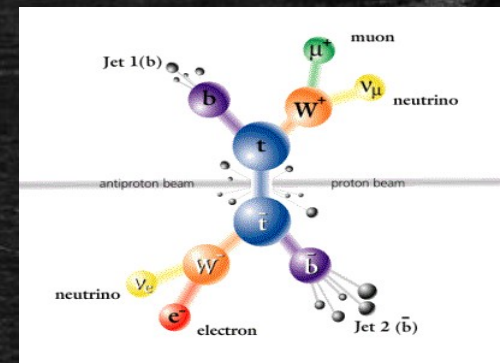


Физика топ-кварка



- Основные свойства топ-кварка, процессы рождения и распада
- Измерения массы, сечений, существующие рассогласования
- Поиск отклонений от СМ, новые частицы в рождении или распаде топ-кварка, SMEFT, FCNC
- Регистрация «запутанности» в рождении пары $t\bar{t}$, проявление «топониума»
- Поиск темной материи в процессах с топ-кварком

Лев Дудко

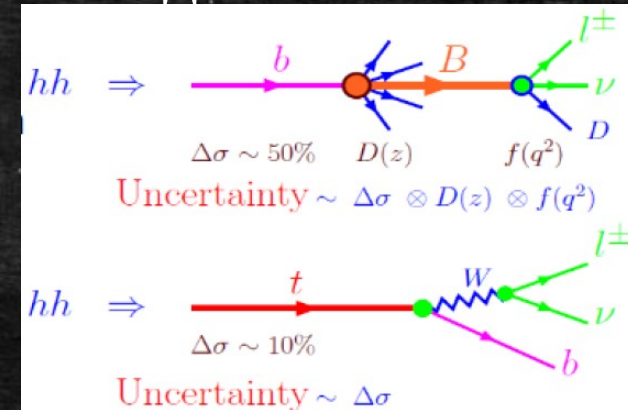
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Главные особенности физики топ-кварка

- Топ-кварк является наиболее тяжелым бесструктурным объектом СМ с массой близкой к масштабу электрослабого взаимодействия ($M_{\text{топ}} = 172.52 \pm 0.33$ ГэВ)
- Топ-кварк не образует составных адронов, следовательно, уменьшается ошибка измерений и сохраняется информация о фундаментальных взаимодействиях (спиновые корреляции,...)

$$\tau_t = \frac{1}{\Gamma_{\text{tot}}} \approx 10^{-25} < \tau_{\text{had}} \approx 10^{-24}$$

- Существует практически единственный канал распада топ-кварка, что существенно упрощает исследования.
- Направление вылета лептона от W полностью коррелирует со спином топ-кварка.



$$t \rightarrow Wb; \quad Br(t \rightarrow \text{other}) < 10^{-3}$$

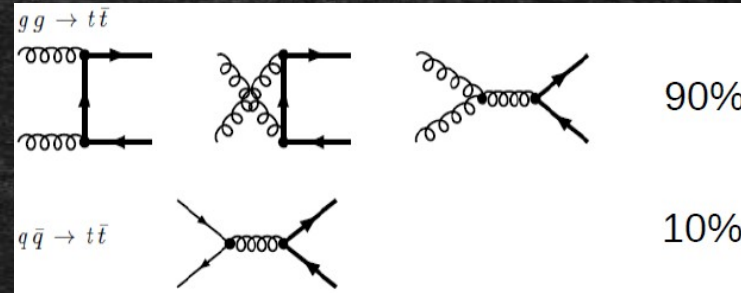
$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{d\cos\varphi} = \frac{1 + \alpha \cos\varphi}{2}$$

- Точность вычислений сечений составляет O(5-10%), можно измерить параметр V_{tb} ККМ матрицы
- Именно в процессах рождения топ-кварка можно ожидать первое проявление отклонений от предсказаний СМ.

Процессы рождения топ-кварка

$t\bar{t}$ парное рождение (КХД) 1995 г.

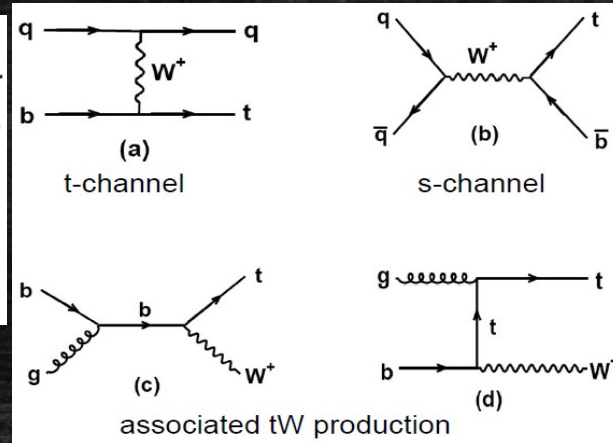
	σ_{NLO} (пб)
Tevatron ($\sqrt{s} = 1.96$ ТэВ $p\bar{p}$)	$7.08 \pm 5\%$
LHC ($\sqrt{s} = 7$ ТэВ pp)	$165 \pm 6\%$
LHC ($\sqrt{s} = 8$ ТэВ pp)	$234 \pm 4\%$
LHC ($\sqrt{s} = 14$ ТэВ pp)	$920 \pm 5\%$



D0, CDF (Tevatron)
CMS, ATLAS,
LHCb [JHEP08(2018)174]
(LHC)

$t(\bar{t})$ одиночное рождение (электрослабые взаимодействия) 2009 г.

	s-channel	t-channel	Wt
Tevatron ⁵⁰ ($\sqrt{s} = 1.96$ TeV $p\bar{p}$)	$1.04 \pm 4\%$	$2.26 \pm 5\%$	$0.14 \pm 20\%$
LHC ^{63,72} ($\sqrt{s} = 7$ TeV pp)	$4.6 \pm 5\%$	$64 \pm 4\%$	$15.6 \pm 8\%$
LHC ⁷³ ($\sqrt{s} = 8$ TeV pp)	$5.55 \pm 4\%$	$87.2^{+4}_{-3}\%$	$11.1 \pm 7\%$
LHC ⁵² ($\sqrt{s} = 14$ TeV pp)	$12 \pm 6\%$	$243 \pm 4\%$	$75 \pm 10\%$

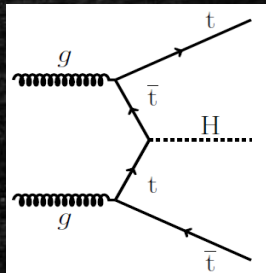


D0, CDF (Tevatron)
CMS, ATLAS (LHC)

CMS, ATLAS (LHC)

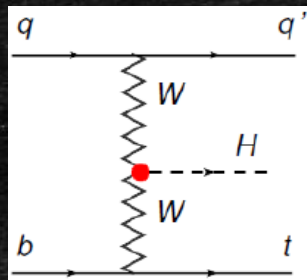
$t\bar{t}H(W,Z,A)$

$\sim 0.1 - 1$ pb
 $>5\sigma$

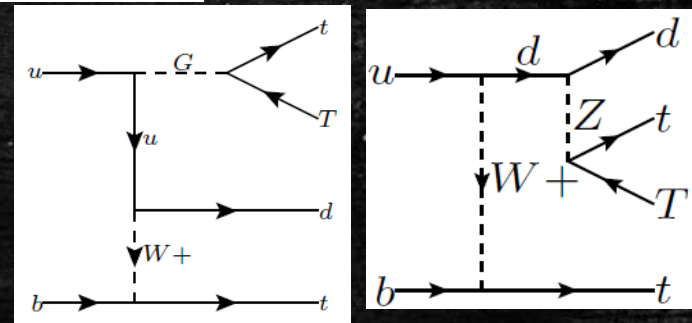


**tHq
(tZq, tAq)**

~ 0.01 pb

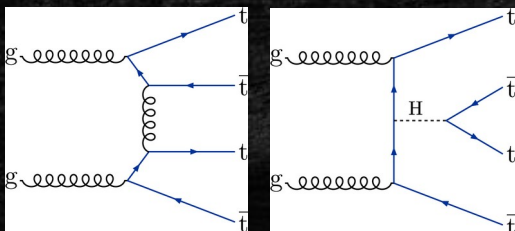


**$t\bar{t}W$ тройное рождение
 ~ 2 fb, HL-LHC**



$t\bar{t}t\bar{t}$

~ 10 fb

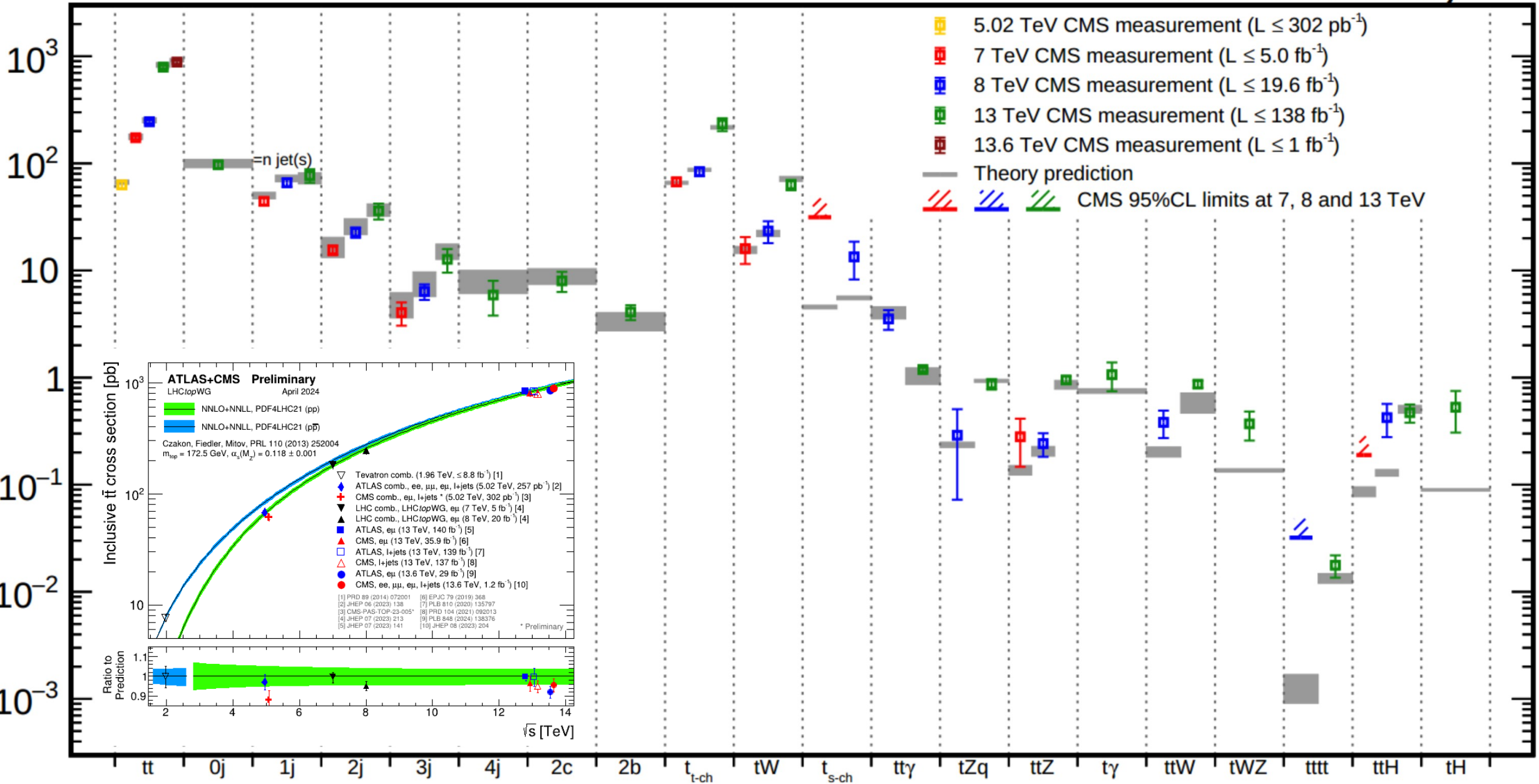


E.Boos, L.Dudko "Single Top Quark Physics" Int.J.Mod.Phys.A 27 (2012) 1230026
E.Boos et.al. "Top Quark" Phys.Part.Nucl. 50 (2019) 3, 231-258, Fiz.Elem.Chast.Atom.Yadra 50 (2019)

Aug 2023

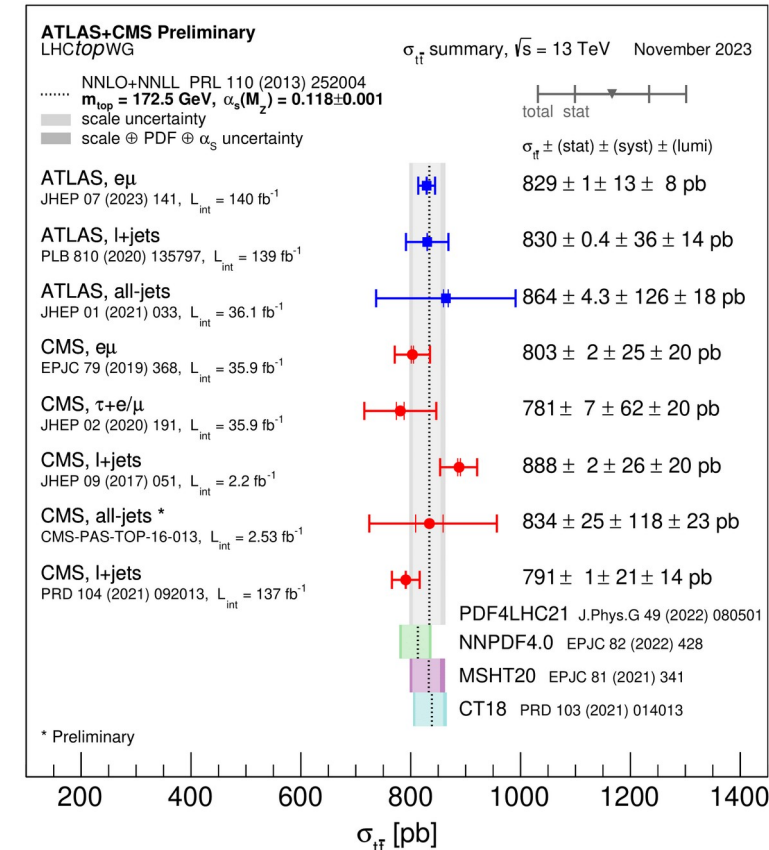
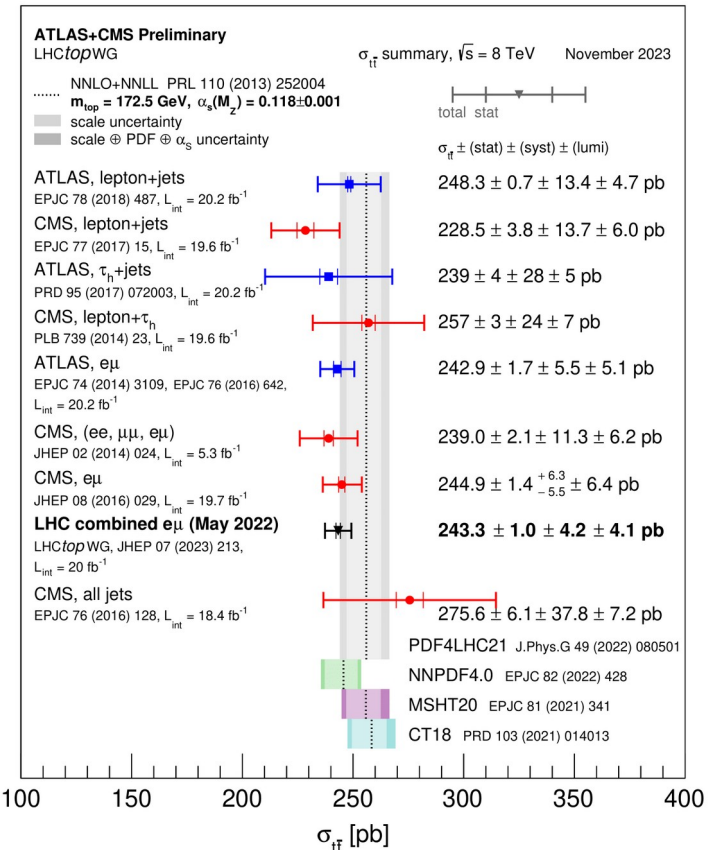
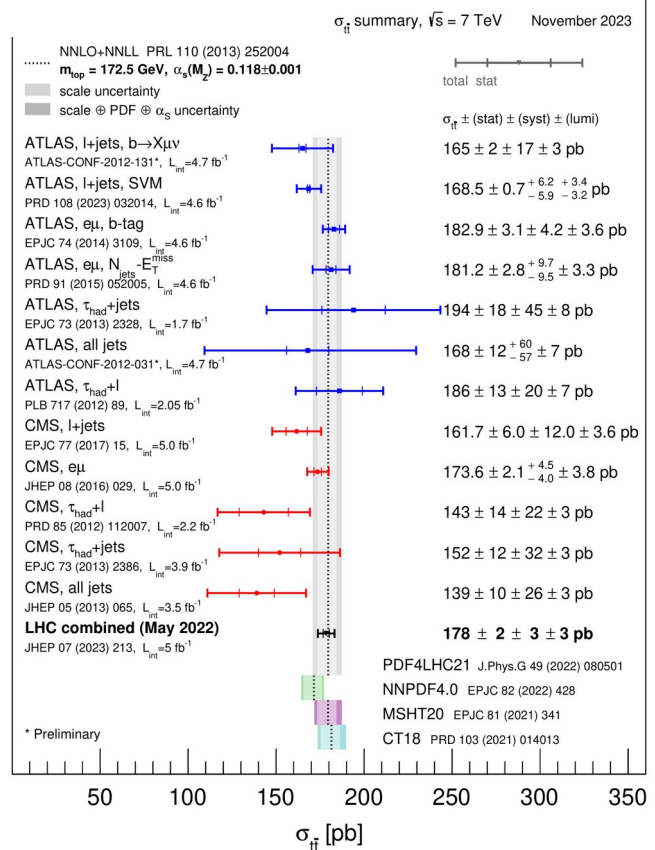
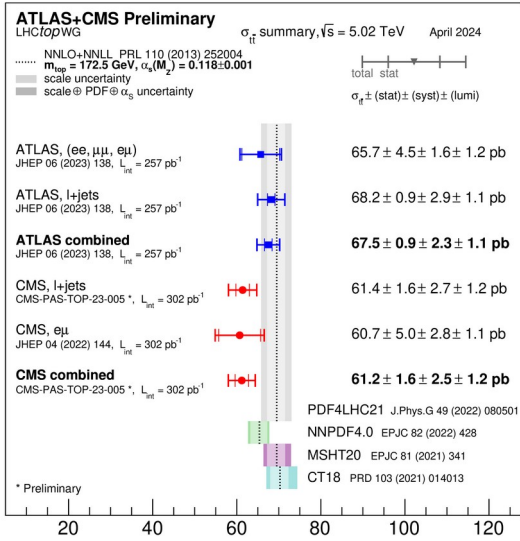
CMS Preliminary

Production Cross Section, σ [pb]

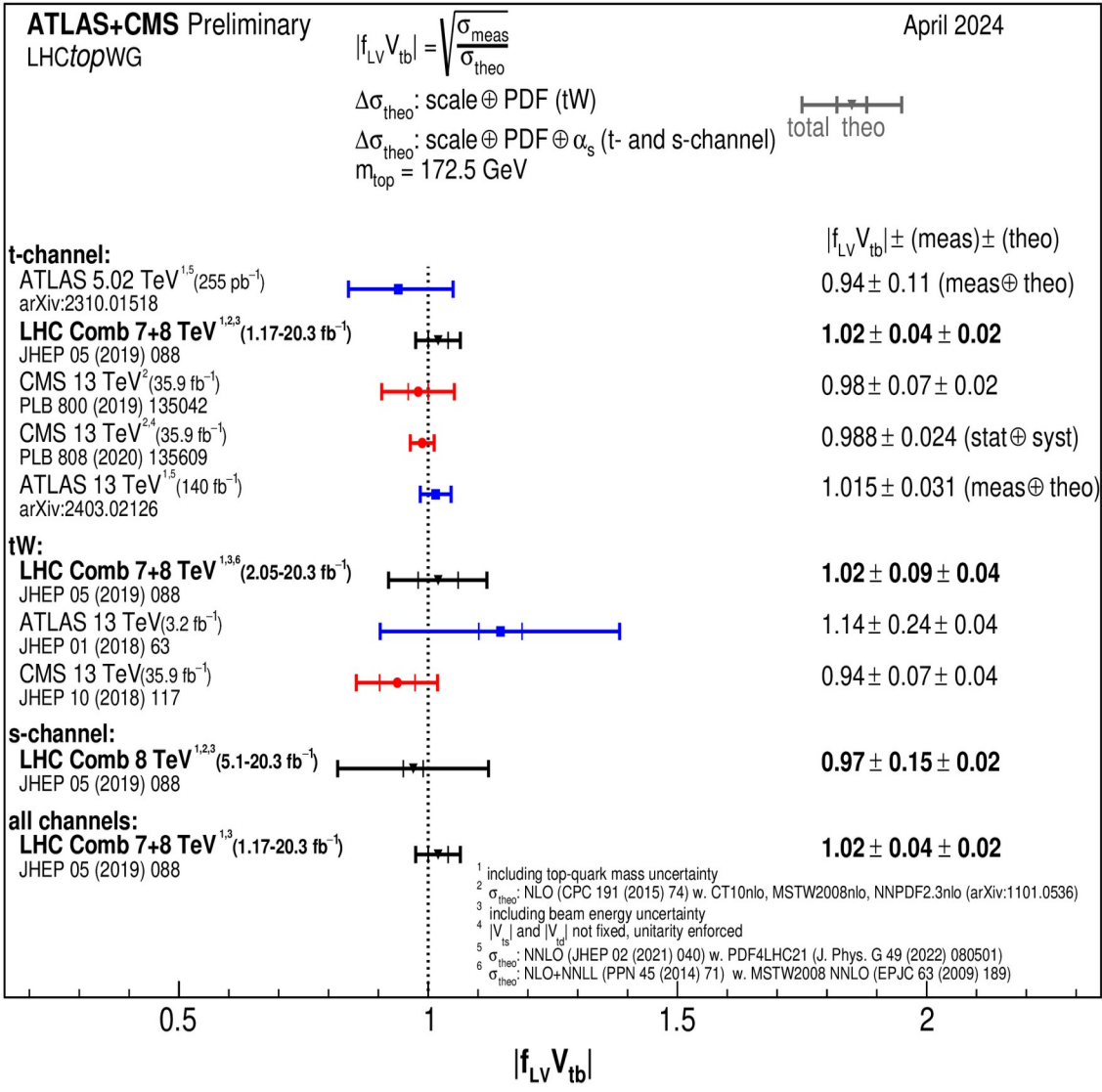
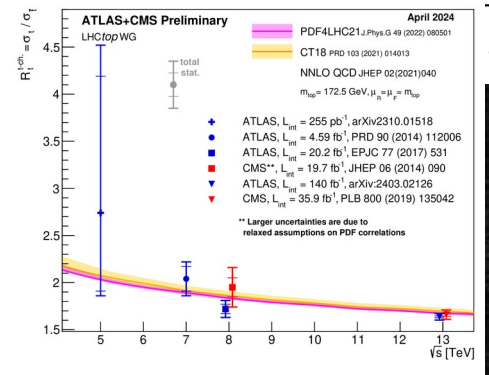
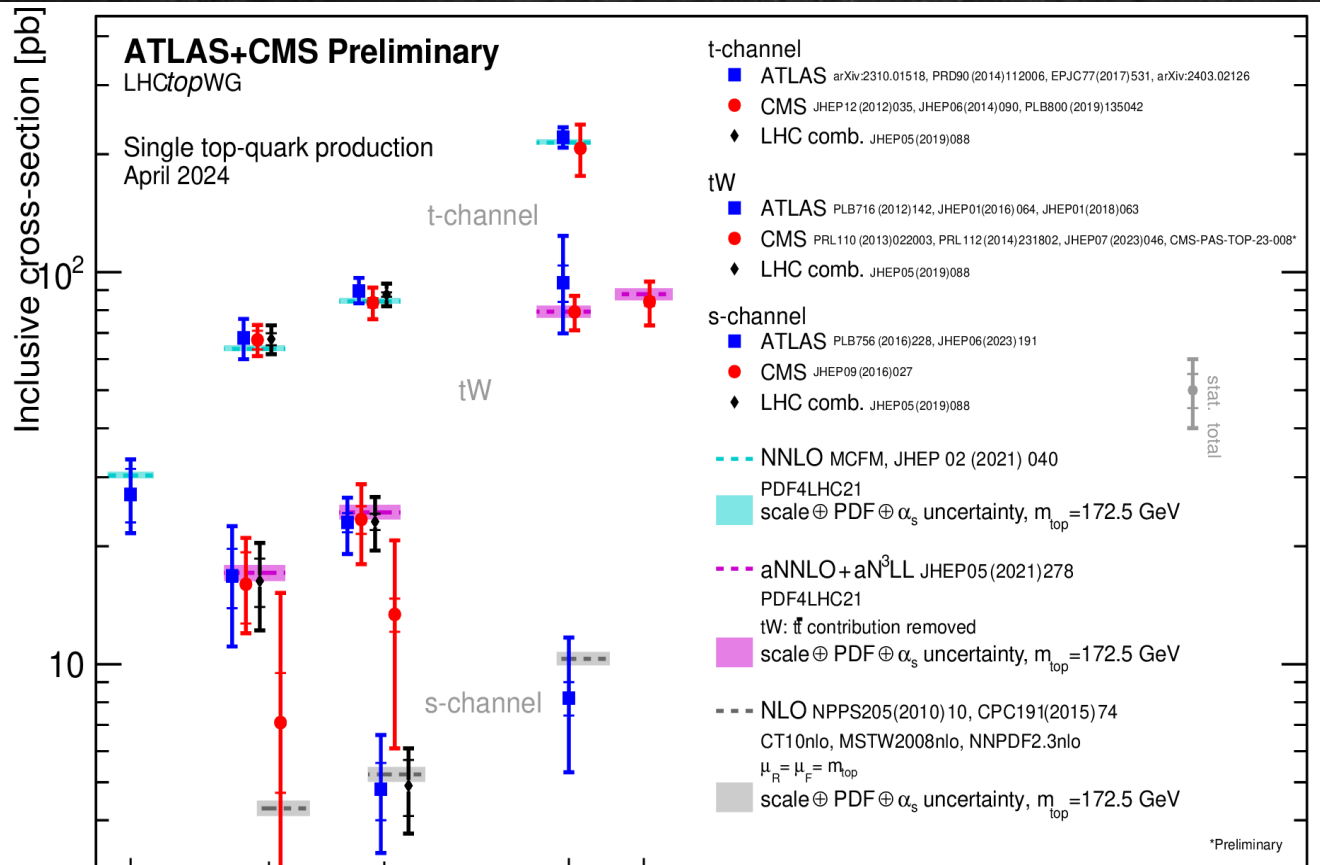


All results at: <http://cern.ch/go/pNj7>

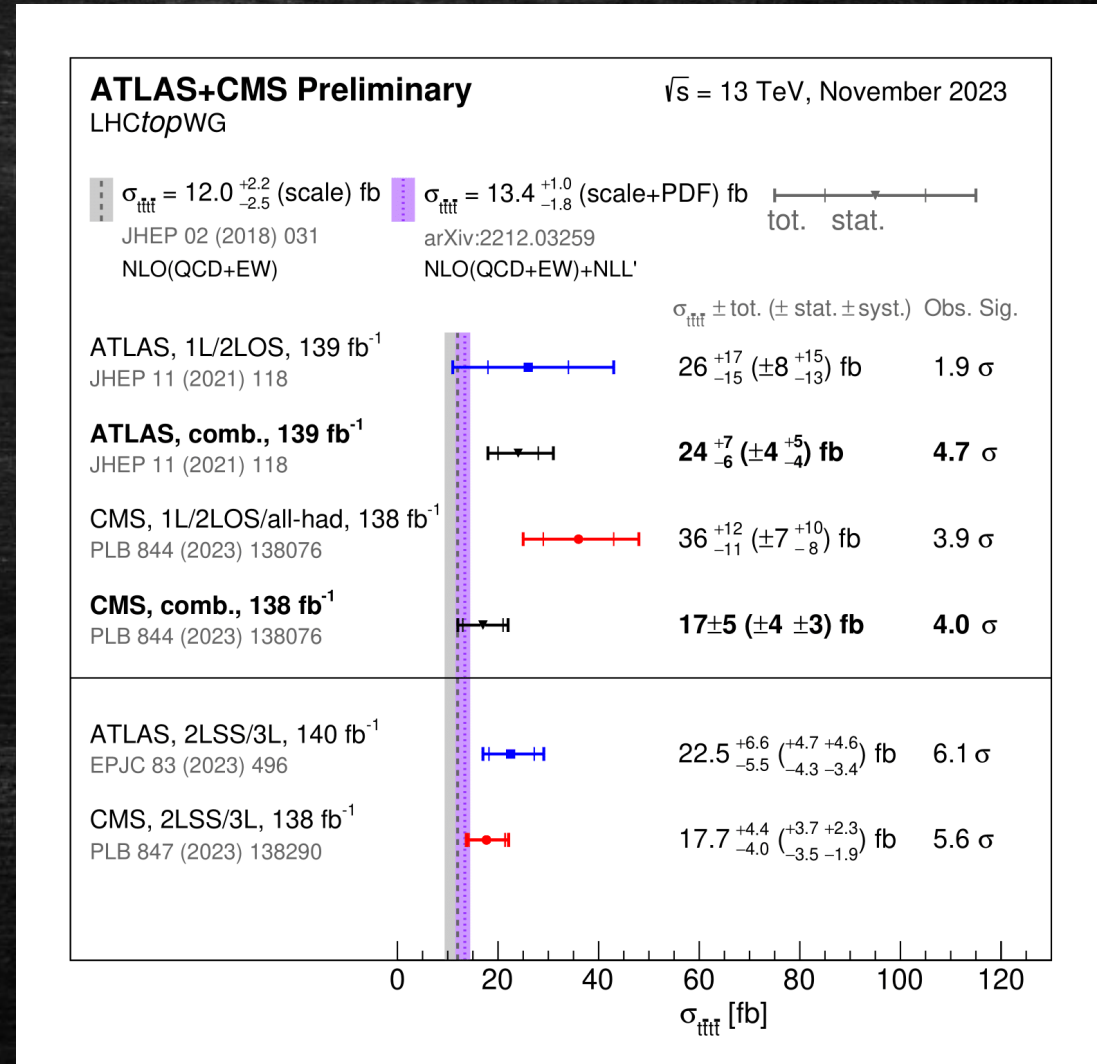
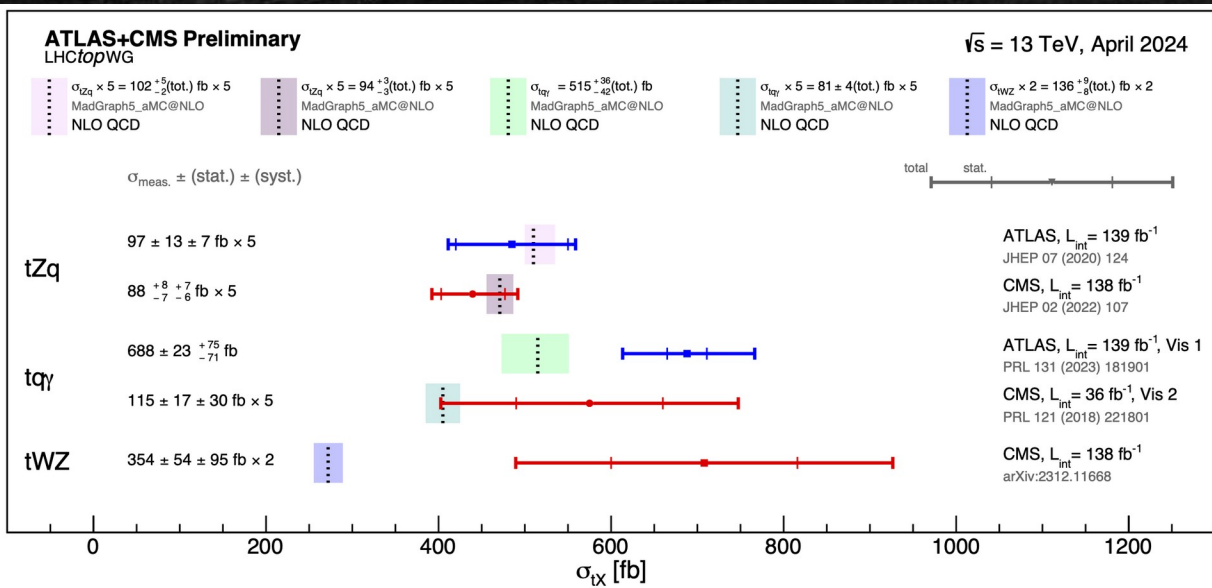
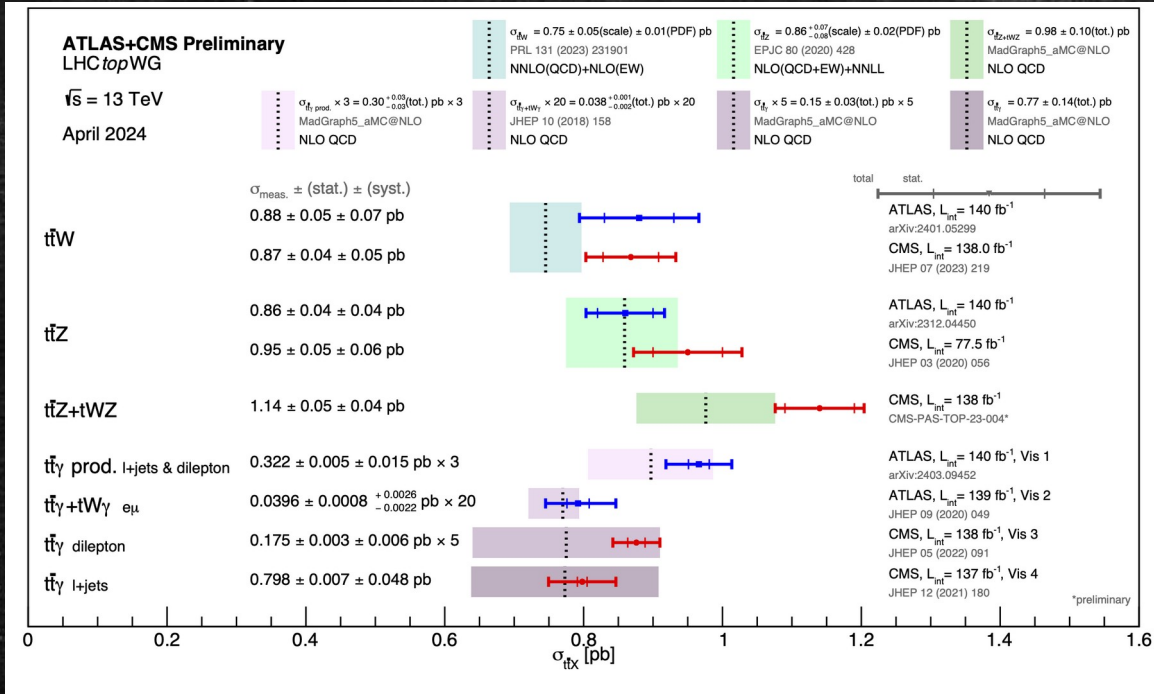
Сечения парного (КХД) рождения топ-кварков



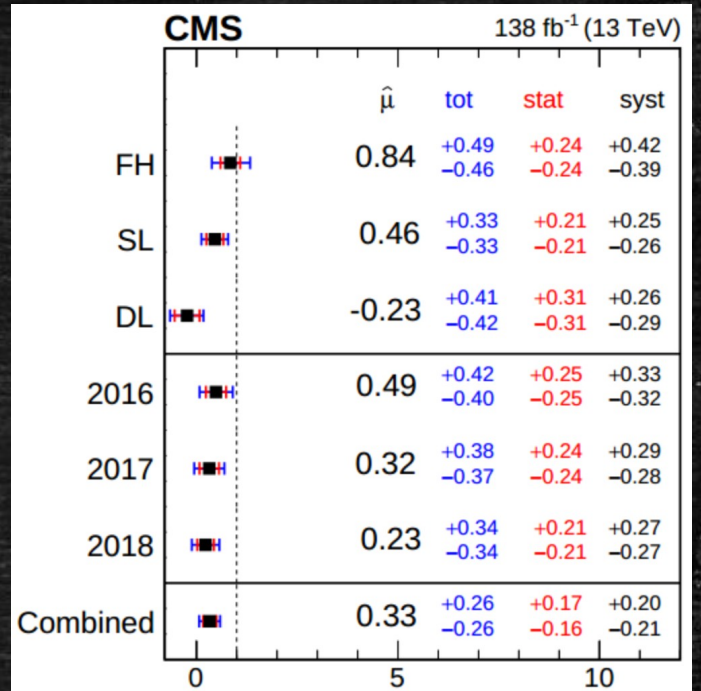
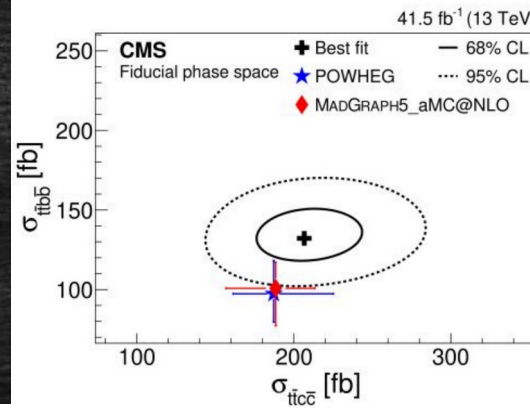
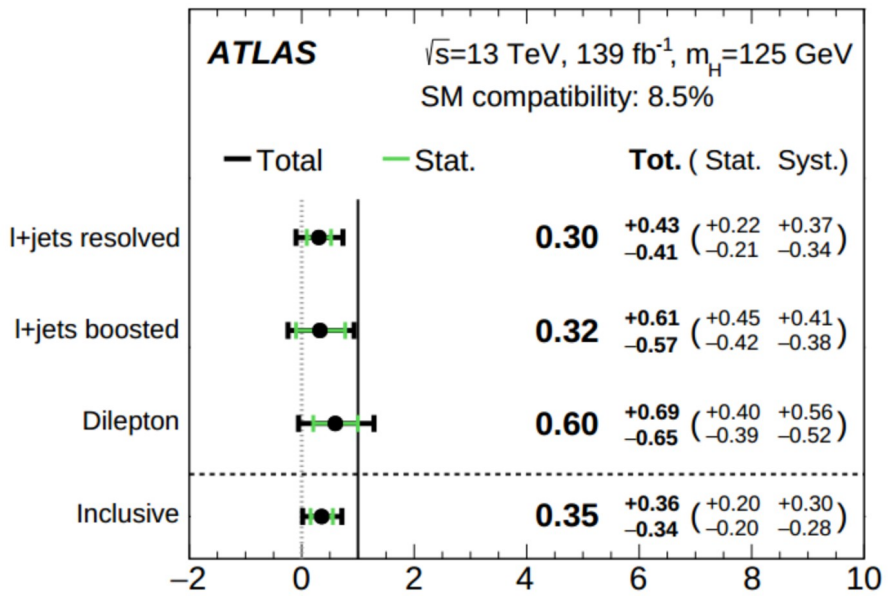
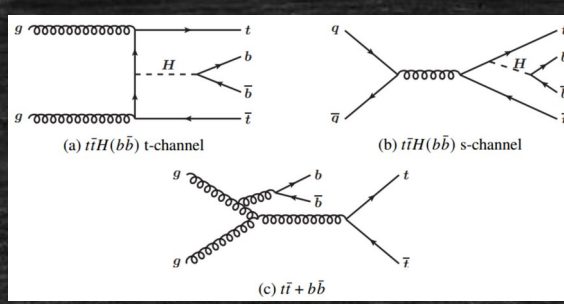
Одиночное (электрослабое) рождение топ-кварка, измерение V_{tb} (CKM)



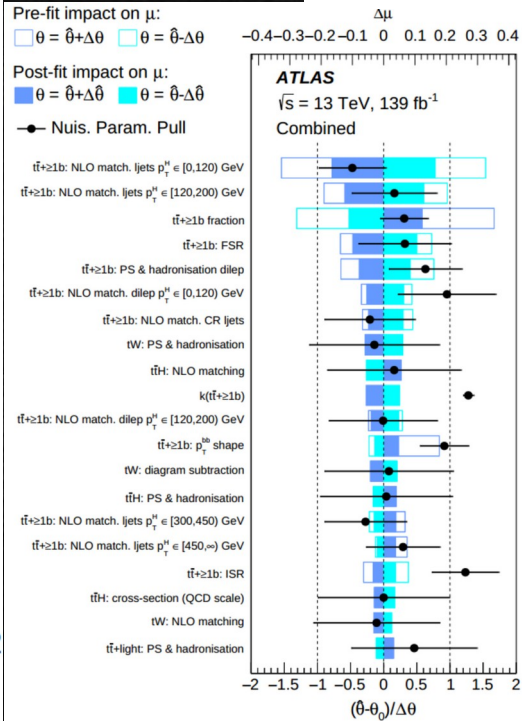
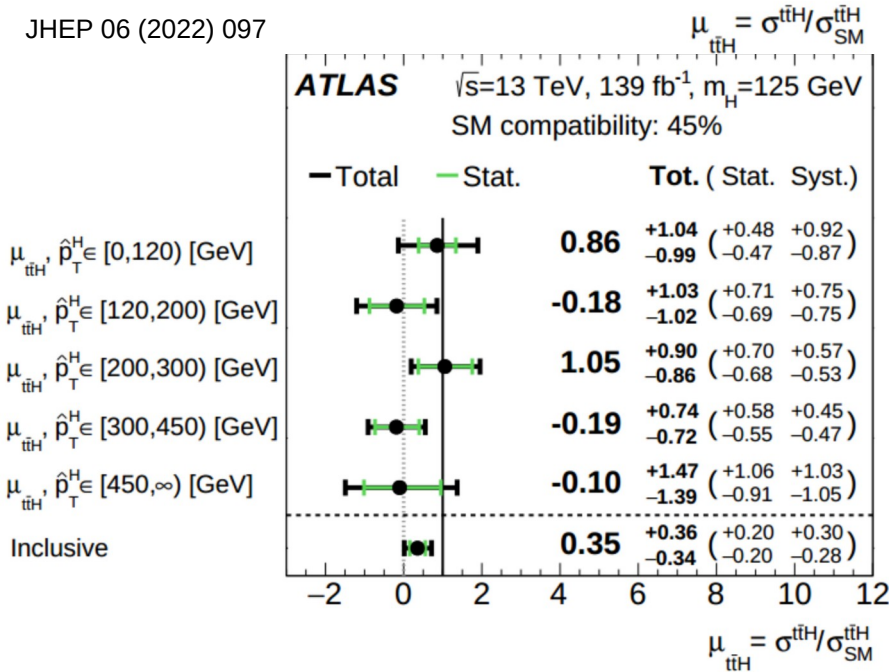
$t\bar{t}X$, tX , $t\bar{t}t\bar{t}$ процессы рождения топ-кварка



$t\bar{t}H$ процессы

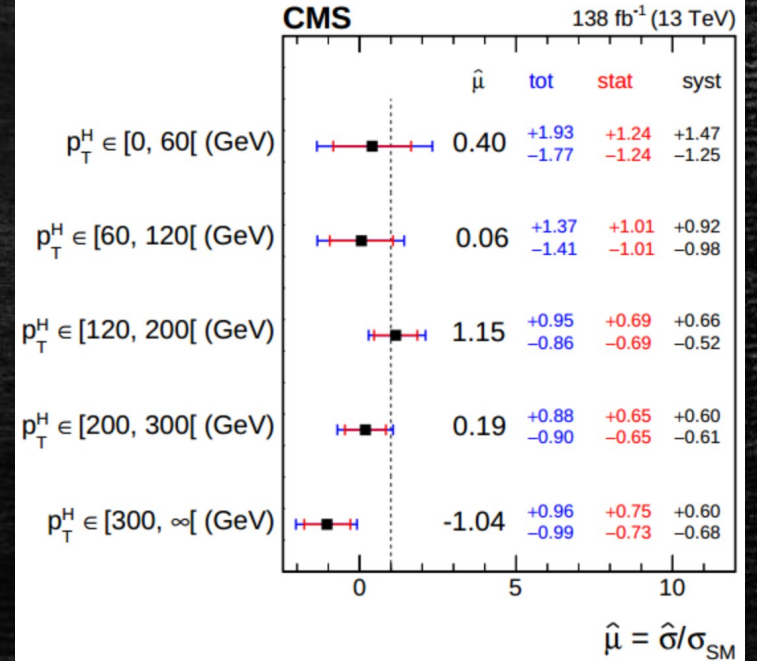


JHEP 06 (2022) 097



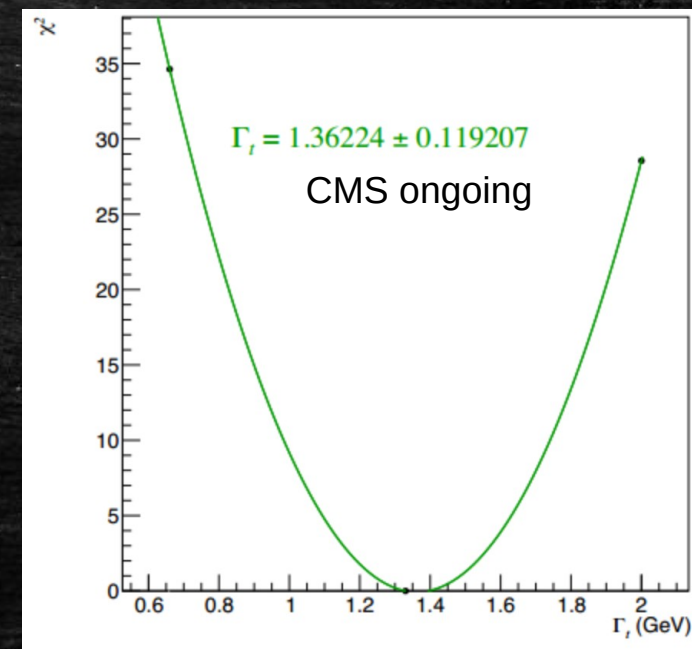
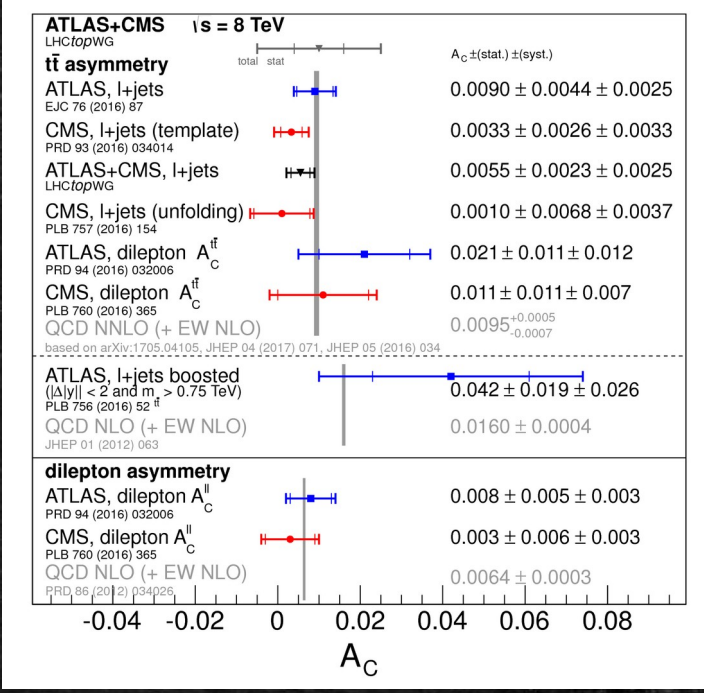
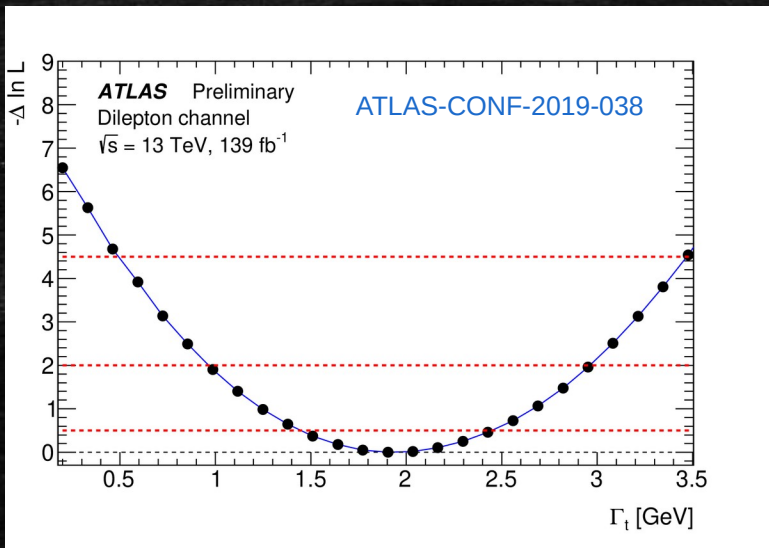
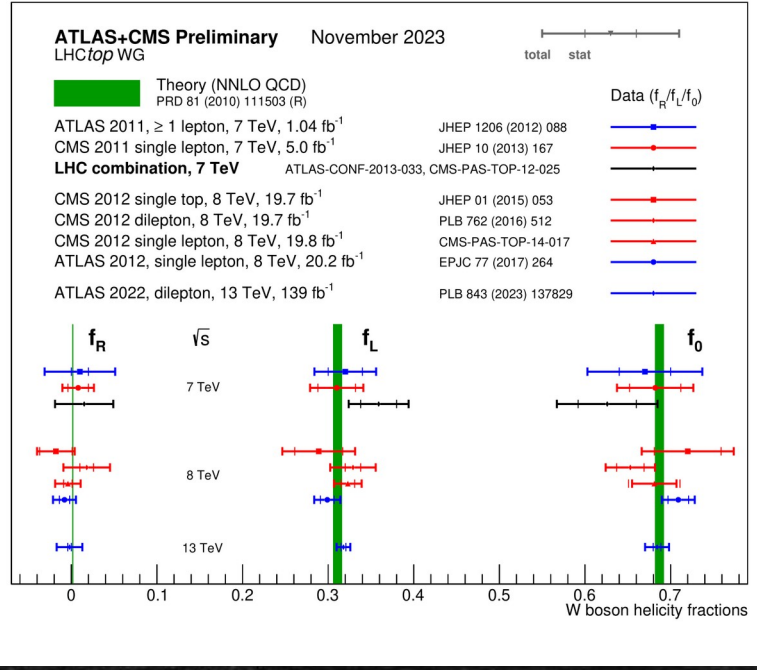
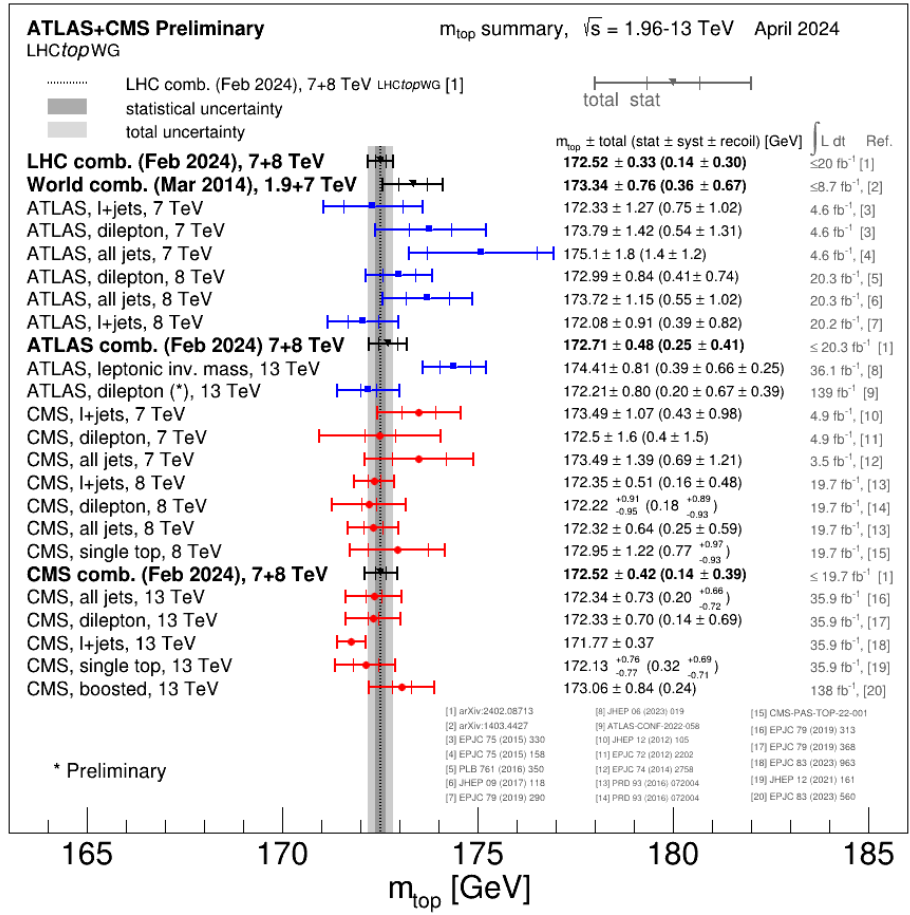
2407.10896

$$\hat{\mu} = \hat{\sigma} / \sigma_{SM}$$

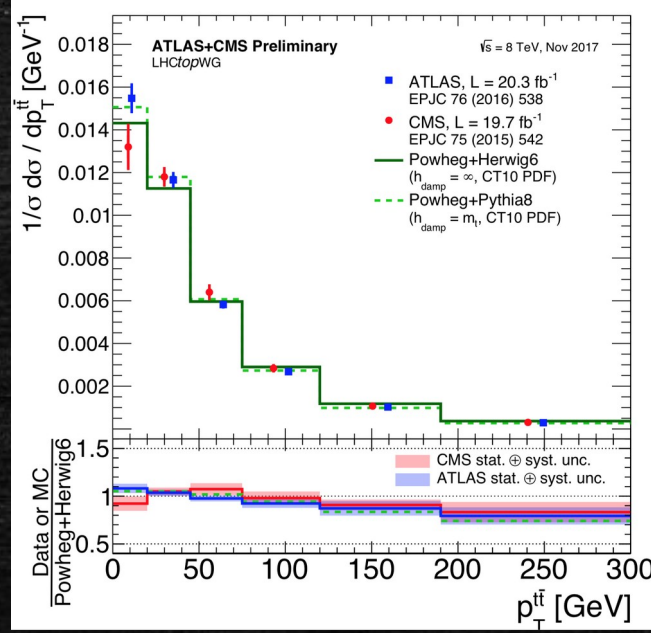
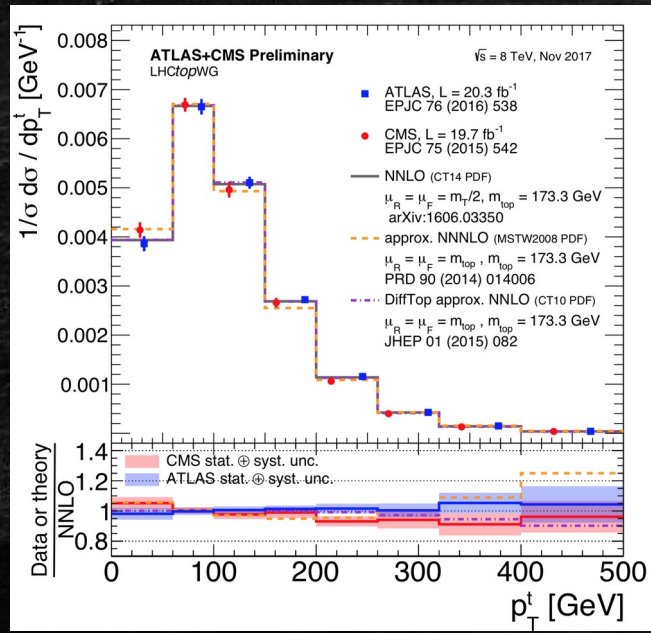
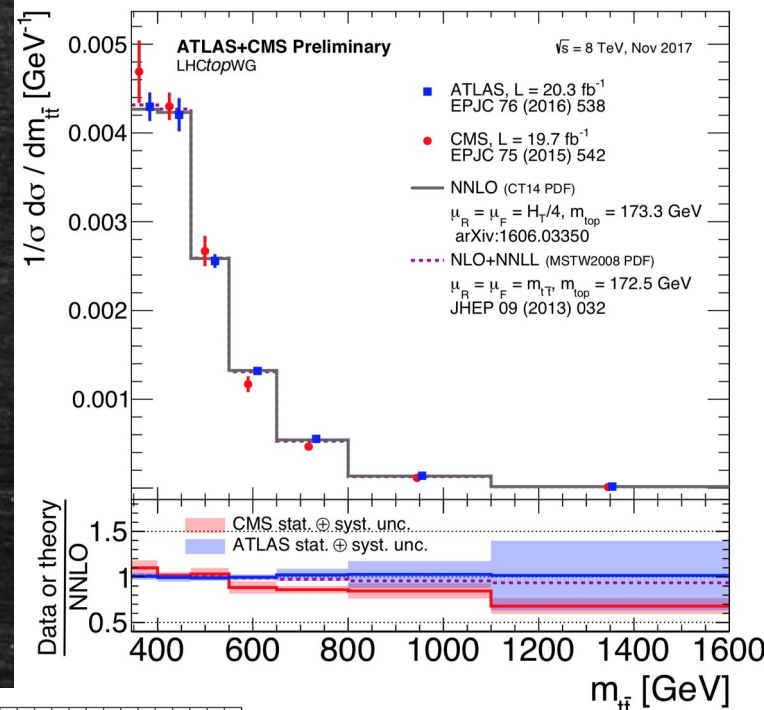
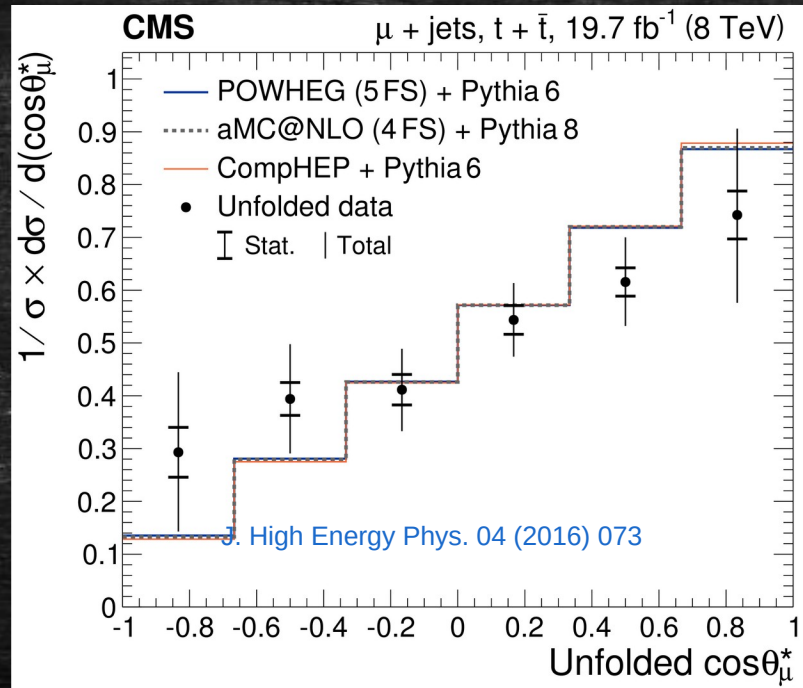
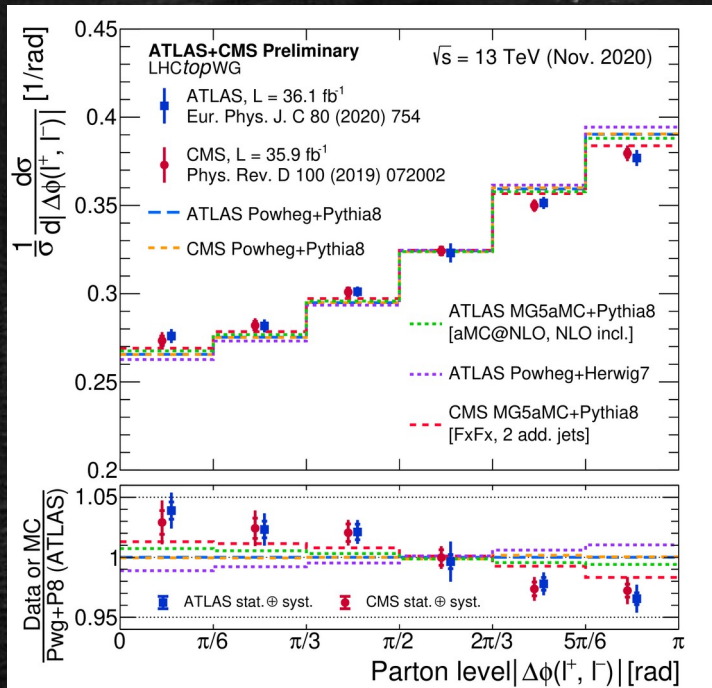


$$\hat{\mu} = \hat{\sigma} / \sigma_{SM}$$

Измеренные характеристики топ-кварка



Измерение дифференциальных сечений



Поиск отклонений от СМ проявляющихся в процессах с рождением топ-кварка

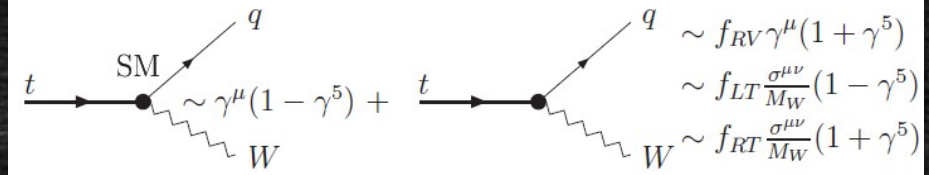
EFT:

$$L = L_{SM} + \sum_i \frac{C_i^{(6)}}{\Lambda^2} O_i^{(6)} + \sum_i \frac{C_i^{(8)}}{\Lambda^4} O_i^{(8)} + \dots,$$

$$\begin{aligned} v_{tt}^H &= y_t = \sqrt{2} \frac{m_t}{v_{ew}}, & a_{tt}^H &= 0, \\ v_{tq}^H &= a_{tq}^H = 0, & q &\neq t \\ f_V^L &= \frac{V_{tq}}{2} & \text{СМ} & \quad f_V^R = f_T^L = f_T^R = 0 \\ v_{tt}^Z &= \frac{1}{2} - 2Q_t \sin^2 \vartheta_W, & a_{tt}^Z &= \frac{1}{2} \\ v_{tq}^Z &= a_{tq}^Z = 0, & q &\neq t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{anom} = & -\frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{q=u,c,t} \bar{t} (v_{tq}^H + \gamma_5 a_{tq}^H) q H \\ & -\frac{g}{\sqrt{2}} \bar{t} \gamma^\mu (f_V^L P_L + f_V^R P_R) b W_\mu^+ \\ & -\frac{g}{2 \cos \vartheta_W} \sum_{q=u,c,t} \bar{t} \gamma^\mu (v_{tq}^Z - a_{tq}^Z \gamma_5) q Z_\mu \\ & -g_s \sum_{q=u,c,t} \frac{\kappa_{tq}^g}{\Lambda} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} t^a (f_{tq}^g + i h_{tq}^g \gamma_5) q G_{\mu\nu}^a \\ & -\frac{g}{\sqrt{2}} \bar{t} \frac{\sigma^{\mu\nu} \partial_\nu W_\mu^+}{M_W} (f_T^L P_L + f_T^R P_R) b \\ & -e \sum_{q=u,c,t} \frac{\kappa_{tq}^\gamma}{\Lambda} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} (f_{tq}^\gamma + i h_{tq}^\gamma \gamma_5) q A_{\mu\nu} \\ & -\frac{g}{2 \cos \vartheta_W} \sum_{q=u,c,t} \frac{\kappa_{tq}^Z}{\Lambda} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} (f_{tq}^Z + i h_{tq}^Z \gamma_5) q Z_{\mu\nu} \end{aligned} \quad + \text{h.c.}$$

Отклонения в Wtb взаимодействиях:



$$\begin{aligned} O_{\phi q}^{(3,3+3)} &= \frac{i}{2} [\phi^\dagger (\tau^I D_\mu - \overleftarrow{D}_\mu \tau^I) \phi] (\bar{q}_{L3} \gamma^\mu \tau^I q_{L3}), & O_{\phi\phi}^{33} &= i(\tilde{\phi}^\dagger D_\mu \phi)(\bar{t}_R \gamma^\mu b_R), \\ O_{dW}^{33} &= (\bar{q}_{L3} \sigma^{\mu\nu} \tau^I b_R) \phi W_{\mu\nu}^I, & O_{uW}^{33} &= (\bar{q}_{L3} \sigma^{\mu\nu} \tau^I t_R) \tilde{\phi} W_{\mu\nu}^I, \end{aligned}$$

$$f_V^L = V_{tb} + C_{\phi q}^{(3,3+3)} \frac{v^2}{\Lambda^2}, \quad f_V^R = \frac{1}{2} C_{\phi\phi}^{33} \frac{v^2}{\Lambda^2},$$

$$f_T^L = \sqrt{2} C_{dW}^{33} \frac{v^2}{\Lambda^2}, \quad f_T^R = \sqrt{2} C_{uW}^{33} \frac{v^2}{\Lambda^2}$$

Упрощенные модели (W' , Z' , H^\pm , DM , ...)

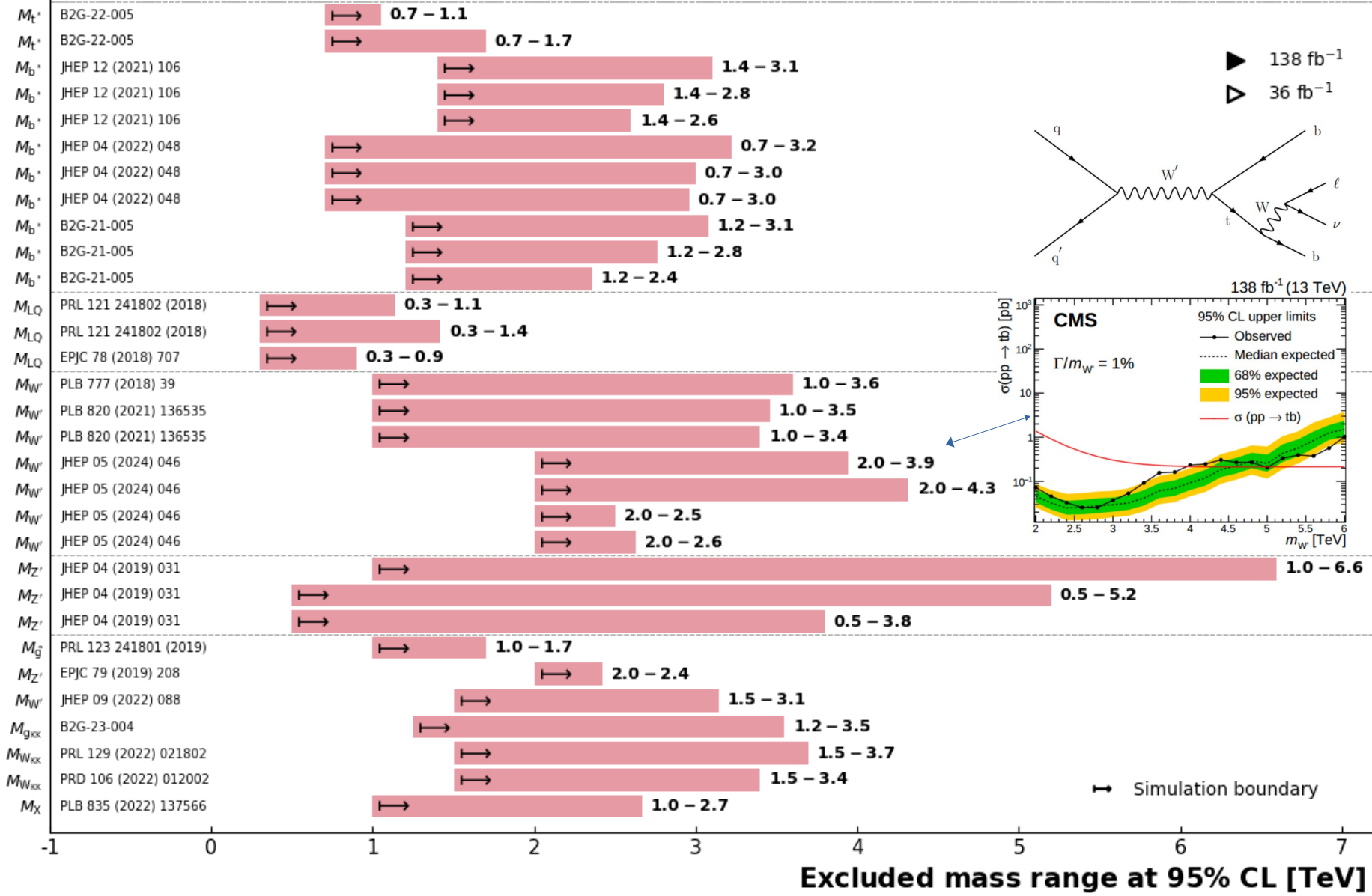
$$\mathcal{L} = \frac{V_{fi} V_{fj}}{2\sqrt{2}} g_W \bar{f}_i \gamma_\mu [a_{fi f_j}^R (1 + \gamma^5) + a_{fi f_j}^L (1 - \gamma^5)] W'^\mu f_j + \text{h.c.}$$

Overview of CMS B2G Results

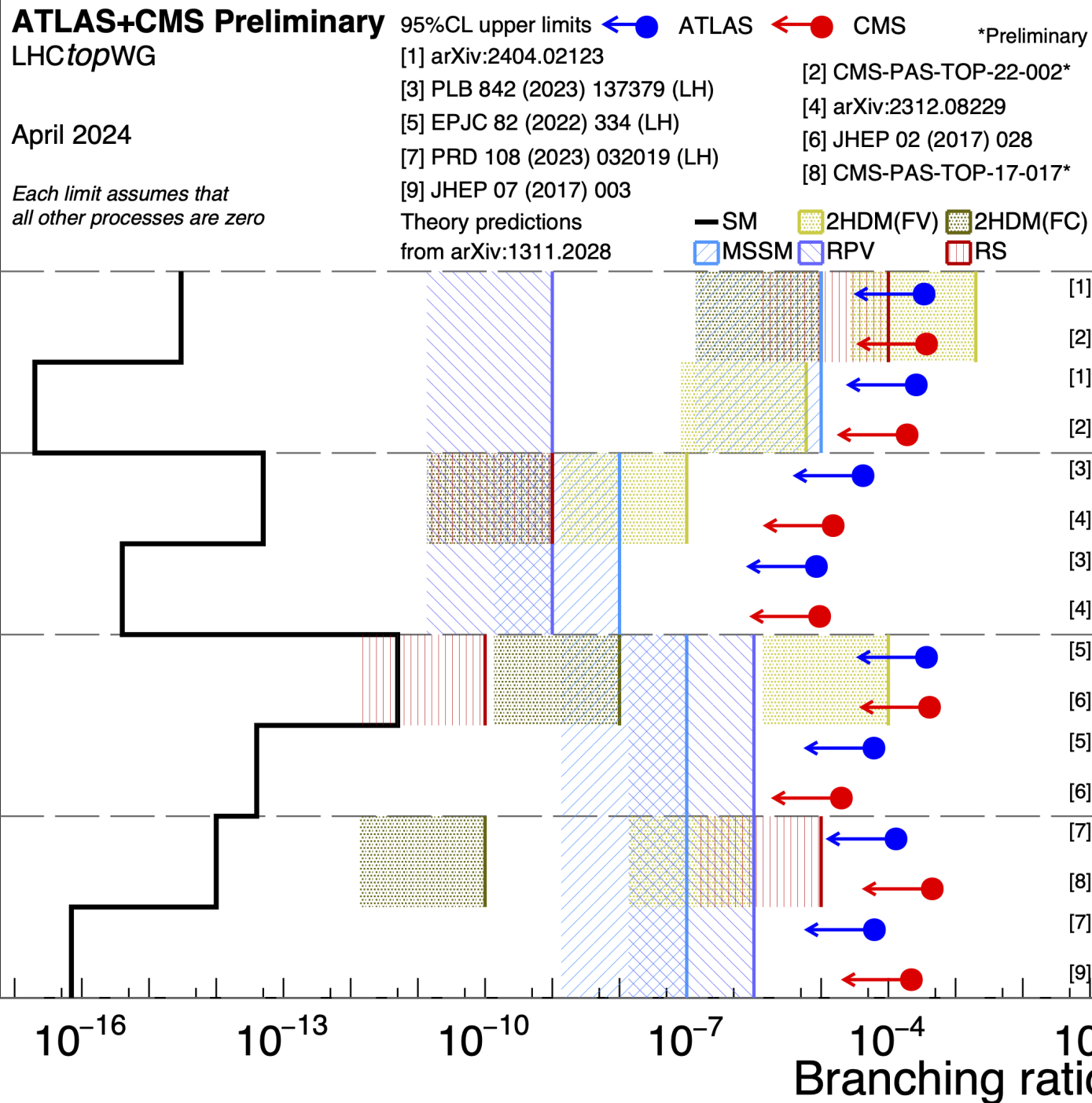
CMS Preliminary

Resonances

- Excited quarks**
 - ▶ $t^* \bar{t}^* \rightarrow t\bar{t}g, 1\ell$ (spin-1/2)
 - ▶ $t^* \bar{t}^* \rightarrow t\bar{t}g, 1\ell$ (spin-3/2)
 - ▶ $b^* \rightarrow tW \rightarrow bq\bar{q} q\bar{q}$ (LH+RH)
 - ▶ $b^* \rightarrow tW \rightarrow bq\bar{q} q\bar{q}$ (RH)
 - ▶ $b^* \rightarrow tW \rightarrow bq\bar{q} q\bar{q}$ (LH)
 - ▶ $b^* \rightarrow tW \rightarrow bq\bar{q} \ell\nu$ (LH+RH)
 - ▶ $b^* \rightarrow tW \rightarrow bq\bar{q} \ell\nu$ (RH)
 - ▶ $b^* \rightarrow tW \rightarrow bq\bar{q} \ell\nu$ (LH)
 - ▶ $b^* \rightarrow tW \rightarrow b\ell\nu q\bar{q}$ (LH+RH)
 - ▶ $b^* \rightarrow tW \rightarrow b\ell\nu q\bar{q}$ (RH)
 - ▶ $b^* \rightarrow tW \rightarrow b\ell\nu q\bar{q}$ (LH)
- LQ**
 - ▷ $LQ\bar{L}\bar{Q} \rightarrow b\nu b\nu$ (scalar)
 - ▷ $LQ\bar{L}\bar{Q} \rightarrow t\mu t\mu$ (scalar)
 - ▷ $LQ\bar{L}\bar{Q} \rightarrow tttt$
 - ▷ $W' \rightarrow tb, 1\ell$ (RH) $M_{W'} > M_W$
- W'→tb**
 - ▶ $W' \rightarrow tb, 0\ell$, (LH)
 - ▶ $W' \rightarrow tb, 0\ell$, (RH)
 - ▶ $W' \rightarrow tb, 1\ell$ (LH, $\Gamma/M_{W'}=1\%$)
 - ▶ $W' \rightarrow tb, 1\ell$ (RH, $\Gamma/M_{W'}=1\%$)
 - ▶ $W' \rightarrow tb, 1\ell$ (LH, $\Gamma/M_{W'}=10\%$)
 - ▶ $W' \rightarrow tb, 1\ell$ (RH, $\Gamma/M_{W'}=10\%$)
- Z'→tt**
 - ▷ $Z' \rightarrow t\bar{t}$ ($\Gamma/M_{Z'}=30\%$)
 - ▷ $Z' \rightarrow t\bar{t}$ ($\Gamma/M_{Z'}=10\%$)
 - ▷ $Z' \rightarrow t\bar{t}$ ($\Gamma/M_{Z'}=1\%$)
 - ▷ Stealth $\tilde{g} \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 q\bar{q}$ (γ + jets, $M_{\tilde{\chi}_1^0} = 0.2$ TeV)
- KK & others**
 - ▷ $Z' \rightarrow tT \rightarrow tZt/tHt \rightarrow \ell\nu$ + jets ($M_T = 1.5$ TeV)
 - ▶ $W' \rightarrow Tb/Bt$ ($M_{VLQ} = 2/3M_{W'}$)
 - ▶ $g_{KK} \rightarrow gR \rightarrow gWW$ (0ℓ) ($M_R/M_{g_{KK}}=0.5$)
 - ▶ $W_{KK} \rightarrow RW \rightarrow WWW$ ($0\ell + 1\ell$)
 - ▶ $W_{KK} \rightarrow RW \rightarrow WWW$ (0ℓ)
 - ▶ $X \rightarrow aa \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ ($M_a = 0.1$ TeV, $M_X N/f = 8$)



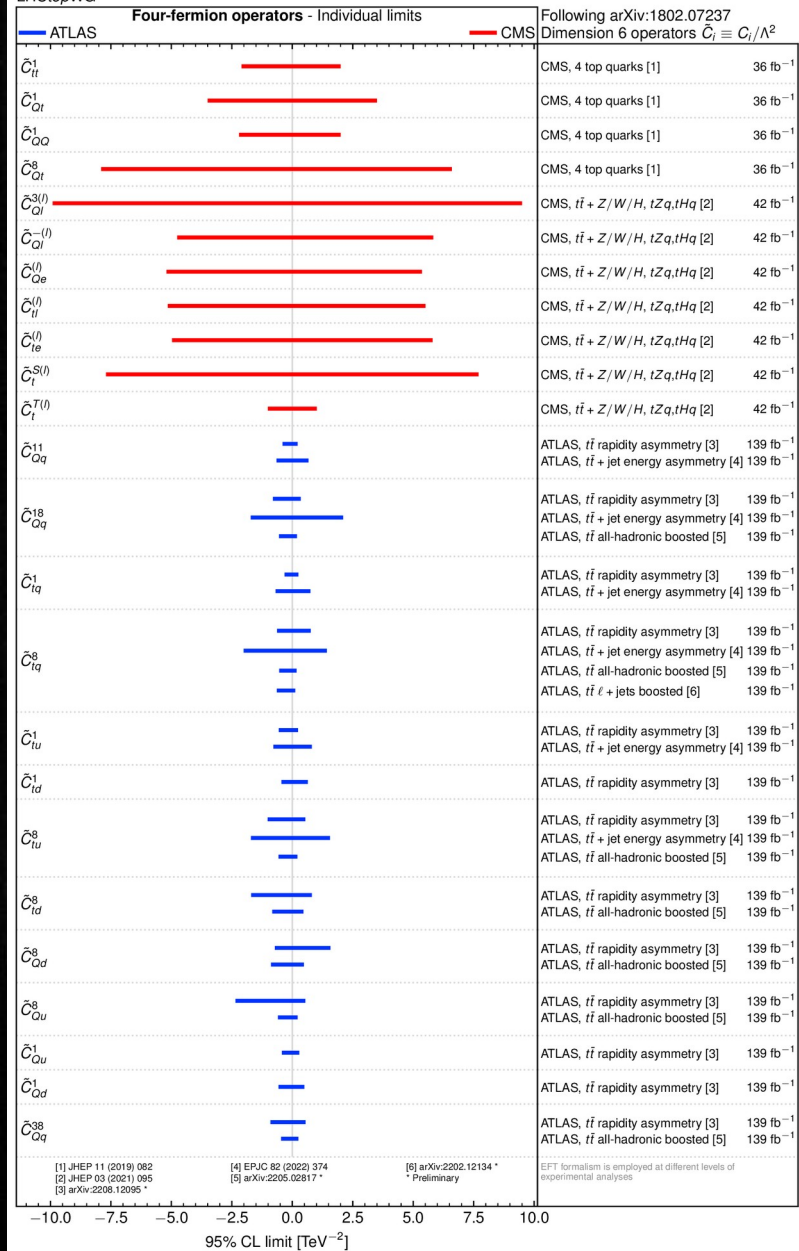
Поиск нейтральных токов в процессах с топ-кварком



SMEFT

$$\mathcal{L}_{\text{SMEFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}}^{(4)} + \frac{1}{\Lambda^2} \sum_i^{N_6} c_i \mathcal{O}_i^{(6)} + \frac{1}{\Lambda^4} \sum_j^{N_8} c_j \mathcal{O}_j^{(8)} + \dots$$

ATLAS+CMS Preliminary LHCtopWG November 2022



$$O_{tt}^1 = (\bar{t}_R \gamma^\mu t_R)(\bar{t}_R \gamma_\mu t_R),$$

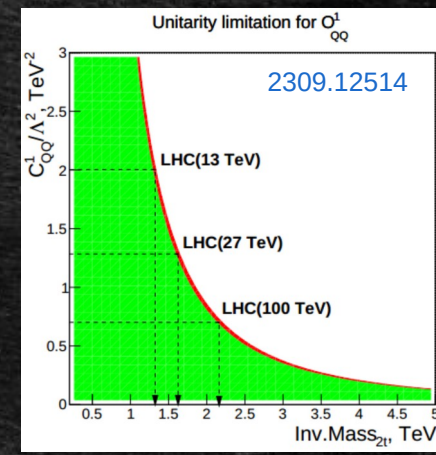
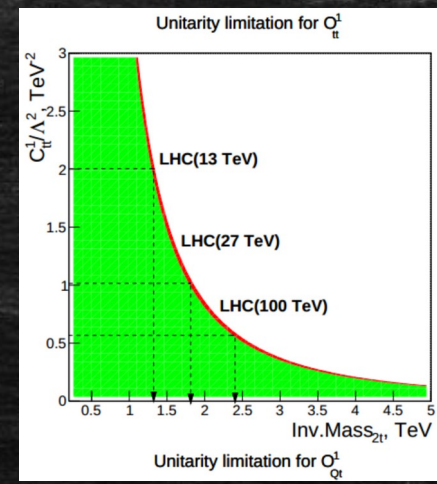
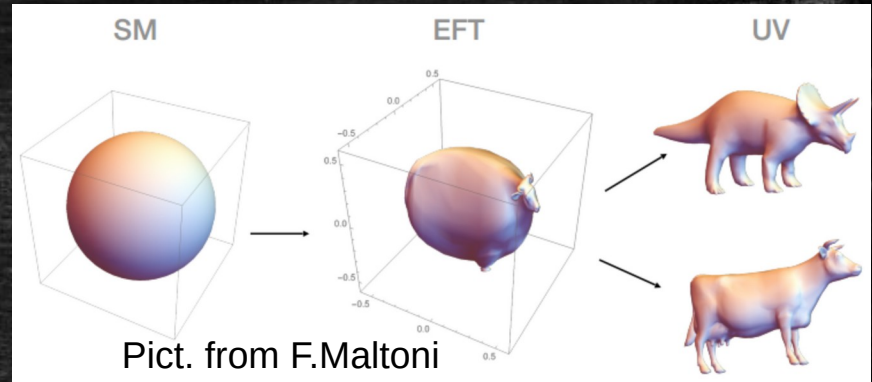
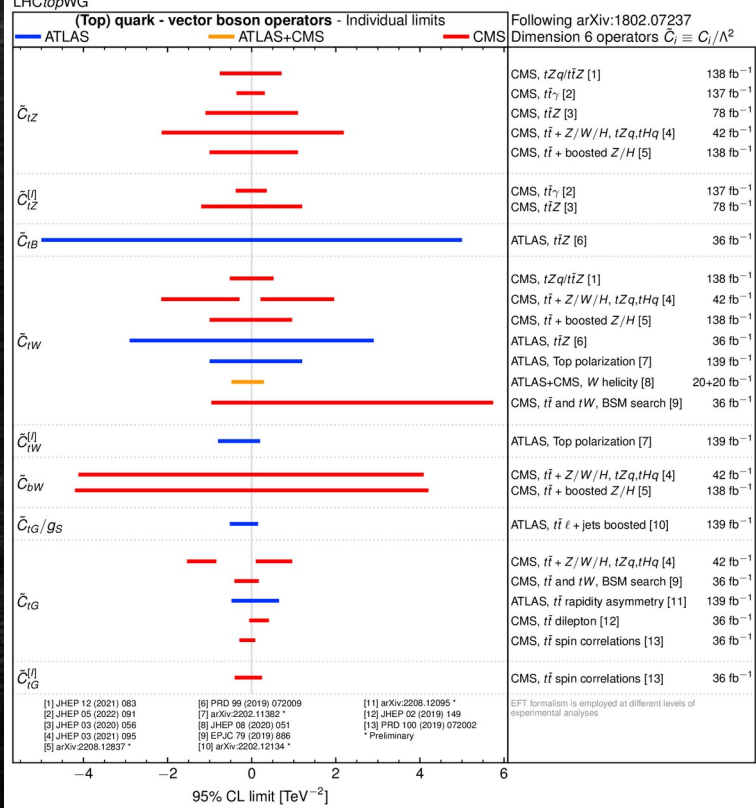
$$O_{QQ}^1 = (\bar{Q}_L \gamma^\mu Q_L)(\bar{Q}_L \gamma_\mu Q_L),$$

$$O_{Qt}^1 = (\bar{Q}_L \gamma^\mu Q_L)(\bar{t}_R \gamma_\mu t_R),$$

$$O_{Qt}^8 = (\bar{Q}_L \gamma^\mu T^A Q_L)(\bar{t}_R \gamma_\mu T^A t_R),$$

$$O_{QQ}^8 = (\bar{Q}_L \gamma^\mu T^A Q_L)(\bar{Q}_L \gamma_\mu T^A Q_L),$$

ATLAS+CMS Preliminary LHCtopWG November 2022



Energy, model	C_{tt}^1	C_{QQ}^1	C_{Qt}^1	C_{Qt}^8
13 TeV, 4t	[-1.2, 1.2]	[-2.4, 2.3]	[-2.2, 2.2]	[-6.8, 5.0]
13 TeV, 3t	[-4.3, 4.2]	[-2.9, 3.2]	[-3.1, 3.2]	[-6.9, 7.3]
13 TeV, 3+4t	[-1.2, 1.2]	[-2.2, 2.2]	[-2.1, 2.1]	[-5.8, 4.8]
14 TeV, 4t	[-1.1, 1.0]	[-2.1, 2.0]	[-1.9, 1.9]	[-5.8, 4.2]
14 TeV, 3t	[-2.5, 2.5]	[-1.6, 2.0]	[-1.8, 1.9]	[-3.9, 4.4]
14 TeV, 3+4t	[-1.1, 1.0]	[-1.5, 1.7]	[-1.5, 1.6]	[-3.8, 3.6]
27 TeV, 4t	[-0.90, 0.83]	[-1.7, 1.6]	[-1.6, 1.6]	[-4.9, 3.6]
27 TeV, 3t	[-2.0, 2.0]	[-1.3, 1.5]	[-1.4, 1.6]	[-3.3, 3.9]
27 TeV, 3+4t	[-0.88, 0.83]	[-1.2, 1.3]	[-1.3, 1.3]	[-3.2, 3.2]
100 TeV, 4t	[-0.68, 0.66]	[-1.3, 1.3]	[-1.2, 1.2]	[-3.8, 3.0]
100 TeV, 3t	[-1.3, 1.4]	[-0.89, 1.0]	[-1.0, 1.1]	[-2.1, 2.6]
100 TeV, 3+4t	[-0.67, 0.64]	[-0.85, 0.94]	[-0.93, 0.94]	[-2.1, 2.3]

[1] JHEP 12 (2021) 083 [2] JHEP 05 (2022) 091 [3] JHEP 02 (2023) 056 [4] JHEP 03 (2021) 095 [5] arXiv:2208.12837* [6] PRD 99 (2019) 072009 [7] arXiv:2202.11382* [8] JHEP 08 (2020) 051 [9] EPJC 79 (2019) 886 [10] arXiv:2202.12134* [11] arXiv:2208.12095* [12] JHEP 02 (2019) 149 [13] PRD 100 (2019) 072002 * Preliminary

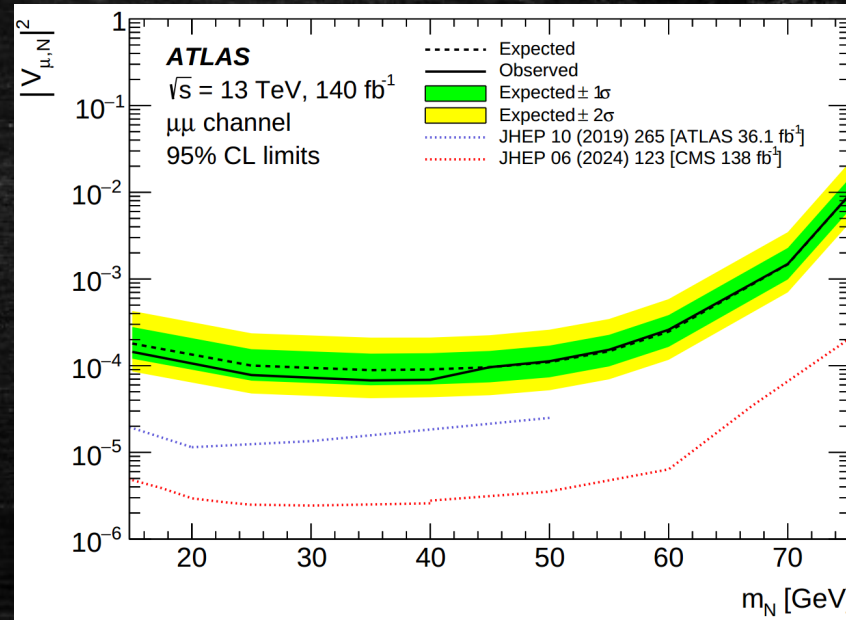
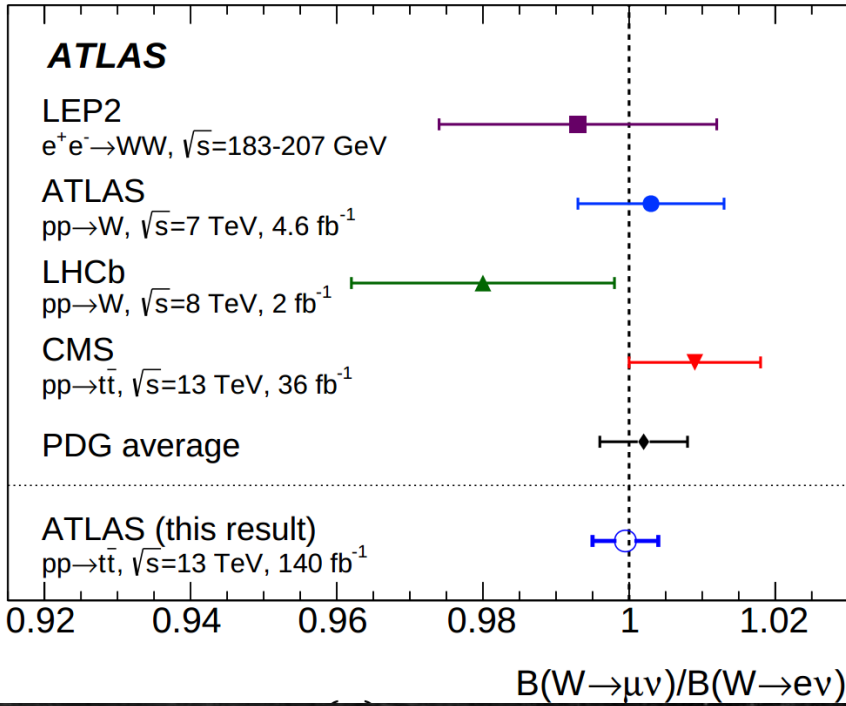
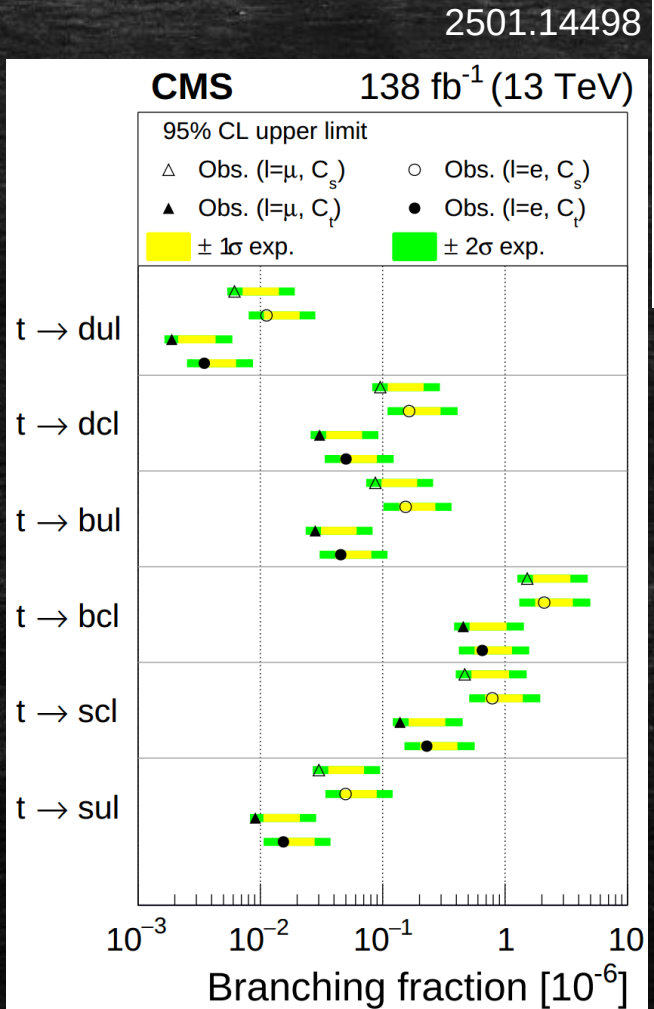
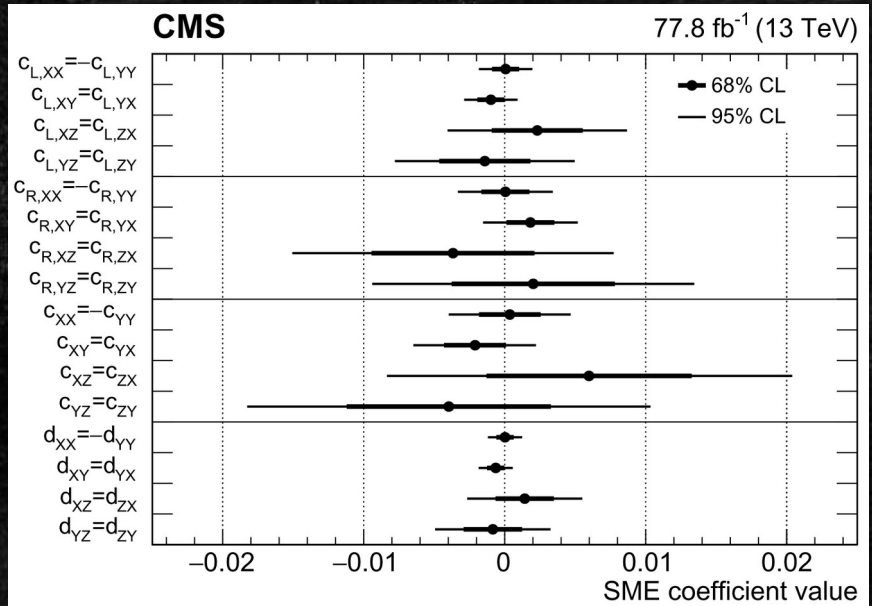
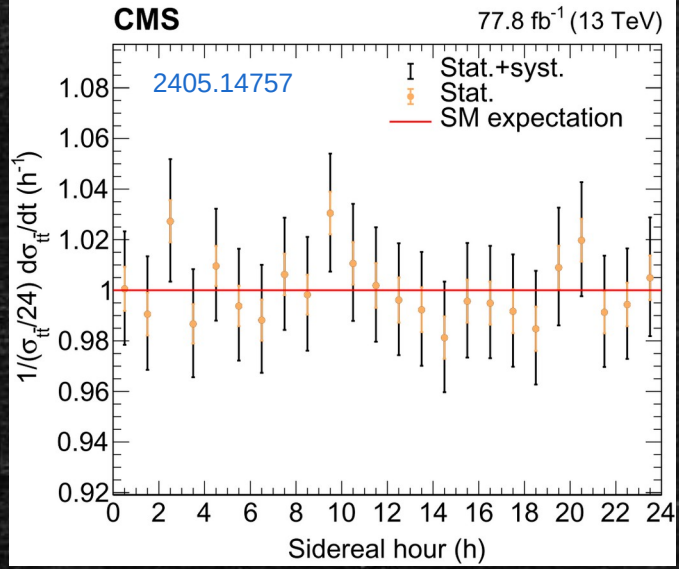
EFT formalism is employed at different levels of experimental analyses

[1] JHEP 11 (2019) 082 [2] JHEP 03 (2021) 095 [3] arXiv:2208.12095* [4] EPJC 82 (2022) 374 [5] arXiv:2205.02817* [6] arXiv:2202.12134* * Preliminary

EFT formalism is employed at different levels of experimental analyses

Проверка лоренц-инвариантности, LFV, BNV, HNL в $t\bar{t}$

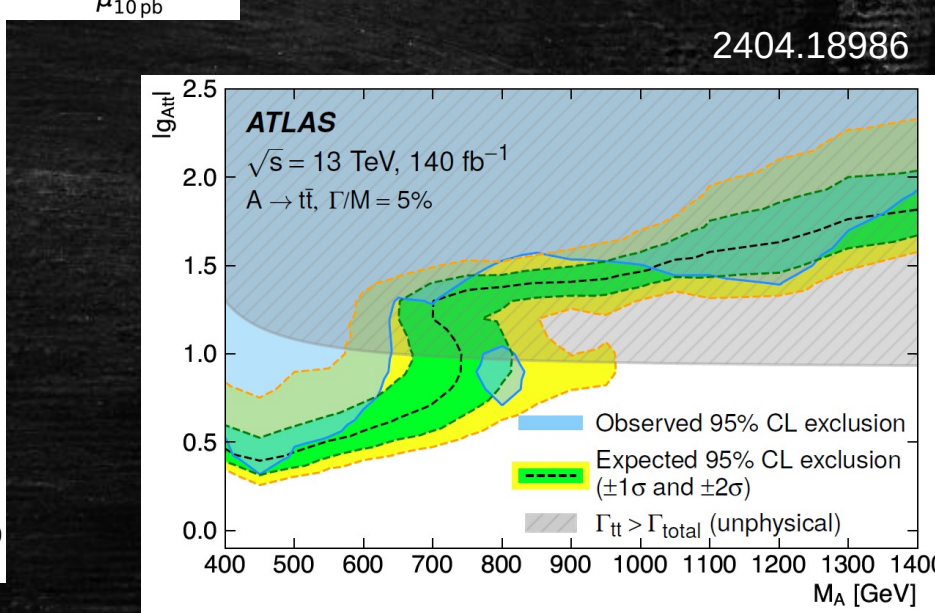
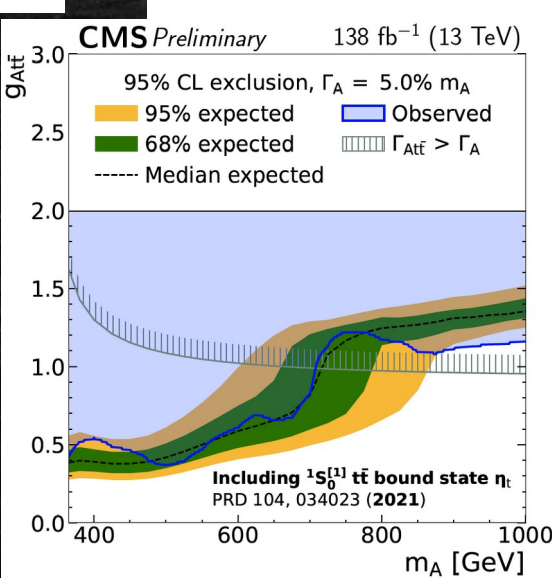
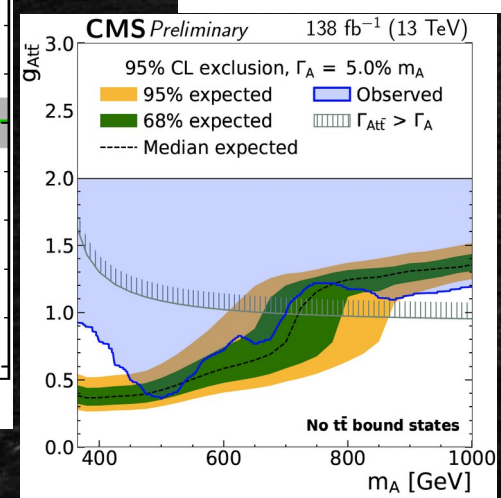
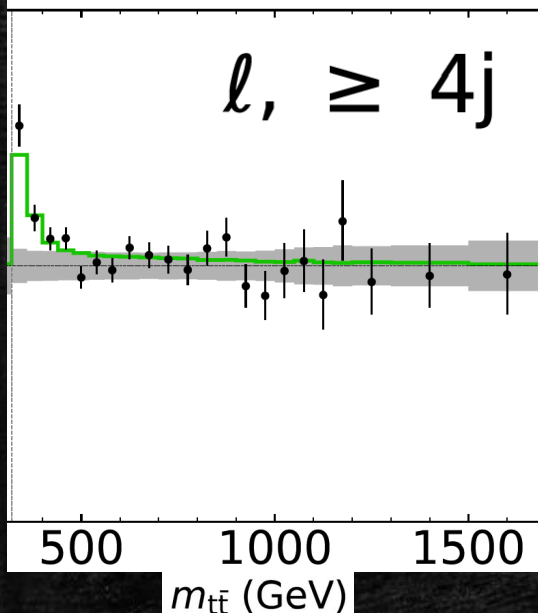
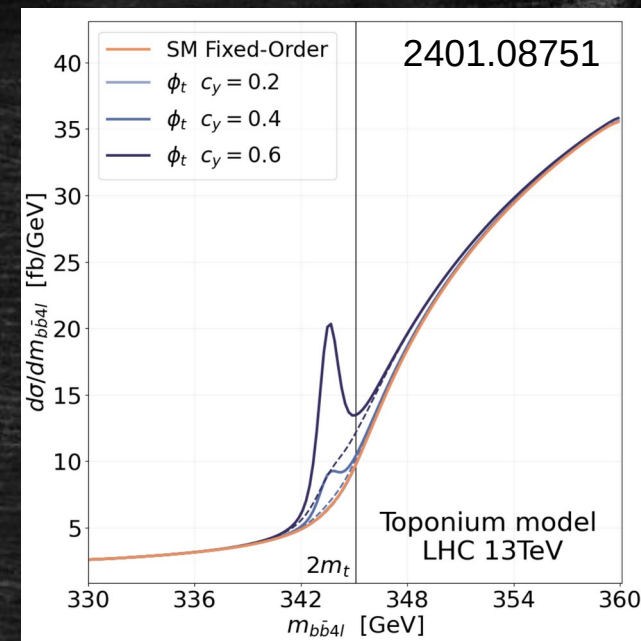
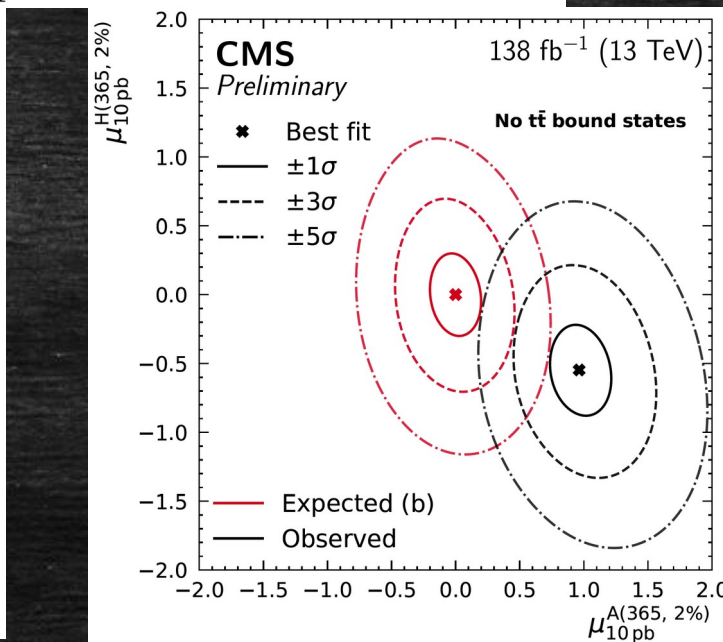
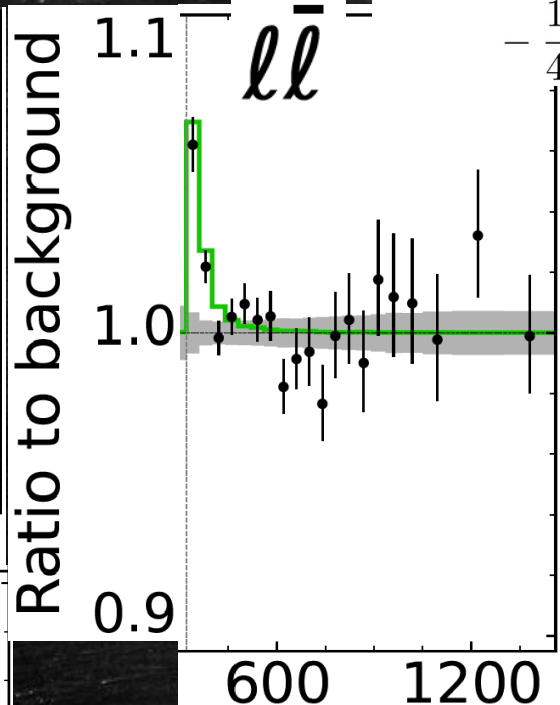
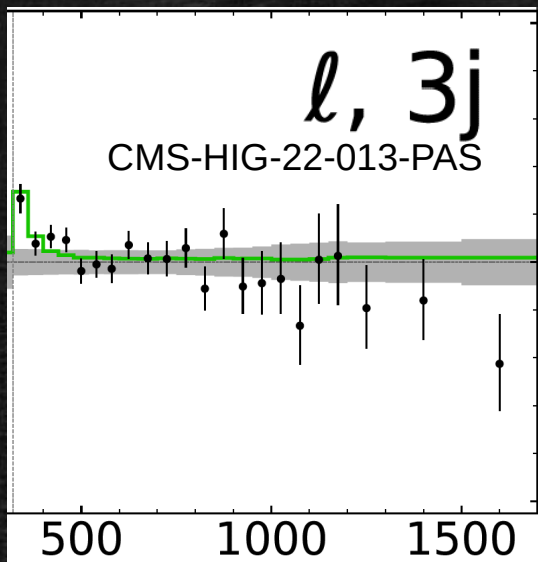
$$\mathcal{L}_{\text{SME}} = \frac{1}{2} i\bar{\psi}(\gamma^\nu + c^{\mu\nu}\gamma_\mu + d^{\mu\nu}\gamma_5\gamma_\mu)\overleftrightarrow{\partial}_\nu\psi - m_t\bar{\psi}\psi$$



Топониум

$$\mathcal{L}_{\eta_t} = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi_{\eta_t} \partial^\mu \phi_{\eta_t} - \frac{1}{2} m_{\eta_t} \phi_{\eta_t}^2$$

$$- \frac{1}{4} g_{gg\eta_t} \phi_{\eta_t} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a\mu\nu} - ig_{tt\eta_t} \phi_{\eta_t} \bar{t} \gamma_5 t$$

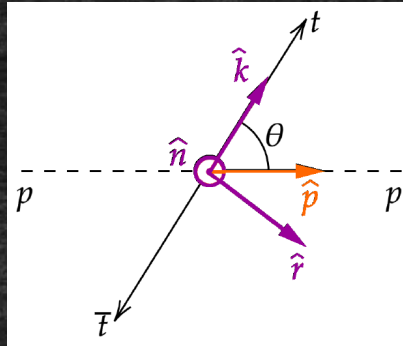


$\eta_t, \mu(\eta_t) = 1.11 \pm 0.12$

Запутанные состояния спинов в паре $t\bar{t}$

$$\rho = \frac{1}{4}(\mathbf{1} \otimes \mathbf{1} + \underline{B}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma} \otimes \mathbf{1} + \underline{B}_2 \cdot \mathbf{1} \otimes \boldsymbol{\sigma} + \underline{C} \cdot \boldsymbol{\sigma} \otimes \boldsymbol{\sigma})$$

$$\hat{k} = \text{top direction}, \quad \hat{r} = \frac{\hat{p} - \hat{k} \cos \theta}{\sin \theta}, \quad \hat{n} = \frac{\hat{p} \times \hat{k}}{\sin \theta}, \quad 2401.08751$$



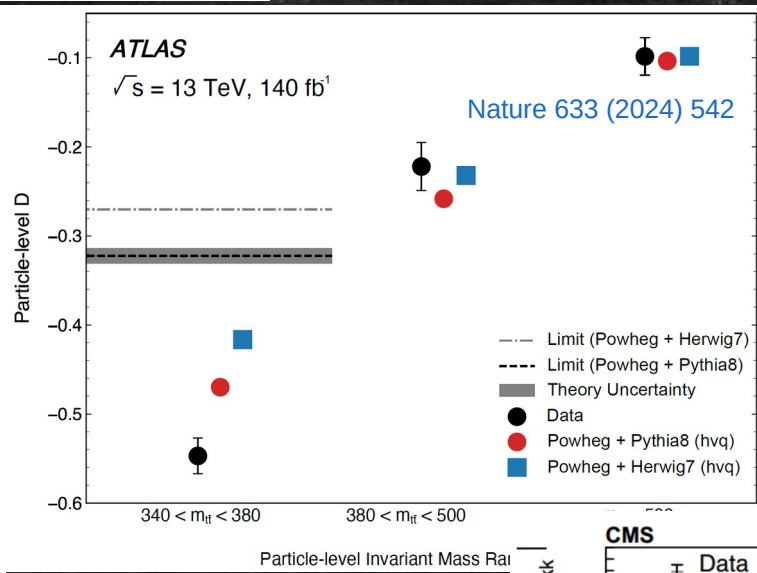
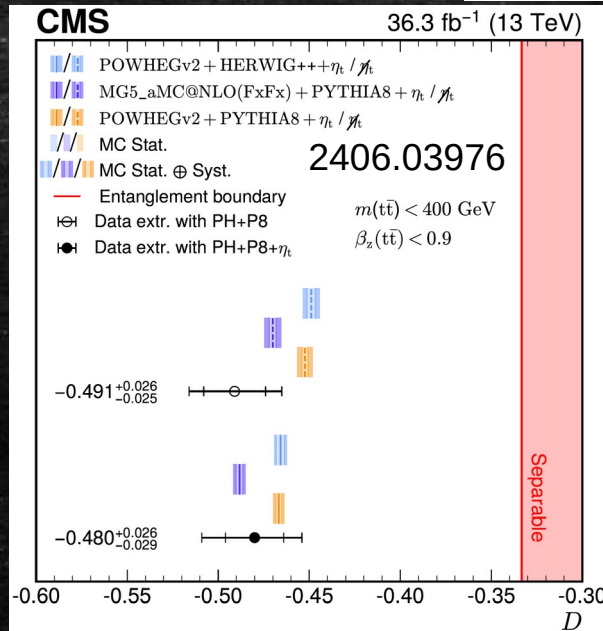
$$|S=0, S_z=0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+^{(1)}\rangle |-^{(2)}\rangle - |-^{(1)}\rangle |+^{(2)}\rangle)$$

$$|S=1, S_z=0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+^{(1)}\rangle |-^{(2)}\rangle + |-^{(1)}\rangle |+^{(2)}\rangle)$$

$$|S=1, S_z=+1\rangle = |+^{(1)}\rangle |+^{(2)}\rangle$$

$$\text{Tr } \rho^2 = 1$$

$$\begin{aligned} -C_{kk} - C_{rr} - C_{nn} &\equiv -3D^{(1)} > 1 \\ -C_{kk} + C_{rr} + C_{nn} &\equiv -3D^{(k)} > 1 \\ +C_{kk} + C_{rr} - C_{nn} &\equiv -3D^{(n)} > 1 \\ +C_{kk} - C_{rr} + C_{nn} &\equiv -3D^{(r)} > 1 \end{aligned}$$



Необходимый критерий
разделяемости состояний
Peres-Horodecki
quant-ph/9604005, quant-ph/9605038

$$D < -1/3 \Rightarrow \text{Entanglement}$$

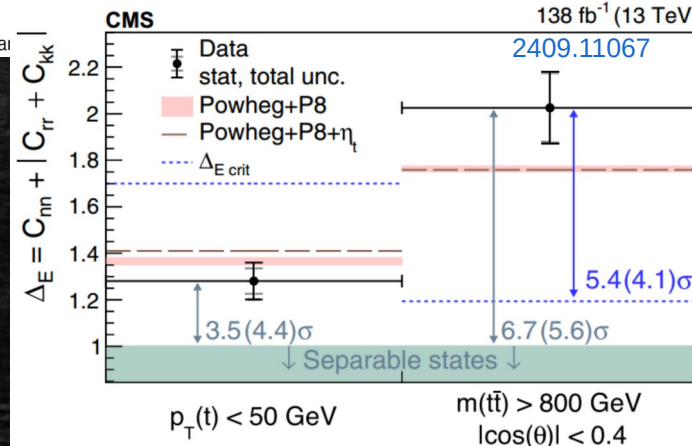
$$\sqrt{2} |-C_{rr} + C_{nn}| \leq 2 \Rightarrow \text{Bell violation}$$

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d \cos \varphi} = \frac{1}{2} (1 - D \cos \varphi)$$

$$\cos \varphi = \hat{\ell}^+ \cdot \hat{\ell}^-$$

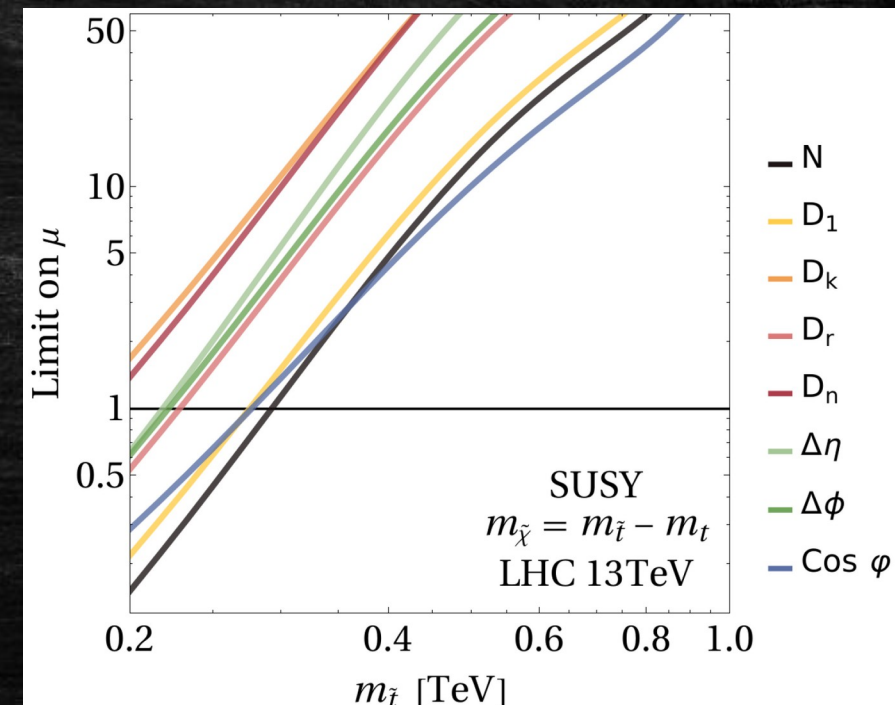
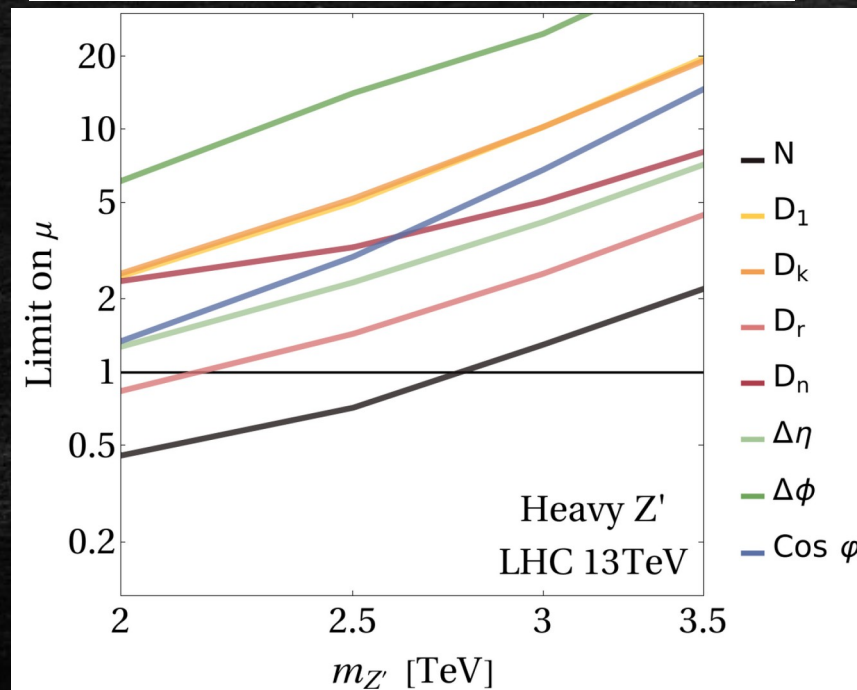
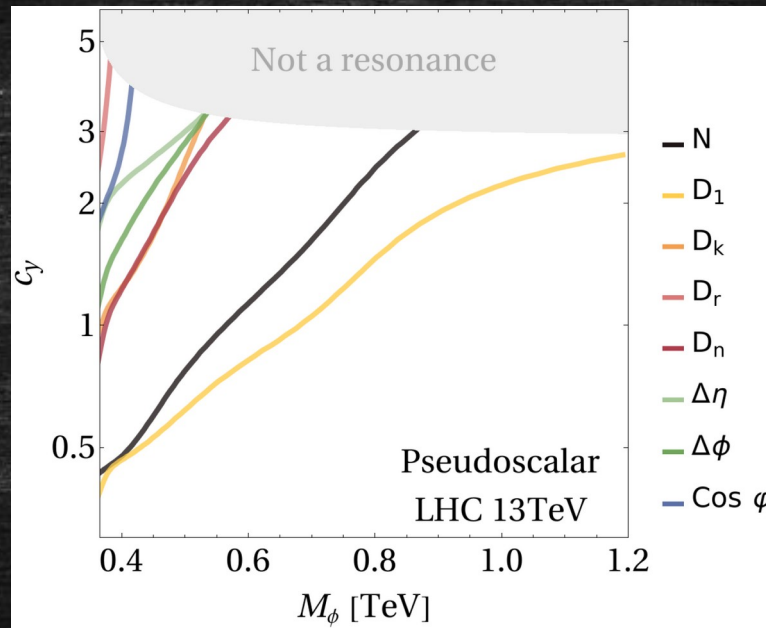
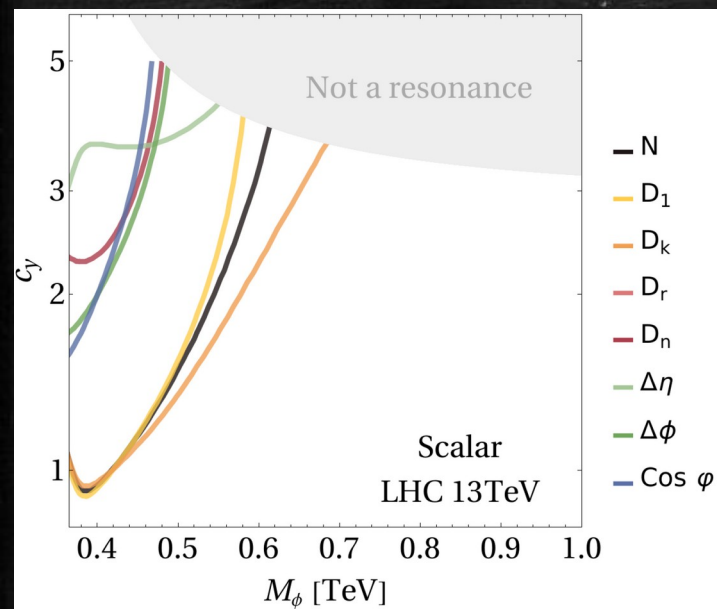
$$\beta_z(t\bar{t}) = |(p_z^t + p_z^{\bar{t}})/(E^t + E^{\bar{t}})|$$

$$\begin{aligned} \tau_{\text{had}} &\approx h/\Lambda_{\text{QCD}} \approx 2 \cdot 10^{-24} \text{ s} \\ \tau_{\text{top}} &\approx h/\Gamma_{\text{top}} = 1/(GF m_t^3 |V_{tb}|^2/8\pi\sqrt{2}) \approx 5 \cdot 10^{-25} \text{ s} \end{aligned}$$



Чувствительность квантовых наблюдаемых к “новой физике”

2401.08751



Поиск темной материи в процессах с топ-кварком

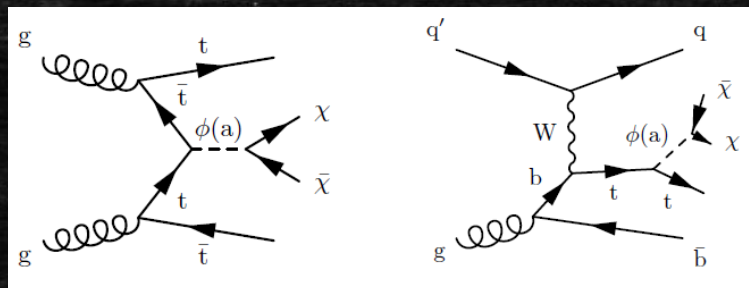
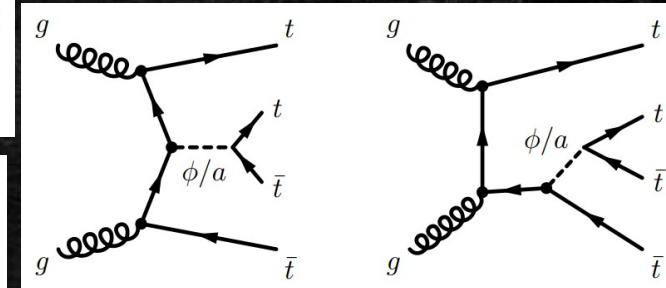
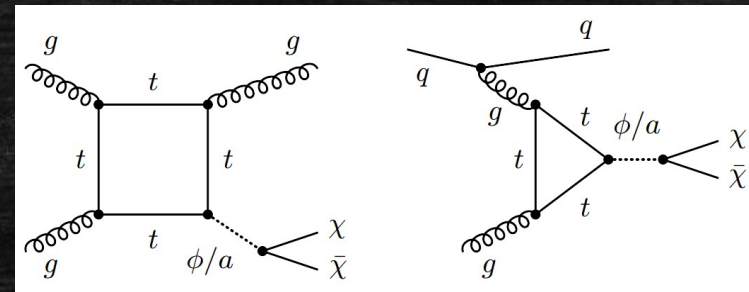
1506.03116

- Упрощенные модели
- Поиск:
 - Ассоциативное рождение t и ТМ;
 - Рождение пары $t\bar{t}$ в распаде медиатора ТМ
- Масса ТМ до 10 ТэВ ($2m_\chi < m_\phi$), квадратичная зависимость от каплинга, основной параметр масса медиатора (m_ϕ)

$$L_\Phi = g_\chi \Phi \bar{\chi} \chi + \frac{g_v \Phi}{\sqrt{2}} \sum_f (y_f \bar{f} f)$$

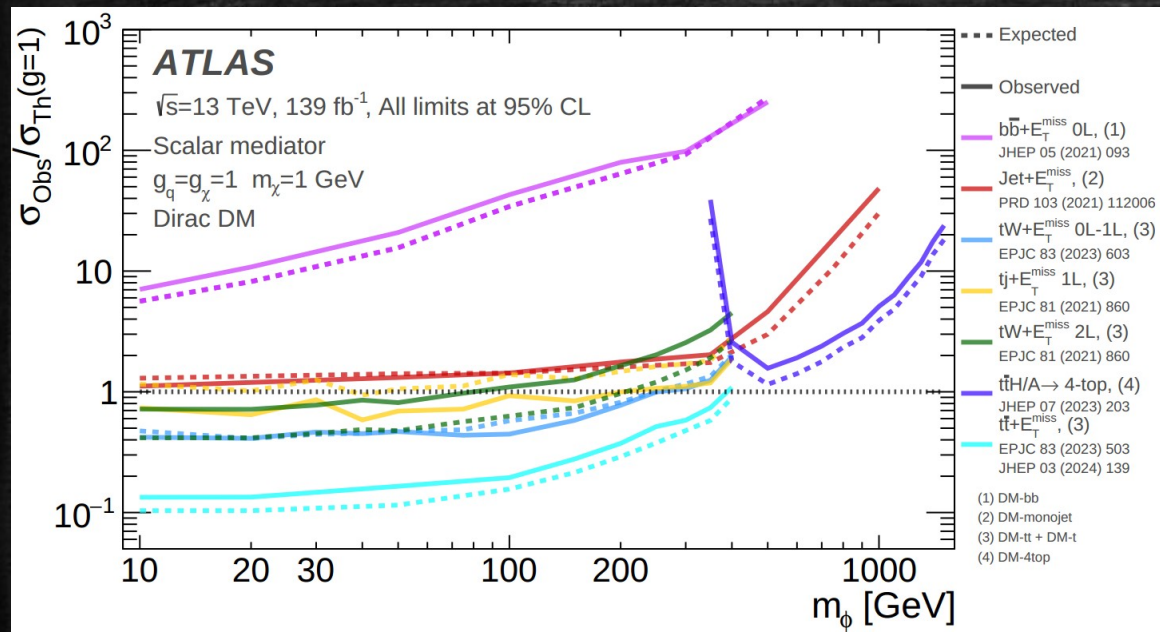
$$L_A = i g_\chi A \bar{\chi} \gamma^5 \chi + i \frac{g_v A}{\sqrt{2}} \sum_f (y_f \bar{f} \gamma^5 f)$$

$$\mathcal{L}_{\text{fermion},V} \supset V_\mu \bar{\chi} \gamma^\mu (g_\chi^V - g_\chi^A \gamma^5) \chi + \sum_{f=q,\ell,\nu} V_\mu \bar{f} \gamma^\mu (g_f^V - g_f^A \gamma^5) f$$

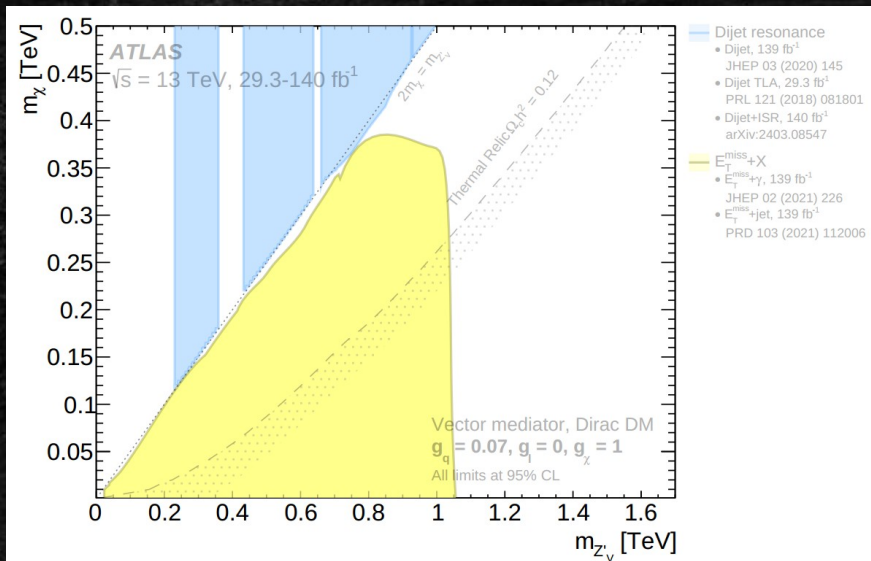
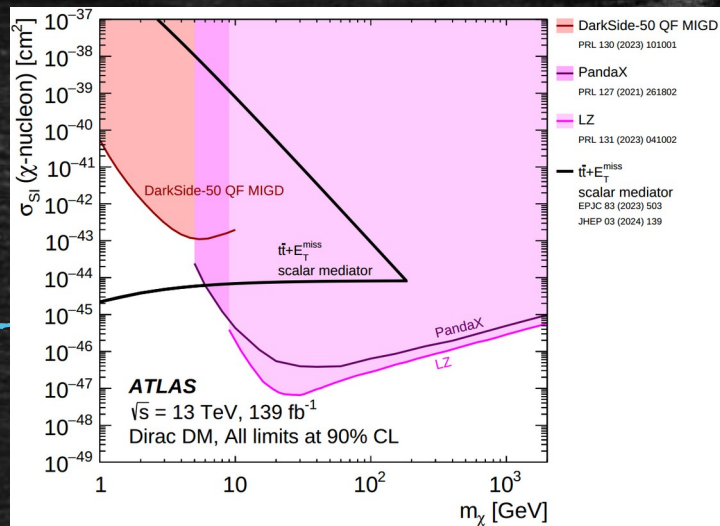


$$\{m_\chi, m_{\phi/a}, g_\chi, g_u, g_d, g_\ell\}$$

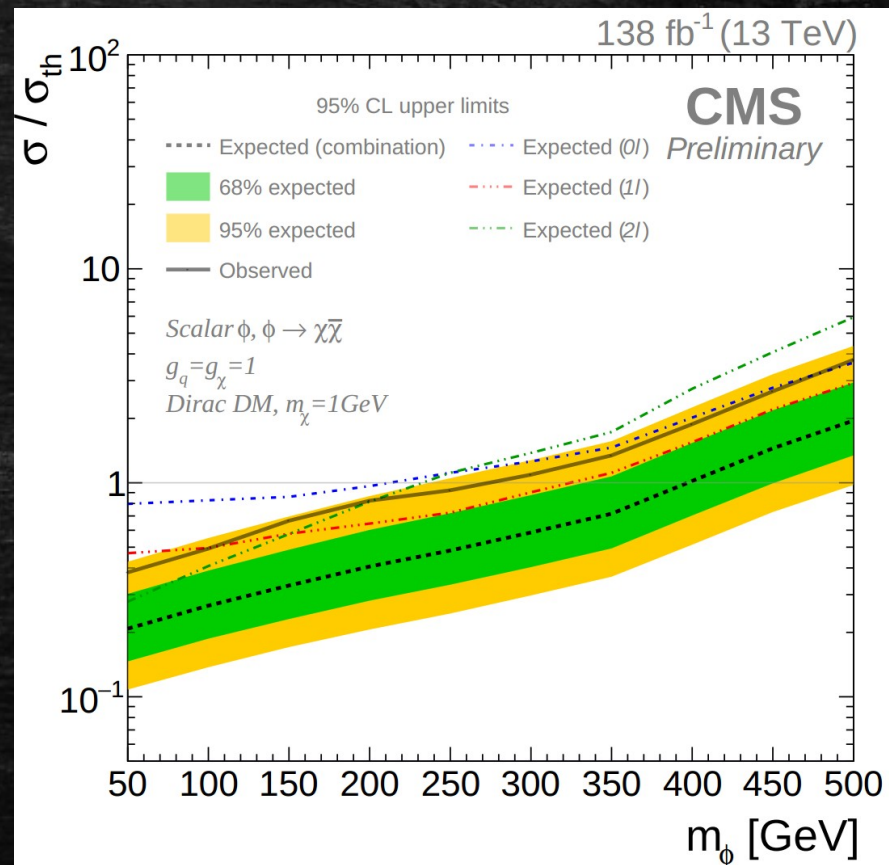
Экспериментальные ограничения



CMS-PAS-EXO-22-014



2404.15930

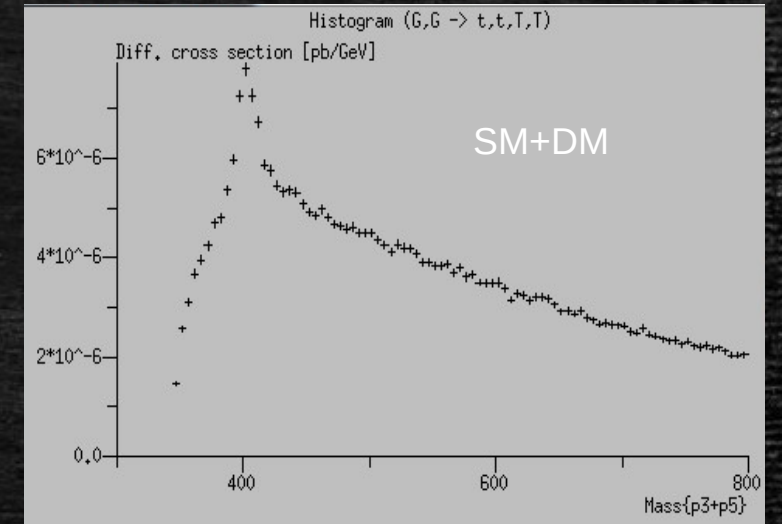
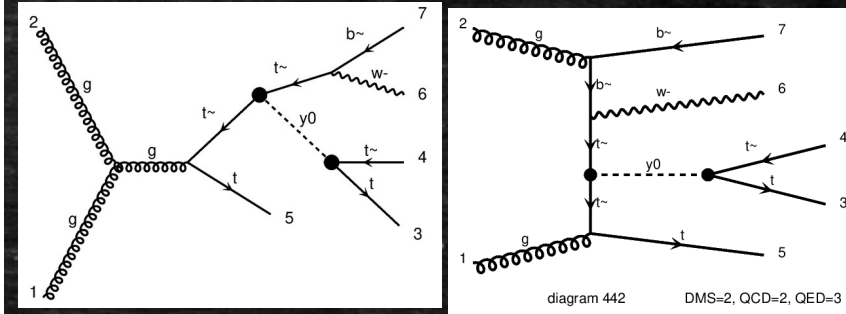


Поиск темной материи в рождении трех и четырех топ-кварков

2407.08308

$g, g \rightarrow t, T, t, W, b$ 3-top-quarks tree NLO + 4-top-quarks:

Process $gg \rightarrow t\bar{t}tW^{-}\bar{b}$	MadGraph Cross-section (fb)
Full set of diagrams in the SM	$15.55 \pm 4.7 * 10^{-2}$
Full set of diagrams in the DM model, excluding loop diagrams	$23.02 \pm 6.2 * 10^{-2}$
Full set of diagrams in the DM model, including loop diagrams	$23.16 \pm 6 * 10^{-2}$
Contribution of diagrams with a DM mediator, excluding loop diagrams	$6.03 \pm 1.2 * 10^{-2}$
Contribution of loop diagrams with a DM mediator	$0.17 \pm 5 * 10^{-4}$



Стандартная модель:

КХД диаграммы 14 fb
 EW диаграммы 6 fb
 Полное сечение 15.5b
 интерференция - 4.5 fb

Скалярный медиатор + SM

Полное сечение 23 fb
 SM 15.5 fb
 Темная материя 7.5 fb
 Вклад темной материи в $t\bar{t}tWb$: 33% , в $t\bar{t}$: 0.1%
 $m_{\text{mediator}} = 400 \text{ GeV}$, каплинги 1

Развитие методологии анализа данных. Например, прямой поиск ТМ в процессах с топ-кварком, в разных конечных сигнатурах

lepton+jets

- $tX+M$, $tt+M$

di-lepton+jets

- $tt+M$, $tttX+M$, $tttt+M$

Same sign di-lep+jets

- $tttX+M$, $tttt+M$

3 leptons + jets

- $tttX+M$, $tttt+M$

- Моделирование всех сигнальных процессов
- Моделирование фоновых процессов для каждой сигнатуры
- Формирование наблюдаемых для каждой сигнатуры
- Проведение отдельных анализов для каждой сигнатуры и их объединение, или
- Тренировка трансформера для всех сигнатур

Заключение

- LHC — фабрика топ-кварков (20-40 млн. событий с топ-кварком)
- Реализована обширная программа измерений в рамках СМ (полные и дифференциальные сечения, масса, спиновые корреляции, ...)
- Поиск возможных отклонений от предсказаний СМ пока не выявил статистически значимых новых эффектов
- Планируемые следующие проекты с возможностью исследования топ-кварков: HL-LHC, FCC (ee, hh), CEPC. Возможный проект в РФ — мюонный коллайдер в кольце 21км (~15 ТэВ, 1901.06150, доклад А. Киселева 19.02)

$$P_{\text{синхр}} \propto \frac{E^4}{m^4 R^2}$$

$$E_{\text{max}} \approx e \cdot c \cdot B \cdot R$$

