LHC как микроскоп и телескоп в познании Мира

Дмитрий Горбунов

Институт ядерных исследований РАН, Москва

16 октября 2012

LHC как

Микроскоп (10^{-18} м ... Атто-):

$\Delta p \sim \hbar/\Delta x \quad \Longrightarrow$ изучение малых расстоянний возможно лишь при больших переданных импульсах

Сейчас на LHC: $1\,\text{ГэВ} \lesssim \Delta p \lesssim 1\,\text{ТэВ}$

- Кинематически разрешено (хватает энергии!) рождать частицы с массами $M \lesssim 1$ ТэВ !!!
- Можно проверять (известные) физические законы на сверхмалых расстояниях

Телескоп (10^{26} м ...)

1) изучаем далёкое
"Далёкое" во Вселенной = "Раннее"

Горячая очень "ранняя" Вселенная:

- ALICE: фазовый переход КХД ($T \sim 100$ МэВ)
- ATLAS, CMS: тёмная материя? ($T \sim 10\text{-}100$ ГэВ, $M_{DM} \sim 100$ ГэВ)
- ATLAS, CMS: хиггсовский сектор (барионная асимметрия? $T \sim 100$ ГэВ, $M_{h,A,\ldots} \sim 100$ ГэВ)

2) Тёмная материя определяет динамику галактик и их скоплений (масштаб 3 тыс.св.л. – 10 млн.св.л.)

LHC как

Микроскоп (10^{-18} м ... Атто-):

$\Delta p \sim \hbar/\Delta x \quad \Longrightarrow$ изучение малых расстоянний возможно лишь при больших переданных импульсах

Сейчас на LHC: $1\,\text{ГэВ} \lesssim \Delta p \lesssim 1\,\text{ТэВ}$

- Кинематически разрешено (хватает энергии!) рождать частицы с массами $M \lesssim 1$ ТэВ !!!
- Можно проверять (известные) физические законы на сверхмалых расстояниях

Телескоп (10^{26} м ...)

1) изучаем далёкое
"Далёкое" во Вселенной = "Раннее"

Горячая очень "ранняя" Вселенная:

- ALICE: фазовый переход КХД ($T \sim 100$ МэВ)
- ATLAS, CMS: тёмная материя? ($T \sim 10$-100 ГэВ, $M_{DM} \sim 100$ ГэВ)
- ATLAS, CMS: хиггсовский сектор (барионная асимметрия? $T \sim 100$ ГэВ, $M_{h,A,\ldots} \sim 100$ ГэВ)

2) Тёмная материя определяет динамику галактик и их скопленний (масштаб 3 тыс.св.л. – 10 млн.св.л.)

План

1. Тёмная материя:
   - сегодня (астрофизика)
   - в ранней Вселенной (космология)
2. Связь с физикой частиц
3. Наиболее натуральный кандидат
4. Поиски частиц тёмной материи на LHC

План

1. Тёмная материя:
   - сегодня (астрофизика)
   - в ранней Вселенной (космология)
2. Связь с физикой частиц
3. Наиболее натуральный кандидат
4. Поиски частиц тёмной материи на LHC

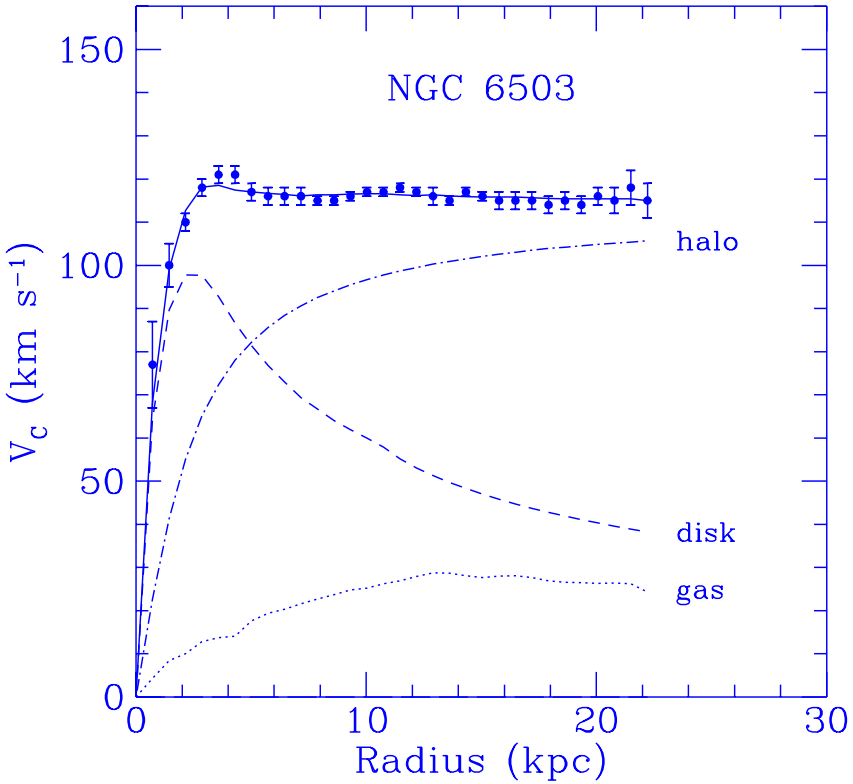
Тёмное гало галактик: пологие “кривые вращения”

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

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

1 kpc= 10^3 парсек =

3.3 тыс.св.лет

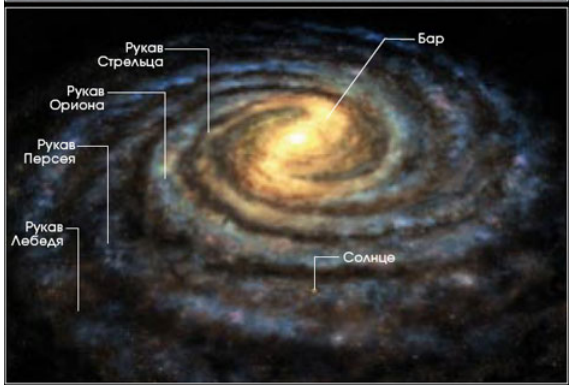


наблюдения: $v(R) \simeq \text{const}$

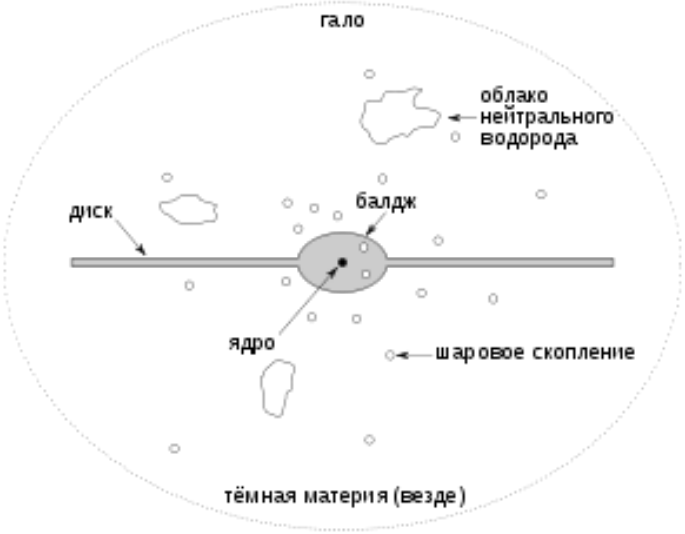
Видимая материя: внутренние области $v(R) \propto \sqrt{R}$

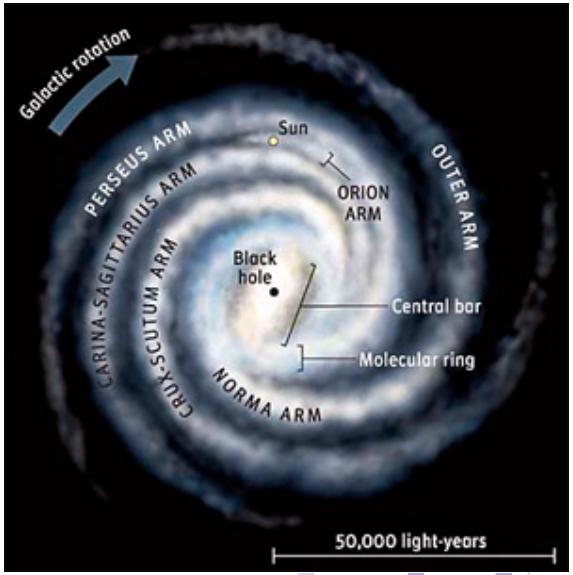
внешние (“пустые”) области $v(R) \propto 1/\sqrt{R}$

Строение Млечного Пути

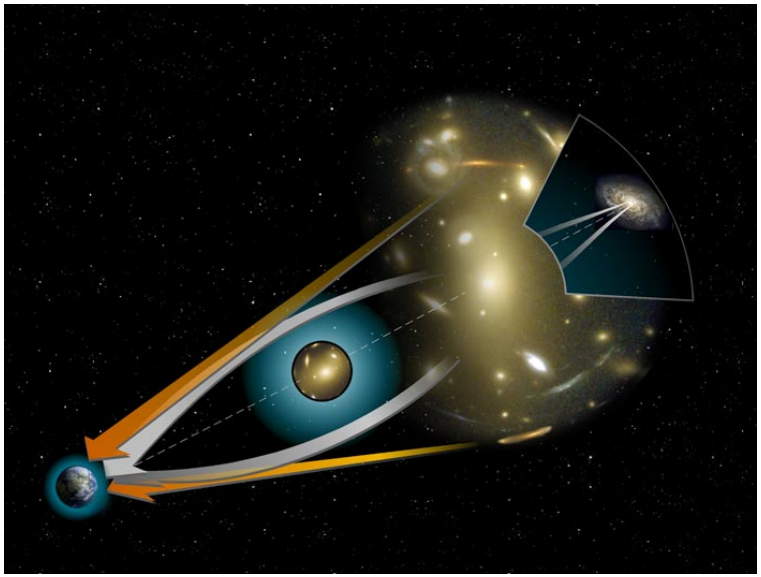


гало также помогает стабилизировать структуру диска ...

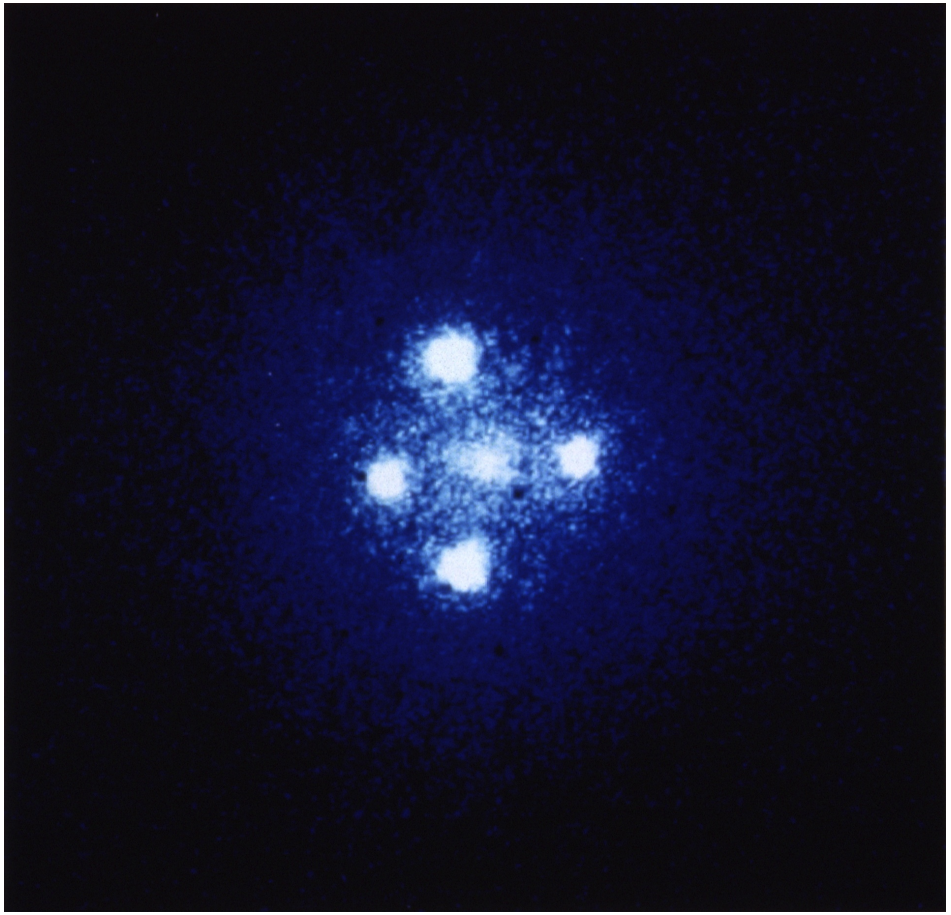


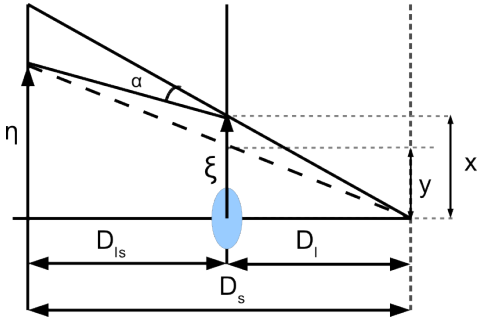


Гравитационное линзирование ОТО: $\alpha = 4GM/(c^2 b)$



Крест Эйнштейна





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

обычная линза со специфическим коэффициентом преломления

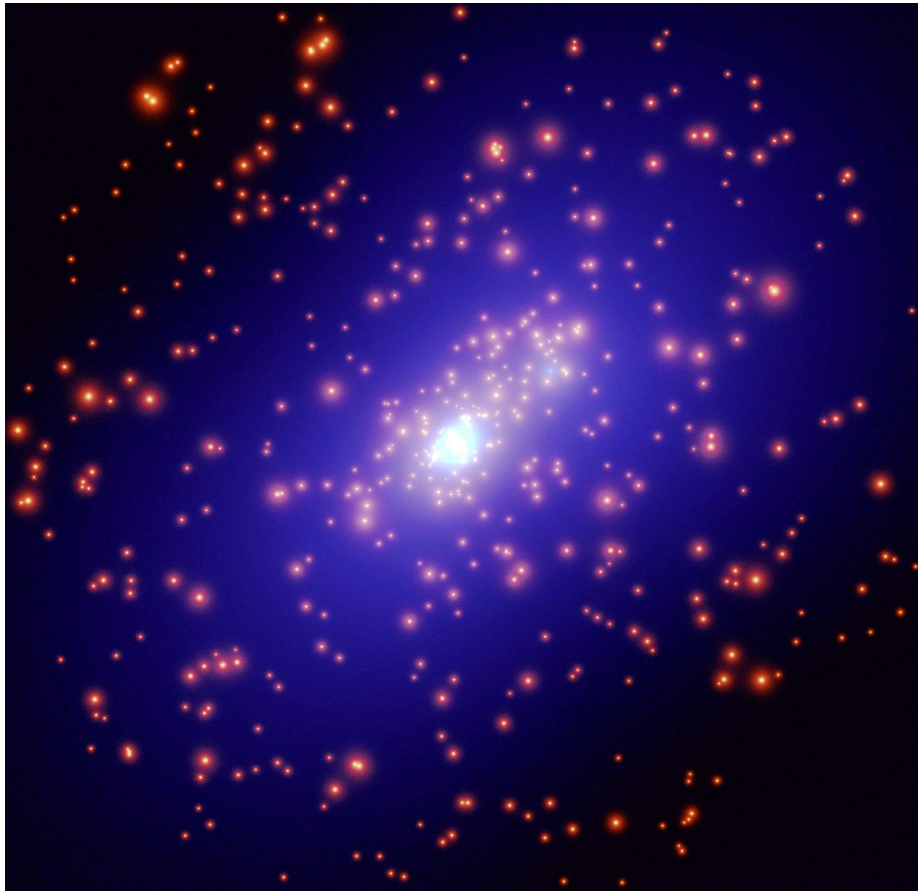
$$\vec{\alpha}\left(\vec{\xi}\right) = \frac{4G}{c}\int \frac{\vec{\xi}-\vec{\xi}'}{\left|\xi-\vec{\xi}'\right|^2} d^2\xi' \int \rho\left(\vec{\xi}', z\right) dz$$

источник: квазар $D_s = 8$ млрд.св.лет

линза: галактика $D_l = 0.4$ млрд.св.лет

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

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

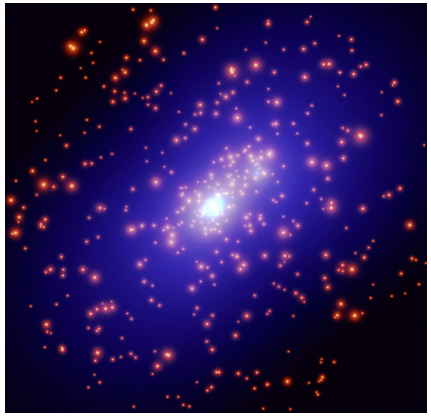
галактики в скоплениях

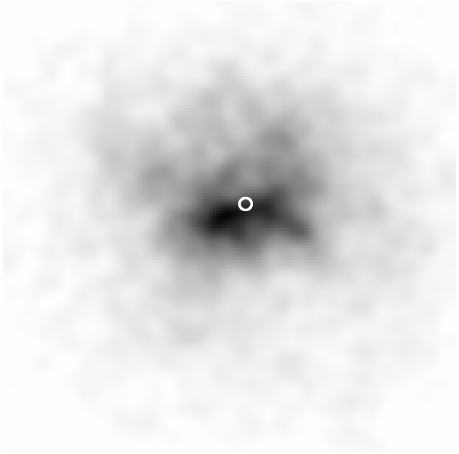
галактики вириализованы,

$U + 2E_k = 0$

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

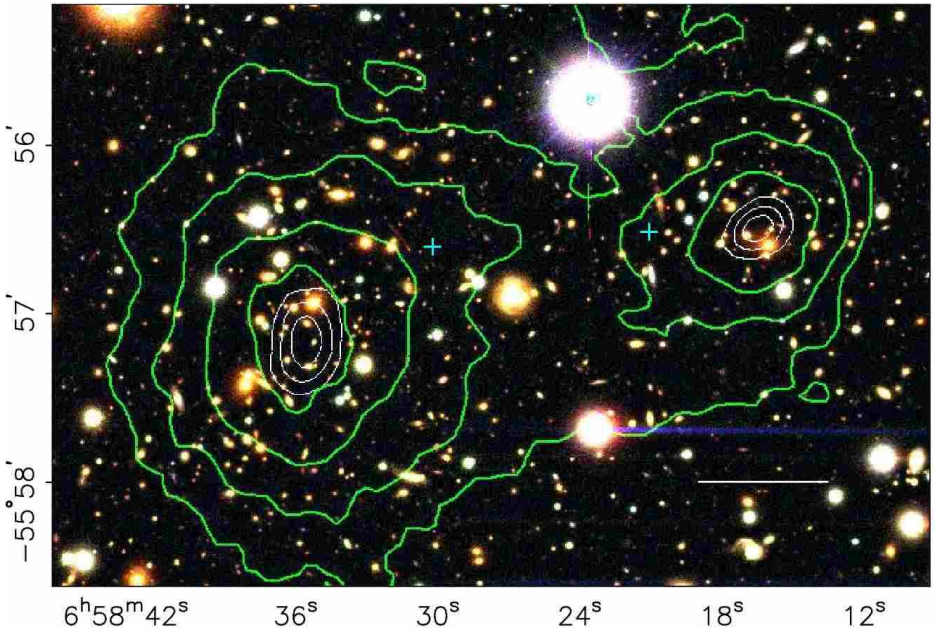
v_r — проекция скорости на луч зрения

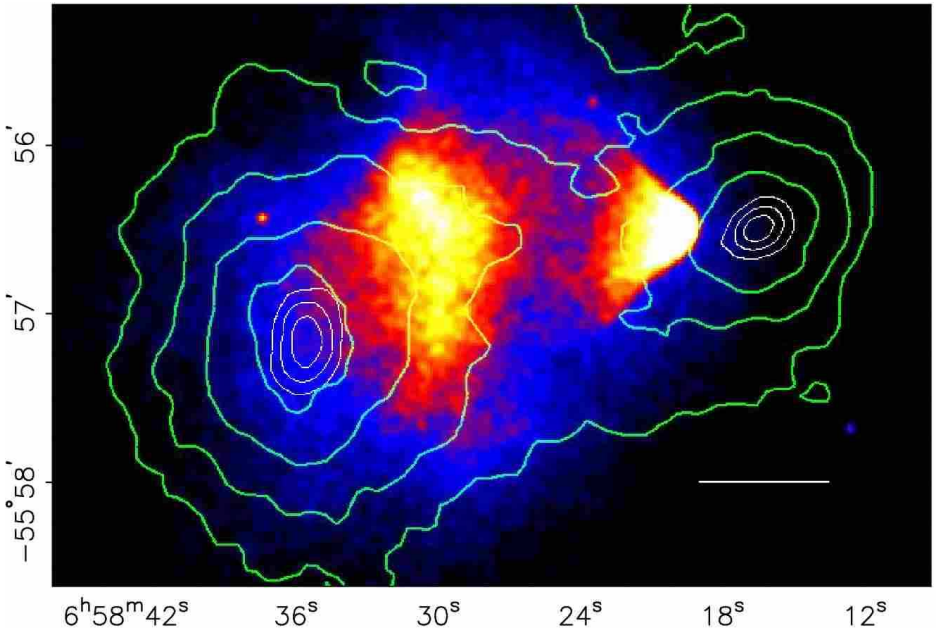




Галактика Млечный путь: движение к центру сверхскопления Девы

Столкнувшиеся скопления (Bullet cluster) 1E0657-558





Гравитационное линзирование

Рентгеновское излучение

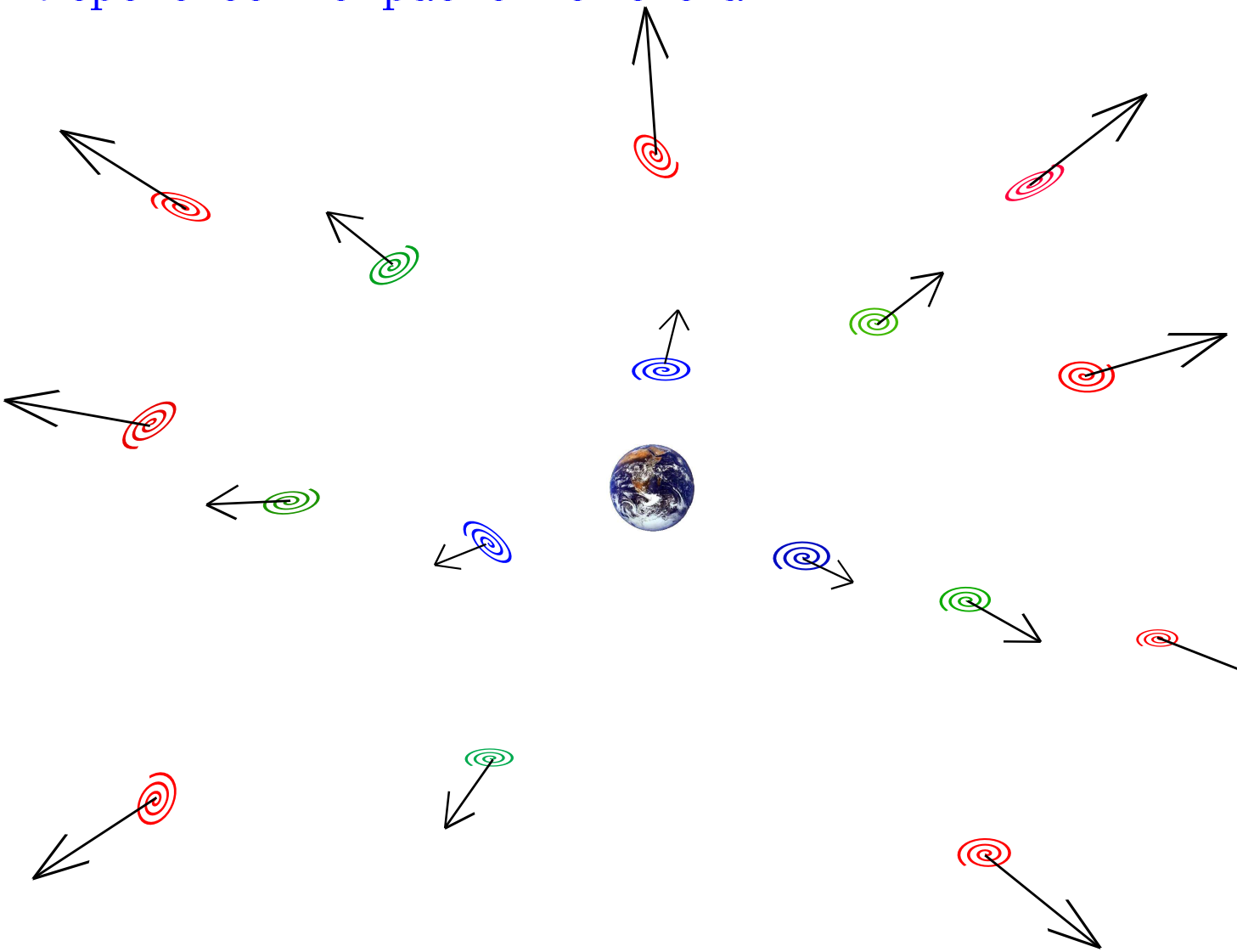
$M \simeq 10 \times m$

приведён масштаб в 700 тыс.св.лет

скопления удалены на расстояние 5 млрд.св.лет

Основные представления о Вселенной: расширяется

Допплеровское “покраснение” света



$L \propto a(t)$

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

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

параметр Хаббла

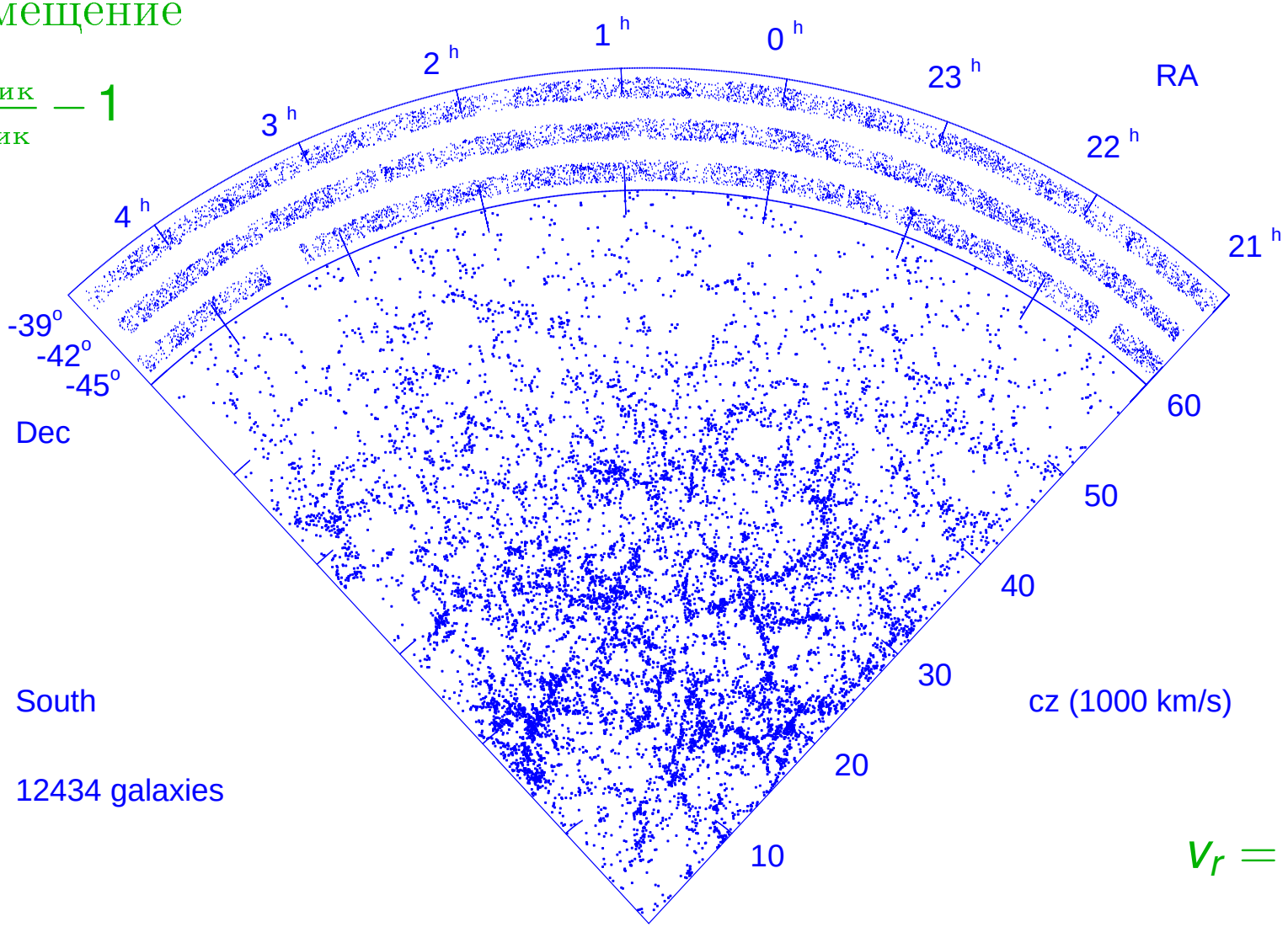
закон Хаббла

$H(t_0)\, r = v_r$

Наша Вселенная: однородна и изотропна

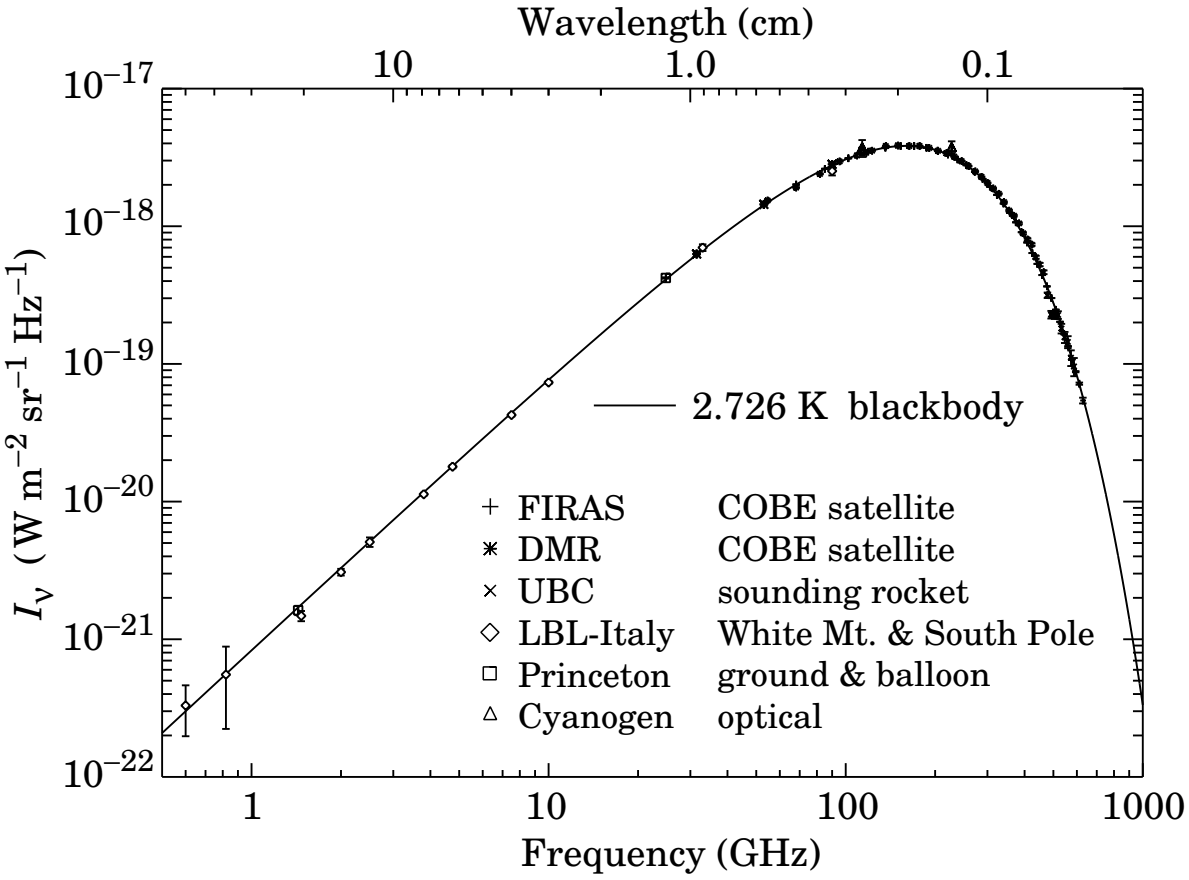
красное смещение

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



$$v_r = cz$$

Вселенная заполнена “горячими” фотонами



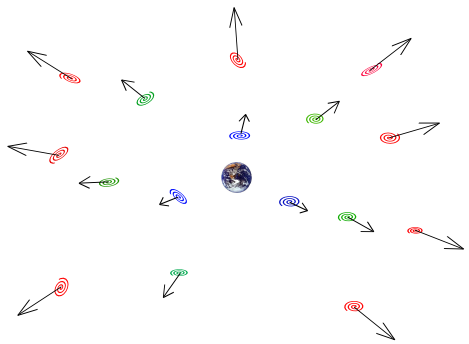
$T_0 = 2.726$ K

и спектр и концентрация равновесны

$n_\gamma = 411$ см$^{-3}$

Выводы из наблюдений

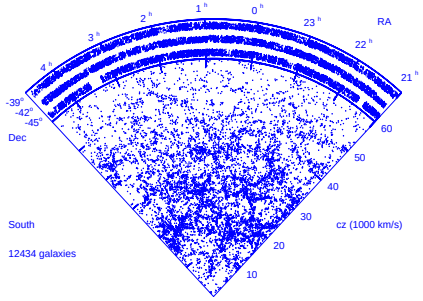
Итак, Вселенная однородна, изотропна, расширяется и “горячая”...



Выводы

- интервал между событиями модифицируется

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

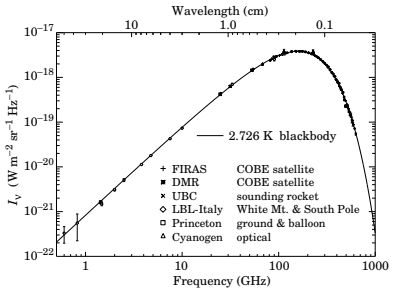


в ОТО расширение описывается уравнением Фридмана

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

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

- 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 $T \sim 1\,\text{МэВ}\,c^2/k \sim 10$ млрд.К

Измерение $a(t)$ даёт состав современной Вселенной

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

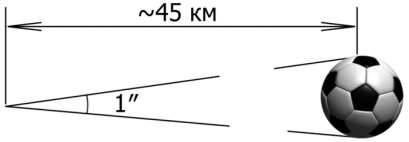
Как мы его проверяем?

Измеряя расстояние L до объекта!

- Измеряя угловой размер θ объекта известного размера d

однотипные галактики

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



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

крупномасштабные неоднородности

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

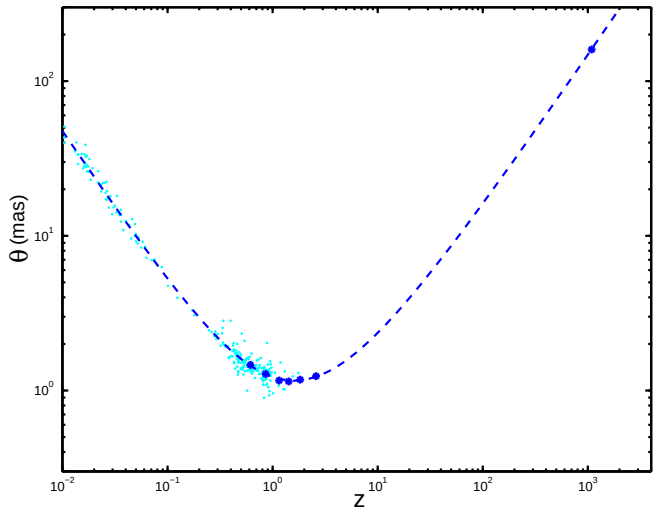
- Измеряя яркость объекта J заданной светимости F

“стандартные свечи”

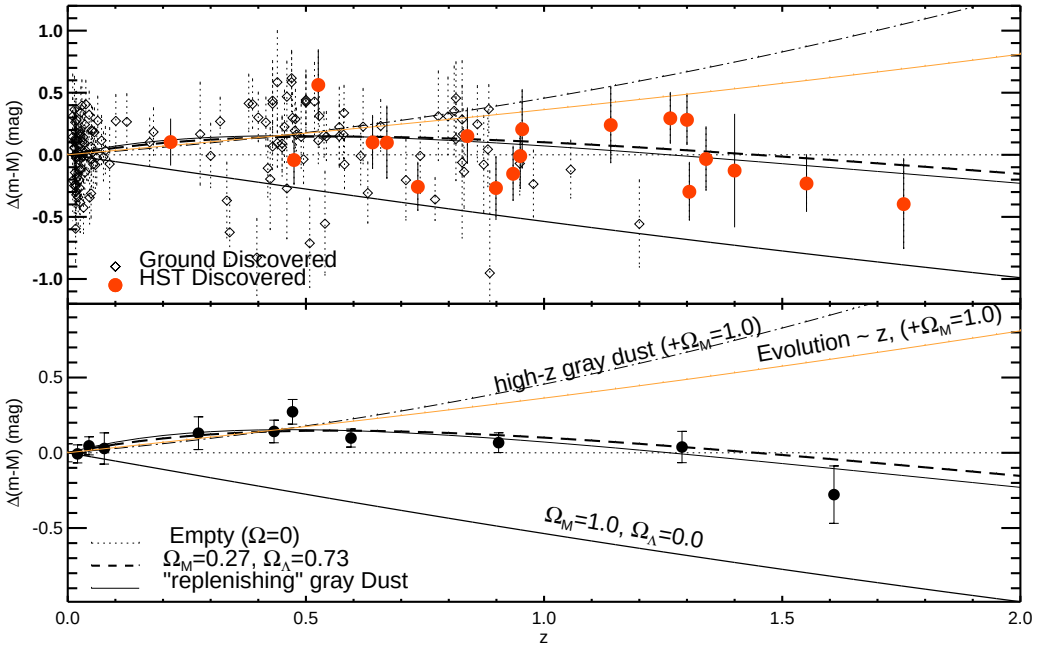
$$J = \frac{F}{4\pi L^2}$$

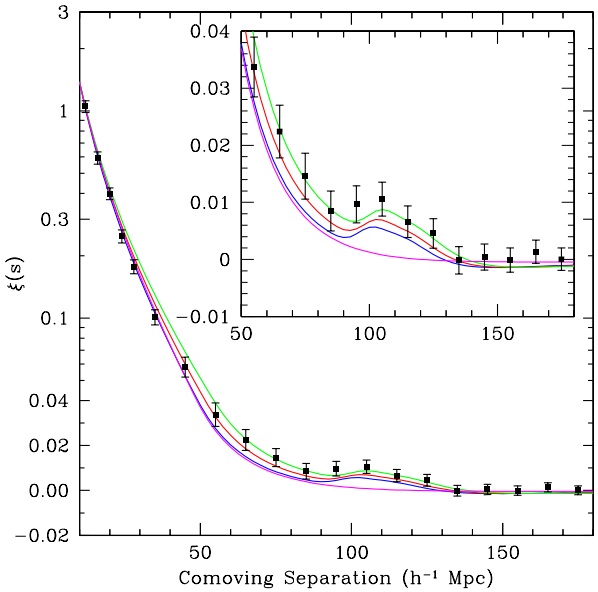
В расширяющейся Вселенной все эти законы модифицируются

Результаты “измерений расстояний”



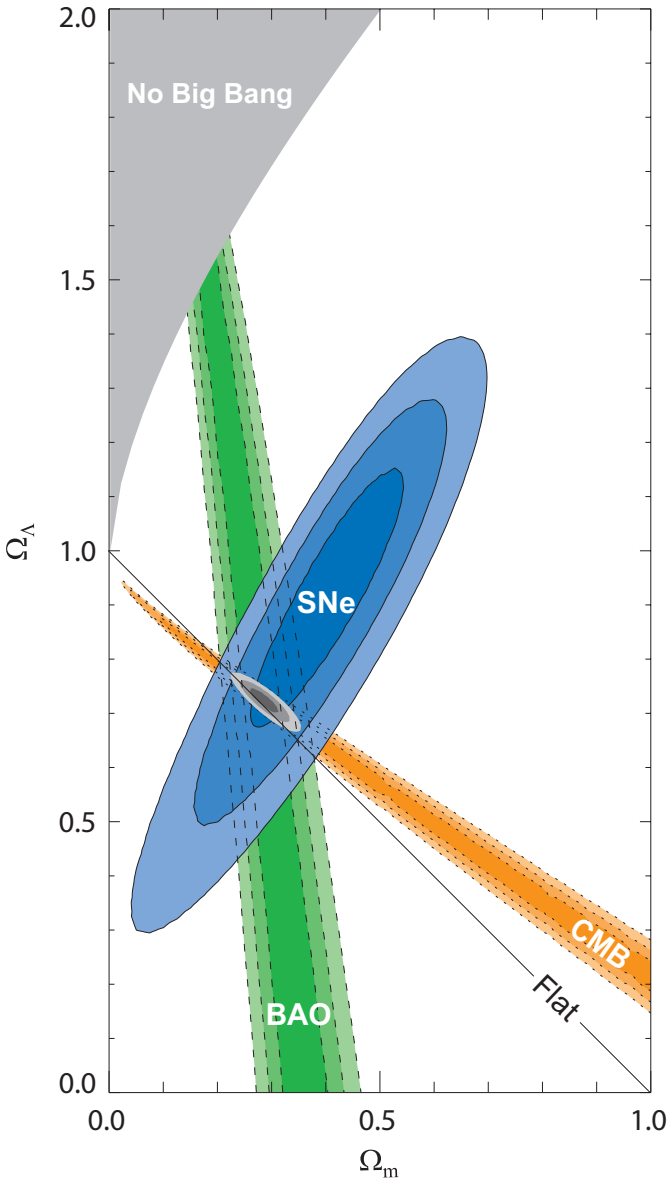
$$\Delta(m-M) = 5\log\frac{r_{ph}}{r_{ph}(\Omega_c = 0.8, \Omega_M = 0.2)}$$





Нобелевская премия по физике 2011

Данные из астрофизики и космологии



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

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

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

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

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

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

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. Тёмная материя:
   - сегодня (астрофизика)
   - в ранней Вселенной (космология)
2. Связь с физикой частиц
3. Наиболее натуральный кандидат
4. Поиски частиц тёмной материи на LHC

Свойства тёмной материи

Если частицы (X): таких нет в СМ !!!

1. стабильные на космологических временах ($t \gg 14$ млрд. лет)
2. нерелятивистские (иначе покинут галактики!
   Млечный путь: $v_X \sim v_{\text{звёзды}} \sim 10^{-3}\, c \simeq 300\,\text{км/с}$)
3. (почти) бесстолкновительны
4. (почти) электрически нейтральны

(квантовое!) условие локализации в галактиках:

волна де Бройля

$\lambda = h/(M_X v_X), \quad \lambda \lesssim L_{\text{галактика}} \longrightarrow$

для бозонов

$M_X \gtrsim 3 \times 10^{-22}$ эВ/с^2

для фермионов

$M_X \gtrsim 750$ эВ/с^2

принцип Паули: 1 состояние $\leq$ 1 частица

$$f(\mathbf{p},\mathbf{x}) = \frac{\rho_X(\mathbf{x})}{M_X} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi} M_X v_X\right)^3} \cdot e^{-\frac{\mathbf{p}^2}{2M_X^2 v_X^2}}\Bigg|_{\mathbf{p}=0} \leq \frac{g_X}{h^3}$$

Стандартная модель: успехи и проблемы

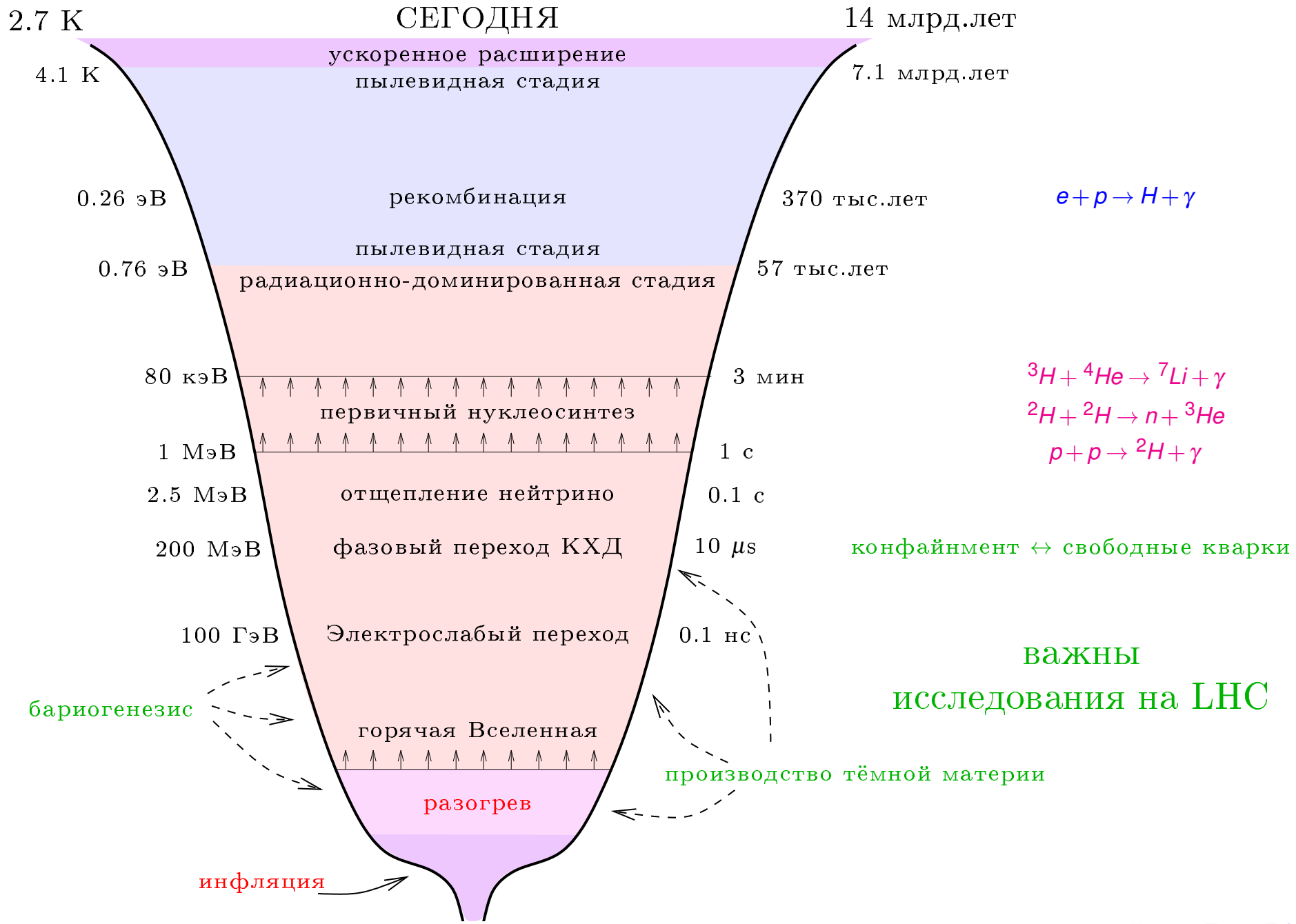
Калибровочные поля (взаимодействия): γ, $W^{\pm}$, Z, g

Три поколения материи: $L = \binom{\nu_L}{e_L}$, 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
  - Нейтринные осцилляции
  - Барионная асимметрия
  - Тёмная материя (Ω_{DM})
  - Тёмная энергия (Ω_Λ)
  - Инфляция ...
  - CP-проблема в КХД: нетривиальная топология, ...
  - Иерархия калибровочных масштабов:
  - Квантовая гравитация

физика частиц должна объяснять это

объясняется физикой на масштабе $E \sim 1/\sqrt{G_N} \sim 10^{19}$ ГэВ ?


2.7 K
СЕГОДНЯ
14 млрд.лет
ускоренное расширение
4.1 K
пылевидная стадия
7.1 млрд.лет
0.26 эВ
рекомбинация
370 тыс.лет
$e+p \to H+\gamma$
пылевидная стадия
0.76 эВ
радиационно-доминированная стадия
57 тыс.лет
80 кэВ
3 мин
$^3H + {}^4He \to {}^7Li + \gamma$
первичный нуклеосинтез
$^2H + {}^2H \to n + {}^3He$
1 МэВ
1 с
$p + p \to {}^2H + \gamma$
2.5 МэВ
отщепление нейтрино
0.1 с
200 МэВ
фазовый переход КХД
10 μs
конфайнмент ↔ свободные кварки
100 ГэВ
Электрослабый переход
0.1 нс
важны
исследования на LHC
бариогенезис
горячая Вселенная
производство тёмной материи
разогрев
инфляция

План

1. Тёмная материя:
   - сегодня (астрофизика)
   - в ранней Вселенной (космология)
2. Связь с физикой частиц
3. Наиболее натуральный кандидат
4. Поиски частиц тёмной материи на LHC

Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)

Массивные слабовзаимодействующие частицы

Предположения:

1. нет $X - \bar{X}$ асимметрии $\qquad n_X = n_{\bar{X}}$
2. при $T < M_X$ они в термальном равновесии в плазме $\qquad$ Больцман!

$$n_X = n_{\bar{X}} = g_X \left(\frac{M_X c^2 k T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{-\frac{M_X c^2}{k T}}$$

Тогда:

- Вселенная расширяется $\Longrightarrow T \searrow, n_X \searrow$
- $T k \ll M_X c^2$: перестают рождаться, оставшиеся частично аннигилируют

$$X + \bar{X} \longrightarrow \text{лёгкие частицы Стандартной модели}$$

$$\tau^{-1}_{\text{аннигиляции}} \propto n_X$$

- аннигиляция завершается при температуре T_f, когда

$$\tau^{-1}_{\text{аннигиляции}} \lesssim H$$

Массивные слабовзаимодействующие частицы → БАК

после закалки: $n_X(t) \propto a^{-3}(t)$

$X + \bar{X}$ вклад в современную плотность энергии:

$$\Omega_X = 2\frac{M_X n_X(T_0)}{\rho_c} \simeq 0.1 \times \left(\frac{0.01 \times \sigma_{\text{слабое}}}{\sigma_{\text{аннигиляции}}}\right)$$

$\sigma_{\text{слабое}}$ — слабые взаимодействия — энергии $E \sim 100$ ГэВ

$\sigma_{\text{аннигиляции}}$ — “сверх”слабые взаимодействия — энергии $E \gtrsim 1$ ТэВ

близкие масштабы — “натуральная” тёмная материя

натурально “лёгкая” для БАК

сечение не больше геометрического — $\sigma_0 \lesssim \frac{h^2}{M_X^2 c^2} \longrightarrow M_X \lesssim 100$ ТэВ c^2

Найти “натуральную” тёмную материю на БАК весьма вероятно

План

1. Тёмная материя:
   - сегодня (астрофизика)
   - в ранней Вселенной (космология)
2. Связь с физикой частиц
3. Наиболее натуральный кандидат
4. Поиски частиц тёмной материи на LHC

WIMPs X взаимодействуют с веществом!

- Поиски на БАК процессов с “потерей” энергии и импульса

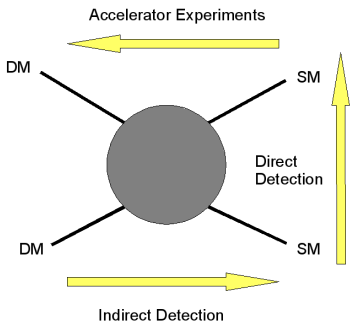
$$p + p \to X + \bar{X} + \text{обычные частицы}$$

- Поиски в лаборатории процессов с “получением” энергии и импульса

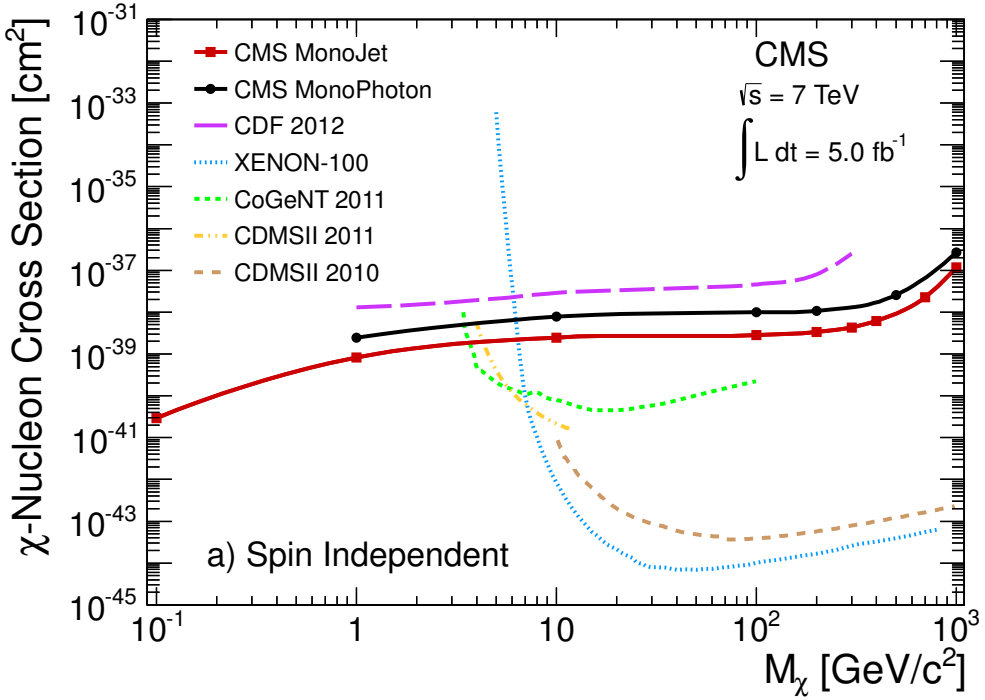
$$\text{Ядро} + X \to \text{Ядро} + X$$

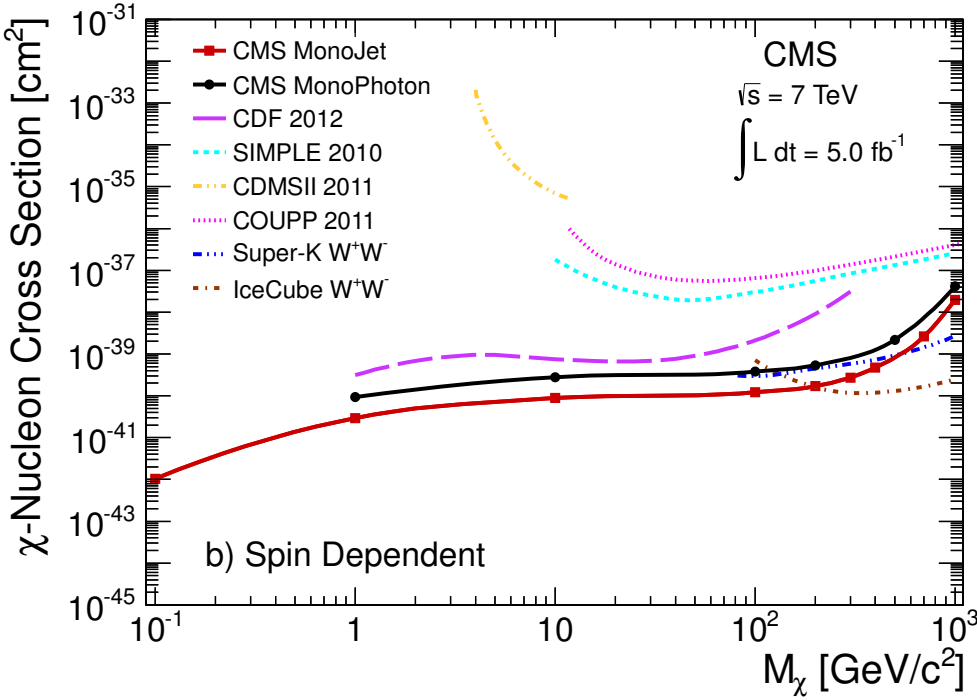
- Поиски “телескопами” обычных частиц от аннигиляции или распада частиц тёмной материи

$$X + \bar{X} \to \text{обычные частицы} \qquad X \to \text{обычные частицы}$$



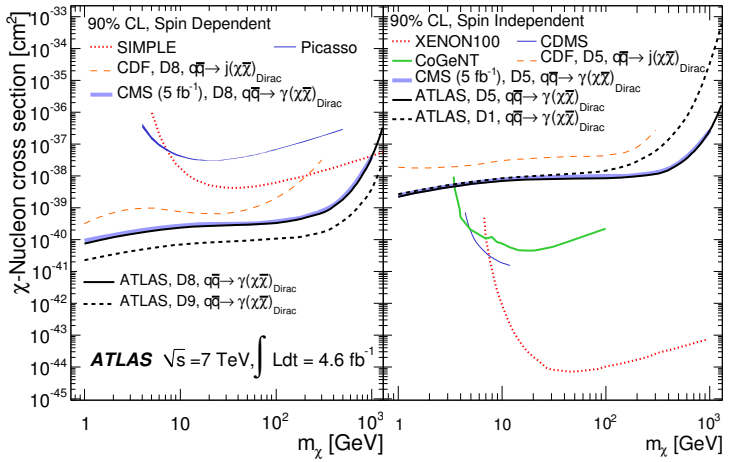
Результаты (не)прямых поисков





для WIMPs

1206.5663

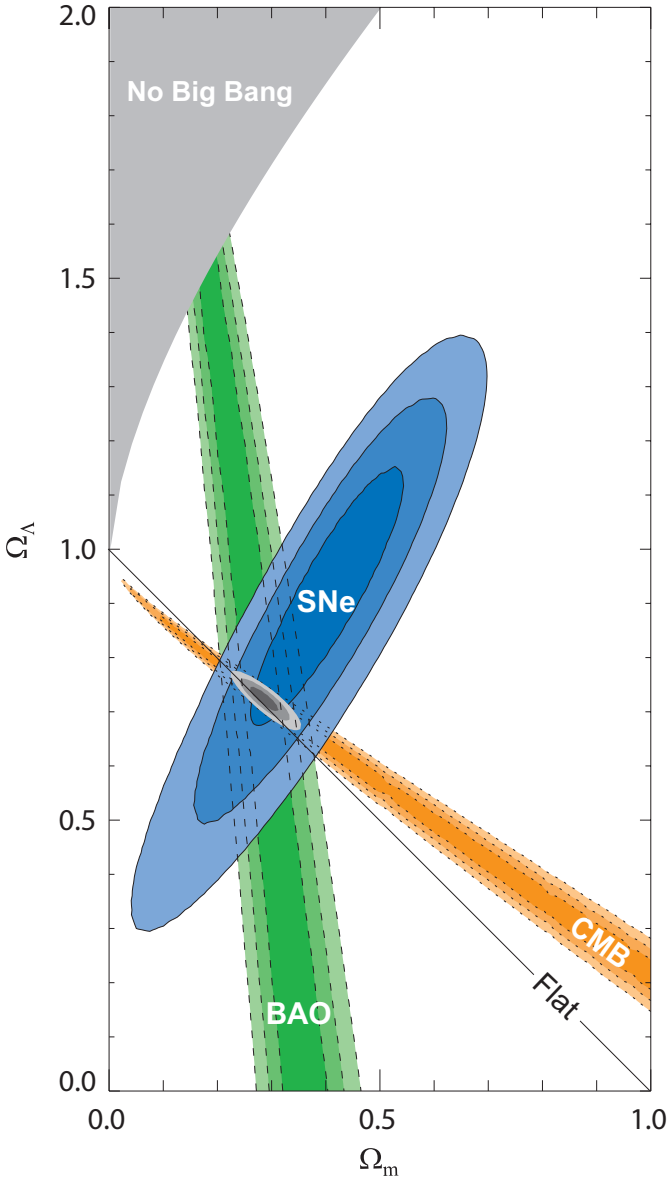


1209.4625

“Дуальная” роль LHC в развитии космологии

Backup slides

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



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

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

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

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

В будущем получаем:

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

с характерным временем роста

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

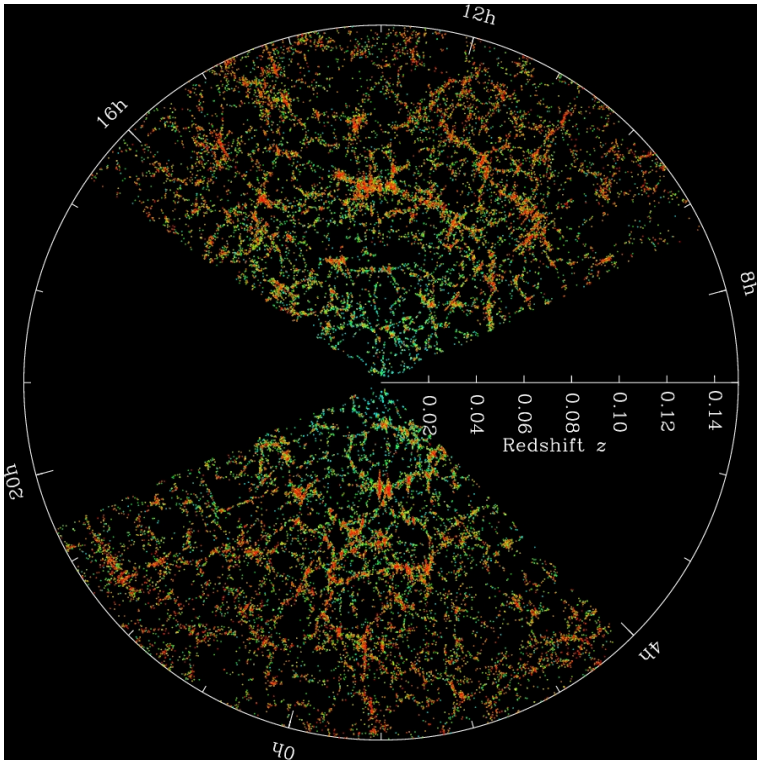
свет летит $\Delta x = ct$, объекты разлетаются: $\Delta x \propto e^{Ht}$

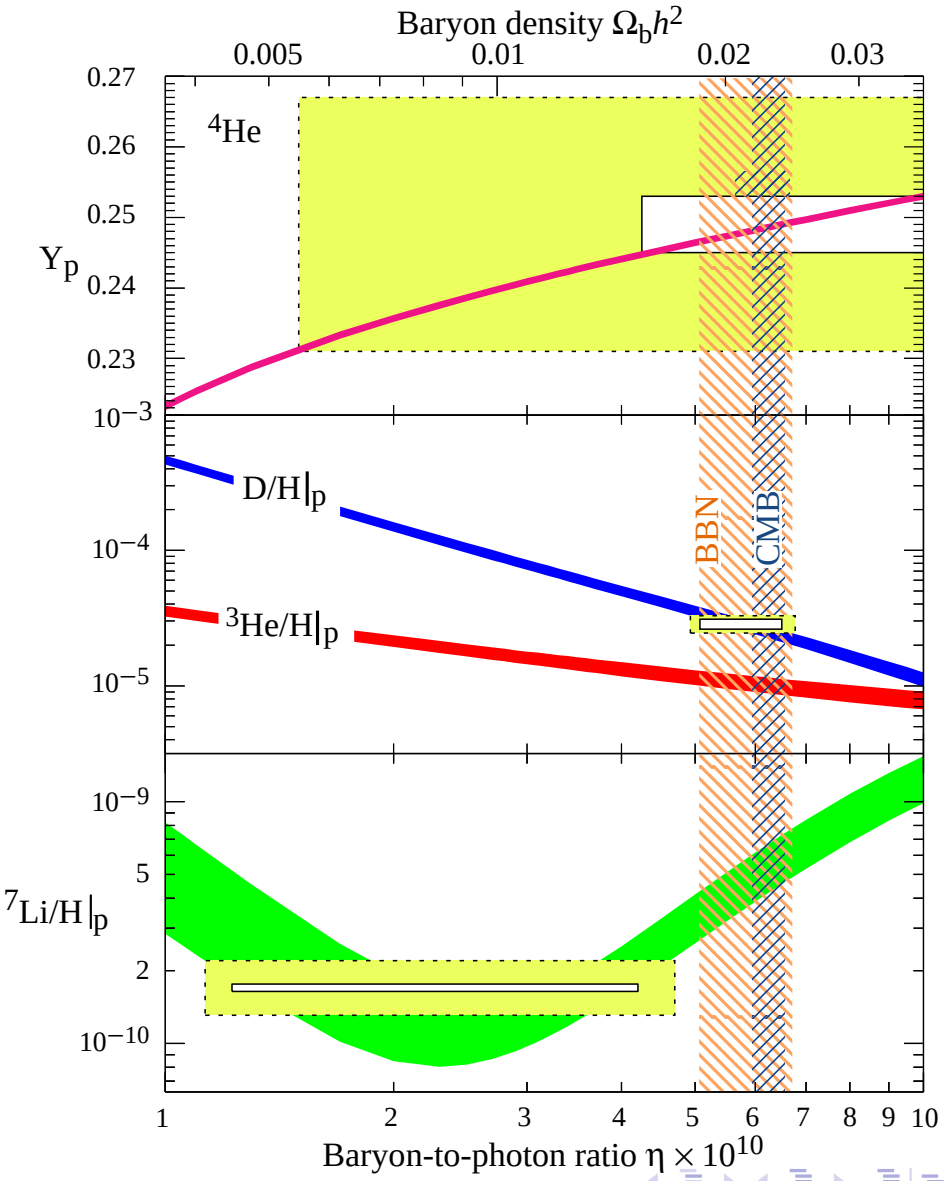
В пределах видимости останутся только гравитационно связанные с нами объекты !!!

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

Условия Сахарова успешного бариогенезиса

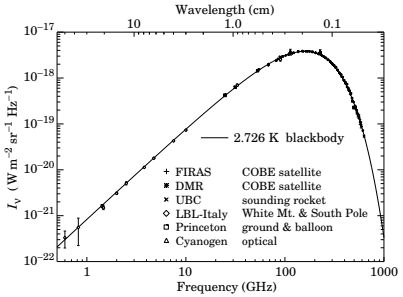
- B (or L)-нарушение
- C- & CP-нарушения
- эти процессы неравновесны

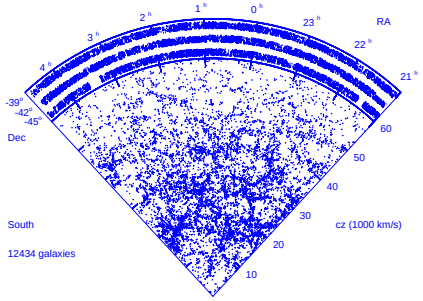


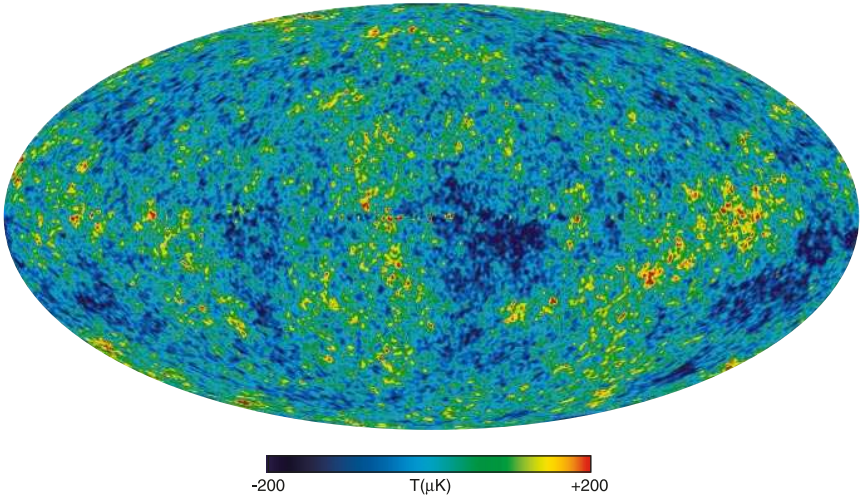


Роль тёмной материи в образовании структур

- 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 $\Longrightarrow \Delta\rho/\rho \nearrow \Longrightarrow$ галактики
- Одни барионы не успели бы! После рекомбинации они “сваливаются” в гравитационные ямы, образованные тёмной материей.



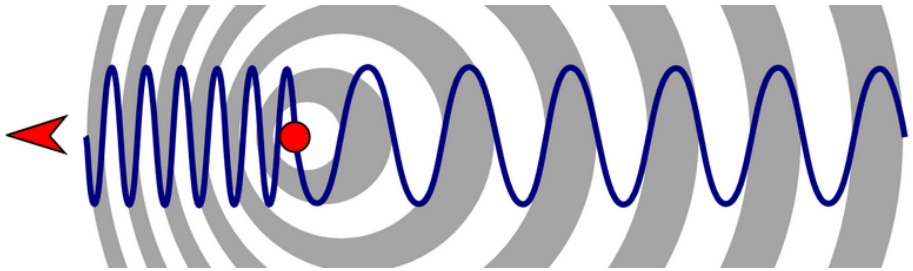




Измерение скоростей объектов в галактиках

Эффект Допплера

$$\omega = \omega_0 \frac{1 + \frac{v_{\text{приёмник}}}{c_{\text{волн в среде}}}}{1 - \frac{v_{\text{источник}}}{c_{\text{волн в среде}}}}$$



Релятивистское обобщение

$$\omega = \omega_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c}\cos\theta}$$

θ — угол между направлением на источник и его скоростью $\vec{v}$

Позволяет найти скорость вращения вне зависимости от скорости центра вращения!

Проблема начальной сингулярности (Взрыв!)

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

пыль: $p = 0$ сингулярно при $t = t_s$

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

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

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

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

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