

Темная материя и темная энергия во Вселенной

В. А. Рубаков

Институт ядерных исследований РАН

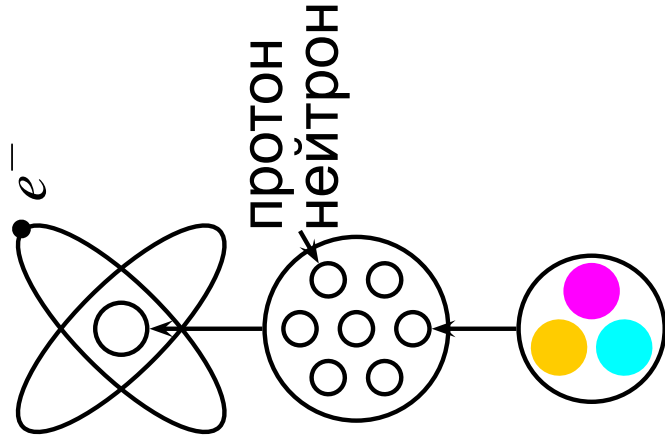
Успехи науки о Вселенной – космологии:

- 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

Известные элементарные частицы



ЛЕПТОНЫ

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

три семейства частиц

кварки

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

e^+ : позитрон, ...

+ АНТИЧАСТИЦЫ

$\bar{\nu}_e$: антинейтрино, ...

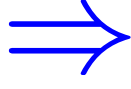
\bar{u} : антикварки, ...

+ частицы, ответственные за взаимодействия

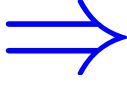
Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная **везде одинаковая**

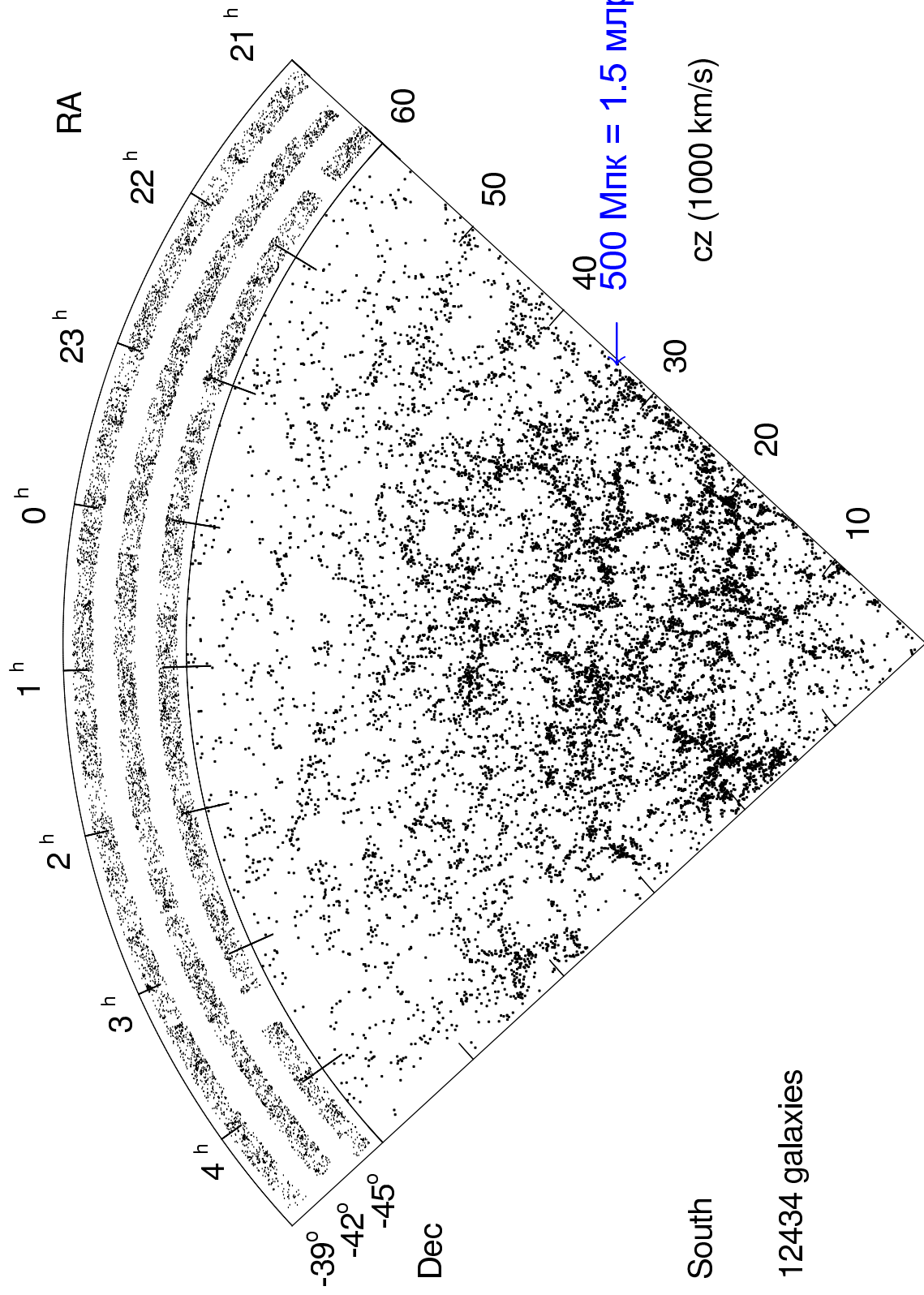
Глубокие обзоры галактик



положение во Вселенной более 300 тыс. галактик,
расстояния до 10 млрд. световых лет



карта видимой части Вселенной



500 Мпк = 1.5 млрд. св. лет

South

12434 galaxies

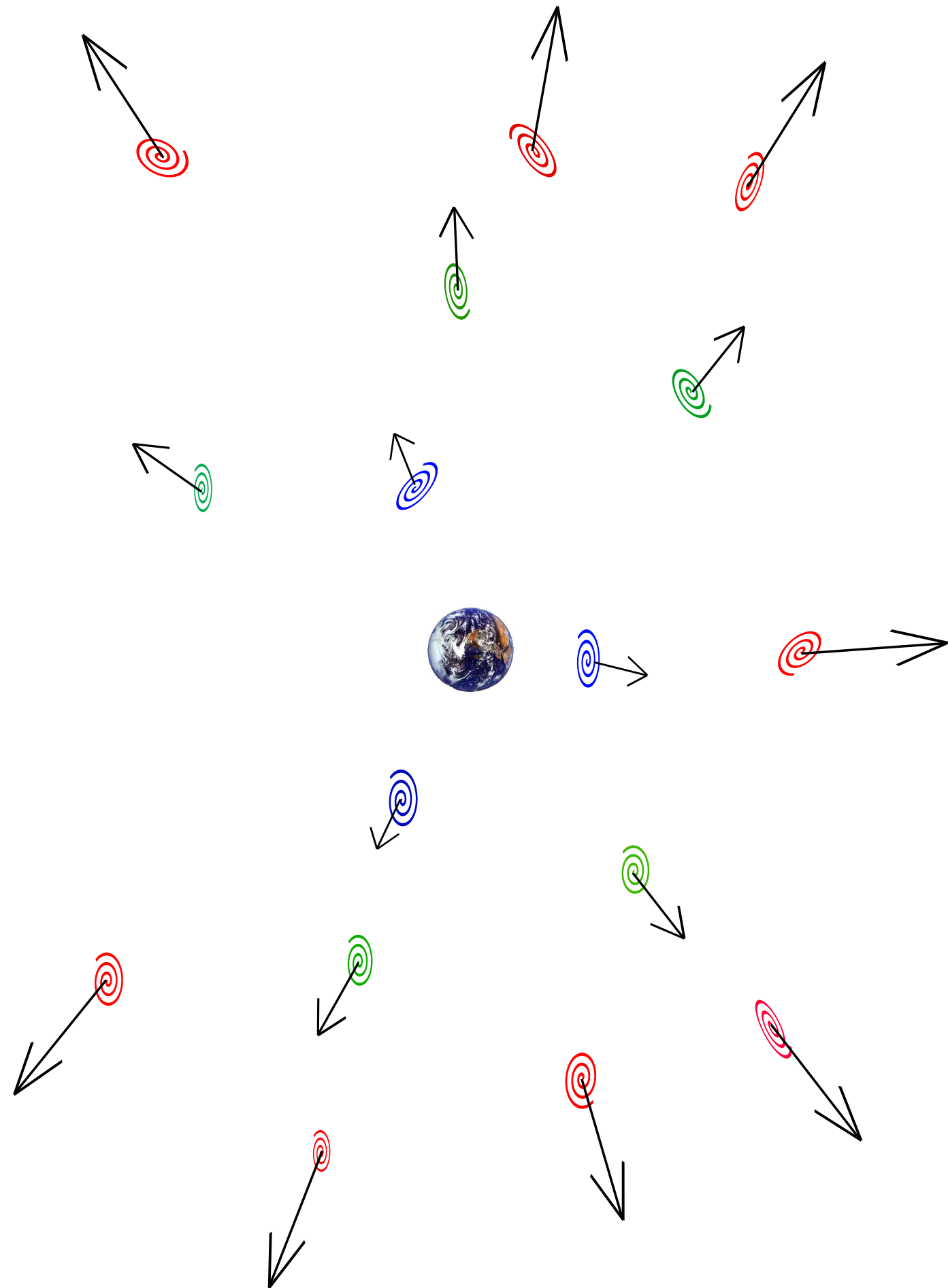
Свойства современной Вселенной:

- 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 Доплера: свет от далеких галактик приходит к нам покрасневшим



Свойства современной Вселенной:

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

Пространство растягивается во все стороны.

Точные измерения скорости расширения \Leftrightarrow “стандартные свечи”

Свойства современной Вселенной:

- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная расширяется

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

В прошлом Вселенная расширялась гораздо быстрее

В будущем Вселенная будет более разреженной.

В прошлом вещество во Вселенной было гораздо более ПЛОТНЫМ

- Наивное продолжение эволюции назад во времени ⇒
момент Большого Взрыва: “начало”, бесконечная плотность вещества, бесконечная скорость расширения.

Свойства современной Вселенной:

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

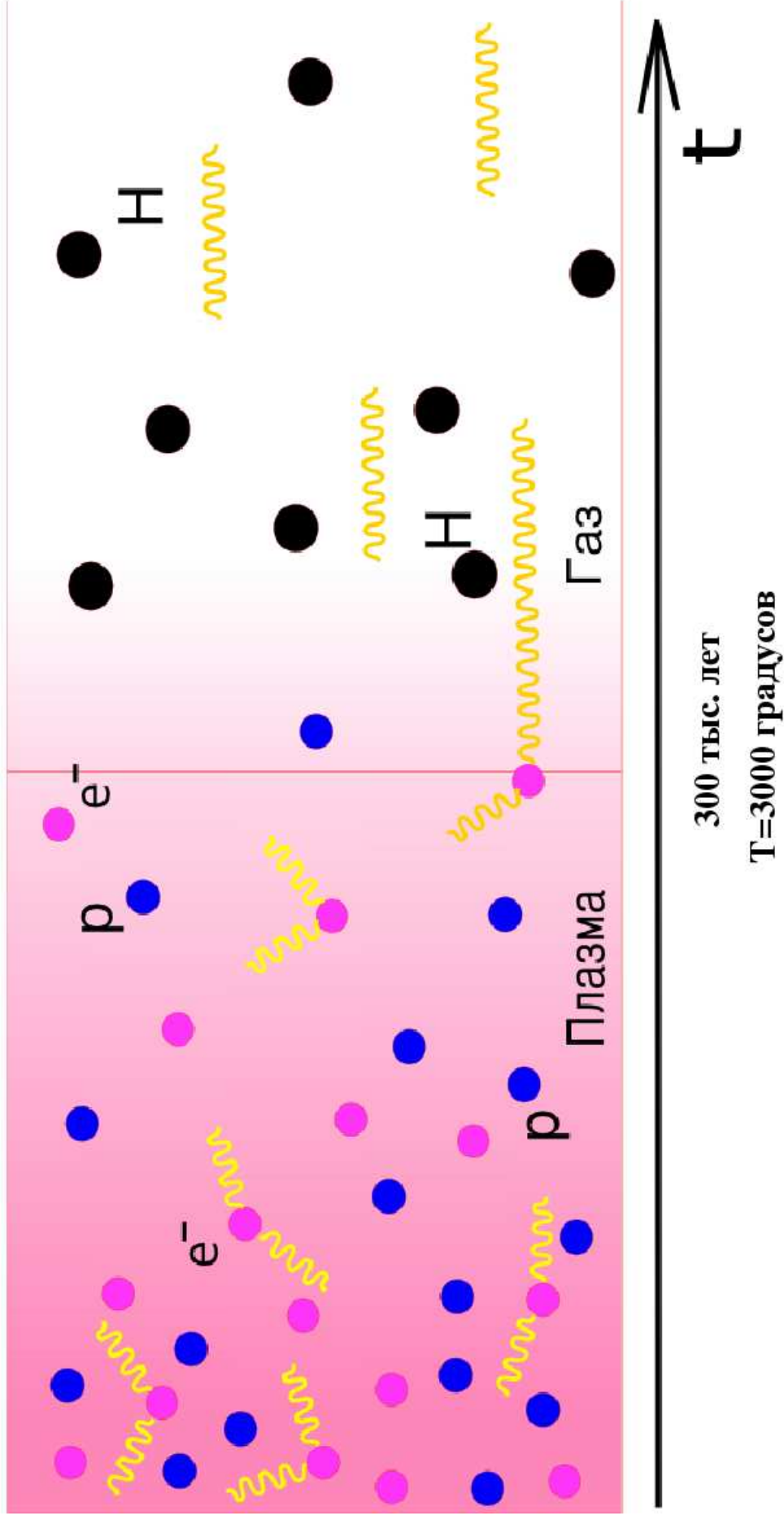
Заполнена тепловым электромагнитным излучением (Пензиас–Вильсон, 1950-е),

$$T = 2.725 \text{ градусов Кельвина}$$

(ниже температуры жидкого гелия)

В прошлом была гораздо более горячей.
Остыла из-за расширения.

Переход плазма–Газ

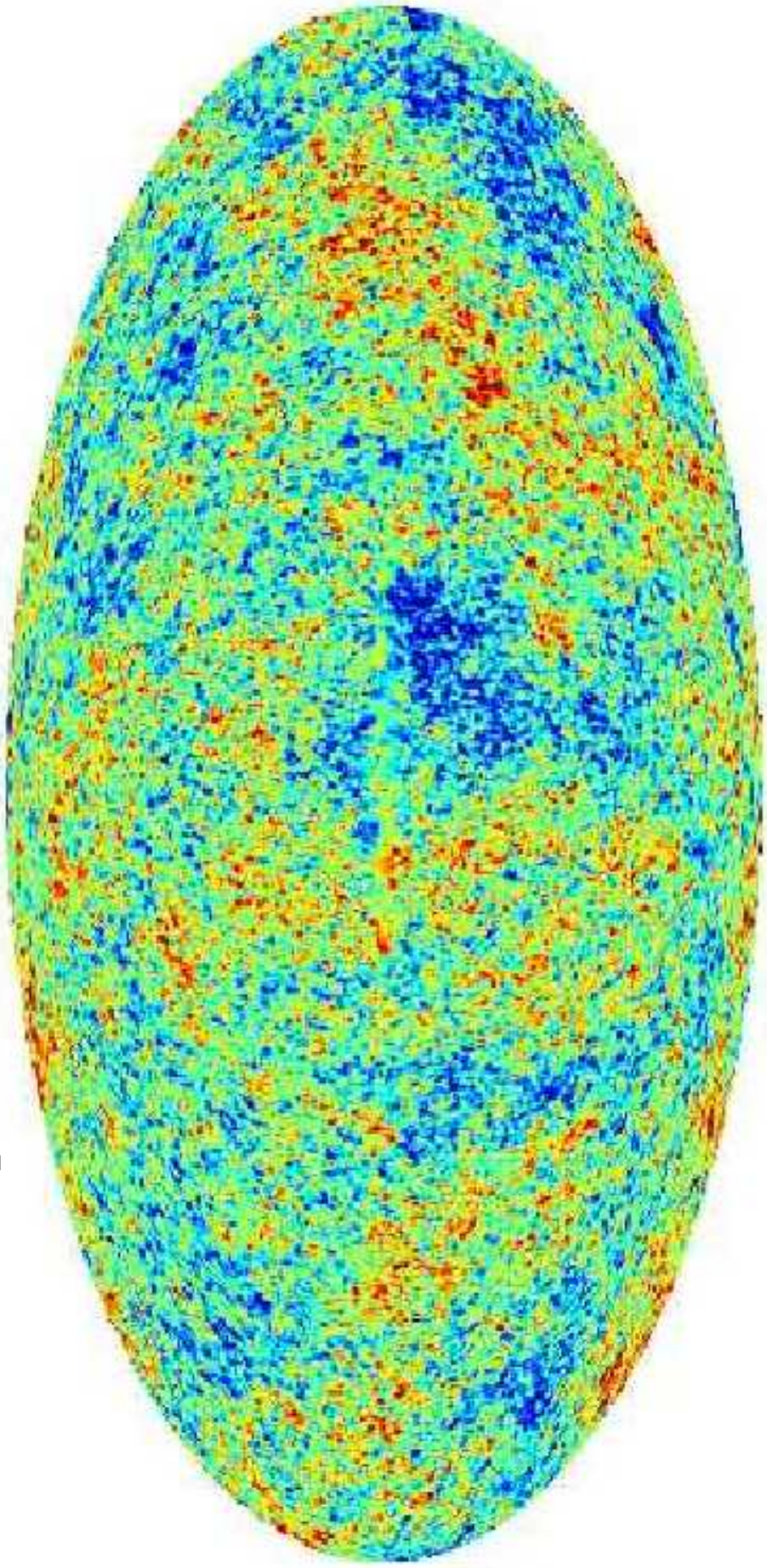


● Измерения температуры реликтового излучения в зависимости от направления на небе



фотоснимок Вселенной в возрасте 300 тыс. лет
(сегодня — 14 млрд. лет)

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



- 200 μ K 200 μ K

WMAP

Свойства современной Вселенной:

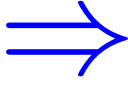
- Видимая Вселенная везде одинаковая
- Вселенная расширяется
- Вселенная “теплая”
- Наше пространство евклидово

Сумма углов треугольника = 180 градусам.

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

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

Скорость расширения
+
евклидовость пространства
+
теория гравитации (общая теория относительности)

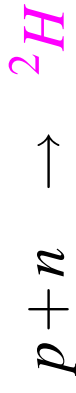


полная плотность энергии всех форм материи

$$\epsilon_{\text{полн}} = 5 \cdot \frac{(\text{масс протона}) \cdot c^2}{\text{м}^3}$$

Ранняя Вселенная:

- Переход плазма–газ
 $T = 3000$ градусов,
возраст Вселенной = 300 тыс. лет.
- Эпоха **термоядерных реакций**
 $T =$ миллиарды градусов
возраст Вселенной = 1 секунда \rightarrow 3 минуты (!)



...

(1)

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
В современной Вселенной

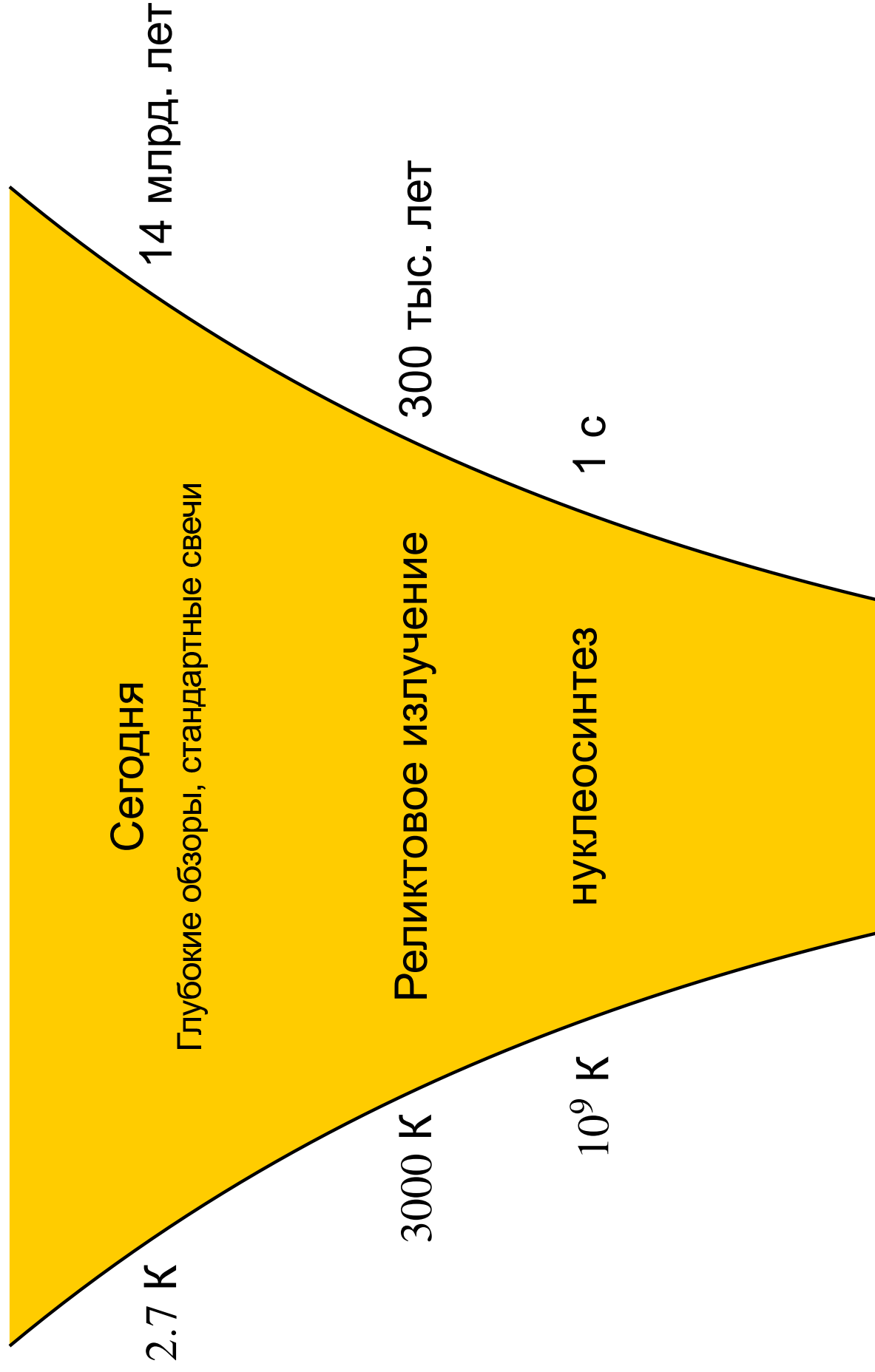
$$n_B = 0.25 \cdot \frac{\text{ПРОТОНОВ}}{\text{М}^3}$$

$$\varepsilon_B = 0.25 \cdot \frac{(\text{масс протона}) \cdot c^2}{\text{М}^3}$$

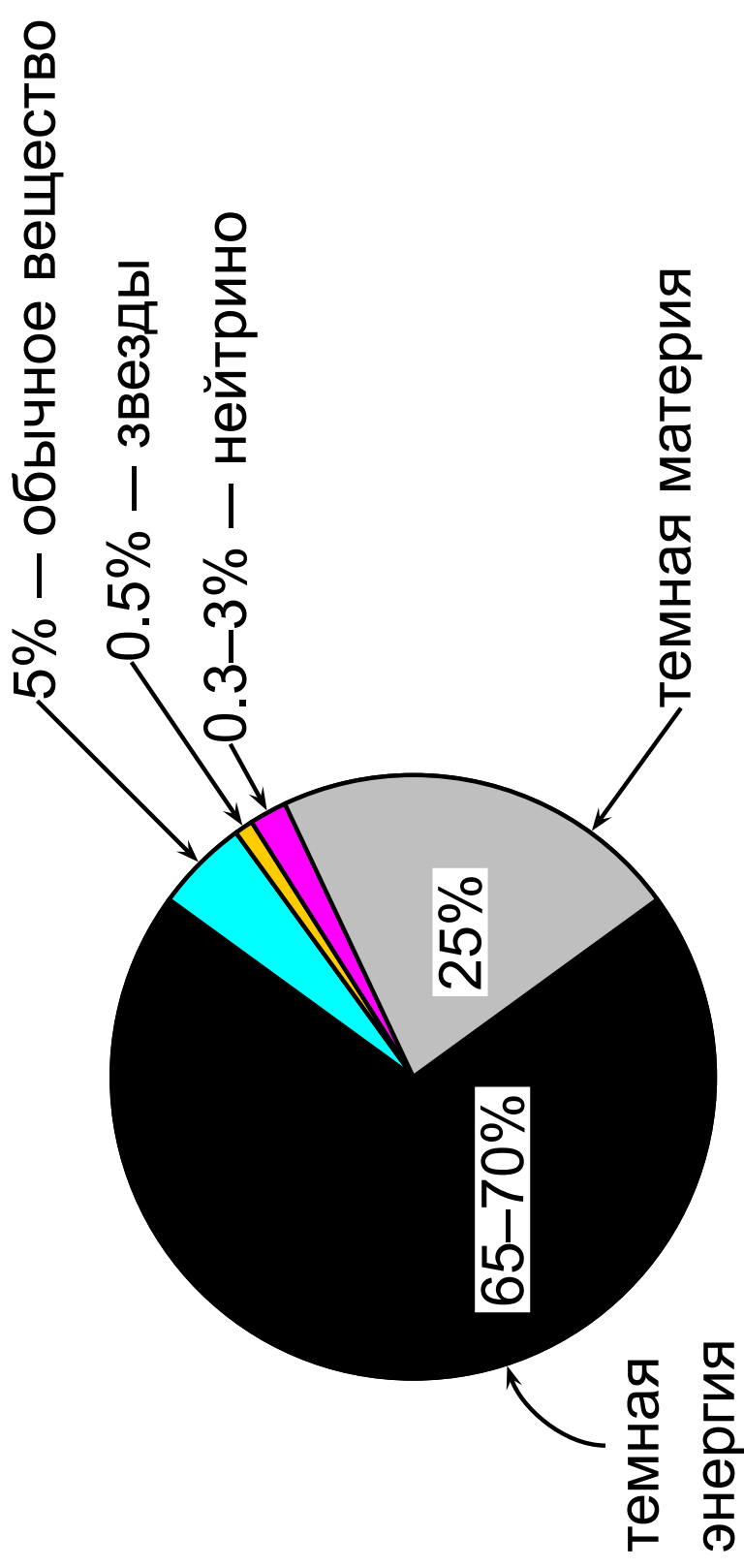
$$\frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_{\text{ПОЛН}}} = 0.05$$

Независимая проверка: наблюдения реликтового излучения

Этапы эволюции Вселенной и данные о них



Баланс энергий в современной Вселенной

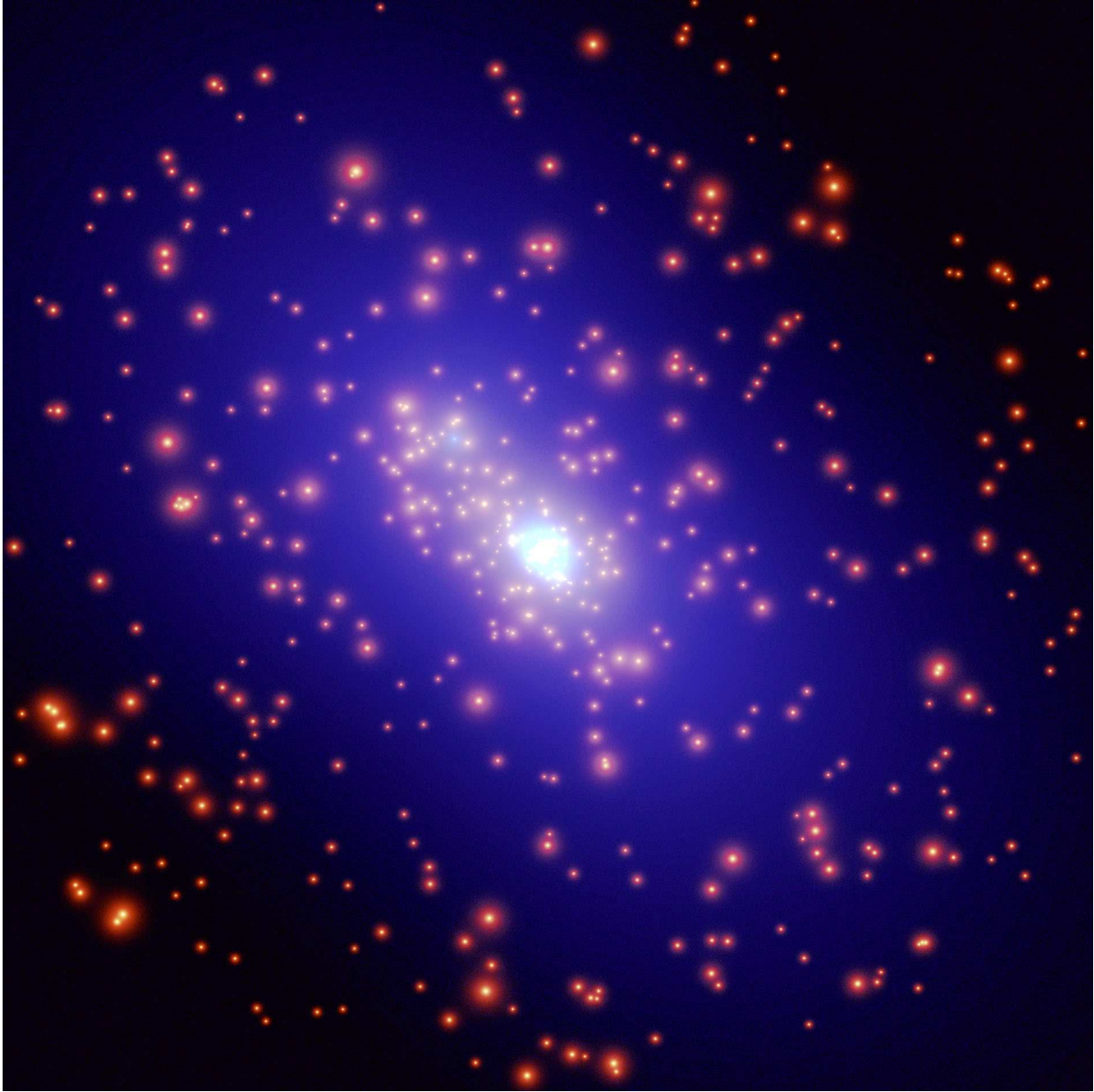


ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

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

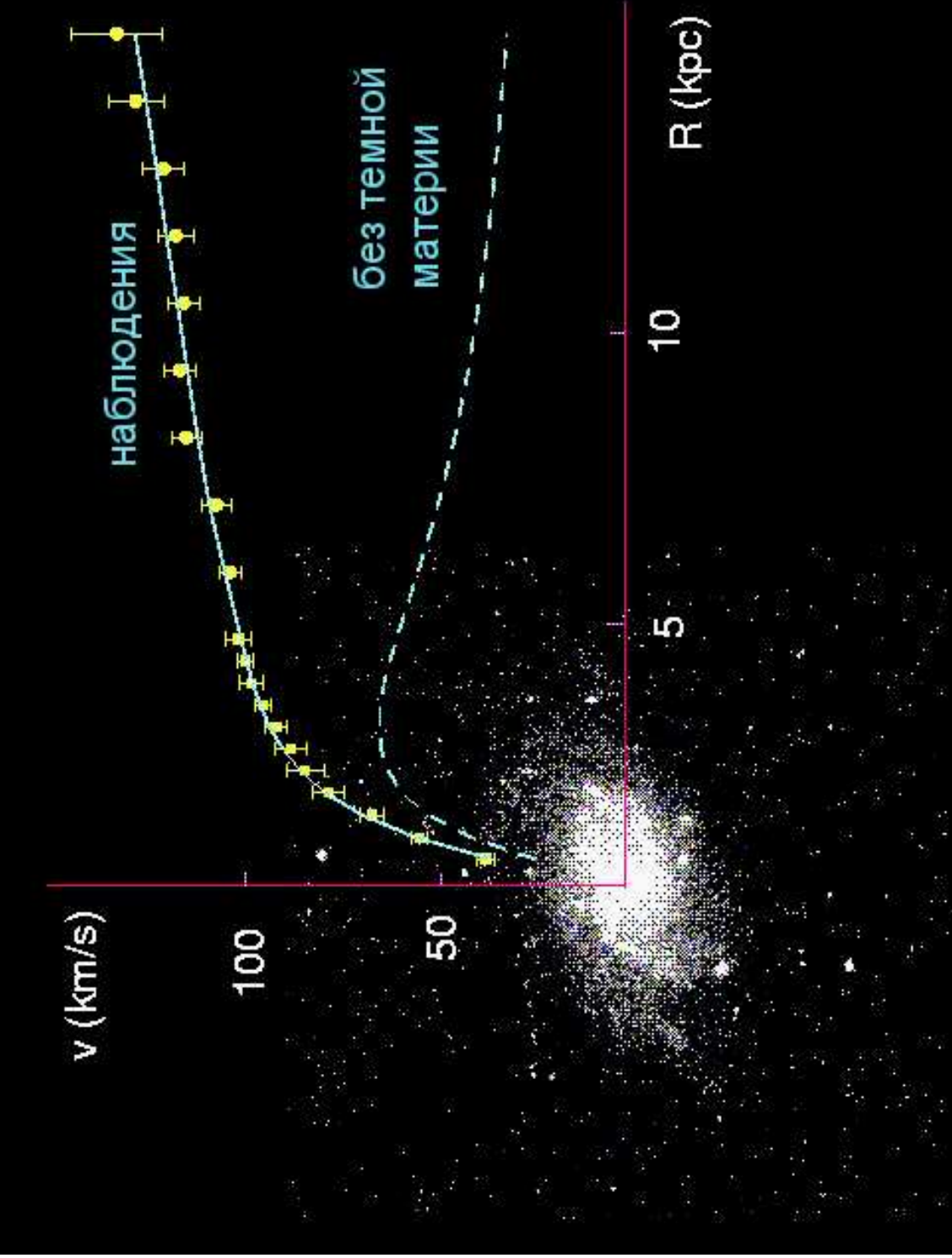
Гравитационное линзирование





Темная материя

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



Природа темной материи — область гипотез

Скорее всего

- темная материя = неизвестные тяжелые частицы, электрически нейтральные.
- $(1000-10^4) \frac{1}{M^3}$ 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 $m = 100-1000$ масс протона, взаимодействующие, хотя и слабо, с обычным веществом

Новая физика при энергиях, доступных для изучения сейчас и в недалеком будущем

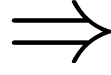
- Скорее всего, частица темной материи – лишь один из членов нового семейства элементарных частиц.

Пути поиска частиц темной материи

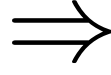
- Эксперименты в подземных лабораториях ⇔ регистрация частиц темной материи

Трудности:

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



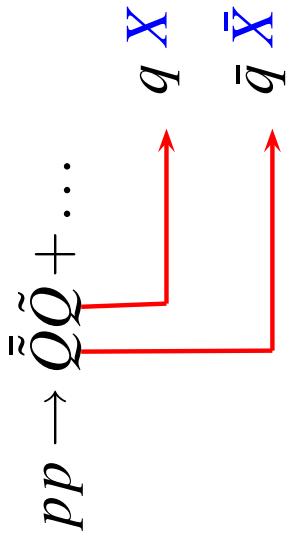
низкофонные условия



подземные лаборатории,
сверхчистые изотопы

- Ускорители – коллайдеры следующего поколения ⇔
рождение частиц темной материи и их партнеров

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



LHC at CERN

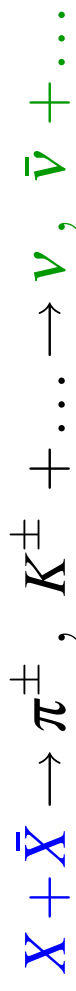


Switzerland

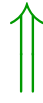
France

4.3 km

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

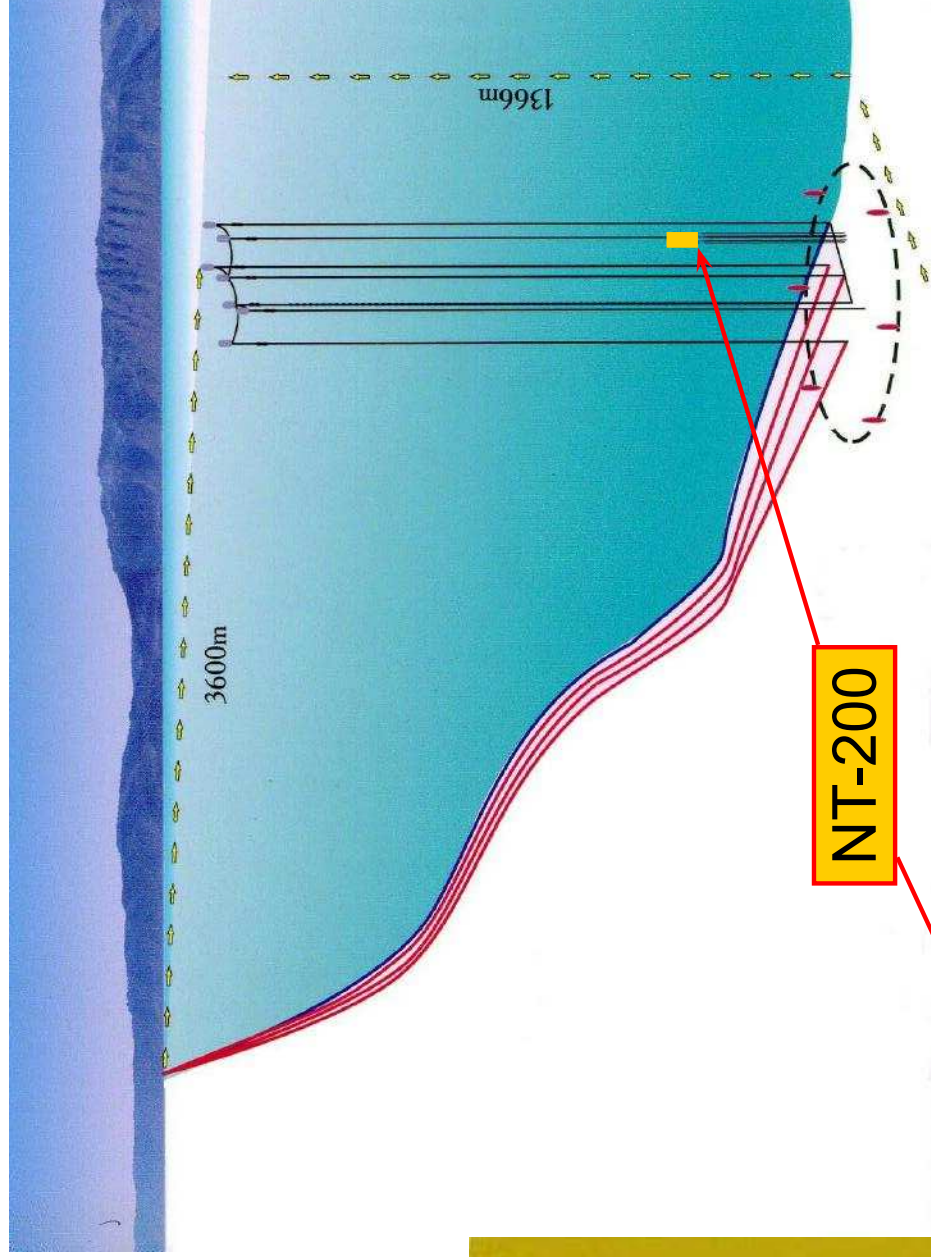


Нейтрино
высоких
энергий

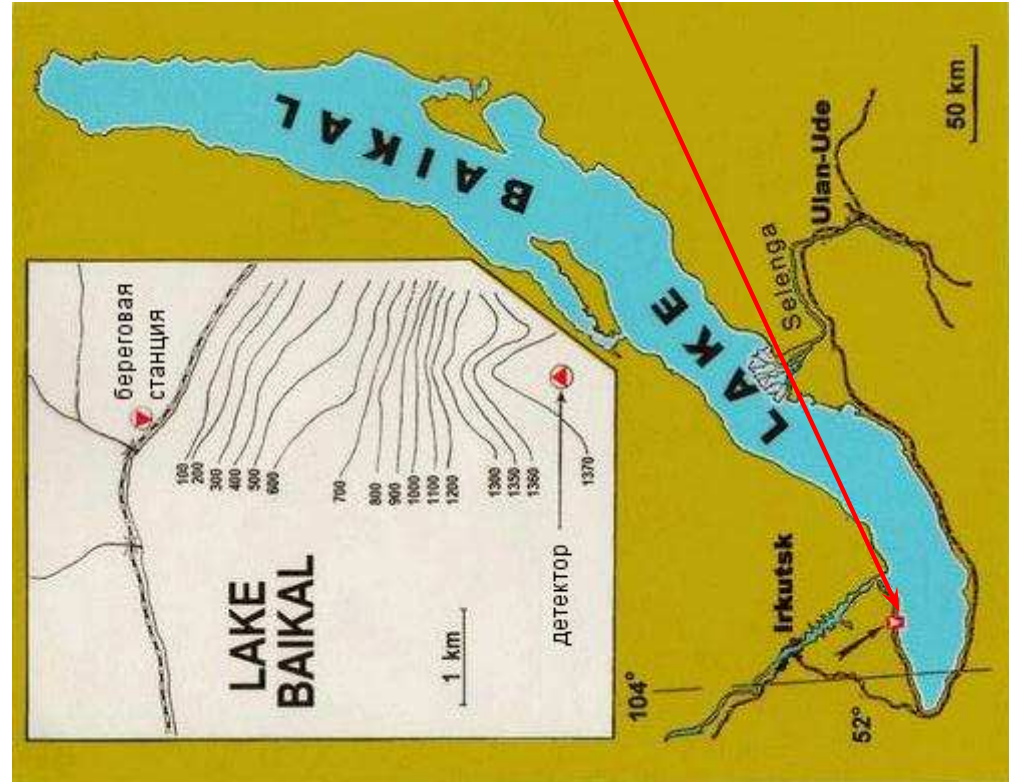


- Подземный сцинтилляционный телескоп Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

- Байкальский нейтринный телескоп

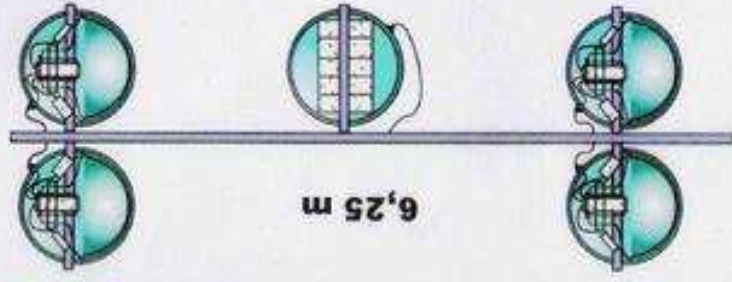


NT-200



Нейтринный телескоп NT-200

На берег Калибровочный лазер



Электронный модуль

Оптический модуль

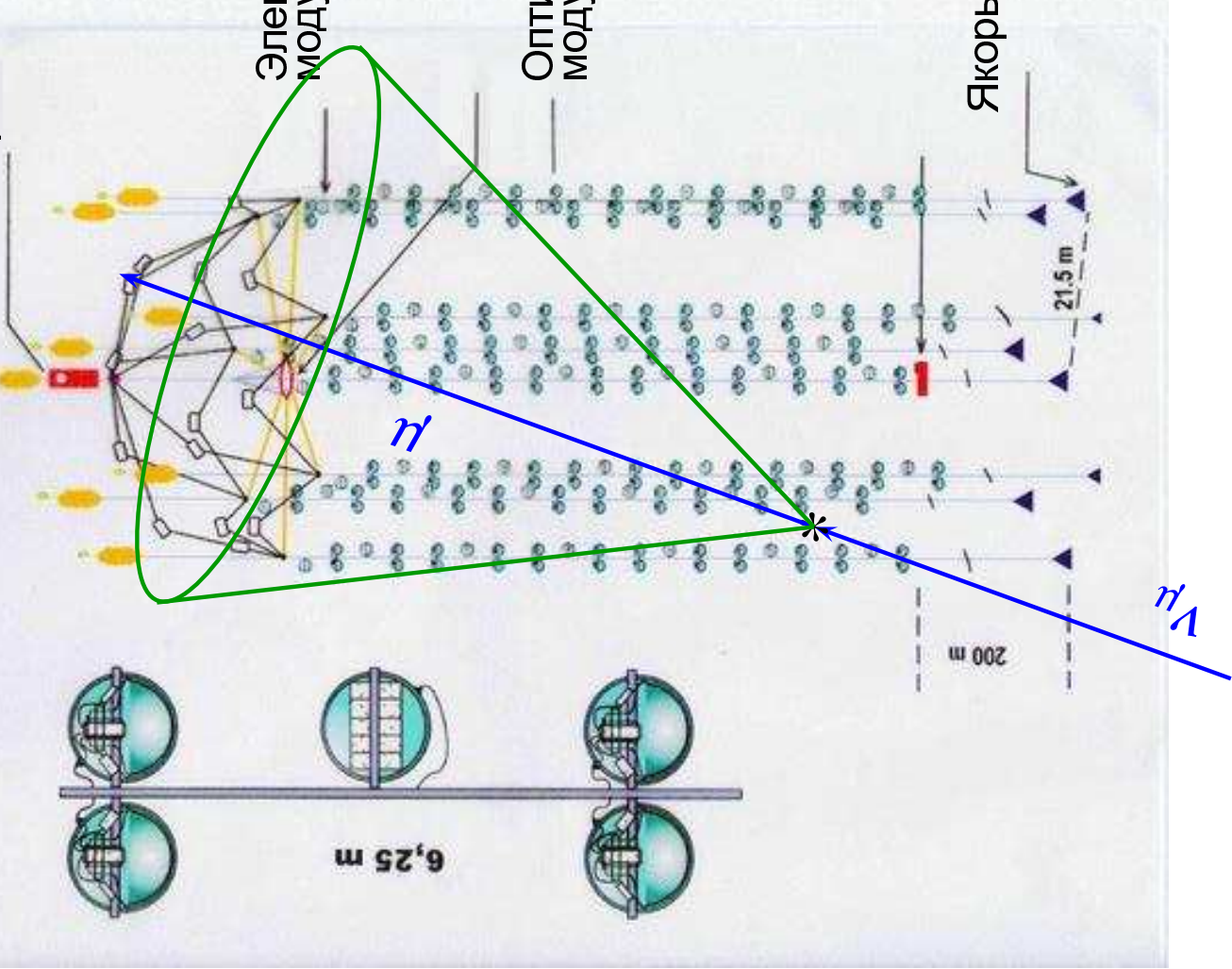
Якорь

200 m

21,5 m

ν_{μ}

ν_{μ}



- Еще одна возможность: регистрация продуктов аннигиляции в космосе. Поиск e^+ , \bar{p} в космических лучах; фотонов от e^+e^- -аннигиляции в космосе

ПРОГНОЗ:

частицы темной материи будут открыты в ближайшие 10 лет.

Загадка: $\epsilon_V \approx \epsilon_{\text{Темн. мат.}}$

Сейчас и в отношении недавно в прошлом масса обычного вещества во Вселенной \approx масса темной материи

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

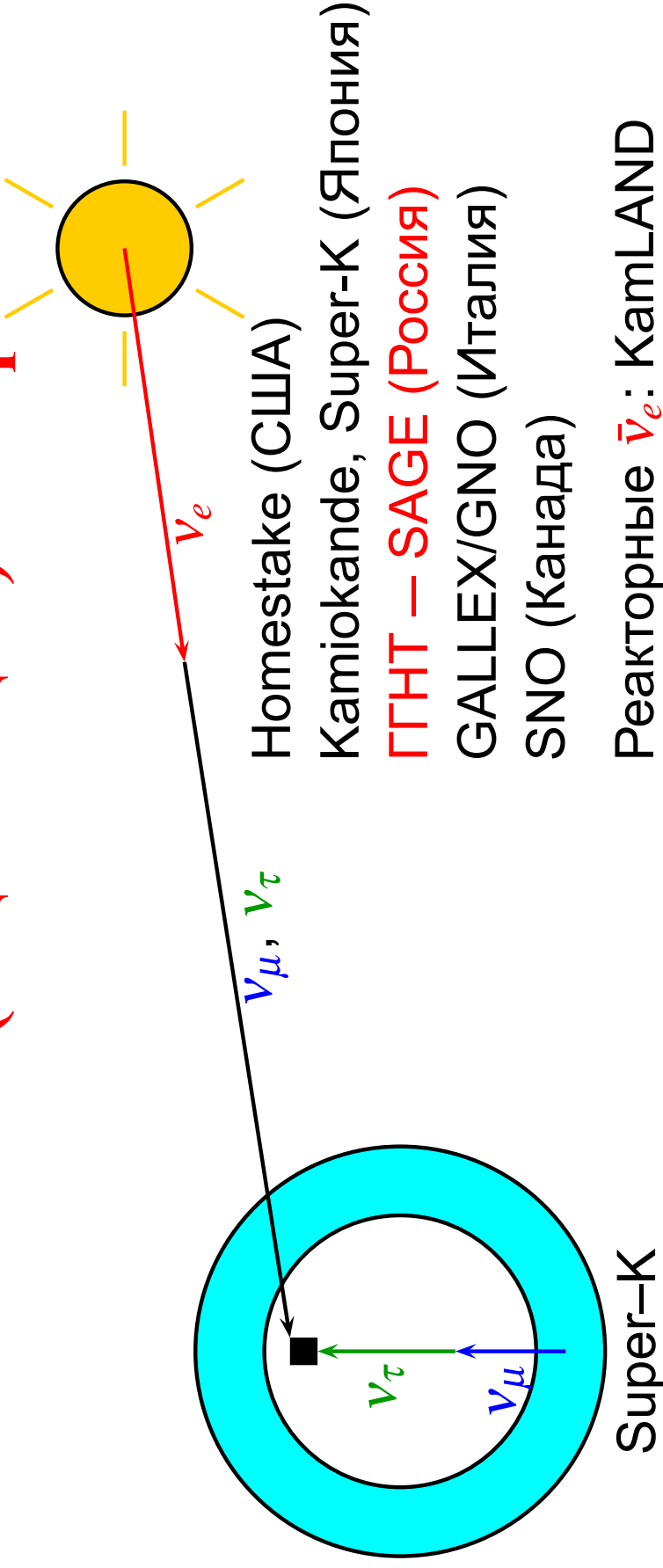
$$\frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_q + n_{\bar{q}}} \sim 10^{-9}$$

Каким образом такой перекоп возник в результате эволюции Вселенной?

Требуется:

- Превращение частиц одного типа в другой (нарушение известных законов сохранения)
 - до последнего времени не наблюдалось
- Различие между материей и антиматерией во взаимодействиях частиц
 - наблюдалось, но только для кварков/антикварков

Ключ: **взаимопревращения** **(осцилляции) нейтрино**



Тип частицы изменяется.

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

Предстоит узнать:

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

$\epsilon_B \approx \epsilon_{\text{Темн. мат.}}$: совпадение или единый механизм генерации?

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 субстанция имеет **отрицательное давление**.

Природа темной энергии — возможно главная загадка физики XXI века

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

Эволюция Вселенной тоже, скорее всего, началась со стадии ускорения

Теория раздувающейся (инфляционной) Вселенной

A. A. Старобинский;

A. Guth;

A. Д. Линде; A. Albrecht, J. Steinhardt
конец 70-х — начало 80-х

Ответ на глобальные вопросы:

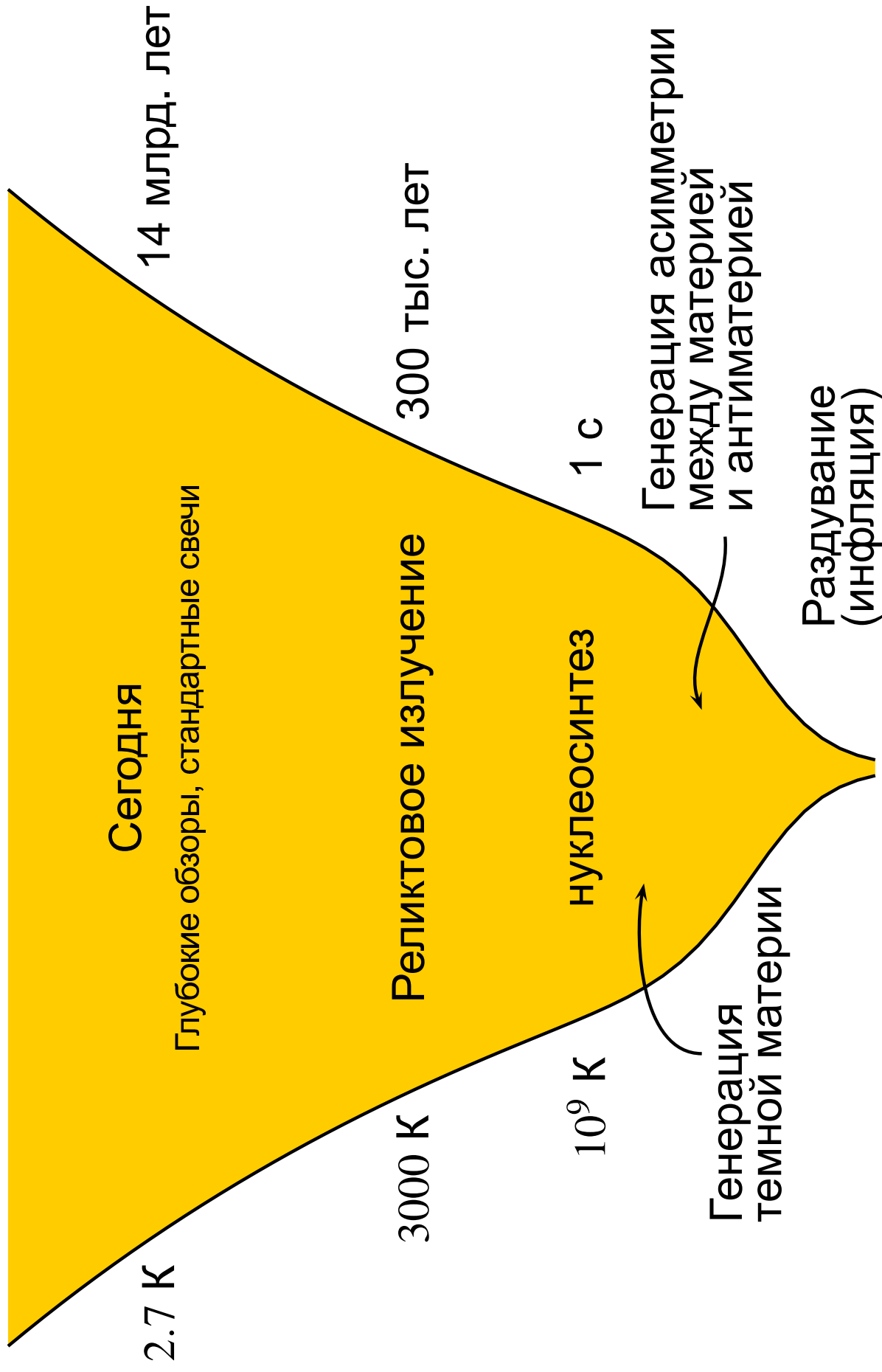
- Почему Вселенная такая большая и однородная?
- Почему она была такая горячая?
- Почему наше пространство евклидово?
- etc.

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

Инфляционная теория

- механизм генерации начальных возмущений плотности: усиление вакуумных флуктуаций квантовых полей.
- **Согласуется с наблюдательными данными.**
- Окончательное подтверждение: будущие измерения поляризации реликтового излучения.
- Механизм раздувания \Leftrightarrow физика сверхмалых расстояний, сверхвысоких энергий

В перспективе: изучение методами наблюдательной космологии.



Космологические данные о темной материи и темной энергии
— главное свидетельство неполноты имеющихся сегодня
представлений о физике микромира.

Современный этап развития естествознания: начало
кардинального изменения взгляда на природу

Главные открытия впереди.

