

Атом против общей теории относительности

Простой анализ поведения атома в гравитационном поле показывает: скорость течения времени убывает с увеличением высоты над земной поверхностью – вопреки теории гравитации Эйнштейна. Этот вывод можно проверить экспериментально с помощью современных высокоточных часов.

Согласно общей теории относительности гравитация искривляет пространство-время: длина эталонной линейки и скорость хода стандартных часов изменяются вблизи большой массы. Но ведь линейки и часы состоят из атомов. Поэтому имеет смысл ответить на простой вопрос: что происходит с атомом в гравитационном поле?

Когда в 1916 г. Альберт Эйнштейн заложил основы современной теории гравитации, ответить на этот вопрос было трудно, т.к. атомная структура вещества ещё находилась на стадии изучения. Поэтому при построении теории великий физик воспользовался им же сформулированным принципом эквивалентности: однородное гравитационное поле тождественно ускоренной системе отсчёта. Используя этот принцип, он перенёс все свойства неинерциальной системы отсчёта на гравитационное поле. Но насколько правомочен такой перенос?

Рассчитаем изменение атомных характеристик, опираясь только на известные уравнения квантовой механики и не привлекая принципа эквивалентности.

Дефект массы и постоянная Планка

Любая система, части которой соединены между собой силами притяжения (ядерными или гравитационными), имеет так называемый дефект массы, равный энергии связи, делённой на квадрат скорости света. На эту величину полная масса системы меньше суммарной массы всех её частей. Например, масса ядра атома гелия, состоящего из двух протонов и двух нейтронов, заметно меньше, чем масса двух протонов и двух нейтронов.

Именно поэтому при термоядерном синтезе выделяется большая энергия. Аналогично масса планеты, состоящей из огромного числа различных атомов, меньше суммарной массы всех этих атомов. Другими словами, атом, расположенный на земной поверхности, имеет массу чуть-чуть меньшую, чем точно такой же атом, поднятый, скажем, на высоту 1 м. Это и понятно, ведь чтобы поднять тело массы m на высоту H , ему нужно передать энергию $E = mgH$ (где $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения). А вместе с энергией телу будет передана и дополнительная масса $\Delta m = E/c^2 = mgH/c^2 = m\Delta\phi/c^2$ (где c – скорость света; $\Delta\phi$ – разность гравитационных потенциалов). Т.е. дефект массы зависит от разности гравитационных потенциалов $\Delta\phi$ и пропорционален массе тела m :

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta\phi}{c^2}. \quad (1)$$

Нетрудно рассчитать, что при подъёме на 1 м масса атома возрастает на относительную величину порядка 10^{-16} . Кстати, Эйнштейн обратил внимание на гравитационный дефект массы уже в 1912 г. в статье “Существует ли гравитационное воздействие, аналогичное электромагнитной индукции?”

Рассмотрим самый простой атом – атом водорода, состоящий только из протона и электрона. Пусть он находится в невозбуждённом состоянии и падает в гравитационном поле. Масса его при этом уменьшается. К чему это приведёт? В общем случае для расчёта

атомных характеристик нужно использовать уравнения квантовой механики, но для самого простого атома можно воспользоваться моделью Бора, которая в этом случае также даёт правильный ответ. И, кроме того, наглядна и проста.

Согласно этой модели электрон, находясь на стационарной орбите, движется вокруг протона под действием кулоновских сил. Если масса электрона уменьшится, то сила притяжения к ядру перевесит центробежную силу и электрон перейдёт на более низкую орбиту. Скорость его при этом возрастет, и равновесие сил восстановится.

Рассмотрим этот процесс более детально. Когда масса электрона уменьшится, его момент импульса уменьшится в той же самой пропорции. Затем, когда электрон приблизится к протону, момент импульса не изменится, т.к. движение происходит в центрально-симметричном поле. В результате момент импульса электрона уменьшится в той же самой пропорции, что и его масса. А ведь момент импульса электрона, находящегося на самой низкой орбите, в точности равен постоянной Планка \hbar . Следовательно, эта постоянная уменьшится так же, как и масса:

$$\frac{\Delta \hbar}{\hbar} = \frac{\Delta \varphi}{c^2}. \quad (2)$$

Теперь у нас есть всё необходимое, чтобы узнать, как изменятся свойства атома водорода (а значит, и любого другого атома) в гравитационном поле. В результате мы узнаем, что произойдёт с эталонами метра, секунды, килограмма, а также со всеми их производными.

Нам понадобятся только два уравнения квантовой механики, записанные в системе СГС: для расчёта размера атома водорода

$$a = \frac{\hbar^2}{m_e e^2}, \quad (3)$$

где a – размер невозбуждённого атома; e – заряд электрона; m_e – его масса, и для определения его уровней энергии

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{2\hbar^2 (1 + \frac{m_e}{m_p})} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (4)$$

где n – порядковый номер уровня; E_n – его энергия; m_p – масса протона.

При переходе электрона с уровня E_n на уровень $E_k (n > k)$ излучается фотон с энергией $\varepsilon = E_n - E_k$ и частотой $\omega = (E_n - E_k)/\hbar$.

Эталон метра в гравитационном поле

Поскольку постоянная Планка (2) уменьшается в гравитационном поле в той же пропорции, что и масса электрона (1), то из уравнения (3) можно сделать вывод: размер атома водорода уменьшится вблизи большой массы на относительную величину:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta \varphi}{c^2}, \quad (5)$$

Размер любого другого атома и, следовательно, размер любого тела, включая знаменитый эталон метра, хранящийся в Международном бюро мер и весов в Севре (Франция), должен измениться в той же пропорции. Это доказывает, почему пространство искривляется вблизи большой массы (рис. 1).

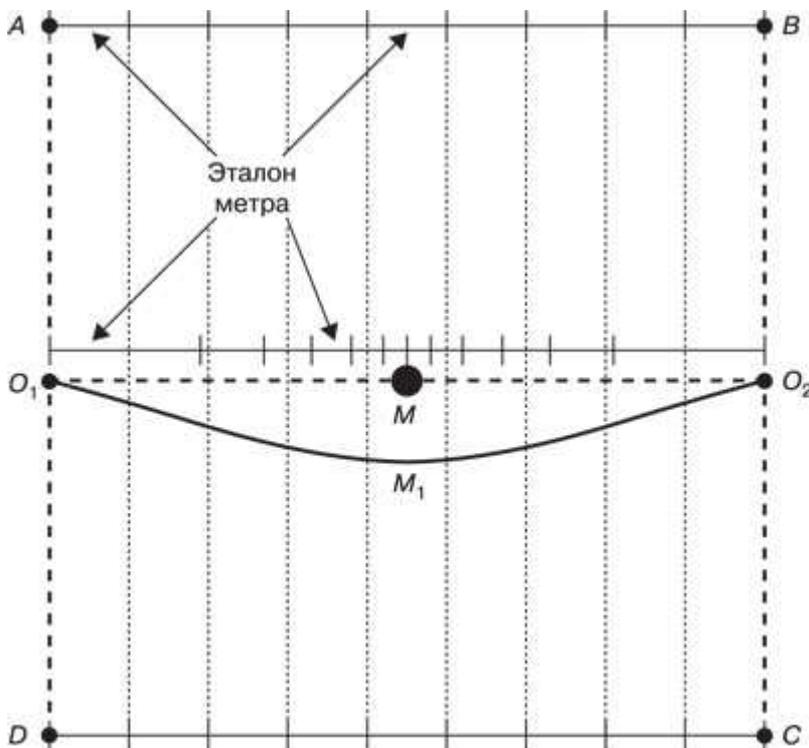


Рис. 1
 Модель искривления пространства вблизи большой массы: все вершины квадрата $ABCD$ находятся на одинаково большом расстоянии от массы M ; если измерять расстояние между точками A и B или между точками D и C метровым эталоном, то получится одинаковое количество метров, но если измерять тем же самым метровым эталоном расстояние O_1O_2 , то получится большее количество метров; это произойдет потому, что эталоны длины будут уменьшаться вблизи массы M , т.е. расстояние O_1O_2 , измеренное в метрах (или любых других единицах длины), будет больше, чем расстояние AB (или DC), поэтому кратчайшим расстоянием между точками O_1 и O_2 будет не прямая линия O_1MO_2 , а кривая $O_1M_1O_2$, т.к. её длина, измеренная эталоном метра, будет меньше

Все эталоны длины сокращаются в гравитационном поле, и, соответственно, все расстояния, измеренные с помощью этих эталонов, наоборот, увеличиваются. Это дополнительное увеличение расстояний нетрудно найти из уравнения (5). Можно отметить, что данный вывод находится и в качественном и даже в количественном согласии с общей теорией относительности (см., например, [1]).

Атомная секунда в гравитационном поле

С 1967 г. в качестве основного эталона времени принята атомная секунда, равная 9192631770 периодам излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133. Т.е. длительность секунды обратно пропорциональна атомной частоте. Из уравнений (1, 2, 4) нетрудно рассчитать, что частота атома ω повышается вблизи большой массы:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -2 \frac{\Delta\phi}{c^2}, \quad (6)$$

Т.е. скорость течения времени – скорость хода стандартных атомных часов – должна возрасть вблизи массивного тела. А ведь согласно общей теории относительности время, наоборот, должно замедляться вблизи большой массы:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\Delta\phi}{c^2}, \quad (7)$$

Именно на этом постулате общей теории относительности строится обоснование существования чёрных дыр – компактных массивных объектов, вблизи которых время не просто замедляется, а полностью останавливается. Несмотря на регулярные сообщения СМИ об открытии очередной чёрной дыры, эти гипотетические объекты всё ещё не обнаружены. И речь пока идёт только о кандидатах в чёрные дыры. Вот их астрономы зарегистрировали уже более сотни.

Согласно новой гипотезе чёрные дыры не существуют, т.к. время ускоряется вблизи огромных масс. И этот вывод основан не на сомнительном принципе эквивалентности, а на хорошо проверенных уравнениях квантовой механики (3) и (4).

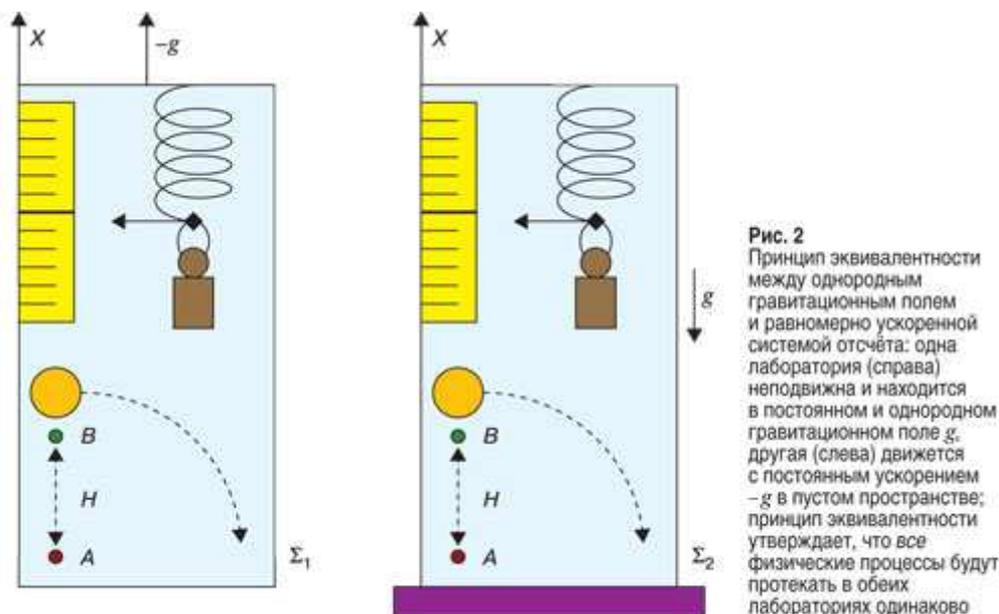
Одного взгляда на них достаточно, чтобы убедиться в этом. Действительно, размер атома не может увеличиться в гравитационном поле, поскольку в этом случае все расстояния сократятся, что уже противоречит общей теории относительности.

А т.к. масса электрона уменьшается в гравитационном поле (дефект массы ещё никто не отменял), то постоянная Планка тоже должна уменьшиться. В противном случае размер атома возрастёт (3). А если постоянная Планка уменьшится, то частота излучения атома соответственно повысится (4). И, следовательно, атомные часы будут идти быстрее.

Почему же сторонники общей теории относительности верят, что время замедляется вблизи массивного тела? В основном этому способствуют два фактора: сформулированный Эйнштейном принцип эквивалентности и неправильная интерпретация красного смещения.

Принцип эквивалентности – первая ошибка Эйнштейна

В 1907 г. появилась обзорная статья Эйнштейна “О принципе относительности и его следствиях”. И в пятой, последней, её части “Принцип относительности и тяготение” был сформулирован принцип эквивалентности между однородным гравитационным полем и равномерно ускоренной системой отсчёта, который впоследствии и лёг в основу общей теории относительности и доказывается следующим образом. В постоянном и однородном гравитационном поле \vec{g} все тела движутся с ускорением \vec{g} . В системе отсчёта, которая движется с постоянным ускорением – \vec{g} , все тела также движутся с ускорением \vec{g} . Значит, траектории движения тел при заданных начальных условиях будут одинаковы и в гравитационном поле, и в ускоренной системе отсчёта. Следовательно, будут одинаковы и законы движения (рис. 2).



Это, на первый взгляд безупречное, доказательство можно встретить почти в любом учебнике по гравитации. Но чтобы увидеть в нём ошибку, достаточно задать простой вопрос: по каким часам измеряется ускорение свободного падения? Ведь скорость хода часов изменяется и в гравитационном поле, и в неинерциальной системе отсчёта. Одинаково ли это изменение или нет? Скорость хода часов в гравитационном поле должна отличаться от скорости их хода в неинерциальной системе отсчёта, в которой нет дефекта масс. Поэтому когда Эйнштейн положил в основу гравитационной теории принцип эквивалентности, он в неё неявным образом ввёл ошибочное утверждение о замедлении времени, справедливое только в неинерциальной системе отсчёта.

Интерпретация красного смещения – вторая ошибка Эйнштейна

Когда Эйнштейн пришёл к ошибочному выводу, что время в гравитационном поле замедляется точно так же, как и в неинерциальной системе отсчёта, он получил уравнение (7), на основании которого рассчитал: время на Солнце течёт медленнее, чем на Земле, на относительную величину 2×10^{-6} . Т.е. земной наблюдатель должен обнаружить, что все процессы на Солнце протекают чуть-чуть замедленно. И значит, он должен обнаружить, что все атомные спектры сдвинуты в инфракрасную область на относительную величину 2×10^{-6} . К сожалению, этот правильный вывод Эйнштейн получил исходя из двух неверных предположений. Попробуем разобраться в эффекте красного смещения.

Предположим, есть два одинаковых высокостабильных лазера. Первый находится у основания башни в точке A , второй – на её вершине, в точке B (рис. 3). Наблюдатель в точке C регистрирует, что частота лазера B выше, чем лазера A на относительную величину:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\Delta\phi}{c^2}. \quad (8)$$

Вправе ли наблюдатель сделать вывод, что время в точке B течёт на ту же относительную величину быстрее, чем в точке A ? Нет, такой вывод делать нельзя. Ведь пока свет от лазера в точке A движется в точку C , он теряет энергию на преодоление гравитационного притяжения и его частота понижается. Если бы свет, двигаясь вверх, не терял энергию, а вместе с ней и частоту, то можно было бы сделать вывод о замедлении времени в точке A .

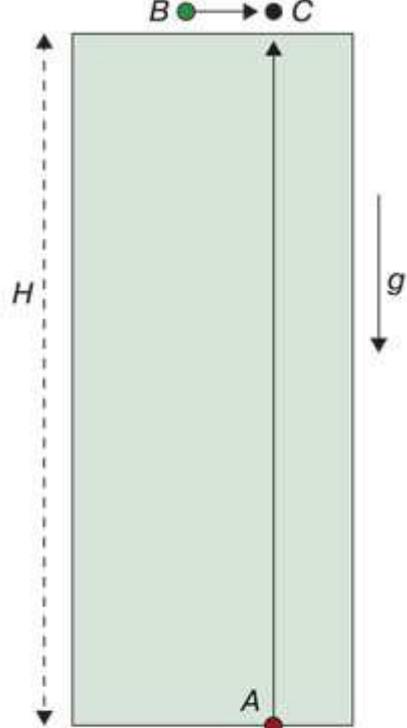


Рис. 3
 Интерпретация красного гравитационного смещения: свет лазера A приходит в точку C с пониженной частотой не потому, что время в точке A течёт медленнее, а потому, что, двигаясь вверх, свет теряет энергию, и его частота понижается

В своей работе 1911 г. “О влиянии силы тяжести на распространение света” Эйнштейн утверждает, что частота света не может измениться при движении в статическом гравитационном поле. Он исходит из того, что общее количество гребней и впадин в любой волне должно сохраняться. Этому мнению придерживаются и сторонники общей теории относительности (см., например, [1]). И действительно, если мысленно представлять световую волну в виде неких материальных максимумов и минимумов, движущихся в пространстве, напрашивается вывод, что её частота измениться не может.

Ошибка здесь в том, что световые волны нельзя сравнивать с обычными волнами материи. Это волны вероятности, и общее количество их гребней не сохраняется. В качестве примера рассмотрим фотон. С ним связан некий волновой процесс с частотой триллионы герц.

С такой частотой изменяется его волновая функция.

Однако гребни и впадины этой функции – всего лишь волны вероятности, и при регистрации фотона они исчезают без следа.

Итак, соединив между собой два ошибочных утверждения (замедление времени и неизменность частоты фотона), Эйнштейн получил правильное предсказание красного смещения. И это неудивительно, т.к. правильный ответ он знал заранее: точную величину красного смещения можно рассчитать на основе закона сохранения энергии без использования дополнительных гипотез о природе гравитации.

Когда в 1960-х годах красное смещение было зарегистрировано в экспериментах Паунда и Ребки, то сторонники общей теории относительности сделали вывод и о замедлении времени. Более того, многие из них ставят знак тождества между эффектами красного смещения и замедления времени.

Проще говоря, не делают никакой разницы между скоростью хода часов и их “цветом”: раз нижние часы всегда выглядят более “красными”, чем верхние, апологеты Эйнштейна ошибочно утверждают, что нижние часы идут медленнее.

Эксперимент с часами

Чтобы выяснить, как влияет гравитация на скорость времени, одних лазеров недостаточно. С ними можно проводить только эксперименты по гравитационному сдвигу частоты. Можно сказать, что лазер – это неполноценные часы. В том смысле, что он только “тикает”, но не “показывает” время. Нужны полноценные часы, состоящие из квантового генератора частоты и счётчика. Счётчик частоты вносит дополнительную погрешность 1–2-го порядка. Такие устройства ещё несколько лет назад занимали целую комнату. Возможно, именно поэтому многие физики предпочитают работать не с атомными часами, а с лазерами, ведь они искренне считают, что никакой разницы нет. Стоит отметить, что только к началу XXI века точность лучших атомных часов достигла уровня, достаточного для измерения гравитационных эффектов. И сейчас можно провести

довольно простой эксперимент, который не на словах, пусть и убедительных, а на деле опровергнет общую теорию относительности. Вот, вкратце, его суть.

Двое высокоточных атомных часов с погрешностью 10^{-15} синхронизированы и находятся на первом этаже высокого здания. Затем первые часы аккуратно поднимают на верхний этаж, скажем, на 100 м. Проходит несколько суток, и аналогичным способом на верхний этаж поднимают вторые часы. После чего их показания сравнивают.

Если верна общая теория относительности, то в соответствии с уравнением (7) верхние часы будут уходить вперёд примерно на 1 нс каждые сутки. Если же верна теория гравитации, основанная на уравнениях квантовой механики, то верхние часы, наоборот, будут отставать примерно на 2 нс каждые сутки (6). Т.е. эффект на самом деле в два раза сильнее, а главное, имеет другой знак.

А разве подобные эксперименты не проводились многократно? Вот, скажем, недавно в российских СМИ со ссылкой на журнал *Science* появилась информация, что в Национальном институте стандартов и технологий (Болдер, США) физики, используя сверхточные атомные часы на ионах алюминия, зафиксировали разницу хода времени при перепаде высот всего в один фут. Часы, поднятые на 30 см, начинали “тикать” чуть-чуть быстрее в полном согласии с общей теорией относительности. Разберём этот эксперимент.

Двое часов находятся на одной высоте и “тикают” одинаково. Первые поднимают вверх, и их частота изменяется на относительную величину X . Затем сигнал от них движется вниз ко вторым часам. При этом его частота изменяется на относительную величину Y . Экспериментаторы сравнивают частоту сигнала, пришедшего от верхних часов, с частотой, генерируемой нижними, и обнаруживают:

$$X + Y = \frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\Delta\phi}{c^2} > 0. \quad (9)$$

Вправе ли учёные сделать вывод, что верхние часы идут быстрее? Нет. Ведь им не известно, чему равен Y . Они, повторяя вторую ошибку Эйнштейна ($Y = 0$), доказывают справедливость общей теории относительности ($X > 0$)! Но частота сигнала, идущего от верхних часов, изменяется: фотоны, из которых состоит сигнал, движутся в гравитационном поле вниз, и их энергия повышается, а частота повышается ещё сильнее из-за понижения величины постоянной Планка (2). В результате получаем $Y > \Delta\phi/c^2$ и, соответственно, $X < 0$. Расчёты, выполненные в [2], показывают: $Y = 3 \Delta\phi / c^2$.

Итак, если мы хотим узнать, какие часы – верхние или нижние – идут быстрее, не стоит напрямую сравнивать между собой скорости их хода. Потому что частота сигнала, движущегося в гравитационном поле от одних часов к другим, будет изменяться. Мы всегда будем измерять только сумму $X + Y$.

А чтобы узнать отдельно величину X , нужно сравнивать не скорости хода, а *показания* двух часов, одни из которых длительное время находились внизу, а другие наверху. Т.е. использовать *накопительный* эффект. И именно такой эксперимент до сих пор не был проведён.

Кстати, суть ускорения течения времени в гравитационном поле можно объяснить на простом примере. Пусть имеется стержень, на концах которого закреплены два положительных заряда. А третий плюсовой заряд находится между ними и может свободно скользить вдоль стержня. Если его незначительно сдвинуть в сторону от

положения равновесия, то он начнёт колебаться с определённой частотой. Теперь переместим это устройство глубже в гравитационное поле – ближе к Земле. Величины зарядов и электрических сил между ними не изменятся, а их массы уменьшатся из-за дополнительной гравитационной энергии связи с Землёй. Соответственно, частота колебаний центрального заряда возрастёт. Этот результат нетрудно обобщить. Ведь внутри любого тела или физического прибора действуют только электромагнитные силы (гравитационные слишком слабы, ядерные ограничены размером ядра). По этому если массы всех частей тела или прибора чуть-чуть уменьшатся, то скорости всех физических процессов внутри них, очевидно, возрастут.

Тёмная сторона Вселенной

Считается, что в 1998 г. в астрономии произошла революция – было открыто ускоренное расширение Вселенной. Оказывается, скорости разбегания галактик не уменьшаются с течением времени из-за взаимного притяжения, а, наоборот, возрастают вопреки закону всемирного тяготения. Гипотетическая субстанция, ответственная за всемирное ускорение, получила название “тёмная энергия”. Так всё-таки, что же именно было открыто в 1998 г.?

Существуют сверхновые звёзды типа Ia. При их взрыве выделяется с хорошей степенью точности одна и та же энергия. Поэтому их используют в качестве “стандартных свечей” для определения расстояний до далёких галактик. В 1998 г. астрономы, исследуя большое число сверхновых Ia, обнаружили, что зависимость их видимой звёздной величины от их красного смещения существенно противоречит предсказаниям общей теории относительности. Существовал только один способ спасти теорию гравитации Эйнштейна: предположить, что вся Вселенная заполнена некой субстанцией, превосходящей по массе в десятки раз всю массу обычного вещества, и которая к тому же должна вызывать ускоренное расширение Вселенной.

Можно отметить, что использование общей теории относительности при решении космологических вопросов привело к ряду серьёзных нестыковок теории с эмпирическими данными, пытаясь снять которые учёные вводили “в обиход” всё новые и новые гипотетические субстанции. Вот далеко неполный перечень того, что родилось в головах теоретиков (помимо уже упомянутых чёрных дыр и тёмной энергии):

– инфляционное поле – гипотетическое поле, которое могло бы заставить Вселенную расширяться со скоростью в триллионы триллионов раз быстрее света в промежутки времени 10^{-35} с от начала расширения. При этом размер Вселенной увеличивается за столь ничтожное время по разным оценкам в 10^{100000} ... $10^{100000000000}$ раз! По мнению большинства космологов, такое невероятное предположение позволило бы решить некоторые космологические проблемы. Существуют даже учебники об инфляционном расширении;

– тёмная холодная материя, тёмная тёплая материя, тёмная горячая материя – разновидности гипотетического вещества небарионной природы. Уже общепринято, что галактики и звёзды не смогли бы образоваться без такого вещества. Тёмная холодная материя должна “помочь” образованию галактик, тёплая – их скоплений, горячая призвана согласовать расширение Вселенной с уравнениями общей теории относительности. Частицы тёмной материи надеются получить на Большом адронном коллайдере;

– кротовые норы – этикие мосты между двумя чёрными дырами, удалёнными друг от друга на гигантские расстояния. Неизвестно, зачем они нужны, но одна из задач очень

дорогого космического проекта “Радиоастрон” – обнаружить кротовую нору в галактике М 87 (центре нашего сверхскопления).

Простой эксперимент с часами (но нужно сравнивать их показания, а не скорости хода), опровергнув общую теорию относительности, помог бы не только избавиться от многих “серьёзных” космологических проблем, но и позволил бы тратить деньги в этой области исследований более осмысленно.

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. – М.: Наука, 1988.
 2. Янчилин В.Л. Тайны гравитации. – 2-е изд. – М.: Новый Центр, 2007.
- Статья подготовлена специально для журнала “Мир измерений”.*