

# Формирование структур из самовзаимодействующей тёмной материи

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

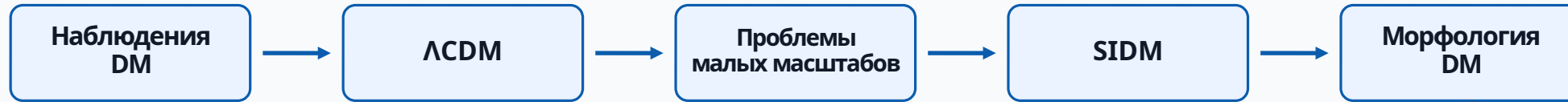
---

Дмитрий Калашников

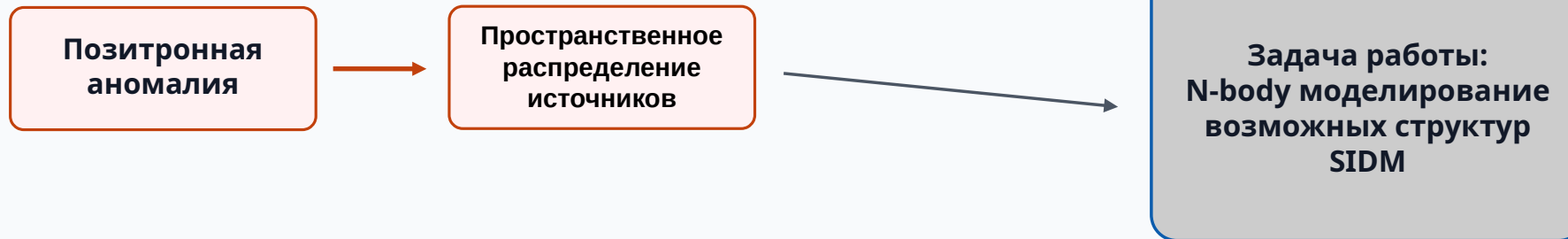
Научный руководитель: К. М. Белоцкий

НИЯУ МИФИ, кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

## история



## мотивация



Позитронная аномалия задаёт прикладную мотивацию, а литературная линия ведёт от наблюдений DM к морфологии SIDM.

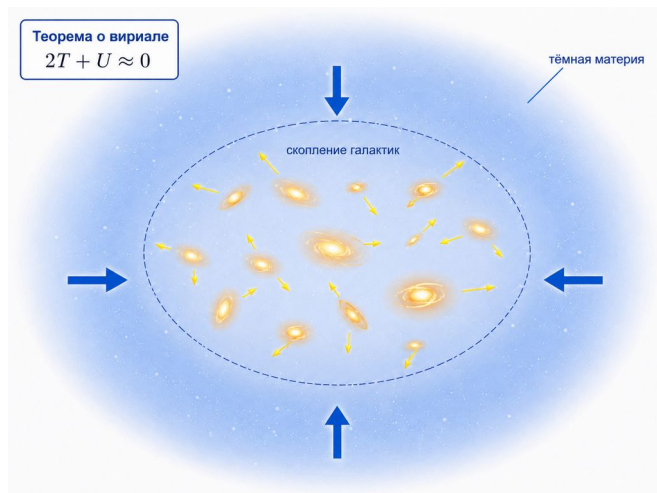
*Belotsky, 2016; Kalashnikov, 2026*

Тёмная материя появилась как общий ответ на несколько независимых динамических наблюдений.

## Скопления галактик

Динамическая масса скопления из скоростей галактик оказывается больше светящейся массы.

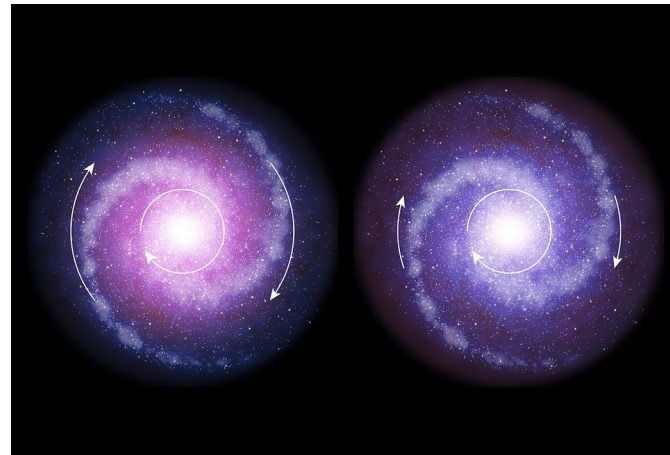
*Zwicky, 1933*



## Кривые вращения

Скорость вращения галактик не падает на больших радиусах, что указывает на тёмное гало.

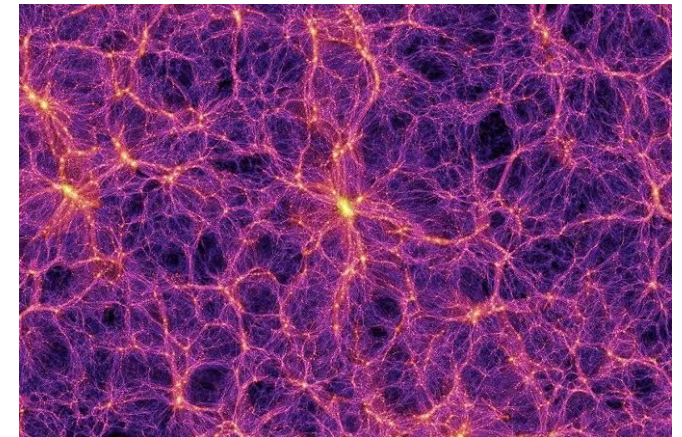
*Rubin & Ford, 1970*



## Рост структуры

Нужна невидимая компонента, которая формирует начальные "семена" галактик.

*Blumenthal et al., 1984*

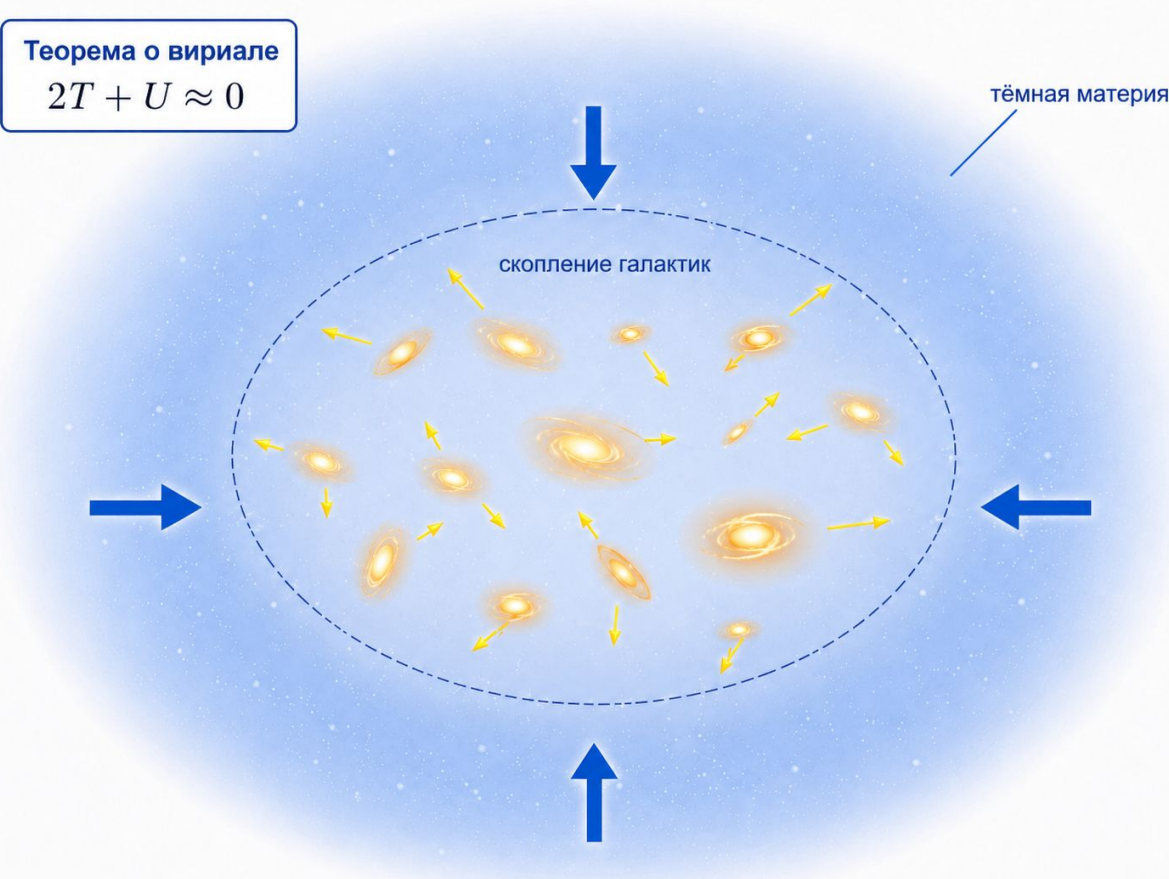


Теорема о вириале

$$2T + U \approx 0$$

тёмная материя

скопление галактик



Вириальная оценка

$$2T + U \approx 0$$
$$M_{\text{dyn}} \sim \frac{R \sigma_v^2}{G}$$

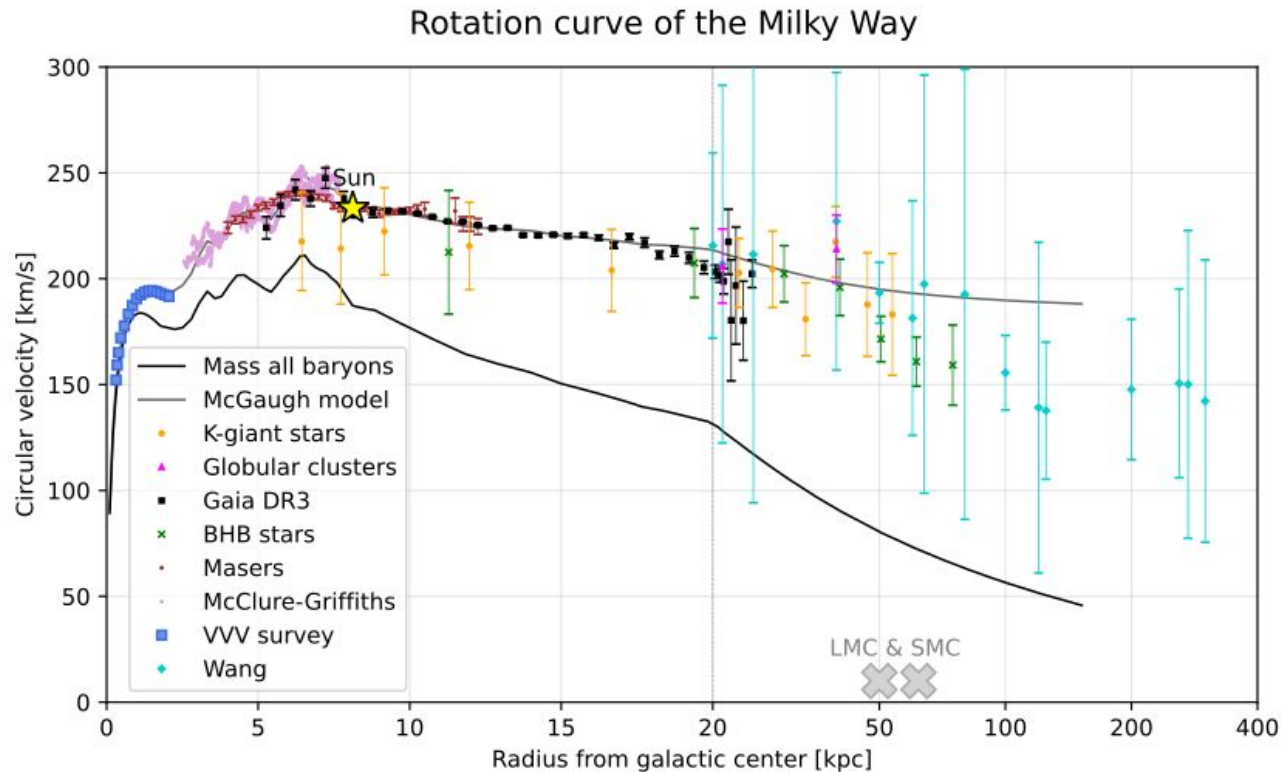
Сравнение масс

$$M_{\text{dyn}} \gg M_{\text{lum}}$$

скорости галактик дают полную динамическую массу скопления

**Вывод:** видимой массы недостаточно, чтобы объяснить динамику скопления галактик.

Zwicky, 1933



**Ожидание от видимой массы**

$$v^2(r) = \frac{GM(r)}{r}$$

$$M(r) \approx \text{const} \Rightarrow v(r) \sim r^{-1/2}$$

**Наблюдение**

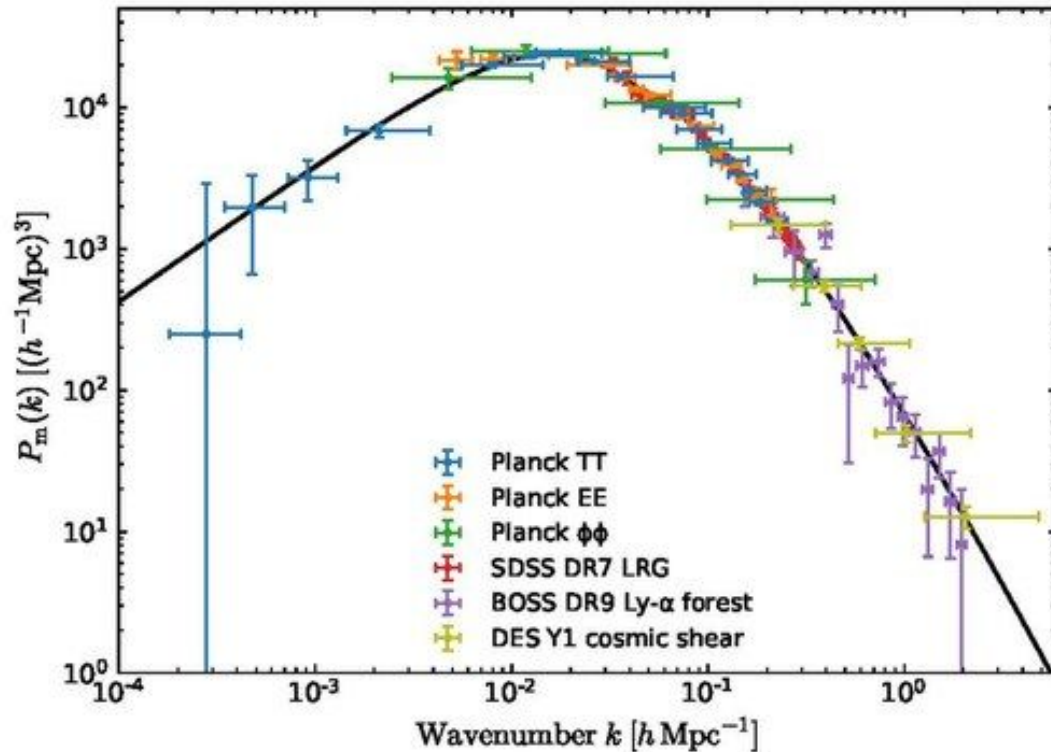
$$v(r) \approx \text{const} \Rightarrow M(r) \sim r$$

масса продолжает расти за пределами  
светящегося диска

**Вывод:** плоские кривые вращения требуют протяжённого тёмного гало вокруг галактики.

*Rubin & Ford, 1970; Rubin et al., 1980*

# Почему именно холодная тёмная материя?



Наблюдаемый спектр мощности материи согласуется с  $\Lambda$ CDM

*ESA & Planck Collaboration, 2018*

## HDM

большие тепловые скорости

сглаживание малых возмущений

формирование сверху вниз

## CDM

малые тепловые скорости

малые возмущения сохраняются

формирование снизу вверх

CDM сохраняет маломасштабные флуктуации, из которых затем формируются первые гало.

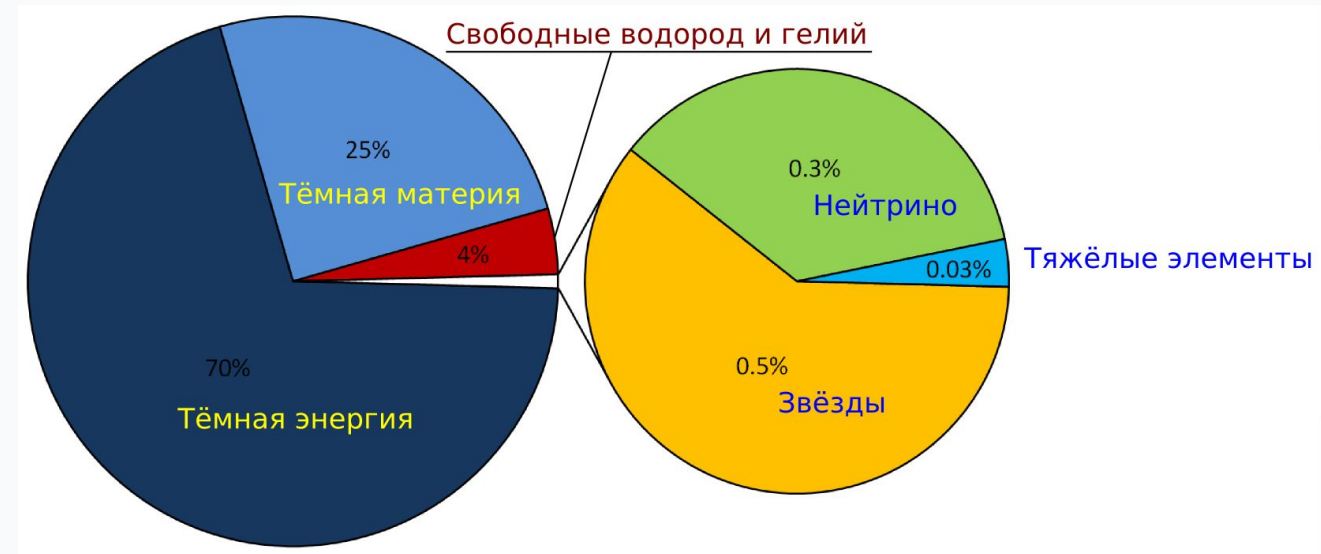
**Вывод:** CDM естественно ведёт к иерархическому формированию структуры: от малых гало к крупным объектам.

*White & Rees, 1978; Davis et al., 1985;*

# $\Lambda$ CDM — стандартная космологическая модель.

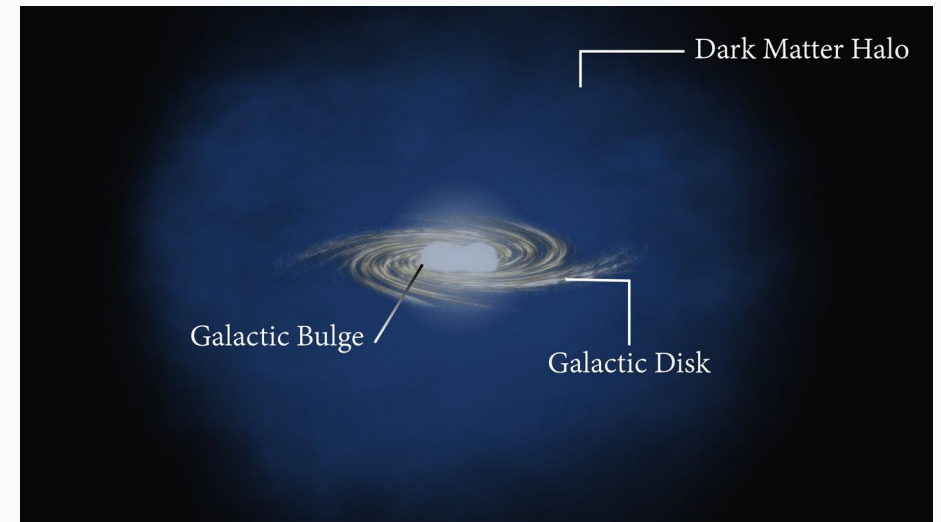
Состав Вселенной согласно  $\Lambda$ CDM:

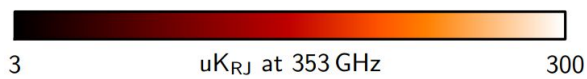
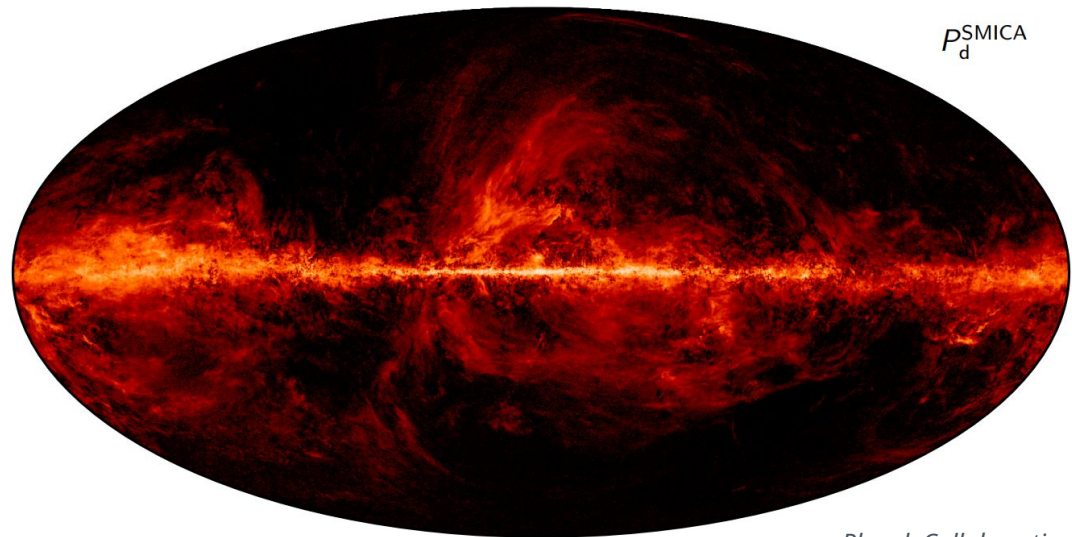
- $\Lambda$ : тёмная энергия: ускоренное расширение
- CDM: холодная тёмная материя: рост структуры
- барионы, фотоны и нейтрино: видимая и релятивистская компоненты



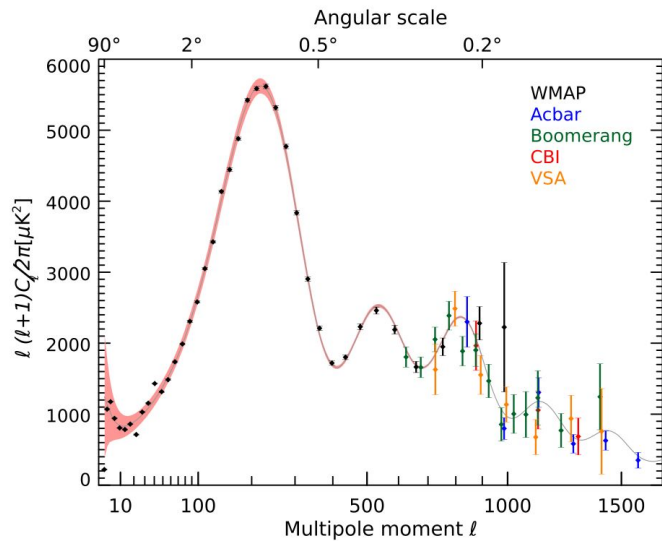
**$\Lambda$ CDM** Объясняет следующие наблюдения:

- 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





Planck Collaboration, 2018



Было предсказано Гамовым в 1948 как следствие теории большого взрыва, и экспериментально обнаружено Пензиасом и Вильсоном в 1965.

*Gamow, 1948; Penzias-Wilson, 1965*

CMB --- излучение эпохи рекомбинации после образования нейтрального водорода фотоны распространяются почти свободно карта CMB фиксирует первичные неоднородности:  $dT/T \sim 10^{-5}$

То есть Вселенная была почти однородна на этот момент, а все галактики образовались быстро из этих первичных неоднородностей

# Гравитационный рост возмущений

## Возмущения плотности

$$\delta(\mathbf{x}) = \frac{\rho(\mathbf{x}) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}, \quad \langle \tilde{\delta}(\mathbf{k}) \tilde{\delta}^*(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 P(k) \delta^3(\mathbf{k} - \mathbf{k}')$$

Спектр Харисона-Зельдовича: линейный спектр  
(все возмущения равны)

*Harrison, E. 1970; Zeldovich, 1972*

$$P_0(\mathbf{k}) = Ak.$$

## Критерий Джинса Jeans, 1902; Peebles, 1980

Описывает линейный рост возмущений,  
через длину взаимодействия

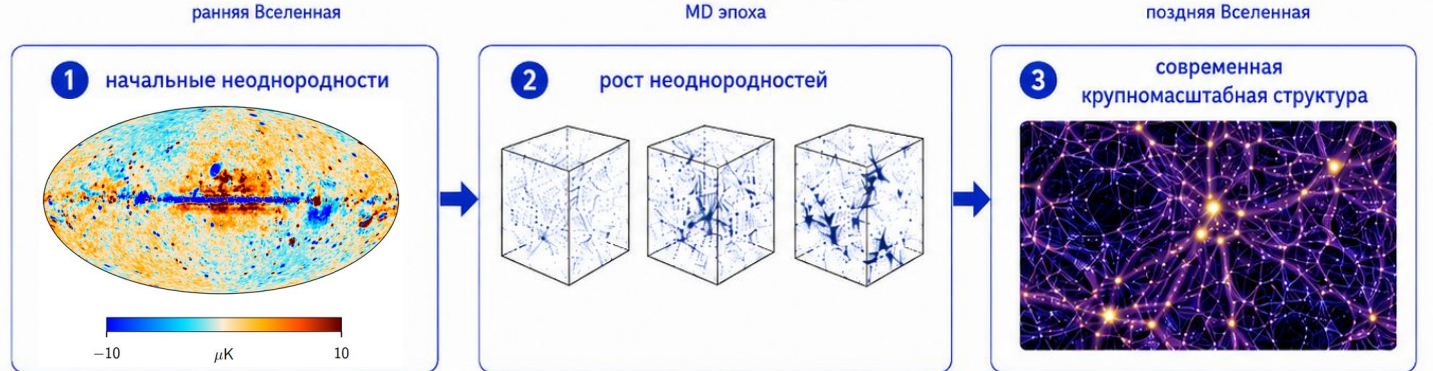
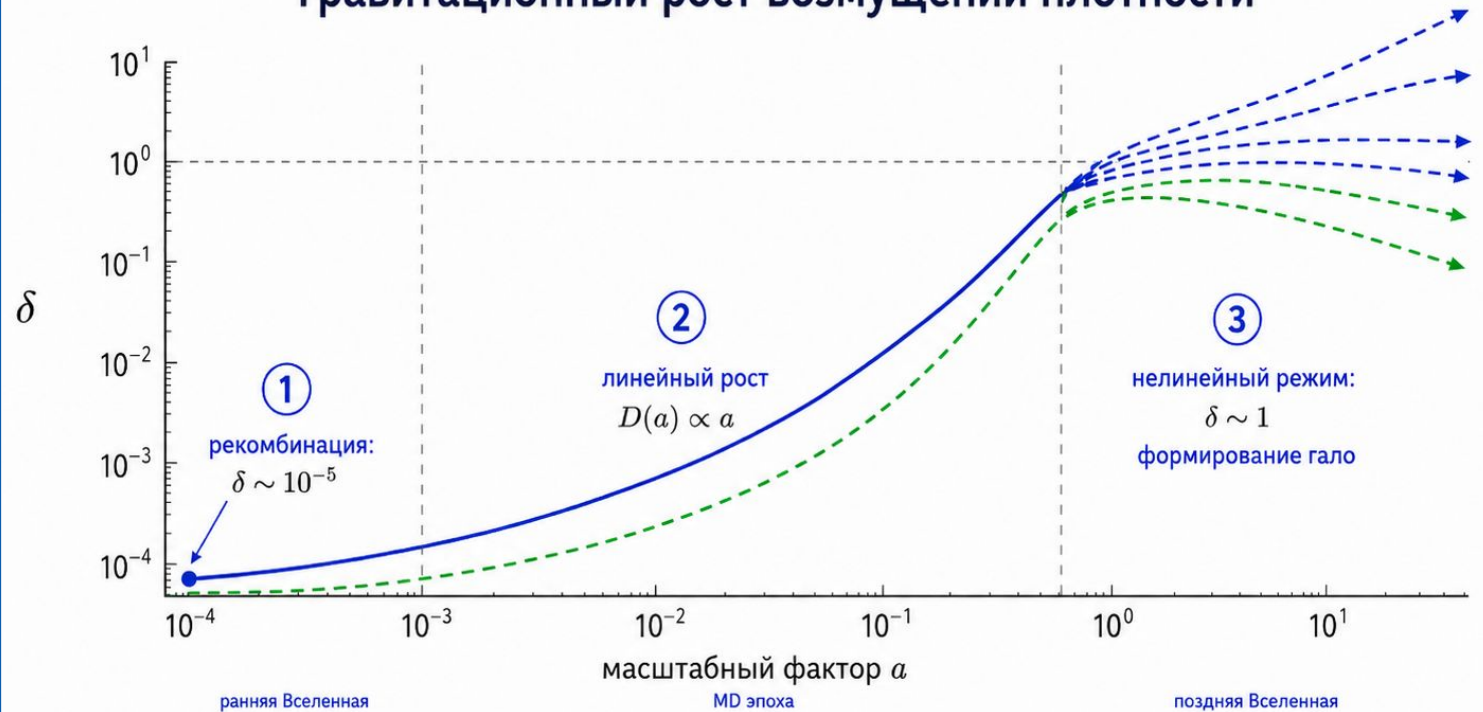
$$\lambda > \lambda_J \Rightarrow \delta \text{ растёт}$$

$$\lambda < \lambda_J \Rightarrow \text{давление сглаживает возмущение}$$

В CDM первичные флуктуации растут за время жизни Вселенной и переходят в нелинейные гало.

*Davis et al., 1985*

## Гравитационный рост возмущений плотности



## Профиль Наваро-Френк-Вайт

аналитическая модель пространственного распределения.  
Получен фитированием и аппроксимация данных

*Navarro, Frenk & White, 1996*

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\frac{r}{R_s} \left(1 + \frac{r}{R_s}\right)^2}$$

$\rho_0$  — характерная плотность  
 $R_s$  — масштабный радиус

Comparison of dark matter halo density profiles

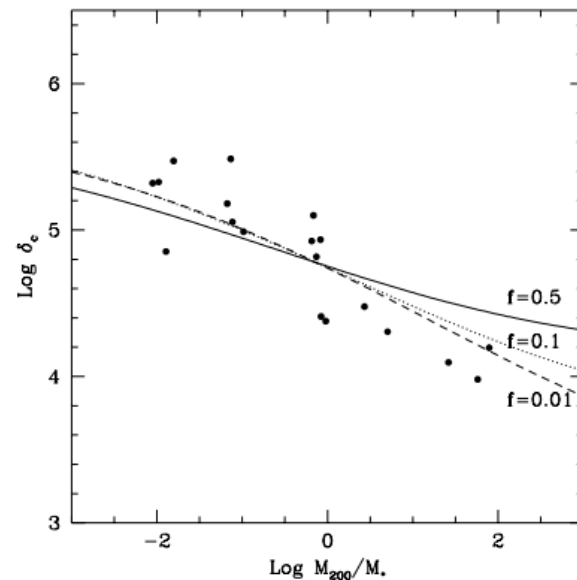
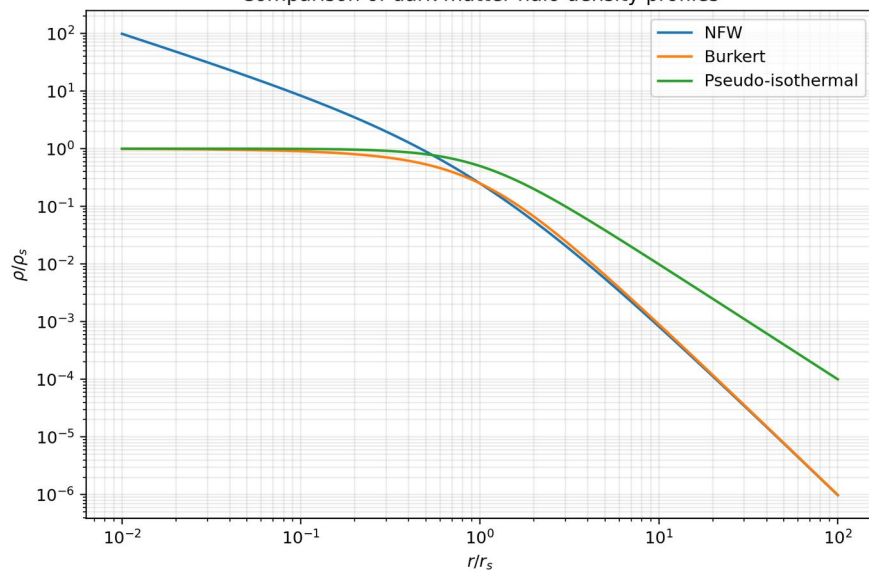


Fig. 7.— The characteristic overdensity  $\delta_c$  as a function of the mass of the halo. The curves show the mass-overdensity relation predicted from the formation times of halos (see text). All curves are normalized so that they cross at  $M_{200} = M_*$ .

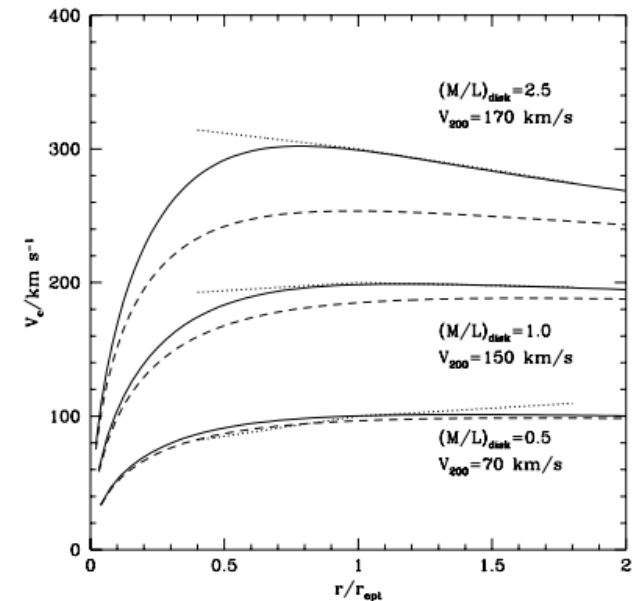
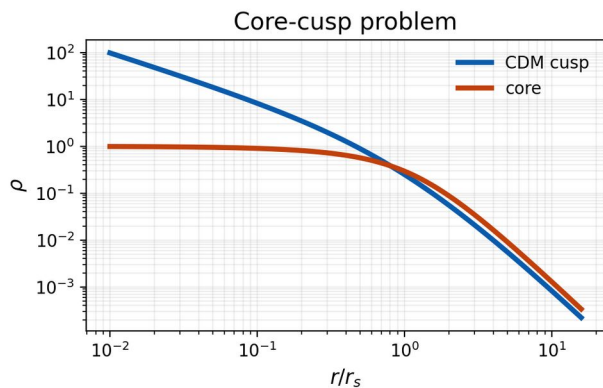


Fig. 11.— Rotation curves of disk+halo systems (solid lines) with parameters chosen to match the observational data of Persic & Salucci (1995) (dotted lines). The dashed lines indicate the contribution of the dark halo. Note that the disk mass-to-light ratio increases as a function of mass, and that the halo contribution is less important in bright galaxies.

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

## Core-cusp

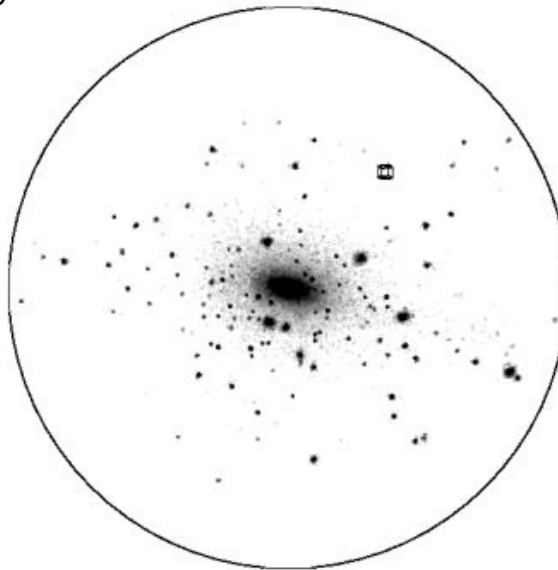
CDM предсказывает центральный cusp; часть наблюдений лучше описывается плоским core.



Moore, 1994; de Blok 2010

## Missing satellites

В симуляциях возникает больше малых субгало, чем наблюдаемых спутников.



Klypin et al., 1999

## Too-big-to-fail

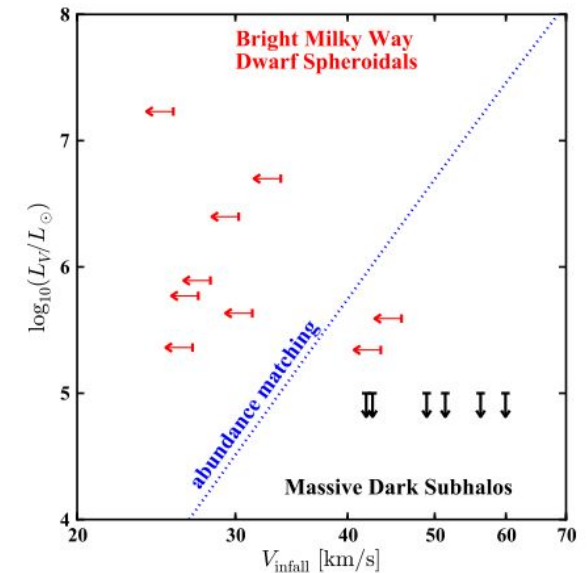


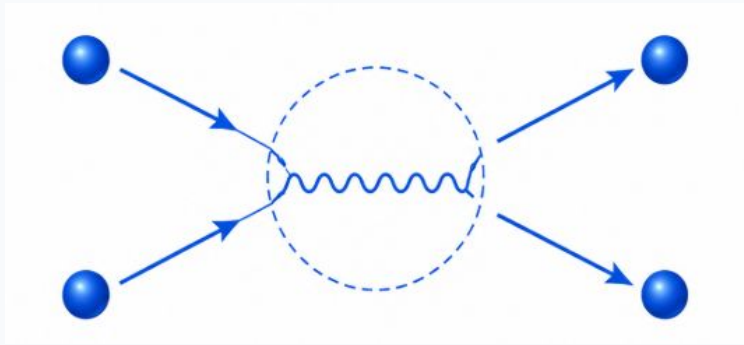
Figure 4. Relation between  $V_{\text{infall}}$  and  $L_V$  for Milky Way dwarf spheroidals (red points) and massive dark subhaloes (black points) for one representative halo realization (Aq-A).

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.



### Ключевой параметр упругих SIDM

$$\sigma/m$$

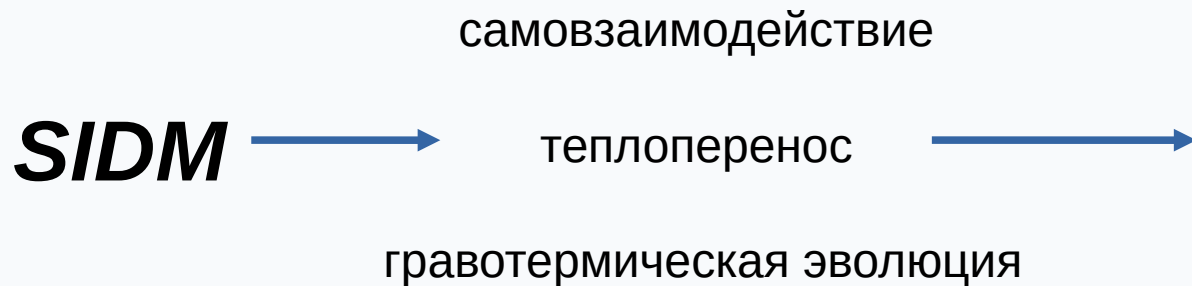
малые  $\sigma/m \rightarrow$  почти CDM, не дают эффектов

$\sigma/m \sim 0.1-1 \text{ cm}^2/\text{g} \rightarrow$  изменение центров гало

слишком большие  $\sigma/m \rightarrow$  сильно ограничены

*Spergel & Steinhardt, 2000; Cirelli 2024*

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)

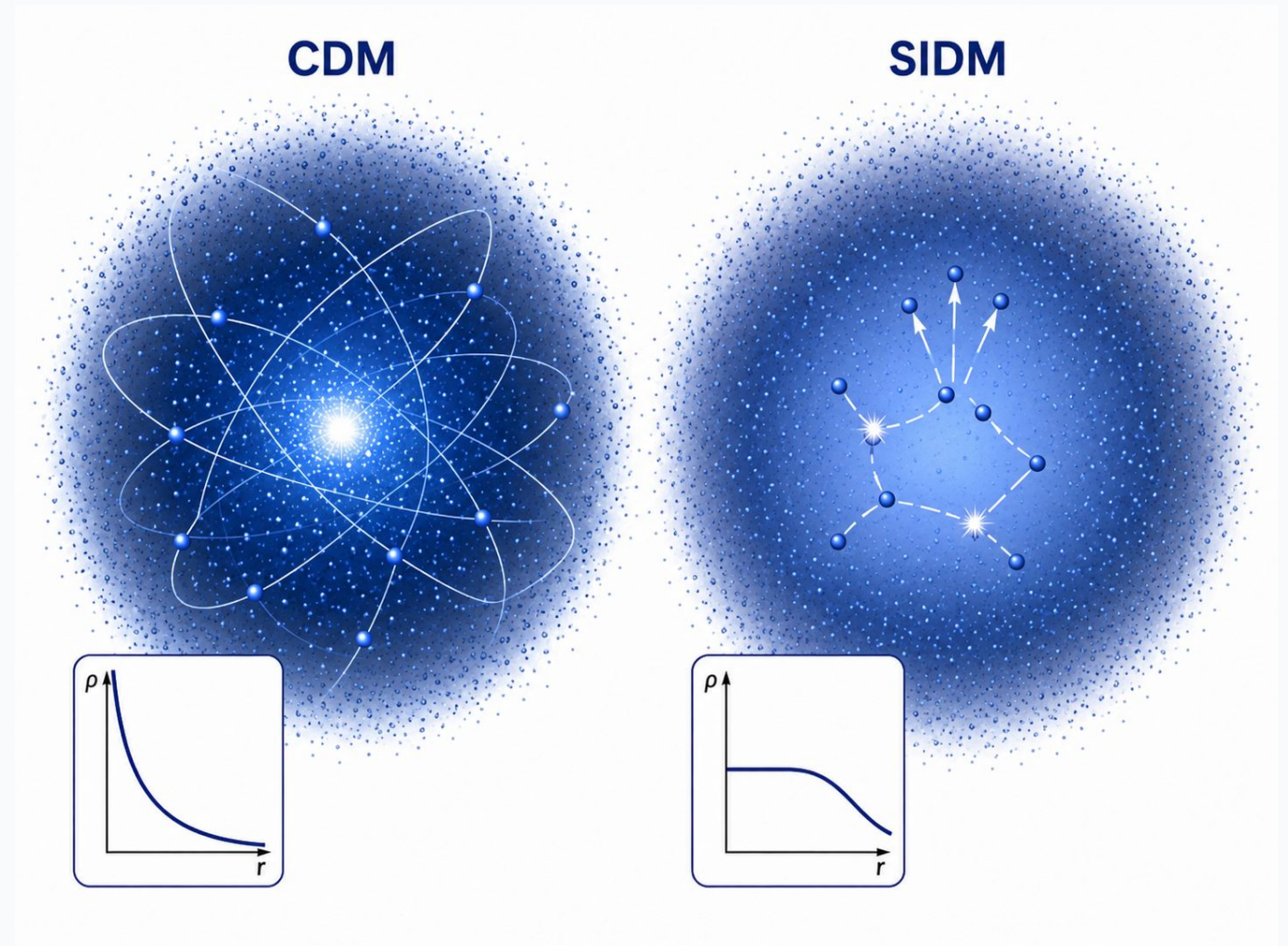
*Roberts et al., 2025*

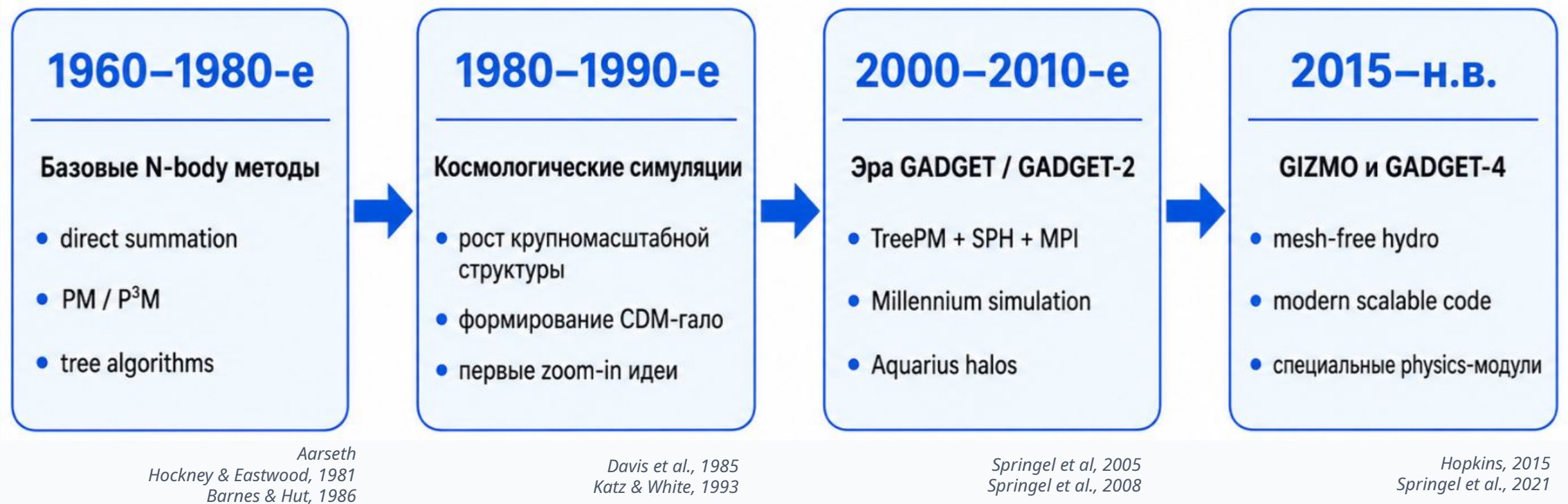
- Нетривиальные структуры из ДМ: диски, бары, спирали, etc.

*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*

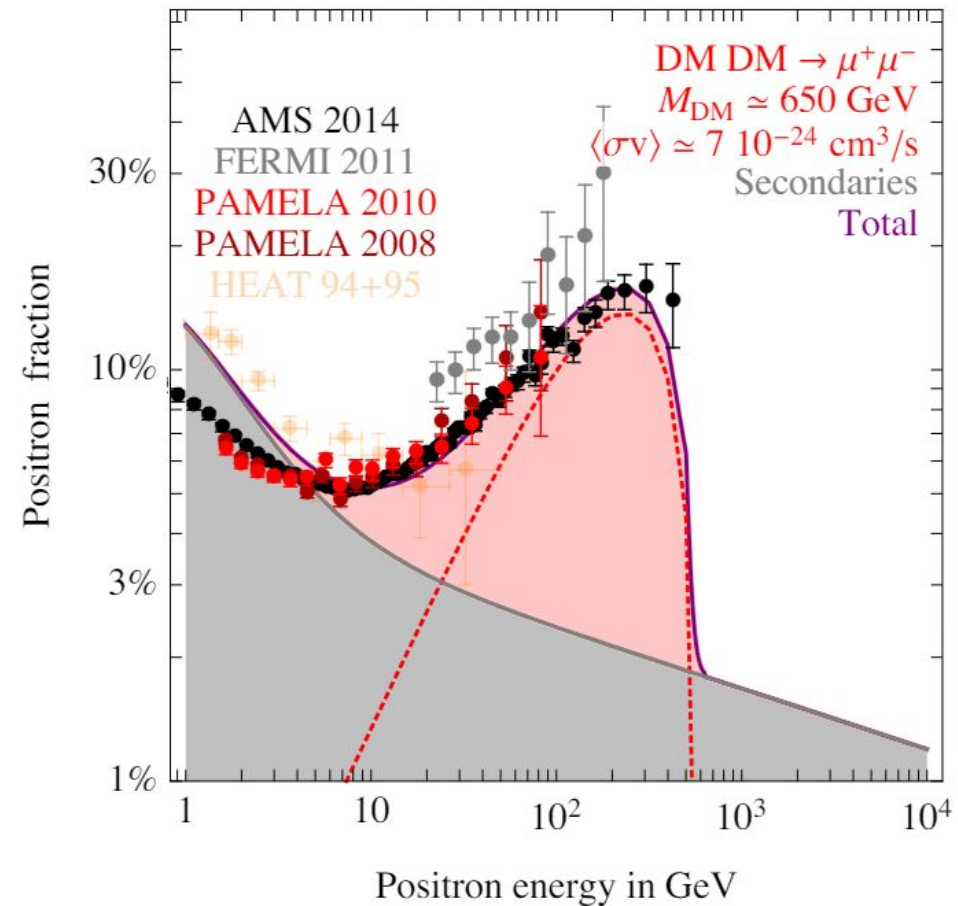




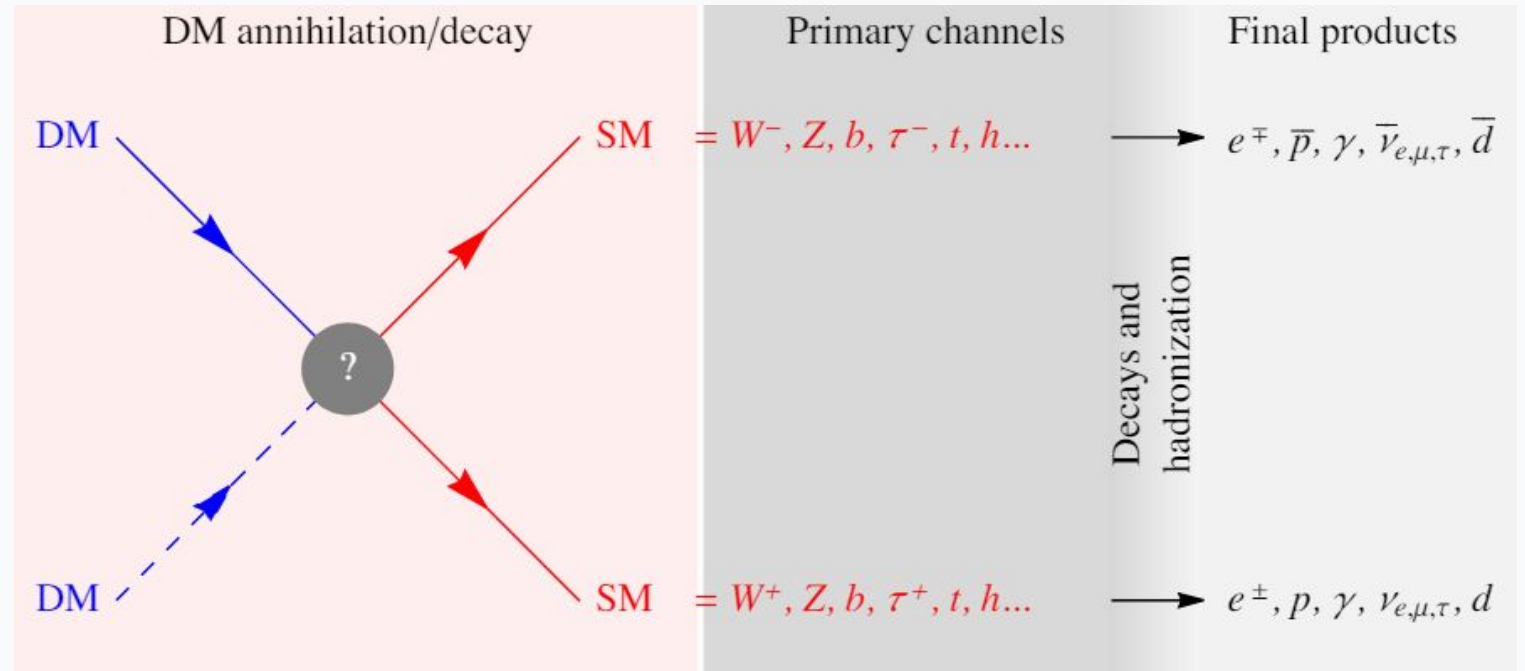
Для задач о внутренней структуре гало, субгало, барионов и SIDM сегодня стандартом являются zoom-in high-resolution симуляции: большой cosmological box сохраняет окружение, а выбранное гало моделируется с высоким разрешением.

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

# Позитронная аномалия

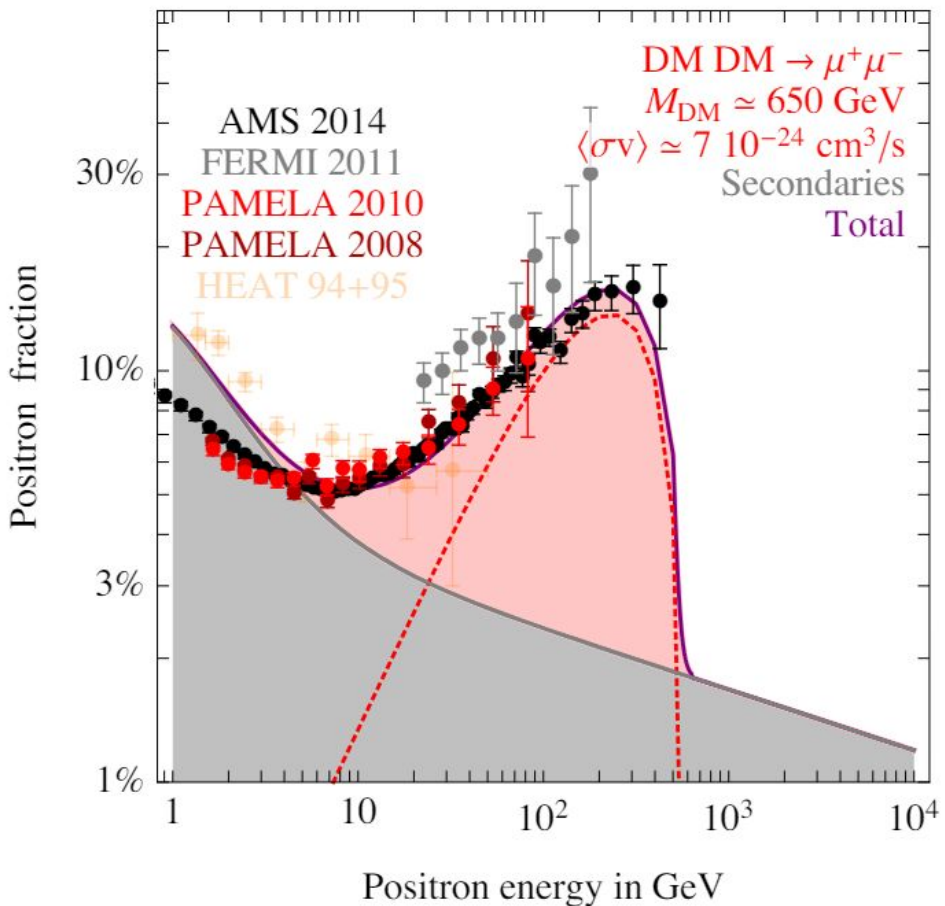


PAMELA Collaboration, 2009; AMS Collaboration, 2014

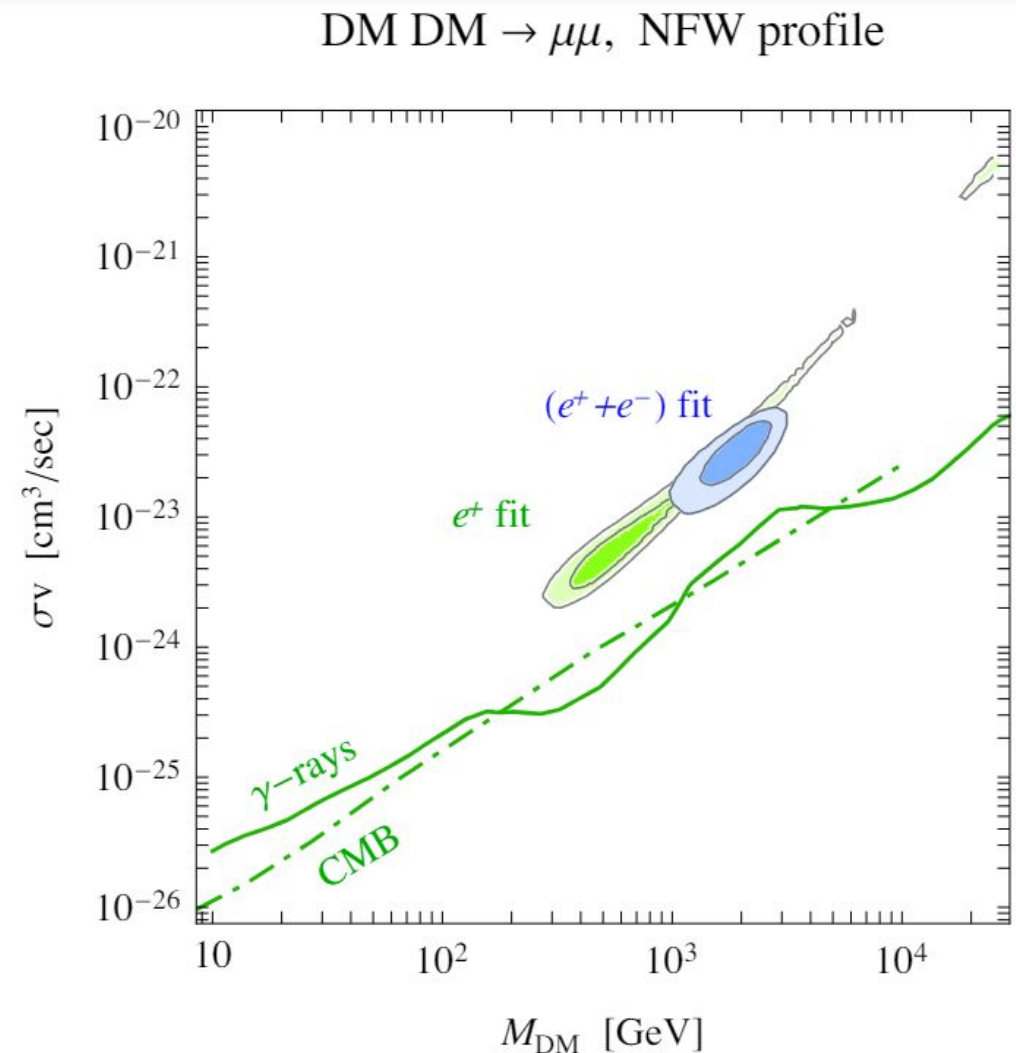


**Вывод:** позитронная аномалия может разрешиться за счет аннигиляции или распада частиц DM

# Позитронная аномалия



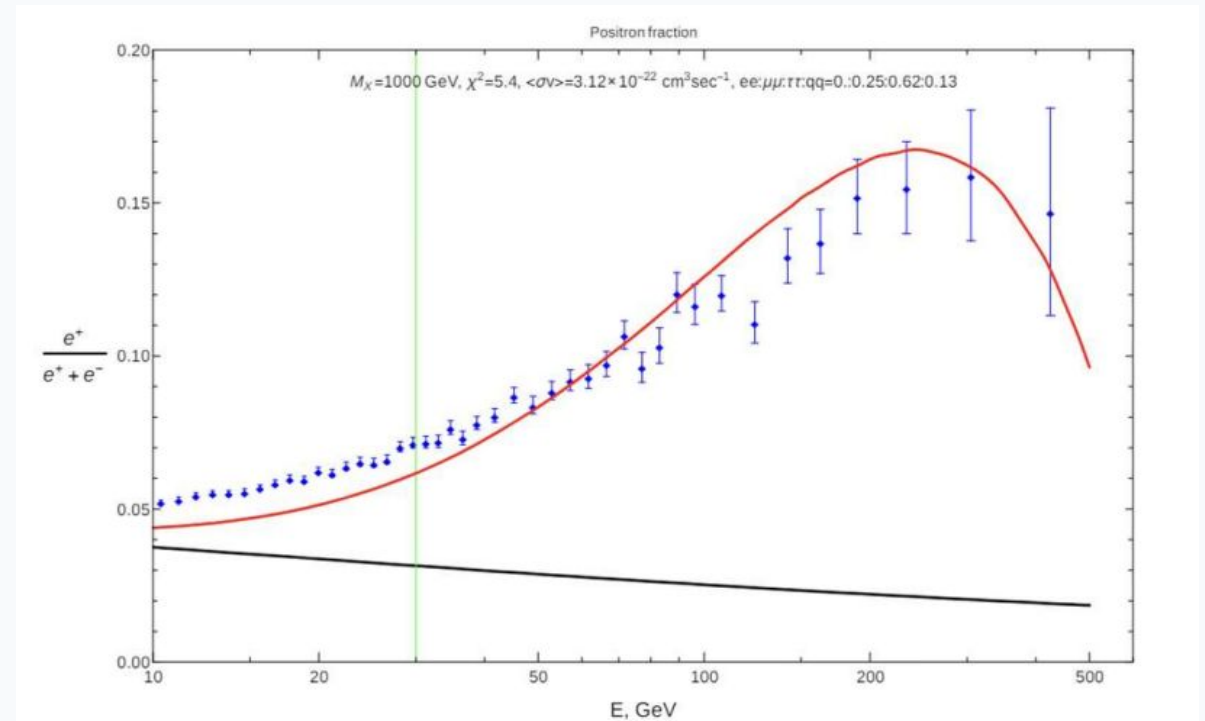
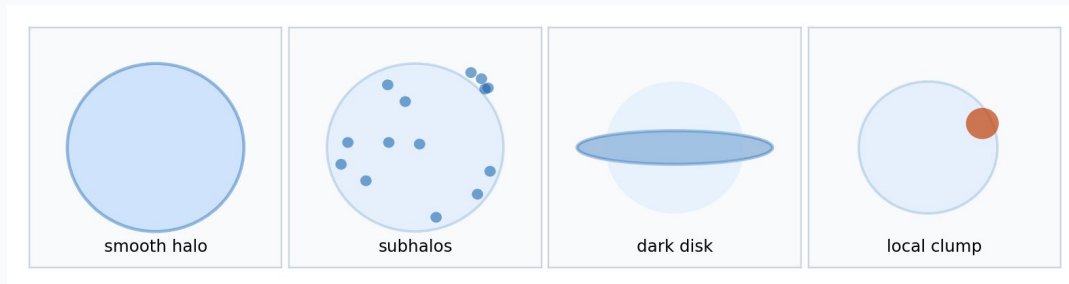
PAMELA Collaboration, 2009; AMS Collaboration, 2014



**Вывод:** позитронная аномалия может разрешиться за счет аннигиляции или распада частиц DM  
Если вся DM распадается  $\rightarrow$  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  $\rho^2$

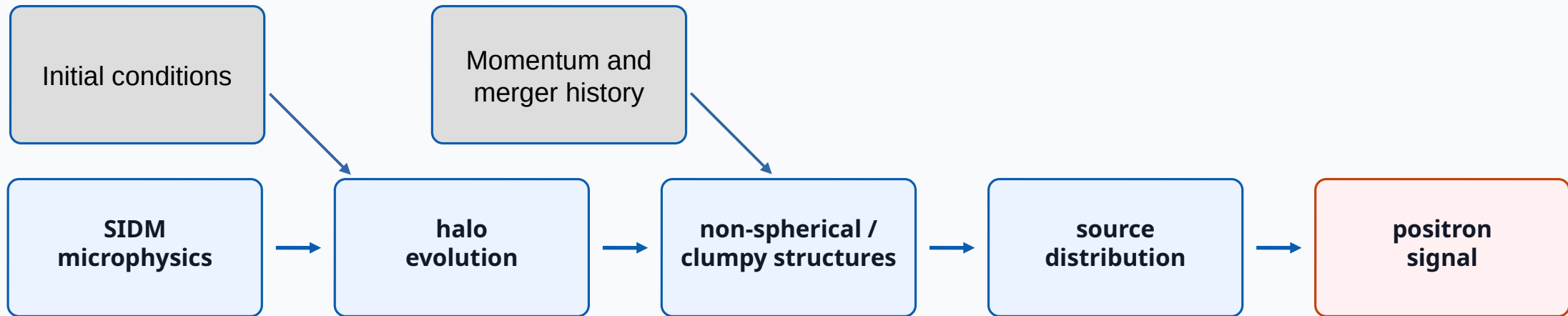


Избыток позитронов для модели темного диска

**Вывод:** морфология тёмной материи напрямую входит в расчёт сигнала позитронов.

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

# Как получить нетривиальные структуры SIDM



**Возможные морфологии:**  
кор(ядро), субгало, клампы, тёмный диск, бары(перемычки), спирали

**Вывод:** для задачи позитронной аномалии важна не только масса частиц, но и геометрия распределения тёмной материи, а также природа взаимодействия между ними.

*Belotsky, 2016; Solovev, 2018; Tulin & Yu, 2018*

## 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.

### Литературный обзор приводит к трём выводам:

1. SIDM меняет внутреннюю эволюцию гало  
самовзаимодействие, теплоперенос, образование кора
2. Возможны нетривиальные барионоподобные структуры DM  
клампы, диски, потоки, несферические гало, субструктуры
3. Для позитронной аномалии важна морфология источников  
поток зависит не только от микрофизики, но и от пространственного  
распределения DM

**Цель: исследовать морфологически возможные структуры SIDM  
и их потенциальную роль в задачах объяснения позитронной аномалии.**

## Наблюдения и $\Lambda$ CDM

Zwicky, 1933 --- динамическая масса скоплений  
Rubin, Ford, 1970; Rubin et al., 1980 --- кривые вращения  
White, Rees, 1978; Davis et al., 1985 --- CDM и рост структуры  
Blumenthal et al., 1984 --- формирование галактик  
Planck Collaboration, 2018 --- CMB и параметры  $\Lambda$ CDM  
Gamow, 1948; Penzias & Wilson, 1965 --- CMB  
Harrison, 1970; Zel'dovich, 1972 --- начальный спектр  
Jeans, 1902; Peebles, 1980 --- рост возмущений  
Navarro, Frenk & White, 1996 --- NFW-профиль

## CDM-проблемы, SIDM

Moore, 1994; de Blok, 2010 --- core-cusp problem  
Klypin et al., 1999 --- missing satellites  
Boylan-Kolchin et al., 2011 --- too-big-to-fail  
Spergel, Steinhardt, 2000 --- SIDM  
Davé et al., 2001; Rocha et al., 2013 --- SIDM simulations  
Zavala et al., 2013; Elbert et al., 2015 --- SIDM и dwarf halos  
Tulin, Yu, 2018 --- SIDM review

## N-body и морфология DM

Hockney, Eastwood, 1981; Barnes & Hut, 1986 --- N-body methods  
Katz, White, 1993 --- zoom-in simulations  
Springel, 2005 --- GADGET-2  
Springel et al., 2008; Diemand et al., 2008 --- high-resolution halos  
Hopkins, 2015 --- GIZMO  
Springel et al., 2021 --- GADGET-4  
Read et al., 2008; Kazantzidis et al., 2008 --- dark disk / disk response  
Fan, Katz, Randall, Reece, 2013; Foot, 2015 --- dissipative dark sector  
Sameie et al., 2018; Despali et al., 2018 --- SIDM + baryonic disk  
Alonso-Álvarez et al., 2024; Roberts et al., 2025 --- recent SIDM applications

## Позитронная аномалия

PAMELA Collaboration, 2009 --- открытие позитронной аномалии;  
AMS Collaboration, 2014 --- подтверждение позитронной аномалии  
Cirelli, 2011 --- идея решения позитронной аномалии через DM;  
Belotsky, 2016 --- идея пространственного распределения для обхода ограничений по гамма;  
Solovev, 2018 --- модель темного диска;

**Спасибо за внимание**

---