

Физика на Большом Адронном Коллайдере: с высоты птичьего полета

Виктор Т. Ким

**Петербургский Институт Ядерной Физики (ПИЯФ), Гатчина
Санкт-Петербургский Гос. Политехнический Университет**



Содержание

Введение в Стандартную Модель элементарных частиц
и их взаимодействий

LHC (БАК)

Поиски бозона Хиггса

Поиски новой физики за пределами Стандартной Модели

Удивительный мир элементарных частиц



Физика элементарных частиц - мир квантовых объектов и
околосветовых скоростей

Ответы на вопрос: Из чего сделан и как устроен мир?



$$1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$$

$$1 \text{ А} = 10^{-10} \text{ м}$$

$$1 \text{ Фм} = 10^{-15} \text{ м}$$

$$10^{-3} \text{ Фм} = 10^{-18} \text{ м}$$

молекула

атом

протон

электрон

$$5 \cdot 10^{-19} \text{ м} \geq \text{кварки (БАК: CMS \& ATLAS)}$$

возможность проверить на БАК

структуру частиц до: $\sim 10^{-5} \text{ Фм} = 10^{-20} \text{ м}$

Единицы Измерений и масштабы

характерное время сильных взаимодействий = $3 \cdot 10^{-24}$ с
свет проходит 1 Фм = 10^{-15} м (размер протона)

время жизни адронов в слабых распадах:
 $\sim 10^{-12} - 10^{-9}$ с

Энергии:

1 эВ = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж

молекулы ~ 0.02 эВ

фотоны ~ 2 эВ

ядерные реакции: 1 МэВ = 10^6 эВ

структура протона: ГэВ = 10^9 эВ

БАК (1 стадия): 3.5 ТэВ х 3.5 ТэВ

1 ТэВ = 1000 ГэВ = 10^{12} эВ

Квантовая физика

Соотношение неопределенности Гейзенберга:

$$\Delta p \cdot \Delta x \simeq \hbar$$

Высокие энергии \longleftrightarrow **малые расстояния**

$$\Delta x \sim \frac{\hbar}{E}$$

Спин (внутренний угловой момент): квантуется

фермионы: полуцелый спин (принцип Паули)

бозоны: целый спин (возможна конденсация)

**Уравнение Дирака для релятивистских частиц:
существуют античастицы**

Стандартная Модель элементарных частиц

Квантовая Хромодинамика (сильные взаимодействия)

Стандартная Модель

Стандартная Модель электрослабых взаимодействий

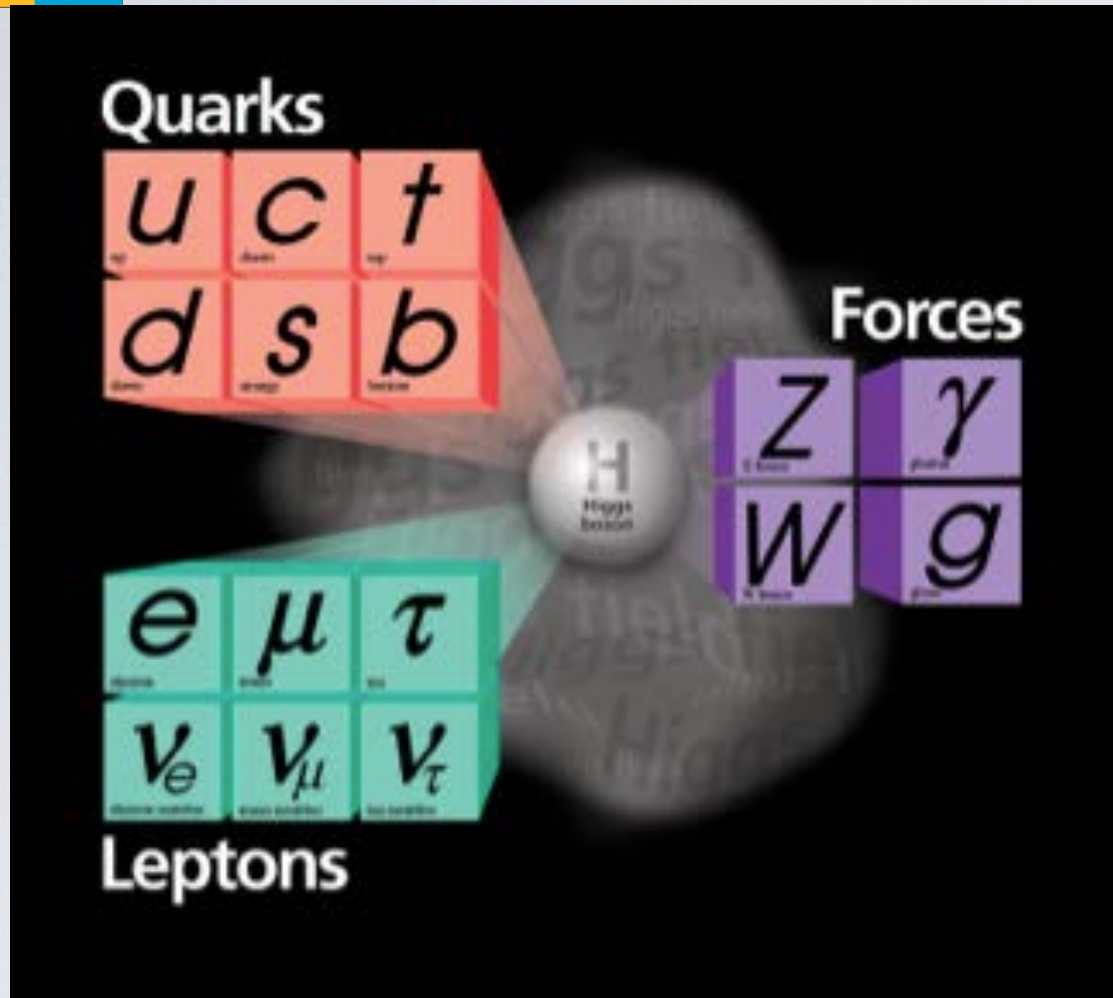
Электромагнитные

Слабые взаимодействия

Электричество

Магнетизм

Стандартная Модель



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
	80.302 ± 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]	490.0 ± 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
$s_\tau^2(A_{FB}^{(0,q)})$	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
	0.1408 ± 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	0.805 ± 0.091	0.9356 ± 0.0001	-0.4
g_W^2	0.38005 ± 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
$Q_W(\text{Tl})$	-116.6 ± 3.7	-116.78 ± 0.05	0.1
$\frac{\Gamma(b \rightarrow s\gamma)}{\Gamma(b \rightarrow Xc\gamma)}$	$3.35^{+0.50}_{-0.44} \times 10^{-3}$	$(3.22 \pm 0.09) \times 10^{-3}$	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?

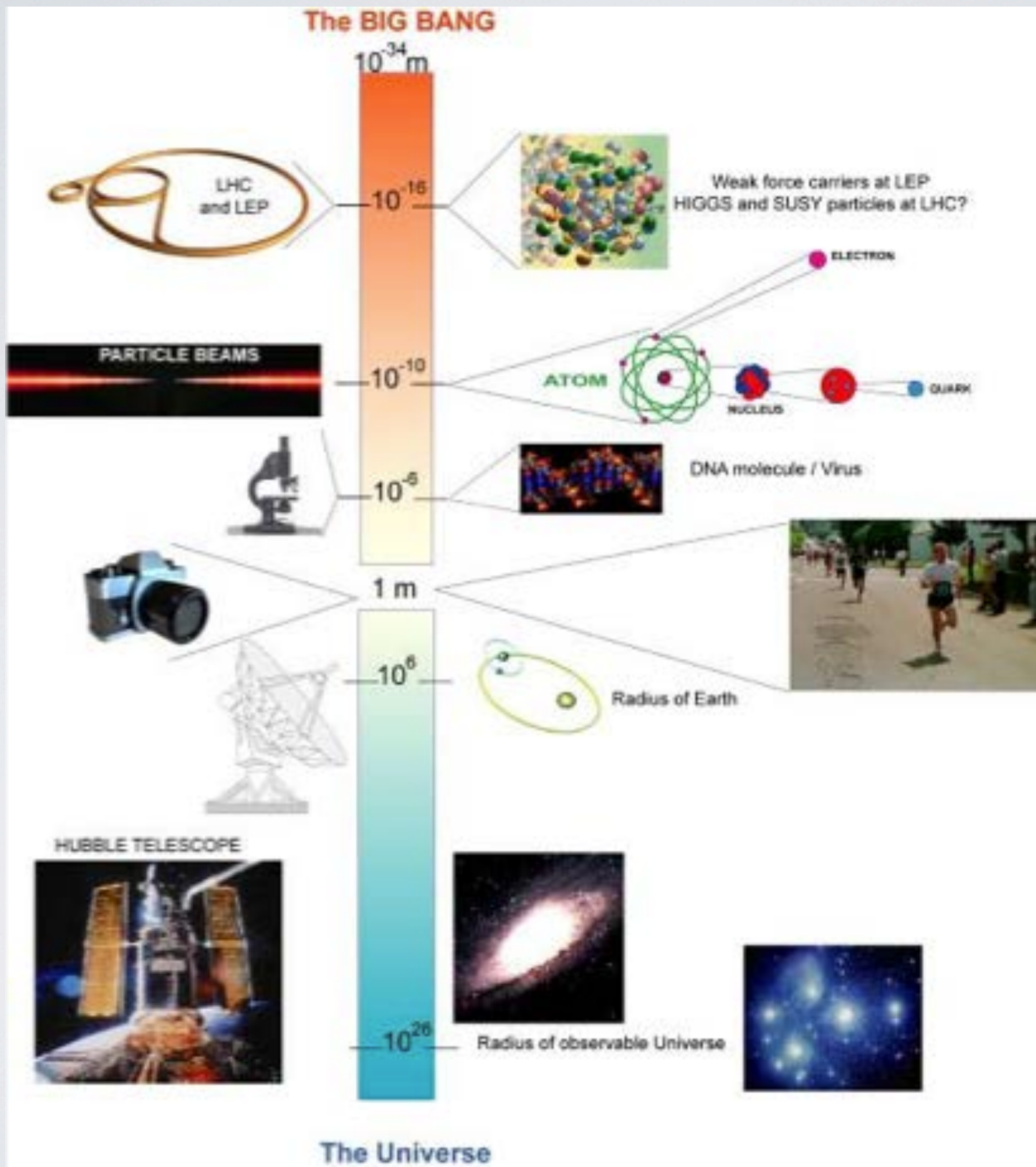
Слишком много параметров: более 20

Как включить гравитацию?

Барион-антибарионная асимметрия Вселенной?

Из чего состоит темная материя и темная энергия?

Характерные масштабы Вселенной



ПОЧЕМУ КОЛЛАЙДЕРЫ?



Г.И. Будкер (ИЯФ СО АН): встречные пучки

$$E^{\text{Лаб}} \approx 2 (E^{\text{СЦМ}})^2 / m$$

Фермилаб: 1 ТэВ x 1 ТэВ

$$E^{\text{L}} = 2 \cdot 10^3 \text{ ТэВ} \quad 2 \cdot 10^3$$

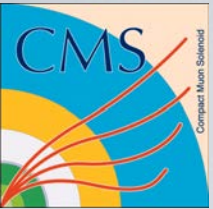
БАК: 3.5 ТэВ x 3.5 ТэВ

$$E^{\text{L}} = 2 \cdot 10^4 \text{ ТэВ} \quad 6 \cdot 10^3$$

БАК: 7 ТэВ x 7 ТэВ

$$E^{\text{L}} = 10^5 \text{ ТэВ} \quad 1.4 \cdot 10^4$$

БАК: 27км | 1000 оборотов/с



Современные коллайдеры



Фермилаб Тэватрон (Чикаго)

pp: 1 ТэВ x 1 ТэВ

$$E^L = 2 \cdot 10^3 \text{ ТэВ}$$

BNL RHIC (Нью-Йорк)

AA: 100 ГэВ/н x 100 ГэВ/н

$$E^L = 20 \text{ ГэВ/н}$$

ЦЕРН БАК (Женева)

pp: 3.5 ТэВ x 3.5 ТэВ

7 ТэВ x 7 ТэВ

$$E^L = 2 \cdot 10^4 \text{ ТэВ}$$

$$E^L = 10^5 \text{ ТэВ}$$

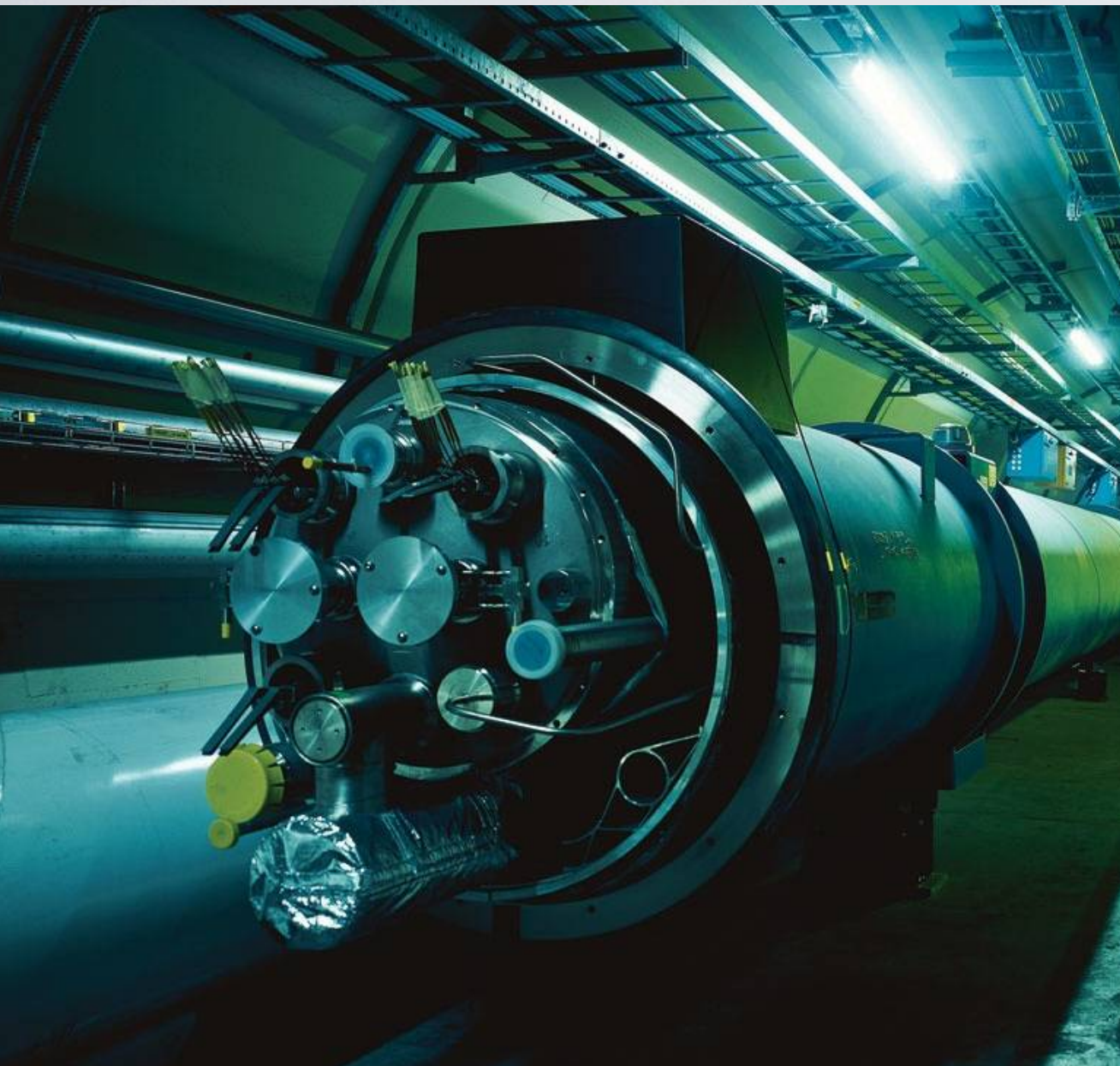
AA: 5.5 ТэВ/нуклон-нуклон

Pb-Pb

Большой адронный коллайдер



Большой адронный коллайдер



туннель 27 км

pp

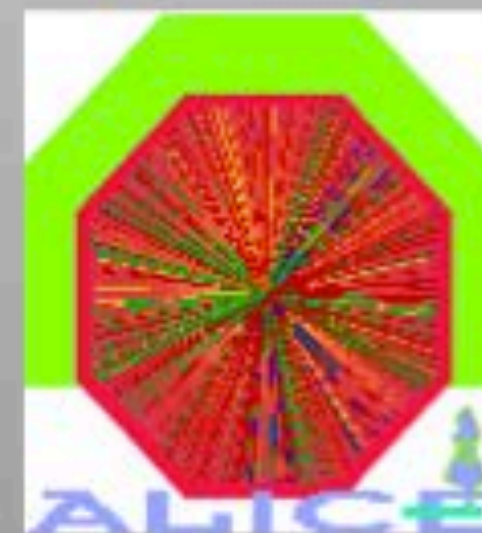
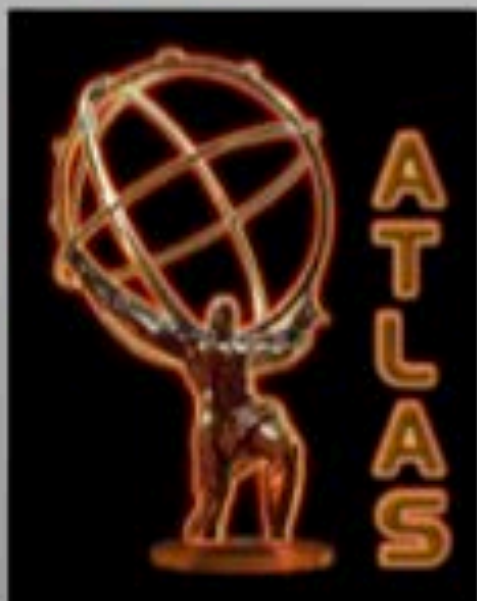
2010-11: 3.5 ТэВ x 3.5 ТэВ

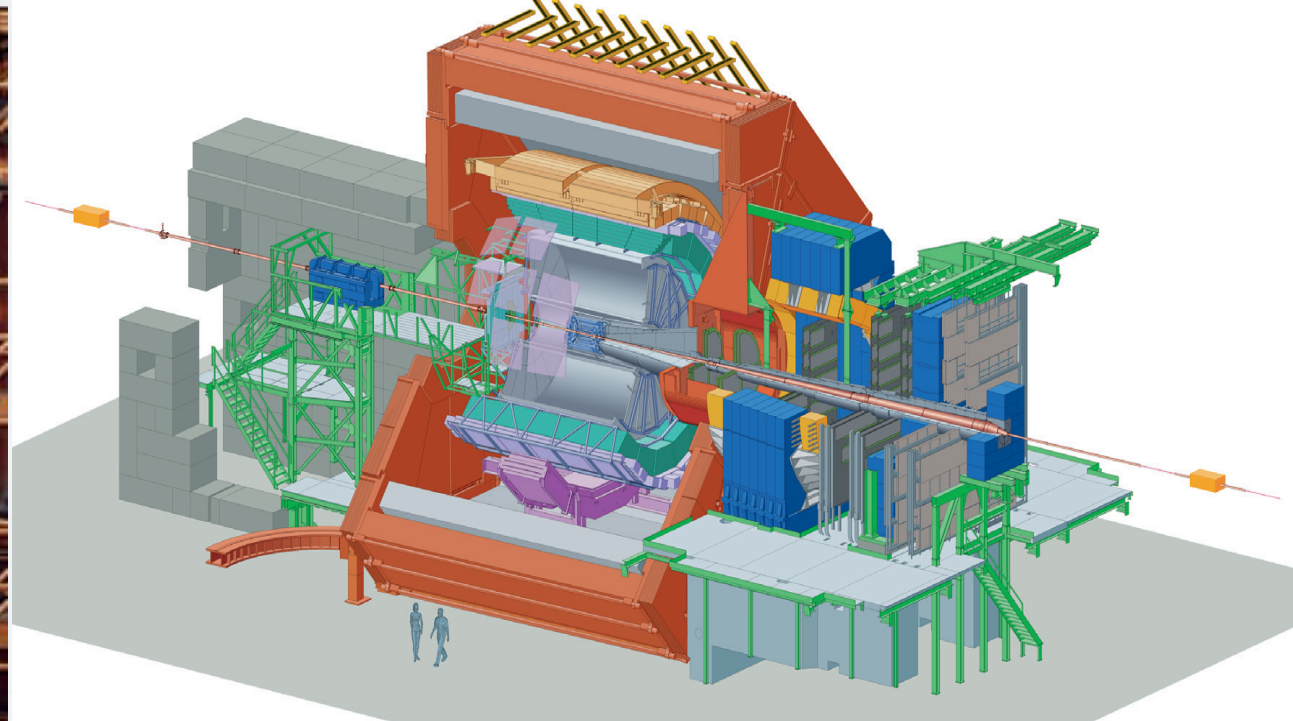
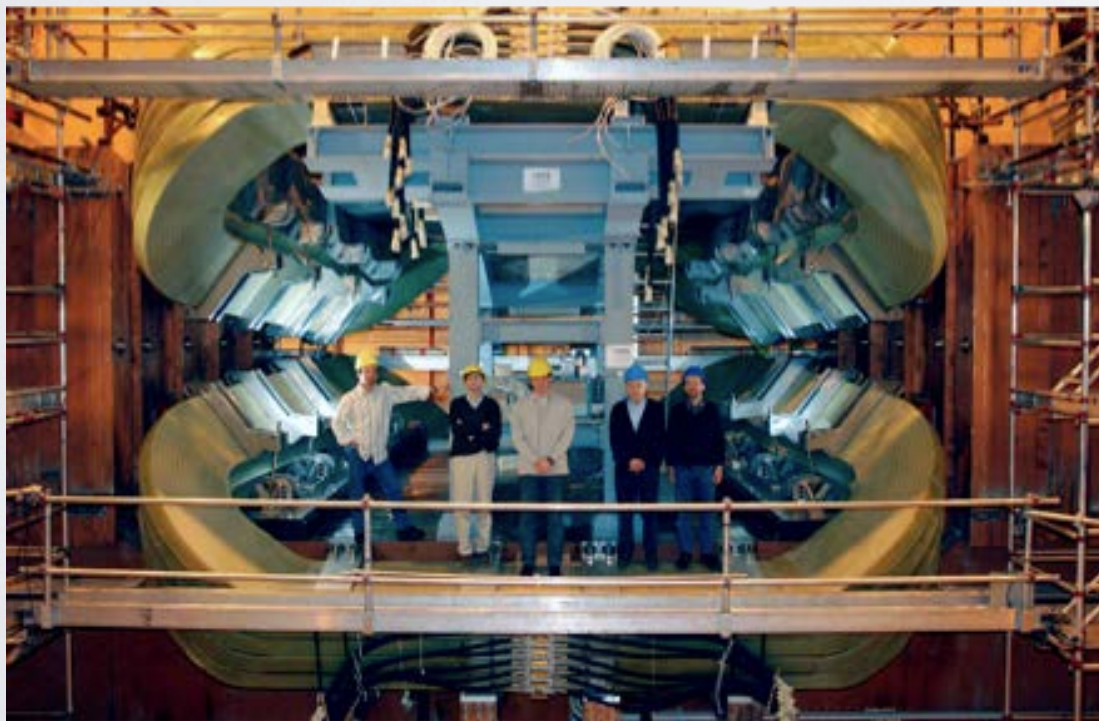
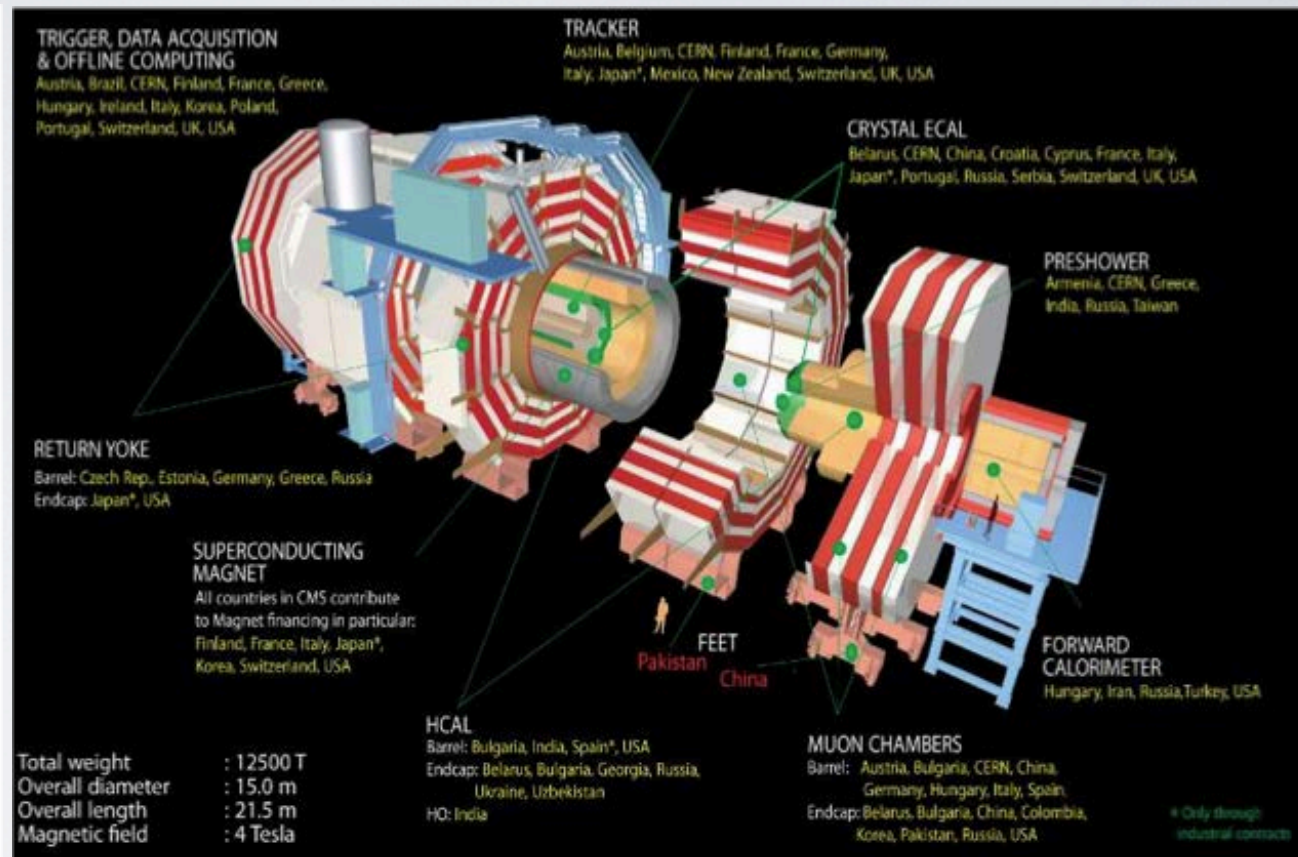
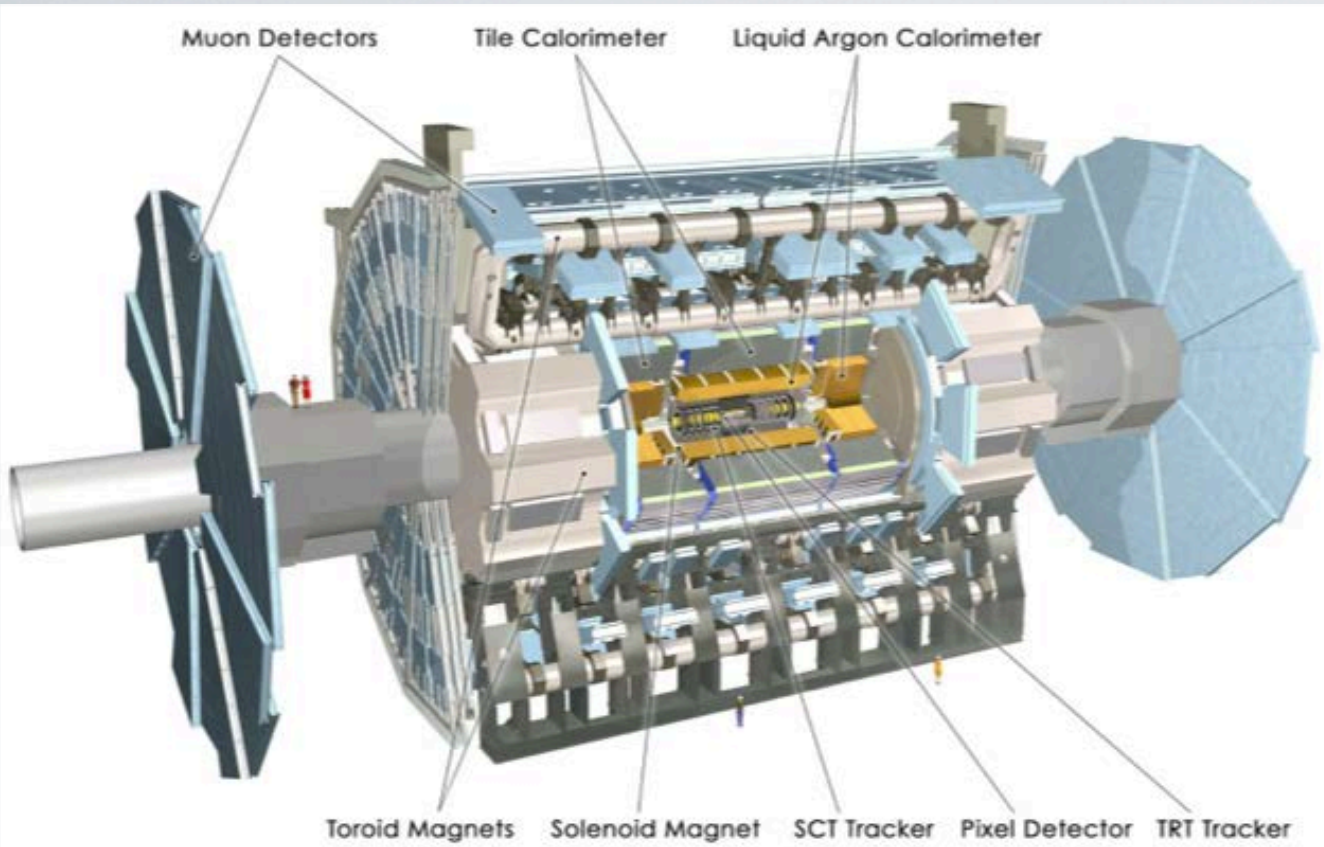
2012: 4 ТэВ x 4 ТэВ

2015: 6.5 ТэВ x 6.5 ТэВ

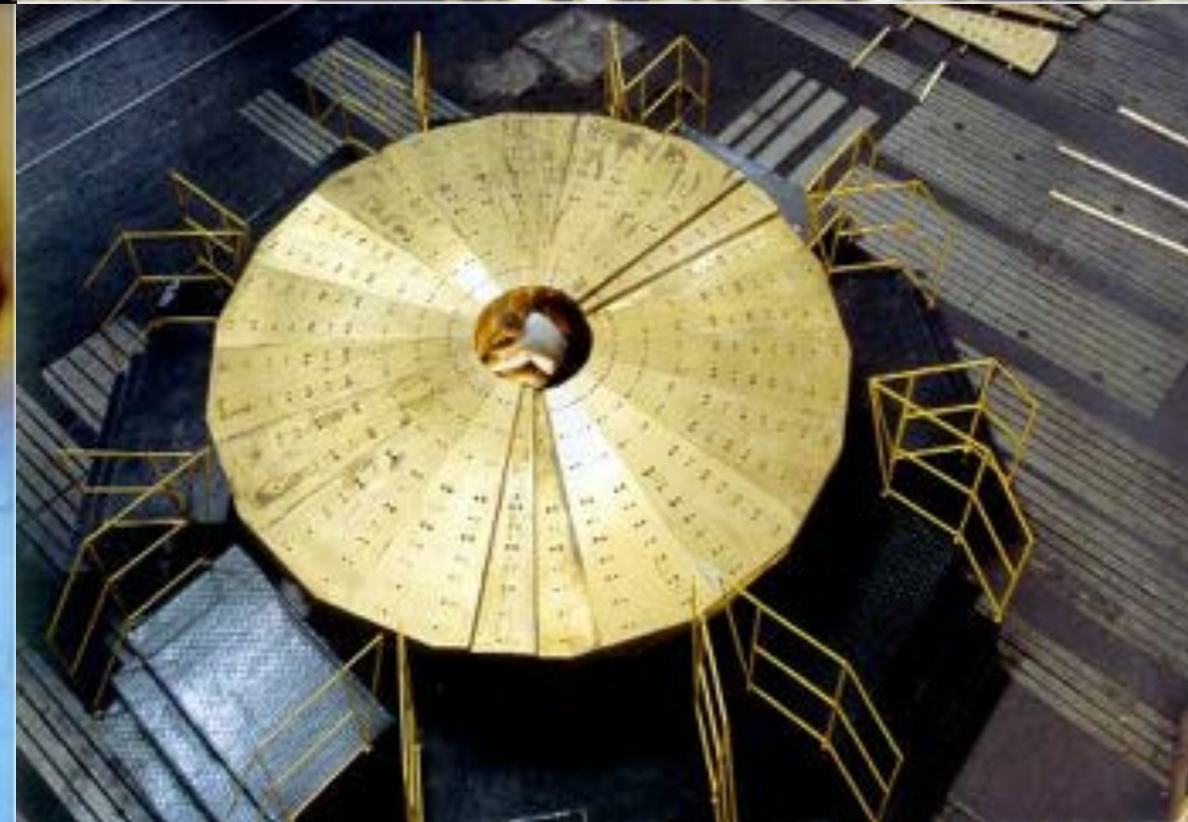


Experiments at the LHC



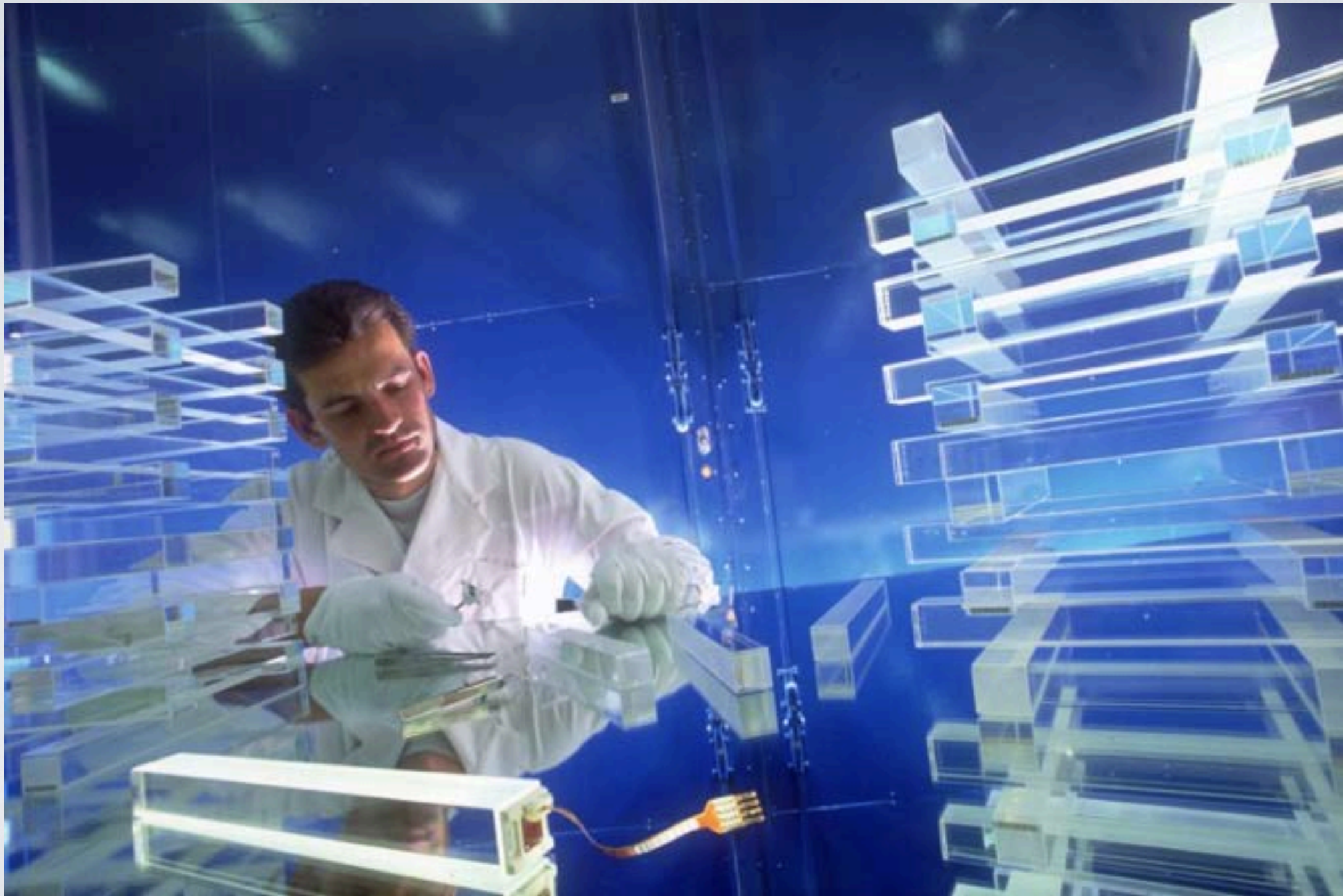


Конверсия ВПК для БАК (CMS)





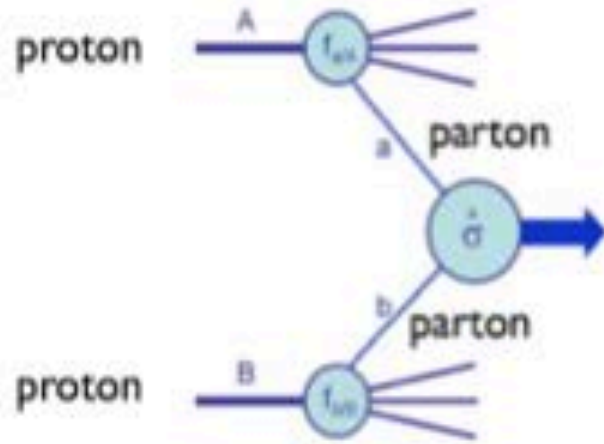
Конверсия ВПК для БАК : кристаллы для CMS ECAL



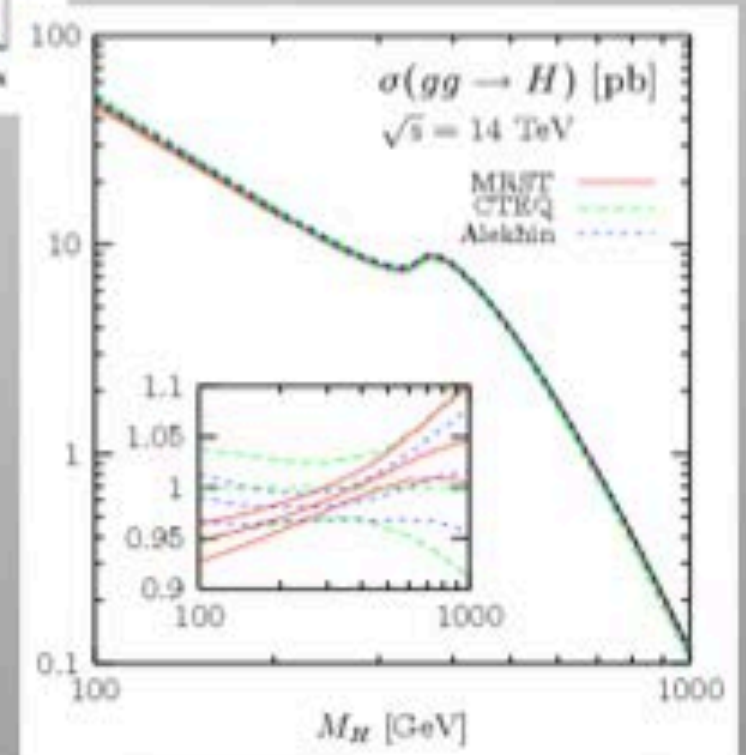
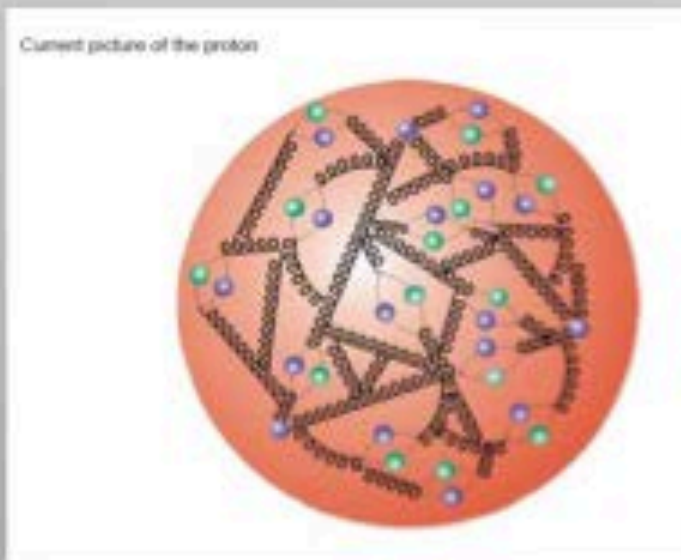
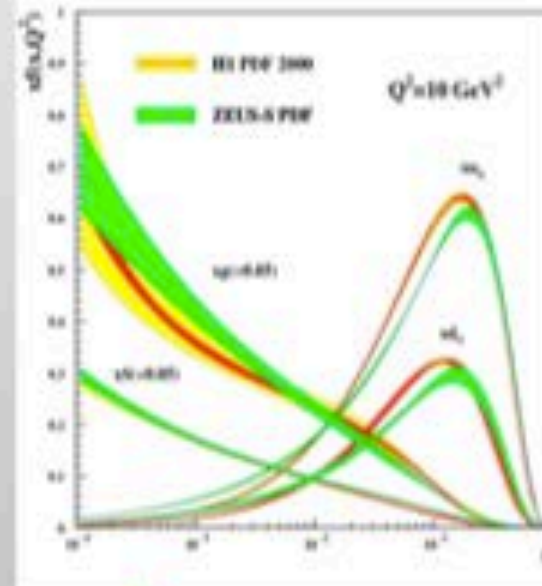
PP-соударения на БАК



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

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ И МАСШТАБЫ



Вероятность взаимодействия ~

поперечное сечение рассеяния ~ r^2

барн: $1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$ $1 \text{ пб} = 10^{-36} \text{ см}^2$

$1 \text{ мб} = 10^{-27} \text{ см}^2$ $1 \text{ Фб} = 10^{-39} \text{ см}^2$

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

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

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

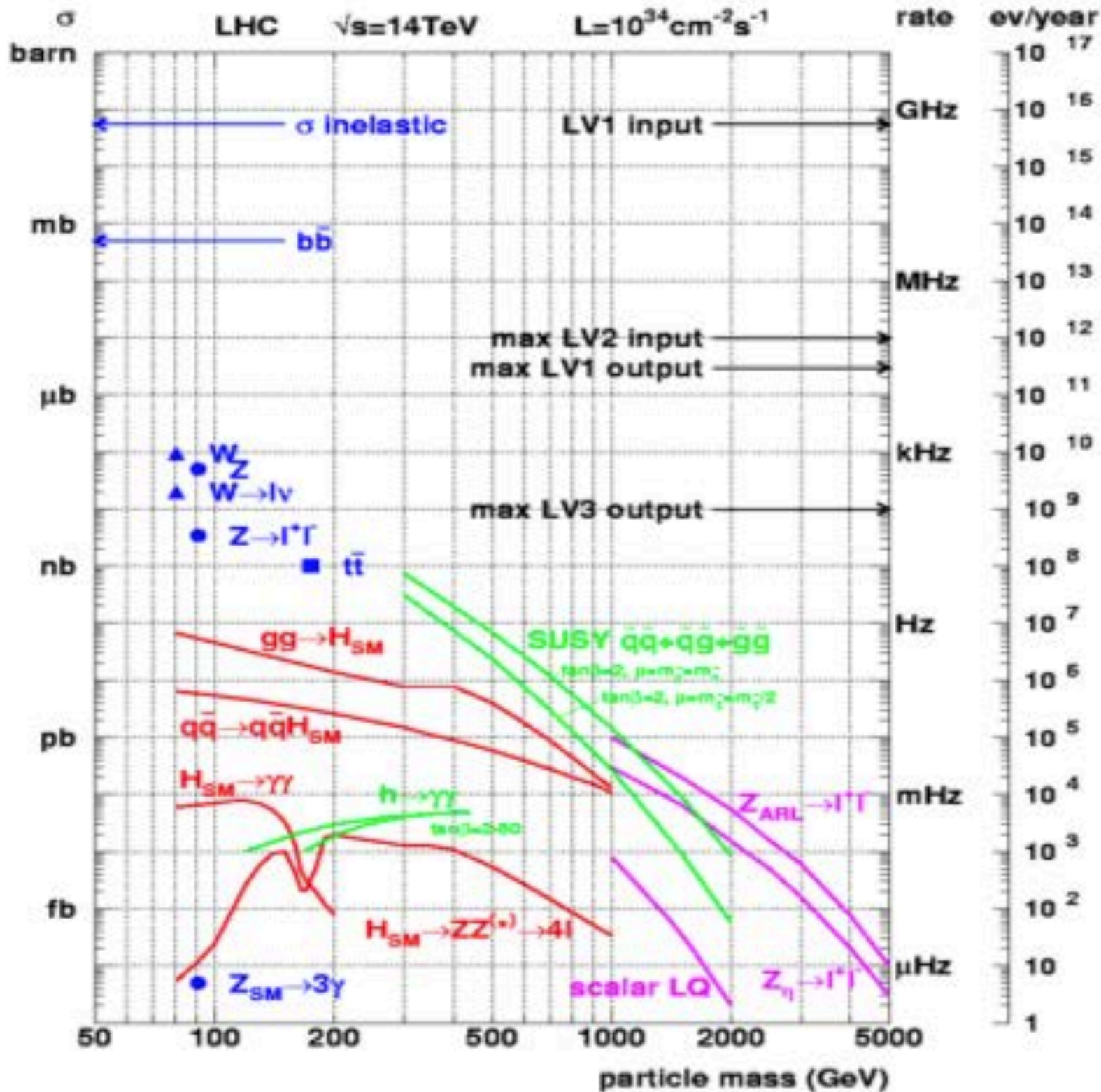
Частота реакций = светимость \times сечение

Бозон Хиггса:

сечение ($m = 125 \text{ ГэВ}$ при 7 ТэВ) $\approx 10 \text{ пб}$

1 событие за 2 мин

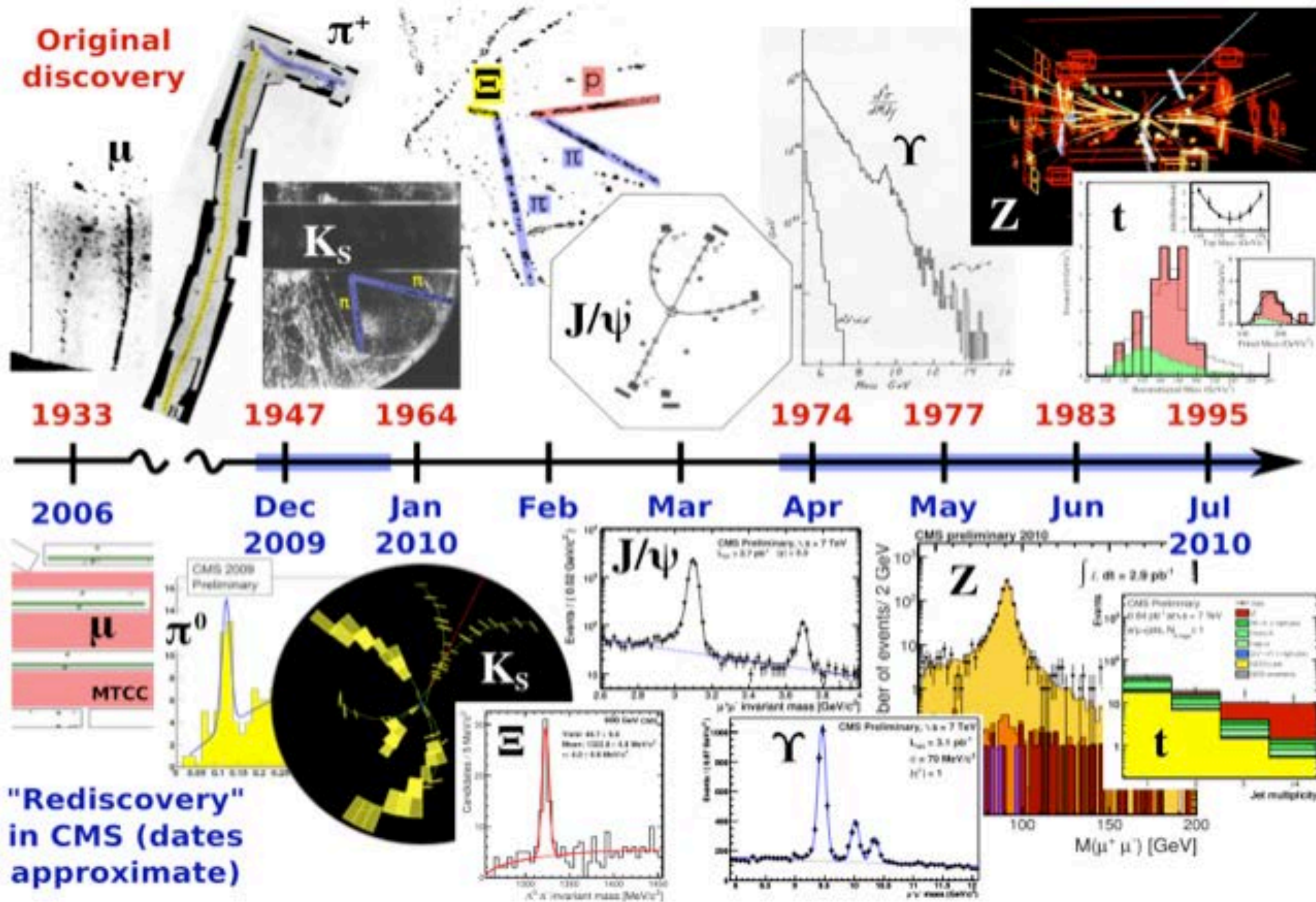
сечения рассеяния на БАК

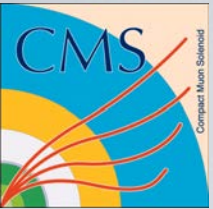


“Well known” processes, don’t need to keep all of them ...

New Physics!!
This we want to keep!

БАК: НАЧАЛО - "ПЕРЕ-ОТКРЫТИЕ" СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ





Основные цели Большого адронного коллайдера

Главные цели БАК:
Бозон Хиггса SM

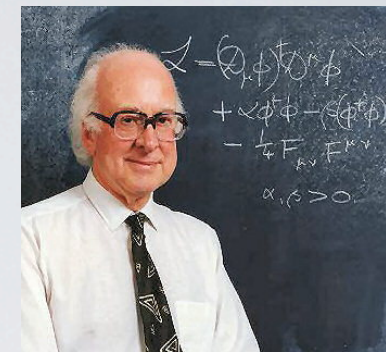
новые частицы и взаимодействия
за пределами Стандартной Модели

а также:

проверка SM при новых энергиях
поиски новой динамики SM

Спонтанное нарушение симметрии

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)



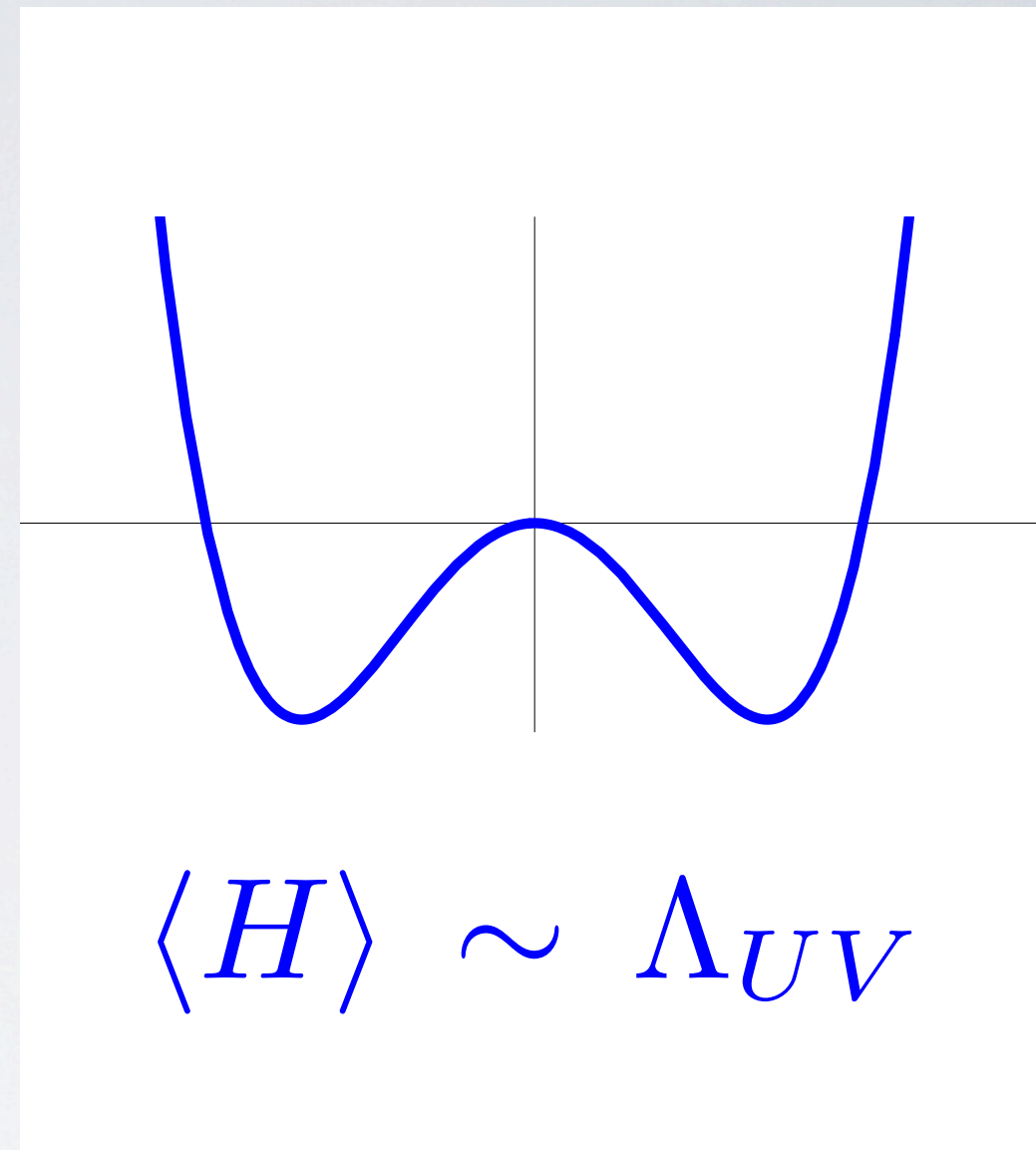
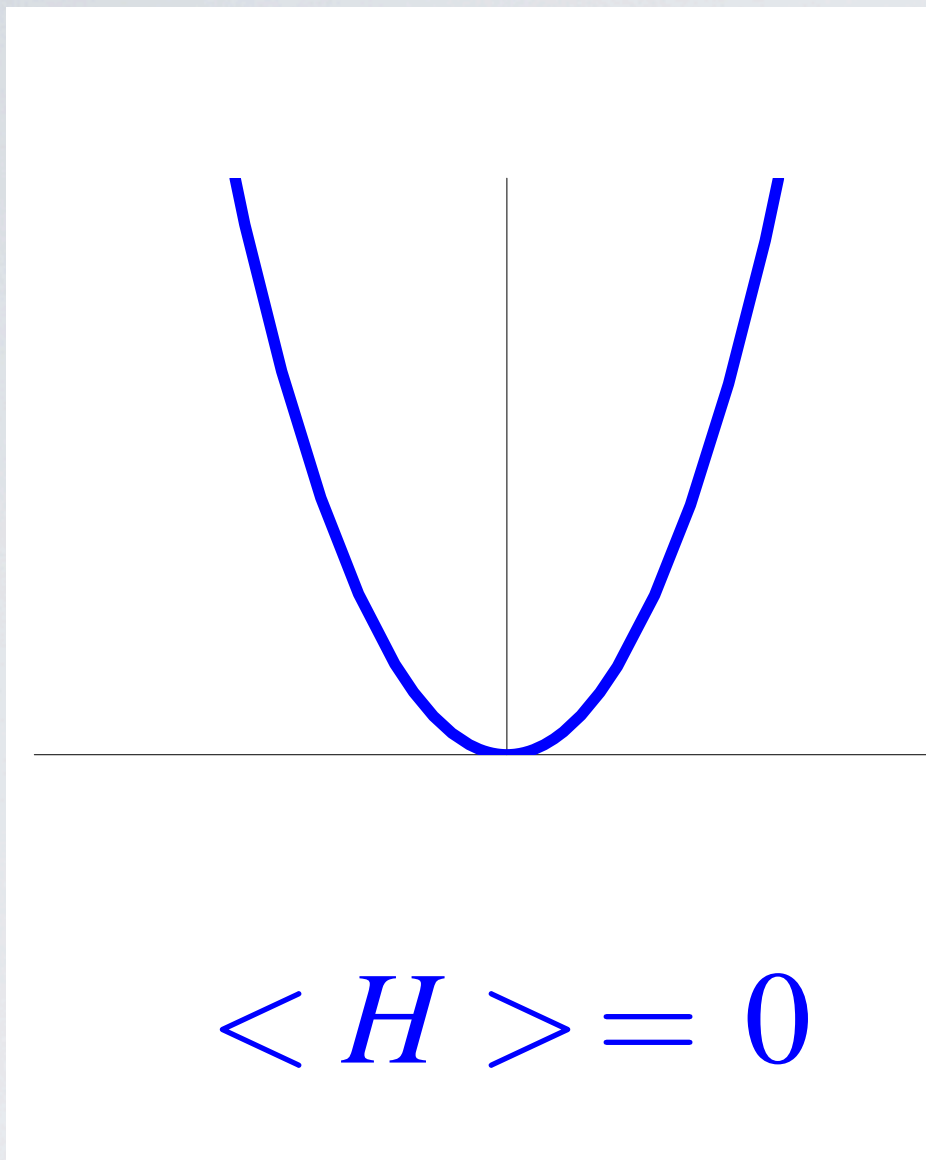
С. Вайнберг (1967) и А. Салам (1968) применили механизм Хиггса к электрослабой теории Ш. Глэшоу (1962)

->

Стандартная Модель с тяжелыми векторными бозонами W и Z



Спонтанное нарушение симметрии

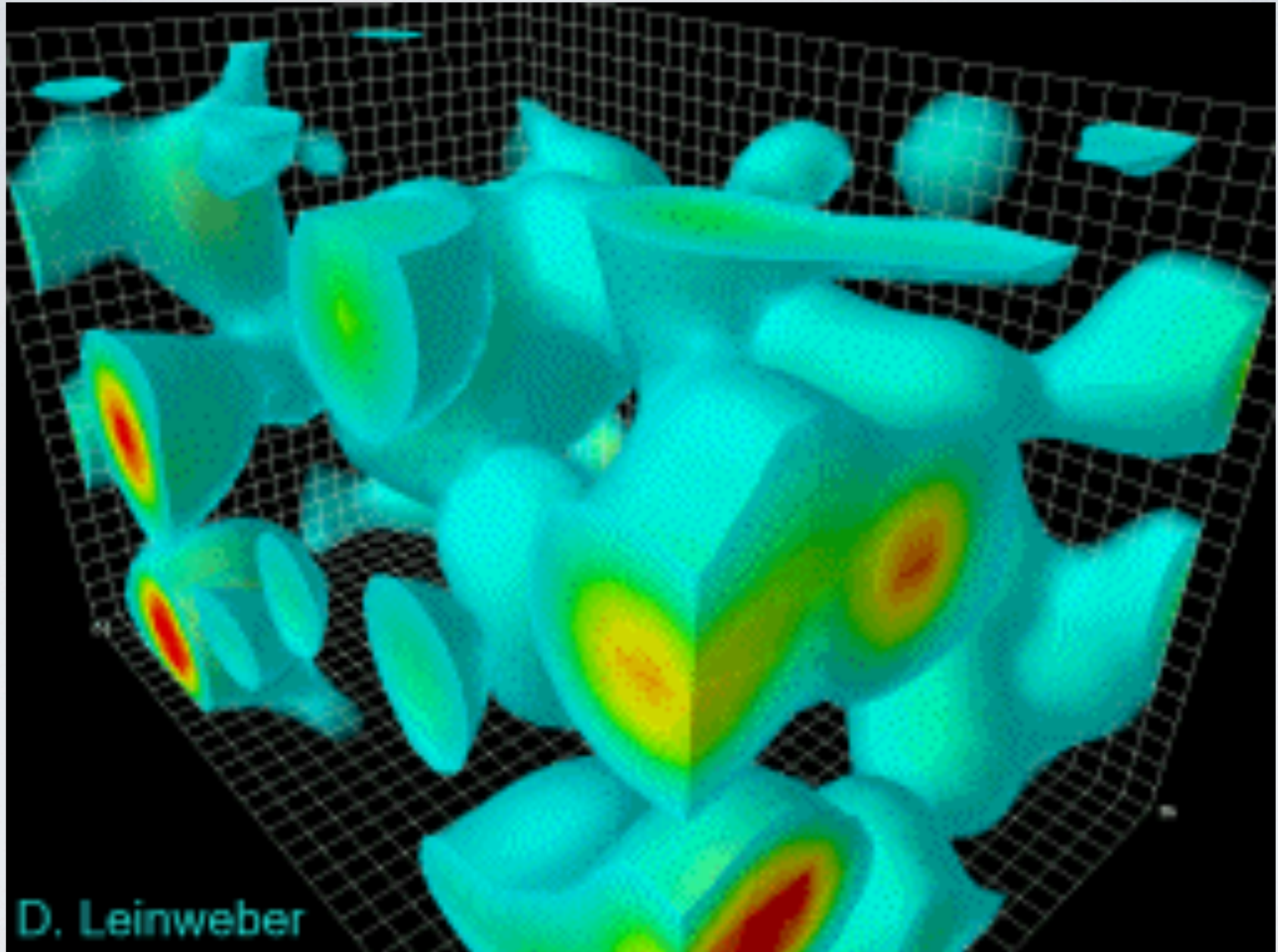


квантовые флуктуации

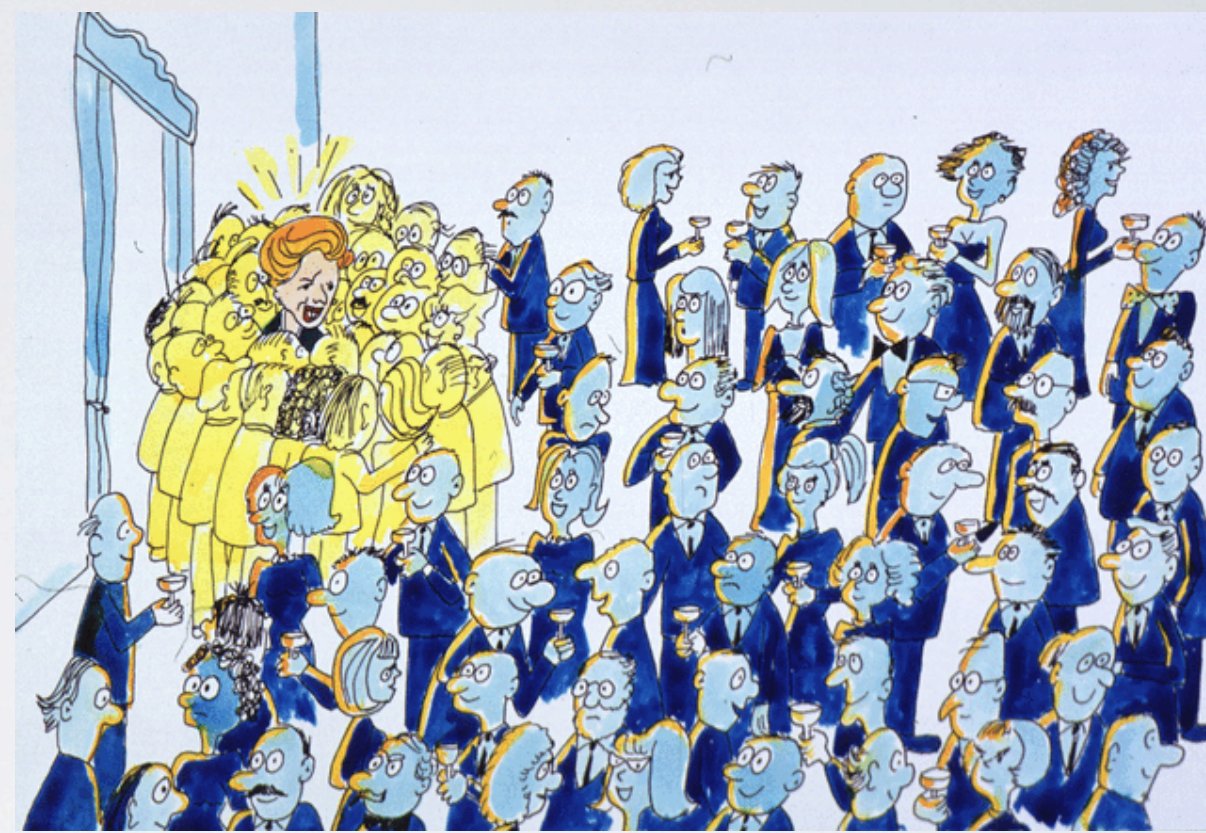
->

**несимметричное
вакуумное состояние**

Физический вакуум



Спонтанное нарушение симметрии





Бозон Хиггса Стандартной модели

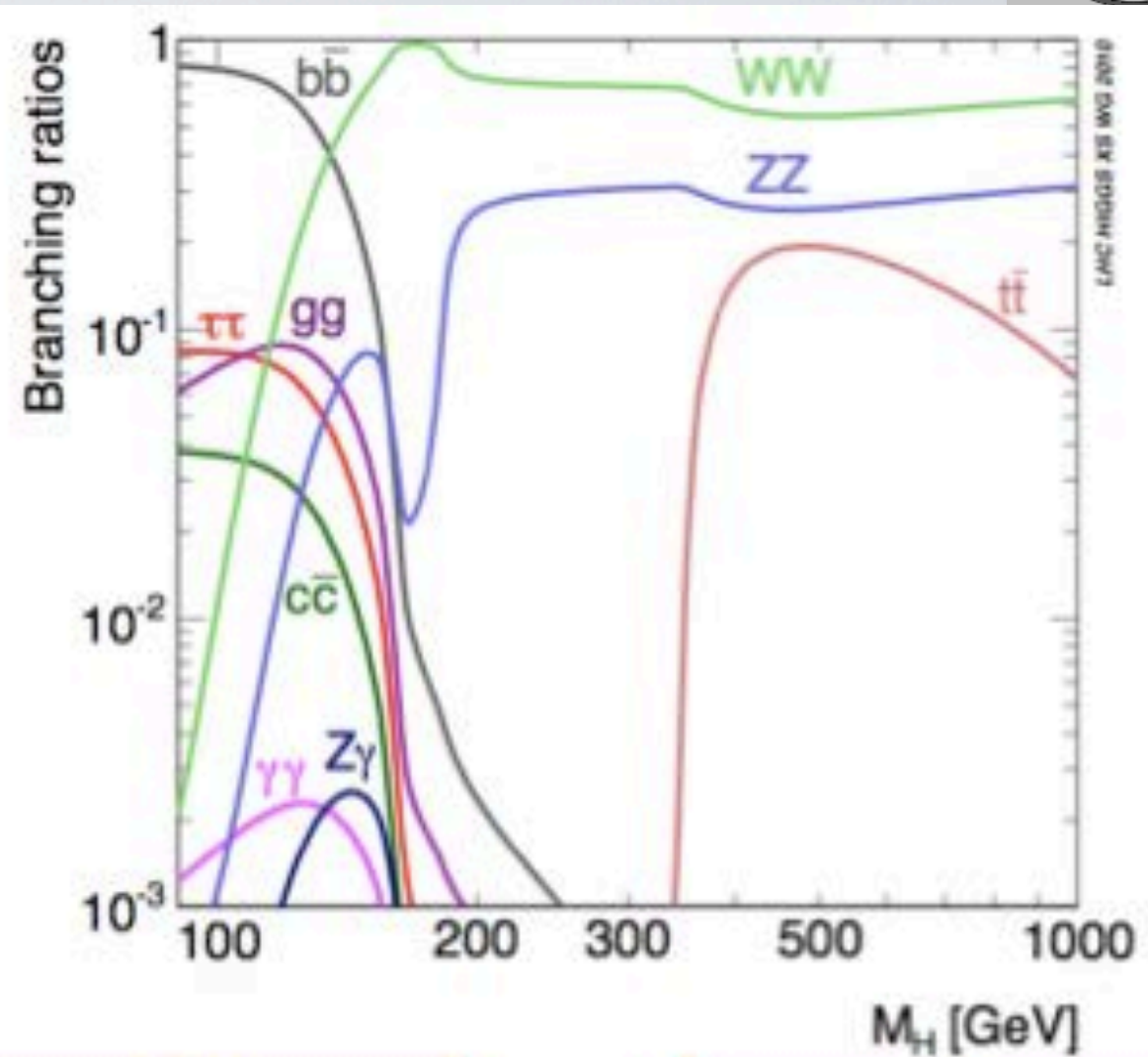
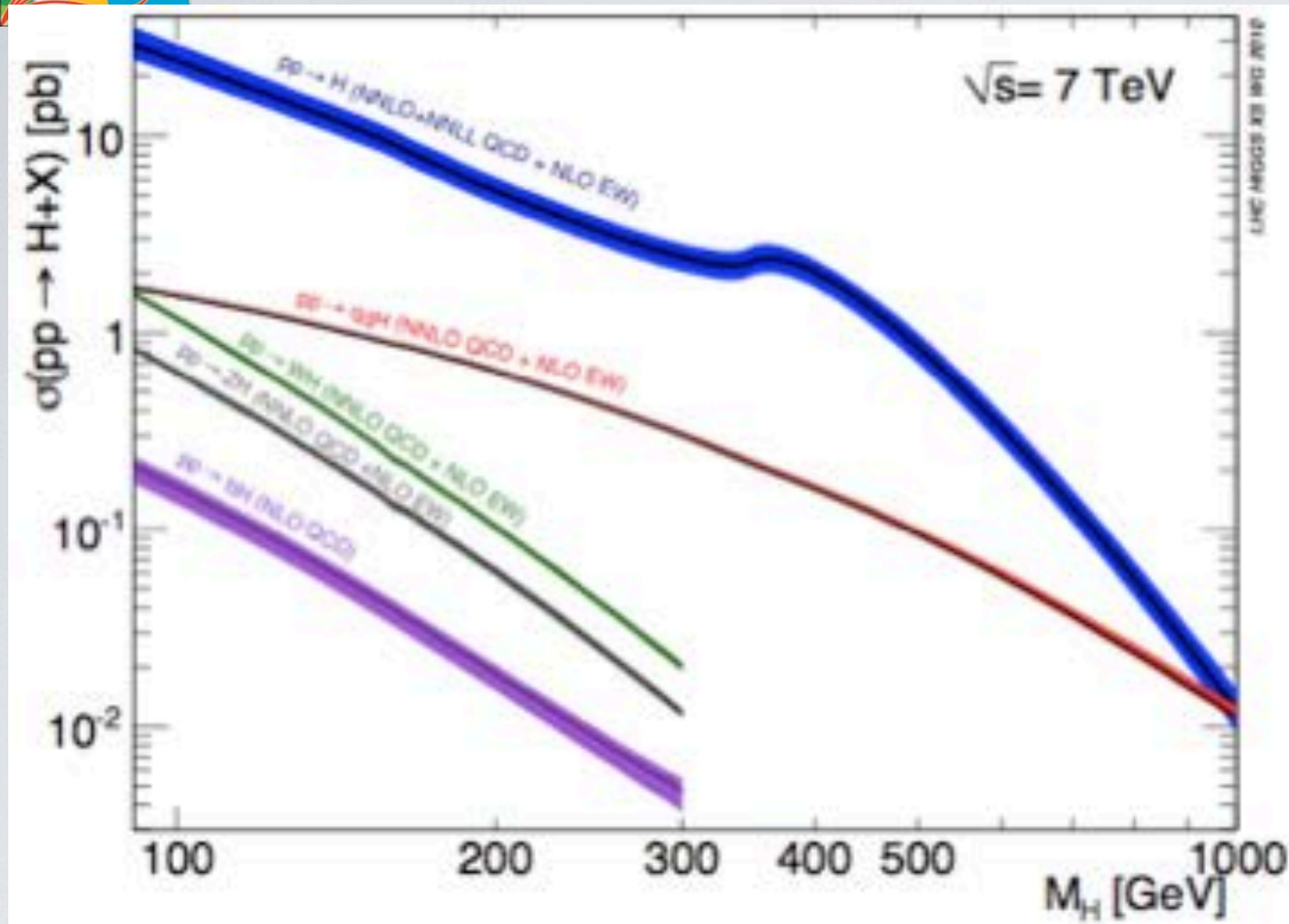
основная роль бозона Хиггса СМ:
получение ненулевых масс векторных бозонов не
нарушая калибровочную инвариантность

а также:

- массы лептонов и кварков
- восстановление унитарности

(закона сохранения вероятности) при рассеянии
тяжелых векторных бозонов

Бозон Хиггса: образование и распады

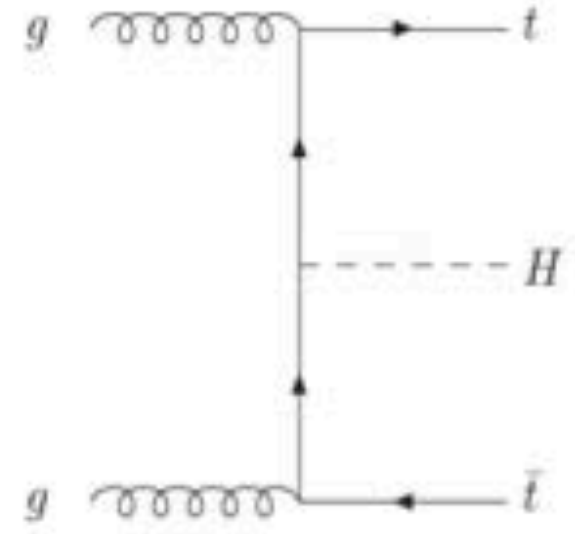
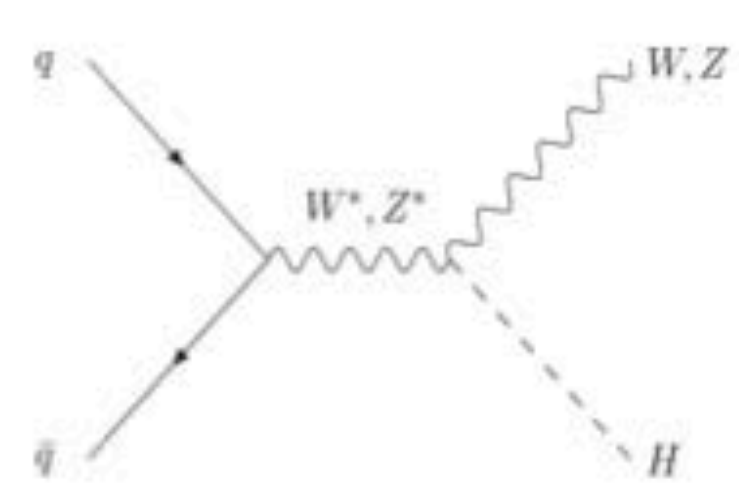
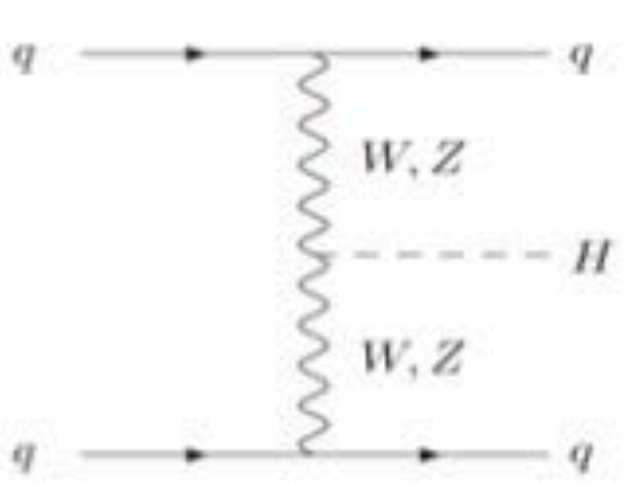
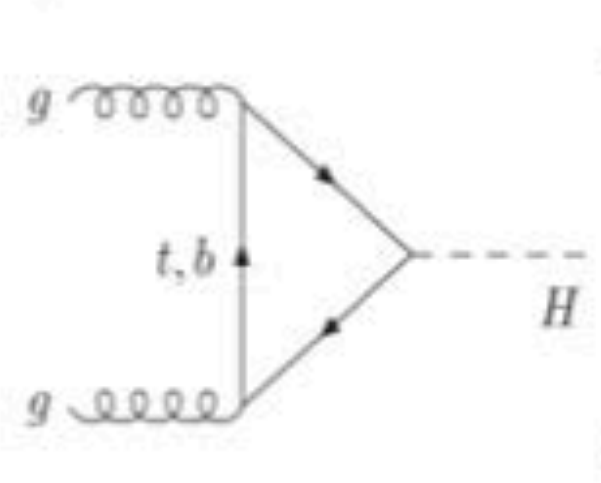


gluon-fusion

VBF

VH

ttH



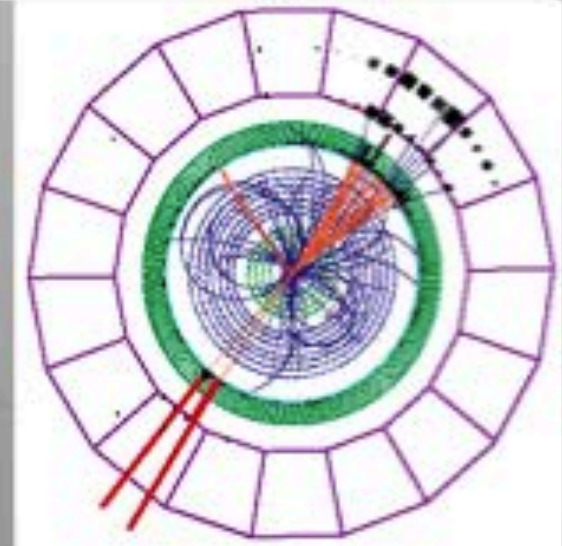
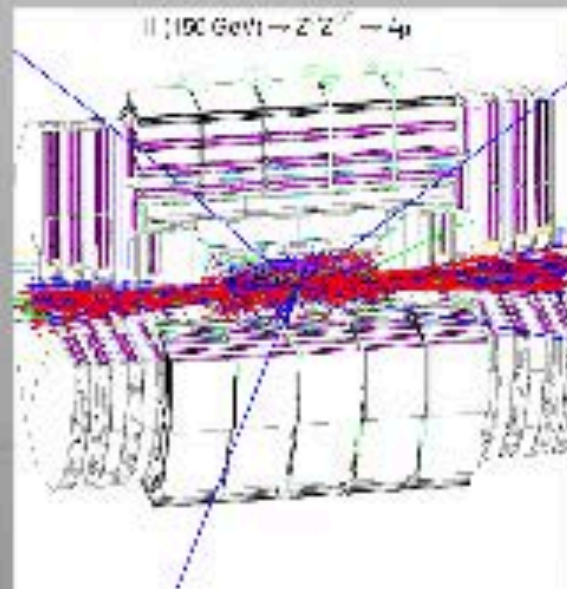
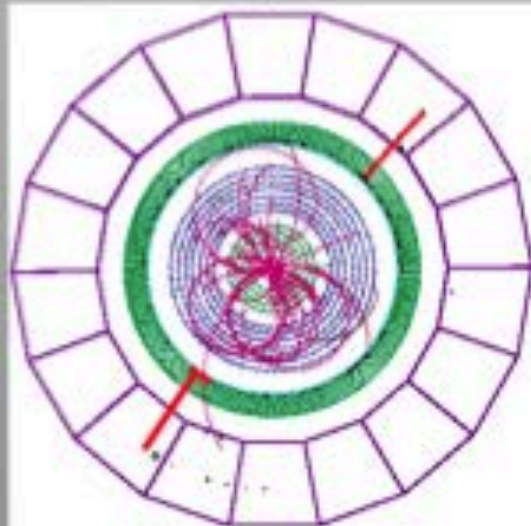
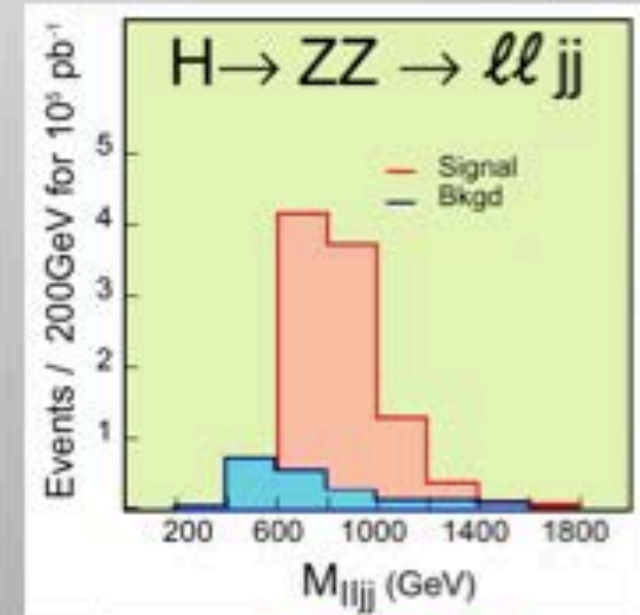
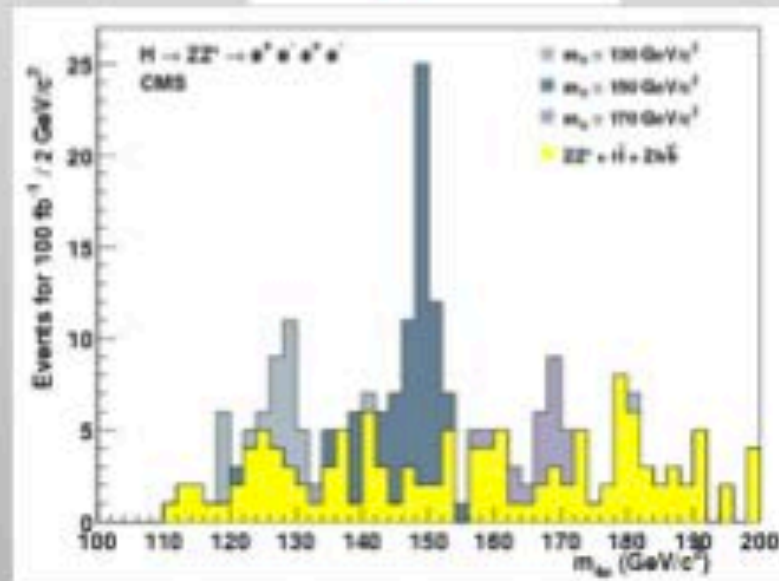
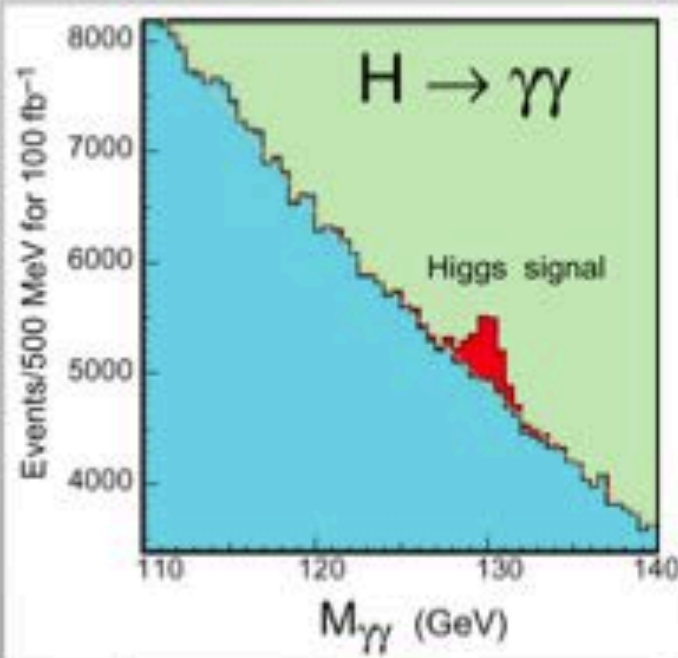
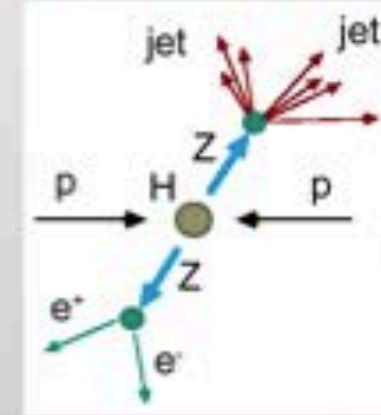
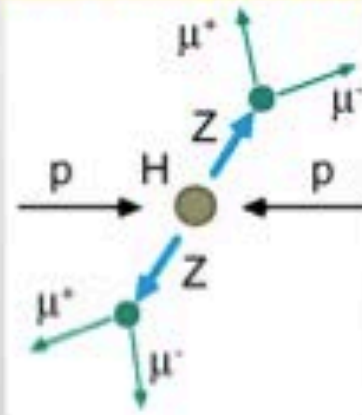
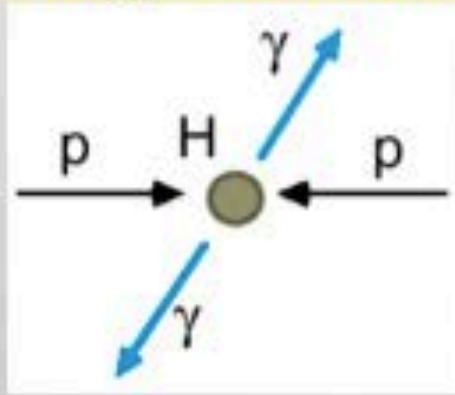
Поиски бозона Хиггса



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

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

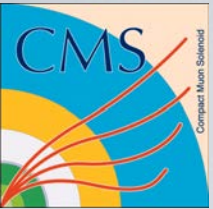
High $M_H > \sim 500 \text{ GeV}/c^2$





Channel	Mass Range (GeV)	Dataset (fb ⁻¹)
H → γγ	[110-150]	1.7
qq-→VH; H → bb	[110-135]	1.1
H → ττ	[110-145]	1.6
H → WW → 2l 2ν	[110-600]	1.5
H → ZZ → 4l	[110-600]	1.7
H → ZZ → 2l 2τ	[180-600]	1.1
H → ZZ → 2l 2j	[226-600]	1.6
H → ZZ → 2l 2ν	[250-600]	1.5

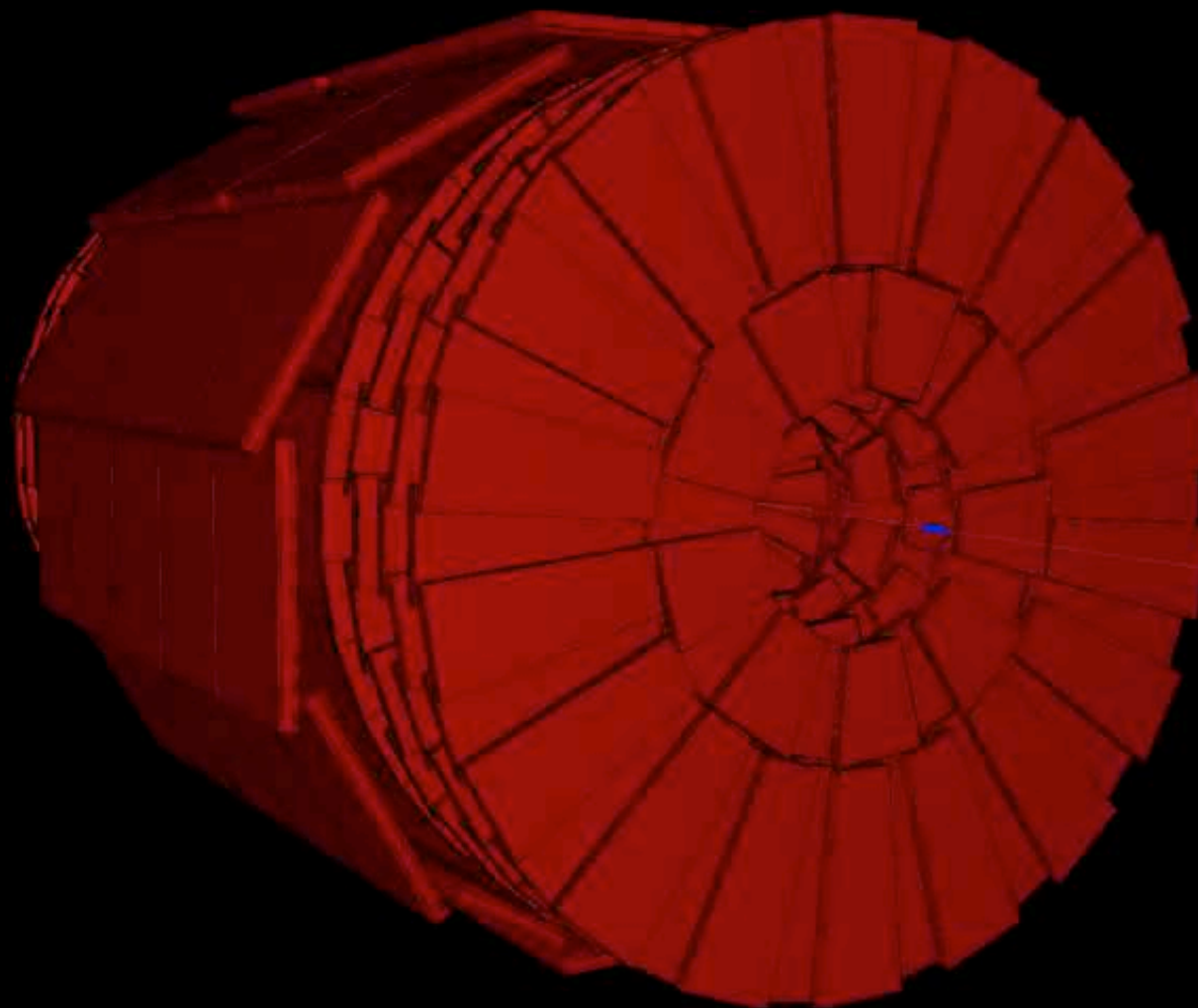
красное: наиболее чувствительные каналы

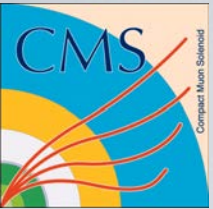


Поиски бозона Хиггса на БАК (CMS)



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>ZZ>4mu candidate

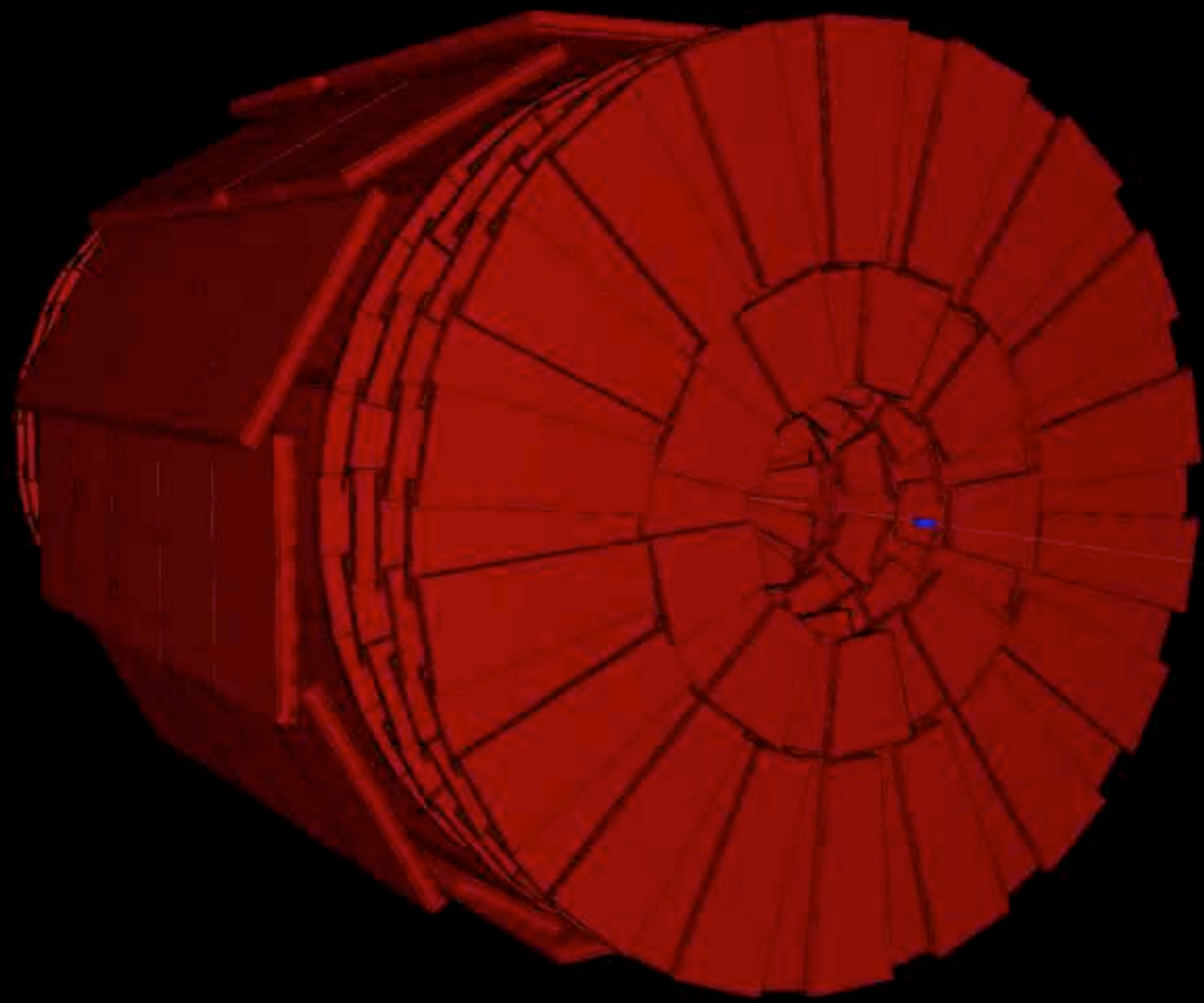


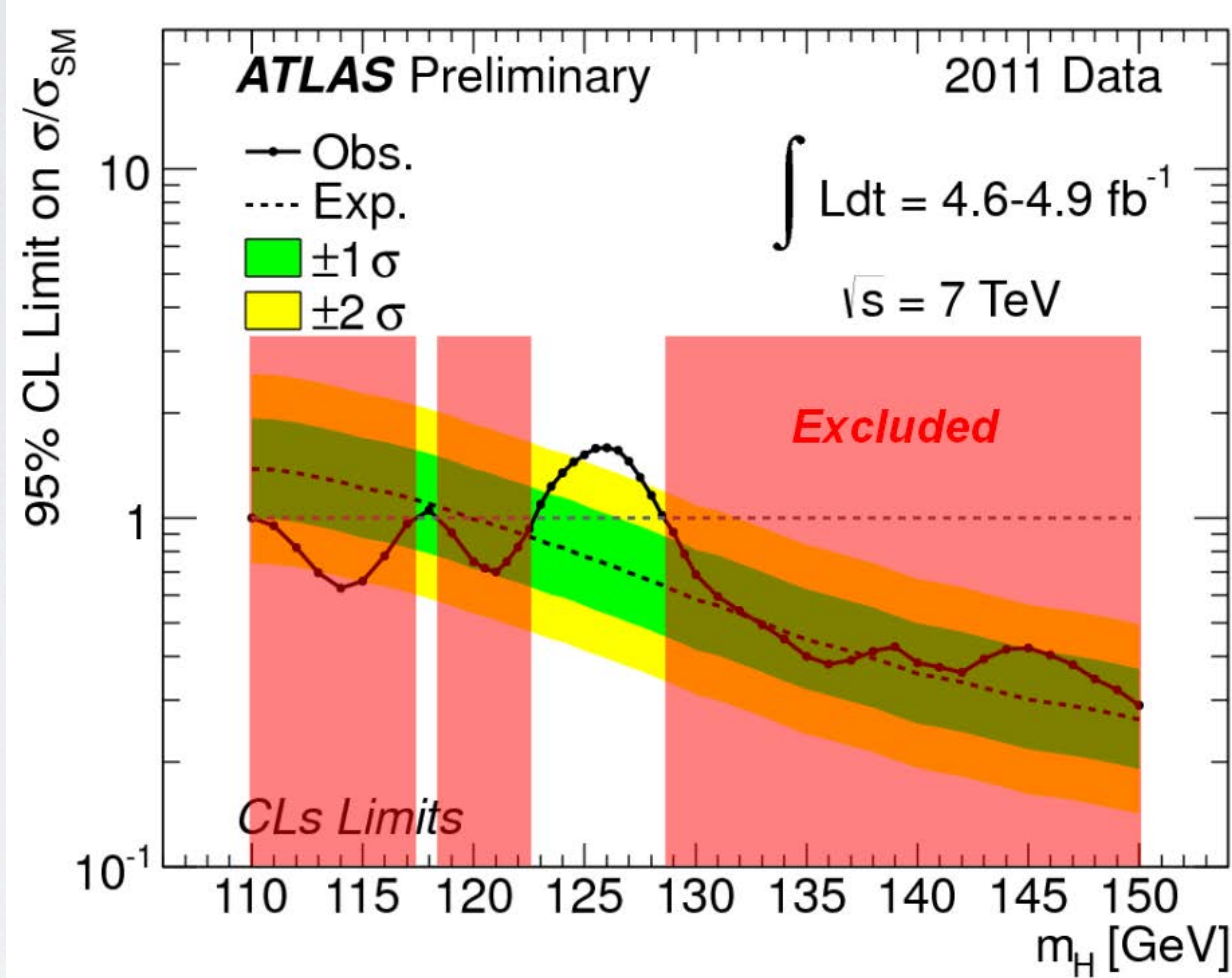
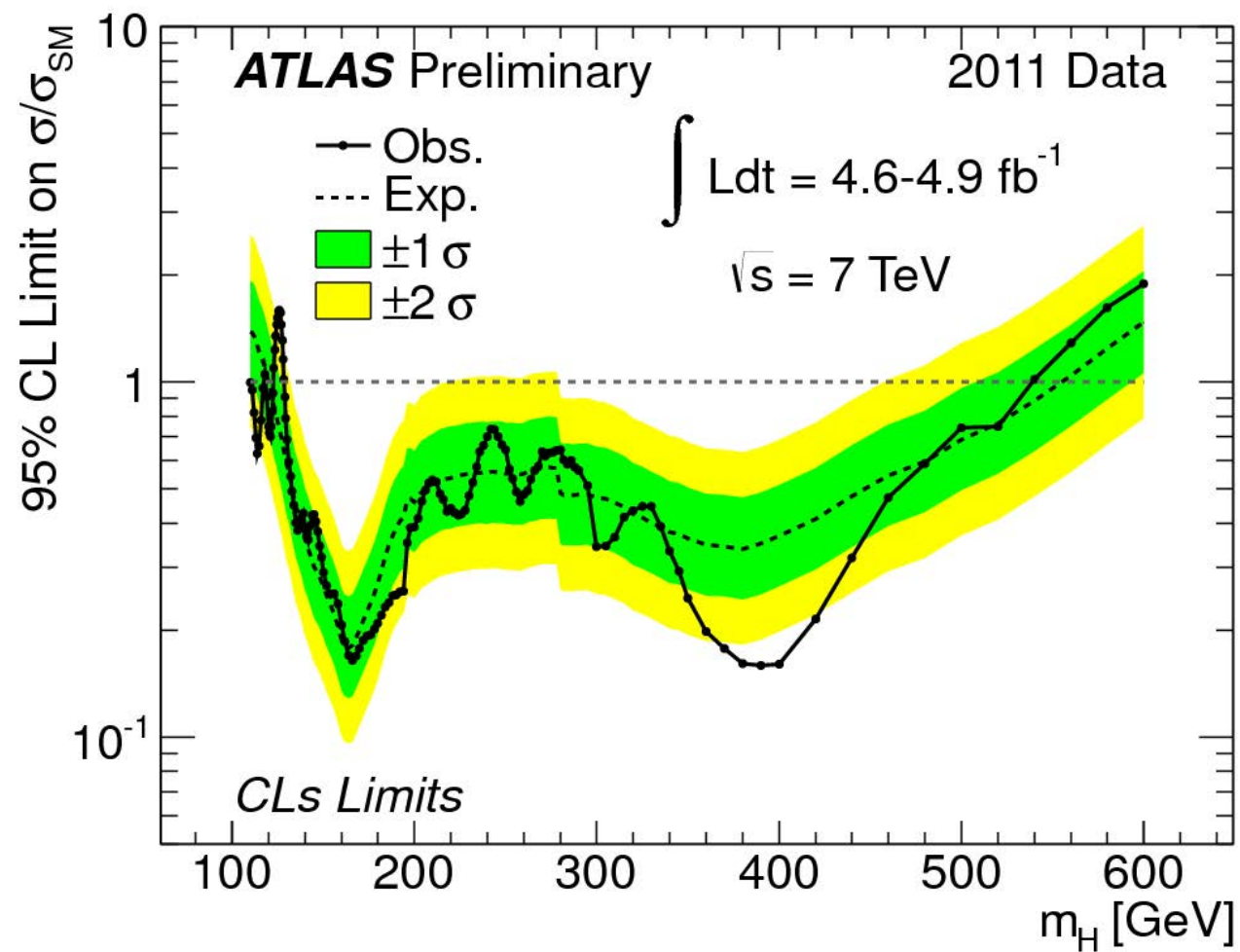


поиски бозона Хиггса на БАК (CMS)



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





АТЛАС: исключены массы

[110-117.5]

ГэВ

[118.5-122.5]

ГэВ

[129-539]

[130-486] ГэВ

95%

99%

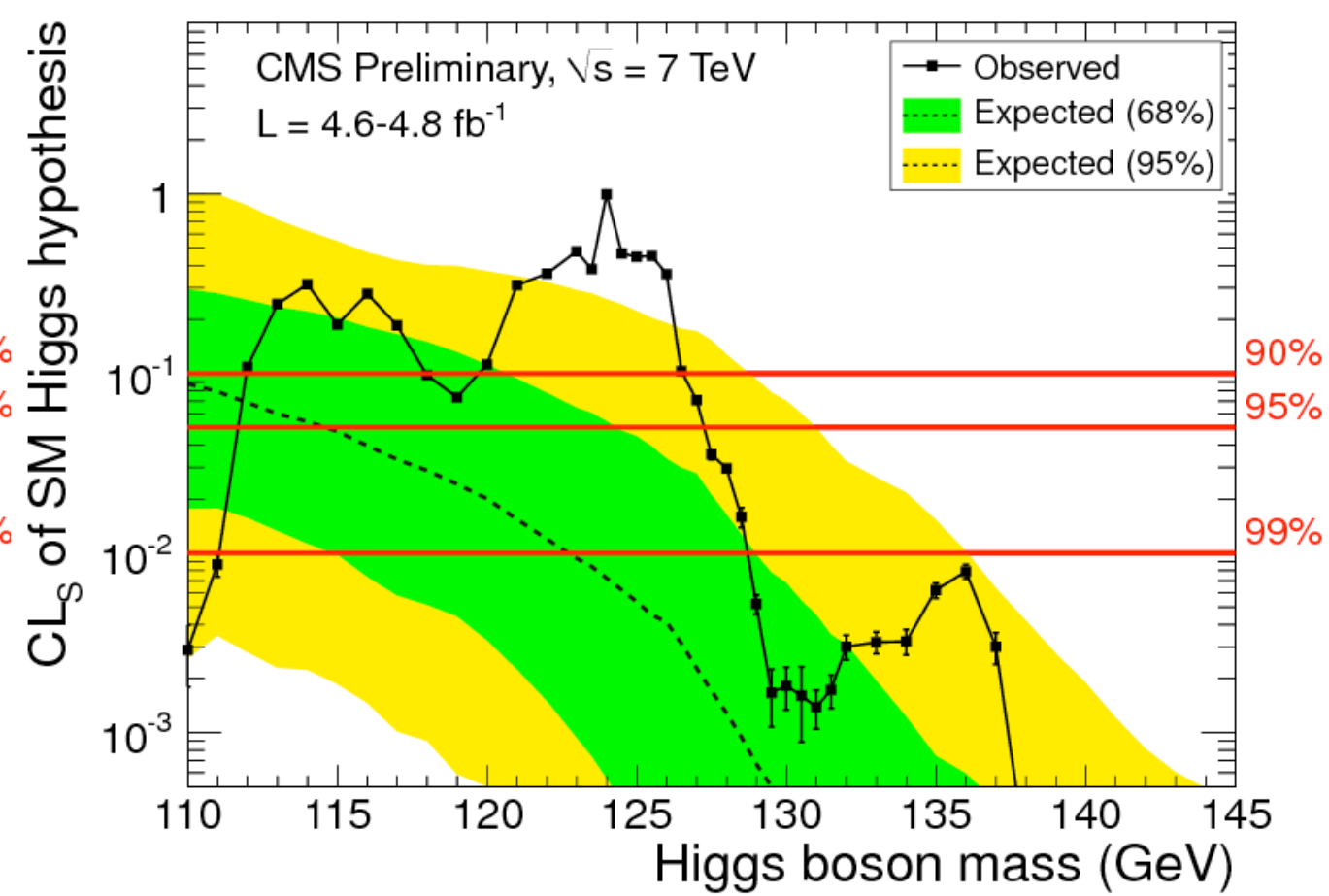
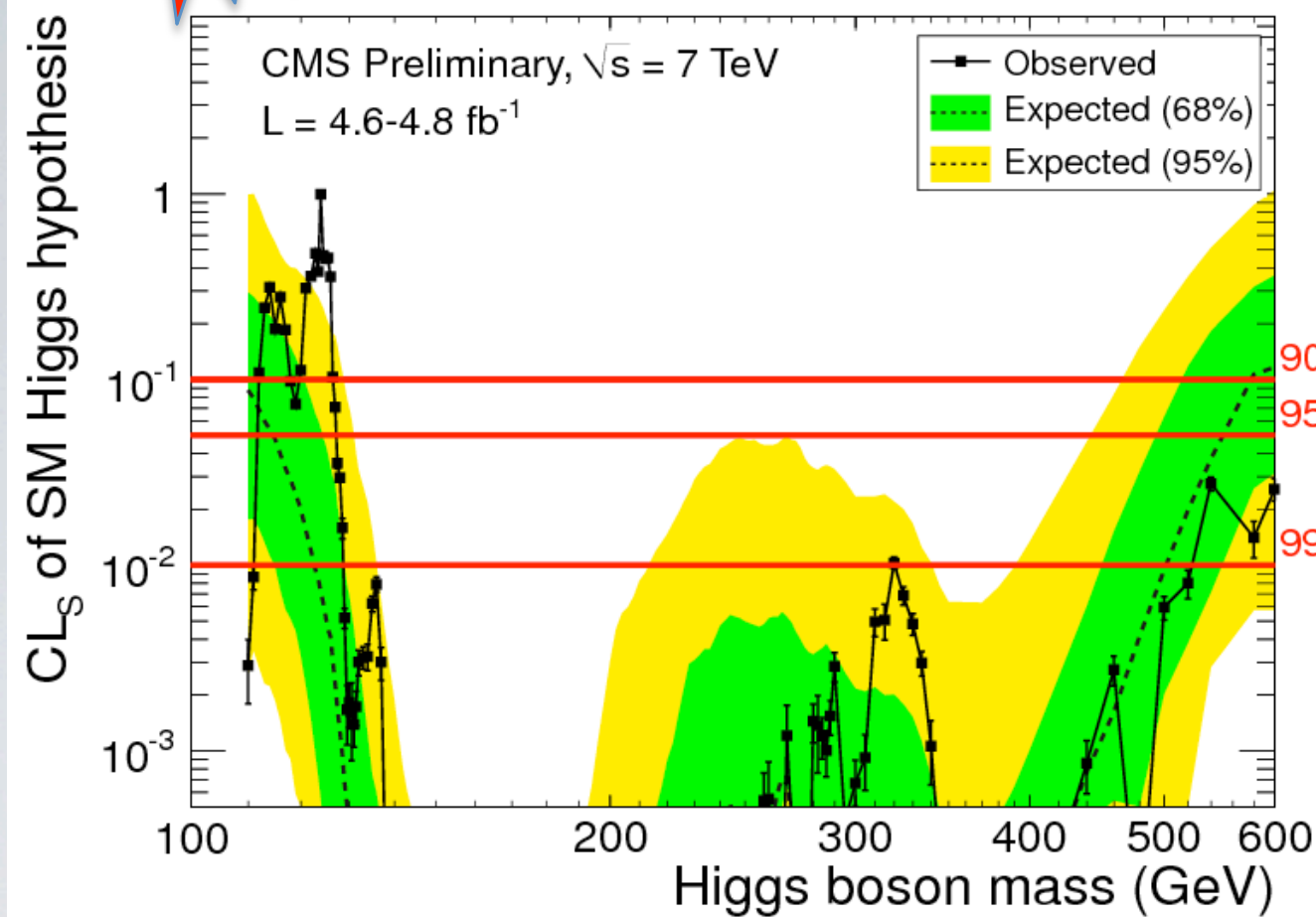
все еще разрешены массы

[117.5-118.5]

ГэВ

[122.5-129]

ГэВ



CMS: исключены массы

[127.5-600]
95%

[129-525] ГэВ
99%

разрешены массы

[114.4-127.5]

ГэВ

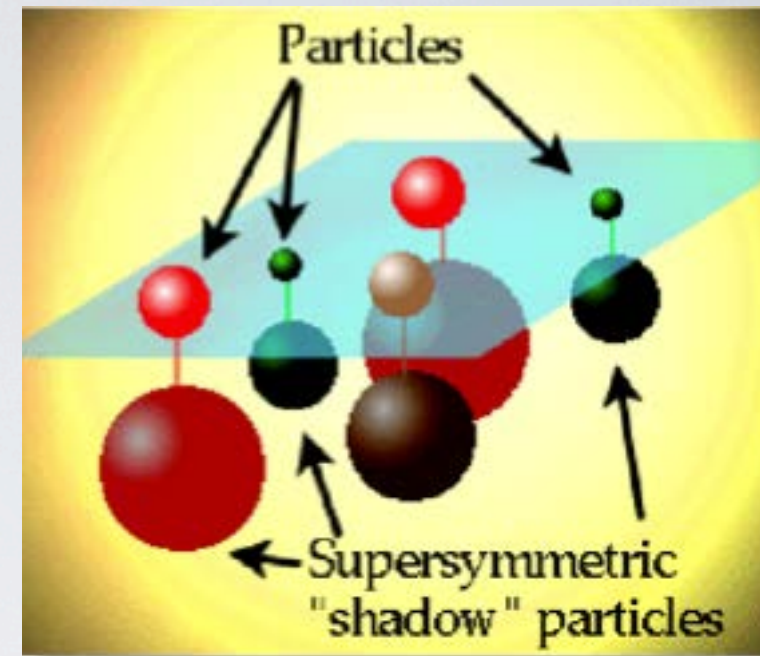


Новая физика? суперсимметрия?

Суперсимметрия:
симметрия между бозонами и
фермионами

$$Q \text{ |boson\rangle} = \text{|fermion\rangle}$$

$$Q \text{ |fermion\rangle} = \text{|boson\rangle}$$



Простейшее обобщение СМ:
Минимальная суперсимметричная
Стандартная Модель (MSSM)

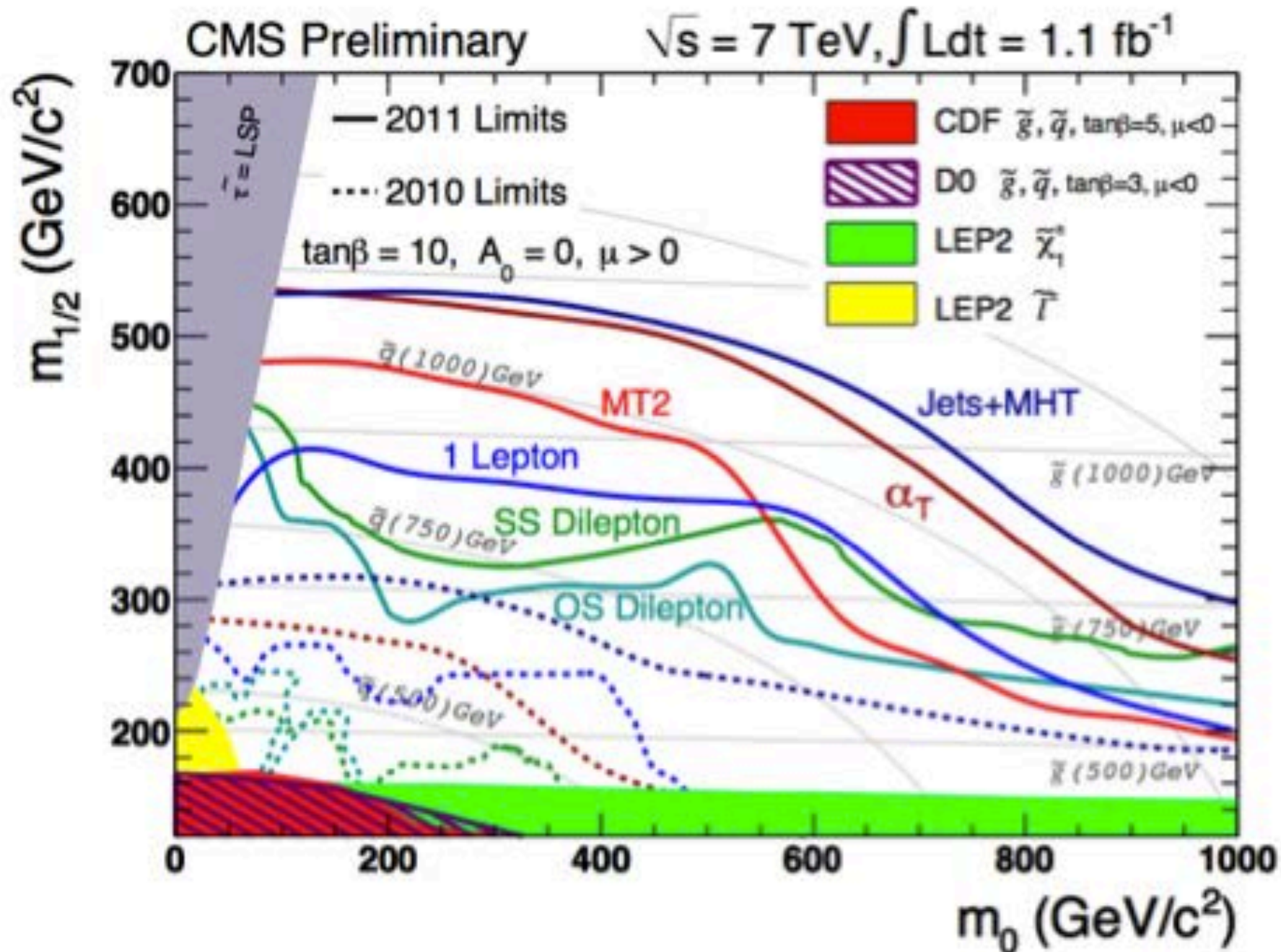
СуперСимметрия

“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 $\begin{cases} \tilde{L}_i = (\tilde{\nu}, \tilde{e})_L \\ \tilde{e}_i = \tilde{e}_R \end{cases}$	leptons $\begin{cases} L_i = (\nu, e)_L \\ e_i = e_R \end{cases}$	1 1	2 1	-1 2
Matter Q_i U_i D_i	squarks $\begin{cases} \tilde{Q}_i = (\tilde{u}, \tilde{d})_L \\ \tilde{U}_i = \tilde{u}_R \\ \tilde{D}_i = \tilde{d}_R \end{cases}$	quarks $\begin{cases} Q_i = (u, d)_L \\ U_i = u_R^c \\ D_i = d_R^c \end{cases}$	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 $\begin{cases} \tilde{H}_1 \\ \tilde{H}_2 \end{cases}$	1 1	2 2	-1 1

Поиски суперсимметрии на БАК

- Limits have been obtained in the constrained MSSM



- Squarks and gluinos up to 1 TeV and beyond are excluded at 95% CL

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

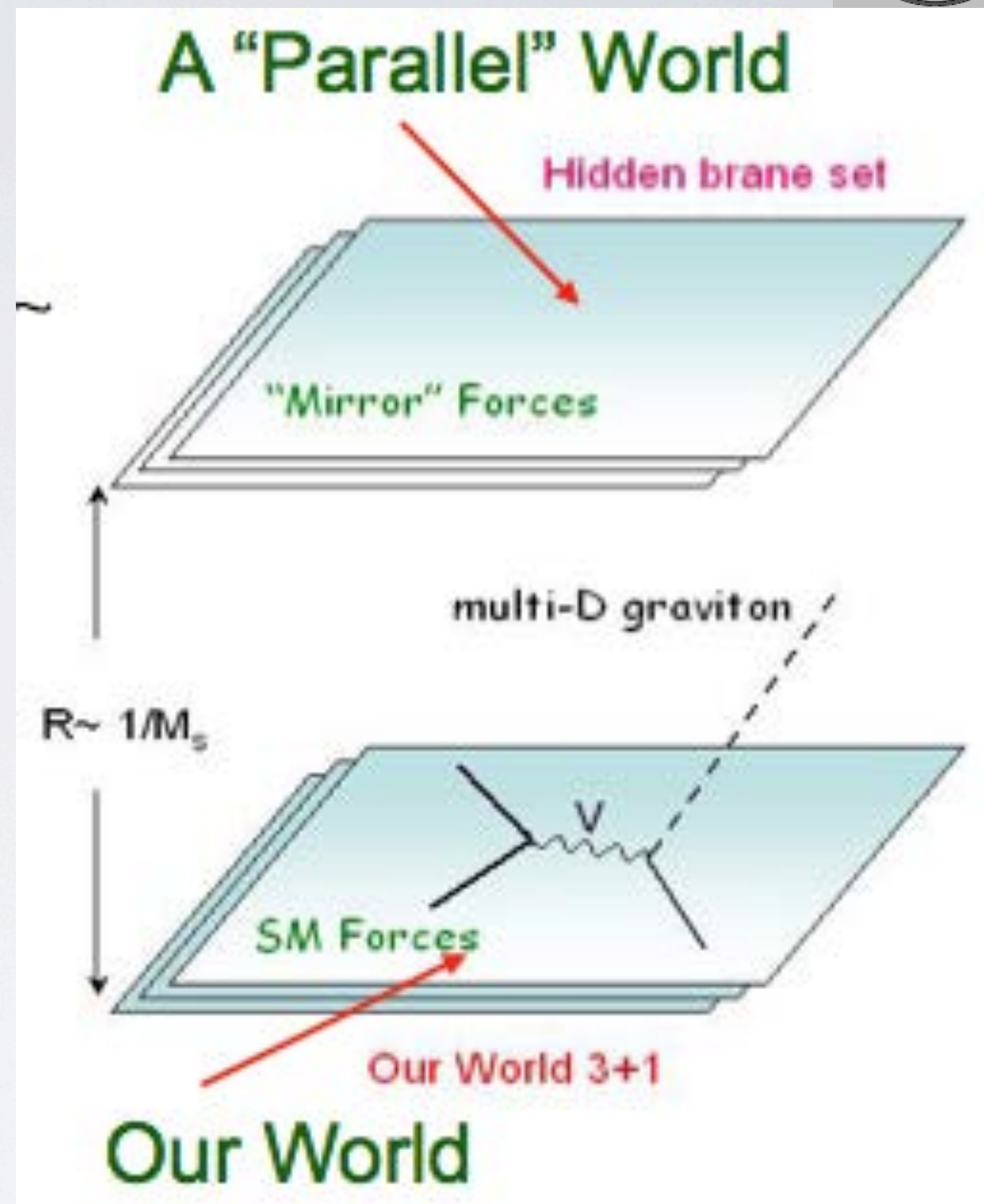
константа Ньютона: G_D

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

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

Радиус Шваршильда R_S :

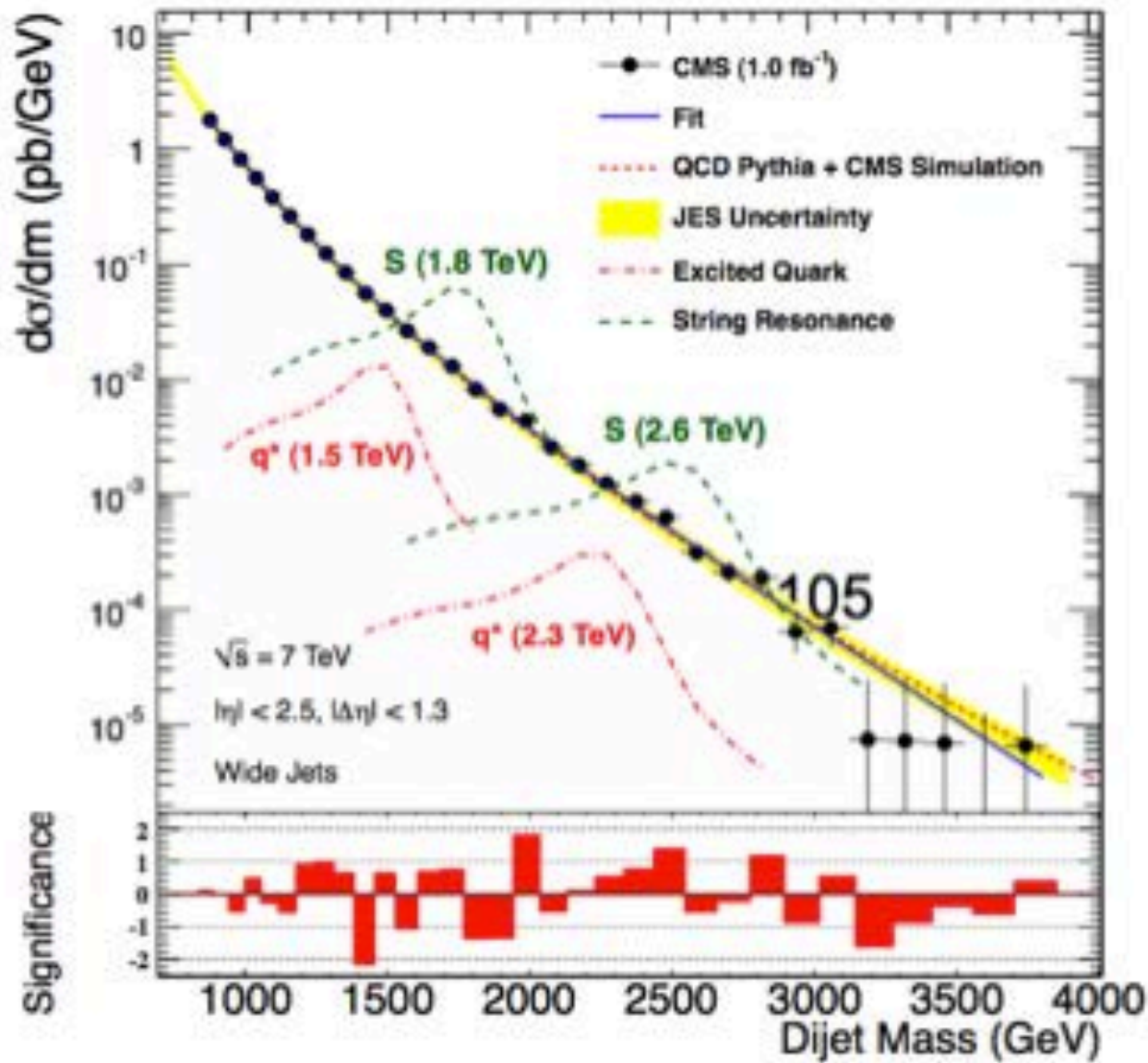
$$R_S = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{8\Gamma[(n+3)/2]}{(n+2)} \frac{G_D \sqrt{s}}{c^4} \right)^{1/(\kappa+1)}$$



Рассеяние на прицельных расстояниях $b \sim R_S$

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

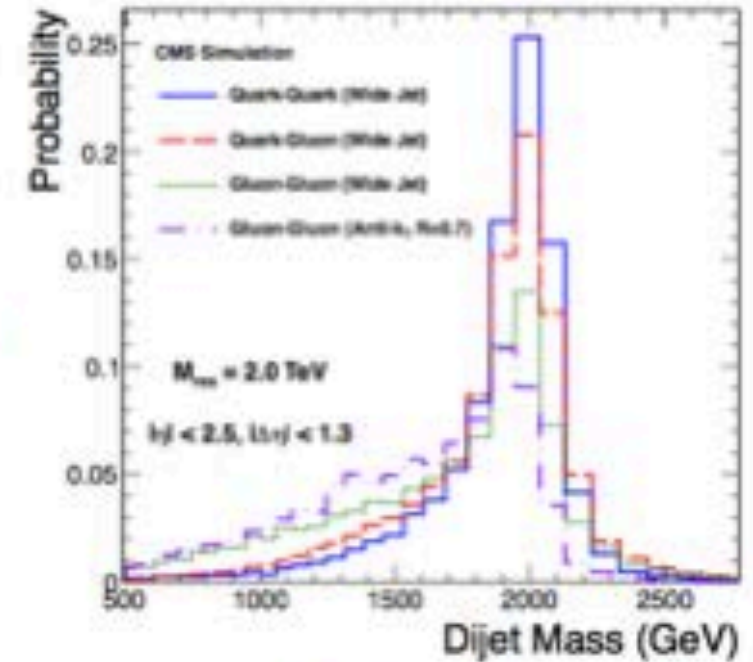
массы двух струй (CMS)



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



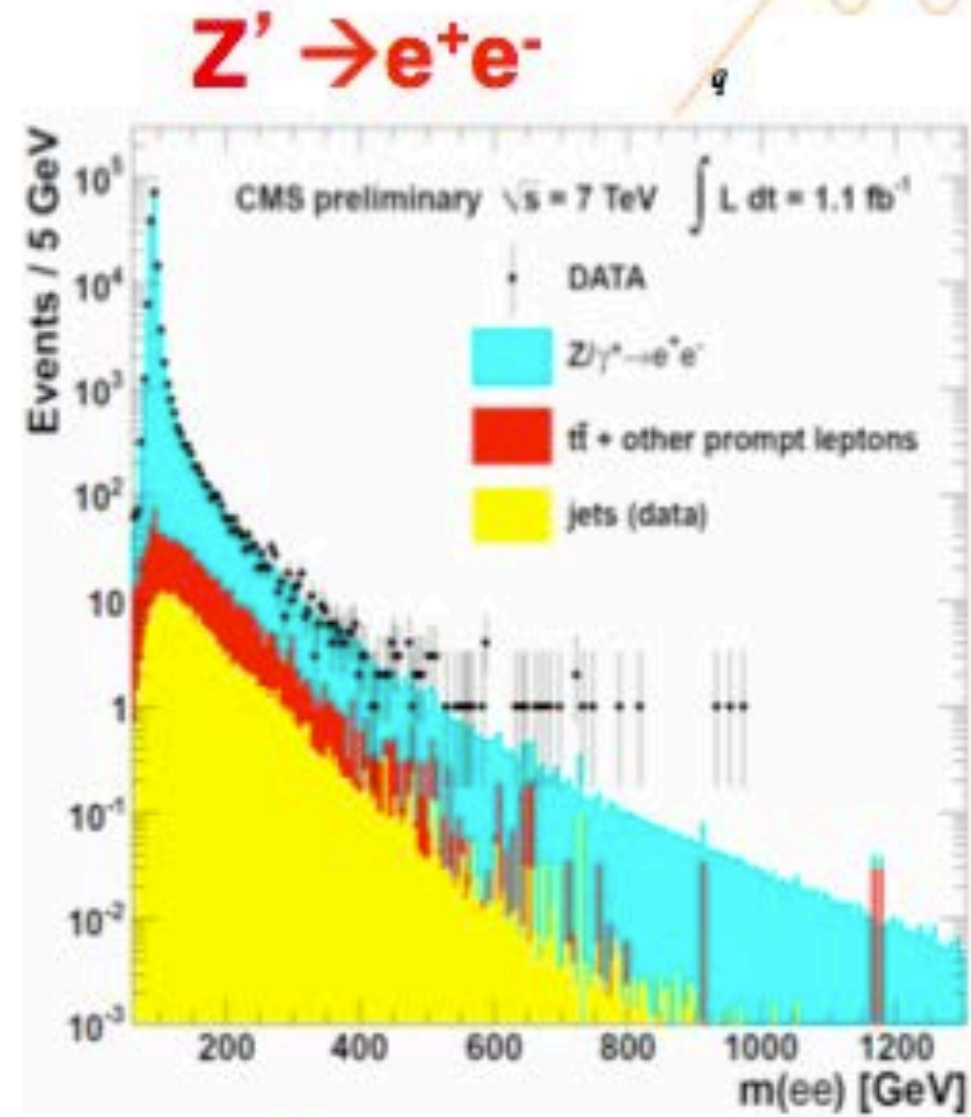
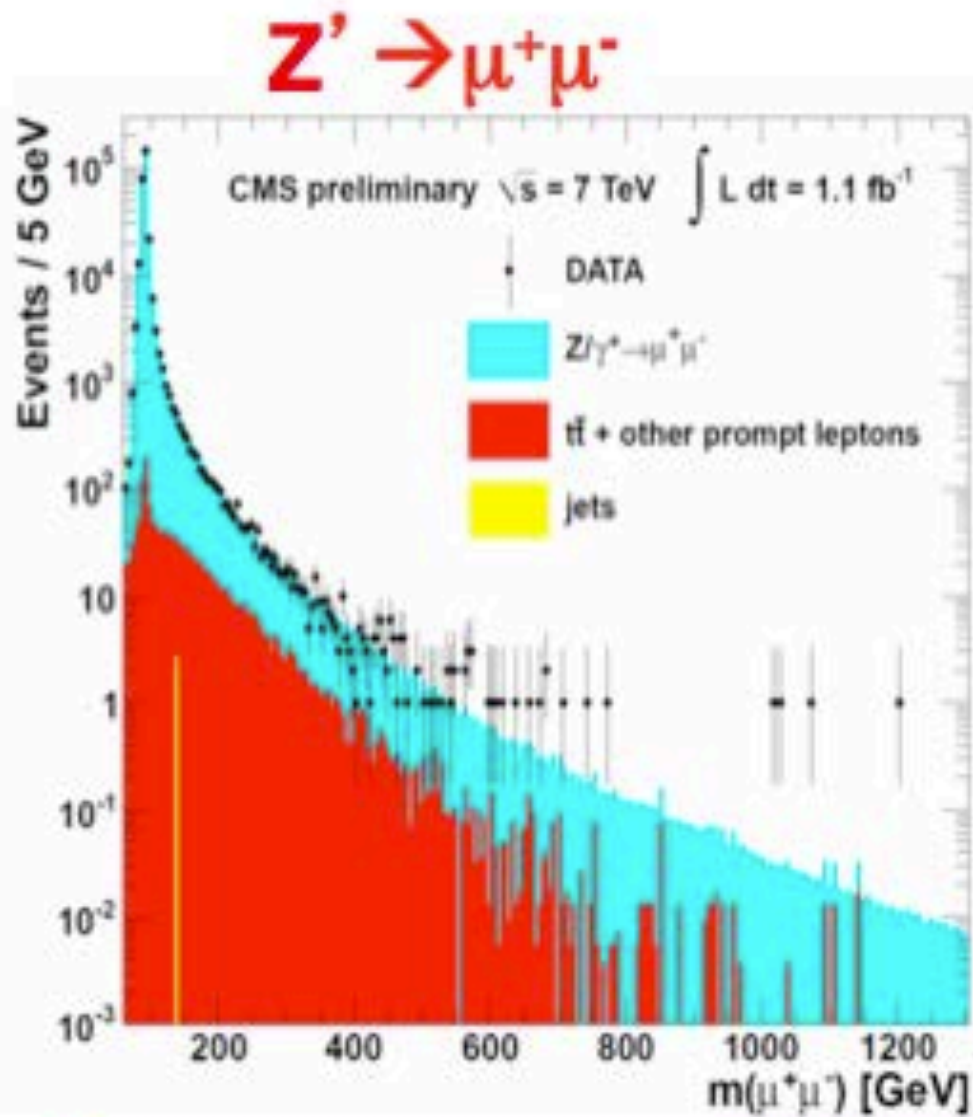
Lower limit on the mass in different models

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

массы двух летонов (CMS)



- Di-muon and di-electron mass spectra



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



БАК: ближайшие перспективы

физика БАК 2011: 5 Фб⁻¹

2012: 15-20 Фб⁻¹

2012: увеличение до 8 ТэВ

Июль (да!) или осень (нет?)

2012: все возможные массы бозона Хиггса СМ
сильные ограничения на MSSM
сюрпризы?

ЦЕРН БАК: МНОГО НОВОСТЕЙ ВПЕРЕДИ!

БАК: “Вавилонская башня”



Pieter Bruegel de Oude "Babylon tower" 1563

ЦЕРН: уникальные возможности!