

Гипотетические частицы, аномальные взаимодействия, используемые методы

**Э.Э.Боос
НИИЯФ МГУ**

No lose theorem!

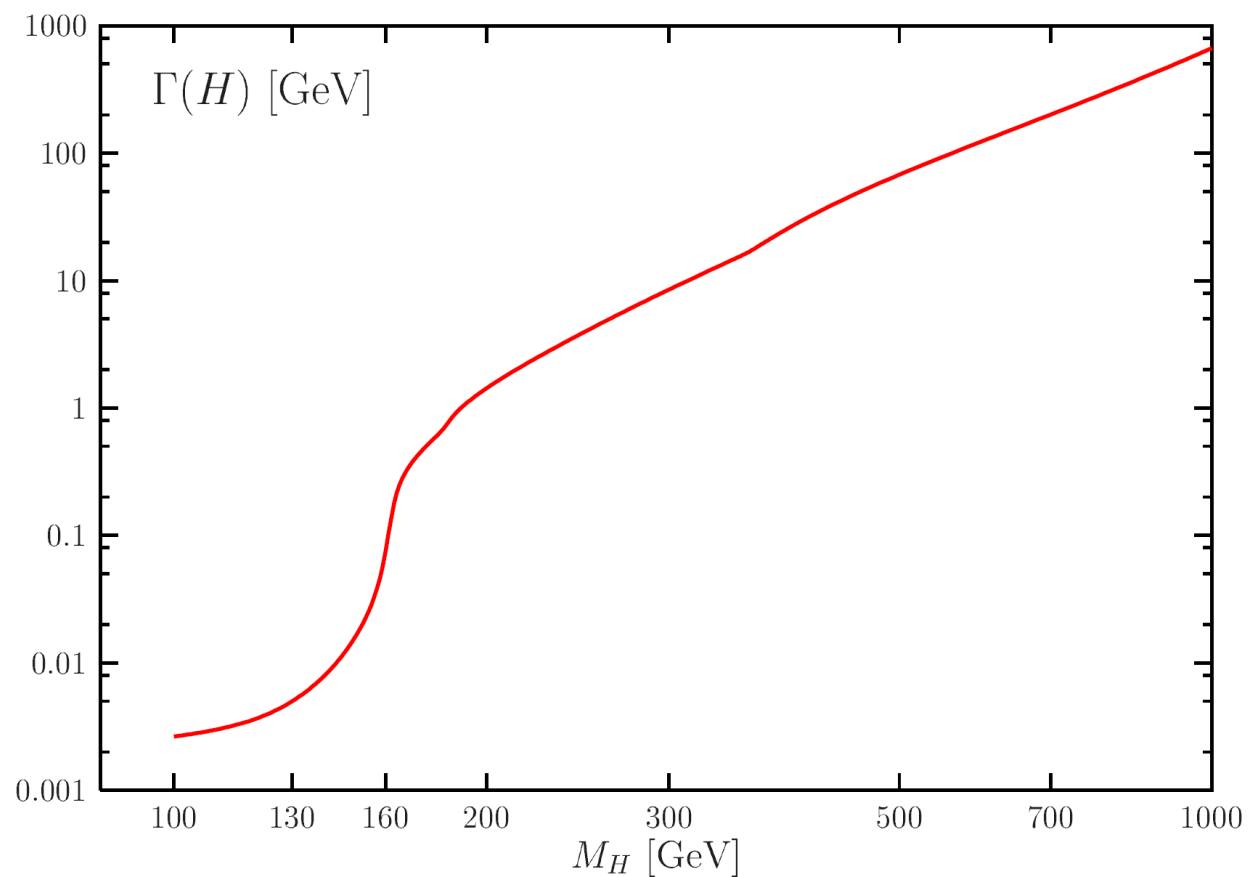
Из требования унитарности для $VV \rightarrow VV$ ($V: W, Z$)

Либо легкий Хиггс

$$M_H \lesssim 710 \text{ GeV}$$

Либо «новая физика» на масштабе
 $\sim 1 \text{ TeV}$

$$\sqrt{s} \lesssim 1.2 \text{ TeV}$$



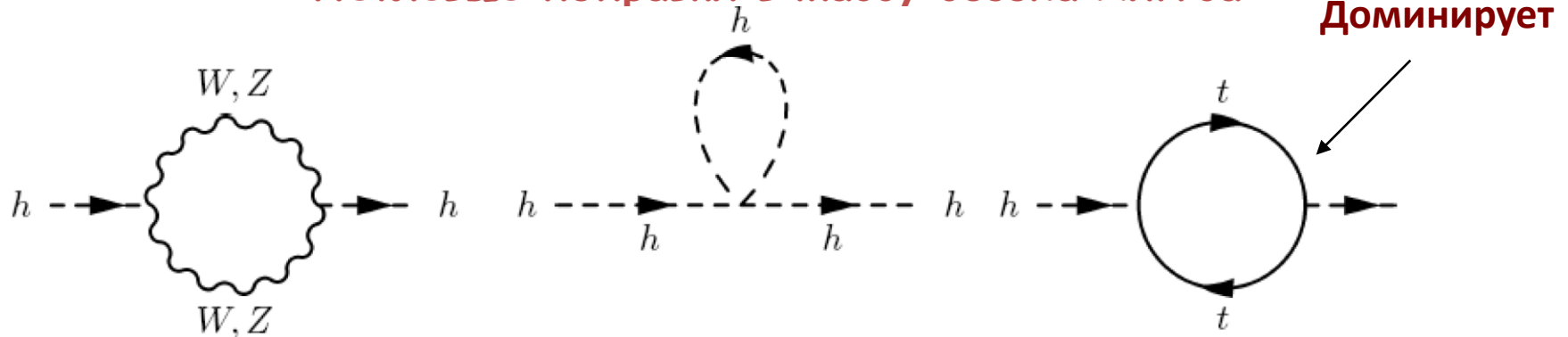
**Полная ширина мала для легкого бозона
Хиггса и велика для тяжелого**

Для массы $M_H \sim 1$ TeV ширина $\Gamma_H \sim 0.5$ TeV

Но достаточно легкий бозон Хиггса открыт...

Простейший механизм Хиггса в СМ не стабилен по отношению к петлевым квантовым поправкам (проблема натуральности СМ)

Петлевые поправки в массу бозона Хиггса



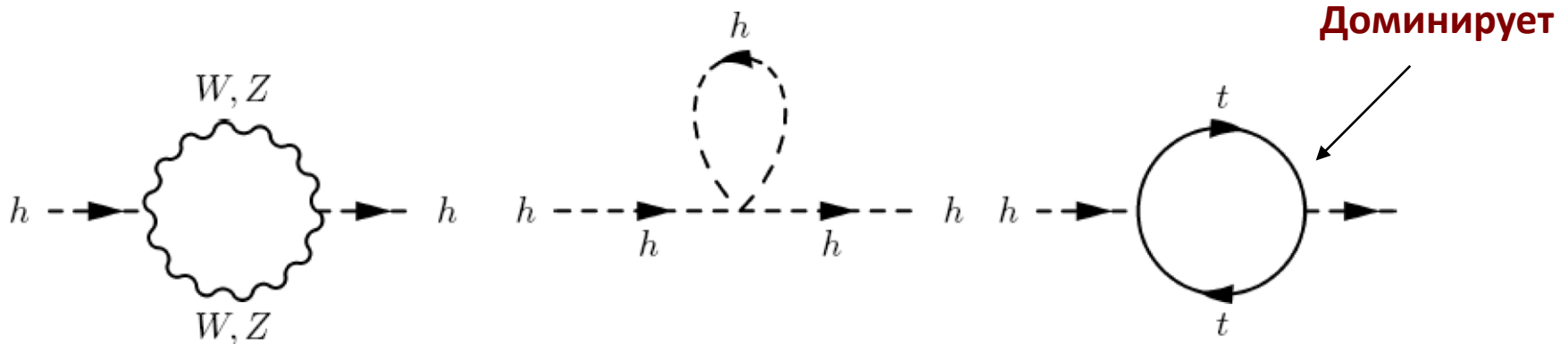
$$\delta m_H^2 = \frac{3G_F}{4\sqrt{2}\pi^2} (2m_W^2 + m_Z^2 + m_H^2 - 4m_t^2) \Lambda^2 \approx -(0.2 \Lambda)^2$$

$$\delta m_H < 125 \text{ GeV (95\% CL limit on SM Higgs)} \quad \Lambda \sim 0.6-0.7 \text{ TeV}$$

В СМ нет симметрии, которая бы предохраняла массу бозона Хиггса от больших квадратичных поправок

Необходимо что-то в дополнение к СМ => Существование достаточно легкого партнера топ-кварка - одно из мотивированных предсказаний

Петлевые поправки в массу бозона Хиггса



$$\delta m_H^2 = \frac{3G_F}{4\sqrt{2}\pi^2} (2m_W^2 + m_Z^2 + m_H^2 - 4m_t^2) \Lambda^2 \approx -(0.2 \Lambda)^2$$

$$\delta m_H < 125 \text{ GeV (95\% CL limit on SM Higgs)} \quad \Lambda \sim 0.6-0.7 \text{ TeV}$$

Но СМ – перенормируемая теория. Рассмотрение в размерной регуляризации

$$M_H^2(\Lambda) = M_H^2(v) - C y_f^2 M_f^2 \text{Ln}(\Lambda^2/v^2) + \dots$$

Большая поправка, если есть частица с массой $M_f^2 \sim \Lambda^2$ и взаимодействие с бозоном Хиггса СМ y_f^2 достаточно сильно

Поправка в МССМ

$$\Delta m_h^2 = \frac{3m_t^4}{4\pi^2 v^2} \left[\ln \left(\frac{M_{\text{SUSY}}^2}{m_t^2} \right) + \frac{X_t^2}{M_{\text{SUSY}}^2} \left(1 - \frac{X_t^2}{12M_{\text{SUSY}}^2} \right) \right]$$

Факты, которые не находят объяснения в Стандартной Модели

1. Механизм Хиггса наделяет бозоны и фермионы массами.

Но по какой причине массы фермионов столь различны ?

($M_{\text{top}} \approx 173 \text{ GeV}$, $M_e \approx 0.5 \text{ MeV}$, $\Delta M_\nu \approx 10^{-3} \text{ eV}$)

2. Темная материя во Вселенной

3. $(g-2)_\mu$ (about 3.5σ)

4. Осцилляции нейтрино

5. Асимметрия частицы-античастицы во Вселенной,
природа CP-нарушения

6. Гравитационные взаимодействия существенно слабее электрослабых.
В чем причина? Что представляет собой темная энергия и почему так
мала гравитационная постоянная ?

Нет ответов на многочисленные вопросы “почему?”

Остается множество вопросов

- Что такое поколение? Почему поколений только 3?
- Какова природа кварк-лептонной аналогии? Как соотносятся друг другу лептоны и кварки?
- Элементарны ли кварки и лептоны?
- Существуют ли новые кварки и лептоны?
- Что определяет калибровочные симметрии? Почему квантуются заряды частиц?
- Существуют ли новые калибровочные взаимодействия?
- Что формирует потенциал поля Хиггса?
- Почему электрослабый масштаб столь мал по сравнению с массой Планка?
- Почему гравитация столь слаба? Как ее включить в общую схему?
- Почему столь мала космологическая постоянная?
- Насколько точна CPT-симметрия?
- Существуют ли новые симметрии в природе?
- Существуют ли дополнительные измерения пространства-времени?
- Что такое темная энергия и темная материя?
-

Физика за рамками СМ должна быть, но новый масштаб неизвестен

Поиск за рамками Стандартной модели

Характерная энергия столкновений $>$ порога рождения

- Новые частицы

новые резонансы (leptoquarks, leptogluons,
возбужденные лептоны и кварки, KK states, $W', Z', \pi_T, \rho_T \dots$)
партнеры топа
(stop, sbottom, vector like T or B decaying to top...)

Характерная энергия столкновений $<$ порога рождения

- Аномальные взаимодействия

в калибровочном и хиггсовском секторах,
во взаимодействиях кварков 3-его поколения
(W_{tb}, Z_{tt}, Z_{bb} anomalous couplings,
FCNC ...)



Изменения сечений рождения, форм распределений,
вероятностей и ширин распадов; усиление редких распадов

Вычисление полного набора диаграмм

CompHEP

Одновременный учет сигнальных диаграмм и диаграмм неприводимого фона в различных кинематических областях

Калибровочная инвариантность

Учет интерференций и ширин нестабильных частиц

Учет спиновых корреляций

Оптимизация стратегии выделения вклада сигнала

E. Boos and M. Dubinin, Physics Letters B 308 (1993) 147-152

**Complete tree level calculation of the $e+e$ - Zbb process at LEP200.
Higgs signal and background**

Giampiero PASSARINO

«...we point out the relevance of the
pioneering work of E. Boos and M. Dubinin...»

``Standard Higgs boson searches at LEP-2,`` Nucl. Phys. B488, 3 (1997)

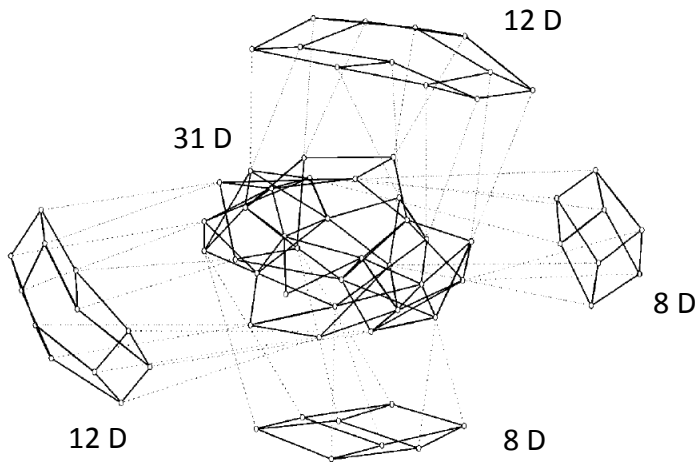
Калибровочно-инвариантные поднаборы диаграмм

E.Boos, T.Ohl Phys.Rev.Lett. 83 (1999) p.3

Minimal Gauge Invariant Classes of Tree Diagrams in Gauge Theories

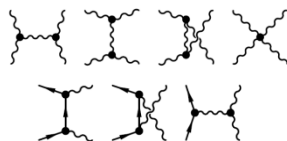
Точка на графе соответствует диаграмме Феймана. Линия соответствует возможному переходу от одной диаграммы к другой путем бозонной или фермионной перестановки

$$\gamma\gamma \rightarrow u\bar{d}d\bar{u}$$



External fields (E)	Diagrams	Classes
$u\bar{u}u\bar{u}u\bar{u}$	144	18×8
$u\bar{u}u\bar{u}u\bar{u}\gamma$	1008	$18 \times 24 + 36 \times 16$
$u\bar{u}u\bar{u}d\bar{d}$	92	$4 \times 11 + 6 \times 8$
$u\bar{u}u\bar{u}d\bar{d}\gamma$	716	$4 \times 95 + 6 \times 24 + 12 \times 16$
$\ell^+\ell^-u\bar{u}d\bar{d}$	35	$1 \times 11 + 3 \times 8$
$\ell^+\ell^-u\bar{u}d\bar{d}\gamma$	262	$1 \times 94 + 3 \times 24 + 6 \times 16$
$\ell^+\nu\bar{d}u\bar{d}$	20	2×10
$\ell^+\nu\bar{d}u\bar{d}\gamma$	152	2×76
$\ell^+\ell^-\ell^+\nu\bar{d}u$	20	2×10
$\ell^+\ell^-\ell^+\nu\bar{d}u\gamma$	150	2×75
$\ell^+\nu\ell^-\bar{v}d\bar{d}$	19	$1 \times 9 + 2 \times 4 + 1 \times 2$
$\ell^+\nu\ell^-\bar{v}d\bar{d}\gamma$	107	$1 \times 59 + 2 \times 12 + 2 \times 8 + 2 \times 4$
$\ell^+\nu\ell^-\bar{v}\ell^+\ell^-$	56	$4 \times 9 + 4 \times 4 + 2 \times 2$
$\ell^+\nu\ell^-\bar{v}\ell^+\ell^-\gamma$	328	$4 \times 58 + 4 \times 12 + 4 \times 8 + 4 \times 4$
$\ell^+\nu\ell^-\bar{v}\nu\bar{\nu}$	36	$4 \times 6 + 6 \times 2$
$\ell^+\nu\ell^-\bar{v}\nu\bar{\nu}\gamma$	132	$4 \times 26 + 2 \times 6 + 4 \times 4$
$\nu\bar{\nu}\nu\bar{\nu}\nu\bar{\nu}$	36	18×2

Диаграммы, связанные бозонными перестановками находятся в одном калибровочно-инвариантном поднаборе



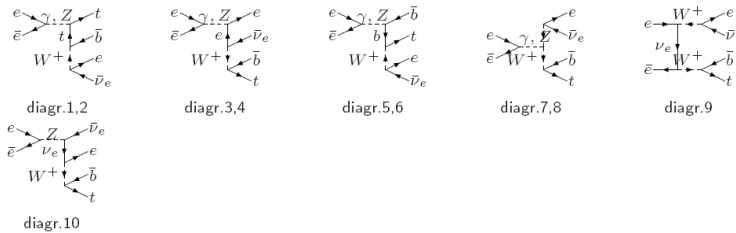
Фермионная перестановка переводит из одного поднабора в другой



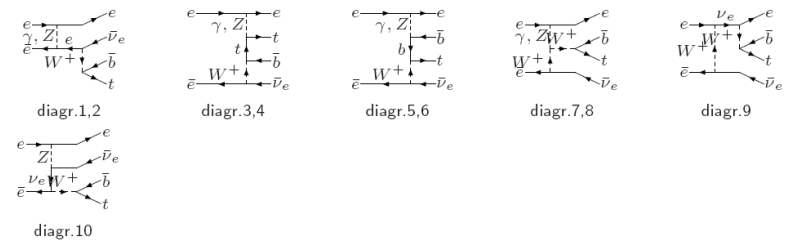
Одиночное рождение топ-кварка в e^+e^- , $\gamma\gamma$, γe - соударениях

$$e^+e^- \rightarrow t \bar{b} e^- \bar{\nu}_e$$

Gauge invariant s-channel subset of 10 diagrams



Gauge invariant t-channel subset of 10 diagrams

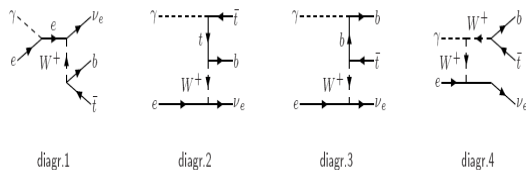


E.B., M. Sachwitz, H.J. Schreiber, S. Shichanin, A. Pukhov, V. Ilyin,
T. Ishikawa, T. Kaneko, S. Kawabata, Y. Kurihara, Y. Shimizu, H. Tanaka,
“Single top quark production at LEP-200?,” Phys. Lett. B 326, 190 (1994);

E.B, Y. Kurihara, Y. Shimizu, M. Sachwitz, H. J. Schreiber and S. Shichanin.,
“Top quark production in the reaction $e^+e^- \rightarrow \nu_e e t \bar{b}$ at linear collider energies,”
Z. Phys. C 70, 255 (1996);

$$\gamma e \rightarrow t \bar{b} \nu_e$$

Single Top Diagrams in γe Collisions

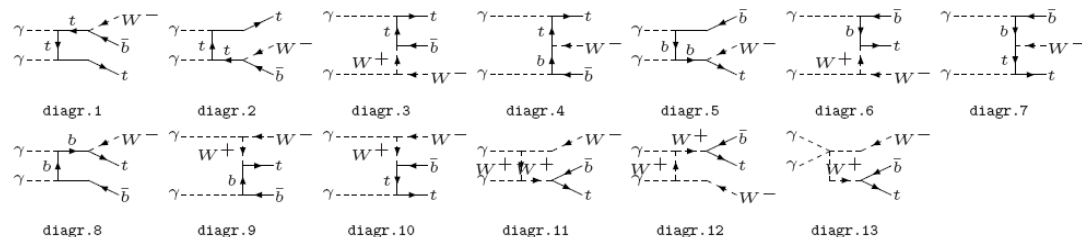


E.B., Pukhov, Sachwitz, Schreiber,
“Probing anomalous $W t b$ coupling via single top production at TeV energy gamma e colliders,”
Phys. Lett. B 404, 119 (1997);

E.B., Dubinin, Pukhov, Sachwitz, Schreiber,
“Single top production in e^+e^- , e^-e^- , gamma e and gamma gamma collisions,” Eur. Phys. J. C 21, 81 (2001)

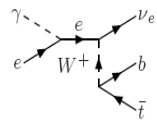
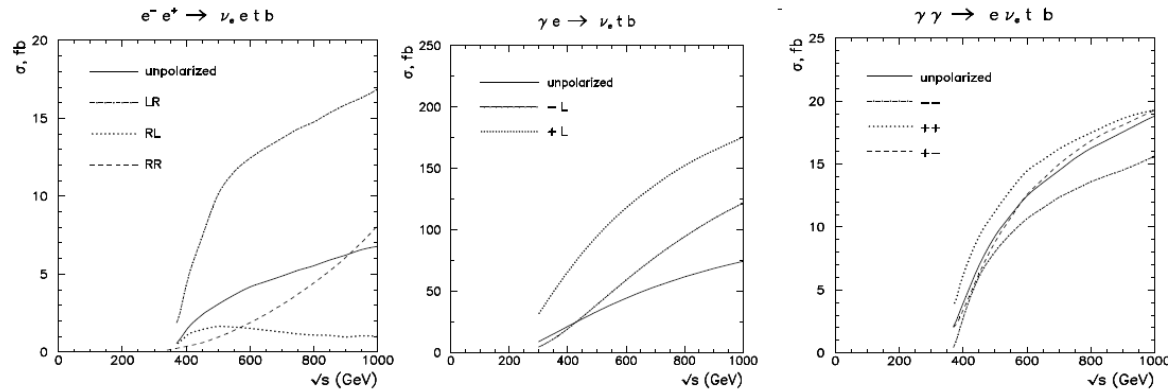
$$\gamma\gamma \rightarrow t \bar{b} W^-$$

There are no invariant subsets of diagram in $\gamma\gamma$

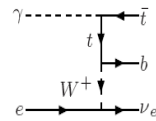


Cross sections of single top in e^+e^- , $\gamma\gamma$, γe - collisions

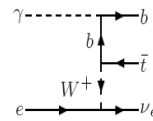
CompHEP



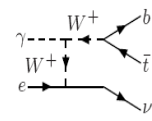
diagr.1



diagr.2

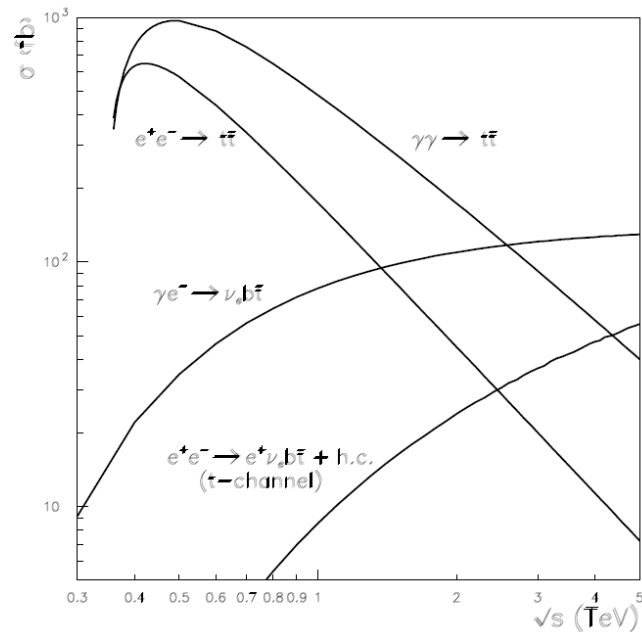


diagr.3

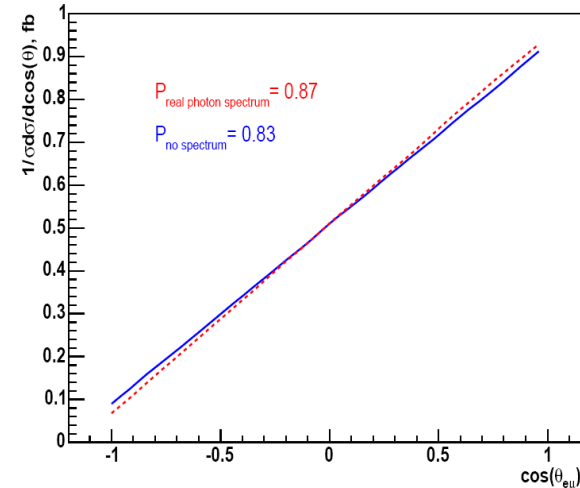


diagr.4

“gold plated” mode



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



E.Boos, “Top quarks at photon colliders,”
Nucl. Instrum. Meth.A 472, 22 (2001)

Поиски подпороговых эффектов

- Effective field theory approach (EFT)

W. Buchmuller, D. Wyler, Effective Lagrangian analysis of new interactions and flavour conservation, Nucl.Phys. B268, 621 (1986)

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \sum \frac{c_i}{\Lambda^2} \mathcal{O}_i + \dots$$

c_i - dimensionless coefficients

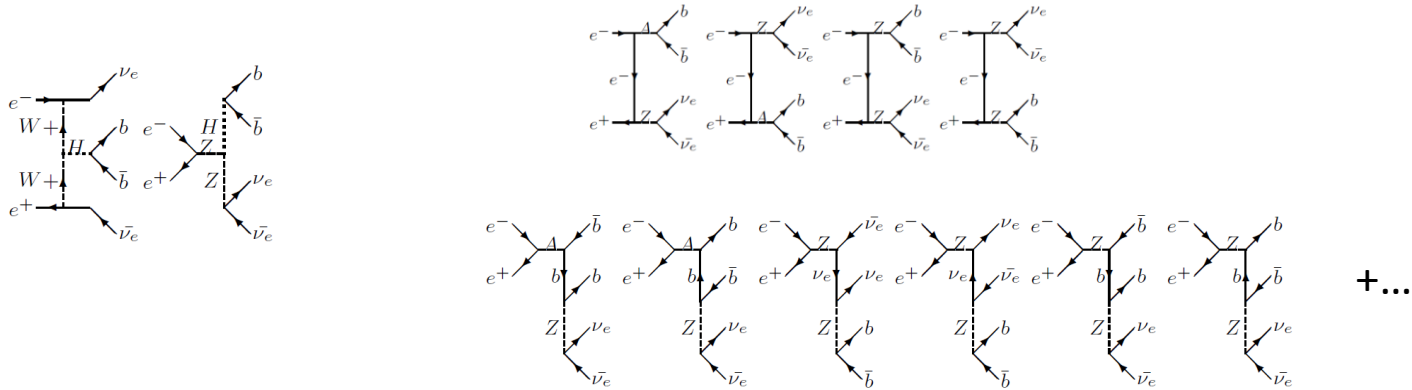
$\mathcal{O}_i$ – operators constructed from SM fields preserving
SM gauge invariance

- Searches below particle thresholds predicted in models

Бозон Хиггса под порогом на LEP2

E.Boos, M.Dubinin and L.Dudko,

"Higgs boson production under the resonance threshold at LEP-2,"
Int. J.Mod.Phys. A11, 5015 (1996)



$\sqrt{s} = 205 \text{ GeV}$									
m_H, GeV	115			120			125		
$\sigma_{tot} \text{ [fb]}$ fixed Γ	98.6			92.0			89.9		
$\sigma_{tot} \text{ [fb]}$ overall Γ	98.2			91.6			89.6		
channel	ν_e	ν_μ	ν_τ	ν_e	ν_μ	ν_τ	ν_e	ν_μ	ν_τ
$\sigma_{tot} \text{ [fb]}$ fixed Γ	39.1	29.8	29.8	35.7	28.2	28.2	34.2	27.9	27.9
$\sigma_{tot} \text{ [fb]}$ overall Γ	38.8	29.7	29.7	35.4	28.1	28.1	33.9	27.8	27.8

CompHEP

Вычисление характеристик и исследование многих процессов с числом фермионов в конечном состоянии ≥ 4 для LEP2, Tevatron, ILC, LHC

Идентификация бозона Хиггса

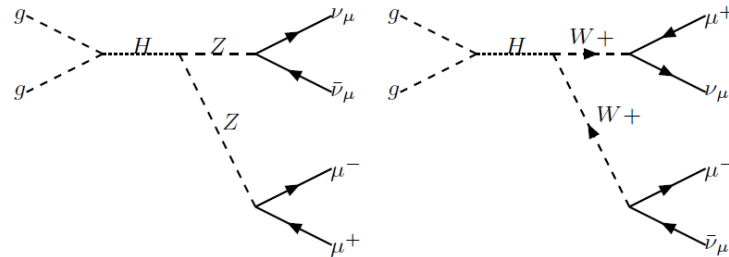
E.Boos, V.Bunichev, M.Dubinin and Y.Kurihara,
 "Higgs boson signal at complete tree level in
 the SM extension by dimension-six operators,"
 Phys. Rev. D 89, 035001 (2014)

- scalar-gauge boson sector*

$$\begin{aligned} O_{\Phi G} &= \frac{1}{2}(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} & O_{\Phi \tilde{G}} &= \frac{1}{2}(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a\mu\nu} \\ O_{\Phi B} &= \frac{1}{2}(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} & O_{\Phi \tilde{B}} &= \frac{1}{2}(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})B_{\mu\nu} \tilde{B}^{\mu\nu} \\ O_{\Phi W} &= \frac{1}{2}(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})W_{\mu\nu}^i W^{i\mu\nu} & O_{\Phi \tilde{W}} &= \frac{1}{2}(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})W_{\mu\nu}^i \tilde{W}^{i\mu\nu} \\ O_{\Phi}^{(1)} &= (\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})D_\mu \Phi^\dagger D^\mu \Phi \end{aligned}$$

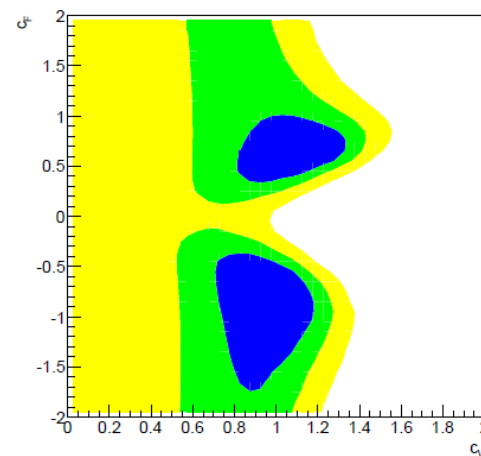
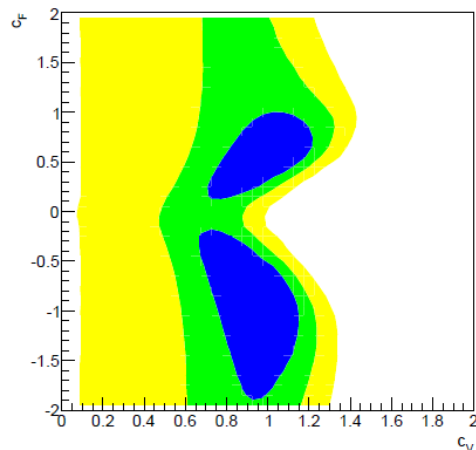
- scalar-fermion sector*

$$\begin{aligned} O_{t\Phi} &= (\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})(\bar{Q}_L \Phi^c t_R) \\ O_{b\Phi} &= (\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})(\bar{Q}_L \Phi b_R) \\ O_{\tau\Phi} &= (\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})(\bar{L}_L \Phi \tau_R) \end{aligned}$$



**Небольшая отрицательная интерференция
увеличивает допустимые области**

Приближение узкой ширины



Аномальные взаимодействия Wtb

Operators contributing to tWb interactions

$$O_{\phi q}^{(3,3+3)} = \frac{i}{2} \left[\phi^\dagger (\tau^I D_\mu - \overleftarrow{D}_\mu \tau^I) \phi \right] (\bar{q}_{L3} \gamma^\mu \tau^I q_{L3}), \quad O_{\phi\phi}^{33} = i(\tilde{\phi}^\dagger D_\mu \phi)(\bar{t}_R \gamma^\mu b_R),$$

$$O_{dW}^{33} = (\bar{q}_{L3} \sigma^{\mu\nu} \tau^I b_R) \phi W_{\mu\nu}^I, \quad O_{uW}^{33} = (\bar{q}_{L3} \sigma^{\mu\nu} \tau^I t_R) \tilde{\phi} W_{\mu\nu}^I,$$

Kane, Ladinski, Yaun

$$\mathcal{L} = \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{b} \gamma^\mu \left(f_V^L P_L + f_V^R P_R \right) t W_\mu^- - \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{b} \frac{\sigma^{\mu\nu} \partial_\nu W_\mu^-}{M_W} \left(f_T^L P_L + f_T^R P_R \right) t + \text{h.c.}$$

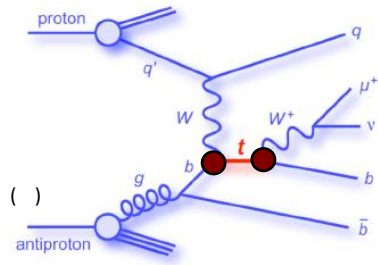
where $f_{LV} = V_{tb} + C_{\phi q}^{(3,3+3)*} \frac{v^2}{\Lambda^2}$, $f_{RV} = \frac{1}{2} C_{\phi\phi}^{33*} \frac{v^2}{\Lambda^2}$, $f_{LT} = \sqrt{2} C_{dW}^{33*} \frac{v^2}{\Lambda^2}$, $f_{RT} = \sqrt{2} C_{uW}^{33} \frac{v^2}{\Lambda^2}$.

CM: $\mathbf{f}_1^L = \mathbf{V}t\mathbf{b}$, $\mathbf{f}_1^R = \mathbf{0}$, $\mathbf{f}_2^{L,R} = \mathbf{0}$

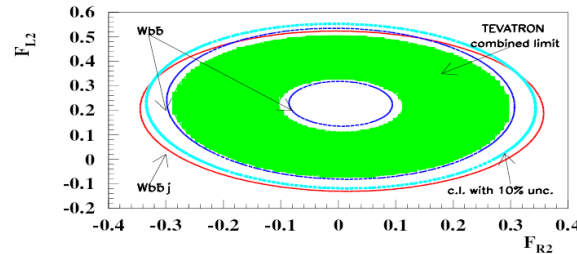
Natural size $|1 - \mathbf{f}_L^V|, \mathbf{f}_R^V \sim v^2/\Lambda^2$

Natural size $\mathbf{f}_L^T, \mathbf{f}_R^T \sim v^2/\Lambda^2$

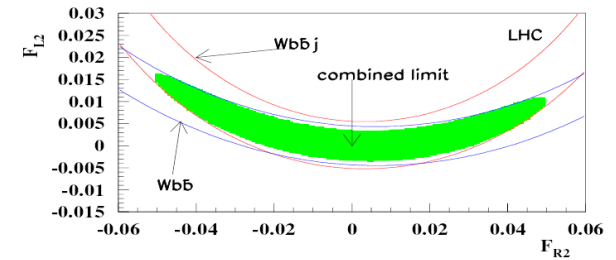
Аномальные взаимодействия Wtb



Theory predictions



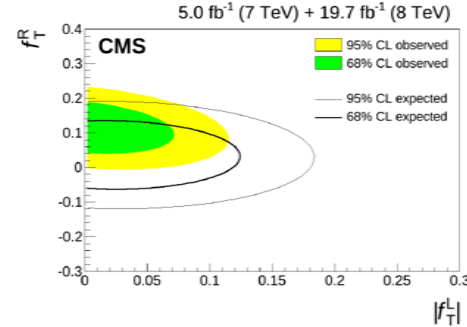
E. Boos, L. Dudko, T. Ohl
Complete calculations of Wbb and
 $Wbb + jet$ production at Tevatron and LHC:
Probing anomalous Wtb couplings
in single-top production
Eur. Phys. J. C 11, 473 (1999)



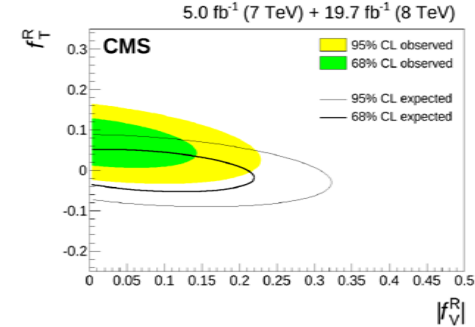
D0 limits (5.4 fb^{-1})

Scenario	Cross section	Coupling
(L_V, L_T)	$< 0.60 \text{ pb}$	$ V_{tb} \cdot f_{L_T} ^2 < 0.06$
(L_V, R_V)	$< 2.81 \text{ pb}$	$ V_{tb} \cdot f_{R_V} ^2 < 0.93$
(L_V, R_T)	$< 1.21 \text{ pb}$	$ V_{tb} \cdot f_{R_T} ^2 < 0.13$

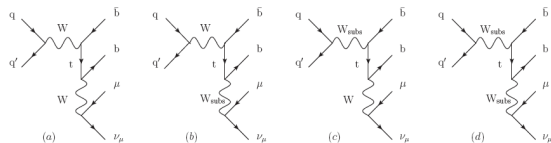
Generator SingleTop (CompHEP)



New CMS limits



New method of modeling with subsidiary gauge fields corresponding to each anomalous coupling



E.B. Bunichev, Dudko, Perfilov
‘Modeling of anomalous Wtb interactions
in single top quark events using subsidiary fields’
Int. J. Mod. Phys. A 32, 1750008 (2016)

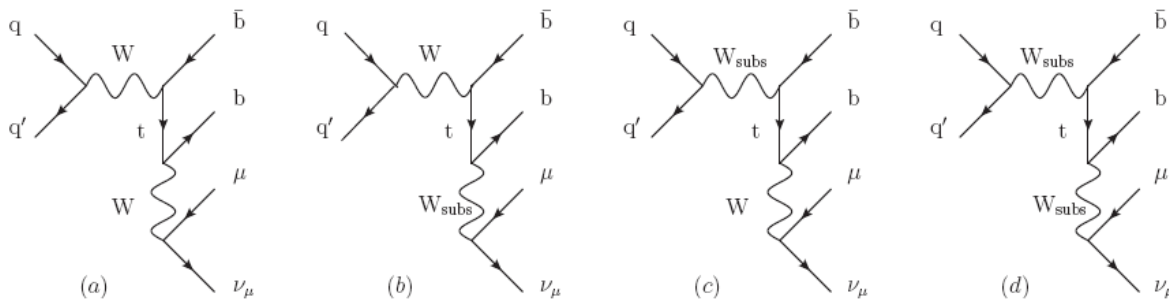
Метод моделирования событий с помощью введения вспомогательных векторных полей

Вершина взаимодействия фермиона с калибровочным полем

$$\Gamma_{\mu} = \Gamma_{\mu}^{SM} + \Gamma_{\mu}^{NP1} + \Gamma_{\mu}^{NP2} + \dots,$$

Если просто подставлять новую вершину в матричный элемент, то очень сложно выделить линейные по отклонению от СМ вклады

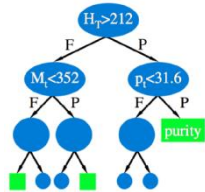
Для каждой новой аномальной вершины вводится новое поле с такими же параметрами как и калибровочное поле и только с одной, отличной от СМ вершиной Γ_{μ}^{NP1} , Γ_{μ}^{NP2} ...



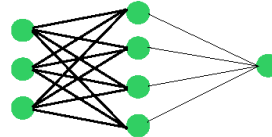
Позволяет учитывать линейные и/или квадратичные вклады по аномальному взаимодействию
 Получать минимальный набор независимых образцов событий с единичными аномальными параметрами
 Кинематические распределения в общем случае получаются путем сложения распределений
 минимального набора с определенными коэффициентами

Многомерные методы анализа

Boosted Decision Trees



Neural Network



single discriminant



Выбор переменных для разделения сигнала и фона («тренировка» сети)

Метод оптимальных переменных

- Основан на анализе диаграмм Феймана, дающих вклад в сигнал фон

Три класса переменных

- “Singular” Variables (знаменатели диаграмм Феймана)
- “Angular” Variables (числители диаграмм Феймана)
- “Threshold” Variables (кинематические пороги)

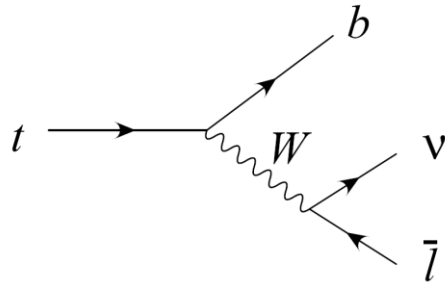
$\hat{s}$ и H_t – примеры таких переменных

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\cos\theta_{qt}^*} = \frac{1 + P \cos\theta_{qt}^*}{2}$$

Boos, Dudko, “Optimized neural networks to search for Higgs boson production at the Tevatron,” Nucl. Instrum. Meth. A 502, 486 (2003)
Boos, Bunichev, Dudko, Markina, Perfilov,
“Optimization of the analysis of single top-quark production at the Large Hadron Collider (LHC),”
Phys. Atom. Nucl. 73, 971 (2010) [Yad. Fiz. 73, 1007 (2010)]

Спиновые корреляции в одиночном рождении топ-кварка

V-A структура взаимодействия

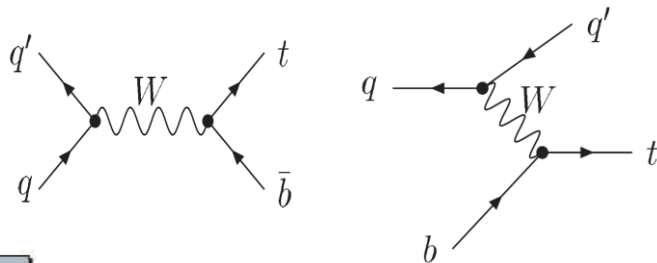


в системе покоя топ-кварка:

$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{d \cos \theta_\ell} = \frac{1}{2} (1 + \cos \theta_\ell)$$

где, угол – это угол между трех-вектором спина $s = (0, \hat{s})$ и импульсом заряженного лептона

Одиночное рождение как распад назад во времени



Boos, Sherstnev,

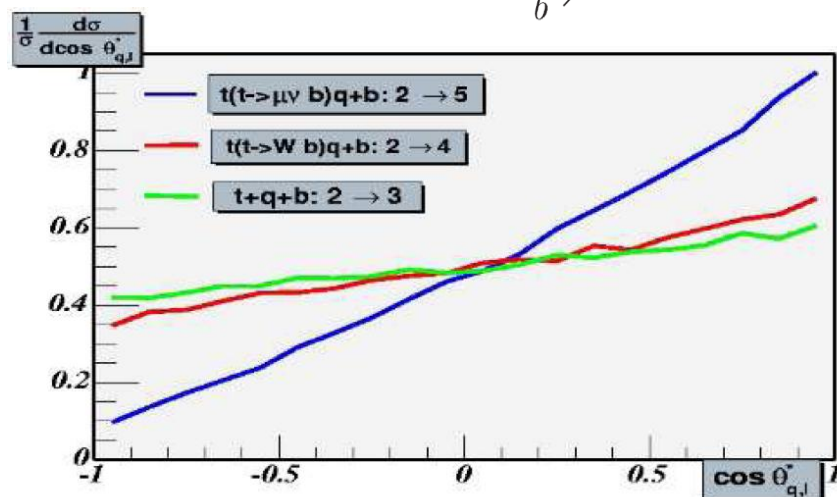
“Spin effects in processes of single top quark production at hadron colliders,”
Phys. Lett. B 534, 97 (2002)

Нижняя компонента слабого изодублета – d-кварк в рождении играет роль лептона в распаде

t-channel production

Наилучшая спиновая корреляционная переменная – угол между лептоном в распаде и импульсом рожденной легкой струи в системе покоя топ-кварка

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d \cos \theta_{ql}^*} = \frac{1 + P \cos \theta_{ql}^*}{2} \quad P_{top} \approx 90 \%$$

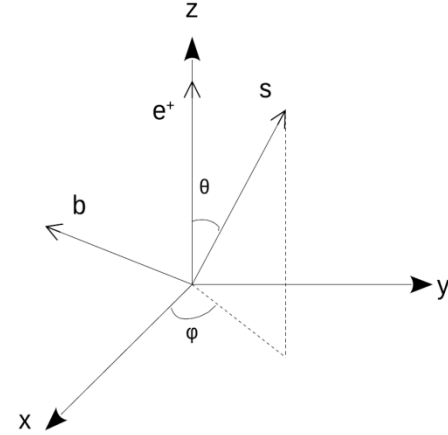


Распад поляризованного топ кварка в его системе отсчета. Most general case with complex anomalous parameters.

Boos, Bunichev 2018

Integrating over **b** and **v** 4-momenta we have:

$$\begin{aligned} \frac{d\Gamma_{t \rightarrow b \nu e^+}}{dE_{e^+} \cdot d \cos \theta \cdot d\phi} &= \frac{g^4}{256 \cdot \pi^3 \cdot \Gamma_W \cdot m_W} \cdot [\\ &+ |f_{LV}|^2 \cdot (E_{max} - E_{e^+}) \cdot E_{e^+} \cdot (1 + \cos \theta) \\ &+ |f_{LT}|^2 \cdot (E_{e^+} - E_{min}) \cdot E_{e^+} \cdot (1 + \cos \theta) \\ &+ |f_{RT}|^2 \cdot (E_{max} - E_{e^+}) \cdot \left(E_{min} + E_{max} - E_{e^+} + \frac{m_W}{E_{e^+}} \cdot c_{e^+} \cdot \sin \theta \cos \phi + \left(\frac{m_W^2}{2E_{e^+}} + E_{e^+} - E_{min} - E_{max} \right) \cdot \cos \theta \right) \\ &+ |f_{RV}|^2 \cdot (E_{e^+} - E_{min}) \cdot \left(E_{min} + E_{max} - E_{e^+} + \frac{m_W}{E_{e^+}} \cdot c_{e^+} \cdot \sin \theta \cos \phi + \left(\frac{m_W^2}{2E_{e^+}} + E_{e^+} - E_{min} - E_{max} \right) \cdot \cos \theta \right) \\ &+ (Re f_{LV} \cdot Re f_{RT} + Im f_{LV} \cdot Im f_{RT}) \cdot (E_{max} - E_{e^+}) \cdot (-2c_{e^+} \cdot \sin \theta \cos \phi - m_W \cdot (1 + \cos \theta)) \\ &+ (Re f_{LT} \cdot Re f_{RV} + Im f_{LT} \cdot Im f_{RV}) \cdot (E_{e^+} - E_{min}) \cdot (-2c_{e^+} \cdot \sin \theta \cos \phi - m_W \cdot (1 + \cos \theta)) \\ &+ (Re f_{LV} \cdot Im f_{RT} - Im f_{LV} \cdot Re f_{RT}) \cdot (E_{max} - E_{e^+}) \cdot (-2c_{e^+} \cdot \sin \theta \sin \phi) \\ &+ (Re f_{LT} \cdot Im f_{RV} - Im f_{LT} \cdot Re f_{RV}) \cdot (E_{e^+} - E_{min}) \cdot (-2c_{e^+} \cdot \sin \theta \sin \phi)] \end{aligned}$$



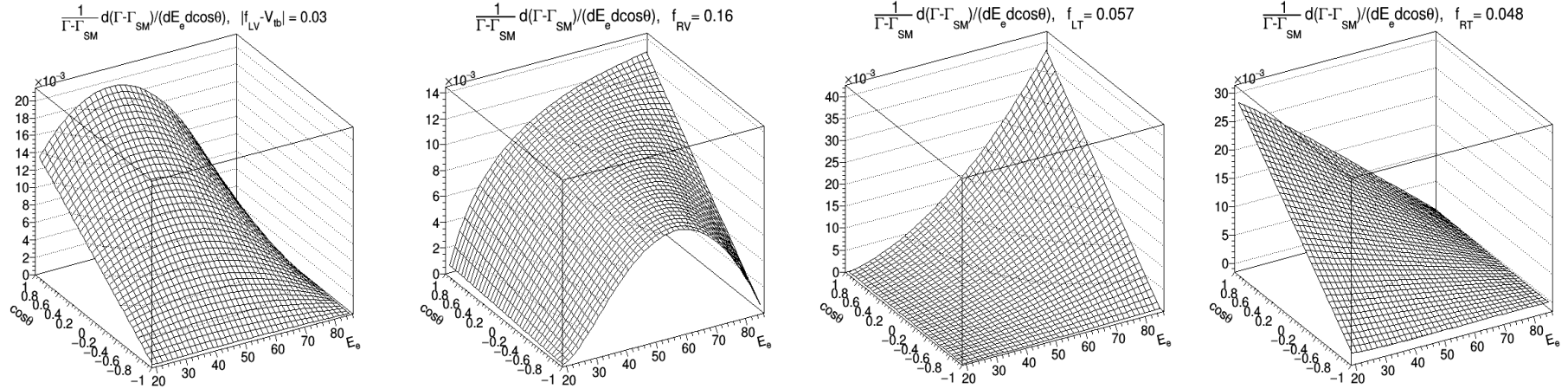
where:

$$c_{e^+} = \sqrt{(E_{max} - E_{e^+}) \cdot (E_{e^+} - E_{min})}, \quad E_{max} = m_t/2, \quad E_{min} = m_W^2/(2m_t)$$

8 different kinematical expressions as functions of E_e , θ , ϕ

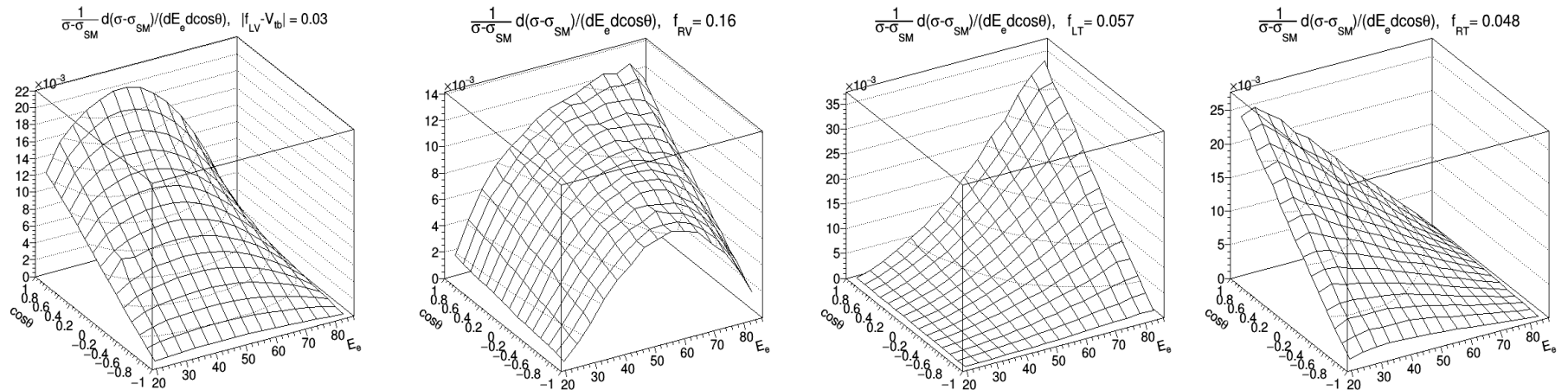
Comparison of distributions for different sets of anomalous couplings, predicted by the derived analytic formula with distributions performed by Monte-Carlo simulation of the complete process involving the t-channel top quark production and its decay .

Distributions predicted by the **analytic formula**



Monte-Carlo simulation of the **complete t-quark production and decay** process

(it contains all t-channel subprocesses and also contains anomalous couplings both in production and in decay)



Форма двумерных распределений существенно различна для различных констант

Fitting in the 2D coordinate space (E_e , $\cos\theta$)

The accuracy of measuring the two anomalous parameters by fitting in the 2D coordinate space (E_e , $\cos\theta$), $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$:

L, fb^{-1}	$\Delta Re f_{LV},$ $\Delta Re f_{RV}$	$\Delta Re f_{LV},$ $\Delta Re f_{LT}$	$\Delta Re f_{LV},$ $\Delta Re f_{RT}$
10	0.0025 0.02	0.002 0.01	0.003 0.003
300	0.0005 0.003	0.0004 0.0015	0.001 0.001
3000	0.0001 0.0005	0.0001 0.0004	0.0003 0.0003

The accuracy of measuring the three anomalous parameters by fitting in the 2D coordinate space (E_e , $\cos\theta$), $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$:

L, fb^{-1}	$\Delta Re f_{LV}$ $\Delta Im f_{LV},$ $\Delta Im f_{RT}$	$\Delta Re f_{LV}$ $\Delta Im f_{RV},$ $\Delta Im f_{LT}$
10	0.002 0.025 0.025	0.002 0.04 0.05
300	0.0004 0.005 0.005	0.0004 0.01 0.01
3000	0.0002 0.001 0.001	0.0002 0.002 0.002

Поиск проявлений моделей с дополнительными измерениями ниже порога 1-ой или 2-ой КК-моды

$$L_{eff} = \lambda J_{SM} * \Delta * J_{SM}, \quad \lambda = \frac{1}{2} g^2 M^{-d} \left(\sum_{n \neq 0} \frac{(\psi^{(n)}(y_B))^2}{M_n^2} \right)$$

Models with gravity in the bulk

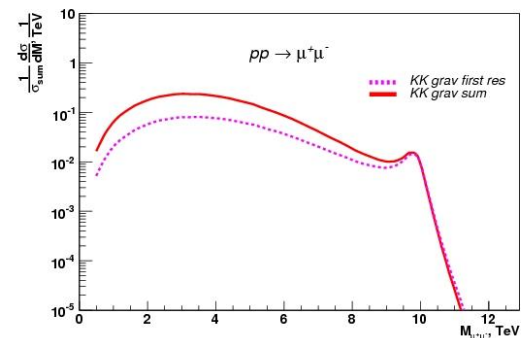
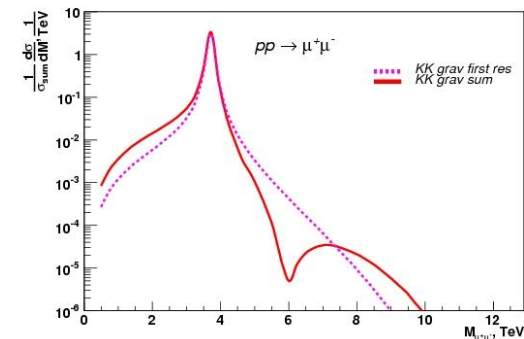
$$J_{SM} \rightarrow T_{\mu\nu} = 2 \frac{\delta L_{SM}}{\delta \gamma^{\mu\nu}} - \gamma_{\mu\nu} L_{SM}$$

$$L_{eff} = \frac{C}{M^4} T^{\mu\nu} \tilde{\Delta}_{\mu\nu, \rho\sigma} T^{\rho\sigma}$$

$$\tilde{\Delta}_{\mu\nu, \rho\sigma} = \eta_{\mu\rho} \eta_{\nu\sigma} + \eta_{\mu\sigma} \eta_{\nu\rho} - \left(\frac{2}{3} - \delta \right) \eta_{\mu\nu} \eta_{\rho\sigma}$$

New contact 4 SM particle interactions,
4 fermions, 4 bosons, 2 fermions 2 bosons

E.Boos, V.Bunichev, I.Volobuev, M.Smolaykov
``Testing extra dimensions below the production
threshold of Kaluza-Klein excitations,"
Phys. Rev. D79, 104013 (2009)

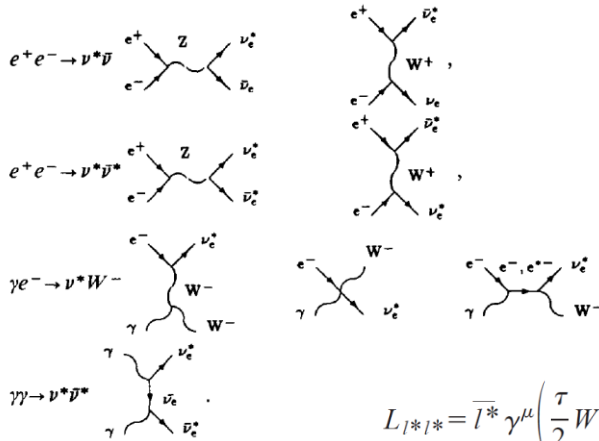


Dilepton invariant mass at LHC for RS1 model
 $M_{res} = 3.8$ and 10 TeV

Поиски гипотетических частиц

Simplified models

Возбужденные лептоны



A.Beliaev, E. Boos, A. Pukhov

Physics Letters B 296 (1992) 452

“Study of excited neutrino production in e^+e^- , γe and $\gamma\gamma$ collisions at TeV energies”

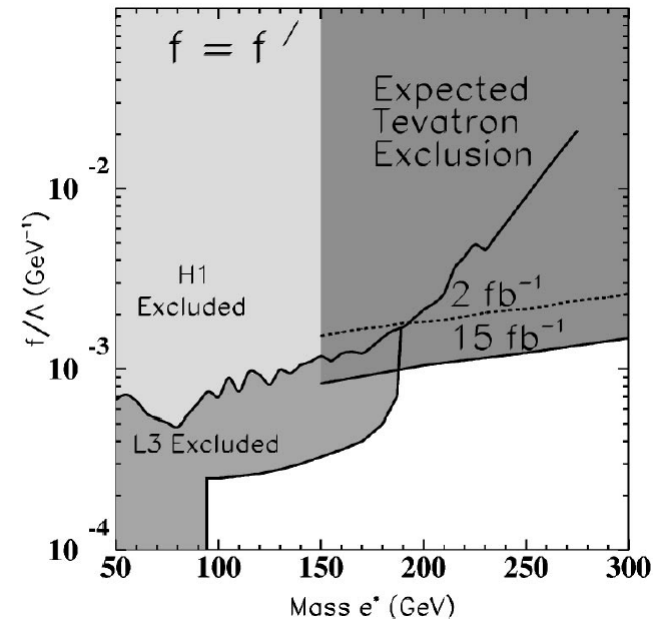
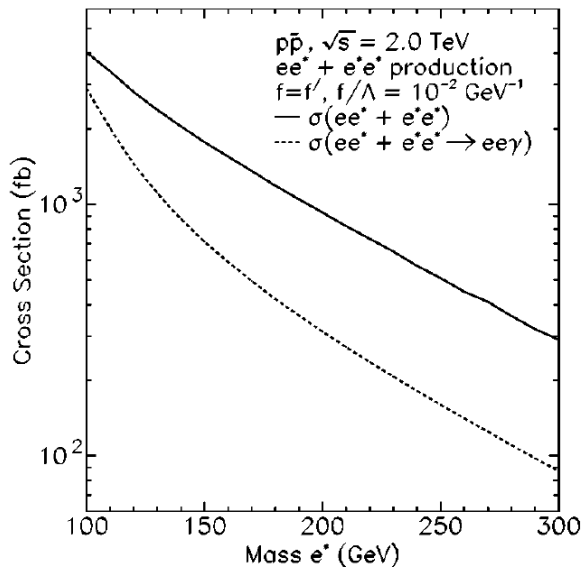
E. Boos, A. Vologdin, D. Toback, and J.Gaspard

PHYSICAL REVIEW D 66, 013011 (2002)

“Prospects of searching for excited leptons during run II of the Fermilab Tevatron”

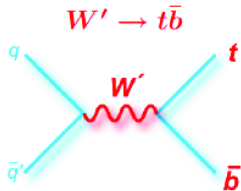
$$L_{l^*l} = \bar{l}^* \gamma^\mu \left(\frac{\tau}{2} W_\mu + g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) l^*$$

$$L_{l^*l} = \frac{1}{2\Lambda} \bar{l}^* \sigma^{\mu\nu} \left(f g \frac{\tau}{2} W_{\mu\nu} + f' g' \frac{Y}{2} B_{\mu\nu} \right) l_L$$



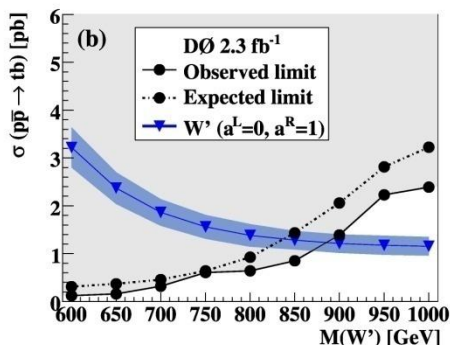
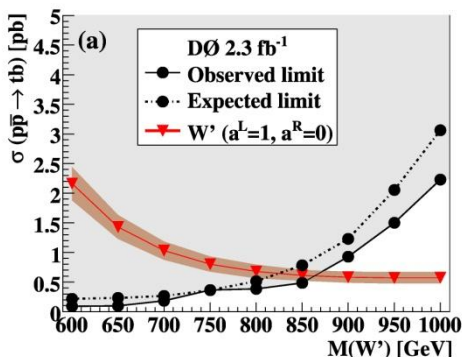
Современные ограничения ЛНС на массы $e^* \sim 3 \text{ TeV}$ и $\nu^* \sim 1.6 \text{ TeV}$

Поиски нового резонанса W' в моде $top + b$



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

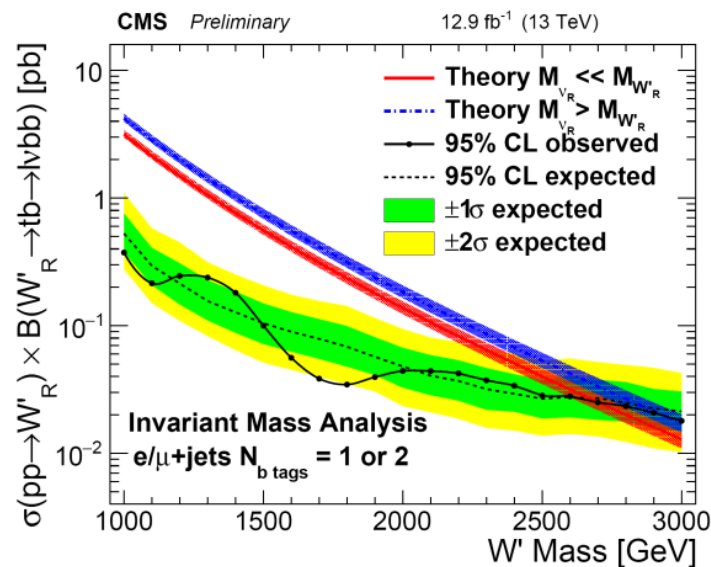
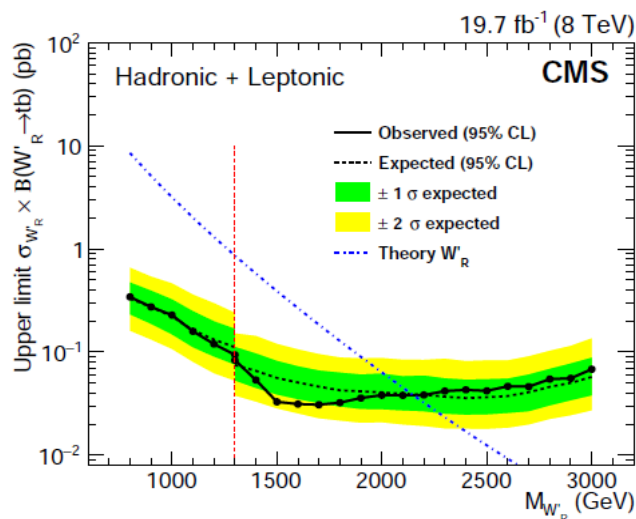
Пределы на массу W' -бозона (D0, 2.3 fb⁻¹): $M_{W'} > 830$ (860) GeV L(R)



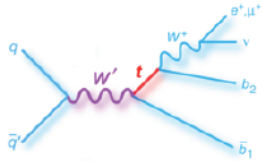
V. M. Abazov et al. [D0 Collaboration],
Phys. Rev. Lett. 100, 211803 (2008)

Пределы на массу W' -бозона (R) в эксперименте CMS

S. Chatrchyan et al. [CMS Collaboration],
Phys. Lett. B 718, 1229 (2013);
JHEP 1602, 122 (2016)

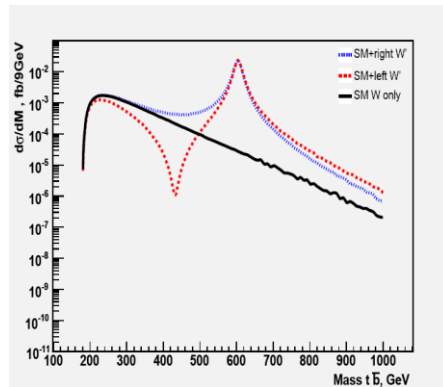


Поиски нового резонанса W' в моде $top + b$



Отрицательная интерференция для W' (L)

Boos, Bunichev, Dudko, Perfilov
 “Interference between W' and W
 in single-top quark production processes,”
 Phys. Lett. B 655, 245 (2007)

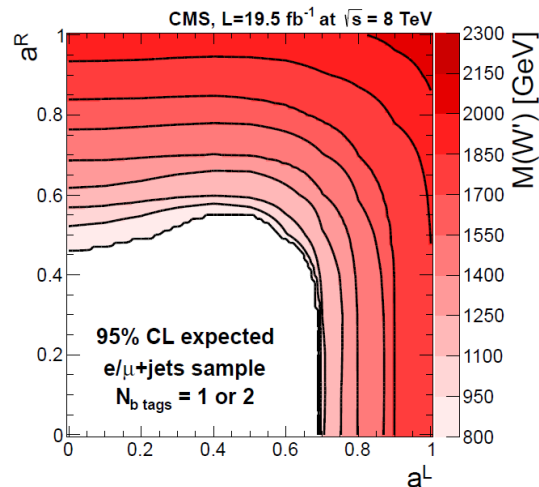
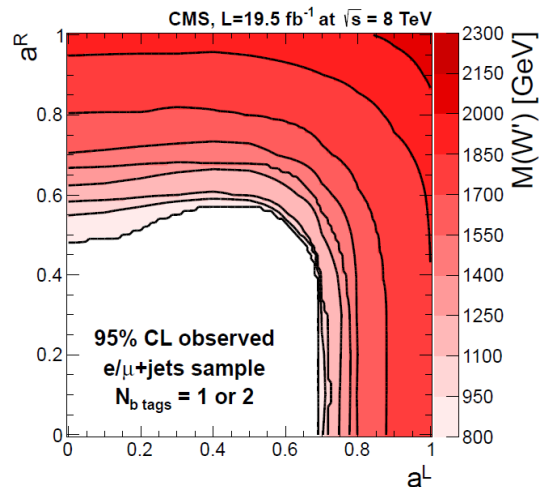
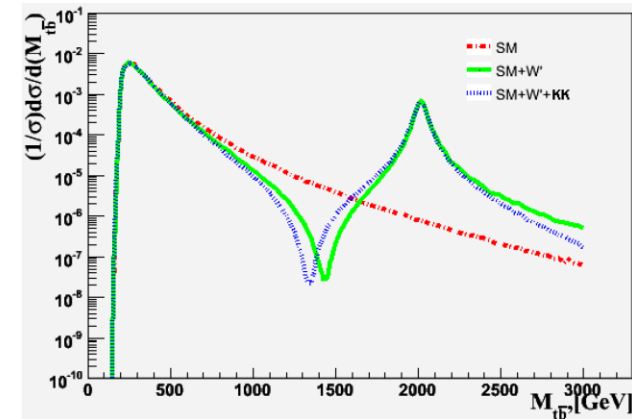


1-ое КК возбуждение W'
 на LHC

Дополнительная
 интерференция с башней
 КК возбуждений

Интересно посмотреть
 величину эффекта для FCC

Boos, Bunichev, Perfilov, Smolyakov, Volobuev
 “The specificity of searches for W' , Z' and γ'
 coming from extra dimensions,”
 JHEP 1406, 160 (2014)

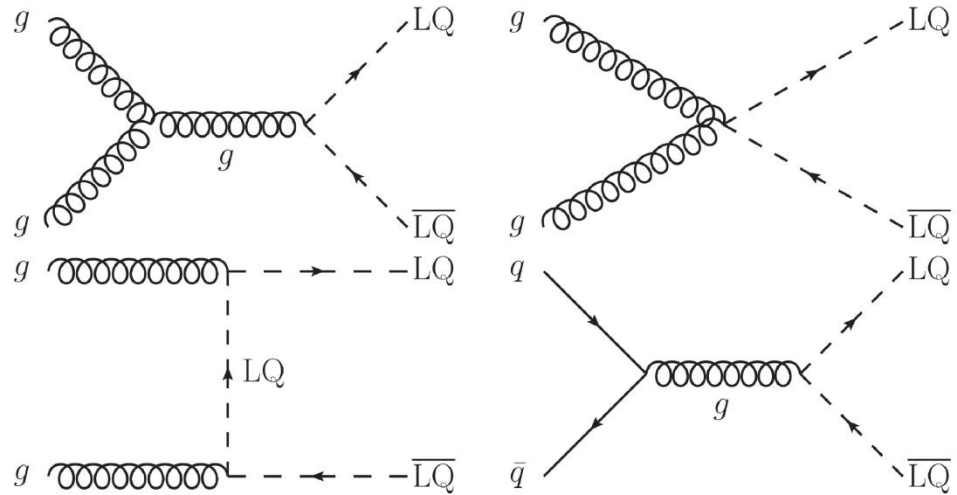


В силу отрицательной
 интерференции пределы
 на a^L несколько хуже,
 чем на a^R

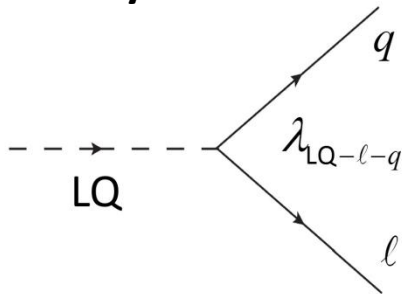
Поиски лептокварков

LQs are predicted by composite models, GUT ...

Production channels



Decays



Final states for leptoquarks of three generations

LQ1 $\rightarrow eu, ed, \nu_e u, \nu_e d$

LQ2 $\rightarrow \mu c, \mu s, \nu_\mu c, \nu_\mu s$

LQ3 $\rightarrow \tau t, \tau b, \nu_\tau t, \nu_\tau b$

where

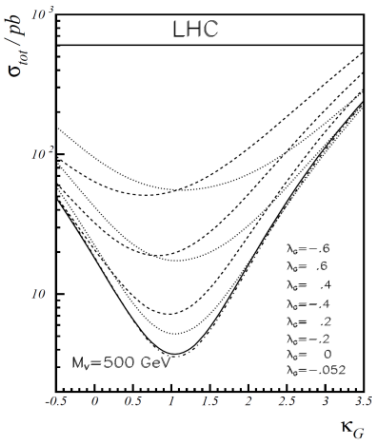
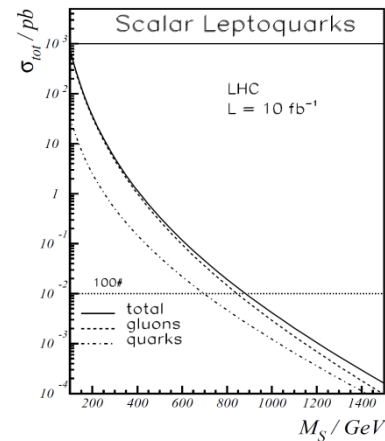
$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_S^g + \mathcal{L}_V^g,$$

$$\mathcal{L}_S^g = \sum_{\text{scalars}} \left[\left(D_{ij}^\mu \Phi^j \right)^\dagger \left(D_\mu^{ik} \Phi_k \right) - M_S^2 \Phi^{i\dagger} \Phi_i \right],$$

$$\mathcal{L}_V^g = \sum_{\text{vectors}} \left\{ -\frac{1}{2} G_{\mu\nu}^{i\dagger} G_i^{\mu\nu} + M_V^2 \Phi_\mu^{i\dagger} \Phi_i^\mu - i g_s \left[(1 - \kappa_G) \Phi_\mu^{i\dagger} t_{ij}^a \Phi_\nu^j \mathcal{G}_a^{\mu\nu} + \frac{\lambda_G}{M_V^2} G_{\sigma\mu}^{i\dagger} t_{ij}^a G_\nu^{j\mu} \mathcal{G}_a^{\nu\sigma} \right] \right\}$$

$\kappa_G = \lambda_G = 0$ Yang-Mills type of couplings

$\kappa_G = 1, \lambda_G = 0$ minimal vector of couplings



Collider	Mode	$\sqrt{S}$	Luminosity	Q	Scalar Leptoquarks		Vector Leptoquarks	
					100#	10#	100#	10#
TEVATRON	$p\bar{p}$	1.8 TeV	$100pb^{-1}$		140	200	170	225
TEV33	$p\bar{p}$	2.0 TeV	$1fb^{-1}$		210	290	290	370
LHC	pp	14 TeV	$10fb^{-1}$		900	1200	1200	1500
HERA	ep	314 GeV	$100pb^{-1}$	1/3	-	50	50	60
				5/3	45	60	60	75
			$500pb^{-1}$	1/3	45	60	60	75
				5/3	55	75	70	85
LEP $\otimes$ LHC	ep	1.26 TeV	$1fb^{-1}$	1/3	125	180	180	240
				5/3	165	225	210	270
LINAC e^+e^-	$\gamma^*\gamma^*$ WWA	500 GeV	$10fb^{-1}$	1/3	90	120	120	155
				5/3	135	185	170	210
LINAC e^+e^-	$\gamma\gamma$ Compton	500 GeV	$10fb^{-1}$	1/3	160	180	175	190
				5/3	200	205	200	205
LINAC e^+e^-	$\gamma^*\gamma^*$ WWA	1 TeV	$10fb^{-1}$	1/3	140	195	285	345
				5/3	220	325	435	470
LINAC e^+e^-	$\gamma\gamma$ Compton	1 TeV	$10fb^{-1}$	1/3	300	340	390	405
				5/3	400	405	410	410

Current LHC limits for scalar LQ at 13 TeV are about 1100 GeV for 1,2st generations and 640 GeV for 3d generation

Поиски новых бозонов Хиггса и новых скаляров

In MSSM there are 2 Higgs doublets
(8 degrees of freedom)

$$H_1 = \begin{pmatrix} H_1^0 \\ H_1^- \end{pmatrix} \text{ and } H_2 = \begin{pmatrix} H_2^+ \\ H_2^0 \end{pmatrix}$$

After EWSB 3 degrees of freedom go to longitudinal components of $W_L^\pm, Z_L$ leaving 5 physical Higgs states:

$h, H, A, H^\pm$

At tree level there are only two parameters: $\tan\beta$ and M_A

$$M_{h,H}^2 = \frac{1}{2} \left[M_A^2 + M_Z^2 \mp \sqrt{(M_A^2 + M_Z^2)^2 - 4M_A^2 M_Z^2 \cos^2 2\beta} \right]$$
$$M_{H^\pm}^2 = M_A^2 + M_W^2$$

$$M_h \leq \min(M_A, M_Z) \cdot |\cos 2\beta| \leq M_Z \quad M_{H^\pm} > M_W, M_H > M_A$$

LEP2 bounds: $M_{h,H} \geq 92.8 \text{ GeV}, M_A \geq 93.4 \text{ GeV}, M_{H^\pm} \geq 78.6 \text{ GeV}$

Why MSSM is not ruled out yet?

Fortunately, top quark is very heavy!

Поиски новых бозонов Хиггса и новых скаляров

E. Boos, A.Djouadi, M. Muhlleitner and A.Vologdin
 "Minimal supersymmetric standard model Higgs
 bosons in the intense-coupling regime"
 Phys. Rev. D 66, 055004 (2002)

E.Boos, A.Djouadi and A.~Nikitenko,
 "Detection of the neutral MSSM Higgs
 bosons in the intense coupling regime at the LHC,"
 Phys. Lett. B 578, 384 (2004)

Пераметризация ведущих поправок в хиггсовском секторе MSSM

$$M_{h,H}^2 = \frac{1}{2}(M_A^2 + M_Z^2 + \epsilon) \left[1 \mp \sqrt{1 - 4 \frac{M_Z^2 M_A^2 \cos^2 2\beta + \epsilon(M_A^2 \sin^2 \beta + M_Z^2 \cos^2 \beta)}{(M_A^2 + M_Z^2 + \epsilon)^2}} \right]$$

$$\epsilon = \frac{3 G_F \bar{m}_t^4}{\sqrt{2} \pi^2 \sin^2 \beta} \left[t + \frac{X_t}{2} \right] - \frac{3 G_F}{\sqrt{2} \pi^2} \left[\frac{\bar{m}_t^2 M_Z^2 t}{2} + \frac{2 \alpha_S}{\pi} \frac{\bar{m}_t^4}{\sin^2 \beta} (X_t t + t^2) \right]$$

$$t = \log \left(\frac{M_S^2}{m_t^2} \right), \quad X_t = \frac{2 A_t^2}{M_S^2} \left(1 - \frac{A_t^2}{12 M_S^2} \right) \quad \bar{m}_t \text{ is the running } \overline{\text{MS}} \text{ top}$$

In the decoupling limit

$$M_A \gg M_Z \quad M_H \sim M_{H^\pm} \sim M_A$$

Light Higgs h is very similar to H_{SM}

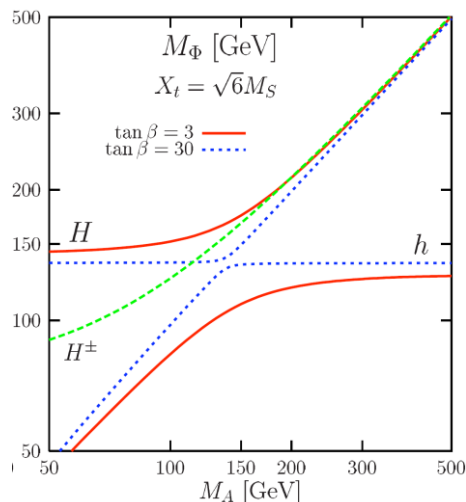
In the Intense-coupling regime

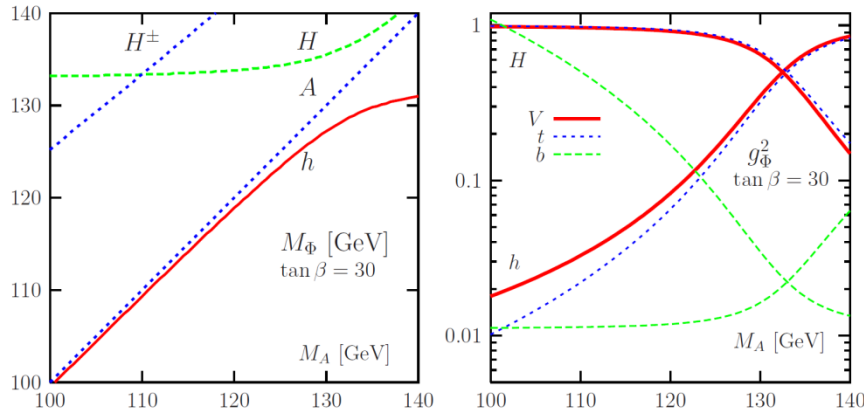
$$M_h \simeq M_H$$

At $\tan \beta \rightarrow \infty$

$$M_C = M_h^{\text{max}} = M_H^{\text{min}} = \sqrt{M_Z^2 + \epsilon}$$

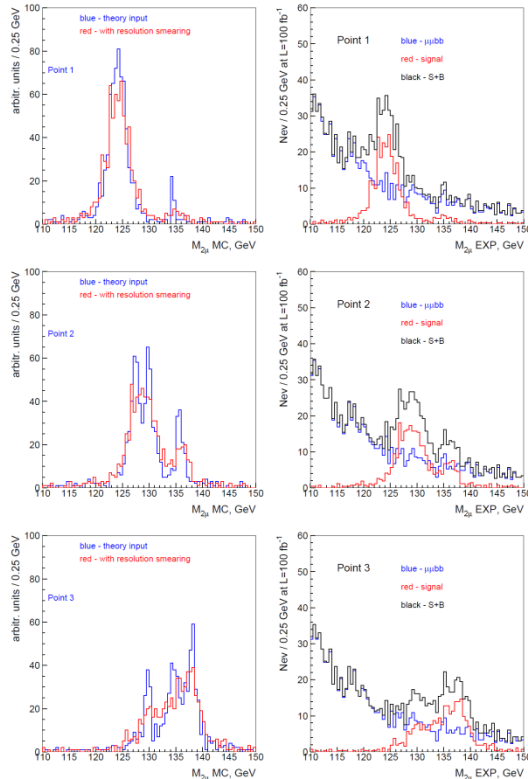
An interesting problem how to resolve close states





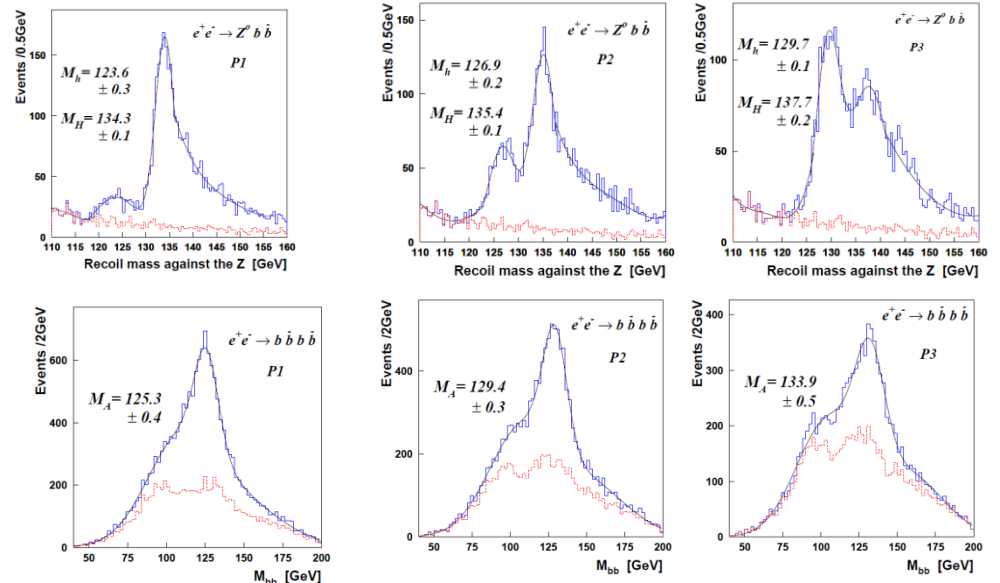
Point	Φ	M_Φ	Γ_Φ	$\text{BR}(\gamma\gamma)$	$\text{BR}(WW^*)$	$\text{BR}(\mu^+\mu^-)$
P1	h	123.3	2.14	1.9×10^{-6}	5.2×10^{-5}	3.29×10^{-4}
	A	125.0	2.51	5.9×10^{-7}	0	3.29×10^{-4}
	H	134.3	0.36	2.4×10^{-5}	5.1×10^{-3}	3.31×10^{-4}
P2	h	127.2	1.73	3.7×10^{-6}	2.1×10^{-4}	3.30×10^{-4}
	A	130.0	2.59	4.7×10^{-7}	0	3.31×10^{-4}
	H	135.5	0.85	7.4×10^{-6}	1.9×10^{-3}	3.33×10^{-4}
P3	h	129.8	0.97	1.0×10^{-5}	9.2×10^{-4}	3.31×10^{-4}
	A	135.0	2.67	4.5×10^{-7}	0	3.33×10^{-4}
	H	137.9	1.69	1.8×10^{-6}	6.5×10^{-4}	3.35×10^{-4}

LHC 14 TeV, 100 fb⁻¹



E.Boos, V.Bunichev, A.Djouadi, H.J.Schreiber,
 "Prospects of mass measurements for neutral MSSM
 Higgs bosons in the intense-coupling regime at a linear collider,"
 Phys.Lett. B 622, 311 (2005)

ILC 500 GeV, 1 ab⁻¹

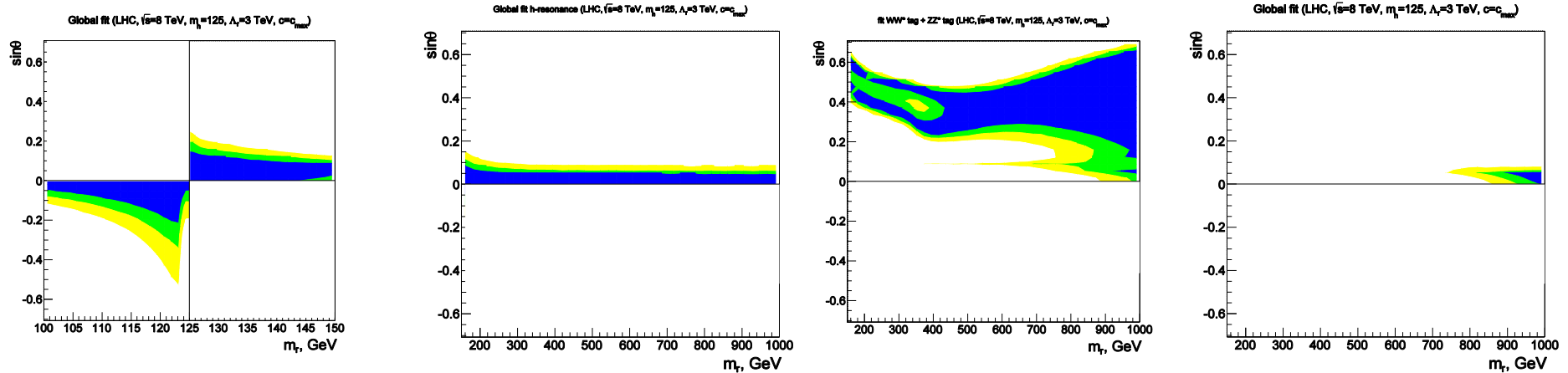


Large tan β regimes are practically closed by present LHC data

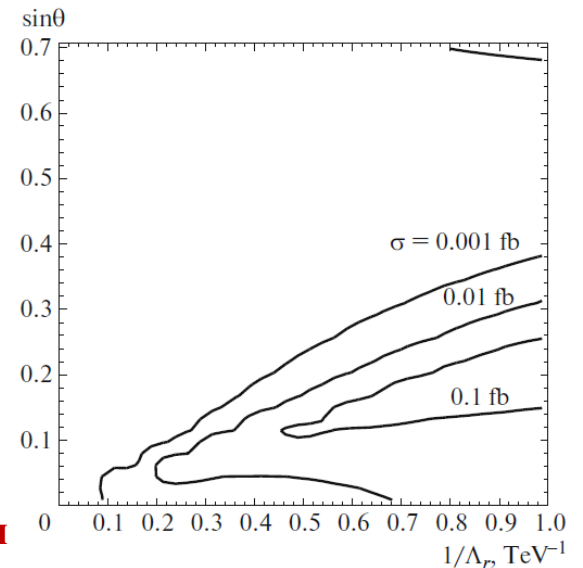
Радион

E.Boos, V.Bunichev, M.Perfilov, M.Smolyakov, and I.Volobuev,
 ``Higgs-radion mixing in stabilized brane world models,"
 Phys.Rev.D 92, no. 9, 095010 (2015)

E.Boos, V.Bunichev, and I.Volobuev,
 ``Heavy scalar boson in view of the unconfirmed
 750 GeV LHC diphoton excess,"
 J.Exp.Theor.Phys. 124, no. 5, 722 (2017).



$$\begin{aligned}
 L_{h-r} = & \frac{1}{2} \partial_\mu h \partial^\mu h - \frac{1}{2} m_h^2 h^2 + \frac{1}{2} \partial_\mu r \partial^\mu r - \frac{1}{2} \mu_r^2 r^2 \\
 & - \frac{(c \cos \theta + \sin \theta)}{\Lambda_r} h (T_\mu^\mu + \Delta T_\mu^\mu) + \frac{(c \sin \theta - \cos \theta)}{\Lambda_r} r (T_\mu^\mu + \Delta T_\mu^\mu) \\
 & - \sum_f \frac{m_f}{v} \bar{\psi}_f \psi_f (\cos \theta h - \sin \theta r) + \frac{2M_W^2}{v} W_\mu^- W^{\mu+} (\cos \theta h - \sin \theta r) \\
 & + \frac{M_Z^2}{v} Z_\mu Z^\mu (\cos \theta h - \sin \theta r) + \frac{M_W^2}{v^2} W_\mu^- W^{\mu+} (\cos \theta h - \sin \theta r)^2 \\
 & + \frac{M_Z^2}{2v^2} Z_\mu Z^\mu (\cos \theta h - \sin \theta r)^2.
 \end{aligned}$$



При малых углах смешивания нельзя исключить легкий радион
При массе радиона 750 GeV сечение его рождения в 50-100 раз
меньше необходимого для интерпретации «всплеска»

Заряженный скаляр

E. Boos, I. Volobuev
Simple Standard Model Extension by Heavy
Charged Scalar, arXiv:1801.09080
Accepted for publication in Phys.Rev.D

The simplest model Lagrangian contains the kinetic term and the mass and self-coupling terms of the charged scalar boson field:

$$L_S = D_\nu^* S^* D^\nu S - V(S) \quad D_\nu = \partial_\nu - ig_1 \frac{Y_S}{2} B_\nu \quad B_\nu = A_\nu \cos\theta_W - Z_\nu \sin\theta_W$$

The potential $V(S)$ may have, in general, the following gauge invariant form

$$V(S) = \mu_S^2 |S|^2 + \lambda_S (|S|^2)^2 + \lambda_{\Phi S} |\Phi|^2 |S|^2$$

Three parameters $M_S^2 = \mu_S^2 + 1/2 \lambda_{\Phi S} v^2$ $\lambda_{\Phi S}$ λ_S

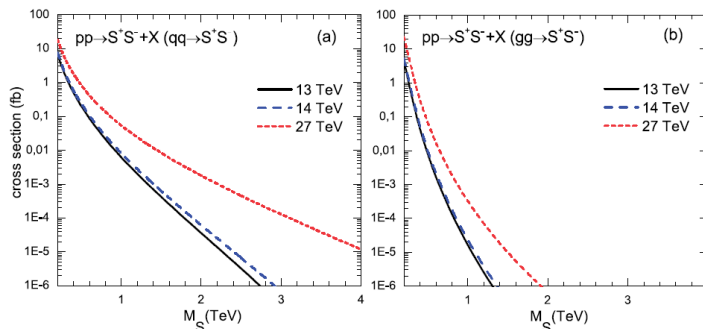
The only possible dimension 4 gauge invariant Lagrangian violates lepton flavor and lepton number

$$L_{S,\text{leptons}} = \left(f_{12} (\bar{\mu}_L \nu_e^c - \bar{e}_L \nu_\mu^c) + f_{13} (\bar{\tau}_L \nu_e^c - \bar{e}_L \nu_\tau^c) + f_{23} (\bar{\tau}_L \nu_\mu^c - \bar{\mu}_L \nu_\tau^c) \right) S^- + h.c.$$

Constraints from rare decays, neutrino mixing, and mass differences

J. Herrero-Garcia, T. Ohlsson,
S. Riad and J. Wirén ' JHEP 2017

$$|f_{12}|, |f_{13}|, |f_{23}| < 10^{-6}$$



A good candidate for Heavy stable charged particles (HSCP) or long-lived particles (LLP) with current mass LHC limits 300-320 GeV. Expected future HL-LHC (27 TeV, 15 ab⁻¹) bounds are about 2.7 GeV

**Но пока не найдены достоверно
ни новые частицы и взаимодействия,
ни отклонения во взаимодействиях,
предсказанных Стандартной моделью**

**Но пока не найдены достоверно
ни новые частицы и взаимодействия,
ни отклонения во взаимодействиях,
предсказанных Стандартной моделью**

Но когда-то и топ-кварк с бозоном Хиггса были гипотетическими
(правда, ожидаемыми в СМ) частицами.

**Но пока не найдены достоверно
ни новые частицы и взаимодействия,
ни отклонения во взаимодействиях,
предсказанных Стандартной моделью**

Но когда-то и топ-кварк с бозоном Хиггса были гипотетическими
(правда, ожидаемыми в СМ) частицами.

Надо продолжать поиски по всем возможным направлениям !

Спасибо !!!

Minimal Flavour Violation hypothesis

$$L_{S,\text{quarks}} = -\frac{1}{\Lambda} \bar{Q}'_L \lambda_u \Phi u'_R{}^j S^- - \frac{1}{\Lambda} \bar{Q}'_L \lambda_d \Phi^C d'_R S^+ + \text{h.c.}$$

$$L_{S,\text{quarks}} = -\frac{1}{\Lambda} \left[\bar{d} \cdot V_u \frac{1+\gamma_5}{2} u \cdot S^- + \bar{u} \cdot V_d \frac{1+\gamma_5}{2} d \cdot S^+ + \text{h.c.} \right] \cdot \left(1 + \frac{h}{v} \right)$$

$$V_d = V_{CKM}(U_L^d)^\dagger \mu_d U_R^d \text{ and } V_u = V_{CKM}^\dagger(U_L^u)^\dagger \mu_u U_R^u$$

$$pp \rightarrow t + S^- + X$$

