

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Национальный Исследовательский Ядерный Университет
Московский Инженерно-Физический Институт

Кафедра №40 «Физики Элементарных Частиц»

Реферат

по космомикрoфизике на тему:

«Первичные чёрные дыры»

Выполнил
студент группы Т1-40М
Шакиров А.В.
Преподаватель:
Хлопов М.Ю.

Москва 2012

Введение

Первичные черные дыры являются одним из теоретических инструментов космоархеологического анализа, позволяющим получить информацию о ранней Вселенной.

Согласно теории гравитации любой объект с массой M может образовать черную дыру, если эту массу поместить внутрь его гравитационного радиуса

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}.$$

Теоретическая астрофизика рассматривает черные дыры как конечную стадию эволюции звезд с массой, превышающей несколько солнечных масс (звезды с меньшей массой образовать черную дыру не могут, так как, чем меньше масса вещества, тем до большей плотности ее надо сжать, чтобы превратить в черную дыру, а при больших плотностях возникают мощные силы давления, препятствующие сжатию). [2]

Однако Я.Б. Зельдович и И.Д. Новиков, а затем С. Хокинг высказали гипотезу о возможности образования чёрных дыр на ранних этапах космологического расширения Вселенной. Такие черные дыры получили название первичных.

Для образования ПЧД необходимо, чтобы в метрике, описывающей Вселенную, с самого начала были большие отклонения от однородности (т.е., гравитационное поле было сильно неоднородным). Это представляется маловероятным, так как возмущения метрики должны были быть порядка 1, хотя распределение плотности вещества по пространству было однородным при приближении к началу космологического расширения. Когда в ходе расширения Вселенной величина $l = ct$, где t – время, прошедшее с начала расширения, станет порядка линейного размера неоднородности метрики, появляется возможность образования черной дыры с массой, содержащейся к моменту t в объёме l^3 . Таким образом, возможно формирование черных дыр с массой, существенно меньшей звездных, если такие дыры возникают достаточно рано. [1]

Во Вселенной с уравнением состояния

$$p = \gamma \varepsilon,$$

где численный фактор находится в диапазоне $0 < \gamma < 1$, вероятность образовать черную дыру из возмущения внутри космологического горизонта равна

$$W_{\text{ПЧД}} \approx \exp \left\{ -\frac{\gamma^2}{2\langle \delta^2 \rangle} \right\}$$

Первичные черные дыры представляют особый интерес, так как квантовое испарение Хокинга существенно именно для черных дыр малой массы, а такими могут быть только первичные черные дыры.

Возможные способы образования ПЧД

Предполагается, что первичные черные дыры могли образоваться следующими способами.

1). Обособление от релятивистского расширения в некоторой области:

1.1). Остановка релятивистского расширения

Как указали Зельдович и Новиков (1966), черные дыры с любой массой, превышающей планковскую массу, в принципе, могли образоваться в ранней Вселенной, поскольку масса в размерах космологического горизонта может естественным образом сформировать черную дыру, если расширение остановится в рассматриваемой области. В однородной и изотропной Вселенной остановке релятивистского расширения соответствует экспоненциально малая вероятность.

1.2). Прямое образование ПЧД на пылевых стадиях

Другая возможность образования ПЧД – особенности условий на пылевой стадии, при которых рост флуктуаций приводит к образованию столь однородных и изотропных конфигураций, что при обособлении от расширения они сжимаются в пределы своего гравитационного радиуса.

Прямое рождение ПЧД означает, что, после того как флуктуация плотности выросла до величины порядка 1 и обособилась от общего космологического расширения, конфигурация сжимается под свой гравитационный радиус.

Можно показать, что для образования черной дыры конфигурация должна быть очень близка к сферически симметричной.

2). Фазовые переходы первого рода

В процессах фазового перехода первого рода столкновения стенок пузырей могут приводить к образованию ПЧД, концентрируя кинетическую энергию стенок в пределах ее гравитационного радиуса.

Есть несколько возможных вариантов образования черных дыр в процессах фазового перехода:

2.1). Гравитационный коллапс мешка ложного вакуума, сформированного вследствие столкновения стенок пузырей истинного вакуума.

Последовательные стадии такого процесса представлена на рис.1:

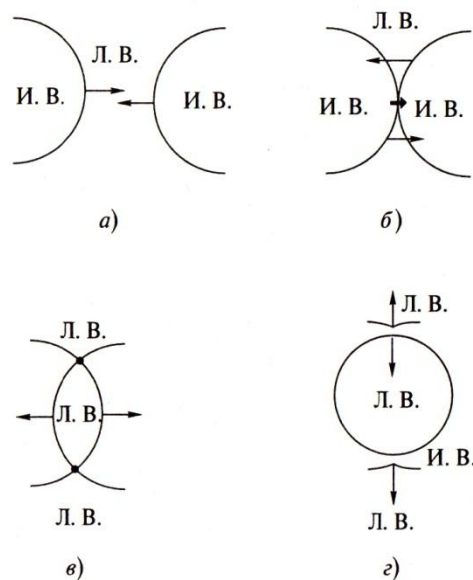


Рис.1. Схема образования мешка ложного вакуума

Непосредственно после столкновения совместное проникновение стенок на расстояние, сравнимое с толщиной стенки, сопровождается дополнительным увеличением потенциальной энергии. Затем стенки отражаются и двигаются в обратном направлении в область истинного вакуума. Пространство между ними заполняется полем в состоянии ложного вакуума, преобразуя кинетическую энергию стенок обратно в энергию ложного вакуума и уменьшая скорость стенок. Тем временем внешняя часть стенок, продолжая расширяться и ускоряться, поглощает ложный вакуум во внешней области. Неизбежно наступает момент, зависящий от параметров теории, когда центральная область ложного вакуума отделяется и образует обособленный мешок ложного вакуума.

Дальнейшая эволюция мешка ложного вакуума состоит из следующих этапов:

1. Мешок вырастает до определенного размера, пока кинетическая энергия его стенок не становится равной 0
2. Затем мешок ложного вакуума начинает стягиваться до размера, сравнимого с толщиной стенки
3. Объем расширяется снова и затем сжимается опять, так что последовательное сжатие и расширение мешка ложного вакуума продолжается.

Такой процесс периодической смены сжатия и расширения (осцилляция) приводит к потере энергии мешка ложного вакуума, преобразующейся в колебания классического скалярного поля. Таких осцилляций может произойти лишь несколько [4][5]

2.2). Образование замкнутых стенок скалярного поля сразу после окончания инфляции и их коллапс в кластер ПЧД.

На рис. 2 изображен гипотетический потенциал инфлатонного поля. Пространственная область, схематично нарисованная слева, заполнена полем, величина которого отмечена черной точкой на кривой потенциала. Во время инфляции эта область, как и все остальные, быстро увеличивается в размерах. Кроме того, поле внутри области меняется со временем случайным образом за счет квантовых флуктуаций.

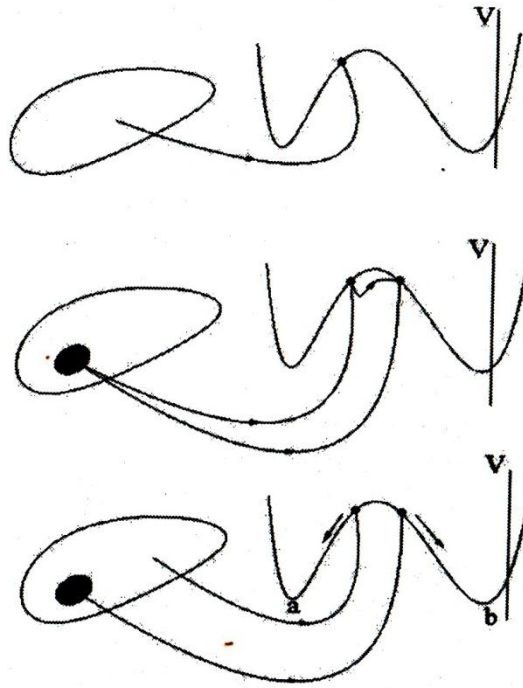


Рис.2. Рождение полевой стенки в результате квантовой флуктуации вблизи максимума потенциала.

На среднем рисунке показано, что поле внутри подобласти, закрашенной черным, может случайно оказаться по другую сторону «холма» - максимума потенциала. Затем инфляция увеличит многократно размер этой маленькой области. Когда инфляция закончится, поле начнет быстро скатываться к минимуму потенциала. Но в то время, как поле в основной области скатывается к своему минимуму, точка «а» на нижнем рисунке, поле внутри подобласти движется к другому минимуму, «b».

Следующий рисунок, рис. 3 (I), показывает возможное расположение в пространстве обеих областей после того как поле скатилось в соответствующие минимумы. Расширение пространства во время инфляции многократно увеличило размеры обеих областей. Поскольку основная пространственная область и ее подобласть увеличились в одинаковое число раз, последняя осталась внутри основной области. Теперь обширная область занята полем «а», в то время как меньшая область содержит поле «b». Ясно, что если мы пойдем (мысленно) из внутренней области наружу в любом направлении, т.е. из одного минимума в другой, то обязательно побываем в точке, где потенциал максимален. Значит, маленькая область окружена замкнутой поверхностью с повышенной плотностью энергии. Возникла так называемая замкнутая полевая стенка.

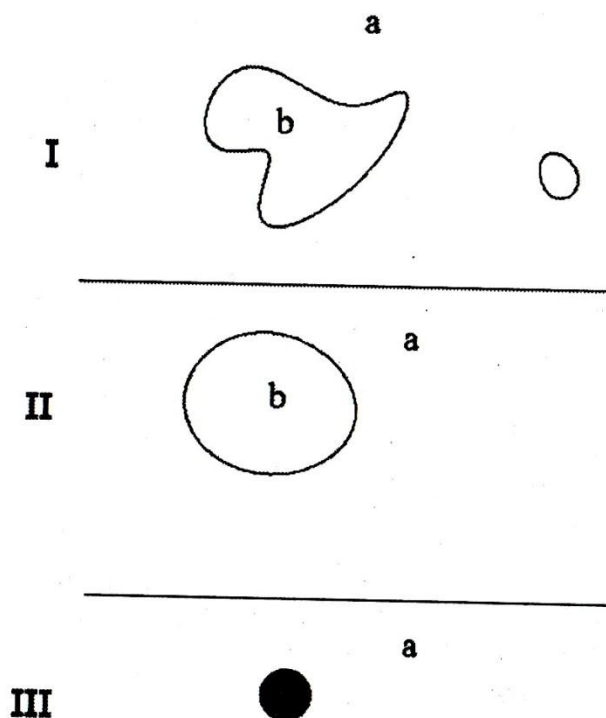


Рис.3. Стенки больших размеров коллапсируют, образуя черные дыры. Стенки малых размеров исчезают, оставляя после себя колебания скалярного поля.

Дальнейшая эволюция замкнутой стенки происходит следующим образом. Стенка, обладая избытком энергии, стремится в энергетически наиболее выгодное состояние. Она, как мыльный пузырь, приобретает сферическую форму и сжимается, см. рис.3 (II). Судьба маленькой стенки малоинтересна – она сжимается к центру, происходит столкновение разных областей стенки друг с другом, в результате чего вся ее энергия переходит в разлетающиеся волны поля, из которого состояла стенка. Совсем другая ситуация с большими стенками. Сжимаясь, они доставляют колоссальную энергию в небольшой объем пространства. Эта энергия удерживается гравитационным полем, и образуется компактный объект, рис.3 (III). Более подробный анализ показывает, что такие объекты – черные дыры – образуются целыми семьями, кластерами, рис. 4. [6]

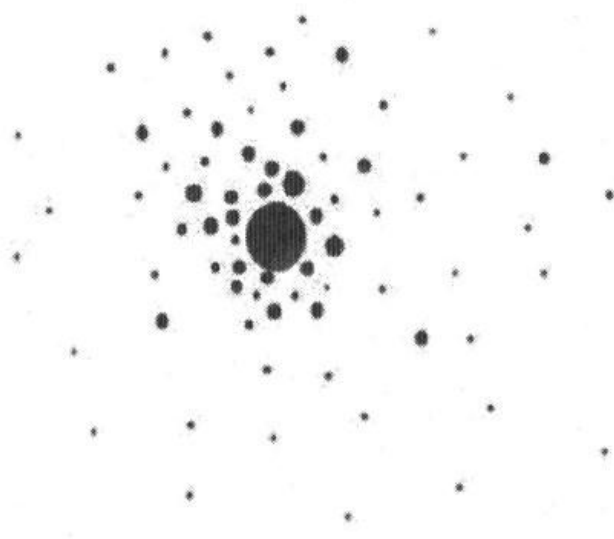


Рис.4. Типичная картина кластера первичных черных дыр.

Ограничения на ПЧД

В 1974 г. Хокинг теоретически обнаружил процесс испарения черных дыр, суть которого заключается в том, что в сильном гравитационном поле черной дыры происходит рождение из вакуума частиц, уносящих массу черной дыры на бесконечность.

Можно предположить наличие ограничений на массу существующих ПЧД, исходя из этого процесса.

Темп потери энергии за счет частиц, уходящих на бесконечность, определяется гравитационным радиусом черной дыры и соответствует излучению черного тела с температурой

$$T_{\text{ПЧД}} = \frac{1}{4\pi r_g} = \frac{m_{Pl}^2}{8\pi M}$$

Светимость черной дыры по порядку величины равна

$$\frac{dE}{dt} \sim T^4 r_g^2 \sim r_g^{-2} \sim \frac{m_{Pl}^4}{M^2}$$

Такие потери энергии означают, что черная дыра теряет свою массу со скоростью

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{dE}{dt} \sim \frac{m_{Pl}^4}{M^2}$$

Характерное время полной потери массы черной дыры, т.е. время ее испарения, составляет

$$t_{\text{исп}} \sim \left(\frac{M}{m_{Pl}} \right)^3 t_{Pl}$$

С учетом всех численных факторов время испарения черной дыры равно

$$t_{\text{исп}} = 10^{-27} \text{ сек} \cdot \left(\frac{M}{1 \text{ грамм}} \right)^3$$

Отсюда следует, что время испарения черных дыр, образующихся вследствие эволюции звезд (т.е., с массами $M > 2M_{\odot}$)

$$t_e \sim 10^{66} \text{ лет},$$

что сильно превышает возраст Вселенной. Испарением таких черных дыр можно пренебречь. Однако для ПЧД, которые могут иметь любую массу вплоть до планковской, время испарения становится меньше возраста Вселенной при массах

$$M < M_e \sim 10^{15} \text{ г. [2]}$$

Таким образом, в современной Вселенной не могут существовать первичные черные дыры, образованные с массами $< 10^{15} \text{ г.}$

Заключение

Первичные черные дыры могут быть использованы для изучения ранней Вселенной (ограничения на инфляционные сценарии и модели), гравитационного коллапса (изучение критических явлений), физики высоких энергий (наблюдение космических частиц от испарения ПЧД) и квантовой гравитации. [7]

Список литературы

- [1] Новиков И.Д., Фролов В.П. (1986) «Физика черных дыр»
- [2] Хлопов М.Ю. (2004) «Основы космомикрoфизики»
- [3] Полнарeв А.Г., Хлопов М.Ю. (1985). «Успехи физических наук», т. 145
- [4] Watkins. R., Widrow L.M. (1992). Nucl. Phys. B374, 446
- [5] Belova T.I., Kudryavtzev A.E. (1988). Physica. D32, 18.
- [6] С.Г. Рубин, К.А. Бронников «Лекции по гравитации и космологии»
- [7] Bernard Carr “Primordial Black Holes: Do They Exist and Are They Useful?”, Inflating Horizon of Particle Astrophysics and Cosmology 2005