

ЛНС: конец или начало новой физики?

Дмитрий Горбунов

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Четвёртые Черенковские чтения

12 апреля 2011

План

- 1 Явления, указывающие на неполноту Стандартной модели
 - Нейтринные осцилляции: нарушение аромата
 - Барионная асимметрия Вселенной
 - Тёмная материя
 - Тёмная материя и ЛНС
- 2 Другие проблемы Стандартной модели...

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

физика частиц

должна объяснять это

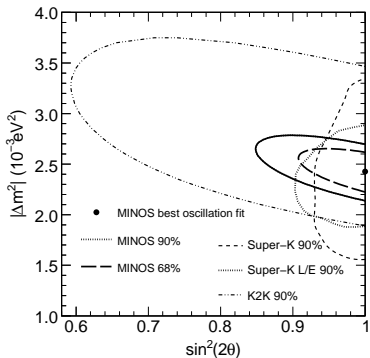
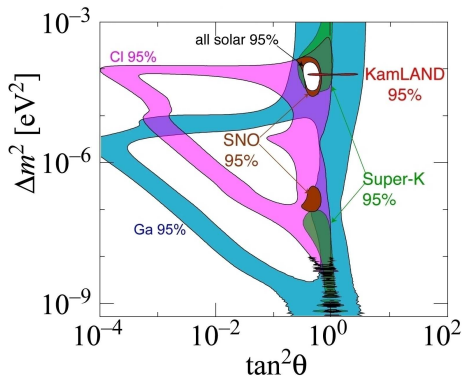
объясняется физикой на масштабе

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

Осцилляции нейтрино: массы и углы смешивания

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

Земля: ${}^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$



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

arXiv:0806.2237

$m_1 > 0.008$ эВ

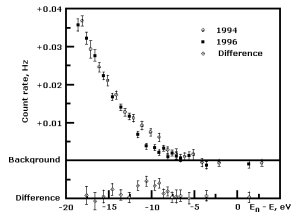
$m_2 > 0.05$ эВ

Проверка СМ: прямые поиски массы нейтрино



ИТЭФ, 1980-1990-е

годы



Космология: вклад в
тёмную материю

$m_{\bar{\nu}_e} \sim 20$ эВ

ИЯИ, 1990-2000-е годы

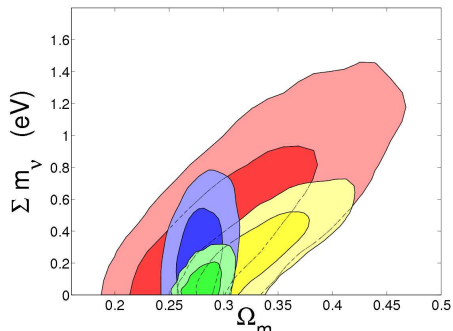


$m_{\bar{\nu}_e} \lesssim 2$ эВ

Космология: рост структур

$\sum_i m_{\nu_i} \lesssim 0.5$ эВ

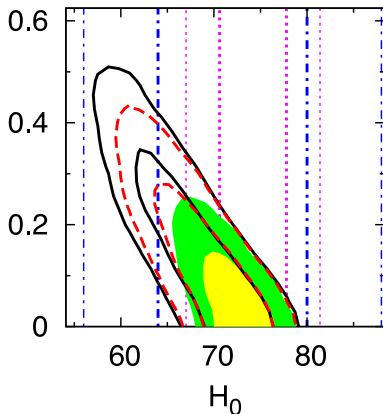
Ограничения из космологии на массы нейтрино



LRG+BAO+WMAP5+SNe+BAO

$\Sigma m_\nu < 0.28 \text{ eV}$ (95% CL)

0911.5291



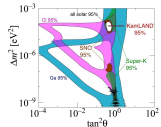
CMB+Hubble measurements

$\Sigma m_\nu < 0.20 \text{ eV}$ (95% CL)

0911.0976

Примеры обобщений с “массивными” нейтрино

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



Перенормируемая теория: стерильные нейтрино

Наиболее общий вид с 3-мя майорановскими нейтрино N_I

$$\mathcal{L}_{SM} + \bar{N}_I i \not{\partial} N_I - f_{I\alpha} \bar{L}_\alpha N_I \tilde{H} - \frac{M_I}{2} \bar{N}_I^c N_I + \text{h.c.}$$

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)

V массы и смешивание: механизм “качелей” в $f_{l\alpha} H \bar{N}_l L_\alpha$

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

3 тяжёлых нейтрино с массами M_l $-\frac{M_l}{2} \bar{N}_l^c N_l + \text{h.c.}$

Массы лёгких нейтрино

$$M^\nu = -(M^D)^T \frac{1}{M_l} M^D \propto f^2 \frac{v^2}{M_l}$$

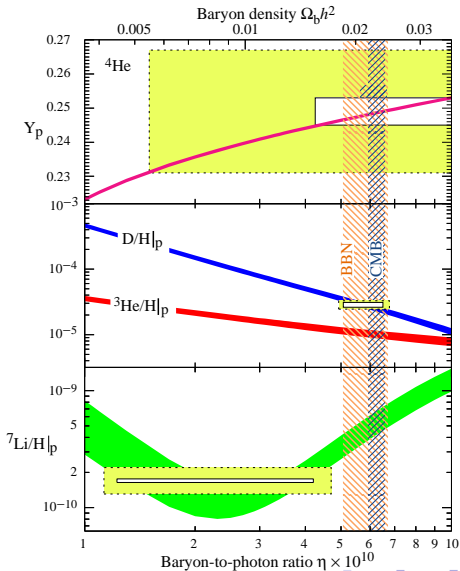
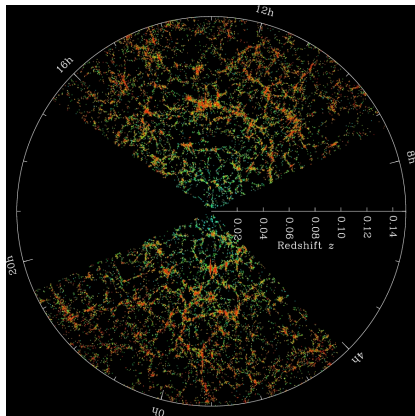
$$U^T M^\nu U = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{pmatrix}$$

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

смешивание активное-стерильное

$$\theta_{\alpha l} = \frac{(M^D)_{\alpha l}^\dagger}{M_l} \propto f \frac{v}{M_l} \ll 1$$

Отсутствие антивещества



Бариогенезис

Условия Сахарова успешного бариогенезиса

- В-нарушение (L-нарушение) электрослабые сфалероны
- C- & CP-нарушения
- эти процессы неравновесны в ранней Вселенной

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

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

1) Электрослабый бариогенезис в многохиггсовских моделях

Хиггсовский потенциал нельзя проверить на ЛНС...

2) Комплексное скалярное поле: механизм Аффлекса–Дайна

Работает на масштабе энергий $\gg 100 \text{ ГэВ}$...

3) Лептогенезис, стерильные нейтрино, ...

Работает на масштабе энергий $\gtrsim 100 \text{ ГэВ}$...

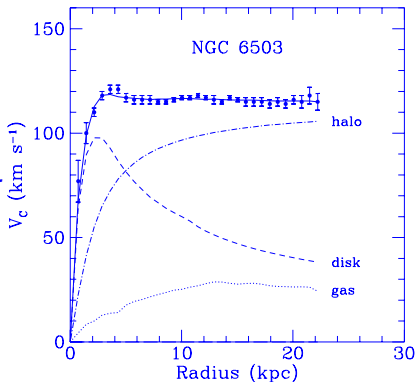
Тёмное гало галактик: пологие “кривые вращения”

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

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

1 кpc = 10^3 парсек =

3.3 тыс. св. лет



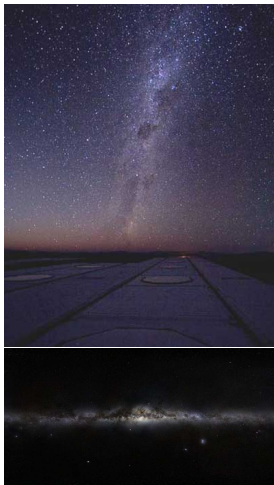
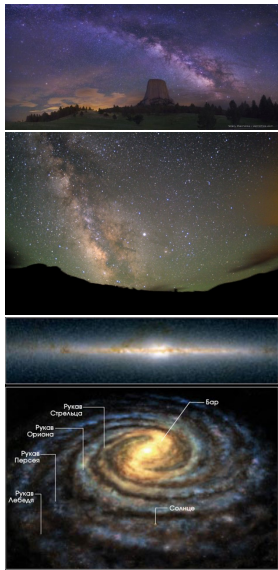
наблюдения:

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

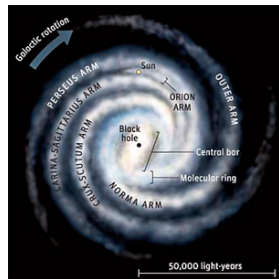
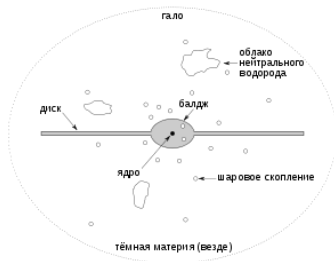
Видимая материя:

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

Строение Млечного Пути



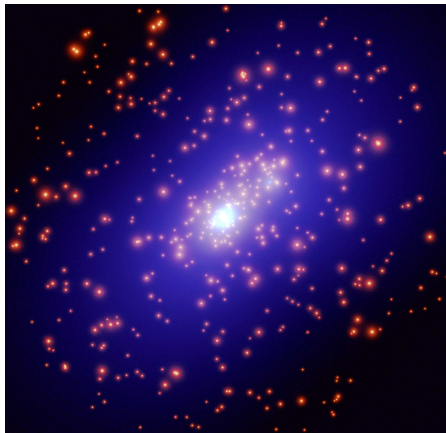
гало также помогает стабилизировать структуру диска ...



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

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

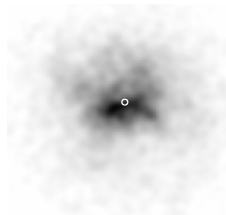
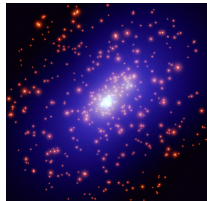
галактики в скоплениях

галактики вириализованы,

$$U + 2E_k = 0$$

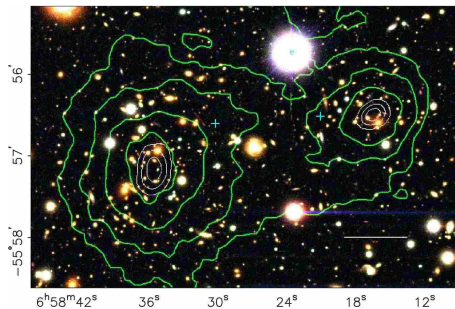
$$3M \langle v_r^2 \rangle = G \frac{M^2}{R}$$

v_r — проекция скорости на луч зрения

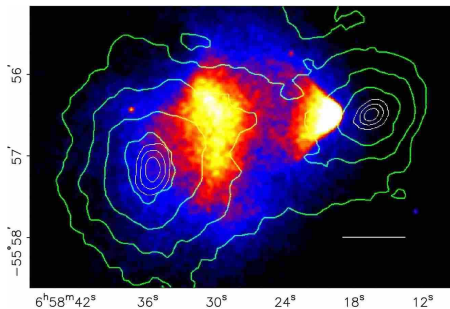


Галактика Млечный путь: движение к центру сверхскопления Девы

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

Свойства тёмной материи

$$p = 0$$

Если новые частицы (X):

- 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:

$$M_X \gtrsim 1 \text{ кэВ}$$

Если нет:

для бозонов

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

для фермионов

принцип Паули:

$$M_X \gtrsim 750 \text{ эВ}$$

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

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

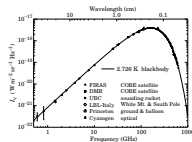
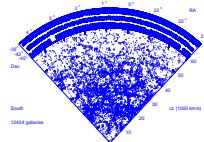
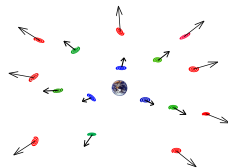
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(t) = \frac{8\pi}{3} G \rho_{\text{плотность энергии}}$$

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

- 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

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

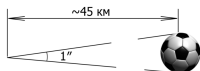
Как мы его проверяем?

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

Роль тёмной материи в образовании структур

- Реликтовое излучение не совсем изотропно.

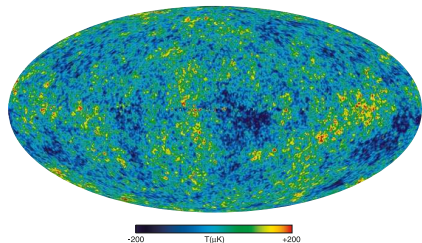
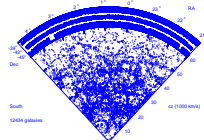
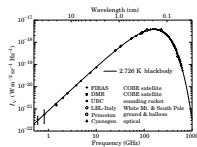
- 1 Движение Земли относительно РИ

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

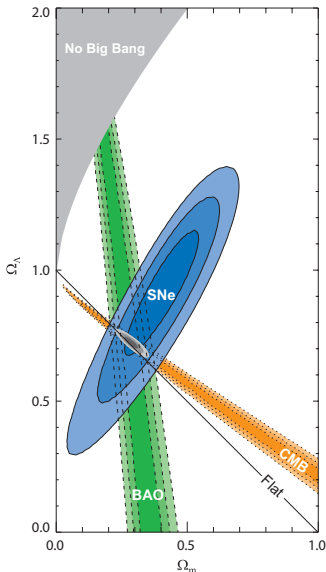
- 2 Есть более сложная анизотропия!

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

- 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.



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.)

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

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:

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

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 \rightarrow LHC

Предположение:

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

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

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

$X\bar{X} \rightarrow$ лёгкие частицы

температура закалки T_f

$$\frac{1}{n_X} \frac{1}{\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle} = H^{-1}(T_f) \rightarrow T_f = \frac{M_X}{\ln \left(\frac{g_X M_X M_{\text{Pl}}^* \sigma_0}{(2\pi)^{3/2}} \right)}.$$

Bethe formula:

s-wave: $\sigma_{\text{ann}} = \frac{\sigma_0}{v}$

Weakly Interacting Massive Particles

после заковки:

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

современная концентрация:

$$n_X(T_0) = \left(\frac{a(T_f)}{a(T_0)}\right)^3 n_X(T_f) = \left(\frac{s_0}{s(T_f)}\right) n_X(T_f) \propto \frac{1}{T_f}$$

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

$$\begin{aligned} \Omega_X &= 2 \frac{M_X n_X(T_0)}{\rho_c} = 7.6 \frac{s_0 \ln\left(\frac{g_X M_{\text{Pl}}^* M_X \sigma_0}{(2\pi)^{3/2}}\right)}{\rho_c \sigma_0 M_{\text{Pl}} \sqrt{g_*(T_f)}} \\ &= 0.1 \cdot \left(\frac{(10 \text{ TeV})^{-2}}{\sigma_0}\right) \frac{0.3}{\sqrt{g_*(T_f)}} \ln\left(\frac{g_X M_{\text{Pl}}^* M_X \sigma_0}{(2\pi)^{3/2}}\right) \cdot \frac{1}{2h^2} \end{aligned}$$

Массивные слабовзаимодействующие частицы \rightarrow ЛНС

$$\sigma_{\text{слабое}} = G_F^2 M_Z^2$$

$X + \bar{X}$ 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 $E \gtrsim 1-10$ ТэВ
 близкие масштабы — “натуральная” тёмная материя

натурально “лёгкая” для ЛНС

унитарность...

сечение не больше геометрического —

$$\sigma_0 \lesssim \frac{4\pi}{M_X^2} \rightarrow M_X \lesssim 100 \text{ ТэВ}$$

Найти “натуральную” тёмную материю на ЛНС весьма вероятно

WIMPS на LHC

- сечение рождения $AB \rightarrow XX$ 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!

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

- Не обязательно искать (найти) на LHC

Тёмная материя: Прямые поиски

- **WIMPs** (*neutralino, ...*) recoil energy, (**LHC**, Baksan, PAMELA, ...)
- **sterile neutrinos** sharp line: $\nu_s \rightarrow \nu_a + \gamma$, (XMM, INTEGRAL, ...)
- light scalar field
- axion oscillations $\mathbf{a} + \mathbf{B} \rightarrow \gamma$
- 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