

Кафедра физики элементарных частиц

Реферат

по космомикрoфизике на тему:

«Первичные черные дыры»

Выполнил:

студент группы Т9-40

Пантусов А.Н.

Преподаватель:

Хлопов М.Ю.

1. Введение

Черная дыра - область в пространстве-времени, гравитационное притяжение которой настолько велико, что покинуть её не могут даже объекты, движущиеся со скоростью света, в том числе кванты самого света. Граница этой области называется горизонтом событий, а её характерный размер - гравитационным радиусом. Черные дыры являются финальной ступенью эволюции тяжелых звезд, минимальная масса коллапсирующего ядра которых, исходя из предела Оппенгеймера-Волкова, равна 2.5 – 3 солнечных масс. При этом силы давления уже не могут противостоять силам гравитации, которые схлопывают вещество звезды, образуя черную дыру. Однако помимо черных дыр, определяемых вышеуказанным образом, рассматривается существование таких, которые образовались не за счет гравитационного коллапса крупной звезды, а в сверхплотной материи в момент начального расширения Вселенной, т.к. масса внутри космологического горизонта может естественным образом сформировать черную дыру, если расширение в данной области Вселенной остановится. Такие черные дыры носят название первичные. Изучение данных объектов может помочь в понимании физики первых моментов жизни Вселенной, корректировке различных существующих физических моделей, объяснении некоторых проблем космофизики.

Основная часть.

Исходя из наблюдения за активными ядрами галактик, нельзя описать происходящие в них процессы свойствами находящихся в них звезд и газопылевых комплексов. На данный момент считается, что в центре таких активных галактик находится массивный компактный объект, по предположению являющийся сверхмассивной черной дырой, с массой, значительно превышающей 1000 масс Солнца. Однако в самом начале образования галактик, когда ещё не могло появиться никаких массивных компактных объектов, которые могли бы стать ядрами образования первичных галактик, уже могли существовать первичные черные дыры в виде кластеров, которые и могли привести к появлению определенной космической структуры, которую мы видим сейчас. Также нет никаких запретов на образование маленьких первичных черных дыр, масса которых на момент образования могла составлять порядка m_{Pl} , а радиус порядка 10^{-35} м и даже меньше. Каждое из подобных предположений может привести к интересному решению многих космологических проблем, таких как наличие точечных гамма источников во Вселенной, проблему скрытой массы и других. Также в случае существования первичных черных дыр и возможности их детектирования, информация, которую мы от них получим, может пролить свет на самые ранние этапы развития Вселенной и физику сверхвысоких энергий.

2. Механизмы образования первичных черных дыр

Существует несколько теоретических механизмов образования первичных черных дыр.

Образование ПЧД на ранних пылевых стадиях

Крайне маловероятно образование первичных черных дыр в однородно расширяющейся Вселенной. Однако предполагая возмущения метрики с гауссовым распределением и дисперсией $\langle \delta^2 \rangle \ll 1$, вероятность флуктуаций метрики порядка 1 будет определяться экспоненциально малым хвостом высокоамплитудных выбросов этого распределения. Вероятность образования первичной черной дыры из возмущений в пределах космологического горизонта равна $W_{\text{РВН}} \sim \exp(-\gamma^2/2\langle \delta^2 \rangle)$

С уравнением состояния Вселенной имеющим вид $p=\gamma\varepsilon$, где параметр γ изменяется в пределах от 0 до 1. Изучая такой спектр первичных черных дыр можно получить информацию, о степени первичной неоднородности и уравнении состояния во Вселенной.

При рассмотрении ранних пылевых стадий доминантности сверхмассивных метастабильных частиц, вне зависимости от свойств данных частиц в пределах космологического горизонта будет развиваться гравитационная неустойчивость. Рост начальных возмущений в таком случае приведет к образованию неоднородностей. Свойством таких гравитационно связанных объектов является то, что они неизбежно схлопнутся в черную дыру. На пылевой стадии ПЧД могут прямо образовываться, если в рассматриваемой области остановится релятивистское расширение, чему соответствует в однородной и изотропной Вселенной экспоненциально малая вероятность. Также при определенных условиях рост флуктуаций может привести к образованию однородных и изотропных конфигураций, которые при обособлении от расширения сожмутся в пределах своего гравитационного радиуса. В случае образования подобных структур при достижении плотности образования черной дыры ρ_{BH} уравнение состояния внутри конфигурации может оказаться релятивистским $p=\varepsilon/3$, и в таком случае черная дыра может образоваться только если гравитационные силы будут превышать градиент давления. Исходя из ограничений на величину плотности, неоднородности и сферической формы таких конфигураций можно заключить, что вероятность прямого рождения первичных черных дыр на ранней пылевой стадии $W_{BH\geq}W_sW_u\sim x^{13/2}$, где W_s – вероятность реализации сферически симметричной конфигурации, W_u – вероятность реализации достаточно однородной конфигурации, $x=r_g/r_1$, где r_g – гравитационный радиус рассматриваемой конфигурации с массой M , r_1 – линейный размер конфигурации. Спектр масс таких черных дыр связан со спектром флуктуаций плотности, которые формируются в частности на инфляционной стадии. Образование таких ПЧД подавлено для флуктуаций до начала пылевой стадии, а также для флуктуаций не успевших вырасти до единицы до конца стадии. Диапазон масс таких черных дыр определяется снизу массой, заключенной под космологическим горизонтом на момент начала пылевой стадии, а сверху максимальной массой частиц, успевших образовать черную дыру при развитии гравитационной неустойчивости, до того как частицы распадутся. Данный механизм не описывает образование сверхмассивных черных дыр, однако обеспечивает универсальную модельно независимую проверку для неоднородностей на ранних пылевых стадиях.

Образование ПЧД в результате фазовых переходов первого рода

При рассмотрении скалярного поля с двумя минимумами в результате квантовых флуктуаций может появиться область истинного вакуума в пространстве ложного вакуума. Такие «пузыри» истинного вакуума начинают расти, преобразуя при этом потенциальную энергию ложного вакуума в кинетическую энергию своих стенок, которые быстро начинают расширяться со световой скоростью. Столкновение таких пузырей может сконцентрировать энергию стенок в пределах гравитационного радиуса для данного значения энергии, что может привести к образованию черной дыры. При столкновении двух пузырей требуется значительное количество энергии, необходимое для образования ПЧД, а значит, требуется, например, одновременное столкновение нескольких стенок, следовательно, вероятность образования таких черных дыр будет подавлена. В работах (Коноплич и др., 1998;1999) был предложен механизм столкновения двух стенок, который ведет к образованию ПЧД с вероятностью порядка 1, что снимает это подавление. После столкновения происходит совместное проникновение стенок, на расстояние, сравнимое с толщиной стенки. Затем в центральной области пересечения стенок образуется область ложного вакуума, окруженная истинным вакуумом. Появляется мешок ложного вакуума, который начинает терять энергию на осцилляции – переход кинетической энергии стенок в потенциальную и обратно – сжатие и расширение области, переходящее в колебания скалярного поля. Вторичные осцилляции могут произойти, только если минимальный размер мешка превышает его гравитационный радиус, в противном случае из мешка ложного вакуума образуется черная дыра. Такие ПЧД могут являться чувствительным индикатором для фазовых переходов первого рода в ранней Вселенной.

Образование ПЧД в результате фазовых переходов второго рода

В результате квантовых флуктуаций на энергетическом масштабе f , происходит фазовый переход первого рода, при котором образуются области истинного вакуума со значением потенциала поля ϕ , далее в результате наклона скалярного потенциала происходит фазовый переход второго рода на энергетическом масштабе $\lambda \ll f$, который ведет к появлению флуктуаций в значении поля ϕ . Эти флуктуации могут привести к тому, что значение фазы комплексного скалярного поля пройдет через π – бывшую точку равновесия и станет равным либо 0, либо 2π , в зависимости от величины ϕ в каждой области. Примерный вид потенциала показан на рисунке 1. На рисунке 2 показан вид потенциала сверху, с учетом того, что он наклонился.

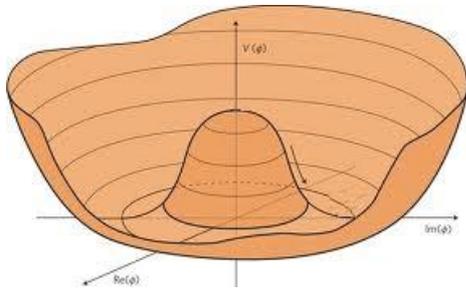


Рис.1. Потенциал «Мексиканская шляпа»

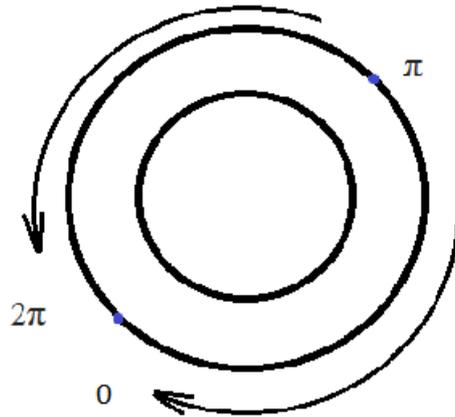


Рис.2. Вид потенциала сверху

Таким образом, друг навстречу другу движутся области истинного вакуума, несущие в себе значения поля с отличающимися скалярными потенциалами и фазами. Такие пузыри рождаются по всему пространству и с самого начала являются причинно-несвязанными. Как только области узнают друг о друге, то может оказаться так, что область со значением фазы 2π будет окружена областью со значением фазы 0 , значения потенциала поля ϕ в этих областях также будут отличаться. В результате этого образуется ограниченная область с замкнутой стенкой (кинк) – областью пространства с ненулевой плотностью энергии, которая обладая достаточной величиной плотности энергии, может схлопнуться в черную дыру. Подобный механизм может привести к образованию ПЧД очень больших масс, вплоть до масс активных галактических ядер, что позволит объяснить наличие центров образования галактик - неоднородностей, в догалактическую эпоху. Вокруг них по предположению и начали образовываться первые галактики.

3. Излучение Хокинга, испарение черных дыр

Испарение черных дыр – эффект, открытый Хокингом (1975 г.), заключается в том, что черная дыра может терять свою массу, черпая энергию из гравитационного поля и порождая пары частиц, одна из которых

остаётся в пределах горизонта, а другая может улететь на бесконечность. Скорость этого процесса обратно пропорциональна квадрату массы черной дыры. Излучение черной дыры описывается как излучение с поверхности абсолютно черного тела с температурой $T_{\text{РВН}} = 1/4\pi r_g = m_{\text{П}}^2/8\pi M$. Потери энергии черной дыры пропорциональны светимости взятой с обратным знаком и равны $dM/dt \sim m_{\text{П}}^4/M^2$. Время испарения черных дыр, представляющих собой последнюю стадию развития массивных звезд, больше возраста Вселенной, т.к. они имеют предел на минимальную массу, которая всё равно является слишком большой для возможности полностью испариться. Однако массы ПЧД могут быть очень маленькими, порядка планковской и даже меньше. Для таких черных дыр испарение – очень существенный процесс. По расчетам черные дыры с массами $< 10^{15}$ г к нынешнему моменту должны испариться, если они образовались на ранней стадии. Проверить, действительно ли существовали такие ПЧД, можно по эффектам от их испарения. Также ПЧД могут рассматриваться как универсальный источник всех существующих типов элементарных частиц, с массами $< T_{\text{РВН}}$, образованных в результате испарения.

Некоторые ограничения на массы ПЧД

Масса черных дыр, родившихся в результате фазового перехода первого рода, пропорциональна массе, которая может находиться в пузыре в период столкновения, если плотность энергии стенок полностью термализована. Значит при условии того, что фазовый переход первого рода имел место быть в конце инфляции, могут образовываться ПЧД с массами пропорциональными массе вещества, заключенного в пределах хаббловского горизонта в конце инфляции. Если рассмотреть оценку горизонта, взятую из наблюдений за анизотропией теплового электромагнитного фона, то получится, что в момент завершения фазового перехода появляются черные дыры, с массой примерно 0.7 г. Далее вклад таких ПЧД в общую космологическую плотность растет как масштабный фактор. ПЧД ведут себя как пылевая материя, которая заканчивает доминировать к моменту, когда все такие ПЧД испарятся. Отсюда берется верхний предел масс таких черных дыр, появившихся после фазового перехода $M_{\text{max}} \leq 5 \cdot 10^{14}$ г, т.к. черные дыры с массами больше не успели бы испариться к нынешнему времени. Более жесткое ограничение $M < 10^3$ г следует из того (Зельдович, Старобинский, 1976), что испарение ПЧД не приводит к перепроизводству энтропии во Вселенной. Таким образом, испаряющиеся ПЧД могли быть доминирующей частью космологической плотности в период их образования, только если их

масса не превышает вышеуказанного предела. Такие ПЧД не противоречат ограничениям, полученным из наблюдений. А также испарению таких черных дыр можно приписать наблюдаемую энтропию Вселенной.

4. Способы наблюдения

Первичные черные дыры, как и просто черные дыры, наблюдать довольно трудно. Исходя из гравитационных расчетов, наблюдая за очень массивным телом, не испускающим свет, можно с некоторой степенью точности говорить о том, что он является черной дырой. Черные дыры можно детектировать по различным искажениям света, проходящего около них. Например, при пролете мимо отдаленной звезды, свет от звезды исказится. Однако найти звезды, в данный момент взаимодействующие с черной дырой очень трудно. Также черные дыры ищут по излучению Хокинга. В этом случае они являются источником космических лучей, нейтрино и гамма лучей. Однако температуры известных астрономам чёрных дыр слишком малы, чтобы излучение от них можно было бы зафиксировать — массы дыр слишком велики. Есть возможность измерить излучение Хокинга, для ПЧД малых масс, объединенных в кластер. В таком случае излучение каждой из дыр сложится вместе, что позволит телескопу, такому как, например, Fermi LAT gamma-ray telescope, обнаружить их. Также массивные черные дыры можно обнаружить, наблюдая за аккрецией вещества, при которой происходит очень мощное излучение ускоряющихся частиц. Благодаря особой конфигурации магнитного поля, при поглощении вещества посредством аккреции, черные дыры могут выстреливать узконаправленным пучком частиц – jet-ом в пространство, который тоже можно детектировать.

5. Заключение

Первичные черные дыры – объекты, которые, в случае образования на самых ранних этапах развития Вселенной, будут нести информацию об этом периоде в своем спектре. Будучи образованными от сверхмассивных метастабильных частиц, ПЧД смогут дать информацию о свойствах таких частиц. Исследуя возможные проявления и следы ПЧД можно делать ограничения на различные параметры ранней Вселенной, такие как величина начального возмущения метрики, первичные неоднородности плотности, наличие или отсутствие фазовых переходов первого и второго рода. Рассматривая ПЧД можно объяснить наличие направленных электрон-позитронных потоков в космосе, наличие точечных гамма-источников, сделать различные заключения о скрытой массе в виде ПЧД, особенно на ранних периодах развития Вселенной. Также возможное изучение ПЧД поможет существенно уточнить существующие физические теории и параметры моделей, особенно касаясь самых первых моментов жизни Вселенной.

6. Литература

1. М.Ю. Хлопов, Основы космофизики, УРСС, 2004 г.
2. К.М. Belotsky et. al., Signatures of Primordial Black Holes Dark Matter, arXiv:1410.0203v1 [astro-ph.CO] 1 Oct 2014.
3. Л. Г. Полнарев, М. Ю. Хлопов, Космология, Первичные Черные Дыры и Сверхмассивные Частицы, УФН, 1985 г. Март, Том 143, вып. 3.