

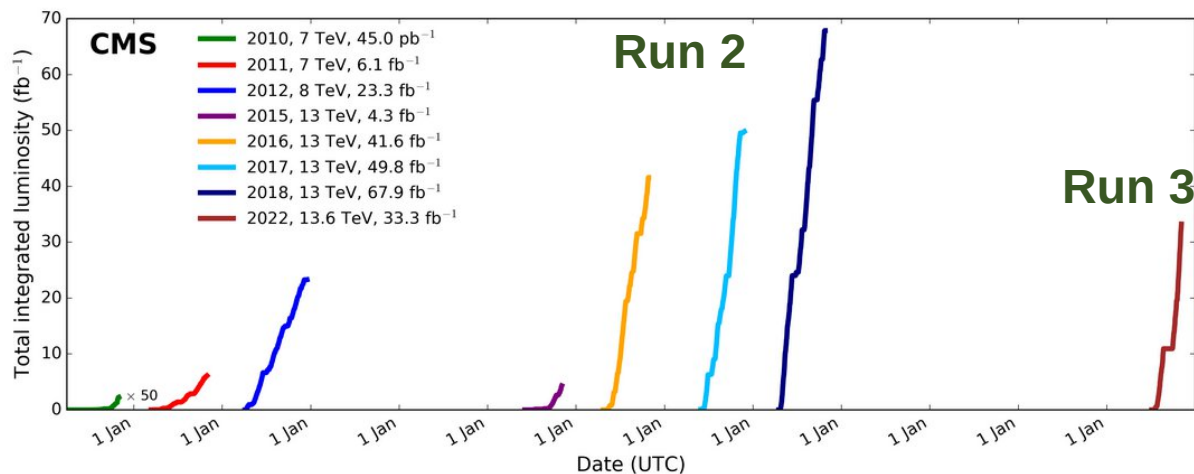
Физические результаты эксперимента CMS на БАК

Орешкин В. А

Сессия Ученого Совета
ОФВЭ НИЦ КИ-ПИЯФ

21 декабря 2022 года

Набор данных CMS



Run 2, энергия 13 ГэВ

- 2015-2018
- собрано ~ 150 fb⁻¹
- улучшения в:
 - калибровке измерений физ. объектов
 - понимании триггера
 - устранении pile-up
 - таггировании b и c

Run 3. энергия 13.6 ТэВ

- первые соударения 5 июля
- сбор физ. данных:
 - 5 июля-28 ноября 2022
 - 14-15 ноября - PbPb (тестовый)
 - собрано: 38 fb⁻¹

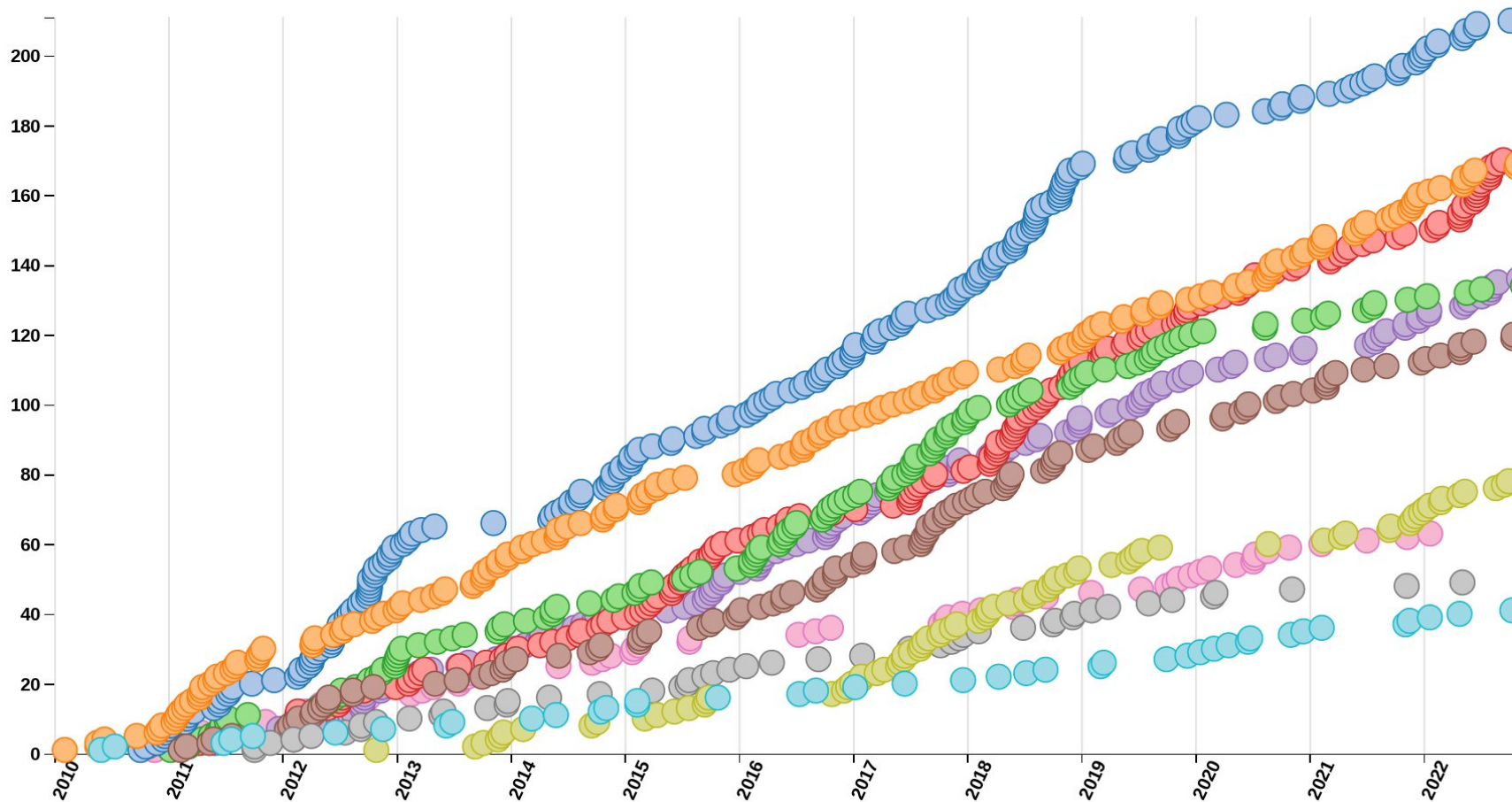


TRK-20-001

Количество публикаций CMS на физических данных за 12 лет

- Show all
- Total
- Exotica
- Standard Model
- Supersymmetry
- Higgs
- Top
- Heavy Ions
- B and Quarkonia
- Forward and Soft QCD
- Beyond 2 Generations
- Detector Performance

1175 collider data papers submitted as of 2022-12-15



μ - модификатор
силы сигнала

Phys. Lett. B 805 (2020) 135425

$$m_H = 125.38 \pm 0.14 \text{ GeV}$$

$$\mu = (\sigma \mathcal{B})_{\text{obs}} / (\sigma \mathcal{B})_{\text{exp}}$$

$$\mu = 1.002 \pm 0.057 = 1.002 \pm 0.036 \text{ (theory)} \pm 0.033 \text{ (exp.)} \pm 0.029 \text{ ((stat.))}$$

The dominant background arises from irreducible nonresonant WW production and is estimated from data. The channel has a good sensitivity to the ggH and VBF production processes

немного точнее чем ATLAS:

$$\text{ATLAS } \mu = 1.05 \pm 0.04 \text{ (th)} \pm 0.03 \text{ (exp)} \pm 0.03 \text{ (stat)}$$

$$(\mu = 0.87 \pm 0.23)$$

μ - модификатор силы сигнала:
для рождения и распада

$$\mu_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_i^{SM}}$$

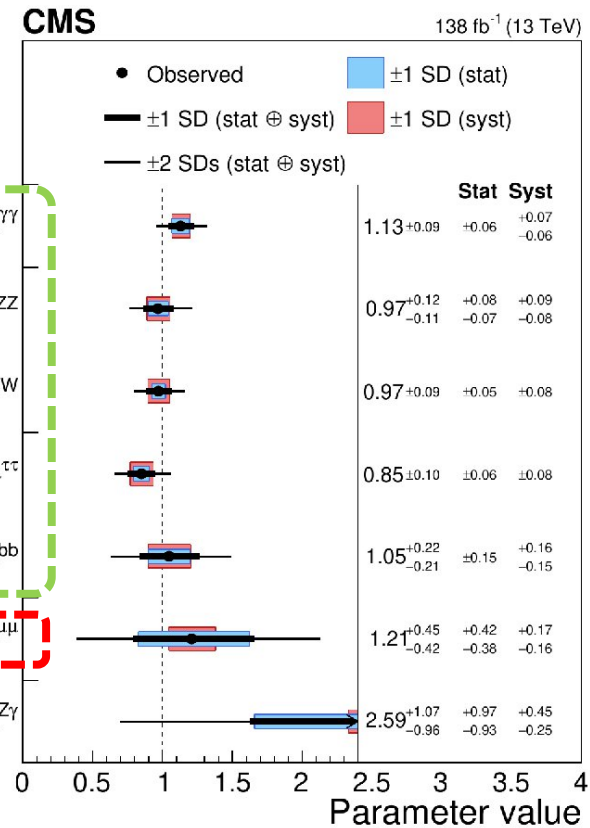
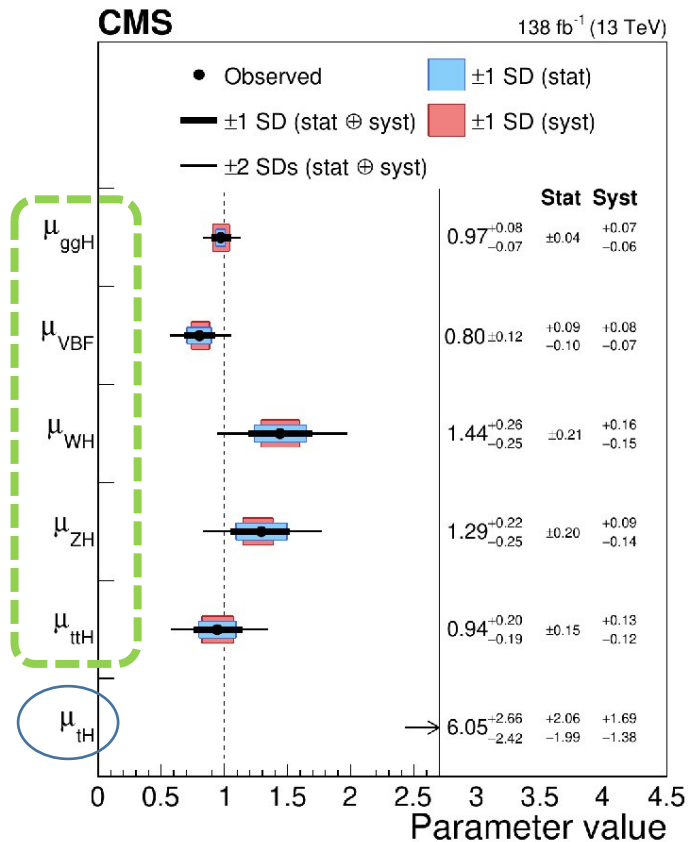
$$\mu^f = \frac{\mathcal{B}^f}{\mathcal{B}_{SM}^f}$$

$$\mu_i^f = \frac{\sigma_i \times BR_f}{(\sigma_i \times BR_f)_{SM}}$$

моды рождения

моды распада

стат. знач. > 5 σ ,
кроме tH

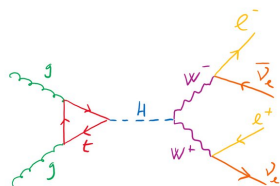
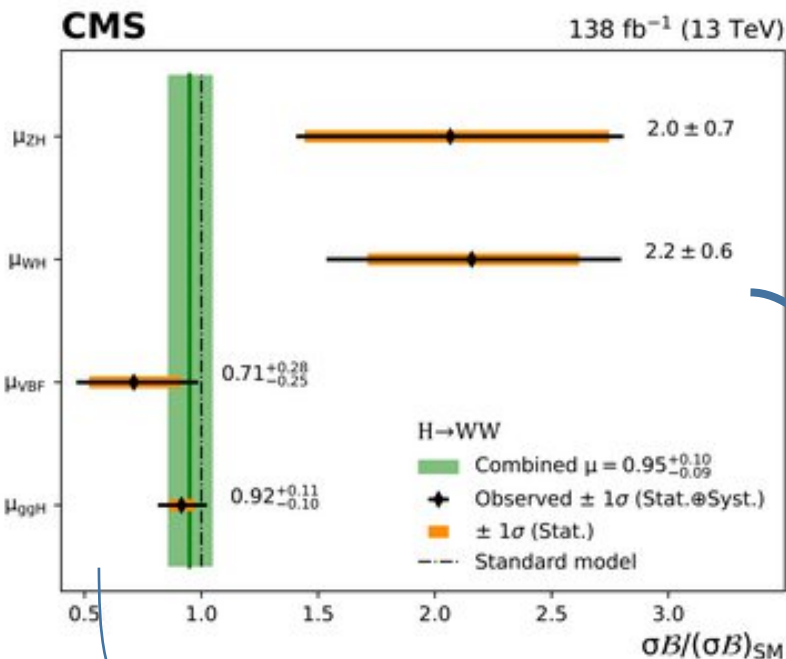


первое изм-е с
стат знач. 3 σ

$\mu = 1$ - ожидание Стандартной модели

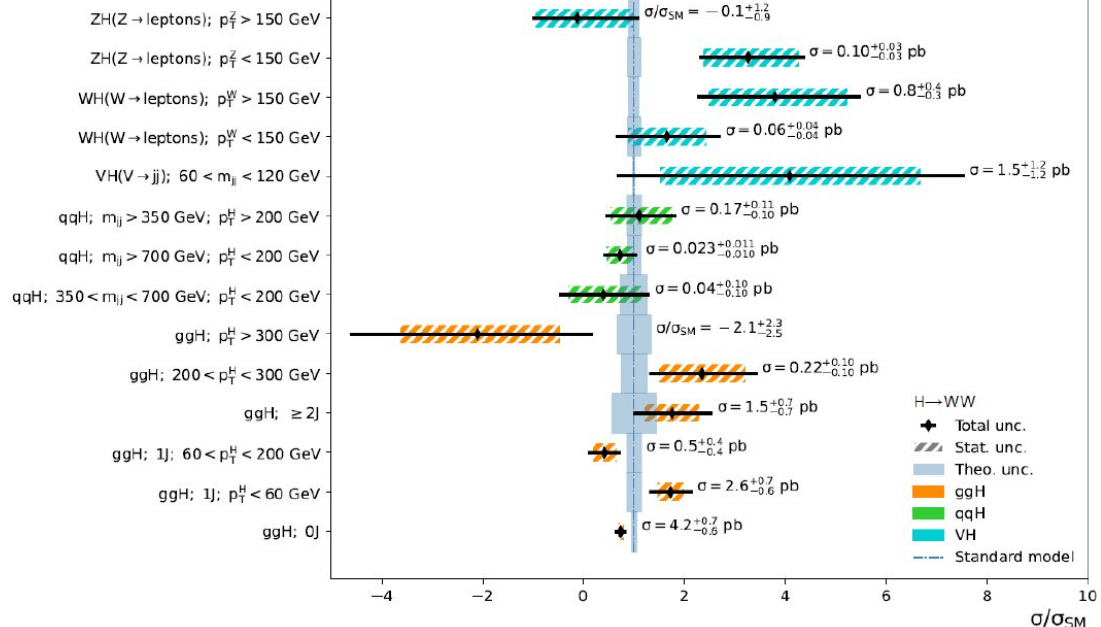
хорошее согласие с СМ, p-value - 3.1%-30%

H->WW*, инклюзивные сечения



STXS

CMS



1. НWW - хороший выход событий
2. но: много фонов
3. нейтрино -> MET

одно из самых точных измерений для одного канала

- точность силы сигнала:
- ~11% (ggH), ~35% (VBF и VH);
 - ~9.5% в целом

1. одновременное измерение 14-ти сечений STXS
2. хорошая точность для
 - 1) мал. кол-во струй
 - 2) несильным бустом

- STXS - Simplified Template Cross Sections
- альтернатива дифференциальным сечениям
 - минимизация искажений связ с теор. предсказ (за счёт удачной разбиновки с плоским акцепт.)
 - максимизация чувствительности (возм-ть использования ML дискриминаторов)

модификаторы силы сигнала : μ

✗ decay

$$\#events^{cat} = \mu^{cat} \cdot \sum_i \left[(Eff \cdot A^{SM})_i^{cat} \cdot \sigma_i^{SM} \cdot BR^{SM} \cdot L \right] + bkg^{cat}$$

$$\mu^{cat} \Rightarrow \mu_{bin}$$

✗ decay

$$\#events^{cat} = \sum_{bin} \left[\underbrace{\mu_{bin} \cdot \sigma_{bin}^{SM}}_{SM AS TEMPLATE IN STXS BIN} \cdot (Eff \cdot A^{SM})_{bin}^{cat} \cdot BR^{SM} \cdot L \right] + bkg^{cat}$$

kinematic properties still defined in terms of the full phase space, but STXS bins defined to minimise the theory uncertainties

1. разбиновка: константный акцептанс в каждом бине
- уменьшение модельной зависимости
2. разрешён MVA
- повышение чувствительности
3. инклюзивно по всем распадам
4. агностичен по отношению к деталям рождения

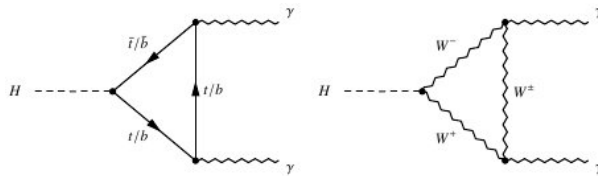
κ - kappa framework: отношение сечений (μ) \rightarrow отношение амплитуд (κ)

LHC Higgs Cross Section Working Group,
arXiv:1307.1347, Ch.3

$$\kappa_j^2 = \sigma_j / \sigma_j^{\text{SM}} \quad \text{or} \quad \kappa_j^2 = \Gamma^j / \Gamma_{\text{SM}}^j$$

$$\kappa_H^2 = \sum_j \text{BR}_{\text{SM}}^j \kappa_j^2 \quad \Gamma_H = \frac{\kappa_H^2 \cdot \Gamma_H^{\text{SM}}}{1 - \text{BR}_{\text{BSM}}}$$

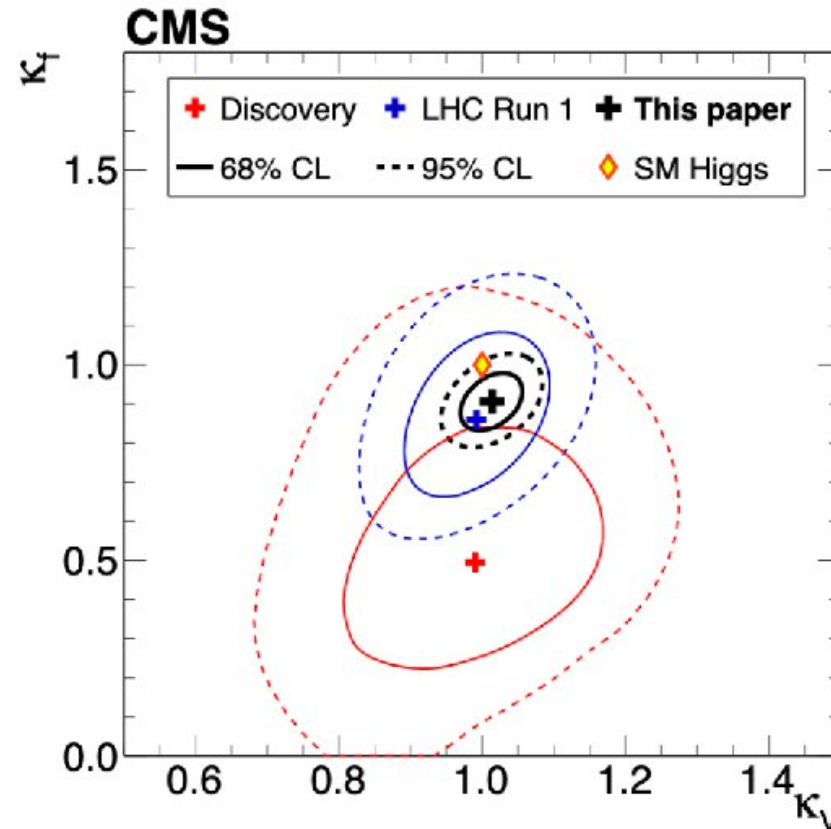
позволяет
учитывать эффекты
в петлевых
диаграммах:



эволюция результатов: три набора данных:

1. **discovery** - данные при открытии H (2012)
2. full LHC Run 1
3. Run2, in paper **Nature 607 (2022) 60-68**

фит с двумя модификаторами вз-я
– κ_f - для фермионов
– κ_V - для тяжёлых векторных бозонов



согласие с
СМ в пределах
10%

κ - kappa framework

$$\kappa_j^2 = \sigma_j / \sigma_j^{\text{SM}} \quad \text{or} \quad \kappa_j^2 = \Gamma^j / \Gamma_{\text{SM}}^j$$

$$\kappa_H^2 = \sum_j \text{BR}_{\text{SM}}^j \kappa_j^2 \quad \Gamma_H = \frac{\kappa_H^2 \cdot \Gamma_H^{\text{SM}}}{1 - \text{BR}_{\text{BSM}}}$$

для тяжелых калибровочных бозонов

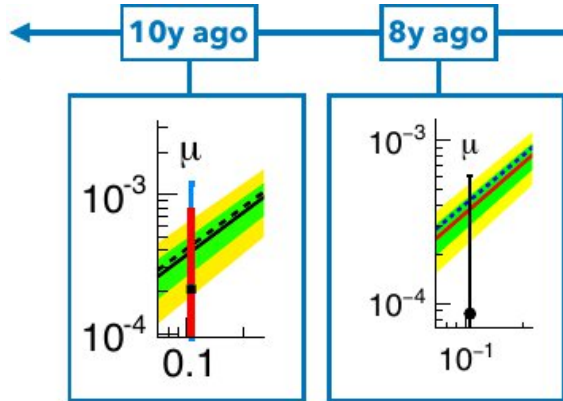
- κ_W, κ_Z

для фермионов

- $\kappa_t, \kappa_b, \kappa_\tau, \kappa_\mu$

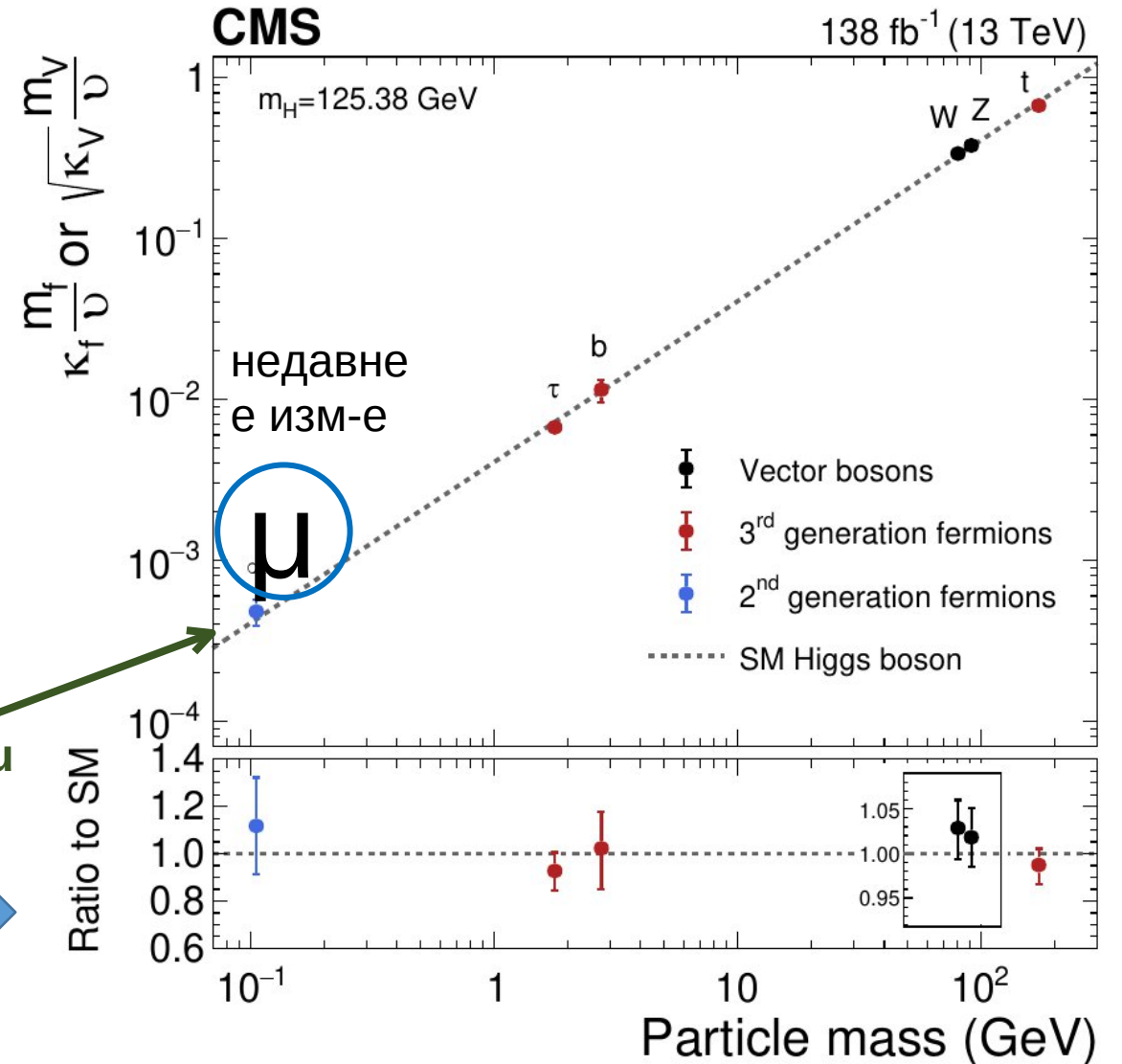
$$g_V = 2 \frac{m_V^2}{v}$$

$$g_F = \sqrt{2} \frac{m_f}{v}$$



CMS (2021) H → μ μ for the first time!

проверка линейной зависимости вз-я фермионов (юкавского вз-я) и тяжелых калибровочных бозонов



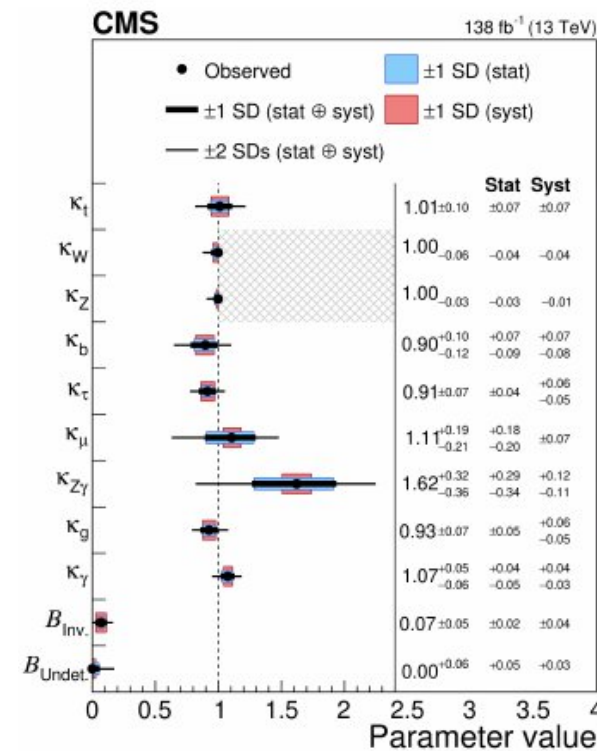
κ - kappa framework

более детально для каждой
вершины взаимодействия:

$$\mathcal{L} = \kappa_3 \frac{m_H^2}{2v} H^3 + \kappa_Z \frac{m_Z^2}{v} Z_\mu Z^\mu H + \kappa_W \frac{2m_W^2}{v} W_\mu^+ W^{-\mu} H$$

$$+ \kappa_g \frac{\alpha_s}{12\pi v} G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} H + \kappa_\gamma \frac{\alpha}{2\pi v} A_{\mu\nu} A^{\mu\nu} H + \kappa_{Z\gamma} \frac{\alpha}{\pi v} A_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} H$$

$$- \left(\kappa_t \sum_{f=u,c,t} \frac{m_f}{v} f\bar{f} + \kappa_b \sum_{f=d,s,b} \frac{m_f}{v} f\bar{f} + \kappa_\tau \sum_{f=e,\mu,\tau} \frac{m_f}{v} f\bar{f} \right) H$$



precision 3-10%

precision 5-10%
(BSM sensitivity)

B_{inv} - невидимые распады бозона Хиггса (MET>0)
B_{undet} - распады бозона Хиггса на недетектируемые
частицы (нет замыкания суммы BR на 1)

p уровень значимости = 28%
для B_{inv} = B_{und} = 0

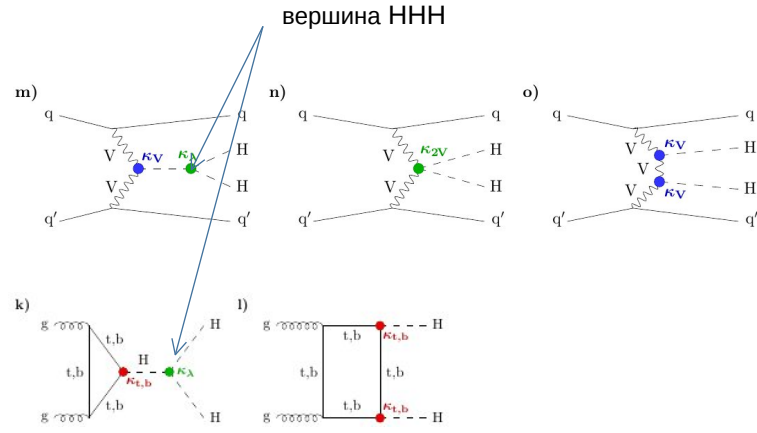
Двойное рождение бозона Хиггса: измерение самодействия H

Nature 607 (2022) 60

$32.76^{+1.95}_{-6.83}$ на три порядка меньше одиночного рождения

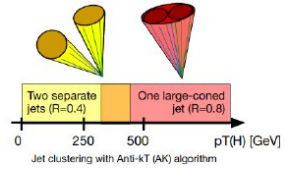
определены пределы сечений рождения и модификационные факторы (комбинация 4-х анализов)

- κ_λ in range $(-1.24, 6.49)$
- κ_{2V} in range $(0.67, 1.38)$
- $\kappa_{2V} = 0$ is excluded, with a significance of 6.6σ for the first time!

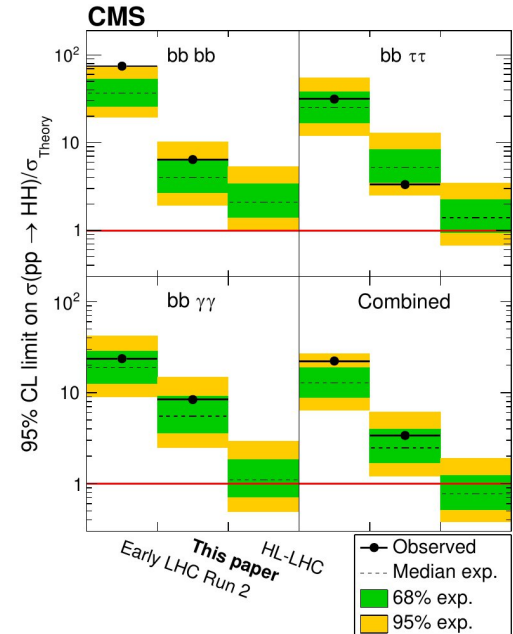
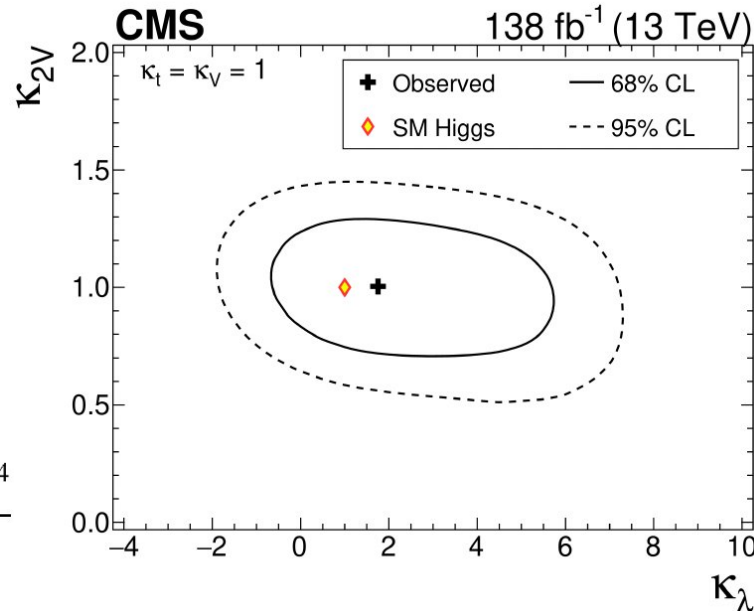
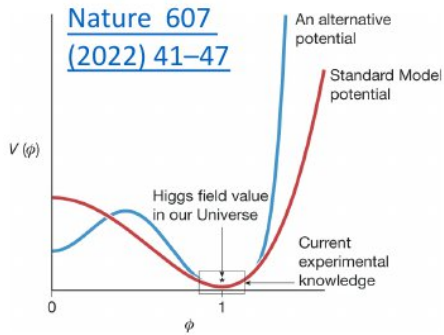


H → bb
H → γγ
H → ττ

DeepJet CMS algorithms



отношение верхних пределы сечений/предсказание CMS:



$$\mathcal{L}_{scalar} \ni \frac{1}{2} (\partial_\mu h \partial^\mu h) - \lambda v^2 h^2 - \lambda v h^3 - \frac{\lambda}{4} h^4 - \frac{\lambda v^4}{4}$$

прогресс по сравнению с 2016: (HIG-17-030): $\sigma_{HH} < 22.2 (12.8) \sigma_{HH}^{SM} \longrightarrow \sigma_{HH} < 3.4 (2.5) \sigma_{HH}^{SM}$

рождение бозона Хиггса вне массовой поверхности и его ширина

Nat. Phys. 18 (2022) 1329

процесс $H \rightarrow ZZ$

измерение **ширины** (arXiv:2202.06923)

- рождение вне массовой пов-ти, 3.6σ
 - стат, значимость 3.6σ (p value=0.003)
- рождения вне массовой пов-ти

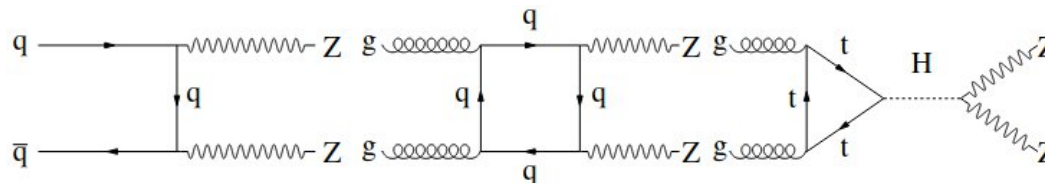
$$\Gamma_H = 3.2^{+2.4}_{-1.7} \text{ MeV}$$

- в согласии с предсказанием СМ: 4.1 MeV
- альтернативный методы
 - осн. на времени пролёта (Phys. Rev. D 92, 072010 (2015))

$$\Gamma_H < 46 \text{ MeV}$$

- ширина пика вблизи мас. пов-ти: разрешение $>$ ширины $1 \text{ ГэВ} > 4 \text{ МэВ}$
- сильная деструктивная интерференция с **фоном** (нерезонантным рождением ZZ)
 - нужно много данных
- дополнительно: поиск аномальных вз-ий HVV
- отличие от предыдущего измерения (HIG-18-002): $\bar{\Gamma}_H < 28 \text{ MeV}$ at a 95% CL.
 - гораздо больше статистики(данных)
 - дополнительное конечное состояние для реконструкции ZZ

$$\boxed{ZZ \rightarrow 2\ell 2\nu} \text{ and } ZZ \rightarrow 4\ell.$$

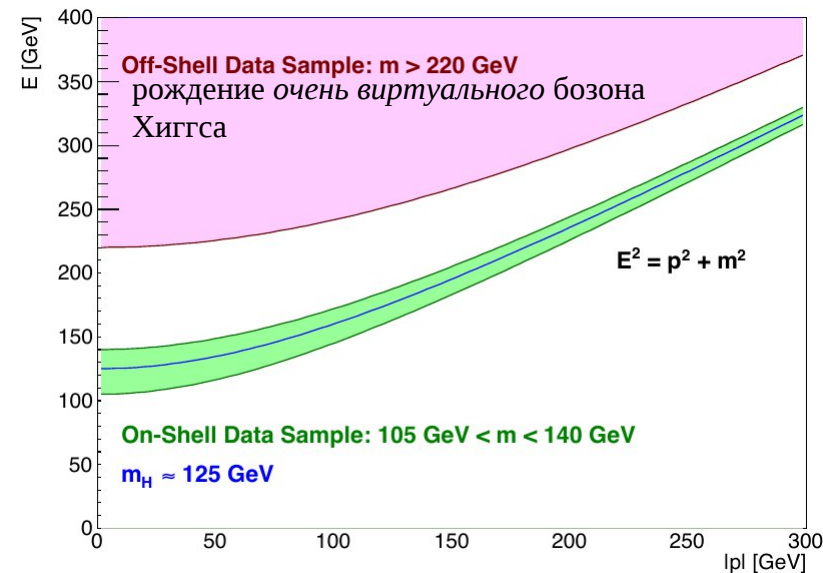


$$\sigma_{onshell}^{pp \rightarrow H \rightarrow ZZ} \sim \frac{g_{Hgg}^2 g_{HZZ}^2}{m_H \Gamma_H}$$

$$\sigma_{offshell}^{pp \rightarrow H \rightarrow ZZ} \sim \frac{g_{Hgg}^2 g_{HZZ}^2}{M_{ZZ} - m_H}$$

$$\frac{\sigma_{off-shell}^{vv \rightarrow H \rightarrow 4\ell}}{\sigma_{on-shell}^{vv \rightarrow H \rightarrow 4\ell}} \propto \Gamma_H$$

$vv = gg, WW, ZZ, Z\gamma, \gamma\gamma$



взаимодействие бозона Хиггса с чарм кварком

ICNP2022, arXiv:2205.05550

$$H \rightarrow c + \bar{c}$$

валидация метода: **первое** наблюдение $VZ(cc)$ на адронном коллайдере (5.7σ)

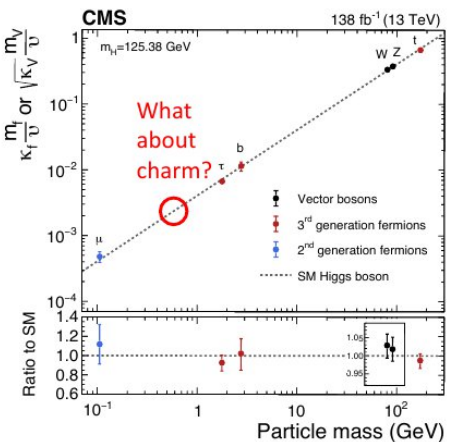
$$\mu_{VZ(Z \rightarrow c\bar{c})} = 1.01^{+0.23}_{-0.21}$$

самое лучше $VH(H \rightarrow c\bar{c})$ ограничение до сих пор

$$1.1 < |\kappa_c| < 5.5 \text{ obs.}$$

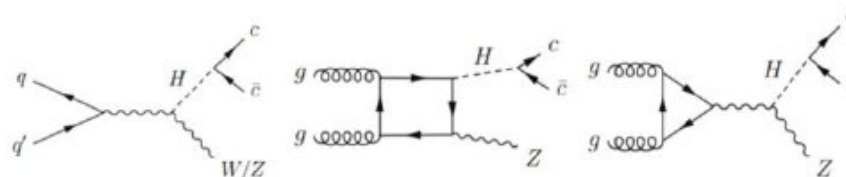
$$|\kappa_c| < 3.40 \text{ exp.}$$

@ 95% C. L.



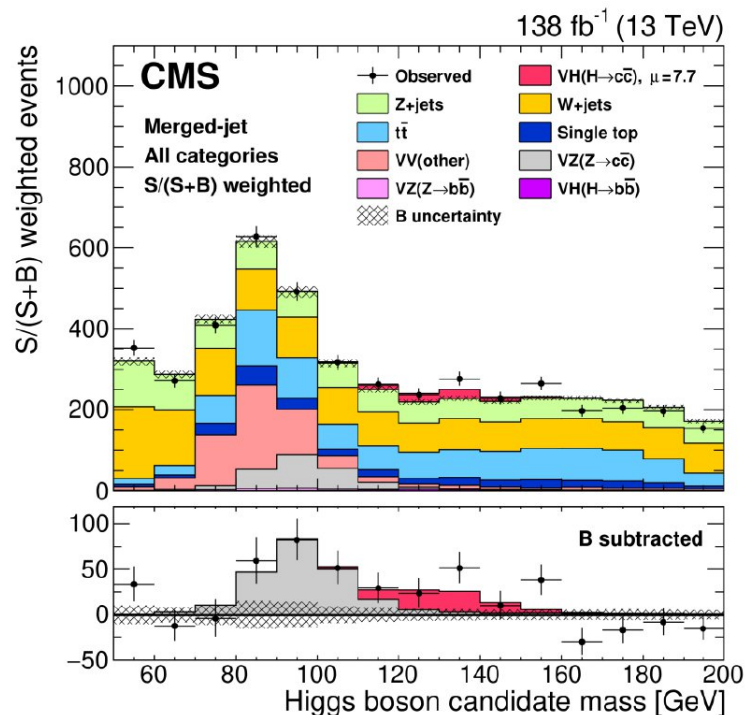
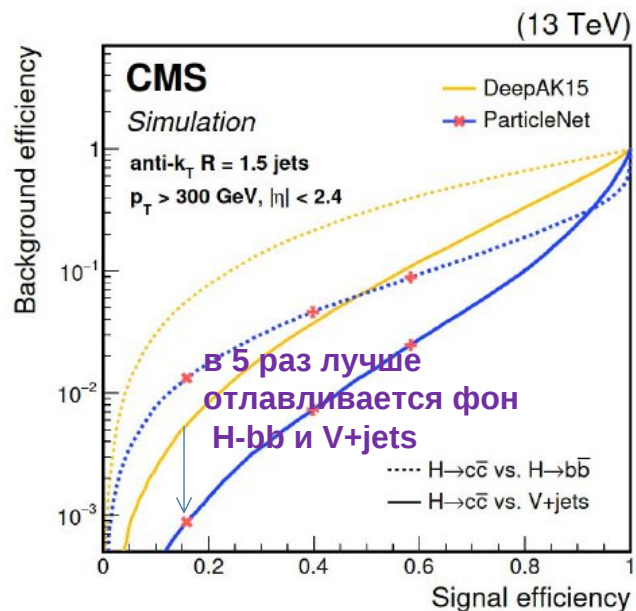
новые техники для таггирования чарм-струй: DeepAK15 -> ParticleNet

VH

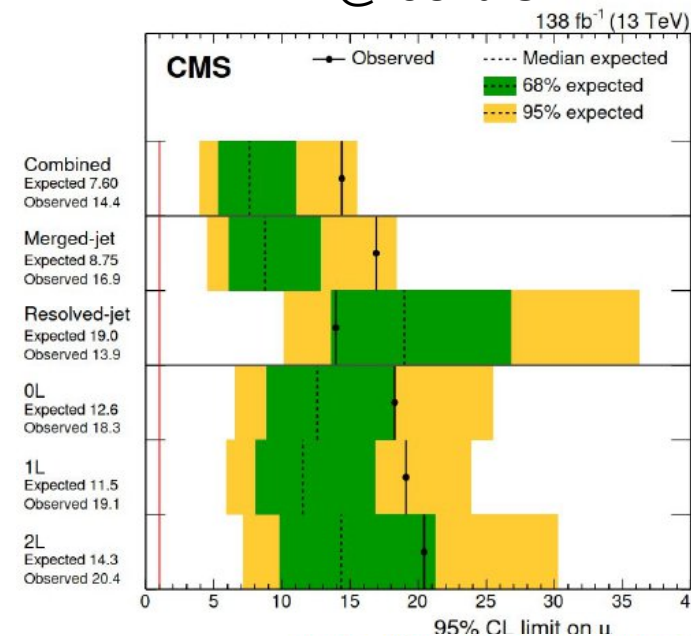


c-струи трудны для таггирования: и не легкие и не тяжёлые (как b)

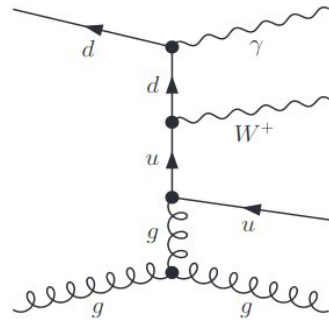
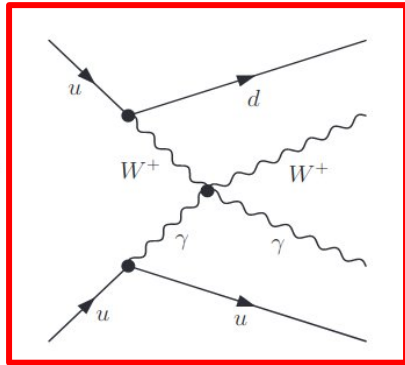
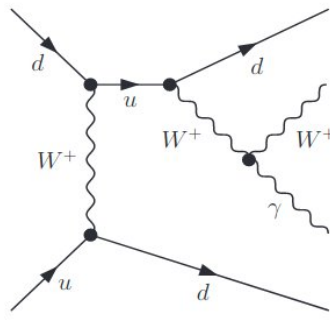
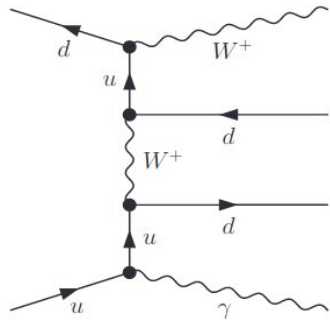
эффективность таггирования чарм-струй (ParticleNet)



распределение массы Хиггс-кандидата



$$\mu_{VH(H \rightarrow c\bar{c})} < 14 (7.6) @ 95\% CL$$



взаимодействие четвёртой степени

W+gamma

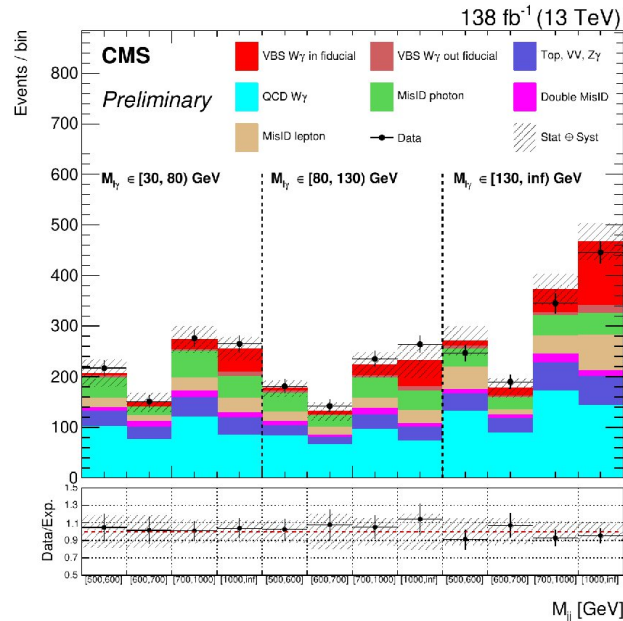
экспериментальная сигнатура:

1. две струи с большой общей инв массой
2. провал по быстротам
3. большой MET
4. изолированный фотон

Wγ + две струи

четверная электрослабая вершина

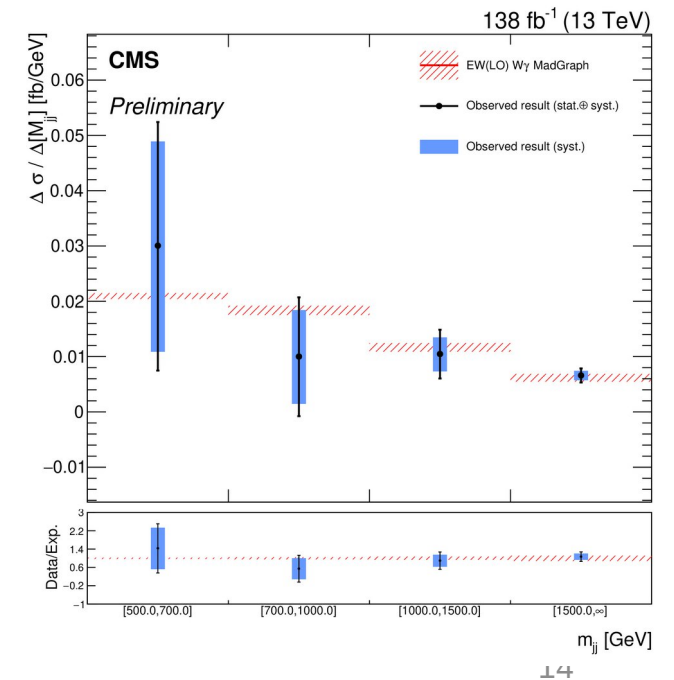
2D распределение 4x3



исключающие пределы при 95% CL аномальных четвертных вз-ий (aQGC, операторы высших порядков, 8-dim)

Expected. limit	Observed. limit	U_{bound}
$-5.1 < f_{M0}/\Lambda^4 < 5.1$	$-5.6 < f_{M0}/\Lambda^4 < 5.5$	1.7
$-7.1 < f_{M1}/\Lambda^4 < 7.4$	$-7.8 < f_{M1}/\Lambda^4 < 8.1$	2.1
$-1.8 < f_{M2}/\Lambda^4 < 1.8$	$-1.9 < f_{M2}/\Lambda^4 < 1.9$	2.0
$-2.5 < f_{M3}/\Lambda^4 < 2.5$	$-2.7 < f_{M3}/\Lambda^4 < 2.7$	2.7
$-3.3 < f_{M4}/\Lambda^4 < 3.3$	$-3.7 < f_{M4}/\Lambda^4 < 3.6$	2.3
$-3.4 < f_{M5}/\Lambda^4 < 3.6$	$-3.9 < f_{M5}/\Lambda^4 < 3.9$	2.7
$-13 < f_{M7}/\Lambda^4 < 13$	$-14 < f_{M7}/\Lambda^4 < 14$	2.2
$-0.43 < f_{T0}/\Lambda^4 < 0.51$	$-0.47 < f_{T0}/\Lambda^4 < 0.51$	1.9
$-0.27 < f_{T1}/\Lambda^4 < 0.31$	$-0.31 < f_{T1}/\Lambda^4 < 0.34$	2.5
$-0.72 < f_{T2}/\Lambda^4 < 0.92$	$-0.85 < f_{T2}/\Lambda^4 < 1.0$	2.3
$-0.29 < f_{T5}/\Lambda^4 < 0.31$	$-0.31 < f_{T5}/\Lambda^4 < 0.33$	2.6
$-0.23 < f_{T6}/\Lambda^4 < 0.25$	$-0.25 < f_{T6}/\Lambda^4 < 0.27$	2.9
$-0.60 < f_{T7}/\Lambda^4 < 0.68$	$-0.67 < f_{T7}/\Lambda^4 < 0.73$	3.1

сечение рассеяния



CMS-PAS-TOP-20-008, Workshop on Top Quark Physics 2022

$$m_{\text{top}} = 171.77 \pm 0.38 \text{ GeV}$$

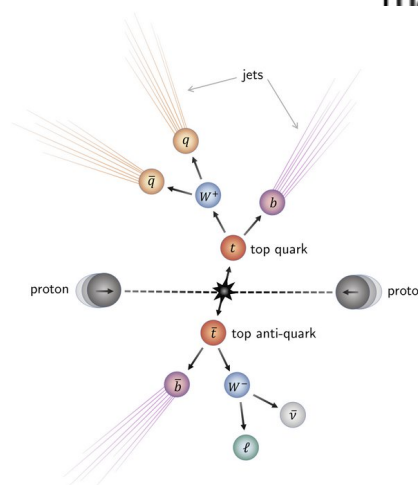
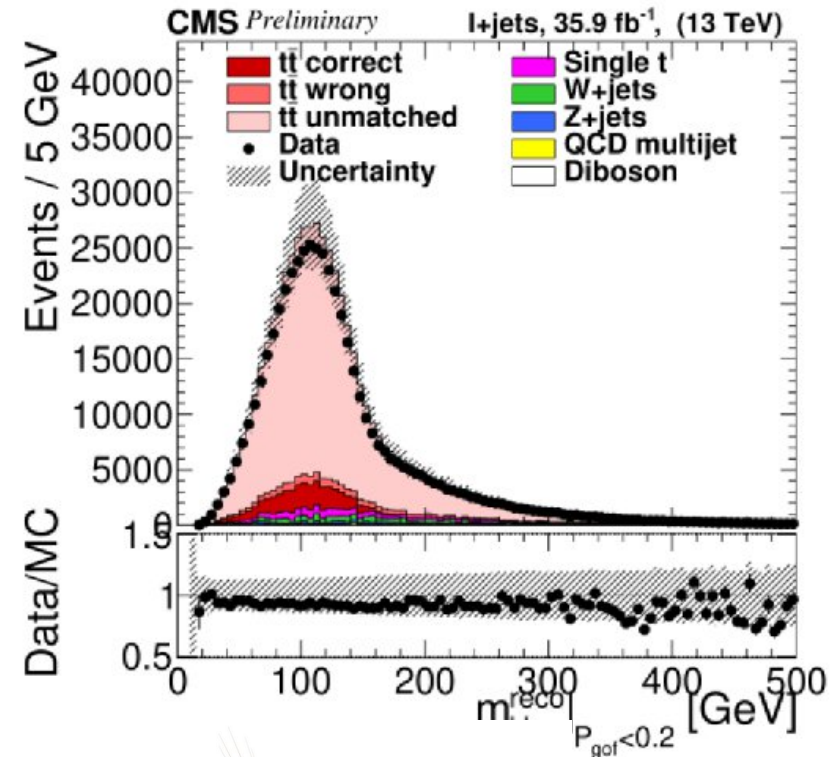
- 13 ТэВ
- конечное состояние: лептон+ 4 адронные струи (2 b-струи)
- прямое измерение массы
- самое точное измерение до сих пор: 0.22%
- новые методы анализа и определения сист. ошибок
 - сист. ошибки определяются в ML фите

$$\lambda(m_t, \vec{\theta}, \vec{\beta}, \vec{\omega} | \text{data}) = \left(\prod_i \lambda_i(m_t, \vec{\theta}, \vec{\beta}, \vec{\omega} | x_i) P(\vec{\beta}) P(\vec{\omega}) \right) \left(\prod_l P(\theta_l) \right)$$

- лучшее понимание теор. неопределённостей
- **пять** кинематических переменных вместо трёх, как в предыдущих измерениях

Ещё измерения массы топ кварка:

1. масса топ кварка из струной массы
2. полюсная масса



измерение относит. вер-ти распада B^0 мезона на два мюона:

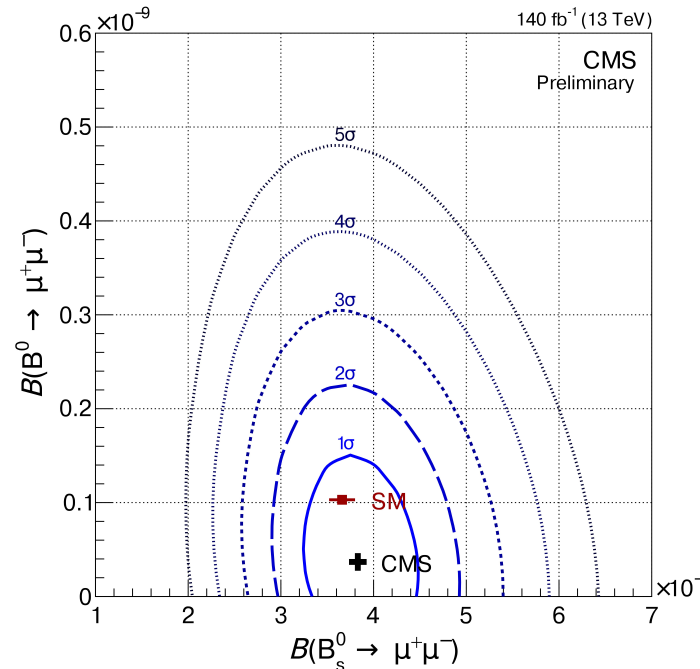
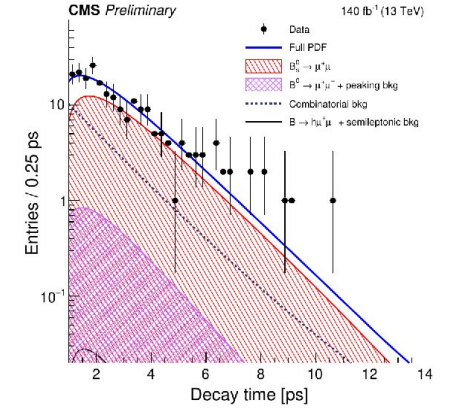
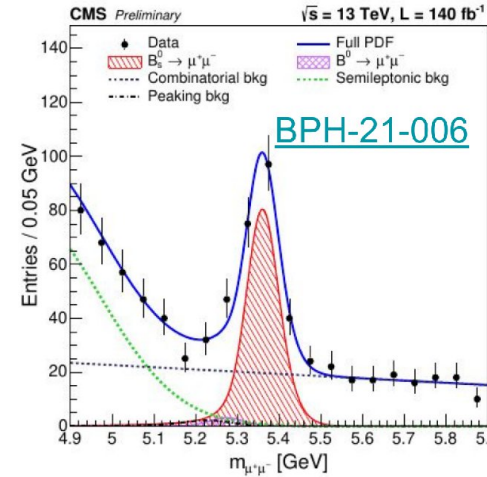
$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = [3.95_{-0.37}^{+0.39} (\text{stat})_{-0.24}^{+0.29} (\text{syst})] \times 10^{-9}$$

1. впервые был обнаружен в 2014 в комбинированном анализе CMS+LHCb- (поиски с 1980-х)
2. м.б. чувствителен к новой физике: диаграммы более высокого порядка (FCNC)
3. может быть связан с e/μ аномалиями, обнаруженными в LHCb, в таких процессах как

$$b \rightarrow sl^+\bar{l}^-$$

1. пока самое точное измерение без комбинаций с другими эксп-тами
2. хорошо согласуется с предсказаниями СМ лучше чем пред. измерения
3. измерено эфф. время жизни (среднее):

$$\tau = 1.83_{-0.20}^{+0.23} (\text{stat})_{-0.04}^{+0.04} (\text{syst}) \text{ ps.}$$



ограничение сверху на BR $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) < 1.5 \times 10^{-10} \text{ at } 90\% \text{ CL,}$$

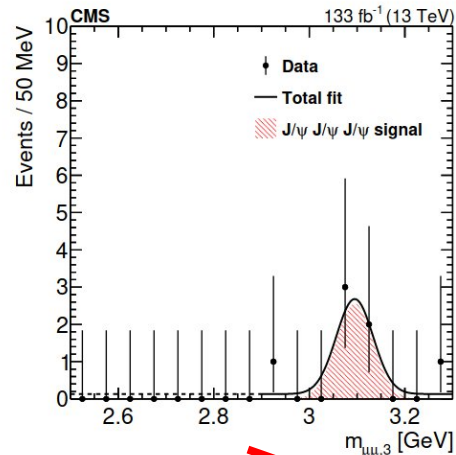
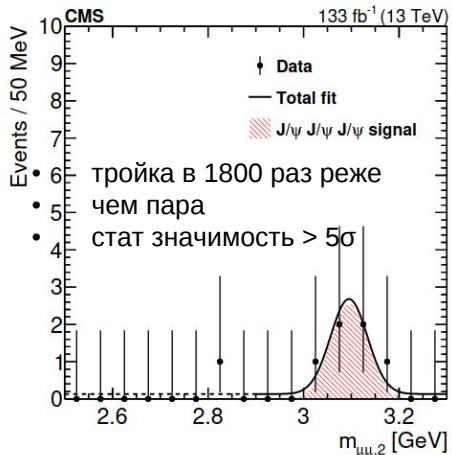
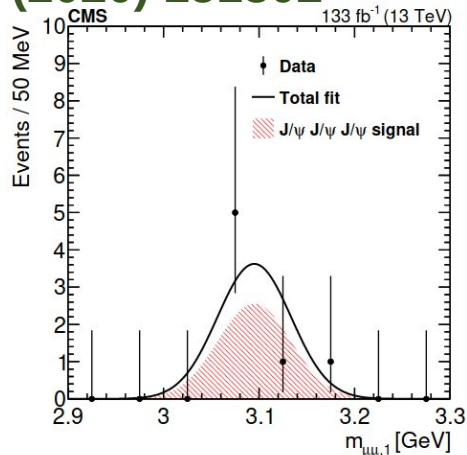
$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) < 1.9 \times 10^{-10} \text{ at } 95\% \text{ CL,}$$

контур ф-ции правдоподобия

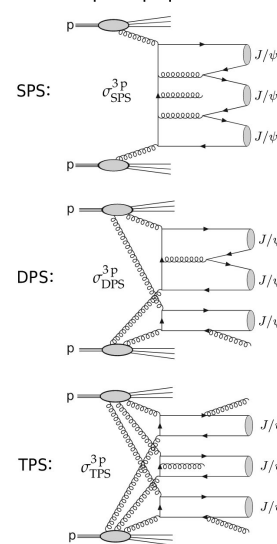
Двойное и тройное партонное взаимодействие: тройное рождение J/psi и двойное WW

Phys. Rev. Lett. 125
(2020) 151802

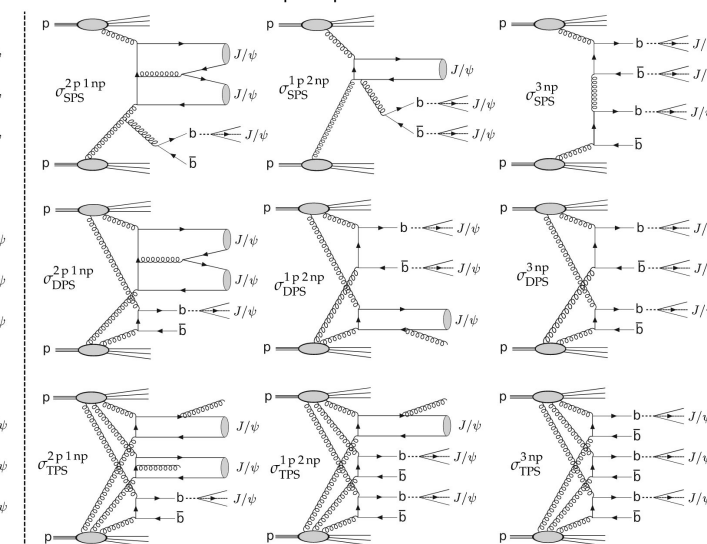
распределение инв. массы пары мюонов



Pure prompt production:



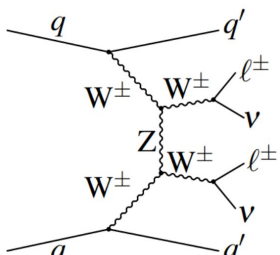
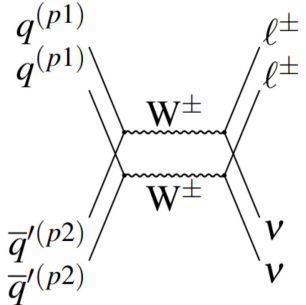
Nonprompt contributions:



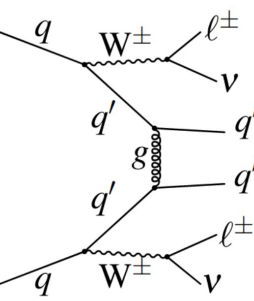
arXiv:2206.02681

нет струй - удобное КС

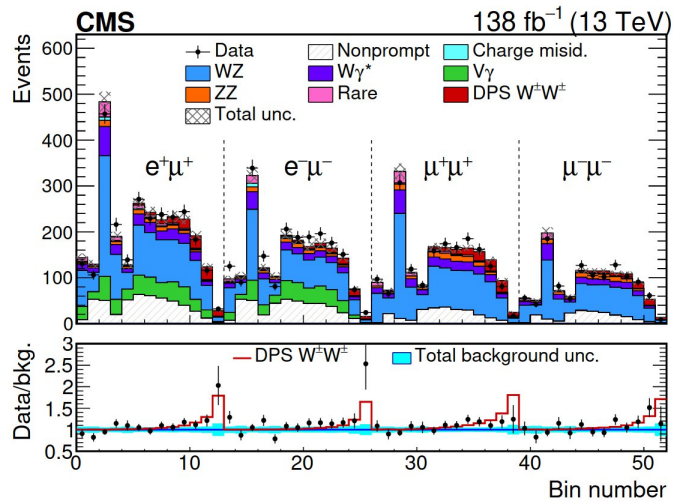
DPS



SPS



стат. значимость 6.2σ. первое набл

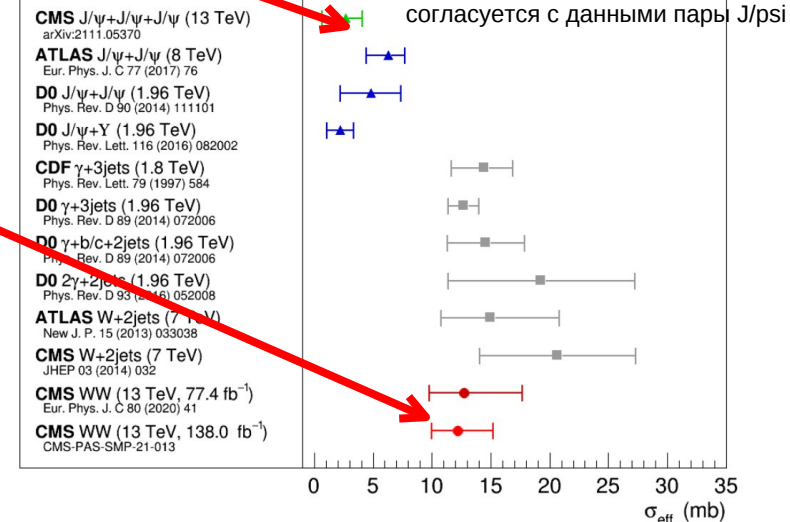


BDT дискриминант

σ_{eff}^- параметр модели MPI.

~ (поперечному расстоянию между взаимодействующими партонами)²

CMS Supplementary



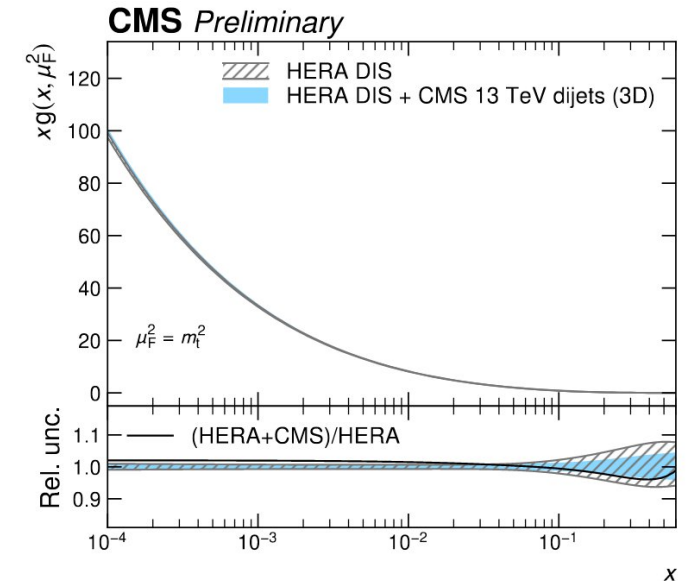
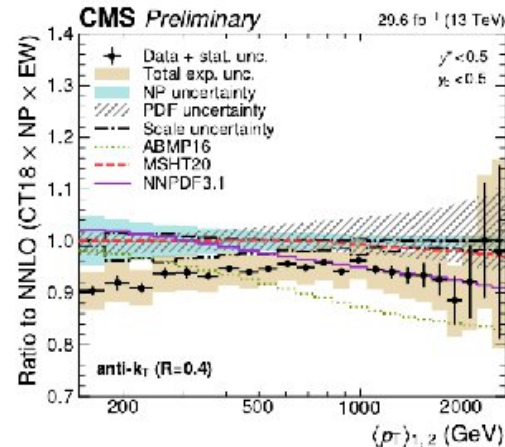
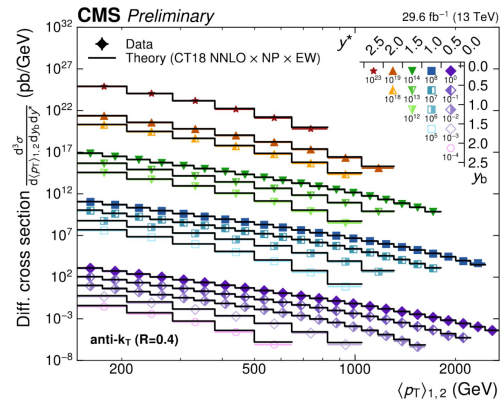
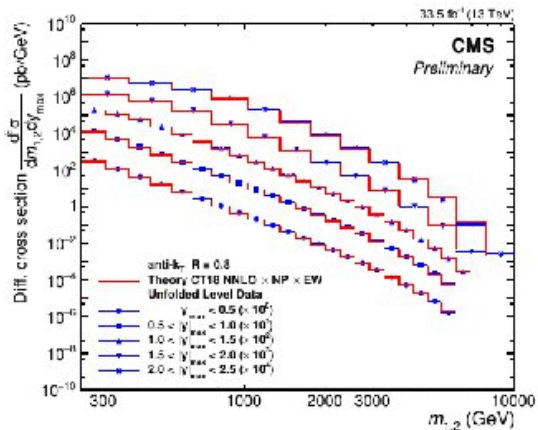
измерение дифференциального сечения
двухструйных событий

$$y_{\max} = \text{sign}(|\max(y_1, y_2)| - |\min(y_1, y_2)|) \max(|y_1|, |y_2|).$$

$$y^* = \frac{1}{2}|y_1 - y_2|, \quad y_b = \frac{1}{2}|y_1 + y_2|, \quad m_{1,2} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}, \quad \langle p_T \rangle_{1,2} = \frac{1}{2}(p_{T,1} + p_{T,2})$$

$$\frac{d^3\sigma}{dy^* dy_b dx} = \frac{1}{\varepsilon \mathcal{L}_{\text{int}}} \frac{N}{\Delta y^* \Delta y_b \Delta x} \quad \frac{d^2\sigma}{dy_{\max} dm_{1,2}} = \frac{1}{\varepsilon \mathcal{L}_{\text{int}}} \frac{N}{(2 \Delta |y|_{\max}) \Delta m_{1,2}}$$

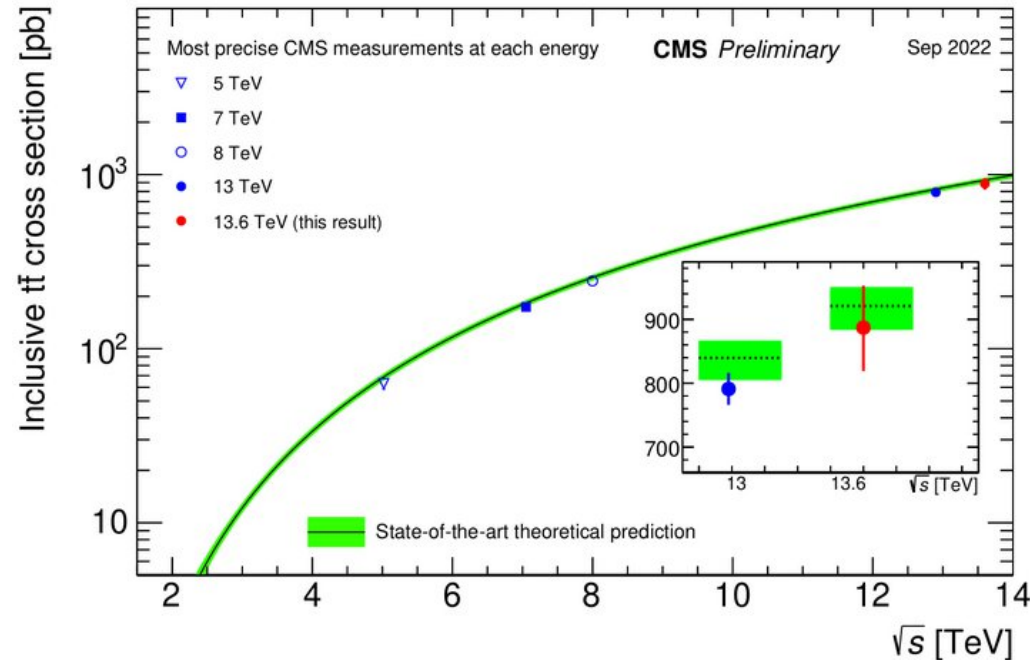
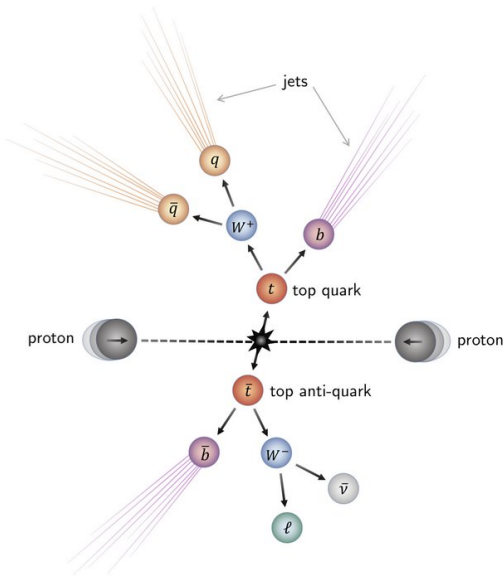
1. 2D и 3D распределения и сечения
2. многомерный unfolding
3. одноструйные и двухструйные триггеры



вклад в определение глюонной партонной
плотности (по методу HERA PDF):
улучшение точности для средних и больших x

Первые результаты для Run 3, $\sqrt{s} = 13.6$ GeV

первое измерение сечения рождения пары топ кварков при $\sqrt{s} = 13.6$ GeV



хорошее согласие с
теор. предсказаниями

СВЕТИМОСТЬ: $1.20 \pm 0.07 \text{ fb}^{-1}$

ИНКЛЮЗИВНОЕ СЕЧЕНИЕ: 887^{+43}_{-41} (stat + syst) ± 53 (lumi) pb

согласие с СМ: 921^{+29}_{-37} pb

на 10% больше топ-кварков чем
при 13 ТэВ

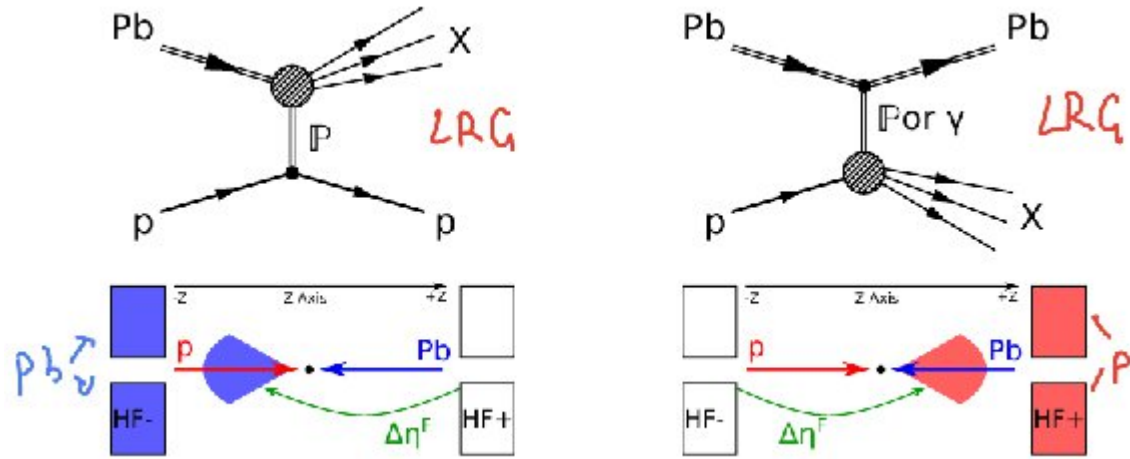
каналы:

- дилептонный
- лептон+струи

Участники эксперимента CMS от ПИЯФа

В.Т. Ким
Е.В. Кузнецова
В.А. Мурзин
В.А. Орешкин
А.Ю. Егоров
Д.Е. Соснов
и др.

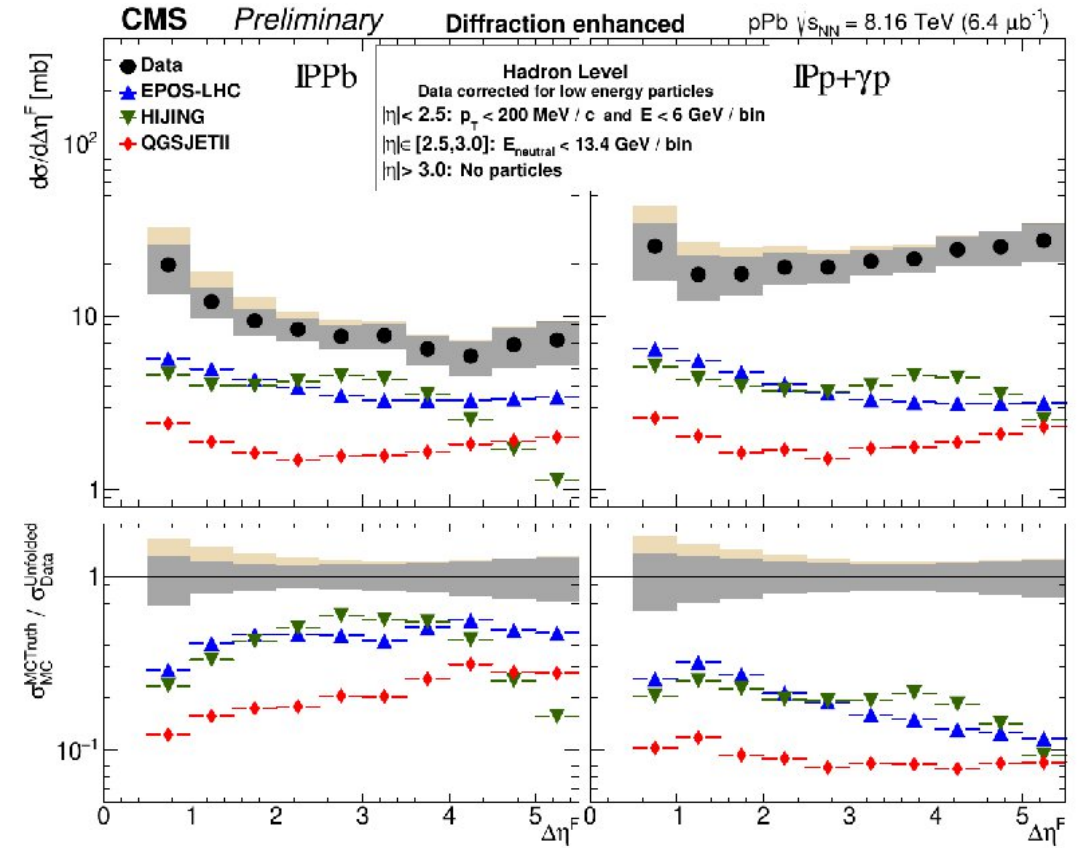
Измерение сечений как функции от величины быстрого интервала отсутствующего излучения в pPb соударениях



первое измерение на БАК!

- предыдущее измерение p+ядро при энергии 29.1 (эксперимент HELIOS)

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Delta\eta^F} \right|_{\Delta\eta^F: |\eta| < 3} = \frac{1}{A\epsilon\mathcal{L}} \left. \frac{dN}{d\Delta\eta^F} \right|_{\Delta\eta^F: |\eta| < 3}$$



большие отличия между данными и предсказаниями

1. EPOS-LHC в два раза меньше
 2. QGSJET II - в 4 раза меньше
- но хорошо предсказывают форму распр-я

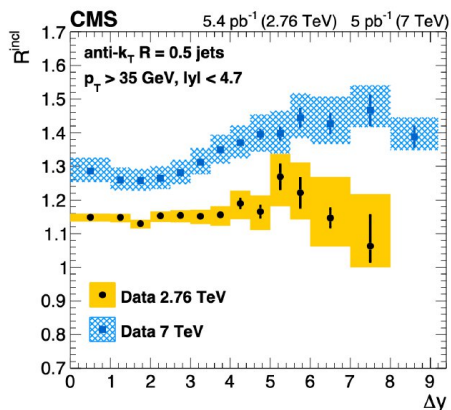
указание на большой вклад процессов ультрапериферического фотонного обмена

КХД: двуструйные сечения

измерение двухструйного сечения
и двуструйного К-фактора при 2.76 ТэВ
для Мюллер-Навелле струй
CMS [JHEP03(2022)189]

измерение при
двух энергиях
2.76 ТэВ и 7 ТэВ

JHEP 03 (2022) 189



$$R^{\text{incl}} = (d\sigma^{\text{incl}} / d\Delta y) / (d\sigma^{\text{excl}} / d\Delta y),$$

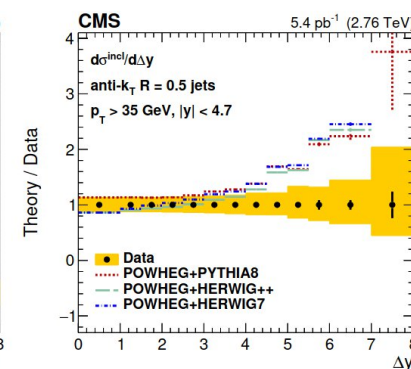
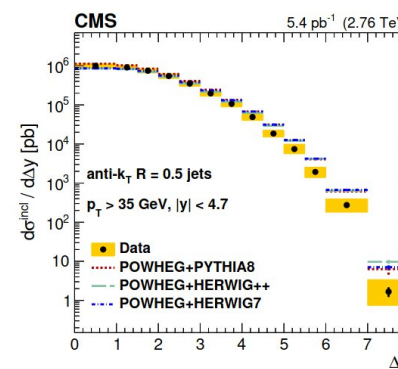
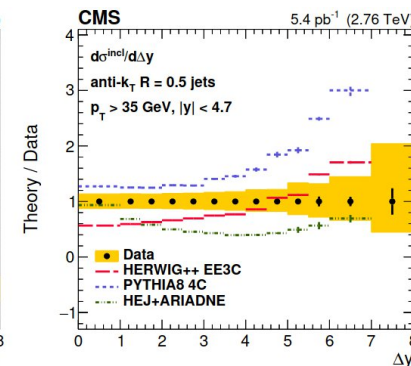
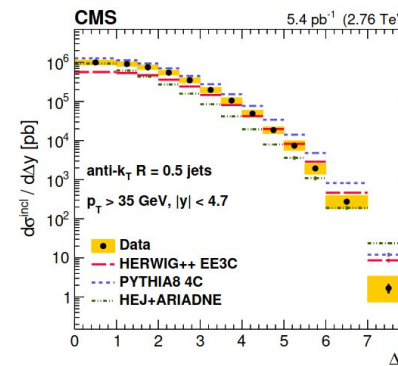
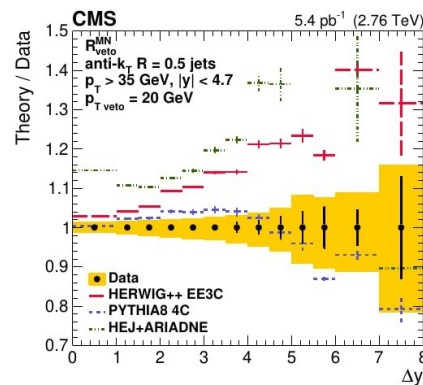
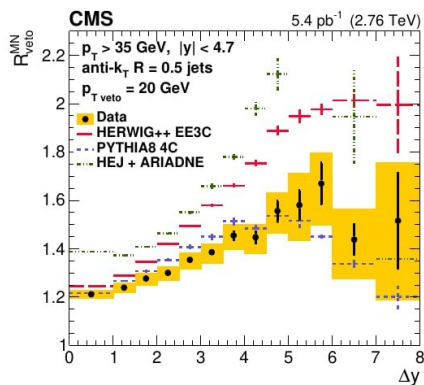
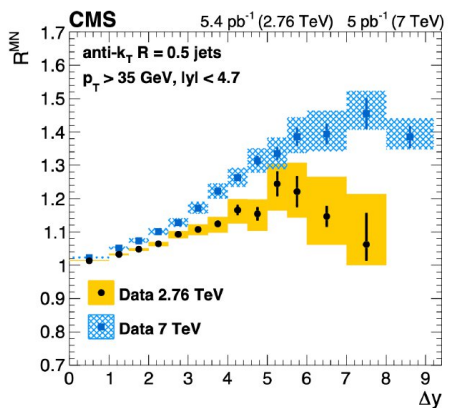
$$R^{\text{MN}} = (d\sigma^{\text{MN}} / d\Delta y) / (d\sigma^{\text{excl}} / d\Delta y),$$

$$R_{\text{veto}}^{\text{incl}} = (d\sigma^{\text{incl}} / d\Delta y) / (d\sigma_{\text{veto}}^{\text{excl}} / d\Delta y),$$

$$R_{\text{veto}}^{\text{MN}} = (d\sigma^{\text{MN}} / d\Delta y) / (d\sigma_{\text{veto}}^{\text{excl}} / d\Delta y).$$

$$d\sigma^{\text{incl}} / d\Delta y,$$

$$d\sigma^{\text{MN}} / d\Delta y,$$



- наблюдаемая чувствительна к эффектам БФКЛ
- измерение при разных энергиях важно для изучения струй Мюллер-Навелле

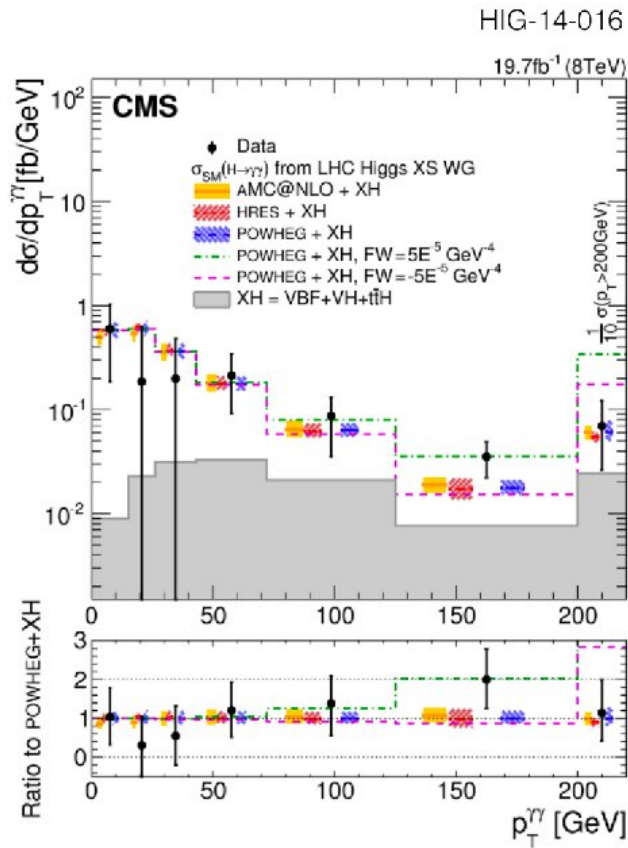
Заключение

1. коллаборация CMS получила много новых результатов
- за 10 лет были измерены многие характеристики бозона Хиггса
2. Улучшены точности по многим характеристикам частиц стандартной модели
 1. масса H
 2. масса топ кварка
 3. наблюдаются редкие процессы, которые раньше
 4. статистические и систематические и теор. неопределённости сравнивались
 5. Run 2 - эра прецизионных измерений
3. Группа ПИЯФ участвовала в анализах
 - струи с большим интервалом разделения по скорости с вето на образование дополнительных струй
 - предварительные данные первого измерения дифракционного протон-свинцового рассеяния указывают на большой вклад обмена фотонами

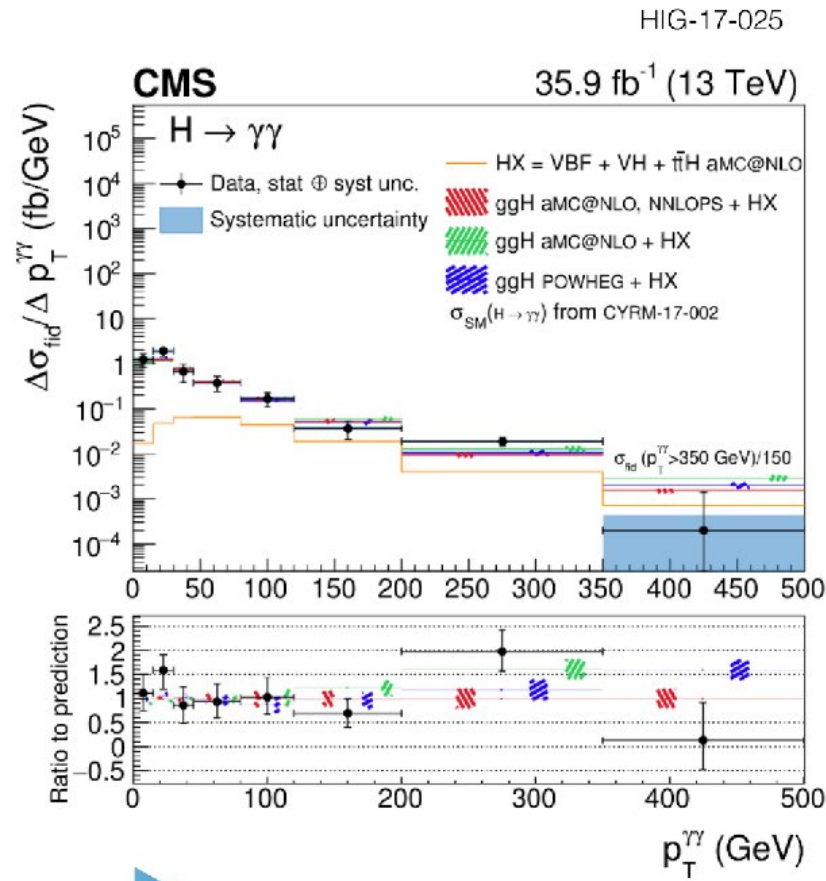
Backup

Изучение свойств бозона Хиггса (10 лет)

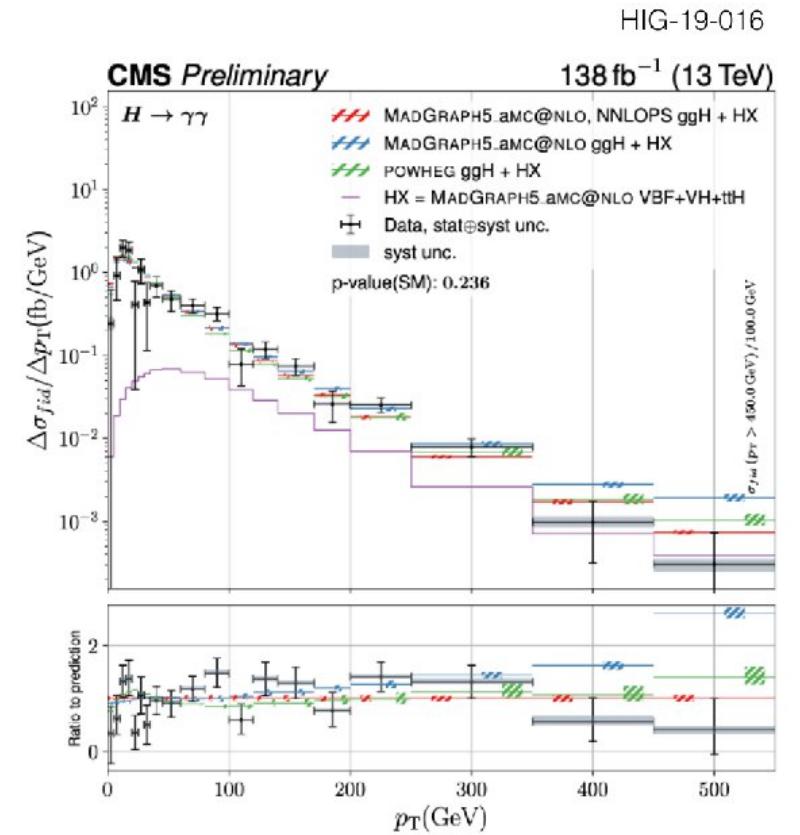
эволюция измерений



Run 1



2016

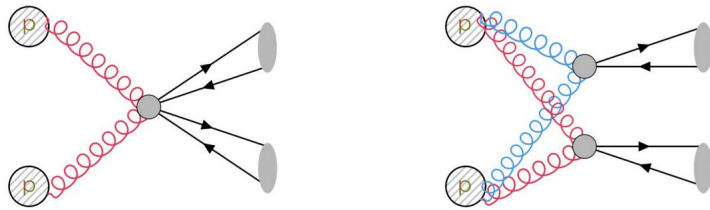


Full Run 2

тройное партонное вз-е:

рождение тройки J/ψ мезонов

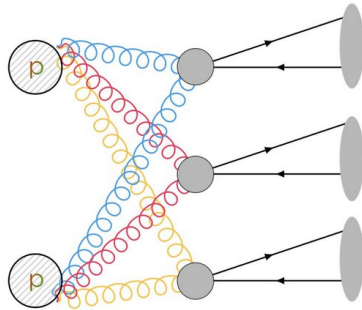
ранее эксперименты ATLAS, CMS, LHCb наблюдали рождение двух J/ψ мезонов



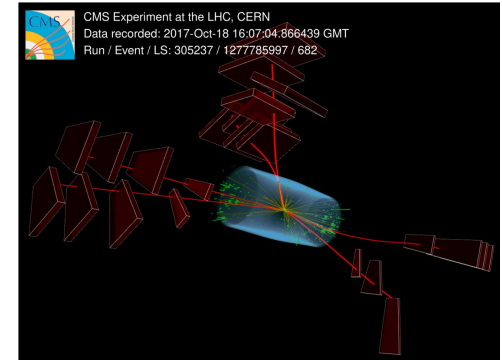
double parton scattering

CMS впервые провёл измерение рождения тройки J/ψ мезонов

triple parton scattering



- извлечён $\sigma(\text{eff})$ - параметр модели многократных вз-ий
- он согласуется с данными пары J/ψ
- однако, не согласуется с данными рождения Z-бозона или пары струй указание на различие в поперечном распределении кварков и глюонов



конечное состояние: 6 мюонов

