

# Нерешенные проблемы космологии

В. А. Рубаков

Институт ядерных исследований РАН, физфак МГУ

# План

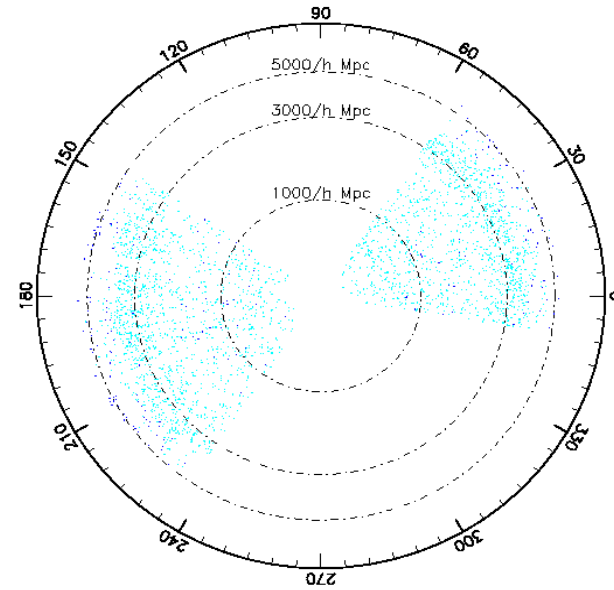
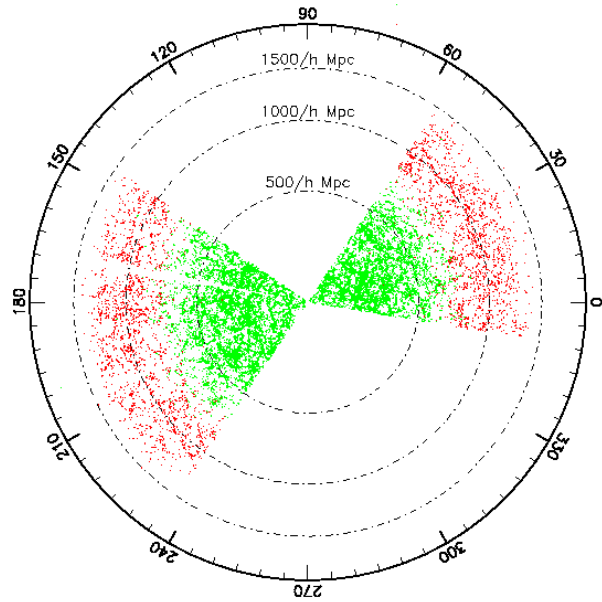
- “Начало Вселенной”: инфляция?
- Нынешняя эпоха: темная энергия?
- Темная материя
- Асимметрия между веществом и антивеществом

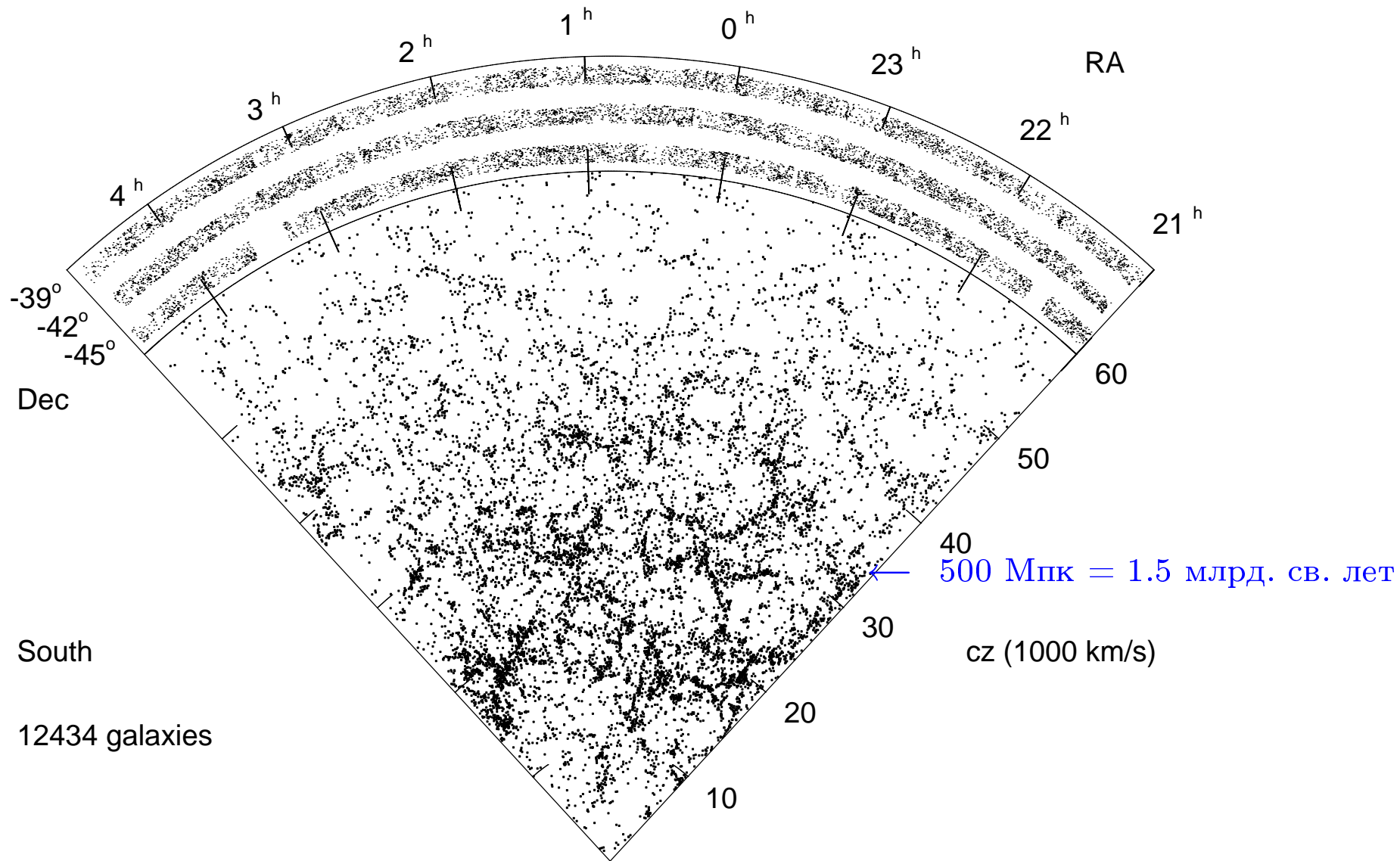
## Однородность/неоднородность Вселенной

- Вселенная сегодня: однородна на больших масштабах, сильно неоднородна на малых
  - Глубокие обзоры галактик  $\Rightarrow$   
распределение галактик во Вселенной  $\Rightarrow$   
**Карта Вселенной:**  
Состояние и эволюция Вселенной сегодня и в прошлом  
**SDDS:** положение во Вселенной более 1 млн. галактик,  
расстояния до 10 млрд. световых лет

Рис.

# Карта Вселенной





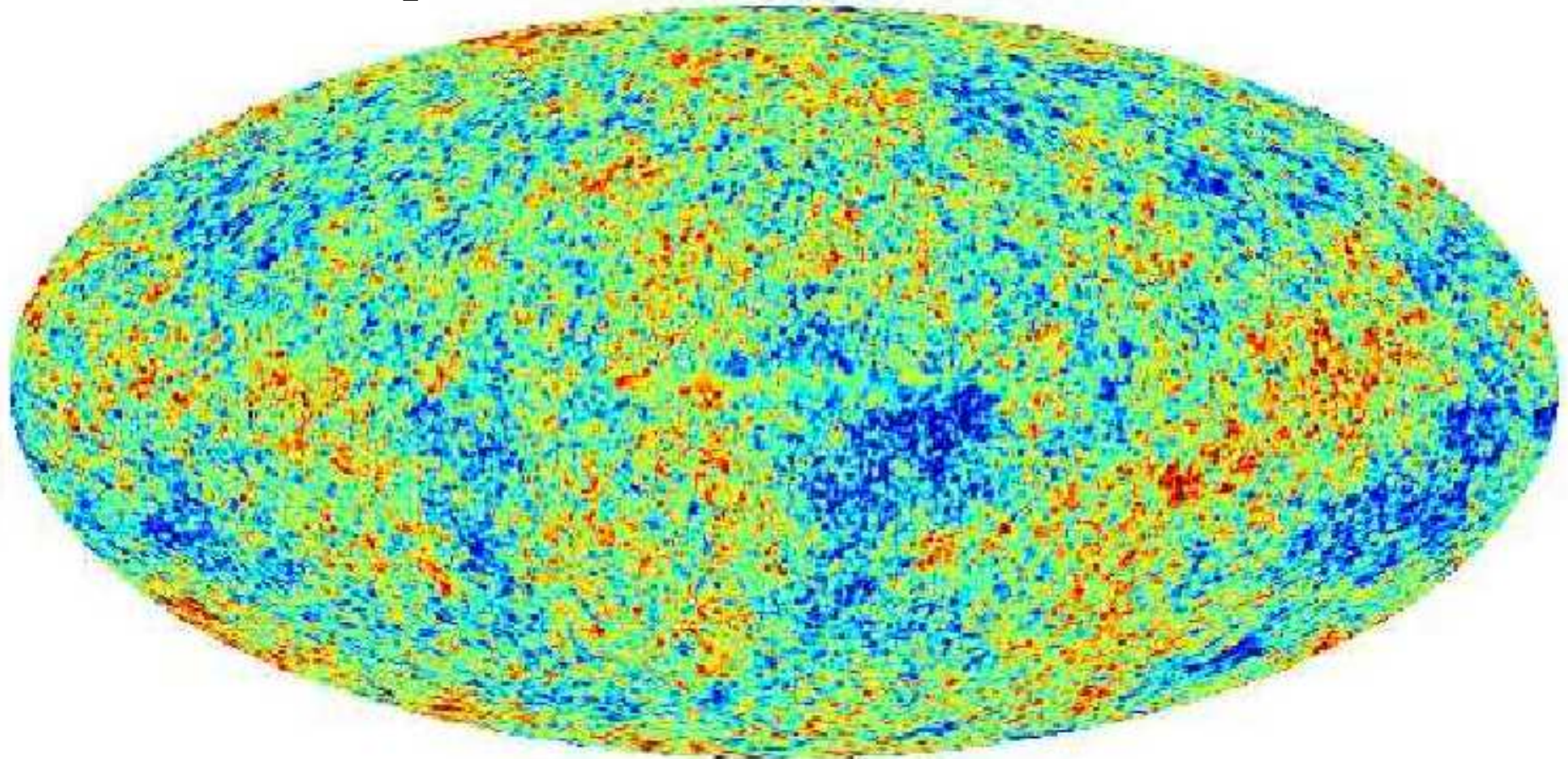
# Прошлое:

Вселенная расширялась в течение всей своей истории  $\Rightarrow$   
В прошлом вещество во Вселенной было гораздо более плотным  
и горячим

- Наивное продолжение эволюции назад во времени  $\Rightarrow$  момент Большого Взрыва: “начало“, бесконечная плотность вещества, бесконечная скорость расширения.
- Потом Вселенная расширялась, остывала; плотность вещества уменьшалась
- При  $T > 3000$  К вещество находилось в фазе плазмы, при  $T = 3000$  К произошел переход плазмы в газ (водород)
- $T > 3000$  К: тепловые фотоны перестали взаимодействовать с веществом  $\Rightarrow$  летают по Вселенной, краснея из-за расширения пространства  $\Rightarrow$  наблюдаемое реликтовое излучение,  $T_0 = 2.725$  К

- Измерения распределения температуры реликтового излучения на небесной сфере  $\Rightarrow$  фотоснимок Вселенной в возрасте 300 тыс. лет (сегодня — 14 млрд. лет), при температуре  $T = 3000$  К.

$$T = 2.725^{\circ}\text{K}, \quad \frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$$



WMAP



- При  $T = 3000$  К,  $t = 300$  тыс. лет Вселенная была почти однородной, относительные неоднородности плотности были на уровне  $10^{-5}$  на всех доступных наблюдениям масштабах длин

30 миллиардов световых лет — 1 миллион световых лет

10 Гигапарсек, масштаб видимой части Вселенной

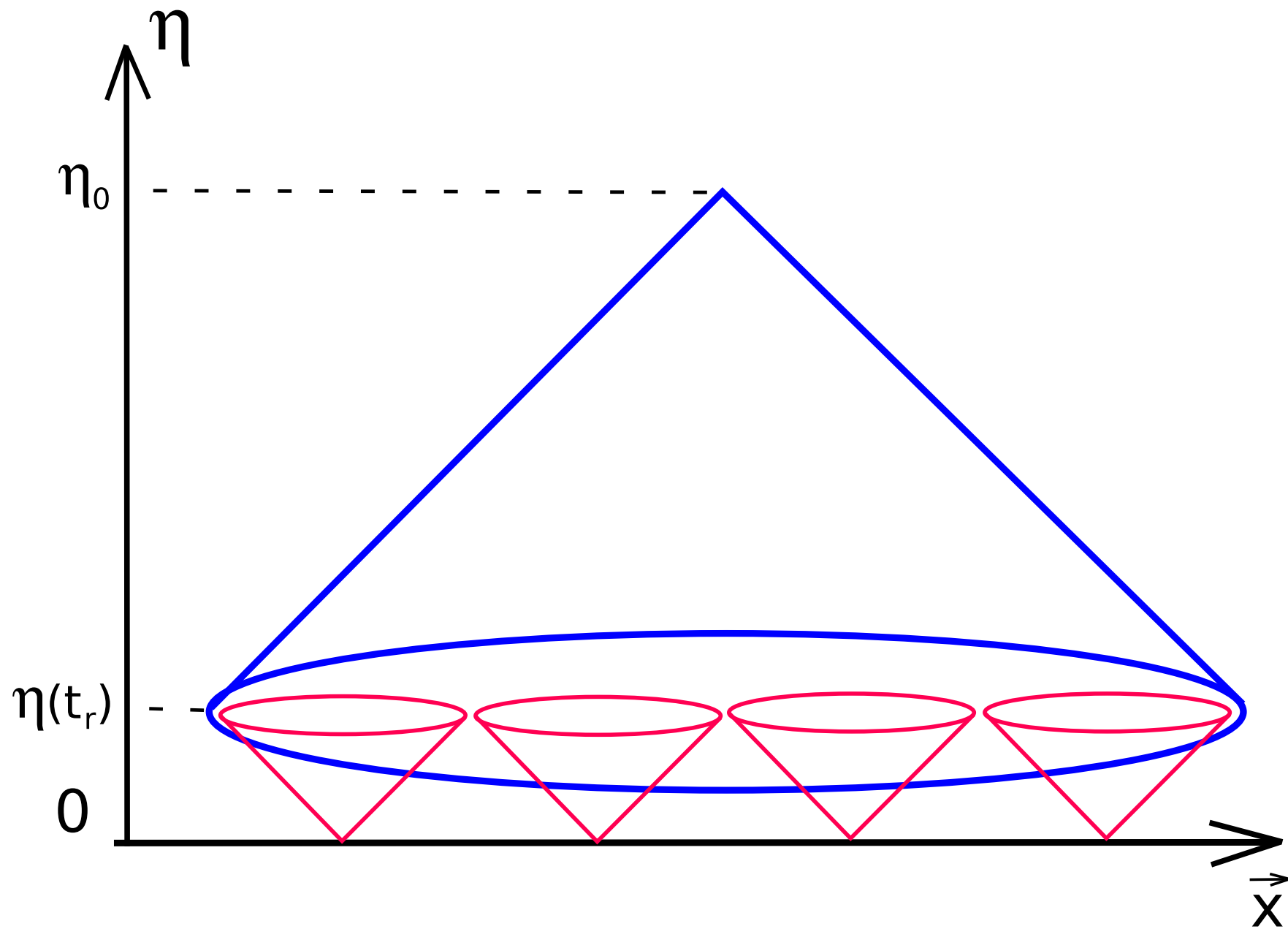
—  
300 килопарсек, масштаб области, из которой вещество собралось в небольшую галактику

# Ну и что?

- Через  $3 \cdot 10^5$  лет после Большого Взрыва размер причинно связанной области был  $6 \cdot 10^5$  св. лет
- Сегодня это  $6 \cdot 10^8$  св. лет (Вселенная растянулась в 1000 раз)
- А видимый сегодня размер —  $3 \cdot 10^{10}$  св. лет, в 30 раз больше!
- Тем не менее, все  $50^3$  причинно несвязанные области одинаковые!!!

ЧТО-ТО НЕ ТО!

ПРОБЛЕМА ОДНОРОДНОСТИ/ГОРИЗОНТА



# Проблемы начальных условий

“Естественные начальные условия”: в момент начала классической стадии эволюции Вселенной

- Неоднородности плотности большие на всех пространственных масштабах, разные области Вселенной ничего не знают друг о друге
- Кривизна 3-мерного пространства порядка кривизны 4-мерного пространства-времени
- энтропия (безразмерное число) порядка единицы

Эволюция с такими начальными данными привела бы к картине, совершенно не похожей на реальность

- Вселенная осталась бы сильно неоднородной (неоднородности плотности растут со временем) — в реальности неоднородности на уровне  $10^{-5}$
- Пространственная кривизна была бы на много порядков больше наблюдательного ограничения
- Энтропия в видимой части реальной Вселенной порядка

$$S \sim T^3 R_U^3 \sim \left( \frac{R_U}{\lambda_{CMB}} \right)^3 \sim 10^{88}$$

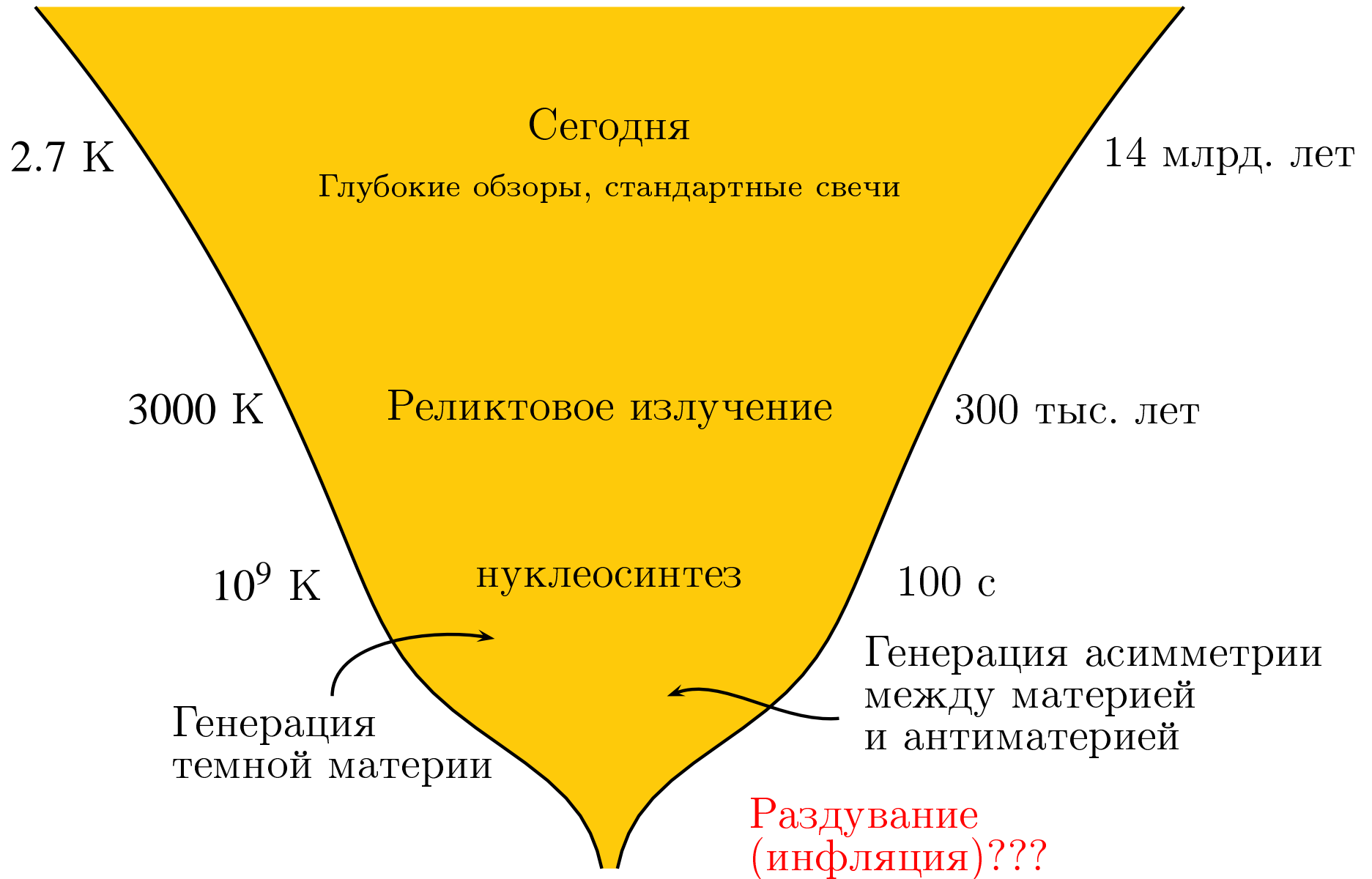
# Популярная гипотеза: инфляция

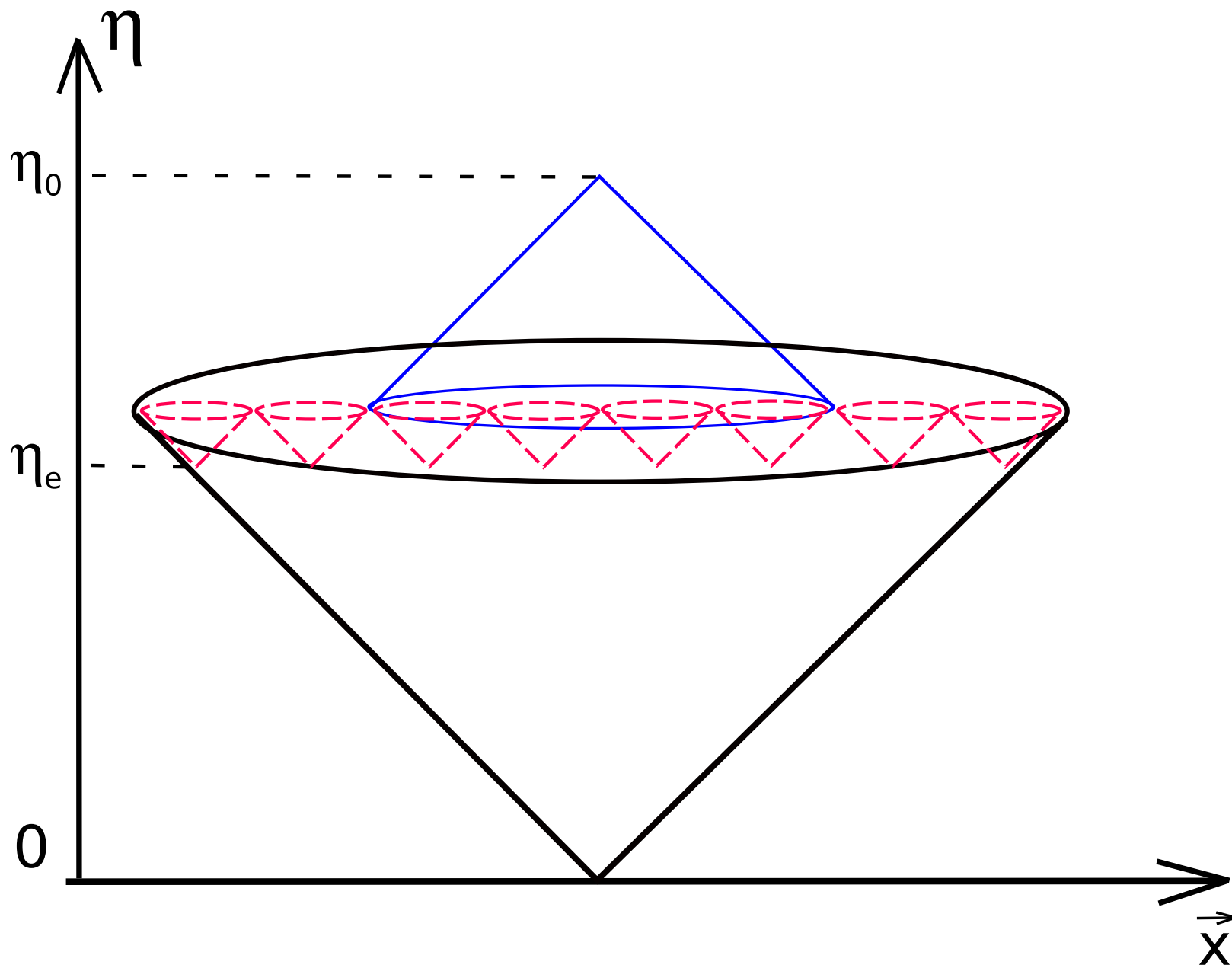
Раздувание  $\equiv$  инфляция =  
расширение с гигантским ускорением,  
с микро- до макро-размеров за малые доли секунды.

Оно происходит за счёт энергии нового поля — “инфлатона”

- Неоднородности разглаживаются
- Пространство растягивается, пространственная кривизна уменьшается
- В конце инфляции энергия инфлатона переходит в тепло, генерируется энтропия
- Характерные времена:  $10^{-37}$  с

# Этапы эволюции Вселенной







# Начальные неоднородности плотности

Что про них сегодня известно?

- Возмущения плотности — гауссово случайное поле.

Сильное указание на источник: усиленные **вакуумные флуктуации** какого-то квантового поля.

Пусть  $\hat{q}$  — оператор координаты гармонического осциллятора,  $\hat{A} = \text{const} \cdot \hat{q}$ .

Если осциллятор в основном состоянии, то  $\hat{A}$  — гауссова случайная величина.

$$\langle A^n \rangle = \int dA e^{-\text{const} \cdot A^2} A^n$$

Аналогично для невзаимодействующего квантового поля

- Возмущения плотности — гауссово случайное поле.
- Спектр начальных возмущений плотности близок к плоскому, но, возможно, не точно плоский,

$$\left\langle \left( \frac{\delta\rho}{\rho} \right)^2 \right\rangle = \left( \frac{k}{k_0} \right)^{n_s-1}, \quad n_s \approx 1$$

Красный спектр :  $n_s < 1$ .

Синий спектр :  $n_s > 1$ .

$n_s = 1$ : спектр Гаррисона–Зельдовича

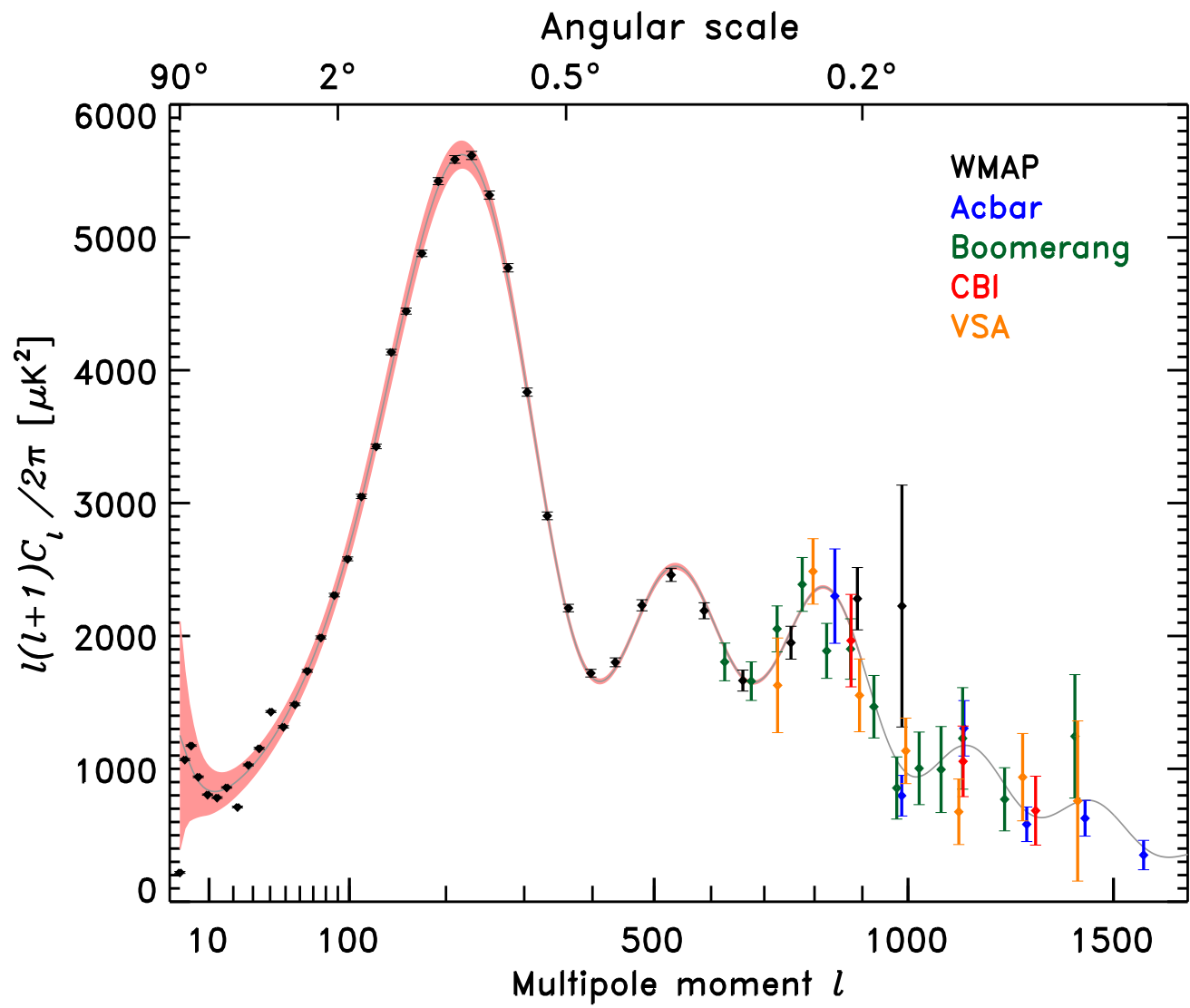
- Генерация возмущений плотности происходила на очень ранней стадии эволюции  $\iff$  фаза фиксирована

Разложение “Фурье” флуктуаций температуры на небесной сфере:

$$\frac{\delta T}{T} = \sum_{l,m} C_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

$C_{lm}$  измеряются;

большие  $l \Leftrightarrow$  малые угловые масштабы



# Физика

Звуковые волны в плазме

$$\frac{\delta\rho}{\rho}(\mathbf{x}, t) = e^{i\mathbf{k}\mathbf{x}} \cdot \cos\left(\int_0^t \omega_k(t) dt + \alpha_k\right)$$

Наблюдения:

$$\alpha_k = 0$$

Примеси **sin** нет  $\implies$  пики в угловом спектре, соответствующие длинам волн, для которых **cos** максимален

Поздняя генерация возмущений  $\implies$  фаза  $\alpha_k$  — случайная функция  $k$ , пиков нет

НВ: пространственно плоская Вселенная

# Инфляционная теория

Дает механизм генерации начальных возмущений плотности: усиление вакуумных флуктуаций квантовых полей.

- **Предсказания:**

- Возмущения плотности — гауссово случайное поле.
- Спектр начальных возмущений плотности близок к плоскому, но не точно плоский.  
Возможен как красный, так и синий спектр, в зависимости от конкретной модели.

# Ещё предсказание

- Генерация реликтовых гравитационных волн с большими длинами и заметной амплитудой

$$\sqrt{\langle h^2 \rangle} \sim 10^{-6},$$

для волн с длинами  $\lambda \gtrsim 500$  Мпк.

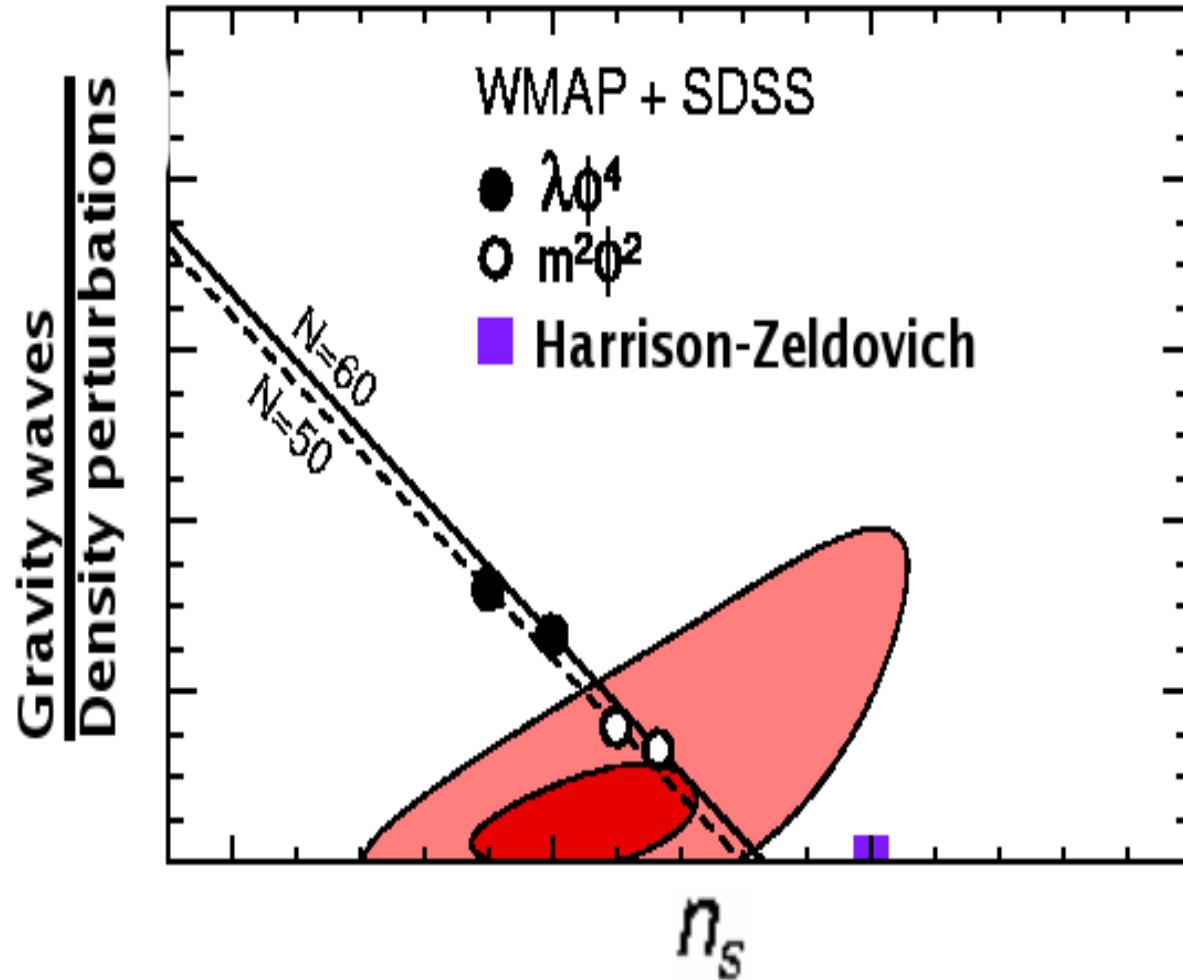
- Гравитационные волны с меньшими длинами имеют меньшие амплитуды.

Эти предсказания доступны проверке:

- Анизотропия и поляризация реликтового излучения
- Глубокие обзоры, карта Вселенной
- Будущие космические детекторы гравитационных волн

Имеющиеся данные согласуются с предсказаниями инфляционной теории

# Первое прямое указание на инфляцию:



Либо гравитационные волны, либо наклон  $n_s < 1$ ,  
либо и то, и другое.

Новые данные: Планк, полетел в 2009 году.



# Альтернативы инфляции?

Начальная стадия изучения вопроса.

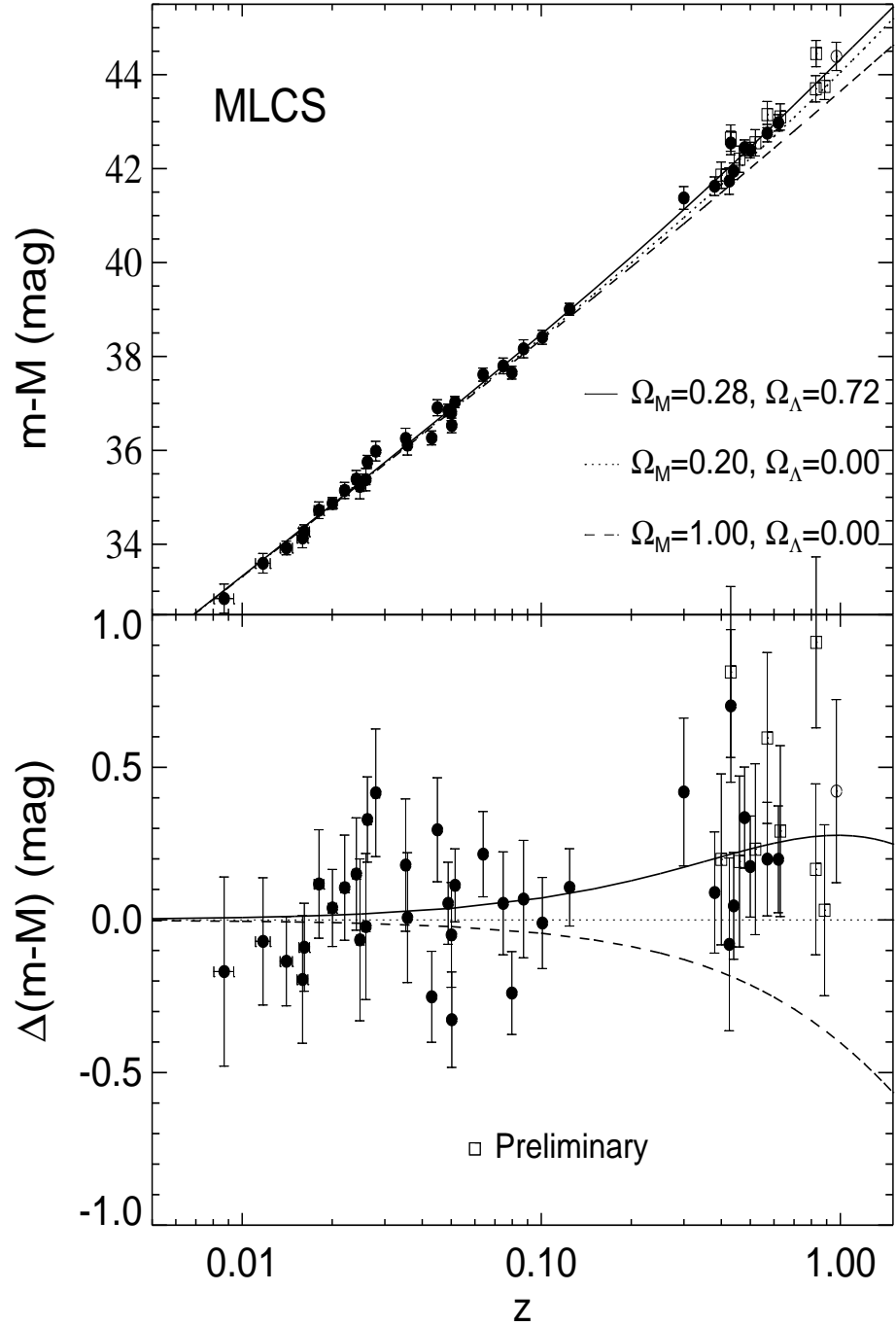
Частные результаты:

- Можно иметь смену сжатия расширением (под теоретическим контролем)
- Можно генерировать правильные возмущения плотности
- Гравитационные волны с плоским спектром получить невозможно
- Все это пока некрасиво

**НУЖНО НАПРЯЧЬ ФАНТАЗИЮ**

# ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

- Однородно “разлита” во Вселенной, не собирается в сгустки (галактики, скопления)
- Вселенная сегодня расширяется **с ускорением**
- Яркое свидетельство: наблюдения сверхновых типа 1a (стандартных свеч)



$$\Omega_M = \frac{\text{плотность темной материи}}{\text{полная плотность энергии}} ;$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\text{плотность темной энергии}}{\text{полная плотность энергии}}$$

Темп расширения **растет**



АНТИГРАВИТАЦИЯ

- Нет противоречия с общей теорией относительности, если субстанция имеет **отрицательное давление**.

# Природа темной энергии — возможно главная загадка физики XXI века

- Энергия вакуума  $\equiv$  космологическая постоянная?
- Новое сверхслабое поле?
- Новая гравитация на сверхбольших расстояниях?

Плотность темной энергии  $\epsilon_{DE} = 4 \frac{\Gamma \text{эВ}}{\text{м}^3} \implies$

масштаб энергий  $\Lambda_{DE} \sim 10^{-3} \text{ эВ}$

$\sim 10^{-12} \Lambda_{QCD} \sim 10^{-14} M_W \sim 10^{-31} M_{Pl}$

**СКОЛЬКО-НИБУДЬ ПРАВДОПОДОБНОГО ОБЪЯСНЕНИЯ  
ЭТОМУ МАСШТАБУ НЕТ**

40 лет теоретических поисков без результата

# Уравнение состояния тёмной энергии

$p$  — давление,  $\varepsilon$  — плотность энергии,

$$p = w\varepsilon$$

Сохранение энергии:

$$dE \equiv d(\varepsilon V) \equiv d\varepsilon \cdot V + \varepsilon dV = -pdV$$

Поэтому

$$\frac{d\varepsilon}{dV} = -\frac{p + \varepsilon}{V}$$

или

$$\frac{d\varepsilon}{dV} = -(1 + w)\frac{\varepsilon}{V}$$

- $w = -1 \Rightarrow$  плотность тёмной энергии  $\varepsilon$  не зависит от времени

ВАКУУМ = космологическая постоянная

- $w > -1 \Rightarrow$  плотность тёмной энергии  $\varepsilon$  уменьшается со временем

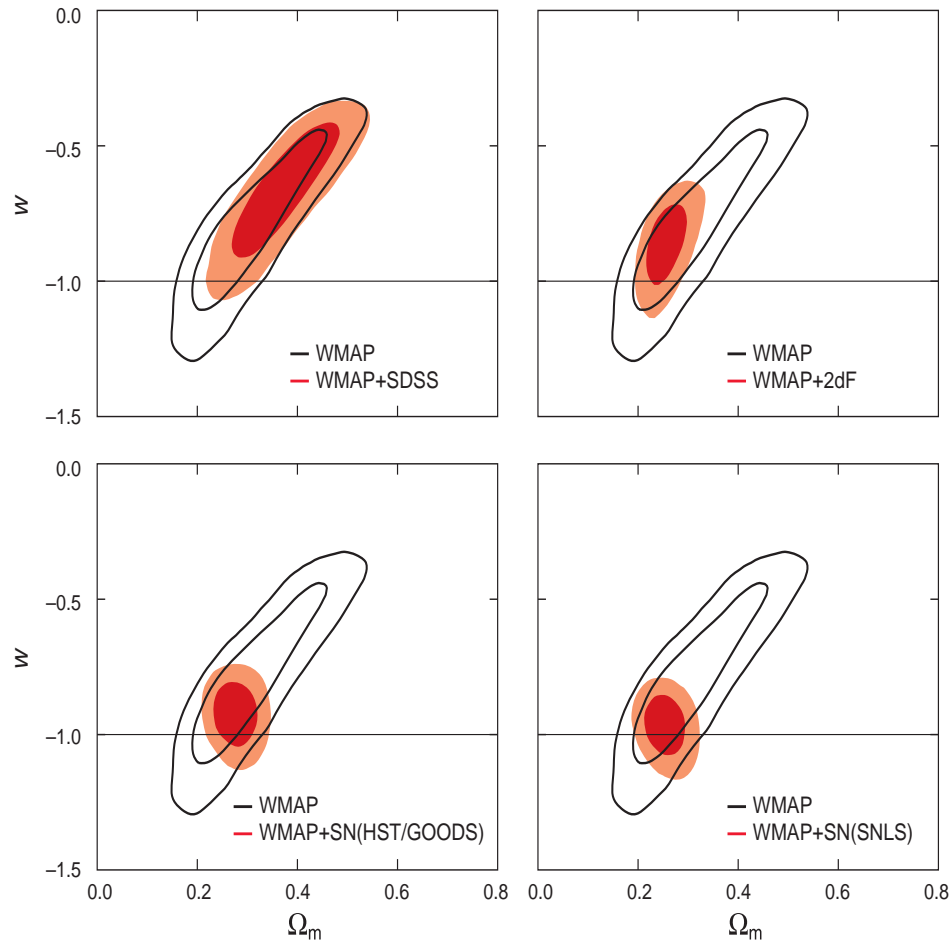
Новое поле, “квинтэссенция”

- $w < -1 \Rightarrow$  плотность тёмной энергии  $\varepsilon$  растёт со временем

Неустойчивая ситуация, “фантом”,  
нарушение Лоренц-инвариантности

Или новая гравитация на космологических расстояниях и временах?

# $p = w\rho$ : наблюдательная ситуация



$w = -1$  соответствует  $\Lambda$ -члену = вакуумной энергии

$$\Omega_m = \frac{\text{плотность массы тёмного и обычного вещества}}{\text{полная плотность энергии}}$$

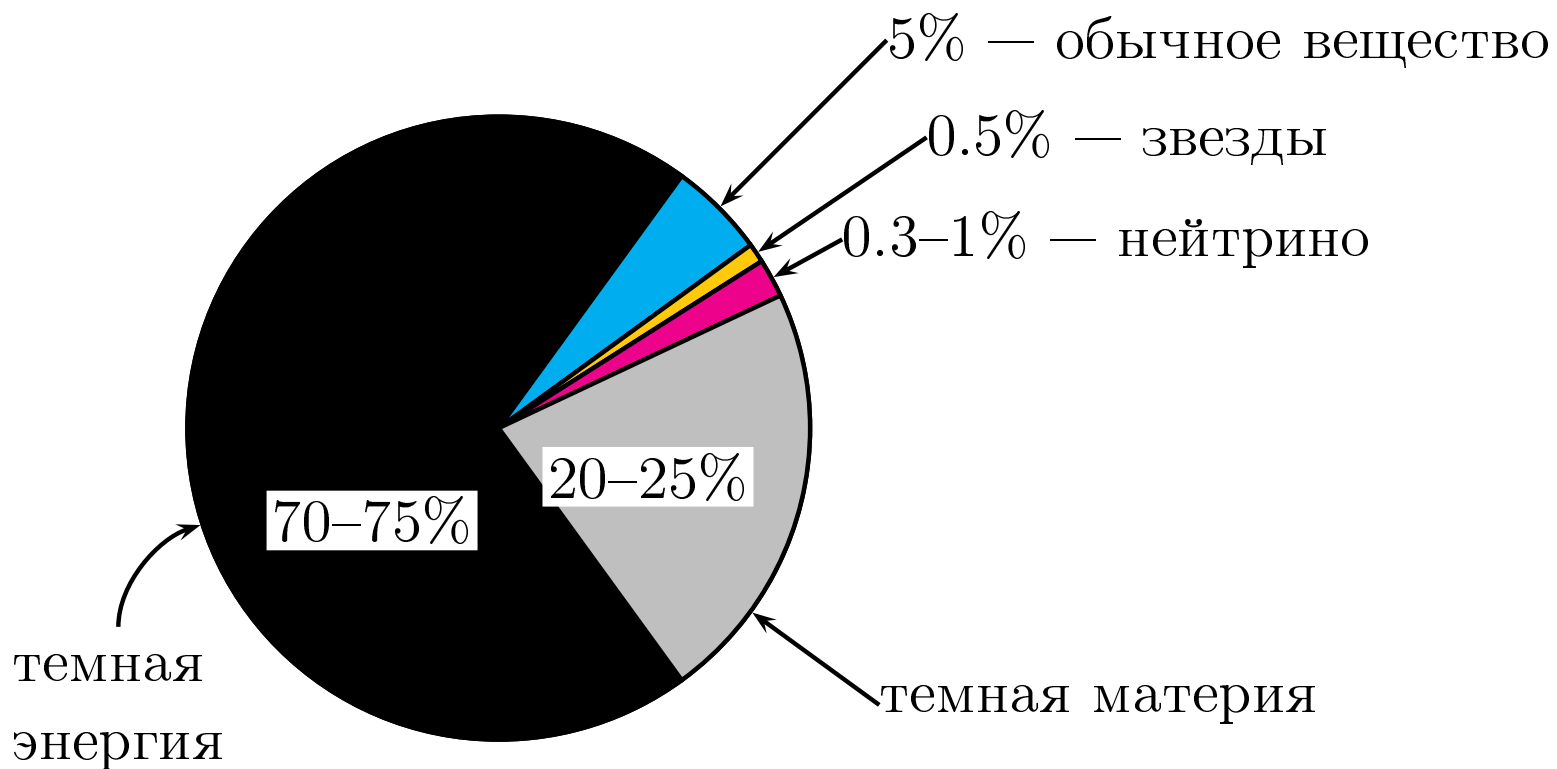


Путь к пониманию:

Теоретико-полевые модели темной энергии или  
модифицированной гравитации  $\implies$  Предсказания для  
наблюдений и эксперимента.

**НУЖНО НАПРЯЧЬ ФАНТАЗИЮ**

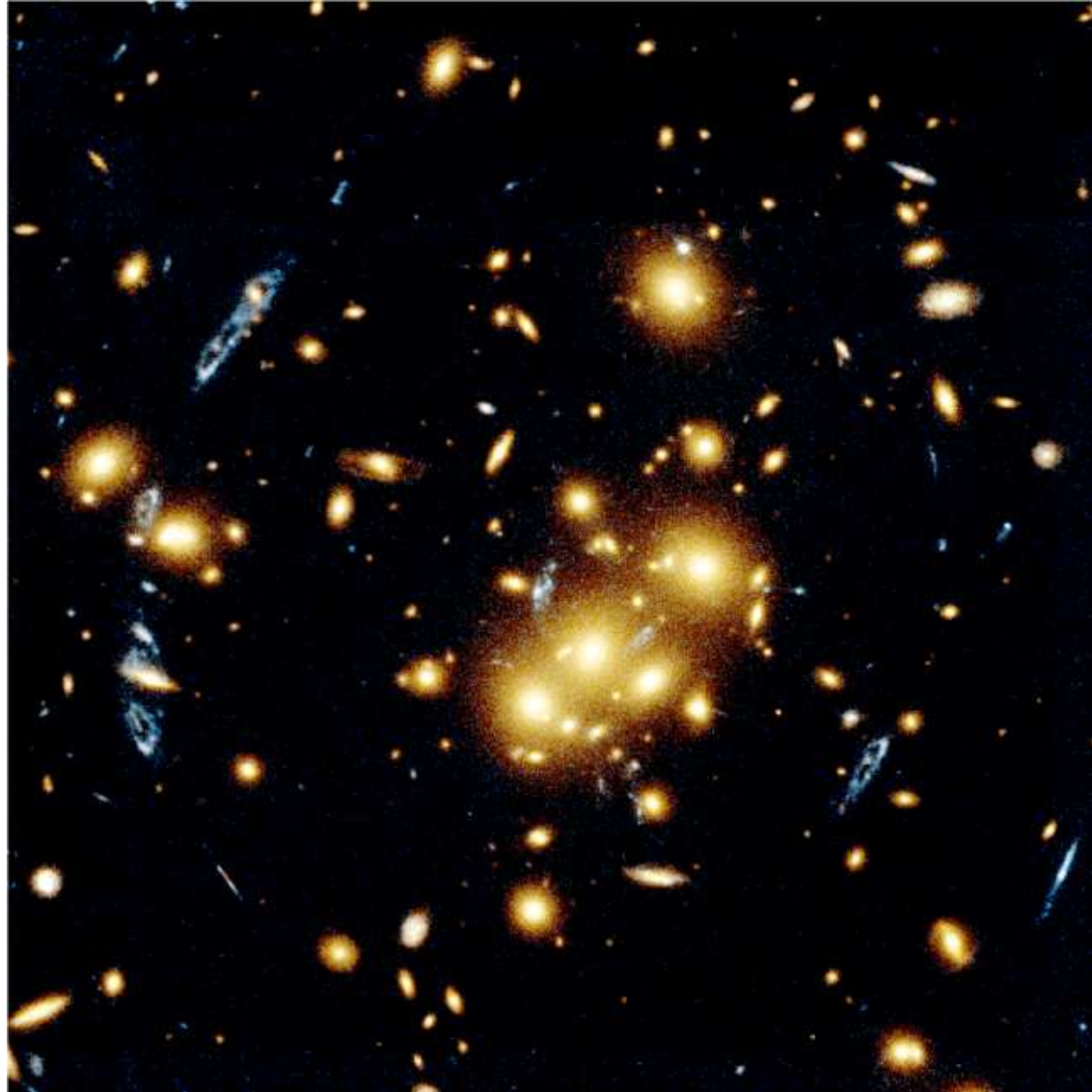
## Баланс энергий в современной Вселенной

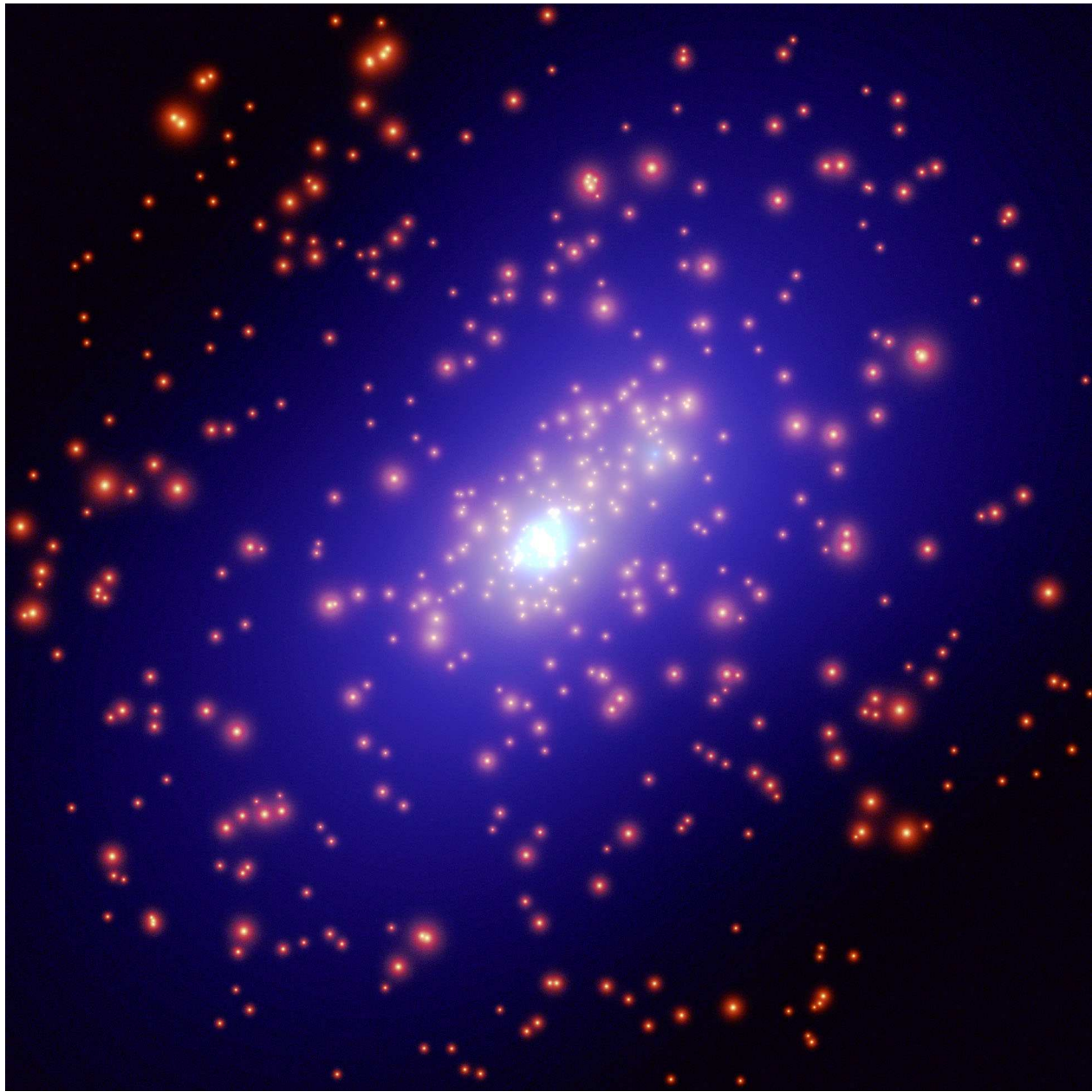


# Темная материя

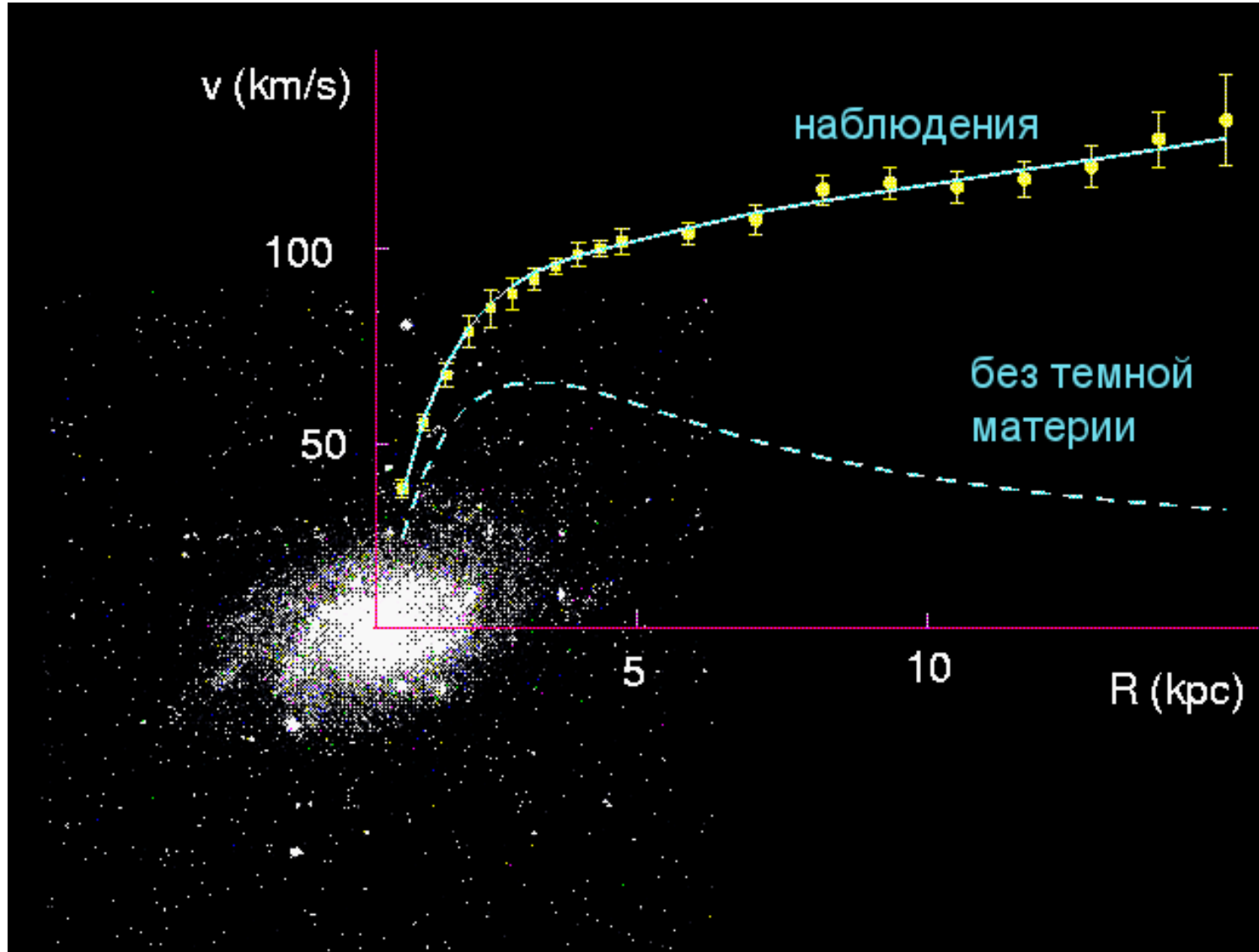
- данные о распределении галактик, реликтовом излучении
- гравитационные силы в скоплениях галактик,  $R \sim 10$  Мпк
- кривые вращения на периферии галактик,  $R \sim 10$  кпк

# Гравитационное линзирование СКОПЛЕНИЙ





# Кривые вращений В ГАЛАКТИКАХ



# Тёмная материя

- Наиболее правдоподобная гипотеза:  
 $X$ -частицы массы  $m_X = 100 \text{ ГэВ} - 1 \text{ ТэВ}$  (в 100–1000 раз тяжелее протона), участвующие в слабых взаимодействиях
  - Большая концентрация пар  $X$ - $\bar{X}$  при  $T > m_X$
  - Аннигиляция пар при  $T < m_X$
  - Аннигиляция происходит не до конца (расширение Вселенной довольно быстрое при  $T \sim 100 \text{ ГэВ}$ )
  - Остаточная плотность получается правильной, если сечение аннигиляции сравнимо со слабыми сечениями (масштаб энергий 100 ГэВ – 1 ТэВ).

Новая физика при доступных энергиях,  $E \sim \text{ТэВ}$

- Суперсимметрия в ТэВной области: легчайший суперпартнер – отличный кандидат на роль  $X$ -частицы

- Другие кандидаты на роль темной материи:  
современная плотность получается правильной  
**СЛУЧАЙНО,**  
в результате подгонки неизвестных параметров.



# Пути поиска частиц темной материи

- LHC  $\Leftrightarrow$  рождение частиц темной материи и их партнеров
- Низкофоновые эксперименты в подземных лабораториях  $\Leftrightarrow$  регистрация частиц темной материи

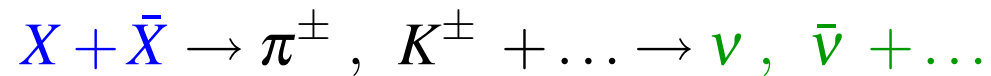
Скорость  $X$ -частиц вблизи Земли  $u \sim 10^{-3}c$   
(характерная скорость вращения в грав. поле Галактики)

Упругие столкновения  $X$ -частиц с ядрами детектора:  
редкие процессы с малой передачей энергии

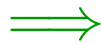
$$\begin{aligned} E_{\text{отдачи}} &\sim M_{\text{ядра}} u^2 \\ &\sim 10 \text{ кэВ} - 1 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

- низкофоновые условия  $\Leftrightarrow$  подземные лаборатории
- сверхчистые изотопы

- Регистрация **продуктов аннигиляции  $X$ -частиц в центре Земли, Солнца**



Нейтрино  
высоких  
энергий



- Подземный сцинтилляционный телескоп Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.
- Байкальский нейтринный телескоп

- Еще одна возможность: регистрация продуктов аннигиляции в космосе.

Поиск  $e^+$ ,  $\bar{p}$  в космических лучах (PAMELA, ATIC), аннигиляционных  $\gamma$ -квантов (FERMI, ...).

Регистрация частиц тёмной материи:

Новые частицы, фундаментальные законы сохранения;  
окно в раннюю Вселенную

при температуре  $k_B T \sim 10 \div 100$  ГэВ, в возрасте  $10^{-8} \div 10^{-10}$  с.

## ЗАГАДКА:

сейчас и в относительно недалеком прошлом  
масса обычного вещества во Вселенной  
 $\approx$  масса темной материи

Вопрос поднят давно, правдоподобного объяснения нет!

## СЛУЧАЙНОСТЬ?

Асимметрия  
между материей и антиматерией во Вселенной –  
еще одна проблема космологии

Вещество есть, антивещества нет.

В чем здесь проблема?

Ранняя Вселенная ( $T > 10^{12}$  К = 100 МэВ):  
рождение и аннигиляция кварк-антикварковых пар  $\Rightarrow$

$$\frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_q + n_{\bar{q}}} \sim 10^{-9}$$

Каким образом такая асимметрия возникла в результате эволюции?

А. Д. Сахаров'67, В. А. Кузьмин'70

Требуется нарушение закона сохранения барионного числа

ПОЧТИ ВСЕ, ЧТО МЫ ЗНАЕМ О ВСЕЛЕННОЙ,  
ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ НЕРЕШЕННУЮ ПРОБЛЕМУ.

Почти все требует выхода за рамки  
Стандартной модели физики частиц

Поле активной теоретической  
и экспериментальной деятельности



























