, pp. 4325-4334.
26. Melnikov V. N. Variations of constants as a test of gravity, cosmology and unified models. Grav. Cosm, 2007, Vol. 13, No. 2 (50), pp. 81-100.
27. Alimi J.-M., Ivashchuk V. D., Kononogov S. A., Melnikov V. N. Multidimensional cosmology with anisotropic fluid: acceleration and variation of G . Grav. Cosm. 2006, Vol. 12, pp. 173-178.
28. Ivashchuk V. D., Kononogov S. A., Melnikov V. N., Novello M. Non-singular solutions in multidimensional cosmology with a perfect fluid: acceleration and variation of G . Grav. Cosm. 2006, Vol. 12, pp. 273-278.
29. Alimi J.-M., Ivashchuk V. D., Melnikov V. N. S-brane solution with acceleration and small enough variation of G . Grav. Cosm. 2007, Vol. 13, No. 2, pp. 137-141.
30. Dehnen H., Ivashchuk V. D., Kononogov S. A., and Melnikov V. N. On time variation of G in multidimensional models with two curvatures. Grav. Cosm. 2005, Vol. 11, No. 4, pp. 340-344.
31. Kolosnitsyn N. I. and Melnikov V. N. Test of Inverse Square Law Through Precession of Orbits. GRG, 2004, Vol. 36, issue 7, pp. 1619-1624.
32. Bronnikov K. A., Kononogov S. A., Melnikov V. N. Brane world corrections to Newton's law. GRG, 2006, Vol. 38, pp. 1215-1232; gr-qc/0601114.
33. Колосницын Н. И., Кононогов С. А., Мельников В. Н. Измерит. Техника, 2007, № 6, с. 3.

Фундаментальні фізичні константи, їх стабільність та перехід на нові визначення одиниць СІ

В. Н. Мельников, С. А. Кононогов

Дискутуються основні тенденції у сучасній теорії гравітації та космології, проблеми вибору, класифікації, кількості, точності визначення фундаментальних фізичних констант та нових напрямків сучасної фундаментальної метрології. Викладено основи гравітаційно-релятивістської метрології. Особливої уваги приділено гравітаційній сталій: проблемам виміру її абсолютного значення, можливих варіацій у часі та просторі. Дискутується також запланований на 2011 р. перехід на нові визначення одиниць СІ через фіксацію низки фундаментальних констант.

Fundamental Physical Constants and their Stability, Transition to New Definitions of the SI Units

V. N. Melnikov and S. A. Kononogov

Main trends in gravitation and cosmology, problems of fundamental physical constants, their choice, classification, number, precision of measurement and new trends of modern fundamental metrology are analyzed. Basics of gravitational-relativistic metrology are also presented. Special attention is paid to problems of Newton's gravitational constant G : its absolute value measurements and possible time and range variations. Problems of the transition to new definitions of the SI units, based fully on fundamental physical constants and expected in 2011 are analyzed.