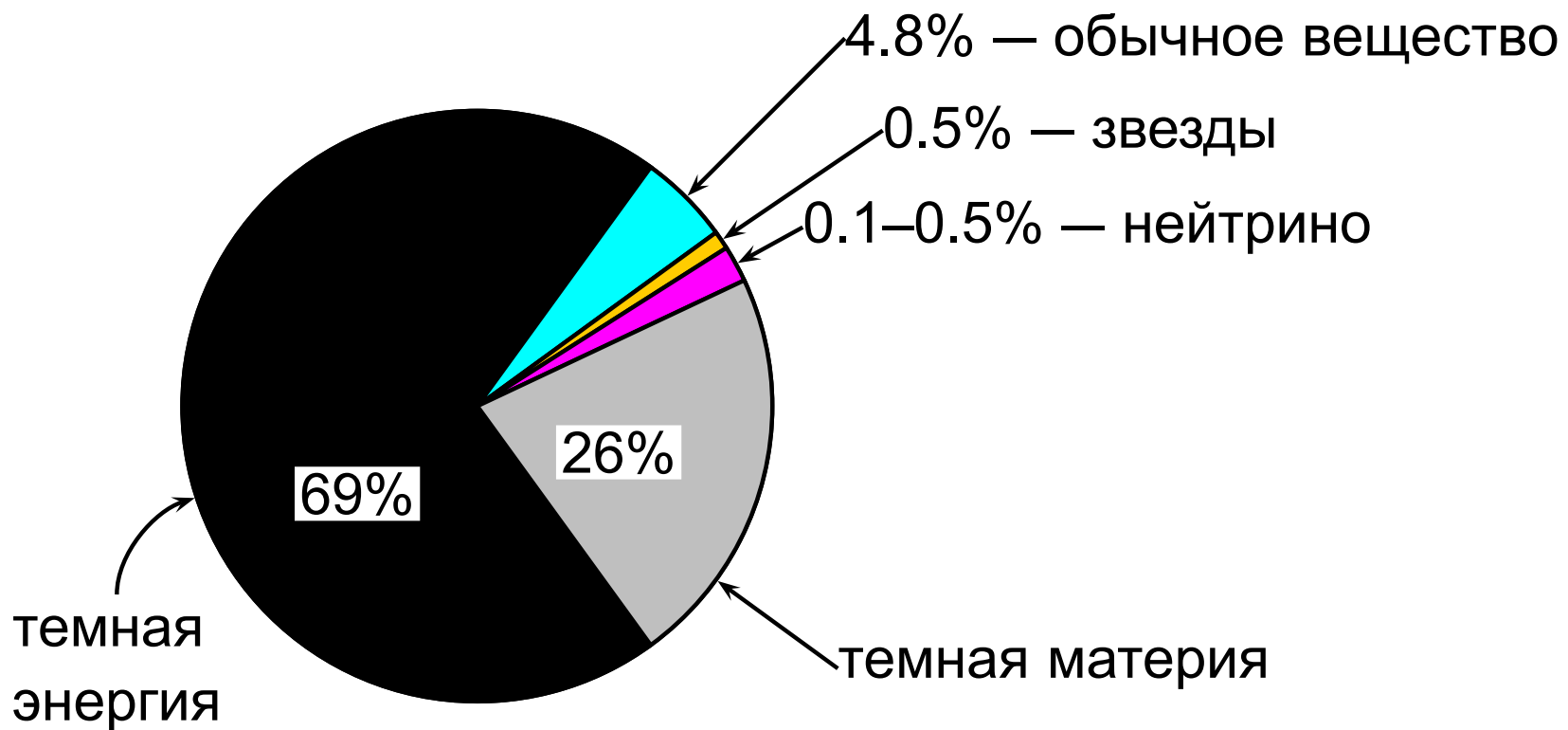


Представления фундаментальной  
физики:  
от взаимодействий  
элементарных частиц  
до структуры и эволюции  
Вселенной

Лекция 8

## Баланс энергий в современной Вселенной



# Результат

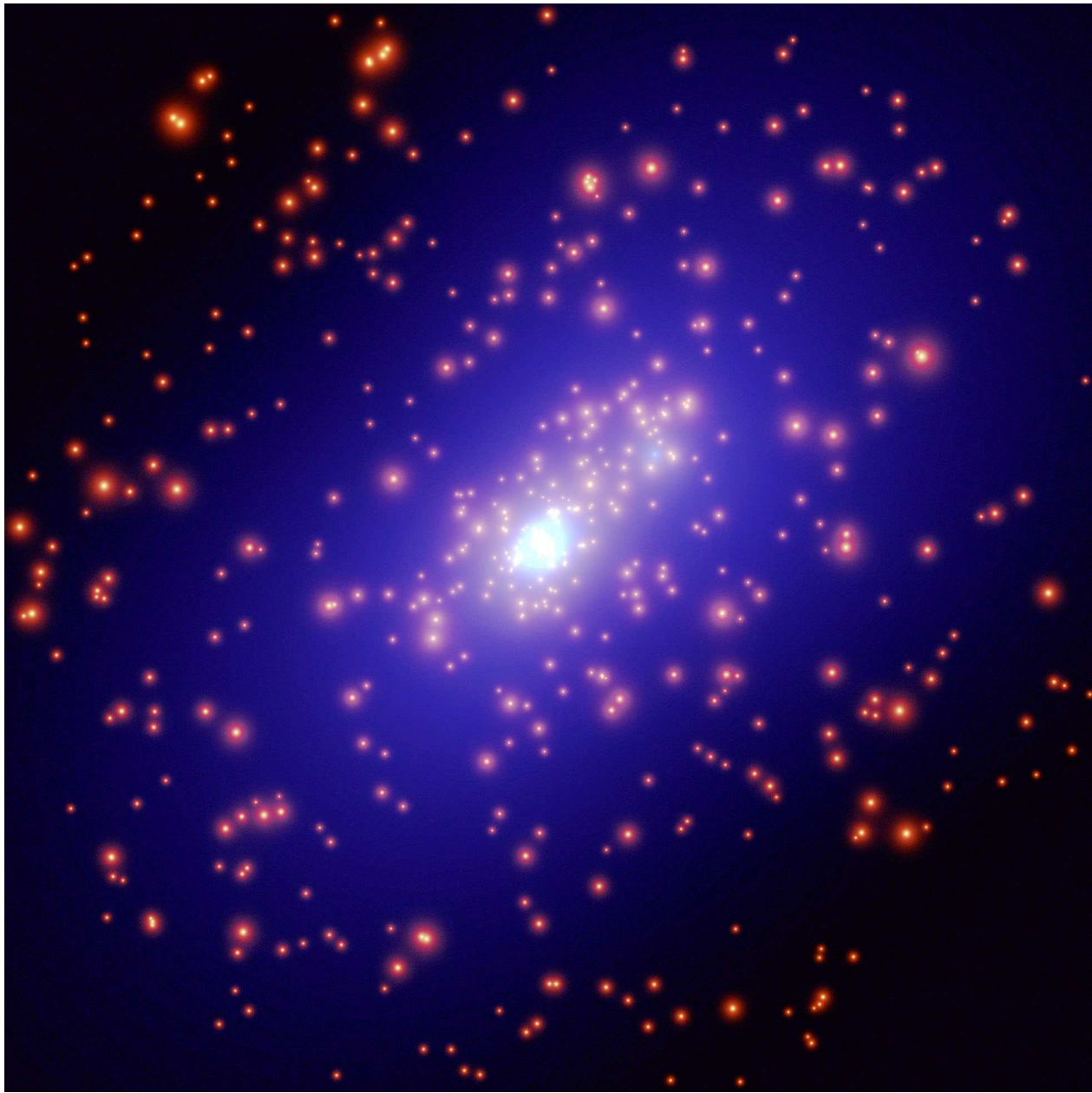
Существующих знаний о фундаментальных частицах и их взаимодействиях недостаточно для описания наблюдаемого мира

# Темная материя

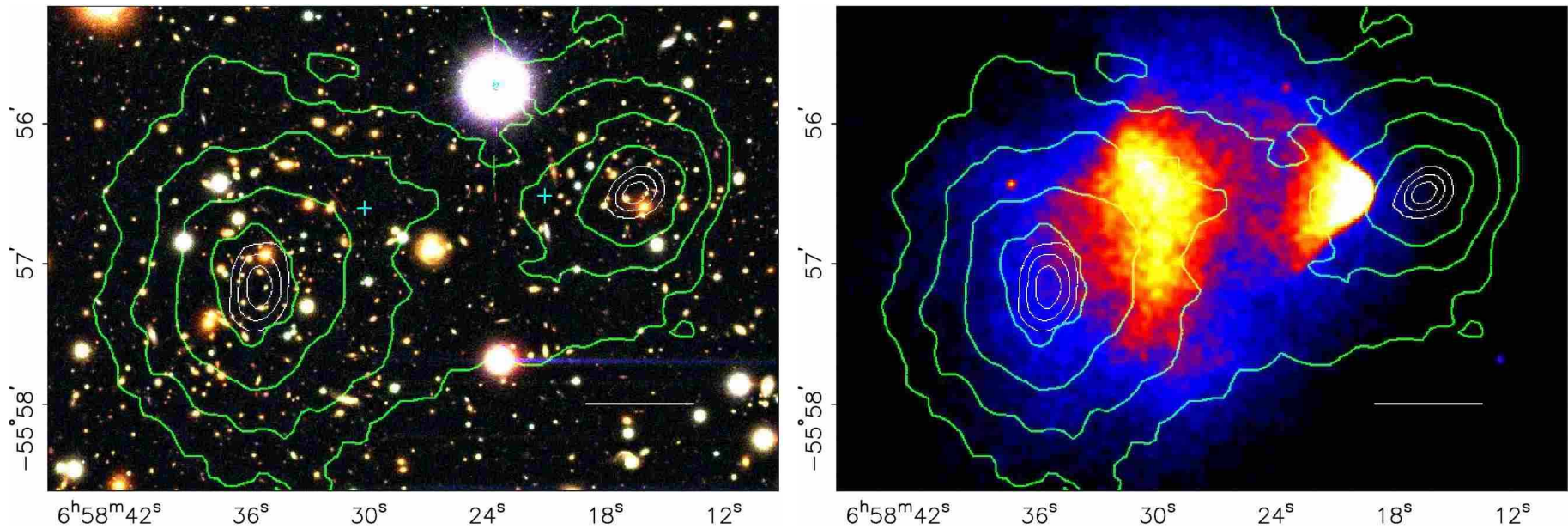
- данные о распределении галактик, реликтовом излучении
- гравитационные силы в скоплениях галактик,  $R \sim 3$  Мпк
- кривые вращения на периферии галактик,  $R \sim 10$  кпк

# Гравитационное линзирование СКОПЛЕНИЙ





# Скопления после столкновения



Контурь – распределение **массы**.

Цвет – распределение **обычного вещества**, горячего газа



# Кривые вращения

2-й закон Ньютона + закон всемирного тяготения для движения по окружности вокруг распределения массы  $M(r)$ :

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{M(r)m}{r^2}$$

⇒

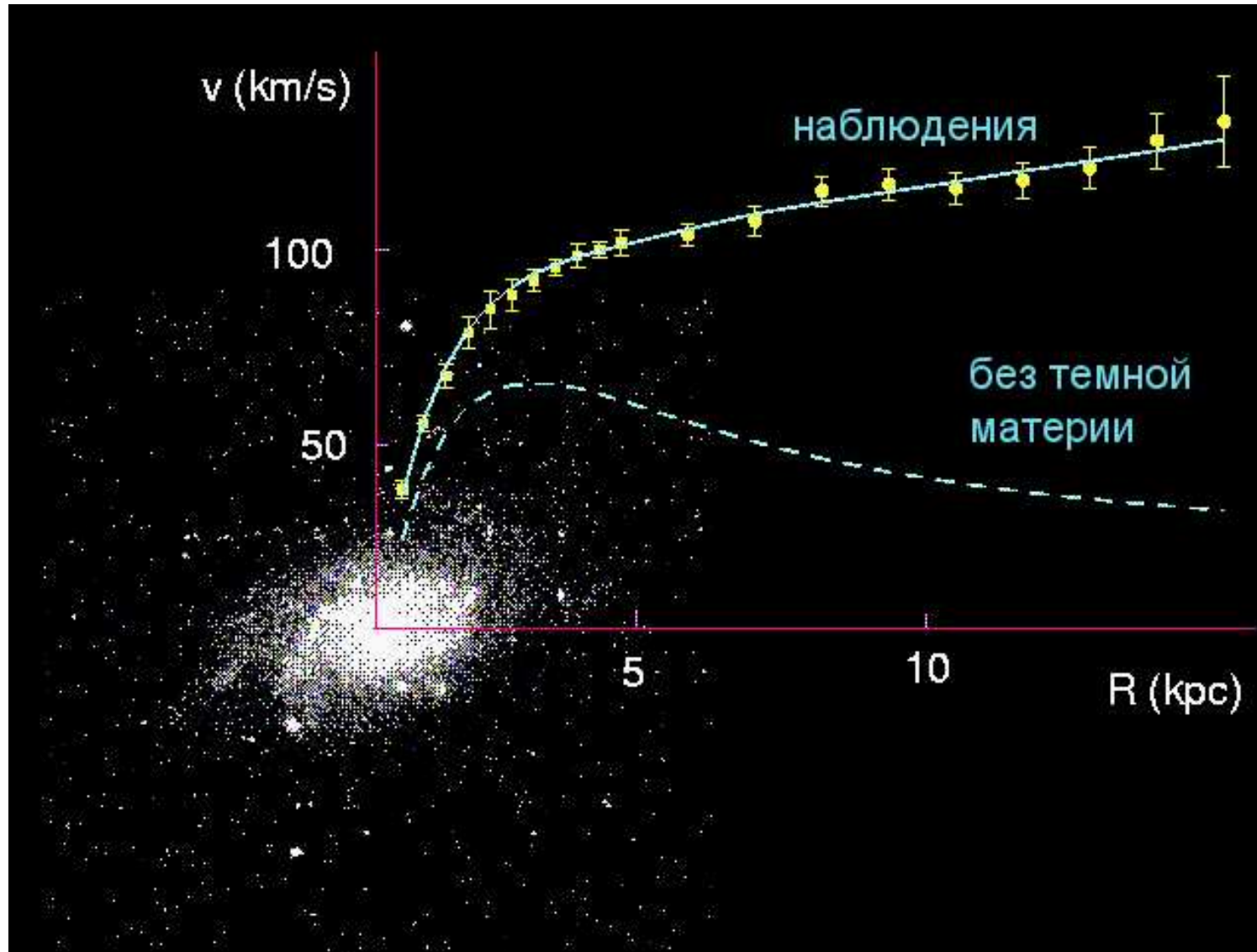
$$v(r) = \sqrt{\frac{M(r)}{r}}$$

Измеряем скорость (по эффекту Допплера) ⇒ измеряем  $M(r)$ .

Цвикки, скопления галактик, 1930-е



# Кривые вращений В ГАЛАКТИКАХ



- Темная материя испытывает такие же гравитационные силы, как обычное вещество
- Темная материя жизненно важна для нас  
Неоднородности плотности темной материи создают гравитационные ямы, в которые “сваливается” обычное вещество и образует галактики.  
Если бы не темная материя,  
не было бы ни галактик, ни звезд
- Темная материя — реликт ранней эпохи, когда вещество в ранней Вселенной было очень горячим и очень плотным, а Вселенная расширялась быстро

- Частицы темной материи:

- массивные

- стабильные

(время жизни больше возраста Вселенной  $\approx 14$  млрд. лет)

- не несут электрического заряда

(иначе они были бы уже обнаружены)

В Стандартной модели таких частиц нет

(нейтрино не годятся: слишком легкие)

## Стандартная модель неполна

# Отступление

- $E = mc^2$ ;  $E = kT$ : новые тяжёлые частицы могут рождаться в столкновениях частиц при высоких энергиях или температурах
- Соотношение неопределенностей  $\Delta p \cdot \Delta x \simeq \hbar$   
 $p = E/c$  при высоких энергиях.

Высокие энергии (импульсы)  $\longleftrightarrow$  малые расстояния:

$$\Delta x \sim \frac{\hbar}{E}$$

Энергии **100 ГэВ** соответствует длина  $10^{-16}$  см

**NB:** размер протона =  $10^{-13}$  см

- Взаимодействия на малых расстояниях  $r$  происходят редко, вероятность  $\propto r^2$

Энергия  $E \iff$  Масса  $M \sim E \iff$  Расстояние  $r \sim 1/E \iff$   
Вероятность взаимодействия  $\propto 1/E^2$

Для чего нужны ускорители-коллайдеры?

Чтобы открыть новые тяжелые частицы и новые взаимодействия на сверхмалых расстояниях, нужны пучки частиц высокой энергии и высокой интенсивности (светимости)

# Тёмная материя

- Наиболее правдоподобная гипотеза:  
 $X$ -частицы массы  $m_X = 10 \text{ ГэВ} - 1 \text{ ТэВ}$  (в 10–1000 раз тяжелее протона),
  - Большая концентрация пар  $X\text{-}\bar{X}$  при  $T > m_X$   
NB: измеряем массу и температуру в единицах энергии:  
 $E = mc^2$ ,  $E = kT$ .
  - Аннигиляция пар при  $T < m_X$
  - Аннигиляция происходит не до конца (расширение Вселенной довольно быстрое при  $T \gtrsim 1 \text{ ГэВ}$ )
  - Остаточная плотность получается правильной, если вероятность аннигиляции соответствует масштабу энергий 100 ГэВ – 1 ТэВ.

WIMPs: weakly interacting massive particles

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

# Пути поиска частиц темной материи

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

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

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

$$E_{\text{отдачи}} \sim M_{\text{ядра}} \cdot v^2 \sim 100 \text{ ГэВ} \cdot (10^{-3})^2 = 100 \text{ кэВ}$$
$$\Rightarrow 10 \text{ кэВ} - 1 \text{ МэВ}$$

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



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

$$X + \bar{X} \rightarrow \pi^{\pm}, K^{\pm} + \dots \rightarrow \nu, \bar{\nu} + \dots$$

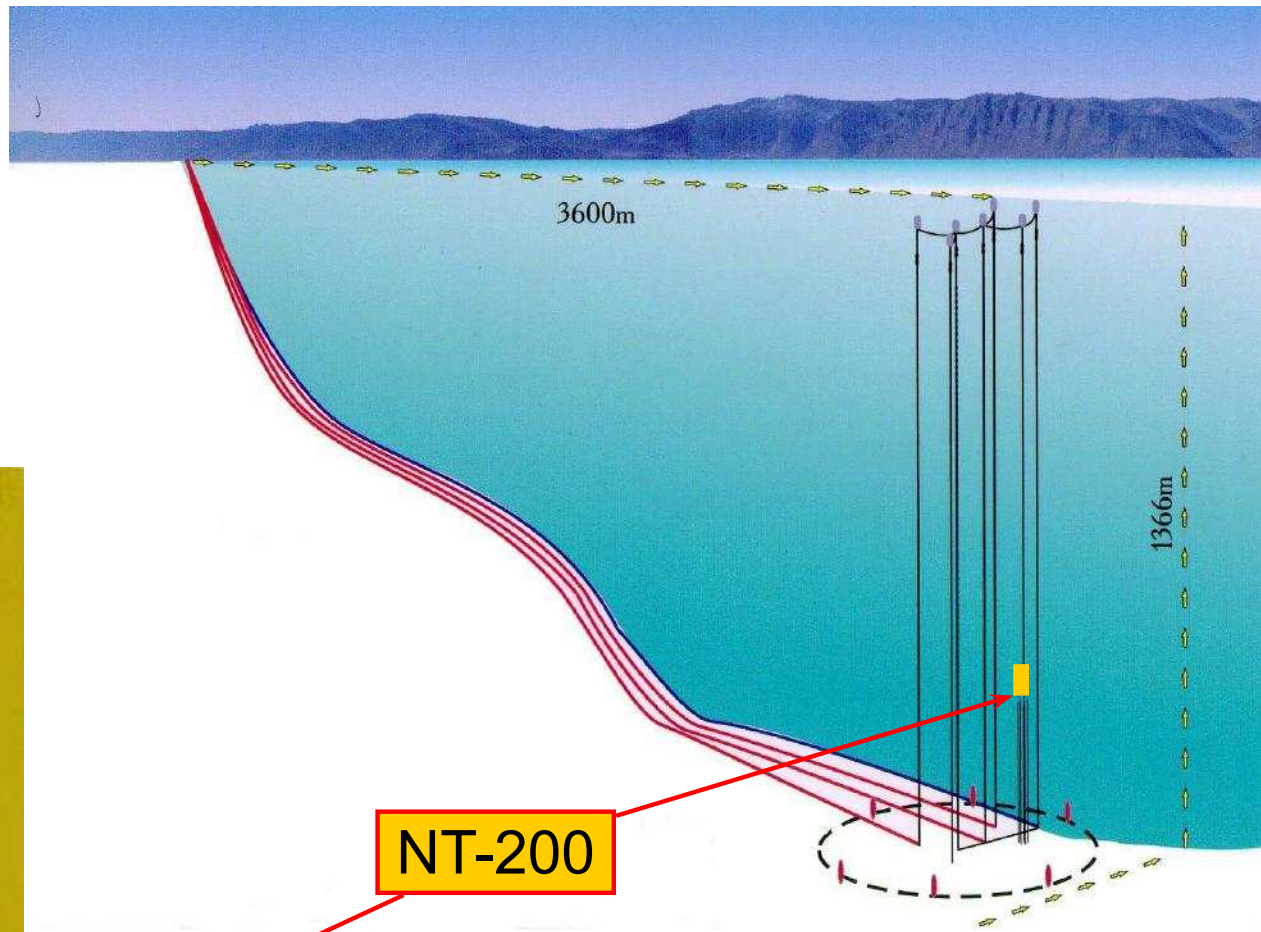
Нейтрино  
высоких  
энергий



- Подземный сцинтилляционный телескоп Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.
- Байкальский нейтринный телескоп
- IceCube: детектор объема 1 куб. км. в Антарктиде.

- Еще одна возможность: регистрация продуктов аннигиляции в космосе.

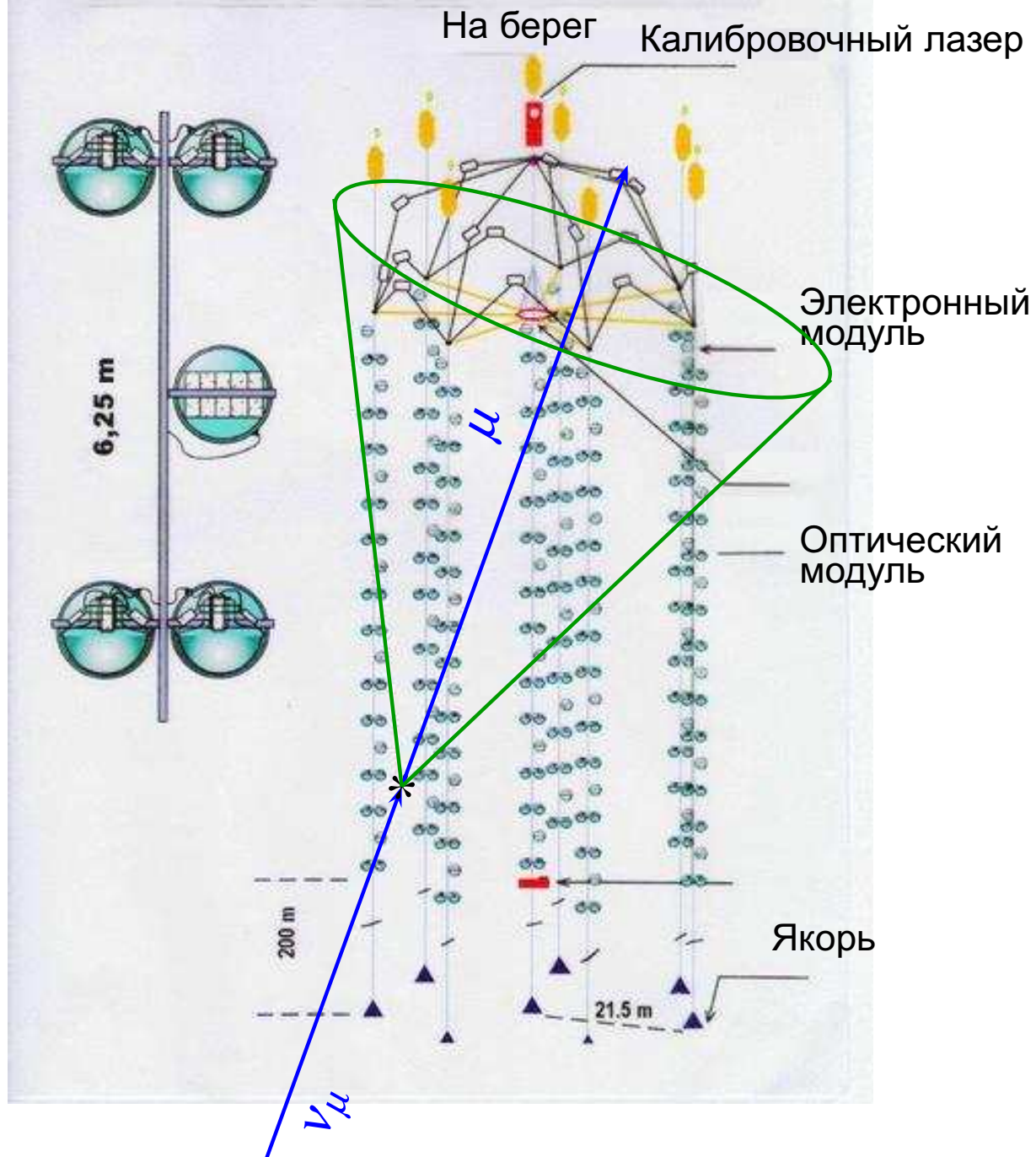
Поиск  $e^+$ ,  $\bar{p}$  в космических лучах (PAMELA, AMS-02), аннигиляционных  $\gamma$ -квантов (EGRET, FERMI ...).



NT-200

# Нейтринный телескоп NT-200

Дата: 06



Регистрация частиц тёмной материи:

Новые частицы, фундаментальные законы сохранения;

окно в раннюю Вселенную

при температуре  $kT \sim 1 \div 100$  ГэВ, в возрасте  $10^{-6} \div 10^{-10}$  с.

Сравните: сегодня мы имеем данные о Вселенной эпохи  
нуклеосинтеза; начало

$$T = 10^{10} \text{ К} \implies kT = 1 \text{ МэВ, возраст } t = 1 \text{ с.}$$

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

Барионное число

$$= \frac{1}{3} [(\text{количество кварков}) - (\text{количество антикварков})]$$

Сохраняется в обычных условиях.

Протон состоит из трех кварков  $\implies$  барионное число = 1.

Легчайшая частица, несущая барионное число.

Протон стабилен, не распадается

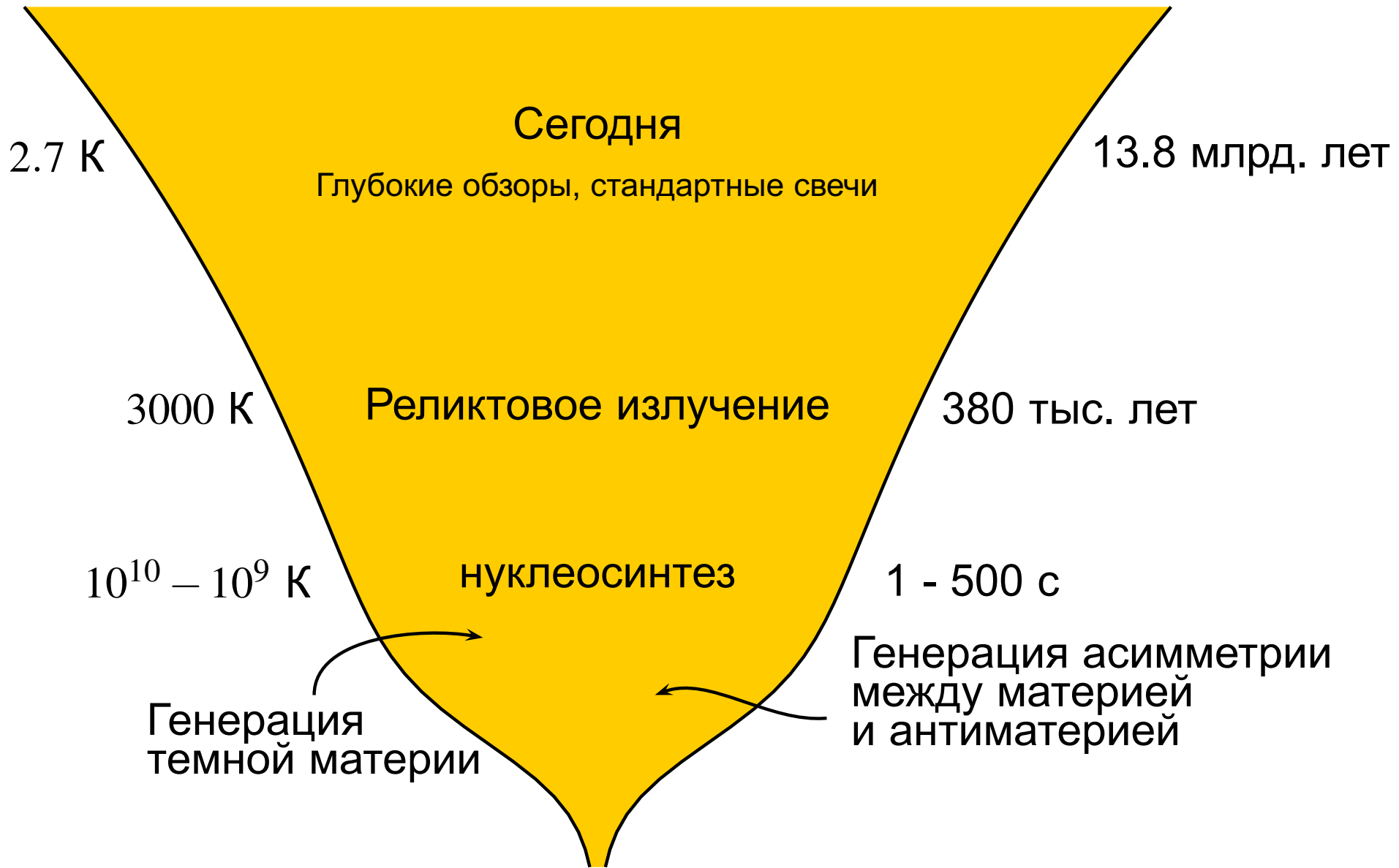
$$\tau_p > 10^{33} \text{ лет}$$

**Барионное число должно нарушаться в  
ранней Вселенной**

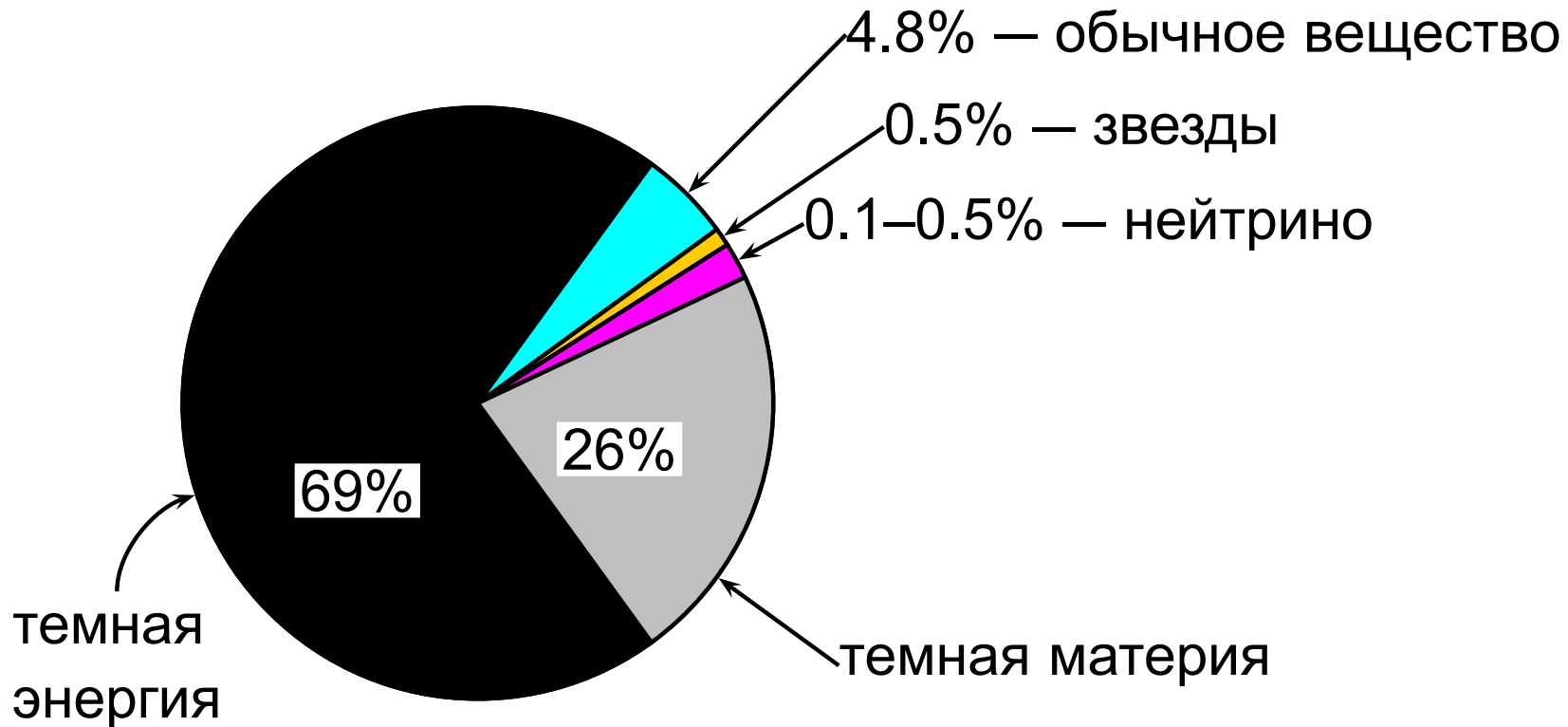
Требуется расширение Стандартной модели



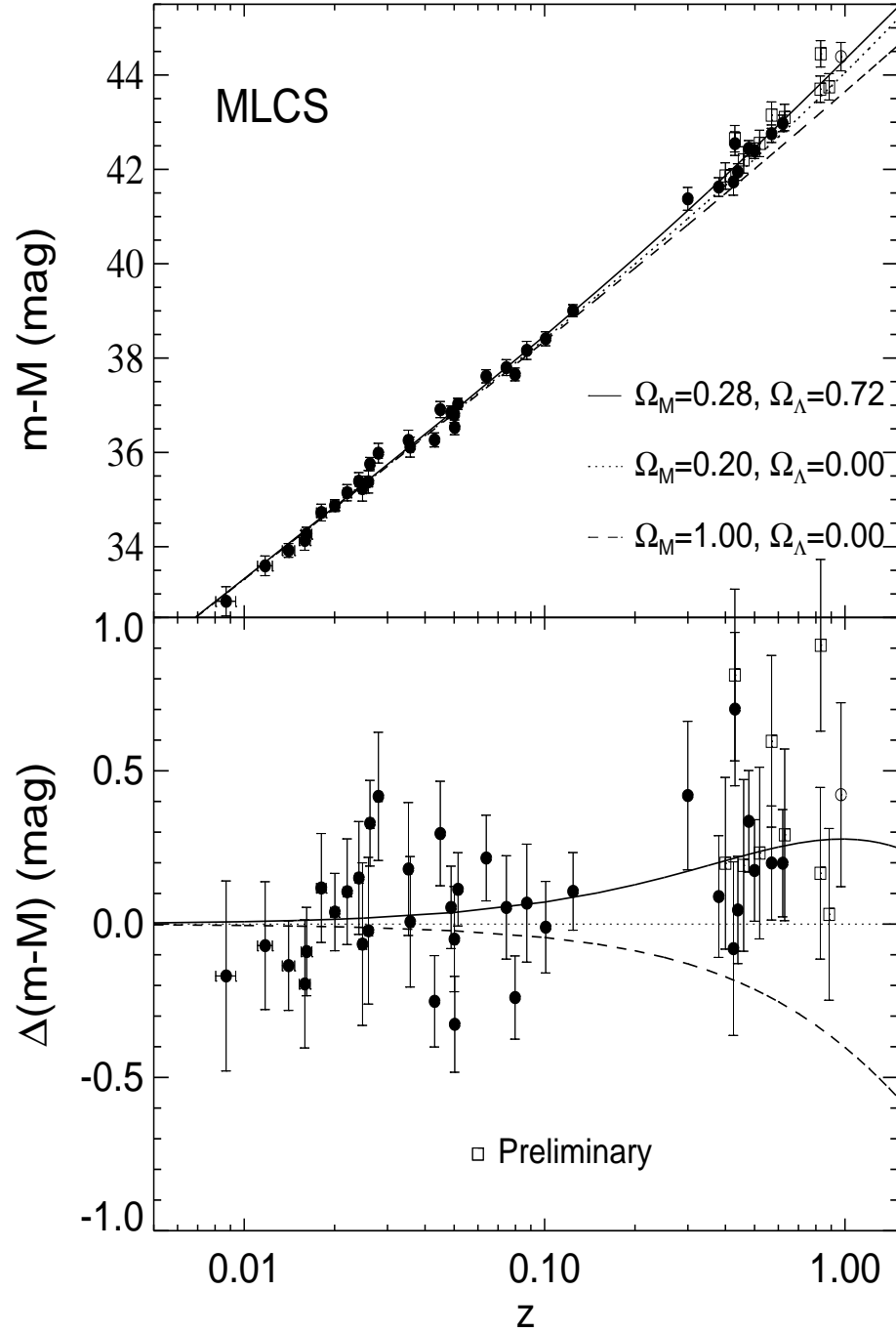
# Этапы эволюции Вселенной



# 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 плотность энергии не зависит (или слабо зависит) от времени

$$H^2(t) \equiv \left( \frac{\dot{r}}{r} \right)^2 (t) = \frac{8\pi}{3} G_{\text{НЬЮТОН}} \cdot \varepsilon_{tot}$$

$$\varepsilon = \text{const} \implies \dot{r} = \alpha r \implies$$

$$r = c \exp(\alpha t), \quad \alpha = \sqrt{\frac{8\pi}{3} G \varepsilon}$$

$$\ddot{r} > 0.$$

# 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  $\varepsilon_{DE} = 4 \frac{\text{ГэВ}}{\text{м}^3} \implies$

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

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

$$p = w\varepsilon$$

Сохранение энергии:  $dE = -pdV$ .

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

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?

Пока наблюдательные данные согласуются с  $w = -1$   
(точность на уровне 10%)



# Загадки и случайности в физике частиц и космологии:

- Разброс масштабов энергии

$$\Lambda_{DE} \sim 10^{-3} \text{ эВ}, \quad \Lambda_{QCD} \sim 1 \text{ ГэВ}, \quad M_W \sim 100 \text{ ГэВ}, \quad M_{Pl} \sim 10^{19} \text{ ГэВ}$$

- В Стандартной модели требуется чрезвычайно тонкая настройка параметров, чтобы обеспечить

$$M_W \ll M_{Pl}$$

- Тонкая настройка не требуется, если Стандартная модель расширяется при энергиях

$$E \sim 1 \text{ ТэВ}$$

до теории с улучшенным поведением при высоких энергиях.

- Главное теоретическое основание ожидать “новой физики” при энергиях порядка 1 ТэВ.

Если это верно, то “новая физика” будет открыта на  
ЛНС/БАК

# Еще загадки

- Чрезвычайно тонкая подстройка параметров нужна и для темной энергии,  $\Lambda_{DE} \ll \Lambda_{QCD}, M_W$ .

- Иерархия масс элементарных частиц

$$m_e = 0.0005 \text{ ГэВ} , \quad \dots , \quad m_t = 172 \text{ ГэВ}$$

- Примерное равенство плотностей массы тёмной материи и обычного вещества во Вселенной
- Многое другое ...

# Накопившиеся загадки: что это?

- Доминирующая точка зрения: Свидетельство новой физики при доступных энергиях. Целых пластов!
- Другая возможность: “случайности” действительно имеют место на самом фундаментальном уровне. Значения некоторых параметров могут быть – и являются – ненатуральными.

Антропный принцип:  
фундаментальные параметры таковы, что наше  
существование возможно.

На первый взгляд, лженаука. Но только на первый взгляд.

# Дружелюбные случайности

- Космологическая постоянная (плотность темной энергии) должна быть мала чтобы успели образоваться галактики

Линде '87 , Вайнберг '87

- Протон и нейтрон:  $m_p = 0.9383$  ГэВ,  $m_n = 0.9396$  ГэВ  
Массы лёгких кварков и значения электрических зарядов таковы, что  $m_n > m_p$  (водород существует), но ядра стабильны

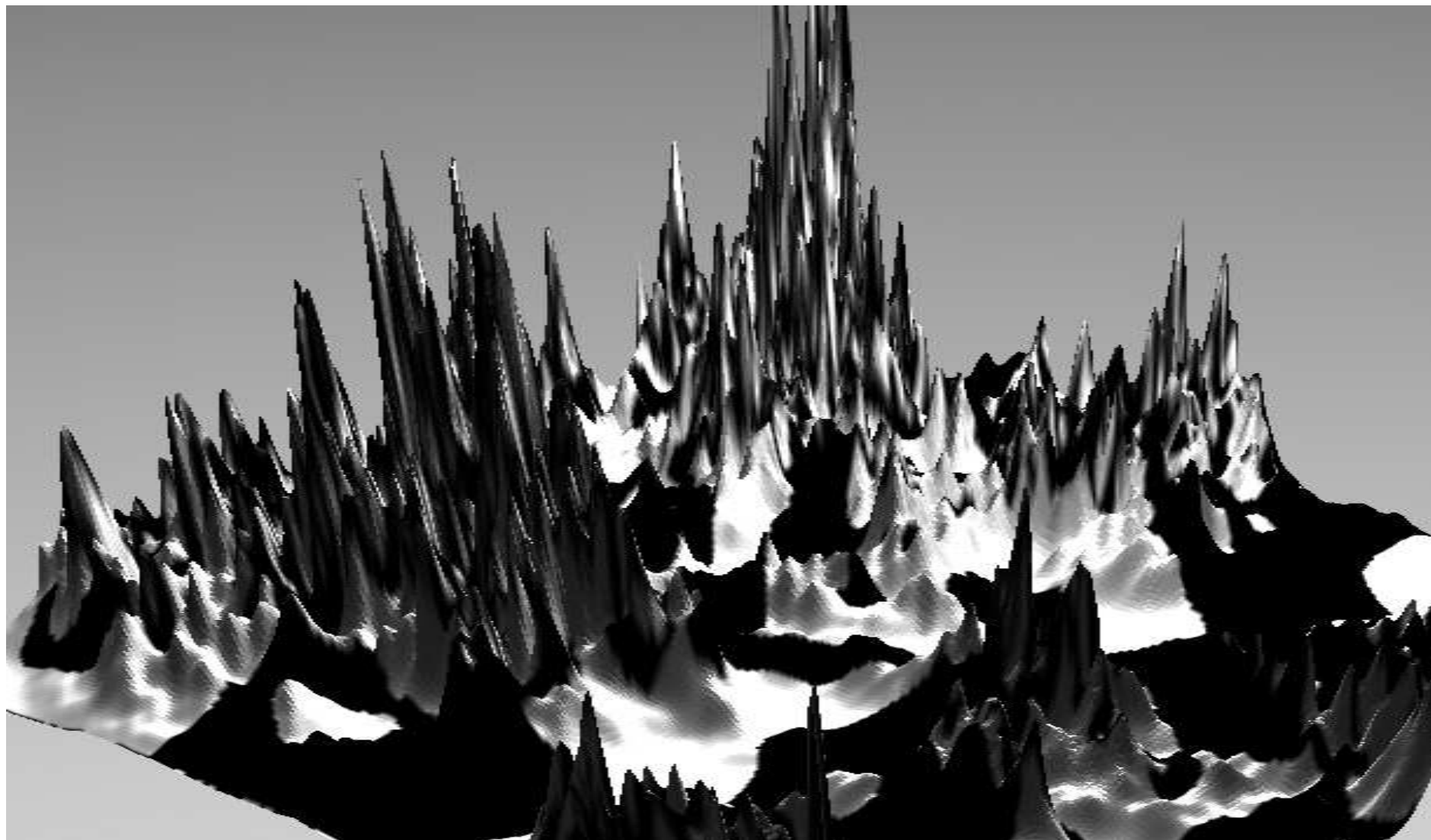
- Первичные возмущения плотности  $\frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon} \sim 10^{-5}$  как раз таковы, что образуются звёзды и планетные системы

Тегмарк, Рисс '97

- Множество других ...

Теоретические идеи  
(инфляционная теория ранней Вселенной;  
дочерние вселенные;  
“ландшафт” теории суперструн):

**Вселенная гораздо больше, чем та ее  
часть, которую мы наблюдаем**



Вселенная в целом. Масштаб  $1 : 10^{30}$   
(в 1 миллиметре 100 млрд. световых лет)

- Законы физики, в том числе “фундаментальные” константы, различны в разных частях Вселенной
- Мы там, где подходящие законы и константы

НАШЕ СУЩЕСТВОВАНИЕ – ПРОСТО ОДИН ИЗ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ФАКТОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ  
ОКРУЖАЮЩУЮ НАС ОБЛАСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

Нас же не удивляет,  
что на Земле температура от 220 до 320 градусов Кельвина,  
хотя в подавляющем большинстве мест во Вселенной  $T \sim 3 \text{ K}$

# Антропный принцип/environmentalism:

- если работает – плохо для теоретиков  
разрешены любые подгонки параметров;  
критерий естественности не работает
- трудно опровергнуть:  
мы же в самом деле существуем
- открытие зависимости плотности тёмной энергии от времени стало бы аргументом “против”
- может появиться (хорошо бы нет!) аргумент “за”,  
причём скоро:  
если на LHC/БАК не будет найдено “новой физики”

Не исключено, что электрослабый масштаб  $M_W \sim 100$  ГэВ — это ещё одна “антропная” величина



Находимся ли мы на пороге перехода  
от традиционного к антропоному взгляду  
на законы природы?