

Современный статус измерений свойств бозона Хиггса в CMS

Вадим Орешкин

Оглавление:

1. краткая история измерений на CMS
2. масса бозона Хиггса
3. ширина распада бозона Хиггса
4. Юкавские вз-я
 1. Хиггс и тау лептон
 2. Хиггс и мюон
 3. Хиггс и очарованный кварк
5. Распад Хиггса на фотон и Z бозон

Введение

- Одна из основных задач физики высоких энергий и эксперимента CMS: экспериментальное обнаружение и исследование свойств бозона Хиггса

- Основные вехи в исследовании:

1. 4 июля 2012 года – объявление об открытии, $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow 4\ell$, 5σ , $m_h = 125.3 \pm 0.6 \text{ GeV}$, <https://indico.cern.ch/event/197461/>

2. $L = 10 \text{ fb}^{-1}$

- масса, спин, CP (2013-2015)

3. $L = 25 \text{ fb}^{-1}$

- рождение ggH , VBF (2013-2014)
- распад: $\gamma\gamma$, ZZ, WW (2013-2014)
- ширина (время жизни), fiducial xsec

4. $L = 36 \text{ fb}^{-1}$

- рождение ttH (2016-2017)
- распад: $H \rightarrow \tau\tau$
- STXS, стадия 0,1

5. $L = 80 \text{ fb}^{-1}$

- рождение VH
- распад: bb (первое наблюдение)
- $H \rightarrow \tau\tau$ (дифф сечение и анализ CP)

6. $L = 140 \text{ fb}^{-1}$

- $H \rightarrow \mu\mu$ (2021)
- $H \rightarrow Z\gamma$ (2022)
- $H \rightarrow c\bar{c}$ (2022)

10th anniversary of the Higgs boson discovery

<https://indico.cern.ch/event/1135177/timetable/>

Monday

Jul 4, 2022

1. Масса **Phys. Lett. B 805 (2020), 135425**, 35.9 fb^{-1}

2. спин, чётность, $J^{PC}=0^{++}$ **PRD 92 (2015) 012004**, $5.1 \text{ fb}^{-1} + 19.7 \text{ fb}^{-1}$

3. взаимодействие с калибровочными бозонами

- (HWW) **Phys. Lett. B 791 (2019), 96**

4. Юкавские вз-я с

1. тау лептоном **Phys. Lett. B 779 (2018), 283-316**

2. топ кварком, **Phys. Rev. Lett. 120 (2018) no.23, 231801**

3. b-кварком **Phys. Rev. Lett. 121 (2018) no.12, 121801**

2018 - a major milestone: 1) tau 2) top (ttH), 3) bottom,

Основные моды рождения бозона Хиггса

Nature 607 (2022) 60

μ - модификатор силы сигнала:
для рождения и распада

$$\mu_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_i^{SM}}$$

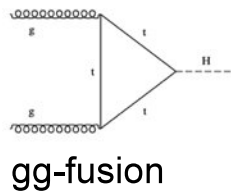
$$\mu^f = \frac{\mathcal{B}^f}{\mathcal{B}_{SM}^f}$$

$$\mu_i^f = \frac{\sigma_i \times BR_f}{(\sigma_i \times BR_f)_{SM}}$$

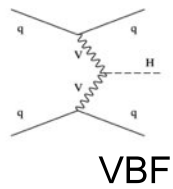
допущение narrow width approximation is valid (production/decay decoupled)

1. основные 5 мод рождения бозона Хиггса наблюдаются со стат. значимостью $> 5\sigma$
2. они составляют 99% от всех рождений при 13 ТэВ

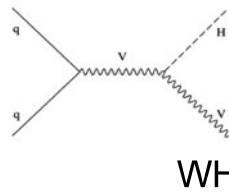
87.2%



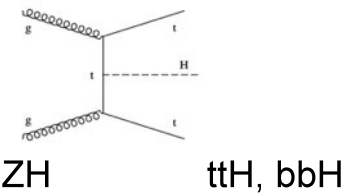
6.8%



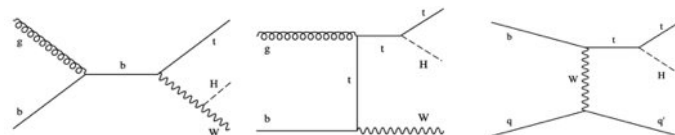
2.5%



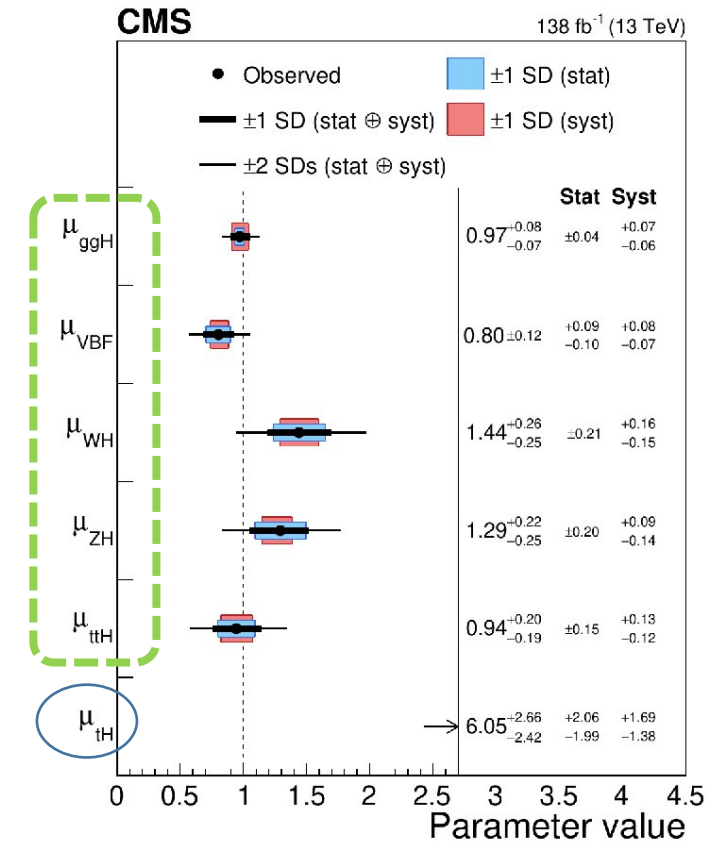
0.9%



tH



0.2%



Основные каналы распада бозона Хиггса

μ - модификатор силы сигнала:
для рождения и распада

$$\mu_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_i^{SM}}$$

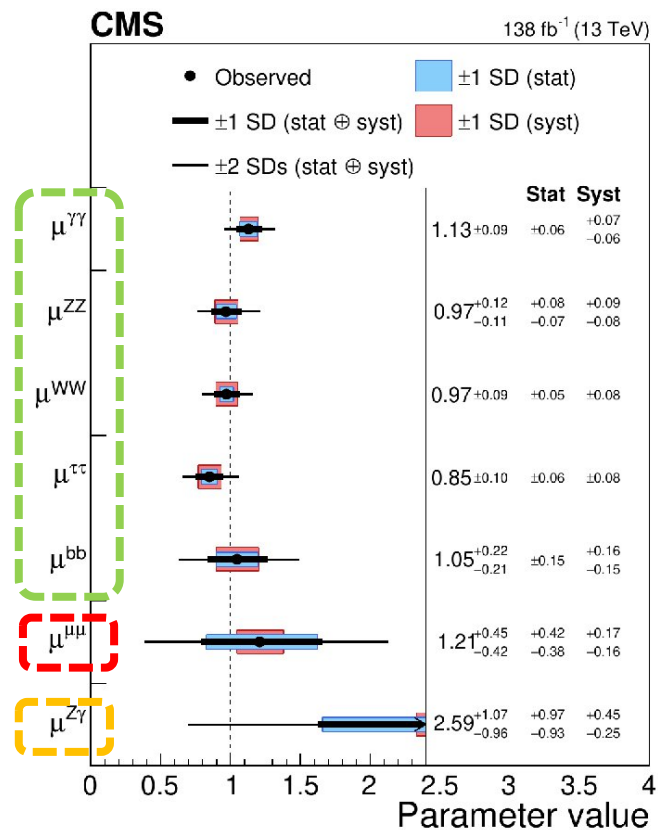
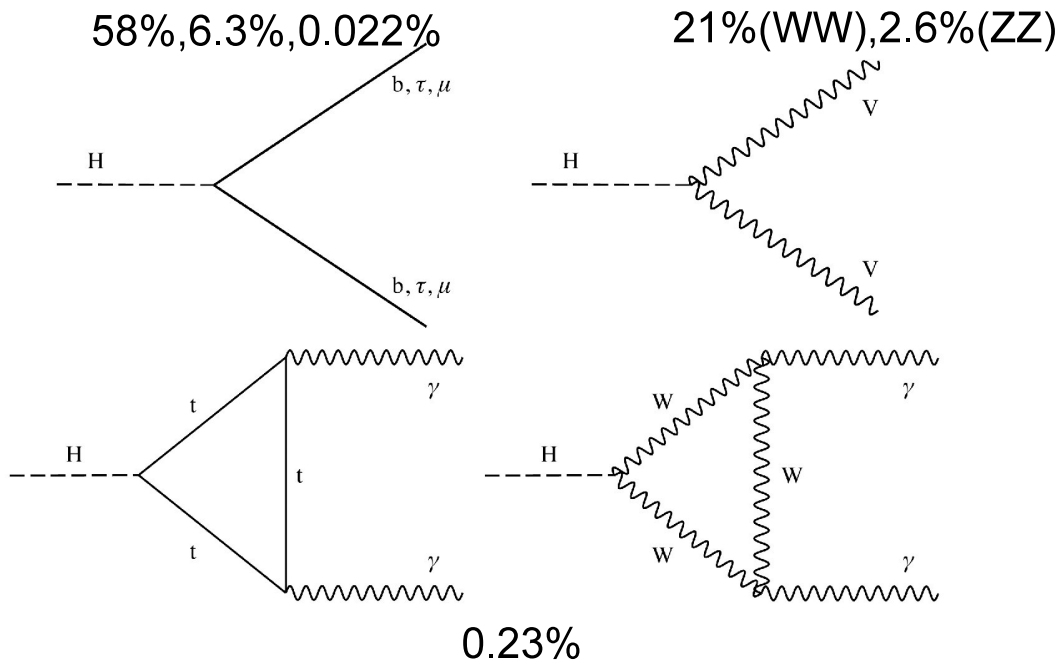
$$\mu^f = \frac{\mathcal{B}^f}{\mathcal{B}_{SM}^f}$$

$$\mu_i^f = \frac{\sigma_i \times BR_f}{(\sigma_i \times BR_f)_{SM}}$$

- 5 основных каналов распада
наблюдены с 5σ
- хорошее согласие с SM
- они составляют 90% от полной
ширины бозона Хиггса при 13 ТэВ

Nature 607 (2022) 60

моды распада



первое изм-е с
стат знач. 3σ

первое изм-е с
стат знач. 2.7σ ,
превышение

Масса бозона Хиггса

CMS:

$\gamma\gamma$ вместе с 4ℓ : $m_H = 125.46 \pm 0.13 \pm 0.13$ GeV (36/fb)

- $\gamma\gamma$: $m_H = 125.78 \pm 0.18(\text{stat}) \pm 0.18(\text{syst})$ GeV **PLB 805 (2020) 135425**
- 4ℓ : $m_H = 125.26 \pm 0.20(\text{stat}) \pm 0.08(\text{syst})$ GeV **JHEP 11 (2017) 047**

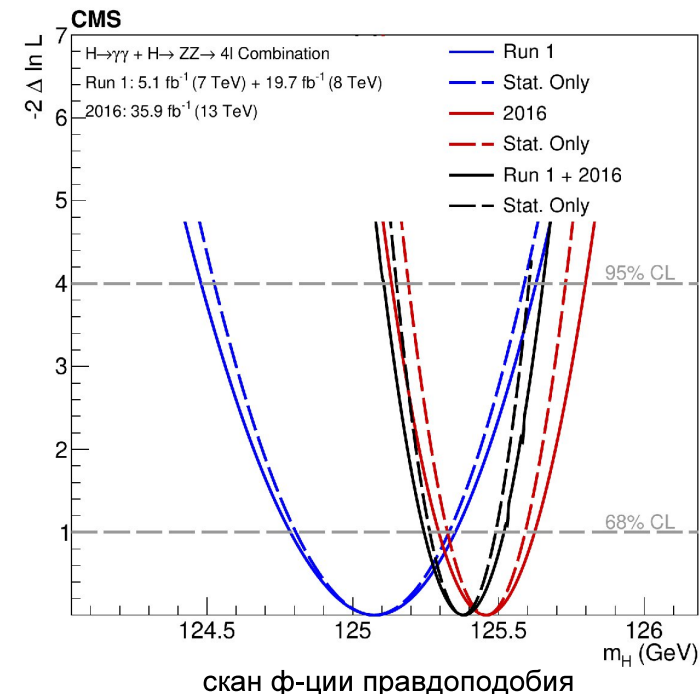
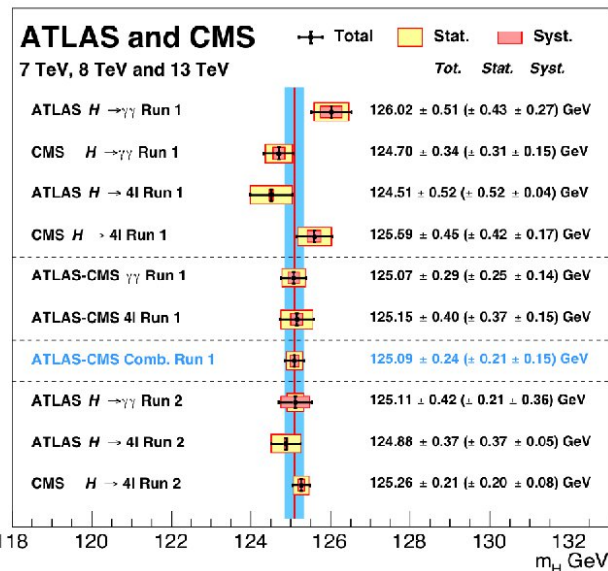
- два основных канала
- их стат. погрешности похожи по величине
- для канала $\gamma\gamma$, систематические неопределенности становятся ограничивающим фактором

проекция на Run-3, 2023 год:
ожидается точность <100 МэВ,
проекция на HL-LHC < 20 МэВ
CMS PAS FTR-21/007, 21/008

для сравнения. результат из Run1
комбинация ATLAS+CMS:

$\gamma\gamma + 4\ell$ $m_H = 125.09 \pm 0.21 \pm 0.11$ GeV (Run1)

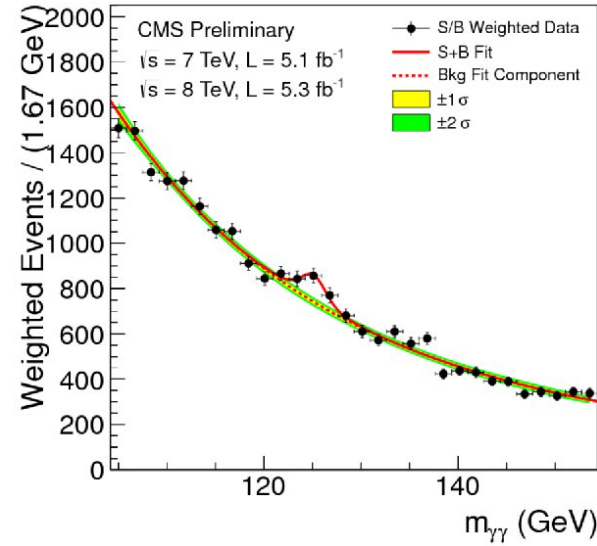
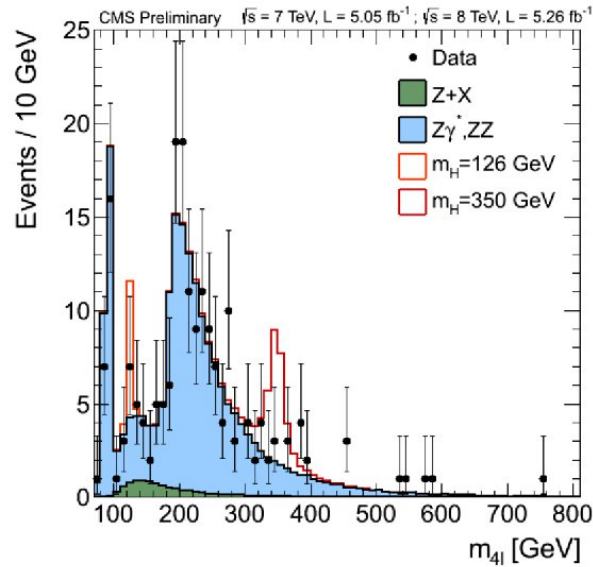
PRL 114 (2015) 191803



1. fits of per-event m_H , δm_H and event classifier (S/B)
2. ℓ calibration from J/ψ or $Z \rightarrow \ell\ell$
3. γ calibration from $Z \rightarrow e e$

Масса бозона Хиггса

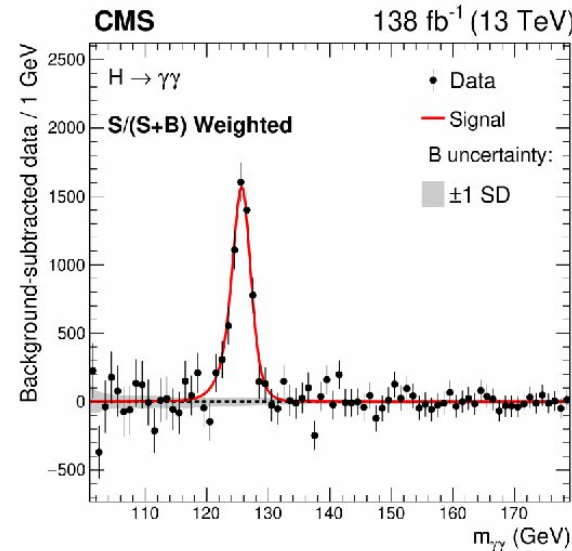
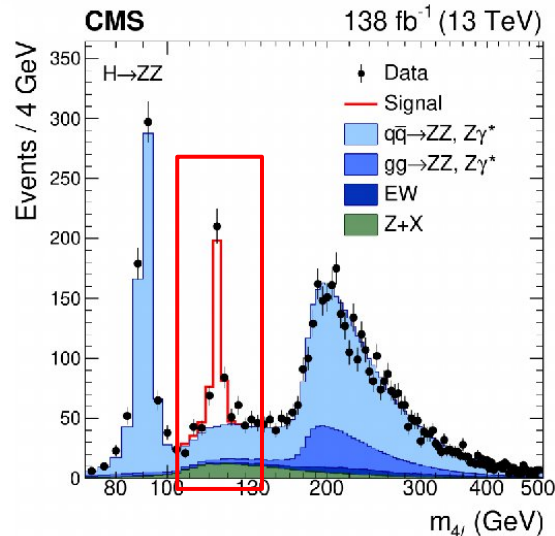
$H \rightarrow 4\ell$



$H \rightarrow \gamma\gamma$

$$m_H = 125.3 \pm 0.6 \text{ GeV}$$

только ~ 4000 событий с Хиггс бозоном внесло в вклад в наблюдение



самая высокая точность измерения массы.

Спустя 10 лет: в 30 раз больше бозонов Хиггса

$$m_H = 125.46 \pm 0.13 \pm 0.13 \text{ GeV}$$

Nature 607 (2022) 60-68

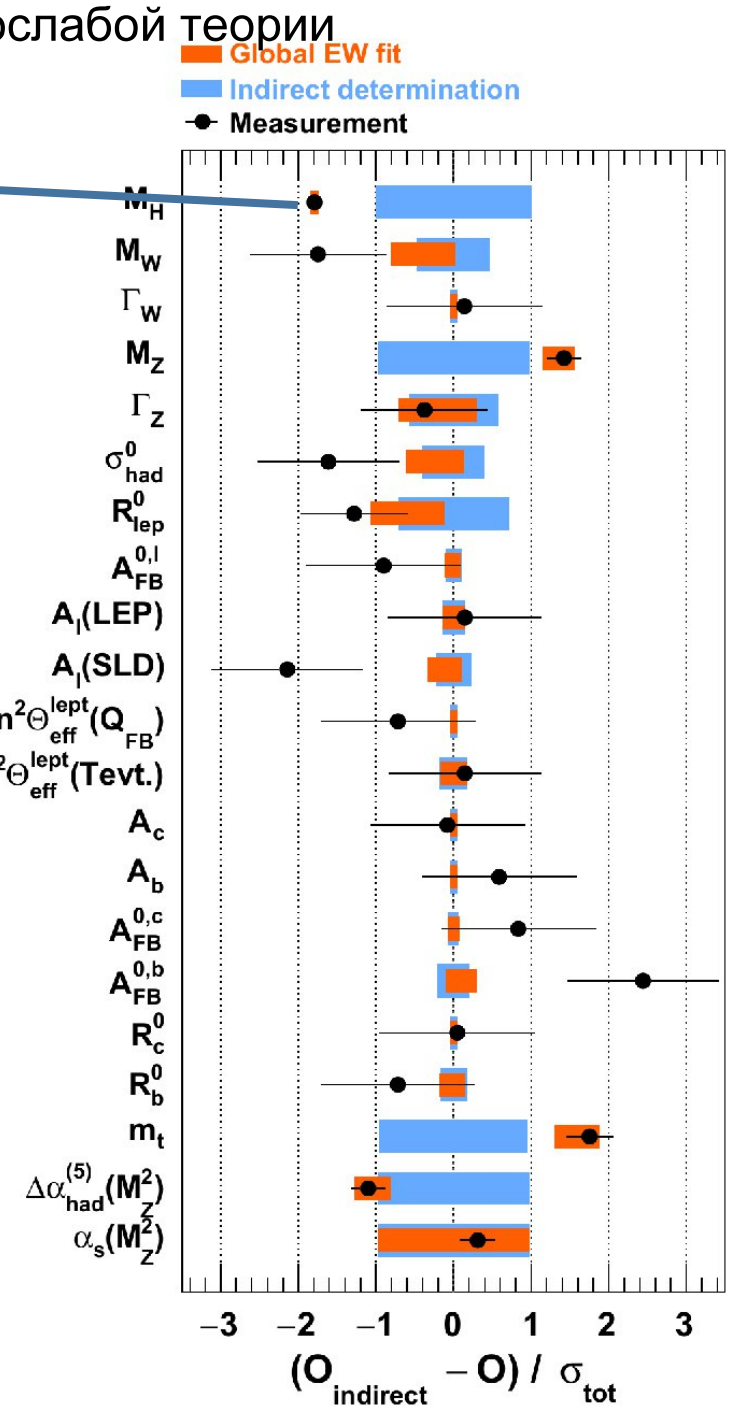
Неопределённость m_H мала по сравнению с неопределённостью других параметров стандартной модели

улучшение точности m_H не влияет существенно на новый фит Gfitter

Eur.Phys.J.C 78 (2018) 8, 675

$$m_H = 125.1 \pm 0.2$$

сравнение результата фита Gfitter и эксп. измерений в единицах полной погрешности

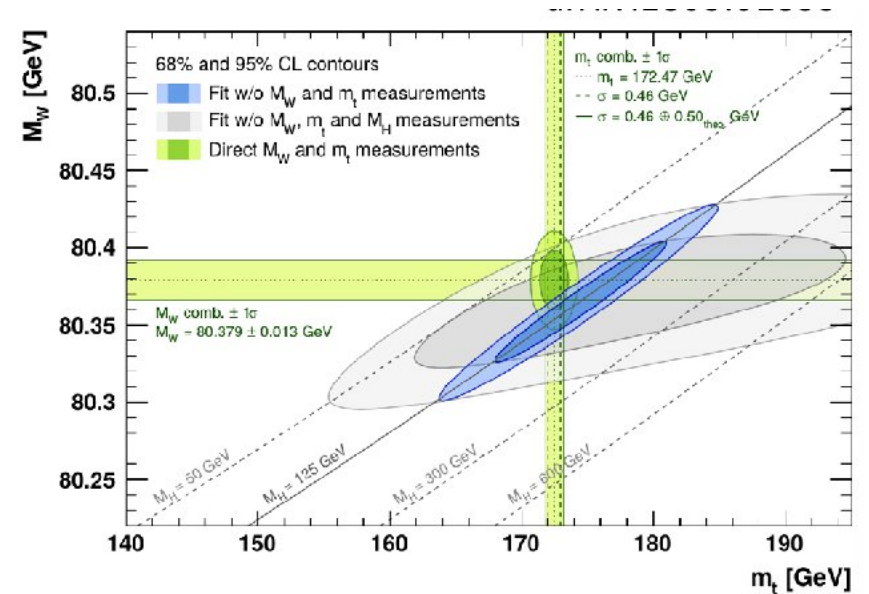


место массы бозона Хиггса в глобальных фитах электрослабой теории

измерение массы Хиггс бозона, вместе с массой топ кварка и W бозона это важный тест СМ

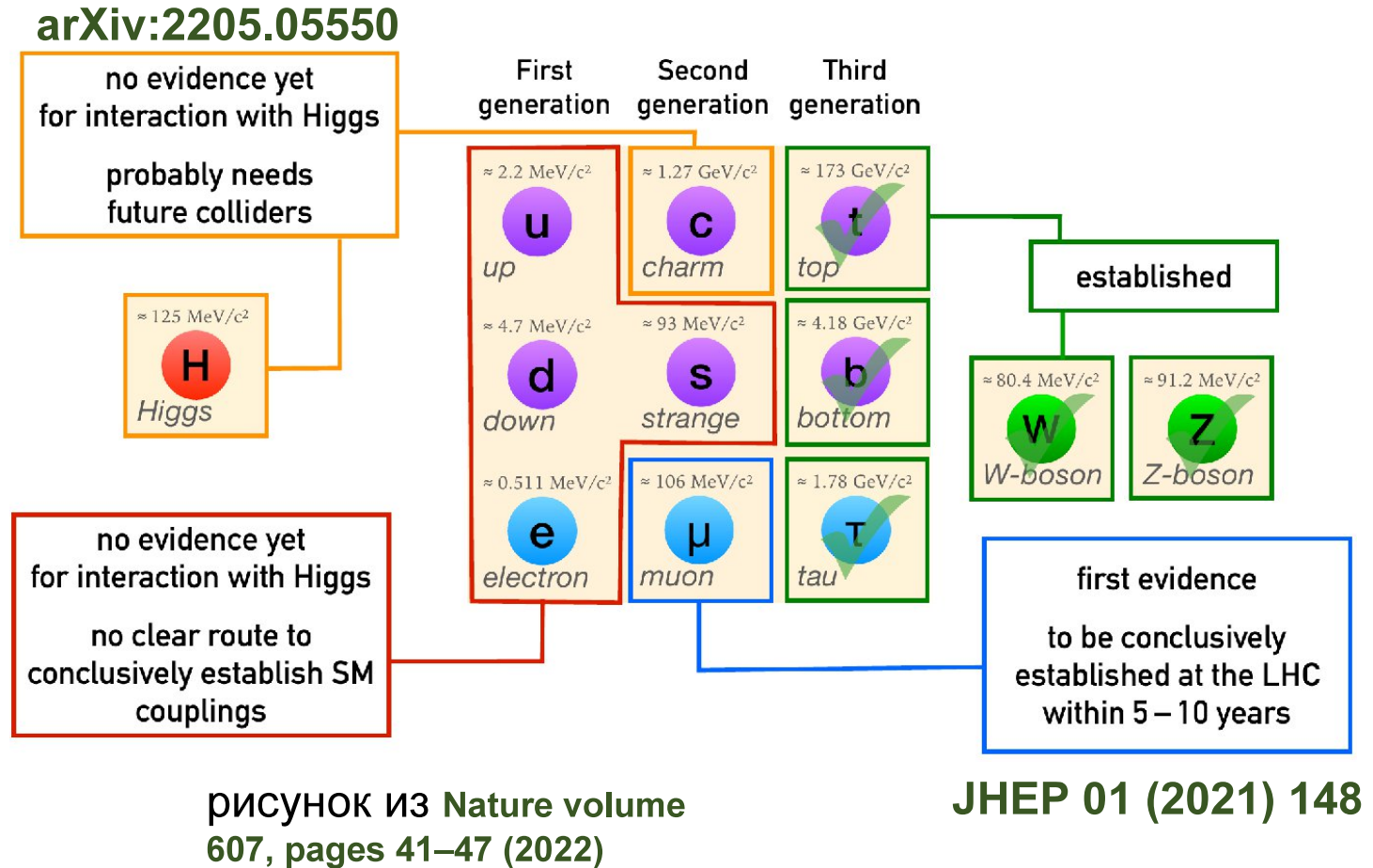
насколько самосогласована стандартная модель на масштабе электрослабого вз-я:

1. p -value сейчас около 0.22 (согласно вычислениям 2018 проекта **GFitter** (http://project-gfitter.web.cern.ch/project-gfitter/Standard_Model/)).
 p -value 0.34 (**GFitter** 2022 года)
 2. - если бы масса Хиггс-бозона была бы 300 ГэВ, то значение было бы $3 \cdot 10^{-5}$
 - если исключить m_H из глобального фита, то $m_H = 90 \pm 21$ GeV
1. насколько тонко подстроены поправки в массе?
 2. насколько стабилен вакуум при данных значениях массы Хиггса, массы топ кварка



Взаимодействие с фермионами:

1. $L = 10 \text{ fb}^{-1}$
 - масса, спин, CP
2. $L = 25 \text{ fb}^{-1}$
 - рождение ggH , VBF
 - распад: $\gamma\gamma$, ZZ , WW
 - ширина (время жизни), fiducial σ_{H}
3. $L = 36 \text{ fb}^{-1}$
 - рождение $t\bar{t}H$
 - распад: $H \rightarrow \tau\tau$
 - STXS, стадия 0,1
4. $L = 80 \text{ fb}^{-1}$
 - рождение VH
 - распад: bb (первое наблюдение)
 - $H \rightarrow \tau\tau$ (дифф сечение и анализ CP)
5. $L = 140 \text{ fb}^{-1}$
 - $H \rightarrow \mu\mu$ (2021)
 - $H \rightarrow Z\gamma$ (2022)
 - $H \rightarrow cc$ (2022)



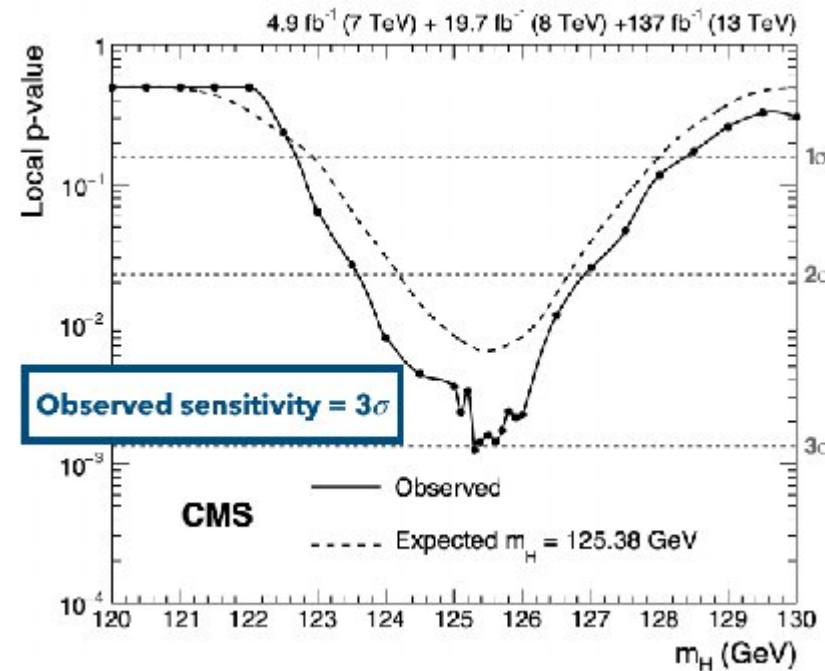
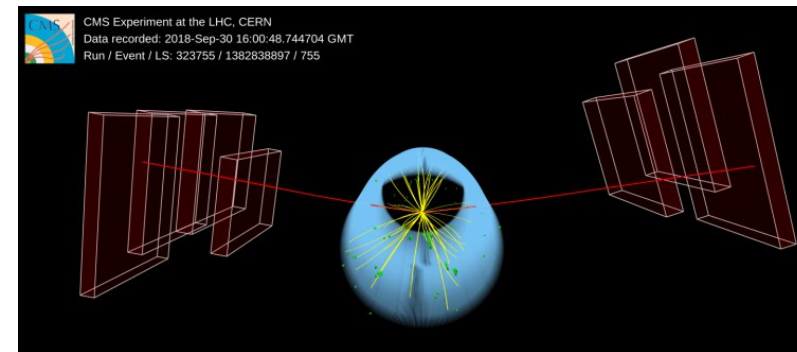
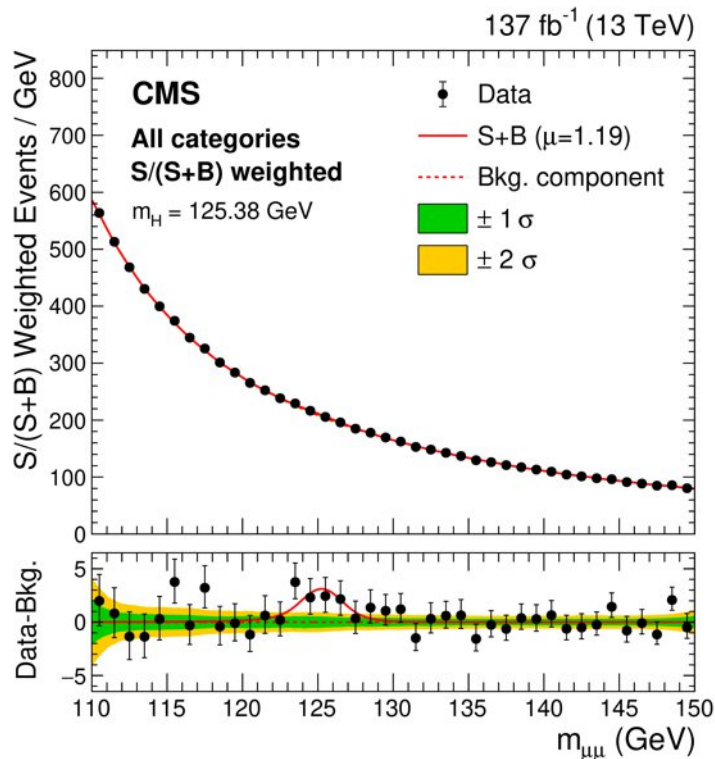
наличие двух мюонов:

1. prompt
2. изолированных
3. противоположные заряды
4. инв масса $\sim m_H$

стат. значимость: 3σ
 сила сигнала: 1.2 ± 0.4

– была необходима полная статистика Run-2 $\sim 137 \text{ фб}^{-1}$

чтобы достичь стат. значимости 5σ , нужно в 4 раза больше данных. Run3 обещает 300 фб^{-1}



$$\kappa_j^2 = \sigma_j / \sigma_j^{\text{SM}} \quad \text{or} \quad \kappa_j^2 = \Gamma^j / \Gamma_{\text{SM}}^j$$

$$\kappa_H^2 = \sum_j \text{BR}_{\text{SM}}^j \kappa_j^2 \quad \Gamma_H = \frac{\kappa_H^2 \cdot \Gamma_H^{\text{SM}}}{1 - \text{BR}_{\text{BSM}}}$$

для тяжелых калибровочных бозонов

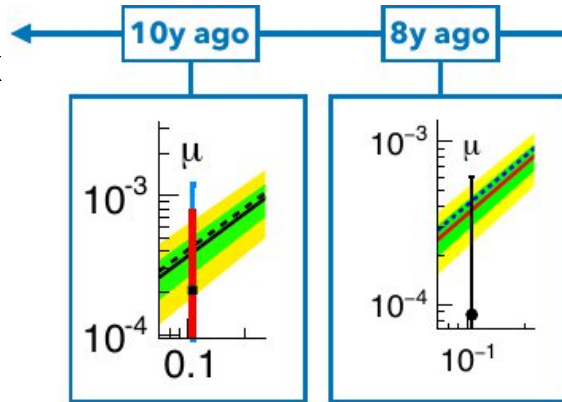
- κ_W, κ_Z

$$g_V = 2 \frac{m_V^2}{v}$$

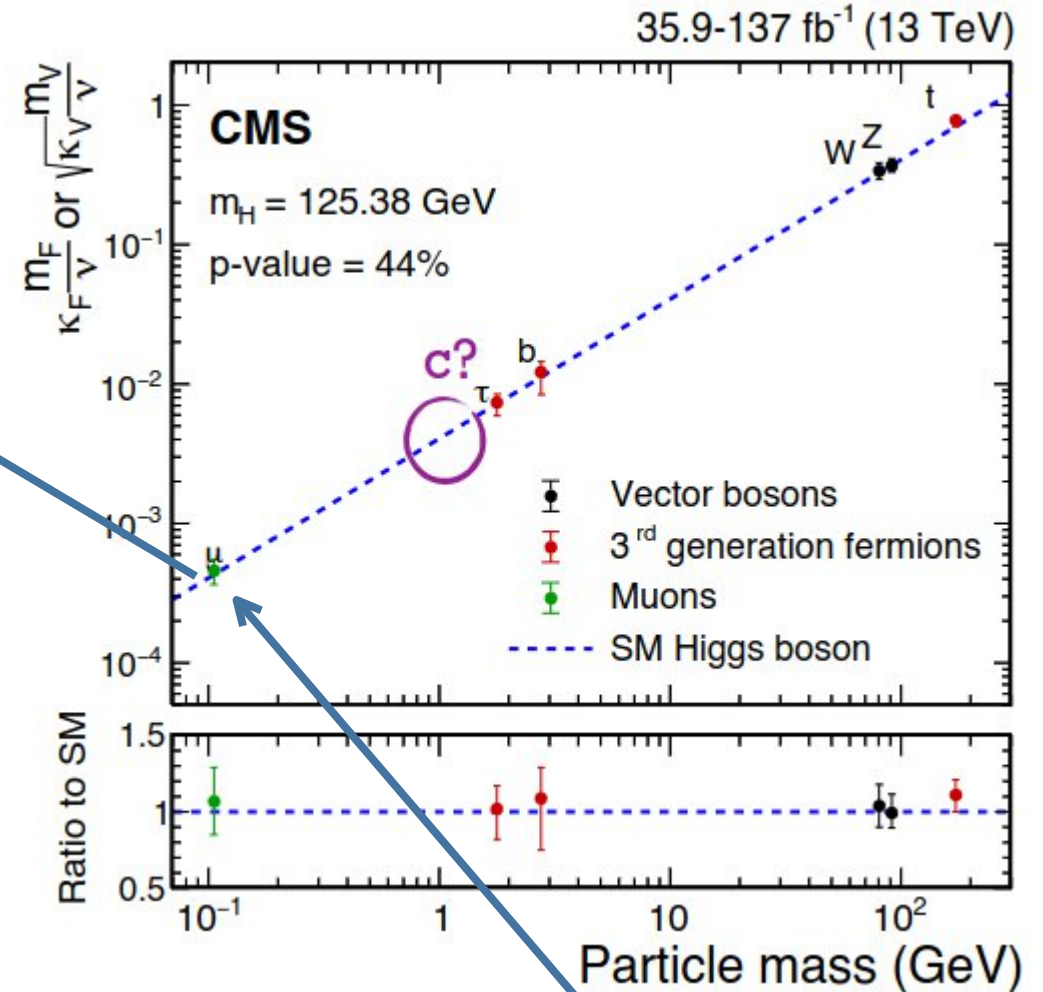
для фермионов

- $\kappa_t, \kappa_b, \kappa_\tau, \kappa_\mu$

$$g_F = \sqrt{2} \frac{m_f}{v}$$



проверка линейной зависимости вз-я фермионов (юкавского вз-я) и тяжелых калибровочных бозонов



линейная зависимость подтверждается на протяжении 4 порядков величины κ

ещё на один порядок больше!

Взаимодействие бозона Хиггса с очарованными кварками $H \rightarrow c + \bar{c}$

arXiv:2205.05550, HIG-21-012

c-струи трудны для таггирования:
 1. и не легкие
 2. и не тяжёлые (как b)
нужно различать от обоих!

новые алгоритмы для таггирования чарм-струй:
 DeepAK15 -> **ParticleNet**:
 - идентификация струй
 - измерение их массы
 Dynamic Graph Convolutional Neural Network
 - неупорядоченное облако

раньше считалось, что для наблюдения требуется ee или ep коллайдер

чтобы получить 3σ - в 100 раз больше данных

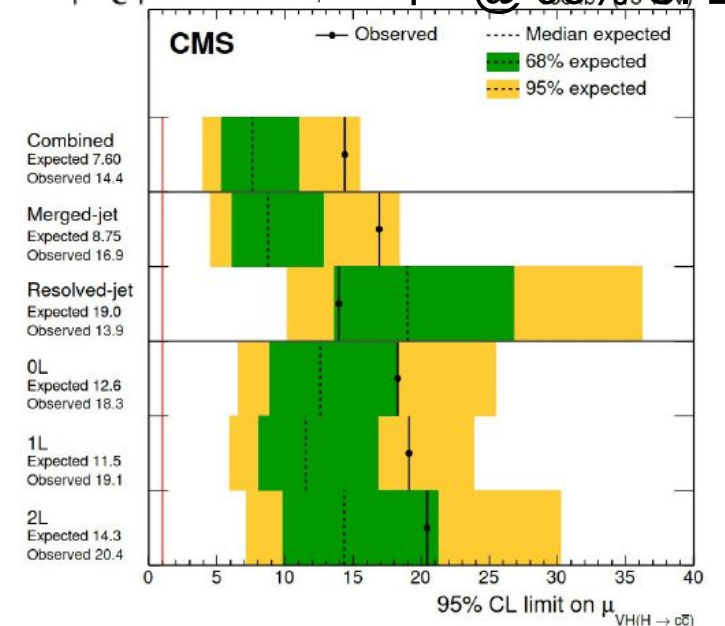
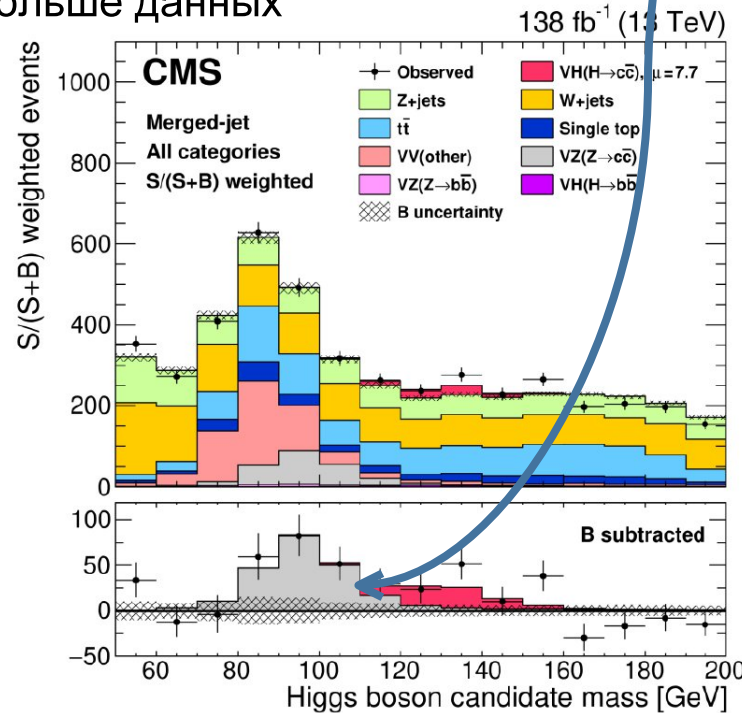
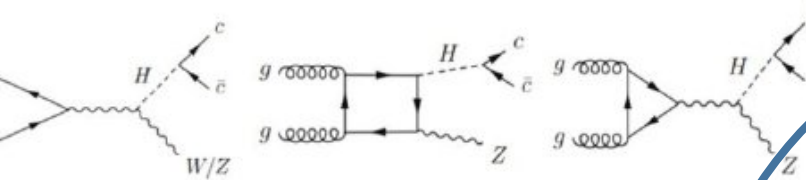
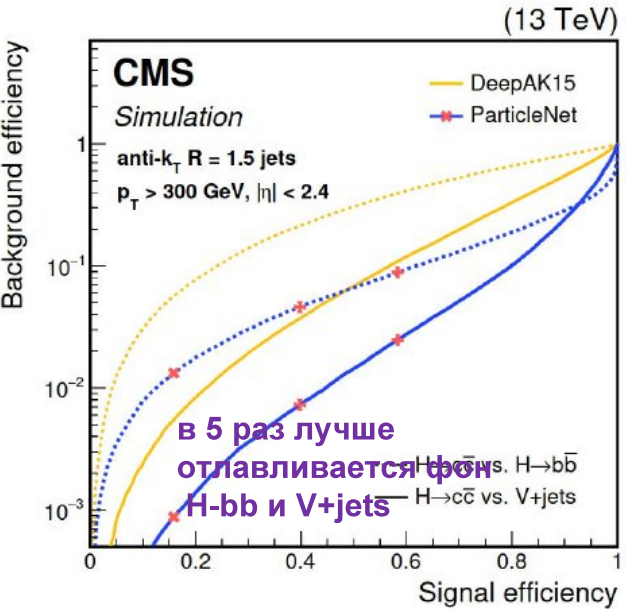
валидация метода: **первое** наблюдение $VZ(cc)$ на адронном коллайдере (5.7σ)

$$\mu_{VZ(Z \rightarrow c\bar{c})} = 1.01^{+0.23}_{-0.21}$$

самое лучше $VH(H \rightarrow c\bar{c})$
 ограничение до сих пор

$$1.1 < |\kappa_c| < 5.5 \text{ obs.}$$

$$|\kappa_c| < 3.40 \text{ exp. @ 95\% C.L.}$$



эффективность таггирования чарм-струй (**ParticleNet**)

распределение массы Хиггс-кандидата

сила сигнала: $\mu = 7.7 \pm 3.7$
 $\mu_{VH(H \rightarrow c\bar{c})} < 14 (7.6) @ 95\% CL$

Взаимодействие с тау лептонами

1. Юкавское вз-е с тау- одно из первых
наблюденных CMS, **Phys. Lett. B 779**
(2018), 283-316

13 ТэВ. 35.9 fb⁻¹

2018 важный этап, 5.9σ

(до этого ATLAS+CMS, конце Run-2)

2. Спустя 4 года: первое измерение
фидуциального и дифференциальных
сечений. **Phys. Rev. Lett. 128 (2022)**
081805

13 TeV, 138 fb⁻¹

426 ± 102 fb, (SM prediction of 408 ± 27 fb)

3. **arXiv:2110.04836**

Поиск нарушения CP четности:

$$\mathcal{L}_{H\tau\tau} = -\frac{m_\tau}{\nu} \kappa_\tau \left(\underbrace{\cos \phi_\tau \bar{\tau}\tau}_{\text{чётн}} + \underbrace{\sin \phi_\tau \bar{\tau}i\gamma_5\tau}_{\text{нечётн}} \right) H$$

1 ± 19° (21° exp), чистый CP-нечётн исключён с 3σ

04/04/2023

DeepTau: алгоритм использующий CMS-DP-2019-033

- convolutional Neural Network
- комбинирует информация как от
 - реконструированного тау-лептона
 - так и низкоуровневую информацию из внутреннего трэкера, калориметров, и мюонных детекторов

Конечные состояния $\tau_\mu\tau_h$ and $\tau_h\tau_l$

$$\tau_\mu \rightarrow \mu^\pm \nu \nu (17\%)$$

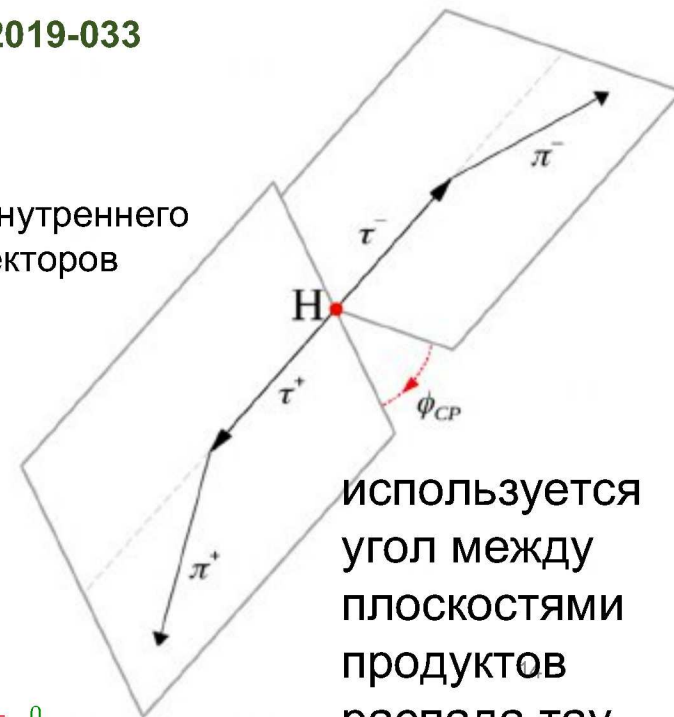
$$\tau_h \rightarrow \pi^\pm \nu (12\%)$$

$$\rightarrow \rho^\pm \nu \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \nu (26\%)$$

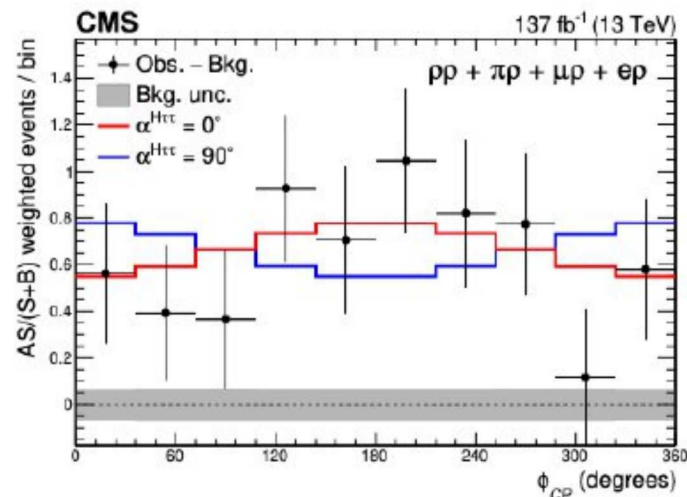
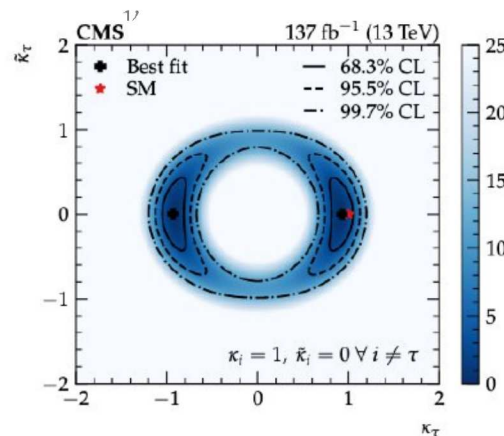
$$\rightarrow a_1^\pm \nu \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0 \nu (10\%)$$

$$\rightarrow a_1^\pm \nu \rightarrow \pi^\pm \pi^\pm \pi^\mp \nu (10\%)$$

остальные к.с. не исп. - смазан спин. корр.



$$H \rightarrow \tau_h \tau_h \rightarrow (\rho^+ \nu)(\rho^- \nu) \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^- \pi^0 \nu$$



Взаимодействие с топ-кварком

ttH самый недавно наблюдаемая мода рождения Хиггса, **Phys. Rev. Lett. 120 (2018) no.23, 231801**

PRL 125 (2020) 061801

$$\mu = 1.38 \pm 0.33, 6.6\sigma$$

$ttH, H \rightarrow \gamma\gamma$

EPJC 81 (2021) 378

$$\mu = 0.92 \pm 0.33, 4.7\sigma$$

$ttH, (H \rightarrow WW/ZZ/\tau\tau) \rightarrow leptons$

$$\mathcal{L}_{t\bar{t}H} = -\kappa'_t y_t \phi \bar{\psi}_t (\text{чётн} + i\gamma_5 \text{нечётн}) \psi_t$$

чётн

нечётн

Использованы конечные состояния:

$pp \rightarrow ttH \rightarrow (j\bar{j}b)(j\bar{j}b)(\gamma\gamma)$ [адронное]

$pp \rightarrow ttH \rightarrow (l\nu b)(j\bar{j}b)(\gamma\gamma)$ [лулептонное]

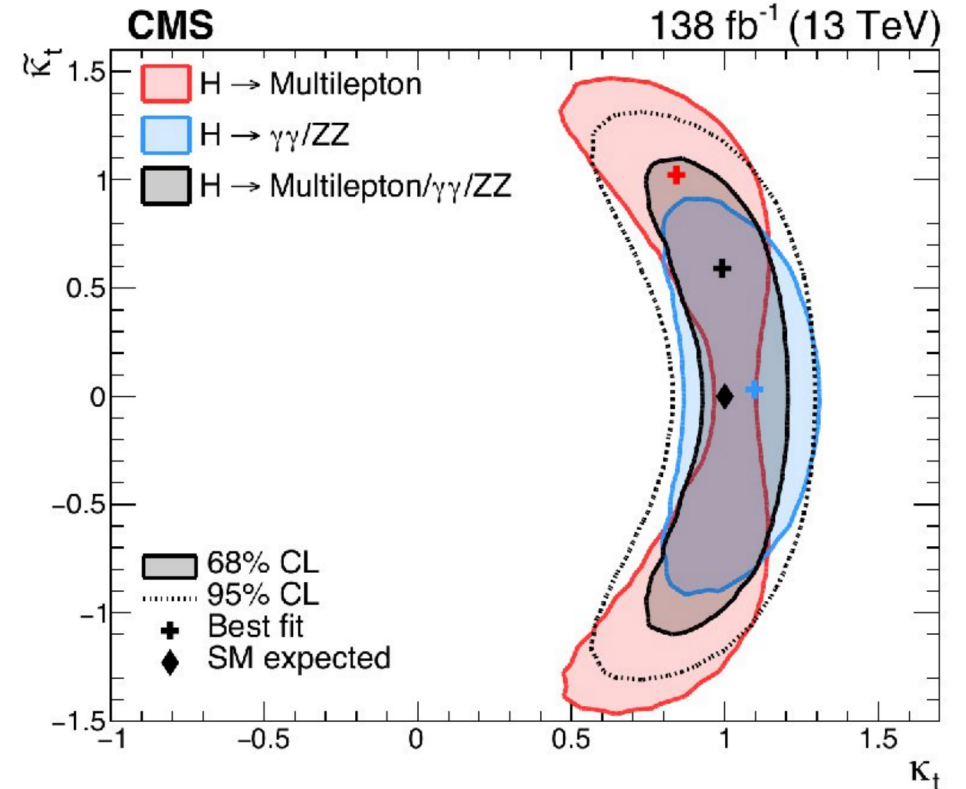
BDT дискриминант, натренирован на двух моделях:

- CP-even
- CP-odd

PRL 125 (2020)061801 $\gamma\gamma$

<https://arxiv.org/abs/2208.02686>,

CMS-PAS-HIG-21-006 (2022) $\gamma\gamma+ZZ+\text{multileptons}$

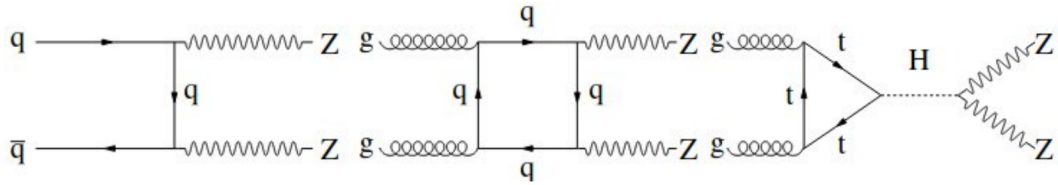


$$f_{CP}^{Htt} = \frac{\tilde{\kappa}_t^2}{\tilde{\kappa}_t^2 + \kappa_t^2} \quad |f_{CP}^{Htt}| = (\sin \alpha)^2$$

$$|f_{CP}^{Htt}| = 0.28 (< 0.55 \text{ at } 1\sigma)$$

чистый CP-нечётн исключён с 3.7σ

Измерение ширины распада бозона Хиггса: рождение вне массовой поверхности



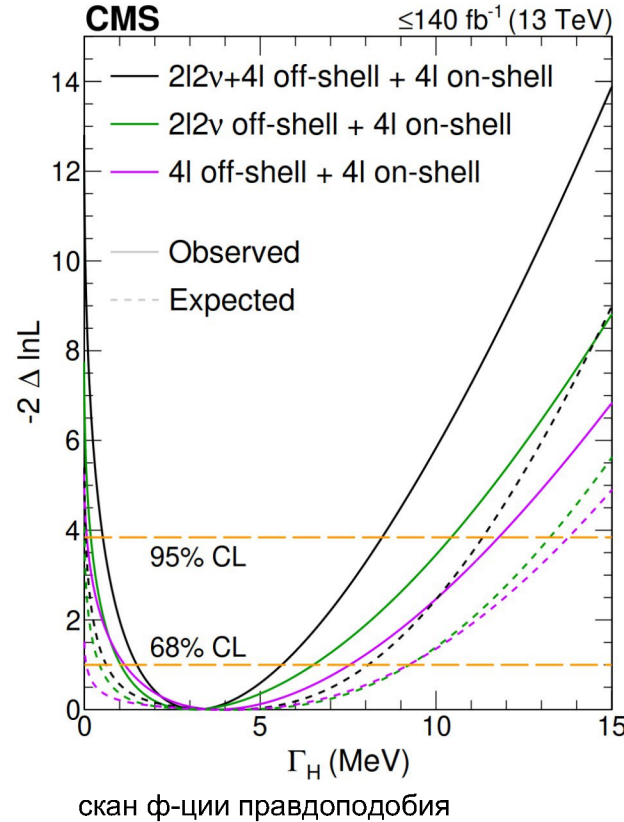
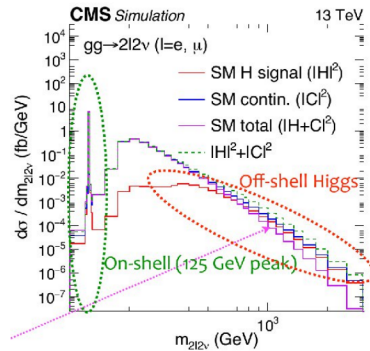
измерение ширины (arxiv:2202.06923)

- рождение вне массовой поверхности
- стат. значимость 3.6σ (p value=0.003) рождения вне массовой поверхности

$$\Gamma_H = 3.2^{+2.4}_{-1.7} \text{ MeV}$$

- в согласии с предсказанием СМ: 4.1 MeV

- сильная деструктивная интерференция с фоном (нерезонантным рождением ZZ)



Nat. Phys. 18 (2022) 1329

$$\sigma_{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^*}^{\text{on-shell}} \sim \frac{g_{ggH}^2 g_{HZZ}^2}{m_H \Gamma_H}$$

$$\sigma_{gg \rightarrow H^* \rightarrow ZZ}^{\text{off-shell}} \sim \frac{g_{ggH}^2 g_{HZZ}^2}{(2m_Z)^2}$$

пропагатор:

$$\frac{1}{(m^2 - m_H^2)^2 + \Gamma_H^2 m_H^2}$$

допущение:

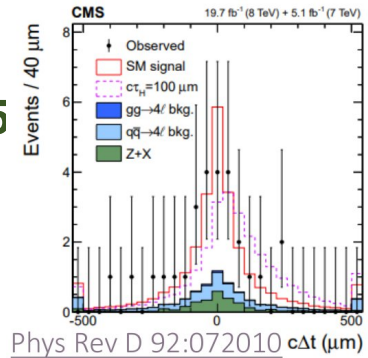
- off-shell и on-shell взаимодействия одинаковы!

Измерение ширины будет использовано впоследствии для определения ограничений на B_{inv} and B_{undet} без использования ограничений на k_W и k_Z .

Альтернативные методы измерения ширины бозона Хиггса

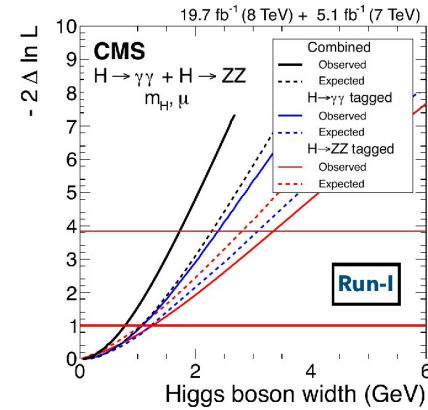
- альтернативный методы
- осн. на времени пролёта (Phys. Rev. D 92, 072010 (2015))

$$\Gamma_H < 46 \text{ MeV}$$



Прямое измерение (on-shell)

- ширина пика вблизи мас. пов-ти:
- разрешение > ширины 1 ГэВ > 4 МэВ
- $\Gamma_H < 1.1 \text{ ГэВ}$

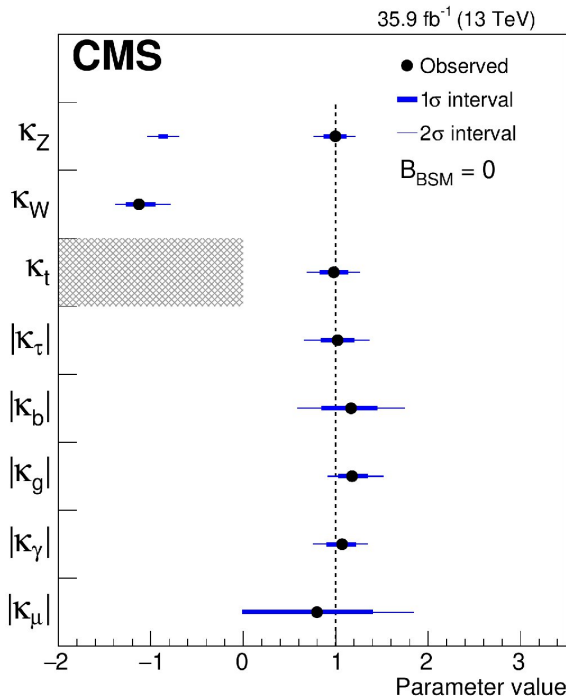


Eur. Phys. J. C 79 (2019) 421

$H \rightarrow ZZ, WW, \gamma\gamma, \tau\tau, bb, \text{ and } \mu\mu$

Измерение ширины распада бозона Хиггс из фита в kappa-framework

по сравнению с предыдущим методом: $\frac{\Gamma_H}{\Gamma_H^{\text{SM}}} = \frac{\kappa_H^2}{1 - (\mathcal{B}_{\text{undet}} + \mathcal{B}_{\text{inv}})}$ $\Gamma_{\text{tot}} = \Gamma_{\text{WW}} + \Gamma_{\text{ZZ}} + \Gamma_{\text{bb}} + \dots + \Gamma_{\text{BSM}}$



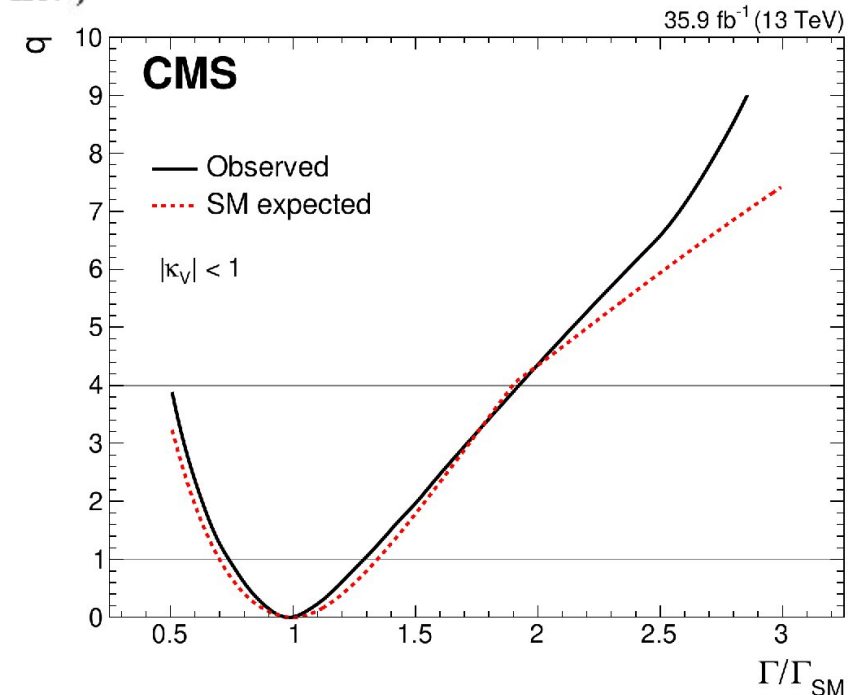
Допущения:

$$|\kappa_W|, |\kappa_Z| \leq 1$$

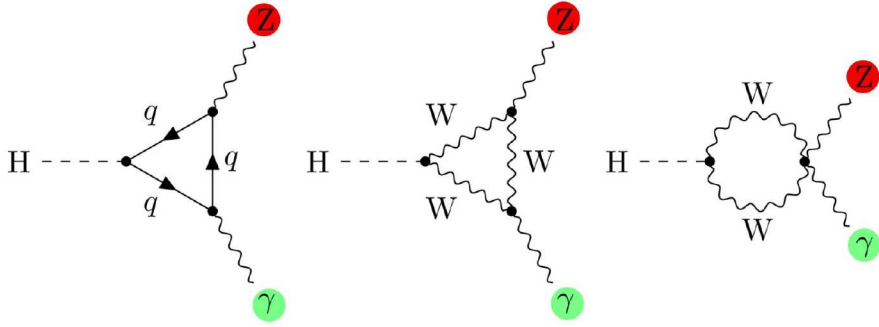
чтобы избежать вырождения фитирования:
когда все kappa просто домножаются на 1
множитель \mathcal{B}_{inv}

$$\Gamma_H / \Gamma_H^{\text{SM}} = 0.98^{+0.31}_{-0.25}$$

$$\Gamma_H = 4.0^{+1.3}_{-1.0} \text{ MeV}$$



$$H \rightarrow Z\gamma$$

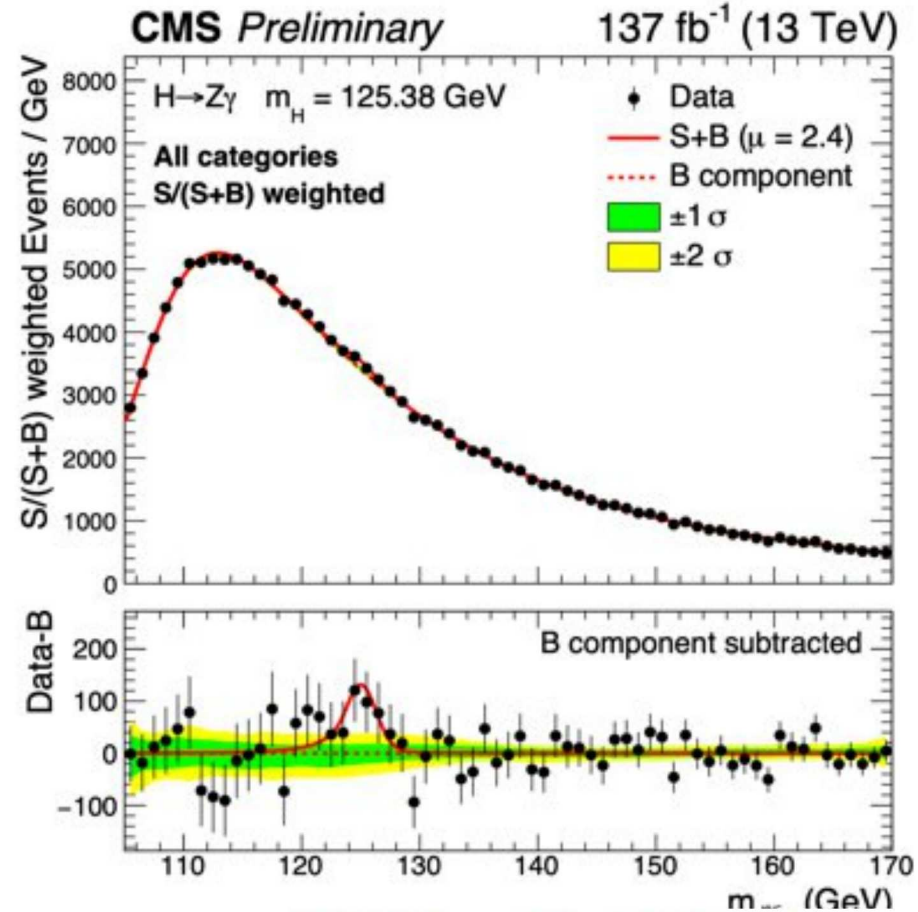


1. два prompt лептона с инв. массой $\sim m_Z$
2. моды рождения: VBF, VH, ttH, ggF
3. поиск маленького пика в спектре инв. массы двух лептонов

стат. значимость: 2.7σ
 сила сигнала: $\mu = 2.4 \pm 0.9$
 (есть избыток, но все-таки в согласии с SM в пределах погрешности)

в допущении Хиггса в рамках SM, нужно в 20 раз больше данных для статзначимости 5σ

в лидирующем приближении только петлевые диаграммы: чувствительность к физике за пределами SM.



отношение $BR(H \rightarrow Z\gamma)/BR(H \rightarrow \gamma\gamma)$ $1.5^{+0.7}_{-0.6}$,
 чувствительно к новой физике

Заключение

1. Спустя 10 лет свойства бозона Хиггса были основательно изучены в эксперименте CMS
2. Недавние анализы дают рекордную точность измерений таких свойств бозона Хиггса как масса, ширина, а также CP свойства вз-ий благодаря изм. диф. сечений. А также наблюдают процессы, которые раньше невозможно было измерить
3. Большое кол-во анализов осталось «за кадром» этой презентации
 1. вз-е с калибровочными бозонами и его CP
 2. проверка LFU ($H \rightarrow e\tau, e\mu, \mu\tau$)
 3. tH, ttH invisible decay
 4. Hbb
 5. STXS
 6. поиск аномальных взаимодействий (EFT)
 7. поиск ограничений на самодействие бозона Хиггса

Спасибо за внимание

курс LIP по Хиггсу: 4 лекции по ~70 слайдов: <https://indico.lip.pt/event/1181/timetable/#11-higgs-physics-1>