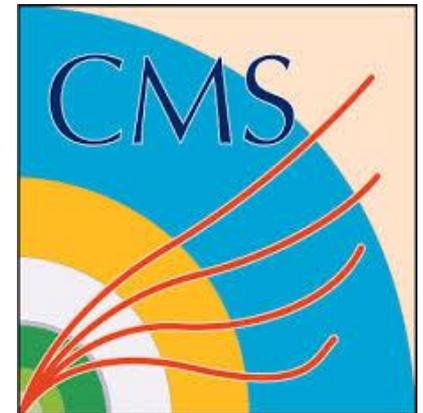


# Недавние результаты по бозону Хиггса с экспериментов на LHC



LHC

НИЦ КИ (ККТЭФ)



И.И. Цукерман,

*НИЦ “Курчатовский Институт”*

*Сессия отделения ЯФ ОФН РАН, посвященная 70-летию акад. В.А. Рубакова*

*Москва, Россия, Президиум РАН, 19.02.2025 г.*

# Содержание

- Результаты по бозону Хиггса СМ ( $H$ ) при 13.6 ТэВ  
первые измерения каналов распада  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ ,  $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Новые результаты по бозону Хиггса СМ при 13 ТэВ
  - последние измерения канала  $VH$ ,  $H \rightarrow bb$
  - последние измерения канала  $ttH$ ,  $H \rightarrow bb$
  - комбинация различных механизмов рождения и распадов
  - ограничения на сечение рождения пар бозонов Хиггса ( $HH$ )
  - небольшой намек на новую физику в  $\gamma\gamma$  при массе 95 ГэВ?
- Заключение

# $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ при $\sqrt{s}=13.6$ ТэВ

**ATLAS:** EPJ C84 (2024) 78

Измеренное сечение:  $2.8 \pm 0.7$  фб

Ожидаемое сечение:  $3.67 \pm 0.19$  фб

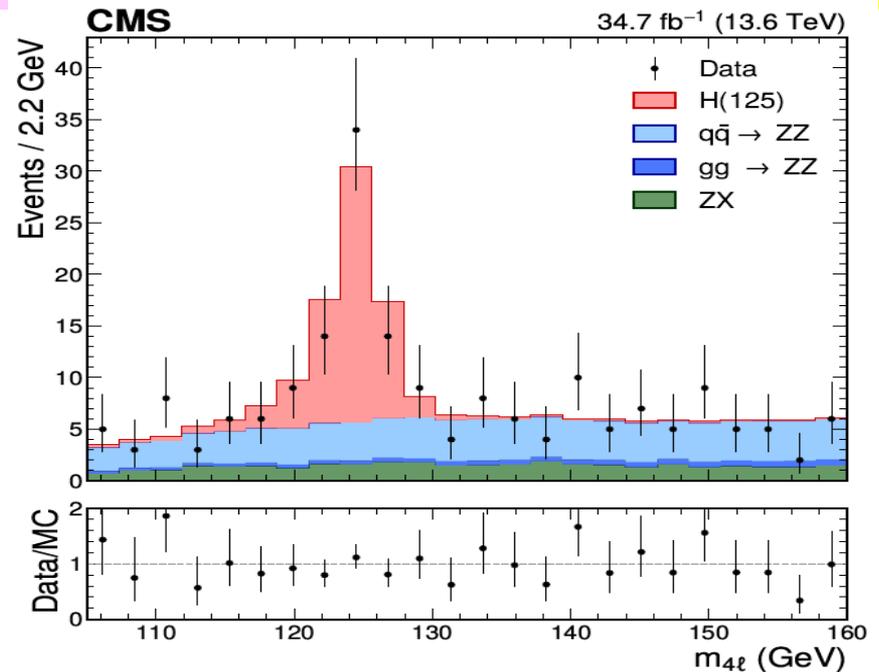
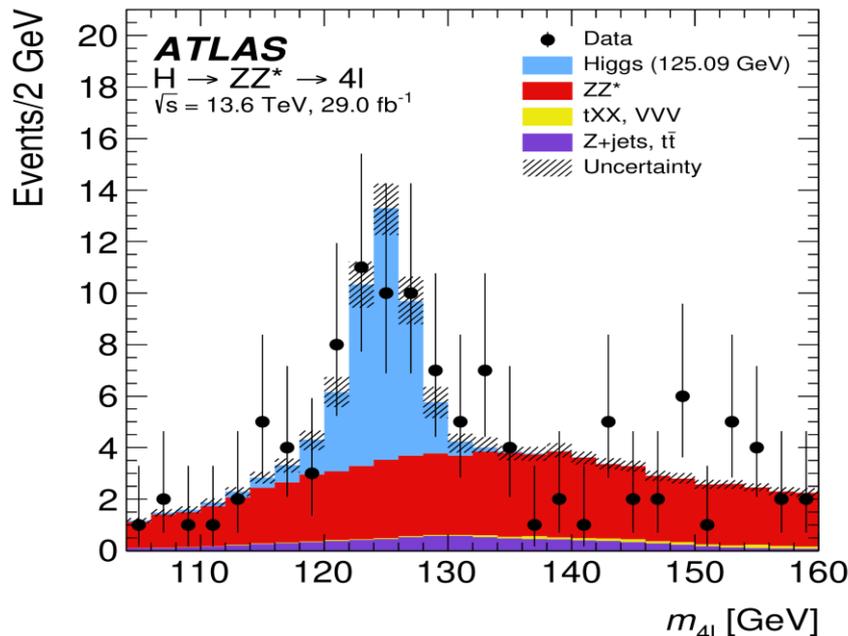
BR( $H \rightarrow 4\ell$ ) уже учтен в сечении

**CMS:** arXiv:2501.14849

Измеренное сечение:  $2.9 \pm 0.6$  фб

Ожидаемое сечение:  $3.09^{+0.27}_{-0.24}$  фб

BR( $H \rightarrow 4\ell$ ) уже учтен в сечении



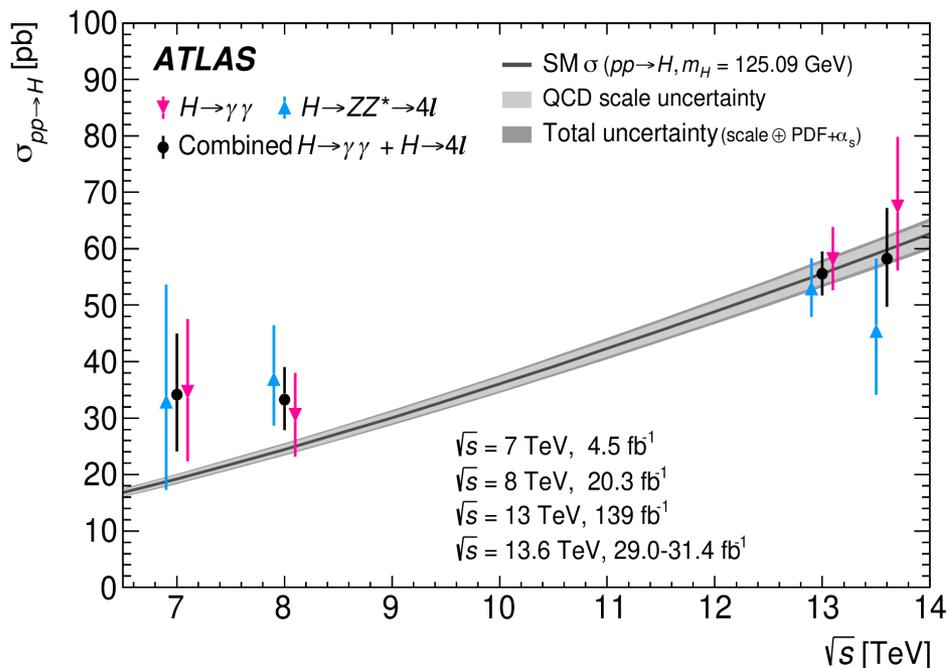
Оба эксперимента видят четкий максимум около 125 ГэВ

# Зависимость полного сечения $H$ от $\sqrt{s}$

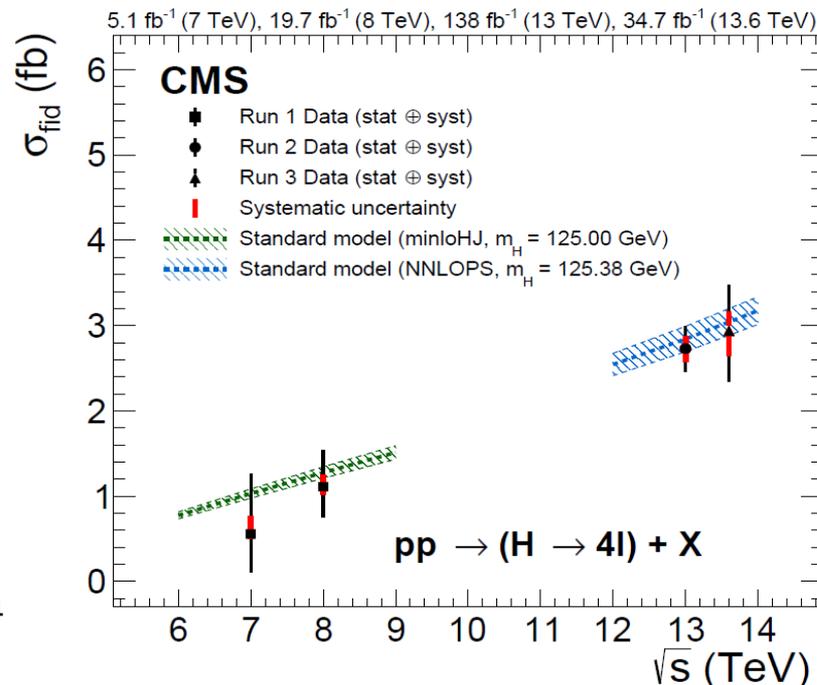
■ **ATLAS:** EPJ C84 (2024) 78

■ **CMS:** arXiv:2501.14849

Полное сечение при разных  $\sqrt{s}$



Fiducial сечение при разных  $\sqrt{s}$



Величины сечения рождения бозона Хиггса как и его зависимость от энергии в с.ц.м неплохо воспроизводятся в СМ

# $(W+Z)H, H \rightarrow bb$ при 13 ТэВ

**ATLAS:** arXiv:2410.19611

**CMS:** PR D109 (2024) 092011

$\mu = 0.92^{+0.16}_{-0.15}$  для  $VH$

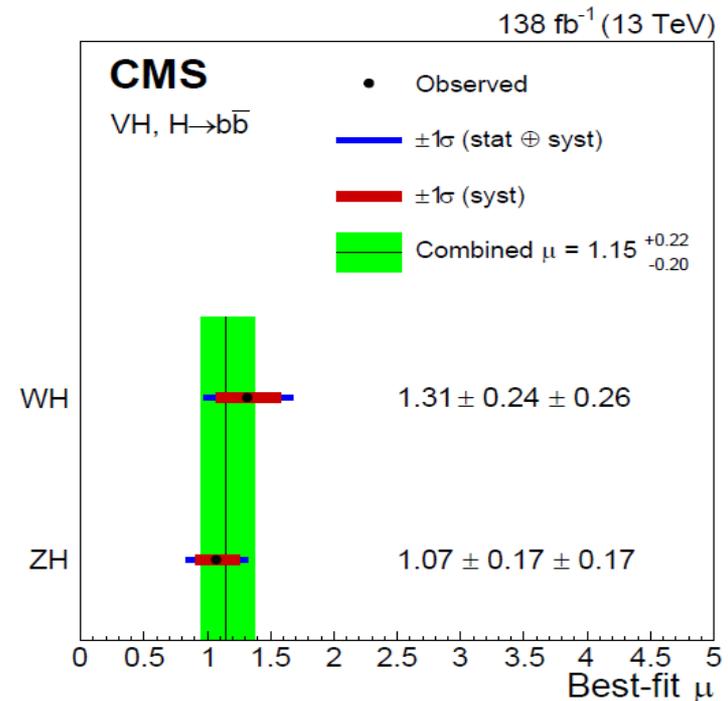
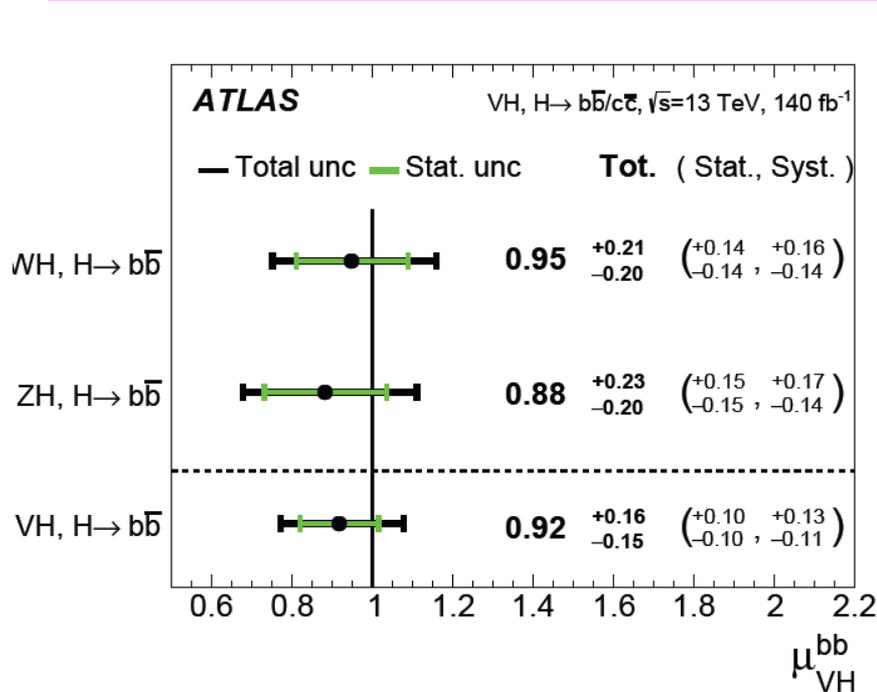
Набл. значимость:  $7.4 \sigma$  для  $VH$

Ожид. значимость:  $8.0 \sigma$  для  $VH$

$\mu = 1.15 \pm 0.21$  at 125 GeV для  $VH$

Набл. значимость:  $6.3 \sigma$  для  $VH$

Ожид. значимость:  $5.6 \sigma$  для  $VH$



Точность измерения в  $VH, H \rightarrow bb$  превышает 20% в ATLAS и CMS.  
Не наблюдается существенных отклонений от СМ.

# $ttH, H \rightarrow bb$ при 13 ТэВ

**ATLAS:** arXiv:2407.10904

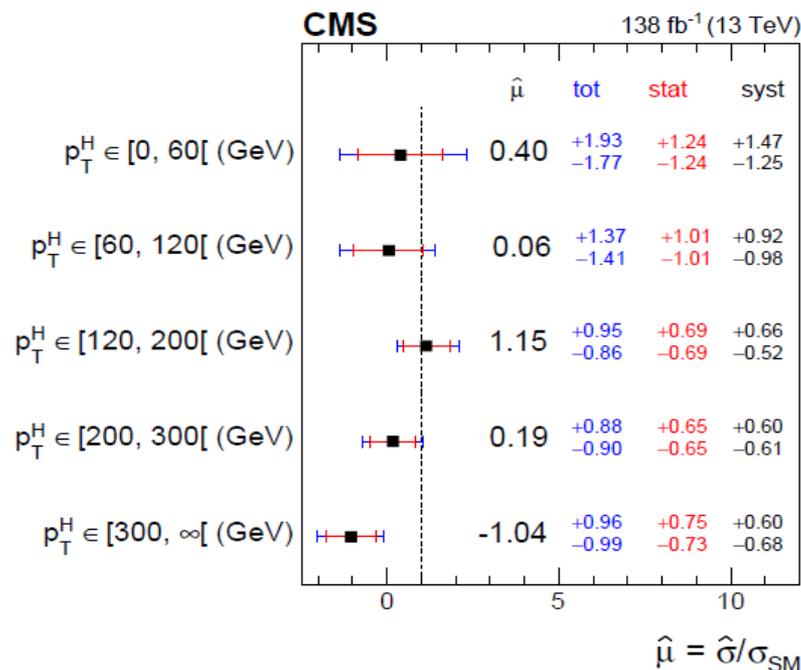
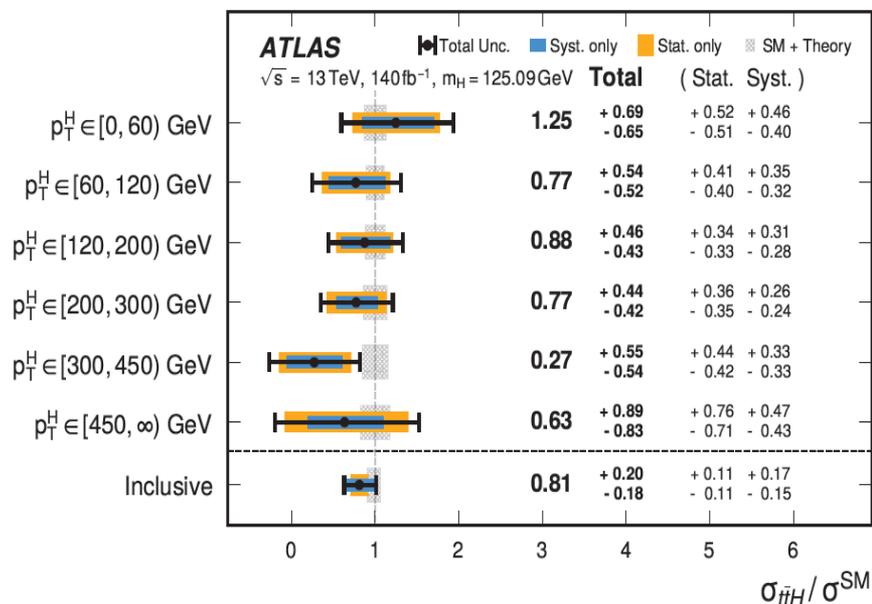
**CMS:** arXiv:2407.10896

$\mu = 0.81^{+0.22}_{-0.19}$  для  $ttH$

Набл. значимость:  $4.6 \sigma$  для  $ttH$

Ожид. значимость:  $5.4 \sigma$  для  $ttH$

$\mu = 0.33 \pm 0.26$  для  $ttH$ . Направивается проверить в Run3 этот вывод.

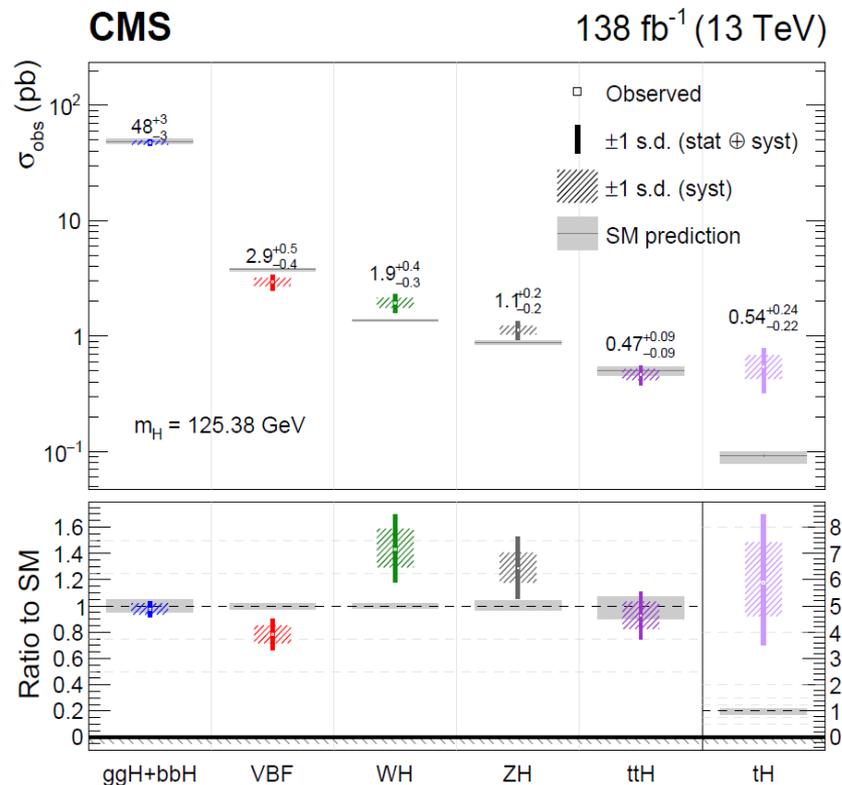
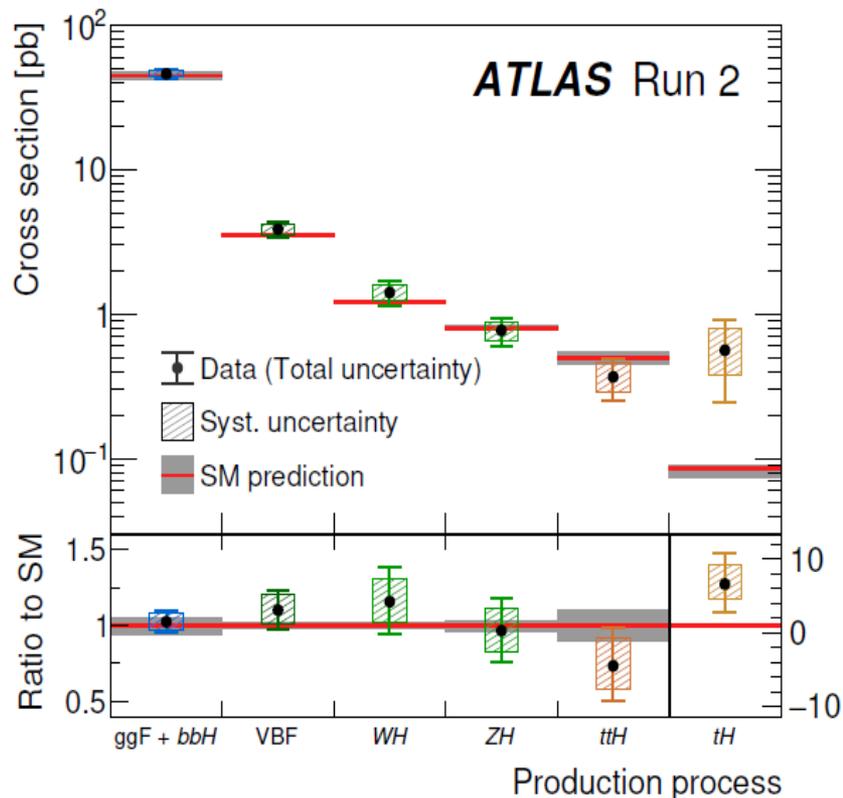


$ttH, H \rightarrow bb$  значимость - около  $5\sigma$  в ATLAS, сигнал не виден в CMS. В ATLAS нет значимого отличия от SM, в CMS - около  $2.5\sigma$  натяжка

# Суммарные результаты по $H$ -бозону при 13 ТэВ

arXiv:2404.05498

arXiv:2405.18661



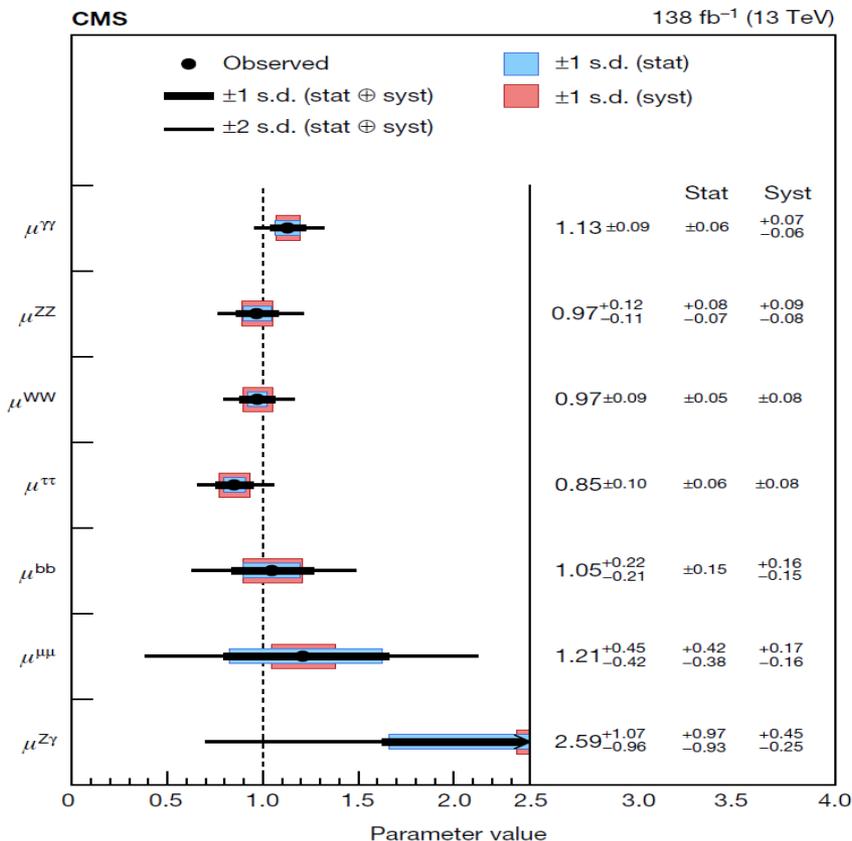
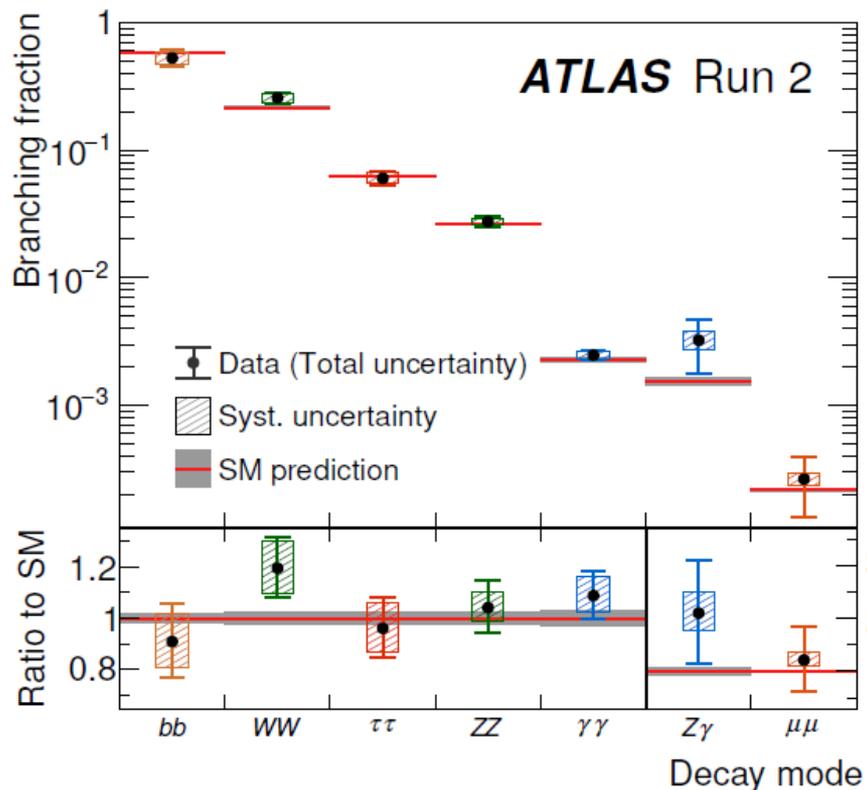
В каждом из экспериментов четко видны **5 механизмов рождения  $H$**   
Заметного отклонения от СМ нет при допущении распадов как в СМ

**Точность измерения суммарного сечения рождения - 6% в ATLAS и CMS**

# Суммарные результаты по $H$ -бозону при 13 ТэВ

ATLAS: arXiv:2404.05498

CMS: Nature 607 (2022) 60

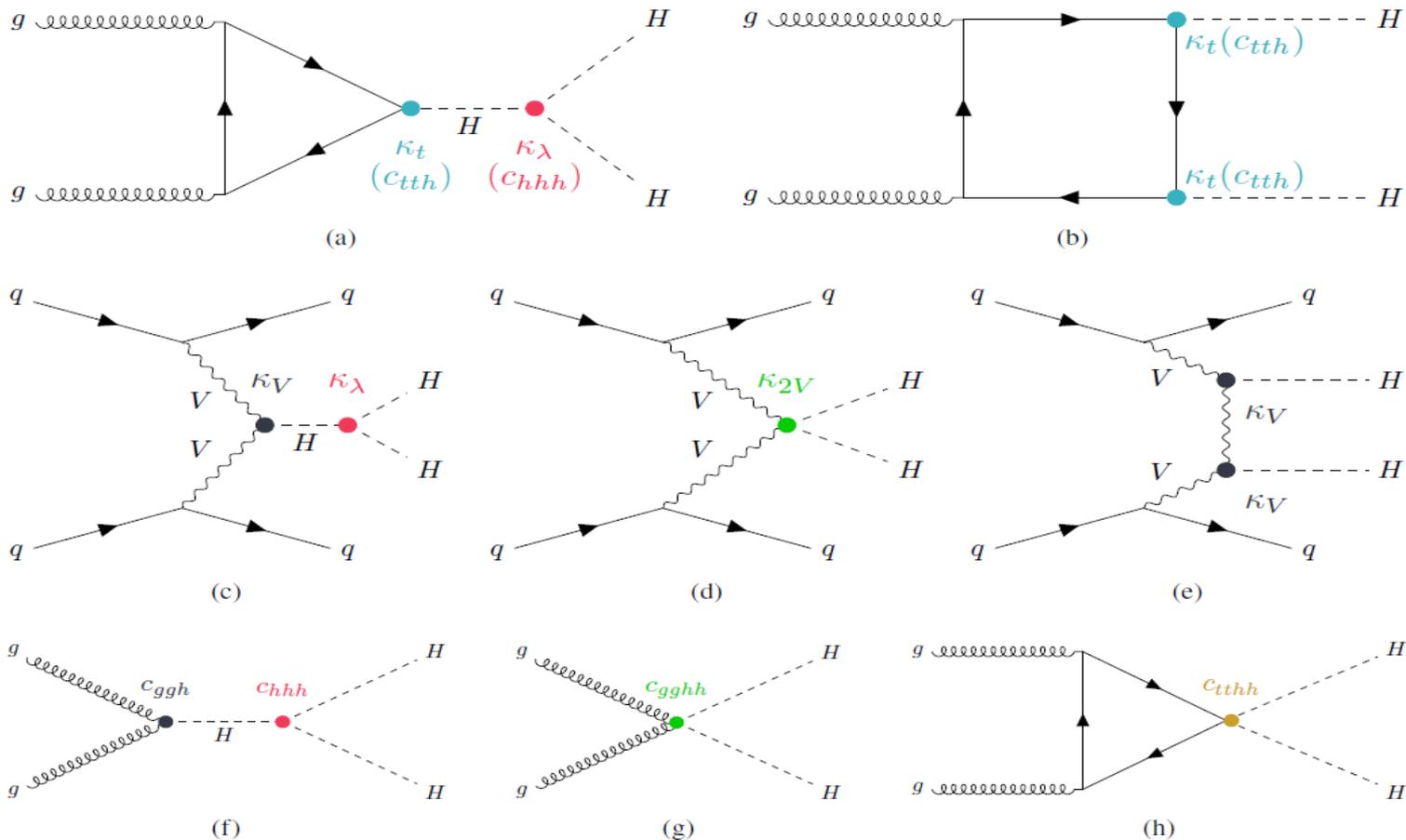


В каждом из экспериментов четко видны пять мод распада  $H$ -бозона. Заметного отклонения от СМ нет при допущении рождения  $H$  как в СМ

$$\mu (\text{ATLAS}) = 1.05 \pm 0.06$$

$$\mu (\text{CMS}) = 1.00 \pm 0.06$$

# Парное нерезонансное рождение $H$ на LHC



Показаны диаграммы  $ggF$  и  $VBF$ -рождения пар бозонов Хиггса  
Нижние диаграммы соответствуют возможным отклонениям от СМ

# Парное нерезонансное рождение $H$ на LHC: BR

$$\sigma_{\text{ggF}}^{\text{SM}}(HH) = 31.1_{-7.1}^{+1.9} (\text{scale} + m_{\text{top}}) \pm 0.9 (\text{PDF} + \alpha_s) \text{ fb}$$

$$\sigma_{\text{VBF}}^{\text{SM}}(HH) = 1.73 \pm 0.04 \text{ fb}$$

Распад	BR	Rates*	Распад	BR	Rates
<b><math>HH \rightarrow bbbb</math></b>	<b>.33</b>	<b>1.8K</b>	$HH \rightarrow \tau\tau\tau\tau$	.0040	20
$HH \rightarrow WW^* WW^*$	.047	250	$HH \rightarrow WW^* \gamma\gamma$	.0005	3
$HH \rightarrow bb WW^*$	.124	650	$HH \rightarrow \tau\tau\gamma\gamma$	.00014	0.8
<b><math>HH \rightarrow bb\tau\tau</math></b>	<b>.036</b>	<b>200</b>	<b><math>HH \rightarrow bb\gamma\gamma</math></b>	<b>.0013</b>	<b>7</b>
$HH \rightarrow WW^* \tau\tau$	.013	70	$HH \rightarrow ZZ^* \gamma\gamma$	.00006	0.3
$HH \rightarrow bb ZZ^*$	.015	80	$HH \rightarrow bb\mu\mu$	.00013	0.7
$HH \rightarrow ZZ^* WW^*$	.0058	30	$HH \rightarrow WW^* \mu\mu$	.00005	0.2
$HH \rightarrow ZZ^* \tau\tau$	.0017	9	$HH \rightarrow \tau\tau\mu\mu$	.00001	0.05
$HH \rightarrow ZZ^* ZZ^*$	.0007	4			

\* оценка числа событий, набранных в  $pp$  столкновениях для  $140 \text{ fb}^{-1}$  на LHC при 13 ТэВ в идеальном  $4\pi$  детекторе

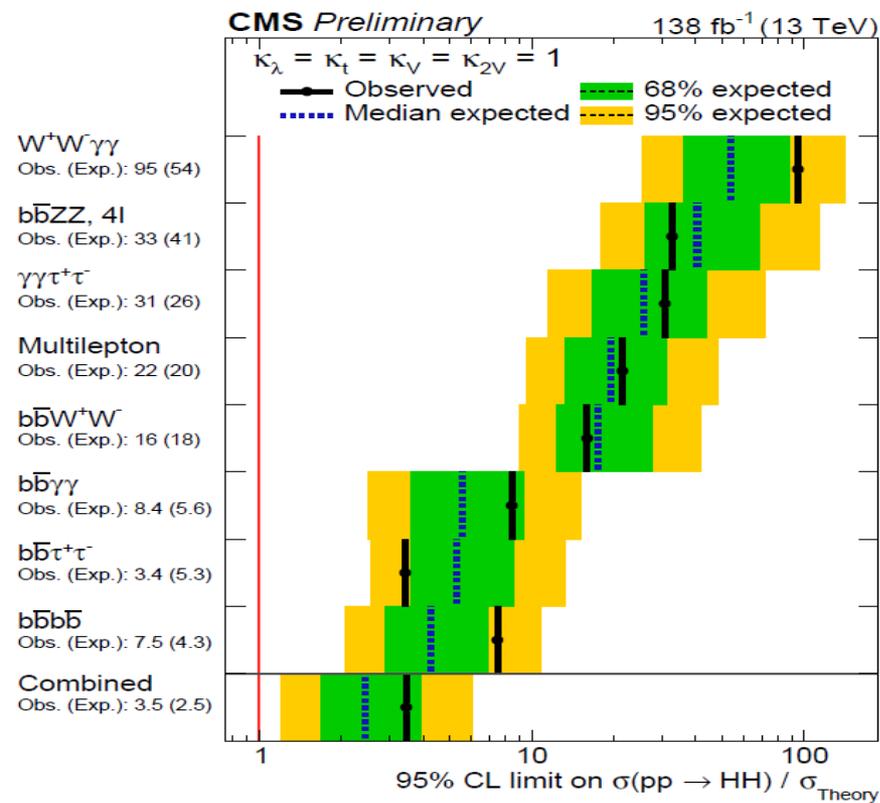
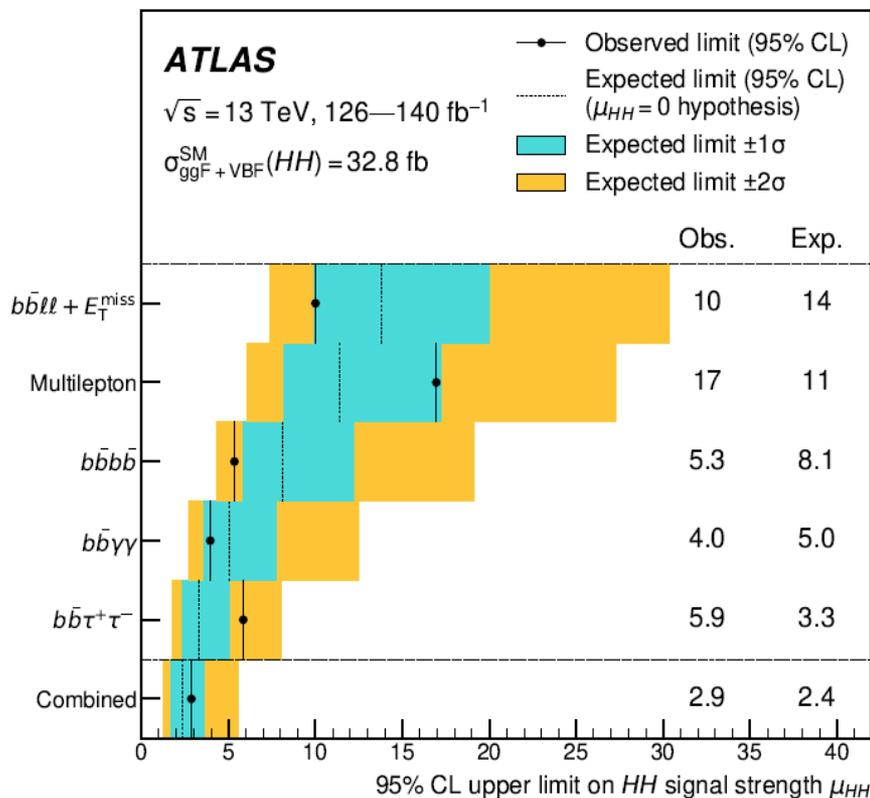
# Нерезонансное $HH$ -рождение при 13 ТэВ

**ATLAS:** arXiv:2406.09971

Набл. ограничение на 95% CL:  $2.9 \sigma/\sigma_{SM}$   
 Ожид. ограничение на 95% CL:  $2.4 \sigma/\sigma_{SM}$

**CMS:** PAS-HIG-20-011

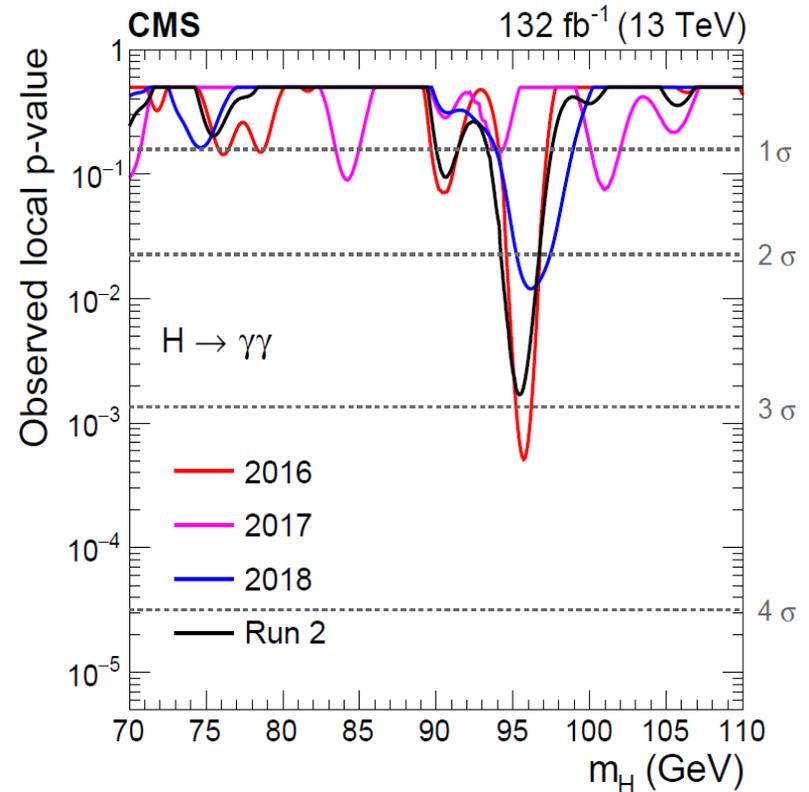
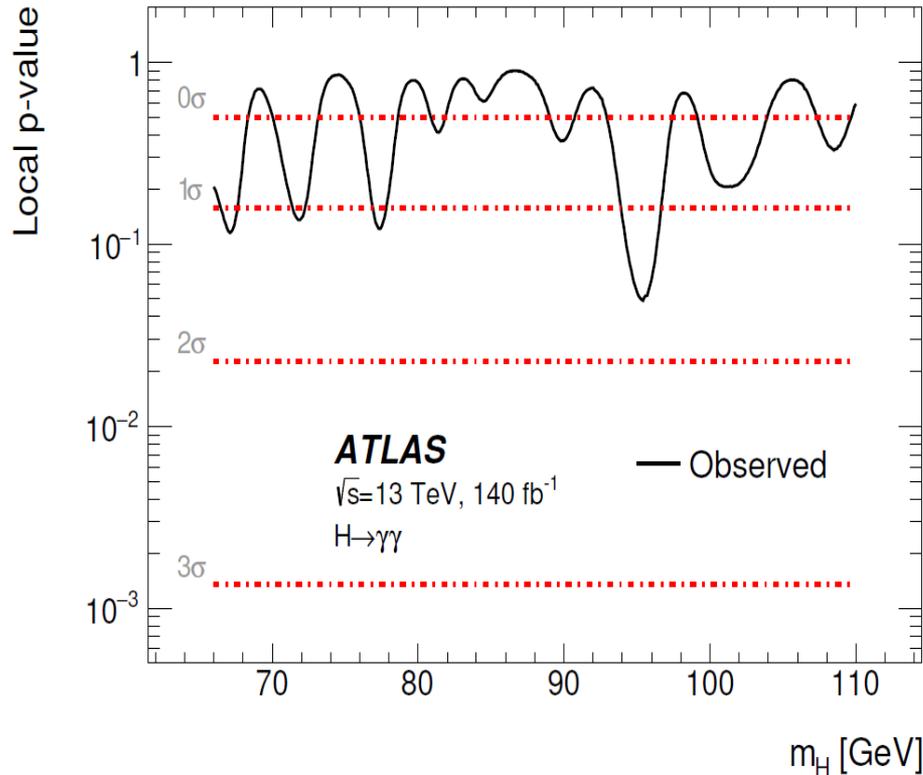
Набл. ограничение на 95% CL:  $3.5 \sigma/\sigma_{SM}$   
 Ожид. ограничение на 95% CL:  $2.5 \sigma/\sigma_{SM}$



# BSM $H \rightarrow \gamma\gamma$ в области 66/70-110 ГэВ при 13 ТэВ

**ATLAS:** arXiv:2407.07546

**CMS:** arXiv:2405.18149



И в ATLAS, и в CMS самый заметный намек на сигнал - при 95 ГэВ.  
Локальная значимость –  $\approx 1.5 \sigma$  ( $2.9 \sigma$ ) в ATLAS (CMS). Для проверки в Run3

# Заключение

**В экспериментах ATLAS и CMS на полной статистике изучены почти все основные механизмы рождения и моды распада бозона Хиггса, с точностью около 5% померено полное сечение его рождения при 13 ТэВ. Все оказалось в согласии с СМ.**

**С точностью 0,10 ГэВ измерена масса бозона Хиггса, оценена его ширина, показано, что он действительно скаляр.**

**Грубо измерены два редких распада бозона Хиггса, поставлены ограничения сверху на вероятность распада по невидимой моде и на сечение по парному рождению.**

**ATLAS и CMS улучшают точность измерений, анализируя уже набранные данные при повышенной светимости и энергии LHC с 2022 г., и готовясь к работе при сверхвысокой светимости на HL-LHC с 2030 г. по 2042 г.**

# Запасные слайды

- Бозон Хиггса в Стандартной модели
- Академик В.А. Рубаков об обнаружении бозона Хиггса
- Большой адронный коллайдер
- Ожидаемые сечения рождения и вероятности распадов бозона Хиггса
- Отступление об измеряемых сечениях на LHC
- Отступление о недавних экспериментальных обзорах по LHC
- Доп. информация об изучении распада  $H \rightarrow \gamma\gamma$  при 13.6 ТэВ
- Доп. информация об изучении распада  $H \rightarrow \tau\tau$  при 13 ТэВ
- Доп. информация об объединении разных каналов рождения и распадов  $H$
- Дифференциальные сечения рождения бозона Хиггса при 13 ТэВ
- Другие интересные результаты по бозону Хиггса
- Перспективы измерения  $H$ -бозона на HL-LHC
- Перспективы измерения констант связи  $H$  на проектируемых коллайдерах
- Механизмы рождения заряженных  $H$ -бозонов
- Детали о поисках заряженного бозона Хиггса

ATLAS public results about  $H$ : <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HiggsAndDiHiggsPublicResults>

CMS public results: <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/HIG/index.html>

# Бозон Хиггса ( $H$ ) в Стандартной Модели (СМ)

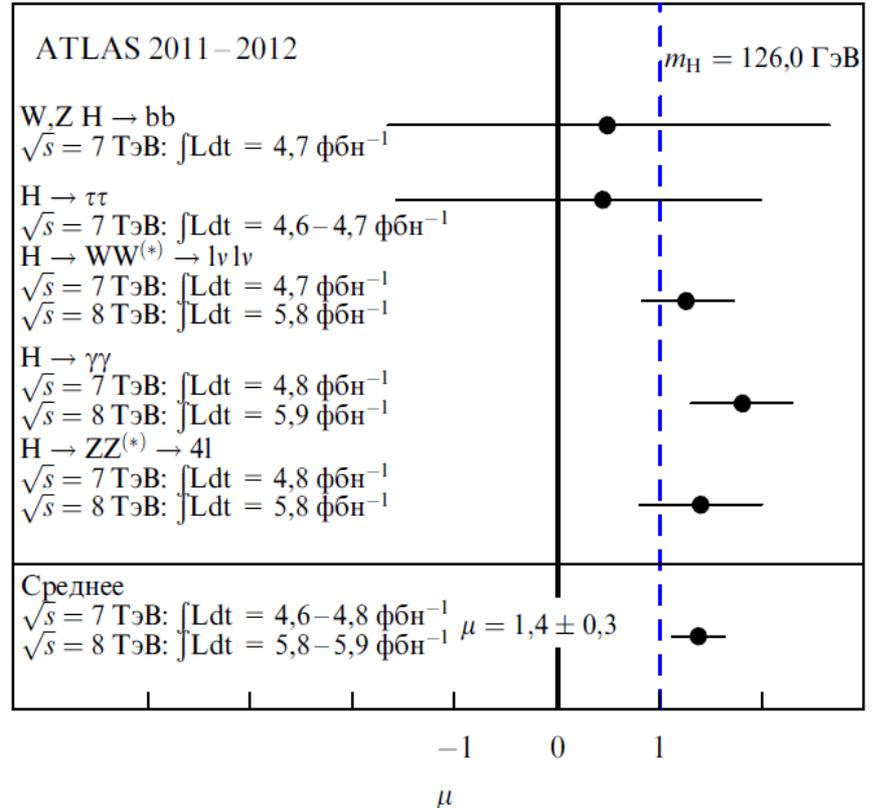
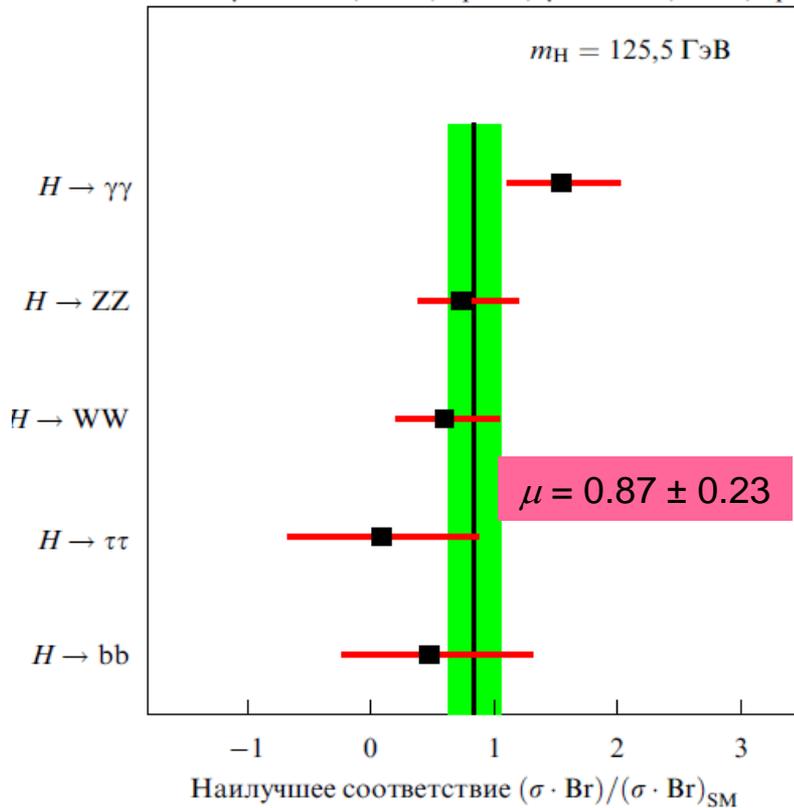
- Бозон Хиггса ( $H$ ) обеспечивает фундаментальные частицы массами
- Масса бозона Хиггса – единственный свободный параметр теории  
Из теоретических соображений (пертурбативная унитарность):  $m_H < 1 \text{ ТэВ}$
- $H$  должен иметь **квантовые числа вакуума**, т.е.  $J^P = 0^+$

## Что мы знали о бозоне Хиггса более 10 лет назад?

- $m_H > 114.4 \text{ ГэВ}$  на 95% CL, меньшие массы исключены на  $\gg 95\%$  CL  
Объединенные результаты с 4-х экспериментов LEP, PL B565 (2003) 61
- $m_H < 152 \text{ ГэВ}$  на 95% CL, предсказанная величина:  $m_H = 94^{+29}_{-24} \text{ ГэВ}$   
Из прецизионного анализа эксп. данных, <http://lepewwg.web.cern.ch>
- **Обнаружен ( $5\sigma$ ) в экспериментах ATLAS и CMS,  $m_H \approx 125 \text{ ГэВ}$**   
ATLAS: PL B716 (2012) 1, CMS: PL B716 (2012) 30; семинар в CERN 04.07.2012  
Замечание. FNAL CDF + D0 эксперименты увидели сигнал со значимостью  $\approx 3\sigma$

**Бозон Хиггса мог бы быть открыт в России, если бы проект УНК в ИФВЭ с энергией 6 ТэВ и светимостью  $10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  был реализован.**

CMS  $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}, L = 5,1 \text{ фбн}^{-1}, \sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}, L = 5,3 \text{ фбн}^{-1}$



«Особая роль новой частицы и, более широко, скалярного сектора физики элементарных частиц была сформулирована Л.Б. Окунем на международном лептон-фотонном симпозиуме в Бонне в заключительном докладе «Перспективы физики частиц: август 1981 г.»

# Большой Адронный Коллайдер (LHC)

(JINST 3 (2008) S08001)

- LHC работал с протон-протонными столкновениями при энергии  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ в 2010-2011 и при 8 ТэВ в 2012 (Run 1)
- Было 50 нс между столкновениями и 1380 банчей; с 2016 г. около 2500
- После остановки в 2013-2014 работа при энергии 13 ТэВ в 2015-2018 г. (Run 2) (25 нс между столкновениями с 09.2018)
- Многоцелевые эксперименты: **ATLAS, CMS, LHCb, ALICE**  
Также TOTEM, LHCf, MoEDAL...
- «Хорошие» данные на ATLAS и CMS:  
2011: 5 фб<sup>-1</sup>, 2012: 20 фб<sup>-1</sup>,  
2015-2018: 140 фб<sup>-1</sup>

Достигнута светимость  $3.8 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

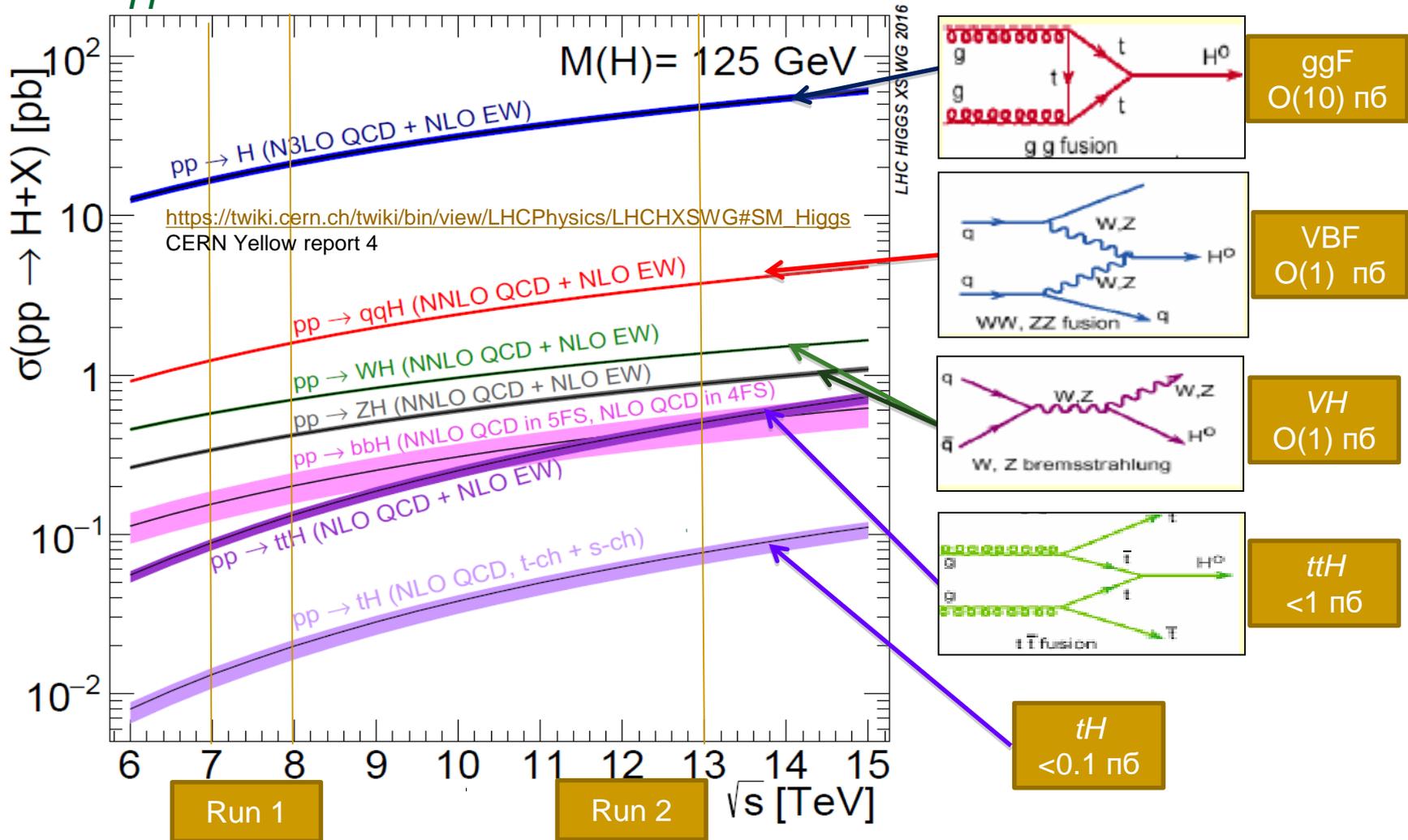
Работа при энергии 13,6 ТэВ в 2022-2026 гг.  
после трехлетней остановки в 2019-21.

**200 фб<sup>-1</sup>** данных набрано к концу 2024 г.



LHC, вид сверху

# Ожидаемое сечение рождения $H$ бозона на LHC с $m_H=125$ ГэВ в зависимости от $\sqrt{s}$



# BR каналов распада $H$

Величины для BR взяты из

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CERNYellowReportPageAt13TeV>

Распад	BR, %	Как лучше наблюдать?	13 ТэВ*	7+8 ТэВ*
$H \rightarrow bb$	$57.5 \pm 1.9$	$VH$ - и $ttH$ -рождение	$\approx 100000$	$\approx 7000$
$H \rightarrow WW^*$	$21.6 \pm 0.9$	Лептонные распады $W$	$\approx 70000$	$\approx 5000$
$H \rightarrow gg$	$8.56 \pm 0.86$	Нереально увидеть на LHC		
$H \rightarrow \tau\tau$	$6.30 \pm 0.36$	VBF или большой $p_T(H)$	$\approx 40000$	$\approx 3000$
$H \rightarrow cc$	$2.90 \pm 0.35$	Как $H \rightarrow bb$ , но сложнее	$\approx 5000$	$\approx 350$
$H \rightarrow ZZ^*$	$2.67 \pm 0.11$	Лептонные распады $Z$	$\approx 1000$	$\approx 70$
$H \rightarrow \gamma\gamma$	$0.23 \pm 0.01$	Категоризация событий	$\approx 20000$	$\approx 1400$
$H \rightarrow Z\gamma$	$0.16 \pm 0.01$	Лептонные распады $Z$	$\approx 1000$	$\approx 70$
$H \rightarrow \mu\mu$	$.022 \pm .001$	Категоризация событий	$\approx 2000$	$\approx 140$

\* оценка числа событий, набранных в  $pp$  столкновениях (для  $140 \text{ фб}^{-1}$  при 13 ТэВ,  $20 \text{ фб}^{-1}$  при 8 ТэВ и  $5 \text{ фб}^{-1}$  при 7 ТэВ) в идеальном  $4\pi$  детекторе

# Отступление об измеряемых сечениях

- Полные или дифференциальные (total or differential cross section)

$$\sigma_i = N_{\text{reco},i} / (A_i \times C_i \times L \times B)$$

$N_{\text{reco},i}$  – число восстановленных событий за вычетом фона,  $A_i$  – acceptance,  $C_i$  – поправка на эффективность установки,  $L$  - интегральная светимость (LHC),  $B$  - относительная вероятность конечного состояния (branching fraction)

- Сечения в «рабочем объеме» установки (fiducial cross section)

- Рабочий объем зависит от задачи
- Удобно для интерпретации теоретиками и позволяет сохранить измерения для потомков

$$\sigma_i \times B = N_{\text{reco},i} / (C_i \times L)$$

Нет поправки на acceptance  $A_i$  – меньшая модельная зависимость!

Формулы приводятся для иллюстрации, в реальной жизни делается сложная процедура «развертки» (unfolding) - переход от измеренных величин переменных к «истинным» (truth)

**При изучении бозона Хиггса СМ в экспериментах на LHC**

**измеряется именно  $\sigma_{\text{H}} \times B(\text{H} \rightarrow \text{X})$ , где X – конечное состояние**

# Отступление об обзорах ATLAS и CMS

Сотрудничества ATLAS и CMS опубликовали в сумме 2700(!) статей и пришли к выводу о необходимости публикации обзоров.

- 6 обзоров ATLAS (приняты в Physics Reports)

**arXiv:2404.05498 – результаты по изучению бозона Хиггса CM (13 ТэВ)**

arXiv:2403.02455 – результаты по поискам суперсимметричных частиц (13 ТэВ)

arXiv:2403.09292 – результаты по поискам экзотических частиц (13 ТэВ)

arXiv:2404.06829 – результаты по физике CM (тяжелые ароматы, EW, КХД - 13 ТэВ)

arXiv:2404.10674 – результаты по физике топ-кварков (13 ТэВ)

**arXiv:2405.04914 – результаты по поискам бозонов Хиггса вне CM (13 ТэВ)**

- 7 обзоров CMS (приняты в Physics Reports)

arXiv:2403.01313 – результаты по измерению массы топ-кварка

arXiv:2403.02455 – результаты по рождению бозона Хиггса CM через резонансы

arXiv:2403.16134 – data scouting and parking

arXiv:2405.10785 – результаты по тяжелым ионам (КХД)

arXiv:2405.13778 – результаты поиска темной материи

arXiv:2405.17605 – результаты поиска экзотики (векторные частицы и HNL)

**arXiv:2405.18661 – изучение CM (от полного сечения до бозона Хиггса CM)**

Совместные результаты ATLAS/CMS есть только по топу (LHCTopWG)

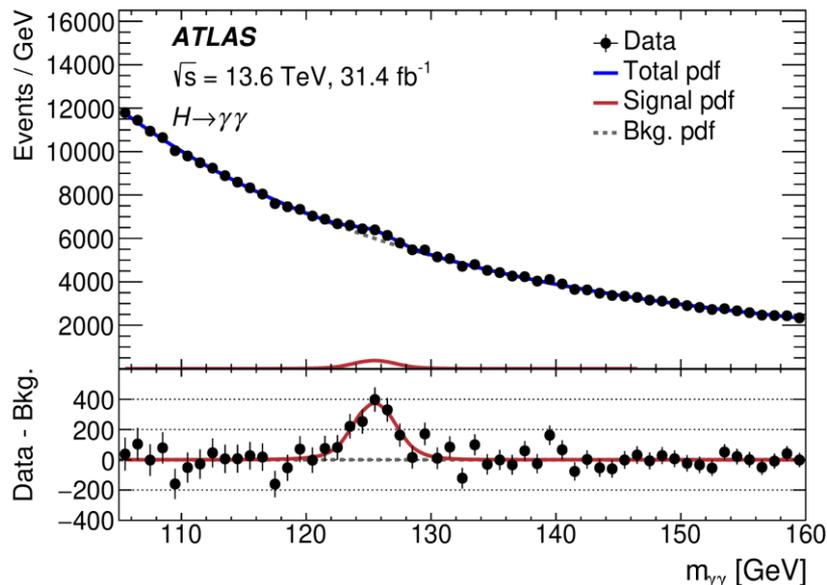
# $H \rightarrow \gamma\gamma$ при $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ

## ■ ATLAS: EPJ C84 (2024) 78

Измеренное сечение:  $76 \pm 14$  фб

Ожидаемое сечение:  $68 \pm 4$  фб

BR( $H \rightarrow \gamma\gamma$ ) уже учтен в сечении

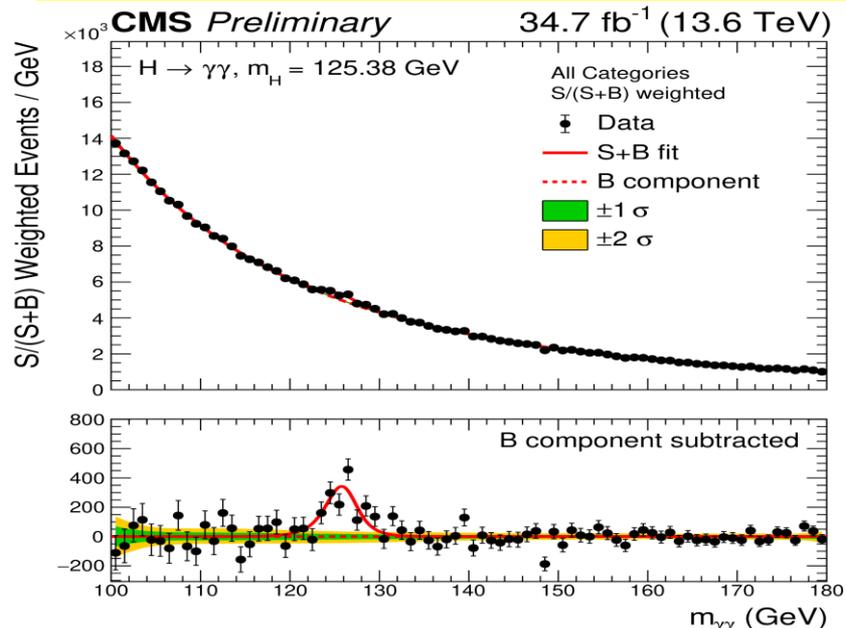


## ■ CMS: PAS-HIG-23-014

Измеренное сечение:  $78 \pm 13$  фб

Ожидаемое сечение:  $68 \pm 4$  фб

BR( $H \rightarrow \gamma\gamma$ ) уже учтен в сечении

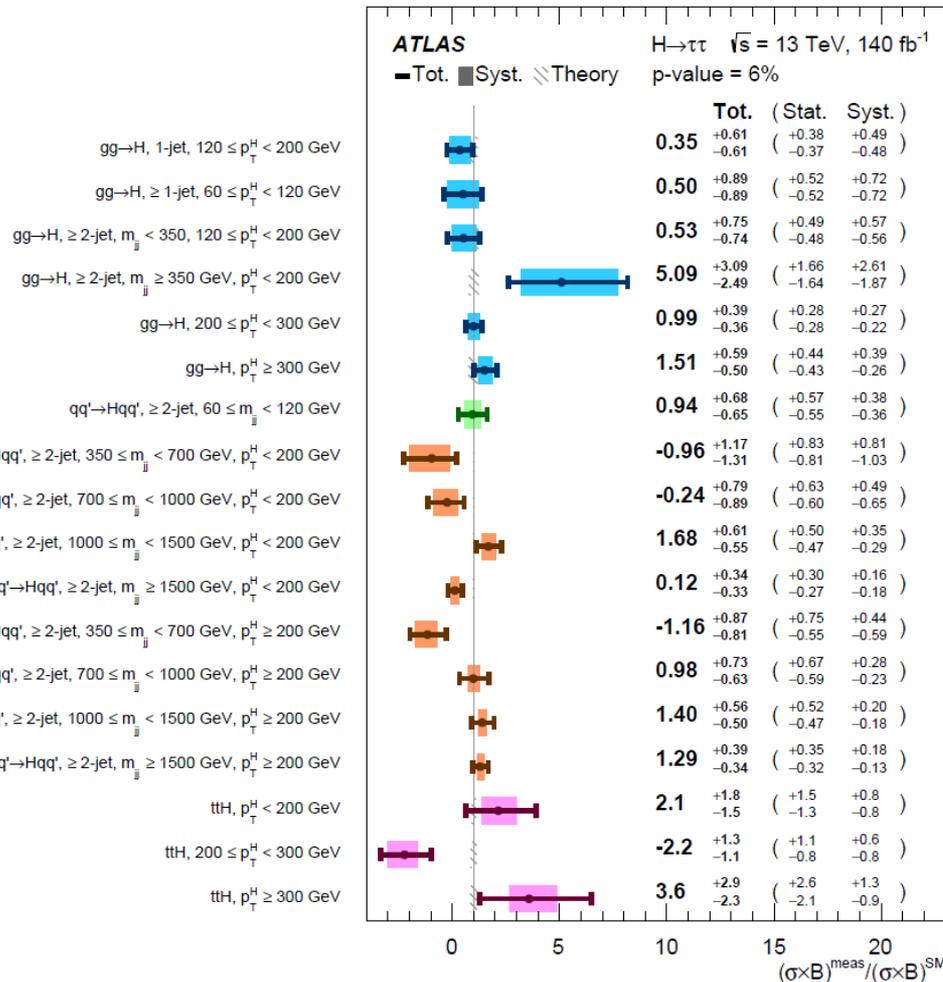
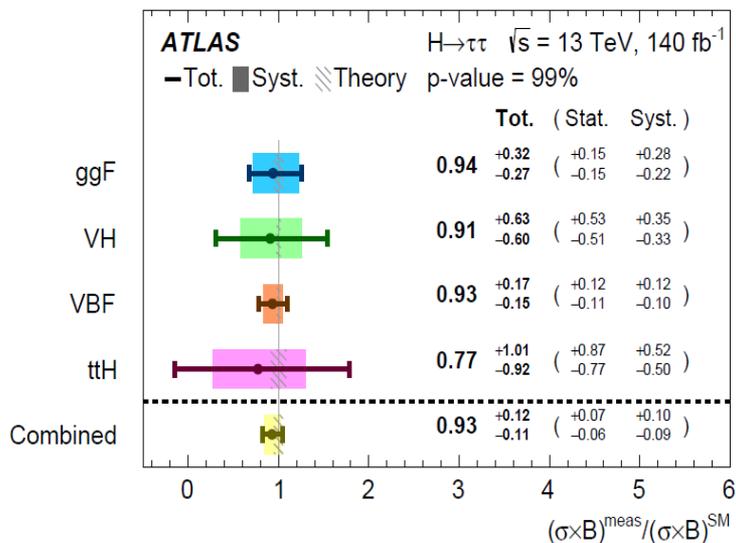


Виден большой избыток событий над фоном при 125 ГэВ

# $H \rightarrow \tau\tau$ при 13 ТэВ в ATLAS

arXiv:2407.16320

В предыдущей статье ATLAS (JHEP 2208 (2022) 175) точность измерения сечения составляла 14%. В новом отчете также представлены дифференциальные сечения



Сечение в распаде  $H \rightarrow \tau\tau$  измерено с точностью 13%, аналогичная точность была ранее достигнута в эксперименте CMS (EPJC 83 (2023) 562)

# Комбинированный анализ рождения/распадов $H$

arXiv:1606.02266

- “Сила сигнала”  
 $\sigma_i$  ( $i = ggF, VBF, WH, ZH, ttH$ )  
 $B^f$  ( $f = ZZ, WW, \gamma\gamma, \tau\tau, bb, \mu\mu$ )  
$$\mu_i = \frac{\sigma_i}{(\sigma_i)_{SM}} \quad \text{and} \quad \mu^f = \frac{B^f}{(B^f)_{SM}}$$
$$\mu_i^f = \frac{\sigma_i \cdot B^f}{(\sigma_i)_{SM} \cdot (B^f)_{SM}} = \mu_i \cdot \mu^f$$

- «Модификаторы» констант связи (LO)

$$\kappa_j^2 = \sigma_j / \sigma_j^{SM} \quad \text{or} \quad \kappa_j^2 = \Gamma^j / \Gamma_{SM}^j \quad \sigma_i \cdot B^f = \frac{\sigma_i(\vec{k}) \cdot \Gamma^f(\vec{k})}{\Gamma_H}$$

Указанная факторизация возможна при допущении малости  $\Gamma_H$

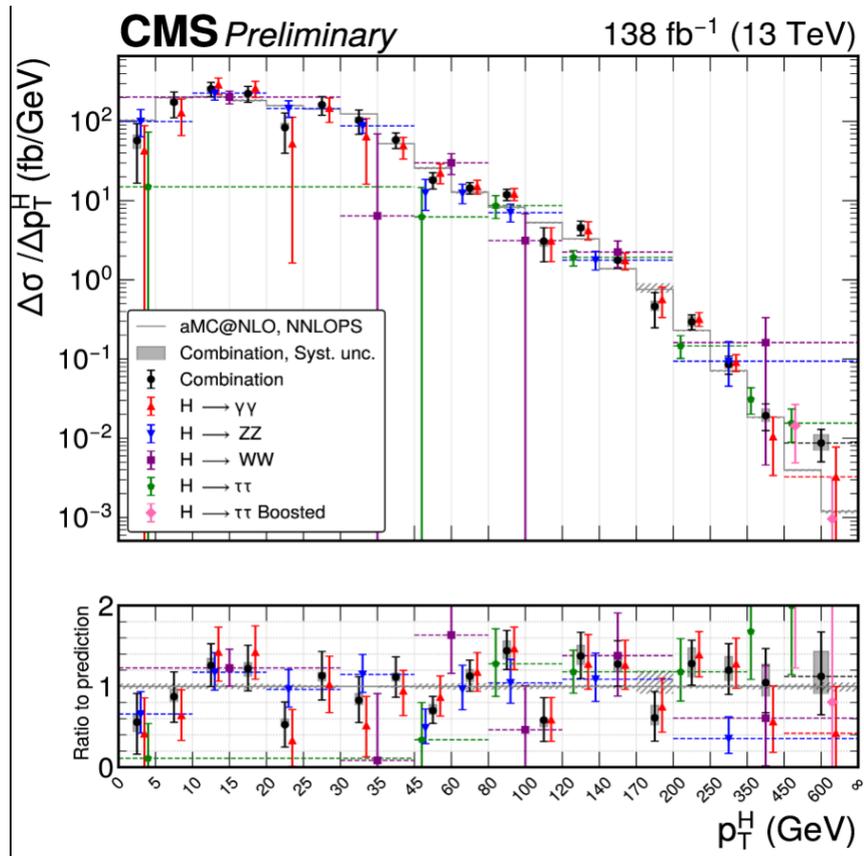
$$\Gamma_H = \frac{\kappa_H^2 \cdot \Gamma_H^{SM}}{1 - B_{BSM}} \quad \text{При отсутствии распадов вне SM формула такова} \quad \kappa_H^2 = \Gamma_H / \Gamma_H^{SM}$$

По определению 
$$\kappa_H^2 = \sum_j B_{SM}^j \kappa_j^2$$

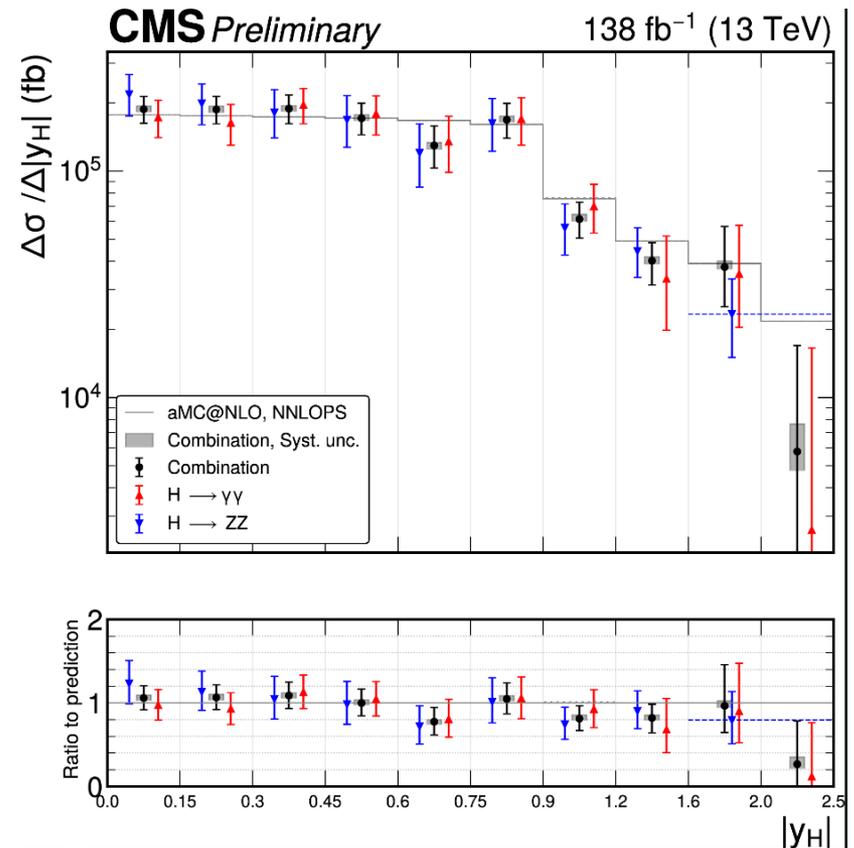
- Делается и более сложный анализ в рамках SMEFT

Подробности для всех возможных вариантов коллайдеров: [arXiv:2206.08326v5](https://arxiv.org/abs/2206.08326v5)

## Поперечный импульс $H$ -бозона



## Быстрота $H$ -бозона



Объединены от двух до четырех мод распада  $H$ -бозона.  
Заметного отклонения от СМ не наблюдается

# Другие новые результаты по $H$ -бозону-1

- Улучшенные измерения ширины и массы  $H$ -бозона (off-shell  $H \rightarrow ZZ^*$ )  
ATLAS (arXiv:2412.01548):  $\Gamma_H = 4.3^{+2.7}_{-1.9}$  МэВ,  $m_H$  здесь не измеряли  
CMS (arXiv:2409.13663):  $\Gamma_H = 3.0^{+2.0}_{-1.5}$  МэВ,  $m_H = 125.04 \pm 0.12$  ГэВ
- Ограничения сверху на сечение рождения  $H \rightarrow c\bar{c}$   
ATLAS,  $VH$  (arXiv:2410.19611):  $11.5$  (10.6)  $\sigma_{\text{CM}}$  на 95% CL  
CMS,  $VH$  (PRL 131 (2023) 061801):  $14$  (7.6)  $\sigma_{\text{CM}}$  на 95% CL
- Верхние пределы на BR экзотических распадов бозона Хиггса  
ATLAS,  $H \rightarrow ZX$  (arXiv:2411.16361):  
CMS,  $H \rightarrow (c\bar{c})X$  (arXiv:2411.15000):
- Пределы на аномальные константы связи  $H$ -бозона в CMS  
 $H \rightarrow WW^*$  (arXiv:2403.00657): константы связи  $HVV$  и  $Hgg$
- Ограничения сверху на сечения рождения ggF и VBF  $H \rightarrow b\bar{b}$  в CMS  
(arXiv:2407.08012): бозон Хиггса с большим  $p_T$

# Другие новые результаты по $H$ -бозону-2

- Канал распада  $H \rightarrow \tau\tau$   
ATLAS (arXiv:2312.02394):  $4.5 \sigma$  ( $3.5 \sigma$ ) значимость для  $VH$ -рождения  
CMS (arXiv:2403.20201):  $3.5 \sigma$  ( $2.2 \sigma$ ) значимость для случая больших  $p_T$
- Детали рождения в канале  $WH$ ,  $H \rightarrow bb$   
ATLAS (arXiv:2402.00426):  
CMS (arXiv:2405.16566, arXiv:2411.16907)
- Верхний предел на сечение в механизме рождения  $bbH$  в CMS  
 $H \rightarrow WW^*$  и  $H \rightarrow \tau\tau$  (arXiv:2408.01344):  $3.7$  ( $6.1$ )  $\sigma_{\text{SM}}$
- Интерпретация комбинации рождения и распадов  $H$  в ATLAS  
(arXiv:2402.05742): SMEFT- и  $\kappa$ -формализмы, пределы на 2HDM и MSSM
- Пределы на константу самодействия бозона Хиггса в CMS  
Комбинация  $H/HH$ -рождения (arXiv:2407.13554):  $-2.0 < \kappa_\lambda < 7.7$  в единицах SM
- Дифф. сечения в  $ttH$ -рождении в CMS  
 $H \rightarrow WW^*$  и  $H \rightarrow \tau\tau$  (PAS-HIG-23-015): сравнение с SM

# Перспективы ATLAS и CMS по $H$ -бозону

Подробности - <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1902/1902.10229.pdf>, Part 3

- 2022-2026: Run 3 при 13.6 ТэВ с целью иметь  $\approx 300 \text{ фб}^{-1}$   
Измерения констант связи в пяти каналах распада с точностью около 10%  
Ожидаемая точность около 40% для  $\mu\mu$  and  $Z\gamma$  распадов  $H$ -бозона.  
(Наблюдение рождения нестандартного бозона Хиггса?)
- 2027-2030: Фаза 2 модернизации LHC/ATLAS+CMS  
High Luminosity (HL)-LHC, проект довольно успешно реализуется  
ATLAS и CMS должны будут работать при светимостях до  $7 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
- 2030-2042: Runs 4-5 при 14 ТэВ(?) с целью набрать  $\approx 3000 \text{ фб}^{-1}$   
20% точность в распадах  $\mu\mu$  and  $Z\gamma$ , попытка увидеть  $H \rightarrow J/\psi\gamma, Y\gamma$   
Попытка увидеть распад  $H \rightarrow c\bar{c}$

Наблюдение  $HH$  при объединении нескольких каналов распада,  
грубое измерение константы связи  $HHH$   
(CMS: Nature 607 (2022) 60, ATLAS: ATL-PHYS-PUB-2022-005)

# H –бозон на проектируемых коллайдерах

- CDR по HE-LHC, FCC-ee/ep/pp на веб–странице CERN <https://fcc-cdr.web.cern.ch/> четыре тома, посвященных этому
- HE-LHC (27 ТэВ, 15 аб<sup>-1</sup>): точность 15% для HHH, первое наблюдение распада  $H \rightarrow c\bar{c}$ . 1 аб<sup>-1</sup> = 1000 фб<sup>-1</sup>
- FCC-ee (при разных энергиях:  $m_Z$ ,  $2m_W$ ,  $2m_t$ ... несколько аб<sup>-1</sup>)  
Может работать параллельно с HE-LHC, отдельное 100-км кольцо
- FCC-hh (100 ТэВ, 20 аб<sup>-1</sup>)  
Вдобавок к FCC-ee:  $t\bar{t}H$ , точные измерения  $H \rightarrow \mu\mu$ ,  $H \rightarrow Z\gamma$ , HHH  
Работа после FCC-ee в его кольце по аналогии с LHC после LEP
- Линейные ee-коллайдеры ILC и CLIC с энергией  $\sqrt{s} > 1$  ТэВ?  
Интересная заметка об их неконкурентности с FCC-ee: arXiv:2412.13130
- Мюонные коллайдеры с возможностью работы при  $\sqrt{s} = 125$  ГэВ?

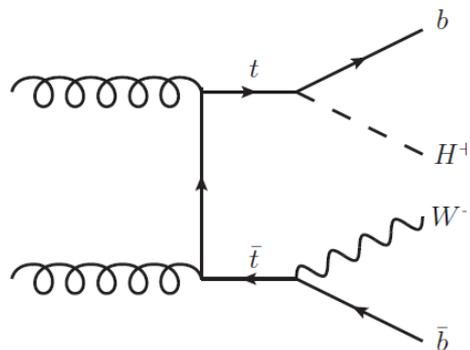
**Проект, аналогичный FCC (CEPC) в Китае** <http://arxiv.org/pdf/arXiv:1809.00285>

# Ожидаемая точность на HL-LHC в %

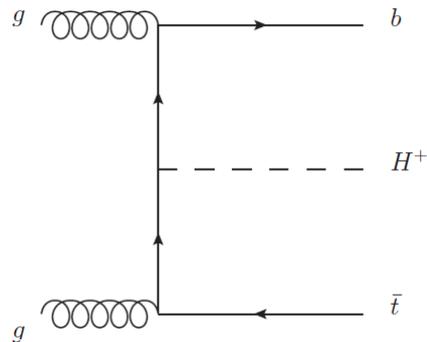
arXiv:2206.08326v5

HL-LHC	3 ab <sup>-1</sup> ATLAS+CMS				
Prod.	<i>ggH</i>	VBF	<i>WH</i>	<i>ZH</i>	<i>ttH</i>
$\sigma$	-	-	-	-	-
$\sigma \times BR_{bb}$	19.1	-	8.3	4.6	10.7
$\sigma \times BR_{cc}$	-	-	-	-	-
$\sigma \times BR_{gg}$	-	-	-	-	-
$\sigma \times BR_{ZZ}$	2.5	9.5	32.1	58.3	15.2
$\sigma \times BR_{WW}$	2.5	5.5	9.9	12.8	6.6
$\sigma \times BR_{\tau\tau}$	4.5	3.9	-	-	10.2
$\sigma \times BR_{\gamma\gamma}$	2.5	7.9	9.9	13.2	5.9
$\sigma \times BR_{\gamma Z}$	24.4	51.2	-	-	-
$\sigma \times BR_{\mu\mu}$	11.1	30.7	-	-	-
$\sigma \times BR_{inv.}$	-	2.5	-	-	-
$\Delta m_H$	10-20 MeV	-	-	-	-

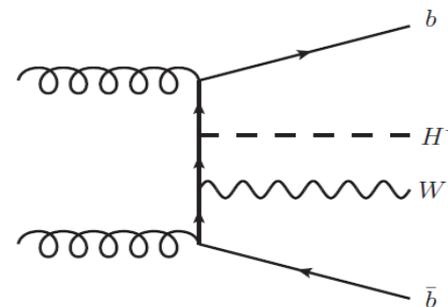
# Механизмы рождения $H^\pm$ -бозонов



Рождение **легкого** заряженного бозона Хиггса в распадах топ-кварков



Рождение **тяжелого** заряженного бозона Хиггса вместе с b- и топ-кварками



Рождение заряженного бозона Хиггса вместе с W и b-кварками

В рамках моделей типа 2HDM предсказываются распады  $H^\pm \rightarrow \tau\nu$  и  $H^\pm \rightarrow cs$ , а в рамках более сложных 3HDM-моделей – еще и распад  $H^\pm \rightarrow cb$ . Есть и бозонные моды распада, но новых результатов по ним нет.

$$H^\pm \rightarrow \tau\nu$$

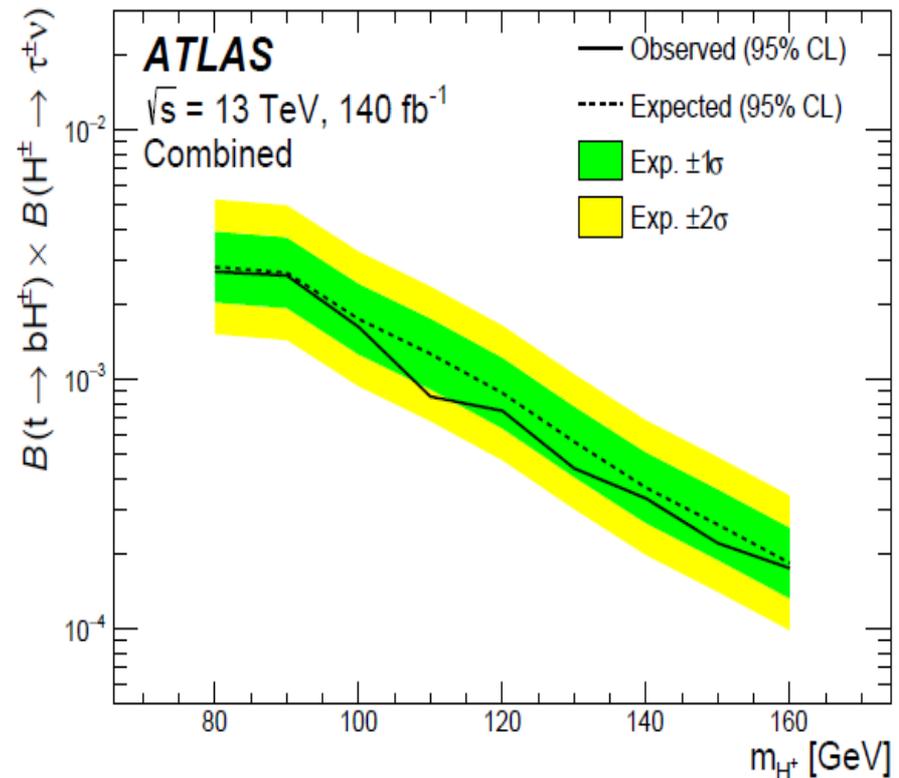
Конечное состояние:  
1 тау-лептон с адронным  
распадом и один легкий  
лептон

Многомерный анализ для  
подавления фонов

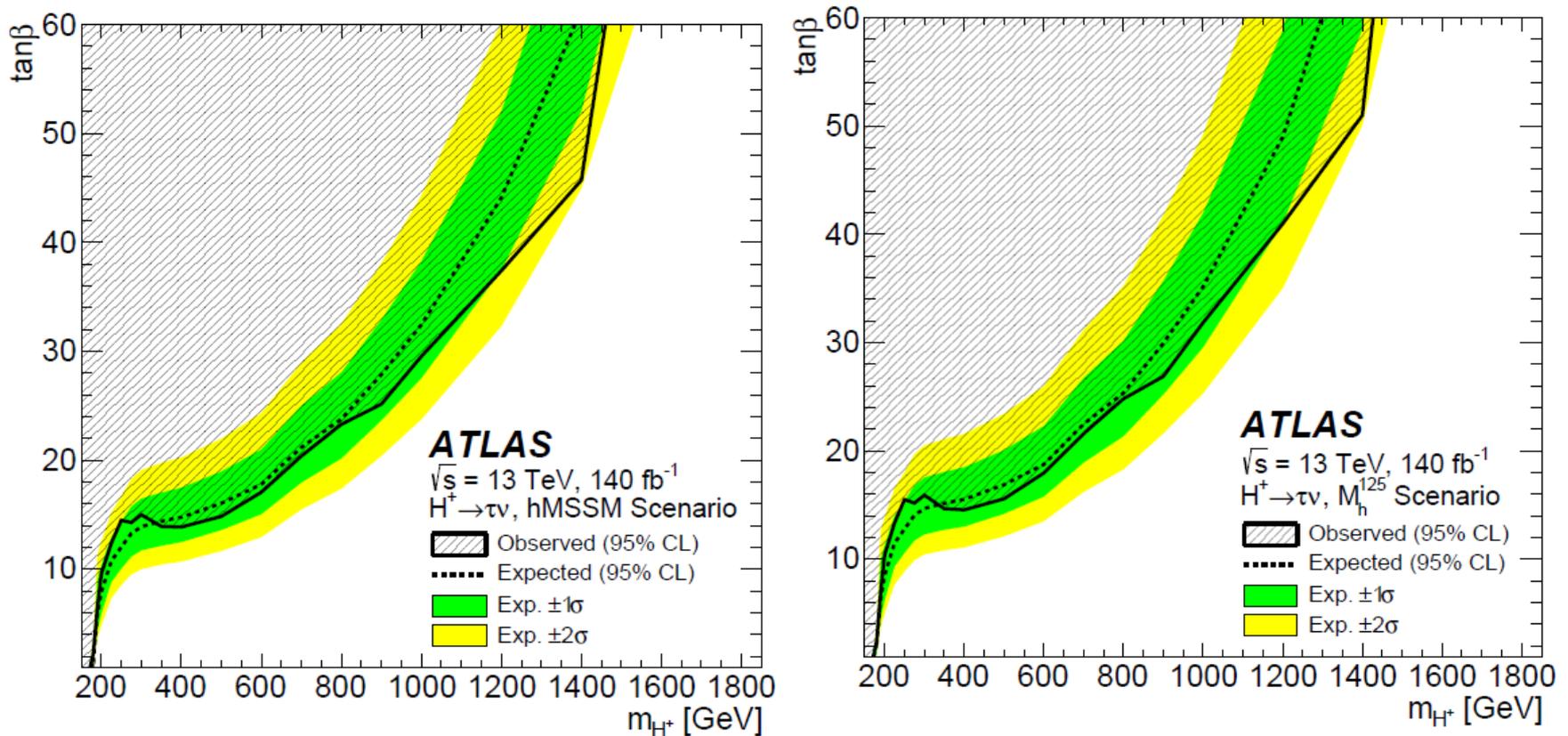
Диапазон масс: от 80 ГэВ до  
3000 ГэВ

95% CL верхний предел на  
 $\sigma_H \times B(H^\pm \rightarrow \tau\nu)$  – от 4.5 пб до  
0.4 фб

У CMS есть результат только  
на  $36 \text{ fb}^{-1}$  и для более узкой  
области масс  
(JHEP1907 (2019) 142)



Наблюдаемый (ожидаемый) верхний  
предел на 95% CL на  $B(t \rightarrow H^\pm b) \times B(H^\pm \rightarrow \tau\nu)$   
– в диапазоне от 0.27% (0.28%) до 0.02%  
(0.02%) при массе от 80 ГэВ до 160 ГэВ



Области исключения почти не зависят от сценариев MSSM. При  $\tan\beta=60$  (выше нет реалистичных предсказаний) на 95% CL исключается масса заряженного бозона Хиггса менее 1400 ГэВ

# $H^\pm \rightarrow cs$

arXiv:2407.10096

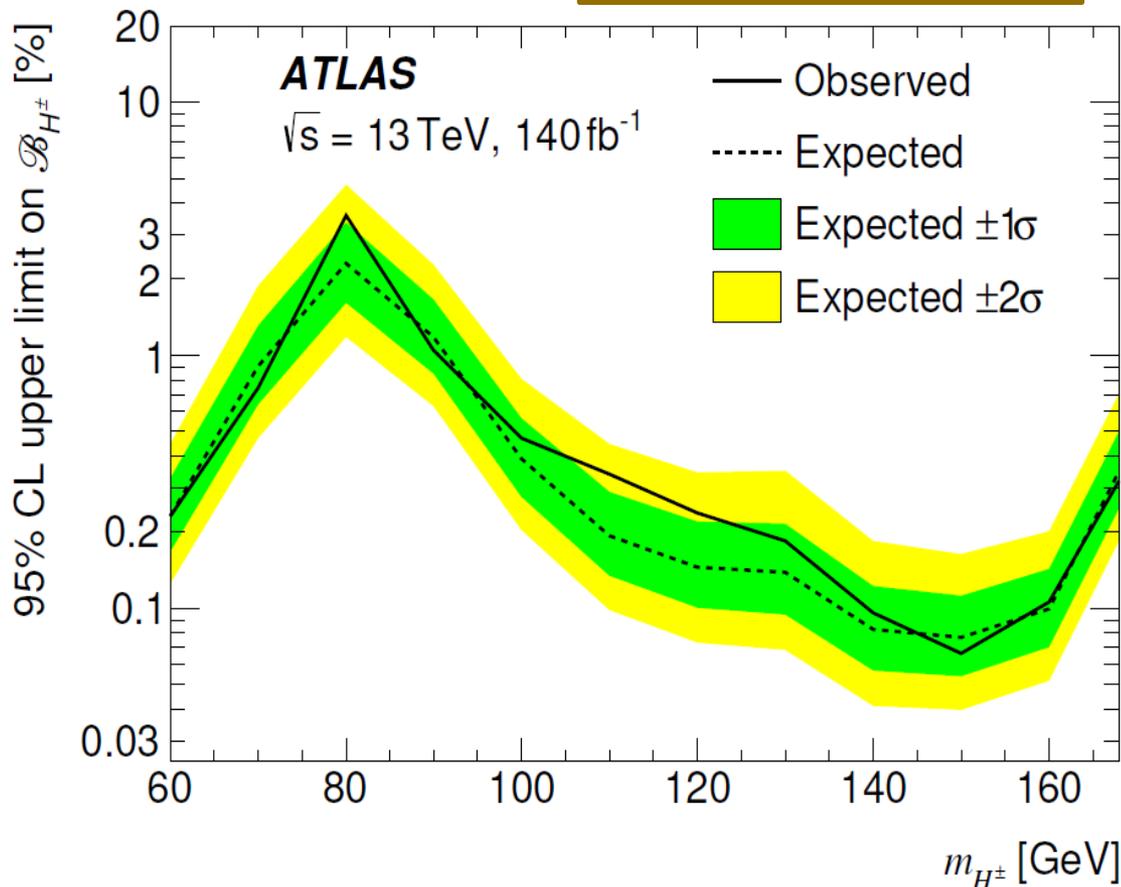
Конечное состояние:  
1 изолированный лептон  
и 4 струи, 2  $b$ -струи

Многомерный анализ для  
подавления фона от  
парного рождения топов

Допущение:

$$B(t \rightarrow Wb) + \\ B(t \rightarrow H^\pm (\rightarrow cs)b) = 1$$

У CMS есть результат  
только на  $36 \text{ fb}^{-1}$  и для  
более узкой области масс  
(PR D102 (2020)72001)



Наблюдаемый (ожидаемый) верхний  
предел на 95% CL на  $B(t \rightarrow H^\pm b)$  – в  
диапазоне от 0.066% (0.077%) до 3.6%  
(2.3%) при массе от 60 ГэВ до 168 ГэВ