О ПРИЧИНАХ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

Ихлов Б. Л.

Обзор

Аннотация
Пояснена физика взрыва. Показано, что решение Шварцшильда неполно и может не иметь сингулярности. Рассмотрены типы неустойчивости черной дыры. Показано, что в СТО вращение может остановить коллапс. Рассмотрены версии отрицательной массы, белой дыры, вакуума, инфляционного механизма, взрыва черной дыры и распада максимона как источника Большого взрыва. Показано, что физика черных дыр близка к физике элементарных частиц.
Ключевые слова: гравитационный радиус, вращение, давление, нейтроний

Введение. Феноменология взрыва
В основе классических физических взрывов лежит быстрое изменение состояния системы с выделением большого количества энергии, приводящее к образованию, например, разогретых газов с высоким давлением или к росту внутреннего давления, которое превышает предельно допустимые значения.
К физическим относятся взрывы: взрывы сосудов с газами и оборудования, работающих под давлением; за счёт энергии фазового перехода «жидкость – кристалл».
Взрыв возникает из-за химических и ядерных реакций, а также из-за разогрева сжатого вещества. Так же взрыв возникает при сжатии паров вскипающей жидкости, в результате внешнего подогрева сосуда, наполненного горючей легкокипящей жидкостью. Существуют электрические, вулканические взрывы, взрывы при столкновении космических тел (например, при падении метеоритов на поверхность планеты), взрывы, вызванные гравитационным коллапсом (взрывы сверхновых и др.).
Взрывы за счет энергии фазового перехода связаны прежде всего с процессами вскипания и испарения, происходящими настолько интенсивно, что возникающие возмущения среды формируют сильные волны давления. Причины, вызывающие такие взрывы: вскипание расплавов; быстрая (мгновенная) перекристаллизация расплава, т.е. быстрое образование кристалла.
Например, при смешении горячей и холодной жидкостей, когда температура одной из них значительно превышает температуру кипения другой (например, при выливании расплавленного металла в воду), может быть детонация.
На первой стадии происходит превращение того или иного вида энергии в энергию сильно сжатых газов и паров. Вторая стадия – мгновенное расширение сильно сжатых газов и паров.
Для возникновения взрыва необходимы три условия, являющиеся и его характеристиками: экзотермичность, скорость процесса и газообразование.

Превращение вещества сопровождается выделением свободной энергии лишь в том случае, если вещество обладает запасом энергии. Последнее означает, что микрочастицы вещества находятся в состоянии с энергией покоя большей, чем в другом возможном, переход в которое существует. Самопроизвольному переходу всегда препятствует энергетический барьер, для преодоления которого микрочастица должна получить извне какое-то количество энергии — энергии возбуждения. Экзоэнергетическая реакция состоит в том, что в следующем за возбуждением превращении выделяется энергии больше, чем требуется для возбуждения процесса. Существуют два способа преодоления энергетического барьера: либо за счёт кинетической энергии сталкивающихся частиц, либо за счёт энергии связи присоединяющейся частицы.

Деление тяжелого ядра возбуждается одним нейтроном, а в результате появляется более одного нейтрона (в среднем равно от 2 до 3). Следовательно, процесс деления может породить разветвлённую цепную реакцию, носителями которой будут служить нейтроны. Если скорость потерь нейтронов (захватов без деления, вылетов из реакционного объёма и т. д.) компенсирует скорость размножения нейтронов таким образом, что эффективный коэффициент размножения нейтронов в точности равен единице, то цепная реакция идёт в стационарном режиме. Если коэффициент размножения больше единицы, цепная реакция развивается экспоненциально.
При взрыве происходит экспоненциальный рост характеристик.
При детонации тротил подвергается разложению, равносильному химической реакции

$$2\ C_7H_5N_3O_6 \rightarrow 3\ N_2 + 5\ H_2 + 12\ CO + 2\ldots$$

плюс некоторые реакции

$$H_2 + CO \rightarrow H_2O + C \text{ и } 2\ CO \rightarrow CO_2 + C.$$

Реакция является экзотермической, но имеет высокую энергию активации (в газовой фазе ~62 ккал/моль). В конденсированных фазах (твердой или жидкой) энергия активации значительно ниже и составляет примерно 35 ккал/моль из-за уникальных бимолекулярных путей разложения при повышенных плотностях. Из-за образования углерода при взрыве ТНТ выделяется сажа. Поскольку в тротиле содержится избыток углерода, взрывчатые смеси, напр., аматол (смесь тротила с аммиачной селитрой) с соединениями, богатыми кислородом, могут выделять больше энергии на килограмм, чем один только тротил.

Тринитротолуол может быть взорван с помощью детонатора большой мощности или при сильном сотрясении В течение многих лет тринитротолуол использовался в качестве эталона для определения степени чувствительности. Тринитротолуол имел рейтинг 100 по шкале «F of I». С тех пор эталон был заменен на более чувствительное ВВ - RDX, которое имеет рейтинг 80 по шкале «F of I».

Скорость детонации зависит от диаметра заряда ВВ, плотности заряжания, наличия оболочки, дисперсности частиц ВВ, критического диаметра заряда ВВ и ширины зоны химической реакции.

Большой взрыв не есть взрыв в пустом пространстве, когда вещество начинает расширяться из небольшого объёма в окружающую пустоту, образуя сферическое газовое облако с чётким фронтом расширения, за пределами которого — вакуум. Большой взрыв происходил во всех точках пространства одновременно, нельзя указать на какую-либо точку как на центр взрыва, в пространстве нет крупномасштабных градиентов давления и плотности и нет границ или фронтов, отделяющих расширяющееся вещество от пустоты.

Однако, возможно, изложенная феноменология может быть аналогична процессам, протекавшим при БВ.

Постановка вопроса

Выпишем метрику сферического тела

$$ds^2 = A(r,t)dt^2 - B(r,t)(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) - C(r,t)dr^2$$

Подобно стационарному уравнению Шредингера, которое не допускает переходом электронов в атоме с орбиты на орбиту, решение Шварцшильда тоже является стационарным, коэффициенты A, B, C не зависят от времени. Поэтому ожидать от него каких-то качественных переходов типа взрыва в процессе сжатия не приходится.

Ситуация подобна термодинамике: при критических температурах теплоемкости обращаются в бесконечность, но на уравнении это никак не сказывается, скажем, в адиабате бесконечности сокращаются.

Масса сердцевины звезды после выгорания термоядерного топлива должна составлять не менее 2,5 масс Солнца. Давление вещества не способно удержать столь большую массу от сжатия до состояния черной дыры.

Вместе с тем, существует верхний предел массы вырожденного электронного газа, предел Чандрасекара, за которым давление газа не может удержать звезду от коллапса - 1,44 масс Солнца для объектов с типичным составом, ожидаемым для белых карликов (углерод и кислород с двумя барионами на электрон). В ОТО и с реалистичными кулоновскими поправками соответствующий предел массы составляет около 1,38 массы Солнца. Предел может меняться в зависимости от химического состава объекта. Вращение изменяет предел.

Для крайне массивных звезд, с массой больше 100 Солнц, сжатие не происходит, в основном, из-за сильного светового давления. Для звезд массивнее 200 Солнц ни газодинамического, и ни светового давления оказывается недостаточно, чтобы предотвратить коллапс – если нет вращения.

Верхний предел массы вырожденного нейтронного газа (нейтрония), предел Толмена-Оппенгеймера-Волкова, аналогичен пределу Чандрасекара и составляет всего 0,75 масс Солнца, что не стыкуется с расчетами предела Чандрасекара.

Но в более реалистичных моделях, включающих барионное взаимодействие, точный предел не установлен, т.к. он зависит от уравнений состояния ядерной материи, для которой не существует точной модели. Предел оценивают в 2,5 - 3,2 масс солнца.

Давление нейтронного газа зависит только от его плотности:

$$p = K(N/V)^{4/3} = K(M/mV)^{4/3} = K_1 \rho^{4/3} \sim 1/r^3$$

Коллайдер ускоряет только заряженные частицы. Поэтому там используются протоны, а не нейтроны. Однако в черной дыре условия могут имитировать разгон частиц на коллайдере. Ускорение свободного падения на поверхности черной дыры порядка 10^9 g. Поэтому в нейтронных звездах могут протекать неизученные ядерные реакции типа столкновения нейтронов или ядерные реакции на уровне кварк-глюонной плазмы. Есть версия, что нейтроны могут распадаться на гамма-лучи и темную материю. Предполагается, что в нейтронных или кварковых звездах может находиться кварк-вырожденная материя.

Так или иначе, в метрике Шварцшильда не отражен баланс между давлением и притяжением, отсутствует скачкообразная зависимость сжатия от массы звезды.

Современное состояние Вселенной – почти плоское, эффекты ОТО почти не значимы. Как, в таком случае, плоская Вселенная может расширяться, если эффектов ОТО почти нет и, соответственно, уравнения Фридмана должны перейти в уравнение Ньютона?
Как мог произойти Большой взрыв? Ведь радиус планковской Веленной – вдвое меньше гравитационного.

Большой взрыв начался с нулевой отметки по времени и длился с 10^{-43} сек до 10^{--42} сек. Сразу после него началась инфляция, продолжавшаяся до 10^{-36} сек.
Вселенная сразу после БВ должна была быть не только чрезвычайно плотной, но и чрезвычайно горячей. При таких высоких температурах большая часть содержимого Вселенной находилась бы не в виде вещества, а в виде интенсивного излучения. Этот радиационная эра.
Однако для взрыва необходим некий фактор, который сдерживает силу отталкивания, как стенки сосуда в случае расширяющегося газа.
В качестве альтернативной причины Большого взрыва и последующей инфляции выдвигают гипотезу отрицательной материи. Источником отталкивания в планковской Вселенной может быть отрицательная плотность вакуума. Дело в том, что полная масса Вселенной с учетом гравитационной энергии равна нулю [1], вакуум, например, электромагнитного поля дает небольшой отрицательный вклад [2].
Можно также предположить, что планковская Вселенная была белой дырой.

Версия отрицательной массы
Метрика черной дыры

$$g_{ik} = \mathrm{diag}\,(1 - r_s/r : -(1 - r_s/r)^{-1} : r^2 : r^2 \sin^2\theta)$$

Утверждается, что решение Шварцшильда для параметра отрицательной массы имеет голую сингулярность в фиксированном пространственном положении.
Однако ничто не мешает поменять знак массы, с учетом того, что единица соответствует кинетической энергии:

$$ds^2 = -(1 - r_g / r)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\varphi^2 + (1 - r_g / r) dt^2$$

Получаем, что сингулярность сохраняется.
Можно решить уравнение Шварцшильда с отрицательной массой, не нарушая энергетических условий. Отрицательная масса может возникать из-за области пространства, в которой составляющая напряжения тензора энергии-импульса больше по величине, чем плотность массы.
Однако на существование отрицательного вещества накладываются некоторые ограничения. Отрицательная масса не может существовать в асимптотически плоском пространстве-времени.
В ОТО Вселенная описывается как риманово многообразие, связанное с метрическим тензором уравнениями Эйнштейна. В таких рамках убегающее движение запрещает существование материи с отрицательной массой.
В то же время существует механическая модель, которая иллюстрируется ядром с массой m_1 , соединенных внутри через пружину с постоянной жесткостью со снарядом массой m_2 . На систему действует внешняя синусоидальная сила. Если решить уравнения движения масс и заменить всю систему одной эффективной массой, то

$$m_{eff} = m_1 + m_2\omega^2 / (\omega_0^2 - \omega^2)$$

Когда частота уменьшается из области больших частот, то эффективная масса будет отрицательной. Такой системой является, например, газ свободных электронов в ионной решетке.

Отрицательная масса возникает в результате колебания металлической частицы с частотой, близкой к частоте плазменных колебаний электронного газа относительно ионной решётки.
Можно наблюдать эффективную отрицательную массу в атомах рубидия. снизив температуру почти до абсолютного нуля, создав конденсат Бозе-Эйнштейна. Используя лазерную ловушку, можно обратить вспять спин некоторых атомов рубидия, и после выхода из ловушки атомы расширяются и проявляют свойства частиц с отрицательной массой, в частности ускоряются в направлении силы, а не прочь от неё. Этот вид отрицательной эффективной массы аналогичен хорошо известной кажущейся отрицательной эффективной массе электронов в верхней части полосы дисперсии в твёрдых телах.
Некоторые ещё не открытые композиты сверхпроводимости, метаматериалов и нормального вещества могут проявлять признаки отрицательной эффективной массы во многом так же, как низкотемпературные сплавы плавятся при температуре ниже точки плавления их компонентов или некоторых полупроводников с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Однако ни один из этих случаев не является отрицательной массой в смысле ТЭИ.
Таким образом, ОТО, исключая отрицательную массу, вступает в противоречие с ньютоновской физикой и квантовой механикой, где такая масса возможна.

Пока что констатируем, что отрицательная масса соответствует внутреннему пространству черной дыры с положительной массой, где время меняется с пространством – но внешнему (за горизонтом событий) пространству черной дыры с отрицательной массой.

Версия белой дыры
Не исключена возможность, что планковская Вселенная была белой дырой.
Для внешнего наблюдателя белая дыра выглядит как взрывное рождение вещества. Вследствие неустойчивости белая дыра должна существовать во Вселенной с самого начала её расширения, она не может родиться позднее — например, в процессе гравитационного коллапса.
Предполагается, что белые дыры могут образовываться при выходе из-за горизонта событий вещества чёрной дыры, находящейся в обратном направлении стрелы времени. При этом полная карта пространства-времени содержит как чёрную, так и белую дыры, а отдельного образования только «чистой» чёрной или только «чистой» белой дыры на полной карте пространства-времени не может быть в принципе.
В зависимости от рассматриваемого типа решения для черной дыры существует несколько типов белых дыр. В случае черной дыры Шварцшильда геодезическая, выходящая из белой дыры, исходит из содержащейся в ней гравитационной сингулярности. Невозможно достичь области внутри белой дыры, поэтому ее поведение – и, в частности, то, что из нее может получиться, - предсказать невозможно. В этом смысле белая дыра - это конфигурация, в соответствии с которой эволюция Вселенной не может быть предсказана, поскольку она не является детерминированной.
Большой взрыв можно рассматривать как голую сингулярность в космическом пространстве, но она не соответствует белой дыре. Тем не менее, в [4] утверждается, что Большой взрыв является белой дырой.
В рамках петлевой гравитации доказывается, что чёрные дыры взрываются, посредством квантового скачка они превращаются в белые дыры, которые начинают извергать вещество [5].
По данной модели коллапсирующая звезда должна достичь стадии, при которой она не может сжиматься дальше, поскольку петли не могут быть сжаты до меньшего размера, чем они есть. Вместо этого они будут оказывать давление. Произойдёт квантовый скачок, превращающий чёрную дыру в белую.

В координатах Эддингтона-Финкельштейна $u = t - r$

$$ds^2 = -(1 - 2M/r)du^2 - 2dudr + r^2 d\Omega^2$$

это область, где $r < 2M$. Если занулить смещения по радиусу и углам, то

$$c^2 d\tau^2 = ds^2 = g_{11} c^2 dt^2 \; ; \; d\tau = \pm (g_{00})^{1/2} dt$$

Знак плюс соответствует черной дыре, знак минус – белой. Это не означает, что время начинает идти в обратном направлении. Дело в том, что это построение неверно.
Решение Шварцшильда содержит две особенности пространства-времени. Эти особенности - пространственно-подобны и находятся в бесконечном прошлом (белая дыра) и бесконечном будущем (черная дыра).
Координаты Эддингтона-Финкельштейна сохраняют стационарность метрики, однако в них теряется симметрия по отношению к обращению времени. Это связано с тем, что линия $r = r_g$ в этих координатах

находится в абсолютном будущем по отношению ко всей области $r > r_g$ и в шварцшильдовых координатах находится в бесконечном будущем $t \to +\infty$. Обращение времени - это замена $V \to -U$, что дает альтернативную систему координат Эддингтона-Финкельштейна

$$ds^2 = (1 - r_g/r)\, dU^2 + 2dUdr - r^2 (d\vartheta^2 + \sin^2 \vartheta\, d\phi^2) ,$$

описывающую события в бесконечном прошлом по отношению к системе координат Шварцшильда.
В новой системе координат поверхность $r = r_g$ представляет собой горизонт событий прошлого.
Сингулярность $r = 0$ в этой области не поглощает частицы, а испускает их. Область внутри горизонта событий прошлого называют белой дырой.
Таким образом, никакого мистического обращения времени в белой дыре нет.

Уточнение решения Шварцшильда

Масса солнца 10^{30} кг, масса черной дыры – порядка 1 массы Солнца. Масса нейтрона - 10^{-27} кг
Радиус нейтрона – 10^{-15} м. Радиус Шварцшильда для нейтрона – 2 х 10^{-27} х 7 х 10^{-11} = 10^{-37} .
Плотность пульсаров 2,8 х 10^{14} г/см куб = 10^{17} кг/м^3 . Плотность в центре 10^{18} кг/м^3 . больше плотности атомного ядра. Радиус ядра атома гелия 2 х 10^{-13} м. Число нейтронов в нейтронной звезде, что по порядку величины равно числу нейтронов коллапсирующей звезде – $10^{30} : 10^{-27} = 10^{57}$.
Чтобы радиус Шварцшильда совпадал с радиусом нейтронного объекта, необходимо, чтобы $r_n \sim 10^{-13}\, N^{1/3} \sim (G\, N\, m) / c^2$, откуда $N \sim 10^{54}$, на 3 порядка меньше. Дефект масс не меняет порядки величин. Данный расчет ставит под сомнение смысл такого параметра, как радиус Шварцшильда.

Существуют обобщения решение Шварцшильда — для статической аксиально-симметричной системы, для гравитационных мультиполей. Также существует глобальное решение Шварцшильда, метрика для него вне горизонта используется для описания гравитационного поля звёзд, а также солнечной системы.
Первое упрощение, которое делают, чтобы получить метрику массивного шара - ее диагонализация. В результате получаются две неопределенные константы.

$$ds^2 = Adr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 - Bdt^2$$

Условие, определяющее одну и констант – то. что на больших расстояниях метрика должна переходить в метрику Минковского. Вторая константа определяется, если принять приближение слабого поля

$$g_{44} \approx -c^2 + 2Gm/r$$

В [6] указывается, что при выводе решения Шварцшильда для определения констант в метрике используется то, что на бесконечности метрика становится плоской. Тогда как в [6, стр. 362] в законе сохранения учитывается псевдотензор энергии-импульса гравитационного поля.
Но не указывается, что для дальнейшего определения констант используется второе приближение: то, что в уравнение для их определения подставляется классическая потенциальная энергия под действием силы тяжести с коэффициентом 2. То есть: метрику планковской Вселенной, чей радиус меньше радиуса Шварцшильда, можно описать решением Шварцшильда, поскольку это решение справедливо для любых сферически симметричных тел.
Для слабого поля потенциал для уравнения движения имеет вид:

$$\varphi = -c^2(1 + g_{44})/2 ,\ \varphi(r) = -\frac{Gm}{r} + C$$

$$\Delta\varphi = \frac{2}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial^2 r} = 4\pi Gm; a \square -\nabla\varphi .$$

В пост-ньютоновском приближении

$$a = -\nabla\varphi + q(\nabla\varphi)^2 ,\quad (\nabla\varphi)^2 = \frac{1}{2}\Delta\varphi^2 - \varphi\Delta\varphi ,\ a = -\nabla\varphi + 4\pi qm\varphi = g = Gm/r^2 + 4\pi qGm/r .$$ So.

$$g = \frac{4}{3}\pi G\rho r(q + r)$$

Тогда метрика примет вид:

$$ds^2 = (1 - r_g/r + c_1)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 - (1 - r_g/r + c_1)dt^2$$

Релятивистская добавка к силе тяготения $F_{add} \sim 1/r^4$. Ее учет приводит к метрике

$$ds^2 = (1 - r_g/r + c_2/r^3)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 - (1 - r_g/r + c_2/r^3)dt^2$$

Утверждается, что при превышении предельной скорости вращения радиус становится комплексным

$$r_{\pm} = r_S \pm \sqrt{r_S{}^2 - a^2}; a = J / mc; r_S = Gm / c^2$$

метрика является регулярной для всех положительных значений , что должно означать, что сингулярность не имеет горизонта событий [7].

Чтобы вращение остановило коллапс, его энергия должна превысить тяготение. В классической механике

$$J\omega^2 / 2 \geq Gm^2 / r$$

Тогда чтобы тяготение был остановлено вращением, скорость на сфере должна быть больше 5/2 скорости света. Если использовать ограничение Керра - Ньюмена

$$(L / m)^2 = (mr^2\omega / 5m) \geq G^2m^2 / c^2$$

то скорость на поверхности тоже должна быть больше скорости света

$$v \geq \sqrt{5}c$$

Следовательно, в классической физике нет такого вращения, которое бы останавливало коллапс.

Так или иначе, нужно добавить энергию вращения в метрику: $c_3 r^2$.

Кроме этого. Есть еще давление внутри сжимающейся звезды, пропорциональное плотности энергии

$$p \sim \varepsilon \sim 1 / r^3$$

Давление дает вклад в метрику *1/r* .

При образовании черной дыры давление вырожденного нейтронного газа не исчезает, оно возрастает,

Теперь нужно учесть, что для планковской Вселенной в приближении слабого поля ее масса покоя равна и противоположна по знаку массе гравитационной энергии [1]. Тогда (1) примет вид

$$g_{00} = g_{33}{}^{-1} = 1 - r_g / r - c_2 / r^3 + c_2 r^2 + c_3 / r = 1 - (2r_g / r - c_3) / r - c_2 / r^3 + c_3 r^2 \quad (1)$$

В таком случае сингулярность должна быть в точке

$$1 - (2r_g / r - c_3) / r - c_2 / r^3 + c_3 r^2 = 0$$

Данное уравнение, имеет комплексные решения при высоких давлениях и вещественные решения при низких давлениях, что очевидно. Давление играет ту же роль, что и вращение, соответственно, существует критическое давление.

Отметим: в знаменателе у коэффициента g_{00} – может быть (1 + …), т.е. это эффективная отрицательная гравитационная масса – при положительной инертной массе.

Для вакуума инертная масса равна нулю, поэтому при высоких плотностях вакуума сингулярность отсутствует.

Взрыв черной дыры

1. Выбросы материи возникают, когда чёрная дыра поглощает слишком большое количество вещества, что приводит к ярким и легко наблюдаемым вспышкам излучения. Но это не является взрывом.

Есть версия, что по мере испарения черной дыры ее масса становится меньше критической, тогда она взрывается – вследствие исчезновения горизонта событий. Но эта версия не подтверждена теоретически, механизм неясен. Если же учесть эффекты специальной теории относительности [3], то

$$L = \frac{2}{5} mR^2\omega + \frac{4mR^4\omega^3}{35c^2}$$

При $R\omega \to c$

$$L = \frac{3}{4} mRc$$

В этом случае предельная скорость, при которой коллапс останавливается, существует:

$$v = 2c/3$$

В этом случае коллапсирующая звезда не теряет сингулярность, а ее разрывает на части, звезда взрывается – но не так, как обычная звезда, а именно как черная дыра.

Голая сингулярность возникает, если черная дыра по каким-либо причинам начинает вращаться быстрее, вследствие чего центробежные силы становится больше центростремительных гравитационных сил. Но если центробежные силы изначально больше гравитационных, не образуется ни голой сингулярности, ни сингулярности вообще.

2. Может ли черная дыра взорваться вследствие какого-либо типа неустойчивости? Линеаризованные уравнения Эйнштейна в случае нулевой кривизны устойчивы относительно возмущений метрики.
Одна из основных сложностей с доказательствами устойчивости решения Шварцшильда связана с отслеживанием происходящего в четырёхмерном пространстве-времени во время эволюции решения. Вам необходима система координат, позволяющая измерять расстояния и определять точки в пространстве-времени, такие, как линии широты и долготы, используемые для определения местоположения на Земле. Но непросто найти систему координат, работающую в каждой точке пространства времени, и продолжающую работать, когда форма пространства-времени меняется.
В контексте теории устойчивости чёрной дыры, любая используемая система координат должна развиваться так же, как форма пространства-времени – как удобная перчатка подстраивается под изменение формы руки. Соответствие между системой координат и пространством-временем должно быть хорошим вначале и оставаться хорошим всю дорогу. Если это не так, то может случиться две вещи, мешающие попыткам доказать наличие устойчивости.

В [8] доказано, что медленно вращающиеся ЧД устойчивы.
Есть мнение, что неустойчивость вблизи критической скорости вращения звезды возникает из-за квантовых флуктуаций, что может привести к взрыву черной дыры [9].

3. Хокинг полагал, что горизонта событий вокруг черной дыры вообще не существует. Квантовые эффекты, возникающие вблизи чёрной дыры, вызывают резкие пространственно-временные флуктуации, и эти колебания настолько велики, что строгая граница, вроде горизонта событий, просто не может возникнуть.
Эту версию нужно отбросить, т.к. квантовые флуктуации не могут привести к макроскопическим флуктуациям.
Однако есть вероятность, что черная дыра может взорваться вследствие неустойчивости вблизи критической скорости вращения.

4. Есть предположение, что сверхмассивные черные дыры в центрах галактик не растут бесконечно – они могут достигнуть массы в 50 миллиардов Солнц, после чего их диск аккреции распадется.
Однако из (1) следует, что вблизи нуля функция зависимости массы от радиуса не имеет максимума. То есть, не должно быть ограничений на массу черной дыры.
Но есть экспериментальные доказательства того, что есть верхний предел масс черных дыр [10-12].
Неясно, какой именно физический фактор может ограничивать массу черных дыр. Но к этому вопросу примыкает версия, что Вселенная находится внутри черной дыры. Действительно, если следовать общепринятой оценке массы Вселенной, ее видимые размеры совпадают с ее гравитационным радиусом.
С другой стороны, планковская Вселенная – это черная дыра. Ли Смолин предлагал модель, в которой Вселенная возникает при взрыве черной дыры.
Предполагается, что планковская Вселенная - голая сингулярность, без горизонта событий.
Возможно, что черные дыры взрываются в том случае, если их радиус вдвое меньше радиуса Шварцшильда, как в планковской Вселенной.

5. Пенроуз предположил, что частицы, проходящие вблизи горизонта событий, могут забирать часть вращательной энергии чёрной дыры. Позже Зельдович доказал, что схожее явление возможно и без участия чёрной дыры — например, в эксперименте с быстро вращающимся металлическим цилиндром и светом. Если окружить такой цилиндр зеркалом, то энергия, усиленная за счёт вращения, может накапливаться и приводить к мощному выбросу — «взрыву», т.н. «бомба черной дыры». Это было доказано и экспериментально.

Согласно гипотезе Ли Смолина, «по ту сторону» черной дыры возникает новая вселенная.
Космология черной дыры, или космология Шварцшильда, позволяет такую теорию, что наблюдаемая Вселенная может находиться внутри черной дыры, существующей в более крупной родительской Вселенной (Раджем Патриа и математик Ирвин Гуд). Они предположили, что горизонт событий черной дыры — граница, внутри которой ничто не может покинуть черную дыру — совпадает с границей наблюдаемой Вселенной.
Никодем Поплавский объяснил, что черные дыры могут порождать «мультивселенные». Он считал, что когда материя в черной дыре достигает состояния чрезвычайно высокой плотности, она не сжимается

до сингулярности, а отскакивает и начинает расширяться, подобно сжатой пружине. Этот процесс может объяснить механизм Большого взрыва.
6. Взрыв черной дыры возможен и в том случае, если она не вращается.

$$p \sim \varepsilon \sim 1/r^3$$

Давление дает вклад в метрику $1/r$.
При образовании черной дыры давление вырожденного нейтронного газа не исчезает, оно возрастает.
Если вокруг черной дыры закончился межзвездный газ, тогда испарение черной дыры может привести к неустойчивости, когда ее масса становится бесконечно приближенной к критической, необходимой для образования черной дыры. Тогда внутреннее давление разрывает черную дыру.

Версия частицы
Можно ли рассматривать распад частицы как взрыв?
Возможно, что механизм распада черной дыры подобен распаду частиц.
Конфайнмент —невозможность получения кварков в свободном состоянии. Для объяснения удержания предполагалось, что цветовой заряд антиэкранирует - из-за того, что глюоны сами обладают цветовым зарядом, в процессе движения порождают новые глюоны из вакуума и тем усиливают взаимодействие. В результате кварки притягиваются тем сильнее, чем дальше они друг от друга.
Асимптотическая свобода —взаимодействие между кварками становится сколь угодно малым при уменьшении расстояния между ними. В асимптотическом пределе $r \to 0$ частицы перестают взаимодействовать и становятся свободными.
Конфайнмент может быть именно тем фактором, который играет роль стенок сосуда при взрыве.
В это смысле становится привлекательной гипотеза распада максимона [3].
Величина ограничения для момента импульса планковской Вселенной как черной дыры, измеренная в (2) в единицах $\hbar$, с достаточной степенью точности равна единице, но чуть меньше: 0,9985. Следовательно, максимон с $s = 1$ разрушает планковскую Вселенную как черную дыру.
Очевидно, что максимон в виду своей огромной массы распадается по типу распада Z-бозона (на кварк и антикварк, образующих мезон, распадающийся на лептон и антилептон).

Версия инфляции
В модели Ли Смолина-Патриа-Гуда Вселенная произошла от взрыва в черной дыре. Однако не предложен механизм взрыва.
В инфляционной модели взрыв происходит из-за большой постоянной Хаббла, пространство «расталкивается» неким скалярным полем (полями), которое порождает (порождают) частицы.
Однако этот процесс должен начинаться с нулевой точки по времени, а не вследствие каких-либо изменений в планковской Вселенной.
Взрыв погашается не из-за трения частиц о среду, а за счет фазового перехода, перехода вещества к консистенции, в которой доминирует излучение.

Взрыв мог произойти при равенстве сил отталкивания и притяжения. При этом для неустойчивости баланса некое «течение» должно было поддерживать флуктуацию
Возможно, имелись в виду системы, находящиеся вблизи точки бифуркации между различными динамическими режимами. В таких условиях квантовые флуктуации нарастают для той физической переменной, которая оказывается неустойчивой вблизи порога.
Некоторые примеры систем, в которых рассматривалось усиление квантовых флуктуаций: параметрические взаимодействия световых волн, взаимодействие ридберговских атомов с модой электромагнитного поля в высокодобротном резонаторе при динамическом режиме, соответствующем близости к сепаратрисе и пр.

Полная масса планковской вселенной с учетом отрицательной гравитационной энергии – половина шварцшильдовской. То есть, если не привлекать гипотезу максимона, чтобы состоялся БВ, была масса вакуума, которая расталкивает. С другой стороны, была масса обычного вещества, которая мешала расталкиванию. Т.е. был другой вакуум, космологический, и дополнительная масса типа темной материи. И они были равны по массе.
То есть: масса обычного вещества в планковской Вселенной создает сингулярность, гравитационная масса вакуума не создает сингулярность, но создает силу расталкивания.

Как взрыв может рассматриваться спонтанное нарушение симметрии – а именно симметрии меж вакуумом и веществом.

Выпишем систему уравнения Фридмана для масштабного фактора и для скалярного поля:

$$H = \dot{a}/a = \sqrt{2\pi G/3}m\varphi,\ \ddot{\varphi} + 3H\dot{\varphi} + m^2\varphi = 0$$

Линде объясняет свою модель следующим образом: при большой постоянной Хаббла трение велико, скалярное поле уменьшается очень медленно. Поэтому и постоянная Хаббла, являющаяся функцией скалярного поля, долгое время почти не менялась. Решение уравнения Эйнштейна с медленно меняющейся постоянной Хаббла описывает экспоненциально быстро расширяющуюся Вселенную: $a \sim \exp(Ht)$. Постепенно поле уменьшилось, постоянная Хаббла тоже уменьшилась, трение стало маленьким, и поле начало колебаться, порождая элементарные частицы.

Однако само решение уравнения для скалярного поля не рассматривается. Оно зависит не только от того, насколько велика постоянная Хаббла, но и какова масса поля, играет роль их отношение. Выпишем уравнение для колебаний с трением $\ddot{\varphi} + 2\delta\dot{\varphi} + \omega_0^2\varphi = 0$. При большом трении $\delta > \omega_0$ колебания отсутствуют:

$$\varphi = e^{-\delta t}(Ae^{\omega_0 t} + Be^{-\omega_0 t})$$

Колебательный режим возможен только тогда, когда трение, наоборот, мало: $\omega_0 > \delta$, тогда

$$\varphi = \Phi e^{-\delta t}\cos(\omega t + \varphi_0)\ ,\ \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

Если постоянна Хаббла начала уменьшаться, она должна была пройти критическую точку, при $\omega_0 = \delta$ - критическое затухание: $\varphi = e^{-\delta t}(A + Bt)$. В этой точке поле тоже затухает и не может перейти в колебательный режим.

Так или иначе модель Гута-Линде не может служить основой для физики Большого взрыва. Поэтому разделяют БВ и стадию инфляции

Версия вакуума

Вещество с уравнением состояния $p = -\rho$ является неустойчивым относительно малых возмущений. Квадрат скорости звука в нем отрицателен, поэтому малые возмущения, описываемая экспонентой с мнимым декрементом, либо растут по экспоненте, либо затухают по экспоненте. Растущие возмущения разрушают вещество с отрицательным давлением и прекращают инфляцию.

Скорость распространения возмущения в вакууме как сплошной среде (звук) определяется выражением

$$\upsilon_3^2 = \frac{dp}{d\rho}$$

p = 4,6 x 10^{113} Па

С другой стороны, если планковская Вселенная возникла до периода порождения частиц скалярным полем и до начала действия механизма Хиггса, в ней не могло быть сверхплотной обычной материи, т.к. таковой еще не было. Модель Хиггса – для энергий ниже 1 ТэВ, для сингулярности она не подходит.

Ложный вакуум соответствует локальному минимуму энергии системы. Такое состояние стабильно в течение определённого времени (метастабильно), но может туннелировать в состояние истинного вакуума.

В одной из гипотез раздувающейся Вселенной из ложного вакуума вскоре после появления Вселенной могла образоваться не одна, а множество метагалактик, в таком случае Большой взрыв — переход ложного вакуума в обычный.

Распад ложного вакуума сопровождается выделением колоссальной энергии [13].

Пример распада ложного вакуума - в сверхпроводящем ферромагнетике [14].

Ряд теорий предполагает, что инфляция может быть следствием распада ложного вакуума на истинный. Сама инфляция может быть следствием того, что поле Хиггса находится в ловушке ложного вакуумного состояния с самодействием Хиггса λ и его функцией β_λ, крайне близкой к нулю на планковском масштабе [15-17].

О версии возникновения Вселенной путем спонтанного возникновения из «ничего» (из «области», где отсутствует вещество, пространство и время) вследствие квантовых флуктуаций метастабильного ложного вакуума, вызвавшими расширение истинного вакуума см. [3].

В [18] отмечено, что скорость распада вакуума может значительно увеличиться в окрестностях чёрных дыр, которые будут служить зародышами. Согласно этому исследованию, потенциально катастрофический распад вакуума может быть вызван в любой момент первичными черными дырами.
В [19] изучена кинетика фазовых переходов первого рода в калибровочных теориях со спонтанным нарушением симметрии. Разработана общая теория распада метастабильной фазы (ложного вакуума) при конечной температуре.

Заключение
Из всех моделей наиболее реалистичной выглядит БВ как распад максимона с дальнейшим распадом образовавшихся частиц. В этом случае для взрыва необходим не один, а множество максимонов, чтобы началась цепная реакция.

Литература

1. Ихлов Б. Л. Ненулевая масса Вселенной
https://zmclub.ru/blog/boris-ikhlov/1679-nenulevaya-massa-vselennoj
2. Ихлов Б. Л. Вакуумные состояния
3. Ихлов Б. Л. К гипотезе возникновения Вселенной из квантовой флуктуации.
4. Реттер, А. и Хеллер, С. (2012). Возрождение белых дыр в виде маленьких взрывов. Новая астрономия. **17** (2): 73–75. doi:10.1016/j.newast.2011.07.003. S2CID 118505127.
5. Hal M. Haggard* and Carlo Rovelli. Black hole fireworks: quantum-gravity effects outside the horizon spark black to white hole tunneling. Phys. Rev. D **92**, 104020 – Published 6 November, 2015
DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.104020
6. Ландау Л. Л., Лившиц Е. М. Курс теор. физ. Т. 2. Теория поля. М., Физматлит, 2003. 536 с.
7. Hobson, et. al, General Relativity an Introduction for Physicists, Cambridge University Press 2007, p. 300-305.
8. Peter Hirtz, Andras Vasy. The global non-linear stability of the Kerr-de Sitter family of black holes. Acta Mathematica, 220:1-206, 2018. V. 2290(2018). N1. P. 1-206. http^//doi.prg/10.4310/acta.2018.v220.nl.al
9. https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.7c70d8f5-679f9eae-71a36dc9-74722d776562/https/www.physicsforums.com/threads/upper-bh-mass-limit-another-structure-formation-clue.255274/
10. http://doi.org/10.48550/arXiv.0808.2813
11. Andrew King. How Big Can a Black Hole Grow? Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 456, Issue 1, December 2015, Pages L109–L112, https://doi.org/10.1093/mnrasl/slv186
12. Bernard Carr, Florian Kuhnel, Luca Visinelli Constraints on Stupendously Large Black Holes Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 501, Issue 2, February 2021, Pages 2029–2043, https://doi.org/10.1093/mnras/
13. Павел Эмнуэль. Много вселенных из ничего. Наука и жизнь. №9. 2017.
14. Zenesini A. etc. False vacuum decay via bubble formation in ferromagnetic superfluids. Nature Physics. 2024. V. 20. P. 558-564. doi:10.1038/s41567-023-02345-4.
15. Крис Смеенк. Ложный вакуум: космология ранней Вселенной и развитие инфляции
321, 90095 smeenk@humnet.ucla.edu
16. Алехин С., Джуади А., Мох С., Хоекер А., Риотто А. (2012-08-13). «Массы топ-кварка и бозона Хиггса и стабильность электрослабого вакуума». Письма в журнал «Физика В». **716** (1): 214–219. arXiv:1207.0980. Bibcode:2012PhLB..716..214A. doi:10.1016/j.physletb.2012.08.024. S2CID 28216028.
17. Хэ, Дуншань; Гао, Дунфэн; Цай, Цин-Юй (2014). «Спонтанное создание Вселенной из ничего». Physical Review D. **89** (8): 083510. doi:10.1103/PhysRevD.89.083510.
18. Бурда, Филипп; Грегори, Рут; Мосс, Иэн Г. (2015). «Метастабильность вакуума с участием чёрных дыр». Журнал физики высоких энергий. **2015** (8): 114. doi:10.1007/JHEP08(2015)114. ISSN 1029-8479. S2CID 53978709.
19. Распад ложного вакуума при конечной температуре. https://doi.org/10.1016/0550-3213(83)90293-6
См. также Чернин Д. А. Космический вакуум. УФН. 2001. Т. 171. №11. С. 1153-1175.
Raúl Carballo-Rubio et.al. Towards a Non-singular Paradigm of Black Hole Physics. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.05505