

Физика частиц
за рамками Стандартной модели

Дмитрий Горбунов

gorby@ms2.inr.ac.ru

Институт ядерных исследований РАН, Москва

inbox

Russian Teachers
Programme 2015

План

- 1 Нейтринная новая физика
- 2 Барионная асимметрия и электрослабый вакуум
- 3 Тёмная материя
- 4 Новая физика на LHC ?

Главные вопросы

- Что измерить?
 - параметры хиггсовского сектора уточнить массу t -кварка
 - величины масс нейтрино
 - CP-нарушение в нейтринном секторе
 - гравитационные волны от астрофизических источников уже завтра ?
- Что найти?
 - тёмную материю
 - реликтовые гравитационные волны
- Что понять? Почему такие числа ??
 - как появляются массы нейтрино
 - как появилась барионная асимметрия Вселенной
 - причину иерархии в кварковом секторе
 - $\Omega_B \sim \Omega_{DM} \sim \Omega_\Lambda$?
 - причину ускоренного расширения Вселенной
 - почему энергия вакуума так мала?
 - сильная CP-проблема почему нет электрического диполя у нейтрона?
 - почему мала масса бозона Хиггса несмотря на Квадратичные расходимости ??
 -
 -
 - причины экспериментальных результатов, которые считаются аномальными...

Теории Большого Объединения: $SU(5)$ модель

Мотивация:

поведение калибровочных констант связи
с ростом энергетического масштаба

Масштаб объединения: $10^{15} - 10^{16}$ ГэВ
 $SU(3)_c \times SU(2)_W \times U(1)_Y \rightarrow SU(5)$

прямое обобщение ЭС-перехода в СМ:
 $U(1)_{em} \rightarrow SU(2)_W \times U(1)_Y$

Увеличение точности измерения констант —
суперсимметричный вариант

Нарушены B, L — распад протона
 $\tau_{p \rightarrow K \nu} > 6.7 \times 10^{32}$ лет
“Объединение” b и τ

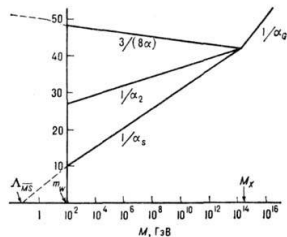
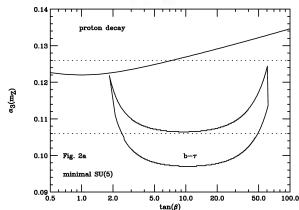


Рис. 1.



C.Carone, H.Muroyama,
Phys.Rev.D53:1658-1664,1996.

План

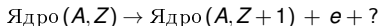
- 1 Нейтринная новая физика
- 2 Барионная асимметрия и электрослабый вакуум
- 3 Тёмная материя
- 4 Новая физика на LHC ?

Роль нейтрино в слабых взаимодействиях



В. Паули (1930)

- Сохраняет энергию (экспериментально спектр позитронов непрерывен!)



- Сохраняет угловой момент (фермионы! спины! Вспоминаем химию... принцип Паули)

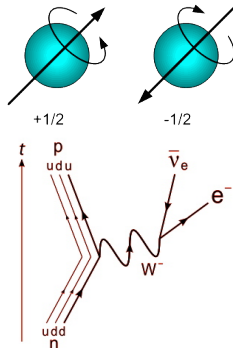
$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

Спины: $\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{2}$

- Сохраняет лептонные числа L_e, L_μ, L_τ

$$L_e(n) = 0 \implies L_e(\bar{\nu}_e) = -L_e(e)$$

$$L_e(\nu_e) = -L_e(\bar{\nu}_e)$$



Свойства нейтрино

- **нейтрино очень лёгкие** (в Стандартной модели — безмассовы!)
- **антинейтрино** $\bar{\nu}_e$ рождаются в β^- -распаде (вместе с **электроном**), $\Delta L_e = 0$

$$\text{в ядре: } n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

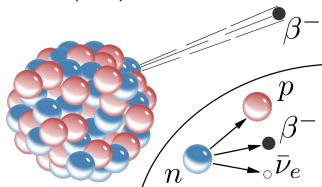
- **нейтрино** ν_e рождаются в β^+ -распаде (вместе с **позитроном**), $\Delta L_e = 0$

$$\text{в ядре: } p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

всё зависит от энергетического баланса

(нужно родить электрон(позитрон) за счёт $m_n - m_p$ и разницы энергий связи):

$$M_{\text{ядра}}(A, Z) = Z m_p + (A - Z) m_n - E_{\text{связи}}(A, Z)$$



Свойства нейтрино

- **нейтрино очень лёгкие** (в Стандартной модели — безмассовы!)
- **антинейтрино** $\bar{\nu}_e$ рождаются в β^- -распаде (вместе с **электроном**), $\Delta L_e = 0$

$$\text{в ядре: } n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

- **нейтрино** ν_e рождаются в β^+ -распаде (вместе с **позитроном**), $\Delta L_e = 0$

$$\text{в ядре: } p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

всё зависит от энергетического баланса

(нужно родить электрон(позитрон) за счёт $m_n - m_p$ и разницы энергий связи):

$$M_{\text{ядра}}(A, Z) = Z m_p + (A - Z) m_n - E_{\text{связи}}(A, Z)$$

- **Важнейшее свойство:**

участвуют только в **слабых взаимодействиях**
 ($W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$, $W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$, $Z \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_e$)

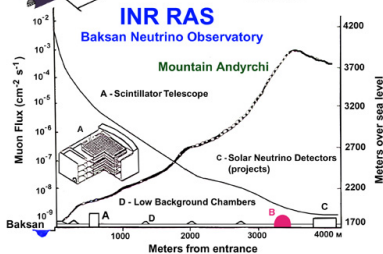
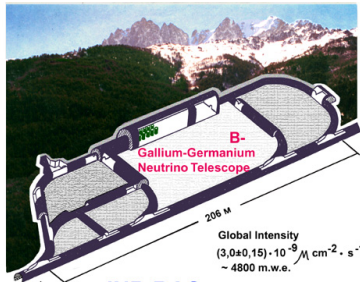
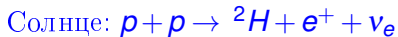
взаимодействуют очень редко!

$\bar{\nu}_e$ из ядерного реактора пролетает в воде без столкновений более 10^{13} км столько свет пролетит за год!!!

1) отовсюду вылетает, 2) нужны большие детекторы



Регистрация солнечных нейтрино: SAGE



Нейтрино от Солнца не хватает!!!

подтверждено

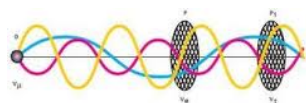
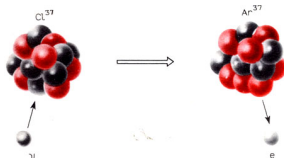


Бруно Понтекорво

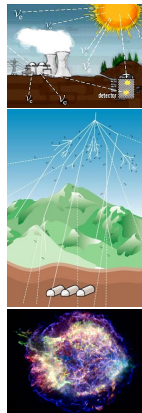
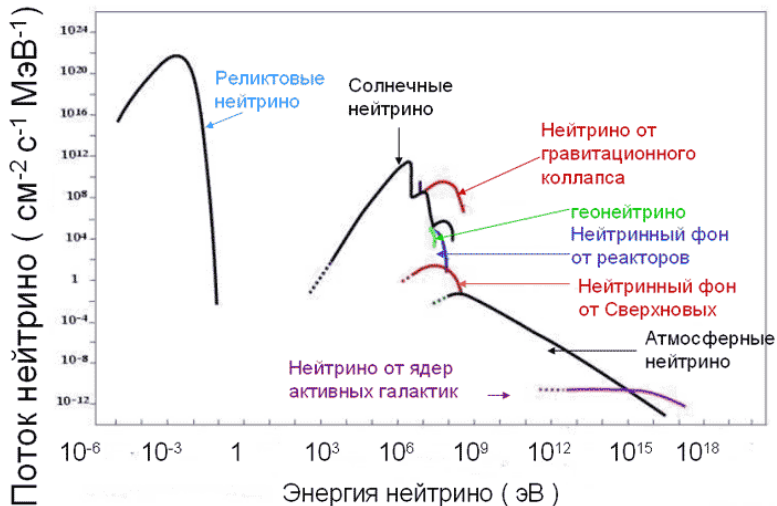
Все нейтрино взаимодействуют одинаково — могут “смешиваться”!

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$$

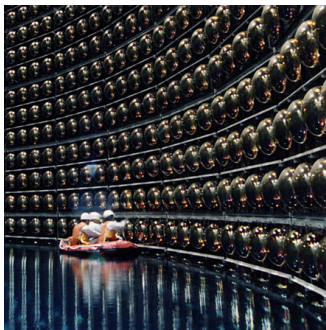
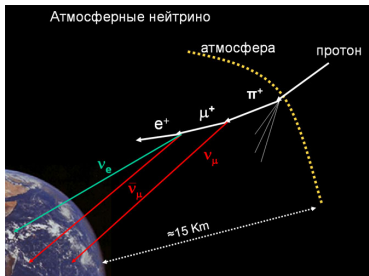
процесс запрещён в СМ
ибо нейтрино безмассовы
Нейтрино массивны!
СМ неполна!



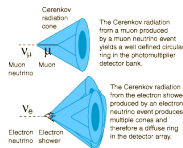
Нейтрино и антинейтрино вокруг нас



Регистрация атмосферных и космических нейтрино

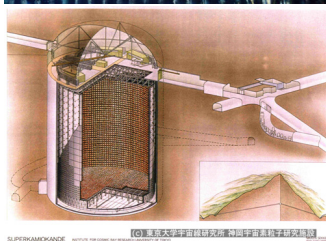
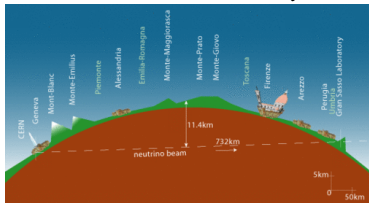


Черенковский свет от e и μ
($v_{\text{частицы}} < c$ в среде)



← SuperK

OPERA: появление ν_τ



Поток $\mu \uparrow < \text{Поток} \mu \downarrow$

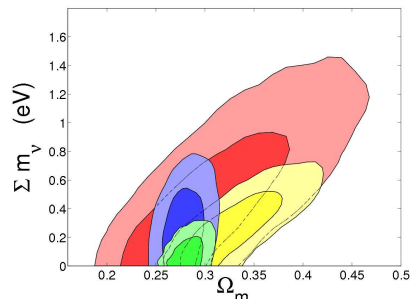
Поток $e \uparrow = \text{Поток} e \downarrow$

Космология ограничивает сумму масс нейтрино

Вклад нейтрино:

Начало формирования структур
Гравитационные потенциалы в эпоху
рекомбинации

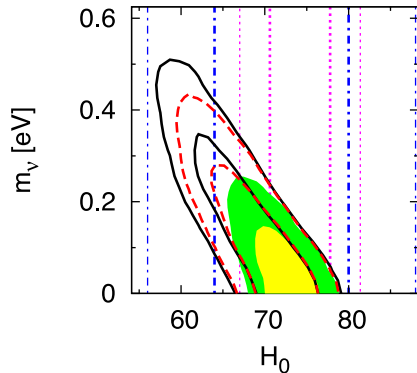
Поздняя эволюция структур
Расширение Вселенной



LRG+BAO+WMAP5+SNe

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

0911.5291



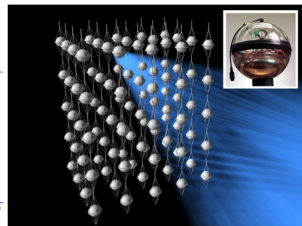
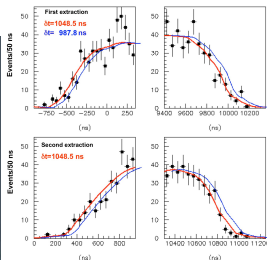
CMB+Hubble измерения

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

0911.0976

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 половинка лёгкого нейтрино?
- NB: LSND+MiniBooNE не согласуются с космологией !!!
- ICESCube астрофизические нейтрино (нестандарт?)
- OPERA точно рассосалось



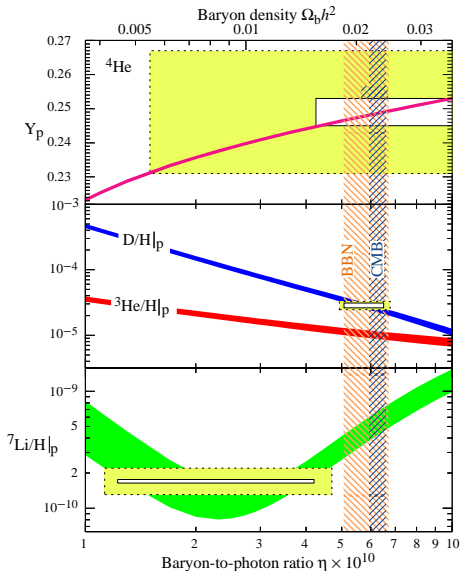
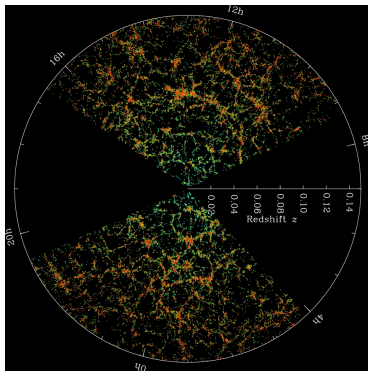
План

- 1 Нейтринная новая физика
- 2 Барионная асимметрия и электрослабый вакуум
- 3 Тёмная материя
- 4 Новая физика на LHC ?

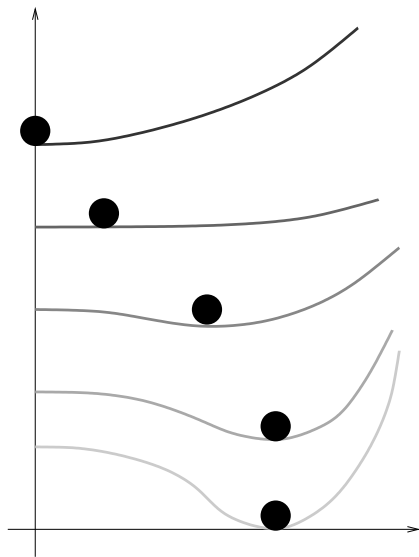
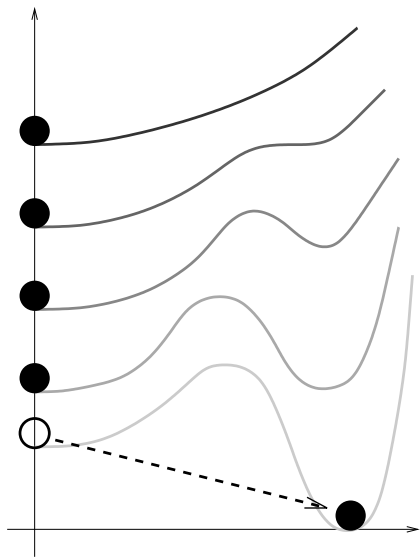
Отсутствие антивещества

Условия Сахарова успешного бариогенезиса

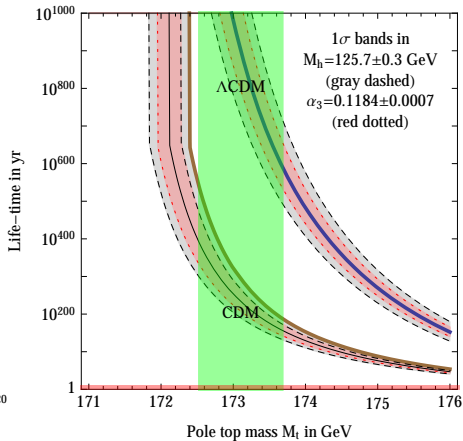
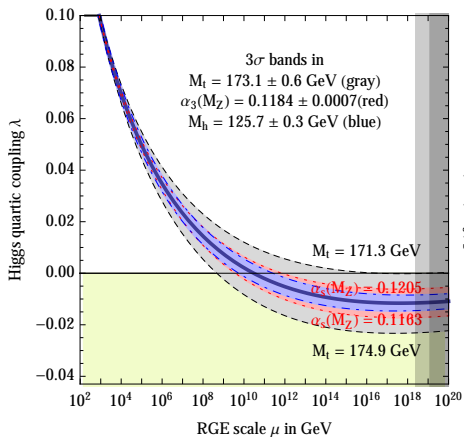
- В (or L)-нарушение
- C- & CP-нарушения
- эти процессы неравновесны



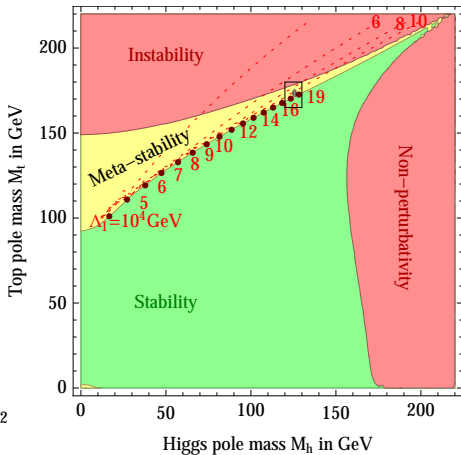
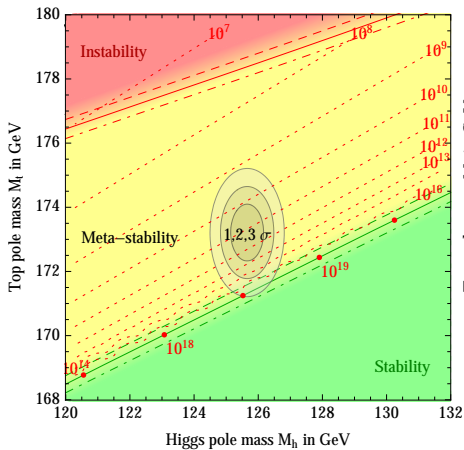
Фазовые переходы I и II рода



Электрослабый вакуум в СМ



Электрослабый вакуум в СМ



План

- 1 Нейтринная новая физика
- 2 Барионная асимметрия и электрослабый вакуум
- 3 Тёмная материя
- 4 Новая физика на LHC ?

Свойства тёмной материи: если это 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**
- 5 **должны как-то появиться в ранней Вселенной !**
а вдруг они взаимодействуют (не только гравитационно) с нашими частицами ?

Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)

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

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

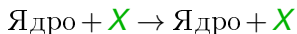
$$\tau_{\text{аннигиляции}}^{-1} \propto n_X$$

- аннигиляция завершается при температуре T_f , когда

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

WIMPs X взаимодействуют с веществом!

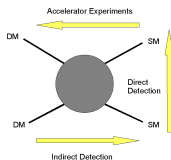
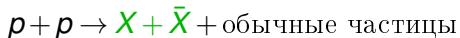
- Поиски в лаборатории процессов с “получением” энергии и импульса



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

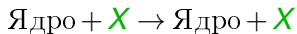


- Поиски на БАК процессов с “потерей” энергии и импульса



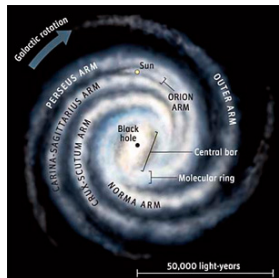
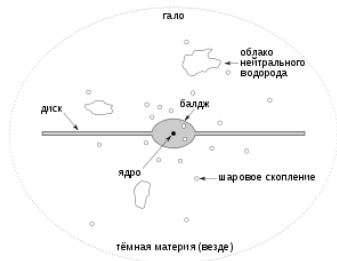
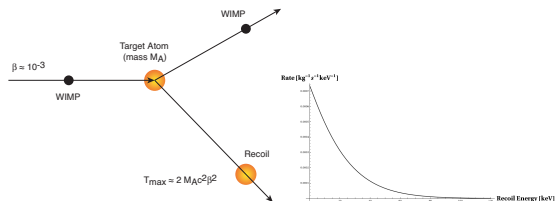
Прямые поиски WIMPs

Поиски в лаборатории процессов с
“получением” энергии и импульса



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

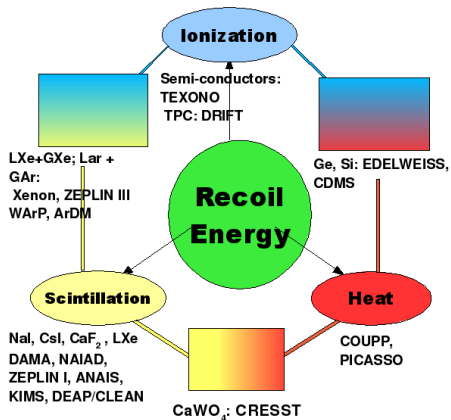
$$\Delta E = 2M_X v_X^2 \frac{M_{\text{Ядро}}/M_X}{(1 + M_{\text{Ядро}}/M_X)^2}$$



Методы регистрации выделенной энергии

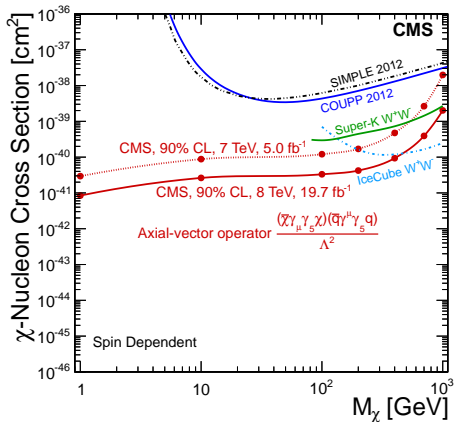
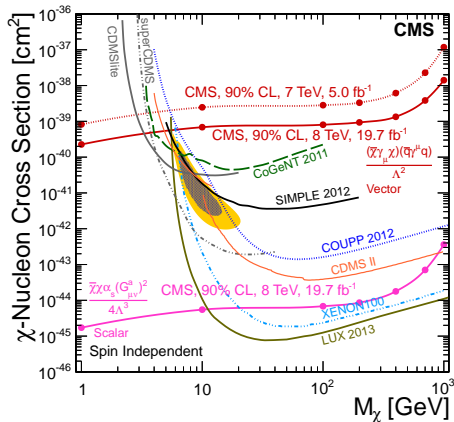
Это всё “трение” !

- 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

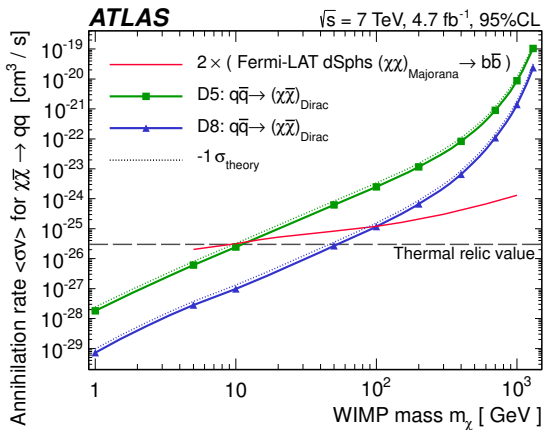


CMS results of searches at @ 8 TeV

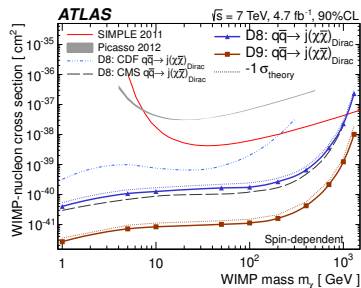
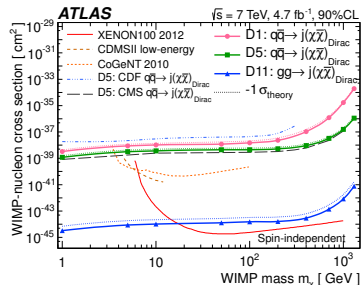
V. Khachatryan et al (2014)



ATLAS results of (in)direct searches @ 7 TeV



1210.4491v1



План

- 1 Нейтринная новая физика
- 2 Барионная асимметрия и электрослабый вакуум
- 3 Тёмная материя
- 4 Новая физика на LHC ?

Так что мы увидим на LHC?

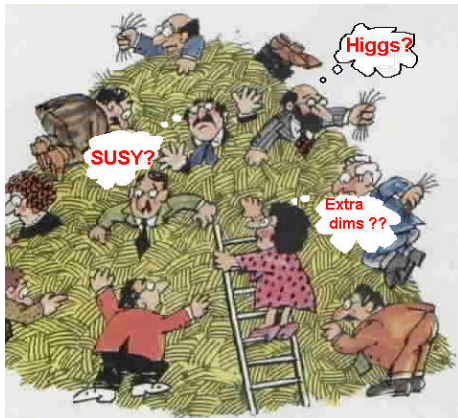
Указывают на LHC

(Хиггса уже нашли !!)

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

нет
FCNC,
распада протона,
и т.п.

Очень “много”
или
совсем мало новой физики



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 $m_h = 126$ ГэВ!
(можно ослабить, добавив скаляр, NMSSM)
- гравитино, стголдстино, аксино, ...
- скварки, глюино: $M < 2.5$ ТэВ

+?



Массивные нейтрино

Дополнительные калибровочные или хиггсовские бозоны

Особенности различных моделей (II)

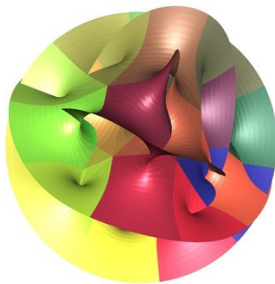
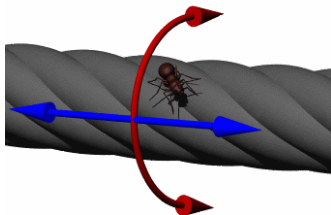
Дополнительные измерения

- КК-возбуждения гравитона
- радион
- пропажа частиц
- 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



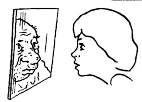
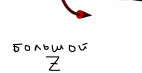
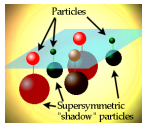
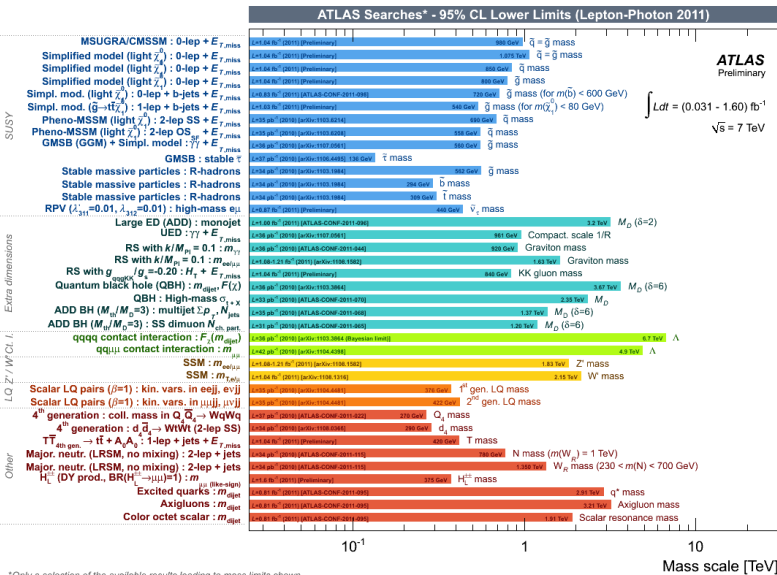
Результаты поиска новой физики (ATLAS)

SUSY

Extra dimensions

LQ, Z' / W' CL L

Other

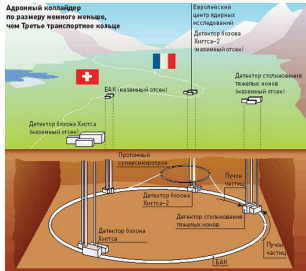


ATLAS Preliminary
 $\int L dt = (0.031 - 1.60) \text{ fb}^{-1}$
 $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$

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

Перспективы поиска новой физики

Поднимаем энергию LHC...



- фоновые каналы измерены
- множественные столкновения в пучке



Дмитрий Горбунов (ИЯИ)

Belle II:

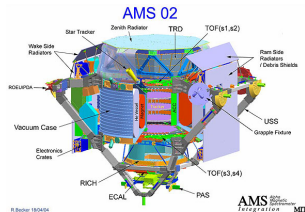


физика нейтрино ?

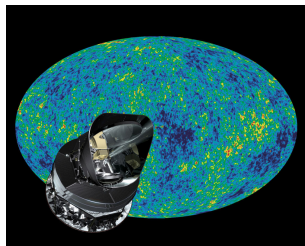


6 ноября 2014

Сигнал от аннигиляции DM:



Уточнение космологических параметров: PLANK



CERN, Женева

Новая физика на LHC

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

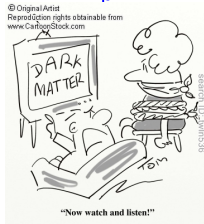
Please LHC!
Pleeeassee!



Backup slides

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 $a + \mathbf{B} \rightarrow \gamma$
- 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