

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 Космологической моделирование включающее SIDM	4
4 Образование структур барионов	5
5 Оценка параметра σ/m для скрытой массы	7
6 Заключение	8
Список использованных источников	9

1 Введение

В настоящей работе проводилось исследование возможности образования структуры из диссипативной само взаимодействующей 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-спутников.

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

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, которая может образовывать структуры, подобные структурам из барионной материи. Далее сравнить эту область с наблюдаемыми параметрами: 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 данном семестре был проведен литературный обзор по следующим темам:

1. образование структуры барионов;
2. образование темного диска в Λ CDM;
3. космологическое моделирование SIDM и диссипативной SIDM.

2 Образование темного диска в Λ CDM

В серии статей [4; 5] 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 [4], 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 [4]. Более низкая относительная скорость темного диска по сравнению с гало увеличивает сечение захвата.

3 Космологической моделирование включающее SIDM

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 [7], 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 недиссипативной самовзаимодействующей скрытой массы была рассмотрена статья [8]. В ней получены различные результаты, но для данной работы интересно сравнение радиального профиля распределения плотности гало в CDM и SIDM моделях (Рисунки 2 и 4). 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 похожие 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 ограничениями для SIDM моделей.
3. Основными параметрами определяющими модели SIDM являются сила самовзаимодействия (σ/m), а также степень диссипации. В статье [2] получено ограничение на (σ/m) исходя из наблюдений:

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

4 Образование структур барионов

Для проверки возможностей образования структур из самовзаимодействующей скрытой массы в данной секции будет 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 сгущивание 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.

В рассмотренный на данный момент литературе не были найдены численные оценки на характеристики барионной материи, необходимые для образования структур. Поиск в данном направлении будет продолжен в дальнейшем.

5 Оценка параметра σ/m для скрытой массы

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:

$$\frac{\sigma_d}{m} \approx \frac{10^{-23 \div 27}}{m} \text{ см}^2 \text{ Г}^{-1}. \quad (3)$$

Чтобы данный параметр был согласован с наблюдениями, он должен находится в диапазоне (2). 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. Существуют возможности образования структур из частиц с другими значениями сечений самовзаимодействия или другие необходимые условия, которые в данной работе еще не были найдены.

6 Заключение

В работе исследовалась возможность образования структуры из диссипативной самовзаимодействующей скрытой массы. В этом семестре был проведен литературный обзор по темам связанным с проблемой, также были изучены возможные пути решения проблемы.

Была изучена литература, посвященная образованию темного диска [4; 5] без введения самовзаимодействия скрытой массы. В данных статьях темным диском называют увеличения плотности темной материи в окрестности галактического диска, а не самостоятельные структуры.

Для понимания методов, с помощью которых исследуют SIDM модели, были изучены источники [6–8]. Все работы основаны на космологическом моделировании самовзаимодействующей скрытой массы. В источниках исследуются различные параметры модели, при которых достигается наибольшее согласие с наблюдаемыми данными. В работе [3] были найдены ограничения на параметр σ/m .

Для понимания того, какими свойствами должна обладать скрытая масса для формирования структур, была изучена литература по теории образования структур скрытой массы [9; 10]. На текущий момент не были найдены необходимые для образования структур условия.

Была проведена простая оценка на массы частиц SIDM модели, взаимодействие которых схоже с сильным взаимодействием (3).

В дальнейшем необходимо найти диапазоны параметров, при которых возможно образование структуры из барионов и сравнить их с ограничениями на параметры скрытой массы, полученные из наблюдений.

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. Thin, thick and dark discs in LSDM / J. Read [et al.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2008. — P. 1041–1057.
5. Signatures of the Milky Way’s Dark Disk in Current and Future Experiments / T. Bruch [et al.]. — 2008.
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. 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.
8. The Signatures of Self-Interacting Dark Matter and Subhalo Disruption on Cluster Substructure / S. Bhattacharyya [et al.]. — 2021.
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.