

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ  
ОБРАЗОВАНИЯ  
СТРУКТУРЫ ИЗ ДИССИПАТИВНОЙ  
САМОВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ СКРЫТОЙ  
МАССЫ

Научный руководитель:

К. М. Белоцкий

Выполнил:

Д. С. Калашников

# $\Lambda$ CDM и расширение SIDM

В современной стандартной космологической модели  $\Lambda$ CDM Вселенная заполнена барионной материей, темной энергией и холодной невзаимодействующей скрытой массой(CDM).

$\Lambda$ CDM – хорошо согласуется с наблюдениями крупномасштабных структур Вселенной, но существует несколько расхождений:

1. Различие в плотности темной материи в гало
2. Дефицит карликовых галактик-спутников.

Одним из вариантов решения данных проблем являются расширения  $\Lambda$ CDM модели с добавлением самовзаимодействующей скрытой массы (SIDM)

# SIDM

Наличие самовзаимодействия приводит к обмену энергией и моментом между частицами скрытой массы (SIDM), что позволяет сгладить плотностный профиль гало.

Взаимодействие должно быть слабым, чтобы не влиять на результаты полученные CDM, которые согласуются с наблюдениями.

# Постановка проблемы

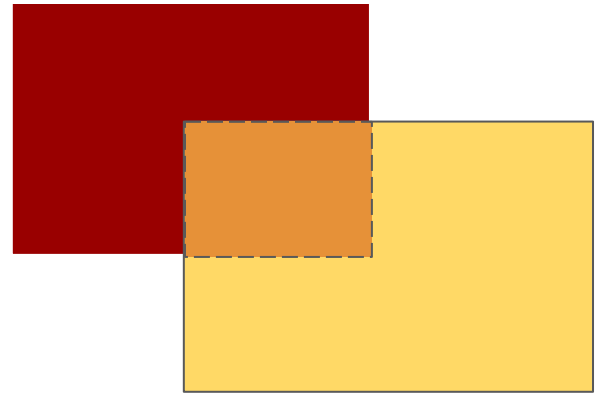
Наделяя частицы скрытой массы взаимодействием, мы наделяем ее некоторыми свойствами барионной материи, в связи с чем возникает вопрос: может ли самовзаимодействующая скрытая масса образовывать структуры и если может, то какие структуры?

# Постановка проблемы

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?

## *Метод решения:*

Для ответа на вопрос необходимо найти область в пространстве параметров, которая может образовывать структуры, подобные структурам из барионной материи и сравнить эти параметры с ограничениями из наблюдений.



# Задачи

Для решения поставленной проблемы необходимо:

1. Провести литературный обзор по темам
  - a. Образование структуры барионов
  - b. Образование темного диска в  $\Lambda$ CDM
  - c. Работы по SIDM и dSIDM
2. Найти диапазон параметров, при котором диссипативная SIDM способна образовывать структуры
  - a. Рассмотреть моделирование барионной материи
  - b. Найти ограничения на параметры из теории
3. Найти диапазон параметров, при которых диссипативная SIDM согласуется с наблюдаемыми данными.
4. Сравнить эти диапазоны.

# Основные результаты предыдущего семестра

1. Были рассмотрены статьи с моделированием dSIDM и SIDM. Работы сводятся к подбору оптимальных параметров. Была приведена оценка на параметры SIDM которые решают проблемы CDM и согласуются с наблюдениями.
2. Рассмотрены работы о темном диске. Но диск в этих работах скорее уплотнение гало, чем самостоятельная структура.
3. Источники о формировании структур из барионов. Из данных работ не были найдены численные ограничения на свойства барионной материи.

# Учет барионов при моделировании

Был предложен метод поиска ограничений на параметры dSIDM, исходя из области параметров с которыми моделируют барионную материю в космологическом моделировании.

Если барионная материя участвует в моделировании, в качестве параметров в уравнениях, то эти параметры можно использовать в качестве ограничений для dSIDM

Для использования этого метода были рассмотрены несколько программ моделирования (PKDGRAV, FIRE-2, GADGET), использованных в работах с SIDM и dSIDM.



# Учет барионов при моделировании

Были рассмотрены обзоры о моделях использованных в статьях [5,6,9], но в них не учитывались барионы.

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.

Причины, почему барионы не учитываются в космологическом моделировании хорошо 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 слабо используют.

Поэтому предложенный метод не подходит для определения параметров, при которых возможно образования структур.

4. Rubakov V. A. / Cosmology and Dark Matter. 2019.

4. Dissipative dark matter on FIRE-I. Structural and kinematic properties of dwarf galaxies / X. Shen [et al.]

5. Randall L., Scholtz J. / Dissipative dark matter and the Andromeda plane of satellites

9. The Signatures of Self-Interacting Dark Matter and Subhalo Disruption on Cluster Substructure / S. Bhattacharyya [et al.].

10. Robles V. H., Bullock J. S., Boylan-Kolchin M. Scalar field dark matter

# Параметры dSIDM

В статье [5] в качестве параметров dSIDM используют силу взаимодействия  $\sigma/m$  и коэффициент диссипации  $f_a$ .

Если диссипативная скрытая масса это добавка к обычной CDM, то к этим параметрам необходимо также добавить относительная плотность dSIDM, что расширяет пространство параметров, что усложняет задачу.

# Заключение

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

1. Метод поиска ограничений, исходя из моделирования барионной материи не позволил определить допустимые параметры для dSIDM
2. Так как dSIDM составляет лишь часть от всей скрытой массы, необходимо добавить в качестве параметров относительную плотность dSIDM.

В следующем семестре необходимо разработать другой подход к поиску параметров барионной материи, при которых идет образование структур.

Спасибо за внимание!

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Density Profiles and Substructure of Dark Matter Halos: Converging Results at Ultra-High Numerical Resolution / S. Ghigna [et al.]
2. Spergel D. N., Steinhardt P. J. / Observational Evidence for Self-Interacting Cold Dark Matter
3. Self-interacting dark matter / B. D. Wandelt [et al.]
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.]
6. Randall L., Scholtz J. / Dissipative dark matter and the Andromeda plane of satellites
7. Thin, thick and dark discs in LSDM / J. Read [et al.]
8. Signatures of the Milky Way's Dark Disk in Current and Future Experiments /T. Bruch [et al.]
9. The Signatures of Self-Interacting Dark Matter and Subhalo Disruption on Cluster Substructure / S. Bhattacharyya [et al.].
10. Robles V. H., Bullock J. S., Boylan-Kolchin M. Scalar field dark matter: helping or hurting small-scale problems in cosmology?
11. Shandarin S., Doroshkevich A., Zel'dovich Y. / The large-scale structure of the universe
12. Springel V., Frenk C., White S. / The large-scale structure of the Universe

Предыдущий семестр

# Образование темного диска в $\Lambda$ CDM

В серии статей [4,5] показана возможность существования темного диска в  $\Lambda$ CDM модели без участия SIDM и его влияние на наблюдения.

В текущей работе интерес представляла возможность формирования структуры из темной материи без участия SIDM. Темным диском называют увеличения плотности темной материи в окрестности галактического диска, а не самостоятельные структуры.

Темный диск не сильно влияет на динамику движения звезд, но играет важную роль в поиске скрытой массы рядом с Солнце.

4. Thin, thick and dark discs in LSDM / J. Read [et. al]

5. Signatures of the Milky Way's Dark Disk in Current and Future Experiments / T. Bruch

# Космологическое моделирование включающее SIDM

1. Вклад самовзаимодействующей скрытой массы мал по сравнению с  $\Lambda$ CDM моделью, что не приводит к новой физике, а лишь корректирует некоторые наблюдаемые величины.
2. Работы сводятся к подбору оптимальных параметров, 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 ( $\sigma/m$ ), а также степень диссипации. В статье [2] получено ограничение на ( $\sigma/m$ ) исходя из наблюдений:

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



# Образование структур из барионов

Образование крупномасштабных структур описывают две теории: адиабатическая теория (А-теория) и энтропийная теория (Е-теория)[9].

А-теория – иерархическая концепция, “от большого к малому”

Е-теория – эмпирические сценарии, “от малого к большому”

Важную роль играют возмущения среды, возможность обмена частицами энергии и диссипации.

Не были найдены численные оценки на характеристики барионной материи, необходимые для образования структур.