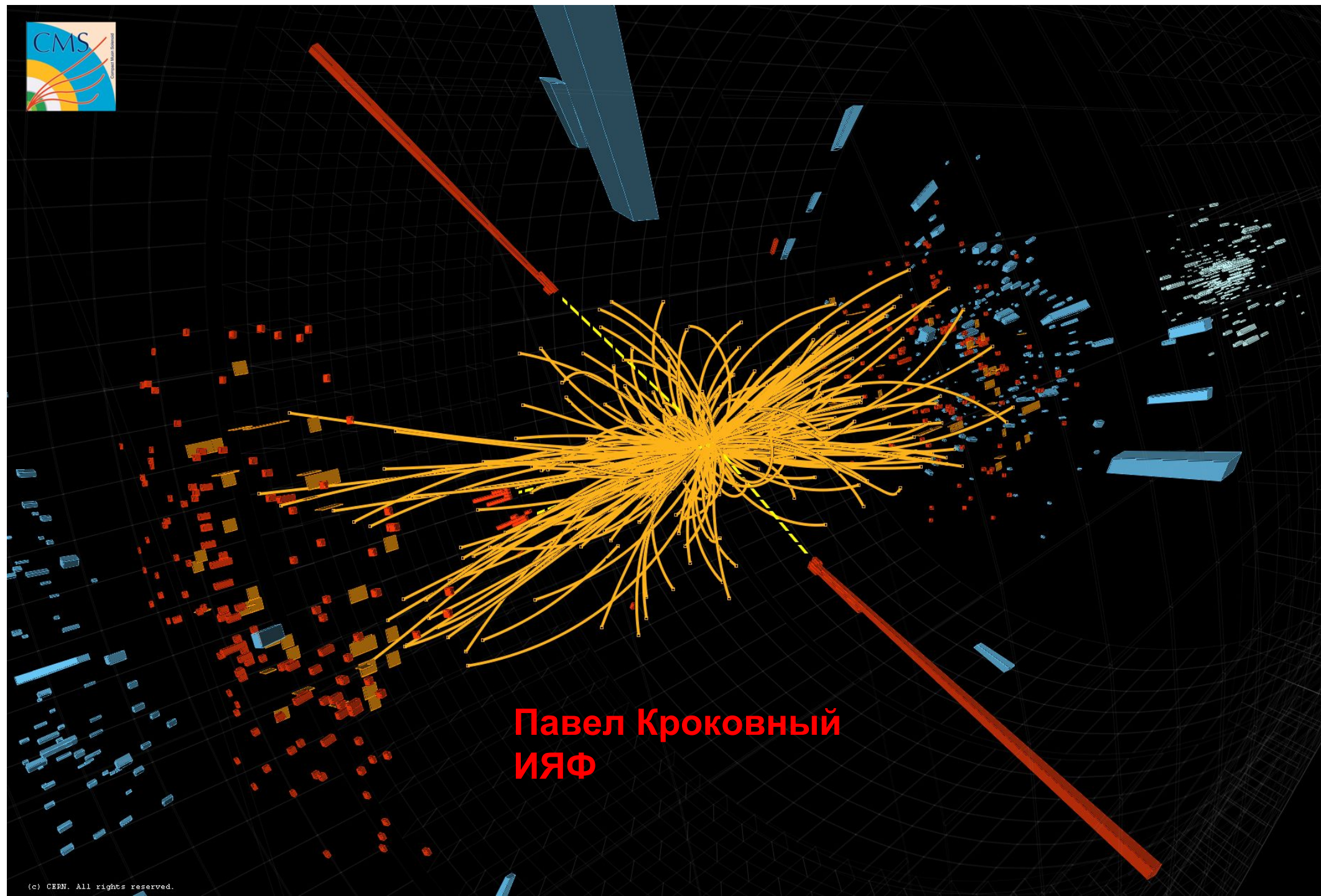
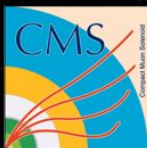


Хиггс бозон



Павел Кроковный
ИЯФ

Периодическая система элементов



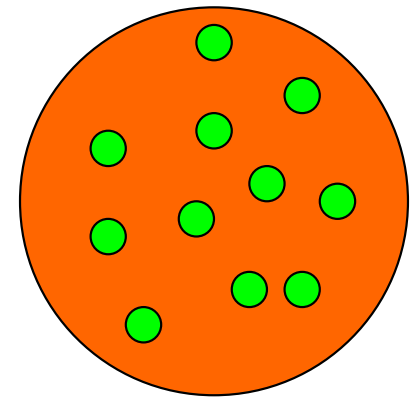
Group	IA		IIB	IIA	III A	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	IB	II B	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII
	H ¹																	He ²
	Li ³	Be ⁴											B ⁵	C ⁶	N ⁷	O ⁸	F ⁹	Ne ¹⁰
	Na ¹¹	Mg ¹²											Al ¹³	Si ¹⁴	P ¹⁵	S ¹⁶	Cl ¹⁷	Ar ¹⁸
	K ¹⁹	Ca ²⁰	Sc ²¹	Ti ²²	V ²³	Cr ²⁴	Mn ²⁵	Fe ²⁶	Co ²⁷	Ni ²⁸	Cu ²⁹	Zn ³⁰	Ga ³¹	Ge ³²	As ³³	Se ³⁴	Br ³⁵	Kr ³⁶
	Rb ³⁷	Sr ³⁸	Y ³⁹	Zr ⁴⁰	Nb ⁴¹	Mo ⁴²	Tc ⁴³	Ru ⁴⁴	Rh ⁴⁵	Pd ⁴⁶	Ag ⁴⁷	Cd ⁴⁸	In ⁴⁹	Sn ⁵⁰	Sb ⁵¹	Te ⁵²	I ⁵³	Xe ⁵⁴
	Cs ⁵⁵	Ba ⁵⁶	Lu ⁷¹	Hf ⁷²	Ta ⁷³	W ⁷⁴	Re ⁷⁵	Os ⁷⁶	Ir ⁷⁷	Pt ⁷⁸	Au ⁷⁹	Hg ⁸⁰	Tl ⁸¹	Pb ⁸²	Bi ⁸³	Po ⁸⁴	At ⁸⁵	Rn ⁸⁶
	Fr ⁸⁷	Ra ⁸⁸	Lr ¹⁰³	Unq ¹⁰⁴	Unp ¹⁰⁵	Unh ¹⁰⁶	Uns ¹⁰⁷	Uno ¹⁰⁸	Une ¹⁰⁹	Uun ¹¹⁰	Uuu ¹¹¹	Uub ¹¹²						
Lanthanide Series			La ⁵⁷	Ce ⁵⁸	Pr ⁵⁹	Nd ⁶⁰	Pm ⁶¹	Sm ⁶²	Eu ⁶³	Gd ⁶⁴	Tb ⁶⁵	Dy ⁶⁶	Ho ⁶⁷	Er ⁶⁸	Tm ⁶⁹	Yb ⁷⁰		
Actinide Series			Ac ⁸⁹	Th ⁹⁰	Pa ⁹¹	U ⁹²	Np ⁹³	Pu ⁹⁴	Am ⁹⁵	Cm ⁹⁶	Bk ⁹⁷	Cf ⁹⁸	Es ⁹⁹	Fm ¹⁰⁰	Md ¹⁰¹	No ¹⁰²		

- Разработана Менделеевым в 1969 г.
- В то время было известно 63 элемента.
- Были предсказаны свойства Ga, Sc, Ge.

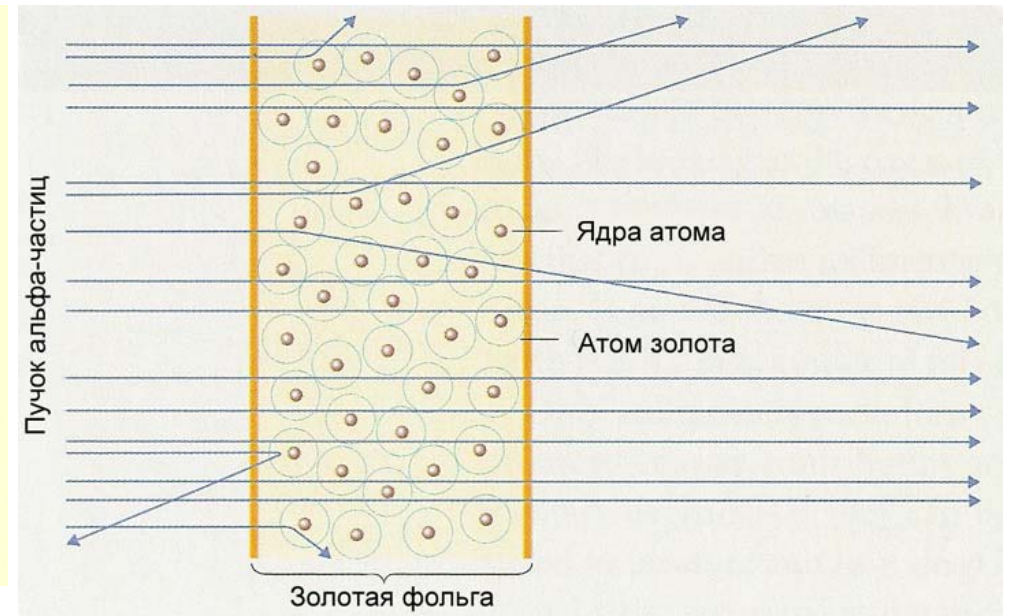
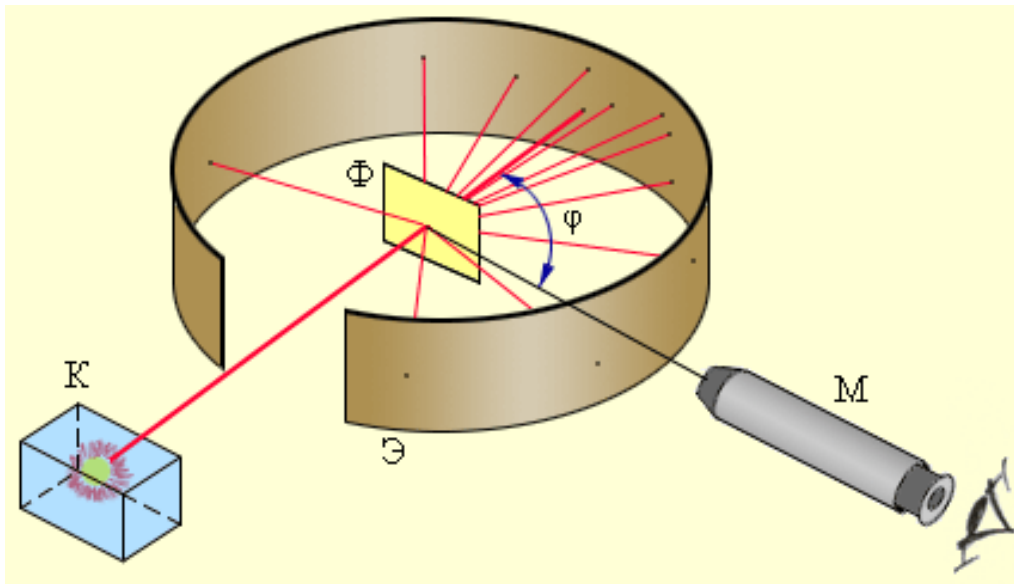
Модель ядра Томпсона



- В 1897 Томсон открывает электрон => в атомах есть внутренняя структура.
- Модель атома Томпсона: электроны находятся в положительно заряженном ядре как изюм в булочке



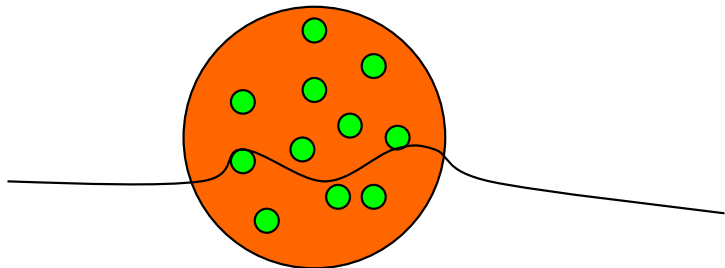
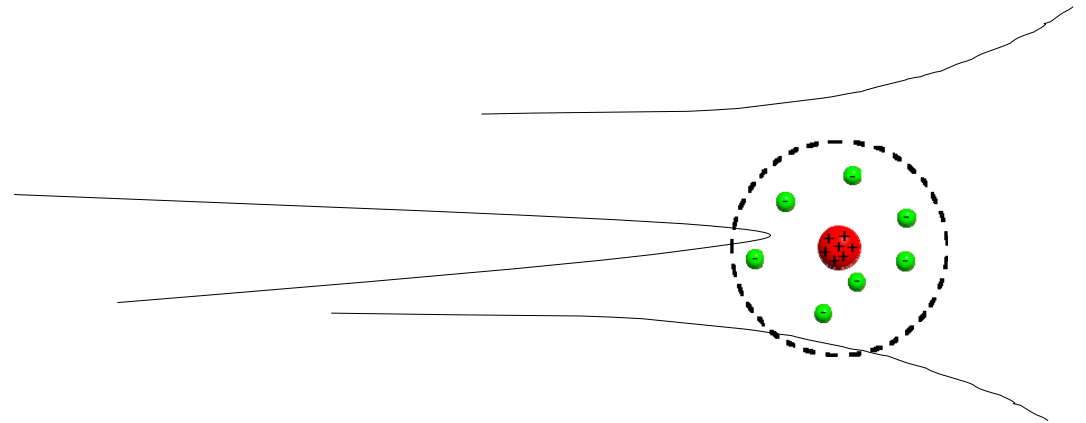
Структура атома



- В 1912 году Резерфорд провел первый эксперимент в физике элементарных частиц.
- Золотая фольга облучалась пучком α -частиц (ядро гелия). После они регистрировались как вспышки на люминесцентном экране.
- Резерфорд решил поставить экран за источником и обнаружил что **часть частиц рассеивается назад.**

Рассеяние Резерфорда

Резерфорд: "Как будто кто-то стреляет из пистолета в лист бумаги и пуля отскакивает назад"

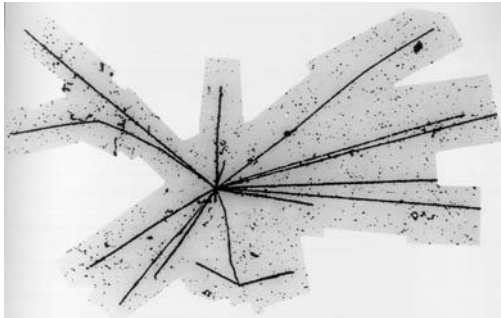


Модель ядра Резерфорда:
Плотное ядро с положительным зарядом ведет себя как точечный объект, на котором может происходить рассеяние назад.

Модель Томпсона не может объяснить рассеяние на большие углы

Наблюдение новых частиц

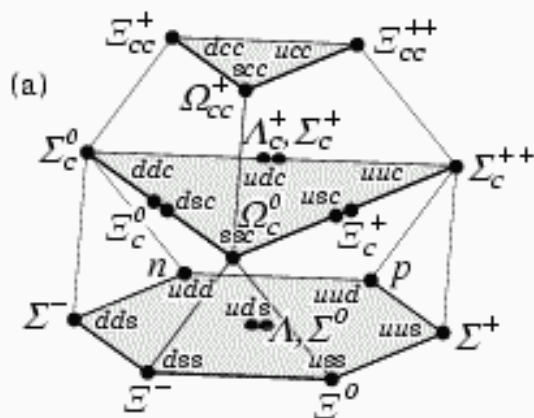
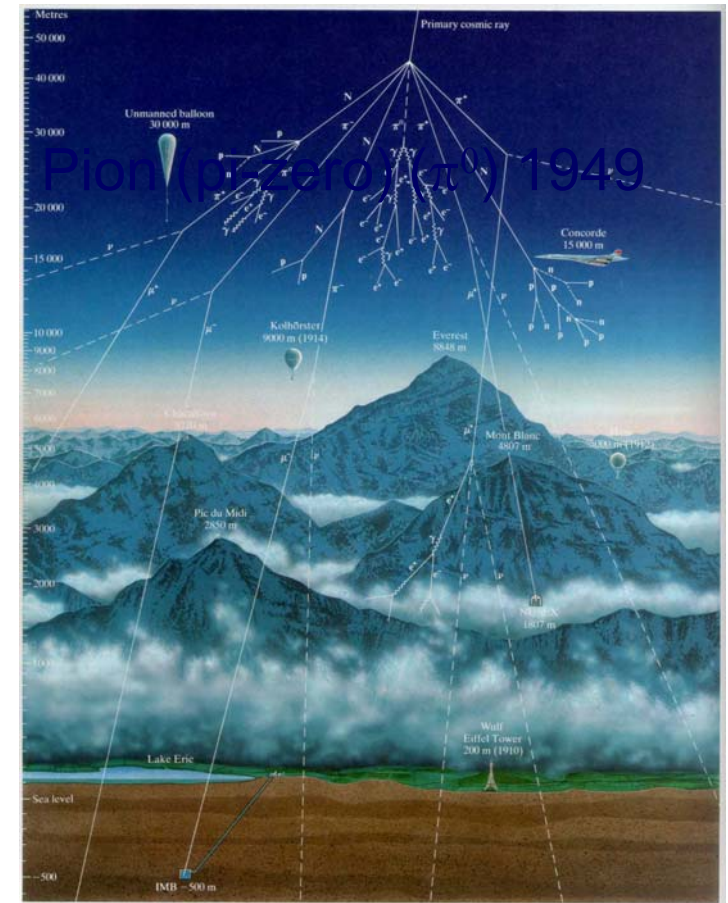
протон (p) 1918
нейтрон (n) 1932



мюон (μ) 1936
нейтрино (ν) 1955

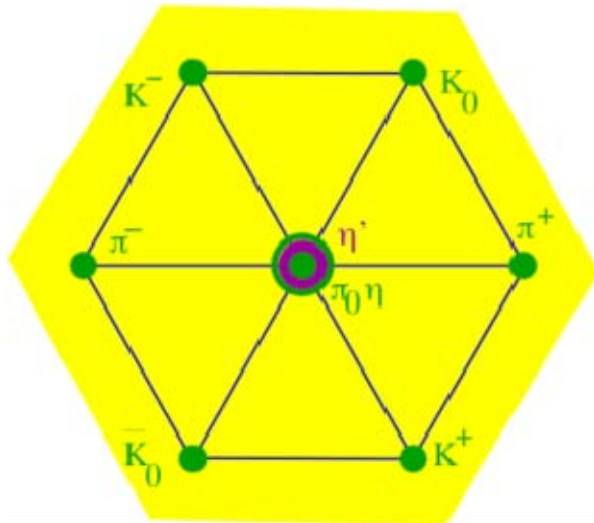
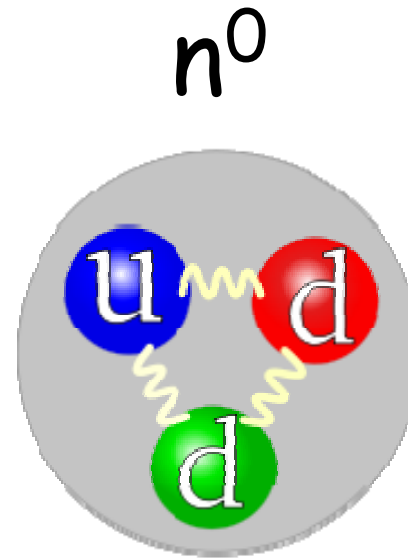
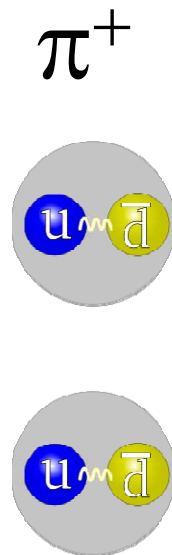
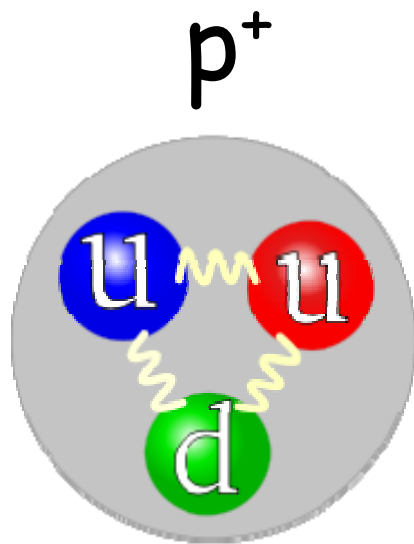
пион ($\pi^+ \pi^- \pi^0$) 1947
каон ($K^- K^+ K^0$) 1947

лямбда (Λ) 1951
сигма (Σ^- Σ^+) 1953



Поиск структуры для новых частиц

Кварковая модель



- В 1964 Глен-Манн и Цвейг предложили кварковую модель: все адроны состоят из 3 кварков u , d и s .

- В 1967 в SLAC повторили опыт Резерфорда исследуя рассеяние электронов на протоне и обнаружили внутреннюю структуру: кварки.

Вещество вокруг нас

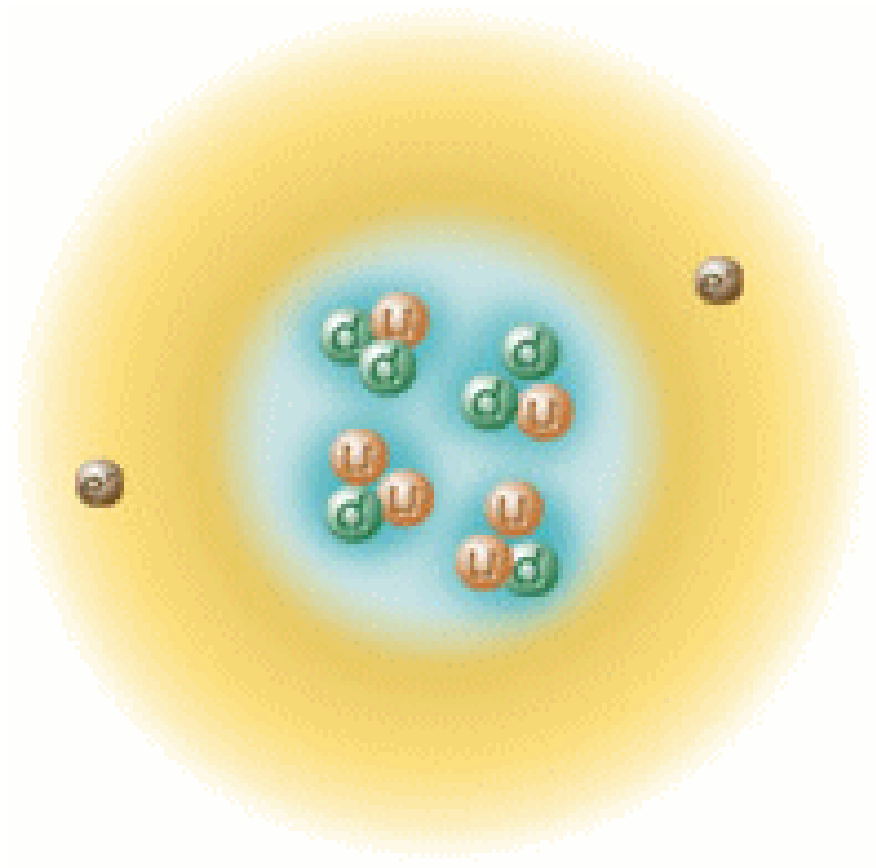
Модель атома

Кварки и электрон –
элементарные частицы

Протон – up up down (uud)

Нейтрон – down down up (ddu)

Массы ~ 1 ГэВ



Все вещество во вселенной состоит из трех элементарных частиц



Элементарные частицы

Кварки: 3 поколения

Заряды $1/3$ и $2/3$

3 цвета, наблюдаемы только бесцветные комбинации

Барионы: 3 кварка

Мезоны: кварк и анти-кварк

Лептоны: 3 поколения, нейтрино

Закон сохранения лептонного аромата

Бозоны: частицы переносящие взаимодействия

Фотон – электро-магнитное

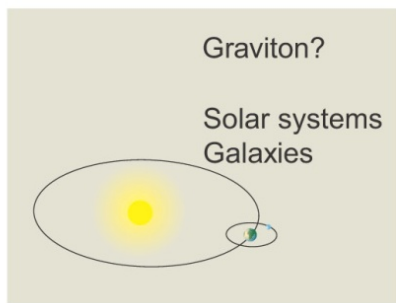
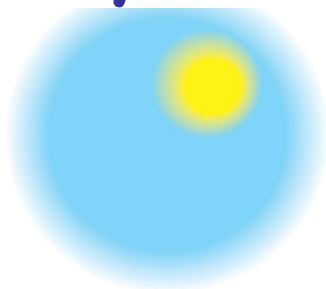
Глюон – сильное

W и Z^0 - слабое

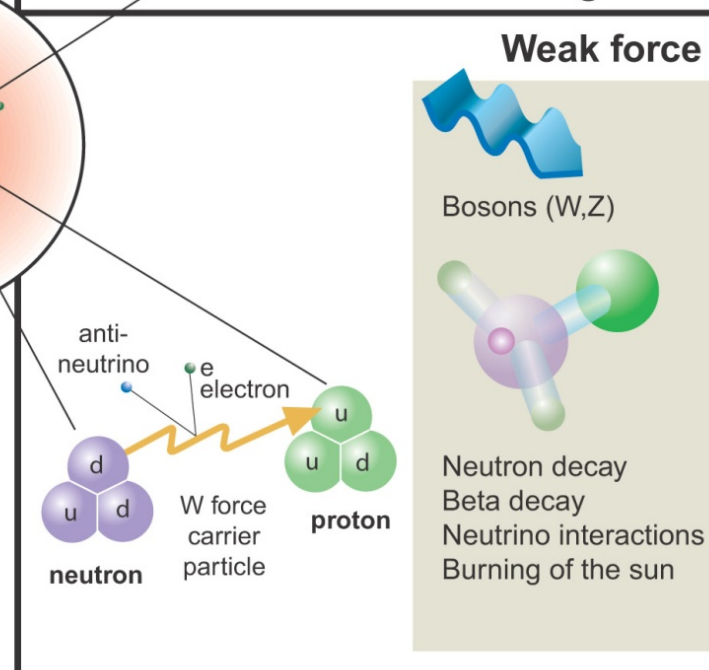
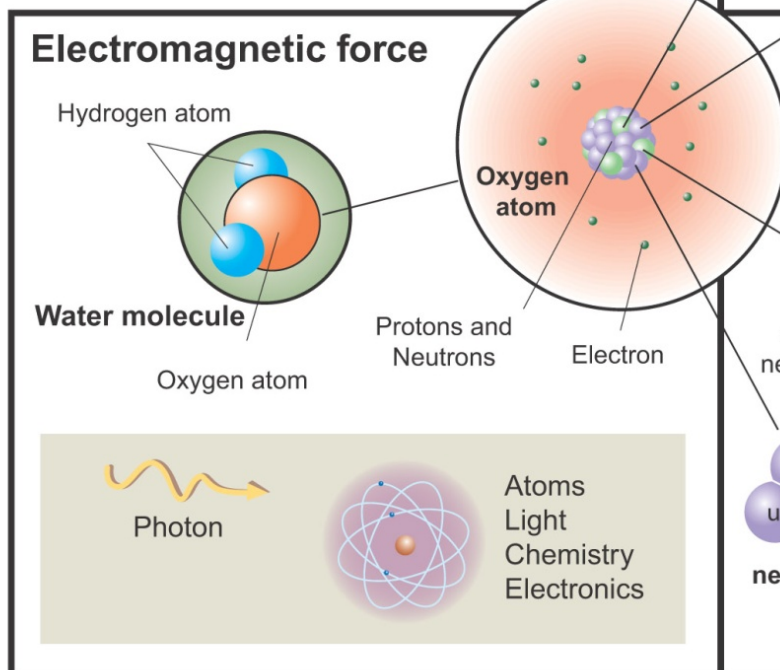
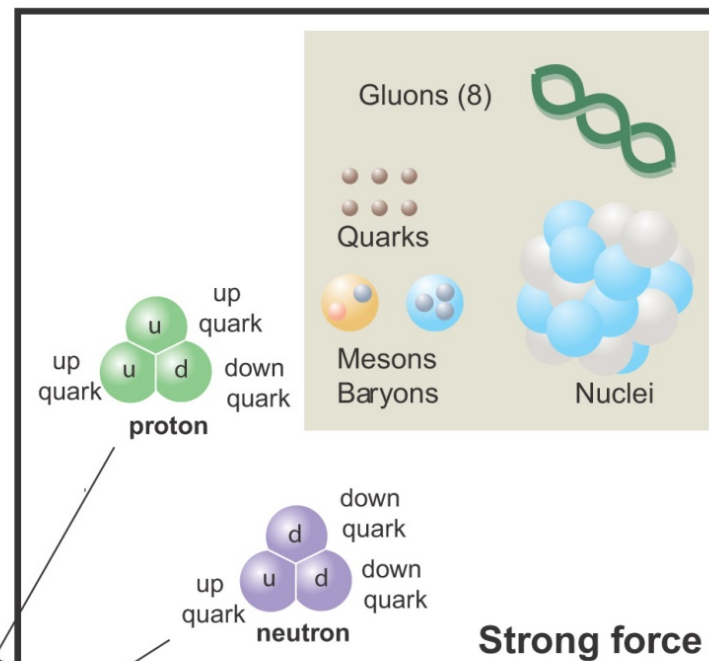
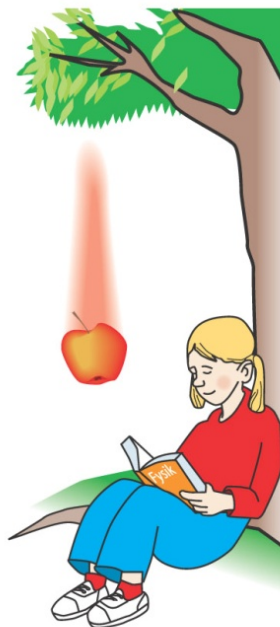
Three generations of matter (fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
Gauge bosons	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	± 1
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson

Фундаментальные силы



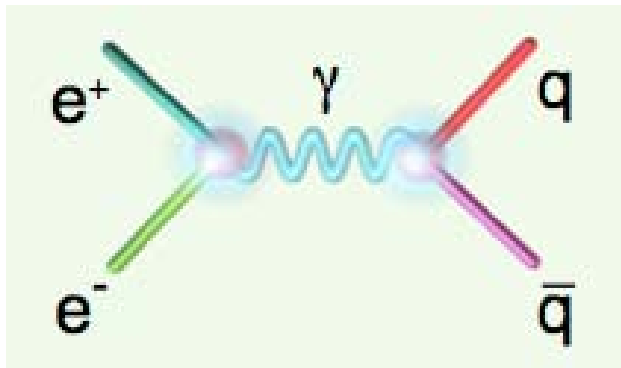
Gravity Force



Переносчики взаимодействий

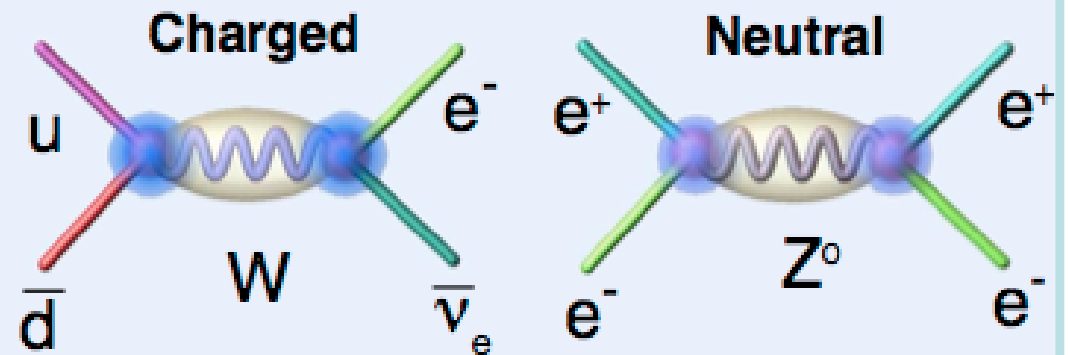
Фотон (ЭМ взаимодействие)

- обнаружен 1923, Комптон
- масса равна 0



W,Z бозоны (слабые силы)

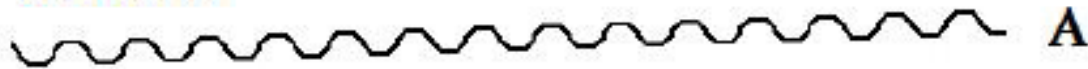
- наблюдение 1983, SPS, CERN
- $m_W = 80 \text{ GeV}/c^2$, $m_Z = 91 \text{ GeV}/c^2$



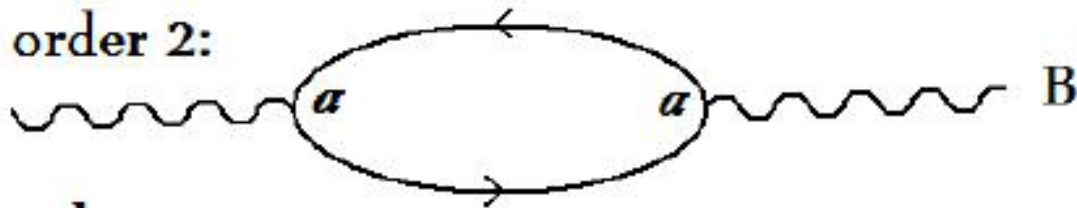
- Электромагнитные и слабые взаимодействия это проявление одной силы.
- Такое описание требует безмассовых W и Z бозонов.
- Как объяснить их большие массы ?

Ультрафиолетовая расходимость

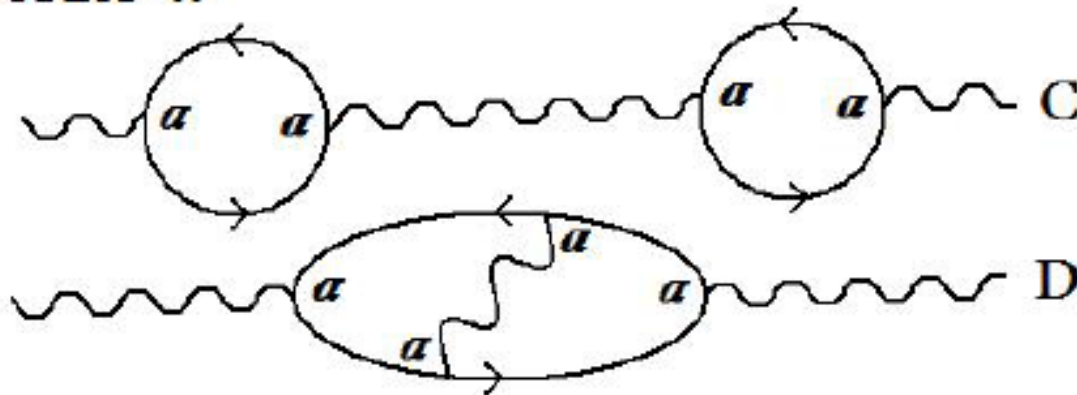
order 0:



order 2:



order 4:



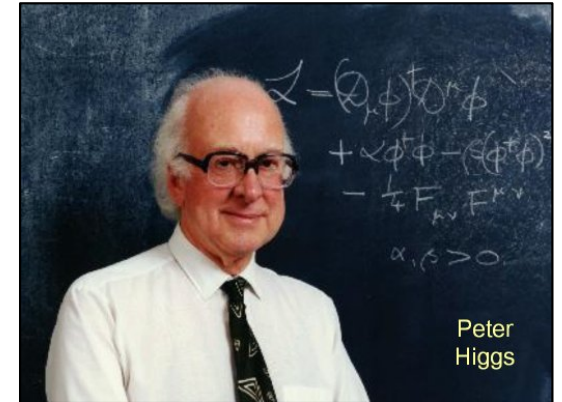
$$P = A + B\alpha^2 + (C + D)\alpha^4 + \dots$$

Diagrams define a series in α

- ЭМ и слабые взаимодействия описываются в теории возмущений.
- Точность описания проверена до **0.01 ppm**.
- Конечный ответ только когда массы фотона и W,Z бозонов равны 0.
- Аналог: излучение абсолютно черного тела.

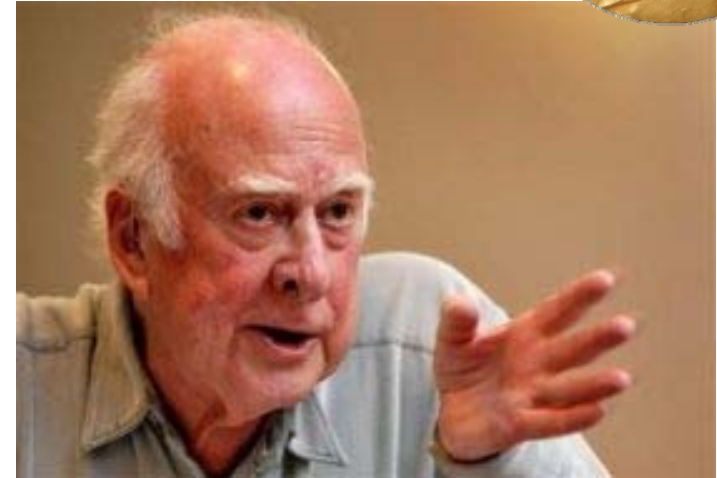
Зачем нужен бозон Хиггса?

- Симметрии Стандартной Модели требуют **безмассовых** бозонов (переносчиков взаимодействия)
- Массивный W и Z бозоны требуют **нарушения симметрии**.
- Механизм нарушения: «разлитое в вакууме» поле (Бракт-Энглер-Хиггс)
- Все элементарные частицы (лептоны, кварки, W, Z бозоны) **обладают массой из-за взаимодействия с Хиггсовским полем**
- **Квант поля – бозон Хиггса**, как фотон квант электромагнитного взаимодействия.



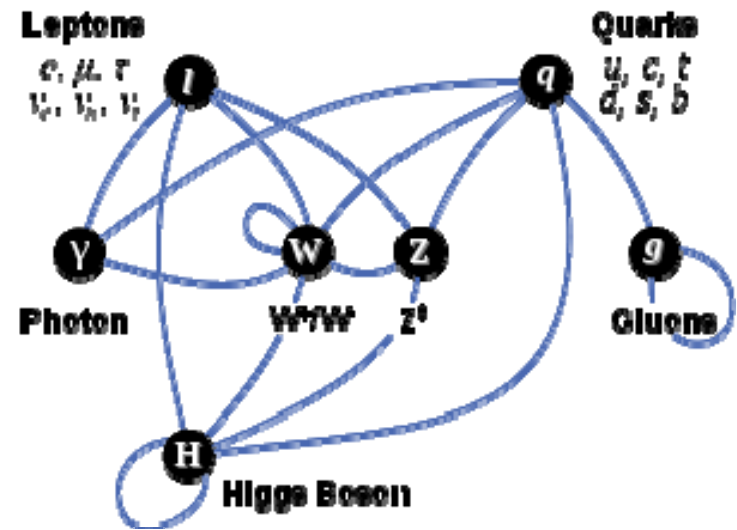
Поле Хиггса

- Поле «ответственное» за инерционную массу частиц

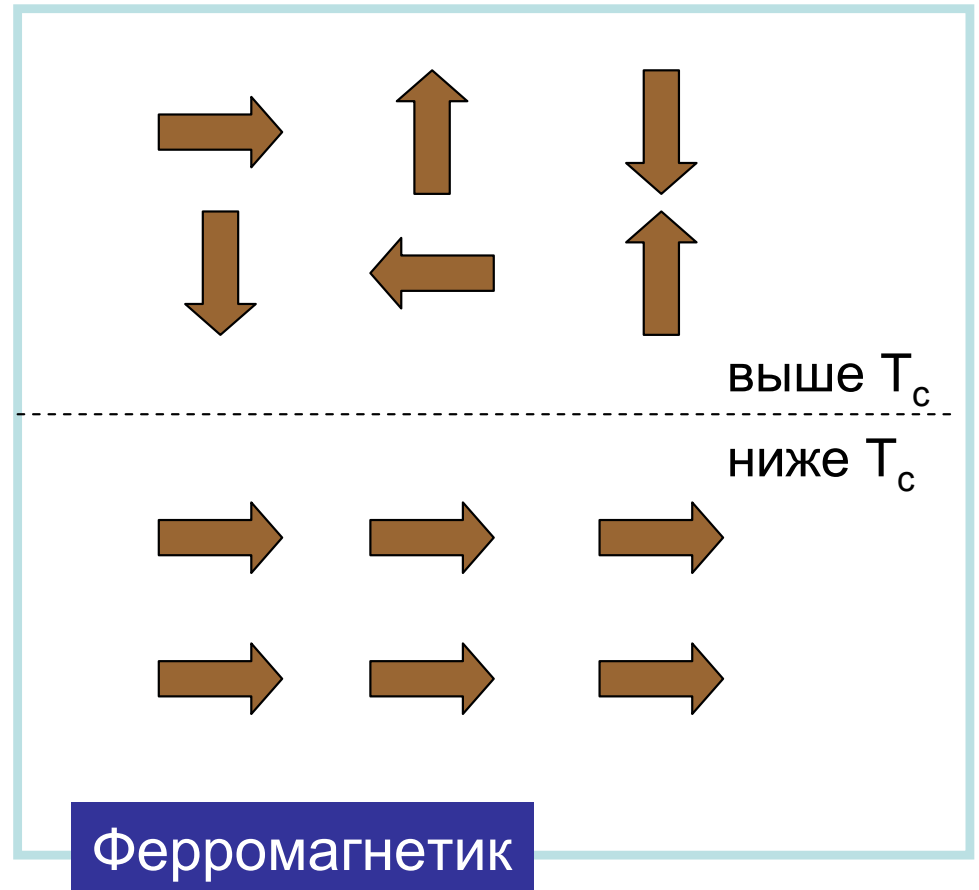
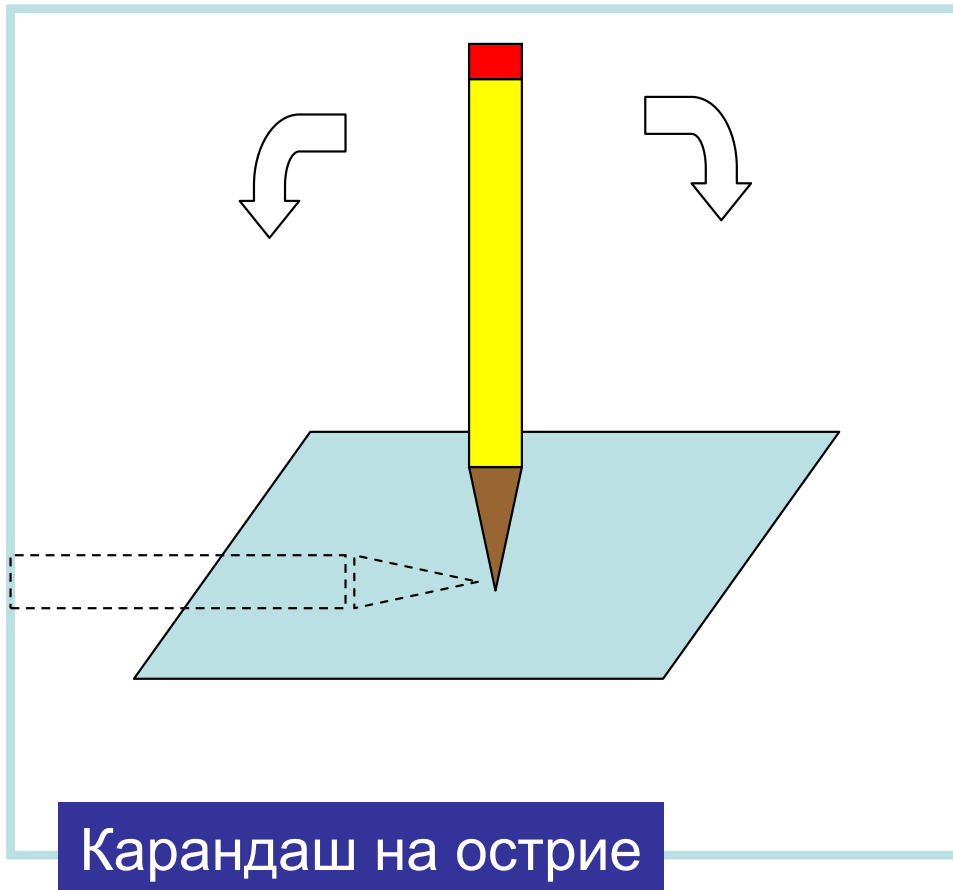


Бозон Хиггса

- Квант поля Хиггса



Спонтанное нарушение симметрии



В теории есть симметрия к вращению. Низшее состояние по энергии ее нарушает.

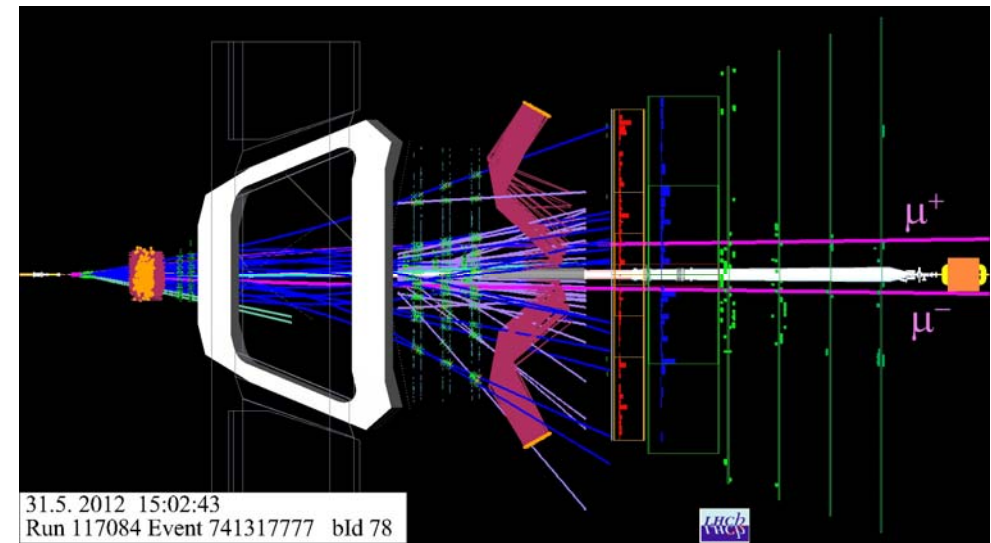
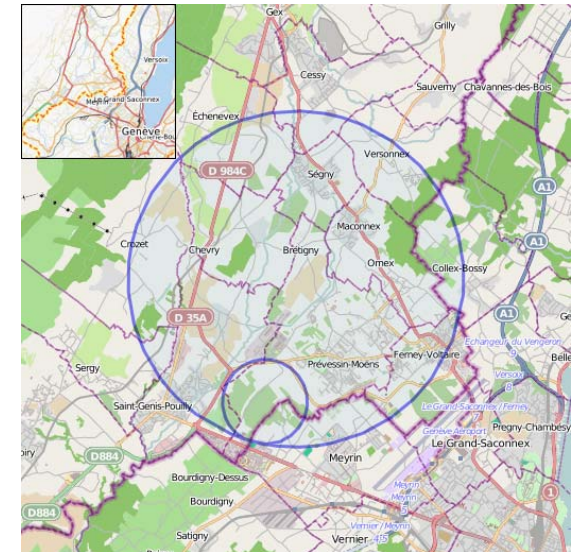
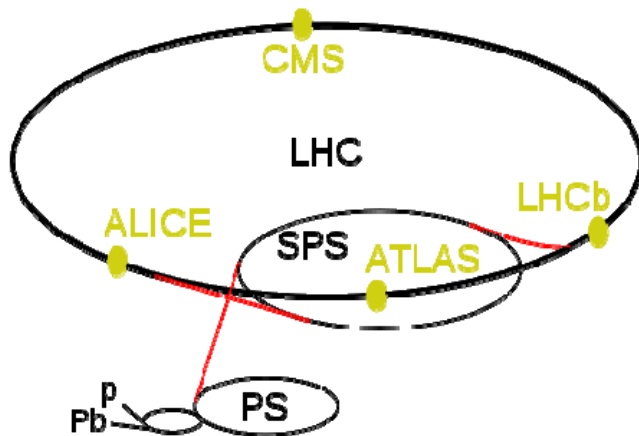
→ Симметрия нарушается внешним воздействием

Коллайдер LHC

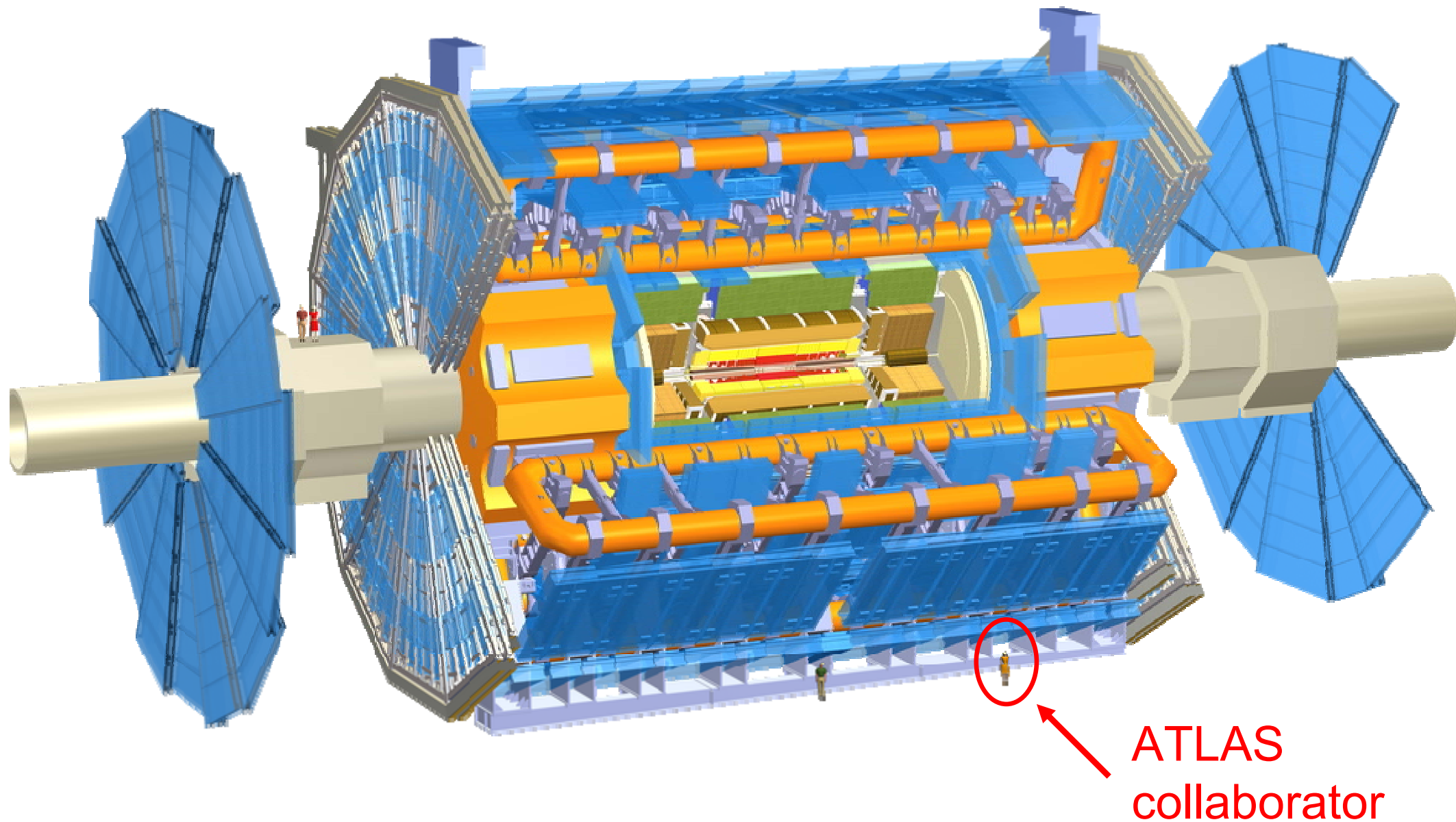
LHC: Large Hadrons Collider, CERN, Женева.

4 детектора: ATLAS, CMS, LHCb, ALICE

Основные задачи: **поиск бозона Хиггса**, проверка Стандартной Модели:
точные измерения,
поиск редких и запрещенных распадов.



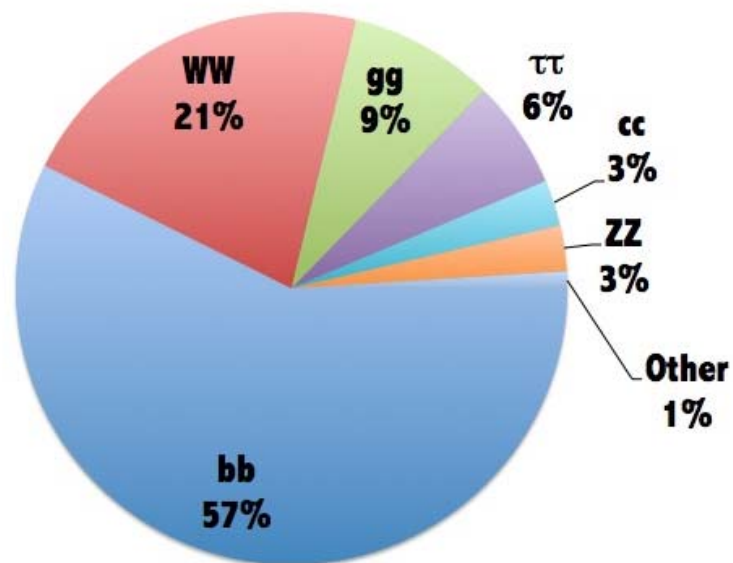
Детектор ATLAS



Распад Хиггс бозона

Основные моды распада бозона Хиггса

- 57% пара b /анти- b кварков
- 21% $W^+ W^-$ бозоны
- 9% два глюона
- 6% два тау лептона
- 3% пара c /анти- c кварков
- 3% два Z^0 бозона
- 0.2% two photons

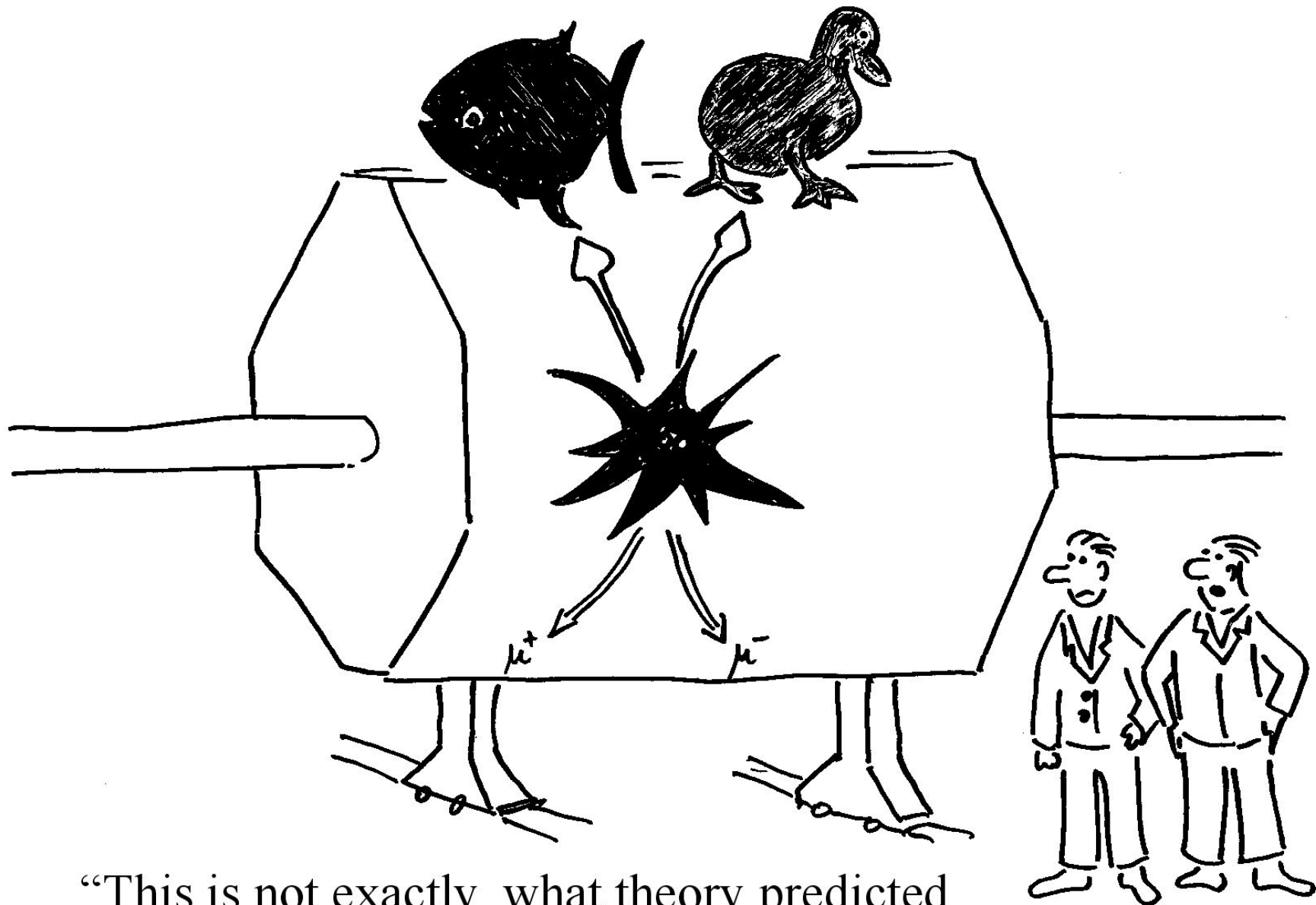


В каких модах искали:

- 3% два Z^0 бозона
- 0.2% два фотона

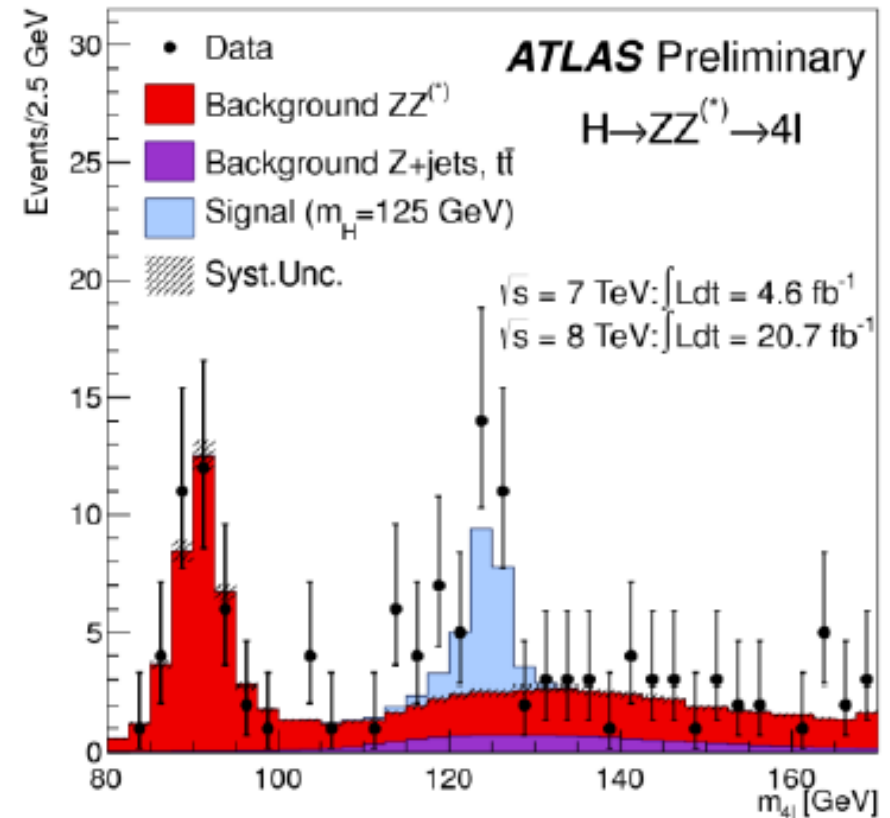
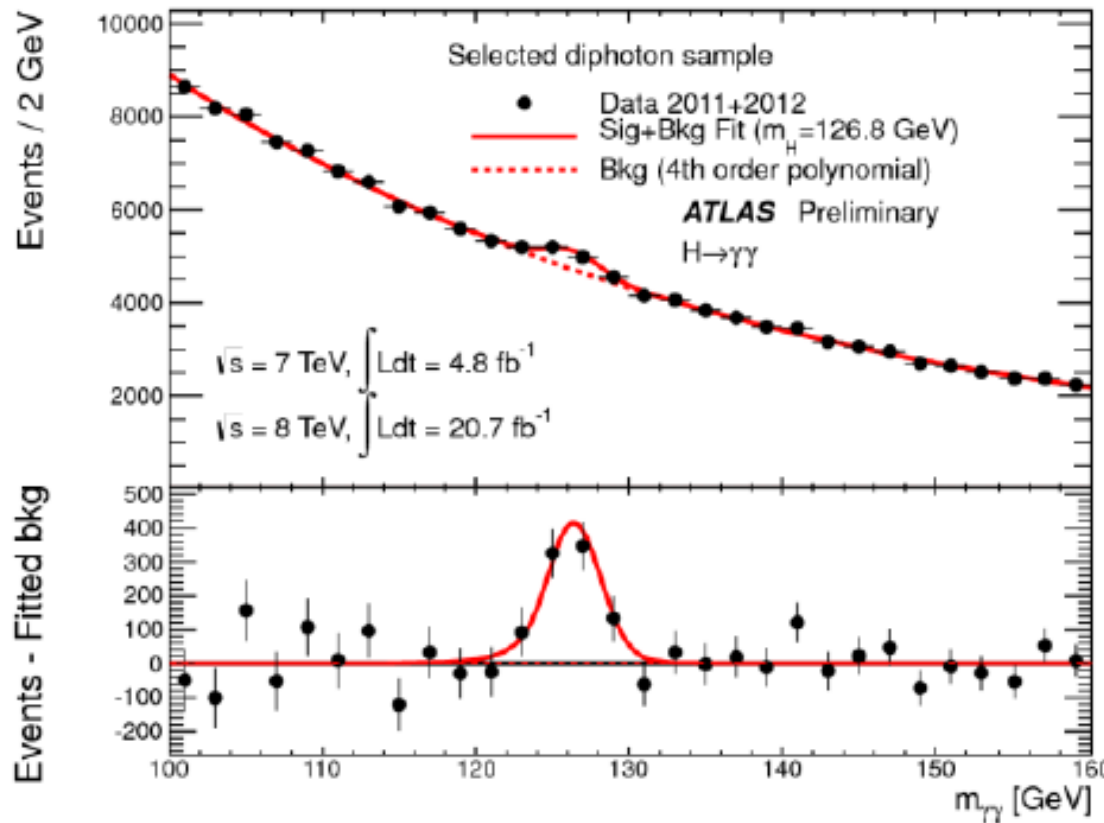


Редкие распады



“This is not exactly, what theory predicted
for the Higgs decay!”

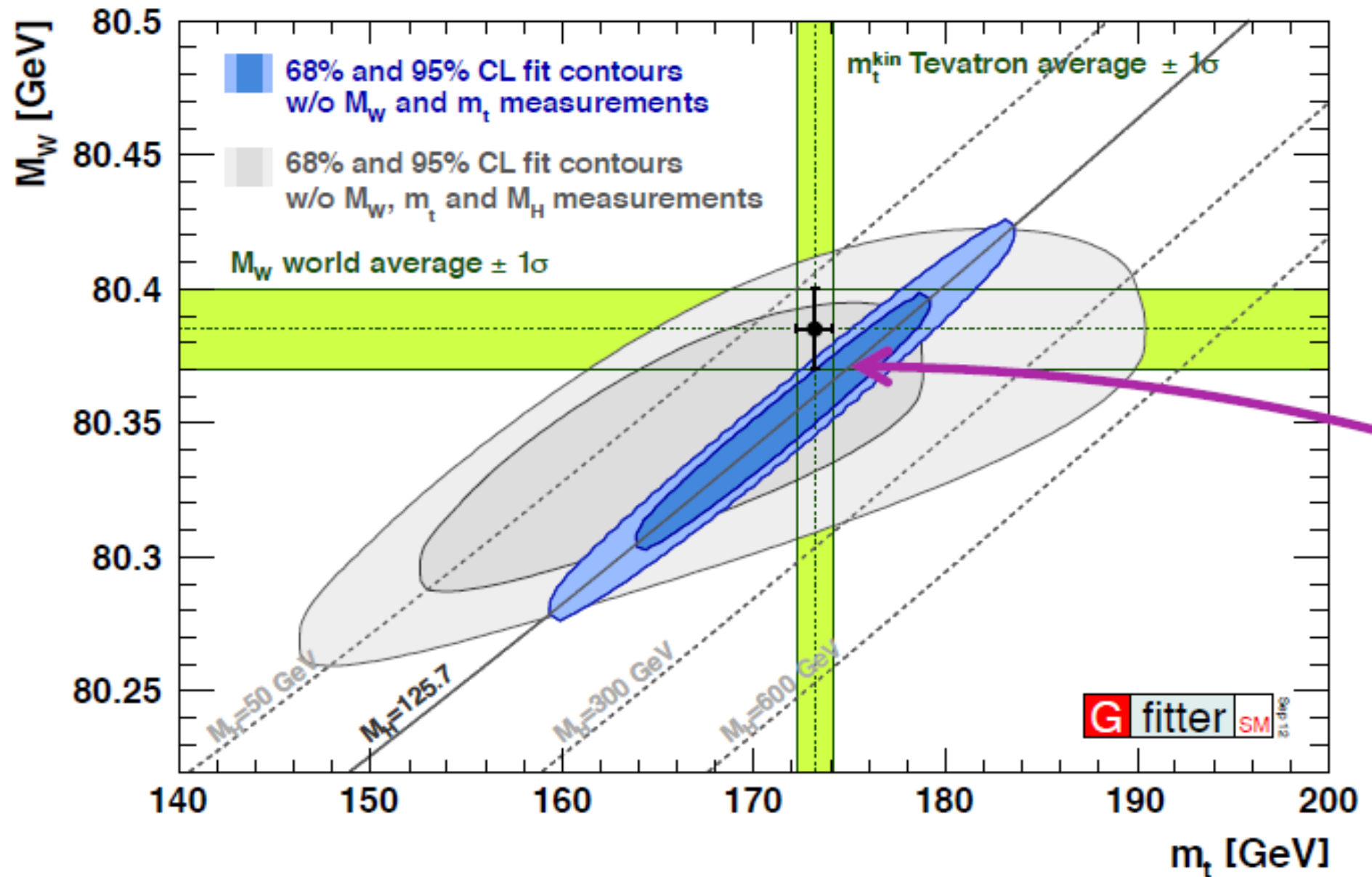
Сигнал Хиггс бозона, ATLAS



$$m_H = 125.8 \pm 0.5 \text{ (stat.)} \pm 0.2 \text{ (syst.) GeV}$$

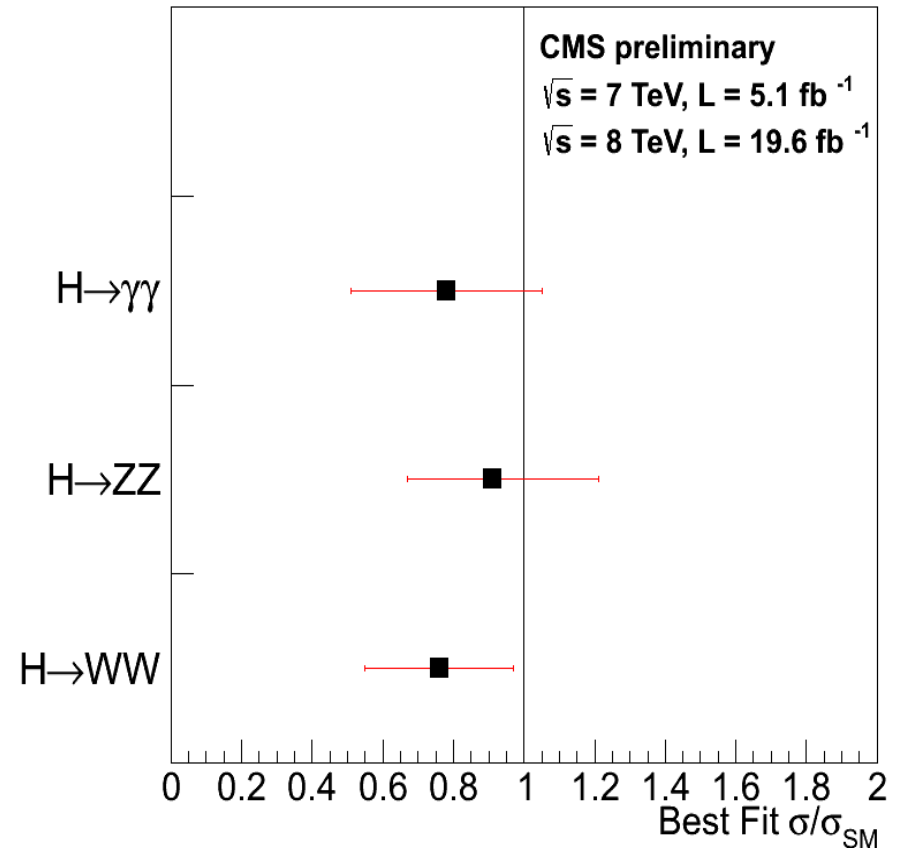
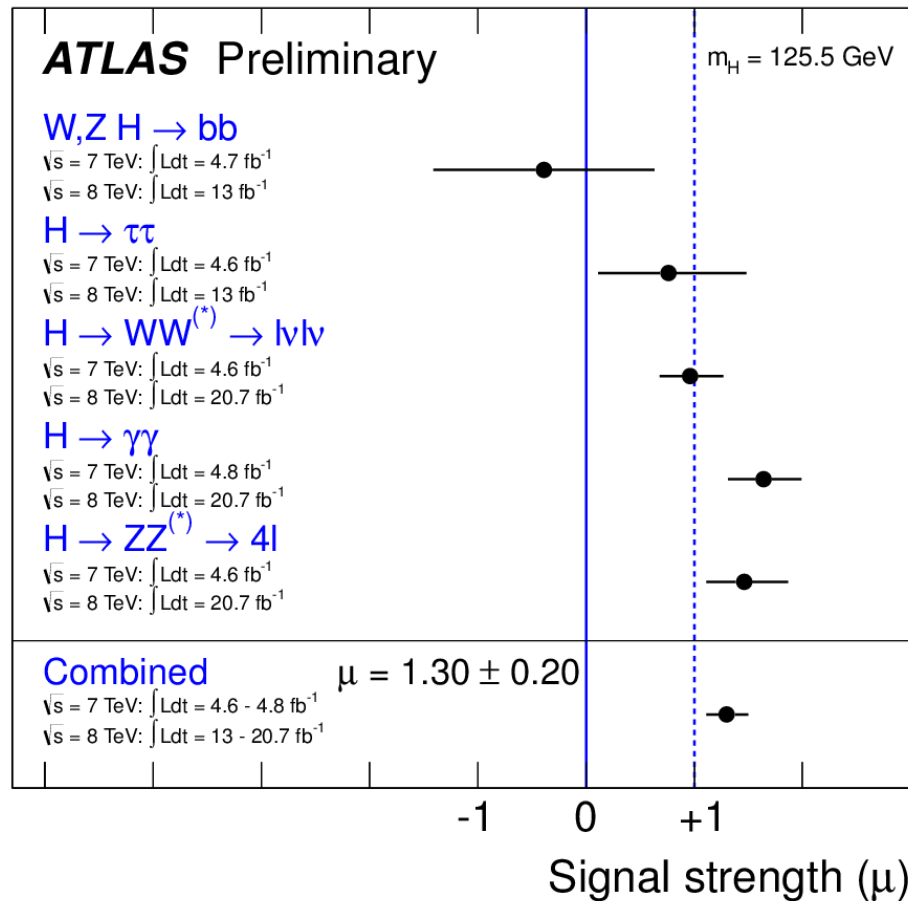
$$m_H = 125.4 \pm 0.5 \text{ (stat.)} \pm 0.6 \text{ (syst.) GeV}$$

Предсказание массы из других измерений



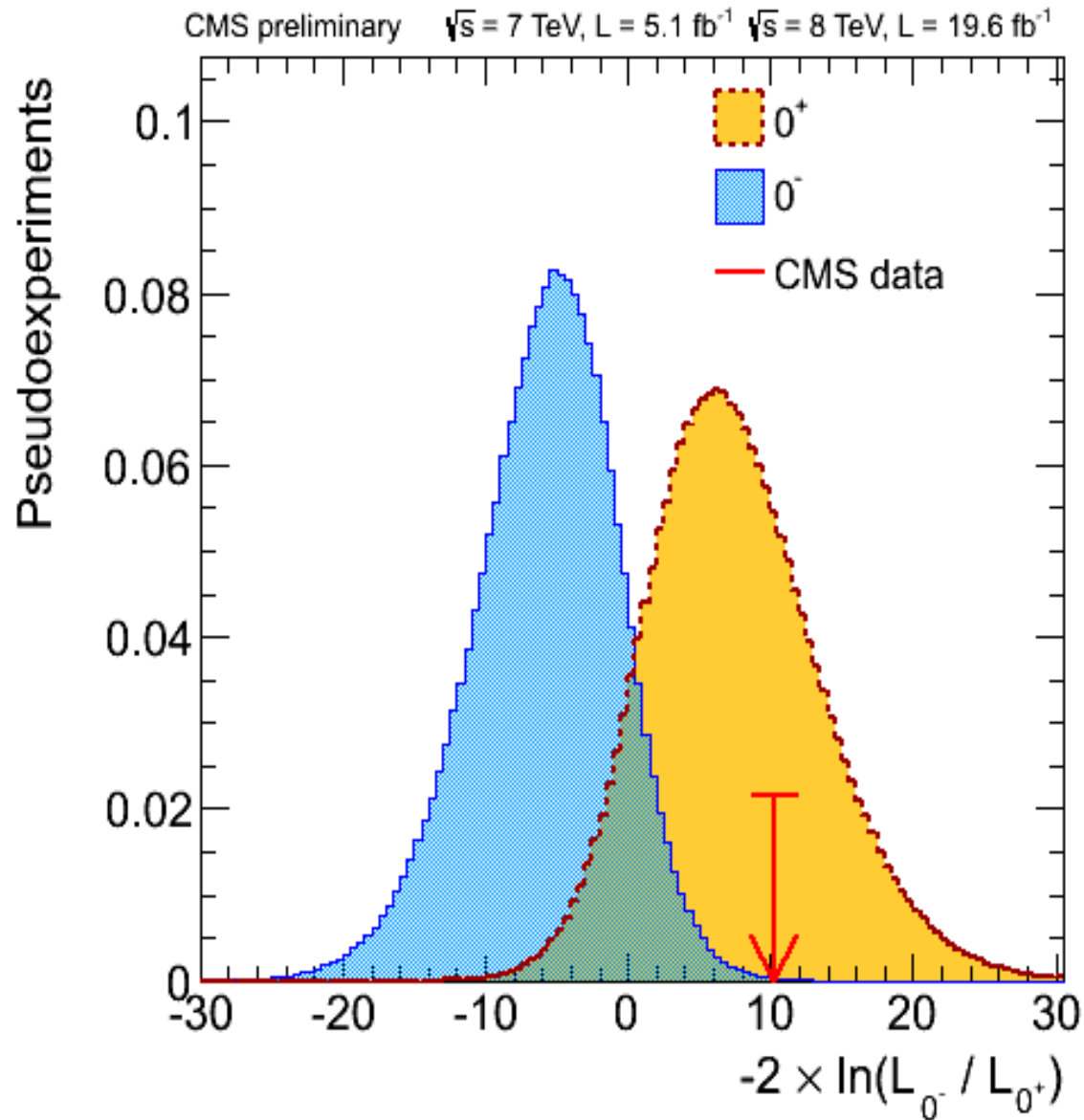
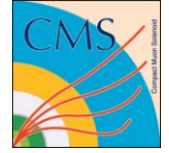
Отличное согласие со Стандартной Моделью!

Сигнал Хиггс бозона в различных каналах распада



Хорошее согласие со Стандартной Моделью

Другие параметры: спин и четность



Хиггс бозон в Стандартной Модели: $J^P=0^+$

Остальные гипотезы исключены на уровне 99.8%

Другие возможные объяснения

Предположим, что обнаруженная частица, $H(126)$, это не бозон Хиггса.

Тогда эта модель должна объяснить:

- почему $\Gamma(H \rightarrow ZZ^*) \gg \Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma)$ и $\Gamma(H \rightarrow ZZ^*)/\Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma)$ так близко к предсказанием из Стандартной Модели
- если $H(126)$ не нарушает симметрию электрослабого взаимодействия: то что ее нарушает?
- все предыдущие точные измерения ЭМ и слабых взаимодействий

Ни одна из не-Хиггс моделей, предложенных на данный момент, не может удовлетворительно ответить на эти вопросы

Заключение

- Поле Хиггса предсказано теоретически для объяснения массы у элементарных частиц. Бозон Хиггса является квантом этого поля.
- В 2012 в ЦЕРН была найдена частица с массой 126 ГэВ.
- Измеренные свойства этой частицы (масса, спин и четность, вероятности распадов) хорошо согласуются с предсказаниями Стандартной Модели. Другие возможные теоретические модели не могут объяснить всю совокупность экспериментальной информации.

Что же дальше?

- Все предсказания Стандартной Модели подтверждаются экспериментально.
- Но не все наблюдаемые явления описываются СМ (темная материя и энергия)
- Стандартная модель является только частью более общей теории (как классическая механика часть релятивистской)
- Есть куда двигаться дальше 😊