

Модели с лёгкими экзотическими бозонами: теория и эксперимент

Дмитрий Горбунов

gorby@ms2.inr.ac.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ
КОМПЛЕКС

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Всероссийское совещание по прецизионной физике и фундаментальным
физическим константам, ОИЯИ, Дубна

8 декабря 2011

План

- 1 Мир элементарных частиц и его проблемы
- 2 Лёгкая экзотика: модели и эксперименты
- 3 А были ли сигналы?
- 4 Примеры: Спин-0 и Спин-1
- 5 Перспективы...

План

- 1 Мир элементарных частиц и его проблемы
- 2 Лёгкая экзотика: модели и эксперименты
- 3 А были ли сигналы?
- 4 Примеры: Спин-0 и Спин-1
- 5 Перспективы...

Элементарные частицы и взаимодействия между ними

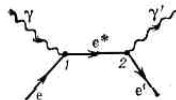
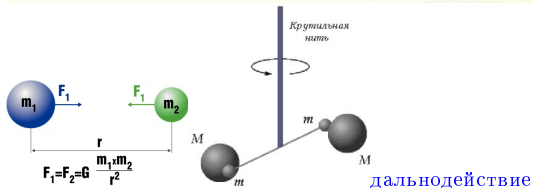
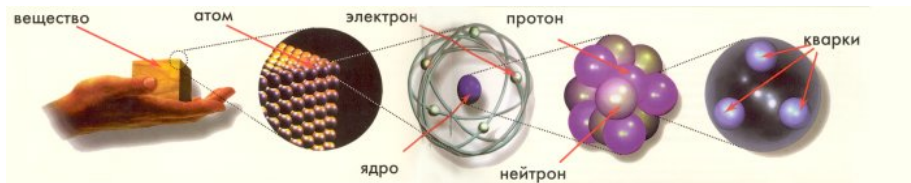


Рис. 2.

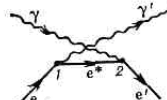
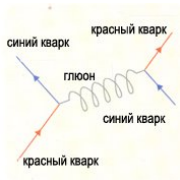


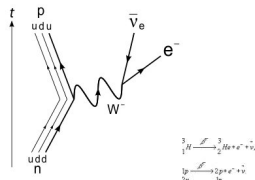
Рис. 3.



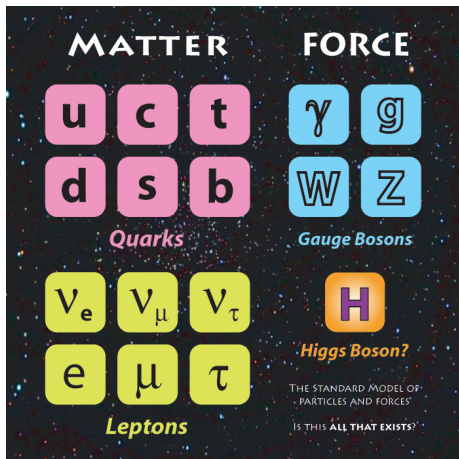
10^{-13} см

короткодействие

10^{-16} см



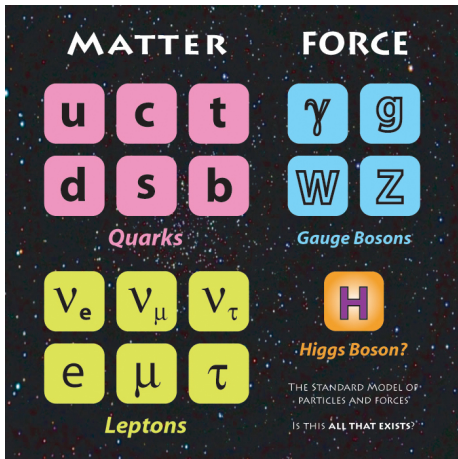
Элементарные частицы и взаимодействия между ними



1 2 3 ← поколения

И античастицы материи (e^+ , ...)

Элементарные частицы и взаимодействия между ними



1 2 3 ← поколения

У античастиц противоположный заряд!
(e^+ , ...)

У всех поколений одинаковы

- сильные
- слабые
- электромагнитные

взаимодействия!

Пример: электромагнетизм

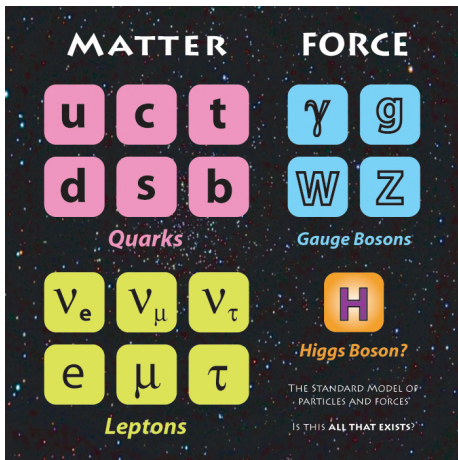
$$\begin{pmatrix} u(+\frac{2}{3}) \\ d(-\frac{1}{3}) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c(+\frac{2}{3}) \\ s(-\frac{1}{3}) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t(+\frac{2}{3}) \\ b(-\frac{1}{3}) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e(0) \\ e(-1) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu(0) \\ \mu(-1) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau(0) \\ \tau(-1) \end{pmatrix}$$

$$W^+(+1), W^-(-1),$$

NB: остальные нейтральны!

Элементарные частицы и взаимодействия между ними



1 2 3 ← поколения

Что их различает?

- МАССЫ и значит
- гравитационные

взаимодействия!

В массах электрона и протона,

$$m_p \approx 2000 m_e \approx 1.7 \times 10^{-27} \text{ кг}$$

$$\begin{pmatrix} m_u \approx 5 m_e \\ m_d \approx 10 m_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_c \approx 1.3 m_p \\ m_s \approx 0.1 m_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_t \approx 175 m_p \\ m_b \approx 4.5 m_p \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} m_{\nu_e} - ? \\ m_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{\nu_\mu} - ? \\ m_\mu \approx 200 m_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{\nu_\tau} - ? \\ m_\tau \approx 1.8 m_p \end{pmatrix}$$

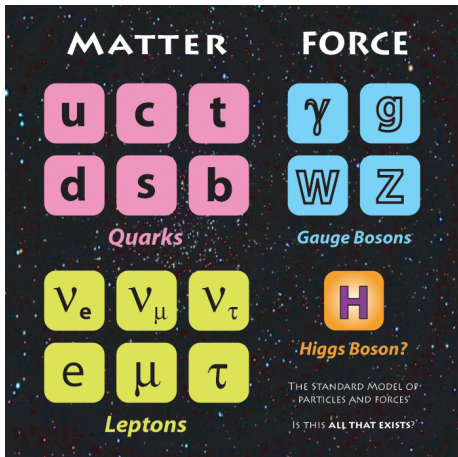
$$m_{W^+} = m_{W^-} \approx 80 m_p, \quad m_Z \approx 90 m_p$$

$$m_H > 115 m_p$$

$$0 < m_\nu c^2 < 10^{-6} m_e c^2 \sim \text{эВ} < \text{Ry} !! \quad \lambda_\gamma \sim 0.1 \mu\text{m}$$

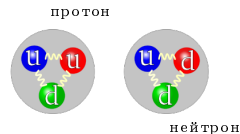
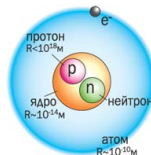
У античастиц та же масса! ($M_{e^+} = M_{e^-}, \dots$) NB: остальные (γ, g) безмассовы!

Элементарные частицы и взаимодействия между ними

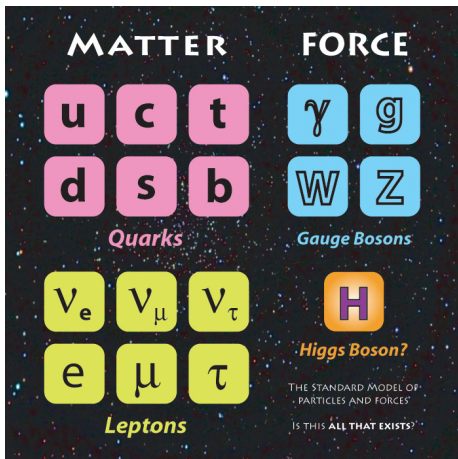


1 2 3 ← поколения

- Почему столь различные массы???
- Почему 2- и 3-го поколений нет в повседневной жизни?



Элементарные частицы и взаимодействия между ними

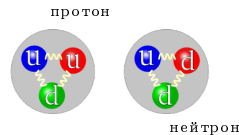
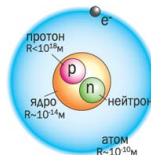


1 2 3 ← поколения

$$m_d - m_u \approx 5 m_e, \quad m_n - m_p \approx 3 m_e$$

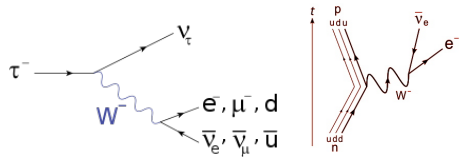
долгожитель: мюон $\tau_\mu \sim 10^{-6} \text{ с}$

- Почему столь различные массы???
- Почему 2- и 3-го поколений нет в повседневной жизни?



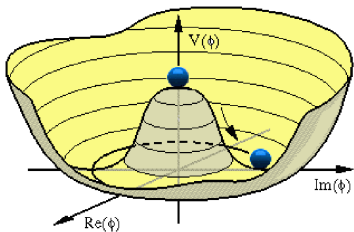
Спасибо

слабым взаимодействиям!



Механизм Хиггса: спонтанное нарушение

$$SU(3)_s \times SU(2)_w \times U(1)_Y \longrightarrow SU(3)_s \times U(1)_{em}$$



$$H : (0, 2, 1) \longrightarrow \langle H^\dagger H \rangle = \frac{v^2}{2}$$

$$\mathcal{L}^{self} = \mathcal{D}_\mu H^\dagger \mathcal{D}^\mu H - \lambda \left(H^\dagger H - \frac{v^2}{2} \right)^2$$

$$\mathcal{D}_\mu H \equiv \left(\partial_\mu - ig \frac{\tau^a}{2} V_\mu^a - ig' \frac{Y_H}{2} A_\mu \right) H$$

унитарная калибровка: $H = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} + \frac{h}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$

Роль бозона Хиггса в СМ: массы частиц

унитарная калибровка: $H = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} + \frac{h}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$

$$\mathcal{D}_\mu H^\dagger \mathcal{D}^\mu H \longrightarrow \frac{g^2 v^2}{4} W_\mu^+ W^{\mu-} + \frac{(g^2 + g'^2) v^2}{8} Z_\mu Z^\mu$$

$$Y_j^l \bar{L}_j H E_j + h.c. \longrightarrow m_j \left(\bar{e}_{L_j} e_{R_j} + \bar{e}_{R_j} e_{L_j} \right)$$

$$L_1 \equiv \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L, \quad E_1 \equiv e_R, \quad m_j = Y_j \frac{v}{\sqrt{2}}$$

Как проверить роль бозона Хиггса?

унитарная калибровка: $H = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} + \frac{h}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$

$$\begin{aligned} \mathcal{D}_\mu H^\dagger \mathcal{D}^\mu H &\rightarrow \frac{g^2}{4} h^2 |W_\mu^-|^2 + \frac{g^2 + g'^2}{8} h^2 Z_\mu Z^\mu \\ &+ \frac{g^2}{2} v h |W_\mu^-|^2 + \frac{g^2 + g'^2}{4} v h Z_\mu Z^\mu \\ Y_f H \bar{f} f &\rightarrow Y_f h \bar{f} f / \sqrt{2} = \frac{m_f}{v} h \bar{f} f \end{aligned}$$

Численно:

$$g \approx 0.5, g' \approx 0.3, Y_f = 10^{-6} - 10^{-2}, Y_b \approx 1/60, Y_t \approx 0.6$$

- 1 Новая (5-я) короткодействующая сила:
Юкавский потенциал между массивными частицами!
- 2 Унитарность в $WW \rightarrow WW$
- 3 Унитарность в $f\bar{f} \rightarrow WW$

Стандартная модель: успехи и проблемы

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

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

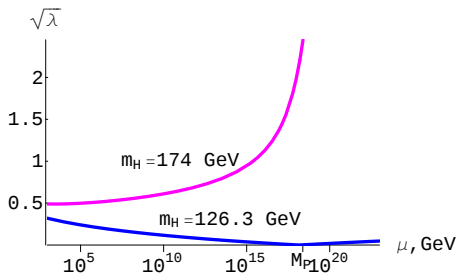
должна объяснять это

объясняется физикой на масштабе

$E \sim 1/\sqrt{G_N} \sim 10^{19} \text{ ГэВ}$? > < = > =

Что интересно объяснить? (Указание на новое...)

- $\Lambda \ll M_{Pl}^4, M_W^4, \Lambda_{QCD}^4$?
- $\Omega_\Lambda \neq 0$?
- $\Omega_B \sim \Omega_{DM} \sim \Omega_\Lambda$?
- $\frac{\delta T_{CMB}^2}{T_{CMB}^2} \sim \Delta_B \sim 10^{-10}$?
- $\theta G_{\mu\nu} G_{\lambda\rho} \epsilon^{\mu\nu\lambda\rho}, \theta < 10^{-9}$?
- $m_e \ll m_\tau \ll m_{top}$?
- ...



- Иерархия масштабов взаимодействий $M_W \ll M_{Pl}$?
- Квадратичные расходимости — стабильность электрослабого вакуума
пропала из официальных докладов
- Прецизионные измерения EW-сектора
- Хинт от Хиггса: величина массы

План

- 1 Мир элементарных частиц и его проблемы
- 2 Лёгкая экзотика: модели и эксперименты
- 3 А были ли сигналы?
- 4 Примеры: Спин-0 и Спин-1
- 5 Перспективы...

ТЕОРИЯ и ЭКСПЕРИМЕНТ

- Спин-0:
DLP (скаляр)
ALP (псевдоскаляр)
- Спин-1:
парафотон
аксиал
- Спин-2:
массивные гравитоны
бигравитация
- Прямые поиски:
5-я сила
редкие распады $1 \rightarrow 2$
проникновение через защиту
- Астрофизика:
охлаждение звёзд
затухание сигнала
распространение без потерь
- Космология:
первичный нуклеосинтез,
реликтовое излучение
образование структур
тёмные материя и энергия

ЧАСТИЦЫ

и

МОДЕЛИ

- Спин-0:
DLP (скаляр)
ALP
(псевдоскаляр)
- Спин-1:
парафотон
аксиал
- Спин-2:
массивные
гравитоны
бигравитация
- Суперсимметрия: (псевдо)скалярное гюлдстоينو O'R
(псевдо)векторное гюлдстоينو FI
- Сильная CP-проблема: PQ-аксион
- Модификация гравитации: массивный гравитон (LIV?)
второй гравитон (LIV)
новые скаляры и векторы
- Зеркальный мир: парафотоны
- Голдстоуны: фамилон, майорон, ...
- Дополнительные измерения: радион
KK-гравитоны
- "Теории струн": дилатон
- Ускоренное расширение: квинтэссенция
- Звёзды, нейтрино, ... хамелеон
- СМЕСЬ

ТЕОРИЯ: общие замечания о лёгких бозонах

Массы

- безмассовые
Голдстоуны?
- (очень) лёгкие
 - ▶ свободные
(иногда закрыты!
космология...)
 - ▶ взаимодействуют со
СМ
Почему лёгкие?
псевдоголдстоуны?
- изменяющаяся масса

Взаимодействия

- Могут быть слабыми
(псевдо)голдстоуны

$$g X \partial_\mu J^\mu, \quad g \propto \frac{1}{\Lambda},$$

- Могут быть очень слабыми
(с)голдстино

$$g \propto \frac{1}{\Lambda^2} \sim \frac{m}{\Lambda} \frac{1}{\Lambda},$$

- Только в веществе:
хамелеон $g = g(n_{\text{Matter}})$

ЭКСПЕРИМЕНТ: общие замечания о лёгких бозонах

- Прямые поиски

Рождение $\propto g^2$,

Распад вблизи рождения $\propto g^2 \times g^2$

Распад далеко $\propto g^2 \times e^{-l/l_X} \times g^2$

Распад $\propto g^2$

большой фоновый поток

невидимая мода?

- Астрофизика

Единичные или регулярные наблюдения

Должны рождаться и улетать

$$\dots < \sigma < \dots \quad \Rightarrow \quad \dots < \Lambda < \dots$$

- Космология

Как появляются во Вселенной?

Работает ли теория возмущений?

План

- 1 Мир элементарных частиц и его проблемы
- 2 Лёгкая экзотика: модели и эксперименты
- 3 А были ли сигналы?
- 4 Примеры: Спин-0 и Спин-1
- 5 Перспективы...

А были ли сигналы?

- Прямые измерения:

- ▶ PVLAS
- ▶ HyperCP
- ▶ DAMA, CoGent?
- ▶ ...

- Астрофизика:

- ▶ скоррелированность поляризации далёких квазаров?
- ▶ ускоренное охлаждение белых карликов?
- ▶ прозрачность Вселенной для ТэВных фотонов?
- ▶ ...

- Космология:

- ▶ темп расширения Вселенной в эпоху BBN
- ▶ интервал времени между “равенством” и рекомбинацией
- ▶ карликовые галактики, устройство галактических центров, ...
- ▶ ...

План

- 1 Мир элементарных частиц и его проблемы
- 2 Лёгкая экзотика: модели и эксперименты
- 3 А были ли сигналы?
- 4 Примеры: Спин-0 и Спин-1
- 5 Перспективы...

Любимый пример: аксион

- Теория и природа:

$$\Delta \mathcal{L} \propto \theta G_{\mu\nu} G_{\lambda\rho} \varepsilon^{\mu\nu\lambda\rho}$$

$$\theta < 10^{-9}$$

- не антропный параметр!

-

$$\theta \rightarrow \theta + a(x)/f_a$$

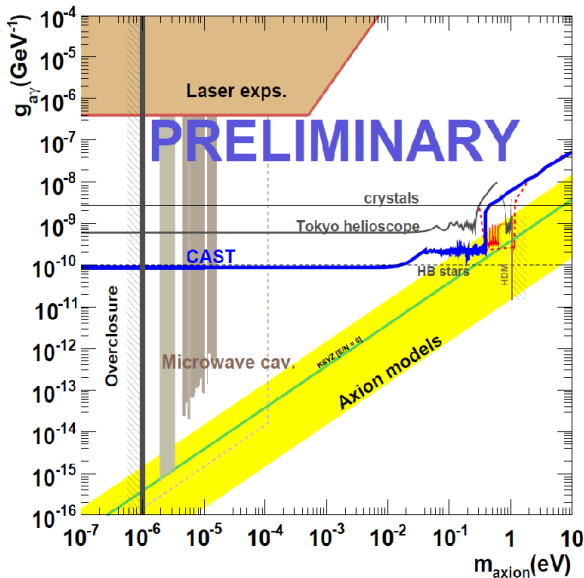
$$m_{\text{axion}} = f_\pi m_\pi / f_a$$

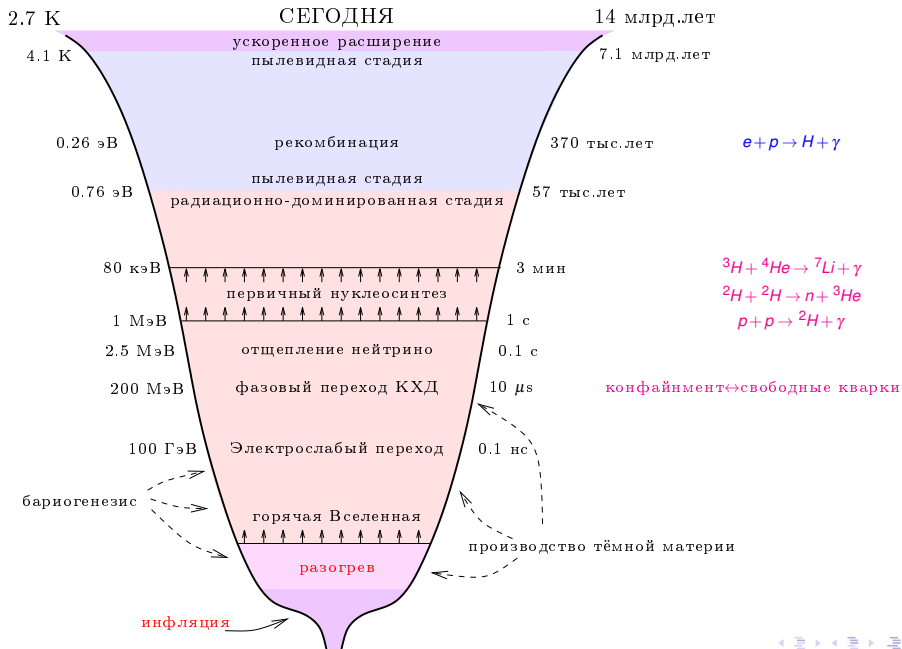
- Сигнал: PVLAS

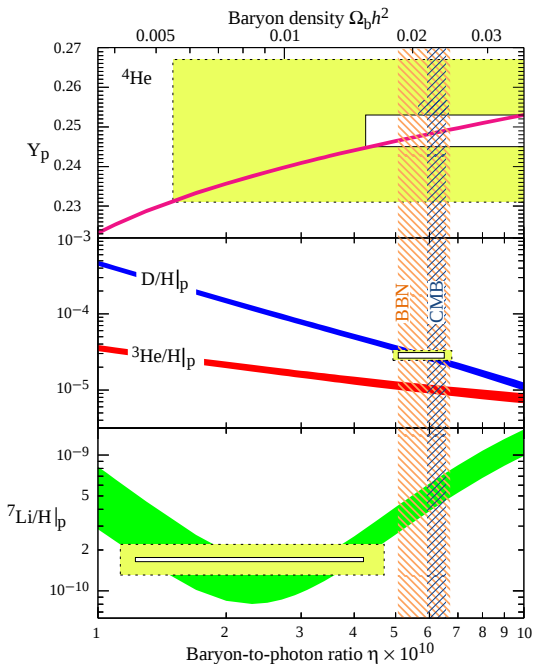
- Интерес: тёмная материя

$$\frac{\Omega_{\text{axion}}}{\Omega_{DM}} = \bar{\theta}_i^2 \cdot \left(\frac{4 \cdot 10^{-6} \text{ eV}}{m_{\text{axion}}} \right)^{1.2}$$

Космология...



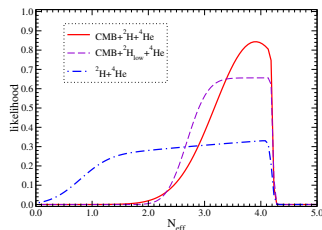




$$Y_p = 0.2581 \pm 0.025,$$

$$D/H|_p = (2.87 \pm 0.21) \times 10^{-5}$$

1103.1261



аналогичные ответы у других

1001.4440, 1001.5218

$$N_\nu < 4.2 @ 95\%CL$$

$N_\nu < 4.3$ если нейтрон живёт меньше...

1 эВ стерильное нейтрино: LSND, MiniBooNE, реакторные эксп.

Зеркальный мир: Р-чётность

Абелев портал

$$\Delta \mathcal{L} = -\frac{\varepsilon}{2} F^{\mu\nu} F'_{\mu\nu}$$

Космология: генерация
зеркальной материи в ранней
Вселенной

со Стандартным BBN, CMB,
формированием структур:

$$\varepsilon < 4 \times 10^{-10}$$

с аномальными (R. Foot)

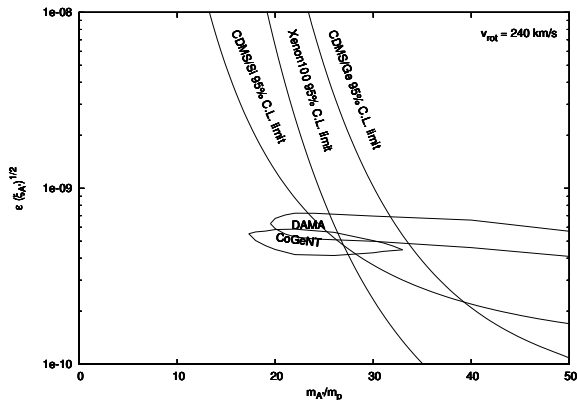
$$\varepsilon \lesssim 10^{-8}$$

Ops-Ops' осцилляции:

(S.Gninenko, P.Cirelli)

например в рамках AEgIS

$$\varepsilon_{\min} = 10^{-9}$$



масса зеркального ядра m'_A

1106.2688

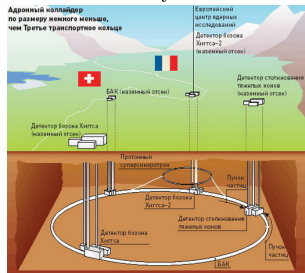
доля зеркальной материи в них $\xi_{A'}$

План

- 1 Мир элементарных частиц и его проблемы
- 2 Лёгкая экзотика: модели и эксперименты
- 3 А были ли сигналы?
- 4 Примеры: Спин-0 и Спин-1
- 5 Перспективы...

Поиск экзотики: часто ничего не уточняем...

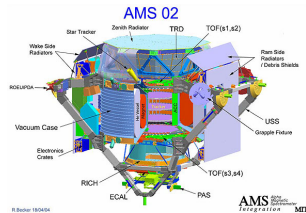
Мы только запустили ЛНС...



Belle II:

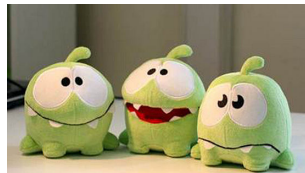
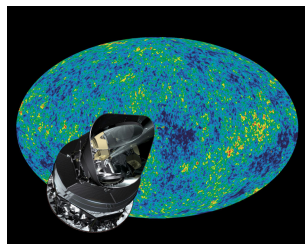


Сигнал от аннигиляции DM:

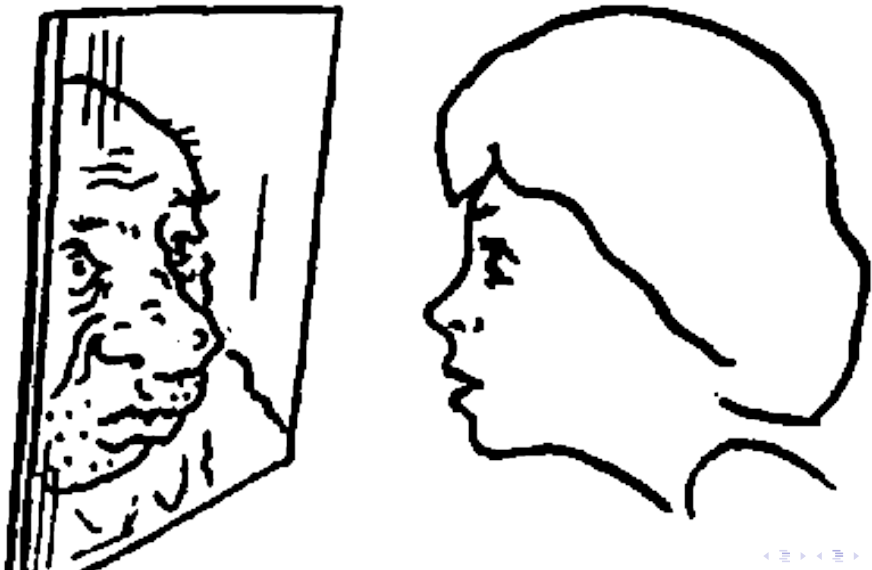


- Не все фоновые каналы измерены
- Множественные столкновения в пучке

Super B factory @ Cabibbo Lab:



Результаты поиска такой физики непредсказуемы



Backup slides

Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)

Массивные слабо взаимодействующие частицы

Предположения:

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

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

Больцман!

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

Тогда:

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

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

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

- аннигиляция завершается при температуре T_f , когда

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

Массивные слабо взаимодействующие частицы $\rightarrow$ БАК

после заделки:

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

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

естественно “лёгкая” для БАК

сечение не больше геометрического —

$$\sigma_0 \lesssim \frac{h^2}{M_X^2 c^2} \longrightarrow M_X \lesssim 100 \text{ ТэВ } c^2$$

Найти “естественную” тёмную материю на БАК весьма вероятно

Свойства тёмной материи

Если новые частицы (X):

- 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

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

для бозонов

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

для фермионов

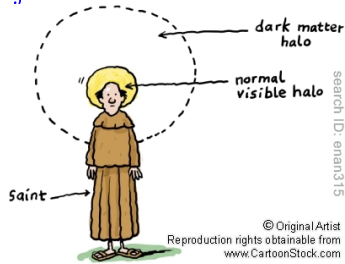
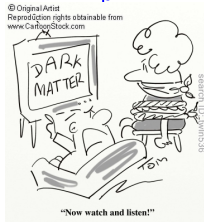
$$M_X \gtrsim 750 \text{ эВ}/c^2$$

принцип Паули: 1 состояние $\leq$ 1 частица

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

Кандидаты в частицы тёмной материи

- WIMPs (нейтралино, ...) Натуральное, но почему тяжёлое???
- стерильные нейтрино Увы: Не seesaw !!!
- аксион
- гравитино, аксино Весьма сильно ограничены
- Тяжёлые реликты Если нестабильны, то UNECRs ???
- Зеркальные барионы В основном в тёмных звёздах
- (Топологические) дефекты
- Massive Astrophysical Compact Halo Objects
- Первичные чёрные дыры (остатки)



Тёмная материя: Прямые поиски

- WIMPs (нейтралино, ...) энергия отдачи, (LHC, Baksan, PAMELA, ...)
- стерильные нейтрино линия: $\nu_s \rightarrow \nu_a + \gamma$, (XMM, INTEGRAL, ...)
- лёгкое скалярное поле
- аксион конвертация $a + \mathbf{B} \rightarrow \gamma$
- гравитино, аксино потеря энергии & LHC, ...
- Тяжёлые реликты если нестабильны: космические лучи
- Зеркальные барионы Ops-Ops', n-n' осцилляции
- (Топологические) дефекты лензирование РИ
- Massive Astrophysical Compact Heavy Objects микролинзирование
- Первичные чёрные дыры (остатки?) космические лучи

Так что мы увидим на LHC?

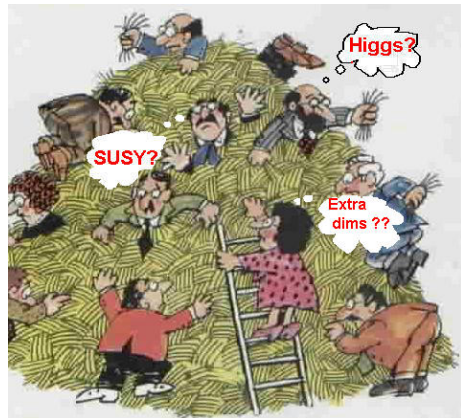
Указывают на LHC

(конечно же в СМ: бозон Хиггса)

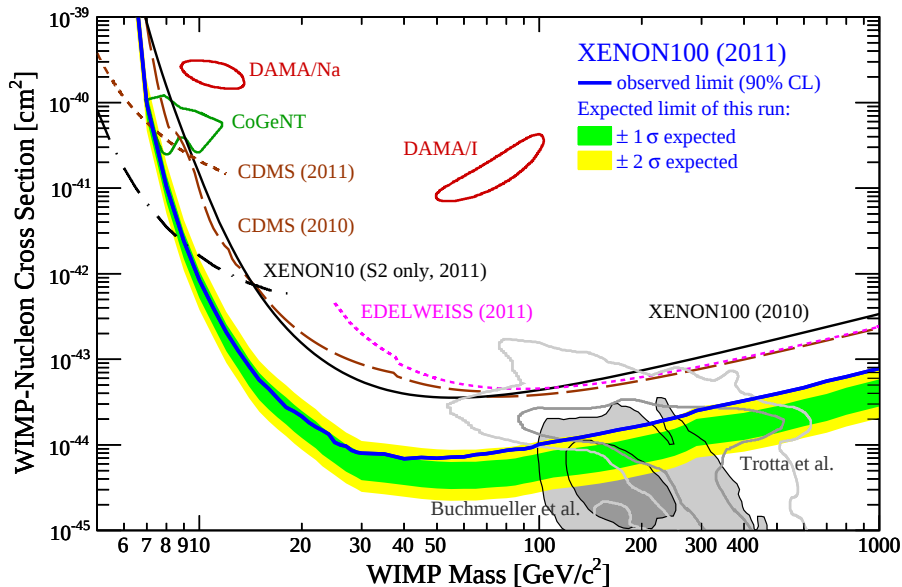
- явления: WIMPS
- теория: проблема стабильности EW-масштаба относительно квантовых поправок

нет
FCNC,
распада протона,
и т.п.

Сразу “много”
или
совсем мало новой физики



Результаты прямых поисков WIMPs



Neutron decoupling



typical energy scales

$$T \gtrsim \Delta m = 1.3 \text{ MeV}, \quad T \gtrsim m_e = 0.5 \text{ MeV}$$

neutron interaction rate

$$\tau_{n \leftrightarrow p} = \frac{1}{\Gamma_{n \leftrightarrow p}} = \frac{1}{C_n G_F^2 T^5}$$

neutron decoupling

$$\Gamma_{n \leftrightarrow p}(T) \sim H(T) = T^2 / M_{Pl}^*$$

$$T_n = \frac{1}{(C_n M_{Pl}^* G_F^2)^{1/3}} \propto g_*^{1/6}$$

$$g_* = 2 + \frac{7}{8} \cdot 4 + \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot N_\nu$$

$$t = \frac{1}{2H(T_n)} = \frac{M_{Pl}^*}{2T_n^2} \simeq 1 \text{ s}$$

$$T_n \approx 0.8 \text{ MeV}$$

Neutron density after decoupling

$$n_n = g_n \left(\frac{m_n T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{\frac{\mu_n - m_n}{T}}$$

$$\mu_n + \mu_\nu = \mu_p + \mu_e$$

$$\frac{n_n}{n_p} = e^{-\frac{m_n - m_p}{T}} e^{\frac{\mu_n - \mu_p}{T}}$$

for relativistic e^+ and e^-

$$n_{e^-} - n_{e^+} \sim \mu_e T^2 \longrightarrow \frac{\mu_e}{T} \sim \frac{n_{e^-} - n_{e^+}}{T^3} = \frac{n_p}{T^3} \sim \eta_B \sim 10^{-9}$$

$$\frac{n_n}{n_p} = e^{-\frac{m_n - m_p}{T_n}} \approx \frac{1}{5}$$

Helium abundance (NO chemical equilibrium)

Neutrons remain mostly in helium

$$n_{\text{He}}(T_{\text{NS}}) = \frac{1}{2} n_n(T_{\text{NS}}),$$

neutron-to-proton ratio

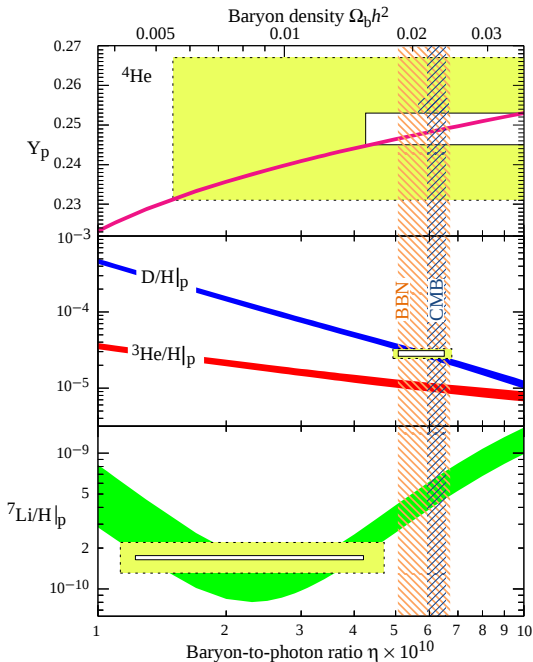
$$\tau_n \approx 886 \text{ s}$$

$$\frac{n_n(T_{\text{NS}})}{n_p(T_{\text{NS}})} \approx e^{-\frac{m_n - m_p}{T_n}} \cdot e^{-\frac{t_{\text{NS}}}{\tau_n}} \approx \frac{1}{5} \cdot e^{-\frac{t_{\text{NS}}}{\tau_n}} \approx \frac{1}{7},$$

$$Y_p \equiv \frac{m_{\text{He}} \cdot n_{\text{He}}(T_{\text{NS}})}{m_p(n_p(T_{\text{NS}}) + n_n(T_{\text{NS}}))} = \frac{2}{\frac{n_p(T_{\text{NS}})}{n_n(T_{\text{NS}})} + 1} \approx 25\%.$$

relic helium abundance grows with T_n (with N_ν) and τ_n

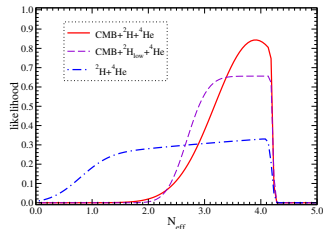
Recent estimates: $Y_p \nearrow$ and $\tau_n \searrow$!!! Hence $T_n \nearrow$ and $N_\nu \nearrow$



$$Y_p = 0.2581 \pm 0.025 ,$$

$$D/H|_p = (2.87 \pm 0.21) \times 10^{-5}$$

1103.1261



similar results from other recent studies

1001.4440, 1001.5218

$$N_\nu < 4.2 \text{ @ } 95\% \text{CL}$$

$N_\nu < 4.3$ with shorter neutron's life...

План

- Наиболее естественный кандидат

6 CMB and LSS

matter-radiation (RD/MD) transition

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi}{3} G \rho_c \left[\Omega_M \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 + \Omega_{rad} \left(\frac{a_0}{a}\right)^4 \right]$$

RD: $a(t) \propto \sqrt{t}$ smooth transition MD: $a(t) \propto t^{2/3}$

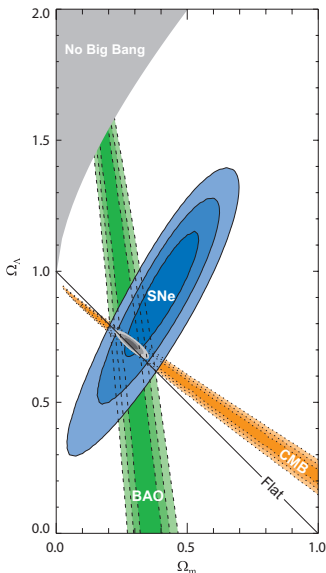
$$z_{eq} + 1 = \frac{a_0}{a_{eq}} = 0.6 \frac{\Omega_M}{\Omega_{rad}} \approx 3 \times 10^3, \quad T_{eq} = T_0(1 + z_{eq}) \approx 0.7 \text{ eV}$$

0.3-1 eV neutrinos are still relativistic!

More accurately: e^+e^- heat photons $T_\nu = \left(\frac{4}{11}\right)^{1/3} T_\gamma$

$$\rho_\nu = N_\nu \cdot 2 \cdot \frac{7}{8} \frac{\pi^2}{30} T_\nu^4, \quad \rho_{rad} = \rho_\gamma + \rho_\nu = \left[2 + N_\nu \frac{7}{4} \left(\frac{4}{11}\right)^{4/3} \right] \frac{\pi^2}{30} T^4$$

Standard Λ CDM



$$\rho_{\text{total}}(t_0) \equiv \rho_c \approx 0.53 \times 10^{-5} \frac{\text{GeV c}^2}{\text{cm}^3}$$

CMB:

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

baryons:

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

neutrino:

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

dark matter:

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

dark energy:

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

It seems we should fix

$$\Omega_M = \Omega_{DM} + \Omega_B + \Omega_s,$$

since today 1 eV sterile neutrinos are nonrelativistic!

Even lower Ω_{DM} , even lower T_{eq} !

Light sterile neutrinos at recombination and later

With larger N_ν and fixed Ω_M we get later RD/MD transition, hence:

- DM perturbations start to grow
 $\delta\rho_{DM}/\rho_{DM} \propto a$ later
- gravity potential evolution changes later
- oscillations in baryon-photon plasma change

CMB is sensitive to $(T_{eq} - T_{rec})$!

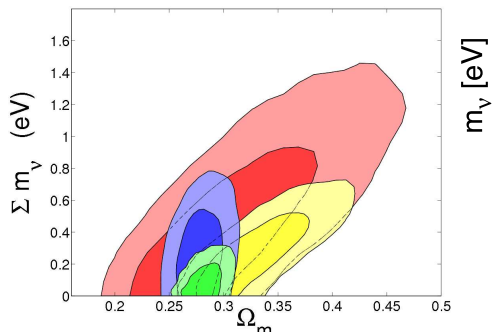
LSS is sensitive to T_{eq}
if initial $\delta\rho_{DM}/\rho_{DM}$ is fixed

Sterile neutrinos become nonrelativistic at $T \sim M_{\nu s}/3 \sim 0.1 - 0.3$ eV ...

- neutrinos start to contribute to $\rho_M \propto 1/a^3$
- neutrino perturbations of large lengths contribute to DM perturbations $\delta\rho_M$
- neutrino perturbations of small scales disappear because of free streaming (Landau damping)
- oscillations in baryon-photon plasma change

LSS is sensitive to both N_ν and $M_{\nu s}$...
Not to forget about active neutrino masses!

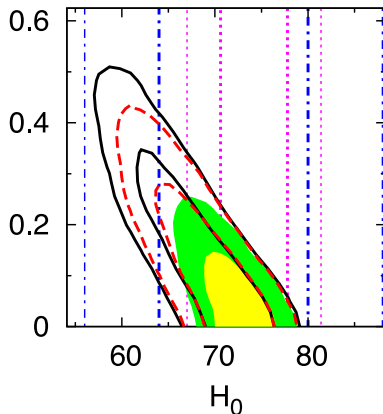
Cosmological limits on active neutrino masses



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