

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное

учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский ядерный университет

«МИФИ»

УДК 53.01

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ

СТРУКТУРЫ ИЗ ДИССИПАТИВНОЙ

САМОВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ СКРЫТОЙ МАССЫ

Научный руководитель

_____ К. М. Белоцкий

Выполнил

_____ Д. С. Калашников

Москва 2021

Содержание

Содержание	1
1 Введение	2
2 Образование темного диска в Λ CDM	4
3 Образование структур барионов	5
4 Оценка параметра σ/t для скрытой массы	6
5 Сопоставление результатов моделирования и наблюдений	7
6 Учет барионной материи	8
7 Заключение	9
Список использованных источников	10

1 Введение

В настоящей работе проводилось исследование возможности образования структуры из диссипативной самовзаимодействующей скрытой массы. В современной стандартной космологической модели Λ CDM Вселенная заполнена барионной материей, темной энергией и холодной невзаимодействующей скрытой массой (CDM).

Выводы, получаемые с использованием CDM согласуются с наблюдениями крупномасштабных структур во Вселенной, но существует ряд расхождений между предсказаниями Λ CDM и наблюдениями. В данной работе мы сосредоточим внимание на двух из них:

1. Различие в плотности темной материи в гало [1];
2. Различие в количестве карликовых галактик.

Для объяснения причин расхождения рассматриваются расширения Λ CDM модели с добавлением самовзаимодействующей скрытой массы (SIDM) [2]. На крупных масштабах, наличие самовзаимодействия приводит к обмену энергией и моментом между частицами скрытой массы, что позволяет компенсировать различие плотностного профиля гало, сделать внутреннюю часть гало более симметричной [3].

Множество работ [3–6] показывают, что количество карликовых галактик в космологическом моделировании с SIDM согласуется с наблюдениями.

Наделяя частицы скрытой массы взаимодействием, мы наделяем ее некоторыми свойствами барионной материи, в связи с чем возникает вопрос: может ли самовзаимодействующая скрытая масса образовывать структуры и если может, то какие структуры?

Для ответа на этот вопрос необходимо найти область в пространстве параметров диссипативной самовзаимодействующей скрытой массы (dSIDM), которая может образовывать структуры, подобные структурам из барионной материи. Далее сравнить эту область с ограничениями из наблюдений: если области будут иметь пересечение, то мы можем говорить о возможности образования структур, если пересечения нет – самовзаимодействующая скрытая масса структуру образовать не сможет.

Для решения поставленной задачи необходимо: рассмотреть как изучаются свойства SIDM на основе моделирования и наблюдений; разобраться в том, как образуются структуры из барионной материи; изучить статьи связанные с образованием структуры скрытой массы.

В предыдущем семестре был проведен литературный обзор по следующим темам:

1. образование структуры барионов;
2. образование темного диска в Λ CDM;
3. результаты, получаемые из космологического моделирования с SIDM и dSIDM.

В этом семестре были исследованы следующие темы:

1. Технические составляющие моделирования;
2. Учет барионной материи при моделировании SIDM.

Также остался не решен вопрос, возникший на первом семестре: как численно оценить параметры барионной материи, необходимые для образования структур.

2 Образование темного диска в Λ CDM

В статьях [7; 8] показана возможность существования темного диска в Λ CDM модели без участия SIDM и его влияние на наблюдения. Исследование заключалось в моделировании формирования космологической структуры для определения частоты столкновений галактик-спутников с диском.

Ключевая идея, представленная в работе [7], заключается в том, что аккреция вблизи диска, приводит к образованию диска из темной материи. Дается оценка на плотность темного диска в окрестности Солнца:

$$\rho_{\text{DDISC}} = 0.22 \rho_{\text{HALO}}. \quad (1)$$

Систематические ошибки могут составлять до 30%, поэтому максимальная плотность может достигать трех плотностей гало в окрестности Солнца.

Темный диск не сильно влияет на динамику движения звезд, но играет важную роль в поиске скрытой массы рядом с Солнцем. Влияние темного диска на скорость обнаружения темной материи описано в статье [7]. Более низкая относительная скорость темного диска по сравнению с гало увеличивает сечение захвата. Темный диск в данной статье скорее не самостоятельная структура, а уплотнение в гало.

3 Образование структур барионов

Для проверки возможностей образования структур из самовзаимодействующей скрытой массы в данной секции были рассмотрены теории образования крупномасштабных структур из барионной материи. На основе этих теории необходимо получить критерии, при которых образование структуры из материи возможны.

В работе [9] проведен широкий обзор информации о крупномасштабной структуре Вселенной. Несмотря на год публикации работы, многие данные остаются актуальными до сих пор. Образование крупномасштабных структур описывают две теории: адиабатическая теория (А-теория) и энтропийная теория (Е-теория).

Согласно А-теории вначале образуются объекты большого масштаба — «блины», отождествляемые со сверхскоплениями галактик. Увеличиваясь в размерах «блины» со временем сливаются и создают крупномасштабную сетчатую структуру Вселенной. В плотных «блинах» идет процесс образования галактик и звезд вокруг возмущений в плотности, в разреженных областях между «блинами» галактики не образуются. Далее происходит распад сетчатой структуры на отдельные облака и их последовательное собирание в крупные образования: галактики, скопления галактик.

Согласно Е-теории предполагается существование энтропийных возмущений: возмущений в отношении плотностей барионов и фотонов. Эволюция энтропийных возмущений приводит к образованию объектов сравнительно малого масштаба — шаровые скопления и карликовые галактики. В дальнейшем происходит гравитационное скупивание вещества в объекты все большей массы вплоть до галактик и скоплений галактик.

На данный момент нет общепринятой теории эволюции галактик, которая была бы естественной и при этом бы хорошо объясняла все наблюдения. В современной литературе А-теорию называют иерархической концепцией, а Е-теорию эмпирической [10]. Иерархическая концепция хорошо согласуется с Λ CDM моделью, описывающей развитие структур «от малого к большому». Главное отличие эмпирических сценариев от иерархической концепции состоит в том, что формирование галактик, согласно им, происходило «от большого к малому». Крупнейшие галактики и звёзды в них сформировались первыми, а

потом практически не изменялось ни их число, ни состав.

Большая часть статей посвященных космическому моделированию, которые были изучены в данной работе, основывались на иерархической концепции, поэтому в дальнейшем будем считать ее достоверной.

В рассмотренный на данный момент литературе не были найдены численный оценки на характеристики барионной материи, необходимые для образования структур.

4 Оценка параметра σ/m для скрытой массы

Помимо академического интереса данная задача также может быть использована для наложения ограничений на "темное" взаимодействие или свойств частиц скрытой массы. Ниже представлен простой пример ограничения на массы частиц самовзаимодействующей скрытой массы при определенном типе взаимодействия между ними.

Для образования материи из барионов, необходимо наличие между ними сильного взаимодействия. Сильное взаимодействие позволяет составлять из барионов звезды и другие крупные структуры.

Предположим, что частицы SIDM обладают темным сильным взаимодействием и гравитационным. Оценим параметр σ_d/m , используя в качестве значения сечения взаимодействия обычное сечение сильного взаимодействия:

$$\frac{\sigma_d}{m} \approx \frac{10^{-23 \div 27}}{m} \text{ см}^2 \text{ Г}^{-1}. \quad (2)$$

Чтобы данный параметр был согласован с наблюдениями, он должен находится в диапазоне (3). Значит масса подходящих для образования частиц должна лежать в диапазоне: $10^{-23 \div 27} \text{ Г} = 1 \div 1000 \text{ ГэВ}$.

Эта простая оценка дает ограничение на массы SIDM с темным сильным взаимодействием, подобным обычному, но его не недостаточно для ответа на поставленную задачу.

5 Сопоставление результатов моделирования и наблюдений

Чтобы решить поставленную задачу, была рассмотрена литература, связанная диссипативными моделями SIDM и тем, как их изучают. Основная часть статей изучающих SIDM сводится к космологическому моделированию с различными параметрами скрытой массы и коэффициентами диссипации.

В статье [6] с помощью методов моделирования исследуют влияние самовзаимодействующей скрытой массы на количество карликовых галактик-спутников, которое плохо описывается Λ CDM моделью.

Наличие темного диска, образованного из охлажденной диссипативной темной материи во время галактических столкновений, может привести к образованию карликовых галактик. При моделировании окончательное соотношение темной материи к барионной согласуются с некоторыми наблюдаемыми значениями вокруг галактики Андромеды.

В статье [5], также с помощью методов моделирования, рассматривается влияние на распределение плотности карликовых галактик и эволюцию гало диссипативной SIDM. Выводы, содержащиеся в этой статье, могут послужить для ограничения моделей диссипативной скрытой массы.

Для рассмотрения различий в моделировании диссипативной скрытой массы от самовзаимодействующей скрытой массы была рассмотрена статья [11]. Значения плотности для этих моделей оказываются достаточно близки при удалении от центра. Вблизи центра SIDM модель предсказывает более однородный плотностный профиль.

На основе этих статей можно сделать следующие выводы:

1. Параметры при моделировании подбирают таким образом, чтобы вклад самовзаимодействующей скрытой массы был малым по сравнению с Λ CDM моделью, что не приводит к новой физике, а лишь корректирует некоторые наблюдаемые величины: распределение плотности темного гало, количество карликовых галактик-спутников;
2. Работы сводятся к подбору оптимальных параметров σ/m и параметров диссипации, при которых будет достигнуто хорошее согласование с наблюдениями. Полученные таким образом параметры являются ограниче-

ниями для dSIDM и SIDM моделей.

3. Основными параметрами определяющими модели SIDM являются сила самовзаимодействия (σ/m) . В статье [2] получено ограничение на (σ/m) исходя из наблюдений:

$$\frac{\sigma}{m} = (0.5 - 6) \text{ см}^2 \text{Г}^{-1}. \quad (3)$$

4. В статьях не описаны методы моделирования, также не понятно, можно ли учесть в этих моделях участие барионной материи. Что не дает возможности сравнить свойства dSIDM и барионную материю.

6 Учет барионной материи

В статьях рассмотренных выше практически не говорится о технической части моделирования. Но для решения поставленной задачи, понимание основ моделирования может быть полезным, например для понимания учета барионной материи.

Были рассмотрены программа и обзорные статьи по моделям, использованным в статьях выше. Во всех статьях использовался свой пакет моделирования (PKDGRAV, FIRE-2, GADGET). Из обзоров данных пакетов стали были получены некоторые тезисы, которые могут быть полезны в этой работе. Ни в одной из выше приведенных статей барионная материя не моделировалась. В работе [5] был использован пакет FIRE-2, который позволяет моделировать барионную материю, но изучаемые в работе величины не были чувствительны к включению барионной материи в моделирование. Также присутствуют ссылки на работу [12], где барионы учтены.

Причины, почему барионы не учитываются в космологическом моделировании описаны в статье [4], а также были обсуждены с А. Г. Дорошкевичем. До рекомбинации возмущения плотности связанные с барионной материей не растут из-за высокого давления, в связи с этим влияние барионов на формирование структур мало. Барионную структуру учесть очень сложно в рамках многокомпонентной модели: считается грубая модель, где в нужных местах вводится подробная сетка и расчет многократно повторяется. Из-за большого количества параметров и сложности вычислений эти схемы редко используют.

7 Заключение

В работе исследовалась возможность образования структуры из диссипативной самовзаимодействующей скрытой массы.

Для решения данной задачи было предложено построить в пространстве параметров dSIDM две области: область ограничивающую параметры dSIDM из наблюдений и область параметров, при которой образуются структуры. Пересечение этих областей отвечает на вопрос о возможности образования структуры.

В предыдущем семестре был проведен литературный обзор по темам связанным с космологическим моделированием и его соответствием с наблюдениями, формированием структур барионов. Для поиска метода решения задачи, в этом семестре были изучены обзор разных моделей космологического моделирования, а также рассмотрена возможность учета барионов в моделировании.

Был предложен метод поиска ограничений на параметры dSIDM, исходя из области параметров с которыми моделируют барионную материю в космологическом моделировании. Были рассмотрены обзоры о моделях использованных в статьях [5; 6; 11], но в них не учитывались барионы. Учет барионов возможен в многокомпонентном моделировании, но модель получается очень грубая. Поэтому предложенный метод не подходит для определения параметров, при которых возможно образования структур.

Модели диссипативной скрытой массы описываются двумя параметрами: σ/m и f_d . Если диссипативная скрытая масса это добавка к обычной CDM, то к этим параметрам необходимо также добавить относительную плотность dSIDM, что расширяет пространство параметров, что усложняет задачу.

На данный момент, основная проблема – найти метод ограничения параметров σ/m и f_d при которых барионная материя образует структуры, а также понять достаточно ли двух параметров для этого.

Список использованных источников

1. Density Profiles and Substructure of Dark Matter Halos: Converging Results at Ultra-High Numerical Resolution / S. Ghigna [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2000. — Dec. — Vol. 544, no. 2. — P. 616–628.
2. *Spergel D. N., Steinhardt P. J.* Observational Evidence for Self-Interacting Cold Dark Matter // Phys. Rev. Lett. — 2000. — P. 3760–3763.
3. Self-interacting dark matter / B. D. Wandelt [et al.] // 4th International Symposium on Sources and Detection of Dark Matter in the Universe (DM 2000). — 2000. — P. 263–274.
4. *Rubakov V. A.* Cosmology and Dark Matter. — 2019.
5. Dissipative dark matter on FIRE-I. Structural and kinematic properties of dwarf galaxies / X. Shen [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — P. 4421–4445.
6. *Randall L., Scholtz J.* Dissipative dark matter and the Andromeda plane of satellites // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2015. — P. 057–057.
7. Thin, thick and dark discs in LSDM / J. Read [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2008. — P. 1041–1057.
8. Signatures of the Milky Way’s Dark Disk in Current and Future Experiments / T. Bruch [et al.]. — 2008.
9. *Shandarin S., Doroshkevich A., Zel’dovich Y.* The large-scale structure of the universe // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. — 1983. — Jan. — Vol. 139. — P. 83.
10. *Springel V., Frenk C., White S.* The large-scale structure of the Universe // Nature. — 2006. — May. — Vol. 440. — P. 1137–44.
11. The Signatures of Self-Interacting Dark Matter and Subhalo Disruption on Cluster Substructure / S. Bhattacharyya [et al.]. — 2021.

12. *Robles V. H., Bullock J. S., Boylan-Kolchin M.* Scalar field dark matter: helping or hurting small-scale problems in cosmology? // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2018.