The background of the slide is a complex 3D visualization of a particle detector, likely ATLAS. It features a central cylindrical structure with a dense grid of blue lines. Numerous yellow and orange lines radiate from a central point, representing particle tracks. There are also green and blue rectangular blocks scattered throughout the scene, possibly representing detector components or data points. The overall aesthetic is technical and futuristic, with a dark background and vibrant colors.

# Эксперимент АТЛАС

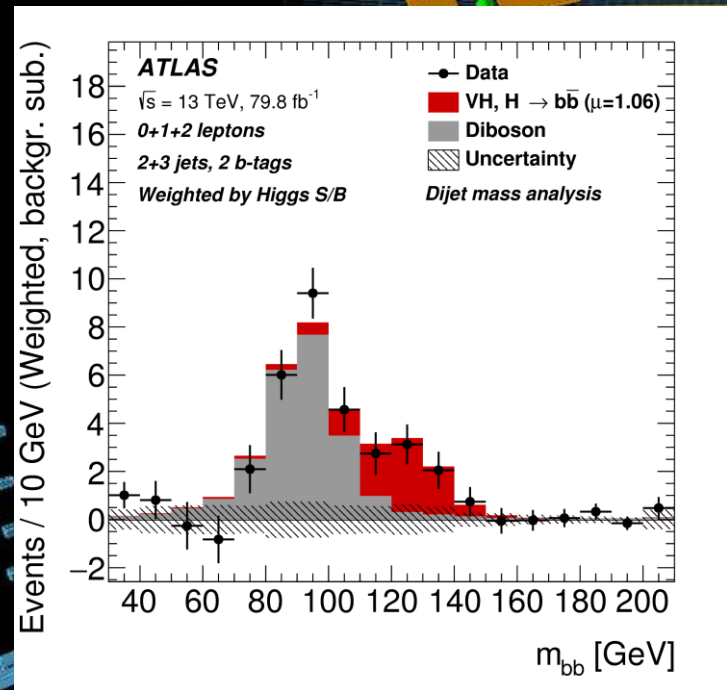
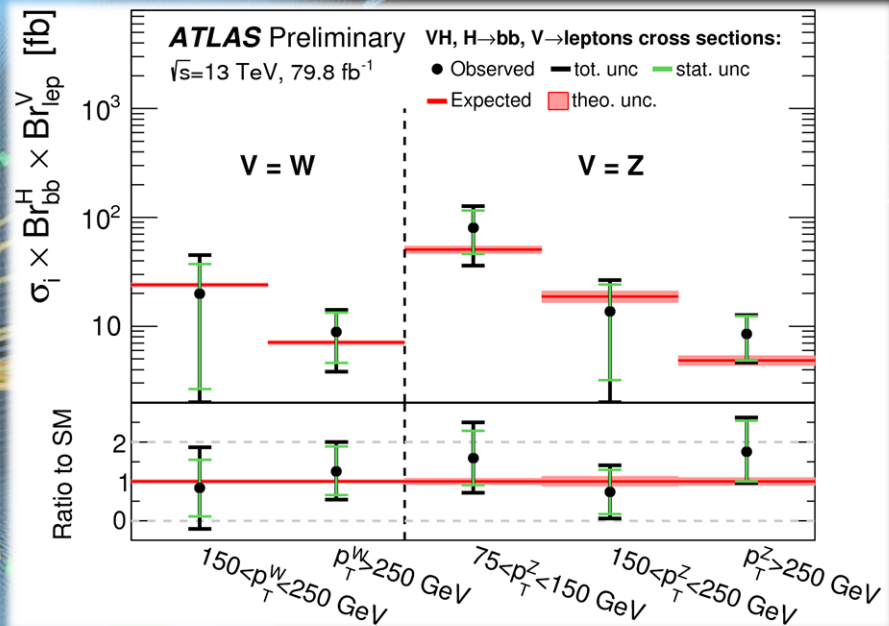
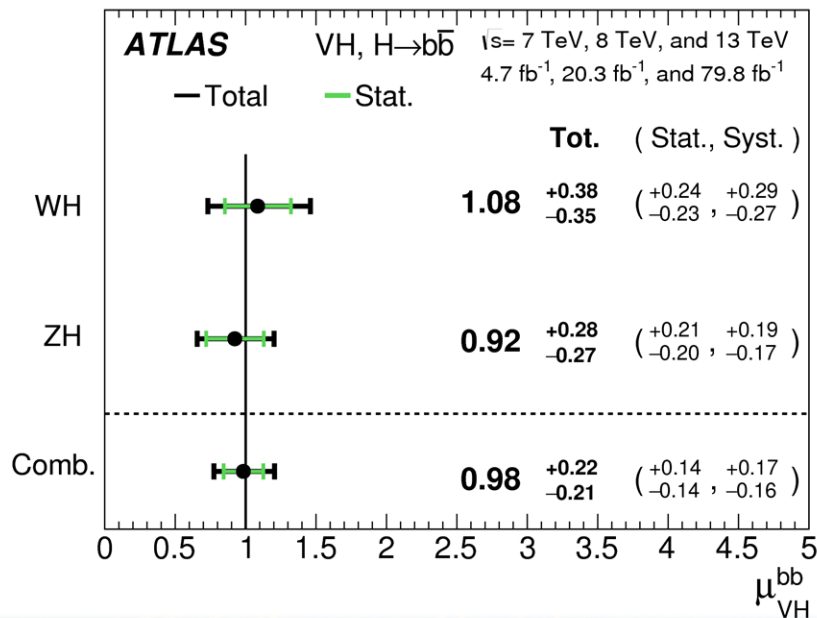
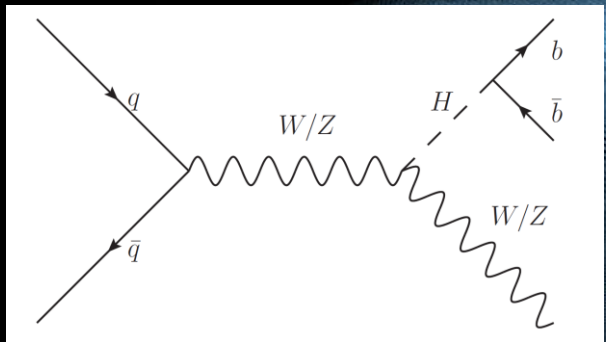
## Физические результаты

Ю.Г. Нарышкин

Научная сессия ОФВЭ ПИЯФ, 25.12.2018



# Прямое наблюдение распада бозона Хиггса на $b$ -кварки: $H \rightarrow b\bar{b}$

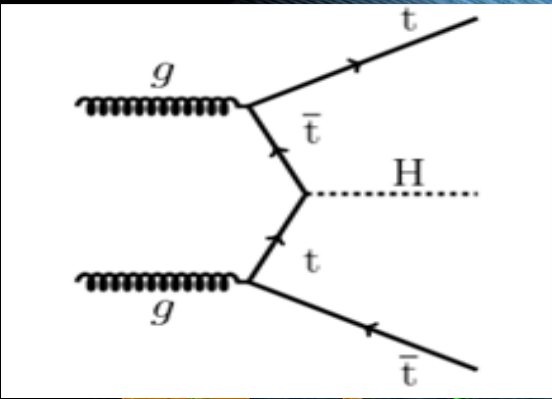


$H \rightarrow b\bar{b}$ , BR=60%, большой фон от процессов с рождением  $b$ -струй  
 Ассоциативное рождение  $H$  с векторным бозоном:  $pp \rightarrow VH, VH (V=Z, W)$   
 Вклад процесса 4%, высокая чувствительность (лептонный распад  $V$ )  
 Run I и Run II (ATLAS)  $\text{sign.} = 5.4 \sigma, \mu = 1.16 \pm 0.27 \pm 0.25$   
 Хорошее согласие с предсказаниями СМ

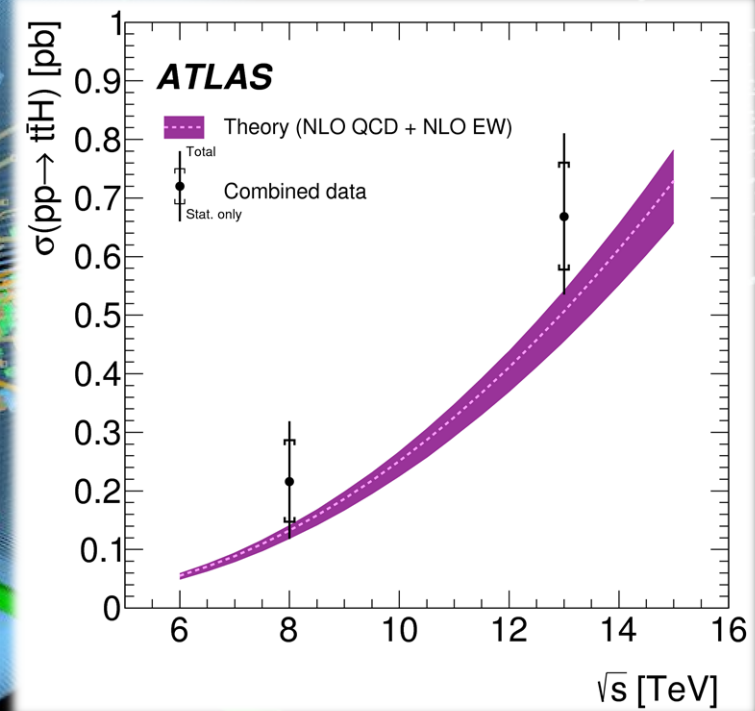
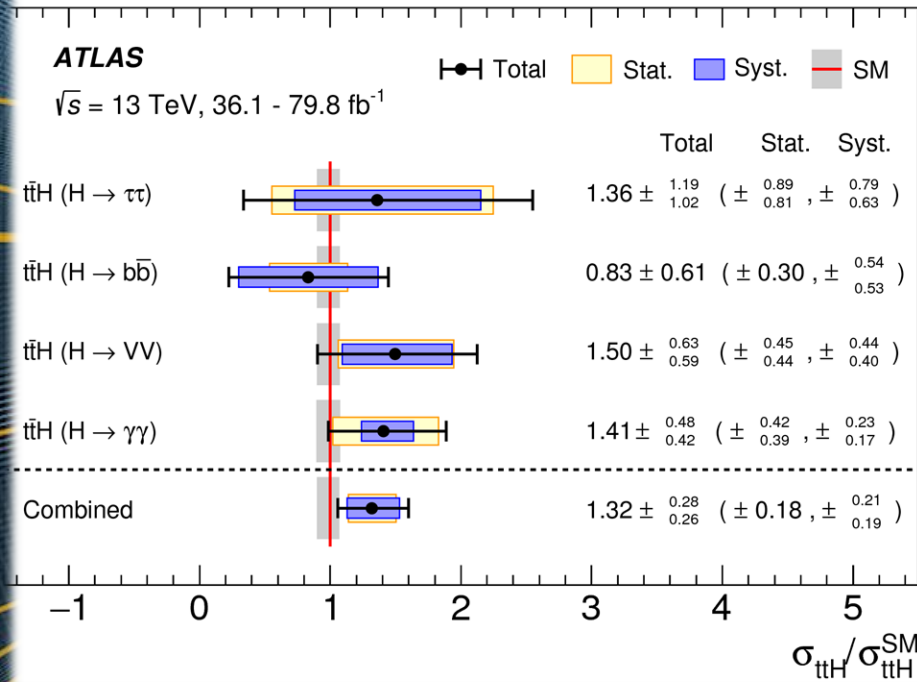




# Ассоциативное рождение бозона Хиггса с парой t-кварков: $t\bar{t}H$

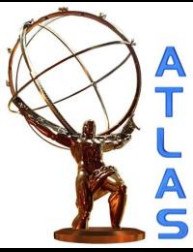


Process	Obs. Sig.
H to $\gamma\gamma$	4.1
H to multilep	4.1
H to bb	1.4
H to ZZ to 4l	0
Comb (13 TeV)	5.8
Comb (7, 8, 13 TeV)	6.3

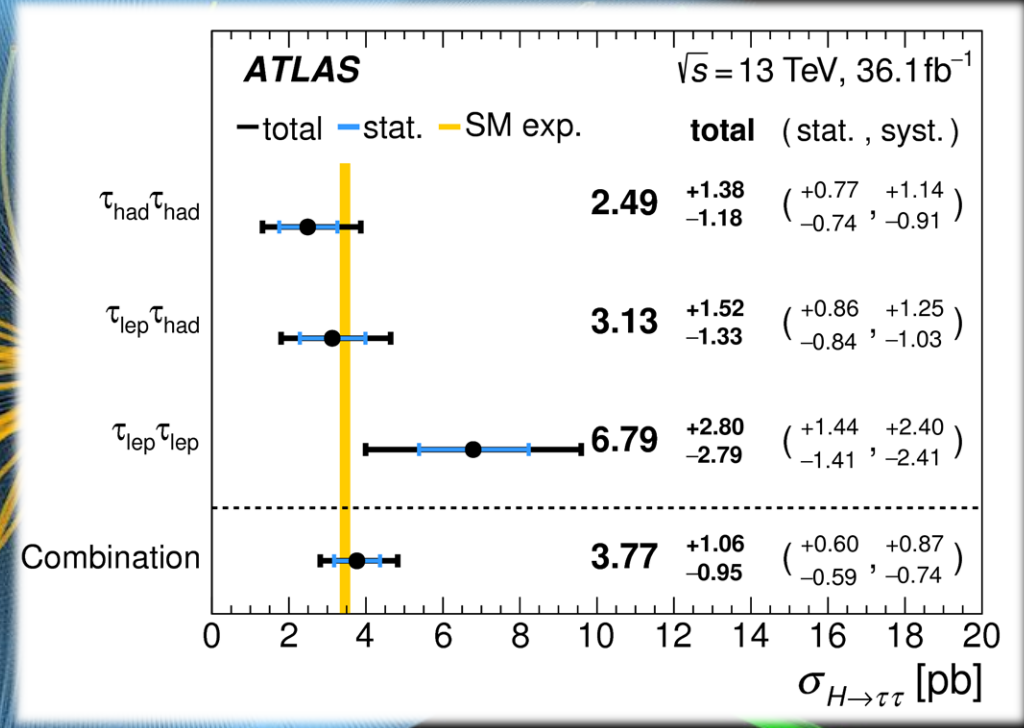
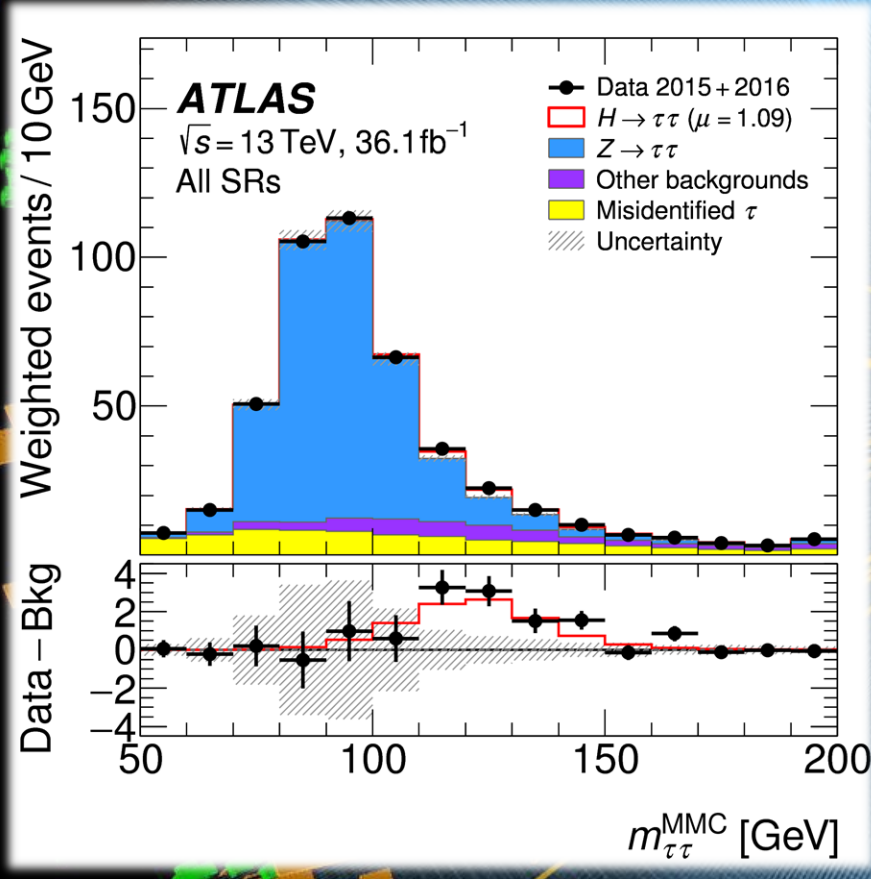


Phys. Lett. B 784 (2018) 173

Полное сечение ассоциативного рождения  $t\bar{t}H$  at 13TeV  $\sigma = 670 \pm 90$  (stat.)  $^{+110}_{-100}$  (syst.) fb  
 Полученный результат хорошо согласуется с предсказаниями SM.



# Наблюдение распада бозона Хиггса на $\tau$ лептоны: $H \rightarrow \tau\tau$



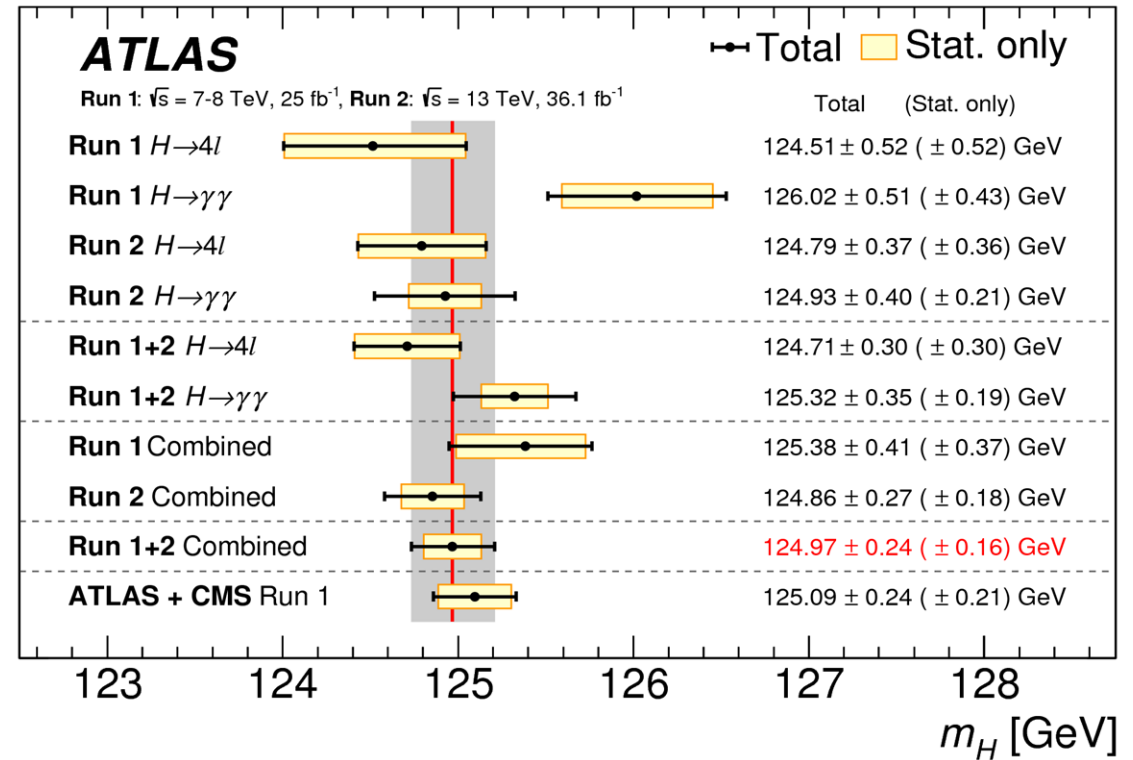
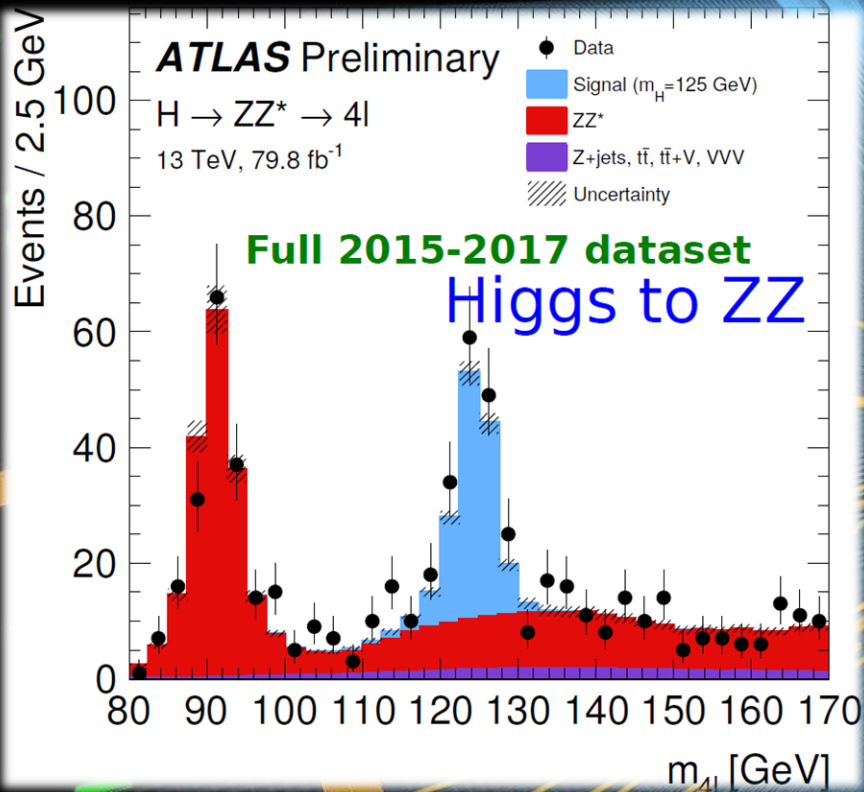
arXiv:1811.08856, Submitted to PRD

Данные 2015 - 2016 годов, полная светимость  $36.1 \text{ fb}^{-1}$  Анализировались лептонный и адронный каналы распада  $\tau$ -лептона. Статистическая значимость сигнала **4.4 (4.1)  $\sigma$** . Полное сечение распада  $H \rightarrow \tau\tau$ :  $\sigma = 3.77_{-0.59}^{+0.60}(\text{stat})_{-0.74}^{+0.87}$  (СМ:  $3.46 \pm 0.13 \text{ pb}$ ). Полученные результаты хорошо





# Измерение массы и ширины H в каналах: $H \rightarrow \gamma\gamma$ , $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$

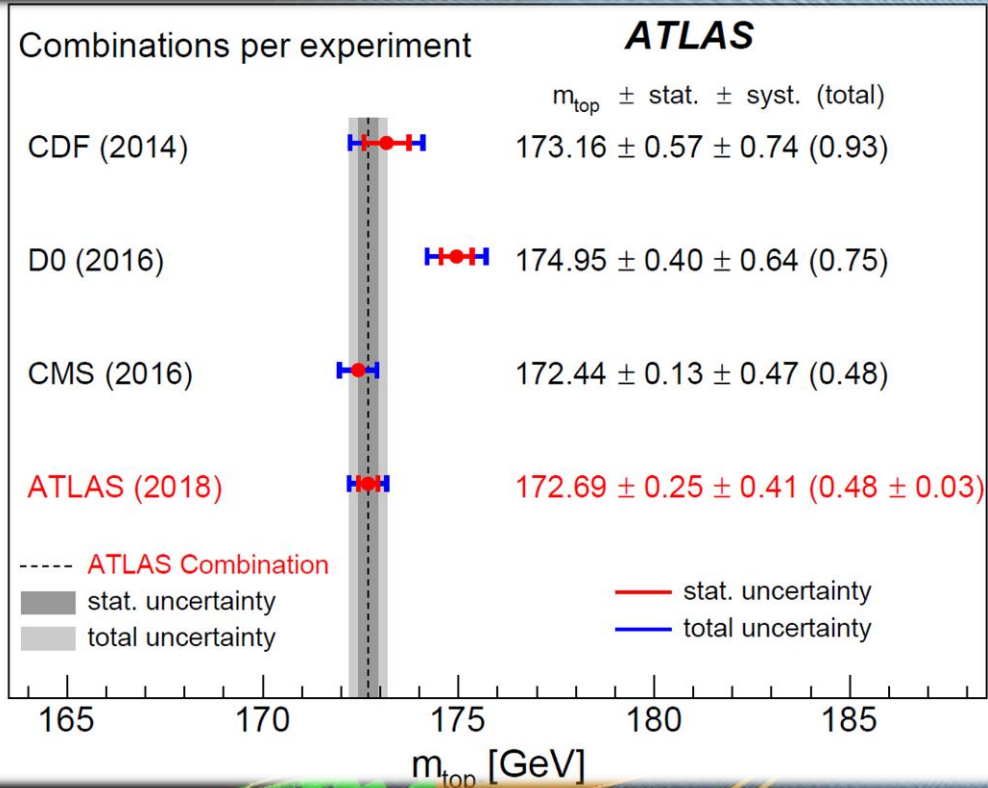


По результатам измерений в каналах  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  и  $H \rightarrow \gamma\gamma$  с использованием данных Run 1 ( $\sqrt{s}=7,8$  ТэВ) и Run II (2015,2016 36.1 фб<sup>-1</sup>)  $m_H = 124.97 \pm 0.24$  ГэВ.  
 Верхние пределы для ширины бозона Хиггса (off-shell анализ): 14.4 (15.2) МэВ

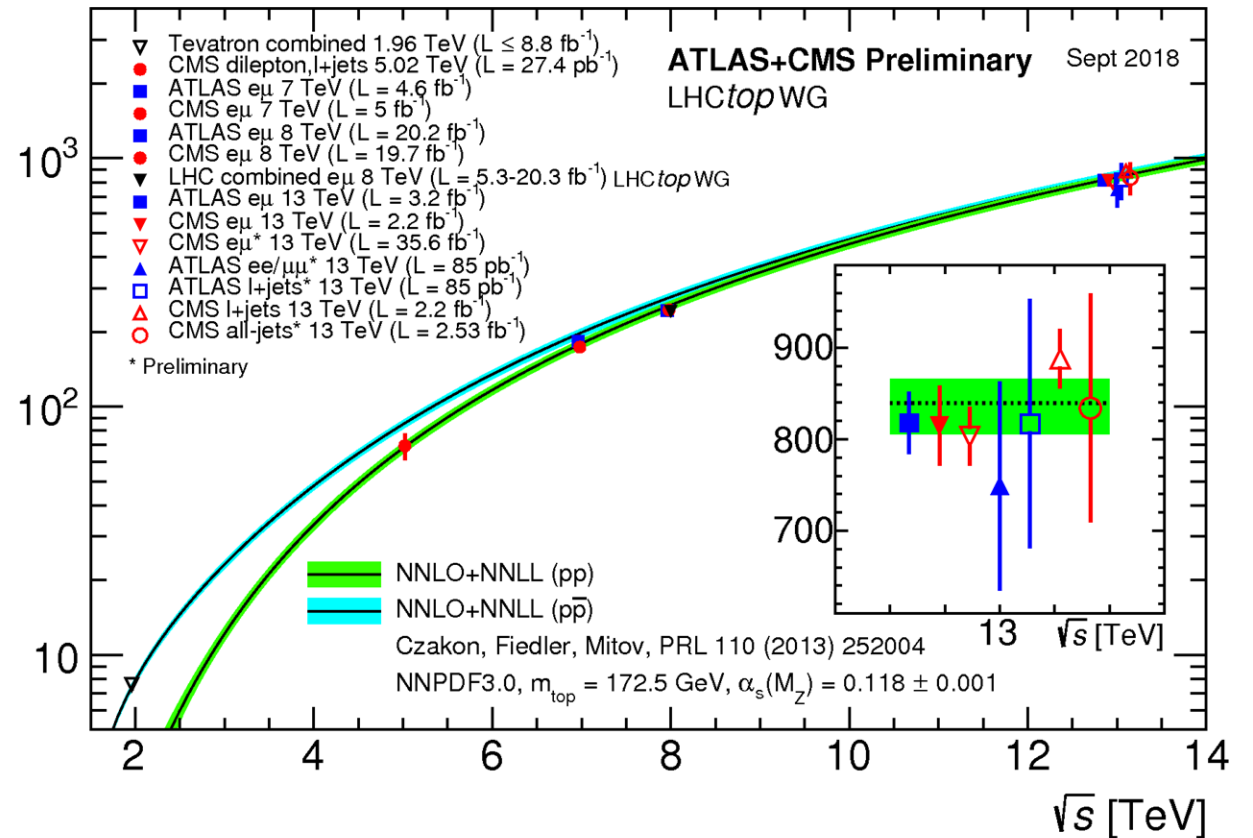
Phys. Lett. B 784 (2018) 345  
 Phys. Lett. B 786 (2018) 223



# Измерения массы и сечений рождения $t$ -кварка



Inclusive  $t\bar{t}$  cross section [pb]

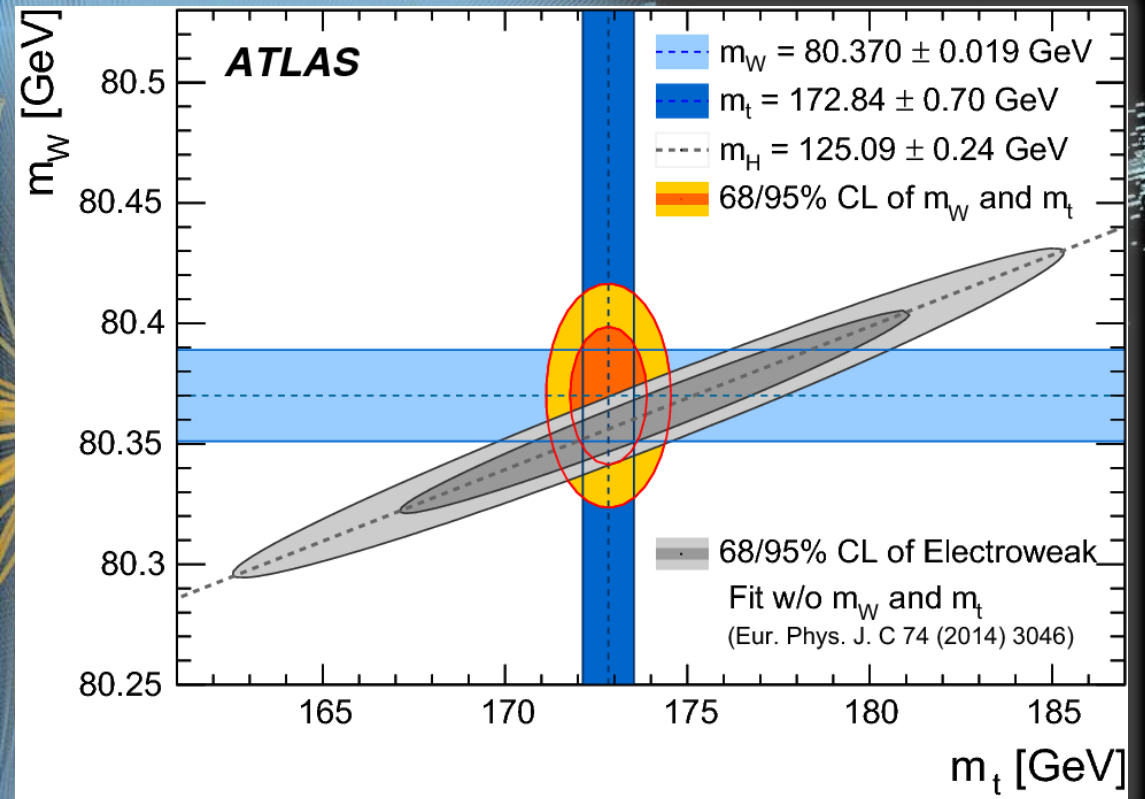
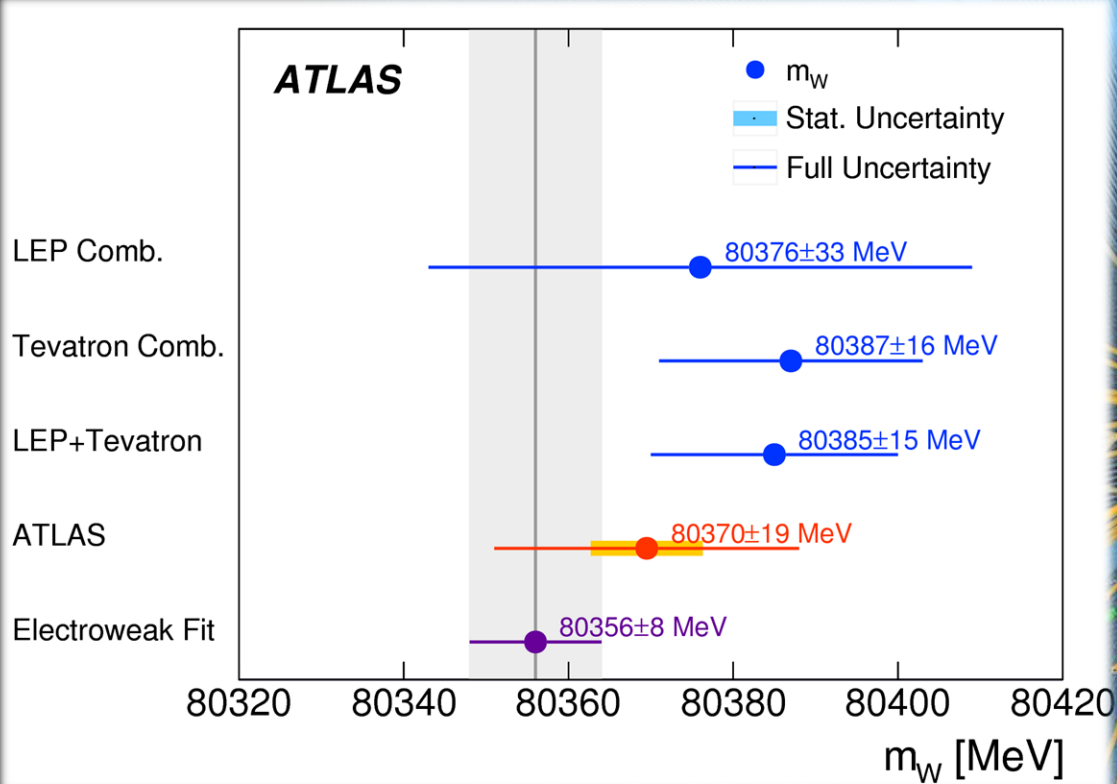


Измерение массы  $t$ -кварка в различных каналах его рождения по данным Run II ( $36.1 \text{ fb}^{-1}$ ),  $m_t = 172.69 \pm 0.25 \pm 0.41 \text{ ГэВ}$  (СМ:  $173.1 \pm 0.6$ ). Измерены сечения рождения  $t$ -кварка в разных каналах и его зависимость от  $\sqrt{s}$ . Результаты хорошо согласуются с предсказаниями СМ.





# Измерение массы W-бозона



Run I ( $\sqrt{s}=7$  TeV) luminosity =  $4.6 \text{ fb}^{-1}$   
 $m_W = 80370 \pm 19 \text{ MeV}$  (SM:  $80356 \pm 8 \text{ MeV}$ )  
 $m_{W^+} - m_{W^-} = -29 \pm 28 \text{ MeV}$

Eur.Phys.J. C78 (2018) no.2, 110  
 Eur.Phys.J. C78 (2018) no.11, 898



# Участие ПИЯФ В физической программе эксперимента АТЛАС



- **Поиски новых явлений за пределами Стандартной модели (BSM):**
  - частиц темной материи в процессе моно- $Z$
  - тяжелого нейтрального бозона Хиггса (2HDM)
  - "невидимых" каналов распада бозона Хиггса  $SM$
  - Поиски RS гравитона (extra dimensions)
- **Измерение параметров Стандартной модели**
  - Прецизионное измерение спектра поперечного импульса  $Z$ - бозона и угловой переменной  $\varphi^*$  в процессе  $Z \rightarrow \ell\ell$
  - Бозе-Эйнштейн корреляции

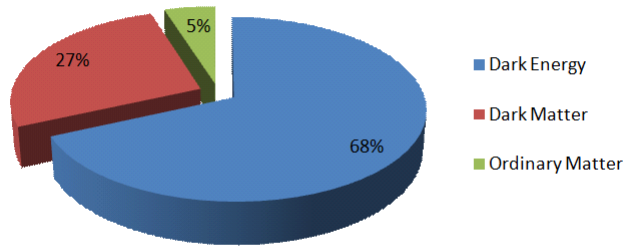
Руководитель – О.Л. Федин

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

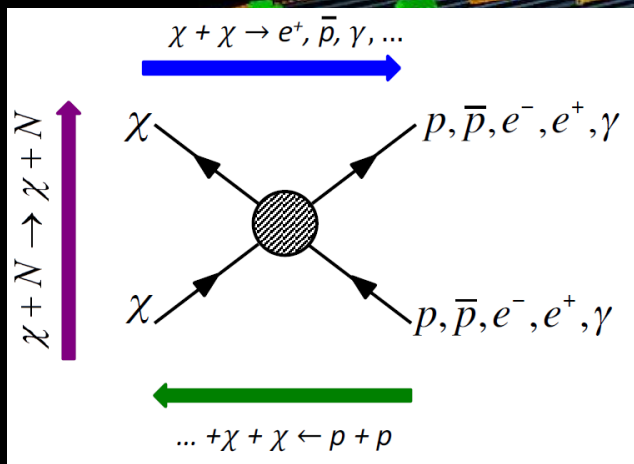




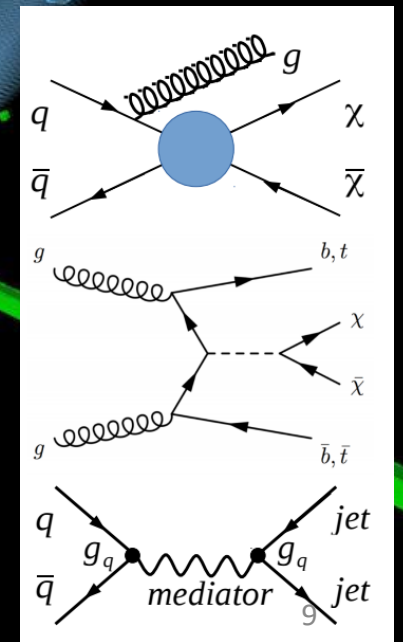
# Поиски темной материи



- Indication on the Dark Matter existence follows from the astrophysical observations
- Direct, indirect, collider searches
- Dark Matter particles predicts by some of SM extensions (BSM models): MSSM, 2HDM, HTM ...

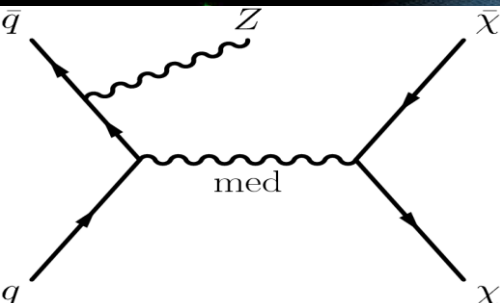


- LHC searches: mono-X, associative production, search for the dark mediator
- Interpretation: EFT, simplified models, 2HDM
- For the data analysis wide range of DM mass and mediator mass for different mediator types: axial-vector, vector pseudo scalar ....



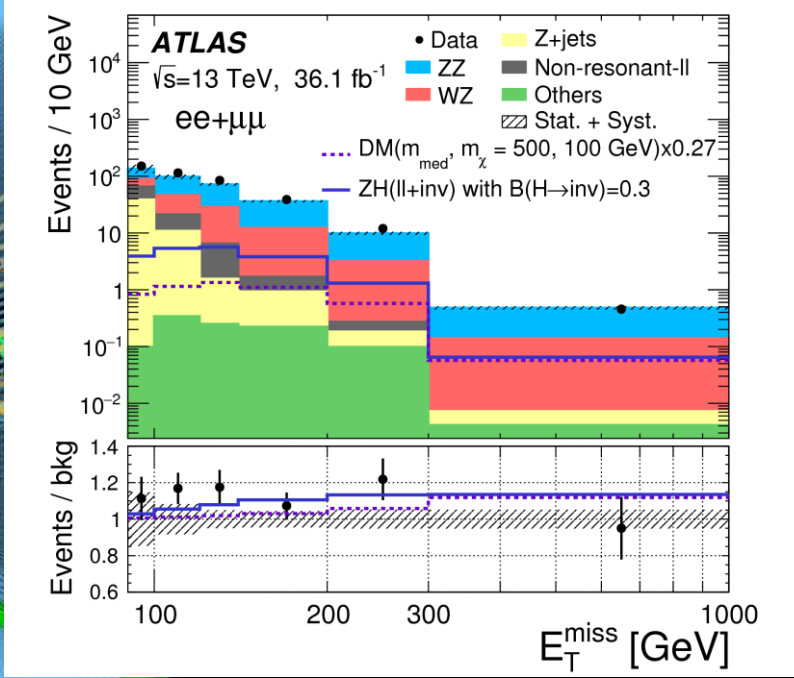
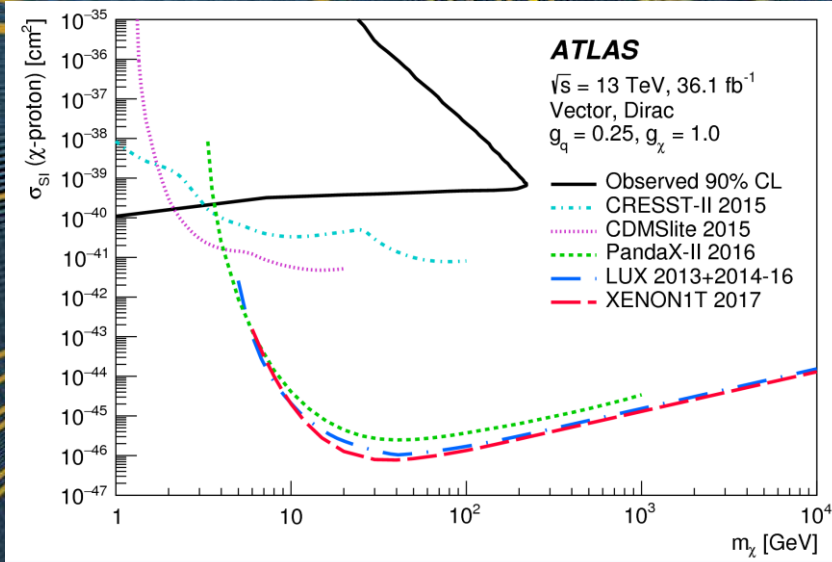
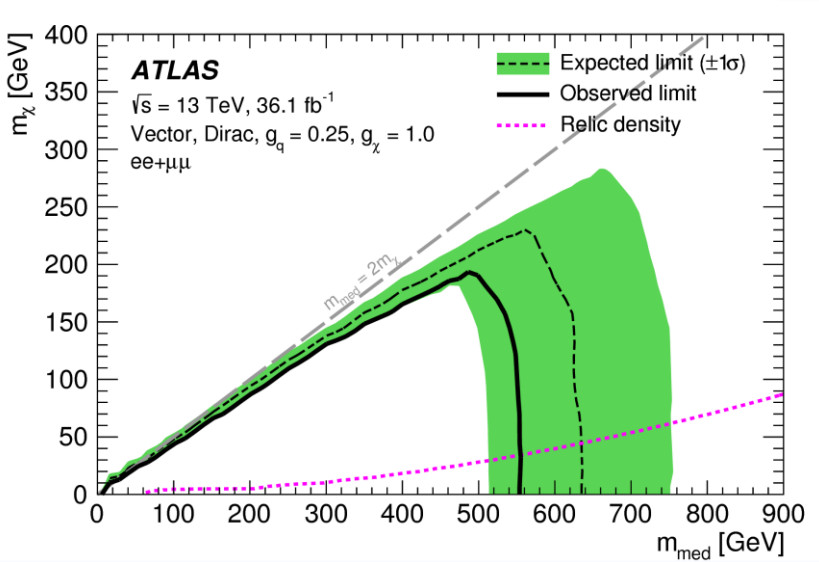


# Поиски темной материи в процессе моно-Z (ISR)



⇐ Сигнатура (признак) события - рождение Z-бозона в ISR.

⇒ При анализе данных используется распределение по недостающей энергии  $E_T^{miss}$



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

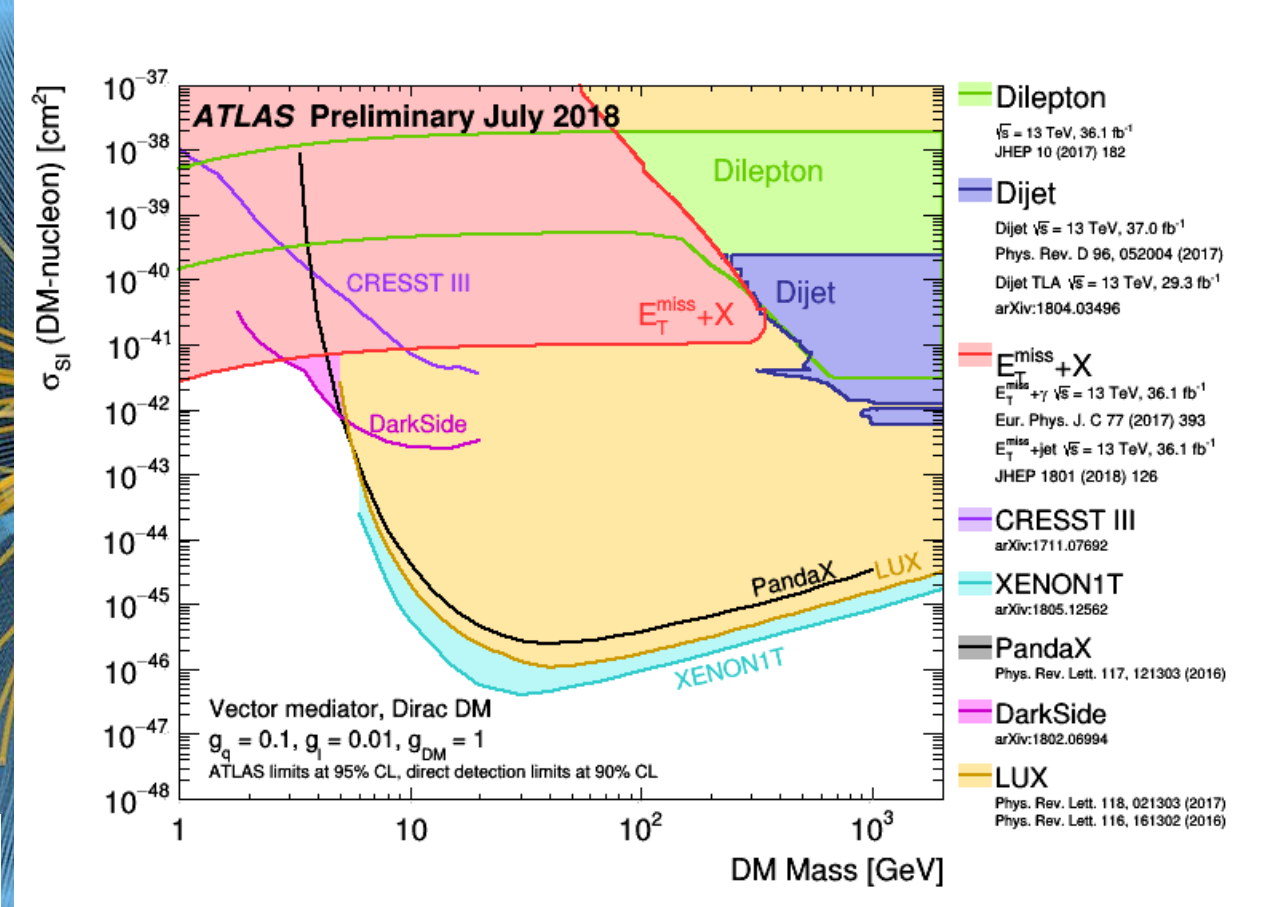
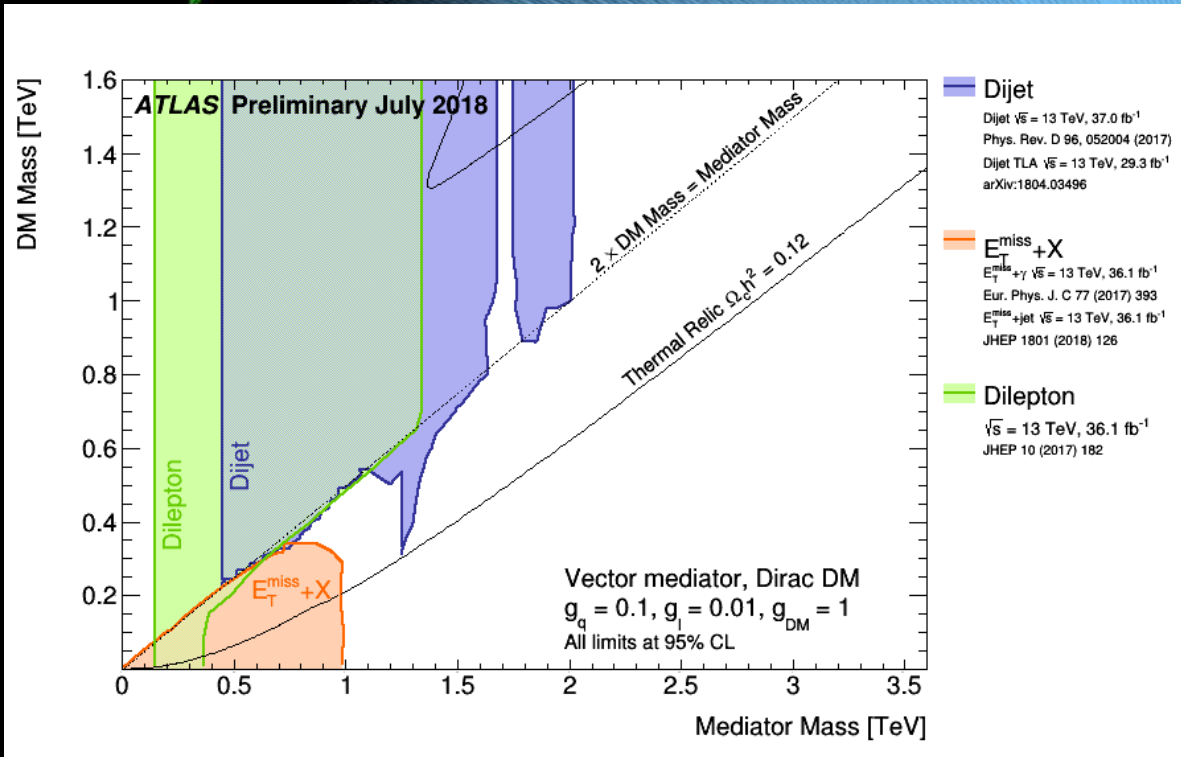
Вклад ЛАФ ОФВЭ в анализ данных:  
 Оценка вклада фоновых процессов,  
 Оптимизация отбора событий,  
 интерпретация

Не обнаружено отклонений от предсказания Стандартной Модели.  
 Получены верхние пределы на сечения рождения частиц масс частиц ТМ в интервале масс ТМ **10 - 300 ГэВ** и масс медиатора **10 - 1000 ГэВ**





# Dark Matter



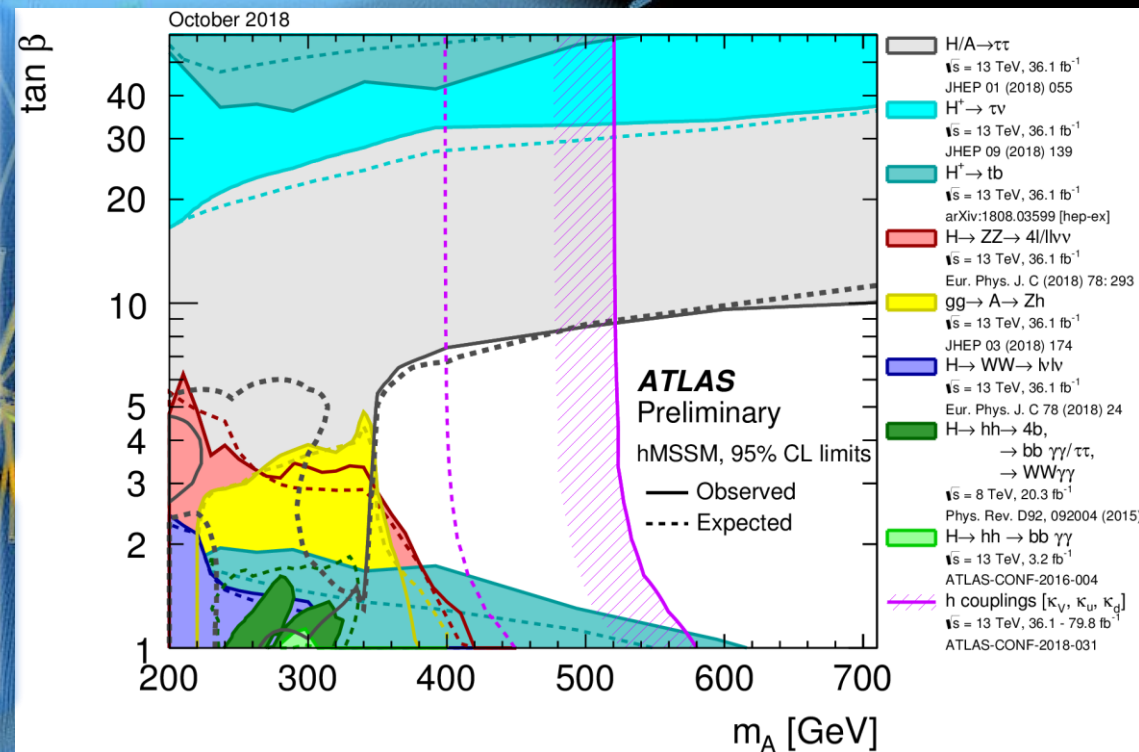
Полученные результаты сильно зависят от параметров моделей. В области малых масс ТМ ( $m_{DM} < 6 \text{ ГэВ}$ ) ограничения на сечения, полученные в экспериментах на БАК, являются более сильными.



# Поиска 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:**  $h/H/A \rightarrow \tau\tau, H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu, A \rightarrow Zh (Z \rightarrow \ell\ell, h \rightarrow b\bar{b}(\tau\tau)), h/H/A \rightarrow t\bar{t} \dots$
- **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:**  $H^\pm \rightarrow \tau\nu, H^\pm \rightarrow tb, H^\pm \rightarrow WZ \rightarrow 3\ell + \nu_\ell, H^\pm \rightarrow WZ \rightarrow 2\ell + 2j, H^\pm \rightarrow \mu\nu, H^\pm \rightarrow Wh/WA/W\gamma, H^\pm \rightarrow cs, cb$
- **Double charged Higgs boson:**  $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell^\pm\ell^\pm, H^{++} \rightarrow WW$

... and many more ...



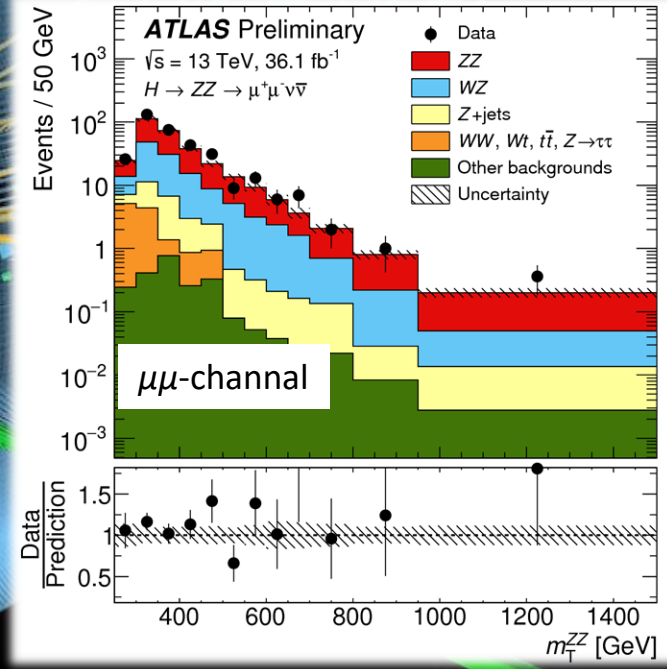
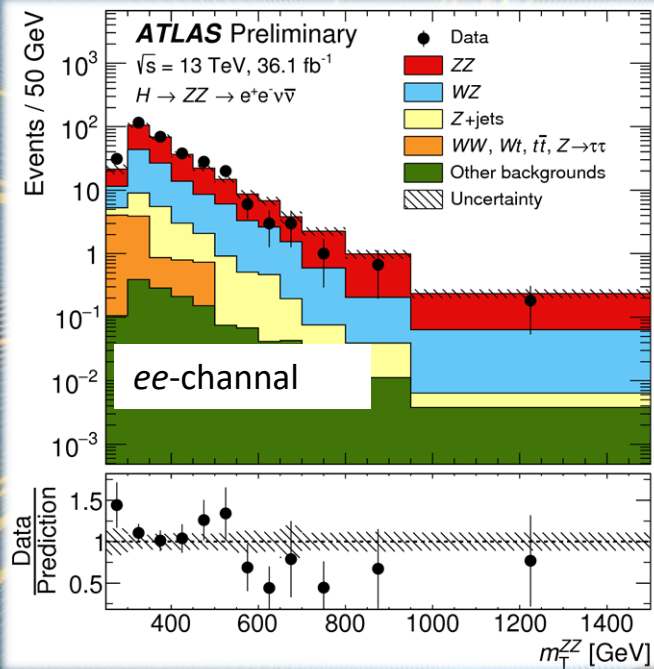
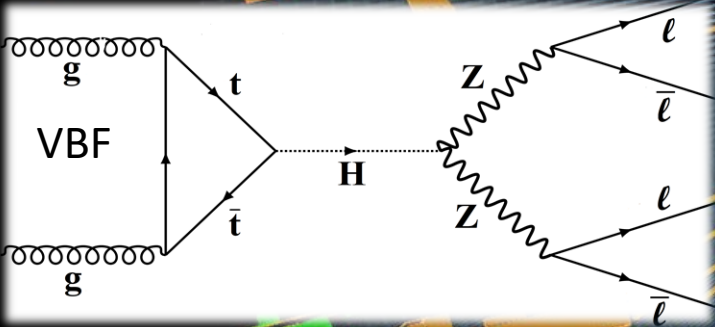
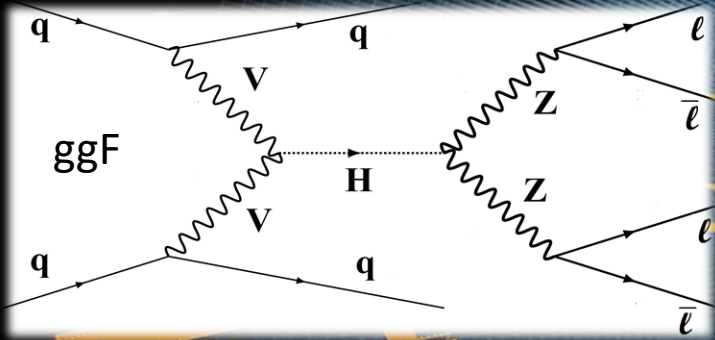


# Поиски новых бозонов Хиггса (BSM)



$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \ell (2\ell 2\nu)$

Predicted by the SM extension (BSM): **2HDM, MSSM: CP-even h and H, CP-odd pseudoscalar (A), charged H<sup>+</sup>, H<sup>-</sup>** **HTM: H<sup>±±</sup>, H<sup>±</sup>, A, H and h, NMSSM, LRSM ...**

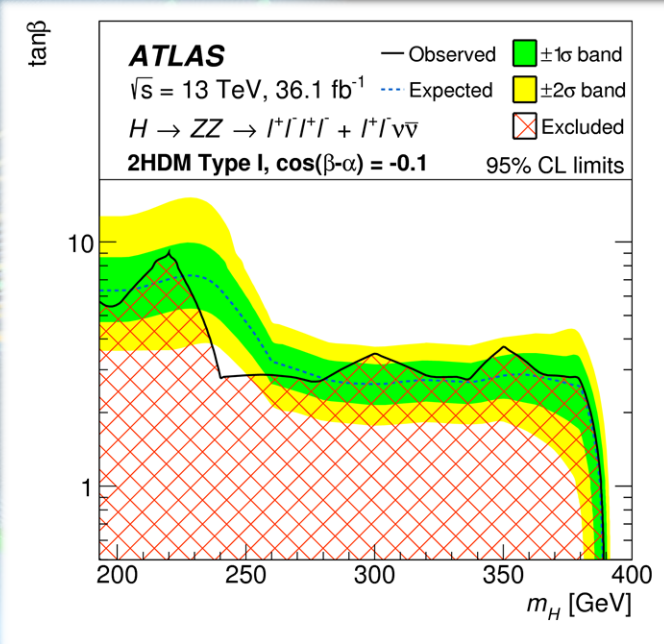
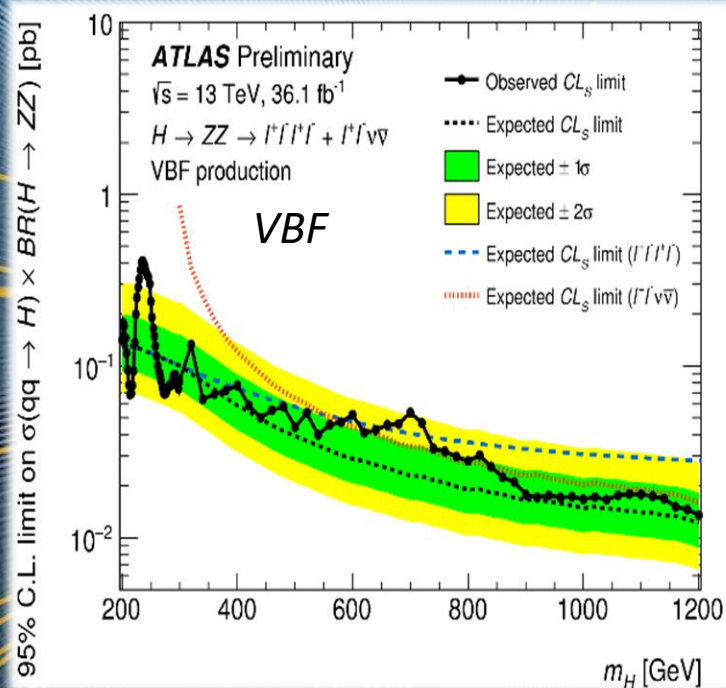
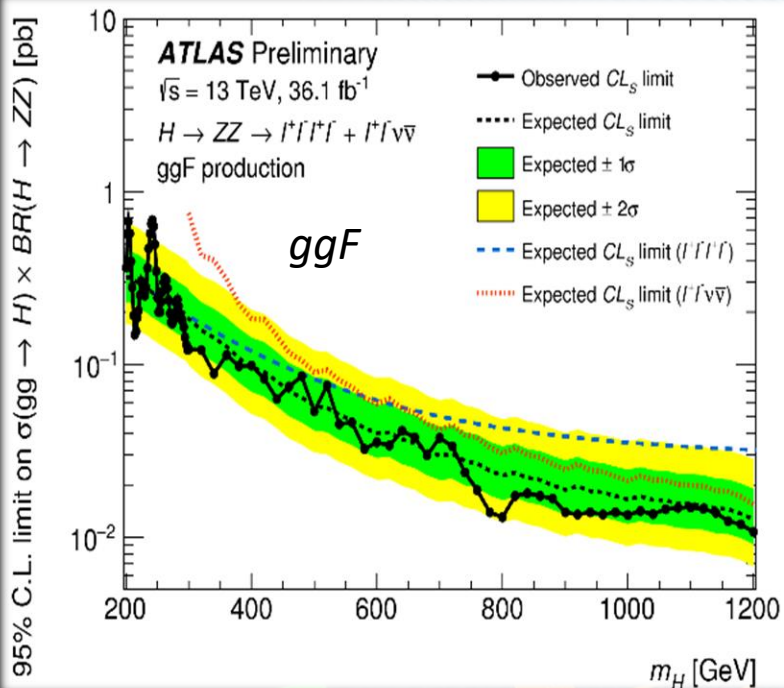


$$m_T \equiv \sqrt{\left[ \sqrt{m_Z^2 + (p_T^{\ell\ell})^2} + \sqrt{m_Z^2 + (E_T^{\text{miss}})^2} \right]^2 - \left| \vec{p}_T^{\ell\ell} + \vec{E}_T^{\text{miss}} \right|^2}$$

No deviation from the Standard Model in the mass range: **от 200 до 2000 ГэВ**



# Поиски новых бозонов Хиггса (BSM)



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

Получены верхние пределы на сечения рождения нового тяжёлого бозона Хиггса в интервале масс **200-2000 ГэВ**, для разных механизмов его возможного рождения. Проведена интерпретация в рамках **2HDM**, получены пределы на параметры этой модели.

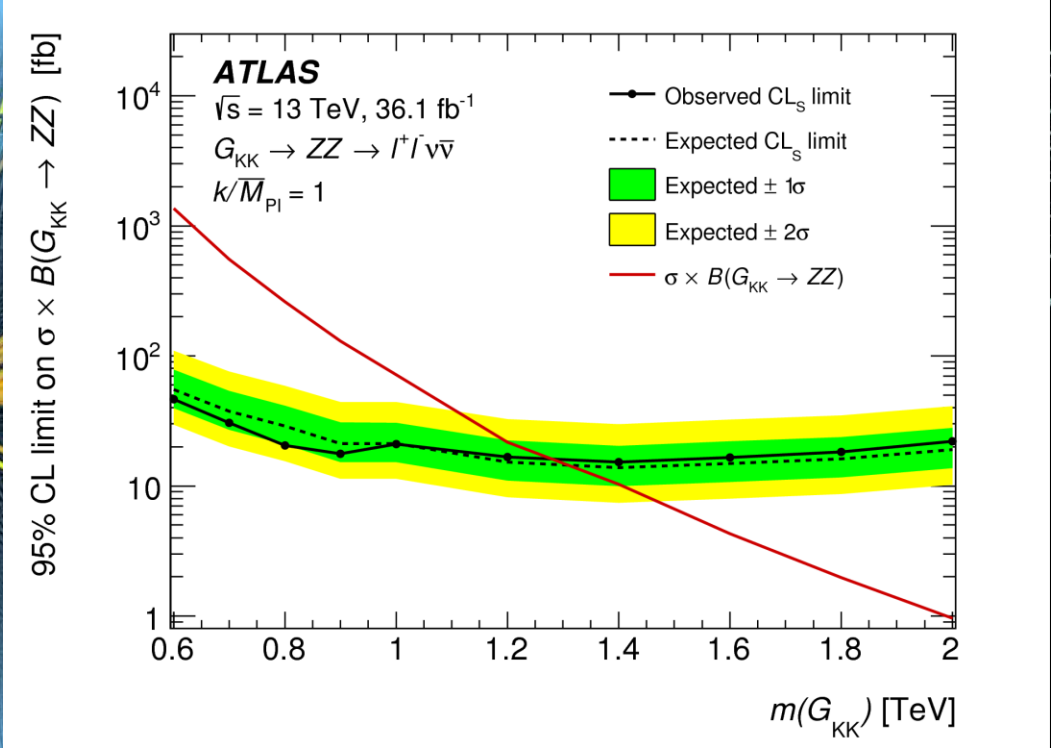
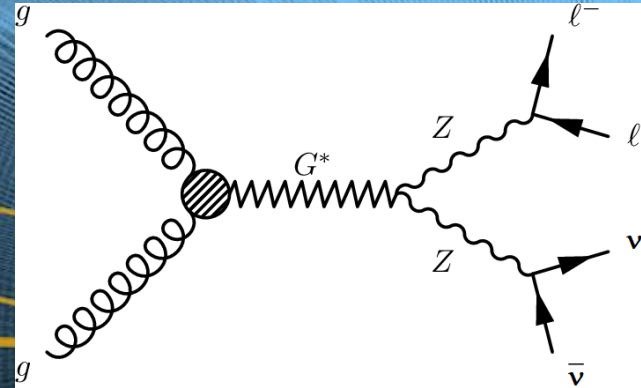
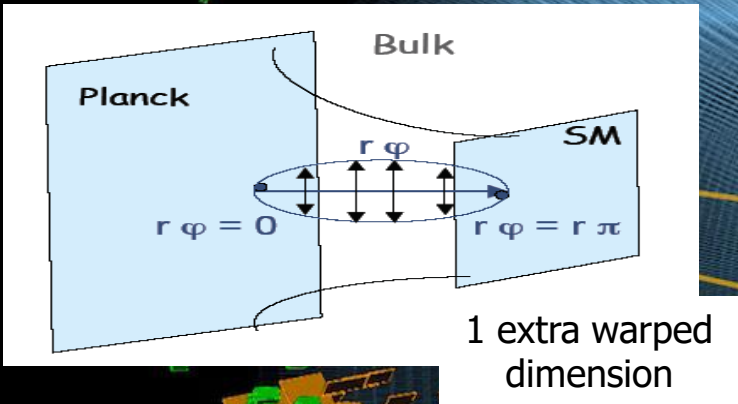
Вклад ЛАФ ОФВЭ в анализ данных:  
Оценка вклада фоновых процессов, интерпретация.

Грант РФФИ 2018-2019





# Поиски RS гравитона (extra dimensions)



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

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

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**.

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

Вклад ЛАФ ОФВЭ в анализ данных:  
 Оценка вклада фоновых процессов

# Precision studies of $p_T$ and $\phi^*$ of Z-boson

## • 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)

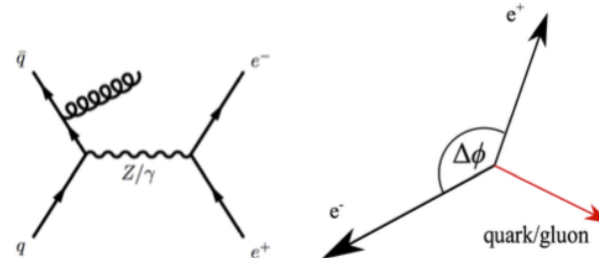
## • Results can be used for

- **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

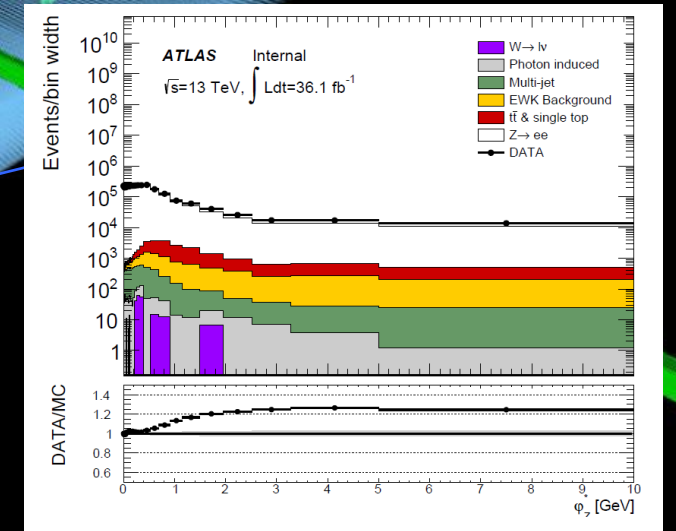
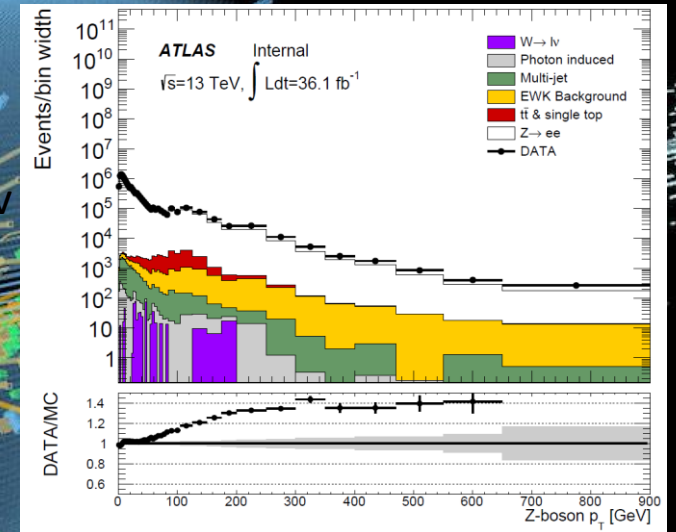
## Advantages and definition of $\phi^*$ :

- 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)

$$f_h^* = \tan\left(\frac{\rho - Df}{2}\right) \cdot \sin(q_h^*) \quad q_h^* = \arccos\left(\tanh\left(\frac{h^- - h^+}{2}\right)\right)$$



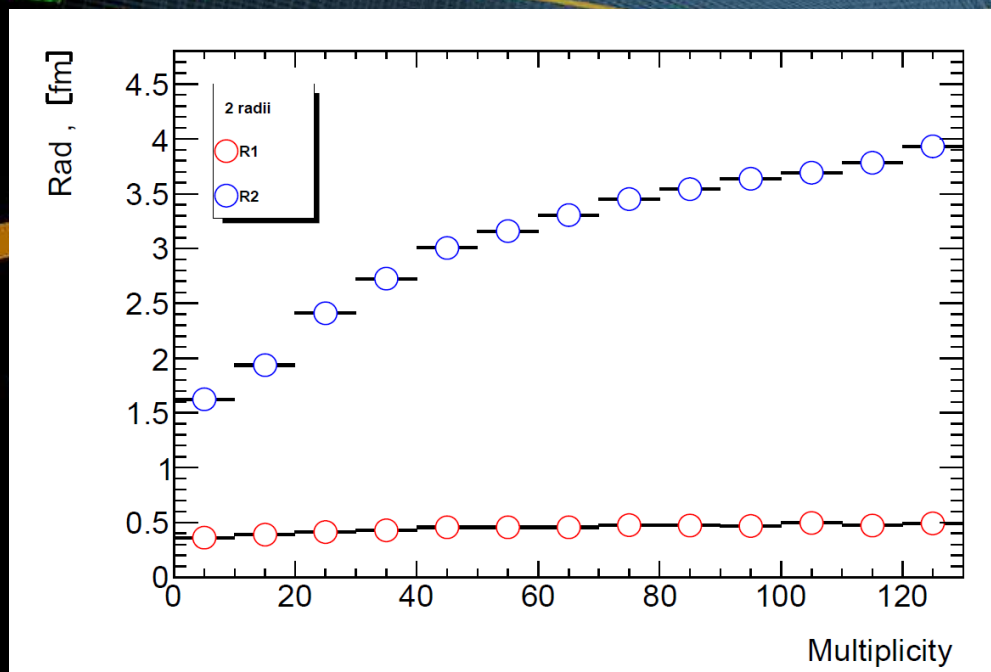
- **For ATLAS collaboration we contribute to the analysis of electron channel**





# Изучение Бозе-Эйнштейн корреляций

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



Были изучены зависимости всех параметров от множественности заряженных частиц. Показано, что аппроксимация функцией Леви заметно лучше описывает данные.

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 R1 которые распределены в области размера R2:

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

$\alpha$  - показатель стабильности Леви  
распределения,  $\lambda$  - strength of BEC.

arXiv 1804.07153v1

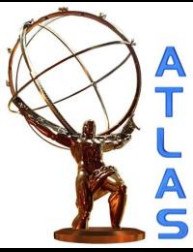
# По результатам работы в 2018 г. :

- Опубликовано в 2018 году:
  - препринты (CONF notes) 1
  - внутренних препринтов 2
  - Статей 3
- доклады на конференциях 4
- Грант РФФИ “Поиск нового тяжелого нейтрального бозона Хиггса в распаде на четыре лептона в эксперименте ATLAS”
- Защищена докторская диссертация:  
О.Л. Федин - “Измерение поляризационных угловых коэффициентов в процессах лептонного распада Z-бозона в эксперименте ATLAS на LHC”



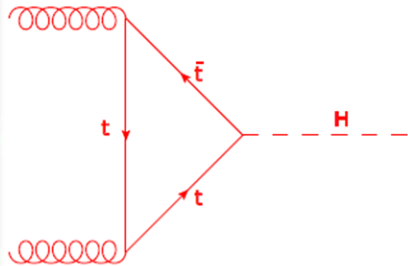
A futuristic 3D visualization of a data network. The scene is set against a black background. A large, glowing blue, cylindrical structure, resembling a data tunnel or a network core, is the central focus. It is composed of many fine, parallel lines that create a mesh-like texture. From the center of this cylinder, a dense cluster of bright yellow lines radiates outwards, connecting to various nodes and clusters of data. These nodes are represented by small, colorful rectangular blocks in shades of green, orange, and blue. Some of these blocks are larger and more prominent, while others are smaller and more numerous. The overall effect is one of a complex, interconnected digital space. The word "BACKUP" is prominently displayed in the center of the image, overlaid on the yellow lines. The text is in a bold, white, sans-serif font. Two thick, bright green lines cross the scene diagonally, one from the top right and one from the bottom right, adding to the dynamic and high-tech aesthetic.

**BACKUP**

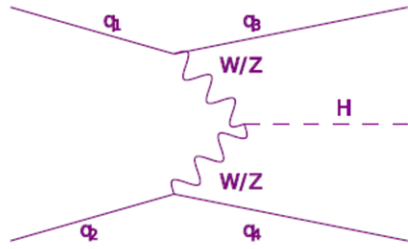


# Исследование свойств бозона Хиггса CM

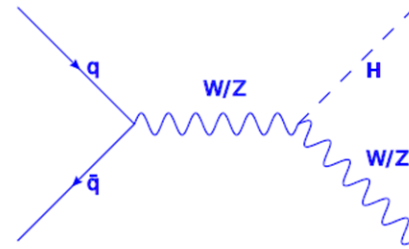
## Higgs production mechanisms



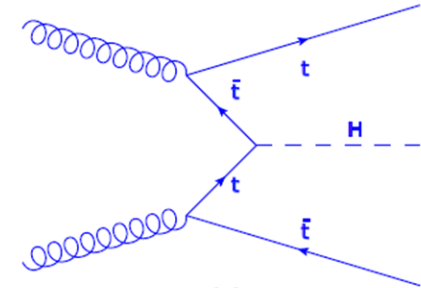
ggF  
Run 1



VBF  
Run 1 (ATLAS+CMS)  
Run 2 (ATLAS alone)

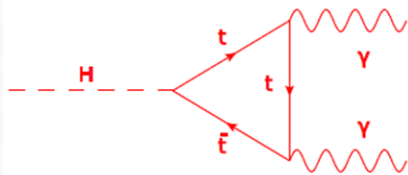


VH  
2018

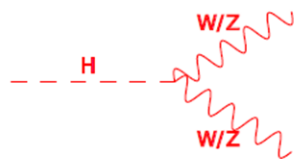


ttH  
2018

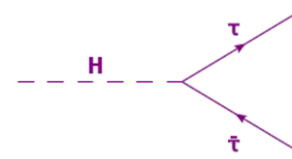
## Higgs decay modes



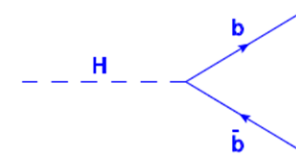
Hγγ  
Run 1



HWW/HZZ  
Run 1



Hττ  
Run 1 (ATLAS+CMS)  
2018 (ATLAS alone)

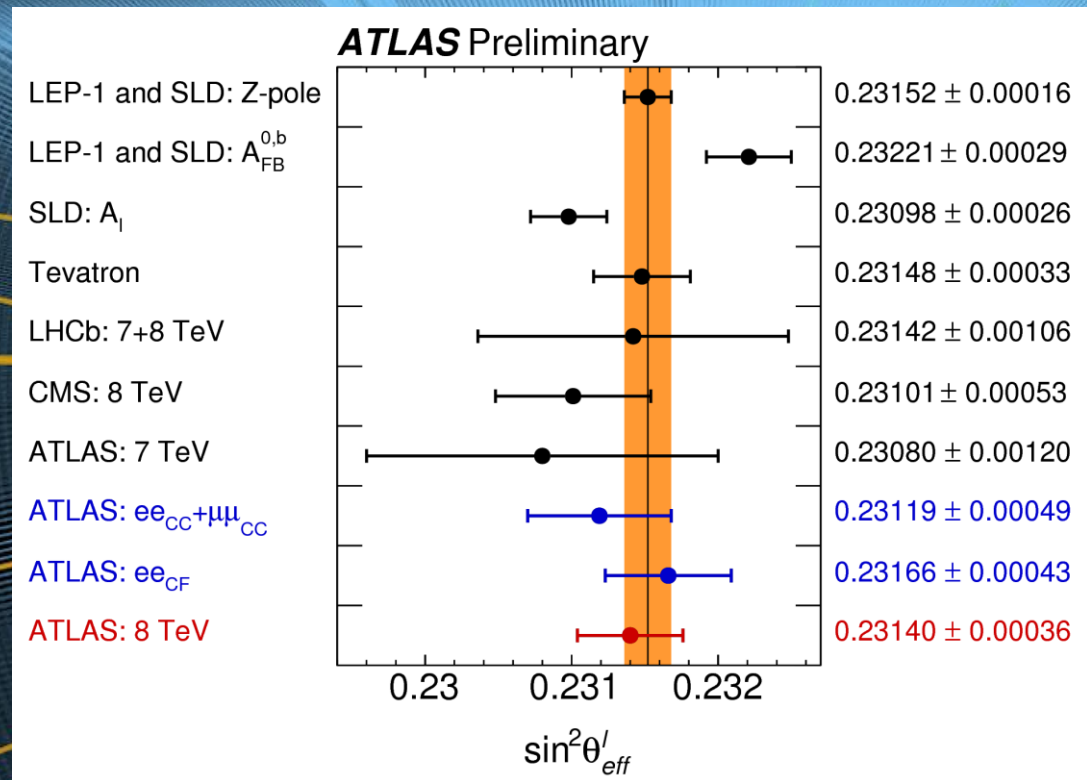


Hbb  
2018





# Измерение угла Вайнберга



ATLAS-CONF-2018-037

По данным 2012 ( $\sqrt{s}=8$  TeV) значение угла Вайнберга:  
 $0.23140 \pm 0.00021(\text{stat.}) \pm 0.00024(\text{PDF}) \pm 0.00016(\text{syst.})$

# Группа ЛАФ ПИЯФ

- Руководитель – О.Л. Федин
- **Прецизионное измерение спектра поперечного импульса Z-бозона и угловой переменной  $\phi^*$  в процессе  $Z \rightarrow \ell\ell$ :**  
А.Е. Ежилов, В.М. Соловьев, Д. Пуджа
- **Бозе-Эйнштейн корреляции:**  
В.А. Щегельский
- **Поиск частиц темной материи:**  
Ю.Г. Нарышкин, А.С. Кирьянова
- **Поиск тяжелого нейтрального бозона Хиггса и RS гравитона:**  
Ю.Г. Нарышкин , А.С. Кирьянова





# Results of ATLAS experiment (2018) CM



- Observation of  $H \rightarrow b\bar{b}$  decays and  $VH$  production with the ATLAS detector Phys. Lett. **B 786** (2018) 59
- Study of the rare decays of  $B_{0s}$  and  $B_0$  into muon pairs from data collected during 2015 and 2016 with the ATLAS detector ATLAS-CONF-2018-046
- Measurement of the  $W$ -boson mass in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV with the ATLAS detector Eur. Phys. J. **C 78** (2018) 110
- Measurement of the top quark mass in the  $t\bar{t} \rightarrow \text{lepton}+\text{jets}$  channel from  $\sqrt{s}=8$  TeV ATLAS data and combination with previous results Submitted to: Eur.Phys.J. arXiv:1810.01772
- Measurement of  $\tau$  polarisation in  $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$  decays in proton–proton collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV with the ATLAS detector Eur.Phys.J. **C78** (2018) no.2, 163

# Поиск тяжелого нейтрального бозона Хиггса: BSM Models

- **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**
- **NMSSM**: Higgs singlet is added to MSSM  $\rightarrow$  7 physics states, 5 neutral, 2 charged: CP-even  $H_1, H_2, H_3$ , CP-odd  $A_1, A_2$ , charged  $H^+, H^-$
- **HTM**: (Higgs Triplet Model): Higgs triplet is added, lead to 7 physical states:  $H^{\pm\pm}, H^\pm, A, H$  and  $h$
- **LRSM**: (Left Right Symmetric model) several variations: e.g. addition of triplet + two doublets (bi-doublet)

• ... and more ...



# Searches by ATLAS & CMS

- Neutral Heavy Higgs:  $h/H/A \rightarrow \tau\tau$ ,  $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ ,  
 $A \rightarrow Zh (Z \rightarrow \ell\ell, h \rightarrow b\bar{b} (\tau\tau))$ ,  $h/H/A \rightarrow t\bar{t} \dots$
- 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:  $H^\pm \rightarrow \tau\nu$ ,  $H^+ \rightarrow tb$ ,  $H^+ \rightarrow WZ \rightarrow 3\ell + \nu_\ell$ ,  $H^+ \rightarrow WZ \rightarrow 2\ell + 2j$   
 $H^+ \rightarrow \mu\nu$ ,  $H^+ \rightarrow Wh/WA/W\gamma$ , light  $H^+ \rightarrow cs$ ,  $cb$
- Double charged Higgs boson:  $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell^\pm\ell^\pm$ ,  $H^{++} \rightarrow WW$
- ... and more ...



# Search for a Dark Matter (WIMP ) in mono-Z (ISR) process



Вклад ЛАФ ОФВЭ в анализ:

- Оптимизация критериев отбора полезных событий
- Участие в Монте-Карло генерировании сигнальных событий
- Проверка эффективности триггеров используемых для анализа данных
- Оценка вклада фоновых процессов
- Установка верхних пределов на сечения рождения частиц темной материи.





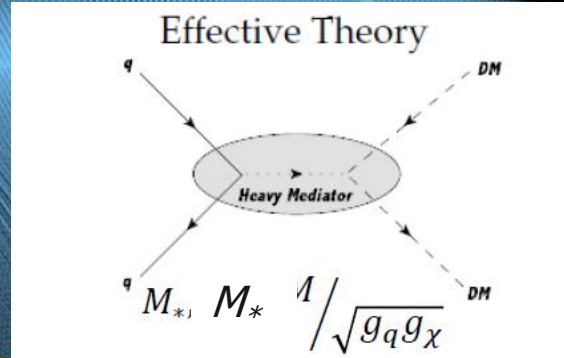
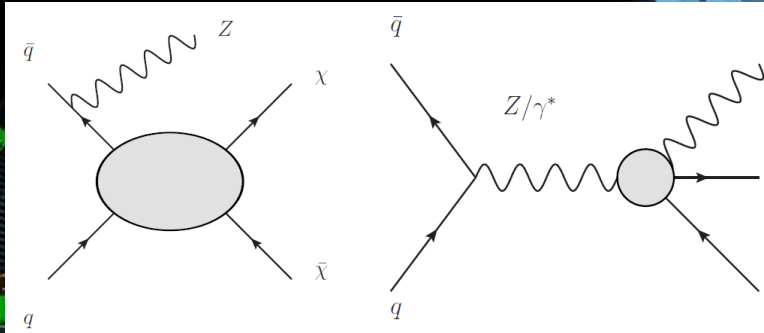
# Higgs width in off shell analysis



$$\mu_{\text{off-shell}} = \frac{\sigma_{\text{off-shell}}^{gg \rightarrow H^* \rightarrow ZZ}}{\sigma_{\text{off-shell,SM}}^{gg \rightarrow H^* \rightarrow ZZ}} = \kappa_{g,\text{off-shell}}^2 \cdot \kappa_{Z,\text{off-shell}}^2$$

$$\mu_{\text{on-shell}} = \frac{\sigma_{\text{on-shell}}^{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^*}}{\sigma_{\text{on-shell,SM}}^{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^*}} = \frac{\kappa_{g,\text{on-shell}}^2 \cdot \kappa_{Z,\text{on-shell}}^2}{\Gamma_H / \Gamma_H^{\text{SM}}}$$

# EFT: Effective Field Theory



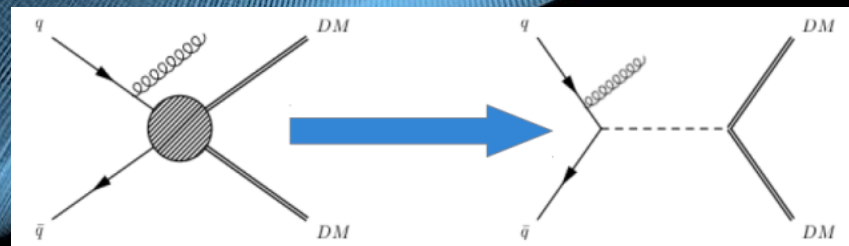
arXiv:1008.1783

Name	Operator	Coefficient
D1	$\bar{\chi}\chi\bar{q}q$	$m_q/M_*^3$
D4	$\bar{\chi}\gamma^5\chi\bar{q}\gamma^5q$	$m_q/M_*^3$
D5	$\bar{\chi}\gamma^\mu\chi\bar{q}\gamma_\mu q$	$1/M_*^2$
D8	$\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi\bar{q}\gamma_\mu\gamma^5q$	$1/M_*^2$

Частицы темной материи описываются как дираковские фермионы  
 Теория содержит 2 параметра  $M_*$ ,  $m_\chi$   
 Где  $M_*$  – характеризует силу взаимодействия и является функцией массы  
 промежуточной частицы  $M$  и констант взаимодействия  $g_q$  и  $g_\chi$

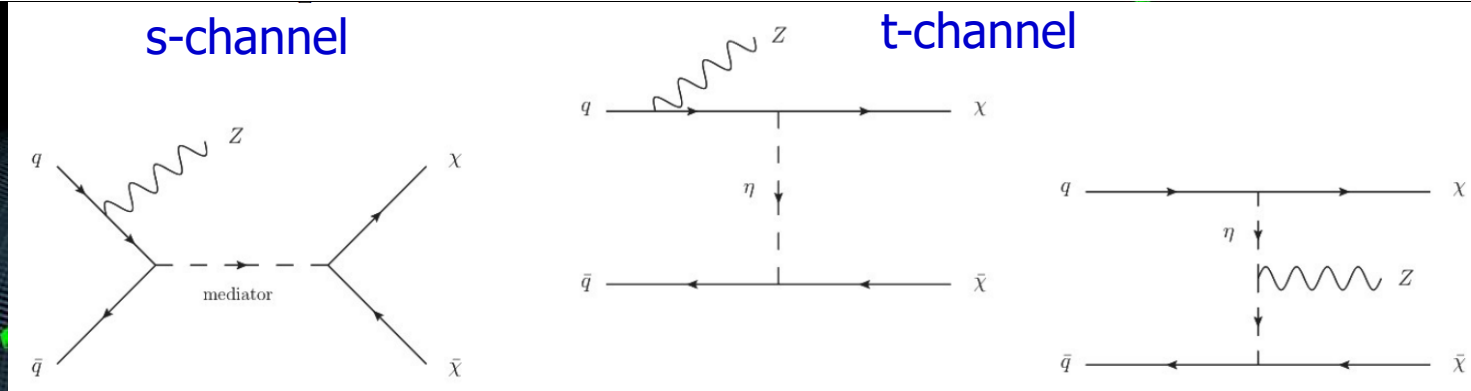
Важное условие:  $M \gg Q_{tr}$ , где  $Q_{tr}$  переданный импульс

Run I  $\rightarrow$  Run II: EFT  $\rightarrow$  Simplified models





# Simplified models



Медиаторы:

для s - канала: vector, axial,  
scalar, pseudoscalar  
для t - канала: colored scalar mediator.

Теория содержит 5 параметров:

WIMP mass:  $m_\chi$   
 Mediator mass:  $M$   
 Mediator width:  $\Gamma$   
 Coupling between the mediator and the WIMP:  $g_\chi$   
 Coupling between the mediator and the SM particle:  $g_q$

## Рекомендации DM форума:

$m_\chi$ (GeV)	$m_{\text{med}}$ (GeV)										
1	10	20	50	100	200	300	500	700	1000	2000	10000
10	10	15	50	100		300	500				10000
30	10			100		300	500	700			
50	10		50	95	200	300	500	700			10000
100				100		300	500	700			
150	10				200	295	500		1000		10000
500	10						500		995	2000	10000
1000	10								1000	1995	10000

black = recommended, bold = requested/simulated initially, red = requested/simulated later to improve limit

Моделирование проводилось  
с использованием MadGraph

Константы связи:

S-channel, vector and axial-vector case:  $g_\chi = 1.0, g_q = 0.25$   
 S-channel, scalar and pseudoscalar case:  $g_\chi = g_q = 1.0$   
 T-channel, coloured scalar case:  $g_\chi = g_q = 3.0$