

Введение в физику частиц

А.В. Бедняков

Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова
Объединенный институт ядерных исследований

ЦЕРН, Школа по физике, 31.10.2016

План

~~Лекция 1~~ (побольше про теорию)

- Вглубь материи...
- Частицы и поля... скалярные, векторные, фермионные...
- Стандартная модель и КТП...
- Симметрия и ее нарушение
- Промежуточные итоги

Лекция 2 (побольше про эксперимент)

- Бозон Хигса и как его ловят?
- ~~Самые большие атто(zepto)скопы~~
(БАК, его предшественники и последователи)
- За пределами Стандартной модели.
Моделисты-конструкторы
- Итоги?

Нобелевская премия по физике 2013



Питер Хиггс

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
(Received 31 August 1964)

3961 цитирований



Франсуа Энглер и Роберт Браут

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium
(Received 26 June 1964)

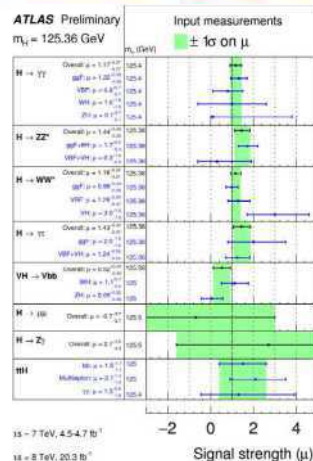
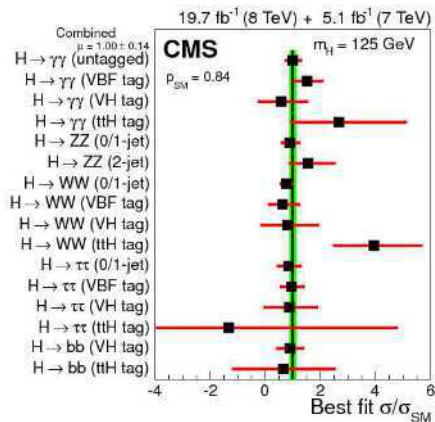
3642 цитирований

1964 год

Питер Хиггс

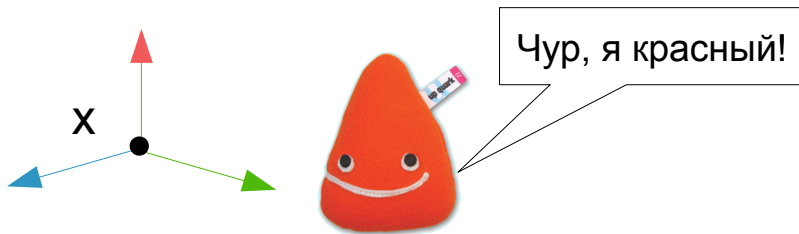
Предсказал
существование
бозона Хиггса в

1964 году



Стандартная Модель

- Квантовая Теория Поля, описывающая частицы как **возбуждения** полей.
 - Обладает рядом **симметрий**, которые ограничивают (и даже **во много определяют!**) возможные взаимодействия частиц!
- Взаимодействия **калибровочных** бозонов целиком определяется **локальной калибровочной симметрией!**



масса→	≈2.3 МэВ/c ²	≈1.275 ГэВ/c ²	≈173.07 ГэВ/c ²	0	≈126 ГэВ/c ²
заряд→	2/3	2/3	2/3	0	0
спин→	1/2	1/2	1/2	1	0
	u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
КВАРКИ					
	≈4.8 МэВ/c ²	≈95 МэВ/c ²	≈4.18 ГэВ/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
	0.511 MeV/c ²	105.7 МэВ/c ²	1.777 ГэВ/c ²	91.2 ГэВ/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e электрон	μ мюон	τ тау	Z Z бозон	
ЛЕПТОНЫ					
	<2.2 эВ/c ²	<0.17 МэВ/c ²	<15.5 МэВ/c ²	80.4 ГэВ/c ²	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	
					КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ



Причем, этот выбор не зависит еще и от точки пространства!

Например, взаимодействия глюонов устроено так, что оно не зависимость от выбора того, что мы называем "красным", "зеленым" или "синим" кварком.

Стандартная Модель

Принцип калибровочной симметрии требовал, чтобы переносчики взаимодействия были **безмассовые!**



Ок, у фотона нет массы

Ок, у глюона тоже



Что-то не так у вас с теорией-то. Слабые-то силы короткодействующие!



Дж.Янг и Р.Миллс (1954)

Это была одна из проблем, которую решали **Хиггс, Энглерт, Браут, а также Гуральник Хаген и Киббл!**

Зачем нужно поле Хиггса?

Поле Хиггса играет в Стандартной модели **важнейшую роль.**

Благодаря ему возникает масса у (нужных) калибровочных бозонов частиц (и в качестве бонуса у фермионов тоже).

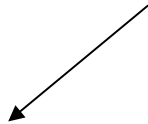
механизм Хиггса

Зачем нужно поле Хиггса?

Поле Хиггса играет в Стандартной модели
важнейшую роль.

Благодаря ему возникает масса у элементарных частиц.
(так называемый **механизм Хиггса***)

Симметрия, лежащая в основе Стандартной модели,
предсказывает нулевые массы у частиц.



Явно нарушение
симметрии



*Механизм Энглера-Браута-Хиггса-Гуральника-Хагена-Киббла.

Зачем нужно поле Хиггса?

Поле Хиггса играет в Стандартной модели
важнейшую роль.

Благодаря ему возникает масса у элементарных частиц.
(так называемый **механизм Хиггса***)

Симметрия, лежащая в основе Стандартной модели,
предсказывает нулевые массы у частиц.

Явно нарушение
симметрии



Спонтанное
нарушение
симметрии

*Механизм Энглера-Браута-Хиггса-Гуральника-Хагена-Киббла.

Зачем нужно поле Хиггса?

Поле Хиггса играет в Стандартной модели
важнейшую роль.

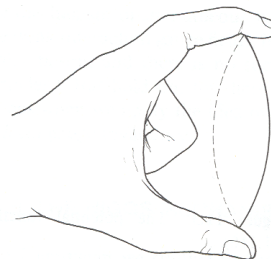
Благодаря ему возникает масса у элементарных частиц.
(так называемый **механизм Хиггса***)

Симметрия, лежащая в основе Стандартной модели,
предсказывает нулевые массы у частиц.

Явно нарушение
симметрии



**Неустойчивое
симметричное
состояние
равновесия**



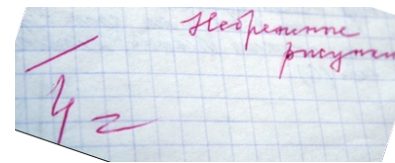
Спонтанное
нарушение
симметрии

**Устойчивое
несимметричное
состояние
равновесия**

*Механизм Энглерта-Браута-Хиггса-Гуральника-Хагена-Киббла.

Зачем нужно поле Хиггса?

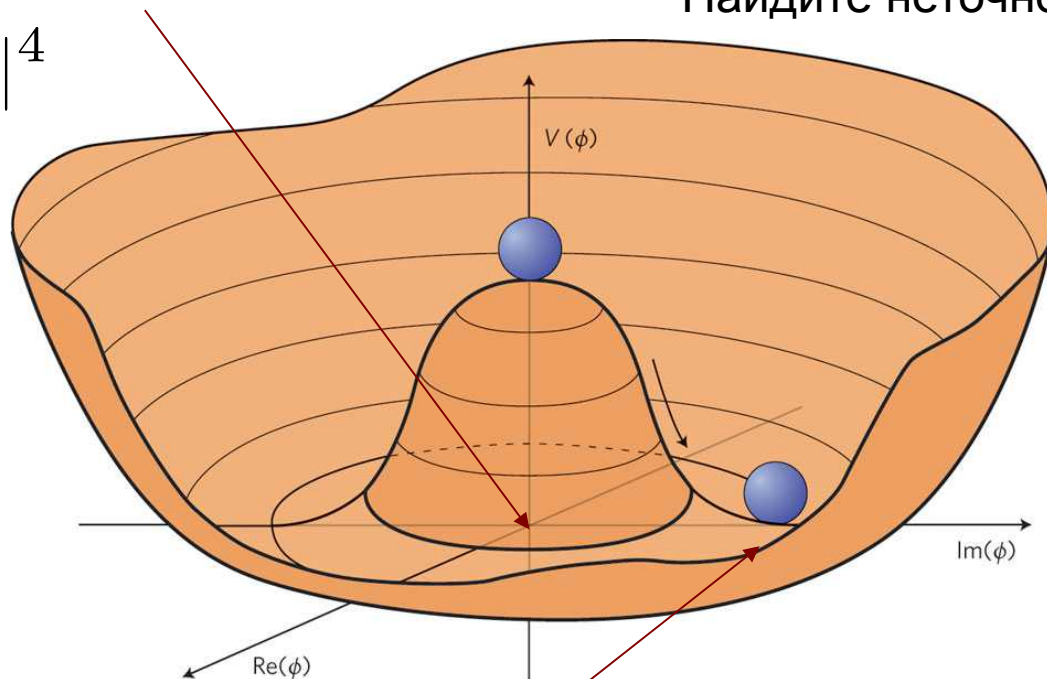
Неустойчивому симметричному состоянию равновесия соответствует ситуация, когда поле Хиггса (в среднем) **равно нулю**.



$$V(\phi) = m^2 |\phi|^2 - \lambda |\phi|^4$$

$$\left. \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} \right|_{\phi = \langle \phi \rangle} = 0$$

$$\langle \phi \rangle \neq 0$$



Найдите неточность!

Устойчивому **Н**есимметричному состоянию равновесия соответствует ситуация, когда поле Хиггса **не равно нулю** во всем пространстве.

Механизм возникновения масс



Поле Хиггса

Элементарная частицы

Благодаря взаимодействию с полем Хиггса возникает **масса**. Чем **сильнее** взаимодействие, тем **больше** масса...

Механизм возникновения масс



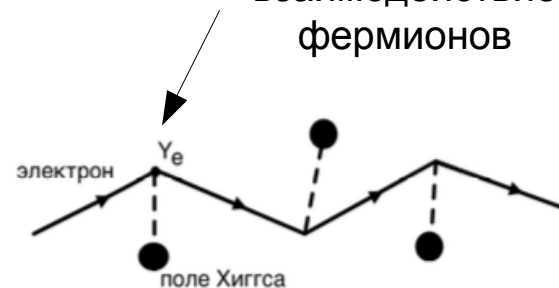
Поле Хиггса

Элементарная частицы

Юкавское взаимодействие фермионов

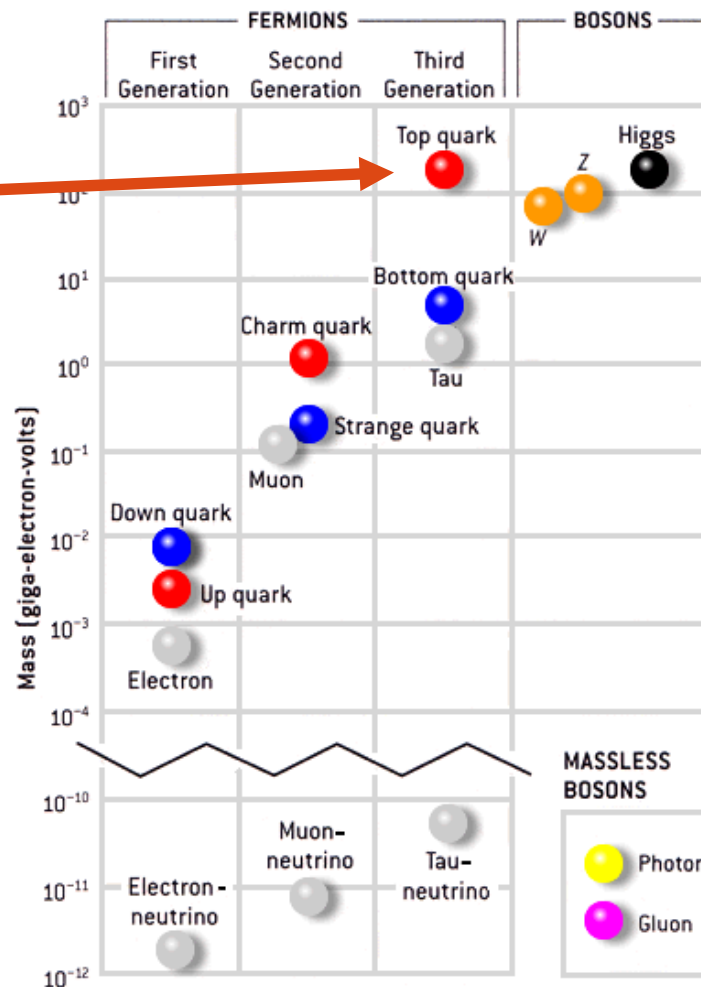
$$\alpha_{ew} \phi^2 W_\mu^2 \rightarrow [\alpha_{ew} \langle \phi \rangle^2] W_\mu^2 \rightarrow m_W^2 W_\mu^2$$

$$Y \phi \bar{\psi} \psi \rightarrow [Y \langle \phi \rangle] \bar{\psi} \psi \rightarrow m_\psi \bar{\psi} \psi$$



Механизм возникновения масс

Самый тяжелый известный
(элементарный) фермион

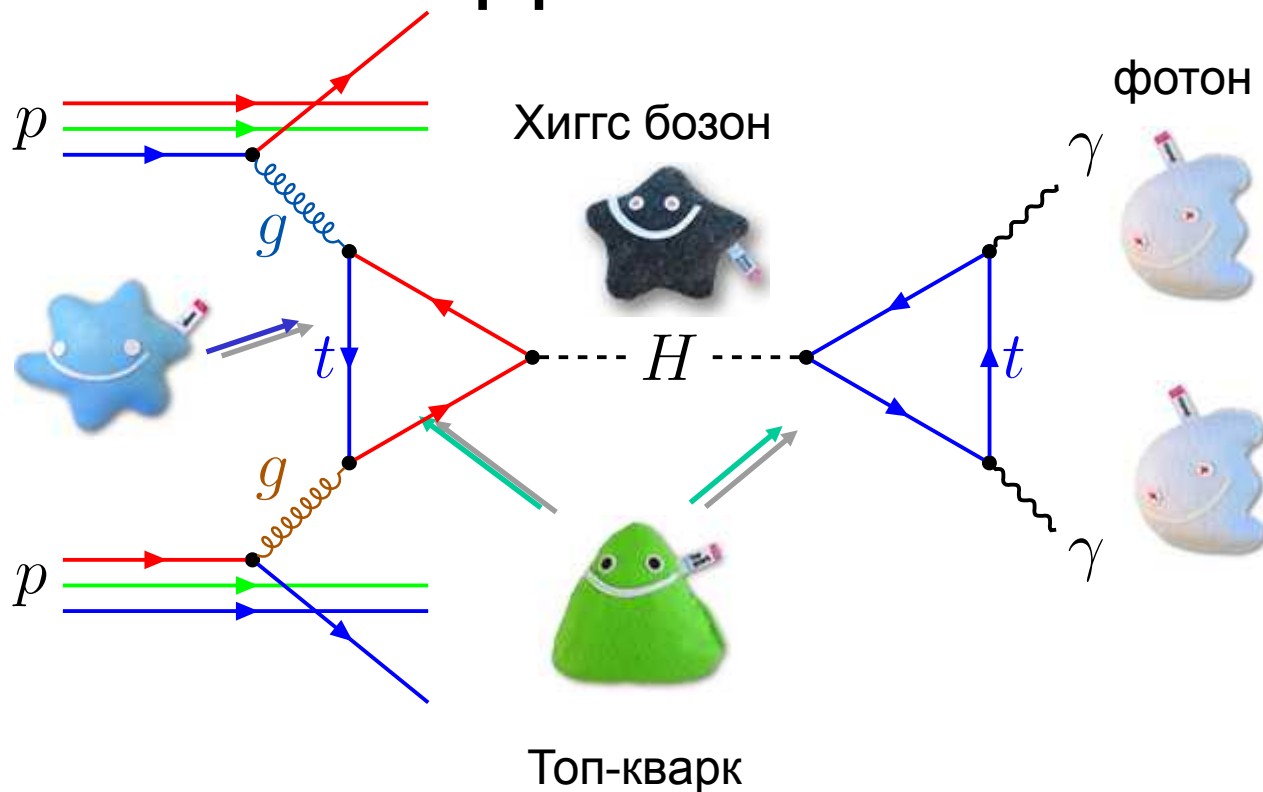


Следы хиггса

протон



глюон



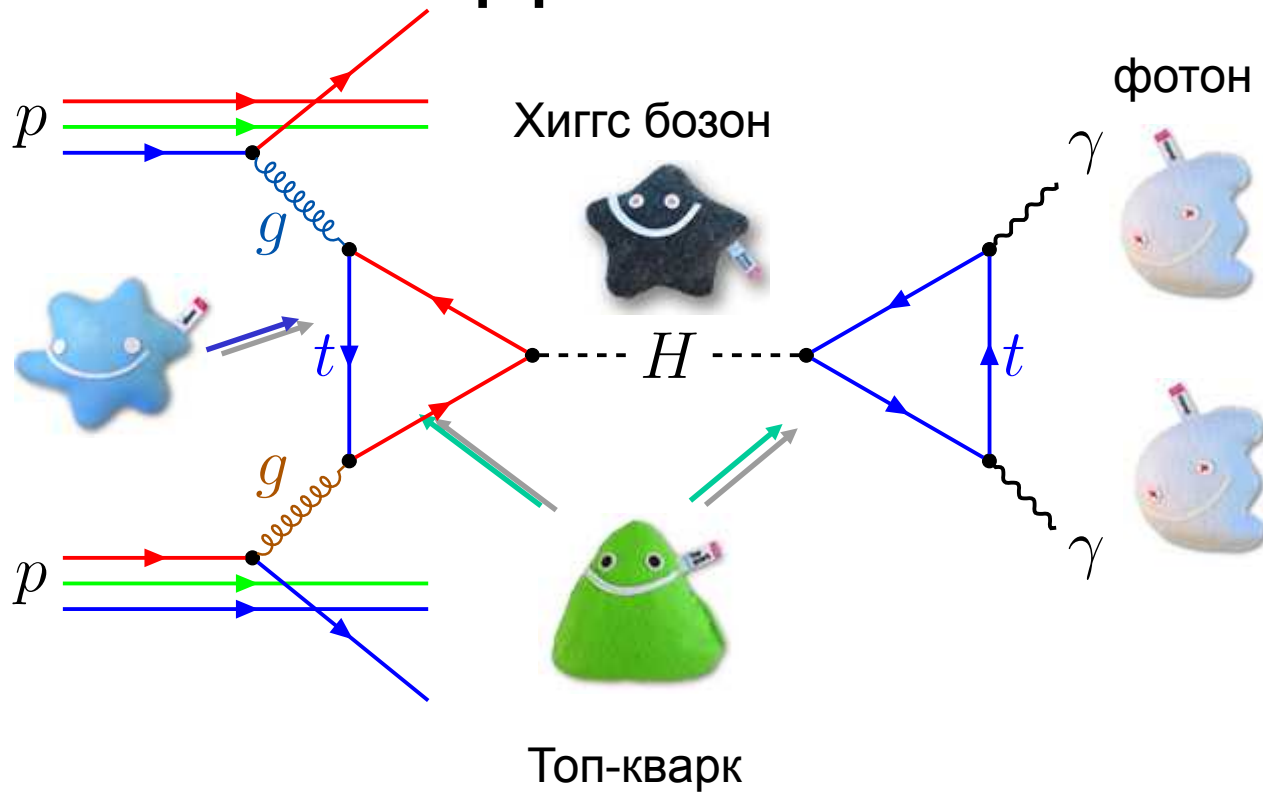
Диаграммы Фейнмана – способ представления возможных событий в физике высоких энергий. Каждой диаграмме по определенным правилам (Фейнмана) ставится в соответствие некоторое выражение, связанное с вероятностью рассматриваемого события...

Следы хиггса

протон



ГЛЮОН



Рождение бозона Хиггса при столкновении двух протонов на Большом адронном коллайдере.

Привет!

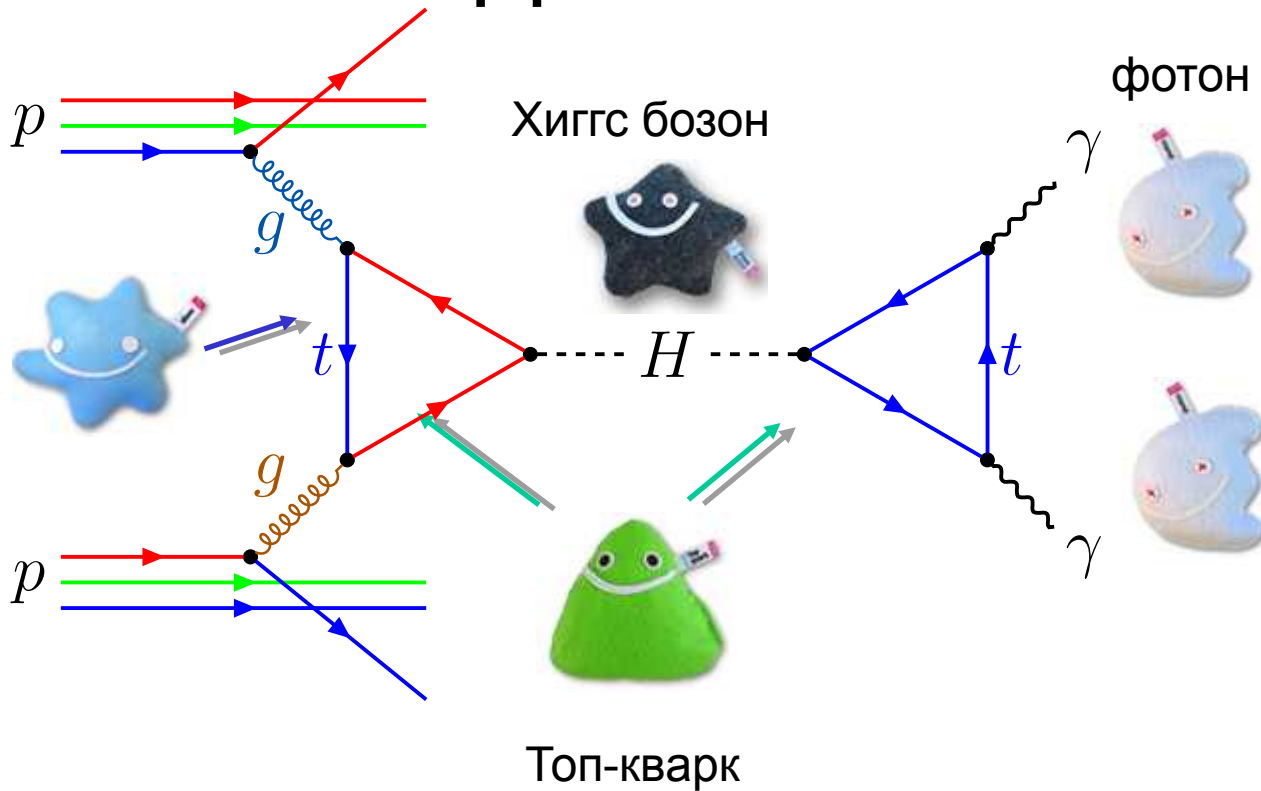


Следы хиггса

ПРОТОН



ГЛЮОН



Топ-кварк

Его (очень-очень-очень) короткую
жизнь $\sim 10^{-22}$ сек.



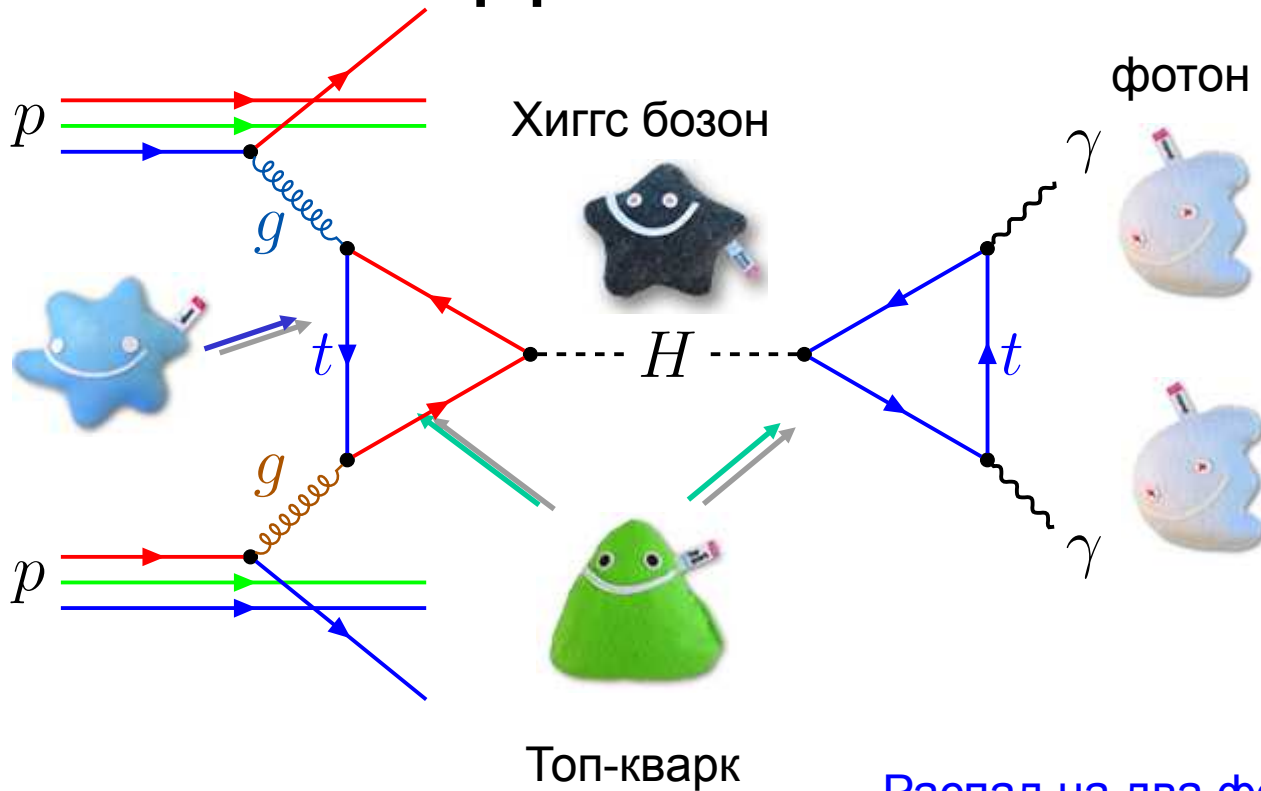
Я лечу!

Следы хиггса

ПРОТОН



ГЛЮОН



Распад на два фотона

Это одна из **ВОЗМОЖНЫХ** историй с участием бозона Хиггса!



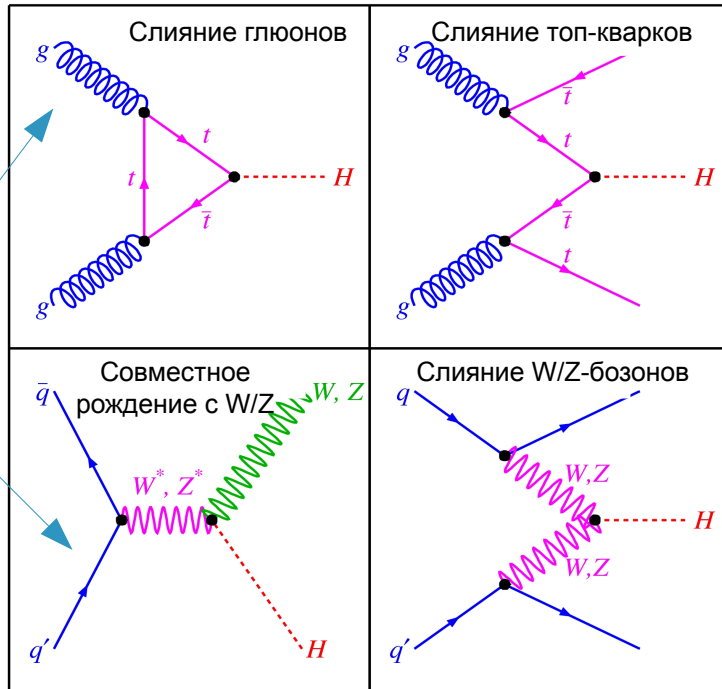
Ой, 10^{-22} сек уже прошло?

Сечение процесса и светимость

Теоретики, используя диаграммы Фейнмана вычисляют **сечения некоторого процесса** (например, рождения бозона Хиггса в столкновениях протонов)...

Сечение σ имеет размерность площади (некоторая “эффективная” площадка, в которую “должны попасть” частицы) и будучи умноженное на **светимость ускорителя** дает среднюю (ожидаемую в теории) частоту возникновения интересующих нас событий.

партноны в протонах

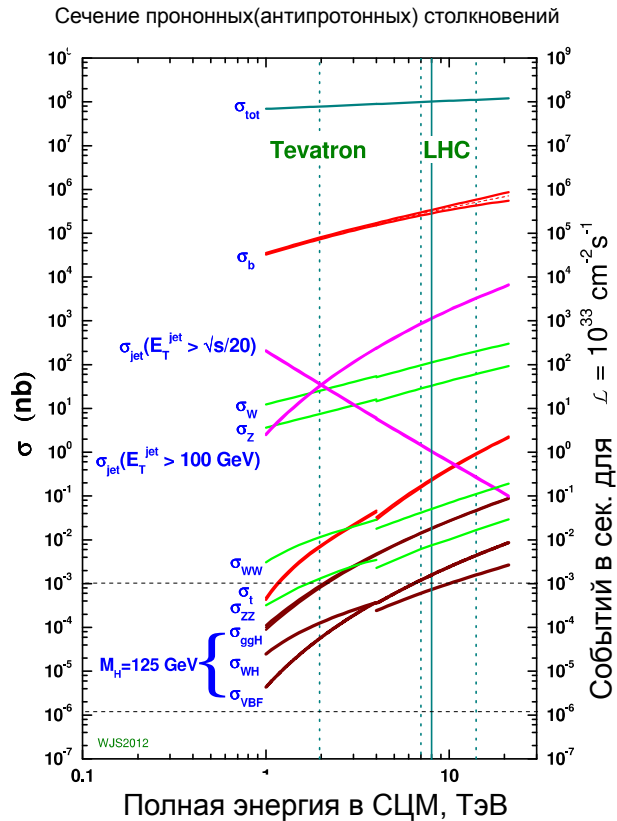


Сечение измеряется в барнах: $1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$
пикобарн - $1 \text{ пб} = 10^{-36} \text{ см}^2$
фемтобарн - $1 \text{ фб} = 10^{-39} \text{ см}^2$

Светимость – характеристика ускорителя, чем она выше, тем чаще происходят соударения частиц из встречных пучков

Сечение процесса и светимость

Теоретики, используя диаграммы Фейнмана вычисляют **сечения** **некоторого процесса** (например, рождения бозона Хиггса в столкновениях протонов)...



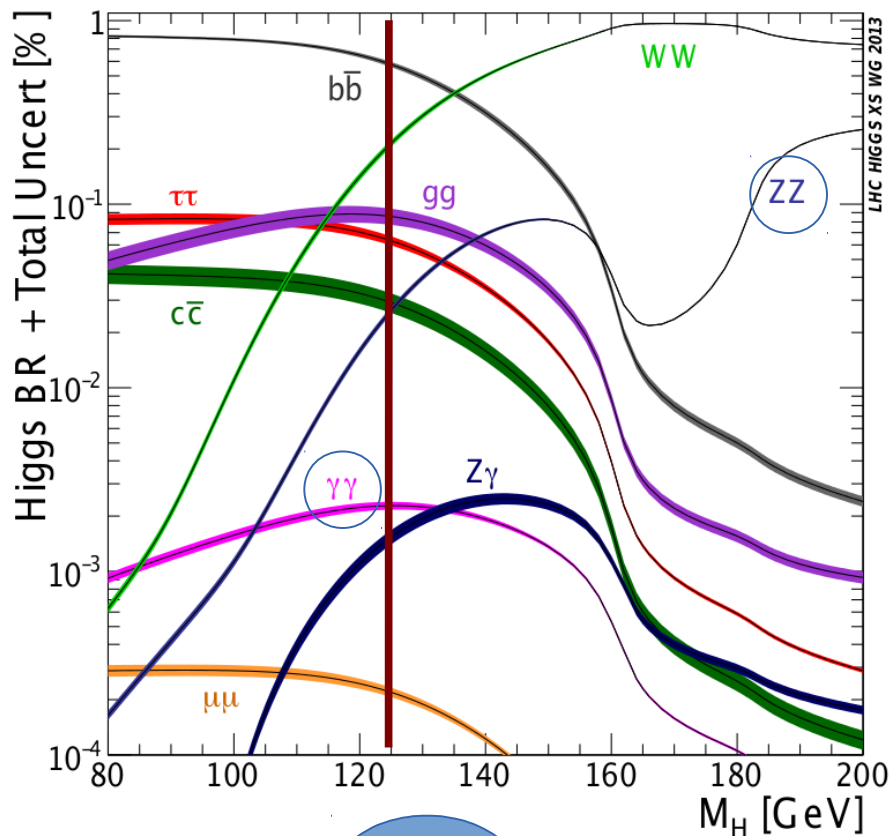
Тэватрон p-анти p коллайдер – $L = 4 \times 10^{32} \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}$
БАК (LHC) p-анти p коллайдер - $L = 10^{34} \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}$

При такой светимости на БАК бозон Хиггса рождается раз в 10 сек.

Сечение измеряется в барнах: 1 барн = 10^{-24} см^2
 нанобарн - 1 нб = 10^{-33} см^2
 пикобарн - 1 пб = 10^{-36} см^2
 фемтобарн - 1 фб = 10^{-39} см^2

Светимость \mathcal{L} – характеристика ускорителя, чем она выше, тем чаще происходят соударения частиц из встречных пучков

Но поймать бозон не просто..



Зная **массу хиггса** можно предсказать:

Как,
на что,
и как часто
Он будет распадаться!.

Ловим частицы –
продукты распада
Бозона Хиггса!

Хиггс (СМ) любит распадаться
в b-кварки, но проще детектировать
фотоны и лептоны

Я тут!?

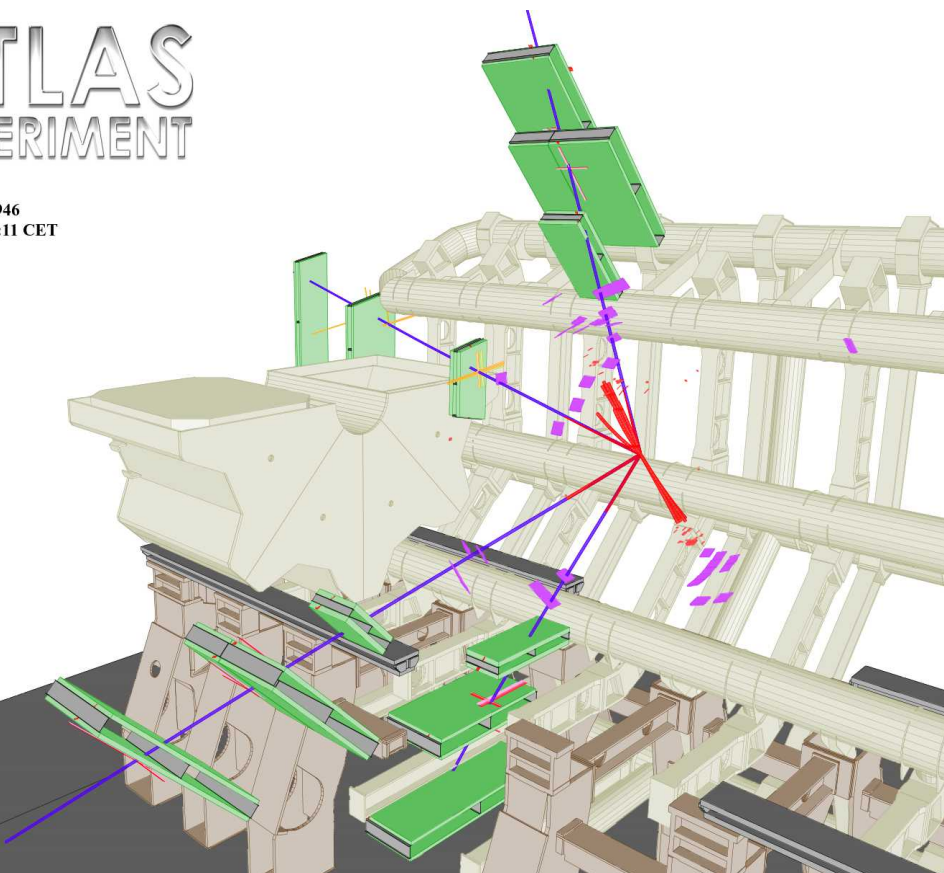




Run Number: 189280,
Event Number: 143576946
Date: 2011-09-14, 11:37:11 CET

EtCut>0.3 GeV
PtCut>3.0 GeV
Vertex Cuts:
Z direction <1cm
Rphi <1cm

Muon: blue
Cells: Tiles, EMC



Persint

Следы хиггса

Зная **массу хиггса** можно предсказать:

Как,

на что,

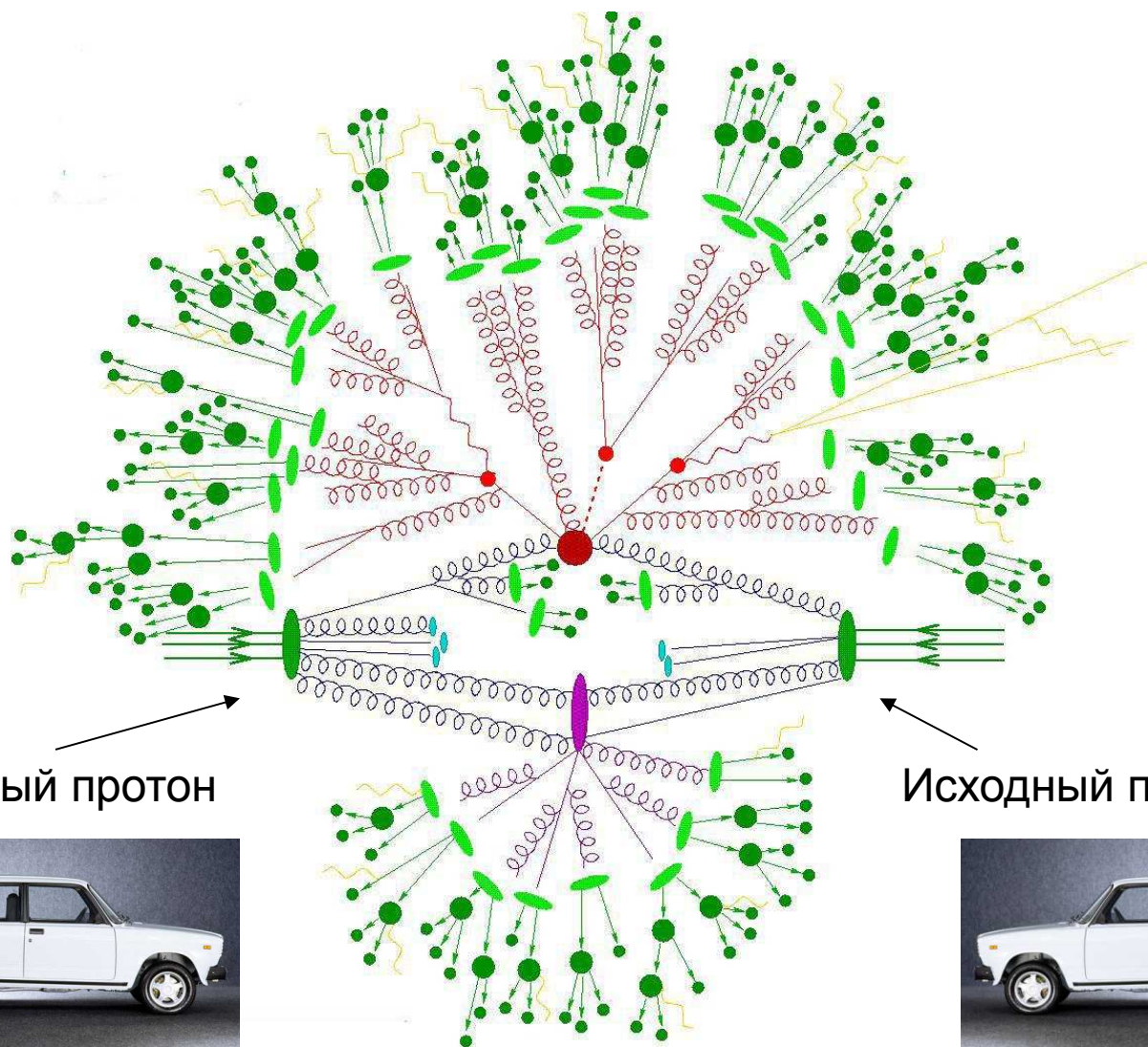
и как часто

Он будет распадаться!.

Распад бозона Хиггса на четыре мюона (длинные треки)

«Поймай хиггс»

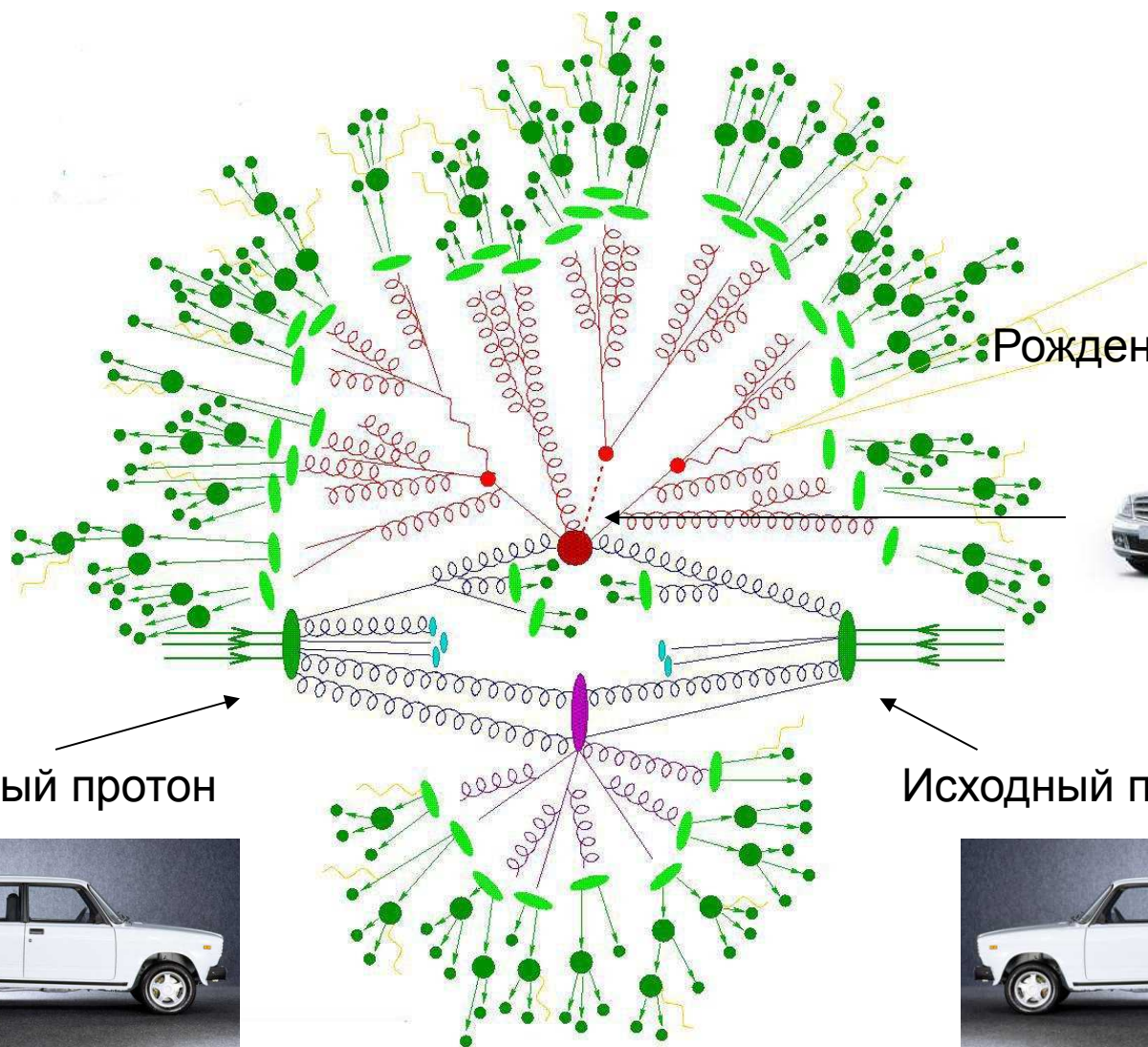




Исходный протон

Исходный протон





Рождение новых частиц

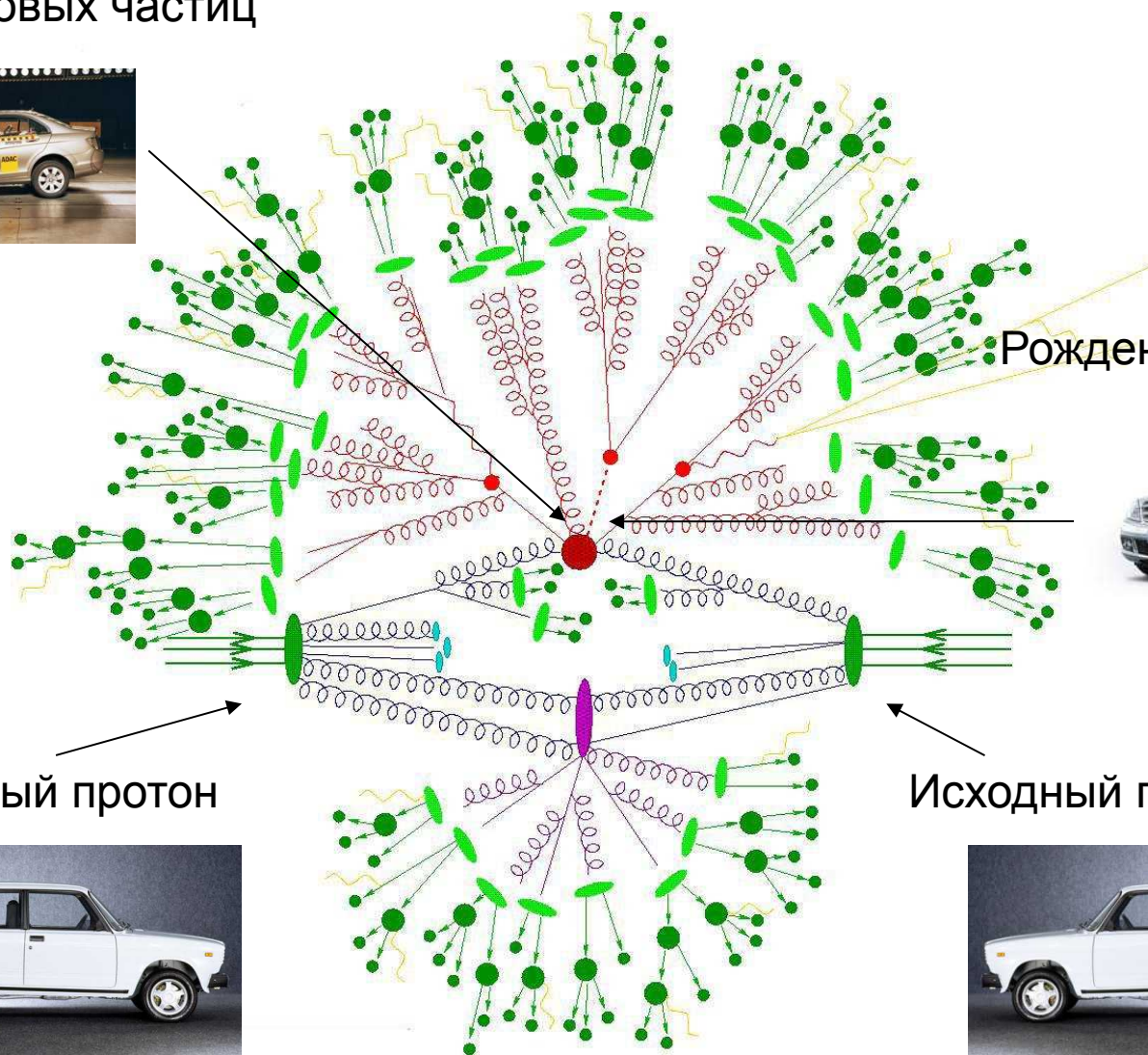


Исходный протон

Исходный протон



Распад новых частиц



Рождение новых частиц



Исходный протон

Исходный протон



Распад новых частиц



Адронизация



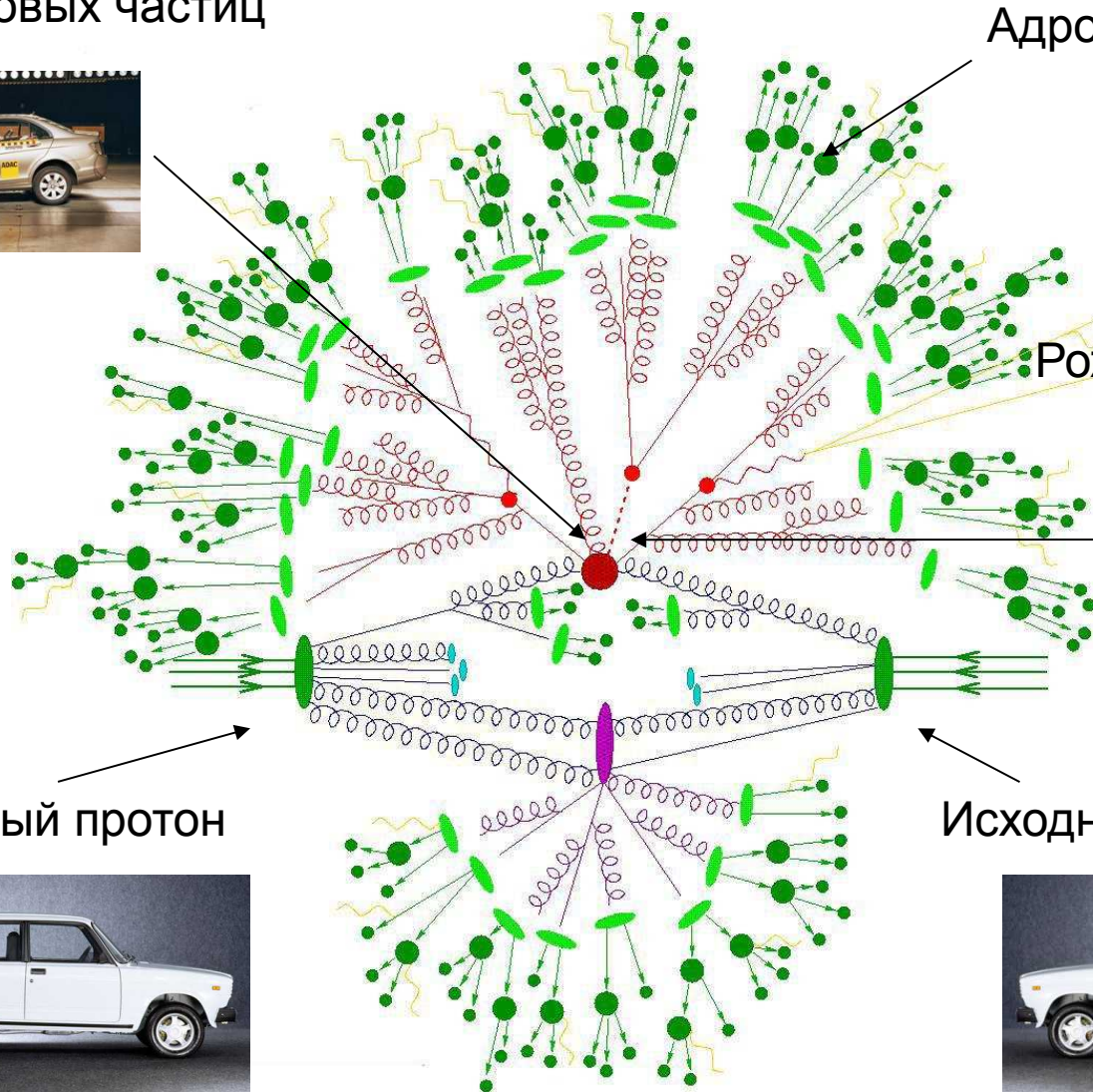
Рождение новых частиц



Исходный протон



Исходный протон



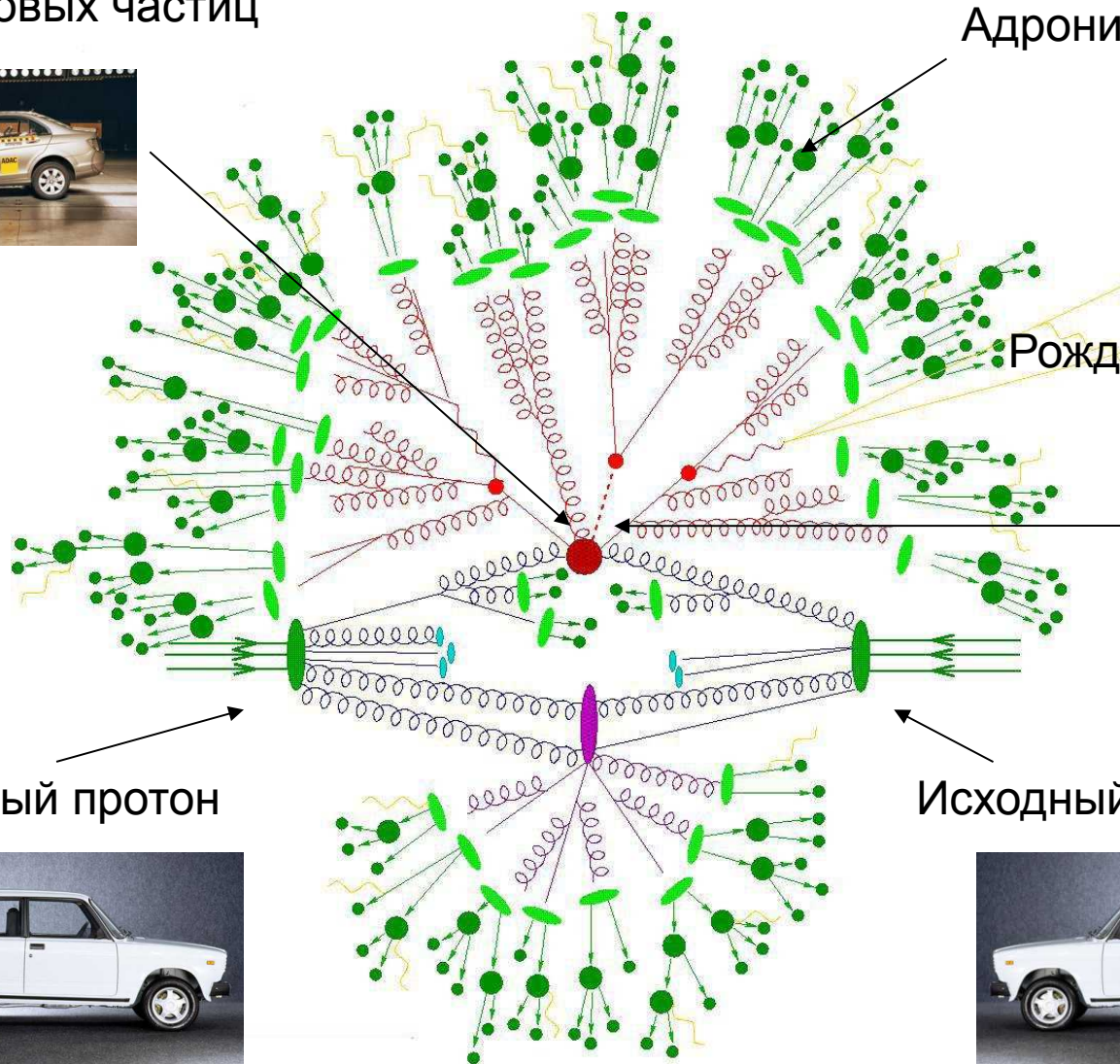
Распад новых частиц



Адронизация



Рождение новых частиц



Исходный протон

Исходный протон



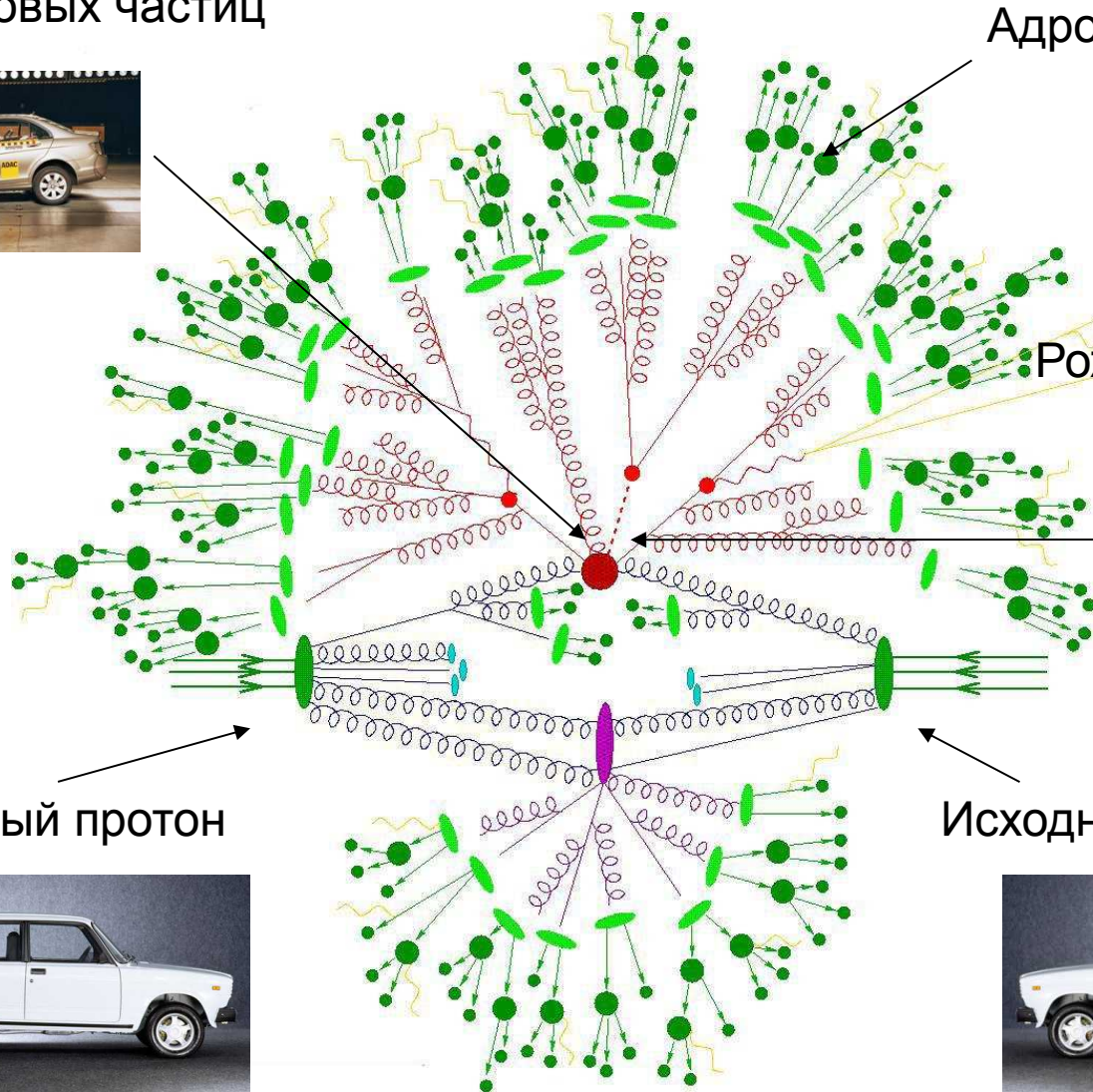
Распад новых частиц



Адронизация



Рождение новых частиц



Исходный протон



Исходный протон

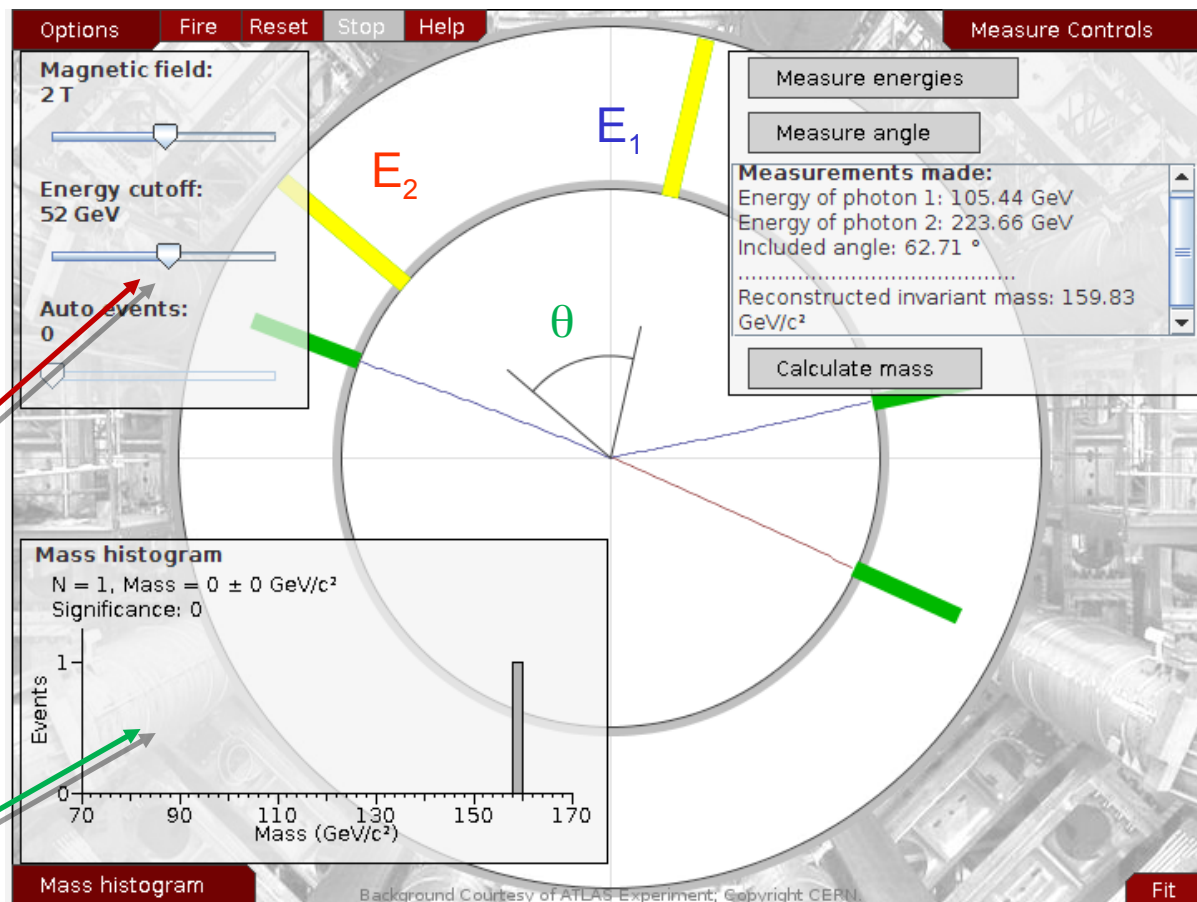


Следы хиггса

Массы бозона Хиггса вычисляется (реконструируется) из знания энергии фотонов $E_{1,2}$ и угла θ

$$M_H = \sqrt{\frac{2E_1 E_2 (1 - \cos \theta)}{c^2}}$$

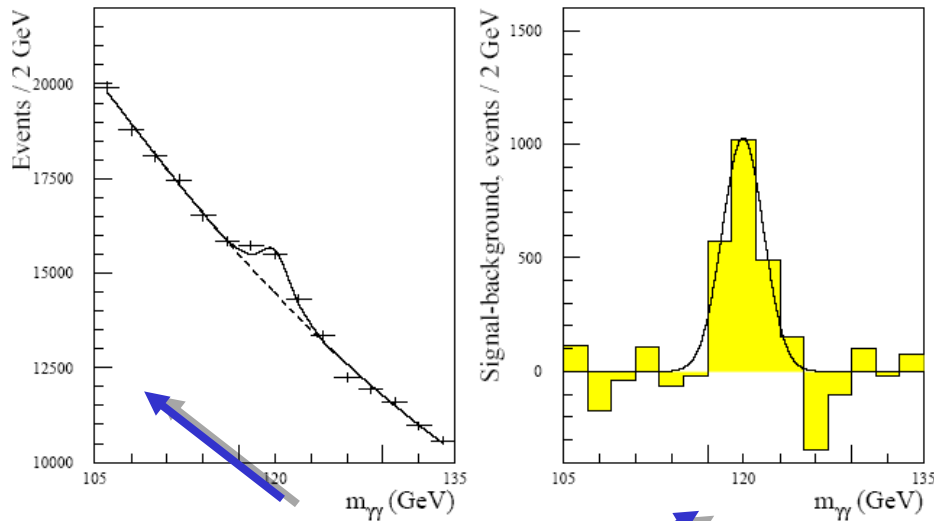
ФОТОНЫ С
меньшей энергий
не
рассматриваются



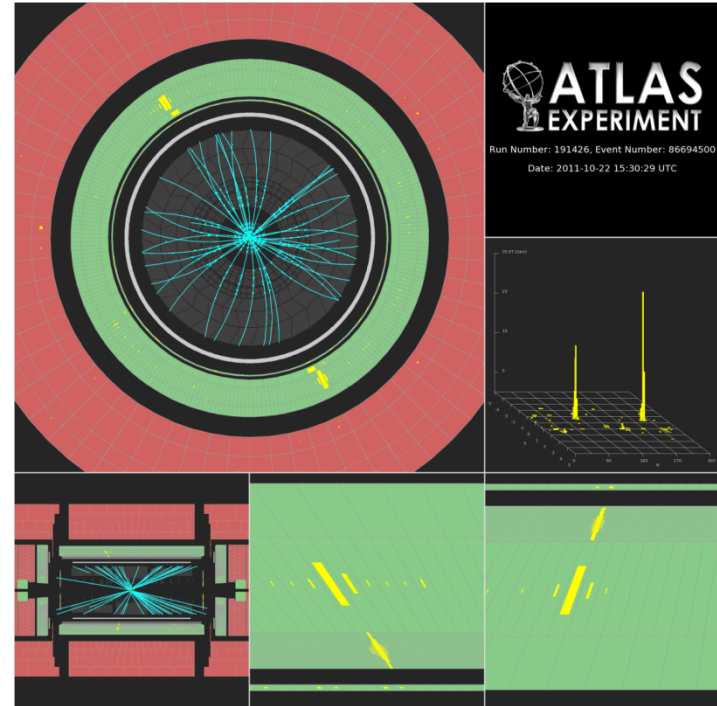
Гистограмма показывает сколько событий (Events) с определенным значением M_H было зарегистрировано.

Бозон Хиггса найден!?

Так событие выглядит на самом деле



А так выглядят гистограммы...



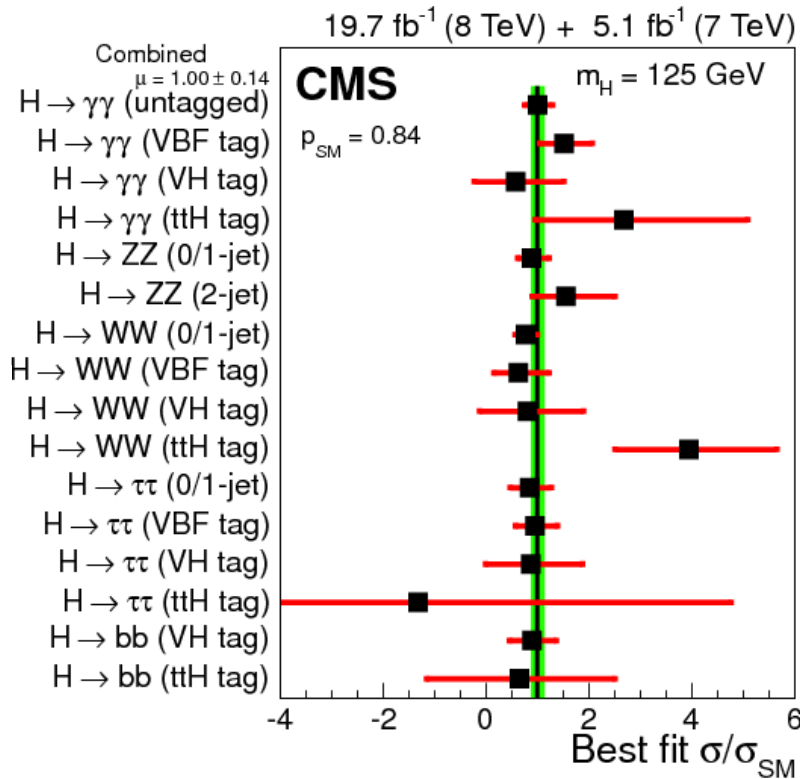
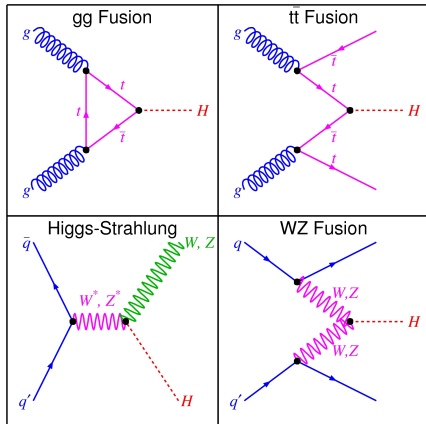
4 июля 2012 года были объявлены результаты поисков бозона Хиггса, согласно которым был найдена новая частица с массой $M_H=125$ ГэВ.

...ОН самый?

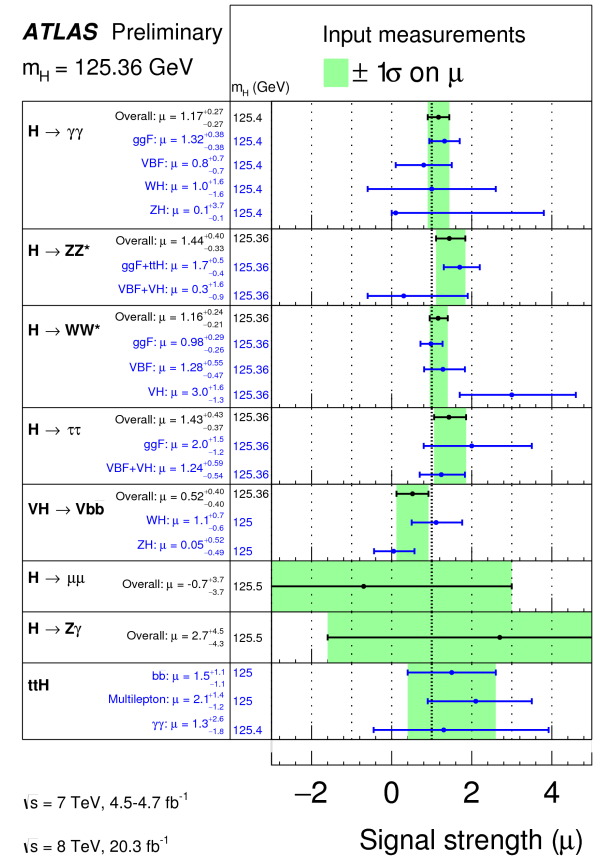


CMS-HIG-14-009

ATLAS-CONF-2015-007



ATLAS Preliminary
 $m_H = 125.36 \text{ GeV}$



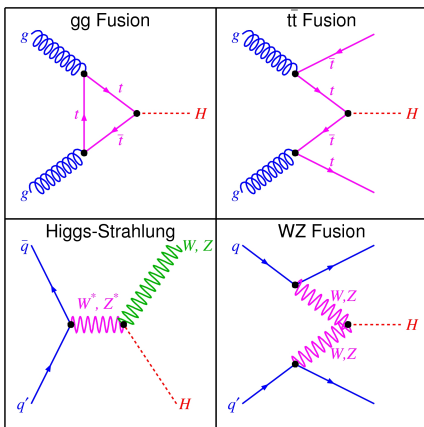
...ОН самый?



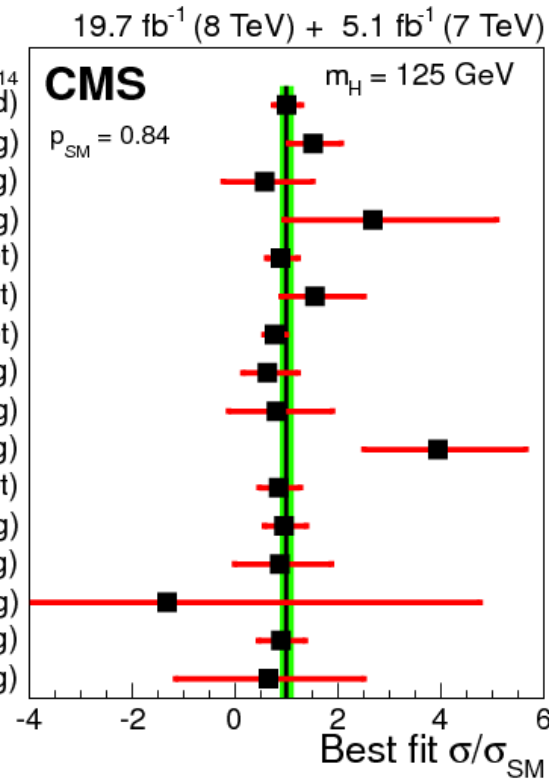
В течение 2013-2014
 Было потрачено много
 Сил, чтобы подтвердить,
 Что найденная частица
ОЧЕНЬ-ОЧЕНЬ
 Похожа на
Бозон Хиггса

CMS-HIG-14-009

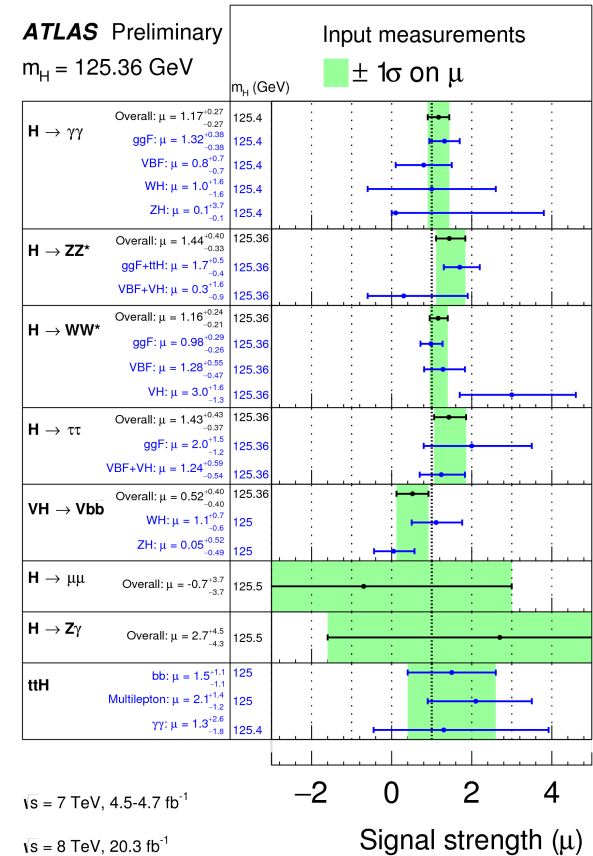
ATLAS-CONF-2015-007



- Combined $\mu = 1.00 \pm 0.14$
- H $\rightarrow \gamma\gamma$ (untagged)
 - H $\rightarrow \gamma\gamma$ (VBF tag)
 - H $\rightarrow \gamma\gamma$ (VH tag)
 - H $\rightarrow \gamma\gamma$ (ttH tag)
 - H $\rightarrow ZZ$ (0/1-jet)
 - H $\rightarrow ZZ$ (2-jet)
 - H $\rightarrow WW$ (0/1-jet)
 - H $\rightarrow WW$ (VBF tag)
 - H $\rightarrow WW$ (ttH tag)
 - H $\rightarrow \tau\tau$ (0/1-jet)
 - H $\rightarrow \tau\tau$ (VBF tag)
 - H $\rightarrow \tau\tau$ (VH tag)
 - H $\rightarrow \tau\tau$ (ttH tag)
 - H $\rightarrow bb$ (VH tag)
 - H $\rightarrow bb$ (ttH tag)



ATLAS Preliminary
 $m_H = 125.36 \text{ GeV}$



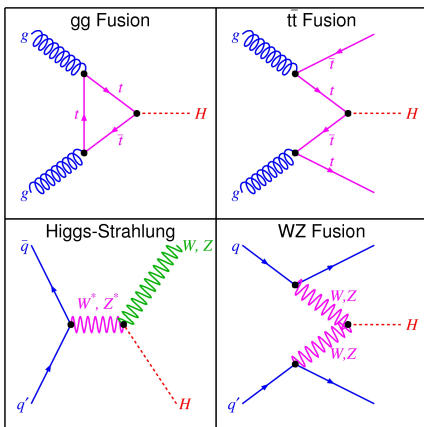
...ОН самый?



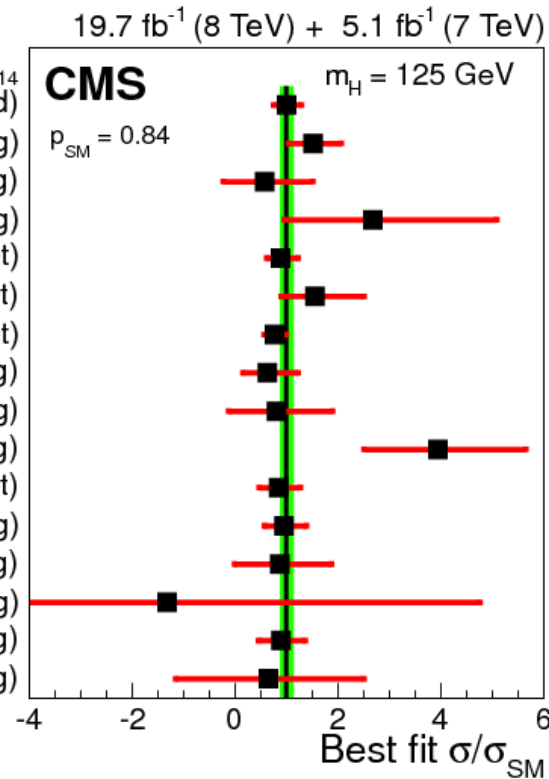
В течение 2013-2014
 Было потрачено много
 Сил, чтобы подтвердить,
 Что найденная частица
ОЧЕНЬ-ОЧЕНЬ
 Похожа на
Бозон Хиггса

CMS-HIG-14-009

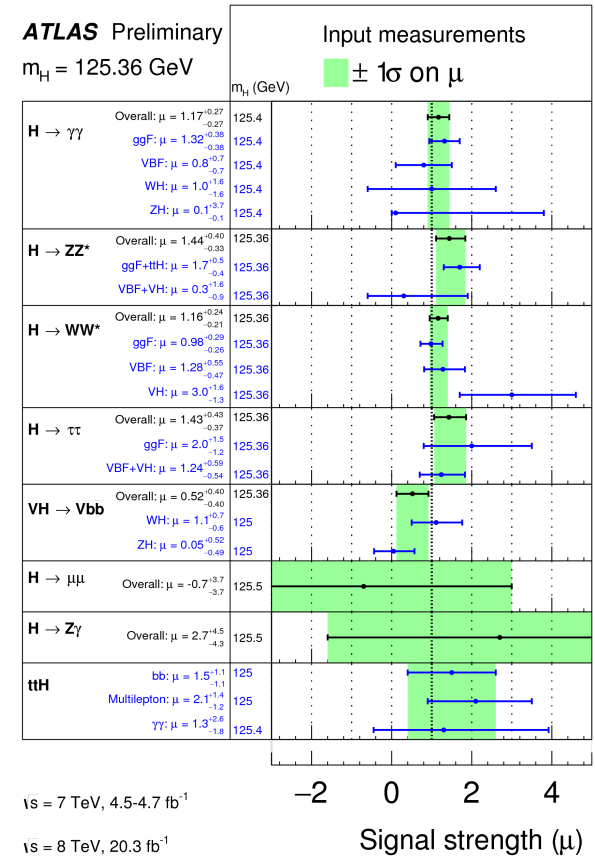
ATLAS-CONF-2015-007



- Combined $\mu = 1.00 \pm 0.14$
- H $\rightarrow \gamma\gamma$ (untagged)
 - H $\rightarrow \gamma\gamma$ (VBF tag)
 - H $\rightarrow \gamma\gamma$ (VH tag)
 - H $\rightarrow \gamma\gamma$ (ttH tag)
 - H $\rightarrow ZZ$ (0/1-jet)
 - H $\rightarrow ZZ$ (2-jet)
 - H $\rightarrow WW$ (0/1-jet)
 - H $\rightarrow WW$ (VBF tag)
 - H $\rightarrow WW$ (ttH tag)
 - H $\rightarrow \tau\tau$ (0/1-jet)
 - H $\rightarrow \tau\tau$ (VBF tag)
 - H $\rightarrow \tau\tau$ (VH tag)
 - H $\rightarrow \tau\tau$ (ttH tag)
 - H $\rightarrow bb$ (VH tag)
 - H $\rightarrow bb$ (ttH tag)



ATLAS Preliminary
 $m_H = 125.36 \text{ GeV}$



Бозон Хиггса найден! Да, похоже, это ОН



Триумф Стандартной Модели

Триумф СМ...и открытые вопросы

Хотя Стандартная модель **прекрасно описывает** **большинство** наблюдаемых явлений в современной физике частиц, существует ряд причин, по которой ее считают **неполной!**

Открытые вопросы:

- 1) Почему массы фермионов такие разные?
- 2) Какова масса у нейтрино?
- 3) Почему три поколения?
- 4) Куда делась антиматерия?
- 5) Что такое темная материя?
- 6)

Существует **множество** расширений Стандартной модели, пытающиеся решить какие-то из этих проблем!

масса→	≈2.3 МэВ/c ²	≈1.275 ГэВ/c ²	≈173.07 ГэВ/c ²	0	≈126 ГэВ/c ²
заряд→	2/3	2/3	2/3	0	0
спин→	1/2	1/2	1/2	1	0
КВАРКИ	u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
	≈4.8 МэВ/c ²	≈95 МэВ/c ²	≈4.18 ГэВ/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
	0.511 MeV/c ²	105.7 МэВ/c ²	1.777 ГэВ/c ²	91.2 ГэВ/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e электрон	μ мюон	τ тау	Z Z бозон	
ЛЕПТОНЫ	<2.2 эВ/c ²	<0.17 МэВ/c ²	<15.5 МэВ/c ²	80.4 ГэВ/c ²	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	
					КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ

Симметрия!?



Триумф СМ...и открытые вопросы

Хотя Стандартная модель **прекрасно описывает** **большинство** наблюдаемых явлений в современной физике частиц, существует ряд причин, по которой ее считают **неполной!**

Открытые вопросы:

- 1) Почему массы фермионов такие разные?
- 2) Какова масса у нейтрино?
- 3) Почему три поколения?
- 4) Куда делась антиматерия?
- 5) Что такое темная материя?
- 6)

Именно поэтому, БАК продолжает работать и искать хоть малейшие отклонения от предсказаний СМ!

масса→	$\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$
заряд→	2/3	2/3	2/3	0	0
спин→	1/2	1/2	1/2	1	0
	u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
	d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
КВАРКИ					
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ МэВ}/c^2$	$1.777 \text{ ГэВ}/c^2$	$91.2 \text{ ГэВ}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e электрон	μ мюон	τ тау	Z Z бозон	
	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$	$80.4 \text{ ГэВ}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
ЛЕПТОНЫ	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ

Симметрия!?



Заключение

Стандартная модель – выдающееся достижение человечества!

Есть лишь немного мест, где она, возможно, дает сбой. Любое ее расширение (Новая Физика) должна с хорошей точностью воспроизводить **уже проверенные** предсказания СМ.

В связи с отсутствием явных проявлений чего-то нового, важной задачей является **улучшение точности** как теоретических расчетов, так и экспериментальных измерений!

Кроме того, нельзя забывать, что физика частиц не обособленная наука и подсказки могут прийти из космоса!



В 2016 году БАК очень успешно отработал и записал много новых данных, обработка которых еще ждет своего часа. Кто знает, какие сюрпризы готовит нам еще Природа.

Спасибо за внимание!



(Объединение взаимодействий?)

см.также <http://elementy.ru/LHC>
<http://nuclphys.sinp.msu.ru>
<http://teachers.jinr.ru>