

Фундаментальные представления  
современной физики:  
от взаимодействий элементарных частиц  
до структуры и эволюции Вселенной

Лекция 6

## Основные разделы курса:

- понятия и принципы квантовой физики;
- квантовые физические системы в макро- и микромире;
- квантовая логика, квантовые вычисления, квантовая телепортация;
- релятивистские квантовые поля как универсальная форма существования материи;
- элементарные частицы и типы их взаимодействий;
- свойства современной Вселенной;
- асимметрия между веществом и антивеществом во Вселенной;
- тёмная материя и тёмная энергия;
- основные этапы космологической эволюции;
- инфляционная космология;
- астрофизика высоких и сверхвысоких энергий

# Физика элементарных частиц

*(приблизительно две лекции)*

1. От квантовой механики к квантовой теории поля.
2. Взаимодействующие поля и взаимодействия частиц.
3. Стандартная модель физики частиц.
4. Симметрии и законы сохранения.
5. Механизм Хиггса и бозон Хиггса.

# Симметрии и законы сохранения

- Всякой симметрии соответствует свой закон сохранения и наоборот.
  - Симметрия относительно сдвигов во времени [законы физики одинаковы в разные моменты времени]  $\iff$  закон сохранения энергии
  - Симметрия относительно сдвигов в пространстве  $\iff$  закон сохранения импульса
  - Симметрия относительно поворотов в пространстве  $\iff$  закон сохранения углового момента
- NB: “Очевидные”, пространственно-временные симметрии
- А как с законом сохранения электрического заряда?
  - Тоже соответствует симметрия, но неочевидная, “внутренняя”

# Симметрии и законы сохранения: распады и стабильность частиц

**«всё, что разрешено, - происходит!»**

➤ все частицы распадаются, если это разрешено законами сохранения

**закон сохранения энергии:**

частица не может распасться на более легкую

**+ закон сохранения заряда:**

заряженная частица может распасться только на заряженную

**= легчайшая заряженная частица стабильна!**

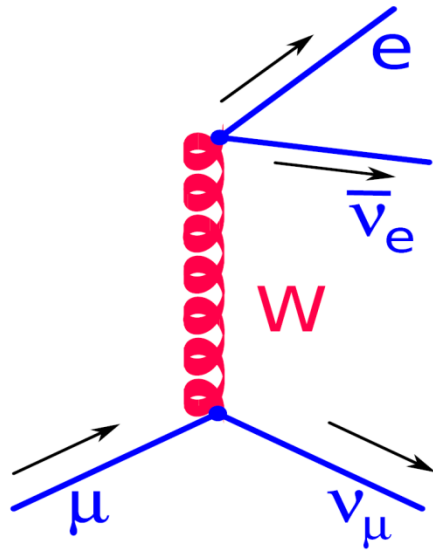
*электрический заряд: электрон*

*барионный заряд: протон*

# Симметрии и законы сохранения: распады и стабильность частиц

«всё, что разрешено, - происходит!»

- все частицы распадаются, если это разрешено законами сохранения



*тау*  
1777 МэВ

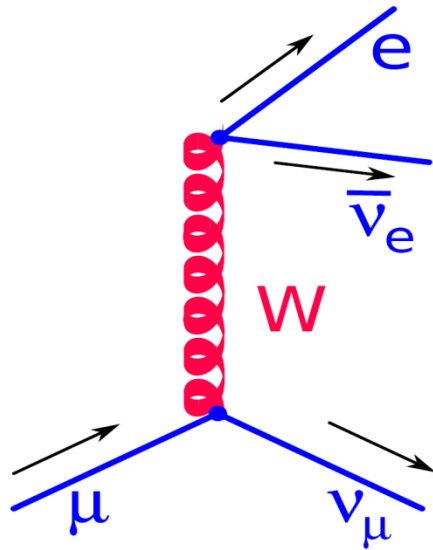
*мюон*  
106 МэВ

*электрон*  
0.511 МэВ

# Симметрии и законы сохранения: распады и стабильность частиц

«всё, что разрешено, - происходит!»

- все частицы распадаются, если это разрешено законами сохранения



*тау*  
1777 МэВ

*мюон*  
106 МэВ

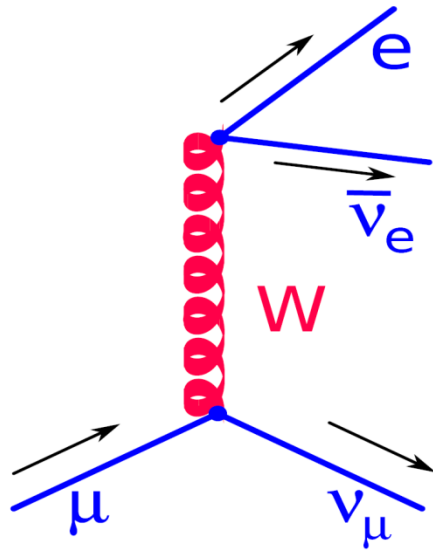
*электрон*  
0.511 МэВ

**ХМ....**

# Симметрии и законы сохранения: распады и стабильность частиц

«всё, что разрешено, - происходит!»

- все частицы распадаются, если это разрешено законами сохранения



$\tau_{\mu}$   
1777 МэВ

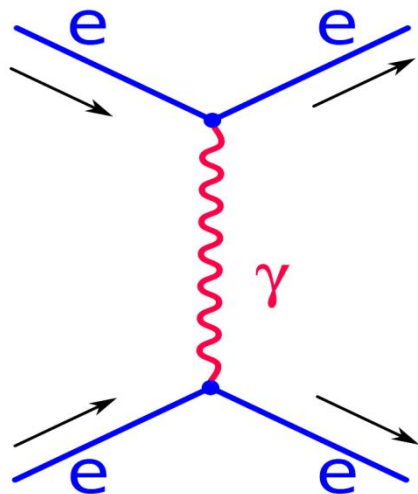
$m_{\mu}$   
106 МэВ

$m_e$   
0.511 МэВ

$m_W$ ....

$m_W$   
80385 МэВ

# Взаимодействующие поля и взаимодействие частиц



частицы **реальные**  
и частицы **виртуальные**

$$E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$$

физически наблюдаемые частицы  
(начальные, конечные состояния)

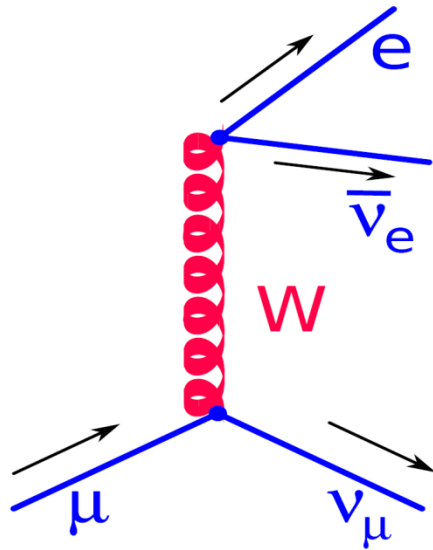
$$E^2 \neq \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$$

только во внутренних линиях  
(промежуточные состояния)

# Симметрии и законы сохранения: распады и стабильность частиц

«всё, что разрешено, - происходит!»

- все частицы распадаются, если это разрешено законами сохранения



*тау*  
1777 МэВ

*мюон*  
106 МэВ

*электрон*  
0.511 МэВ

# Симметрии и законы сохранения: 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
- Близкие аналоги фотона: *W*- и *Z*-бозоны

Но они имеют массы!

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

Что-то не то ...

---

# Симметрии и законы сохранения: нарушение симметрии

**совместить теоретические принципы симметрии**  
(например, калибровочную инвариантность)  
**с экспериментальными результатами**  
(например, массивные  $W$  и  $Z$ )

# Симметрии и законы сохранения: нарушение симметрии

совместить теоретические принципы симметрии  
с экспериментальными результатами

## **явное**

- принципы испорчены
- красоты нет
- считать трудно

# Симметрии и законы сохранения: нарушение симметрии

совместить теоретические принципы симметрии  
с экспериментальными результатами

## **явное**

- принципы испорчены
- красоты нет
- считать трудно

## **динамическое**

- квантовые поправки
- красоты нет  
*(в квантовой теории)*
- редко

# Симметрии и законы сохранения: нарушение симметрии

совместить теоретические принципы симметрии  
с экспериментальными результатами

## **явное**

- принципы испорчены
- красоты нет
- считать трудно

## **динамическое**

- квантовые поправки
- красоты нет  
*(в квантовой теории)*
- редко

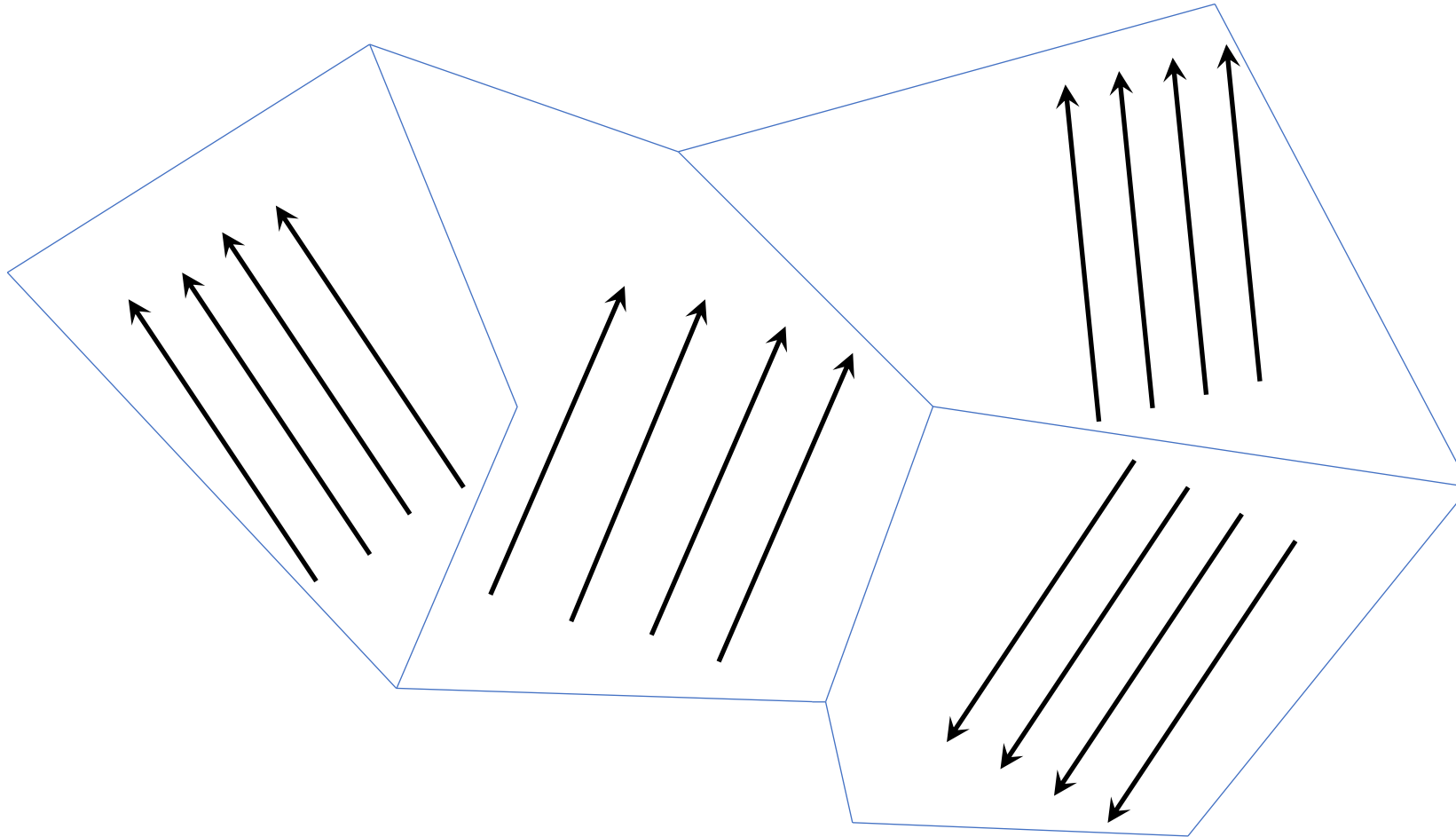
## **спонтанное**

- теория симметрична,  
основное состояние - нет
- красота есть  
*(в полной теории)*
- симметричные запреты  
не действуют



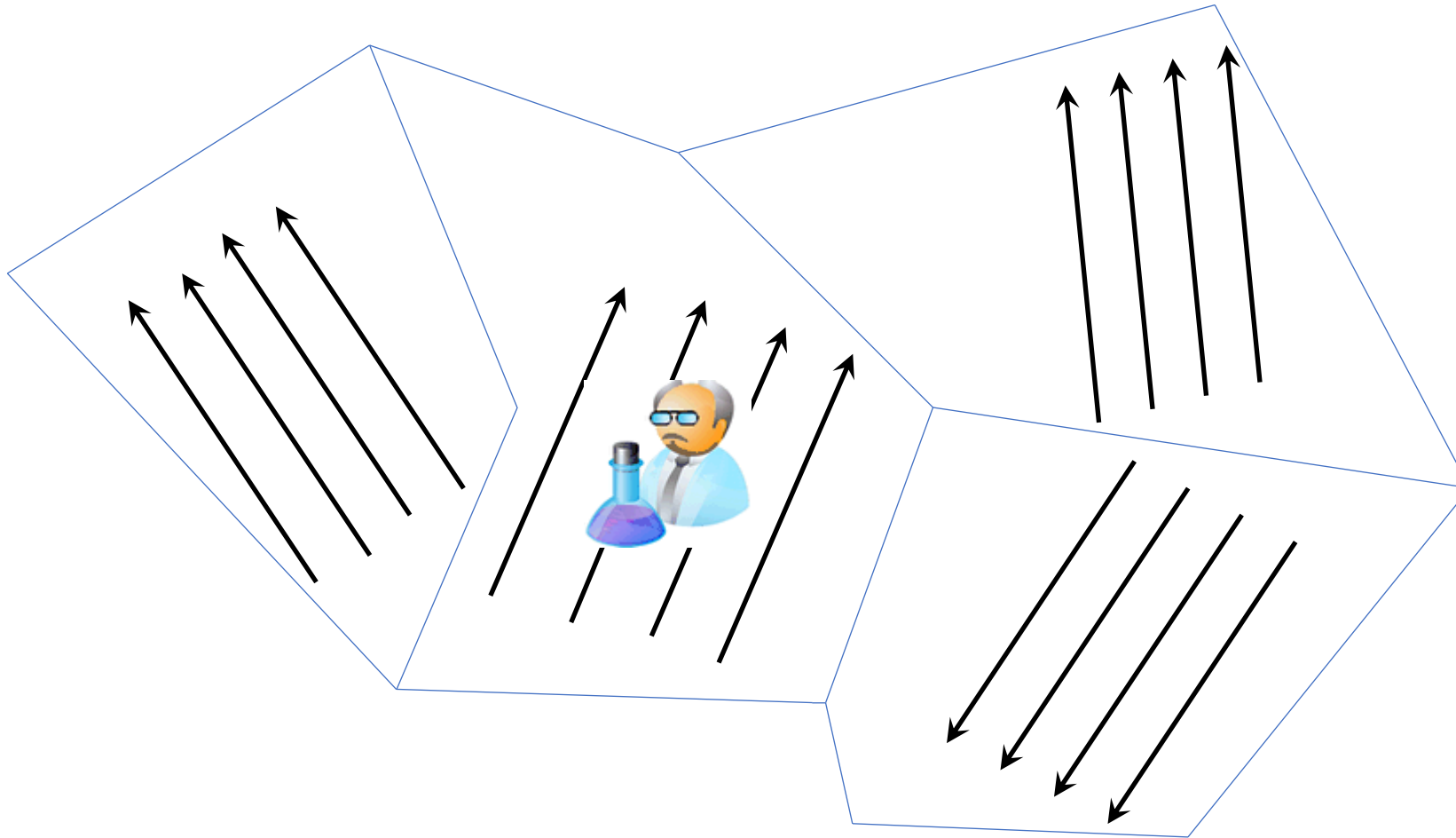
# Симметрии и законы сохранения: спонтанное нарушение симметрии (пример)

ферромагнетик (железка)



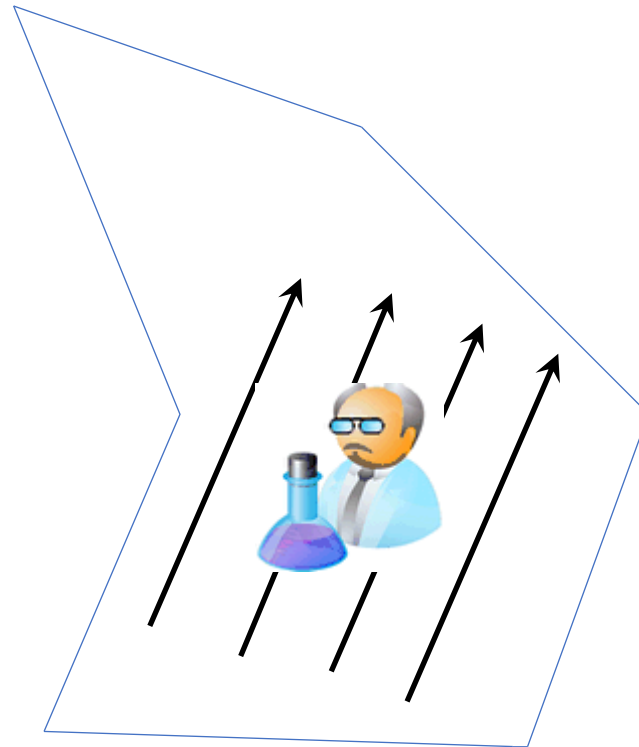
# Симметрии и законы сохранения: спонтанное нарушение симметрии (пример)

ферромагнетик (железка)



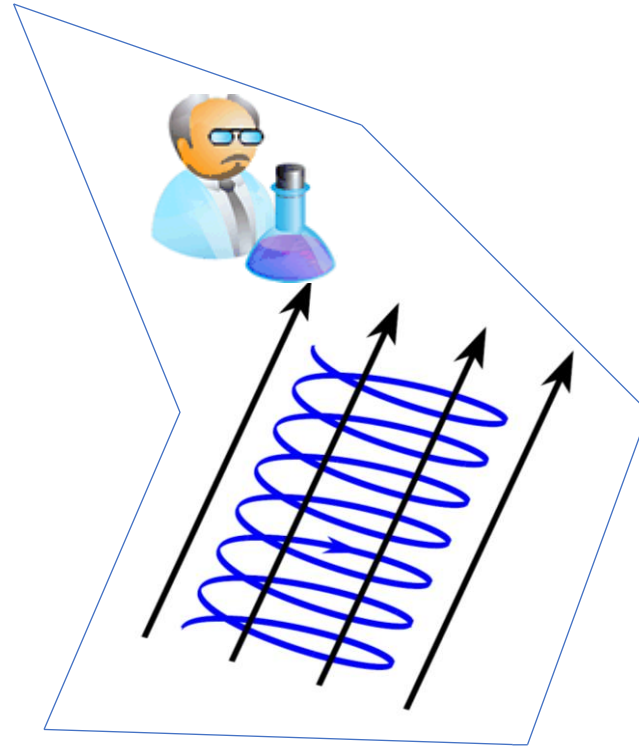
# Симметрии и законы сохранения: спонтанное нарушение симметрии (пример)

ферромагнетик (железка)



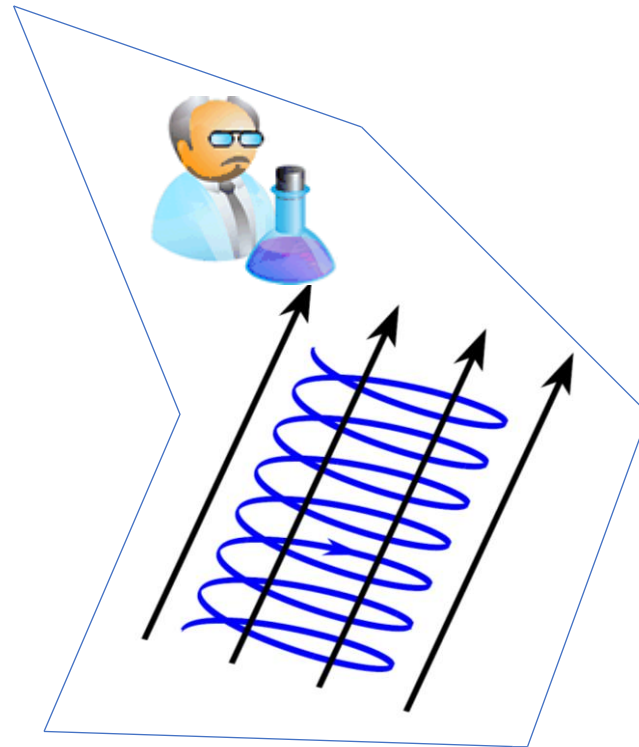
# Симметрии и законы сохранения: спонтанное нарушение симметрии (пример)

ферромагнетик (железка)



# Симметрии и законы сохранения: спонтанное нарушение симметрии (пример)

ферромагнетик (железка)



Экспериментатор внутри магнита решил бы, что в пространстве есть выделенное направление.

А теоретик бы так не решил.

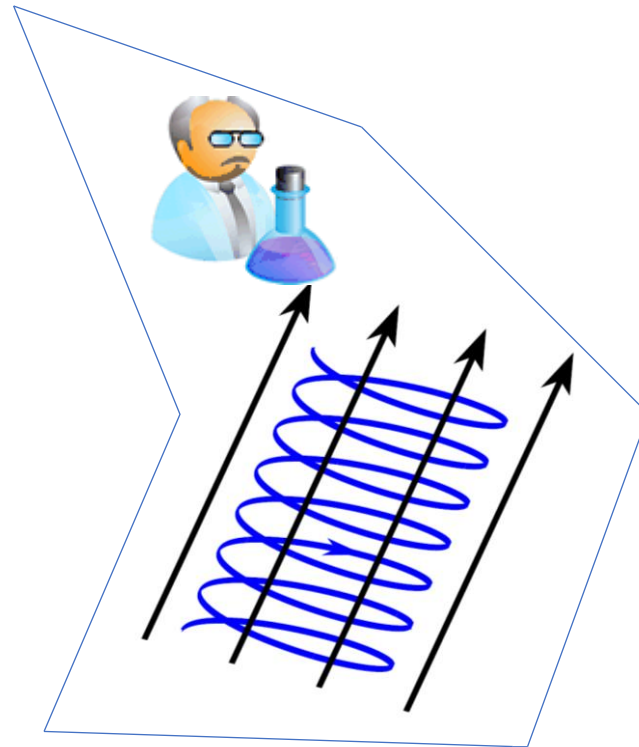
# Физика элементарных частиц

*(приблизительно две лекции)*

1. От квантовой механики к квантовой теории поля.
2. Взаимодействующие поля и взаимодействия частиц.
3. Стандартная модель физики частиц.
4. Симметрии и законы сохранения.
5. **Механизм Хиггса и бозон Хиггса.**

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: спонтанное нарушение симметрии (пример)

ферромагнетик (железка)



Экспериментатор внутри магнита решил бы, что в пространстве есть выделенное направление.

А теоретик бы так не решил.

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса

## Физики внутри магнита.

Теоретик: “Вращательная симметрия в пространстве есть, но она **нарушена** пронизывающим все магнитным полем  $\implies$  запрет на несохранение углового момента не действует. **Квант нового поля – фотон.**”

## Физики, изучающие микромир.

Энглер–Браут (1964 г.) и чуть позже Хиггс (1964 г.):  
“Внутренняя симметрия в микромире есть, но она **нарушена** разлитым в **вакууме** новым полем  $\implies$  запрет на существование масс не действует. Частицы спина 1 автоматически имеют массы” (сейчас  $W, Z$ ). “Новое поле не нарушает пространственно-временные симметрии  $\implies$  новое поле – **скалярное**”

Хиггс (1964 г.): “**Квант нового поля – новая частица**” (бозон Хиггса). “**Ее спин равен 0**”

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса

Физики внутри магнита.

Экспериментатор: построил ускоритель, столкнул электроны, открыл в их столкновениях фотон.

Физики, изучающие микромир.

Экспериментаторы на LHC/БАК: так и есть!

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса

Физика внутри магнита

Симметрия вращений  
пространства

Нарушена в  
образце железа

Нарушение магнитным  
полем  $\vec{B}$

поле  $\vec{B}$  – вектор,  
выделяет направление  
в пространстве,  
квант имеет спин  $1 \cdot \hbar$

Физика микромира

Внутренняя симметрия

Нарушена в вакууме

Нарушение новым  
полем  $H$

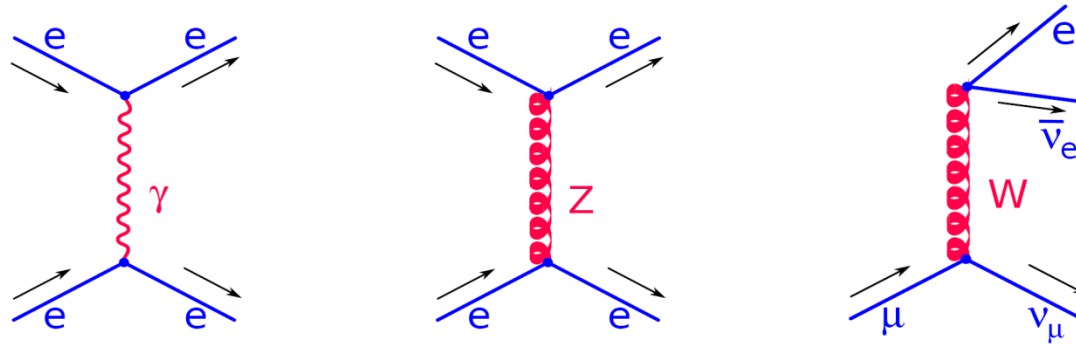
поле  $H$  – скаляр,  
не выделяет направления  
в пространстве,  
квант имеет спин  $0$

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса

**совместить теоретические принципы симметрии**  
(например, калибровочную инвариантность)  
**с экспериментальными результатами**  
(например, массивные  $W$  и  $Z$ )

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: массы других частиц

Взаимодействия всех частиц с  $W$ - и  $Z$ -бозонами (слабые взаимодействия) хорошо изучены



Они устроены в принципе так же, как взаимодействия с фотоном.

Взаимодействие электрона с  $Z \iff Z$ -заряд электрона

Внутренняя симметрия этих взаимодействий **запрещает всем частицам иметь массы.**

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: массы других частиц

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)

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: массы других частиц

Все частицы должны были бы **не иметь** массы

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

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

+ фотон, глюоны,  $W$ ,  $Z$ , гравитон

Но почти все они массивные

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

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

+ фотон, глюоны,  $W$ ,  $Z$ , гравитон + бозон Хиггса.

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: массы других частиц

главное – не частица,  
главное – поле!

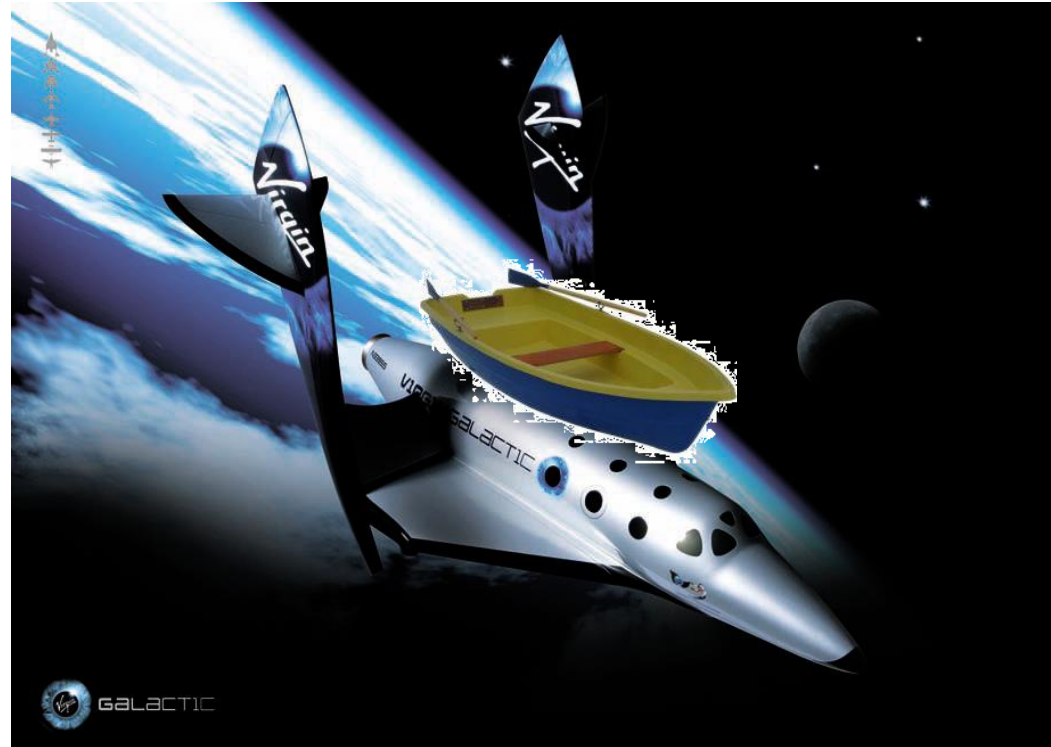
Хиггсовское поле приводит к возникновению массы у частиц



# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: массы других частиц

главное – не частица,  
главное – поле!

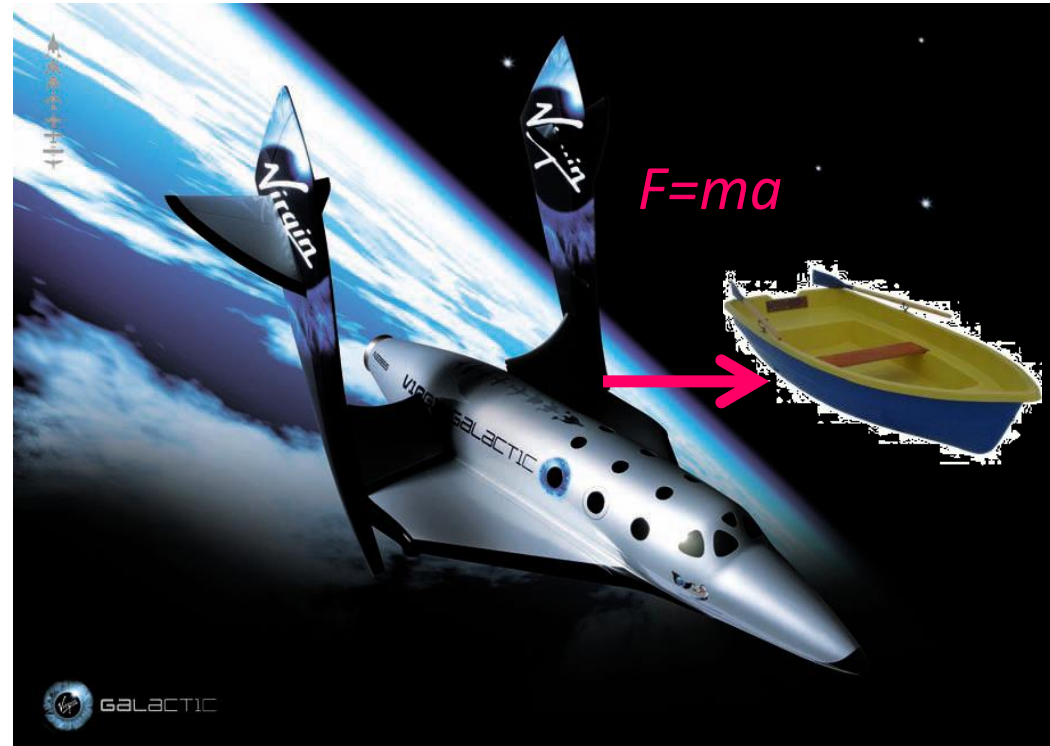
Хиггсовское поле приводит к возникновению массы у частиц



# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: массы других частиц

главное – не частица,  
главное – поле!

Хиггсовское поле приводит к возникновению массы у частиц



# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: массы других частиц

главное – не частица,  
главное – поле!

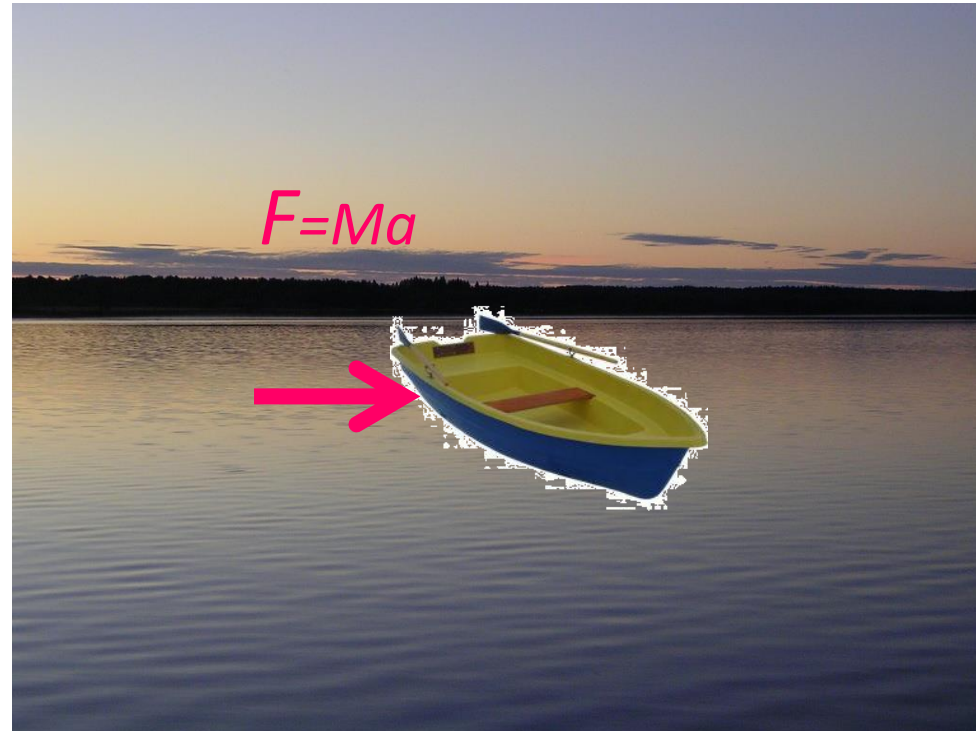
Хиггсовское поле приводит к возникновению массы у частиц



# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: массы других частиц

главное – не частица,  
главное – поле!

Хиггсовское поле приводит к возникновению массы у частиц



# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: массы других частиц

главное – не частица,  
главное – поле!

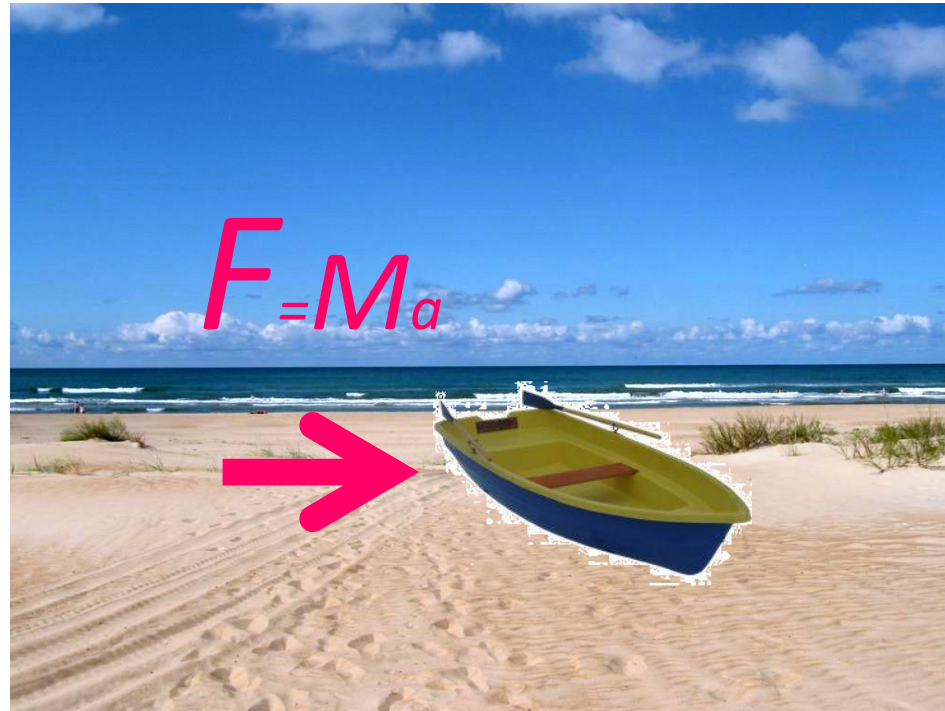
Хиггсовское поле приводит к возникновению массы у частиц



# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: массы других частиц

главное – не частица,  
главное – поле!

Хиггсовское поле приводит к возникновению массы у частиц



# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: массы других частиц

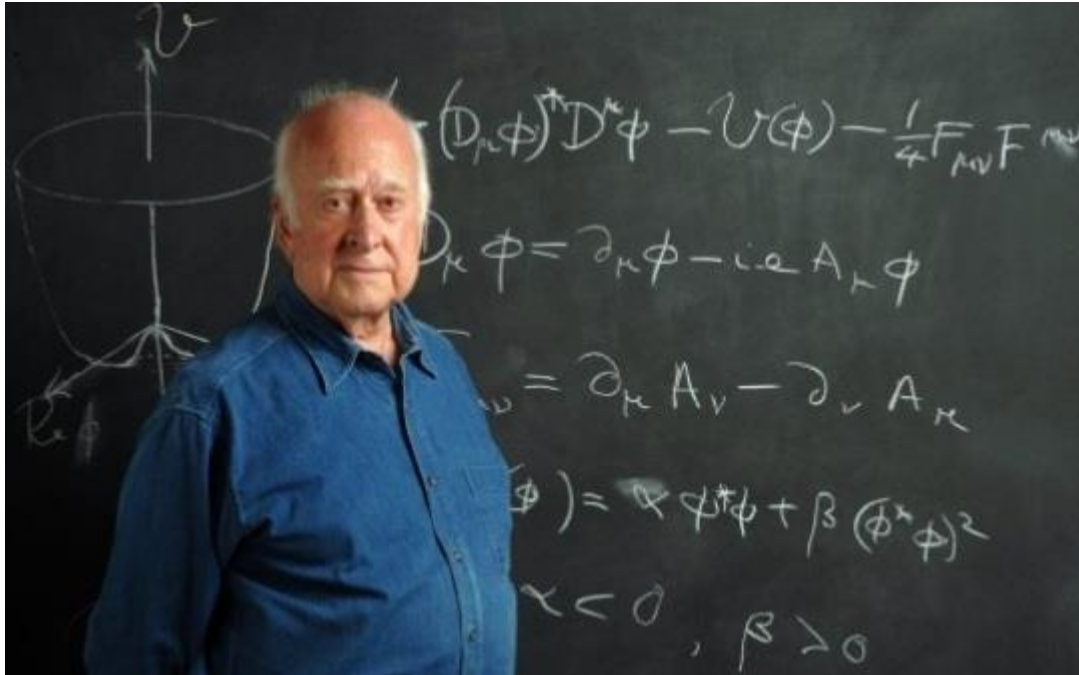
главное – не частица,  
главное – поле!

Хиггсовское поле приводит к возникновению массы у частиц

Бозон Хиггса –  
экспериментальное  
проявление этого поля  
*(волны на воде)*

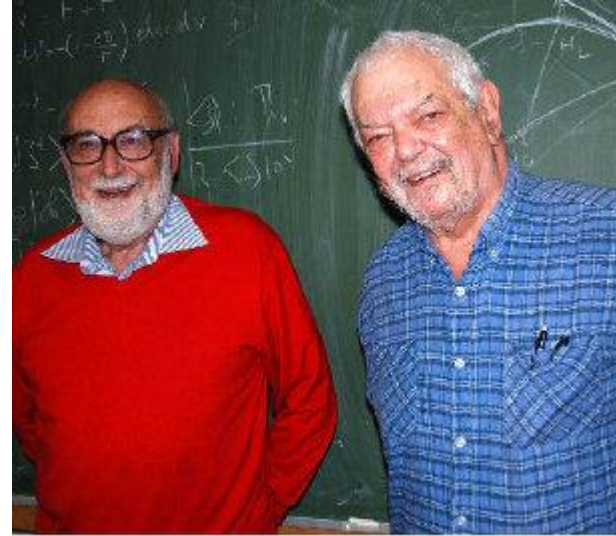
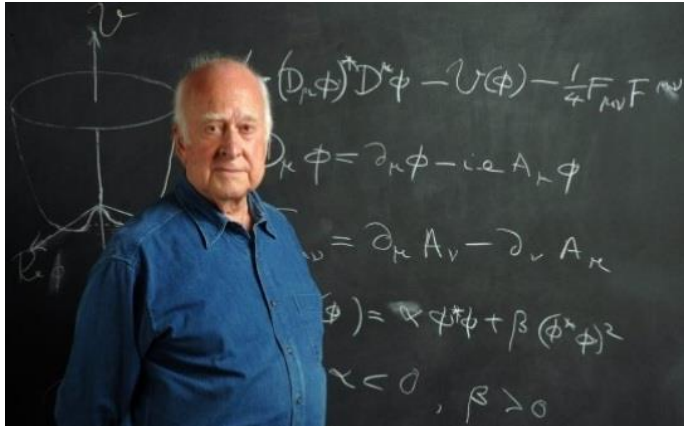


# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: история



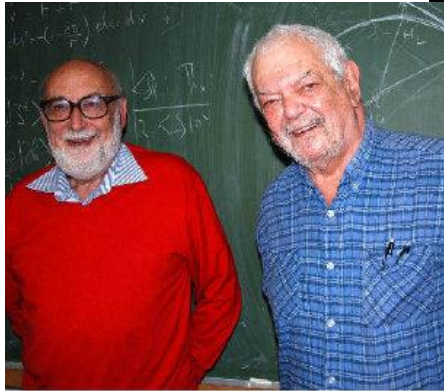
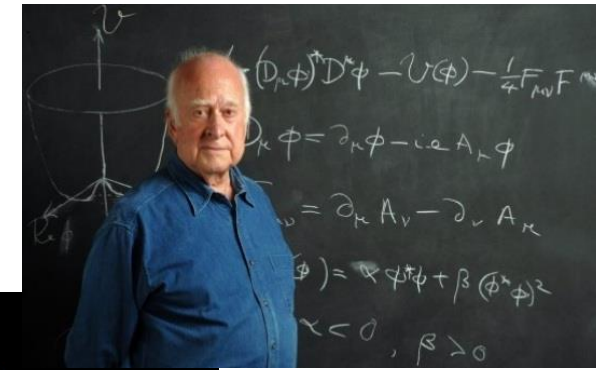
Единственная частица, носящая имя ученого, Питера Хиггса...

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: история



Единственная частица, носящая имя ученого, Питера Хиггса...  
... была впервые предсказана Робертом Браутом и Франсуа Энглером в 1964 г.

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: история



Единственная частица, носящая имя ученого, Питера Хиггса...  
... была впервые предсказана Робертом Браутом и Франсуа Энглером в 1964 г.

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: открытие частицы

*июль 2012:*

открытие нового бозона со свойствами,  
напоминающими свойства бозона Хиггса

*декабрь 2012:*

подтверждение открытия, уточнение свойств

*март 2013:*

дополнительное уточнение свойств  
(вероятно, это именно бозон Хиггса!)

*декабрь 2013:*

Нобелевская премия теоретикам (работы 1964 г.)

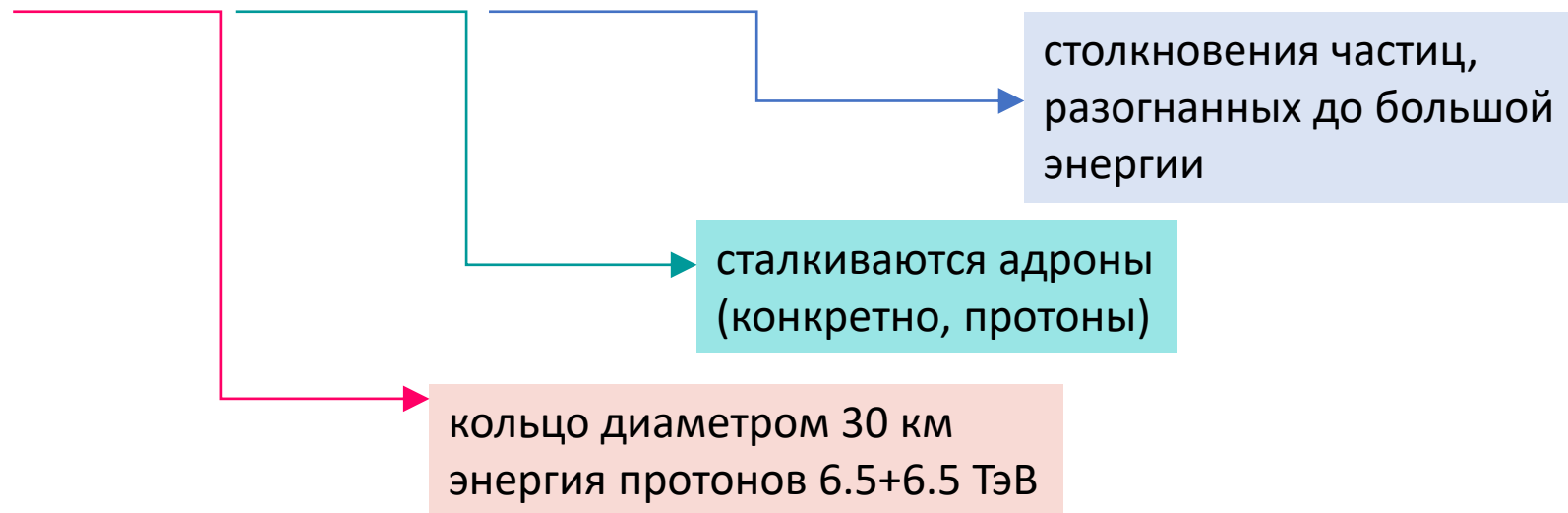
## Стандартная модель физики частиц: замечание

Чтобы открыть новые тяжелые частицы и новые взаимодействия на сверхмалых расстояниях, нужны пучки частиц высокой энергии и высокой интенсивности (светимости)

# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: открытие частицы

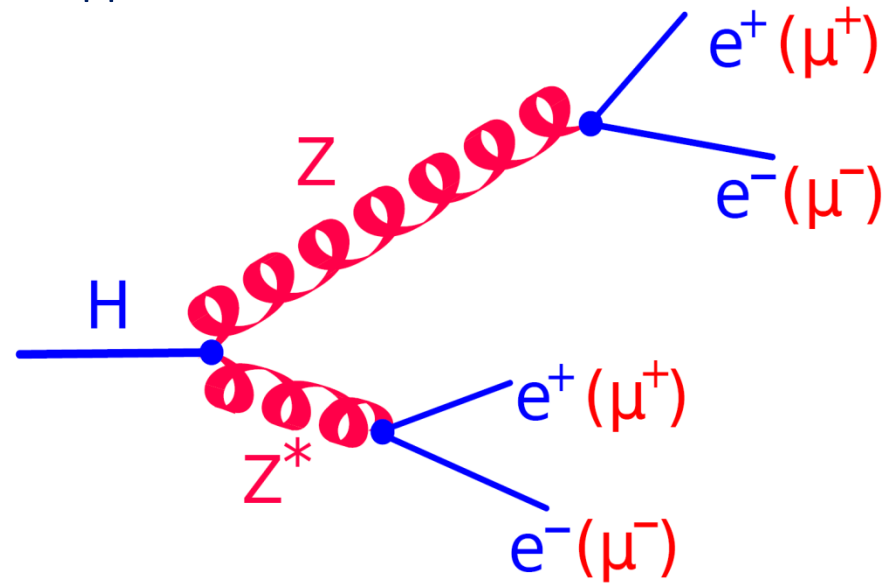
Чтобы открыть новые тяжелые частицы и новые взаимодействия на сверхмалых расстояниях, нужны пучки частиц высокой энергии и высокой интенсивности (светимости)

Большой адронный коллайдер (LHC)



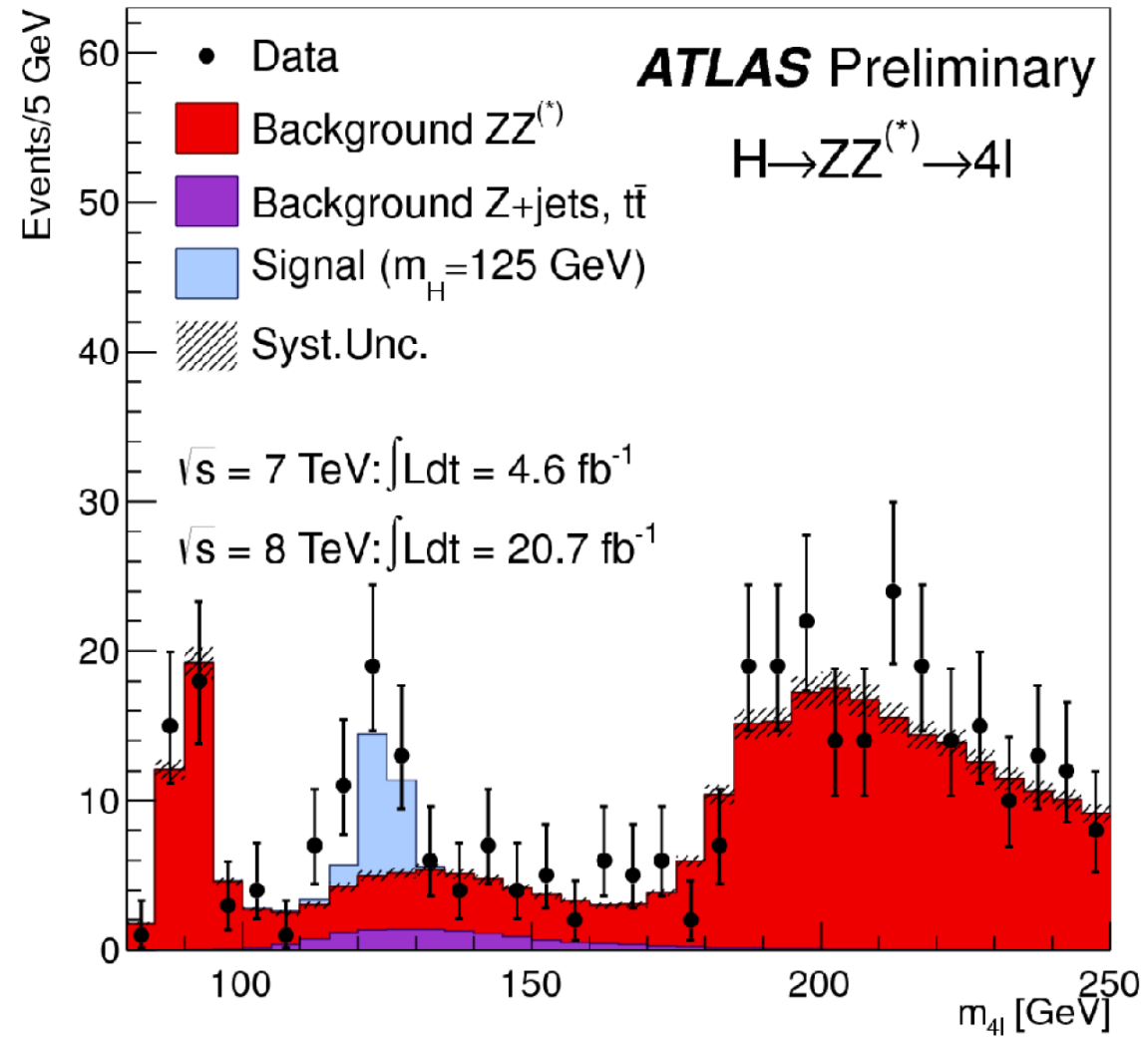
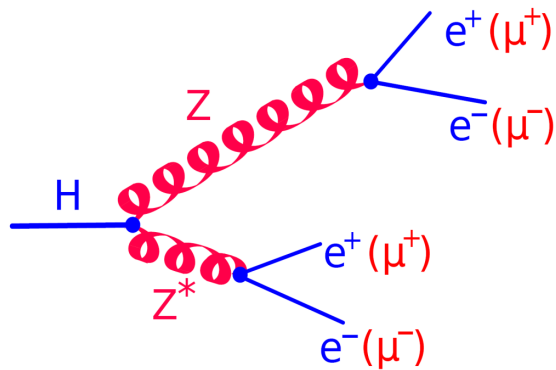
# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: открытие частицы

пример одного  
из каналов распада:



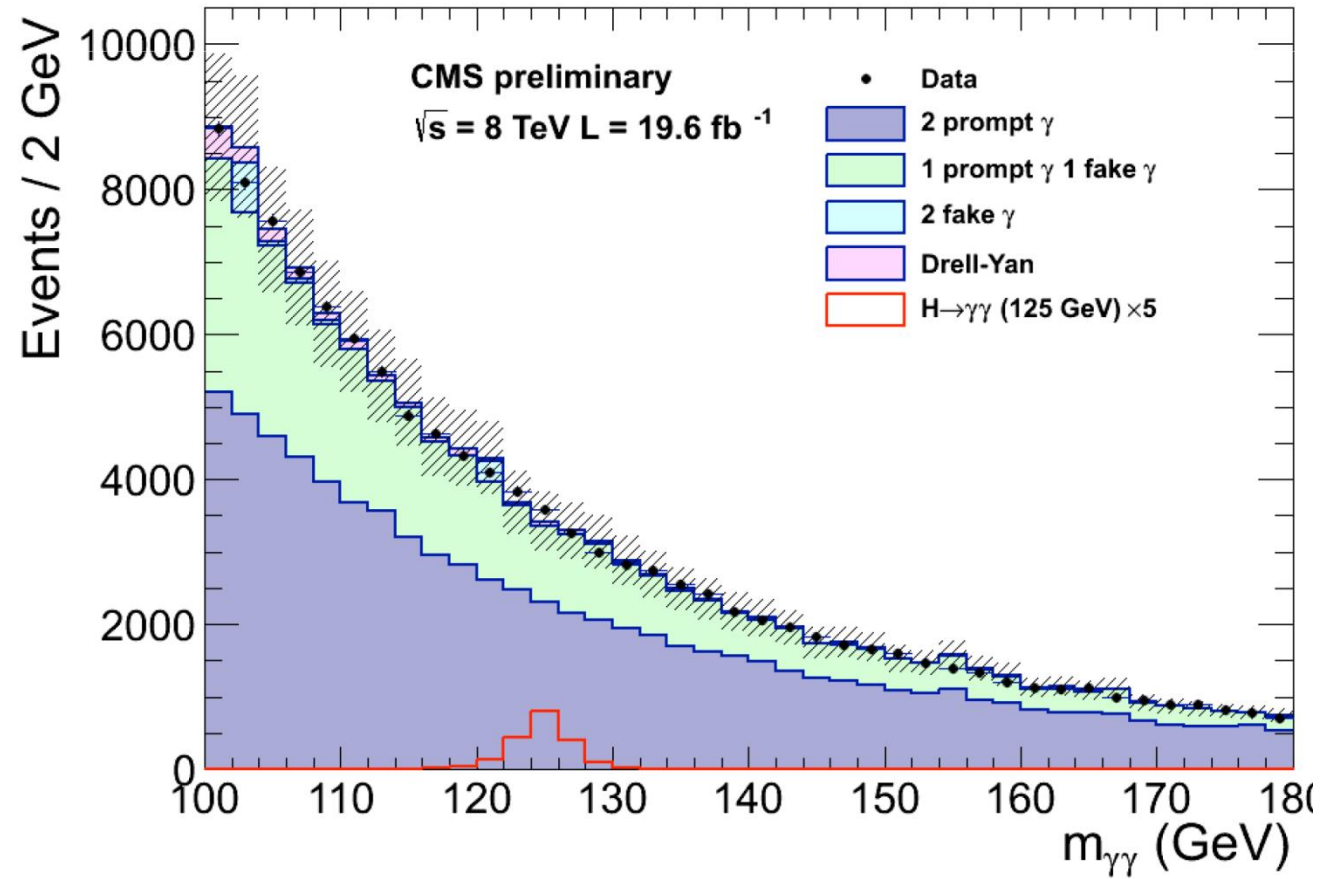
# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: открытие частицы

пример одного  
из каналов распада:



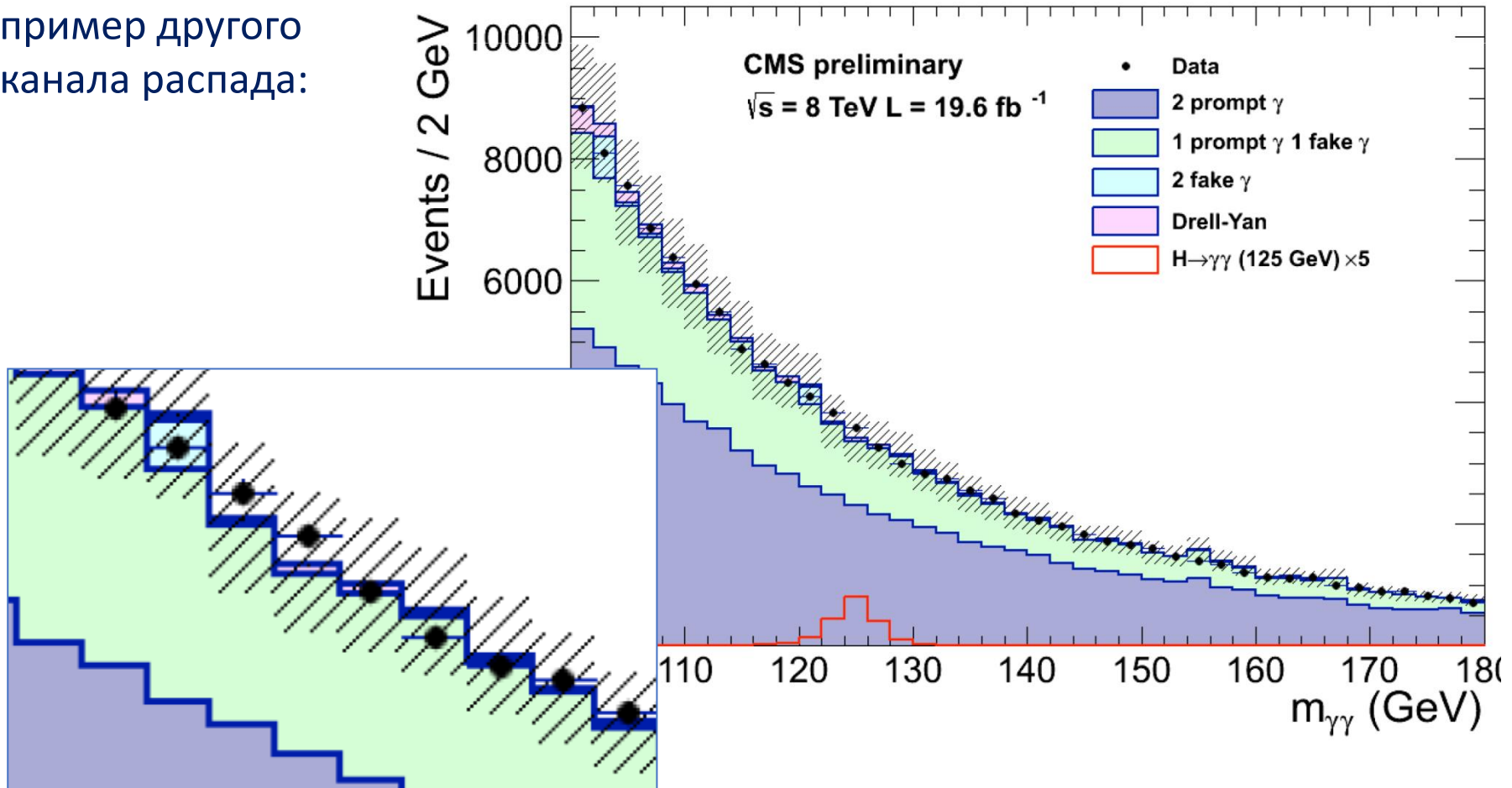
# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: открытие частицы

пример другого  
канала распада:



# Механизм Хиггса и бозон Хиггса: открытие частицы

пример другого  
канала распада:



# Основные разделы курса:

- понятия и принципы квантовой физики;
  - квантовые физические системы в макро- и микромире;
  - квантовая логика, квантовые вычисления, квантовая телепортация;
  - релятивистские квантовые поля как универсальная форма существования материи;
  - элементарные частицы и типы их взаимодействий;
- 
- свойства современной Вселенной;
  - асимметрия между веществом и антивеществом во Вселенной;
  - тёмная материя и тёмная энергия;
  - основные этапы космологической эволюции;
  - инфляционная космология;
  - астрофизика высоких и сверхвысоких энергий

**презентации и список литературы по теме  
«Физика элементарных частиц» (лекции 5-6)  
– на сайте:**

[http://ppc.inr.ac.ru/crossfac\\_2013.php](http://ppc.inr.ac.ru/crossfac_2013.php)

## Контрольная работа

1. Протон состоит из трёх кварков ( $uud$ ), а нейтрон – из трёх кварков ( $udd$ ). Какие электрические заряды имеют кварки  $u$  и  $d$ ? Каков электрический заряд мезона с кварковым составом ( $ud$ ) (черта обозначает античастицу).

Подсказка: ядро гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов.

2. Может ли мюон распасться на фотон и нейтрино,  $\mu \rightarrow \nu \gamma$  ?
3. Приведите пример спонтанного нарушения симметрии, относящийся к Вашей специальности.

Контрольную необходимо прислать в удобочитаемом виде  
(компьютерный набор, скан или читаемое фото)  
на адрес [sergey.troitsky@gmail.com](mailto:sergey.troitsky@gmail.com)  
до вечера воскресенья