

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 531.3, 539.1.05

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КЛАСТЕРНЫХ СТРУКТУР  
ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР С БЕЛЫМИ КАРЛИКАМИ И  
НЕЙТРОННЫМИ ЗВЕЗДАМИ**

Студент

\_\_\_\_\_ Н. Б. Мясников

Научный руководитель,

д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ К. М. Белоцкий

Москва 2023

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КЛАСТЕРНЫХ СТРУКТУР  
ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР С БЕЛЫМИ КАРЛИКАМИ И  
НЕЙТРОННЫМИ ЗВЕЗДАМИ**

Студент

\_\_\_\_\_ Н. Б. Мясников

Научный руководитель,

д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ К. М. Белоцкий

Рецензент,

к.ф.-м.н., доц.

\_\_\_\_\_ В. А. Гани

Секретарь ГЭК,

к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,

д.ф.-м.н., проф.

\_\_\_\_\_ М. Д. Скорохватов

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1 Первичные черные дыры</b>	<b>5</b>
1.1 Роль ПЧД . . . . .	5
1.2 Ограничения на долю ПЧД . . . . .	6
<b>2 Кластеры первичных черных дыр</b>	<b>9</b>
2.1 Влияние эффекта кластеризации на ограничения доли ПЧД в СМ . . . . .	9
<b>3 Белые карлики и нейтронные звезды</b>	<b>10</b>
3.1 Типичные параметры . . . . .	10
3.2 Взаимодействие с ПЧД . . . . .	10
<b>4 Шаровые скопления и карликовые галактики</b>	<b>12</b>
4.1 Шаровые скопления . . . . .	12
4.2 Ядра шаровых скоплений . . . . .	13
4.3 Карликовые галактики . . . . .	14
4.4 Сопоставление ШС и КГ . . . . .	14
<b>5 Исследование возможности пересмотра ограничения доли ПЧД в СМ в случае их кластеризации</b>	<b>17</b>
5.1 Белые карлики . . . . .	17
5.2 Нейтронные звезды . . . . .	19
<b>6 Пересмотр ограничения доли ПЧД в СМ в случае их кла- стеризации для ШС</b>	<b>21</b>
6.1 Белые карлики . . . . .	21
6.2 Нейтронные звезды . . . . .	25

7	Исследование возможности пересмотра ограничения доли ПЧД в СМ для КГ	27
8	Пересмотр ограничения доли ПЧД в СМ в случае их кластеризации для КГ	29
9	Заключение	32
	Список использованных источников	33

# 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. В контексте физики частиц они связаны с новыми стабильными частицами, выходящими за рамки стандартной модели, например, так называемые слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMPs). Однако кандидаты, для которых не требуются новые стабильные частицы, также существуют и остаются перспективными. Привлекательным кандидатом такого типа являются первичные черные дыры (ПЧД) [2].

# 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 ( $m_{\text{ПЧД}}/10^{20}$  г), что делает их практически бесстолкновительными объектами. На данный момент ПЧД не были идентифицированы в наблюдениях, хотя некоторые астрофизические эффекты могут быть отнесены к ПЧД, такие как сверхмассивные черные дыры в звездных квазарах, черные дыры в событиях их слияния, наблюдаемых по гравитационным волнам. Поэтому до сих пор ПЧД дают информацию о процессах в ранней Вселенной только в виде ограничений на первичные возмущения [3] и на физические условия в разные эпохи.

Основополагающей работой по ПЧД считается статья Зельдовича и Новикова 1966 года [4], 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 [5] и Карра [6], а также их совместная статья [7]. Впоследствии было понято, что ПЧД могут представлять собой (возможно, большую часть) СМ [8]. Эта захватывающая возможность была дополнительно подтверждена, когда стало понятно, что ПЧД являются естественным следствием многих сценариев инфляции [9; 10].

Большой интерес к ПЧД вызван еще и тем, что загадка происхождения СМ не является единственной, которую могут естественным образом решить ПЧД. В частности, они могут объяснить:

- 1) Как отмечено выше, происхождение ранних квазаров [11; 12];

- 2) Также, как отмечено выше – события слияния двойных черных дыр. В частности, массы, угловые скорости и темпы слияния черных дыр, обнаруженных LIGO/Virgo [13];
- 3) Наблюдаемый эффект микролинзирования в направлении Галактического балджа, генерируемый объектами планетарной массы с плотностью около 1% от плотности СМ [14], что намного выше ожиданий для свободных планет;
- 4) Микролинзирование квазаров [15];
- 5) Неожиданно высокое число событий микролинзирования в направлении Галактического балджа объектов СМ в промежутке масс между  $2-5M_{\odot}$  [16], когда модели звездной эволюции не позволяют сформировать ЧД [17];
- 6) Необъяснимая корреляция между рентгеновскими и космическими инфракрасными фоновыми флуктуациями [18];
- 7) Ненаблюдение ультратусклых карликовых галактик (КГ) ниже некоторого критического радиуса [19];
- 8) обнаружение галактик на высоких красных смещениях (выше  $z=10$ , возможно, до  $z \approx 18$  [20]), которые все больше и больше расходятся со стандартными представлениями о СМ;
- 9) Наблюдаемая в последнее время популяция сверхновых, которая не отличается высокой звездной плотностью, но вполне соответствует ожидаемому распределению взаимодействий СМ и белых карликов (БК) [21];
- 10) Массы, угловые скорости и темпы слияния ЧД, обнаруженных LIGO/Virgo [13];
- 11) Необъяснимая взаимосвязь между массой галактики и ее центральной черной дырой.

## 1.2 ОГРАНИЧЕНИЯ НА ДОЛЮ ПЧД

Существует ряд наблюдательных ограничений на долю ПЧД в общем количестве СМ. Во-первых, ПЧД с массой  $m_{\text{ПЧД}} \leq 5 \times 10^{14}$  г испаряются под действием излучения Хокинга [22] за время, меньшее, чем возраст Вселенной, и не могут дожить до наших дней. При несколько больших массах,

даже если время жизни ПЧД достаточно велико, испарение Хокинга все еще представляет проблему: ПЧД испускают  $\gamma$ -лучи с энергией около 100 МэВ [23] в количестве, противоречащем данным о внегалактическом гамма-фоне. Например, телескоп Energetic Gamma Ray Experiment Telescope [24] установил верхний предел на космологическую плотность  $\Omega_{\text{ПЧД}} \leq 10^{-9}$  для  $m_{\text{ПЧД}} = 10^{15}$  г [25]. Из этих наблюдений можно сделать вывод, что ПЧД с массами  $m_{\text{ПЧД}} \leq 10^{16}$  г не может составлять более 1% от СМ. В диапазоне масс между  $\sim 10^{18}$  г и  $\sim 10^{20}$  г доля ПЧД ограничена на уровне менее 10% благодаря фемтолинзированию гамма-всплесков [26]. Более массивные ПЧД были ограничены в ходе исследования EROS и коллаборации MACHO, которые установили верхний предел в 3% на долю ПЧД в галактическом гало в диапазоне масс  $10^{26}\text{г} < m_{\text{ПЧД}} < 10^{30}\text{г}$  [27]. При еще больших массах  $10^{33}\text{г} < m_{\text{ПЧД}} < 10^{40}\text{г}$ , для установления ограничений на плотность ПЧД были использованы данные микроволнового анизотропного зонда Уилкинсона (WMAP3) и данные инфракрасного абсолютного спектрофотометра COBE Far (FIRAS) [28]. 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 [29] рассматривается захват ПЧД звездой во время процесса формирования звезды и их дальнейшее наследование компактным остатком звезды, нейтронной звездой (НЗ) или белым карликом (БК).



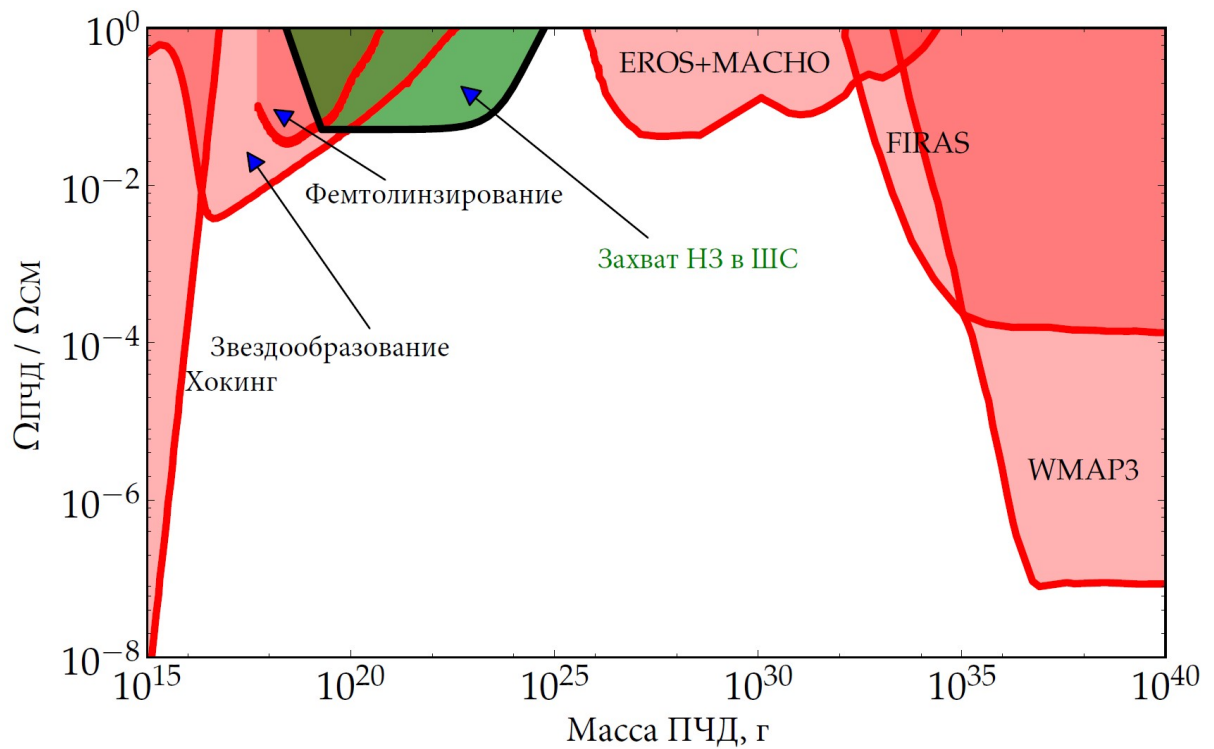


Рисунок 1 — Ограничения на долю ПЧД в общем количестве СМ, полученные из различных наблюдений. В закрашенном зеленым регионе показаны ограничение, которое должно следовать из наблюдений НЗ в ядрах шаровых скоплений (ШС), если принять плотность СМ  $2 \times 10^3 \text{ ГэВ}/\text{см}^3$ , полученную в численных симуляциях в [30].

## 2 КЛАСТЕРЫ ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

### 2.1 ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА КЛАСТЕРИЗАЦИИ НА ОГРАНИЧЕНИЯ ДОЛИ ПЧД В СМ

Большинство ограничений предполагают, что ПЧД имеют равномерное пространственное распределение, однако кластеризация ПЧД может существенно повлиять на эти ограничения. В случае, если ПЧД образуют кластеры, они могут либо частично, либо полностью обходить существующие ограничения на плотность равномерно распределенных ПЧД, что позволяет ПЧД стать жизнеспособными кандидатами в СМ. Идея кластеризации ПЧД представляется весьма перспективной [31]. Такие структуры могли бы объяснить наблюдения квазаров [32], внести вклад в СМ, вызвать всплески гравитационных волн, стать причиной реионизации и квазиточечных источников космического гамма-излучения.

Идея кластеризации ПЧД дает естественное объяснение происхождению массивных бинарных ЧД. Недавнее исследование [33] о возможном существовании  $\sim 10^4$  черных дыр с почти солнечной массой в пределах одного парсека вокруг галактического центра также может быть интерпретировано в рамках кластерной модели.

Почти все существующие ограничения на плотность ПЧД с равномерным распределением массы должны быть рассмотрены в случае кластеризации ПЧД [31]. Например, все ограничения, связанные с эффектом линзирования, могут быть нерелевантными, так как кластер в целом должен давать эффект линзирования, в то время как его размер может превышать Эйнштейновский радиус. Кроме того, вероятность линзирования для более мелких ПЧД может быть подавлена из-за их неоднородного (кластерного) распределения в пространстве.

# 3 БЕЛЫЕ КАРЛИКИ И НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

## 3.1 ТИПИЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Наблюдательные данные и обоснованное теоретическое понимание позволяют выделить два класса компактных объектов, которые не коллапсируют за счет холодного, вырожденного давления фермионов: белые карлики (БК), внутренности которых напоминают твердые тела с ионными решетками, окруженными вырожденными электронами, и нейтронные звезды (НЗ), внутренности которых напоминают гигантское атомное ядро – смесь взаимодействующих нуклонов и электронов, а также, возможно, и других элементарных частиц и конденсатов. Белые карлики поддерживаются давлением вырожденных электронов, а нейтронные звезды поддерживаются давлением, возникающим в результате сочетания вырождения ядер и ядерных взаимодействий. Эти уникальные состояния материи достигаются за счет значительного сжатия звездного вещества.

Типичная масса для НЗ составляет  $M \sim 1 - 2M_{\odot}$ , где  $M_{\odot} = 2 \times 10^{33}$  г – масса Солнца, и типичный радиус  $R \approx 10 - 14$  км [34]. Для БК типичные параметры следующие:  $M \sim 1M_{\odot}$ ,  $R \approx R_{\oplus}$ , где  $R_{\oplus} = 6400$  км – радиус Земли [35].

## 3.2 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПЧД

При прохождении ПЧД через БК или НЗ 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 [29] рассматривается захват ПЧД нейтронной звездой или белым карликом. Присутствие даже одной ПЧД с соответствующей массой внутри звезды (НЗ или БК) приводит к быстрому разрушению последней за счет аккреции вещества на ПЧД [36]. Таким образом, простые наблюдения НЗ и БК в среде, богатой СМ, такой, какая может присутствовать в центрах ШС, накладывают ограничение на долю ПЧД в СМ и исключают ПЧД в качестве единственного кандидата на роль СМ в диапазоне масс  $10^{16}\text{г} < m_{\text{ПЧД}} < 10^{22}\text{г}$ .

# 4 ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ И КАРЛИКОВЫЕ ГАЛАКТИКИ

## 4.1 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  $\sim 10^5 M_{\odot}$ , а радиус ядра – 1-2 пк. Возраст ШС составляет от 8 до 13,5 миллиардов лет [37], и поэтому они являются самыми старыми выжившими звездными подсистемами в Галактике, состоящими из II популяции звезд, БК, НЗ и ЧД [29].

Существуют два теоретических класса моделей формирования ШС: формирование за счет СМ ("dark matter" formation models [38]) и "барионные" модели формирования. В моделях с преобладанием СМ, ШС должно иметь (по крайней мере, первоначально) своё собственное гало из СМ, чтобы появиться. Первоначальные идеи включали ранний коллапс газа в мало-массивных темных гало для образования ШС [39], или, в качестве альтернативы, столкновения гало темного вещества могут привести к формированию ШС при высоких красных смещениях [40]. Согласно таким моделям, ШС образуются в результате натекания барионного вещества в гравитационные ямы, соответствующие пикам плотности СМ при красном смещении  $z > 10$  [41–45]. Если ШС действительно формируются в собственных гало из СМ, то возможно существование ШС, живущими в среде с низкой плотностью, не связанных с галактиками. Однако до сих пор такие "свободно плавающие" ШС не наблюдались [46]. Хотя "несвязанные" ШС присутствуют в скоплениях галактик, которые, как считается, оторваны от своих родительских галактик [38]. Второй сценарий – "барионный". Согласно ему ШС формировались преимущественно барионных процессах,

таких как масштабные слияния, гидродинамические флуктуации и другие, в основном в протогалактиках, которые позже объединились с Млечным путём [47—49]. В таком сценарии полагается, что формирование ШС является естественным продолжением формирования звездных скоплений, а вся разница между типами звездных скоплений и ШС заключается в массе, а не в механизме формирования [50; 51]. В этой модели ШС также могут формироваться в темном гало, но, важно подчеркнуть, эти гало связаны, прежде всего, с галактикой-хозяином, а не с отдельными ШС.

Более того, оба механизма могут работать одновременно, поскольку наблюдаемое распределение металличности в ШС явно бимодальное, так что бедные металлами ШС могут иметь космологическое происхождение, а богатые металлами ШС могут образовываться в процессе слияний [52]. Хотя в настоящее время нет доказательств присутствия СМ в ШС [53], было показано, что она могла присутствовать во время образования ШС и впоследствии постепенно уменьшаться из-за взаимодействия с галактикой-хозяином [54]. По этой причине можно предположить, что по крайней мере некоторые ШС в прошлом находились в минигало из СМ [29].

Таким образом, каждая из моделей формирования ШС принципиально допускает присутствия СМ или, другими словами, присутствия темного гало у ШС.

## 4.2 ЯДРА ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

Вероятность захвата ПЧД выше в более плотных областях с меньшей дисперсией скоростей, поэтому в некоторых работах основное внимание уделяется шаровым скоплениям [29], хотя они могут не иметь значительного содержания темной материи [55]. Вообще говоря, наличие СМ в шаровых скоплениях является спорным вопросом. В одной из моделей формирования ШС предполагается, что ШС формируются вместе с темными гало. В противовес этому мнению утверждается, что даже если ШС родились вместе с гало из СМ, то с тех пор оно [гало] было разрушено из-за взаимодействия с галактикой-хозяином [56]. Однако есть исследования показывающие, что гало СМ, находящееся в ядре ШС, способно пережить приливные взаимодействия с галактикой-хозяином [42; 54]. По этой причине

сочетание слабо взаимодействующей СМ в ядрах ШС и старых холодных БК представляется реальной возможностью проверки свойств СМ.

### 4.3 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<sup>1</sup>, в среднем, составляет 200 пк. Однако, в недавних исследованиях, например, [57], были обнаружены объекты, имеющие до 1000 раз меньшие яркости и эффективный радиус меньше 20 пк. Природа этих новых спутников не была сразу ясна. Эти объекты по многим характеристикам занимают промежуточное положение между ШС и КГ. В последующие несколько лет спектроскопия звезд этих объектов позволила сделать вывод, что это в большей степени галактика, нежели скопление. Учитывая очевидные различия в глобальных свойствах относительно ранее известных КГ, некоторые ученые начали называть эти объекты "сверхтусклыми" карликами. В связи с тем, что в литературе до сих пор нет явного формального определения такого класса объектов, и его использование не всегда согласованно, в статье [58] предлагается использовать следующий дифференцирующий критерий: КГ с яркостью меньше, чем  $L = 10^5 L_{\odot}$  являются "сверхтусклыми" КГ. Также существует критерий по массам КГ:

- Яркие КГ:  $M \approx 10^{7-9} M_{\odot}$
- Классические КГ:  $M \approx 10^{5-7} M_{\odot}$
- Сверхтусклые КГ:  $M \approx 10^{2-5} M_{\odot}$

### 4.4 СОПОСТАВЛЕНИЕ ШС И КГ

Традиционно ШС и КГ различают, используя один или несколько из следующих критериев: масса, светимость, размер, отношение массы к свету (наблюдаемому барионному веществу) и разброс в металличности. Однако, как уже было упомянуто ранее, несколько недавно открытых объектов демонстрируют некоторое перекрытие между областями в параметрах, которые занимают КГ и ШС, что хорошо видно на рисунке 2.

---

<sup>1</sup>радиус, в пределах которого излучается половина всего излучаемого объектом света.

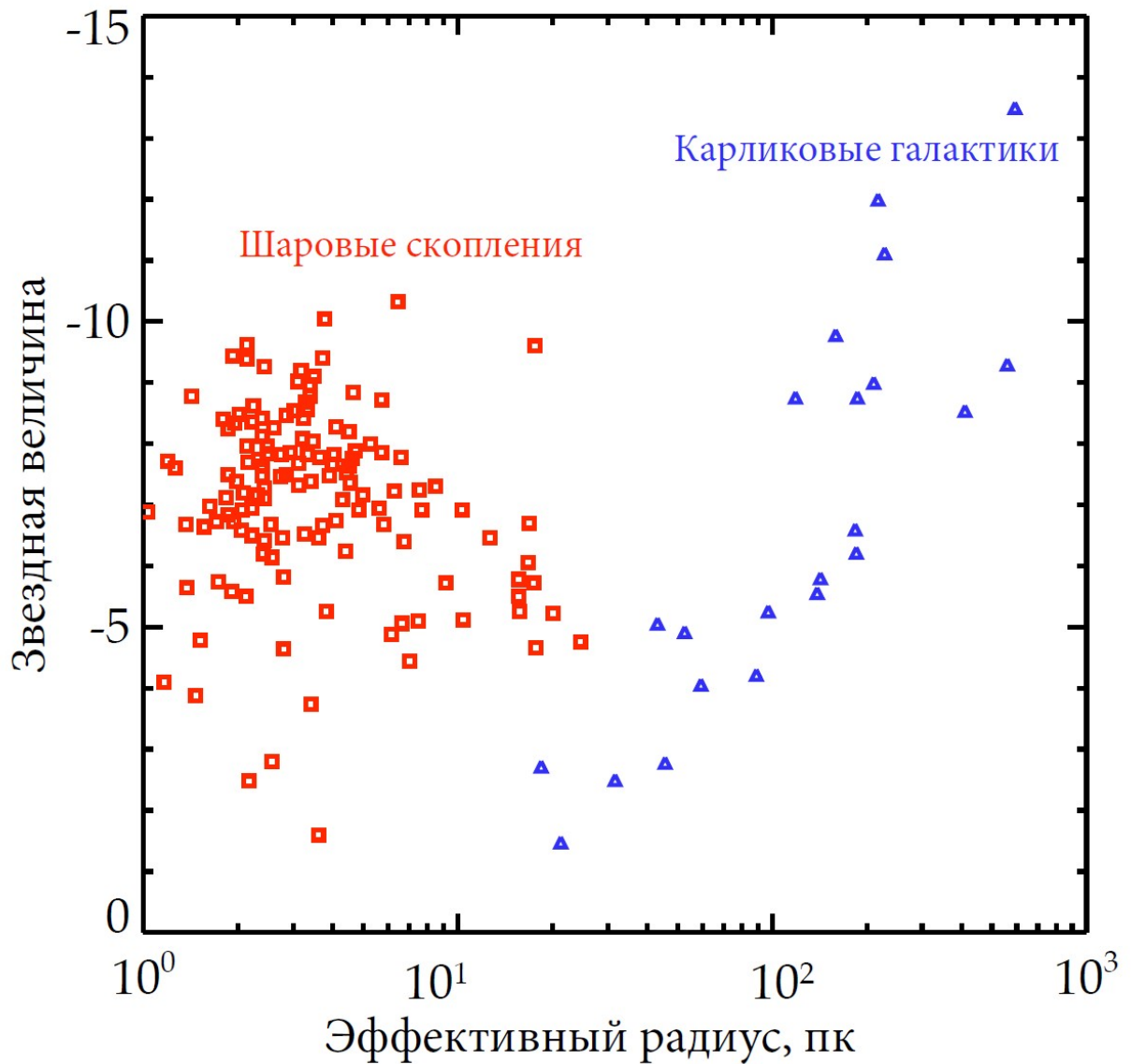


Рисунок 2 — Отношение между звездной величиной и эффективным радиусом для ШС Млечного Пути (красные квадраты, слева) и КГ (синие треугольники, справа) [59].

По этой причине проблема классификации (и строгой дифференциации) КГ и ШС является насущной в научном сообществе. Одним из примеров может служить [60], где в качестве критерия предлагается степень эллиптичности. На рисунке 3 видно, что КГ значительно более сплюснуты, чем ШС. В некоторых случаях это может помочь различить эти два класса объектов.



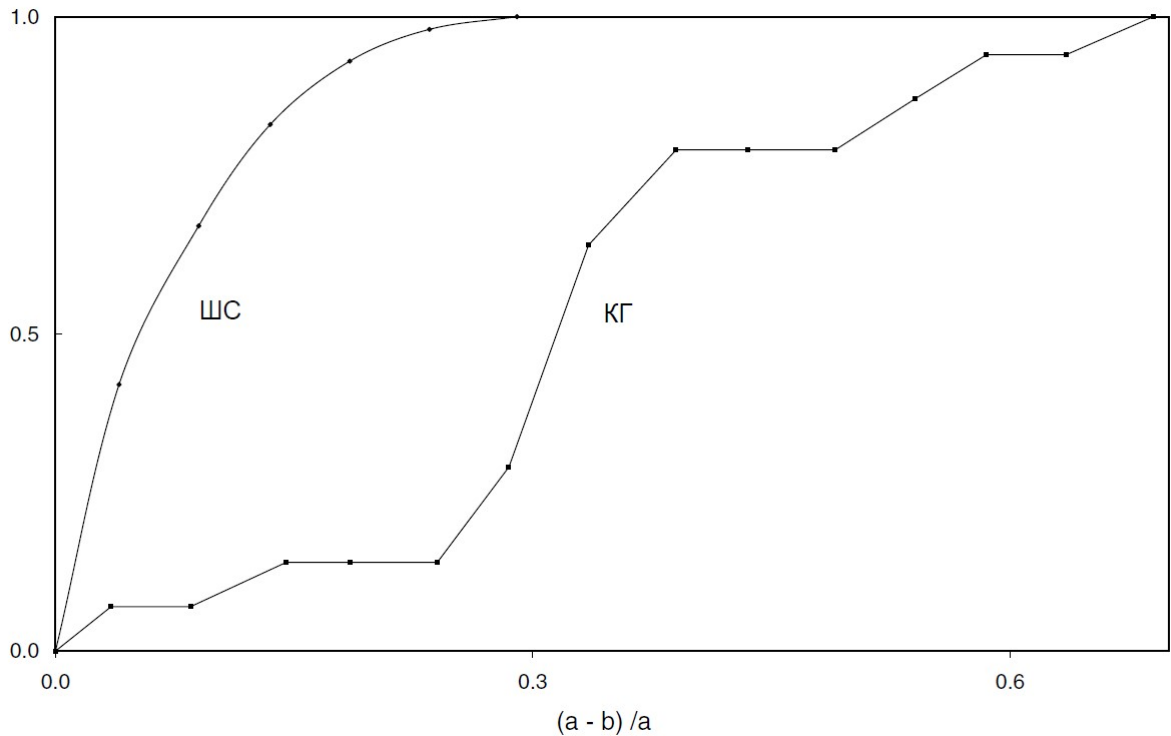


Рисунок 3 — Нормированное кумулятивное распределение эллиптичности  $(a - b)/a$ , полученное в [60], для галактических ШС по сравнению с распределением для КГ, где  $a$  и  $b$  — большая и малая полуоси соответственно.

Чтобы разрешить путаницу, вызванную отсутствием согласованной системы для отделения КГ от ШС, авторы [61] предложили следующее определение: "Галактика — это гравитационно связанное скопление звезд, свойства которых не могут быть объяснены сочетанием барионов и ньютоновского закона тяготения". Другими словами, такой объект должен иметь СМ. Что касается ШС, то на сегодняшний день наблюдательные данные не дают оснований полагать, что оно содержит СМ.

Как было сказано выше, обнаружение большого числа компактных "сверхтусклых" КГ в данных увеличило трудности классификации. Несмотря на большую активность научного сообщества, однозначной классификации КГ и ШС еще не существует. Более того, проблема определения природы самых тусклых и самых компактных спутников Млечного Пути в ближайшие годы станет еще более острой, поскольку наблюдения станут чувствительны к еще более низкой светимости и более удаленным звездным системам.

# 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕСМОТРА ОГРАНИЧЕНИЯ ДОЛИ ПЧД В СМ В СЛУЧАЕ ИХ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

## 5.1 БЕЛЫЕ КАРЛИКИ

В качестве параметра кластера ПЧД возьмем массу кластера  $M_{\text{кл}}$ , который будет принимать значения:

- $M_{\text{кл}} = 10^4 M_{\odot}$ ,
- $M_{\text{кл}} = 1 M_{\odot}$ ,
- $M_{\text{кл}} = 0.1 M_{\odot}$ ,
- $M_{\text{кл}} = 0.01 M_{\odot}$ ,

где  $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{36}$  г – масса Солнца . Данные параметры укладываются в предсказания модели кластеров, рассмотренной в работе [31]. Для БК использовались стандартные значения:  $M_{\text{БК}} = 1 M_{\odot}$ ,  $R_{\text{БК}} = 6400$  км.

Оценим сечение гравитационного захвата БК  $\sigma_{\text{БК}}$ :

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

где  $R_{\text{БК}}$  – радиус белого карлика,  $v_{\infty} = 200$  км/с – относительная скорость между ПЧД и БК на бесконечно большом расстоянии,  $v_2 = \sqrt{\frac{2GM_{\text{БК}}}{R_{\text{БК}}}}$  – вторая космическая скорость БК, для которой выполняется условие  $v_2 \gg v_{\infty}$ . Численное значение  $\sigma_{\text{БК}} = 2.1 \times 10^{11}$  км<sup>2</sup>.

Следующая важная величина –  $N$  – количество ПЧД, которые должен захватить БК (если бы его не разрушали) при пролете через кластер

ПЧД. Эта величина оценивается как:

$$N \sim n \sigma_{\text{БК}} R_{\text{кл}} \sim \frac{\sigma_{\text{БК}} M_{\text{кл}}}{m R_{\text{кл}}^2} \quad (2)$$

Здесь  $n = \frac{M_{\text{кл}}/m}{4/3 \cdot \pi R_{\text{кл}}^3}$  – концентрация ПЧД внутри кластера в упрощающем предположении о равномерном распределении ПЧД в кластере,  $m$  – масса ПЧД. Для  $m$  рассатривается промежуток  $[10^{16}; 10^{23}]$  г, соответствующий ограничению [29].

Размер кластера от его массы согласно рассматриваемой модели (что соответствует многим другим естественным моделям)  $R \propto M^{1/3}$ , что в случае нами рассматриваемой модели есть

$$R_{\text{кл}} \approx \left( \frac{M_{\text{кл}}}{10^3 \cdot M_{\odot}} \right)^{1/3} \text{ ПК.} \quad (3)$$

Также рассматривается случай кластеров с высокой степенью компактности. Для них зависимость  $R_{\text{кл}}(M_{\text{кл}})$  выглядит следующим образом:

$$R_{\text{кл}} \approx 10^{-3} \cdot \left( \frac{M_{\text{кл}}}{10^3 \cdot M_{\odot}} \right)^{1/3} \text{ ПК.} \quad (4)$$

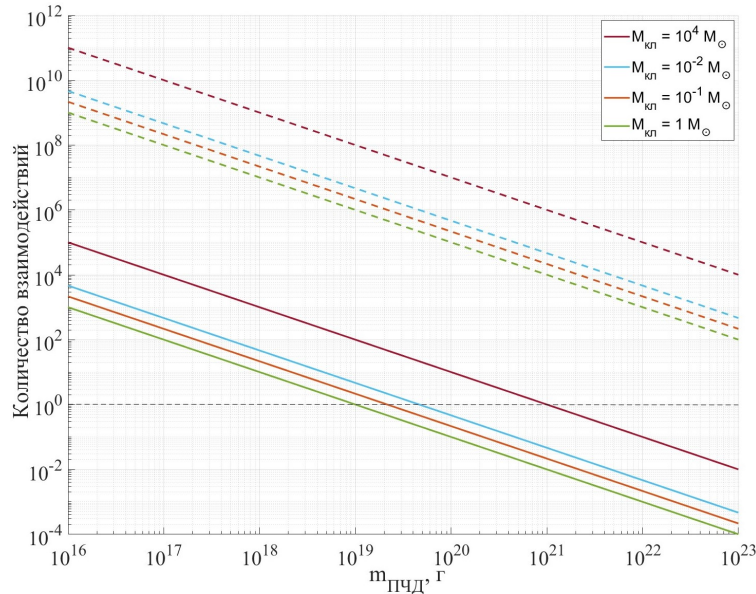


Рисунок 4 — Ожидаемое количество ПЧД, которые захватит БК при единичном пролёте через кластер ПЧД. Пунктирными линиями обозначены случаи кластеров повышенной компактности.

График зависимости  $N(m)$  представлен для нескольких значений масс кластера  $M_{\text{кл}}$  на рисунке 4. Как видно, в большинстве случаев  $N \gg 1$ , что обуславливает соответствующее ослабление ограничения на плотность ПЧД. Действительно, эффект от  $N$  ПЧД в этом случае такой же, как от одной, т.к. БК разрушается при встрече с первой ПЧД (имеет место эффект экранировки).

## 5.2 НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Применяя аналогичную логику, можно получить результат для нейтронных звёзд. Параметры кластера ПЧД совпадают с теми, что использовались в предыдущей секции. Что касается НЗ, то, следуя [30], за массу  $m_{\text{НЗ}}$  и радиус  $R_{\text{НЗ}}$  были взяты следующие значения:

$$m_{\text{НЗ}} = 1.4M_{\odot}, \quad R_{\text{НЗ}} = 12\text{км}.$$

Оценочный характер рассмотрения взаимодействия позволяет говорить о том, что законы будут совпадать с вышеописанными, то есть:

$$\sigma_{\text{НЗ}} = \pi R_{\text{НЗ}}^2 \cdot \left( \left( \frac{v_2}{v_{\infty}} \right)^2 + 1 \right) \approx \pi R_{\text{НЗ}}^2 \cdot \left( \frac{v_2}{v_{\infty}} \right)^2,$$

где  $R_{\text{НЗ}}$  – радиус нейтронной звезды,  $v_{\infty} = 200$  км/с – относительная скорость между ПЧД и НЗ на бесконечно большом расстоянии,  $v_2 = \sqrt{\frac{2GM_{\text{НЗ}}}{R_{\text{НЗ}}}}$  – вторая космическая скорость НЗ, для которой выполняется условие  $v_2 \gg v_{\infty}$ . Численное значение  $\sigma_{\text{НЗ}} = 3.5 \times 10^8$  км<sup>2</sup>.

Количество ПЧД, которые должна захватить НЗ (если бы его не разрушали) при пролете через кластер ПЧД  $N$ :

$$N \sim n\sigma_{\text{НЗ}}R_{\text{кл}} \sim \frac{\sigma_{\text{НЗ}}M_{\text{кл}}}{mR_{\text{кл}}^2},$$

где  $n = \frac{M_{\text{кл}}/m}{4/3 \cdot \pi R_{\text{кл}}^3}$  – концентрация ПЧД внутри кластера,  $m$  – масса ПЧД.

Для  $m$  рассматривается промежуток  $[10^{18}; 10^{26}]$  г, соответствующий ограничению [30].

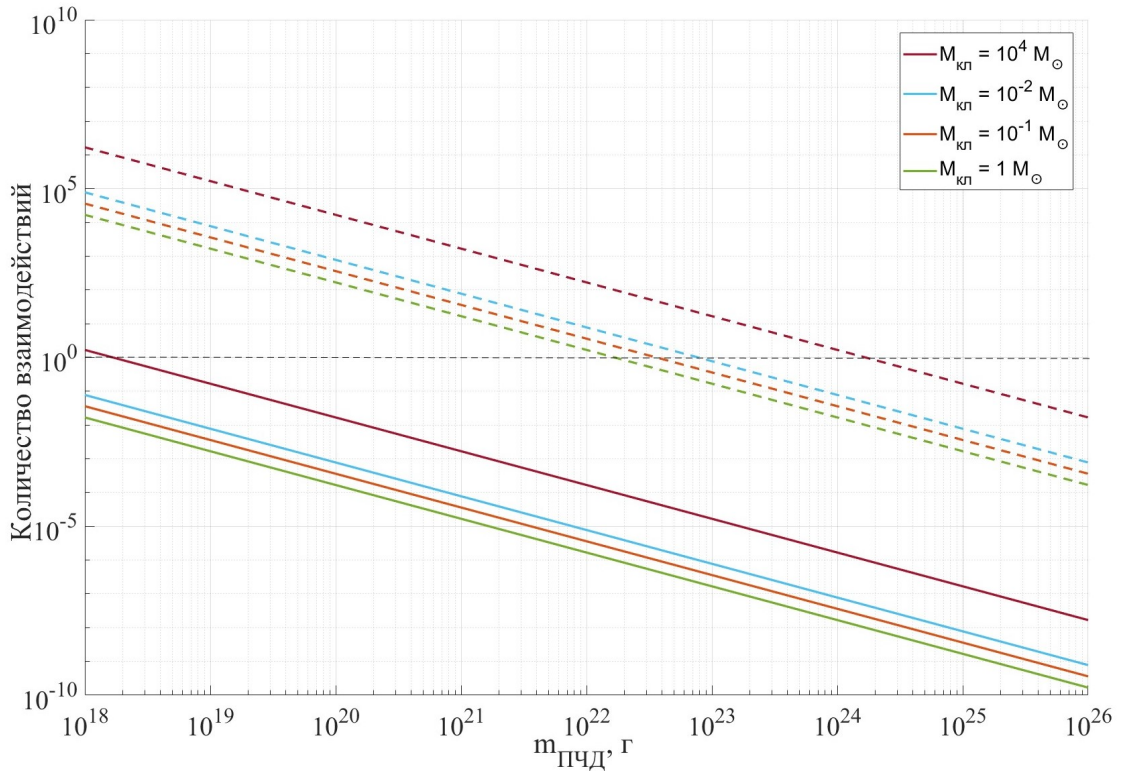


Рисунок 5 — Ожидаемое количество ПЧД, которые захватит НЗ при единичном пролёте через кластер ПЧД. Пунктирными линиями обозначены случаи кластеров повышенной компактности.

Разница между рисунком 5 и рисунком 4, достаточно очевидна, поскольку оценка  $N$  проводится из геометрических соображений. Такой подход отражает физическую действительность, чего на данном этапе достаточно. Однако стоит подчеркнуть, что для более корректного сопоставления БК и НЗ нужно учитывать факторы, учитывающие природу этих объектов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в случае нахождения БК или НЗ внутри кластера они захватят существенное количество ПЧД и, как следствие, будут уничтожены. Но, в то же время, вероятность попадания в сам кластер мала, об этом свидетельствуют наблюдательные данные. Таким образом, ограничение на плотность распространения ПЧД можно ослабить, заменив его на вероятность попадания в кластер.

# 6 ПЕРЕСМОТР ОГРАНИЧЕНИЯ ДОЛИ ПЧД В СМ В СЛУЧАЕ ИХ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ШС

## 6.1 БЕЛЫЕ КАРЛИКИ

Следующий этап исследования заключается в решении задачи, представляющей собой получение графика в координатах  $(\Omega_{\text{ПЧД}}/\Omega_{\text{СМ}}, m_{\text{ПЧД}})$  для случая кластеризации ПЧД.

В статье [29] было получено ограничение на долю ПЧД в случае равномерного распределения ПЧД в ядре ШС.

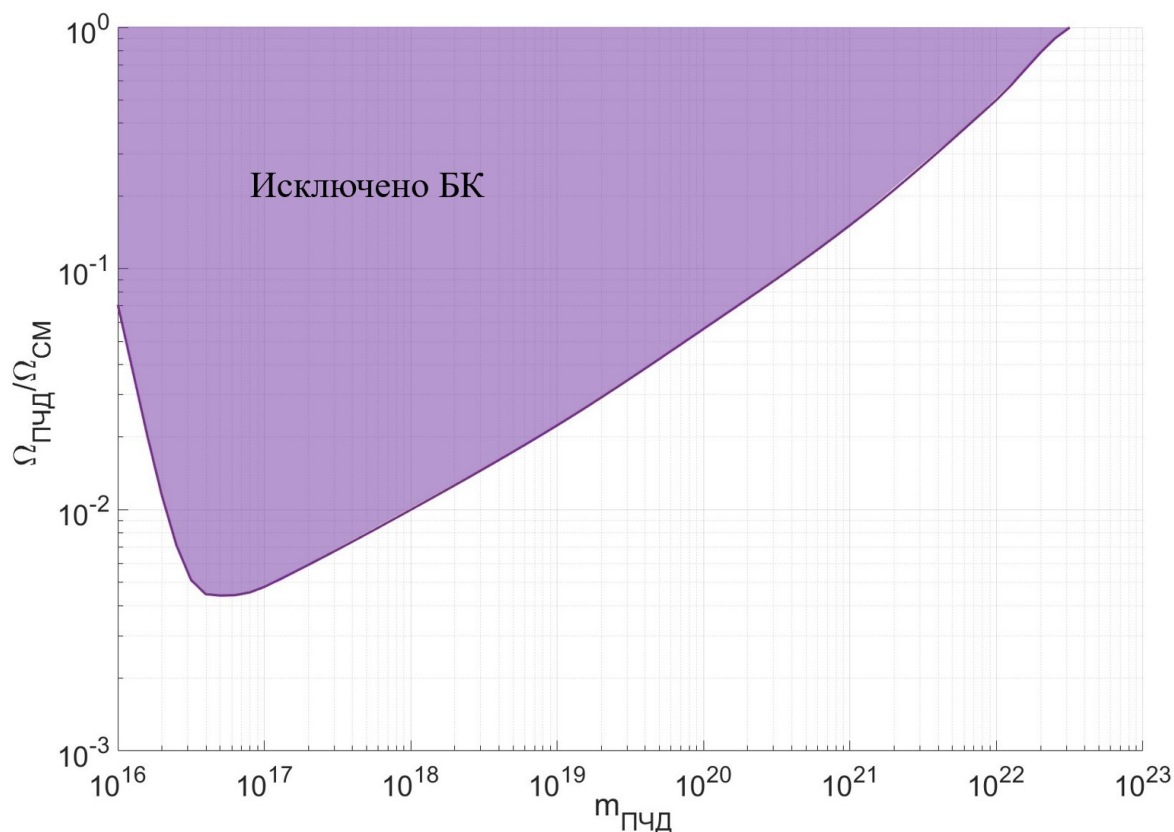


Рисунок 6 — Ограничение на долю  $\Omega_{\text{ПЧД}}/\Omega_{\text{СМ}}$ , полученные из наблюдений БК в ядрах ШС.

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

$$N = n_{\text{ПЧД}} \cdot \sigma_{\text{БК}} \cdot v_{\infty} \cdot t, \quad (5)$$

где  $n_{\text{ПЧД}}$  – концентрация ПЧД внутри ШС,  $\sigma_{\text{БК}}$  – гравитационное сечение захвата БК,  $v_{\infty}$  – скорость между БК и ПЧД на большом расстоянии,  $t = 10^{10}$  лет – характерное время задачи.

Количество взаимодействий белого карлика с ПЧД в случае кластеризации:

$$N_{\text{кл}} = [n_{\text{кл}} \cdot \sigma_{\text{кл}} \cdot v_{\infty} \cdot t] \times [n_{\text{ПЧД}}^{\text{кл}} \cdot \sigma_{\text{БК}} \cdot d_{\text{кл}}]. \quad (6)$$

В некластеризованном случае количество обусловлено одним событием – взаимодействием БК с ПЧД. В случае кластеризации данная величина факторизуется, то есть состоит из двух множителей, один из которых отвечает за количество попаданий БК в кластер за время  $t$ , другой – за количество взаимодействий БК с ПЧД внутри кластера.

Оценим количество попаданий БК в кластер внутри ядра ШС. В качестве параметров ШС (ядра, где распределены кластеры) возьмем следующие:  $\mathbf{M}_{\text{ШС}} = 10^5 M_{\odot}$ ,  $\mathbf{R}_{\text{ШС}} = 2$  пк. Сечение попадания БК в кластер:

$$\sigma_{\text{кл}} = \pi R_{\text{кл}}^2 \cdot \left( \left( \frac{v_2^{(\text{кл})}}{v_{\infty}} \right)^2 + 1 \right) \approx \pi R_{\text{кл}}^2, \quad (7)$$

где  $v_2^{(\text{кл})} \approx 30 \text{ км/с}$  – вторая космическая скорость кластера,  $v_{\infty} = 200 \text{ км/с}$  – скорость между БК и кластером на большом расстоянии, для скоростей выполняется условие  $v_2^{(\text{кл})} \ll v_{\infty}$ . Для выбранных параметров кластера (секция 5.1) численно имеем  $\sigma_{\text{кл}} \approx 3.1 \cdot 10^{26} \text{ км}^2$ .

Теперь необходимо учесть эффект экранировки (имеет место, когда  $N > 1$ ), поскольку нас интересует только первое взаимодействие, ведь после него уже можно утверждать, что БК будет разрушен. Формула (6) примет вид:

$$N_{\text{кл}} = [n_{\text{кл}} \cdot \sigma_{\text{кл}} \cdot v_{\infty} \cdot t] \times [1 - \exp(-N_{\text{вз}}^{\text{кл}})], \quad (8)$$

где

$$N_{\text{вз}}^{\text{кл}} = n_{\text{ПЧД}}^{\text{кл}} \cdot \sigma_{\text{БК}} \cdot d_{\text{кл}}.$$

Построим график зависимости вероятности первого взаимодействия от массы ПЧД при разных массах кластера за (условное) время  $10^{10}$  лет.

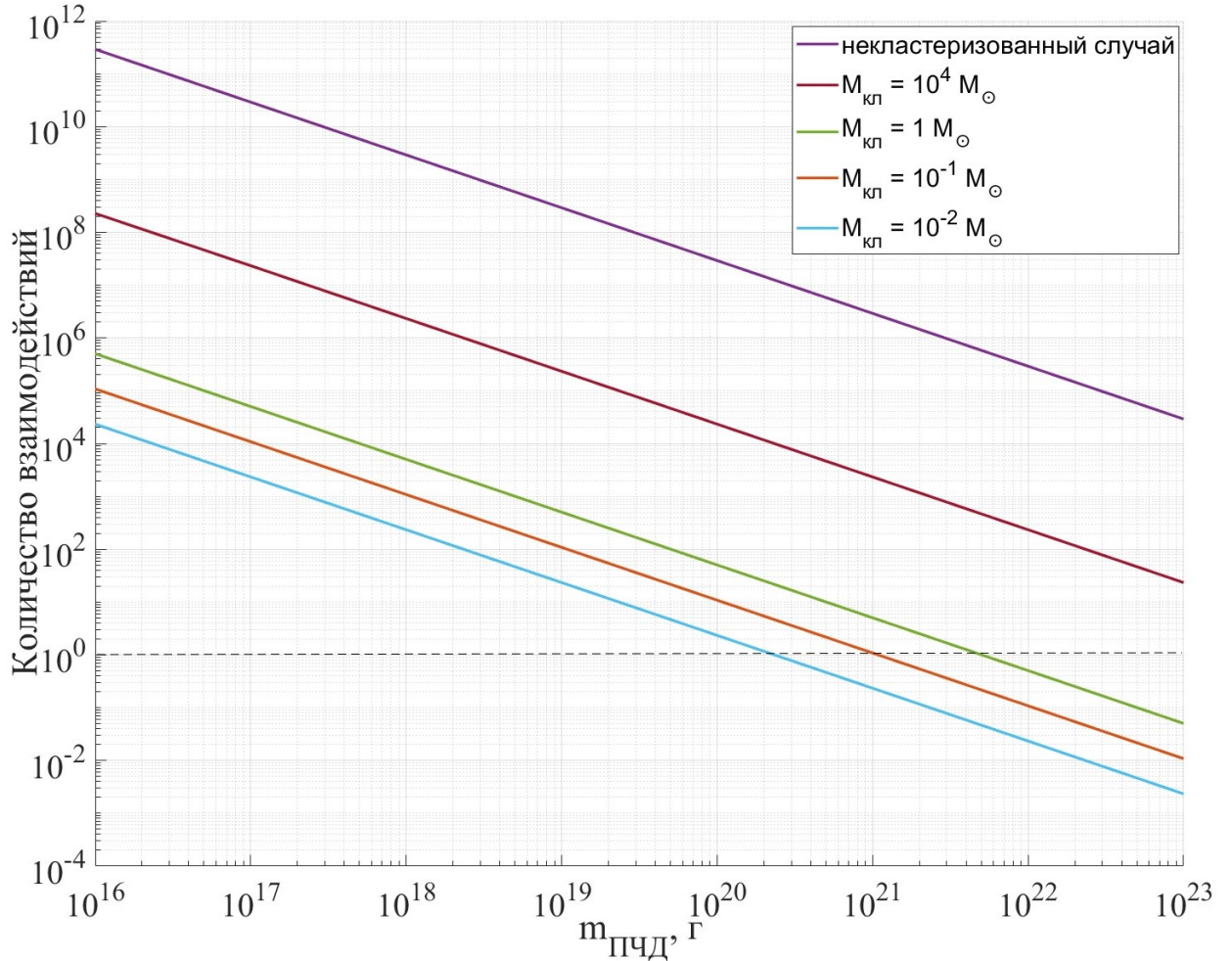


Рисунок 7 — График количества взаимодействий ПЧД с БК от массы ПЧД при разных массах кластера за время  $t$ , если бы его не уничтожали.

Видно, что в случае кластеризации вероятность взаимодействия существенно меньше, чем в случае равномерного распределения ПЧД. Такой вывод непосредственно следует из того факта, что количество взаимодействий в некластеризованном случае больше. Поскольку ограничение из рисунка 6 получено для одиночных ПЧД, отношение  $N_{\text{кл}}/N$  будет определять степень его ослабления. Фиолетовая линия соответствует  $N$ , три оставшиеся линии —  $N_{\text{кл}}$ .



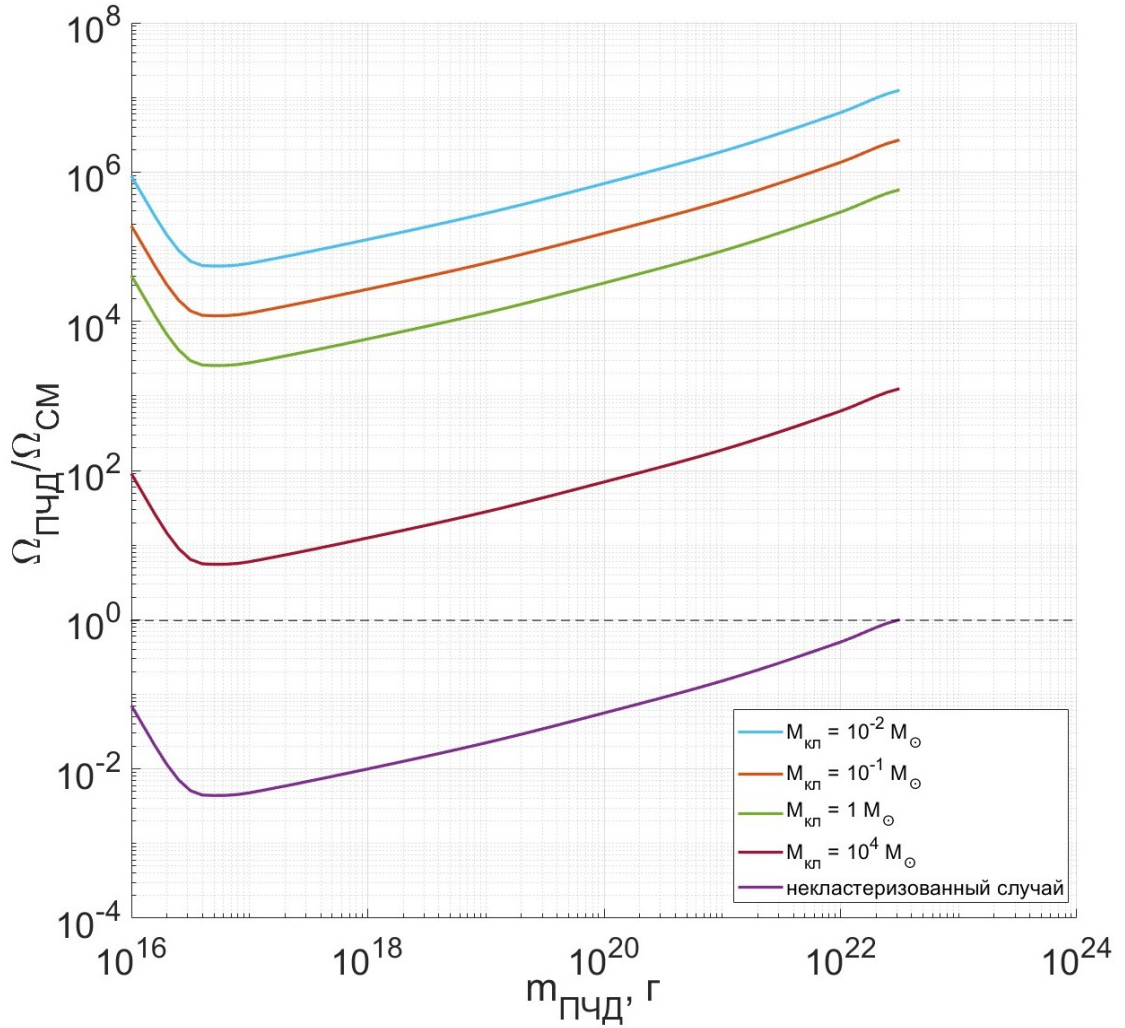


Рисунок 8 — Исходное ограничение на долю  $\Omega_{\text{ПЧД}}/\Omega_{\text{СМ}}$  и новые ограничения с учетом эффекта кластеризации.

Отношение  $N_{\text{кл}}/N$  из графика 7 является ослабляющей поправкой ограничения на одиночные ПЧД (из статьи [29]). Как видно из графика на рисунке 8, порядок величины этой поправки во всех случаях даёт один и тот же результат – ограничение из рисунка 6 на долю ПЧД в ШС по БК снимается в случае кластеризации ПЧД.

## 6.2 НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

В статье [30] были получены ограничение на долю ПЧД в случае равномерного распределения ПЧД в ядре ШС.

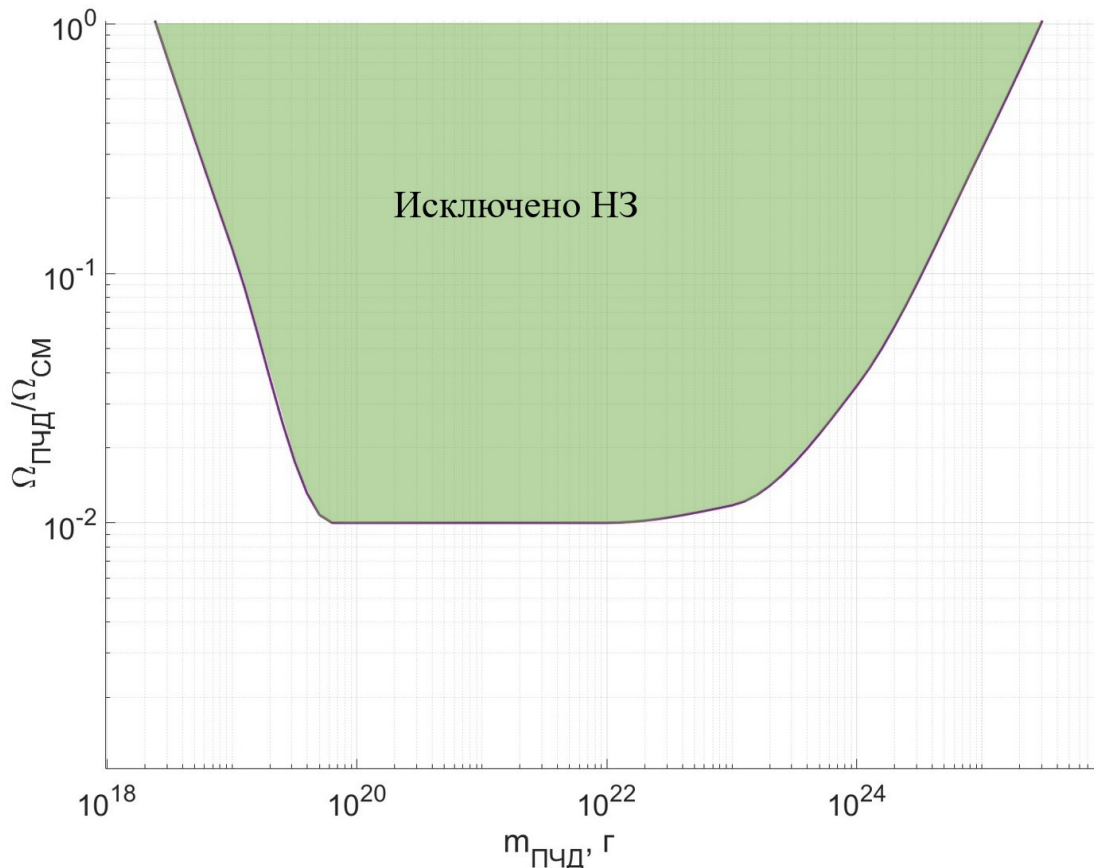


Рисунок 9 — Ограничение на долю  $\Omega_{\text{ПЧД}}/\Omega_{\text{CM}}$ , которые должны следовать из наблюдений НЗ в ядрах ШС.

Следуя описанной выше логике, можно получить оценки для НЗ в ядрах ШС. Ограничение из рисунка 9 получено для одиночных ПЧД, следовательно, отношение  $N_{\text{кл}}/N$  будет определять степень его ослабления.

Аналогично случаю с БК, из графика 10 следует величина  $N_{\text{кл}}/N$ , которая, как уже было сказано, является ослабляющей поправкой ограничения на одиночные ПЧД (из статьи [30]). Фиолетовая линия соответствует  $N$ , три оставшиеся линии —  $N_{\text{кл}}$ .

Как видно из графика на рисунке 11, порядок величины этой поправки во всех случаях даёт один и тот же результат — ограничение из рисунка 9 на долю ПЧД в ШС по НЗ снимается в случае кластеризации ПЧД.

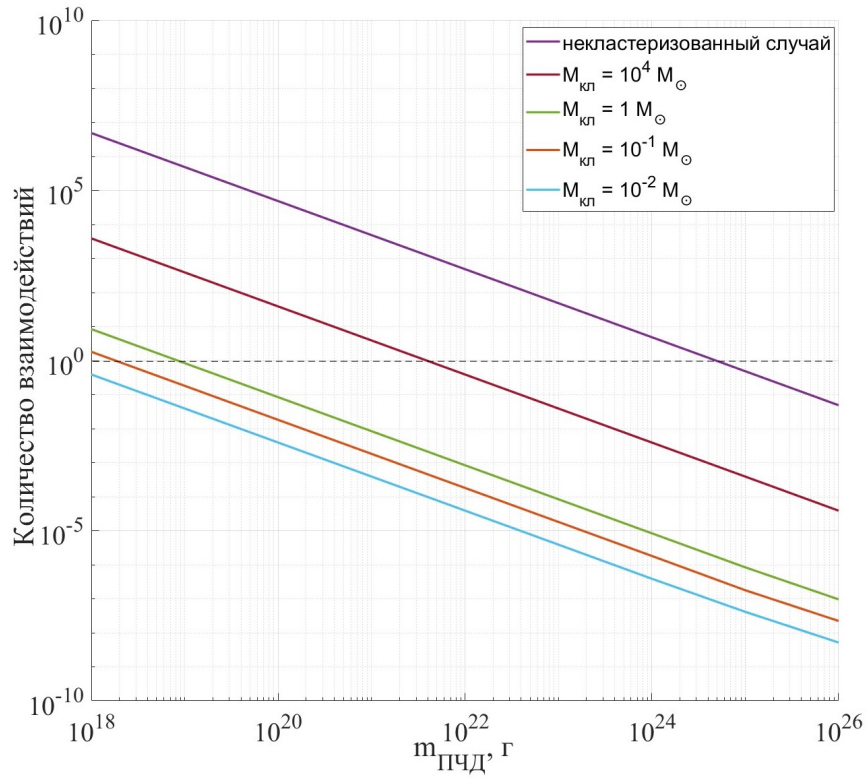


Рисунок 10 — График количества взаимодействий ПЧД с НЗ от массы ПЧД при разных массах кластера за время  $t$ , если бы его не уничтожали.

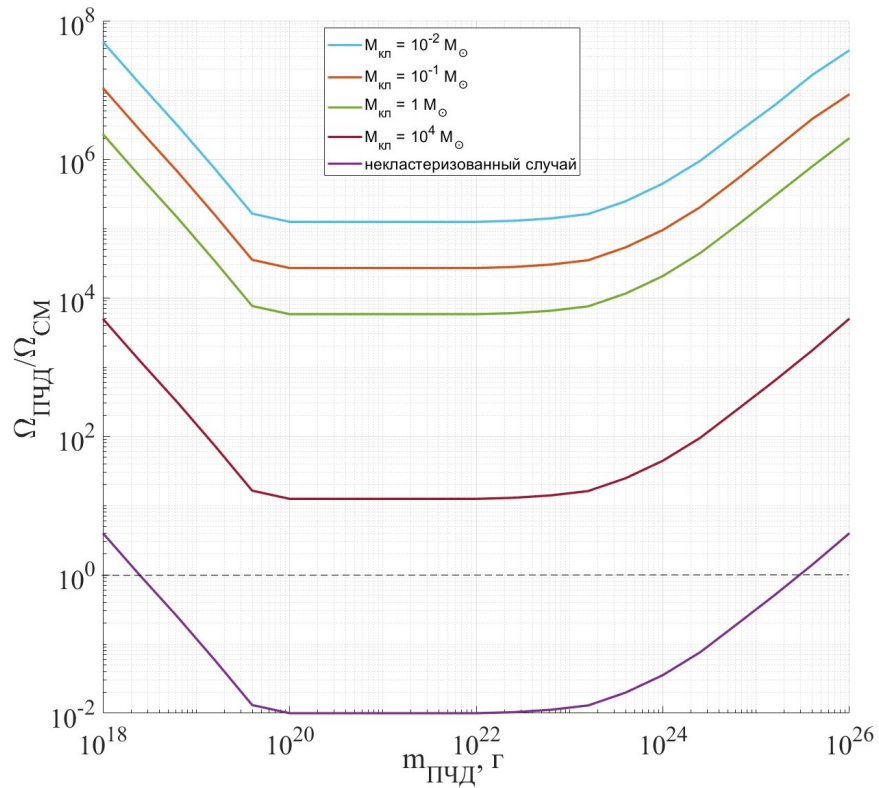


Рисунок 11 — Исходное ограничение на долю  $\Omega_{\text{ПЧД}}/\Omega_{\text{СМ}}$  и новые ограничения с учетом эффекта кластеризации.

## 7 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕСМОТРА ОГРАНИЧЕНИЯ ДОЛИ ПЧД В СМ ДЛЯ КГ

Результаты, полученные в [29; 30], подвергаются сомнению, а именно – оценки плотности скрытой массы в ядре ШС существенно завышены [62]. Близость многих физических параметров КГ и ШС объектов позволяет предположить, что "проблемные" ШС можно заменить на "беспроблемные" в этом смысле КГ. "Беспроблемные" они потому, что на сегодняшний день ни у кого нет сомнений, что всякая КГ существует внутри темного гало – гало из скрытой массы. Что нельзя сказать про ШС. На настоящий момент наблюдательные данные не дают оснований полагать, что ШС содержит скрытую массу. Однако тут важно еще раз подчеркнуть, что это не значит, что темного гало у ШС не было никогда. Существуют две теоретические модели формирования ШС, и обе они принципиально допускают присутствие темного гало у ШС, но с некоторыми оговорками, что было описано в секции 4.1.

Принимая во внимание секцию 4.4 настоящей работы, рассмотрим похожие на ШС по природе объекты – КГ. Прежде всего, необходимо оценить, как наша модель ведет себя в такого рода объектах. Выделим 2 ключевых критерия для сравнения ШС и КГ: количество ПЧД, приходящихся на 1 БК и количество взаимодействий за время  $t$  на 1 БК, если бы его не уничтожали. ШС рассматривается в рамках статьи [29], где предполагается присутствие некоторого количества СМ в ШС.

Первый критерий рассчитывается из следующей логики:

$$\frac{M_{\text{ШС}}}{M_{\text{БК}}} * \alpha,$$

где  $M_{\text{ШС/КГ}}$  – масса (барионная) ШС/КГ,  $M_{\text{ШС}}$  – масса БК,  $\alpha$  – свободный

параметр – доля БК в общем количестве звёзд – который должен следовать из будущих наблюдений ШС/КГ (можно предположить, что он будет соответствовать величинам порядка  $\sim 10^{-3}$ ).

Второй критерий соответствует формуле (5), поскольку в данном случае достаточно рассмотреть равномерное распределение ПЧД.

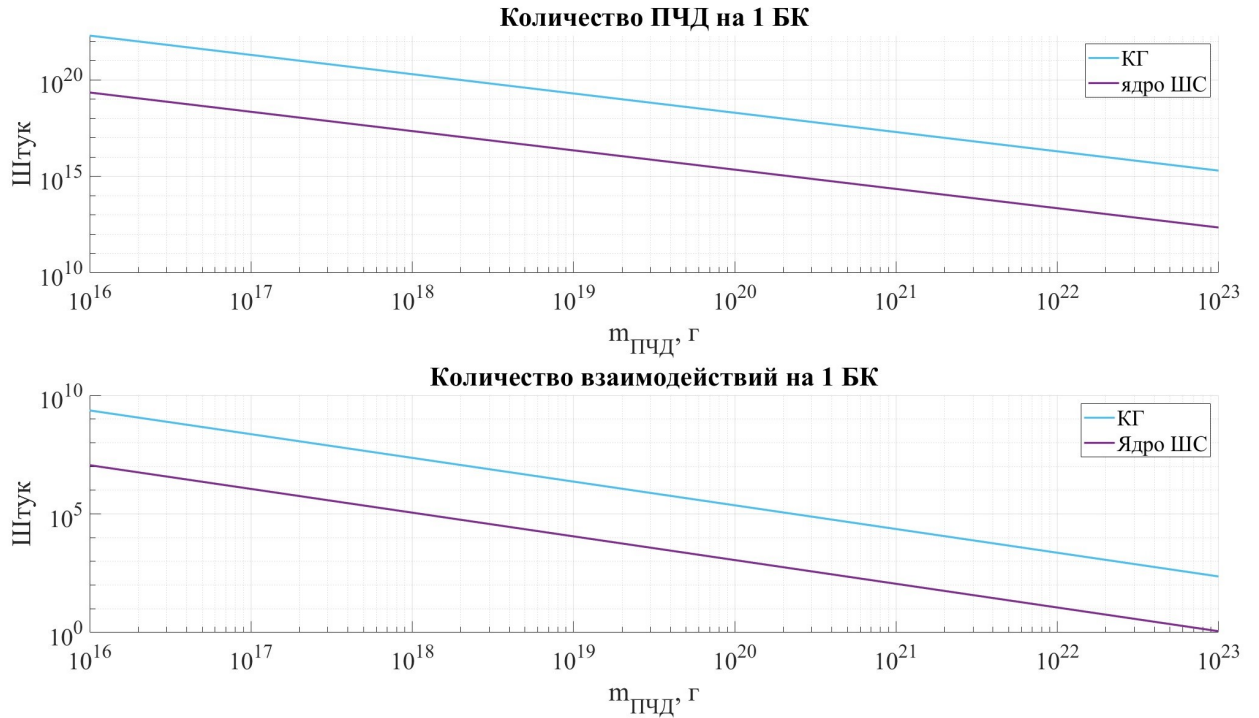


Рисунок 12 — Графики, демонстрирующие разницу между КГ и БК по двум критериям: количество ПЧД, приходящихся на 1 БК (верхний) и количество взаимодействий за время  $t$  на 1 БК, если бы его не уничтожали (нижний).

Как видно, обнаруженные в последние годы КГ, во многом занимающие промежуточное положение между ШС и КГ, позволяют говорить о том, что их можно рассматривать в качестве потенциальной замены ШС, ведь по обоим выделенным критериям они обладают преимуществом перед ядрами ШС: как удельное количество ПЧД, так и удельное количество взаимодействий у КГ выше.

## 8 ПЕРЕСМОТР ОГРАНИЧЕНИЯ ДОЛИ ПЧД В СМ В СЛУЧАЕ ИХ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ КГ

В статье [63] также выдвигается идея об исследовании СМ в КГ в контексте ПЧД. В ней получено ограничение на долю ПЧД в общем количестве СМ для КГ на примере Triangulum II.

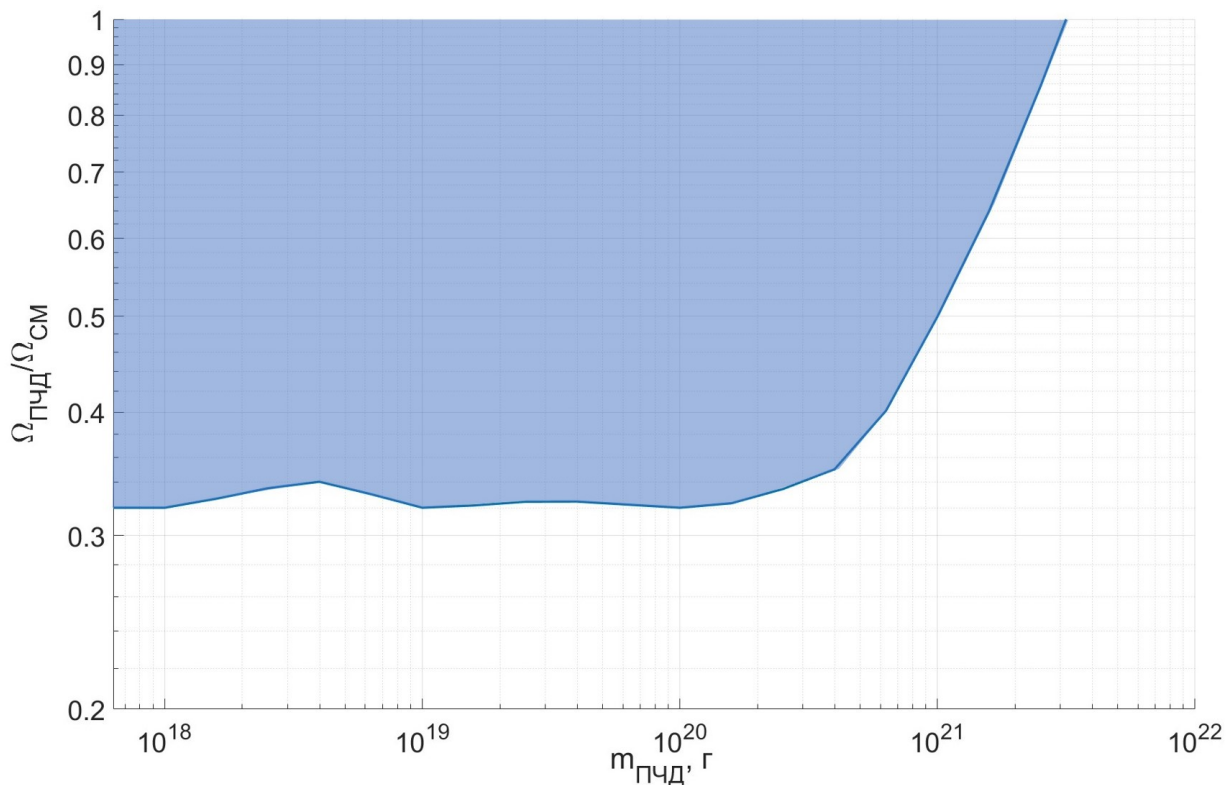


Рисунок 13 — Ограничение на долю  $\Omega_{\text{ПЧД}}/\Omega_{\text{СМ}}$  в КГ Triangulum II, полученные в [63].

Первоначально было выдвинуто предложение о рассмотрении захвата ПЧД нейтронными звездами и белыми карликами, как в предыдущих секциях данной работы, однако в настоящее время НЗ в КГ не наблюдаются. Не смотря на то, что солнцеподобные звёзды представляются менее удачными кандидатами для рассмотрения захвата ПЧД, в контексте КГ они более выгодны, поскольку наблюдаются на регулярной основе.

Следуя логике, описанной в секции 6.1, можно пересмотреть ограничение из рисунка 13.

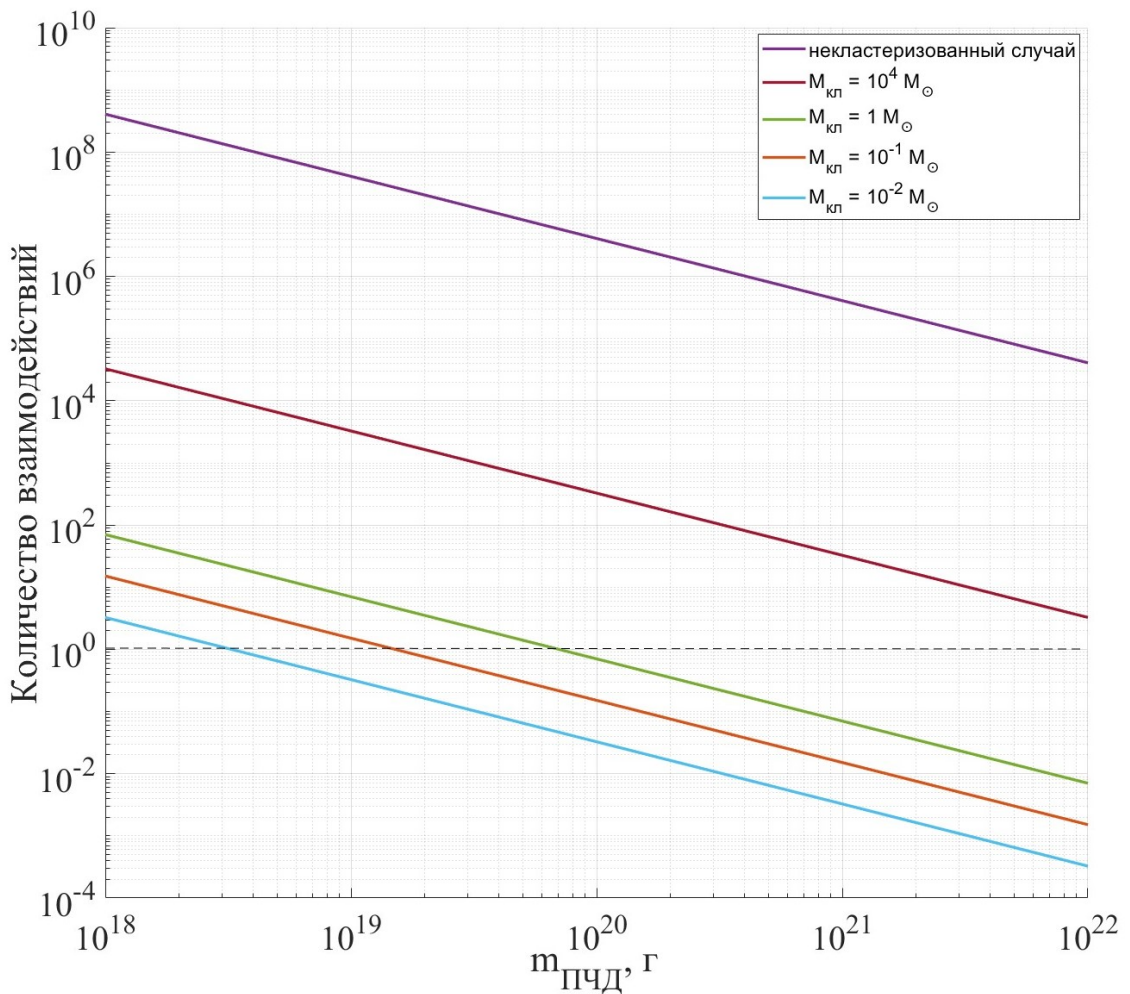


Рисунок 14 — График количества взаимодействий ПЧД со звездой от массы ПЧД при разных массах кластера за время  $t$ , если бы её не уничтожали.

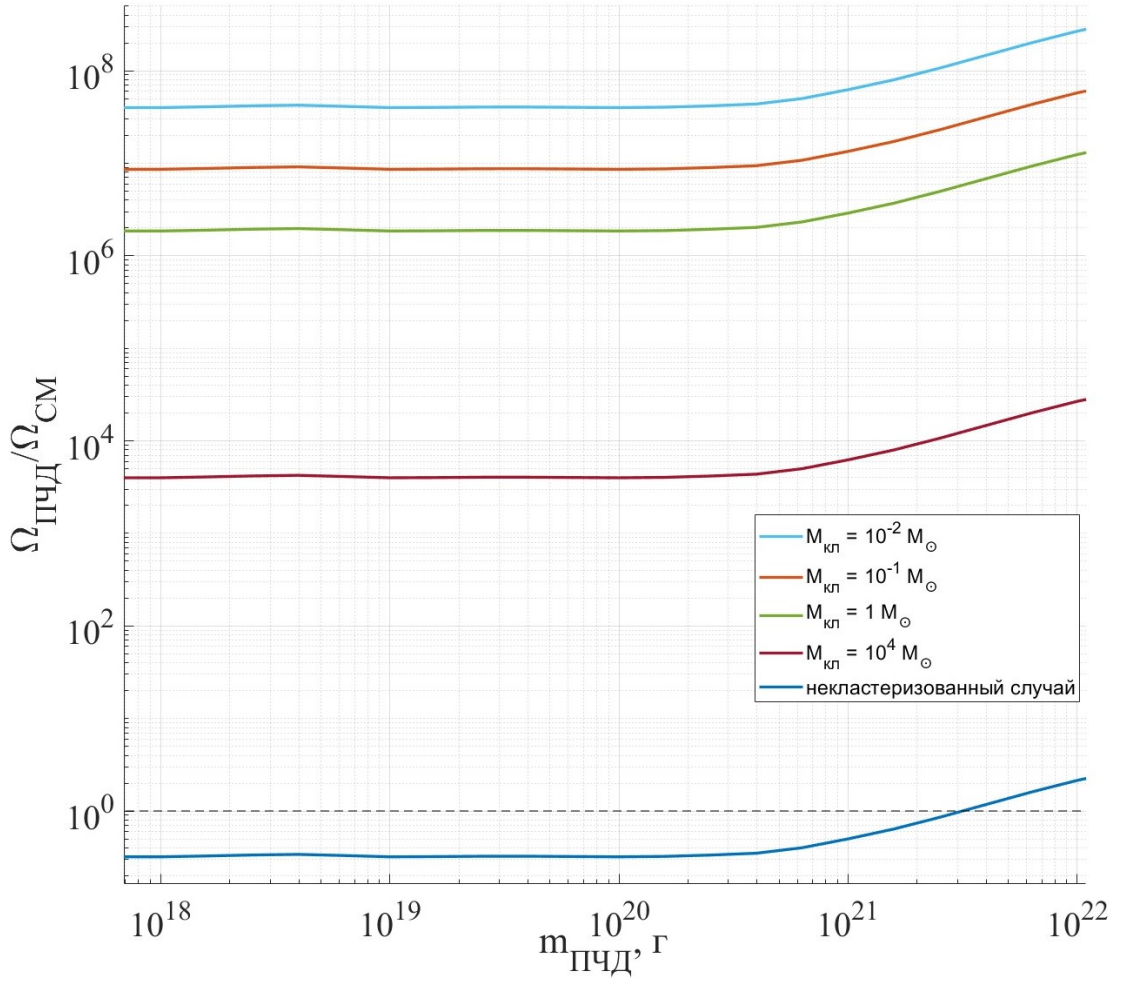


Рисунок 15 — Исходное ограничение на долю  $\Omega_{\text{ПЧД}}/\Omega_{\text{СМ}}$  и новые ограничения с учетом эффекта кластеризации.

Как и в случаях, рассмотренных ранее, отношение  $N_{\text{кл}}/N$  является ослабляющей поправкой ограничения на одиночные ПЧД (из статьи [63]). На рисунке 14 синяя линия соответствует  $N$ , три оставшиеся линии —  $N_{\text{кл}}$ . Как видно из графика на рисунке 15, порядок величины этой поправки во всех случаях даёт один и тот же результат — ограничение из рисунка 13 на долю ПЧД в КГ (на примере Triangulum II) по звездам солнечного типа снимается в случае кластеризации ПЧД.



## 9 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучалось взаимодействие кластерных структур первичных черных дыр с белыми карликами и нейтронными звездами в шаровых скоплениях, а также с звездами солнечного типа в случае карликовых галактик. В частности, исследовалось влияние эффекта кластеризации первичных черных дыр на ограничение на долю первичных черных дыр в скрытой массе. В качестве источника ограничения рассматривался эффект разрушения звезды при попадании в неё первичной черной дыры [29; 30; 63]. В качестве параметров кластера рассматривались его масса и масса первичных черных дыр, из которых он состоит. Размер кластера определялся его массой.

В результате показано, что существующие ограничения на долю первичных черных дыр в случае кластеризации последних могут быть сняты в случае рассмотрения:

- как шаровых скоплений,
- так и карликовых галактик.

Это открывает новую возможность для объяснения всей скрытой массы Вселенной с помощью первичных черных дыр.

## 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. *Josan A. S., Green A. M., Malik K. A.* Generalized constraints on the curvature perturbation from primordial black holes // *Physical Review D*. — 2009. — Т. 79, № 10.
4. *Zel'dovich Y. B., Novikov I.* The Hypothesis of Cores Retarded during Expansion and the Hot Cosmological Model //. — 1966.
5. *Hawking S.* Gravitationally collapsed objects of very low mass // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1971. — Т. 152. — С. 75.
6. *Carr B. J.* The Primordial black hole mass spectrum // *Astrophys. J.* — 1975. — Т. 201. — С. 1—19.
7. *Carr B. J., Hawking S. W.* Black holes in the early Universe // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1974. — Т. 168. — С. 399—415.
8. *Chapline G. F.* Cosmological effects of primordial black holes // *Nature*. — 1975. — Т. 253, № 5489. — С. 251—252.
9. *Carr B. J., Lidsey J. E.* Primordial black holes and generalized constraints on chaotic inflation // *Phys. Rev. D*. — 1993. — Т. 48. — С. 543—553.
10. *Ivanov P., Naselsky P., Novikov I.* Inflation and primordial black holes as dark matter // *Phys. Rev. D*. — 1994. — Т. 50. — С. 7173—7178.

11. An 800-million-solar-mass black hole in a significantly neutral Universe at a redshift of 7.5 / E. Bañados [и др.] // Nature. — 2017. — Т. 553, № 7689. — С. 473—476.
12. The evolution of the X-ray luminosity functions of unabsorbed and absorbed AGNs out to  $z \sim 5$  / J. Aird [и др.]. — 2015. — arXiv: [1503.01120 \[astro-ph.HE\]](#).
13. The population of merging compact binaries inferred using gravitational waves through GWTC-3 / T. L. S. Collaboration [и др.]. — 2022. — arXiv: [2111.03634 \[astro-ph.HE\]](#).
14. Constraints on Earth-mass primordial black holes from OGLE 5-year microlensing events / H. Niikura [и др.] // Phys. Rev. D. — 2019. — Т. 99, № 8. — С. 083503. — arXiv: [1901.07120 \[astro-ph.CO\]](#).
15. *Garsden H., Bate N. F., Lewis G. F.* Gravitational Microlensing of a Reverberating Quasar Broad Line Region - I. Method and Qualitative Results // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. — 2011. — Т. 418. — С. 1012. — arXiv: [1108.0504 \[astro-ph.CO\]](#).
16. *Wyrzykowski L., Mandel I.* Constraining the masses of microlensing black holes and the mass gap with Gaia DR2 // Astron. Astrophys. — 2020. — Т. 636. — A20. — arXiv: [1904.07789 \[astro-ph.SR\]](#).
17. *Brown G. E., Lee C. H., Bethe H. A.* High mass black holes in soft x-ray transients: gap in black hole masses ? — 1999. — arXiv: [astro-ph/9909270](#).
18. Tracing the first stars with fluctuations of the cosmic infrared background / A. Kashlinsky [и др.] // Nature. — 2005. — Т. 438. — С. 45—50. — arXiv: [astro-ph/0511105](#).
19. *Clesse S., Garcia-Bellido J.* Seven Hints for Primordial Black Hole Dark Matter // Phys. Dark Univ. — 2018. — Т. 22. — С. 137—146. — arXiv: [1711.10458 \[astro-ph.CO\]](#).
20. A population of red candidate massive galaxies  $\sim 600$  Myr after the Big Bang / I. Labbé [и др.] // Nature. — 2023. — Т. 616, № 7956. — С. 266—269.

21. White Dwarfs in Dwarf Spheroidal Galaxies: A New Class of Compact-Dark-Matter Detectors / J. Smirnov [и др.]. — 2022. — arXiv: [2211.00013](https://arxiv.org/abs/2211.00013) [[astro-ph.CO](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].
22. *Hawking S. W.* Black hole explosions // *Nature*. — 1974. — Т. 248. — С. 30–31.
23. *Page D. N., Hawking S. W.* Gamma rays from primordial black holes // *Astrophys. J.* — 1976. — Т. 206. — С. 1–7.
24. EGRET Observations of the Extragalactic Gamma-Ray Emission / P. Sreekumar [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 1998. — Т. 494, № 2. — С. 523–534.
25. New cosmological constraints on primordial black holes / B. J. Carr [и др.] // *Physical Review D*. — 2010. — Т. 81, № 10.
26. *Barnacka A., Glicenstein J.-F., Moderski R.* New constraints on primordial black holes abundance from femtolensing of gamma-ray bursts // *Physical Review D*. — 2012. — Т. 86, № 4.
27. EROS and MACHO Combined Limits on Planetary-Mass Dark Matter in the Galactic Halo / C. Alcock [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 1998. — Т. 499, № 1. — С. L9–L12.
28. *Ricotti M., Ostriker J. P., Mack K. J.* Effect of Primordial Black Holes on the Cosmic Microwave Background and Cosmological Parameter Estimates // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — Т. 680, № 2. — С. 829–845.
29. *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.
30. *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.
31. Clusters of primordial black holes / K. M. Belotsky [и др.] // *Eur. Phys. J. C*. — 2019. — Т. 79, № 3. — С. 246. — arXiv: [1807.06590](https://arxiv.org/abs/1807.06590) [[astro-ph.CO](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].
32. *Dokuchaev V., Eroshenko Y., Rubin S.* Quasars formation around clusters of primordial black holes. — 2004. — arXiv: [astro-ph/0412418](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0412418) [[astro-ph](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].

33. A density cusp of quiescent X-ray binaries in the central parsec of the Galaxy / C. J. Hailey [и др.] // *Nature*. — 2018. — Т. 556. — С. 70—73.
34. *Potekhin A. Y.* The physics of neutron stars // *Physics-Uspekhi*. — 2010. — Т. 53, № 12. — С. 1235—1256.
35. *Balberg S., Shapiro S. L.* The Properties of Matter in White Dwarfs and Neutron Stars. — 2000. — arXiv: [astro-ph/0004317](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0004317) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph)].
36. *Kouvaris C., Tinyakov P.* Can neutron stars constrain dark matter? // *Physical Review D*. — 2010. — Т. 82, № 6.
37. THE ACS SURVEY OF GALACTIC GLOBULAR CLUSTERS. IX. HORIZONTAL BRANCH MORPHOLOGY AND THE SECOND PARAMETER PHENOMENON / A. Dotter [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — Т. 708, № 1. — С. 698—716.
38. *Beasley M. A.* Globular Cluster Systems and Galaxy Formation // *Reviews in Frontiers of Modern Astrophysics*. — Springer International Publishing, 2020. — С. 245—277.
39. *Peebles P. J. E.* Dark matter and the origin of galaxies and globular star clusters // *Astrophys. J.* — 1984. — Т. 277. — С. 470—477.
40. Globular Cluster Formation from Colliding Substructure / P. Madau [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2020. — Т. 890, № 1. — С. 18.
41. *Bromm V., Clarke C. J.* The Formation of the First Globular Clusters in Dwarf Galaxies before the Epoch of Reionization // *The Astrophysical Journal*. — 2002. — Т. 566, № 1. — С. L1—L4.
42. *Mashchenko S., Sills A.* Globular Clusters with Dark Matter Halos. I. Initial Relaxation // *The Astrophysical Journal*. — 2005. — Т. 619, № 1. — С. 243—257.
43. Globular clusters, satellite galaxies and stellar haloes from early dark matter peaks / B. Moore [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2006. — Т. 368, № 2. — С. 563—570.
44. GLOBULAR CLUSTER FORMATION WITHIN A COSMOLOGICAL CONTEXT / A. C. Boley [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — Т. 706, № 1. — С. L192—L196.

45. Globular cluster formation within the Aquarius simulation / B. F. Griffen [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2010.
46. *Mackey A. D., Beasley M. A., Leaman R.* No sign (yet) of intergalactic globular clusters in the Local Group // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. — 2016. — Т. 460, № 1. — С. L114—L118. — ISSN 1745-3925. — eprint: <https://academic.oup.com/mnrasl/article-pdf/460/1/L114/8010812/slw076.pdf>.
47. *Ashman K. M., Zepf S. E.* The Formation of globular clusters in merging and interacting galaxies // Astrophys. J. — 1992. — Т. 384. — С. 50.
48. *Kravtsov A. V., Gnedin O. Y.* Formation of Globular Clusters in Hierarchical Cosmology // The Astrophysical Journal. — 2005. — Т. 623, № 2. — С. 650—665.
49. *Muratov A. L., Gnedin O. Y.* MODELING THE METALLICITY DISTRIBUTION OF GLOBULAR CLUSTERS // The Astrophysical Journal. — 2010. — Т. 718, № 2. — С. 1266—1288.
50. Observations and Theory of Star Cluster Formation / B. G. Elmegreen [и др.]. — 1999. — arXiv: [astro-ph/9903136](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9903136) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9903136)].
51. *Kruijssen J. M. D.* Globular clusters as the relics of regular star formation in ‘normal’ high-redshift galaxies // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2015. — Т. 454, № 2. — С. 1658—1686.
52. *Brodie J. P., Strader J.* Extragalactic Globular Clusters and Galaxy Formation // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2006. — Т. 44, № 1. — С. 193—267.
53. *Moore B.* Constraints on the Global Mass-to-Light Ratios and on the Extent of Dark Matter Halos in Globular Clusters and Dwarf Spheroidals // The Astrophysical Journal. — 1996. — Т. 461, № 1.
54. *Mashchenko S., Sills A.* Globular Clusters with Dark Matter Halos. II. Evolution in a Tidal Field // The Astrophysical Journal. — 2005. — Т. 619, № 1. — С. 258—269.
55. Revisiting constraints on asteroid-mass primordial black holes as dark matter candidates / P. Montero-Camacho [и др.] // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2019. — Т. 2019, № 08. — С. 031—031.

56. Tidal Disruption of Dark Matter Halos around Proto–Globular Clusters / T. R. Saitoh [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2006. — Т. 640, № 1. — С. 22–30.
57. A New Milky Way Companion: Unusual Globular Cluster or Extreme Dwarf Satellite? / B. Willman [и др.] // The Astronomical Journal. — 2005. — Т. 129, № 6. — С. 2692–2700.
58. *Simon J. D.* The Faintest Dwarf Galaxies // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2019. — Т. 57, № 1. — С. 375–415.
59. *Strigari L. E.* Galactic searches for dark matter // Physics Reports. — 2013. — Т. 531, № 1. — С. 1–88.
60. *Bergh S. van den.* Globular clusters and dwarf spheroidal galaxies // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. — 2008. — Т. 385, № 1. — С. L20–L22.
61. *Willman B., Strader J.* “GALAXY, ” DEFINED // The Astronomical Journal. — 2012. — Т. 144, № 3. — С. 76.
62. *Carr B., Kühnel F.* Primordial black holes as dark matter candidates // SciPost Physics Lecture Notes. — 2022.
63. *Esser N., Tinyakov P.* Constraints on primordial black holes from observation of stars in dwarf galaxies. — 2022. — arXiv: [2207.07412](https://arxiv.org/abs/2207.07412) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/abs/2207.07412)].