

ВАКУУМНЫЕ СОСТОЯНИЯ. ОБЗОР

Борис Ихлов

Аннотация

Перечислены некоторые вакуумные состояния. Показана связь нулевых колебаний вакуума с уровнями квантового осциллятора. Найдено полное решение уравнения Шредингера. Показано, что система квантовых уровней осциллятора не имеет классического предела. Доказано, что традиционное решение уравнения Шредингера является частным решением. Введена характерная длина, отличная от комптоновской, что открывает путь к реанимации версии реджеонов. Рассмотрен космологический вакуум. Показано, что планковская Вселенная находится вне пространственно-временной формы, что отчасти объясняет причины Большого взрыва. Подсчитано, что суммарная масса планковской Вселенной – отрицательна, при этом масса вакуума обычных полей в планковской Вселенной не может быть источником Большого взрыва. Указано, что принцип космической цензуры Пенроуза неверен. Предложена новая трактовка квантовой метрики.

Ключевые слова: осциллятор, поле, атом, метрика, космология

Введение

Хотя вакуум не является динамической системой, он может воздействовать на физические объекты, как. Например, в эффекте Казимира или в космологии.

В 2017 году в совместной работе Принстона и Гонконга показано, что микроскопический механизм, состоящий из двух зубчатых кремниевых пластин, расположенных на расстоянии 100 нм друг от друга, способен вырабатывать из вакуума небольшое количество энергии. Механическое напряжение можно трансформировать в электрический ток [1]. Измерена также немонотонная сила Казимира [2] и независимая от расстояния сила Казимира [3]

Вакуум – это состояние системы с наименьшей энергией. Чем существенно отличается это состояние от состояния 1-го возбужденного или первого отстоящего от наименьшей энергии уровня?

Нулевые колебания вакуума

К вакуумоподобным состояниям можно отнести бозе-конденсат и ферми-конденсат. Однако эти состояния вещества существенно отличаются от вакуума, вещество в состоянии конденсата обладает инертной массой. Наинизший уровень электрона в атоме нельзя рассматривать как вакуумное состояние, с увеличением номера уровня его энергия падает. Парадоксально, что при этом увеличивается угловой момент электрона $L = n\hbar$, что в классической механике ведет к увеличению энергии с номером моды.

Обладает инертной массой и квантовый осциллятор на низшем энергетическом уровне.

Энергия квантового осциллятора –

$$E = \hbar\omega(n + 1/2) \quad (1)$$

Уравнение (1) является условием существования решений стационарного уравнения Шредингера для осциллятора

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{2m_0}{\hbar^2}(E - \frac{m_0\omega_0 x^2}{2})\Psi = 0; -\infty < x < \infty \quad (2)$$

Решением (2) является волновая функция

$$\Psi_n(z) = \exp(z^2/2)H_n(z); n = 0; 1; 2...$$

где H_n – функции Эрмита, квадрат модуля нулевой волновой функции отличен от нуля.

В уравнении (1) ω - собственная частота осциллятора, но осциллятор на основной частоте колеблется с частотой вдвое меньше, $\omega/2$. Таким образом, и собственная частота может быть определена только после вычитания бесконечной энергии вакуума.

Спектр (1) соответствует принципу неопределенности:

$$\Delta E \sim \hbar\Delta\omega$$

В уравнении (1) слагаемое $1/2$ получается из неравенства Коши-Буняковского, для одномерного случая, для двумерного – $(n + 1)$, для трехмерного

$$E_n = \hbar\omega_0(n + 3/2)$$

Приведем вид волновых функций для первых трех энергетических уровней:

$$\Psi_0(t) = c_1 \exp(c_2 t^2)$$

$$\Psi_1(t) = c_2 z \exp(c_2 t^2)$$

$$\Psi_2(t) = c_3 (c_3 t^2 - 2) \exp(c_2 t^2)$$

Временная зависимость выражается соотношением

$$\Psi = \sum_{m,n} c_m c_n \exp\left[\frac{i}{\hbar} (E_m - E_n) t\right]$$

где c_i – коэффициенты.

Сделаем стационарное уравнение Шредингера безразмерным с включением отрицательной энергии:

$$\begin{aligned} \Psi' &= cz; \Psi'' = cz''; x = ft; dx = f dt \\ c &= (\hbar^2 / 2m_0 E)^2; f = (\hbar^2 / m_0^2 \omega_0)^{1/4} \\ z'' - t^2 z \pm z &= 0 \quad (4) \end{aligned}$$

Общее решение уравнения (3) имеет вид:

$$z = \Psi / c = \sqrt{\pi} \exp(C_1 \mp t^2 / 2) \cdot \operatorname{erfi}(t) + C_2 \exp(C_1 \mp t^2 / 2)$$

При вариации коэффициентов решение возможно выразить только с помощью численного счета.

Проблема корректности уравнения Шредингера

Спектр (1) можно получить также из уравнения для классического осциллятора, если представить координату в виде двумерной матрицы, т.е. дискретной, и воспользоваться квантовым коммутационным соотношением. При этом теряется классическая зависимость осциллятора от времени.

При решении уравнения не оговаривается, какими размерами должен обладать осциллятор, т.е. по Шредингеру свойство квантовости – для систем любых размеров.

Между тем, если оценить комптоновскую длину волны для, напр., человека, она окажется порядка 10^{-44} м, т.е. на 9 порядков меньше планковской длины.

Если собственная частота струны равна, скажем, 440 Гц, то ее квантовая – почти ноль.. Но эта энергия растет с номером обертона и, в конце концов, становится бесконечной.

В классической струне максимальной энергией обладает первый обертон, энергия падает с номером обертона, полная энергия струны – конечна.

В квантовом осцилляторе нет понятия амплитуды, в то же время энергия классического осциллятора растет с амплитудой.

В квантовой механике нет той ситуации, что в классической механике, нет массы, которая бы изменяла свою координату в зависимости от времени по закону косинуса.

С другой стороны, решение задачи о квантовом гармоническом осцилляторе - идеализация. Парабола является хорошим приближением только для малых колебаний вблизи положения равновесия.

Реальная зависимость энергии – несимметричная парабола.

Для колебаний большой амплитуды формула (1) непригодна, интервалы между верхними уровнями энергии и нижними не одинаковы. Для верхних уровней энергии E_n потенциальная яма шире параболы, и поэтому интервалы между этими уровнями меньше интервалов между нижними уровнями. Спектр из эквидистантного дискретного переходит в непрерывный. То есть, уравнение Шредингера автоматически ограничивает размеры системы для проявления квантовых свойств.

Таким образом, вопросы о потере времени и об отсутствии в уравнении Шредингера ограничений на размеры и массу осциллятора отпадают. Тем не менее некоторые проблемы остаются.

1. Энергетический спектр (1) получен из уравнения Шредингера, которое не определяет, к какой частице оно относится. То есть, это спектр любой частицы с массой покоя.

Спектр (1) получен из решения уравнения Шредингера с экзотическим потенциалом – с возвращающей силой $kx^2 / 2$. Пример трехмерного квантового осциллятора – атом в кристалле. Но других примеров нет.

2. Для соответствия квантовой механики и СТО в (1) должен быть предельный переход к классической механике. Однако этого перехода нет. В (1) чем выше гармоника, тем больше энергия.

Для классической пружины частота обратно пропорциональна корню квадратному из массы (момента инерции), для математического маятника частота не зависит от массы, ее аналогом выступает длина нити. Энергия непрерывной струны пропорциональна массе, но снижается при увеличении частоты:

$$E_n = (c_1 m \sin^2 c_2 n) / n^2 \quad (3)$$

где m – масса струны, c_1 , c_2 – константы (бесконечная сумма гармоник сходится за счет снижения энергии гармоник обратно пропорционально квадрату ее номера).

Аналогичная картина для всех типов классических осцилляторов. Таким образом, в квантовой механике зависимость энергии от номера гармоник обратная.

Причем эта зависимость – почти та же, что в атоме Бора, $E \sim 1/n^2$.

Кроме того, увеличение кинетической энергии – не дискретно, нет мод увеличения энергии при росте скорости.

3. Спектр (1) получен из решения уравнения Шредингера с помощью представления решения в виде степенного ряда. В этом разложении тоже нет идентификации какого-либо поля, какой-либо частицы. Это просто частица с массой, как в уравнении Ньютона.

Решение в виде ряда должно сходиться, но рассмотрение сходимости отбрасывается, просто ряд ограничивается с помощью зануления рекуррентного соотношения.

Причем не все решения отображаются степенным рядом, могут быть решения в виде негладких (с разрывами) или не аналитических функций. Нет общего метода определения области сходимости ряда для произвольной функции. Во-вторых, ряд может плохо приближать функцию вблизи границ области сходимости.

Кроме того, уравнение допускает решение в виде ряда с отрицательными степенями (для обратной функции), то есть, с отрицательными энергиями.

Например, соотношение, устанавливающее существование позитронов

$$E = \pm \sqrt{(\pm mc^2)^2 + p^2 c^2}$$

Можно представить в виде, устанавливающем существование отрицательных масс:

$$m = \pm \sqrt{E^2 - p^2 c^2}$$

По теореме о спектре в задаче Штурма-Лиувилля спектр уравнения Штурма-Лиувилля всегда ограничен снизу. Т.е. всегда имеется наименьшее значение спектра и оно конечно, ограничение степенного ряда относится и к отрицательным степеням.

Те. дискретные решения для квантового осциллятора – это лишь частное решение.

Уравнение поля Хиггса допускает решения с отрицательной массой. См. также [4, 5].

СТО и квантовая механика

Существуют ли аналогии между СТО и квантовой механикой? Можно ли состояние покоя считать вакуумным?

В Стандартной модели заряды обмениваются продольными (виртуальными) фотонами, массы – исключительно виртуальными гравитонами.

Чем обмениваются магнит и проводник?

Для квантовой частицы в потенциальной яме ненулевое низшее состояние – аналогично вакууму, хотя это не отсутствие частиц.

Вакууму электромагнитного поля соответствует спектр (1), но n уже не натуральное число, а квантовый оператор, выраженный через операторы рождения-уничтожения в фокковском пространстве: $n = a^+ a$.

Таким образом, электромагнитное поле можно представить как бесконечную сумму квантовых осцилляторов, с той разницей, что (1) представляет не спектр частот, а одну и ту же частоту для разного количества фотонов с энергией $E = \hbar \omega$.

Но энергетический спектр разных полей, скалярных, массивных скалярных, спинорных и пр., не тождественен (1), он разный, т.к. уравнения полей разные. Соответственно, и выражение для нулевой энергии различается для разных полей.

Энергия фотона – $\hbar \omega$, но первая мода – другая, $(3/2)\hbar \omega$. То есть, чтобы получить энергию первой моды, нужно сначала вычесть бесконечную энергию нулевой моды.

Инертная масса электромагнитного поля (ЭМП) поля выражается через энергию, напр., через сумму квадратов магнитной и электрической напряженностей. В связи с наличием инертной массы ЭМП может быть системой отсчета. В принципе волны являются специфическими системами отсчета [6-9].

При квантовании точно так же исчезает классическая зависимость осциллятора от времени.

Для волнового описания отдельной частицы, обладающей массой покоя, необходимо просуммировать некоторое количество волн, обладающих близкими частотами, и в таком случае волновая функция будет заметно отлична от нуля лишь в некоторой, сравнительно небольшой области пространства. Получится волновой пакет. Его групповая скорость — это кинематическая характеристика диспергирующей волновой среды, обычно интерпретируемая как скорость перемещения максимума амплитудной огибающей узкого квазимонохроматического волнового пакета.

Взаимодействие с вакуумом переводит электроны с возбужденных орбит на основные (лэмбовский сдвиг). Вакуум также порождает квантовый орбитальный момент [10, 11].

Уравнение Шредингера дает стационарные орбиты. Без спонтанного перехода с возбужденных орбит на основные. Спонтанные переходы осуществляются вследствие взаимодействия электрона с вакуумом. Однако решение уравнения Шредингера содержит вакуум.

Массовая длина волны

Квантуется не масса – и не нулевая частота. Это параметры. Квантуется энергия. Вполне вероятно, что энергия покоя частиц в СТО – связана с основным состоянием соответствующего поля.

$$E_n = \hbar \omega_0 (n + 3/2)$$

$$E_0 = mc^2 = \hbar \omega_0 \quad (5)$$

$$E_0^{field} = \frac{3}{2} E_0^{particle}$$

То есть, нулевая мода соответствует массе покоя колеблющейся массы.

Возможно ли, что увеличение энергии при повышении скорости частицы имеет дискретный характер – при малости разницы близлежащих уровней, как на Рис. 1?

Очевидно, что в рамках СТО нет места дискретному спектру энергии при увеличении скорости частицы.

4. Энергия покоя связана с комптоновской длиной волны h/mc . То есть. соединение СТО и квантовой механики дает известную комптоновскую длину. Чем больше масса покоя, тем больше энергия нулевых колебаний.

Комптоновская длина волны не связана с размерами частиц, для покоящейся частицы массы она определяет период вращения амплитуды вероятности, квадрат которой является вероятностью того, что частица переместится из одной точки 4-пространства-времени в другую. Для покоящейся частицы это перемещение происходит только во времени, но не в пространстве. Аналогично волна Де Бройля (волна Комптона для любых скоростей) тоже не связана с размерами частицы, это волна амплитуды вероятности, определяющая плотность вероятности обнаружения тела в заданном интервале конфигурационного пространства. Данные конструкции не всегда адекватны, например, уравнение для энергии частицы:

$$E = mc^2 / \sqrt{1 - (\lambda \omega / 2\pi)^2 / c^2}$$

Для фотона нет массы покоя, если подставить его скорость, получим неопределенность.

С другой стороны, комптоновская длина обратна размерам частиц. Так, для электрона она $\sim 10^{-13}$, а для протона, естественно, 10^{-16} . При этом соотношение их размеров обратное, для электрона – 10^{-18} , для протона – $0,9 \times 10^{-15}$. Прямой зависимости от массы соответствует гравитационный радиус

$$r_s = 2Gm/c^2.$$

Гравитационная энергия шара

$$U = - Gm^2/r$$

Для фотона (без учета спина фотона) вместо массы покоя нужно подставить импульс, деленный на скорость света p/c :

$$U = - Gp^2 / rc^2 = -G\hbar c l_{Pl}^2 / \lambda_{Comp}^3$$

$$r_s = 2Gp / c^3 = 2G\hbar / \lambda_{Comp} c^3$$

λ_{Comp} - комптоновская длина, l_{Pl} – планковская длина

$$l_{Pl} = \sqrt{G\hbar / c^3}$$

Но эта конструкция для протона имеет порядок 10^{-57} м, т.е. на 42 порядка меньше, чем размер протона. Во-вторых, в эту конструкцию не входит постоянная Планка. Конструкцию можно модифицировать, например:

$$\lambda_s = [2Gm / c^2][\lambda_{Comp} / (\alpha l_{Pl})]^2$$

где α - постоянная тонкой структуры.

В этом случае размеры частиц, выраженные через длину волны Шварцшильда, казалось бы, соответствует массам электрона и протона. Однако данная конструкция ведет к той же длине волны Комптона, поскольку

$$r_{Sh} = 2l_{Pl}^2 / \lambda_{Comp}$$

Можно сконструировать выражение с постоянной Планка и с угловым моментом протона. Однако в таком случае постоянная Планка сократится.

Адекватнее выглядит конструкция $\sigma = \hbar c / Fl_{Pl}$, где F – сила Кулона, действующая между двумя протонами в ядре гелия. Тогда

$$\lambda_s = \sigma r_s = \zeta \hbar m \sim r_p$$

Таким образом, наряду с комptonовской длиной волны и длиной волны де Бройля можно ввести длину волны Шварцшильда, соответствующую размерам частиц.

Этой длине волны соответствует частота, которая снижается при увеличении массы, для звездных систем - почти до нуля.

Т.к. для более тяжелых кварков те же размеры, что для электрона, у менее тяжелых мезонов те же размеры, что у протона, для полного соответствия нужно ввести безразмерный квантовый параметр, характеризующий частицу: $\eta \in (0,10)$, который является дискретным, но не целым, наподобие полного углового момента частицы, и для протона и электрона равен единице:

$$\lambda_s = \eta \frac{2}{F} \sqrt{\frac{G}{c}} \sqrt{\hbar m} \quad (6)$$

Таким образом, элементарные частицы предстают как струны с частотами, которые для протона превышают частоту гамма-квантов: порядка 10^{24} Гц, что соответствует частоте, рассчитанной по формуле (2). То есть, сами частицы есть основное (вакуумное) состояние в некоем изопространстве.

Частота дрожания протона и других частиц (см. (2)) приобретает смысл энергетического выражения состояния изопространства.

Объекты величиной с 1 м должны были бы иметь частоту порядка сотен мегагерц, для Солнца – порядка 1 Гц, что, очевидно, не имеет физического смысла и указывает на область ограничения законов квантовой механики размерами системы.

В отличие от изоспина параметр связывает не только разные кварки, но и разные классы частиц. Таким образом, частицы представляются как классические струны, с увеличением длины волны (не частоты!) растет энергия.

Для классической струны частота обратно пропорциональна корню квадратному из массы и длины:

$$\omega \propto 1 / \sqrt{ml} = const / \sqrt{mm} = const / m.$$

Таким образом, с учетом (6) аналогия частиц с классической струной продолжается и на зависимость частоты от массы. Для частицы со спином

$$L = J\omega = \hbar \sqrt{s(s+1)}; \omega = \frac{\hbar}{J} \sqrt{s(s+1)}; J \propto m; L \propto \frac{1}{m}$$

В теории струн для адронов (пионов) обратная картина, в теории струн момент импульса

$$L = \hbar \sqrt{s(s+1)} \propto m^2 \quad \text{и} \\ E = \hbar \omega(n + 1/2)$$

Таким образом, в теории струн нет перехода от квантовой к классической механике.

Отметим, что частота вращения, зависящая от спина, не связана с частотой колебаний в (1).

Кроме того, в нашей конструкции в отличие от теории струн каждая частица – не отдельная струна, а все частицы – это одна и та же струна с разными гармониками. Таким образом, данное построение – это

возврат к модели реджеонов, в которой уже не разные адроны, но все элементарные частицы рассматриваются как различные проявления единого протяжённого объекта.

Можно также использовать радиус сильного взаимодействия $\approx 10^{-15}$ м.

Однако необходимо подчеркнуть, что размеры частиц не обязательно пропорциональны массе. Так, масса электрона $0,9 \times 10^{-30}$, массы мюона и каона $- 2 \times 10^{-28}$, размер $- 10^{-15}$ м. Размеры кварков – как у электрона, массы 2,3 верхний, 4,8 нижний, т.е. больше 0,511 электрона на порядок. В то же время должны были бы существовать частицы «два протона», «два электрона» и т.д. Таким образом, если версия реджеонов имеет место, она должна быть скорректирована.

Космологический вакуум

Гравитационная энергия отрицательной плотности вакуума выражается через закон тяготения (со знаком плюс)

$$U = GM^2 / r$$

Можно ли сопоставить расходимости в вычислении энергии вакуума и расходимость гравитационной энергии в точке?

Вакуум – это отсутствие частиц. В основном, наинизшем, состоянии электромагнитного поля фотоны отсутствуют.

Средние значения электрического и магнитного полей в вакуумном состоянии равны нулю, но средние значения квадратов этих величин больше нуля.

Экспериментальные исследования эффекта Казимира показывают наличие вакуума электромагнитного поля. Всем прочим полям, скалярным, спинорным и др. соответствуют другие граничные условия.

При расчете вакуумных средних массивных полей используют уравнения полей, в которых фигурирует инертная масса. Но в вакууме этих полей нет инертной массы.

Можно ли поставить вопрос, каким образом квантовые поля, переходя в основное состояние, теряют инертную массу?

В отличие от конденсата вакуум не образуется путем скатывания системы к минимальной потенциальной энергии. Вакуум полей всегда присутствует в системе.

Как только полевая система «скатывается» на низший уровень, она теряет свойство быть системой отсчета. Несмотря на различия, возможно, состояние конденсата может иметь черты вакуума поля в релятивистском смысле.

Космологический вакуум имеет отрицательную плотность, которая при расширении Вселенной не меняется. То есть, расширение Вселенной есть процесс увеличения отрицательной массы космологического вакуума.

Космологический вакуум обладает отрицательной плотностью и, соответственно, отрицательной массой. Следовательно, он должен расталкивать галактики на любых расстояниях. То есть, закон Хаббла проявляется не только на больших расстояниях.

Космологический и другие вакуумы не имеют инертной массы, они не тормозят электромагнитные волны, но имеют гравитационную массу.

С другой стороны, космологический вакуум имеет гравитационную массу, но не имеет массы инертной, его нельзя сдвинуть с места. Таким образом, у космологического вакуума гравитационная масса не равна нулевой инертной массе. Следовательно, принцип эквивалентности не выполняется.

Космологический и другие вакуумы не могут быть системой отсчета, во Вселенной каждая точка есть центр. Космологический вакуум, вследствие равенства нулю инертной массы, обеспечивает принцип относительности.

Электромагнитный вакуум может порождать электрон-позитронные пары. Следовательно, другие вакуумы, в том числе космологический, тоже могут порождать пары соответствующих частиц.

Если у вакуума нет инертной массы, то нет и закона сохранения массы.

Однако откуда берется отрицательная гравитационная масса космологического вакуума при расширении Вселенной?

Если квадрат интервала $ds^2 > 0$, то события разделены времениподобным интервалом; если меньше нуля - пространственноподобным, в случае равенства нулю - интервал светоподобный.

Инвариантность интервала означает, что он имеет одинаковое значение в любых инерциальных системах отсчёта. О событиях, интервал между которыми времениподобен или светоподобен, всегда можно сказать, что одно событие произошло до другого (т.е. эти события можно упорядочить во времени, и их последовательность будет одинаковой в любой ИСО). Эти события могут быть связаны причинно-следственными связями. В событиях, интервал между которыми пространственноподобен, нет определённой последовательности: если в одной системе отсчёта два события произошли в моменты времени, можно найти другую инерциальную систему отсчёта, в которой события произошли в моменты времени в другом порядке. То есть, такие события не могут быть связаны причинно-следственными связями.

Чтобы принцип причинности выполнялся, нужно положить в интервале $g_{00} dt^2 = 0$, что, возможно, связано с алгеброй Грассмана, в которой внешний квадрат произвольного вектора равен нулю.

Таким образом, для причинно связанных пространственновременных событий $ds^2 = - dx_i dx^i$.

Например, на радиусе Шварцшильда коэффициент перед dt^2 равен нулю:

$$g_{00} = 1 - r_{sh} / r$$

То есть, интервал - пространственноподобный, но причинность не нарушается. На поверхности Шварцшильда останавливается время. За ней оно не идет вспять, а меняется местами с пространством.

В координатах Леметра $g_{00} = 1$, но при $r = r_s$ $g_{rr} = \infty$:

$$d\tau = dt + \sqrt{r_s / r} / (1 - \frac{r_s}{r})^{-1} dr$$

Дело в том, что вблизи черных дыр нет инерциальных систем отсчета, поэтому системы отсчета неравноправны.

Интегрировать определённое через g_{ik} расстояние нельзя, так как результат зависел бы от мировой линии, по которой бы велось интегрирование. Таким образом, в общей теории относительности понятия расстояния между далёкими объектами в трёхмерном пространстве теряет смысл. Единственное исключение — ситуация, в которой метрический тензор g_{ik} не зависит от времени.

Для малых объемов с высокой плотностью энергии вакуума $g_{00} = 0$.

Для планковской вселенной нет не только временной, но и пространственной формы, т.к.

$$g_{rr} = (1 - r_g / r)^{-1} \sim 0$$

Для вакуума, когда вещества нет вообще, $g_{00} = 1$.

Таким образом, из планковской Вселенной возникает не только масса вещества, но и масса космологического вакуума, который заполняет возникающую пространственно-временную форму.

Ограничение объема поля эквивалентно незначительному искривлению пространства. Т.е. для вакуума

$$\langle T_{ik} \rangle = 1 - \beta / r^3$$

То есть, плотность энергии всегда больше нуля. В эффекте Казимира поверхности либо притягиваются, либо отталкиваются потому, что $1 - \beta$ — это аналог $1/2$, в (1), она вычитается как нулевая энергия.

Таким образом, с учетом вклада вакуума в полную массу формулу для радиуса Шварцшильда необходимо скорректировать:

$$r_{sh} = 2G(m + m_{vac}) / c^2 = \sqrt{2\pi c^2 / 3G(\rho + \rho_{vac})} \quad (7)$$

Следовательно, при отрицательной плотности вакуума, превышающей плотность вещества, из (7) следует, что массы становятся не отрицательными, а мнимыми.

С другой стороны, при отрицательной плотности вакуума для образования черных дыр требуется БОльшая масса. Верно ли это? Плотность энергии вакуума в эффекте Казимира для сферы

$$\varepsilon = \frac{c_1}{r^4} > 0$$

Соответственно, сила, действующая на стенки — это сила отталкивания.

Плотность обычного вещества $\rho \propto 1/r^3$. Равенство отрицательной плотности электромагнитного вакуума и положительной плотности вещества достигается при выполнении соотношения

$$m / r^3 = const / r^4$$

$$r = 0,046 \cdot \frac{3\hbar}{4\pi c} \frac{1}{m} \approx 10^{-2} \frac{\hbar}{mc} \quad (8)$$

(8) может выполняться только для объектов типа мезонов, т.е. вакуум практически не оказывает влияния на физику черных дыр, не может и быть макроскопических объектов с нулевой массой.

Радиус Шварцшильда для планковской Вселенной – $3,225 \times 10^{-35}$ м, планковский радиус – $1,62 \times 10^{-35}$ м, вдвое меньше. Следовательно, можно предположить, что планковская масса была вдвое меньше, и, соответственно, плотность вакуума в планковской вселенной составляла примерно $1,09 \times 10^{-8}$ кг со знаком минус. В таком случае радиус планковской Вселенной равен шварцшильдовскому.

Если же масса вакуума в планковской Вселенной было равна массе вещества, то возникает неустойчивость, квантовая флуктуация в виде частицы с положительной массой может «нарастать», из нее может произойти Вселенная. Однако если посчитать энергию Казимира электромагнитного поля для планковской Вселенной, она оказывается на два порядка ниже планковской массы и тоже не оказывает влияния на физику ранней Вселенной. Следовательно, отрицательная масса вакуума не может уменьшить радиус Шварцшильда для планковской Вселенной.

Если предполагать, что массу планковской Вселенной всё же снижает эффект Казимира, должен существовать вакуум иного, не электромагнитного поля, который снижает массу планковской Вселенной настолько, чтобы ее размер стал больше радиуса Шварцшильда для того, чтобы Большой взрыв мог состояться. Но это поле не нужно. Масса гравитационной энергии в планковской Вселенной

$$m_g = -\frac{Gm_{pl}^2}{c^2 r_{pl}} = -m_{pl} = -2,176 \cdot 10^{-8} \text{ кг}$$

То есть, полная масса планковской Вселенной равна нулю. Больше того, с учетом эффекта Казимира эта масса немного меньше нуля. Это означает, в частности, что масса современной Вселенной никак не может быть компенсирована гравитационной энергией.

Если коллапсирующее тело вращается, центробежные силы уменьшают силу гравитационного притяжения. В том случае, если энергия вращения равна или больше гравитационной энергии, то это означает образование голой сингулярности. В классическом случае

$$J\omega^2 / 2 \geq Gm^2 / r; \frac{1}{5}mr^3\omega^2 \geq Gm^2$$

Подставляя $r_g = 2Gm / c^2$; $v = \omega r$, получим для скорости на поверхности черной дыры

$$v \geq \sqrt{5/8}c \approx 0,8c$$

Учет эффектов теории относительности, который вытекает из ограничения для черной дыры Керра-Ньюмена, при заряде, равно нулю

$$L / m = Gm / c$$

дает следующее выражение для скорости на поверхности черной дыры

$$v \geq c / 2$$

Нет никаких запретов, чтобы ограничение на скорость вращения было преодолено. С другой стороны, тело не обязано быть черной дырой, его радиус может быть чуть больше радиуса Шварцшильда. В таком случае тоже ничто не препятствует уравнивать центробежную силу с силой гравитации. Таким образом, данные расчеты ставят под вопрос как сильный принцип космической цензуры Пенроуза, так и слабый.

Отрицательная масса гравитационной энергии или вакуума какого-либо поля может играть роль центростремительной силы. Для планковской Вселенной отсутствуют и удаленный наблюдатель, и временные изменения. Но «индетерминизм» может проявляться и без наблюдателя.

В частности, индетерминизм может выражаться в форме принципа неопределенности. Неопределенность в координате и времени может привести к флуктуациям метрики над состоянием с отсутствием временной и пространственной форм. В этом случае квантовая метрика приобретает смысл флуктуации, но место комптоновской длины занимает полученная выше длина волны Шварцшильда:

$$\sqrt{g_{ii}} = \lambda_{comp} \rightarrow \lambda_s; \sqrt{g_{00}} = \hbar / mc^2$$

где длина волны и масса – характеристики уже не планковского сгустка, а единой элементарной частицы, максимона [12]. Эти флуктуации могут быть спусковым механизмом для возникновения метрики Минковского.

Заключение

1) Поскольку на сфере Шварцшильда нет временной формы, нет закона сохранения чего-либо во времени. Поэтому масса на сфере Шварцшильда может появляться появляется «ниоткуда».

Тем самым становится понятнее вопрос о Большом взрыве: каким образом он мог состояться, ведь для того, чтобы он произошел, в планковской Вселенной должны были произойти какие-то изменения. Но как могли они происходить, если времени еще не существовало? Следовательно, изменения в планковской Вселенной, подобной черной дыре, происходили вне временной формы. Поскольку трехмерное многообразие вложено в четырехмерное, трехмерное пространство планковской Вселенной генерирует время.

В N -мерном мире должны нарушаться причинно-следственные связи при явлениях в мире $N+1$, затрагивающих только дополнительную координату, а также законы сохранения физических величин. 2) Поскольку физическое поведение сингулярностей неизвестно, если сингулярности можно наблюдать из остального пространства-времени, причинно-следственная связь может нарушиться. Утверждается, что нарушение космической цензуры приводит к нарушению детерминизма, потому что пока невозможно предсказать поведение пространства-времени в причинном будущем сингулярности.

Принцип слабой космической цензуры утверждает, что не может быть сингулярности, видимой из будущей нулевой бесконечности (области на границе асимптотически плоского пространства-времени, конечной точки всех нулевых геодезических в пространстве Минковского). Сингулярности должны быть скрыты от наблюдателя на бесконечности горизонтом событий черной дыры.

Принципа сильной космической цензуры утверждает, что общая теория относительности является детерминированной теорией в том же смысле, в каком классическая механика.

Подчеркнем, что принцип космической цензуры – лишь гипотеза, основанная на предположении. С другой стороны, квантовая механика нарушает детерминизм классической физики, она приводит к новому, не механистическому пониманию детерминизма. В целом причинно-следственная связь есть лишь частность: «Каузальность, понимаемая нами обычно есть лишь часть всемирной связи» [13].

3) Остается открытым вопрос: мог ли космологический вакуум быть причиной инфляции?

Литература

1. А. Жук, Х. Клейнерт, Эффект Казимира при ненулевой температуре в закрытой Вселенной Фридмана, ТМФ, 1996, том 109, номер 2, 307–320 DOI: 10.4213/tmf1229
<https://www.mathnet.ru/links/8e8136824d9407f14d1912de2a47b296/tmf1229.pdf>
2. Лу, Т.; Ван, Мингканг; Нг, К. Ю.; Николич, М.; Чан, К. Т.; Родригес, Алехандро; Чан, Х. Б.; и др. (9 января 2017 г.). "Измерение немонотонных сил Казимира между кремниевыми наноструктурами". Фотоника природы. **11** (2): 97-101. doi:10.1038/nphoton.2016.254. S2CID 119327017.
3. Ван, Мингканг; Тан, Л.; Нг, К.Ю.; Мессина, Риккардо; Гизал, Брахим; Кросс, Дж. А.; Антецца, Мауро; Чан, К. Т.; Чан, Х. Б.; и др. (26 января 2021 г.). "Сильная геометрическая зависимость силы Казимира между взаимопроницаемыми прямоугольными решетками". Nature Communications. **12** (1): 600. doi: 10.1038 / s41467-021-20891-4. PMC 7838308. PMID 33500401.
4. Ихлов Б. Л. Квантовый космологический вакуум. С. 130-135. Материалы V Российской конференции «Основания фундаментальной физики и математики», М., РУДН, 11-12 декабря 2021 г.
5. Ихлов Б. Л. О гипотезе вращения Вселенной. Научное обозрение. 2022. №1.
<https://physics-mathematics.ru/article/view?id=105>
6. J. S. Farnes. A unifying theory of dark energy and dark matter: Negative masses and matter creation within a modified Λ CDM framework. Vol. 620, December 2018.
7. Неинерциальные системы отсчета и квантовой механике
<https://cyberleninka.ru/article/n/fizika-neinertzialnyh-sistem-otschyota-i-kvantovaya-mehanika/viewer>
8. Стоячие волны как система отсчета <https://cyberleninka.ru/article/n/stoyachie-volny-kak-sistemy-otscheta-klassicheskaya-model-relyativistskogo-prostranstva-vremeni/viewer>
9. Владимиров Ю. С. Системы отсчета в теории гравитации. М., Энергоиздат, 1982. 256 с.
10. Ихлов Б. Л. О гипотезе вращения Вселенной. Научное обозрение. 2022. №1.
<https://physics-mathematics.ru/article/view?id=105>
11. Ихлов Б. Л. Квантовый космологический вакуум. С. 130-135. Материалы V Российской конференции «Основания фундаментальной физики и математики», М., РУДН, 11-12 декабря 2021 г.
12. Ихлов Б. Л. К гипотезе возникновения Вселенной из квантовой флуктуации. Основания фундамент. физики и математики. Мат-лы VII рос. конференции 8-9.12.2023. М., РУДН. С. 178-187.
13. В. И. Ленин. Философские тетради. ПСС. Т. 29.