

Санкт-Петербургский Астрофизический Семинар
22 декабря 2010

**Космологическая
стандартная модель и
экстраполяция в прошлое**

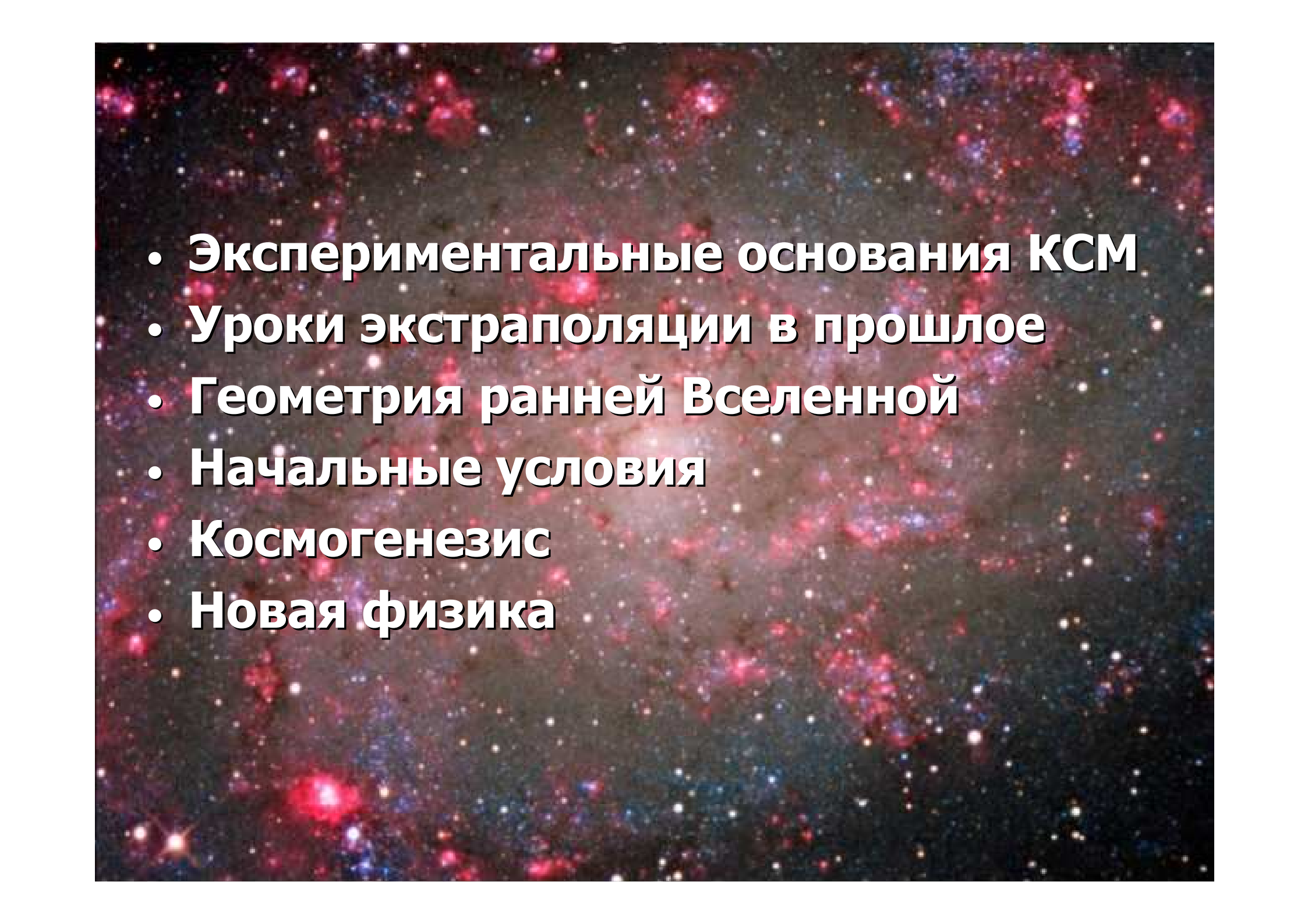
В.Н. Лукаш

со: **Е.В. Михеева и В.Н. Строков**

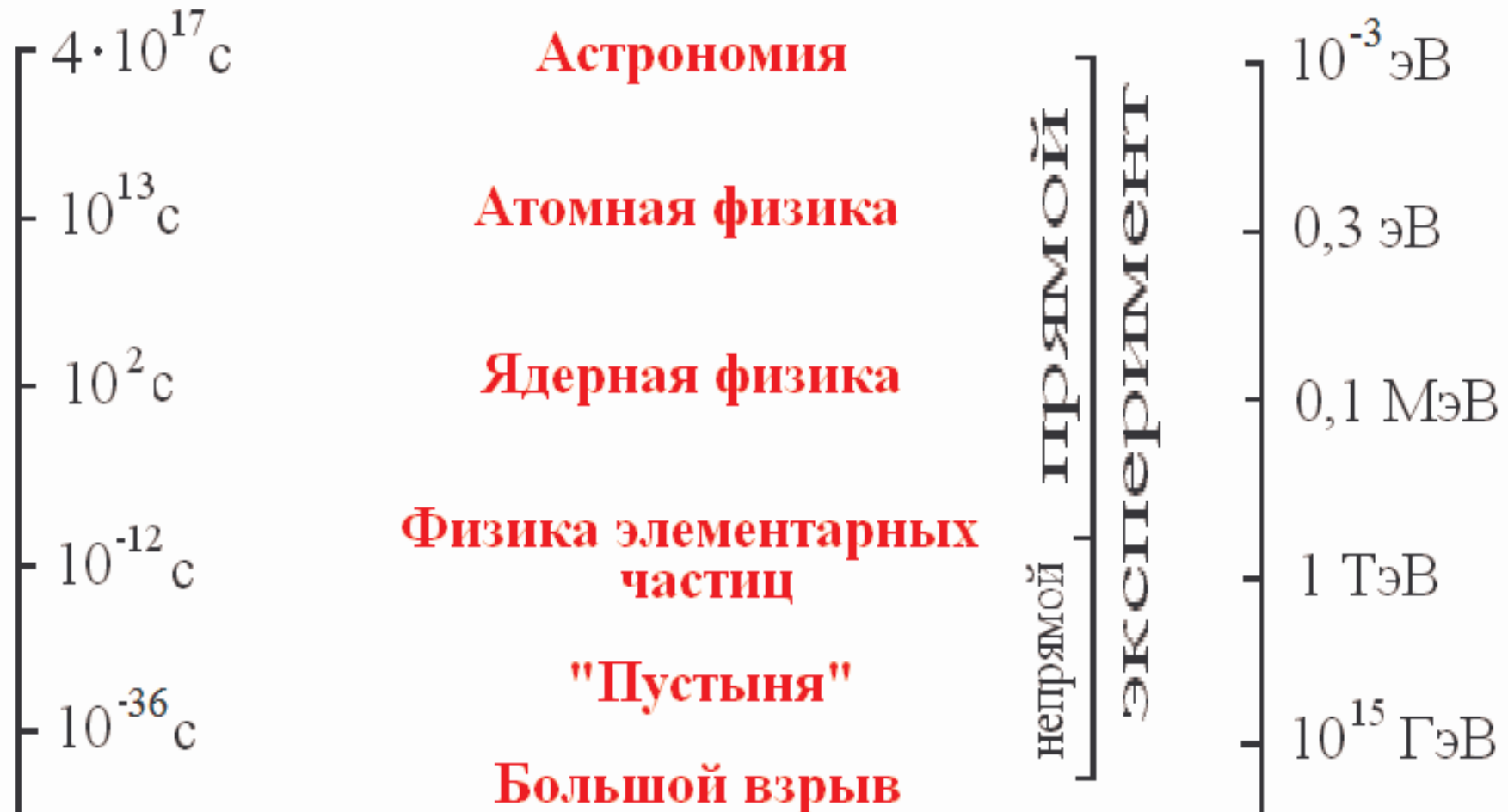
Астрокосмический Центр ФИАН

A photograph of the Space Shuttle Columbia in orbit above Earth. The shuttle is oriented vertically, with its nose pointing upwards. The Earth's blue surface and white clouds are visible on the left side of the frame, curving away into the blackness of space. The shuttle's external tank and solid rocket boosters are clearly visible.

Стандартная модель

- 
- **Экспериментальные основания КСМ**
 - **Уроки экстраполяции в прошлое**
 - **Геометрия ранней Вселенной**
 - **Начальные условия**
 - **Космогенезис**
 - **Новая физика**

Экспериментальные основания КСМ



КОСМОГЕНЕЗИС

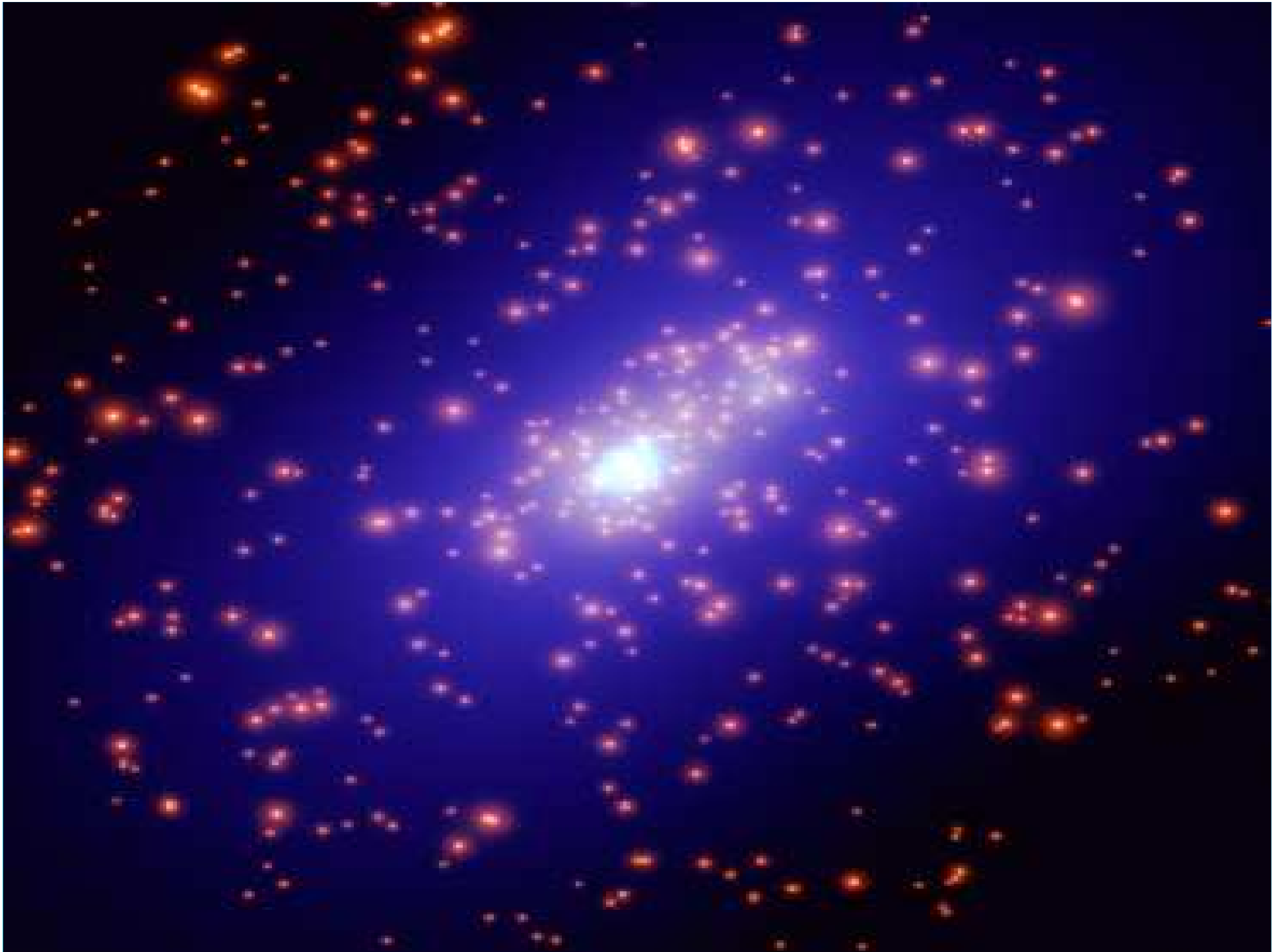
*Астрономы наблюдают структуры
неизвестные физикам*

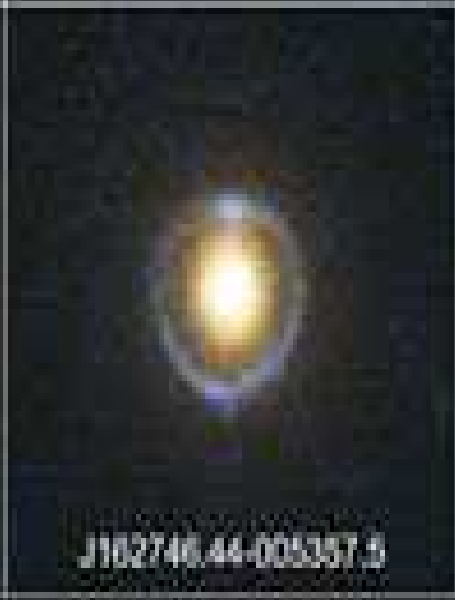
*Структурированная материя - ТМ (25%)
Неструктурированная материя - ТЭ (70%)*



**ТМ не взаимодействует со светом
НО СВЕТ ТАМ, ГДЕ ЕСТЬ МАТЕРИЯ**









Где находится небарионная ТМ ?

- * большая дисперсия скорости галактик в скоплениях (1930)
 - * плоские кривые вращения спиральных галактик, стабилизация дисков (1970)
 - * массы скоплений установлены (1980)
-
- рентгеновский газ ($T \sim 1$ кэВ)
 - гравитационные линзы

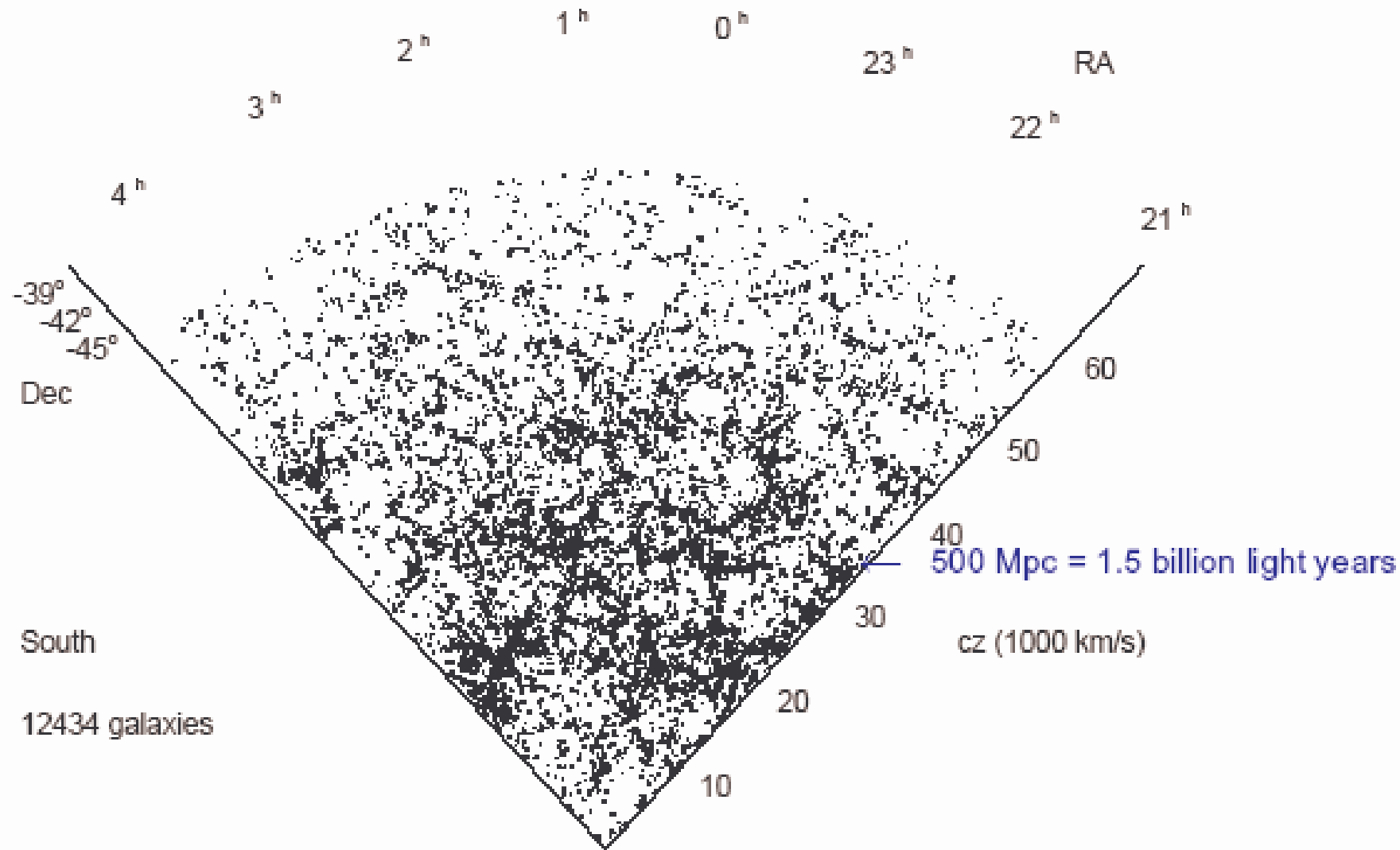
Ответ: небарионная ТМ находится в гравитационно-связанных системах

**слабовзаимодействующие частицы,
не диссипируют как барионы**

Барионы радиационно остывают и оседают к центрам галактик, достигая вращательного равновесия

Темная материя группируется вокруг светящегося вещества галактик в масштабе около 200 кпк (масса Местной Группы $2\div 4 \cdot 10^{12} M_{\odot}$, более половины - в галактиках Млечный Путь и Туманность Андромеды)

Крупномасштабная структура Вселенной



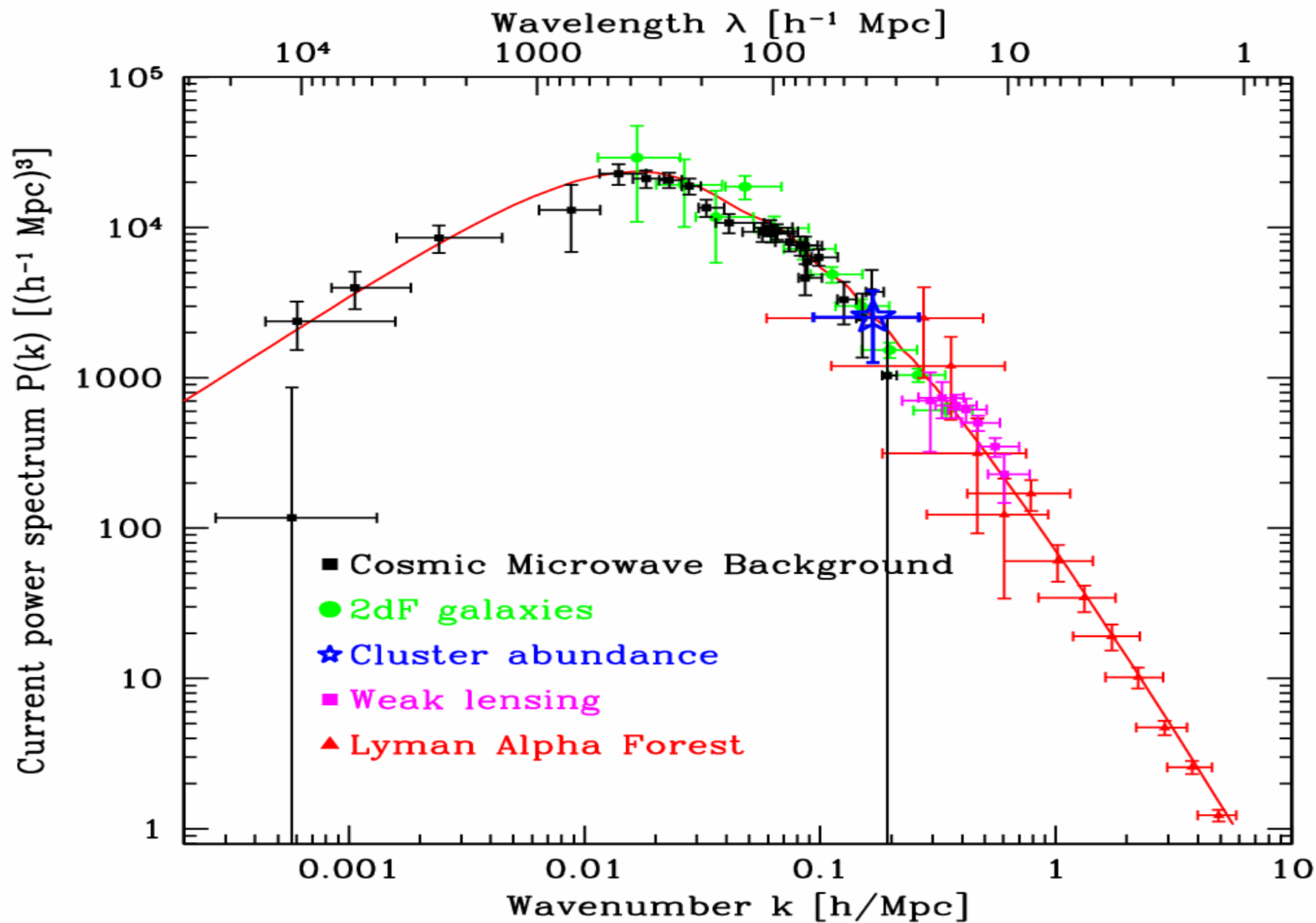
Моделирование структуры

$z=0.00$

$t=13.49$ Gyrs



Космологические возмущения плотности

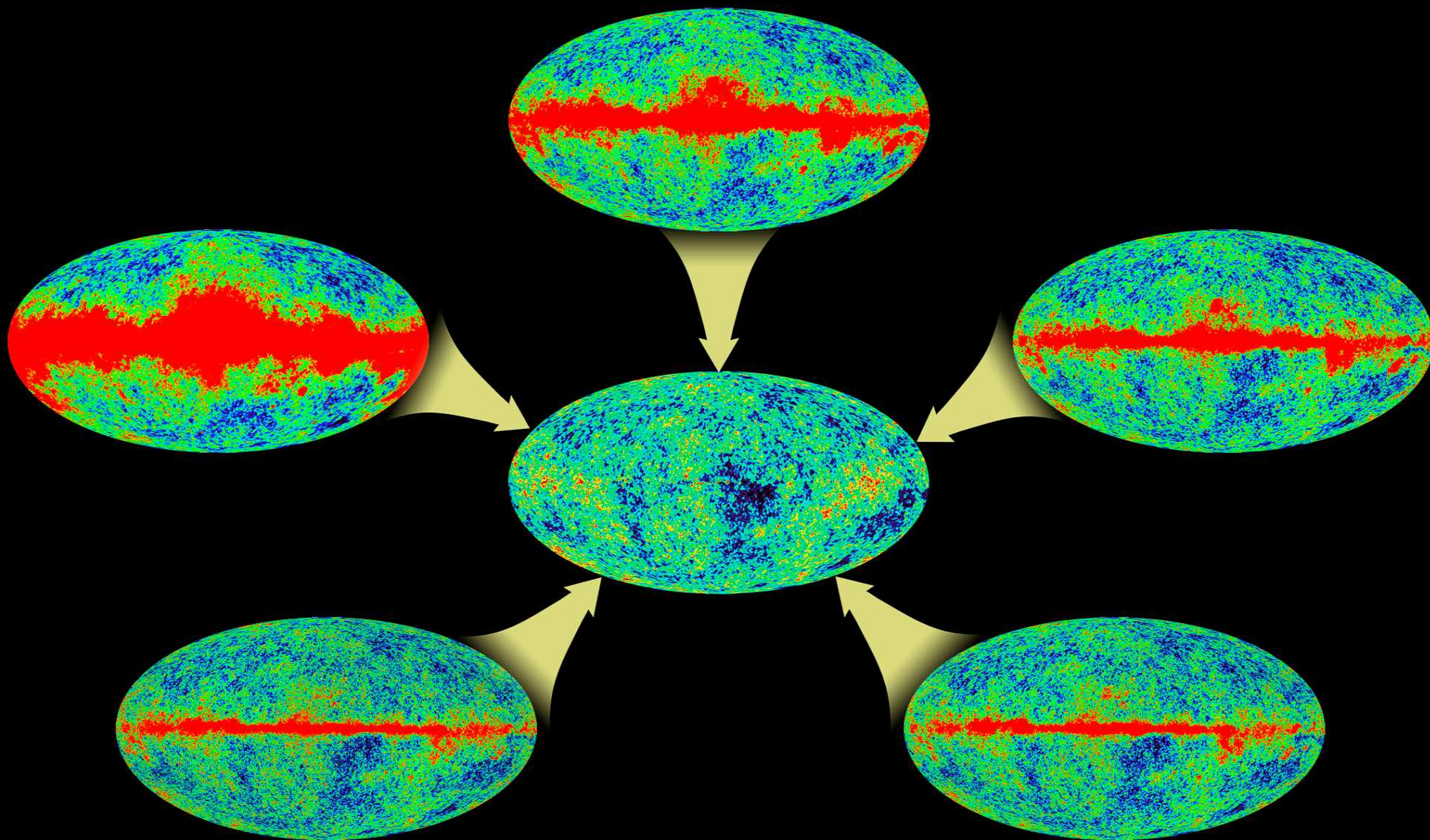


В ОДНОМ КУБИЧЕСКОМ САНТИМЕТРЕ

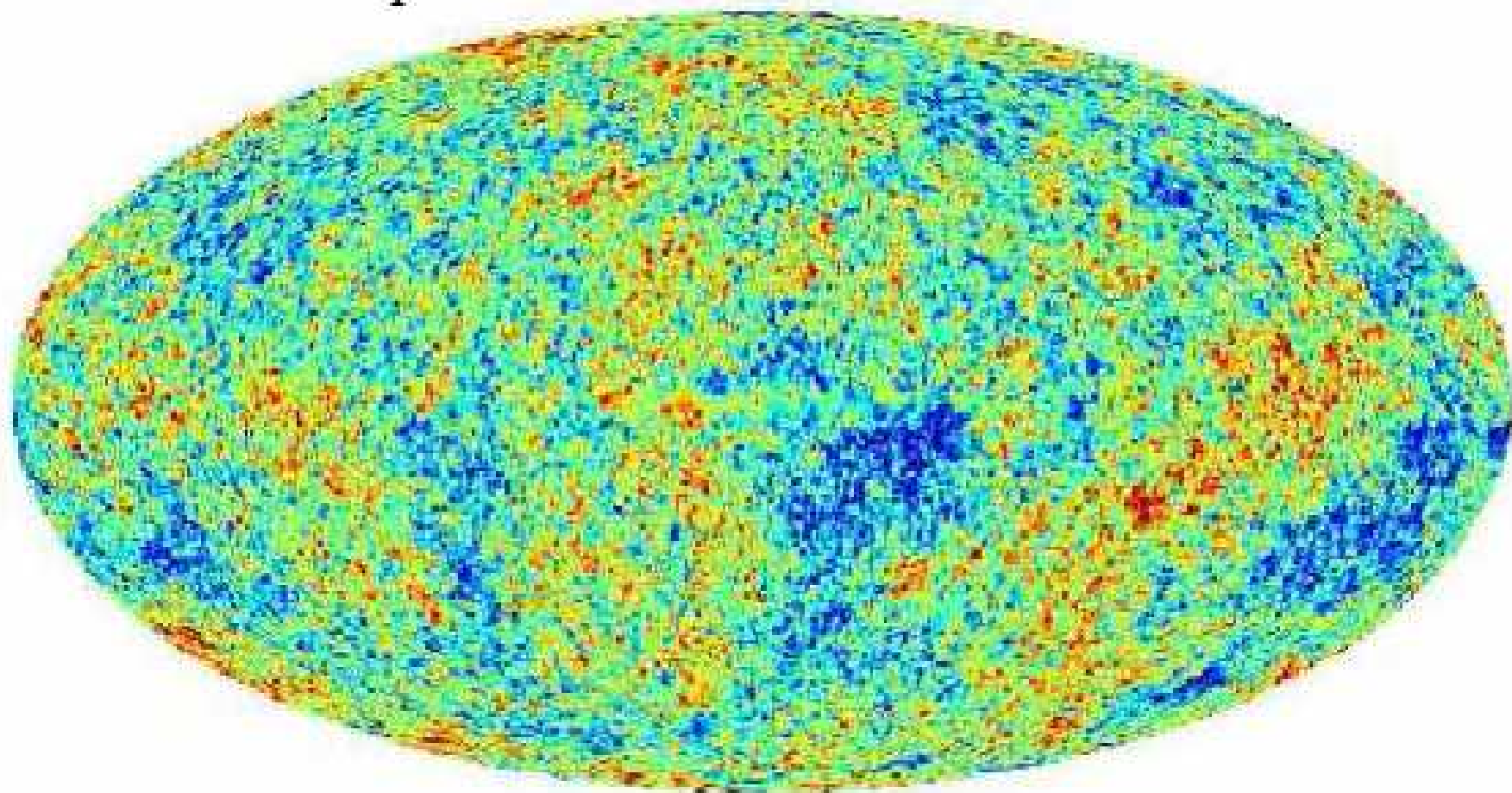
450 РЕЛИКТОВЫХ ФОТОНОВ

340 НЕЙТРИНО ТРЕХ СОРТОВ

Анизотропия реликтового фона



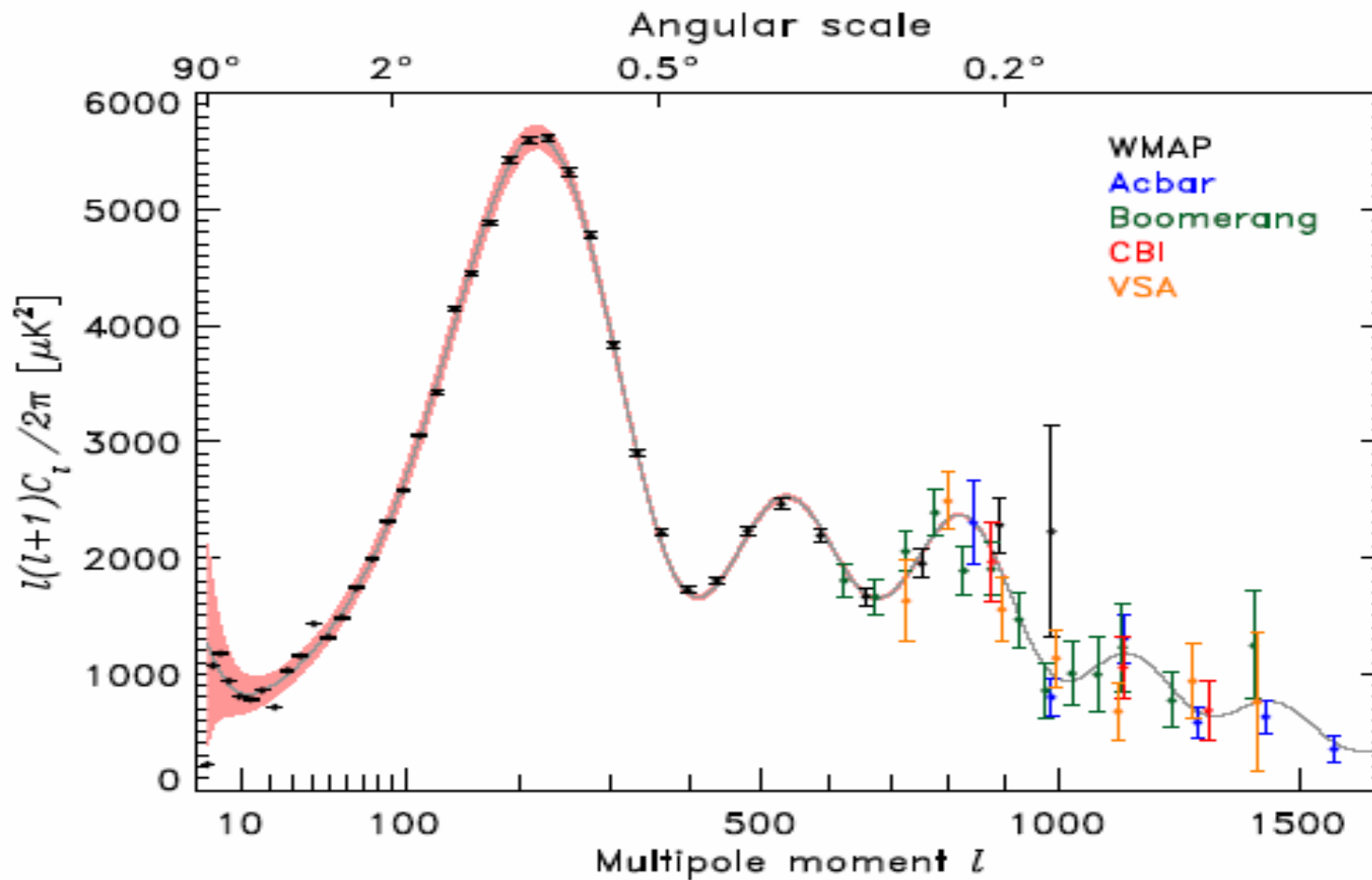
$$T = 2.725^{\circ}\text{K}, \quad \frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$$



- 200 μK  200 μK

WMAP

МЫ *видим звук* - начальные возмущения



Вначале был звук
И это был звук Большого взрыва

**Наблюдение структуры в развитии...
этого достаточно, чтобы определить
геометрию ранней Вселенной**

Геометрия ранней Вселенной (структура гравитационного поля)

- Нулевой порядок **диаграмма Хаббла**

- Первый порядок **структура**

S-мода (возмущения плотности) $S(\mathbf{k})$

T-мода (гравитационные волны) $T(\mathbf{k})$

V-мода (вихревые возмущения) $V(\mathbf{k})$

Ранняя Вселенная детерминирована !

Нулевой порядок геометрии

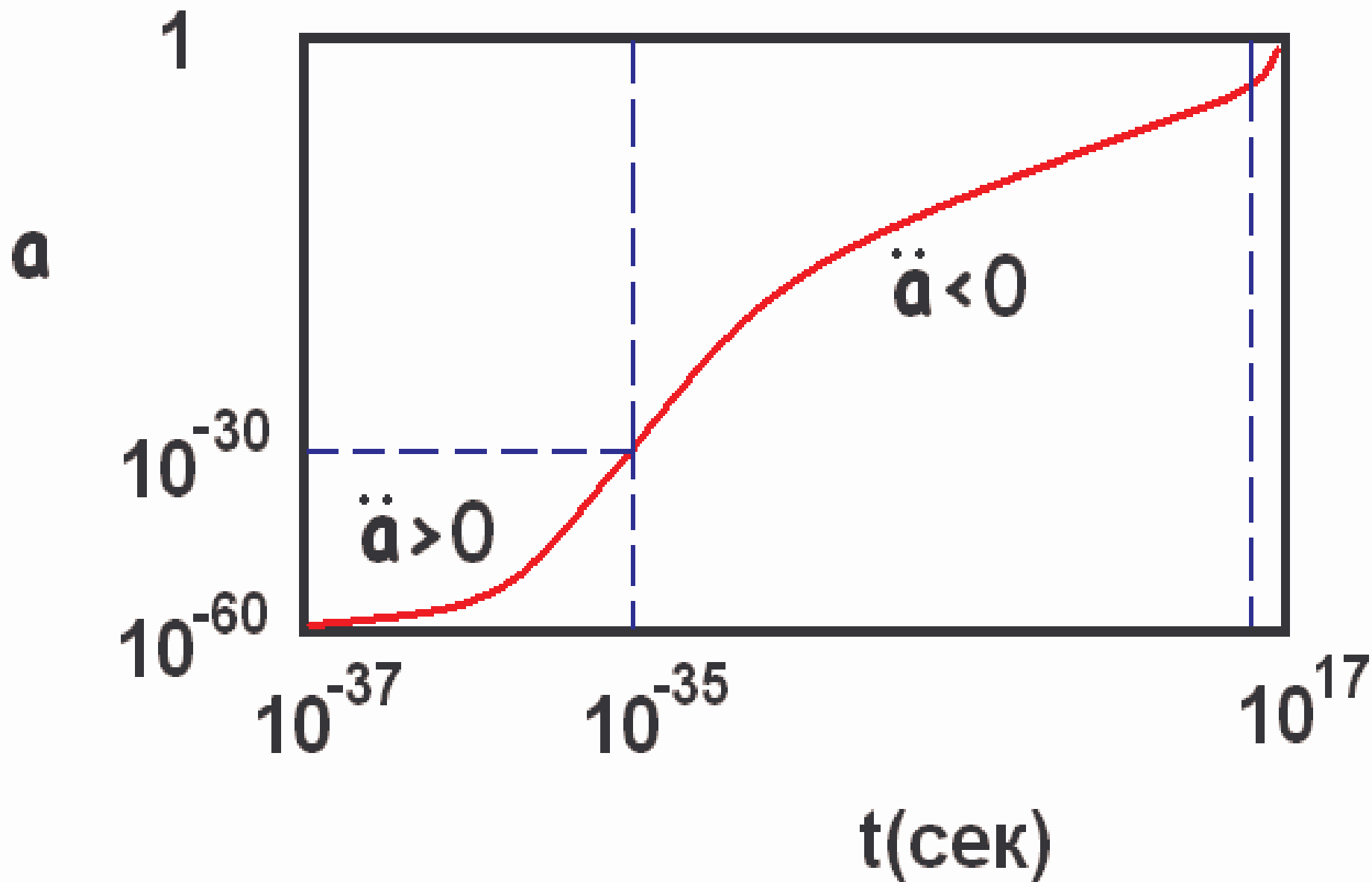
$$\frac{H}{H_0} = 10^{61} \frac{H}{M_P} = \left(\frac{10^{-4}}{a^4} + \frac{0.3}{a^3} + 0.7 \right)^{1/2} \Rightarrow \frac{10^{-2}}{a^2}$$

$$\gamma \equiv -\frac{\dot{H}}{H^2} = \frac{2 \times 10^{-4} + 0.4}{10^{-4} + 0.3a + 0.7a^4} \subset (2, 0.4)$$

$$H_0^{-1} = 14 \text{ Gyr} = 10^{33} \text{ eV}^{-1}$$

$$M_P = 10^{19} \text{ GeV} = 10^{33} \text{ cm}^{-1}$$

Эволюция масштабного фактора

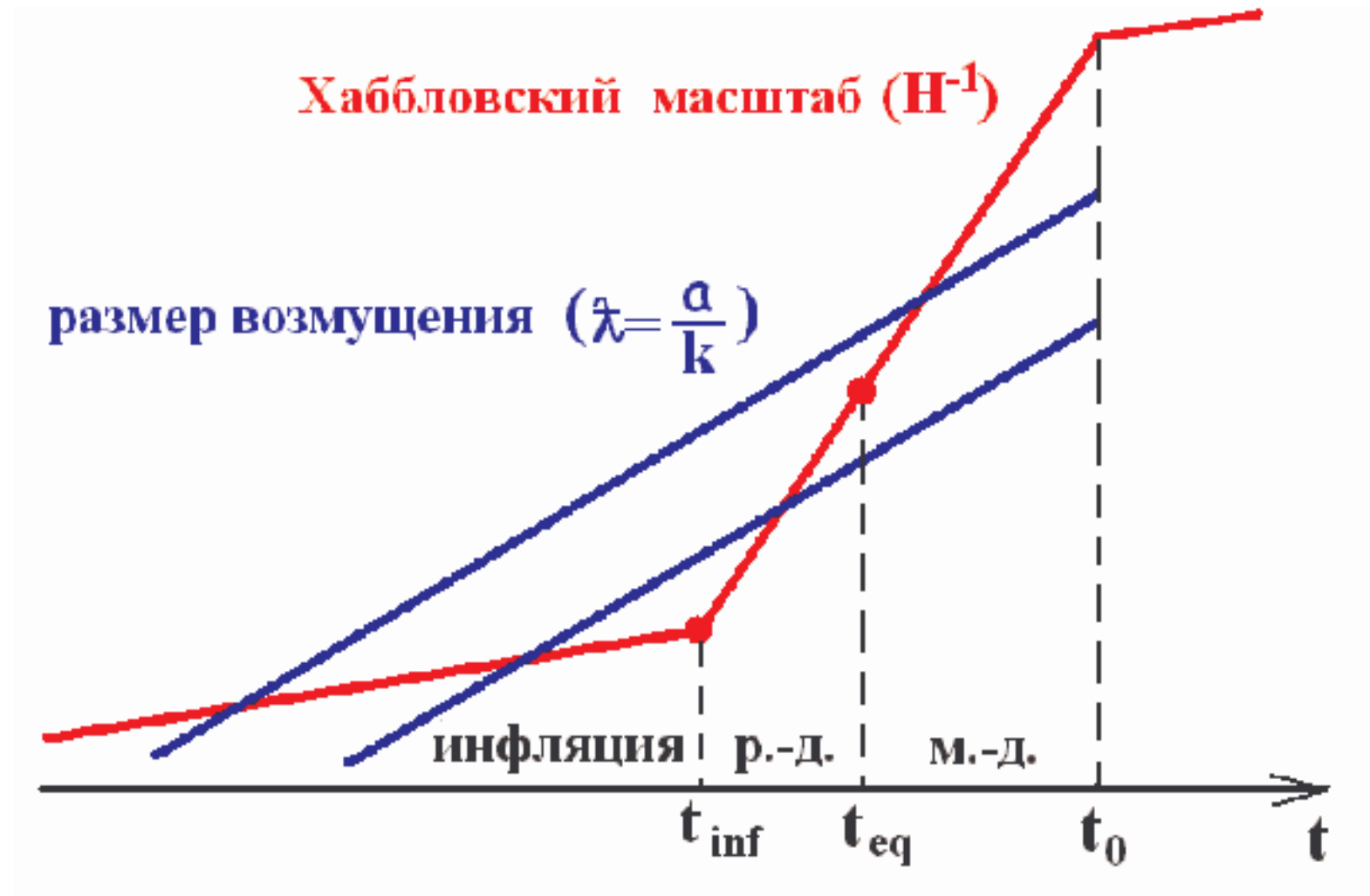


урок 1: Вселенная большая

**С самого начала физический
размер Вселенной превосходил
фундаментальный масштаб в 10^{30} раз**

**Столь большой фактор можно объяснить
существованием предшествовавшей
короткой стадии инфляции (БВ: $\gamma < 1$)**

урок 2: непричинные возмущения



урок 3: гауссовы возмущения (случайное распределение в пространстве)

Первый порядок геометрии

S → заправка для структуры ТМ
(галактики, скопления, войды..)

S+T+V → заправка для структуры РИ
(анизотропия и поляризация)

Наблюдательный факт

$$T/S < 0.1$$

*иначе не успеет сформироваться
структура ТМ, поскольку
сумма $S+T+V = 10^{-10}$ фиксирована РИ*

**Теория: игра параметров в
ранней Вселенной**

Квантово-гравитационное происхождение начальных космологических возмущений

*рождение безмассовых полей из вакуума
под действием гравитационного поля*

- **Рождение материи** (Гриб, Старобинский 1970е)
- **Генерация Т-моды** (Грищук 1974)
- **Генерация S-моды** (В Н Л 1980)

Генерация T и S мод возмущений в модели Фрийдмана сводится к квантово-механической задаче об элементарных осцилляторах $q_k(\eta)$ ($\lambda = a/k$, $\omega = \beta k$), находящихся под влиянием внешнего нестационарного поля $\alpha = \alpha(\eta)$ в пространстве-времени Минковского $\eta = \int dt/a$

$$S_k = \int L_k d\eta, \quad L_k = \frac{\alpha^2}{2k^3} (q'^2 - \omega^2 q^2)$$

Q_T - **бесследово-поперечная
компонента гравитационного поля**

$$\alpha_T^2 = a^2 / 8\pi G, \quad \beta = 1$$

Q_S - **калибровочно-инвариантная
комбинация гравитационного
потенциала и скорости материи**

$$\alpha_S^2 = a^2 \gamma / 4\pi G \beta^2, \quad \beta = c_s / c$$

Эволюция элементарных осцилляторов

$$\bar{q} = \alpha q, \quad U = \frac{\alpha''}{\alpha}$$

$$\bar{q}'' + (\omega^2 - U)\bar{q} = 0$$

адиабатическая зона

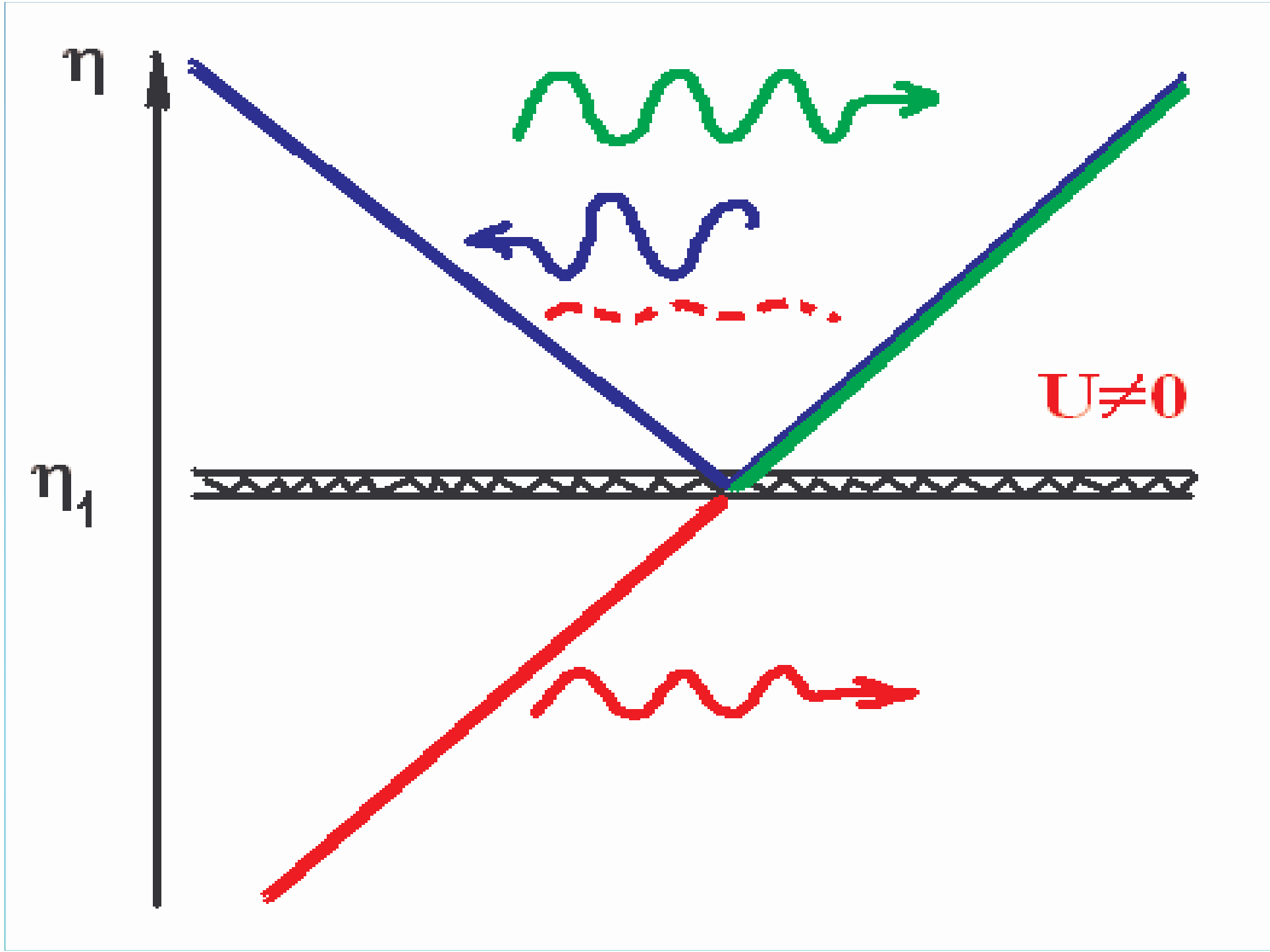
$$\omega^2 > U: \quad |q| \sim 1 / \alpha \sqrt{\beta}$$

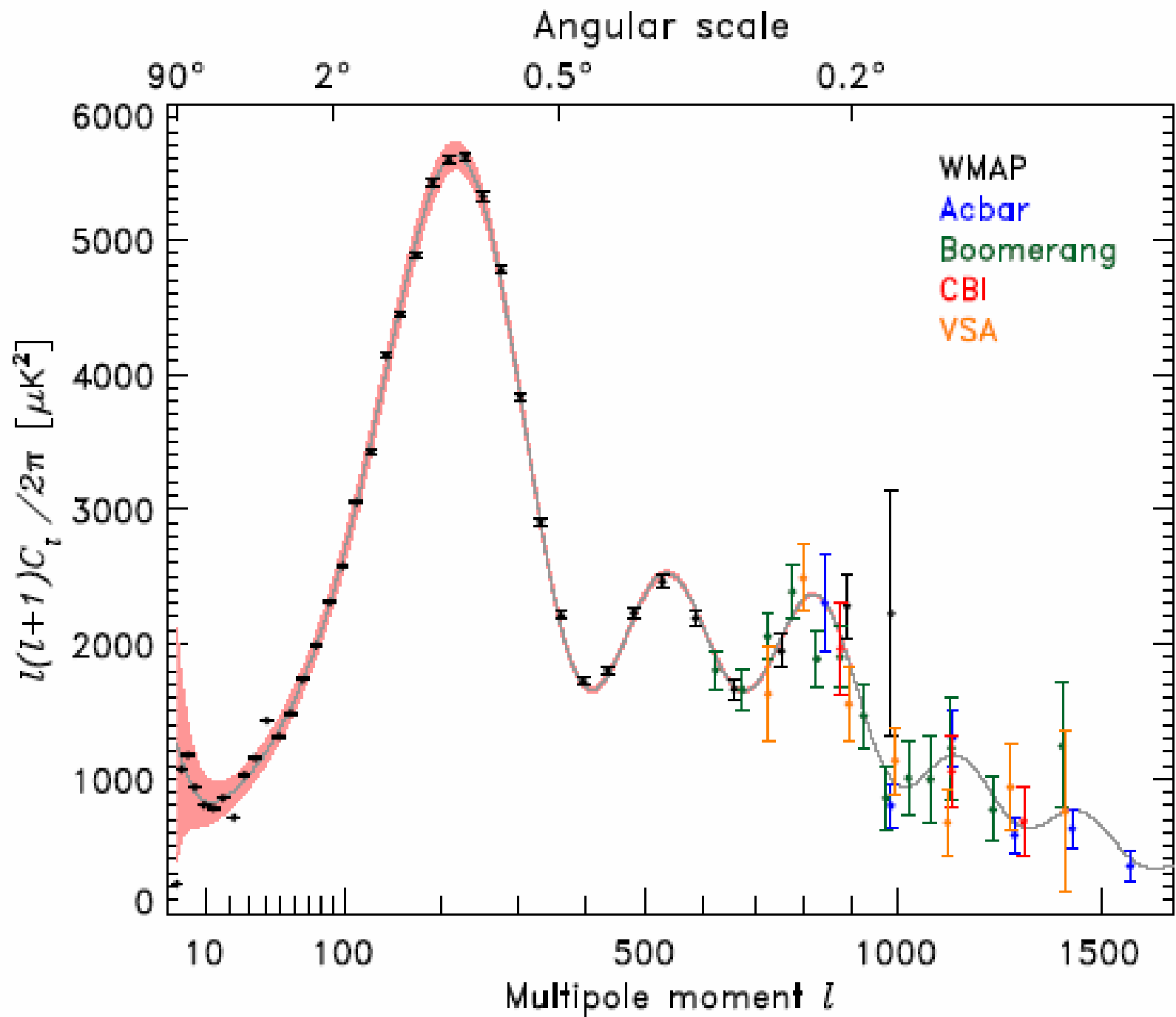
параметрическая зона

$$\omega^2 < U: \quad q \sim \text{const}$$

момент рождения

$$\omega^2 = U \cong (2 - \gamma) a^2 H^2$$





Общий результат

$$T = \frac{H^2}{M_{\text{P}}^2}, \quad \frac{T}{S} = 4\gamma$$

Ожидается $T/S < 0.1$:

$$H < 10^{13} \text{ ГэВ}, \quad \gamma < 0.02$$

Инфляционный Большой взрыв ($\gamma < 1$)

**Для рождения S нужны энергии
Великого объединения**

**для генерации малого T/S нужна
инфляционная ранняя Вселенная**

урок 4: свидетельство ТМ

Происхождение ТМ связано
с барионной асимметрией

подсказка: $\epsilon_V \cong \epsilon_{TM}$ теперь
и в момент образования

**ещё одна подсказка: совпадение
масштабов распределений БМ и ТМ**

**космологический горизонт в момент равенства
энергий излучения и ТМ *идентичен*
звуковому горизонту в эпоху рекомбинации БМ**

В стандартной модели таких частиц нет !



ЛЕПТОНЫ

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

3 поколения частиц

кварки

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

+
АНТИЧАСТИЦЫ

$$\begin{matrix} e^+ & , & \dots \\ \bar{\nu}_e & , & \dots \\ \bar{u} & , & \dots \end{matrix}$$

+ частицы переносчики взаимодействий

γ , W^\pm , Z , глюоны

Гипотезы небарионной ТМ

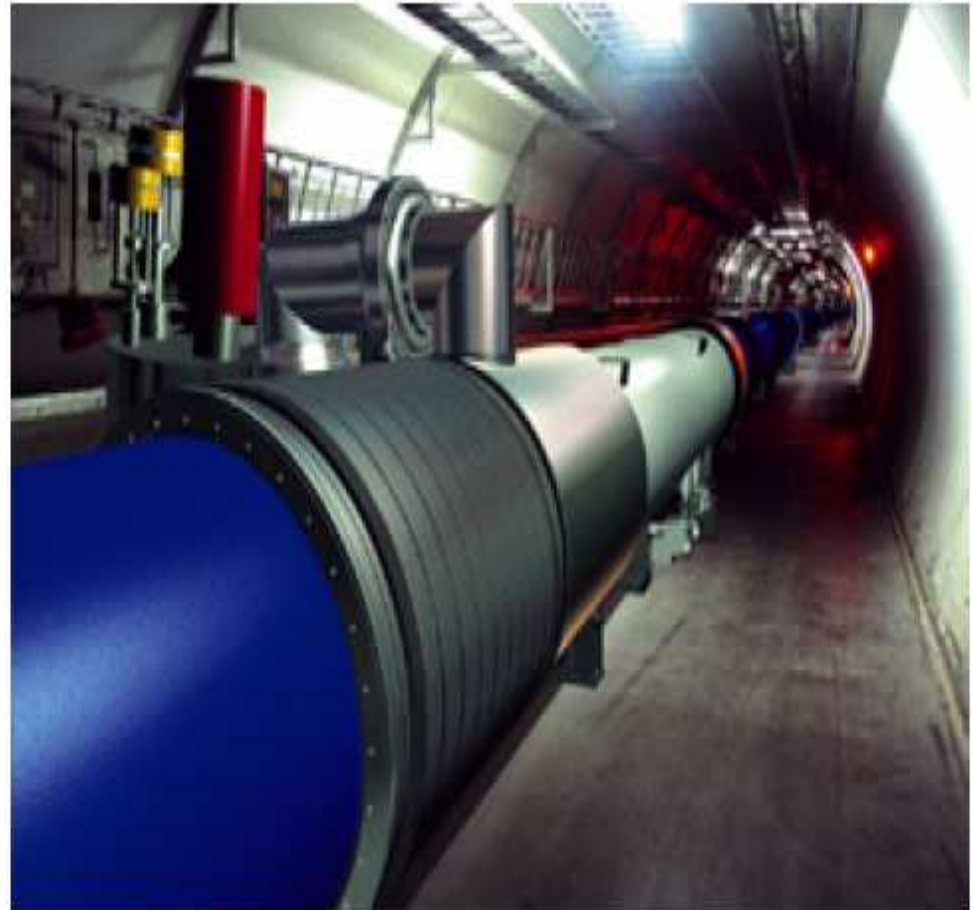
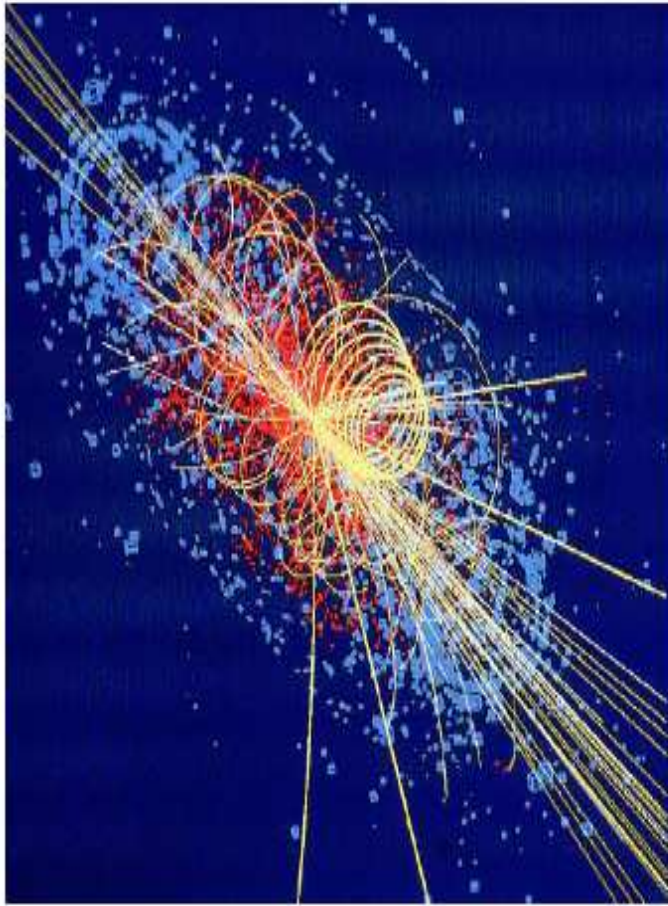
кандидат	масса
Гравитоны	10^{-21} эВ
Аксионы	10^{-5} эВ
Стерильные нейтрино	10 кэВ
Зеркальное вещество	1 ГэВ
Массивные частицы	100 ГэВ
Многомерие, браны	10^3 ГэВ
Сверхмассивные частицы	10^{13} ГэВ
Монополи, дефекты	10^{19} ГэВ
Первичные черные дыры	10^{-16} - $10^{-7} M_{\odot}$

Возможно прямое детектирование - *БАК 2011*

- неизвестные частицы (WIMP)
- масса ~ 100 ГэВ, 1 частица в стакане
- **стабильные**, **нейтральные**, **слабо взаимодействующие** (нейтралино)

Новая физика!

Поиски нейтраліно в ЦЕРНе



Возможно косвенное детектирование - аннигиляционный сигнал от каспов ТМ

Проблема каспов -ключ к физике ТМ

- * предсказываются численным экспериментом
- * не наблюдаются в карликовых галактиках
- * возможная связь с массивными черными дырами

**Гипотеза нейтралино будет
проверена в ближайшие годы**

урок 5: свидетельство ТЭ

структурный аргумент: КМС + РИ

$$\rho_m / \rho_c < 0,3$$

Анизотропия РИ - плоская 3-геометрия

**Более 70% энергии Вселенной остается
нескученной $\rightarrow p \approx -\rho$ (темная энергия)**

**Другие аргументы - пекулярные скорости галактик,
линзирование, рентгеновский газ в скоплениях,
кривые вращений, сверхновые, интегральный SW**

Что такое темная энергия ?

- слабовзаимодействующая субстанция, заполняющая все пространство Вселенной

Сверхслабое поле ?

*Принципиально ничем не
отличается от инфлатона
(только другие параметры)*

Фундаментальные взаимодействия

1 ГэВ **сильные**

100 ГэВ **электрослабые**

10^{19} ГэВ **гравитационные**

Но масштаб ТЭ $\sim 10^{-3}$ эВ !

**Для образования крупномасштабной структуры Вселенной необходимы :
начальные возмущения плотности +**

$$\rho_r < \rho_{TM}, \quad \rho_{TЭ} \leq \rho_{TM}$$

окно гравитационной неустойчивости

$$\rho_r \ll \rho_b \leq \rho_{TM}$$

условие образования звезд

**доминирование ТЭ закрывает окно
гравитационной неустойчивости, прекращает
генерацию структуры и восстанавливает
хаббловский поток**

Образование Вселенной это
создание хаббловского потока

$$\vec{v} = H \vec{r} , \quad H = \dot{a} / a$$

$\ddot{a} > 0$ (антиколлапс или инфляция)

Образование структуры это
разрушение хаббловского потока

$\ddot{a} < 0$ (коллапс: гало, черные дыры)

урок 6: история Вселенной

- * за 14 млрд лет - две стадии инфляции**
- * их могло быть больше, сходные причины**
- * простейшая причина стадий инфляции --
сверхслабые массивные поля**
- * инфляция создает и восстанавливает
хаббловские потоки**

**История Вселенной это история
образования и распада массивных полей**

***Определение параметров ТЭ –
это прецизионная космология***



Три способа измерения ТЭ

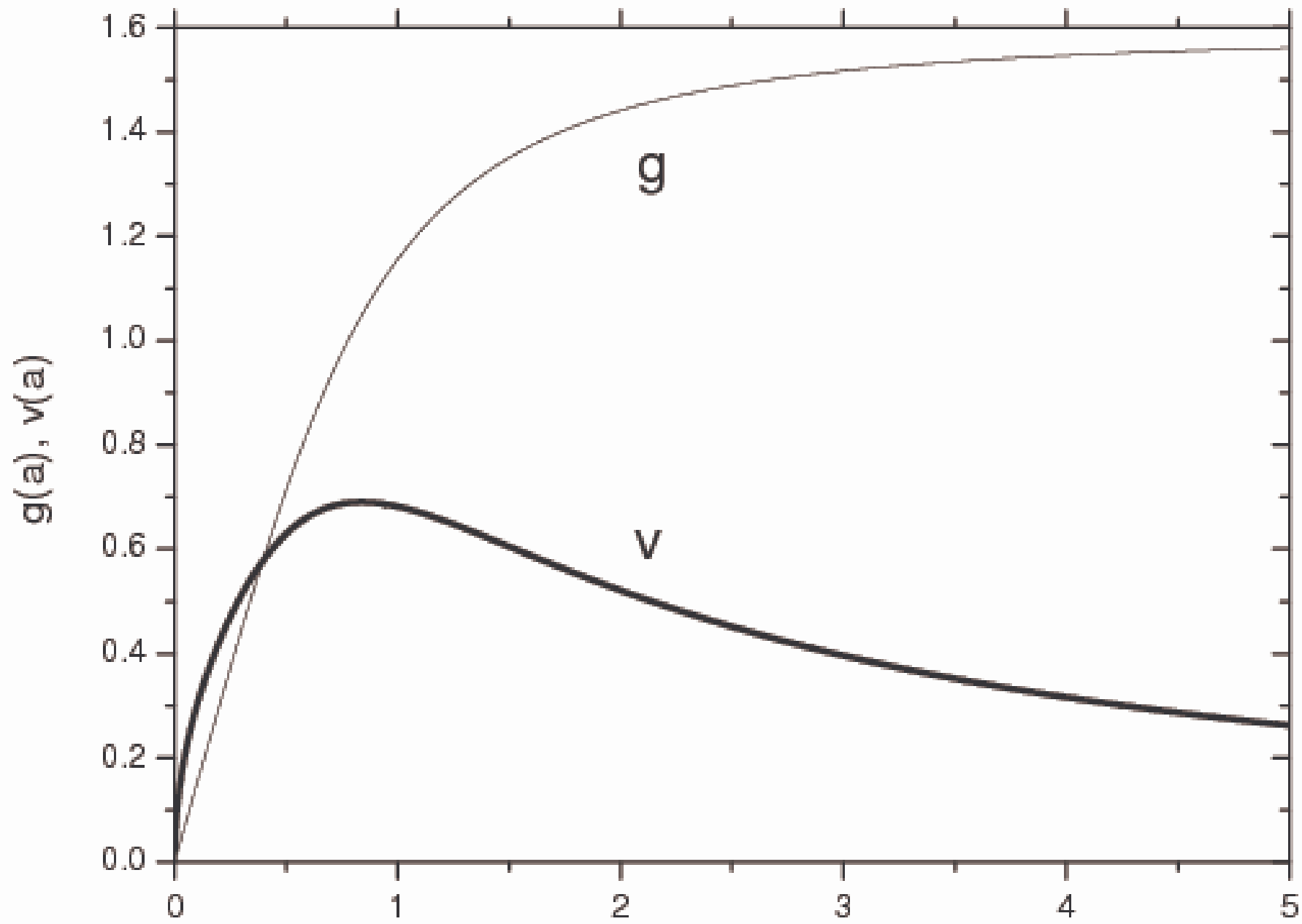
Структурный

Динамический

Геометрический

отношение к Радиоастроному

**ТЭ, не входя в структуру,
кардинально влияет на
скорость ее образования**



масштабный фактор $a=(1+z)^{-1}$

Формирование крупномасштабной структуры в нашей Вселенной происходит от 1 до 22 миллиардов лет с момента Большого взрыва

Мы находимся в периоде максимальной генерации структуры во Вселенной !

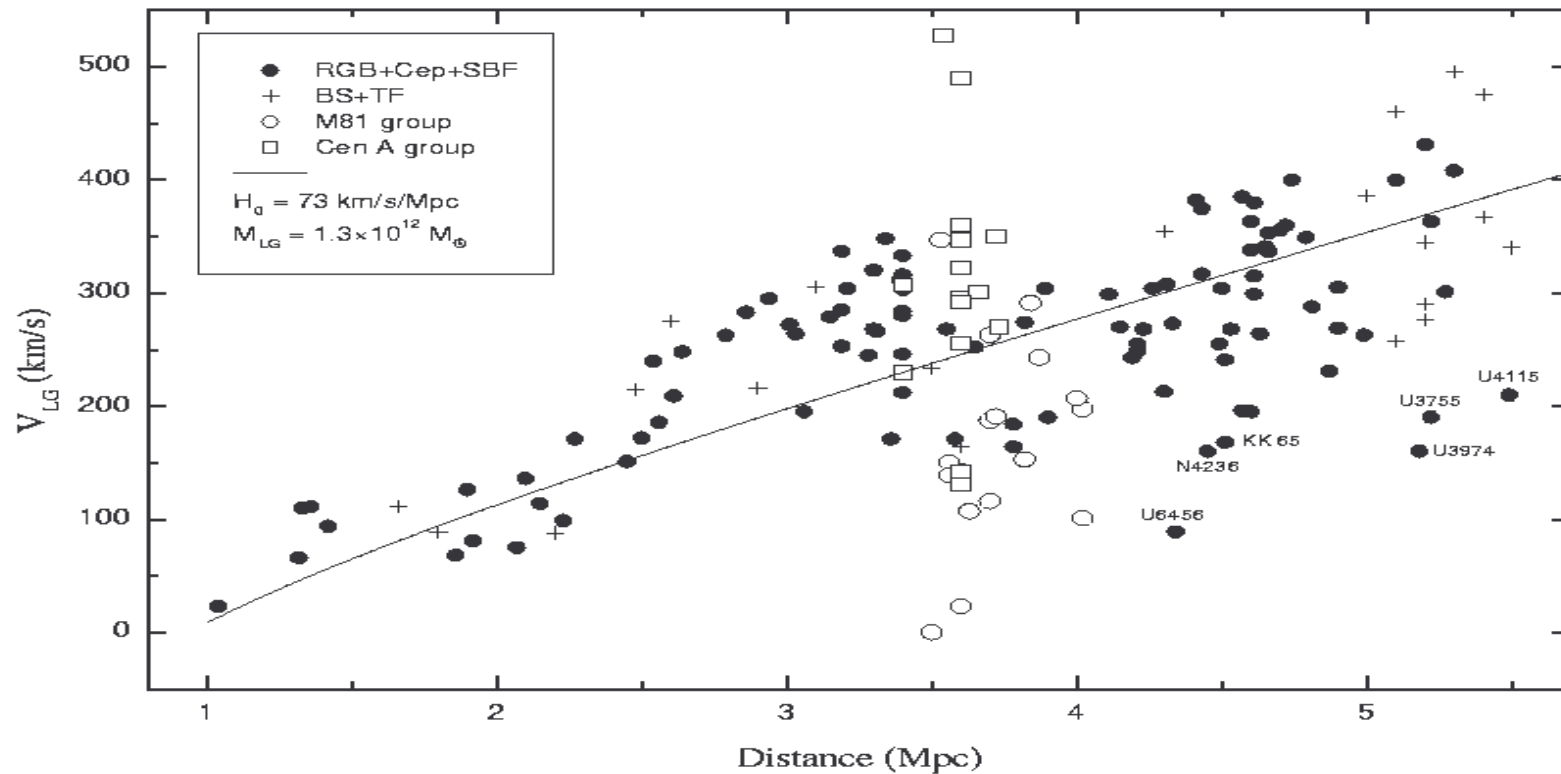
Грех не использовать такой шанс:

Мы можем измерить ТЭ, взвешивая количество структуры при разных z

$$\delta V_i = \frac{\partial}{\partial t} \delta r_i = H_{ik} \delta r^k, \quad H_{ik} = H(\delta_{ik} - h \cdot \hat{q}_{,ik})$$

156 ближайших галактик

радиальная скорость



Главные значения $H_{ik} = \text{diag} (81, 62, 48) \text{ км/с/Мпк}$

Геометрические измерения

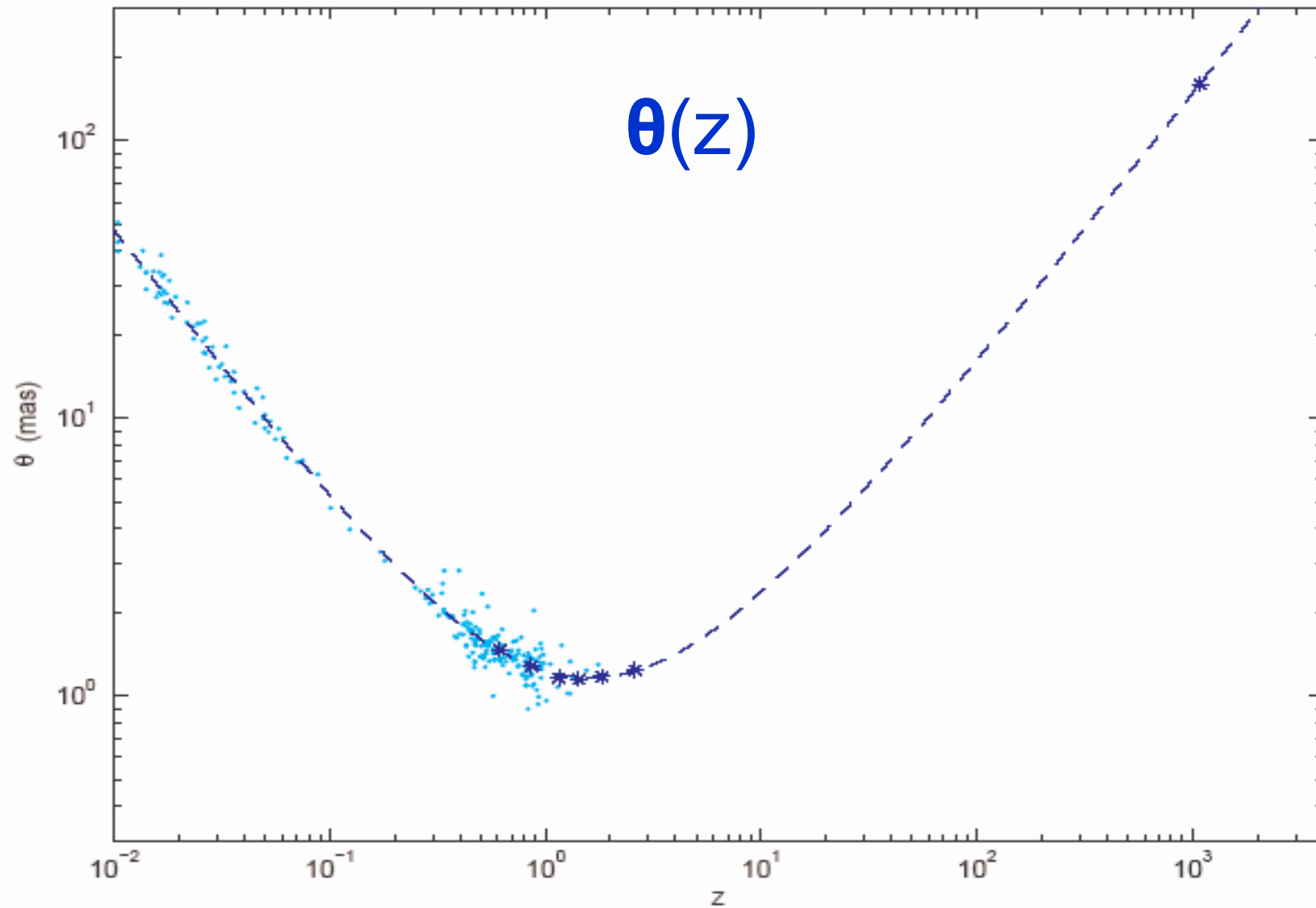
Видимая величина / красное смещение
 $m(z)$

(SNIa, стандартная свеча)

Угловой размер / красное смещение
 $\theta(z)$

(UCRSmas, стандартный размер)

Ультра-компактные радиисточники



Jackson & Jannetta 2006

урок 7: космогенезис

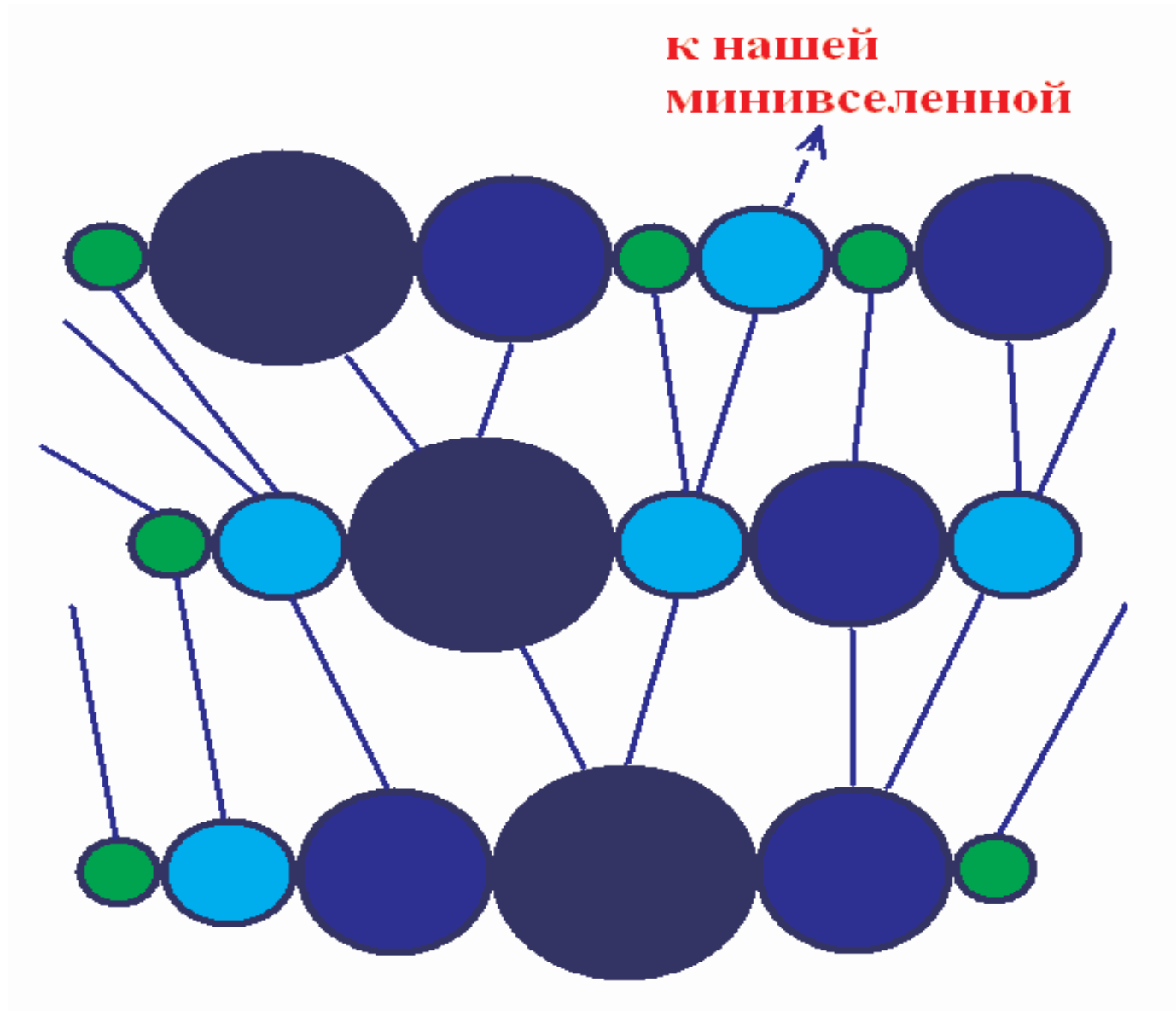
Парадигмы

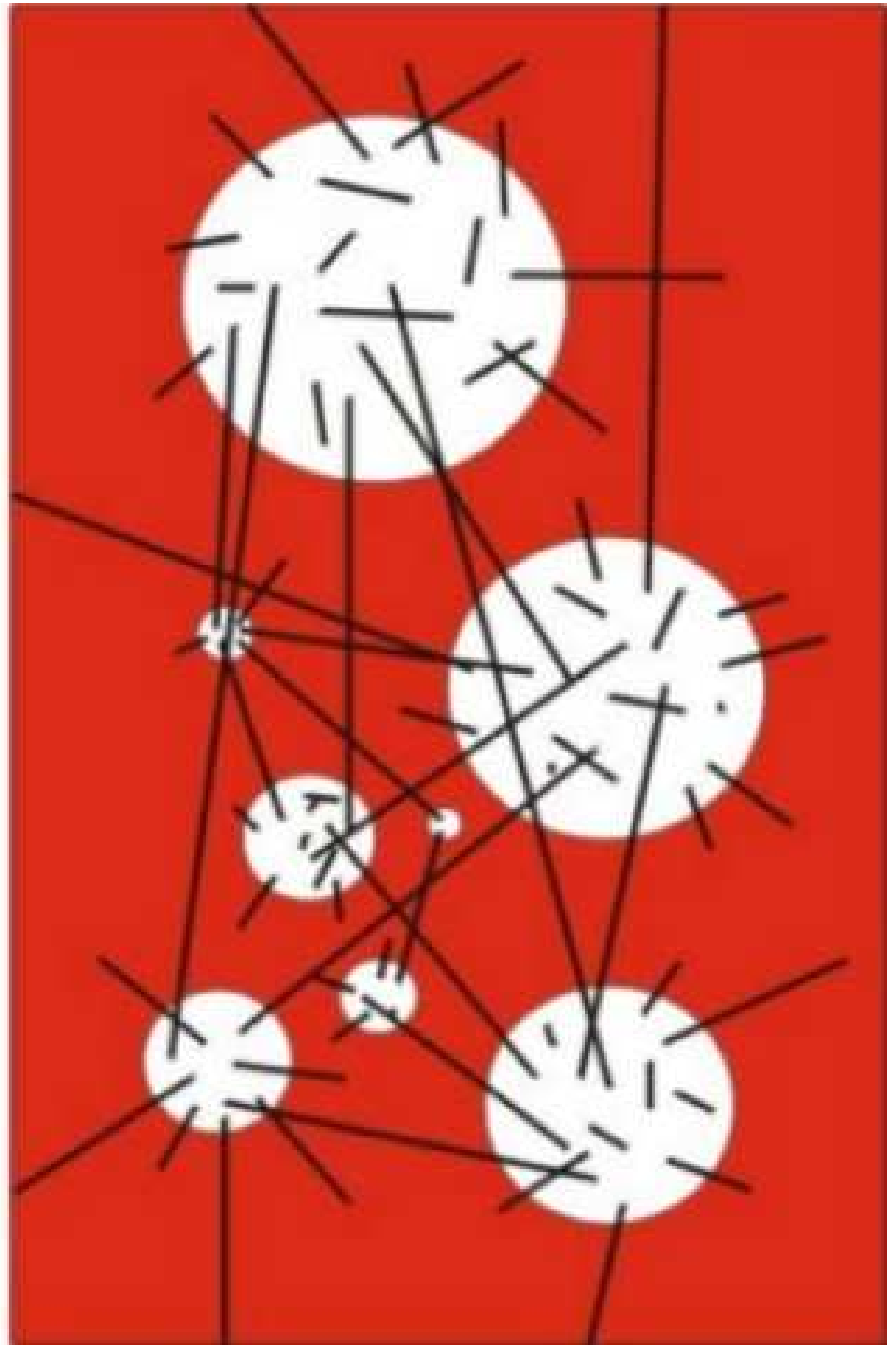
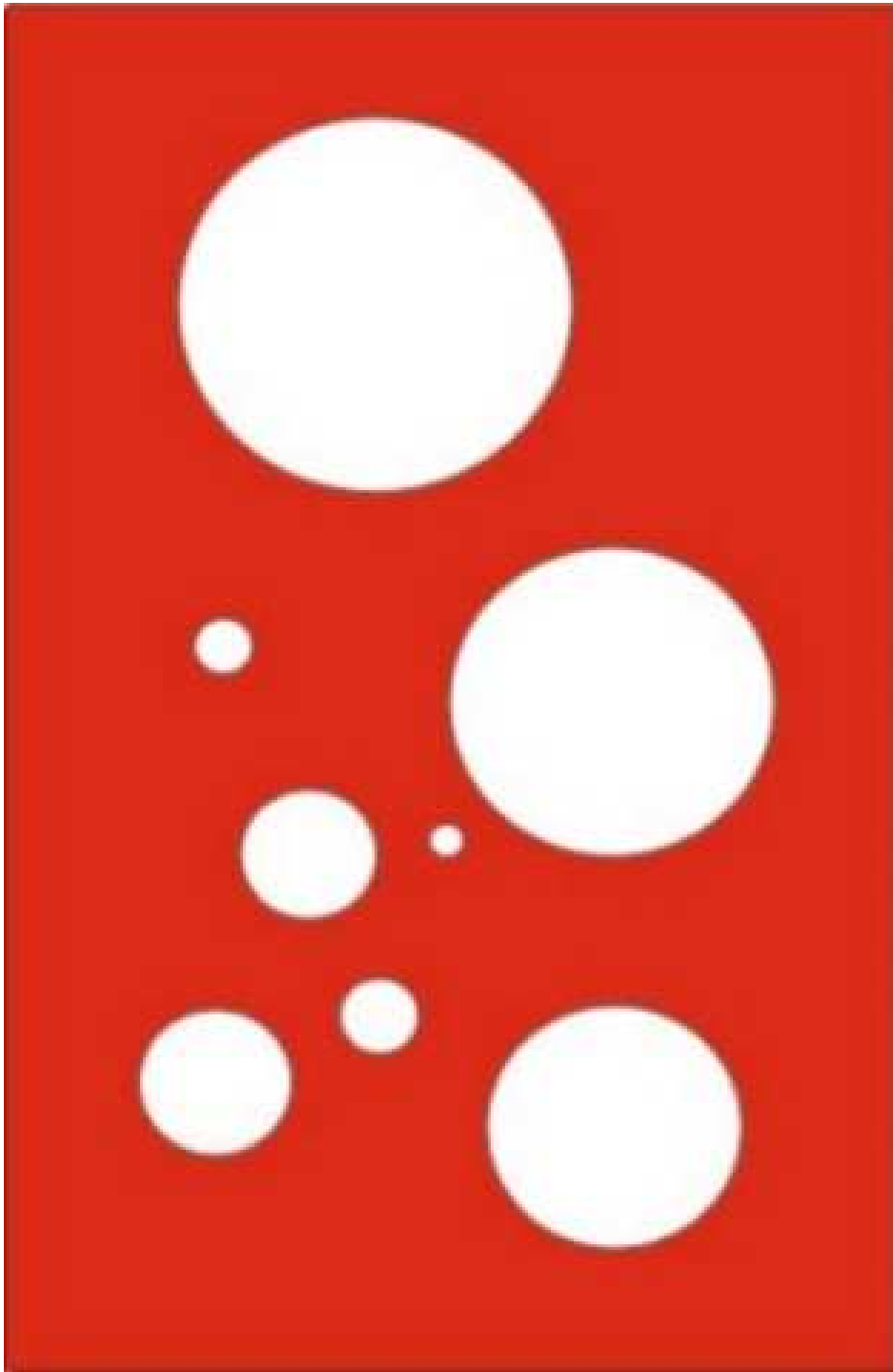
- **Космологический постулат (универс)**
- **Множественные миры (мултиверс)**

Как возникают большие плотности ?

Проявление гравитационной неустойчивости

Вечная инфляция ?





A photograph of a large, green, parabolic antenna dish mounted on a complex metal structure inside a building. The dish is the central focus, with a central feed horn. The building's interior is visible, showing metal walls, walkways with railings, and some lighting fixtures. The word "Выводы" is overlaid in the center of the image in a bold, yellow, sans-serif font with a black outline.

Выводы

