

# Космология и Большой адронный коллайдер

В. А. Рубаков

Институт ядерных исследований РАН

Максимальная энергия столкновений сегодня:

Тэватрон в Фермилабе, США,

протон-антипротонный коллайдер,  $1 \times 1$  ТэВ

Большой адронный коллайдер (ЛHC):

протон-протонный коллайдер в ЦЕРНе,  $7 \times 7$  ТэВ.

Начал работать в 2010 году,

$E = 3.5 \times 3.5$  ТэВ, светимость пока мала

NB: Протоны состоят из кварков и глюонов  $\longleftrightarrow$

Энергия элементарного столкновения на ЛHC

$$E \lesssim \frac{14}{6} \text{ ТэВ} \sim 2.5 \text{ ТэВ.}$$

На Тэватроне  $E \lesssim 350$  ГэВ.

# LHC at CERN



# Почему важно иметь высокие энергии?

- Могут рождаться новые тяжёлые частицы (если они есть в природе):

$$E = mc^2$$

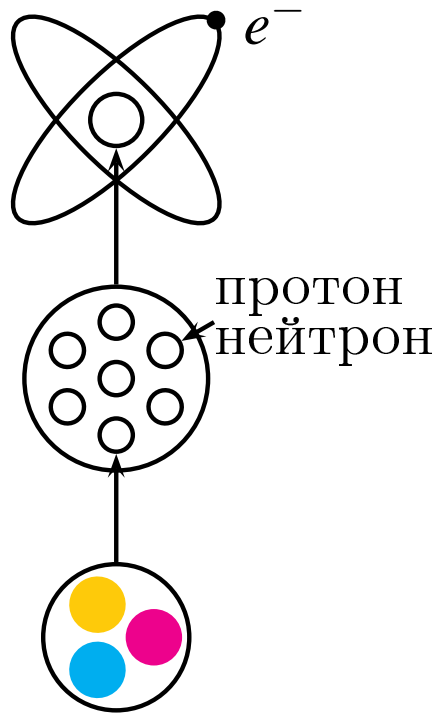
Энергия покоя наиболее тяжёлой известной элементарной частицы —  $t$ -кварка  $m_t c^2 = 172 \text{ ГэВ}$

$c = 1$  в дальнейшем,  $E = mc^2 = m$ .

- Высокие энергии (импульсы)  $\iff$  малые расстояния:

$$\Delta p \cdot \Delta x \simeq \hbar \iff \Delta x \sim \frac{\hbar}{E_{\text{ц.м.}}}$$

# Сегодня: Стандартная модель физики частиц



ЛЕПТОНЫ

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

три семейства частиц

кварки

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

+ АНТИЧАСТИЦЫ

$e^+$  : позитрон, ...

$\bar{\nu}_e$  : антинейтрино, ...

$\bar{u}$  : антикварки, ...

+ частицы, ответственные за взаимодействия: фотон, глюоны,  $W$ ,  $Z$ , гравитон + бозон Хиггса (еще не открыт)

# Зачем нужен бозон Хиггса?

Симметрии Стандартной модели **запрещают** частицам иметь массы.

А они есть  $\iff$  симметрии должны быть нарушены, как в намагниченном куске железа нарушена симметрия относительно вращений пространства.

Механизм нарушения (в физике частиц: Браут–Энглер–Хиггс) — “разлитое в вакууме” поле. Близкий аналог: нарушение симметрии в сверхпроводнике. Эффект Мейсснера  $\iff$  массивный фотон.

Хиггсовский бозон — квант этого поля.

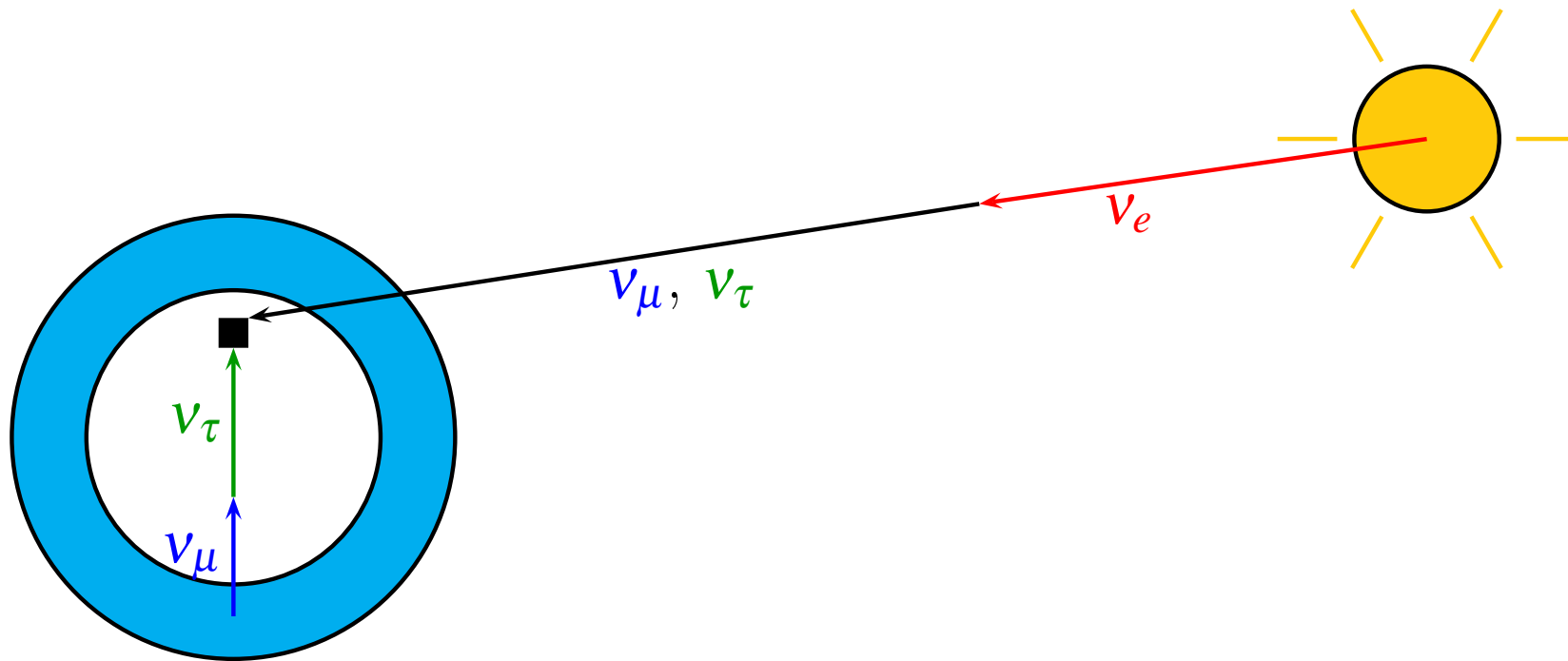
Хиггсовский бозон или что-то на него похожее обязательно должен быть в природе

Его обнаружение и изучение  $\iff$  механизм, дающий массы кваркам, лептонам,  $W$ - и  $Z$ -бозонам

- Стандартная модель проверена в многочисленных экспериментах
  - Электрослабая теория при высоких энергиях  $E \sim 100$  ГэВ проверена на уровне точности порядка  $10^{-3}$ , то есть на уровне радиационных поправок.
  - Предсказание массы  $t$ -кварка до его обнаружения:  
 $m_t = 170 \div 180$  ГэВ. Экспериментально  
 $m_t = 172 \pm 2$  ГэВ
- Теория сильных взаимодействий — квантовая хромодинамика — тоже надёжно проверена.
  - Правда, до сих пор непонятно, почему кварки и глюоны бывают только в составе адронов (протона, нейтрона, мезонов и т.д.) и никогда — в свободном состоянии  $\longleftrightarrow$  проблема невылетания цвета.

И всё же Стандартная модель не полна.

# Взаимопревращения (осцилляции) нейтрино



Super-K

Ускорительные  $\nu_\mu$ : K2K  
MINOS

Homestake (США)

Камиоканде, Super-K (Япония)

**ГГНТ — SAGE (Россия)**

GALLEX/GNO (Италия)

SNO (Канада)

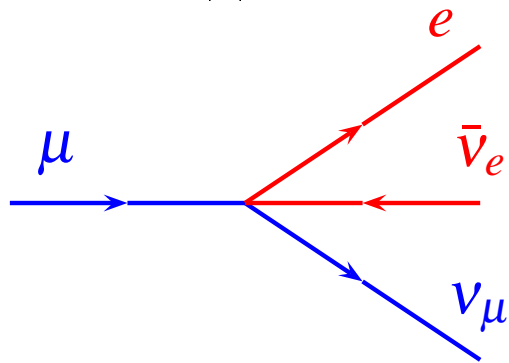
Реакторные  $\bar{\nu}_e$ : KamLAND



# Законы сохранения в Стандартной модели

- Энергия, импульс.
- Барионное число  $(N_q - N_{\bar{q}})$   
протон стабилен,  $\tau_p > 10^{33}$  лет!
- Лептонные числа  
 $L_e = (N_{e^-} + N_{\nu_e}) - (N_{e^+} + N_{\bar{\nu}_e})$   
 $L_\mu$ ,  $L_\tau$

Распад мюона



$$\mu \rightarrow e \gamma, \quad \text{Br} < 10^{-11}$$

В рамках Стандартной модели осцилляции нейтрино  
НЕВОЗМОЖНЫ:  
они противоречат сохранению лептонных чисел.

Нейтрино имеют массы, причем такие,  
что лептонные числа нарушаются

Эти массы крайне малы:  $m_\nu < 2.05$  эВ (Троицк  $\nu$ -масс)  
по сравнению с массой электрона  $m_e = 511$  кэВ  $= 5 \cdot 10^5$  эВ  
(не говоря уже о более тяжелых лептонах и кварках)

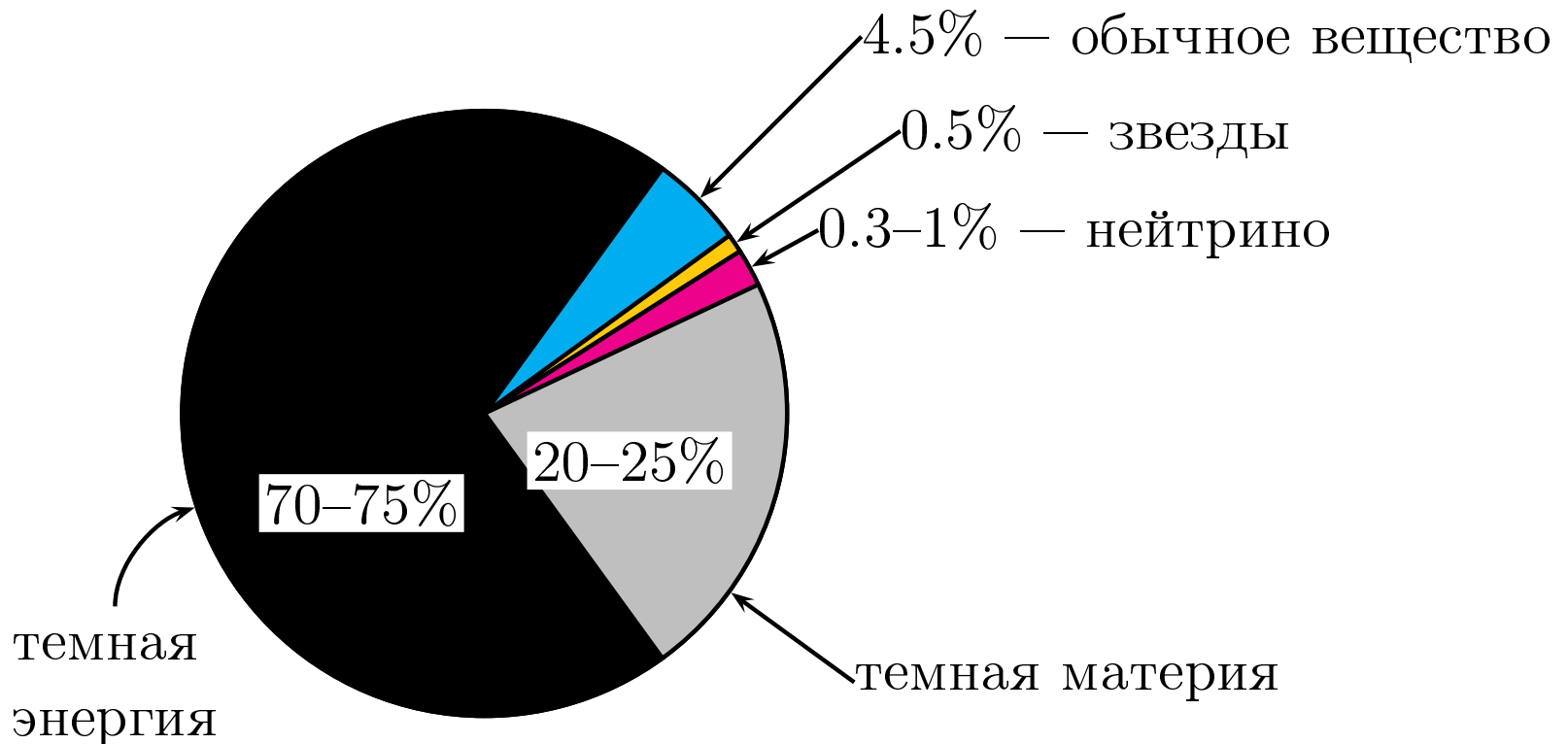
**ПЕРВОЕ ПРЯМОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО НЕПОЛНОТЫ  
СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ.**

ЛНС вряд ли прольет свет на природу масс нейтрино

# Тёмная материя

Космология требует, чтобы существовали стабильные, массивные, электрически нейтральные частицы, составляющие тёмную материю во Вселенной.

## Баланс энергий в современной Вселенной



# Тёмная материя

- Жизненно важна для нас: обеспечивает формирование структур во Вселенной
- Наиболее правдоподобная гипотеза:  
X-частицы массы  $m_X = 100 \text{ ГэВ} - 1 \text{ ТэВ}$  (в 100–1000 раз тяжелее протона), участвующие в слабых взаимодействиях  
Образуются в очень ранней и горячей Вселенной в столкновениях частиц высоких энергий при  $kT \gtrsim m_X$ . Часть аннигилирует, часть доживает до наших дней.  
Остаточная плотность получается правильной, если скорость аннигиляции сравнима со скоростью процессов, обязанных слабым взаимодействиям (масштаб энергий 100 ГэВ – 1 ТэВ).

Масштаб энергий ЛНС !

Новые стабильные частицы  $\iff$  новый закон сохранения

## 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

Барионная асимметрия тоже жизненно важна

Если бы ее не было, кварки проаннигилировали бы с антикварками, и во Вселенной не было бы обычного вещества.

# Барионная асимметрия: условия Сахарова

Три необходимых условия генерации асимметрии должны выполняться в одно время:

- несохранение барионного числа
- *C*- и *CP*-нарушение:  
микрофизика различает частицы и античастицы
- Нарушение теплового равновесия

Может ли барионная асимметрия генерироваться за счет физики на масштабе энергий 100 ГэВ — ТэВ ?

На первый взгляд НЕТ: время жизни протона  $\tau_p > 10^{33}$  лет  
 $\implies$  масштаб энергий  $10^{16}$  ГэВ

# Однако

Барионное число **не сохраняется** в электрослабых взаимодействиях

необходимы большие флуктуации полей  $W$ - и  $Z$ -бозонов

Большие **вакуумные** флуктуации крайне маловероятны.

Высокие температуры: большие **тепловые** флуктуации

**$B$ -несохранение — быстрое по сравнению с космологическим расширением при  $T \gtrsim 100$  ГэВ.**

ПРОБЛЕМА:

Вселенная расширяется медленно. Темп расширения при  $T \sim 100$  ГэВ

$$H^{-1} \sim 10^{-10} \text{ с}$$

Слишком медленный для нарушения теплового равновесия?

## Единственный шанс: фазовый переход 1-го рода, сильно неравновесный процесс

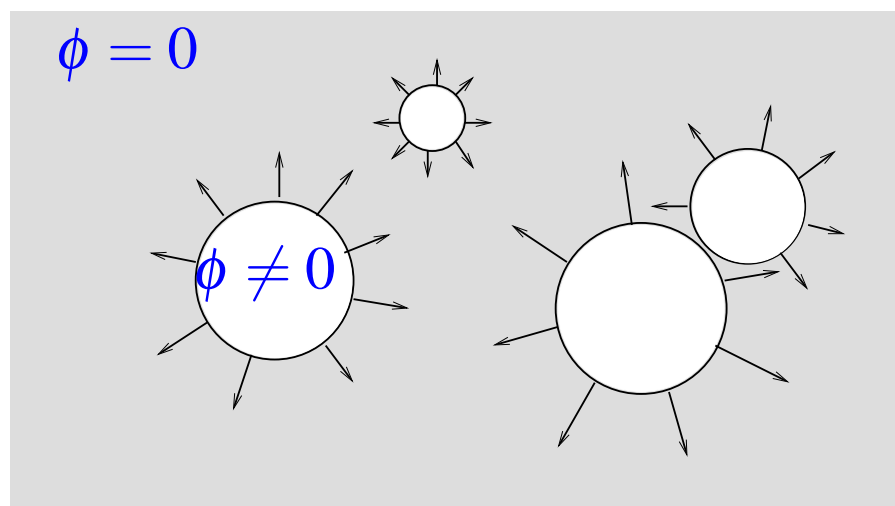
Электрослабая симметрия нарушена в вакууме, но не нарушена при  $T \gtrsim 100$  ГэВ.

Аналогия: сверхпроводник становится нормальным металлом при “высокой”  $T$

Переход может в принципе быть 1-го рода

Переход 1-го рода происходит из переохлажденного состояния путем образования пузырьков новой фазы с  $r \sim 10^{-16}$  см, их расширения с  $v \sim 0.1c$  до  $r \sim 0.1H^{-1} \sim$  мм, столкновения стенок и перколяции.

Кипящая Вселенная, далека от теплового равновесия





А как на самом деле?

В Стандартной модели фазового перехода 1-го рода нет

Ее свойства при высоких температурах вычисляются однозначно

- Фазового перехода нет вообще, есть гладкий кроссовер
- Кроме того, слишком слабое нарушение  $CP$

Что требуется для электрослабой генерации барионной асимметрии?

- Новые поля/частицы
  - Должны сильно взаимодействовать с хиггсовскими бозонами
  - Должны присутствовать в плазме при  $T \sim 100$  ГэВ  
 $\implies$  масса не более 300 ГэВ
- дополнительный источник  $CP$ -нарушения, лучше в хиггсовском секторе  $\implies$  несколько хиггсовских полей

В любом случае бариогенезис при  $T \sim 100$  ГэВ требует сложной динамики в секторе, нарушающем электрослабую симметрию

при  $E \sim (\text{a few}) \cdot 100$  ГэВ

Область ЛНС

ЛНС вполне может дать ключ к разгадке жизненно важных проблем темной материи и барионной асимметрии Вселенной

Гарантии нет:

- темная материя может быть, например, аксионами или гравитино
- Барионная асимметрия может генерироваться тем же механизмом, который дает массы нейтрино (лептогенезис)



- В Стандартной модели требуется чрезвычайно тонкая настройка исходных (затравочных) параметров, чтобы сократить радиационные вклады и обеспечить

$$m_H \ll M_{Pl}$$

- Радиационные вклады в  $m_H$  невелики, если Стандартная модель расширяется при энергиях

$$M \sim 1 \text{ ТэВ}$$

до теории с улучшенным поведением при высоких энергиях.  
Тогда

$$\delta m_H \sim \lambda \cdot M$$

$$\delta m_H \sim 0.1 \cdot 1000 \text{ ГэВ} \sim 100 \text{ ГэВ} \lesssim m_H$$

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

Если это верно, то новые частицы и взаимодействия будут  
скоро открыты на LHC

Прямое рождение новых частиц в  $pp$ -столкновениях.

# Популярный (но не единственный) сценарий:

## Суперсимметрия:

симметрия между бозонами (целый спин) и фермионами (полуцелый спин)

- Гипотеза: все частицы Стандартной модели имеют суперпартнёров с массами в области сотен ГэВ — нескольких ТэВ

кварк ( $s = 1/2$ )  $\iff$  скварк ( $s = 0$ )

электрон ( $s = 1/2$ )  $\iff$  сэлектрон ( $s = 0$ )

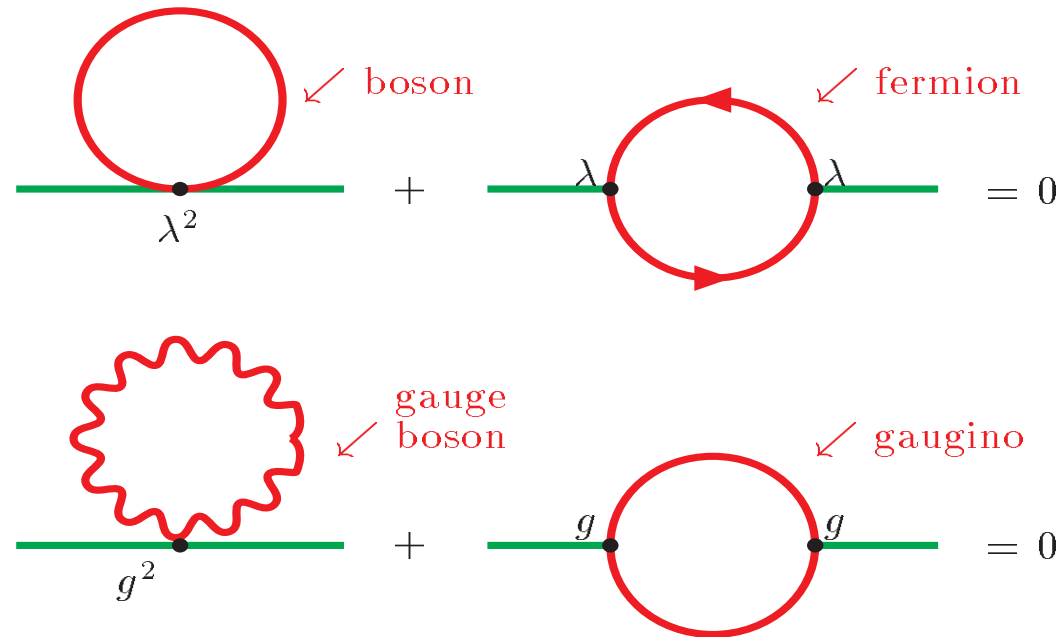
фотон ( $s = 1$ )  $\iff$  фотино ( $s = 1/2$ )

глюон ( $s = 1$ )  $\iff$  глюино ( $s = 1/2$ )

и т.д.

- Все эти новые частицы будут рождаться на ЛНС

- Суперсимметрия приводит к сокращению больших радиационных вкладов в  $m_H$ :



Что и требуется

# Дополнительные плюсы суперсимметрии

## Объединение “констант” связи

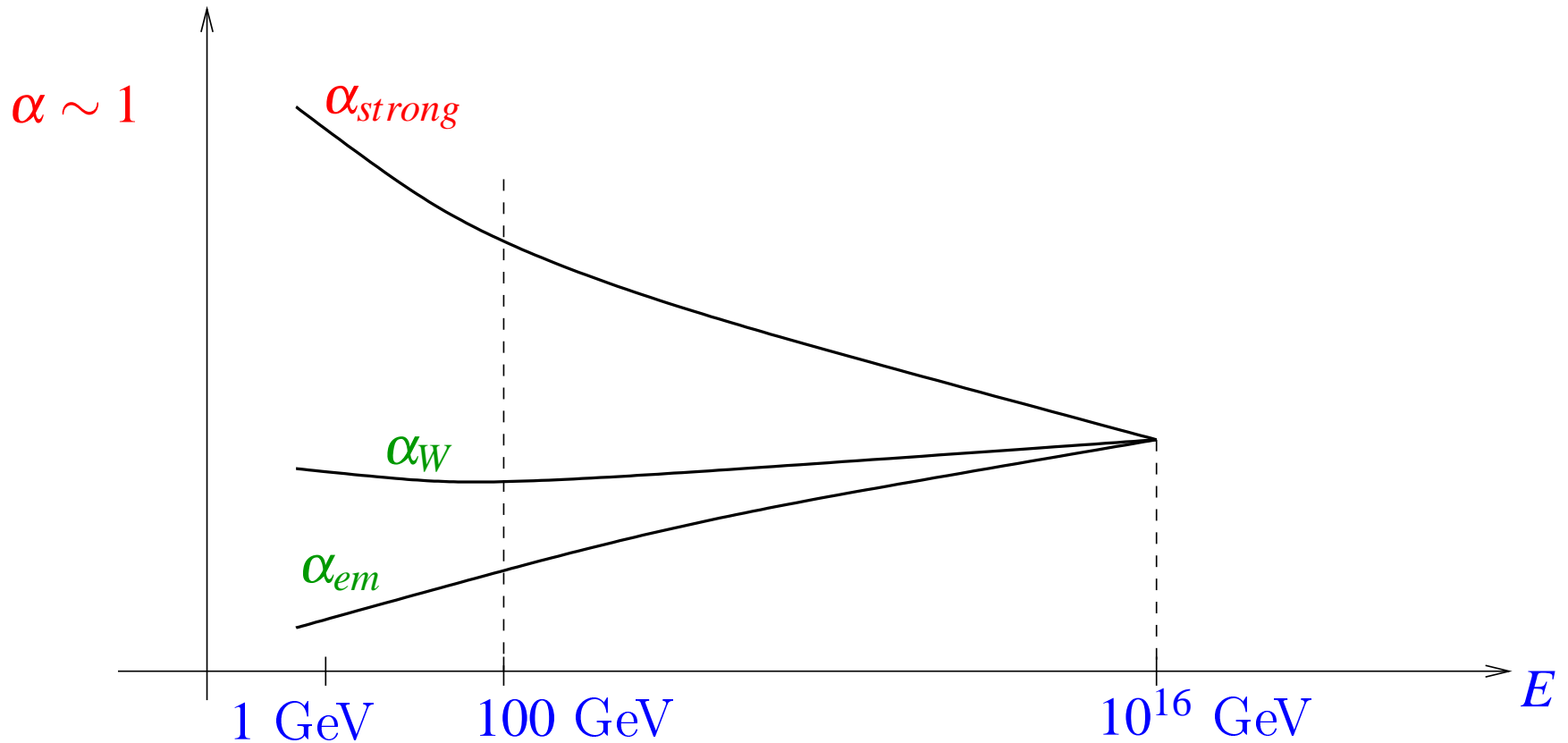
- “Константы” сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий на самом деле зависят от энергии.
- Эта зависимость слабая (логарифмическая)
- В суперсимметричной теории “константы” сходятся в одну точку при  $E \sim 10^{16}$  ГэВ

NB: В Стандартной модели этого не происходит

- “Большое объединение”: сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия суть единое взаимодействие, только проявляющееся по-разному при  $E < 10^{16}$  ГэВ



# Зависимость от энергии “констант” связи



Объясняется большое различие (иерархия) энергетических масштабов разных взаимодействий

# Ещё плюсы суперсимметрии

Есть кандидат на роль частицы тёмной материи

- Суперпартнёры рождаются и исчезают парами
- Легчайший суперпартнёр стабилен
- Во многих моделях он электрически нейтрален (нейтралино, например, фотино)
- Именно это требуется от частицы тёмной материи.

Возможна генерация барионной асимметрии

- Электрослабый фазовый переход 1-го рода, если  $t$ -скварк — легкий,  $m_{\tilde{t}} \lesssim 200$  ГэВ
- Два хиггсовских поля  $\implies$  дополнительный источник  $CP$ -нарушения

Суперпартнёры будут хорошо видны на LHC

# Все не так просто:

Существующие экспериментальные данные серьёзно ограничивают суперсимметричные модели.

В связи с этим — много альтернативных гипотез

- Модели, в которых известные “элементарные” частицы и хиггсовский бозон составлены из ещё более фундаментальных частиц
- Модели с дополнительными размерностями пространства
- и т.д.

РАЗБРОД И ШАТАНИЯ В ТЕОРЕТИЧЕСКИХ УМАХ

Физика фундаментальных взаимодействий снова стала экспериментальной наукой

# Итак,

- Последние 30 – 35 лет: время запланированных открытий в физике частиц
  - Теоретическое уточнение и экспериментальное подтверждение Стандартной модели
  - Измерение её параметров (масс частиц, констант взаимодействий и т.д.)
  - Недостающее звено: бозон Хиггса
- Незапланированные открытия: нейтринные осцилляции, тёмная материя
  - Свидетельствуют о неполноте Стандартной модели

- Запланированные открытия почти закончились
  - остался бозон Хиггса
- ЛНС: обоснованные ожидания целого пласта “новой физики”
  - Возможен прорыв в космологии

Первые результаты работы ЛНС — 2011 год !



# Пути поиска частиц темной материи

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

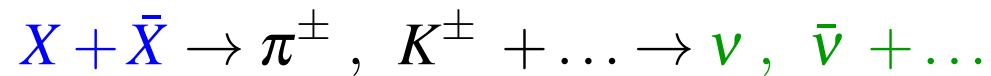
Скорость  $X$ -частиц вблизи Земли  $u \sim 10^{-3}c$   
(характерная скорость вращения в грав. поле Галактики)

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**

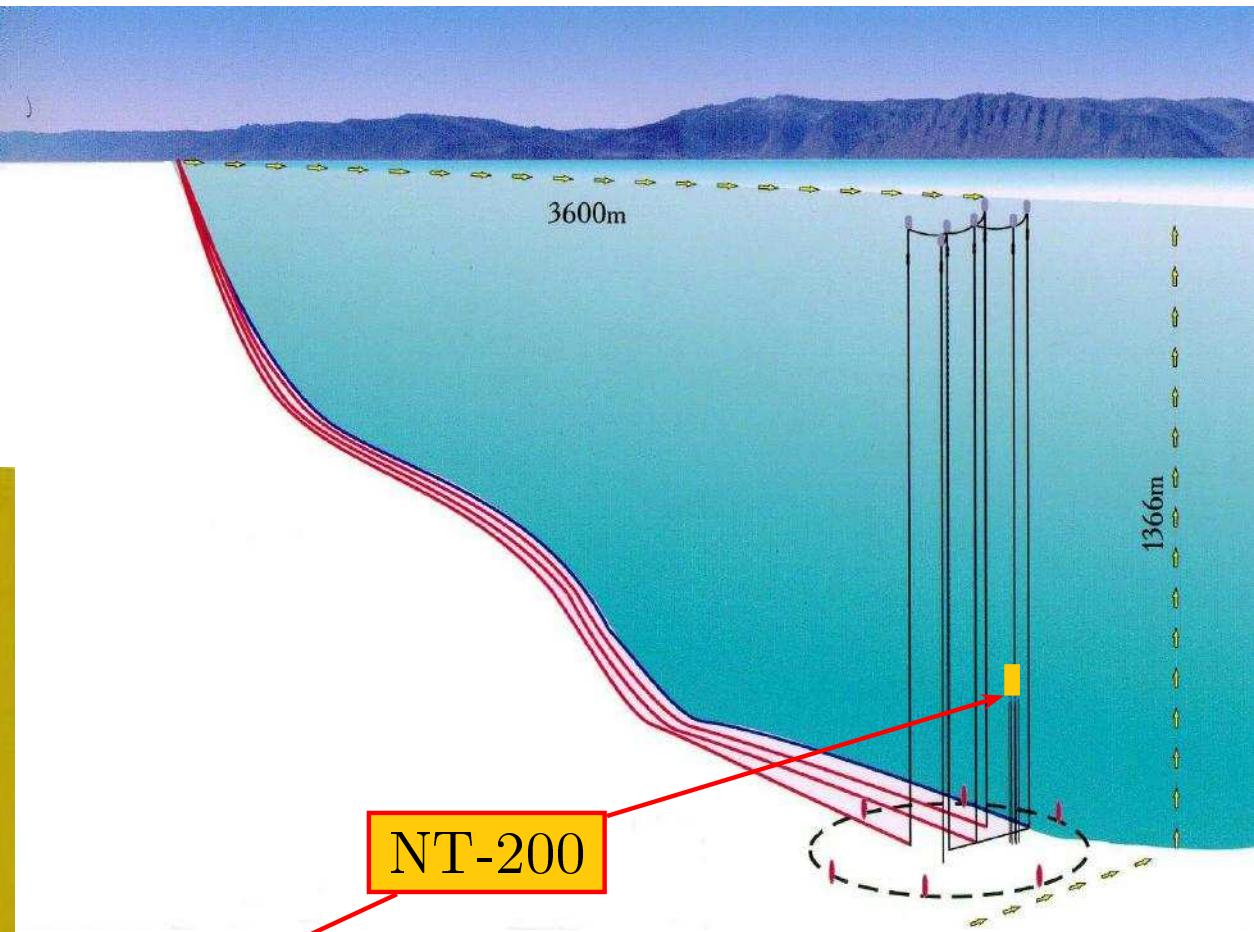


Нейтрино  
высоких  
энергий



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



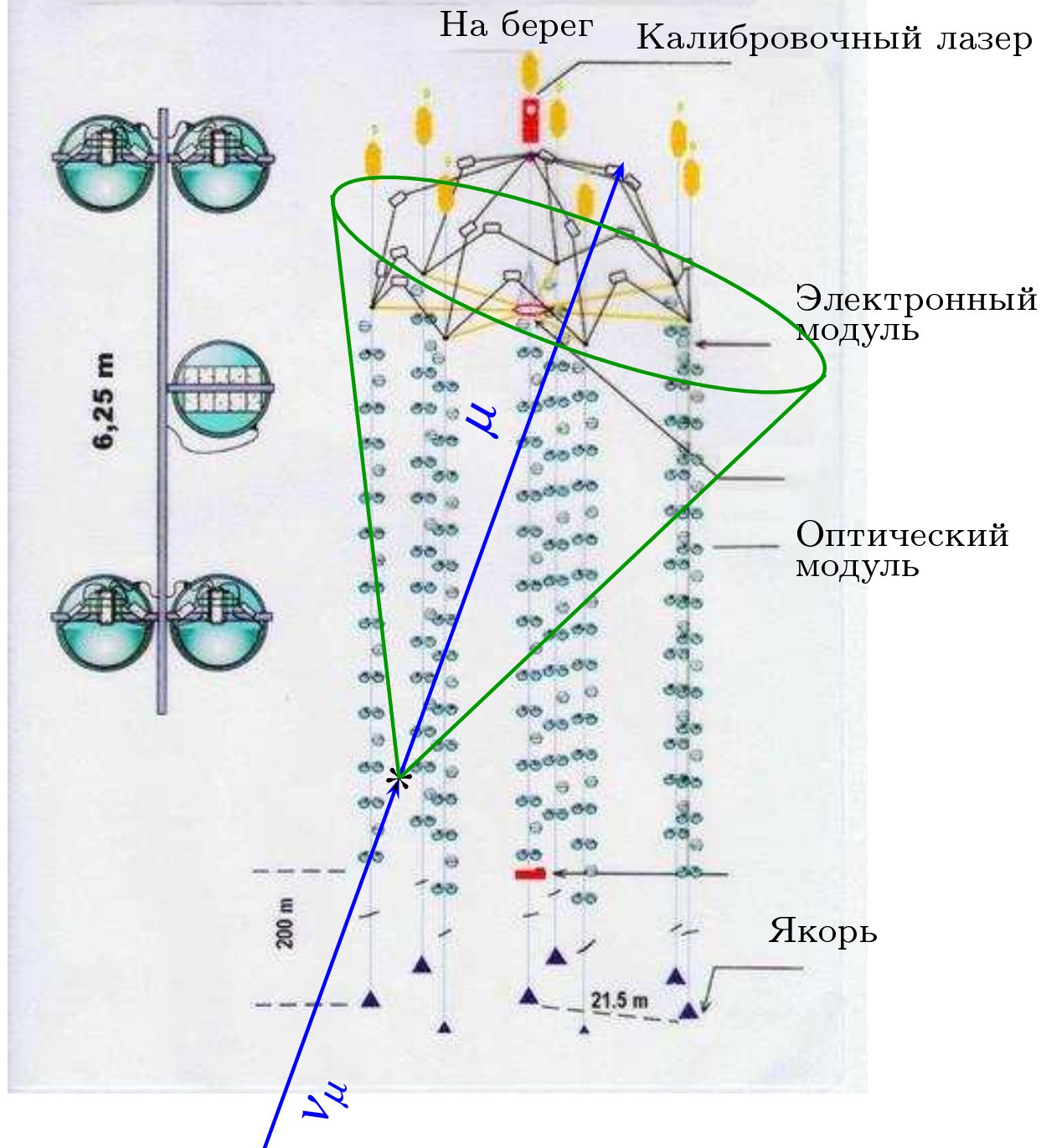


NT-200



# Нейтринный телескоп NT-200

06000-06



- Байкальский нейтринный телескоп  
Существенное развитие возможно и реально.
- Еще одна возможность: регистрация продуктов аннигиляции в космосе.  
Поиск  $e^+$ ,  $\bar{p}$  в космических лучах (PAMELA), аннигиляционных  $\gamma$ -квантов (EGRET, ...).

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.

# Космология стала точной наукой за последние 15 – 20 лет

Количественные результаты:

- Вселенная **расширяется**  
Пространство растягивается во все стороны.

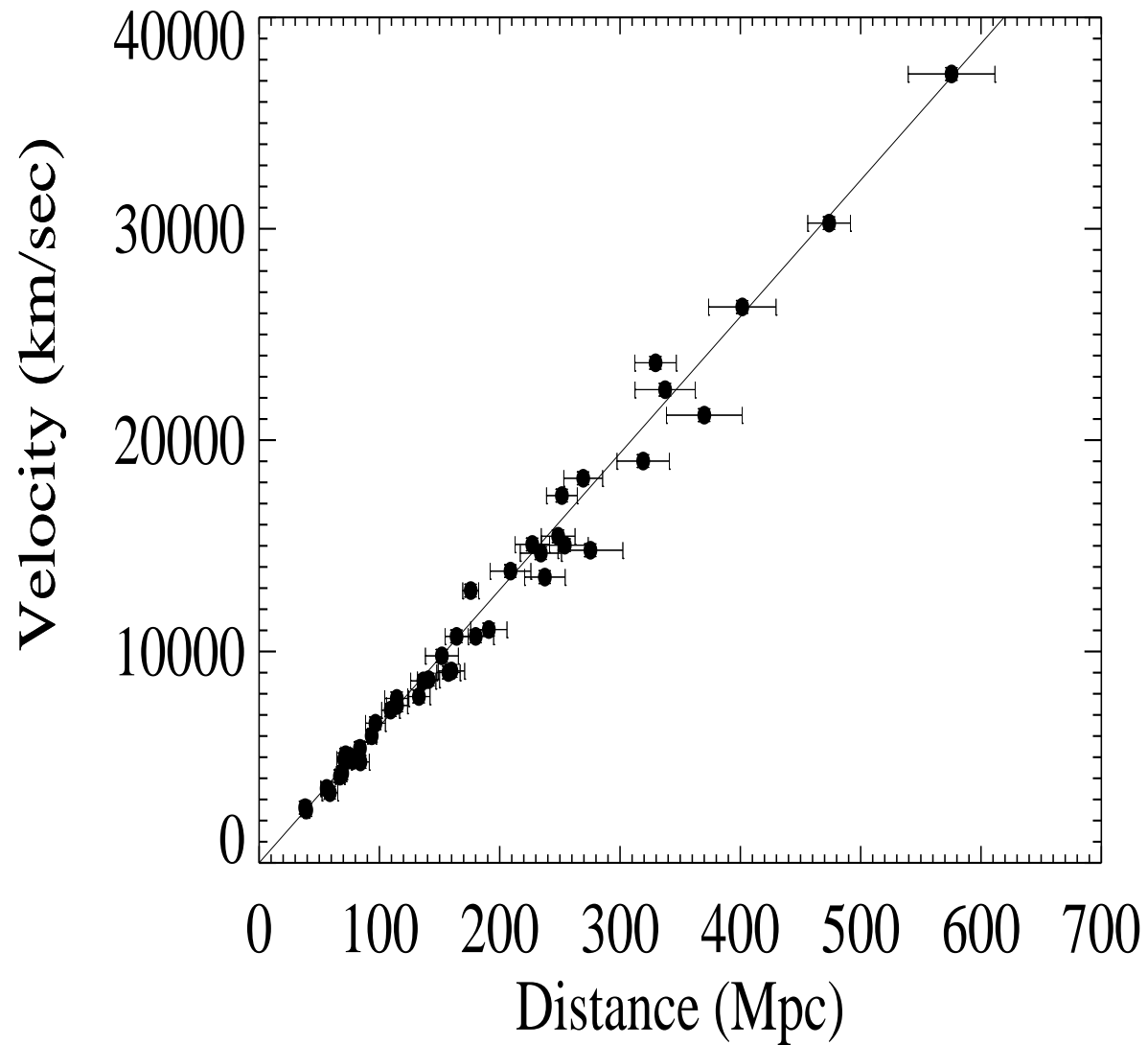
Галактики удаляются от нас; чем дальше галактика, тем быстрее она убегает.

Эффект Доплера: свет от далеких галактик приходит к нам покрасневшим Красное смещение  $z$ :

$$z = v/c.$$

- **Астрономические наблюдения:**  
Скорость удаления от нас далеких галактик в зависимости от расстояния  $\Rightarrow$   
темп расширения Вселенной сегодня и в прошлом

# Небольшие $z$ : закон Хаббла



## Малые расстояния: закон Хаббла

$$z = H_0 \cdot r$$

$r$  = расстояние до источника

$z$  = красное смещение (скорость удаления источника)

$H_0$  = современный темп расширения Вселенной  
= параметр Хаббла

$$H_0 = 73 \pm 4 \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}}$$

NB: 1 Мпк = 3 млн. световых лет

Сегодня расширение медленное: все расстояния увеличатся вдвое за 12 млрд. лет.

В прошлом Вселенная расширялась гораздо быстрее

Для больших расстояний  $z(r)$  зависит от темпа расширения в прошлом  $\implies$

зависимость от времени плотности энергии во Вселенной

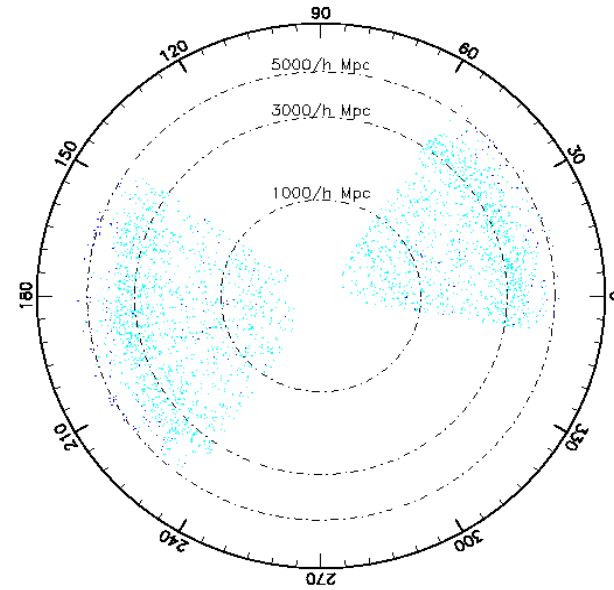
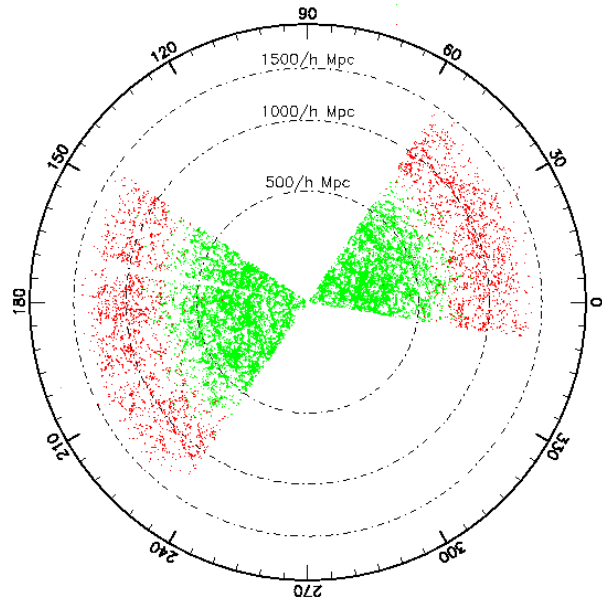
- Глубокие обзоры галактик  $\Rightarrow$   
распределение галактик во Вселенной  $\Rightarrow$

### Карта Вселенной:

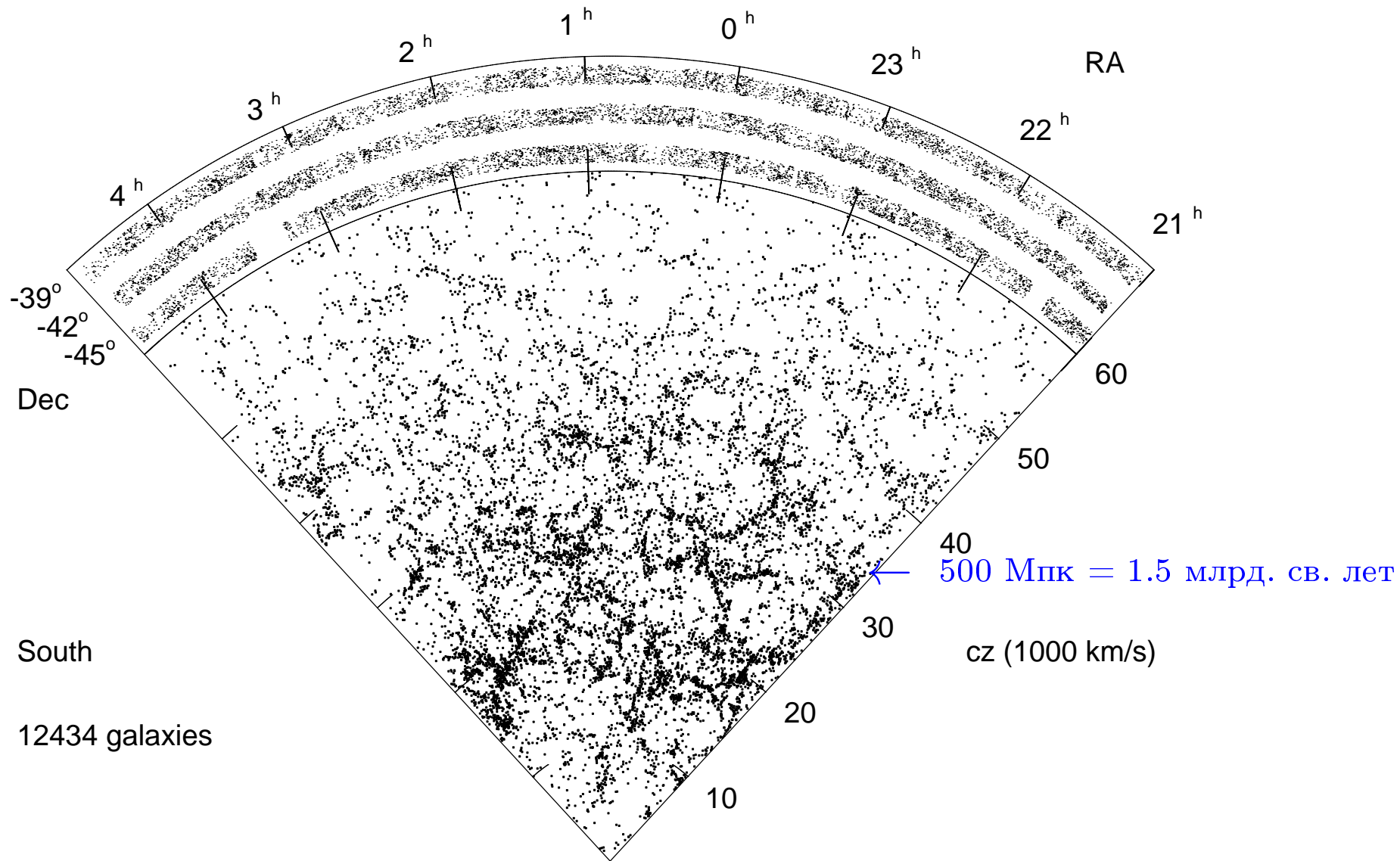
Состояние и эволюция Вселенной сегодня и в прошлом

SDDS: положение во Вселенной более 300 тыс. галактик,  
расстояния до 7 млрд. световых лет

# Карта Вселенной







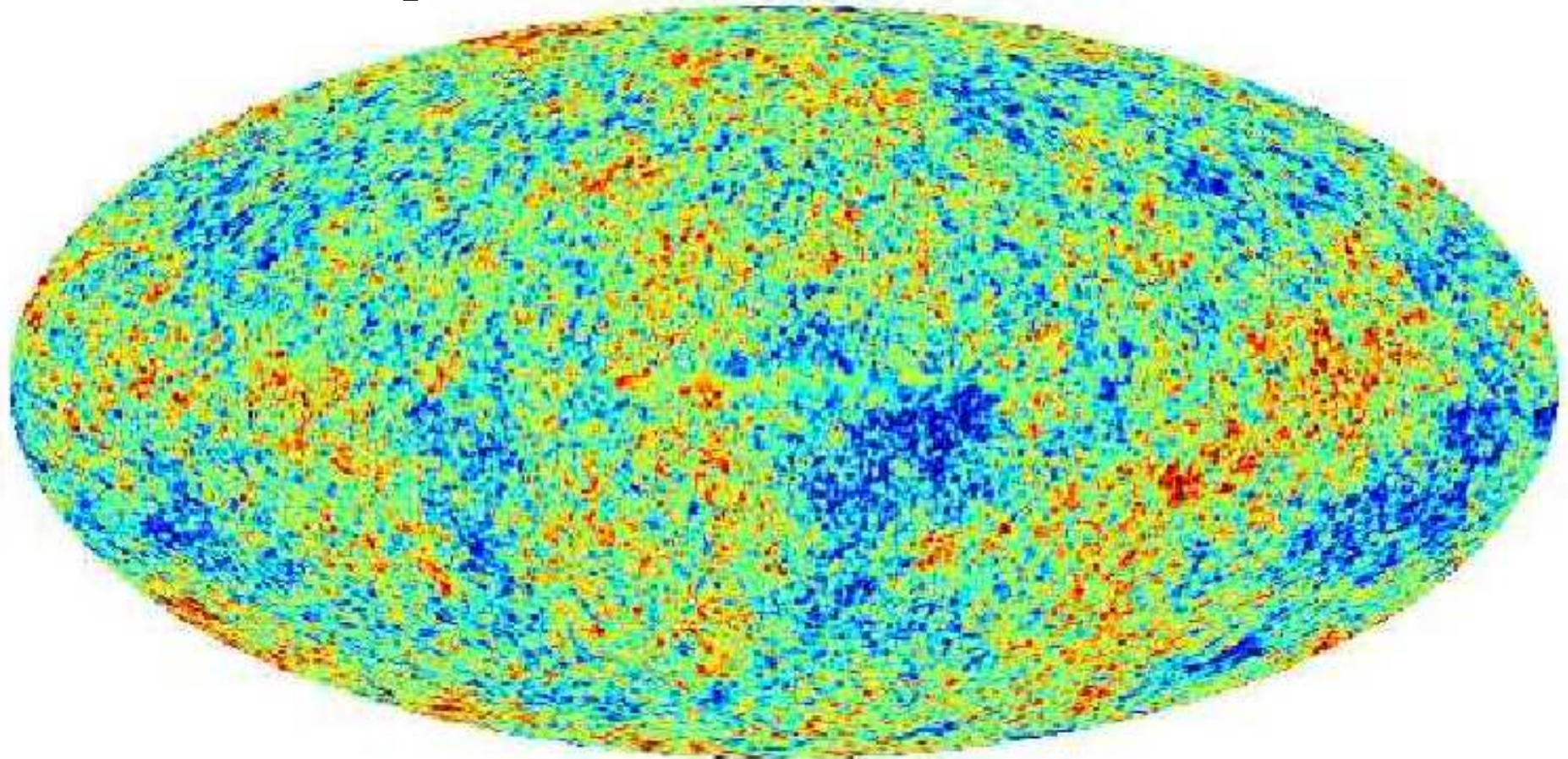
Вселенная расширялась в течение всей своей истории  $\Rightarrow$   
В прошлом вещество во Вселенной было гораздо более плотным  
и горячим

- 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)

- 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.

До этого вещество во Вселенной находилось в состоянии плазмы, непрозрачной для фотонов. При  $T = 3000$  К электроны и протоны рекомбинировали в нейтральный водород, среда стала прозрачной. С тех пор реликтовые фотоны распространяются свободно по Вселенной.

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



WMAP

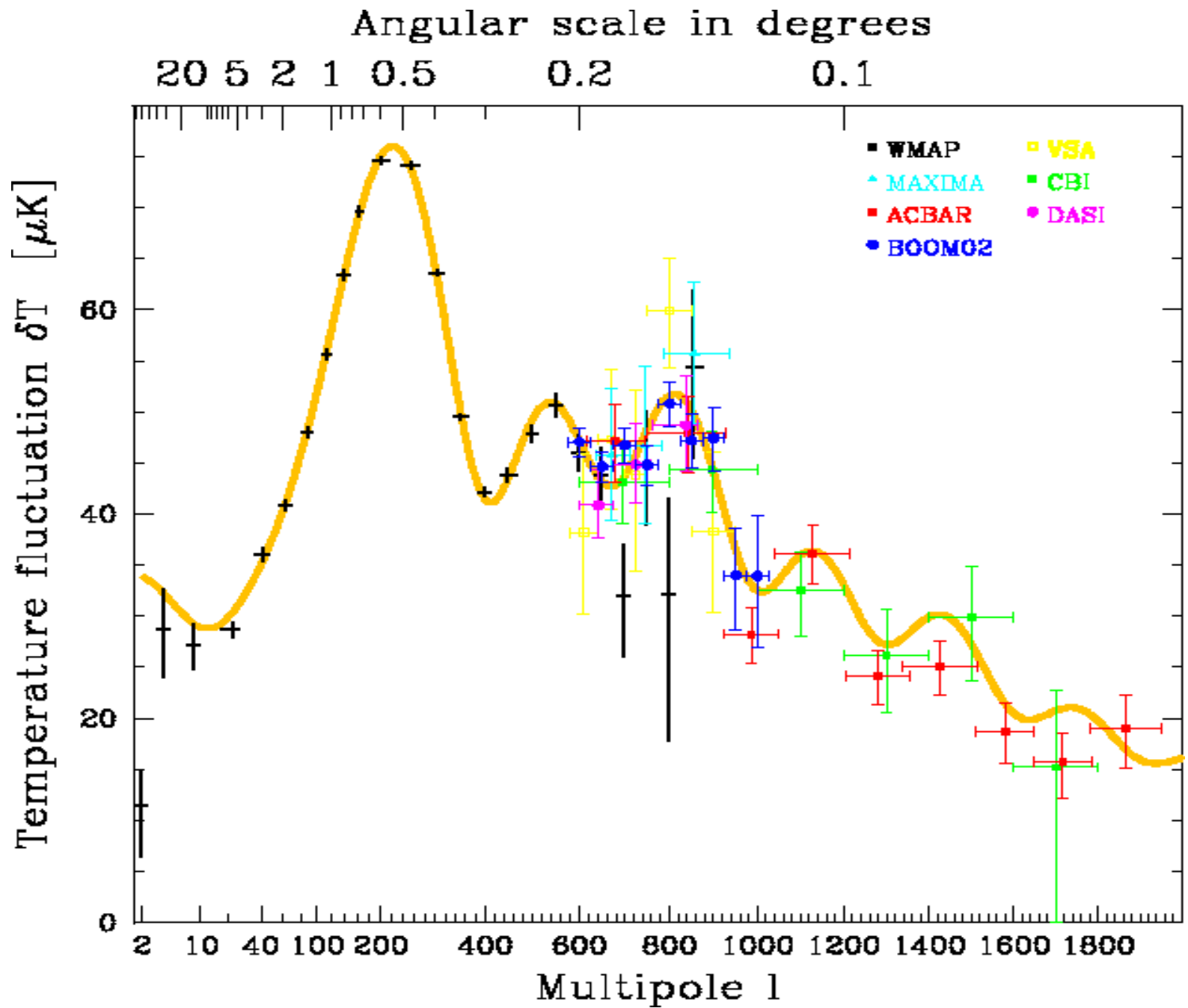
- При  $T = 3000$  К,  $t = 300$  тыс. лет Вселенная была почти однородной, относительные неоднородности плотности были на уровне  $10^{-5}$ .

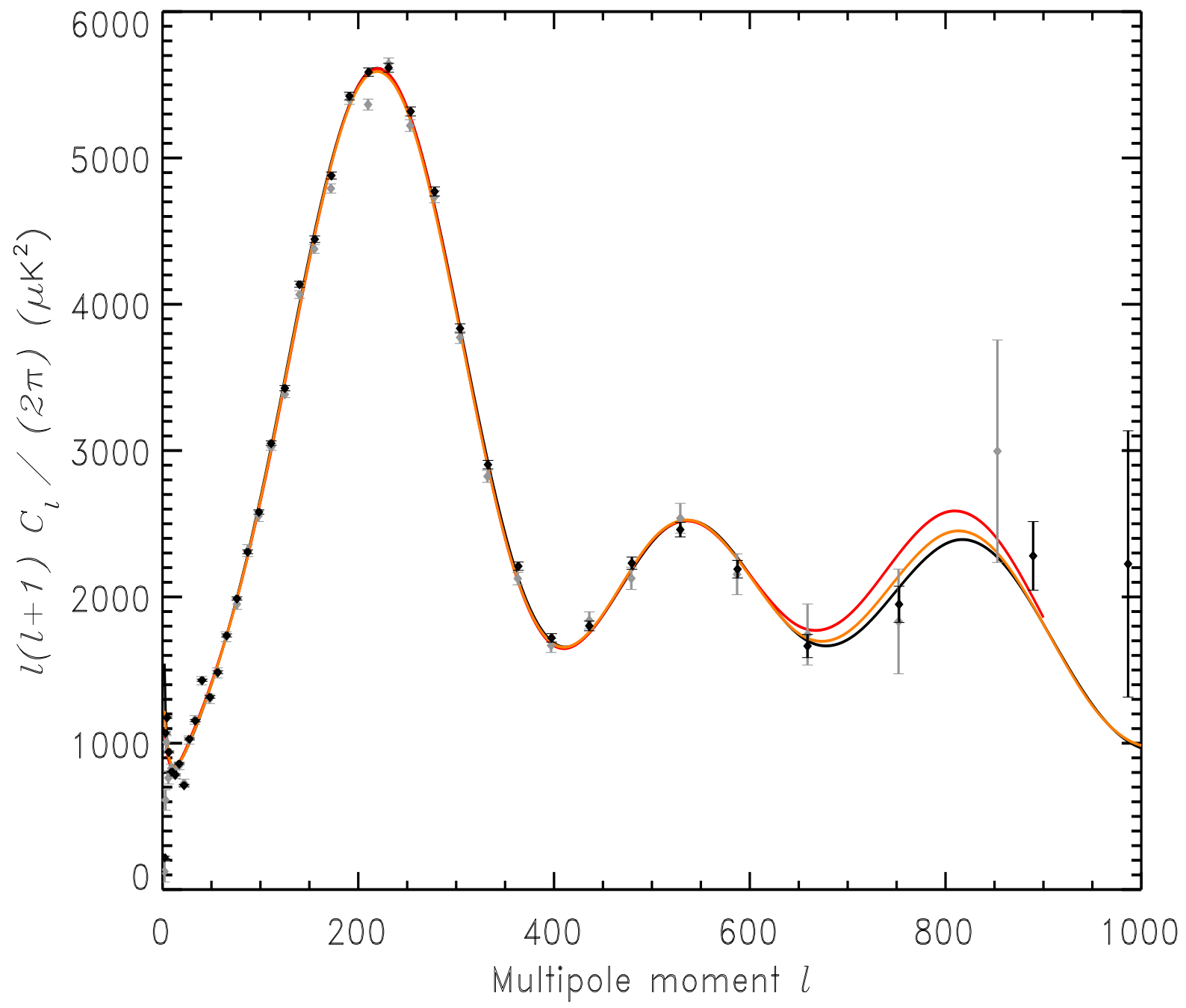
Разложение “Фурье” флуктуаций температуры на небесной сфере:

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

$C_{lm}$  измеряются;

большие  $l \Leftrightarrow$  малые угловые масштабы





● Положение первого пика: пространственная кривизна Вселенной

(физика: нарастание звуковых волн в космической плазме; максимумы при  $\omega = \frac{\text{const}}{300 \text{ тыс. лет}}$ , абсолютная длина волны фиксирована  $\iff$  угол, под которым она видна, зависит от пространственной геометрии )

Вселенная пространственно-плоская с высокой точностью

Сумма углов треугольника = 180 градусам.

Речь идет о треугольниках со сторонами 10 млрд. световых лет !

Видимая часть Вселенной – не более 1/100 ее полного объема.



- Пространственная плоскость + уравнения гравитации  
⇒ полная плотность энергии всех форм материи

$$\begin{aligned}\epsilon_{\text{tot}} &= \frac{3}{8\pi G_{\text{НЬЮТОН}}} H_0^2 \\ &= 0.5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}\end{aligned}$$

- Высота пиков  $\Rightarrow$  концентрация протонов

Метод определения плотности числа барионов в ранней и современной Вселенной

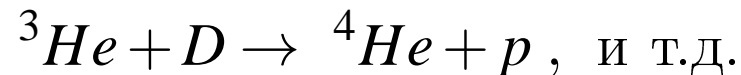
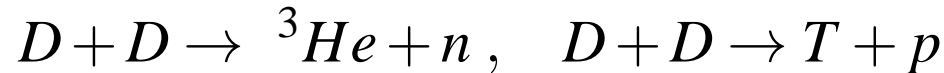
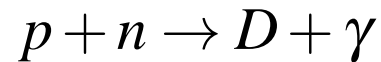
Измеряемый параметр

$$\eta = \frac{\text{число барионов}}{\text{число фотонов}}$$

барион-фотонное отношение, не меняется при расширении.

# Теория первичного термоядерного синтеза

Температура  $10^{10} \rightarrow 10^9$  К, время жизни  $1 \rightarrow 200$  с.



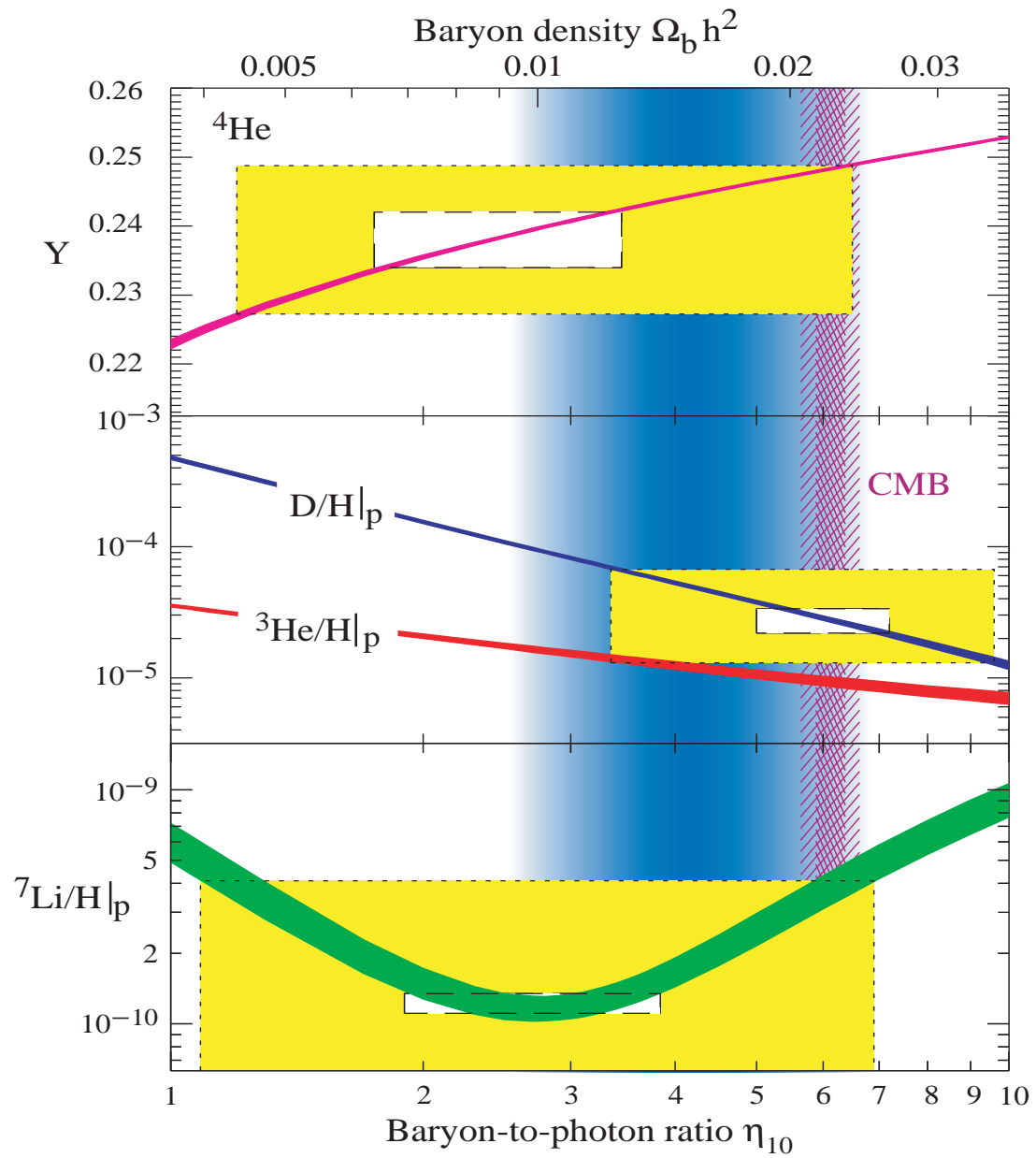
## Параметры:

- плотность барионов = протонов + нейтронов, т.е. барион-фотонное отношение  $\eta$ ;
- число типов нейтрино (сейчас известно, что ровно три)

Измерения концентрации элементов  $\Rightarrow$

состав и эволюция Вселенной в возрасте 1 с — 3 мин.

$\Rightarrow$  концентрация барионов в современной Вселенной



$$\eta_{10} = \frac{\text{число барионов}}{\text{число фотонов}} \cdot 10^{10}$$

- Согласие между независимыми определениями плотности барионов.

В современной Вселенной

$$n_B = 2.5 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{см}^3}$$

$$\epsilon_B = 2.5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$$

$$\frac{\epsilon_B}{\epsilon_{\text{tot}}} = 0.05$$

Остальная энергия – “неизвестно что”

## 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

# Ключ — осцилляции нейтрино!?

- В электрослабых взаимодействиях при высокой температуре ( $k_B T \gtrsim 100$  ГэВ) барионное и лептонные числа по отдельности **не сохраняются**
- Сохраняется комбинация ( $B - L$ )
  - Лептонное число может перерабатываться в барионное, и наоборот

Но из нейтринных осцилляций известно, что лептонные числа не сохраняются!

- Путь к генерации асимметрии между материей и антиматерией за счёт тех же взаимодействий, которые приводят к нейтринным осцилляциям

Измеренные параметры осцилляций  
находятся в правильной области



# Предстоит узнать:

● Массы нейтрино  $\Leftrightarrow$  влияние на эволюцию Вселенной

● Различие свойств нейтрино и антинейтрино (нарушение CP)  $\Leftrightarrow$  асимметрия между веществом и антивеществом

$\epsilon_B \approx \epsilon_{\text{Dark matter}}$ : совпадение или единый механизм генерации?