

# Формирование структур из самовзаимодействующей тёмной материи

**N-body моделирование в контексте  
возможного объяснения позитронной аномалии**

---

Дмитрий Калашников  
Научный руководитель: К. М. Белоцкий  
НИЯУ МИФИ, кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

## Публикации и текст

- Опубликована статья по трехчастичной рекомбинации в Q2.
- Всего три статьи по теме диссертации; две в Q1-Q2.
- В диссертации написаны литобзор и одна глава.

## Педагогическая практика

- Три года стажа ППС.
- Проводил семинары по квантовой механике в МИФИ.
- Проводил семинары по аналитической механике и кинематике в филиалах МИФИ.

## Текущий доклад

Позитронная аномалия

Морфология источников DM

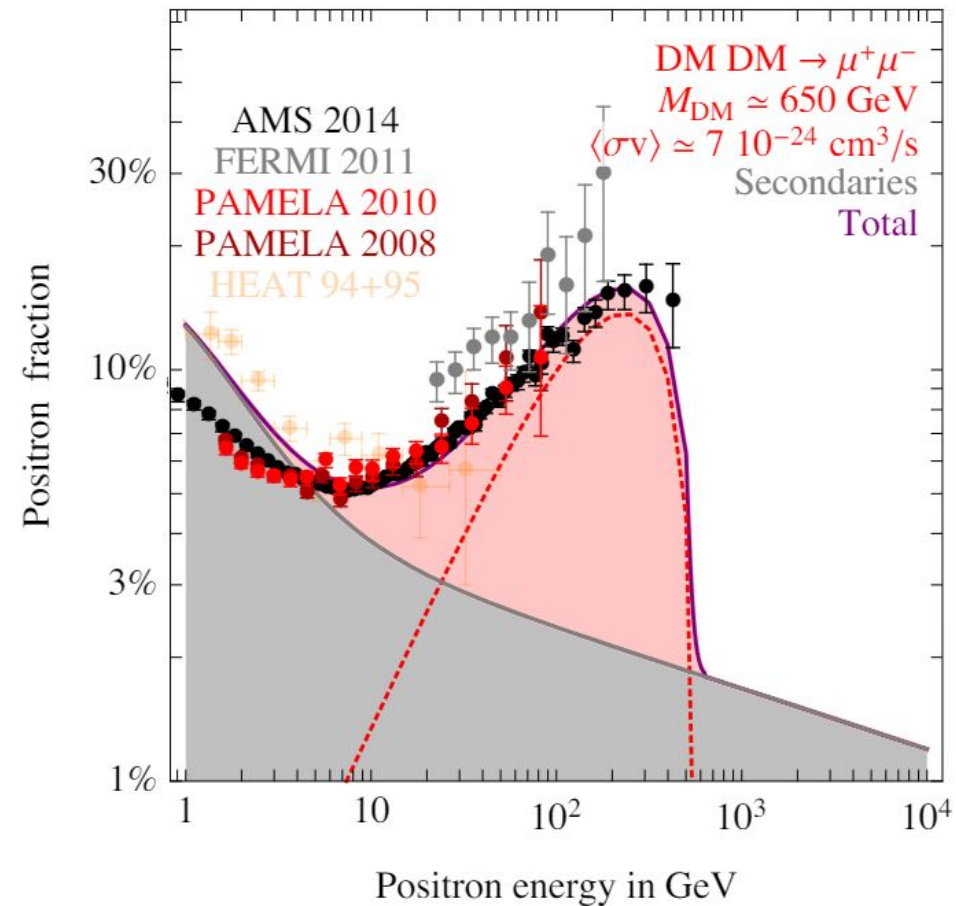
SIDM

N-body

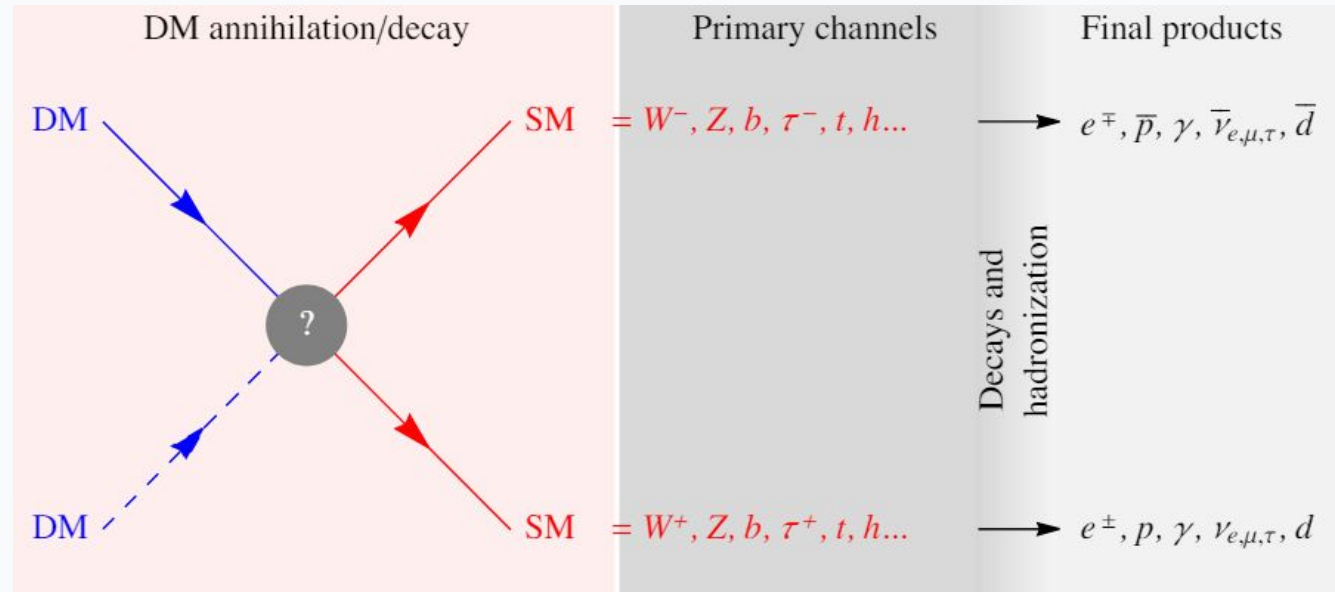
Результаты тестов и диагностики

Формальные требования по публикациям и педагогической практике выполнены.

# Позитронная аномалия



PAMELA Collaboration, 2009; AMS Collaboration, 2014

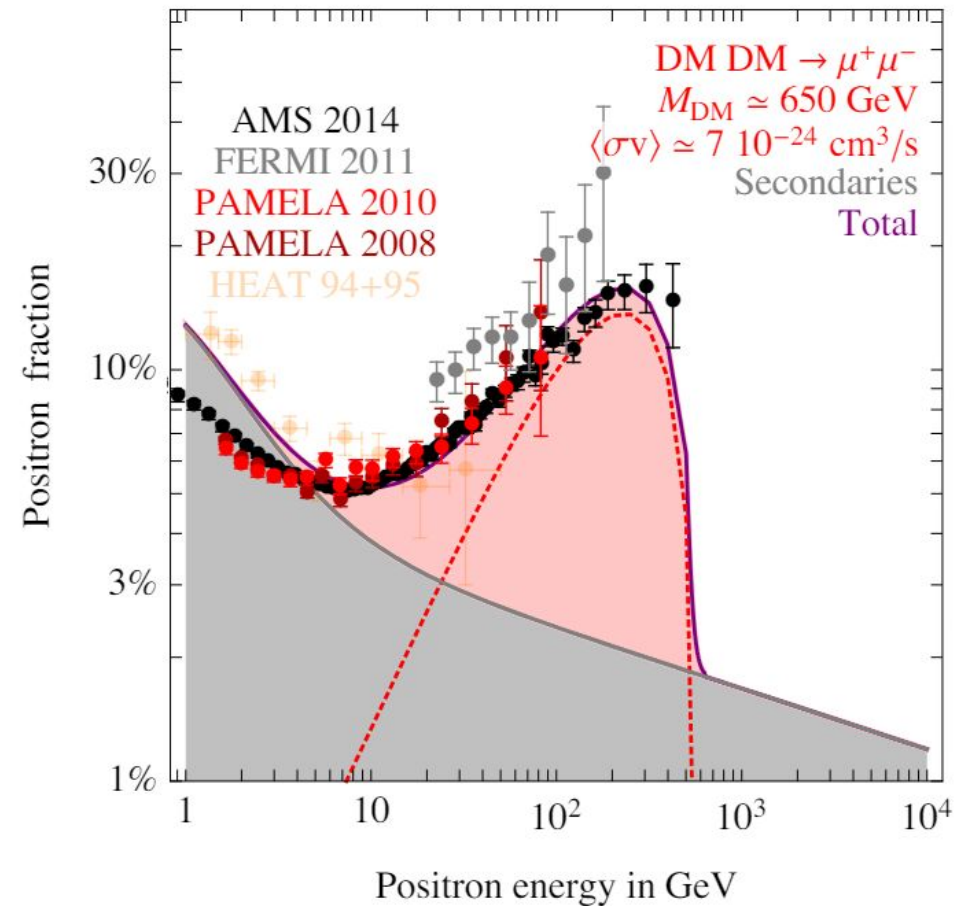


## Возможные объяснения:

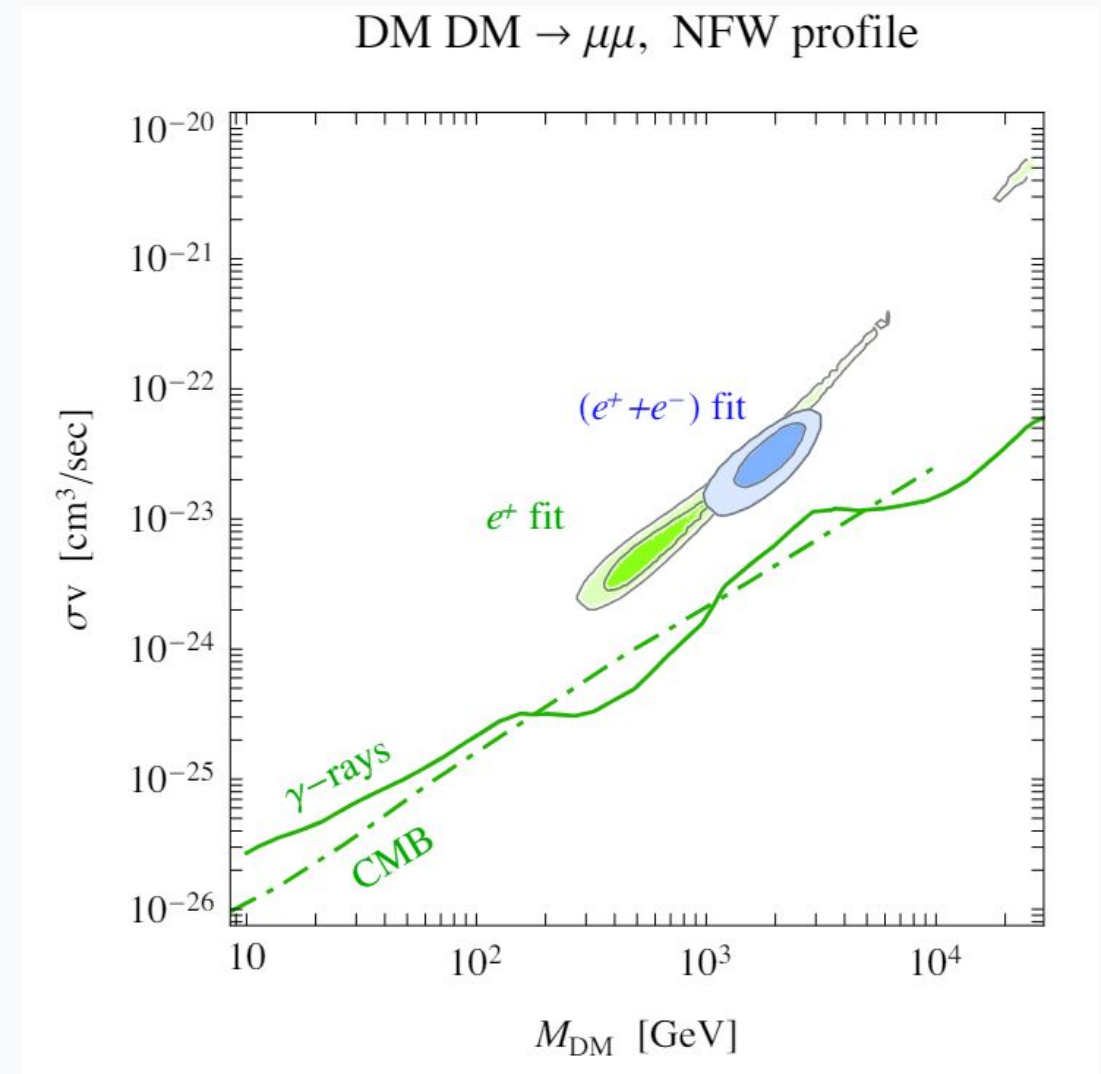
- С использованием скрытой массы
  - Пространственное распределение источников *Alekseev et al., Jan. 2016*
  - Изменение взаимодействия DM *Barak et al., Aug. 2023*
- Астрофизические
  - Пульсары *Hooper et al., Nov. 2017*
  - Сверхновые *Malkov et al., 2016*

**Вывод:** позитронная аномалия может разрешиться за счет аннигиляции или распада частиц DM

# Позитронная аномалия



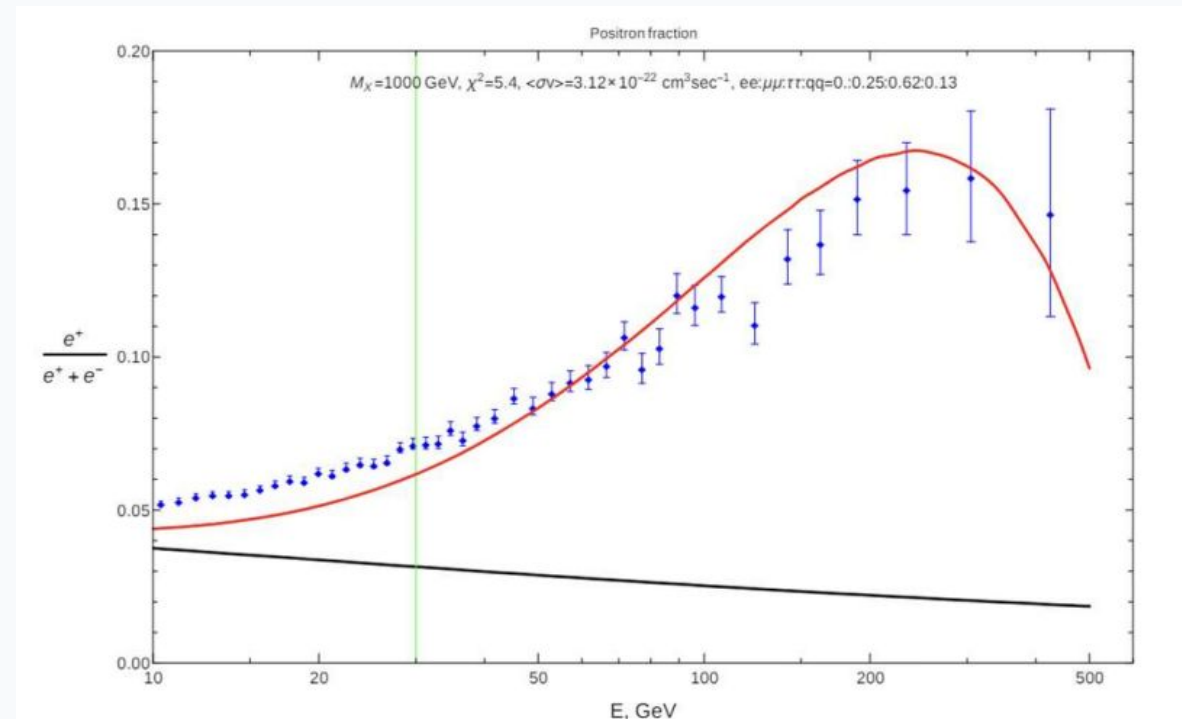
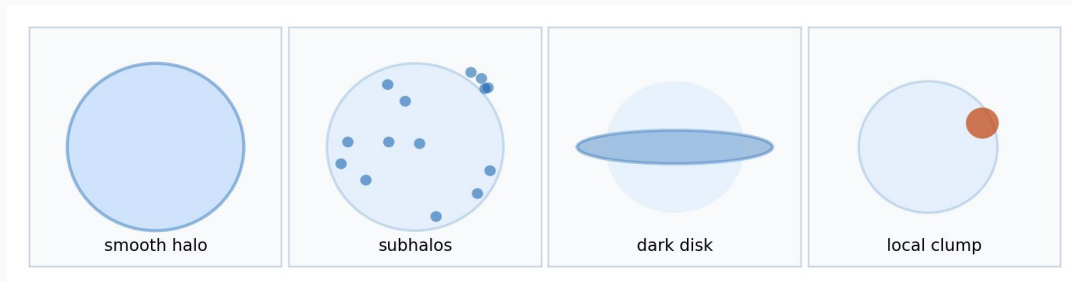
PAMELA Collaboration, 2009; AMS Collaboration, 2014



**Вывод:** позитронная аномалия может разрешиться за счет аннигиляции или распада частиц DM  
Если вся DM распадается → превышает количество гамма фона

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

для аннигиляции клампы и субструктуры особенно важны из-за  $\rho^2$



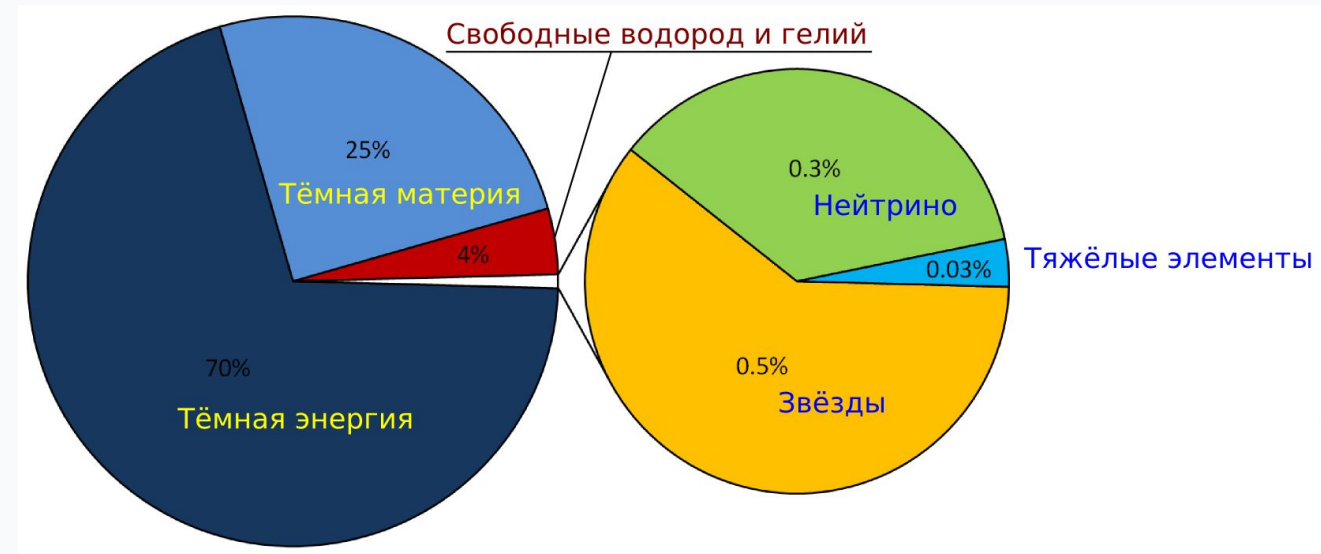
Избыток позитронов для модели темного диска

**Вывод:** пространственное распределение DM помогает объяснить избыток позитронов.

*Cirelli, 2011; Belotsky, 2016; Solovev, 2018*

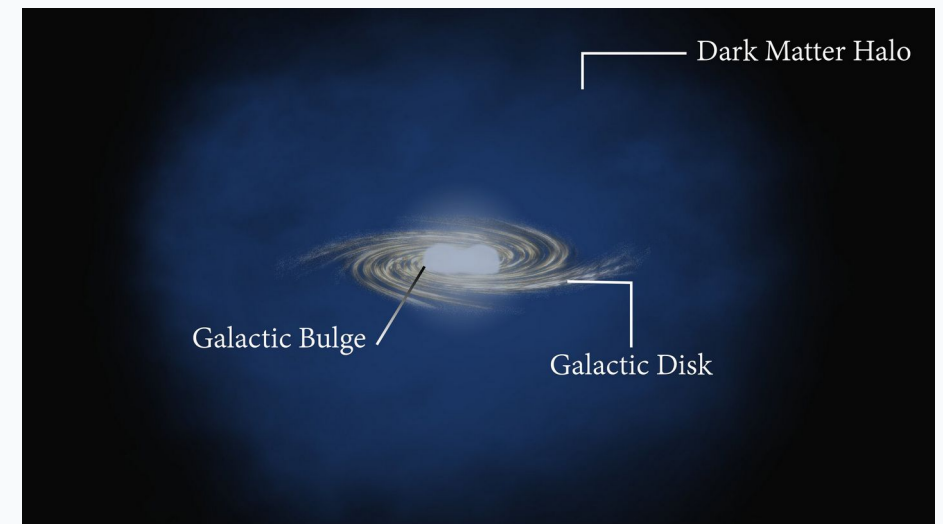
# $\Lambda$ CDM — стандартная космологическая модель.

- Состав Вселенной согласно  $\Lambda$ CDM:
- $\Lambda$ : тёмная энергия: ускоренное расширение
- CDM: холодная тёмная материя: рост структуры
- барионы, фотоны и нейтрино: видимая и релятивистская компоненты



**$\Lambda$ CDM** Объясняет следующие наблюдения:

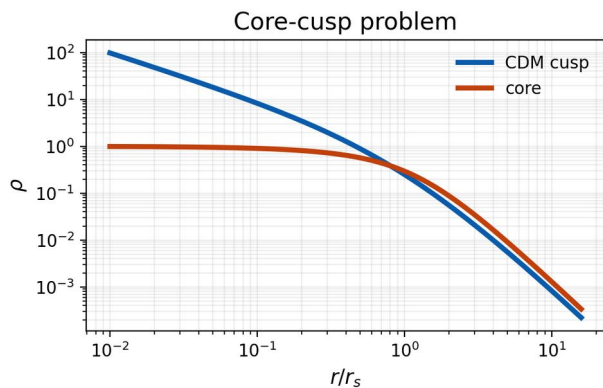
- 1) Крупномасштабную структуру Вселенной (филаменты, нити)
- 2) Иерархическое образование гало
- 3) Барион-акустические осцилляции
- 4) Спектр мощности материи (рост структур)
- 5) CMB: первичные флуктуации во Вселенной
- 6) Ускоренное расширение Вселенной



$\Lambda$ CDM успешна на больших масштабах, но галактики и субгало чувствительны к микрофизике тёмной материи.

## Core-cusp

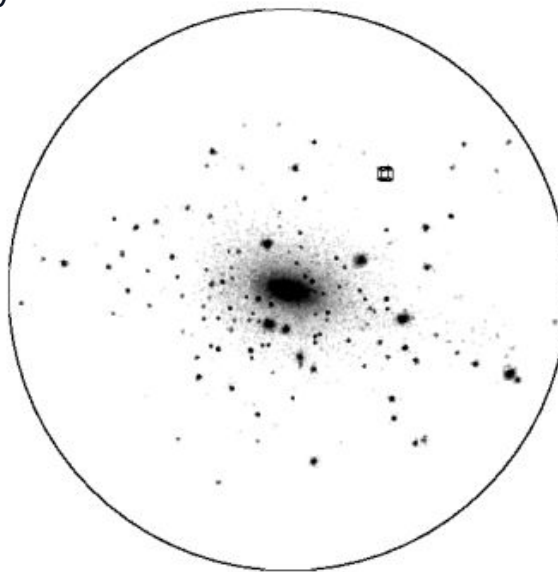
CDM предсказывает центральный cusp; часть наблюдений лучше описывается плоским core.



Moore, 1994; de Blok 2010

## Missing satellites

В симуляциях возникает больше малых субгало, чем наблюдаемых спутников.



Klypin et al., 1999

## Too-big-to-fail

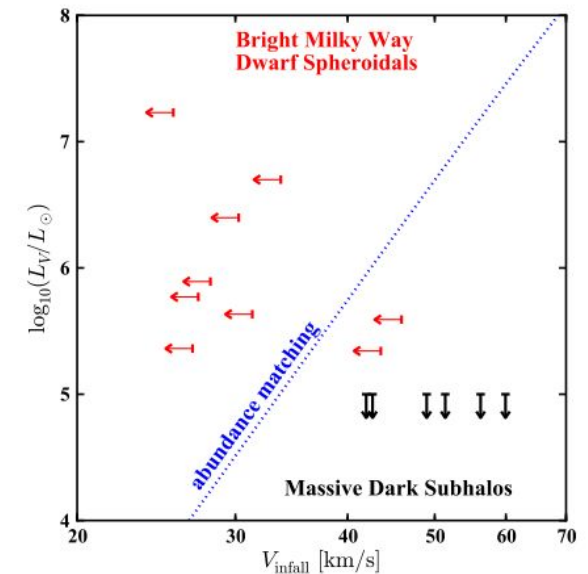


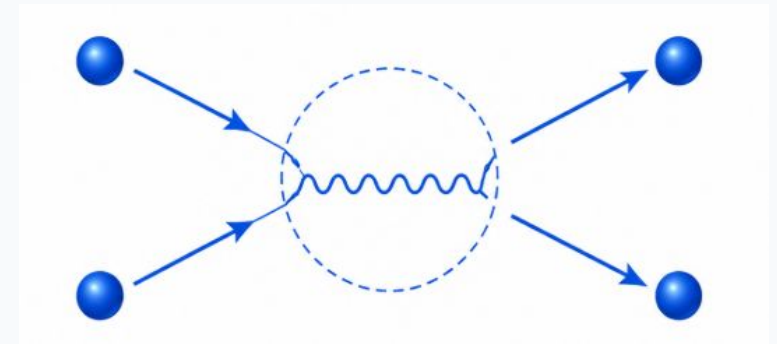
Figure 4. Relation between  $V_{\text{infall}}$  and  $L_V$  for Milky Way dwarf spheroidals (red points) and massive dark subhaloes (black points) for one representative halo realization (Aq-A).

Boylan-Kolchin et al., 2011

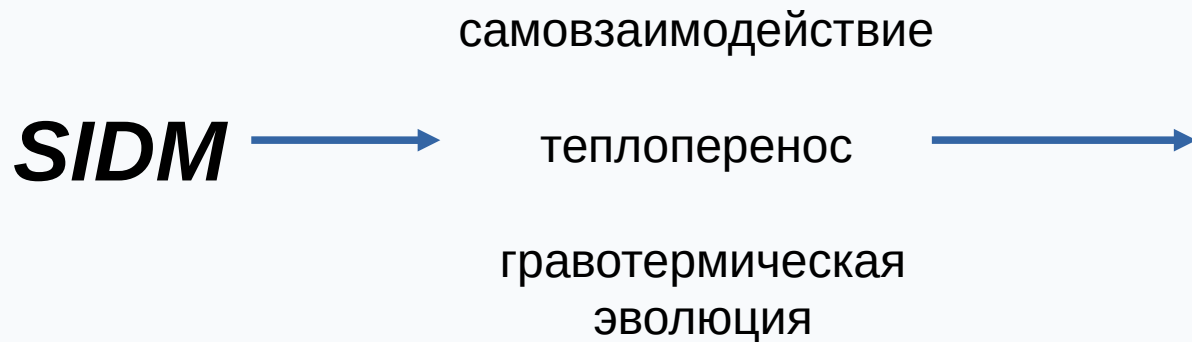
## DM + DM → DM + DM

### Варианты самовзаимодействий тёмной материи:

- 1. Упругое саморассеяние  $\chi\chi \rightarrow \chi\chi$   
меняет распределение энергии и импульса внутри гало, но не меняет число частиц.
- 2. Неупругое саморассеяние  $\chi\chi \rightarrow \chi\chi^*$   
Часть кинетической энергии переходит во внутренние возбуждения тёмной частицы.
- 3. Диссипативное самодействие  $\chi\chi \rightarrow \chi\chi + \text{тёмное излучение}$   
Система может терять энергию, охлаждаться и формировать более компактные структуры.
- 4. Атомарная тёмная материя  $\chi+\chi^- + \text{тёмная электродинамика}$   
Возможны тёмные атомы, рекомбинация, остаточная плазма и сложная многокомпонентная динамика.
- 5. Плазменная / SM-like тёмная материя  
Может вести себя как самовзаимодействующая среда с коллективными эффектами, экранированием и теплопереносом.



SIDM важна не только как решение core-cusp problem: она меняет внутреннюю эволюцию гало и может влиять на морфологию источников.



- Решение проблем  $\Lambda$ CDM

*Dave et al, 2001; Zavala et al, 2013; Elbert et al, 2015*

- Слияние сверхмассивных черных дыр: проблема последнего парсека

*Alonso-Ivarez et al, 2024*

- Избыток ранних галактик (JWST)

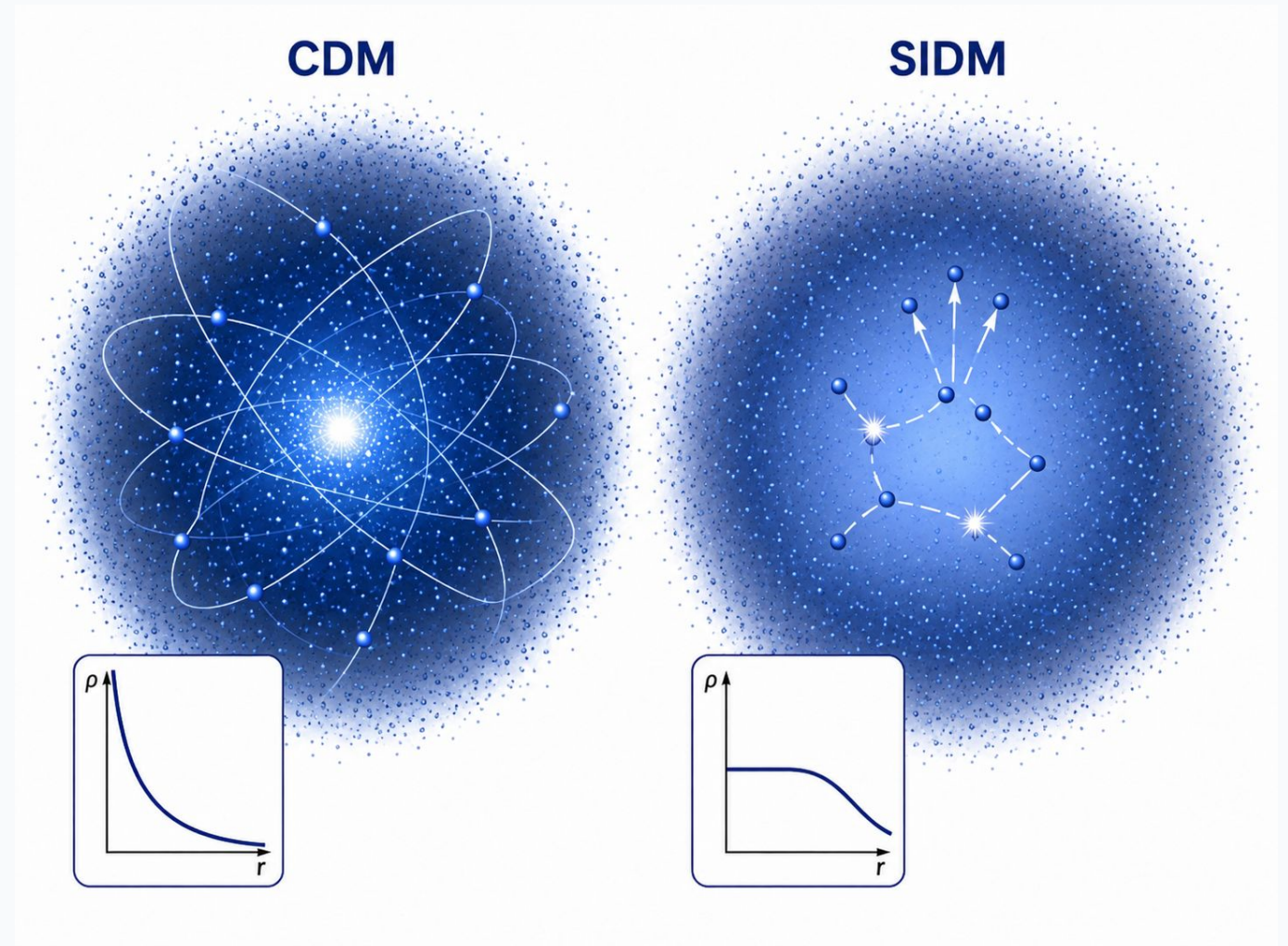
*Roberts et al., 2025*

- Нетривиальные структуры из ДМ: диски, бары, спирали, etc.

*Belotsky, 2016; Solovev, 2018; Foot, 2015; Randall & Reece, 2013*

Самовзаимодействие переносит энергию из центральных областей гало и может сглаживать cusp

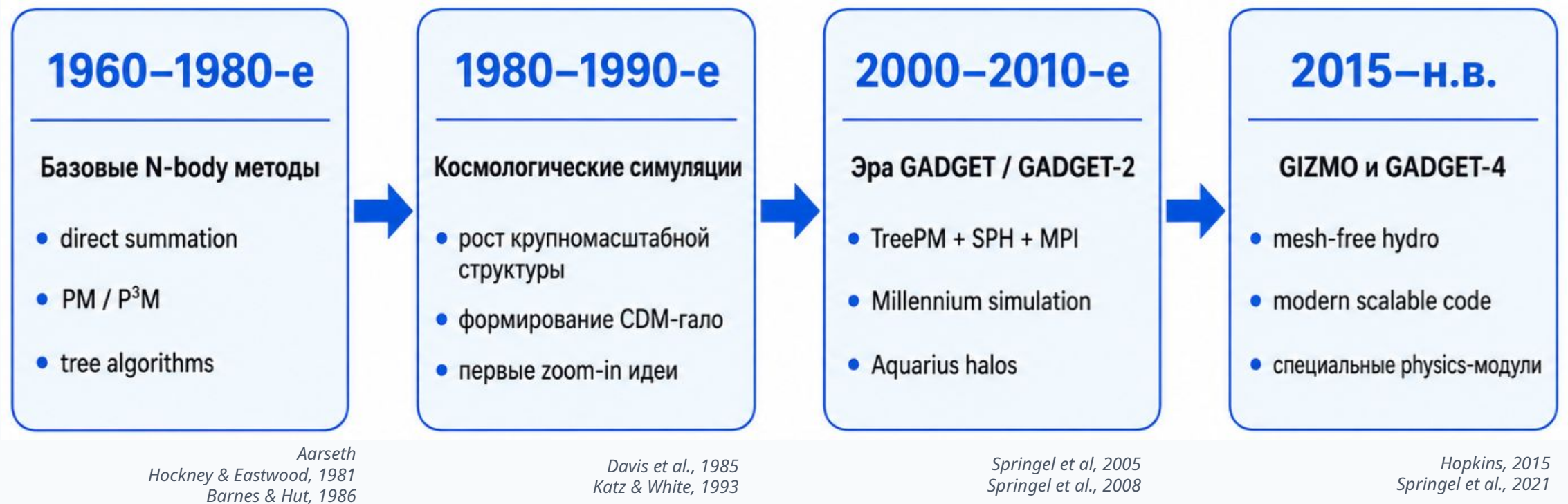
*Rocha et al., 2013; Tulin & Yu, 2018*



## Цель работы:

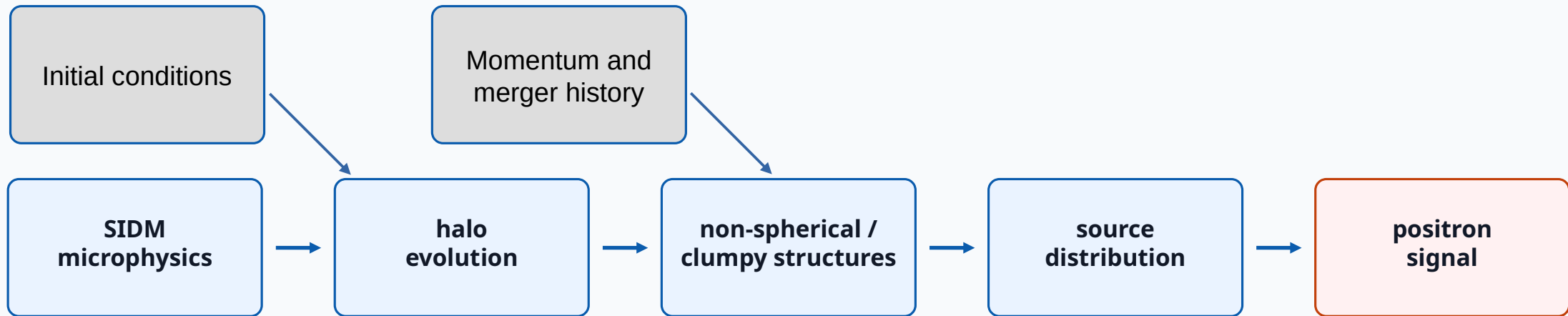
- Исследовать морфологически возможные структуры самовзаимодействующей тёмной материи.
- Какие структуры можно получить при каких моделях самовзаимодействия?

| Structure     | $\sigma/m = 0.01, \text{ cm}^2/\text{g}$ | $\sigma/m = 0.1, \text{ cm}^2/\text{g}$ | $\sigma_1(v)/m, \text{ cm}^2/\text{g}$ |
|---------------|--|---|--|
| Halo          | ✓  | ✓                                       | ✓                                      |
| Disk          | ✗  | ✗                                       | ✓                                      |
| Bars          | ✗  | ✗                                       | ✗                                      |
| Compact cores | ✗  | ✓                                       | ✓                                      |
| Spirals       | ✗  | ✗                                       | ✓                                      |



Для задач о внутренней структуре гало, субгало, барионов и SIDM сегодня стандартом являются zoom-in high-resolution симуляции: большой cosmological box сохраняет окружение, а выбранное гало моделируется с высоким разрешением.

Высокая оптимизация вычислений позволяет запускать симуляции на  $10^{12}$  частиц



## Возможные морфологии:

кор(ядро), субгало, клампы, тёмный диск, бары(перемычки), спирали

## Клампы / сгустки в гало

Образуются естественно в иерархической модели, присутствуют и в CDM.

В CDM слишком рыхлые / легко разрушаются при движении в галактие.

*Springel et al, 2008; Diemand et al, 2008*

## SIDM + барионный диск / несферичность

Самовзаимодействие делает центр гало чувствительным к барионному диску: форма и профиль могут меняться. Несферичность это про анизотропию, а не сложные формы как бары и спирали

*Sameie et al, 2018; Despali et al, 2018*

## Темный диск

### 1. CDM dark disk

Аккреция спутников и удары субгало могут формировать темный диск или менять структуру звездного диска. CDM темный диск «натягивается» на барионный галактический диск.

*Read et al, 2008; Kazantzidis et al., 2008*

### 2. Диссипативный темный сектор

Если часть DM способна охлаждаться, она может образовать тонкий темный диски менять геометрию непрямого сигнала.

*Fan et al, 2013; Foot, 2015*

**Вывод:** в литературе в основном изучены отдельные сценарии и точечные примеры структур темной материи. Систематическая морфологическая карта таких структур, важная для моделирования источников позитронной аномалии, пока развита слабо.

## Предыдущий семестр:

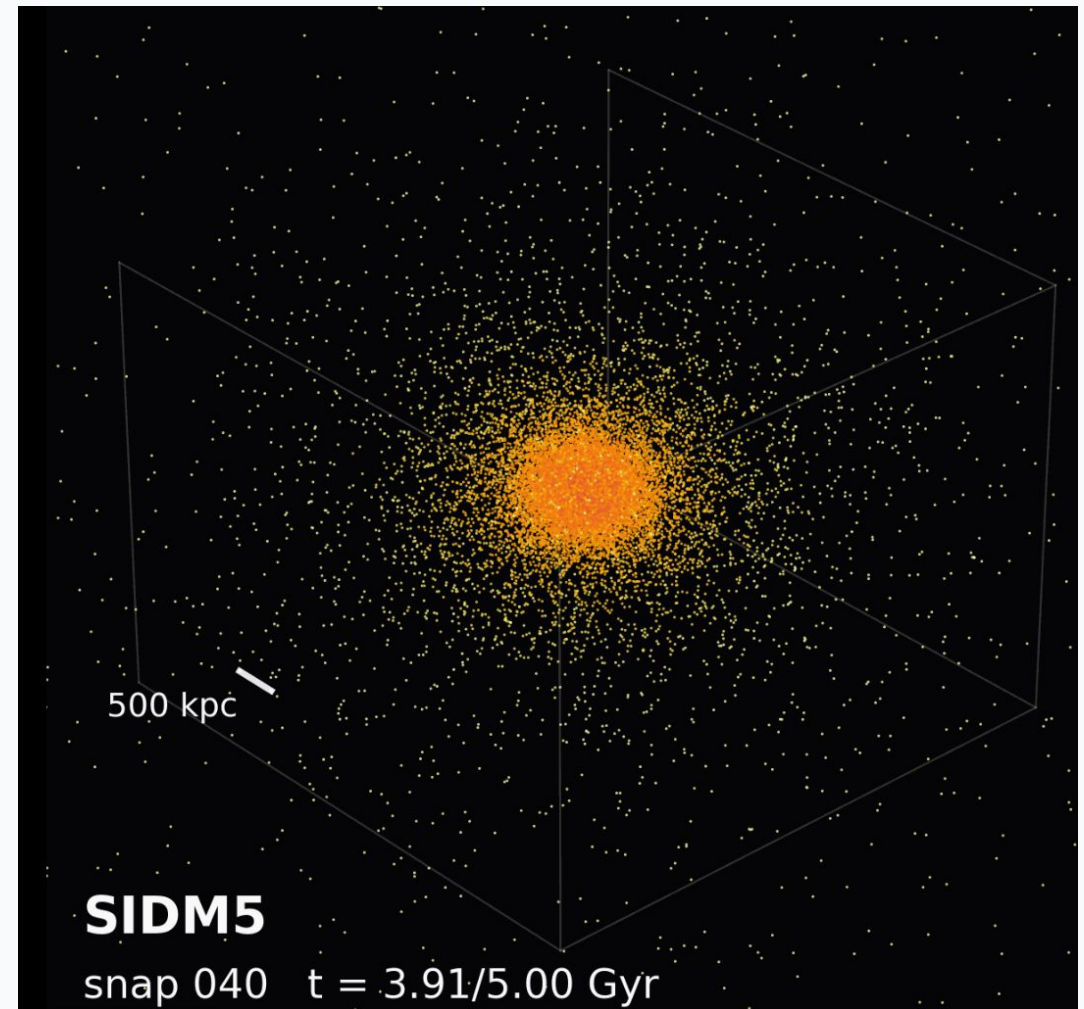
- Подготовлена воспроизводимая среда для N-body расчётов: Docker + GADGET-2 + GIZMO
- Выполнены тестовые CDM-запуски для малого числа частиц.
- Отработан базовый алгоритм:  
запуск симуляции → чтение снимотов → построение профилей.

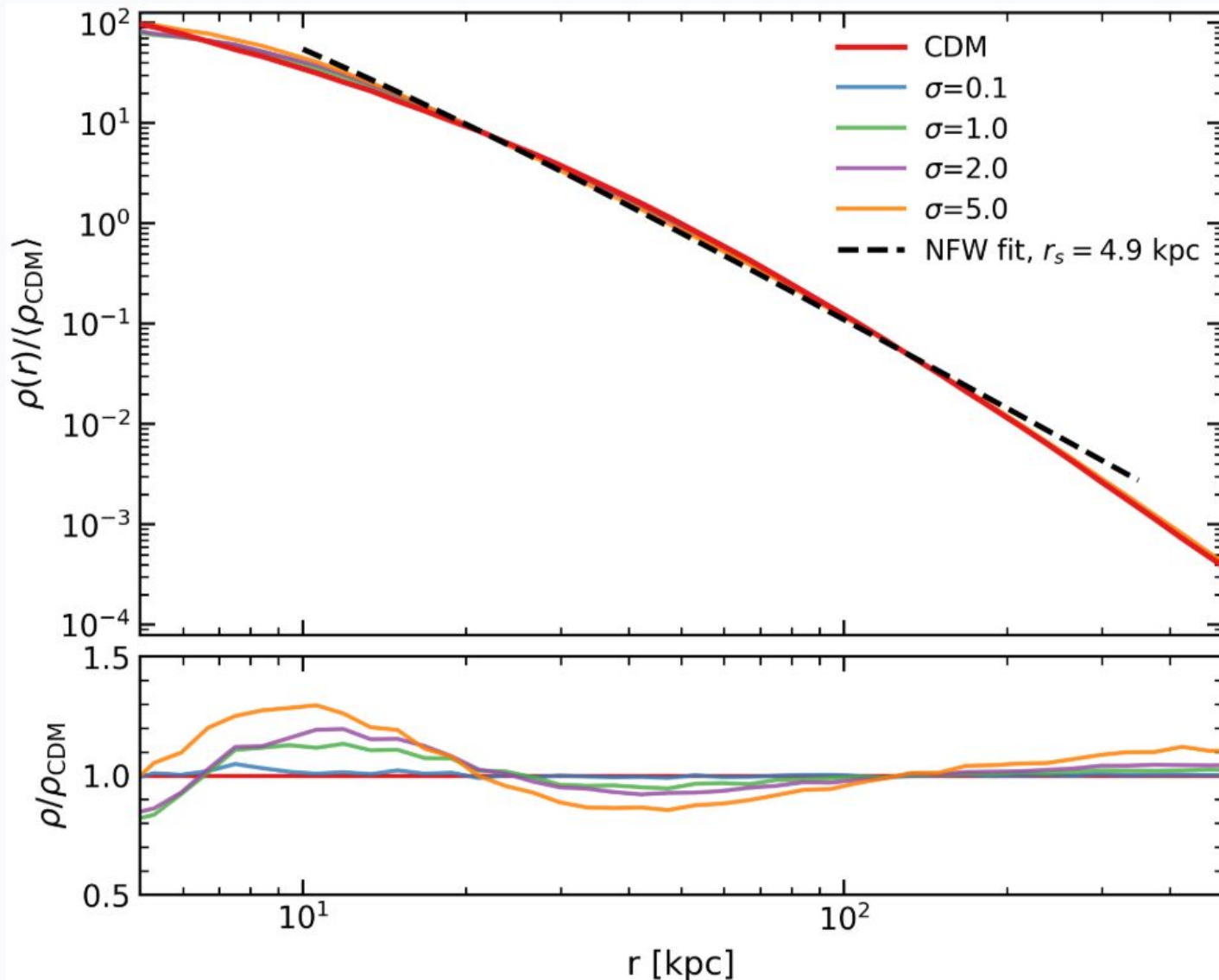
## Текущий семестр:

- Проведены тесты SIDM-модуля, встроенного в GIZMO.
- Запущены расчёты изолированного NFW-гало с  $(10^6)$  частиц.
- Выполнены серии для разных сечений самовзаимодействия:  
 $\sigma/m = 0; 0.1; 1; 2; 5 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

## Результат:

- Получены профили плотности, наклона и дисперсии скоростей.
- Отличия SIDM от CDM слабые, но проявляются во внутренней области гало.





$N = 10^6$  частиц,  
 Нач условия: изолированное NFW-гало,  
 $t = 5$  Gyr,  
 $\sigma/m = 0-5$  cm<sup>2</sup>/g.

Глобально профиль остается близким к CDM. График отношения лучше показывает изменения в области ядра. SIDM не разрушает NFW-гало в целом, но меняет центральное распределение плотности.

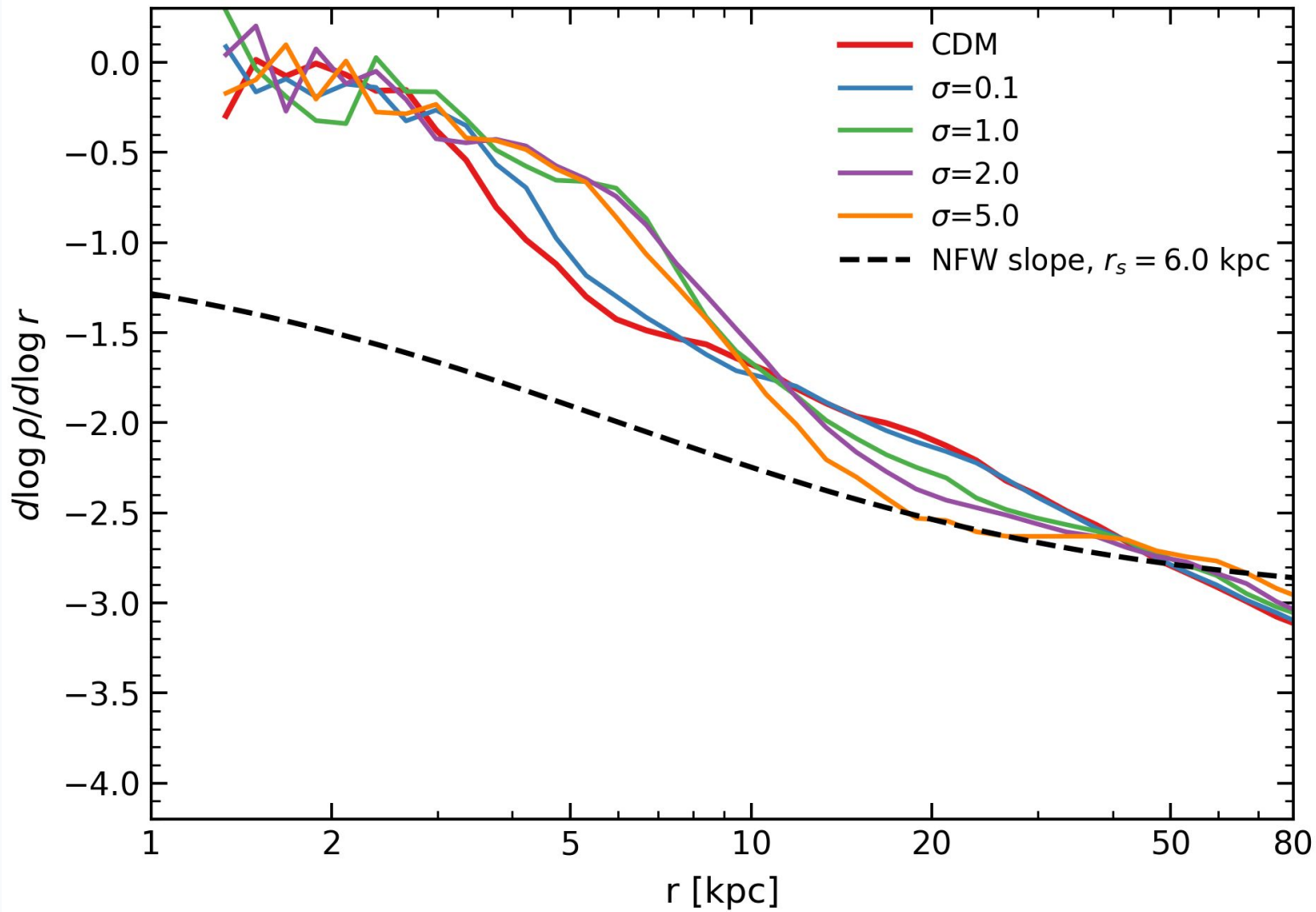
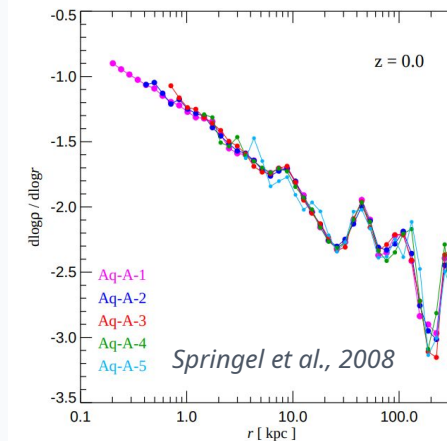


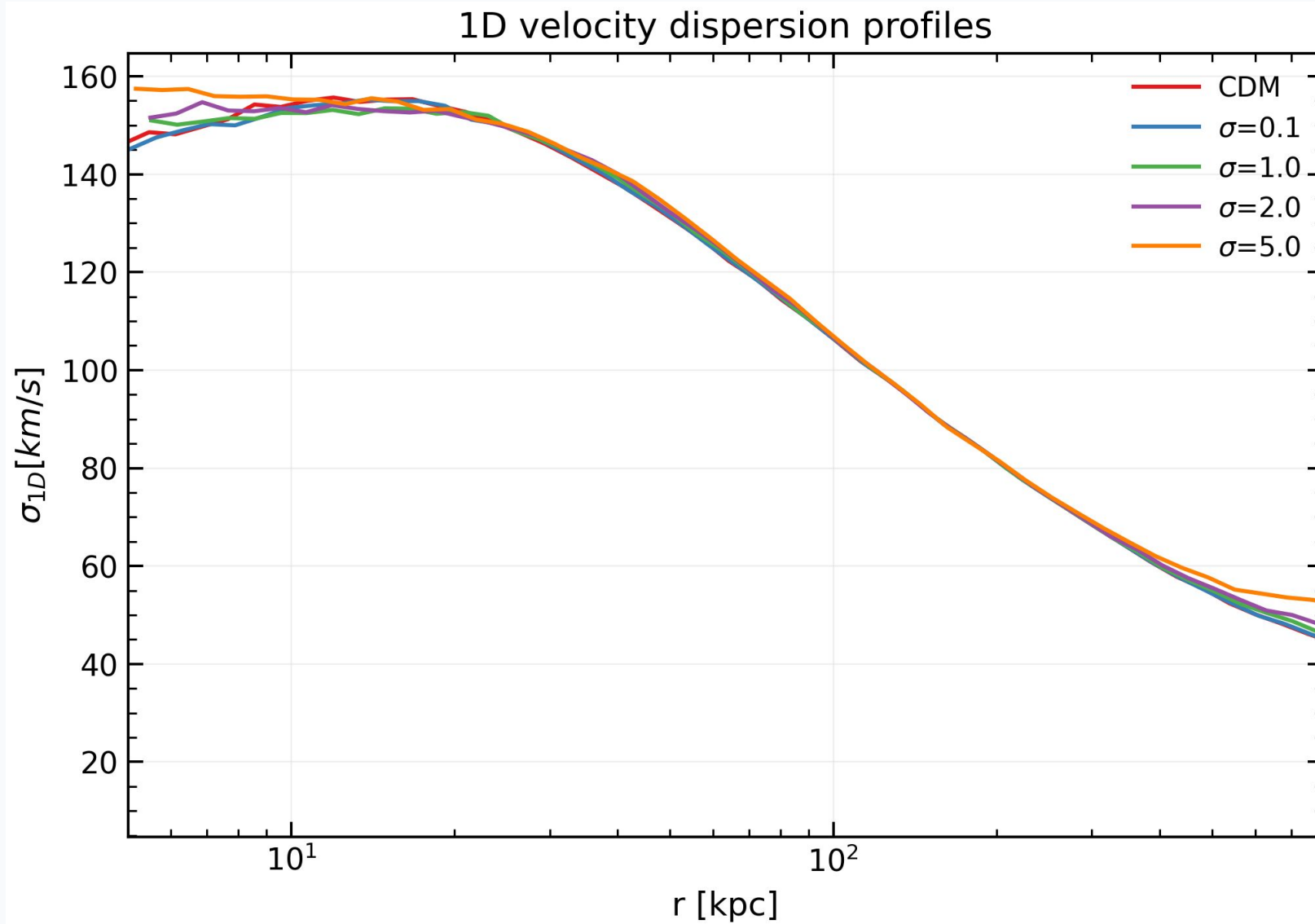
График не совпадает с ожидаемым для CDM.

Видно отличие области ядра гало от NFW профиля.

Модуль самовзаимодействия работает, т.к на малых радиусах сглаживает наклон.

График чувствителен к биннингу и центрированию на центре гало.





Профили ( $\sigma(r)$ ) почти совпадают для CDM и SIDM. Сильной перестройки глобальной динамики гало не наблюдается. Основные отличия SIDM в центральном профиле плотности. Дисперсия в ядре гало выше (больше частиц => чаще столкновения)

**Спасибо за внимание**

---

## $\Lambda$ CDM, CDM-проблемы и SIDM

Blumenthal et al., 1984 --- формирование галактик  
Planck Collaboration, 2018 --- CMB и параметры  $\Lambda$ CDM  
Navarro, Frenk & White, 1996 --- NFW-профиль

Moore, 1994; de Blok, 2010 --- core-cusp problem  
Klypin et al., 1999 --- missing satellites problem  
Boylan-Kolchin et al., 2011 --- too-big-to-fail problem

Spergel & Steinhardt, 2000 --- введение SIDM  
Cirelli, 2024 --- сильный обзор SIDM и DM  
Davé et al., 2001; Zavala et al., 2013; Elbert et al., 2015 --- SIDM и маломасштабные проблемы  $\Lambda$ CDM  
Rocha et al., 2013 --- SIDM simulations и образование core  
Tulin & Yu, 2018 --- обзор SIDM

Alonso-Álvarez et al., 2024 --- SIDM и проблема последнего парсека  
Roberts et al., 2025 --- SIDM и избыток ранних галактик

## N-body и морфология DM

Aarseth --- прямые N-body методы  
Hockney & Eastwood, 1981 --- численные методы N-body  
Barnes & Hut, 1986 --- tree algorithm  
Davis et al., 1985 --- CDM и формирование структуры  
Katz & White, 1993 --- zoom-in simulations  
Springel, 2005 --- GADGET-2  
Springel et al., 2008; Diemand et al., 2008 --- simulations of DM halos  
Hopkins, 2015 --- GIZMO  
Springel et al., 2021 --- GADGET-4  
Read et al., 2008; Kazantzidis et al., 2008 --- dark disk / disk response  
Fan et al., 2013; Foot, 2015 --- dissipative dark sector  
Randall & Reece, 2013 --- dark disk scenario  
Sameie et al., 2018; Despali et al., 2018 --- SIDM + baryonic disk / несферичность гало

## Позитронная аномалия

PAMELA Collaboration, 2009 --- открытие позитронной аномалии  
AMS Collaboration, 2014 --- подтверждение позитронной аномалии  
Hooper et al., 2017 --- пульсарная интерпретация positron excess  
Malkov et al., 2016 --- сверхновые и SNR  
Alekseev et al., 2016 --- пространственное распределение источников  
Barak et al., 2023 --- модели DM с подавлением гамма-ограничений  
Cirelli, 2011 --- не прямые сигналы от тёмной материи  
Belotsky, 2016 --- пространственное распределение источников DM  
Solovev, 2018 --- модель тёмного диска