

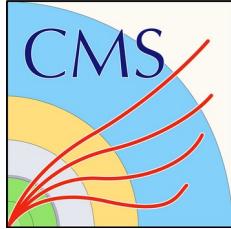
Эксперимент CMS: физические результаты 2025

Мурзин В.А ЛФЭЧ ОФВЭ



Эксперимент CMS 2025:

- Уточнение Стандартной Модели (СМ):
прецизионные измерения,
поиски редких процессов,
установление пределов применимости СМ
- Поиски Новой физики за пределами СМ:
поиск экзотических процессов, предсказываемых
моделями за пределами СМ (темная материя,
дополнительные размерности, SUSY, ...),
поиск процессов SMEFT, ...

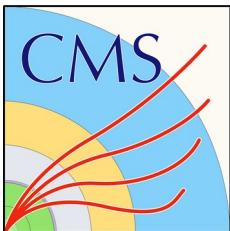


Избранные результаты CMS 2025

Уточнение Стандартной Модели



- Свойства бозона Хиггса
- Прецизионные измерения сечений W и Z бозонов
- Избыток $t\bar{t}$ пар возле порога
- Тетракварк ($cccc$):
первое измерение квантовых чисел



Свойства бозона Хиггса #1

Константы связи с фермионами и векторными бозонами



Combined measurements and interpretations of Higgs boson production and decay

Parameters	Best-fit (Expected)	Stat	Syst
κ_W	$1.05^{+0.05}_{-0.05}$ $(^{+0.05})_{(-0.05)}$	$+0.04$ $(^{+0.04})_{(-0.04)}$	$+0.04$ $(^{+0.04})_{(-0.03)}$
κ_Z	$1.07^{+0.06}_{-0.06}$ $(^{+0.06})_{(-0.06)}$	$+0.04$ $(^{+0.04})_{(-0.04)}$	$+0.04$ $(^{+0.04})_{(-0.04)}$
κ_t	$0.92^{+0.06}_{-0.05}$ $(^{+0.07})_{(-0.06)}$	$+0.04$ $(^{+0.04})_{(-0.04)}$	$+0.04$ $(^{+0.05})_{(-0.05)}$
κ_b	$0.98^{+0.12}_{-0.11}$ $(^{+0.12})_{(-0.12)}$	$+0.08$ $(^{+0.08})_{(-0.08)}$	$+0.09$ $(^{+0.09})_{(-0.08)}$
κ_τ	$0.90^{+0.07}_{-0.07}$ $(^{+0.08})_{(-0.07)}$	$+0.05$ $(^{+0.05})_{(-0.05)}$	$+0.05$ $(^{+0.06})_{(-0.06)}$
κ_μ	$1.09^{+0.20}_{-0.21}$ $(^{+0.21})_{(-0.23)}$	$+0.18$ $(^{+0.19})_{(-0.22)}$	$+0.08$ $(^{+0.08})_{(-0.06)}$

Комбинированный анализ с **наиболее точными измерениями** свойств бозона Хиггса на CMS по данным 13 TeV, 138 фб⁻¹

Процессы образования H:
ggH, vector boson fusion (VBF), VH (V = Z или W), ttH, tH

Каналы распада:
H → yy, H → ZZ → 4l, H → WW → llvv,
H → tt, H → bb, H → μμ and H → Zγ

CMS-PAS-HIG-21-018 (2025)

Получены результаты ($m_H=125.38$ ГэВ):

- **Сечения** образования и **относительные вероятности распадов**
- **Сила сигнала** (отношение измеренных сечений к теоретическим): неопределенность (разные каналы) от **5 до 39%**
 - inclusive signal-strength modifier $\mu = 1.014^{+0.055}_{-0.053}$
 - в согласии с ATLAS: $\mu = 1.05 \pm 0.06$ (arXiv:2207.00092)
- **Модификаторы констант связи:** κ_W , κ_Z , κ_t , κ_b , κ_τ , κ_μ
 - ~ 1, неопределенность от 5-20% (stat.) ± 4-8% (syst.)
- **Ограничение на Higgs boson self-coupling в процессах с одним бозоном Хиггса κ_λ :** $2.14^{+3.95}_{-3.16}$
(см. слайд 5, ограничение κ_λ в процессах с образованием пары бозонов Хиггса)



Свойства бозона Хиггса #2

Константа самодействия

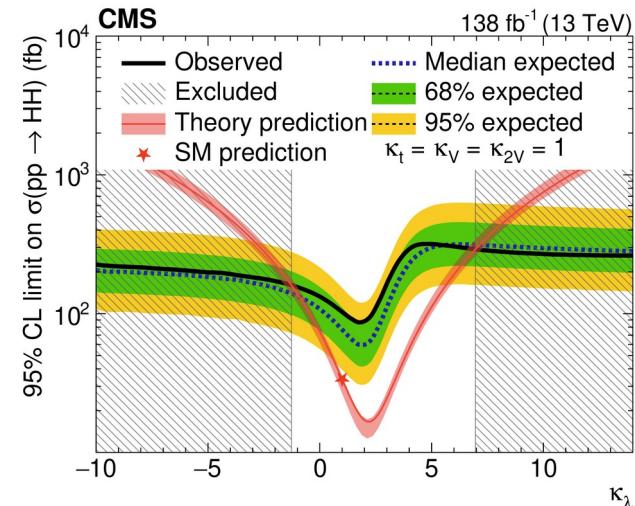
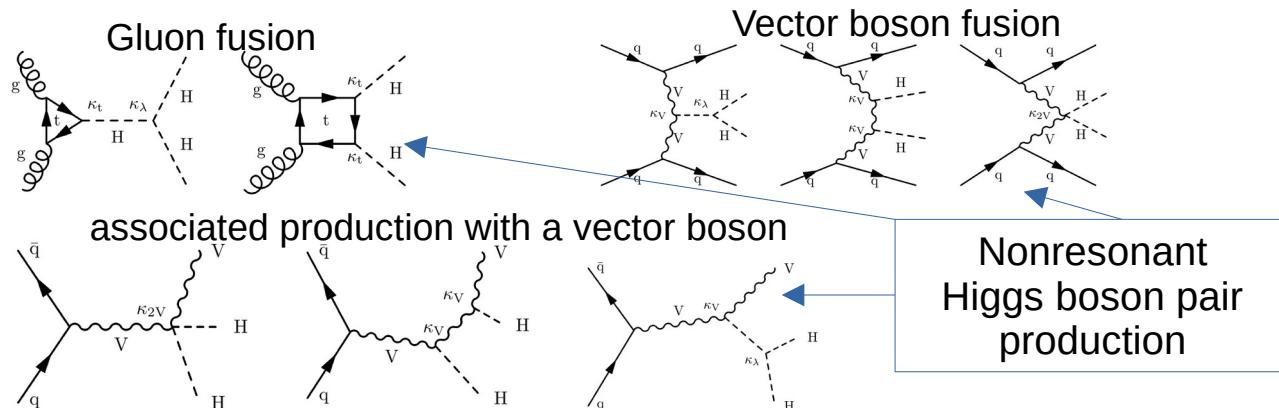


Combination of searches for nonresonant Higgs boson pair production

образования пар бозонов Хиггса не зарегистрировано

Необходимая ожидаемая светимость для первых наблюдений таких процессов 2000 фб^{-1}

arXiv:2510.07527, submitted to ROPP

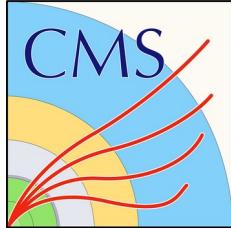


Установлены новые лучшие ограничения на константу самодействия κ_{λ} в процессах с образованием пары бозонов Хиггса: $-1.35 < \kappa_{\lambda} < 6.37$

Согласуется:

ATLAS (arXiv:2406.09971): $-1.2 < \kappa_{\lambda} < 7.2$,

CMS: процессы с одним бозоном Хиггса $\kappa_{\lambda} : 2.14^{+3.95}_{-3.16}$ (CMS-PAS-HIG-21-018 (2025))



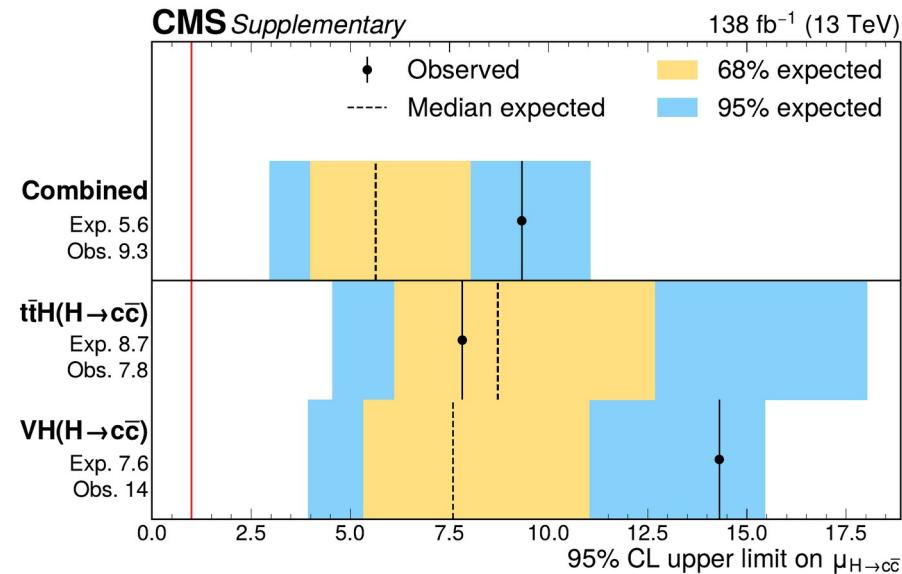
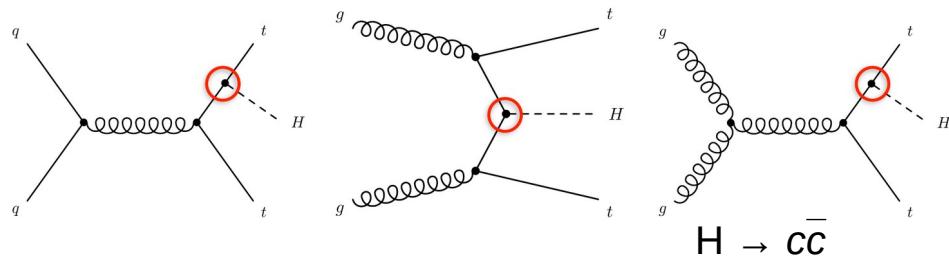
Свойства бозона Хиггса #3

Константа связи с-кварка



arXiv:2509.22535, submitted to PRL

Первое измерение модификатора константы связи с-кварка k_c в канале рождения бозона Хиггса ассоциированного с парой $t\bar{t}$



Предыдущие измерения CMS Run II, 13 TeV:
 $1.1 < |k_c| < 5.5$, канал рождения бозона Хиггса ассоциированного с векторным бозоном

$|k_c| < 4.2$ ATLAS Run II, 13 TeV arXiv:2410.19611

В комбинации с измерениями CMS в канале VH: $|k_c| < 3.5$

HL-LHC:

- Уточнение констант $K_w, K_z, K_t, K_b, K_c, K_\tau, K_\mu$
- Константы связи u, d, s кварков – **вызов для экспериментаторов**



Прецизионные измерения сечений W и Z бозонов

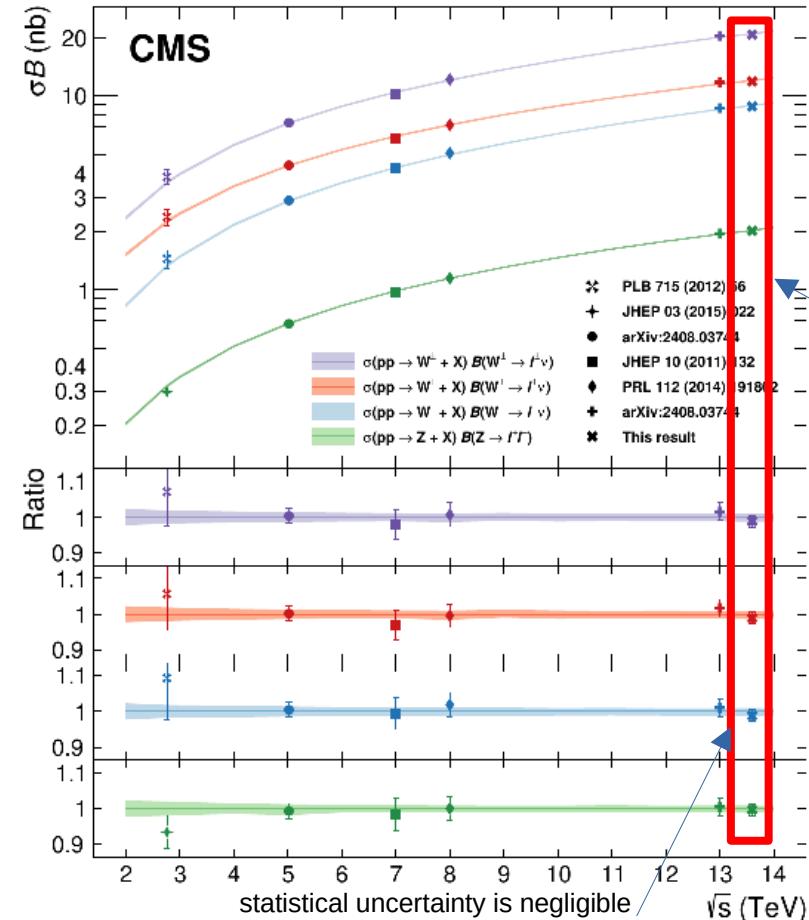


Measurements of the inclusive W and Z boson production cross sections and their ratios

[arXiv:2503.09742](https://arxiv.org/abs/2503.09742) Submitted to JHEP

Первое измерение инклюзивных сечений W и Z на CMS при 13.6 ТэВ, 5.01 fb^{-1}

точность выше, чем у предыдущих измерений CMS
при энергиях 2.76, 5.02, 7, 8 и 13 ТэВ (206 pb^{-1})



несмотря на меньшую статистику (5 fb^{-1} CMS vs 29 fb^{-1} ATLAS, [arXiv:2403.12902](https://arxiv.org/abs/2403.12902)),

CMS: $\sigma_{\text{tot}}(pp \rightarrow Z+X)\mathcal{B}(Z \rightarrow \mu^+\mu^-) = 2.021 \pm 0.009_{\text{(syst)}} \pm 0.028_{\text{(lumi)}}^{+0.011} {}_{-0.013}^{\text{(acceptance)}} \text{ nb}$
наибольшая неопределенность: светимость: $\pm 0.028 \text{ nb}$

ATLAS: $\sigma_{\text{tot}}(pp \rightarrow Z+X)\mathcal{B}(Z \rightarrow \mu^+\mu^-) = 1.989 \pm 0.077 \text{ nb}$, max. unc - lumi: $\pm 0.044 \text{ nb}$
Стат. ошибка в измерениях CMS и ATLAS пренебрежимо мала

Прецизионное измерение инклюзивных сечений рождения W и Z бозонов

- Повышает точность оценки фонов от W и Z бозонов в поисках Новой Физики
- повышает точность определения функций плотностей (PDF) протона



Избыток $t\bar{t}$ возле порога

Observation of a pseudoscalar excess at the top quark pair production threshold

arXiv:2503.22382,
submitted to ROPP

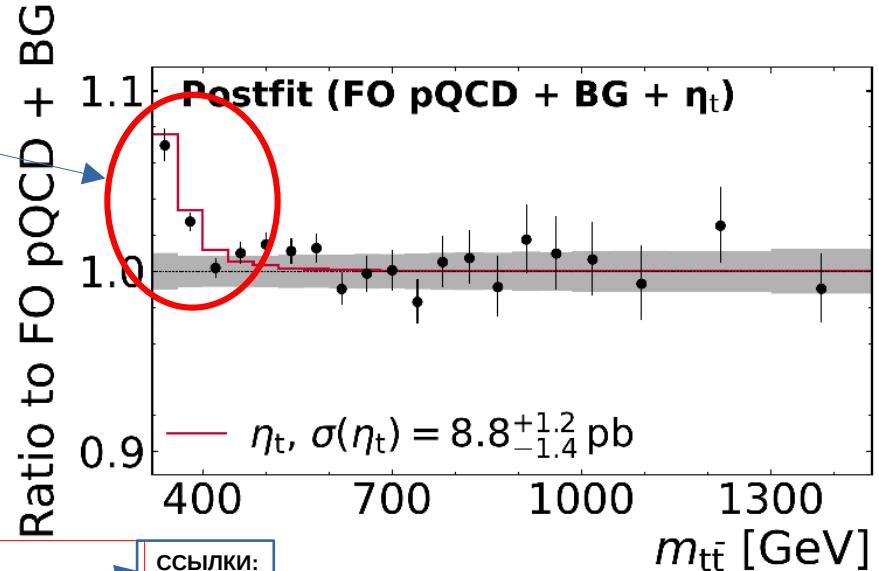
Наблюдается особенность
в спектре масс пары $t\bar{t}$ в
области 340-400 ГэВ,
значимость $> 5\sigma$

"топониевое" квазисвязанное состояние η_t ?

Измерение ATLAS:
ATLAS-CONF-2025-008
значимость $\sim 7.7\sigma$

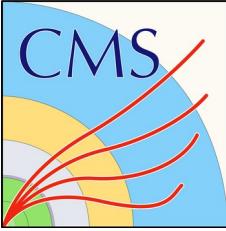
НЕТ!

- Взаимодействие медленных и тяжелых夸克ов в конечном состоянии (см. ссылки)
— нет необходимости в η_t
- см. материалы Семинара ОФВЭ-ОТФ от 4.12.2025:
 - А.Н. Розанов и М.И. Высоцкий, [Слайды](#), [видео](#)



ссылки:

- A. Sommerfeld, Annalen der Physik, 403 (1931) 257
- A. Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien Bd.2 Braunschweig Vieweg 1939
- G.A. Gamow Z.Phys. 51 (1928) 204
- A.D. Sakharov JETP 18 (1948) 631, Sov.Phys.Usp. 34, 375 (1991)
- I. Bigi, Y. Dokshitzer, V. Khoze, J. Kuhn and P. Zerwas, Phys. Lett. B 181, 157-163 - (1986)
- V. Fadin, V. Khoze, Lecture at XXIV Winter School of LIAF (1987)
- V. Fadin, V. Khoze, T. Sjostrand, Z.Phys. C 48, 613-621 (1990)
- A.B. Arbuzov, T.V. Kopylova, Nucl. Phys. B 225-227 (2012) 22-26



Тетракварк ($cccc$): первое измерение квантовых чисел

- Determination of the spin and parity of all-charm tetraquarks

- Nature 648 (2025) 58
- X(6900) – LHCb (2020), ATLAS (2023), CMS (2024)
- X(6600), X(6900), X(7100) – одно семейство частиц (CMS 2024), идентичные квантовыми числами (отличаются радиальными возбуждениями волновых функций)
 - $X \rightarrow J/\psi J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$

- квантовые числа системы: $J^{PC}=2^{++}$

- Более вероятна структура $cc-\bar{c}\bar{c}$
 - плотно-связанная система дикварк-антидикварк
- $J = 0$ и $J = 1$ исключены на уровне достоверности 95% и 99%

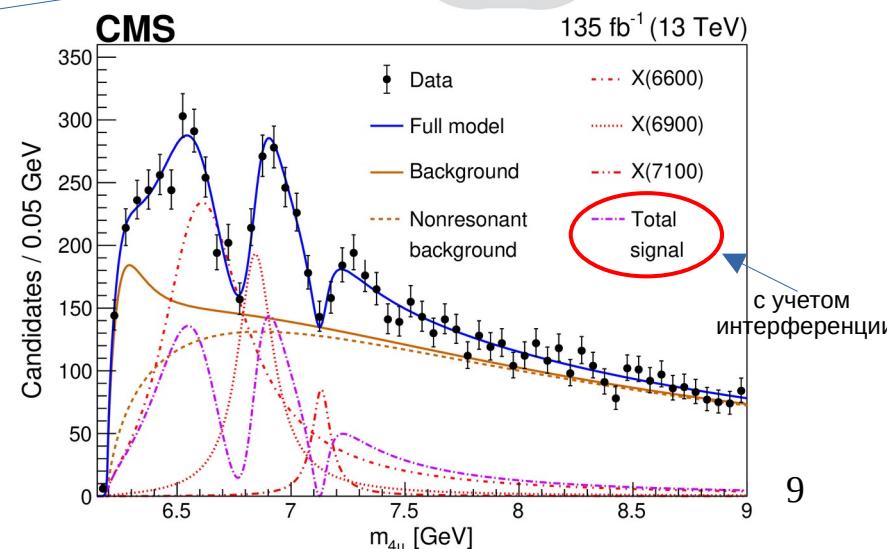
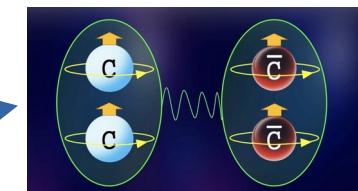
- 2 конфигурации компоновки тетракварка:

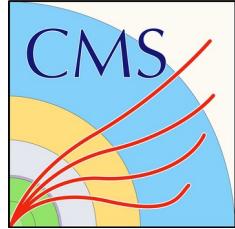
- плотно-связанная: $cc-\bar{c}\bar{c}$
дикварк-антидикварк

- cc и $\bar{c}\bar{c}$ обмениваются глюонами

- слабосвязанная: $cc-\bar{c}\bar{c}$

- cc и $\bar{c}\bar{c}$ обмениваются мезонами



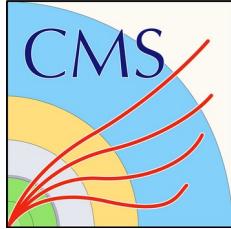


Поиски Новой физики 2025

Избранные результаты



- Первое наблюдение tWZ
- Поиски тяжелых резонансов распадающихся на два бозона Хиггса



Поиски Новой Физики 2025

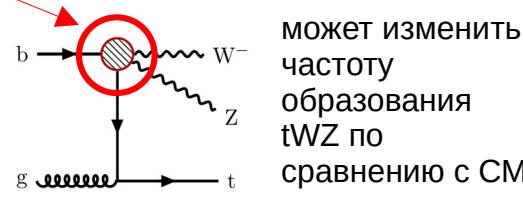
Первое наблюдение tWZ



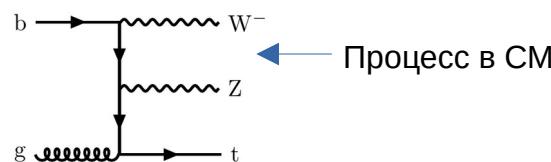
Observation of tWZ production at the CMS experiment

arXiv:2510.19080 Submitted to PRL

Вершина процесса Новой Физики



может изменить
частоту
образования
tWZ по
сравнению с СМ



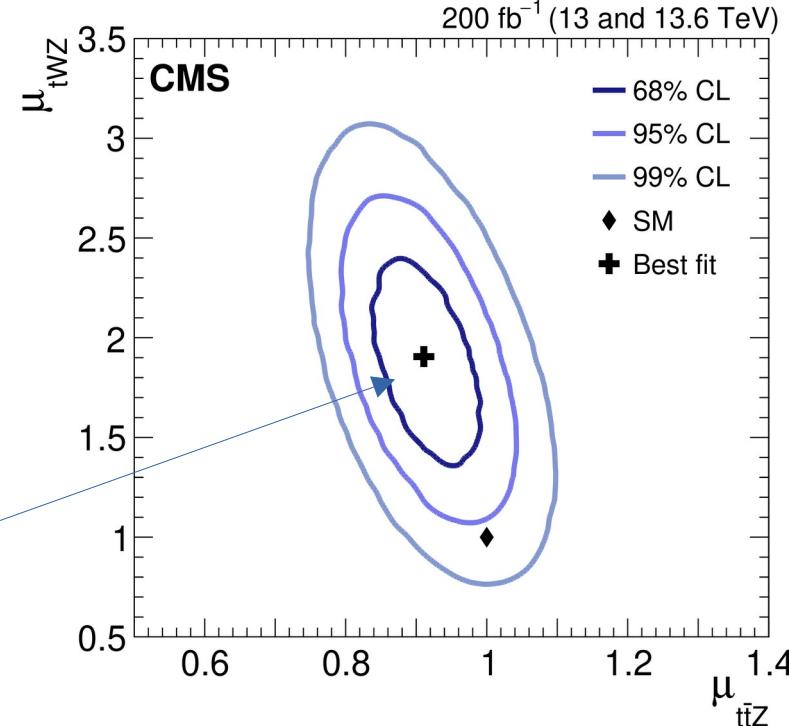
Первое наблюдение
образования одиночного
t-кварка, ассоциированного
с W и Z бозонами
в данных CMS 13 и 13.6 ТэВ

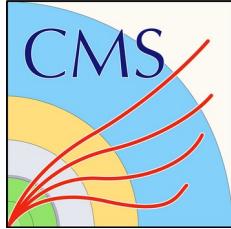
Ранее – указание на образование tWZ,
CMS (2024): [Phys. Lett. B 855 \(2024\) 138815](#)

сечение процесса (значимость 5.8σ):
 248 ± 52 фб (13.6 ТэВ)
 244 ± 74 фб (13 ТэВ)

Сила сигнала μ_{tWZ} отличается
от ожиданий СМ $\sim 2.3\sigma$

Изучение процесса образования tWZ дает возможность строгой проверки
калибровочной структуры СМ и фундаментальных симметрий, определяющих
взаимодействия частиц, а так же для поисков Новой физики



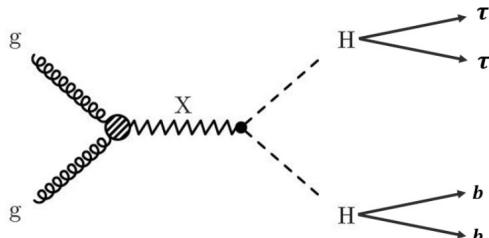


Поиски Новой Физики 2025

$X \rightarrow H(b\bar{b})H(\tau^+\tau^-)$



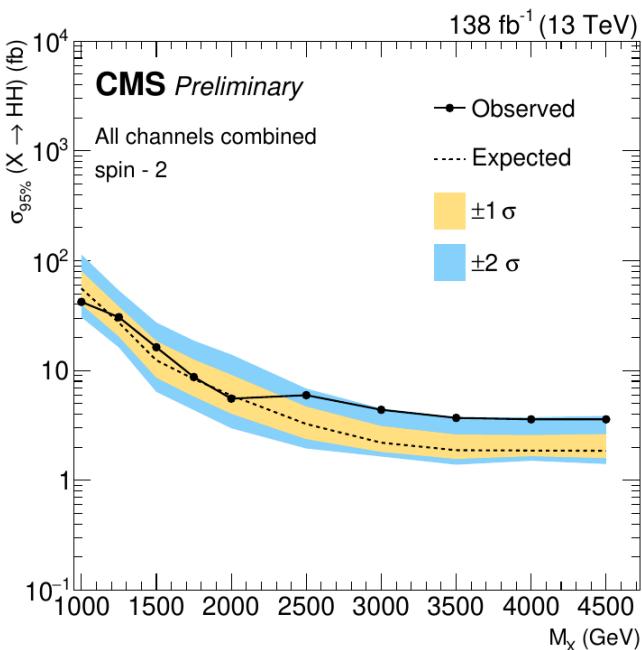
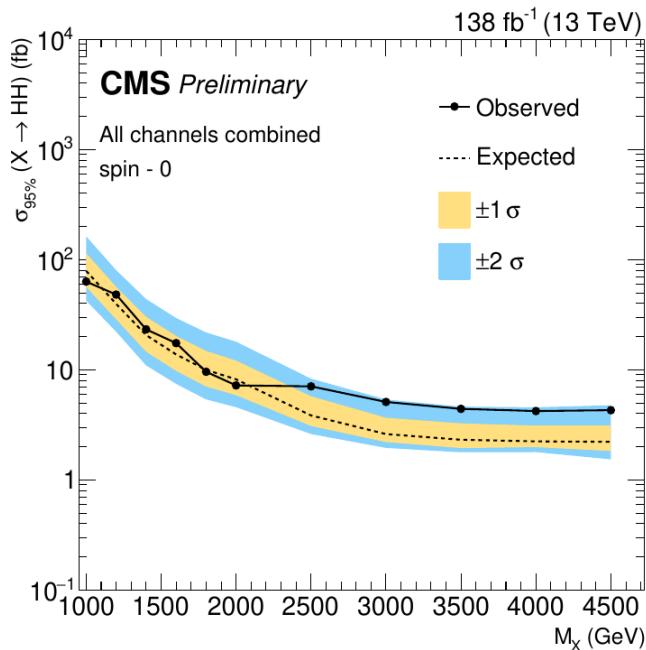
Search for heavy resonances decaying into two Higgs bosons
in the $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ final state in proton-proton collisions at 13 TeV



Поиск резонанса X , $X \rightarrow HH \rightarrow b\bar{b}\tau^+\tau^-$

Отклонений от СМ не обнаружено
для масс X от 1.4 до 4.5 ТэВ

Измерение дополняет поиски резонанса X
в ATLAS ([JHEP 2023 \(2023\) 1](#)),
где был исключен диапазон масс
от 0.251 до 1.6 ТэВ





Публикации и доклады группы ПИЯФ в 2025



• ПУБЛИКАЦИИ

В 2025 году сотрудниками ПИЯФ опубликованы, кроме **95 общих работ** в составе авторского коллектива коллаборации CMS,

4 работы в научных журналах, индексируемых в WoS, Scopus и РИНЦ [1-4]:

- 1) A.Iu. Egorov, V.T. Kim, Manifestation of Asymptotic QCD Effects in Dijet Production at Large Hadron Collider with 2.76 TeV, *Phys.Part.Nucl.Lett.* 22 (2025) 1, 224-228
- 2) A.Iu. Egorov, V.T. Kim, V.A. Murzin, V.A. Oreshkin. Dijets with a large rapidity separation as a probe for a large extra dimension gravity in the Transplanckian regime, *Proceedings of Science (QCDEX2025)* 508 (2025) 011, DOI: <https://doi.org/10.22323/1.508.0011>
- 3) V.T. Kim, E.V. Kuznetsova, D.E. Sosnov, Photon-Exchange Dominance over Pomeron in Forward Rapidity Gap Events in p-Pb Collisions at LHC, *Phys.Part.Nucl.Lett.* 22 (2025) 1, 219-223
- 4) Смирнов И.Б., Реконструкция пространственного разрешения многослойных позиционно-чувствительных детекторов, *ЭЧАЯ* 57 (2026) 2, 1-18

• ВЫСТУПЛЕНИЯ НА КОНФЕРЕНЦИЯХ

Выступления сотрудников ПИЯФ на конференциях и совещаниях в 2025 г.:

- А.Ю. Егоров (НИЦ КИ - ПИЯФ), «Проверка Стандартной Модели и Поиски Новой Физики на Большом Адронном коллайдере», *57-я Зимняя Школа ПИЯФ, Луга, 15-20 марта 2025 г.*
- В.Т. Ким (НИЦ КИ - ПИЯФ), «Brout-Englert-Higgs boson and the boundaries of the Naturalness domain of the Standard Model», *Quantum Field Theory and High Energy Physics (QFTHEP-270) Conference-School, Москва, 30 июня - 4 июля 2025 г.*
- А.Ю. Егоров (НИЦ КИ - ПИЯФ), «Dijets with large rapidity separations at the next-to-leading BFKL for search of new physics at colliders», *75-я Межд. Конф. ЯДРО-2025, Санкт-Петербург, 1-6 июля 2025 г.*
- Д.Е. Соснов (НИЦ КИ - ПИЯФ), «Large rapidity gap events in proton-nucleus collisions at LHC energies», *75-я Межд. Конф. ЯДРО-2025, Санкт-Петербург, 1-6 июля 2025 г.*
- Д.Е. Соснов (НИЦ КИ - ПИЯФ), «Large rapidity gap events in proton-nucleus collisions at LHC energies», *37th Int. Workshop on High Energy Physcs "Diffraction of hadrons: Experiment, Theory, Phenomenology", Протвино, 22-24 июля 2025 г.*
- В.Т. Ким (НИЦ КИ - ПИЯФ), «Naturalness Criteria for the Standard Model», *Int. Conf. Advances in Quantum Field Theory, Дубна, 11 - 15 августа 2025 г.*
- В.Т. Ким (НИЦ КИ - ПИЯФ), «Dijets with a large rapidity separation as a probe for large extra dimension gravity in trans-Planckian regime», *Open Workshop QCD at the Extremes (QCDEX2025), онлайн, 1 - 11 сентября 2025 г.*
- В.Т. Ким (НИЦ КИ - ПИЯФ), «Brout-Englert-Higgs Boson and Naturalness Criteria of the Standard Model», *Conference on High-Energy Physics, Армения, Ереван, 13 - 17 октября 2025 г.*
- А.Ю. Егоров (НИЦ КИ - ПИЯФ), «Dijets with large rapidity separations for search of new physics at colliders», *Conference on High-Energy Physics, Армения, Ереван, 13 - 17 октября 2025 г.*
- Д.Е. Соснов (НИЦ КИ - ПИЯФ), «Pomeron- and photon- exchange for large rapidity gap p-A events at LHC», *Conference on High-Energy Physics, Армения, Ереван, 13 - 17 октября 2025 г.*