

Вселенная: вчера, сегодня и завтра

Дмитрий Горбунов

Институт ядерных исследований РАН, Москва

1 ноября 2011

План

- 1 Связь с физикой частиц
- 2 Что мы знаем о Вселенной?
- 3 Будущее: гарантированный прогноз на 10 млрд. лет
- 4 Настоящее: как увидеть тёмные компоненты
- 5 Прошлое: самое загадочное
- 6 Проблемы Горячего Большого Взрыва

План

- 1 Связь с физикой частиц
- 2 Что мы знаем о Вселенной?
- 3 Будущее: гарантированный прогноз на 10 млрд. лет
- 4 Настоящее: как увидеть тёмные компоненты
- 5 Прошлое: самое загадочное
- 6 Проблемы Горячего Большого Взрыва

Стандартная модель: успехи и проблемы

Калибровочные поля (взаимодействия): γ , W^\pm , Z , g

Три поколения материи: $L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$, e_R ; $Q = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$, d_R , u_R

- Описывает
 - ▶ все эксперименты с участием сильных и электрослабых взаимодействий
- Не описывает
 - ▶ Тёмная энергия (Ω_Λ)
 - ▶ Инфляция ...
 - ▶ CP-проблема в КХД: нетривиальная топология, ...
 - ▶ Иерархия калибровочных масштабов:
 - ▶ Квантовая гравитация
- ▶ Нейтринные осцилляции
- ▶ Барионная асимметрия
- ▶ Тёмная материя (Ω_{DM})

физика частиц

должна объяснять это

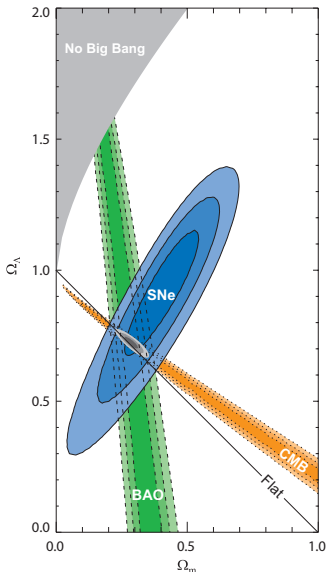
объясняется физикой на масштабе

$E \sim 1/\sqrt{G_N} \sim 10^{19}$ ГэВ ? ▶ ◀ ≡ ≡

План

- 1 Связь с физикой частиц
- 2 Что мы знаем о Вселенной?
- 3 Будущее: гарантированный прогноз на 10 млрд. лет
- 4 Настоящее: как увидеть тёмные компоненты
- 5 Прошлое: самое загадочное
- 6 Проблемы Горячего Большого Взрыва

Данные из астрофизики и космологии



- оценка массы в галактиках, скоплениях и других структурах
- поправки к закону Хаббла : связь между красным смещением и кривыми блеска для “стандартных свеч” (SNe Ia)
- анизотропия РИ, распространённость структур (BAO, и др.)

$$\rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}}(t_0) \equiv \rho_c \approx 0.53 \times 10^{-5} \frac{\text{ГэВ} \text{ c}^2}{\text{см}^3}$$

вклад РИ:

$$\Omega_\gamma \equiv \frac{\rho_\gamma}{\rho_c} = 0.5 \times 10^{-4}$$

Вклад барионов (водород, гелий):

$$\Omega_B \equiv \frac{\rho_B}{\rho_c} = 0.046$$

Вклад нейтрино:

$$\Omega_\nu \equiv \frac{\sum \rho_{\nu_i}}{\rho_c} < 0.01$$

Вклад тёмной материи:

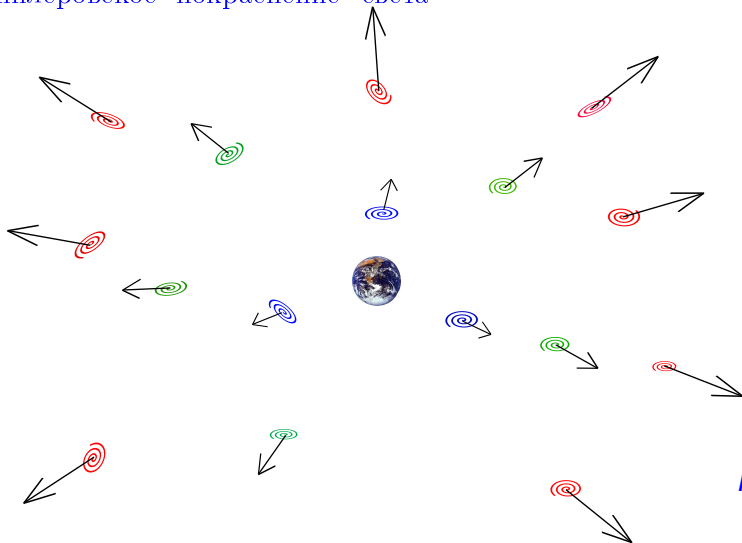
$$\Omega_{DM} \equiv \frac{\rho_{DM}}{\rho_c} = 0.23$$

Вклад тёмной энергии:

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} = 0.73$$

Основные представления о Вселенной: расширяется

Доплеровское “покраснение” света



$$L \propto a(t)$$

$$n \propto a^{-3}(t)$$

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

параметр
Хаббла

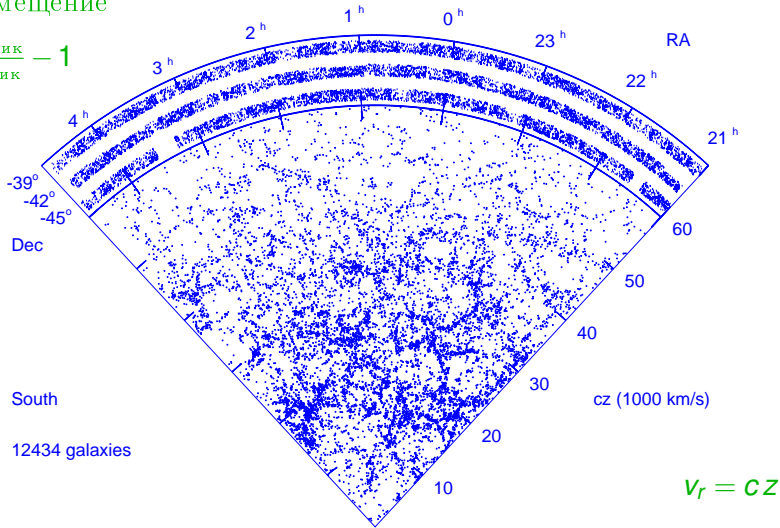
закон
Хаббла

$$H(t_0) r = v_r$$

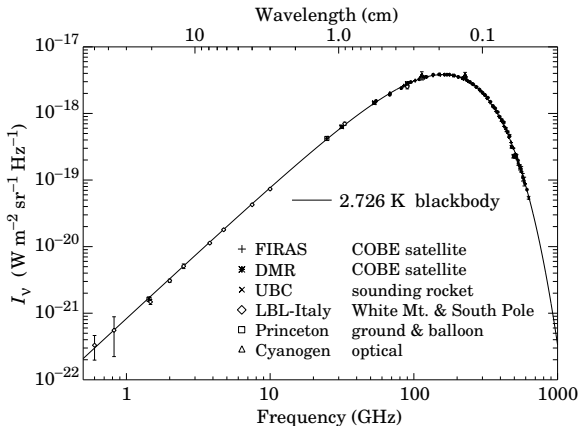
Наша Вселенная: однородна и изотропна

красное смещение

$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{приёмник}}}{\lambda_{\text{источник}}} - 1$$



Вселенная заполнена “горячими” фотонами



$$T_0 = 2.726 \text{ K}$$

и спектр и
концентрация
равновесны

$$n_\gamma = 411 \text{ см}^{-3}$$

Выводы из наблюдений

Итак, Вселенная однородна, изотропна, расширяется и “горячая”...

Выводы

- интервал между событиями модифицируется

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - a^2(t) \Delta \vec{x}^2$$

в ОТО расширение описывается уравнением Фридмана

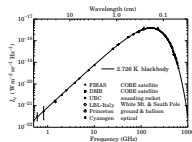
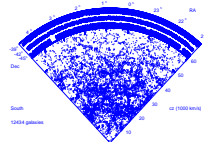
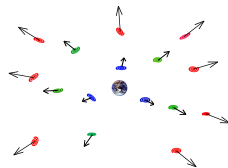
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(t) = \frac{8\pi}{3} G \rho_{\text{плотность энергии}}$$

$$\rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}} = \rho_{\text{радиация}} + \rho_{\text{вещество}}^{\text{обычное}} + \rho_{\text{материя}}^{\text{тёмная}} + \dots$$

- в прошлом Вселенная была “плотнее” и “горячее”, была электромагнитная плазма

$$\rho_{\text{вещество}} \propto 1/a^3(t), \quad \rho_{\text{радиация}} \propto 1/a^4(t)$$

надёжно знаем вплоть до $T \sim 1 \text{ МэВ } c^2/k \sim 10 \text{ млрд. К}$



Измерение $a(t)$ даёт состав современной Вселенной

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - a^2(t) \Delta \vec{x}^2$$

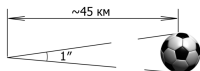
Как мы его проверяем?

Измеряя расстояние L до объекта!

Изменяется закон распространения света

- Измеряя угловой размер θ объекта известного размера d

$$\theta = \frac{d}{L}$$



однотипные галактики

- Измеряя угловой размер $\theta(t)$ соответствующий известно как изменяющемуся размеру $d(t)$

$$\theta(t) = \frac{d(t)}{L}$$

- Измеряя яркость объекта J заданной светимости F

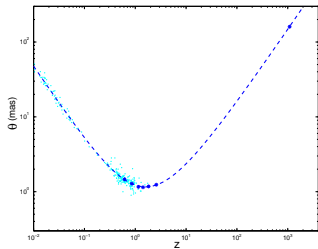
$$J = \frac{F}{4\pi L^2}$$

“стандартные свечи”

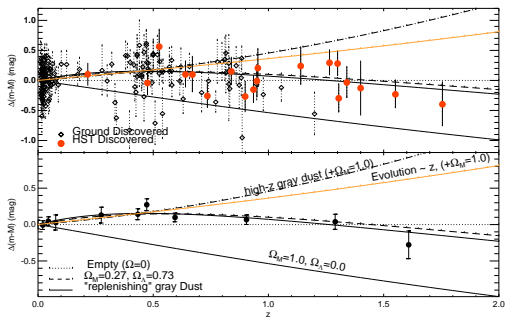
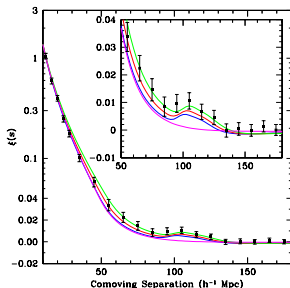


В расширяющейся Вселенной все эти законы модифицируются

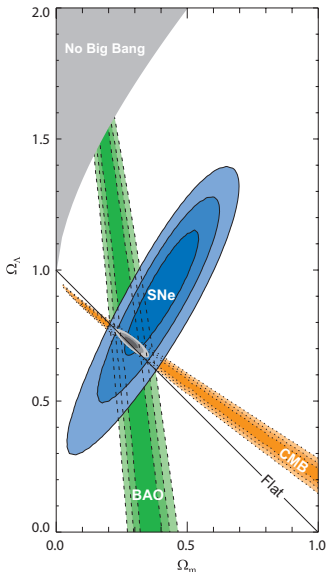
Результаты “измерений расстояний”



$$\Delta(m-M) = 5 \log \frac{r_{ph}}{r_{ph}(\Omega_c = 0.8, \Omega_M = 0.2)}$$



Данные из астрофизики и космологии



$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(t) = \frac{8\pi}{3} G \rho_{\text{плотность энергии}}$$

$$\rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}} = \rho_{\text{радиация}} + \rho_{\text{вещество}}^{\text{обычное}} + \rho_{\text{материя}}^{\text{тёмная}} + \rho_\Lambda$$

$$\rho_{\text{радиация}} \propto 1/a^4(t) \propto T^4(t), \quad \rho_{\text{вещество}} \propto 1/a^3(t)$$

$$\rho_\Lambda = \text{const}$$

$$\frac{3H_0^2}{8\pi G} = \rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}}(t_0) \equiv \rho_c \approx 0.53 \times 10^{-5} \frac{\text{ГэВ} \text{с}^2}{\text{см}^3}$$

вклад РИ:

$$\Omega_\gamma \equiv \frac{\rho_\gamma}{\rho_c} = 0.5 \times 10^{-4}$$

Вклад барионов (водород, гелий):

$$\Omega_B \equiv \frac{\rho_B}{\rho_c} = 0.046$$

Вклад нейтрино:

$$\Omega_\nu \equiv \frac{\sum \rho_{\nu i}}{\rho_c} < 0.01$$

Вклад тёмной материи:

$$\Omega_{DM} \equiv \frac{\rho_{DM}}{\rho_c} = 0.23$$

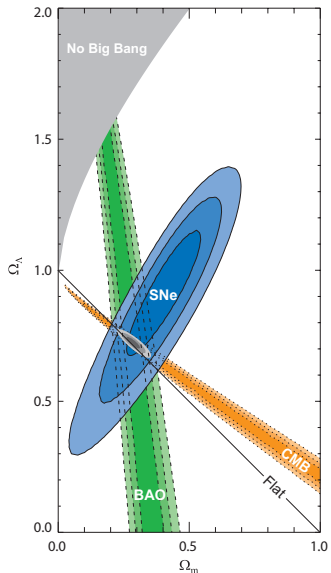
Вклад тёмной энергии:

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} = 0.73$$

План

- 1 Связь с физикой частиц
- 2 Что мы знаем о Вселенной?
- 3 Будущее: гарантированный прогноз на 10 млрд. лет**
- 4 Настоящее: как увидеть тёмные компоненты
- 5 Прошлое: самое загадочное
- 6 Проблемы Горячего Большого Взрыва

Будущее: $t \nearrow$ и $a(t) \nearrow$



$$\rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}} = \rho_{\text{радиация}} + \rho_{\text{вещество}}^{\text{обычное}} + \rho_{\text{материя}}^{\text{тёмная}} + \rho_{\Lambda}$$

$$\rho_{\text{радиация}} \propto 1/a^4(t), \quad \rho_{\text{вещество}} \propto 1/a^3(t)$$

$$\rho_{\Lambda} = \text{const}, \quad \Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\rho_{\Lambda}}{\rho_c} = 0.73$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(t) = \frac{8\pi}{3} G \rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}} \rightarrow \text{const}$$

В будущем получаем:

$$\dot{a} = \text{const} \cdot a \implies a(t) \propto e^{Ht}$$

с характерным временем роста

$$t \sim 1/H \simeq 1/H_0 \approx 14 \text{ млрд. лет}$$

свет летит $\Delta x = ct$, объекты разлетаются: $\Delta x \propto e^{Ht}$

В пределах видимости останутся только гравитационно связанные с нами объекты !!!

План

- 1 Связь с физикой частиц
- 2 Что мы знаем о Вселенной?
- 3 Будущее: гарантированный прогноз на 10 млрд. лет
- 4 Настоящее: как увидеть тёмные компоненты**
- 5 Прошлое: самое загадочное
- 6 Проблемы Горячего Большого Взрыва

Настоящее: а где сегодня тёмные компоненты?

- Тёмная энергия есть везде!!! ($c = \hbar = 1$)

$$-p_\Lambda = \rho_\Lambda = \text{const} > 0$$

- Тёмная материя (как пыль, обычное вещество) собирается в структуры: галактики, скопления галактик, филаменты, ...

Таким образом, можно искать её влияние на динамику этих объектов!!!

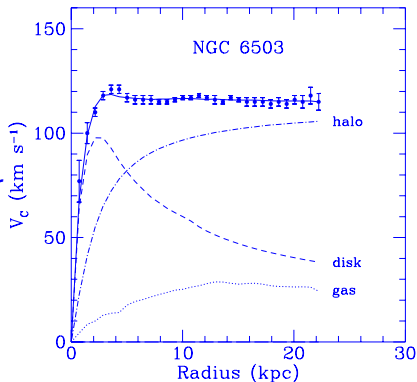
Тёмное гало галактик: пологие “кривые вращения”

$$v(R) = \sqrt{G \frac{M(R)}{R}}$$

$$M(R) = 4\pi \int_0^R \rho(r) r^2 dr$$

1 кpc = 10^3 парсек =

3.3 тыс. св. лет



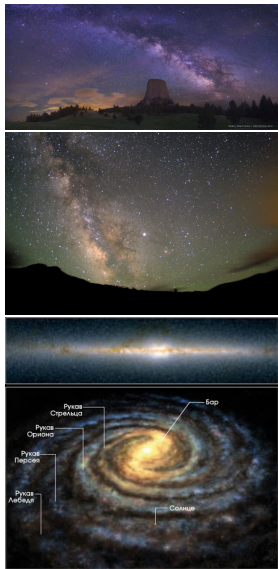
наблюдения:

$$v(R) \simeq \text{const}$$

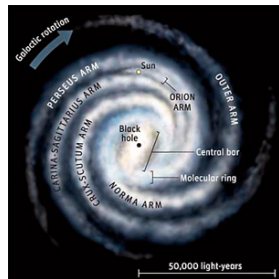
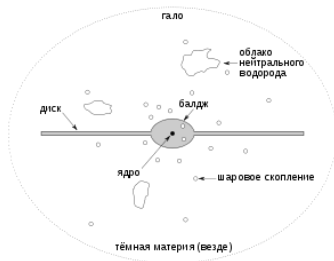
Видимая материя:

внутренние области $v(R) \propto \sqrt{R}$
 внешние (“пустые”) области $v(R) \propto 1/\sqrt{R}$

Строение Млечного Пути

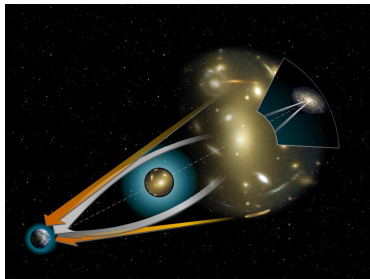


гало также помогает стабилизировать структуру диска ...

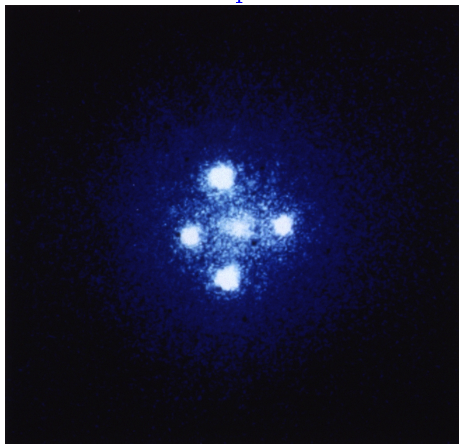


Гравитационное линзирование

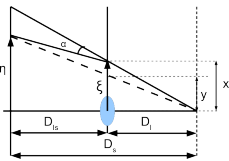
ОТО: $\alpha = 4GM/(c^2 b)$



Крест Эйнштейна



источник: квазар $D_s = 8$ млрд. св.лет
 линза: галактика $D_l = 0.4$ млрд. св.лет



$$\vec{\eta} = \frac{D_s}{D_l} \vec{\xi} - D_{ls} \vec{\alpha}(\vec{\xi})$$

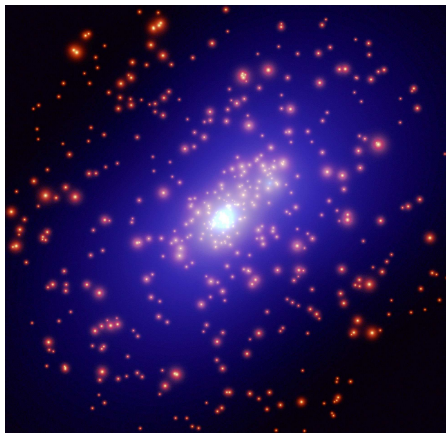
обычная линза
 со специфическим
 коэффициентом
 преломления

$$\vec{\alpha}(\vec{\xi}) = \frac{4G}{c} \int \frac{\vec{\xi} - \vec{\xi}'}{|\vec{\xi} - \vec{\xi}'|^2} d^2 \xi' \int \rho(\vec{\xi}', z) dz$$

Тёмная материя в центре скоплений галактик

гравитационное линзирование

восстановление линзы по изображению



Тёмная материя в скоплениях галактик

X-лучи от горячего газа из центров скоплений

$$\frac{\Delta P}{\Delta R} = -\mu n_e(R) m_p \frac{GM(R)}{R^2}, \quad M(R) = 4\pi \int_0^R \rho(r) r^2 dr, \quad P(R) = n_e(R) T_e(R)$$

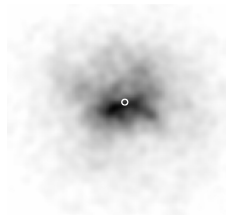
галактики в скоплениях

галактики вириализованы,

$$U + 2E_k = 0$$

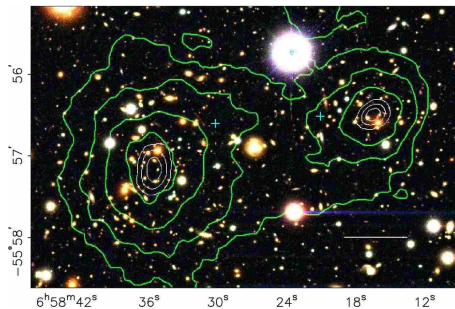
$$3M \langle v_r^2 \rangle = G \frac{M^2}{R}$$

v_r — проекция скорости на луч зрения

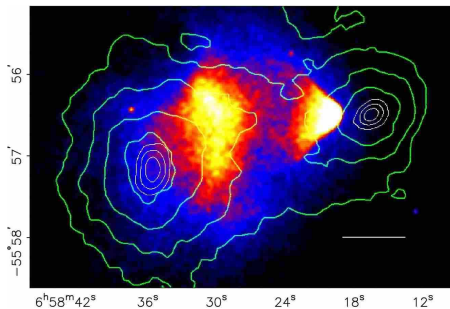


Галактика Млечный путь: движение к центру сверхскопления Девы

Столкнувшиеся скопления (Bullet cluster) 1E0657-558



Гравитационное линзирование



Рентгеновское излучение

$$M \simeq 10 \times m$$

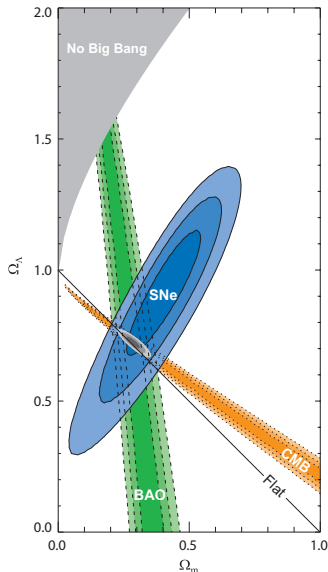
приведён масштаб в 700 тыс. св.лет

скопления удалены на расстояние 5 млрд. св.лет

План

- 1 Связь с физикой частиц
- 2 Что мы знаем о Вселенной?
- 3 Будущее: гарантированный прогноз на 10 млрд. лет
- 4 Настоящее: как увидеть тёмные компоненты
- 5 Прошлое: самое загадочное**
- 6 Проблемы Горячего Большого Взрыва

Данные из астрофизики и космологии



$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(t) = \frac{8\pi}{3} G \rho_{\text{плотность энергии}}$$

$$\rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}} = \rho_{\text{радиация}} + \rho_{\text{вещество}}^{\text{обычное}} + \rho_{\text{материя}}^{\text{тёмная}} + \rho_\Lambda$$

$$\rho_{\text{радиация}} \propto 1/a^4(t) \propto T^4(t), \quad \rho_{\text{вещество}} \propto 1/a^3(t)$$

$$\rho_\Lambda = \text{const}$$

$$\frac{3H_0^2}{8\pi G} = \rho_{\text{энергии}}^{\text{плотность}}(t_0) \equiv \rho_c \approx 0.53 \times 10^{-5} \frac{\text{ГэВ} \text{с}^2}{\text{см}^3}$$

вклад РИ:

$$\Omega_\gamma \equiv \frac{\rho_\gamma}{\rho_c} = 0.5 \times 10^{-4}$$

Вклад барионов (водород, гелий):

$$\Omega_B \equiv \frac{\rho_B}{\rho_c} = 0.046$$

Вклад нейтрино:

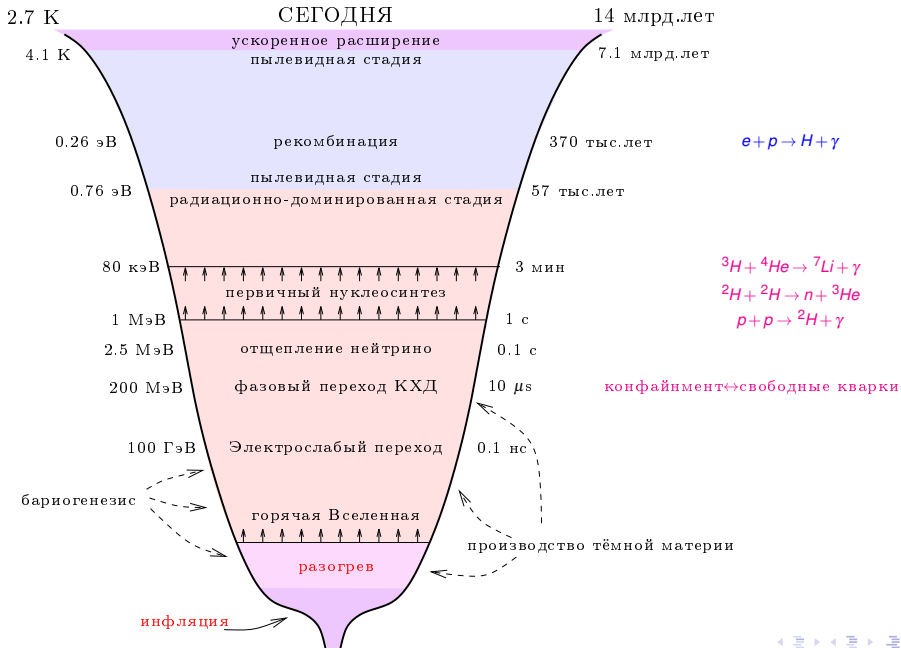
$$\Omega_\nu \equiv \frac{\sum \rho_{\nu_i}}{\rho_c} < 0.01$$

Вклад тёмной материи:

$$\Omega_{DM} \equiv \frac{\rho_{DM}}{\rho_c} = 0.23$$

Вклад тёмной энергии:

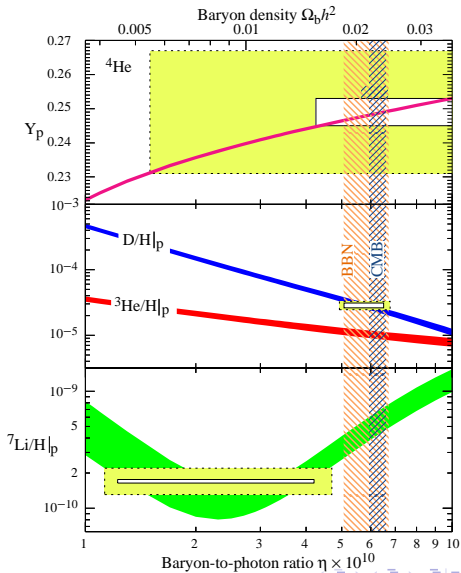
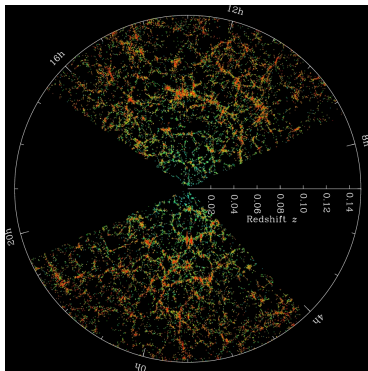
$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} = 0.73$$



Отсутствие антивещества: $n_B/n_\gamma \sim 10^{-9}$ уже в BBN

Условия Сахарова успешного бариогенезиса

- В (or L)-нарушение
- C- & CP-нарушения
- эти процессы неравновесны



План

- 1 Связь с физикой частиц
- 2 Что мы знаем о Вселенной?
- 3 Будущее: гарантированный прогноз на 10 млрд. лет
- 4 Настоящее: как увидеть тёмные компоненты
- 5 Прошлое: самое загадочное
- 6 Проблемы Горячего Большого Взрыва**

Проблемы Горячего Большого Взрыва: ОТО + СМ

- Тёмная материя

$$\Omega_{DM} \sim 0.2$$

- Бариогенезис

$$n_B/n_\gamma \sim 10^{-9}$$

- Начальные флуктуации:
нет источника

$$\delta T/T \sim \delta \rho/\rho \sim 10^{-5},$$

масштабно-инвариантны

- Проблемы горизонта, энтропии, плоскостности, ...

$$l_{H_0}/l_{H,r}(t_0) \sim \sqrt{1+z_r} \simeq 30$$

- Тяжёлые реликты

крайне опасны

- Тёмная энергия

???

- Проблема совпадений:

$$\Omega_B \sim \Omega_{DM} \sim \Omega_\Lambda,$$

$$\Delta_B = n_B/s \sim (\delta T/T)^2,$$

$$T_d^n \sim (m_n - m_p),$$

...

- Λ CDM tensions:

нехватка карликовых галактик?

тёмная материя в центрах галактик?

Роль флуктуаций в образовании структур

- Реликтовое излучение не совсем изотропно.

- 1 Движение Земли относительно РИ

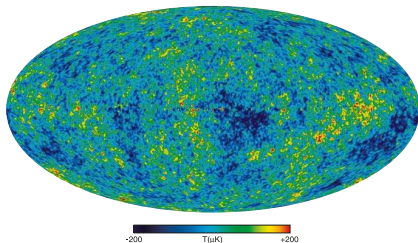
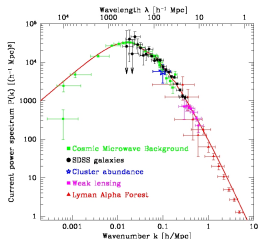
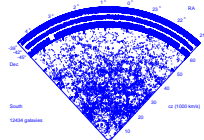
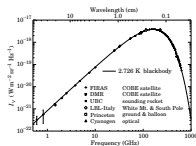
$$\frac{\Delta T_{\text{диполь}}}{T} \sim 10^{-3}$$

- 2 Есть более сложная анизотропия!

$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$

- Были неоднородности вещества $\Delta \rho / \rho \sim \Delta T / T$ в эпоху рекомбинации — образования водорода

- Гравитационная (джинсовская) неустойчивость системы покоящихся частиц $\Rightarrow \Delta \rho / \rho \nearrow \Rightarrow$ галактики



Космологический горизонт (частиц) $l_H(t)$

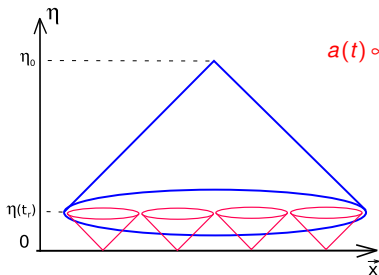
расстояние пройденное фотонами, испущенными при $t = 0$

размер причинно связанной области — размер видимой части Вселенной

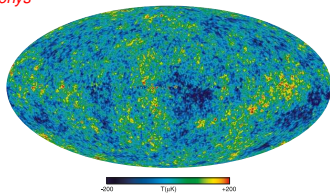
$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - a^2(t) \Delta x^2$$

$$ds = 0 \rightarrow c dt = a dx$$

$$l_H(t) = a(t) \int dx = a(t) \int_0^t \frac{c dt'}{a(t')} \propto t$$



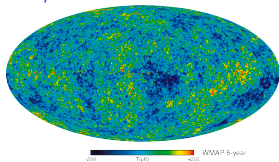
$$a(t) \propto t^\alpha, \quad 0 < \alpha < 1, \quad L_{phys} \propto a$$



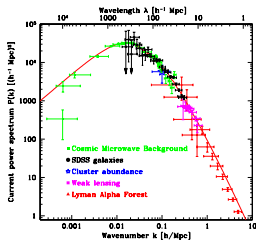
$$l_{H_0} / l_{H,r}(t_0) \sim \sqrt{1 + z_r} \simeq 30$$

Инфляционное решение проблем: вначале было...

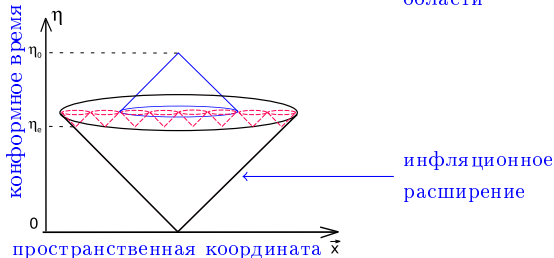
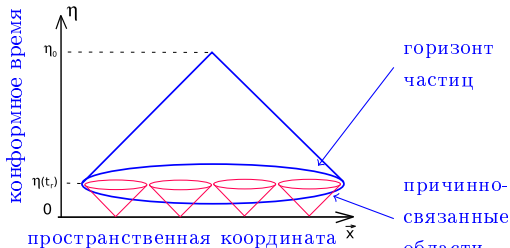
Флуктуации температуры
 $\delta T/T \sim 10^{-5}$



Вселенная однородна!



$\delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$



Backup slides

Проблема энтропии

$$\nabla_{\mu} T^{\mu 0} = 0 \longrightarrow \dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}}{a} (\rho + p) = 0$$

уравнение состояния

$$p = p(\rho)$$

для первичной плазмы получаем

$$-3d(\ln a) = \frac{d\rho}{\rho + p} = d(\ln s)$$

энтропия сохраняется в сопутствующем объёме

$$sa^3 = \text{const}$$

Для видимой части Вселенной:

$$S \sim s_{\gamma,0} \cdot l_H^3 \sim 10^{88}$$

В момент “Взрыва” для планковской ячейки:

$$S_{BB} \sim s_{\gamma,0} \cdot l_{Pl}^3 \sim 100$$

Проблема начальной сингулярности (Взрыв!)

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi}{3}G\rho$$

пыль: $\rho = 0$ сингулярно при $t = t_s$

$$\rho = \frac{\text{const}}{a^3}, \quad a(t) = \text{const} \cdot (t - t_s)^{2/3}, \quad \rho(t) = \frac{\text{const}}{(t - t_s)^2}$$

$$t_s = 0, \quad H(t) = \frac{\dot{a}}{a}(t) = \frac{2}{3t}, \quad \rho = \frac{3}{8\pi G}H^2 = \frac{1}{6\pi G} \frac{1}{t^2}$$

радиация: $\rho = \frac{1}{3}\rho$ сингулярно при $t = t_s$

$$\rho = \frac{\text{const}}{a^4}, \quad a(t) = \text{const} \cdot (t - t_s)^{1/2}, \quad \rho(t) = \frac{\text{const}}{(t - t_s)^2}$$

$$t_s = 0, \quad H(t) = \frac{\dot{a}}{a}(t) = \frac{1}{2t}, \quad \rho = \frac{3}{8\pi G}H^2 = \frac{3}{32\pi G} \frac{1}{t^2}$$