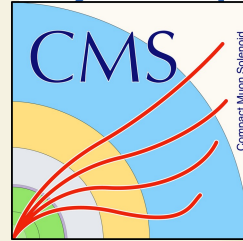


Исследования физики топ кварка в НИИЯФ МГУ



 Fermilab



- ~ Процессы рождения топ кварка
- ~ Экспериментальные измерения и методы
- ~ Поиск “Новой физики” (Wtb , FCNC, W' , H^+ , ...)

75 лет НИИЯФ МГУ, 15.02.2021

Лев Дудко (НИИЯФ МГУ)

Доклад основан на результатах работы группы:

Член.-кор. РАН д.ф.-м.н. Э.Э. Боос, А. Баскаков, к.ф.-м.н. В. Буничев, Г. Воротников, П.В. Волков, к.ф.-м.н. Л. Дудко, к.ф.-м.н. М. Перфилов, к.ф.-м.н. Н. Корнеева, И. Мягков, Н.А. Сотникова, А.В.Беляев, Д.Смирнов, А.Шерстнев, А.Маркина, А. Попов, И.Швецов

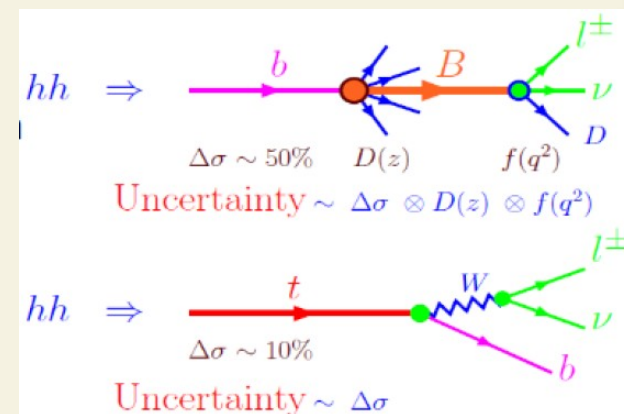
Главные особенности физики топ-кварка

- Топ-кварк является наиболее тяжелым точечным объектом СМ с массой близкой к масштабу электрослабого взаимодействия ($M_{\text{топ}} = 172.44 \pm 0.13 \pm 0.47$ 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

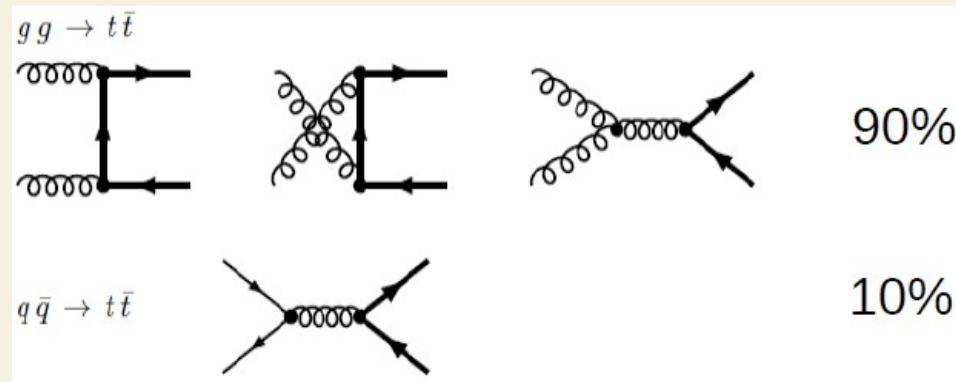
$$t \rightarrow Wb; \quad Br(t \rightarrow \text{other}) < 10^{-3}$$



Процессы рождения топ-кварка

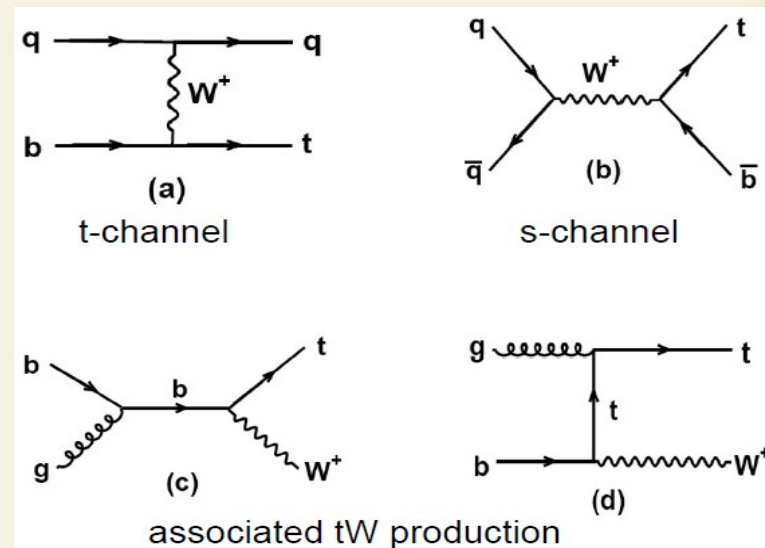
$t\bar{t}$ pair production (QCD)

	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)	$920 \pm 5\%$



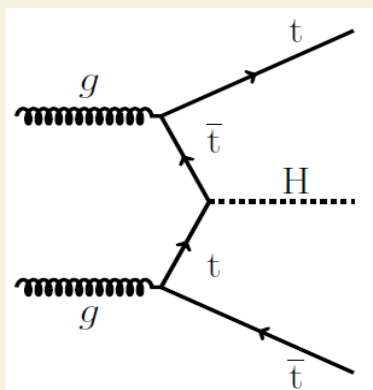
$t(\bar{t})$ single production (electroweak)

	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)	$12 \pm 6\%$	$243 \pm 4\%$	$75 \pm 10\%$



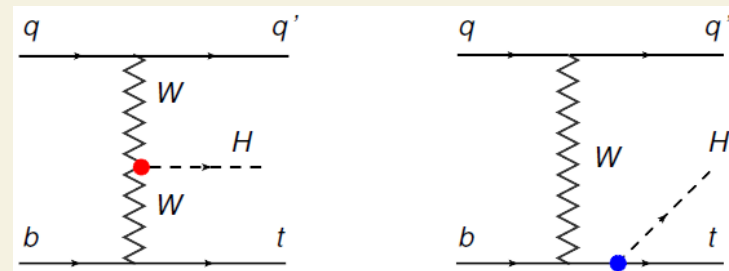
$t\bar{t}H(W,Z,A)$ production

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



tHq (tZq, tAq) production

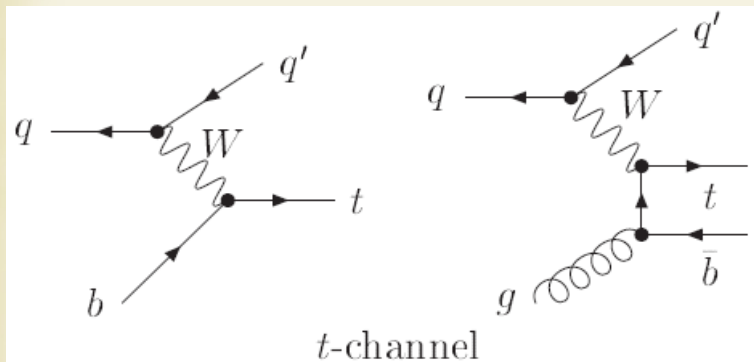
~ 0.01 pb
 $\mu < 3$ @95CL



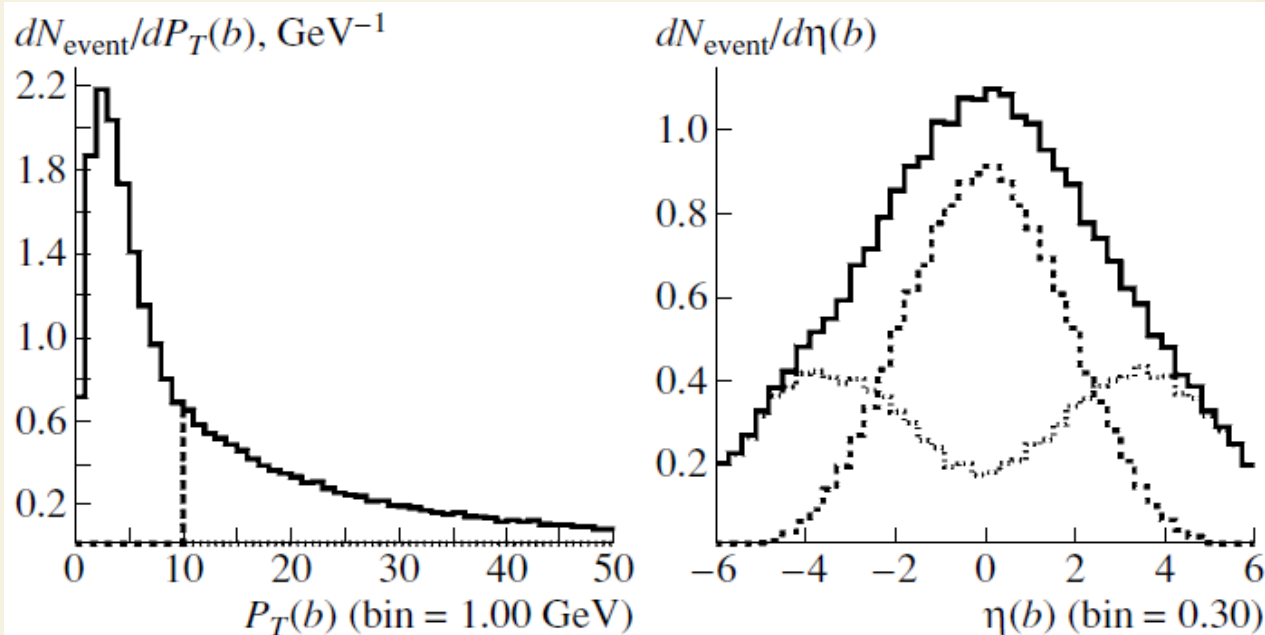
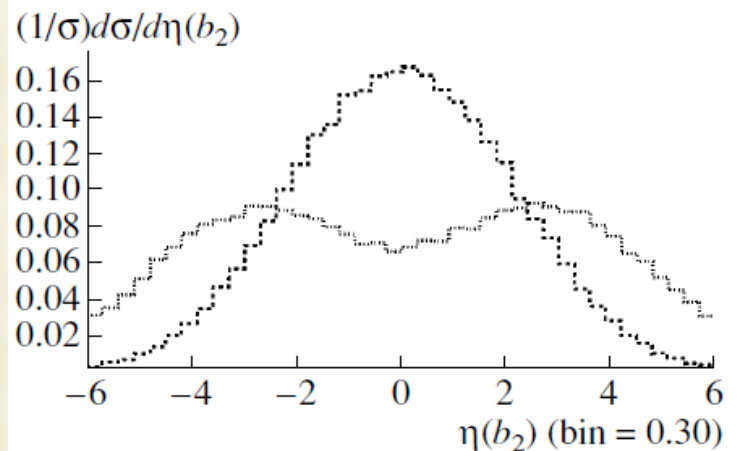
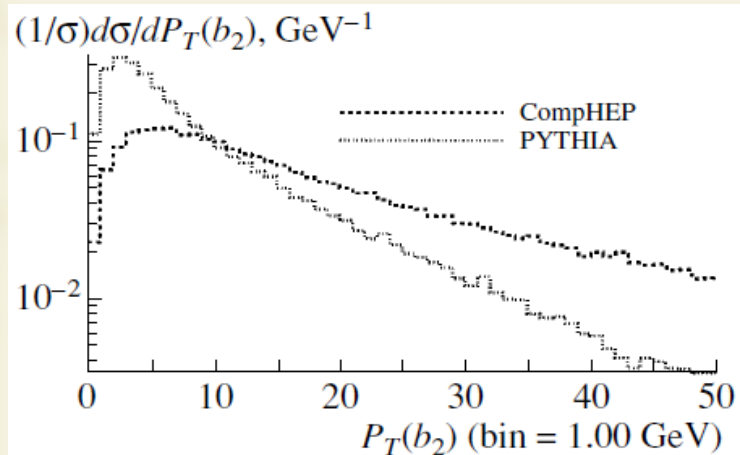
E.Boos, L.Dudko "Single Top Quark Physics" Int.J.Mod.Phys.A 27 (2012) 1230026 – 18 цитир.

E.Boos et.al. "Top Quark" Phys.Part.Nucl. 50 (2019) 3, 231-258, Fiz.Elem.Chast.Atom.Yadra 50 (2019) 3

Сложности моделирования t -канального процесса

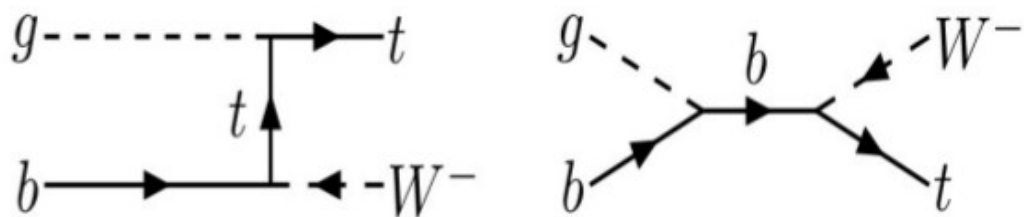


Проведено объединение вкладов диаграмм с начальным b -кварком и диаграмм следующего порядка с глюоном в начальном состоянии



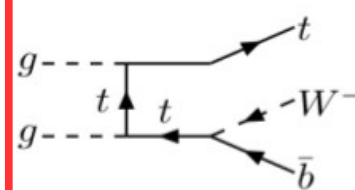
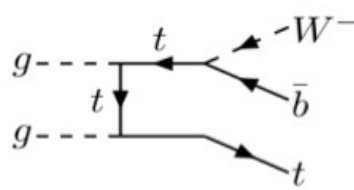
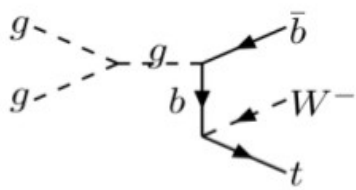
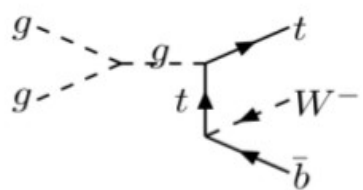
Э.Боос, В.Буничев, Л.Дудко, В.Саврин, А.Шерстнев
 Яд. Физ. 69 (2006) 1352-1365
 (Phys.Atom.Nucl.69(2006)1317) — 169 цитирований,
 CMS Note 2000/065
 Phys.Lett.B 534 (2002) 97-105 - 32 цитир.
 Созданные генераторы событий используются в
 экспериментах D0 (Fermilab, Tevatron) и CMS (LHC)

Сложности моделирования ассоциативного tW рождения (I)

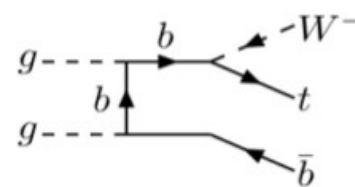
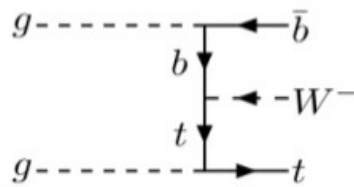
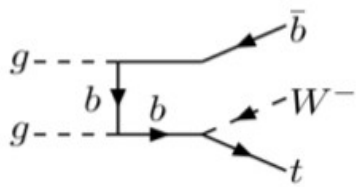
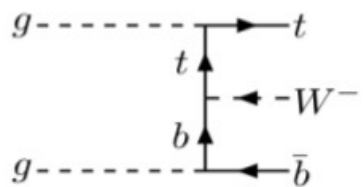


Leading order (**LO**)
2->2 process
tW production

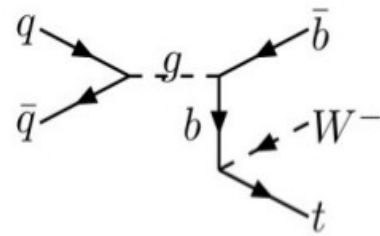
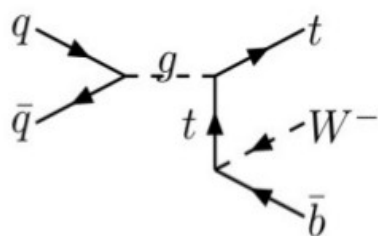
Next to leading order (**NLO**), $O(1/\log(mt/m_b))$, 2->3 processes, **tWb**



t tbar
production



gluon gluon
processes



Сложности моделирования ассоциативного tW рождения (II)

Diagram removal scheme S. Frixione et al., JHEP 07 (2008) 029, 602 цитирования

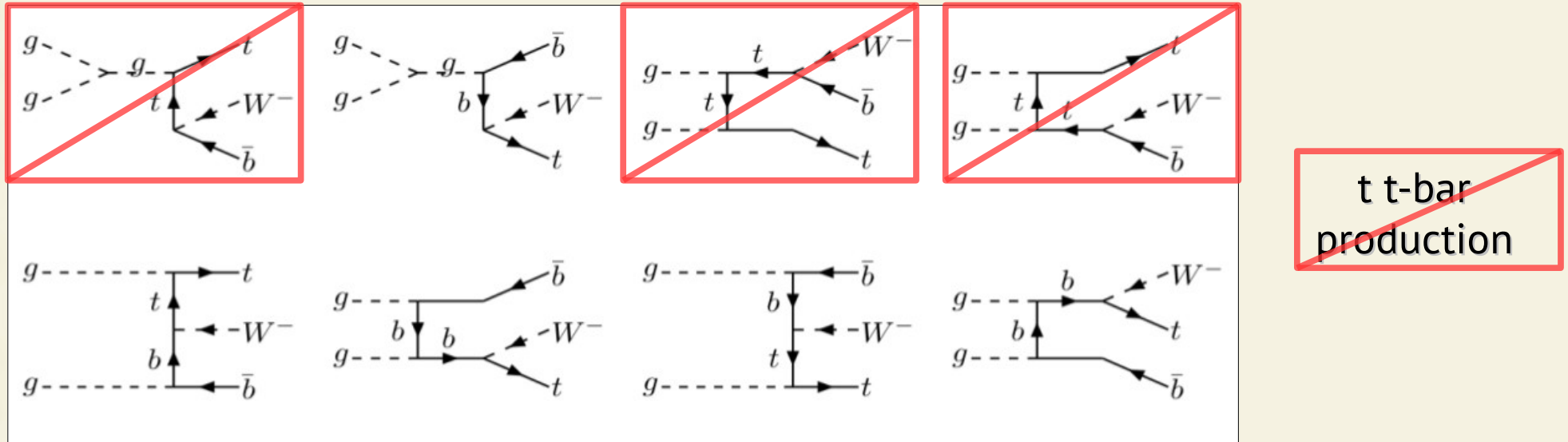
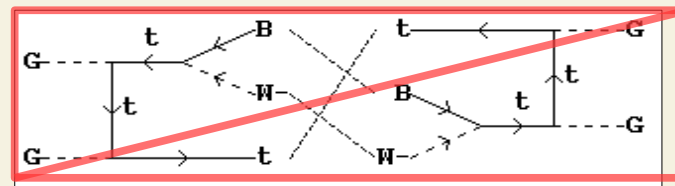
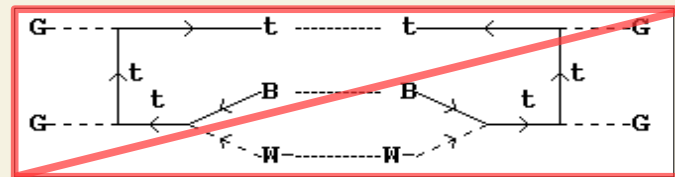
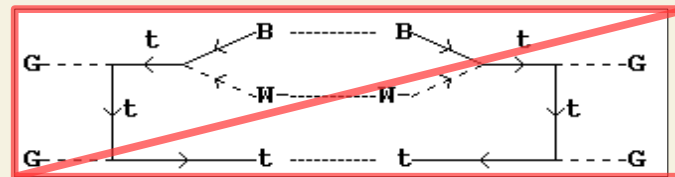


Diagram subtraction
Scheme

T. M. P. Tait,
Phys.Rev.D 61 (1999)
034001

193 цитирования



Kinematic separation

A. Belyaev, E. Boos,
Phys.Rev.D 63 (2001) 034012

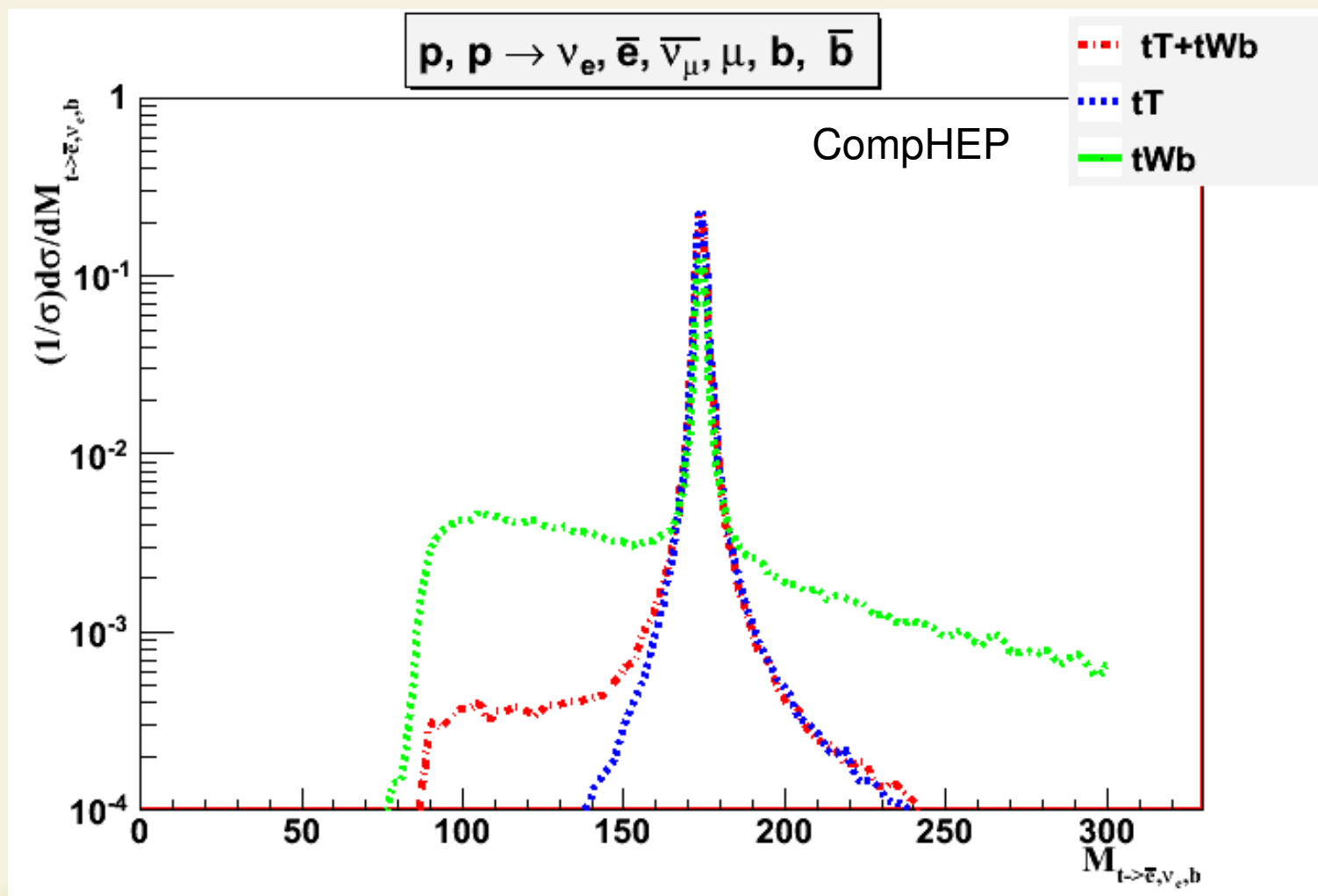
81 цитирование

+ еще 5 статей по этой теме

Сложности моделирования ассоциативного tW рождения (III)

Интерференция между tW (однорезонансный вклад) и $t\bar{t}$ (двухрезонансный вклад) отрицательна и существенна. Наиболее правильным способом моделирования будет учет полного калибровочно-инвариантного набора диаграмм $tW+t\bar{t}$.

А.Баскаков, Е.Боос, Л.Дудко Phys.Rev.D 98 (2018) 11, 116011 – метод измерения ширины топ кварка на основании этого распределения



Экспериментальный поиск. Отбор событий

Конечная сигнатура события



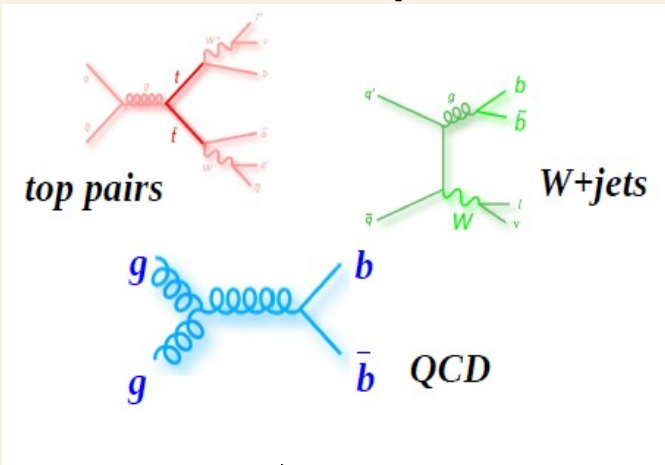
“Single top quark at future hadron colliders:
Complete signal and background study”
A. S. Belyaev, E. E. Boos, L. V. Dudko
Phys. Rev. D 59 (1999), 075001 – 127 цитирований

Tevatron, 1.96 TeV, 2 fb⁻¹

Cuts	Signal	$Wb\bar{b}$	Wjj	WZ	$j(j)b\bar{b}$	$t\bar{t}$	WH
Cut 1	1.986×10^2	3.680×10^2	2.644×10^2	2.059×10^1	6.292×10^2	5.849×10^2	8.428×10^0
Cut 2	1.514×10^2	1.711×10^2	1.034×10^2	1.136×10^1	1.114×10^2	4.898×10^2	6.491×10^0
Cut 3	1.493×10^2	1.453×10^2	9.211×10^1	1.053×10^1	1.030×10^2	4.898×10^2	6.278×10^0
Cut 4	1.295×10^2	1.173×10^2	7.687×10^1	8.564×10^0	8.910×10^1	4.191×10^2	5.145×10^0
Cut 5	1.286×10^2	1.107×10^2	7.488×10^1	8.515×10^0	8.353×10^1	4.186×10^2	5.124×10^0
Cut 6	1.249×10^2	1.038×10^2	6.649×10^1	8.087×10^0	6.961×10^1	4.185×10^2	5.013×10^0
Cut 7	1.247×10^2	1.031×10^2	6.649×10^1	7.419×10^0	4.455×10^1	1.055×10^2	4.562×10^0
Cut 8	1.216×10^2	8.867×10^1	6.141×10^1	7.266×10^0	3.619×10^1	1.039×10^2	4.490×10^0

Signal 122, background 297; S/B≈0.41

Фоновые процессы



$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$	t channel	21 900 ⁺⁹⁸⁰ ₋₈₄₀
	s channel	1 307±47
	19.7 fb^{-1}	

Количество ожидаемых и отобранных событий для сигнала и фона. Данные CMS (LHC) JHEP 02 (2017) 028	tW	9 220±620
	$t\bar{t}$	101 100 ⁺⁵¹⁰⁰ ₋₆₁₀₀
W+jets	36 100 ⁺¹²⁰⁰ ₋₁₂₀₀	
Dibosons	780±20	
Drell-Yan	5 960±320	
Multijets	30 200 ^{+6 000} _{-6 300}	

Total 206 650^{+8 100}_{-8 900}

Data 222 242

Экспериментальные измерения в секторе топ кварка

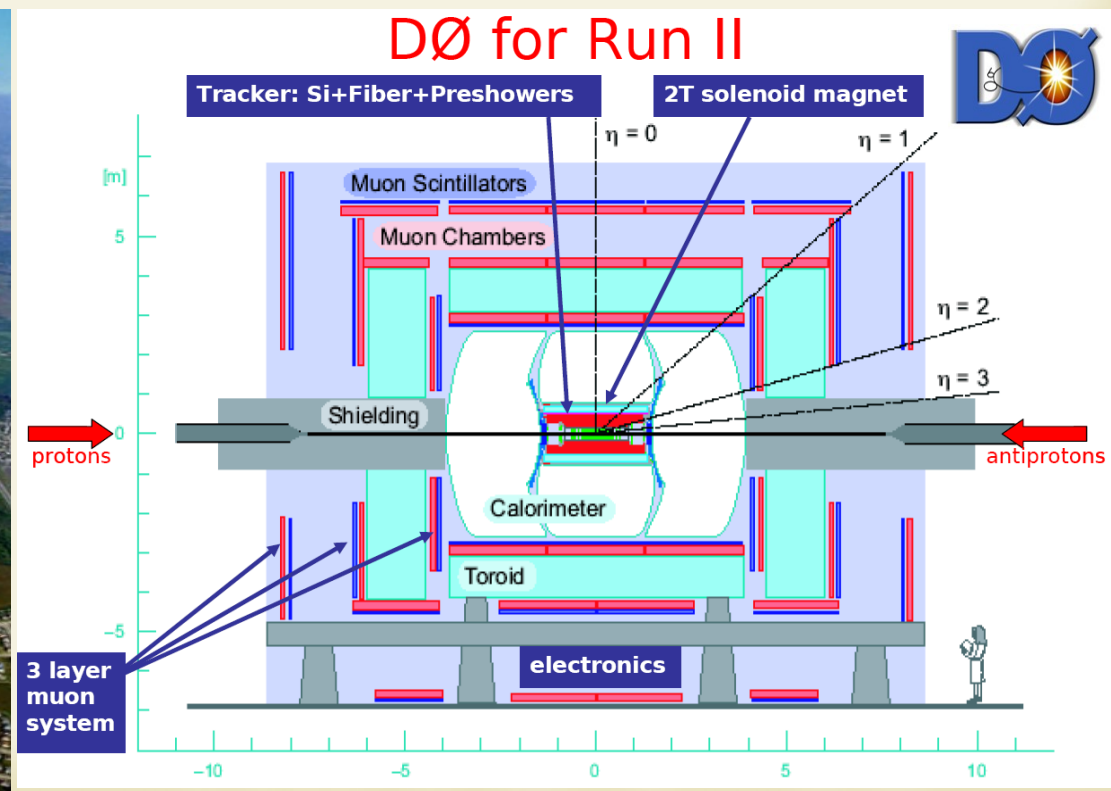
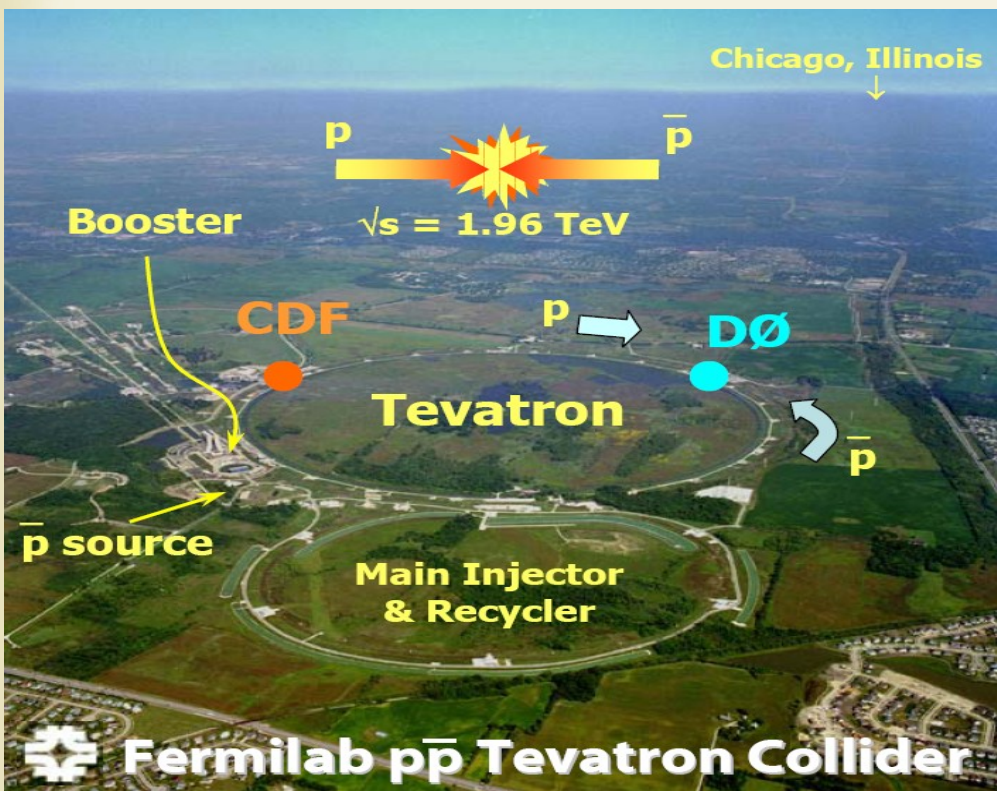
- масса топ кварка ($\Delta m \sim 0.3\%$) и другие параметры
- полные сечения и сечения в ограниченных областях фазового пространства
- дифференциальные сечения
- Характеристики взаимодействия с другими частицами, константы связи (g_{tt} , W_{tb} , FCNC, ...)
- поиск новых резонансов в рождении или распаде топ кварка (W' , H^+ , T , ...)

Tevatron, D0

Протон-антипротонный коллайдер
 Run I: 1992-1995, 1.8 ТэВ, 100 пб⁻¹
 Открытие топ кварка 1995г.
 Phys.Rev.Lett. 74 (1995) 2632-2637 -
 3224 цит.

Run II: 2001-2011, 1.96 ТэВ, 10 фб⁻¹
 Наблюдение одиночного топ кварка
 Phys.Rev.Lett. 98 (2007) 181802 – 270 цит.
 Открытие одиночного топ кварка
 Phys.Rev.Lett. 103 (2009) 092001 – 538 цит.

538 публикаций D0 со словами топ кварк
 в заголовке.

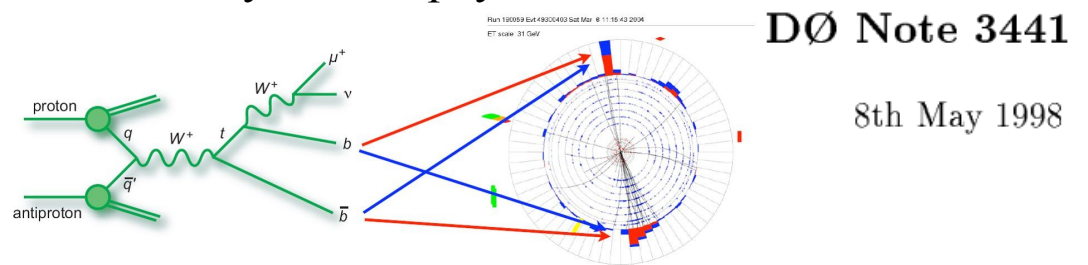


Вклад НИИЯФ в топ физику в D0 коллаборации

1993 г. - создание группы НИИЯФ для анализа данных D0 эксперимента
 1995 г. - создание совместной с UCR группы D0 для исследования одиночного топ кварка.
 Phys.Rev.D 63 (2000) 031101 – 86 цит., первая публикация D0 по одиночному топ кварку
 Phys.Lett.B 517 (2001) 282-294 – 104 цит.
 применение нейронных сетей, одиночный топ.
 Всего 114 публикаций D0 по одиночному топ кварку.

В 2002г. исследования одиночного топ кварка в D0 отмечены Шуваловской премией МГУ.

В 2007 г. первое наблюдение одиночного топ кварка отмечено Ломоносовской премией МГУ



Status of Single Top Analysis for $e + jets/\mu$

A. Belyaev, E. Boos, L. Dudko, P. Ermolov, N. Sotnikova
Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Russia

A. Heinson

University of California, Riverside, USA

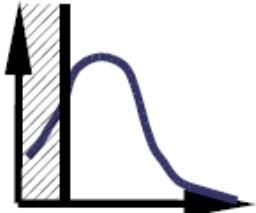
Abstract

"We present the analysis and the preliminary results from a search for single top quark production ($t+X$ and $\bar{t}+X$) in the electron+jets/muon channel ¹. The data set used for this analysis corresponds to approximately 108 pb^{-1} from Runs 1a, 1b, and 1c. We present the event

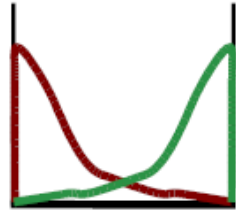


Применение многомерных методов анализа

Cut-Based



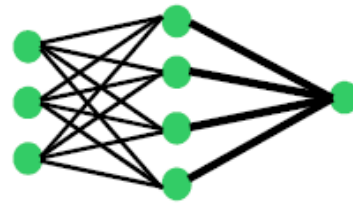
Likelihoods



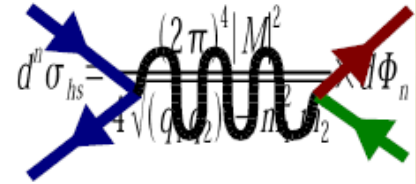
Decision Trees



Neural Networks



Matrix Elements



- **Поиск редких процессов с высоким уровнем фона вынуждает применять наиболее эффективные методы анализа**

→ Начиная с 1995 года группа НИИЯФ МГУ развивает методы применения нейронных сетей для исследования процессов на коллайдерах.

→ D0-Note 3612 (1999) E.Boos, L.Dudko; AINENP'99 (первые публикации)

- **Разработан метод «оптимальных наблюдаемых» и общий рецепт формирования пространства переменных для применения нейронных сетей предложены рецепты применения в задачах поиска топ кварка и бозона Хиггса**

→ E.Boos, L.Dudko, T.Ohl Eur.Phys.J. C11 (1999) 473-484 — 118 цитирований

→ E.Boos, L.Dudko Nucl.Instrum.Meth. A502 (2003) 486-488 — 25 цит.

• E.Boos, V.Bunichev, L.Dudko, A.Markina, M.Perfilov Phys.Atom.Nucl. 71 (2008) 388-393

• Int.J.Mod.Phys.A 35 (2020) 21, 2050119

• Методы использованы в большинстве публикаций D0 по одиночному топ кварку, в некоторых публикациях CMS, и в Physics TDR будущего коллайдера FCC

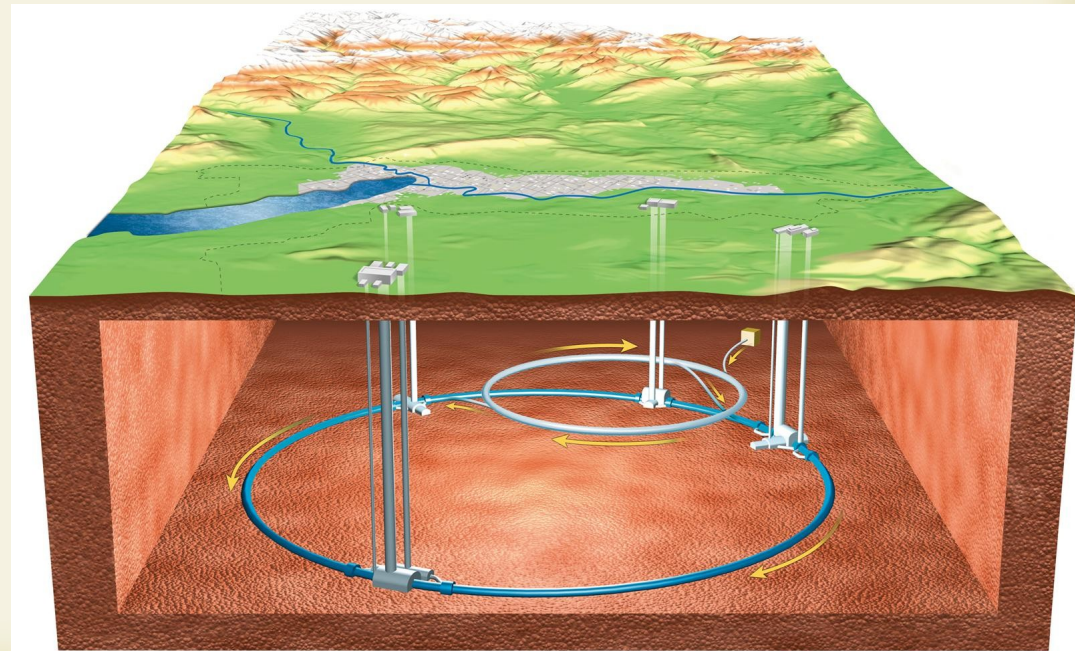
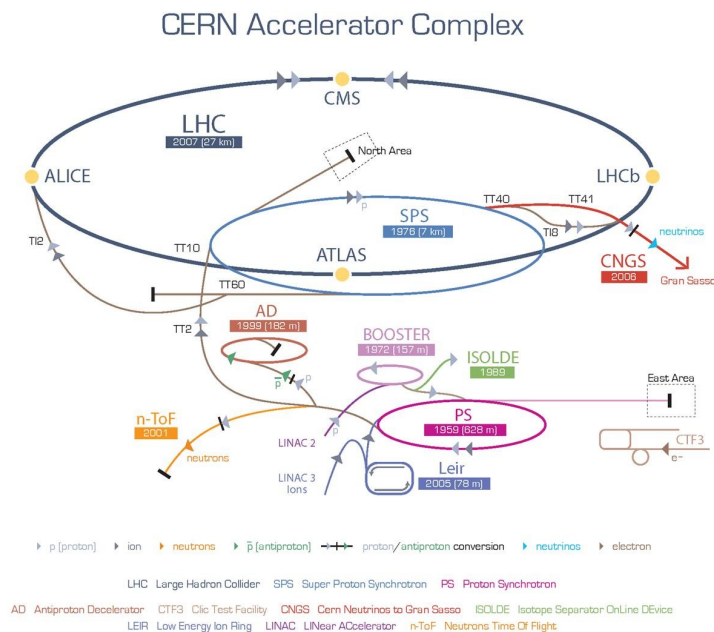
Эксперимент CMS, коллайдера LHC (БАК)

Протон-протонный коллайдер (есть сеансы с тяжелыми ионами) в CERN, первый запуск 2008 год, начал нормальную работу в 2010 году при энергии 7 ТэВ, набрано 5 фб⁻¹ интегральной светимости; 2012 г.: 8 ТэВ, 20 фб⁻¹; 2016-18: 13 ТэВ, 140 фб⁻¹.

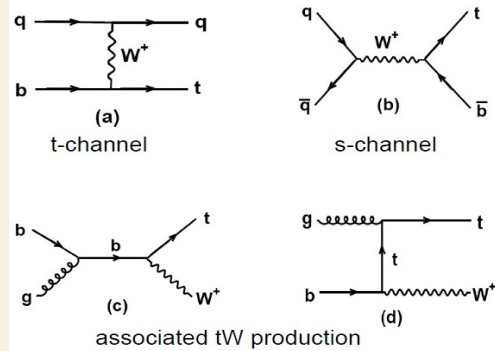
В 1998 г. Создана группа НИИЯФ МГУ для исследований топ кварка в коллаборации CMS. Е.Е. Воос, L.V. Dudko, V.I. Savrin CMS-Note 2000/065 – первая внутренняя публикация из 22х коллаборационных публикаций на сегодняшний день.

Основные направления участия группы НИИЯФ МГУ в задачах в CMS:

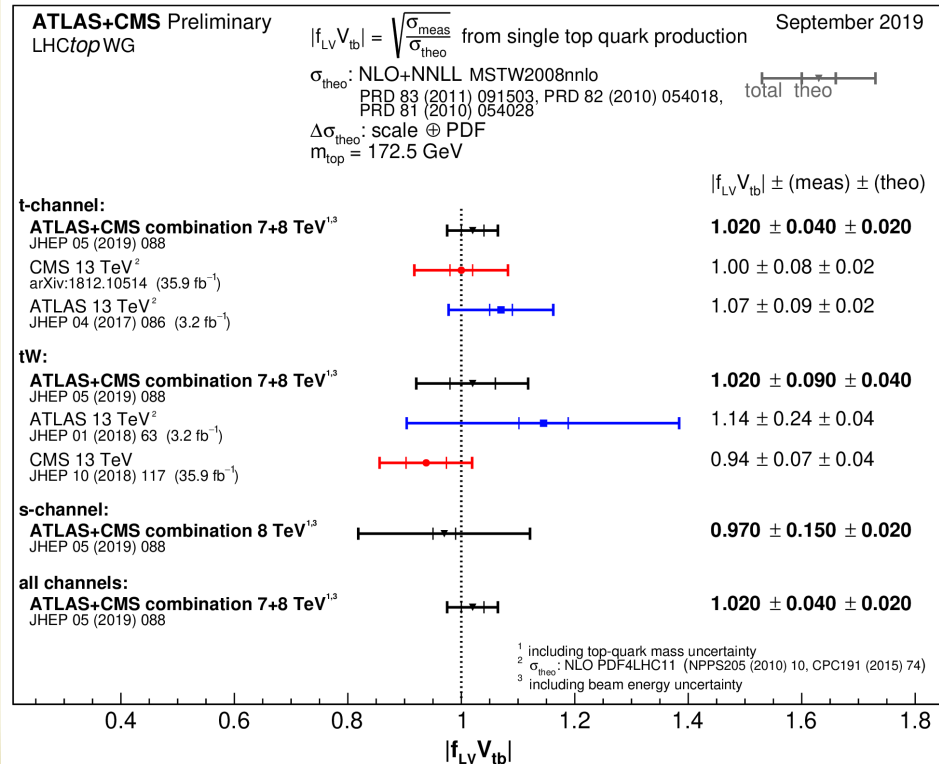
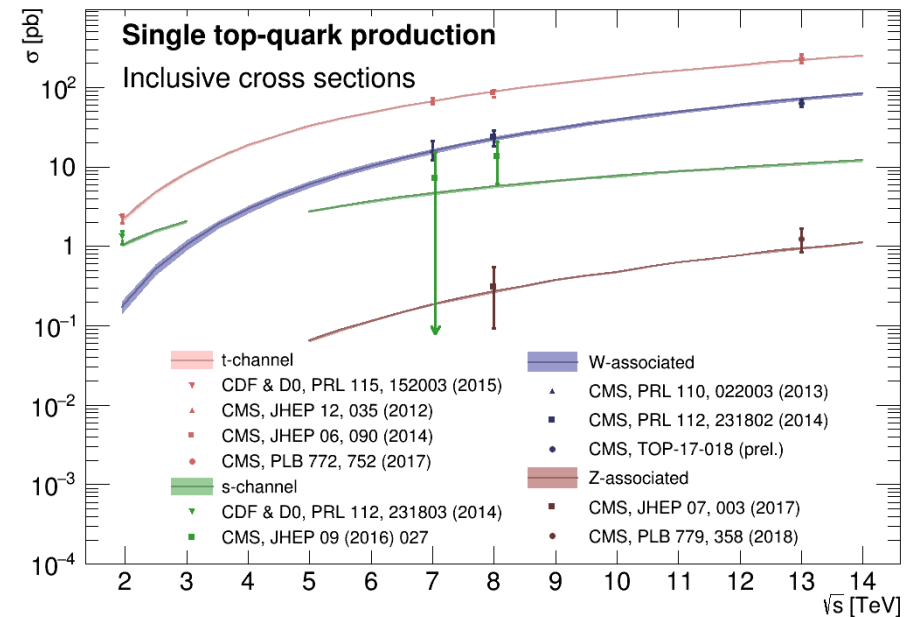
- 1) электрослабое (одиночное) рождение топ кварка
- 2) поиск отклонений от Стандартной модели во взаимодействии t-кварка с W бозоном и b-кварком
- 3) поиск нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействиях топ кварка
- 4) Поиск дополнительного заряженного векторного бозона W'
- 5) Первые попытки исследований топ кварка в столкновениях тяжелых ионов



Одиночное рождение топ-кварка, измерения в рамках Стандартной модели



- Сечение пропорционально $|V_{tb}|^2$ и доступно прямое измерение параметра ККМ матрицы
- Рождение и распад проходят через Wtb вершину и позволяют напрямую тестировать (V-A) структуру взаимодействия
- Сечения вычислены с NNLO точностью
- Процессы чувствительны к различным отклонениям от СМ



Поиск “Новой физики” в процессах с рождением топ кварка

- 1) возможные отклонения в наблюдаемых взаимодействиях (в рамках СМ): **tWb**, **gtt**
- 2) дополнительные взаимодействия: **FCNC tqg**, **tZq**, **tAq**, **tHq**
- 3) рождение новых, вне рамок СМ, резонансов в рождении или распаде топ кварка: **W'**, **H+**, **Z'**

$$\mathcal{L}_{eff} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_i \frac{C_i}{\Lambda^2} O_i$$

Модельнонезависимый подход к исследованию возможной “Новой физики” в рамках эффективной теории поля

$$\mathcal{L}_{Wtb} = -\frac{g}{\sqrt{2}} \bar{b} \gamma^\mu (V_L P_L + V_R P_R) t W_\mu^- - \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{b} \frac{i\sigma^{\mu\nu} q_\nu}{M_W} (g_L P_L + g_R P_R) t W_\mu^- + \text{h.c.}$$

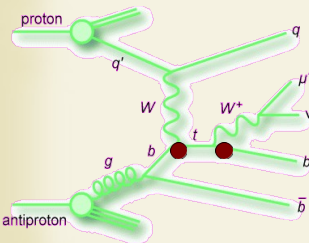
Возможные отклонения в tWb:

Е.Boos, L.Dudko, T.Ohl Eur.Phys.J.C 11 (1999) 473-484

Одно из первых феноменологических исследований отклонений в tWb – 118 цитирований

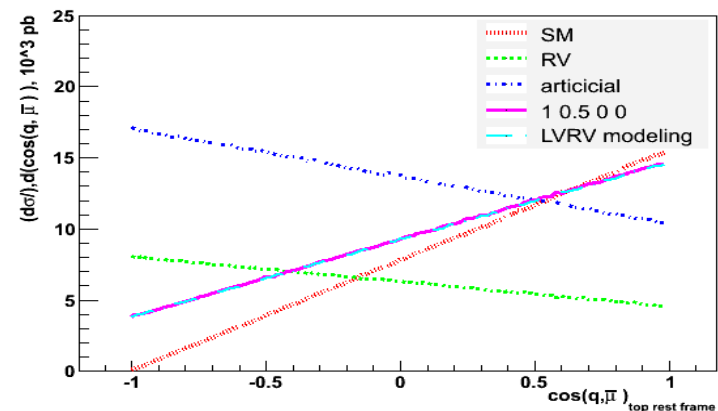
for s-channel:

$$\sigma(\hat{s})_{u\bar{d} \rightarrow t\bar{b}} = \frac{\pi \cdot V_{ud}^2 \cdot \alpha^2}{24 \sin^4 \Theta_W} \cdot \frac{\beta^4 \cdot \hat{s}}{(\hat{s} - m_W^2)^2} \left[(3 - \beta^2) \cdot (f_{LV}^2 + f_{RV}^2) + (3 - 2\beta^2) \cdot \frac{\hat{s}}{m_W^2} \cdot (f_{LT}^2 + f_{RT}^2) - \frac{6m_t}{m_W} \cdot (f_{LV} \cdot f_{RT} + f_{RV} \cdot f_{LT}) \right]$$



for t-channel:

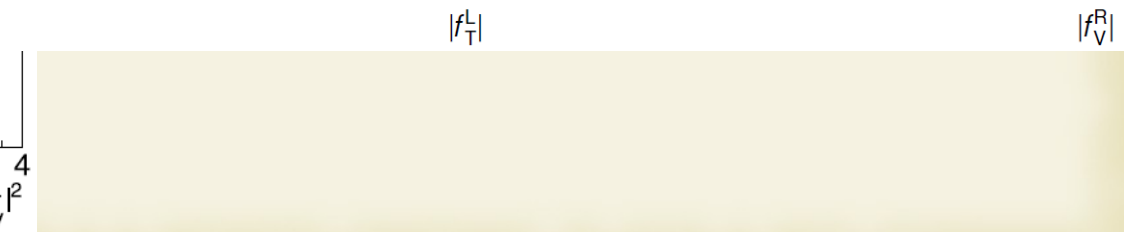
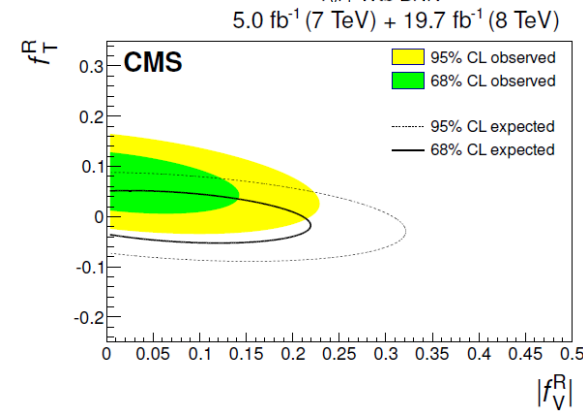
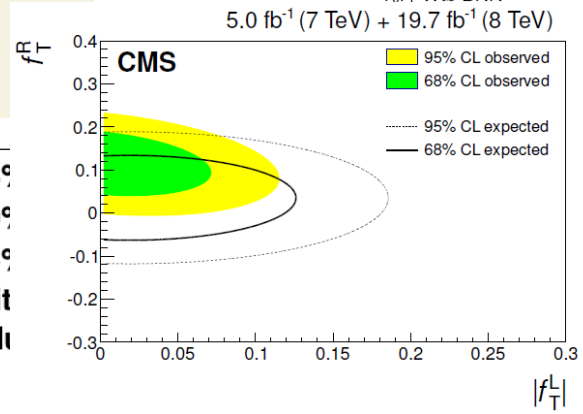
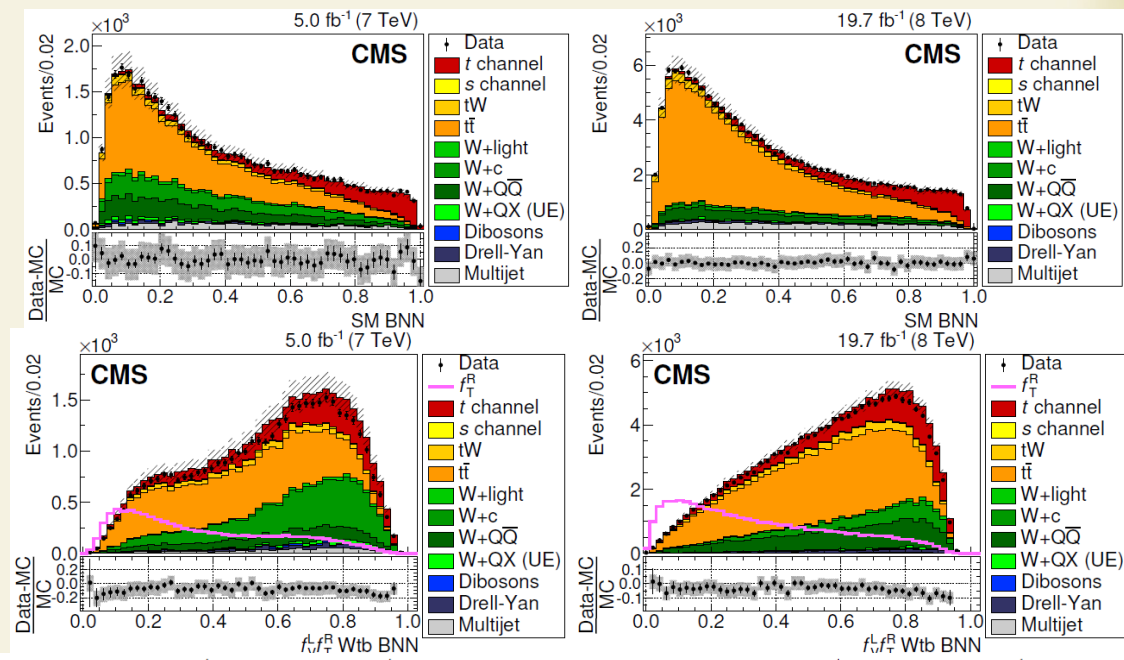
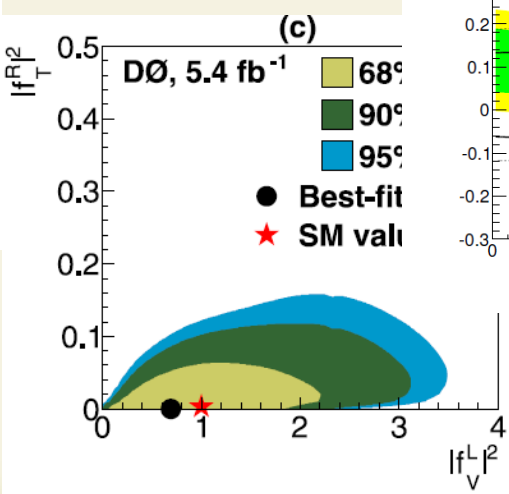
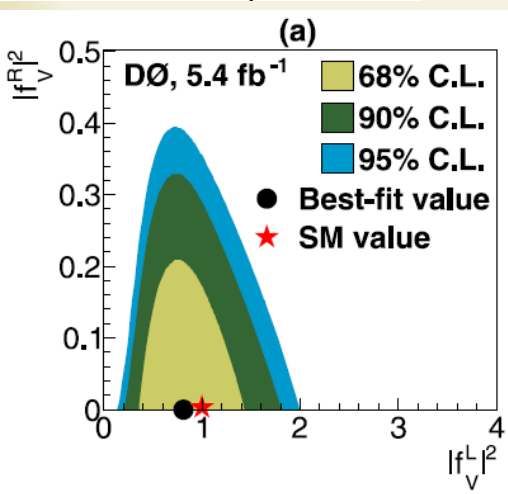
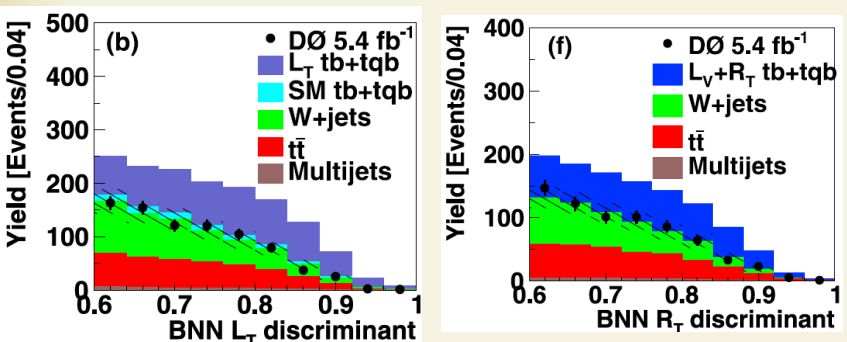
$$\sigma(\hat{s})_{u\bar{b} \rightarrow t\bar{d}} = \frac{\pi \cdot V_{ud}^2 \cdot \alpha^2}{4 \cdot \hat{s} \cdot \sin^4 \Theta_W} \left[c_0 c_p \beta^4 \cdot f_{LV}^2 + (-(1 + c_1) \cdot \ln(a_1) + (2 + c_0) \cdot \beta^2) \cdot f_{RV}^2 + ((2 + c_0) \cdot \ln(a_1) - (1 + c_1) \cdot c_0 c_p \beta^2) \cdot f_{RT}^2 + (c_1 \cdot \ln(a_1) - 2\beta^2) \cdot c_0 \beta^2 \cdot f_{LT}^2 + \frac{2m_t}{m_W} \cdot ((-\ln(a_1) + c_p \beta^2) \cdot f_{LV} \cdot f_{RT}) + \frac{2m_t}{m_W} \cdot ((c_1 \cdot \ln(a_1) - 2\beta^2) \cdot f_{RV} \cdot f_{LT}) \right]$$



Поиск отклонений от СМ в tWb взаимодействии

Результаты поиска в D0 эксперименте:
 Phys.Lett.B 713 (2012) 165-171 – 50 цит.
 Phys.Lett.B 708 (2012) 21-26 – 45 цит.
 Phys.Rev.Lett. 102 (2009) 092002 – 47 цит.
 Phys.Rev.Lett. 101 (2008) 221801 – 54 цит.

Результаты поиска в эксперименте CMS:
 JHEP 02 (2017) 028 – 72 цитирования

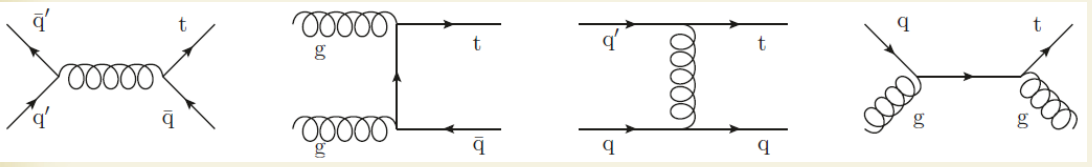


Поиск нейтральных токов (FCNC)

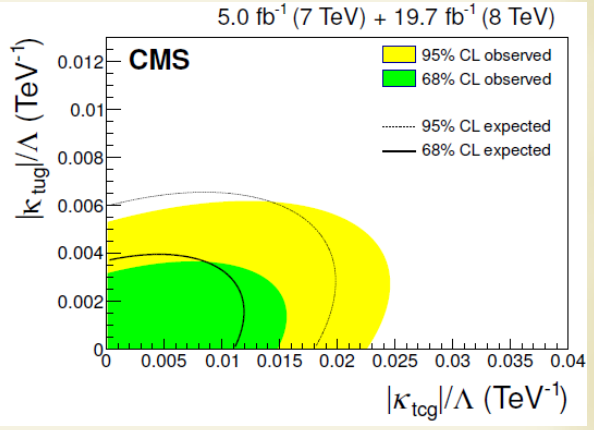
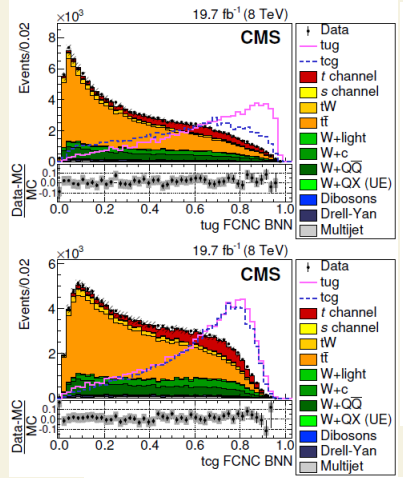
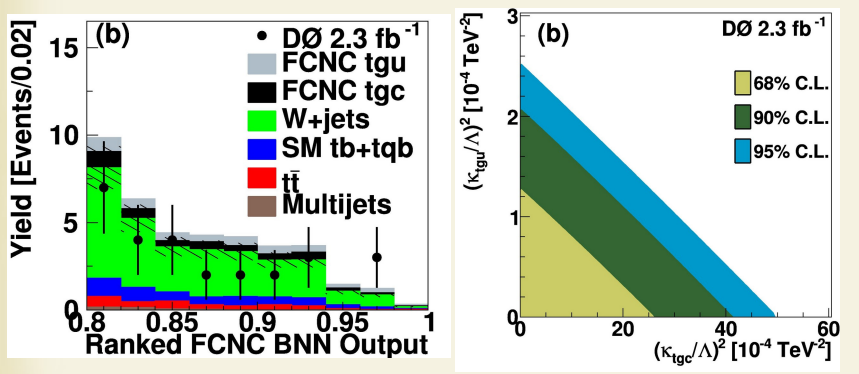
$$g_s \frac{\kappa_{tug}}{\Lambda} \bar{u} \sigma^{\mu\nu} \frac{\lambda^a}{2} t G_{\mu\nu}^a + g_s \frac{\kappa_{tcg}}{\Lambda} \bar{c} \sigma^{\mu\nu} \frac{\lambda^a}{2} t G_{\mu\nu}^a + h.c.$$

Результаты поиска tqg FCNC в CMS:
 JHEP 02 (2017) 028 – 72 цитирования

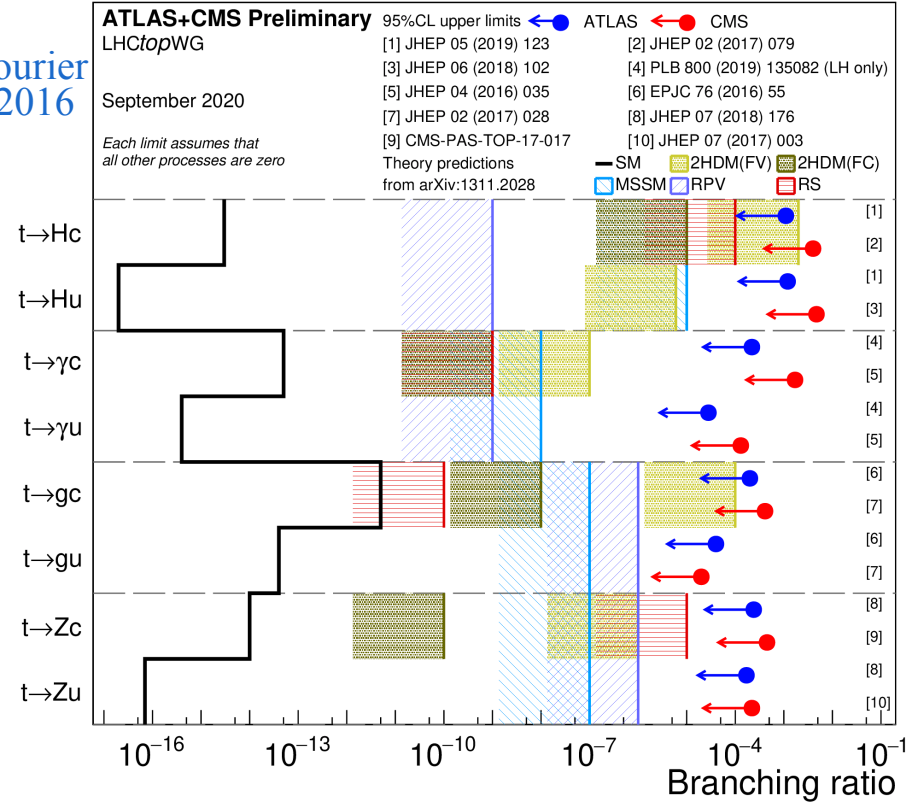
Характерные диаграммы Фейнмана



Результаты поиска tqg FCNC в D0:
 Phys.Lett.B 693 (2010) 81-87 – 81 цитир.
 Phys.Rev.Lett. 99 (2007) 191802 – 77 цитир.



CERN Courier
 Ноябрь, 2016



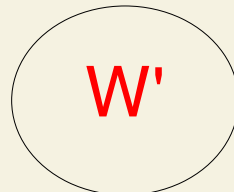
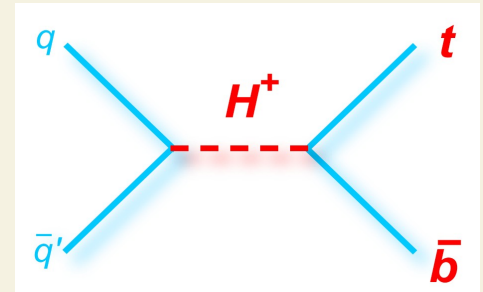
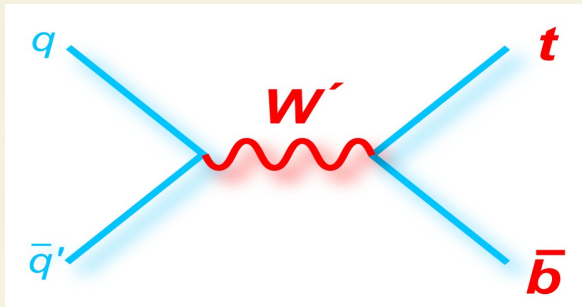
Проверка допустимости такого подхода к измерениям FCNC:
 E.Boos, V.Bunichev, G.Vorotnikov, L.Dudko, M.Perfilov
 Physics of Atomic Nuclei, 83(6), 984-988 (2020)

Исследование потенциала будущих экспериментов:
 HL-LHC, HE-LHC: CMS-PAS-FTR-18-004,
 HL-LHC CERN Yellow report Vol. 7 (2019) – 44 цитир.
 FCC (100 ТэВ): CERN-ACC-2018-0043, FCC CDR vol.1

W' searches

$$L = \frac{V_{q_i q_j}}{2\sqrt{2}} g_W \bar{q}_i \gamma_\mu [a_{q_i q_j}^R (1 + \gamma_5) + a_{q_i q_j}^L (1 - \gamma_5)] W' q_j + H.C.$$

Heavy gauge boson



models of
Universal Extra Dimensions
Datta et al, Phys. Lett B 483, 203 (2000)

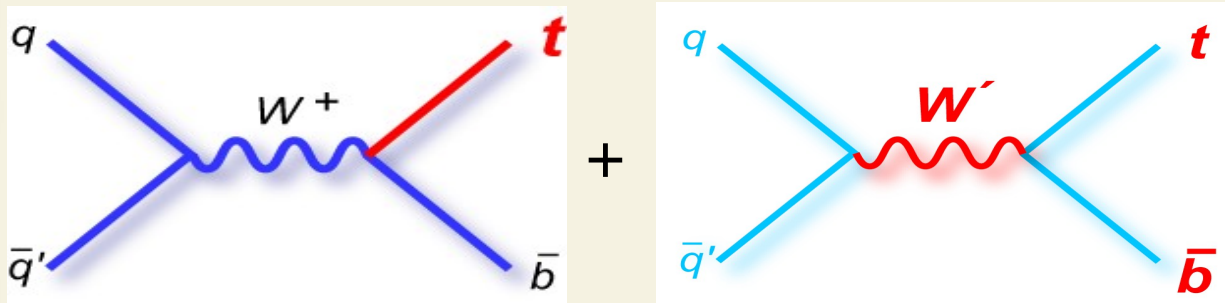
Technicolor models
Chivukula et al, Phys Rev D 53, 5258 (1996)

composite models , Little Higgs models
Grand Unification Theory

top-flavor models
Malkawi et al, Phys Lett. B 385, 304 (1996)

Left-Right symmetric models
Pati, Salam, Phys Rev D 10, 275 (1974)
Mohapatra, Pati, Phys Rev. D 11, 566 (1975)

W' search: $W - W'$ interference



~ considered three scenarios of W' interaction to fermions:

1) SM + purely left-handed W' , 2) purely right-handed W'

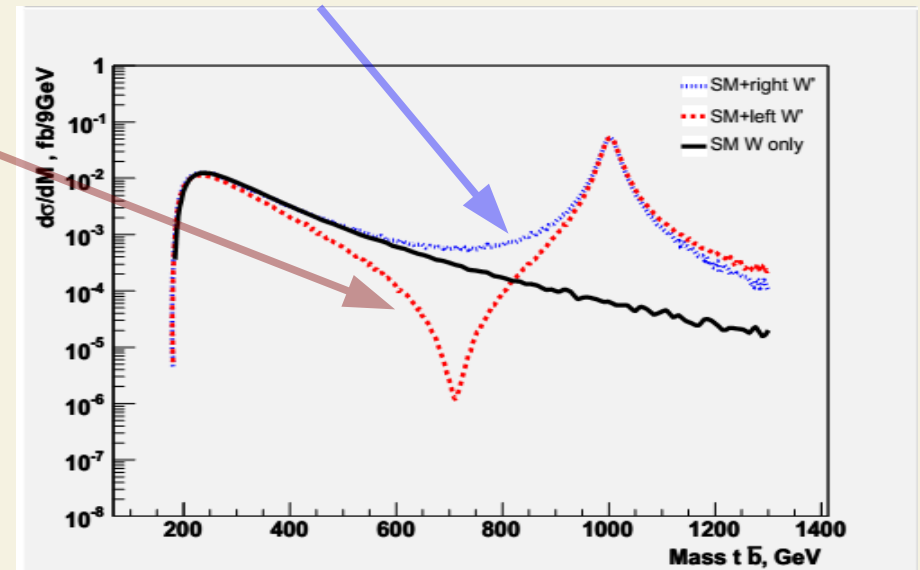
~ Interference of W and W'

in the s-channel usually takes
into account

- destructive influence on the CS

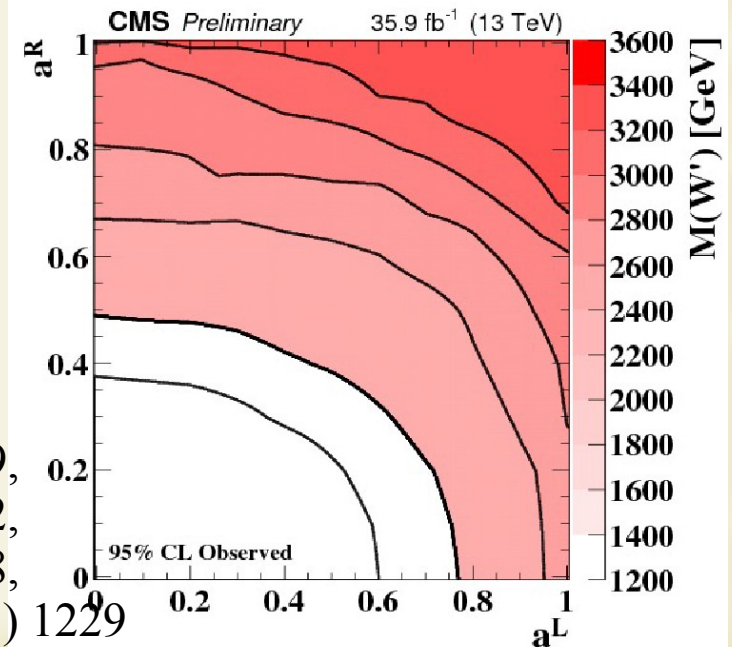
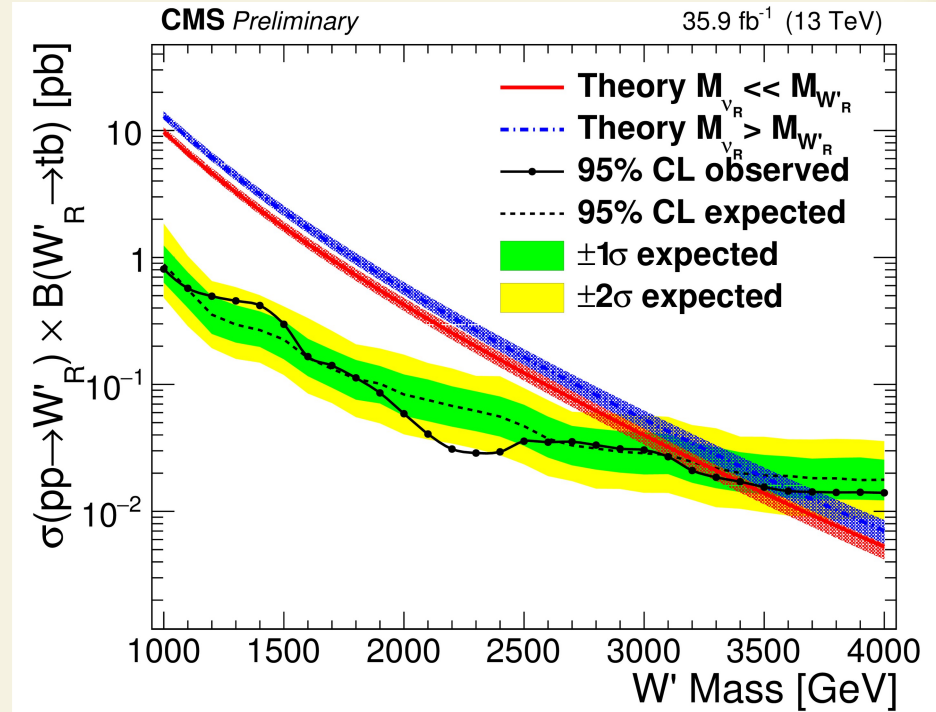
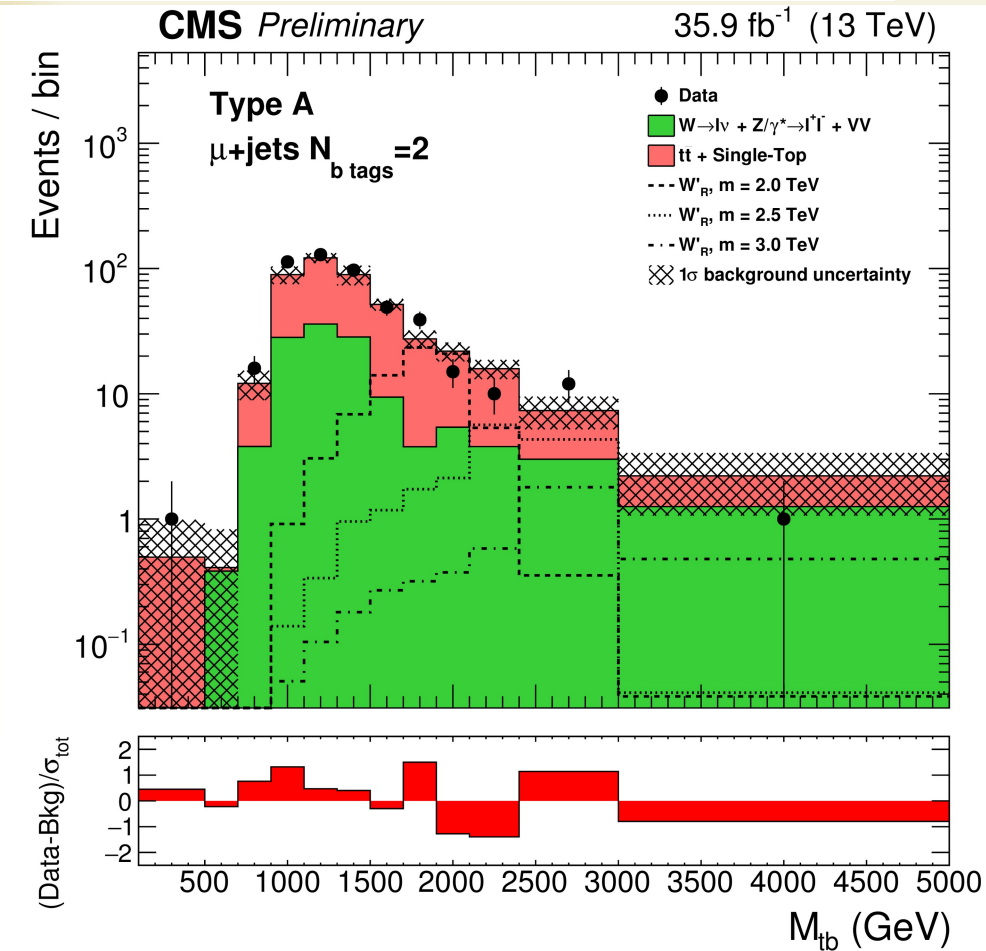
~ squared matrix element of the process:

$$|M|^2 = \text{SM} + 2 \cdot a_{ud}^L \cdot a_{tb}^L \text{ Interference of } W \text{ and } W' + W' \text{ part}$$



Поиск W' \rightarrow tb

$$p_T^{top} > 650 \text{ GeV and } p_T^{j_1+j_2} > 700 \text{ GeV}$$



Результаты D0:

Phys.Lett.B 641 (2006) 423-431 39 цит.

Phys.Rev.Lett. 100 (2008) 211803 91 цит.

Phys.Lett.B 699 (2011) 145-150 81 цит.

Phys.Rev.Lett. 102 (2009) 191802 72 цит.

Результаты CMS:

JHEP 1708 (2017) 029,

JHEP 1602 (2016) 122,

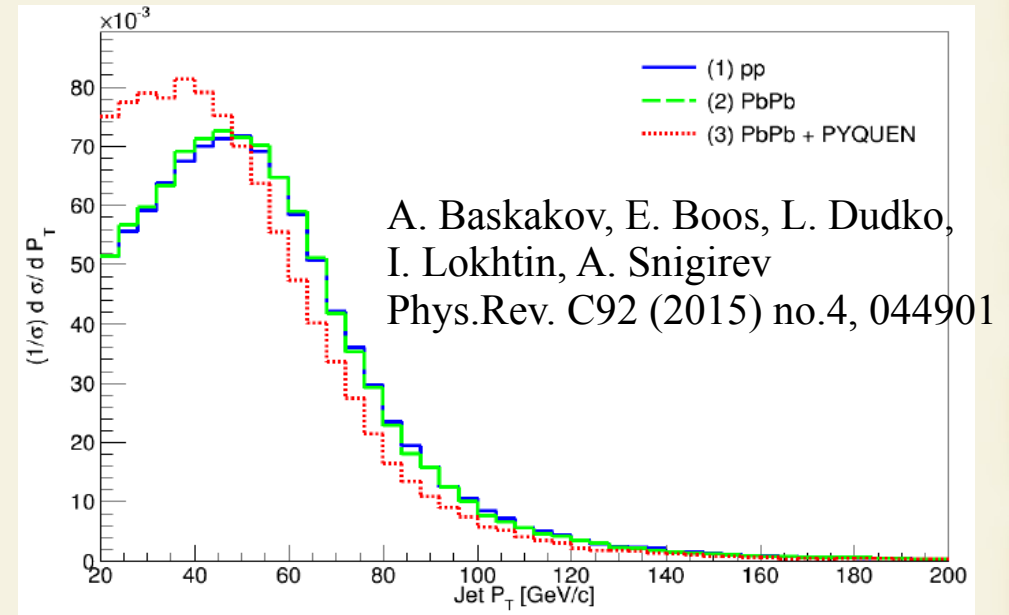
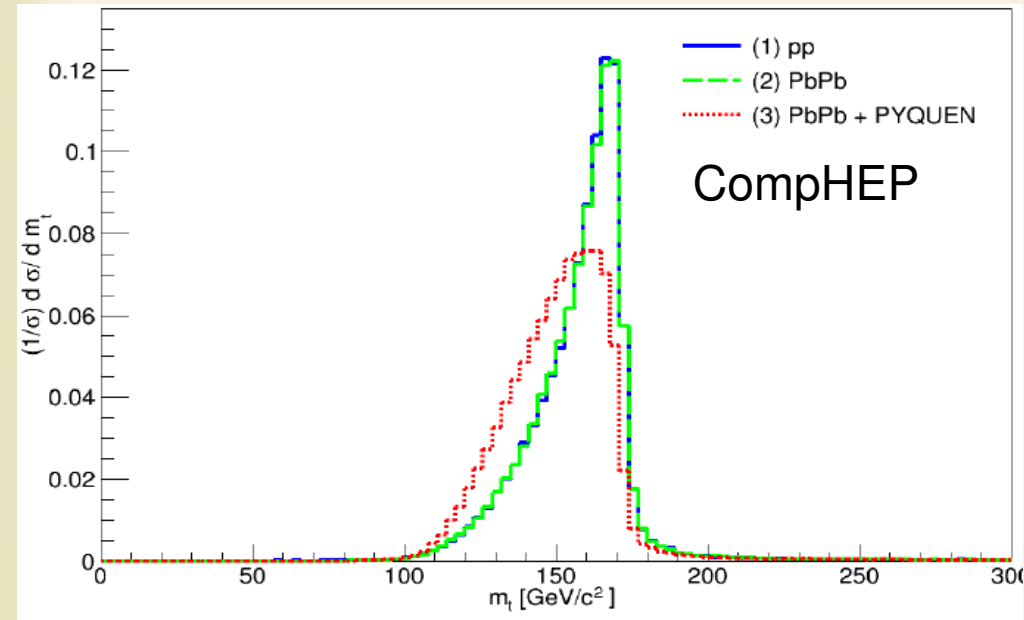
JHEP 1405 (2014) 108,

Phys.Lett. B718 (2013) 1229

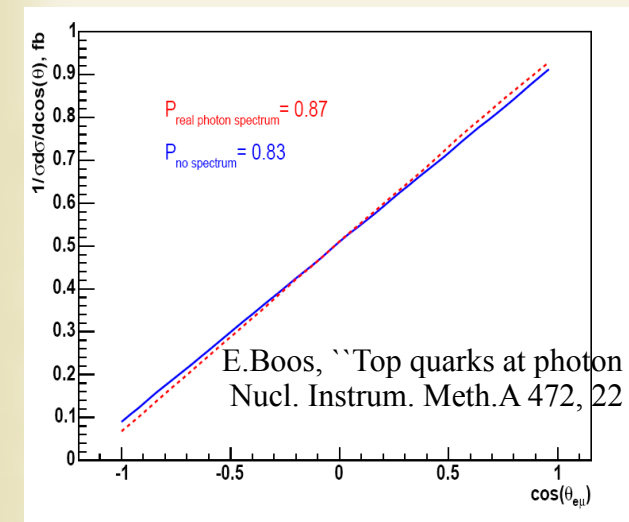
Топ кварк в столкновениях тяжелых ионов.

e^+e^- , $\gamma\gamma$, γe коллайдеры

Single top simulation:



Spin correlations in $\gamma e \rightarrow t b \nu_e$



E.B., Dubinin, Pukhov, Sachwitz, Schreiber,

"Single top production in e^+e^- , e^-e^- , γe and $\gamma\gamma$ collisions," Eur. Phys. J. C 21, 81 (2001)

E.B., Pukhov, Sachwitz, Schreiber,

"Probing anomalous Wtb coupling via single top production at TeV energy γe colliders," Phys. Lett. B 404, 119 (1997);

E.B., M. Sachwitz, H.J. Schreiber, S. Shichanin, A. Pukhov, V. Ilyin,

T. Ishikawa, T. Kaneko, S. Kawabata, Y. Kurihara, Y. Shimizu, H. Tanaka,

"Single top quark production at LEP-200?," Phys. Lett. B 326, 190 (1994);

$$e^+e^- \rightarrow t b e^- \nu_e$$

$$\gamma\gamma \rightarrow t b W^-$$

$$\gamma e \rightarrow t b \nu_e$$

Заключение

- ~ Стандартная модель (СМ) хорошо согласуется с экспериментом. Не наблюдается статистически значимых отклонений от предсказаний СМ в секторе топ-кварка
- ~ Основные направления поиска:
 - рождение тяжелых резонансов распадающихся в топ-кварк
 - возможные модификации tWb взаимодействия
 - дополнительные взаимодействия: $tgu(c)$, $tZu(c)$, $t\gamma u(c)$
- ~ Следующий уровень чувствительности в экспериментах с топ-кварком это проверка взаимодействия ttH , tHq
- ~ Текущие исследования: развитие общего EFT подхода к поиску отклонений от СМ; тройное рождение топ кварков; более точное моделирование ассоциативного рождения топ кварков и бозонов; поиск темной материи.