

КОСМОЛОГИЯ

Дмитрий Горбунов

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Russian Teachers Programme 2013

- 1 Астрономические наблюдаемые и космологические следствия
- 2 Тёмная материя в современной Вселенной
- 3 Свойства частиц тёмной материи
- 4 Поиски частиц тёмной материи (WIMPs)
- 5 Барионная асимметрия Вселенной
- 6 Космология и физика частиц

- 1 **Астрономические наблюдаемые и космологические следствия**
- 2 Тёмная материя в современной Вселенной
- 3 Свойства частиц тёмной материи
- 4 Поиски частиц тёмной материи (WIMPs)
- 5 Барионная асимметрия Вселенной
- 6 Космология и физика частиц

Основные представления о Вселенной: расширяется

Доплеровское “покраснение” света: $\frac{\lambda_{\text{приёмник}}}{\lambda_{\text{источник}}} > 1$

$$L \propto a(t)$$

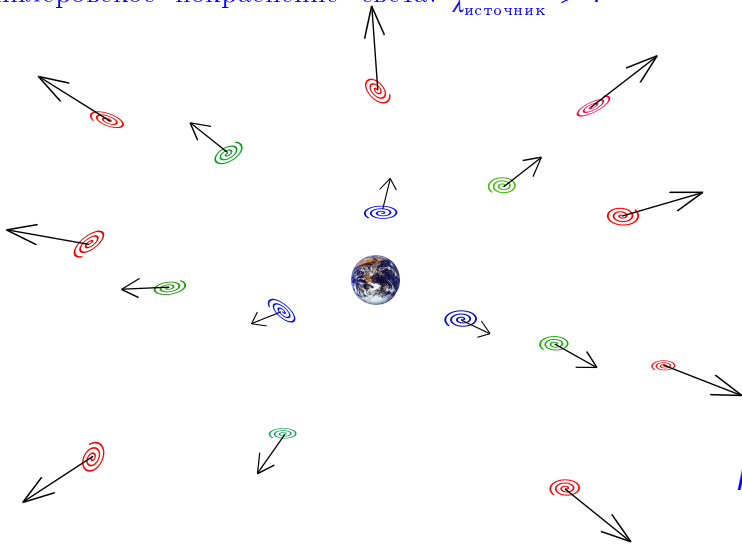
$$n \propto a^{-3}(t)$$

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

параметр
Хаббла

закон
Хаббла

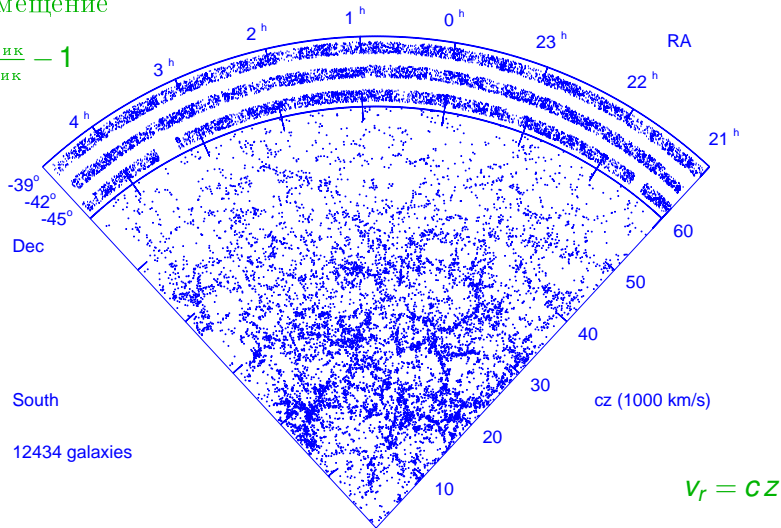
$$H(t_0)r = v_r$$



Наша Вселенная: однородна и изотропна

красное смещение

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



Вселенная заполнена “горячими” фотонами

спектр $f_\gamma(\omega)$ и концентрация n_γ согласованы...

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

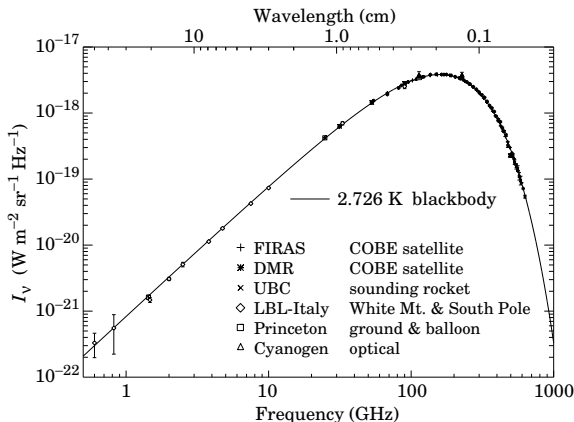
$$f_\gamma(\omega) = \frac{1}{e^{\omega/T_0} - 1}$$

$$\begin{aligned} \rho_\gamma &= \int \frac{\omega^3}{\pi^2} d\omega f_\gamma(\omega) \\ &= \frac{\pi^2}{15} T_0^4 = 4\sigma T_0^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_\gamma &= \int \frac{\omega^2}{\pi^2} d\omega f_\gamma(\omega) \\ &= 411 \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

где σ есть константа
из закона
Стефана–Больцмана

$$P = \sigma S T^4$$



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

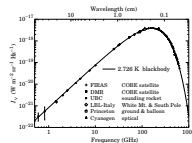
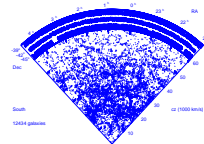
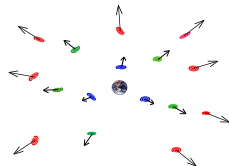
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(t) = \frac{8\pi}{3} G \rho_{\text{энергии}}$$

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

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

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

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 не зависящего от возраста

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



изменяющегося со временем по известному закону, например: $d(t) \propto a(t)$

- крупномасштабные неоднородности в структурах галактик
- анизотропия реликтового излучения на больших углах

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



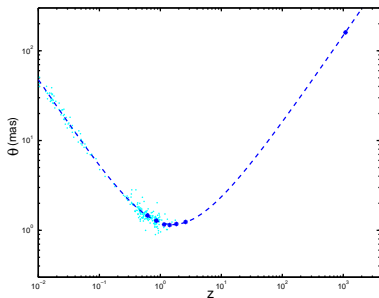
- Измеряя яркость объекта J заданной светимости F – “стандартные свечи”

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



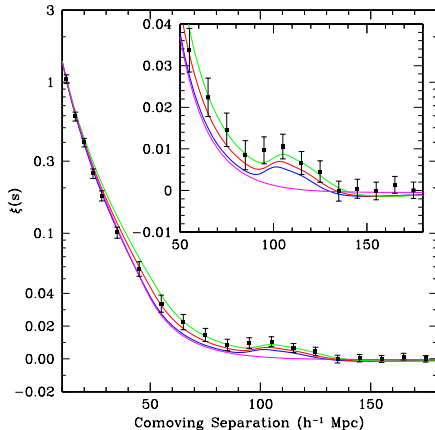
В расширяющейся Вселенной все эти законы модифицируются

Результаты “измерений расстояний”



угловой размер

удалённого объекта $\theta(z)$

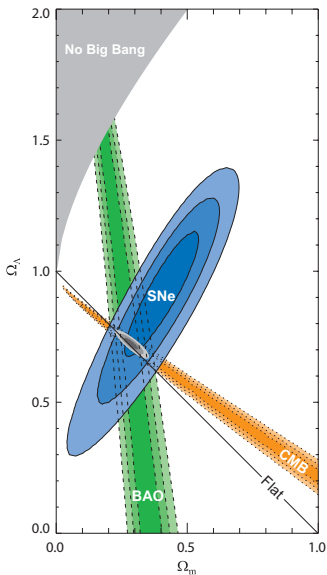


$$\xi_z(s) = \langle n_z(\vec{x}) n_z(\vec{x} + \vec{s}) \rangle_{\vec{x}}$$

цвет соответствует красному смещению

(удалённости) галактик

Совместный анализ различных данных



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

$$\rho_{\text{плотность энергии}} = \rho_{\text{радиация}} + \rho_{\text{обычная материя}} + \rho_{\text{тёмная материя}} + \rho_\Lambda$$

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

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

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

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:

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

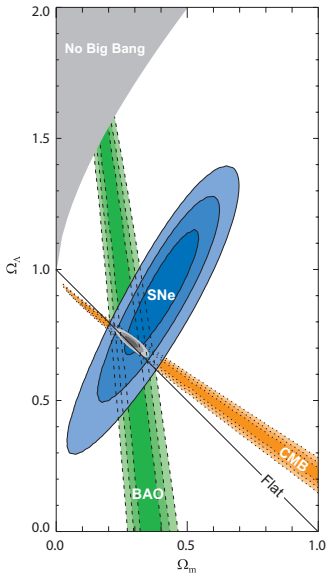
Вклад тёмной материи:

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

Вклад тёмной энергии:

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

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



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

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

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

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

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 !!!

Что за тёмные компоненты и где они сегодня?

- Тёмная энергия (плотность энергии вакуума...?) есть везде!!!
($c = \hbar = 1$)

$$-p_\Lambda = \rho_\Lambda = \text{const} \approx (2.5 \times 10^{-3} \text{ эВ})^4 > 0$$

не связанный и физикой частиц и гравитацией новый энергетический масштаб...?

- Тёмная материя $\rho_{DM} = 0, \rho_{DM} \propto 1/a^3$
(как пыль, обычное вещество) собирается в структуры:
галактики, скопления галактик, филаменты, ...

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

- 1 Астрономические наблюдаемые и космологические следствия
- 2 Тёмная материя в современной Вселенной**
- 3 Свойства частиц тёмной материи
- 4 Поиски частиц тёмной материи (WIMPs)
- 5 Барионная асимметрия Вселенной
- 6 Космология и физика частиц

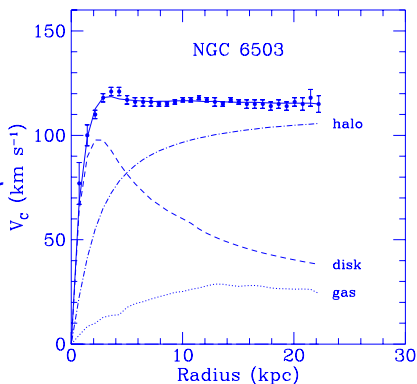
Тёмное гало галактик: пологие “кривые вращения”

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

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

1 кpc = 10^3 парсек =

3.3 тыс. св. лет



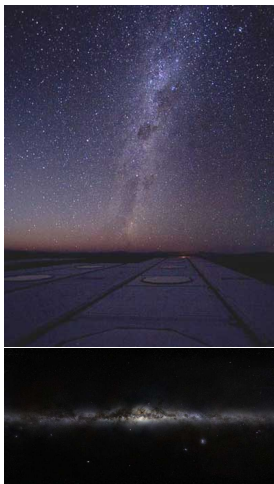
наблюдения:

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

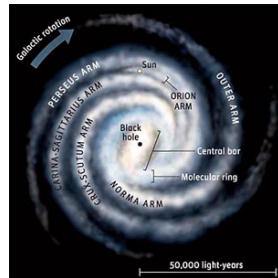
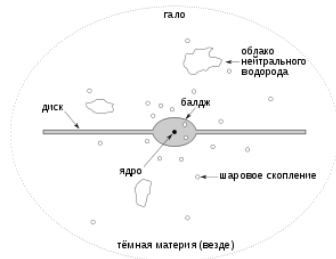
Видимая материя:

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

Строение Млечного Пути: диск внутри гало



гало также помогает стабилизировать структуру диска ...



Тёмная материя в скоплениях галактик

X-лучи от горячего газа из центров скоплений

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

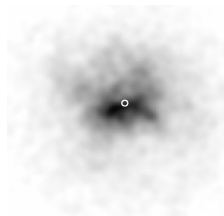
ГАЛАКТИКИ В СКОПЛЕНИЯХ

галактики вириализованы,

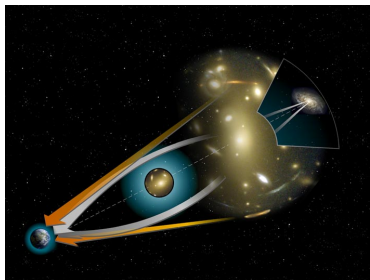
$$U + 2E_k = 0$$

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

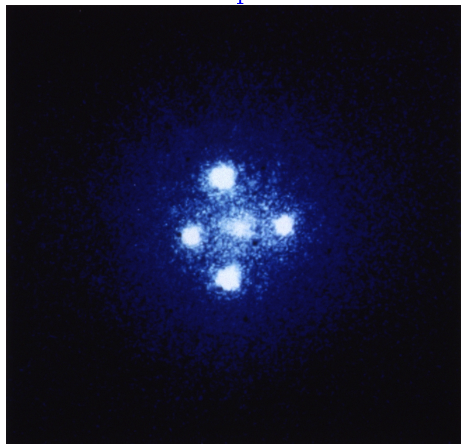
v_r — проекция скорости на луч зрения



Галактика Млечный путь: движение к центру сверхскопления Девы

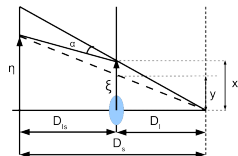


Крест Эйнштейна



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

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



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

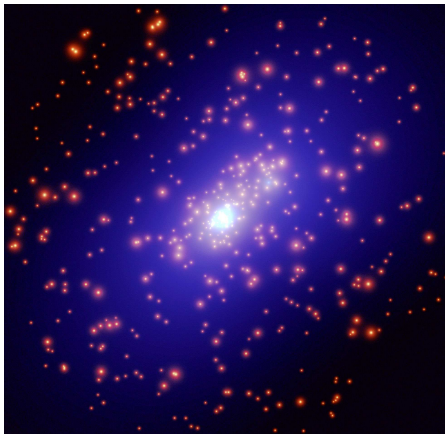
обычная линза
со специфическим
коэффициентом
преломления

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

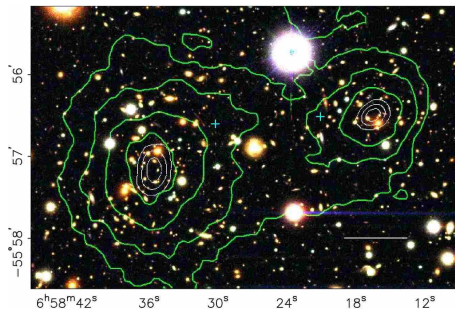
Тёмная материя в центрах скоплений галактик

гравитационное линзирование

восстановление линзы по изображению

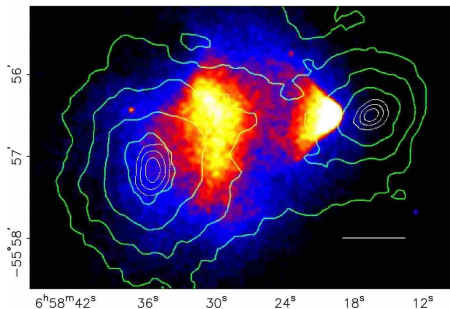


Столкнувшиеся скопления (Bullet cluster) 1E0657-558



Гравитационное линзирование

приведён масштаб в 700 тыс. св. лет
скопления удалены на расстояние 5 млрд. св. лет



Рентгеновское излучение

$M \simeq 10 \times m$

- 1 Астрономические наблюдаемые и космологические следствия
- 2 Тёмная материя в современной Вселенной
- 3 Свойства частиц тёмной материи**
- 4 Поиски частиц тёмной материи (WIMPs)
- 5 Барионная асимметрия Вселенной
- 6 Космология и физика частиц

Свойства тёмной материи

Если частицы (X):

таких нет в СМ !!!

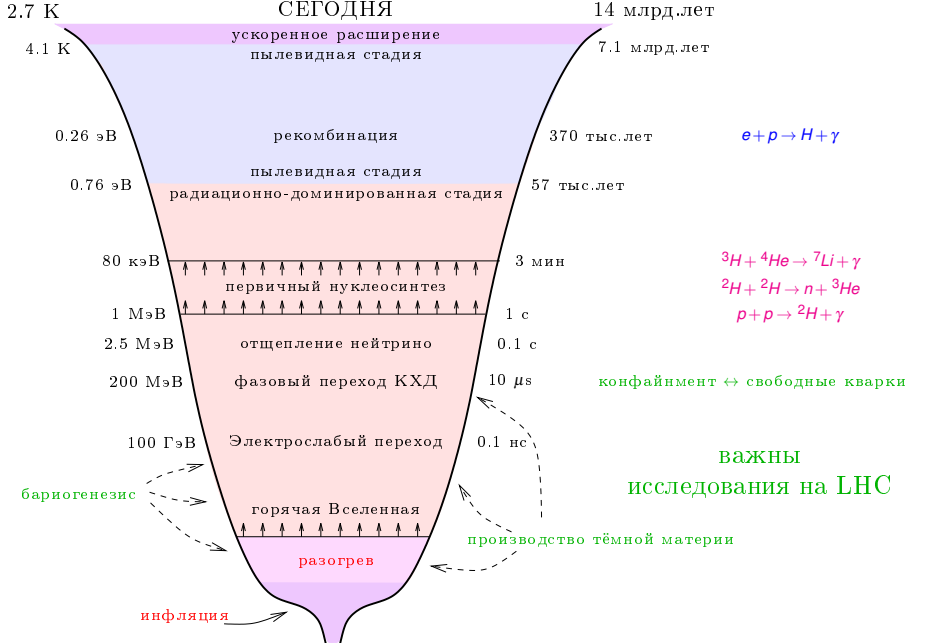
- 1 стабильные на космологических временах ($t \gg 14$ млрд. лет)
- 2 нерелятивистские (иначе не соберутся галактики!)
Млечный путь: $v_X \sim v_{\text{звёзды}} \sim 10^{-3} c \simeq 300 \text{ км/с}$
- 3 электрически нейтральны
- 4 бесстолкновительны

(квантовое!) условие локализации в галактиках:

для фермионов принцип Паули: 1 состояние \leq 1 частица
дискретность уровней электронов в атоме (орбитали)
задаёт структуру таблицы Менделеева
тёмные фермионы в галактике $M_X \gtrsim 750 \text{ эВ}/c^2$

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

СЕГОДНЯ



Массивные слабо взаимодействующие частицы

Предположения:

- нет $X - \bar{X}$ асимметрии
- при $T < M_X$ они в термальном равновесии в плазме

$$n_X = n_{\bar{X}}$$

Больцман!

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

Тогда:

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

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

$$\tau_{\text{аннигиляции}}^{-1} \propto n_X$$

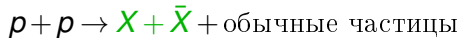
- аннигиляция завершается при температуре T_f , когда

$$\tau_{\text{аннигиляции}}^{-1} \lesssim H$$

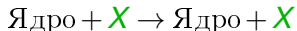
- 1 Астрономические наблюдаемые и космологические следствия
- 2 Тёмная материя в современной Вселенной
- 3 Свойства частиц тёмной материи
- 4 Поиски частиц тёмной материи (WIMPs)**
- 5 Барионная асимметрия Вселенной
- 6 Космология и физика частиц

WIMPs χ взаимодействуют с веществом!

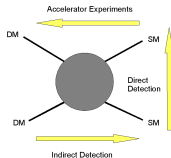
- Поиски на БАК процессов с “потерей” энергии и импульса



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

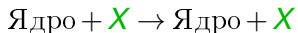


- Поиски “телескопами” обычных частиц от аннигиляции или распада частиц тёмной материи



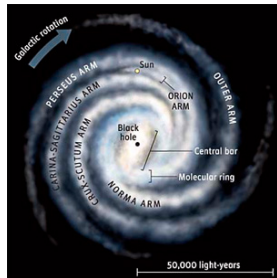
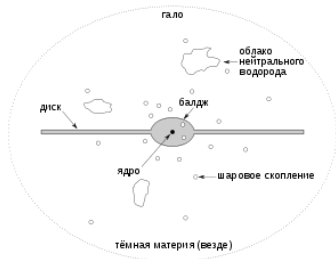
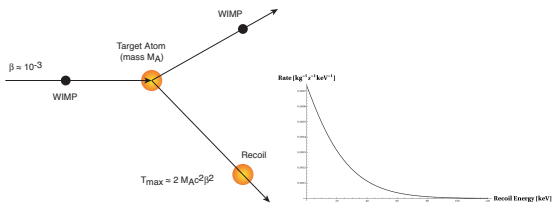
Прямые поиски WIMPs

Поиски в лаборатории процессов с “получением” энергии и импульса



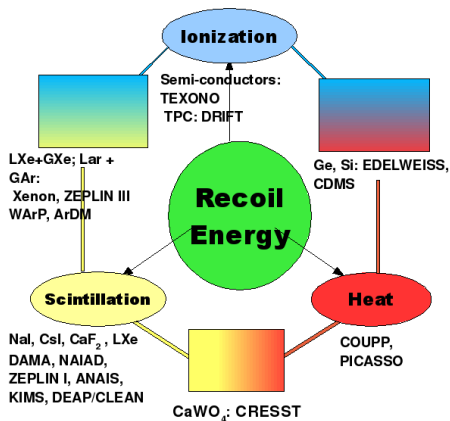
простая кинематика нерелятивистских частиц (ядро покоится, $v_X \sim 10^{-3} c$)

$$\Delta E = 2M_X v_X^2 \frac{M_{\text{Ядро}}/M_X}{(1 + M_{\text{Ядро}}/M_X)^2}$$

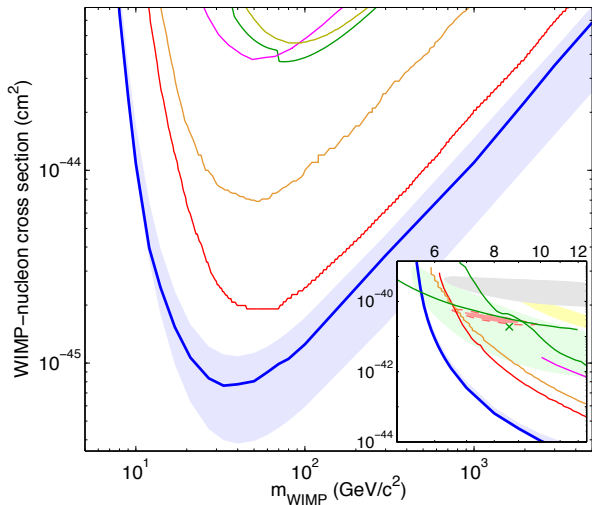


Это всё “трение” !

- Разогрев вещества детектора: перевод поглощённой энергии частиц в тепло
- Ионизация вещества детектора: регистрация “оторвавшихся” от атомов электронов
- Сцинтилляция света веществом детектора: перевод поглощённой энергии частиц в свет



Современные ограничения



● LUX 1310.8214

●

$$\sigma_{WIMP-nucleon} < 10^{-44} \text{ cm}^2$$

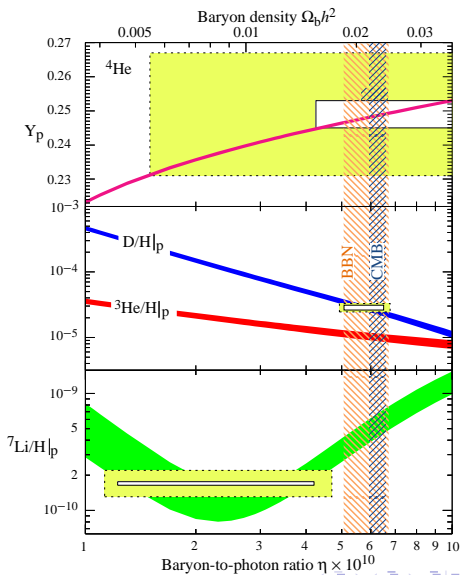
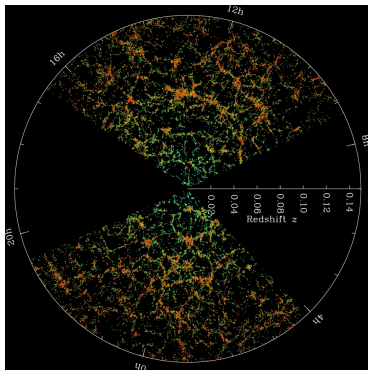
- связь с БАК: предсказания конкретных физических моделей
- должны быть годовые модуляции сигнала...

- 1 Астрономические наблюдаемые и космологические следствия
- 2 Тёмная материя в современной Вселенной
- 3 Свойства частиц тёмной материи
- 4 Поиски частиц тёмной материи (WIMPs)
- 5 Барионная асимметрия Вселенной**
- 6 Космология и физика частиц

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

Условия Сахарова успешного бариогенезиса

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



- 1 Астрономические наблюдаемые и космологические следствия
- 2 Тёмная материя в современной Вселенной
- 3 Свойства частиц тёмной материи
- 4 Поиски частиц тёмной материи (WIMPs)
- 5 Барионная асимметрия Вселенной
- 6 Космология и физика частиц

Указания на неполноту СМ:

- Барионная асимметрия
- Тёмная материя
- Нейтринные осцилляции
- ...

Исследования на ЛНС могут прояснить первые два вопроса

Backup slides

Роль тёмной материи в образовании структур

- Реликтовое излучение не совсем изотропно.

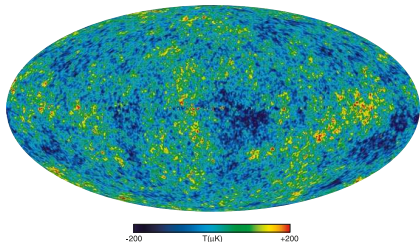
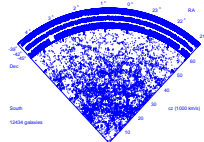
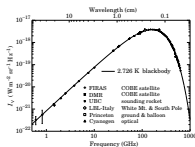
- 1 Движение Земли относительно РИ

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

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



Измерение скоростей объектов в галактиках

Эффект Доплера

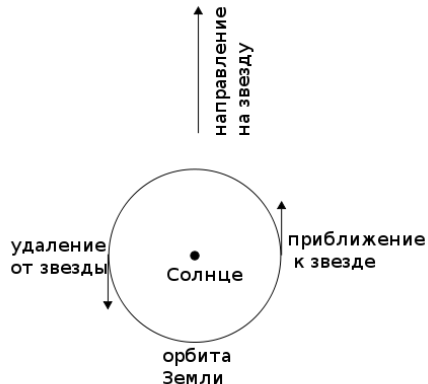
$$\omega = \omega_0 \frac{1 + \frac{v_{\text{приёмник}}}{c_{\text{волн в среде}}}}{1 - \frac{v_{\text{источник}}}{c_{\text{волн в среде}}}}$$

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!



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

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 $t = t_s$

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

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