

Физика частиц  
за рамками Стандартной модели

Дмитрий Горбунов

gorby@ms2.inr.ac.ru

Институт ядерных исследований РАН, Москва

inbox

Russian Teachers Programme  
Spring 2015

# План

- 1 Новая физика: мотивация
- 2 Барионная асимметрия
- 3 Нейтринная новая физика
- 4 Тёмная материя
- 5 Ненейтринная новая физика

# План

- 1 Новая физика: мотивация
- 2 Барионная асимметрия
- 3 Нейтринная новая физика
- 4 Тёмная материя
- 5 Нейтринная новая физика

# 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 ( $\Omega$ )
  - ▶ CP-проблема в КХД
  - ▶ Иерархия калибровочных масштабов
  - ▶ Квантовая гравитация
    - ▶ Что происходит на масштабе  $E \sim 1/\sqrt{G_N} \sim 10^{19}$  ГэВ ?

физика частиц

должна объяснять это

## Квантовые поправки...

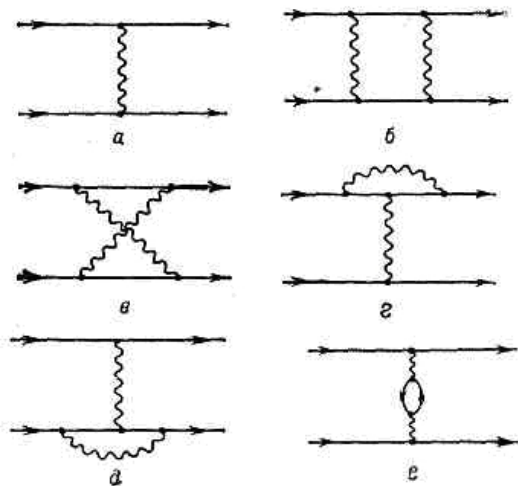


Рис. 2.

$$\alpha + \alpha^2 + \dots \rightarrow \alpha(Q^2 = 1/r^2)$$

“эффективный заряд” зависит от масштаба

# 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  $\tau$

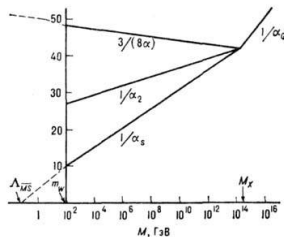
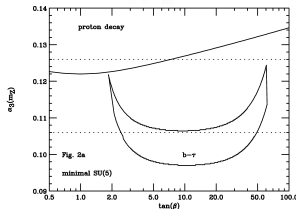


Рис. 1.



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

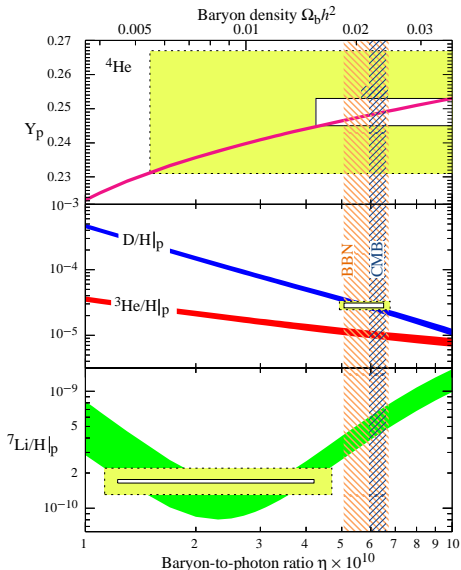
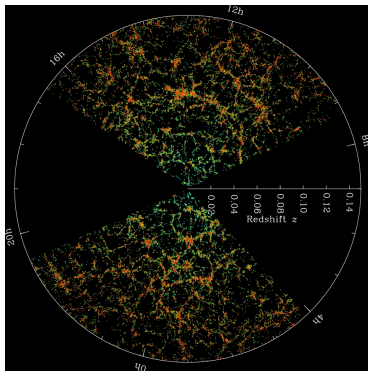
# План

- 1 Новая физика: мотивация
- 2 Барионная асимметрия**
- 3 Нейтринная новая физика
- 4 Тёмная материя
- 5 Ненейтринная новая физика

# Отсутствие антивещества (уже при $t \sim 1$ с)

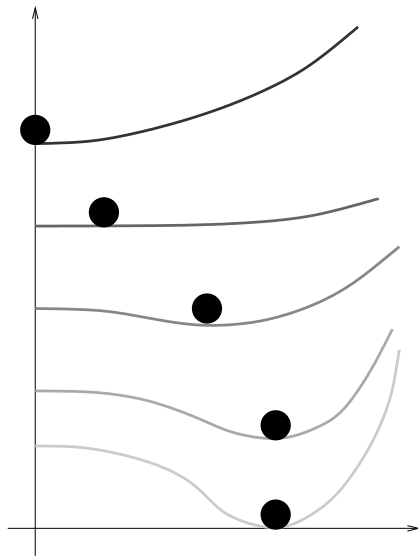
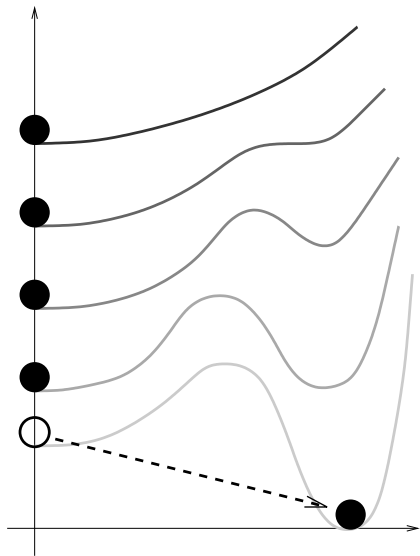
Условия Сахарова успешного бариогенезиса

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

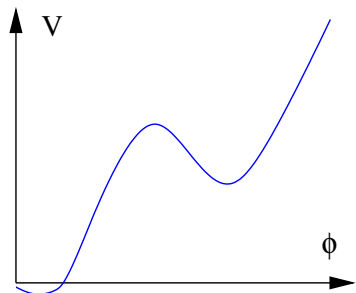




# Фазовые переходы I и II рода

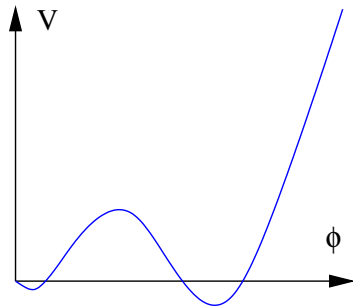


# Multiple point principle: D.Bennett, H.Nielsen (1993), C.Froggatt, H.Nielsen (1995)



Fermi

Planck



Fermi

Planck

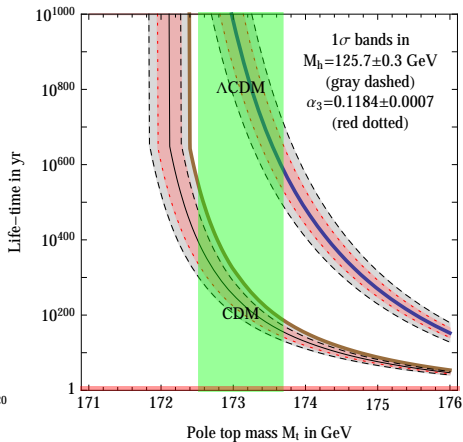
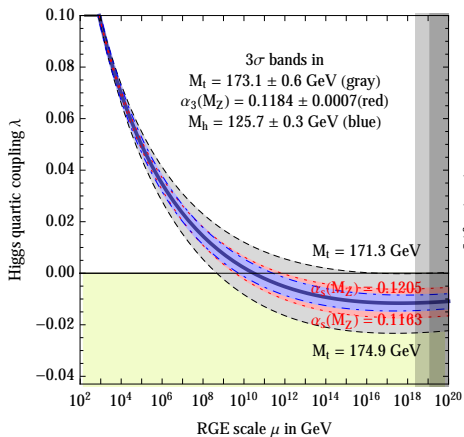
$$\Lambda \simeq 0 \Rightarrow V(\phi_{EW}) = V(\phi_{Planck}) = 0 \Rightarrow \lambda(\mu_{Planck}) = 0$$

$$\text{грав. масштаб} \Rightarrow V'(\phi_{EW}) = V'(\phi_{Planck}) = 0 \Rightarrow \frac{d\lambda(\mu)}{d\log\mu}(\mu_{Planck}) = 0$$

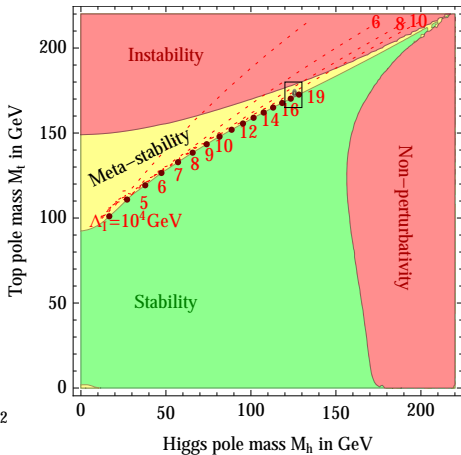
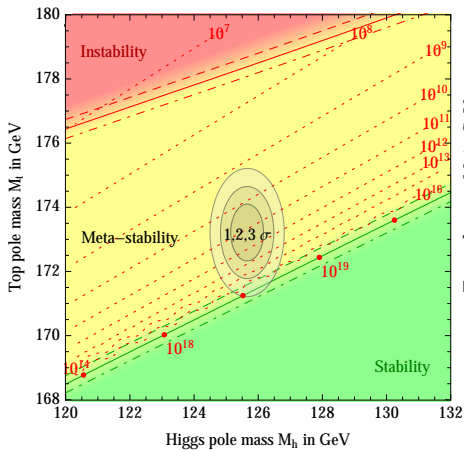
Это даёт

$$m_t \simeq 173 \text{ ГэВ} \text{ и } m_h \simeq 129 \text{ ГэВ}$$

# Электрослабый вакуум в СМ



# Электрослабый вакуум в СМ



# Космологический горизонт (частиц) $l_H(t)$

расстояние пройденное фотонами, испущенными при  $t = 0$

размер причинно связанной области —

размер видимой части Вселенной

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dx^2 = a^2(\eta) (d\eta^2 - dx^2) \quad ds^2 = 0$$

$$l_H(t) = a(t) \int dx = a(t) \int d\eta = a(t) \int_0^t \frac{cdt'}{a(t')} \simeq (2..3) \times t$$

Когда доминирует радиация (ультрарелятивистские частицы)

$$a(t) \propto \sqrt{t}, \quad L_{\text{физ}} \propto a$$

Когда доминирует материя (пыль, нерелятивистские частицы)

$$a(t) \propto t^{2/3}, \quad L_{\text{физ}} \propto a$$

Размер видимой области растёт быстрее!!

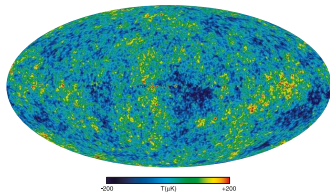
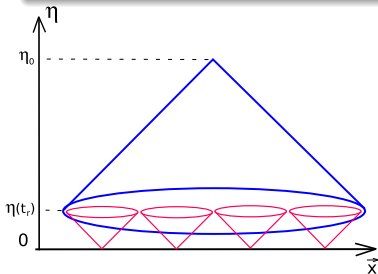
# Проблема однородности на примере РИ

Пусть рекомбинация (образование водорода и “освобождение” реликтовых фотонов) произошло в один и тот же “момент времени” во всей тогда причинно связанной области  $l_{H,rec}$

Далее начинаем “видеть” другие области !

$$L_{\text{физ.размер}} = l_{H,rec} \times (t/t_{rec})^{2/3}$$

$$L_{\text{видимая область}} = l_{H,rec} \times (t/t_{rec})$$



**Проблема:** Сегодня их 1000, а температура одинакова !!!

# Решение проблем: всё началось с ... инфляции

с конформным временем

$$d\eta = a dt$$

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) d\mathbf{x}^2$$

$$= a^2(\eta) (d\eta^2 - d\mathbf{x}^2)$$

Проблема горизонта... :

$l_H(t) \propto t$ , но  $a(t) \propto t^\alpha$ ,

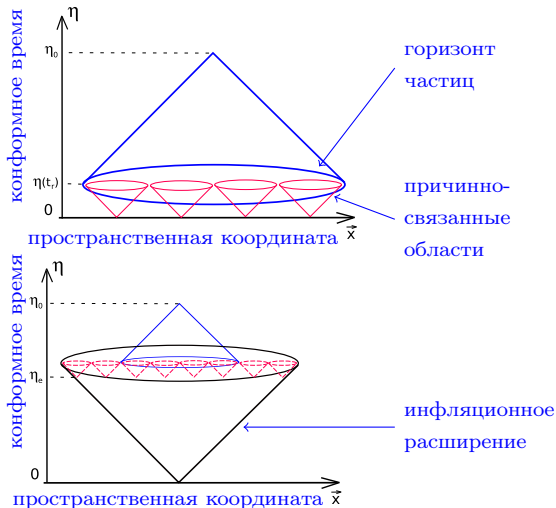
$\alpha = 2/3, 1/2$

Предварительная стадия

с  $\alpha > 1$  !!!

Решение всех проблем:

- горизонта
- плоскости
- монополей
- сингулярности
- первичных неоднородностей ?
- энтропия ?



# Неожиданный бонус: генерация неоднородностей

- Вакуумные флуктуации длины  $\lambda$  свободного безмассового поля  $\phi$  имеют амплитуду  $\delta\phi_\lambda \simeq 1/\lambda$
- В расширяющейся Вселенной:  $\lambda \propto a$

инфляция:  $H \sim 1/H = \text{const}$ , так что моды “выходят за горизонт”

обычная стадия:  $H \sim 1/H \propto t$ ,  $H/\lambda \nearrow$ , моды “входят под горизонт”

## Эволюция на инфляционной стадии

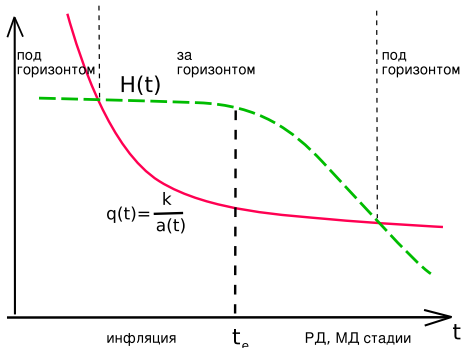
- под горизонтом:  $\lambda < l_H$   
 $\lambda \propto a \Rightarrow \delta\phi_\lambda \propto 1/\lambda \propto 1/a$



- за горизонтом:  $\lambda > l_H$   
 $\lambda \propto a \Rightarrow \delta\phi_\lambda = \text{const} !!!$



- получили “классические” флуктуации:  
 $\delta\phi_\lambda = \delta\phi_\lambda^{\text{quantum}} \times e^{N_e}$

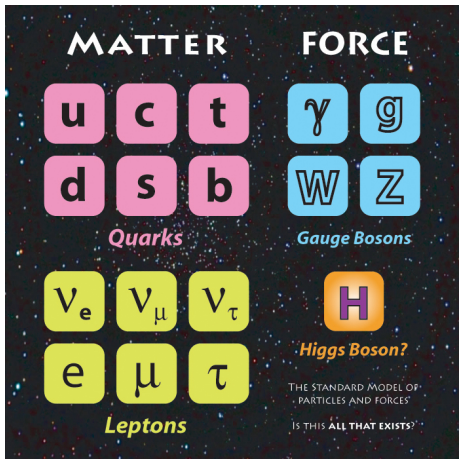




# План

- 1 Новая физика: мотивация
- 2 Барионная асимметрия
- 3 Нейтринная новая физика**
- 4 Тёмная материя
- 5 Нейтринная новая физика

# Слабые распады частиц



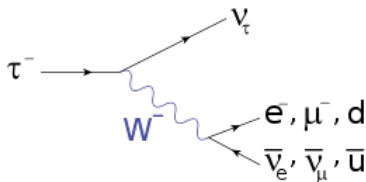
$$m_\tau \approx 1.8 \text{ ГэВ}$$

(SLAC, 1975)

(NP 1995)

$$e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$$

$\tau$ -ЛЕПТОН (ТАОН)  $\tau_\tau \sim 10^{-12} \text{ с}$



СИЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МАССЫ:

$$\tau_\chi \simeq 10^{-6} \text{ с} \times \left(\frac{10 \text{ МэВ} m_\chi}{0}\right)^5$$

# Роль нейтрино в слабых взаимодействиях



В. Паули (1930)

- Сохраняет энергию (экспериментально спектр позитронов непрерывен!)



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

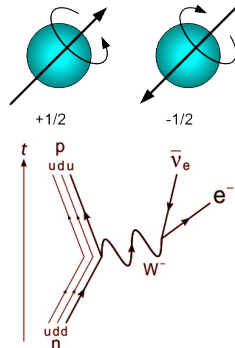
$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

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

- Сохраняет лептонные числа  $L_e, L_\mu, L_\tau$

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

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



# Свойства нейтрино

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

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

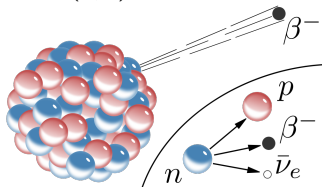
- **нейтрино**  $\nu_e$  рождаются в  $\beta^+$ -распаде (вместе с **позитроном**),  $\Delta L_e = 0$

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

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  $\beta^-$ -распаде (вместе с **электроном**),  $\Delta L_e = 0$

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

- **нейтрино**  $\nu_e$  рождаются в  $\beta^+$ -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):

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

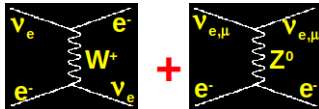
- **Важнейшее свойство:**

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

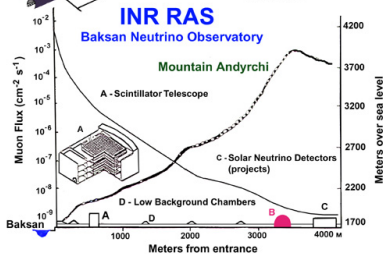
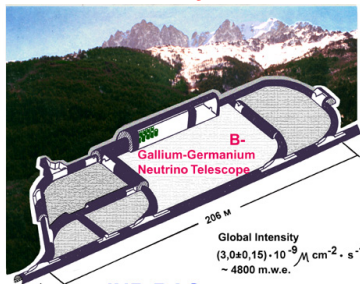
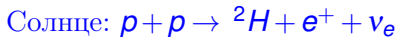
**взаимодействуют очень редко!**

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

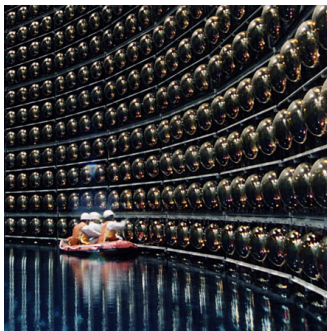
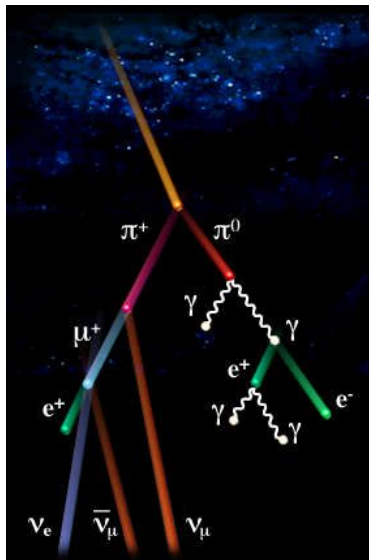
1) отовсюду вылетает, 2) нужны большие детекторы



# Осцилляции солнечных нейтрино: $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$

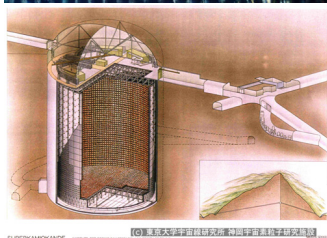


# Осцилляции атмосферных нейтрино: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



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

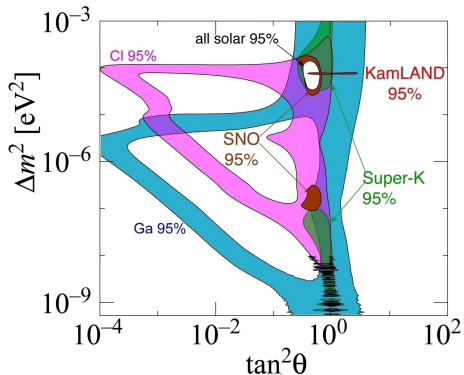
Поток $_{\mu}$   $\uparrow <$  Поток $_{\mu}$   $\downarrow$



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

# Осцилляции нейтрино: массы и углы смешивания

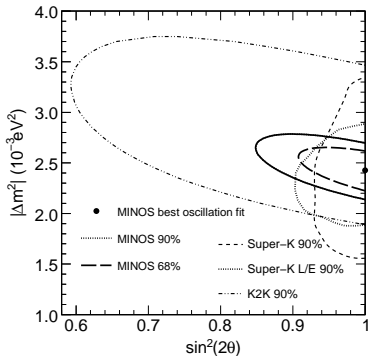
## Солнечный $2 \times 2$ сектор



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

$m_1 > 0.008$  эВ

## Атмосферный $2 \times 2$ сектор



arXiv:0806.2237

$m_2 > 0.05$  эВ

MINOS, T2K, SNO, ..., Глобальный анализ:  $\sin^2 2\theta_{13} \approx 0.1$



# Космология ограничивает сумму масс нейтрино

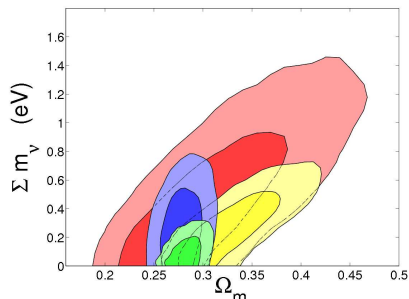
## Вклад нейтрино:

Начало формирования структур

Гравитационные потенциалы в эпоху  
рекомбинации

Поздняя эволюция структур

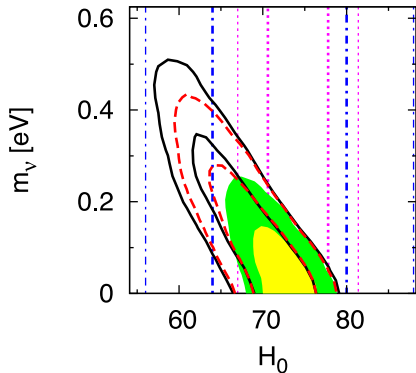
Расширение Вселенной



LRG+BAO+WMAP5+SNe

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

0911.5291



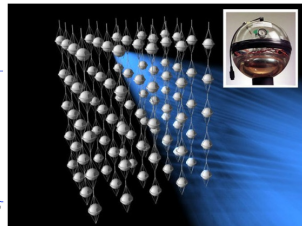
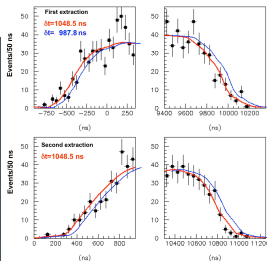
CMB+Hubble измерения

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

0911.0976

# Нейтринные аномалии...

- SN1987a новая астрофизика?
  - LSND 1 эВ стерильные нейтрино
  - MiniBooNE 1 эВ стерильные нейтрино
  - реакторные (Калининская АЭС) 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 !!!



# План

- 1 Новая физика: мотивация
- 2 Барионная асимметрия
- 3 Нейтринная новая физика
- 4 Тёмная материя**
- 5 Нейтринная новая физика

# 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

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

# 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

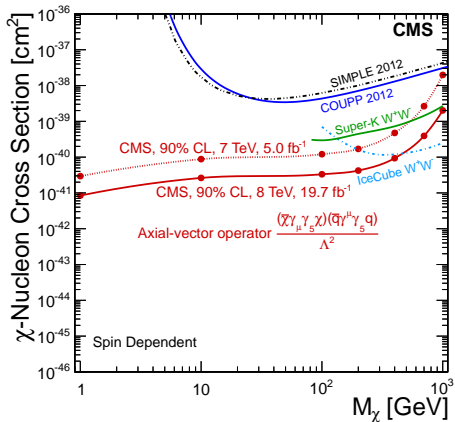
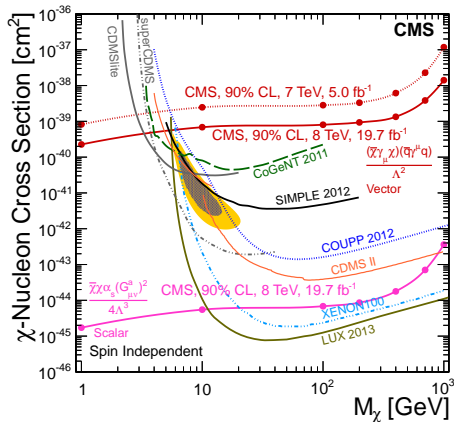
$$\tau_{\text{аннигиляции}}^{-1} \propto n_X$$

- аннигиляция завершается при температуре  $T_f$ , когда

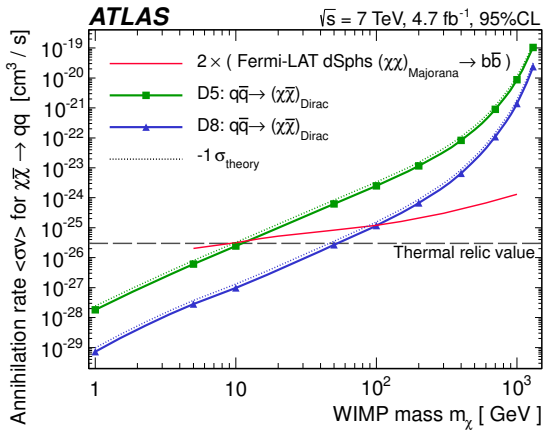
$$\tau_{\text{аннигиляции}}^{-1} \lesssim H$$

## CMS results of searches at @ 8 TeV

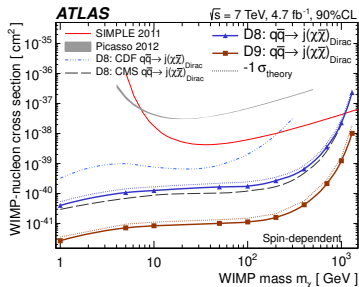
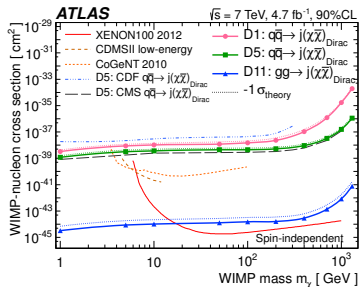
V. Khachatryan et al (2014)



## ATLAS results of (in)direct searches @ 7 TeV

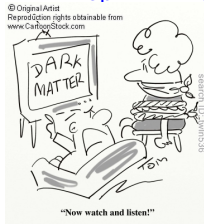


1210.4491v1



# 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

# План

- 1 Новая физика: мотивация
- 2 Барионная асимметрия
- 3 Нейтринная новая физика
- 4 Тёмная материя
- 5 Ненейтринная 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  $\sim 200$  **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, сголдстино, аксино, ...
- скварки, глюино:  $M < 2.5$  ТэВ

+?



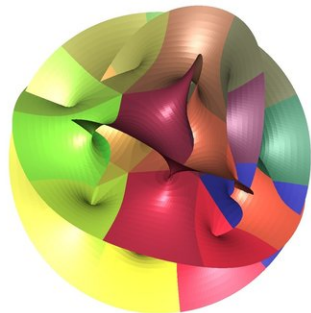
## Массивные нейтрино

## 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

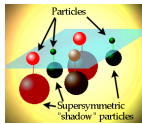
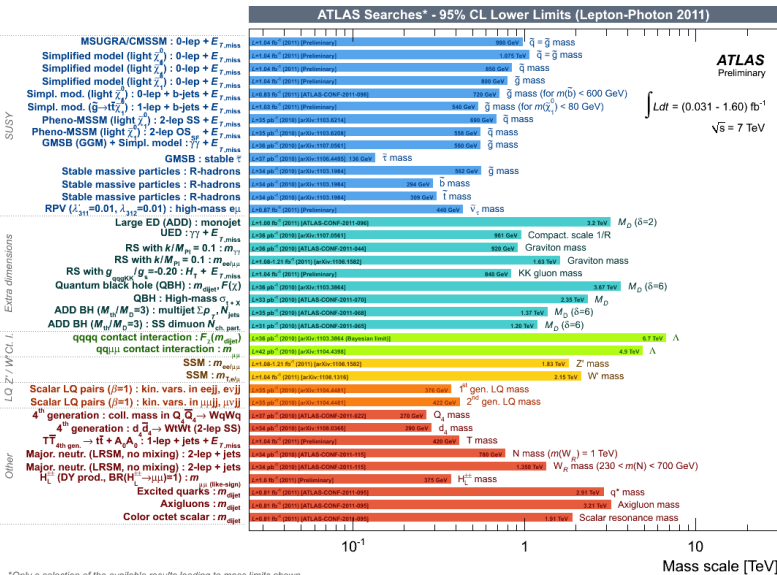
# Результаты поиска новой физики (ATLAS)

SUSY

Extra dimensions

LQ, Z' / W, CL, L

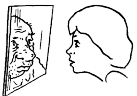
Other



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



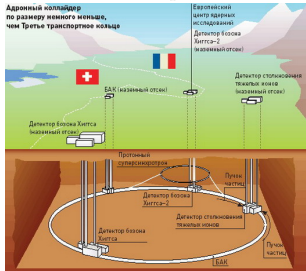
$\Sigma$



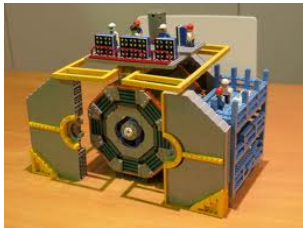
\*Only a selection of the available results leading to mass limits shown

# Перспективы поиска новой физики

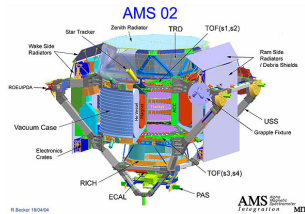
## Поднимаем энергию LHC...



## Belle II:



## Сигнал от аннигиляции DM:

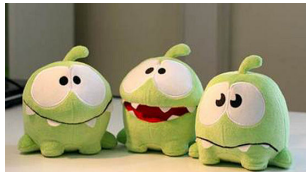
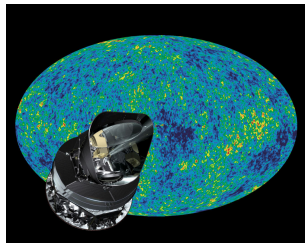


- Не все фоновые каналы измерены
- Множественные столкновения в пучке

## Super B factory @ Cabibbo Lab:



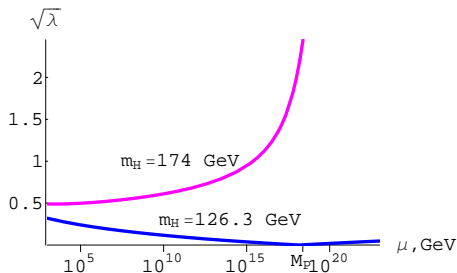
## Уточнение космологических параметров: PLANK





# 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 ... ?