



# Эксперимент ATLAS

## Физические результаты

Соловьев В.М.

Научная сессия ОФВЭ

25 декабря 2019

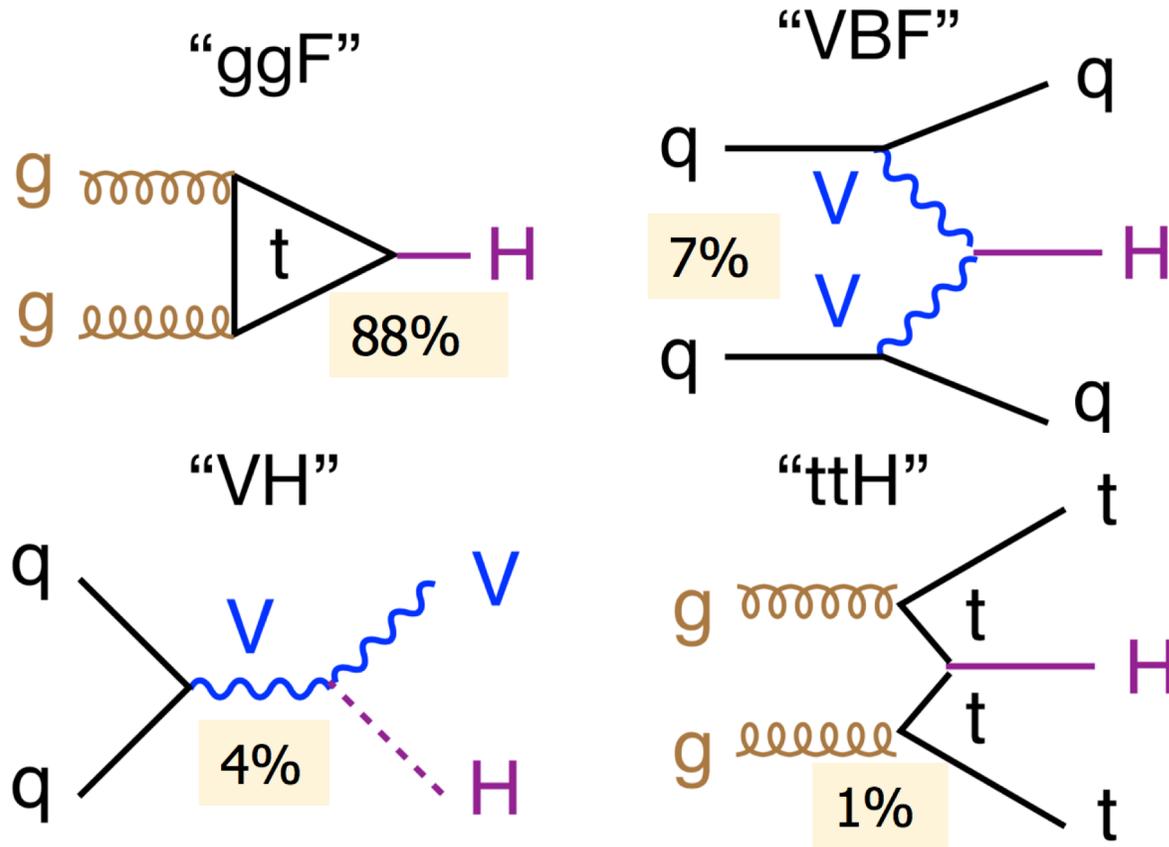
# Физические исследования

- В эксперименте ATLAS достаточно обширная программа физических исследований
- Физика в рамках Стандартной модели:
  - Измерение параметров Стандартной модели (сечения,  $BR$ , массы и т.д.)
  - Изучение свойств бозона Хиггса
  - Физика  $t$ -кварка
  - Физика  $b$ -кварка
  - Физика тяжелых ионов
- Физика за пределами Стандартной модели:
  - Поиск «экзотических» явлений и частиц (тяжелые калибровочные бозоны, темная материя, модели с дополнительными размерностями и т.д.)
  - Суперсимметрия

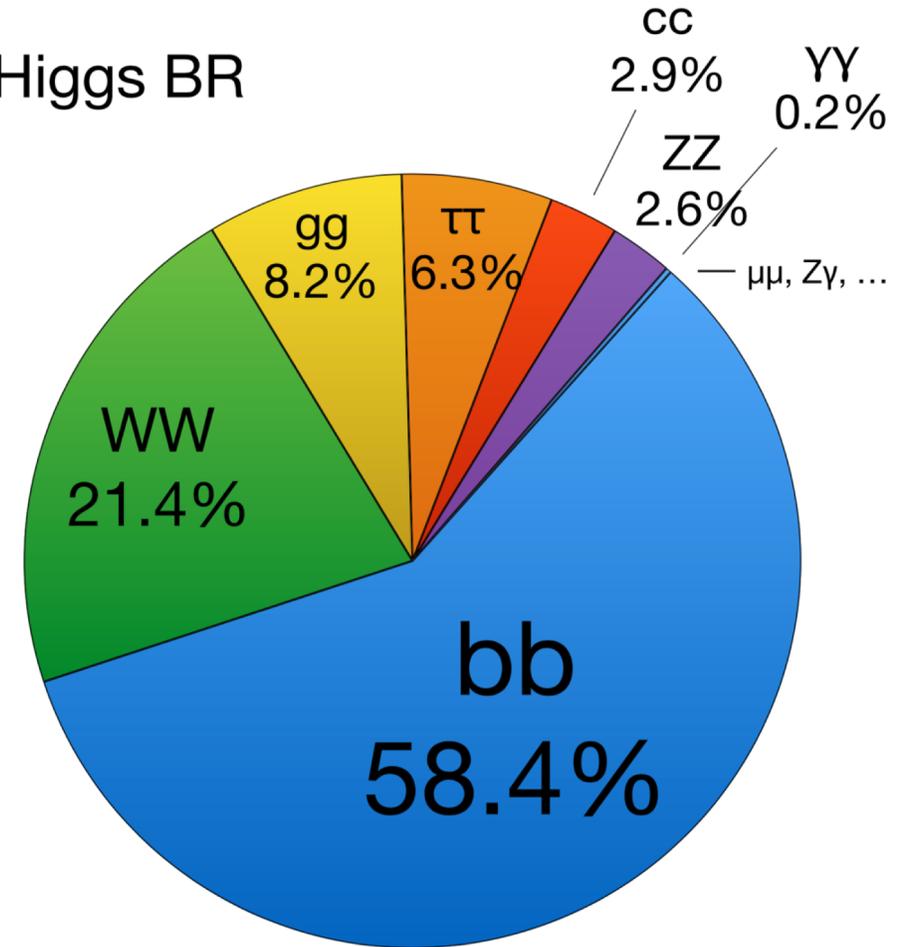
# Физические исследования

- В эксперименте ATLAS достаточно обширная программа физических исследований
- Физика в рамках Стандартной модели:
  - Измерение параметров Стандартной модели (сечения,  $BR$ , массы и т.д.)
  - Изучение свойств бозона Хиггса
  - Физика  $t$ -кварка
  - Физика  $b$ -кварка
  - Физика тяжелых ионов
- Физика за пределами Стандартной модели:
  - Поиск «экзотических» явлений и частиц (тяжелые калибровочные бозоны, темная материя, модели с дополнительными размерностями и т.д.)
  - Суперсимметрия

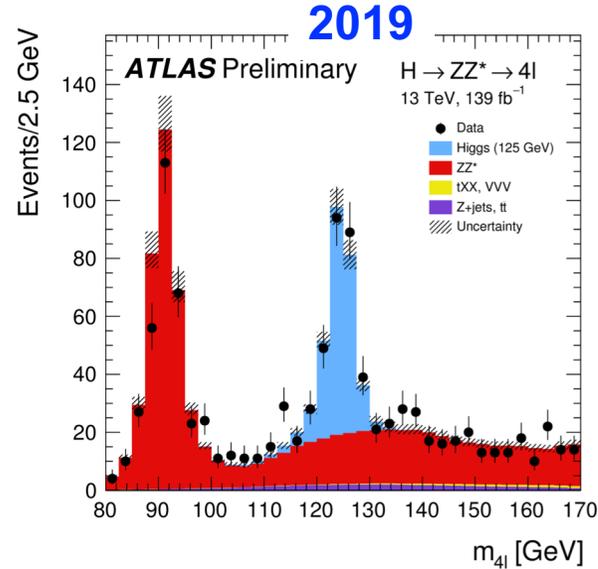
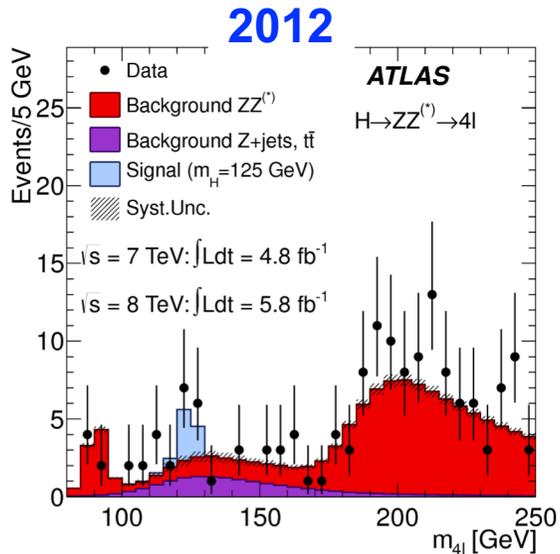
# Рождение и распад бозона Хиггса



Higgs BR



# Изучение свойств бозона Хиггса



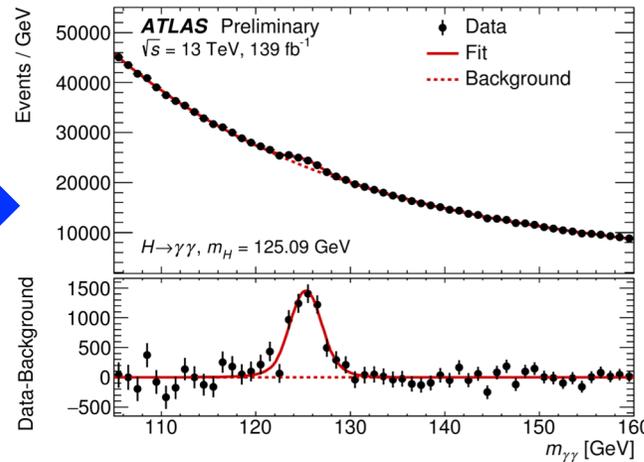
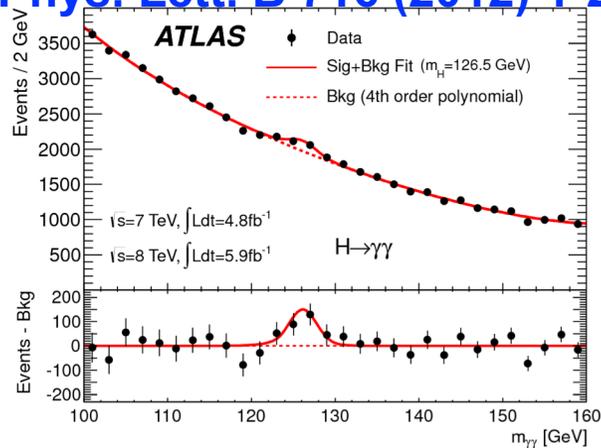
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l:$$

$$\sigma_{fid} = 3.35 \pm 0.30(\text{stat.}) \pm 0.12(\text{syst.}) \text{ fb}$$

$$\sigma_{fid,SM} = 3.41 \pm 0.18 \text{ fb}$$

ATLAS-CONF-2019-025

Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29



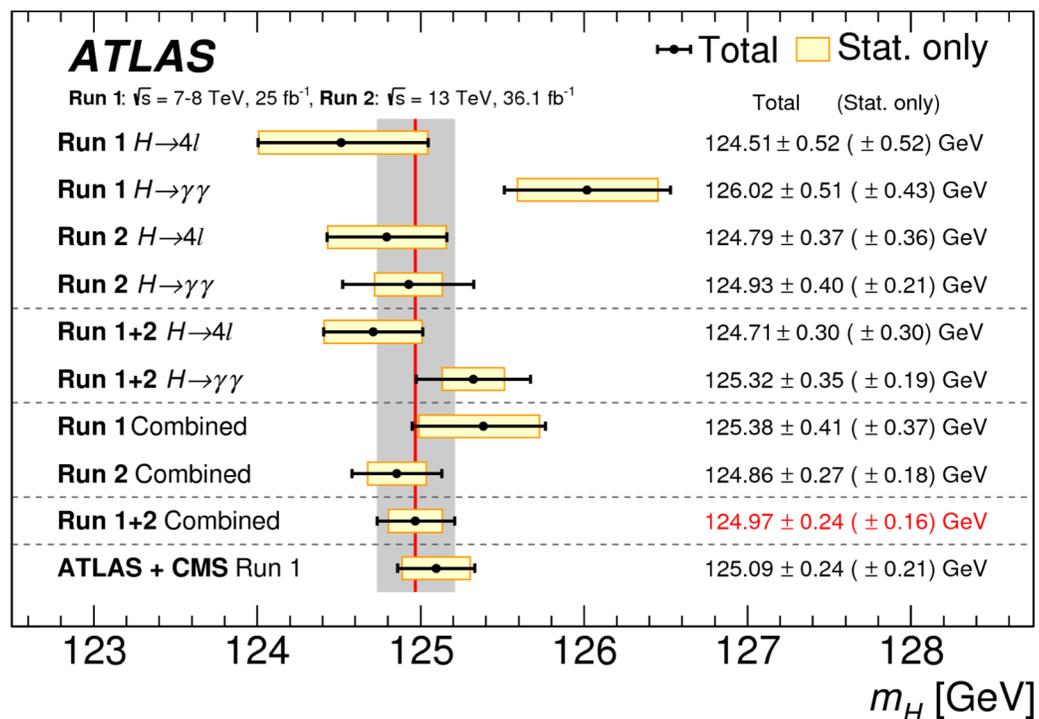
$$H \rightarrow \gamma\gamma:$$

$$\sigma_{fid} = 65.2 \pm 4.5(\text{stat.}) \pm 5.6(\text{syst.}) \text{ fb}$$

$$\sigma_{fid,SM} = 63.6 \pm 3.3 \text{ fb}$$

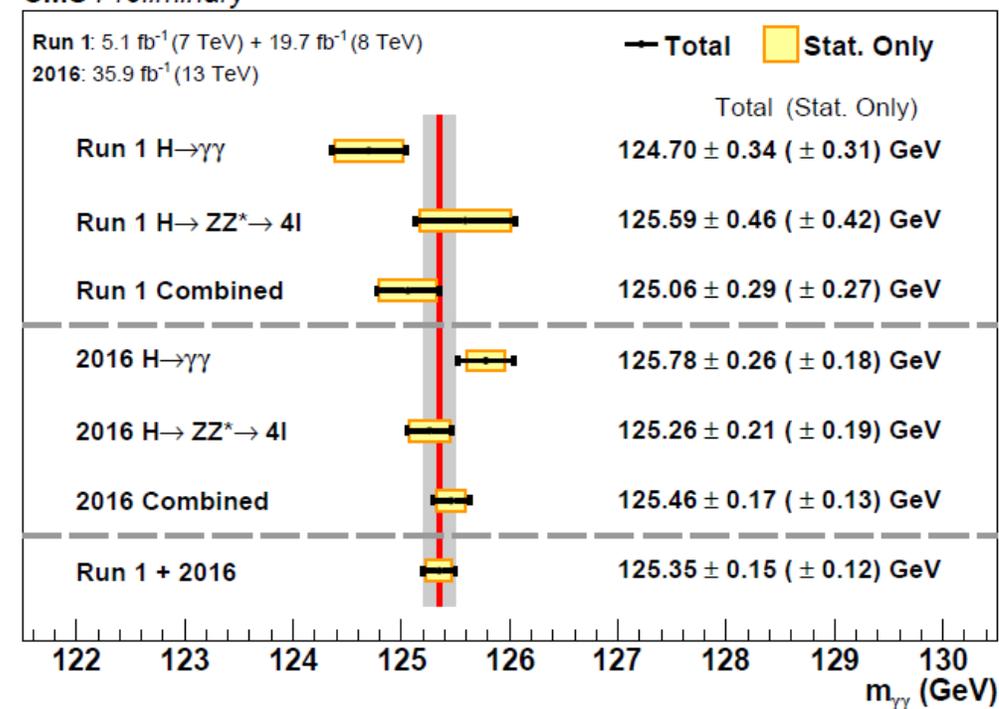
ATLAS-CONF-2019-029

# Измерение массы бозона Хиггса



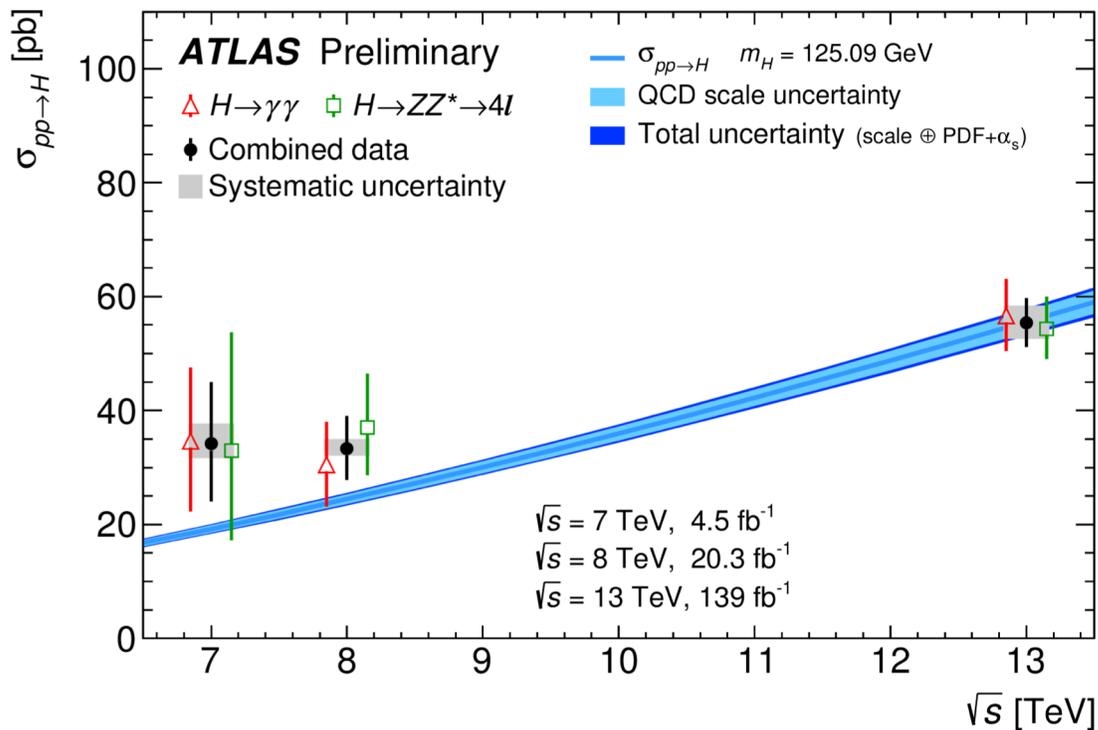
$$m(\text{Run 1} + 2016) = 124.97 \pm 0.24 (\pm 0.16) \text{ GeV}$$

CMS Preliminary



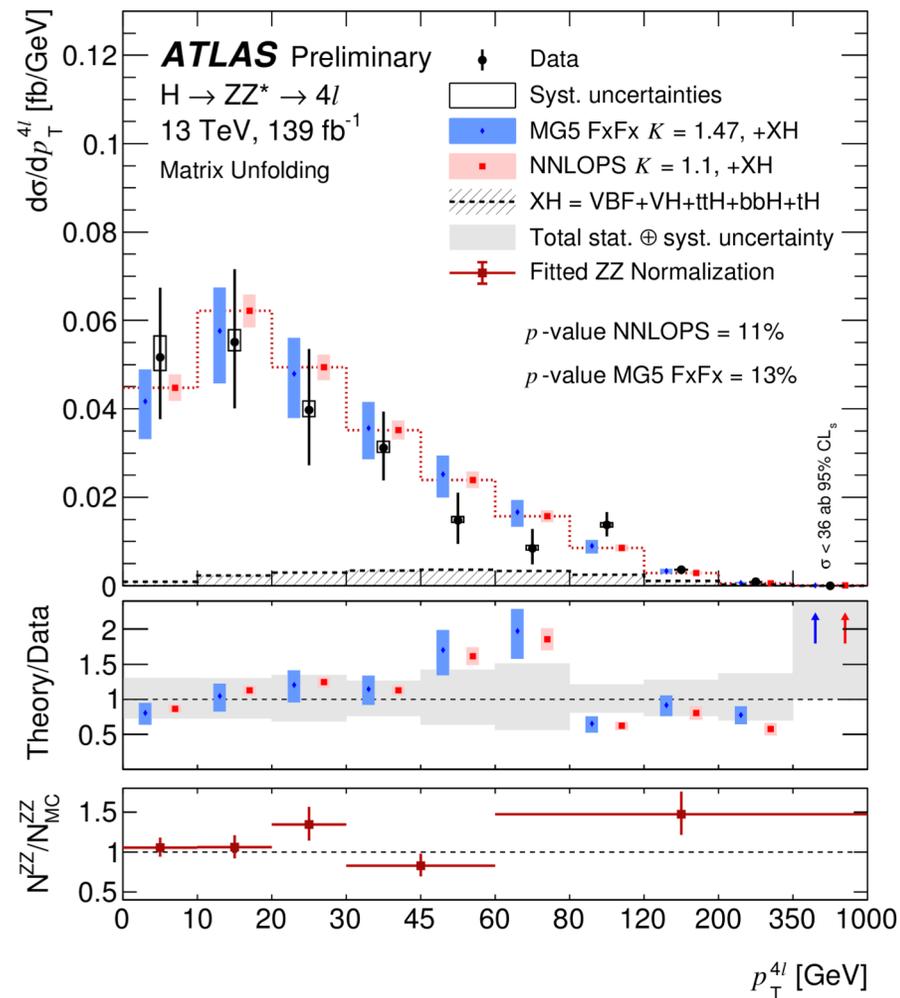
$$m(\text{Run 1} + 2016) = 125.35 \pm 0.15 (\pm 0.12) \text{ GeV}$$

# Сечения рождения бозона Хиггса

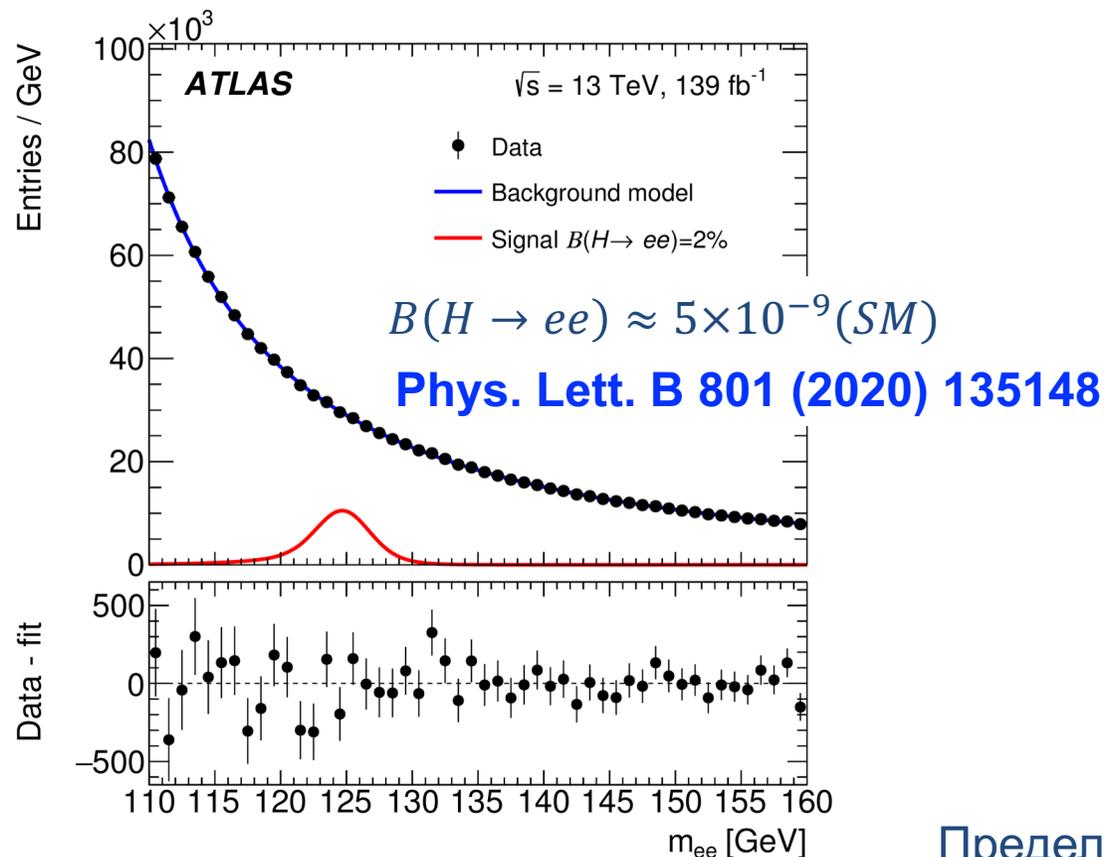


$$\sigma(13 \text{ TeV}) = 55.4^{+4.3}_{-4.2} \text{ pb } (\gamma\gamma + 4l)$$

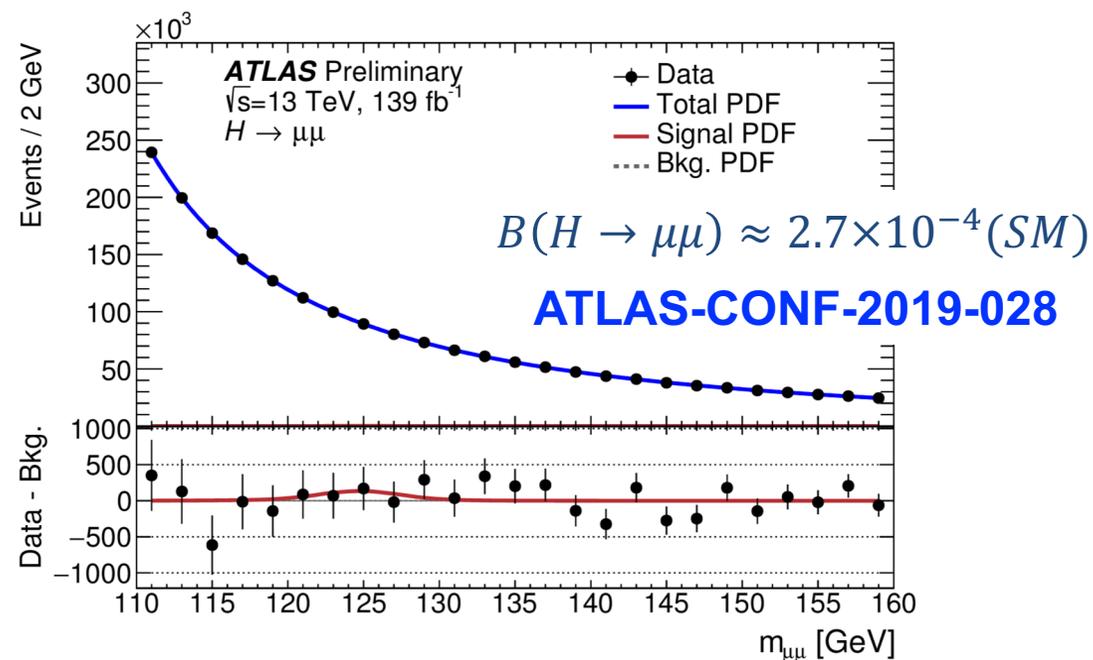
$$\sigma(13 \text{ TeV}) = 55.6 \pm 2.5 \text{ pb } (SM)$$



# Поиск редких распадов $H \rightarrow ee$ и $H \rightarrow \mu\mu$



Верхний предел для  $B(H \rightarrow ee)$ :  
 $3.6 \times 10^{-4}$



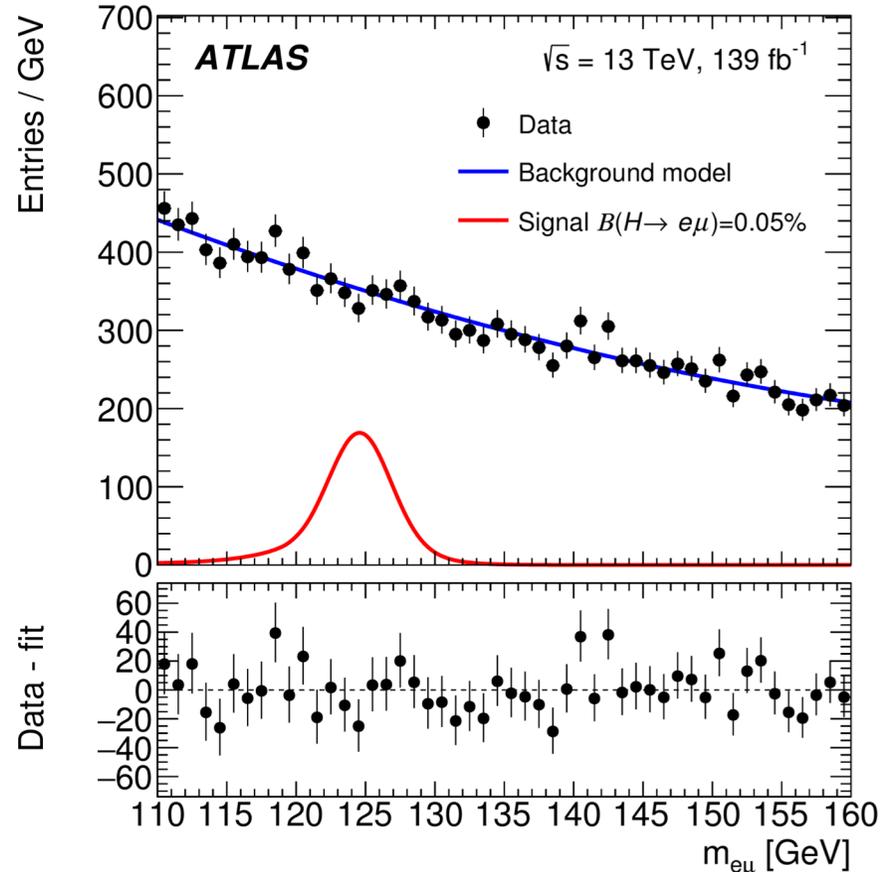
Верхний предел для  $B(H \rightarrow \mu\mu)$ :  
 $3.8 \times 10^{-4}$

Предел для  $B(H \rightarrow ee)$  был улучшен в  $\sim 5$  раз по сравнению с результатами CMS для Run I, предел для  $B(H \rightarrow \mu\mu)$  был улучшен в  $\sim 2$  раза по сравнению с результатом ATLAS и CMS для части данных Run II

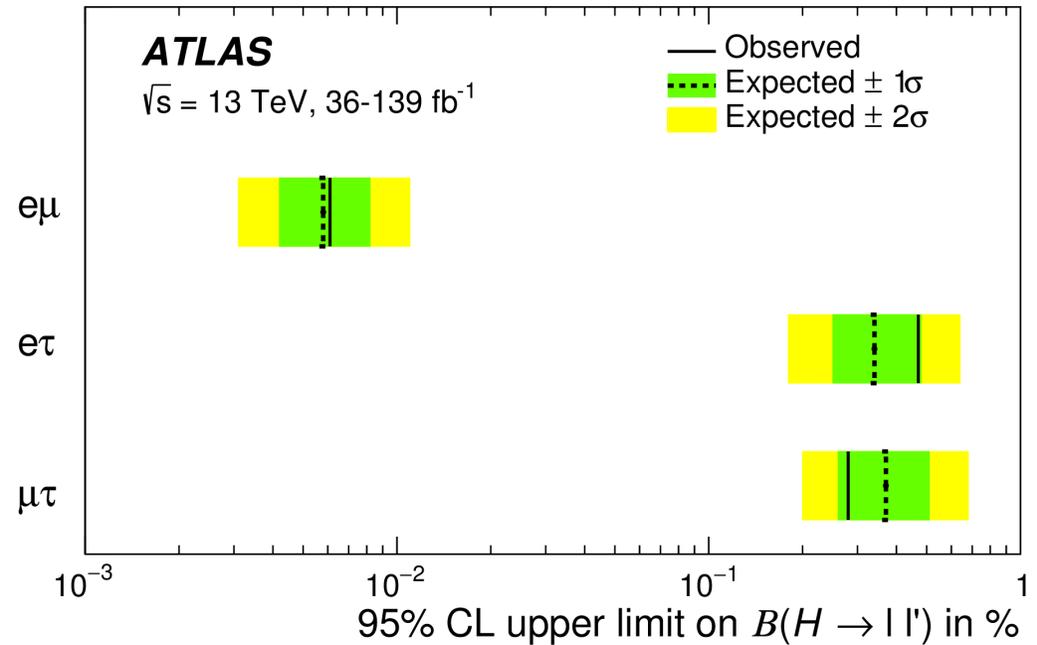
# Поиск LFV распадов $H \rightarrow e\mu, e\tau, \mu\tau$

Phys. Lett. B 801 (2020) 135148

Phys. Lett. B 800 (2020) 135069



Не наблюдается статистически значимого отклонения данных от предсказаний СМ

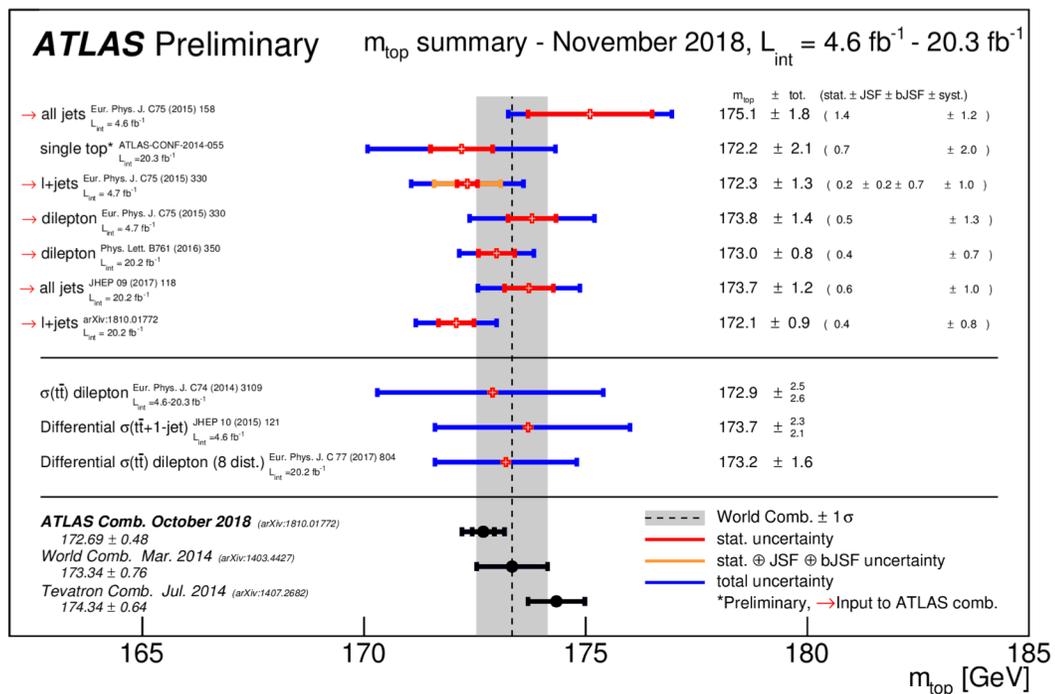


Верхние пределы для  $B(H \rightarrow ll')$

$e\mu$	$e\tau$	$\mu\tau$
$6.1 \times 10^{-5}$	$4.7 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-3}$

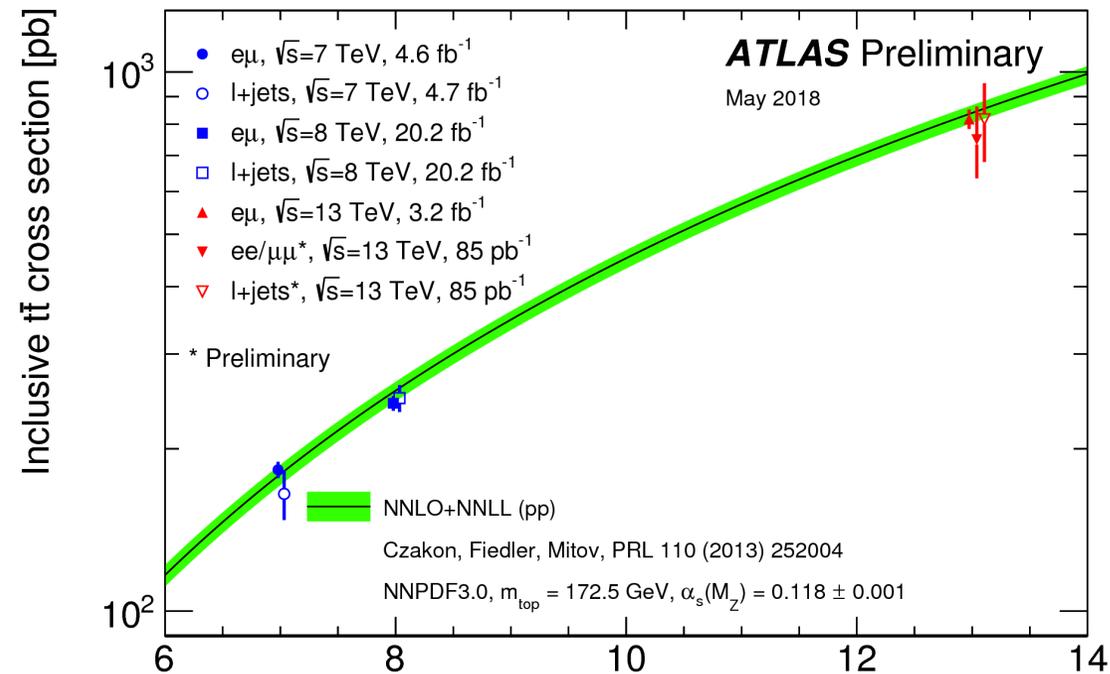
Предел для  $B(H \rightarrow e\mu)$  был улучшен в  $\sim 6$  раз по сравнению с результатами CMS для Run I

# Физика $t$ -кварка



$$m(\text{ATLAS 2018}) = 172.69 \pm 0.48 \text{ GeV}$$

$$m(\text{World Comb. 2014}) = 173.34 \pm 0.76 \text{ GeV}$$



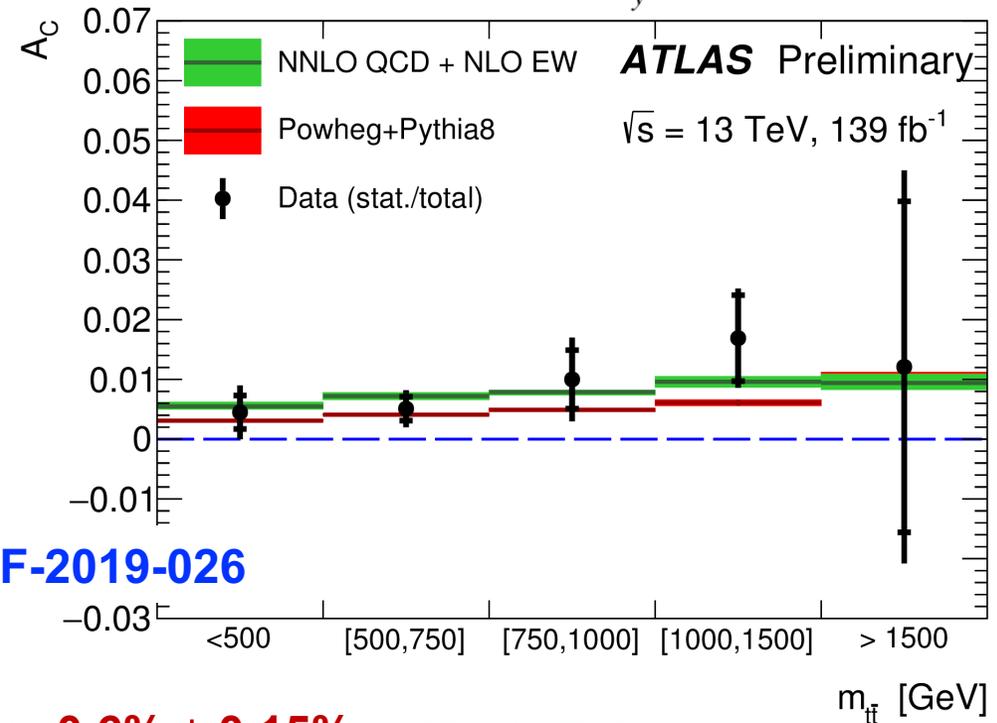
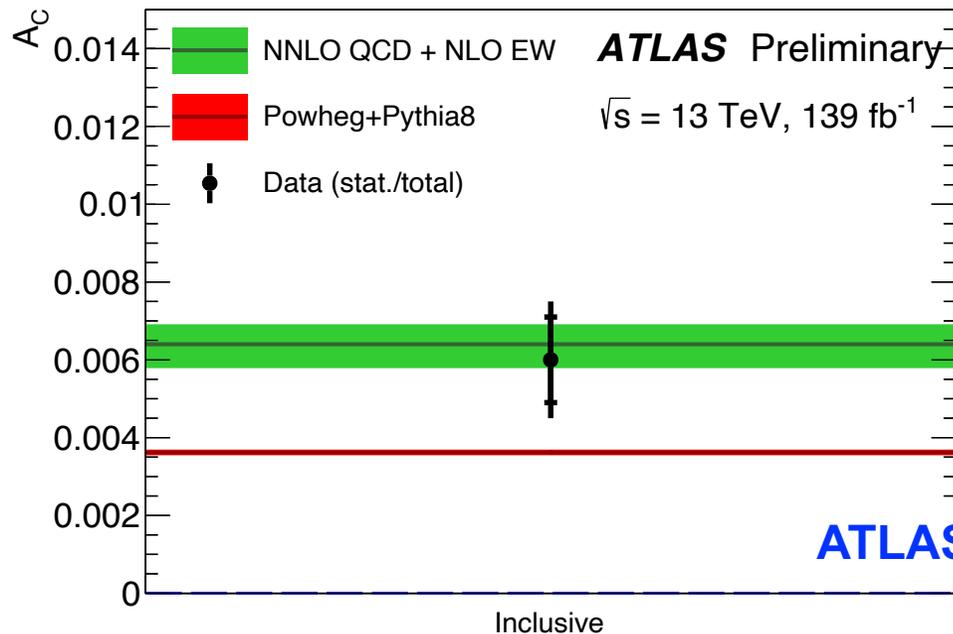
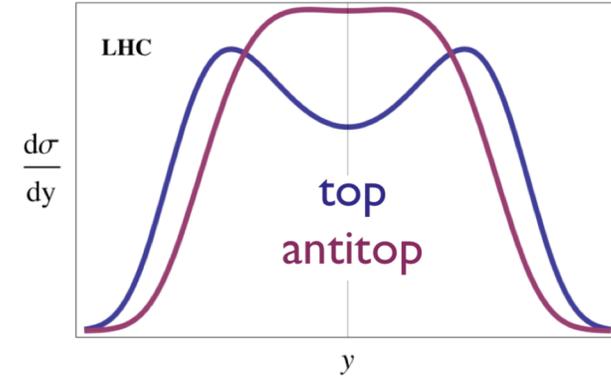
$$\text{Phys. Lett. B761 (2016) 136} \quad \sqrt{s} [\text{TeV}]$$

$$\sigma(13 \text{ TeV}) = 818 \pm 36 \text{ pb} (e\mu)$$

$$\sigma(13 \text{ TeV}) = 832^{+40}_{-46} \text{ pb} (SM)$$

# Зарядовая асимметрия $t\bar{t}$

$$A_C = \frac{N(\Delta|y| > 0) - N(\Delta|y| < 0)}{N(\Delta|y| > 0) + N(\Delta|y| < 0)}, \quad \Delta|y| = |y_t| - |y_{\bar{t}}|$$

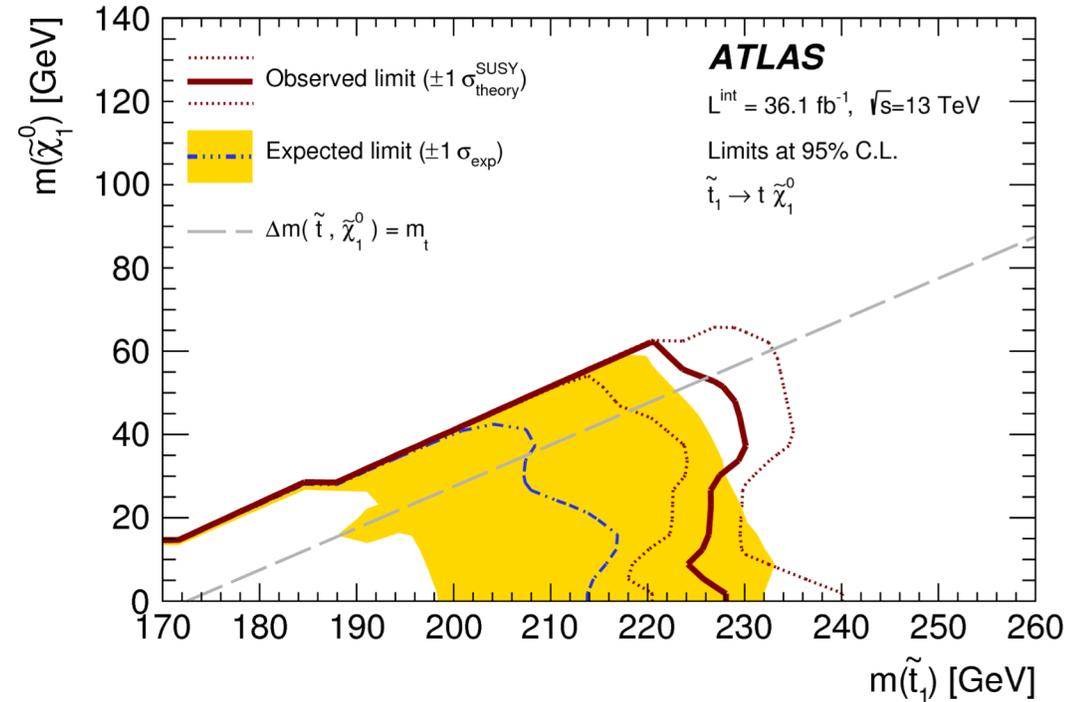
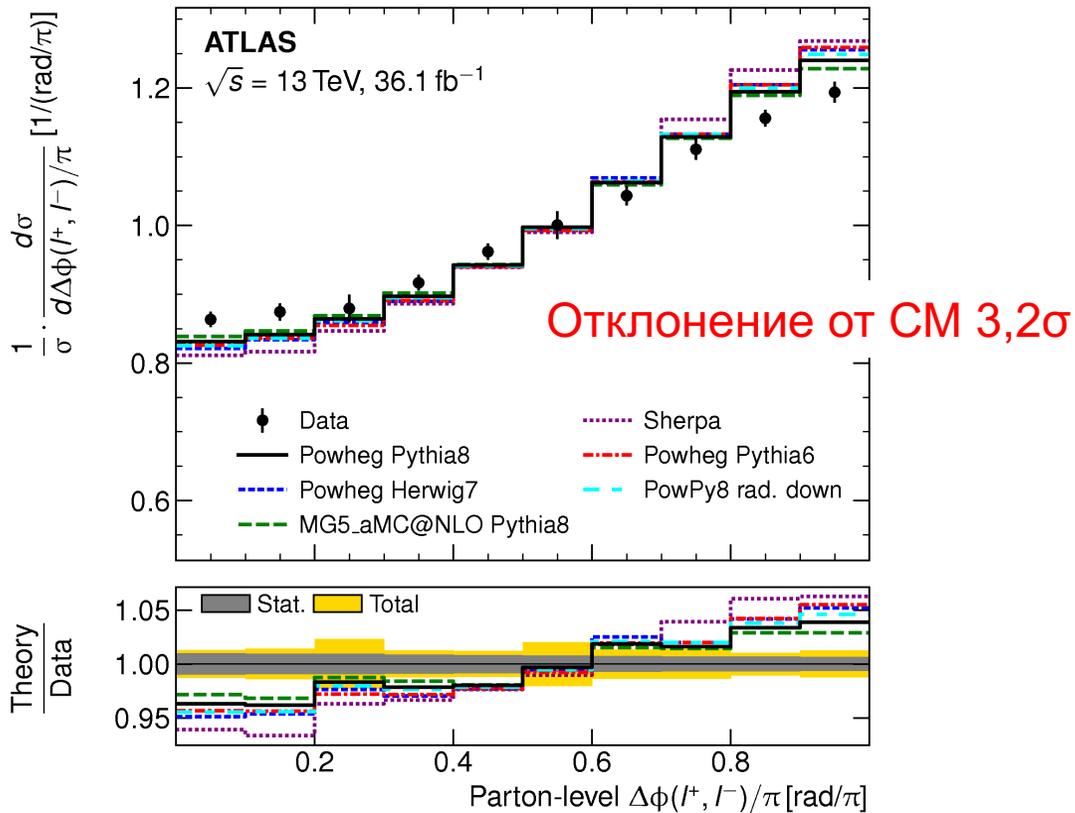


- Величина измеренной зарядовой асимметрии  $0,6\% \pm 0,15\%$  согласуется с расчетами NNLO QCD + NLO EW ( $0,64^{+0,05}_{-0,06}\%$ ) и отличается на  $4\sigma$  от 0

# Спиновые корреляции $t\bar{t}$

arXiv:1903.07570  
Submitted to EPJC

- Заряженные лептоны от распадов  $W$ -бозонов (от распадов  $t$ -кварков) несут почти всю спиновую информацию  $t$ -кварка



- Полученные распределения по  $\Delta\phi$  и  $\Delta\eta$  были использованы также для поиска рождения пары  $\tilde{t}_1 \bar{\tilde{t}}_1$  по распадам  $\tilde{t}_1 \rightarrow t \tilde{\chi}_1^0$

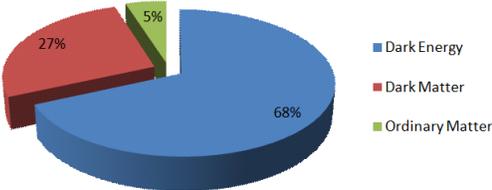
# Участие ОФВЭ в физической программе ATLAS

- Поиски новых явлений за пределами Стандартной модели (BSM):
  - поиск частиц темной материи в процессе моно- $Z$
  - поиск тяжелого нейтрального бозона Хиггса (2HDM)
  - поиск «невидимых» каналов распада бозона Хиггса SM
  - поиск Randall-Sundrum гравитона (extra dimensions)
- Измерение параметров Стандартной модели:
  - Прецизионное измерение спектра поперечного импульса  $Z$ -бозона и угловой переменной  $\varphi^*$  в процессе  $Z \rightarrow ll$
  - Изучение Бозе-Эйнштейн корреляций
  - Измерение коэффициентов спиновой матрицы плотности  $t\bar{t}$

Руководитель – О.Л. Федин

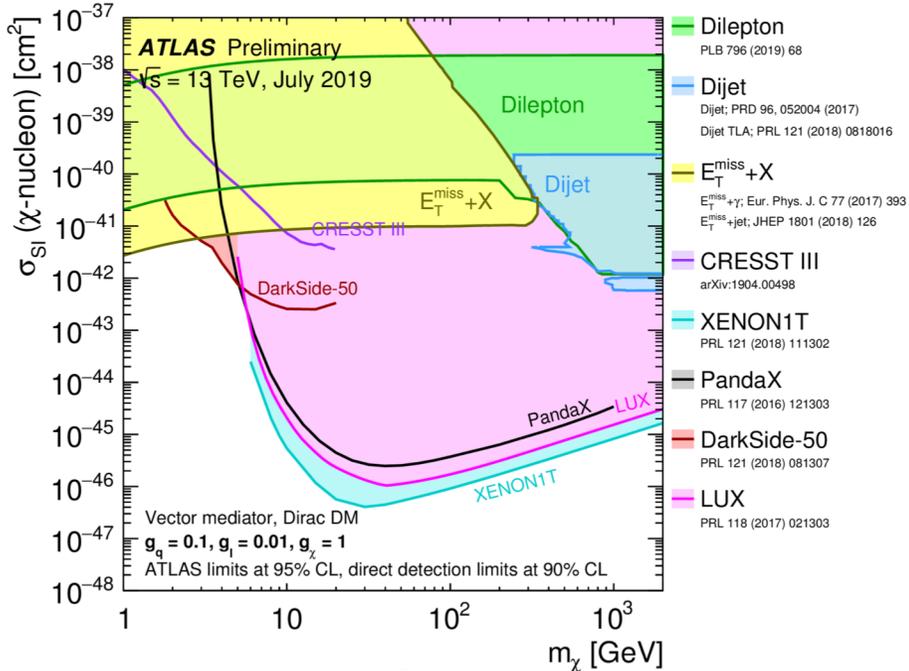
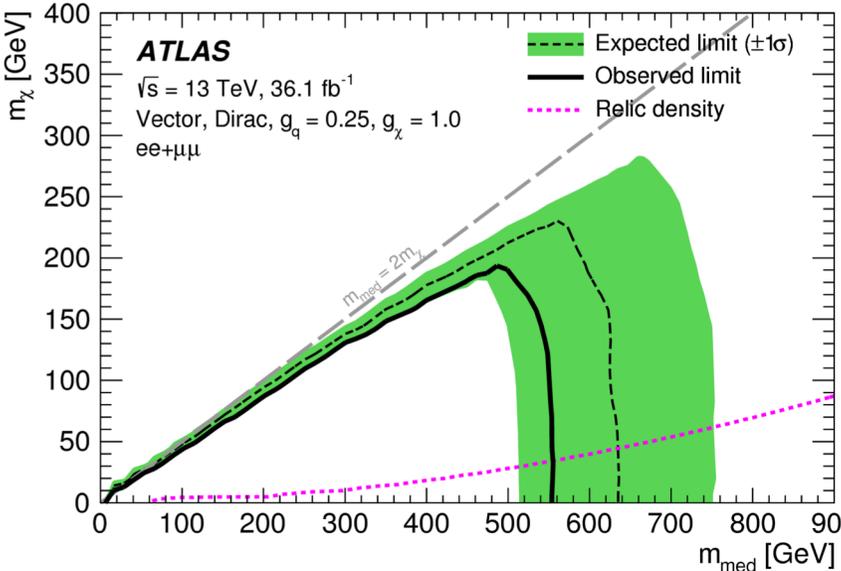
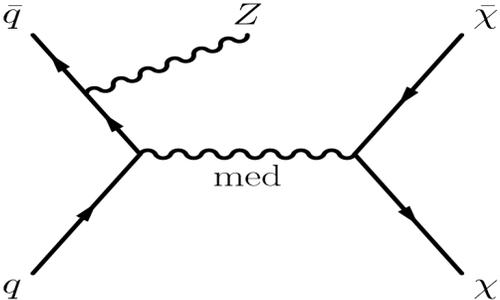
В.П. Малеев, Ю.Г. Нарышкин, В.М. Соловьев, В.А. Щегельский,  
А.Е. Ежилов, А.С. Кирьянова, Д. Пуджа, М.В. Покидова

# Поиск темной материи в процессе моно-Z



- Астрофизические наблюдения указывают на существование темной материи
- Эксперименты по поиску темной материи: прямые, непрямые, коллайдерные
- Частицы темной материи появляются в некоторых расширениях Стандартной модели: MSSM, 2HDM...

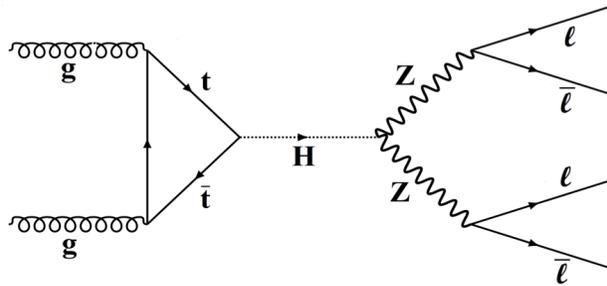
- Один из каналов поиска – это т.н. “моно-Z” канал
- Сигнатура события – рождение Z-бозона до взаимодействия кварков (ISR)



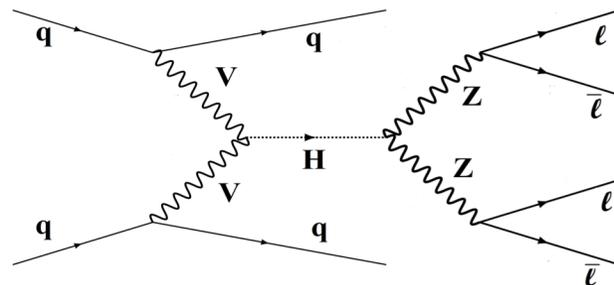
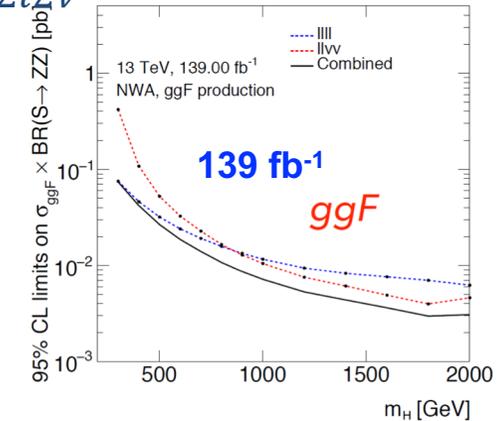
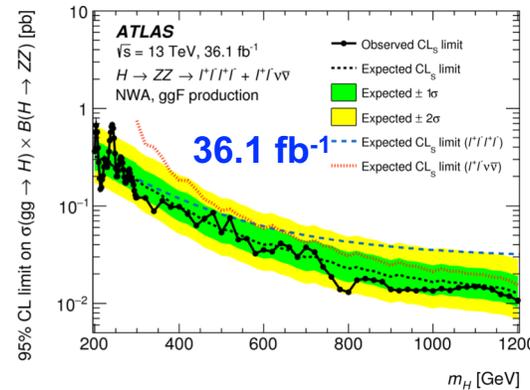
По результатам части **Run II (36.1 фб<sup>-1</sup>)** не обнаружено отклонений от предсказания Стандартной Модели. Получены верхние пределы на массы частиц темной материи в интервале **10 – 300 ГэВ** в зависимости от масс медиатора в интервале **10 – 1000 ГэВ**

# Поиск нового тяжелого бозона Хиггса

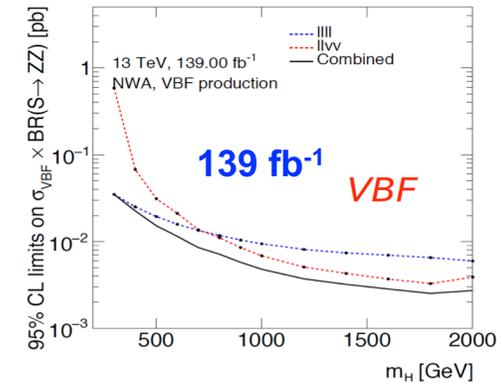
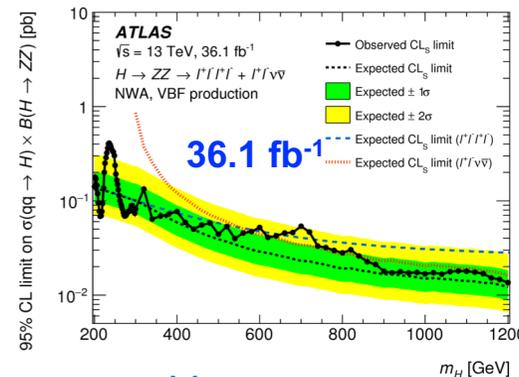
- Расширения Стандартной модели, как например 2HDM (двухдублетная хиггсовская модель), предсказывают новые бозоны Хиггса: CP-четные  $h$  и  $H$ , CP-нечетный псевдоскаляр  $A$ , заряженные  $H^+$ ,  $H^-$ .
- Группа ПИЯФ занимается поиском тяжелого бозона Хиггса в канале:  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2l2\nu$



ggF



VBF



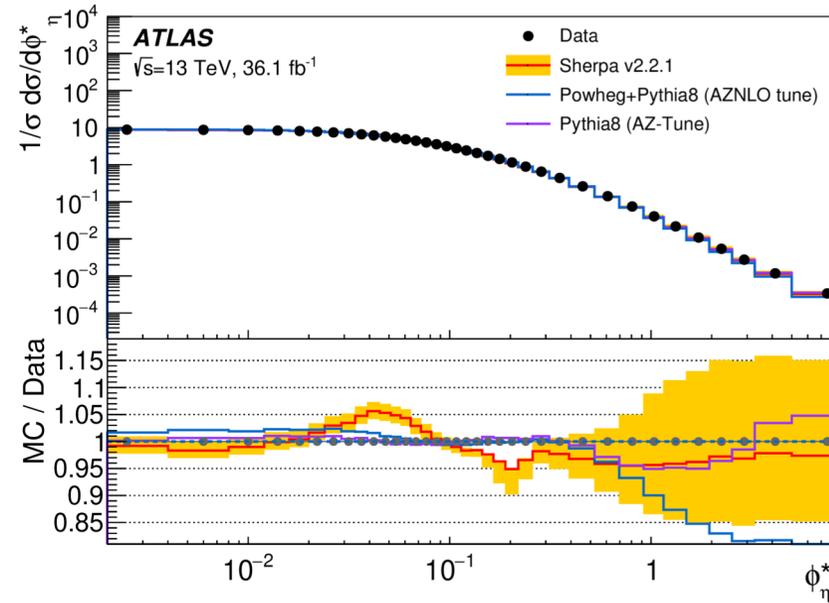
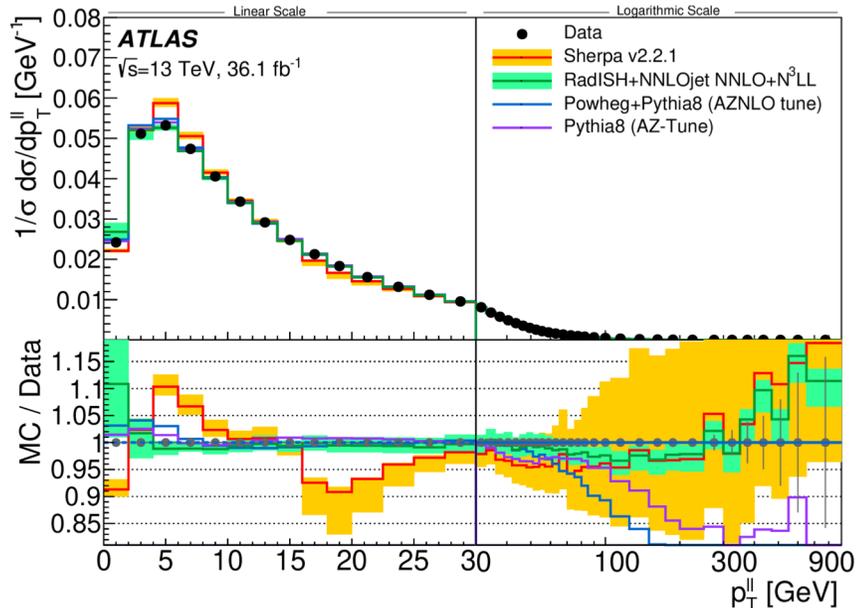
- Отклонений от предсказаний СМ не обнаружено. Установлены верхние пределы на сечение рождения тяжелого нейтрального бозона Хиггса для **ggF** и **VBF** механизмов рождения в интервале масс от **200** до **2000** ГэВ

# Прецизионное измерение $p_T$ Z-бозона

Результаты прецизионных измерений  $p_T$  Z-бозона имеют важное значение для:

- проверки КХД расчетов во всех порядках по  $\alpha_S$ , включая партонные ливни
- проверки методики пересуммирования диаграмм с излучением “мягких” глюонов
- оценки вклада непертурбативных эффектов

Submitted to EPJC



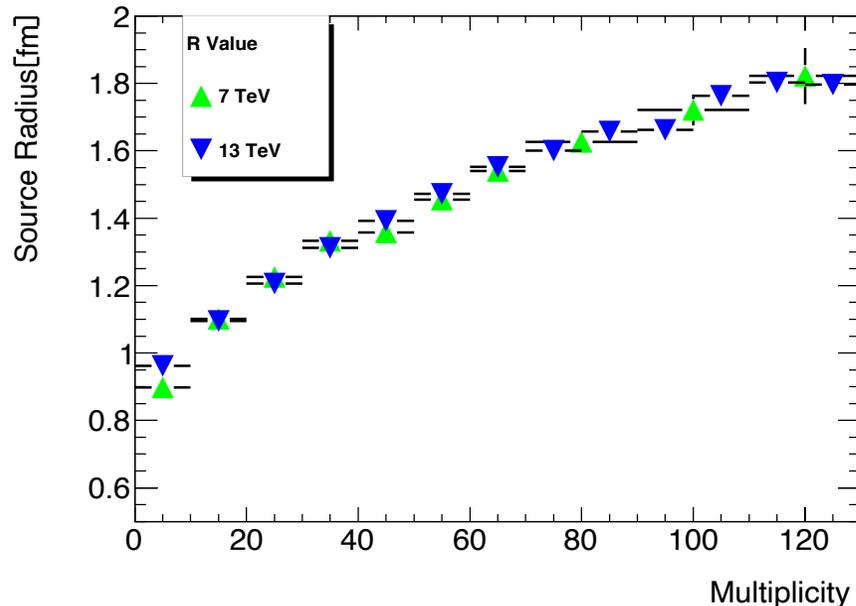
$$\phi_\eta^* = \tan\left(\frac{\pi - \Delta\phi}{2}\right) \cdot \sin(\theta_\eta^*)$$

$$\theta_\eta^* = \arccos\left(\tanh\left(\frac{\eta^- - \eta^+}{2}\right)\right)$$

Проведены прецизионные измерения  $p_T^{ll}$  в интервале до **2.5 ТэВ**. Относительная точность измерений лучше чем **0.2%** для  $p_T^{ll} < 30$  ГэВ. Проведено сравнение экспериментальных спектров по  $p_T^{ll}$  и угловой переменной  $\phi_\eta^*$  с результатами Монте-Карло моделирования для различных генераторов

# Изучение Бозе-Эйнштейн корреляций

- Бозе-Эйнштейн корреляции в протон-протонных столкновениях являются эффективным инструментом для изучения пространственной структуры амплитуды рождения



- В предположении, что источником излучения частиц является расширяющаяся среда – адронное вещество, можно использовать симметричное распределение Леви.
- Как было впервые показано в работе **V.A. Khoze, A.D. Martin, M.G. Ryskin and V.A. Schegelsky, Eur. Phys.J. C76 (2016) 193** вторичные частицы при высоких энергиях излучаются источниками малого размера  $R_1$ , которые распределены в области размера  $R_2$ :

$$C_2(Q) = \lambda e^{-R_1 Q^{\alpha_1}} + (1 - \lambda) e^{-R_2 Q^{\alpha_2}} + a + bQ$$

$\alpha$  – показатель стабильности Леви распределения,  
 $\lambda$  – «сила» БЭК.

- Были изучены зависимости параметров БЭК от энергии и множественности заряженных частиц. Показано, размеры области излучения пионов не зависят от энергии БАК, а определяются числом рожденных частиц

# Заключение

- Количество статей 1+1
- Доклады на совещаниях и конференциях 3
- Грант РФФИ 2018-2019 “Поиск нового тяжелого нейтрального бозона Хиггса в распаде на четыре лептона в эксперименте ATLAS”
- Коллаборацией ATLAS в 2019 году было опубликовано 87 статей  
(+ подано в печать 38)

# Публикации с нашим участием

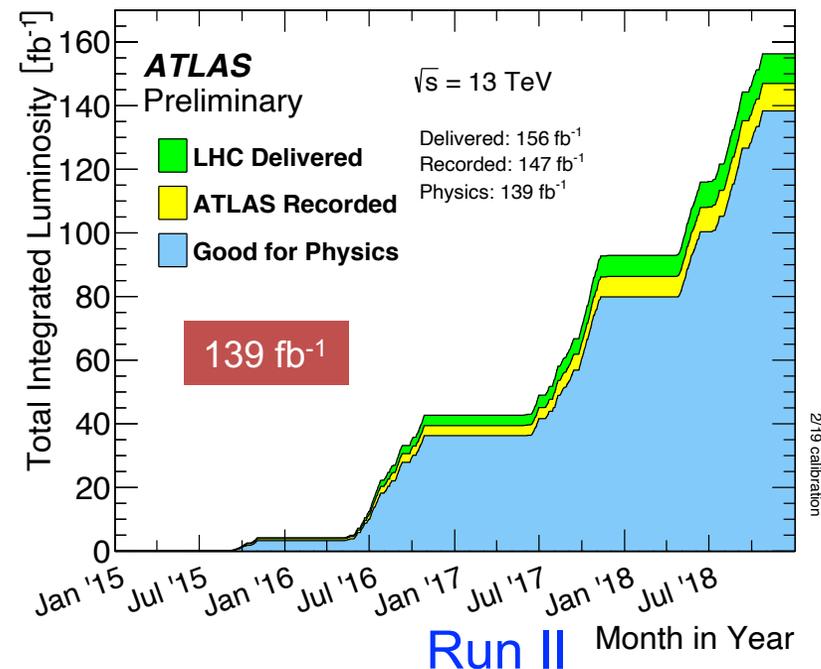
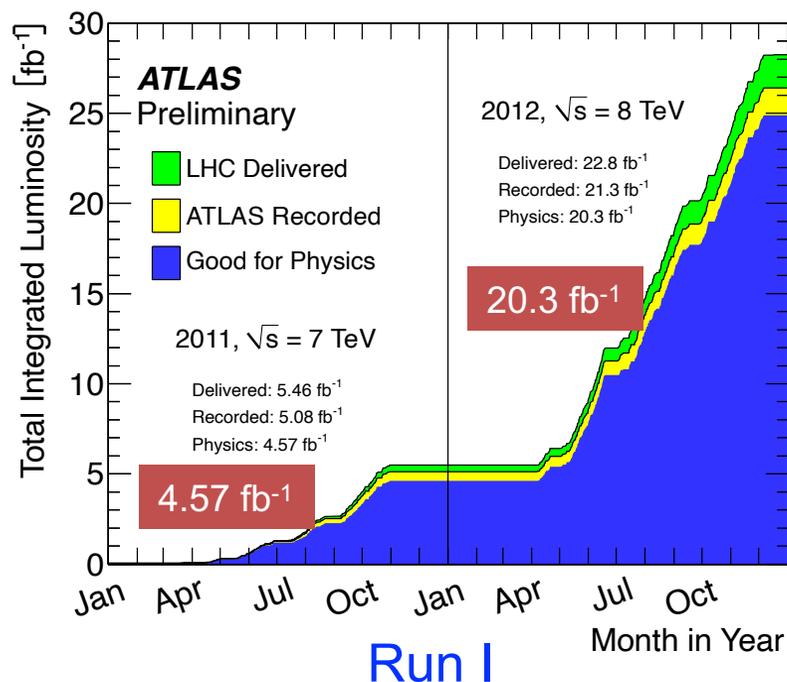
M. Aaboud, ..., O. Fedin, V. Maleev, Yu. Naryshkin, V. Schegelsky, V. Solovyev, A. Ezhilov, Y. Ryabov, V. Grachev, M. Levchenko et.al., ATLAS Collaboration, “Combination of searches for invisible Higgs boson decays with the ATLAS experiment”, Phys. Rev. Lett. 122 (2019) no.23, 231801

M. Aaboud, ..., O. Fedin, V. Maleev, Yu. Naryshkin, V. Schegelsky, V. Solovyev, A. Ezhilov, Y. Ryabov, V. Grachev, M. Levchenko et.al., ATLAS Collaboration, “Measurement of the transverse momentum distribution of Drell-Yan lepton pairs in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV with the ATLAS detector”, Submitted to Eur. Phys. J. C.



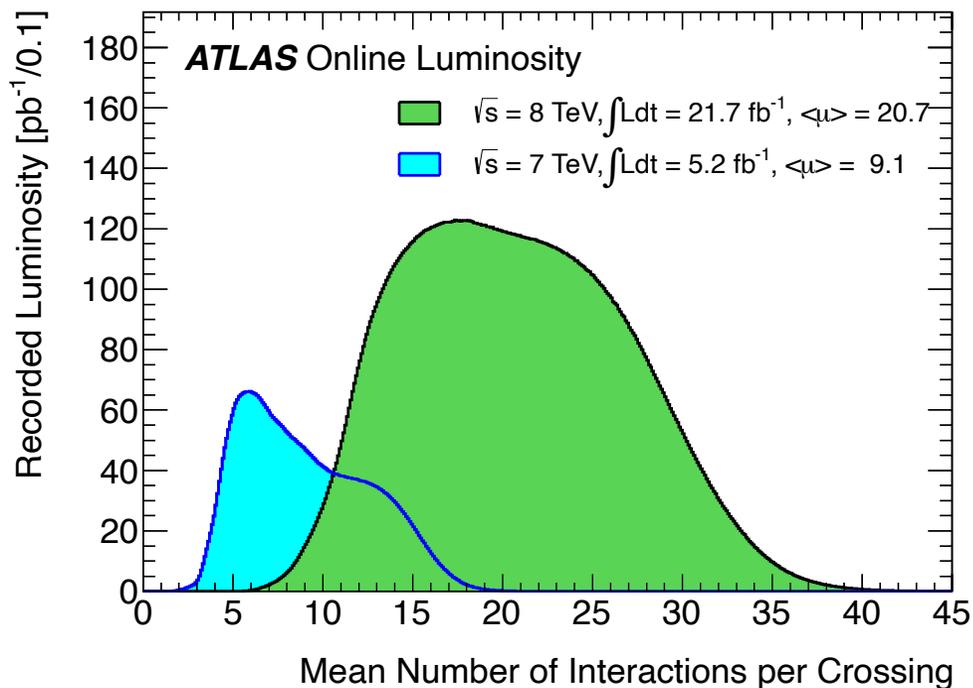
Спасибо за внимание!

# Данные Run I и Run II

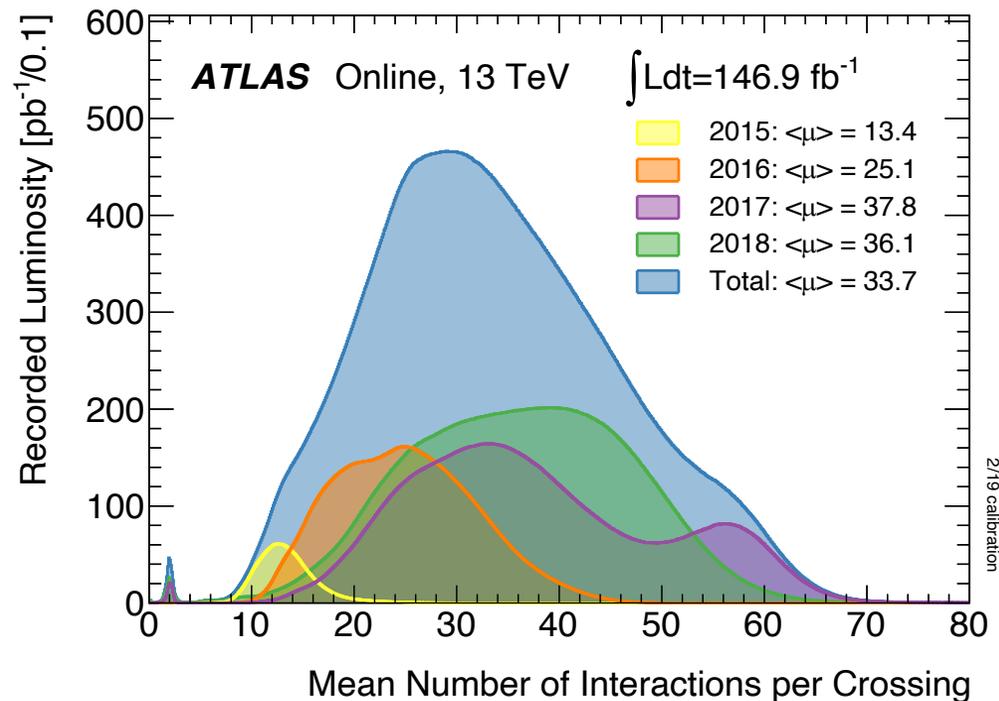


Luminosity	2011	2012		2015	2016	2017	2018
Delivered [fb <sup>-1</sup> ]	5.46	22.8		4.2	38.5	50.2	65.0
Recorded [%]	93.0	93.4		92.8	92.4	93.4	95.7
Good for Physics [%]	89.9	95.5		87.1	93-95	93.6	97.5

# Условия набора данных



Run I



Run II

	2011	2012		2015	2016	2017	2018
$\langle \mu \rangle$	9.1	20.1		13.4	25.1	37.8	36.1
Max lumi * $10^{33}, \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	3.7	7.7		5.0	13.8	20.9	21.0

# Число событий $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

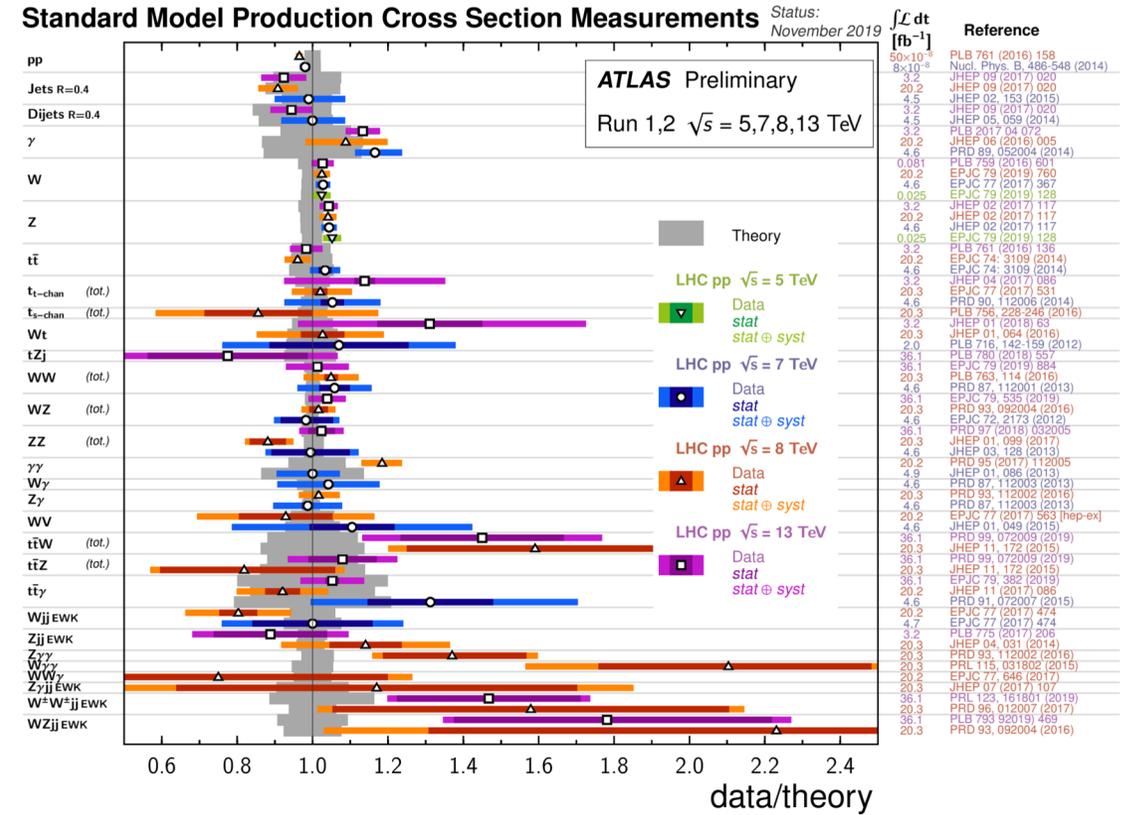
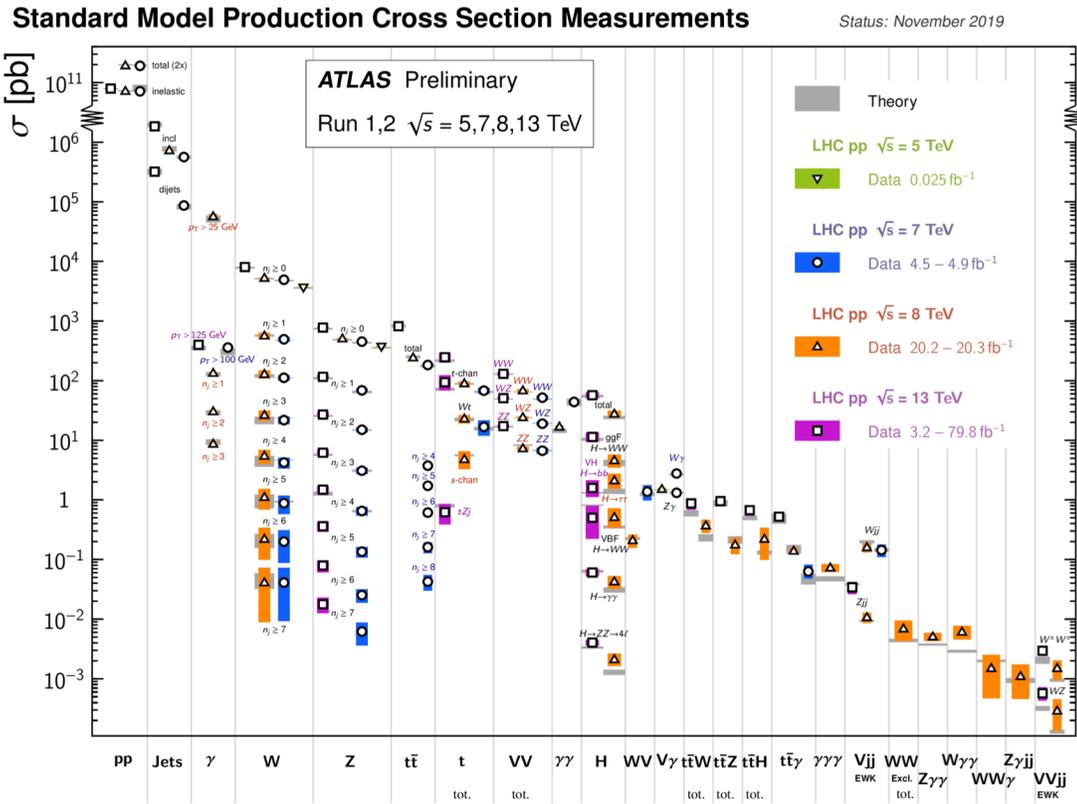
2012

	Signal	$ZZ^{(*)}$	$Z + \text{jets}, t\bar{t}$	Observed
$4\mu$	$2.09 \pm 0.30$	$1.12 \pm 0.05$	$0.13 \pm 0.04$	6
$2e2\mu/2\mu2e$	$2.29 \pm 0.33$	$0.80 \pm 0.05$	$1.27 \pm 0.19$	5
$4e$	$0.90 \pm 0.14$	$0.44 \pm 0.04$	$1.09 \pm 0.20$	2

2019

Final state	Signal	$ZZ^*$ background	Other backgrounds	Total expected	Observed
$4\mu$	$78 \pm 5$	$38.1 \pm 2.2$	$2.87 \pm 0.18$	$119 \pm 5$	118
$2e2\mu$	$52.8 \pm 3.1$	$26.1 \pm 1.4$	$3.01 \pm 0.19$	$81.9 \pm 3.4$	98
$2\mu2e$	$40.0 \pm 2.9$	$17.4 \pm 1.3$	$3.5 \pm 0.5$	$60.9 \pm 3.2$	57
$4e$	$35.3 \pm 2.6$	$15.1 \pm 1.5$	$2.9 \pm 0.4$	$53.3 \pm 3.1$	43
Total	$206 \pm 13$	$97 \pm 6$	$12.3 \pm 0.9$	$315 \pm 14$	316

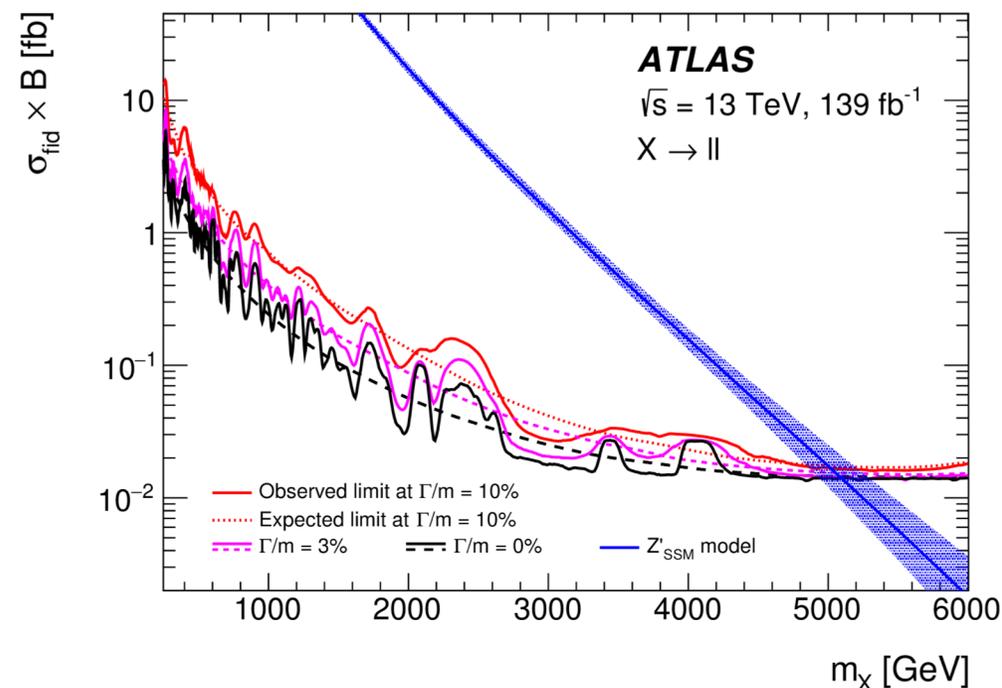
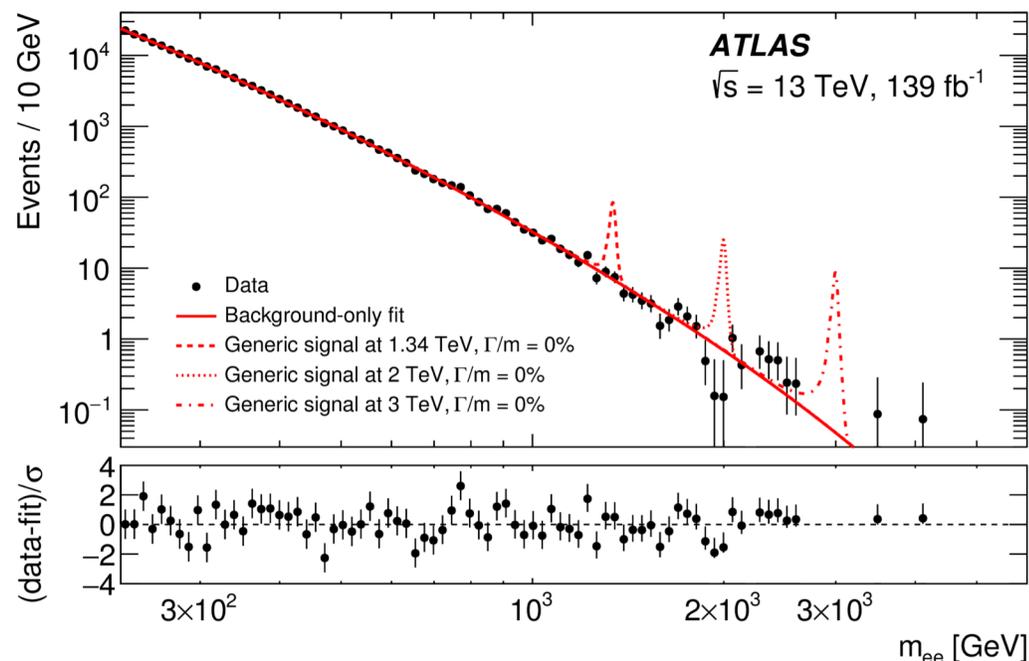
# Измерение параметров Стандартной модели



# Поиск двухлептонных резонансов

Phys. Lett. B 796 (2019) 68

- Различные модели (SSM,  $E_6$ , ...), предсказывают существование новых тяжелых нейтральных бозонов ( $Z'$ ), которые распадаются на 2 лептона

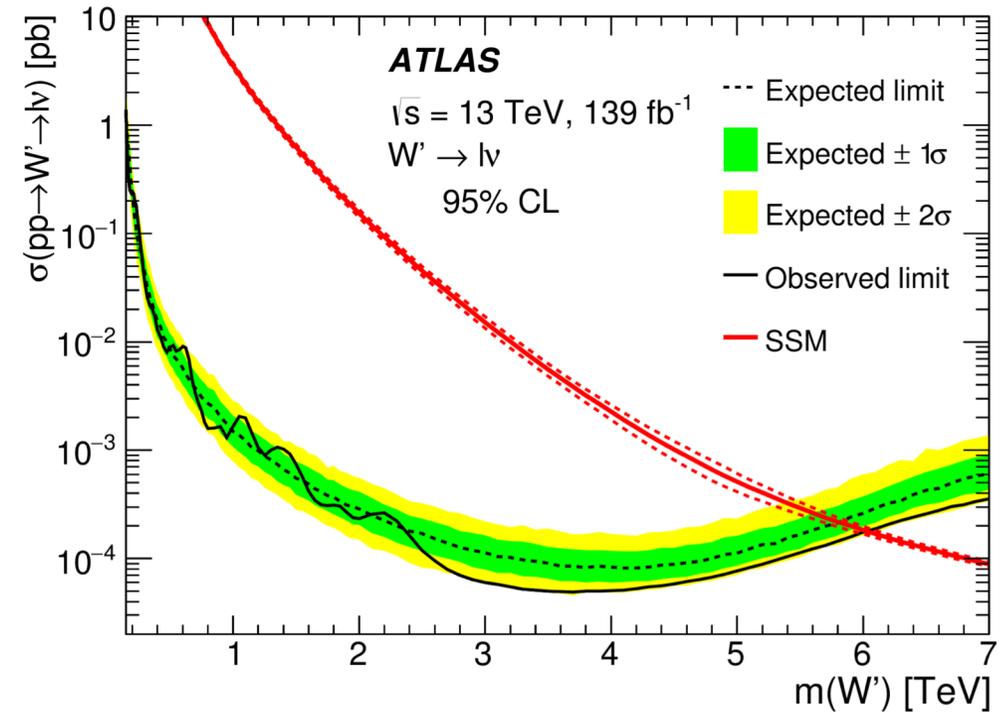
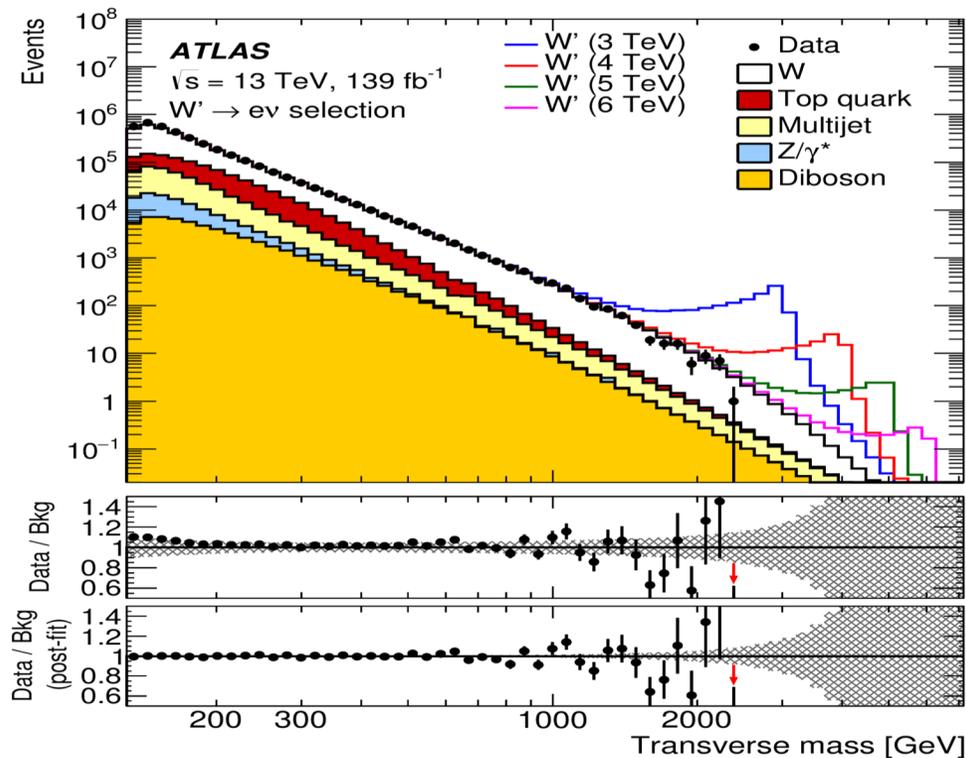


Model	Lower limits on $m_{Z'}$ [TeV]					
	$ee$		$\mu\mu$		$ll$	
	obs	exp	obs	exp	obs	exp
$Z'_\psi$	4.1	4.3	4.0	4.0	4.5	4.5
$Z'_\chi$	4.6	4.6	4.2	4.2	4.8	4.8
$Z'_{\text{SSM}}$	4.9	4.9	4.5	4.5	5.1	5.1

- Отклонений от стандартной модели не обнаружено
- Установлены верхние пределы на сечения рождения  $Z'$ -бозонов и нижние пределы на их массы

# Поиск резонансов лептон + нейтрино

- Различные модели также предсказывают существование тяжелых заряженных бозонов ( $W'$ ), которые распадаются на лептон и нейтрино



Decay	$m(W')$ lower limit [TeV]	
	Observed	Expected
$W' \rightarrow e\nu$	6.0	5.7
$W' \rightarrow \mu\nu$	5.1	5.1
$W' \rightarrow \ell\nu$	6.0	5.8

- Отклонений от стандартной модели не обнаружено

# Физика за пределами Стандартной модели

## ATLAS Exotics Searches\* - 95% CL Upper Exclusion Limits

Status: May 2019

Model	$\ell, \gamma$	Jets†	$E_{miss}$	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Limit	Reference
<b>Extra dimensions</b>	ADD $G_{KK} + g/q$	0 e, $\mu$	1-4 j	Yes	36.1	$M_{KK}$ 7.7 TeV
ADD non-resonant $\gamma\gamma$	2 $\gamma$	-	-	-	36.7	$M_{KK}$ 8.6 TeV
ADD QBH	-	2 j	-	-	37.0	$M_{BH}$ 8.9 TeV
ADD BH high $\Sigma p_T$	$\geq 1 e, \mu$	$\geq 2 j$	-	-	35.2	$M_{BH}$ 8.2 TeV
ADD BH multijet	-	$\geq 3 j$	-	-	36.0	$M_{BH}$ 9.55 TeV
RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$	2 $\gamma$	-	-	-	36.7	$G_{KK}$ mass 4.1 TeV
Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW/ZZ$	multi-channel	-	-	-	36.1	$G_{KK}$ mass 2.3 TeV
Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW + qqqq$	0 e, $\mu$	2 j	-	-	139	$G_{KK}$ mass 1.6 TeV
Bulk RS $G_{KK} \rightarrow tt$	1 e, $\mu$	$\geq 1 b, \geq 1 J/2 j$	Yes	36.1	$G_{KK}$ mass 3.8 TeV	
ZUED / RPP	1 e, $\mu$	$\geq 2 b, \geq 3 j$	Yes	36.1	$M_{KK}$ mass 1.0 TeV	
<b>Gauge bosons</b>	SSM $Z' \rightarrow \ell\ell$	2 e, $\mu$	-	-	139	$Z'$ mass 5.1 TeV
SSM $Z' \rightarrow \tau\tau$	2 $\tau$	-	-	-	36.1	$Z'$ mass 2.42 TeV
Leptophobic $Z' \rightarrow bb$	-	2 b	-	-	36.1	$Z'$ mass 2.1 TeV
Leptophobic $Z' \rightarrow tt$	1 e, $\mu$	$\geq 1 b, \geq 1 J/2 j$	Yes	36.1	$Z'$ mass 3.0 TeV	
SSM $W' \rightarrow \ell\nu$	1 e, $\mu$	-	Yes	139	$W'$ mass 6.0 TeV	
SSM $W' \rightarrow \tau\nu$	1 $\tau$	-	Yes	36.1	$W'$ mass 3.7 TeV	
HVT $V' \rightarrow WZ + qqqq$ model B	0 e, $\mu$	2 j	-	-	139	$V'$ mass 3.6 TeV
HVT $V' \rightarrow WZ + qqqq$ model B	multi-channel	-	-	-	36.1	$V'$ mass 2.93 TeV
LRSM $W_q \rightarrow b\bar{b}$	multi-channel	-	-	-	36.1	$W_q$ mass 3.25 TeV
LRSM $W_q \rightarrow \mu N_q$	2 $\mu$	1 j	-	-	80	$W_q$ mass 5.0 TeV
<b>CI</b>	CI $q\bar{q}q$	-	2 j	-	37.0	$\Lambda$ 21.8 TeV
CI $\ell\ell q\bar{q}$	2 e, $\mu$	-	-	-	36.1	$\Lambda$ 40 TeV
CI $t\bar{t}t\bar{t}$	$\geq 1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	36.1	$\Lambda$ 1.0 TeV	
<b>DM</b>	Axial-vector mediator (Dirac DM)	0 e, $\mu$	1-4 j	Yes	36.1	$m_{DM}$ mass 1.55 TeV
Colored scalar mediator (Dirac DM)	0 e, $\mu$	1-4 j	Yes	36.1	$m_{DM}$ mass 1.67 TeV	
$VV_{\chi}$ EFT (Dirac DM)	0 e, $\mu$	1 j, $\leq 1 j$	Yes	3.2	$M_{\chi}$ 700 GeV	
Scalar reson. $\phi \rightarrow t\bar{t}$ (Dirac DM)	0-1 e, $\mu$	1 b, 0-1 j	Yes	36.1	$m_{\phi}$ 3.4 TeV	
<b>LQ</b>	Scalar LQ 1 <sup>st</sup> gen	1, 2 e	$\geq 2 j$	Yes	36.1	$LQ$ mass 1.4 TeV
Scalar LQ 2 <sup>nd</sup> gen	1, 2 $\mu$	$\geq 2 j$	Yes	36.1	$LQ$ mass 1.56 TeV	
Scalar LQ 3 <sup>rd</sup> gen	2 $\tau$	2 b	-	-	36.1	$LQ$ mass 1.03 TeV
Scalar LQ 3 <sup>rd</sup> gen	0-1 e, $\mu$	2 b	Yes	36.1	$LQ$ mass 970 GeV	
<b>Heavy quarks</b>	VLO $TT \rightarrow Ht/Zt/Wb + X$	multi-channel	-	-	36.1	$T$ mass 1.37 TeV
VLO $BB \rightarrow Wt/Zb + X$	multi-channel	-	-	-	36.1	$B$ mass 1.34 TeV
VLO $T_{5/3} T_{5/3} / T_{5/3} \rightarrow Wt + X$	$2(SS) / \geq 3 e, \mu \geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	36.1	$T_{5/3}$ mass 1.64 TeV		
VLO $Y \rightarrow Wb + X$	1 e, $\mu$	$\geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	36.1	$Y$ mass 1.85 TeV	
VLO $B \rightarrow Hb + X$	0 e, $\mu, 2 \gamma$	$\geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	39.8	$B$ mass 1.21 TeV	
VLO $QQ \rightarrow WqWq$	0 e, $\mu$	$\geq 4 j$	Yes	20.3	$Q$ mass 690 GeV	
<b>Excited fermions</b>	Excited quark $q^* \rightarrow qg$	-	2 j	-	139	$q^*$ mass 6.7 TeV
Excited quark $q^* \rightarrow q\gamma$	1 $\gamma$	1 j	-	-	36.7	$q^*$ mass 5.3 TeV
Excited quark $b^* \rightarrow bg$	-	1 b, 1 j	-	-	36.1	$b^*$ mass 2.6 TeV
Excited lepton $\ell^*$	3 e, $\mu, \tau$	-	-	-	20.3	$\ell^*$ mass 3.0 TeV
Excited lepton $\nu^*$	3 e, $\mu, \tau$	-	-	-	20.3	$\nu^*$ mass 1.6 TeV
<b>Other</b>	Type II Seesaw	1 e, $\mu$	$\geq 2 j$	Yes	79.8	$M_{\Delta}$ mass 560 GeV
LRSM Majorana $\nu$	2 $\mu$	2 j	-	-	36.1	$N_{\Delta}$ mass 3.2 TeV
Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$	2, 3, 4 e, $\mu$ (SS)	-	-	-	36.1	$H^{\pm\pm}$ mass 870 GeV
Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$	3 e, $\mu, \tau$	-	-	-	20.3	$H^{\pm\pm}$ mass 400 GeV
Multi-charged particles	-	-	-	-	36.1	multi-charged particle mass 1.22 TeV
Magnetic monopoles	-	-	-	-	34.4	monopole mass 2.37 TeV

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

†Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter j (J).

## ATLAS Preliminary

$\int \mathcal{L} dt = (3.2 - 139) \text{ fb}^{-1}$   $\sqrt{s} = 8, 13 \text{ TeV}$

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

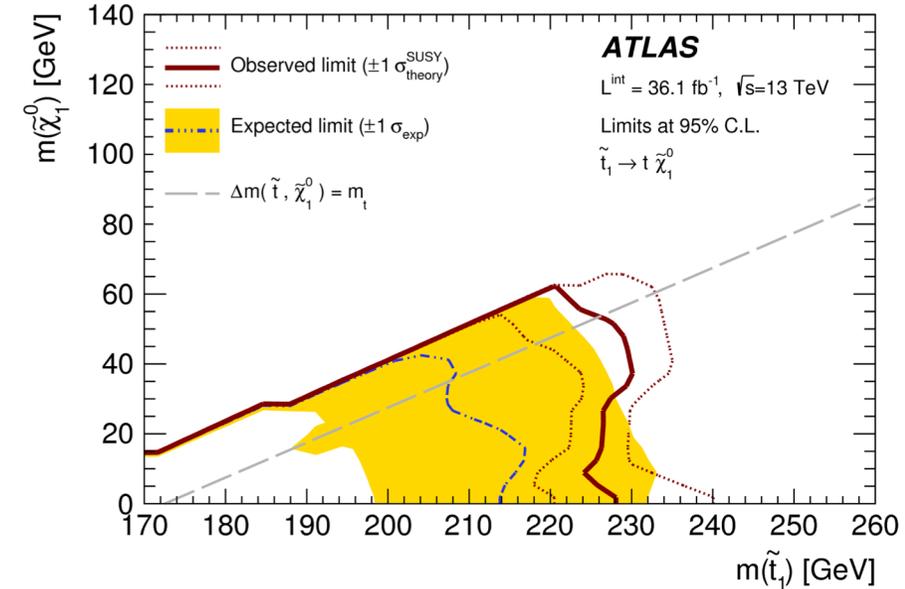
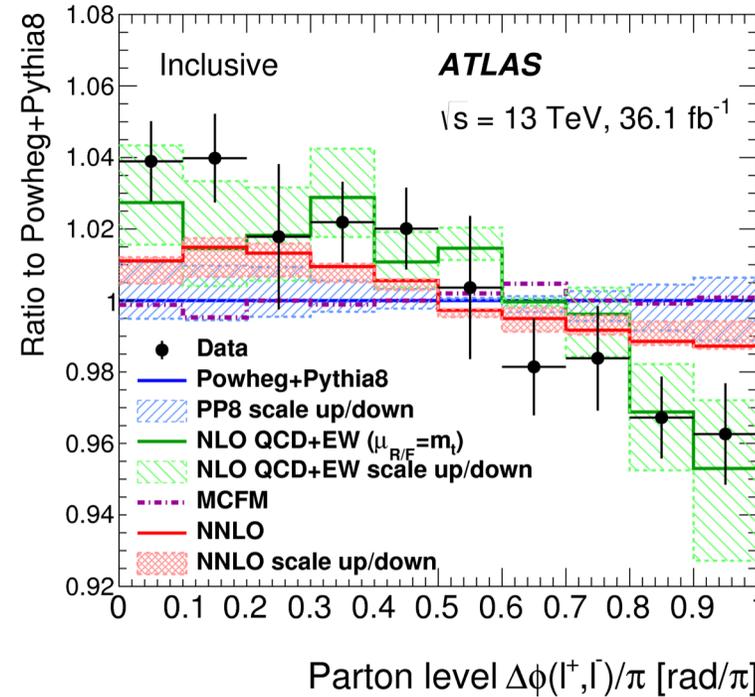
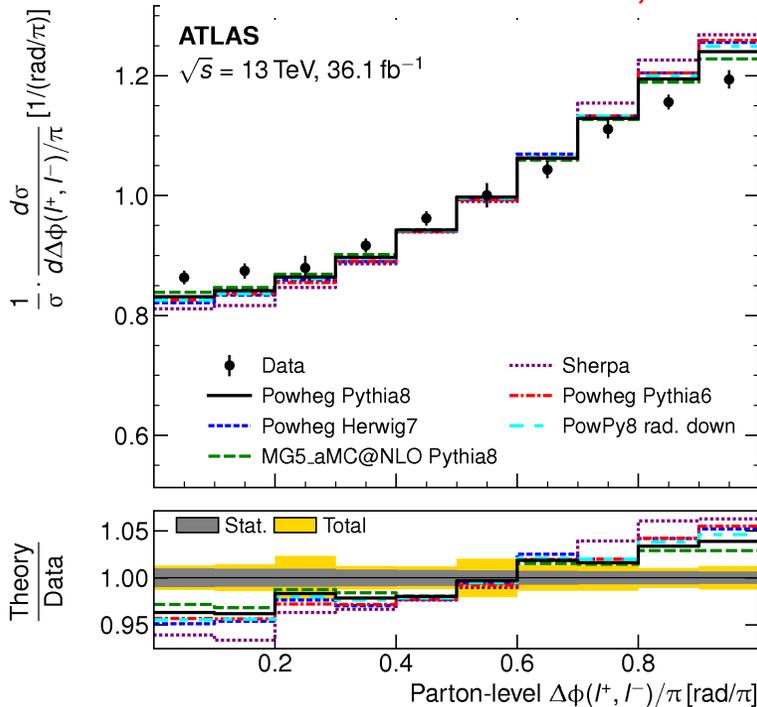
October 2019

Model	Signature	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	Reference
<b>Inclusive Searches</b>	$q\bar{q}, q \rightarrow q\bar{\chi}_1^0$	0 e, $\mu$ mono-jet	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		2-6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [1x, 8x Degen]
		1-3 jets	$E_{T}^{miss}$ 36.1	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		2-6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [1x, 8x Degen]
		3 e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 36.1	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		4 jets	$E_{T}^{miss}$ 36.1	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		2 jets	$E_{T}^{miss}$ 36.1	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		7-11 jets	$E_{T}^{miss}$ 36.1	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 79.8	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		3 b	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e, $\mu$	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		6 jets	$E_{T}^{miss}$ 139	$\tilde{g}$ [10x Degen]
		SS e,		

# Спиновые корреляции $t\bar{t}$

arXiv:1903.07570  
Submitted to EPJC

Отклонение от СМ  $3,2\sigma$



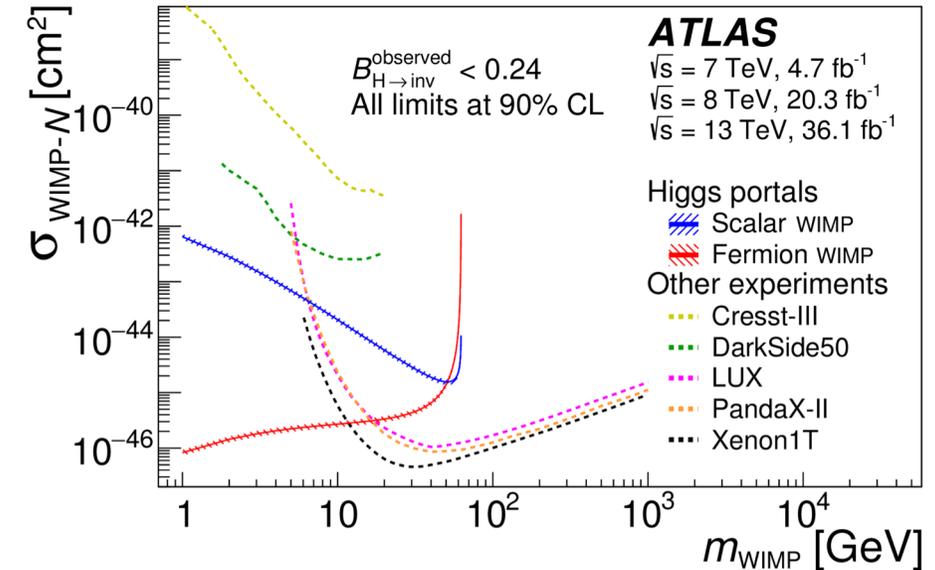
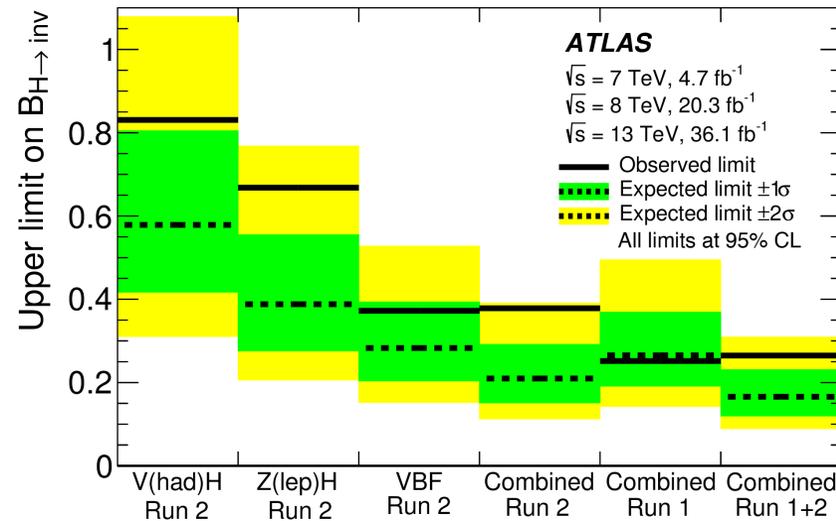
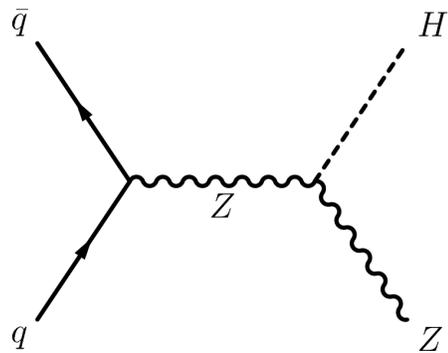
- Заряженные лептоны от распадов  $W$ -бозонов (от распадов  $t$ -кварков) несут почти всю спиновую информацию  $t$ -кварка

- Другие генераторы дают несколько лучшее согласие с данными, но с большими ошибками

- Полученные распределения по  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\eta$  были использованы для поиска рождения пары  $\tilde{t}_1\bar{\tilde{t}}_1$  по распадам  $\tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$

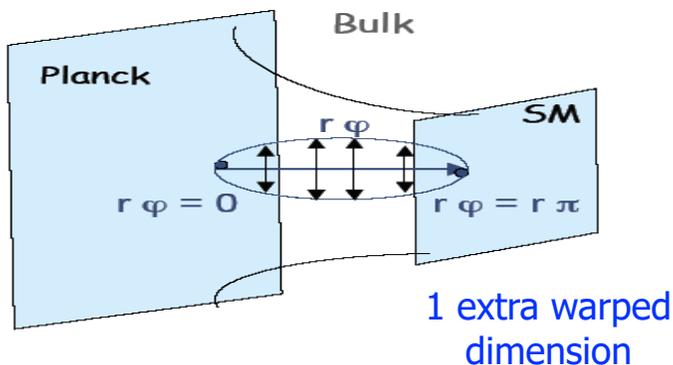
# «Невидимые» каналы распада бозона Хиггса

- Частицы темной материи могут рождаться в результате распада бозона Хиггса Стандартной модели. Поиски таких распадов проводятся для различных процессов рождения бозона Хиггса: VBF, Z(lеп)H, W/Z(had)H.
- Группа ПИЯФ занималась анализом данных для процесса Z(lеп)H. При исследовании этого процесса регистрируется Z-бозон и анализируется спектр по недостающей энергии,  $E_T^{miss}$ .

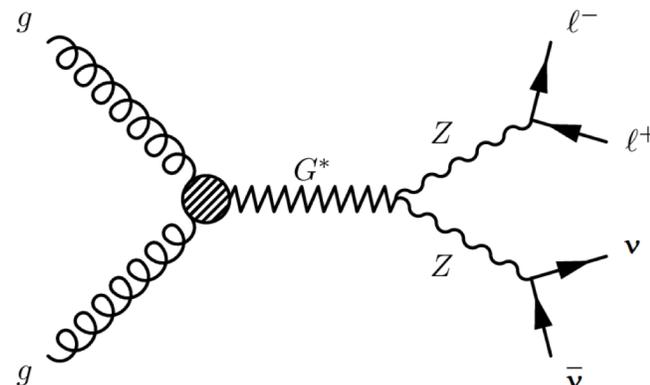


- На основе объединения результатов, полученных в разных процессах с использованием части данных **Run II (36.1 фб<sup>-1</sup>)**, определены верхние пределы для вероятности распада бозона Хиггса СМ на частицы темной материи (ТМ).
- Проведено сравнение сечений рождения частиц ТМ с сечениями рассеяния, полученными в прямых экспериментах. Результаты, полученные в эксперименте АТЛАС, являются более точными в области малых масс частиц ТМ (<10 ГэВ).

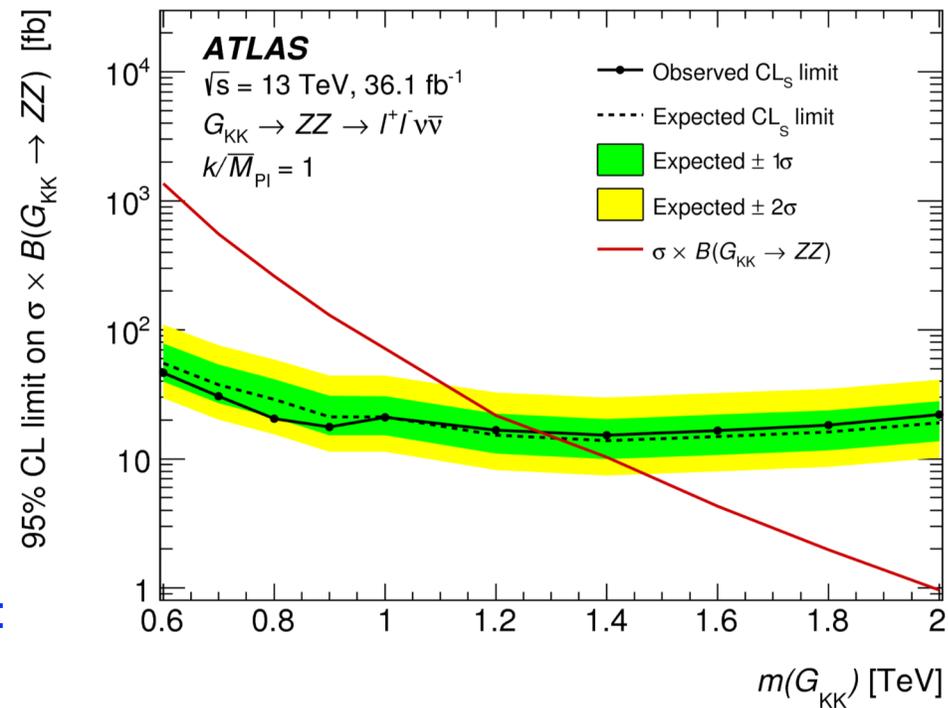
# Поиски RS гравитона (extra dimensions)



**Модель Randall–Sundrum (RS1)**  
 Решение проблемы калибровочной иерархии.  
 В модели – две “браны” (гиперповерхности), на одной - три взаимодействия (СМ) на другой – гравитация.



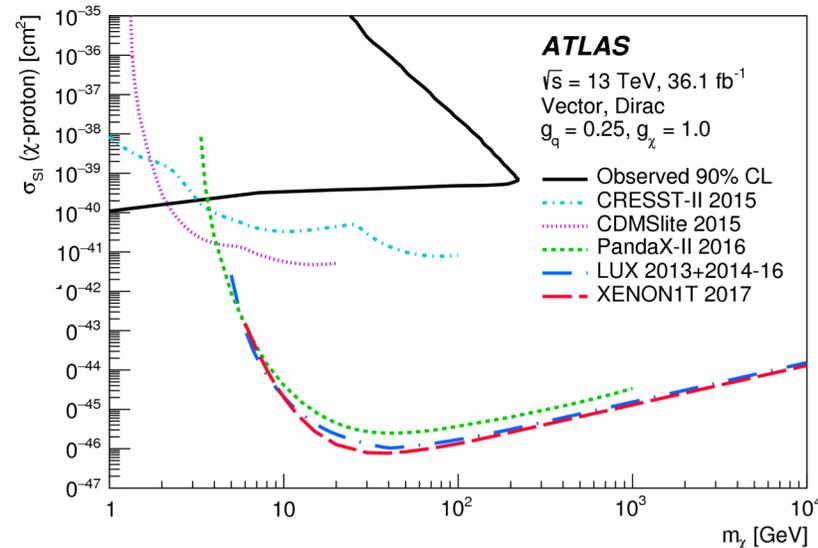
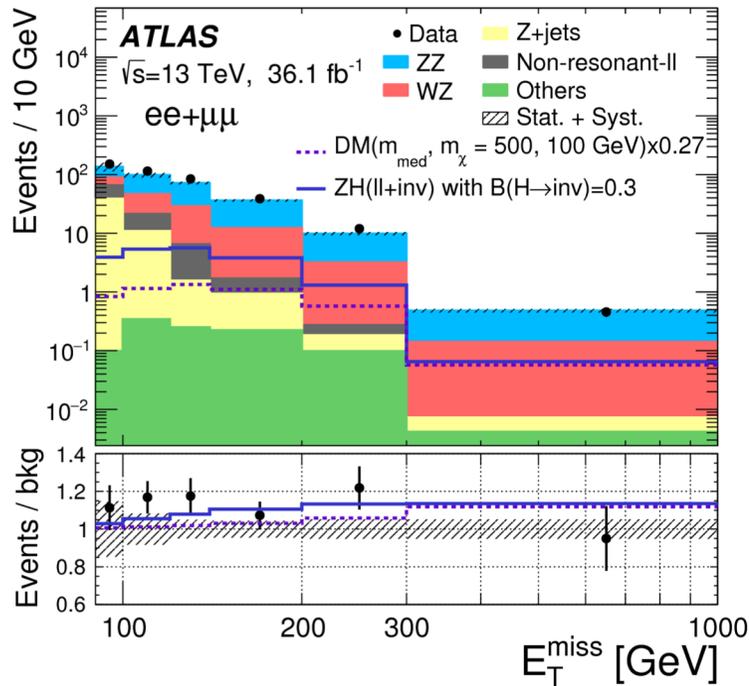
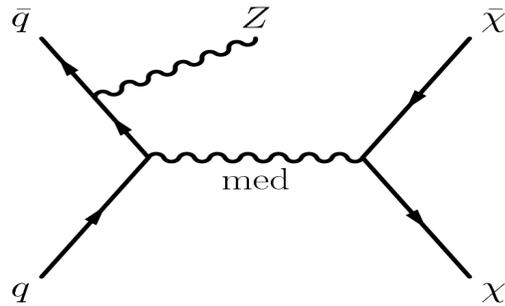
В эксперименте идет поиск Первого возбужденного состояния гравитона в распаде:  
 $G^* \rightarrow ZZ \rightarrow 2l 2\nu$



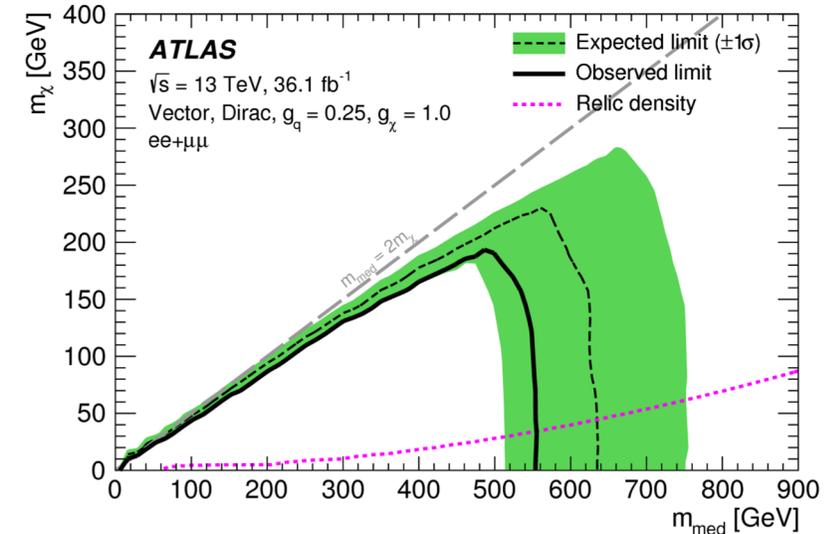
**Eur. Phys. J. C 78 (2018) 293**

Получены верхние пределы на сечения рождения RS-гравитона в зависимости от массы в диапазоне масс **600 – 2000 ГэВ**.  
 Исключены значения масс гравитона **до 1.3 ГэВ**.

# Поиск темной материи в процессе моно-Z



Phys. Lett. B 776, 318-337 (2017)



- Не обнаружено отклонений от предсказания СМ
- Получены верхние пределы на сечения рождения частиц масс частиц темной материи в интервале их масс **10 – 300 ГэВ** и масс медиатора **10 – 1000 ГэВ**

- Вклад ЛАФ ОФВЭ в анализ данных:
- Оценка вклада фоновых процессов
  - Оптимизация отбора событий
  - Интерпретация

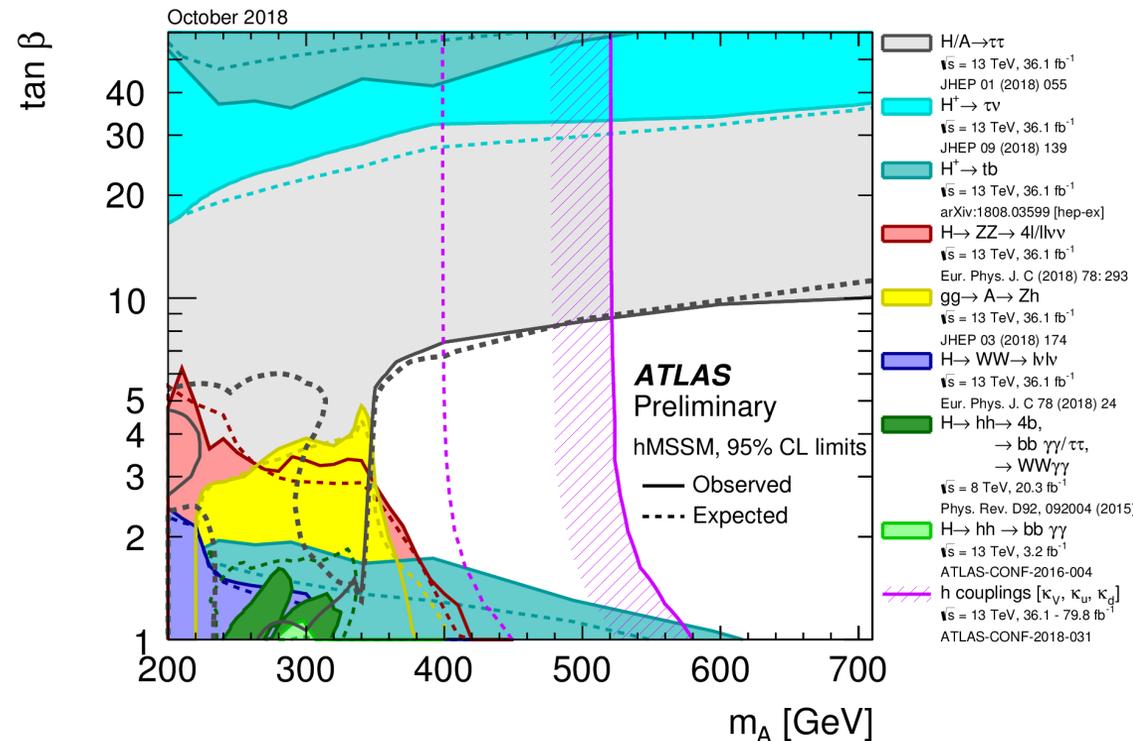
# Поиск BSM бозона Хиггса

**2HDM** (Two Higgs Doublet Model) is an extension of Standard Model: second Higgs doublet is added to SM leads to 5 physical states, 3 neutral, 2 charged: CP-even  $h$  and  $H$ , CP-odd pseudoscalar ( $A$ ), charged  $H^+$ ,  $H^-$ . The minimal model has 6 free parameters: Higgs masses  $m_h, m_H, m_A, m_{H^\pm}$  and the ratio of doublet vacuum expectation values  $\tan\beta = v_1/v_2$  and a mixing angle  $\alpha$  between the CP-even Higgs bosons

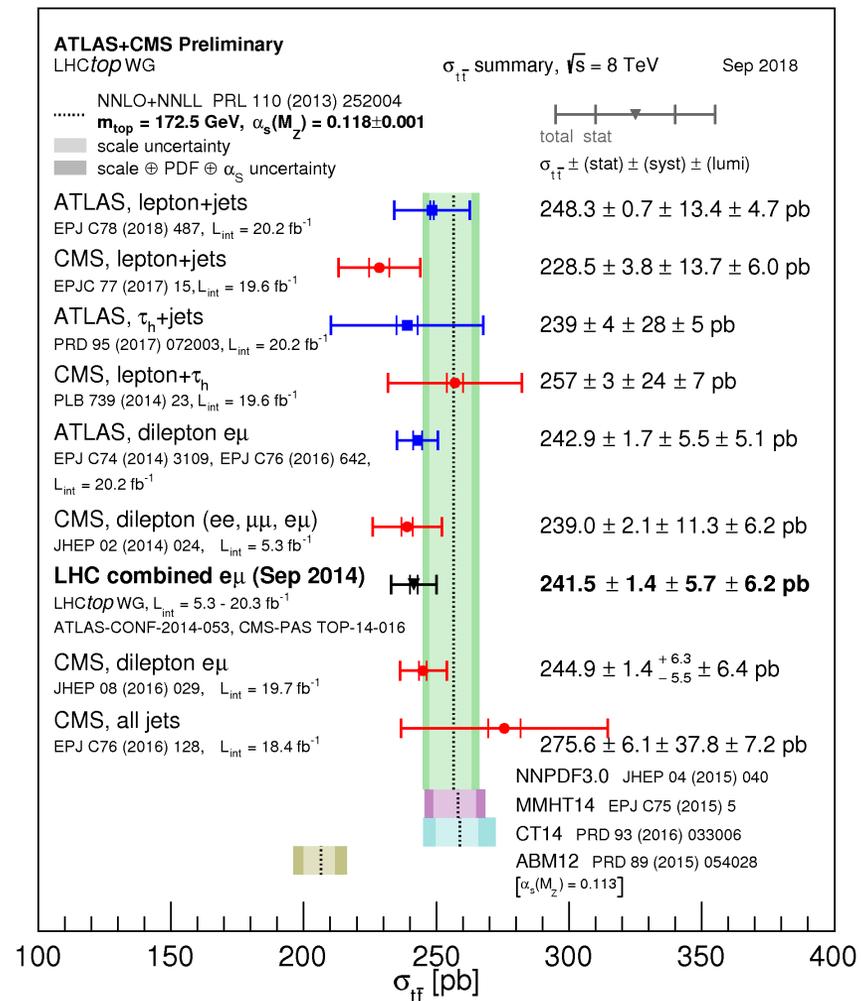
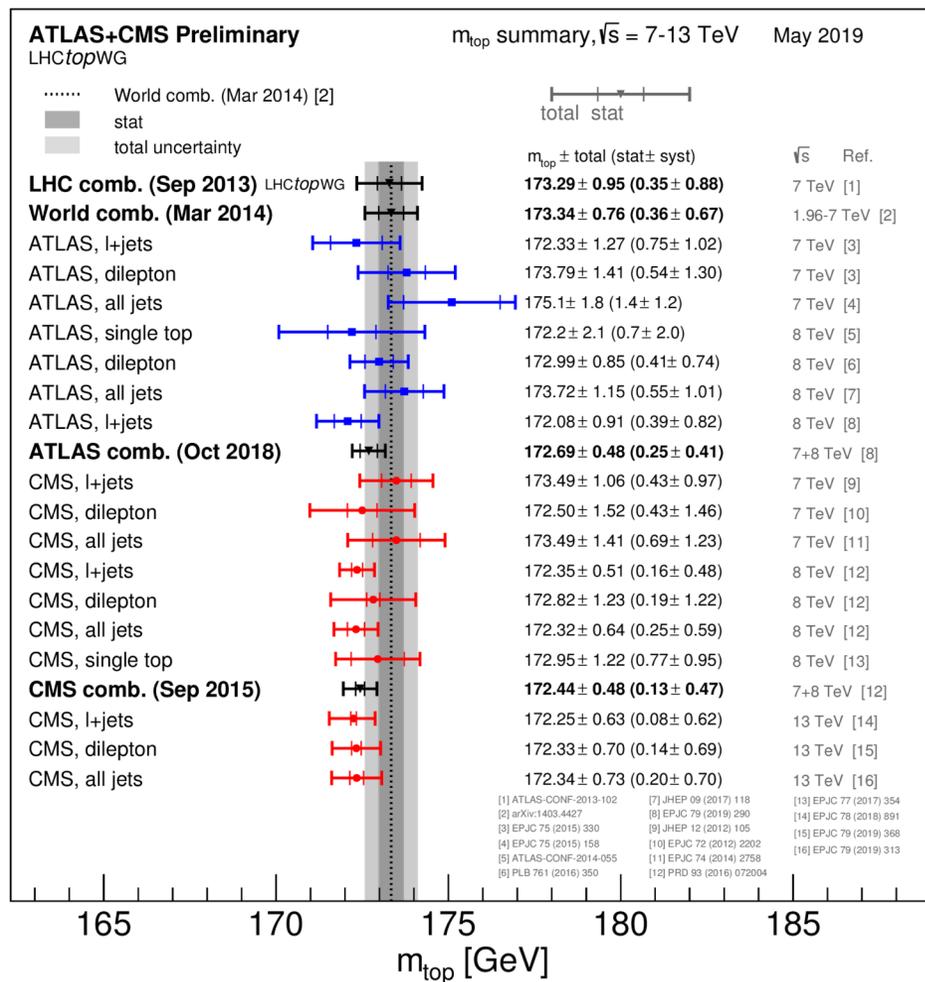
**MSSM** (Minimal Supersymmetric Standard Model): extension of SM (each SM particle has a supersymmetric partner). MSSM higgs sector is a particular case of 2HDM type

- **Neutral Heavy Higgs:**  $h/H/A \rightarrow \tau\tau$ ,  $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ ,  $A \rightarrow Zh (Z \rightarrow ll, h \rightarrow b\bar{b}(\tau\tau))$ ,  $h/H/A \rightarrow t\bar{t}$  ...
- **Neutral Higgs decaying to di-Higgs:**  $H \rightarrow hh \rightarrow bb\tau\tau$ ,  $hh \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ ,  $hh \rightarrow bb\gamma\gamma$ ,  $hh \rightarrow WW\gamma\gamma$ ,  $hh \rightarrow WWbb$ ,  $hh \rightarrow WWWW$
- **Charged Higgs:**  $H^\pm \rightarrow \tau\nu$ ,  $H^+ \rightarrow tb$ ,  $H^+ \rightarrow WZ \rightarrow 3l + \nu_l$ ,  $H^+ \rightarrow WZ \rightarrow 2l + 2j$ ,  $H^+ \rightarrow \mu\nu$ ,  $H^+ \rightarrow Wh/WA/W\gamma$ ,  $H^+ \rightarrow cs, cb$
- **Double charged Higgs boson:**  $H^{\pm\pm} \rightarrow l^\pm l^\pm$ ,  $H^{++} \rightarrow WW$

... and many more ...



# Физика $t$ -кварка

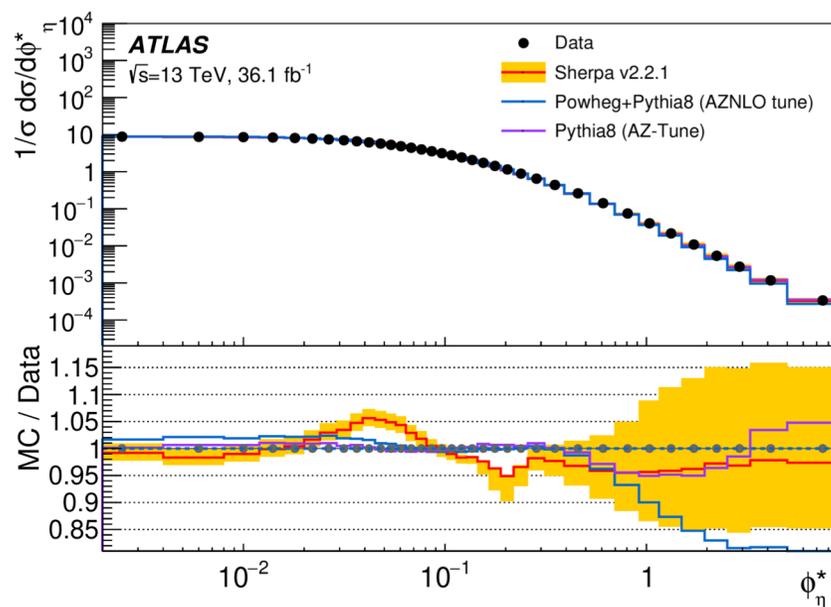
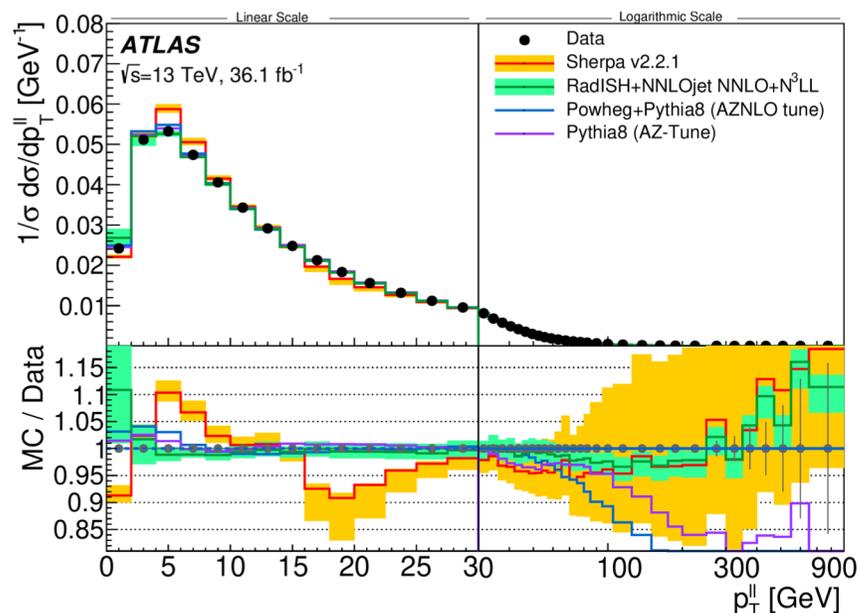


# Прецизионное измерение $p_T$ Z-бозона

Результаты прецизионных измерений  $p_T$  Z-бозона имеют важное значение для:

- проверки КХД расчетов во всех порядках по  $\alpha_S$ , включая партонные ливни
- проверки методики пересуммирования диаграмм с излучением “мягких” глюонов
- оценки вклада непертурбативных эффектов

Submitted to EPJC



Полученные результаты могут быть использованы для:

- уточнения параметров Монте-Карло генераторов
- уточнения параметров Стандартной модели (например массы W бозона)
- оценки фоновых процессов с рождением Z-бозонов при поиске “новой физики”

Проведены прецизионные измерения  $p_T^{ll}$  в интервале до **2.5 ТэВ**. Относительная точность измерений лучше, чем **0.2%** для  $p_T^{ll} < 30$  ГэВ. Проведено сравнение экспериментальных спектров по  $p_T^{ll}$  и угловой переменной  $\phi_\eta^*$  с результатами Монте-Карло моделирования для различных генераторов

# Прецизионное измерение $p_T$ Z-бозона

## • Test predictions of

- QCD predictions in all order of  $\alpha_s$  complimented with Parton Showers(PS)
- Soft-gluon resummation and hard jet emission
- Non-perturbative effects (intrinsic parton transverse momentum)

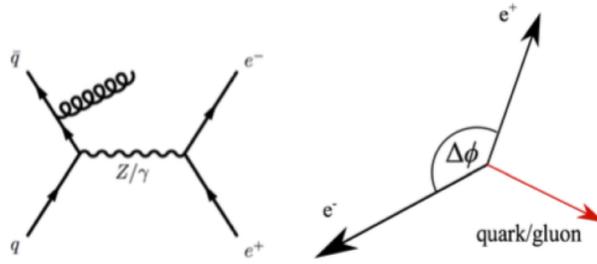
## • Results can be used for

- **Improve re-summed analytical calculations**
- Tune Monte-Carlo generators
- measurement of electroweak observables (e.g. W boson mass)
- Important for searches in which Z processes are background

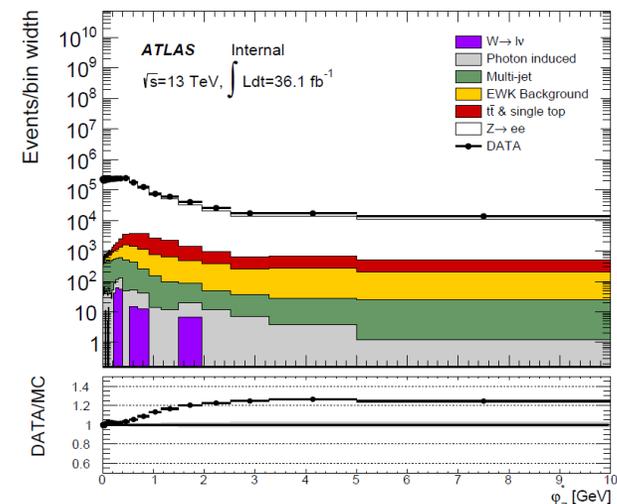
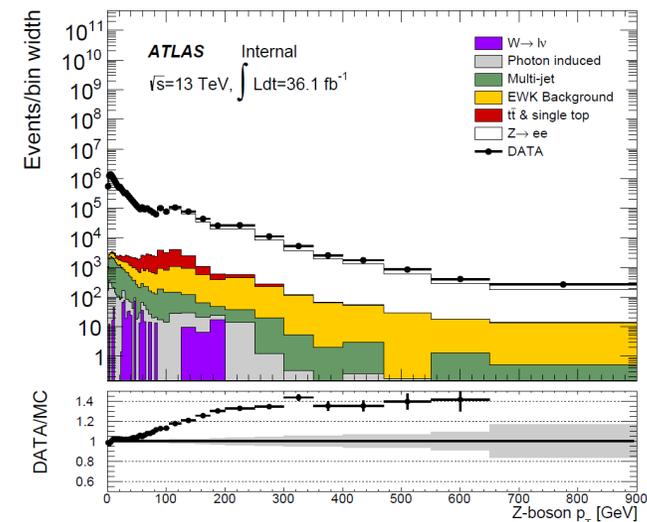
## Advantages and definition of $\phi^*$ :

- independent for  $p_T$  calibration and resolution of the final-state leptons
- depends only on the directions of the two leptons (measured better than their momenta)

$$\phi_\eta^* = \tan\left(\frac{\pi - \Delta\phi}{2}\right) \cdot \sin(\theta_\eta^*) \quad \theta_\eta^* = \arccos\left(\tanh\left(\frac{\eta^- - \eta^+}{2}\right)\right)$$

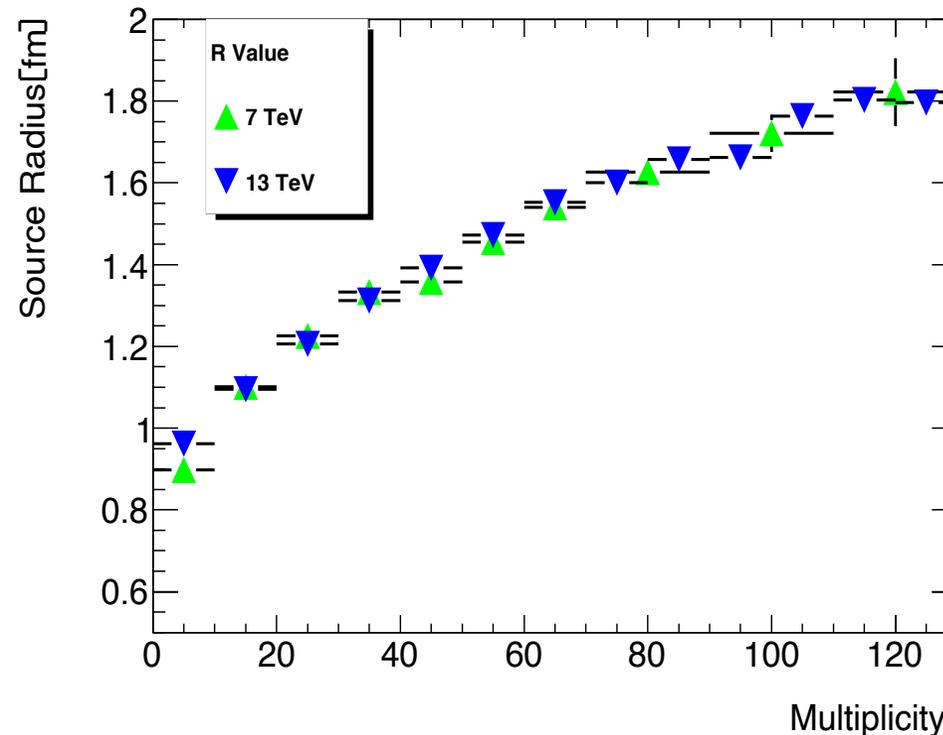


В.М. Соловьев



# Изучение Бозе-Эйнштейн корреляций

- Бозе-Эйнштейн корреляции в протон-протонных столкновениях являются эффективным инструментом для изучения пространственной структуры амплитуды рождения



- Были изучены зависимости параметров БЭК от энергии и множественности заряженных частиц. Показано, что размеры области излучения пионов не зависят от энергии ЛНС, а определяются числом рожденных частиц