

Поиски Хиггса и новой физики

Дмитрий Горбунов

Институт ядерных исследований РАН, Троицк

Happy 60th Anniversary, Yura!

10 октября 2011

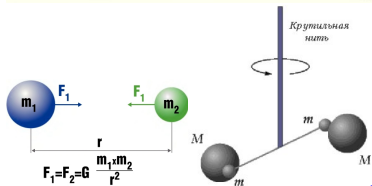
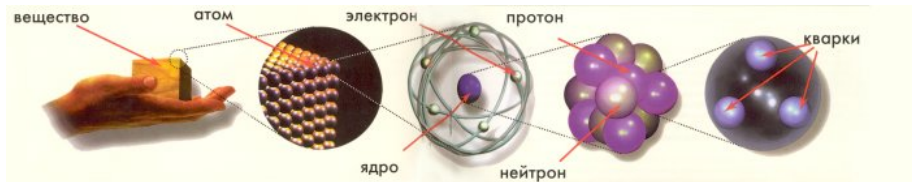
План

- 1 Бозон Хиггса: Новое о Стандартной модели физики частиц
- 2 Физика за пределами Стандартной модели
- 3 Ненейтринная новая физика
- 4 Нейтринная новая физика

План

- 1 Бозон Хиггса: Новое о Стандартной модели физики частиц
- 2 Физика за пределами Стандартной модели
- 3 Ненейтринная новая физика
- 4 Нейтринная новая физика

Элементарные частицы и взаимодействия между ними



дальнодействие

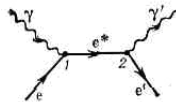


Рис. 2.

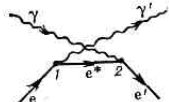
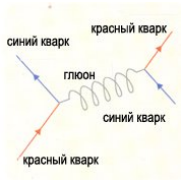


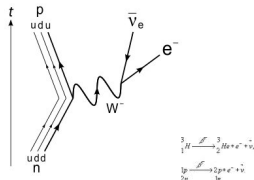
Рис. 3.



10^{-13} см

короткодействие

10^{-16} см



Элементарные частицы и взаимодействия между ними

THE STANDARD MODEL

| | Fermions | | | Bosons | |
|---------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|----------------|
| Quarks | u up | c charm | t top | γ photon | Force carriers |
| | d down | s strange | b bottom | Z Z boson | |
| Leptons | ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino | W W boson | |
| | e electron | μ muon | τ tau | g gluon | |
| | | | | | |

Higgs*
boson

*Yet to be confirmed

Source: AAAS

Что будет интересно?

- Бозон Хиггса!
- Нейтринный сектор!

Что стоит проверять в СМ?

- Унитарность матрицы СКМ:
 - ▶ Отсутствие FCNC
 - ▶ Отсутствие новых CP-фаз
- Параметры EW сектора
- Физика t -кварка
- Физика B_s , B_c , b -барионов
- QCD
- ...

NB:

ВСЁ

Элементарные частицы и взаимодействия между ними

THE STANDARD MODEL

| | Fermions | | | Bosons | |
|---------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|----------------|
| Quarks | u up | c charm | t top | γ photon | Force carriers |
| | d down | s strange | b bottom | Z Z boson | |
| Leptons | ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino | W W boson | |
| | e electron | μ muon | τ tau | g gluon | |

Higgs*
boson

*Yet to be confirmed

Source: AAAS

Что будет интересно?

- Бозон Хиггса!
- Нейтринный сектор!

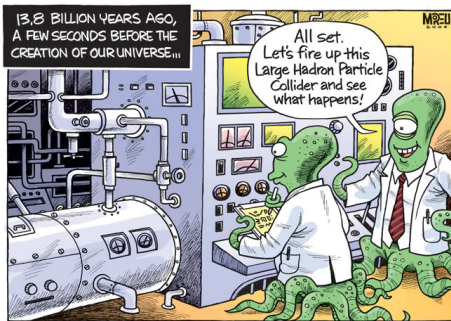
Что стоит проверять в СМ?

- Унитарность матрицы СКМ:
 - ▶ Отсутствие FCNC
 - ▶ Отсутствие новых CP-фаз
- Параметры EW сектора
- Физика t -кварка
- Физика B_s , B_c , b -барионов
- QCD
- ...

NB:

ВСЁ

LHC в главных цифрах



Достигнуто в pp столкновениях

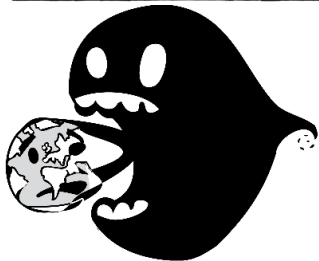
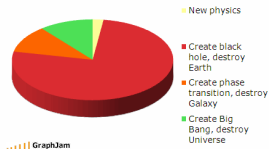
- $E_{pp} = 7$ ТэВ
- $\int \mathcal{L}_{pp} dt \sim 3$ фбарн⁻¹

Планируется достичь

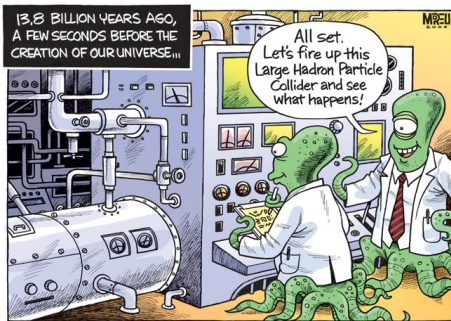
- $E_{pp} = 14$ ТэВ
- $\mathcal{L}_{pp} = 100$ фбарн⁻¹ год⁻¹
- $\sim 10^9$ pp -столкновений в секунду

NB: $E_{pp} \uparrow \Rightarrow \mathcal{L}_{pp} \uparrow$

Popular LHC expectations



LHC в главных цифрах



Достигнуто в pp столкновениях

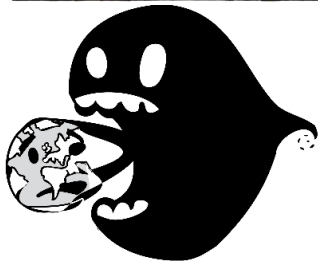
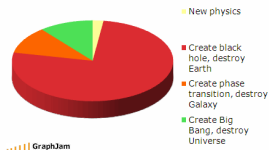
- $E_{pp} = 7$ ТэВ
- $\int \mathcal{L}_{pp} dt \sim 3$ фбарн $^{-1}$

Планируется достичь

- $E_{pp} = 14$ ТэВ
- $\mathcal{L}_{pp} = 100$ фбарн $^{-1}$ год $^{-1}$
- $\sim 10^9$ pp -столкновений в секунду

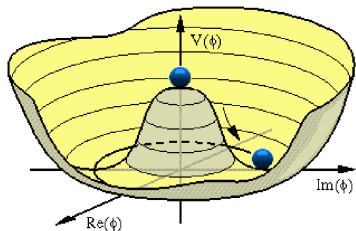
NB: $E_{pp} \nearrow \implies \mathcal{L}_{pp} \nearrow$

Popular LHC expectations



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

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

$$Y_j \bar{L}_j H E_j + h.c. \rightarrow m_j (\bar{e}_{L_j} e_{R_j} + \bar{e}_{R_j} e_{L_j})$$

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

Как проверить роль бозона Хиггса?

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

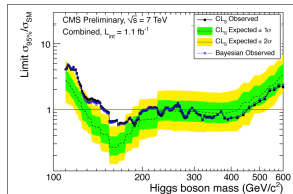
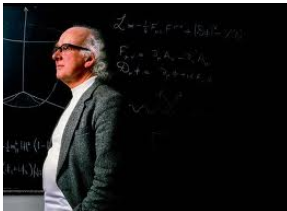
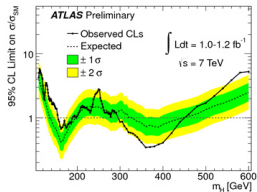
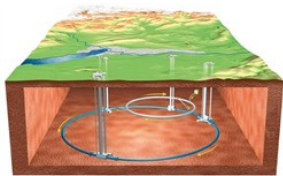
$$\begin{aligned} \mathcal{D}_\mu H^\dagger \mathcal{D}^\mu H &\rightarrow \frac{g^2}{4} h^2 |W_\mu^-|^2 + \frac{g^2 + g'^2}{8} h^2 Z_\mu Z^\mu \\ &+ \frac{g^2}{2} v h |W_\mu^-|^2 + \frac{g^2 + g'^2}{4} v h Z_\mu Z^\mu \\ Y_f H \bar{f} f &\rightarrow Y_f h \bar{f} f / \sqrt{2} = \frac{m_f}{v} h \bar{f}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

Численно:

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

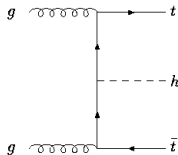
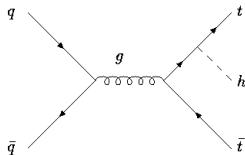
- 1 Новая (5-я) короткодействующая сила:
Юкавский потенциал между массивными частицами!
- 2 Унитарность в $WW \rightarrow WW$
- 3 Унитарность в $f\bar{f} \rightarrow WW$

Мяч ушёл... но Хиггса пока так и нет



Процедура исключения: QCD-поправки, QCD-фон, ...

Перспектива: Проверка механизма получения масс



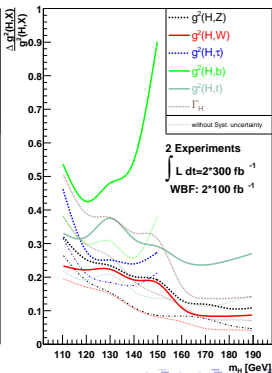
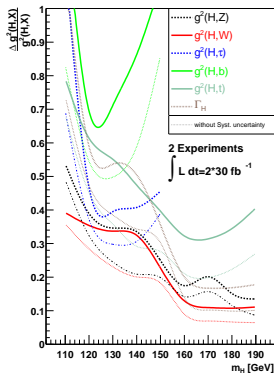
$h\bar{t}t$:

hWW :

$h \rightarrow W^+W^-$

hZZ :

$h \rightarrow ZZ$



Перспектива: Проверка механизма спонтанного нарушения электрослабой симметрии

 $h^3, h^4:$

ТОЛЬКО

 $h^*hh: pp \rightarrow hh + \dots$

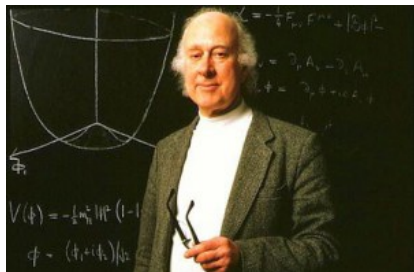
$$-1.1 < \Delta\lambda_{hhh} < 1.6$$

LHC (14 TeV), $\mathcal{L}_{pp} = 600 \text{ фб}^{-1}$

$$-0.62 < \Delta\lambda_{hhh} < 0.74$$

SLHC, $\mathcal{L}_{pp} = 6000 \text{ фб}^{-1}$

$$\Delta\lambda_{hhh} \equiv \lambda/\lambda_{SM} - 1$$



Могут ли Хиггса не найти???

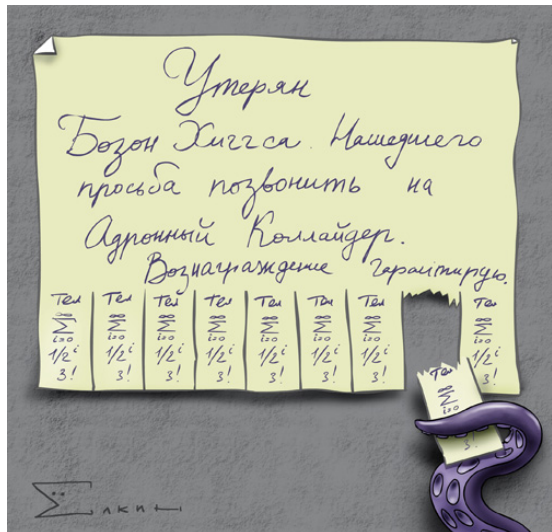
ДА: На LHC и вне СМ!

- Формальное определение 95%-интервала
- Формальное определение теоретических ошибок $\mu_R, \mu_F = m_h/2 - 2m_h$
- Ряд QCD-поправок не сходится...
- Некоторые измерения ($t\bar{t}$, $W + b$ jets, W , etc) систематически расходятся с предсказаниями

Варианты с новой физикой

- Многохиггсовский сектор
- Распад Хиггса в невидимую моду

Проверка Унитарности!



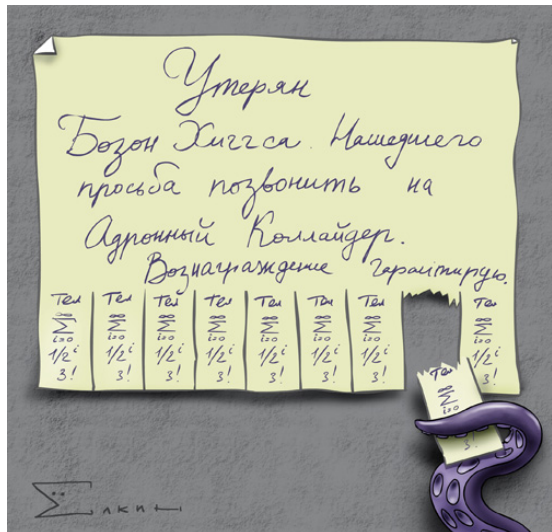
Могут ли Хиггса не найти??? ДА: На LHC и вне СМ!

- Формальное определение 95%-интервала
- Формальное определение теоретических ошибок $\mu_R, \mu_F = m_h/2 - 2m_h$
- Ряд QCD-поправок не сходится...
- Некоторые измерения ($t\bar{t}$, $W + b$ jets, W , etc) систематически расходятся с предсказаниями

Варианты с новой физикой

- Многохиггсовский сектор
- Распад Хиггса в невидимую моду

Проверка Унитарности!



План

- 1 Бозон Хиггса: Новое о Стандартной модели физики частиц
- 2 Физика за пределами Стандартной модели
- 3 Ненейтринная новая физика
- 4 Нейтринная новая физика

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

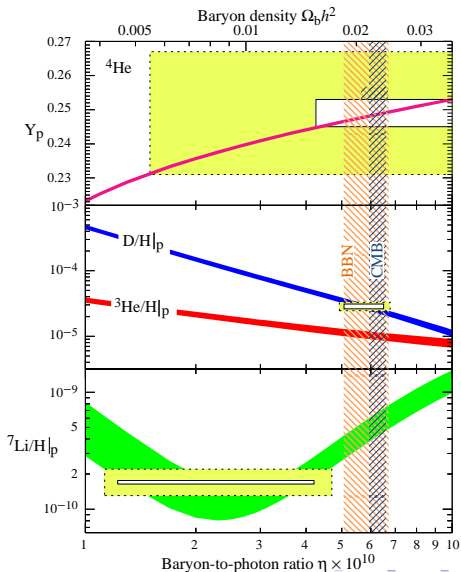
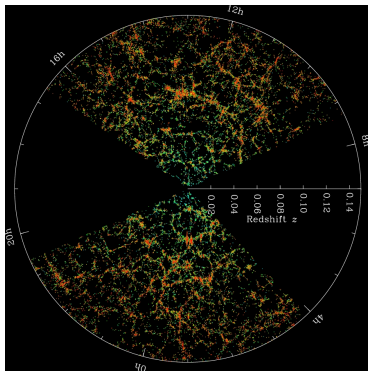
объясняется физикой на масштабе

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

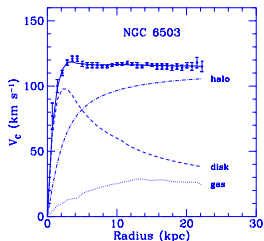
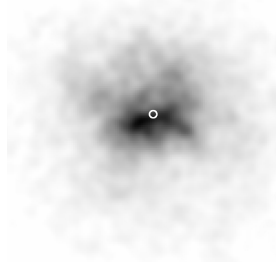
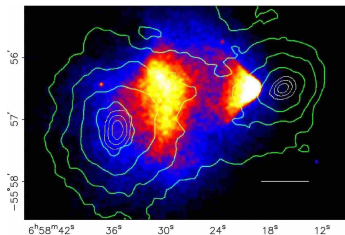
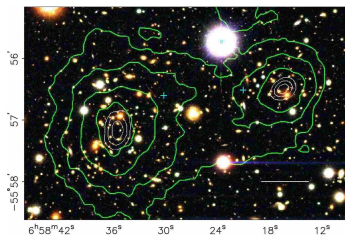
Отсутствие антивещества

Условия Сахарова успешного бариогенезиса

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

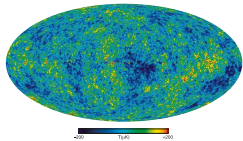
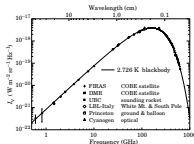
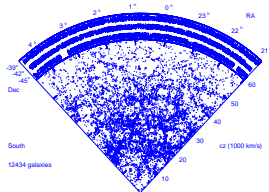
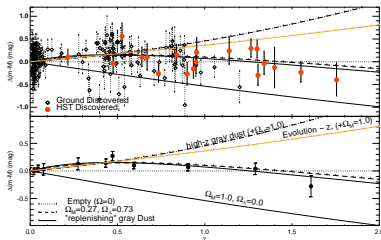
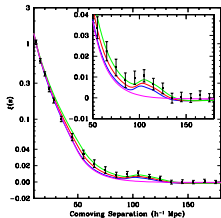
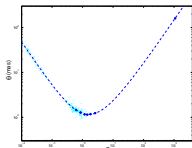


Тёмная материя галактик и скоплений: астрофизика

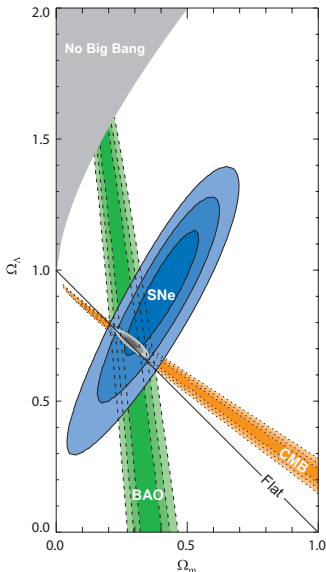


Тёмная материя во Вселенной:

КОСМОЛОГИЯ



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:

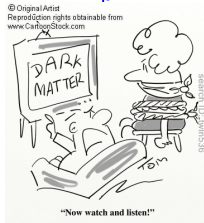
$$\Omega_{DM} \equiv \frac{\rho_{DM}}{\rho_c} = 0.23$$

Вклад тёмной энергии:

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

Кандидаты в частицы тёмной материи

- WIMPs (нейтралино, ...) Натуральное, но почему тяжёлое???
- стерильные нейтрино Увы: Не seesaw !!!
- аксион
- гравитино, аксино Весьма сильно ограничены
- Тяжёлые реликты Если нестабильны, то UHECRs ???
- 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 $\mathbf{a} + \mathbf{B} \rightarrow \gamma$
- 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

План

- 1 Бозон Хиггса: Новое о Стандартной модели физики частиц
- 2 Физика за пределами Стандартной модели
- 3 Ненейтринная новая физика**
- 4 Нейтринная новая физика

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



Новая физика на LHC

- Суперсимметрия
- Техницвет
- Лептокварки
- Дополнительные поколения
- Дополнительные измерения
- Дополнительные калибровочные или хиггсовские бозоны
- Массивные нейтрино
- Некоммутативность
- ...
- ...

Please LHC!
Pleeeassee!



Особенности различных моделей (I)

Суперсимметрия

- Известны квантовые числа, но не массы и, ..., всего ~ 200 **новых параметров**
- **R-чётность** — **LSP**:
суперпартнёры рождаются парами, $2 \rightarrow 2$, **потеря p_t**
- Сложный хиггсовский сектор:
 $h, H, A, H^\pm, g_h < g_h^{CM}$, но **$m_h < 135$ ГэВ!**
(можно ослабить, добавив скаляр, NMSSM)
- гравитино, сголдстино, аксино, ...
- скварки, глюино: **$M < 2.5$ ТэВ**

+?



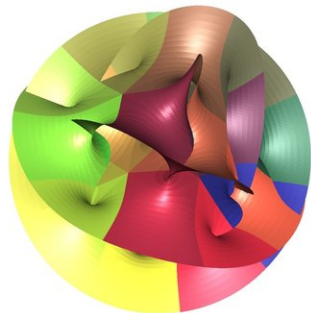
Массивные нейтрино

Дополнительные калибровочные или хиггсовские бозоны

Особенности различных моделей (II)

Дополнительные измерения

- КК-возбуждения гравитона
- радион
- рождение чёрных дыр?
- КК-возбуждения частиц СМ...
- $M_G \gtrsim 2 - 5 \text{ ТэВ}$

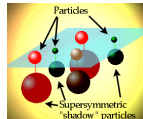
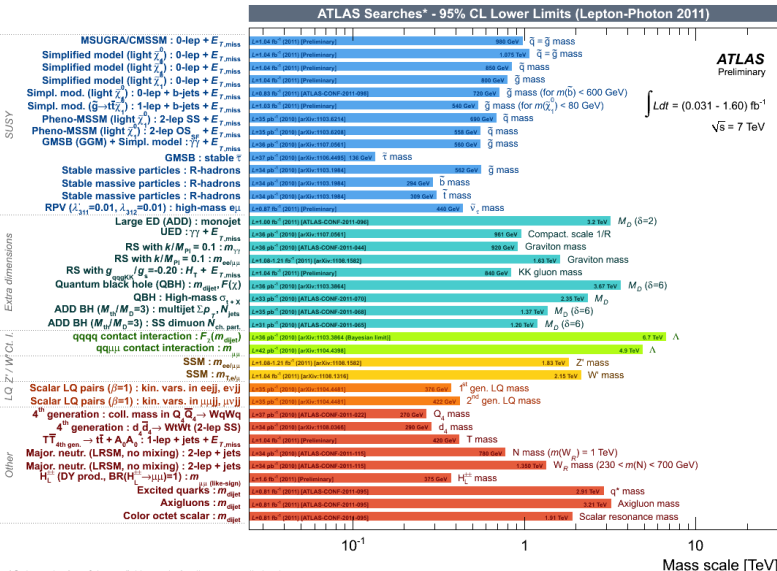


Техницвет: $\Lambda_{qq} \gtrsim 20 \text{ ТэВ}$, $\Lambda_{qI} \gtrsim 40 \text{ ТэВ}$

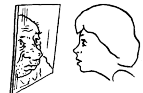
Walking technicolor: можно надеяться обойти эти ограничения

Некоммутативность

Результаты поиска новой физики (ATLAS)



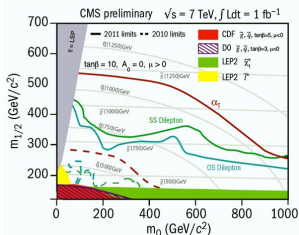
Борисов



*Only a selection of the available results leading to mass limits shown

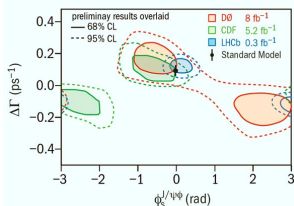
Примеры поиска новой физики (CMS, LHCb, ...)

Поиски SUSY:

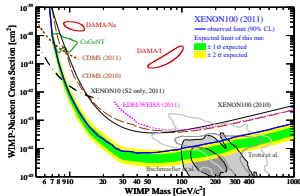


- область для $g-2$
- лёгкий \tilde{t} : EW бариогенезис
- $\tilde{\gamma}, \tilde{Z}, \tilde{\chi}_{1,2}, \tilde{\nu}$: WIMP DM

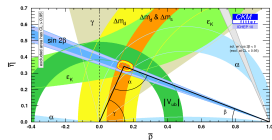
CP в \bar{B}_s-B_s : $B_s \rightarrow J/\psi \phi$



Прямые поиски WIMPов



Редкие процессы



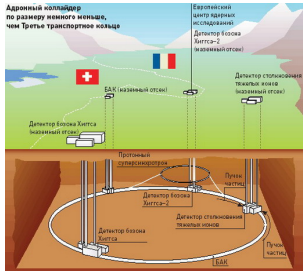
LHCb: @ 95% CL
 $\text{Br}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 1.5 \times 10^{-8}$
 CMS: @ 95% CL
 $\text{Br}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 1.9 \times 10^{-8}$
CM: $= 0.3 \times 10^{-8}$

SuperK: @ 95% CL
 $\tau(n \rightarrow \bar{n}) > 2.44 \times 10^8 \text{ s}$

MEG: @ 95% CL
 $\text{Br}(\mu \rightarrow e \gamma) < 2.4 \times 10^{-12}$

Перспективы поиска новой физики

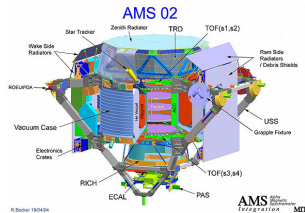
Мы только запустили ЛHC...



Belle II:



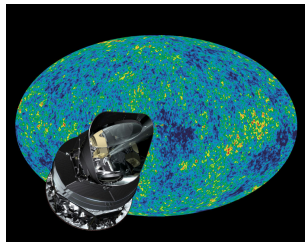
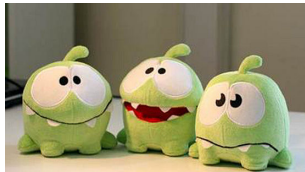
Сигнал от аннигиляции DM:



- Не все фоновые каналы измерены
- Множественные столкновения в пучке

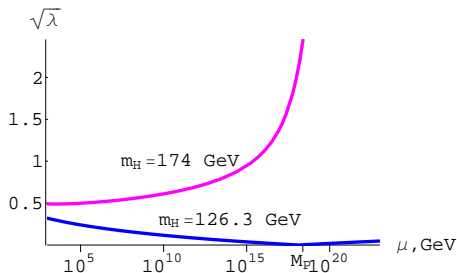
Super B factory @ Cabibbo Lab:

Уточнение космологических параметров: PLANK



Что интересно объяснить?

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



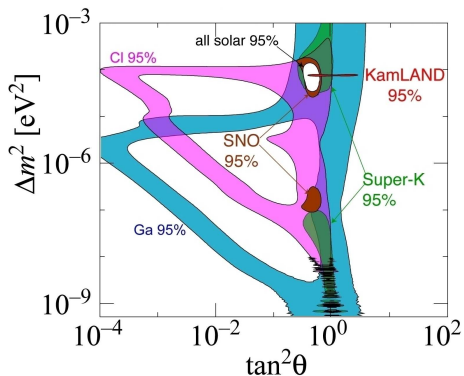
- Иерархия масштабов взаимодействий $M_W \ll M_{Pl}$?
- Квадратичные расходимости — стабильность электрослабого вакуума пропала из официальных докладов
- Прецизионные измерения EW-сектора
- Хинт от Хиггса: величина массы

План

- 1 Бозон Хиггса: Новое о Стандартной модели физики частиц
- 2 Физика за пределами Стандартной модели
- 3 Нейтринная новая физика
- 4 Нейтринная новая физика**

Осцилляции нейтрино: массы и углы смешивания

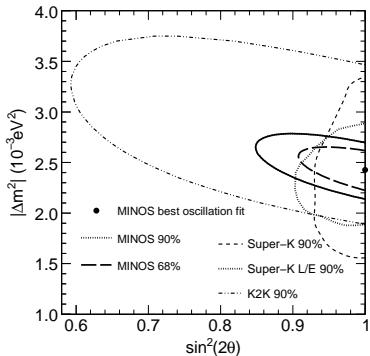
Солнечный 2×2 сектор



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

$m_1 > 0.008$ эВ

Атмосферный 2×2 сектор



arXiv:0806.2237

$m_2 > 0.05$ эВ

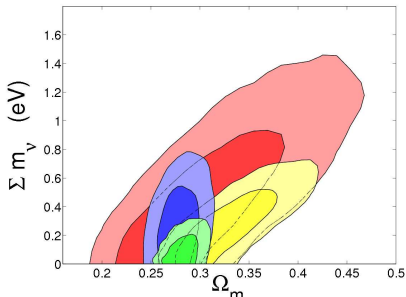
MINOS, T2K, SNO, ..., Глобальный анализ: $\sin^2 2\theta_{13} \lesssim 0.3$

Космология ограничивает сумму масс нейтрино

Вклад нейтрино:

Начало формирования структур
Гравитационные потенциалы в эпоху
рекомбинации

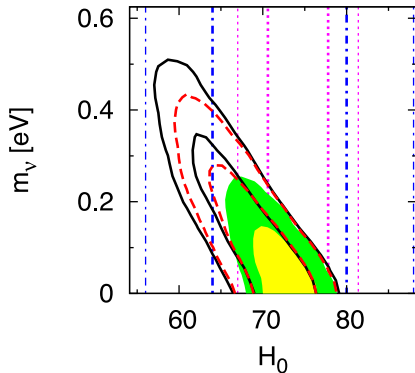
Поздняя эволюция структур
Расширение Вселенной



LRG+BAO+WMAP5+SNe

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

0911.5291



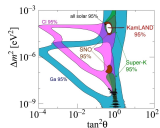
CMB+Hubble измерения

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

0911.0976

Примеры обобщений с “массивными” нейтрино

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



прямое указание на допланковскую новую физику

Перенормируемая теория: стерильные нейтрино

Наиболее общий вид с 3-мя майорановскими нейтрино N_I

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

Новые параметры модели:

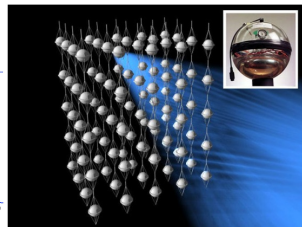
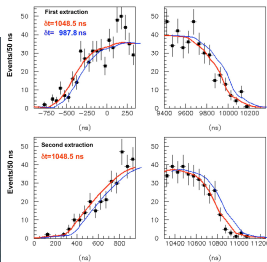
- 3 Майорановских массы M_i
- 15 Юкавских констант
(Дираковская массовая матрица $M^D = f_{I\alpha} \langle H \rangle$ имеет 3 массы,
6 углов смешивания и 6 CP-нарушающих фаз)

Барионная асимметрия через лептогенезис

Неубиваемо

Нейтринные аномалии...

- SN1987a новая астрофизика?
 - LSND 1 эВ стерильные нейтрино ($\nu_s \rightarrow \nu\gamma$?)
 - MiniBooNE 1 эВ стерильные нейтрино ($\nu_s \rightarrow \nu\gamma$?)
 - реакторные 1 эВ стерильные нейтрино
 - космология лёгкое стерильное нейтрино?
- NB: LSND+MiniBooNE не согласуются с космологией !!!
- MINOS лёгкое стерильное нейтрино (нарушение СРТ?)
 - OPERA совсем не КТП !!!



В шестьдесят всё только начинается. . .

