



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2003–13
ОТФ

С.С. Герштейн¹, А.А. Логунов², М.А. Мествиришвили,
Н.П. Ткаченко³

**МАССА ГРАВИТОНА, КВИНТЭССЕНЦИЯ
И ОСЦИЛЛИРУЮЩИЙ ХАРАКТЕР
ЭВОЛЮЦИИ ВСЕЛЕННОЙ**

Направлено в ЯФ

¹ e-mail: gershtein@mx.ihep.su

² e-mail: logunov@mx.ihep.su

³ e-mail: tkachenkon@mx.ihep.su

Аннотация

Герштейн С.С., Логунов А.А., Мествиришвили М.А., Ткаченко Н.П. Масса гравитона, квинтэссенция и осциллирующий характер эволюции Вселенной: Препринт ИФВЭ 2003–13. – Протвино, 2003. – 14 с., 4 рис., библиогр.: 36.

Показано, что, исходя из полевой релятивистской теории гравитации (РТГ) и измеренной величины Ω_{tot} , может быть получен на уровне 95% СЛ верхний предел на массу гравитона: $m \leq 1.6 \cdot 10^{-66}$ г, а в пределах (1σ) — ее вероятное значение $m_g = 1.3 \cdot 10^{-66}$ г. Указано, что, согласно РТГ, для объяснения ускоренного расширения Вселенной необходимо существование квинтэссенции. Использование экспериментальных данных о возрасте Вселенной и плотности холодной материи позволяет определить область возможных значений параметра ν в уравнении состояния квинтэссенции и указать времена, соответствующие началу и концу эпохи ускоренного расширения, а также время максимального расширения, соответствующее полупериоду осцилляционной эволюции Вселенной.

Abstract

Gershtein S.S., Logunov A.A., Mestvirishvili M.A., Tkachenko N.P. Graviton Mass, Quintessence and Oscillatory Character of the Universe Evolution: IHEP Preprint 2003–13. – Protvino, 2003. – p. 14, figs. 4, refs.: 36.

It is shown that using the relativistic field theory of gravity (RTG) and measured value of Ω_{tot} one can obtain the upper limit on the graviton mass with 95% C.L.: $m \leq 1.6 \cdot 10^{-66}$ [g]; within the (1σ) range its probable value is $m_g = 1.3 \cdot 10^{-66}$ [g]. It is pointed out that according to RTG the presence of the quintessence is necessary to explain the Universe accelerated expansion. Experimental data on the Universe age and dark matter density allow one to determine the range of possible values of the ν parameter in the equation of quintessence state and indicate characteristic time, which corresponds to the beginning and cessation of the accelerated expansion epoch, as well as the time period of the maximal expansion, which corresponds to the half-period of the oscillatory evolution of the Universe.

Введение

Открытие ускоренного расширения Вселенной [1]–[3] заставило изменить многие устоявшиеся представления о ее составе и характере эволюции. Одним из популярных объяснений ускоренного расширения является предположение о наличии космологической постоянной Λ , что эквивалентно существованию ненулевой энергии вакуума ε_0 и связанного с ней отрицательного давления $P_0 = -\varepsilon_0$ ([4]–[8]). Такое предположение ведет к неограниченному инфляционному расширению Вселенной (темп которого, однако, по крайней мере на 60 порядков меньше первоначального инфляционного расширения от планковских масштабов, предлагаемого для решения проблемы горизонта и объяснения плоской геометрии трехмерного пространства). Другим, альтернативным объяснением наблюдаемого ускоренного расширения является гипотеза о существовании во Вселенной особой субстанции — квинтэссенции [9]–[11] с уравнением состояния

$$P_q = -(1 - \nu)\varepsilon_q \quad \left(0 < \nu < \frac{2}{3}\right), \quad (1)$$

где ε_q и P_q — соответственно плотность энергии и давление квинтэссенции.

Полевая релятивистская теория гравитации (РТГ) [12,13], рассматривающая гравитационное поле как физическое поле в пространстве Минковского, несовместима с неограниченным расширением Вселенной. Поэтому, как показал В.П. Калашников [14], для объяснения наблюдаемого расширения Вселенной, согласно РТГ, необходимо существование квинтэссенции (1). В этом случае, в соответствии с РТГ, будет происходить циклическая эволюция Вселенной. Важность вопроса и появление новых экспериментальных данных побудили нас снова вернуться к этой проблеме.

В настоящей статье показано, что при наличии квинтэссенции релятивистская теория гравитации (РТГ), в которой отсутствует космологическая особенность и однозначно предсказывается плоский характер трехмерной геометрии пространства, приводит к тому, что при $\nu > 0$ существующее ускорение Вселенной должно в будущем сменится замедлением и остановкой расширения, после чего начнется “сжатие” до некоторого минимального значения масштабного фактора и новый цикл расширения. В разделе 1 излагаются основные положения РТГ, а в разделе 3 вытекающие из них следствия для эволюции однородной и изотропной Вселенной. В разделе 2, используя экспериментально определенный недавно космологический параметр Ω_{tot} , устанавливается с достоверностью 95% верхний предел на массу гравитона, а в пределах ошибки (1σ) — ее возможная величина. Используя это значение в разделе 4, находится область возможных значений параметра ν , согласующаяся

с данными о современном возрасте Вселенной и с другими измеренными космологическими параметрами. В разделе 5 проводятся оценки времени, соответствующего началу и концу наблюдаемого в настоящее время ускорения, а также оценки возможного периода осцилляций Вселенной.

1. Основные положения РТГ

РТГ исходит из представления, что гравитационное поле, как и все другие поля, развивается в пространстве Минковского и что источником этого поля является сохраняющийся в пространстве Минковского тензор энергии-импульса всех полей материи, включая и гравитационное поле. Такой подход созвучен современным калибровочным теориям электрослабого взаимодействия и КХД, в которых источником векторных полей служат сохраняющиеся заряды и их токи. Поскольку в качестве источника гравитационного поля выбран тензор энергии-импульса, само гравитационное поле должно описываться симметричным тензором второго ранга $\varphi^{\mu\nu}$. Это и обуславливает в дальнейшем возможность “геометризации” теории. Исходная система уравнений РТГ имеет вид [12,13] ($\hbar = c = 1$)

$$(\gamma^{\alpha\beta} D_\alpha D_\beta + m_g^2) \tilde{\varphi}^{\mu\nu} = 16\pi G t^{\mu\nu}, \quad (2)$$

$$D_\nu \tilde{\varphi}^{\mu\nu} = 0, \quad (3)$$

где D_α — ковариантная производная в пространстве Минковского с метрическим тензором $\gamma_{\alpha\beta}$, а $\tilde{\varphi}^{\mu\nu}$ и $t^{\mu\nu}$ — соответственно плотности гравитационного поля и полного тензора энергии-импульса:

$$\tilde{\varphi}^{\mu\nu} = \sqrt{-\gamma} \varphi^{\mu\nu}, \quad \gamma = \det(\gamma_{\mu\nu}) = \det(\tilde{\gamma}^{\mu\nu}), \quad t^{\mu\nu} = -2 \frac{\delta L}{\delta \gamma_{\mu\nu}},$$

где L — плотность Лагранжиана материи и гравитационного поля. Уравнение (3) обеспечивает сохранение полного тензора энергии-импульса и выделяет поляризационные состояния, соответствующие гравитонам со спином 2 и 0, исключая состояния со спином 1 и 0' (аналогично условию Лоренца, исключая фотон со спином 0.) Для того чтобы система уравнений (2)–(3) следовала из принципа наименьшего действия, т.е. являлась следствием уравнений Эйлера ¹

$$\frac{\delta L}{\delta \tilde{\varphi}^{\mu\nu}} = 0, \quad \frac{\delta L_M}{\delta \tilde{\varphi}_k} = 0, \quad (4)$$

необходимо и достаточно, чтобы плотность тензора $\tilde{\varphi}^{\mu\nu}$ и плотность метрического тензора пространства Минковского $\tilde{\gamma}^{\mu\nu}$ входили в лагранжиан вещества в комбинации [12,13]:

$$\tilde{\varphi}^{\mu\nu} + \tilde{\gamma}^{\mu\nu} = \tilde{g}^{\mu\nu}; \quad \tilde{g}^{\mu\nu} = \sqrt{-g} \cdot g^{\mu\nu}; \quad g = \det(\tilde{g}^{\mu\nu}) = \det g_{\mu\nu}.$$

Таким образом,

$$L = L_g + L_M(\tilde{g}^{\mu\nu}, \tilde{\varphi}_k),$$

и движение вещества в гравитационном поле выглядит так, как если бы оно происходило в эффективном римановом пространстве с метрикой $g_{\mu\nu}$. Следует пояснить, что все

¹Здесь $L_M(\tilde{\gamma}^{\mu\nu}, \tilde{\varphi}^{\mu\nu}, \tilde{\varphi}_k)$ — плотность лагранжиана вещества, отвечающая движению поля материи φ_k в гравитационном поле, а L — плотность полного лагранжиана, включающего лагранжиан собственно гравитационного поля L_g .

кардинальные изменения по сравнению с общей теорией относительности А. Эйнштейна возникают в РТГ благодаря рассмотрению гравитационного поля как физического поля в пространстве Минковского. Именно такой подход с необходимостью приводит к наличию массы гравитона.

Уравнения гравитации с отличной от нуля массой гравитона писались и раньше (см., например, [15]). Однако они записывались только в инерциальных системах отсчета, так как специальную теорию относительности считали справедливой только для таких систем. Поэтому эти уравнения естественно оказывались необщековариантными, и в силу этого серьезно не рассматривались. В РТГ же учитывается, что в пространстве Минковского могут быть использованы любые, в том числе ускоренные системы отсчета, в которых метрические коэффициенты $\gamma_{\mu\nu}$ образуют тензор относительно произвольных преобразований координат. Именно поэтому уравнения (2) и (3) являются общековариантными.

Необходимость введения ненулевой массы гравитона в полевой теории гравитации обусловлена тем, что при ее отсутствии гравитационное поле $\varphi^{\mu\nu}$ (источником которого служит сохраняющийся полный тензор энергии импульса) обладает группой калибровочных преобразований [12,13] (см. также [16]), благодаря существованию которой ряд физически наблюдаемых величин (в том числе метрический тензор эффективного риманова пространства и его кривизна) зависят от выбора калибровки. Введение массы гравитона нарушает калибровочную группу и тем самым обеспечивает независимость физически измеримых величин от какого-либо произвола, сохраняя при этом общековариантность уравнений гравитации.

Структура члена в лагранжиане гравитационного поля, нарушающего калибровочную свободу гравитационного поля путем введения ненулевой массы гравитона, однозначно получена в работах [12,13]. В результате, уравнения гравитационного поля и вещества принимают вид

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}R + \frac{1}{2}\left(\frac{m_g c}{\hbar}\right)^2 \left[g^{\mu\nu} + \left(g^{\mu\alpha}g^{\nu\beta} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}g^{\alpha\beta} \right) \gamma_{\alpha\beta} \right] = 8\pi G T^{\mu\nu}, \quad (5)$$

$$D_\mu \tilde{g}^{\mu\nu} = 0, \quad (6)$$

где $R^{\mu\nu}$ и R — соответствующие кривизны в эффективном римановом пространстве, а $T^{\mu\nu}$ — тензор энергии-импульса вещества в эффективном римановом пространстве

$$\sqrt{-g} \cdot T^{\mu\nu} = -2 \cdot \frac{\delta L_M}{\delta g_{\mu\nu}}.$$

Уравнения (5)–(6) общековариантны относительно произвольных преобразований координат и форминвариантны относительно преобразований Лоренца. Благодаря $m_g \neq 0$, в уравнении (5) сохраняется связь эффективного риманового пространства с метрикой исходного пространства Минковского $\gamma_{\alpha\beta}$.

Уравнения (5)–(6) составляют полную систему уравнений. Необходимо подчеркнуть, что соотношение (6) является при этом именно **уравнением**, вытекающим из закона сохранения полного тензора энергии-импульса (или, что эквивалентно, из уравнения (4) для поля материи), а не каким-либо дополнительным условием. При существующих оценках на возможную величину массы гравитона (см. раздел 3) уравнения (5) и (6) полностью согласуются со всеми релятивистскими гравитационными эффектами, наблюдаемыми в Солнечной системе.

2. Эволюция однородной и изотропной Вселенной на основе РТГ

Для однородной и изотропной Вселенной интервал между событиями в эффективном римановом пространстве может быть представлен в симметричной метрике *Фридмана-Робертсона-Уолкера*:

$$ds^2 = U(t)(dx^0)^2 - V(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\Theta^2 + \sin^2 \Theta d\varphi^2) \right], \quad (7)$$

где $k = 1, -1, 0$ — соответственно для замкнутой (эллиптической), открытой (гиперболической) и плоской (параболической) Вселенной.

Уравнения (6) для метрики (7) принимают вид

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{V^3}{U} \right) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \sqrt{1 - kr^2} \right) - 2r(1 - kr^2)^{-1/2} = 0. \quad (9)$$

Из (8) следует $V^3/U = \text{const}$, или

$$V = \beta U^{1/3}; \quad \beta = \text{const}. \quad (10)$$

Уравнение (9) может выполняться лишь при $k = 0$.

Таким образом, из уравнения (6) сразу следует, что **пространственная геометрия Вселенной должна быть плоской** (причем для этого не требуется первоначального инфляционного расширения). Этот результат был впервые отмечен в работе [17]. То, что в РТГ получается единственное (плоское) решение $k = 0$ для однородной и изотропной Вселенной вместо трех возможных решений Фридмана, вполне естественно, так как система уравнений (5)–(6) вместе с уравнением состояния для $T^{\mu\nu}$ представляет полную систему уравнений, имеющую единственное решение.

Введя собственное время

$$d\tau = U^{1/2} \cdot dt$$

и обозначение

$$a^2(\tau) = U^{1/3},$$

можно записать интервал (7) в виде

$$ds^2 = c^2 d\tau^2 - \beta a^2(\tau) \cdot \left[dr^2 + r^2(d\Theta^2 + \sin^2 \Theta d\Phi^2) \right]. \quad (11)$$

При использовании выражения (11) уравнения гравитации (5) для однородной и изотропной Вселенной принимают вид [12,13]

$$\left(\frac{1}{a} \frac{da}{d\tau} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{1}{6} \left(\frac{m_g c^2}{\hbar} \right)^2 \left(1 - \frac{3}{2\beta a^2} + \frac{1}{2a^6} \right), \quad (12)$$

$$\frac{1}{a} \frac{d^2 a}{d\tau^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3P}{c^2} \right) - \frac{1}{6} \left(\frac{m_g c^2}{\hbar} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{a^6} \right), \quad (13)$$

где ρ и P — соответственно суммарная плотность всех видов материи и вызываемое ею давление.

Постоянная β , определенная равенством (10) и входящая в уравнение (12), имеет простой физический смысл. Рассматривая гравитационное поле $\varphi^{\mu\nu}$ как физическое поле в пространстве Минковского, необходимо потребовать выполнения принципа причинности, который сводится к тому, что под действием гравитационного поля траектория частицы не должна выходить за пределы светового конуса в пространстве Минковского. Для интервала (11) это условие приводит к неравенству

$$a^2(\tau) \cdot [a^4(\tau) - \beta] \leq 0.$$

Таким образом, постоянная β определяет максимальное значение масштабного множителя [12,13]

$$a_{\max}^4 = \beta.$$

Это означает, что, **согласно РТГ, невозможно неограниченное увеличение масштабного фактора $a(\tau)$** , т.е. неограниченное расширение Вселенной ².

Ненулевая масса гравитона, согласно уравнению (12), обеспечивает выполнение этого требования в случае, если плотность вещества ρ является убывающей функцией масштабного фактора a . Минимальное значение ρ , отвечающее остановке расширения ($da/d\tau = 0$, $a \gg 0$), согласно (12) равно

$$\rho_{\min} = \frac{1}{16\pi G} \left(\frac{m_g c^2}{\hbar} \right)^2. \quad (14)$$

Если уравнение состояния вещества представить в виде (1), то, как известно из первого закона термодинамики, следует, что зависимость ρ от масштабного фактора a будет выражаться в виде

$$\rho = \frac{\text{const}}{a^{3\nu}}, \quad (15)$$

где $\nu = 4/3$ для релятивистской материи (радиации и “легких” нейтрино) и $\nu = 1$ для барионной материи и холодной темной массы. Холодная масса и радиация, согласно (13), должны приводить к замедлению расширения. Для того чтобы объяснить наблюдаемое ускорение, необходимо предполагать наличие во Вселенной “темной” энергии \mathcal{E}_x , для которой

$$\left(\rho_x + \frac{3P_x}{c^2} \right) < 0.$$

В этом случае из уравнения состояния (1) следует

$$\rho_x + \frac{3P_x}{c^2} = -2\rho_x \left(1 - \frac{3}{2}\nu \right),$$

и для наличия ускорения требуется

$$0 \leq \nu < \frac{2}{3}.$$

²Мы придерживаемся традиционного термина “расширение” Вселенной, хотя в действительности Вселенная бесконечна: координата r в интервале (17) меняется в пределах $0 < r < \infty$. Возрастание расстояний между галактиками, определяемое по красному смещению и интерпретируемое как эффект Доплера, является следствием того, что испускание светового сигнала от далеких галактик происходит в более сильном гравитационном поле, чем поле в момент прихода сигнала к наблюдателю.

Значению $\nu = 0$ отвечает наличие энергии вакуума с плотностью $\mathcal{E}_{\text{vac}} = \rho_{\text{vac}} \cdot c^2$ и $P_{\text{vac}} = -\mathcal{E}_{\text{vac}}$. В этом случае ρ_{vac} не зависит от масштабного фактора, и при $\rho_{\text{vac}} > \rho_{\text{min}}$ (где ρ_{min} определяется выражением (14)) расширение Вселенной согласно (12), (13) носит неограниченный характер. Поэтому релятивистская теория гравитации в пространстве Минковского несовместима с наличием вакуумной энергии $\varepsilon_{\text{vac}} \neq 0$. Это естественно, так как в плоском пространстве плотность энергии вакуума не может быть отличной от нуля. С точки зрения РТГ, ускорение в расширении Вселенной может объясняться только наличием квинтэссенции (1) с показателем ν , строго бóльшим нуля

$$\nu > 0.$$

В этом случае плотность темной энергии должна убывать с ростом масштабного фактора по закону (15), и при достаточно больших значениях масштабного фактора наличие ненулевой массы гравитона должно, согласно уравнениям (12) и (13), привести к остановке расширения Вселенной, которое затем сменится ее сжатием. Это сжатие, в свою очередь, должно остановиться при некотором минимальном значении масштабного фактора $a_{\text{min}} \neq 0$. Действительно, в силу положительной определенности левой части уравнения (12), отрицательный член в его правой части, растущий при $a \rightarrow 0$ пропорционально $m_g^2 a^{-6}$, должен быть скомпенсирован ростом плотности ρ (происходящим в радиационно-доминантной стадии пропорционально $\rho \sim 1/a^4$). А это возможно лишь при $a_{\text{min}} \neq 0$. После достижения значения $a = a_{\text{min}}$ должен начаться новый этап расширения Вселенной.

Таким образом, структура члена, пропорционального m_g^2 , в уравнениях (12)–(13) обеспечивает как устранение космологической особенности, так и устранение возможности неограниченного расширения Вселенной. Другими словами, согласно РТГ, благодаря ненулевой массе гравитона эволюция Вселенной должна происходить в осциллирующем режиме. Полученные к настоящему времени экспериментальные данные позволяют оценить возможное значение массы гравитона и на этой основе дать оценку возможного периода осцилляции.

3. Ω_{tot} и оценка возможной массы гравитона

В 1970 г., вскоре после открытия реликтового излучения, Р.А. Сюняевым и Я.Б. Зельдовичем было проведено детальное количественное рассмотрение процессов, происходящих в период рекомбинации водорода и отрыва реликтового излучения от вещества [18]. В частности, ими было показано, что адиабатические возмущения (звуковые волны) в плазме в эпоху рекомбинации должны приводить к угловой анизотропии наблюдаемого реликтового излучения, изучая которую можно экспериментально определить величину ряда важных космологических параметров (см. также более ранние работы Дж. Силка (J. Silk) [19] и последующее рассмотрение в работах [20,21,22]). Вопрос о необходимой точности измерения угловых корреляций спектра реликтового излучения был подробно рассмотрен в работах [23,24]. Среди космологических параметров, значение которых непосредственно определяется в результате измерений угловых характеристик спектра реликтового излучения, имеется величина Ω_{tot}^0 , представляющая отношение полной плотности всех типов материи (ρ) к современному значению критической плотности ρ_c^0 , т.е.

$$\Omega_{\text{tot}}^0 = \rho / \rho_c^0 \quad (\rho_c^0 = 3H_0^2 / 8\pi G),$$

где H_0 – современное значение постоянной Хаббла [25]:

$$H_0 = h \cdot (9.778 \, 13 \cdot 10^9 \text{ лет})^{-1}, \quad h = 0.71 \pm 0.07.$$

В работе А. Джаффе (A.H. Jaffe) и др. [26] был приведен совместный анализ экспериментов BOOMERANG-98 [27] и Maxima-1 [28] с привлечением данных предыдущих экспериментов COBE DMR [29], а также данных, полученных при наблюдении сверхновых $SN1a$ [1,2] и крупномасштабных структур Вселенной [31]. Результаты анализа [26] показывают, что средние значения Ω_{tot} для комбинации различных экспериментов систематически превышают значение $\Omega_{\text{tot}} = 1$ (см. таблицу, взятую из работы [26]).

Таблица I (из работы А. Джаффе (A.H. Jaffe) и др. [26]).

	Ω_{tot}^0
B98 +DMR	$1.15^{+0.10}_{-0.09}$
MAXIMA-1+DMR	$1.01^{+0.09}_{-0.09}$
B98+MAXIMA1+DMR	$1.11^{+0.07}_{-0.07}$
CMB + LSS	$1.11^{+0.05}_{-0.05}$
CMB + SN1a	$1.09^{+0.06}_{-0.05}$
CMB + SN1a+LSS	$1.06^{+0.04}_{-0.04}$

На уровне достоверности 68% величина Ω_{tot} , согласно [26], равна

$$\Omega_{\text{tot}}^0 = 1.11 \pm 0.07, \quad (16)$$

в то время как, согласно инфляционной теории эволюции ранней Вселенной [4]–[8], величина Ω_{tot}^0 с высокой степенью точности должна быть равной единице. Поэтому, хотя результаты обработки [26] на уровне 95% CL

$$\Omega_{\text{tot}}^0 = 1.11^{+0.13}_{-0.12} \quad (17)$$

не противоречат значению $\Omega_{\text{tot}}^0 = 1$, сам факт систематического превышения средних значений $\Omega_{\text{tot}}^0 > 1$ представляется довольно интригующим. Действительно, отношение обеих частей уравнения (12) (для настоящего времени) к современному значению постоянной Хаббла H_0^2 приводит к соотношению ($a \gg 1$)

$$\Omega_{\text{tot}}^0 = 1 + f^2/6, \quad (18)$$

где $f = m_g c^2 / \hbar H_0$. Величину f удобно представить в виде отношения массы гравитона к величине m_H^0 , которую можно было бы назвать **массой Хаббла**:

$$m_H^0 = \frac{\hbar H_0}{c^2} = 3.8 \cdot 10^{-66} \cdot h \text{ [Г]},$$

$$f = m_g / m_H^0. \quad (19)$$

Соотношения (18)–(19) дают сразу представления о возможном порядке величины массы гравитона. Из значений (17) и выражения (18) следует, что верхний предел на массу гравитона составляет

$$m_g \leq 1.2 \cdot m_H^0 \quad (95\% \text{ CL}).$$

В то же время на уровне достоверности 68% это не исключает того факта, что согласно (16)–(18) масса гравитона равна

$$m_g = (0.8_{-0.5}^{+0.2}) \cdot m_H^0.$$

Появившиеся совсем недавно предварительные данные эксперимента WMAP [31] позволяют уточнить сделанные выше оценки массы гравитона. Согласно этим данным,

$$\Omega_{\text{tot}}^0 = 1.02 \pm 0.02. \quad (20)$$

Отсюда следует, что на уровне (2σ) $f^2/6 < 0.06$, т.е.

$$m_g \leq 0.6 \cdot m_H^0 = 1.6 \cdot 10^{-66} \text{ [г]} \quad (\text{при } h = 0.71).$$

Вместе с тем в пределах (1σ) верхнее значение (20) $\Omega_{\text{tot}}^0 = 1.04$ совпадает с нижним значением (16). Это не исключает возможности

$$\frac{f^2}{6} = 0.04 \quad \text{и} \quad m_g \approx 0.5 \cdot m_H^0 = 1.3 \cdot 10^{-66} \text{ [г]}. \quad (21)$$

Это значение массы гравитона мы и используем для дальнейших оценок.

4. Возраст Вселенной и ограничения на параметр квинтэссенции ν

Поскольку выход масштабного множителя a от его минимального значения a_{\min} на фридмановский режим эволюции занимает ничтожное время, а продолжительность радиационно-доминантной стадии расширения по крайней мере на 4 порядка меньше современного возраста Вселенной, определение последнего можно начать сразу с материально-доминантной стадии, полагая плотность холодной материи (включая барионы) равной $\rho_m = \rho_m^0 \frac{1}{x^3}$, где ρ_m^0 — современная плотность, а величина x — отношение масштабного фактора $a(\tau)$ к его современному значению a_0 :

$$x = a(\tau)/a_0.$$

Аналогичным образом плотность квинтэссенции можно представить в виде

$$\rho_q = \frac{\rho_q^0}{x^{3\nu}},$$

где ρ_q^0 — ее современное значение. Уравнение (12) тогда принимает вид

$$\left(\frac{1}{x} \cdot \frac{dx}{d\tau} \right)^2 = H_0^2 \cdot \left(\frac{\Omega_m^0}{x^3} + \frac{\Omega_q^0}{x^{3\nu}} - \frac{f^2}{6} \right), \quad (22)$$

где

$$\Omega_m^0 = \frac{\rho_m^0}{\rho_c^0} \quad \text{и} \quad \Omega_q^0 = \frac{\rho_q^0}{\rho_c^0}.$$

Из (22) следует, что

$$d\tau = \frac{1}{H_0} \frac{x^{1/2} dx}{\sqrt{F(x)}},$$

где

$$F(x) = \Omega_m^0 + \Omega_q^0 \cdot x^{3(1-\nu)} - \frac{f^2}{6}x^3. \quad (23)$$

Таким образом, современный возраст Вселенной t_0 определяется интегралом

$$t_0 = \frac{1}{H_0} \int_0^1 \frac{x^{1/2} dx}{\sqrt{F(x)}}, \quad (24)$$

а времена, отвечающие началу (t_1) и концу (t_2) наблюдаемого в настоящий момент ускорения, соответственно равны

$$t_{1(2)} = \frac{1}{H_0} \int_0^{x_1(x_2)} \frac{x^{1/2} dx}{\sqrt{F(x)}},$$

где x_1 и x_2 — корни уравнения

$$\Omega_m^0 - 2\Omega_q^0 \left(1 - \frac{3}{2}\nu\right) x^{3(1-\nu)} + \frac{f^2}{3}x^3 = 0,$$

отвечающего обращению в ноль ускорения (13). Максимальное время расширения (полу-период осцилляции $T_0/2$) определяется аналогичным интегралом

$$T_0/2 = \frac{1}{H_0} \int_0^{x_{\max}} \frac{x^{1/2} dx}{\sqrt{F(x)}},$$

где x_{\max} — корень уравнения

$$F(x_{\max}) = 0. \quad (25)$$

Определение возраста Вселенной $t_0 = (13.7 \pm 0.2) \cdot 10^9$ лет, приведенное в [31], позволяет получить ограничения на область изменения параметра квинтэссенции ν при ненулевой массе гравитона. Поскольку непосредственно измеренной в эксперименте WMAP ³ величиной является $\omega_m = \Omega_m^0 \cdot h^2 = 0.135^{+0.008}_{-0.009}$, а $\Omega_q^0 = \Omega_\Lambda^0 = \Omega_{\text{tot}} - \Omega_m^0$, где при выбранной согласно (21) массе гравитона $\Omega_{\text{tot}} = 1.04$, возраст Вселенной в области $\bar{\omega}_m - \Delta\omega_m < \omega_m < \bar{\omega}_m + \Delta\omega_m$ приобретает в соответствии с формулами (23)–(24) дополнительную зависимость от h и ν . Отсюда определяется область допустимых значений ν , отвечающих определеному в [31] интервалу для современного возраста Вселенной $13.5 \cdot 10^9 \leq t_0 \leq 13.9 \cdot 10^9$ лет ³. Указанная область допустимых значений ⁴ представлена на рис. 1.

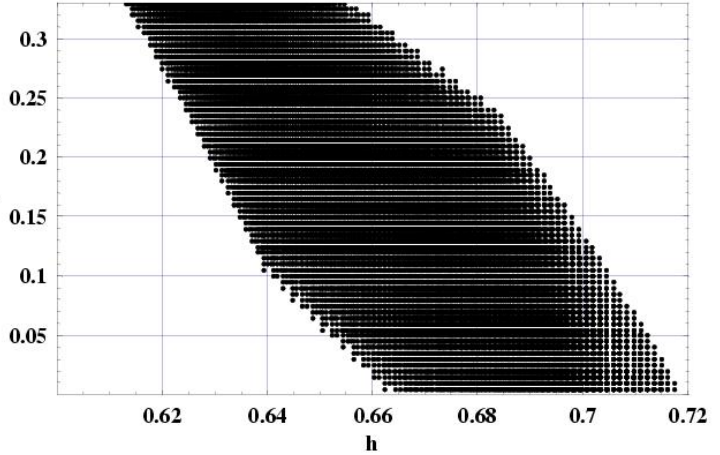


Рис. 1. Область изменения параметра ν при $\Omega_{\text{tot}} = 1.04$; $0.126 \leq \omega_m \leq 0.143$, $13.5 < t_0 < 13.9$ GY.

³Мы выбрали для определенности указанный интервал для возраста Вселенной несмотря на то, что его определение нельзя считать полностью моделью независимым (см. Н.П. Ткаченко. Препринт ИФВЭ, 2003).

⁴В соответствии с данными PDG [25] следует при этом ограничивать интервал h : $0.64 \leq h \leq 0.78$.

Интересно отметить, что выбранный интервал для современного возраста Вселенной $13.5 \cdot 10^9 < t_0 < 13.9 \cdot 10^9$ лет требует при $0.64 < h < 0.67$ существования квинтэссенции с $\nu_{\min} > 0$. В принципе, значение ν можно будет определить, если удастся уточнить данные относительно величин Ω_m^0 , Ω_Λ^0 (полагая $\Omega_\Lambda^0 = \Omega_q^0$) и величины ускорения q_0 . Согласно (13),

$$q_0 = \frac{\ddot{a}_0}{a_0 \cdot H_0^2} = \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \nu\right) \cdot \Omega_q^0 - \frac{\Omega_m^0}{2} - \frac{f^2}{6}. \quad (26)$$

Исключая из этого соотношения величину $f^2/6$, согласно (18) имеем

$$\frac{3}{2} \cdot \nu \cdot \Omega_q^0 = 1 - q_0 - \frac{3}{2} \cdot \Omega_m^0. \quad (27)$$

Современным данным не противоречит условие

$$q_0 < 1 - \frac{3}{2} \cdot \Omega_m^0,$$

необходимое для выполнения $\nu > 0$ в равенстве (26). Если же принять для ускорения q_0 значение $q_0 = 0.32 \pm 0.16$, то для средних значений $\Omega_m^0 = 0.27$, $\Omega_q^0 = \Omega_\Lambda^0 = 0.73$ [31] из равенства (27) имеем $\bar{\nu} = 0.25$, а в пределах (1σ) — $0.05 < \nu < 0.43$.

5. Времена, соответствующие началу и концу эпохи ускоренного расширения. Период осцилляции

Исходя из оценки возможной массы гравитона (21) и измеренных значений величины $\omega_m = \Omega_m^0 \cdot h^2 = 0.135_{-0.09}^{+0.08}$ [31], можно представить современный возраст Вселенной, а также время начала ускоренного расширения (t_1) и его конца (t_2) для различных возможных значений ν как функцию величины h (см. рис. 2–3). Из приведенных графиков видно, что время начала ускорения (t_1) не очень чувствительно к величине массы гравитона и к значению параметра ν , оставаясь в пределах $(7 \div 8) \cdot 10^9$ лет. При этом наименьшему значению $t_1 \approx 7 \cdot 10^9$ лет отвечают наибольшие значения параметра h , совместимые с выбранным интервалом возраста Вселенной. Возникновение ускорения, начиная с $t_1 \approx 7 \cdot 10^9$ лет, объясняет известный наблюдательный парадокс, заключающийся в справедливости

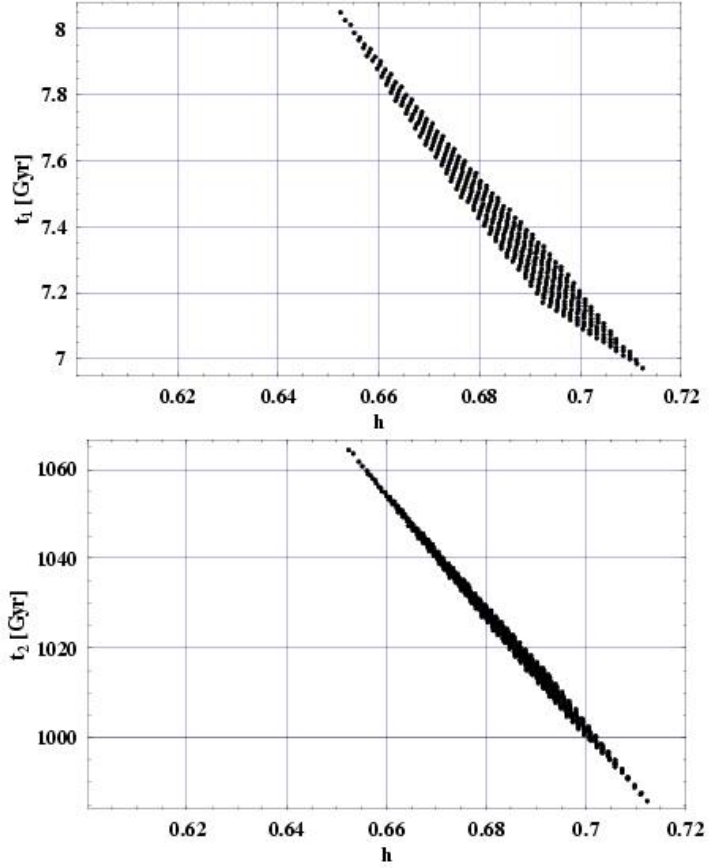


Рис. 2. Зависимость времени начала ускоренного расширения Вселенной (а) и его конца (б) от величины h для $\nu = 0.05$ при $\Omega_{\text{tot}} = 1.04$; $13.5 < t_0 < 13.9$ GY; $\nu = 0.05$; $0.126 < \omega_m < 0.143$.

закона расширения Хаббла уже на сравнительно малых расстояниях, порядка нескольких десятков Мпс (см., например, [32]). С ростом ν область изменения h , соответствующая выбранному интервалу возраста Вселенной, смещается в сторону меньших значений h . Так, при $\nu = 0.05$ она составляет $0.65 \leq h \leq 0.71$, а при $\nu = 0.20$ — $0.64 \leq h \leq 0.69$.

Время, соответствующее концу ускоренного расширения и началу замедления, приводящего к остановке расширения, сильно зависит от параметра ν (см. табл. 2).

Таблица 2. Время начала ускоренного расширения Вселенной t_1 и его окончания t_2 . Время максимального расширения (полупериод осцилляции) t_{\max} в миллиардах лет.

	t_1	t_2	t_{\max}
$\nu = 0.05$	7.0 - 8.2	980 - 1080	1220 - 1360
$\nu = 0.10$	7.0 - 8.2	440 - 485	620 - 685
$\nu = 0.15$	7.1 - 8.3	275 - 295	430 - 460
$\nu = 0.20$	7.1 - 8.3	190 - 205	325 - 347
$\nu = 0.25$	7.2 - 8.5	142 - 149	263 - 280
$\nu = 0.30$	7.5 - 8.7	109 - 113	227 - 235

Как уже отмечалось выше, полевая теория гравитации в пространстве Минковского (РТГ) не допускает неограниченного расширения Вселенной. Поэтому, с точки зрения РТГ, единственной возможностью объяснения наблюдаемого ускорения является существование квинтэссенции, или какой-либо другой субстанции, плотность которой падает с увеличением масштабного фактора, но не быстрее, чем const/a^2 . Остановка расширения вытекает из существования отличной от нуля массы гравитона. При этом достигается минимальное значение плотности вещества (14).

Масштабный фактор, отвечающий остановке расширения x_{\max} , определяется корнем уравнения (25) и при малых ν с хорошей точностью равен

$$x_{\max} \simeq \left(\frac{\Omega_q^0}{f^2/6} \right)^{1/3\nu}.$$

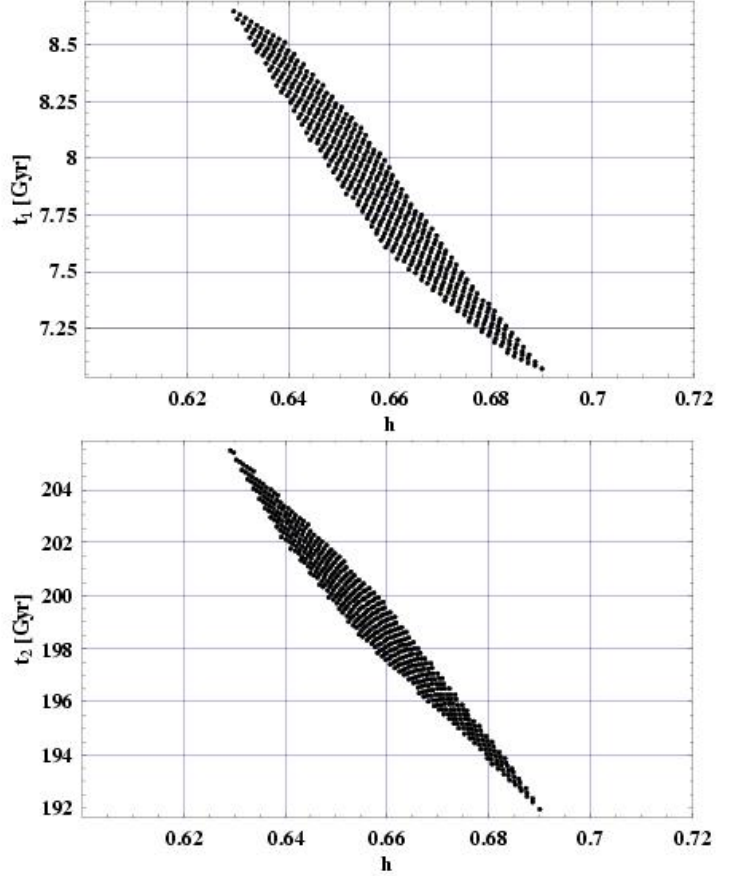


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, для $\nu = 0.20$.

В указанном приближении он связан с масштабным фактором (x_2), отвечающим окончанию ускоренного расширения, соотношением

$$x_2 = \left(1 - \frac{3}{2}\nu\right)^{1/3\nu} \cdot x_{\max} \approx \frac{x_{\max}}{\sqrt{e}}.$$

Время, отвечающее остановке расширения (полупериод осцилляции), при выбранном значении массы гравитона (21) составляет при $\nu = 0.05$ около $1300 \cdot 10^9$ лет, при $\nu = 0.10$ около $650 \cdot 10^9$ лет и при $\nu = 0.25$ около $270 \cdot 10^9$ лет (см. рис. 4 и табл. 2).

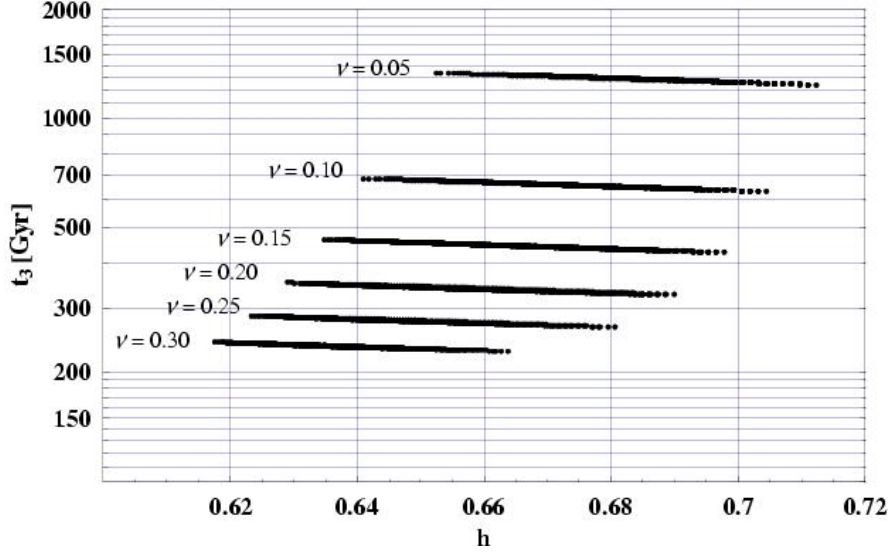


Рис. 4. Зависимость времени максимального расширения Вселенной от величины h для различных значений ν при $\Omega_{\text{tot}} = 1.04$; $13.5 < t_0 < 13.9$ GY; $\nu = 0.05$; $0.126 < \omega_m < 0.143$.

Идея об осциллирующем характере эволюции Вселенной неоднократно выдвигалась ранее, исходя преимущественно из философских соображений (см., например, [33,34]). Такой режим, в принципе, мог бы ожидаться в закрытой модели Фрийдмана с $\Omega_{\text{tot}} > 1$. Однако этому препятствуют, во-первых, непреодолимая трудность, связанная с переходом через космологическую особенность, а во-вторых, соображения, связанные с ростом энтропии от цикла к циклу [35]. В РТГ для бесконечной Вселенной указанные трудности снимаются. При этом осциллирующий характер эволюции за бесконечное число предшествующих циклов может обеспечить наблюдаемую в настоящее время в среднем однородность вещества во Вселенной на больших масштабах.

Привлекательность осциллирующей эволюции Вселенной отмечена в недавней работе [36]. Осциллирующий режим осуществляется в ней за счет введения скалярного φ -поля, взаимодействующего с веществом, и использования идеи дополнительной размерности. При этом высказываются важные соображения о том, что фаза ускоренного расширения способствует сохранению энтропии в повторяющихся циклах эволюции. В РТГ осциллирующий характер эволюции Вселенной достигается в результате одного лишь рассмотрения гравитационного поля как физического поля в пространстве Минковского, генерируемого суммарным тензором энергии-импульса всей материи (см. (5), (6)).

В заключение авторы выражают благодарность за обсуждение работы В.В. Ежеле, В.В. Киселеву, В.А. Петрову, П.К. Силаеву, Н.Е. Тюрину и Ю.В. Чугрееву.

Список литературы

- [1] Riess A.G. et al. // *Astron. J.* **V.116**, 1009 (1999).
- [2] Perlmutter S. et al. // *Astrophys. J.* **517**, 565 (1999).
- [3] Garnvich P.M. // *Astrophys. J.* **509**, 74 (1998).
- [4] Guth A.H. // *Phys. Rev.* **D23**, 347 (1981).
- [5] Kato S. // *MNRAS* **195**, 467 (1981).
- [6] Linde A.D. // *Phys. Lett.* **B108**, 389 (1982).
- [7] Albrecht A. and P.J. Steinhardt. // *Phys. Rev. Lett.* 1982. **48**. P.1220.
- [8] Starobinskii A.A. // *Phys.Lett.* **B117**, 175 (1982).
- [9] R.R. Caldwell , R. Dave and P.J. Steinhardt. // *Phys. Rev. Lett.* **80**, 1592 (1998).
- [10] Caldwell R.R. and Steinhardt P.J. // *Phys. Rev.* **D57**, 6057 (1998).
- [11] Ostriker J.P. and Steinhardt P.J. // *Sci. Am.* **284**, 36 (2001).
- [12] Логунов А.А., Мествиришвили М.А. *Релятивистская теория гравитации*. – Наука: Москва, 1989.
- [13] Логунов А.А. *Теория гравитационного поля*. – Наука: Москва, 2001. Logunov A.A. *The Theory of Gravity*. – Nauka, Moscow, 2001.
- [14] Калашников В.Л., gr-qc/0109060; gr-qc/0202084.
- [15] Ogievetsky V.I. and Polubarinov I.V. // *Ann. of Phys.* **35**, 167 (1965) и ссылки в этой работе.
- [16] *Feynman Lectures on Gravitation* Addison-Weley Publ. Comp., 1995.
- [17] Логунов А.А., Мествиришвили М.А. // *ТМФ.* **61**, 327 (1984).
- [18] Sunyaev R.A. and Zeldovitch Ya.B. // *Astrophys. and Space Science*, **7**, 1 (1970).
- [19] Silk J. // *Nature.* **215** 1155 (1967); **21** 453 (1968); *Astrophys. Journ.* **151**, 459 (1968).
- [20] Peebls P.J. and Yu J.T //, *Astrophys. Journ.* **162**, 815 (1970).
- [21] Wilson M.L. and Silk J. // *Astrophys. Journ.* **243**, 14 (1981).
- [22] Bond J.R. and Efstathiou G. // *Astrophys. Journ.* **285**, 45 (1984); *Mon Not. R. // Astron. Soc.* **226**, L655 (1987).
- [23] Yungman G. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **76** 1007 (1996.); *Phys. Rev.* **D54**, 1332 (1996).
- [24] Bond J.R., Efstathiou G.E. and Tegmark M. *Mon Not. R. // Astron. Soc.* **291**, L33 (1997).
- [25] Particle Data Group. *Review of Particles Physics.* *Phys. Rev.* **D66**, N1-1 (2002).
- [26] Jaffe A.H., Ade P.A.R., Babbi A. et al. // *Phys. Rev. Lett.* **86** 3475 (2001).
- [27] de Bernardis P. et al. *Nature (London).* **404**, 995 (2002).
- [28] Hanany S., Ade P., Babbi A. et al. // *Astrophys. J.* **545**, L5 (2000).
- [29] Bennett C., Banday A., Gorski K.M. et al. // *Astrophys. J.* **464**, L1 (1996).
- [30] Lange A.E. et al. astro-ph/0005004. [*Phys. Rev. D...*].
Bond J.R. and Jaffe A.H. *Philos. Trans. R. Soc. London*, **357**, 57 (1999).

- [31] Bennet C. et al. arXiv: astro-ph/0302207 v.2, 2003.
- [32] Чернин А.Д. // УФН. **171**, 1153 (2001).
- [33] Сахаров А.Д. *Научные труды*. – (Центрком: Москва, 1985) с. 269-299; ЖЭТФ. **83**, 1233 (1982).
- [34] Аман Э.Г. и Марков М.А. // ТМФ. **58**, 163 (1984);
Аман J.M. and Markov M.A. // Ann. Phys. **155**, 333 (1984).
- [35] Tolman R.C. *Relativity, Thermodynamics and Cosmology* (Oxford U. Press, Clarendon Press) 1934.
- [36] Steinhardt P.J. and Turok N. arXiv: hep-th/0111030, 2002. v.2.

Рукопись поступила 16 мая 2003 года.

С.С. Герштейн, А.А. Логунов, М.А. Мествиришвили, Н.П. Ткаченко.
Масса гравитона, квинтэссенция и осциллирующий характер эволюции
Вселенной.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **ИГРХ**.

Редактор Н.В. Ежела.

Технический редактор Н.В. Орлова.

Подписано к печати 20.05.2003. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ.л. 1,62. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 100. Заказ 62. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

