

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования Российской Федерации
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539.1.05

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕСМОТРА ОГРАНИЧЕНИЯ
ДОЛИ ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР В СКРЫТОЙ МАССЕ ДЛЯ
КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИК**

Научный руководитель,

д.ф.-м.н.

_____ К. М. Белоцкий

Студент

_____ К. М. Кузнецова

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Первичные черные дыры	4
1.1. Роль ПЧД,	4
1.2. Ограничения на долю ПЧД,	4
2. Взаимодействие белых карликов с ПЧД	6
3. Шаровые скопления и карликовые галактики	7
3.1. Шаровые скопления	7
3.2. Карликовые галактики	7
4. Исследование возможности пересмотра ограничения доли ПЧД в СМ для КГ	8
5. Заключение	11
Список использованных источников	12

ВВЕДЕНИЕ

По состоянию на сегодняшний день существование скрытой массы (СМ) было установлено только благодаря её гравитационному взаимодействию. Следовательно, о природе СМ известно немного, кроме того факта, что она небарионная, нерелятивистская, слабо взаимодействующая и составляет около 26,8% от общей энергии Вселенной [1]. В научной литературе рассматриваются различные кандидаты на роль СМ. Одним из них являются первичные черные дыры (ПЧД) [2;11;12].

1. ПЕРВИЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

1.1. РОЛЬ ПЧД

В ранней Вселенной некоторые флуктуации плотности могли коллапсировать, произведя определенное количество черных дыр, называемых первичными. Эти ПЧД обладают свойствами, которые делают их подходящими кандидатами на роль СМ: они являются нерелятивистскими и имеют размеры (гравитационный радиус) порядка 10^{-8} см ($m_{\text{ПЧД}}/10^{20}\text{Г}$), что делает их практически бесстолкновительными объектами.

Основополагающей работой по ПЧД считается статья Зельдовича и Новикова 1966 года [3], в которой было впервые выдвинуто предположение о существовании объектов, которые сегодня называют ПЧД. В следующие несколько лет, в начале 1970-х годов, вышли работы за авторством Хокинга и Карра, а также их совместная статья [4]. Впоследствии было понято, что ПЧД могут представлять собой (возможно, большую часть) СМ [5].

1.2. ОГРАНИЧЕНИЯ НА ДОЛЮ ПЧД

Существует ряд наблюдательных ограничений на долю ПЧД в общем количестве СМ. Эти ограничения кратко изложены на рисунке 1. Они оставляют открытыми окна масс в диапазоне $\sim 10^{16}\text{Г} < m_{\text{ПЧД}} < 10^{18}\text{Г}$ и $10^{20}\text{Г} < m_{\text{ПЧД}} < 10^{26}\text{Г}$. Для того, чтобы наложить ограничение на ПЧД в оставшемся допустимом диапазоне масс, в статье [6] рассматривается захват ПЧД звездой во время процесса формирования звезды и их дальнейшее наследование компактным остатком звезды, нейтронной звездой (НЗ) или белым карликом (БК).

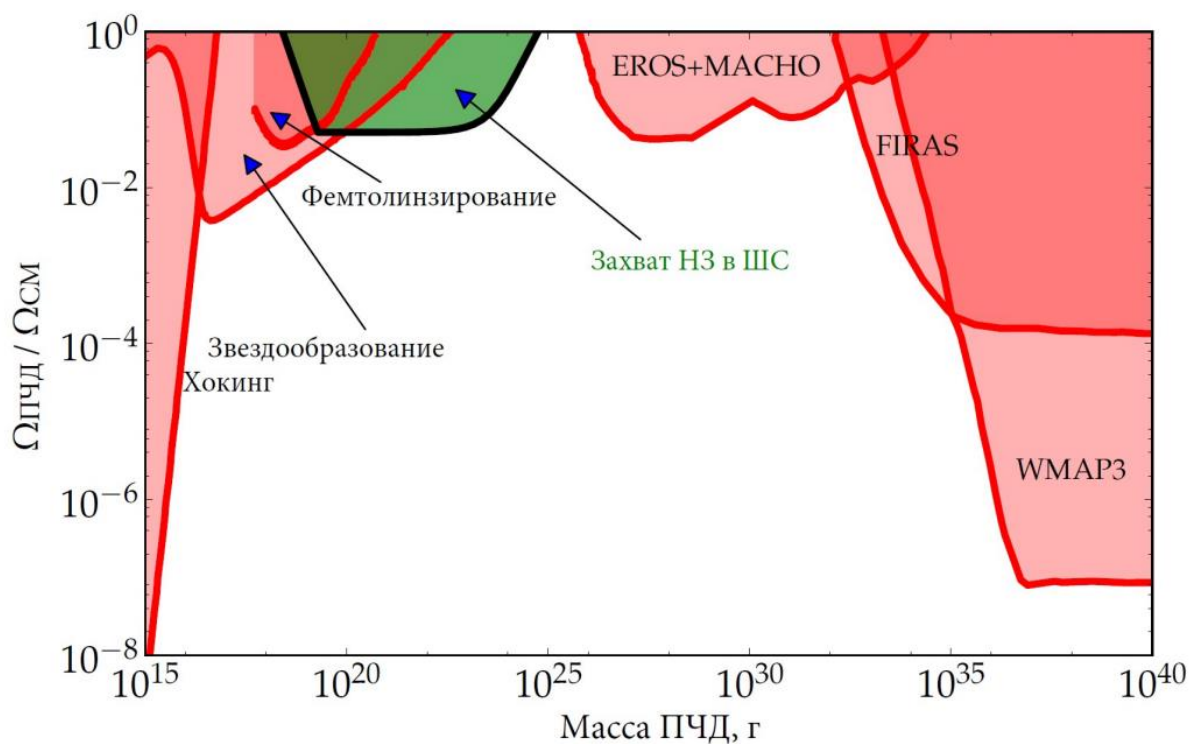


Рисунок 1 — Ограничения на долю ПЧД в общем количестве СМ, полученные из различных наблюдений. В закрашенном зеленом регионе показаны ограничение, которое должно следовать из наблюдений НЗ в ядрах шаровых скоплений (ШС), если принять плотность СМ $2 \times 10^3 \text{ ГэВ/см}^3$, полученную в численных симуляциях в [8].

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ С ПЧД

При прохождении ПЧД через БК происходит локализованный нагрев вещества звезды вокруг траектории ПЧД в результате динамического трения. Для достаточно массивных ЧД этот нагрев может инициировать необратимую термоядерную реакцию, в результате чего звезда взрывается в виде сверхновой. Для того, чтобы наложить ограничение на долю ПЧД, в работе [6] рассматривается захват ПЧД нейтронной звездой или белым карликом. Присутствие даже одной ПЧД с соответствующей массой внутри звезды (БК) приводит к быстрому разрушению последней за счет аккреции вещества на ПЧД [7]. Таким образом, простые наблюдения БК в среде, богатой СМ, накладывают ограничение на долю ПЧД в СМ.

3. ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ И КАРЛИКОВЫЕ ГАЛАКТИКИ

3.1. ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ

Шаровые скопления (ШС) – это гравитационно-связанные системы, состоящие из $10^4 - 10^7$ звезд с диаметром от 20 до 100 пк. В нашей Галактике известно около 100 ШС. Типичная масса ШС составляет $\sim 10^5 M_{\odot}$, эффективные радиус ~ 40 пк, а радиус ядра – 1-2 пк. Возраст ШС составляет от 8 до 13,5 миллиардов лет, и поэтому они являются самыми старыми выжившими звездными подсистемами в Галактике.

ШС становятся подходящим предметом для рассмотрения в данной работе, так как обладают параметром, значительным в контексте взаимодействий ПЧД с БК, а именно, концентрацией звезд внутри ШС.

3.2. КАРЛИКОВЫЕ ГАЛАКТИКИ

Карликовые галактики (КГ), известные до 2005 года, имеют светимости более $2.5 \times 10^5 L_{\odot}$, где $L_{\odot} = 3.827 \times 10^{33}$ эрг/с – светимость Солнца. Их эффективный радиус, в среднем, составляет 200 пк.

КГ в свою очередь интересны в рамках данной работы, так как обладают высокой долей СМ, приходящейся на объекты внутри КГ [9].

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕСМОТРА ОГРАНИЧЕНИЯ ДОЛИ ПЧД В СМ ДЛЯ КГ

Исследование в данной работе заключается в том, чтобы составить отношение, позволяющее оценить, насколько ограничение доли ПЧД в СМ для КГ преобладает над этой же характеристикой для ШС или уступает ей.

В статье [6] было получено ограничение доли ПЧД в случае равномерного распределения ПЧД в ядре ШС.

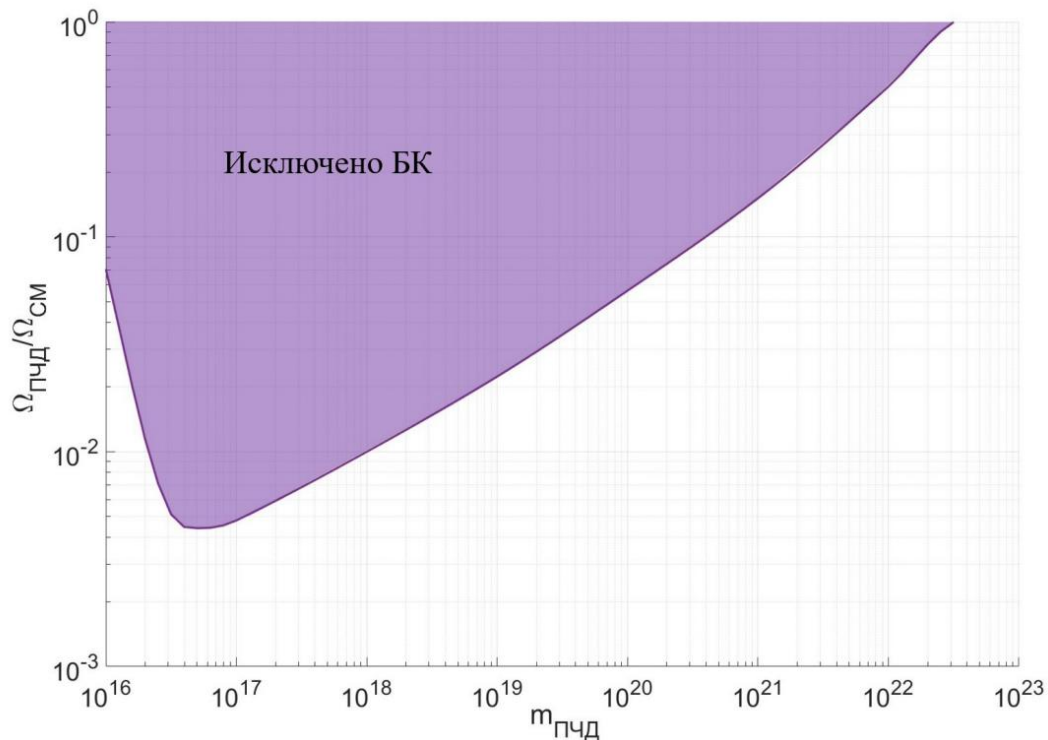


Рисунок 2 — Ограничение на долю $\Omega_{\text{ПЧД}}/\Omega_{\text{СМ}}$, полученные из наблюдений БК в ядрах ШС.

Количество взаимодействий белого карлика с ПЧД в случае равномерного распределения ПЧД:

$$N_{\text{вз}} = n_{\text{ПЧД}} \cdot V_{\text{БК}} \cdot \alpha \cdot N, \quad (1)$$

$$V_{\text{БК}} = \sigma_{\text{БК}} \cdot v_{\infty} \cdot t, \quad (2)$$

где $n_{\text{ПЧД}} = \frac{M_{\text{СМ}}/m_{\text{ПЧД}}}{V}$ – концентрация ПЧД внутри ШС, $\sigma_{\text{БК}}$ – гравитационное сечение захвата БК, v_{∞} – скорость между БК и ПЧД на большом расстоянии, $t = 10^{10}$ лет – характерное время задачи, α – свободный параметр – доля БК в общем количестве звёзд – который должен следовать из будущих наблюдений ШС/КГ (можно предположить, что он будет соответствовать величинам порядка $\sim 10^{-3}$), N – общее количество звезд.

Введем величину β , показывающую, на сколько приведенное к объему число взаимодействий ПЧД с БК для КГ превосходит или уступает приведенному к объему числу взаимодействий ПЧД с БК для ШС:

$$\beta = (N_{\text{ВЗ}}^{\text{КГ}})^* / (N_{\text{ВЗ}}^{\text{БК}})^* \quad (3)$$

Подставляя выражения (1) и (2) в (3), приходим к отношению:

$$\beta = (n_{\text{ЗВ}}^{\text{КГ}} / n_{\text{ЗВ}}^{\text{ШС}}) \cdot (\rho_{\text{СМ}}^{\text{КГ}} / \rho_{\text{СМ}}^{\text{ШС}}) \quad (4)$$

Для оценки величины β использовались параметры КГ, приведенные в статье [10]. В качестве плотности СМ в ШС рассматривалась доля плотности ШС:

$$\rho_{\text{СМ}}^{\text{ШС}} = \gamma \cdot \rho^{\text{ШС}}, \quad (5)$$

где γ – свободный параметр – доля СМ в общей массе ШС – который должен следовать из будущих наблюдений ШС (будем рассматривать параметр γ , соответствующий диапазону $(10^{-3}; 1)$).

Результаты проведенных оценок занесены в таблицу 1.

γ	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1
β	(10 - 1000)	(1 - 100)	(0,1 - 10)	($10^{-2} - 1$)

Таблица 1 — Отношение приведенных к объему числу взаимодействий ПЧД с БК для КГ и ШС для различных значений свободного параметра γ .

На рисунке 3 приведен график величины β для $\gamma = 1$, где по оси ординат отложены значения $y = (n_{\text{ЗВ}}^{\text{КГ}} / n_{\text{ЗВ}}^{\text{ШС}})$, а по оси абсцисс $x = (\rho_{\text{СМ}}^{\text{КГ}} / \rho_{\text{СМ}}^{\text{ШС}})$.

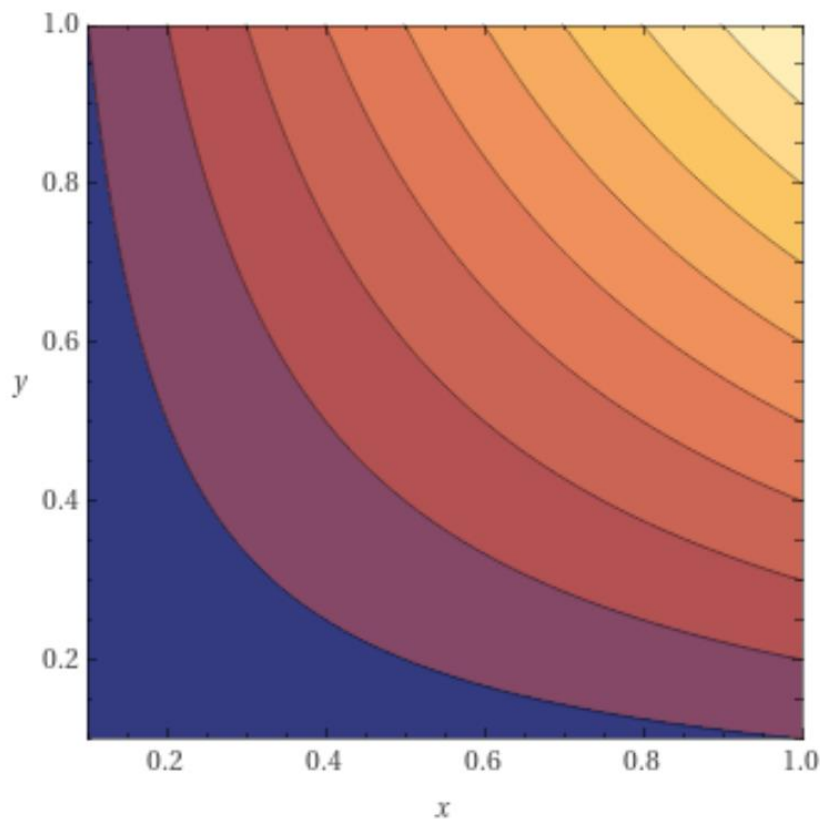


Рисунок 3 — График величины β для $\gamma = 1$.

В ходе исследования также рассмотрен случай, когда отношение β (при $\gamma = 1$) принимает значение, превышающие 1:

$$\beta \text{ (для КГ: Willman 1)} = 1.7$$

Полученные оценки показывают, что при значениях свободного параметра $\gamma = (10^{-3} - 10^{-2})$ гарантировано усиливается ограничение доли ПЧД в СМ для КГ по отношению к ШС. Кроме того, имеется случай, когда при $\gamma = 1$ отношение β также показывает преобладания данного ограничения в случае КГ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучалась литература, посвященная первичным черным дырам и ограничениям их долю в общем количестве скрытой массы, имеющаяся на данный момент. Также рассматривалось взаимодействие первичных черных дыр с белыми карликами в шаровых скоплениях и карликовых галактиках. В частности, исследовалась возможность пересмотра ограничения на долю ПЧД в скрытой массе для карликовых галактик. В качестве источника ограничения рассматривался эффект разрушения звезды при попадании в неё ПЧД [6; 8]. Рассматривалось соотношение, позволяющее оценить рассматриваемое ограничение для карликовых галактик по отношению к шаровым скоплениям.

В результате, показано, что при значениях свободного параметра – доли скрытой массы в общей массе шарового скопления – $\gamma = (10^{-3} - 10^{-2})$ ограничение доли ПЧД в скрытой массе для карликовых галактик преобладает над ограничением доли ПЧД в скрытой массе для шарового скопления.

Дальнейшая работа по исследованию возможности пересмотра ограничения на долю ПЧД в случае кластеризации последних для КГ является перспективной. Это может открыть новую возможность для объяснения скрытой массы Вселенной с помощью ПЧД.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. iPlanck/i2013 results. XVI. Cosmological parameters / and P. A. R. Ade [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2014. — Т. 571. — A16.
2. Hawkins M. R. S. The case for primordial black holes as dark matter // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2011. — Т. 415, № 3. — С. 2744—2757.
3. Zel'dovich Y. B., Novikov I. The Hypothesis of Cores Retarded during Expansion and the Hot Cosmological Model // — 1966
4. Carr B. J., Hawking S. W. Black holes in the early Universe // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1974. — Т. 168. — С. 399—415
5. Chapline G. F. Cosmological effects of primordial black holes // *Nature*. — 1975. — Т. 253, № 5489. — С. 251—252.
6. Capela F., Pshirkov M., Tinyakov P. Constraints on primordial black holes as dark matter candidates from star formation // *Physical Review D*. — 2013. — Т. 87, № 2.
7. Kouvaris C., Tinyakov P. Can neutron stars constrain dark matter? // *Physical Review D*. — 2010. — Т. 82, № 6
8. Capela F., Pshirkov M., Tinyakov P. Constraints on primordial black holes as dark matter candidates from capture by neutron stars // *Physical Review D*. — 2013. — Т. 87, № 12.
9. Battaglia G., Nipoti C. Stellar dynamics and dark matter in Local Group dwarf galaxies. — 2022. — arXiv:2205.07821 [astro-ph.GA]
10. McConnachie A.W. The observed properties of dwarf galaxies in and around the local group // *Astronomical Journal*. — 2012. — Т. 144, № 1.
11. Carr B., Clesse S., Garcia-Bellido J., Hawkins M., Kuhnel F. Observational Evidence for Primordial Black Holes: A Positivist Perspective. — 2023. — arXiv:2306.03903 [astro-ph.CO]

12. Carr B., Kuhnel F. Primordial Black Holes as Dark Matter Candidates // SciPost
Physics Lecture Notes. — 2022. — arXiv:2110.02821 [astro-ph.CO]