

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

---

## ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Модели скрытой массы и их проверка

Научный руководитель: \_\_\_\_\_ Хлопов М.Ю  
Студент: \_\_\_\_\_ Айдеков А.А.

Москва 2021

## Содержание

1.Введение	3
2.Скрытая масса основные понятия	3
2.1.Модели скрытой массы	3
3.Проверка моделей скрытых масс	5
3.1.Рентгеновские изображения	
3.2.Микролинзирование	
3.3.WIMPs	
4.Список литературы	8

## Введение

Скрытой массой называют существующее во Вселенной, но ненаблюдаемое вещество. Скрытая масса состоит из двух, совершенно различных по природе компонентов:

Темного— вещества неизвестной природы, существование которого проявляется лишь косвенным образом — через гравитационные воздействия на различные объекты Вселенной

Барионного темного вещества— обычного вещества, которое мы пока не можем наблюдать из-за ограниченных возможностей.

## Модели скрытой массы

Претендентами на звание частиц темной материи являются:

- астрономические объекты (MACHOs — массивные астрофизические компактные гало-объекты):

- черные дыры

- нейтронные звезды

- коричневые, или бурые, карлики (*brown dwarfs*)

- элементарные частицы (WIMPs — слабо взаимодействующие массивные частицы)

- фотино (партнер, античастица фотона), гипотетическая нейтральная частица (без электрического заряда), тяжелая, участвующая в слабом взаимодействии. Скорость около 300 км/с

- аксионы

- фермионы

Наиболее убедительными конкретными свидетельствами существования скрытой массы считаются: кинематика членов скоплений галактик; кривые вращения (дисковых) галактик; наблюдения рентгеновского излучения горячего газа в скоплениях галактик; наблюдения гравитационного микролинзирования.

К первой группе относятся исследования, выполненные знаменитым швейцарским астрономом Фрицем Цвикки, опубликованные еще в 1930-х годах. Цвикки измерил дисперсию скоростей галактик в скоплении Coma и оценил (динамическую) массу скопления из законов небесной механики. Он также оценил суммарную светимость галактик. Оказалось, что отношение массы к излучаемой энергии в 400 раз больше,

чем для Солнца. К этому времени уже сложились основы физики звезд, согласно которым в нормальном звездном мире такого не могло быть. Поэтому Цвикки сделал вывод, что-либо в скоплениях галактик, либо в пространстве между ними присутствует некий очень массивный компонент, который не светится, т.е. является «темным». Он и удерживает галактики, движущиеся с огромными скоростями (дисперсия скоростей около 1000 км/с) в скоплении.

Измерения кривых вращения галактик, т.е. зависимости скорости вращения от расстояния до центра галактики, считается наиболее убедительным свидетельством существования скрытой массы в галактиках. Оказалось, что на большом протяжении линейная скорость вращения остается постоянной. На рис. 1 показана кривая вращения галактики NGC 3198. Кривая вращения, полученная по наблюдениям HI на 21 см (нижняя панель), разложена на три составляющие. Кривая, помеченная как disk, — ожидаемая кривая вращения модели галактики, у которой распределение поверхностной плотности по радиусу соответствует (пропорционально) распределению поверхностной яркости. Газ в галактике также дает свой вклад в кривую вращения. Видно, что совместный вклад газа и звезд недостаточен для объяснения наблюдений кривой вращения. Приходится добавлять компонент (halo), состоящий из ненаблюдаемого темного вещества. На больших расстояниях от центра галактики вклад этого гало (иногда используют название «темное гало») является доминирующим.

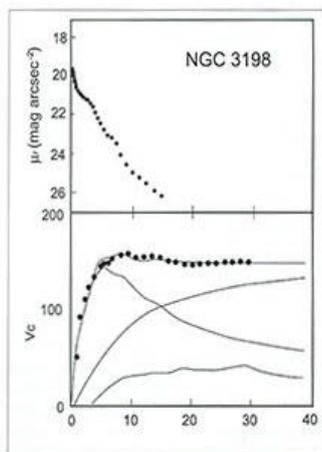


Рис. 1. Фотометрическая кривая, т.е. распределение яркости по радиусу (верхняя панель) и кривая вращения галактики NGC 3198, полученная по наблюдениям нейтрального водорода на 21 см (нижняя панель). Кривая вращения разложена на три составляющие: диск — ожидаемая кривая вращения модели галактики, у которой распределение звезд по радиусу соответствует (пропорционально) распределению яркости (верхняя панель); газ — вклад газового компонента; гало — вклад ненаблюдаемого компонента — темного гало.

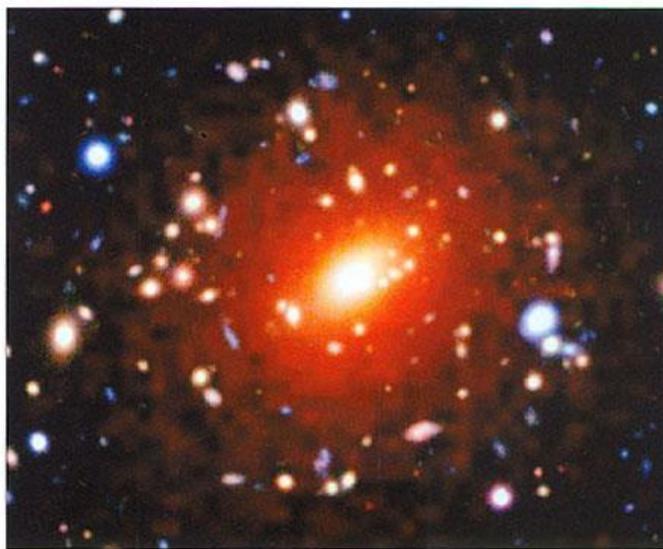


Рис. 2. Скопление галактик MACSJ1423.8+2404. Оптическое изображение (голубоватый цвет) получено Эбелингом на телескопе Subaru. Рентгеновское (красный цвет) получено Алленом и др. на космическом рентгеновском телескопе Chandra (NASA: For release: 05-18-04 Photo release #: 04-144).

# Методы проверки скрытой массы

## 1. Рентгеновские изображения

Скрытая масса, несомненно, присутствует в гигантских эллиптических галактиках, а также в богатых скоплениях галактик. Важнейшим инструментом для изучения скрытой массы в этих объектах считаются наблюдения в них горячего газа, излучающего в рентгеновском диапазоне (рис. 2). Частицы газа, нагретого до температуры в десятки миллионов градусов, движутся с огромными скоростями, и чтобы удержать этот газ от разлета в окружающее пространство, нужна мощная сила гравитации. И снова, как и в исследованиях Цвикки, наблюдаемой массы существенно (в разы) недостаточно для удержания этого газа. Поскольку эти горячие газовые гало должны быть близки к гидростатическому равновесию, измерение распределений температуры по рентгеновским изображениям и спектрам дает возможность оценивать полное распределение массы. Как показывают результаты работ многих исследователей, во внутренних областях гигантских эллиптических галактик на расстояниях  $R < R_e$ , где  $R_e$  — эффективный радиус, доминирует обычное вещество, а темная материя составляет не более 20%, но при  $R \gg R_e$  доминирует уже темная материя.

## 2. Микролинзирование

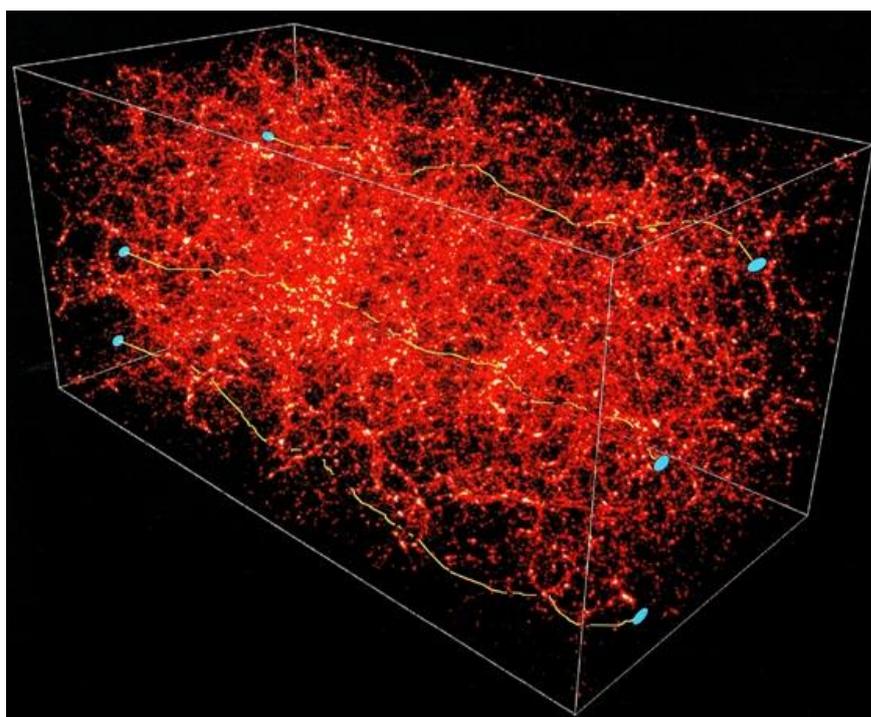
Еще одним способом обнаружения скрытой массы являются наблюдения событий микролинзирования. Суть этого метода состоит в том, что гравитационное поле невидимого нам компактного тела, движущегося близ луча зрения между удаленным источником излучения (звездой из другой галактики, квазаром и т.д.) и наблюдателем, действует на излучение источника как линза, и при близком прохождении от луча зрения дает заметное усиление яркости источника — вспышку. Объекты, вызывающие микролинзирование, находятся недалеко от нас по сравнению с внегалактическими объектами. В связи с этим угловые скорости их движения, перпендикулярные лучу зрения наблюдателя, сравнительно велики. Поэтому эффект каждой микролинзы можно наблюдать всего несколько десятков суток. В мире проводится ряд экспериментов по обнаружению такого рода вспышек. Уже зарегистрированы многие тысячи таких событий.

Результаты наблюдений явлений микролинзирования в эксперименте OGLE и других подобных проектах позволили предположить, что одним из компонентов скрытой массы являются маломассивные (массой не более нескольких десятых

масс Солнца) звезды, возможно, коричневые карлики. По некоторым оценкам, количество таких маломассивных звезд в нашей Галактике превышает предсказываемое современной теорией происхождения и эволюции звезд. Однако есть и другие заключения. На основании анализа результатов эксперимента проведена проверка гипотезы о большом количестве (до 1012) маломассивных звезд (белых карликов) в гало нашей Галактики. Практически все неэкзотичные сценарии образования Галактики исключают такую возможность. Микролинзой может быть не только звезда или планета, но и сгусток ТВ (если сгустки такой массы могут существовать). В эксперименте OGLE наблюдалось около двух миллионов звезд Магеллановых облаков. Цель — пронаблюдать вспышки, вызванные эффектом микролинзирования на объектах в гало нашей Галактики. Общий вывод: маловероятно, чтобы в гало нашей Галактики существовали сгустки ТВ, способные вызвать эффект микролинзирования. Таким образом, перед учеными стоит проблема, требующая решения.

### 3. miracle WISPs

Другой путь объяснения недостающей массы выбрали физики, изучающие элементарные частицы. Они предположили, что галактическое пространство заполнено частицами особого вида. Их общее количество как раз и образует ту самую скрытую массу. WIMPs предположительно возникли, когда наша Вселенная была еще очень молодой и горячей.



Почему же мы их не видим и почему эти частицы не собираются в плотные объекты типа темных карликов? Приходится предположить, что частицы эти практически не взаимодействуют с другими, обычными частицами, и в частности не излучают фотонов. Только гравитация указывает на их существование. Эти необычные свойства создают большие трудности в доказательстве существования WIMPs. Если эти частицы существуют, то они заполняют всю нашу Галактику и непрерывно пронизывают Землю. От обычных частиц, прилетающих из Космоса, нас спасает атмосфера, которая поглощает даже наиболее энергичных представителей. Но WIMPs не взаимодействуют с обычной материей и, следовательно, не задерживаются атмосферой. Каждую секунду нас, возможно, пронизывает примерно  $10^{14}$  этих частиц, к счастью, не влияющих на молекулы нашего тела, поэтому мы их просто не замечаем, и они пролетают сквозь нас, не оставляя никакого следа. Надежда обнаружить WIMPs основана на том, что, возможно, они все-таки взаимодействуют с обычными частицами. Пусть вероятность столкновения крайне мала, но если собрать много обычных частиц вместе, то, возможно, с кем-нибудь эта неуловимая WIMPs да «провзаимодействует». Ведь их должно быть очень много, и если подольше подождать, то столкновение произойдет. Конечно, подавляющее большинство этих частиц пролетит незамеченным не только сквозь материал, но и сквозь Землю, но, возможно, отдельные WIMPs-неудачники все-таки столкнутся с атомами материала - мишени.

Так, проект предусматривает охлаждение большого куска кристаллического материала почти до абсолютного нуля температур. Если через такой кристалл будут пролетать мириады WIMPs, то когда-нибудь они провзаимодействуют с материалом кристалла. Ожидается, что небольшое тепло, которое выделится при столкновении, будет зафиксировано приборами, что и докажет существование WIMPs

## Список литературы

- 1) M.Yu.Khlopov Multi-messenger cosmology of new physics. J. Phys.: Conf. Ser. V.1690 PP. 012182 (2020), doi:10.1088/1742-6596/1690/1/012182, arXiv:2010.14581
- 2)M.Yu.Khlopov, Cosmoparticle physics of dark matter. EPJ Web of Conferences V. 222, 01006 (2019) Proceedings of QFTHEP2019. E-Print: arXiv:1910.12910; <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922201006>
- 3)M.Yu.Khlopov, Cosmological Reflection of Particle Symmetry. Invited review in special issue "Nuclear Symmetry Energy" Symmetry 2016, 8(8), 81 (41 pages); <https://www.mdpi.com/2073-8994/8/8/81>
- 4) <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%BC%D0%BF>
- 5) <http://galspace.spb.ru/index60-4.html>
- 6) <https://www.den-za-dnem.ru/page.php?article=1132>
- 7) [https://studme.org/335043/matematika\\_himiya\\_fizik/problema\\_skrytoy\\_massy\\_temnaya\\_materiya](https://studme.org/335043/matematika_himiya_fizik/problema_skrytoy_massy_temnaya_materiya)
- 8)[https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D1%80%D1%8B%D1%82%D0%B0%D1%8F\\_%D0%BC%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D1%80%D1%8B%D1%82%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B0)
- 9) [http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi\\_Fiz\\_Nauk/2001/N08/2001-8-06.pdf](http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi_Fiz_Nauk/2001/N08/2001-8-06.pdf)