

Загадки Вселенной

В.А. Рубаков

Институт ядерных исследований РАН,
кафедра физики частиц и космологии
физического факультета МГУ



Успехи науки о Вселенной – космологии:

- Свойства современной Вселенной, её эволюция в прошлом известны с хорошей точностью

В то же время:

Имеющихся знаний об элементарных частицах, фундаментальных взаимодействиях, формах материи недостаточно для описания наблюдаемого мира

Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная **везде одинаковая**

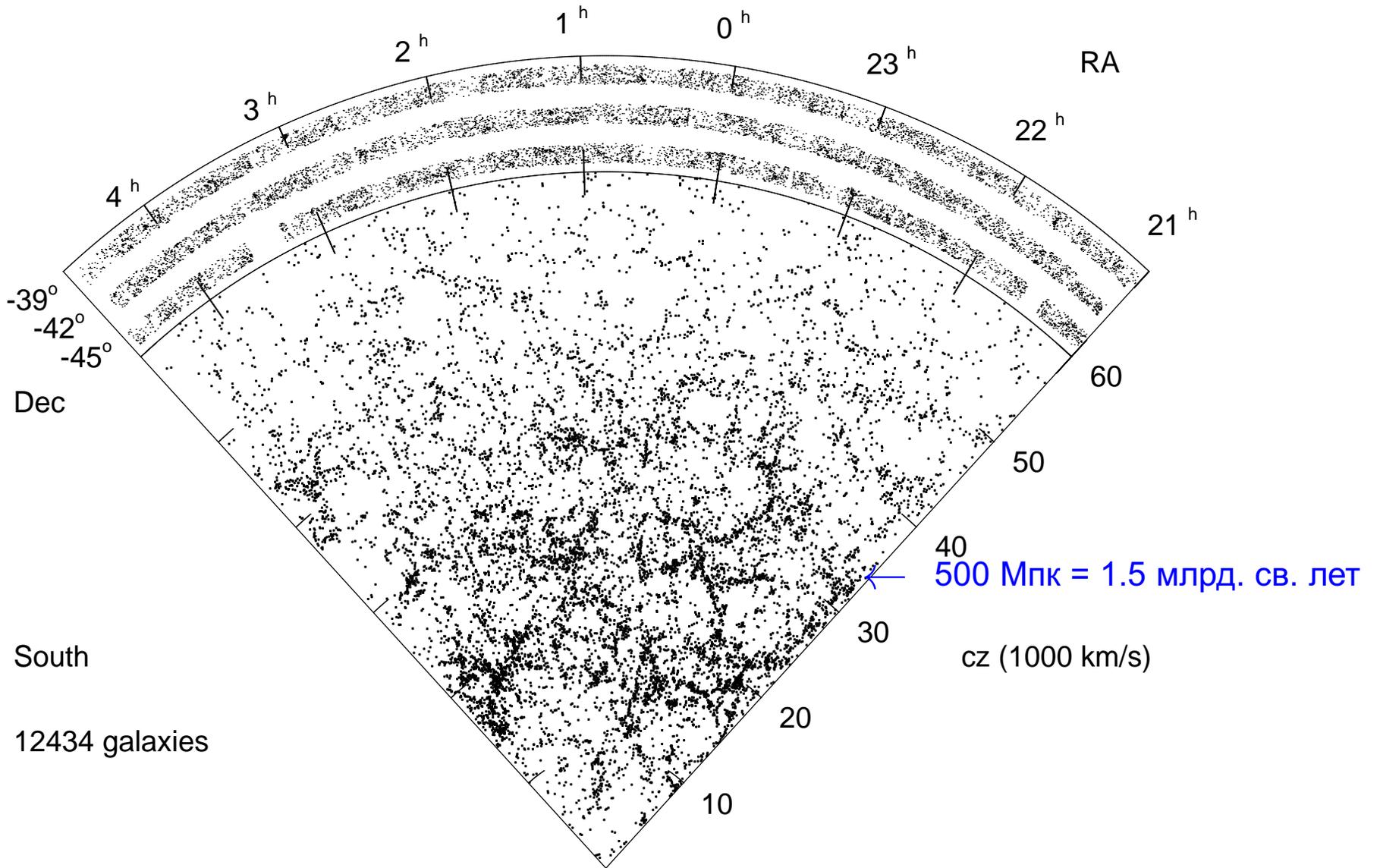
Глубокие обзоры галактик



положение во Вселенной более миллиона галактик,
расстояния до 20 млрд. световых лет



карта видимой части Вселенной



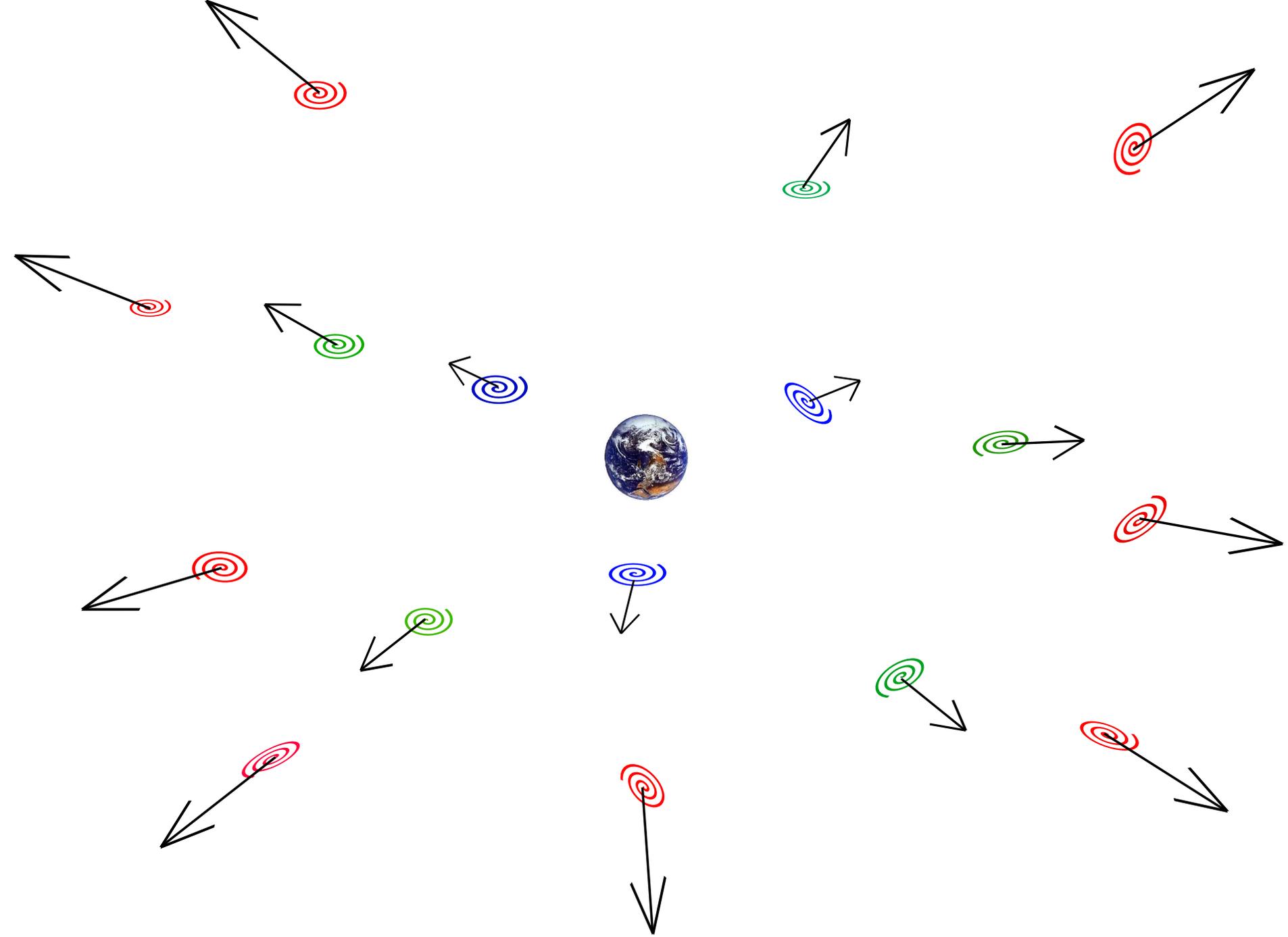
Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная **расширяется**

Пространство растягивается во все стороны.

Галактики удаляются от нас; чем дальше галактика, тем быстрее она убегает (закон Хаббла – конец 1920-х).

Эффект Допплера: свет от далеких галактик приходит к нам покрасневшим



Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная расширяется

Сегодня расширение медленное: все расстояния увеличатся вдвое за 10 млрд. лет.

В прошлом Вселенная расширялась гораздо быстрее

В будущем Вселенная будет более разреженной.

В прошлом вещество во Вселенной было гораздо более плотным

Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная расширяется
- Вселенная “теплая”

Заполнена тепловым электромагнитным излучением
(Пензиас–Вильсон, 1950-е),

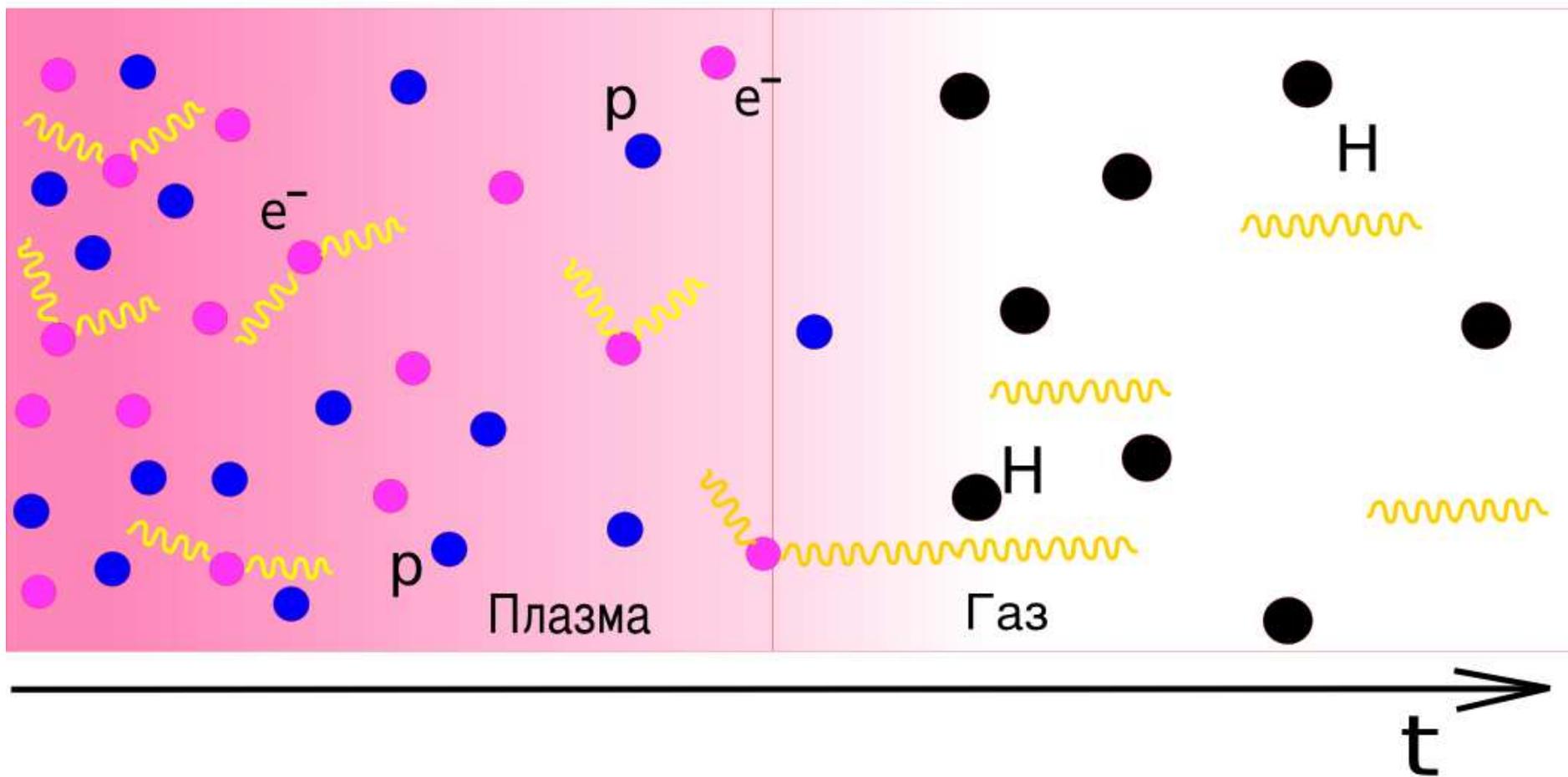
$$T = 2.726 \text{ градусов Кельвина}$$

(ниже температуры жидкого гелия)

В прошлом была гораздо более горячей.

Остыла из-за расширения.

Переход плазма-газ

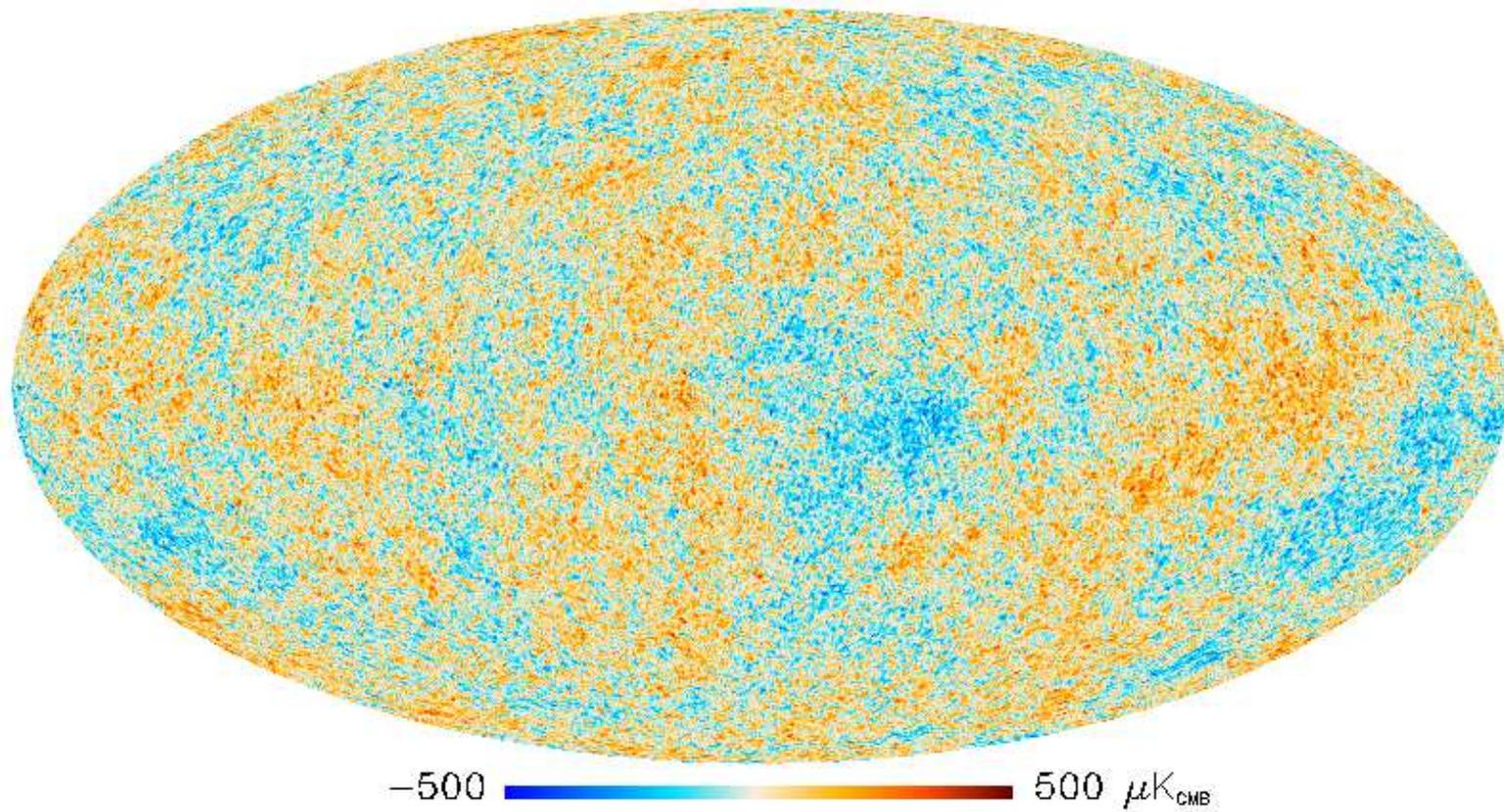


- Измерения температуры реликтового излучения в зависимости от направления на небе



фотоснимок Вселенной в возрасте 380 тыс. лет
(сегодня — 13.8 млрд. лет)

$$T = 2.726^\circ K, \quad \frac{\delta T}{T} \sim 0.0001 - 0.000001$$



Planck

Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная расширяется
- Вселенная “теплая”
- Наивное продолжение эволюции назад во времени ⇒
момент Большого Взрыва: “начало“, бесконечная
плотность вещества, бесконечная температура,
бесконечная скорость расширения.

Сегодня мы знаем, что горячая стадия не была первой.
Ей предшествовала другая, необычная стадия
(инфляция???)

Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная расширяется
- Вселенная “теплая”
- Наше пространство евклидово

Сумма углов треугольника = 180 градусам.

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

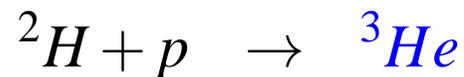
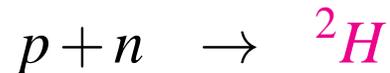
Видимая часть Вселенной – не более $1/100$ ее полного объема.

Ранняя Вселенная:

- Переход плазма–газ
 $T = 3000$ градусов,
возраст Вселенной = 380 тыс. лет.
- Эпоха **термоядерных реакций**

$T =$ миллиарды градусов

возраст Вселенной = 1 секунда \rightarrow 3 минуты (!)



...

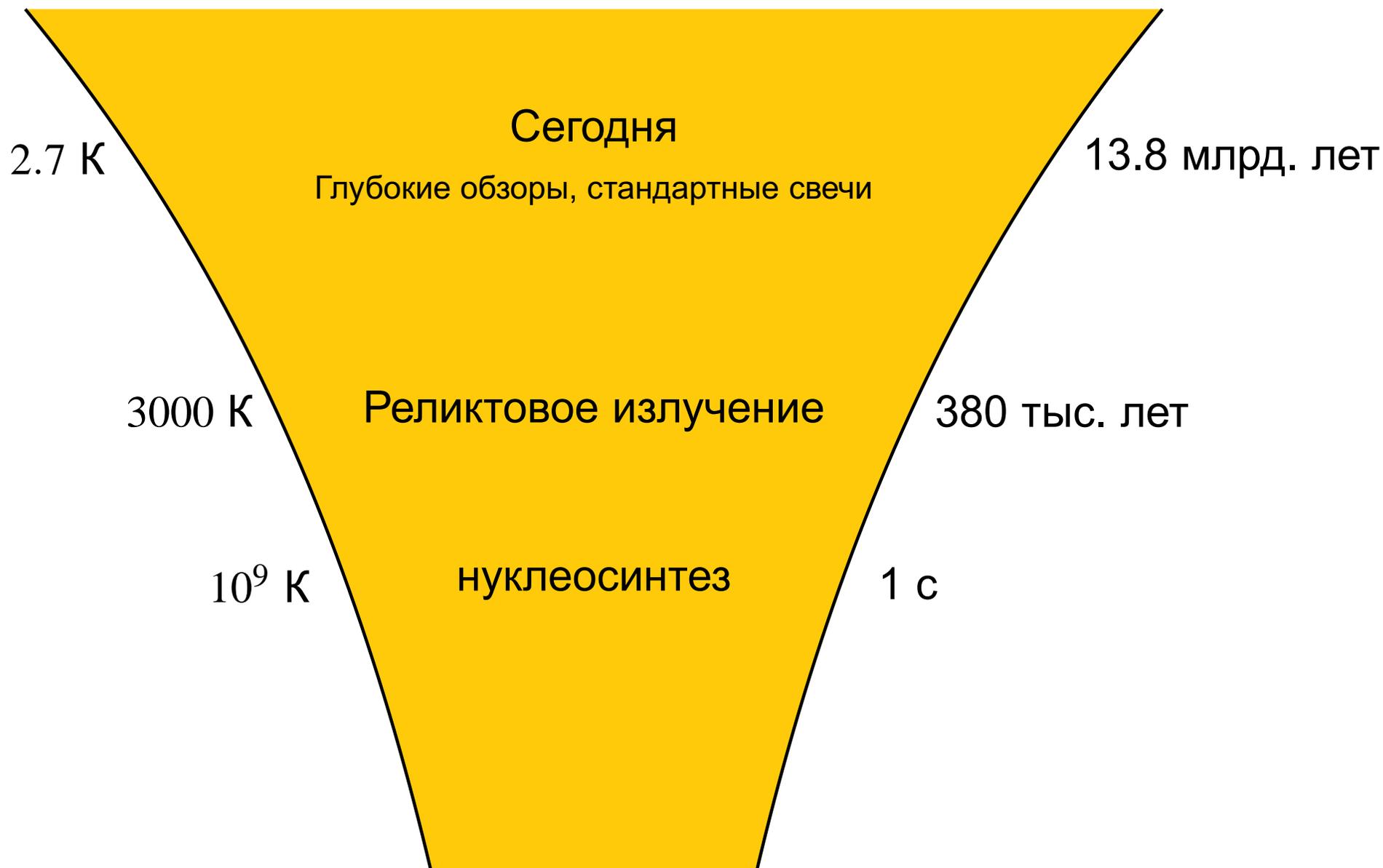
Примеси легких элементов измерены

Сравнение наблюдений примеси легких элементов с теорией:

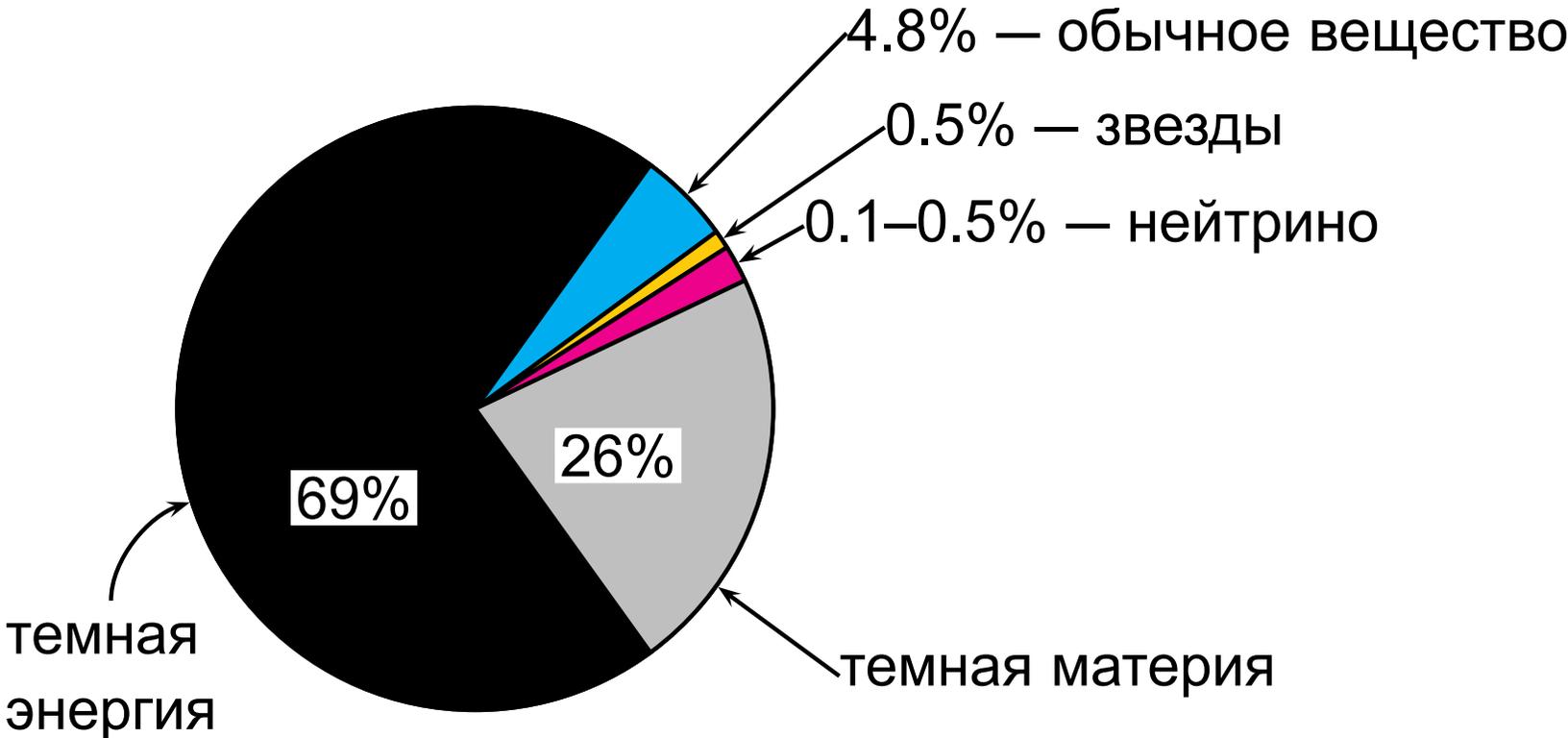
- Проверка теоретического описания ранней Вселенной через 1 секунду после Большого Взрыва
- Измерение плотности обычного вещества тогда \Rightarrow сейчас

Независимая проверка: измерение свойств реликтового излучения

Этапы эволюции Вселенной и данные о них



Баланс энергий в современной Вселенной



Загадка No. 1:

Откуда во Вселенной обычное вещество?

(“проблема барионной асимметрии”)

Современная Вселенная: вещество есть, антивещества нет.

В чем здесь проблема?

В обычных условиях действует
закон сохранения барионного числа

$$N_B = \frac{1}{3}(N_{\text{кварков}} - N_{\text{антикварков}}) = \text{const}$$

- Единственная причина стабильности протона (3 кварка)
— легкой частицы, несущей барионное число

$$\tau_p > 10^{33} \text{ лет}$$

Ранняя Вселенная, $T > 10^{12}$ К = 0.1 ГэВ:

рождение и аннигиляция кварк-антикварковых пар \implies

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

на 1 млрд. пар кварк-антикварк был один “лишний” кварк (!)

Невероятно, чтобы такая асимметрия
была во Вселенной с самого начала.

Она возникла в результате эволюции.

Каким образом?

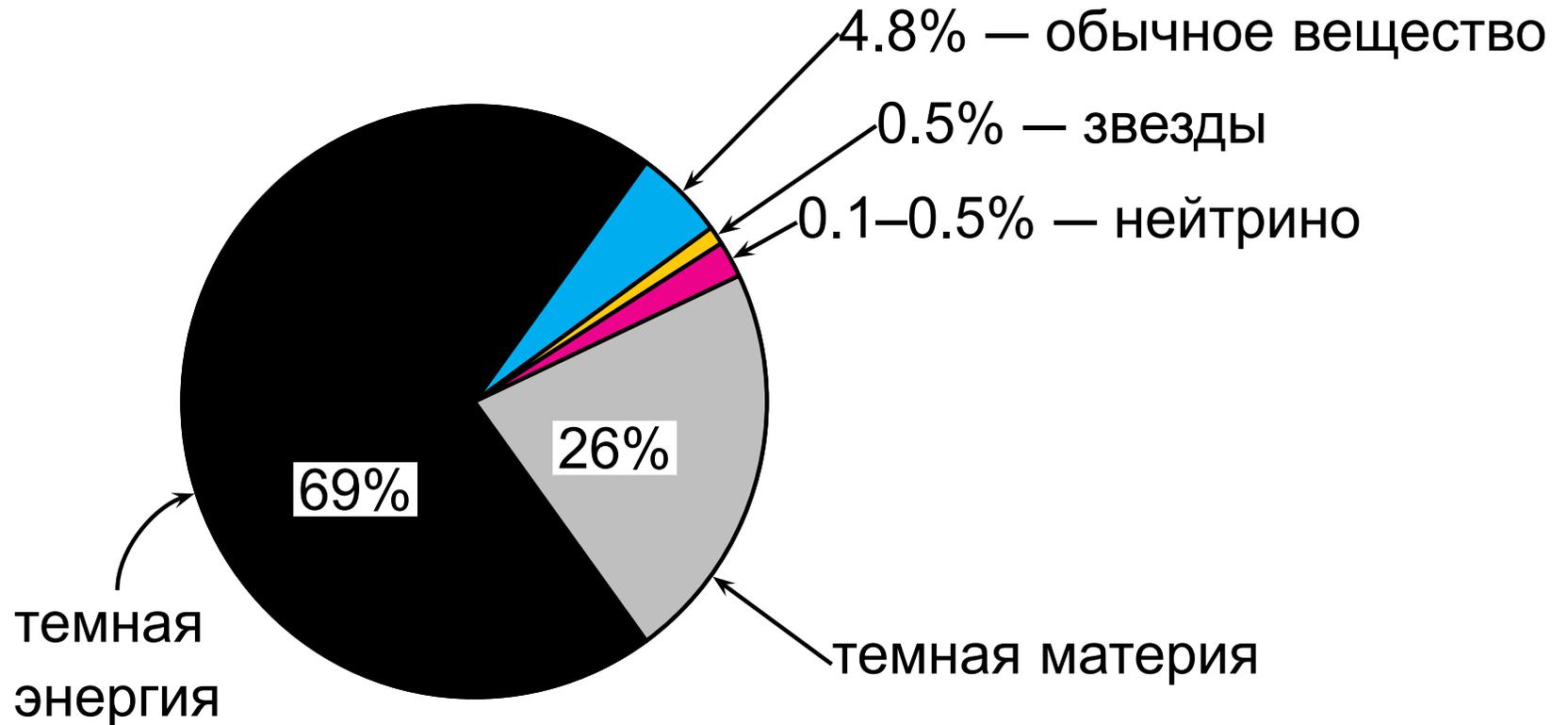
А. Д. Сахаров'67, В. А. Кузьмин'70

Барионная асимметрия жизненно важна для нас.

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

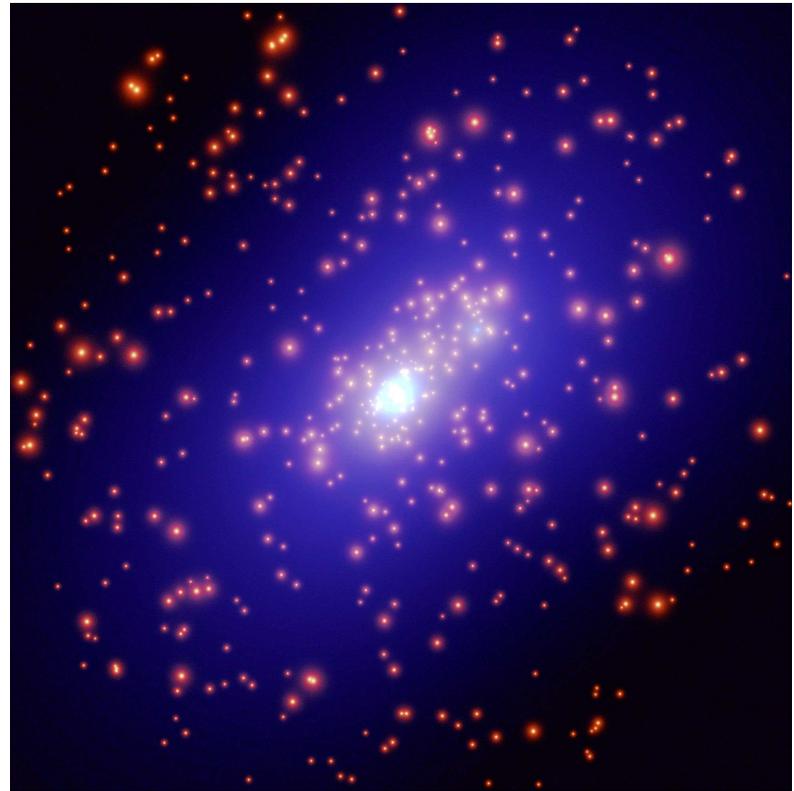
Гипотез много, ни одна не подтверждена

Загадка No. 2: ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

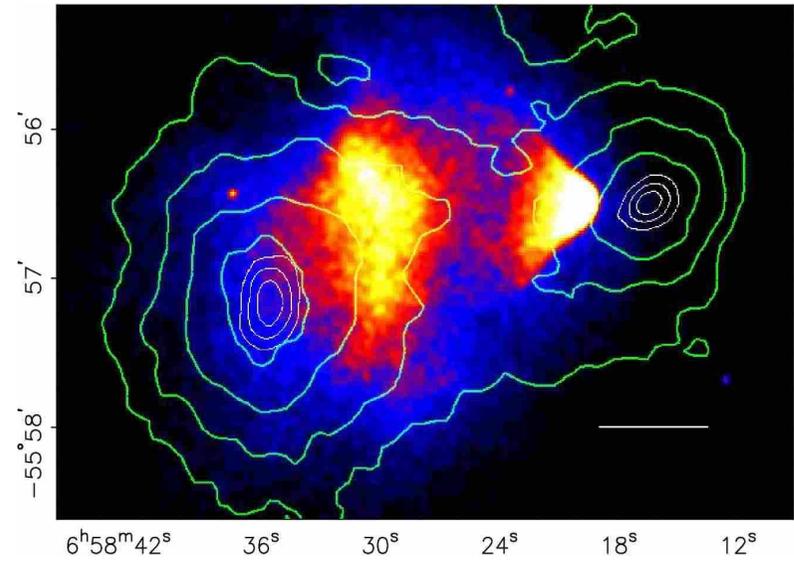
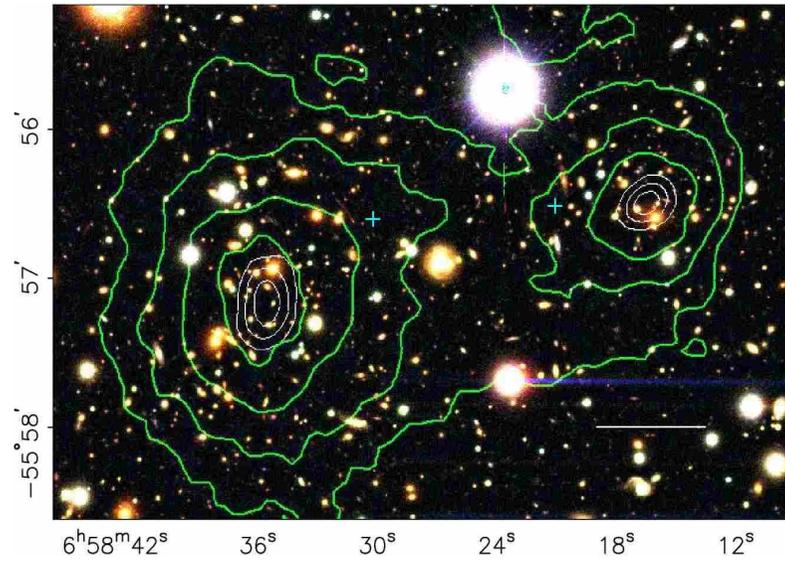


- данные о распределении галактик, реликтовом излучении
- гравитационные силы **в скоплениях галактик**

Гравитационное линзирование

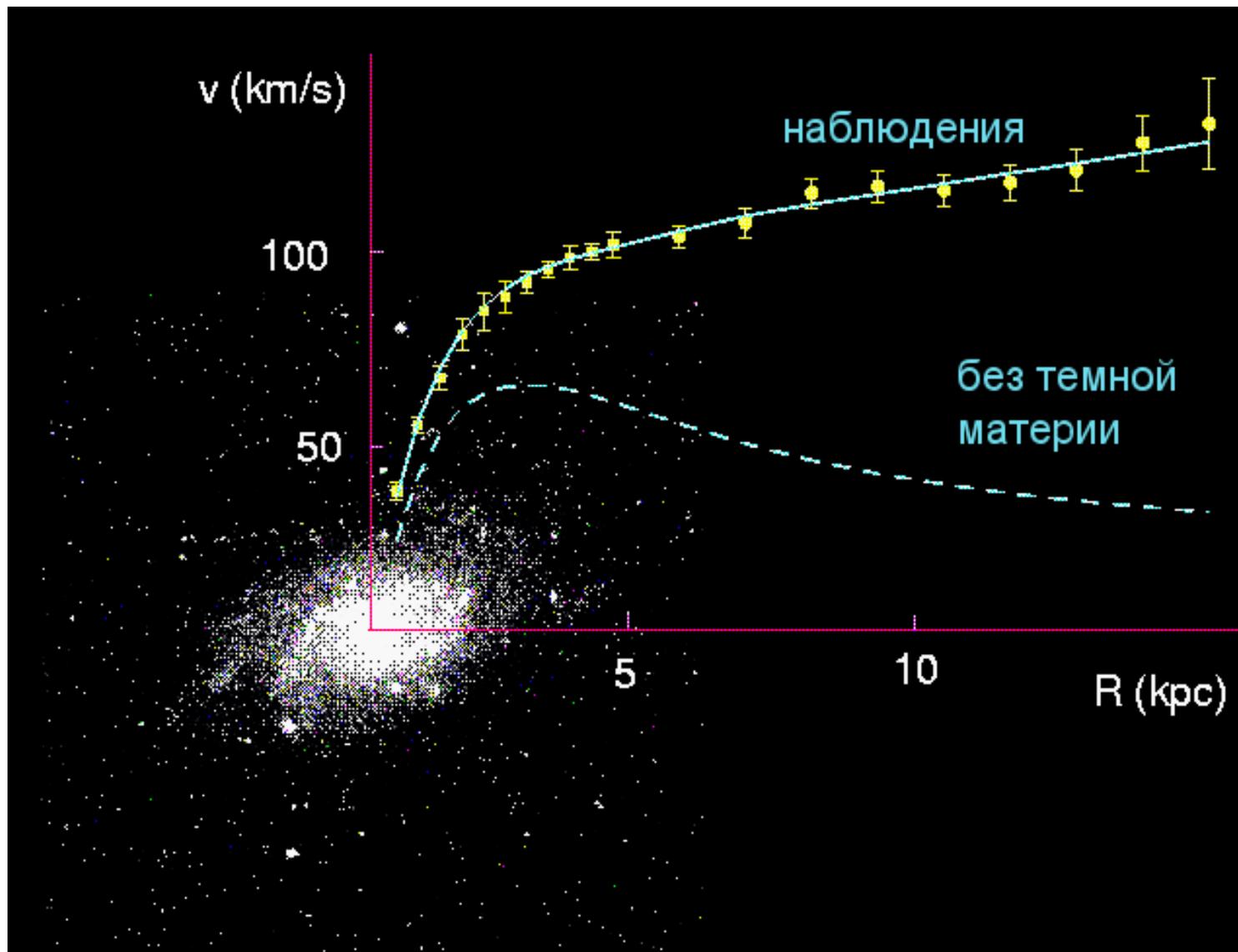


Столкнувшиеся скопления

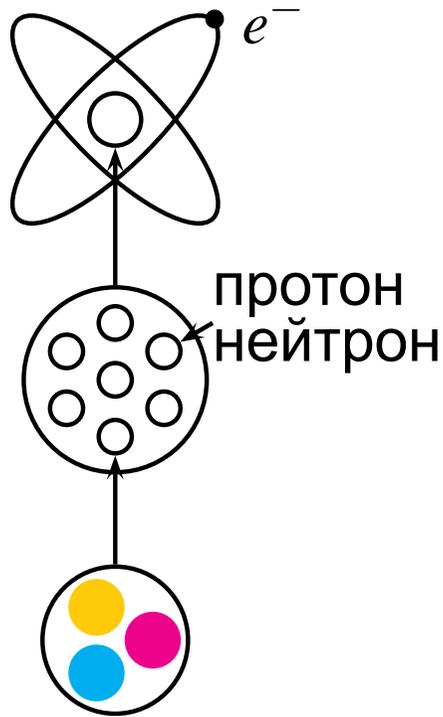


Темная материя

- данные о распределении галактик, реликтовом излучении
- гравитационные силы в скоплениях галактик
- вращение звезд на периферии галактик



Известные элементарные частицы



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 \Leftrightarrow электромагнитные, глюоны \Leftrightarrow сильные,
 $W, Z \Leftrightarrow$ слабые
+ бозон Хиггса, ответственный за массы.

Природа темной материи — область гипотез

Скорее всего

- темная материя = неизвестные тяжелые частицы, электрически нейтральные.
- $(1000-10^4) \frac{1}{\text{М}^3}$ здесь и сейчас
- Нет среди известных частиц
- Стабильные. Слабо взаимодействуют с веществом.
- Новые симметрии фундаментальных взаимодействий

- Наиболее правдоподобная гипотеза:
новые, пока не открытые элементарные частицы массы $m = 100\text{--}1000$ масс протона, взаимодействующие, хотя и слабо, с обычным веществом

Новая физика при энергиях, доступных для изучения на ускорителях

- Скорее всего, частица темной материи – лишь один из членов нового семейства элементарных частиц.

Пути поиска частиц темной материи

- Эксперименты в подземных лабораториях \Leftrightarrow регистрация частиц темной материи

Трудности:

- Мало столкновений этих частиц с обычными атомами
- Слабый сигнал от столкновения
- Мешают естественная радиоактивность, космические лучи.



низкофоновые условия

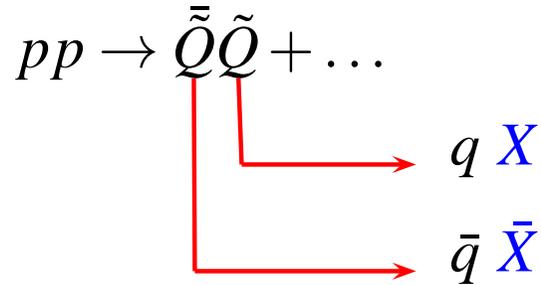


подземные лаборатории,
сверхчистые изотопы

- Ускорители – коллайдеры высоких энергий \Leftrightarrow рождение частиц темной материи и их партнеров

Большой адронный коллайдер, LHC в CERN

(Международный центр физики высоких энергий вблизи Женевы): pp , $E = 7 + 7$ ТэВ

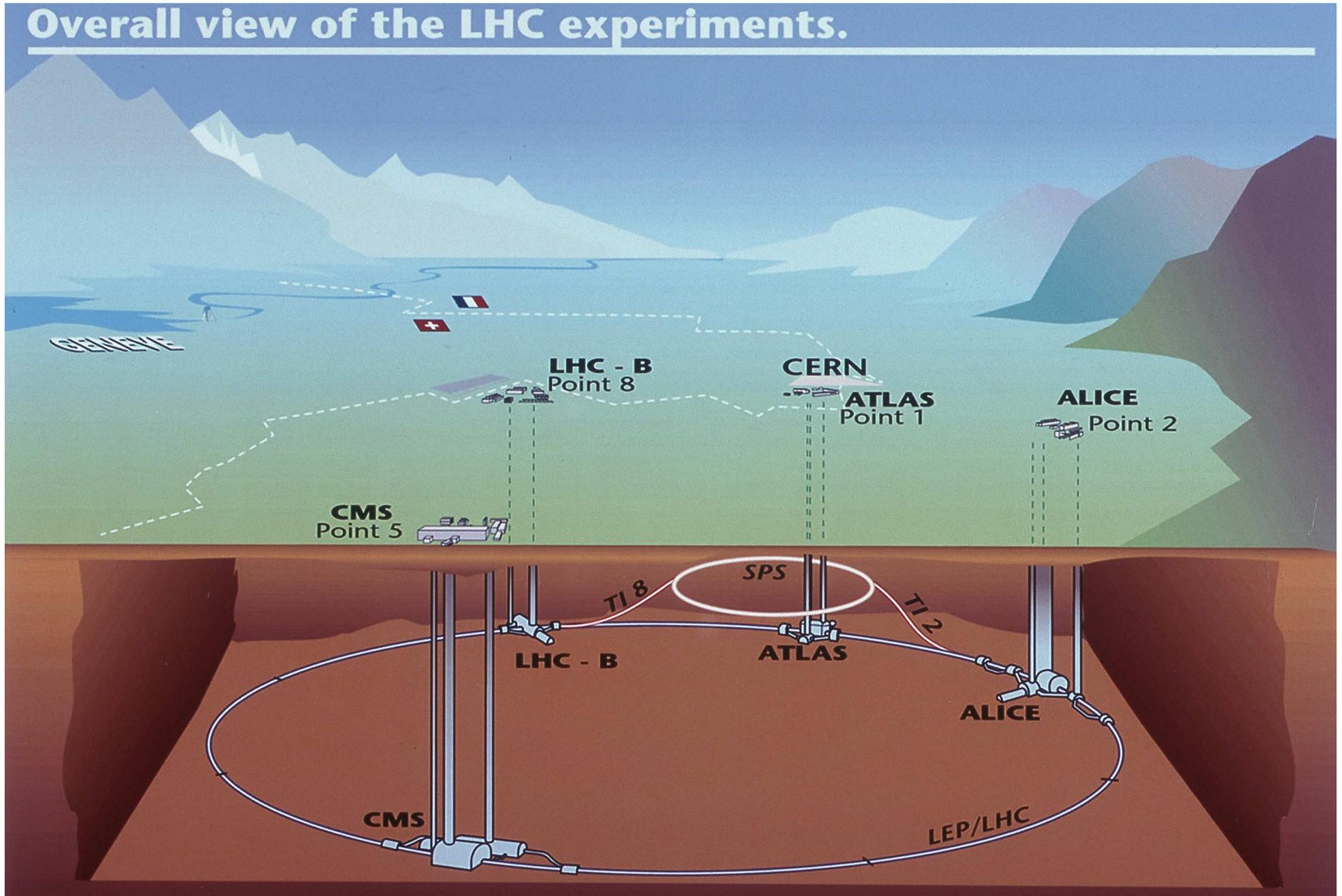


Пока не видно...



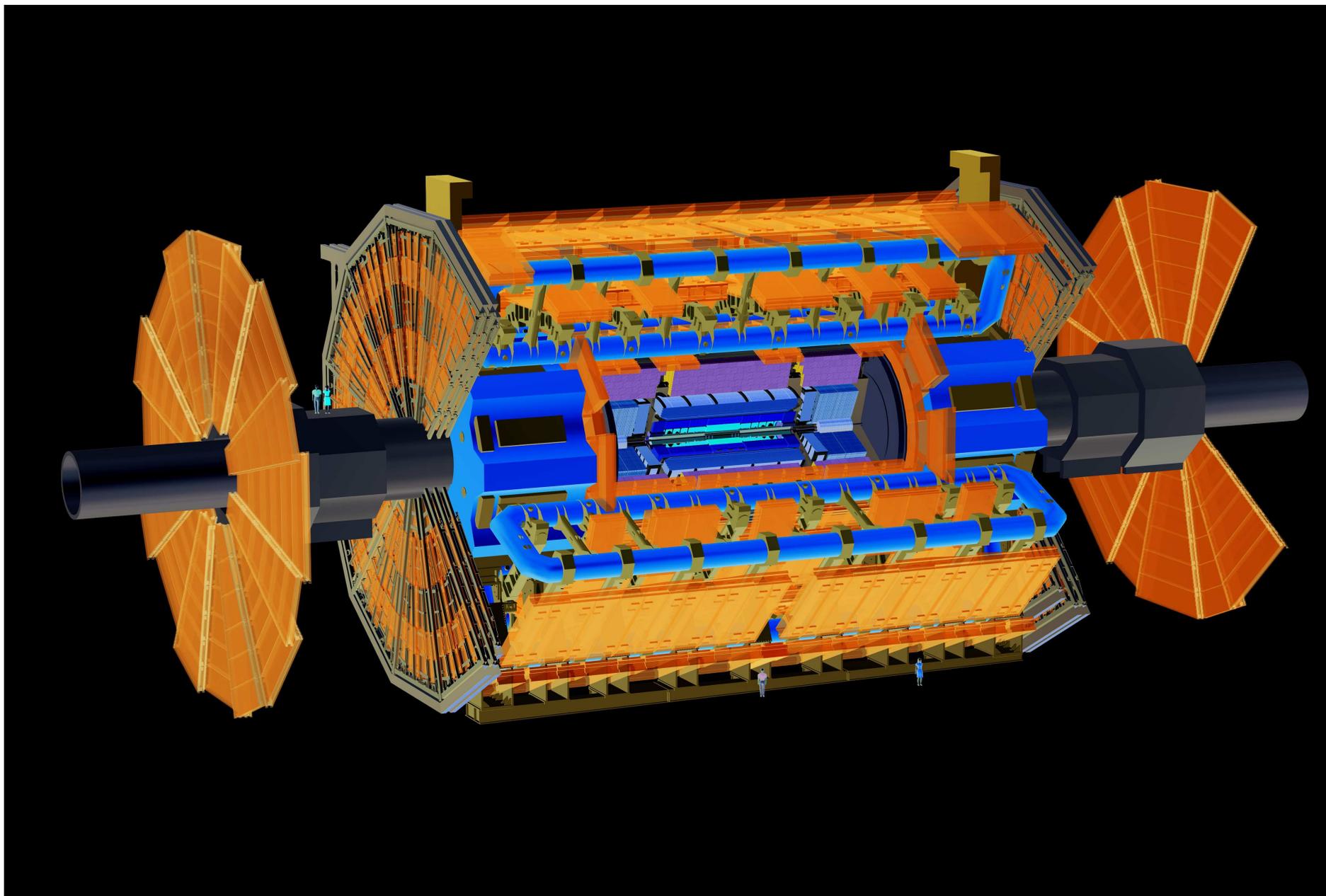
LHC/БАК

Overall view of the LHC experiments.

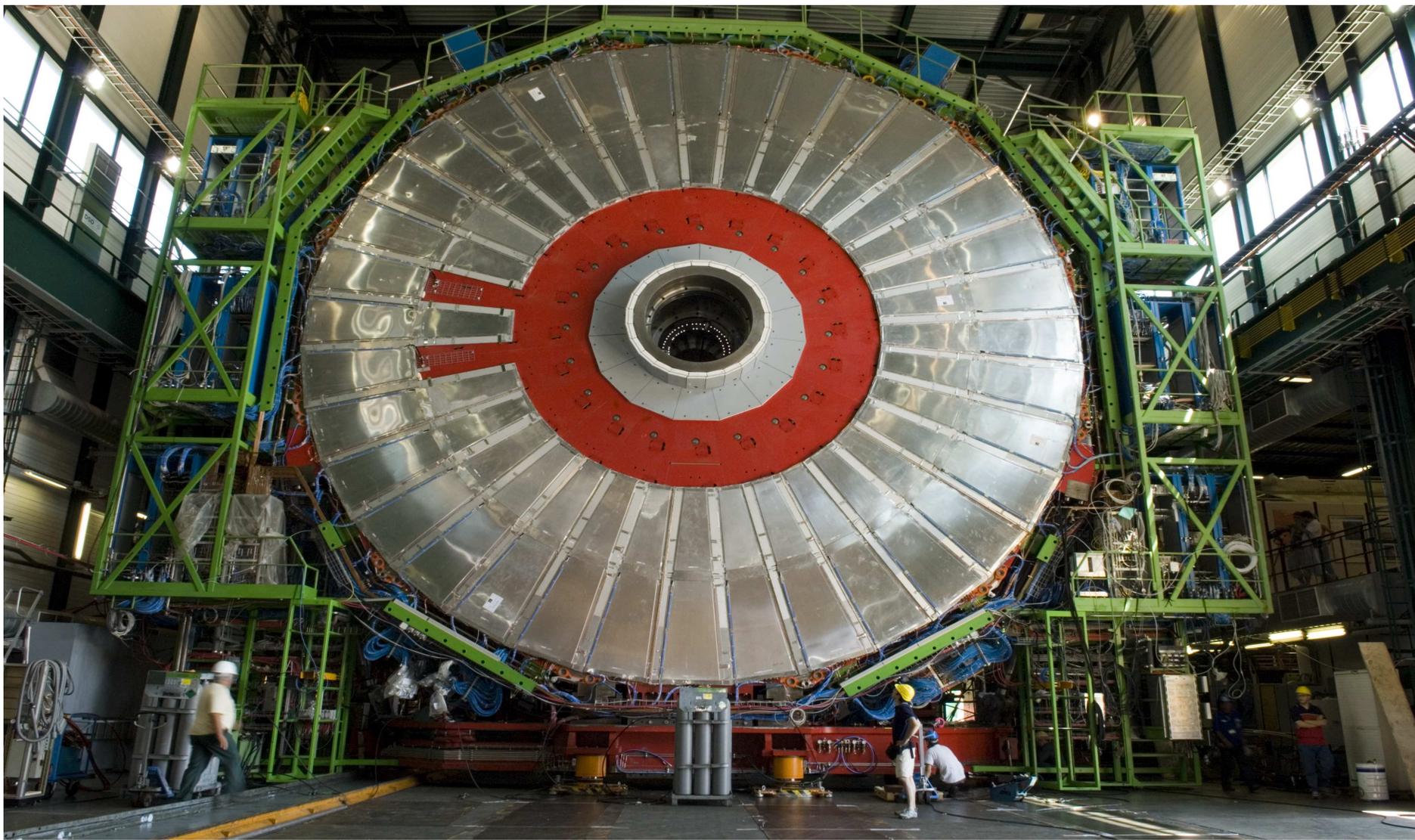


Детекторы ЛНС/БАК

ATLAS



CMS с торца

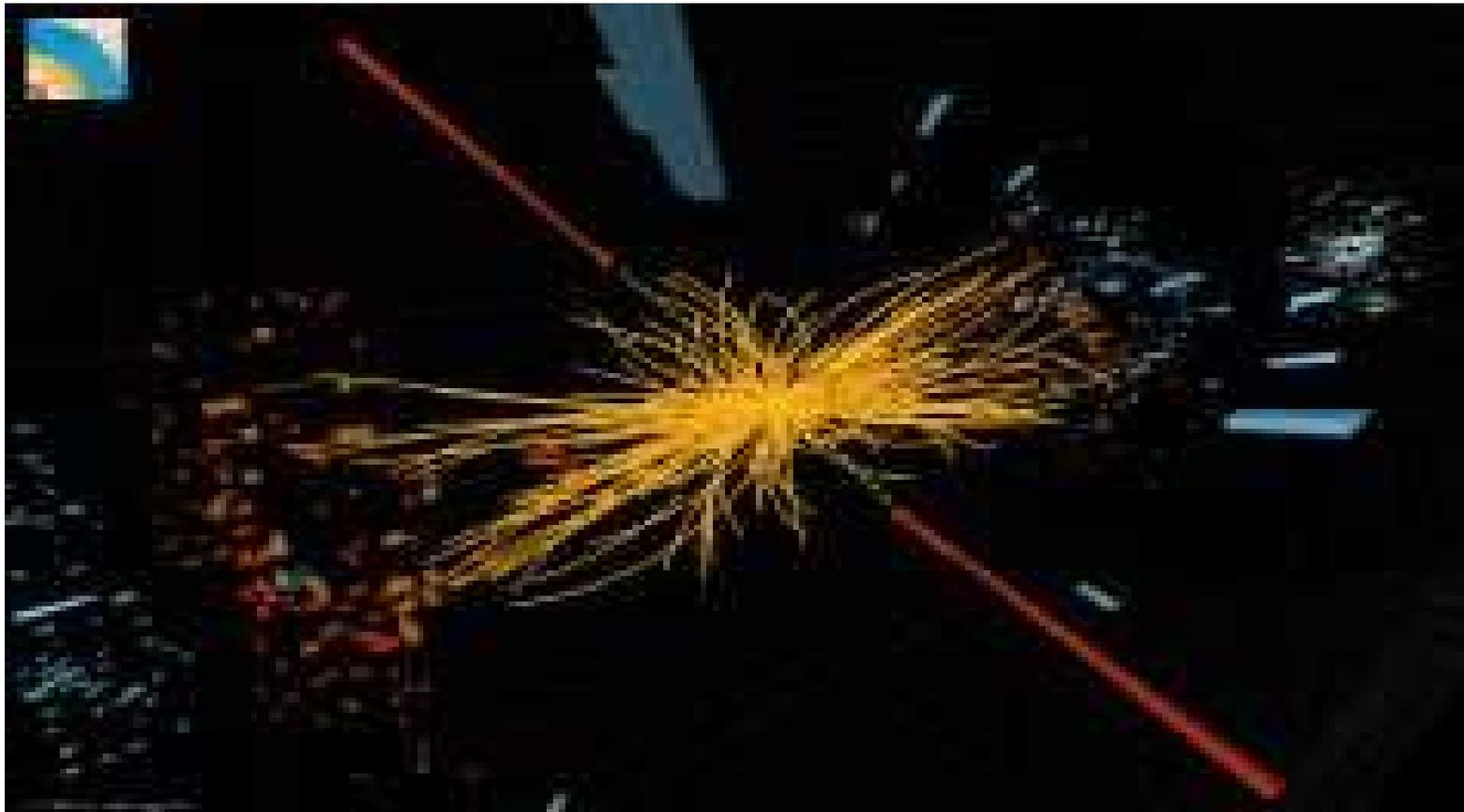


Что видят детекторы?

Детектируются все заряженные частицы и фотоны.

Определяется тип частицы – электрон, фотон, мюон, адрон (протон, нейтрон, мезон).

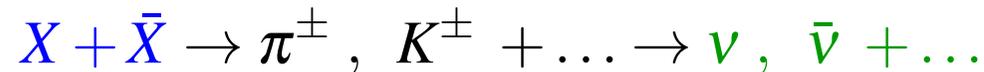
Измеряется энергия и направление движения каждой частицы.



Так могло бы выглядеть событие с рождением новой частицы

Непрямые поиски частиц темной материи

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



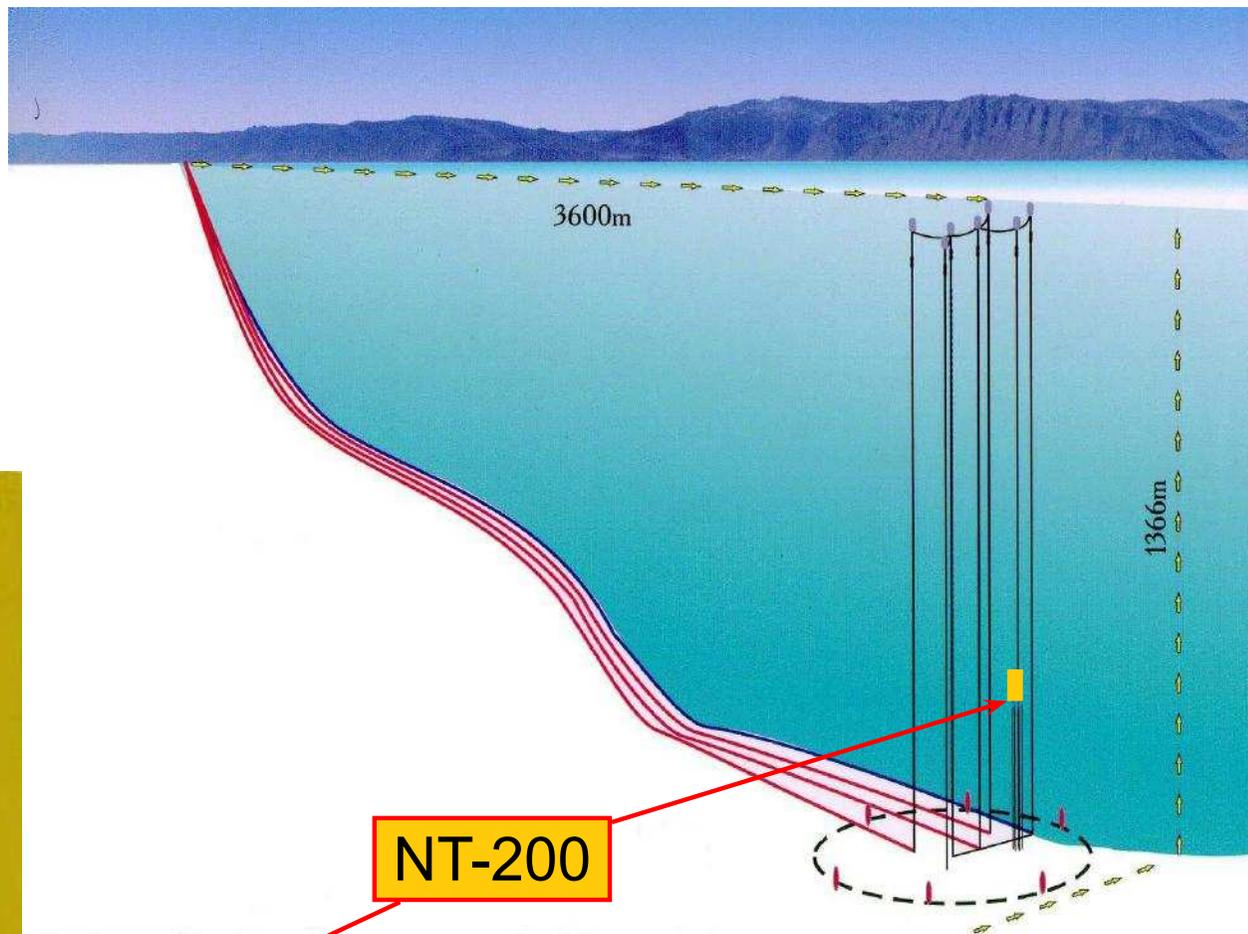
Нейтрино
высоких
энергий \implies

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

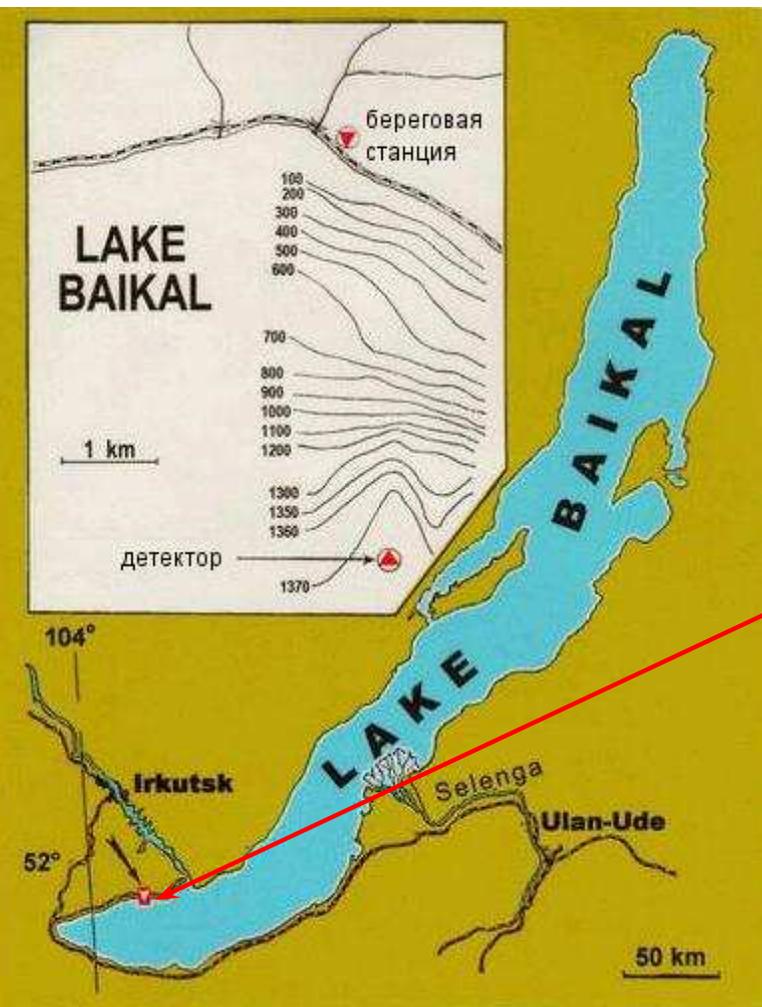
- Регистрация продуктов аннигиляции в космосе.

Поиск e^+ , \bar{p} в космических лучах; фотонов от e^+e^- -аннигиляции в космосе

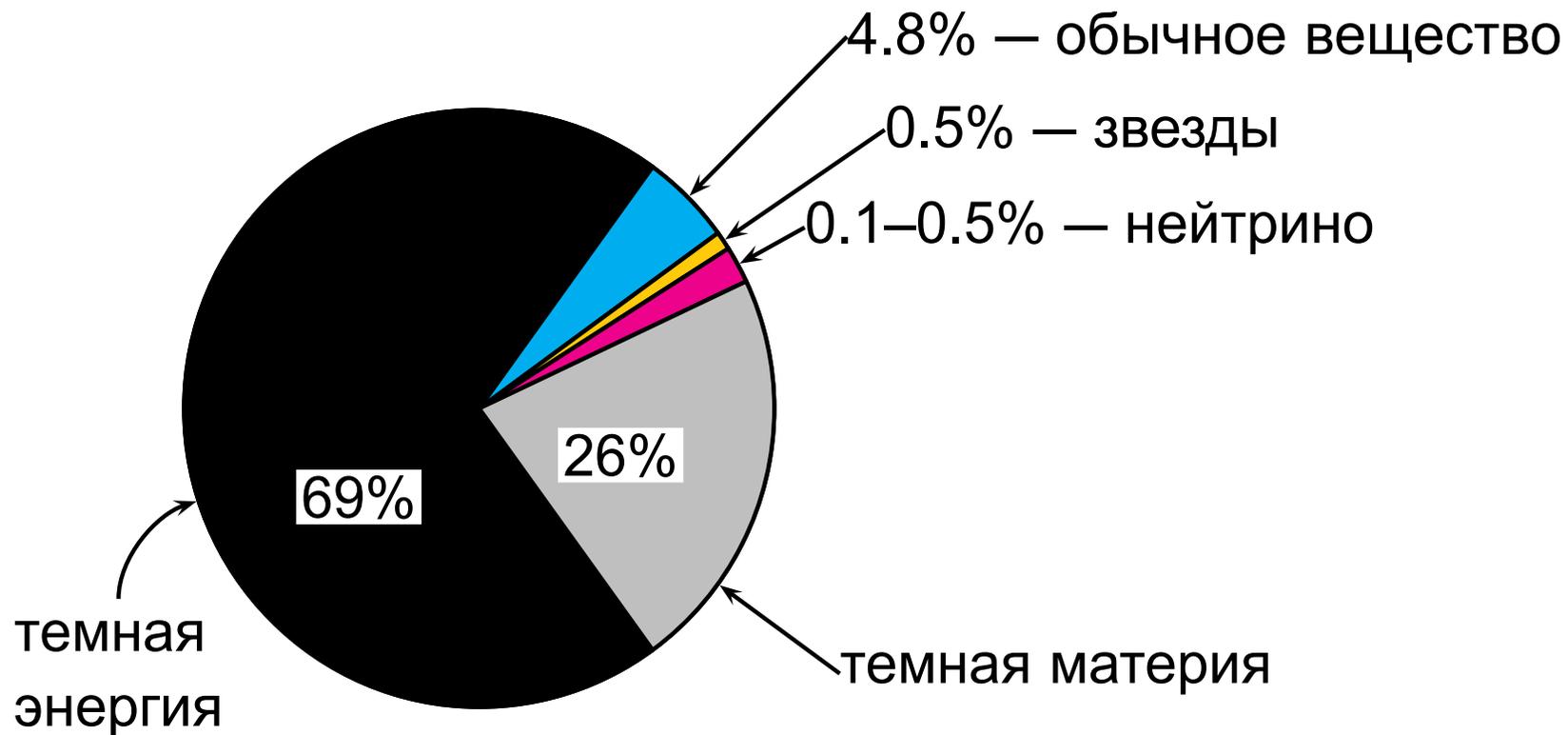
Pamela (Россия – Италия), AMS на МКС.



NT-200



Загадка No. 3: ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ



ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

- Однородно “разлита” во Вселенной, не собирается в сгустки (галактики, скопления)
- Вселенная сегодня расширяется **с ускорением**

Темп расширения **растет**



АНТИГРАВИТАЦИЯ

- Нет противоречия с общей теорией относительности, если **плотность** темной энергии **не меняется** (или почти не меняется) **при расширении Вселенной**

Природа темной энергии — возможно главная загадка физики XXI века

- Энергия вакуума?
- Новое сверхслабое поле?
- Новая гравитация на сверхбольших расстояниях?

Загадка No. 4: что было до горячей стадии эволюции Вселенной?

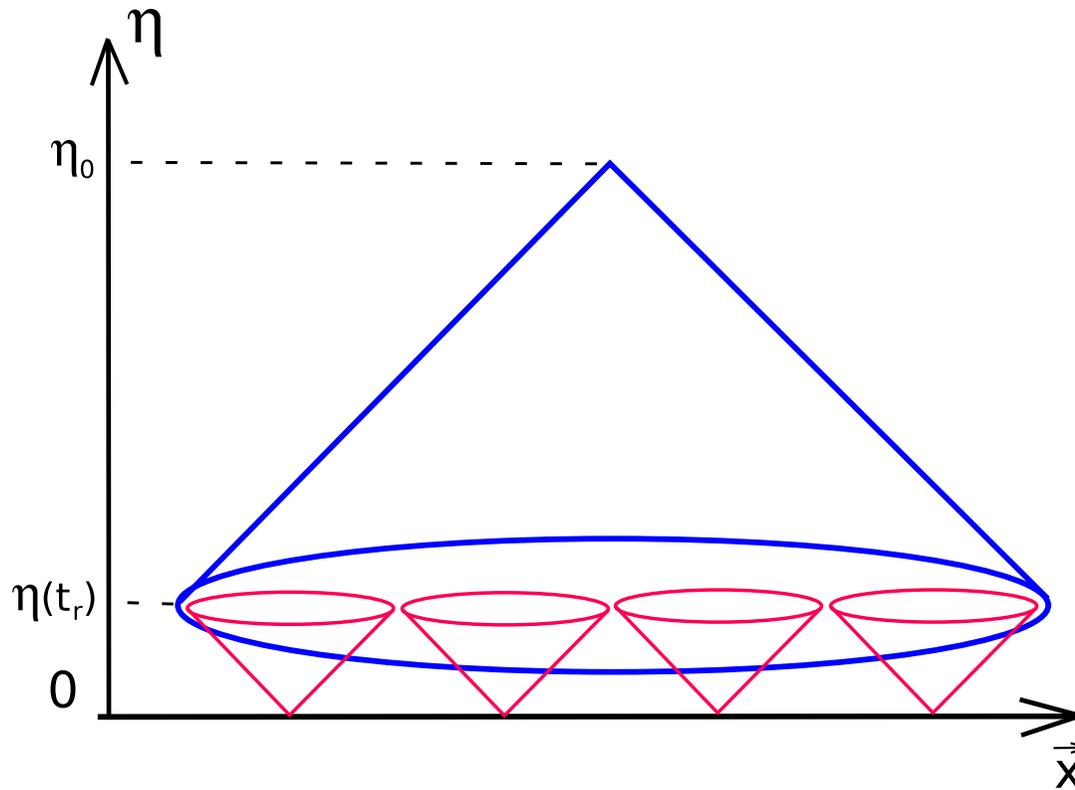
● Глобальные вопросы:

- Почему Вселенная такая большая и однородная?
- Почему она была такая горячая?
- Почему наше пространство евклидово?

● Происхождение неоднородностей во Вселенной

Ключ: причинность.

Причинная структура пространства-времени в теории горячего Большого взрыва

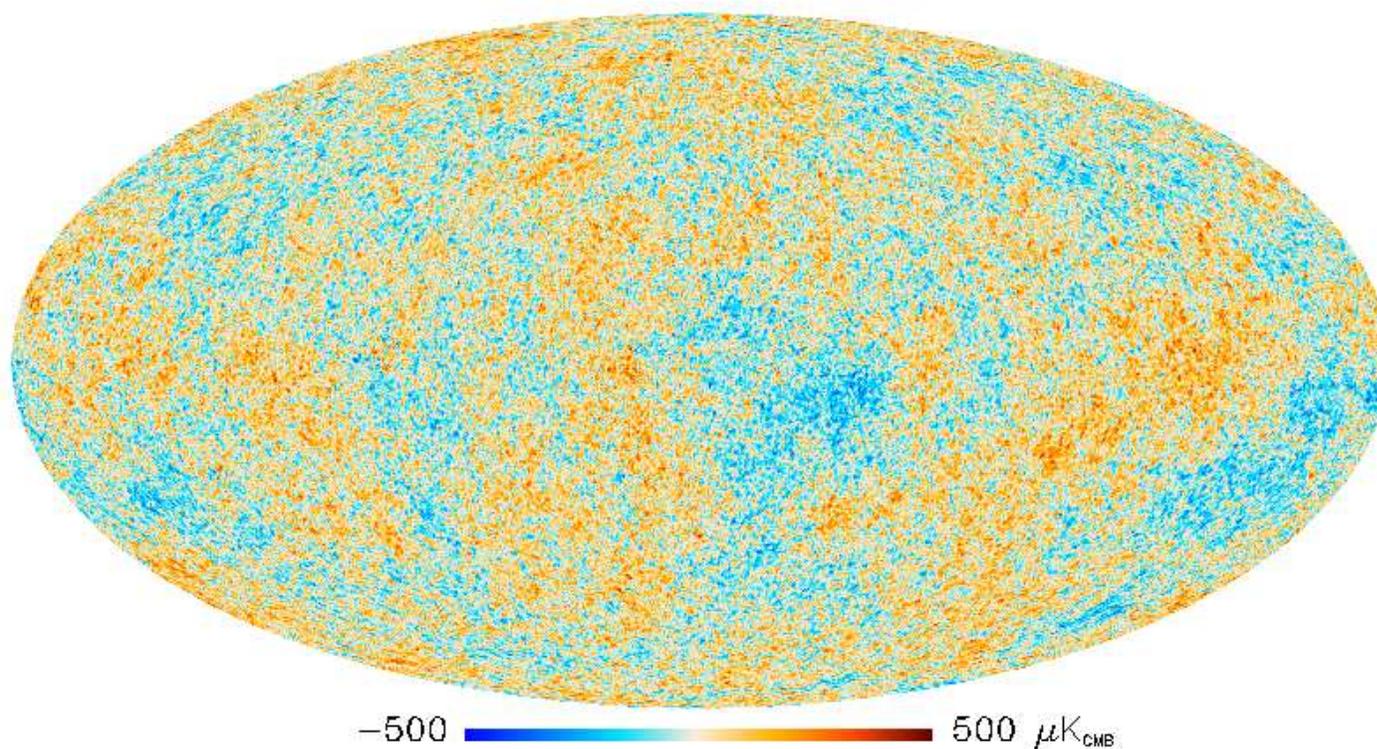


Горизонт: максимальное расстояние, которое проходит сигнал, испущенный сразу после Большого взрыва = максимальный размер причинно-связанной области

Угловой размер горизонта эпохи рекомбинации = 2° .

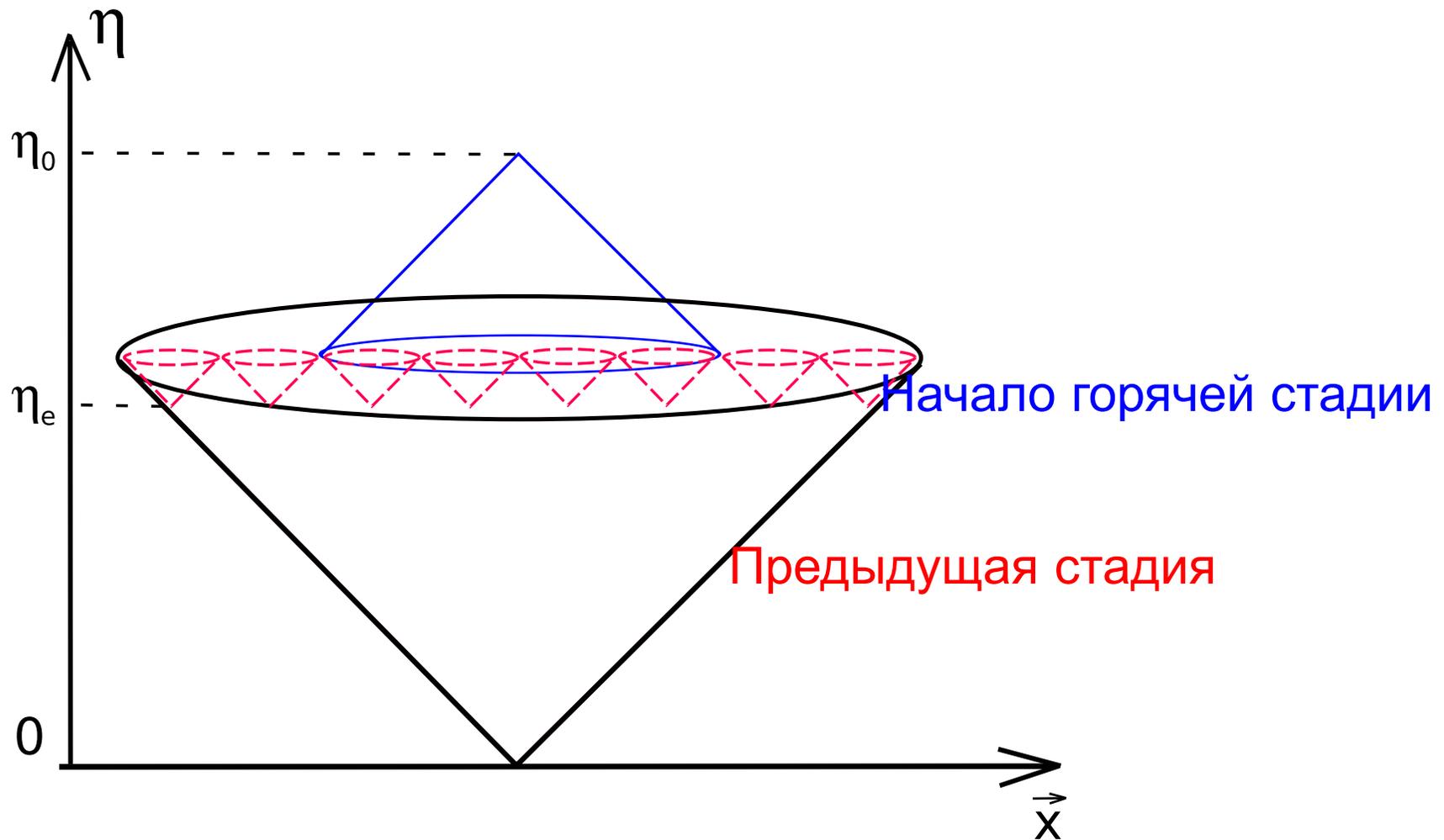
В эпоху рекомбинации неоднородностей углового размера больше 2° не должно быть.

А они есть!



Значит, горячая стадия не была первой!

Причинная структура в полной теории



Проект ответа:

Теория раздувающейся (инфляционной) Вселенной

А. А. Старобинский;

A. Guth;

А. Д. Линде; A. Albrecht, J. Steinhardt

конец 70-х — начало 80-х

Раздувание = расширение с гигантским **ускорением**,
с микро- до макро-размеров за малые доли секунды.

Но не исключены и альтернативы:

- Сжатие – отскок – расширение
- “Разгоняющаяся Вселенная”, старт с малой плотностью энергии и малым темпом расширения

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

Реализуется в инфляционной теории

В. Муханов, Г. Чибисов;

S. Hawking;

A. Старобинский;

A. Guth, S.-Y. Pi;

конец 70-х — начало 80-х

Согласуется с наблюдательными данными.

- Аналогичный механизм работает и в теориях, альтернативных инфляции

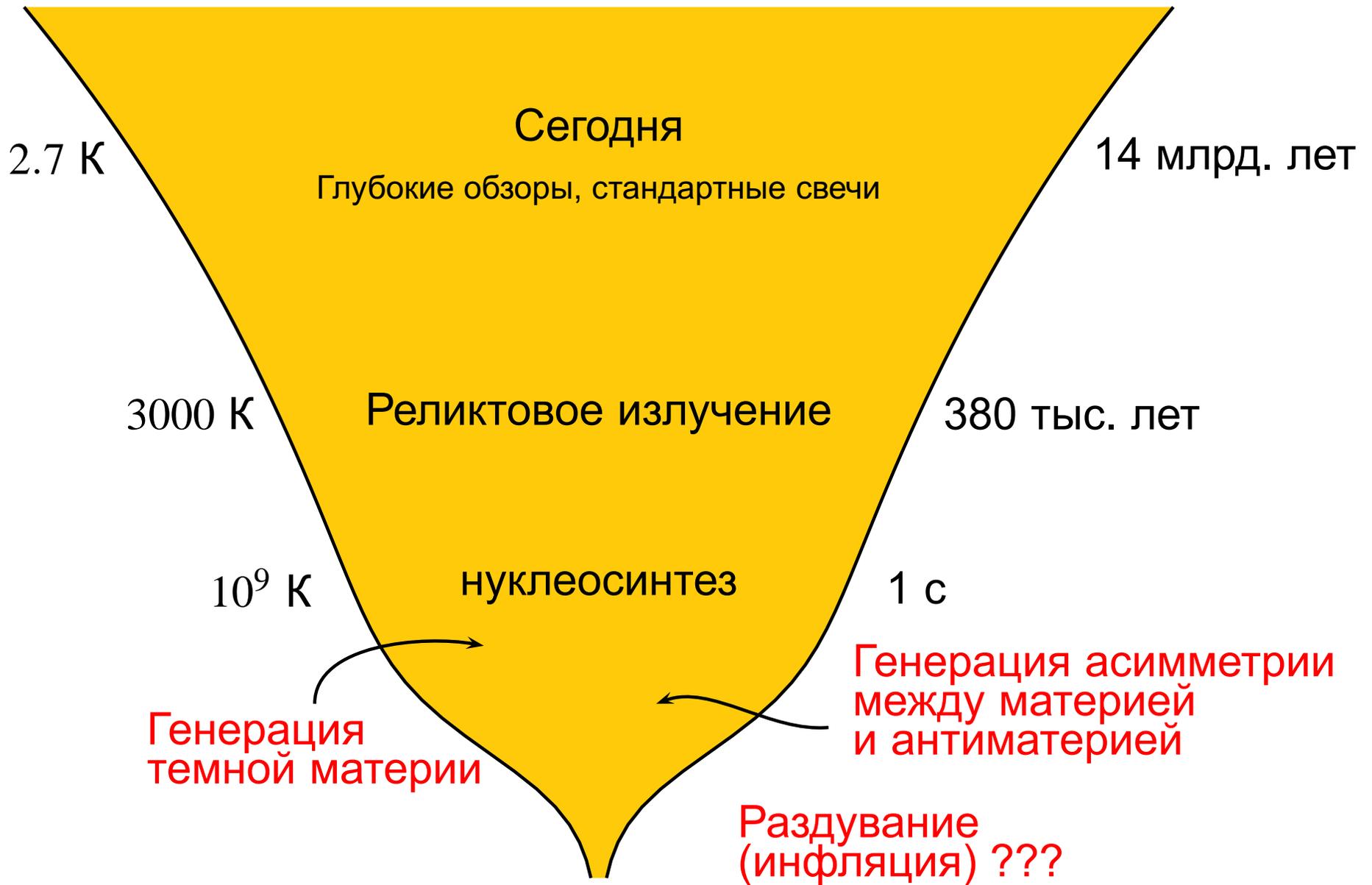
Удастся ли выяснить, что было до горячей стадии?

Нужно более детально изучить свойства космологических неоднородностей

- Реликтовые гравитационные волны были бы доказательством инфляции.
[Шум вокруг BICEP-2, март 2014, был преждевременным.]
- Тонкие корреляционные свойства неоднородностей.
Пока не обнаружены.

Механизмы инфляции и альтернатив \iff физика сверхмалых расстояний, сверхвысоких энергий

В перспективе: изучение методами наблюдательной космологии.



Космологические данные о темной материи, темной энергии,
асимметрии между веществом и антивеществом,
неоднородностях в Вселенной –
свидетельство неполноты наших представлений
об элементарных частицах и полях,
фундаментальных физических законах.

Современный этап развития естествознания:
начало кардинального изменения взгляда на природу

ГЛАВНЫЕ ОТКРЫТИЯ ВПЕРЕДИ

Барионная асимметрия: требуется:

- Нарушение известных законов сохранения

– до недавнего времени не наблюдалось

- Барионное число $B = \frac{1}{3}(N_q - N_{\bar{q}})$,

- Лептонные числа $L_e = (N_{e^-} + N_{\nu_e}) - (N_{e^+} + N_{\bar{\nu}_e})$, L_μ , L_τ .

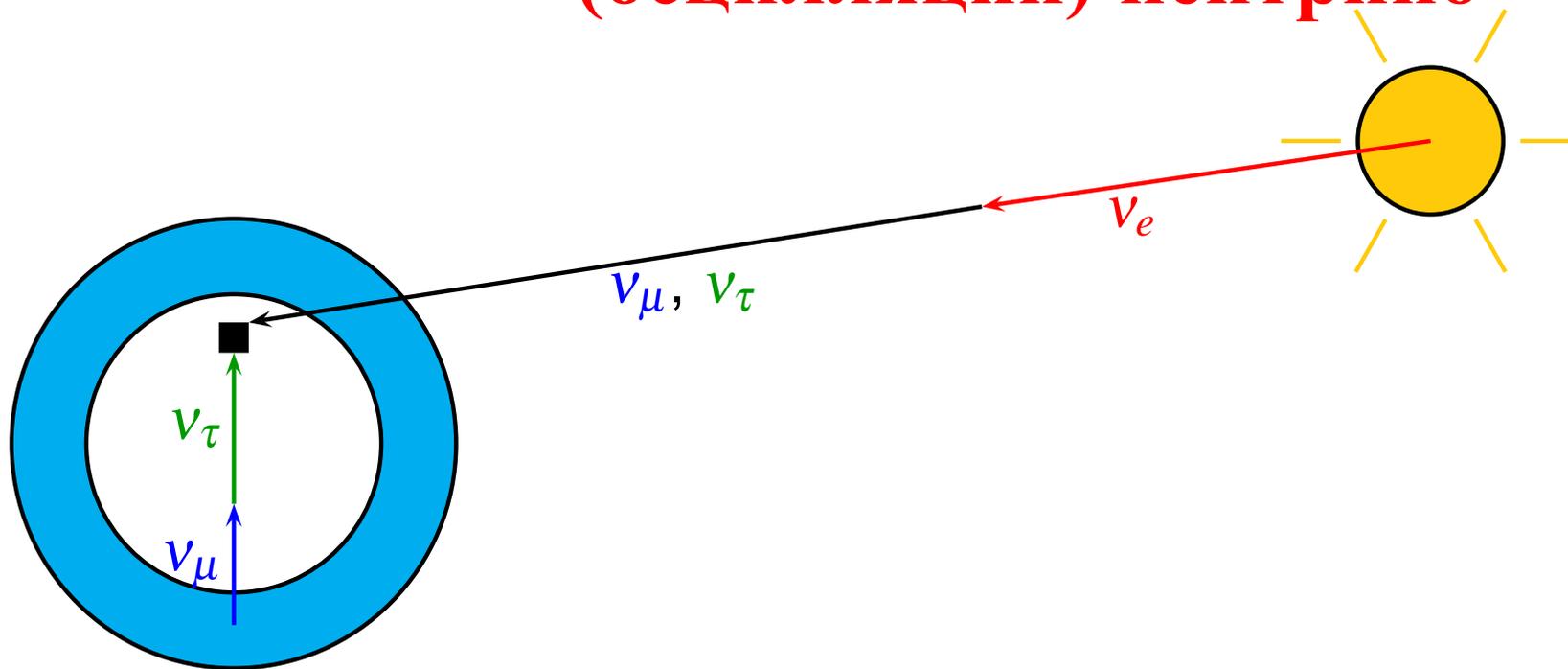
Распад мюона $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$

Вероятность распада $\mu \rightarrow e \gamma$ меньше 10^{-11} (!)

- Различие между материей и антиматерией во взаимодействиях частиц

– наблюдалось, но чересчур слабое

Ключ: взаимопревращения (осцилляции) нейтрино



Super-K

Ускорительные ν_μ : K2K
T2K, Minos

Homestake (США)

Kamiokande, Super-K (Япония)

ГГНТ – SAGE (Россия)

GALLEX/GNO (Италия)

SNO (Канада)

Реакторные $\bar{\nu}_e$: KamLAND

CHOOZ, Daya Bay, RENO

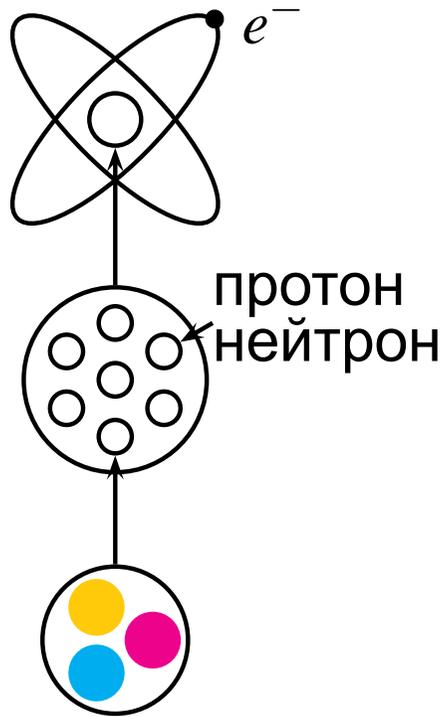
Нарушение законов сохранения лептонных чисел!

В принципе, этого достаточно для объяснения асимметрии между веществом и антивеществом во Вселенной.

Предстоит узнать:

- Массы нейтрино \longleftrightarrow влияние на эволюцию Вселенной
- Различие свойств нейтрино и антинейтрино (нарушение CP) \longleftrightarrow асимметрия между веществом и антивеществом

Известные элементарные частицы



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 \Leftrightarrow электромагнитные, глюоны \Leftrightarrow сильные,
 $W, Z \Leftrightarrow$ слабые
+ бозон Хиггса, ответственный за массы.