

Введение в физику частиц – II

Физика на Большом Адронном Коллайдере

Виктор Т. Ким

**Петербургский Институт Ядерной Физики НИЦ КИ, Гатчина
Санкт-Петербургский Политехнический Университет**





Содержание



Физика на Большом Адронном Коллайдере

Поиски бозона Хиггса

Поиски новой физики за пределами Стандартной Модели



Стандартная Модель элементарных частиц

Квантовая Хромодинамика (сильные взаимодействия)

Стандартная Модель

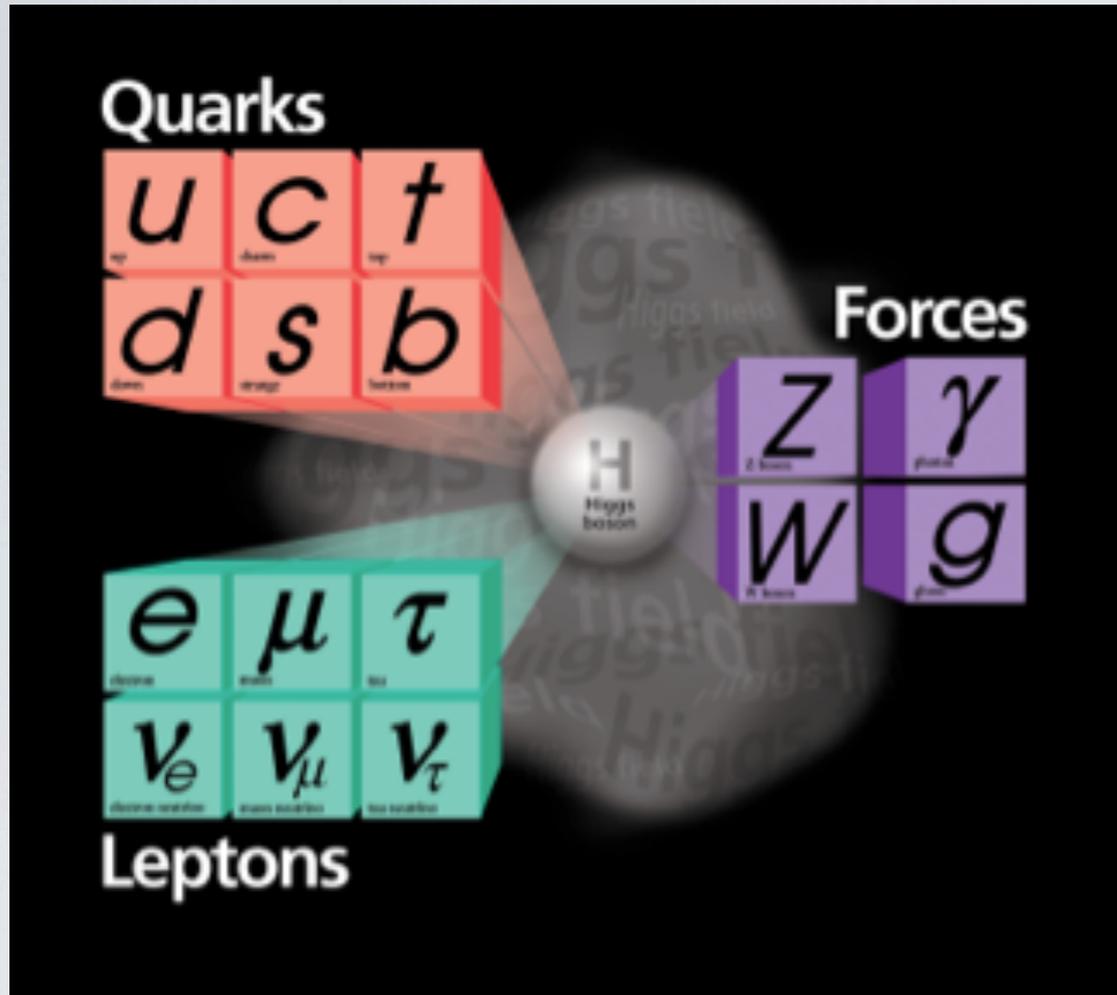
Стандартная Модель электрослабых взаимодействий

Электромагнитные

Слабые взаимодействия

Электричество

Магнетизм



e.g. LEP and SM

Quantity	Value	Standard Model	Pull
m_t [GeV]	$172.7 \pm 2.9 \pm 0.6$	172.7 ± 2.8	0.0
M_W [GeV]	80.450 ± 0.058	80.376 ± 0.017	1.3
	80.392 ± 0.039		0.4
M_Z [GeV]	91.1876 ± 0.0021	91.1874 ± 0.0021	0.1
Γ_Z [GeV]	2.4952 ± 0.0023	2.4968 ± 0.0011	-0.7
$\Gamma(\text{had})$ [GeV]	1.7444 ± 0.0020	1.7434 ± 0.0010	—
$\Gamma(\text{inv})$ [MeV]	499.0 ± 1.5	501.65 ± 0.11	—
$\Gamma(\ell^+\ell^-)$ [MeV]	83.984 ± 0.086	83.996 ± 0.021	—
σ_{had} [nb]	41.541 ± 0.037	41.467 ± 0.009	2.0
R_e	20.804 ± 0.050	20.756 ± 0.011	1.0
R_μ	20.785 ± 0.033	20.756 ± 0.011	0.9
R_τ	20.764 ± 0.045	20.801 ± 0.011	-0.8
R_b	0.21629 ± 0.00066	0.21578 ± 0.00010	0.8
R_c	0.1721 ± 0.0030	0.17230 ± 0.00004	-0.1
$A_{FB}^{(0,e)}$	0.0145 ± 0.0025	0.01622 ± 0.00025	-0.7
$A_{FB}^{(0,\mu)}$	0.0169 ± 0.0013		0.5
$A_{FB}^{(0,\tau)}$	0.0188 ± 0.0017		1.5
$A_{FB}^{(0,b)}$	0.0992 ± 0.0016	0.1031 ± 0.0008	-2.4
$A_{FB}^{(0,c)}$	0.0707 ± 0.0035	0.0737 ± 0.0006	-0.8
$A_{FB}^{(0,s)}$	0.0976 ± 0.0114	0.1032 ± 0.0008	-0.5
$s_W^2(A_{FB}^{(0,q)})$	0.2324 ± 0.0012	0.23152 ± 0.00014	0.7
	0.2238 ± 0.0050		-1.5
A_e	0.15138 ± 0.00216	0.1471 ± 0.0011	2.0
	0.1544 ± 0.0060		1.2
	0.1498 ± 0.0049		0.6
A_μ	0.142 ± 0.015		-0.3
A_τ	0.136 ± 0.015		-0.7
	0.1439 ± 0.0043		-0.7
A_b	0.923 ± 0.020	0.9347 ± 0.0001	-0.6
A_c	0.670 ± 0.027	0.6678 ± 0.0005	0.1
A_s	0.895 ± 0.091	0.9356 ± 0.0001	-0.4
g_W^2	0.30005 ± 0.00137	0.30378 ± 0.00021	-2.7
g_B^2	0.03076 ± 0.00110	0.03006 ± 0.00003	0.6
g_V^e	-0.040 ± 0.015	-0.0396 ± 0.0003	0.0
g_A^e	-0.507 ± 0.014	-0.5064 ± 0.0001	0.0
A_{PV}	-1.31 ± 0.17	-1.53 ± 0.02	1.3
$Q_W(\text{Cs})$	-72.62 ± 0.46	-73.17 ± 0.03	1.2
$Q_W(\text{Ti})$	-116.6 ± 3.7	-116.78 ± 0.05	0.1
$\frac{\Gamma(b \rightarrow s\gamma)}{\Gamma(b \rightarrow \text{had})}$	$3.35^{+0.50}_{-0.44} \times 10^{-3}$	$(3.22 \pm 0.09) \times 10^{-3}$	0.3
$\frac{1}{2}(g_\mu - 2 - \frac{g}{2})$	4511.07 ± 0.82	4509.82 ± 0.10	1.5
τ_τ [fs]	290.89 ± 0.58	291.87 ± 1.76	-0.4

Стандартная Модель:
замечательная и
хорошо проверенная
экспериментально теория



Стандартная Модель: проблемы



Где бозон Хиггса?

Происхождение масс и их иерархия?

Происхождение CP-нарушения?

Новые состояния кварк-глюонной материи?

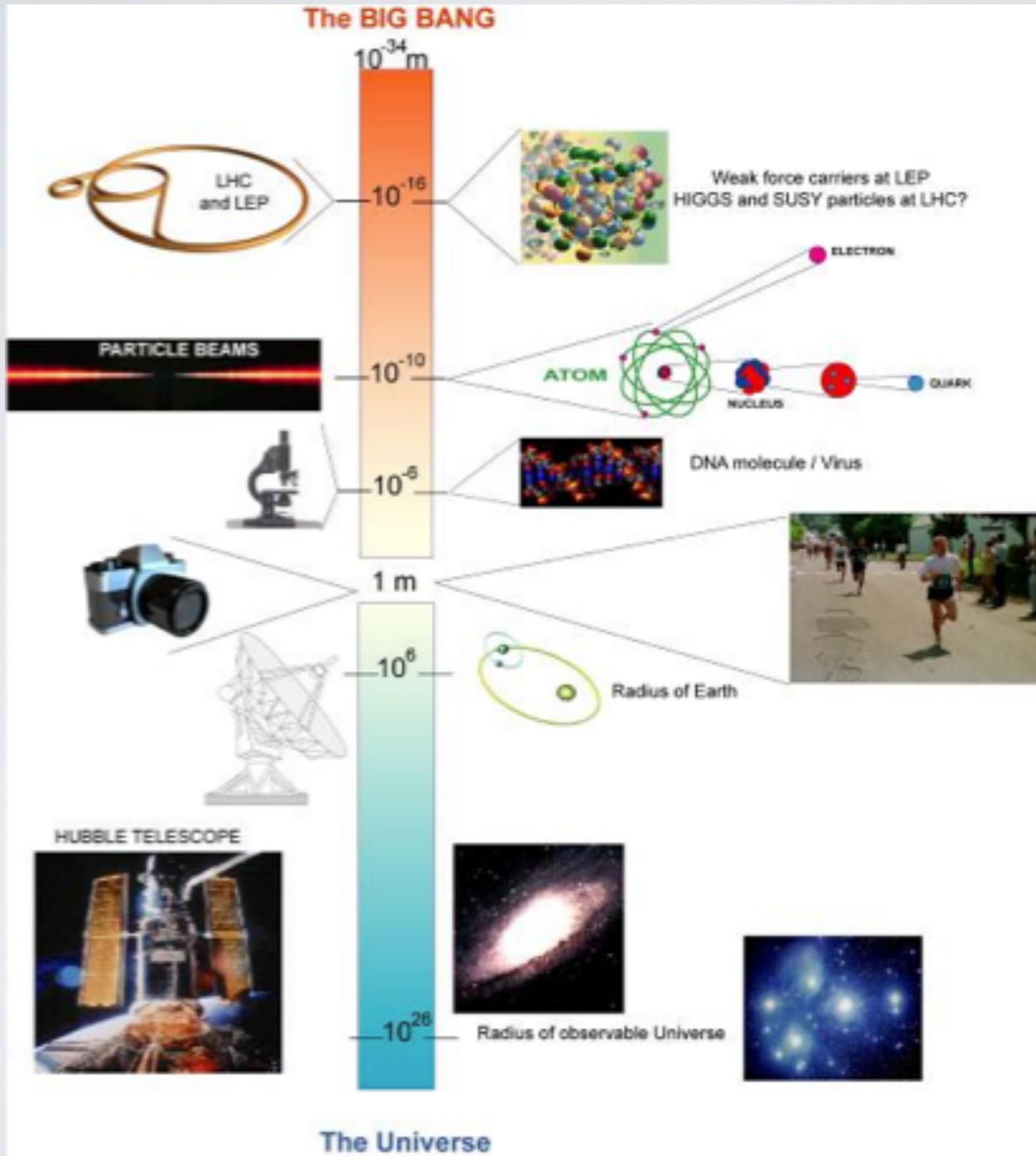
Слишком много параметров: более 20

Как включить гравитацию?

Барион-антибарионная асимметрия Вселенной?

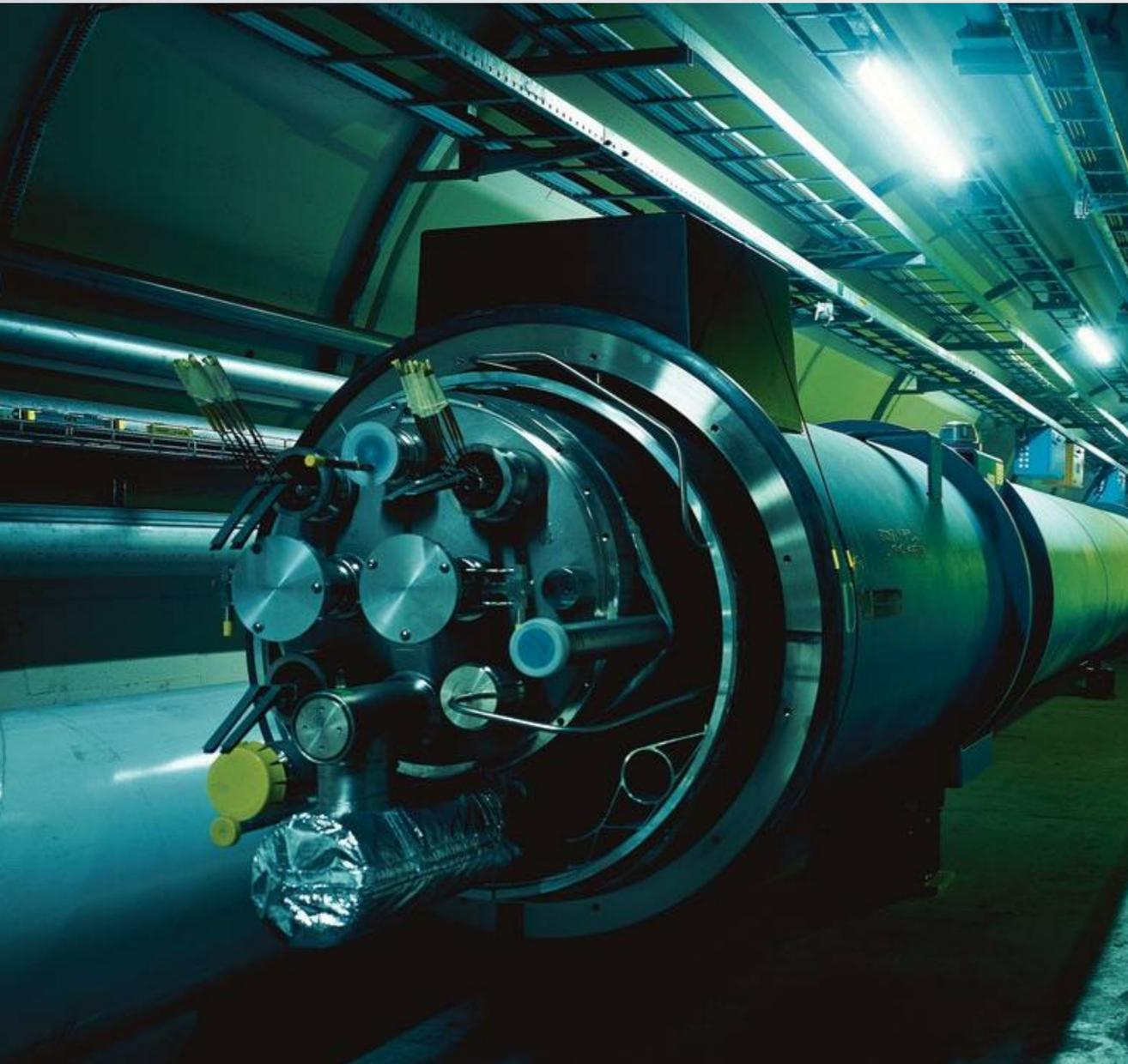
Из чего состоит темная материя и темная энергия?

Характерные масштабы Вселенной



Большой адронный коллайдер





туннель 27 км
p-p, p-pB, Pb-Pb
2010-11: 3.5 ТэВ x 3.5 ТэВ
2012: 4 ТэВ x 4 ТэВ
2015: 6.5 ТэВ x 6.5 ТэВ



Большой адронный коллайдер

Самое горячее место в Галактике: $T \geq 5 \cdot 10^{12} \text{ K}$

$$T_{\text{Sun}} = 1.6 \cdot 10^7 \text{ K}$$

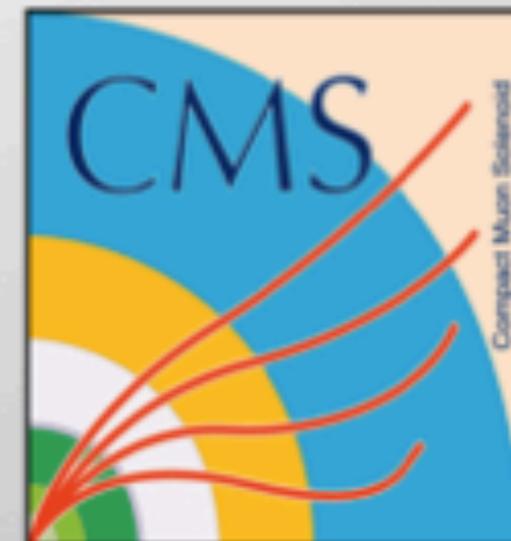
Самое холодное место в Галактике: $T \leq 2 \text{ K}$

Olympics'2014: **Hot! Cool! Yours!**

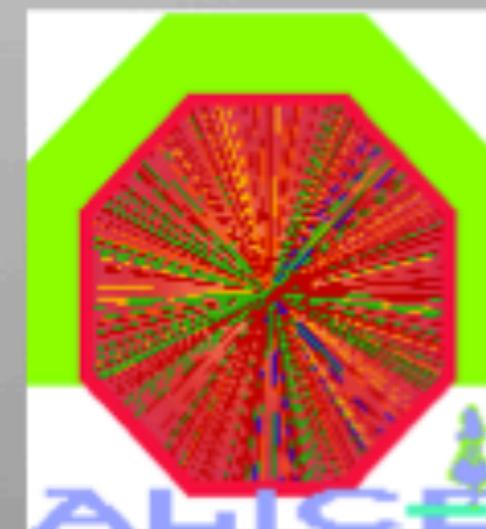
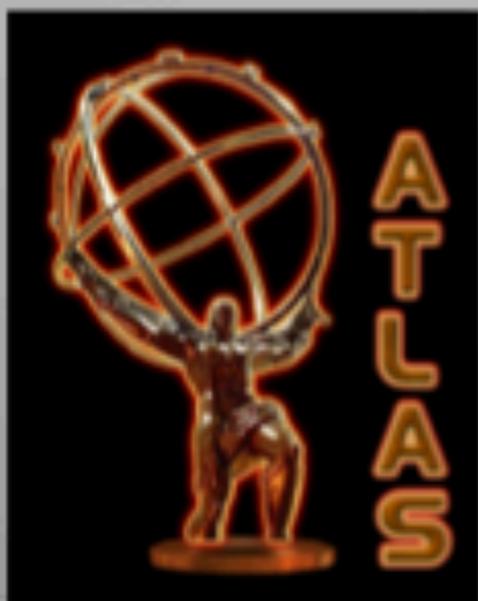
Жаркие! Зимние! Твои!

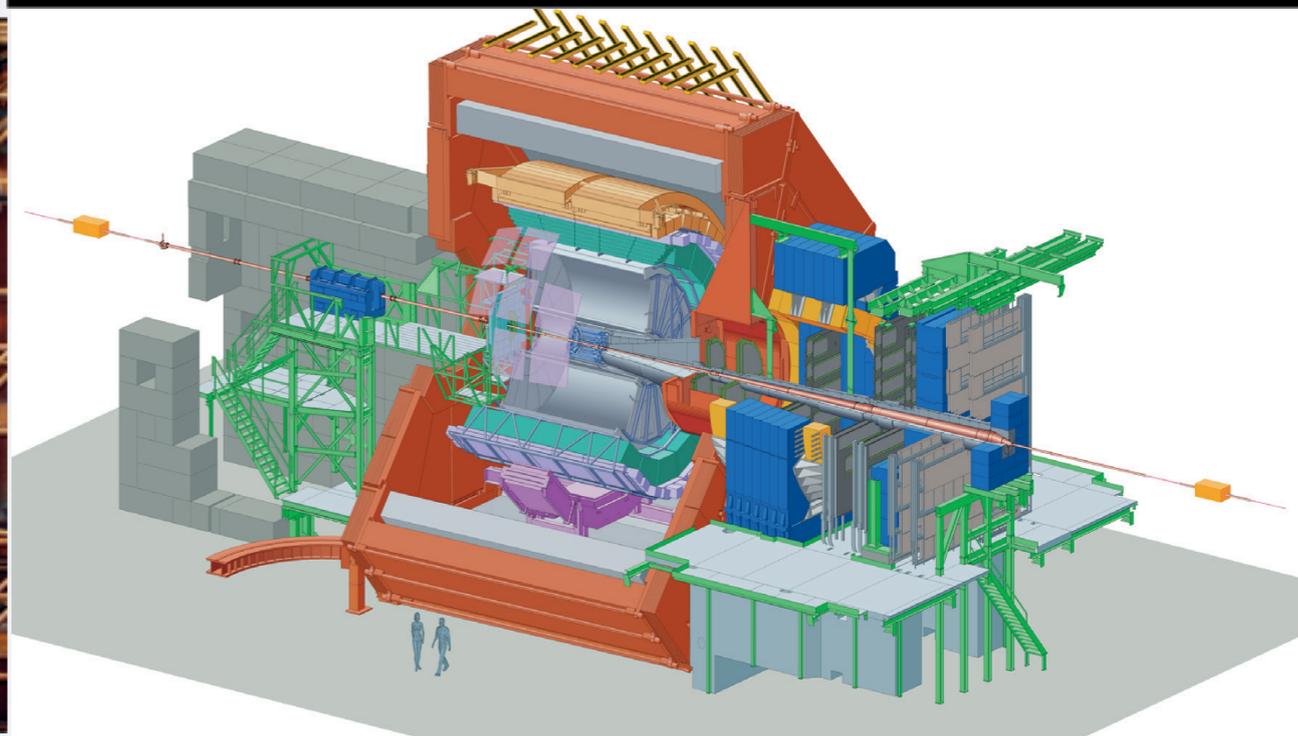
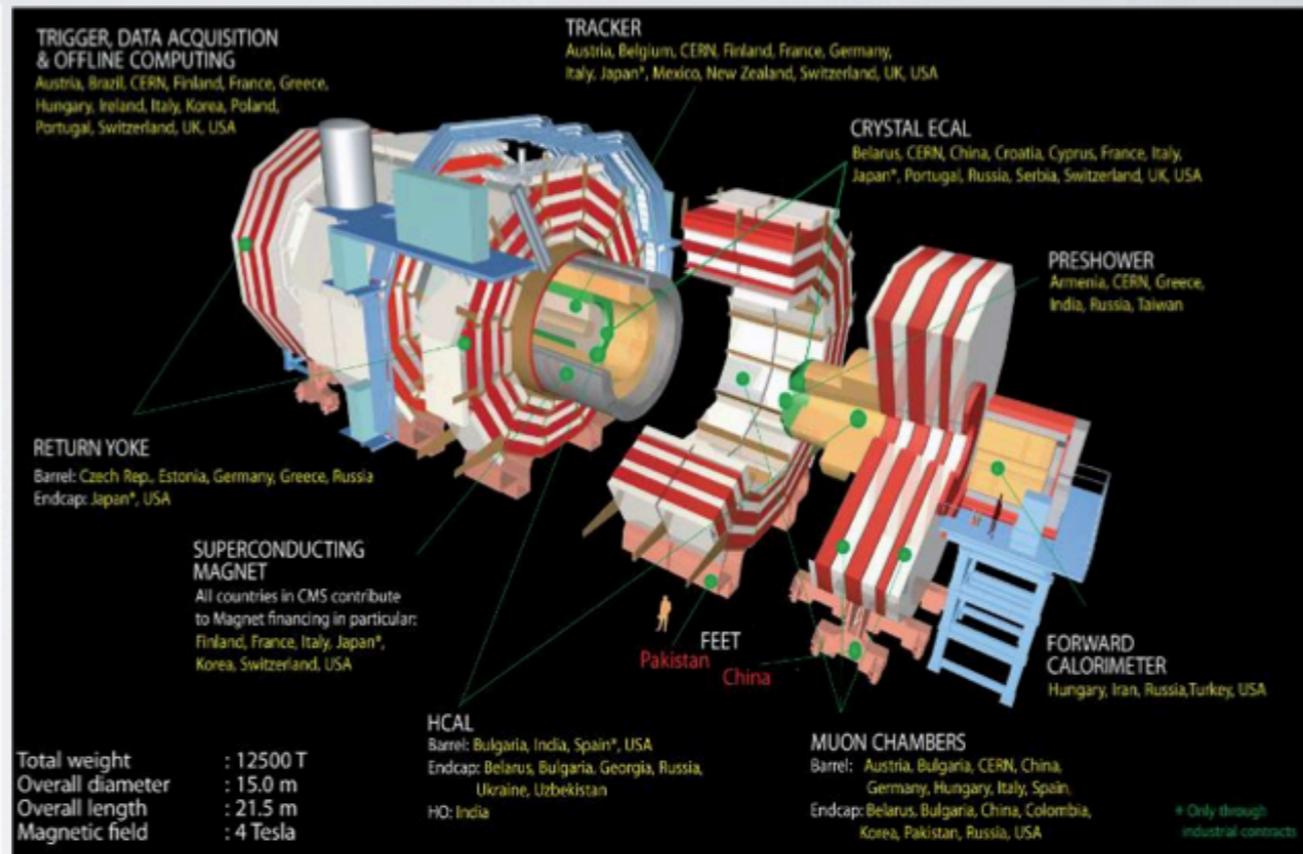
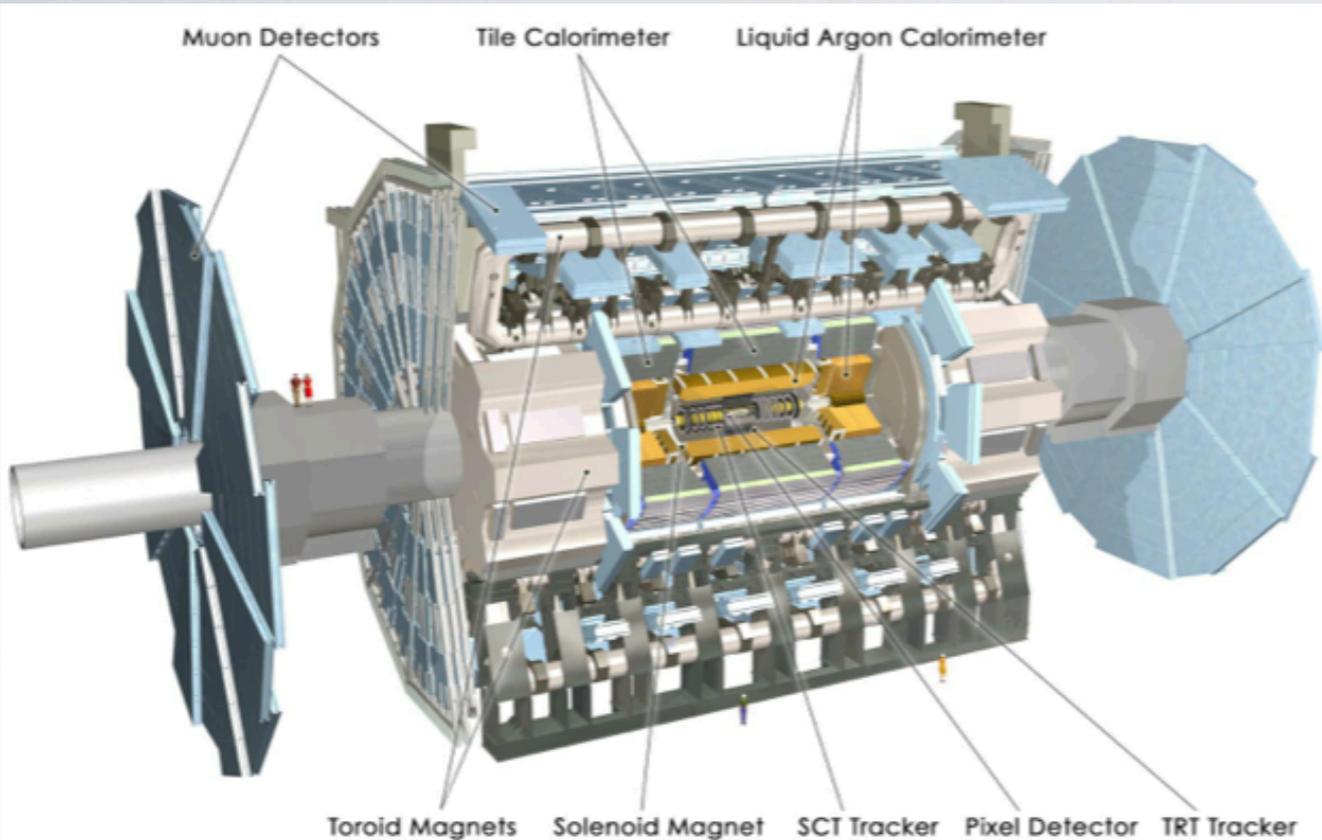
(Крутые!)

CERN LHC: **Most Hot! Most Cool! Most Yours!**

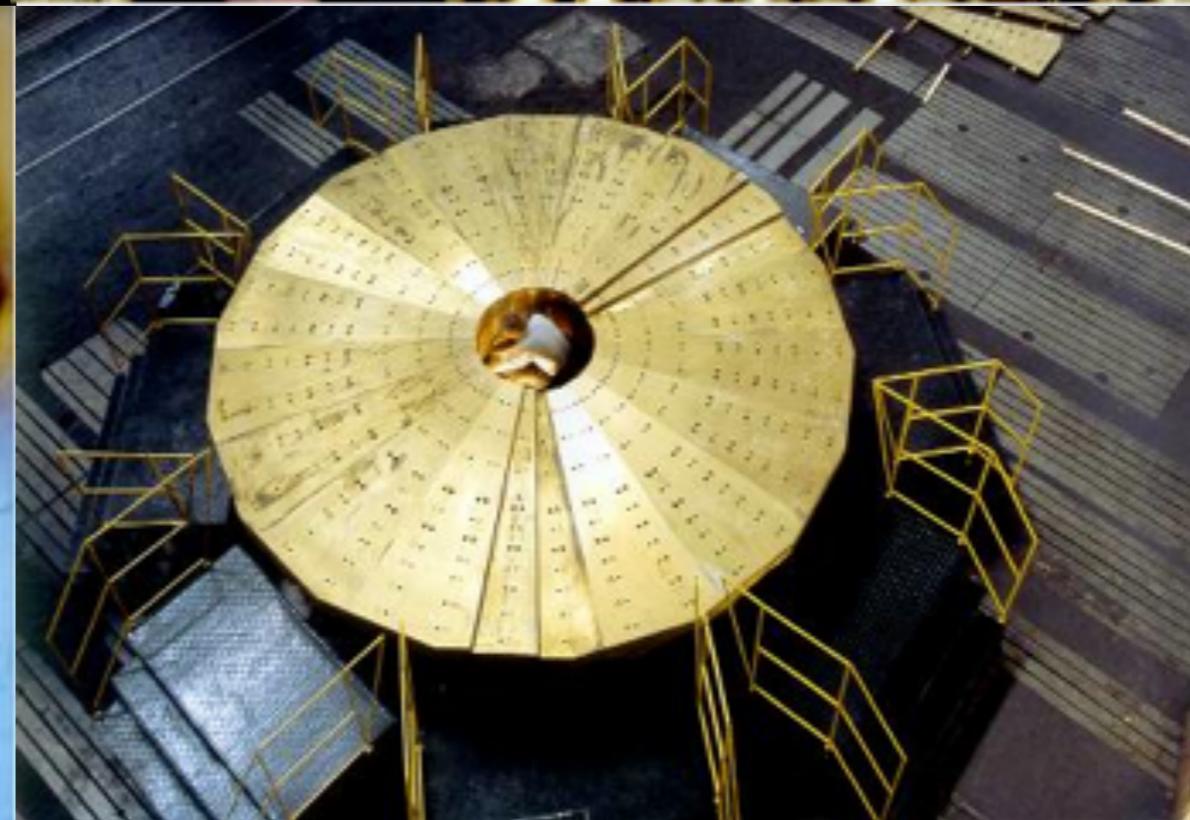


Experiments at the LHC





Конверсия ВПК для БАК (CMS)



Конверсия ВПК для БАК : кристаллы для CMS ECAL





Эксперименты на БАК: ATLAS, CMS, LHCb & ALICE

**Более 80 стран
~ 10000 участников
из них ~ 2000 аспиранты**

Россия: ~ 500

ОИЯИ

НИЦ КИ: ИФВЭ, ПИЯФ НИЦ КИ, ИТЭФ, КИ

РАН: ИЯФ СО, ИЯИ, ФИ

ВУЗЫ: МИФИ, НИИЯФ МГУ, СПбГУ

ATLAS, CMS, ALICE, LHCb

Открытие бозона Хиггса (ATLAS & CMS)

Россия: ~ 150



Основные цели Большого адронного коллайдера

Главные цели БАК:

Бозон Хиггса SM

новые частицы и взаимодействия
за пределами Стандартной Модели

а также:

проверка SM при новых энергиях
поиски новой динамики SM

РР-соударения: сечения рассеяния и образования частиц

Physical cross section

Parton distribution function

Renormalization scale μ_R

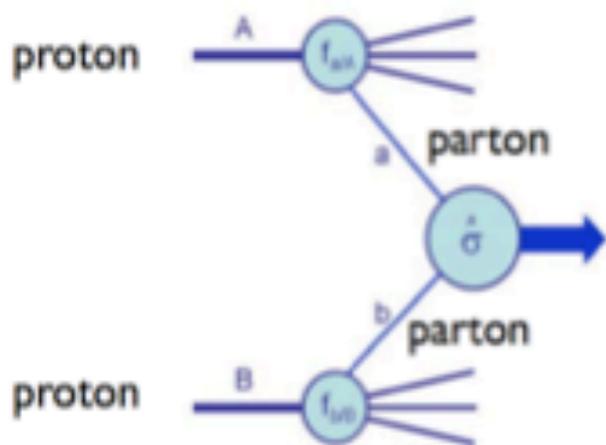
$$\sigma(P_1, P_2) = \sum_{i,j} \int dx_1 dx_2 f_i(x_1, \mu_F) f_j(x_2, \mu_F) \hat{\sigma}_{ij}(p_1, p_2, \alpha_S(\mu_R), Q^2, \mu_R, \mu_F).$$

Factorization scale μ_F

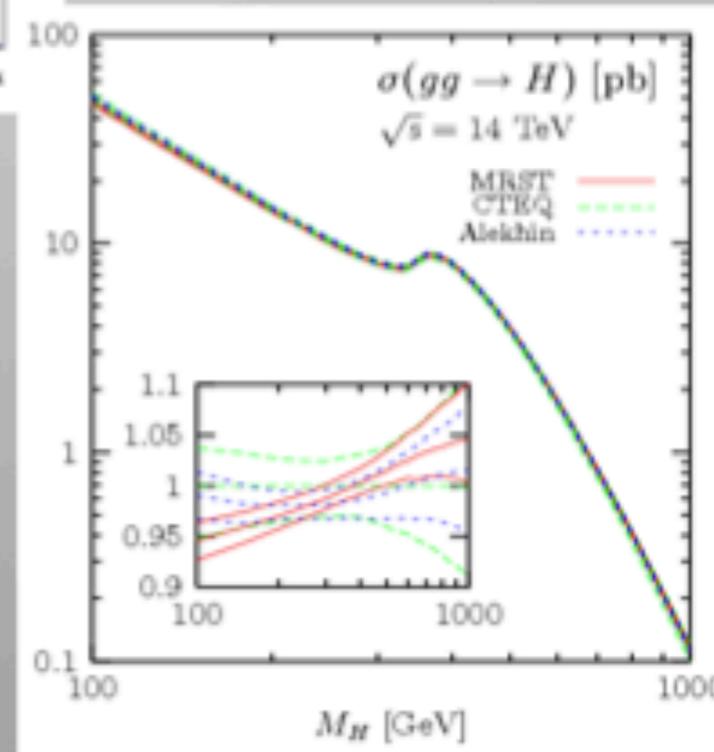
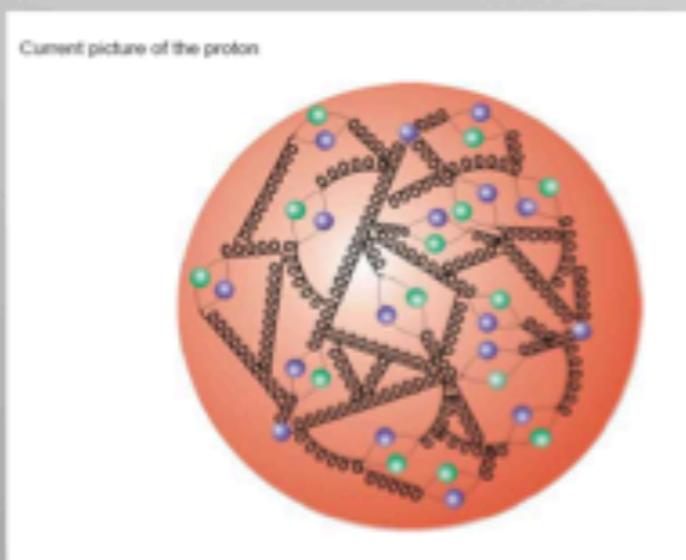
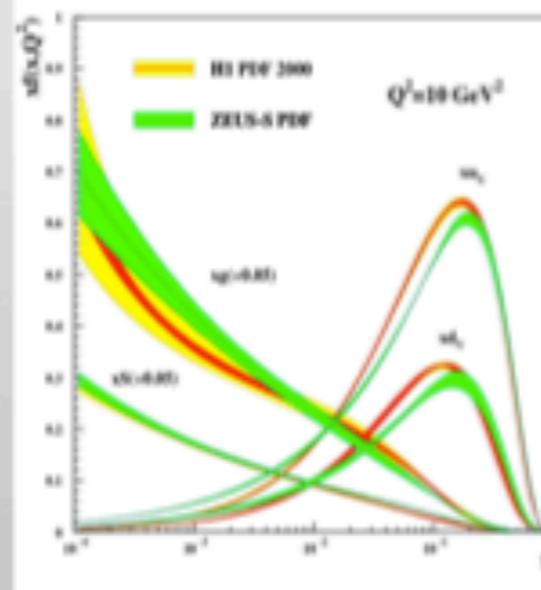
Short distance cross section, calculated as a perturbation series in α_S

РР-соударения на БАК

Generic LHC Collision

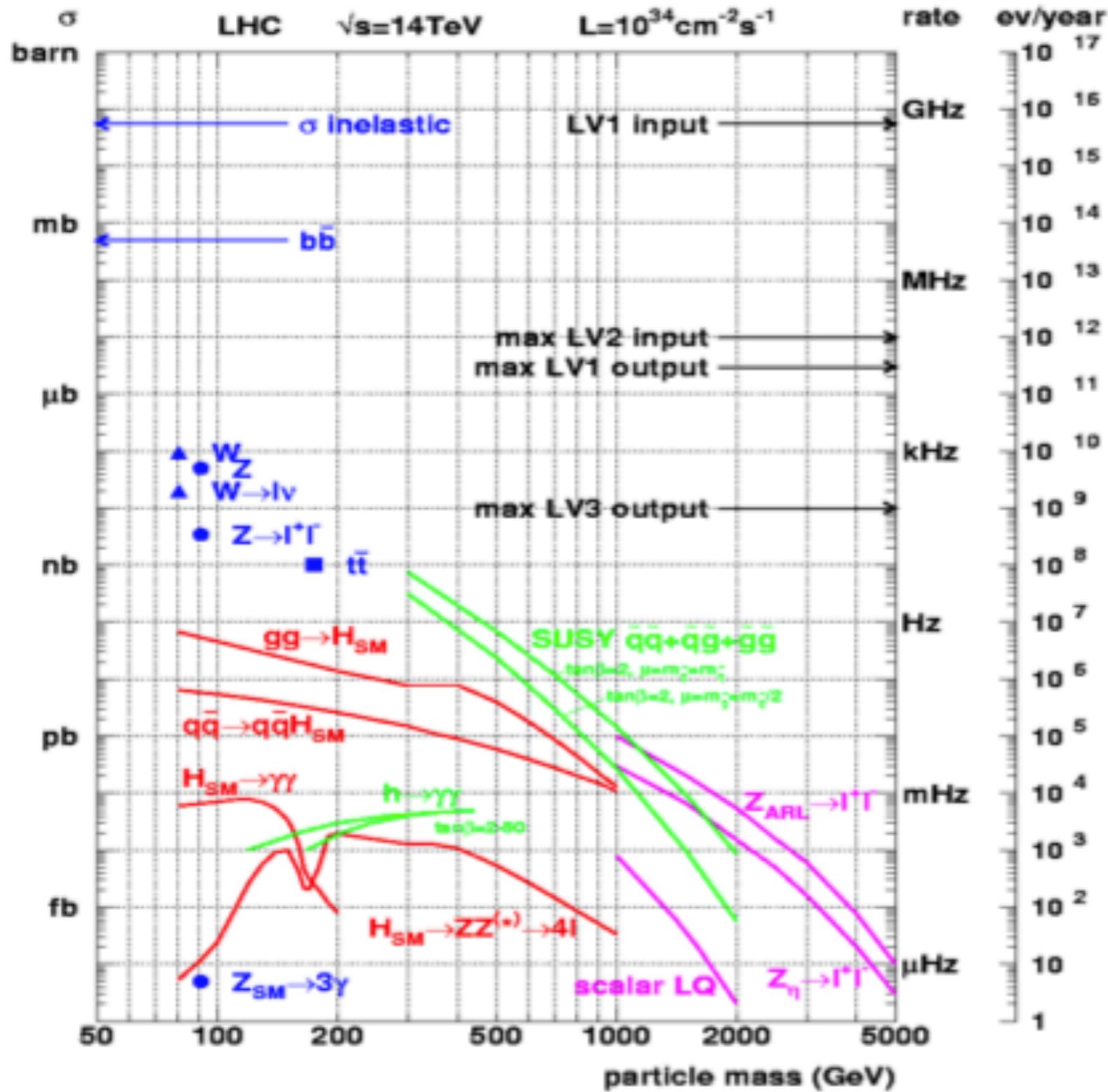


Parton Distribution Functions: the probability of finding a parton with momentum fraction x in the proton



Structure function measurements eg from HERA

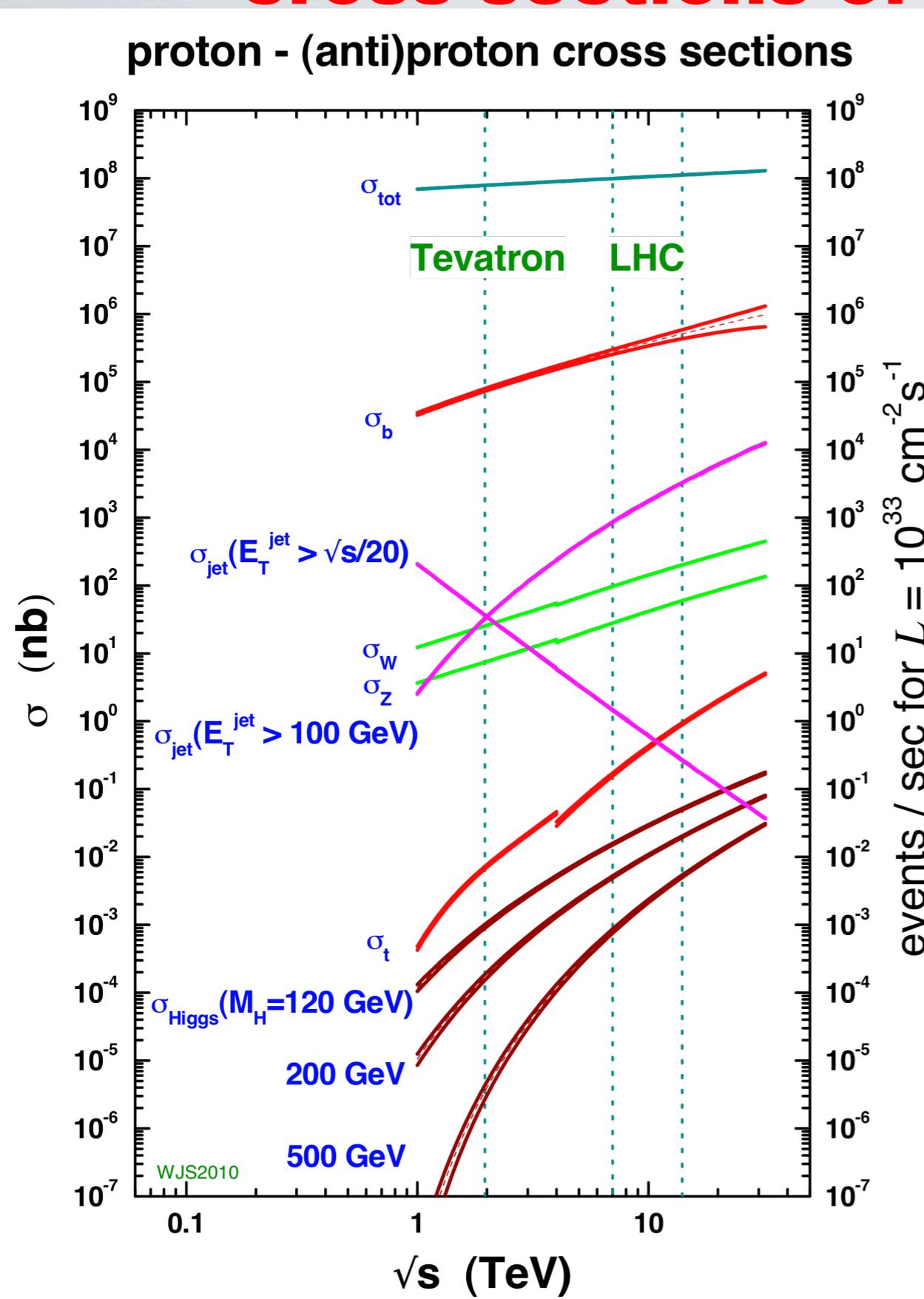
сечения рассеяния на БАК



“Well known” processes, don’t need to keep all of them ...

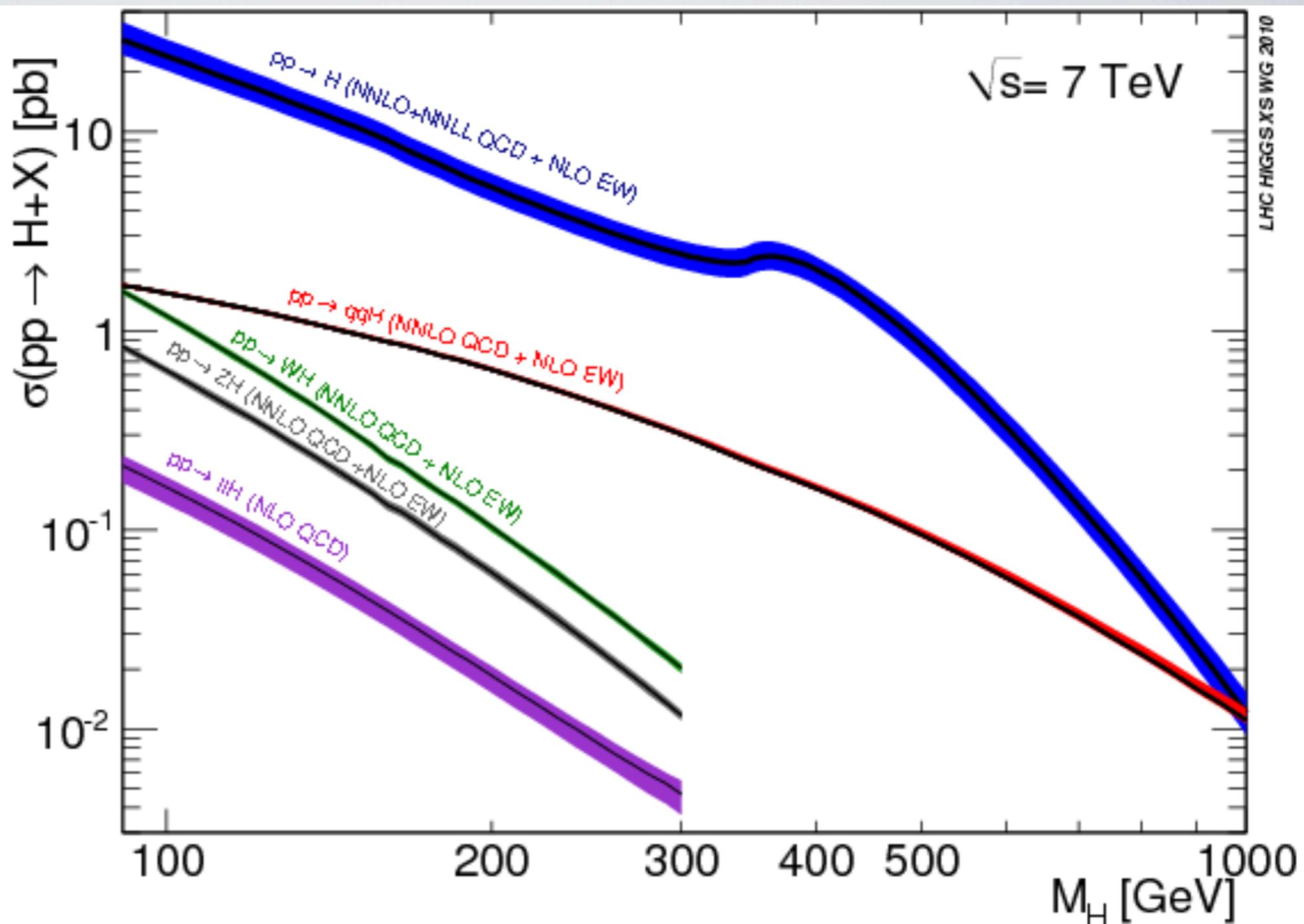
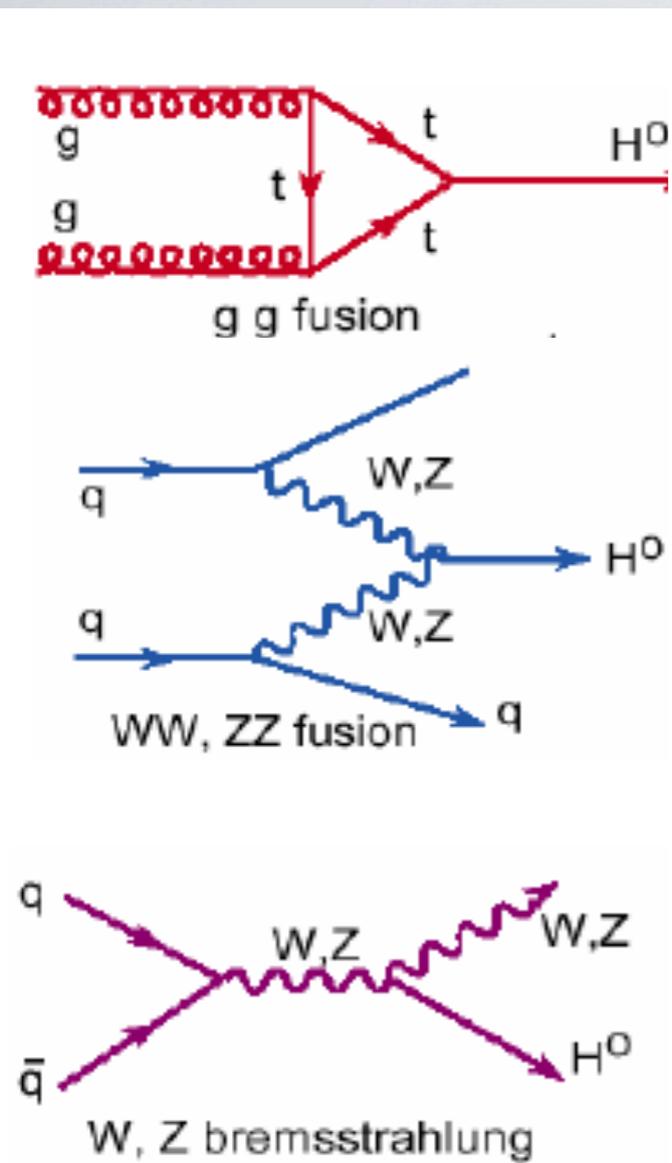
New Physics!!
This we want to keep!

pp-collisions: cross sections of particle production

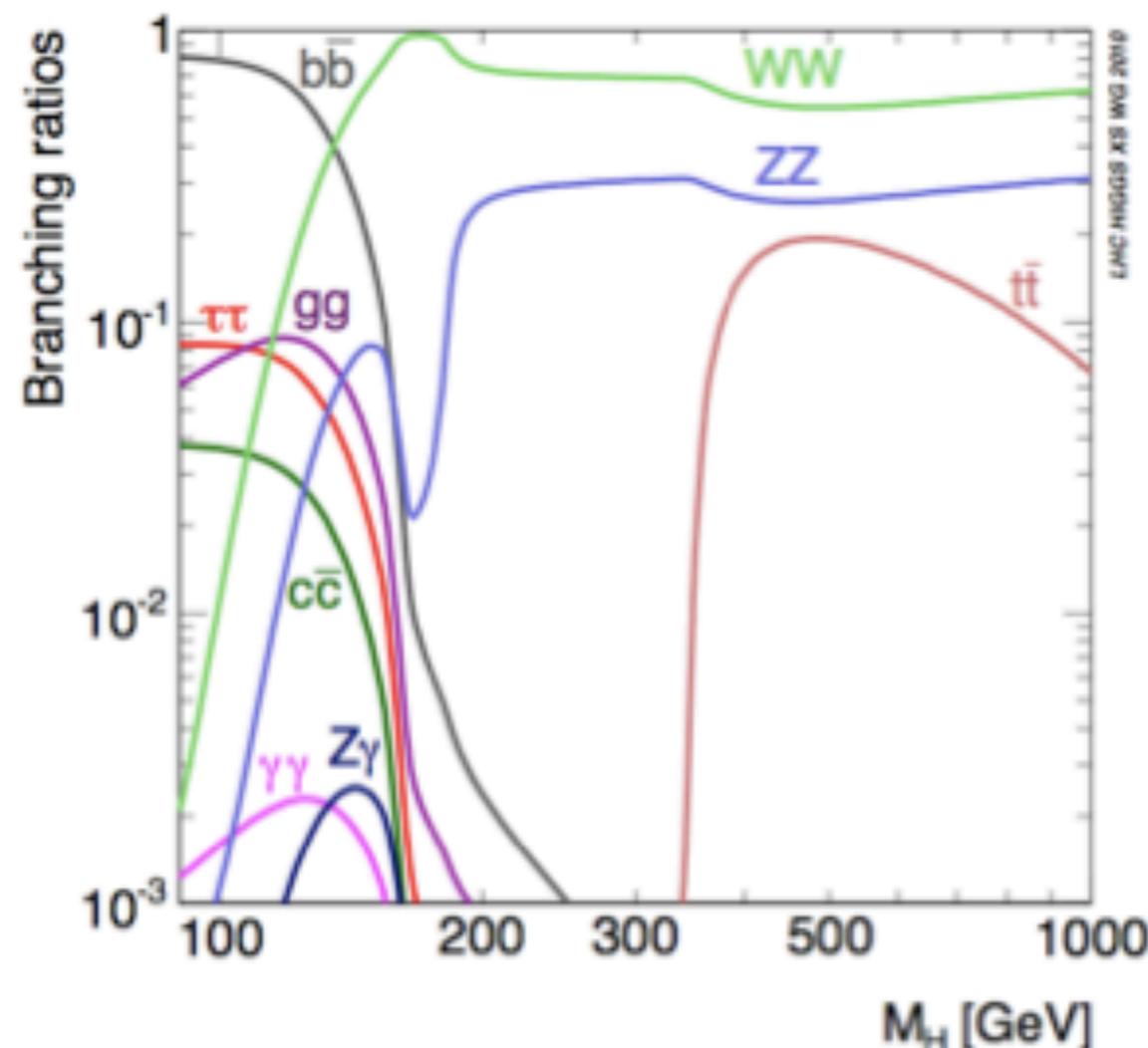
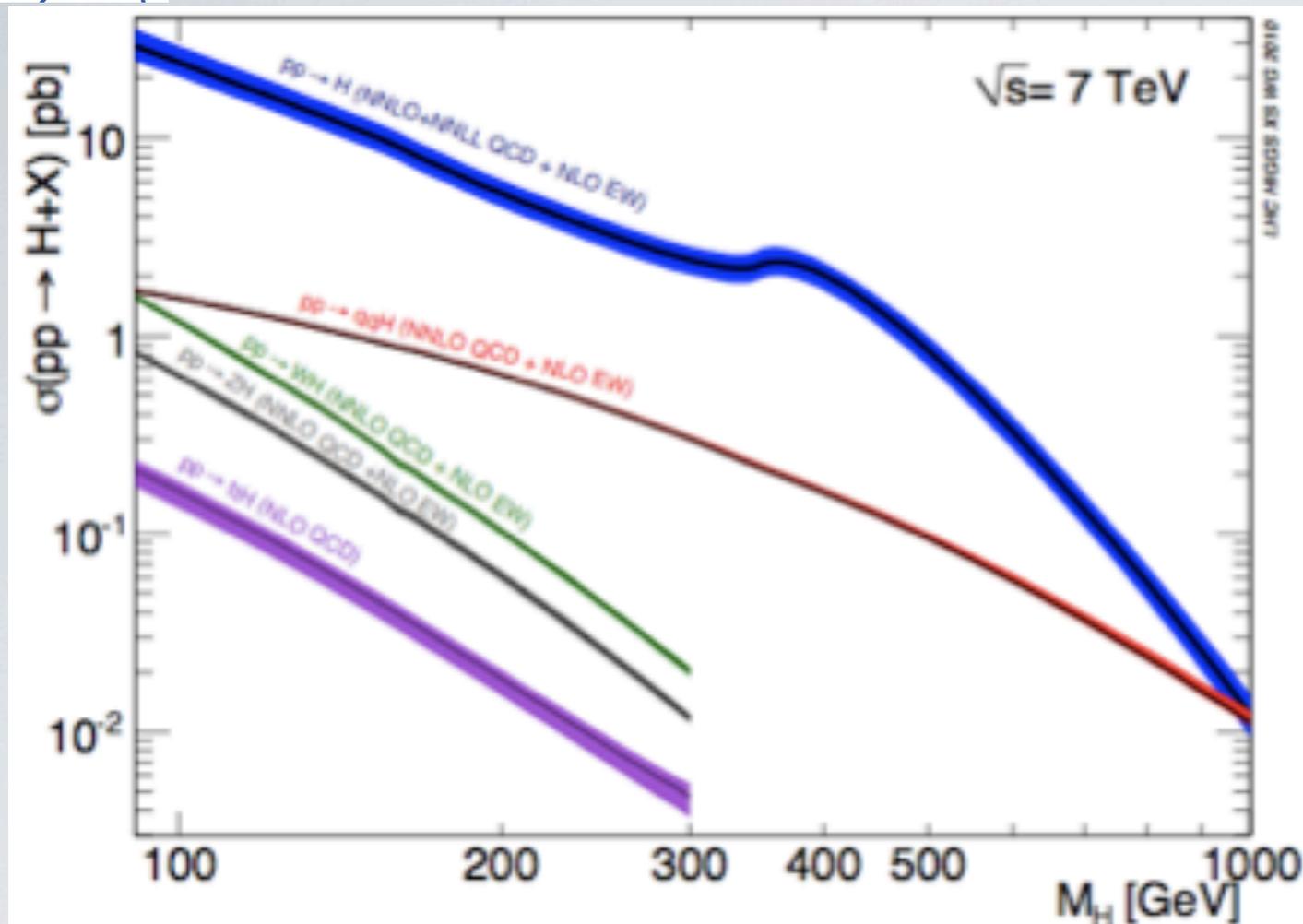


process	Rate at L_{peak} (Hz)
any interactions	10^9
Bottom quarks	10^6
Jets with $p_T > 100 \text{ GeV}$	10^4
W bosons	10^3
Z bosons	10^2
Top quarks	1
Higgs ($M=125 \text{ GeV}$)	0.1
$H \rightarrow \gamma\gamma$ ($M=125 \text{ GeV}$)	2×10^{-4}

PP-соударения: образование бозона Хиггса



Бозон Хиггса: образование и распады

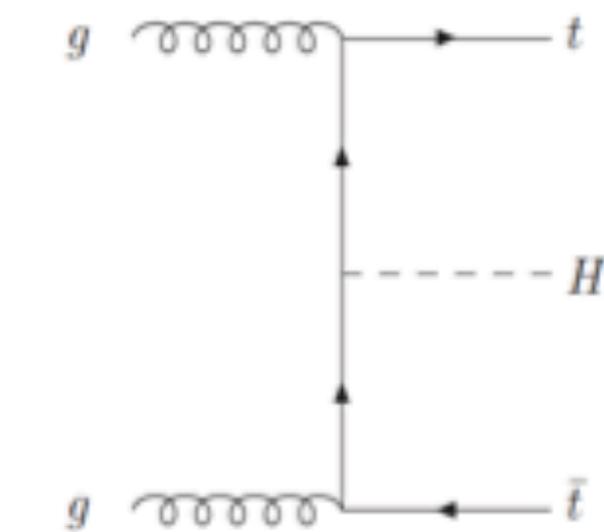
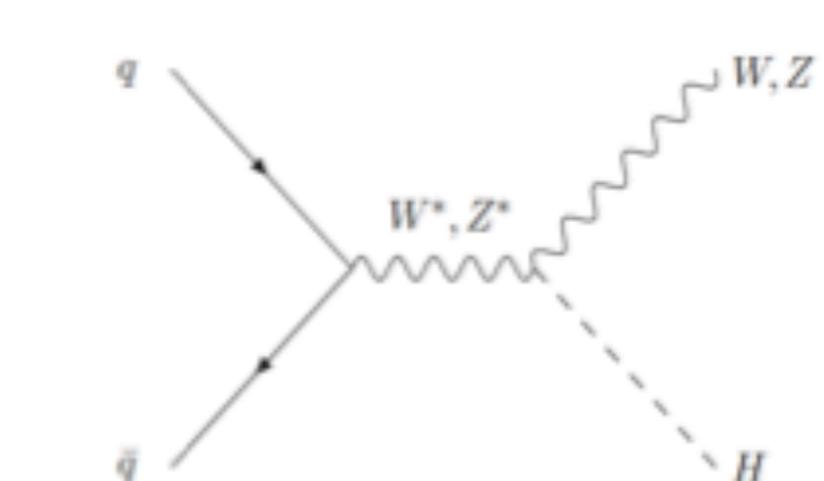
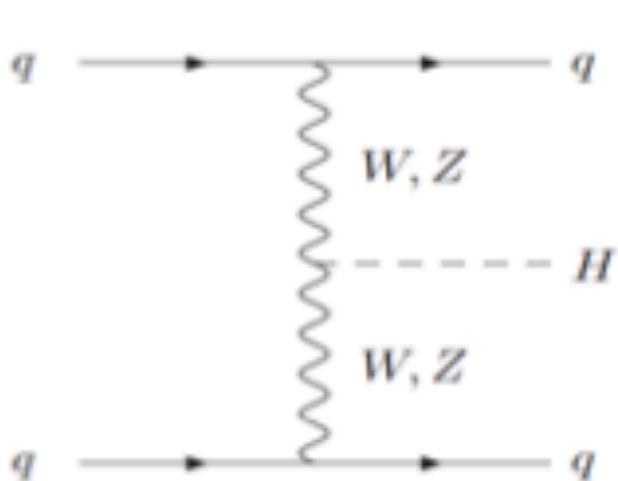
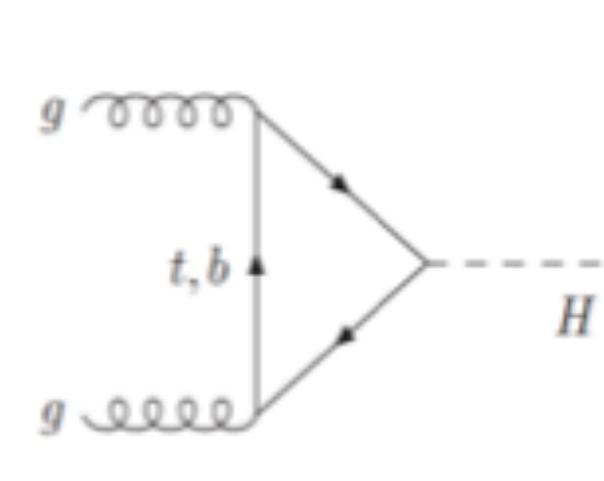


gluon-fusion

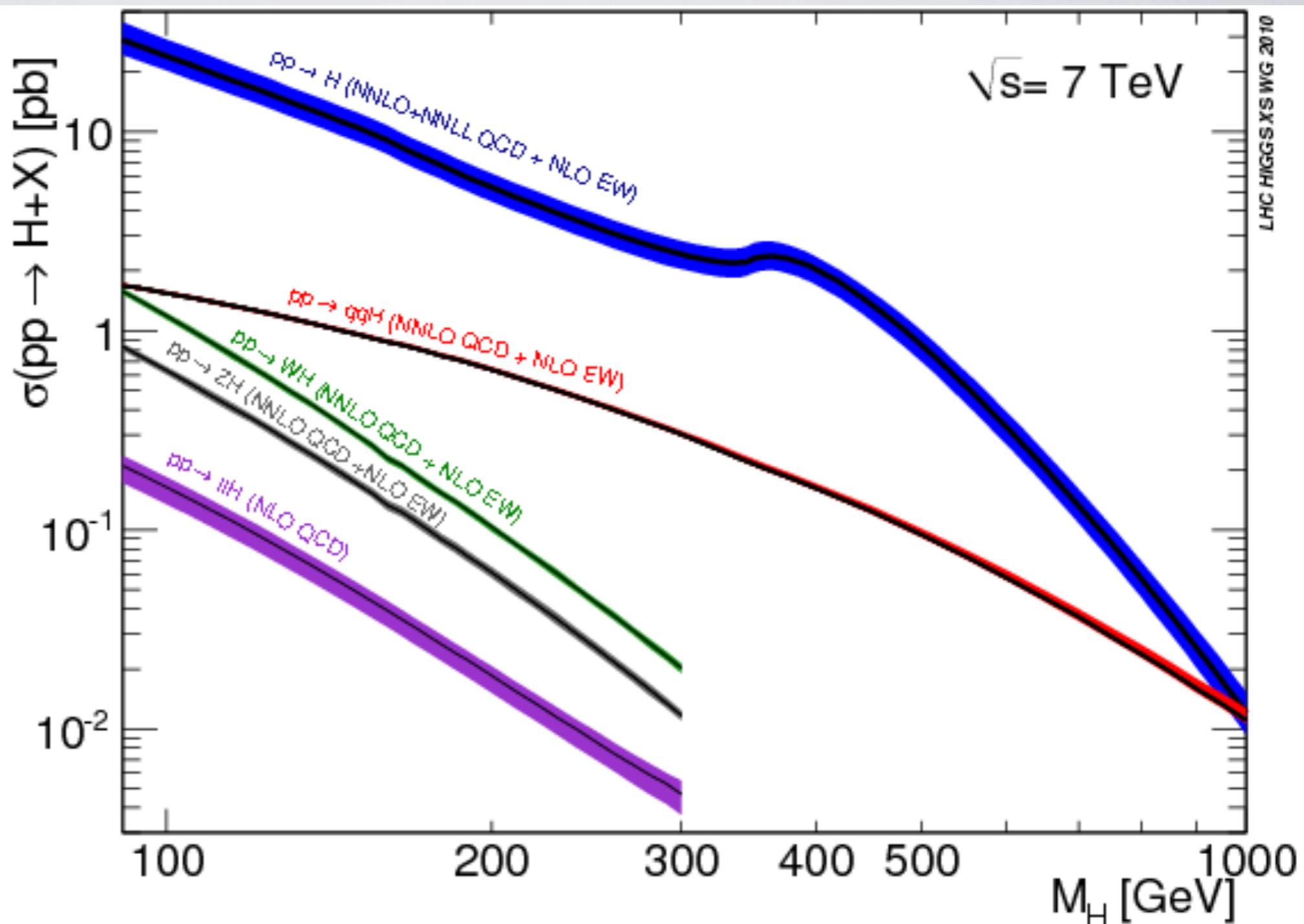
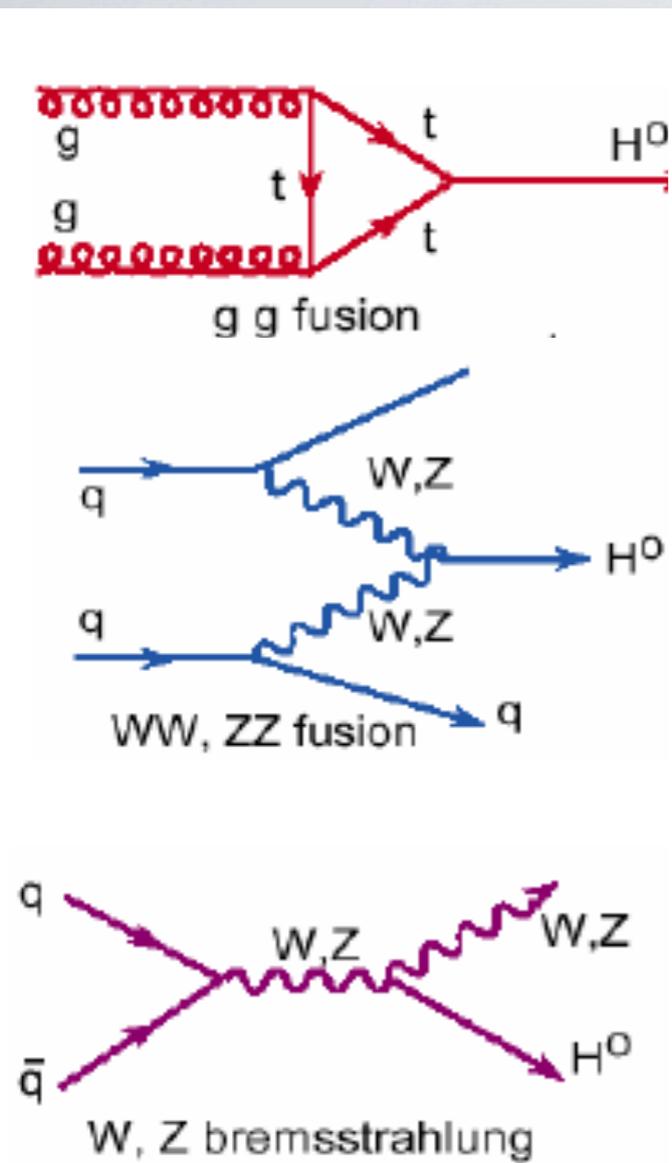
VBF

VH

ttH



PP-соударения: образование бозона Хиггса



Набор данных на БАК: 2010-2012

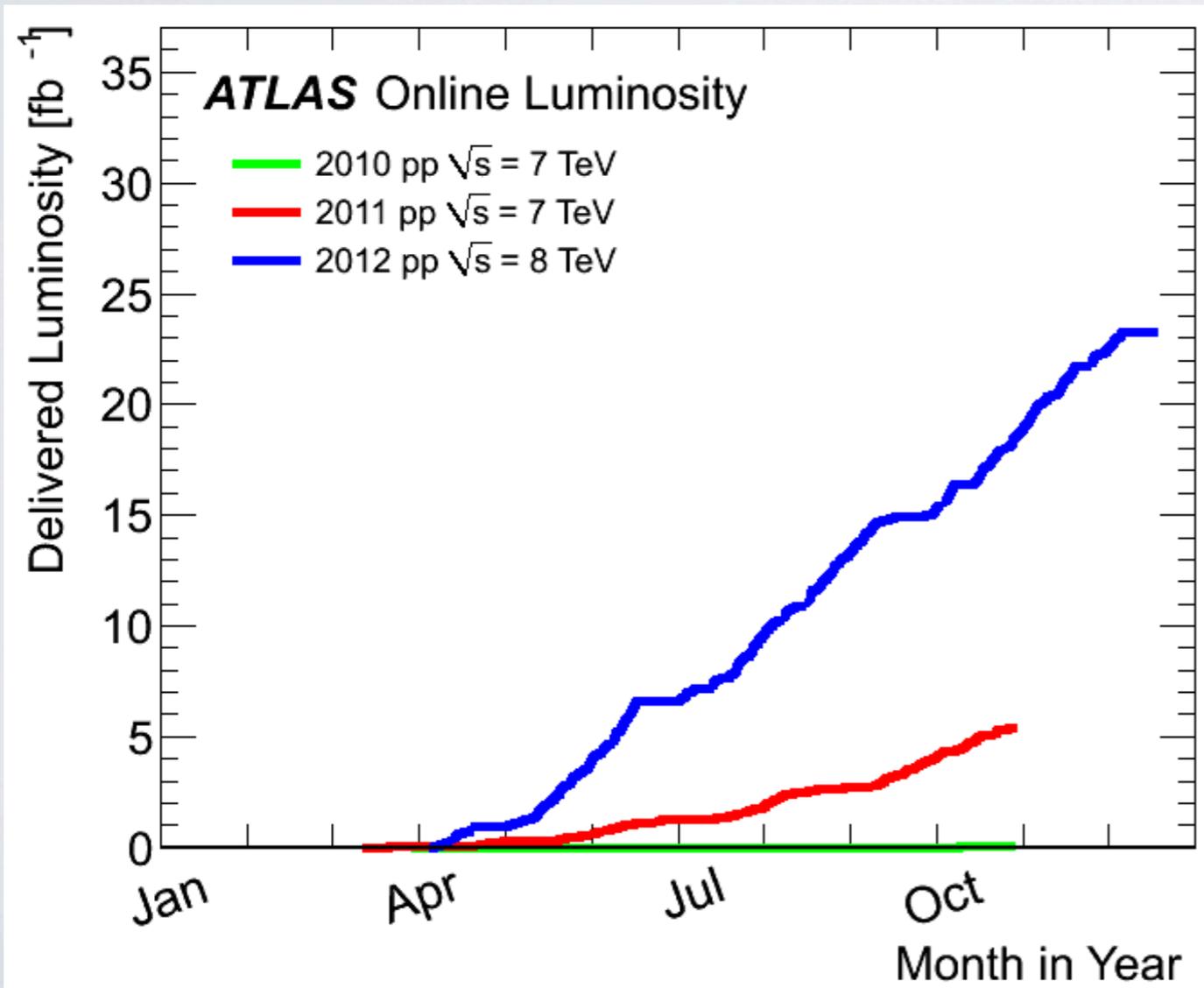
АТЛАС: Интегральная светимость: $\sim 28 \text{ Фб}^{-1}$

Пиковая светимость: $7.7 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

Соударения: 20 миллионов/с

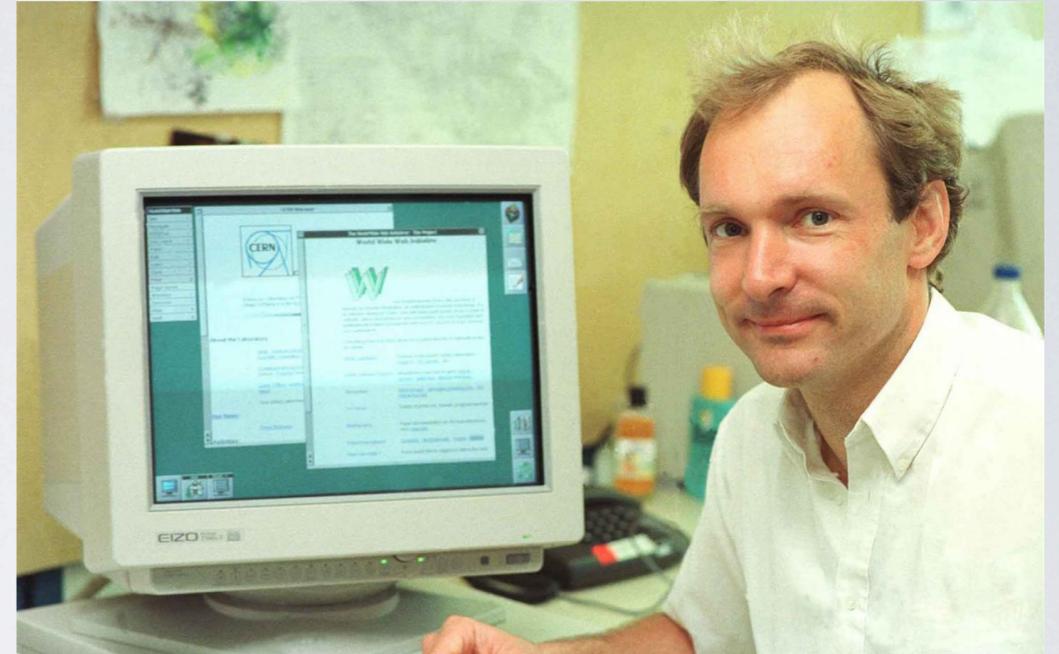
Запись: ~ 400 событий/с

Объем данных: ~ 150 тыс. ТБ



CERN: WWW (интернет)

Тим Бернерс-Ли (1989)



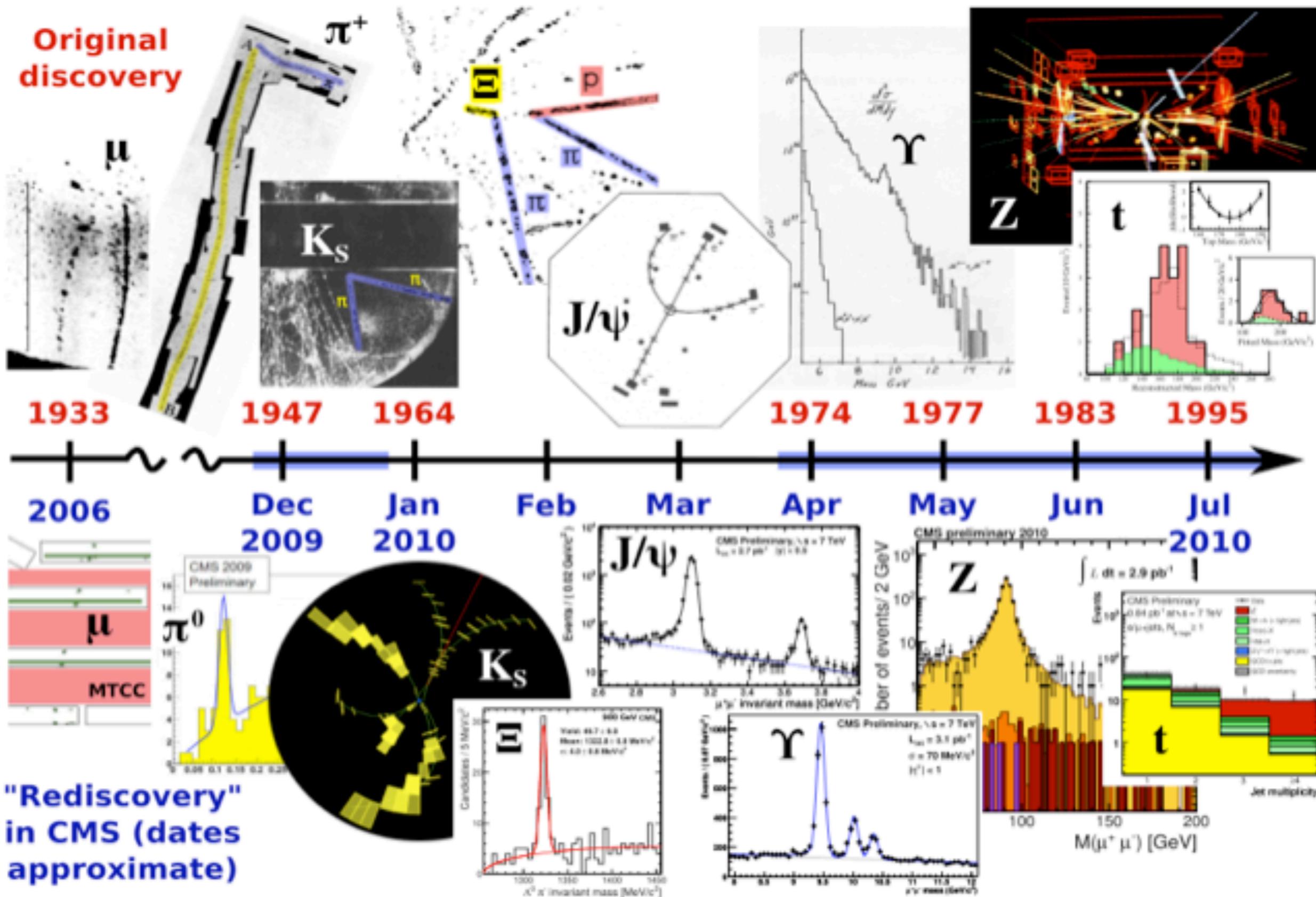
Набор данных на БАК: ~ 1 ГБ/с

LHC GRID: система распределенных вычислений
и хранения данных БАК

Россия: $\sim 6\%$

ПИЯФ: $\sim 1\%$

БАК: НАЧАЛО - "ПЕРЕ-ОТКРЫТИЕ" СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ



Спонтанное нарушение симметрии В Стандартной модели (СМ) электрослабых взаимодействий

СМ – теория с (нарушенной) локальной калибровочной инвариантностью

Проблема: калибровочная инвариантность требует безмассовость калибровочных векторных бозонов?

Проблема: перенормируемость физических теорий с массивными калибровочными векторными бозонами ?

С. Вайнберг (1967) и А. Салам (1967) применили механизм Хиггса к электрослабой теории Ш. Глэшоу (1962) ->

Стандартная Модель с тяжелыми векторными бозонами W и Z
Нобелевская премия (1979)

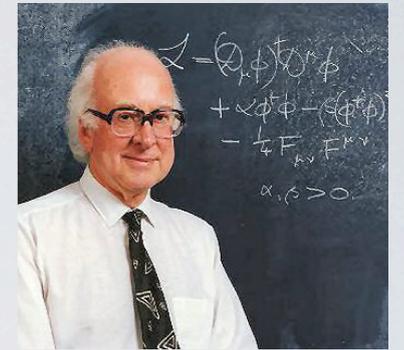
Перенормируемость Стандартной Модели:
Нобелевская премия: Ж.т'Хуфт, М.Велтман (1999)

Спонтанное нарушение симметрии

идея: Л.Д. Ландау, В.Л. Гинзбург

концепция: Н.Н. Боголюбов - конденсированные среды

Й. Намбу (1960), Дж.Голдстоун (1961) - физика частиц



Механизм Хиггса образования массивных частиц:

- нерелятивистский вариант: Ф. Андерсон (1962)

- релятивистский вариант:

Р. Брут, Ф.Энглерт (1964)

П. Хиггс (1964)

Дж.Гуралник, К.Хаген, Т. Киббл (1964)

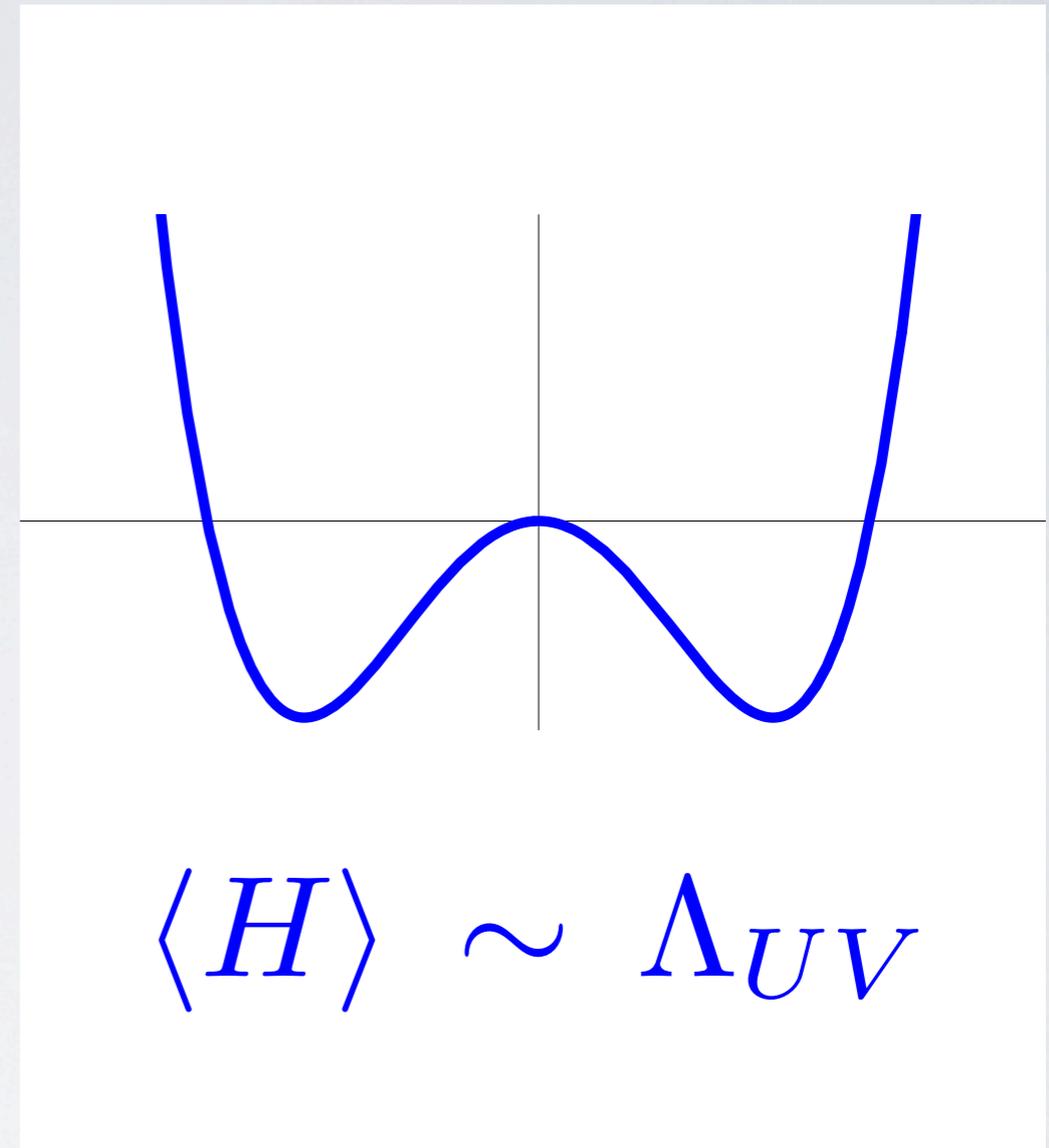
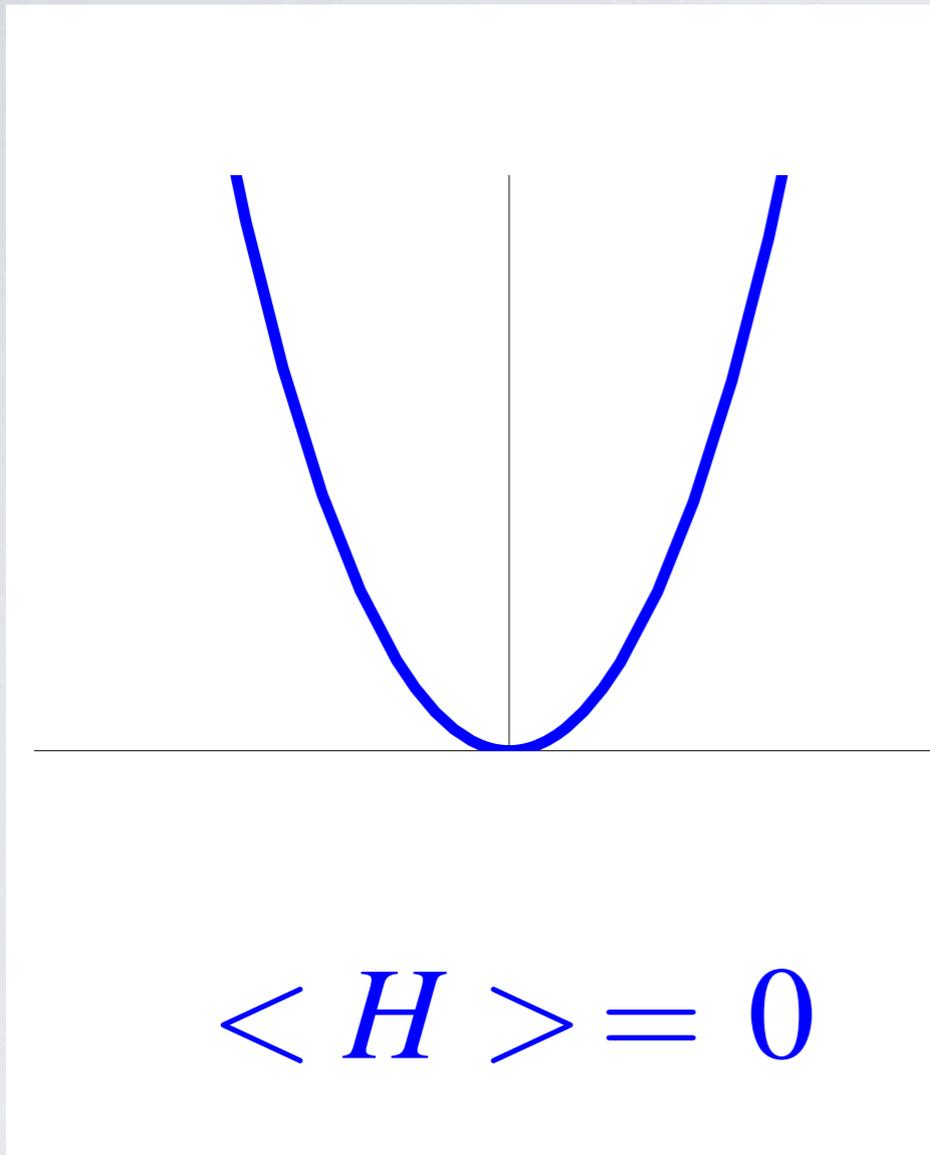


С. Вайнберг (1967) и А. Салам (1968) применили механизм Хиггса к электрослабой теории Ш. Глэшоу (1962)

->

Стандартная Модель с тяжелыми векторными бозонами W и Z

Спонтанное нарушение симметрии

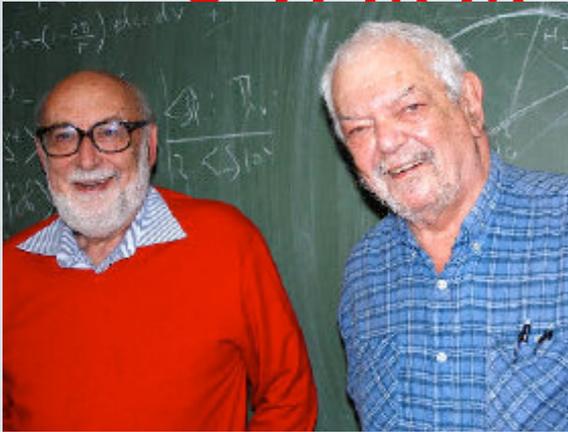


квантовые флуктуации

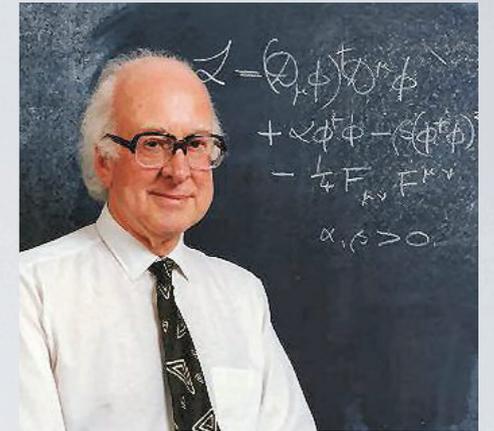
->

**несимметричное
вакуумное состояние**

Спонтанное нарушение симметрии: калибровочные поля



R. Brout and F. Englert (1964)
P. Higgs (1964)



Механизм Браута-Энглера-Хиггса:

фундаментальное скалярное поле может приводить к спонтанному нарушению локальной калибровочной симметрии и возникновению масс частиц

The purpose of the present note is to report that...the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass...This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenomenon to which Anderson has drawn attention



Бозон Хиггса Стандартной модели

основная роль бозона Хиггса СМ:
получение ненулевых масс векторных бозонов не
нарушая калибровочную инвариантность

а также:

- массы лептонов и кварков
- восстановление унитарности

(закона сохранения вероятности) при рассеянии
тяжелых векторных бозонов



Tevatron

pp: 2 TeV

LHC pp: 7,8 TeV → 13,14 TeV

Lepton collider (?)

Hadron collider (?)



Единицы измерений и масштабы

Вероятность и интенсивность взаимодействия:
сечение рассеяния $\sim r^2$

барн: $1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$

$1 \text{ мб} = 10^{-27} \text{ см}^2$

$1 \text{ пб} = 10^{-36} \text{ см}^2$

$1 \text{ Фб} = 10^{-39} \text{ см}^2$

Светимость (интенсивность пучков): $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

БАК 2010: $\sim 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

2011: $\sim 10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

2012: $\sim 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

частота реакций = светимость \times сечение

количество событий = время \times частота реакций

Бозон Хиггса:

сечение ($m = 125 \text{ ГэВ}$ при 8 тэВ) $\approx 10 \text{ пб}$

$1 \text{ событие за } 10 \text{ сек.}$

Измерение массы частицы по распаду на две частицы



$$1 \rightarrow 2 + 3$$

$$\begin{aligned} p_1 &= p_2 + p_3 \\ &= (E_2 + E_3, p_{2x} + p_{3x}, p_{2y} + p_{3y}, p_{2z} + p_{3z}) \end{aligned}$$

масса ← Лоренц-инвариант (длина 4-вектора)

$$p^2 = E^2 - \vec{p}^2 = m^2$$

$$m_2^2 = p_2^2 = E_2^2 - \vec{p}_2^2$$

$$m_3^2 = p_3^2 = E_3^2 - \vec{p}_3^2$$

масса распавшейся частицы:

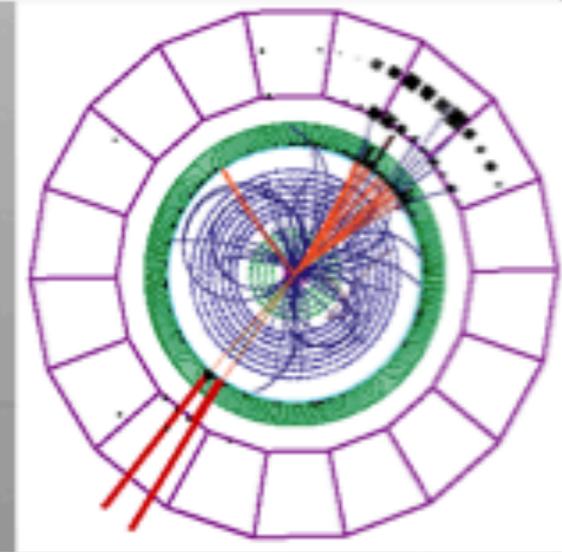
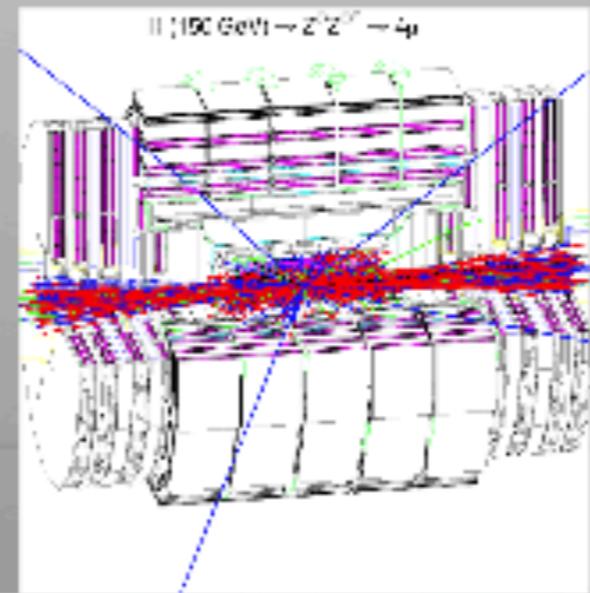
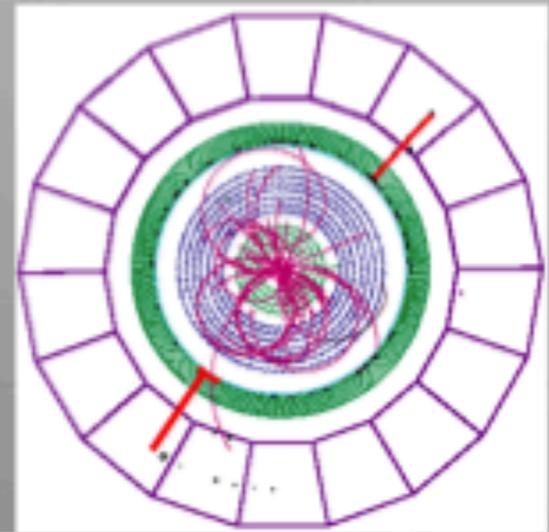
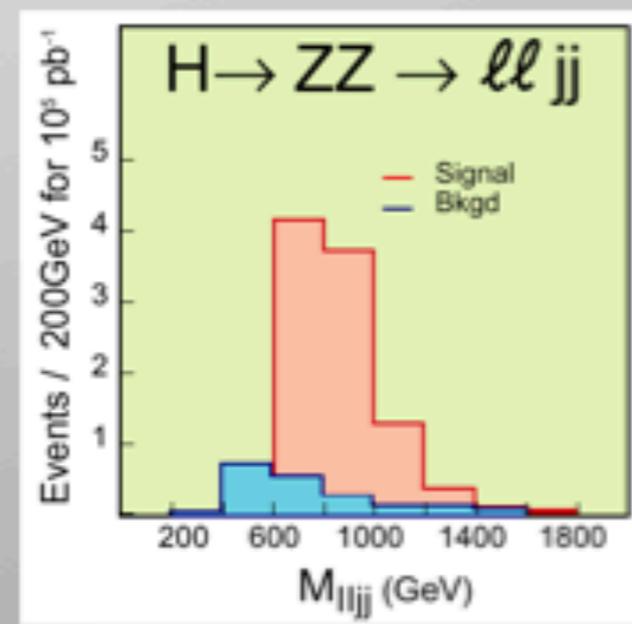
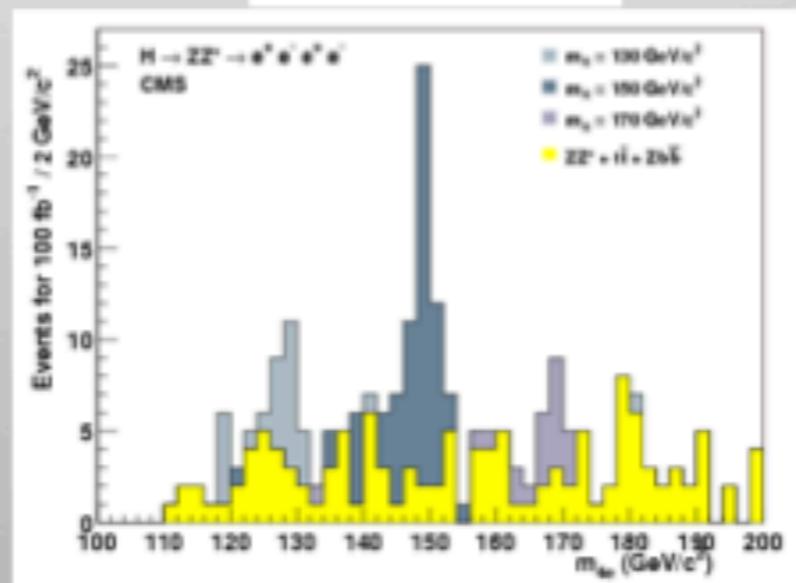
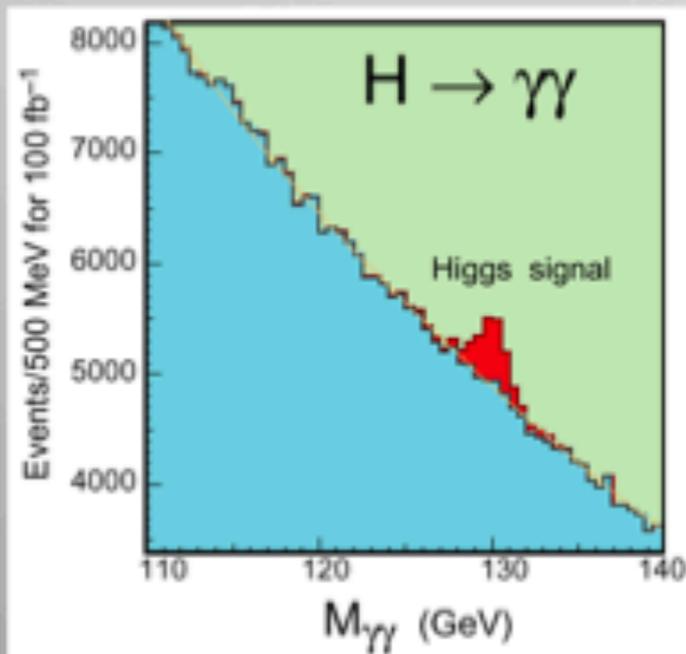
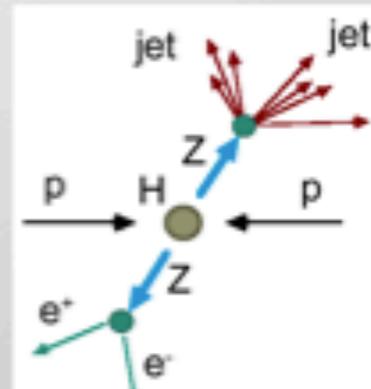
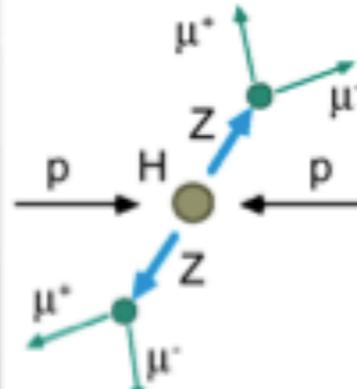
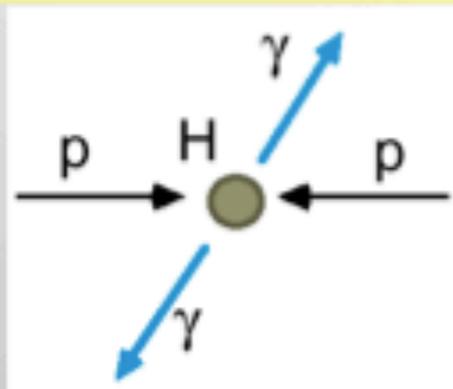
$$m_1^2 = p_1^2 = (E_2 + E_3)^2 - (\vec{p}_2 + \vec{p}_3)^2$$

Поиски бозона Хиггса

Low $M_H < 140 \text{ GeV}/c^2$

Medium $130 < M_H < 500 \text{ GeV}/c^2$

High $M_H > \sim 500 \text{ GeV}/c^2$



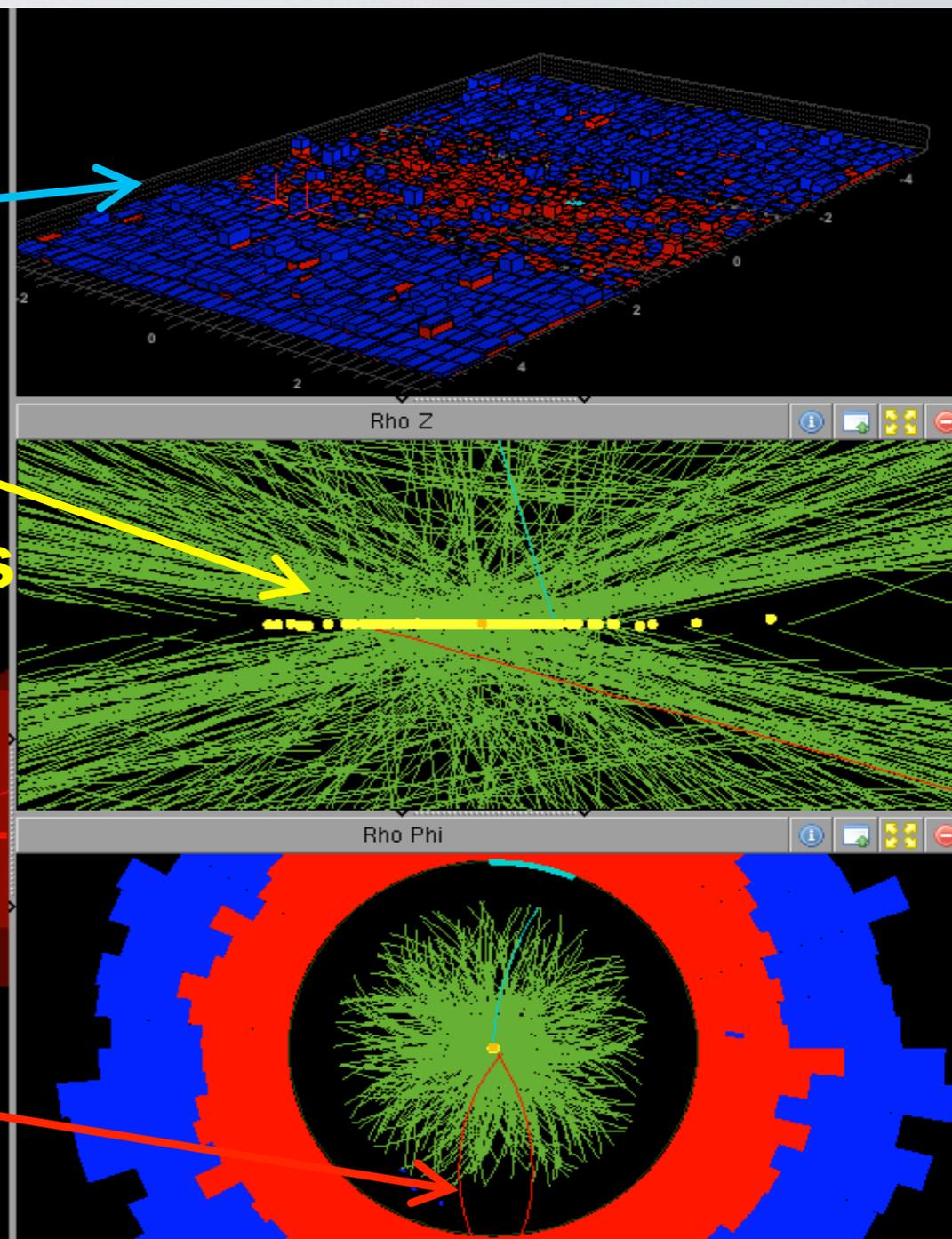
Реконструированное двух-мюонное событие с 78 вершинами в CMS

Lots and lots of low energy deposits

Tracking worked

78 (!) vertices

2 muons



Каналы распада бозона Хиггса

Channel	Mass Range (GeV)
$H \rightarrow \gamma\gamma$	[110-150]
$qq \rightarrow VH; H \rightarrow bb$	[110-135]
$H \rightarrow \tau\tau$	[110-145]
$H \rightarrow WW \rightarrow 2l 2\nu$	[110-600]
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	[110-600]
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2l 2\tau$	[180-600]
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2l 2j$	[226-600]
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2l 2\nu$	[250-600]

красное: наиболее чувствительные каналы на ATLAS и CMS



Новый бозон! Бозон Хиггса СМ?



4 июля 2012: открытие новой частицы!

ATLAS: 126.0 (0.4) (0.4) ГэВ

CMS: 125.3 (0.4) (0.5) ГэВ

Volume 712, Issue 3, 6 June 2012 ISSN 0370-2693

ELSEVIER

PHYSICS LETTERS B

Available online at www.sciencedirect.com
SciVerse ScienceDirect

The cover of Physics Letters B features two main plots. The top plot shows the ratio of signal to signal plus background, $S/(S+B)$, weighted by the number of events, divided by 1.5 GeV, as a function of the invariant mass of two photons, $m_{\gamma\gamma}$ (GeV). The data points (black circles) are fitted with a signal plus background (red line) and a background-only fit (dotted line). The plot includes a magnified view of the region around 125 GeV. The bottom plot is an ATLAS plot from 2011-12 at $\sqrt{s} = 7-8$ TeV, showing the local significance p_0 as a function of the Higgs boson mass m_H [GeV]. The observed significance (black line) is compared to the expected significance (blue shaded area). The plot shows a clear peak at approximately 125 GeV, reaching a significance of about 5 sigma.

<http://www.elsevier.com/locate/physletb>

The Economist

JULY 7TH-13TH 2012 Economist.com

In praise of charter schools
Britain's banking scandal spreads
Volkswagen overtakes the rest
A power struggle at the Vatican
When Lonesome George met Nora

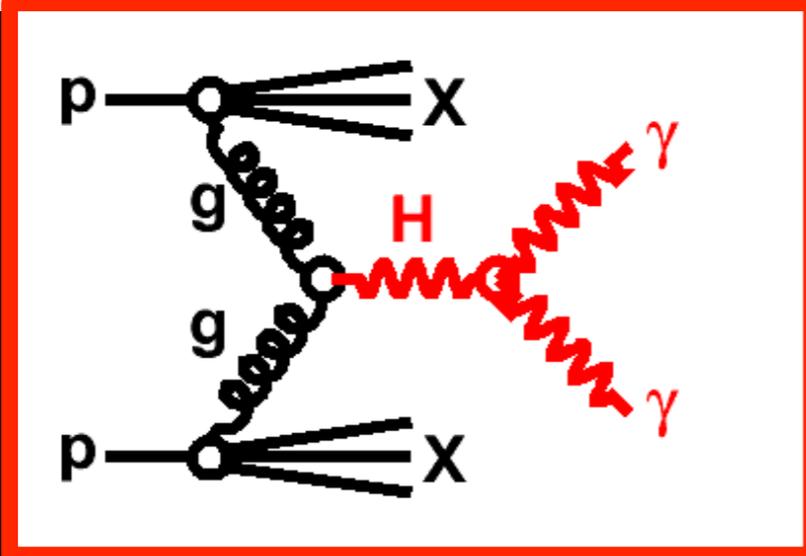
A giant leap for science

The cover of The Economist features a man in a dark suit and white shirt jumping over a vibrant, colorful nebula in space. The man is holding a white envelope or document. The background is a deep blue and black space filled with stars and the colorful gas clouds of the nebula.

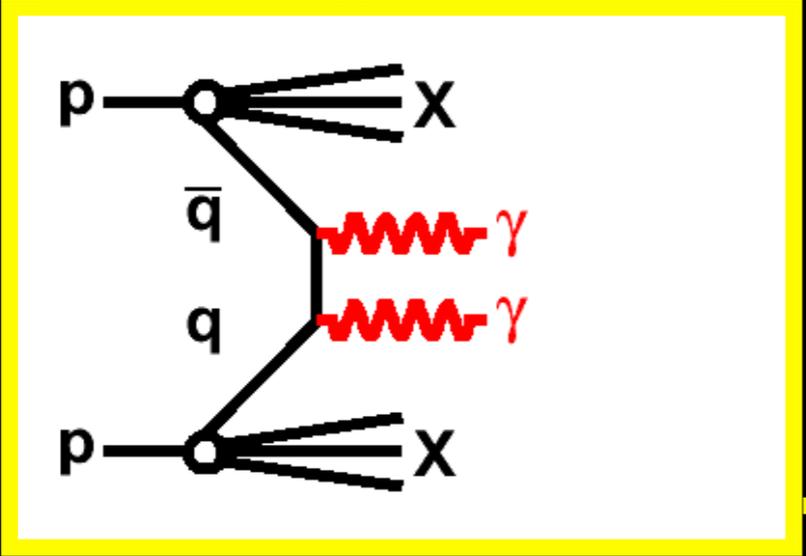
Finding the Higgs boson

Поиски бозона Хиггса: $H \rightarrow \gamma\gamma$

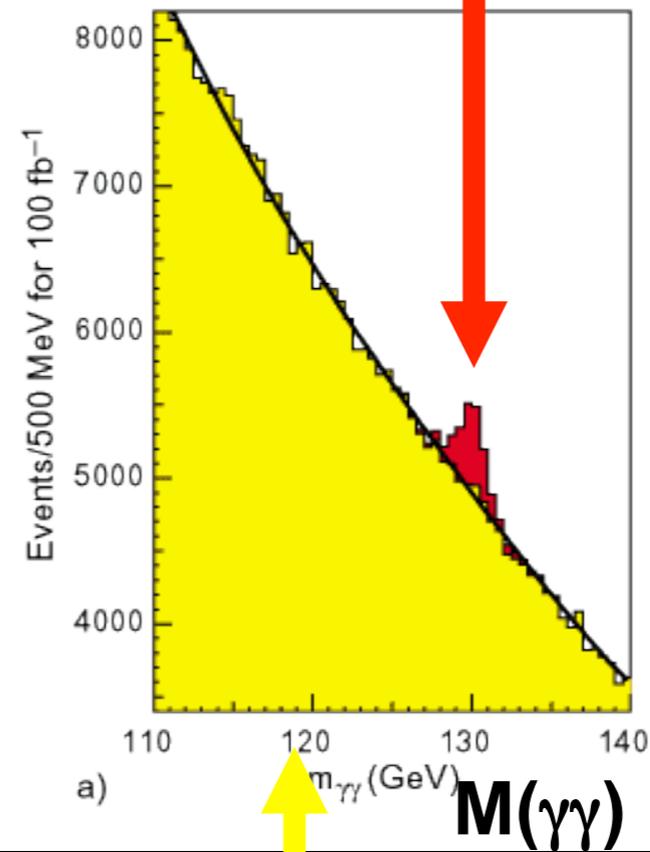
Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$



background



simulation

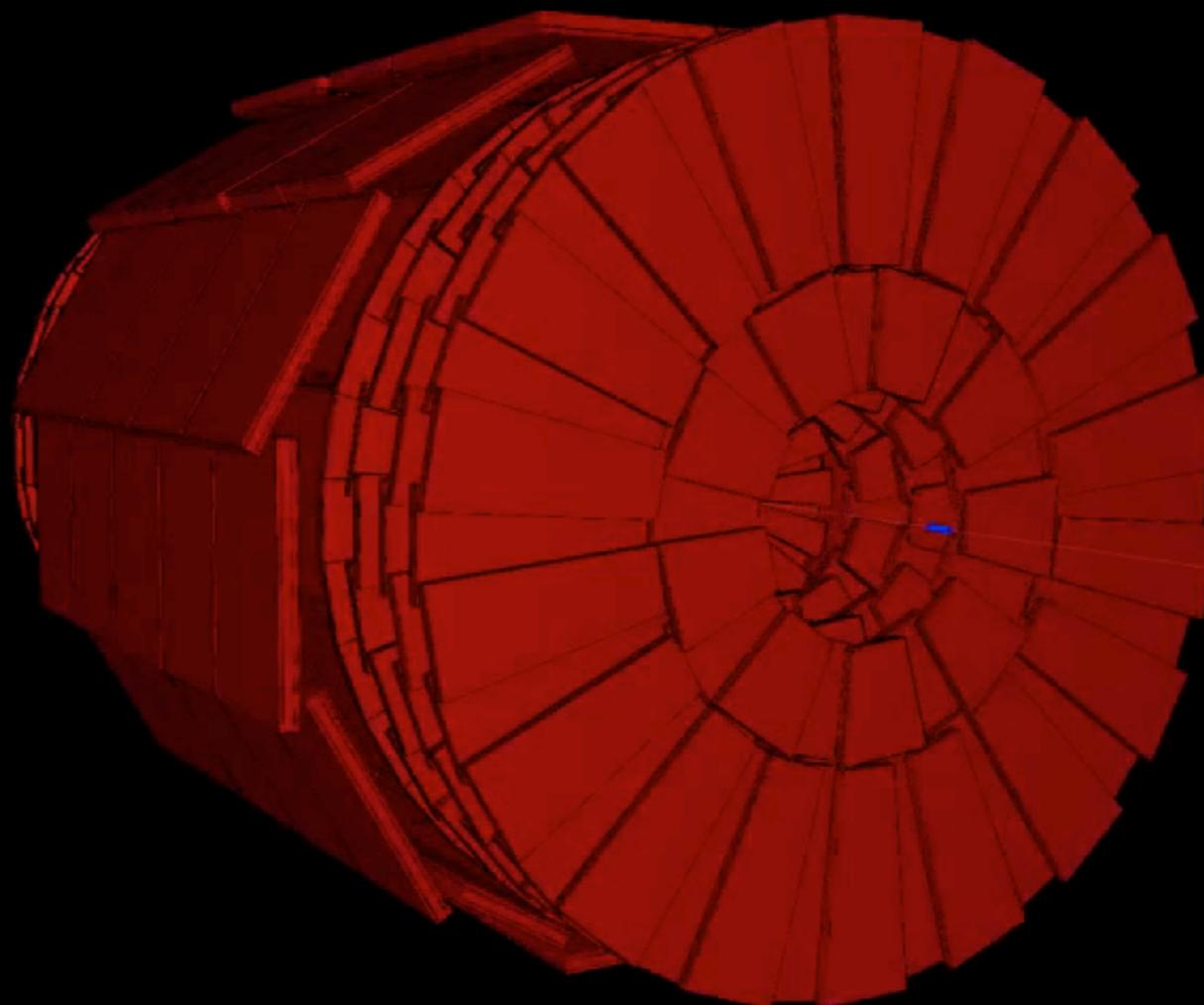




Поиски бозона Хиггса на БАК (CMS): $\gamma\gamma$



CMS Experiment at the LHC, CERN
Sun 2011-Aug-07 05:00:32 CET
Run 172822 Event 2554393033
C.O.M. Energy 7.00TeV
H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 μ candidate



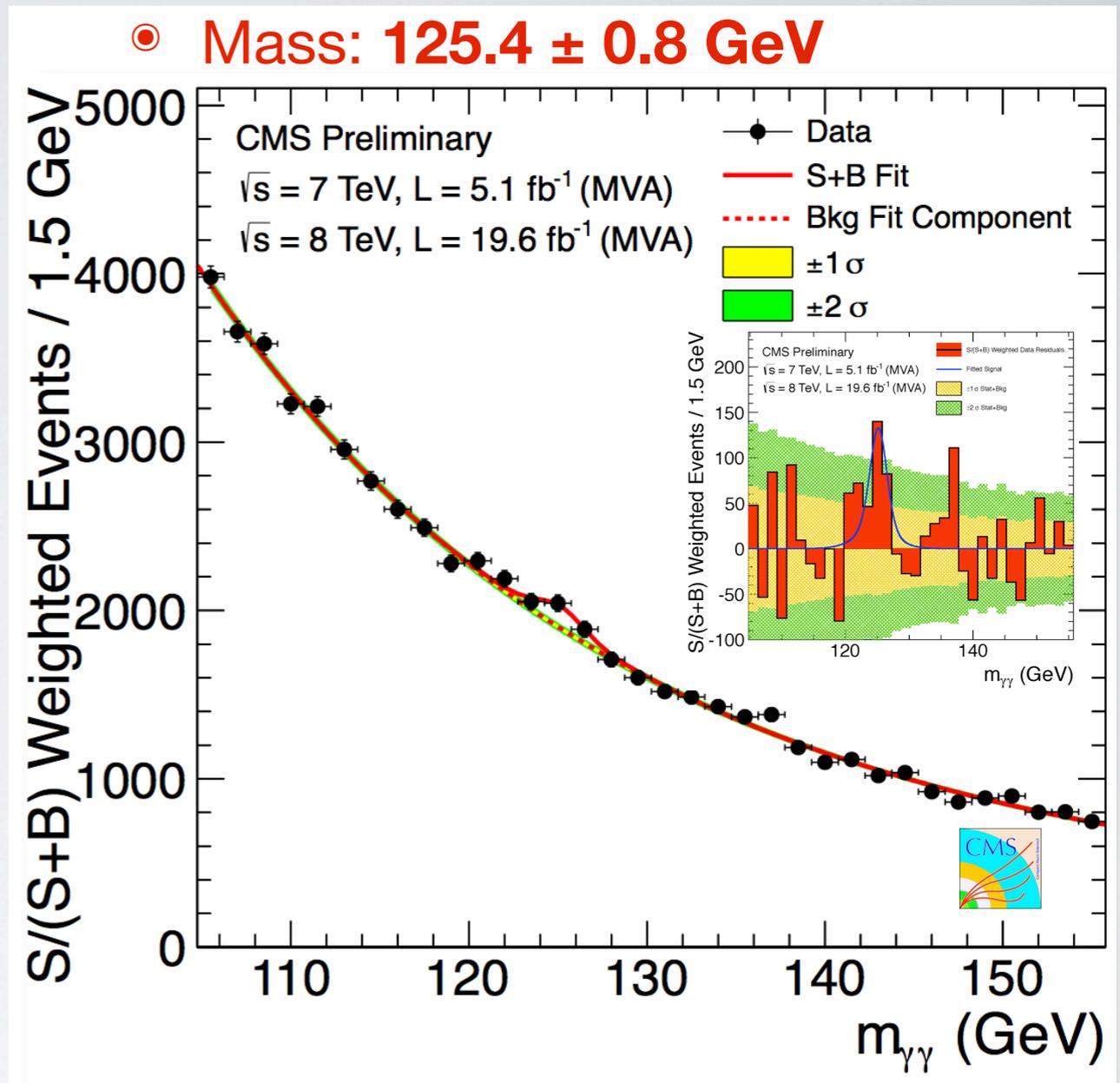
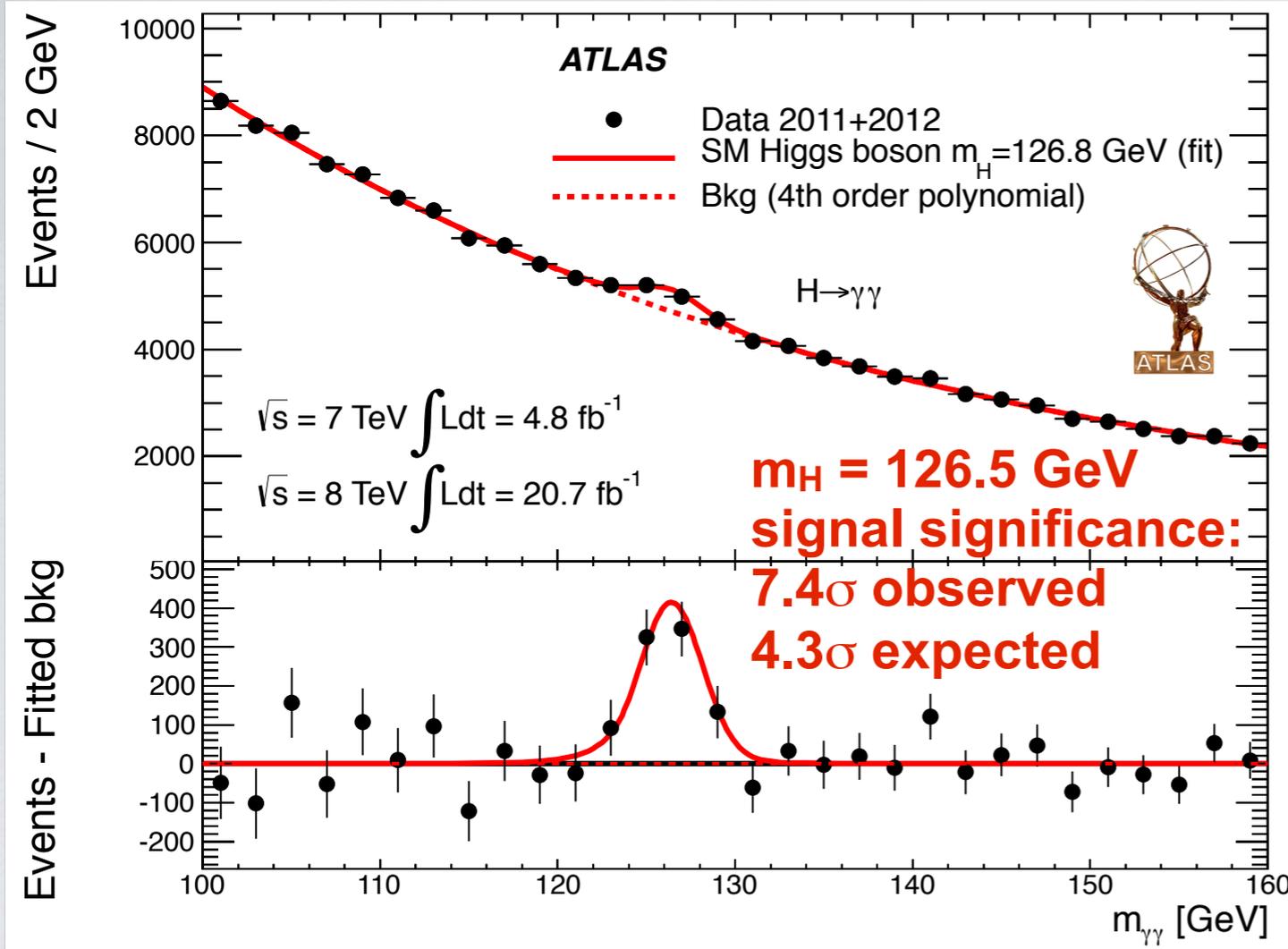
$$\begin{aligned} p_1 &= p_2 + p_3 \\ &= (E_2 + E_3, p_{2x} + p_{3x}, p_{2y} + p_{3y}, p_{2z} + p_{3z}) \end{aligned}$$

$$m_1^2 = (E_2 + E_3)^2 - (\vec{p}_2 + \vec{p}_3)^2$$

масса \leftarrow Лоренц-инвариант (длина 4-вектора)

$$p^2 = E^2 - \vec{p}^2 = m^2$$

Бозон Хиггса: $H \rightarrow \gamma\gamma$



ATLAS: $M_H = 126.8 \pm 0.2_{stat} \pm 0.7_{sys}$ GeV

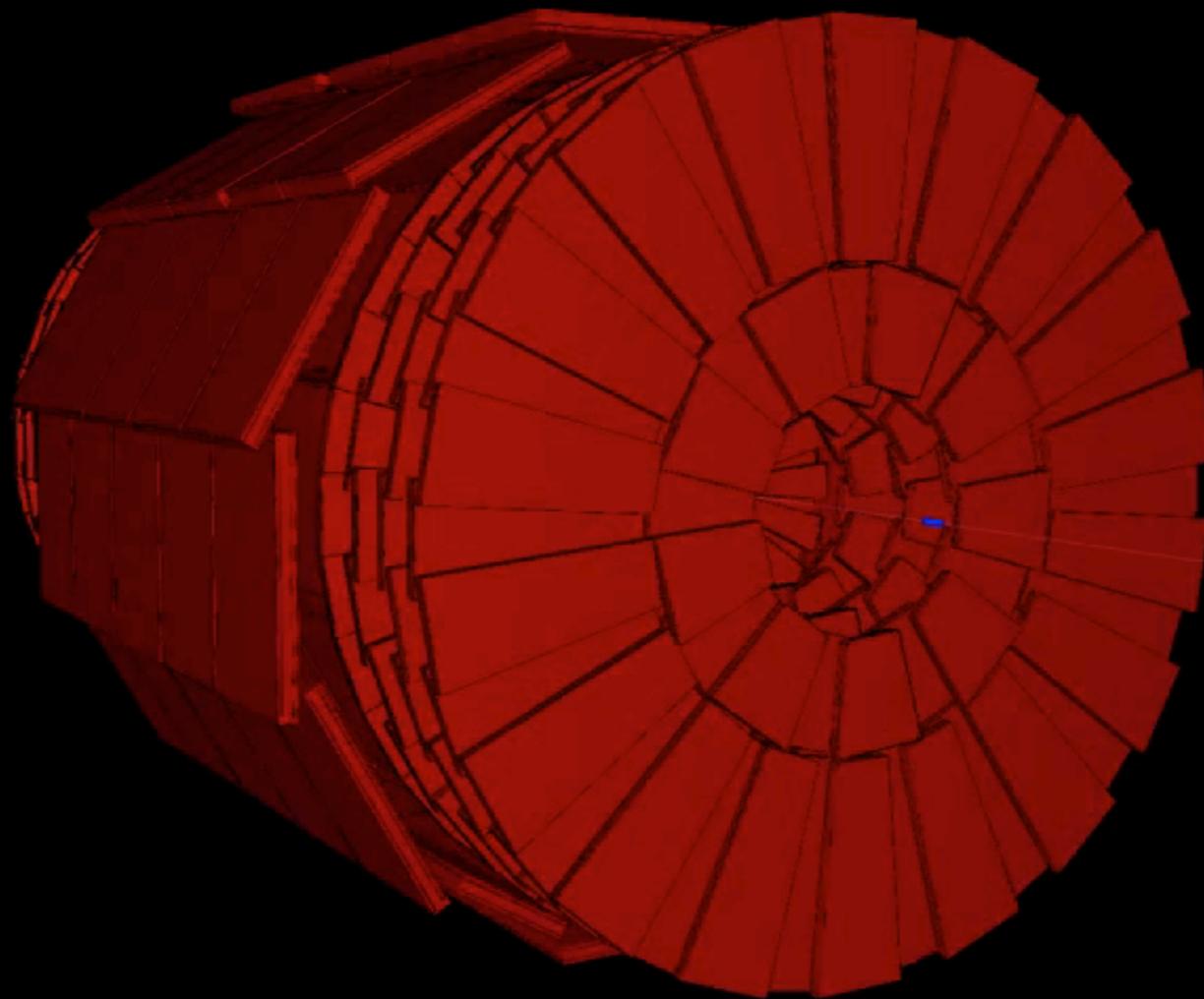
CMS: $M_H = 125.4 \pm 0.5_{stat} \pm 0.6_{sys}$ GeV



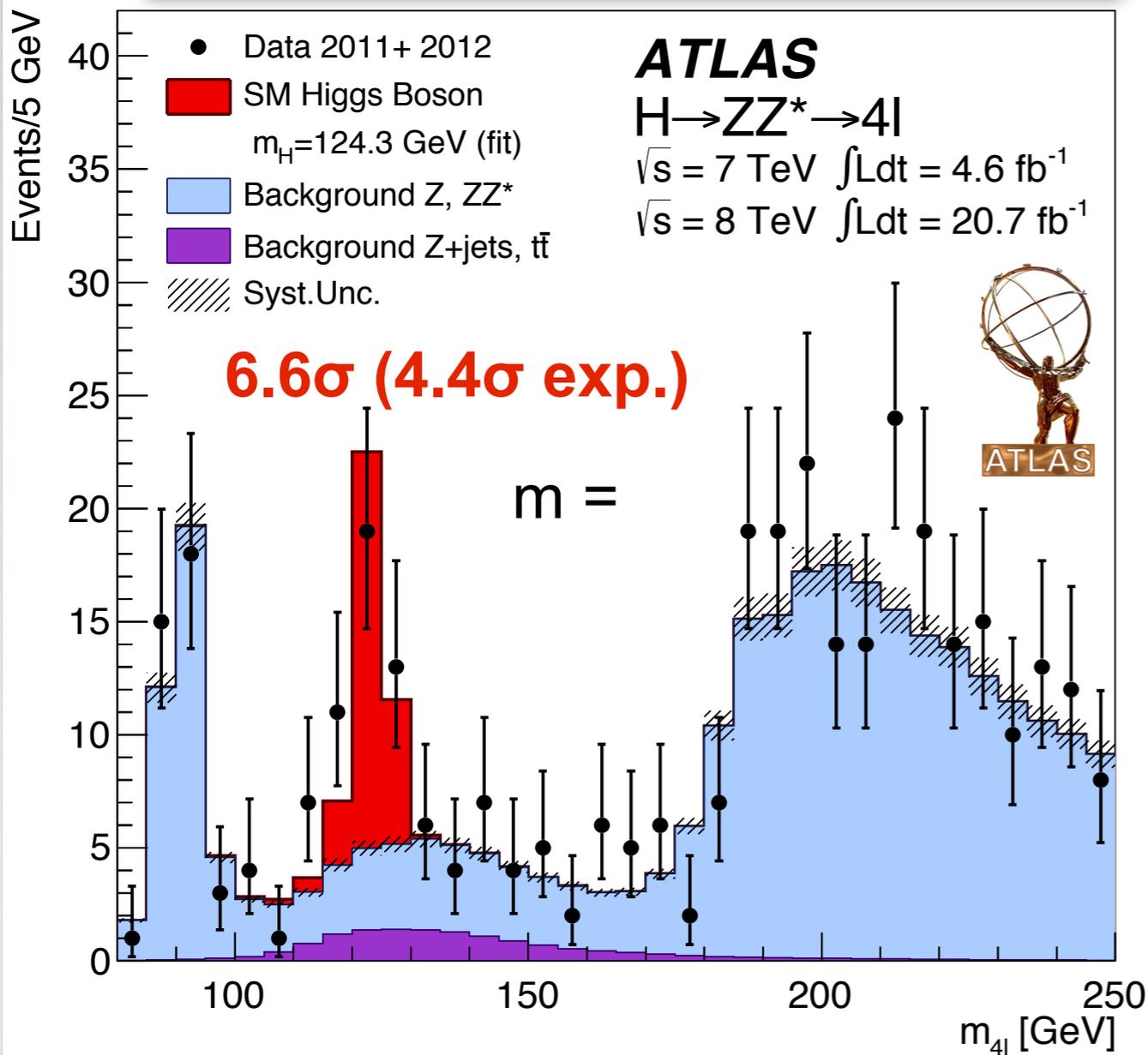
Поиски бозона Хиггса на БАК (CMS): $\mu\mu\mu\mu$



CMS Experiment at the LHC, CERN
Sat 2011-Apr-23 06:05:17 CET
Run 163302 Event 27907479
C.O.M. Energy 7.00TeV
H>GammaGamma candidate

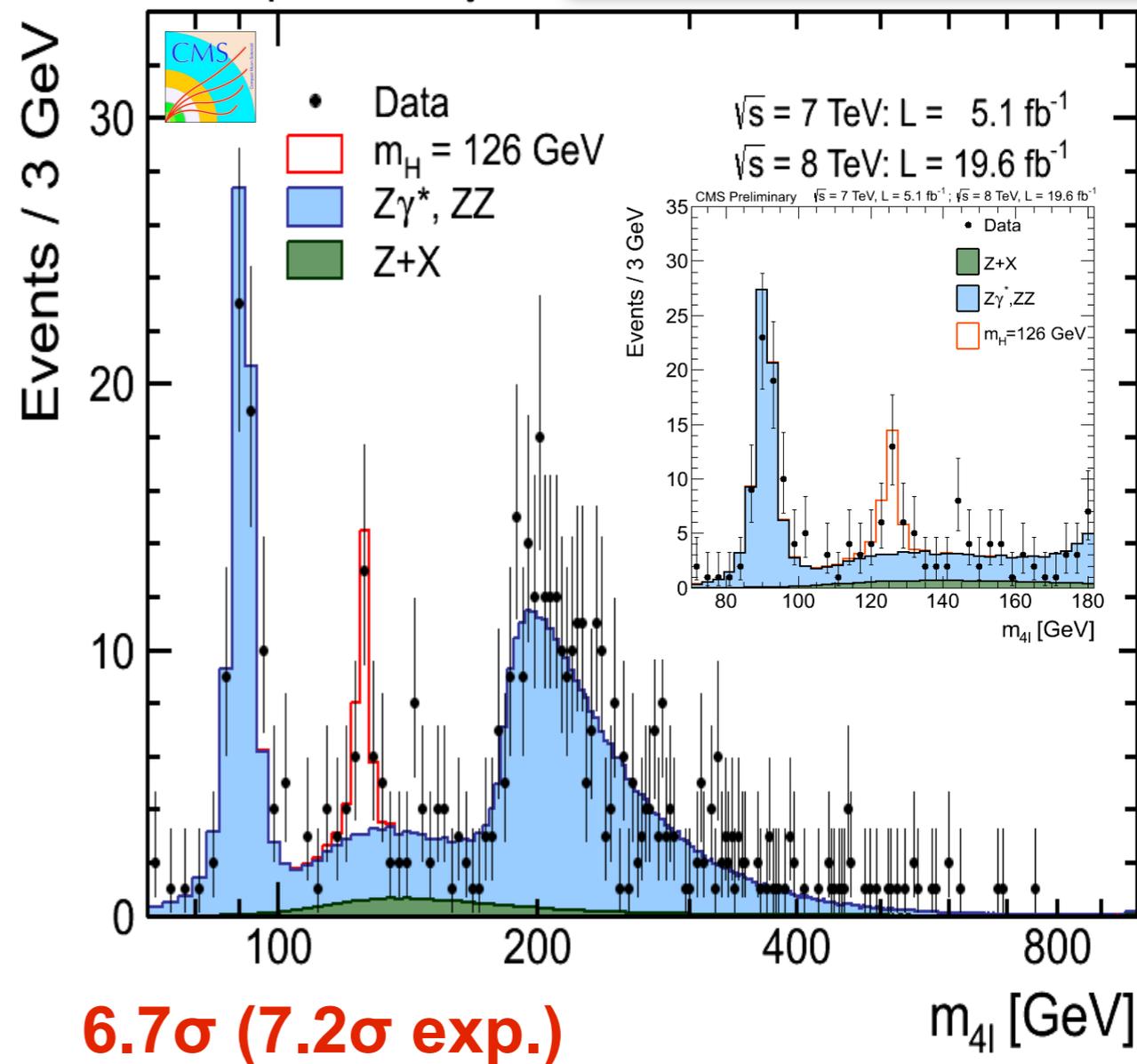


ATLAS Collaboration, arXiv:1307.1427



CMS preliminary

CMS PAS HIG-13-002



ATLAS: $M_H = 124.3 \pm 0.6_{\text{stat}} \pm 0.4_{\text{sys}} \text{ GeV}$

CMS: $M_H = 125.8 \pm 0.5_{\text{stat}} \pm 0.2_{\text{sys}} \text{ GeV}$

Новая частица!

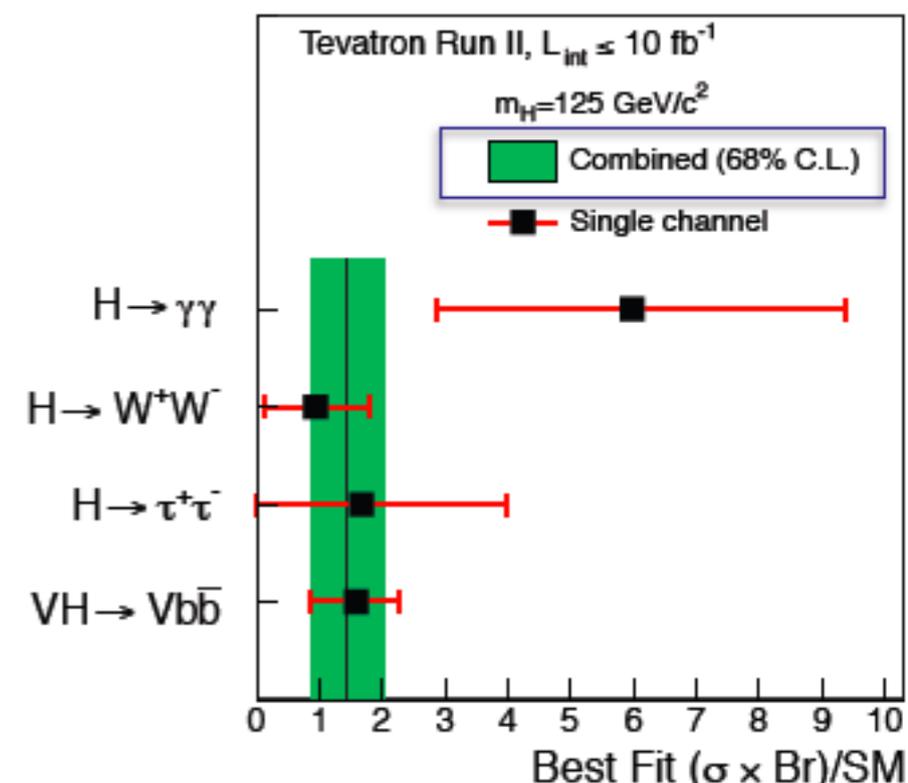
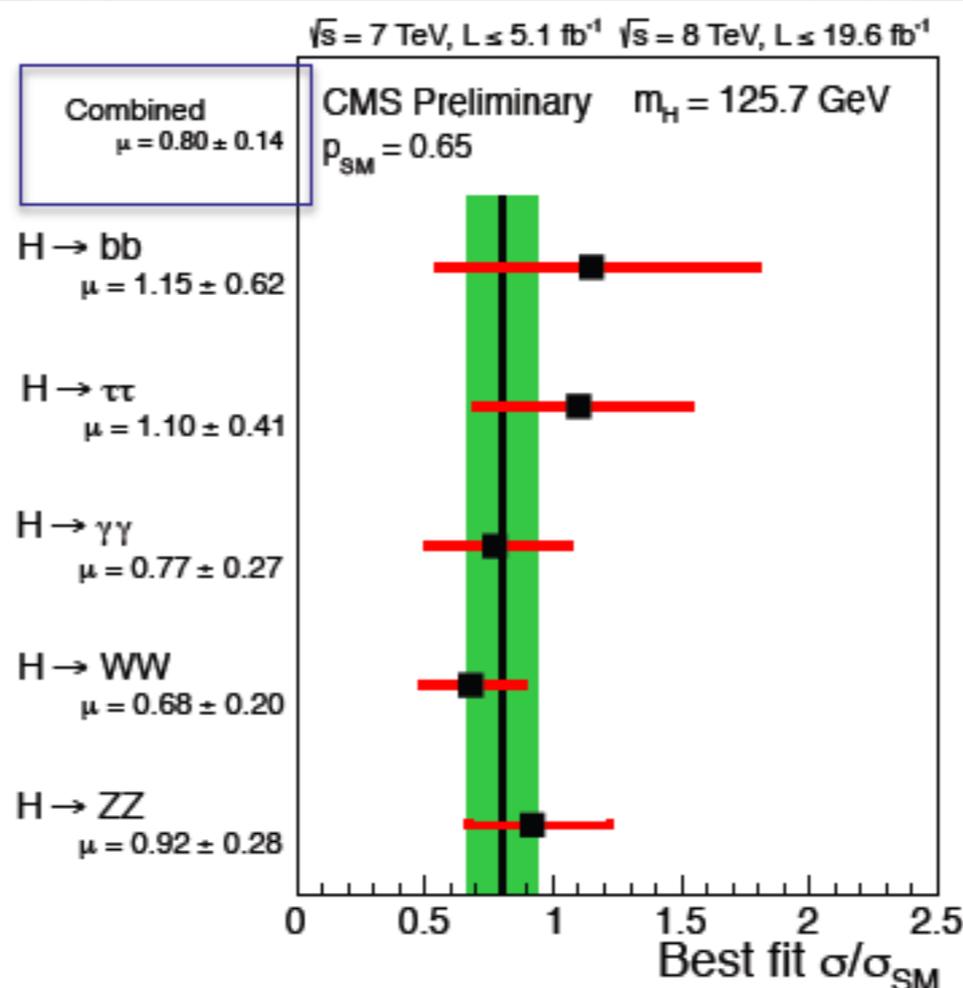
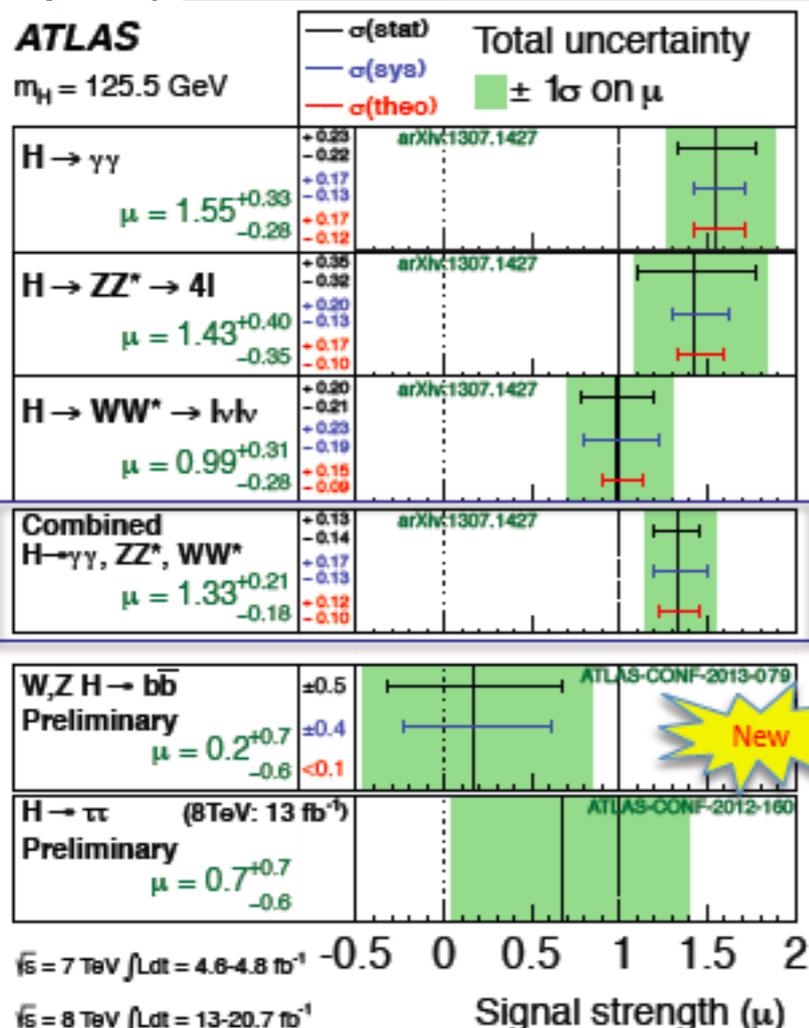
Новая частица в ATLAS и CMS (июль 2012):
бозон 125 ГэВ

Бозон Хиггса Стандартной Модели? Или что-то еще?

Сечение образования: \rightarrow SM

Квантовые свойства:

- электрический заряд \rightarrow SM: 0
- Спин \rightarrow SM(?): 0 да $\sim 90\%$
- зарядовая и пространственная четность
 - \rightarrow SM (?): $0+$ да $\sim 90\%$
- соотношение между вероятностями различных распадов \rightarrow SM(?) да $\sim 80\%$
 - ?



ATLAS ($\gamma\gamma, WW^*$ and ZZ^*) $\mu = (1.33 \pm 0.20)$ (1.23 ± 0.18 including $b\bar{b}$ and $\tau\tau$)

CMS ($\gamma\gamma, \tau\tau, b\bar{b}, WW^*$ and ZZ^*) $\mu = (0.80 \pm 0.14)$

TEVATRON ($b\bar{b}, \gamma\gamma, \tau\tau, WW^*$) $\mu = (1.44 \pm 0.60)$

Согласуется с СМ: точность $\sim 15\%$

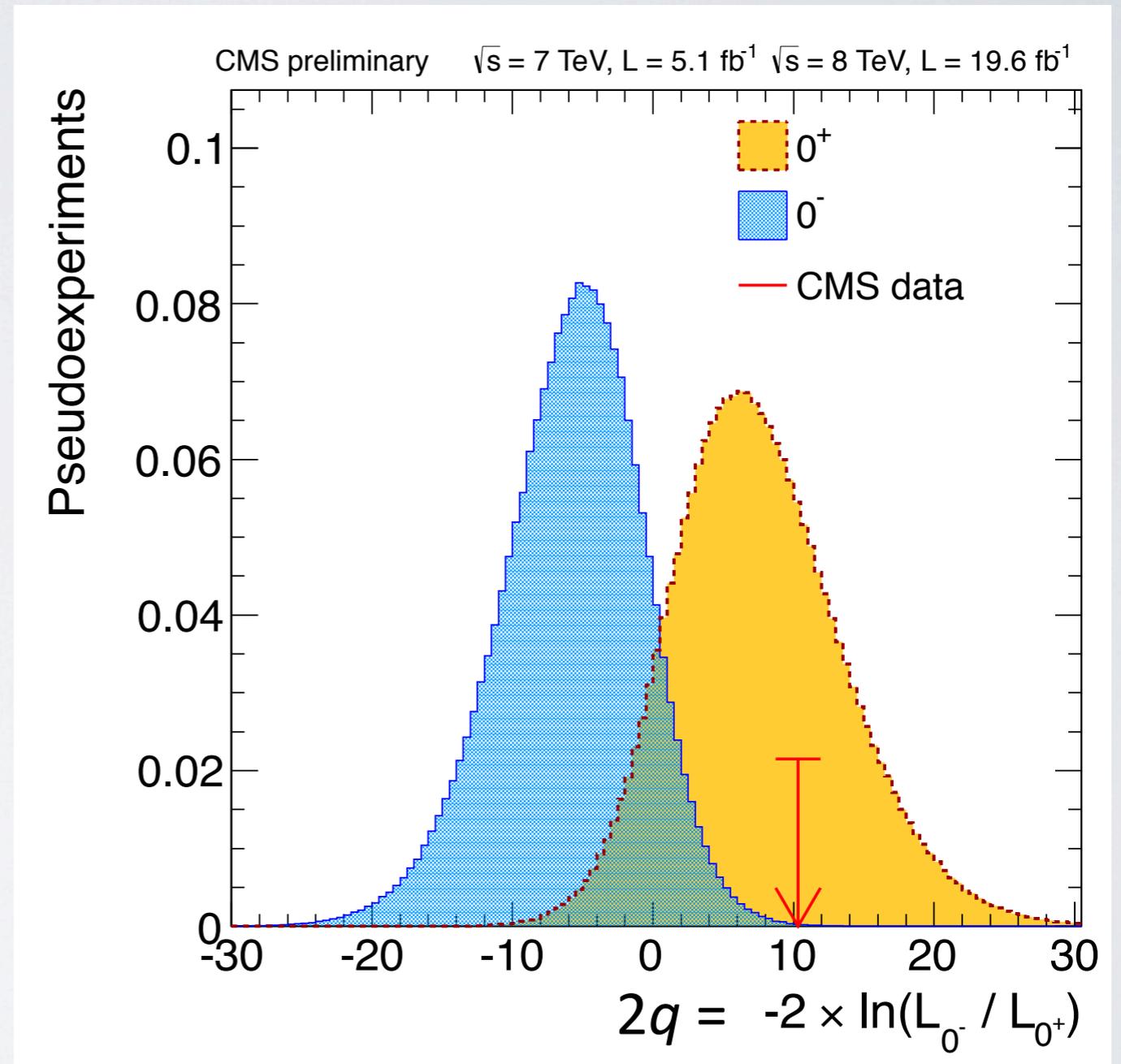
Бозон Хиггса? Бозон Хиггса СМ?

Заряд (0)? Спин (0 и/или 2)? Четность?

CMS:

- 0^- Excluded @ 99.8% CL (exp. 99.5%)

Compatible with SM 0^+



Новая частица!

Новая частица в ATLAS и CMS (июль 2012):
бозон 125 ГэВ

Бозон Хиггса Стандартной Модели?

Сечение образования: \rightarrow СМ да $\sim 75\%$

Квантовые свойства:

- электрический заряд \rightarrow СМ: 0 да $\sim 100\%$
 - Спин \rightarrow СМ(?): 0 да $\sim 90\%$
- зарядовая и пространственная четность
 - \rightarrow СМ (?): $0+$ да $\sim 90\%$
- соотношение между вероятностями различных распадов \rightarrow СМ(?) да $\sim 80\%$
 - ?



Бозон Хиггса SM!

июль 2013

Конференция Европейского Физического Общества

Премия ЕФО: ATLAS и CMS

Июль 2013: Бозон Хиггса SM!

**Июль 2013, Конференция Европейского Физ. Общ.
CMS и ATLAS: бозон Хиггса Стандартной Модели 125 ГэВ
на уровне 7σ**



François Englert and Peter Higgs

Photo: © CERN

**2013 Nobel Prize
in Physics**

**2013 – 2015, CERN: новые свидетельства
в пользу бозона Хиггса SM**

Охота на бозон Хиггса на LHC: переход от спринта ...



Охота на бозон Хиггса на LHC: переход ... к марафону





New physics beyond Standard Model



The Unknown Unknowns

**As we know,
There are known knowns.
There are things we know we know.
We also know
There are known unknowns.
That is to say
We know there are some things
We do not know.
But there are also unknown unknowns,
The ones we don't know
We don't know.**

**Donald Rumsfeld
—Feb. 12, 2002, Department of Defense news
briefing**



Available hints for new physics beyond Standard Model



Is Higgs boson a portal to a new physics?

Theory:

Origin of masses and their hierarchy (naturalness)?

Origin of CP-violation?

Too many parameters: > 20

How to incorporate gravity?

Baryon-antibaryon asymmetry of Universe?

What are dark matter and dark energy?

New states of quark-gluon matter?

It should a new fundamental theory!



Физика элементарных частиц: симметрии и их нарушения

Принципы:

наименьшего действия

относительности

локальной калибровочной инвариантности

...

Законы:

сохранение энергии-импульса

сохранение электрического заряда

сохранение барионного заряда

...

Принципы и законы связаны с симметриями!



Принципы и законы в действии:

Принцип относительности -> СТО

Принцип относительности -> ОТО – гравитация

Закон сохранения энергии -> нейтрино

Принцип Паули -> цвет (сильный заряд) у кварков

**Локальная калибровочная инвариантность ->
квантовая теория поля: Стандартная Модель**



Принципы и законы в действии:

Закон сохранения энергии ->

X закон сохранения массы

Принцип относительности ->

X принцип одновременности

Принцип неопределенности Гейзенберга ->

X точное измерение координат и импульса одновременно

X энергия, импульс для виртуальных частиц

Квантовая механика ->

X принцип причинности



Поиски новой физики за пределами Стандартной Модели:

Мы готовы признать приближенными

- законы: закон сохранения энергии, импульса, заряда, ...**
- и даже принципы: относительности, ...**
- и фундаментальные параметры: размерность пространства, ...**

! При этом:

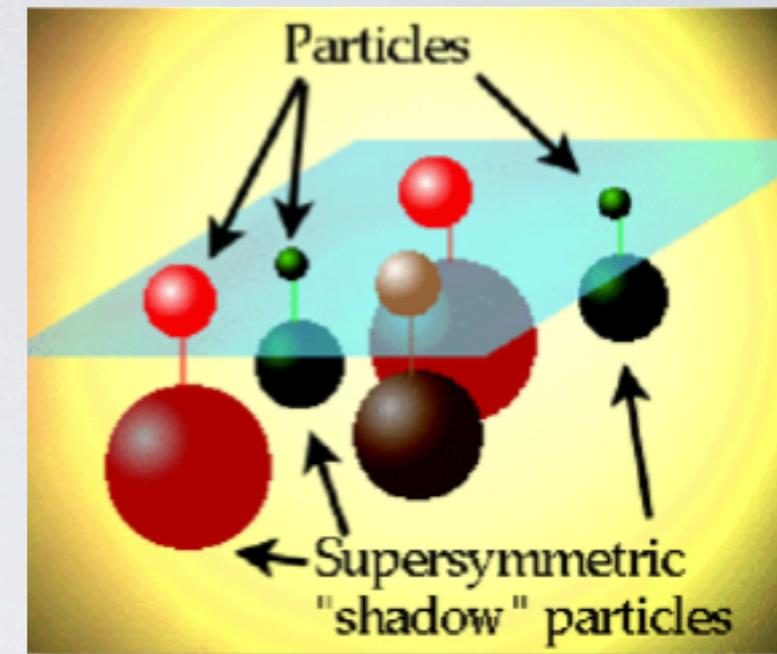
**сохранив всю описательную мощь Стандартной Модели
В установленной области ее применимости**

Новая физика? суперсимметрия?

Суперсимметрия:
симметрия между бозонами и
фермионами

$$Q |boson\rangle = |fermion\rangle$$

$$Q |fermion\rangle = |boson\rangle$$



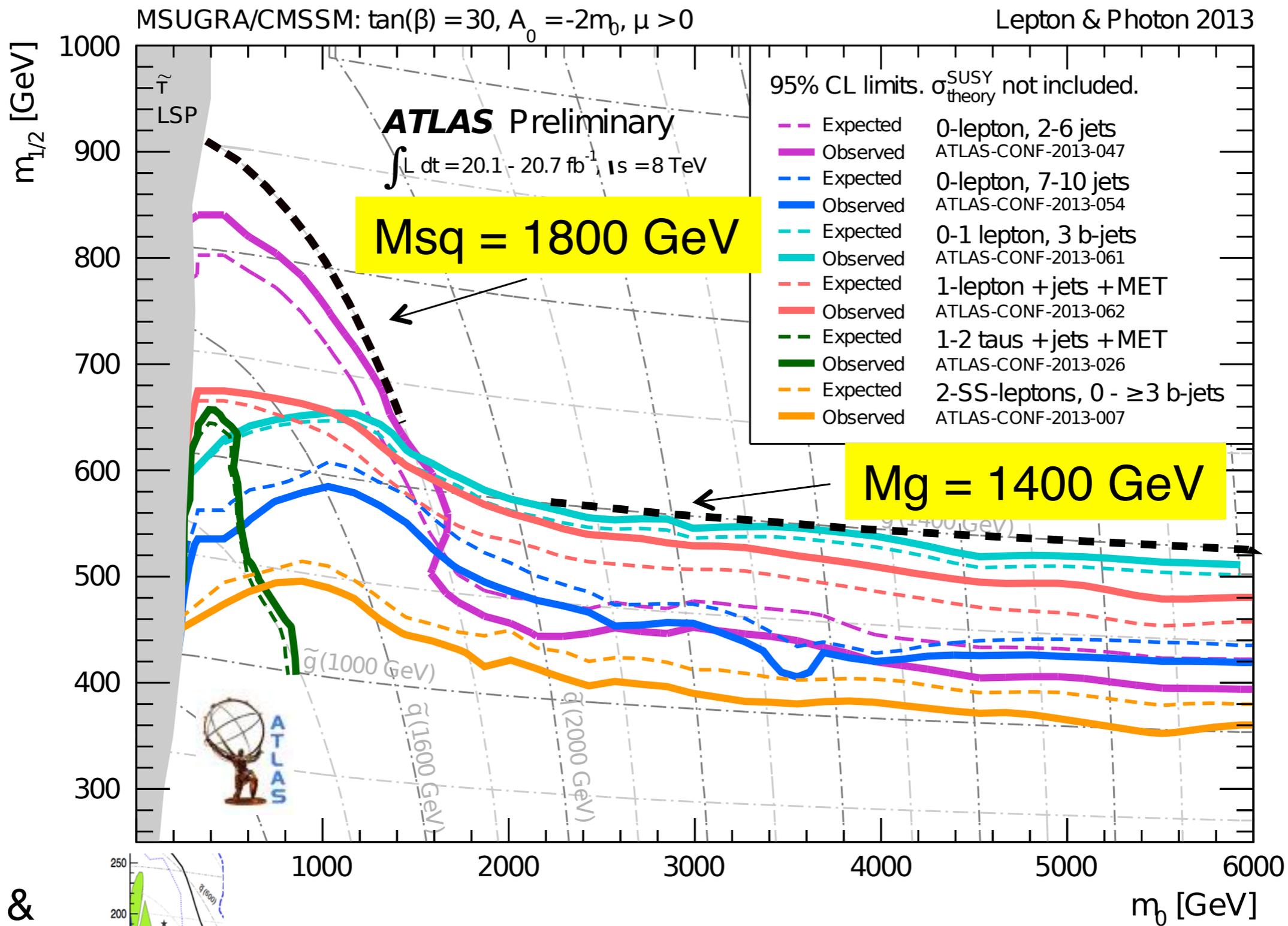
Простейшее обобщение СМ:
Минимальная суперсимметричная
Стандартная Модель (MSSM)

СуперСимметрия

“Зоопарк” частиц MSSM

Суперполя	Бозоны	Фермионы	$SU_C(3)$	$SU_L(2)$	$U_Y(1)$
Gauge G^a V^K $V(\mathbb{X})$	gluon: $g^a, a=1,2,3$ weak: $W^K (W^\pm, Z)$ hypercharge: $B(\mathbb{X})$	gluino: \tilde{g}^a wino, zino: $\tilde{W}^K (\tilde{W}^\pm, \tilde{Z})$ bino: $\tilde{b}(\tilde{Y})$	8 1 1	0 3 1	0 0 0
Matter L_i \mathbb{X}_i	sleptons $\left\{ \begin{array}{l} \tilde{L}_i = (\tilde{\nu}, \tilde{e})_L \\ \tilde{e}_i = \tilde{e}_R \end{array} \right.$	leptons $\left\{ \begin{array}{l} L_i = (\nu, e)_L \\ e_i = e_R \end{array} \right.$	1 1	2 1	-1 2
Matter Q_i U_i D_i	squarks $\left\{ \begin{array}{l} \tilde{Q}_i = (\tilde{u}, \tilde{d})_L \\ \tilde{U}_i = \tilde{u}_R \\ \tilde{D}_i = \tilde{d}_R \end{array} \right.$	quarks $\left\{ \begin{array}{l} Q_i = (u, d)_L \\ U_i = u_R^c \\ D_i = d_R^c \end{array} \right.$	3 3* 3*	2 1 1	1/3 -4/3 2/3
Higgs H_1 H_2	two higgs doublets H_1 H_2	higgsions $\left\{ \begin{array}{l} \tilde{H}_1 \\ \tilde{H}_2 \end{array} \right.$	1 1	2 2	-1 1

Поиски суперсимметрии на БАК



LEP & Tevatron

The LHC has pushed the mass scale in constraint SUSY models to a new level!

Дополнительные измерения?

Arcani-Hamed, Dimopoulos & Dvali (1999)

Randall & Sunodrum (1999)

multi-dimensional gravity:
solving hierachy scale problem

новая масса Планка: M_D

новая длина Планка: L_D

новая гравитационная

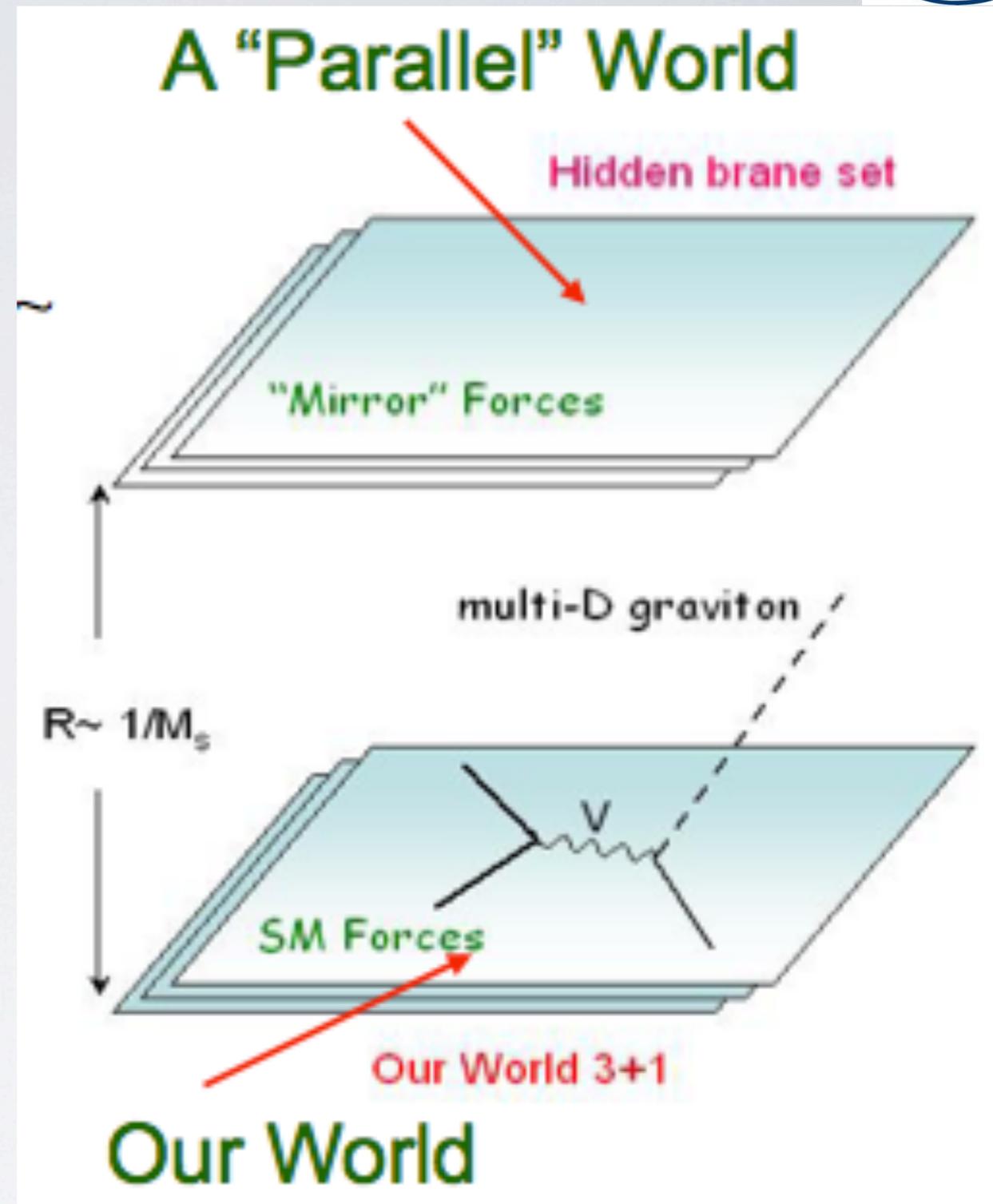
константа Ньютона: G_D

$$L_D = \left(\frac{G_D \hbar}{c^3} \right)^{1/(n+2)}$$

$$G_D = \frac{(2\pi)^{n-1} \hbar^{n+1}}{4c^{n-1} M_D^{n+2}}$$

Радиус Шваршильда R_S :

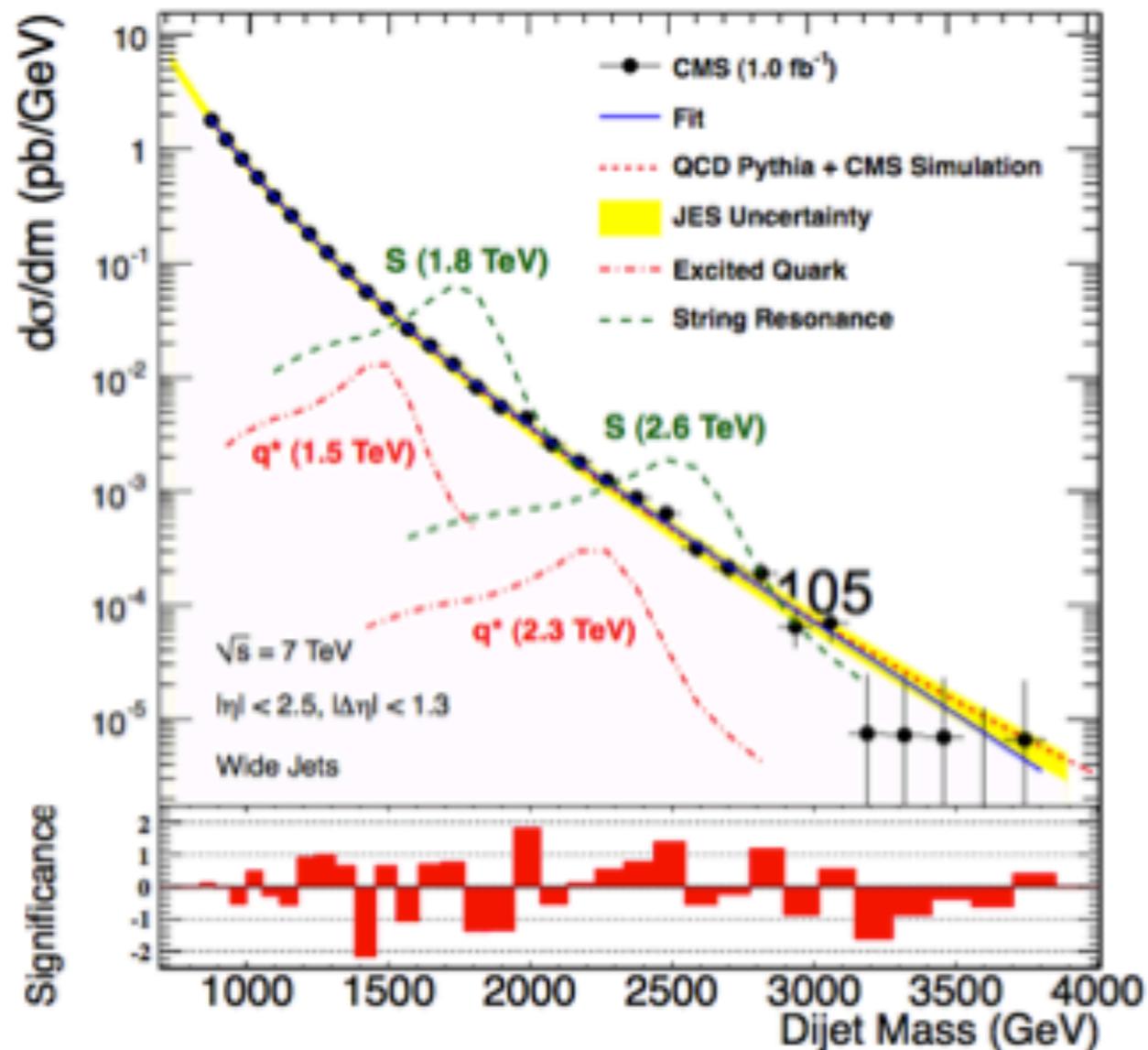
$$R_S = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{8\Gamma[(n+3)/2]}{(n+2)} \frac{G_D \sqrt{s}}{c^4} \right)^{1/(n+1)}$$



Рассеяние на прицельных расстояниях $b \sim R_S$

-> образование черных микро-дыр! время жизни $\ll 10^{-30}$ sec

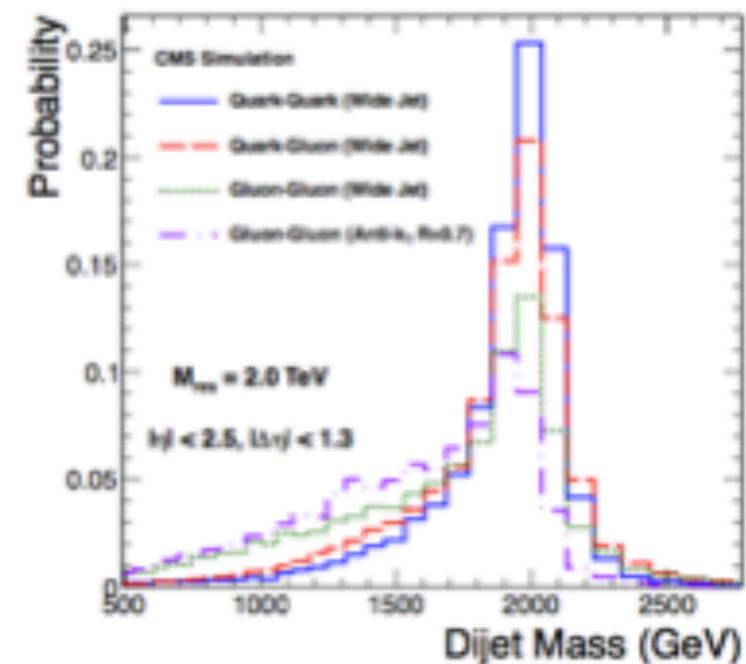
массы двух струй (CMS)



Parametrization of the data:

$$\frac{d\sigma}{dm} = \frac{P_0(1 - m/\sqrt{s})^{P_1}}{(m/\sqrt{s})^{P_2+P_3 \ln(m/\sqrt{s})}}$$

Signal shape



Lower limit on the mass in different models

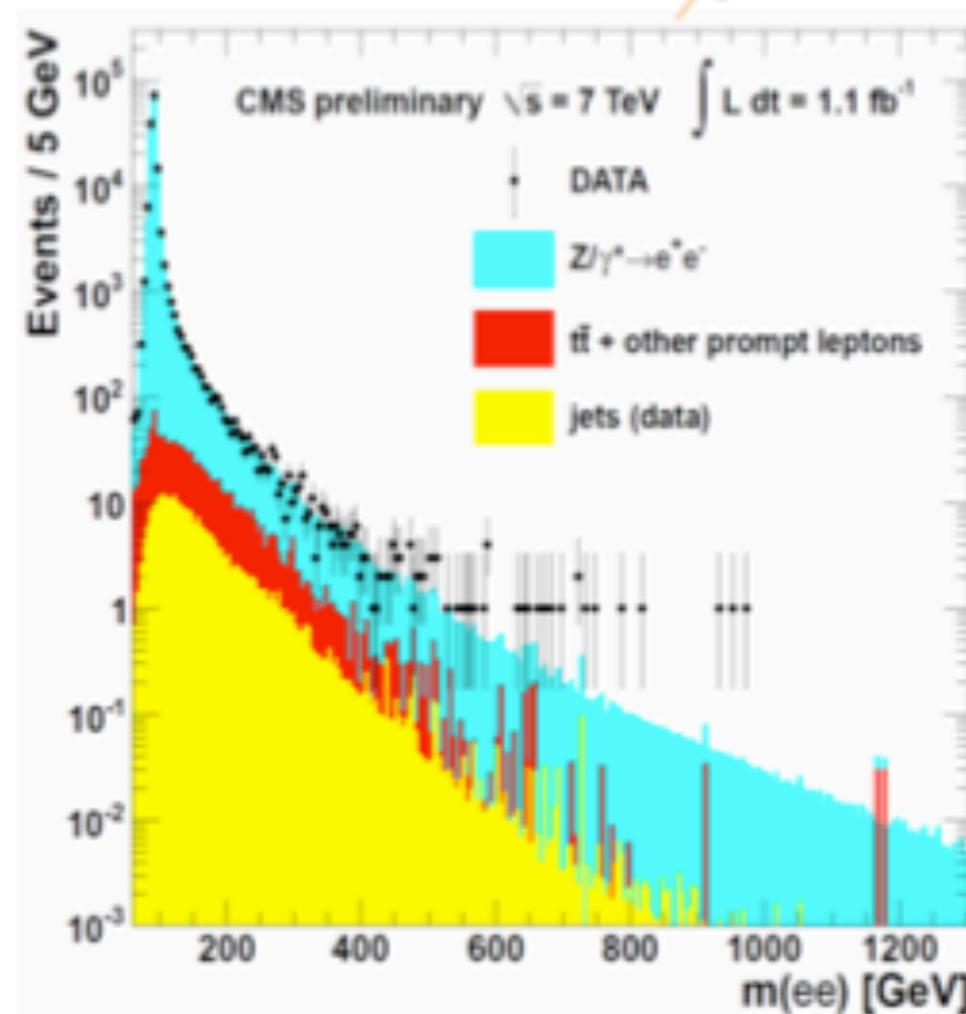
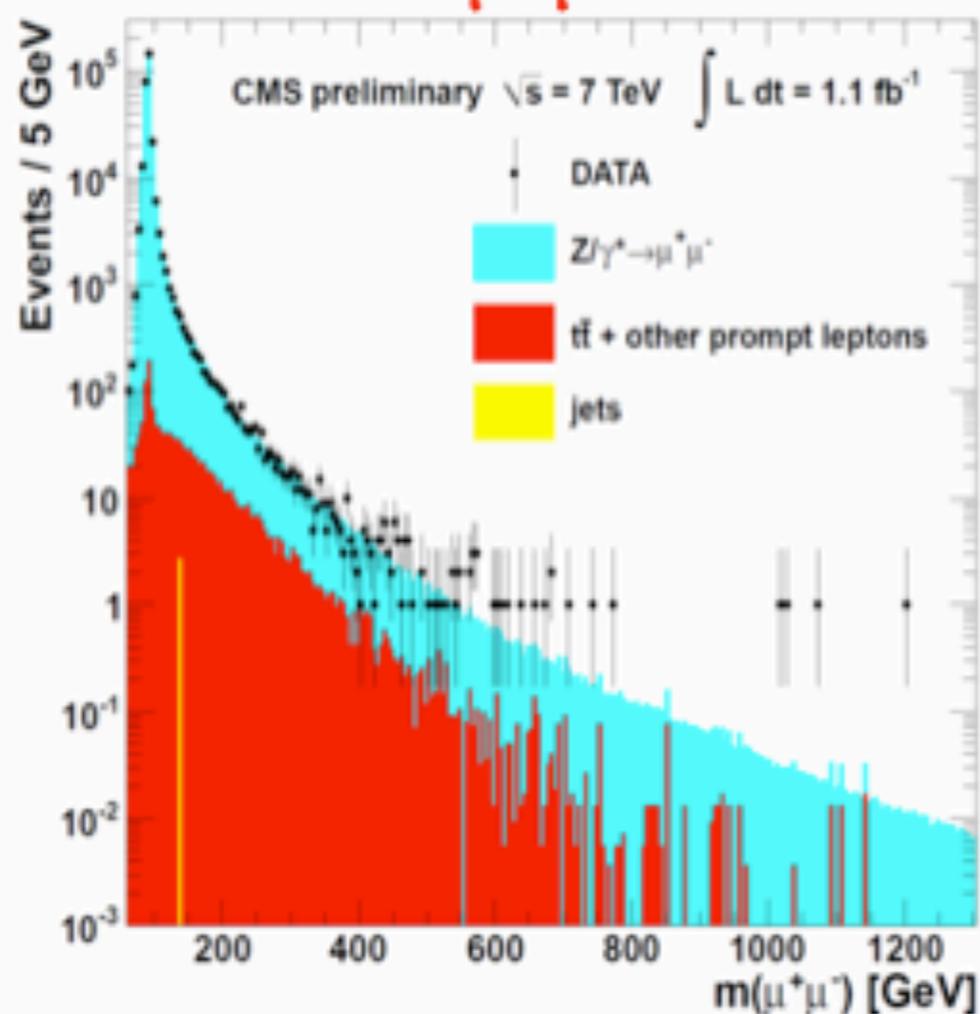
Model	Excluded Mass (TeV)	
	Observed	Expected
String Resonances	4.00	3.90
E ₆ Diquarks	3.52	3.28
Excited Quarks	2.49	2.68
Axiguons/Colorons	2.47	2.66
W' Bosons	1.51	1.40

- Di-muon and di-electron mass spectra



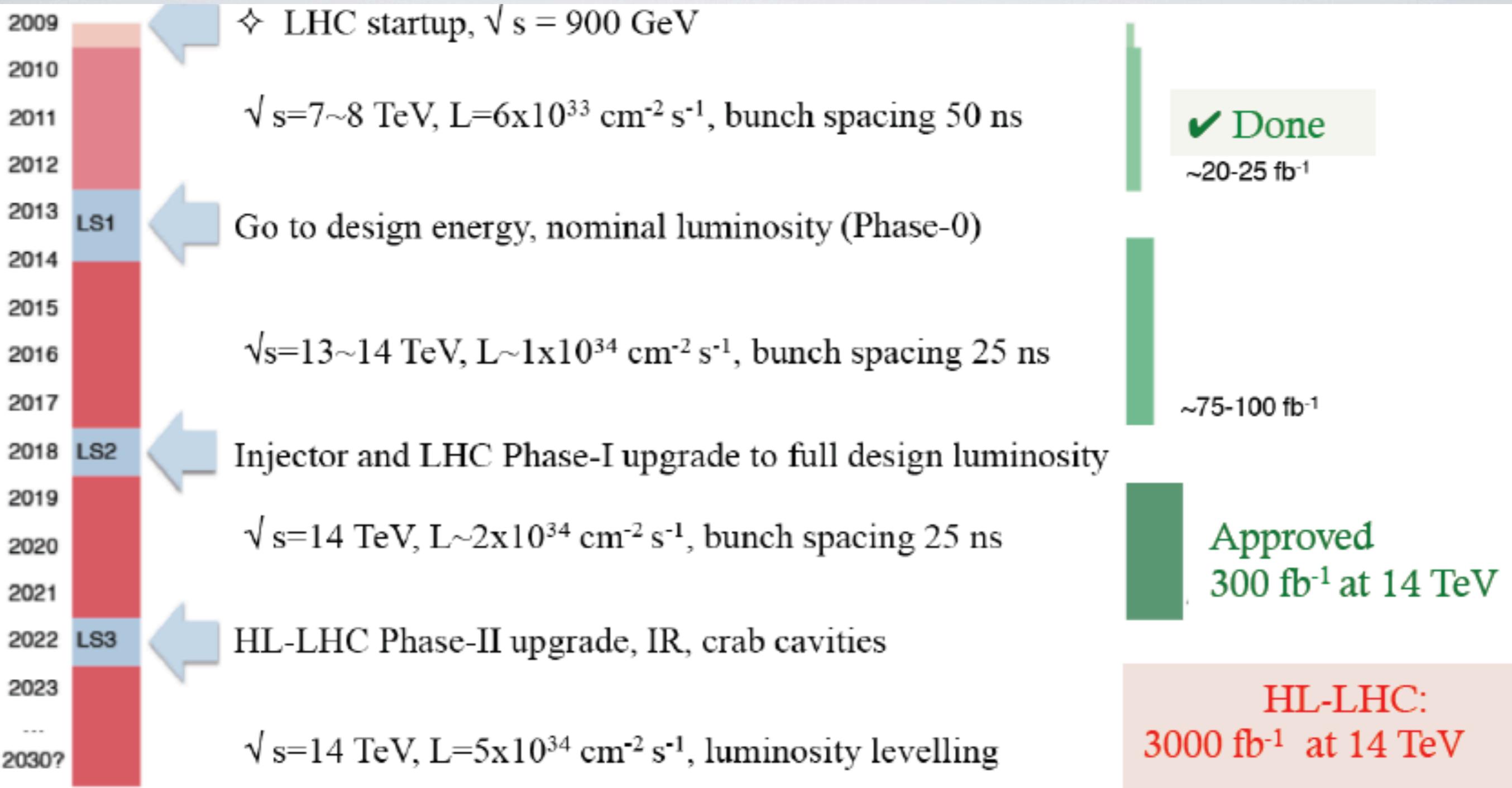
$Z' \rightarrow \mu^+ \mu^-$

$Z' \rightarrow e^+ e^-$



Model	95% CL lower limit on the mass
Sequential Standard Model Z'_{SSM}	1940 GeV
Super-String inspired models, Z'_{ψ}	1620 GeV
RS Kaluza-Klein Gravitons for (k/M_{Pl}) 0.05-0.1	1450-1780 GeV

Планы БАК





БАК: ближайшие перспективы



Планы БАК:

RUN 2 2015 - 2017

увеличение до энергии 6.5 x 6.5 ТэВ

увеличение светимости

ЦЕРН БАК: МНОГО НОВОСТЕЙ ВПЕРЕДИ!

LNCR2015 Conference

Санкт-Петербург, 31 августа - 5 сентября 2015

Барселона (2013), Нью-Йорк (2014)



Конференция Физика Большого Адронного Коллайдера (ЛНСП2015)

Барселона (ЛНСП2013), Нью-Йорк (ЛНСП2014)

ЦЕРН БАК: НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ!

ЛНСП2015 Conference

Санкт-Петербург, 31 августа - 5 сентября 2015

ЛНСП2015 Outreach Event:

**Встреча с учеными, работающими на БАК
для учителей, школьников студентов**

6 сентября, 2015 г.

СПбПУ (Политех)



Информация о БАК



<http://public.web.cern.ch>

<http://atlas.ch>

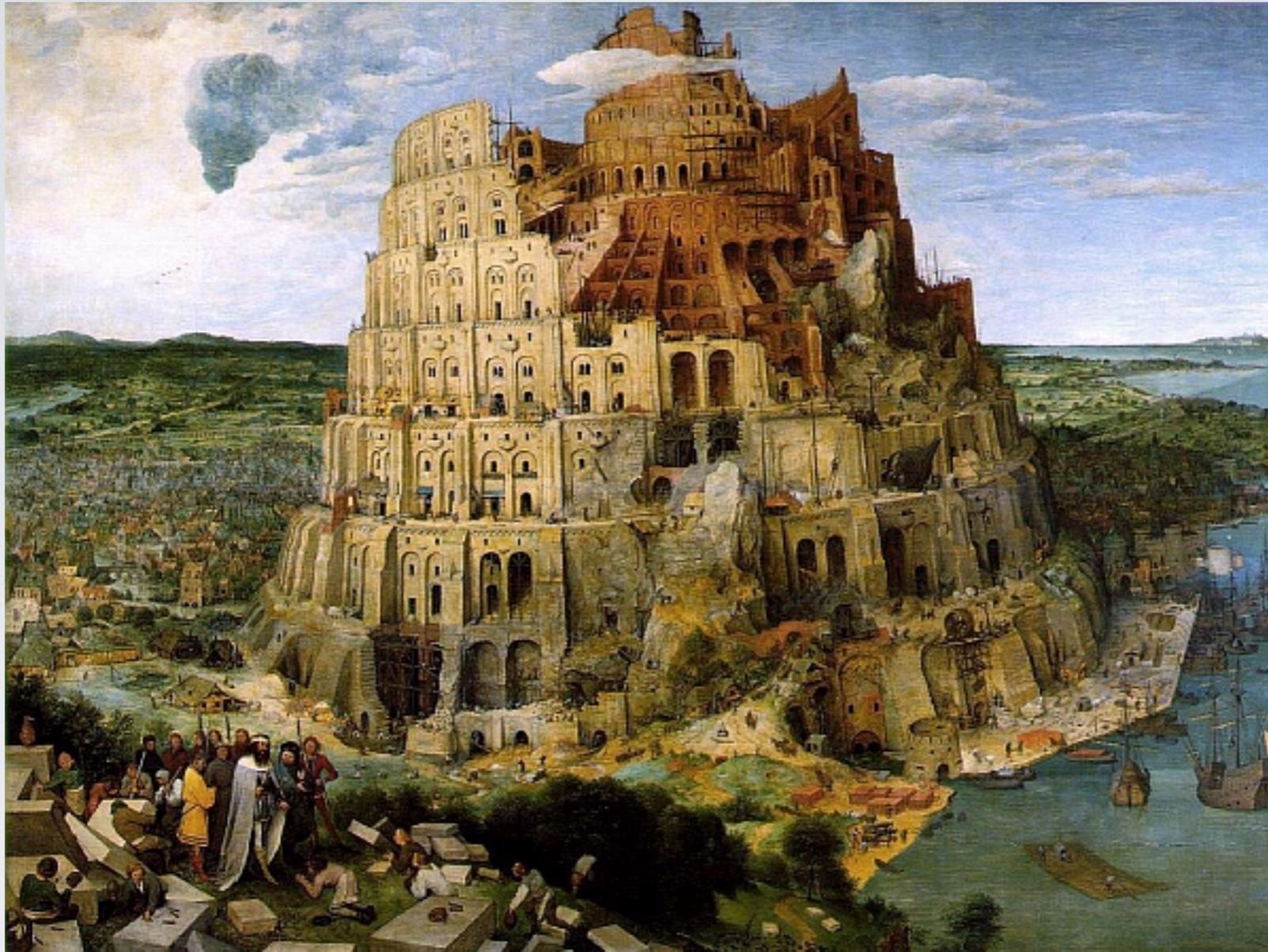
<http://cmsinfo.cern.ch/outreach>

Научно-популярный сайт:

<http://elementy.ru>

- “Страсти по частицам” (“Particle Fever”) YouTube
- Виртуальная академия ФВЭ (ОИЯИ)

БАК: “Вавилонская башня”



Pieter Bruegel de Oude "Babylon tower" 1563

ЦЕРН: уникальные возможности!