



Run Number: 206962  
Event Number: 38652990  
Date: 2012-07-14, 08:31:06 CET  
EtCut > 0.5 GeV  
PtCut > 0.4 GeV  
Electron: black  
Cells: Tiles, EMC

# Введение в физику частиц

Татьяна Берже-Гринева  
(LAPP Аннесу, Франция)

# Стандартная Модель (СМ)

1968: SLAC <b><i>u</i></b> up quark	1974: Brookhaven & SLAC <b><i>c</i></b> charm quark	1995: Fermilab <b><i>t</i></b> top quark	1979: DESY <b><i>g</i></b> gluon
1968: SLAC <b><i>d</i></b> down quark	1947: Manchester Univ.. <b><i>s</i></b> strange quark	1977: Fermilab <b><i>b</i></b> bottom quark	1923: Washington Univ. <b><math>\gamma</math></b> photon
1956: Savannah River Plant <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	1982: Brookhaven <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	2000: Fermilab <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	1983: CERN <b><i>W</i></b> W boson
1897: Cavendish Laboratory <b><i>e</i></b> electron	1937: Caltech & Harvard <b><math>\mu</math></b> muon	1976: SLAC <b><math>\tau</math></b> tau	1983: CERN <b><i>Z</i></b> Z boson
			2012: CERN <b><i>H</i></b> Higgs boson



# Higgs Physics



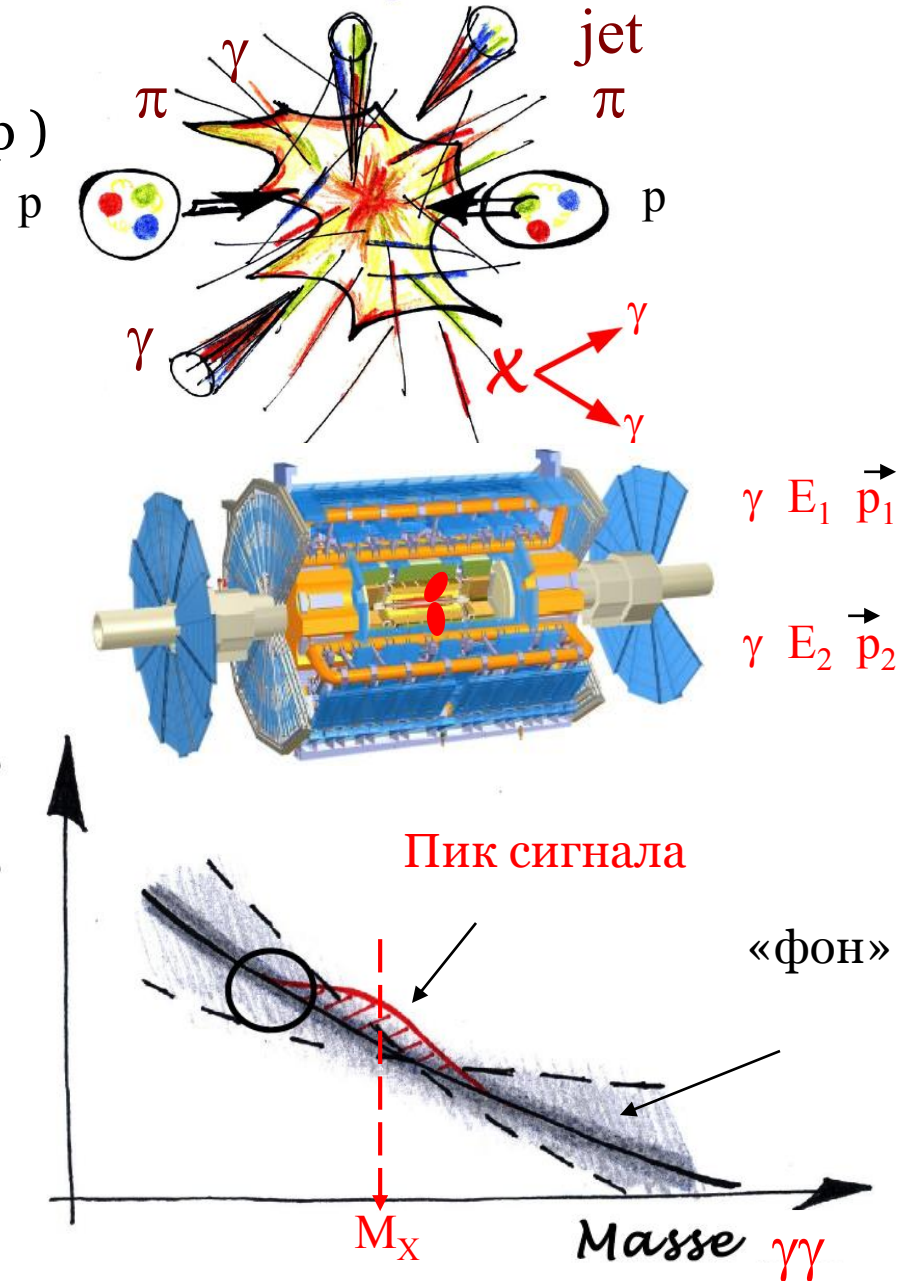
# «Как частицы получают массу»



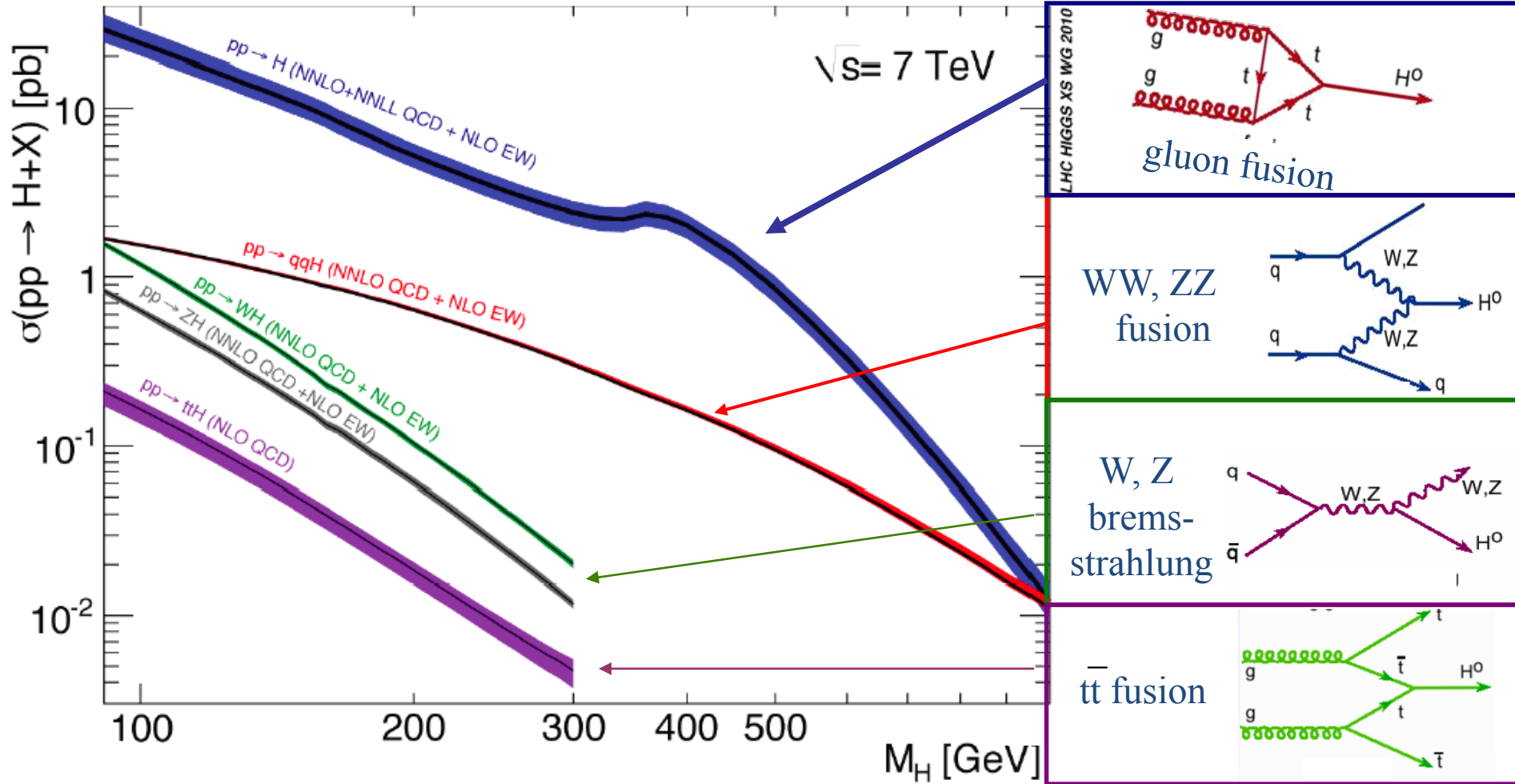
# Как найти бозон Хиггса?

- Произвести в столкновениях (напр.  $pp$ )  
⇒ Среди других известных частиц может быть  $X$
- Идентифицировать и измерить свойства частиц, особенно тех, что получаются при распадах  $X$
- Чаще всего, бозон Хиггса проявится как пик в распределении инвариантной массы ( $m_{\gamma\gamma}$ ).

$$M_{\gamma\gamma}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$



# Как производится бозон Хиггса?

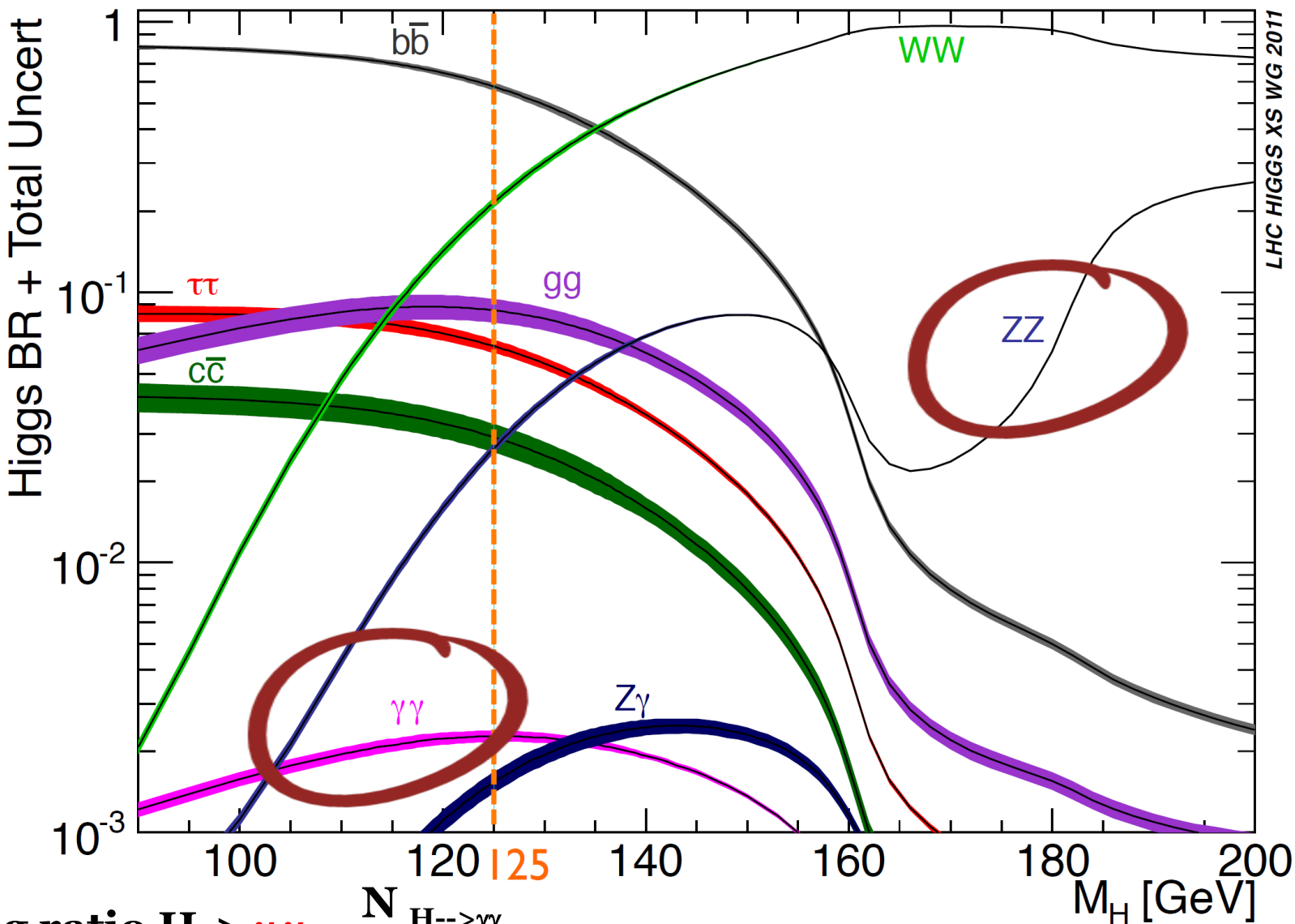


Главный канал: глюонный синтез.



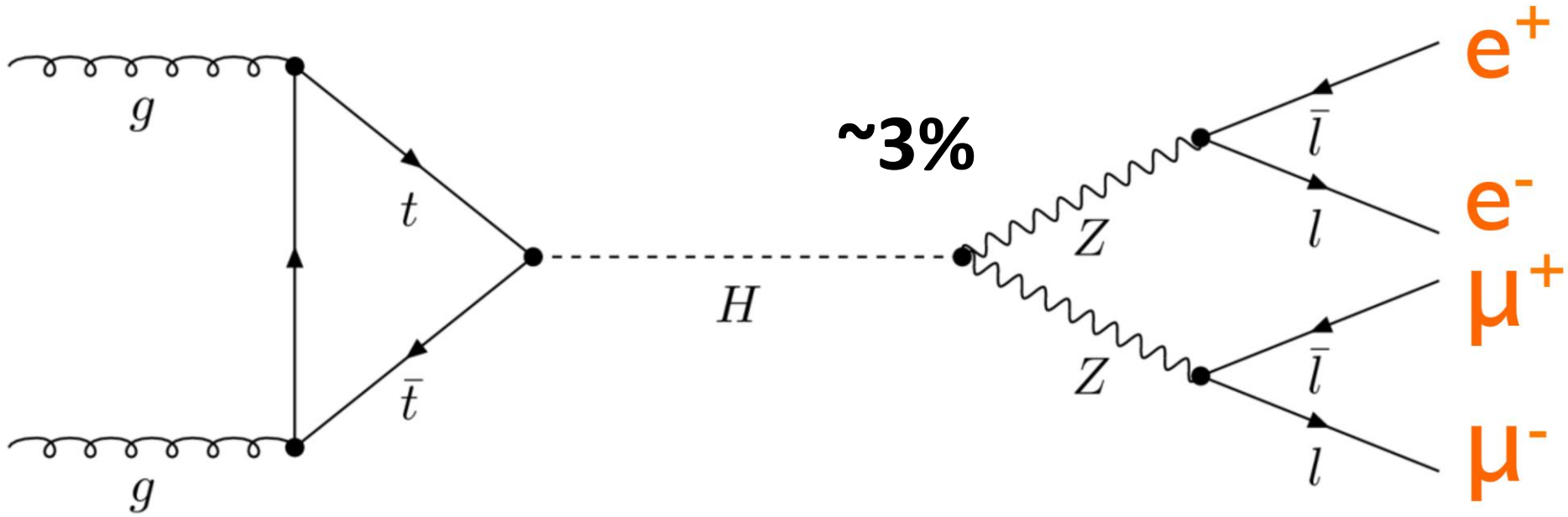
# Каналы распада бозона Хиггса в СМ

Branching Ratio (BR)  
это  
процент  
распадов  
в заданное  
конечное  
состояние.



$$\text{Branching ratio } H \rightarrow \gamma\gamma = \frac{N_{H \rightarrow \gamma\gamma}}{N_{H \rightarrow \text{all}}}$$

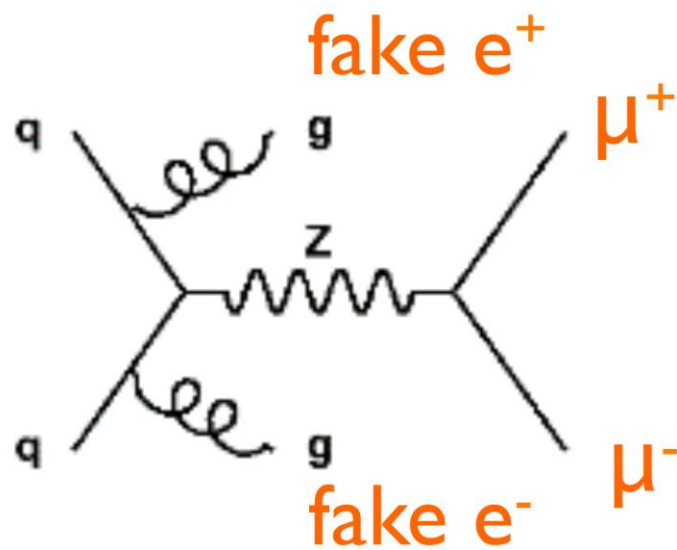
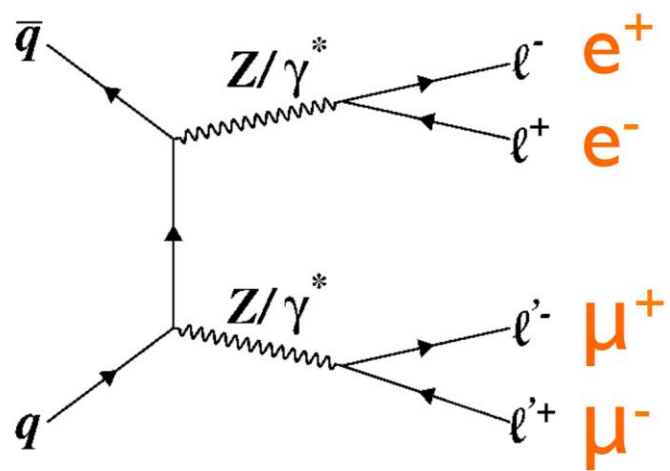
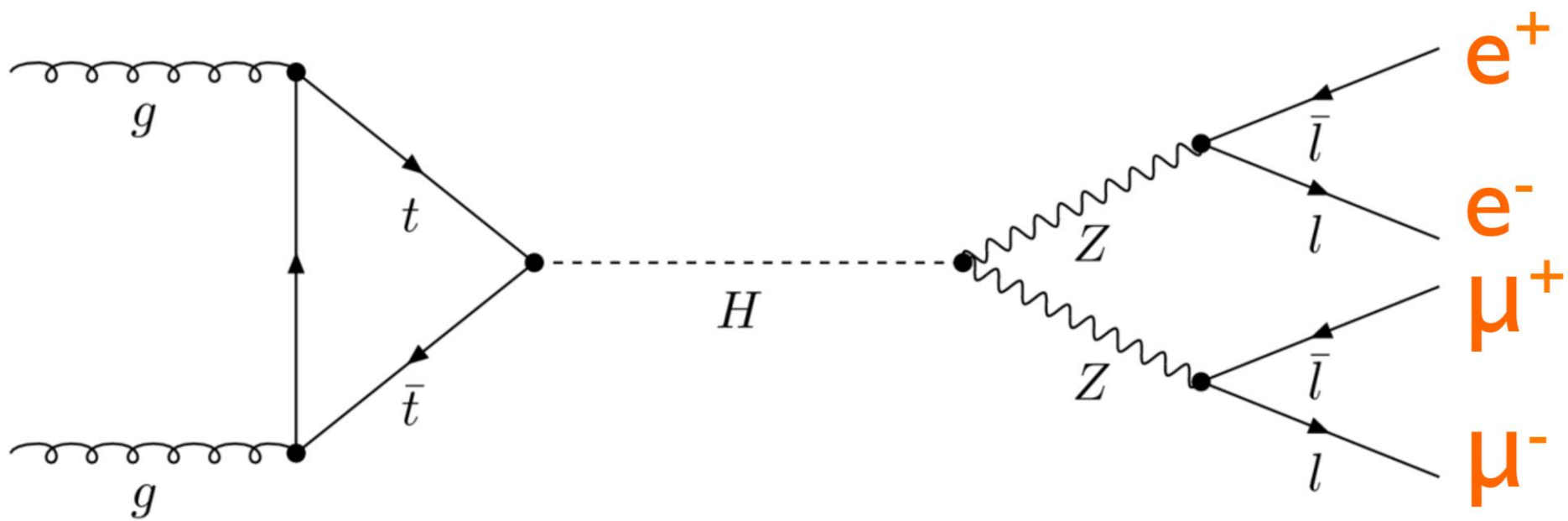
# $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



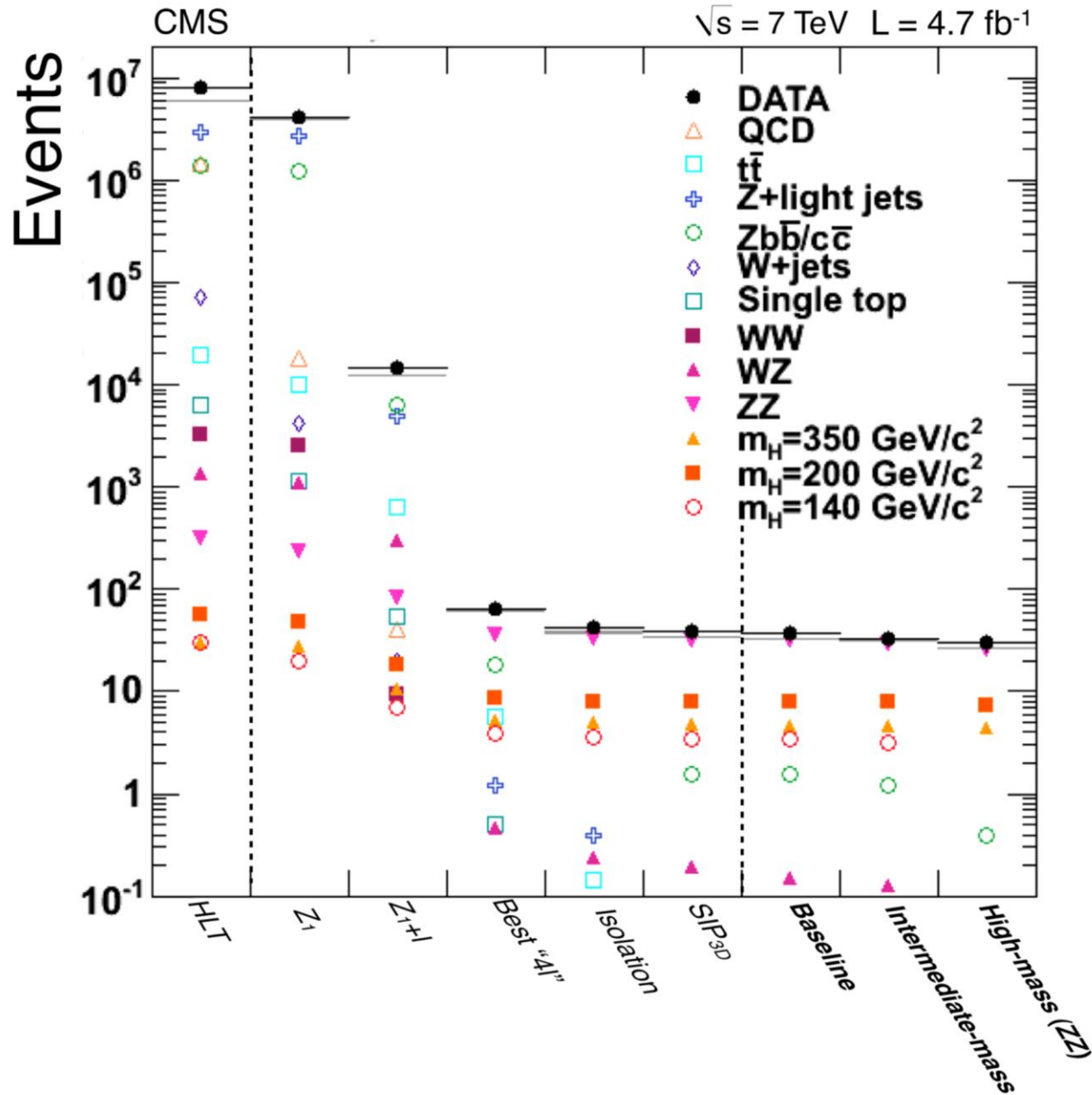
## Z DECAY MODES

	Mode	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )
$\Gamma_1$	$e^+ e^-$	( 3.363 $\pm$ 0.004 ) %
$\Gamma_2$	$\mu^+ \mu^-$	( 3.366 $\pm$ 0.007 ) %



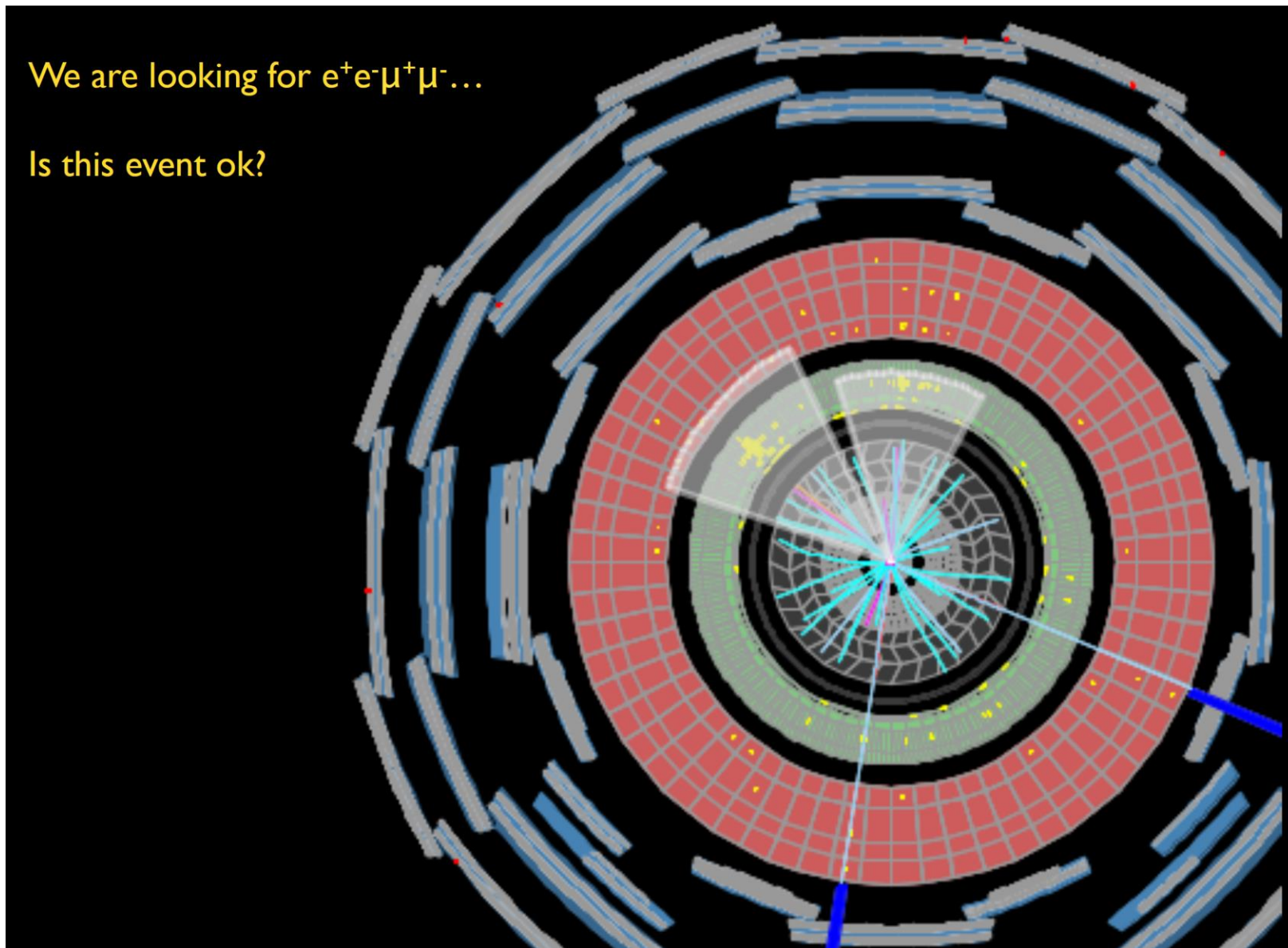


# Выбор событий



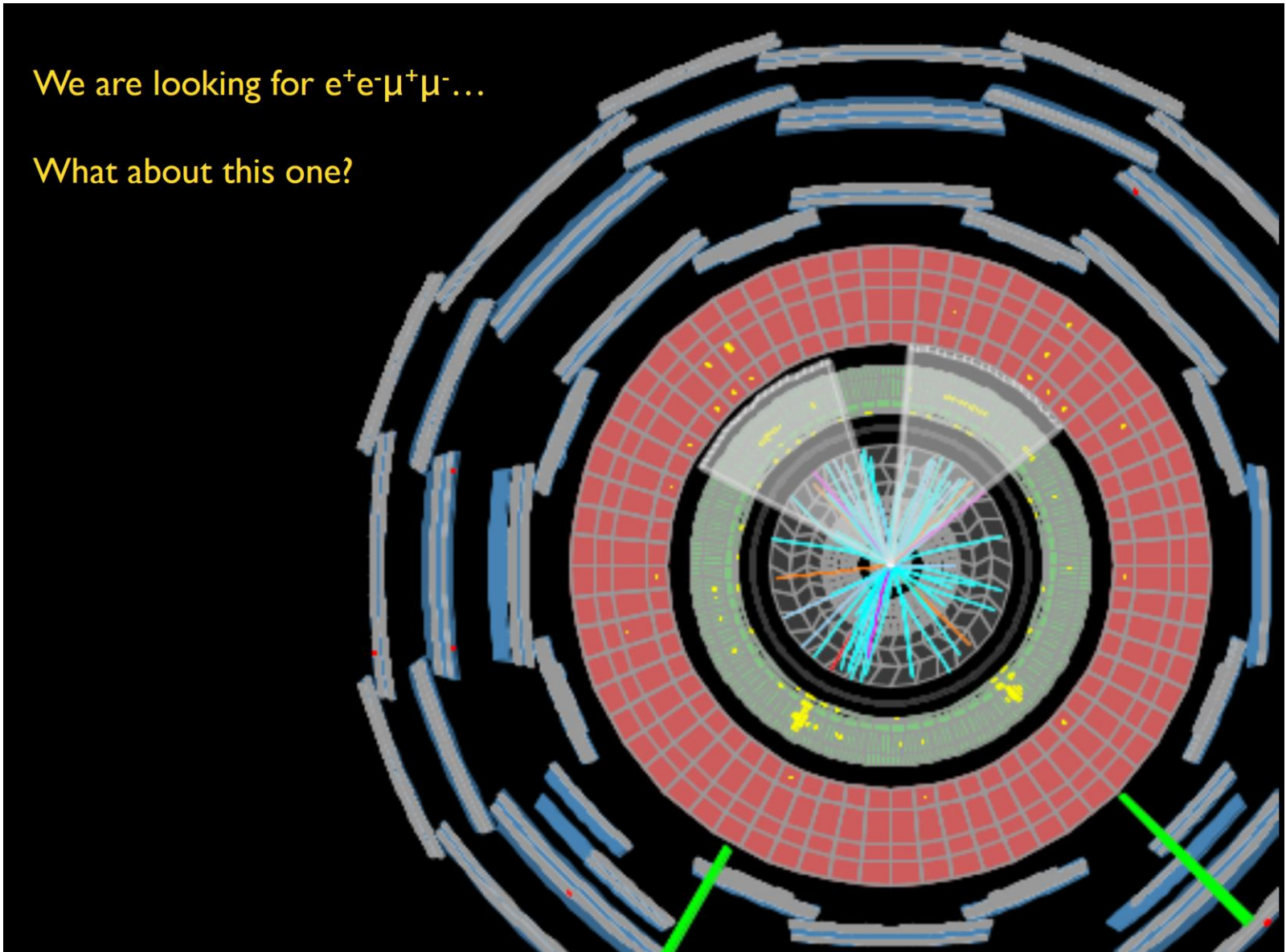
We are looking for  $e^+e^-\mu^+\mu^-$ ...

Is this event ok?



We are looking for  $e^+e^-\mu^+\mu^-$ ...

What about this one?

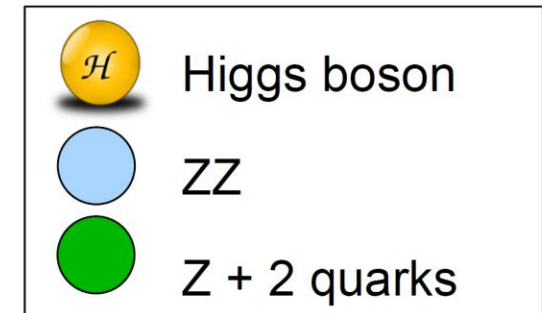
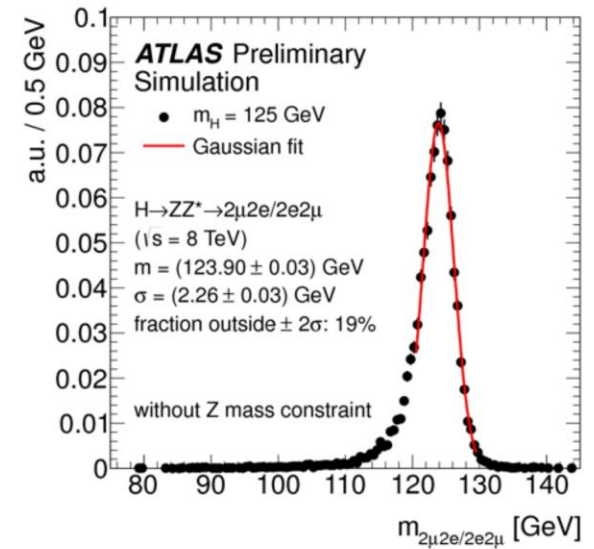
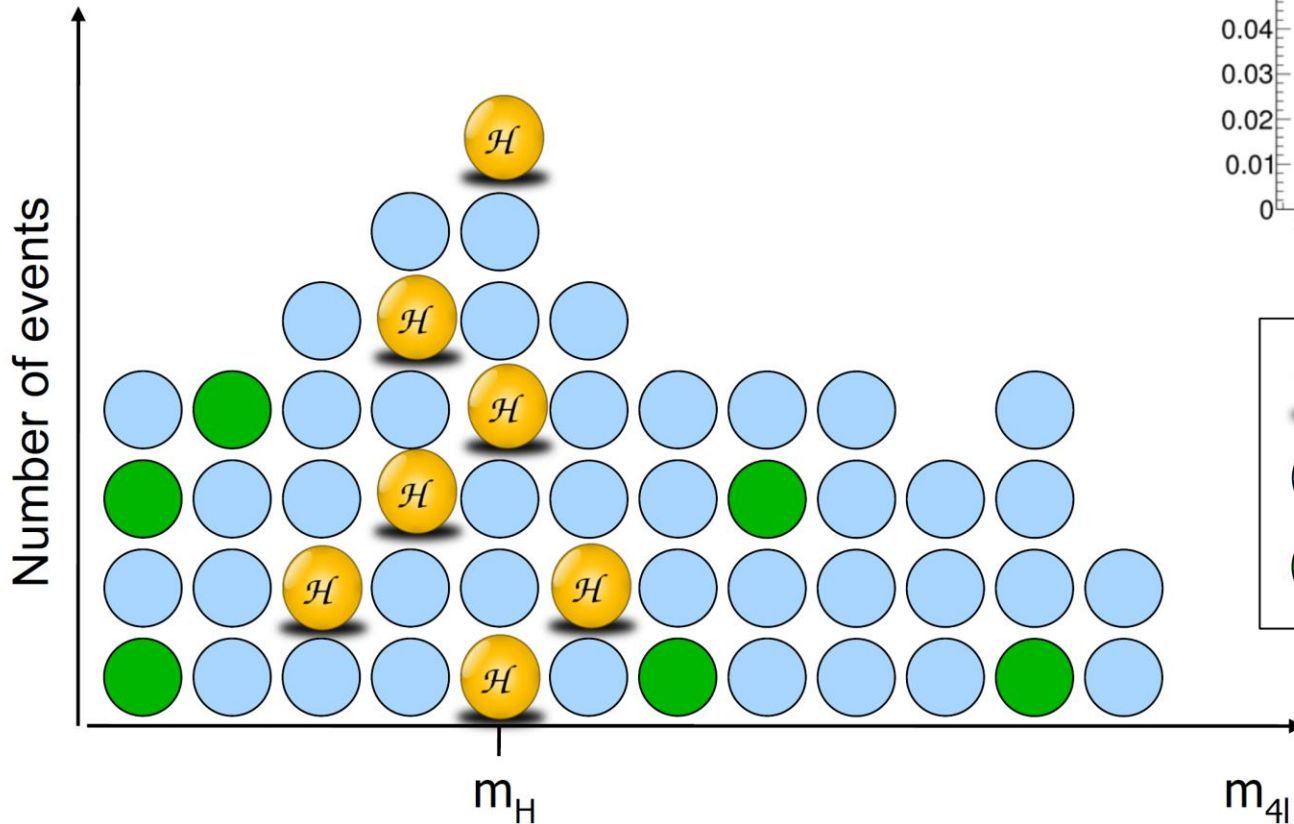






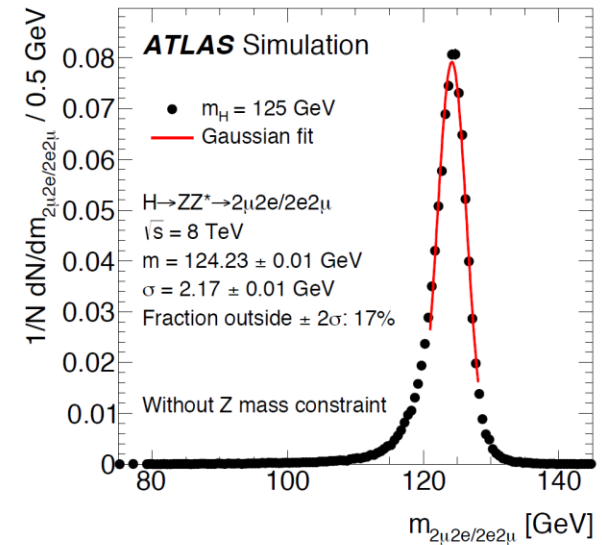
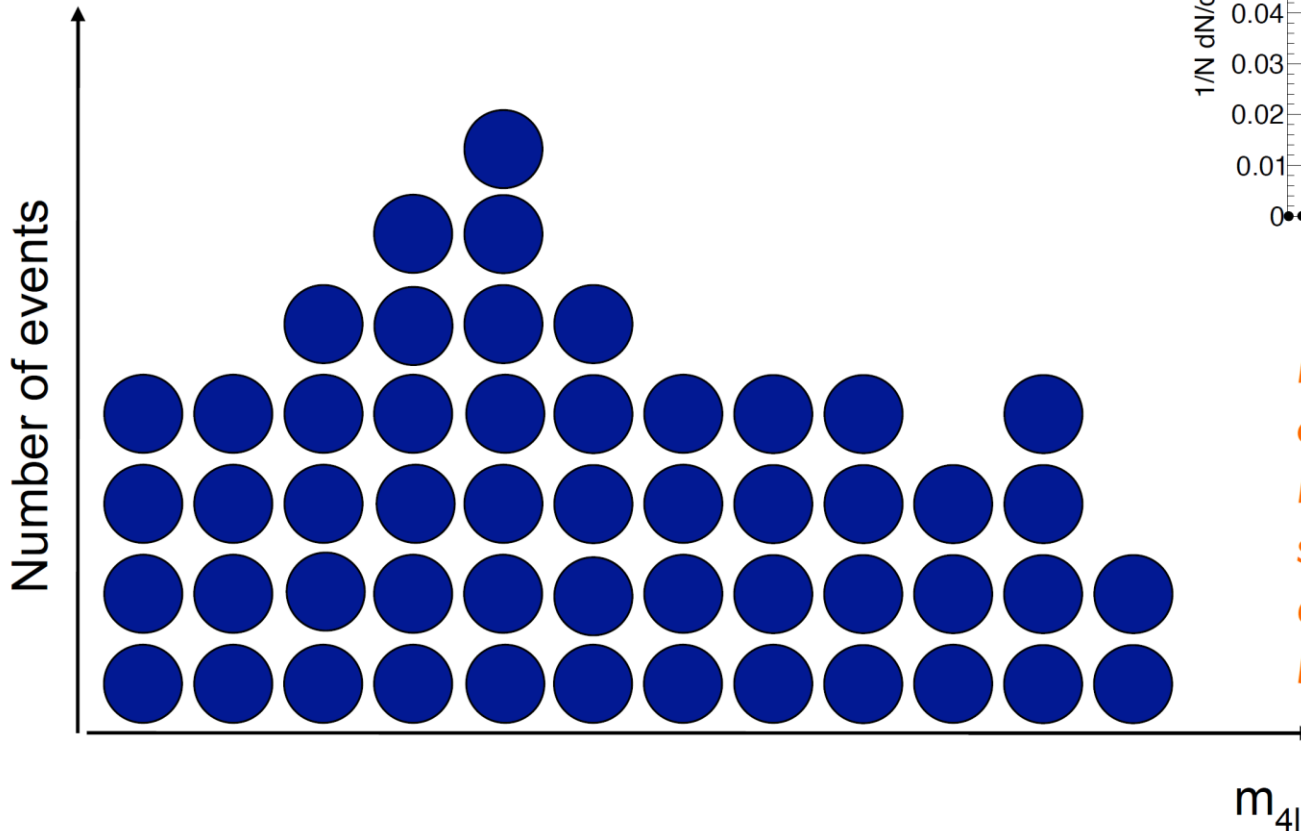
# Извлечение сигнала из фона

$$M = \sqrt{\left(\sum E_i\right)^2 - \left(\sum \vec{p}_i\right)^2}$$



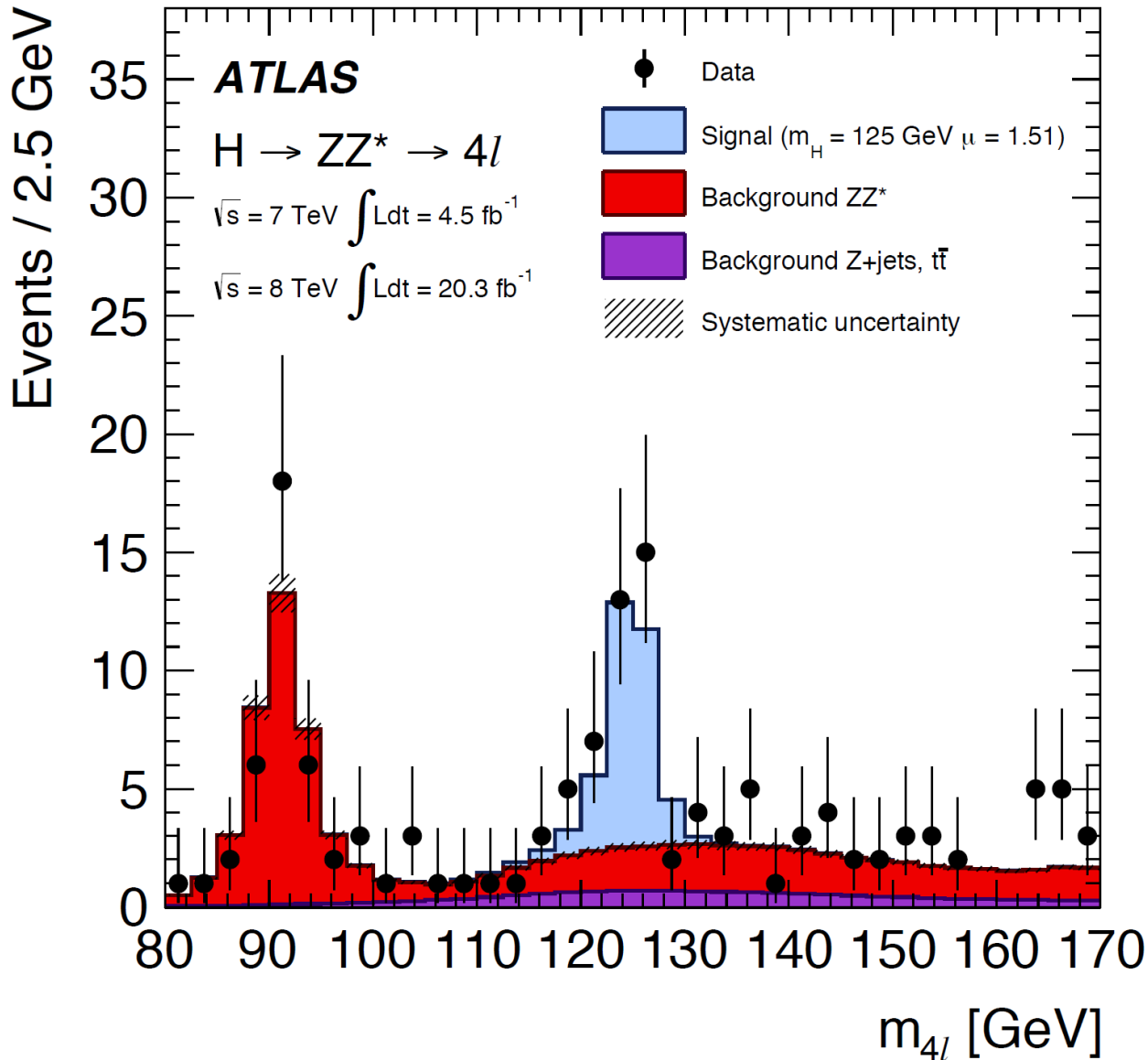
# Извлечение сигнала из фона

$$M = \sqrt{\left(\sum E_i\right)^2 - \left(\sum \vec{p}_i\right)^2}$$



*Events in real life do not come with a label!  
No way to distinguish signal from background on an event-by-event base...*

# Измерение фона

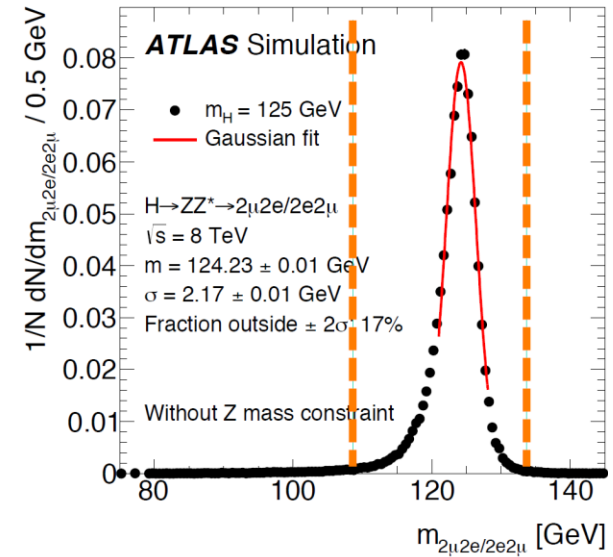
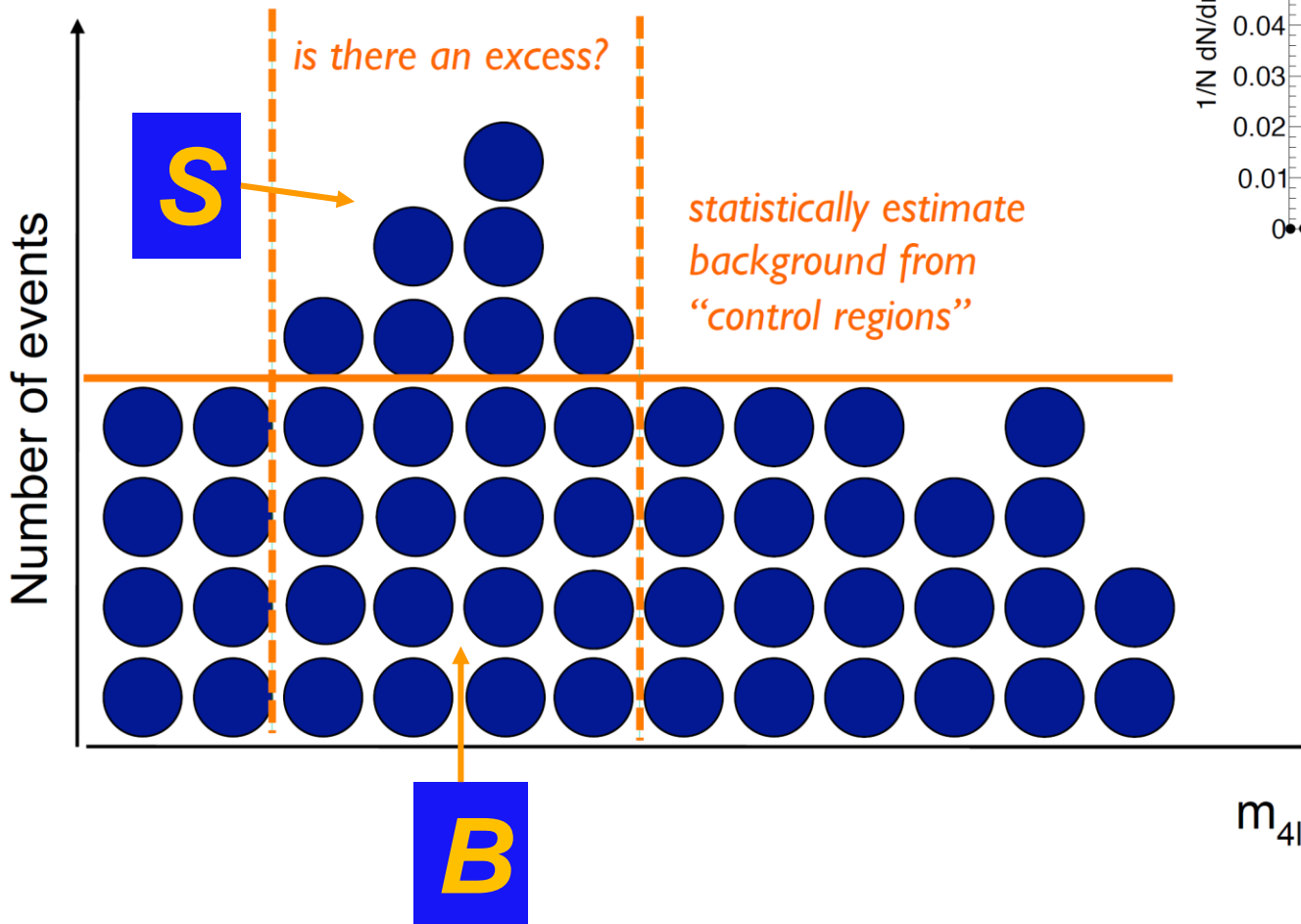


- моделирование методом Монте-Карло
- измерение с помощью боковых полос



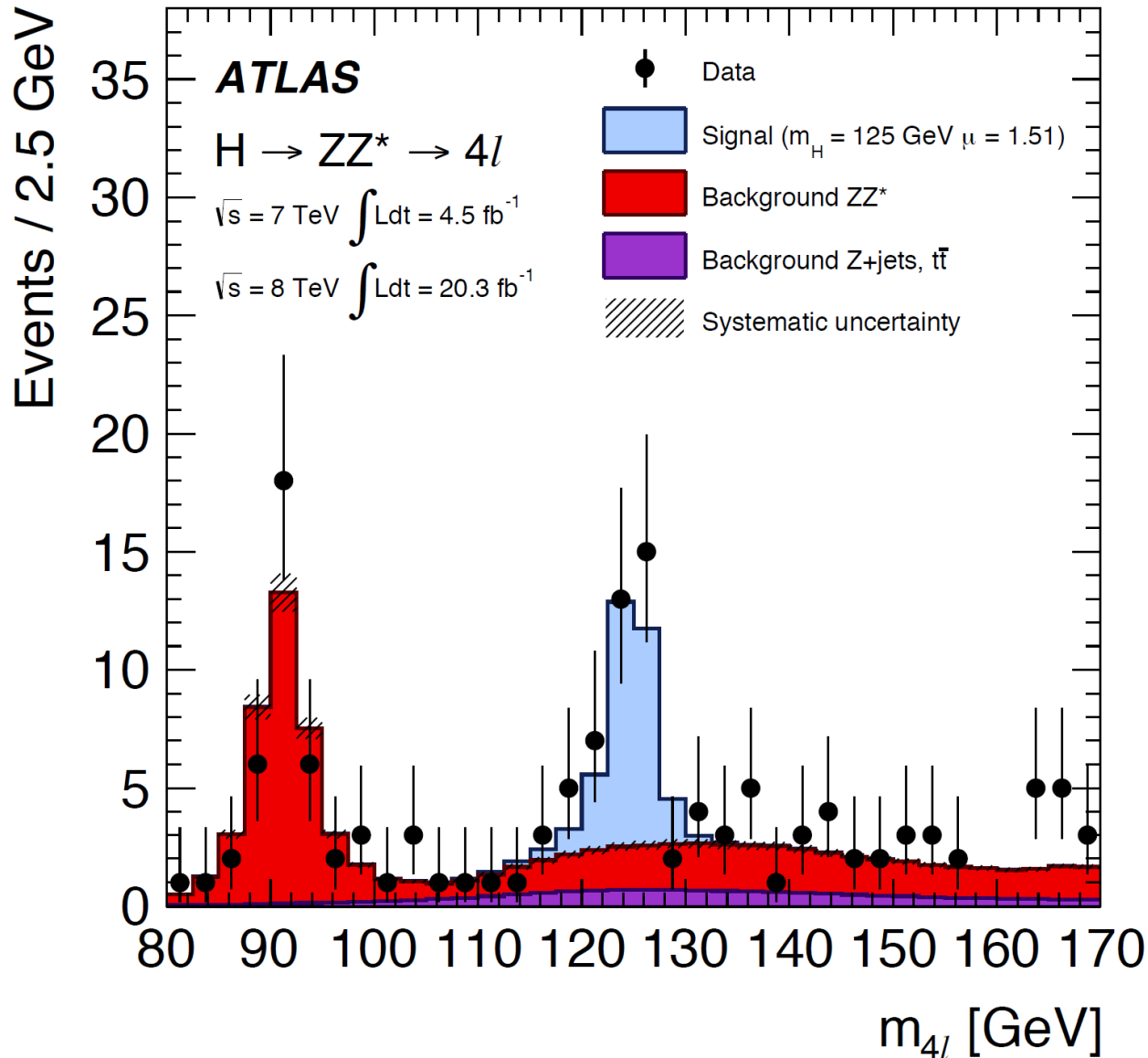
# Извлечение сигнала из фона

$$M = \sqrt{\left(\sum E_i\right)^2 - \left(\sum \vec{p}_i\right)^2}$$



$$Z \sim \frac{S}{\sqrt{B}}$$

# Значительно ли превышение?

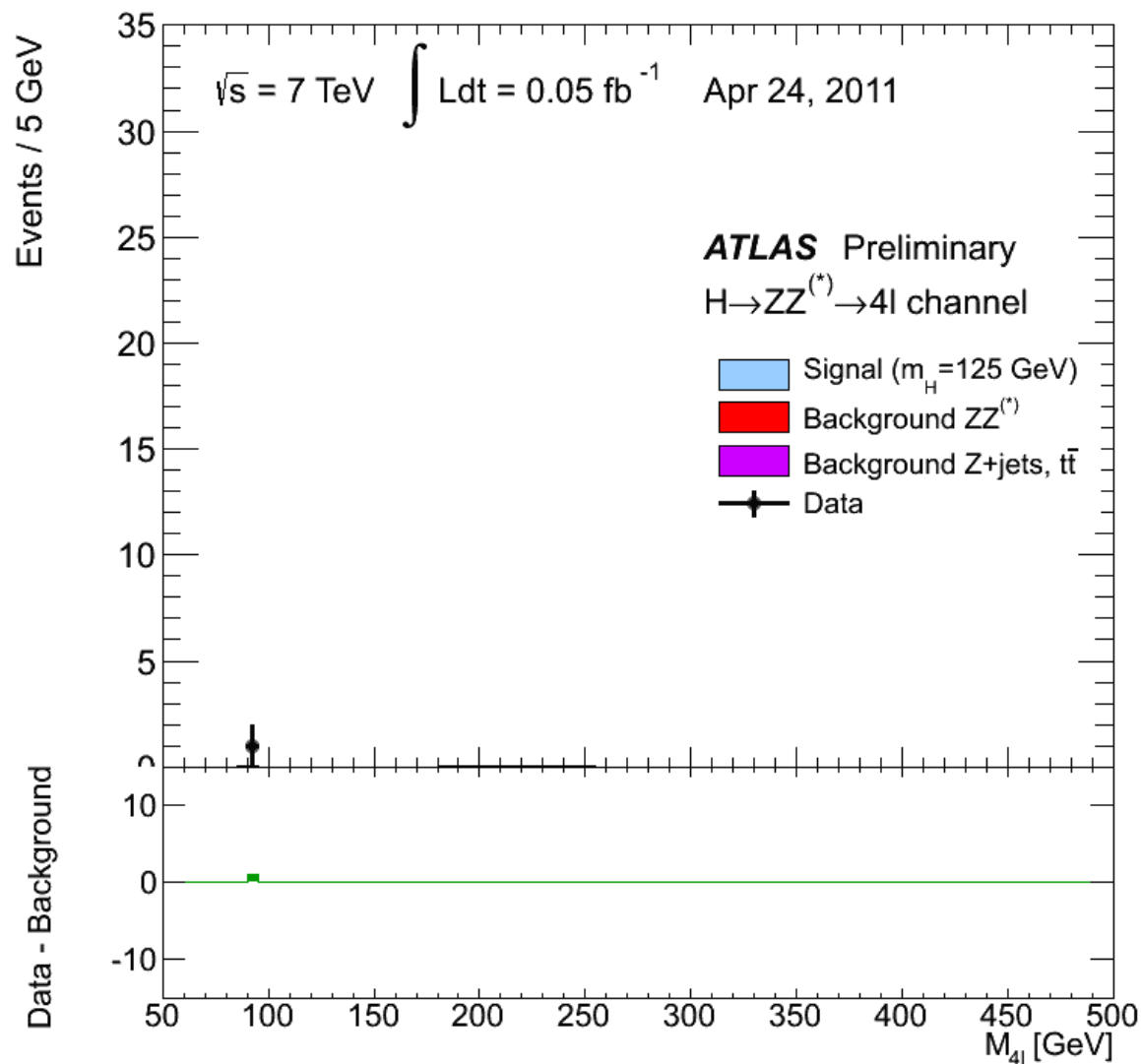


$$Z \sim \frac{S}{\sqrt{B}}$$

$3\sigma$  is an evidence  
 $5\sigma$  is a discovery

Пять стандартных отклонений  
-  $5\sigma$  -  
(1-in-3.5 миллионов шанс произойти случайно) требуется для утверждения об открытии новой частицы.

# Увеличение значимости со временем

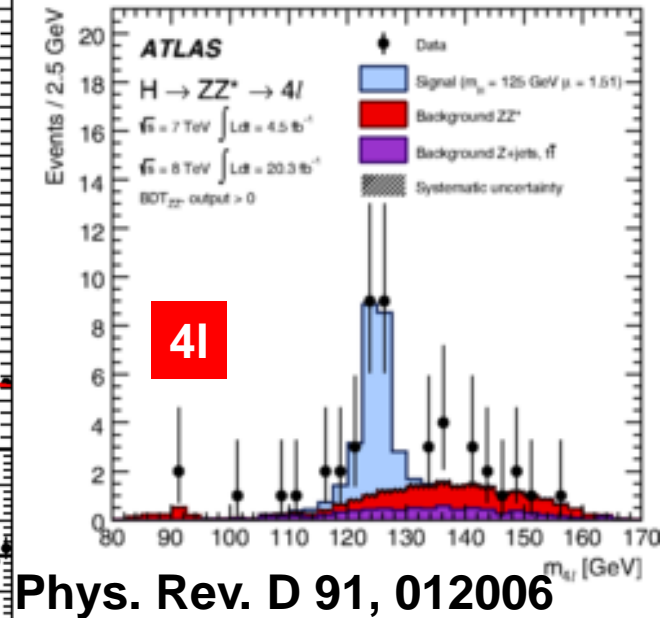
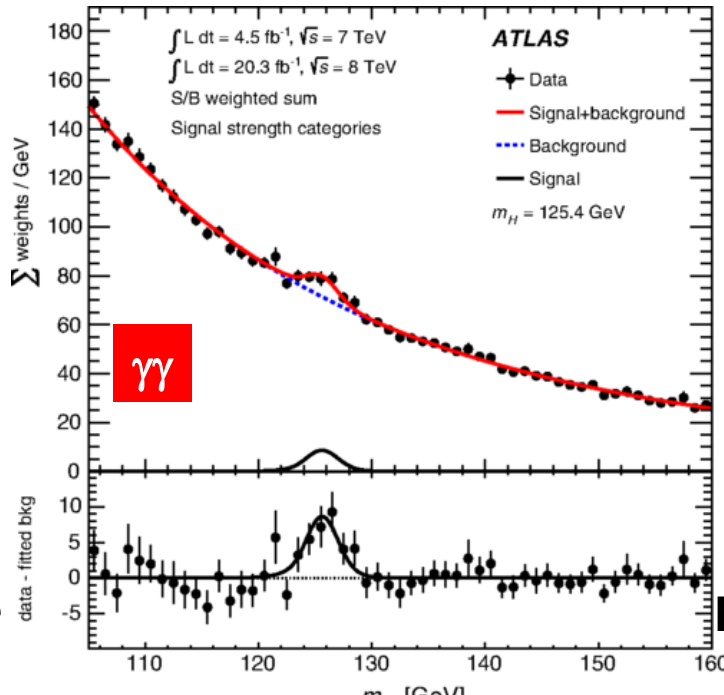


# Higgs Boson Decays ( $m_H=125\text{GeV}$ )

Mode	Sensitivity	Mass res.	S/B (incl)	rate	comments
$ZZ^* \rightarrow 4l$	Green	Green	Green	Red	very pure; $m_H$ ; SpinCP
$\gamma\gamma$	Green	Green	Yellow	Green	$m_H$ ; via loop
$WW \rightarrow l\nu l\nu$	Green	Red	Yellow	Green	high rate
$\tau\tau$	Yellow	Red	Red	Green	mainly VBF (sensitivity)
$bb$	Yellow	Red	Red	Green	mainly VH (trigger,QCD)
$ZZ^* \rightarrow llqq/ll\nu\nu$	Yellow	Green	Yellow	Yellow	high-mass (mainly)
$WW \rightarrow l\nu qq$	Yellow	Green	Yellow	Green	high-mass (mainly)
$\mu\mu$	Red	Green	Red	Red	rare
$Z\gamma$	Red	Green	Red	Red	

Mode	BR
$bb$	57.7%
$WW$	21.5%
$gg$	8.6%
$\tau\tau$	6.3%
$cc$	2.9%
$ZZ$	2.6%
$\gamma\gamma$	0.23%
$Z\gamma$	0.15%
$\mu\mu$	0.022%

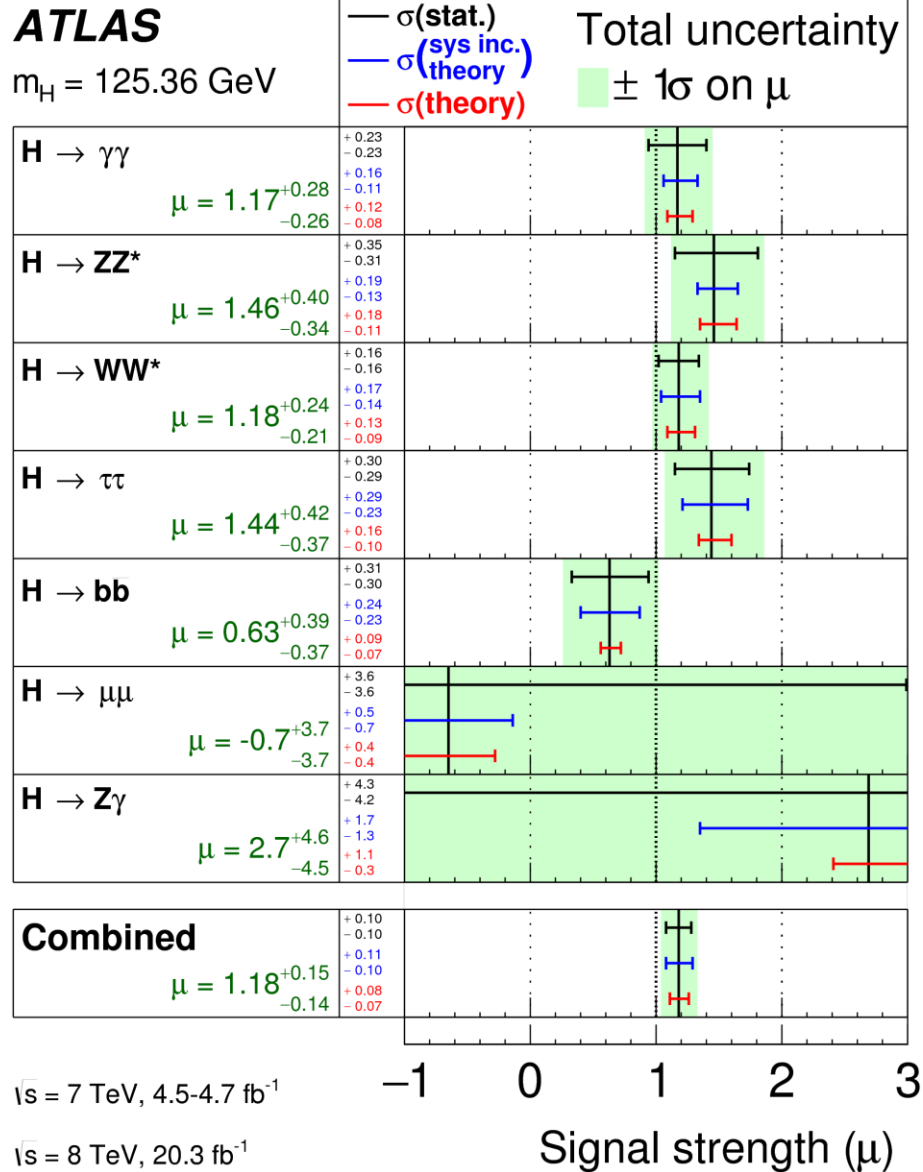
Phys. Rev. D 90, 112015



Phys. Rev. D 91, 012006



# Распады бозона Хиггса



# Spin!

Спин (собственный момент импульса)

What's a particle spin?

“An *amount of rotation* that is somehow quantized”



An electron has always an angular momentum of  $\frac{1}{2} \hbar$  either in its direction of travel ( $+\frac{1}{2} \hbar$ ) or opposite to it ( $-\frac{1}{2} \hbar$ )

$$\hbar = 1.0545 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg / s}$$

# Спин частиц СМ



**fermions**  
**(quarks, leptons)**  
**spin =  $+1/2, -1/2$**

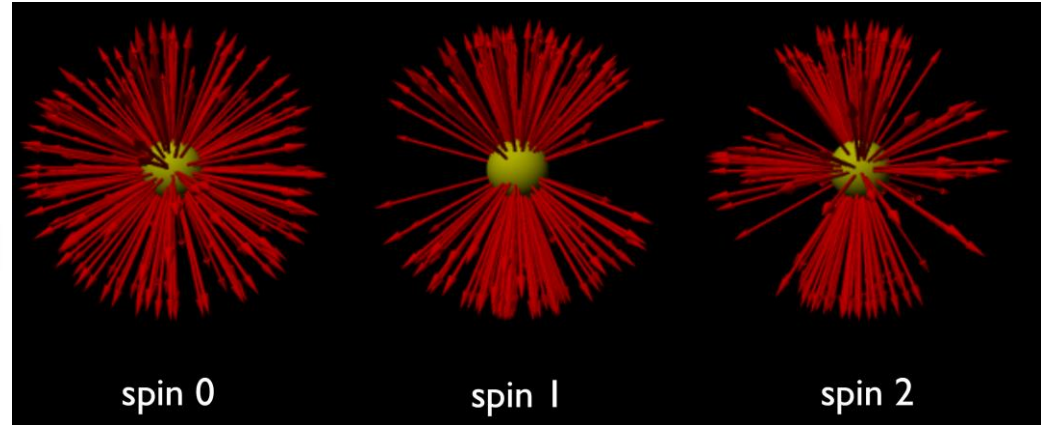
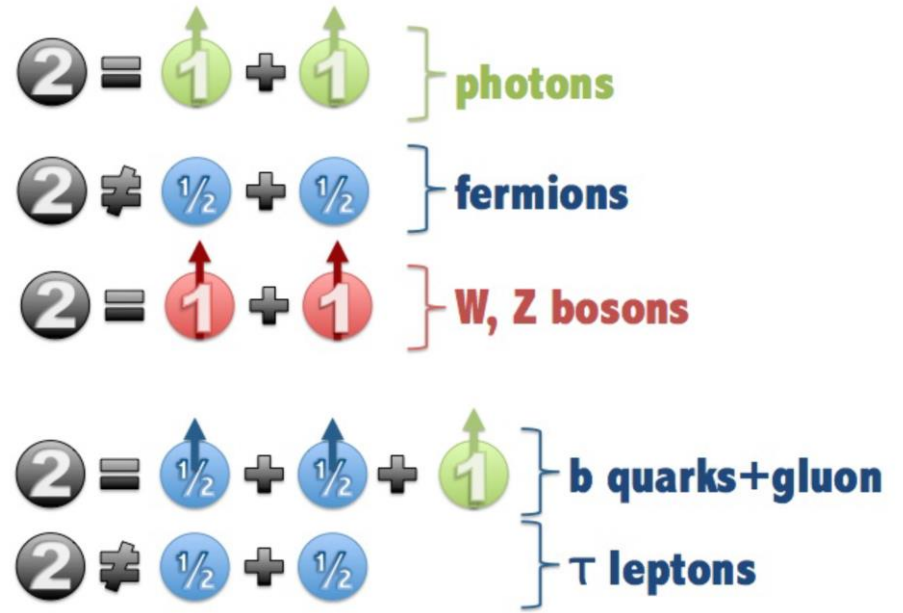
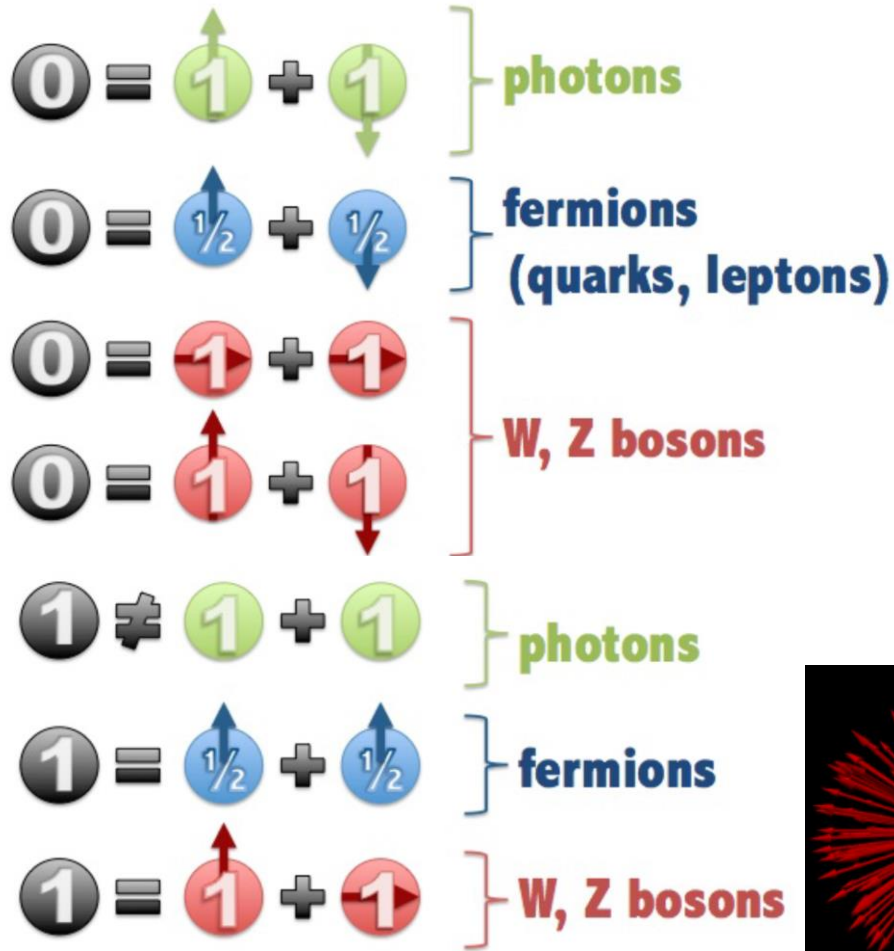


**massive bosons**  
**(W, Z bosons)**  
**spin =  $+1, 0, -1$**



**massless bosons**  
**(photon, gluon)**  
**spin =  $+1, -1$**

# Спин и распад частицы

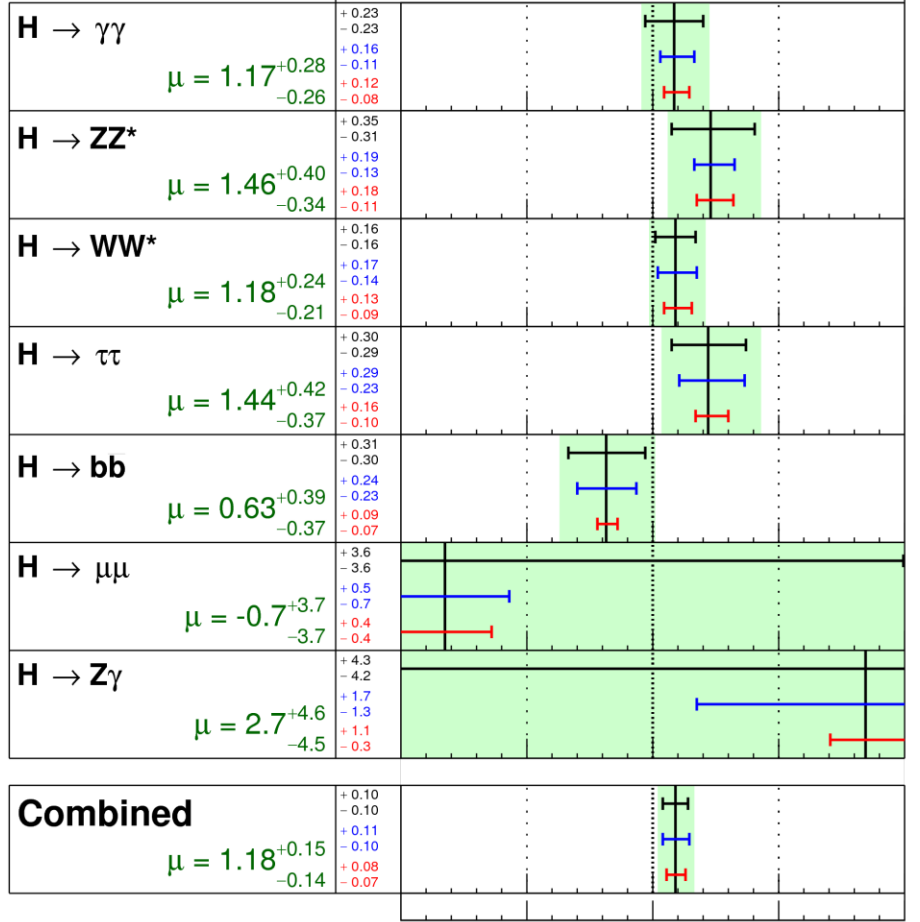
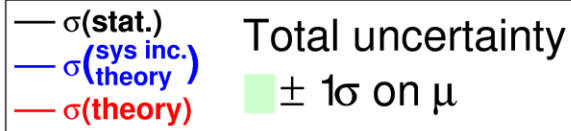




# Распады бозона Хиггса

**ATLAS**

$m_H = 125.36 \text{ GeV}$



$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}, 4.5\text{-}4.7 \text{ fb}^{-1}$

$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}, 20.3 \text{ fb}^{-1}$

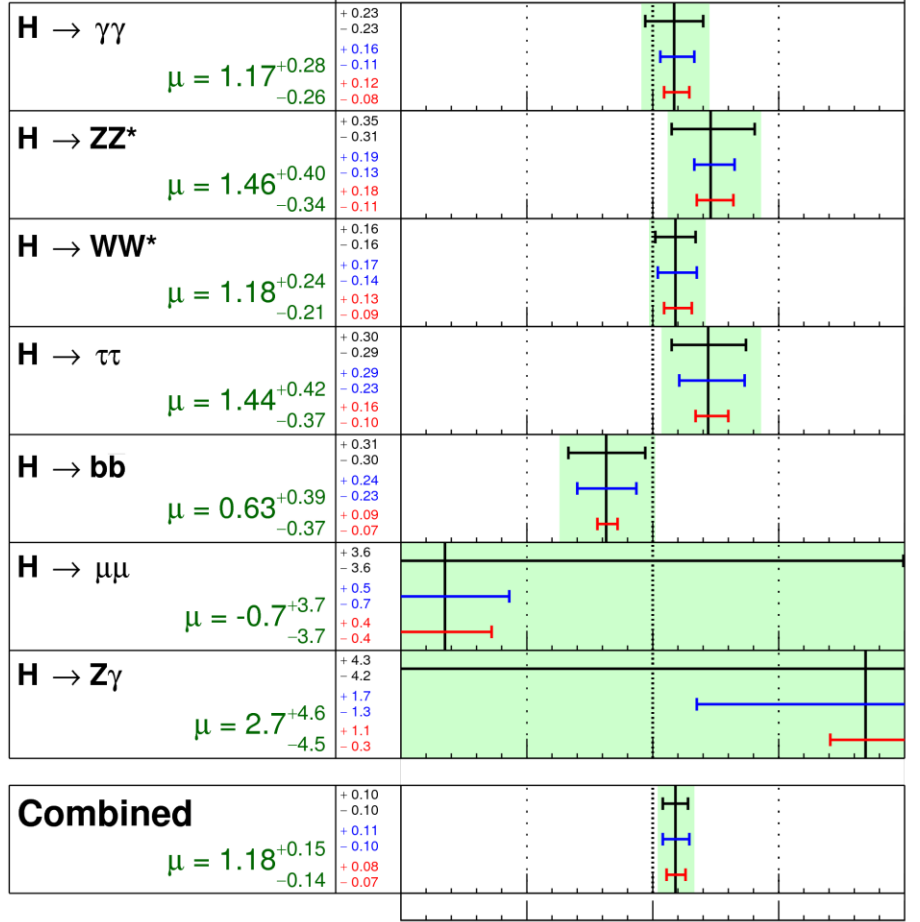
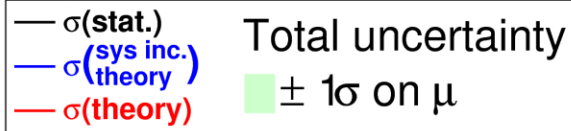
Signal strength ( $\mu$ )

Spin	$\gamma\gamma$	$ZZ$	$\tau\tau$
0	😊	😊	😊
1	😞	😊	😊
2	😊	😊	😞

# Распады бозона Хиггса

**ATLAS**

$m_H = 125.36 \text{ GeV}$



$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}, 4.5\text{-}4.7 \text{ fb}^{-1}$

$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}, 20.3 \text{ fb}^{-1}$

Signal strength ( $\mu$ )

Spin	$\gamma\gamma$	$ZZ$	$\tau\tau$
0	😊	😊	😊
1	😞	😊	😊
2	😊	😊	😞

Хиггс частица со спин=0,  
как предсказано СМ

# Физика вне Стандартной Модели ?

С открытием бозона Хиггса мы нашли все частицы СМ, но на много вопросов нет ответа:

- Почему Хиггс легок?
- Что такое темная материя?
- Почему существует 3 поколения?

...

Как найти ответ на наши вопросы?

1968: SLAC <b><i>u</i></b> up quark	1974: Brookhaven & SLAC <b><i>c</i></b> charm quark	1995: Fermilab <b><i>t</i></b> top quark	1979: DESY <b><i>g</i></b> gluon
1968: SLAC <b><i>d</i></b> down quark	1947: Manchester Univ.. <b><i>s</i></b> strange quark	1977: Fermilab <b><i>b</i></b> bottom quark	1923: Washington Univ. <b><math>\gamma</math></b> photon
1956: Savannah River Plant <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	1982: Brookhaven <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	2000: Fermilab <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	1983: CERN <b><i>W</i></b> W boson
1897: Cavendish Laboratory <b><i>e</i></b> electron	1937: Caltech & Harvard <b><math>\mu</math></b> muon	1976: SLAC <b><math>\tau</math></b> tau	1983: CERN <b><i>Z</i></b> Z boson
			2012: CERN <b><i>H</i></b> Higgs boson

# Физика вне Стандартной Модели ?

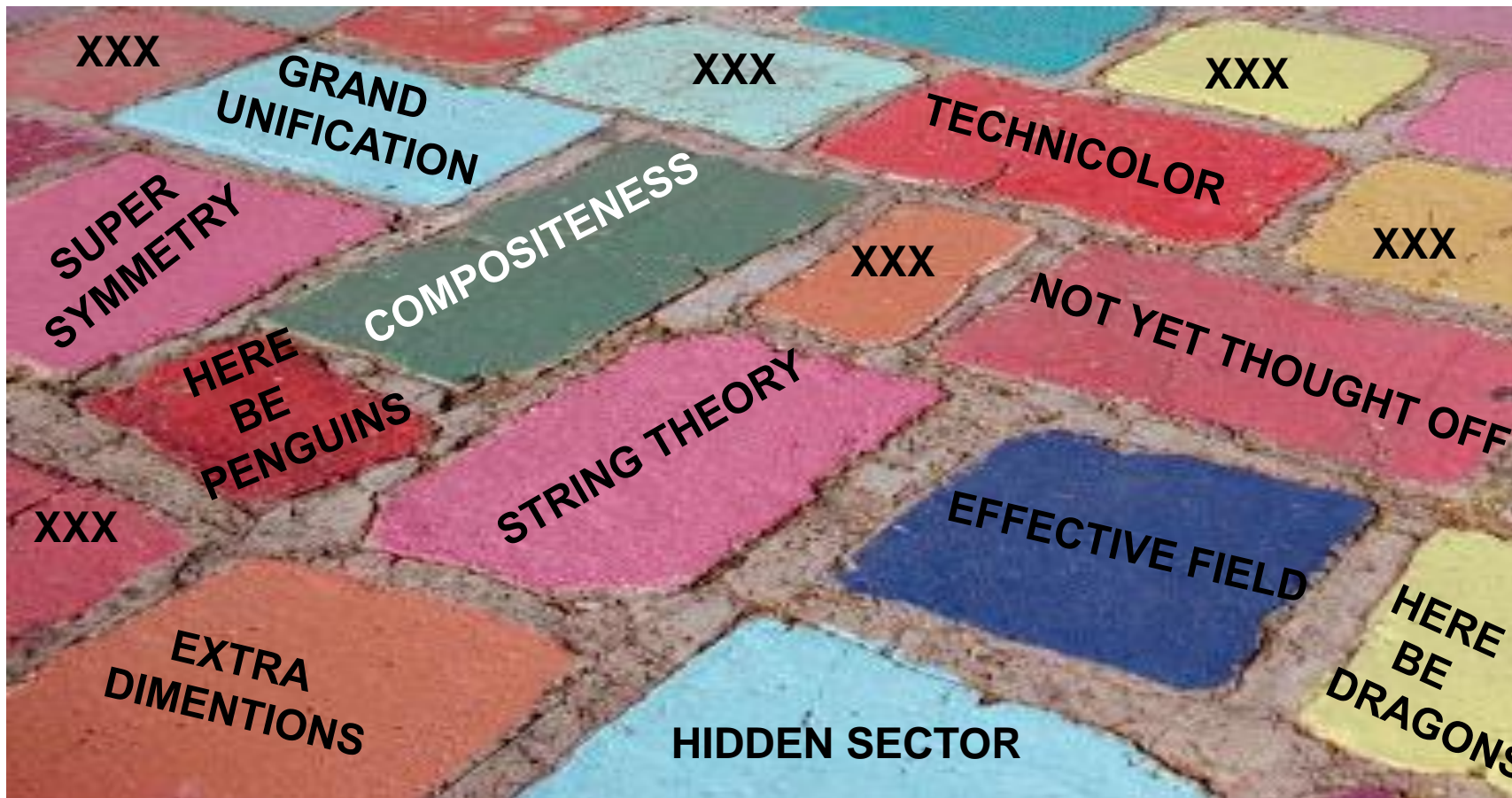
С открытием бозона Хиггса мы нашли все частицы СМ (кроме аксиона), но на много вопросов нет ответа:

- Почему Хиггс легок?
- Что такое темная материя?
- Почему существует 3 поколения?
- ...

Как найти ответ на наши вопросы?



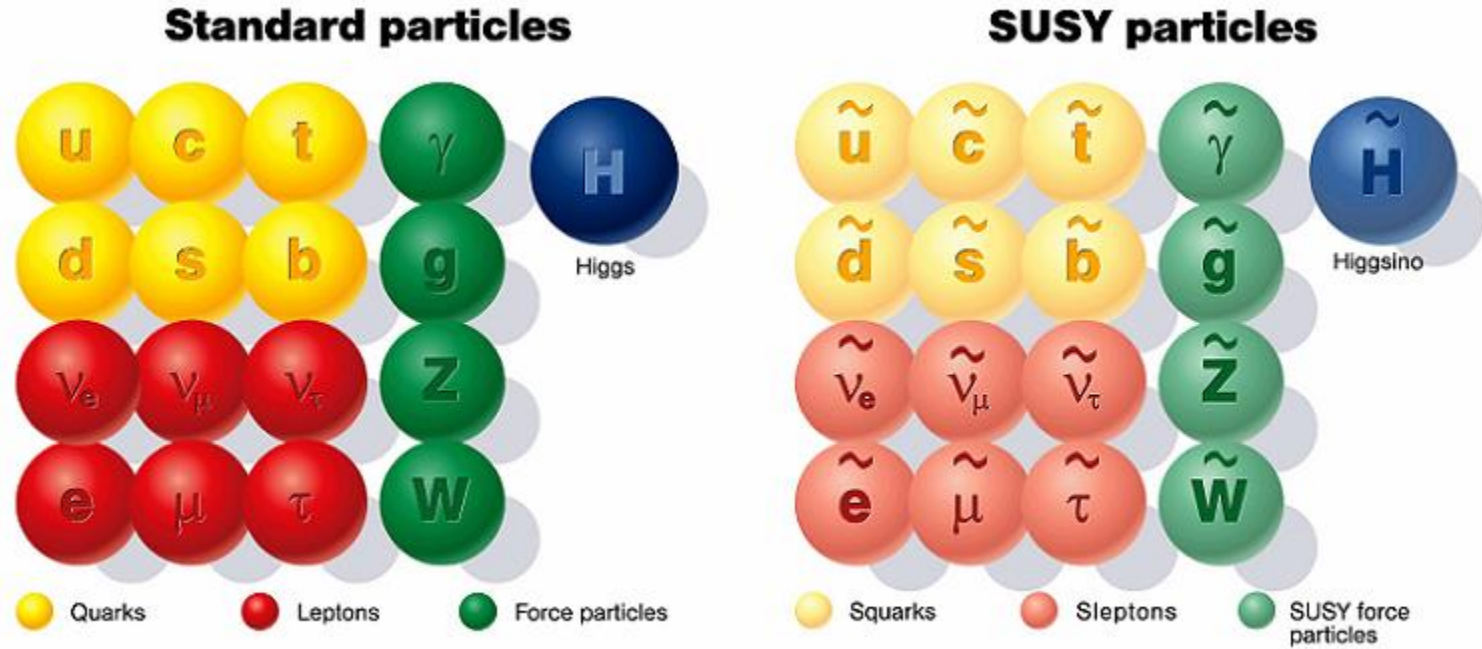
# Мир вне СМ глазами теоретиков



Balboa Park, San Diego, USA, from <https://beautifulbalboapark.wordpress.com>



# Суперсимметрия (SUSY)

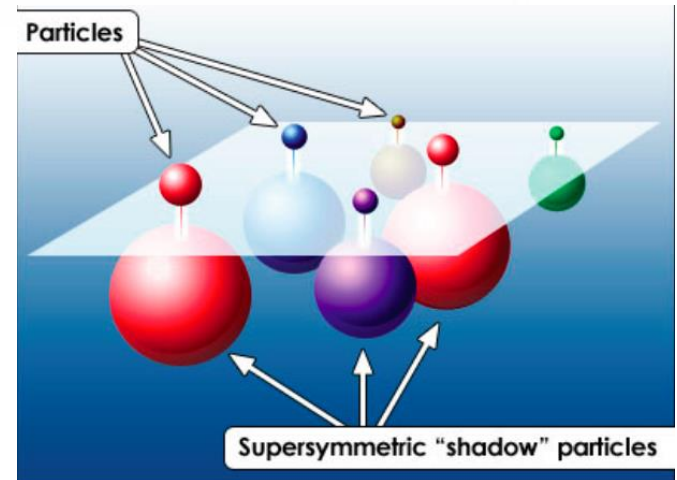


Симметрия между фермионами и бозонами.

У каждой частицы СМ со спином  $S$  появляется партнер со спином  $S-1/2$ .

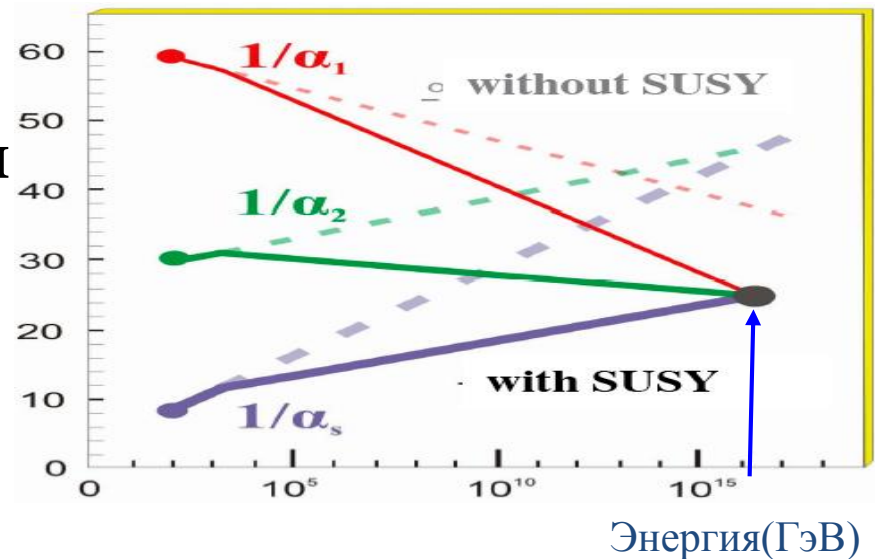
Так как мы не еще видели супер-частиц Эта симметрия должна быть нарушена.

Много новых частиц и новых параметров (120!). ☹



# Зачем нужна Суперсимметрия?

- Объединение **электро-магнитной, слабой** и **сильной** констант взаимодействия при одной энергии
- Новая стабильная, нейтральная частица  $\Rightarrow$  идеальный кандидат для темной материи
- Простейшее обобщение СМ:  
Минимальная  
Суперсимметричная  
Стандарная Модель (MSSM)



# ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

Status: July 2015

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$

Model	$e, \mu, \tau, \gamma$	Jets	$E_T^{\text{miss}}$	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$	Reference	
Inclusive Searches	MSUGRA/CMSSM	0-3 $e, \mu/1-2 \tau$	2-10 jets/3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{q}, \tilde{g}$	1.8 TeV	$m(\tilde{q})=m(\tilde{g})$	1507.05525
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	20.3	850 GeV		$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(1^{\text{st}} \text{ gen. } \tilde{q})=m(2^{\text{nd}} \text{ gen. } \tilde{q})$	1405.7875
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$ (compressed)	mono-jet	1-3 jets	Yes	20.3	100-440 GeV		$m(\tilde{q})-m(\tilde{\chi}_1^0)<10 \text{ GeV}$	1507.05525
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q(\ell\ell/\ell\nu/\nu\nu)\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$ (off-Z)	2 jets	Yes	20.3	780 GeV		$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1503.03290
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	20.3		1.33 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1405.7875
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow q\tilde{q}W^\pm\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$	2-6 jets	Yes	20		1.26 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<300 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}^\pm)=0.5(m(\tilde{\chi}_1^0)+m(\tilde{g}))$	1507.05525
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}(\ell\ell/\ell\nu/\nu\nu)\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$	0-3 jets	-	20		1.32 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1501.03555
	GMSB ( $\tilde{\ell}$ NLSP)	1-2 $\tau + 0-1 \ell$	0-2 jets	Yes	20.3		1.6 TeV	$\tan\beta > 20$	1407.0603
	GGM (bino NLSP)	2 $\gamma$	-	Yes	20.3		1.29 TeV	$c\tau(\text{NLSP})<0.1 \text{ mm}$	1507.05493
	GGM (higgsino-bino NLSP)	$\gamma$	1 $b$	Yes	20.3		1.3 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<900 \text{ GeV}, c\tau(\text{NLSP})<0.1 \text{ mm}, \mu<0$	1507.05493
GGM (higgsino-bino NLSP)	$\gamma$	2 jets	Yes	20.3		1.25 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<850 \text{ GeV}, c\tau(\text{NLSP})<0.1 \text{ mm}, \mu>0$	1507.05493	
GGM (higgsino NLSP)	2 $e, \mu$ (Z)	2 jets	Yes	20.3	850 GeV		$m(\text{NLSP})>430 \text{ GeV}$	1503.03290	
Gravitino LSP	0	mono-jet	Yes	20.3	$F^{1/2}$ scale	865 GeV	$m(\tilde{G})>1.8 \times 10^{-4} \text{ eV}, m(\tilde{g})=m(\tilde{q})=1.5 \text{ TeV}$	1502.01518	
3 <sup>rd</sup> gen. $\tilde{g}$ med.	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0$	0	3 $b$	Yes	20.1		1.25 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<400 \text{ GeV}$	1407.0600
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$	0	7-10 jets	Yes	20.3		1.1 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 350 \text{ GeV}$	1308.1841
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$	3 $b$	Yes	20.1		1.34 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<400 \text{ GeV}$	1407.0600
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$	3 $b$	Yes	20.1		1.3 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<300 \text{ GeV}$	1407.0600
3 <sup>rd</sup> gen. squarks direct production	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	0	2 $b$	Yes	20.1		100-620 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<90 \text{ GeV}$	1308.2631
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^\pm$	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	20.3		275-440 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=2 m(\tilde{\chi}_1^0)$	1404.2500
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm$	1-2 $e, \mu$	1-2 $b$	Yes	4.7/20.3	110-167 GeV	230-460 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm) = 2m(\tilde{\chi}_1^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=55 \text{ GeV}$	1209.2102, 1407.0583
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow W\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0$ or $t\tilde{\chi}_1^0$	0-2 $e, \mu$	0-2 jets/1-2 $b$	Yes	20.3	90-191 GeV	210-700 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=1 \text{ GeV}$	1506.08616
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	mono-jet/ $c$ -tag	Yes	20.3		90-240 GeV	$m(\tilde{t}_1)-m(\tilde{\chi}_1^0)<85 \text{ GeV}$	1407.0608
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (natural GMSB)	2 $e, \mu$ (Z)	1 $b$	Yes	20.3		150-580 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>150 \text{ GeV}$	1403.5222
	$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + Z$	3 $e, \mu$ (Z)	1 $b$	Yes	20.3		290-600 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<200 \text{ GeV}$	1403.5222
EW direct	$\tilde{\ell}_{L,R}\tilde{\ell}_{L,R}, \tilde{\ell} \rightarrow \tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$	0	Yes	20.3		90-325 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1403.5294
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\nu}(\ell\nu)$	2 $e, \mu$	0	Yes	20.3		140-465 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1403.5294
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\tau}(\tau\nu)$	2 $\tau$	-	Yes	20.3		100-350 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\tau}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1407.0350
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\ell}_1\nu\tilde{\ell}_1\ell(\tilde{\nu}\nu), \ell\tilde{\nu}\tilde{\ell}_1\ell(\tilde{\nu}\nu)$	3 $e, \mu$	0	Yes	20.3		700 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^\pm), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1402.7029
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_2^\pm \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 Z\tilde{\chi}_1^0$	2-3 $e, \mu$	0-2 jets	Yes	20.3		420 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^\pm), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \text{sleptons decoupled}$	1403.5294, 1402.7029
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_2^\pm \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 h\tilde{\chi}_1^0$	$e, \mu, \gamma$	0-2 $b$	Yes	20.3	250 GeV		$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^\pm), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \text{sleptons decoupled}$	1501.07110
	$\tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\ell}_R\ell$	4 $e, \mu$	0	Yes	20.3		620 GeV	$m(\tilde{\chi}_2^0)=m(\tilde{\chi}_3^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_2^0)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1405.5086
	GGM (wino NLSP) weak prod.	1 $e, \mu + \gamma$	-	Yes	20.3	$\tilde{W}$	124-361 GeV	$c\tau < 1 \text{ mm}$	1507.05493
	Long-lived particles	Direct $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^\pm$	Disapp. trk	1 jet	Yes	20.3	270 GeV		$m(\tilde{\chi}_1^\pm)-m(\tilde{\chi}_1^0) \sim 160 \text{ MeV}, \tau(\tilde{\chi}_1^\pm)=0.2 \text{ ns}$
Direct $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^\pm$		dE/dx trk	-	Yes	18.4		482 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)-m(\tilde{\chi}_1^0) \sim 160 \text{ MeV}, \tau(\tilde{\chi}_1^\pm) < 15 \text{ ns}$	1506.05332
Stable, stopped $\tilde{g}$ R-hadron		0	1-5 jets	Yes	27.9		832 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=100 \text{ GeV}, 10 \mu\text{s} < \tau(\tilde{g}) < 1000 \text{ s}$	1310.6584
Stable $\tilde{g}$ R-hadron		trk	-	-	19.1				1411.6795
GMSB, stable $\tilde{\tau}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\tau}(\tilde{e}, \tilde{\mu}) + \tau(e, \mu)$		1-2 $\mu$	-	-	19.1		537 GeV	$10 < \tan\beta < 50$	1411.6795
GMSB, $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\gamma}\tilde{G}$ , long-lived $\tilde{\chi}_1^0$		2 $\gamma$	-	Yes	20.3		435 GeV	$2 < \tau(\tilde{\chi}_1^0) < 3 \text{ ns}, \text{SPS8 model}$	1409.5542
$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow e\tilde{\nu}/e\tilde{\mu}/\mu\tilde{\nu}$		displ. $e\tilde{\nu}/e\tilde{\mu}/\mu\tilde{\nu}$	-	-	20.3		1.0 TeV	$7 < c\tau(\tilde{\chi}_1^0) < 740 \text{ mm}, m(\tilde{g})=1.3 \text{ TeV}$	1504.05162
GGM $\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow Z\tilde{G}$		displ. vtx + jets	-	-	20.3		1.0 TeV	$6 < c\tau(\tilde{\chi}_1^0) < 480 \text{ mm}, m(\tilde{g})=1.1 \text{ TeV}$	1504.05162
RPV	LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e\mu/\tau\mu$	$e\mu, e\tau, \mu\tau$	-	-	20.3		1.7 TeV	$\lambda'_{311}=0.11, \lambda_{133/132/233}=0.07$	1503.04430
	Bilinear RPV CMSSM	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{q}, \tilde{g}$	1.35 TeV	$m(\tilde{q})=m(\tilde{g}), c\tau_{LSP} < 1$	1404.2500
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow ee\tilde{\nu}_\mu, e\mu\tilde{\nu}_e$	4 $e, \mu$	-	Yes	20.3		750 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^\pm), \lambda_{121} \neq 0$	1405.5086
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tau\tilde{\nu}_\tau, e\tau\tilde{\nu}_\tau$	3 $e, \mu + \tau$	-	Yes	20.3	450 GeV		$m(\tilde{\chi}_1^0) > 0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^\pm), \lambda_{133} \neq 0$	1405.5086
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$	0	6-7 jets	-	20.3		917 GeV	$\text{BR}(t)=\text{BR}(b)=\text{BR}(c)=0\%$	1502.05686
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow q\tilde{q}$	0	6-7 jets	-	20.3		870 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=600 \text{ GeV}$	1502.05686
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow \tilde{t}_1 t, \tilde{t}_1 \rightarrow b s$	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	20.3		850 GeV		1404.250
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b s$	0	2 jets + 2 $b$	-	20.3	100-308 GeV			ATLAS-CONF-2015-026
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\ell$	2 $e, \mu$	2 $b$	-	20.3		0.4-1.0 TeV	$\text{BR}(\tilde{t}_1 \rightarrow b e/\mu) > 20\%$	ATLAS-CONF-2015-015	
Other	Scalar charm, $\tilde{c} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	2 $c$	Yes	20.3		490 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}$	1501.01325

$10^{-1}$

1

Mass scale [TeV]

\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus  $1\sigma$  theoretical signal cross section uncertainty.

# Дополнительные измерения

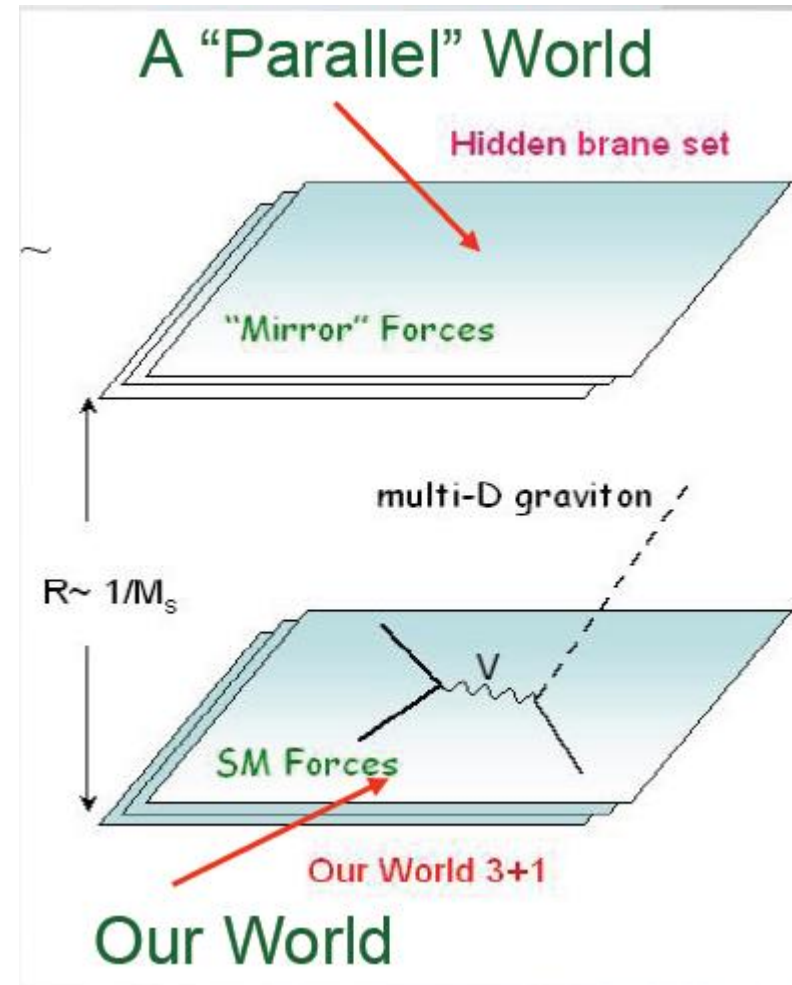
- Суперсимметрия не отвечает на все вопросы
  - Почему слабое взаимодействие в  $10^{32}$  раз сильнее гравитационного
- Если существуют  $>1$  новых измерения размером  $< \text{мм}$ , гравитационные эффекты могут быть в пределах энергий БАК
  - Гравитонные резонансы (G)
  - Производство мини черных дыр (QВН)
  - ...

новая масса Планка:  $M_D$

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

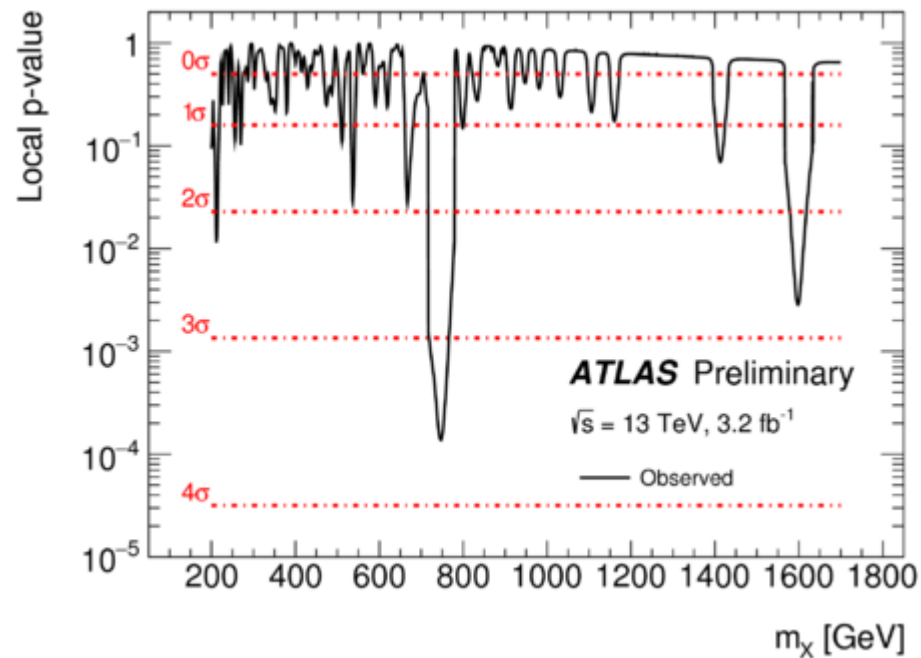
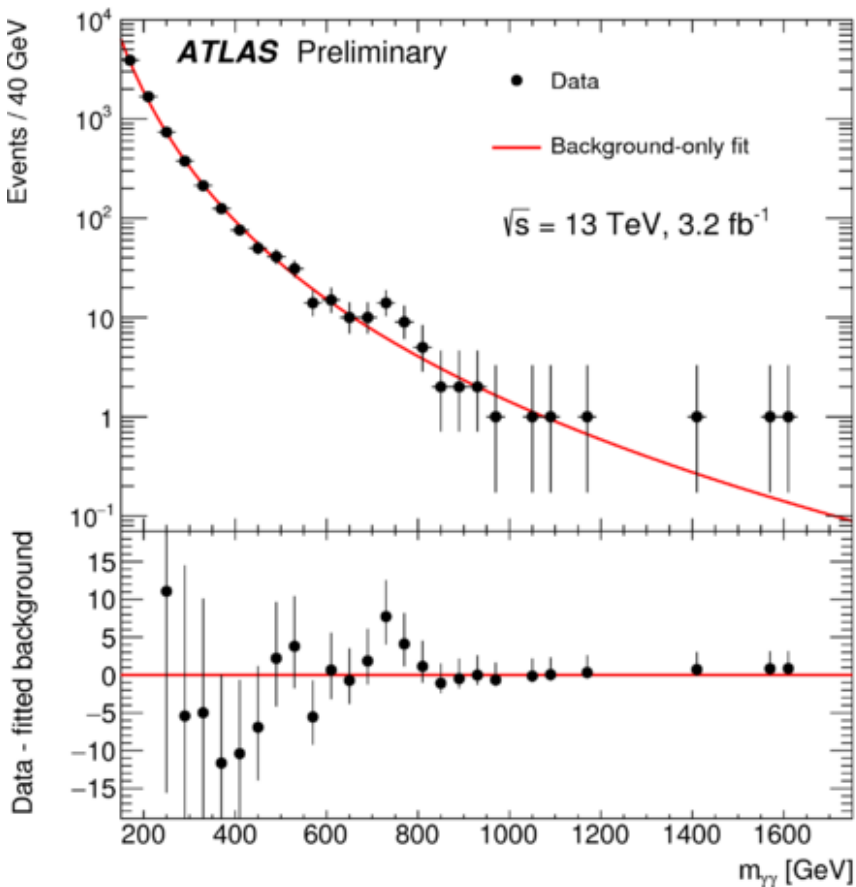
новая гравитационная

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



Каналы поиска:  
qq, qγ, γγ, qℓ, ℓℓ,  
multi-jet etc.

# Ди-бозоны $\gamma\gamma$ (2015)

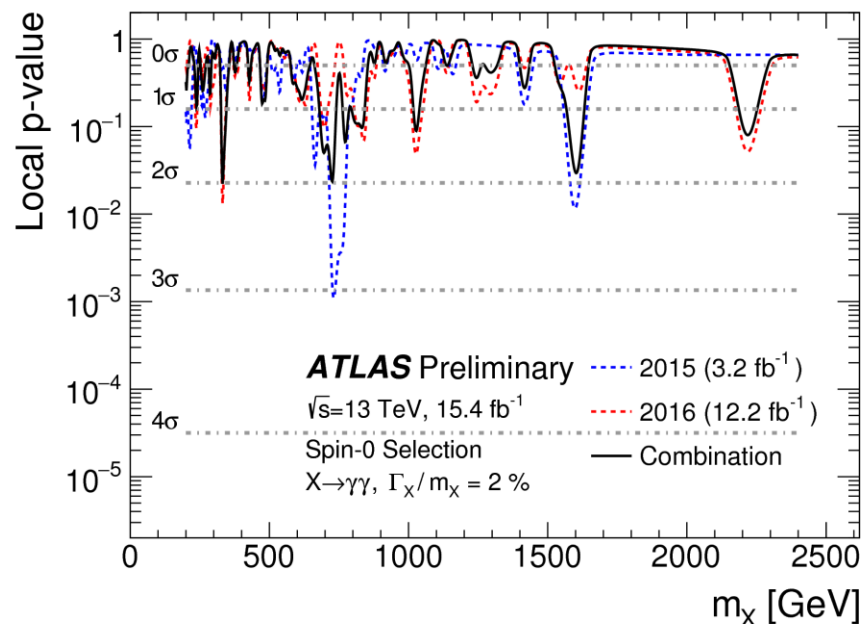
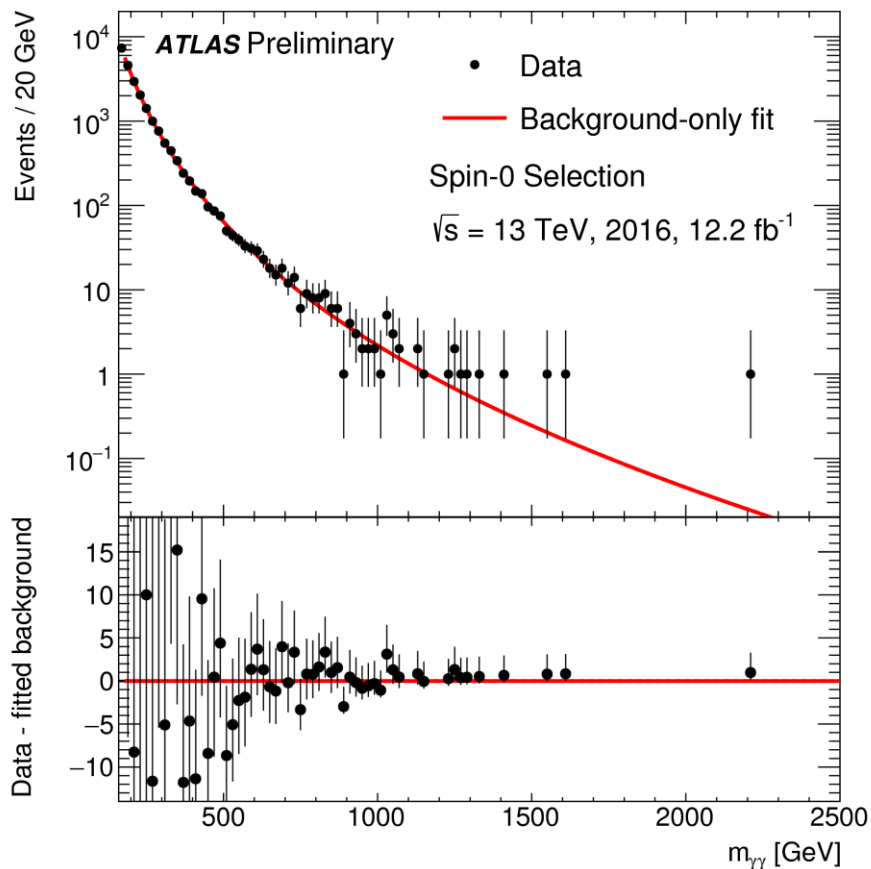


Интересный новый  
 избыток событий  
 в обоих экспериментах.

		Local $\sigma$	Global $\sigma$
ATLAS @ 750 GeV	NWA	3.6	2.0
	LWA (6%)	3.9	2.3
CMS @ 760 GeV	NWA	2.6	1.2
	LWA (6%)	~2	n/a



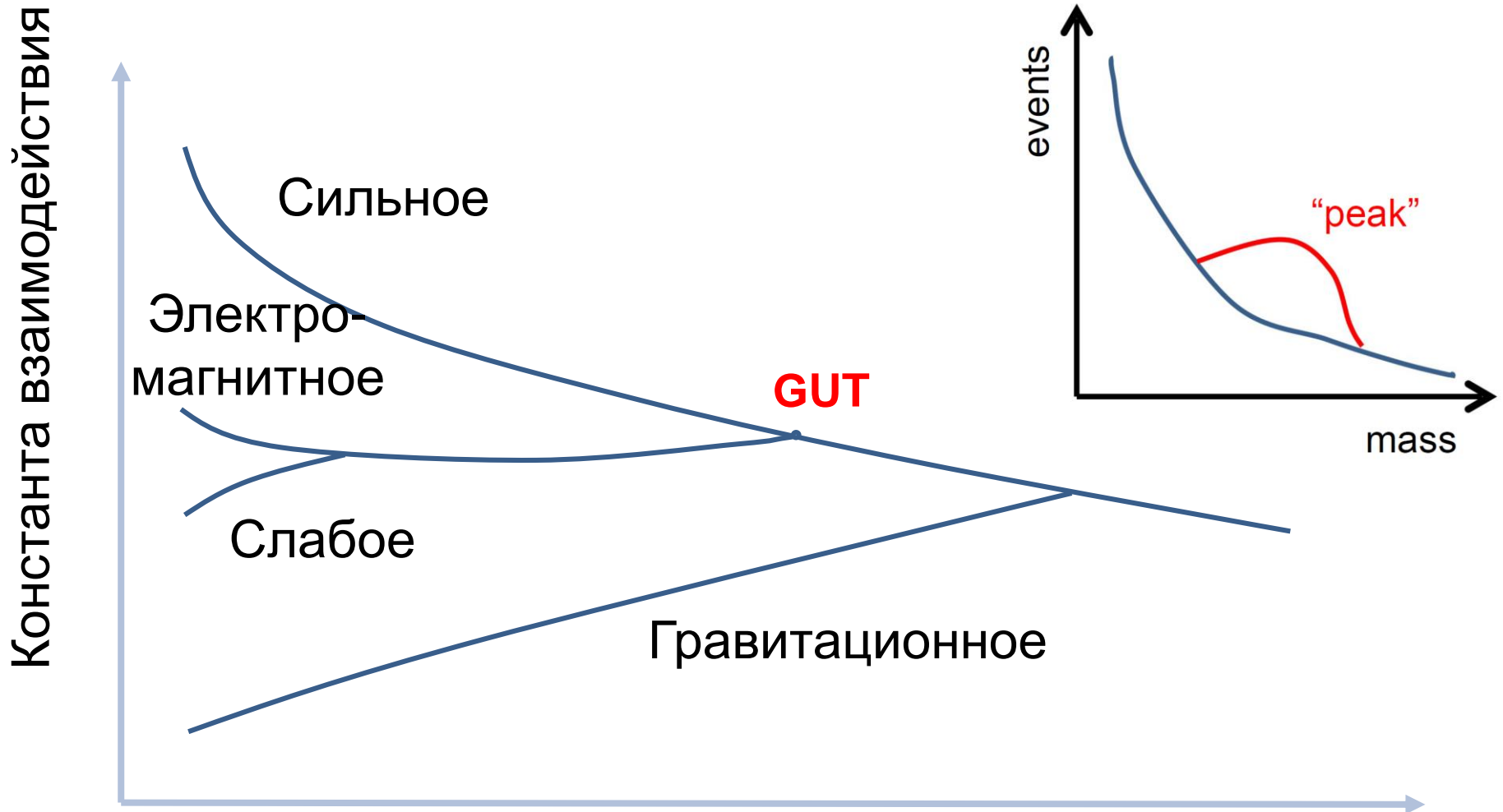
# Ди-бозоны $\gamma\gamma$ (2015)



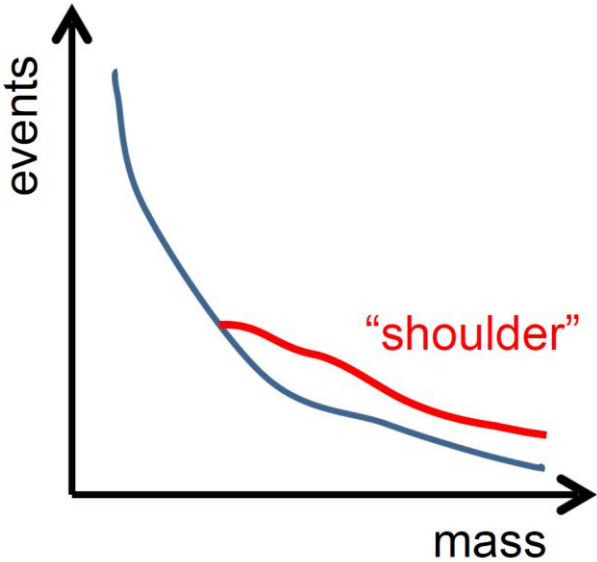
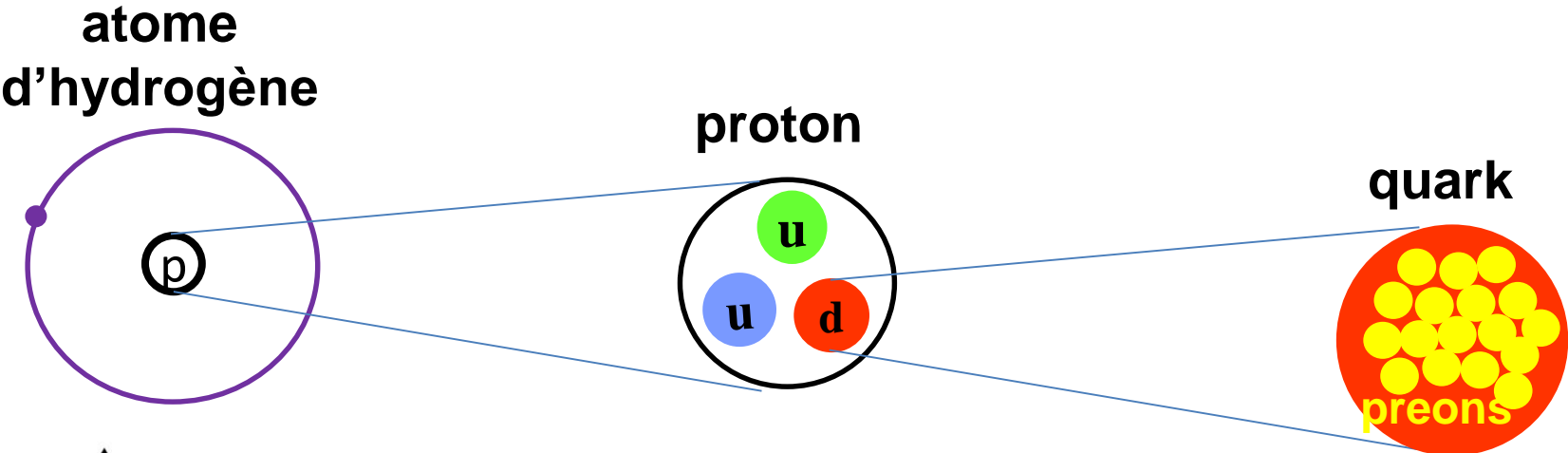
Новые данные не подтвердили присутствие сигнала.

# Теории великого объединения (GUT)

Предсказание: появление  
новых бозонов  
взаимодействия ( $Z'$ ,  $W'$ )



# Подструктура



# Di-Electron Event

High Mass Dielectron

$ET_1 = 370 \text{ GeV}$   $ET_2 = 246 \text{ GeV}$

$m_{ee} = 1.8 \text{ TeV}$

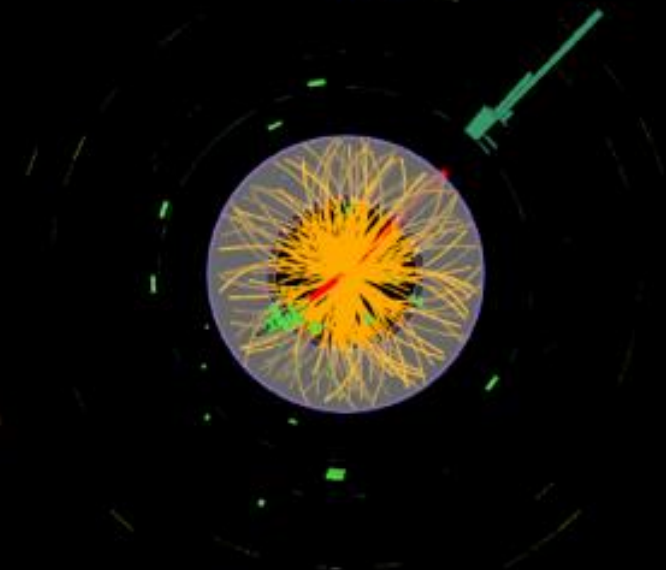
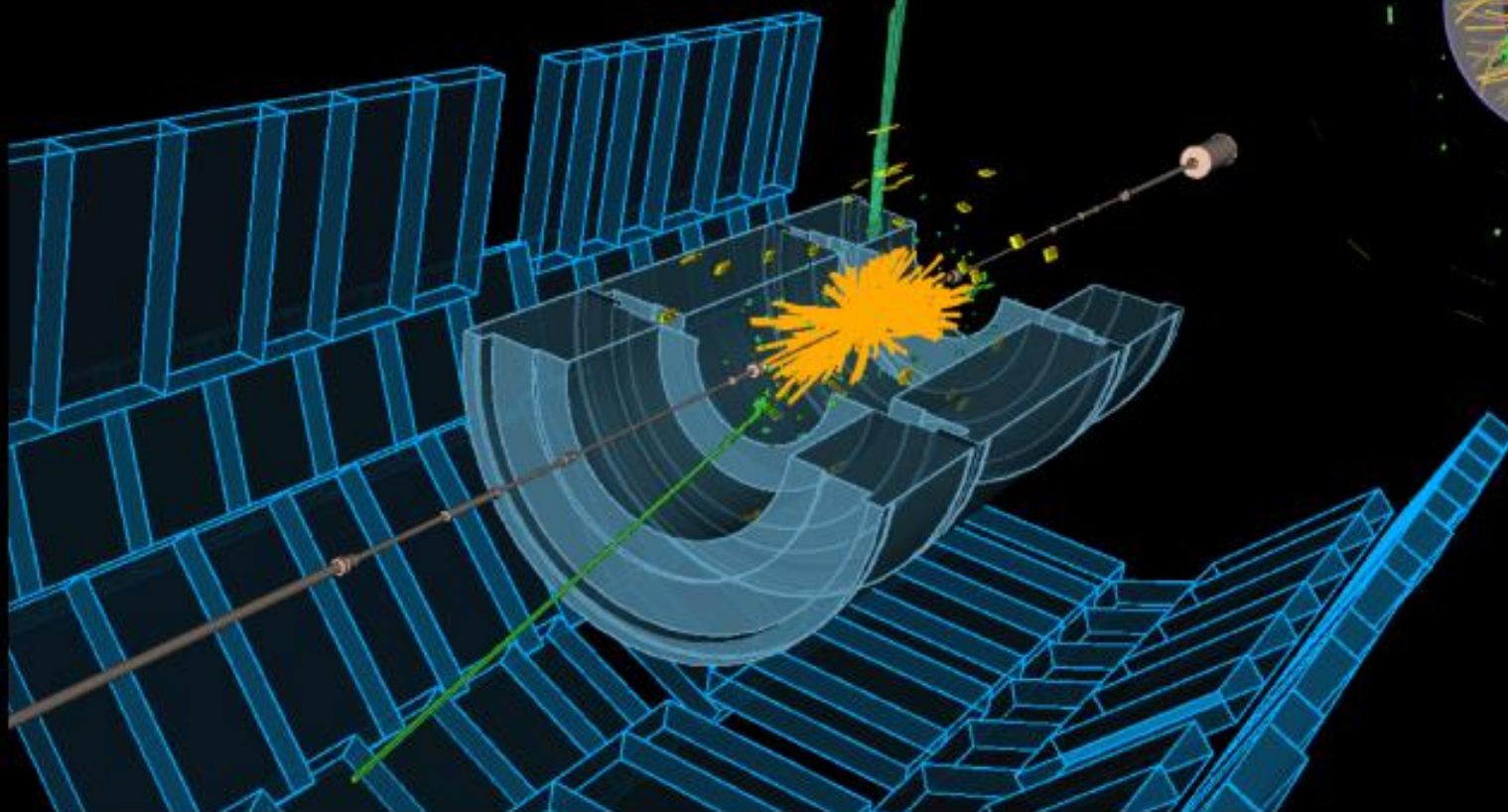


Run: 280319

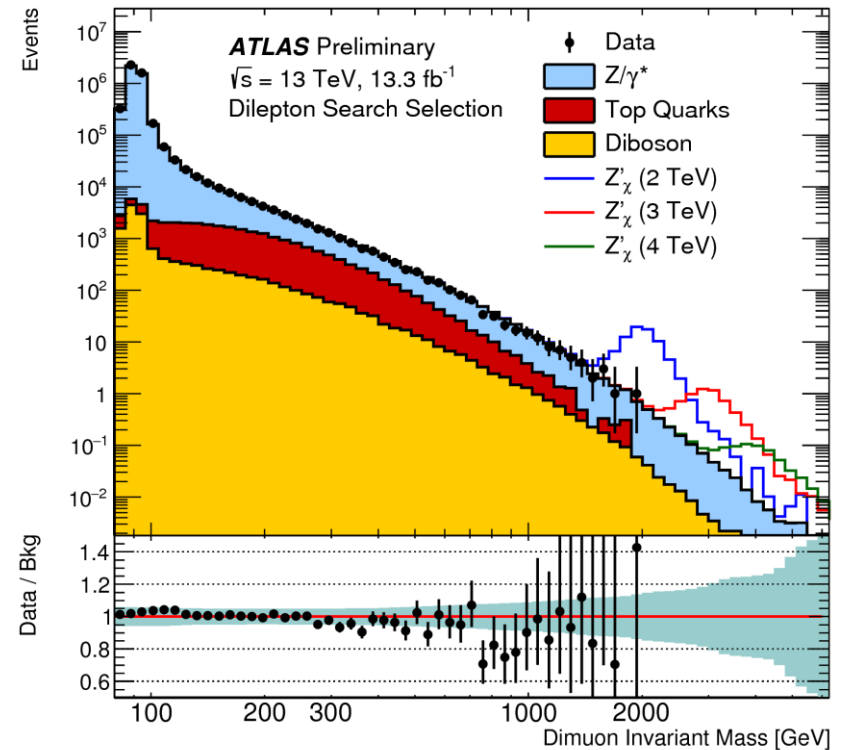
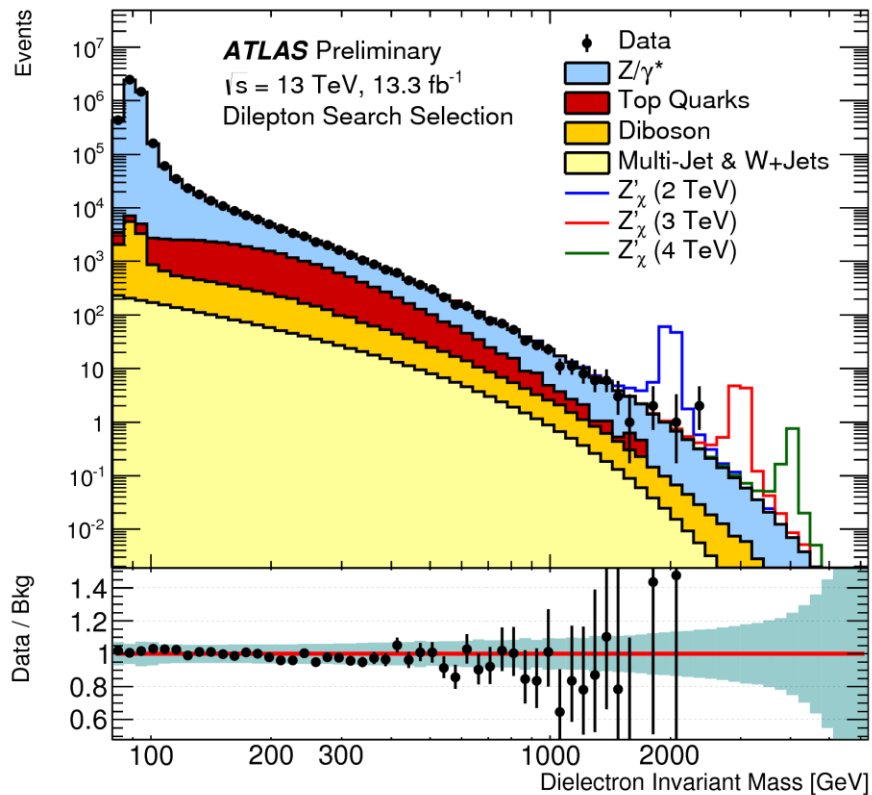
Event: 472098394

2015-09-25 16:25:21 CEST

Z' to 2e candidate Event



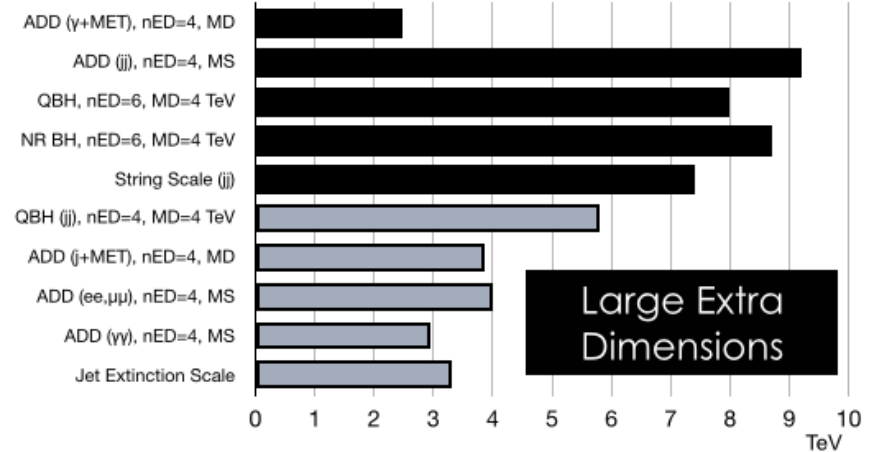
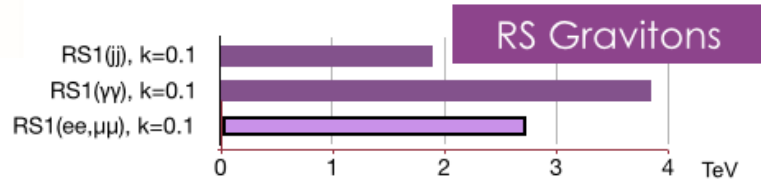
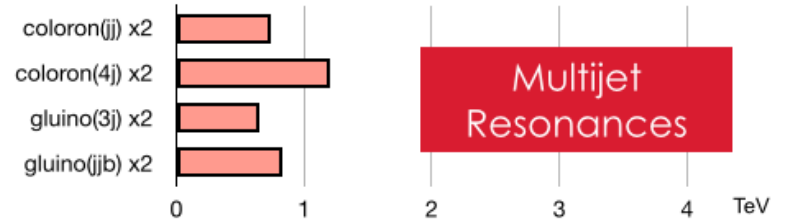
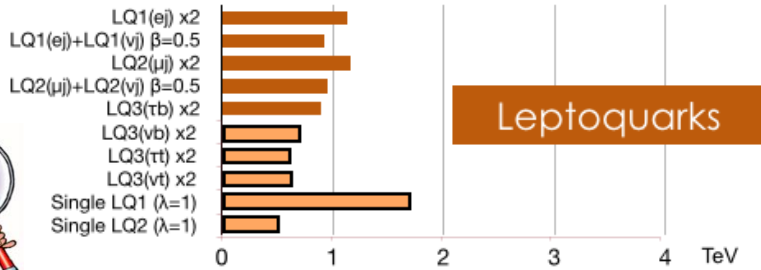
# Спектр дилептонов



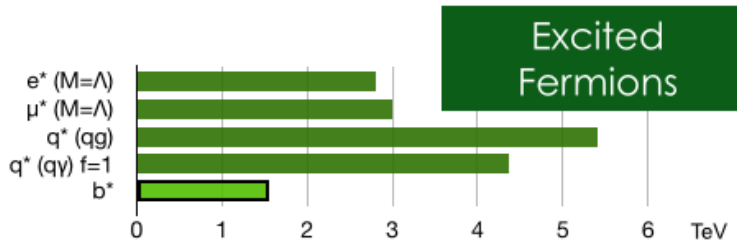
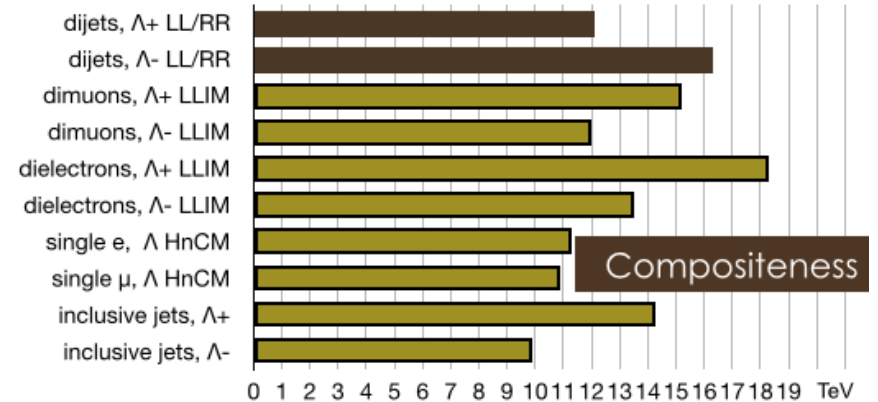
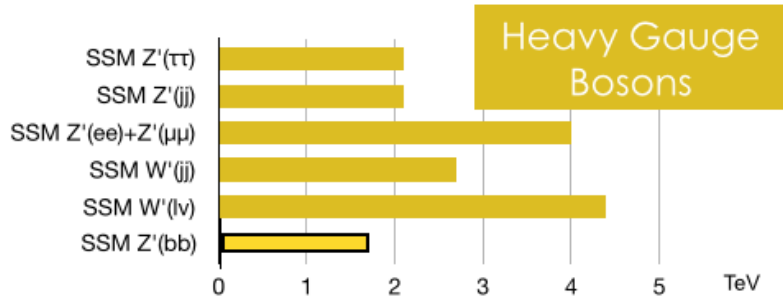
- Спектр соответствует предсказаниям СМ.
- Многие теоритические модели предсказывают сигналы с одинаковыми конечными состояниями.



13 TeV 8 TeV



# CMS Preliminary



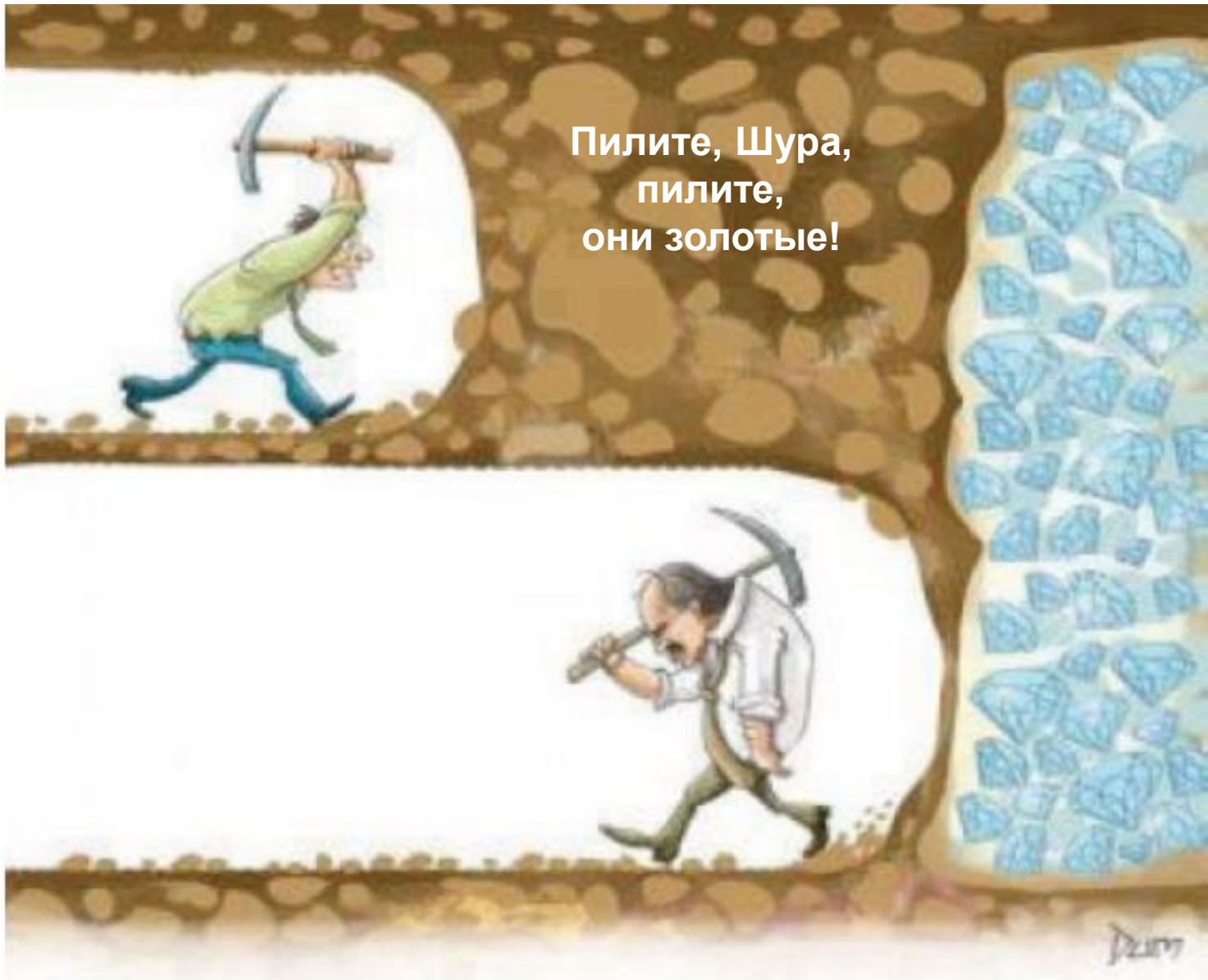
Model	$\ell, \gamma$	Jets	$E_T^{\text{miss}}$	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Limit	Reference	
<b>Extra dimensions</b>	ADD $G_{KK} + g/q$	-	$\geq 1j$	Yes	20.3	$M_D$ 5.25 TeV	$n = 2$ 1502.01518
	ADD non-resonant $\ell\ell$	$2e, \mu$	-	-	20.3	$M_S$ 4.7 TeV	$n = 3 \text{ HLZ}$ 1407.2410
	ADD QBH $\rightarrow \ell q$	$1e, \mu$	$1j$	-	20.3	$M_{\text{th}}$ 5.2 TeV	$n = 6$ 1311.2006
	ADD QBH	-	$2j$	-	20.3	$M_{\text{th}}$ 5.82 TeV	$n = 6$ 1407.1376
	ADD BH high $N_{\text{trk}}$	$2\mu$ (SS)	-	-	20.3	$M_{\text{th}}$ 4.7 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, non-rot BH}$ 1308.4075
	ADD BH high $\Sigma p_T$	$\geq 1e, \mu$	$\geq 2j$	-	20.3	$M_{\text{th}}$ 5.8 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, non-rot BH}$ 1405.4254
	ADD BH high multijet	-	$\geq 2j$	-	20.3	$M_{\text{th}}$ 5.8 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, non-rot BH}$ 1503.08988
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \ell\ell$	$2e, \mu$	-	-	20.3	$G_{KK} \text{ mass}$ 2.68 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 0.1$ 1405.4123
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$	$2\gamma$	-	-	20.3	$G_{KK} \text{ mass}$ 2.66 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 0.1$ 1504.05511
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow ZZ \rightarrow qq\ell\ell$	$2e, \mu$	$2j/1J$	-	20.3	$G_{KK} \text{ mass}$ 740 GeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 1.0$ 1409.6190
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW \rightarrow qq\ell\nu$	$1e, \mu$	$2j/1J$	Yes	20.3	$W' \text{ mass}$ 760 GeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 1.0$ 1503.04677
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	-	$4b$	-	19.5	$G_{KK} \text{ mass}$ 500-720 GeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 1.0$ 1506.00285
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow t\bar{t}$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 1J/2J$	Yes	20.3	$G_{KK} \text{ mass}$ 2.2 TeV	BR = 0.925 1505.07018
	2UED / RPP	$2e, \mu$ (SS)	$\geq 1b, \geq 1j$	Yes	20.3	$KK \text{ mass}$ 960 GeV	1504.04605
	<b>Gauge bosons</b>	SSM $Z' \rightarrow \ell\ell$	$2e, \mu$	-	-	20.3	$Z' \text{ mass}$ 2.9 TeV
SSM $Z' \rightarrow \tau\tau$		$2\tau$	-	-	19.5	$Z' \text{ mass}$ 2.02 TeV	1502.07177
SSM $W' \rightarrow \ell\nu$		$1e, \mu$	-	Yes	20.3	$W' \text{ mass}$ 3.24 TeV	1407.7494
EGM $W' \rightarrow WZ \rightarrow \ell\nu\ell'\ell'$		$3e, \mu$	-	Yes	20.3	$W' \text{ mass}$ 1.52 TeV	1406.4456
EGM $W' \rightarrow WZ \rightarrow qq\ell\ell$		$2e, \mu$	$2j/1J$	-	20.3	$W' \text{ mass}$ 1.59 TeV	1409.6190
EGM $W' \rightarrow WZ \rightarrow qqqq$		-	$2J$	-	20.3	$W' \text{ mass}$ 1.3-1.5 TeV	1506.00962
HVT $W' \rightarrow WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$		$1e, \mu$	$2b$	Yes	20.3	$W' \text{ mass}$ 1.47 TeV	$g_V = 1$ 1503.08089
LRSM $W'_R \rightarrow t\bar{b}$		$1e, \mu$	$2b, 0-1j$	Yes	20.3	$W' \text{ mass}$ 1.92 TeV	1410.4103
LRSM $W'_R \rightarrow t\bar{b}$	$0e, \mu$	$\geq 1b, 1J$	-	20.3	$W' \text{ mass}$ 1.76 TeV	1408.0886	
<b>CI</b>	CI $qqqq$	-	$2j$	-	17.3	$\Lambda$ 12.0 TeV	$\eta_{LL} = -1$ 1504.00357
	CI $qq\ell\ell$	$2e, \mu$	-	-	20.3	$\Lambda$ 21.6 TeV	$\eta_{LL} = -1$ 1407.2410
	CI $uutt$	$2e, \mu$ (SS)	$\geq 1b, \geq 1j$	Yes	20.3	$\Lambda$ 4.3 TeV	$ C_{LL}  = 1$ 1504.04605
<b>DM</b>	EFT D5 operator (Dirac)	$0e, \mu$	$\geq 1j$	Yes	20.3	$M_*$ 974 GeV	at 90% CL for $m(\chi) < 100 \text{ GeV}$ 1502.01518
	EFT D9 operator (Dirac)	$0e, \mu$	$1J, \leq 1j$	Yes	20.3	$M_*$ 2.4 TeV	at 90% CL for $m(\chi) < 100 \text{ GeV}$ 1309.4017
<b>LQ</b>	Scalar LQ 1 <sup>st</sup> gen	$2e$	$\geq 2j$	-	20.3	LQ mass 1.05 TeV	$\beta = 1$ Preliminary
	Scalar LQ 2 <sup>nd</sup> gen	$2\mu$	$\geq 2j$	-	20.3	LQ mass 1.0 TeV	$\beta = 1$ Preliminary
	Scalar LQ 3 <sup>rd</sup> gen	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 3j$	Yes	20.3	LQ mass 640 GeV	$\beta = 0$ Preliminary
<b>Heavy quarks</b>	VLQ $TT \rightarrow Ht + X$	$1e, \mu$	$\geq 2b, \geq 3j$	Yes	20.3	T mass 855 GeV	T in (T,B) doublet 1505.04306
	VLQ $YY \rightarrow Wb + X$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 3j$	Yes	20.3	Y mass 770 GeV	Y in (B,Y) doublet 1505.04306
	VLQ $BB \rightarrow Hb + X$	$1e, \mu$	$\geq 2b, \geq 3j$	Yes	20.3	B mass 735 GeV	isospin singlet 1505.04306
	VLQ $BB \rightarrow Zb + X$	$2\geq 3e, \mu$	$\geq 2\geq 1b$	-	20.3	B mass 755 GeV	B in (B,Y) doublet 1409.5500
	$T_{5/3} \rightarrow Wt$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 5j$	Yes	20.3	$T_{5/3} \text{ mass}$ 840 GeV	1503.05425
<b>Excited fermions</b>	Excited quark $q^* \rightarrow q\gamma$	$1\gamma$	$1j$	-	20.3	$q^* \text{ mass}$ 3.5 TeV	only $u^*$ and $d^*$ , $\Lambda = m(q^*)$ 1309.3230
	Excited quark $q^* \rightarrow qg$	-	$2j$	-	20.3	$q^* \text{ mass}$ 4.09 TeV	only $u^*$ and $d^*$ , $\Lambda = m(q^*)$ 1407.1376
	Excited quark $b^* \rightarrow Wt$	$1 \text{ or } 2e, \mu$	$1b, 2j \text{ or } 1j$	Yes	4.7	$b^* \text{ mass}$ 870 GeV	left-handed coupling 1301.1583
	Excited lepton $\ell^* \rightarrow \ell\gamma$	$2e, \mu, 1\gamma$	-	-	13.0	$\ell^* \text{ mass}$ 2.2 TeV	$\Lambda = 2.2 \text{ TeV}$ 1308.1364
	Excited lepton $\nu^* \rightarrow \ell W, \nu Z$	$3e, \mu, \tau$	-	-	20.3	$\nu^* \text{ mass}$ 1.6 TeV	$\Lambda = 1.6 \text{ TeV}$ 1411.2921
<b>Other</b>	LSTC $a_T \rightarrow W\gamma$	$1e, \mu, 1\gamma$	-	Yes	20.3	$a_T \text{ mass}$ 960 GeV	1407.8150
	LRSM Majorana $\nu$	$2e, \mu$	$2j$	-	20.3	$N^0 \text{ mass}$ 2.0 TeV	$m(W_\nu) = 2.4 \text{ TeV, no mixing}$ 1506.06020
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$	$2e, \mu$ (SS)	-	-	20.3	$H^{\pm\pm} \text{ mass}$ 551 GeV	DY production, BR( $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$ )=1 1412.0237
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$	$3e, \mu, \tau$	-	-	20.3	$H^{\pm\pm} \text{ mass}$ 400 GeV	DY production, BR( $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$ )=1 1411.2921
	Monotop (non-res prod)	$1e, \mu$	$1b$	Yes	20.3	spin-1 invisible particle mass 657 GeV	$a_{\text{non-res}} = 0.2$ 1410.5404
	Multi-charged particles	-	-	-	20.3	multi-charged particle mass 785 GeV	DY production, $ q  = 5e$ 1504.04188
	Magnetic monopoles	-	-	-	7.0	monopole mass 1.34 TeV	DY production, $ g  = 1g_D, \text{ spin } 1/2$ Preliminary

$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$        $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$

10<sup>-1</sup>      1      10      Mass scale [TeV]

\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

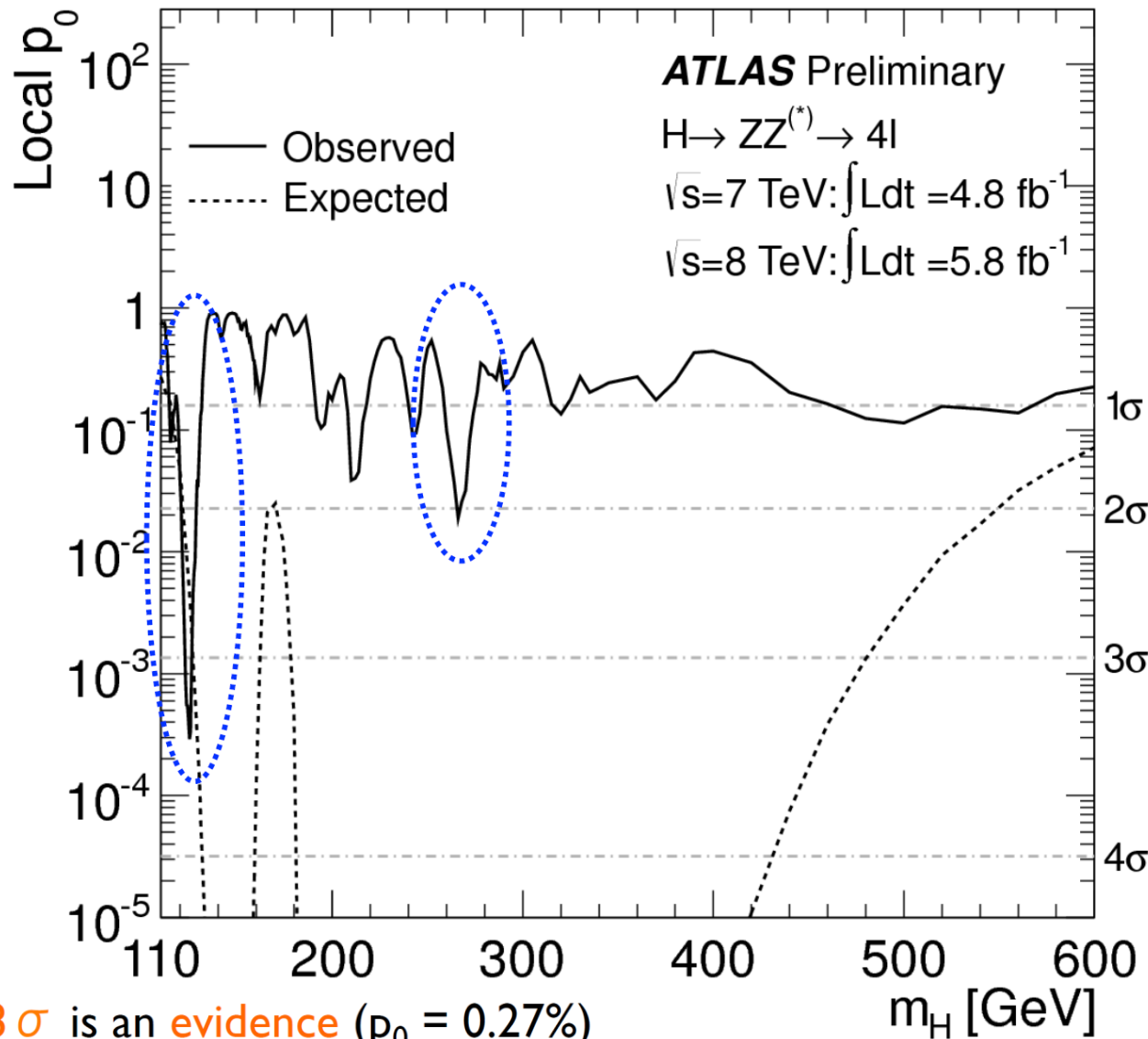
# Заключение



# Дополнительные прозрачки

---

# Значительно ли превышение?



**P-значение** ([англ. P-value](#))

величина, используемая при тестировании статистических гипотез. это вероятность ошибки при отклонении от нулевой гипотезы.

$$p_0 = 1 - \text{Erf} \left( \frac{Z}{\sqrt{2}} \right)$$

$$\text{erf}(z) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt.$$

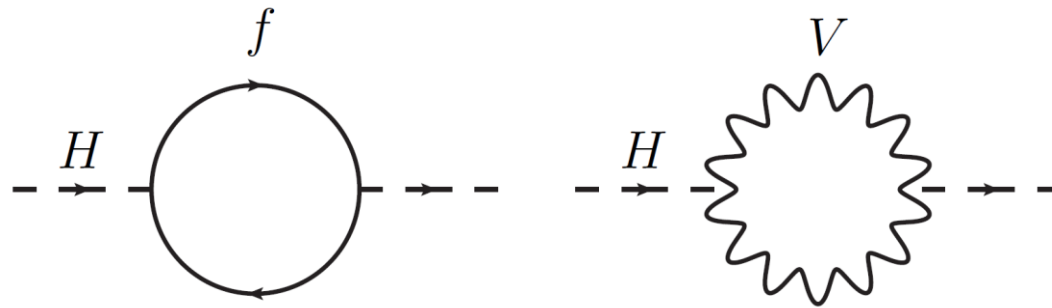
$3\sigma$  is an **evidence** ( $p_0 = 0.27\%$ )

$5\sigma$  is a **discovery** ( $p_0 = 5.7 \cdot 10^{-7}$ )



# Hierarchy problem of SM

- SM is an effective theory valid up to a cut off scale  $\Lambda_{\text{SM}}$
- Radiative



$$\Delta m_H^2 = -\frac{|y_f|^2}{16\pi^2} \left[ 2\Lambda^2 + \mathcal{O} \left( m_f^2 \ln \left( \frac{\Lambda}{m_f} \right) \right) \right]$$