

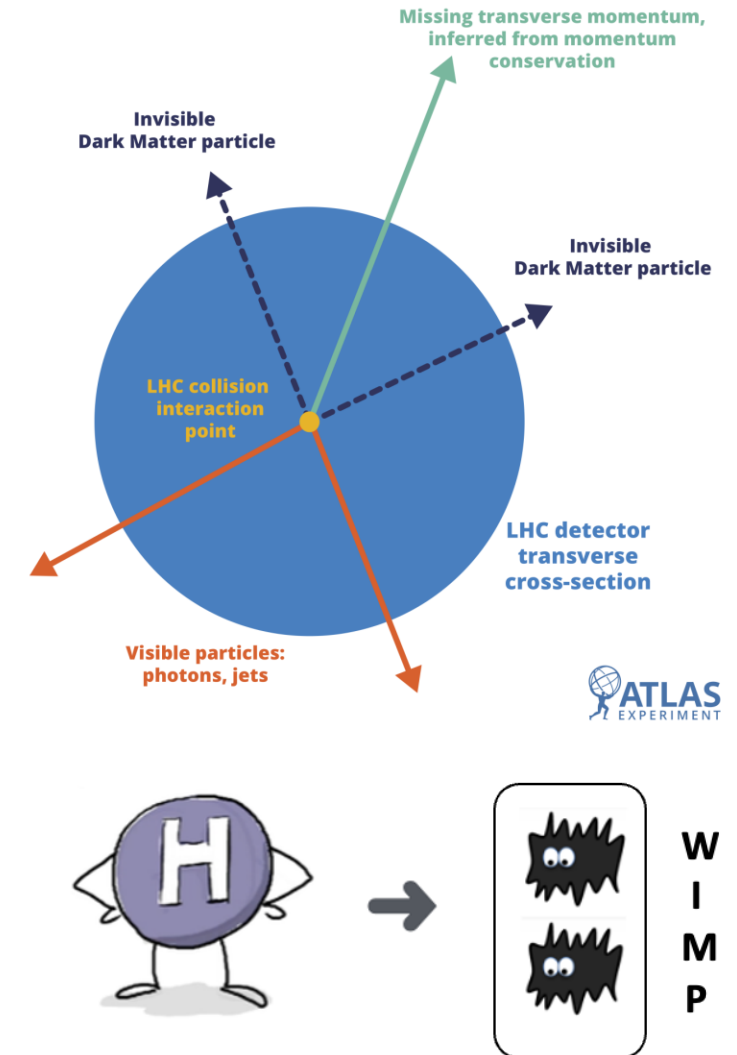
Latest results of searches for invisible Higgs Boson decays in events with vector-boson fusion signatures in the ATLAS experiment

Марина Покидова,
ЛАФ ОФВЭ ПИЯФ, СПБПУ



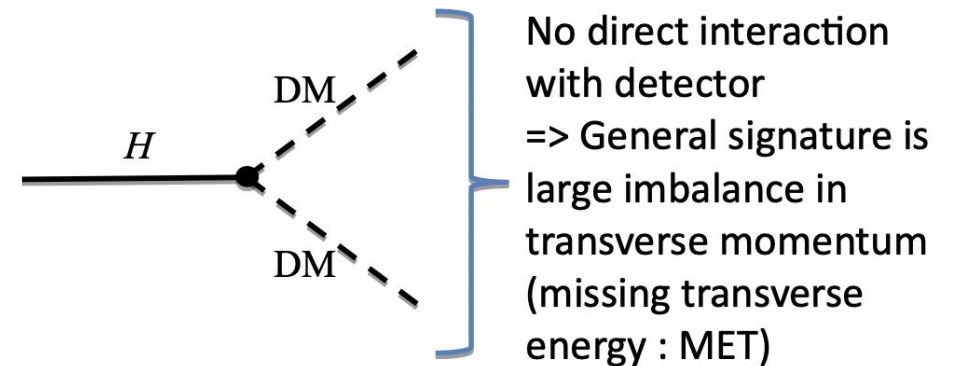
Введение

- **1933** – Ф.Цвикки: «скрытая масса» в скоплении Кома.
- **1970** – В.Рубин и К. Форд: «скрытая масса» в других спиральных галактиках, в частности в Млечном Пути.
- Слабовзаимодействующие массивные частицы (**WIMP**) – кандидаты на роль частиц ТМ.
- Согласно СМ, большинство частиц получают свою массу посредством взаимодействия с полем Хиггса. Если частицы ТМ приобретают свою массу таким же образом, в теориях за пределами СМ существуют $H \rightarrow inv$ на частицы ТМ



Введение

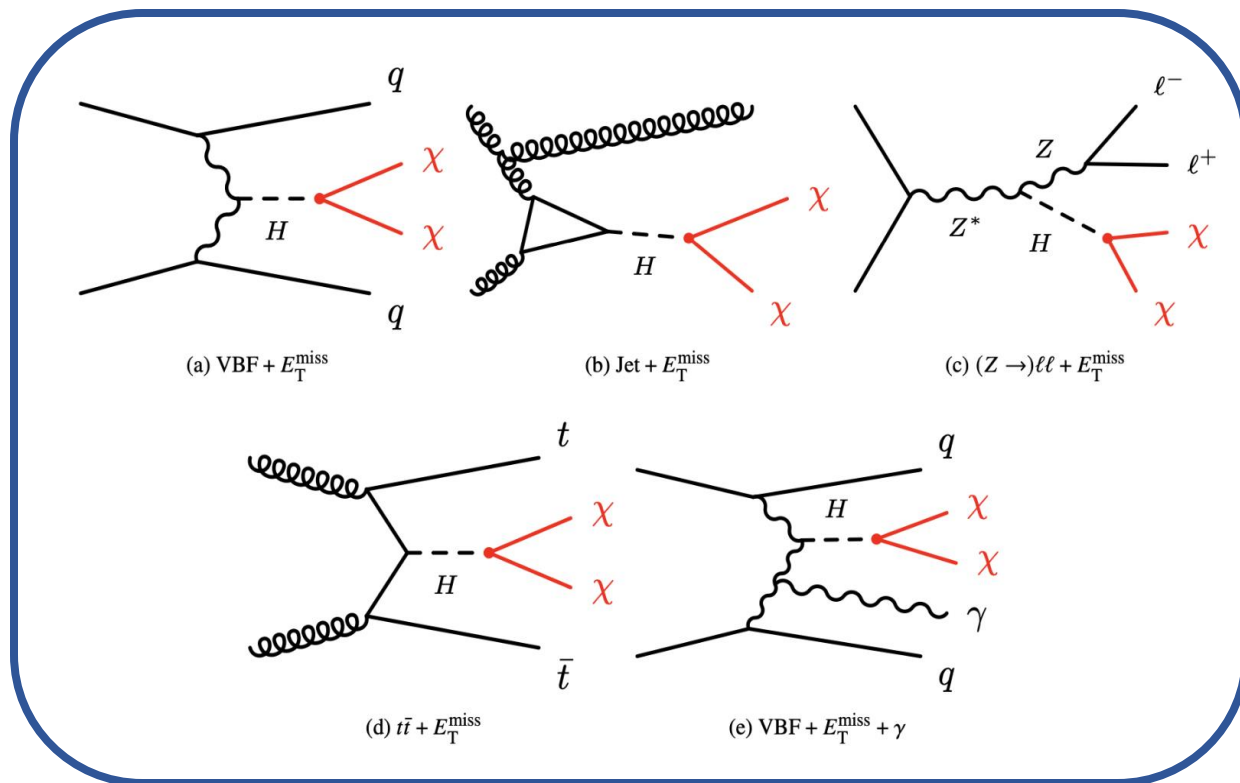
- В рамках СМ предсказывается
«невидимый распад» $\text{BR}(H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\nu) \sim 0.1\%$
- Модели невидимого распада, где бозон Хиггса действует как частица-посредник между частицами ТМ и частицами СМ называются «порталом Хиггса»



Модели «Портала Хиггса» лежат в основе исследований по поиску $H \rightarrow \text{inv}$ 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](#)

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

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

VBF topology

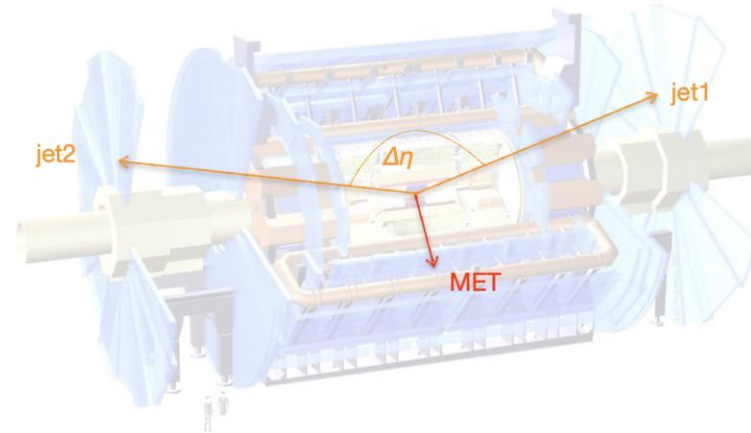
- Two jets with $p_T(j1/j2) > 80/50$ GeV
- Small add. jet activity: $p_T(j3) < 25$ GeV ...
3 or 4 jets, if compatible with FSR
- Jets in opposite hemispheres
- $\Delta\eta(jj) > 3.8$
- $m(jj) > 0.8$ TeV

EWK suppression

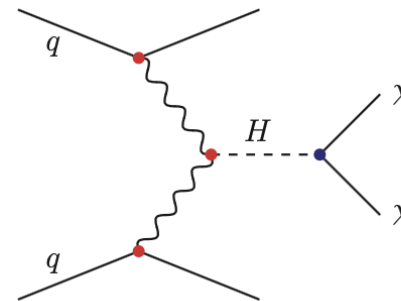
- Lepton (electron and muon) veto

Multijet suppression

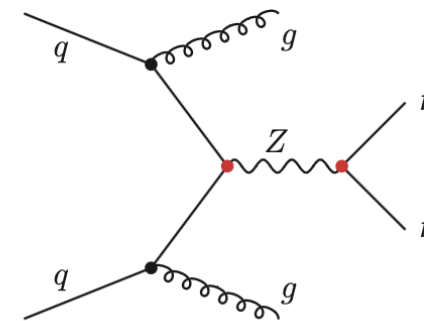
- MET > 160 GeV
- $\Delta\Phi(jj) < 2.0$



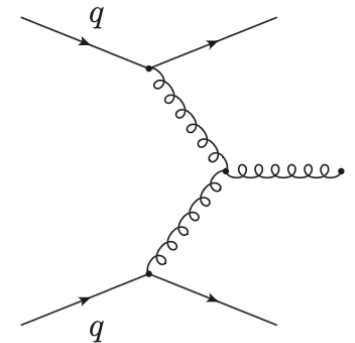
Signal



V+jets



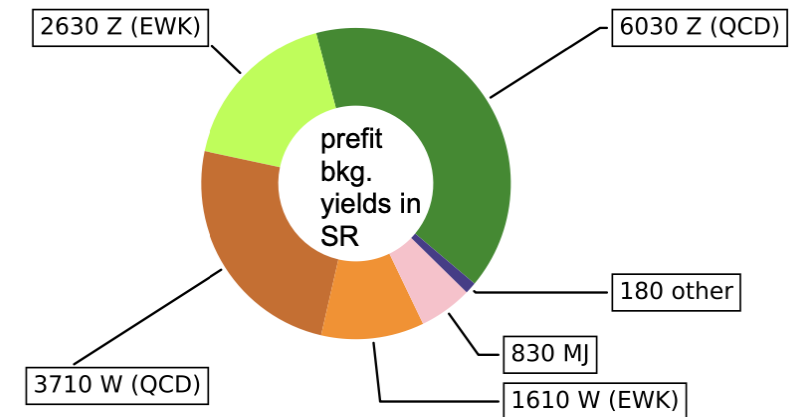
Multijet



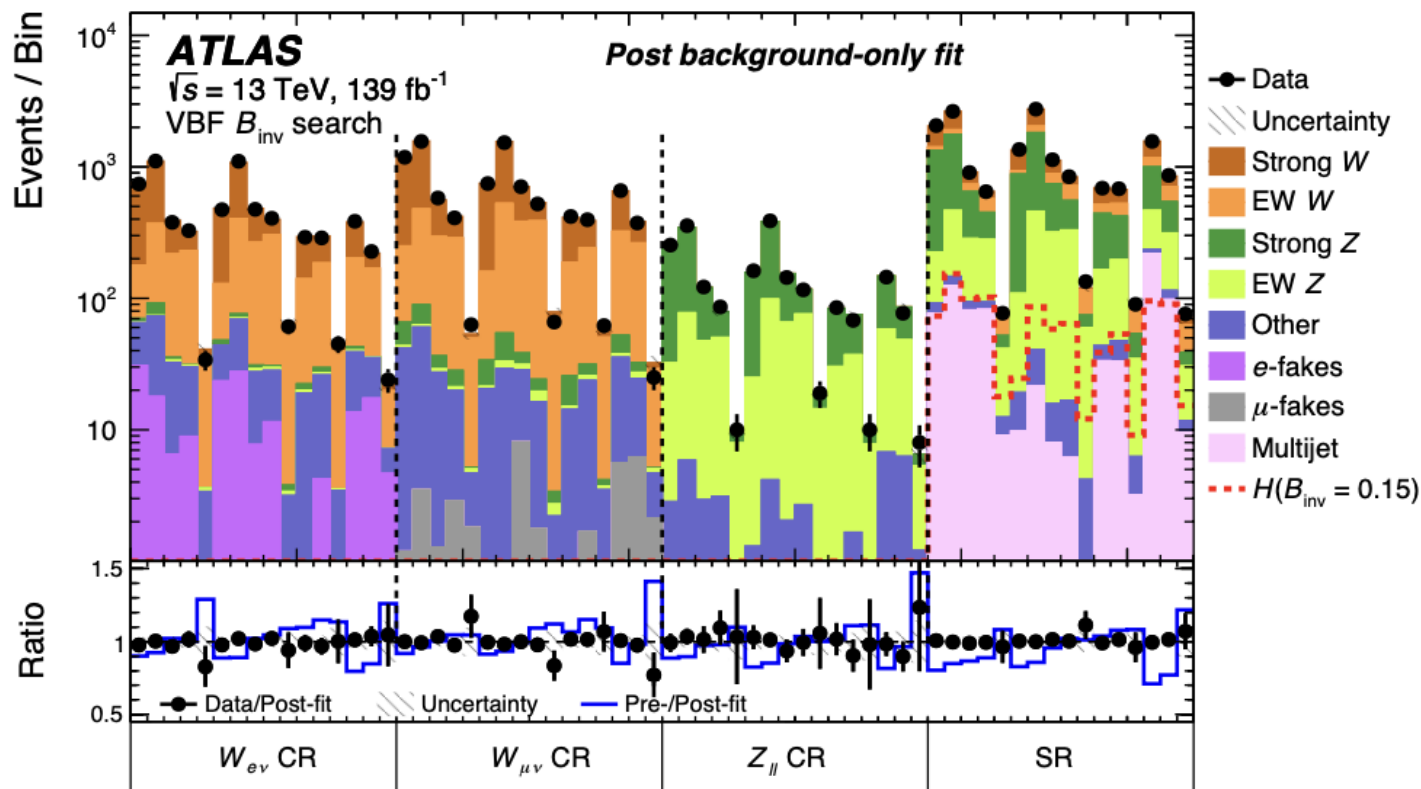
$H \rightarrow \text{inv}$ при рождении в слиянии векторных бозонов (VBF+MET)

- 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 & MET>200 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 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 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 $H \rightarrow \text{inv}$ поиска VBF+MET в эксперименте АТЛАС для Run2

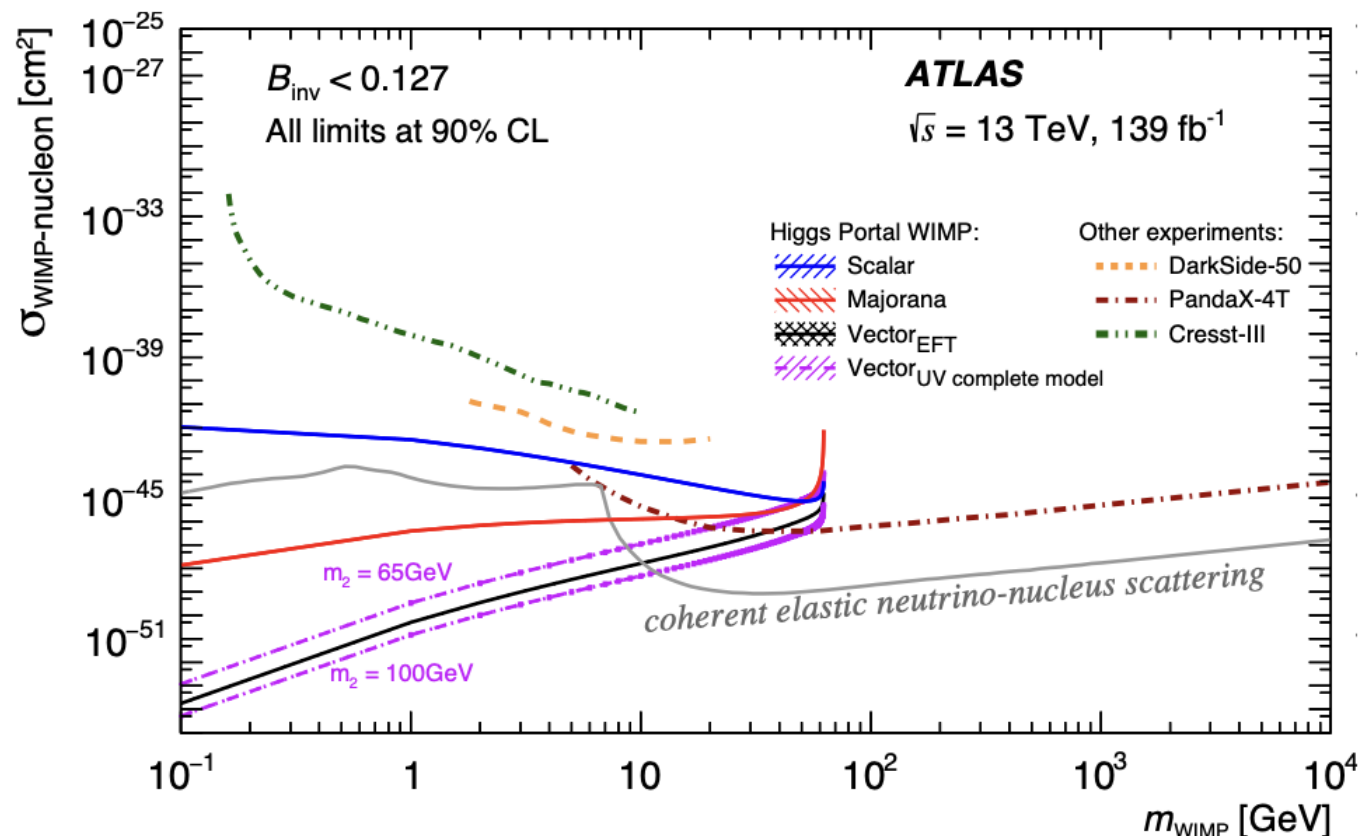


- Нет значительного отклонения от прогнозов СМ.
- **$\text{BR}(H \rightarrow \text{inv}) < 0.145$ (0.103)** при 95% CL

CMS Run2: $\text{BR}(H \rightarrow \text{inv}) < 0.17$ (0.11)
при 95% CL $\rightarrow$ ATLAS получил
наиболее строгий предел

- *SR и все CR области после фитирования*

Результаты $H \rightarrow \text{inv}$ поиска VBF+MET в эксперименте АТЛАС для Run2

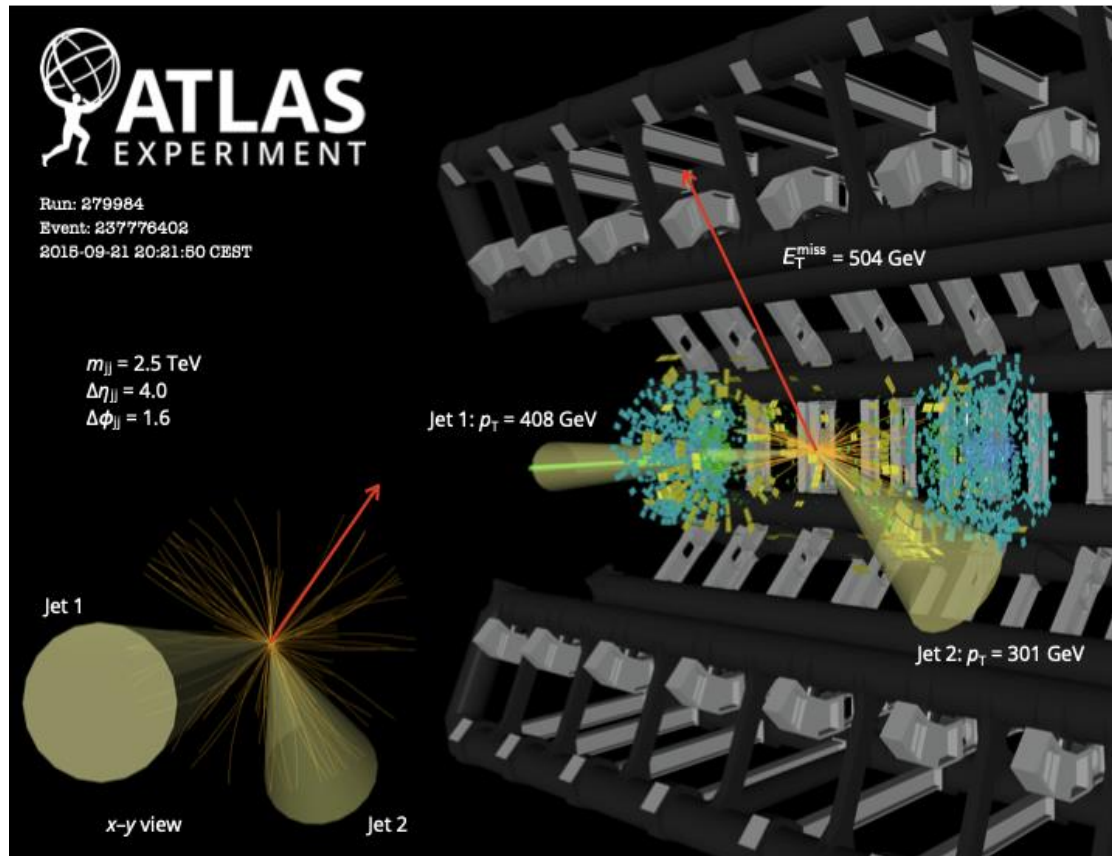


- Верхние пределы спин-независимого поперечного сечения WIMP–нуклона с использованием интерпретаций портала Хиггса B_{inv} для 90% CL в зависимости от m_{WIMP} .
- Взаимодополняемость прямых и коллайдерных экспериментов. Так, коллайдерные эксперименты имеют более высокую чувствительность для меньших m_{WIMP} ($< 10 \text{ ГэВ}$).

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

- В Run3 энергия центра масс достигла 13.6 ТэВ
- Ожидаемая светимость Run3 $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$
- 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 продолжаются исследования, с использованием данных Run3

Планы $H \rightarrow \text{inv}$ поиска VBF+MET в эксперименте АТЛАС

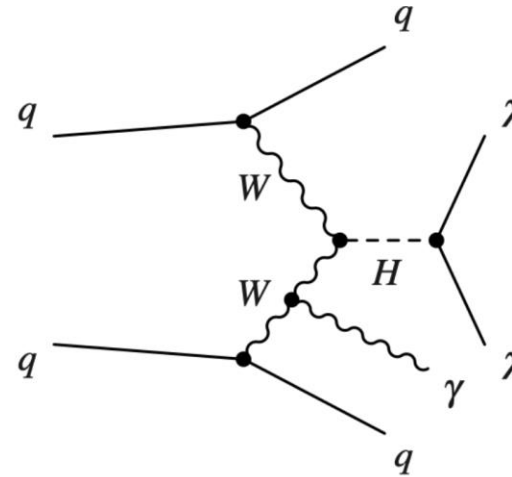


Анализ данных Run2 + Run3

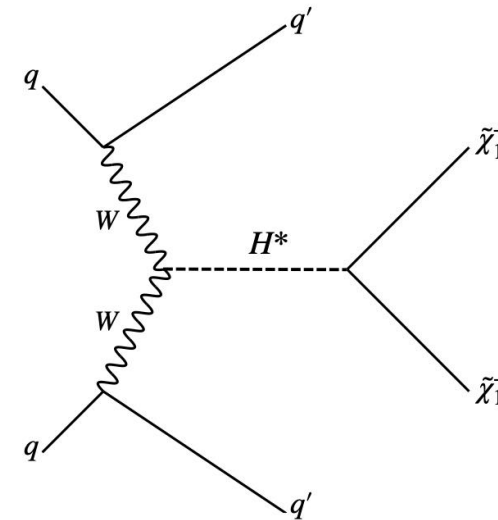
- Оптимизация отбора фоновых процессов и оценка вклада фоновых процессов с помощью методов машинного обучения (BDT с GradBoost, RNN, DNN, GNN)
 - Переменные на основе информации о дополнительных струях в событиях
 - Low-level Calorimeter информация
- Сравнение экспериментальных данных с предсказаниями СМ
 - Определение более точных верхних пределов на $\text{BR}(H \rightarrow \text{inv})$ в VBF+MET канале (pyhf)

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 $H \rightarrow \text{inv}$ в процессе VBF+MET+gamma



- Диаграмма Фейнмана процесса рождения Хиггсина посредством процесса VBF.

Заключение

- **Последние результаты VBF+MET** [JHEP 08 \(2022\) 104](#)
 - Исследования ATLAS были проведены с использованием данных за Run-2 ($\sqrt{s} = 13$ ТэВ, $L \sim 139 \text{ фбн}^{-1}$)
 - Отклонений от СМ не найдено
 - **$\text{BR}(H \rightarrow \text{inv}) < 0.145$ (0.103) при 95% CL**
- **В настоящее время происходит работа над исследованиями $H \rightarrow \text{inv}$ в канале VBF+MET с использованием данных полученных за Run2 и Run3**
 - Планируется увеличение статистики
 - Новые ML исследования
 - Дополнительные интерпретации полученных результатов

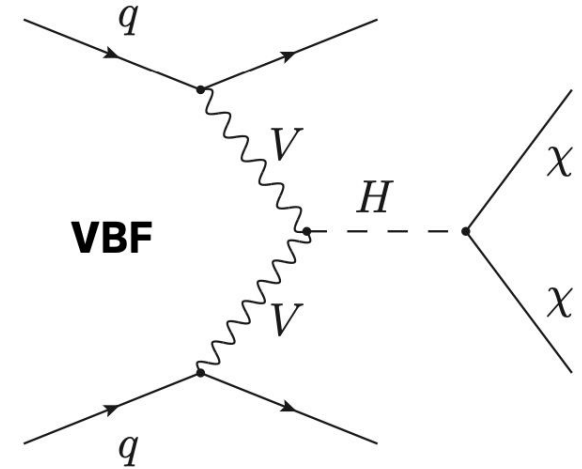
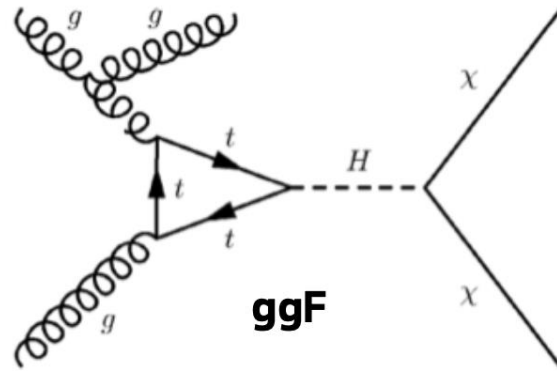
Спасибо за внимание

Backup slides

Работа в исследованиях $H \rightarrow \text{inv}$

- Mono-Z анализ Run2 [Phys. Lett. B 829 \(2022\) 137066](#)
 - Оценка вклада фонового процесса $Z + \text{jets}$ с помощью методов ABCD и One sideband
 - Исследования систематики $Z + \text{jets}$
- 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)

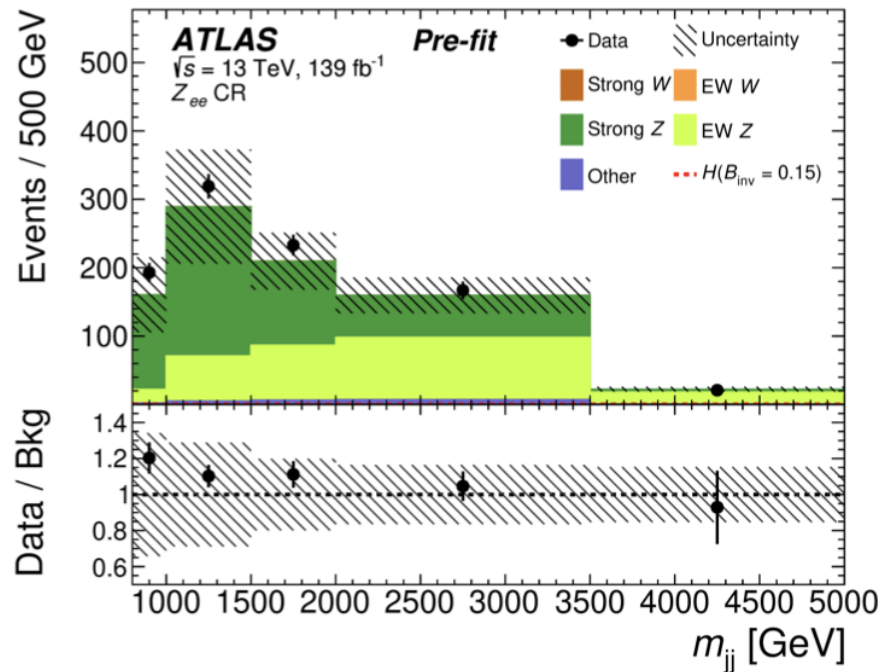
почему VBF+MET наиболее чувствительный канал ?



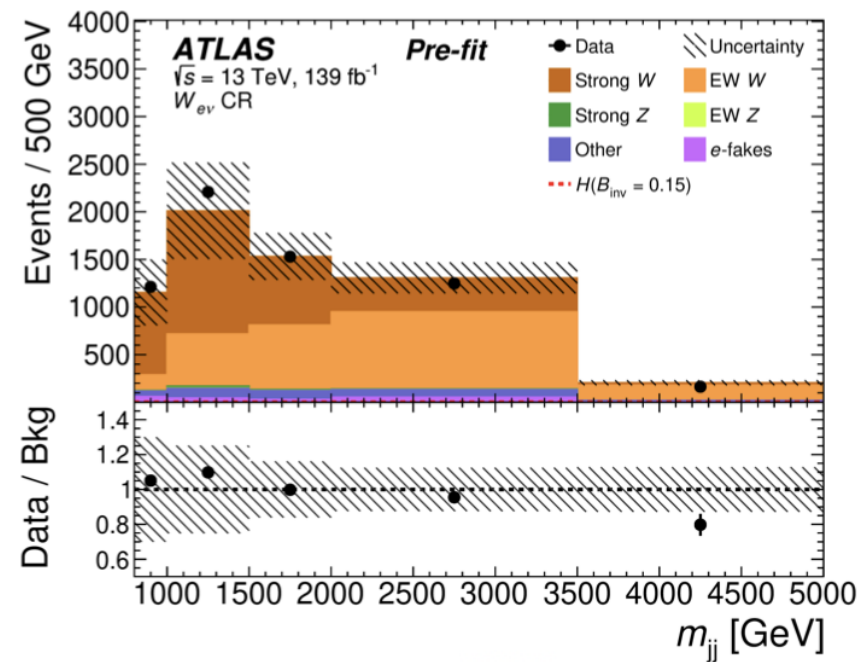
- $Z \rightarrow \nu\nu$ (strong production) is large compared to ggF:
$$\frac{\sigma_{\text{ggF}}(H + \text{jet})}{\sigma(Z + \text{jet}) \cdot \text{Br}(Z \rightarrow \nu\nu)} \sim \frac{1}{300}$$
- VBF: signal and bg are comparable
$$\frac{\sigma_{\text{VBF}}(H + qq)}{\sigma_{\text{VBF}}(Z + qq) \cdot \text{Br}(Z \rightarrow \nu\nu)} \sim \frac{4}{3}$$

$V + jets$ фоновый процессы

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



(a)



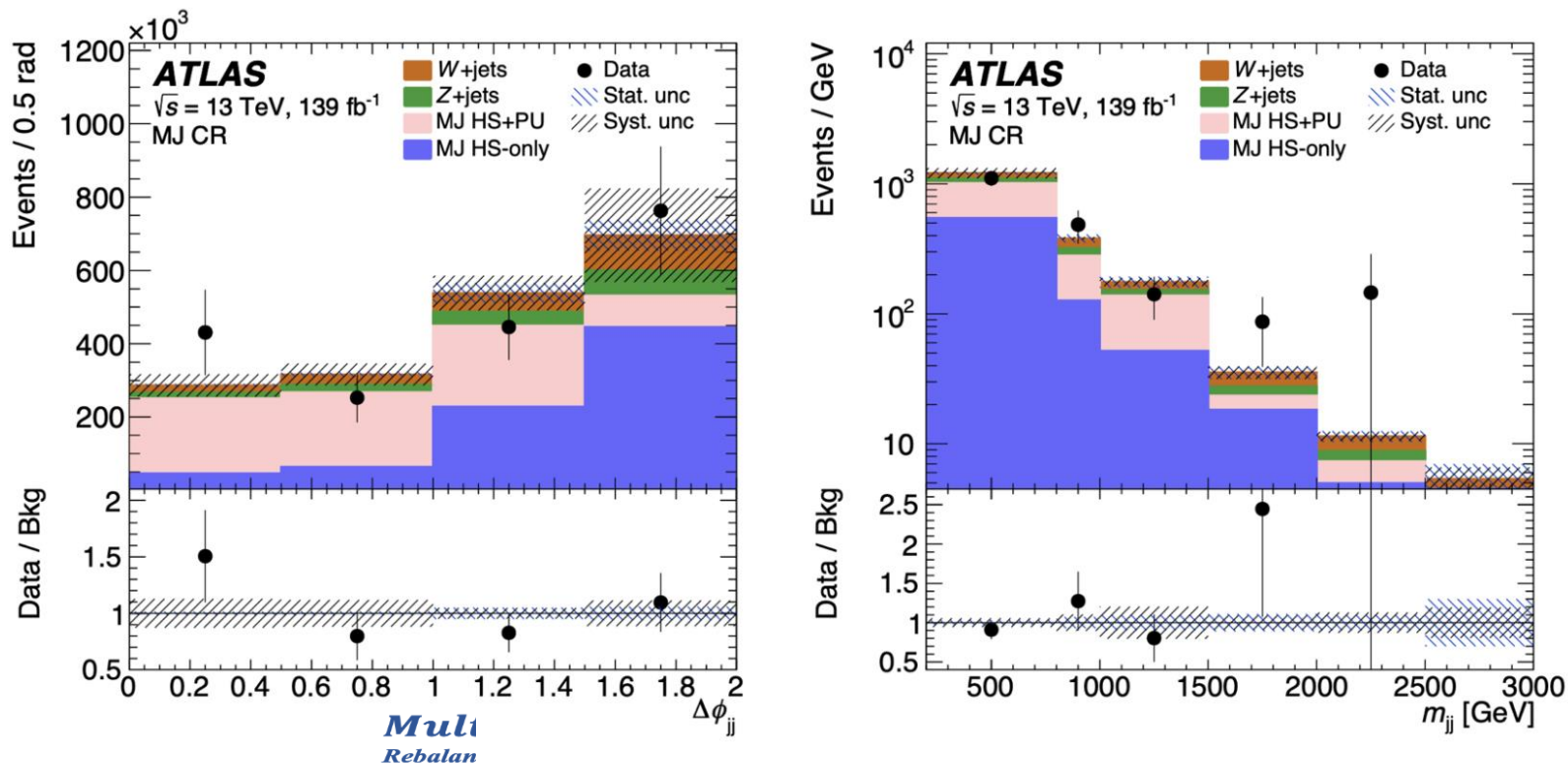
(b)

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

Multijet фоновый процесс

Rebalance and Smear method

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

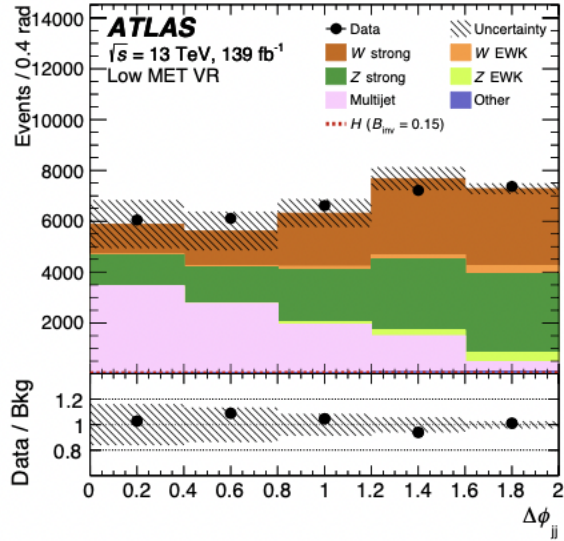


Полученные в Run2 распределения (а) $\Delta\phi_{jj}$ и (б) m_{jj} в MJ region
($100 \text{ GeV} < E_{miss}^T < 200 \text{ GeV}$, $m_{jj} > 400 \text{ GeV}$, $N_{jet} = 2$, $\Delta\eta_{jj} > 2.5$)

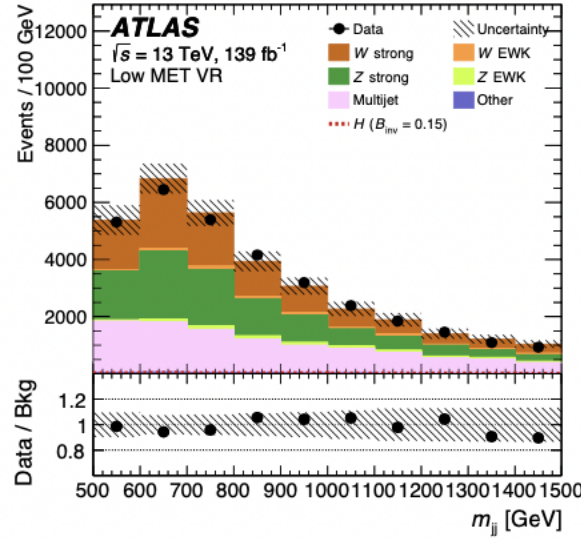
Multijet фоновый процесс

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

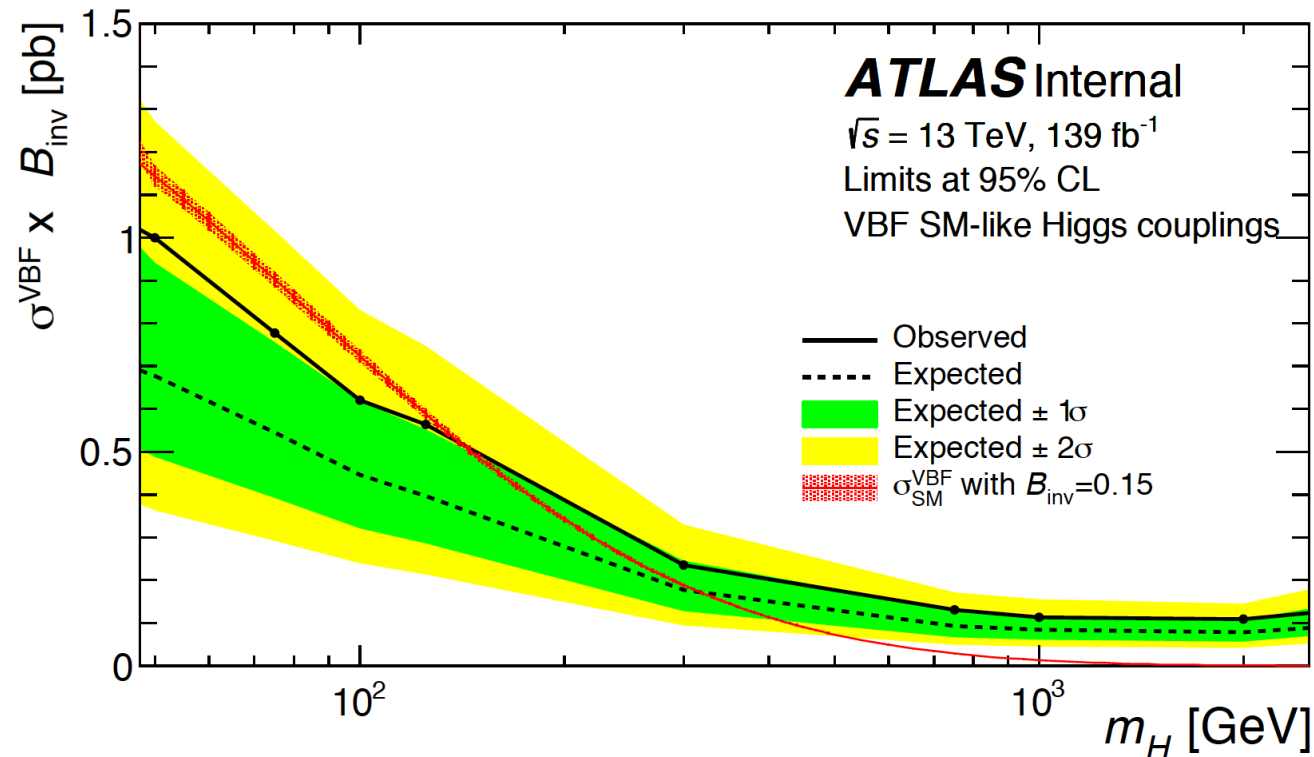
$$B_{MJ,i}^{SR} = R_{MJ,i} \cdot \left(N_i^{PU-CR} - B_{non-MJ,i}^{PU-CR} \right),$$

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

Полученные в Run2 распределения (a) $\Delta\phi_{jj}$ 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 $H \rightarrow \text{inv}$ поиска VBF+MET в эксперименте АТЛАС для Run2

- Результаты были интерпретированы для массы медиатора до 2 ТэВ



- Верхний предел сечения, умноженного на B_{Rinv} 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_{inv} 15%.

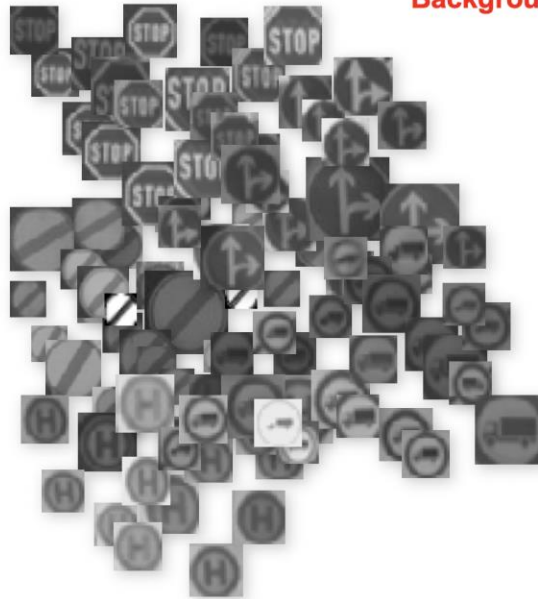
Оптимизация отбора событий с помощью MVA/ML подходов

Для данных исследований используется метод BDT с Gradient Boosting

Signal



Background



Class 1



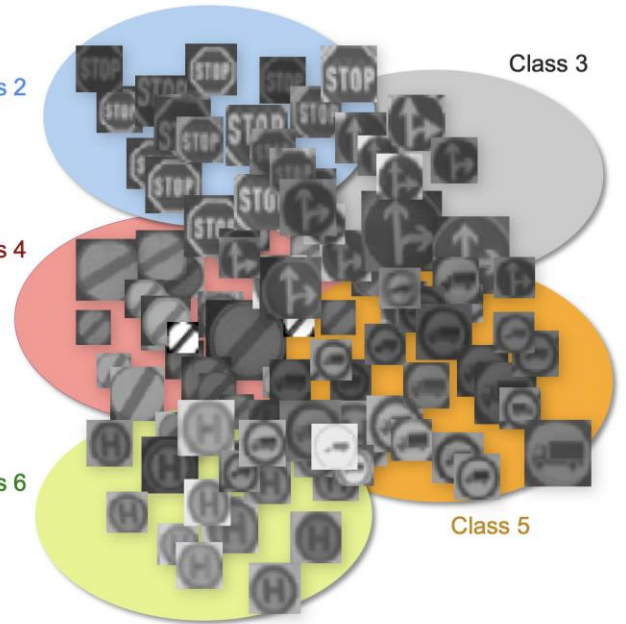
Class 2

Class 4

Class 6

Class 3

Class 5



- Бинарная классификация (S/B) с BDTG

in progress

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

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 σ	-1 σ	+2 σ	- 2 σ
Published	0.145	0.103	0.144	0.075	0.196	0.055
Pyhf	0.146	0.105	0.146	0.077	0.197	0.059