Большой Адронный Коллайдер: конец или начало новой физики?

Дмитрий Горбунов

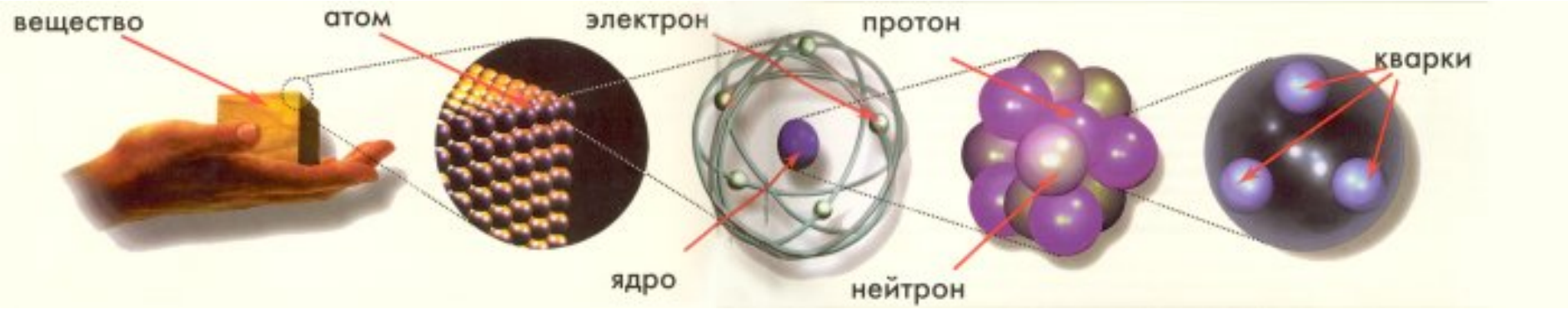
Институт ядерных исследований РАН, Москва

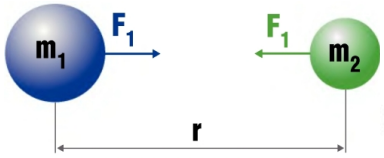
13 октября 2010

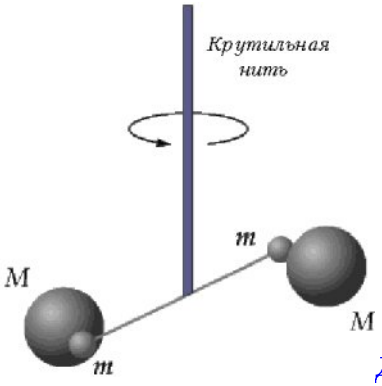
План

1. Стандартная модель физики частиц
2. Явления, указывающие на неполноту Стандартной модели
   - Нейтринные осцилляции: нарушение аромата
   - Барионная асимметрия Вселенной
   - Тёмная материя
3. Другие проблемы Стандартной модели...

Элементарные частицы и взаимодействия между ними







дальнодействие

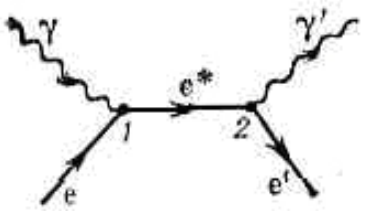


Рис. 2.

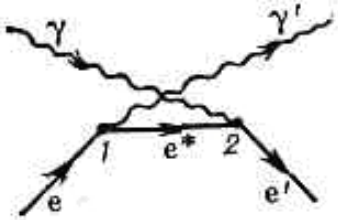
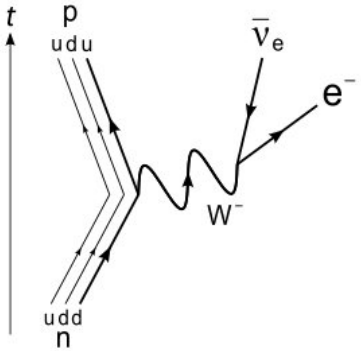


Рис. 3.

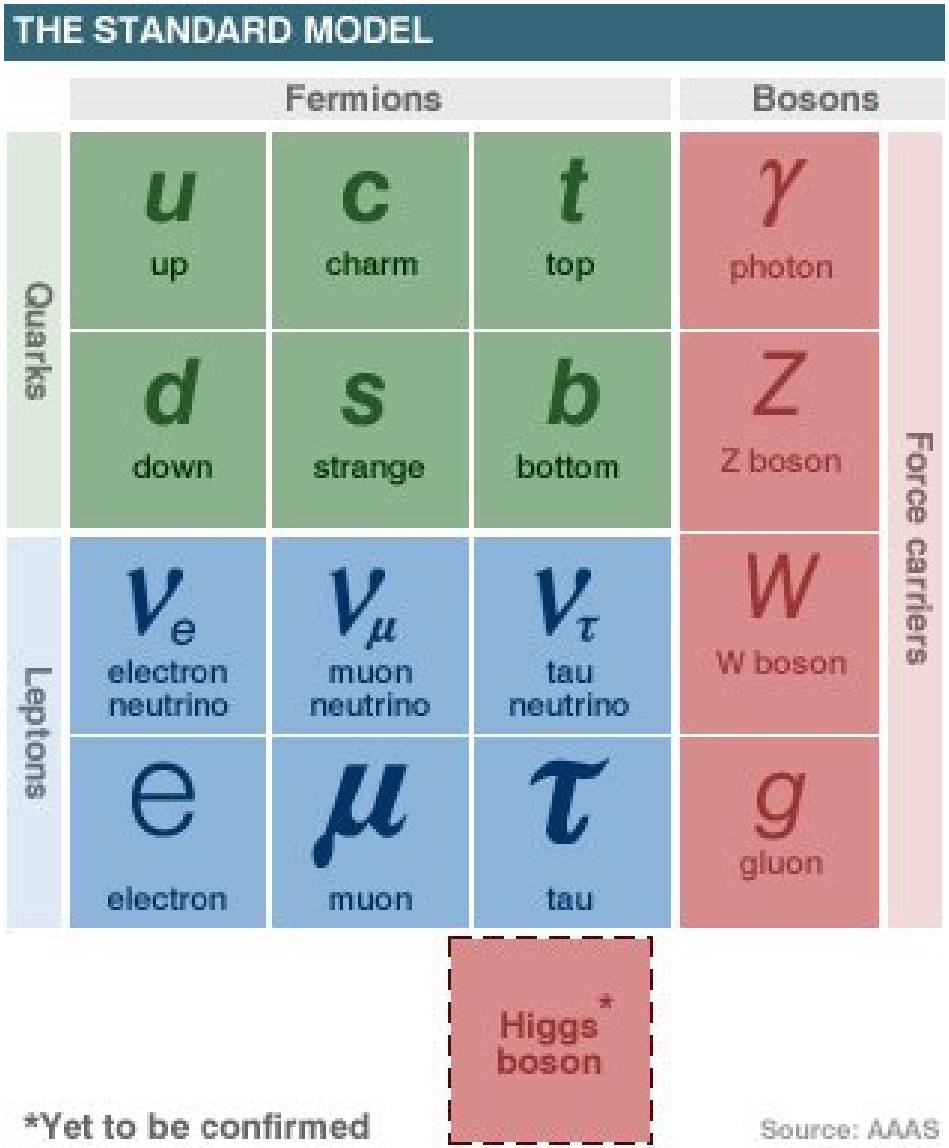
10^{-13} см

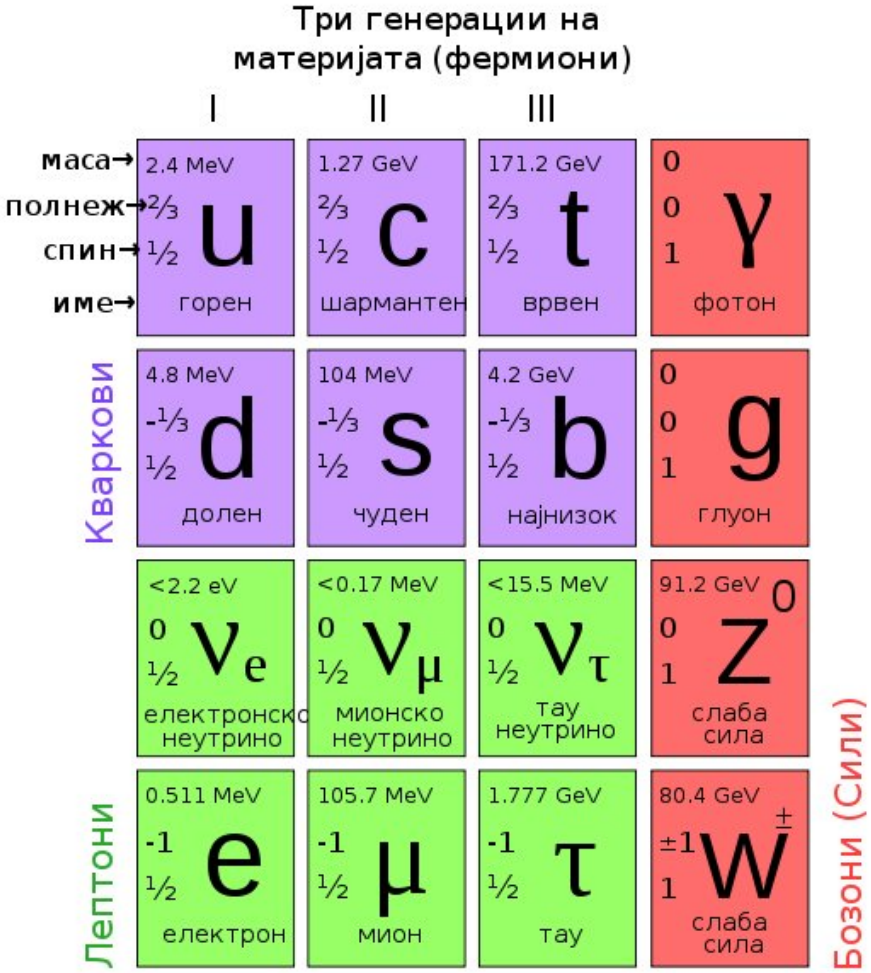
короткодействие

10^{-16} см



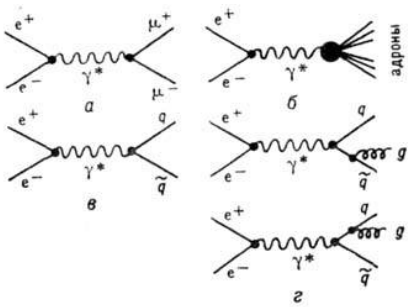
Элементарные частицы и взаимодействия между ними





Проверки Стандартной модели

- распады частиц: $\mu \to e\bar{\nu}_e\nu_\mu$, $Z \to \mu^+\mu^-$
- рассеяния частиц:



Проверки предсказаний СМ

Проверки предсказаний её мотивированных обобщений

Регулярно обновляемая достоверная информация

http://pdg.lbl.gov

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
  - Тёмная материя (Ω_{DM})
  - Барионная асимметрия
  - Тёмная энергия (Ω_Λ)
  - Инфляция: R^2, $RH^\dagger H$, ...
  - CP-проблема в КХД: нетривиальная топология, ...
  - Иерархия калибровочных масштабов: нет новых
  - Квантовая гравитация

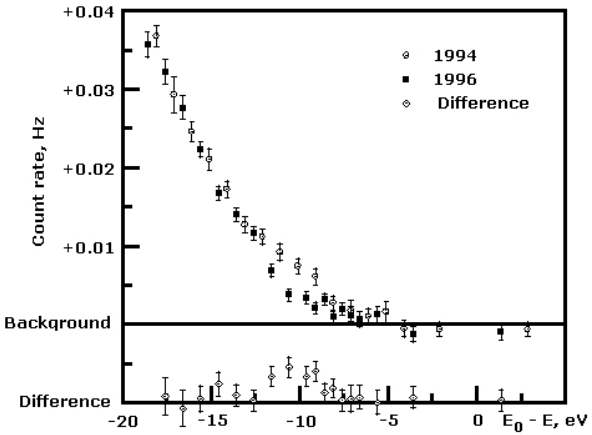
новая физика частиц должна объяснять это

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

Проверка СМ: прямые поиски массы нейтрино

$^3\mathrm{H} \to {}^3\mathrm{He} + e + \bar{\nu}_e$

ИТЭФ, 1980-1990-е годы



Космология: вклад в тёмную материю

$m_{\bar{\nu}_e} \sim 20$ эВ

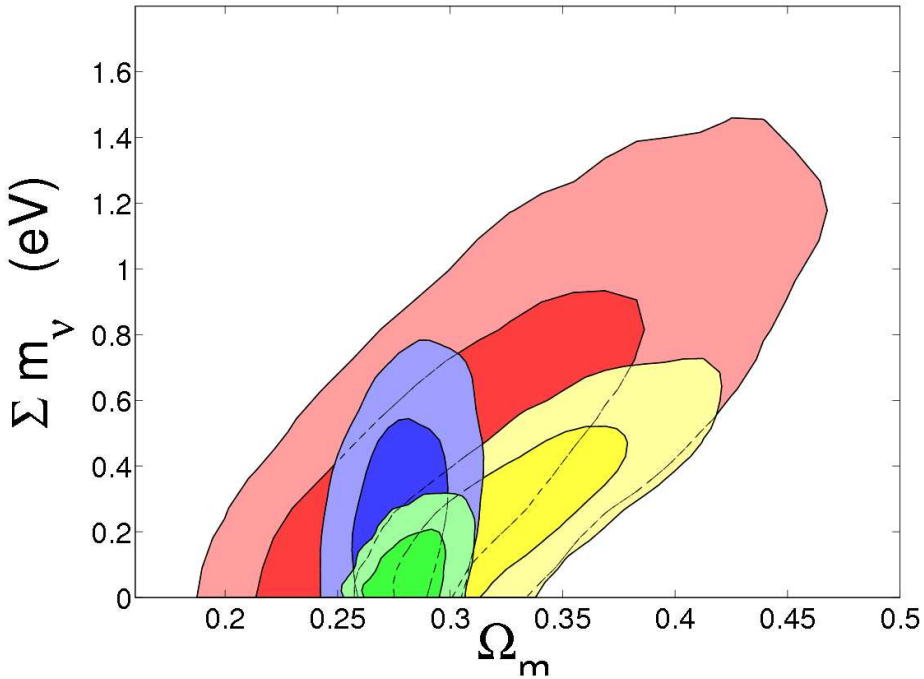
ИЯИ, 1990-2000-е годы

$m_{\bar{\nu}_e} \lesssim 2$ эВ

Космология: рост структур

$\sum_i m_{\nu_i} \lesssim 0.5$ эВ

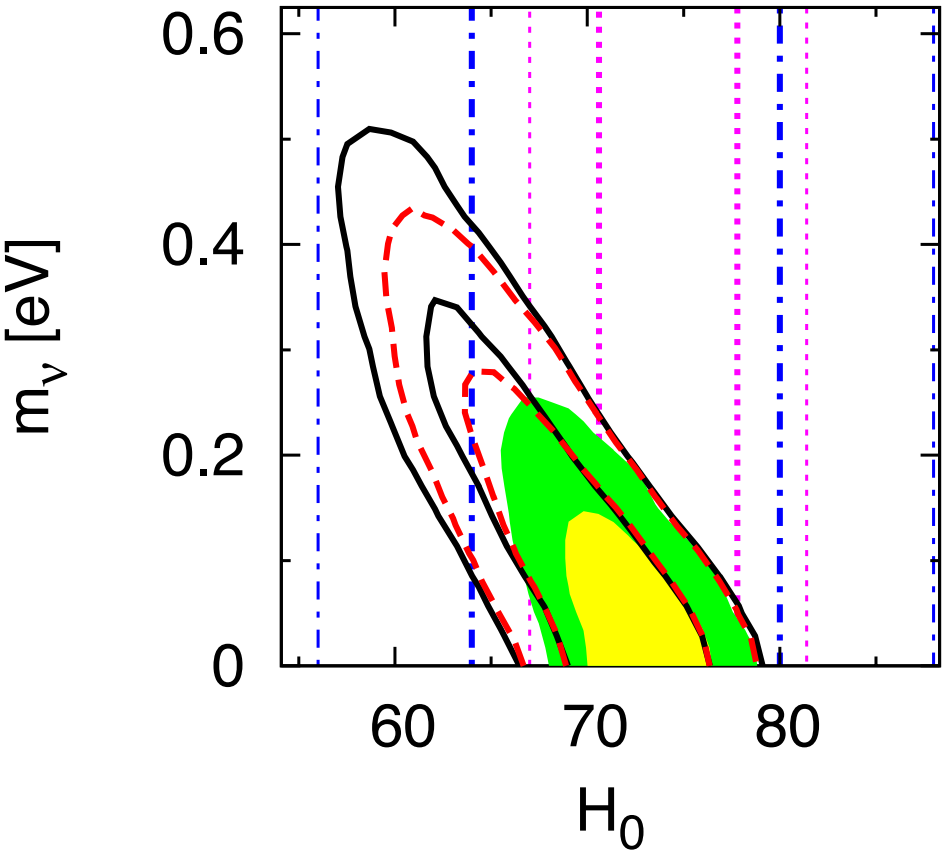
Limits from LSS and CMB on neutrino masses



LRG+BAO+WMAP5+SNe+BAO

$\sum m_\nu < 0.28$ eV (95% CL)

0911.5291



CMB+Hubble measurements

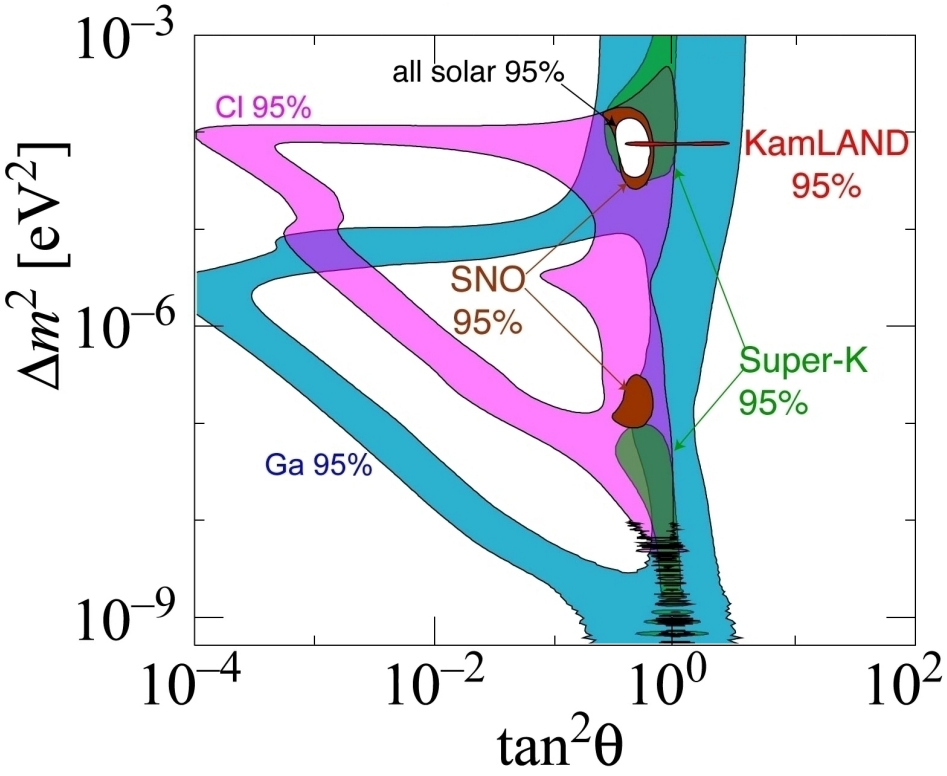
$\sum m_\nu < 0.20$ eV (95% CL)

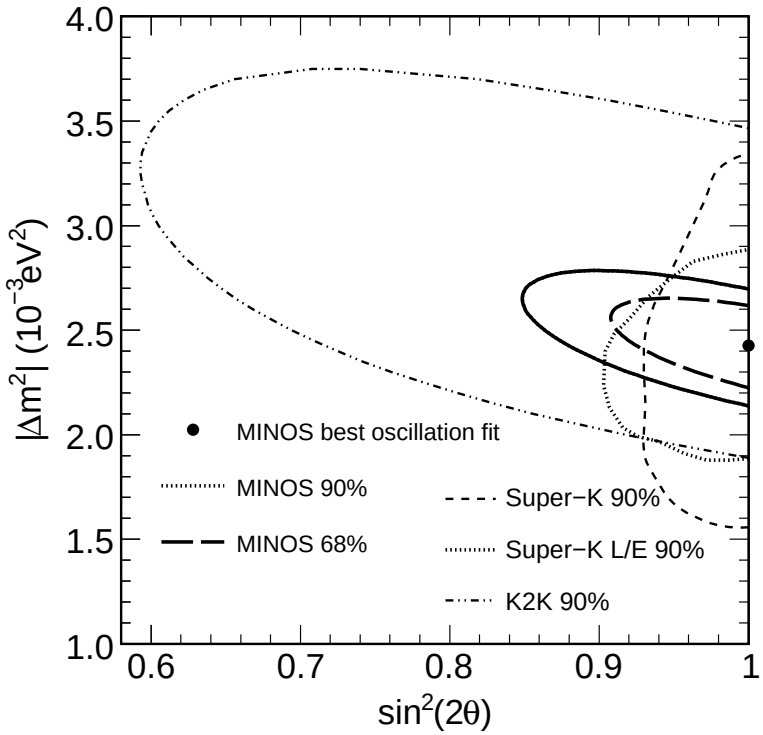
0911.0976

Осцилляции нейтрино: массы и углы смешивания

Солнце: $p + p \to {}^2H + e^+ + \nu_e$

Земля: ${}^{37}\mathrm{Cl} + \nu_e \to {}^{37}\mathrm{Ar} + e^-$





http://hitoshi.berkeley.edu/neutrino/

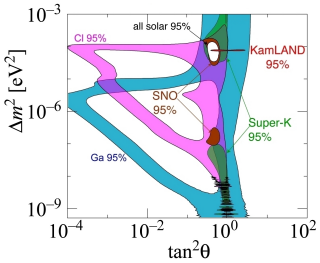
arXiv:0806.2237

$m_1 > 0.008$ эВ

$m_2 > 0.05$ эВ

Примеры обобщений с “массивными” нейтрино

$$\mathscr{L}^{(5)} = -\frac{F_{\alpha\beta}}{4\Lambda}\,\bar{L}_\alpha \tilde{H}\cdot H^\dagger L^c_\beta + \text{h.c.}\,, \quad \Lambda < 2.8\times 10^{14}\ \text{GeV}\ \times \left(\frac{3\cdot 10^{-3}\ \text{eV}^2}{\Delta m^2_{atm}}\right)^{1/2}.$$



Перенормируемая теория: стерильные нейтрино

Наиболее общий вид с 3-мя майорановскими нейтрино N_I

$$\mathscr{L}_{MSM} + \overline{N}_I i\partial\!\!\!/ N_I - f_{I\alpha}\bar{L}_\alpha N_I \tilde{H} - \frac{M_I}{2}\overline{N}^c_I N_I + \text{h.c.}$$

Новые параметры модели:

- 3 Майорановских массы M_i
- 15 Юкавских констант
  (Дираковская массовая матрица $M^D = f_{I\alpha}\langle H\rangle$ имеет 3 массы, 6 углов смешивания и 6 CP-нарушающих фаз)

ν массы и смешивание: механизм “качелей” в $f_{I\alpha} H \overline{N}_I L_\alpha$

$M_I \gg M^D = f\,v$ нет информации о M_I ! опасность: $\delta m_h^2 \propto M_I^2$

3 тяжёлых нейтрино с массами M_I

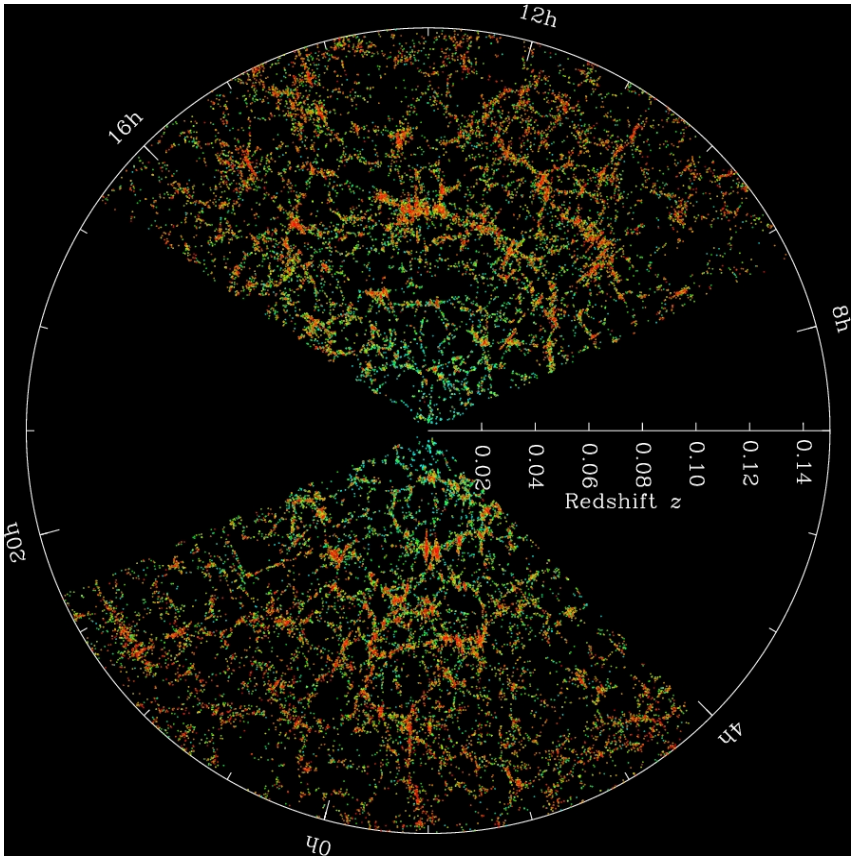
Массы лёгких нейтрино $$M^\nu = -(M^D)^T \frac{1}{M_I} M^D \propto f^2 \frac{v^2}{M_I}$$

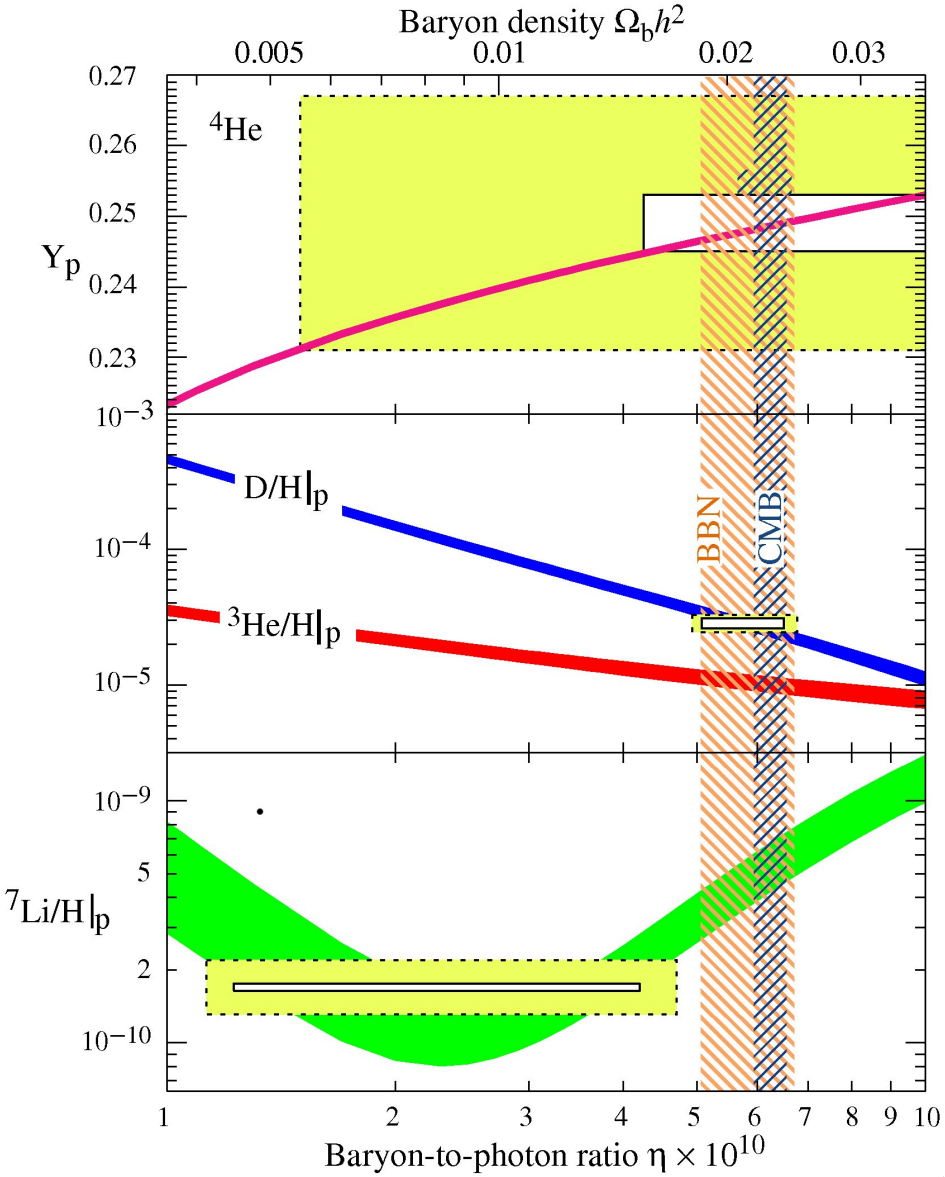
$$U^T M^\nu U = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{pmatrix}$$

Смешивание: калибровочный базис $\nu_\alpha = U_{\alpha i}\nu_i + \theta_{\alpha I} N_I^c$

смешивание активное-стерильное $$\theta_{\alpha I} = \frac{(M^D)^\dagger_{\alpha I}}{M_I} \propto f\frac{v}{M_I} \ll 1$$

Отсутствие антивещества





Бариогенезис

Условия Сахарова успешного бариогенезиса

- B-нарушение
- C- & CP-нарушения
- эти процессы неравновесны

1) Комплексное скалярное поле: механизм Аффлека–Дайна

2) Лептогенезис, стерильные нейтрино, ...

Электрослабые сфалероны: $B-L$

$$\partial^\mu j^{\rm B}_\mu = 3\frac{g^2}{16\pi^2} V^{\mu\nu\ a}\tilde{V}^a_{\mu\nu}\,,$$

$$\partial^\mu j^{{\rm L}n}_\mu = \frac{g^2}{16\pi^2} V^{\mu\nu\ a}\tilde{V}^a_{\mu\nu}\,,\quad n=1,2,3\,,$$

$V^a_{\mu\nu} = \partial_\mu V^a_\nu - \partial_\nu V^a_\mu + g\varepsilon^{abc}V^b_\mu V^c_\nu$ — напряжённость поля $SU(2)_{\rm W}$, $\tilde{V}^a_{\mu\nu} = \frac{1}{2}\varepsilon_{\mu\nu\lambda\rho}V^{\lambda\rho\ a}$

Аномалия: только левые фермионы взаимодействуют с полями V^a_μ.

Для ненулевых калибровочных полей в вакууме или плазме

$$\Delta B = B(t_f) - B(t_i) = \int_{t_i}^{t_f} dt \int d^3\mathbf{x}\partial^\mu j^{\rm B}_\mu = 3\int_{t_i}^{t_f} d^4x \frac{g^2}{16\pi^2} V^{\mu\nu\ a}\tilde{V}^a_{\mu\nu}\,,$$

Требуются сильные поля: $V^a_{\mu\nu} \propto \frac{1}{g}$, (интеграл — целое число!). Энергии таких конфигураций $\propto \frac{1}{g^2}$.

$$\Delta B = 3\Delta L_e = 3\Delta L_\mu = 3\Delta L_\tau$$

При температурах 100 ГэВ $\lesssim T \lesssim 10^{11}$ ГэВ сохраняются только 3 комбинации, н-р

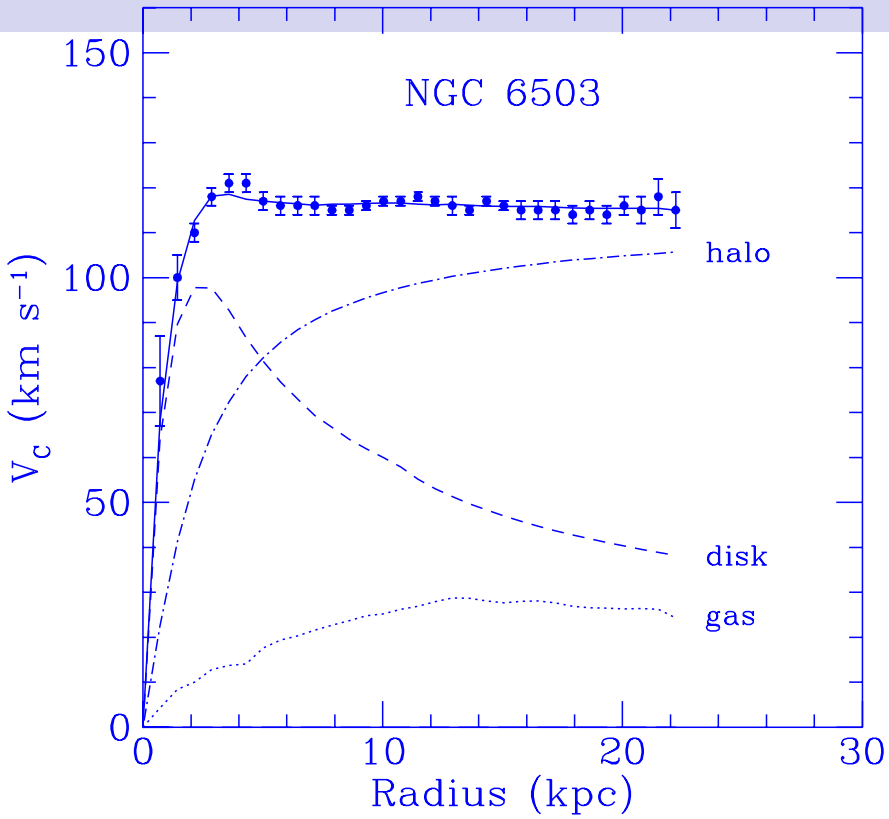
$$B-L\,,\quad L_e - L_\mu\,,\quad L_e - L_\tau$$

Масштаб энергий LHC никак не выделен

Тёмная материя в галактиках: пологие “кривые вращения”

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

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



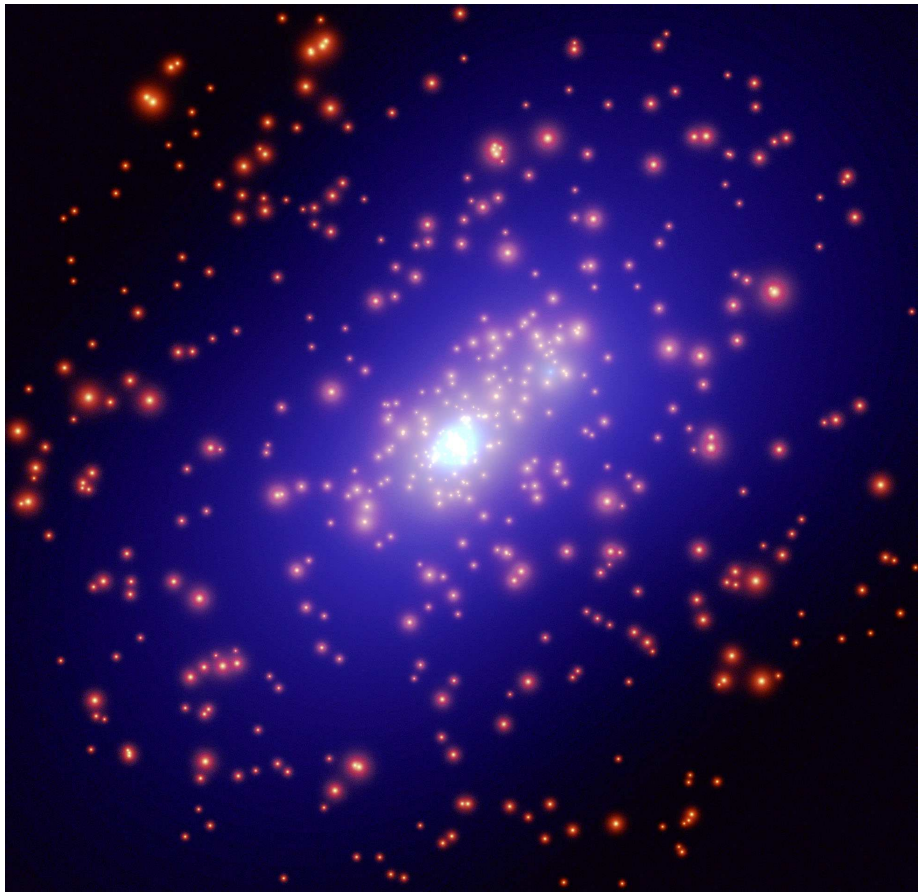
наблюдения: $v(R) = \text{const}$

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

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

Тёмная материя в скоплениях галактик

гравитационное линзирование $\rho_{\text{M}} \approx 0.25\rho_c$



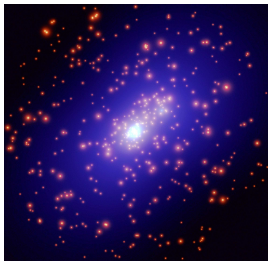
Тёмная материя в скоплениях галактик

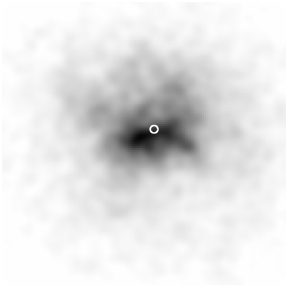
X-лучи от горячего газа из центров скоплений

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

галактики в скоплениях

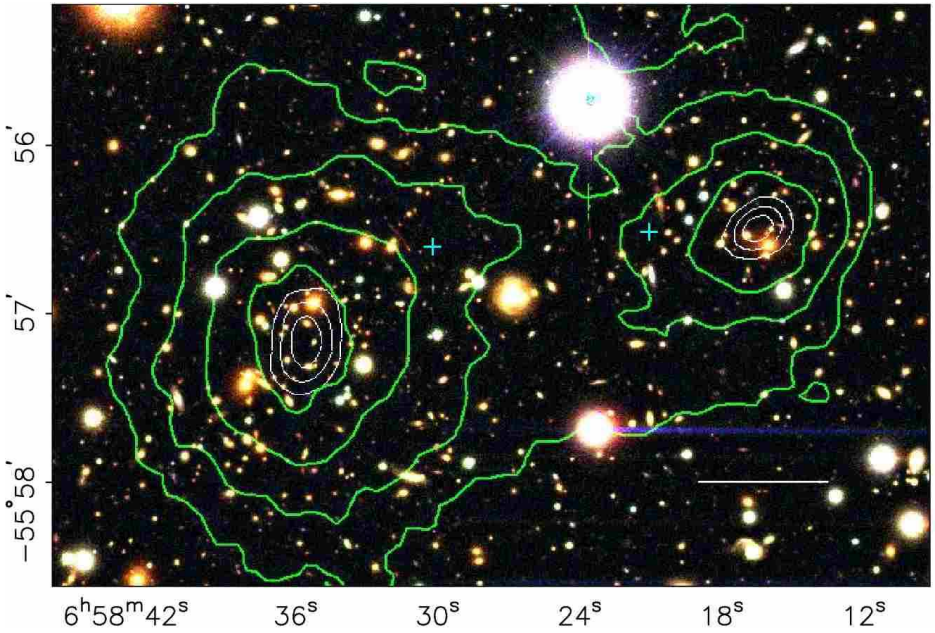
$$3M\langle v_r^2\rangle = G\frac{M^2}{R}$$

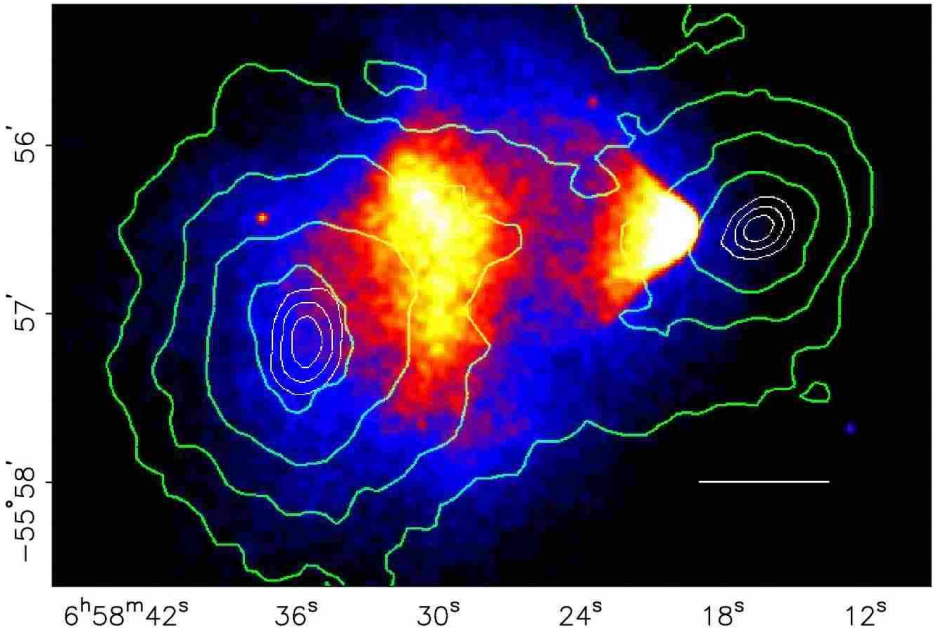




Галактика Млечный путь: движение к центру сверхскопления Девы

Столкнувшиеся скопления





Свойства тёмной материи $p = 0$

(Если) частицы:

1. стабильные на космологических временах ($t \gg 14$ млрд. лет)
2. нерелятивистские сейчас и раньше (эпоха равенства вкладов в энергию материи и радиации, $T \simeq 1$ эВ, $v_{RD/MD} \lesssim 10^{-3}$)
3. (почти) бесстолкновительны
4. (почти) электрически нейтральны

Если были в термальном равновесии: $M_X \gtrsim 1$ кэВ

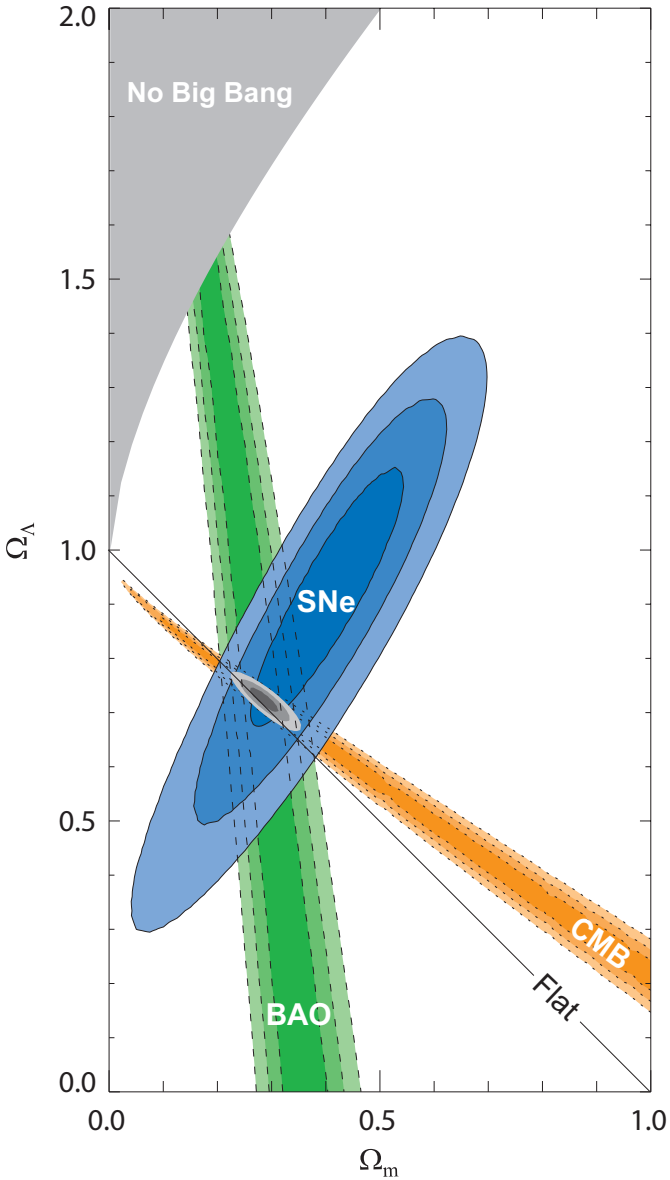
Если нет:

$\lambda = 2\pi/(M_X v_X)$, в галактиках $v_X \sim 0.5 \times 10^{-3} \longrightarrow$ для бозонов $M_X \gtrsim 3 \times 10^{-22}$ эВ

принцип Паули: для фермионов $M_X \gtrsim 750$ эВ

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

Данные из 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.)

$$\rho_c \approx 0.53 \times 10^{-5} \frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$$

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

Кандидаты в частицы тёмной материи

- WIMPs (нейтралино, ...)
- стерильные нейтрино
- аксион
- гравитино
- Тяжёлые реликты
- (Топологические) дефекты
- Massive Astrophysical Compact Halo Objects
- Первичные чёрные дыры (остатки)

Weakly Interacting Massive Particles → LHC

Предположение:

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

$$n_{\rm X} = n_{\bar{\rm X}} = g_{\rm X} \left(\frac{M_{\rm X} T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{-M_{\rm X}/T}$$

$X\bar{X} \longrightarrow$ лёгкие частицы

температура закалки T_f

$$\frac{1}{n_{\rm X}} \frac{1}{\langle \sigma_{\rm ann} v \rangle} = H^{-1}(T_f) \longrightarrow T_f = \frac{M_{\rm X}}{\ln \left(\frac{g_{\rm X} M_{\rm X} M_{\rm Pl}^* \sigma_0}{(2\pi)^{3/2}} \right)} .$$

Bethe formula: $\qquad$ s-wave: $\sigma_{\rm ann} = \frac{\sigma_0}{v}$

Weakly Interacting Massive Particles

после закалки: $n_X(T_f) = \frac{T_f^2}{M_{Pl}^* \sigma_0}$

современная концентрация: $n_X(T_0) = \left(\frac{a(T_f)}{a(T_0)}\right)^3 n_X(T_f) = \left(\frac{s_0}{s(T_f)}\right) n_X(T_f)$

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

$$\Omega_X = 2\frac{M_X n_X(T_0)}{\rho_c} = 7.6\frac{s_0 \ln\left(\frac{g_X M_{Pl}^* M_X \sigma_0}{(2\pi)^{3/2}}\right)}{\rho_c \sigma_0 M_{Pl}\sqrt{g_*(T_f)}}$$

$$= 0.1 \cdot \left(\frac{(10\ \text{TeV})^{-2}}{\sigma_0}\right) \frac{0.3}{\sqrt{g_*(T_f)}} \ln\left(\frac{g_X M_{Pl}^* M_X \sigma_0}{(2\pi)^{3/2}}\right) \cdot \frac{1}{2h^2}$$

натуральная тёмная материя

натурально “лёгкая” $\sigma_0 \lesssim \frac{4\pi}{M_X^2} \longrightarrow M_X \lesssim 100$ ТэВ

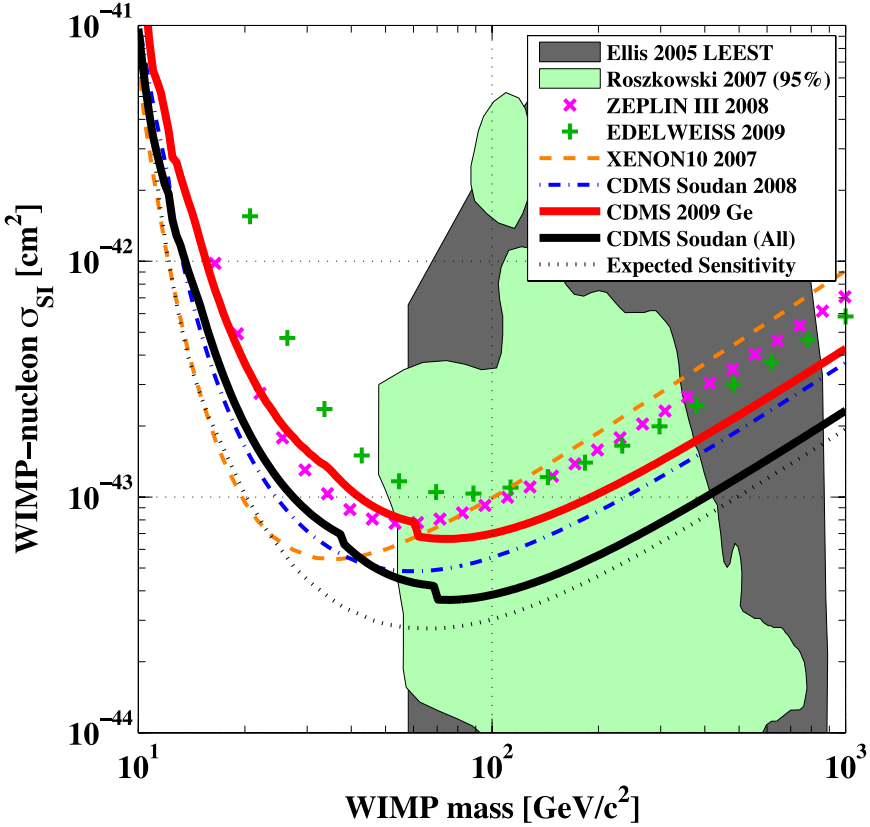
WIMPS на LHC

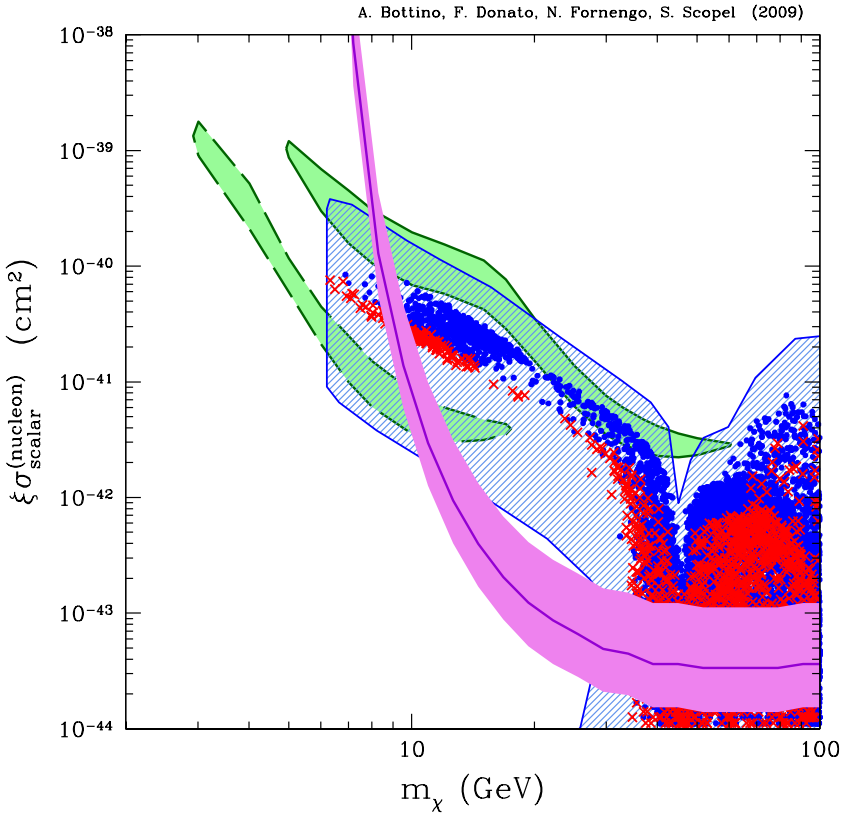
- сечение рождения $AB \to XX$ масштаба слабого
- Не обязательно “много” новых частиц на LHC
- Подходящая область параметров моделей как правило уже (очень) сильно закрыта и ничем другим не выделена
- Подойдёт всего одна частица!

$$\mathscr{L} = \frac{1}{2}\partial_\mu S \partial^\mu S - \frac{1}{2} m_s^2 S^2 - \lambda S^4 - \xi S^2 H^\dagger H$$

- Не обязательно искать (найти) на LHC

Недавние результаты прямых поисков

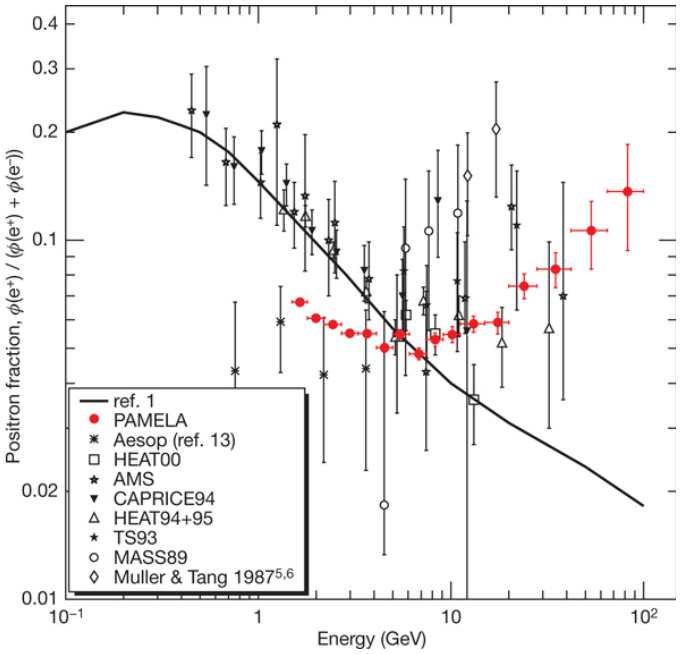


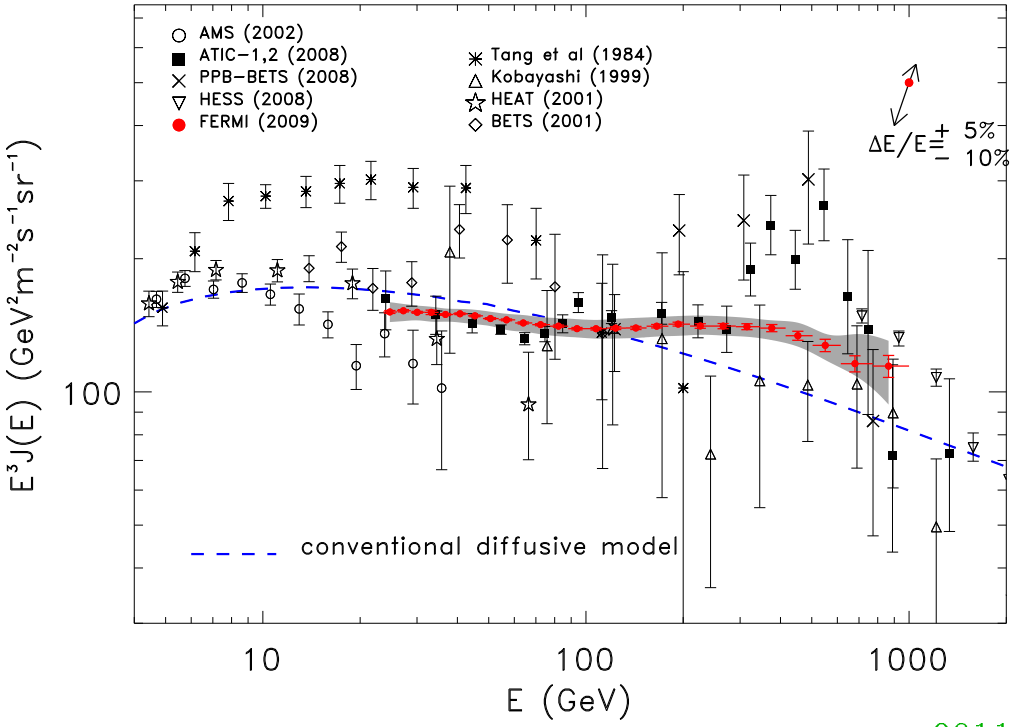


заявлено 2 события 0912.3592

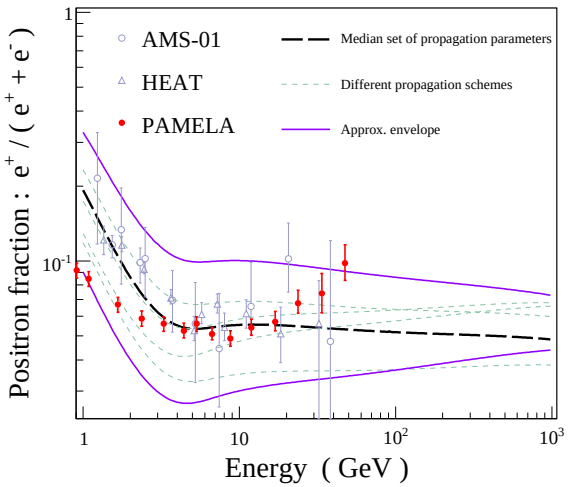
0912.4025, см. однако, 0912.4264

Космические лучи от распада или аннигиляции





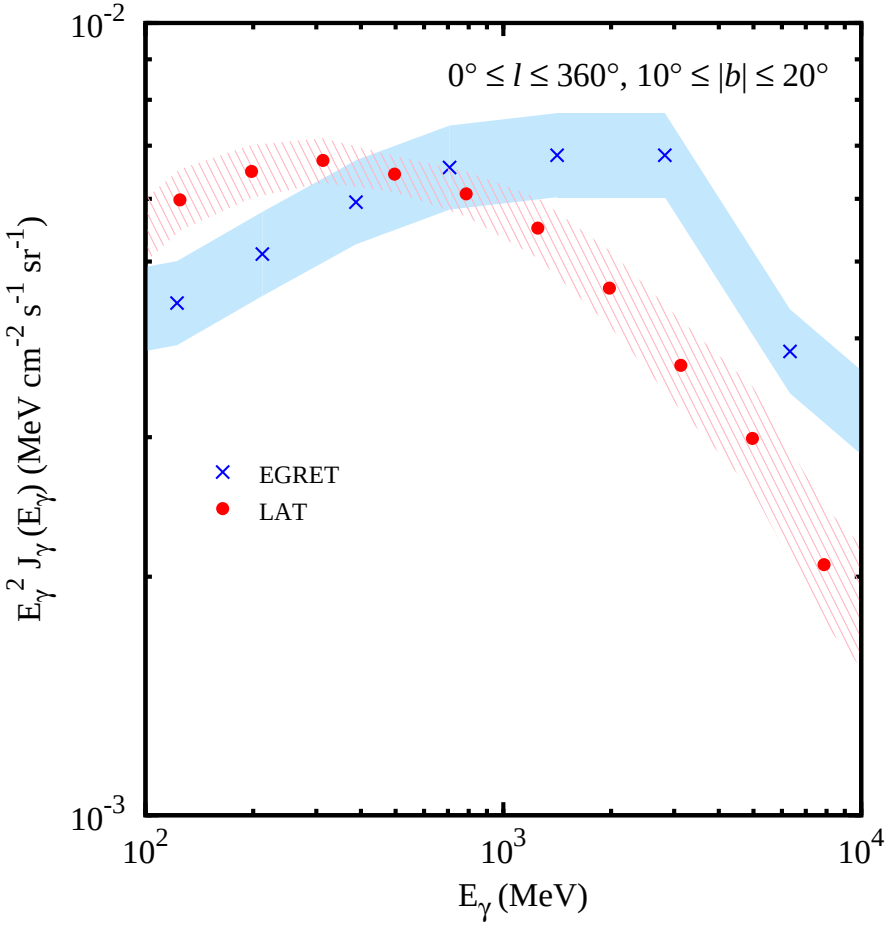
0911.4276

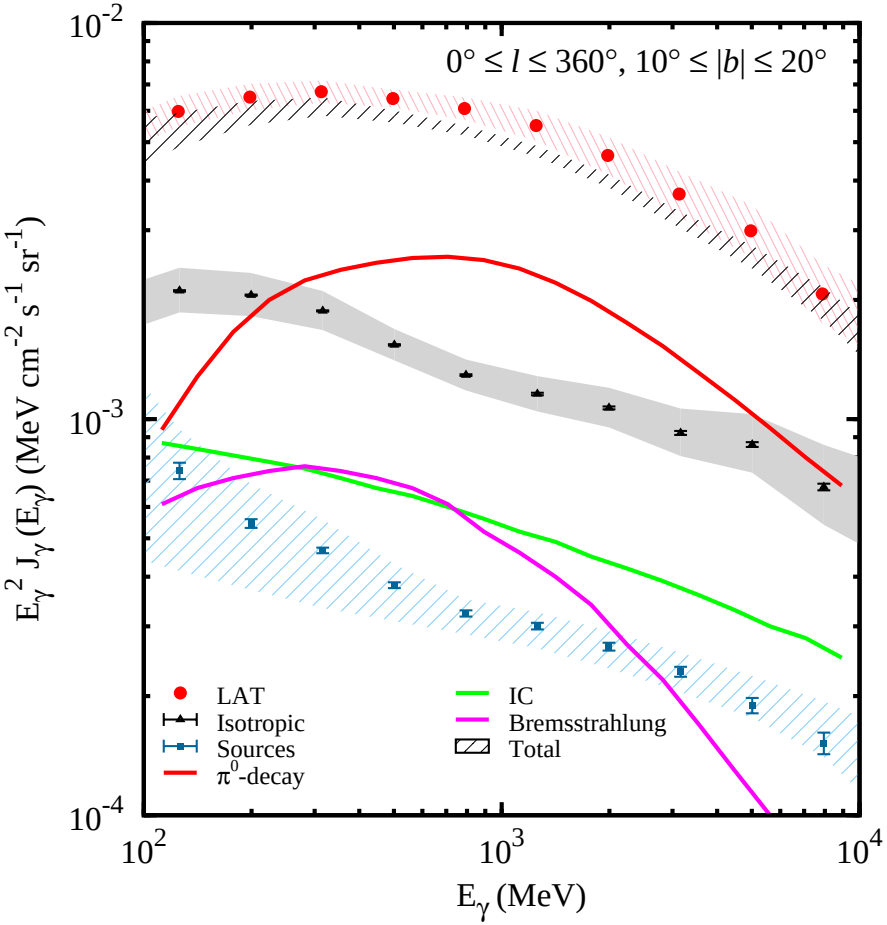


0909.1182, 0911.4779

- слишком сильный сигнал (boost factor: clumps or new light mediators)
- нет антипротонов (leptofobic)
- “изотропный” поток γ

Fermi LAT и предыдущий эксперимент EGRET





0911.4276

Тёмная материя: Прямые поиски

- WIMPs (neutralino, ...) recoil energy, (LHC, Baksan, PAMELA, ...)
- sterile neutrinos sharp line: $\nu_s \to \nu_a + \gamma$, (XMM, INTEGRAL, ...)
- light scalar field
- axion oscillations $a + \mathbf{B} \to \gamma$
- gravitino missing energy at LHC, ...
- Heavy relics if unstable — Cosmic rays
- (Topological) defects lensing of CMB
- Massive Astrophysical Compact Heavy Objects microlensing
- Primordial black hole remnants Cosmic rays

Что ещё было бы интересно объяснить

- Квадратичные расходимости — стабильность массы бозона Хиггса
- Иерархия масштабов взаимодействий $M_W \ll M_{Pl}$?
- $\Lambda \ll M_{Pl}^4, M_W^4, \Lambda_{QCD}^4$?
- $\Omega_\Lambda \neq 0$?
- $\Omega_B \sim \Omega_{DM} \sim \Omega_\Lambda$?
- $\frac{\delta T_{CMB}^2}{T_{CMB}^2} \sim \Delta_B \sim 10^{-10}$?
- $\theta G_{\mu\nu} G_{\lambda\rho} \varepsilon^{\mu\nu\lambda\rho}$, $\theta < 10^{-9}$?
- $m_e \ll m_\tau \ll m_{top}$?
- ...

Нет редких процессов с нарушением ароматов (FCNC, etc), протон стабилен, ... Сразу “много” или совсем мало новой физики