

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

РЕФЕРАТ НА ТЕМУ

Первичные Черные Дыры как кандидаты в скрытую массу

Преподаватель,
д.ф.-м.н., профессор

_____ М. Ю. Хлопов

Студент

_____ К. К. Казакова

Москва 2023

Содержание

1	Введение	3
1.1	ПЧД как скрытая масса	4
2	Образование ПЧД	5
2.1	Первичные неоднородности	5
2.2	Коллапс при фазовом переходе квантовой хромодинамики . . .	5
2.3	Коллапс скалярного поля	5
2.4	Коллапс доменных стенок	5
3	Ограничения на ПЧД	6
3.1	Ограничения на испарение	6
3.2	Ограничения на линзирование	6
3.3	Динамические ограничения	6
3.4	Гравитационно-волновые ограничения	6
4	Свидетельства наблюдения ПЧД	7
4.1	Линзирование	7
4.2	Наблюдения LIGO/Virgo	7
4.3	Кластеры ПЧД	7
5	ПЧД и частицы скрытой массы	8
5.1	Решение проблемы точной настройки ПЧД	8
6	Заключение	9
	Список используемых источников	10

1 Введение

Черная дыра (ЧД) представляет собой область в пространстве и времени, обладающую настолько сильным гравитационным полем, что даже фотоны не в состоянии покинуть эту область [1]. Граница, перейдя которую объекты перестают быть причинно связанными с нами (наблюдателем), называется горизонтом событий ЧД. Если какой-либо объект находится внутри этой границы, он будет перемещаться только внутри черной дыры. Хотя объект из внешнего пространства может проникнуть за горизонт событий, он уже не сможет вернуться обратно. Иными словами, ЧД — это сферические объекты массой M (в модели Шварцшильда) [2], помещенные внутрь гравитационного радиуса r_g (или радиуса Шварцшильда):

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}. \quad (1.1)$$

Черные дыры классифицируются на два типа: астрофизические и первичные. Астрофизические черные дыры образуются в результате коллапса массивных звезд, масса которых составляет порядка 10 солнечных масс, или же в результате коллапса больших звездных скоплений в центрах галактик. Однако, в 1966 году Зельдович и Новиков предложили модель образования черных дыр, в которой образование происходит на ранних этапах развития Вселенной, до образования крупномасштабных структур [3]. Такие ЧД называются первичными черными дырами (ПЧД) [4]. Также гипотезу существования таких ПЧД выдвинул Хокинг [5]. На протяжении более полувека ПЧД привлекают к себе пристальное внимание.

На массу ПЧД, образовавшуюся в момент времени t , существует верхнее ограничение: масса ЧД не может превзойти массу Хаббловского горизонта в этот момент времени:

$$M \sim \frac{c^3 t}{G} \sim 10^{15} \left(\frac{t}{10^{-23} \text{с}} \right) g. \quad (1.2)$$

Таким образом, ПЧД могли бы иметь массу $M_{Pl} \sim 10^{-5}g$, если бы они образовались за Планковское время ($t \sim 10^{-43}s.$), $1M_{\odot}$ если бы они образовались в эпоху КХД ($t \sim 10^{-5}s.$) и $10^5 M_{\odot}$ если бы они образовались за $t \sim 1s$. Таким образом, ПЧД могут охватывать огромный диапазон масс и являются единственными, которые могут иметь массу меньше массы Солнца.

1.1 ПЧД как скрытая масса

Первичные черные дыры представляют особый интерес для космологии, особенно ПЧД с массой более 10^{15} грамм, которые почти не подвержены излучению Хоккинга. Так как скрытая масса до сих пор не объяснена, ведется активный поиск кандидатов на роль скрытой массы. Астрофизические ЧД не могут объяснить всю скрытую массу, так как они образуются из барионов и подчиняются хорошо известному ограничению нуклеосинтеза Большого взрыва (НБВ), согласно которому на барионы приходится не более 5% от критической плотности [6].

Таким образом, интерес к ПЧД связан с тем, что они являются одними из кандидатов на роль скрытой массы, так как были сформированы в эпоху преобладания радиации до НБВ, и избегают этого ограничения. Поэтому ПЧД классифицируются как небарионные и ведут себя как любая другая форма холодной скрытой массы, даже не смотря на то, что они являются тяжелыми.

Сравнительно недавно были рассмотрены многочисленные ограничения [7] на долю скрытой массы $f(M)$ в ПЧД массой M . Эти ограничения предполагают, что существует только несколько диапазонов масс, где f может быть значительной: небольшой диапазон ($10^{17} - 10^{23}$) г., средний диапазон ($10 - 10^5 M_{\odot}$) и огромный диапазон ($M > 10^{11} M_{\odot}$).

Следует подчеркнуть, что неиспаряющиеся ПЧД могут представлять большой космологический интерес, даже если они обеспечивают лишь малую долю скрытой массы. Например, они бы могли сыграть определенную роль в образовании сверхмассивных ЧД в ядрах галактик. Также возможно, что скрытая масса содержит некоторую смесь ПЧД и слабо взаимодействующих массивных частиц Вимпов (WIMP) [8].

2 Образование ПЧД

Условием формирования ПЧД в ранней Вселенной является преобладание энергии гравитации над силами внутреннего давления (т.е. преобладание над внутренней энергией). Если рассмотреть область Вселенной с размером R , то гравитационную энергию можно будет записать в виде $U_g \sim GM^2/R \sim G\rho^2 R^5$, где ρ – плотность среды. Внутреннюю энергию релятивистского вещества можно записать в виде $U_p = pV$, где $p = c^2\rho/3$. Тогда $U_p \sim c^2\rho R^3$. Таким образом, можно записать условие формирования ПЧД, с помощью которого был получен верхний предел массы ПЧД [1.2](#) в момент времени t :

$$\frac{G\rho R^2}{c^2} > 1. \quad (2.1)$$

2.1 Первичные неоднородности

2.2 Коллапс при фазовом переходе квантовой хромодинамики

2.3 Коллапс скалярного поля

2.4 Коллапс доменных стенок

3 Ограничения на ПЧД

3.1 Ограничения на испарение

3.2 Ограничения на линзирование

3.3 Динамические ограничения

3.4 Гравитационно-волновые ограничения

4 Свидетельства наблюдения ПЧД

4.1 Линзирование

4.2 Наблюдения LIGO/Virgo

4.3 Кластеры ПЧД

5 ПЧД и частицы скрытой массы

5.1 Решение проблемы точной настройки ПЧД

6 Заключение

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Banados M., Teitelboim C., Zanelli J.* The Black hole in three-dimensional space-time // *Phys. Rev. Lett.* — 1992. — Vol. 69. — P. 1849–1851. — arXiv: [hep-th/9204099](https://arxiv.org/abs/hep-th/9204099).
2. *Ortín T.* The Schwarzschild Black Hole // *Gravity and Strings*. — 2nd ed. — Cambridge University Press, 2015. — P. 291–317. — (Cambridge Monographs on Mathematical Physics).
3. *Zel'dovich Y. B., Novikov I. D.* The Hypothesis of Cores Retarded during Expansion and the Hot Cosmological Model // *Soviet Astron. AJ* (Engl. Transl.), — 1967. — Vol. 10. — P. 602.
4. *Khlopov M. Y.* Primordial black holes // *Research in Astronomy and Astrophysics*. — 2010. — May. — Vol. 10, no. 6. — P. 495–528. — URL: <https://doi.org/10.1088%2F1674-4527%2F10%2F6%2F001>.
5. *Hawking S.* Black hole explosions? // *Nature*. — 1974. — Mar. — No. 24. — P. 30–31. — URL: <https://doi.org/10.1038/248030a0>.
6. *Cybert R. H., Fields B. D., Olive K. A.* Primordial nucleosynthesis in light of WMAP // *Physics Letters B*. — 2003. — Vol. 567, no. 3. — P. 227–234. — ISSN 0370-2693. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037026930300916X>.
7. *Carr B.* [et al.]. Constraints on primordial black holes // *Reports on Progress in Physics*. — 2021. — Dec. — Vol. 84, no. 11. — P. 116902. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6633/ac1e31>.
8. *Pospelov M., Ritz A., Voloshin M. B.* Secluded WIMP Dark Matter // *Phys. Lett. B*. — 2008. — Vol. 662. — P. 53–61. — arXiv: [0711.4866](https://arxiv.org/abs/0711.4866) [[hep-ph](https://arxiv.org/archive/hep)].