

Формирование структур из самовзаимодействующей скрытой массы

Отчет о Научно-исследовательской деятельности аспиранта

Дмитрий Калашников

impermast@gmail.com

Константин Михайлович Белоцкий

**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Кафедра № 40 «Физика элементарных частиц»**

3 июля 2025 г.



Plan

- 1 Мотивация
 - Позитронная аномалия.
 - Самовзаимодействующая тёмная материя
- 2 Трёхчастичная рекомбинация
 - Аналитическое решение
 - Численный анализ
- 3 N-body для формирования структур
 - Аналитические подходы
 - N-body симуляции
 - Работа с Gadget-2
- 4 Заключение

Мотивация

Повышенная концентрация позитронов в космических лучах.

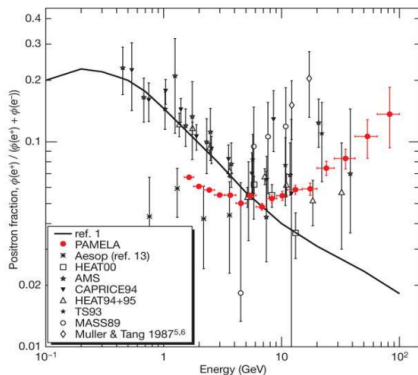


Рис. 1: О Adriani и др. (2009)

Повышенная концентрация позитронов в космических лучах.

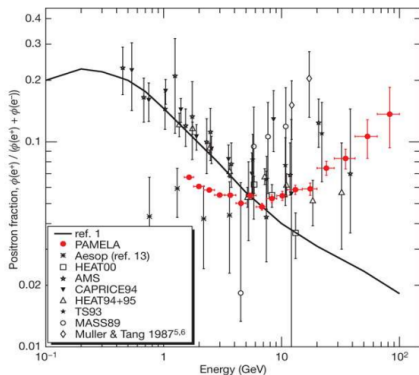
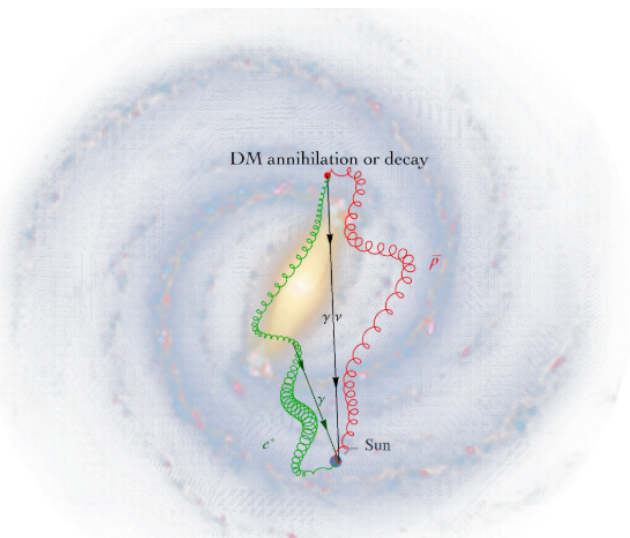


Рис. 2: O Adriani и др. (2009)



$$Q = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{M} \right)^2 \langle \sigma v \rangle_{\text{tot}} \frac{dN_{e^\pm}}{dE} & (\text{DM annihilation}), \\ \frac{\rho}{M} \Gamma_{\text{tot}} \frac{dN_{e^\pm}}{dE} & (\text{DM decay}), \end{cases}$$

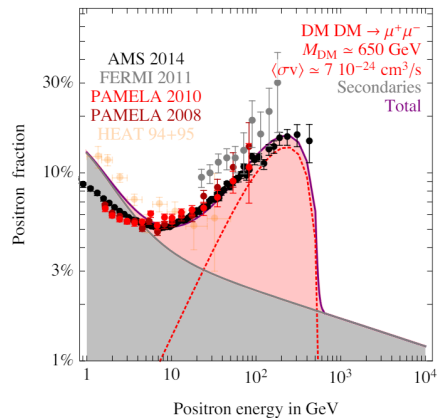
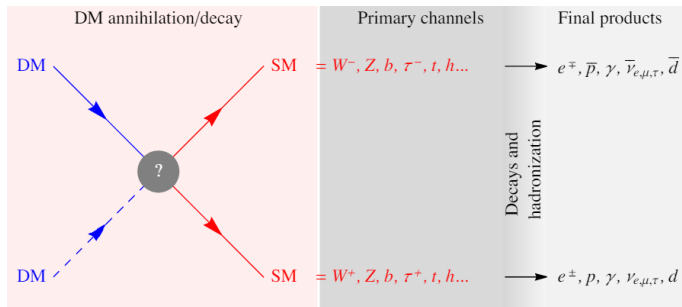
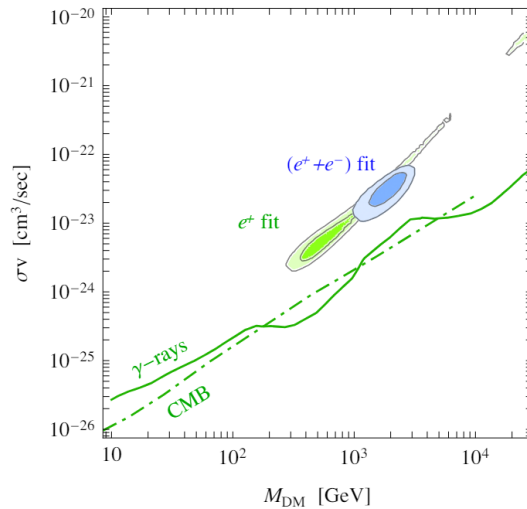
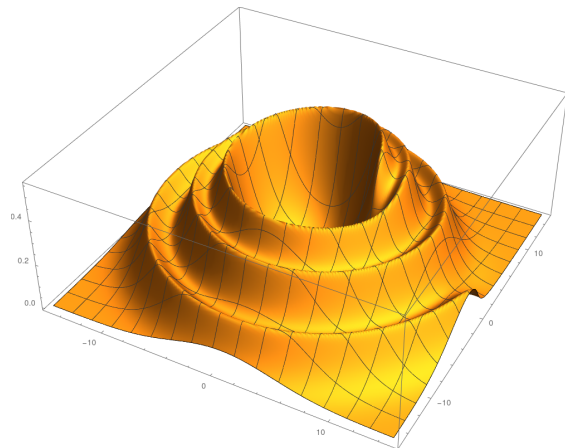
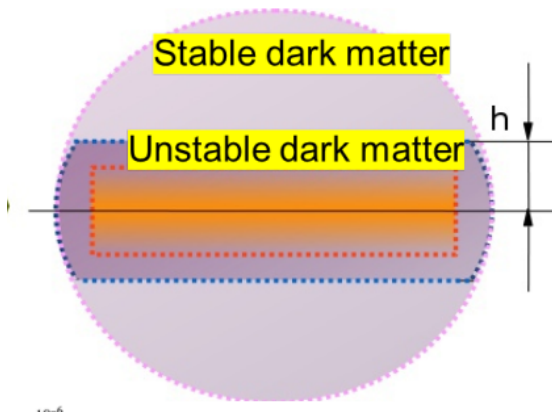


Рис. 3: Cirelli, 2024

DM DM $\rightarrow \mu\mu$, NFW profile

Используем различные сечения взаимодействия для ТМ $\Rightarrow$
Взаимодействие тёмной материи $\Rightarrow$ Структуры тёмной материи.
Высокоэнергетические позитроны не достигают нас с больших
расстояний, в отличие от гамма-излучения. Распределим их
источники вокруг нас.



Взаимодействие тёмной материи $\Rightarrow$ Структуры тёмной материи

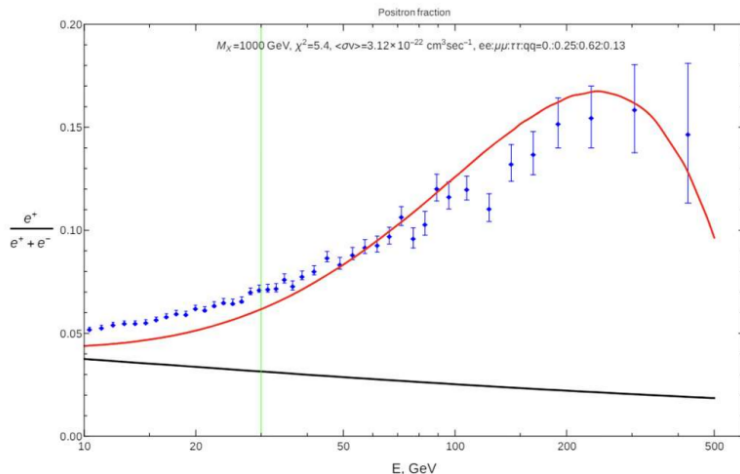
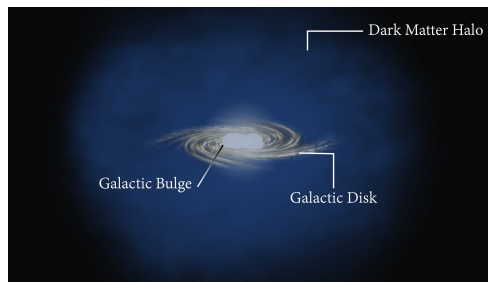
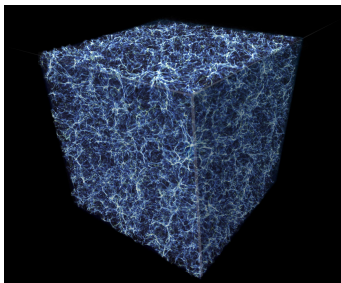


Рис. 4: Белоцкий и др. (2018)

Cold dark matter (CDM)

Самое простое предположение о тёмной материи состоит в том, что у неё **нет взаимодействий**.



Проблемы CDM на масштабе отдельных галактик

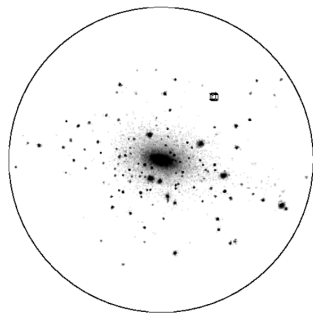


Рис. 5: Проблема "дефицита галактик-спутников Klypin (1999)

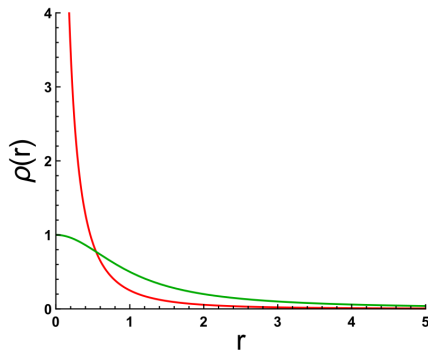


Рис. 6: Проблема "core-cusp de Blok (2010)

SIDM

- Self-Interacting Dark Matter (SIDM) — дополнительное взаимодействие только между частицами тёмной материи.
- Решает проблемы стандартной космологической модели на масштабе отдельных галактик.
- Самовзаимодействие необходимо для формирования негалообразных структур.
- В данной работе рассматривается модель SIDM с кулоновским подобием взаимодействия между частицами **a** и **b**. Частица **a** имеет меньшую массу и может образовывать связанное состояние с **b**.

Идея

Небольшая фракция взаимодействующей (заряженной) тёмной материи формирует негалообразные структуры (диски, спирали...). Основная часть тёмной материи рекомбинировала (незаряженная). Она образует структуры типа гало, согласующиеся с Λ CDM на больших масштабах.

Заряженная тёмная материя нестабильна и имеет каналы аннигиляции/распада в частицы Стандартной Модели $\Rightarrow$ решает позитронную аномалию

- **Цель** — построить механизм формирования структур из самовзаимодействующей тёмной материи.
- Проблема, связанная с рекомбинацией, естественным образом позволяет получить как взаимодействующую, так и невзаимодействующую компоненты тёмной материи в ранней Вселенной.
- Важной задачей является определение параметров взаимодействующей тёмной материи, которые определяют форму возникающих структур.

Пример морфологической таблицы

Структура	$\sigma = 0.01, \text{ см}^2/\text{г}$	$\sigma = 0.1, \text{ см}^2/\text{г}$	$\sigma_1(v), \text{ см}^2/\text{г}$
Гало	✓	✓	✓
Диск	✗	✗	✓
Спирали	✗	✗	✓
Перемычки	✗	✗	✗
Компактные ядра	✗	✓	✓

Трёхчастичная рекомбинация

Рекомбинация

- Рекомбинация — переход к связанным состояниям.
- Существуют различные механизмы вычисления рекомбинации:
 1. Двухчастичная рекомбинация, традиционно используемая в космологии. Н. А. Kramers (1923)

$$\sigma_K = \frac{32\pi}{3\sqrt{3}} \frac{\alpha^3}{\mu^2} \frac{\ln(v^{-1})}{v^2}, \quad (1)$$

2. Л. Питаевский (1962)



$$\langle \sigma v \rangle = \beta = \frac{32\sqrt{2}\pi}{3} \frac{m_a^{1/2} (4\pi\alpha)^3 \sigma}{T^{5/2} m_b} n. \quad (2)$$

Рекомбинация

Динамические свойства частиц SIDM критически зависят от числа рекомбинировавших частиц.



Равновесие и оцепление

- Ранняя Вселенная: химическое равновесие процессов ионизации и рекомбинации при $T > m_a$.
- Отделение обычного и тёмного сектора происходит до рекомбинации.
- y -электроны и y -протоны рекомбинируют, что приводит к «замерзанию» y -фотонов и прозрачности y -плазмы [Belotsky, 2016].

$$T_a \approx \frac{T^2}{T_{ay}}, \quad T_{ay} = 0.2 \text{ MeV} \left(\frac{m_a}{100 \text{ GeV}} \right)^{3/2} \frac{0.01}{\alpha_y}. \quad (3)$$

Уравнение Больцмана для эволюции

$$-\frac{dn}{dt} = \langle \sigma v \rangle n^2 + 3Hn, \quad r = \frac{n}{s}. \quad (4)$$

Подставим плотность энтропии (g_s — число степеней свободы):

$$s \approx \frac{2\pi^2 g_s}{45} T^3, \quad -dt = \frac{dT}{HT}. \quad (5)$$

Скорость рекомбинации для трёхчастичных процессов ($\sigma \sim e_y^4/T_a^2$):

$$\frac{dr}{dT} = \frac{32\sqrt{2\pi}}{3} \frac{r^3 s^2 m_a^{1/2} e_y^6 \sigma}{HT T_a^{5/2} m_b}. \quad (6)$$

Решение во время стадии доминирования излучения

$$H(T) = h_{\text{RD}} T^2, \quad h_{\text{RD}} = 5.5 \sqrt{g_\epsilon/11}/M_{\text{Pl}}. \quad (7)$$

$$\frac{dr}{dT} = \frac{32\sqrt{2\pi}}{3} \frac{(2\pi^2 g_s/45)^2 m_a^{1/2} e_y^{10} T_{ay}^{9/2} r^3}{h_{\text{RD}} m_b T^6}. \quad (8)$$

Решение:

$$r_{\text{RD}}(T) = r_0 \left(1 + \frac{2}{5} D_{\text{RD}} r_0^2 \left(\frac{1}{T^5} - \frac{1}{T_{\text{rec}}^5} \right) \right)^{-1/2}, \quad (9)$$

$$D_{\text{RD}} = \frac{32\sqrt{2\pi}}{3} \frac{(2\pi^2 g_s/45)^2 m_a^{1/2} e_y^{10} T_{ay}^{9/2}}{h_{\text{RD}} m_b}.$$

Решение во время доминирования вещества

Переход в $T_{\text{RM}} \sim 1.2 \text{ eV}$, $r_{\text{RM}} = r_{\text{RD}}(T_{\text{RM}})$,

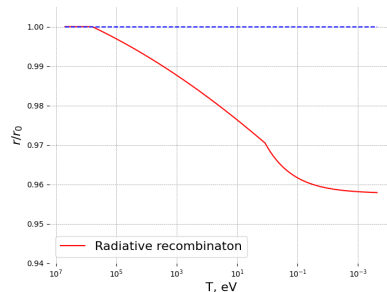
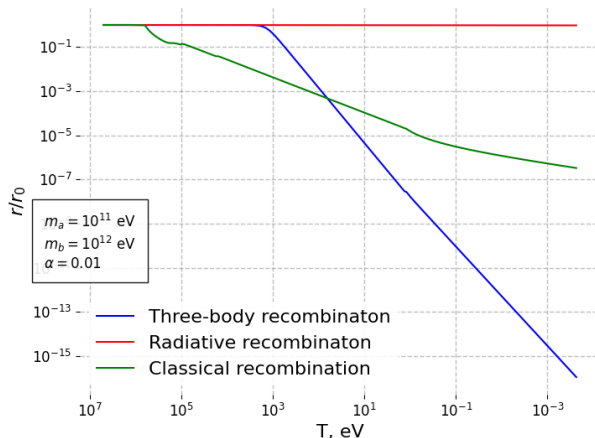
$H(T) = h_{\text{MD}} T^{3/2}$, $h_{\text{MD}} = 10^{-14}/M_{Pl}^{1/2}$.

$$r_{\text{MD}}(T) = r_{\text{RM}} \left(1 + \frac{4}{9} D_{\text{MD}} r_{\text{RM}}^2 \left(\frac{1}{T^{9/2}} - \frac{1}{T_{\text{RM}}^{9/2}} \right) \right)^{-1/2}, \quad (10)$$

$$D_{\text{MD}} = \frac{32\sqrt{2\pi}}{3} \frac{(2\pi^2 g_s/45)^2 m_a^{1/2} e_y^{10} T_{ay}^{9/2}}{h_{\text{MD}} m_b}.$$

T — температура обычных фотонов. $r(T) = \frac{n(T)}{s}$ — относительная плотность заряженных частиц, α — постоянная тёмного взаимодействия.

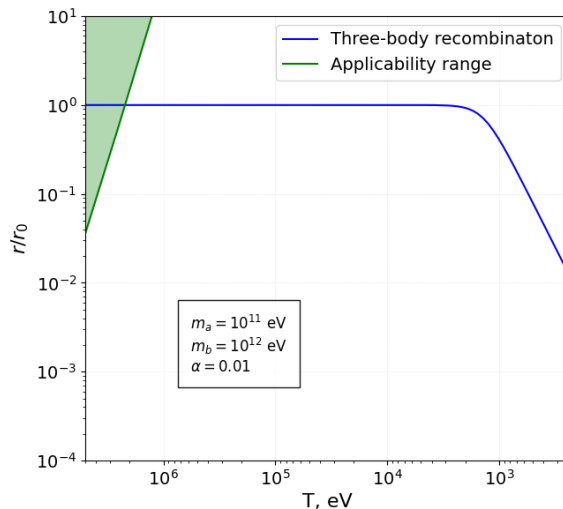
Использовалась модель SIDM, обсуждаемая в статье [Belotsky, 2016] .



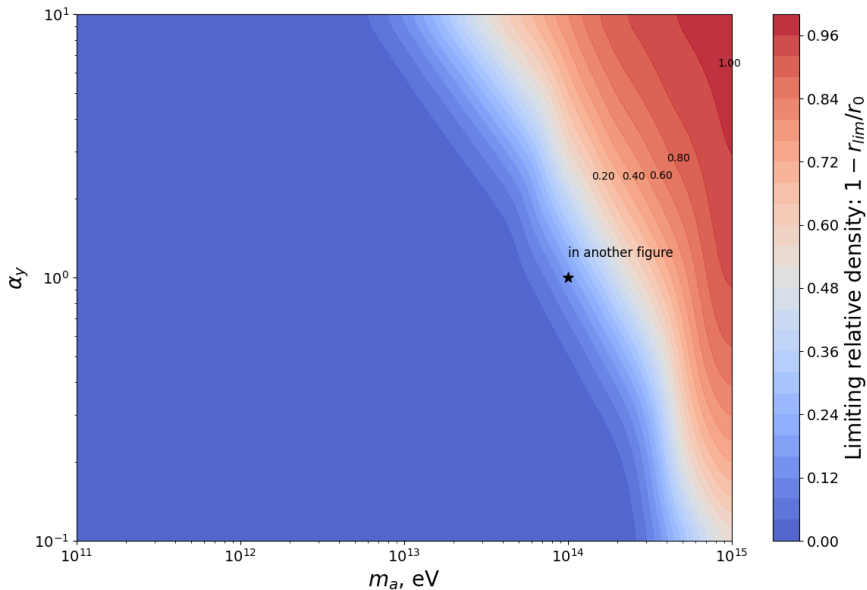
Область применимости трёхчастичной рекомбинации

From
[Pitaevskii, 1962]:

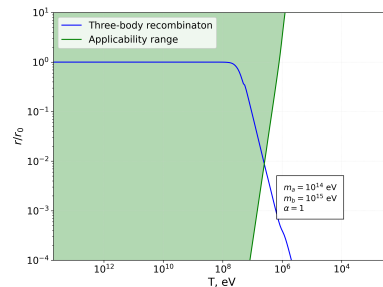
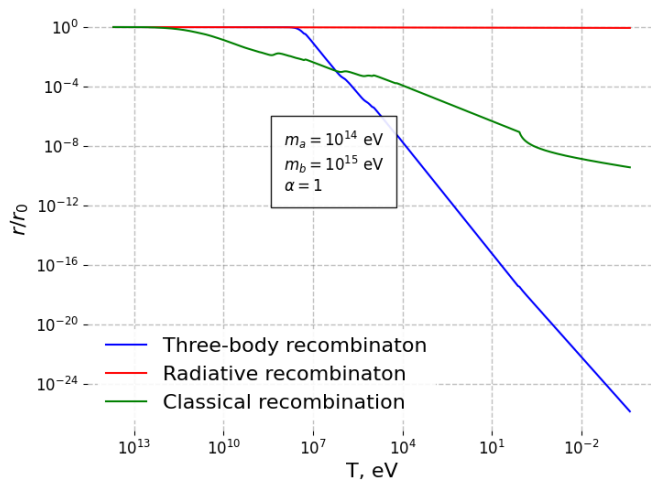
$$T_e \ll e^2 n \sigma \sqrt{\frac{m_a}{m_b}}. \quad (11)$$



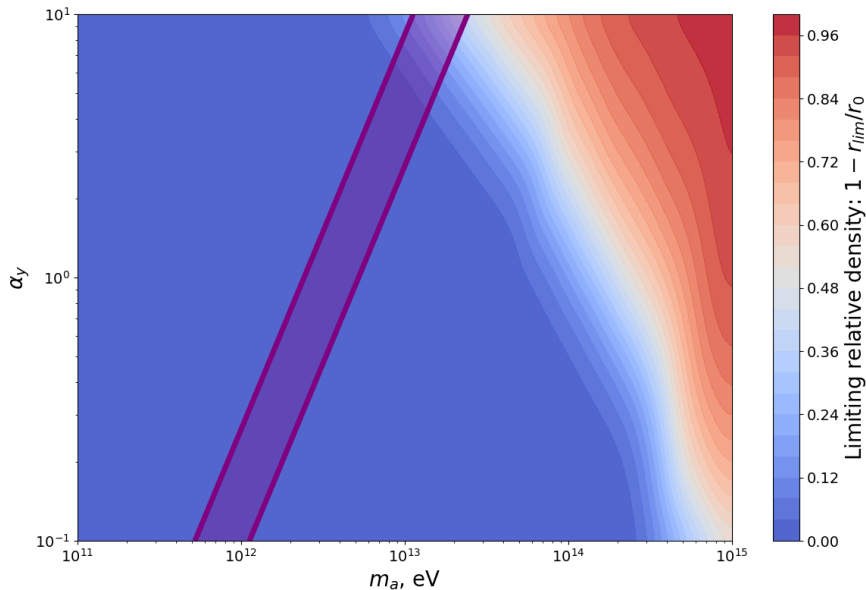
Анализ пространства параметров модели



Анализ пространства параметров модели



Ограничения из наблюдений



Результаты

■ Эффективность трёхчастичной рекомбинации:

- Быстрое образование связанных состояний по сравнению с рекомбинацией по Крамерсу.
- Требуется высокая плотность частиц; параметры, рассмотренные в работе, ограничивают применимость.

■ Потенциальные применения:

- При подходящих условиях увеличивается число связанных состояний.
- Может естественным образом привести к двухкомпонентной модели тёмной материи (SIDM + CDM).
- Согласуется с решениями проблем маломасштабных структур и позитронной аномалии.

Результаты

- **Эффективность трёхчастичной рекомбинации:**
 - Быстрое образование связанных состояний по сравнению с рекомбинацией по Крамерсу.
 - Требуется высокая плотность частиц; параметры, рассмотренные в работе, ограничивают применимость.
- **Потенциальные применения:**
 - При подходящих условиях увеличивается число связанных состояний.
 - Может привести к двухкомпонентной модели тёмной материи (SIDM+CDM).
 - Согласуется с решениями проблем малых масштабов и объяснением позитронной аномалии.

Как формировать структуры?

N-body для формирования структур

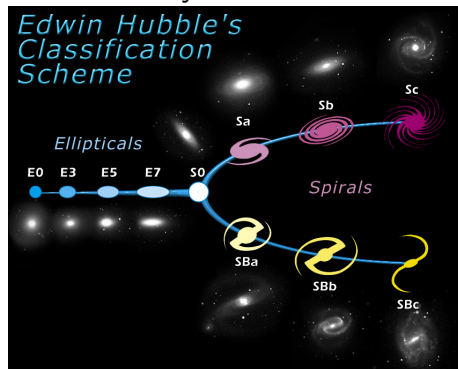
Что мы хотим узнать?

- Можно ли определить форму будущей галактики по параметрам возмущений?
- Можно ли определить форму галактики без её изображения? (Кривые вращения, спектр, красное смещение)
- Как классифицируются структуры в моделировании?
- Как вычислить сечение взаимодействий между объектами внутри галактик?

Как можно найти ответы?

- **Аналитически:** использовать уравнения для структур из обычной материи
- **Численно:**
 - Использовать N-body симуляции с включёнными SIDM моделями
 - Модифицировать N-body симуляции с барионами в качестве основы для SIDM

- Не существует общей теории формирования структур.
- Основной метод — моделирование, при этом важны начальные условия.
- На форму галактик влияют конкурирующие эффекты: столкновения, динамическое трение, адиабатическая отдача.
- Сложные структуры (бары, спирали и т.д.) изучаются при специфических начальных условиях.



- GADGET-2, GADGET-4

Springel, V., et al. (2021)

- Несколько модификаций GADGET-2 с SIDM. Код закрыт.

Bhattacharyya, J., et al. (2022); Driskell, T., et al. (2024), Fischer, M., et al. (2024)

- Симуляции с простыми SIDM-моделями.

Ghigna, S., et al. (2000); Randall, L. (2015); Hopkins, P. (2021)

- **GADGET-2**, GADGET-4

Springel, V., et al. (2021)

- Несколько модификаций GADGET-2 с SIDM. Код закрыт.

Bhattacharyya, J., et al. (2022); Driskell, T., et al. (2024), Fischer, M., et al. (2024)

- Симуляции с простыми SIDM-моделями.

Ghigna, S., et al. (2000); Randall, L. (2015); Hopkins, P. (2021)

Контейнеризация и воспроизводимость

Для обеспечения воспроизводимости, переносимости и простоты установки была собрана удобная **Docker-сборка**, автоматически устанавливающая:

- Все необходимые библиотеки: MPI, FFTW, GSL;
- Симулятор GADGET-2 с ключевыми make-опциями: PERIODIC, PMGRID, DOUBLEPRECISION, TREEPM;
- Модуль yt и вспомогательные Python-скрипты для анализа и визуализации результатов.

Сборка выложена в открытый репозиторий на GitHub и сопровождается **CI-скриптом**, проверяющим:

- корректность компиляции;
- успешный прогон минимального теста — развитие неустойчивостей в расширяющейся Вселенной.

CDM симуляции

N-body симуляция только с ТМ.

Размер области = 50 Мpc.

Число частиц = 128^3 .

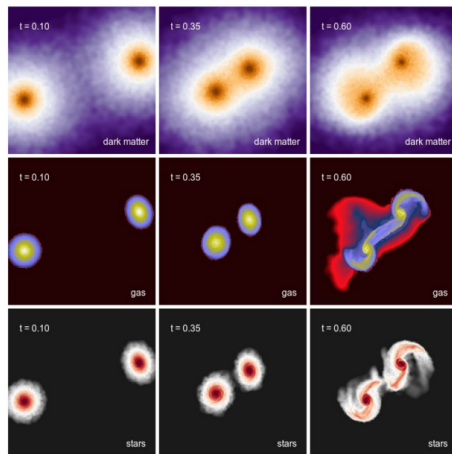
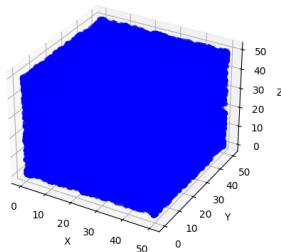


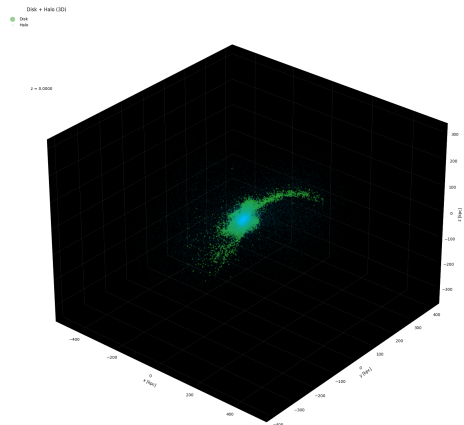
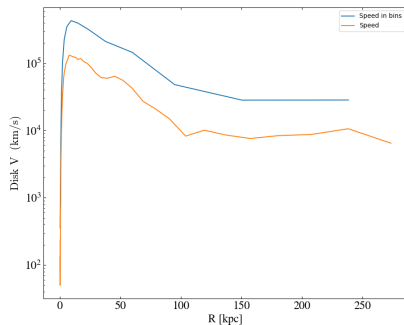
Рис. 7: V. Springel et al. (2021)

CDM симуляции

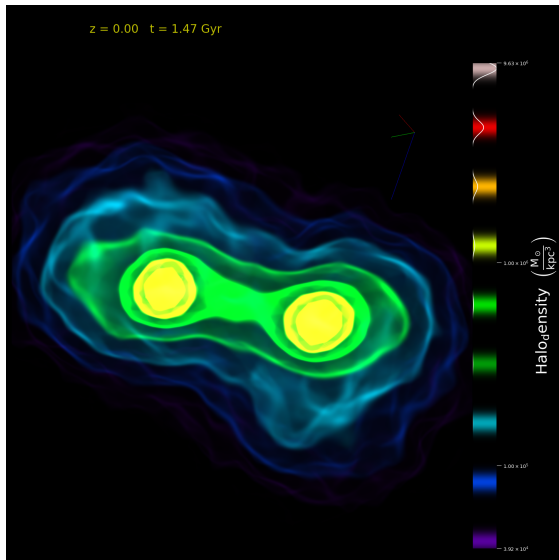
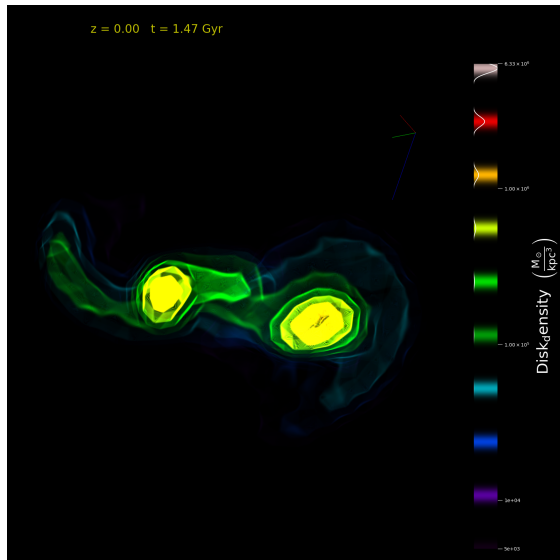
N-body симуляция столкновений
двух галактик disk+halo.

Размер области = 500 kpc.

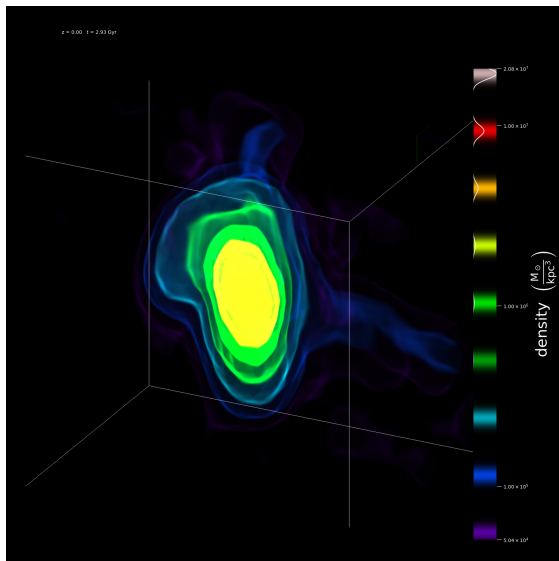
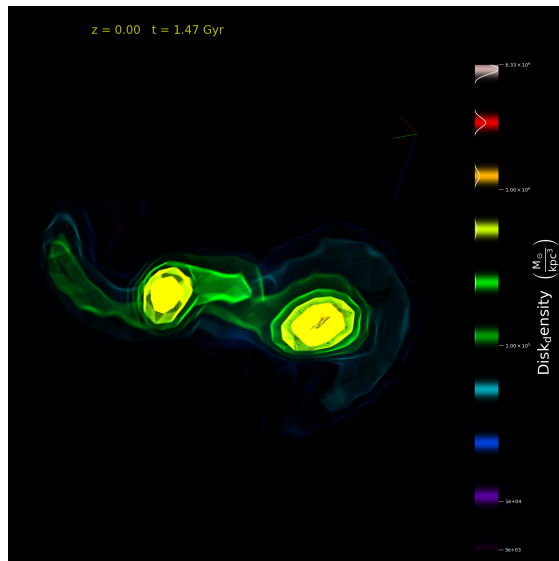
Число частиц = 10^4 .



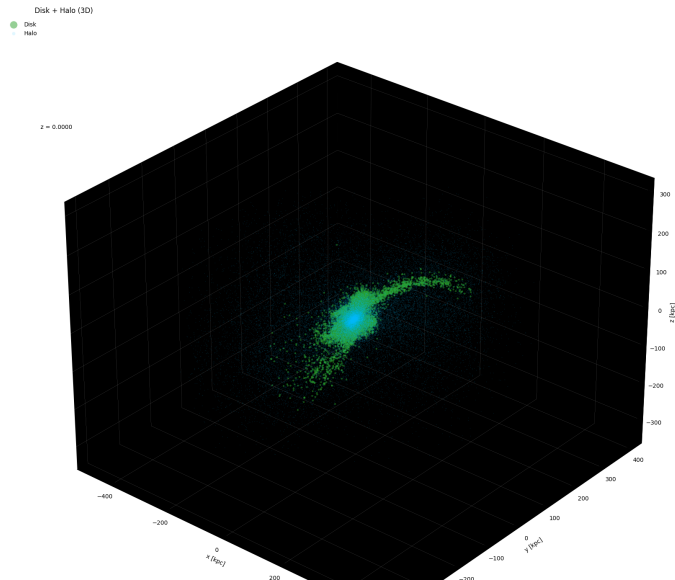
CDM симуляции



CDM симуляции



CDM симуляции



Заклучение

Заклучение

В данной работе были:

- Разработан эффективный механизм генерации двухкомпонентной тёмной материи: взаимодействующей (заряженной) и холодной (рекомбинированной).
- Показана более высокая эффективность трёхчастичной рекомбинации в образовании нейтральных тёмных атомов и определены параметры модели, при которых этот процесс становится значимым.
- Собрана удобная Docker-сборка с установленным GADGET-2 и поддержкой визуализации через yt; выполнены пробные моделирования и написаны модули визуализации тестов.
- В планах — реализация SIDM-взаимодействий на базе существующего кода и запуск космологической симуляции с анализом структуры галактик в зависимости от параметров самовзаимодействий скрытой массы.



Спасибо за внимание