**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**

**Кафедра физики элементарных частиц**

**Реферат**

**по космомикрофизике на тему:**

«Первичные черные дыры»

 Выполнил:

студент группы Т9-40

Пантусов А.Н.

 Преподаватель:

Хлопов М.Ю.

 Москва 201488822222222222222222222222222

1. **Введение**

 Черная дыра - пространственно-временная область, из которой никакие сигналы не уходят на пространственную бесконечность [6]. Граница этой области называется горизонтом событий [7], а её характерный размер - гравитационным радиусом. Черные дыры являются финальной ступенью эволюции звезд с массами, 10 - 40 солнечных масс [13], 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 сжимают вещество звезды, образуя черную дыру. По одной из наиболее распространенных моделей считают, что активные галактические ядра – объекты, обладающие переменным широким электромагнитным спектром излучения, позволяющим судить о наличии магнитного поля, характерных выбросов и перемещении горячего газа с большой скоростью, являются сверхмассивными черными дырами [15]. Массы таких черных дыр превышают 106 солнечных масс. По одной из гипотез [14], центрами самых первых галактик являлись первичные черные дыры – объекты, которые образовались не за счет гравитационного коллапса 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. Также в теории рассматривается существование и первичных черных дыр, масса которых на момент образования могла составлять порядка mPl и даже меньше, а радиус порядка 10−35 м. Каждое из подобных предположений может привести к интересному решению многих космологических проблем. Описывая космологическую эволюцию Вселенной, учитывающую инфляционную модель, бариосинтез и наличие небарионной темной материи, всегда появляются различные физические предсказания, зависящие от модели, которые можно проверить, основываясь на астрофизических данных [16]. Одно из таких предсказаний – первичные черные дыры, изучение которых может пролить свет на множество космологических вопросов. ПЧД являются единственным источником информации о возможном существовании уже распавшихся сверхтяжелых метастабильных частиц, а также о виде уравнения состояния на ранних этапах жизни Вселенной. Они также могут дать нам информацию о первичных неоднородностях и их различных параметрах. ПЧД могут служить способом проверки существования фазовых переходов первого и второго рода. ПЧД являются одной из возможных форм темной материи [2]. Также с их помощью можно объяснить образование первых активных галактических ядер.

1. **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 ‹δ2›<<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 WPBH~exp(-γ2/2‹δ2›)

С уравнением состояния Вселенной имеющим вид p=γε, 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 образуют черную дыру. Если бы не было расширения, то масса внутри космологического горизонта находилась бы как раз в пределах своего гравитационного радиуса. Существует экспоненциально малая вероятность того, что в некоторой области однородной и изотропной Вселенной полностью остановится релятивистское расширение, в результате чего сформируется черная дыра (Зельдович, Новиков, 1966). 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 ρBH уравнение состояния внутри конфигурации может оказаться релятивистским p=ε/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 WBH≥WsWu~x13/2 , где Ws – вероятность реализации сферически симметричной конфигурации, Wu – вероятность реализации достаточно однородной конфигурации, x=rg/r1, где rg – гравитационный радиус рассматриваемой конфигурации с массой M, r1 – линейный размер конфигурации [1]. Спектр масс таких черных дыр связан со спектром флуктуаций плотности, которые формируются в частности на инфляционной стадии. Образование ПЧД за счет прямого механизма сильно подавлено для флуктуаций в пределах космологического горизонта до начала пылевой стадии, и для флуктуаций, которые не успели вырасти до еденицы до конца этой стадии. Диапазон масс таких черных дыр определяется снизу массой, заключенной под космологическим горизонтом на момент начала пылевой стадии, а сверху массой максимального количества частиц, сумевших образовать черную дыру, до того как эти 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**

 Рассмотрим поле с потенциалом, обладающим как минимум двумя вакуумными состояниями. В этом случае 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, чтобы образовать ПЧД. При этом должно, например, одновременно столкнуться несколько стенок, следовательно, вероятность образования таких черных дыр будет подавлена (Moss, 1994). В работах (Коноплич и др., 1999) был предложен механизм столкновения двух стенок, который ведет к образованию ПЧД с вероятностью порядка 1, что снимает это подавление. После столкновения происходит взаимное 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, кинетическая энергия стенок которого переходит в потенциальную и наоборот, в результате чего происходит 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**

 Рассмотрим комплексное скалярное поле, потенциал которого имеет вид V(φ)=λ(φ 2-f2/2)2. После спонтанного нарушения симметрии возникает бесконечное вырождение вакуума φ≈(f/√2)exp(iθ). 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» потенциала V(φ) за счет присутствия другого потенциала вида δV(θ)=Λ4(1-cosθ), происходит фазовый переход второго рода на энергетическом масштабе Λ << f, который ведет к появлению флуктуаций в значении потенциала поля. Эти флуктуации могут привести к тому, что появятся области, где значение фазы комплексного скалярного поля пройдет через π – точку максимума и станет равным либо 0, либо 2π. Примерный вид потенциала показан на рисунке 1. На рисунке 2 показан вид потенциала сверху, с учетом того, что он «наклонён».

Рис.1. Потенциал «Сомбреро» Рис.2. Вид потенциала сверху

Такие области ограничены и границей их является замкнутая стенка. На космологическую эволюцию таких стенок могут влиять следующие факторы. Стенки стремятся принять сферическую форму и сжаться к центру. Область, заключенная между стенками, может обособиться от общего расширения, если величина энергии стенки и энергии окружающей среды выровняется. Существует пропорциональная зависимость между энергией стенки и её площадью, при пересечении космологического горизонта. Также должны быть силы трения с окружающей плазмой при сжатии черной дыры. Размер таких замкнутых стенок в момент их формирования превышает размер космологического горизонта. Когда эти размеры сравняются, то это 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 одной из теорий и начали образовываться первые галактики [20].

1. **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 остается 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 TPBH=1/4πrg=m2Pl/8πM. Потери энергии черной дыры пропорциональны светимости взятой с обратным знаком и равны dM/dt~m4Pl/M2. 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 <1015 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 <TPBH , образованных в результате испарения. Испарение ПЧД может являться источником появления гравитино – элементарных частиц в теории супергравитации [17].

**Некоторые ограничения на массы ПЧД**

 Масса черных дыр, родившихся в результате фазового перехода первого рода равна MЧД=γ1Mn, где γ1<10-2, а Mn обозначает массу, которая может находиться в пузыре в период столкновения пузырей, если плотность энергии стенок пузырей полностью термализована. Таким образом, при наличии фазового перехода первого рода в конце инфляции, могут образовываться ПЧД с массами пропорциональными массе вещества, заключенного в пределах хаббловского горизонта в конце инфляции. Если рассмотреть оценку горизонта Hend≈4∙106mPl , которая следует из наблюдений анизотропии 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 одна из форм материи, которая вносит значительный вклад в общую космологическую плотность, пока все такие ПЧД не испарятся. Отсюда берется верхний предел масс таких черных дыр, появившихся после фазового перехода Mmax ≤5∙1014 г, иначе они существовали бы до сих пор. Ограничение, полученное из условия того (Зельдович, Старобинский, 1976), что испарение ПЧД не приводит к перепроизводству энтропии во Вселенной, дается выражением β(M)<10-8(1011г/M) и подразумевает, что испаряющиеся ПЧД могут быть доминирующей частью космологической плотности в период их образования, только если их масса не превышает 103г. Это означает, что испарению таких черных дыр можно приписать наблюдаемую энтропию Вселенной, что не вступает в противоречие наблюдательных ограничений. Рассматривая массивные ПЧД, следует учитывать ограничения из наблюдений за гамма-излучением и эффектами фемто/микро линзирования, которые не запрещают существование ПЧД в районе масс 1017г. При попытке объяснить реионизацию, за счет ПЧД, были получены ограничения на массу 3∙1016 … 8∙1016 г [2].

1. **Способы наблюдения**

 На данный момент учёными обнаружено около тысячи объектов во Вселенной, которые причисляются к чёрным дырам. Единственный достоверный способ отличить черную дыру от объекта другого типа – измерить массу и размер объекта и сравнить его радиус с гравитационным. Также по наблюдениям за движением звезд, вокруг массивного тела, не испускающего свет, можно с некоторой степенью точности говорить о том, что оно является черной дырой. Черные дыры можно детектировать по различным искажениям света, проходящего около них. Например, при пролете мимо отдаленной звезды, свет от звезды исказится. Также черные дыры ищут по излучению Хокинга. В этом случае они являются источником космических лучей, нейтрино и гамма лучей. Однако данное излучение слишком слабое и зафиксировать его не удается. Есть возможность измерить излучение Хокинга, для ПЧД малых масс, объединенных в кластер [2]. 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 излучать узконаправленный пучок частиц – jet, в пространство, который тоже можно детектировать.

1. **Заключение**

 Первичные черные дыры – объекты, которые, в случае образования на самых ранних этапах развития Вселенной, будут нести информацию об этом периоде в своем спектре. Если ПЧД образовались от сверхмассивных метастабильных частиц, то они 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 в районе масс 1017г можно объяснить наличие позитронных линий из центра галактики, наличие точечных гамма-источников, ПЧД также рассматривают как один из возможных видов темной материи [2]. Изучение ПЧД поможет существенно уточнить существующие физические теории и параметры моделей, описывающих самые первые моменты жизни Вселенной.

1. **Литература**

1. М.Ю. Хлопов, Основы космомикрофизики, УРСС, 2004 г.

2. K.M.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.

4. S. G. Rubin, A. S. Sakharov, and M. Yu. Khlopov, “The formation of primary galactic nuclei during phase transitions in the early Universe,” Journal of Experimental and Theoretical Physics, vol. 92, no. 6, pp. 921–929, 2001. 5. M. Yu. Khlopov, S.G. Rubin, A. S. Sakharov, “Strong primordial inhomogeneities and galaxy formation,”CERN-TH-2002-033, 2002. 6. И.Д. Новиков, В.П. Фролов, Физика черных дыр (М.: Наука, 1986). 7. Горизонт событий // Википедия. [2005—2014]. Дата обновления: 07.12.2014. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=67210922> (дата обращения: 29.12.2014). 8. Р.В. Коноплич, С.Г. Рубин, А.С. Сахаров, М.Ю. Хлопов, Ядерная физика. 62, 1999.-1705с. 9. I.G. Moss, Phys. Rev. D50, 1994.-676с. 10. S.W. Hawking, Comm. Math. Phys. 43, 1975.-199с. 11. Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков, Астрон. ж. 43, 1966.-758с. 12. Я.Б. Зельдович, А.А. Старобинский, Письма ЖЭТФ. 24, 1976.-616с. 13. И.Д. Новиков, В.П. Фролов “УФН” 171, 307 - 324 (2001). 14. V.I. Dokuchaev and Y.N. Eroshenko, AApTr 22 (2003) 727-730. 15. V.I. Dokuchaev, Y.N. Eroshenko, and S.G. Rubin, Astronomy Reports 52 (2008) 779-789. 16. M.Yu. Khlopov, Research in Astron. Astrophys, Vol. 10 No. 6 (2010), 495-528 17. M.Yu.Khlopov, A. Barrau and J. Grain “Gravitino production by Primordial Black Hole evaporation and constraints on the inhomogeneity of the early Universe” Class. Quantum Grav. V. 23 (2006), 1875 -1882. 18. M.Yu. Khlopov, R.V. Konoplich, S.G. Rubin, A.S. Sakharov, “First-Order Phase Transitions As A Source Of Black Holes In The Early Universe” Grav.Cosmol.6, 2000 ,153-156. 19. S.G. Rubin, M.Yu. Khlopov, A.S. Sakharov “Primordial Black Holes From Nonequilibrium Second Order Phase Transition” Grav.Cosmol.6, 2000, 1-10. 20. M.Yu. Khlopov, S.G. Rubin, A.S. Sakharov “Primordial Structures of Massive Black Hole Clusters” arXiv:0401532v2 [astro-ph] 13 Dec 2004.