

# Открытие и закрытие новой физики: как это бывает

Дмитрий Горбунов

Институт ядерных исследований РАН, Москва

6 октября 2010





- Главная
- [Онователь](#)
- [Сотрудники](#)
- [Студенты](#)
- [ИЯИ РАН](#)
- [Обучение](#)
- [Презентации](#)
- [Для 2 курса](#)
- [Наука](#)
- [Школы](#)
- [Контакты](#)



### Дорогие друзья!



Интересует ли вас устройство нашей Вселенной? А может, вы мечтаете придумать новую теорию элементарных частиц? В общем, вас интересуют загадки фундаментальной физики?

Тогда мы ждем вас!

Научная деятельность кафедры физики частиц и космологии [Физического факультета МГУ](#) связана с задачами на стыке теоретической физики элементарных частиц, астрофизики и космологии. В состав кафедры войдут ученые-теоретики мирового уровня. Обучение студентов на кафедре будет ориентировано на научную работу в сотрудничестве со специалистами из различных

институтов - [НИИЯФ](#), [ОИЯИ](#), [ФИАН](#), [ИТЭФ](#). Кафедра поддерживает устойчивые научно-технические связи с зарубежными институтами, такими как [CERN](#), [EPFL](#) (Швейцария), [ULB](#) (Бельгия), [ICRR](#) (Япония), [Boston U.](#) (США). Базовым институтом кафедры является [Институт ядерных исследований РАН](#).

### Новости

- С целью ознакомления студентов-младшекурсников с тематикой работы кафедры в октябре 2010 года проводится цикл **научно-популярных лекций**. Лекции начинаются в 17:05.
  - 06/10/10 (среда), 5-42: [Д.С. Горбунов](#) - «Открытие и закрытие новой физики: как это бывает».
  - 07/10/10 (четверг), 5-42: [Д.Г. Левков](#) - «Черные дыры, голография и AdS/CFT-соответствие».
  - 12/10/10 (вторник), 5-25: [В.А. Рубakov](#) - «Темная энергия во Вселенной».
  - 19/10/10 (вторник), 5-25: [С.В. Троицкий](#) - «(Не)прозрачность Вселенной».
  - 26/10/10 (вторник), 5-25: [В.В. Белокурова](#) - «».
- 01/09/10 Поздравляем всех студентов с началом учебного года!

### Архив новостей

Mail to: [ppc@iitp.ac.ru](mailto:ppc@iitp.ac.ru)

Last Modified: Fri, 01 Oct 2010 16:26:25 GMT



# План

- 1 Стандартная модель физики частиц
- 2 Явления, указывающие на неполноту Стандартной модели
  - Нейтринные осцилляции: нарушение аромата
  - Барионная асимметрия Вселенной
  - Тёмная материя
  - Другие трудности
- 3 Примеры модификаций Стандартной модели
  - Теории Большого Объединения
  - Поиски тёмной материи
  - Совсем неожиданные явления...

# “Естественная” система единиц в физике частиц

$$\hbar = c = k_B = 1$$

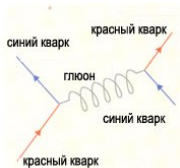
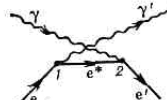
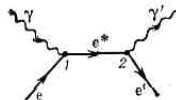
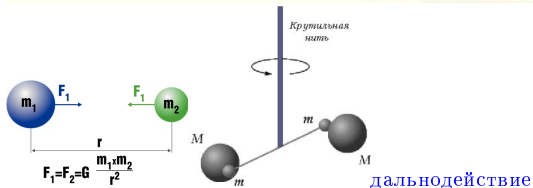
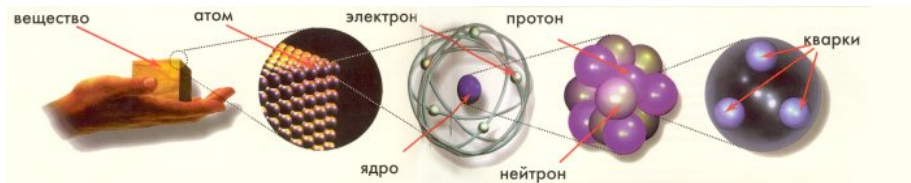
измеряют в ГэВ: энергия  $E$ , масса  $M$ , температура  $T$

$$m_p = 0.938 \text{ ГэВ}, \quad 1 \text{ К} = 8.6 \cdot 10^{-14} \text{ ГэВ}$$

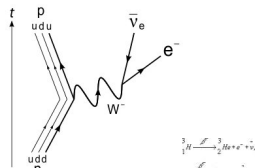
измеряют в ГэВ<sup>-1</sup>: время  $t$ , длина  $L$

$$1 \text{ с} = 1.5 \times 10^{24} \text{ ГэВ}^{-1}, \quad 1 \text{ см} = 5.1 \times 10^{13} \text{ ГэВ}^{-1}$$

# Элементарные частицы и взаимодействия между ними

10<sup>-13</sup> см

краткодействие (short-range interaction)

10<sup>-16</sup> см

# Элементарные частицы и взаимодействия между ними

## THE STANDARD MODEL

|         | Fermions                                       |                                              |                                              | Bosons                               |                |
|---------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|----------------|
| Quarks  | <b>u</b><br>up                                 | <b>c</b><br>charm                            | <b>t</b><br>top                              | <b><math>\gamma</math></b><br>photon | Force carriers |
|         | <b>d</b><br>down                               | <b>s</b><br>strange                          | <b>b</b><br>bottom                           | <b>Z</b><br>Z boson                  |                |
| Leptons | <b><math>\nu_e</math></b><br>electron neutrino | <b><math>\nu_\mu</math></b><br>muon neutrino | <b><math>\nu_\tau</math></b><br>tau neutrino | <b>W</b><br>W boson                  |                |
|         | <b>e</b><br>electron                           | <b><math>\mu</math></b><br>muon              | <b><math>\tau</math></b><br>tau              | <b>g</b><br>gluon                    |                |

Higgs\*  
boson

\*Yet to be confirmed

Source: AAAS

## Три генерации на материята (фермиони)

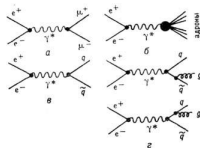
|                        | I                         | II                          | III                          |                            |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| маса →                 | 2.4 MeV                   | 1.27 GeV                    | 171.2 GeV                    | 0                          |
| полнеж → $\frac{2}{3}$ | <b>u</b>                  | <b>c</b>                    | <b>t</b>                     | <b><math>\gamma</math></b> |
| спин → $\frac{1}{2}$   | горен                     | шармантен                   | врвен                        | фотон                      |
| име →                  |                           |                             |                              |                            |
| Кваркови               | 4.8 MeV                   | 104 MeV                     | 4.2 GeV                      | 0                          |
|                        | $-\frac{1}{3}$            | $-\frac{1}{3}$              | $-\frac{1}{3}$               | 0                          |
|                        | <b>d</b>                  | <b>s</b>                    | <b>b</b>                     | <b>g</b>                   |
|                        | $\frac{1}{2}$             | $\frac{1}{2}$               | $\frac{1}{2}$                | 1                          |
|                        | долен                     | чуден                       | најнизок                     | глуон                      |
| Лептони                | <2.2 eV                   | <0.17 MeV                   | <15.5 MeV                    | 91.2 GeV                   |
|                        | 0                         | 0                           | 0                            | 0                          |
|                        | <b><math>\nu_e</math></b> | <b><math>\nu_\mu</math></b> | <b><math>\nu_\tau</math></b> | <b>Z</b>                   |
|                        | $\frac{1}{2}$             | $\frac{1}{2}$               | $\frac{1}{2}$                | 1                          |
|                        | електронско неутрино      | мионско неутрино            | тау неутрино                 | слаба сила                 |
|                        | 0.511 MeV                 | 105.7 MeV                   | 1.777 GeV                    | 80.4 GeV                   |
|                        | -1                        | -1                          | -1                           | $\pm 1$                    |
|                        | <b>e</b>                  | <b><math>\mu</math></b>     | <b><math>\tau</math></b>     | <b>W</b>                   |
|                        | $\frac{1}{2}$             | $\frac{1}{2}$               | $\frac{1}{2}$                | 1                          |
|                        | електрон                  | мион                        | тау                          | слаба сила                 |

Бозони (Сили)

# Проверки Стандартной модели

- распады частиц:
- рассеяния частиц:

$$\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu, Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



Фундаментальные частицы

| масса — заряд — спин | u           | c         | t               | $\gamma$      |
|----------------------|-------------|-----------|-----------------|---------------|
| K                    | up          | charm     | top (truth)     | фотон         |
| B                    | первый      | оверквинт | истинный        |               |
| A                    | 4.8 МэВ     | 1.6 МэВ   | 171.2 ГэВ       | 0             |
| P                    | 2/3         | 2/3       | 2/3             | 1             |
| K                    | d           | s         | b               | глюон         |
| H                    | down        | strange   | bottom (beauty) | Б О З О Н Ы   |
|                      | нижний      | странный  | прекрасный      |               |
| L                    | 5.12 МэВ    | 1.27 МэВ  | 155 МэВ         | 91.2 ГэВ      |
| E                    | $\nu_e$     | $\nu_\mu$ | $\nu_\tau$      | $Z^0$         |
| H                    | электронное | мюонное   | тау-            | $\rho$ -бозон |
| T                    | нейтрона    | нейтрона  | нейтрона        |               |
| O                    | 8.33 МэВ    | 186.7 МэВ | 1.777 ГэВ       | 93.4 ГэВ      |
| H                    | 1           | 1         | 1               | $W^\pm$       |
| Y                    | e           | $\mu$     | $\tau$          | W-бозон       |
|                      | электрон    | мюон      | тау-лептон      |               |

Три поколения фермионов

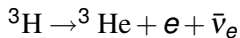
Проверки предсказаний СМ

Проверки предсказаний её мотивированных обобщений

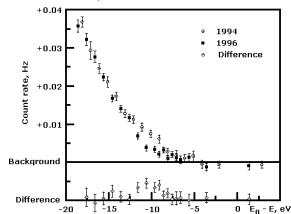
Регулярно обновляемая достоверная информация

<http://pdg.lbl.gov>

# Проверка СМ: прямые поиски массы нейтрино



ИТЭФ, 1980-е годы



Космология: вклад в  
тёмную материю

$$m_{\bar{\nu}_e} \sim 20 \text{ эВ}$$

ИЯИ, 1990-2000-е годы



$$m_{\bar{\nu}_e} < 2.2 \text{ эВ}$$

Космология: рост структур

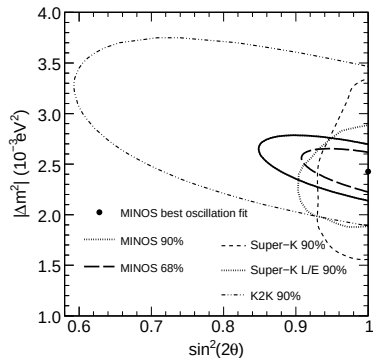
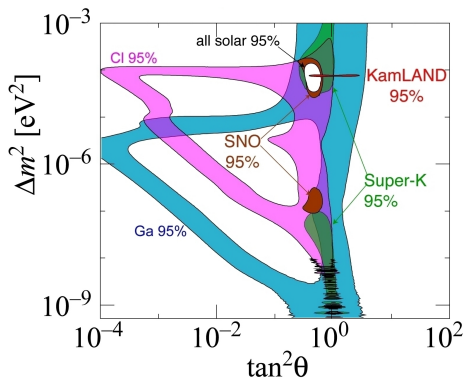
$$\sum_i m_{\nu_i} \lesssim 0.5 \text{ эВ}$$



# Осцилляции нейтрино: массы и углы смешивания

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

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



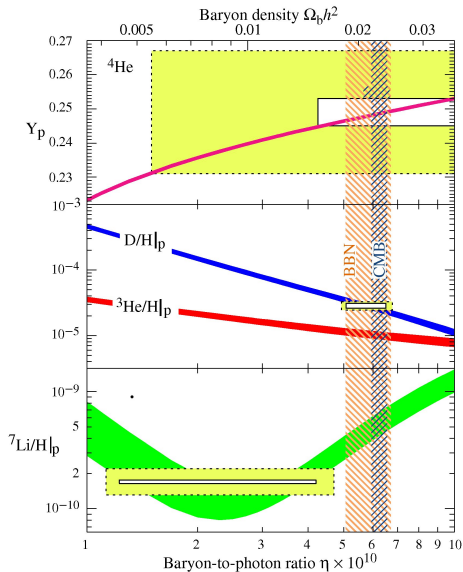
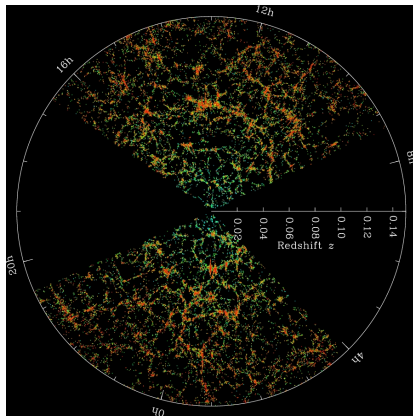
<http://hitoshi.berkeley.edu/neutrino/>

arXiv:0806.2237

$m_1 > 0.008$  эВ

$m_2 > 0.05$  эВ

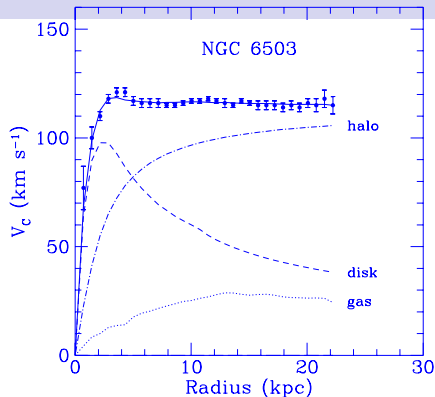
# Отсутствие антивещества



# Тёмная материя в галактиках: пологие “кривые вращения”

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

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



наблюдения:

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

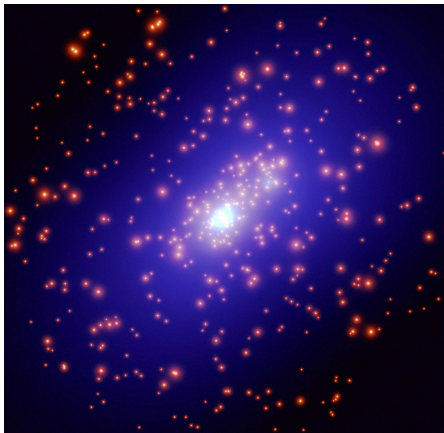
Видимая материя:

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

# Тёмная материя в скоплениях галактик

гравитационное линзирование

$$\rho_{\text{м}} \approx 0.25 \rho_{\text{с}}$$



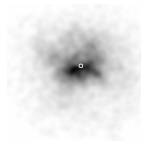
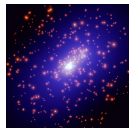
# Тёмная материя в скоплениях галактик

X-лучи от горячего газа из центров скоплений

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

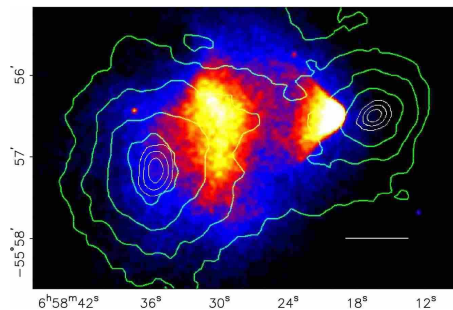
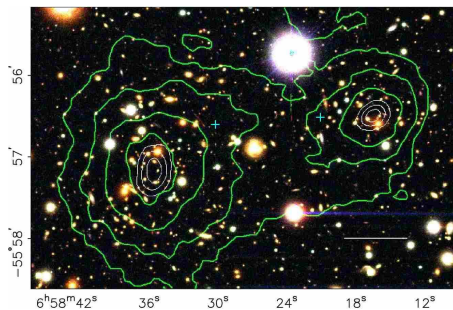
галактики в скоплениях

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



Галактика Млечный путь: движение к центру сверхскопления Девы

# Столкнувшиеся скопления



## Свойства тёмной материи

$$p = 0$$

(Если) частицы:

- ① **стабильные** на космологических временах ( $t \gg 14$  млрд. лет)
- ② **нерелятивистские** сейчас и раньше (эпоха равенства вкладов в энергию материи и радиации,  $T \simeq 1$  эВ,  $v_{RD}/MD \lesssim 10^{-3}$ )
- ③ (почти) **бесстолкновительны**
- ④ (почти) электрически **нейтральны**

Если были в **термальном равновесии**:

$$M_X \gtrsim 1 \text{ кэВ}$$

Если нет:

для бозонов

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

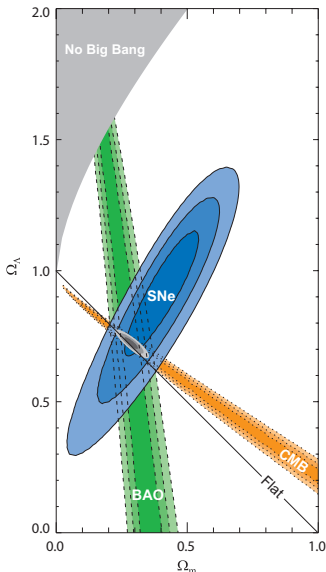
для фермионов

принцип Паули:

$$M_X \gtrsim 750 \text{ эВ}$$

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

# 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.)

$$\rho_c \approx 0.53 \times 10^{-5} \frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$$

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:

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



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

новая физика частиц  
должна объяснять это

объясняется физикой на масштабе  
 $E \sim 1/\sqrt{G_N} \sim 10^{19}$  ГэВ ?

# 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  $\tau$

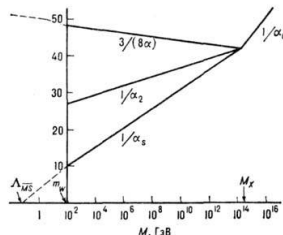
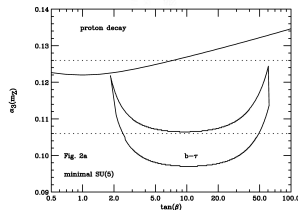


Рис. 1.



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

# Кандидаты в частицы тёмной материи

- WIMPs (нейтралино, ...)
- стерильные нейтрино
- аксион
- гравитино
- Тяжёлые реликты
- (Топологические) дефекты
- Massive Astrophysical Compact Halo Objects
- Первичные чёрные дыры (остатки)

# Weakly Interacting Massive Particles

после закалики:

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

современная концентрация:  $n_X(T_0) = \left(\frac{a(T_f)}{a(T_0)}\right)^3 n_X(T_f) = \left(\frac{s_0}{s(T_f)}\right) n_X(T_f)$

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

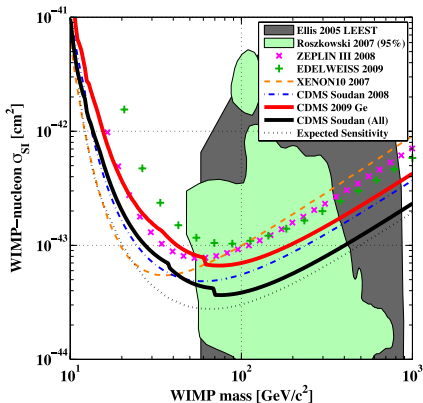
$$\begin{aligned} \Omega_X &= 2 \frac{M_X n_X(T_0)}{\rho_c} = 7.6 \frac{s_0 \ln \left( \frac{g_X M_{\text{Pl}}^* M_X \sigma_0}{(2\pi)^{3/2}} \right)}{\rho_c \sigma_0 M_{\text{Pl}} \sqrt{g_*(T_f)}} \\ &= 0.1 \cdot \left( \frac{(10 \text{ TeV})^{-2}}{\sigma_0} \right) \frac{0.3}{\sqrt{g_*(T_f)}} \ln \left(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

натуральная тёмная материя

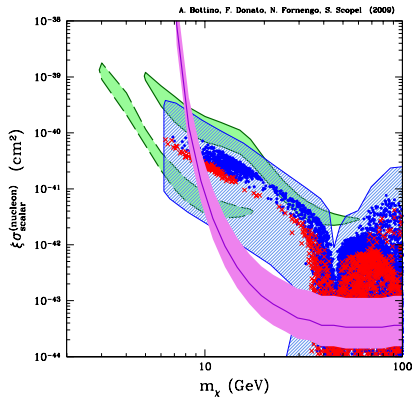
натурально “лёгкая”

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

# Недавние результаты прямых поисков

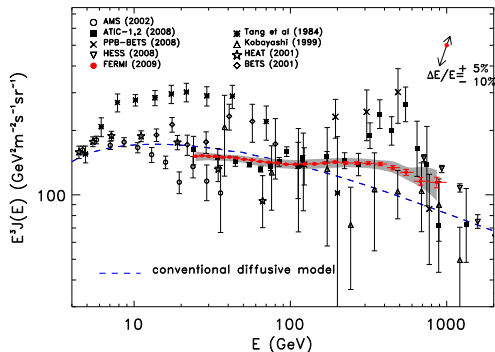
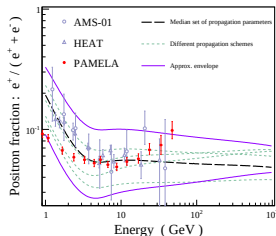
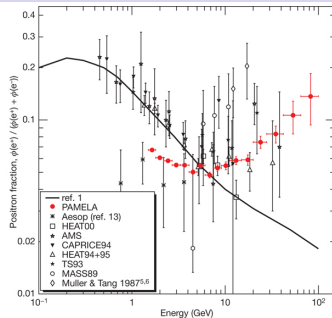


заявлено 2 события 0912.3592



0912.4025, см. однако, 0912.4264

# Космические лучи от распада или аннигиляции

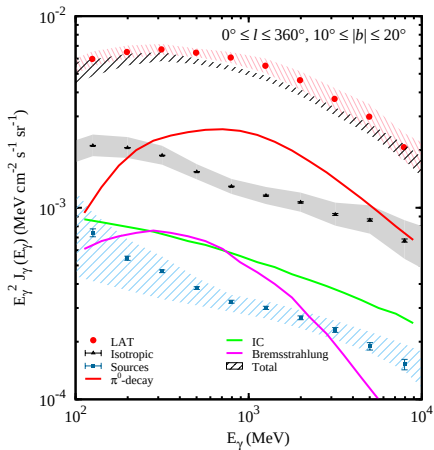
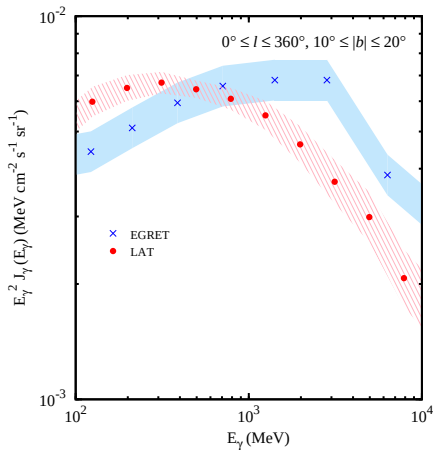


0911.4276

- слишком сильный сигнал  
(boost factor: clumps or new light mediators)
- нет антипротонов  
(leptofobic)
- “изотропный” поток  $\gamma$

0909.1182, 0911.4779

# Fermi LAT и предыдущий эксперимент EGRET



0911.4276

# Dark Matter: Direct Searches

- **WIMPs** (*neutralino*, ...) recoil energy, (LHC, Baksan, PAMELA, ...)
- **sterile neutrinos** sharp line:  $\nu_s \rightarrow \nu_a + \gamma$ , (XMM, INTEGRAL, ...)
- **light scalar field**
- **axion** oscillations  $\mathbf{a} + \mathbf{B} \rightarrow \gamma$
- **gravitino** missing energy at LHC, ...
- **Heavy relics** if unstable — Cosmic rays
- **(Topological) defects** lensing of CMB
- **Massive Astrophysical Compact Heavy Objects** microlensing
- **Primordial black hole remnants** Cosmic rays



# Совсем неожиданные явления...