

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

Кафедра физики элементарных частиц (№40)

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТА
НА ТЕМУ:

Исследование возможности снятия ограничения на первичные черные дыры по
белым карликам в случае кластеризации

Студент Б19-102

Мясников Н.Б.

Научный руководитель

Белоцкий К.М.

Москва 2021

Содержание

1	Введение	4
2	Задача	5
3	Заключение	9

1 Введение

Первичные черные дыры (ПЧД) могут составлять значительную часть темной материи во Вселенной. Кластеризация ПЧД может существенно повлиять на ограничения их плотности. Мы предлагаем аналитическое рассмотрение кластеризации ПЧД. В случае если ПЧД образуют кластеры, они могут ослабить или снять существующие ограничения на плотность равномерно распределенных ПЧД, что позволит ПЧД стать жизнеспособными кандидатами на темную материю

2 Задача

Оценить возможность снятия ограничения на плотность ПЧД по белым карликам (БК) в скоплениях в случае кластеризации. Первый этап оценки проводился при следующих параметрах: Радиус кластера ПЧД $R = 1 \text{ пк} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}$, общая масса кластера $M = 10^3 M_{\odot} = 2 \cdot 10^{36} \text{ г}$. Для БК использовались стандартные значения: $M_{\text{БК}} = 1 M_{\odot}$, $R_{\text{БК}} = 6400 \text{ км}$. Для получения гравитационного сечения $\sigma_{\text{ГЗ}}$ захвата БК использовалась формула:

$$\sigma_{\text{БК}} = 4\pi R_{\text{БК}}^2 \cdot \left(\frac{v_2}{v_{\infty}} \right)^2, \quad (1)$$

где v_2 – вторая космическая скорость, v_{∞} – скорость на бесконечно большом расстоянии, $R_{\text{БК}}$ – радиус белого карлика. Таким образом, было получено значение $\sigma_{\text{ГЗ}} = 5.4 \cdot 10^{11} \text{ км}^2$ для БК. Следующая важная для нашей задачи величина – $N_{\text{БК}}$ – количество ПЧД, с которыми провзаимодействует (т.е. захватит) БК при пролете через кластер. Значение $N_{\text{БК}}$ может быть получено следующим выражением:

$$N = \sigma_{\text{WD}} \cdot d \cdot n, \quad (2)$$

Где $\sigma_{\text{БК}}$ – гравитационное сечение захвата БК, $d = 2R$ – диаметр кластера, n – концентрация ПЧД внутри кластера. Подставив заданные в условии величины, получаем следующее:

$$N = \frac{\sigma M}{2mR^2}, \quad (3)$$

где m – масса ПЧД, принадлежащая промежутку $[10^{18}; 10^{24}] \text{ г}$.

Таблица 1

m, г	N
10^{18}	$6 \cdot 10^8$
10^{19}	$6 \cdot 10^7$
10^{20}	$6 \cdot 10^6$
10^{21}	$6 \cdot 10^5$

Логарифмируя значения из таблицы 1, получаем:

Таблица 2

log(m)	log(N)
18	9
19	8
20	7
21	6

По полученным данным можем построить график в логарифмическом масштабе

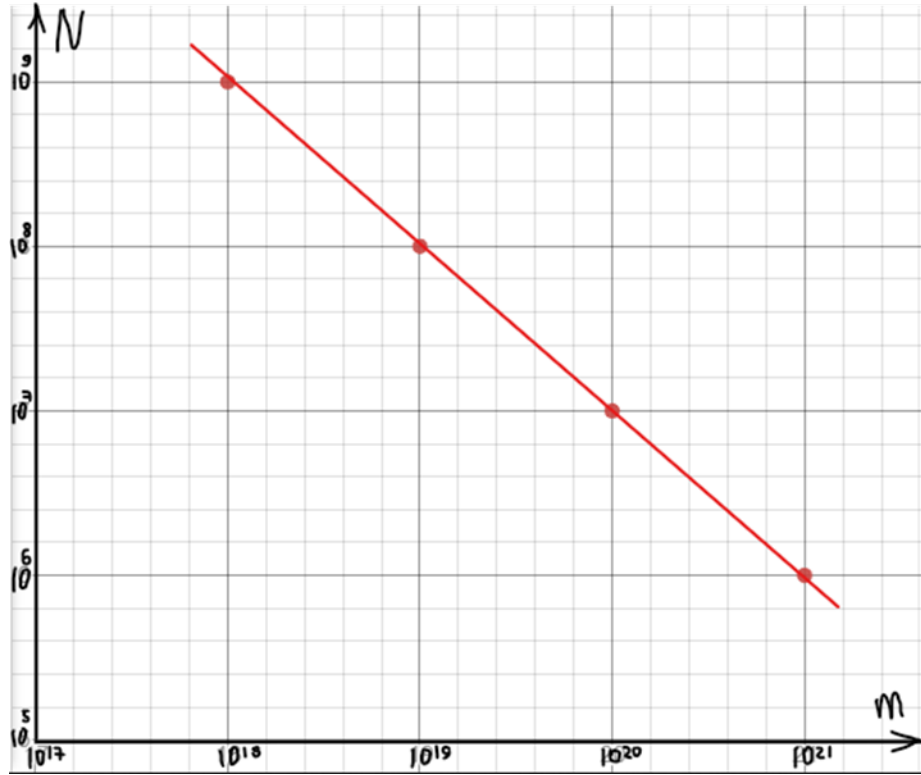


Рис. 1: Зависимость количества пойманных ПЧД белым карликом при пролете через кластер с параметрами $R = 1 \text{ пк} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}$, $M = 10^3 M_{\odot} = 2 \cdot 10^{36} \text{ г}$ от массы ПЧД.

Следующим естественным предположением для усовершенствования модели будет изменение параметров кластера следующим образом: общая масса кластера $M_1 = 10^{-3} M_{\odot} = 2 \cdot 10^{36} \text{ г}$, $M_2 = 1 M_{\odot}$, $M_3 = 10^4 M_{\odot}$, радиус кластера ПЧД $R = 1 \text{ пк} \cdot \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\frac{1}{3}} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см} \cdot \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\frac{1}{3}}$.

Аналогичным образом, получаем:

Таблица 3

m, g	N ₁	N ₂	N ₃
10^{18}	10^6	$6 \cdot 10^7$	10^9
10^{19}	10^5	$6 \cdot 10^6$	10^8
10^{20}	10^4	$6 \cdot 10^5$	10^7
10^{21}	10^3	$6 \cdot 10^4$	10^6
10^{22}	10^2	$6 \cdot 10^3$	10^5
10^{23}	10	$6 \cdot 10^2$	10^4
10^{24}	1	$6 \cdot 10^1$	10^3
M	$10^{-3} M_{\odot}$	$1 M_{\odot}$	$10^4 M_{\odot}$

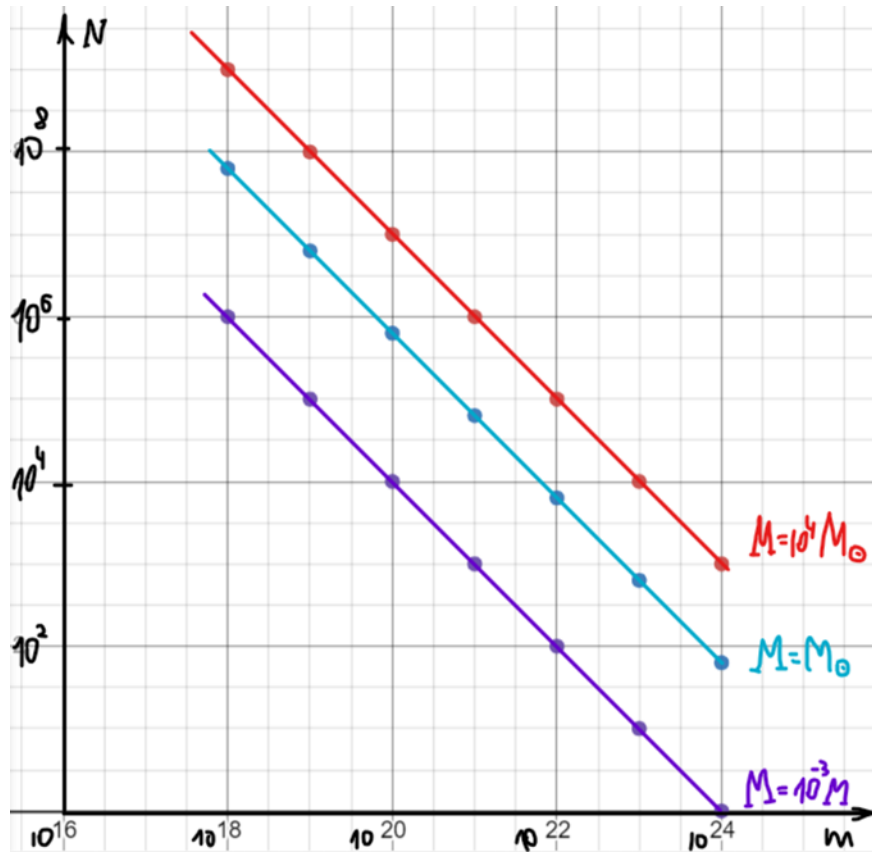


Рис. 2: Зависимость количества пойманных ПЧД белым карликом при пролете через кластер с параметрами $R = 1 \text{ пк} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}$, $M_1 = 10^{-3} M_\odot$, $M_2 = 1 M_\odot$, $M_3 = 10^4 M_\odot$ от массы ПЧД.

Следующий этап исследования заключается в построении схожей модели, но в масштабах галактики. Параметры галактики: $M = 5 \cdot 10^{12} M_\odot$, $R = 100 \text{ кпк}$. Поскольку физика процесса та же, то и формулы сильно отличаться не будут. Таким образом, имеем:

$$\sigma_{\text{кл}} = 4\pi R_{\text{кл}}^2 \cdot \left(\left(\frac{v_2}{v_\infty} \right)^2 + 1 \right) \quad (4)$$

где v_2 – вторая космическая скорость, v_∞ – скорость на бесконечно большом расстоянии, $R_{\text{кл}}$ – радиус кластера ПЧД. Таким образом, было получено значение сечение гравитационного захвата кластера $\sigma_{\text{кл}} = 5.24 \cdot 10^{38} \text{ см}^2$. В масштабах галактики отношение $(\frac{v_2}{v_\infty})^2$ стремится к нулю, поэтому формула упрощается:

$$\sigma_{\text{кл}} = 4\pi R_{\text{кл}}^2 \quad (5)$$

Используя формулу (2), получим значение N – количество кластеров, в которые залетит ПЧД при пролете сквозь галактику по диаметру: $N = 1,5$ для массы кластера $M_3 = 10^4 M_\odot$ – наиболее интересный для нас вариант. Для того, чтобы посчитать статистическую вероятность можно разделить полученное значение N на общее количество кластеров N_d , лежащих вдоль траектории полета (на диаметре галактики) БК. После несложных подсчетов получаем отношение: $p = \frac{1.5}{46415} = 3 \cdot 10^{-5}$ – вероят-

ность попадания БК в кластер при пролете вдоль диагонали галактики.

3 Заключение

В данной работе “Исследование возможности снятия ограничения на первичные черные дыры по белым карликам в случае кластеризации” получены количественные оценки взаимодействия БК с кластером ПЧД. Данные занесены в таблицу 1. Значения логарифмов чисел из таблицы 1 занесены в таблицу 2. На ее основании был построен график зависимости количества пойманных ПЧД белым карликом при пролете через кластер с параметрами $R = 1\text{пк}$, $M = 10^3 M_\odot$ от массы ПЧД (рисунок 1). Развивая мысль, начальные параметры кластера были изменены в пользу физической достоверности. Следуя алгоритму из предыдущего этапа, были получены таблицы 3 и 4. На их основании был построен график зависимости количества пойманных ПЧД белым карликом при пролете через кластер с параметрами $R = 1\text{пк}$, $M_1 = 10^{-3} M_\odot$, $M_2 = 1 M_\odot$, $M_3 = 10^4 M_\odot$, от массы ПЧД. Для того, чтобы показать, как меняется характер графика, на одной координатной плоскости изображено 3 линии, соответствующие разным массам кластеров. После этого была сделана оценка гравитационного сечения, а затем и количества кластеров, в которые залетит БК в масштабах галактики при пролете вдоль диаметра. Используя полученные данные, была получена вероятность попадания БК в кластер. Порядок величины – 10^{-5} . Полученные результаты свидетельствуют о том, что в случае нахождения БК внутри кластера он достоверно захватит ПЧД, как следствие, будет уничтожен. Но в то же время вероятность попадания в кластер мала. Таким образом, ограничение на плотность распространения ПЧД можно снять, заменив его на вероятность попадания в кластер.

Список литературы

- [1] Bernard Carr и др. «Constraints on primordial black holes». В: *Rept. Prog. Phys.* 84.11 (2021), с. 116902. DOI: 10.1088/1361-6633/ac1e31. arXiv: 2002.12778 [astro-ph.CO].
- [2] Fabio Capela, Maxim Pshirkov и Peter Tinyakov. «Constraints on primordial black holes as dark matter candidates from capture by neutron stars». В: *Phys. Rev. D* 87.12 (2013), с. 123524. DOI: 10.1103/PhysRevD.87.123524. arXiv: 1301.4984 [astro-ph.CO].
- [3] Fabio Capela, Maxim Pshirkov и Peter Tinyakov. «Constraints on Primordial Black Holes as Dark Matter Candidates from Star Formation». В: *Phys. Rev. D* 87.2 (2013), с. 023507. DOI: 10.1103/PhysRevD.87.023507. arXiv: 1209.6021 [astro-ph.CO].
- [4] Fabio Capela, Maxim Pshirkov и Peter Tinyakov. «A comment on "Exclusion of the remaining mass window for primordial black holes ...", arXiv:1401.3025». В: (февр. 2014). arXiv: 1402.4671 [astro-ph.CO].
- [5] Konstantin M. Belotsky и др. «Clusters of primordial black holes». В: *Eur. Phys. J. C* 79.3 (2019), с. 246. DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-6741-4. arXiv: 1807.06590 [astro-ph.CO].
- [6] Paolo Pani и Abraham Loeb. «Tidal capture of a primordial black hole by a neutron star: implications for constraints on dark matter». В: *JCAP* 06 (2014), с. 026. DOI: 10.1088/1475-7516/2014/06/026. arXiv: 1401.3025 [astro-ph.CO].