

# Теоретические ограничения и ожидания по поискам бозона Хиггса и суперсимметрии на БАК

Артур Семушин

НИЯУ МИФИ

10.11.2021

Базируется на:

1. Статье D.P. Roy «Higgs and SUSY Searches at LHC» 1998 года, <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/9803421.pdf>;
2. PDG, <https://pdg.lbl.gov/>

# Теоретический обзор: бозон Хиггса в СМ

Открытые к 1998 г. частицы СМ:

- 3 поколения верхних ( $u, c, t$ ) и нижних ( $d, s, b$ ) кварков;
- 3 поколения нейтрино ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) и заряженных лептонов ( $e, \mu, \tau$ );
- калибровочные бозоны ( $g, W^\pm, Z, \gamma$ ).

Все эти частицы, кроме нейтрино (в СМ), глюонов и фотона, имеют ненулевую массу. Однако как фермионные, так и бозонные массовые члены нарушают симметрию СМ.

Механизм Хиггса:

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = (D^\mu \phi)^\dagger D_\mu \phi - [\mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2].$$

Поле Хиггса имеет ненулевое вакуумное среднее (минимум потенциала):  $v = \sqrt{-\mu^2/\lambda}$ . Таким образом, кинетический член данного поля придает необходимые массы калибровочным бозонам.

Хиггсовский дублет:  $\phi = \begin{pmatrix} 0 \\ v + H(x) \end{pmatrix}$ . 3 степени свободы потребовались для придания поперечных поляризаций трем массивным бозонам.

$M_W = gv/2$ , взаимодействие  $HWW$ :  $g^2 v/2 = gM_W$ .

$M_H = v\sqrt{2\lambda}$  — масса физического бозона Хиггса.

# Теоретические ограничения на бозон Хиггса СМ

Константа самодействия имеет ультрафиолетовую расходимость.

$$\frac{d\lambda}{d \ln(\mu/M_W)} = \frac{3\lambda^2}{2\pi^2} \Rightarrow \lambda(\mu) = \frac{1}{1/\lambda(M_W) - (3/2\pi^2) \ln(\mu/M_W)}.$$

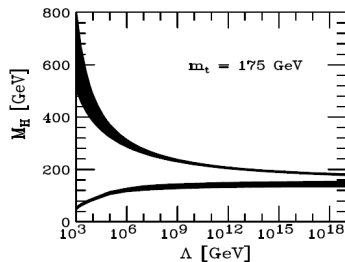
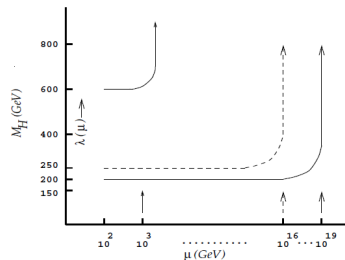
Полюс Ландау:  $\mu_\infty = M_W e^{2\pi^2/3\lambda(M_W)}$ ,  $\lambda(M_W) = \frac{g^2}{8} \frac{M_H^2}{M_W^2}$ .

Вклад  $t$ :  $\frac{d\lambda}{d \ln(\mu/M_W)} = \frac{3}{2\pi^2} (\lambda^2 + \lambda h_t^2 - h_t^4)$ .

Появился отрицательный вклад в уравнении ренорм-группы  $\Rightarrow$  при больших энергиях  $\lambda$  становится отрицательной.

$\Lambda$  — шкала отсечения — энергия, при которой происходит изменение знака.

Новая физика лишь на масштабе Планка и ТВО способна ограничить массу  $H$  диапазоном от 130 ГэВ до 190 ГэВ. Это согласуется с результатами LEP (косвенная оценка из измеренных параметров ЭС модели):  $M_H = 115_{-66}^{+116}$  ГэВ,  $< 420$  ГэВ (95% CL).



# Стратегии поиска бозона Хиггса CM

Поиски на LEP — процесс Бьеркена:

$$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow HZ^* \rightarrow b\bar{b}(l^+l^-, \nu\bar{\nu}, q\bar{q}).$$

Ограничение ALEPH:  $M_H > 88.6$  ГэВ  $\rightarrow$  интересная область для поисков на БАК:  $M_H > 90$  ГэВ.

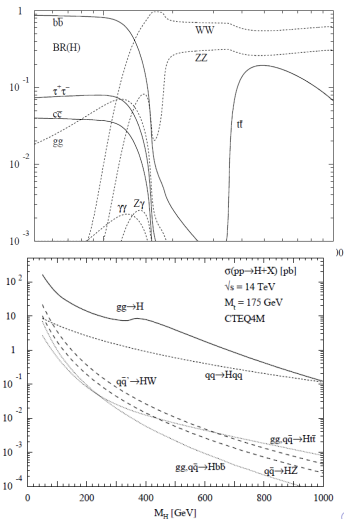
Области BR:  $M_H < 160$  ГэВ — доминирует канал  $b\bar{b}$ ,  $M_H > 160$  ГэВ — доминируют каналы  $W^+W^-$  и  $ZZ$ .

Канал  $b\bar{b}$  — КХД фон в  $\sim 1000$  раз превышает сигнал.

Канал  $\gamma\gamma$  — самый чистый, но  $BR \approx 1/1000$ . Нужна очень точная калориметрия с точностью измерения энергии и углов до 1%.

Ожидается, что CMS будет работать немного лучше, чем ATLAS: охват масс 90 – 140 ГэВ и 110 – 140 ГэВ соответственно (для 100  $\text{fb}^{-1}$ ).

Производство  $H$ : наибольшее сечение — из  $gg$  через треугольную петлю топ-кварков —  $\sim 10$  пб  $\Rightarrow \sim 10$  фб для канала  $\gamma\gamma \Rightarrow$  ожидается  $10^3$  сигнальных событий и  $10^4$  фоновых  $\Rightarrow$  значимость  $S/\sqrt{B} = 10$ .



# Теоретический обзор: МССМ

Идея — симметрия между бозонами и фермионами. Для этого пространство-время расширяется до суперпространства путем добавления антикоммутирующих фермионных координат.

У каждой частицы со спином  $S$  появляется суперпартнер со спином  $|S - 1/2|$ , вместе с которым она формирует супермультиплет.

Field Content of the MSSM						
Super-multiplets	Super-field	Bosonic fields	Fermionic partners	SU(3)	SU(2)	U(1)
gluon/gluino	$\hat{V}_8$	$g$	$\tilde{g}$	8	1	0
gauge boson/ gaugino	$\hat{V}$	$W^\pm, W^0$	$\tilde{W}^\pm, \tilde{W}^0$	1	3	0
	$\hat{V}'$	$B$	$\tilde{B}$	1	1	0
slepton/ lepton	$\hat{L}$	$(\tilde{\nu}_L, \tilde{e}_L^-)$	$(\nu, e^-)_L$	1	2	-1
	$\hat{E}^c$	$\tilde{e}_R^+$	$e_L^c$	1	1	2
squark/ quark	$\hat{Q}$	$(\tilde{u}_L, \tilde{d}_L)$	$(u, d)_L$	3	2	1/3
	$\hat{U}^c$	$\tilde{u}_R^*$	$u_L^c$	$\bar{3}$	1	-4/3
	$\hat{D}^c$	$\tilde{d}_R^*$	$d_L^c$	$\bar{3}$	1	2/3
Higgs/ higgsino	$\hat{H}_d$	$(H_d^0, H_d^-)$	$(\tilde{H}_d^0, \tilde{H}_d^-)$	1	2	-1
	$\hat{H}_u$	$(H_u^+, H_u^0)$	$(\tilde{H}_u^+, \tilde{H}_u^0)$	1	2	1

Лагранжиан строится путем добавления всех возможных взаимодействий, сохраняющих инвариантность и не приводящих к расходимостям.

## Теоретический обзор: бозоны Хиггса в МССМ

В суперсимметричных теориях недостаточно одного хиггсовского дублета для придания необходимых масс. В МССМ включены два хиггсовских дублета, из которых физических бозонов остается 5: два нейтральных скаляра  $h$  и  $H$ , псевдоскаляр  $A$ , 2 заряженных скаляра  $H^\pm$ . На древесном уровне их массы определяются 2 параметрами: отношением вакуумных средних  $\tan \beta$  и массой одного бозона, например, псевдоскаляра  $M_A$ .

В МССМ решается проблема расходимости массы Хиггса. Взаимодействие бозонов Хиггса как с кварками и лептонами, так и со скварками и слептонами, позволяет взаимно уничтожать петлевые поправки.

В МССМ сохраняется  $B - L$ .

$R$ -четность:  $R = (-1)^{3(B-L)+2S}$  — сохраняется в МССМ (у «обычных» частиц и суперпартнеров  $R = +1$  и  $R = -1$  соответственно). Это приводит к существованию стабильной легчайшей суперсимметричной частицы.

Суперпартнер поля Хиггса — поле хиггсино — в процессе нарушения электрослабой симметрии смешивается с гейджино. Образуются 8 физических частиц: 4 нейтралино и 2 пары чарджино.

# Теоретические ограничения на бозоны Хиггса МССМ

Аппроксимация радиационных поправок от кварков и скварков

к массе нейтральных скаляров:  $\epsilon = \frac{3g^2 m_t^4}{8\pi^2 M_W^2} \ln \frac{M_t^2}{m_t^2}$ .

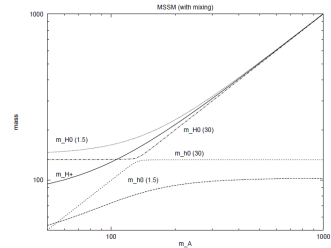
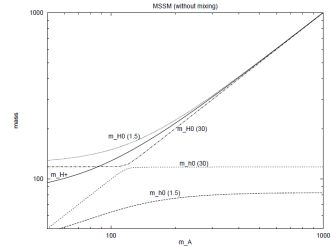
Вклад от смешивания суперпартнеров правого и левого

состояния  $t$ -кварка:  $\epsilon_{\text{mix}} = \frac{3g^2 m_t^4}{8\pi^2 M_W^2} \frac{A_t^2}{M_t^2} \left(1 - \frac{A_t^2}{12M_t^2}\right) \leq \frac{9g^2 m_t^4}{8\pi^2 M_W^2}$ .

Используя данные параметры, могут быть вычислены массы бозонов Хиггса с учетом перенормировок.

$M_h^2 \rightarrow M_Z^2 \cos^2 2\beta + \epsilon + \epsilon_{\text{mix}}$  — верхнее ограничение на массу одного из нейтральных скаляров.

Таким образом, МССМ содержит минимум 1 бозон Хиггса с массой до 140 ГэВ.



# Ожидания по поискам бозонов Хиггса МССМ

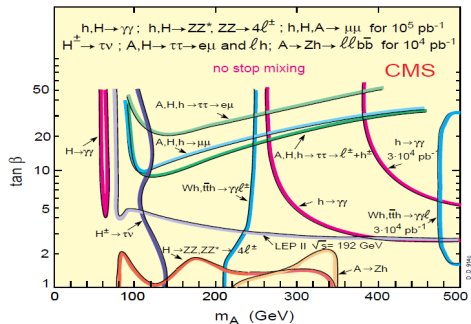
Channel	$H_{SM}$	$h$	$H$	$A$
$\bar{b}b(\tau^+\tau^-)$	$\frac{gm_b}{2M_W}(m_\tau)$	$\sin \alpha / \cos \beta$ $\rightarrow 1$	$\cos \alpha / \cos \beta$ $\tan \beta$	$\tan \beta$ "
$\bar{t}t$	$g\frac{m_t}{2M_W}$	$\cos \alpha / \sin \beta$ $\rightarrow 1$	$\sin \alpha / \sin \beta$ $\cot \beta$	$\cot \beta$ "
$WW(ZZ)$	$gM_W(M_Z)$	$\sin(\beta - \alpha)$ $\rightarrow 1$	$\cos(\beta - \alpha)$ $0$	$0$ "

В пределе большой  $M_A$  взаимодействия  $h$  похожи на взаимодействия бозона Хиггса СМ, что приводит к той же стратегии поиска, например, по каналу распада в  $\gamma\gamma$ . Взаимодействия остальных бозонов подавлены.

## Significance contours for SUSY Higgses

Regions of the MSSM parameter space ( $m_A, \tan\beta$ ) explorable through various SUSY Higgs channels

- $5\sigma$  significance contours
- two-loop / RGE-improved radiative corrections
- $m_{top} = 175$  GeV,  $m_{SUSY} = 1$  TeV





# Ожидания по поискам частиц-суперпартнеров

Explorable domain of  $m_0$   $m_{1/2}$  parameter space  
with  $100 \text{ fb}^{-1}$  in  $\tilde{q}, \tilde{g}$  searches  
in  $n$  leptons +  $E_{\text{T}}^{\text{miss}} > 2$  jets final states

SUGRA - MSSM,  $\tan \beta > 2$ ,  $A_0 = 0$ ,  $\mu < 0$   
 $5 \sigma$  contours

