

Физика бозона Хиггса

М.Н.Дубинин

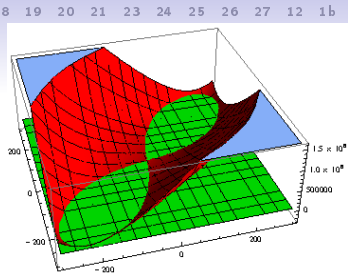
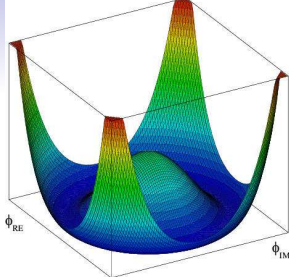
НИИЯФ МГУ



Научная сессия к 75-летию НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына

Outline

- об истории поисков с 1990 г.
 - бозон Хиггса на LEP2. Полные наборы диаграмм. CompuHEP
 - бозон Хиггса на линейных коллайдерах в модах γe^- , $\gamma\gamma$
 - бозон Хиггса на Большом адронном коллайдере (БАК)
- идентификация бозона Хиггса 125 ГэВ на основе данных БАК
 - модельно-независимый подход. Псевдонаблюдаемые. Расширения стандартной модели операторами размерности шесть
 - модельно-зависимый подход. Бозоны Хиггса минимальной суперсимметрии (MSSM).
 - нестандартные сценарии MSSM.



Хиггсовский потенциал стандартной модели

$$U_{SM} = -\mu^2(\Phi^\dagger\Phi) + \frac{\lambda}{4}(\Phi^\dagger\Phi)^2$$

Двухдублетный хиггсовский потенциал минимальной суперсимметрии

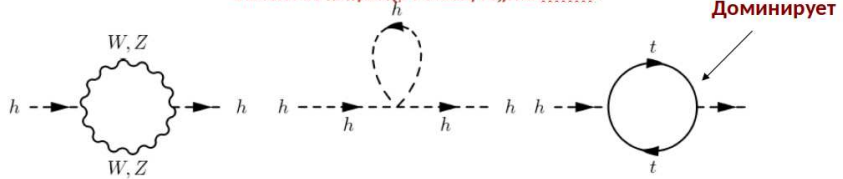
$$\begin{aligned}
 U_{eff}(\Phi_1, \Phi_2) = & -\mu_1^2(\Phi_1^\dagger\Phi_1) - \mu_2^2(\Phi_2^\dagger\Phi_2) - \mu_{12}^2(\Phi_1^\dagger\Phi_2) - (\mu_{12}^2)^*(\Phi_2^\dagger\Phi_1) \\
 & + \lambda_1(\Phi_1^\dagger\Phi_1)^2 + \lambda_2(\Phi_2^\dagger\Phi_2)^2 + \lambda_3(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + \lambda_4(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_1) \\
 & + \frac{\lambda_5}{2}(\Phi_1^\dagger\Phi_2)^2 + \frac{\lambda_5^*}{2}(\Phi_2^\dagger\Phi_1)^2 + \lambda_6(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + \lambda_6^*(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_2^\dagger\Phi_1) \\
 & + \lambda_7(\Phi_2^\dagger\Phi_2)(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + \lambda_7^*(\Phi_2^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_1)
 \end{aligned}$$

$$\lambda_{1,2}^{\text{SUSY}} = \frac{g_1^2 + g_2^2}{8}, \quad \lambda_3^{\text{SUSY}} = \frac{g_2^2 - g_1^2}{4}, \quad \lambda_4^{\text{SUSY}} = -\frac{g_2^2}{2}, \quad \lambda_{5,6,7}^{\text{SUSY}} = 0.$$

$$\lambda_i = \lambda_i^{\text{SUSY}} - \Delta\lambda_i \quad \Delta\lambda_i = \Delta\lambda_i^{\text{thr}} + \Delta\lambda_k^{\text{LL}} \quad (i = 1, \dots, 7, k = 1, \dots, 4)$$

Простейший механизм Хиггса в СМ нестабилен по отношению к квантовым поправкам

Петлевые поправки в массу бозона Хиггса



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

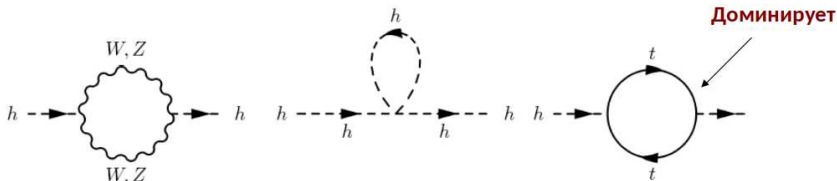
$\delta m_H < 125 \text{ GeV}$ (95% CL limit on SM Higgs)

$\Lambda \sim 0.6-0.7 \text{ TeV}$

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

Необходим компенсационный механизм в расширении СМ => существование достаточно легкого партнера топ-кварка - одно из мотивированных предсказаний минимальной суперсимметрии

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)

$\Lambda \sim 0.6-0.7 \text{ TeV}$

Размерная регуляризация и перенормировка | **дает логарифмический «остаток»**

$$m_H^2(\Lambda) = m_H^2(y) - C y_f^2 m_f^2 \text{Ln}(\Lambda^2/v^2) + \dots$$

весьма существенный, если есть частица (суперпартнер) с массой $m_f^2 \sim \Lambda^2$ взаимодействие которой с бозоном Хиггса СМ y_f^2 достаточно сильное

Поправка в МСМ:

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

Другие трудности однодублетного хиггсовского сектора стандартной модели

(1) юкавские члены СМ не информативны к иерархии масс кварков и лептонов, происхождению смешиваний в кварковом и лептонном секторах

(2) массы майорановских нейтрино не следуют из перенормируемого взаимодействия. HNL не наблюдаются. СМ со стерильными дираковскими R-нейтрино не объясняет естественно малость масс нейтрино

(3) фазовый переход первого рода в СМ появляется при массе бозона Хиггса менее 65 ГэВ, нарушение CP весьма мало, процессы с нарушением барионного числа существенны при массе бозона Хиггса менее 50 ГэВ, что приводит к трудностям моделей генерации барионной асимметрии Вселенной

(4) плотность энергии электрослабого вакуума СМ порядка $10^8 GeV^4$ очень сильно (на 55 порядков) отличается от естественной астрофизической оценки $\gamma^{-1} H_0^2 = M_P^2 H_0^2 = 10^{-5} \frac{GeV}{cm^3} \sim 10^{-47} GeV^4$

Полные калибровочно-инвариантные наборы диаграмм. Рождение бозона Хиггса на LEP2.

Вычисления для сигнала бозона Хиггса SM на коллайдере LEP2 начала 90-х годов проводились на новом уровне точности, что связано с программой разработки в НИИЯФ МГУ пакета программ **CompHEP**, первые версии которого появились в 1991 г. CompHEP обеспечивает

- точный учет диаграмм сигнала и неприводимого фона, их интерференций в любых областях фазового пространства
- контроль калибровочной инвариантности при учете ширины нестабильных частиц
- учет спиновых корреляций

что позволяет оптимизировать выделение сигнала.

Первая публикация такого рода

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

Complete tree level calculation of the $e^+e^- \rightarrow Zb\bar{b}$ process at LEP200. Higgs signal and background.

G.Passarino - "... we point out the relevance of the pioneering work of E. Boos and M. Dubinin..."

Standard Higgs boson searches at LEP2, Nucl. Phys. B488 (1997) 3

Complete tree level calculation
of the $e^+e^- \rightarrow Zb\bar{b}$ process at LEP200.
Higgs signal and background

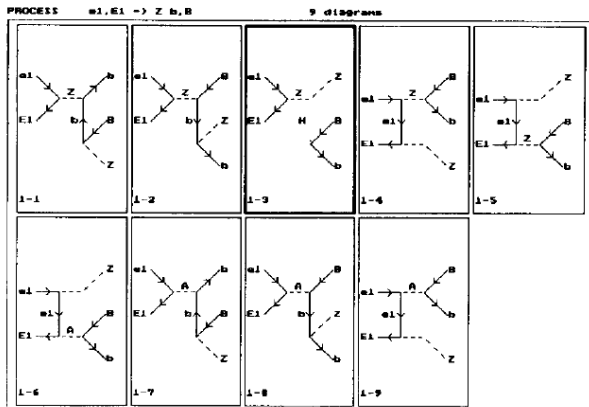
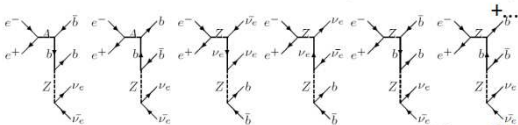
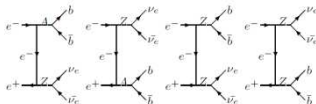
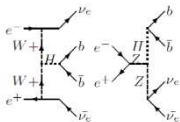


Fig 2. Feynman diagrams for the $e^+e^- \rightarrow Zb\bar{b}$ process.

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)



CompHEP

		$\sqrt{s} = 205 \text{ GeV}$								
m_H, GeV		115			120			125		
$\sigma_{tot} [\text{fb}]$		98.6			92.0			89.9		
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
$\sigma_{tot} [\text{fb}]$		39.1	29.8	29.8	35.7	28.2	28.2	34.2	27.9	27.9
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

Рождение бозона Хиггса на коллайдерах в модах γe и $\gamma\gamma$

Всесторонне обсуждались возможности генерации пучков фотонов высокой энергии для линейных коллайдеров при комптоновском рассеянии луча лазера назад (backscattering). Соответствующие вычисления для полных наборов диаграмм

E.Boos, M.Dubin, V.Ilyin, A.Pukhov, G.Jikia, Phys.Lett.B 273 (1991) 173-176
Associated Higgs boson production in gamma e collisions

E.Boos, G.Jikia, Phys.Lett.B 275 (1992) 164-168

Probing the heavy Higgs sector via gamma gamma \rightarrow W(L)+ W(L)-, Z(L) Z(L) at a TeV linear collider

E.Boos, I.Ginzburg, K.Melnikov, T.Sack, Z.Phys.C 56 (1992) 487-492

Probing of the Higgs fermion coupling at gamma gamma colliders

V.Ilyin, A.Pukhov, Y.Kurihara, Y.Shimizu, A.Kaneko, Phys.Rev.D 54 (1996) 6717-6727

Probing the H**3 vertex in e+ e-, gamma e and gamma gamma collisions for light and intermediate Higgs bosons

E.Boos, A.Pukhov, M.Sachwitz, J. Schreiber, Z.Phys.C 75 (1997) 237-244

Higgs and top production in the reaction gamma e \rightarrow neutrino b anti-b W at TeV linear collider energies

E.Boos, V.Ilyin, T.Ohl, A.Pukhov, Phys.Lett.B 427 (1998) 189-196 Higgs search in the W W* decay mode at photon linear colliders

которые могут давать достоверность сигналов $N_S/\sqrt{N_B}$ в несколько раз больше, чем e^+e^- мода.

Рождение бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере, ассоциированное со струями

Summary of the CMS potential for the Higgs boson discovery,
 Eur.Phys.J.C 39S2 (2005) 41-61

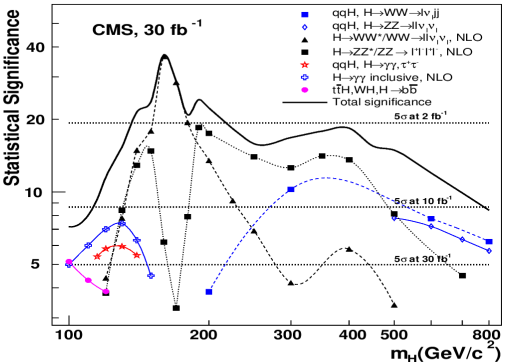


Figure 12: Expected statistical significance with 30 fb^{-1} for the SM Higgs boson as a function of m_H . The NLO cross sections for both signal and background were used for the inclusive $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ^*/ZZ \rightarrow \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ and $H \rightarrow WW^*/WW \rightarrow \ell\ell\nu\nu_\ell$ channels. Poisson statistics were used to calculate the statistical significance for the $H \rightarrow ZZ^*/ZZ \rightarrow \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$ channel.

Рождение бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере, ассоциированное со струями

Сотрудники ОТФВЭ НИИЯФ внесли большой вклад в моделирование "канала открытия" $pp \rightarrow \gamma\gamma + \text{струи}$ в рамках коллаборации CMS.

Основная мода $H \rightarrow \gamma\gamma$ в сопровождении струй позволяет редуцировать фоновые процессы и повысить достоверность сигнала.

S.Abdullin, M.Dubin, V.Ilyin, V.Savrin, Phys.Lett.B 431 (1998) 410-419
Higgs boson discovery potential of LHC in the channel $p p \rightarrow \gamma\gamma + \text{jet}$

упрощенное и полное моделирование в детекторе CMS, генерация событий без веса CompHEP

CMS Note 2001/022, Higgs Boson Signal in the Reaction $pp \rightarrow \gamma\gamma + 2 \text{ Forward Jets}$

CMS Note 2006/097, work with CalTech group (H.Newman, M.Pieri) Vector boson fusion production with $H \rightarrow \gamma\gamma$

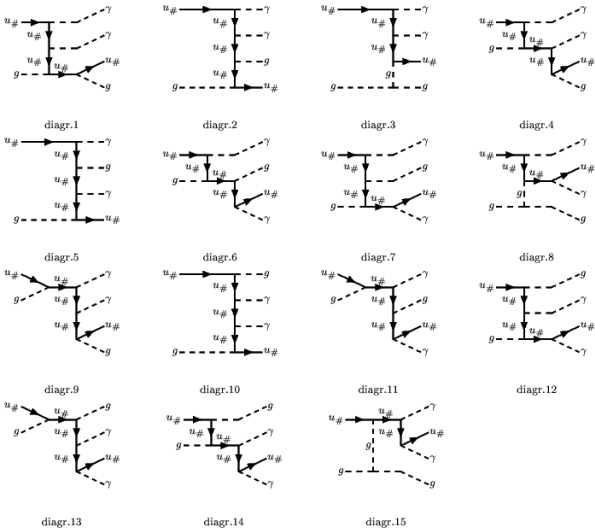
Наиболее трудоемкой частью моделирования сигнала в канале $pp \rightarrow \gamma\gamma + \text{jets}$ оказалась генерация событий без веса для неприводимого и приводимого фона.

Моделирование процесса $pp \rightarrow \gamma\gamma + 2$ Forward Jets коллаборацией CMS

	subprocess	σ , [pb]	acc., 1 σ , %	χ^2	$\frac{\sigma}{\sigma_{max}}$	N_{ev} , $\times 10^{-3}$	eff., $\times 10^4$	file name
1	$u\#, u\# \rightarrow A, A, u\#, u\#$	2.33	0.9	3	0.18	25	2.8	events_1.txt
2	$u\#, U\# \rightarrow A, A, u\#, U\#$	1.63	0.9	2	0.13	25	1.4	events_2.txt
3	$u\#, U\# \rightarrow A, A, d\#, D\#$	0.08	0.4	2	0.01	3	9.1	events_3.txt
4	$u\#, U\# \rightarrow A, A, G, G$	0.70	0.4	2	0.05	2	15.0	events_4.txt
5	$u\#, d\# \rightarrow A, A, u\#, d\#$	1.03	0.8	0.5	0.08	25	3.8	events_5.txt
6	$u\#, D\# \rightarrow A, A, u\#, D\#$	0.48	0.9	1	0.04	6	2.3	events_6.txt
7	$u\#, G \rightarrow A, A, G, u\#$	12.58	0.6	6	1.00	150	5.0	events_7.txt
8	$U\#, u\# \rightarrow A, A, u\#, U\#$	1.64	0.8	1	0.13	25	2.6	events_8.txt
9	$u\#, U\# \rightarrow A, A, d\#, D\#$	0.08	0.6	1	0.01	15	12.0	events_9.txt
10	$U\#, u\# \rightarrow A, A, G, G$	0.70	0.3	1	0.06	15	19.0	events_10.txt
11	$U\#, U\# \rightarrow A, A, U\#, U\#$	0.23	0.9	2	0.02	6	1.3	events_11.txt
12	$U\#, d\# \rightarrow A, A, U\#, d\#$	0.26	0.8	1	0.02	6	2.8	events_12.txt
13	$U\#, D\# \rightarrow A, A, U\#, D\#$	0.19	0.7	4	0.02	6	4.6	events_13.txt
14	$U\#, G \rightarrow A, A, G, U\#$	2.94	0.6	4	0.23	50	3.3	events_14.txt
15	$d\#, u\# \rightarrow A, A, u\#, d\#$	1.02	0.8	5	0.08	15	2.8	events_15.txt
16	$d\#, U\# \rightarrow A, A, U\#, d\#$	0.26	0.8	1	0.02	6	2.3	events_16.txt
17	$u\#, d\# \rightarrow A, A, u\#, d\#$	0.08	1.4	2	0.01	3	2.3	events_17.txt
18	$d\#, D\# \rightarrow A, A, u\#, U\#$	0.03	0.7	5	0.00	2	13.0	events_18.txt
19	$d\#, D\# \rightarrow A, A, d\#, D\#$	0.08	1.2	3	0.01	3	2.9	events_19.txt
20	$d\#, D\# \rightarrow A, A, G, G$	0.03	0.5	3	0.00	2	2.1	events_20.txt
21	$d\#, G \rightarrow A, A, G, d\#$	0.49	0.6	2	0.04	6	9.8	events_21.txt
22	$D\#, u\# \rightarrow A, A, u\#, D\#$	0.48	0.9	2	0.04	6	3.1	events_22.txt
23	$D\#, U\# \rightarrow A, A, u\#, D\#$	0.19	0.6	1	0.02	6	3.9	events_23.txt
24	$D\#, d\# \rightarrow A, A, u\#, U\#$	0.03	0.7	9	0.00	2	8.7	events_24.txt
25	$D\#, d\# \rightarrow A, A, d\#, D\#$	0.08	1.0	4	0.01	3	1.9	events_25.txt
26	$D\#, d\# \rightarrow A, A, G, G$	0.03	0.5	3	0.00	2	2.4	events_26.txt
27	$D\#, D\# \rightarrow A, A, D\#, D\#$	0.02	1.0	2	0.00	2	2.8	events_27.txt
28	$D\#, G \rightarrow A, A, G, F\#$	0.23	0.6	2	0.02	6	9.0	events_28.txt
29	$G, u\# \rightarrow A, A, G, u\#$	12.61	0.6	3	1.00	150	2.0	events_29.txt
30	$G, U\# \rightarrow A, A, G, U\#$	2.92	0.7	2	0.23	50	4.3	events_30.txt
31	$G, d\# \rightarrow A, A, G, d\#$	0.49	0.6	1	0.04	6	6.0	events_31.txt
32	$G, D\# \rightarrow A, A, G, D\#$	0.24	0.6	1	0.02	6	2.4	events_32.txt
33	$G, G \rightarrow A, A, u\#, U\#$	2.81	0.4	1	0.22	50	14.0	events_33.txt
34	$G, G \rightarrow A, A, d\#, D\#$	0.18	0.7	0.7	0.01	3	15.0	events_34.txt
all	$pp \rightarrow A, A, j, j$	47.24				503		Mixed.PEV

L=10.6 fb⁻¹

Моделирование процесса $pp \rightarrow \gamma\gamma + 2$ Forward Jets коллаборацией CMS



Complete set of the tree level (leading order) diagrams for the partonic subprocess No.7 $u\#G \rightarrow \gamma\gamma G u\#$.

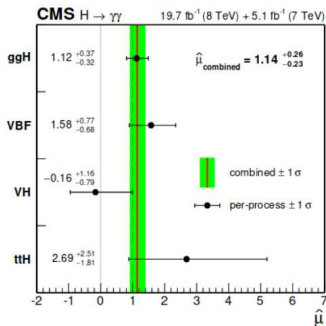


Figure 24: Best-fit signal strength, $\hat{\mu}$, measured for each of the production processes in a combined fit where the signal strengths of all four processes have been allowed to vary independently in the fit. The signal mass, common to all four processes, is treated as an unconstrained parameter in the fit. The horizontal bars indicate $\pm 1\sigma$ uncertainties in the values for the individual processes. The band corresponds to $\pm 1\sigma$ uncertainties in the value obtained from the combined fit with a single signal strength.

Observation of the diphoton decay of the Higgs boson and measurement of its properties

Идентификация бозона (бозонов) Хиггса. Поиски новой физики за рамками стандартной модели.

Энергия столкновения меньше порога рождения новых частиц, масштаб масс которых мультиТэВный.

- Модельно-независимый подход: модель на большом масштабе энергий неизвестна. Аномальные взаимодействия в калибровочном, хиггсовском секторах и взаимодействия кварков третьего поколения определяются всевозможными калибровочно-инвариантными операторами полей СМ размерности больше 4-х:

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

где c_i - безразмерные константы, \mathcal{O}_i - операторы размерности шесть.

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

Идентификация бозона (бозонов) Хиггса. Поиски новой физики за рамками стандартной модели.

- Модель на большом масштабе энергий известна (напр., суперсимметрия). Модельно-зависимый подход: устраним частицы на большом масштабе масс, оставляя от них только квантовые поправки на масштабе $M_{W^\pm, Z}$.

– суммирование определенных типов диаграмм (потенциалы Коулмена-Вайнберга)

– метод фонового поля (тяжелые частицы "выпадают за знак функционального интеграла")

– метод разложения эффективного действия с сохранением ковариантных производных (CDE expansion)

Стыковка констант связи и масс на масштабе m_{top} и масштабе M_S тяжелых частиц производится при помощи уравнений ренормализационной группы (РГ). Эффективный потенциал "улучшен по РГ" ("RG improved").

Каппа - схема ATLAS/CMS (κ - framework)

Предназначена для изучения соответствия СМ экспериментальным данным БАК в псевдонаблюдаемых κ_i .

- в приближении бесконечно малой ширины H любой процесс рождения H

$$\sigma(in \rightarrow H \rightarrow out) = \sigma_{in} \times Br_{out} = \sigma_{in} \times \frac{\Gamma_{out}}{\Gamma_{tot}}$$

- структура вершин взаимодействия H в расширении СМ не отличается от структуры СМ, H представляет собой СР-четный скаляр.
- в каждую вершину взаимодействия H вводится фактор κ_i , тогда

$$\sigma_{in} \times Br_{out} = [\sigma_{in} \times Br_{out}]_{SM} \cdot \frac{\kappa_{in}^2 \cdot \kappa_{out}^2}{\kappa_H^2}$$

- если определить силу сигнала рождения и силу сигнала распада

$$\mu_{in} = \frac{\sigma_{in}}{(\sigma_{in})_{SM}} \quad \mu_{out} = \frac{Br_{out}}{(Br_{out})_{SM}}$$

то сила сигнала процесса рождения в каппа - схеме

$$\mu = \mu_{in} \mu_{out} = \frac{\kappa_{in}^2 \cdot \kappa_{out}^2}{\kappa_H^2}$$

Контуры исключения для псевдонаблюдаемых в рамках модифицированной каппа-схемы

Псевдонаблюдаемые k_i в однопетлевых диаграммах, сила сигнала вычисляется для полных наборов диаграмм.

- *scalar-gauge boson sector*

$$O_{\Phi G} = \frac{1}{2}(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu}$$

$$O_{\Phi B} = \frac{1}{2}(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$$

$$O_{\Phi W} = \frac{1}{2}(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})W_{\mu\nu}^i W^{i\mu\nu}$$

$$O_{\Phi}^{(1)} = (\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})D_\mu \Phi^\dagger D^\mu \Phi$$

- *scalar-fermion sector*

$$O_{t\Phi} = (\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})(\bar{Q}_L \Phi^c t_R)$$

$$O_{b\Phi} = (\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})(\bar{Q}_L \Phi b_R)$$

$$O_{\tau\Phi} = (\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})(\bar{L}_L \Phi \tau_R)$$

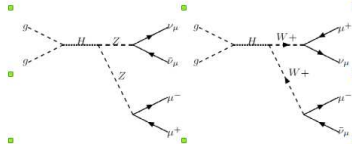
$$O_{\Phi \tilde{G}} = \frac{1}{2}(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a\mu\nu}$$

$$O_{\Phi \tilde{B}} = \frac{1}{2}(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})B_{\mu\nu} \tilde{B}^{\mu\nu}$$

$$O_{\Phi \tilde{W}} = \frac{1}{2}(\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2})W_{\mu\nu}^i \tilde{W}^{i\mu\nu}$$

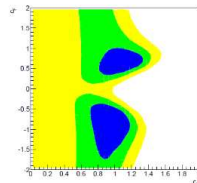
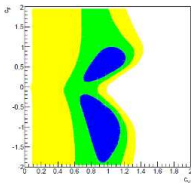
E.Boos, V.Bunichev, M.Dubinina and Y.Kurihara,

"Higgs boson signal at complete tree level in the SM extension by dimension-six operators,"
Phys. Rev. D 89, 035001 (2014)



Небольшая отрицательная интерференция ZZ сокращает ZZ и увеличивает допустимые области

Приближение бесконечно малой ширины WW



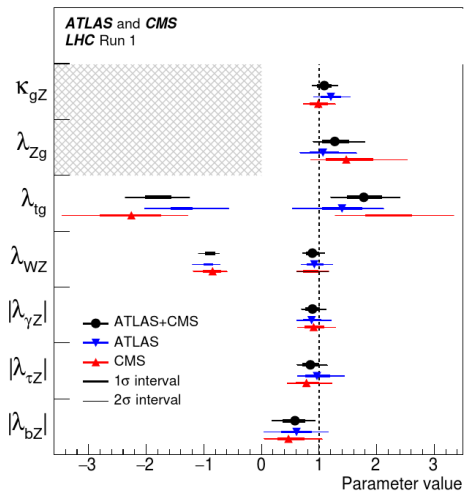


Рис.: Ratios of κ -modifiers, $\kappa_{gZ} = \kappa_g \kappa_Z$, $\lambda_{Zg} = \kappa_Z / \kappa_g$ and so on. Source: Combined ATLAS-CMS analysis, arXiv:1606.02266

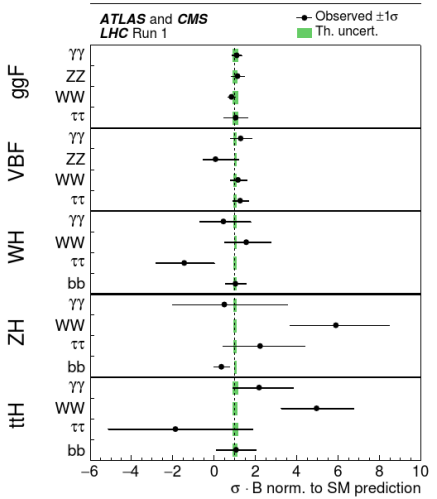


Рис.: Signal strength and its statistical error for different production mechanisms from: Combined ATLAS-CMS analysis, arXiv:1606.02266

Идентификация бозона (бозонов) Хиггса. Поиски новой физики за рамками стандартной модели.

- Модель на большом масштабе энергий известна (напр., суперсимметрия). Модельно-зависимый подход: устраним частицы на большом масштабе масс, оставляя от них только квантовые поправки на масштабе $M_{W^\pm, Z}$.

E.Boos, A.Djouadi, M.Muhlleitner, A.Vologdin, Phys.Rev.D 66 (2002) 055004
The MSSM Higgs bosons in the intense coupling regime

E.Boos, A.Djouadi, A.Nikitenko, Phys.Lett.B 578 (2004) 384-393
Detection of the neutral MSSM Higgs bosons in the intense coupling regime at the LHC

M.Dubinin, E.Petrova (Fedotova), Phys.Rev.D 95 (2017) 5, 055021
Radiative corrections to Higgs boson masses for the MSSM Higgs potential with dimension-six operators

M.Dubinin, E.Petrova (Fedotova), Int.J.Mod.Phys.A 33 (2018) 25, 1850150
Scenarios with low mass Higgs bosons in the heavy supersymmetry

Эффективная теория поля для хиггсовского сектора MSSM на масштабе m_{top} .

Последовательность шагов

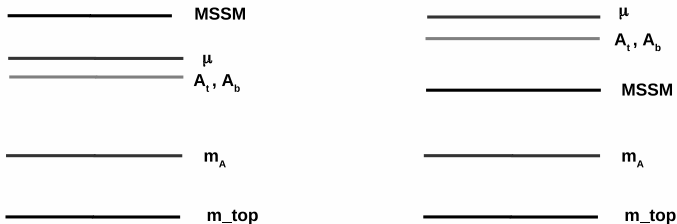
- Определить члены мягкого нарушения SUSY и уменьшить пространство параметров MSSM до приемлемого ($\dim 3 - \dim 5$).
- Определить иерархию масс и характерные масштабы масс – 'сценарии MSSM'.
- Проверить феноменологическую согласованность сценария, используя исключения из данных ATLAS, CMS, LHCb и других экспериментов.
- Преобразовать двухдублетный потенциал Хиггса в массовый базис.
- Отинтегрировать частицы на большом масштабе масс.
- Извлечь соответствующие области пространства параметров, согласующиеся с $m_h = 125$ ГэВ, SM-подобными связями h , возможно, отщеплением других скалярных состояний H , A , H^\pm и согласованностью с экспериментальными исключениями БАК и др.
- Проверить космологические следствия – кандидаты DM

Масштабы масс MССМ

The lightest CP-even MSSM Higgs boson mass $m_h = 125 \text{ ГэВ}$

Five MSSM Higgs bosons: $h, H, A, H^\pm,$

Calculation frameworks for m_h : effective potential decomposition in $1/M_{SUSY}, \overline{MS}$ scheme, RGEs ¹



Эффективный хиггсовский потенциал на масштабе m_Z — двухдублетная модель. Higgsinos, gluino and EW gauginos are very heavy and decouple. Main correctons are due to squarks.

Five-dimensional parameter space: $m_A, \tan \beta, M_{SUSY}, A_t = A_b, \mu$

¹Haber,Hempfling,PR D48 4280 (1993); Sasaki,Carena,Wagner, NP B381 66 (1992); Akhmetzyanova,Dolgoplov,M.D. PR D71 075008 (2005); Phys.Part.Nucl. 37, 677 (2006); Lee,Wagner, PR D92, 075032 (2015) Carena,Haber,Low,Shah,Wagner PR D91 035003 (2015)

Необычные сценарии МССМ. Легкий псевдоскаляр.

see also A.Nikitenko et al, Some updates on dimuon analysis HIG-16-017 with paper's data, 8 TeV and 13 TeV/2016, ФИАН, 9.02.2021

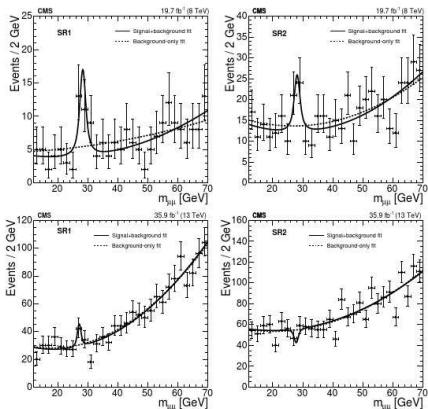


Figure 2: Upper row: the $12 < m_{\mu\mu} < 70$ GeV range in SR1 (left) and SR2 (right) in the 8 TeV analysis. Lower row: the $12 < m_{\mu\mu} < 70$ GeV range in SR1 (left) and SR2 (right) in the 13 TeV analysis. The results of an unbinned maximum likelihood fit for the signal-plus-background (solid lines) and background-only (dashed lines) hypotheses are superimposed.

Рис.: CMS Collaboration, Search for resonances in the mass spectrum of muon pairs produced in association with b-quark jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ and 13 TeV, arXiv:1808.01890 [hep-ex], see also M.D., E.Fedotova, arXiv:1908.05223[hep-ph], ЖЭТФ 156 (2020) 1058-1069

Эффективный хиггсовский потенциал МССМ, расширенный операторами размерности шесть

$$U_{\text{eff}} = U^{(2)} + U^{(4)} + U^{(6)} + \dots,$$

где

$$\begin{aligned} U^{(2)} &= -\mu_1^2(\Phi_1^\dagger\Phi_1) - \mu_2^2(\Phi_2^\dagger\Phi_2) - [\mu_{12}^2(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + h.c.], \\ U^{(4)} &= \lambda_1(\Phi_1^\dagger\Phi_1)^2 + \lambda_2(\Phi_2^\dagger\Phi_2)^2 + \lambda_3(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + \lambda_4(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_1) \\ &+ [\lambda_5/2(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + \lambda_6(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + \lambda_7(\Phi_2^\dagger\Phi_2)(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + h.c.], \\ U^{(6)} &= \kappa_1(\Phi_1^\dagger\Phi_1)^3 + \kappa_2(\Phi_2^\dagger\Phi_2)^3 + \kappa_3(\Phi_1^\dagger\Phi_1)^2(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + \kappa_4(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_2^\dagger\Phi_2)^2 \\ &+ \kappa_5(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_1) + \kappa_6(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_1)(\Phi_2^\dagger\Phi_2) \\ &+ [\kappa_7(\Phi_1^\dagger\Phi_2)^3 + \kappa_8(\Phi_1^\dagger\Phi_1)^2(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + \kappa_9(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_1^\dagger\Phi_2)^2 \\ &+ \kappa_{10}(\Phi_1^\dagger\Phi_2)^2(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + \kappa_{11}(\Phi_1^\dagger\Phi_2)^2(\Phi_2^\dagger\Phi_1) + \kappa_{12}(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_2)^2 \\ &+ \kappa_{13}(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + h.c.], \end{aligned}$$

здесь

$$\Phi_i = \begin{pmatrix} -i\omega_i^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v_i + \eta_i + i\chi_i) \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2$$

– хиггсовские дублеты, $v_1 = v \cos \beta$, $v_2 = v \sin \beta$ ($v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = 246$ ГэВ) – соответствующие вакуумные ожидания, ω_i^+ , η_i , χ_i – флуктуации на вакуумном.

Сценарии с легким псевдоскаляром

- В режиме сильной связи МССМ трилинейные параметры $A_{t,b}$ и параметр хиггсовского суперполя μ от нескольких до 10 ТэВ, параметр $\tan\beta = v_2/v_1$ порядка 1
- Удовлетворительное описание сценариев с легким псевдоскаляром можно получить только в расширениях эффективного потенциала операторами размерности шесть
- спектр масс скаляров относительно слабо расщеплен на масштабе $m_Z - m_{top}$
- режим сильной связи удовлетворяет ограничениям пертурбативной унитарности, пределу настройки связей и непротиворечивым образом описывает совокупность экспериментальных данных

Summary

- сотрудники ОТФВЭ НИИЯФ внесли большой вклад в физические программы и моделирование процессов рождения бозона Хиггса на коллайдерах LEP2 (детекторы ADLO), Tevatron (детектор D0), БАК (детектор CMS) и др. В особенности следует отметить вклад в работу коллаборации CMS, который относится не только к теоретическим вычислениям новых каналов реакций рождения для физической программы, но и генерации событий для моделирования интерферирующих и приводимых фоновых процессов
- моделирование процессов проводилось на новом уровне точности (по сравнению с другими подходами до 1990 г), созданные пакеты программ (CompHEP) получили широкое признание и активно используются во всех центрах физики высоких энергий
- идентификация сигнала $H(125 \text{ ГэВ})$ однозначно не завершена. Возможны и другие скаляры, сигналы которых не видны вследствие больших фоновых вкладов, характерных для БАК.

BACKUP SLIDES

MSSM lagrangian - soft SUSY breaking terms

$$\mathcal{V}^0 = \mathcal{V}_M + \mathcal{V}_\Gamma + \mathcal{V}_\Lambda + \mathcal{V}_{\tilde{Q}},$$

where

$$\mathcal{V}_M = (-1)^{i+j} m_{ij}^2 \Phi_i^\dagger \Phi_j + M_Q^2 (\tilde{Q}^\dagger \tilde{Q}) + M_U^2 \tilde{U}^* \tilde{U} + M_D^2 \tilde{D}^* \tilde{D},$$

$$\mathcal{V}_\Gamma = \Gamma_i^D (\Phi_i^\dagger \tilde{Q}) \tilde{D} + \Gamma_i^U (i \Phi_i^T \sigma_2 \tilde{Q}) \tilde{U} + \Gamma_i^{*D} (\tilde{Q}^\dagger \Phi_i) \tilde{D}^* - \Gamma_i^{*U} (i \tilde{Q}^\dagger \sigma_2 \Phi_i^*) \tilde{U}^*,$$

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_\Lambda = & \Lambda_{ik}^{jl} (\Phi_i^\dagger \Phi_j) (\Phi_k^\dagger \Phi_l) + (\Phi_i^\dagger \Phi_j) \left[\Lambda_{ij}^Q (\tilde{Q}^\dagger \tilde{Q}) + \Lambda_{ij}^U \tilde{U}^* \tilde{U} + \Lambda_{ij}^D \tilde{D}^* \tilde{D} \right] + \\ & + \bar{\Lambda}_{ij}^Q (\Phi_i^\dagger \tilde{Q}) (\tilde{Q}^\dagger \Phi_j) + \frac{1}{2} \left[\Lambda_{\epsilon ij} (i \Phi_i^T \sigma_2 \Phi_j) \tilde{D}^* \tilde{U} + h.c. \right], \quad i, j, k, l = 1, 2, \end{aligned}$$

$\mathcal{V}_{\tilde{Q}}$ denotes the four scalar quarks interaction terms, Pauli matrix $\sigma_2 \equiv \begin{pmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{pmatrix}$.

The Yukawa couplings for the third generation of scalar quarks are defined in a standard way $h_t = \frac{\sqrt{2} m_t}{v \sin \beta}$, $h_b = \frac{\sqrt{2} m_b}{v \cos \beta}$, $\Gamma_{\{1; 2\}}^U \equiv h_U \{-\mu; A_U\}$, $\Gamma_{\{1; 2\}}^D \equiv h_D \{A_D; -\mu\}$.

Models. General.

Experimental and theoretical shortcomings of the SM initiated increasing number of models with new physics at TeV scale. Not all of these models solve or address all of the problems, but two primary issues are focused upon (1) the mechanism of electroweak symmetry breaking (2) the observation of dark matter.

For a long time supersymmetry has been a favorite candidate for new physics beyond the Standard Model (BSM physics). Advantages

- SUSY is renormalizable perturbative field theory
- naturally accounts for the gauge hierarchy between the EW and the Planck scales
- includes consistent mechanism of EW symmetry breaking (two-doublet Higgs sector)
- includes candidates for the dark matter
- includes additional sources of CP violation to produce baryon asymmetry
- ensures unification of electromagnetic, weak and QCD couplings at the GUT scale 10^{15} GeV

Каппа-модификаторы – пример псевдонаблюдаемых.

Псевдонаблюдаемые – величины-посредники между экспериментальными наблюдаемыми и вычисленными теоретически параметрами. Предоставляют возможности анализа в рамках нестандартных моделей, позволяющего избежать трудоемкой реконструкции (начиная от datasets) и одновременно позволяют исполнять разные теоретические интерпретации измеряемых эффектов.

Появились при анализе данных LEP. Примеры: ширины векторных бозонов Γ_l, Γ_q и парциальные вероятности их распадов после процедуры исключения (deconvolution) излучения фотонов из начального состояния и вычитания интерферирующего/неинтерферирующего фона. Асимметрии вперед-назад. После фитирования псевдонаблюдаемых LEP2 составлялась комбинация четырех коллабораций ADLO, известная под названием Electroweak Precision Data (EWPD).

Псевдонаблюдаемые БАК определяются на уровне амплитуд процессов из-за сложной ситуации с фонами и исключения PDF, а также множества возможных теоретических моделей.

