

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 53.05, 53.07

**ОТЧЁТ**  
**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ**  
**ДВОЙНЫХ ПЧД В РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ**

Студент \_\_\_\_\_ Г. И. Воробьев

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ К. Б. Белоцкий

Научный консультант \_\_\_\_\_ В. Д. Стасенко

Москва 2022

# Содержание

Введение . . . . .	2
1 Обобщение моделей ПЧД . . . . .	4
1.1 Механизмы образования . . . . .	4
1.1.1 Флуктуации плотности . . . . .	4
1.1.2 Фазовые переходы первого и второго рода . . . . .	6
1.1.3 Другие теории . . . . .	7
1.2 Ограничения для монохроматического распределения масс ПЧД . . . . .	8
1.3 Скопления ПЧД. Модели формирования и эволюция. . . . .	9
1.3.1 Кластеризация и распределение по массам . . . . .	10
1.3.2 Гравитационно-волновое испарение пар ПЧД . . . . .	11
2 Моделирование Скопления пчд и его эволюции . . . . .	11
2.1 Вычисление параметров системы: ПЧД кластер - сверхмассивная ЧД . . . . .	11
Список использованных источников . . . . .	13

# Введение

Главной задачей *космологии* является исследование наблюдаемой структуры и эволюции Вселенной. Эта область науки прошла большой путь от представлений вселенной с помощью стандартных взаимодействий до современных, расширяющих *Стандартную модель* или вовсе выходящих за её рамки. В тоже время технологический прогресс произошёл и во многих других областях науки (детекторной физики, моделировании, в частности *N-body*, гравитационной интерферометрии), тем самым расширив возможности экспериментальной космологии.

В данной работе мы рассмотрим один из важнейших вопросов космологии - возможность существования первичных чёрных дыр (ПЧД) и их скоплений. Это гипотетические объекты по свойствам схожие с чёрными дырами (ЧД) которые предположительно могли образовываться в ранней Вселенной. Их существование может пролить свет на такие явления как:

1. Сверхмассивные черные дыры ( $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$ ) в центрах галактических ядер. Происхождение таких объектов можно объяснить накопительным эффектом за счёт долгой эволюции галактики. Однако такие объекты обнаружены и на больших красных смещениях  $z > 6$ , что объяснить гораздо сложнее.
2. Сливающиеся двойные черные дыры. Гравитационно-связанная пара ЧД, которые в силу излучения гравитационных волн (ГВ) постепенно сближаются, в конечном итоге образуя новую ЧД большей массы. Такие события с 2014 года стали регистрировать с помощью гравитационно-волновых интерферометров коллабораций LIGO/Virgo. Восстанавливая происхождение этих волн можно вычислить параметры исходной пары ЧД. В некоторых обнаруженных событиях параметры исходных объектов указывают на их вне галактическое происхождение [1].
3. Реионизация Вселенной может быть связана с излучением от маломассивных ПЧД с нейтральным газом или в результате аккреции вещества на массивные ПЧД.

4. Формирование структур при больших красных смещениях  $z > 10$  может быть связано с влиянием ПЧД в ранней вселенной.
5. Скрытая масса. Если ПЧД существуют, то они вносят измеримый вклад в скрытую массу Вселенной.

Первые исследования в этой области начались, после работ В.А. Амбарцумяна о свойствах и структуре *звёздных ассоциаций*<sup>1</sup>. Такие звёзды имеют общее происхождение и довольно молоды: их возраст не превышает нескольких десятков миллионов лет. Однако их можно обнаружить и на больших красных смещениях. Амбарцумян выдвинул гипотезу, что они формируются в последствии взрыва массивных тел, именуемых Д-телами<sup>2</sup>. Другими словами, в ранней вселенной должны быть особые неоднородности материи, приводящие к образованию массивных объектов, влияющих на звёздообразование и анизотропию вещества в целом.

После обнаружения реликтового излучения с температурой 2.7К [4] модель холодной вселенной была опровергнута. Одним из её сторонников был Я.Б.Зельдович. Ему и многим учёным была предложена новая модель согласующаяся с этим экспериментом — модель горячей вселенной [5]. В связи с этим Я.Б.Зельдович и И.Д.Новиков пересмотрели концепцию Д-тел и аналитически доказали, что если такие объекты (именуемые *запаздывающими при расширении ядрами* или ныне *первичными чёрными дырами* (ПЧД)) существуют, то аккреция вещества вокруг них должна вызывать сильное излучение [6]. Дальнейшее развитие исследования возможности существования ПЧД, в частности Хокингом, Каром, выявило связь их образования с условиями сильных неоднородностей в очень ранней Вселенной.

В контексте современного описания космологии основанной на инфляционной космологической модели с бариосинтезом и скрытой массой изучение пчд начинает приобретать всю большую актуальность. Развивающаяся гравитационно-волновая астрономия и поиски явлений гравитационного линзирования существенно расширяют экспериментальные возможности обнаружения ПЧД.

---

<sup>1</sup>Звёздные ассоциации — группировки гравитационно-несвязанных или слабо связанных звёзд.

<sup>2</sup>Д-тело — объект предсказанный В.А.Амбарцумяном, который объяснял природу звездных ассоциаций, как взрыв тела высокой плотности, существовавшего в ранней вселенной [2; 3]

# 1 Обобщение моделей ПЧД

## 1.1 Механизмы образования

Как отмечалось ранее, область космологии изучающая ПЧД невероятно обширна. Связано это во-первых с тем, что ранее лишь по косвенным указаниям восстановленной по сигналу рентгеновскому массы объекта и отсутствие излучения в других диапазонах объекты классифицировались, как ЧД. Во-вторых происхождение этих объектов можно объяснять самыми разными способами и на данный момент в большинстве случаев нельзя с достаточной уверенностью отбросить хотя бы часть теорий.

В связи с прорывом технологий гравитационно-волновой астрономии чувствительность интерферометров к гравитационным волнам сильно возросла, позволяя статистически достоверно утверждать обнаружение гравитационных волн и исследовать свойства их источников (что решило первый отмеченный ранее аспект). В 2014 году коллаборацией LIGO был зафиксирован гравитационно-волновой сигнал соответствующий слиянию ЧД 10-ков солнечных масс с достоверностью в  $5\sigma$ . За это открытие была присуждена Нобелевская премия. Дальнейшие события, обнаруженные гравитационно-волновыми интерферометрами, дали косвенные подтверждения существования ПЧД, однако вопрос природы этих событий только обострился.

В последующих главах этого раздела (1.1.1–1.1.3) рассматриваются космологические модели в качестве примера многообразия объяснений природы ПЧД.

### 1.1.1 Флуктуации плотности

В основе этой модели рассматриваются квантовые флуктуации плотности происходившие в ранней Вселенной (преимущественно рассматривается эпоха космологической инфляции). Однако эти флуктуации при переходе вселенной на RD стадию в некоторый момент времени замораживаются и масштабируются одновременно с ростом вселенной. Начиная с RD-MD перехода эти начальные флуктуации снова входят в причинно-связную область и начинают влиять на формирование звёзд, галактик и скоплений.

В частности, они могут образовывать ПЧД от  $10^{-5}$  до  $10^{25} M_{\odot}$ .

В работах [7; 8] рассмотрены некоторые из таких сценариев. Ниже приведены графики зависимости радиуса Хаббла от масштабного фактора (Рис. 1.1 и 1.2). На них можно явно увидеть, как описанные выше флуктуации попадают за горизонт и возвращаются.

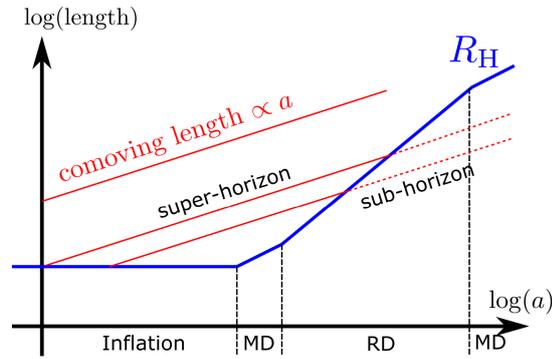


Figure 1: The rough sketch of the standard evolution of the background universe and the perturbations on it.

Рисунок 1.1 – 1

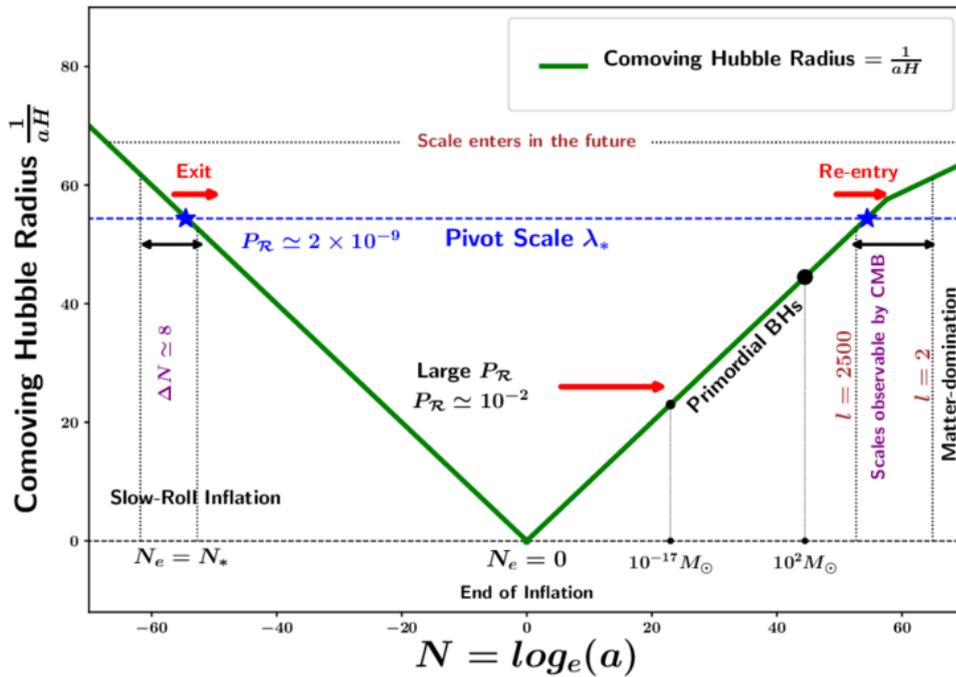


Рисунок 1.2 – 2

### 1.1.2 Фазовые переходы первого и второго рода

В этих моделях рассматриваются в ранней Вселенной скалярные поля, имеющие так называемый «ложный вакуум». Это локальный минимум скалярного поля, при этом отличный от глобального. Как предсказывает квантовая механика — для частиц имеющих такую конфигурацию поля характерен процесс туннелирования (вероятностного перехода частицы из состояния ложного вакуума в состояние истинного или глобального). При этом такой переход может быть как скачкообразный, так и плавный — так возникает различие в между фазовыми переходами первого и второго рода. В результате, в нашей вселенной будут образовываться области с ложным вакуумом и истинным, имеющие характерные границы между друг другом (стенки пузыря или доменные стенки). Поскольку вселенная стремится в состояние истинного вакуума, как более энерго-выгодное, то зоны истинного вакуума будут расти, вытесняя зоны ложного вакуума. Как показано на рисунке 1.4, при фазовом переходе первого рода в результате эволюции таких областей могут образоваться остаточные пузыри ложного вакуума внутри истинного, которые из-за колебания своих размеров могут образовывать ЧД.

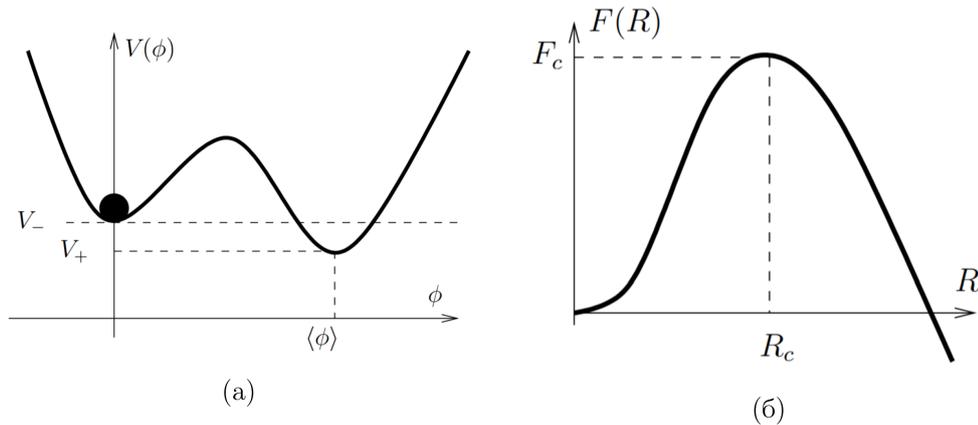


Рисунок 1 — (а) — Вид потенциала скалярного поля, при котором может происходить ФП 1-го рода. (б) — Свободная энергия пузыря новой фазы в зависимости от его радиуса.

Рисунок 1.3 — ...

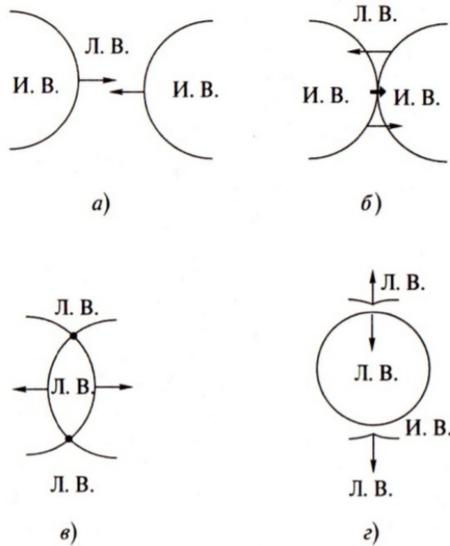


Рисунок 2 – Формирование мешка ложного вакуума при столкновении стенок двух пузырей.

Рисунок 1.4 – ...

### 1.1.3 Другие теории

В предыдущих главах были рассмотрены две из самых обсуждаемых моделей и абсолютно разных по подходу. При этом многообразность механизма формирования ПЧД, как не раз отмечалось ранее, и на половину не отражена ими. Не менее значительное место занимают и пересечения между разными моделями, позволяющие рассматривать более экзотические или наоборот более общие случаи. Данная работа не преследует цели рассмотреть вопрос механизмов формирования со всех сторон. Поэтому для остальных моделей ниже приведён список с источниками на некоторые из них.

1. Развитие гравитационной неустойчивости на этапе доминирования сверхтяжелых нерелятивистских частиц, которые предсказываются в рамках теорий великого объединения.
2. Коллапс космических струн
3. Модели гибридной инфляции
4. Флуктуации барионного заряда, объясняемые модифицированным механизмом бариогенезиса Аффлека-Дайна.

## 1.2 Ограничения для монохроматического распределения масс ПЧД

В этом разделе предоставлены ограничения на долю наблюдаемой скрытой массы, которую может объяснить гипотеза существования ПЧД с массовым распределением в виде дельта-функции. На Рис. 1.5 можно увидеть возможные (белые) зоны, соответствующие массовой доле ПЧД в скрытой массе, и зоны ограничений (цветные), соответствующие доле, которую ПЧД таких масс объяснить не могут в силу экспериментальных ограничений, в зависимости от массы ПЧД [9].

Как можно заметить по по графику — большая часть спектра масс ограничивает возможность объяснить всю тёмную материю с помощью ПЧД. Помимо этих ограничений существует ещё множество других, которые либо нацелены на конкретные модели ПЧД, либо по другим причинам не отражены в оригинальной работе [9]. Однако вывод, который напрашивается из этого графика говорит о том, что если массы ПЧД сконцентрированы в определённом массовом промежутке, то скорее всего такими ПЧД можно объяснить лишь меньше 10% скрытой массы.

Поскольку промежутки масс, для ПЧД с монохроматическим спектром масс с каждым годом всё точнее и больше ограничивают долю в скрытой массе — большой упор этой области науки ушёл в попытки создать такие экзотические модели, способные обойти наблюдаемые ограничения. Одним из таких направлений стало исследование скоплений или кластеров первичных черных дыр.

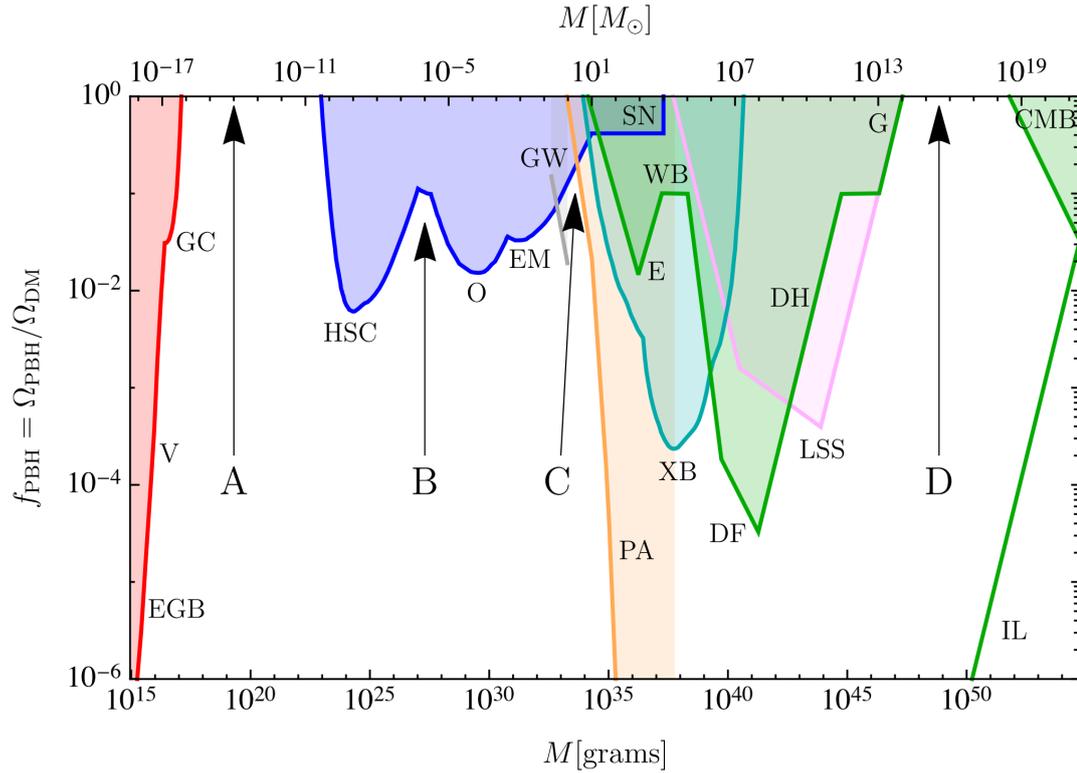


Рисунок 1.5 – Ограничения на долю ПЧД во всех скрытой массе для монохроматической функции масс, обусловленные испарением (красный), линзированием (синий), гравитационными волнами (серый), динамическими эффектами (зеленый), аккрецией (голубой), искажениями реликтового излучения (оранжевый) и крупномасштабной структурой (фиолетовый). Пределы испарения исходят из внегалактического фона  $\gamma$ -излучения (EGB), потока позитронов «Вояджера» (V) и излучения линии аннигиляции от центра Галактики (GC). Пределы линзирования обусловлены микролинзированием сверхновых (SN) и звезд в M31 с помощью Subaru (HSC), Магеллановых Облаков с помощью EROS и MACHO (EM) и галактической выпуклости с помощью OGLE (O). Динамические ограничения связаны с широкими двойными системами (WB), звездными скоплениями в Эриданус II (E), динамическим трением гало (DF), приливными искажениями галактик (G), нагревом звезд в галактическом диске (DH) и диполем реликтового излучения (CMB). Ограничения крупномасштабной структуры вытекают из требования, чтобы различные космологические структуры не формировались раньше наблюдаемого (LSS). Пределы аккреции исходят из рентгеновских двойных (XB) и планковских измерений искажений реликтового излучения (PA). Пределы недоверия (IL) соответствуют одной РВН на соответствующую среду (галактика, скопление, Вселенная). Имеется четыре массовых окна (A, B, C, D), в которых ПЧД могли иметь заметную плотность.

### 1.3 Скопления ПЧД. Модели формирования и эволюция.

Направление исследования ПЧД с отличным от монохроматического распределения спектра масс присутствовало с самого зарождения идеи ПЧД. Однако рассчитывать ограничения и делать предсказания в таких моделях достаточно проблематично в силу вычислительных сложностей.

Аналитические методы в таких моделях перестают давать точный результат или иметь аналитическое решение в целом, а вычислительные достаточно тяжело реализовать с достаточной точностью, доступной вычислительной мощностью и скоростью вычисления.

### 1.3.1 Кластеризация и распределение по массам

Некоторые модели формирования ПЧД развивались отчасти на возможности воссоздавать их скопления. Особенно полно это описано в работе [10]. Т.е. флуктуации предсказываемые той или иной моделью могут быть достаточно близко друг к другу, влиять на друг друга и тем самым группировать ПЧД, образуя скопления или кластеры.

Другой из предпосылок к существованию кластеров ПЧД было изучение звёздных шаровых скоплений. В исследовании [11] показывается, как с помощью *N-body* моделирования получили шаровое скопление похожее на *Palomar 5*. Полученное скопление постепенно увеличивало долю ЧД среди звёзд в скоплении, а через миллиард лет привело к полному «выветриванию» звёзд, оставив лишь кластер из ЧД. Один из выводов работы говорит, что такие кластеры могут быть частым явлением.

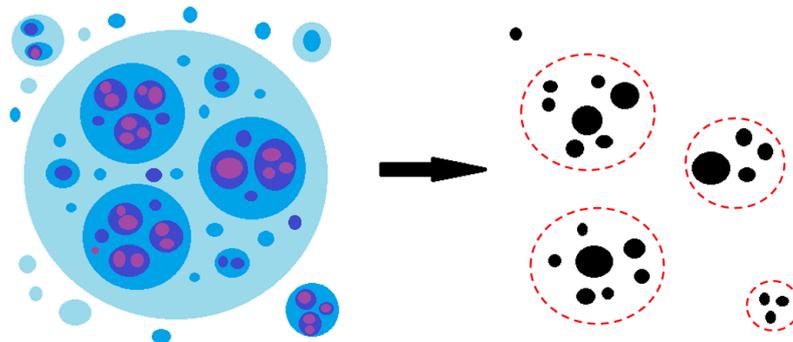


Рисунок 1.6 – Многократные флуктуации, расширяющиеся и накладывающиеся поверх друг друга естественным образом обеспечивают самоподобную структуру. Формируются скопления ПЧД самых разных масс и размеров [12].

Создавать кластеры можно двумя способами. Либо подбирать распределение спектра масс таким образом, на этапе формирования структур они уже стали вносить вклад в последующее формирование вселенной, либо сразу рассматривать скопления и подбирать их параметры. Обычно задачи многих тел считаются неустойчивыми и за конечный промежуток

времени такие системы распадаются. Однако вопрос устойчивости позволяет выбирать и такие системы, время жизни которых значительно больше других.

### 1.3.2 Гравитационно-волновое испарение пар ПЧД

Частота слияний ЧД, измеряемая детекторами коллабораций LIGO, Virgo и KAGRA, также может указывать на близость ПЧД друг к другу. Тем самым прорыв в гравитационно-волновой астрономии способствовал привлечению внимания к теме кластеров ПЧД.

## 2 Моделирование Скопления пчд и его эволюции

### 2.1 Вычисление параметров системы: ПЧД кластер - сверхмассивная ЧД

В этом разделе для дальнейшего исследования эволюции скоплений ПЧД и возможном распределений масс ПЧД в них приводятся некоторые расчёты системы состоящей из скопления пчд в количестве 100 штук общей массой в  $100M_{\odot}$  и одной сверх-массивной ЧД, так же массой в  $100M_{\odot}$ . Решать будем в классическом Ньютоновском N-body формализме.

В первую очередь получаем время релаксации скопления:

$$T_E = \frac{1}{25.5 \lg N/2} \cdot \sqrt{\frac{NR_1^3}{Gm_1}} \quad (1)$$

Зная время релаксации, для стабильного нахождения скопления на орбите возьмём период орбиты сильно больше этого времени, допустим в 100 раз.

Рассмотрим задачу, как два вращающихся тела вокруг равноудалённого на расстояние  $R$  центра масс. Сила, создающая центростремительное ускорение  $F_g = \frac{Gm_1m_2}{(2R)^2} = ma$ . Тогда из второго закона Ньютона можем

найти скорость тел и вывести радиус из периода.

$$m_1 \frac{v^2}{R} = \frac{Gm_1m_2}{(2R)^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{Gm_2}{4R}} \quad (2)$$

$$m_1\omega^2R = m_1\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R = \frac{Gm_1m_2}{(2R)^2} \Rightarrow R^3 = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 Gm_2 \quad (3)$$

Зная эти параметры остаётся только правильно в эти условия вписать положения и скорости ЧД. Скорости по каждой координате выбираем как псевдослучайное число из нормального распределения == тем самым получая максвелловское распределение скоростей. Среднее значение распределения выбираем как **2**, дисперсия же рассчитывается из теоремы Вириала  $2T + U = 0 \Rightarrow \langle v^2 \rangle = -U/(N^2m_1)$ . Здесь  $T = \sum m_1 i v_i^2 / 2 = Nm_1/2 \sum v_i^2 = Nm_1(N \langle v^2 \rangle) / 2$  в силу выбора одинаковой массы и понятия среднего, Потенциальная энергия вычисляется непосредственно суммированием потенциальных энергий всех пар ЧД в скоплении без повторений. Положения ЧД в скоплении выбираются с помощью метода Монте-Карло (заполняется куб точками, после отсекаются точки куба вне шара), а параметры сверхмассивной чд напрямую берутся из **(2-3)**.

Далее испытав на небольшом промежутке времени и примерно оценив сложность вычислений от увеличения этого промежутка можно подобрать оптимальный временной шаг, чтобы промоделировать хотя бы один период вращения этих объектов.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914 / M. Sasaki [et al.] // Physical Review Letters. — 2016. — Aug. — Vol. 117, no. 6. — <https://doi.org/10.1103/physrevlett.117.061101>.
2. *Амбарцумян В.* Научные труды в двух томах. — Ереван : АН Армянской ССР, 1960.
3. *Instituts Solvay, Conseil de physique.* The Structure and Evolution of Galaxies: Proceedings of the Thirteenth Conference on Physics at the University of Brussels, September, 1964. — Interscience, 1965. — [https://books.google.ru/books?id=\\_35SwQEACAAJ](https://books.google.ru/books?id=_35SwQEACAAJ).
4. *Penzias A. A., Wilson R. W.* Half an hour of creation... // Astrophysical Journal. — 1965. — July. — Vol. 142. — P. 419–421 ; — <https://doi.org/10.1086/148307>.
5. *Gamow G.* Half an hour of creation... // Physics Today. — 1950. — Vol. 3 (8). — P. 16–21 ; — <https://doi.org/10.1063/1.3066969>.
6. *Zel'dovich Y. B., Novikov I. D.* The Hypothesis of Cores Retarded during Expansion and the Hot Cosmological Model // *Astronomicheskii Zhurnal*. — 1967. — Feb. — Vol. 10. — <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1967SvA....10..602Z/abstract>.
7. *Chul-Moon Yoo.* The basics of primordial black hole formation and abundance estimation. — 2022. — Nov. ; — <https://arxiv.org/abs/2211.13512>.

8. *Mishra S. S., Sahni V.* Primordial Black Holes from a tiny bump/dip in the Inflaton potential. — 2020. — Mar. ; — <https://arxiv.org/abs/1911.00057>.
9. *Carr B., Kuhne F.* Primordial Black Holes as Dark Matter: Recent Developments. — 2020 ; — <https://arxiv.org/abs/2006.02838>.
10. Clusters of Primordial Black Holes / K. M. Belotsky [et al.] // The European Physical Journal C. — 2019. — Mar. — Vol. 79, no. 3. — <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6741-4>.
11. A supra-massive population of stellar-mass black holes in the globular cluster Palomar 5 / M. Gieles [et al.] // Nature Astronomy. — 2021. — Vol. 5. — P. 957–966 ; — <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01392-2>.
12. *Никулин В.* Космологические эффекты в теориях с неоднородными дополнительными измерениями. — Москва, 2022. — <https://indico.particle.mephi.ru/event/292/>.