

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

## 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.

## 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,  $v_{\infty}$  – скорость на бесконечно большом расстоянии,  $R_{\text{БК}}$  – радиус белого карлика. Таким образом, было получено значение  $\sigma_{\text{БК}} = 5.4 \cdot 10^{11} \text{ км}^2$  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:

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

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

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

Логарифмируя значения из таблицы 1, получаем:

Таблица 2

$\log(m)$ , г	$\log(N)$
18	9
19	8
20	7
21	6

По полученным данным можем построить график в логарифмическом масштабе

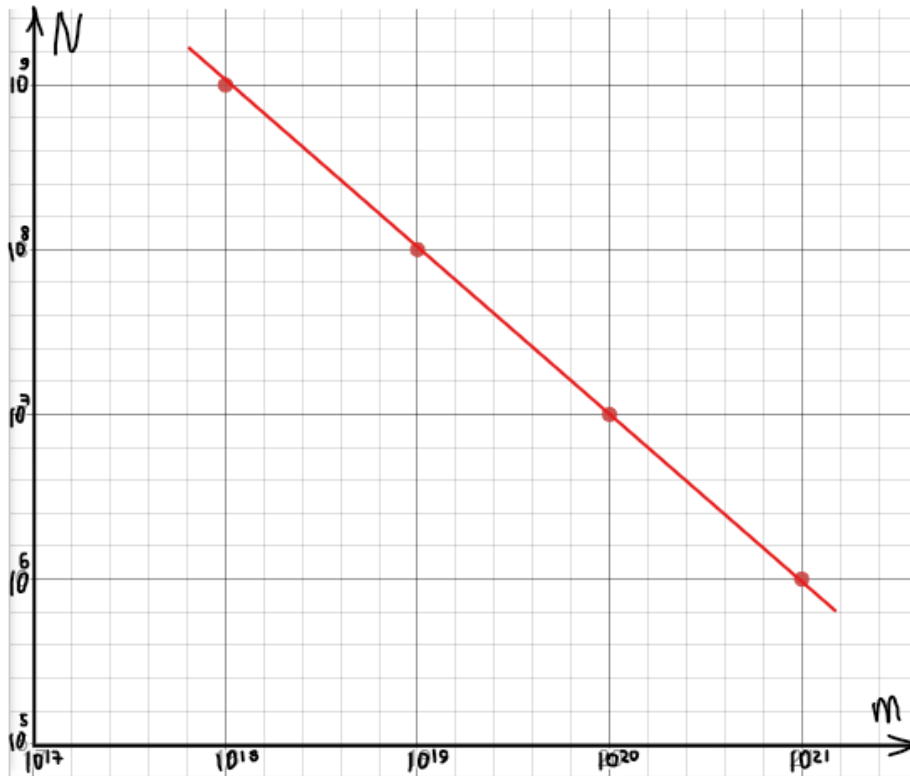


Рис. 1. Зависимость количества пойманных ПЧД белым карликом при пролете через кластер с параметрами  $R = 1 \text{ пк} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}$ ,  $M = 10^3 M_{\odot} = 2 \cdot 10^{36} \text{ г}$  от массы ПЧД.

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, г	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>
10 <sup>18</sup>	10 <sup>6</sup>	6*10 <sup>7</sup>	10 <sup>9</sup>
10 <sup>19</sup>	10 <sup>5</sup>	6*10 <sup>6</sup>	10 <sup>8</sup>
10 <sup>20</sup>	10 <sup>4</sup>	6*10 <sup>5</sup>	10 <sup>7</sup>
10 <sup>21</sup>	10 <sup>3</sup>	6*10 <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup>
10 <sup>22</sup>	10 <sup>2</sup>	6*10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>
10 <sup>23</sup>	10	6*10 <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>
10 <sup>24</sup>	1	6*10 <sup>1</sup>	10 <sup>3</sup>
M	10 <sup>-3</sup> M <sub>⊙</sub>	1 M <sub>⊙</sub>	10 <sup>4</sup> M <sub>⊙</sub>

Таблица 4

m, г	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>
18	6	7.8	9
19	5	6.8	8
20	4	5.8	7
21	3	4.8	6
22	2	3.8	5
23	1	2.8	4
24	0	1.8	3
M	10 <sup>-3</sup> M <sub>⊙</sub>	1 M <sub>⊙</sub>	10 <sup>4</sup> M <sub>⊙</sub>

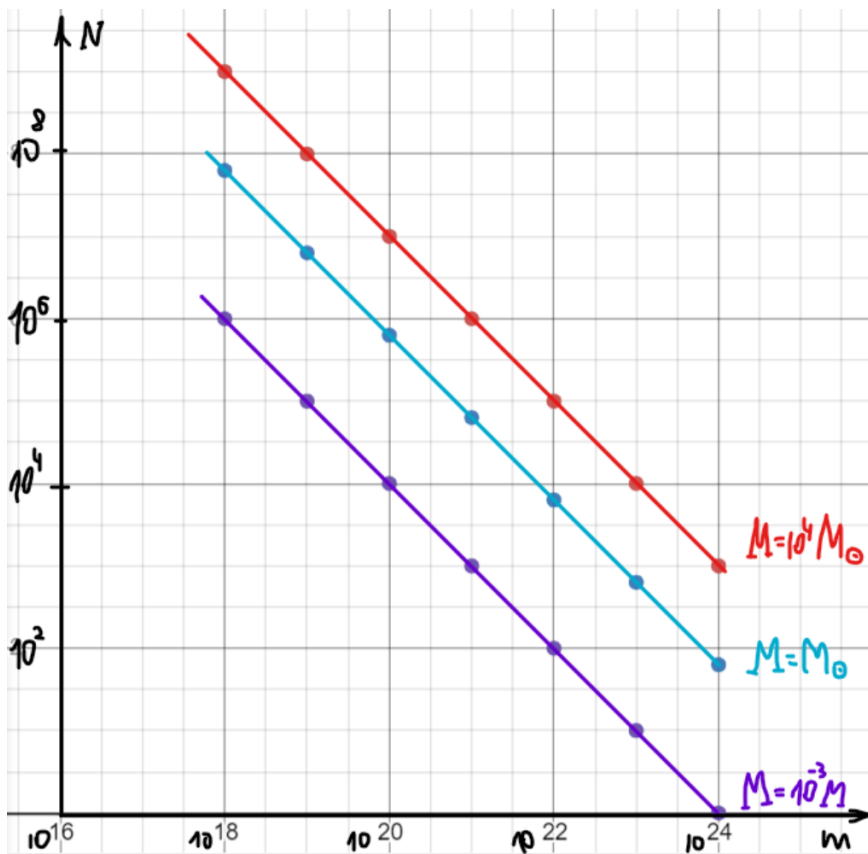


Рис.2. Зависимость количества пойманных ПЧД белым карликом при пролете через кластер с параметрами  $R = 1 \text{ пк} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}$ ,  $M_1 = 10^{-3} M_{\odot}$ ,  $M_2 = 1 M_{\odot}$ ,  $M_3 = 10^4 M_{\odot}$ , от массы ПЧД.

Следующий этап исследования заключается в построении схожей модели, но в масштабах галактики. Параметры галактики:  $M = 5 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ ,  $R = 100$  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,  $v_{\infty}$  – скорость на бесконечно большом расстоянии,  $R_{\text{кл}}$  – радиус кластера ПЧД. Таким образом, было получено значение сечения гравитационного захвата кластера  $\sigma_{\text{кл}} = 5.24 \cdot 10^{38} \text{ см}^2$ . В масштабах галактики отношение  $\left( \frac{v_2}{v_{\infty}} \right)^2$  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:  $p = \frac{1.5}{46415} = 3 \cdot 10^{-5}$  – вероятность попадания БК в кластер при пролете вдоль диагонали галактики.

### 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  $R = 1$  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  $R = 1$  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.

Литература:

1. Bernard Carr, Kazunori Kohri, Yuuiti Sendouda, Jun'ichi Yokoyama. e-Print: 2002.12778 [astro-ph.CO]
2. Fabio Capela, Maxim Pshirkov, Peter Tinyakov. e-Print: 1301.4984 [astro-ph.CO]
3. Capela F., Pshirkov M., Tinyakov P. Constraints on primordial black holes as dark matter candidates from star formation // Phys. Rev. D. 2013. Vol. 87, no. 2. P. 023507. arXiv:astro-ph.CO/1209.6021.
4. Capela F., Pshirkov M., Tinyakov P. Constraints on primordial black holes as dark matter candidates from capture by neutron stars // Phys. Rev. D. 2013. Vol. 87, no. 12. P. 123524. arXiv:astro-ph.CO/1301.4984
5. Capela F., Pshirkov M., Tinyakov P. A comment on "Exclusion of the remaining mass window for primordial black holes ...", arXiv:1401.3025 // ArXiv:e-prints. 2014. arXiv:astro-ph.CO/1402.4671.
6. Konstantin M. Belotsky, Vyacheslav I. Dokuchaev, Yury N. Eroshenko, Ekaterina A. Esipova, Maxim Yu. Khlopov et al. Clusters of primordial black holes (Jul 17, 2018). Eur.Phys.J.C 79 (2019) 3, 246. e-Print: 1807.06590 [astro-ph.CO]
7. Paolo Pani, Abraham Loeb. Tidal capture of a primordial black hole by a neutron star: implications for constraints on dark matter (Jan 13, 2014). JCAP 06 (2014) 026. e-Print: 1401.3025 [astro-ph.CO]