

# Бозон Хиггса открыт. Что дальше?

В. А. Рубаков

Институт ядерных исследований РАН;  
кафедра физики частиц и космологии  
физического факультета МГУ

И  
Я  
И

И  
Н  
Р



Семинар в ЦЕРНе 4 июля 2012 г..

Джо Инкандела (эксперимент CMS) и Фабиола Джанотти (эксперимент ATLAS):

Открыта частица, свойства которой согласуются с теоретическими предсказаниями для бозона Хиггса.

Генеральный директор ЦЕРНа Рольф Хойер:

“I think we have it”, “Думаю, он у нас в руках”.

**Март 2013:** подтверждение открытия на более высокой статистике; новые каналы распада; спин 0.

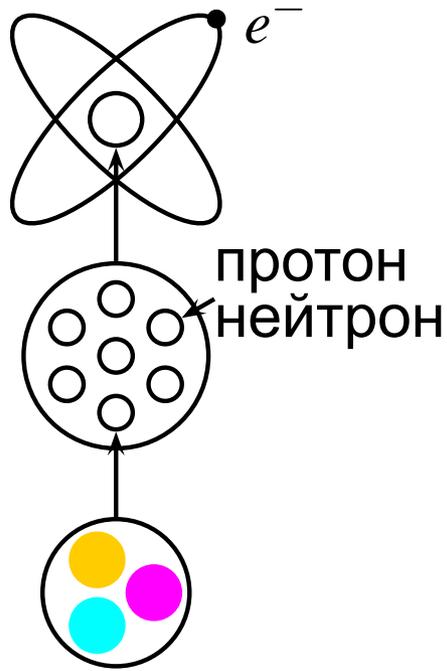
**Речь идет** не просто об открытии очередной элементарной частицы, а о начале изучения нового сектора физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий.

# План

- Бозон Хиггса открыт
- Зачем нужен бозон Хиггса
  - Симметрии микромира и запрет на массу
  - Нарушенные симметрии
- Что дальше: “новая физика”
  - Внутренняя трудность теории: проблема масштаба энергий
  - Сценарии “новой физики”
  - “Будем искать!”
- А если “новой физики” нет?

# Стандартная модель физики частиц:

октябрь 2013



ЛЕПТОНЫ

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

три семейства частиц

кварки

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

+ античастицы

+ фотон, глюоны,  $W$ ,  $Z$  (спин 1), гравитон (спин 2)  
+ **БОЗОН ХИГГСА** (спин 0)

Известные до сих пор бозоны – фотон,  $W$ ,  $Z$ , глюоны – отвечают за взаимодействия.

Главная роль поля Энглера–Браута–Хиггса – обеспечить массы всем частицам.

Бозон Хиггса – квант этого поля. И в этом его уникальность.

Теория: спин бозона Хиггса должен быть равен нулю.

# Бозон Хиггса – тяжелый

$$m_p \approx 1 \text{ ГэВ}$$

$c = 1$  в дальнейшем; энергия = масса.

Масса наиболее тяжёлой известной элементарной частицы —  $t$ -кварка:  $m_t = 173 \text{ ГэВ}$

Масса новой частицы  $H$ :  $m_H = 125,5 \text{ ГэВ}$

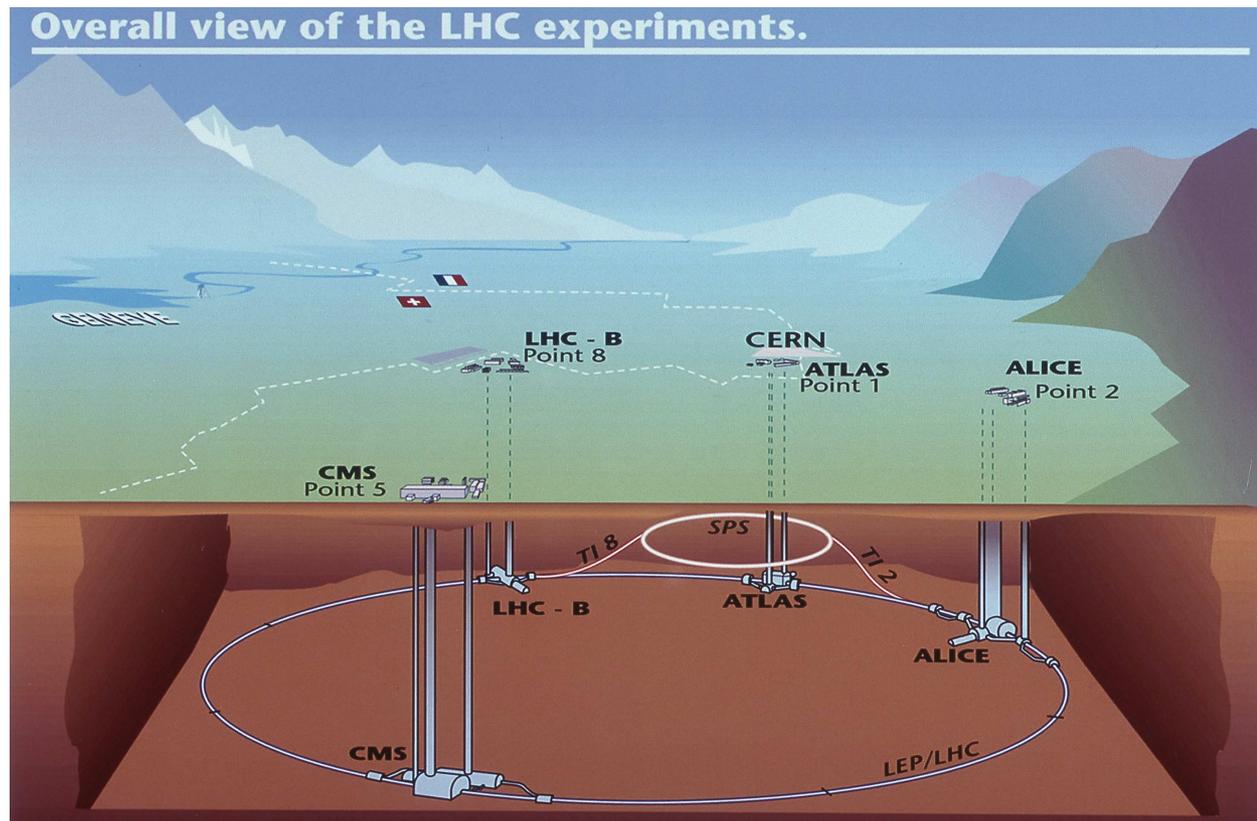
(точность измерений массы и других свойств  $H$  пока невысока)

Именно потому, что масса бозона Хиггса велика, для его открытия понадобился Большой адронный коллайдер (еще одна причина – сечение рождения бозона Хиггса малó)

Бозон Хиггса – электрически нейтральный.

# ЛНС/БАК

- Длина кольца – 27 км
- 1600 сверхпроводящих магнитов
- Столкновения протонов с энергиями  $4 \times 4$  ТэВ в 2012 г.  
Проектная энергия  $7 \times 7$  ТэВ, в сумме 14 ТэВ
- Четыре детектора: ALICE, LHCb, **CMS**, **ATLAS**



# Кто открыл

- ATLAS: 3500 физиков, в том числе ок. 200 из российских институтов и университетов; 38 стран; 174 организации
- CMS: 3000 физиков, в том числе ок. 150 из России; 41 страна; 179 университетов и институтов



# Как открыли

Бозон Хиггса нестабилен. Предсказание теории о времени жизни

$$\tau_H = 1,6 \cdot 10^{-22} \text{ секунд}, \quad c\tau_H = 5 \cdot 10^{-12} \text{ см}.$$

Для сравнения: время жизни  $t$ -кварка – в 500 раз меньше

Прямо измерить  $\tau_H$  на Большом адронном коллайдере невозможно. Известно только, что  $\tau_H \gtrsim 10^{-24} \text{ с}$ .

# Моды открытия

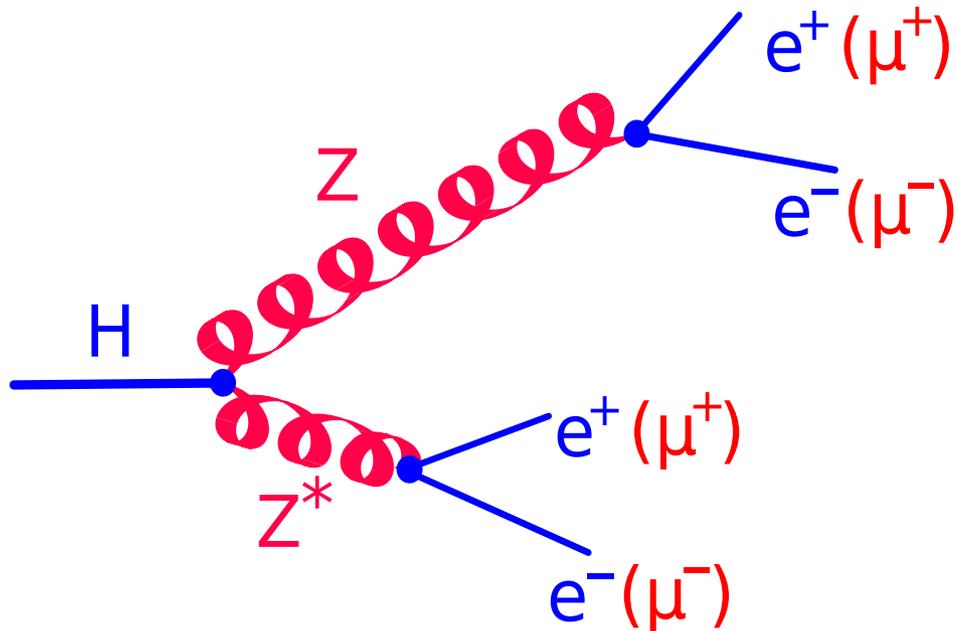
$$H \rightarrow \gamma\gamma, Br = 2 \cdot 10^{-3}$$

и  $H \rightarrow 4l, Br = 1 \cdot 10^{-4}$ , подавление фона  $10^{-12}$  !

$$H \rightarrow e^+e^-e^+e^-$$

$$H \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$$

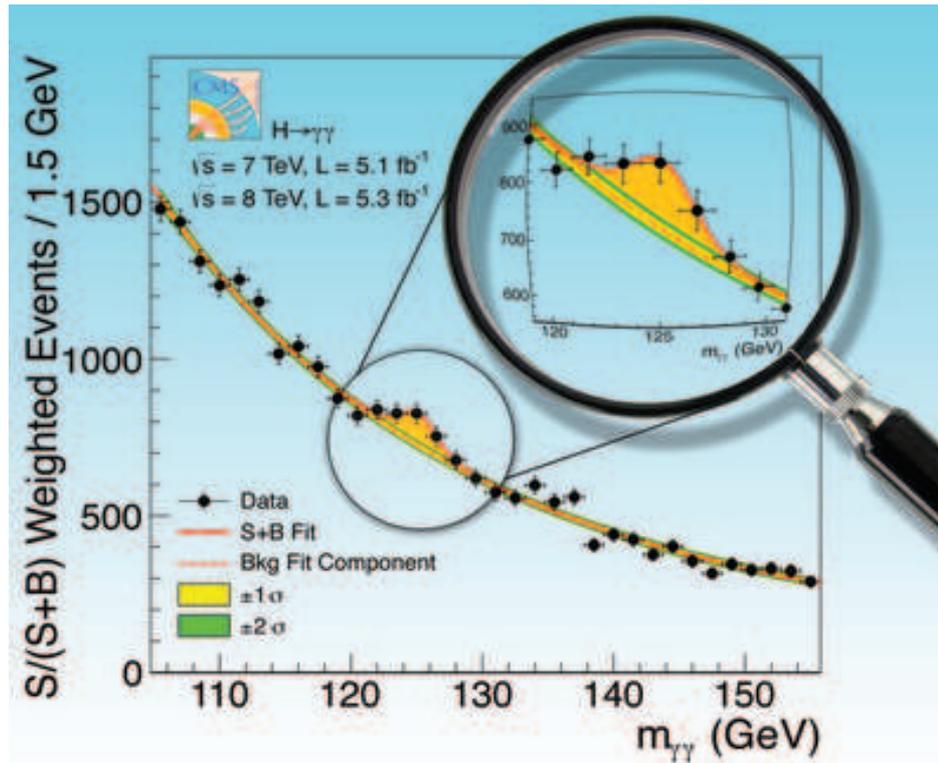
$$H \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$$





Сохранение энергии и импульса в распаде  $H \rightarrow \gamma\gamma \implies$   
инвариантная масса

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{p_1 p_2 (1 - \cos \theta)}$$
 – равна  $m_H$ .

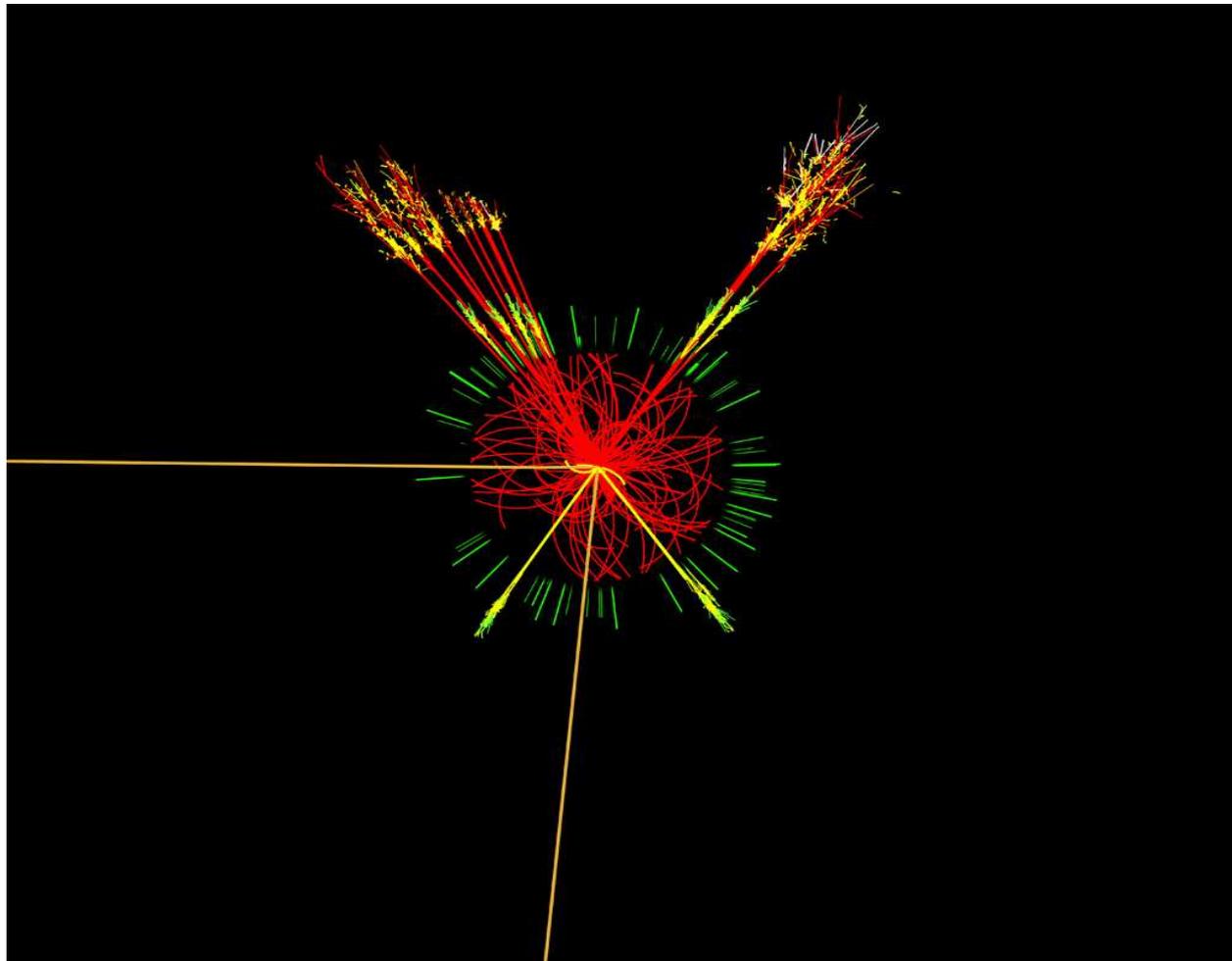


CMS

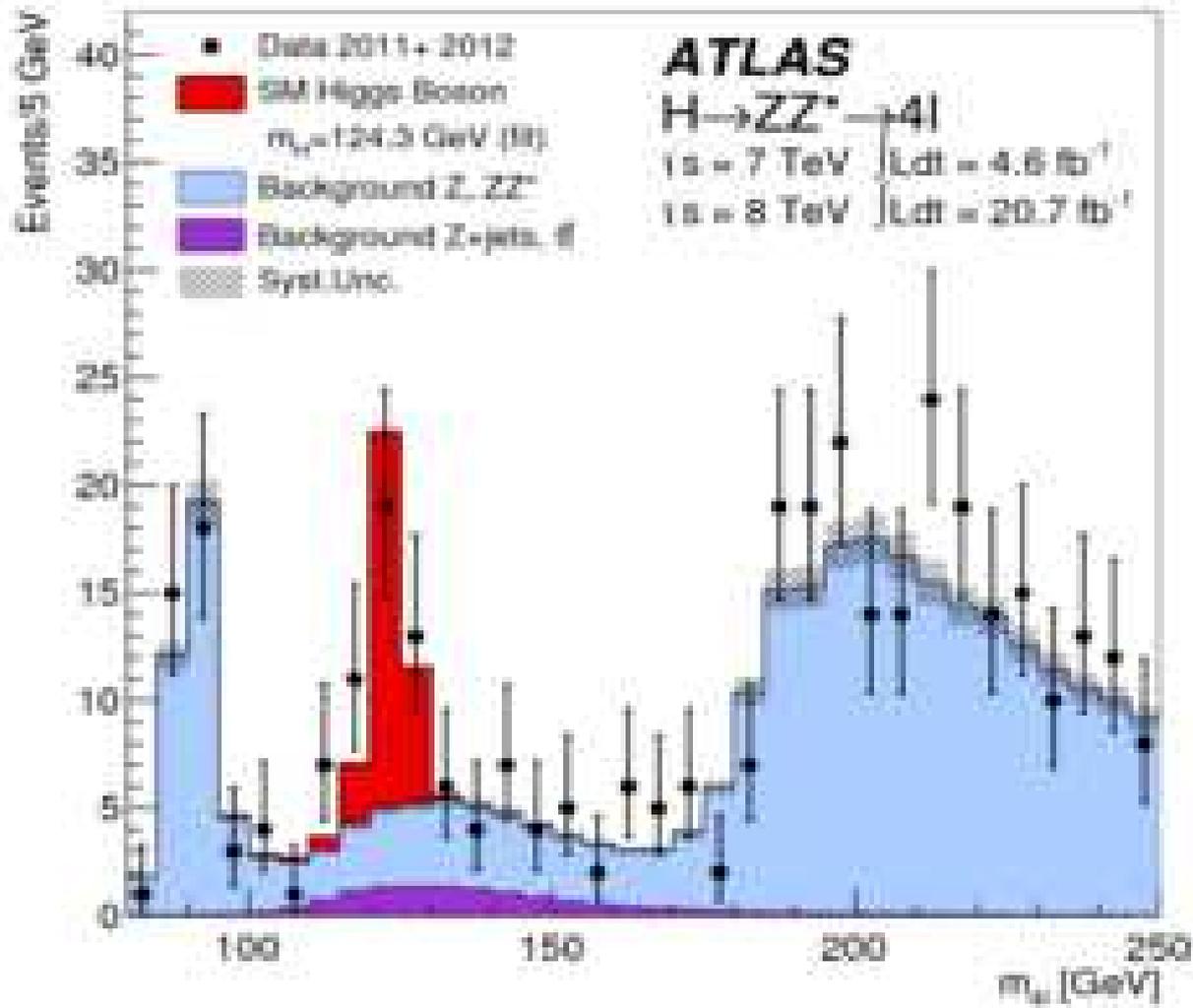
$$H \rightarrow 4l$$

Событие с рождением бозона Хиггса и распадом

$$H \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$$



# $H \rightarrow 4l$



ATLAS

# Новая частица – бозон

Распад  $H \rightarrow \gamma\gamma \implies H$  имеет целый спин.

Спин 1 запрещен теоремой Ландау–Янга.

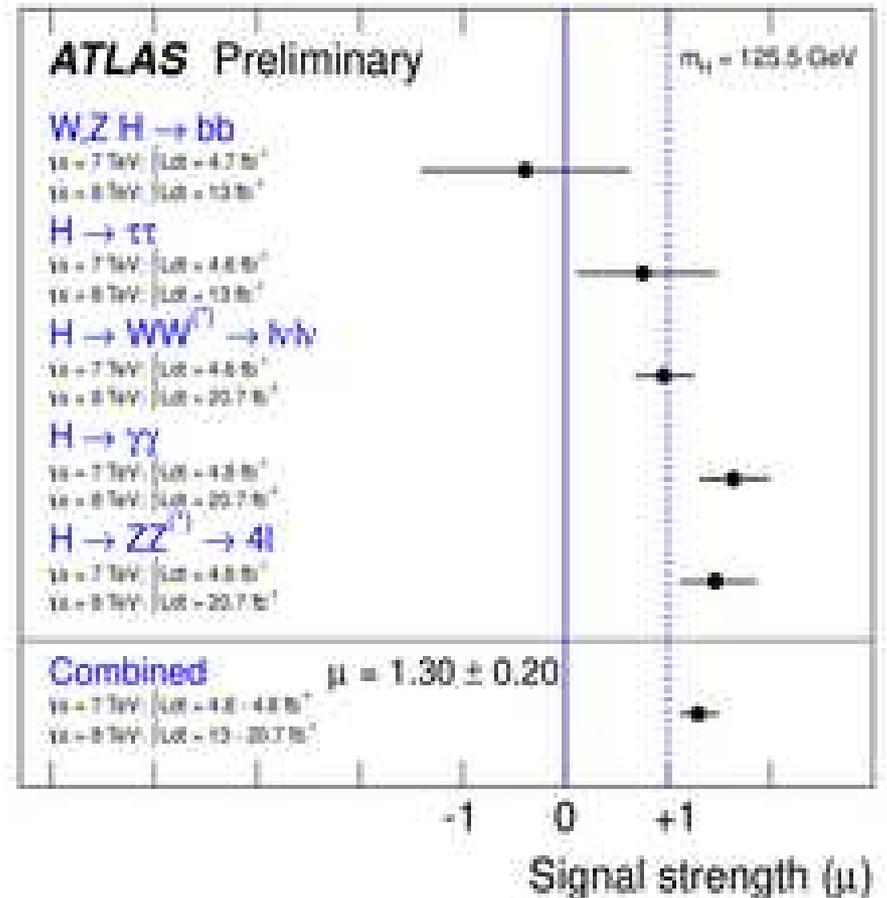
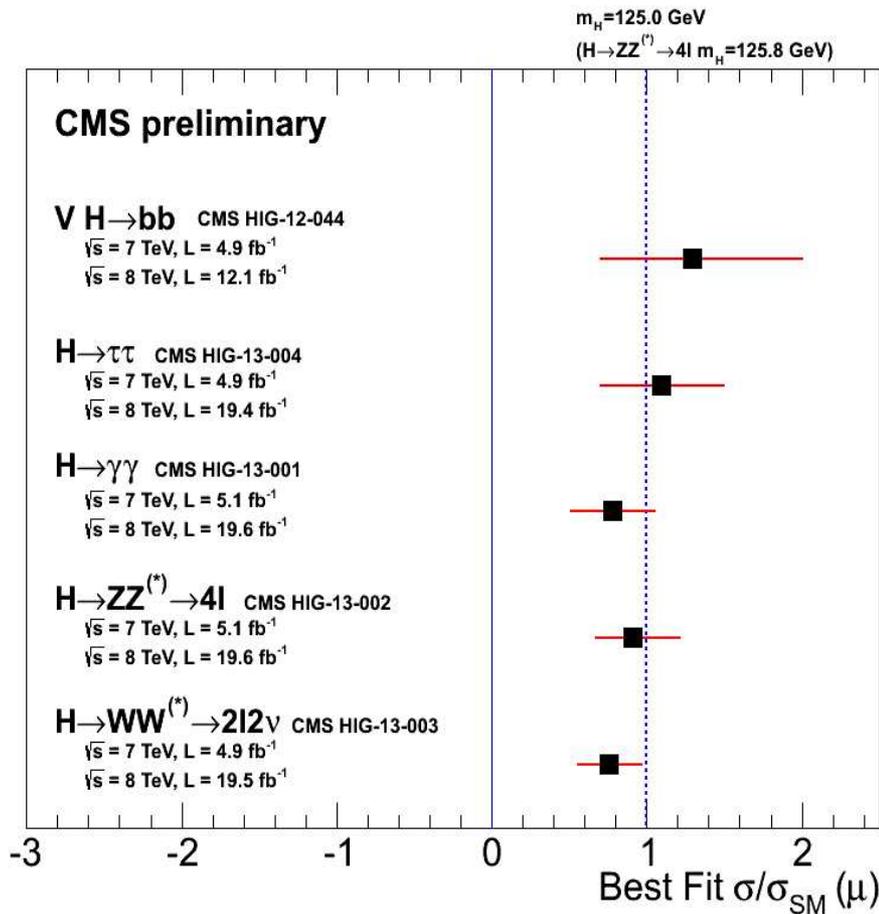
Измерение угловых распределений: отвергает спин 2 и выше.

**NB.** Теория: спин бозона Хиггса должен быть равен нулю.

Известно пока не очень много.

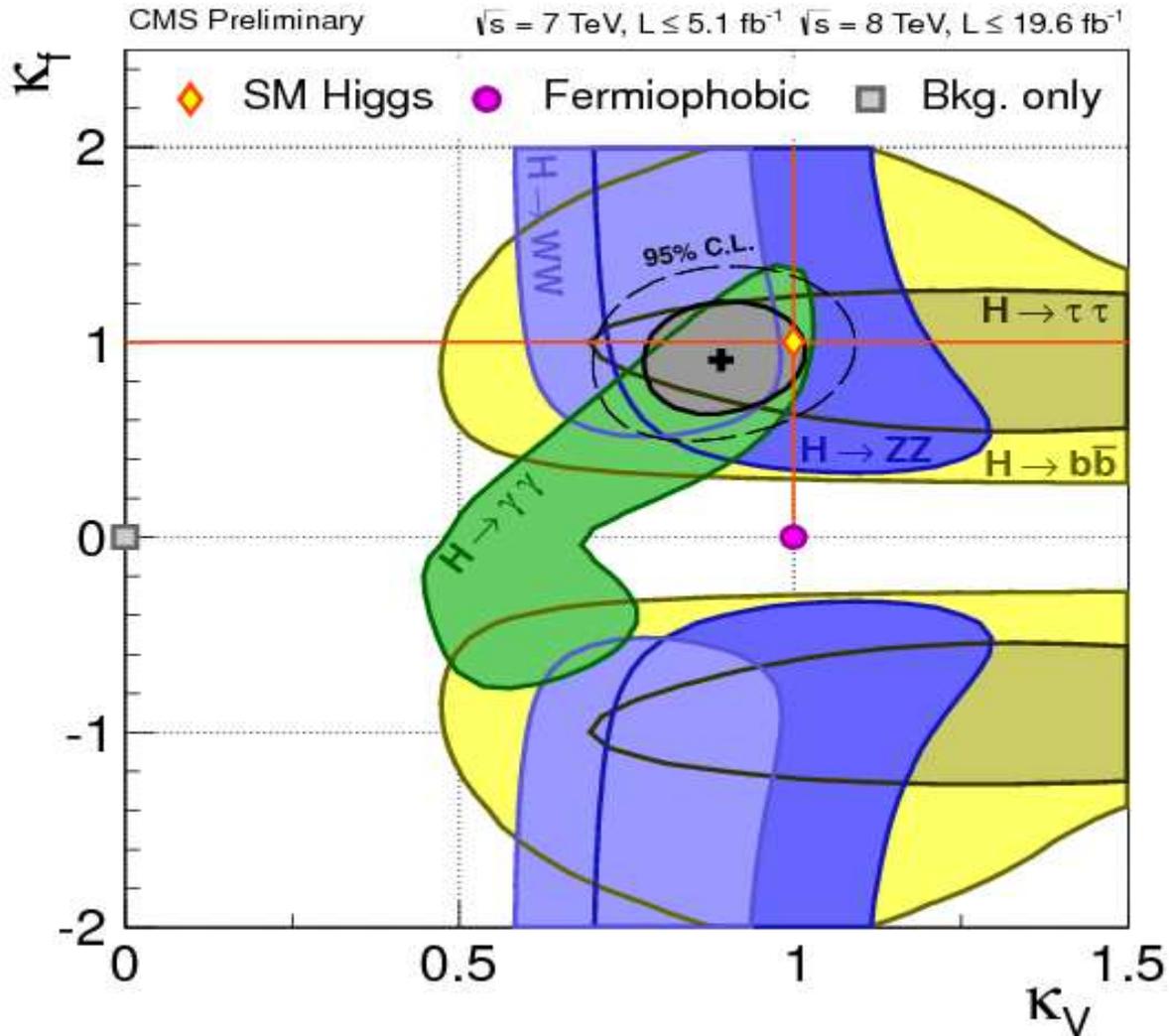
Точность не очень высока.

То, что известно, согласуется со Стандартной моделью



Отношение измеренного числа событий к предсказаниям Стандартной модели

# Константы связи



Параметризация

$g_{VVH} = \kappa_V \cdot g_{VVH, SM}$ , одинаковая для  $W, Z$

$g_{ffH} = \kappa_f \cdot g_{ffH, SM}$ , одинаковая для  $t, b, \tau$

CMS

# Зачем нужен бозон Хиггса?

- Бозон Хиггса – квант поля Энглера–Браута–Хиггса.

Вопрос формулируем так:

Зачем нужно новое поле?

Краткий ответ:

симметрии теории микромира запрещают элементарным частицам иметь массы, а новое поле нарушает эти симметрии и обеспечивает существование масс частиц.

# Внутренняя симметрия электродинамики

## Калибровочная инвариантность

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{\partial \alpha}{\partial x^\mu}$$

- Запрещает фотону иметь массу. Уравнение массивного фотона:

$$\frac{\partial F^{\mu\nu}}{\partial x^\mu} + m_\gamma^2 A^\nu = 0$$

инвариант      не инвариант

- Приводит к сохранению электрического заряда

Уравнение Дирака в КЭД:

$$i\gamma^\mu \left( \frac{\partial}{\partial x^\mu} - ieA_\mu \right) \Psi - m\Psi = 0$$

Симметрия  $\Psi \rightarrow e^{ie\alpha(x)}\Psi$ ,  $A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial\alpha/\partial x^\mu \implies$  сохранение заряда.

- Близкие аналоги фотона:  $W$ - и  $Z$ -бозоны

Но они имеют массы!

$$m_W = 81 \text{ ГэВ} , \quad m_Z = 90 \text{ ГэВ}$$

Внутренняя симметрия электрослабых взаимодействий запрещает всем частицам иметь массы.

Уравнение Дирака для электрона с учетом взаимодействия с Z-бозонным полем

$$i\gamma^\mu \left( \frac{\partial}{\partial x^\mu} - ig_L Z_\mu \right) \Psi_L - m\Psi_R = 0$$

$$i\gamma^\mu \left( \frac{\partial}{\partial x^\mu} - ig_R Z_\mu \right) \Psi_R - m\Psi_L = 0$$

$$\Psi_L = \frac{1 - \gamma^5}{2} \Psi, \quad \Psi_R = \frac{1 + \gamma^5}{2} \Psi, \quad g_L \neq g_R$$

Нужна симметрия

$$\Psi_L \rightarrow e^{ig_L \alpha(x)} \Psi_L$$

$$\Psi_R \rightarrow e^{ig_R \alpha(x)} \Psi_R$$

$$Z_\mu \rightarrow Z_\mu + \frac{\partial \alpha}{\partial x^\mu}$$

Масса электрона явно нарушает эту симметрию

## Мир с безмассовыми электронами:

- Правый электрон (спин вдоль импульса, спиральность  $+$ ), левый электрон (спин против импульса, спиральность  $-$ ) – **разные частицы**. Взаимодействия с  $\gamma, Z, W$  не меняют спиральности.
- $Z$ -заряды **левого** и **правого** электрона **разные**
- С  $W$  взаимодействует только **левый** электрон.

Для массивного электрона такое невозможно:  
**левый** электрон в одной системе отсчета = **правый** в другой

**Запрет на массу электрона и всех других фермионов**

( $\mu, \tau$ , кварков)

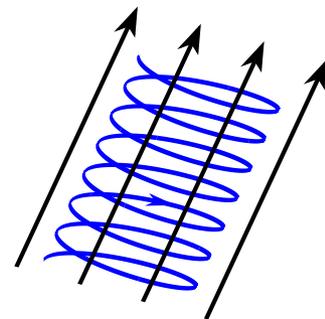
**А массы есть!**

# Нарушенные симметрии

- Законы сохранения и симметричные запреты **не действуют**, если **симметрия нарушена**

Пример: в однородном образце железа – магните – магнитное поле **нарушает симметрию** относительно пространственных вращений.

**Угловой момент электрона внутри магнита не сохраняется.**



- **Внутренняя симметрия Стандартной модели нарушена.**

**Простейший механизм – вакуумное среднее скалярного поля**

Энглер и Браут ' 1964;  
Хиггс ' 1964

## Уравнение Дирака

$$i\gamma^\mu \left( \frac{\partial}{\partial x^\mu} - ig_L Z_\mu \right) \Psi_L - yH\Psi_R = 0$$

$$i\gamma^\mu \left( \frac{\partial}{\partial x^\mu} - ig_R Z_\mu \right) \Psi_R - yH^*\Psi_L = 0$$

## Симметрия

$$\Psi_L \rightarrow e^{ig_L \alpha(x)} \Psi_L$$

$$\Psi_R \rightarrow e^{ig_R \alpha(x)} \Psi_R$$

$$H \rightarrow e^{i(g_L - g_R) \alpha} H$$

В вакууме  $\langle H \rangle = V = 247 \text{ ГэВ} \implies m = y \cdot V$ .

$W$ - и  $Z$ -бозоны тоже получают массы.

# Энглер–Браут–Хиггс

- Поле  $H$  – элементарное (не составное)
- Механизм спонтанного нарушения симметрии: скалярный потенциал

$$U(H) = \lambda (|H|^2 - V^2)^2 \implies |H| = V$$

- Теория перенормируема
- “Живая” радиальная компонента  $[H - \langle H \rangle]$ ; квант — бозон Хиггса.
- Единственный параметр  $\lambda$ ;  $m_H = 2\lambda V$ .

# Внутренняя трудность теории: проблема масштаба энергий

- Энергетические масштабы взаимодействий

- **сильные** :  $m_p \sim 1$  ГэВ

- **Слабые**:

$$m_W, m_H \sim 100 \text{ ГэВ}$$

- **гравитационные**

$$M_{Pl} \sim 10^{19} \text{ ГэВ}$$

$m_p, m_W$  близки между собой, но далеки от гравитационного масштаба  $M_{Pl}$ . **Почему?**

- Масштаб 100 ГэВ определяется массой бозона Хиггса  $m_H$ .

$$V \iff m_H$$

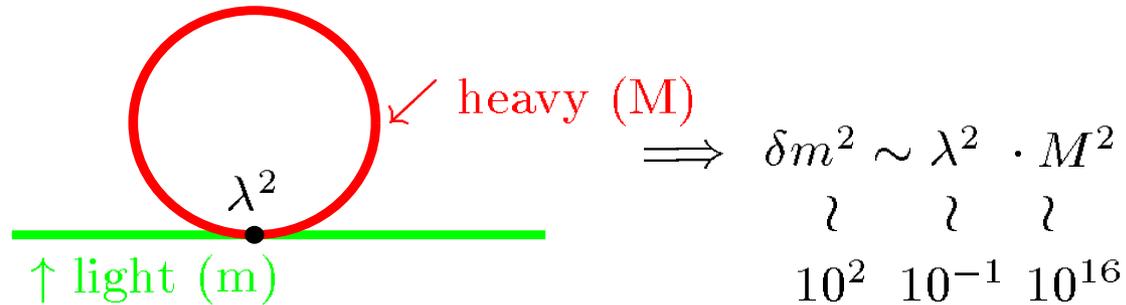
## Хуже того:

- радиационные поправки за счет взаимодействий с виртуальными частицами.  
Лэмбовский сдвиг энергий электронов в атомах  
 $E = mc^2 \implies$  поправка к массе атома
- А как насчет масс элементарных частиц?

Почти все радиационные поправки к массам запрещены симметриями.

Кроме массы бозона Хиггса!

# В Стандартной модели $m_H$ получает ОГРОМНЫЕ радиационные поправки



- Они стремятся подтянуть  $m_H$  к  $M_{Pl}$
- В Стандартной модели требуется чрезвычайно тонкая настройка параметров, чтобы обеспечить  $m_H \ll M_{Pl}$ :

$$m_H^2 = m_0^2 + \delta m^2$$

$$-(10^{15} \text{ ГэВ})^2 + (100 \text{ ГэВ})^2 \quad + (10^{15} \text{ ГэВ})^2$$

# Распространенная точка зрения:

- Тонкая настройка не требуется, если  
Стандартная модель расширяется при энергиях

$$E_{New\ physics} \sim 1\ \text{ТэВ}$$

до теории с улучшенным поведением при высоких энергиях.

$$m_H^2 = m_0^2 + \lambda^2 E_{New\ physics}^2$$

“Новая физика” на масштабе энергий несколько ТэВ  
(но не десятков ТэВ!)

Какая новая физика? – область гипотез.

# Сценарий 1: суперсимметрия

## Суперсимметрия:

симметрия между бозонами (целый спин) и фермионами (полуцелый спин)

- Все частицы Стандартной модели имеют суперпартнёров с массами в области сотен ГэВ — нескольких ТэВ

кварк ( $s = 1/2$ )  $\iff$  скварк ( $s = 0$ )

электрон ( $s = 1/2$ )  $\iff$  сэлектрон ( $s = 0$ )

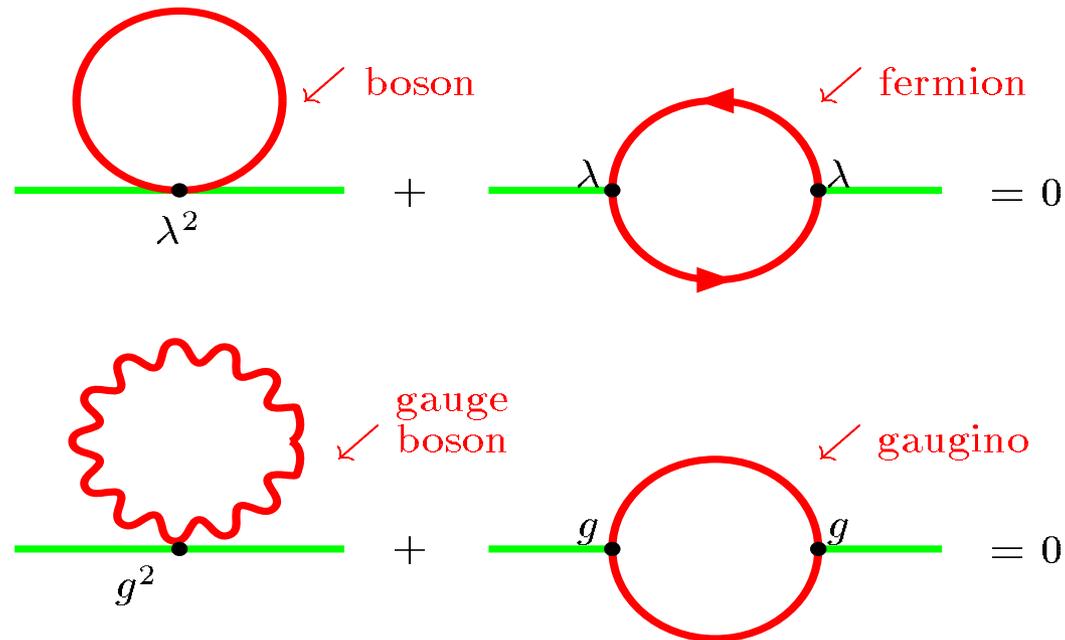
фотон ( $s = 1$ )  $\iff$  фотино ( $s = 1/2$ )

глюон ( $s = 1$ )  $\iff$  глюино ( $s = 1/2$ )

- Все эти новые частицы должны родиться на ЛНС/БАК

Правда, пока не рождаются. Не хватает энергии?

- Суперсимметрия приводит к сокращению больших радиационных вкладов в  $m_H$ :



Что и требуется

Нарушенная суперсимметрия:  $m_{boson} \neq m_{fermion}$

$\iff$  частичное сокращение.

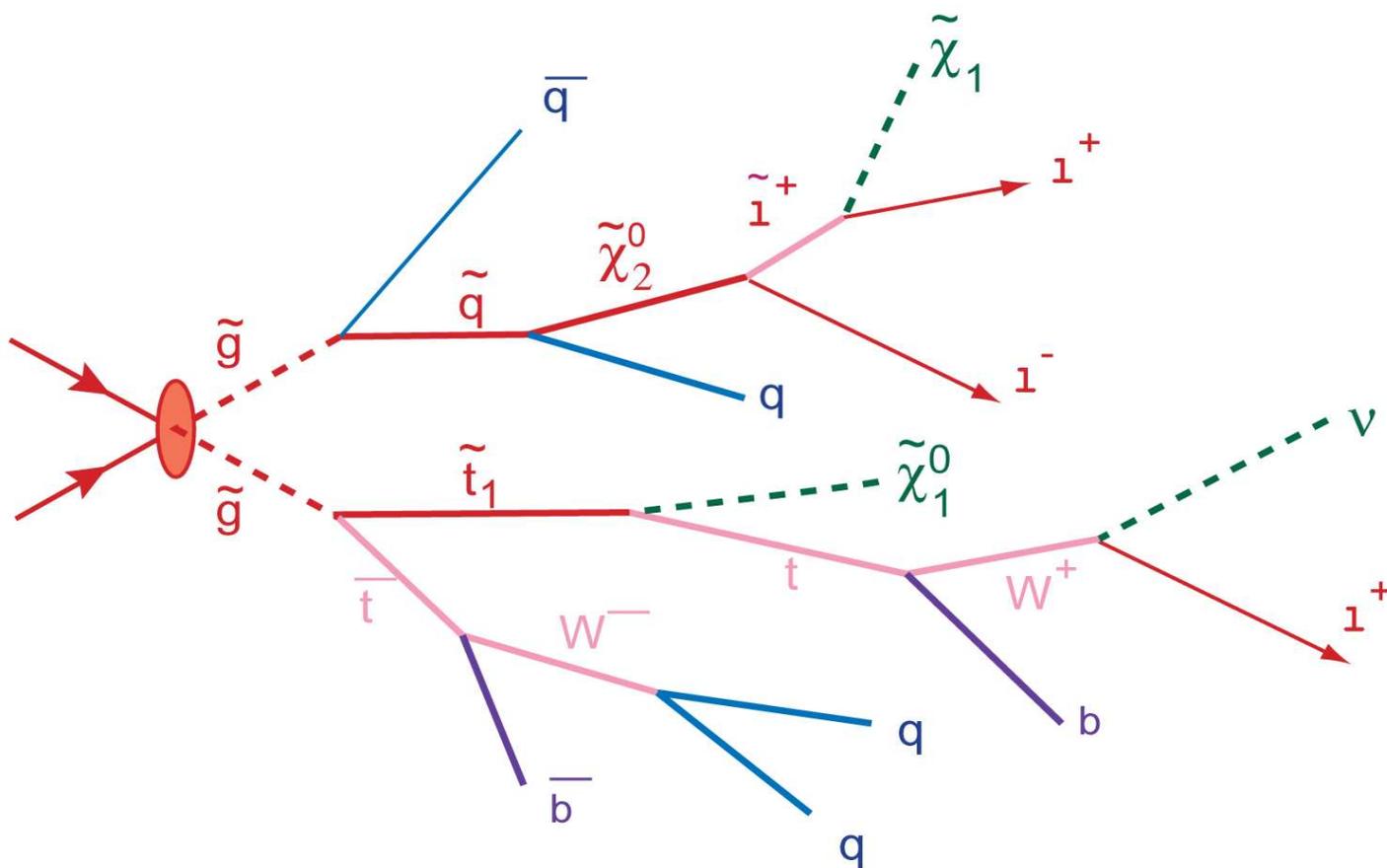
$E_{New\ physics}$  — масштаб масс суперпартнеров.

# Дополнительный плюс суперсимметрии

## Есть кандидат на роль частицы тёмной материи

- Суперпартнёры рождаются и исчезают парами
- Легчайший суперпартнёр стабилен
- Во многих моделях он электрически нейтрален (нейтралино, например, фотино)
- Именно это требуется от частицы тёмной материи.

Суперпартнёры должны быть хорошо видны на LHC/БАК  
при достаточном количестве данных



Пока не видно... А пора бы.

# Сценарий 2: составной бозон Хиггса

С теоретической точки зрения поле Энглера–Браута–Хиггса — не обязательно элементарное.

- Физика конденсированных сред:

Множество примеров нарушения симметрии

и почти всегда нет ничего похожего на элементарный бозон Хиггса

- Сверхпроводимость: эффект Мейсснера (выталкивание магнитного поля из сверхпроводника)  $\iff$  фотон в толще сверхпроводника имеет массу.

Внутренняя симметрия электродинамики нарушена.

Прямой аналог массивных  $W$ - и  $Z$ -бозонов в вакууме.

Никакого элементарного скалярного поля в сверхпроводнике нет.

Эффективная теория сверхпроводимости  
Гинзбурга–Ландау  $\approx$  теория Энглера–Браута–Хиггса  
Поле Гинзбурга–Ландау  $\approx$  поле Энглера–Браута–Хиггса

**Но!** поле Гинзбурга–Ландау – **составное**

Физика частиц: составные скалярные поля  **$\pi$ -мезонов**.  
Нарушение киральной симметрии КХД,  $\langle \bar{q}q \rangle$  – аналог  $V$ .  
Радиальное поле -  **$\sigma$ -мезон**. Составной, совершенно не похож  
на бозон Хиггса.

Составное поле Энглера–Браута–Хиггса  $\implies$  резонансы с  
массами несколько ТэВ – аналоги  $\rho$ -мезона,  $a_1, \dots$

Тоже (пока?) не видно...

**Простые модели закрыты экспериментом**

# Еще сценарии

- Расширенный хиггсовский сектор  $\implies$  несколько бозонов Хиггса
- Дополнительные измерения пространства
- Новые свойства гравитационных взаимодействий

Вполне возможно, природа устроена совсем не так, как о ней думают теоретики  $\implies$  **неожиданные открытия**

Во всех сценариях новой физики свойства открытого бозона Хиггса не совсем такие, как в Стандартной модели

# “Будем искать!”

- Прямые поиски новой физики на LHC/БАК

2014 год – начало работы на полную энергию 13 – 14 ТэВ

- Изучение свойств бозона Хиггса

В минимальной версии Стандартной модели с одним бозоном Хиггса его свойства однозначно предсказываются.

Программа исследований  
свойств новой частицы  
на LHC/БАК

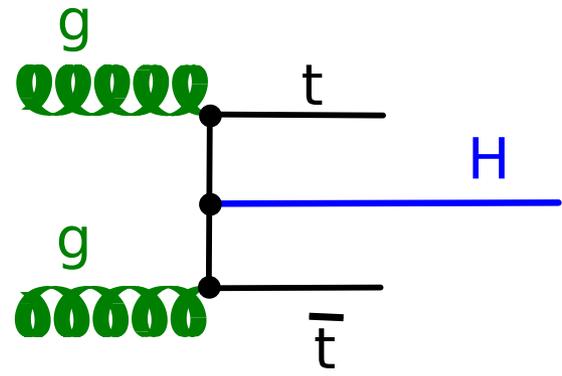
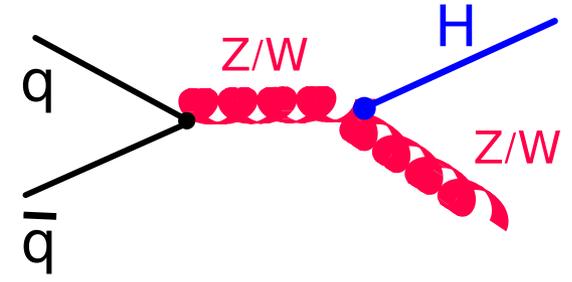
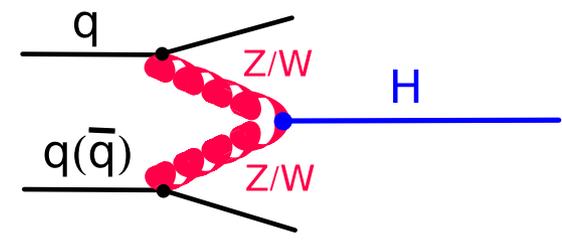
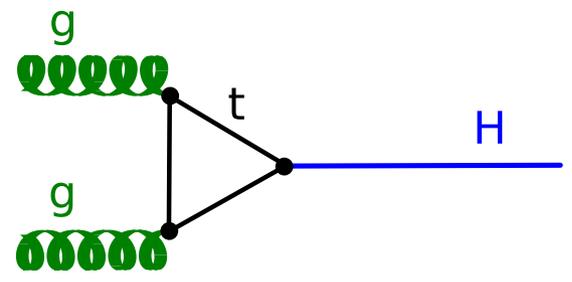
● Распады:

$H \rightarrow WW, H \rightarrow ZZ, H \rightarrow t\bar{t}$  запрещены законом сохранения энергии ( $m_H = 125$  ГэВ,  $m_W = 81$  ГэВ,  $m_Z = 90$  ГэВ,  $m_t = 173$  ГэВ).

- $H \rightarrow b\bar{b}$ ,  $m_b = 4$  ГэВ  $\implies$  вероятность  $\approx 50\%$   
(трудно:  $b$ -кварков и так много рождается на LHC/БАК. Вроде видят на Tevatron'е и начинают видеть на LHC/БАК)
- $H \rightarrow \tau\bar{\tau}$ ,  $m_\tau = 1,8$  ГэВ  $\implies$  вероятность  $\approx 6\%$
- $H \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $m_\mu = 0,105$  ГэВ  $\implies$  вероятность  $\approx 0,02\%$
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,
- $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e^+e^-e^+e^-, e^+e^-\mu^+\mu^-, \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$ ,
- $H \rightarrow WW^* \rightarrow e^+e^- \nu\nu, e^+\mu^-\nu\nu, \mu^+\mu^-\nu\nu$
- $H \rightarrow Z\gamma$ , и т.д.

● Рождение:

- $pp \rightarrow H +$  легкие кварки низких энергий
- $pp \rightarrow H +$  пара кварков высоких энергий
- $pp \rightarrow H + W, pp \rightarrow H + Z$
- $pp \rightarrow H + t\bar{t}$



Все это позволит узнать, как устроен новый сектор физики элементарных частиц.

Пока точность невысока, но она будет постепенно улучшаться.

Любое отклонение от предсказаний минимальной Стандартной модели = новая физика

Пока отклонений нет.

Точности LHC/БАК в любом случае не хватит. Нужен новый  $e^+e^-$ -коллайдер.

$pp$ -коллайдеры — машины открытий.

$e^+e^-$ -коллайдеры — машины для прецизионных исследований.

# Итак,

Открытие – самое начало пути.

Предстоит узнать

- Каковы свойства нового бозона
- Один ли он, или их несколько
- Какая за ним стоит новая физика

Или никакой новой физики нет?

Иерархия энергетических масштабов  $m_H \ll M_{Pl}$  — далеко не единственная загадка в фундаментальной физике.

## Еще загадки

- Энергетический масштаб темной энергии во Вселенной  $\Lambda_{DE} = 0.001$  эВ (!!!).  
Для сравнения:  $\Lambda_{QCD} \simeq 1$  ГэВ,  $m_H = 125$  ГэВ,  $M_{Pl} = 10^{19}$  ГэВ  
Чрезвычайно тонкая подстройка параметров нужна и для  $\Lambda_{DE} \ll \Lambda_{QCD}, M_W$ .
- Иерархия масс элементарных частиц
$$m_e = 0.0005 \text{ ГэВ}, \quad \dots, \quad m_t = 173 \text{ ГэВ}$$
- Примерное равенство плотностей массы тёмной материи и обычного вещества во Вселенной
- Многое другое ...

# Накопившиеся загадки: что это?

- Доминирующая точка зрения: Свидетельство новой физики при доступных энергиях. Целых пластов!
- Другая возможность: “случайности” действительно имеют место на самом фундаментальном уровне. Значения некоторых параметров могут быть – и являются – ненатуральными.

Антропный принцип:  
фундаментальные параметры таковы, что наше  
существование возможно.

На первый взгляд, лженаука. Но только на первый взгляд.

# Дружелюбные случайности

- Космологическая постоянная (плотность темной энергии) должна быть мала, чтобы успели образоваться галактики

Линде '87 , Вайнберг '87

- Протон и нейтрон:  $m_p = 0.9383$  ГэВ,  $m_n = 0.9396$  ГэВ  
Массы лёгких кварков и значения электрических зарядов таковы, что  $m_n > m_p$  (водород существует), но ядра стабильны

- Первичные возмущения плотности во Вселенной как раз таковы, что образуются звёзды и планетные системы

Тегмарк, Рисс '97

- Множество других ...

Теоретические идеи  
(инфляционная теория ранней Вселенной; дочерние  
вселенные; “ландшафт” теории суперструн):

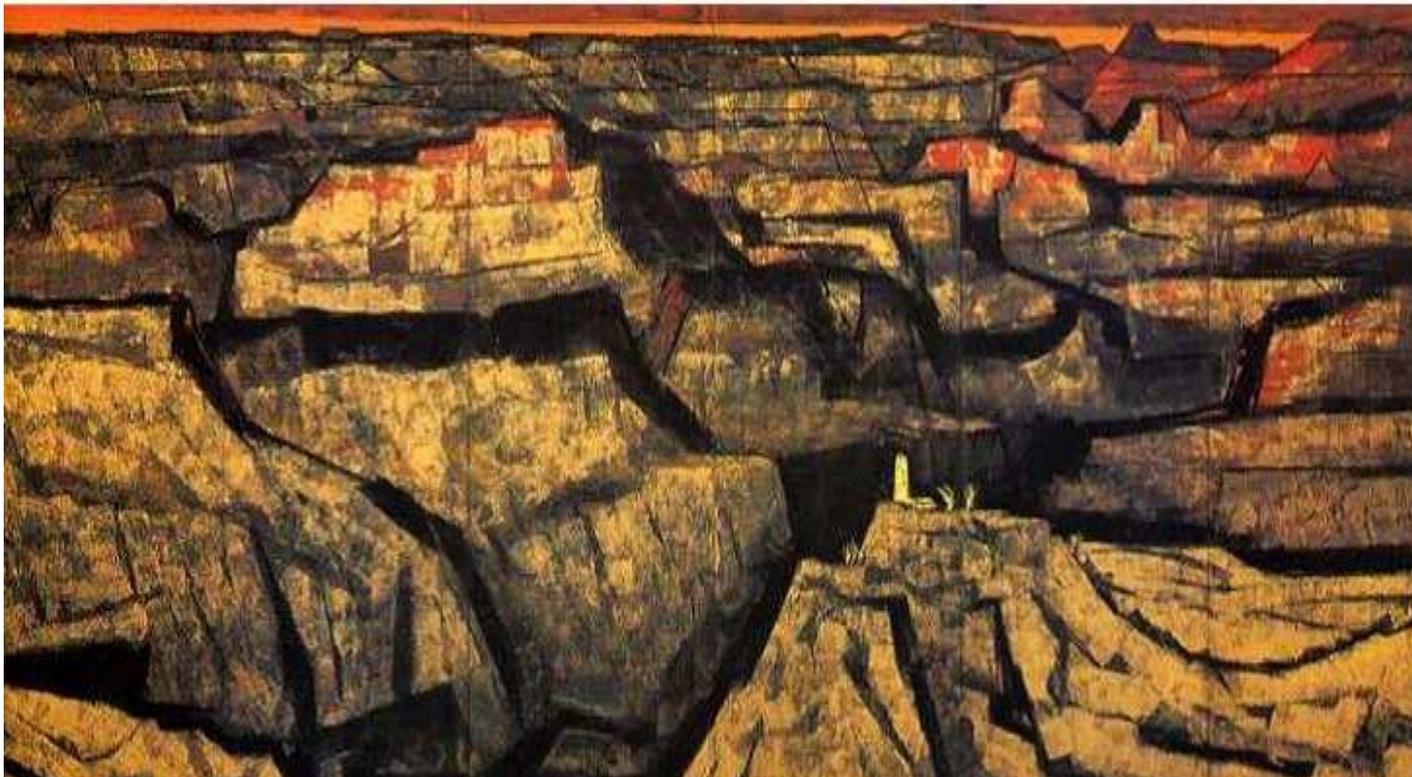
Вселенная гораздо больше, чем ее видимая часть

“Наше положение во Вселенной  
с необходимостью выделено тем,  
что оно допускает существование  
нас как наблюдателей”

Б. Картер' 1974

“Our location in the Universe  
is necessarily privileged to  
the extent of being compatible  
with our existence as observers”

B. Carter' 1974



- Законы физики, в том числе “фундаментальные” константы, различны в разных частях Вселенной
- Мы там, где подходящие законы и константы

НАШЕ СУЩЕСТВОВАНИЕ – ПРОСТО ОДИН ИЗ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ФАКТОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ  
ОКРУЖАЮЩУЮ НАС ОБЛАСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

Нас же не удивляет,  
что на Земле температура от 220 до 320 градусов Кельвина,  
хотя в подавляющем большинстве мест во Вселенной  $T \sim 3 \text{ K}$

# Антропный принцип/environmentalism:

- если работает – плохо для теоретиков  
критерий естественности не работает
- трудно опровергнуть:  
мы же в самом деле существуем
- вполне могут появиться аргументы “против”  
например, открытие зависимости плотности  
тёмной энергии от времени
- может появиться (хорошо бы нет!) аргумент “за”,  
причём скоро:  
если на LHC/БАК не будет найдено “новой физики”

Не исключено, что электрослабый масштаб  $m_H \sim 100$  ГэВ —  
это ещё одна “антропная” величина

При  $m_H > 10$  ТэВ термоядерные реакции в звездах  
невозможны.

При  $m_H \sim M_{Pl} \sim 10^{19}$  ГэВ любой кусок вещества  
был бы черной дырой

# Интрига сохраняется:

НОВАЯ ФИЗИКА — ЗА УГЛОМ

ИЛИ

МЫ НАХОДИМСЯ НА ПОРОГЕ ПЕРЕХОДА  
ОТ ТРАДИЦИОННОГО К АНТРОПНОМУ ВЗГЛЯДУ  
НА ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ?

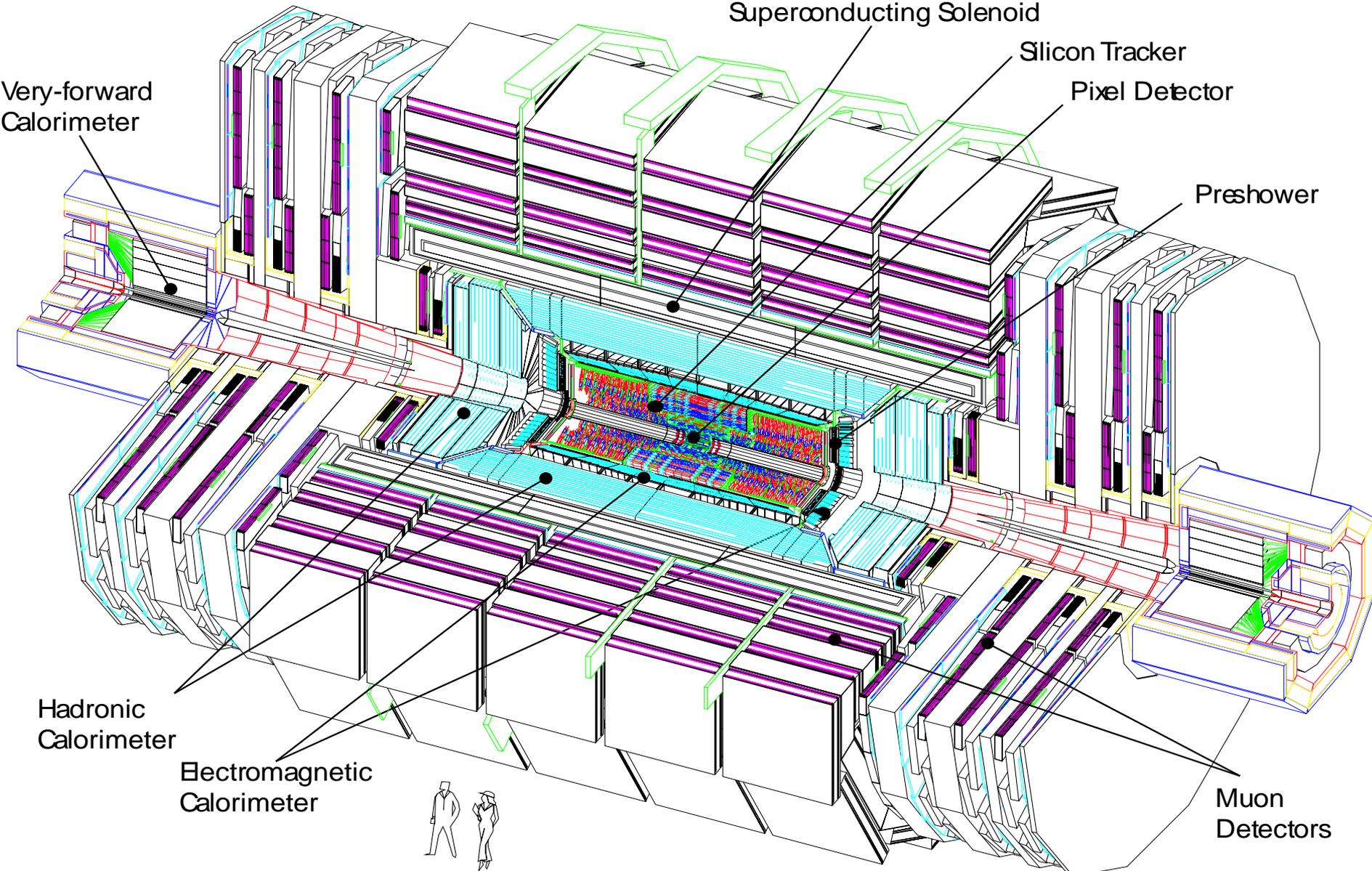




# Backup slides

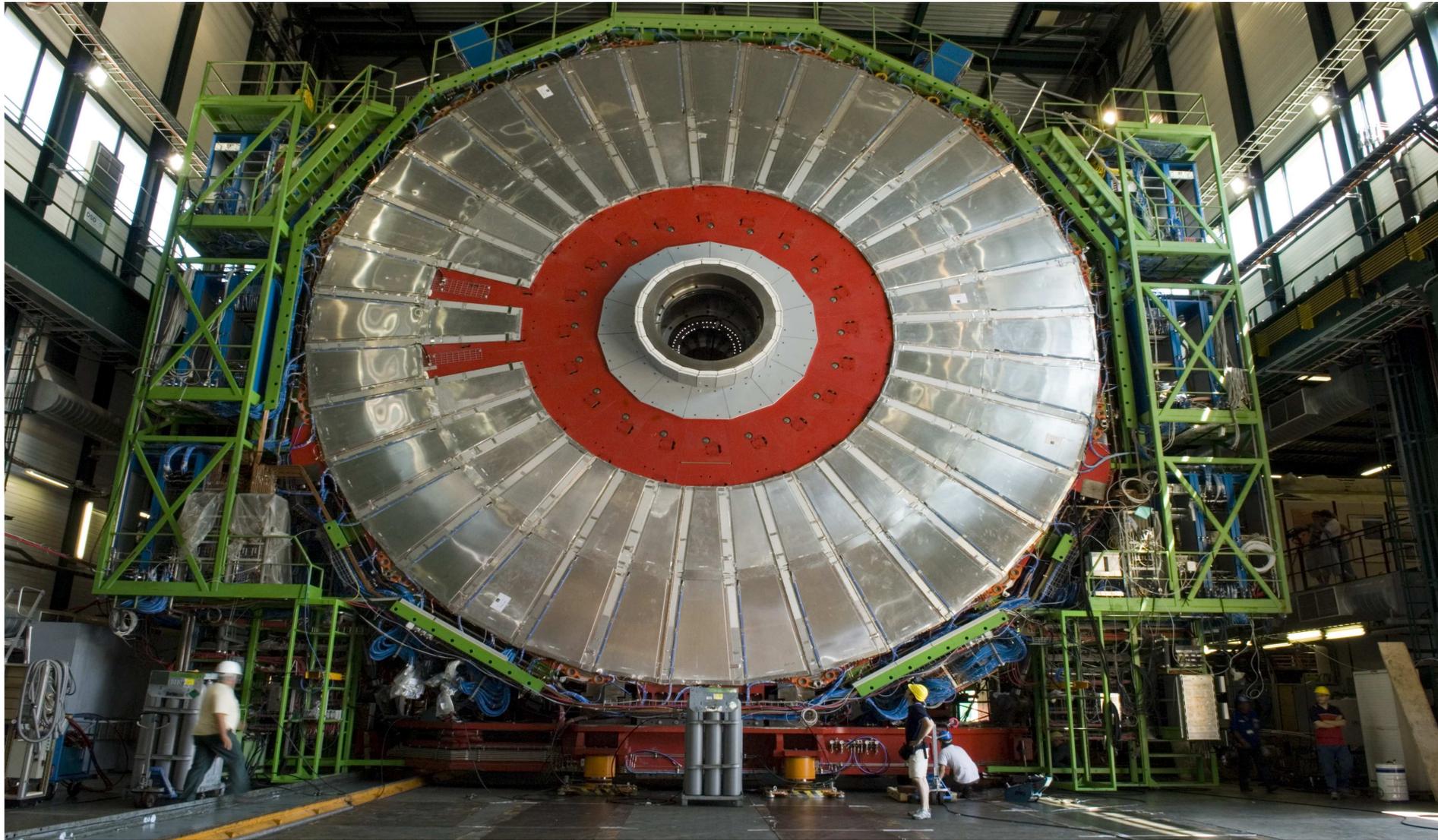
- Вклад России в LHC
- Еще о Стандартной модели (о проверке; космология – темная материя, барионная асимметрия)
- Темная материя: столкнувшиеся скопления; кривые вращений галактик
- Электрослабый переход
- Нейтринные осцилляции
- Пути поиска частиц темной материи
- Антропный принцип

# CMS



**Compact Muon Solenoid**

# CMS с торца



Россия внесла и вносит большой, общепризнанный вклад,  
как интеллектуальный, так и материальный/финансовый



Москва, Новосибирск, Дубна, Троицк, Протвино, С.-Петербург...

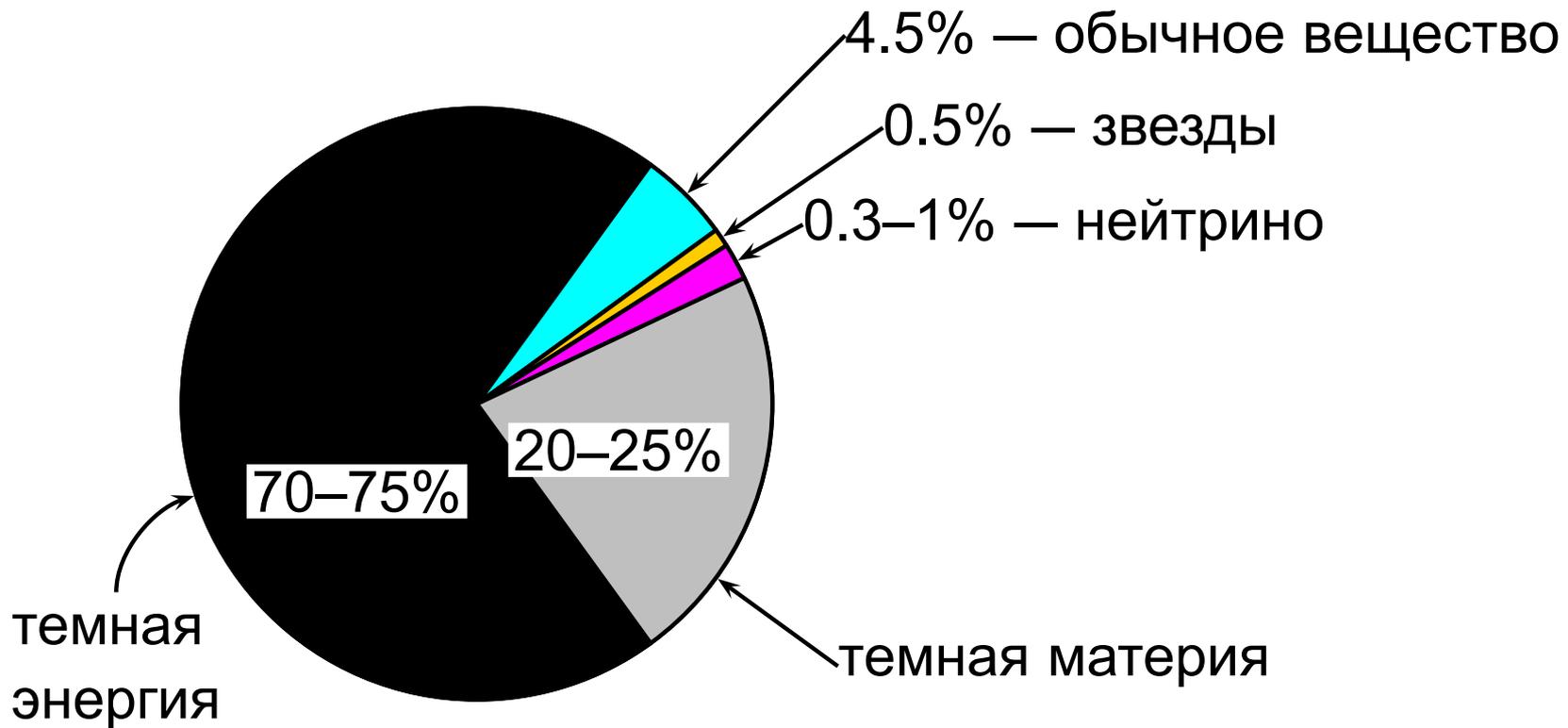
# Еще о Стандартной модели

- Стандартная модель проверена в многочисленных экспериментах
  - Квантовая электродинамика при низких энергиях (лэмбовский сдвиг, аномальные магнитные моменты электрона и мюона): точность  $10^{-8} \div 10^{-12}$
  - Теория электромагнитных и слабых взаимодействий при высоких энергиях  $E \sim 100$  ГэВ проверена на уровне точности порядка  $10^{-3}$ .
  - Предсказание массы  $t$ -кварка до его обнаружения:  
 $m_t = 170 \div 180$  ГэВ. Экспериментально  
 $m_t = 172 \pm 2$  ГэВ
  - Теория сильных взаимодействий — квантовая хромодинамика — тоже надёжно проверена.

И всё же Стандартная модель не полна.

# Космология: прямые свидетельства неполноты Стандартной модели

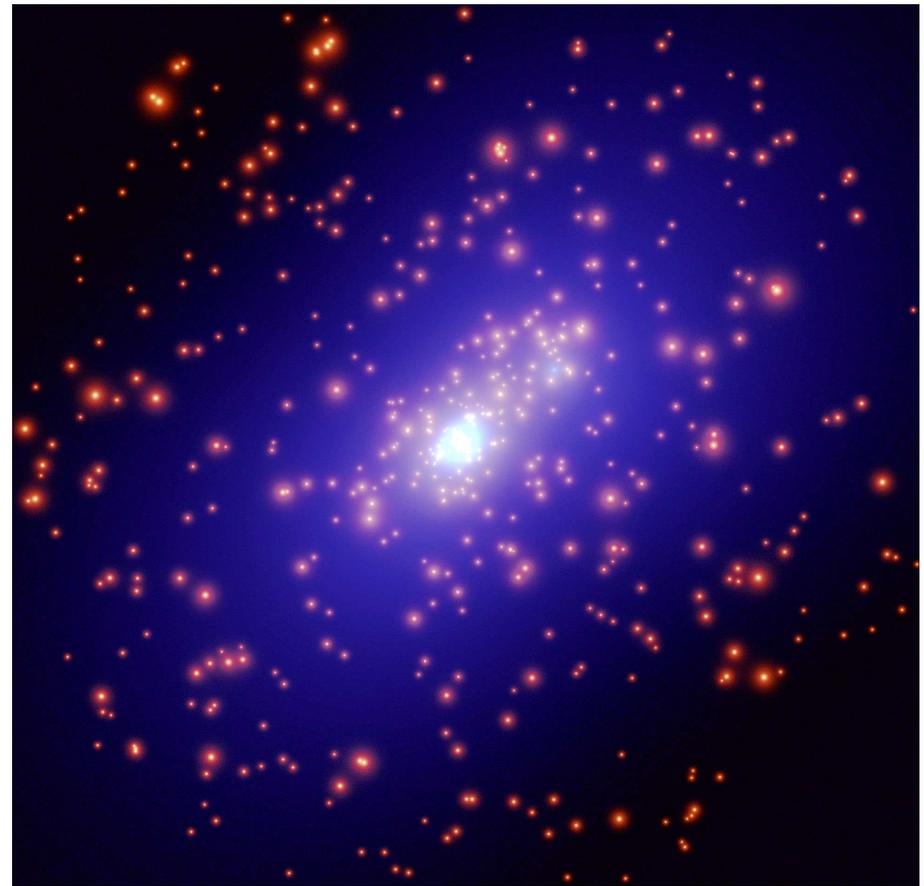
## Баланс энергий в современной Вселенной



# Темная материя

- Данные об образовании галактик и скоплений галактик в процессе эволюции Вселенной
- Гравитационные силы в скоплениях галактик,  
 $R \sim 3 \text{ Мпк} \sim 10^7$  световых лет
- Кривые вращения на периферии галактик,  
 $R \sim 30 \text{ кпк} \sim 10^5$  световых лет

# Гравитационное линзирование скоплений галактик



- Темная материя испытывает такие же гравитационные силы, как обычное вещество
- Темная материя жизненно важна для нас  
Неоднородности плотности темной материи создают гравитационные ямы, в которые “сваливается” обычное вещество и образует галактики.  
Если бы не темная материя,  
не было бы ни галактик, ни звезд
- Темная материя — реликт ранней эпохи, когда вещество в ранней Вселенной было очень горячим и очень плотным, а Вселенная расширялась быстро

- Частицы темной материи:
  - массивные
  - стабильные  
(время жизни больше возраста Вселенной  $\approx 14$  млрд. лет)
  - не несут электрического заряда  
(иначе они были бы уже обнаружены)

В Стандартной модели таких частиц нет  
(нейтрино не годятся: слишком легкие)

**Стандартная модель неполна**

# Частицы тёмной материи

- Наиболее правдоподобная гипотеза:  
X-частицы массы  $m_X = 100 \text{ ГэВ} - 1 \text{ ТэВ}$  (в 100–1000 раз тяжелее протона), участвующие в слабых взаимодействиях

Образуются в очень ранней и горячей Вселенной в столкновениях частиц высоких энергий при  $kT \gtrsim m_X$ . Часть аннигилирует, часть доживает до наших дней.

Остаточная плотность получается правильной, если скорость аннигиляции сравнима со скоростью процессов, обязанных слабым взаимодействиям (масштаб энергий 100 ГэВ – 1 ТэВ).

Масштаб энергий LHC/БАК !

Асимметрия  
между материей и антиматерией во Вселенной –  
еще одна проблема космологии

(“проблема барионной асимметрии”)

Современная Вселенная: вещество есть, антивещества нет.

В чем здесь проблема?

В обычных условиях действует  
закон сохранения барионного числа

$$N_B = \frac{1}{3}(N_{\text{кварков}} - N_{\text{антикварков}}) = \text{const}$$

- Единственная причина стабильности протона (3 кварка) —  
легчайшей частицы, несущей барионное число

$$\tau_p > 10^{33} \text{ лет}$$

Ранняя Вселенная,  $T > 10^{12}$  К = 0.1 ГэВ:  
рождение и аннигиляция кварк-антикварковых пар  $\implies$

$$\frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_q + n_{\bar{q}}} \sim 10^{-9}$$

Невероятно, чтобы такая асимметрия  
была во Вселенной с самого начала.  
Она возникла в результате эволюции.

**Каким образом?**

А. Д. Сахаров'67, В. А. Кузьмин'70

**Барионная асимметрия тоже жизненно важна**

Если бы ее не было, кварки проаннигилировали бы с  
антикварками, и во Вселенной не осталось бы вещества.

Барионная асимметрия может в принципе генерироваться за счет физики на масштабе энергий 100 ГэВ — ТэВ при температурах во Вселенной порядка 100 ГэВ.

А как на самом деле?

Свойства Стандартной модели при высоких температурах вычисляются однозначно. В Стандартной модели генерации барионной асимметрии нет.

Бариогенезис при  $T \sim 100$  ГэВ требует сложной динамики в секторе, нарушающем симметрии Стандартной модели при  $E \sim 100$  ГэВ

Область LHC/БАК

ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ И БАРИОННАЯ АСИММЕТРИЯ  
НАВЕРНЯКА СВИДЕТЕЛЬСТВУЮТ О ЦЕЛОМ ПЛАСТЕ  
НОВОЙ ФИЗИКИ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Гарантии, что это энергии, доступные LHC/БАК, нет: генерация темной материи и барионной асимметрии могла происходить при  $T \gg 100$  ГэВ.



# Радикальная возможность

Проблема иерархии: почему энергетические масштабы известных взаимодействий настолько меньше гравитационного?

$$M_W \sim 100 \text{ ГэВ}, M_{Pl} \sim 10^{19} \text{ ГэВ}$$

Возможный ответ: настоящий гравитационный масштаб тоже невелик,  $M_G \sim 1 \text{ ТэВ}$ .

- Так может быть, если пространство имеет больше трех измерений

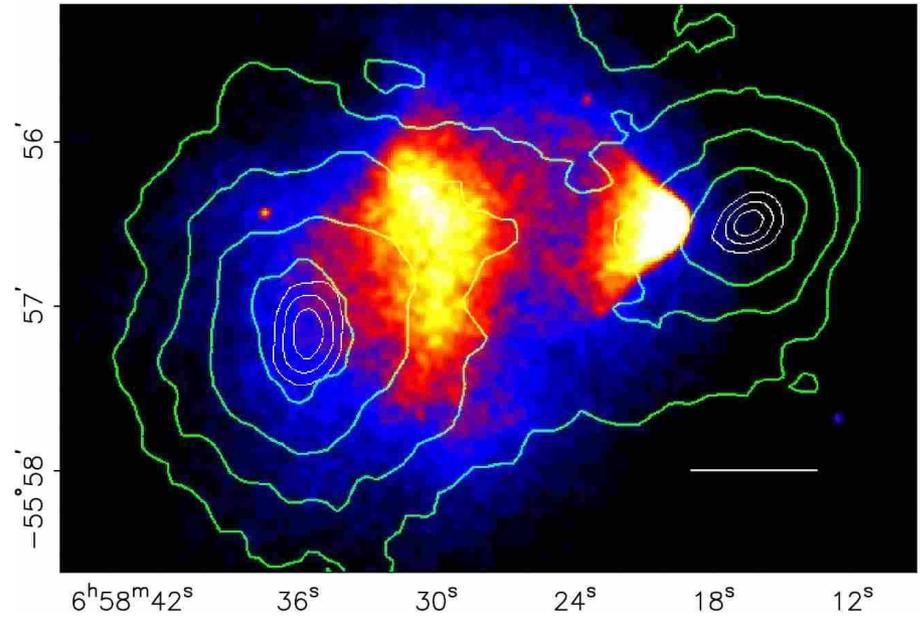
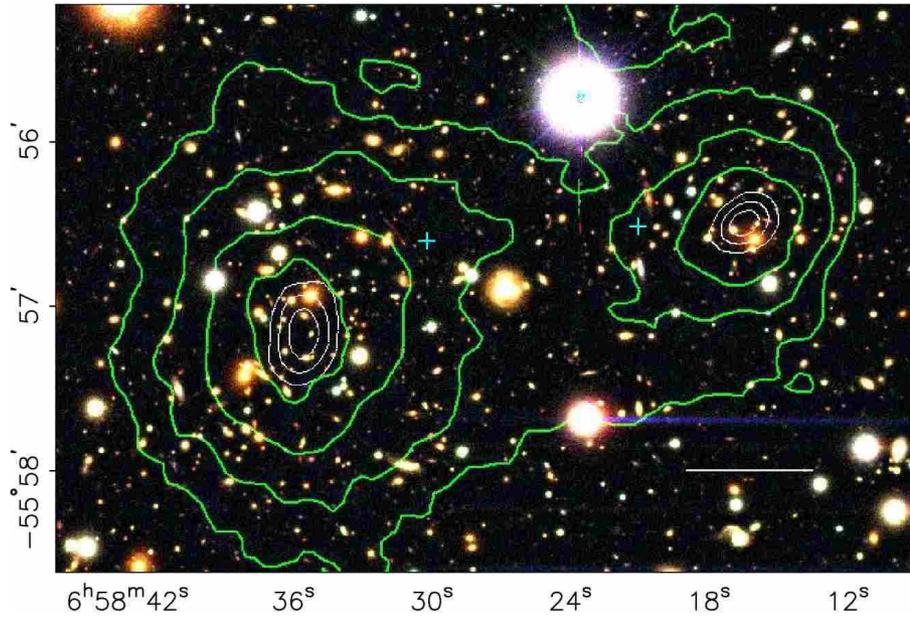
Будет проверено на LHC/БАК

Если верно, то в коллайдерных экспериментах можно будет изучать:

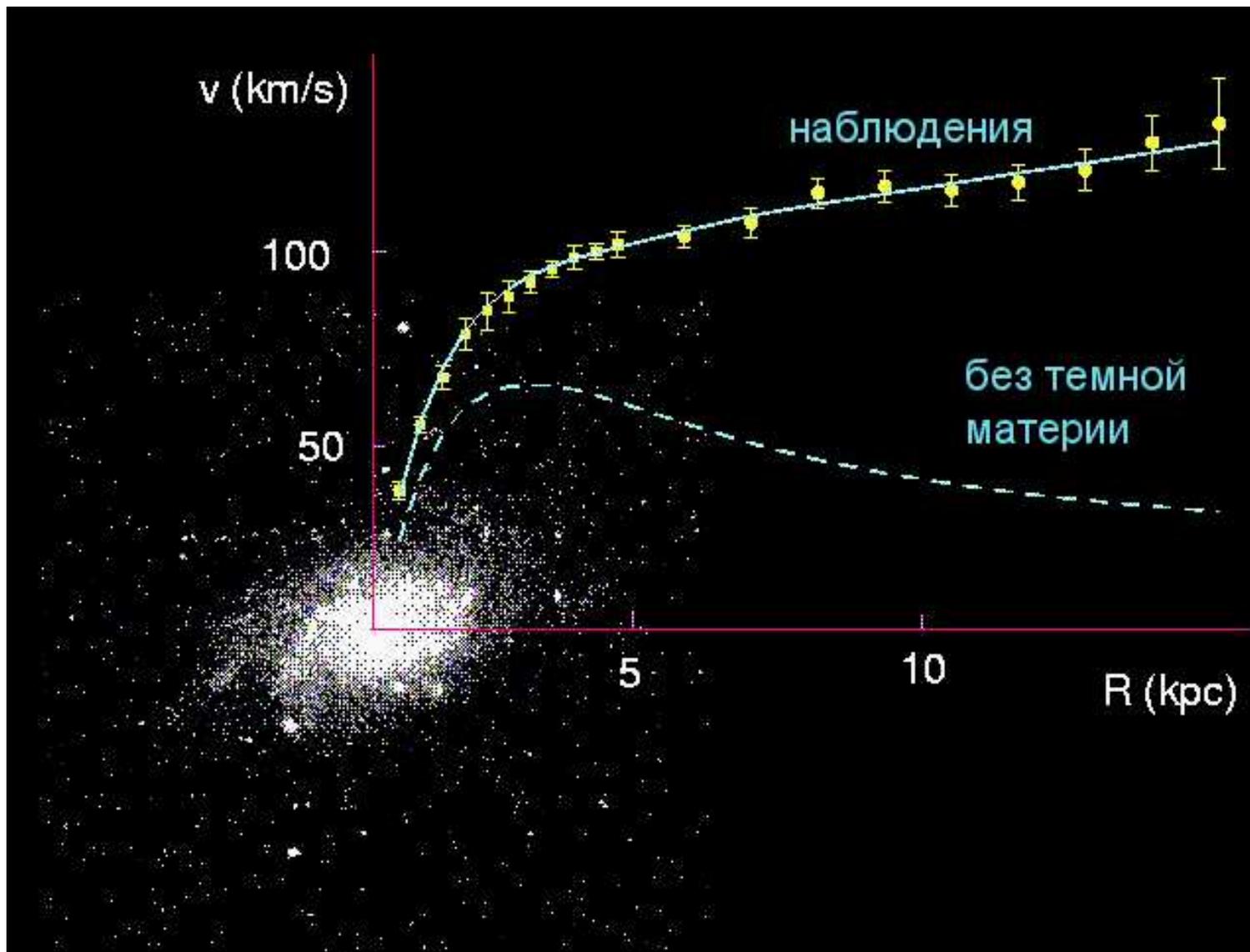
- Дополнительные измерения пространства
- Квантовую гравитацию
- Физику самой ранней Вселенной



# Столкнувшиеся скопления



# Кривые вращений в галактиках





- NB: При повышении температуры **нарушенные симметрии** обычно **восстанавливаются**: намагниченность куска железа пропадает. Это происходит в результате **фазового перехода**
- Симметрии Стандартной модели **не нарушены** при температурах выше  $T \sim 10^{15}$  К,  $kT \sim 100$  ГэВ

$k = 1$  в дальнейшем

Это имеет прямое отношение к космологии: на ранних стадиях эволюции Вселенная была горячей и плотной; скорее всего в ней достигались температуры  $T \sim 100$  ГэВ и выше, **реализовывалась фаза с ненарушенной симметрией**

# Барионная асимметрия: условия Сахарова

Три необходимых условия генерации асимметрии должны выполняться в одно время:

- несохранение барионного числа
- Различие между частицами и античастицами на уровне фундаментальных взаимодействий  
(*C*- и *CP*-нарушение)
- Нарушение теплового равновесия

Может ли барионная асимметрия генерироваться за счет физики на масштабе энергий 100 ГэВ — ТэВ ?

# Теория:

барионное число **не сохраняется** в Стандартной модели  
необходимы **большие флуктуации полей  $W$ - и  $Z$ -бозонов**

Скорость несохранения чрезвычайно мала при нулевой температуре: фактор подавления  $10^{-165}$ .

Высокие температуры: большие **тепловые** флуктуации

**$B$ -несохранение — быстрое по сравнению с космологическим расширением при  $T \gtrsim 100$  ГэВ.**

## ПРОБЛЕМА:

**Вселенная расширяется медленно.** Характерное время расширения при  $T \sim 100$  ГэВ составляет  $10^{-10}$  с

Нужно сравнивать с временем между столкновениями частиц,  
 $t \sim 10^{-24}$  с

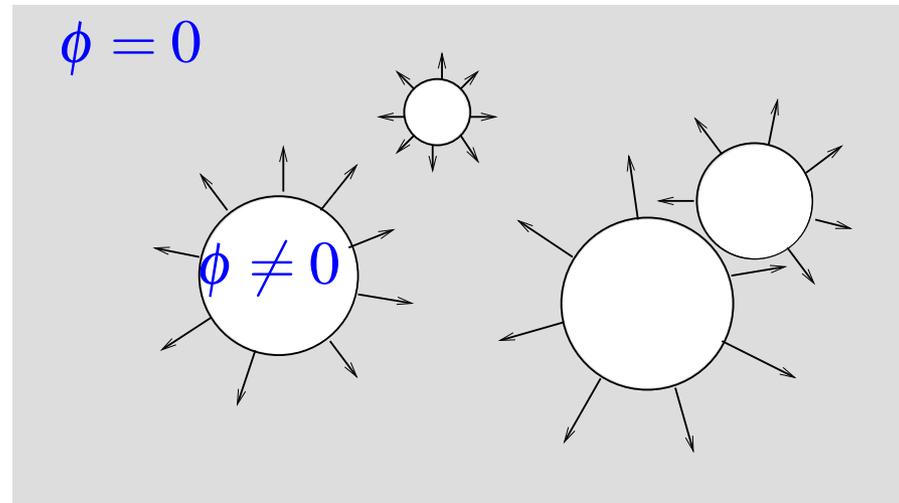
**Достаточно времени для установления теплового равновесия (!?)**

## Единственный шанс: фазовый переход 1-го рода

Симметрии Стандартной модели нарушены в вакууме, но не нарушены при  $T \gtrsim 100$  ГэВ.

Переход из симметричного в асимметричное состояние может в принципе быть фазовым переходом 1-го рода

Кипящая Вселенная, далека от теплового равновесия



Переход 1-го рода происходит из переохлажденного состояния путем образования пузырьков новой фазы с  $r \sim 10^{-16}$  см, их расширения со скоростью  $v \sim 0.1c$  до  $r \sim 0.1H^{-1} \sim$  мм и столкновения стенок.

## А как на самом деле?

Свойства **Стандартной модели** при высоких температурах  
вычисляются однозначно

- В Стандартной модели фазового перехода 1-го рода нет
- Кроме того, слишком слабое различие между частицами и античастицами (нарушение  $CP$ )

Что требуется для генерации барионной асимметрии при  
 $T \sim 100$  ГэВ?

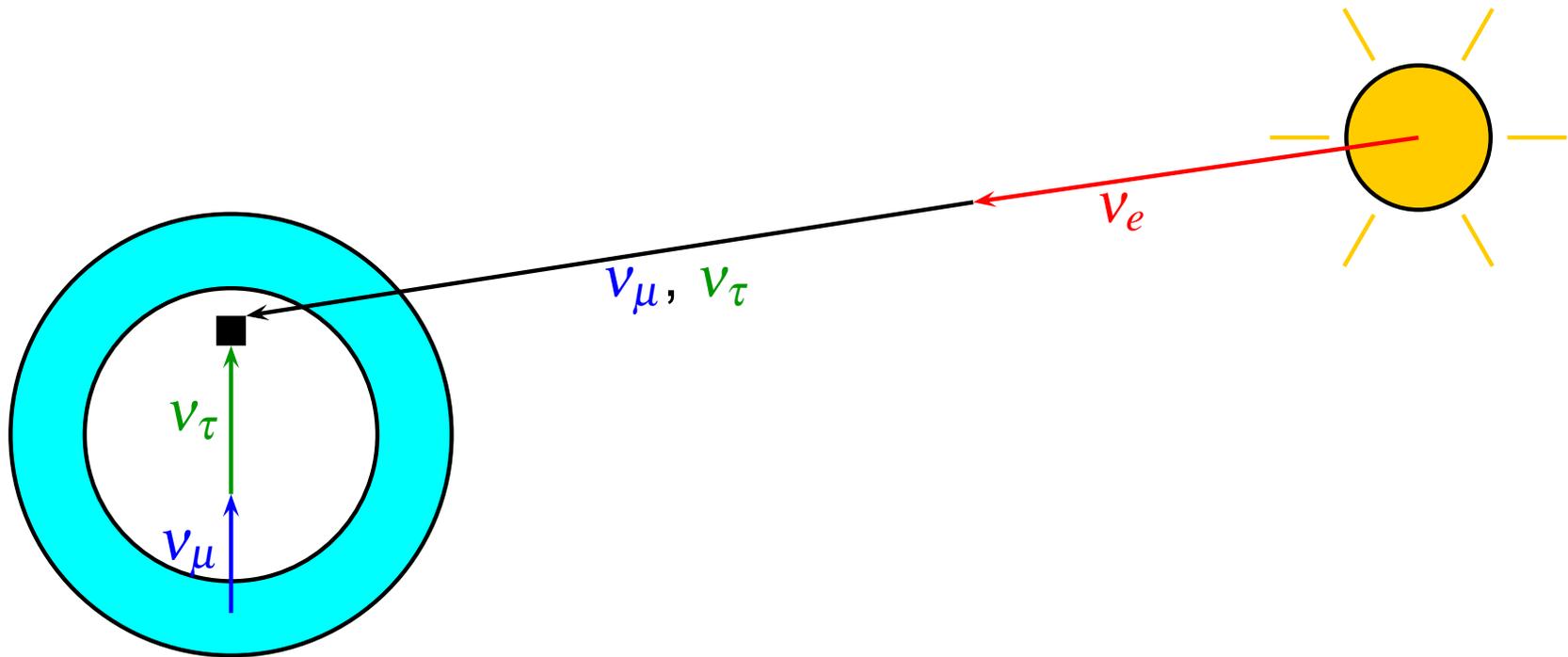
- Новые поля/частицы
  - Должны взаимодействовать с хиггсовскими бозонами, влиять на процесс нарушения симметрии
  - Должны присутствовать в плазме при  $T \sim 100$  ГэВ  
 $\implies$  масса не более 300 ГэВ
- дополнительный источник  $CP$ -нарушения, лучше в хиггсовском секторе  $\implies$  несколько хиггсовских полей

В любом случае бариогенезис при  $T \sim 100$  ГэВ требует сложной динамики в секторе, нарушающем симметрии Стандартной модели  
при  $E \sim 100$  ГэВ

Область LHC/БАК



# Взаимопревращения (осцилляции) нейтрино



Super-K

Ускорительные  $\nu_\mu$ : K2K

Homestake (США)

Kamiokande, Super-K (Япония)

**ГГНТ — SAGE (Россия)**

GALLEX/GNO (Италия)

SNO (Канада)

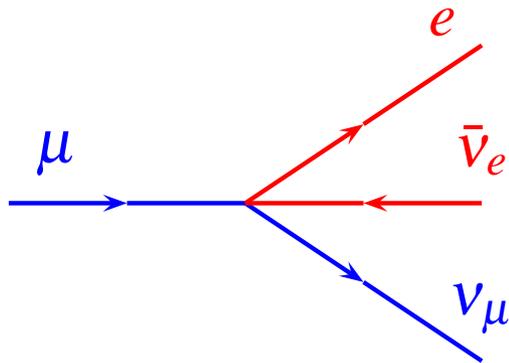
Реакторные  $\bar{\nu}_e$ : KamLAND

# Законы сохранения в Стандартной модели

- Энергия, импульс.
- Барионное число  $(N_q - N_{\bar{q}})$  ← протон стабилен,  $\tau_p > 10^{33}$  лет!

- Лептонные числа  
 $L_e = (N_{e^-} + N_{\nu_e}) - (N_{e^+} + N_{\bar{\nu}_e})$   
 $L_\mu$ ,  $L_\tau$

Распад мюона



$$\mu \longrightarrow e \gamma, \quad \text{Br} < 10^{-11}$$

В рамках Стандартной модели осцилляции нейтрино  
НЕВОЗМОЖНЫ:  
они противоречат сохранению лептонных чисел.

Нейтрино имеют массы, причем такие,  
что лептонные числа нарушаются

Эти массы крайне малы:  $m_\nu < 2.05$  эВ (Троицк  $\nu$ -масс)  
по сравнению с массой электрона  $m_e = 511$  кэВ =  $5 \cdot 10^5$  эВ  
(не говоря уже о более тяжелых лептонах и кварках)

**ПЕРВОЕ ПРЯМОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО НЕПОЛНОТЫ  
СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ.**

ЛНС/БАК вряд ли прольет свет на природу масс нейтрино



# Пути поиска частиц темной материи

- LHC/БАК  $\Leftrightarrow$  рождение частиц темной материи и их партнеров
- Низкофонные эксперименты в подземных лабораториях  $\Leftrightarrow$  регистрация частиц темной материи

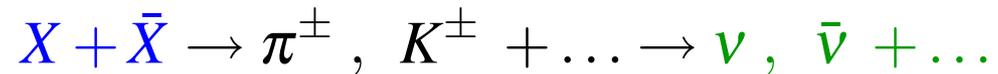
Скорость  $X$ -частиц вблизи Земли  $u \sim 10^{-3}c$   
(характерная скорость вращения в грав. поле Галактики)

Упругие столкновения  $X$ -частиц с ядрами детектора:  
редкие процессы с малой передачей энергии

$$E_{\text{отдачи}} \sim M_{\text{ядра}} u^2$$
$$\sim 10 \text{ кэВ} - 1 \text{ МэВ}$$

- низкофонные условия  $\Leftrightarrow$  подземные лаборатории
- сверхчистые изотопы

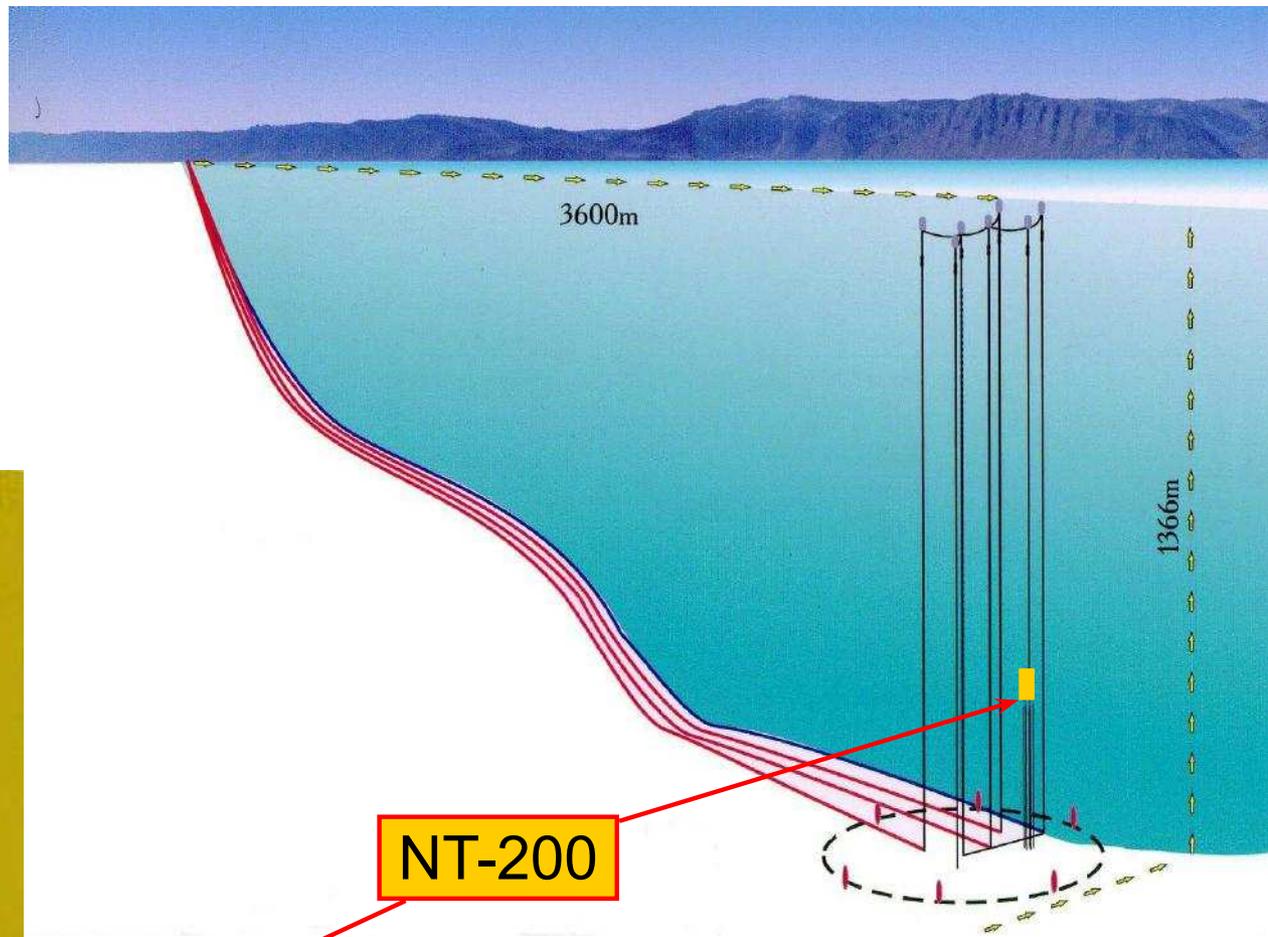
- Регистрация **продуктов аннигиляции X-частиц** в центре Земли, Солнца



Нейтрино  
высоких  
энергий



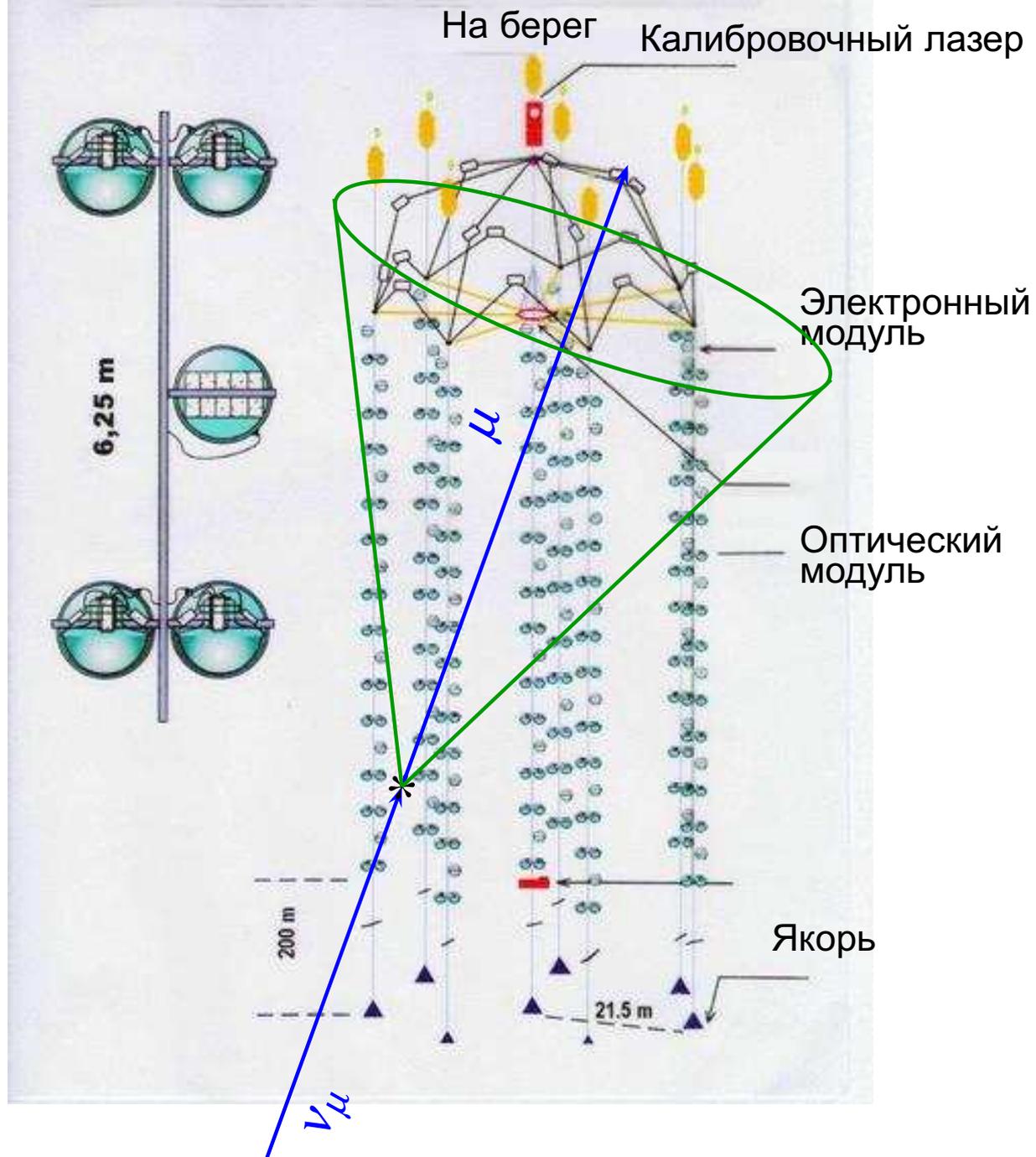
- Подземный сцинтилляционный телескоп Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.
- Байкальский нейтринный телескоп



NT-200

# Нейтринный телескоп NT-200

Дата: 06



- Байкальский нейтринный телескоп  
Существенное развитие возможно и реально.
- Еще одна возможность: регистрация продуктов аннигиляции в космосе.  
Поиск  $e^+$ ,  $\bar{p}$  в космических лучах (PAMELA), аннигиляционных  $\gamma$ -квантов (EGRET, ...).

### Регистрация частиц тёмной материи:

Новые частицы, фундаментальные законы сохранения;  
окно в раннюю Вселенную

при температуре  $k_B T \sim 10 \div 100$  ГэВ, в возрасте  $10^{-8} \div 10^{-10}$  с.