



**Новые результаты с Большого Адронного
Коллайдера:
Recontres de Moriond,
La Thuile, Italy, March 2-16, 2013**

А.А. Воробьев & В.Т. Ким

Петербургский Институт Ядерной Физики (ПИЯФ), Гатчина



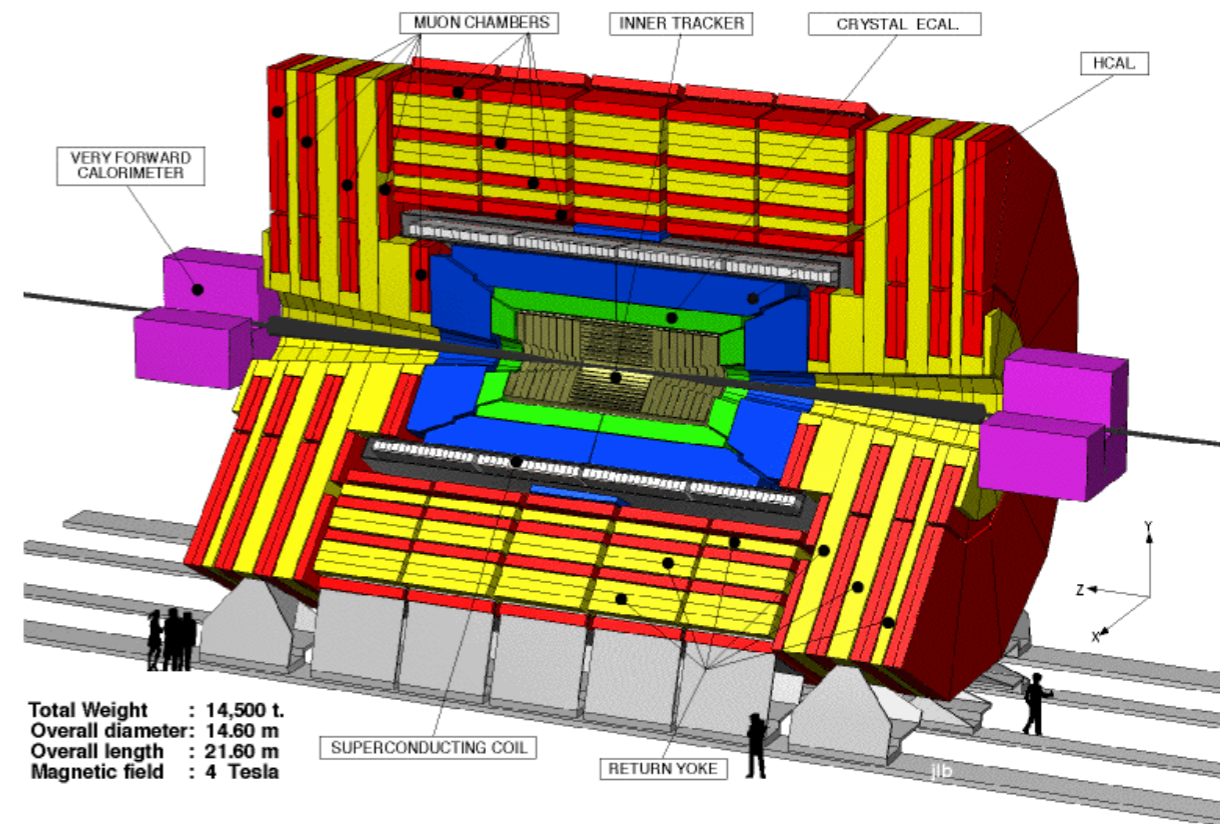
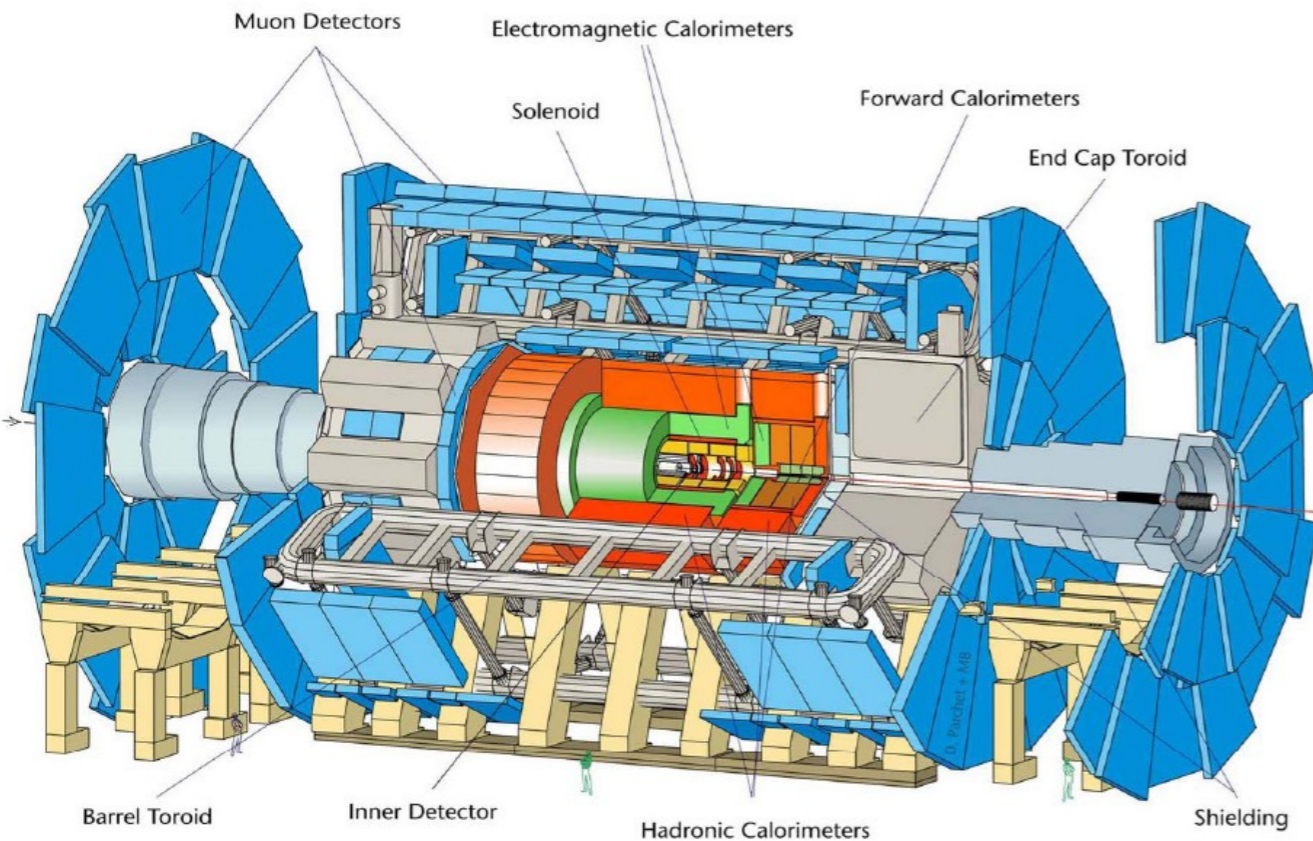
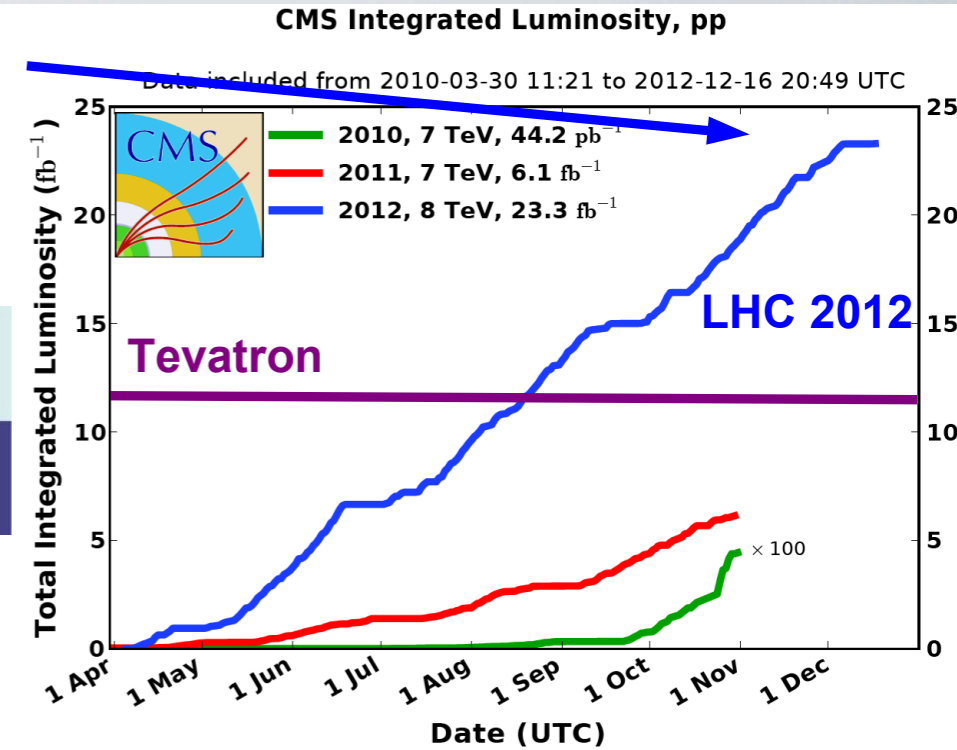
- Уточнение параметров Стандартной Модели при новых энергиях
- Поиски новой динамики Стандартной Модели при новых энергиях
- Поиски бозона Хиггса Стандартной Модели
- Поиски новой физики за пределами Стандартной Модели

Эксперименты на БАК



LHC: Collisions of Pb-Pb, p-Pb and p-p (23/fb)
 $E_{\text{cms}} = 0.9, 2.36, 2.76, 7, 8 \text{ TeV}$
 peak inst. lumi almost $8 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

ATLAS/CMS global features:
 Silicon trackers: Up to $|\eta| = 2.5$
 Calorimetry: Up to $|\eta| \sim 5.0$
 Muon chambers: Up to $|\eta| = 2.4-2.7$
 Jet energy scale: 1 – 3 % prec.





Уникальное участие ПИЯФ на БАК:

ATLAS: детектор переходного излучения, ...

CMS: торцевая мюонная система, ...

LHCb: мюонная система, ...

ALICE: мюонная система, ...

ФИЗИКА БАК: основные цели



- **Уточнение параметров Стандартной Модели при новых энергиях**
- **Поиски новой динамики Стандартной Модели при новых энергиях**
- **Поиски бозона Хиггса Стандартной Модели**
- **Поиски новой физики за пределами Стандартной Модели**

Уточнение параметров Стандартной Модели при новых энергиях



Физика CP:

углы смешивания, осцилляции c - и b - кварков,
редкие распады, ...

Прецизионное измерение масс, ширин распадов, ...

Стандартная Модель: масса топ-кварка



Methods used

Template Fit Method

- select reconstruct
- build template fits m_t) and for bkg, t

Analytical Matrix Wei

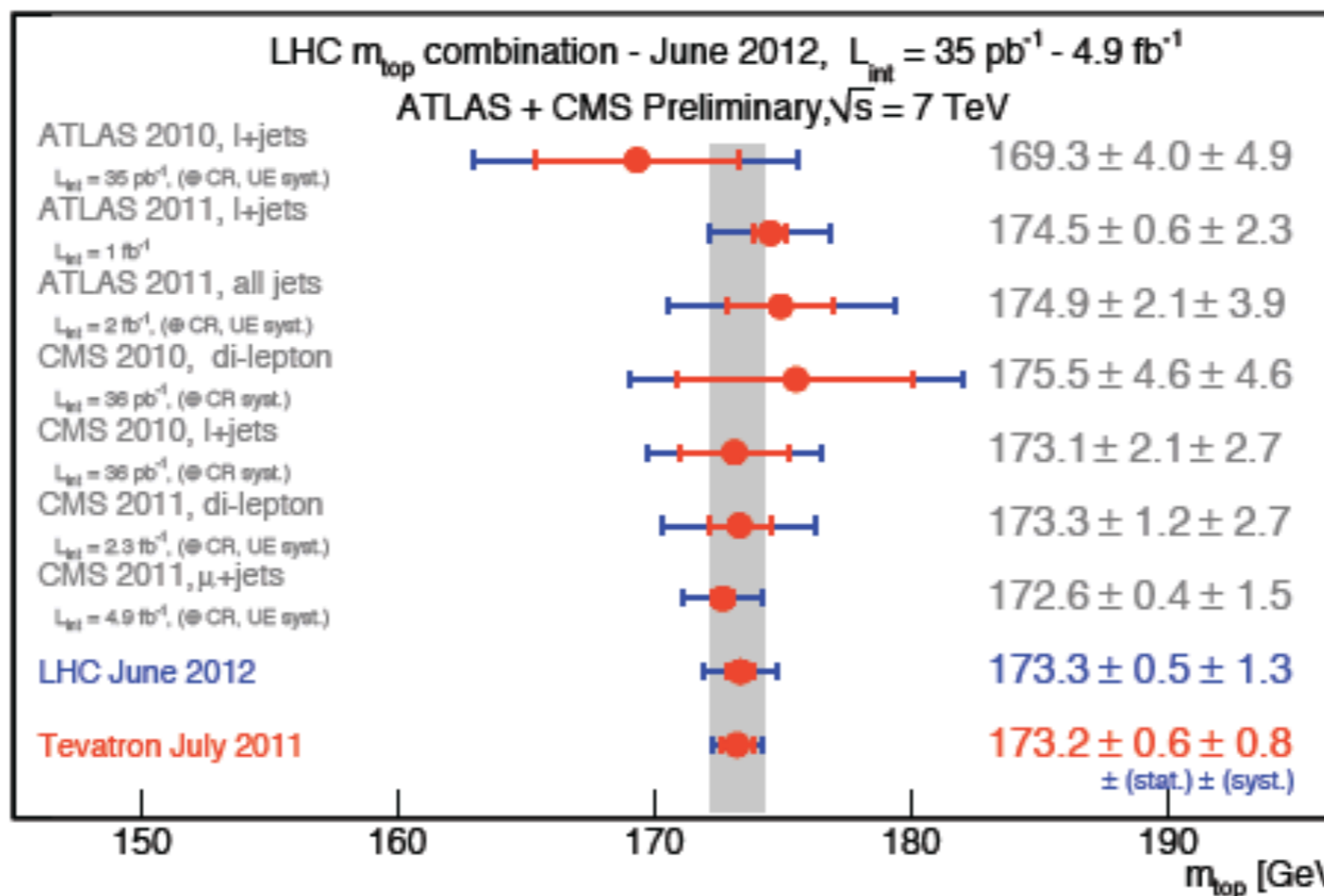
- used for dilepton
- reconstruct analyt possible m_t values
- assign a weight b m_t the one with la
- get m_t from likelih

Ideogram Method

- reconstruct m_t -fitted
- ev. by ev. likelihoc
- based on the p(m accounts all differ

In-situ Jet Energy Sc

- impact m_t measur
- use m_W constraint measurement itse



not covered here)

Tevatron

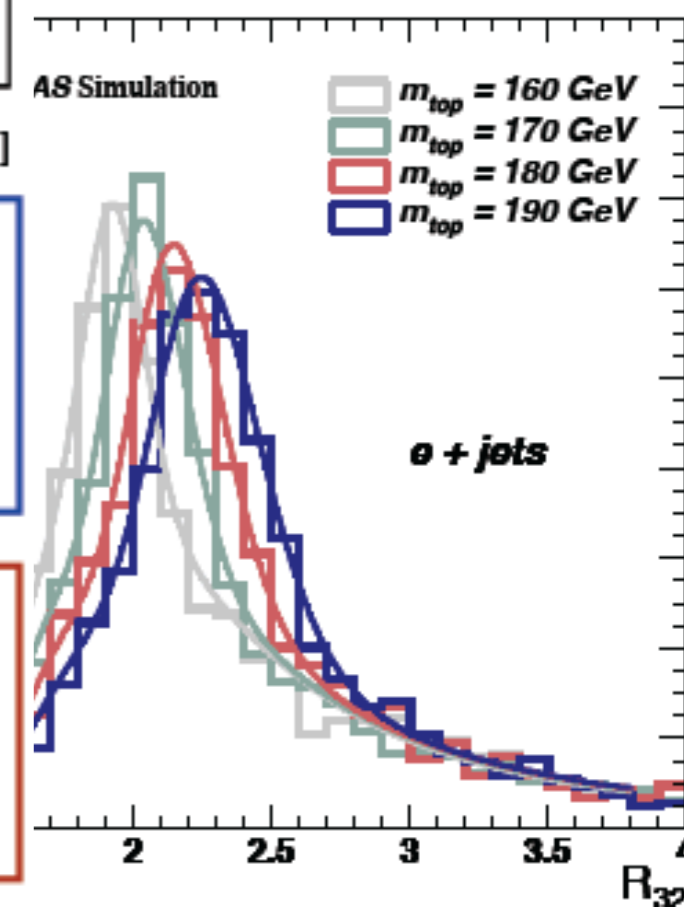
$$m_t^{\text{comb}} = 173.18 \pm 0.56(\text{stat}) \pm 0.75(\text{syst}) \text{ GeV}$$

$$= 173.18 \pm 0.94 \text{ GeV}$$

CMS

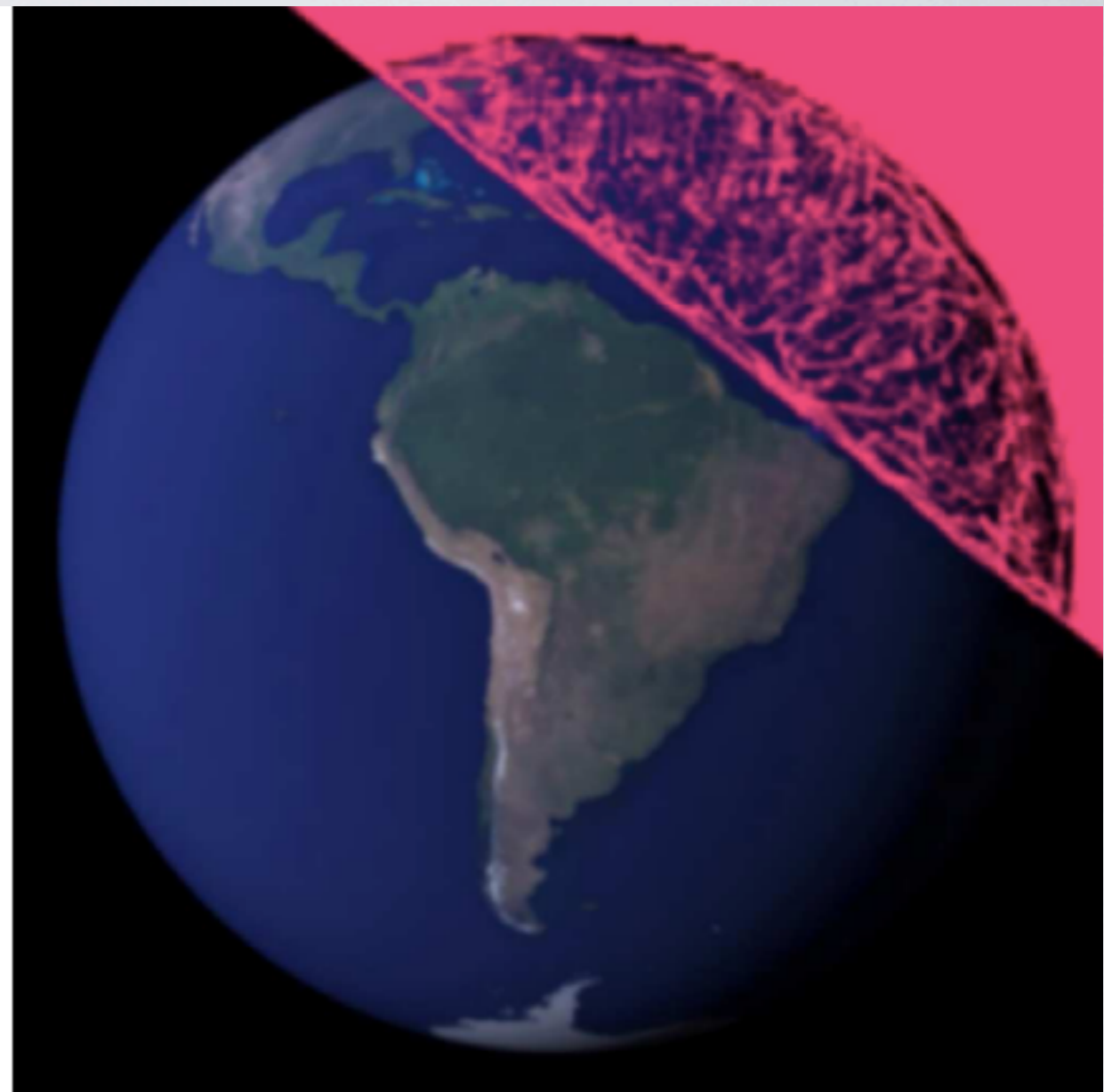
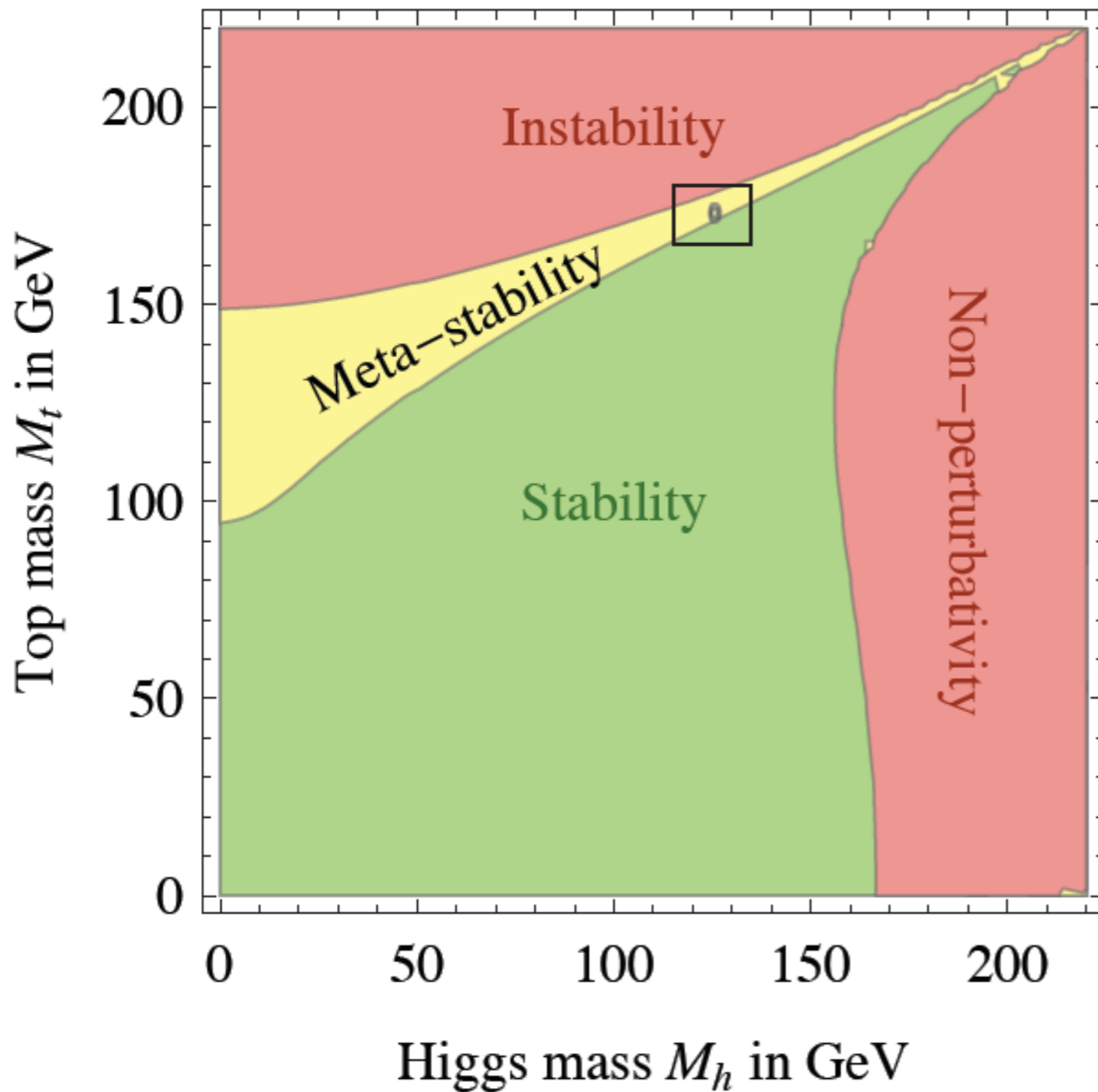
$$m_t^{\text{comb}} = 173.36 \pm 0.38(\text{stat}) \pm 0.91(\text{syst}) \text{ GeV}$$

$$= 173.36 \pm 1.10 \text{ GeV}$$





Масса топ-кварка: ВОЗМОЖНО важнее чем думали раньше!



ФИЗИКА БАК: основные цели



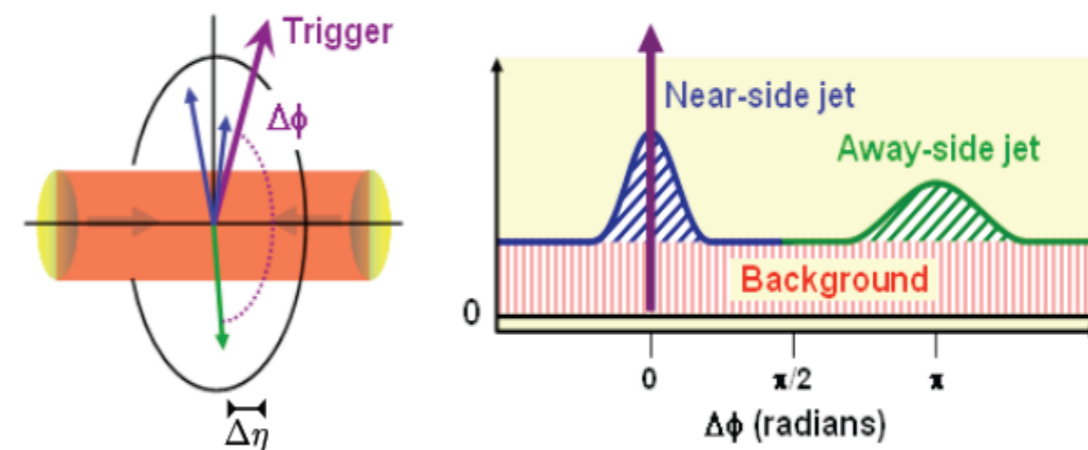
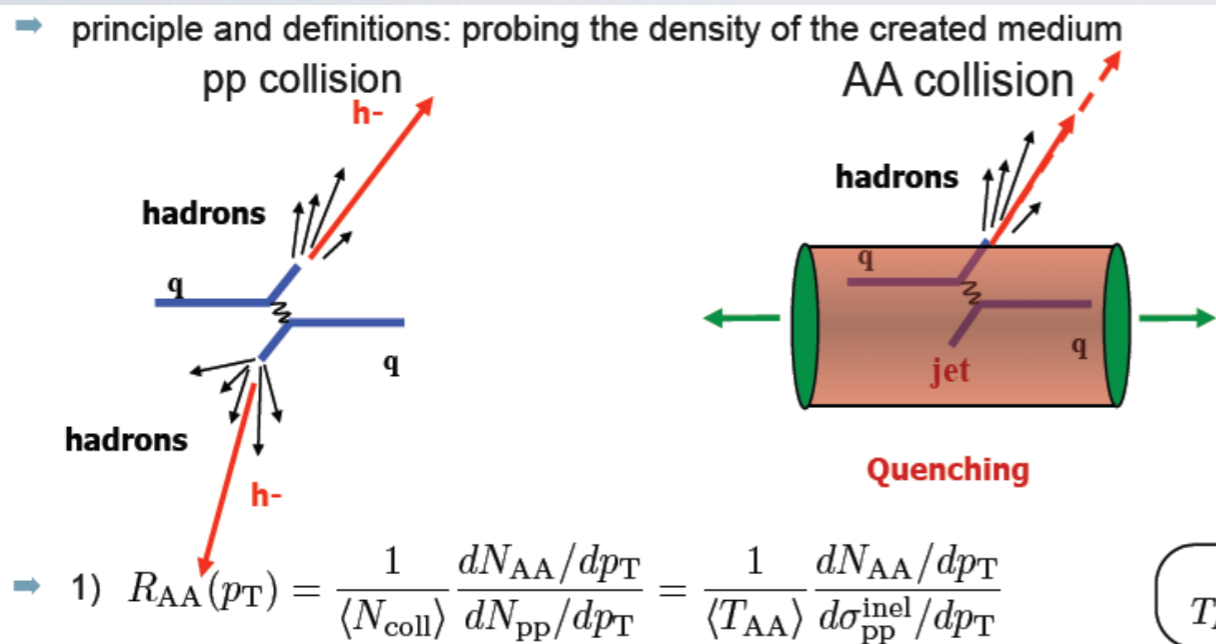
- Уточнение параметров Стандартной Модели при новых энергиях
- **Поиски новой динамики Стандартной Модели при новых энергиях**
- Поиски бозона Хиггса Стандартной Модели
- Поиски новой физики за пределами Стандартной Модели



Поиски новой динамики СМ на энергиях БАК

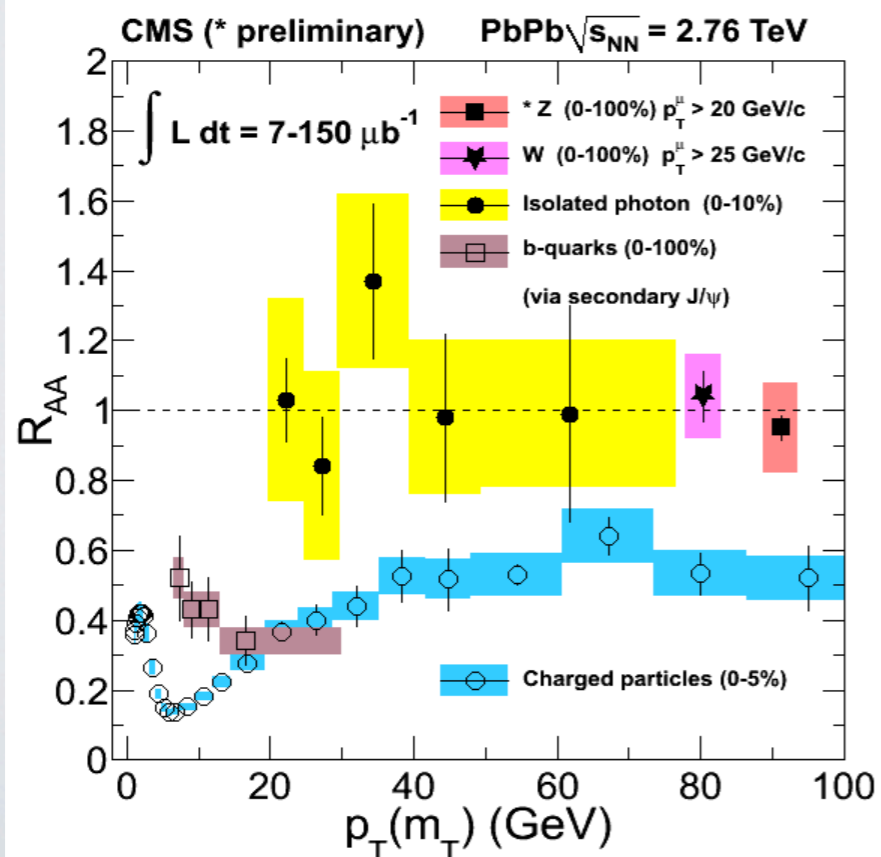
- **Новое состояние
сверхплотной кварк-глюонной материи
в соударениях тяжелых ионов**
- **Физика малых x : поиски БФКЛ**
- **Физика много-партонных взаимодействий**
- **Эффект Хребта (Ridge-effect)**
- **Экзотические адроны**

Квенчинг и угловые корреляции



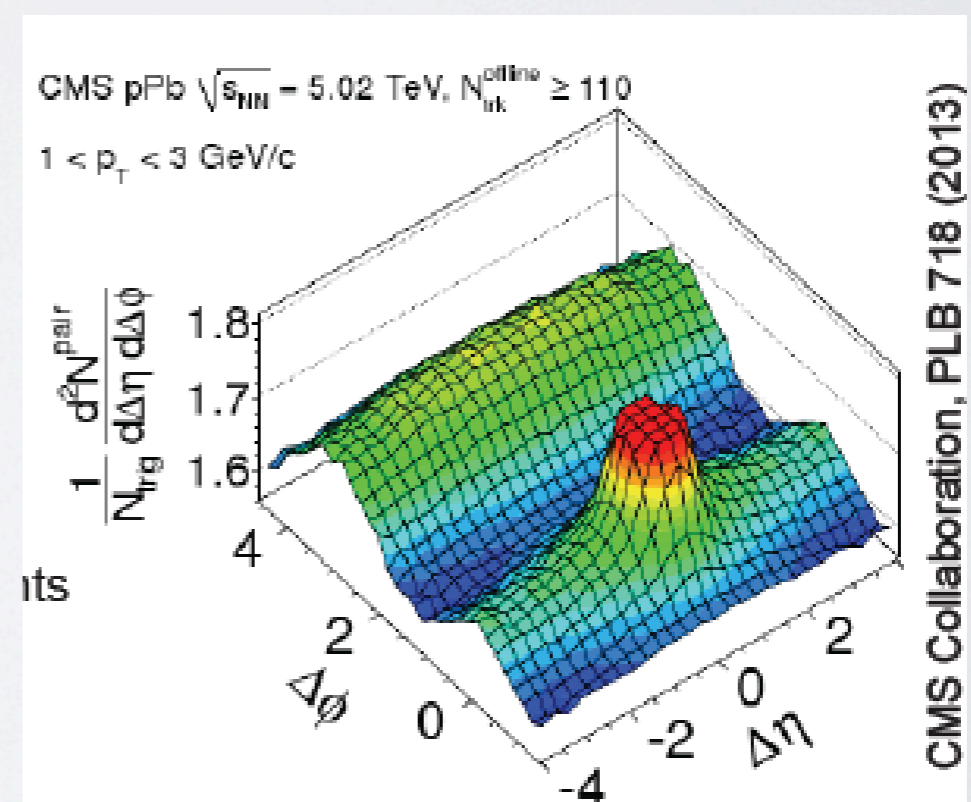
2) Hadron angular correlations:

$$\frac{1}{N_{trig}} \frac{d^2 N_{assoc}}{d\Delta\eta d\Delta\phi} = \frac{S(\Delta\eta\Delta\phi)}{B(\Delta\eta\Delta\phi)}$$



"control" probes: γ , W, Z

strongly quenched:
h±, b-quarks, jets, b-jets



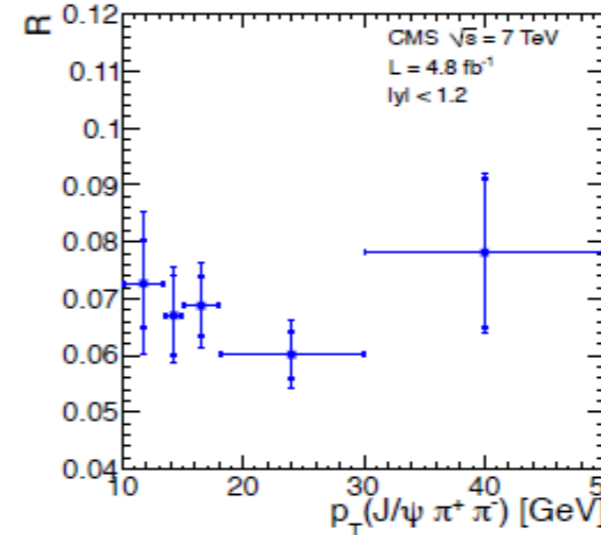
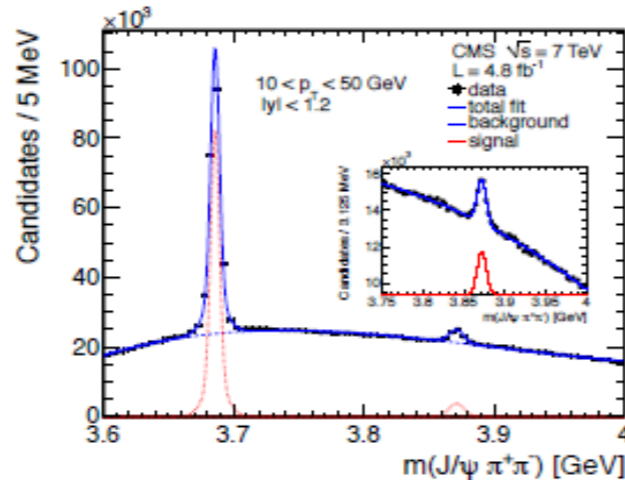


X(3872): экзотический адрон

X(3872) Production via decays to $J/\psi\pi^+\pi^-$ CMS

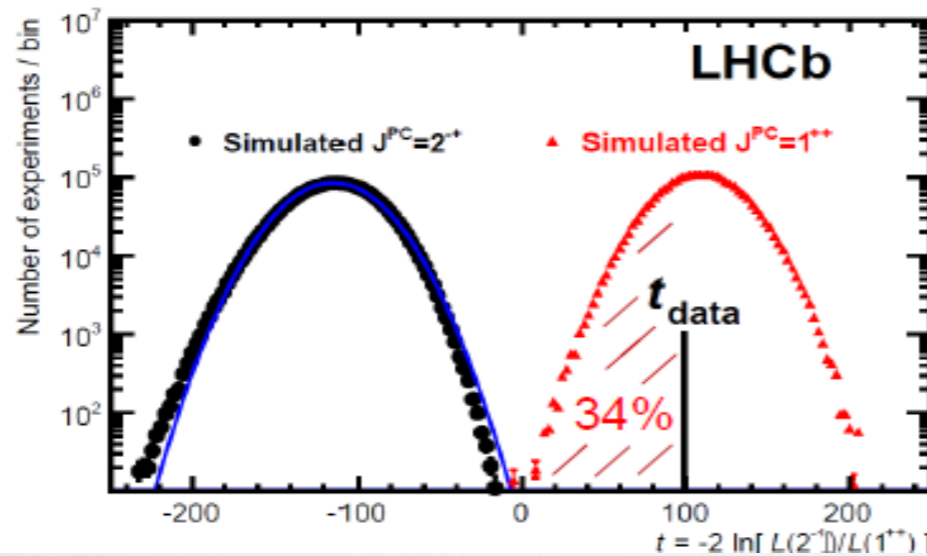
Assuming: $J^{PC} = 1^{++}$ unpolarized

Ratio to $\psi(2S)$ times BR



no significant p_T dependence

- Spectroscopy studies, e.g. X(3872) becomes more and more exotic



*X(3872) is 1^{++} state!
Thus η_{c2} (2^{-+}) conventional charmonium state has been ruled out*

Remaining interpretations involve exotics (non- qq states)

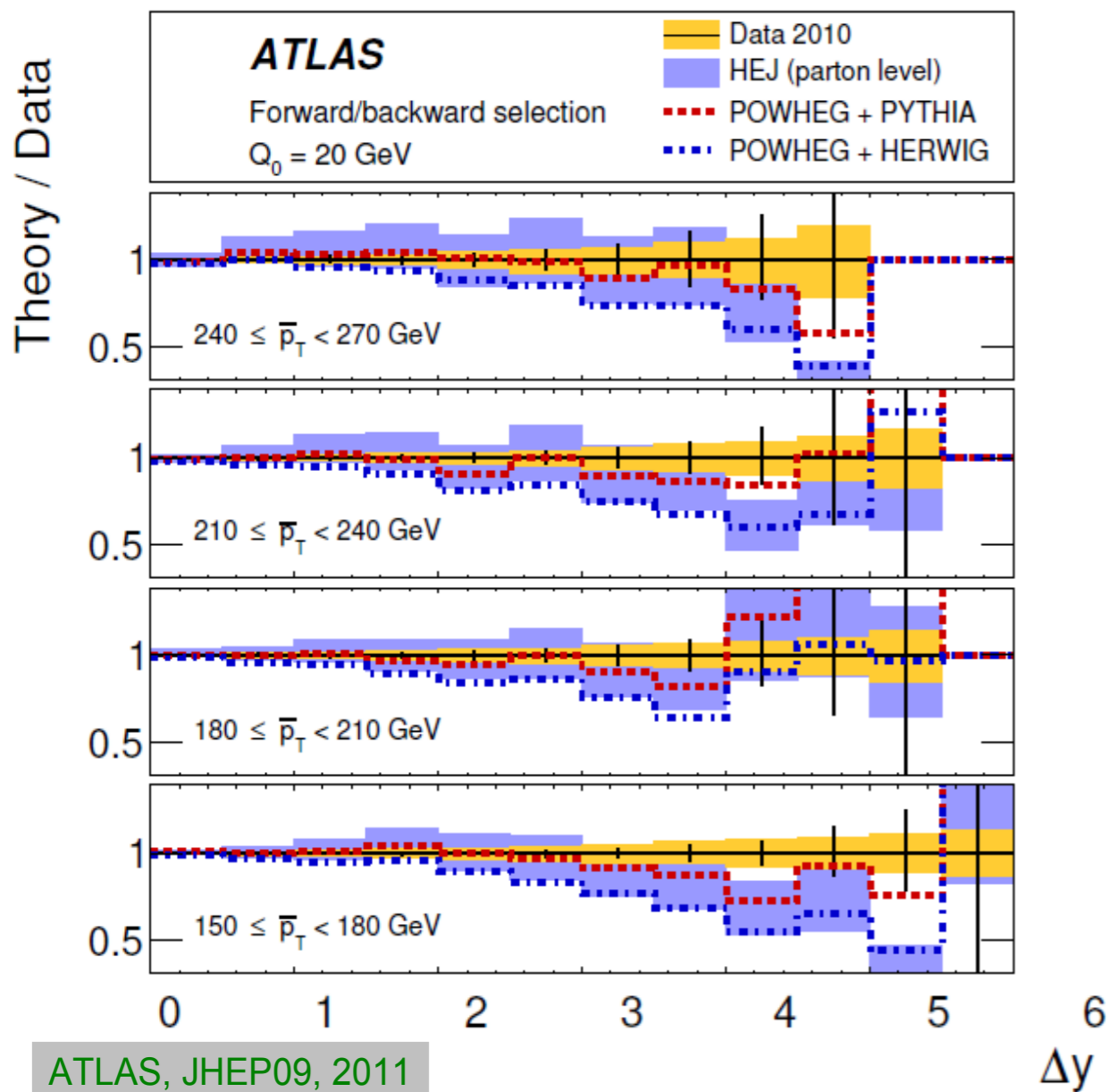
X(3872) has been seen by every experiment capable of detecting this particle, still there is no clear understanding of the nature of this object: critical to continue experimental studies and develop theoretical models

- Window to unexpected?

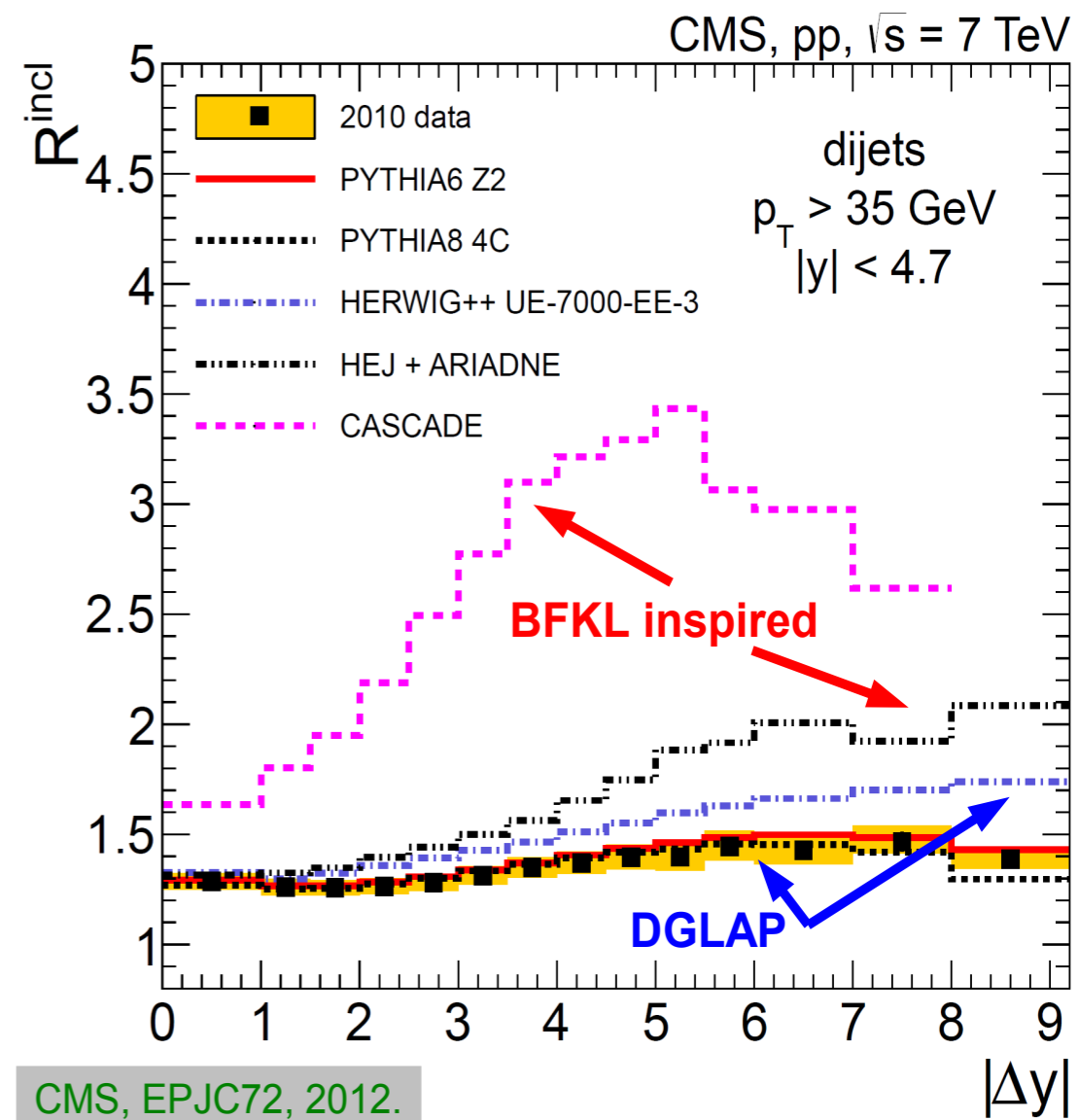


Поиски БФКЛ на БАК

Most forward-backward dijet selection



All possible dijet pair distances over leading dijet pair distance



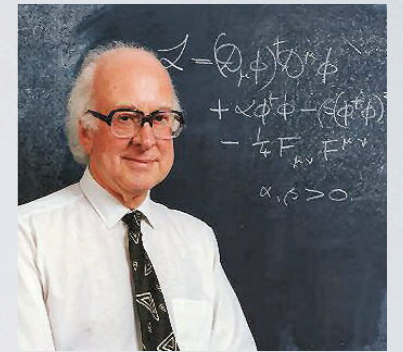


- Уточнение параметров Стандартной Модели при новых энергиях
- Поиски новой динамики Стандартной Модели при новых энергиях
- **Поиски бозона Хиггса Стандартной Модели**
- Поиски новой физики за пределами Стандартной Модели



Спонтанное нарушение симметрии

концепция: Л.Д. Ландау & В.Л. Гинзбург - сверхпроводимость
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

Бозон Хиггса Стандартной модели

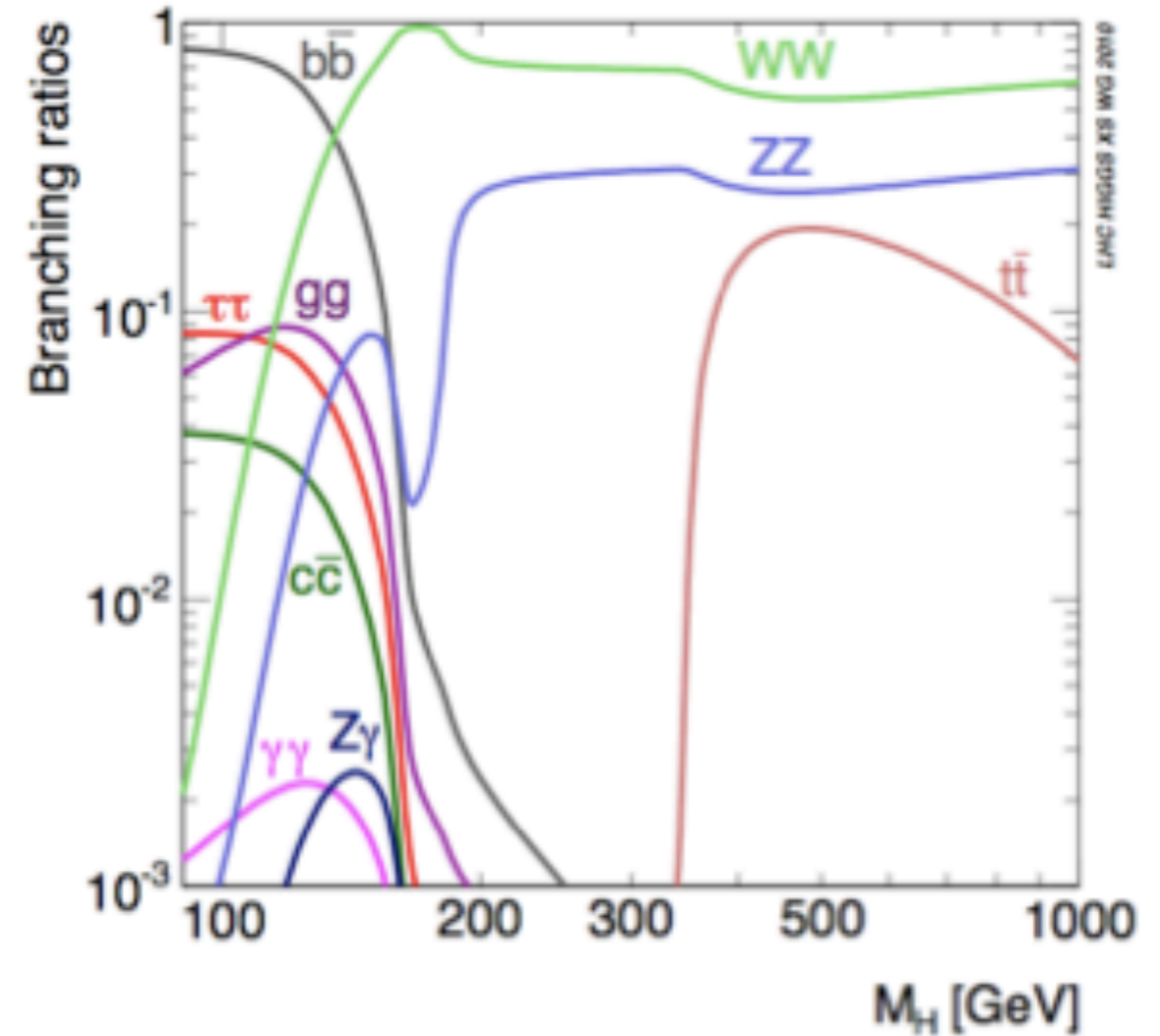
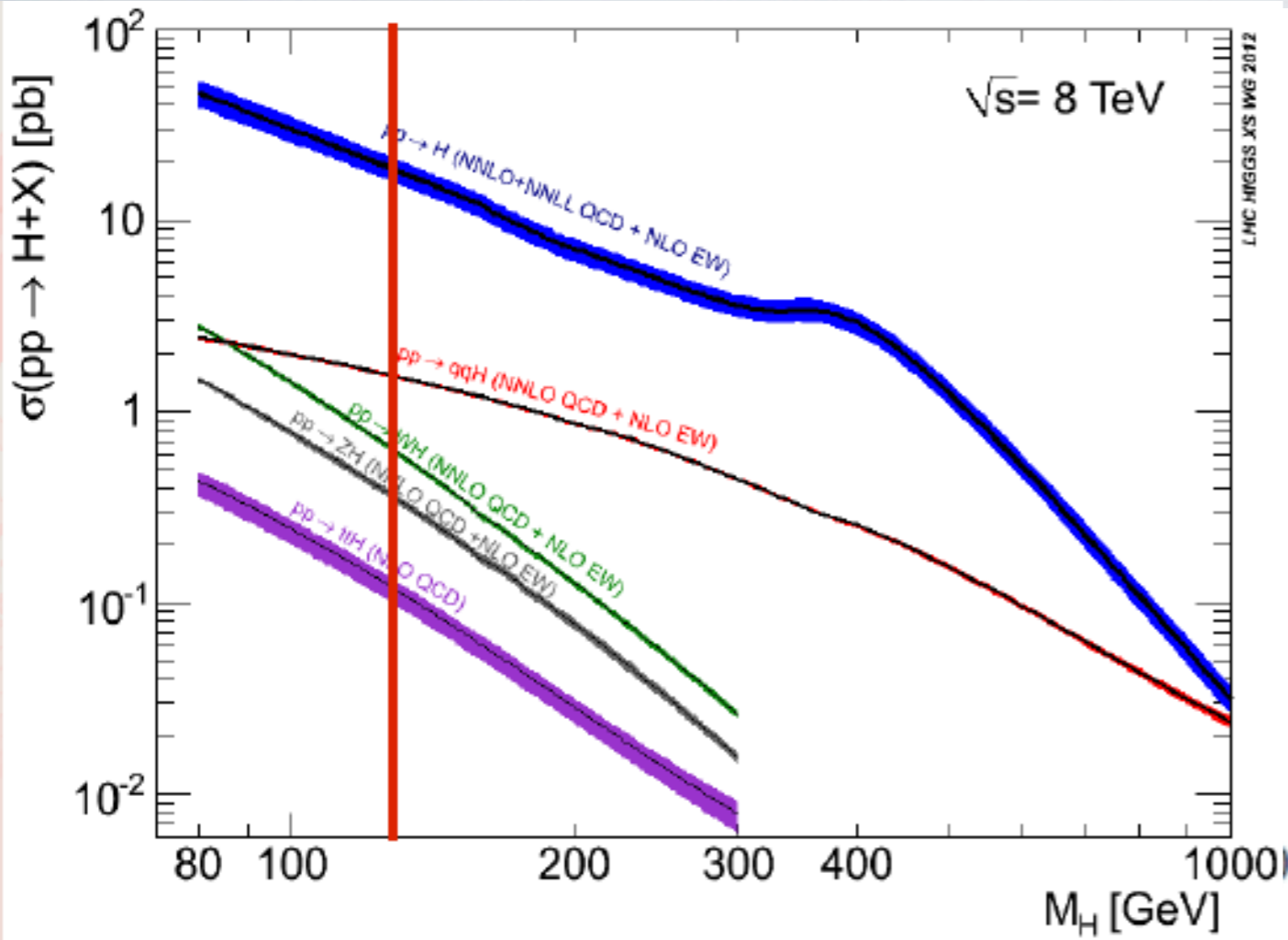


Основная роль бозона Хиггса СМ:
получение ненулевых масс векторных бозонов
не нарушая калибровочную инвариантность

а также:

- массы лептонов и кварков
- восстановление унитарности
(закона сохранения вероятности) при рассеянии
тяжелых векторных бозонов

Бозон Хиггса СМ: образование и распады

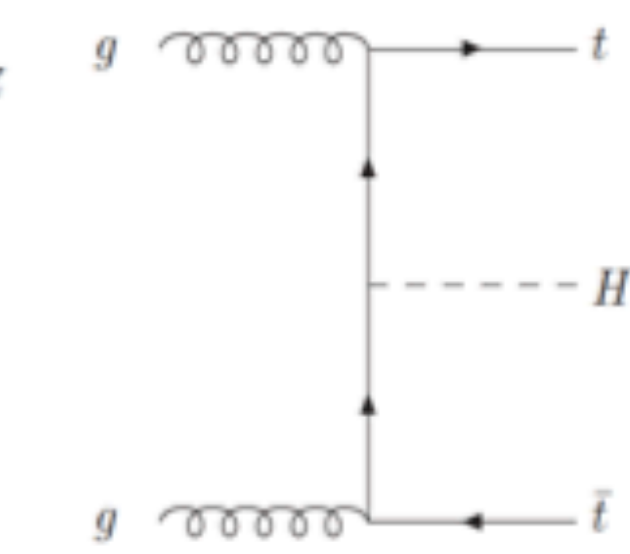
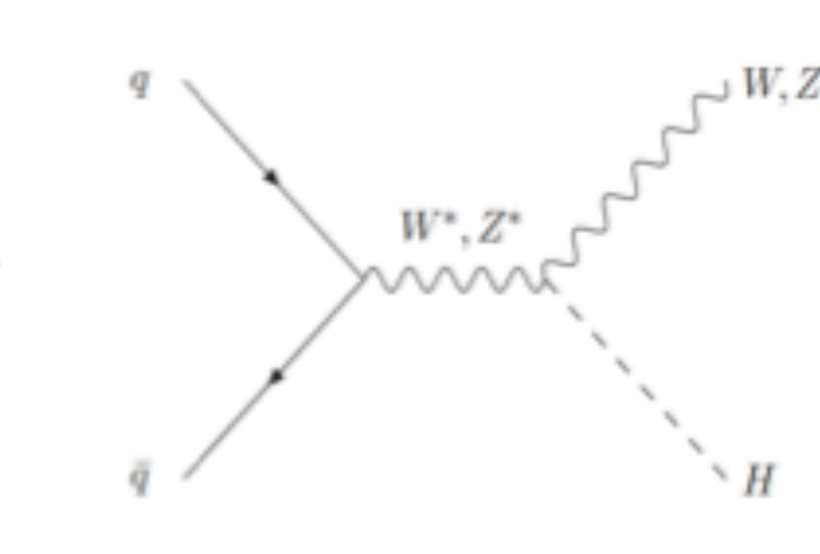
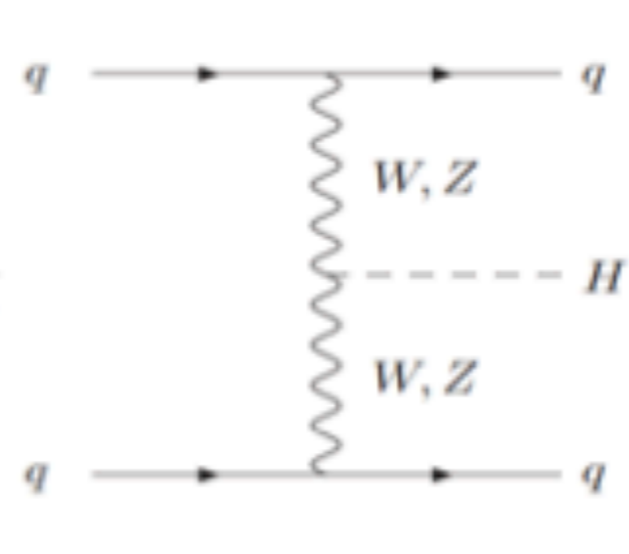
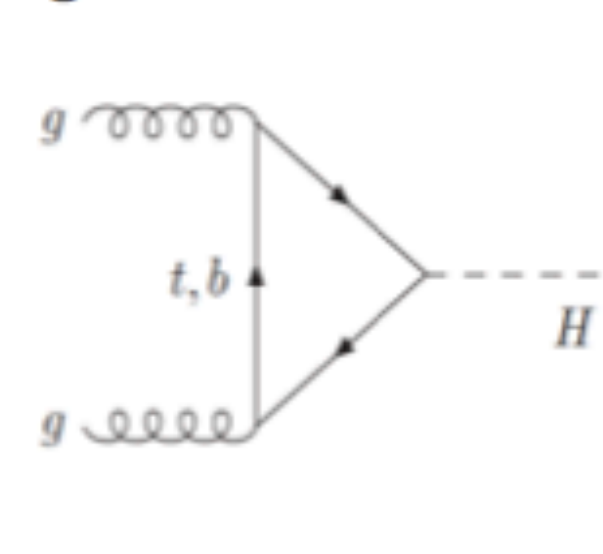


gluon-fusion

VBF

VH

ttH



Новый бозон! Бозон Хиггса SM?



обработка данных до июля 2012
при 8 ТэВ 5.8 Фб⁻¹ : апрель – июнь
4 июля 2012: открытие новой частицы!

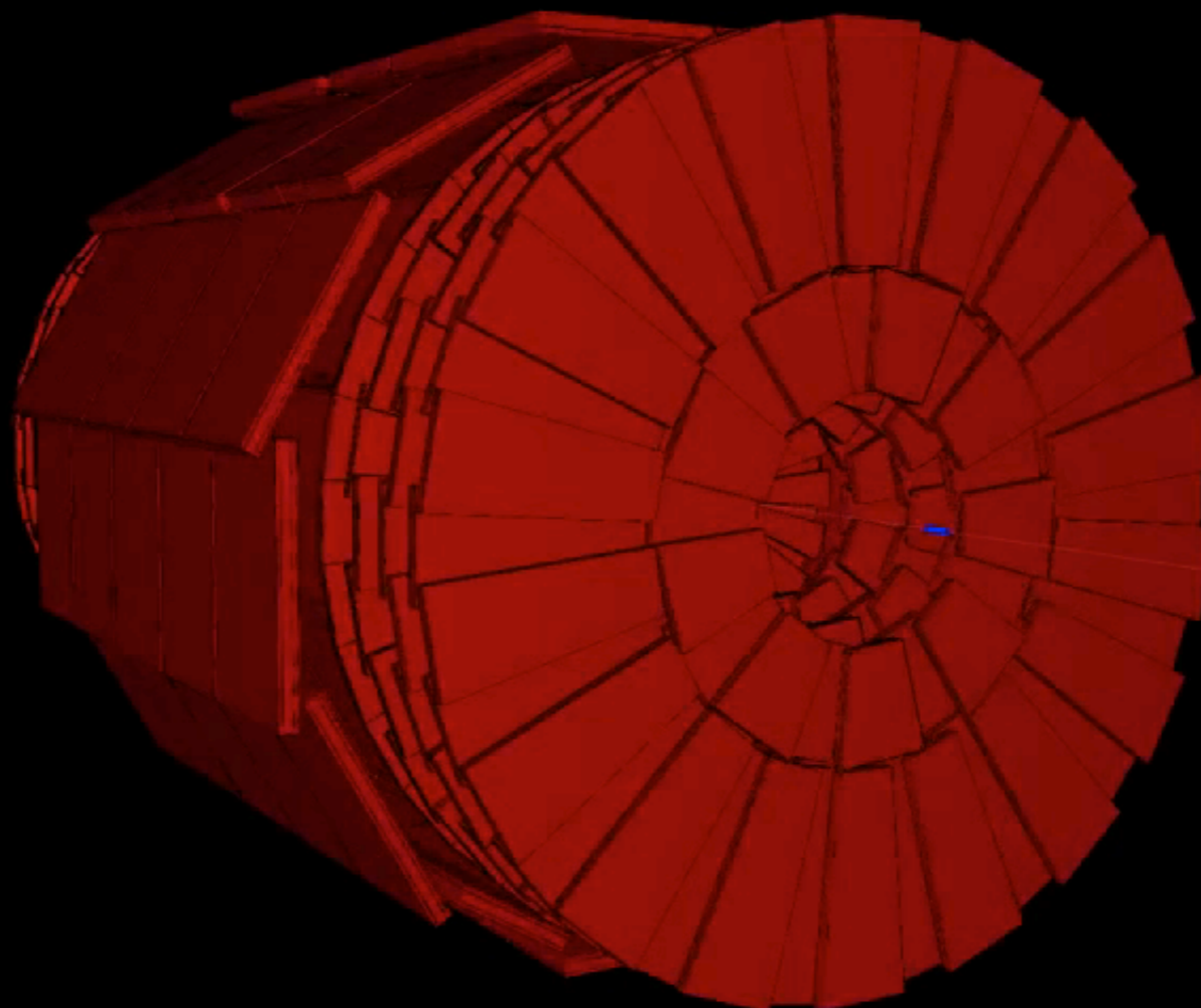
ATLAS: пик при 126.0 (0.4) (0.4) ТэВ
значимость: 5.1

CMS (4.6-4.8 Фб⁻¹): пик при 125.3 (0.4) (0.5) ТэВ
значимость: 5.6

Поиски бозона Хиггса на БАК: 4 лептона



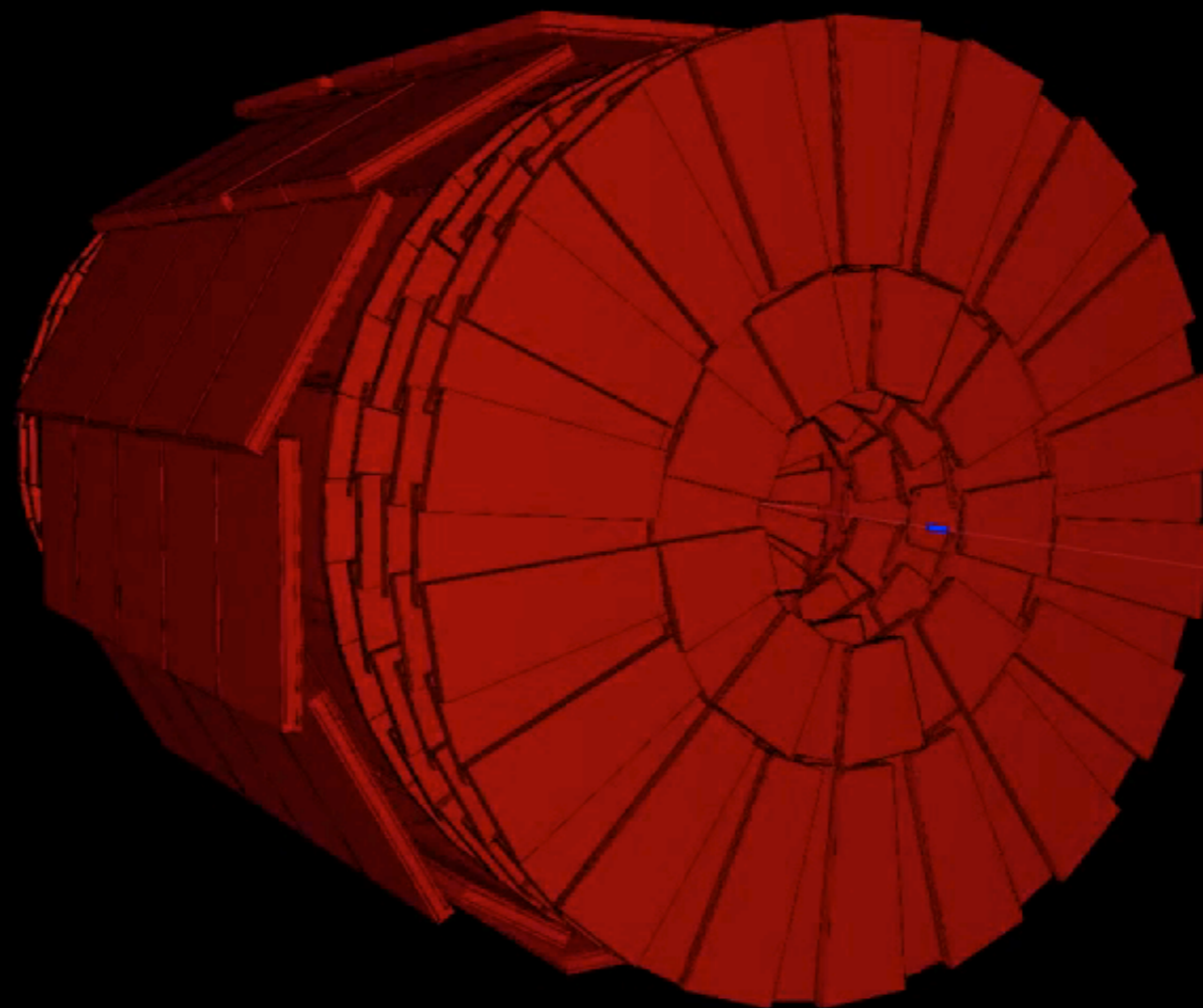
CMS Experiment at the LHC, CERN
Sun 2011-Aug-07 05:00:32 CET
Run 172822 Event 2554393033
C.O.M. Energy 7.00TeV
H>ZZ>4mu candidate



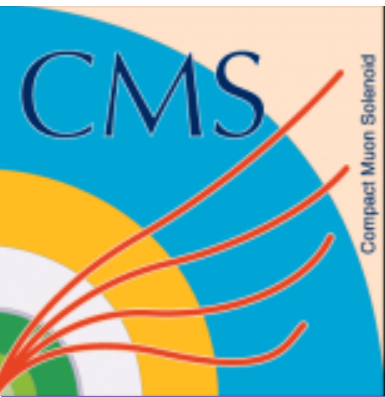
поиски бозона Хиггса на БАК: $\gamma\gamma$



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

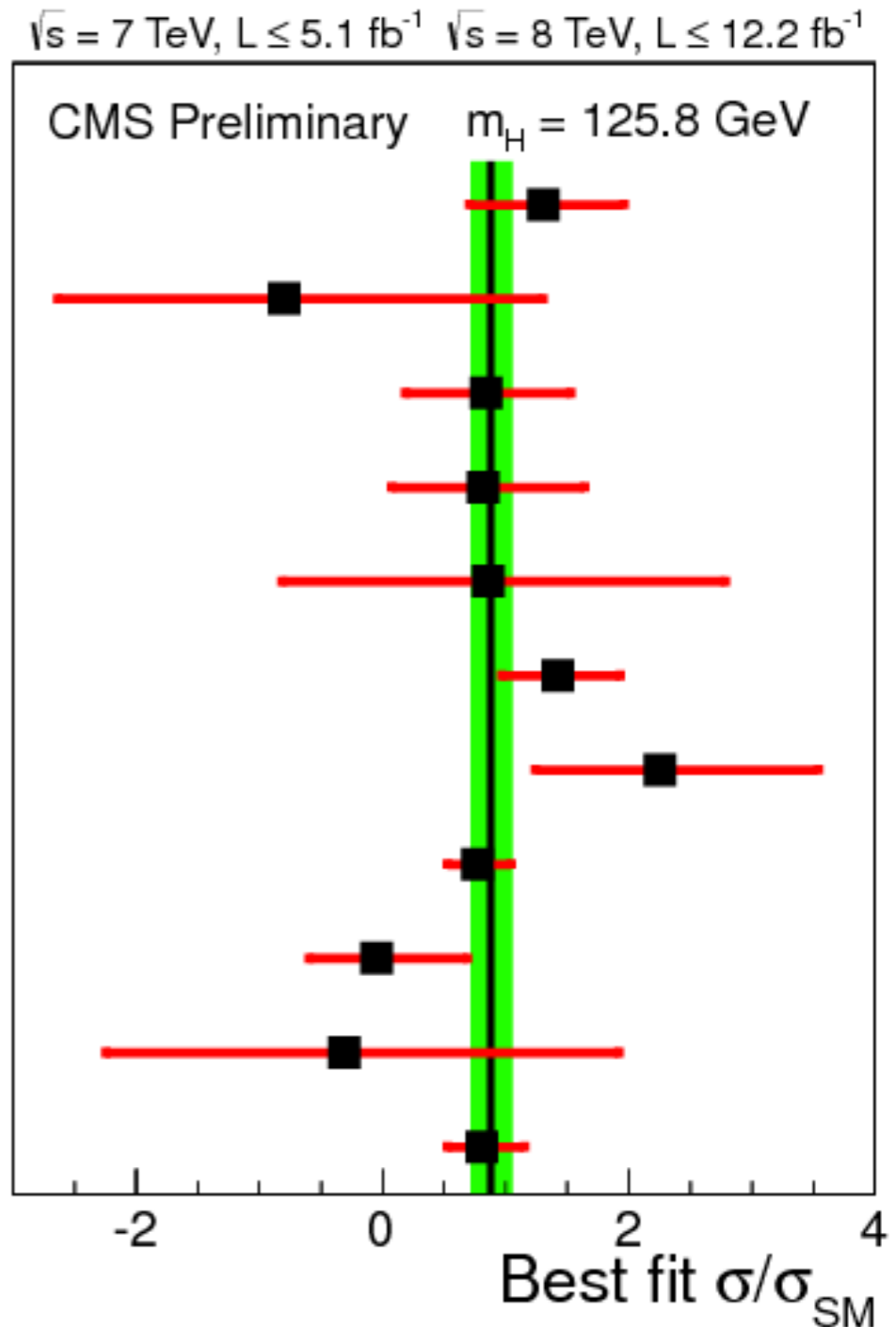


Новый бозон: величина сигнала



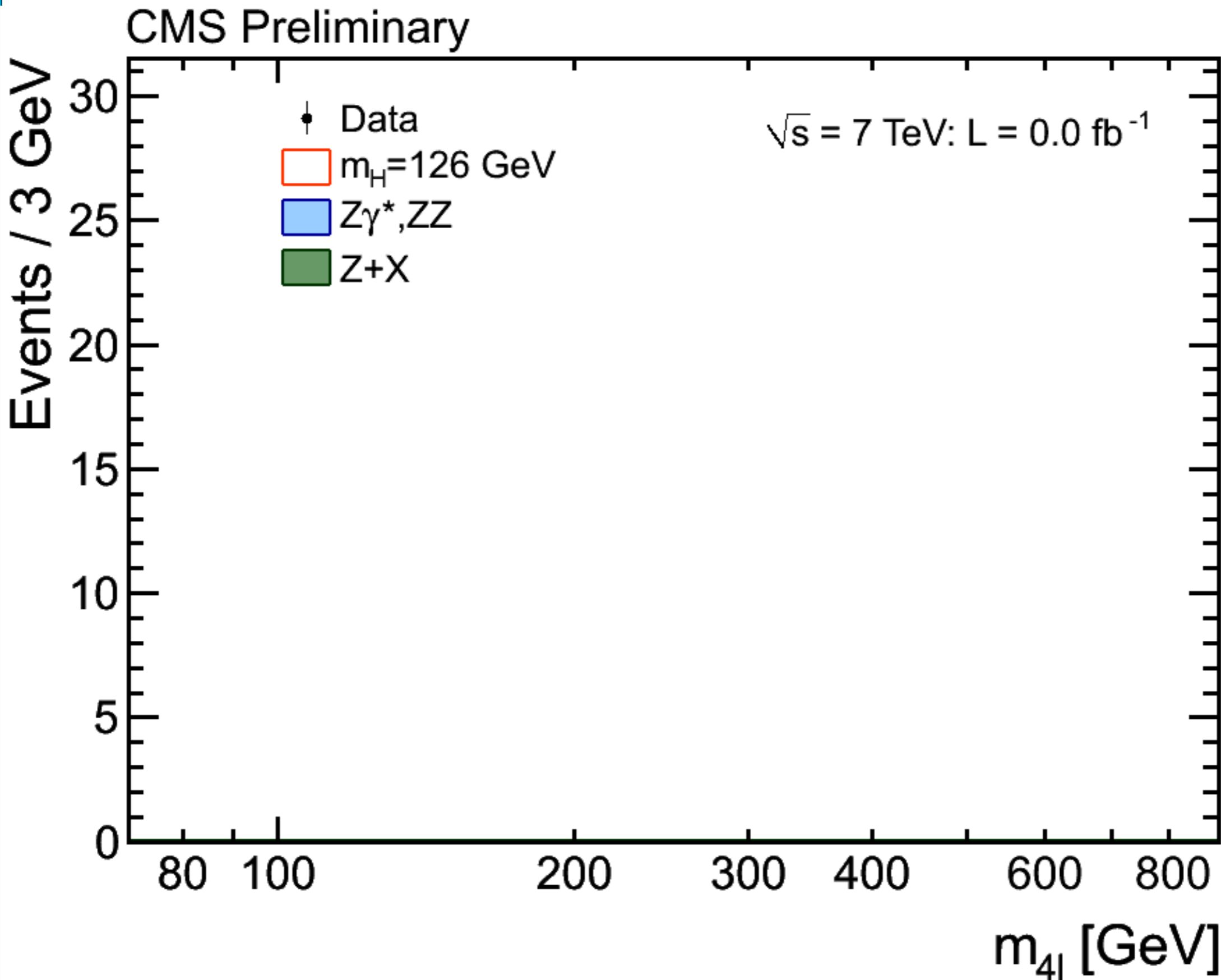
	ggH	VBFH	VH	ttH
$H \rightarrow \gamma\gamma$	✓	✓		
$H \rightarrow ZZ$	✓			
$H \rightarrow WW$	✓	✓	✓	
$H \rightarrow \tau\tau$	✓	✓	✓	
$H \rightarrow bb$			✓	✓

- $H \rightarrow bb$ (VH tag)
- $H \rightarrow bb$ (ttH tag)
- $H \rightarrow \tau\tau$ (0/1 jet)
- $H \rightarrow \tau\tau$ (VBF tag)
- $H \rightarrow \tau\tau$ (VH tag)
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ (untagged)
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ (VBF tag)
- $H \rightarrow WW$ (0/1 jet)
- $H \rightarrow WW$ (VBF tag)
- $H \rightarrow WW$ (VH tag)
- $H \rightarrow ZZ$

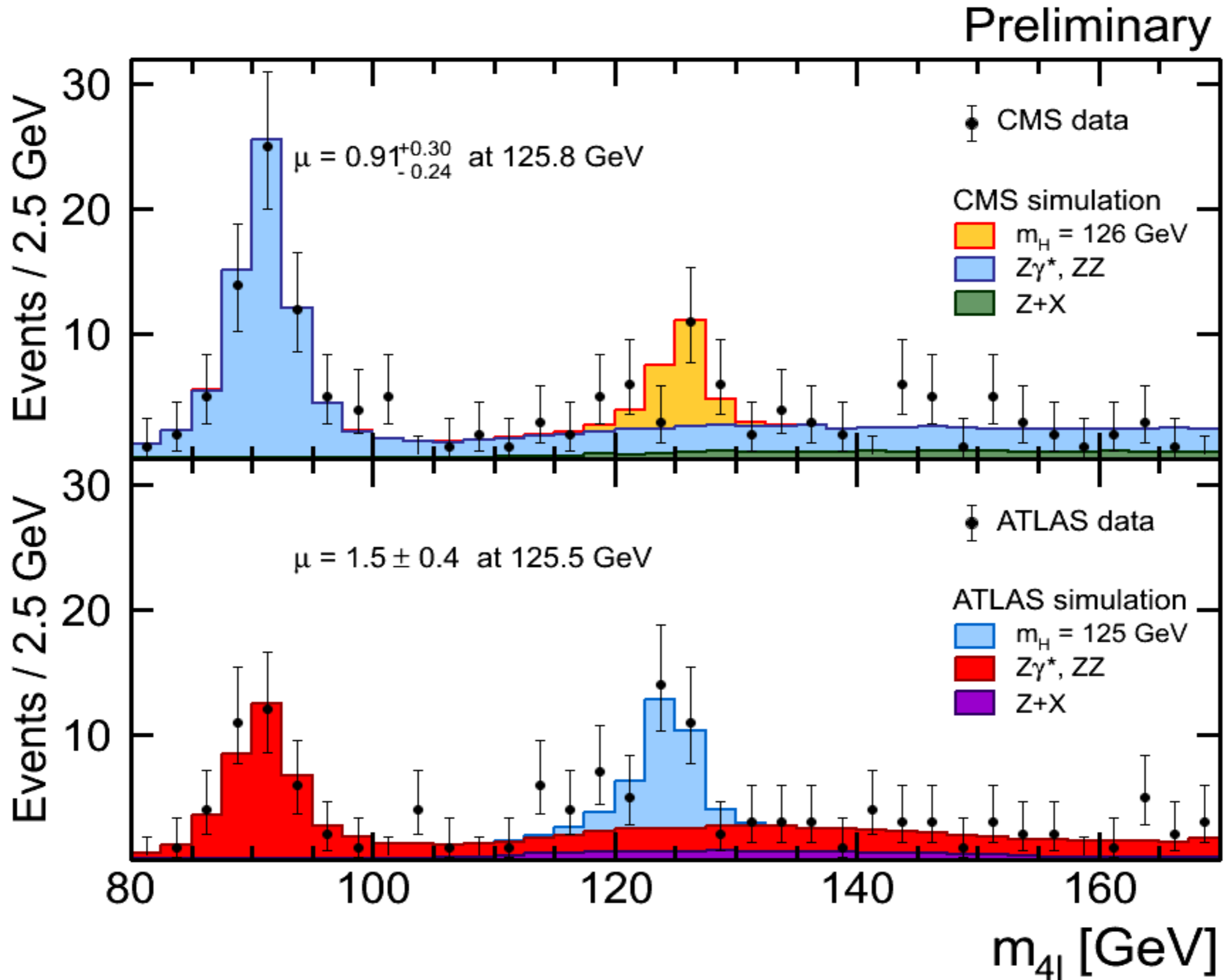


$$\sigma/\sigma_{SM} = 0.88 \pm 0.21$$

Новый бозон -> 4 лептона

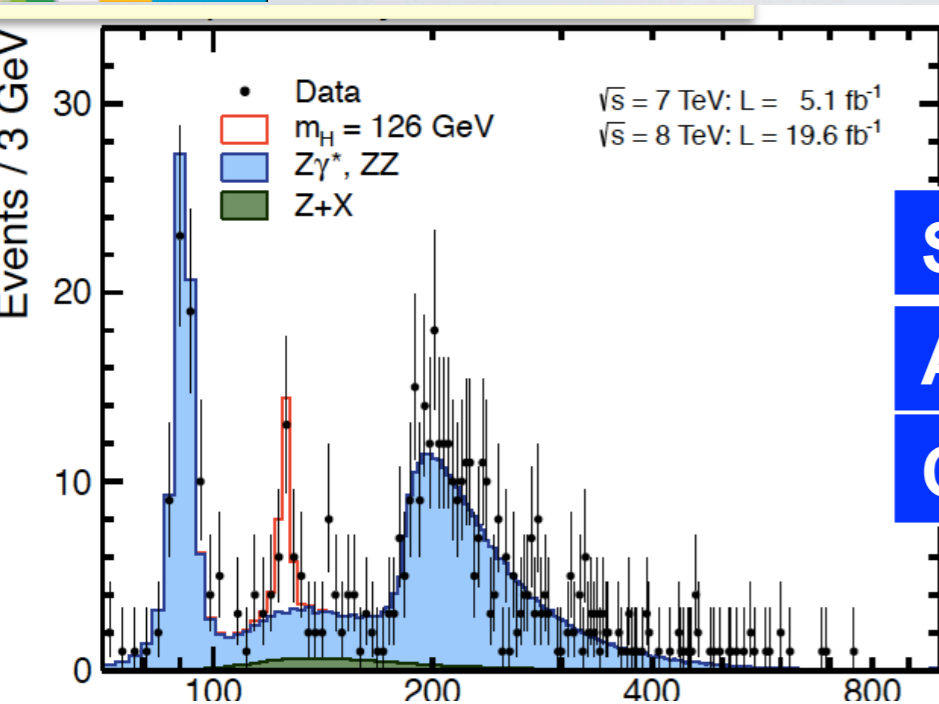


Новый бозон -> 4 лептона

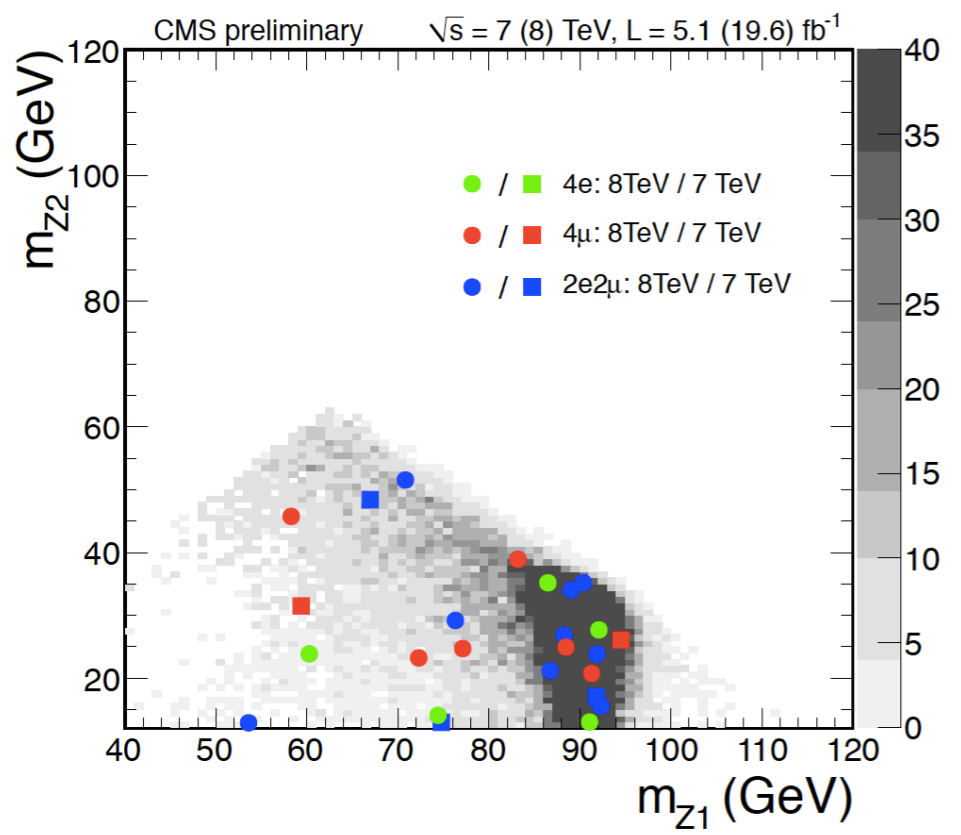
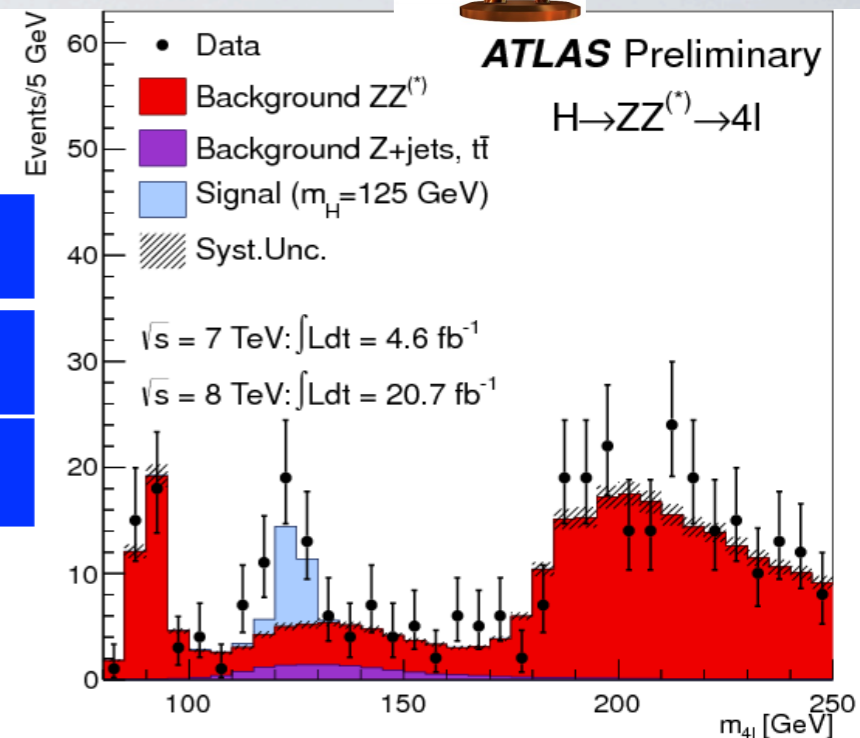




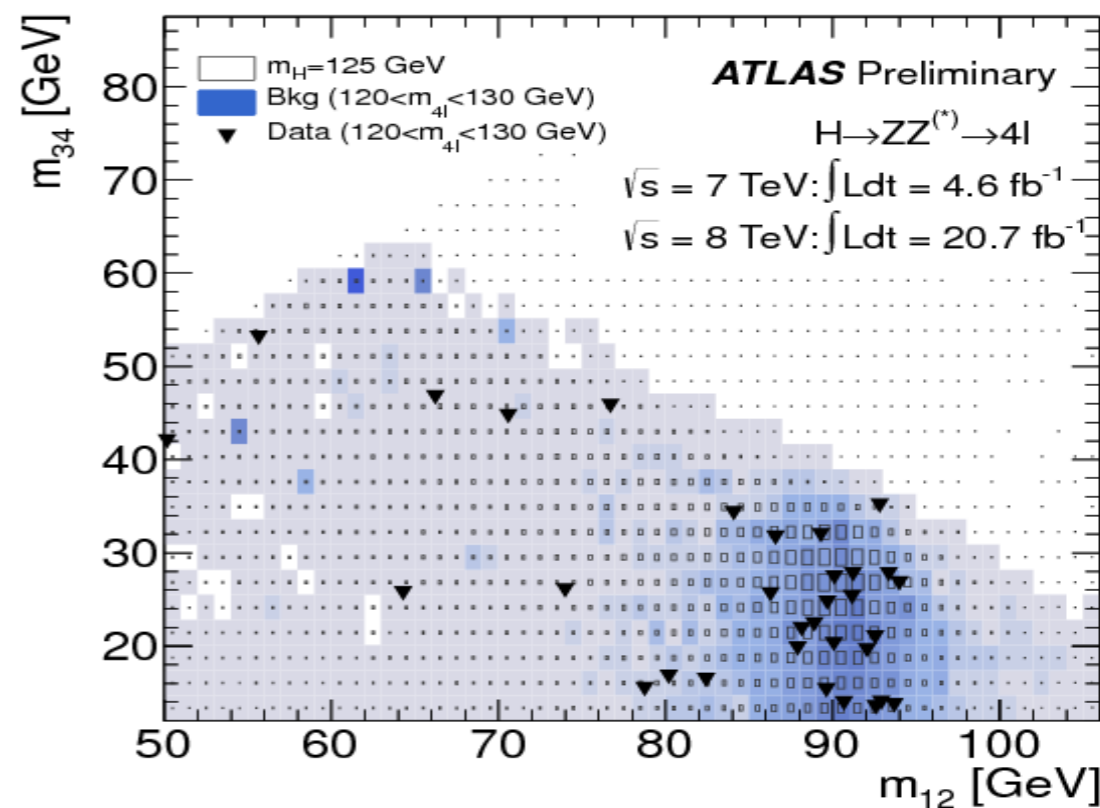
Новый бозон -> ZZ -> 4 лептона



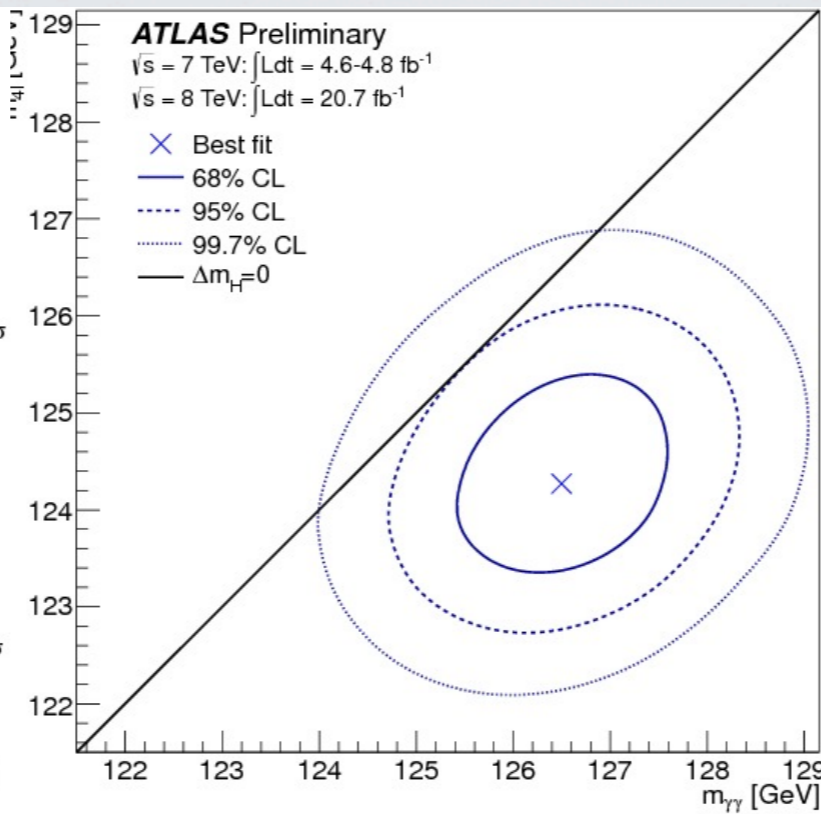
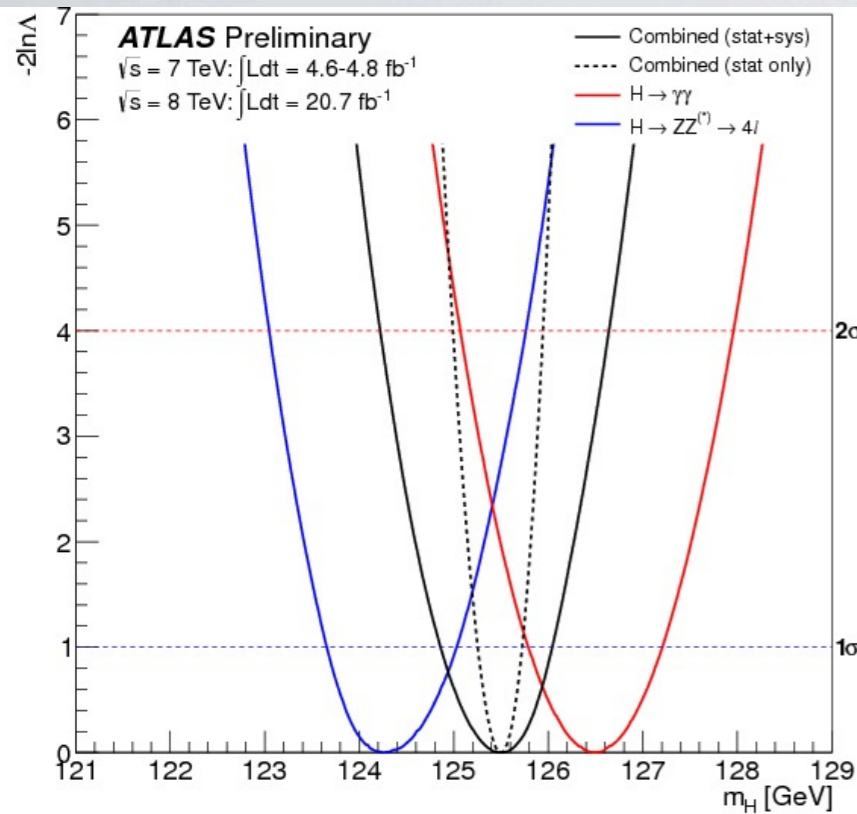
Sign/Exp	Exp	Obs
ATLAS	4.4 σ	6.6 σ
CMS	6.7 σ	7.2 σ



**Z₁ Z₂
mass
ok**



Новый бозон -> ZZ -> 4 лептона: масса



$$\Delta m_H = 2.3^{+0.6}_{-0.7}(\text{stat}) \pm 0.6(\text{sys}) \text{ GeV}$$

$$2.4 \sigma \text{ wrt } \Delta m_H = 0 \text{ (p=1.5\%)}$$

Also: set E-scale, e/γ pdf's to rectangular [$\pm 1 \sigma$] (material models, calo samplings calibration...)
p = 8%

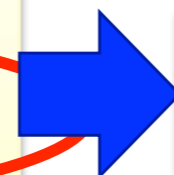
$$m_H = 125.5 \pm 0.2 (\text{stat})^{+0.5}_{-0.6} (\text{sys}) \text{ GeV}$$

BUT

ATLAS

$$m_{4e} = 126.2 \pm 1.5$$

$$m_{4\mu} = 123.8 \pm 0.8$$



CMS situation simpler:

$$m_x = 125.8 \pm 0.6 \text{ GeV } (\pm 0.5\%)$$

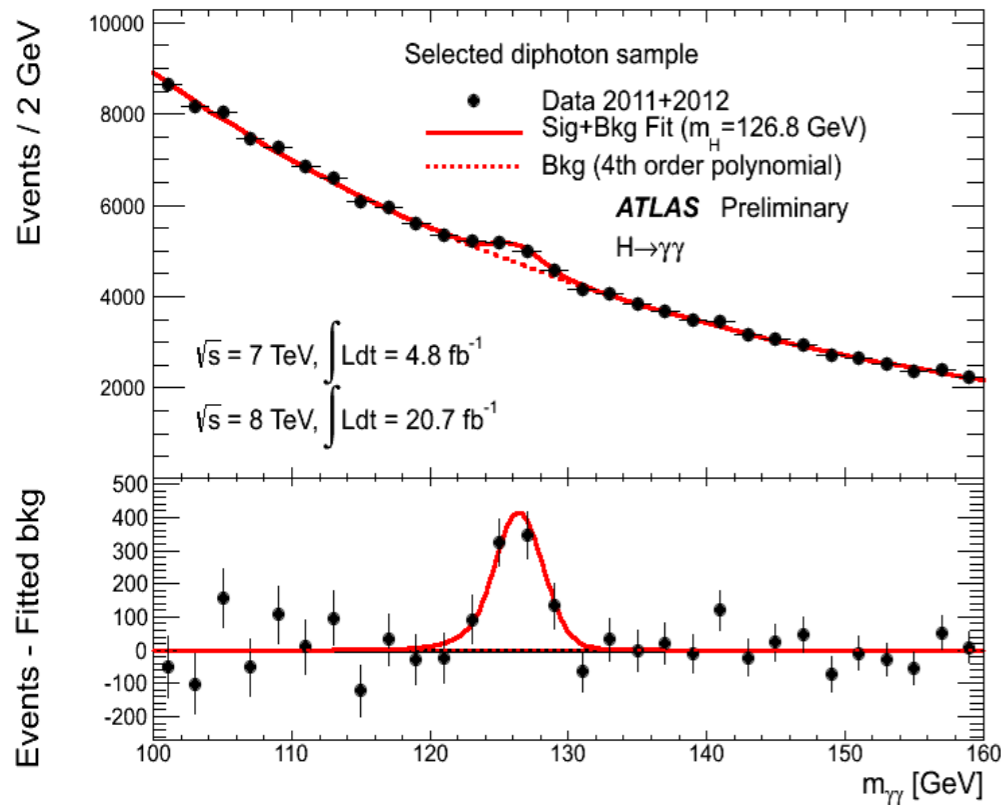
$$= 125.8 \pm 0.4(\text{stat}) \pm 0.4(\text{syst}) \text{ GeV}$$

Conclusion: not an issue

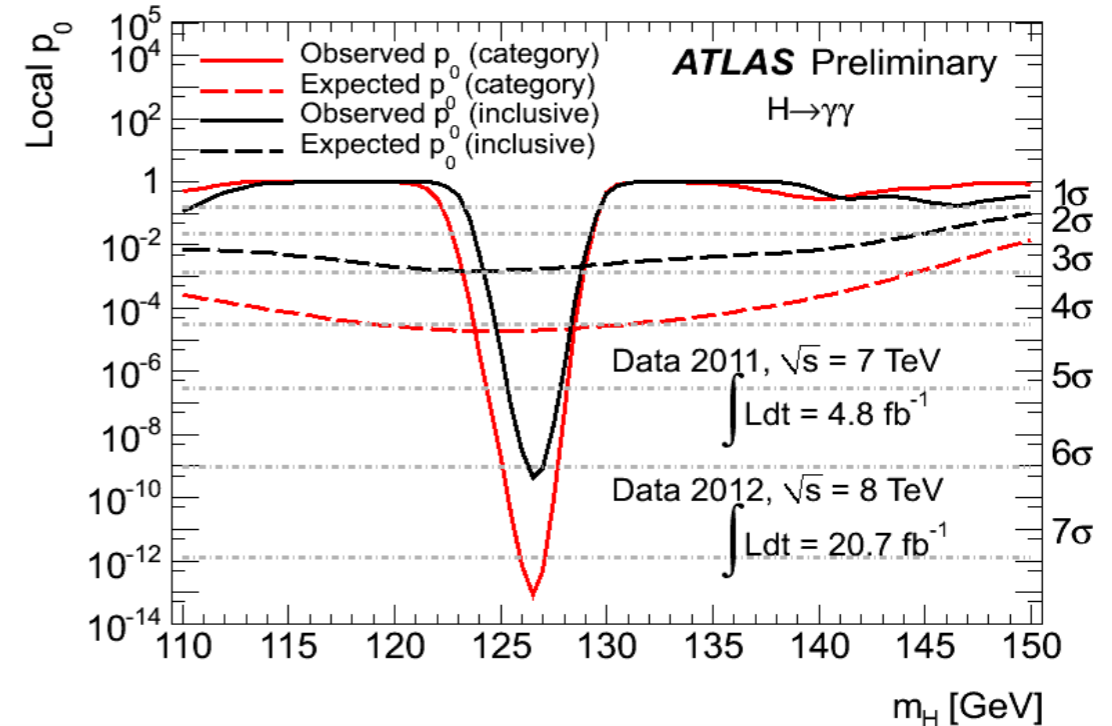
Новый бозон -> $\Upsilon\Upsilon$



Update from ATLAS

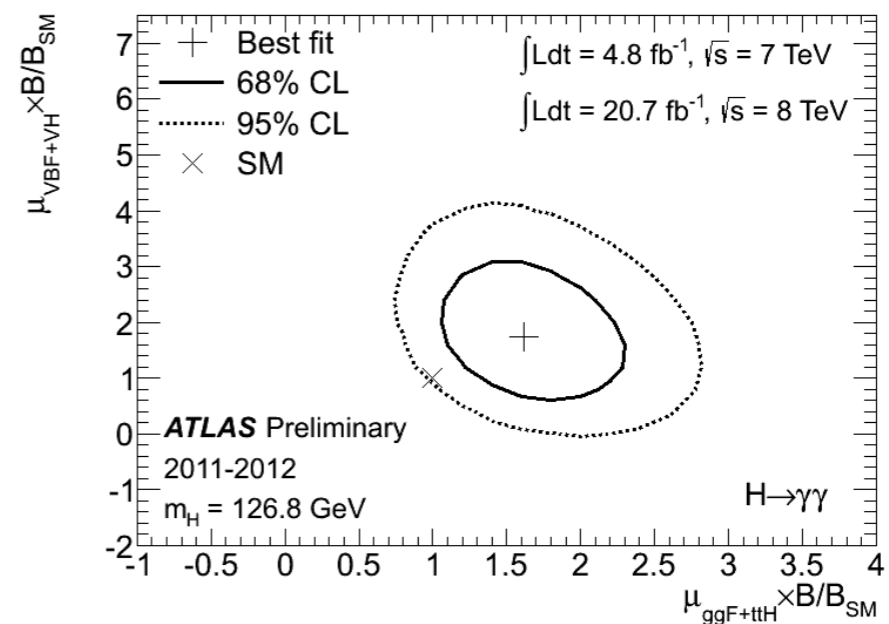


**Mass window ~125 GeV
with 90% signal: S/B~3%**



Significance; obs: 7.4σ ; exp: 4.1σ

Mass: $126.8 \pm 0.2(\text{stat}) \pm 0.7(\text{sys}) \text{ GeV}$

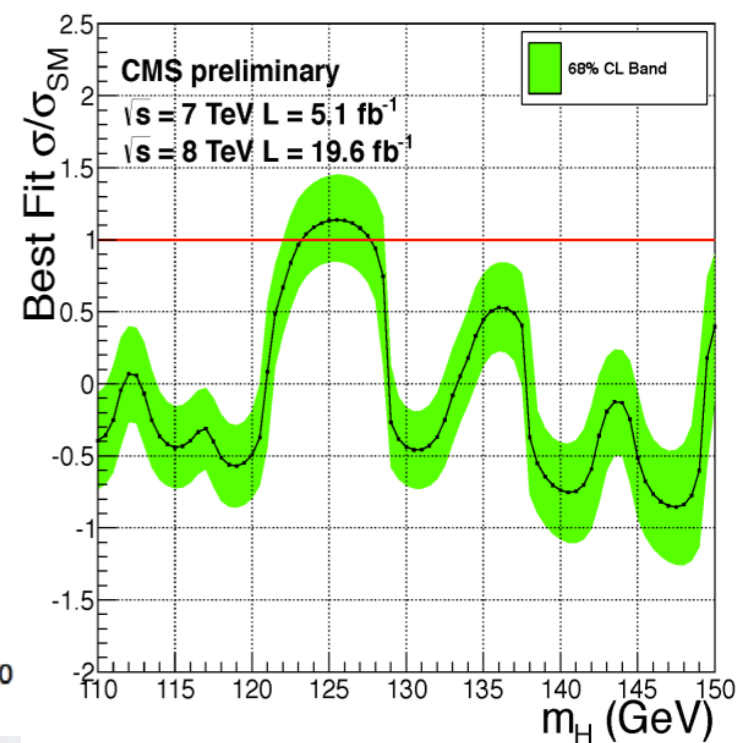
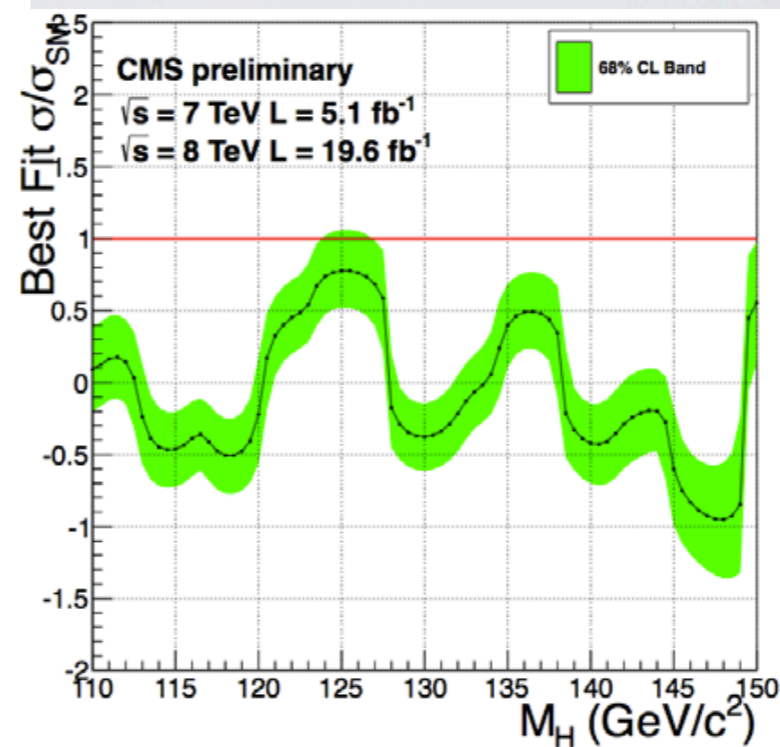
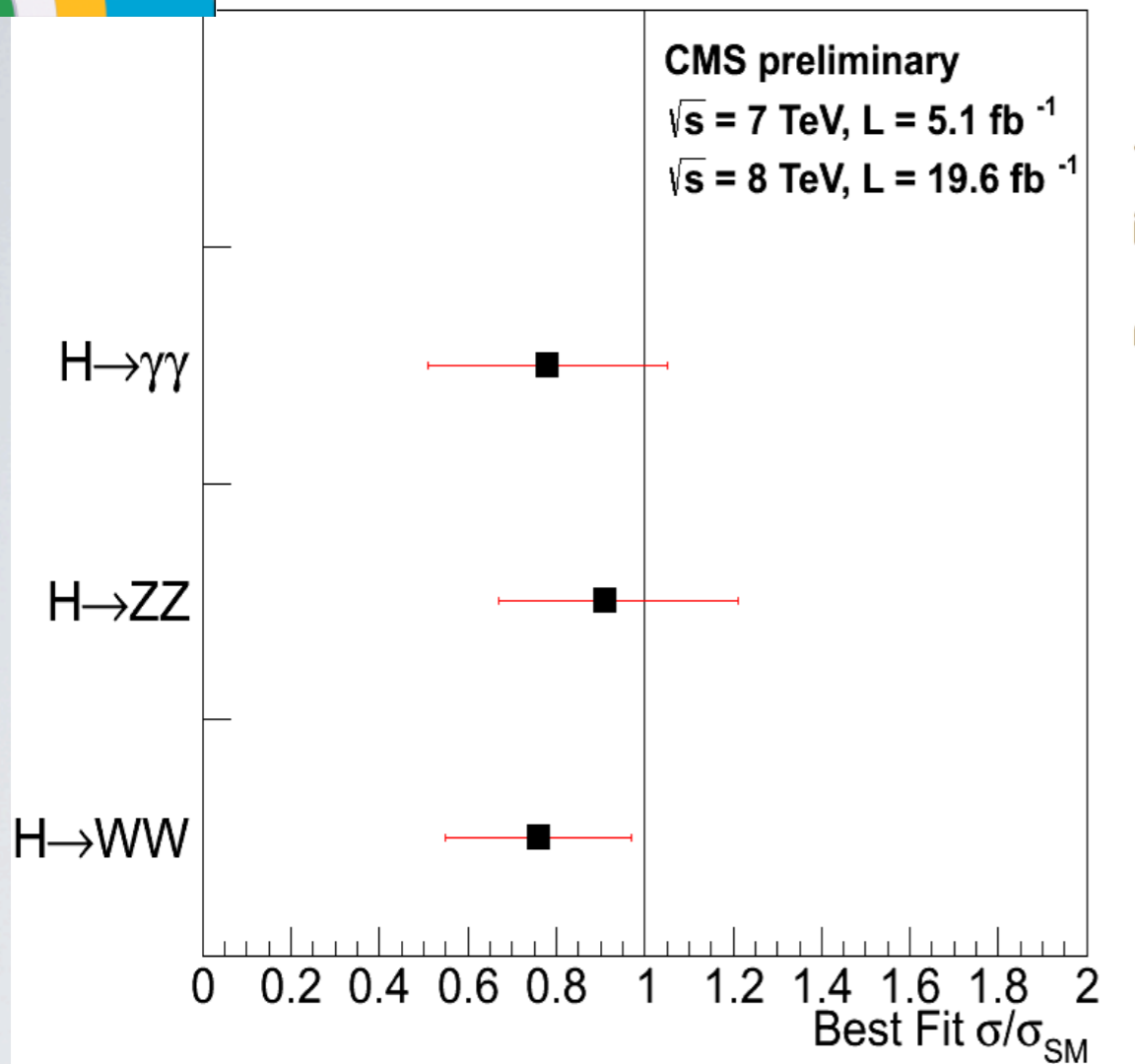


Новый бозон -> $\gamma\gamma$



H to $\gamma\gamma$ MVA

H to $\gamma\gamma$ Cuts



Significance of observation:

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$: 6.7 σ (7.2 exp.)

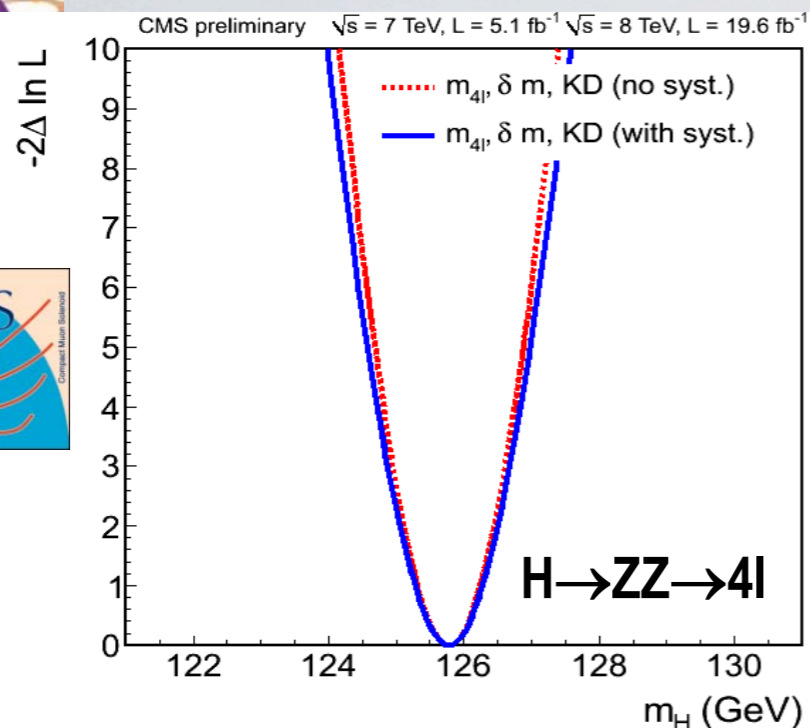
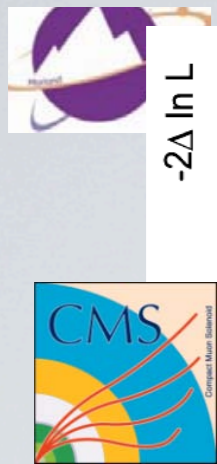
$H \rightarrow WW$: 4.1 σ (5.1 exp.)

$H \rightarrow \gamma\gamma$: 3.2 σ (4.2 exp)

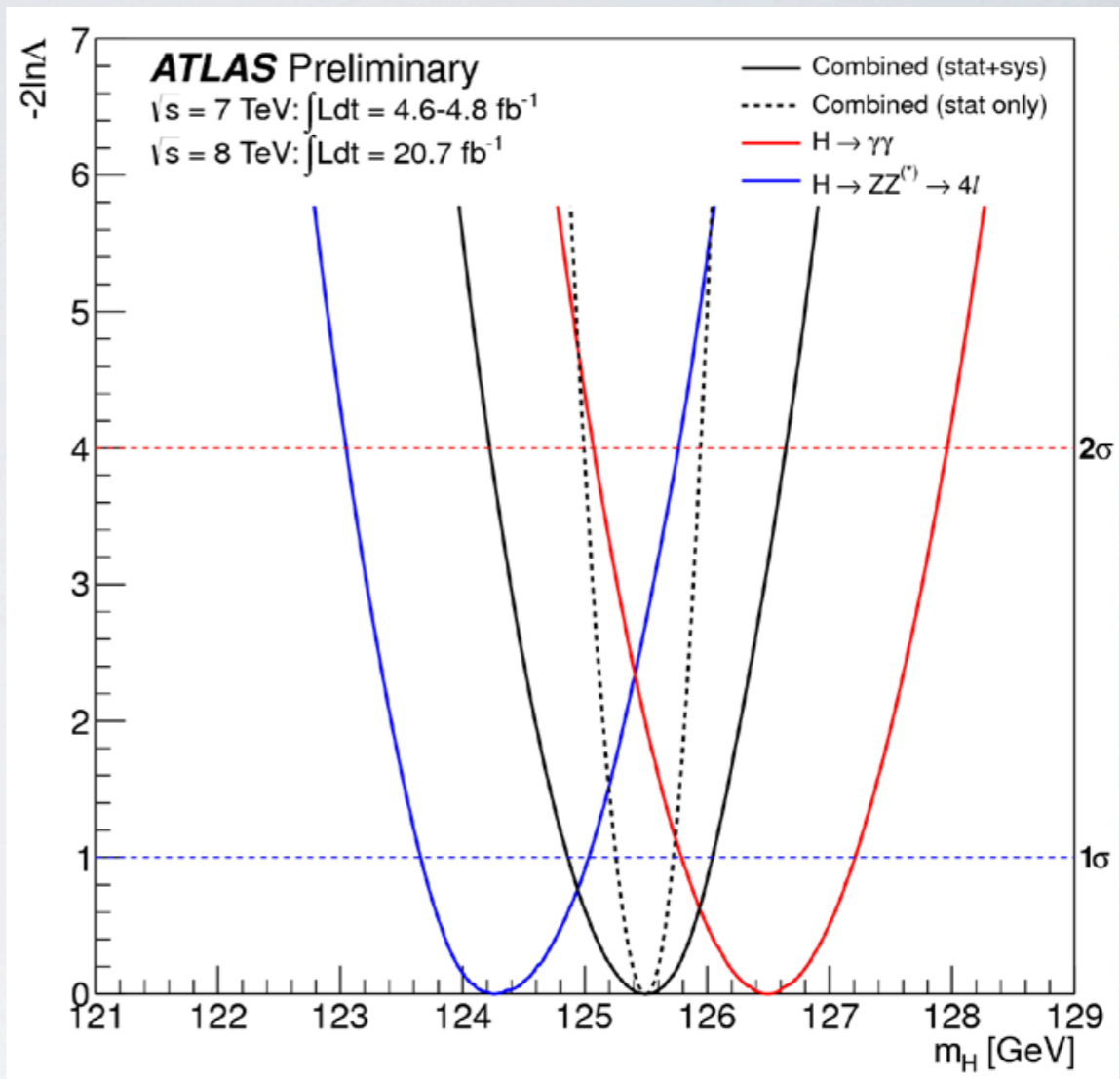
- Updates are not implemented on the plots presented on the previous slide
- On the full data set and with improved analysis H to $\gamma\gamma$ μ value went down from ~ 1.3 to ~ 0.8 , but results are compatible and “cut based” analysis is in agreement with new MVA based value
- No “excess” in $\gamma\gamma$ channel and all results are compatible with SM



Higgs Mass (full data set)

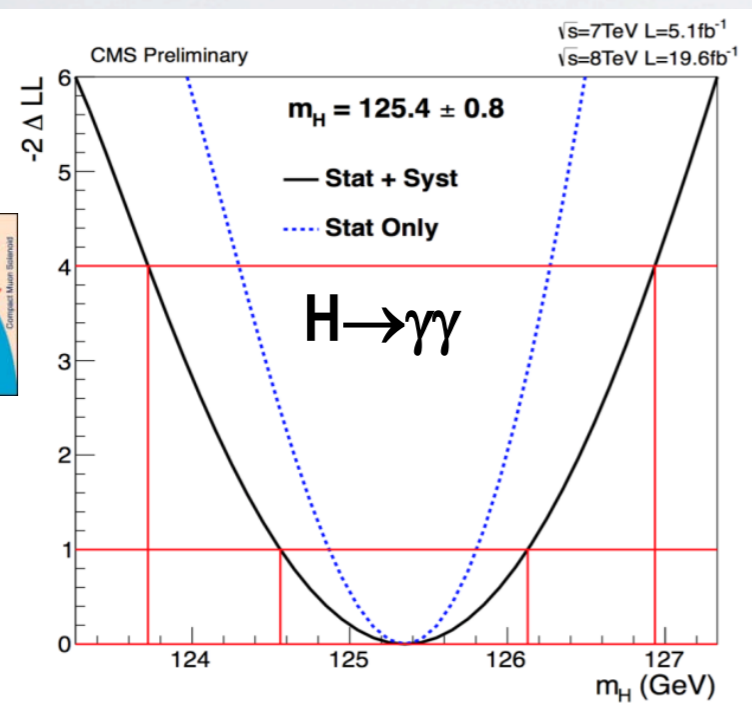
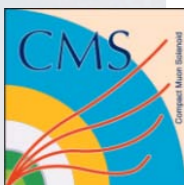


$m_H = 125.8 \pm 0.5 \text{ (stat.)} \pm 0.2 \text{ (syst.) GeV}$



$\gamma\gamma$ and ZZ results are compatible at 2-8% level

$m_H = 125.5 \pm 0.2 \text{ stat } -0.6 + 0.5 \text{ syst GeV}$



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

All results are compatible and provide Higgs mass of ~125.6 GeV with ~0.3 GeV uncertainty

Скалярный бозон Стандартной Модели?



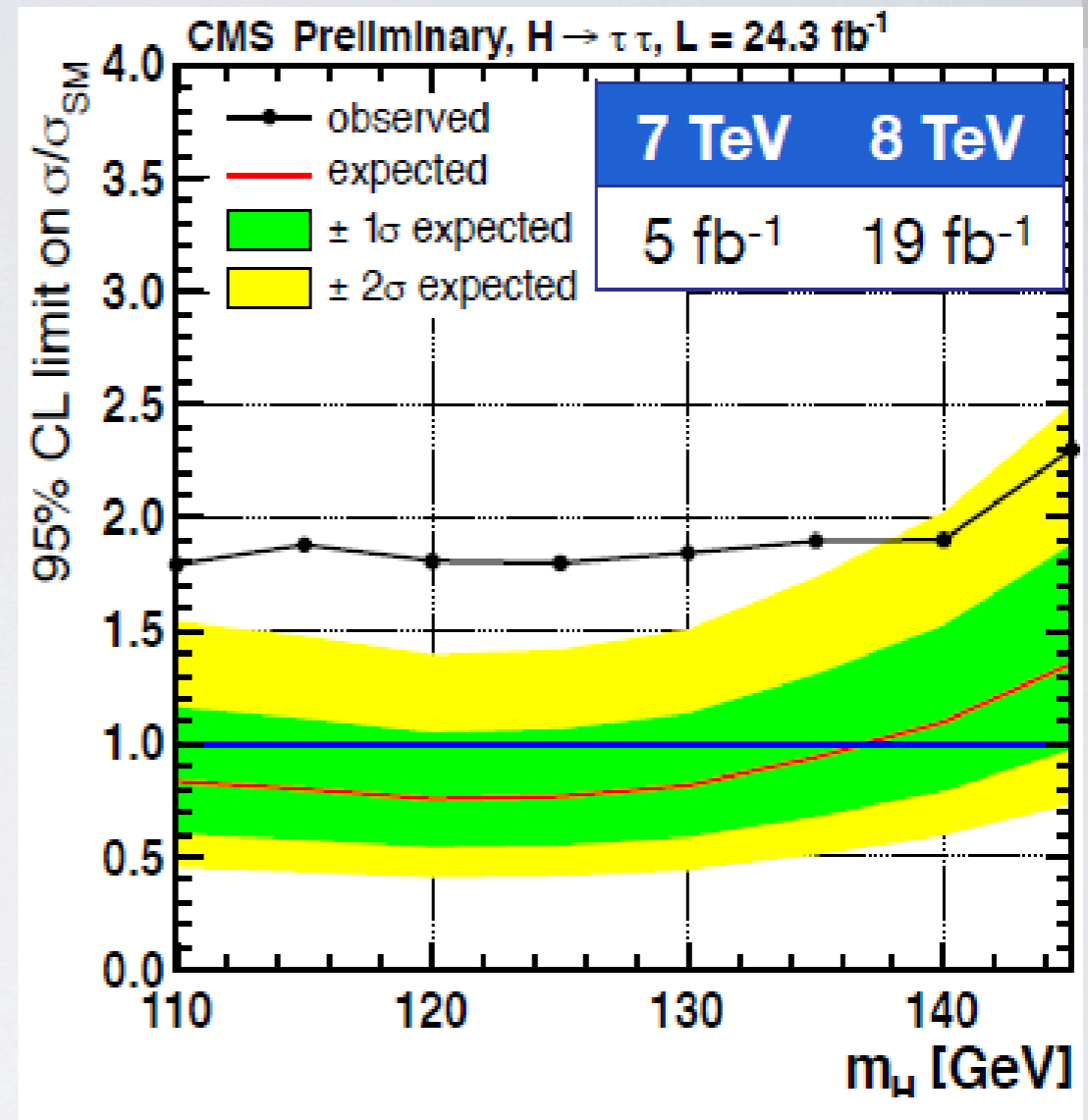
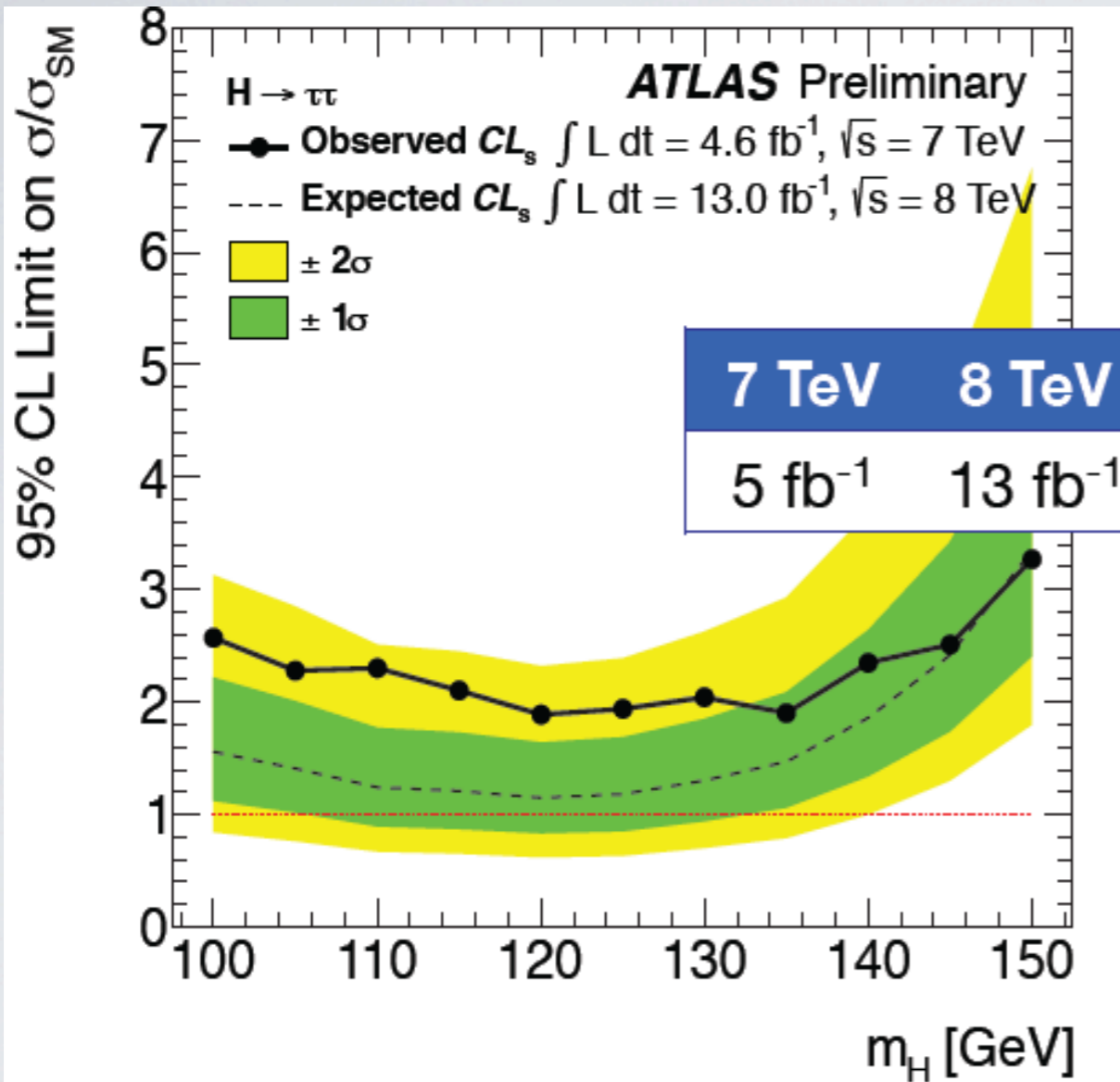
Бозон Хиггса СМ:

- спин 0
- CP-четная компонента $SU(2)_L$ -дублета
- константы связи с фермионами СМ $\sim m_F$
- константы связи с векторными бозонами

Новый бозон может иметь свойства вне СМ, но все еще выполнять роль бозона СМ:

- быть CP-смешанным состоянием
- иметь усиленный брэнчинг $\gamma\gamma$ и/или gg от виртуальных частиц вне СМ
- быть составной частицей

Новый бозон -> $\tau\tau$



Obs (exp) limit = 1.9 (1.2) xSM

$\mu = 0.7 \pm 0.7$

Obs (exp) significance = 1.1 σ (1.7 σ)

Obs (exp) limit = 1.8 (0.8) xSM

$\mu = 1.1 \pm 0.4$

Obs (exp) significance = 2.9 σ

- CMS reached SM sensitivity and observes excess of 2.9 σ consistent with 125 GeV Higgs
- Both ATLAS and CMS compatible with SM Higgs to $\tau\tau$ process

Новый бозон -> bb



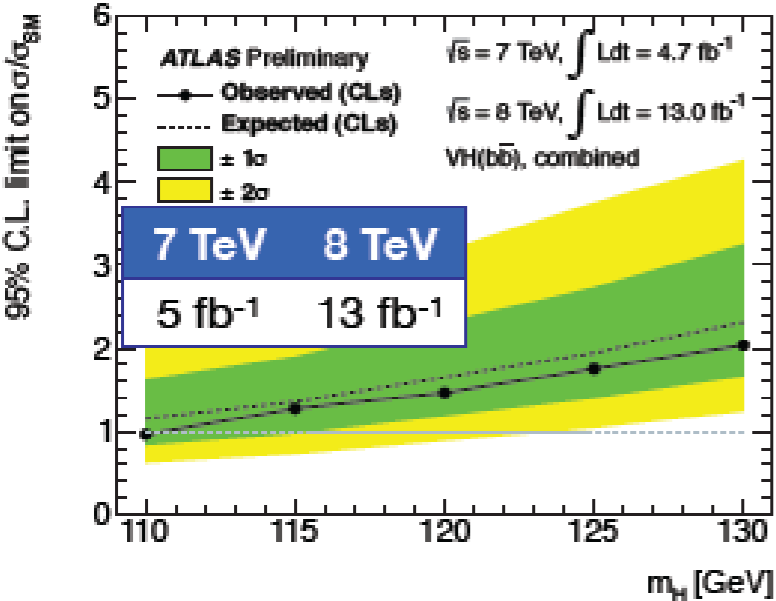
Observed (expected) limit at 125 GeV

- 1.8 (1.9) x SM prediction
- $\mu = -0.4 \pm 0.7$ (stat) ± 0.8 (syst)



Observed (expected) limit at 125 GeV

- 2.5 (1.2) x SM prediction
- $\mu = 1.3^{+0.7}_{-0.6}$, 2.2 σ (2.1 σ) excess



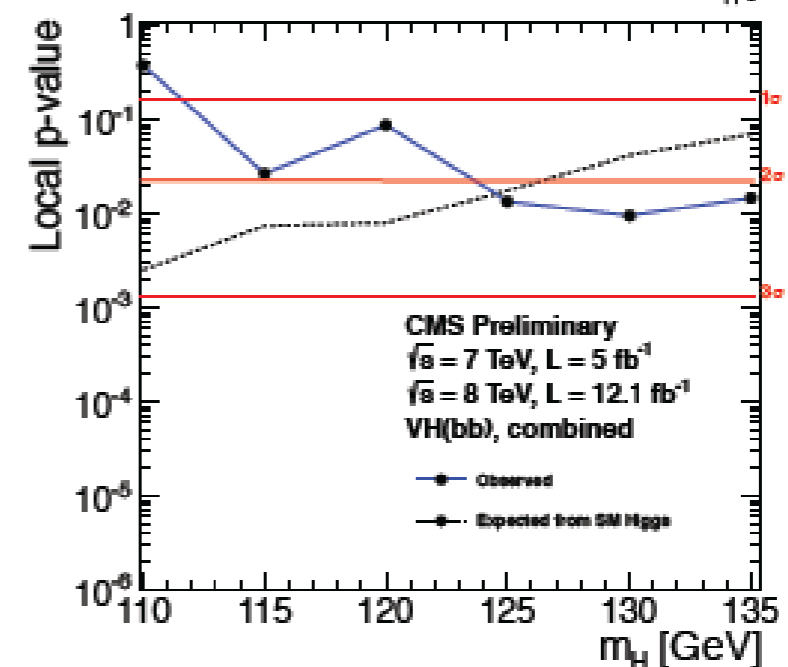
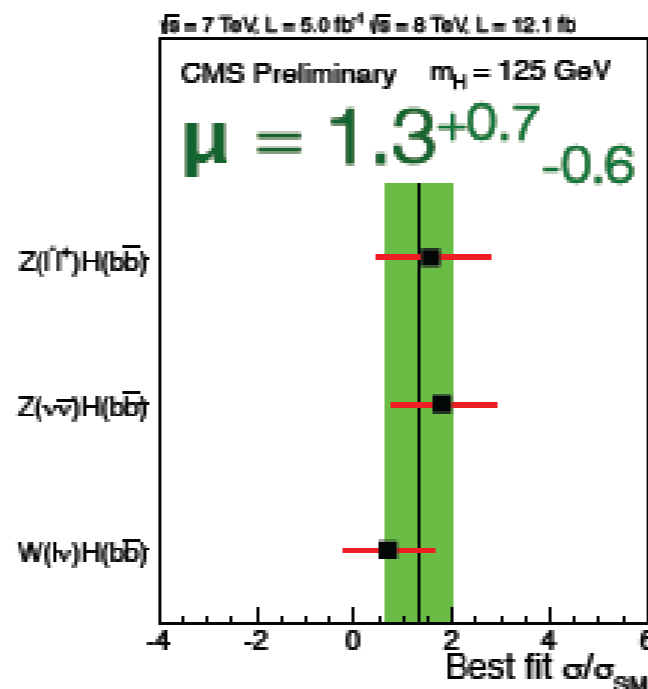
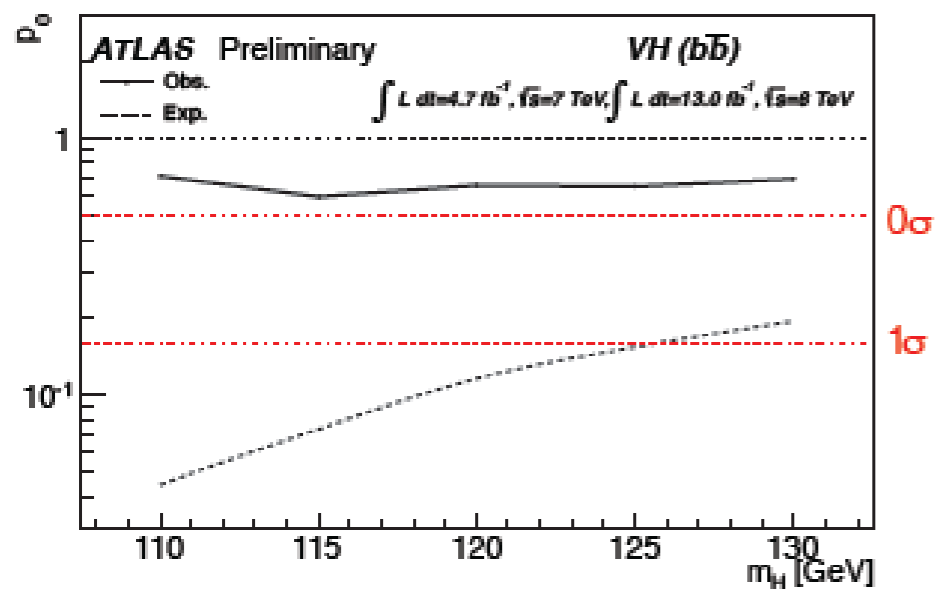
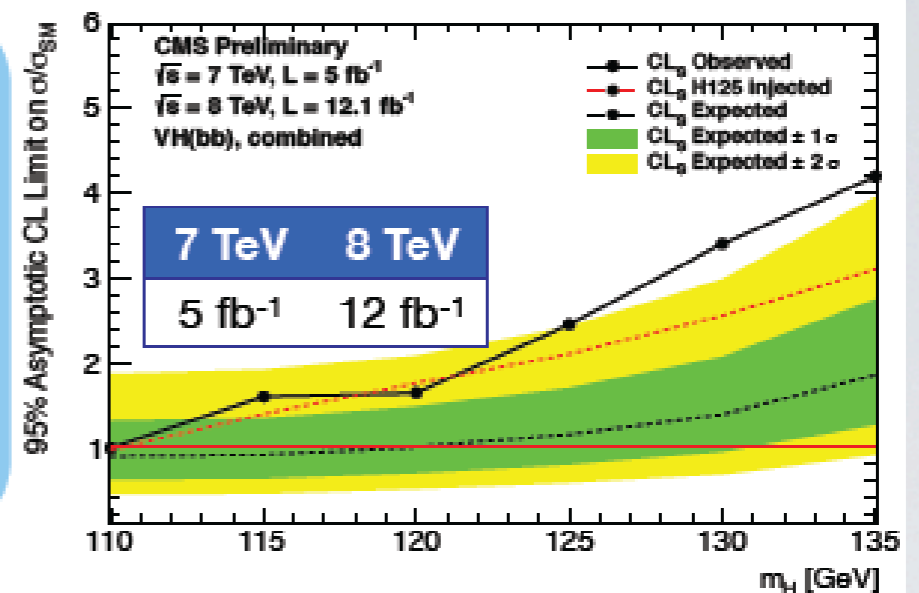
Main systematics:

- b-tag efficiency, JES

Many analysis improvements

1.5x more data to analyze

SM sensitivity in range!

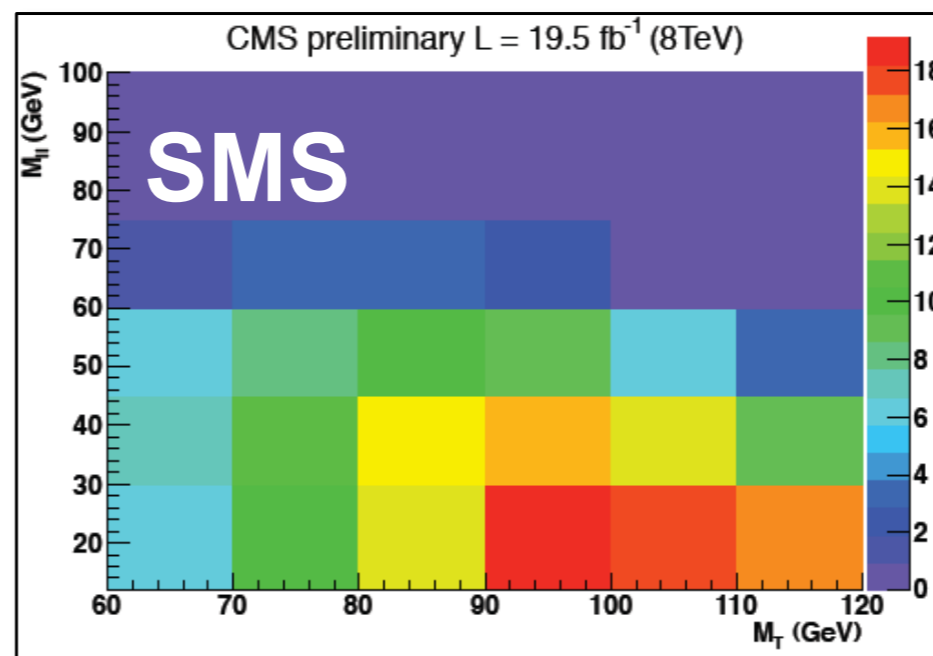
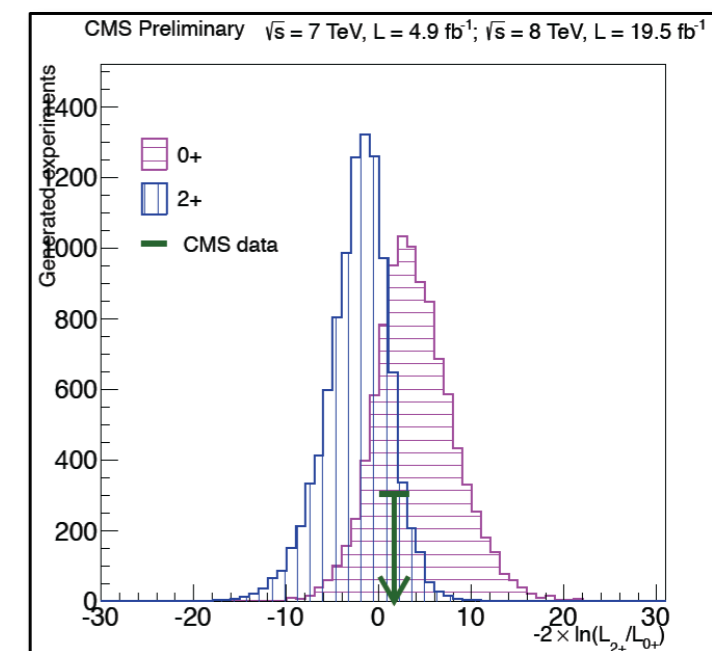
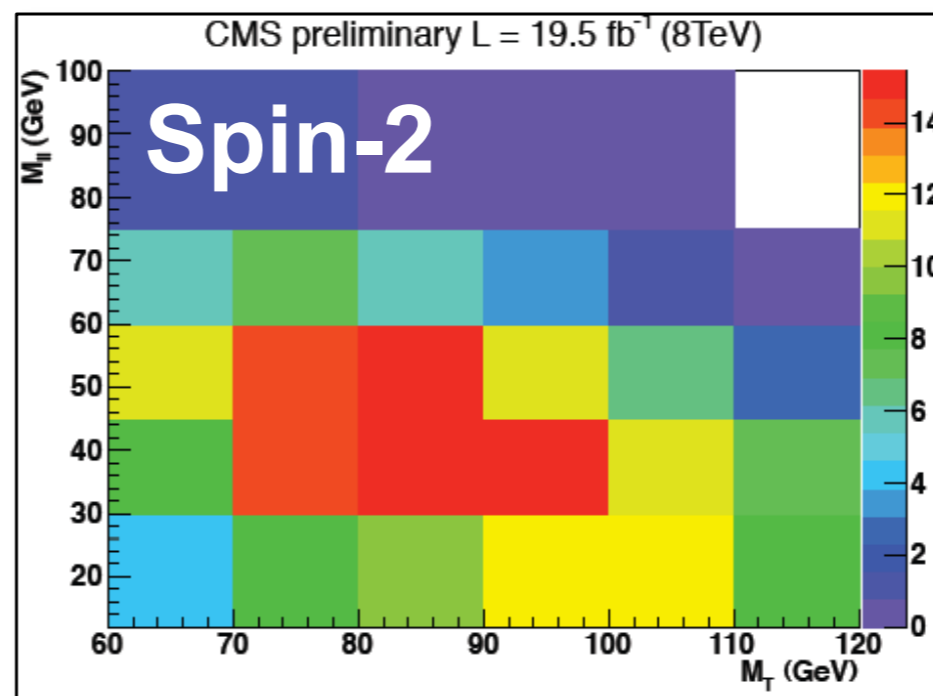
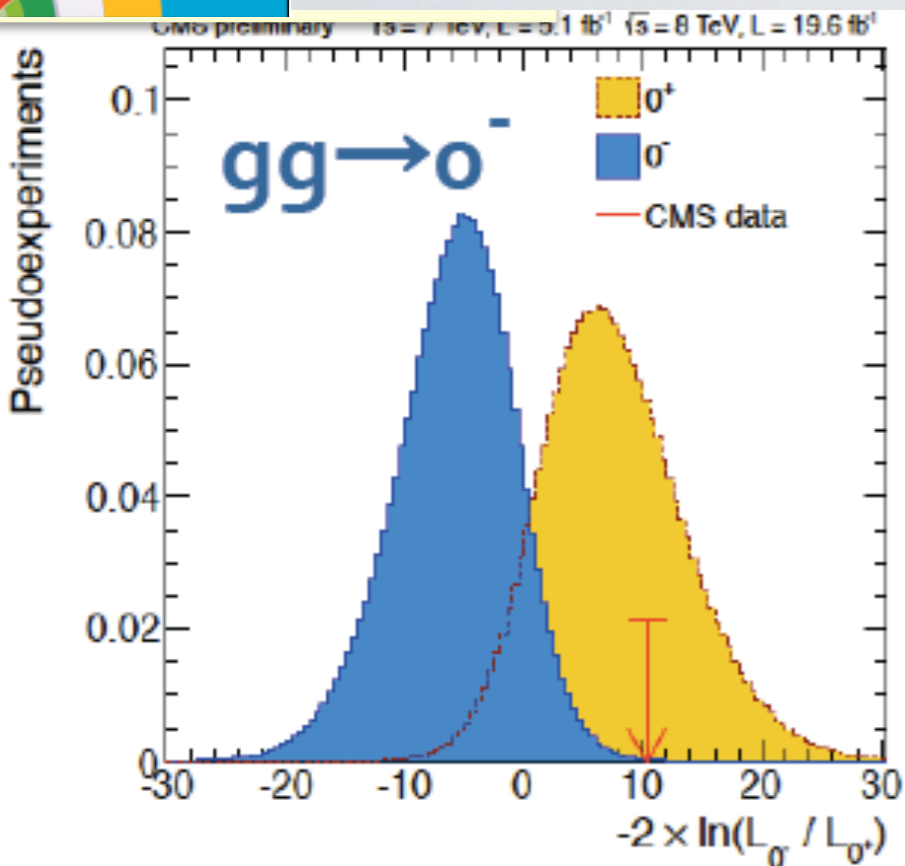


Sensitivity is close to SM level with excess at CMS and small deficit at ATLAS

Results are compatible with SM, will reach ~3 sigma with full 2012 dataset



Спин-четность: $H \rightarrow ZZ, WW$



Expected separation $\sim 2\sigma$
Data: consistent with both hypotheses; favors slightly $0+$

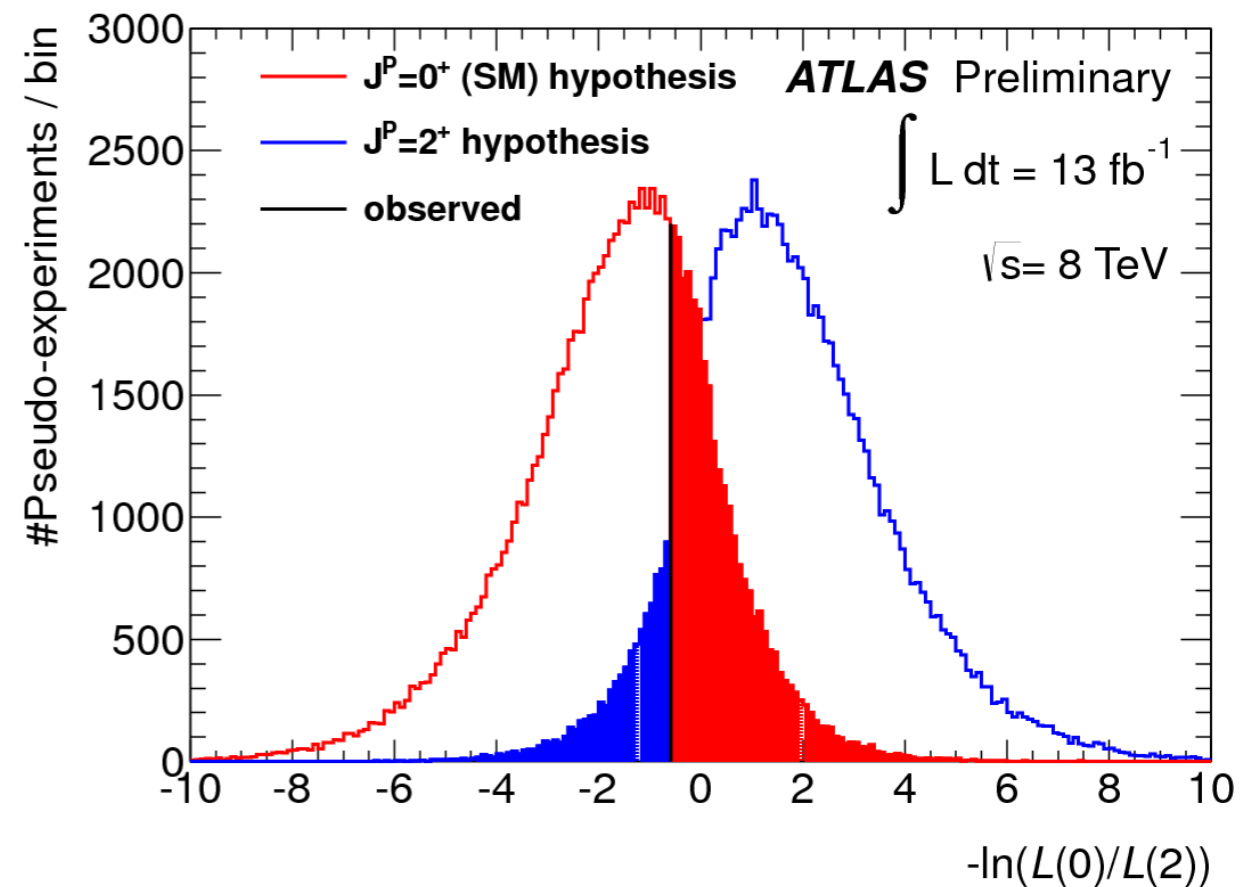
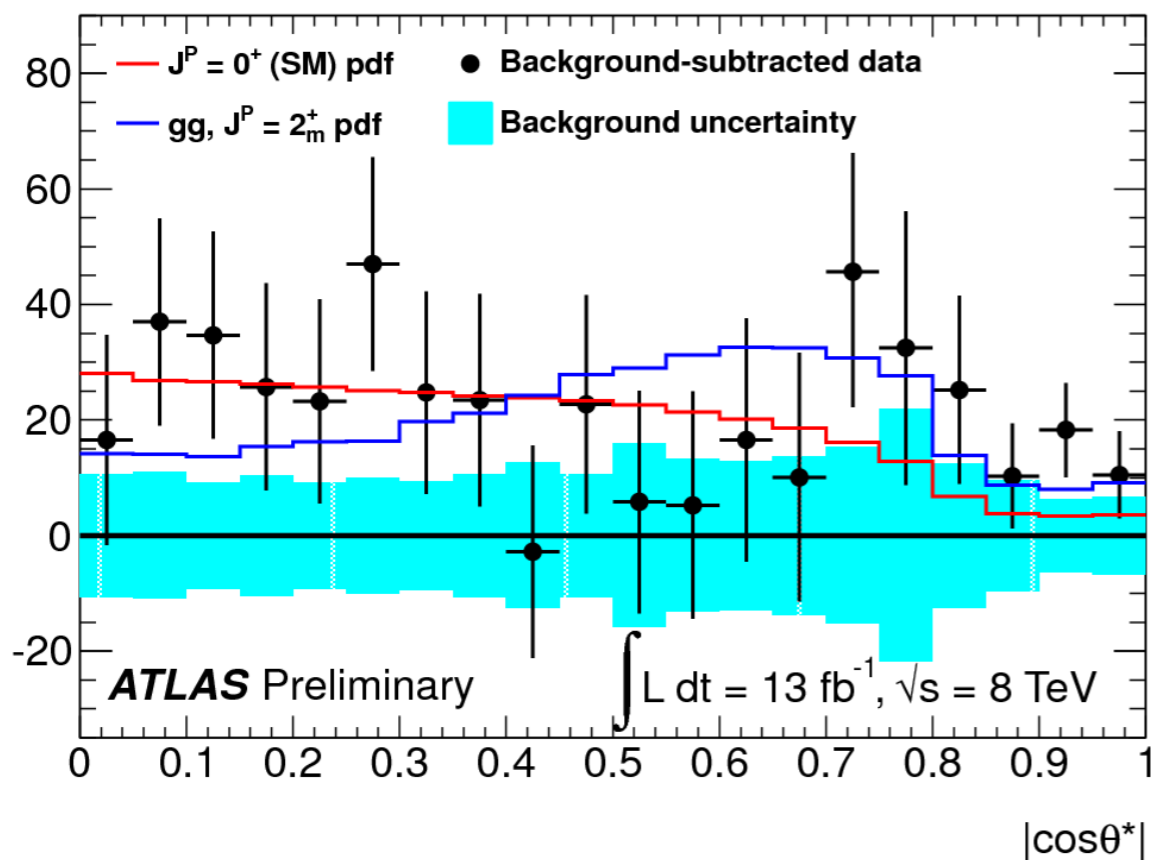
**ZZ^* :
 pseudoscalar,
 spin-1 and spin-2
 cases excluded at
 $\geq 95\%$ CL**



Спин-четность: $H \rightarrow \gamma\gamma$

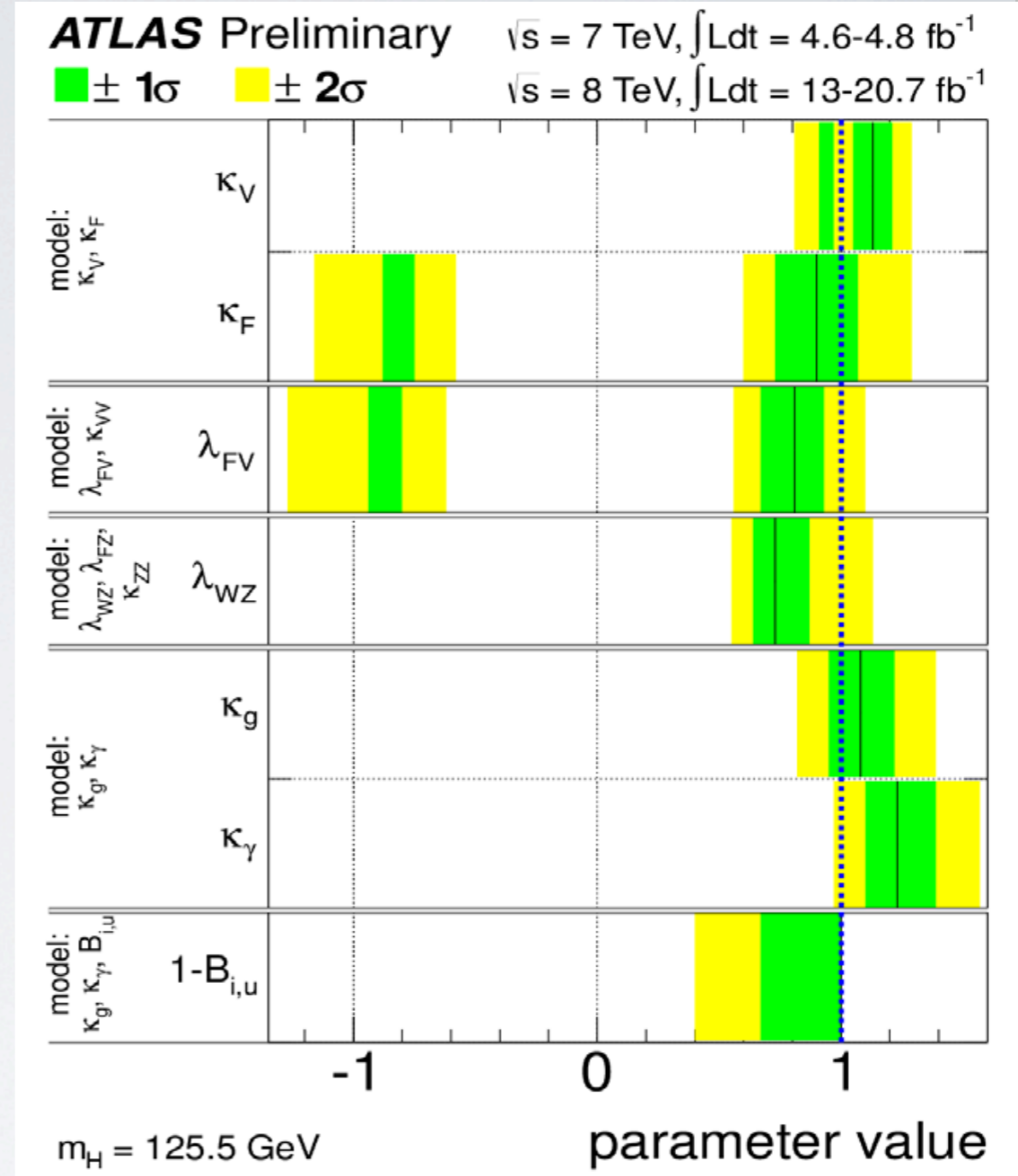
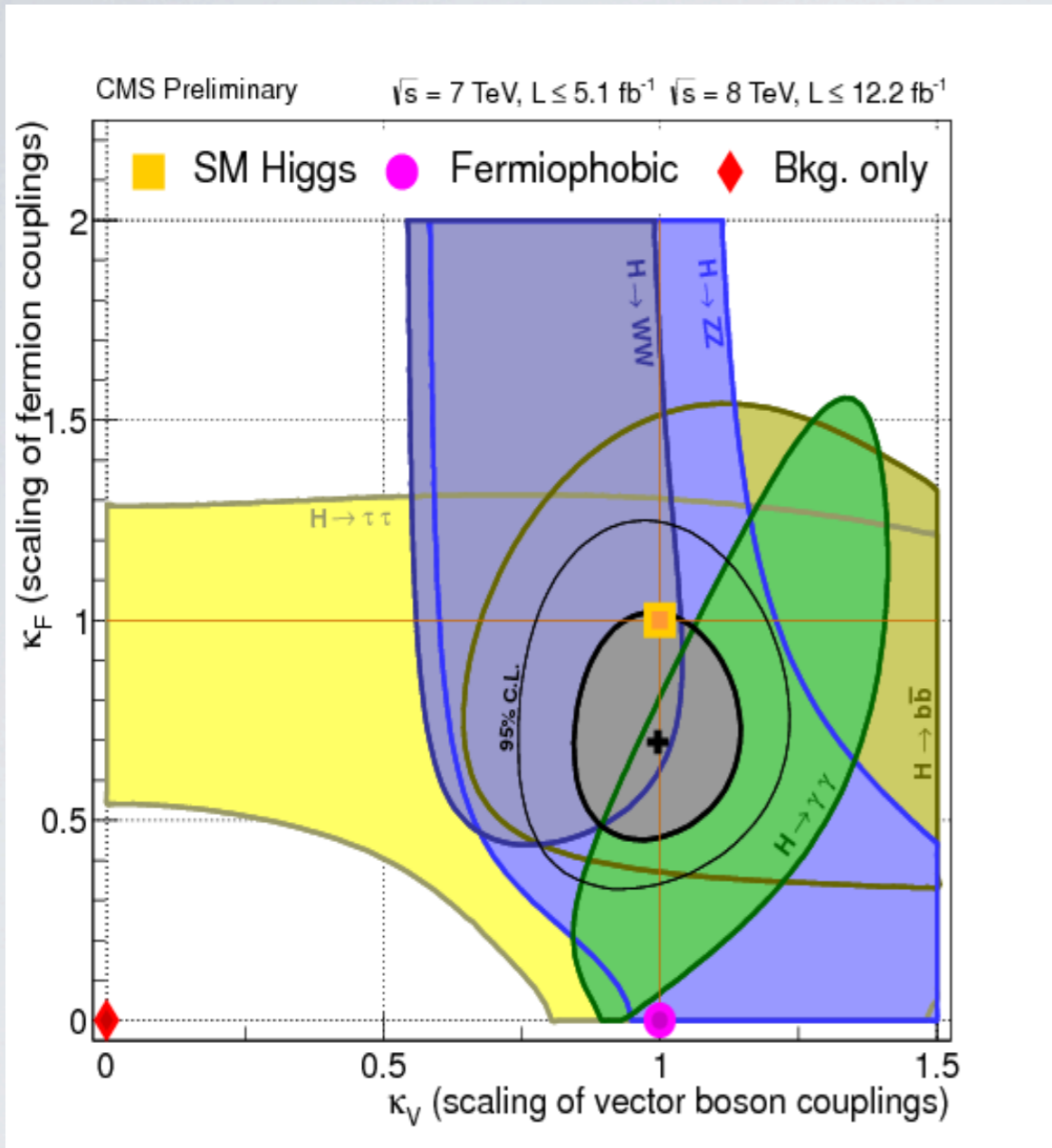


Sensitive to spin-0 vs spin-2



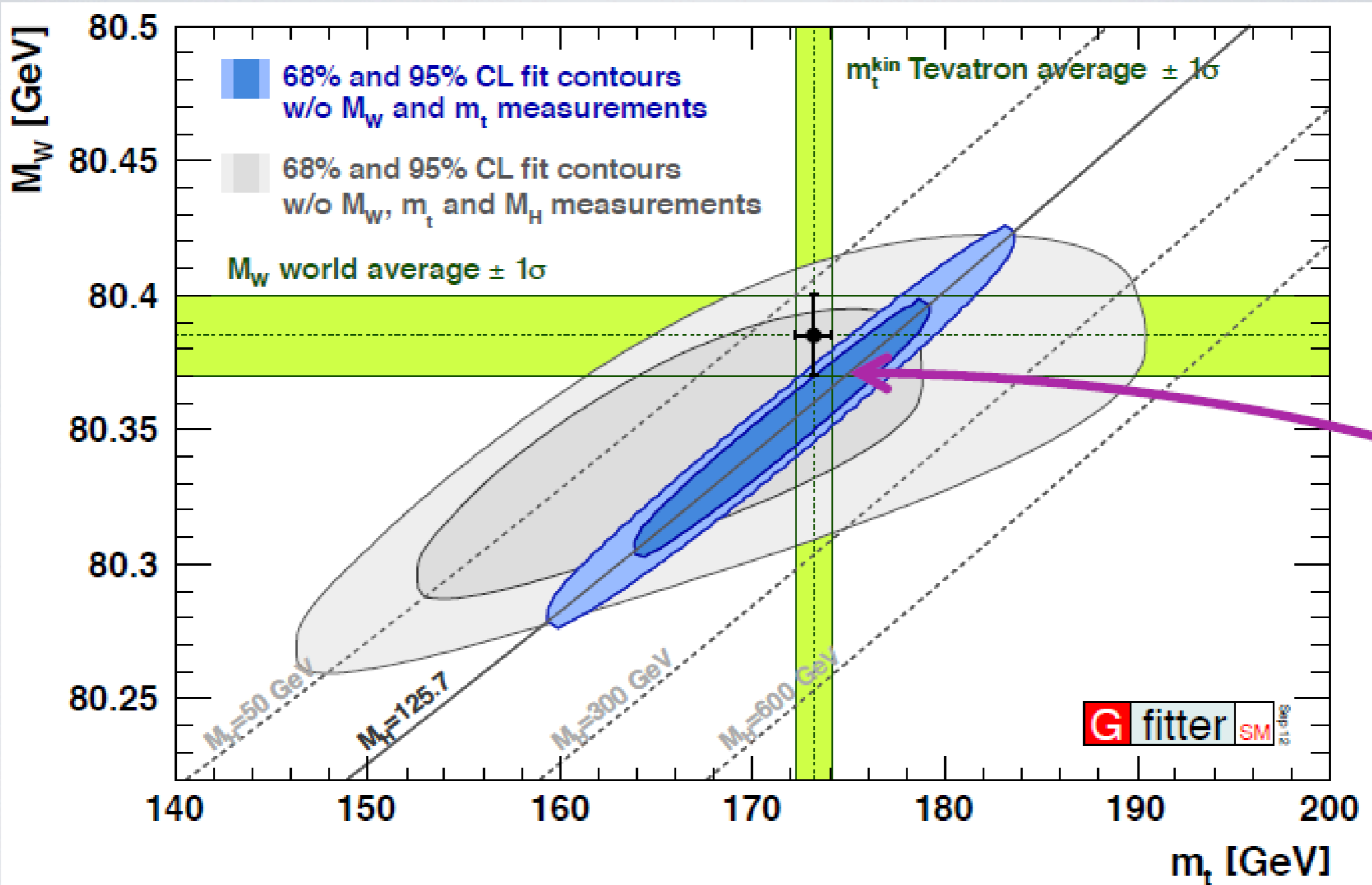
- Spin-2⁺ hypothesis expected exclusion CL_s at 93%
- Observation compatible with spin-0⁺, slightly favored over spin-2⁺ hypothesis

Новый бозон: константы связи



Test standard model by applying scale factors κ_i to each coupling
 Assume a single narrow resonance with a mass near 125 GeV
 All results (many more not shown above) are in reasonable agreement with SM, while errors are relatively large: $\sim 30\%$ for κ_f and $\sim 20\%$ for κ_v

Новый бозон: согласованность СМ



- Goodness of the fit is $\sim 8\%$
- Improvements on W boson mass and top quark mass are important

ФИЗИКА БАК: основные цели



- Уточнение параметров Стандартной Модели при новых энергиях
- Поиски новой динамики Стандартной Модели при новых энергиях
- Поиски бозона Хиггса Стандартной Модели
- **Поиски новой физики за пределами Стандартной Модели**



Поиски новой физики за пределами Стандартной Модели

Новые частицы
Новые взаимодействия

Суперсимметричные частицы
Дополнительные измерения пространства

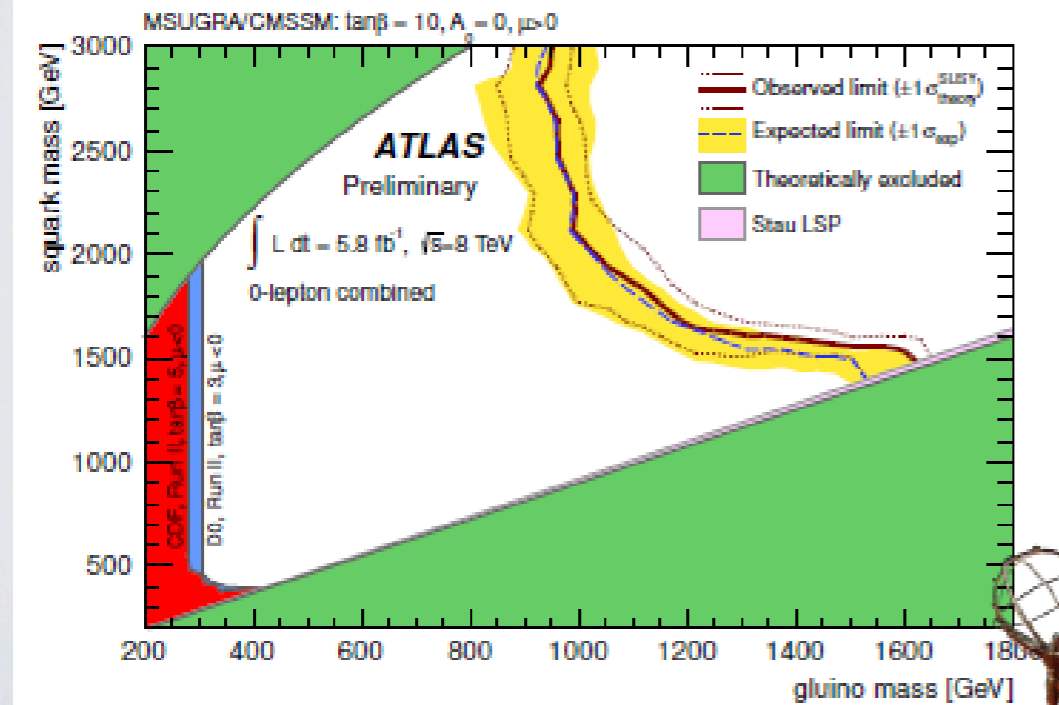
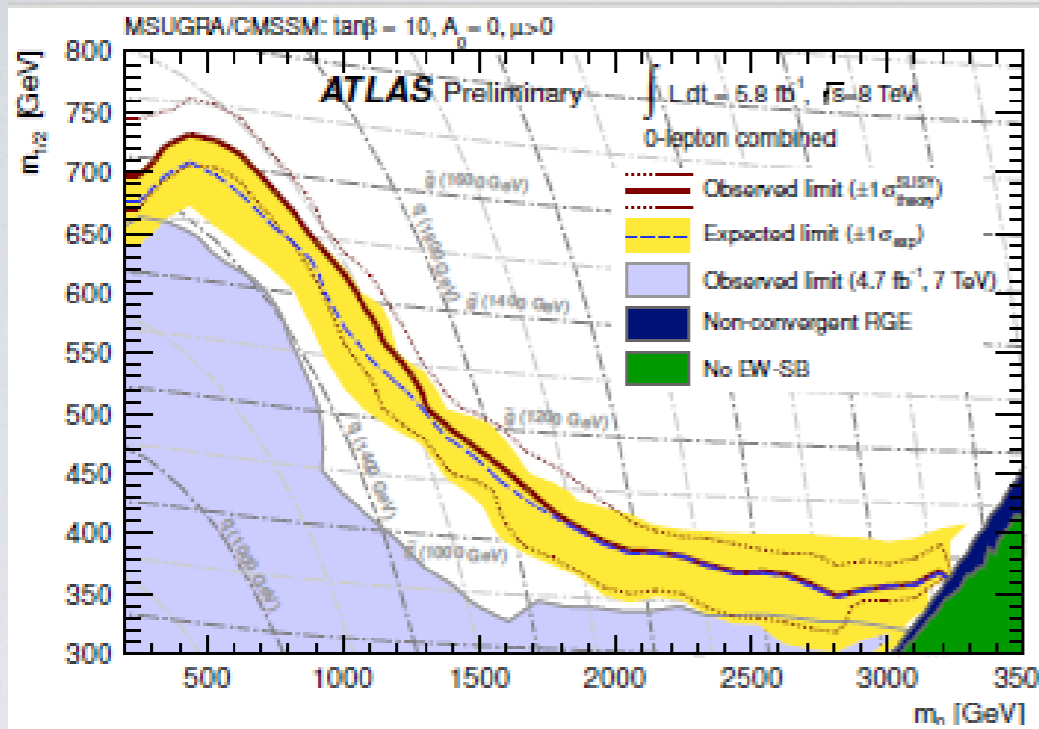
...

Поиски суперсимметрии: жесткие пределы

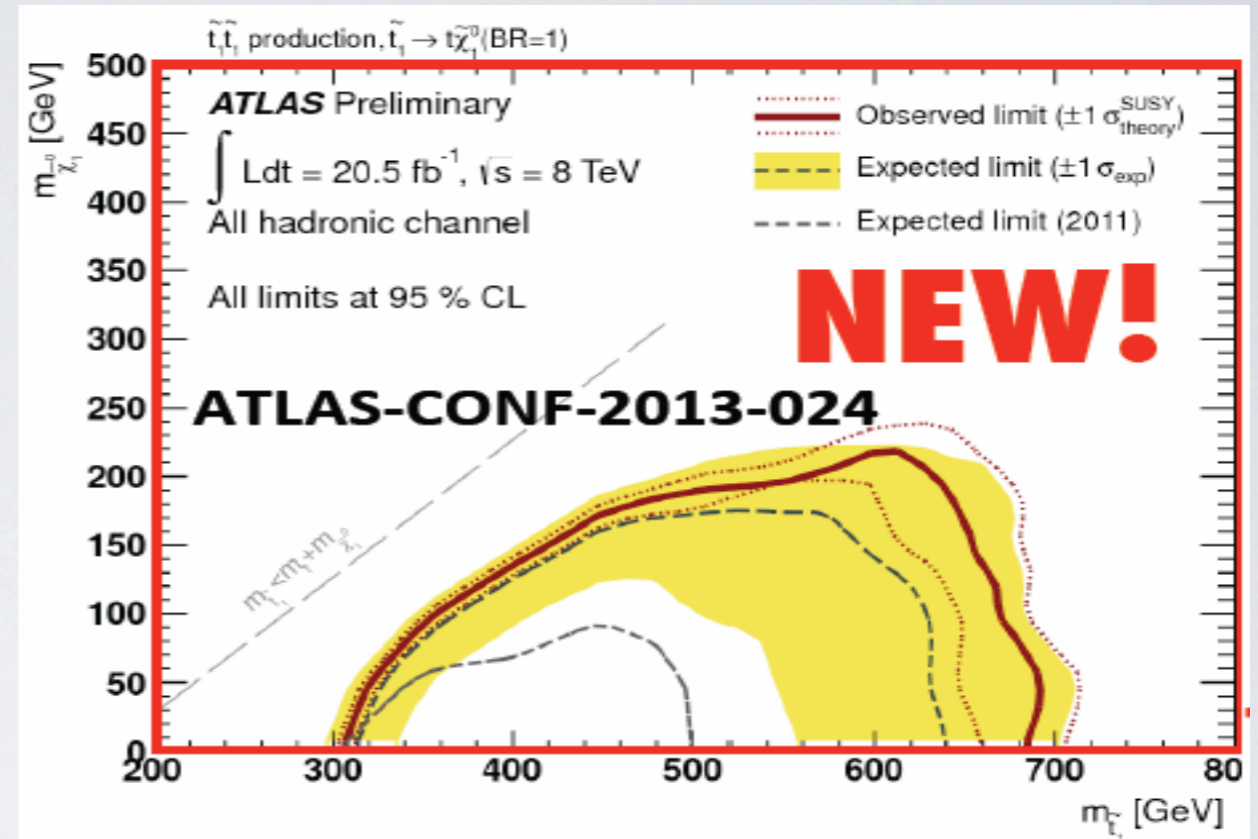


Inclusive squark and gluino

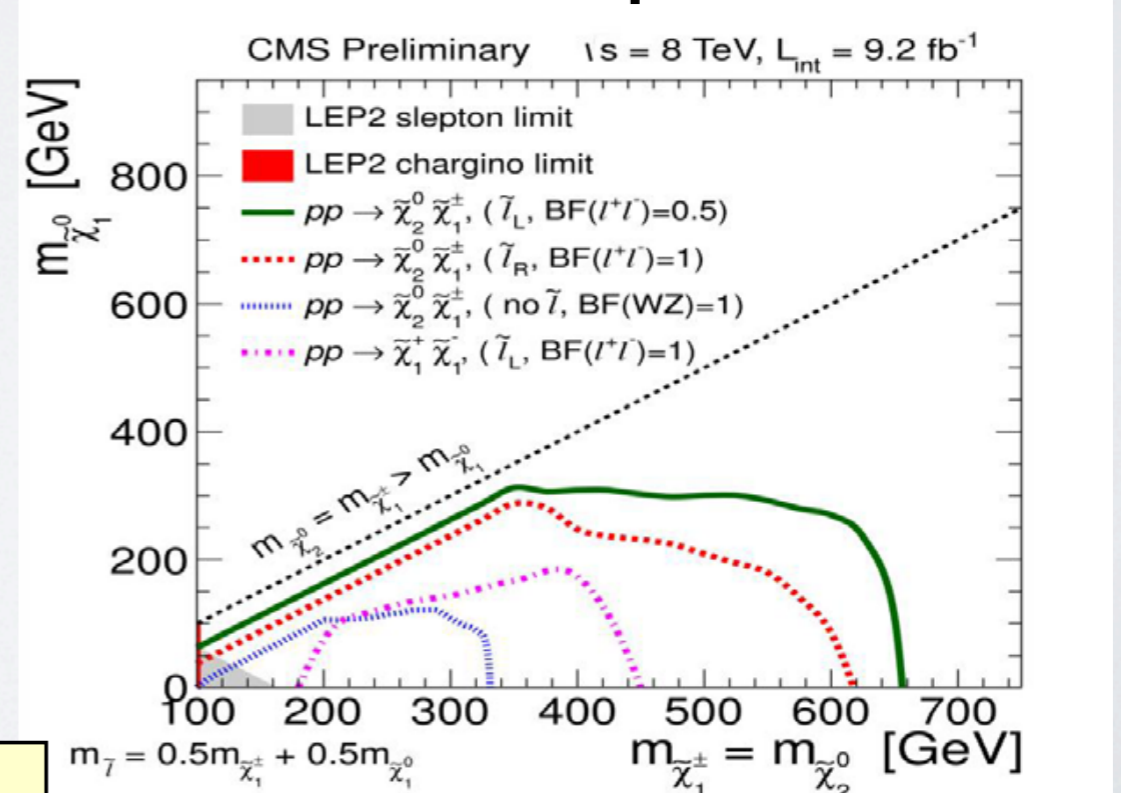
Target: $\bar{q}q, \bar{q}g, \bar{g}g \rightarrow \text{jets} + \tilde{\chi}_1^0$



Stop pair production



Electroweak SUSY production



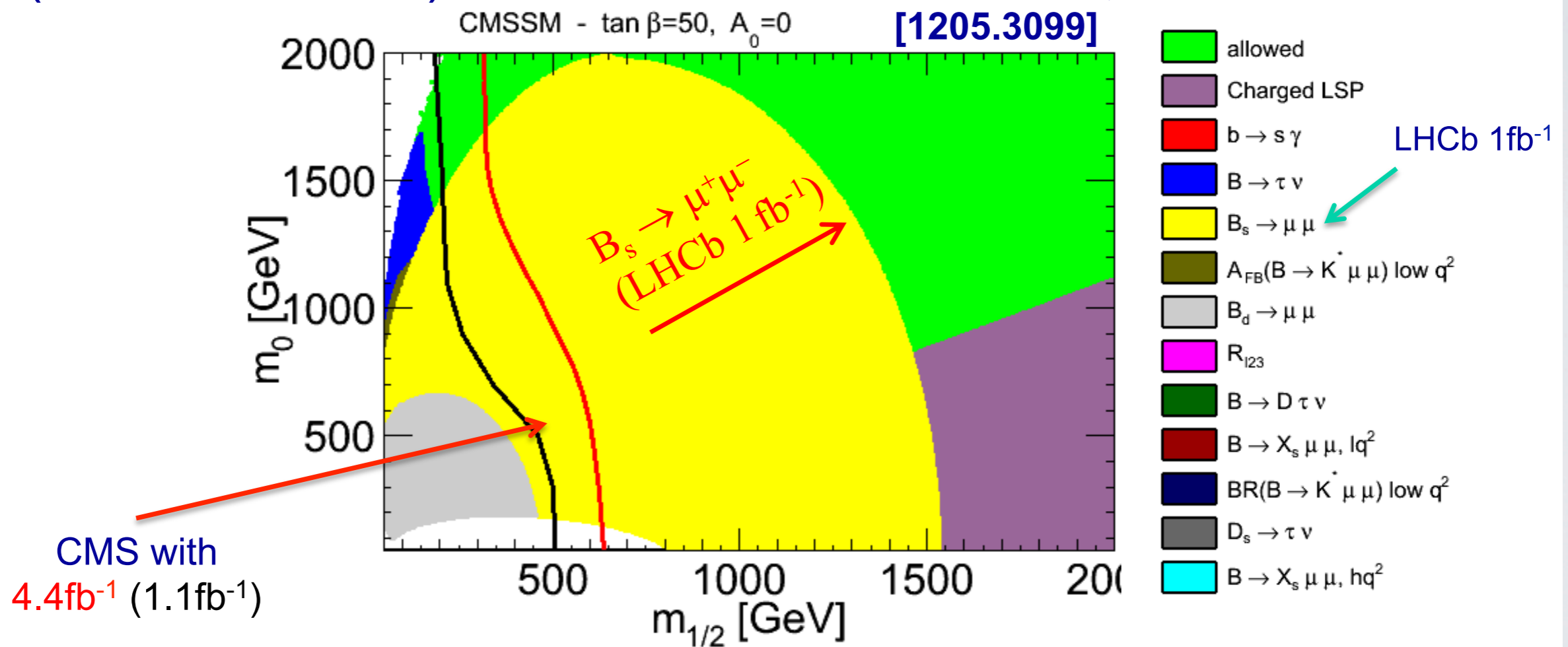
No hints of SUSY observed, strong limits set



БАК: $B_s \rightarrow \mu \mu$

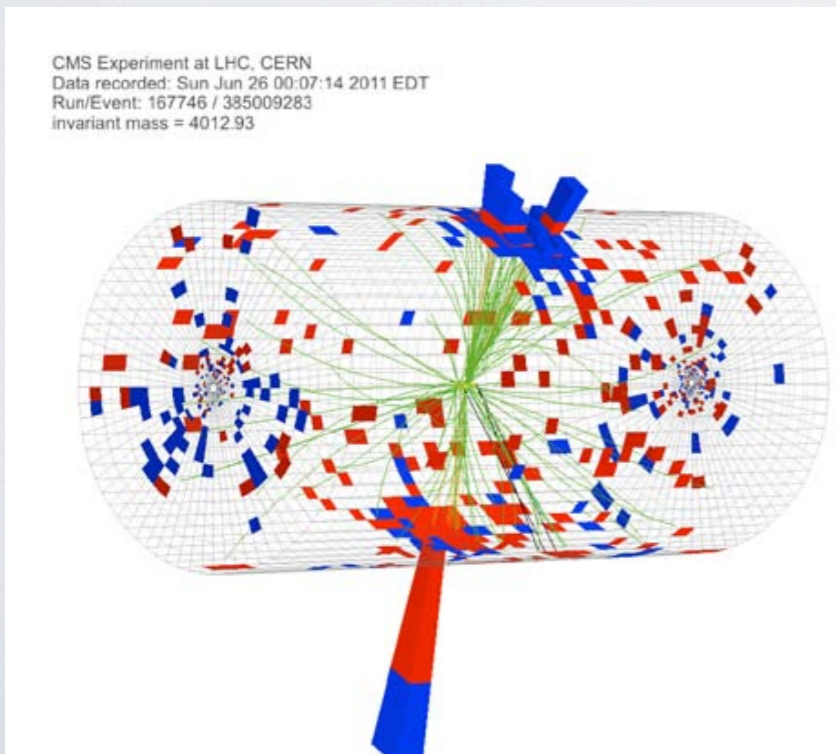
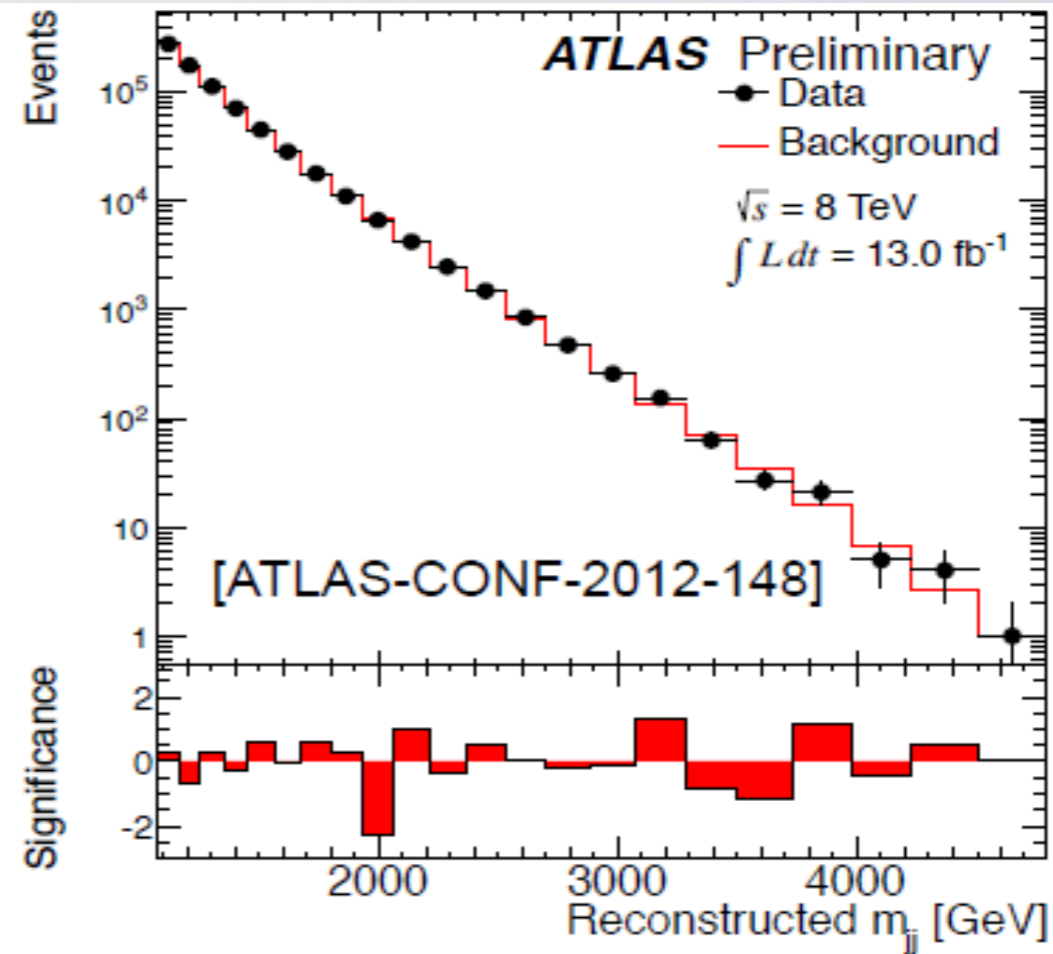
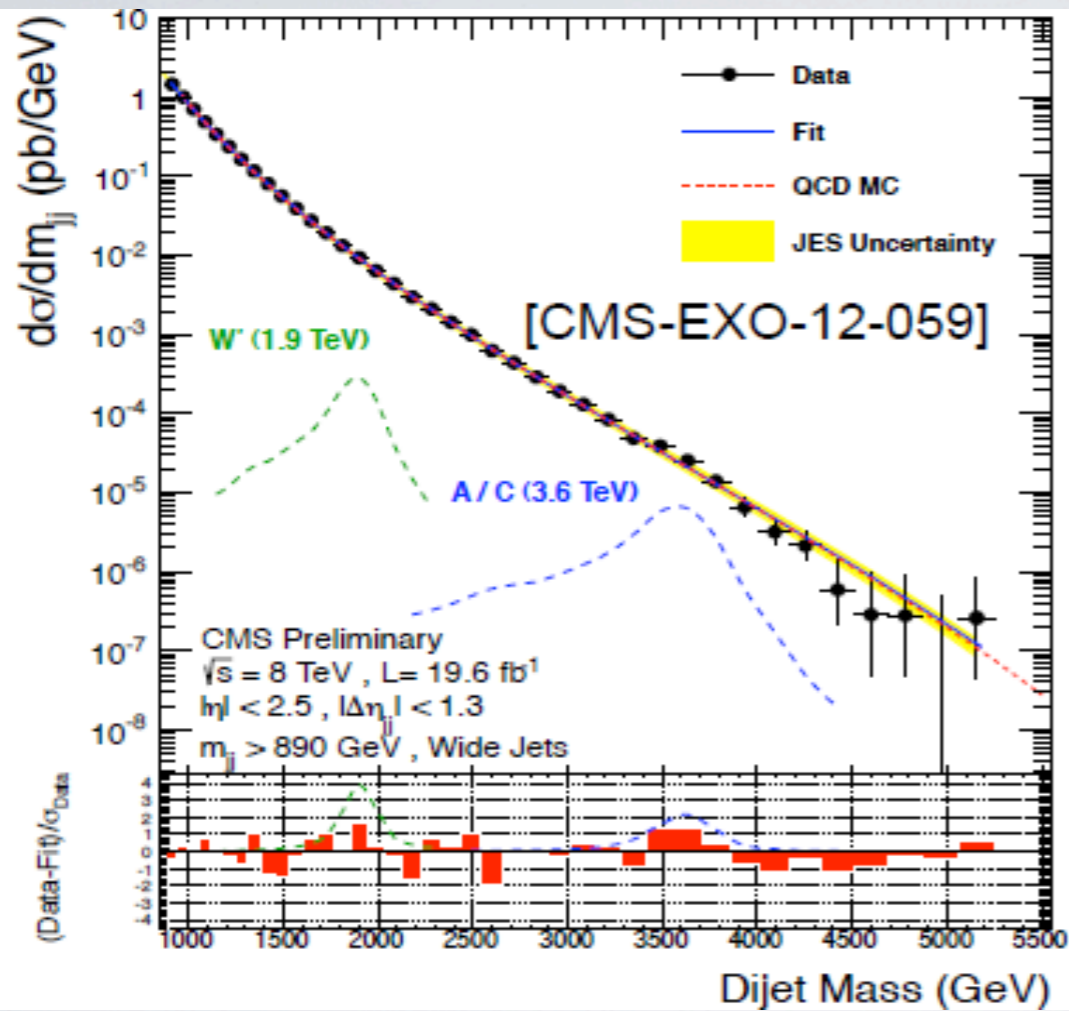
- Global fit to flavour and high P_T observables
 - Includes Higgs and SUSY direct searches, XENON100, EW and flavour measurements
- Done for constrained SUSY models, here CMSSM (NUHM1 similar)

F. Mahmoudi, [1205.3099]



Limits on $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ disfavour constrained SUSY at high $\tan \beta$

Двух-струйные резонансы

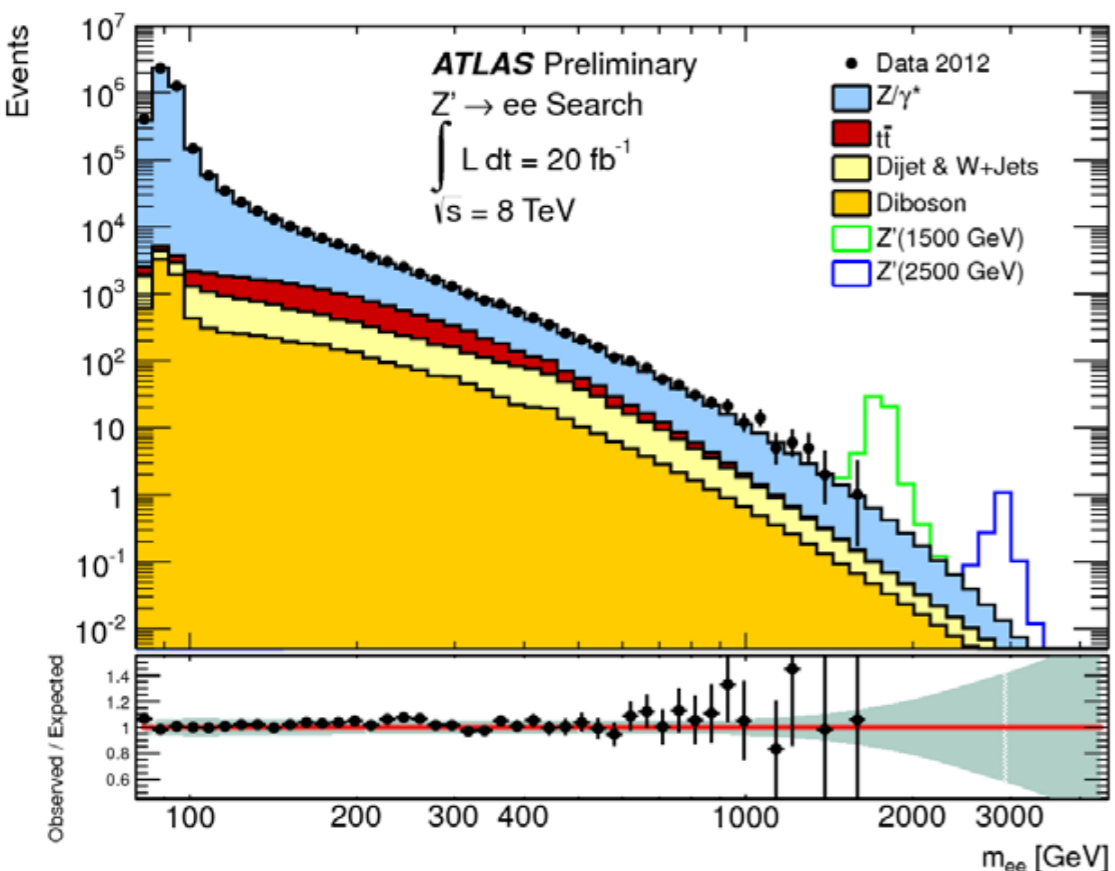
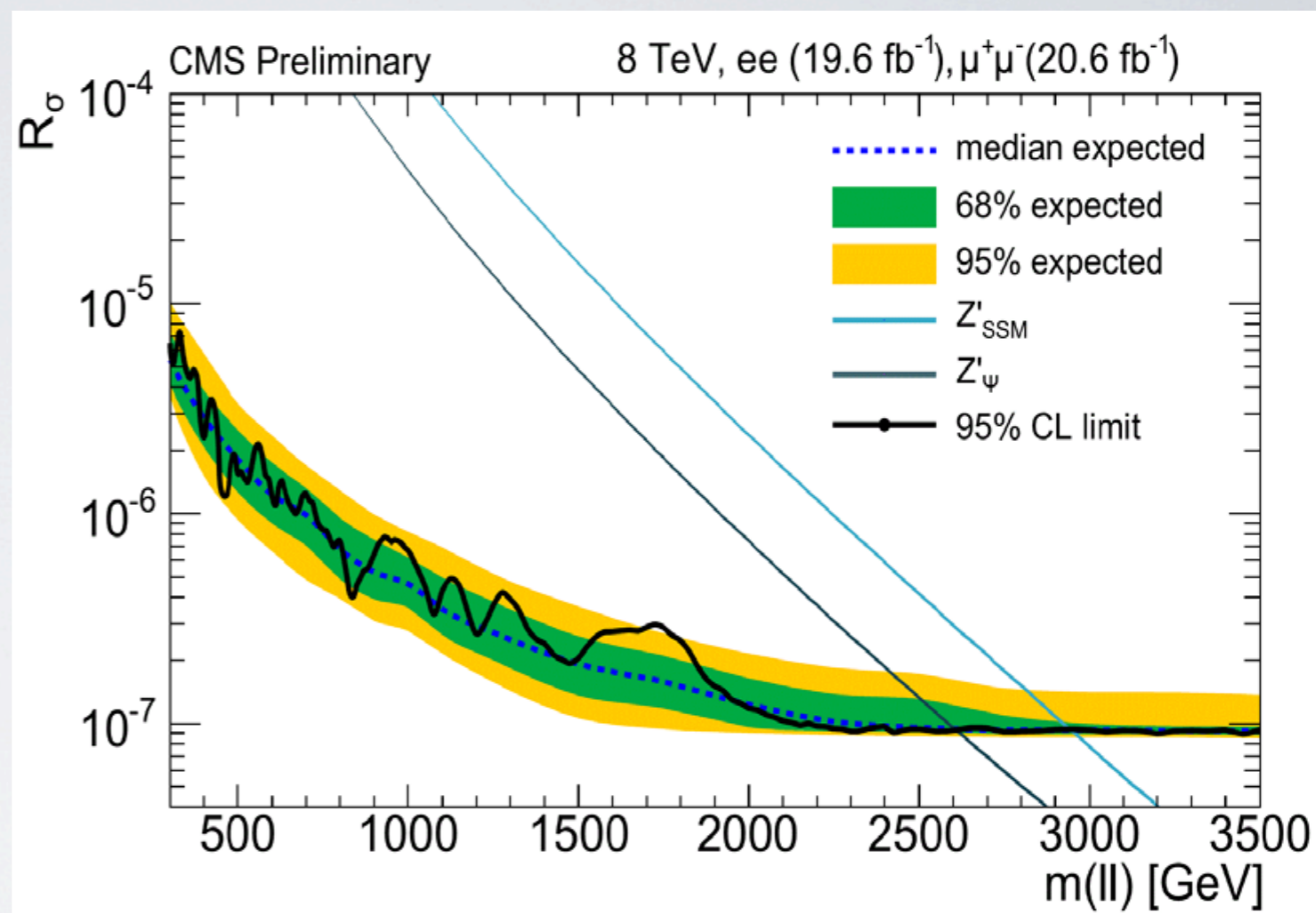
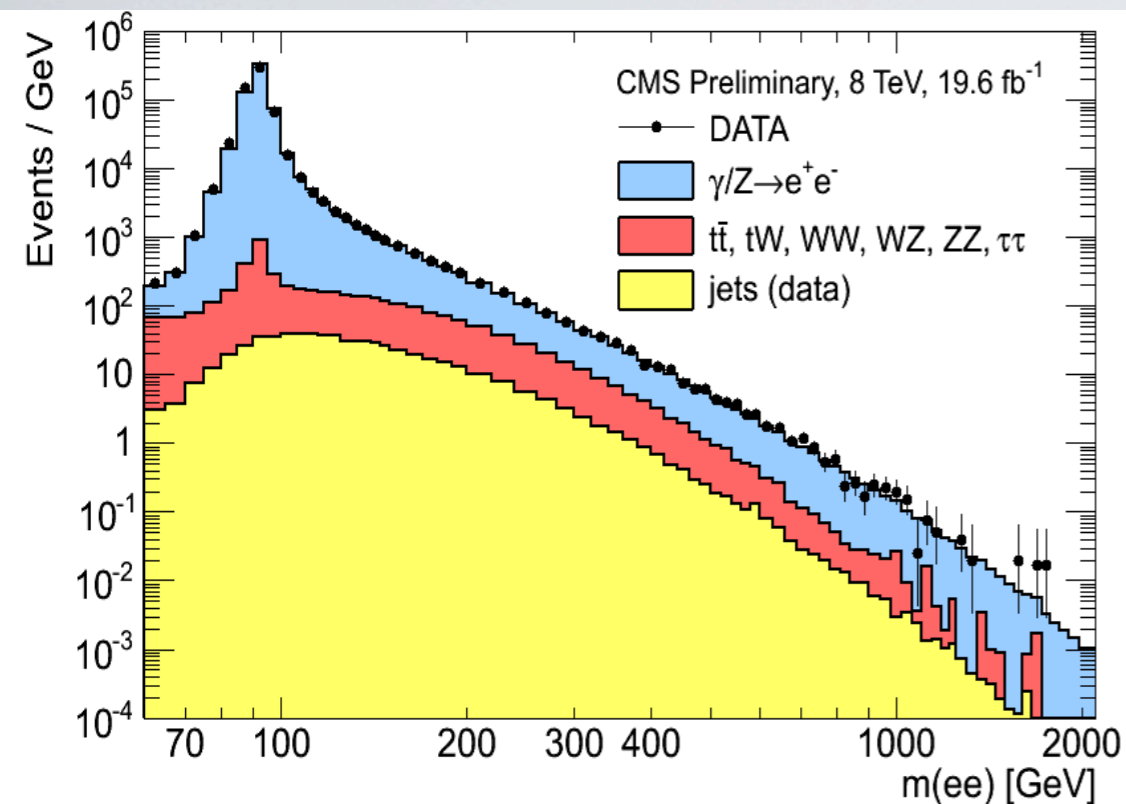


- Probing objects with masses of over $\frac{1}{2}$ of the LHC energy
- Jet energy scale calibration and high energy resolution are important
- Excited quarks with masses up to ~ 4 TeV are excluded
- Excellent predictions of QCD up to the highest masses studied

Двух-лептонные спектры



Search for Z' to $ee/\mu\mu$



- Classic searches for Z' , W' , excited leptons, extra dimensions, etc.
- Excellent mass resolution and well understood backgrounds
- Z'/W' masses up to $\sim 3 \text{ TeV}$ excluded, similar tight limits sets on other models

БАК: текущие выводы



БАК 2011: 7 ТэВ 5 Фб⁻¹ 2012: 8 ТэВ 20 Фб⁻¹

- открыта новая частица с массой 125 ГэВ!
- свойства нового бозона хорошо согласуются со свойствами бозона Хиггса СМ
- $B_s \rightarrow \mu\mu$ согласуется с СМ
- сильные ограничения на новую физику:
SUSY (MSSM), доп. измерения и др.
 - поиски новой динамики СМ:
горячая плотная кварк-глюонная материя,
СР-физика, экзотические адроны, БФКЛ и др ...

БАК: ближайшие перспективы



Анализ полных данных фазы I:

- свойства нового бозона: бозон Хиггса SM?
- еще более сильные ограничения на новую физику?
 - сюрпризы?

Конференции: LHCР (Барселона) май 2013

2015: увеличение энергии до 13-14 ТэВ

ЦЕРН БАК: МНОГО НОВОСТЕЙ ВПЕРЕДИ!