

ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРАЛЬНЫХ МЕЗОНОВ И ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ДЛЯ ЧАСТИЦ И АНТИЧАСТИЦ

*С. Г. Каршенбойм*¹

ФГУП РФ «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,
Санкт-Петербург, Россия

Институт квантовой оптики им. М. Планка, Гархинг, Германия

Осцилляции нейтральных мезонов ($K^0-\bar{K}^0$, $D^0-\bar{D}^0$ и $B^0-\bar{B}^0$) крайне чувствительны к энергии мезонов и антимезонов в покое. Эта энергия определяется как величиной mc^2 с соответствующей инерционной массой, так и энергией гравитационного взаимодействия. Предполагая выполнение СРТ-теоремы для инерционных масс и оценивая гравитационный потенциал, наибольший вклад в который дает поле центра Галактики, из экспериментальных данных по $K^0-\bar{K}^0$ -осцилляциям получаем оценку

$$\left| \left(\frac{m_g}{m_i} \right)_{K^0} - \left(\frac{m_g}{m_i} \right)_{\bar{K}^0} \right| \leq 8 \cdot 10^{-13} \quad \text{при С.Л.} = 90\%.$$

Эта оценка модельнозависима и, в частности, зависит от способа оценки гравитационного потенциала. Анализ осцилляций $K^0-\bar{K}^0$, $B^0-\bar{B}^0$ и $D^0-\bar{D}^0$ позволяет получить более слабые, но модельно-независимые оценки, которые, в частности, исключают возможность антигравитации для античастиц.

The $K^0-\bar{K}^0$, $D^0-\bar{D}^0$, and $B^0-\bar{B}^0$ oscillations are extremely sensitive to the K^0 and \bar{K}^0 energy at rest. The energy is determined by the values mc^2 with the related mass as well as the energy of the gravitational interaction. Assuming the CPT theorem for the inertial masses and estimating the gravitational potential through the dominant contribution of the gravitational potential of our Galaxy center, we obtain from the experimental data on the $K^0-\bar{K}^0$ oscillations the following constraint:

$$\left| \left(\frac{m_g}{m_i} \right)_{K^0} - \left(\frac{m_g}{m_i} \right)_{\bar{K}^0} \right| \leq 8 \cdot 10^{-13}, \quad \text{CL} = 90\%.$$

This estimation is model dependent and in particular it depends on a way we estimate the gravitational potential. Examining the $K^0-\bar{K}^0$, $B^0-\bar{B}^0$, and $D^0-\bar{D}^0$ oscillations provides us also with weaker, but model independent constraints, which in particular rule out the very possibility of antigravity for antimatter.

PACS: 04.80.Cc, 14.40.-n, 95.30.-k, 95.30.Cq

¹E-mail: s.g.karshenboim@vniim.ru, savely.karshenboim@mpq.mpg.de

ВВЕДЕНИЕ

Проверка общей теории относительности и, в частности, принципа эквивалентности является одним из объектов как полуклассических лабораторных экспериментов по сравнению ускорений свободного падения пробных тел, состоящих из разных материалов, так и обработок различных высокоточных наблюдений за движением планет и космических аппаратов.

Наиболее точные лабораторные эксперименты по сравнению свободного падения титановых и бериллиевых шаров приводят к ограничению [1]

$$\eta_{\text{Be-Ti}} = (0,3 \pm 1,8) \cdot 10^{-13}, \quad (1)$$

где

$$\eta_{ab} = \frac{2(g_a - g_b)}{g_a + g_b}, \quad (2)$$

а $g...$ — соответствующее ускорение свободного падения.

Ограничение, следующее из движения космических объектов, и в частности, Земли и Луны в поле солнечной гравитации, приводит к величине [2]

$$\tilde{\eta}_{\text{E-M}} = (-1,0 \pm 1,4) \cdot 10^{-13}, \quad (3)$$

где

$$\tilde{\eta}_{ab} = \left(\frac{m_g}{m_i} \right)_a - \left(\frac{m_g}{m_i} \right)_b, \quad (4)$$

m_i и m_g — это инерционная и гравитационная массы.

Общая теория относительности предполагает, что инерционная масса частиц совпадает с их гравитационной массой или, что то же самое, что ускорение свободного падения в гравитационном поле универсально и не зависит от свойств падающих объектов. Согласно принципу эквивалентности, обе приведенные выше величины ((2) и (4)) должны строго равняться нулю. Соответствующие результаты [1, 2] совместны с нулем в пределах погрешности, которая и указывает на то, с какой точностью принцип эквивалентности подтвержден экспериментально.

В данной заметке мы демонстрируем, что осцилляции нейтральных псевдоскалярных мезонов, и в особенности, каонов, также устанавливают жесткий предел на нарушение принципа эквивалентности. Ограничение, полученное нами для величины $\tilde{\eta}_{K^0 \overline{K^0}}$, оказывается ниже, чем 10^{-12} .

Осцилляции нейтральных каонов — исключительно чувствительный инструмент для получения ограничений на некоторые явления так называемой «новой физики». В принципе, осцилляции $K^0 - \overline{K^0}$ использовались ранее для ограничения, налагаемого на возможные нарушения принципа эквивалентности в системе частица–античастица, однако ограничения, полученные из сравнения данных по осцилляциям в разных точках земной орбиты, были достаточно слабыми [3]¹.

¹Автор данной заметки узнал о работе [3], а также о [4], где осцилляции каонов впервые обсуждались в контексте принципа эквивалентности, уже после того, как анализ был завершен, а электронный препринт [5] опубликован.

Перед тем как перейти к подробному описанию нашего результата, отметим два обстоятельства. Параметры η и $\tilde{\eta}$, в терминах которых выше выписаны ограничения, очень близки по смыслу и в рамках некоторых разумных предположений совпадают. Величина η — модельно-независима, так как имеет дело с непосредственно измеряемыми ускорениями, в то время как $\tilde{\eta}$ можно получить только в рамках очевидных предположений при обработке данных (о том, что неуниверсальность отношения инерционной и гравитационной масс — единственная существенная модификация теории, или одна из ограниченного числа модификаций). Отметим, что величина η не имеет фундаментального характера, а любая ее интерпретация также потребует предположений. Таким образом, любая содержательная проверка принципа эквивалентности модельнозависима. Все предположения, которые делались в ходе приведенного ниже анализа, явно перечислены и прокомментированы в нашей заметке.

Вторым важным обстоятельством является правильный выбор источника гравитации. В нашем анализе [5] мы воспользовались галактическим гравитационным полем, которое определяет движение Солнечной системы относительно центра нашей Галактики и нашей галактики относительно центра местного кластера [6]. В принципе, такое поле также обсуждалось раньше (см., например, [1]), но величина оценки значительно уступала оценкам, основанным на более традиционных источниках гравитации. Существенное отличие нашего анализа [5] (см. также [7]), которое и позволило получить достаточно сильные ограничения, заключается в том, что мы воспользовались величиной потенциала по отношению к бесконечно удаленной точке, применительно к которой ввиду отсутствия гравитации можно сделать предположение о физике интересующих нас явлений.

ПРИНЦИП ОЦЕНКИ

Опишем, на чем основан наш анализ. Он включает в себя следующие элементы:

- мы предполагаем, что при отсутствии гравитации имеет место СРТ-симметрия и, в частности, для инерционных масс выполняется равенство $m_{K^0} = m_{\overline{K^0}}$ (так как цель нашего анализа — ограничения на «новую физику», то мы должны явно перечислить и те предположения, которые обычно считаются очевидными);
- мы предполагаем, что для простых оценок достаточно рассматривать осцилляции $K^0-\overline{K^0}$ для покоящихся каонов, имея в виду, что каоны относительно медленны и учет релятивистских поправок не изменит характера результата;
- мы предполагаем, что две установленные компоненты движения нашей Солнечной системы [6] (движение Солнца относительно центра нашей Галактики со скоростью 259 км/с и нашей Галактики относительно центра местного кластера со скоростью 185 км/с) можно рассматривать как относящиеся к движению по круговым орбитам (небольшое отклонение от этого не должно влиять на величину оценки), описываемому простыми законами ньютоновской механики¹.

¹Это предположение нужно для упрощения нашего анализа. Возможность разбить движение Солнечной системы (относительно системы отсчета, в которой реликтовое излучение изотропно) на несколько компонент, две из которых связаны с движением внутри нашей Галактики или скопления галактик [6], основана на анализе самых различных данных. В случае кругового (или почти кругового) движения для оценки соответствующего гравитационного потенциала достаточно лишь знать основной результат анализа [6] — установленные компоненты скорости. В случае более сложного движения понадобились бы и другие детали.

Идея полученных ниже ограничений очень проста [5] (ср. [3]). Теория $K^0-\bar{K}^0$ -осцилляций предполагает вырожденность диагональных матричных элементов гамильтониана (в состоянии покоя и в отсутствие гравитации — это величины mc^2 для каона и антикаона) при наличии малого переходного матричного элемента, связанного со слабыми переходами между каоном и антикаоном через промежуточные пары 2π . Снятие вырождения диагональных членов приводит к качественному изменению картины осцилляций. Обычно ограничения формулируются в терминах разности масс каона и антикаона (см. [8, 9])

$$\frac{|m_{K^0} - m_{\bar{K}^0}|}{m_{K^0}} \leq 0,8 \cdot 10^{-18} \quad \text{при С. Л.} = 90\% \quad (5)$$

как проверка СРТ-теоремы. Такой подход верен в предположении принципа эквивалентности, ввиду которого гравитационные эффекты одинаковы для частицы и античастицы и не снимают вырождения. В общем случае, если допустить возможное нарушение принципа эквивалентности, для покоящихся частиц получаем ограничения на другую величину:

$$\frac{|E_K^{(0)} - E_{\bar{K}^0}^{(0)}|}{m_K c^2}, \quad (6)$$

где энергия покоя $E^{(0)}$ теперь включает и потенциальную энергию, связанную с гравитацией. Причины, по которым мы рассматриваем покоящиеся частицы, заключаются в том, что нарушение принципа эквивалентности означает необходимость модификации ОТО, а в этом случае мы не можем *a priori* знать, как гравитационное взаимодействие зависит от скорости; такие эффекты модельнозависимы. Мы ограничиваем наше рассмотрение ньютоновским потенциалом.

Если мы предположим, что все возможное отклонение данного параметра от нуля связано с нарушением принципа эквивалентности, то придем к соотношению

$$\frac{|E_K^{(0)} - E_{\bar{K}^0}^{(0)}|}{m_K c^2} = \left| \left(\frac{m_g}{m_i} \right)_{K^0} - \left(\frac{m_g}{m_i} \right)_{\bar{K}^0} \right| \left| \frac{U(r) - U(\infty)}{c^2} \right|. \quad (7)$$

Здесь мы явно учли, что, как это следует из СРТ-теоремы, $m_i(K^0) = m_i(\bar{K}^0)$, и что в отсутствие гравитации (и в частности, при $r = \infty$) обсуждаемая разность равна нулю.

ГАЛАКТИЧЕСКИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПОЛЯ

В настоящее время считается установленным [6], что движение нашей Солнечной системы относительно системы, в которой реликтовое излучение обладает изотропностью, содержит по крайней мере три компоненты. Две из них идентифицированы как вращательное движение Солнца относительно центра нашей Галактики ((259 ± 25) км/с) и как вращение нашей Галактики относительно центра скопления галактик ((185 ± 20) км/с).

Этот результат получен [6] на основе анализа всех имеющихся данных. Движение звездных объектов достаточно медленно, чтобы основой анализа было ньютоновское тяготение. При этом закон убывания потенциала от центра — не ньютоновский ввиду

наличия темной материи. Однако, имея в виду ее сферически-симметричное распределение относительно центра тяготения, можно игнорировать ту темную материю, которая находится за пределами круговой орбиты. Это дает правильную разность потенциалов по сравнению с бесконечностью.

Напомним, что при вращательном движении вокруг притягивающего центра потенциал можно легко выразить через скорость вращения по орбите. Для круговых орбит ускорение выражается известным образом и через гравитационный потенциал, и через скорость вращения:

$$a = -\frac{U(r)}{r} = \frac{\mathbf{v}^2}{r}, \quad (8)$$

где потенциал $U(r)$ определен таким образом, что $U(r = \infty) = 0$. В итоге находим

$$U(r) = -\mathbf{v}^2.$$

В случае нескольких гравитационных центров необходимо просуммировать потенциалы

$$U_{\text{tot}} = \sum_i U_i.$$

В частности, суммируя упомянутые выше скорости вращения [6], получаем

$$-\frac{U_{\text{tot}}}{c^2} = \frac{\sum_i \mathbf{v}_i^2}{c^2} \simeq 10^{-6}.$$

В результате находим ограничение на допустимое нарушение принципа эквивалентности для каона и антикаона

$$|\tilde{\eta}_{K^0 \bar{K}^0}| \leq 8 \cdot 10^{-13} \quad \text{при С. Л.} = 90 \%, \quad (9)$$

которое сопоставимо по уровню с приведенными в начале статьи наилучшими результатами для гравитационных исследований традиционного характера [1, 2].

Выше мы проигнорировали наибольшую из трех компоненту скорости Солнечной системы (455 км/с) [6], поскольку ее происхождение неясно. Отметим, что в рамках приведенных предположений учет других компонент скорости лишь увеличит величину U_{tot} и, следовательно, усилит ограничение.

Выше мы предположили, что потенциал на бесконечности обращается в ноль, что, вообще говоря, неясно и не обязательно справедливо. Однако исследование движений вокруг различных центров притяжения [6] показывает, что потенциал значительно убывает по мере удаления от центра. Убывания потенциала в несколько раз вполне достаточно для справедливости приведенных выше оценок, а строгое обращение в ноль необходимым условием не является.

Приведенное ограничение отличается от полученных ранее ограничений на уровне 10^{-12} (см., например, [1, 2]) тем, что

- явно используется СРТ-инвариантность (в виде условия $m_{K^0} = m_{\bar{K}^0}$);
- пробные частицы — не барионы;
- гравитация также не является чисто барионной (в ней преобладает темная материя).

Ранее полученные ограничения или были существенно менее жесткими, или имели дело с гравитацией обычного атомного вещества и его действием на пробные тела, также состоящие из атомов.

ДРУГИЕ ИСТОЧНИКИ ГРАВИТАЦИИ И ДРУГИЕ ПРОБНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Используя другие источники гравитации и другие пробные частицы, можно получить дополнительные ограничения, более слабые, но независимые.

Рассмотрим осцилляции других нейтральных мезонов $D^0-\overline{D^0}$ и $B^0-\overline{B^0}$. Ограничения [8] на разность их масс составляют

$$\frac{|m_{D^0} - m_{\overline{D^0}}|}{m_{D^0}} \leq 10^{-15}, \quad \frac{|m_{B^0} - m_{\overline{B^0}}|}{m_{B^0}} \leq 10^{-12}. \quad (10)$$

Это приводит к следующим ограничениям:

$$|\tilde{\eta}_{D^0\overline{D^0}}| \leq 10^{-9}, \quad |\tilde{\eta}_{B^0\overline{B^0}}| \leq 10^{-6}.$$

В качестве другого гравитационного источника можно рассмотреть солнечную гравитацию. При скорости вращения Земли вокруг Солнца, составляющей 30 км/с, получаем

$$\frac{U_{\text{Sun}}(r_{\infty}) - U_{\text{Sun}}(r_{\text{Earth}})}{c^2} \simeq 10^{-8}.$$

Это приводит к ограничениям, аналогичным ограничениям с галактическими полями, но на два порядка слабее.

(НЕ)ВОЗМОЖНОСТЬ АНТИГРАВИТАЦИИ ДЛЯ АНТИЧАСТИЦ

Еще более слабое ограничение можно получить, сравнивая потенциалы в афелии и перигелии орбиты Земли (наиболее высокая и наиболее низкая точки земной орбиты), что отвечает величине

$$\frac{U_{\text{Sun}}(r_{\text{perihelion}}) - U_{\text{Sun}}(r_{\text{aphelion}})}{c^2} \simeq 3,2 \cdot 10^{-10}. \quad (11)$$

Именно такой потенциал использовался в работе [3]. Такие ограничения существенно слабее, чем полученные выше, однако могут представлять интерес для проверки гипотезы антигравитации для антиматерии.

Эта гипотеза, к которой теоретики относятся скептически, привлекательна для экспериментаторов по ряду причин. Такое предположение отвечает большому эффекту (100%), но для специфических ситуаций. Уровень ограничений на принцип эквивалентности здесь менее важен, но желательно делать как можно меньше модельнозависимых предположений.

При сравнении потенциала в афелии и перигелии нет необходимости делать предположения ни о выполнении СРТ-теоремы в отсутствие гравитационных эффектов, ни о характере убывания гравитационного поля вдали от источника¹.

¹Конечно, мы имеем гораздо более ясное понимание гравитационного потенциала Солнца (по сравнению с галактическими потенциалами) и знаем, что он с хорошей точностью описывается законом Ньютона. Поэтому в той части, которая касается гравитационного поля, оценки с гравитацией Солнца достаточно надежны.

Стопроцентный эффект, связанный с потенциалом (11), был бы на уровне $3 \cdot 10^{-10}$, что существенно выше, чем допустимая величина [8] $\Delta E/mc^2$ для всех трех нейтральных мезонов.

Проблемой для прямой интерпретации влияния гравитации (и антигравитации) на осцилляции является то обстоятельство, что мезоны состоят из пары кварк–антикварк ($K^0 = \bar{s}d$, $D^0 = c\bar{u}$, $B^0 = \bar{b}d$), тогда как барионы (протоны и нейтроны) состоят из тройки кварков. Поэтому не вполне ясно, как строго оценить асимметрию материи и антиматерии в мезонах.

Мерой чувствительности можно считать величину

$$\kappa_{\bar{q}_1 q_2} = \frac{|m_{\bar{q}_1} - m_{q_2}|}{m_M} \simeq \begin{cases} 0,2 & \text{для } K, \\ 0,6 & \text{для } D, \\ 0,85 & \text{для } B, \end{cases} \quad (12)$$

где мы явно учли, что интересующие нас мезоны состоят из кварка и антикварка разной массы, и сравнили массы токовых кварков с массой мезона. Можно ожидать, что гипотеза о гравитации для кварков и антигравитации для антикварков проверяема в осцилляциях нейтральных каонов, однако чувствительность может быть подавлена не более чем на порядок.

В [3] при анализе каонных осцилляций было проведено сравнение результатов в афелии и перигелии земной орбиты. Для остальных мезонов, как и в случае более точных результатов по каонам [8] ((5) и (10)), явных данных по времени измерений нет, однако эффект в случае антигравитации должен на порядки превышать ограничения (5) и (10) и неминуемо проявиться как крайне сильный шум. Нелишне отметить, что в случае каонов и D -мезонов даже изменения солнечного потенциала при переходе день–ночь ($\Delta U/c^2 \leq 4,2 \cdot 10^{-13}$ — величина зависит от широты и на полюсах убывает до нуля) были бы хорошо различимы. Близкую величину имеет и вклад лунной гравитации при переходе день–ночь.

В случае каонов и D -мезонов данные разных лабораторий также могут наложить жесткие ограничения. Так, разность потенциалов при разности высоты лабораторий в 100 м составляет

$$\frac{\Delta U(\Delta r = 100 \text{ м})}{c^2} \simeq 1,1 \cdot 10^{-14}. \quad (13)$$

Изменения гравитационного потенциала, перечисленные выше, достаточно велики по сравнению с чувствительностью осцилляций к разности энергий мезонов и антимезонов. Это позволяет заключить, что антигравитация для античастиц противоречит экспериментальным данным.

МОДЕЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОЦЕНОК

Часть модельнозависимых предположений была явно перечислена выше. Отметим еще два обстоятельства.

Во-первых, имеется два типа модификаций гравитации. В первом случае предполагается, что гравитация связана только с массой, тогда как другая возможность связана с присутствием некоей дополнительной силы («пятой» силы), которая не пропорциональна

массе. Ограничения, полученные выше, на принцип эквивалентности не зависят от того, какой тип модификации мог бы иметь место (в отличие, например, от ограничений, вытекающих из анализа гравитационных смещений атомных уровней (ср. [7])).

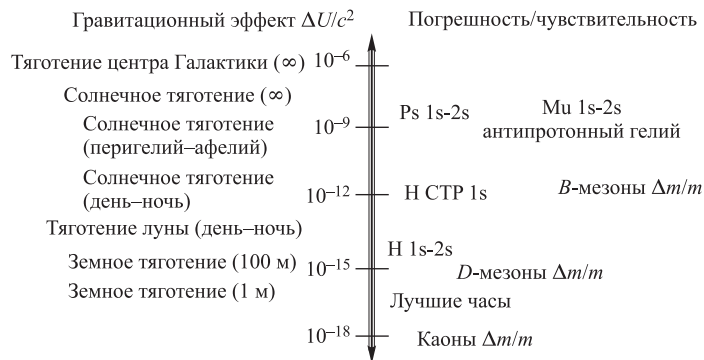
Другой вопрос связан с возможностью сокращения между эффектами небольшой разности в инерционной массе частиц и античастиц и существенно большей разности в их гравитационном взаимодействии. Такая тонкая подстройка формально могла бы иметь место (особенно если учесть, что в случае нарушения ОТО мы не можем модельно-независимо описывать эффекты, пропорциональные скорости), однако в отличие от стандартных аргументов в духе антропного принципа в данном случае предполагаемое сокращение имело бы место не во всей Вселенной, а на определенном расстоянии от центра нашей Галактики и т. д. Поэтому такие сокращения маловероятны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше мы продемонстрировали, что в рамках некоторых естественных предположений можно получить чрезвычайно строгое ограничение (9) на возможное нарушение принципа эквивалентности для частиц и античастиц. Это ограничение сопоставимо по силе с лучшими ограничениями [1, 2], полученными в традиционных исследованиях.

В принципе имеется целый ряд высокочувствительных экспериментов, которые могли бы быть использованы в получении подобных ограничений, а также можно использовать самые различные источники гравитационного поля. Схематично величина гравитационных эффектов и чувствительность разных измерений приведены на рисунке. Ограничение (9), полученное выше, основано на самом сильном источнике гравитационного потенциала и на самом чувствительном эффекте.

Выше мы также рассмотрели такое специфическое нарушение принципа эквивалентности, как предположение антигравитации для античастиц. Показано, что результаты по исследованию осцилляций нейтральных мезонов в различных гравитационных полях, доступных в лабораторных условиях, противоречат этой гипотезе.



Относительные чувствительности и погрешности (справа) различных экспериментов, которые чувствительны к гравитации, и относительные величины соответствующих гравитационных эффектов (слева) (ср. [7])

Благодарности. Работа была выполнена при поддержке РФФИ (гранты 08-02-91969 и 08-02-13516) и DFG (грант GZ 436 RUS 113/769/0-3).

Автор признателен С.И. Эйдельману, Р.А. Сюняеву, Д.А. Варшаловичу, Т. Удему (Th. Udem) и В.Г. Иванову за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schlamming S. et al. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. P. 041101.*
2. *Williams J. G., Turyshev S. G., Boggs D. H. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. P. 261101.*
3. *Apostolakis A. et al. // Phys. Lett. B. 1999. V. 452. P. 425.*
4. *Good M. L. // Phys. Rev. 1961. V. 121. P. 311.*
5. *Karshenboim S. G. gr-gc/0811.1008v1.*
6. *Tully R. B. et al. // Astrophys. J. 2008. V. 676. P. 184.*
7. *Karshenboim S. G. gr-gc/0811.1009v1.*
8. *Amsler C. et al. (Particle Data Group) // Phys. Lett. B. 2008. V. 667. P. 1.*
9. *Carosi R. et al. // Phys. Lett. B. 1990. V. 237. P. 303.*

Получено 10 марта 2009 г.