

# Об интерпретации наблюдаемых отклонений ЛНС как бозонов Хиггса минимальной суперсимметрии

Е.Ю. Федотова  
в коллаборации с М.Н. Дубининым

НИИЯФ МГУ

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,  
посвященная 70-летию В.А. Рубакова

17 – 21 февраля 2025  
Москва



Открытый в 2012 г. коллаборациями ATLAS и CMS (CERN) бозон Хиггса:

- $m = 125.08 \pm 0.12$  ГэВ,  $\Gamma_{125} = 4.2$  МэВ;
- $J = 0$  (99.9% CL), CP-четные свойства;
- точность констант связи порядка  $\sim 8\%$  ( $W^\pm, Z$ ), 10%–20% ( $f$ ).

Свойства наблюдаемого бозона Хиггса согласуются с предсказаниями СМ

Однако все еще требуют уточнения

- самодействие
- взаимодействия с легкими кварками и лептонами
- CP-свойства  $h_{125} = \cos\theta h_{\text{even}} + \sin\theta h_{\text{odd}}$   
CP-четность предпочтительнее CP-нечетности на уровне  $\sim 4\sigma$ .
- и др.

Существующие экспериментальные данные не исключают расширения сектора Хиггса дополнительными мультиплетами.

Поиски сигналов дополнительных скаляров продолжаются



В настоящее время наблюдаются отклонения в инвариантной массе

- 28 ГэВ CMS, LEP 1808.01890[hep-ex]
- 96 ГэВ ATLAS и CMS 2211.01136 [hep-ex], CMS HIG-17-013
- 152 ГэВ ATLAS 2211.01136 [hep-ex], 2301.10486 [hep-ex]  
 $\gamma\gamma$  и  $Z\gamma$  конечные состояния  
2109.02650 [hep-ph], 2306.17209 [hep-ph], 1711.07874 [hep-ph], 2302.07276 [hep-ph] ...

В настоящем докладе обсудим возможность существования бозонов Хиггса с такими массами в рамках Двухдублетной модели типа II и МССМ

5 бозонов Хиггса (два заряженных и 3 нейтральных). Один из нейтральных скаляров ассоциируется с наблюдаемым бозоном Хиггса, его свойства при этом должны удовлетворять пределу настройки связей, т.е. быть близкими к предсказанным в рамках СМ.



Хиггсовский сектор СМ расширен дополнительным  $SU(2)$ -дублетом ( $Y_i = 1, i = 1, 2$ )

$$\Phi_i = \begin{pmatrix} -i\omega_i^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v_i + \eta_i + i\chi_i) \end{pmatrix}, \quad v^2 = v_1^2 + v_2^2 = (246 \text{ ГэВ})^2 \quad (1)$$

$$\text{tg } \beta = v_2/v_1$$

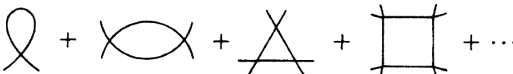
$SU(2) \times U(1)$ -инвариантный и перенормируемый потенциал

$$U = -\mu_1^2(\Phi_1^\dagger\Phi_1) - \mu_2^2(\Phi_2^\dagger\Phi_2) - [\mu_{12}^2(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + h.c.] \quad (2)$$

$$+ \lambda_1(\Phi_1^\dagger\Phi_1)^2 + \lambda_2(\Phi_2^\dagger\Phi_2)^2 + \lambda_3(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + \lambda_4(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_1)$$

$$+ [\lambda_5/2(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + \lambda_6(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + \lambda_7(\Phi_2^\dagger\Phi_2)(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + h.c.]$$

На петлевом уровне:

$$U = U^2 + U^4 + U^6 + \dots$$


The diagram shows four Feynman diagrams representing loop corrections to the potential. From left to right: a tadpole diagram (a loop with one external line), a bubble diagram (two external lines connected by a loop), a triangle diagram (three external lines forming a triangle loop), and a square diagram (four external lines forming a square loop). Each diagram is followed by a plus sign and an ellipsis, indicating a series of higher-order diagrams.



$$\begin{aligned}
U^{(6)} = & \kappa_1(\Phi_1^\dagger\Phi_1)^3 + \kappa_2(\Phi_2^\dagger\Phi_2)^3 + \kappa_3(\Phi_1^\dagger\Phi_1)^2(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + \kappa_4(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_2^\dagger\Phi_2)^2 + \\
& + \kappa_5(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_1) + \kappa_6(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_1)(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + \\
& + [\kappa_7(\Phi_1^\dagger\Phi_2)^3 + \kappa_8(\Phi_1^\dagger\Phi_1)^2(\Phi_1^\dagger\Phi_2) + \kappa_9(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_1^\dagger\Phi_2)^2 + \\
& + \kappa_{10}(\Phi_1^\dagger\Phi_2)^2(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + \kappa_{11}(\Phi_1^\dagger\Phi_2)^2(\Phi_2^\dagger\Phi_1) + \kappa_{12}(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_2)^2 + \\
& + \kappa_{13}(\Phi_1^\dagger\Phi_1)(\Phi_1^\dagger\Phi_2)(\Phi_2^\dagger\Phi_2) + h.c.].
\end{aligned}$$

Dubinin M., Petrova E., Phys.Rev.D 95, 2017, 055021

Существуют режимы, для которых дополнительные **радиационные поправки к операторам размерности 'шесть'** в разложении однопетлевого эфф. потенциала Хиггса существенны Dubinin M., Petrova E., IJMPA

Учет ренормгрупповых эффектов позволяет получить более точные предсказания



Два этапа

$$\eta_i, \chi_i, \omega_i^\pm \xrightarrow{\alpha, \beta} h, H, A, H^\pm, G^\pm, G^0 \xrightarrow{a_{ij}} h_1, h_2, h_3, H^\pm, G^\pm, G^0, \quad (3)$$

где углы смешивания

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\Delta\mathcal{M}_{12}^2 - (m_Z^2 + m_A^2)s_{2\beta}}{(m_Z^2 - m_A^2)c_{2\beta} + \Delta\mathcal{M}_{11}^2 - \Delta\mathcal{M}_{22}^2}, \quad \operatorname{tg} \beta = v_2/v_1, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a'_{11} &= [(m_H^2 - m_{h_1}^2)(m_A^2 - m_{h_1}^2) - c_2^2], a'_{12} = -c_1c_2, a'_{13} = -c_1(m_H^2 - m_{h_3}^2), \\ a'_{21} &= c_1c_2, a'_{22} = -[(m_h^2 - m_{h_2}^2)(m_A^2 - m_{h_2}^2) - c_1^2], a'_{23} = -c_2(m_h^2 - m_{h_3}^2), \\ a'_{31} &= -c_1(m_H^2 - m_{h_1}^2), a'_{32} = c_2(m_h^2 - m_{h_2}^2), a'_{33} = (m_h^2 - m_{h_3}^2)(m_H^2 - m_{h_3}^2) \end{aligned}$$

$$a_{ij} = a'_{ij}/n_j, \quad n_j = k_j \sqrt{a'^2_{1j} + a'^2_{2j} + a'^2_{3j}}, \quad k_j = \pm 1 \quad (5)$$

Achmetzjanova E., Dolgoplov M., Dubinin M., Phys.Rev.D 71, 2005, 075008

$$\begin{aligned} c_1 &= v^2(-1/2 \cdot \operatorname{Im}\lambda_5 c_{\alpha+\beta} + \operatorname{Im}\lambda_6 s_\alpha c_\beta - \operatorname{Im}\lambda_7 c_\alpha s_\beta) + \frac{v^4}{4}[-c_{\alpha+\beta} s_{2\beta} (3\operatorname{Im}\kappa_7 + \operatorname{Im}\kappa_{11} + \operatorname{Im}\kappa_{13}) \\ &\quad + 4(s_\alpha c_\beta^3 \operatorname{Im}\kappa_8 - c_\alpha s_\beta^3 \operatorname{Im}\kappa_{12}) + 2[s_\beta^2(-3c_\alpha c_\beta + s_\alpha s_\beta) \operatorname{Im}\kappa_{10} - c_\beta^2(c_\alpha c_\beta - 3s_\alpha s_\beta) \operatorname{Im}\kappa_9]], \\ c_2 &= -\frac{v^2}{2} \{ \operatorname{Im}\lambda_5 s_{\alpha+\beta} + 2(\operatorname{Im}\lambda_6 c_\beta c_\alpha + \operatorname{Im}\lambda_7 s_\beta s_\alpha) + v^2[2\operatorname{Im}\kappa_8 c_\beta^3 c_\alpha + \operatorname{Im}\kappa_9 c_\beta^2 (s_{\alpha+\beta} + 2c_\alpha s_\beta) \\ &\quad + \operatorname{Im}\kappa_{10} s_\beta^2 (s_{\alpha+\beta} + 2c_\beta s_\alpha) + 2\operatorname{Im}\kappa_{12} s_\beta^3 s_\alpha + \frac{1}{2}(3\operatorname{Im}\kappa_7 + \operatorname{Im}\kappa_{11} + \operatorname{Im}\kappa_{13}) s_{2\beta} s_{\alpha+\beta}] \}, \end{aligned}$$



Взаимодействия наблюдаемого бозона Хиггса с частицами СМ:

$$g^{\text{THDM}}/g^{\text{SM}} \simeq 1 \quad (6)$$

$$g(h_i uu) = (s_\alpha a_{2i} + c_\alpha a_{1i} - i c_\beta a_{3i} \gamma_5)/s_\beta, \quad (7)$$

$$g(h_i dd) = (c_\alpha a_{2i} - s_\alpha a_{1i} - i s_\beta a_{3i} \gamma_5)/c_\beta, \quad (8)$$

$$g(h_i VV) = c_{\beta-\alpha} a_{2i} + s_{\beta-\alpha} a_{1i}. \quad (9)$$

CP-сохранение:  $h_{125} = h_1, \quad \beta - \alpha \simeq \pi/2$

CP-нарушение:

$h_{125}$	I	II
$h_1$	$\beta - \alpha \simeq \pi/2, \quad c_1 \simeq 0$	$\text{tg}(\beta - \alpha) \simeq -c_2/c_1, \quad m_H \simeq 125 \text{ ГэВ}$
$h_2$	$\alpha \simeq 0, \quad \beta \simeq 0, \quad c_2 \simeq 0$	$\text{tg}(\beta - \alpha) \simeq -c_2/c_1, \quad m_h \simeq 125 \text{ ГэВ}$
$h_3$	$\alpha \simeq 0, \quad \beta \simeq 0, \quad m_H \simeq 125 \text{ ГэВ}$	$\beta - \alpha \simeq \pi/2, \quad m_h \simeq 125 \text{ ГэВ}$

Для каждого нейтрального бозона Хиггса предел настройки связей реализуется в двух сценариях (I и II)

В приближении  $\Phi^4$ :  $\text{tg}(\beta - \alpha) \simeq -c_2/c_1 \rightarrow \text{Im}\mu_{12}^2 \simeq 0$



## Предел настройки связей $h_1^I$ : $\beta - \alpha \simeq \pi/2$ , $c_1 \simeq 0$

- напоминает предел настройки связей в CP-сохраняющем пределе + дополнительное условие
- $\varphi$  однозначно фиксируется:  $a \cos^2 \varphi + b \cos \varphi + c \simeq 0$ , где

$$a = -3v^2 c_{\alpha+\beta} s_\beta |\kappa_7|,$$

$$b = -c_{\alpha+\beta} |\lambda_5| + v^2 [s_\beta^2 (-3c_\alpha c_\beta + s_\alpha s_\beta) |\kappa_{10}| - c_\beta^2 (c_\alpha c_\beta - 3s_\alpha s_\beta) |\kappa_9|],$$

$$c = s_\alpha c_\beta |\lambda_6| - c_\alpha s_\beta |\lambda_7| + \frac{v^2}{4} [3c_{\alpha+\beta} s_\beta |\kappa_7| + |\kappa_{11}| + |\kappa_{13}| + 4(s_\alpha c_\beta^3 |\kappa_8| - c_\alpha s_\beta^3 |\kappa_{12}|)].$$

В пределе  $\kappa_i=0$

$$\cos \varphi = \frac{|\lambda_6| s_\alpha c_\beta - |\lambda_7| c_\alpha s_\beta}{|\lambda_5| c_{\alpha+\beta}}. \quad (10)$$

- Предел настройки связей может реализовываться как в режиме отщепления, так и на масштабе  $M_{EW}$
- Взаимодействия  $h_{2,3}$  с  $W^\pm, Z$  отсутствуют или сильно подавлены
- Сигналы с нарушением CP-инвариантности в хиггсовском секторе м.б. обнаружены только во взаимодействиях  $h_3$  с фермионами СМ





Пределы настройки связей  $h_{2,3}^I$ : **исключены**, поскольку  $\beta \simeq 0$  приводит к безмассовому  $b$ -кварку

Пределы настройки связей  $h_{1,2,3}^{II}$ :  $m_h \simeq 125$  ГэВ или  $m_H \simeq 125$  ГэВ

Заметим, что при  $m_{H^\pm} \gtrsim 1$  ТэВ

- зависимость масс от CP-фазы  $\varphi$  пренебрежимо мала, т.е.

$$h_1 \simeq h, \quad h_2 \simeq H, \quad h_3 \simeq A \quad (11)$$

- все дополнительные бозоны Хиггса отщеплены

Тогда возникает противоречие:

$$m_{h_1} \simeq m_{h_2} \simeq 125 \text{ ГэВ} \quad \text{или} \quad m_{h_1} \simeq m_{h_3} \simeq 125 \text{ ГэВ}$$

Т.о.,  $h_{1,2,3}^{II}$ -alignments возможны при  $m_{H^\pm} \sim M_{EW}$

(alignment without decoupling)

- Непрямые ограничения на  $m_{H^\pm}$  исключают такие значения
- **PDG 2024**, ограничения для MSSM
  - при  $m_{H^\pm} < m_{top}$ :  $m_{H^\pm} > 155$  ГэВ
  - при  $m_{H^\pm} > m_{top}$ :  $m_{H^\pm} > 181(249)$  ГэВ для  $\text{tg } \beta = 10(20)$



## Естественная SUSY

Приближение 'скалярные кварки третьего поколения – бозоны Хиггса'

- $\Delta\lambda_i(1\text{-loop})$ : Haber, Hempfling, Phys. Rev. D48 (1993) 4280; Achmetzjanova, Dolgopолоv, Dubinin, Phys.Rev.D 71, 2005, 075008
- $\Delta\lambda_i(2\text{-loop})$ : Carena, Haber, Heinemeyer, Hollik, Wagner, Weiglein, Nucl. Phys. B (2000) 580
- $\Delta\kappa_j(1\text{-loop})$ : Dubinin, Petrova, Phys.Rev.D 95, 2017, 055021

## Параметры MSSM

$$m_{H^\pm}, \quad M_S, \quad \text{tg } \beta, \quad |A_{t,b}|, \quad |\mu|, \quad \varphi = \arg(\mu A_{t,b})$$

'Heuristic' bound: наиболее глубокий минимум эффективного SUSY-потенциала – э/сл минимум

$$\frac{\max(A_{t,b}, \mu)}{M_S} \leq 3 \quad (12)$$

Hollik, Weiglein, Wittbrodt, JHEP **03**, 109 (2019)

$$\text{tg } \beta = \{2, 5, 10, 20\}, \quad M_{\text{SUSY}} = \{2.5, 5, 10\} \text{ ТэВ}$$



## Отклонение 28 ГэВ

Возможно объяснить  $m_A=28$  ГэВ только за счет учета вкладов от операторов  $\mathcal{O}(\Phi^6)$  ценой нарушения условий стабильности э/сл вакуума

$$\frac{\max(A_{t,b}, \mu)}{M_S} \gg 3$$

Dubinin, Petrova, IJMPA 33, 25 (2018); Dubinin, Fedotova, JETP 131, 6, (2020)

## Отклонение 96 ГэВ

Только  $m_A=96$  ГэВ в нестабильном режиме  $A_{t,b}/M_S > 3$ ,  $\mu/M_S > 3$

Dubinin, Petrova, IJMPA 33, 25 (2018)

## Отклонение 152 ГэВ

$m_h=125$  ГэВ и  $m_H=152$  ГэВ достигаются в нестабильном режиме  $A_{t,b}/M_S > 3$ ,  $\mu/M_S > 3$

Например,  $m_{H^\pm}=160$  ГэВ,  $\tan\beta=2$ ,  $M_S=2.5$  ТэВ,  $A=10.8$  ТэВ,  $\mu=5.5$  ТэВ



$h_1^I$ -alignment limit:  $m_{h_1} = 125$  ТэВ,  $\beta - \alpha \simeq \pi/2$ ,  $c_1 \simeq 0$

Таблица: Параметрические сценарии, удовлетворяющие пределу  $h_1^I$  и предсказания модели

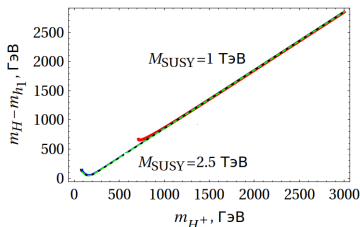
BS	$\text{tg } \beta$	$M_S$ , ТэВ	$A$ , ТэВ	$\mu$ , ТэВ	$m_{H^\pm}$ , ТэВ	$ c_1 $	$a_{33}$	
BS1	5	2.5	5.5	1	$\geq 1$	$\leq 0.01$	0.008	
BS2	10	2.5	5.5	3	$\geq 3$	$\leq 0.01$	0.288	
BS3	10	5	10	1 – 10		$\leq 0.01$	0.026	
					1			$\geq 1$
					10			$\geq 4$
BS4	20	10	28	12	$\geq 3$		0.336	
						3	$\leq 0.1$	
						10	$\leq 0.01$	

Только предел отщепления (decoupling limit). Легких дополнительных скаляров нет.



# Пределы настройки связей $h_i^{\text{II}}$ (СР-нарушение)

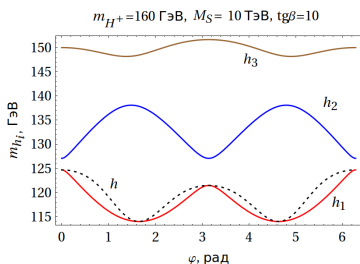
$h_1^{\text{II}}$ -alignment limit:  $m_{h_1}=125$  ГэВ,  $m_H \simeq 125$  ГэВ,  $\text{tg}(\beta - \alpha) \simeq -c_2/c_1$



– наименьшее значение зависимость  $m_H - m_{h_1}$  приобретает при  $m_{H^\pm} \simeq 160$  ГэВ и  $M_{\text{SUSY}} \gtrsim 2$  ТэВ. При больших  $m_{H^\pm}$  величина  $m_H - m_{h_1} \sim \mathcal{O}(1)$  ТэВ;

– зависимость  $m_H - m_{h_1}$  от  $\text{tg} \beta$  существенна: при  $\text{tg} \beta = 5$  минимальное значение порядка 53 ГэВ, при  $\text{tg} \beta = 35$  – порядка 8 ГэВ.

$h_2^{\text{II}}$ -alignment limit:  $m_{h_2}=125$  ГэВ,  $m_h \simeq 125$  ГэВ,  $\text{tg}(\beta - \alpha) \simeq -c_2/c_1$



Предел настройки связей на рис. выполняется при  $\varphi \simeq \pi n$ ,  $n = 0, 1, \dots$  (есть и  $\varphi \neq 0$ )

В  $h_{1,2}^{\text{II}}$ -пределах 152 ГэВ достигается для скаляра  $h_3$

$h_3^{\text{II}}$  не реализуется



В рамках ДДМ типа II и МССМ проанализированы наблюдаемые отклонения в инвариантной массе 28 ГэВ, 96 ГэВ, 152 ГэВ

- в аналитическом виде в рамках ДДМ типа II,
- численно в МССМ.

Наблюдаемый бозон Хиггса ассоциировался со скаляром  $h$  в CP-сохраняющем пределе или с  $h_{1,2}$  случае CP-нарушения.

- Отклонение 28 ГэВ м.б. описано в специальных режимах теории, когда существенными становятся вклады от операторов  $\mathcal{O}(\Phi^6)$ . В МССМ такие режимы нарушают условия стабильности э/сл минимума.
- Отклонение 96 ГэВ может согласовываться с условиями хиггсовского предела настройки связей. В МССМ параметрические режимы нестабильны по отношению к стабильности э/сл минимума
- Отклонение 152 ГэВ может быть ассоциировано со нейтральным хиггсовским бозоном в предположении, что  $m_{H^\pm} \simeq 160$  ГэВ. В рамках МССМ
  - в CP-сохраняющем пределе параметрические режимы нестабильны по отношению к стабильности э/сл минимума,
  - в случае CP-нарушения  $h_{152} = h_3$

