

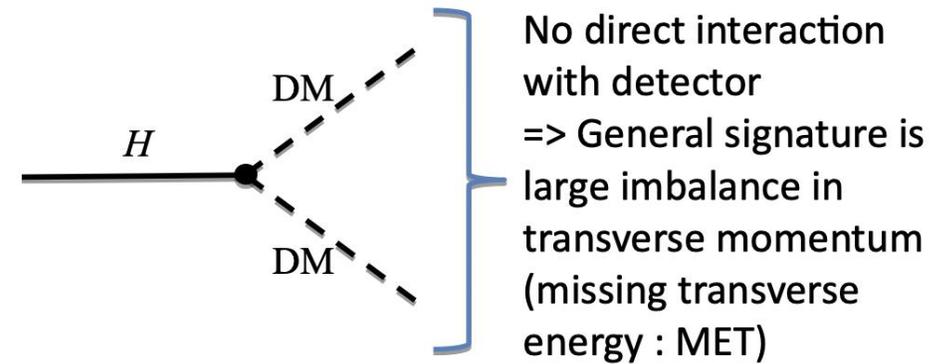
# Последние результаты поисков распада бозона Хиггса на частицы темной материи в эксперименте ATLAS

Марина Покидова,  
ЛАФ ОФВЭ ПИЯФ, СПбПУ



# Введение

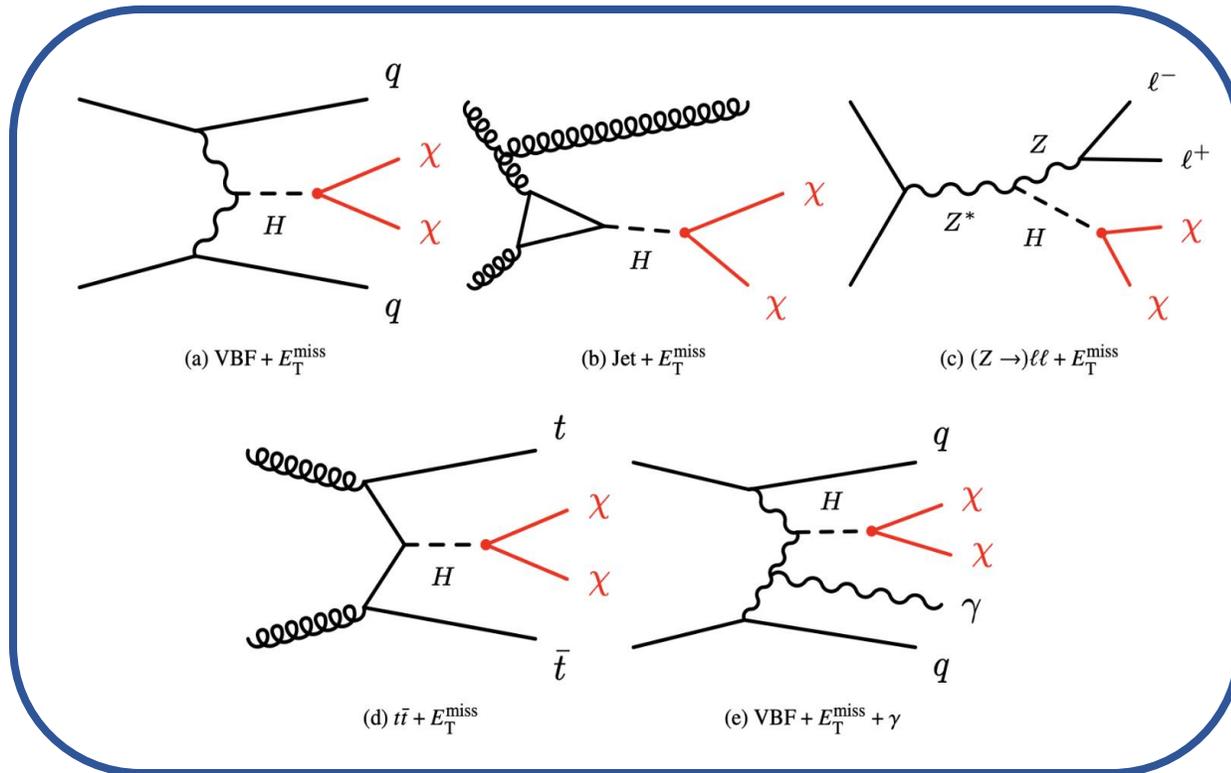
- В рамках СМ предсказывается  
«невидимый распад»  $BR(H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\nu) \sim$   
**0.1%**
- Модели невидимого распада, где бозон Хиггса действует как частица-посредник между частицами ТМ и частицами СМ называются “порталом Хиггса”



Модели «Портала Хиггса» лежат в основе исследований по поиску  $H \rightarrow inv$  в экспериментах ATLAS и CMS на БАК

# Поиск $H \rightarrow inv$ в эксперименте ATLAS

Последние исследования по поиску  $H \rightarrow inv$  в эксперименте ATLAS были проведены с использованием данных за Run-2 ( $L \sim 139 \text{ fb}^{-1}$ )



- $VBF + MET$
- $MET + Z(\ell\ell)$
- $t\bar{t} + MET$
- $VBF + MET + \gamma$
- $monojet$

Подробнее: [Phys. Lett. B 842 \(2023\) 137963](#)

# Результаты $H \rightarrow inv$ поиска в эксперименте ATLAS для Run2

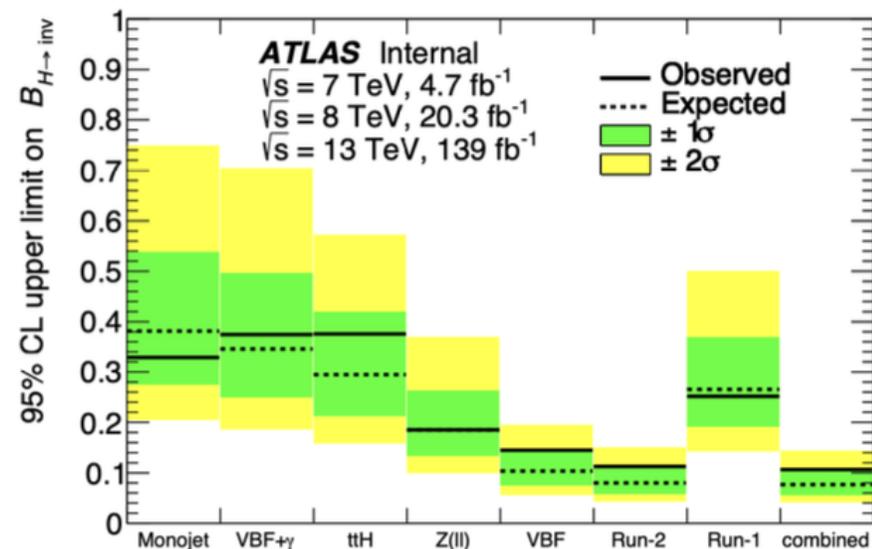
- Значения верхнего предела на вероятность  $H \rightarrow inv$  представлено для всех каналов, Run 1, Run 2 и их комбинации

$B(H \rightarrow inv) < 10.7$  (7.7) % при 95% CL

- Полученные ограничения являются наиболее жесткими на данный момент

Подробнее: [Phys. Lett. B 842 \(2023\) 137963](#)

Results	Expected	+1 $\sigma$	-1 $\sigma$	+2 $\sigma$	-2 $\sigma$	Observed
Jet + $E_T^{\text{miss}}$	0.381	0.538	0.275	0.749	0.205	0.329
VBF + $E_T^{\text{miss}} + \gamma$	0.346	0.497	0.249	0.704	0.186	0.375
$t\bar{t}$	0.295	0.420	0.212	0.573	0.158	0.376
$(Z \rightarrow \ell\ell) + E_T^{\text{miss}}$	0.185	0.263	0.133	0.370	0.099	0.185
VBF + $E_T^{\text{miss}}$	0.104	0.144	0.075	0.195	0.056	0.145
Run-1	0.265	0.370	0.191	0.501	0.142	0.252
comb. Run2	0.080	0.111	0.058	0.151	0.043	0.113
combined	0.077	0.107	0.055	0.144	0.041	0.107



# $H \rightarrow inv$ при рождении в слиянии векторных бозонов (VBF+MET)

Самым «чувствительным» процессом рождения бозона Хиггса для  $H \rightarrow inv$  является VBF+MET канал

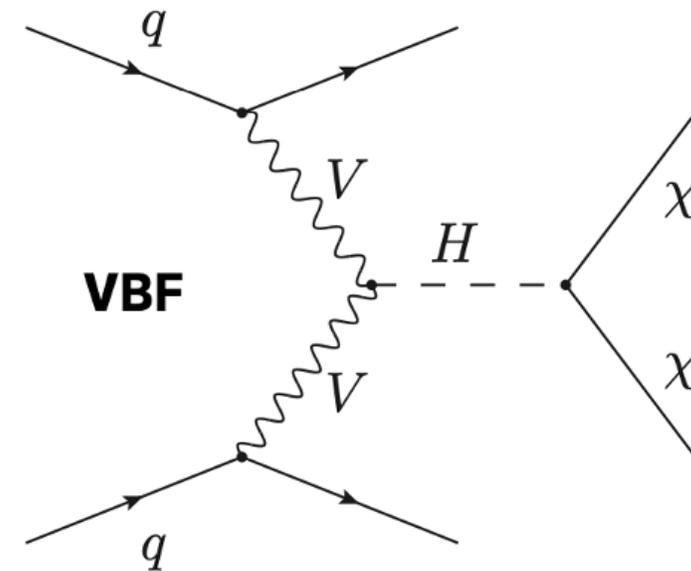
В обоих экспериментах нет статистически значимого отклонения от прогнозов СМ

## ATLAS Run2:

- $B(H \rightarrow inv) < 0.145$  (0.103) при 95% CL

## CMS Run2:

- $B(H \rightarrow inv) < 0.17$  (0.11) при 95% CL



# $H \rightarrow \nu\nu$ при рождении в слиянии векторных бозонов (VBF+MET)

В VBF+MET анализе исследуемое конечное состояние  $H \rightarrow \nu\nu$  характеризуется двумя струями с большим разделением по псевдобыстроте и большой инвариантной массой двух струй и  $E_T^{miss}$ .

## VBF topology

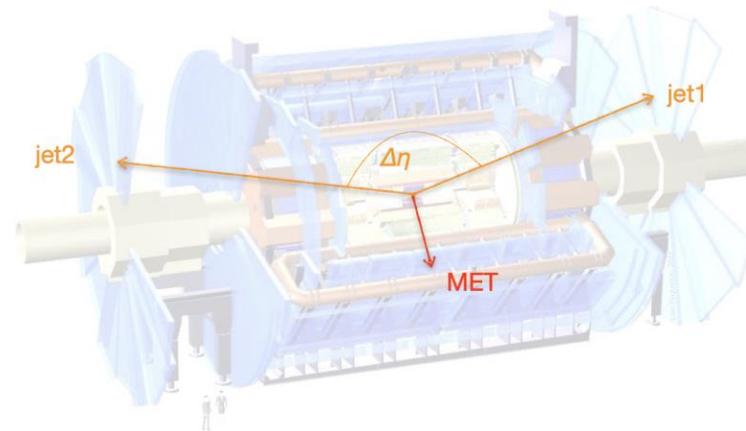
- Two jets with  $p_T(j1/j2) > 80/50$  GeV
- Small add. jet activity:  $p_T(j3) < 25$  GeV ...  
3 or 4 jets, if compatible with FSR
- Jets in opposite hemispheres
- $\Delta\eta(jj) > 3.8$
- $m(jj) > 0.8$  TeV

## EWK suppression

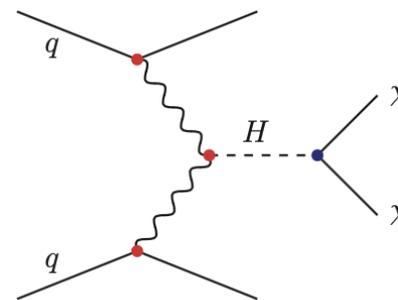
- Lepton (electron and muon) veto

## Multijet suppression

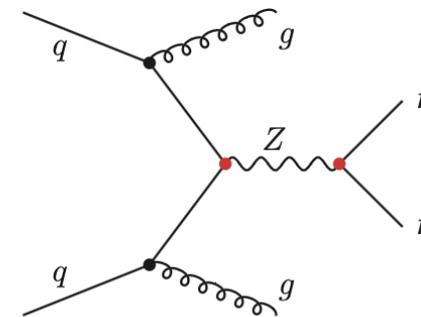
- MET > 160 GeV
- $\Delta\Phi(jj) < 2.0$



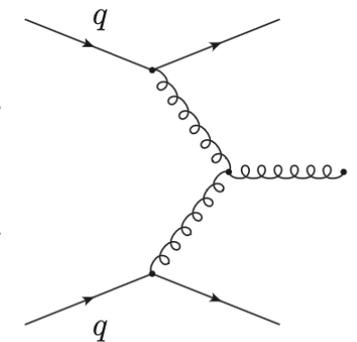
## Signal



## V+jets



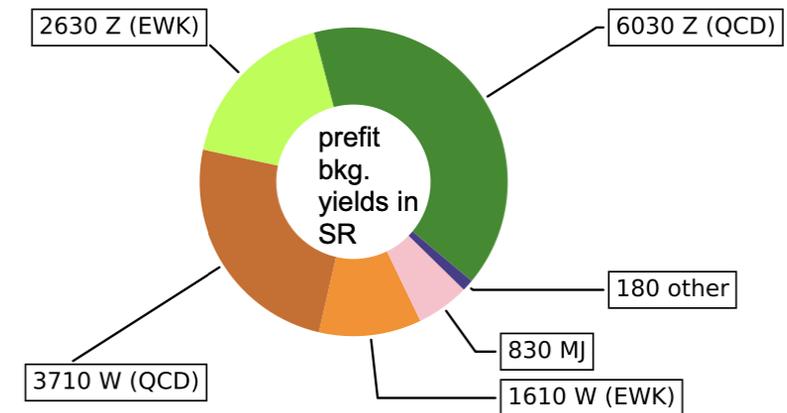
## Multijet



# $H \rightarrow inv$ при рождении в слиянии векторных бозонов (VBF+MET)

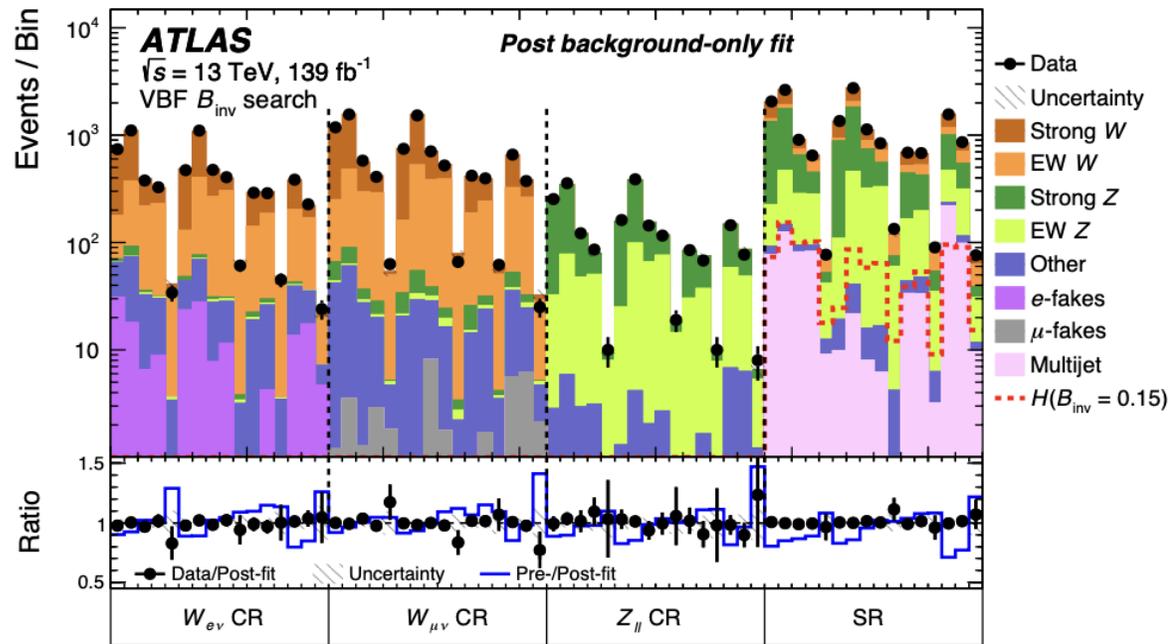
- Хорошее разделение фоновых и сигнальных событий – разделение SR на 16 категорий. CR заданы отдельно для методов оценки фоновых событий.
- $V+jets$  фоновые процессы составляют около 95% фоновых событий в SR, их вклад оценивается с помощью выделенных контрольных областей.
- Меньший вклад обусловлен многоструйными (*Multijet*) процессами и оценивается data-driven методами.
- Незначительный вклад от  $tt^-$ ,  $VV$ ,  $VVV$  оценивается с помощью MC моделирования.

$N_{jet}=2 \text{ \& } MET>200 \text{ GeV}$				
$\Delta\phi_{jj}<1$ $0.8<m_{jj}<1$ bin1	$\Delta\phi_{jj}<1$ $1<m_{jj}<1.5$ bin2	$\Delta\phi_{jj}<1$ $1.5<m_{jj}<2$ bin3	$\Delta\phi_{jj}<1$ $2<m_{jj}<3.5$ bin4	$\Delta\phi_{jj}<1$ $3.5<m_{jj}$ bin5
$1\leq\Delta\phi_{jj}<2$ $0.8<m_{jj}<1$ bin6	$1\leq\Delta\phi_{jj}<2$ $1<m_{jj}<1.5$ bin7	$1\leq\Delta\phi_{jj}<2$ $1.5<m_{jj}<2$ bin8	$1\leq\Delta\phi_{jj}<2$ $2<m_{jj}<3.5$ bin9	$1\leq\Delta\phi_{jj}<2$ $3.5<m_{jj}$ bin10
$N_{jet}>2$ $MET>200 \text{ GeV}$		$N_{jet}>2$ $\Delta\phi_{jj}<2$ $1.5<m_{jj}<2$ bin11	$N_{jet}>2$ $\Delta\phi_{jj}<2$ $2<m_{jj}<3.5$ bin12	$N_{jet}>2$ $\Delta\phi_{jj}<2$ $3.5<m_{jj}$ bin13
$N_{jet}=2$ $160<MET<200 \text{ GeV}$		$\Delta\phi_{jj}<2$ $1.5<m_{jj}<2$ bin14	$\Delta\phi_{jj}<2$ $2<m_{jj}<3.5$ bin15	$\Delta\phi_{jj}<2$ $3.5<m_{jj}$ bin16

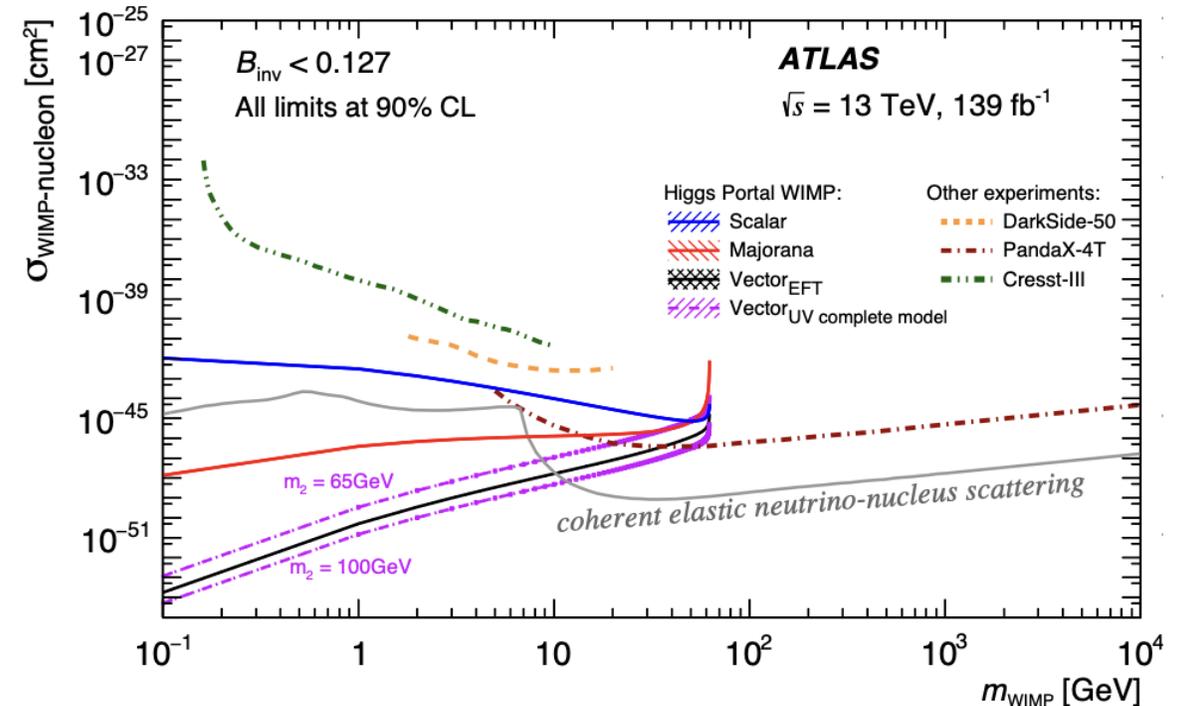


# Результаты $H \rightarrow inv$ поиска VBF+MET в эксперименте АТЛАС для Run2

- Нет значительного отклонения от прогнозов СМ.
- $B(H \rightarrow inv) < 0.145$  ( $0.103$ ) при 95% CL



- SR и все CR области после фитирования

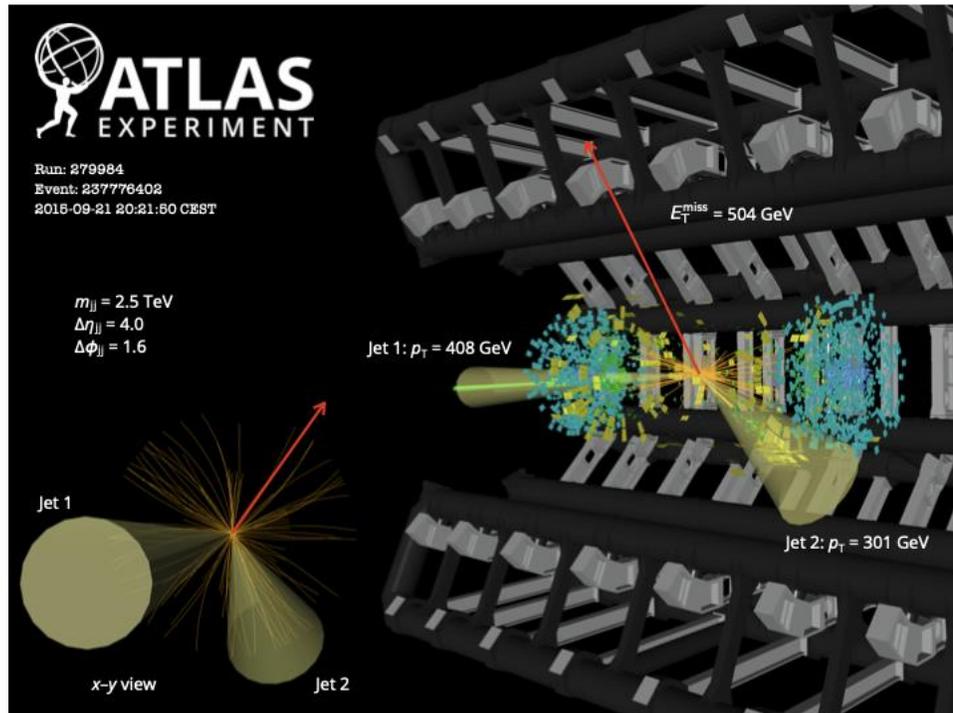


- Верхние пределы спин-независимого поперечного сечения WIMP–нуклона с использованием интерпретаций портала Хиггса  $B_{inv}$  для 90% CL в зависимости от  $m_{\text{WIMP}}$

# Планы Run3 $H \rightarrow \text{inv}$ поиска в эксперименте АТЛАС

- В Run3 энергия центра масс достигла 13.6 ТэВ  $\rightarrow$  увеличение статистики
- Исследования в процессах, которые были статистически ограничены (такие как VBF+MET, monoZ, tt+MET и VBF+MET+gamma), могут достигнуть большую чувствительность
- В некоторых процессах, рассмотренных в Run2 продолжают исследования, с использованием частичных данных Run3

# Планы $H \rightarrow inv$ поиска VBF+MET в эксперименте АТЛАС



- Анализ для комбинации данных Run2 + частично Run3
  - Оптимизация отбора фоновых процессов и оценка вклада фоновых процессов с помощью методов машинного обучения (MVA/ML подходов)
  - Сравнение экспериментальных данных с предсказаниями СМ
  - Определение более точных верхних пределов на ширину распада  
 $\text{BR}(H \rightarrow inv)$  в VBF+MET канале (pyhf)

# Оптимизация отбора событий с помощью MVA/ML подходов

Классификатор на основе ML-фреймворка TMVA root для оптимизации критериев отбора сигнальных и фоновых событий

- Сигнал:  $VBF H \rightarrow inv$ ,
- Фоновые процессы:
  - $W strong$
  - $Z strong$
  - $W EWK$
  - $Z EWK$
  - $Multijet$
  - $другие (singletop, ttbar, etc)$
- Метод ускоренного дерева решений (BDT) с использованием GradBoost (AdaBoost, DNN)

*in progress*

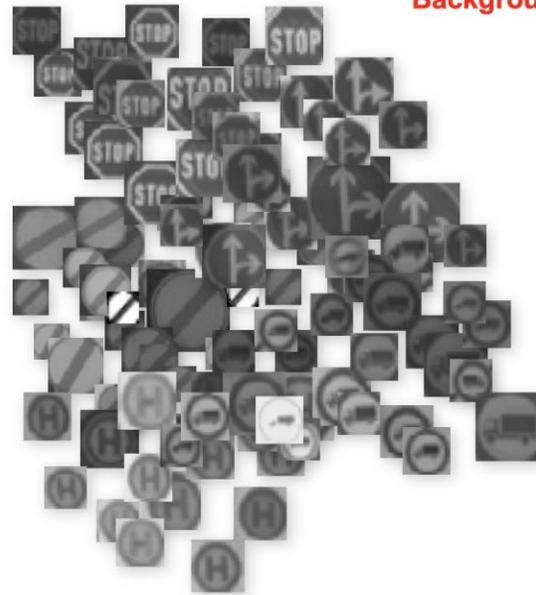
# Оптимизация отбора событий с помощью MVA/ML подходов

Для данных исследований используется метод BDT с Gradient Boosting

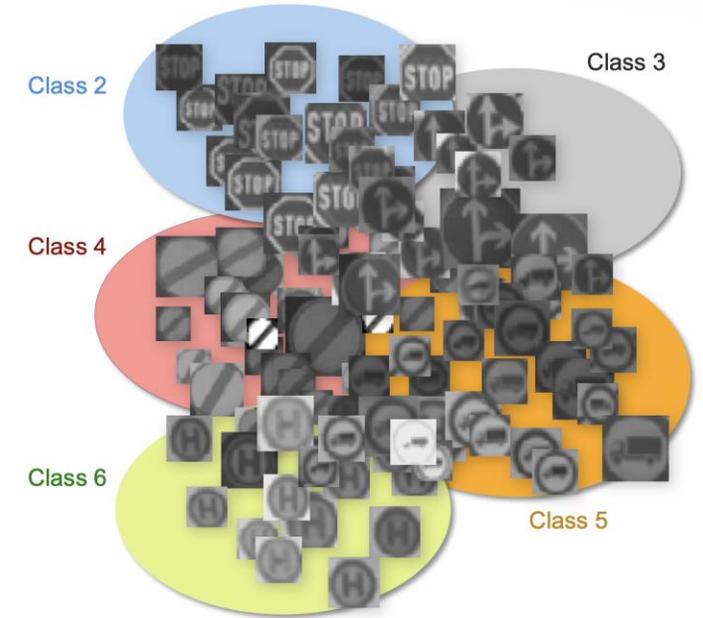
Signal



Background



Class 1



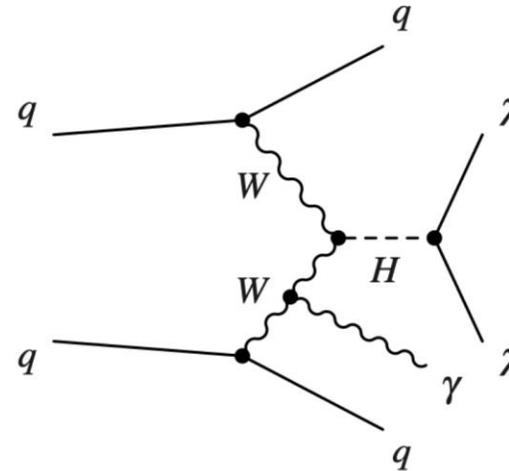
- Бинарная классификация (S/B) с BDTG

*in progress*

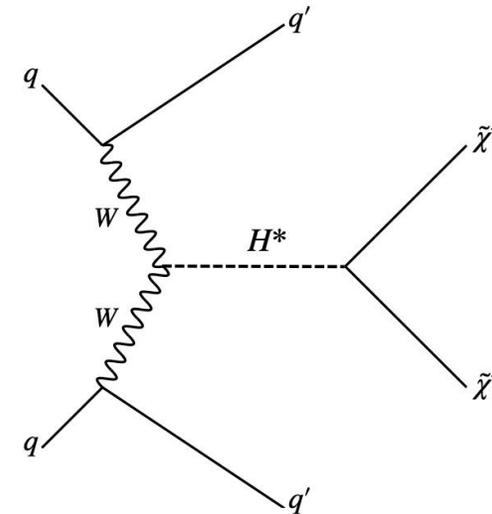
- Многоклассовая классификация – Бинарная классификация с BDTG для каждого фонового процесса (1 vs rest)

# Интерпретация результатов

- **VBF+MET+photon** <https://arxiv.org/pdf/2109.00925.pdf>
- Наблюдаемый (ожидаемый) предел 0.37(0.34)
- Compressed SUSY <https://arxiv.org/pdf/2102.10194.pdf>
- В процессах VBF электрослабые частицы SUSY (нейтралино) производятся парами в ассоциации двумя струями



- Процесс  $H \rightarrow inv$  в процессе VBF+MET+gamma



- Диаграмма Фейнмана процесса рождения Хиггсина посредством процесса VBF.

# Заключение

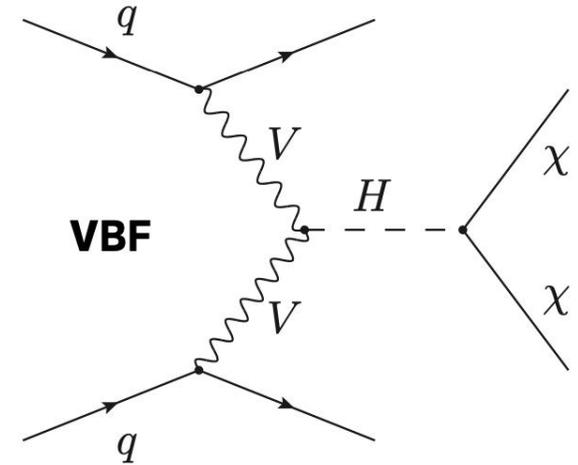
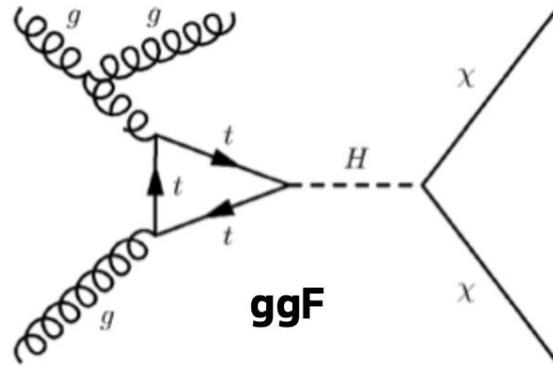
- Последние результаты по поиску  $H \rightarrow \text{inv}$  полученных в различных каналах вошли в статью [Phys. Lett. B 842 \(2023\) 137963](#)
  - Последние результаты VBF+MET [JHEP 08 \(2022\) 104](#)
- В данный момент происходит работа над исследованиями  $H \rightarrow \text{inv}$  в канале VBF+MET с использованием данных полученных за Run2 и частично Run3
  - Планируется увеличение статистики
  - Новые ML исследования
  - Дополнительные интерпретации полученных результатов

**Спасибо за внимание**

# Backup slides

- Mono-Z анализ Run2 [Phys. Lett. B 829 \(2022\) 137066](#)
  - Оценка вклада фонового процесса Z+jets с помощью методов ABCD и One sideband
  - Исследования систематики Z+jets
- Комбинация результатов по поиску невидимых распадов бозона Хиггса Run2 полученных в различных каналах [Phys. Lett. B 842 \(2023\) 137963](#)
  - Исследования перекрытия событий между каналами (overlap check)
- VBF+MET анализ Run2+Run3 (частично?) [atlas-glance](#) (EDboard пока нет)

почему VBF+MET наиболее чувствительный канал ?



- $Z \rightarrow \nu\nu$  (strong production) is large compared to ggF:

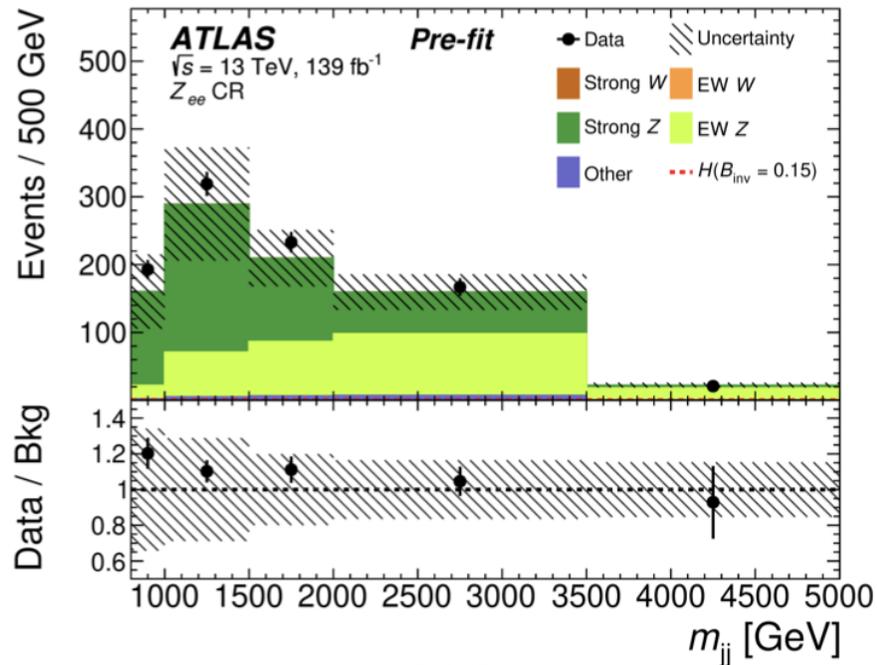
$$\frac{\sigma_{ggF}(H + \text{jet})}{\sigma(Z + \text{jet}) \cdot Br(Z \rightarrow \nu\nu)} \sim \frac{1}{300}$$

- VBF: signal and bg are comparable

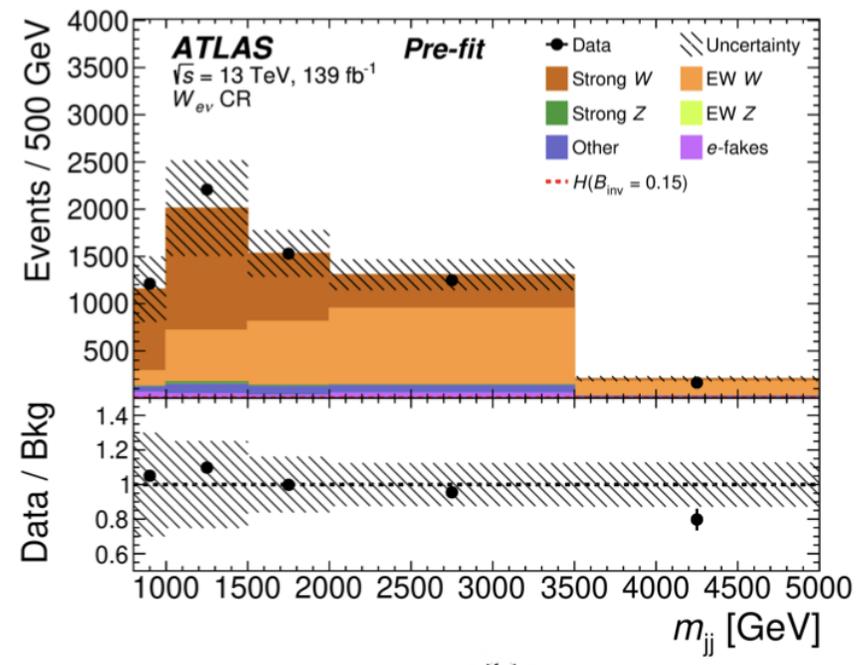
$$\frac{\sigma_{VBF}(H + qq)}{\sigma_{VBF}(Z + qq) \cdot Br(Z \rightarrow \nu\nu)} \sim \frac{4}{3}$$

# $V + jets$ фоновый процессы

- Вклад  $V+jets$  фоновых событий оценивается с помощью метода «контрольных областей» содержащих выбранные  $W (\rightarrow lv) + jets$  (1L) и  $Z (\rightarrow ll) + jets$  (2L) события



(a)



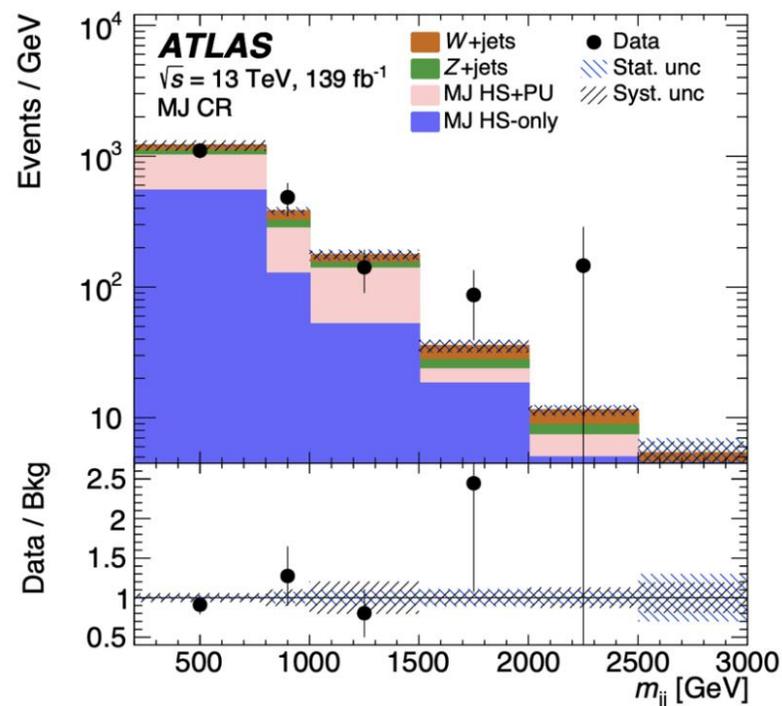
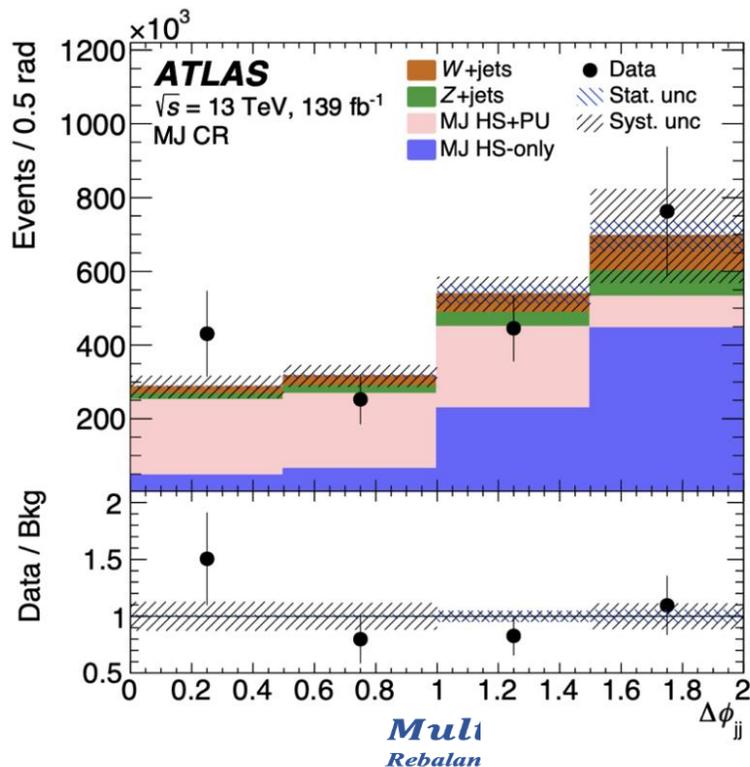
(b)

Полученные в Run2 распределения по  $m_{jj}$  для (a)  $W (\rightarrow lv)$  и (б)  $Z (\rightarrow ll)$  контрольных областей

# Multijet фоновый процесс

## Rebalance and Smear метод

- R+S метод обеспечивает две разные оценки для двух начальных топологий — **HS** и **HS+PU** с помощью множественного применения функции отклика детектора для каждого сбалансированного события, что позволяет увеличить статистику

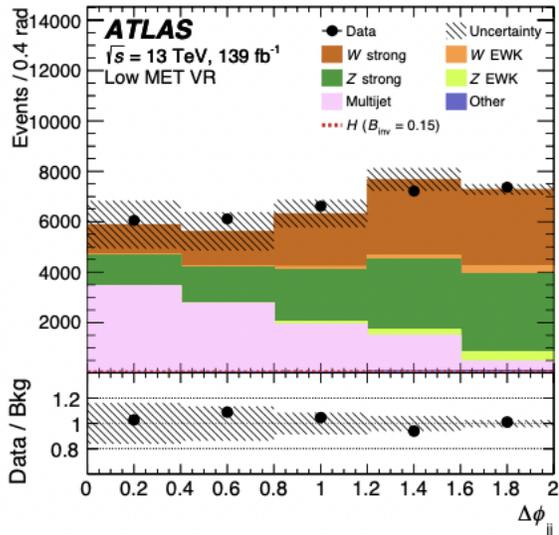


Полученные в Run2 распределения (а)  $\Delta\phi_{jj}$  и (б)  $m_{jj}$  в MJ region ( $100 \text{ GeV} < E_{miss}^T < 200 \text{ GeV}$ ,  $m_{jj} > 400 \text{ GeV}$ ,  $N_{jet} = 2$ ,  $\Delta\eta_{jj} > 2.5$ )

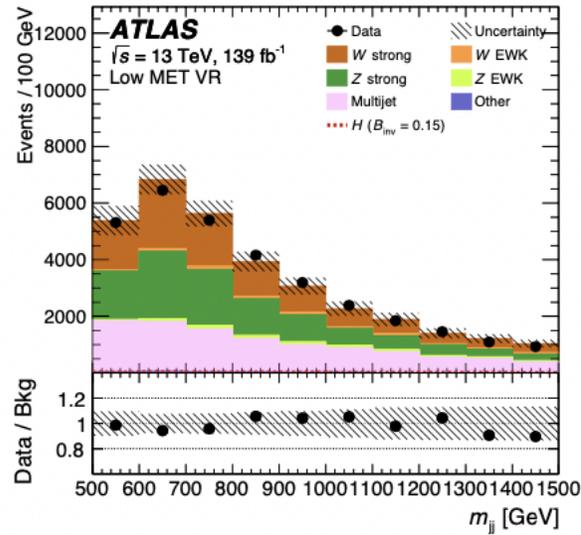
# Multijet фоновый процесс

## Pileup CR (FJVT CR) метод

- Выбор контрольной области, обогащенной многоструйными событиями (PU-CR) путем инвертирования fJVT score лидирующей струи (представления лидирующей струи по  $p_T$  как forward pile-up струи).



(a)



(b)

- SR : критерии отбора + FJVT > 0.5
- CR : критерии отбора + FJVT < 0.5

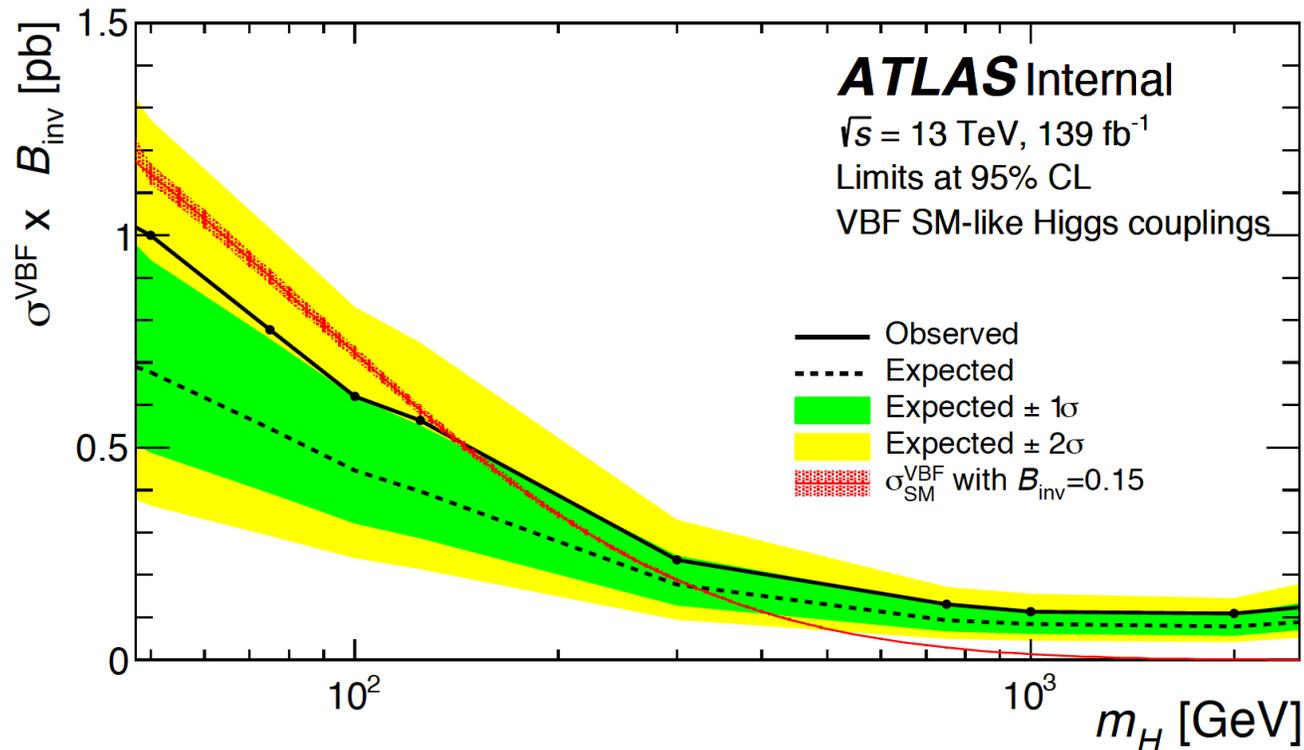
$$B_{MJ,i}^{SR} = R_{MJ,i} \cdot \left( N_i^{PU-CR} - B_{non-MJ,i}^{PU-CR} \right),$$

$$R_{MJ,i} = \frac{N_i^{low-MET} - B_{non-MJ,i}^{low-MET}}{N_i^{PU-CR,low-MET} - B_{non-MJ,i}^{PU-CR,low-MET}}.$$

Полученные в Run2 распределения (а)  $\Delta\phi_{jj}$  и (б)  $m_{jj}$  в low-  $E_{miss}^T$  validation region ( $100 \text{ GeV} < E_{miss}^T < 160 \text{ GeV}$ ). Форма multijet получена с помощью Pileup CR метода

# Результаты $H \rightarrow inv$ поиска VBF+MET в эксперименте АТЛАС для Run2

- Результаты были интерпретированы для массы медиатора до 2 ТэВ



- Верхний предел сечения, умноженного на  $B_{\text{inv}}$  для скалярного медиатора как функции его массы. Для сравнения наложено сечение VBF в NLO в QCD, т.е. без электрослабых поправок, для частицы с бозонными связями Хиггса SM, умноженное на значение  $B_{\text{inv}}$  15%.

# Определение более точных верхних пределов BR

Переход с фреймворка Run2 (HistFitter) на pyhf

- pyhf использует облегченный файл .json, его легче изменять и он гораздо эффективнее
- время выполнения:  $\mathcal{O}(50 \text{ часов}) \rightarrow \mathcal{O}(2 \text{ часа})$

	Observed	Expected	+1 $\sigma$	-1 $\sigma$	+2 $\sigma$	- 2 $\sigma$
<b>Published</b>	0.145	0.103	0.144	0.075	0.196	0.055
<b>Pyhf</b>	0.146	0.105	0.146	0.077	0.197	0.059