

# Latest results of searches of Higgs Boson decays into Dark Matter particles in the ATLAS experiment

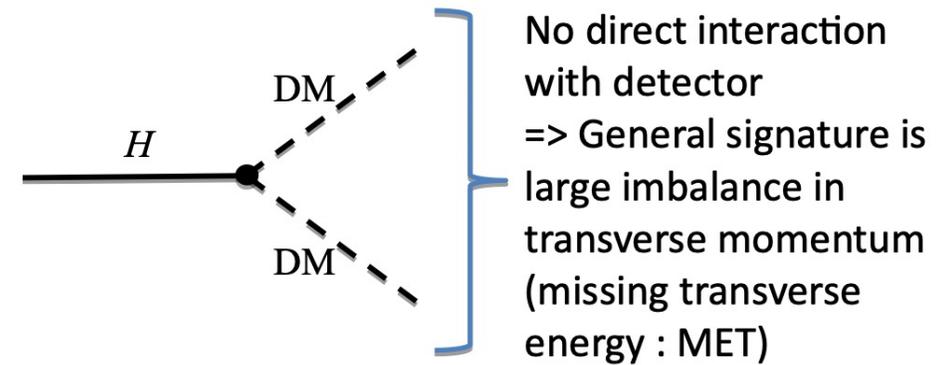
Marina Pokidova,  
NRC KI – PNPI & SPbPU



# Introduction

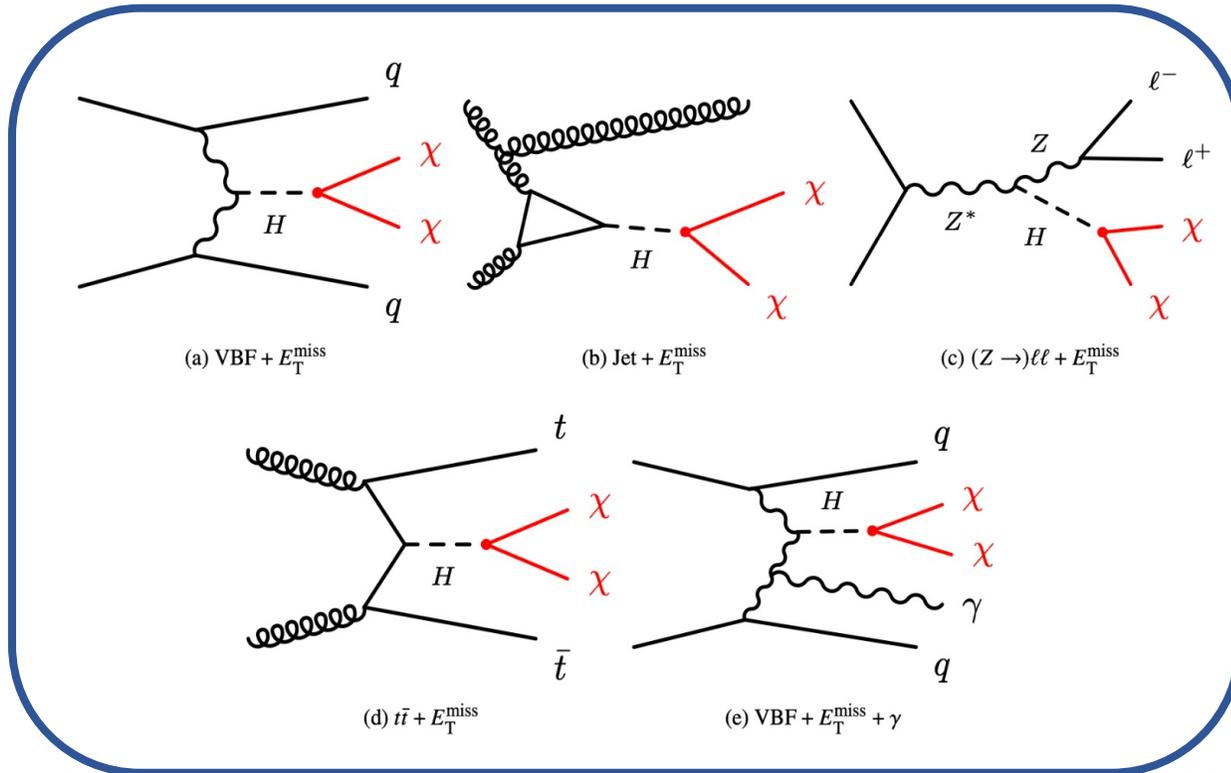
- In Standard Model(SM), Higgs boson can decay to invisible 4-neutrino final state  
$$\text{BR}(H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\nu) \sim 0.1\%$$
- In some of BSM models the 125 GeV Higgs boson can act as a mediator between DM candidates and the SM particles. These models are called "Higgs portal" models

Last  $H \rightarrow \text{inv}$  decay searches were performed at ATLAS experiment using the full ATLAS Run-2 data sample ( $L \sim 139 \text{ fb}^{-1}$ )



# $H \rightarrow inv$ search in ATLAS experiment (Run2 summary)

In searches for invisible Higgs decay in Run2 multiple production modes of the Standard Model Higgs boson were considered



- $VBF + MET$
- $MET + Z(\ell\ell)$
- $tt + MET$
- $VBF + MET + \gamma$
- $monojet$

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

# Results of $H \rightarrow inv$ search in ATLAS experiment for Run2

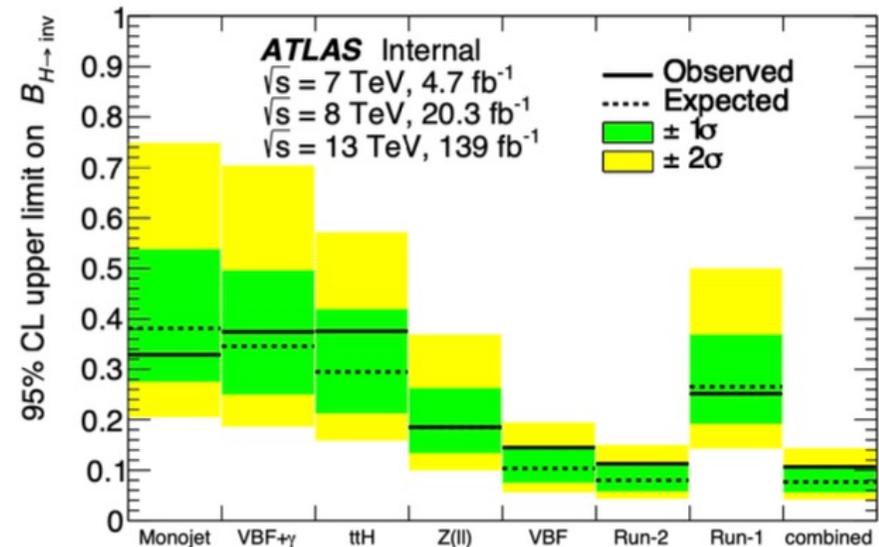
- Limits on the  $H \rightarrow inv$  branching ratio are shown for all the channels, Run1, Run2 and full combinations.

**$BR(H \rightarrow inv) < 10.7 (7.7) \% @ 95\% CL$**

- Full Run2+Run1 combination provides the most stringent limits on the  $B(H \rightarrow inv)$  to date

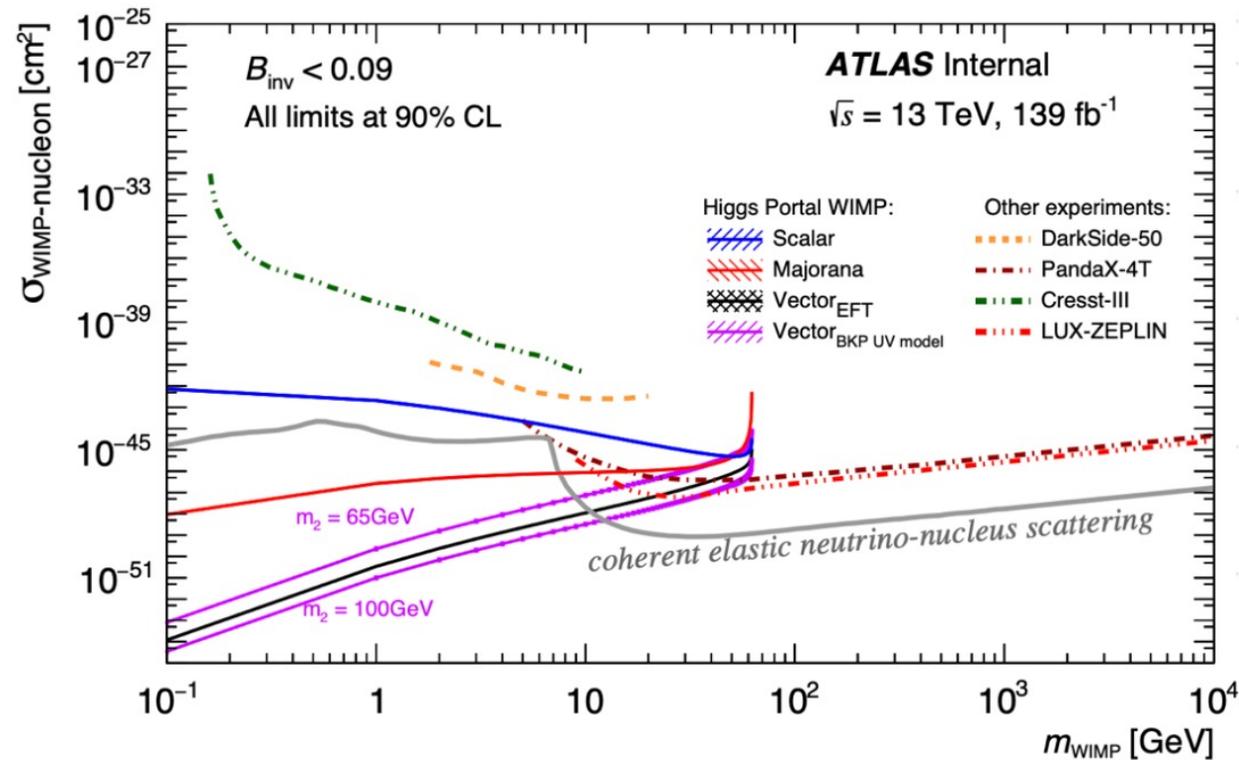
[Phys. Lett. B 842 \(2023\) 137963](#)

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



# Results of $H \rightarrow inv$ search in ATLAS experiment for Run2

- Limits are set @ 90% CL and compared to the most stringent results of WIMP direct detection experiments in the 2D plane of spin-independent WIMP-nucleon cross section vs WIMP mass.



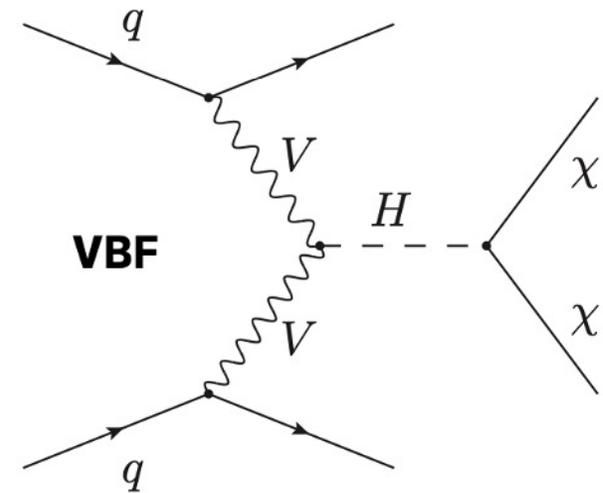
[Phys. Lett. B 842 \(2023\) 137963](#)

# $H \rightarrow inv$ in Vector boson fusion channel (VBF+MET)

- VBF+MET is the 2nd largest Higgs production rate
- In both ATLAS and CMS experiments the VBF+MET final state is the most sensitive channel resulting in an upper limit of

**ATLAS Run2:**  $BR(H \rightarrow inv) < 0.145$  (0.103) @ 95% CL

**CMS Run2:**  $BR(H \rightarrow inv) < 0.17$  (0.11) @ 95% CL



# $H \rightarrow inv$ in Vector boson fusion channel (VBF+MET)

In the VBF production mode, the  $H \rightarrow invisible$  signal is characterized by two jets with a large separation in pseudorapidity and  $E_T^{miss}$  arising from the invisible decays of the Higgs boson

## VBF topology

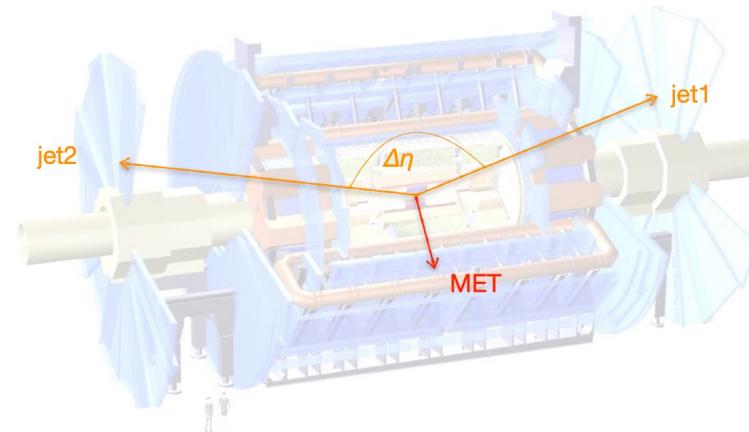
- Two jets with  $p_T(j1/j2) > 80/50$  GeV
- Small add. jet activity:  $p_T(j3) < 25$  GeV ...  
3 or 4 jets, if compatible with FSR
- Jets in opposite hemispheres
- $\Delta\eta(jj) > 3.8$
- $m(jj) > 0.8$  TeV

## EWK suppression

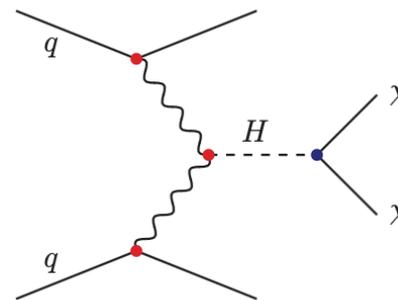
- Lepton (electron and muon) veto

## Multijet suppression

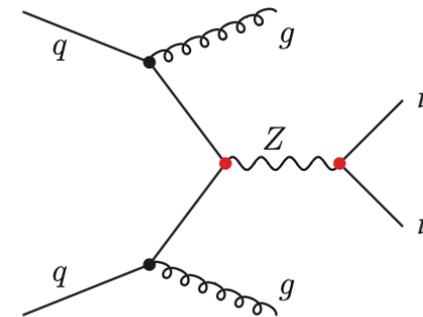
- MET  $> 160$  GeV
- $\Delta\Phi(jj) < 2.0$



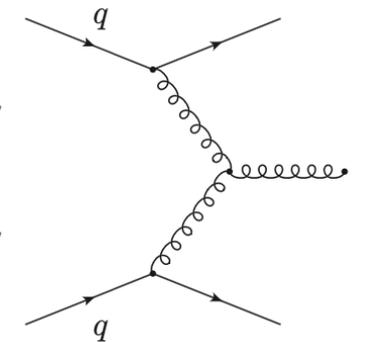
## Signal



## V+jets

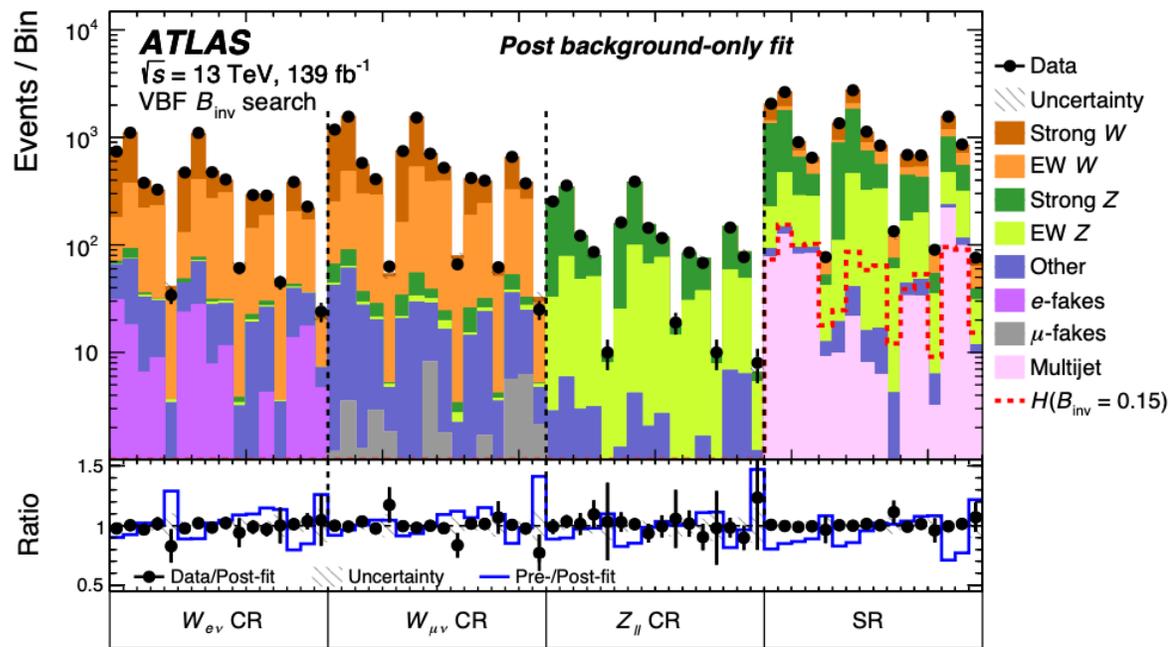


## Multijet

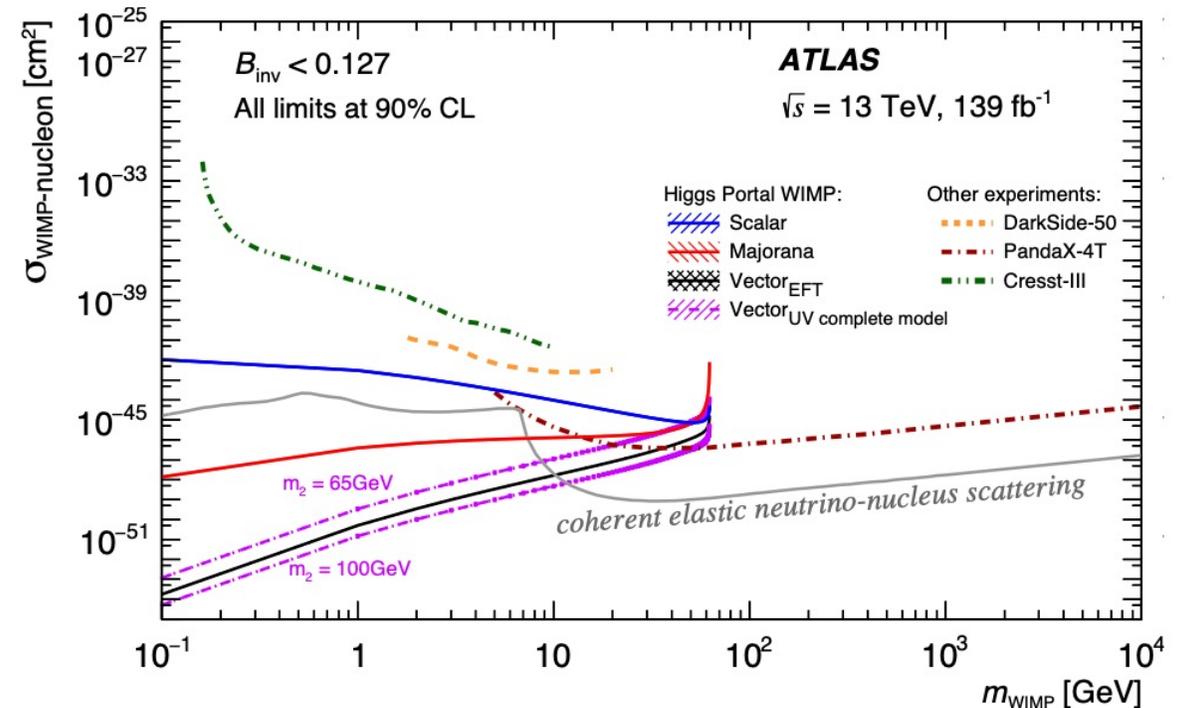


# Results of VBF+MET $H \rightarrow inv$ search in ATLAS experiment for Run2

- The observed numbers of events are found to be in agreement with the background expectation from Standard Model processes
- $BR(H \rightarrow inv) < 0.145$  ( $0.103$ ) @ 95% CL



- Post-fit yields and their uncertainties for all CRs and SR



- Upper limits on the spin-independent WIMP–nucleon cross section using Higgs portal interpretations of  $B_{inv}$  at 90% CL vs  $m_{WIMP}$

# VBF+MET $H \rightarrow inv$ search in ATLAS experiment for Run2 + Run3

In this analysis, several changes and improvements are planned to be made:

- Improvements over Run2 result with the usage of partial Run3 statistics
- Optimization of background process selection and background process contribution estimation using MVA/ML approaches (BDTG,DNN, VBF tagger)
- Comparison of experimental data with SM predictions
- Setting strictest upper limit on  $BR(H \rightarrow inv)$  in VBF+MET channel  
(HistFitter/TRExFitter)

# Summary of MVA/ML studies

Classifier based on TMVA ML framework for optimizing signal and backgrounds selection criteria

- Signal (MC):  $VBF H \rightarrow inv$ ,
- Background processes (MC):
  - $W$  strong
  - $Z$  strong
  - $W$  EWK
  - $Z$  EWK
  - Multijet
  - Other (singletop,  $t\bar{t}$ , etc)
- Boosted decision tree (BDT) method with Gradient boosting (AdaBoost, DNN)

*in progress*

# Input variables of MVA/ML studies

## Input variables used in Run2:

- $m_{jj}, \Delta\eta_{jj}, \Delta\phi_{jj}$
- $\text{met\_tst}, \text{met\_tst\_et}, \text{met\_tst\_nolep\_et}$
- $\text{jet1 } p_T, \text{jet2 } p_T$
- $\Delta\phi(\text{jet1}, \text{MET}), \Delta\phi(\text{jet2}, \text{MET})$
- $\text{maxCentrality}$

## Input variables which can be used in Run3:

For  $i = 3, 4, 5$

- $\text{feta1i} = f_i^\eta = \frac{(\eta_1 - \eta_i) - (\eta_i - \eta_2)}{\eta_1 - \eta_2}$
- $\text{fphi01i} = f_i^\phi = \frac{\Delta\phi_{1i} - \Delta\phi_{i2}}{\Delta\phi_{12}}$
- $\text{fp0Ti} = f_i^p = \frac{2p_{T,i}}{p_{T,1} + p_{T,2}}$
- $\text{cent01i} = C_i = \exp\left(-\frac{4}{(\eta^{j1} - \eta^{j2})^2} \left(\eta^i - \frac{\eta^{j1} + \eta^{j2}}{2}\right)^2\right)$

*in progress*

# Input variables optimization studies

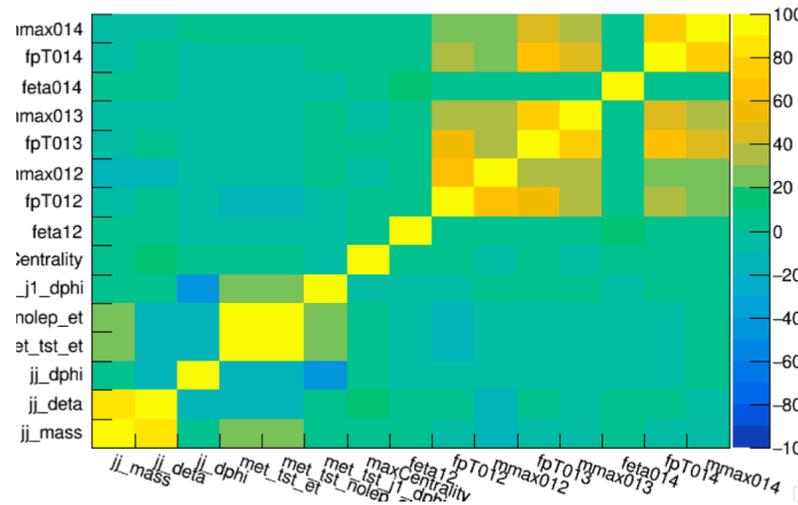
- Selected input variables need to significantly contribute to the classification of events.

Variables were chosen by observing the ranking tables of variables and correlation matrix of variables.

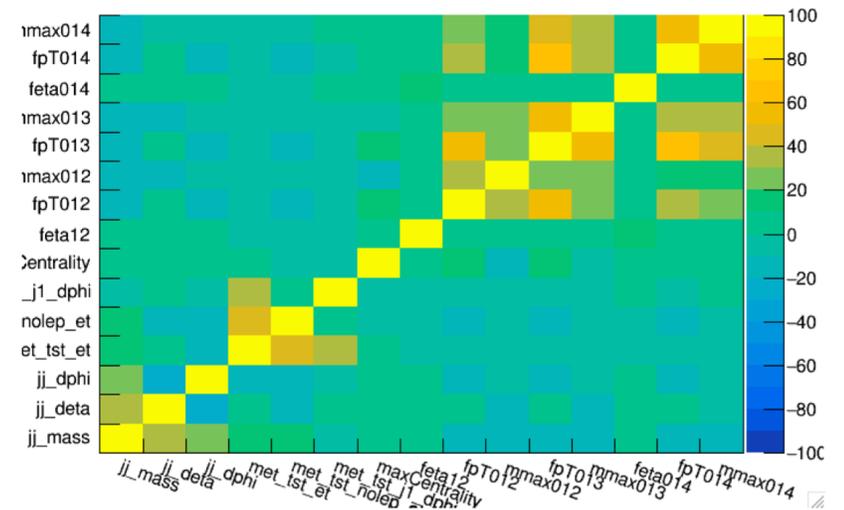
Rank	Variable	Variable Importance
1	met_tst_et	6.050e-01
2	jj_deta	2.181e-01
3	maxCentrality	1.486e-01
4	jj_dphi	2.745e-02
5	met_tst_j2_dphi	9.389e-04
6	fpT013	4.484e-06
7	met_tst_j1_dphi	3.652e-06
8	fpT014	2.818e-06
9	cent014	1.677e-06
10	feta12	1.371e-06
11	feta014	1.205e-06
12	jj_mass	0.000e+00
13	met_tst_nolep_et	0.000e+00
14	fphi12	0.000e+00
15	fpT012	0.000e+00
16	mmax012	0.000e+00
17	cent012	0.000e+00
18	feta013	0.000e+00
19	fphi013	0.000e+00
20	mmax013	0.000e+00
21	cent013	0.000e+00
22	fphi014	0.000e+00
23	mmax014	0.000e+00

DataSet: MVA  
 Name: Method: ROC-integ  
 datasetBkg11 BDTG : 0.999

Correlation Matrix (signal)



Correlation Matrix (background)



# Input variables optimization studies

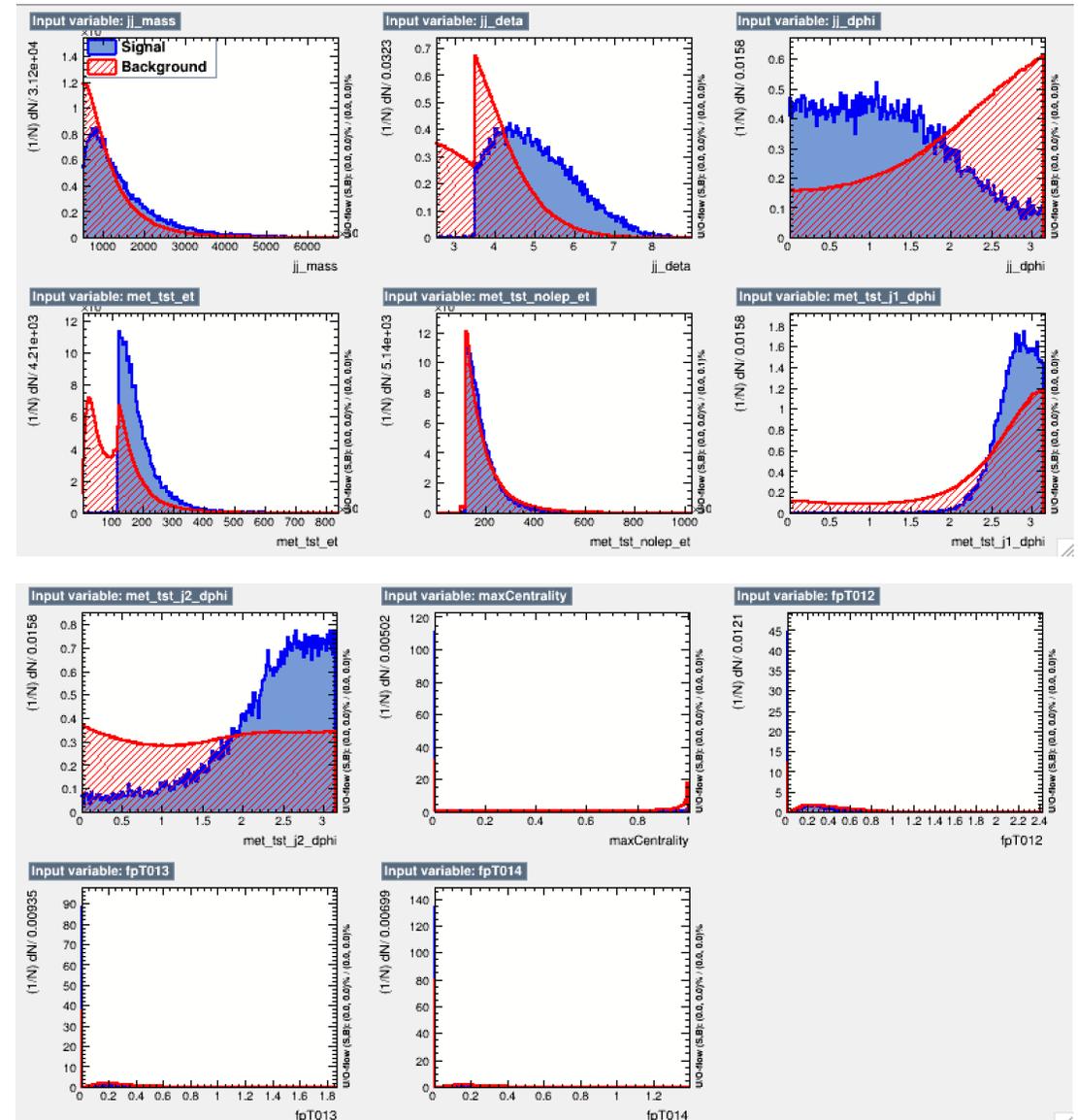
## Selected variables :

- $m_{jj}, \Delta\eta_{jj}, \Delta\phi_{jj}$
- $met\_tst, met\_tst\_et, met\_tst\_nolep\_et$
- $\Delta\phi(jet1, MET), \Delta\phi(jet1, MET)$
- $maxCentrality$

For  $i = 3, 4$  jets

$$\bullet \quad fp0Ti = f_i^p = \frac{2p_{T,i}}{p_{T,1} + p_{T,2}}$$

*in progress*

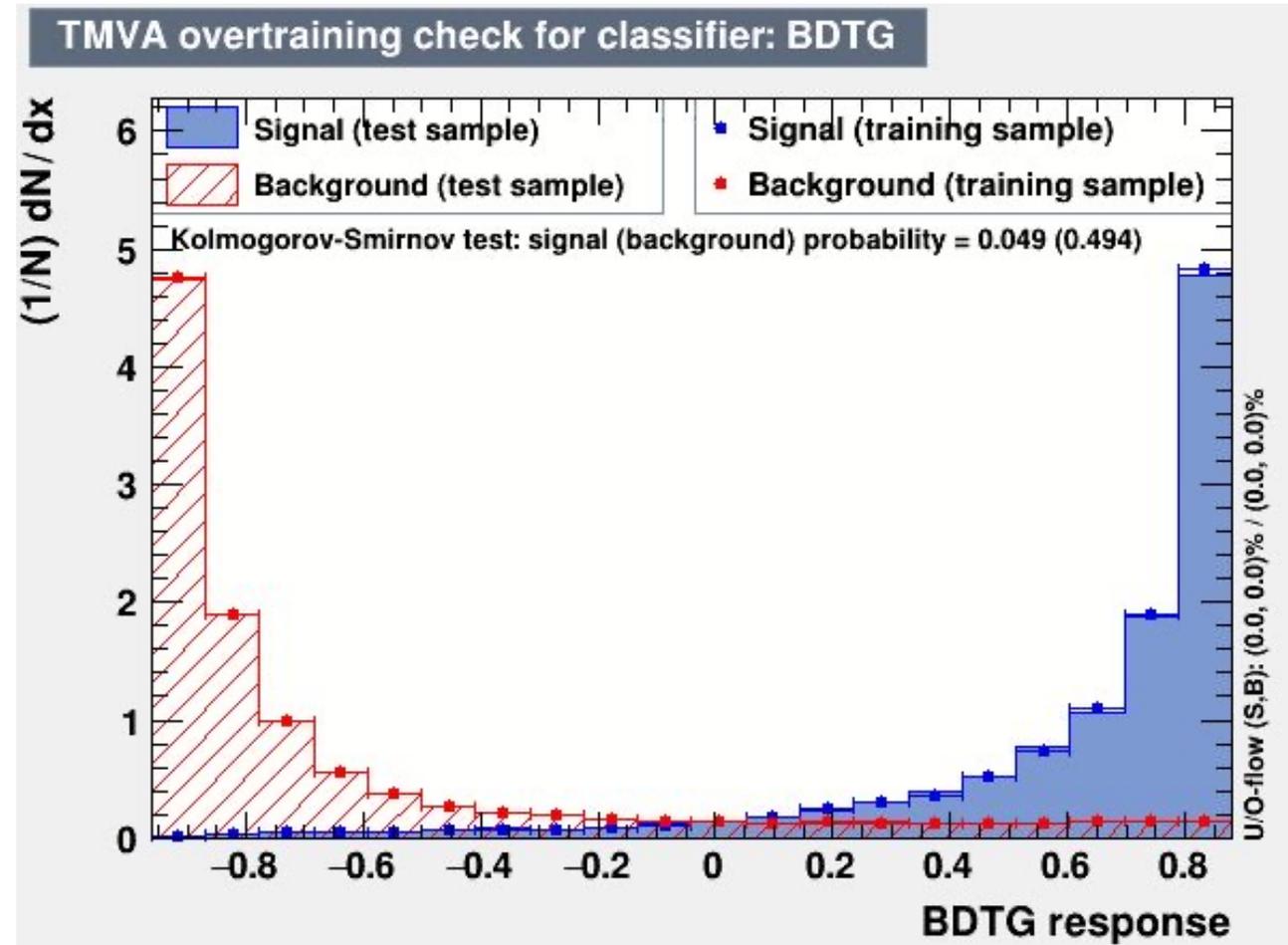


# Output response signal + all bkg (with 1.0 weight) ), old+new vars opt

- Signal vs all bkg processes

```
DataSet      MVA
Name:        Method:      ROC-integ
dataset_05   BDTG           : 0.965
```

Rank	Variable	Variable Importance
1	jj_deta	2.059e-01
2	met_tst_et	1.866e-01
3	maxCentrality	1.837e-01
4	met_tst_j2_dphi	7.670e-02
5	fpT013	6.982e-02
6	met_tst_j1_dphi	6.979e-02
7	jj_dphi	6.514e-02
8	fpT012	6.223e-02
9	fpT014	4.828e-02
10	jj_mass	1.823e-02
11	met_tst_nolep_et	1.357e-02



# Conclusion

- Searches for invisible decays of the Higgs boson using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of pp collision data at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  recorded in Run 2 of the LHC in several Higgs boson production topologies were performed
- A statistical combination of Run2+Run1 results  **$\text{BR}(\text{H} \rightarrow \text{inv}) < 10.7 (7.7) \% @ 95\% \text{ CL}$**
- In ATLAS experiment the VBF+MET final state is the most sensitive channel resulting in an upper limit of  **$\text{BR}(\text{H} \rightarrow \text{inv}) < 0.145 (0.103) @ 95\% \text{ CL}$**
- Results were included in paper «**Combination of searches for invisible decays of the Higgs boson using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  collected with the ATLAS experiment**» [Phys. Lett. B 842 \(2023\) 137963](#)
- The search for Higgs invisible decays will be continued using Run2 and partial Run3 data

Thank you for your attention

Backup slides

# Результаты $H \rightarrow inv$ поиска в моно-Z канале

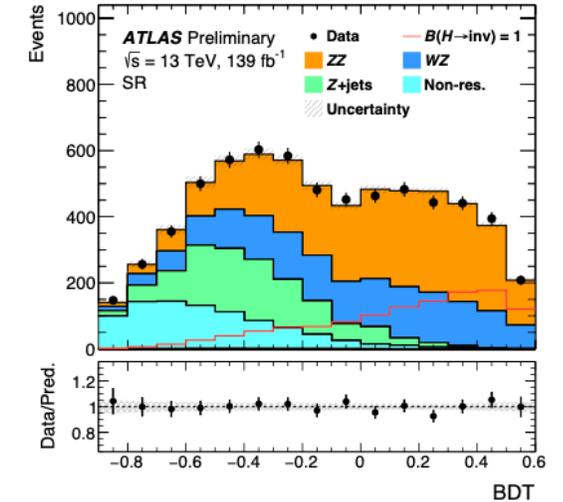
**Boosted Decision Tree (BDT)** – многопараметрический метод анализа для оптимизации сигнальной области

**Кинематические переменные, которые входят в состав BDT как параметры:**

$$\Delta R(l\bar{l}), m_{ll}, MET / HT, MET \text{ significance}, \Delta\Phi(E_T^{miss}, Z), \eta_Z, frac_{p_T}$$

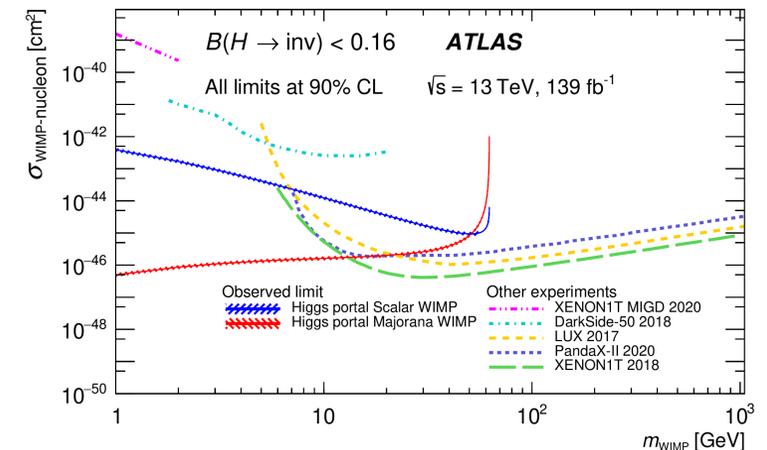
скалярная сумма  $p_T$

	SR	$e\mu$ CR	$3\ell$ CR	$4\ell$ CR
Observed events	6382	891	11415	314
Expected yields after fit	$6385 \pm 80$	$894 \pm 29$	$11410 \pm 110$	$295 \pm 11$
$ZH \rightarrow \ell\bar{\ell} + inv$	$-4 \pm 110$	-	-	-
$ZZ \rightarrow \ell\bar{\ell} \nu\nu$	$2669 \pm 110$	-	$443.4 \pm 7.5$	-
$WZ$	$1624 \pm 28$	$11.59 \pm 0.23$	$10646 \pm 110$	-
$Z + jets$	$1110 \pm 100$	$0.802 \pm 0.018$	$237.6 \pm 4.0$	-
Non-resonant	$876 \pm 39$	$878 \pm 29$	-	-
$ZZ \rightarrow \ell\bar{\ell}\ell\bar{\ell}$	$85.2 \pm 5.5$	-	-	$295 \pm 11$
$t\bar{t}V$	$12.5 \pm 1.1$	$1.769 \pm 0.036$	$48.98 \pm 0.82$	-
Triboson	$12.2 \pm 1.4$	$2.886 \pm 0.076$	$35.65 \pm 0.60$	-



Вклад фоновых процессов для сигнальной и контрольных областей.

Подробнее: [Phys. Lett. B 829 \(2022\) 137066](https://arxiv.org/abs/2203.13706)



- 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)

# Поиск $H(\text{inv})$ на примере моно- $Z$ анализа

В моно- $Z$  анализе отбираются события с двумя лептонами от распада  $Z$ -бозона и с недостающей поперечной энергией  $E_T^{\text{miss}}$  в конечном состоянии :  $Z \rightarrow l^+ l^- + E_T^{\text{miss}} (l = e, \mu)$

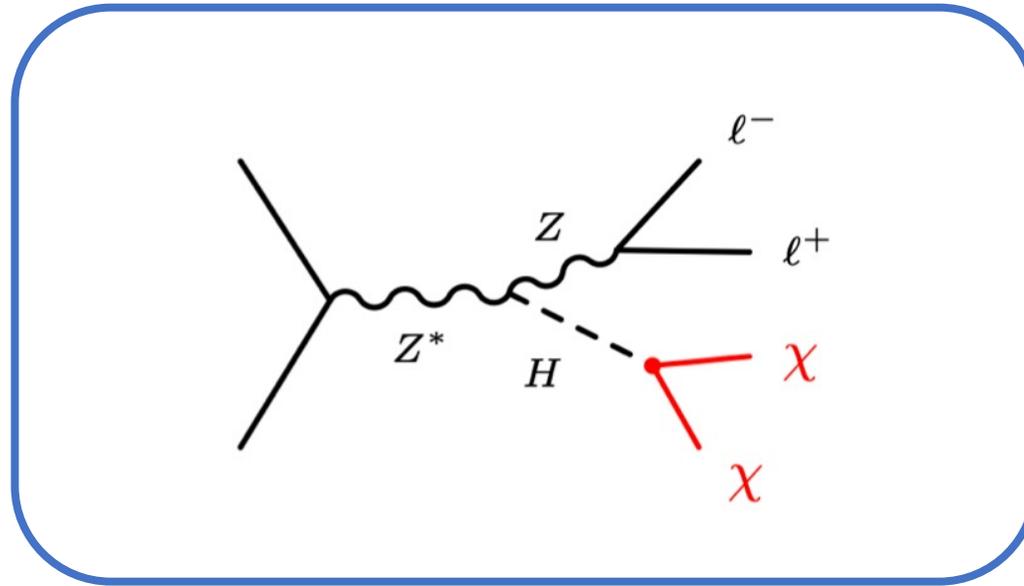
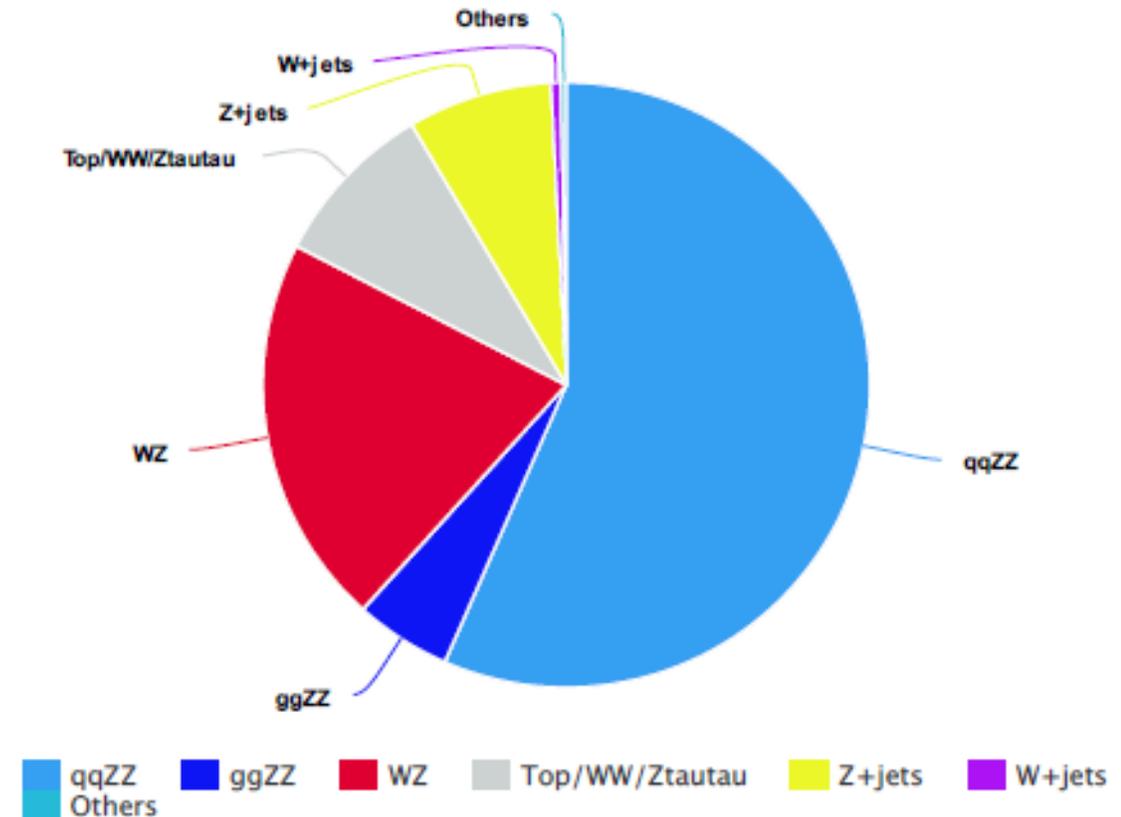


Диаграмма Фейнмана в рамках  
ассоциативного рождения  $Z$ -бозона  
при  $H(\text{inv})$

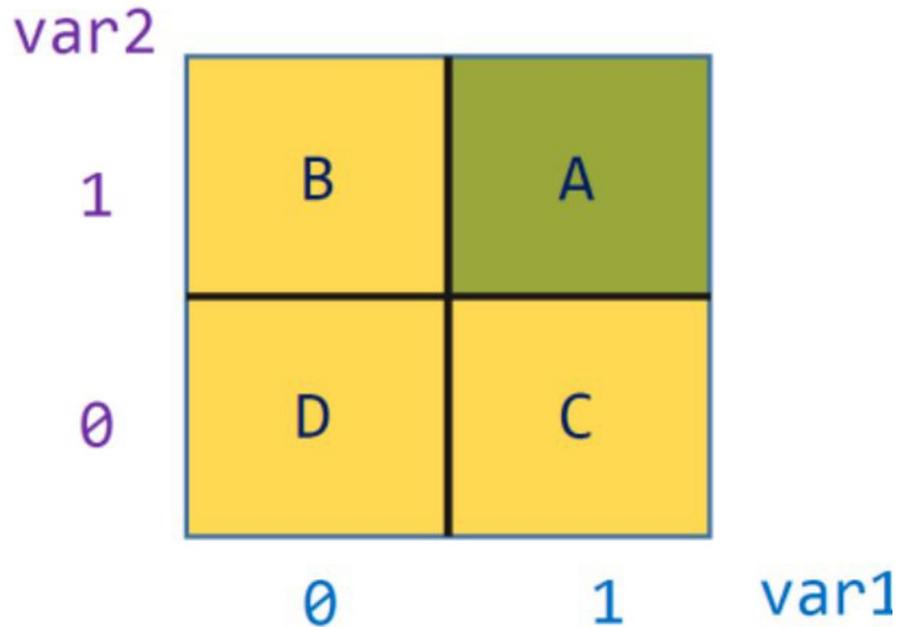
# Методы оценки фоновых процессов

Фоновый процесс	Метод	Вклад, %
ZZ	метод четырехлептонной контрольной области	46%
WZ	метод трехлептонной контрольной области	27%
WW / Wt / t / tt / Z ( $\tau\tau$ )	ем контрольная область	15%
Z + jets	One sideband , ABCD (data-driven)	12%
Другие ttV(V) / VVV	data-driven	< 1%

Фоновые процессы, методы оценки и их вклад в сигнальную область, полученные с помощью методов оценки процессов + МК



# ABCD метод



$$N_A^{est} = N_C^{obs,sub} \frac{N_B^{obs,sub}}{N_D^{obs,sub}} \quad N_A^{MC} \neq N_C^{MC} \frac{N_B^{MC}}{N_D^{MC}}$$

В результате анализа было показано, что кинематические переменные сильно коррелируют. В качестве альтернативы этому методу был проверен так называемый **логический ABCD** метод. В этом методе, вместо кинематической переменной используются логические переменные **var1** и **var2**.

$$N_A^{Zj,est} = (N_C^{data} - N_C^{non-Zj,MC}) \cdot \frac{N_B^{data} - N_B^{non-Zj,MC}}{N_D^{data} - N_D^{non-Zj,MC}} \cdot (1 + \varepsilon)$$

$\varepsilon$  - смещенная оценка числа событий, мера корреляций

# One sideband метод

<p>Контрольная область (CR) <math>E_T^{miss}</math> sign. &lt;9</p>	<p>Сигнальная области (SR) <math>E_T^{miss}</math> sign. &gt;9</p>
---	--

$$N_{SR}^{est, DATA} = N_{CR}^{data, sub} \frac{N_{SR}^{MC, Z+jets}}{N_{CR}^{MC, Z+jets}}$$

$$N_{CR}^{data, sub} = N_{CR}^{data} - N_{CR}^{MC, non Z+jets}$$

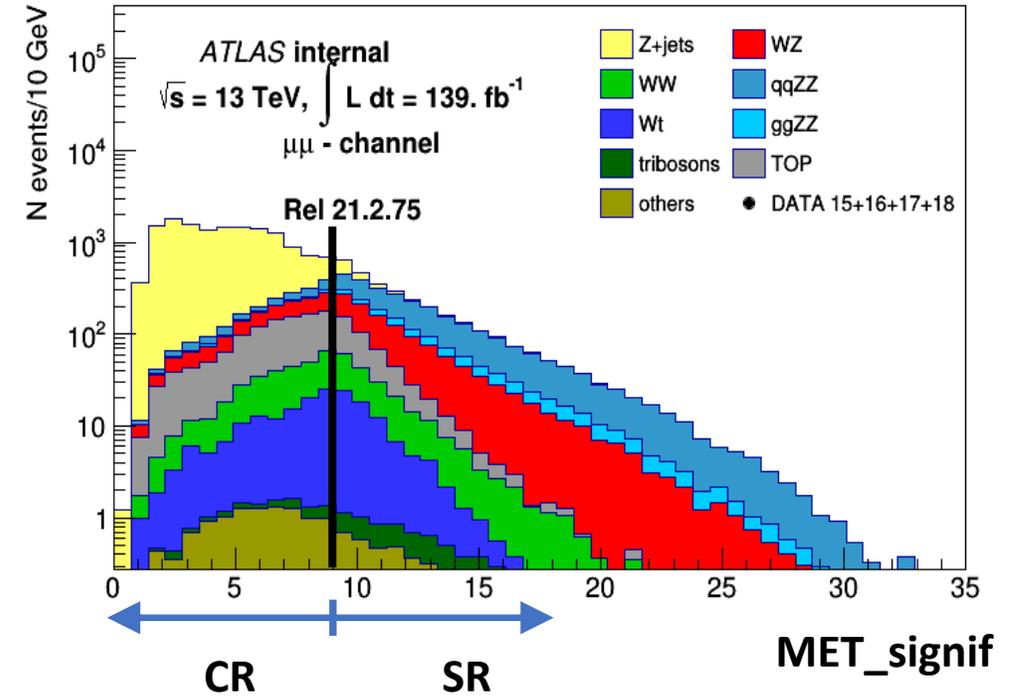
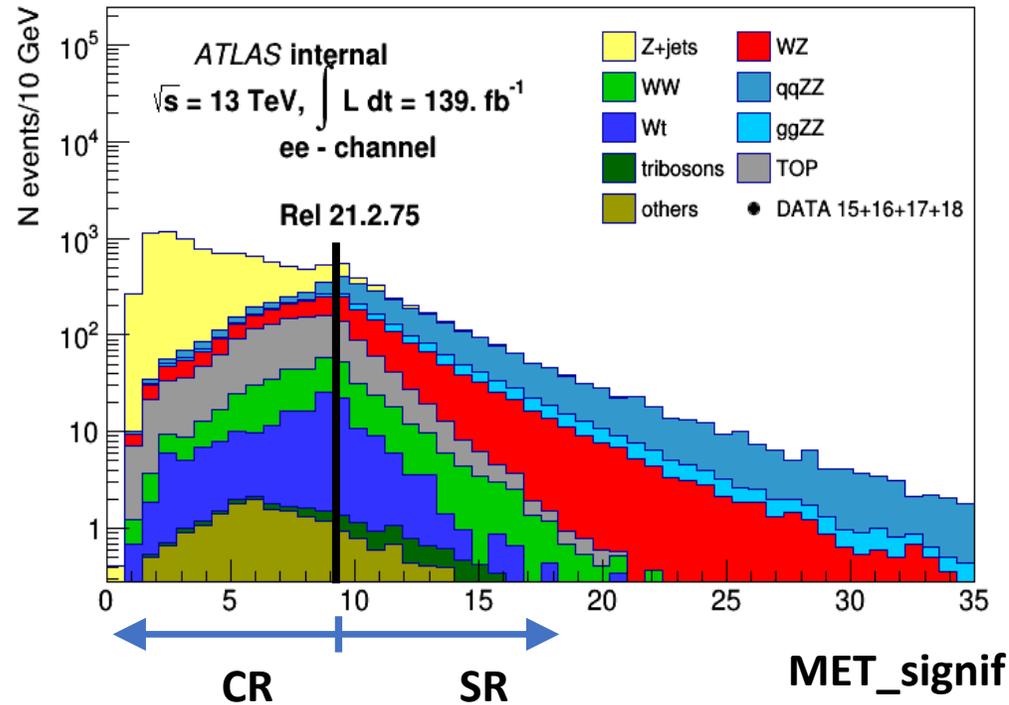
$E_T^{miss}$  significance - статистическая значимость недостающей поперечной энергии  $E_T^{miss}$ .  
Она используется как переменная для разделения контрольной и сигнальной областей

$$Purity = \frac{N_{CR}^{MC, Z+jets}}{N_{CR}^{MC}} \cdot 100 \%$$

# $E_T^{miss}$ significance

ee-channel

$\mu\mu$ -channel



Распределение числа событий по переменной  $E_T^{miss}$  significance после применения всех критериев отбора для электронного и мюонного каналов.

Z+jets доминирует в контрольной области где  $E_T^{miss}$  significance < 9

# Результаты оценки вклада фонового процесса

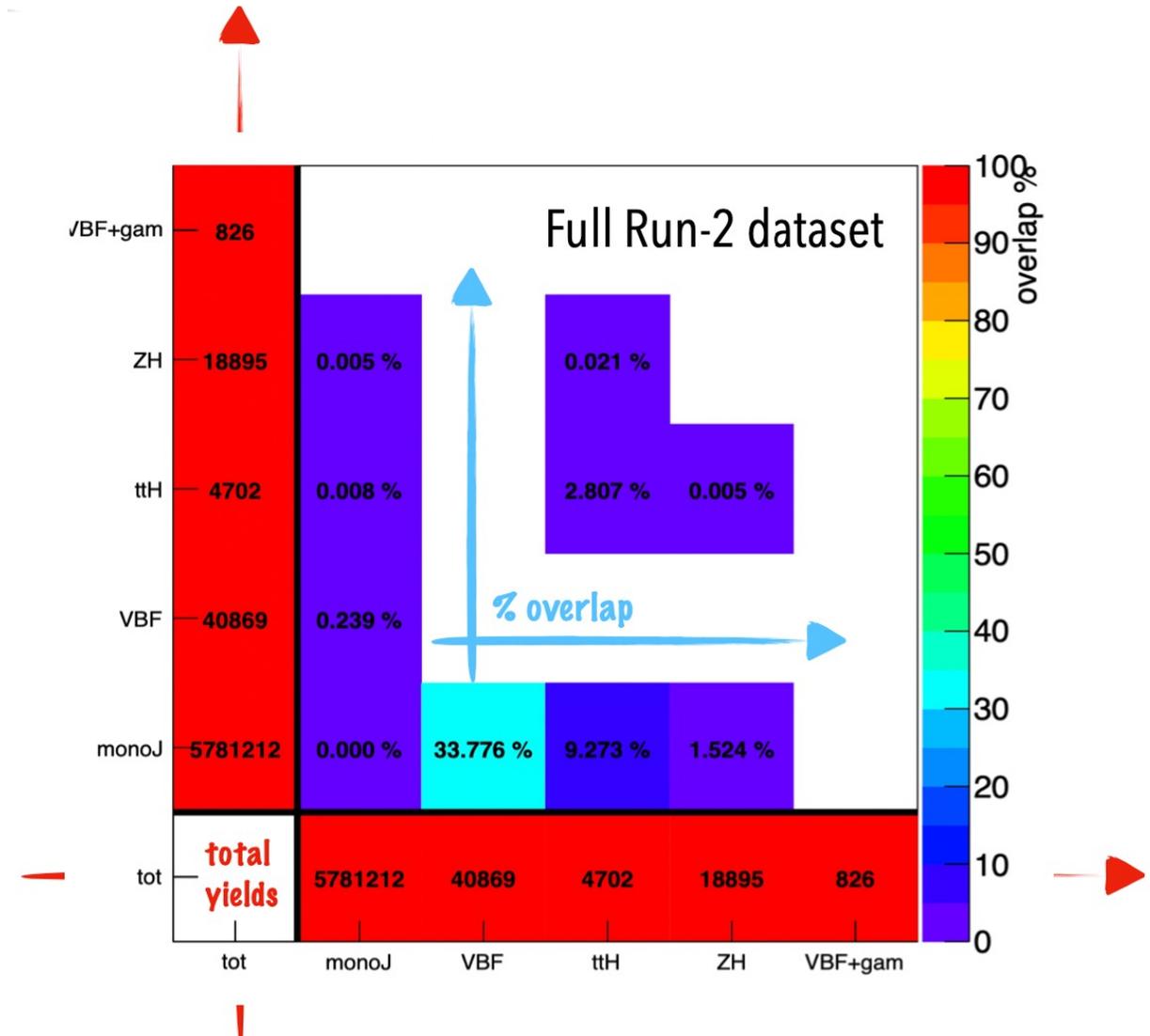
## Z + струи методом контрольной области

Канал	$N_{SR}^{MC,Z+jets}$	$N_{CR}^{data,sub}$	$N_{SR}^{MC,Z+jets} / N_{CR}^{MC,Z+jets}$	$N_{SR}^{est, DATA}$	Purity
ee	$326.5 \pm 24.7$	6004.47	$0.049 \pm 0.003$	$299 \pm 23$	75%
$\mu\mu$	$408.8 \pm 29.9$	12209.2	$0.033 \pm 0.002$	$406 \pm 30$	84%

Оценки событий полученные для электронного и мюонного каналов с помощью метода контрольной области (One sideband) при стандартных критериях отбора

# Исследования перекрытия между анализами

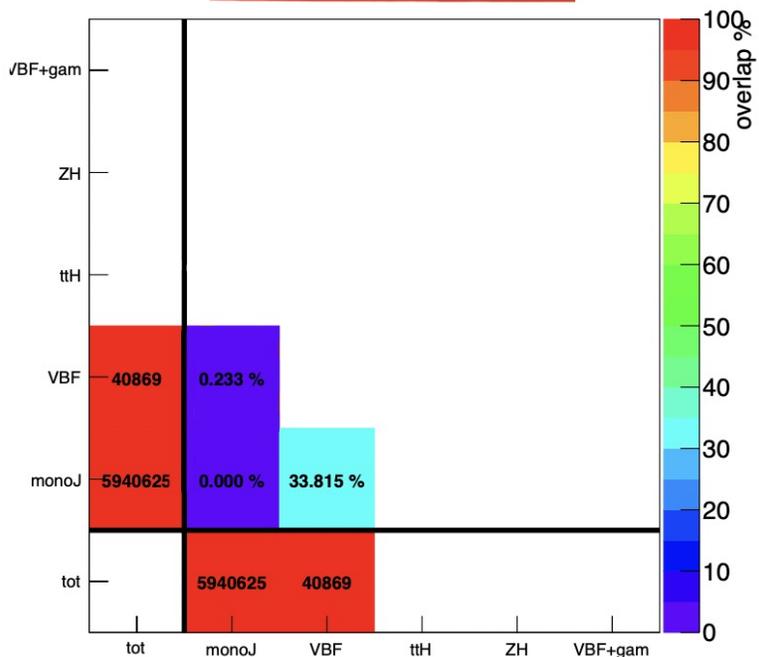
- Величину перекрытия в эксперименте можно измерить количественно, сравнив, какие события выбираются с помощью различных анализов в ключевых выборках
- Такое сравнение было рассмотрено с помощью написанной в коллаборации ATLAS программы **checkOverlap**.



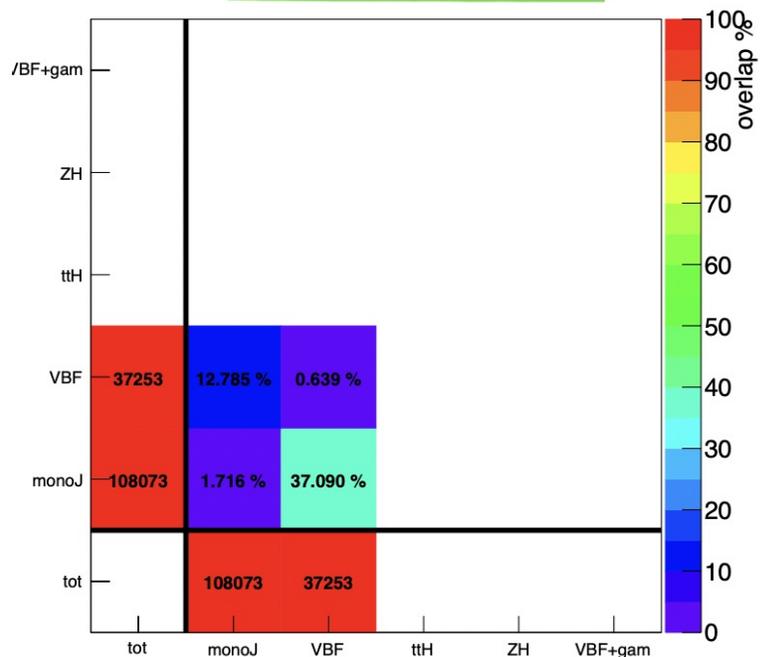
# Исследование перекрытия между моно-jet и VBF анализами

Рассматривая события с помощью программы checkOverlap было выявлено наличие перекрытия между моно-jet и VBF анализами при объединении анализов по поиску невидимых распадов бозона Хиггса.

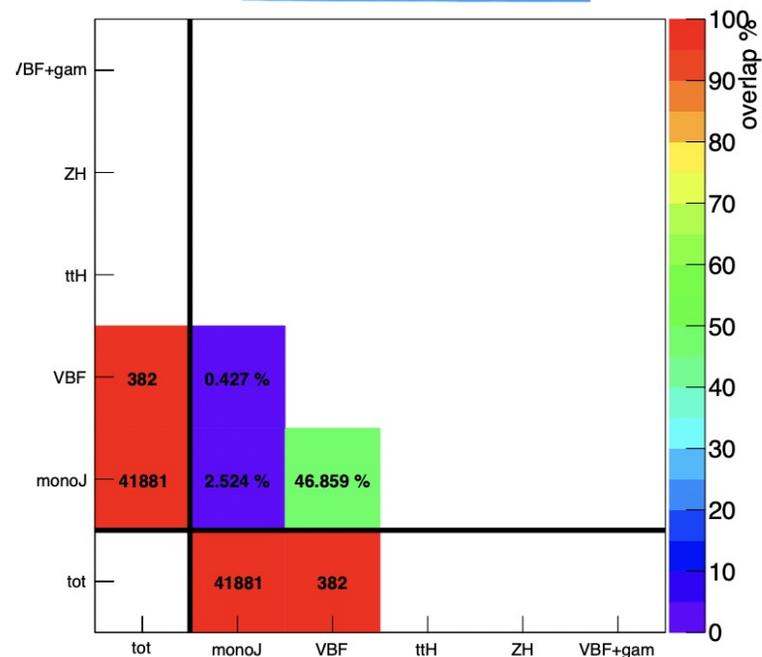
Данные Run-2



VBF Hinv

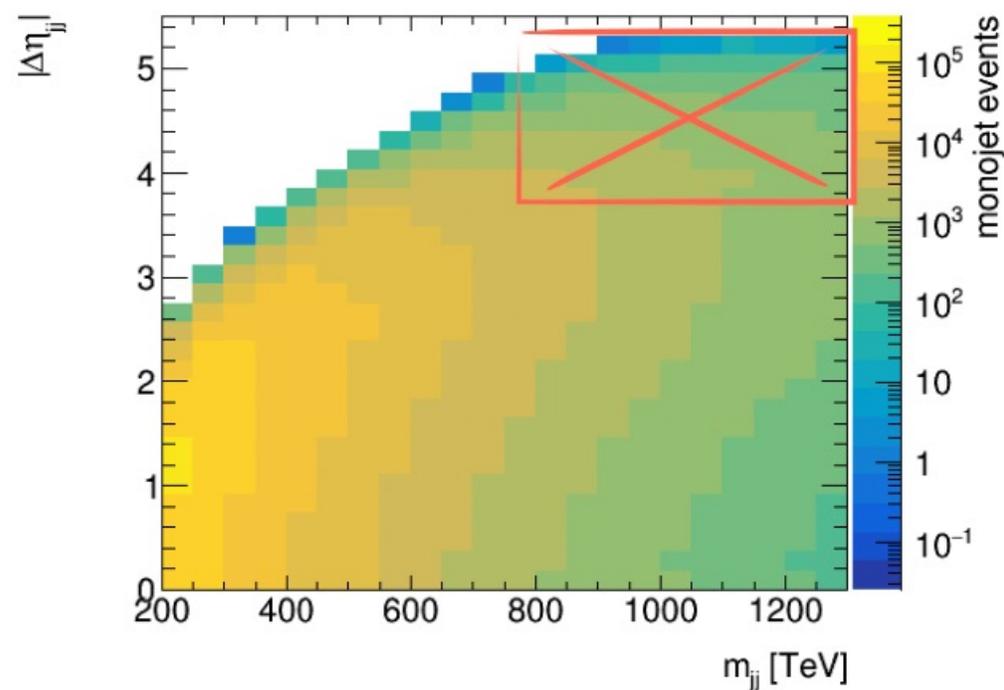
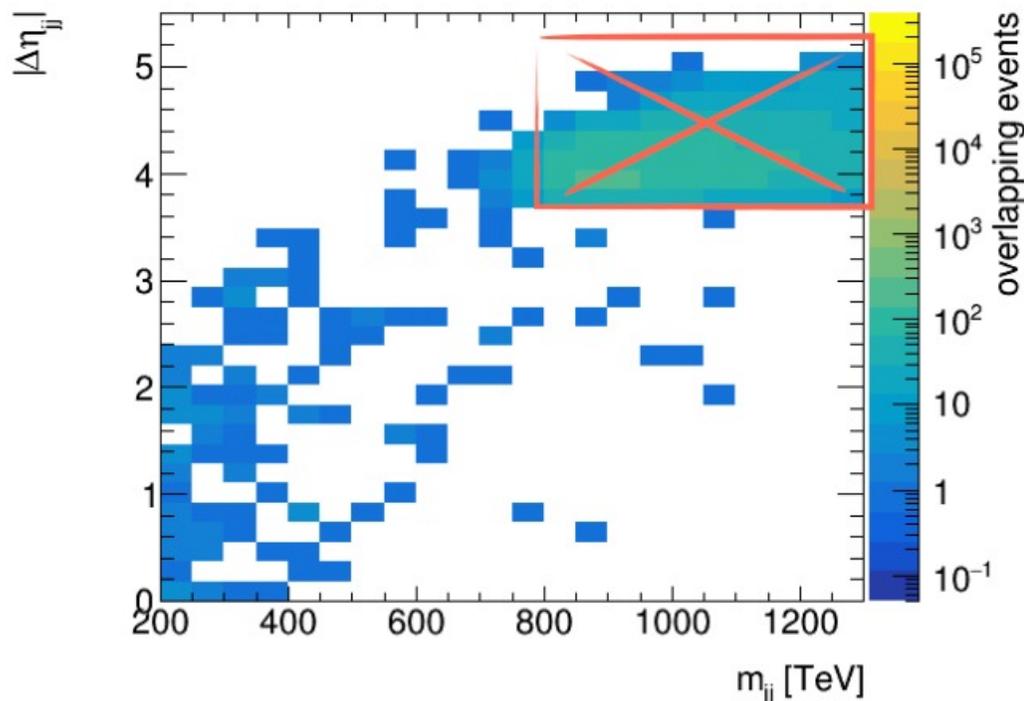


ggF Hinv



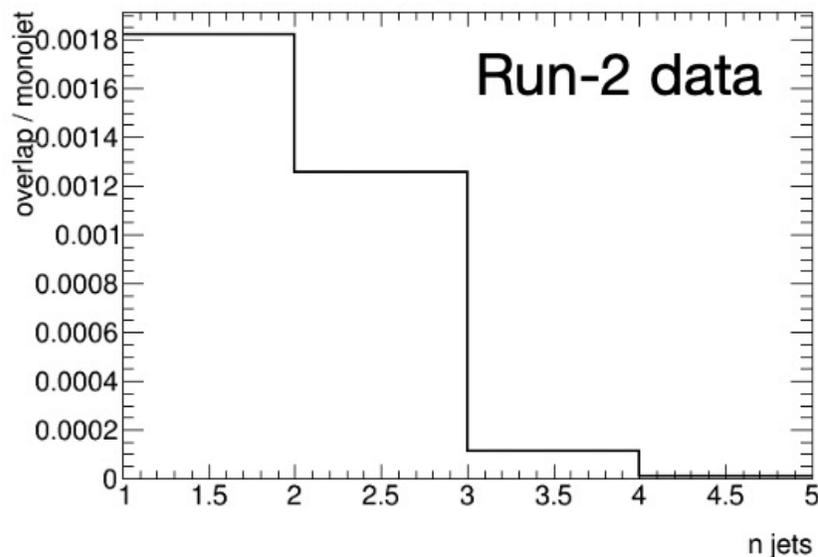
- Требовалось установить дополнительные ограничения на отбор сигнальных событий, которые максимально уменьшат перекрытие между анализами и окажут небольшое влияние на сокращения количества событий.

$$m_{dijet} > 800 \text{ GeV} \ \&\& \ |\Delta\eta_{jj}| > 3.8$$

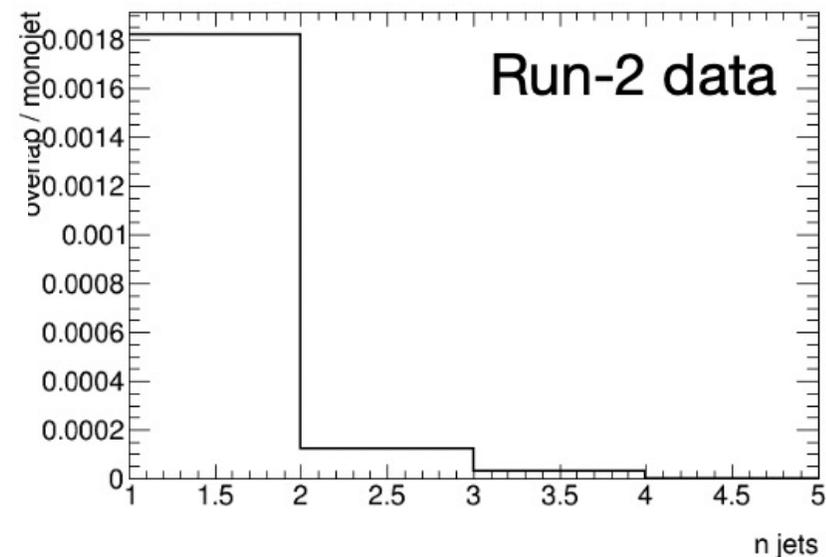


2D распределение соотношения переменных  $m_{dijet}$  и  $\Delta\eta_{jj}$  для наборов overlap и моно-jet

- Ограничение на  $(m_{jj}, \Delta\eta)$  применяется только к событиям с количеством струй более 1



$(m_{dijet}, |\Delta\eta_{jj}|)$



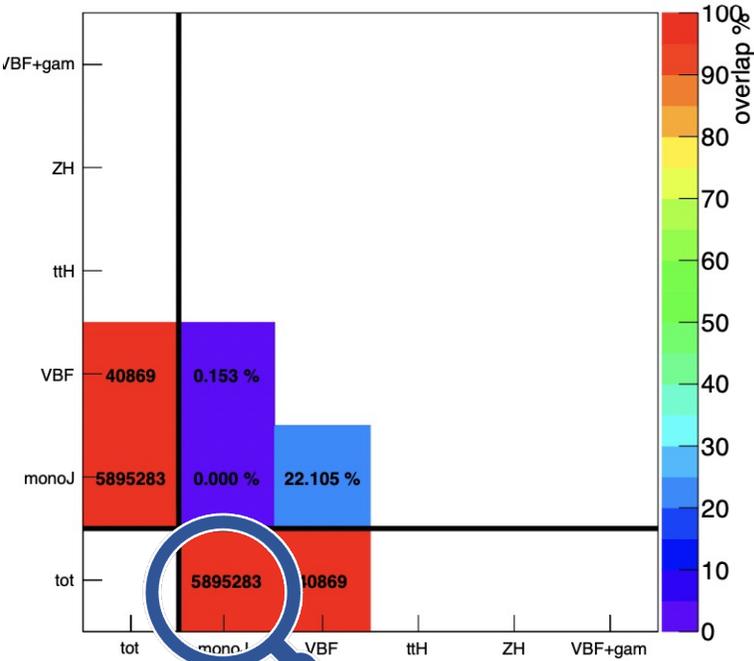
События только с одной струей в моно-jet не затрагиваются, т.к. при отборе событий для моно-jet ограничения на  $\Delta\eta$  струи более строгие, чем для VBF

**VBF +  $E_T^{\text{miss}}$**   
 •  $|\Delta\eta_{jj}| > 3.8$

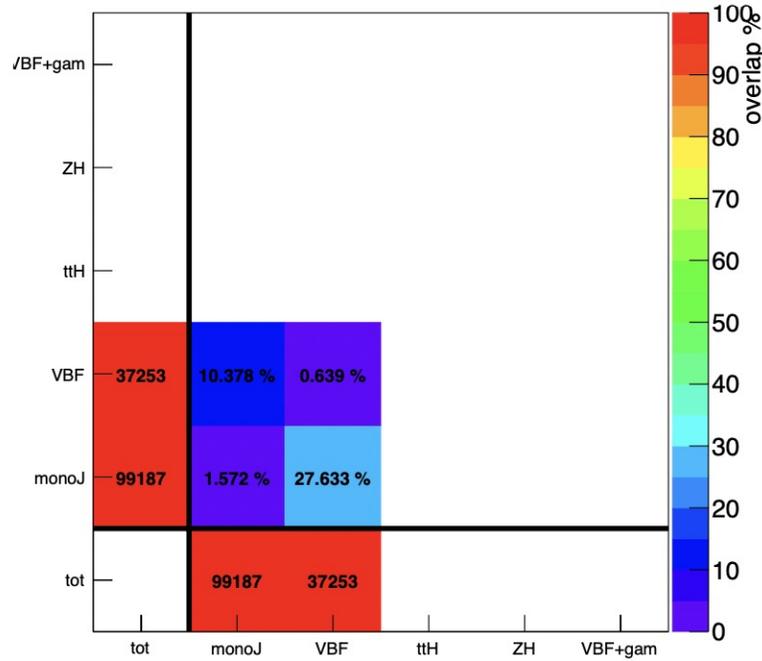
**Mono-Jet**  
 •  $|\Delta\eta_{jj}| < 2.4$

# Перекрытие между моно-jet и VBF анализами после $(m_{jj}, \Delta\eta)$ ограничений

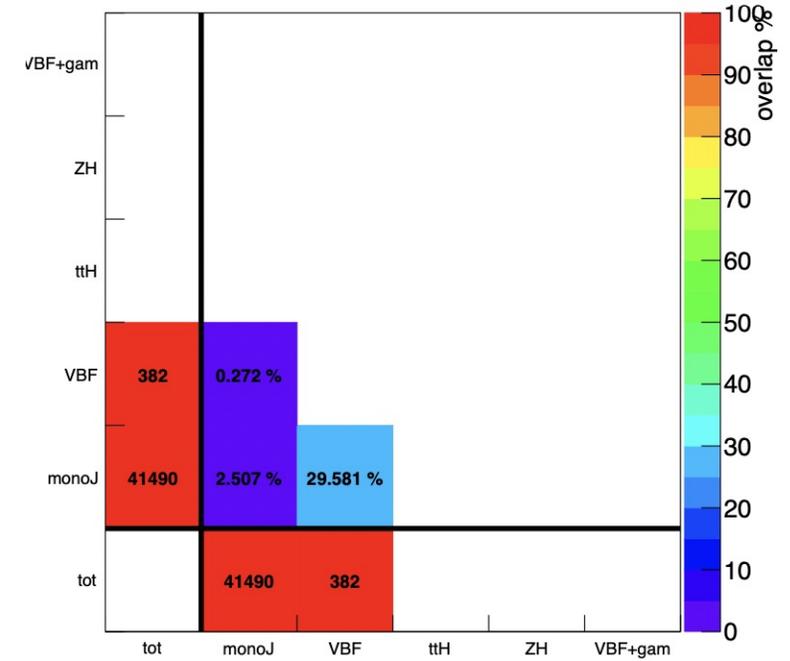
Данные Run-2



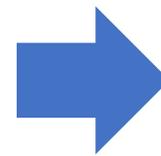
VBF Hinv



ggF Hinv

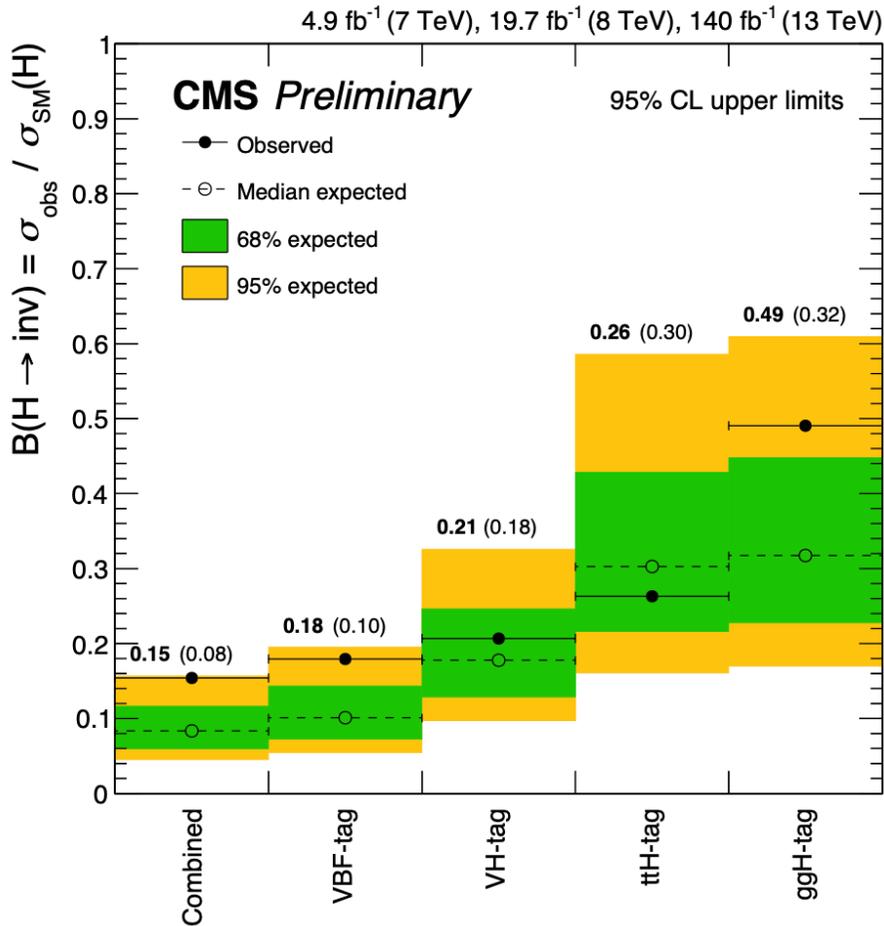


около 0,8% событий моно-jet было сокращено, перекрытие удалось уменьшить на ~12%



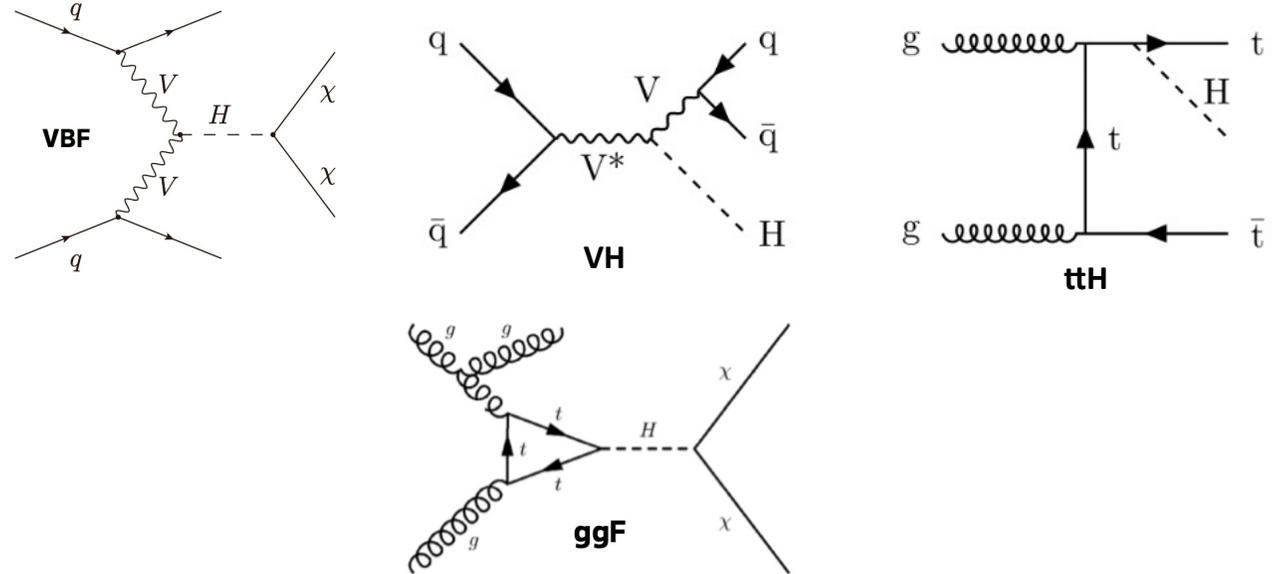
Введение дополнительного ограничения позволило сократить перекрытие между анализами.

# Сравнение с результатами CMS



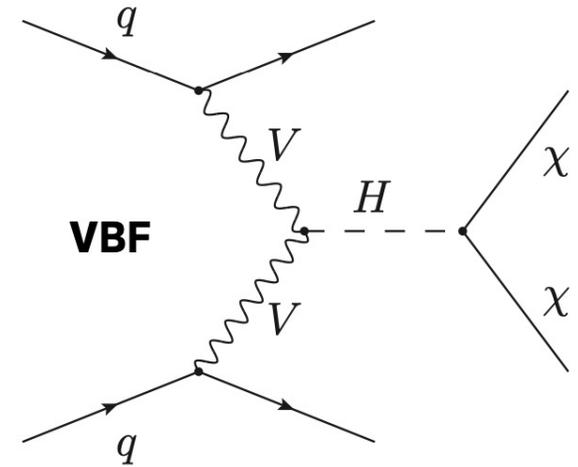
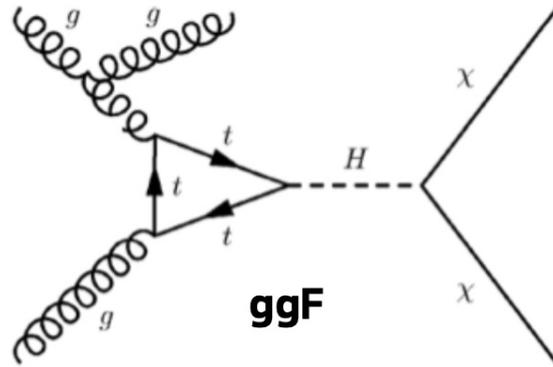
- Полученные в эксперименте CMS значения верхнего предела на вероятность  $H \rightarrow \text{inv}$  для всех каналов, Run 2 и их комбинации

**$B(H \rightarrow \text{inv}) < 15.0$  (8.0) % при 95% CL**



Подробнее: [CMS-PAS-HIG-21-007](https://arxiv.org/abs/2107.00075)

## почему VBF+MET наиболее чувствительный канал ?

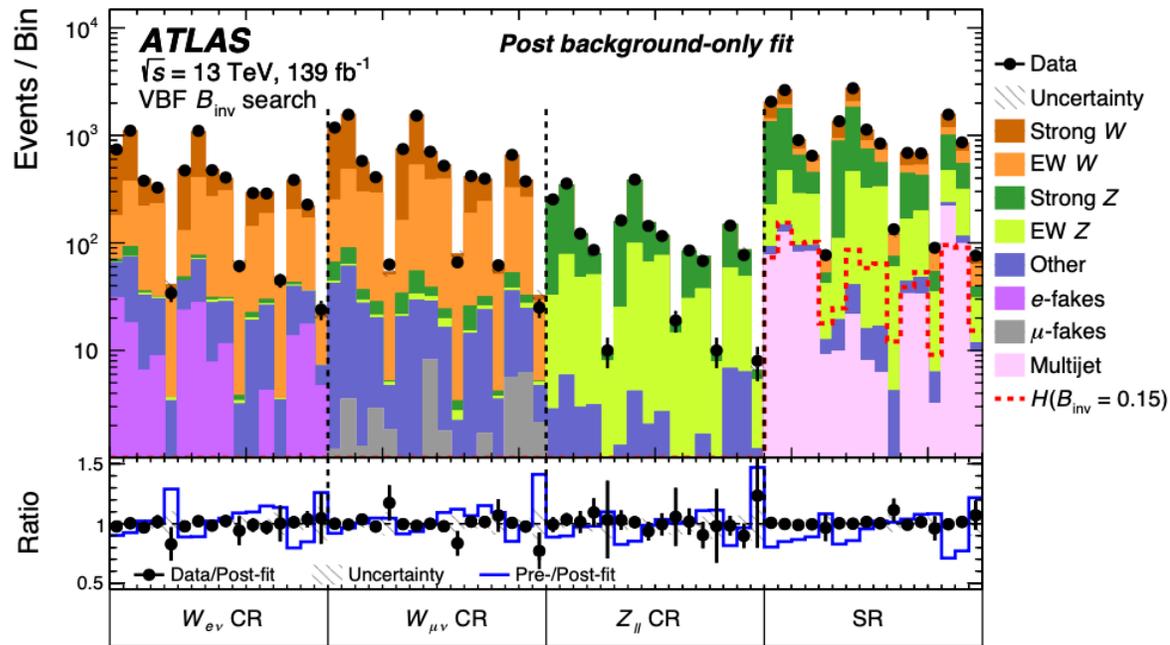


- $Z \rightarrow \nu\nu$  (strong production) is large compared to ggF: 
$$\frac{\sigma_{ggF}(H + \text{jet})}{\sigma(Z + \text{jet}) \cdot Br(Z \rightarrow \nu\nu)} \sim \frac{1}{300}$$

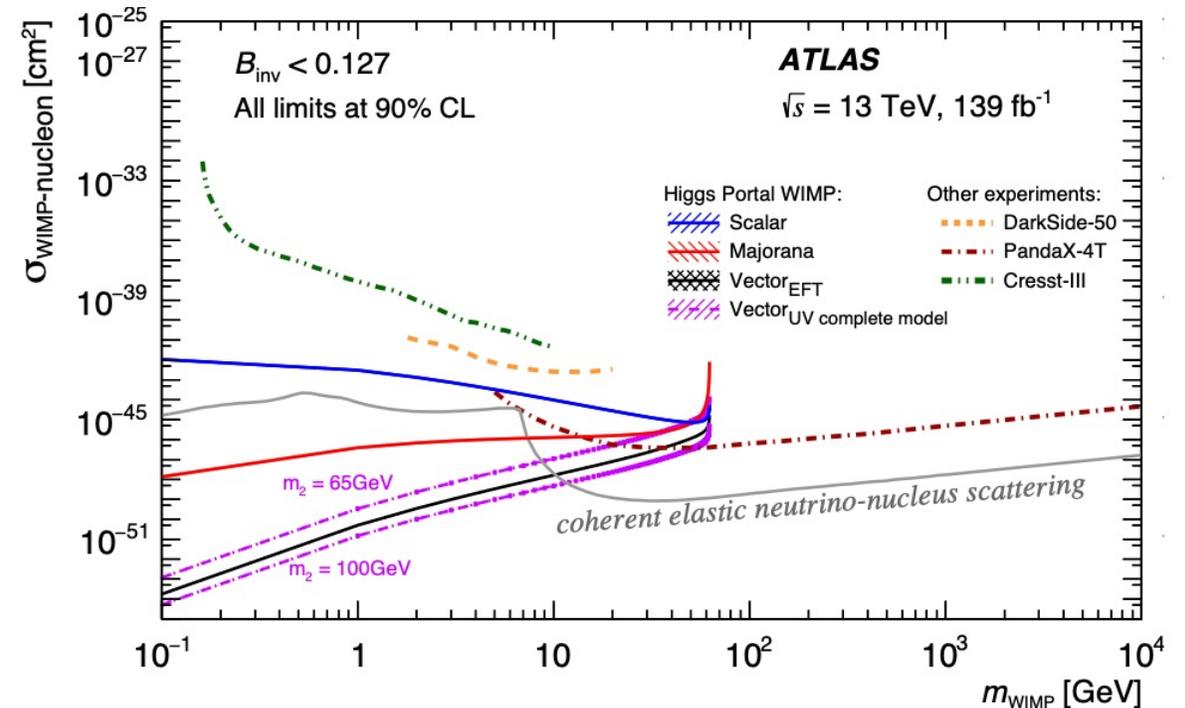
- VBF: signal and bg are comparable 
$$\frac{\sigma_{VBF}(H + qq)}{\sigma_{VBF}(Z + qq) \cdot Br(Z \rightarrow \nu\nu)} \sim \frac{4}{3}$$

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

- Нет значительного отклонения от прогнозов СМ.
- $BR(H \rightarrow inv)$ : 14,5% (наблюдаемый) при 10,3% (ожидаемый)



- SR и все CR области после фитирования и неопределенности

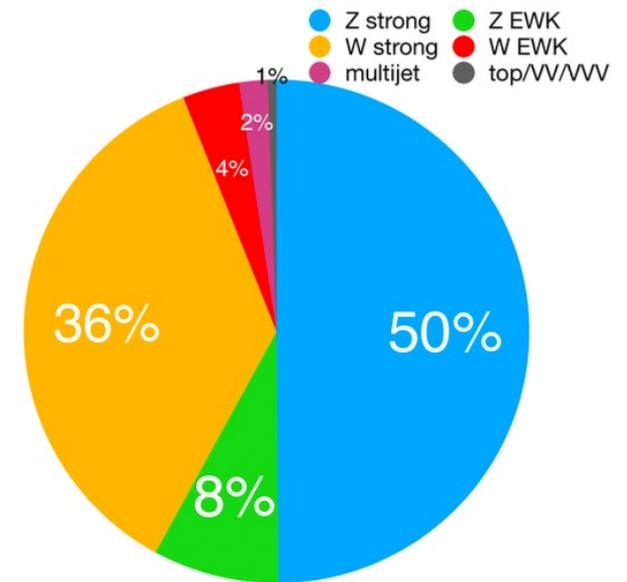


- Верхние пределы спин-независимого поперечного сечения WIMP–нуклона с использованием интерпретаций портала Хиггса  $B_{inv}$  при 90% CL в зависимости от  $m_{WIMP}$ .

# Оценка фоновых процессов

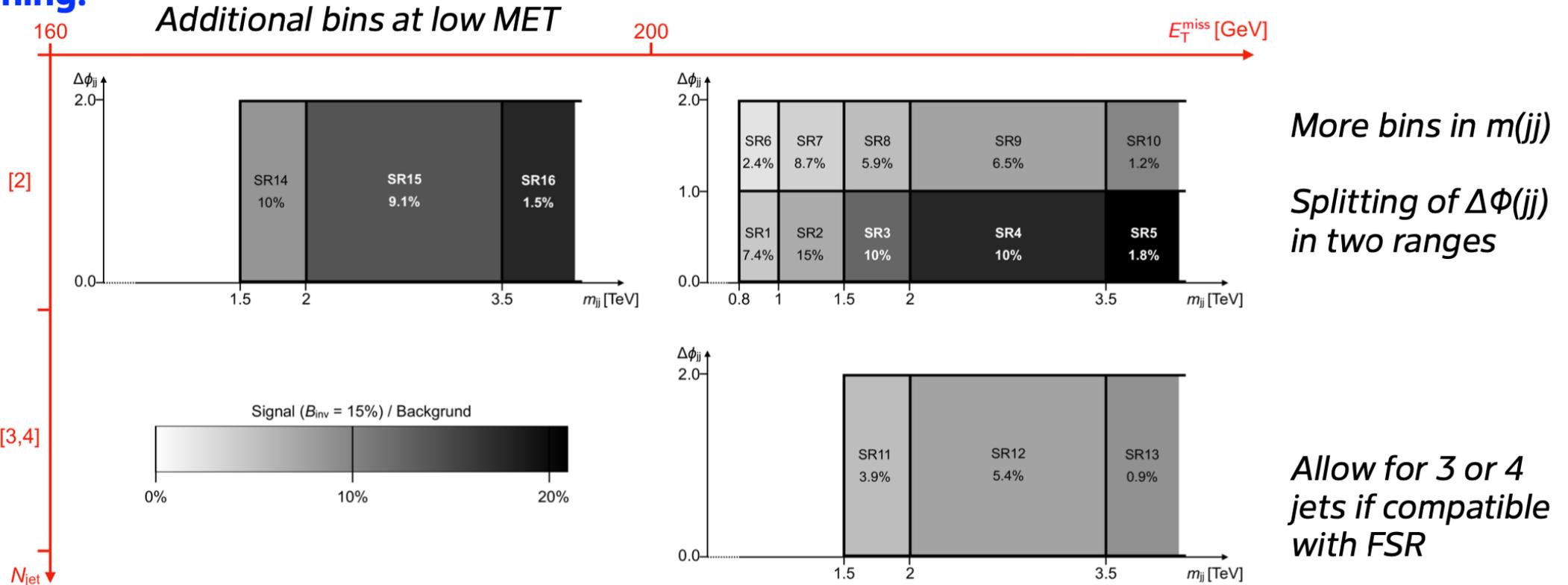
- Хорошее разделение фоновых и сигнальных событий – разделение SR на 16 категорий. CR заданы отдельно для методов оценки фоновых событий.
- $V$ +jets фоновые процессы составляют около 95% фоновых событий в SR, их вклад оценивается с помощью выделенных контрольных областей.
- Меньший вклад обусловлен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

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



36 fb<sup>-1</sup> result: only three  $m(jj)$  bins (1–1.5, 1.5–2, >2 TeV); MET > 180 GeV (no bins with 3 or 4 jet)

**New binning:**



*More bins in  $m(jj)$*

*Splitting of  $\Delta\Phi(jj)$  in two ranges*

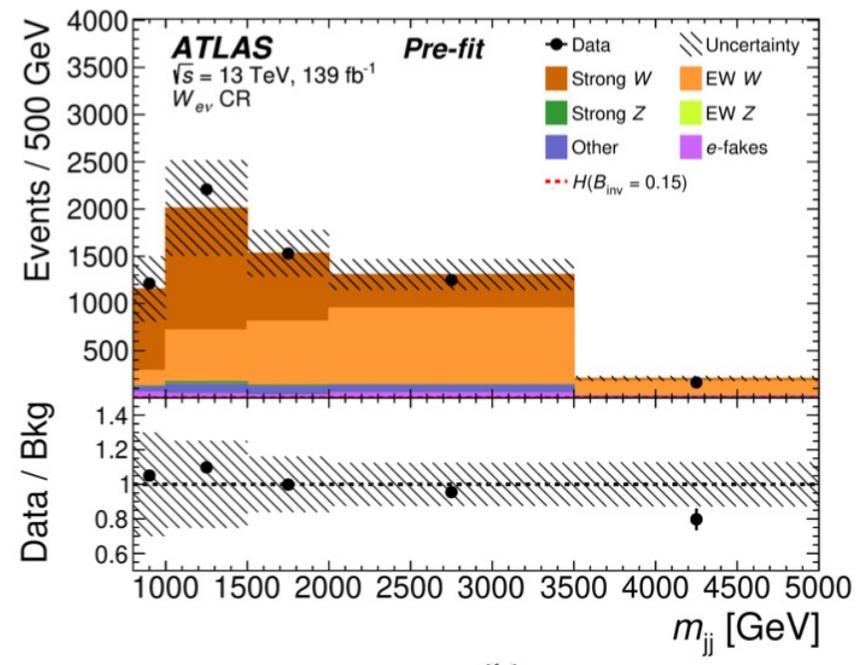
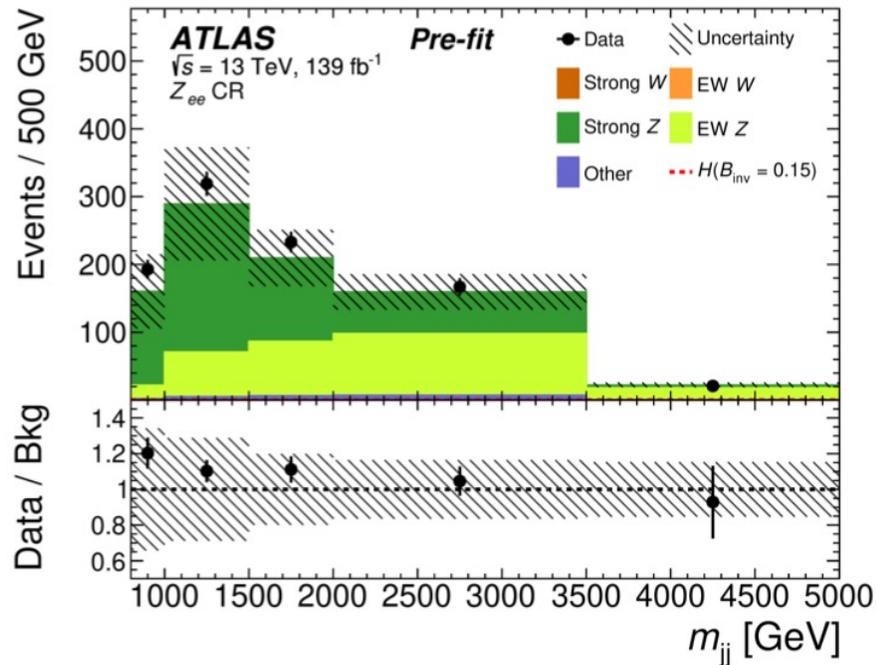
*Allow for 3 or 4 jets if compatible with FSR*

*Shading indicates S/B, assuming BR of Higgs boson to invisible particles of 0.15*

*Percentage gives approximate contribution of signal from invisibly decaying Higgs bosons relative to total signal yield in inclusive SR*

# $V + jets$ 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

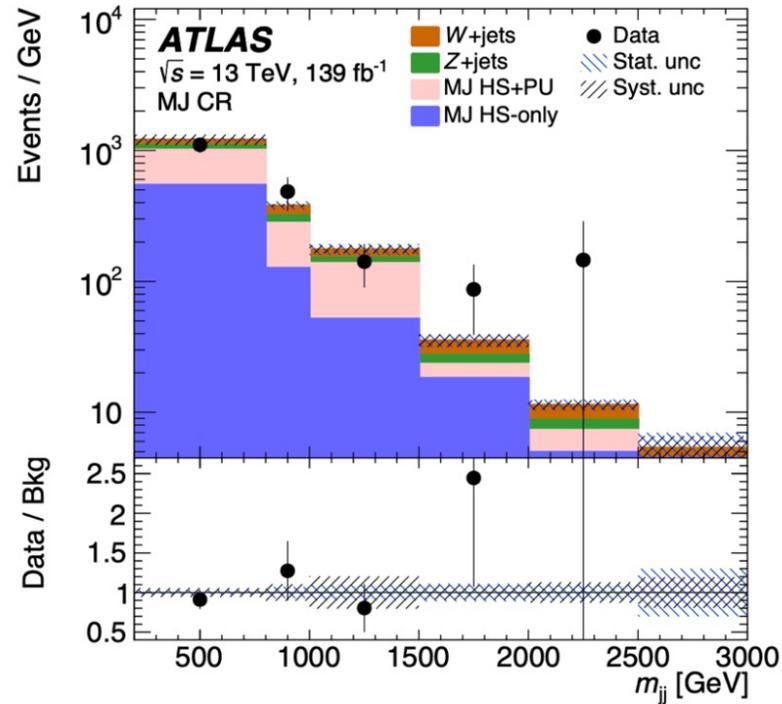
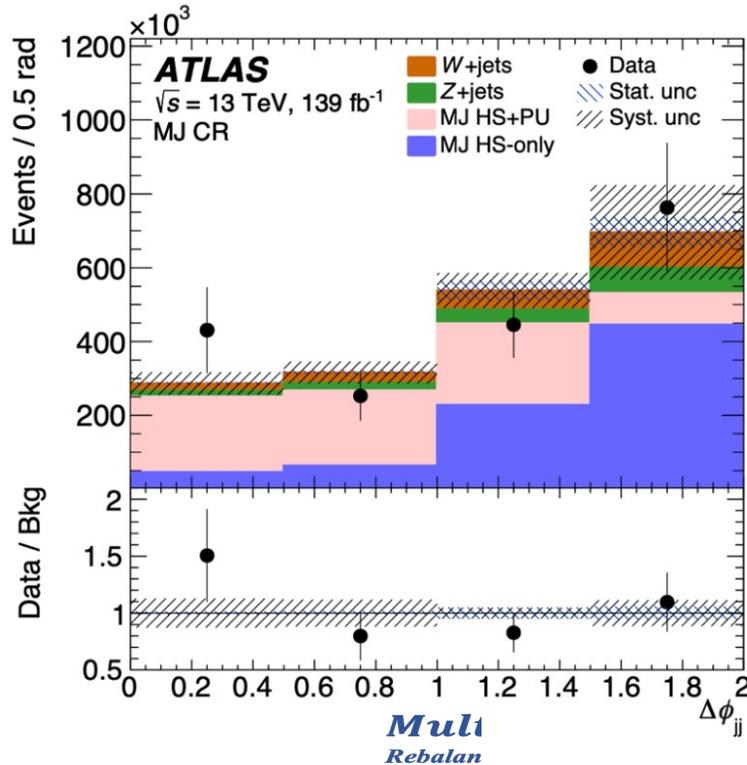


Полученные в Run2 распределения по  $m_{jj}$  для (а)  $W (\rightarrow lv)$  и (б)  $Z (\rightarrow ll)$  контрольных областей

# 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

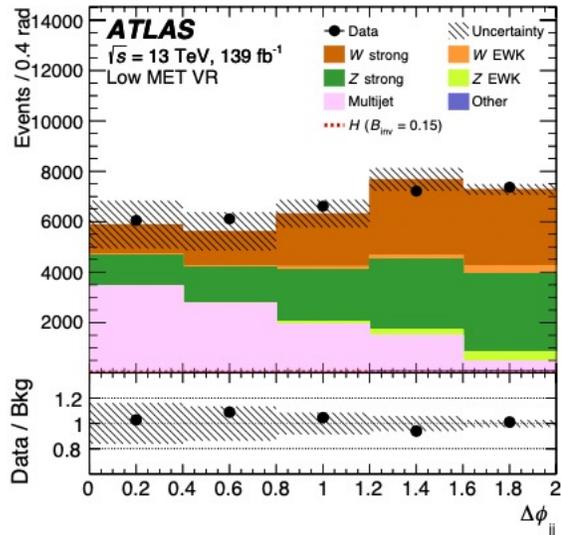


Полученные в Run2 распределения (а)  $\Delta\phi_{jj}$  и (б)  $m_{jj}$  в MJ region  
( $100 \text{ GeV} < E_{miss}^T < 200 \text{ GeV}$ ,  $m_{jj} > 400 \text{ GeV}$ ,  $N_{jet} = 2$ ,  $\Delta\eta_{jj} > 2.5$ )

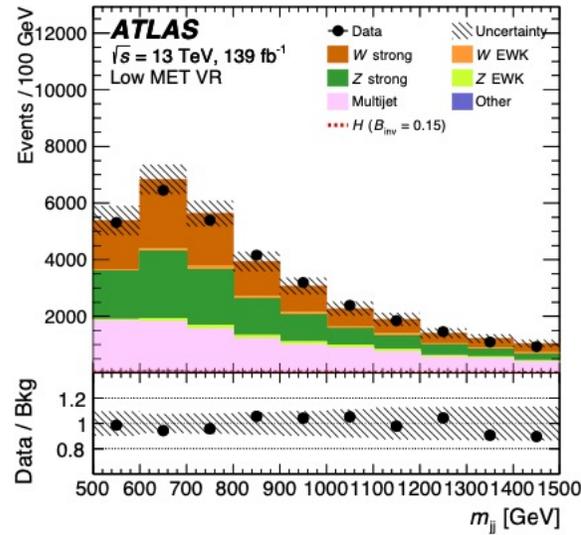
# Multijet фоновый процесс

## 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)

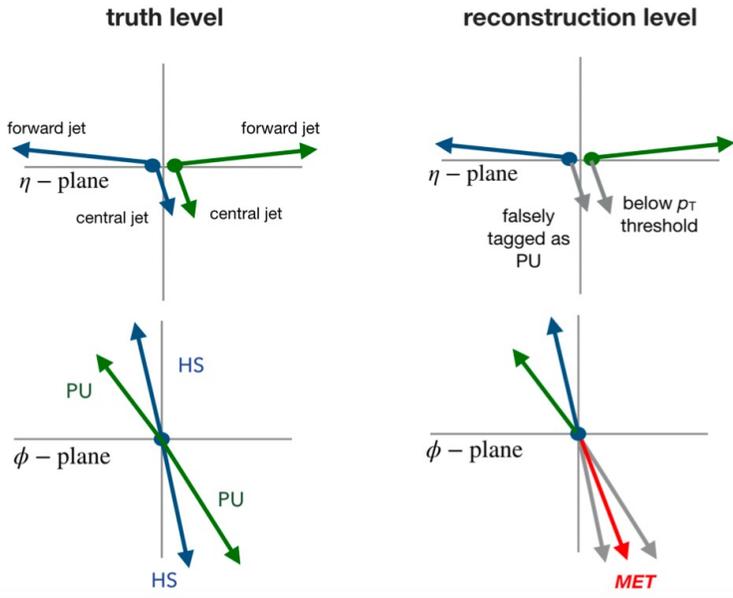
- SR : критерии отбора + FJVT > 0.5
- CR : критерии отбора + FJVT < 0.5

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

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

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

# Multijet фоновый процесс



*При наличии большого количества перекрывающихся событий (Pile-up – PU) неправильное определение струй может привести к симуляции сигнального события фоновым.*

- Вклад КХД многоструйного фонового процесса в данном анализе ожидается небольшой за счет критериев отбора событий.
- Но оценку данного фонового процесса получить не просто, так как помимо недостаточной статистики, и из-за ошибок при реконструкции струй и неточной идентификации сигнальных событий, MC samples имеют большие неопределенности измерения.

В Run2 многоструйный фон оценивался с помощью комбинации двух независимых data-driven методов:

- «**Rebalance and Smear**» (R+S)
- «**Pileup/FJVT CR**» метода

- **Boosting method:** Gradient Boosting
- NTrees = 32
- MinNodeSize = 2.5%
- BoostType = Grad
- Shrinkage = 0.10
- UseBaggedBoost
- BaggedSampleFraction = 0.5
- MaxDepth = 4
- nCuts = 20

## Оптимизация отбора событий с помощью MVA/ML подходов

- У нас всегда есть 2 струи лидирующие по  $p_T$
- В случае отсутствия других струй BDT пропускает такие события

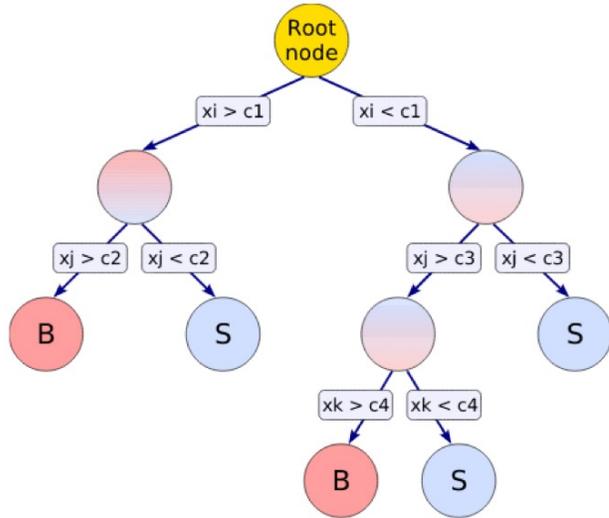
Поэтому было произведено размытие (smearing) отсутствующих событий по Гауссу

- **Mersenne Twister** based (std::mt19937\_64, sigma = 0.1)

# Что такое BDT?

**Boosted Decision Tree (BDT)** – многопараметрический метод анализа для оптимизации сигнальной области в  $H \rightarrow inv$

- Оптимизация и определение выполняются с помощью МК с использованием наилучших доступных оценок.
- Исключены сильно коррелированные переменные.



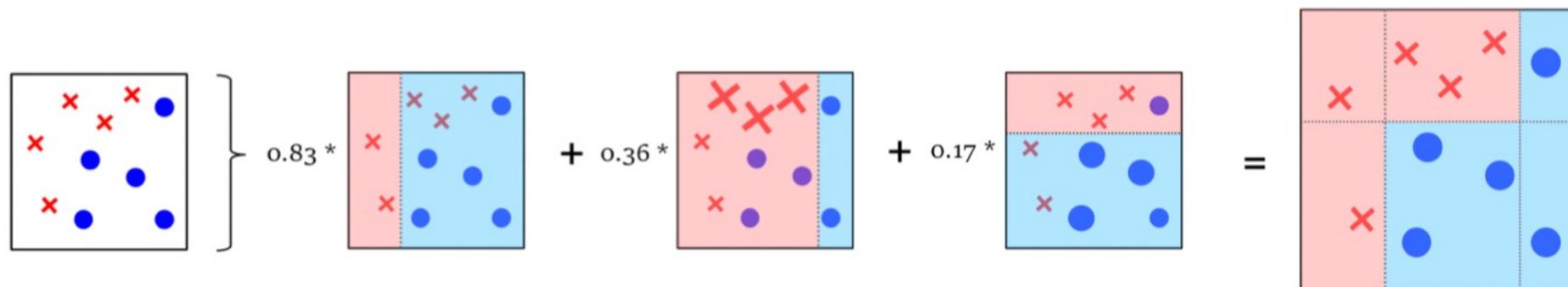
- Дерево решений в этом случае работает как двоичный классификатор, в котором набор данных последовательно разбивается в попытке максимально разделить полученные данные на один из двух классов, в нашем случае 'Сигнал' или "Фон".
- В каждой точке ветвления ("узле") в дереве классификатор определяет, путем минимизации заранее определенной функции потерь, оптимальные переменные для отборов. Ветви дерева создаются в соответствии с тем, лежат ли события выше или ниже этого значения отбора. Это выполняется итеративно до достижения заданной глубины дерева или до тех пор, пока набор данных не будет полностью отнесен к одному из классов.

Input variable	Definition
$Z$ rapidity	
$\Delta R(\ell\ell)$	
$\Delta\phi(\vec{E}_T^{\text{miss}}, \vec{p}_T^Z)$	
$E_T^{\text{miss}}$ -significance	
fractional $p_T$	$  \vec{E}_T^{\text{miss}} + \sum \vec{p}_T^{\text{jets}}  - p_T^Z /p_T^Z$
$H_T$	scalar sum of hard objects $p_T$
$\frac{E_T^{\text{miss}}}{H_T}$	
$m_{\ell\ell}$	

переменные входящие в состав BDT  
для H(inv) моно-Z анализа

Boosting включает в себя объединение нескольких деревьев решений (порядка сотен) с помощью эффективного средневзвешенного значения результатов классификации.

Наиболее распространенные алгоритмы boosting генерируют деревья решений последовательно, учитывая ошибки, допущенные предыдущим классификатором, как показано на рисунке. Комбинируя множество слабых классификаторов, таким образом, можно получить более сильный классификатор, а именно Усиленное дерево решений (BDT).



Набор данных классифицируется в фазовом пространстве с двумя переменными с помощью нескольких последовательных деревьев решений, каждое из которых учитывает ошибки предыдущего классификатора при выполнении своей собственной классификации. Более крупные точки данных представляют больший вес, придаваемый соответствующим событиям при классификации.

Объединив все слабые классификаторы, мы получаем более сильный классификатор.

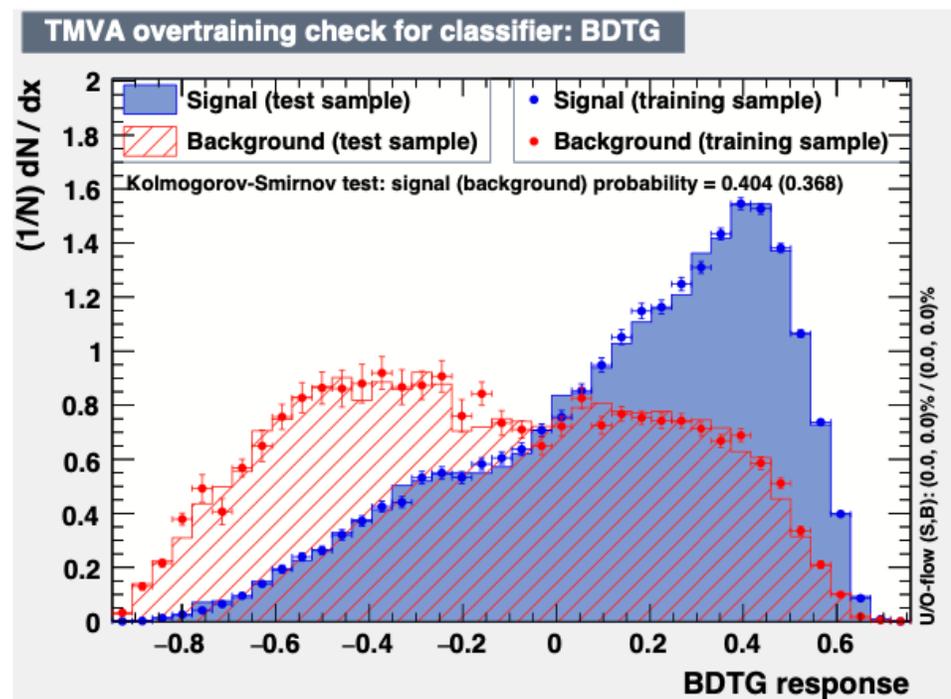
# Boosting Algorithm

- While all boosted decision trees have the same principal, the algorithms that determine the 'boosting', splitting and pruning of the leaves, etc. are different
- Gradient boosting minimizes the residual error from the prediction/classification of the previous 'tree', and uses gradient information to inform the new tree(s)
- Adaptive boosting iteratively modifies training events with new importance 'weights' in order to improve learning

Adaptive Boosting aka Adaboost	Gradient Boosting
<ul style="list-style-type: none"> <li>Both Adaboost (the first boosting algorithm) and Gradient Boosting are boosting algorithms, which combines predictions from multiple weak learners, usually decision stumps to form a strong learner</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>In AdaBoost, the weights of the samples are adjusted at each iteration.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No reweighting of the samples take place in GBM</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Algorithm:</b> Training process starts with a decision stump (usually). At every step, the weights of the training samples which are misclassified are increased for the next iteration. The next tree is built sequentially on the same training data but using the newly weighted training samples. This process is repeated until a desired performance is achieved.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Algorithm:</b> GBM uses gradient descent to iteratively fit new weak learners to the residuals of the previous ones, minimizing a loss function. There are several loss functions to choose from, Mean Squared Error being most common for Regression and Cross Entropy for Classification. GBM uses Decision Trees as the weak learners.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Both Adaboost and GBM are stage-wise additive models (greedy algorithm), meaning new trees in the model are built without changing the previous existing trees</li> </ul> <p style="text-align: right;">© AIML.com Research</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>The final model is formed by combining the predictions from individual trees through a weighted sum. For a classification problem, prediction is given by:</li> </ul> $Prediction = sign\left(\sum_{m=1}^M \alpha_m * F_m(x)\right)$ <p>where, <math>F_m(x)</math> is the output of each model and <math>\alpha_m</math> are the weights computed by the boosting algorithm, <math>m</math> is the number of iterations</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>The final model is an equal-weighted sum of all of the individual trees. Prediction for a regression problem in GBM is given by:</li> </ul> $Prediction = \hat{y} + \eta * \sum_{m=2}^M \hat{r}_{m-1}$ <p>where, <math>\hat{y}</math> is the prediction from the first tree, <math>\eta</math> is the learning rate, <math>\hat{r}_i</math> is the prediction of residuals, <math>m</math> is the no. of iterations</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Both Adaboost and Gradient boosting can be used for both Classification and Regression problem</li> </ul>	

Полученная в результате величина представляет собой Дискриминационную переменную BDT, которая также называется «BDT score».

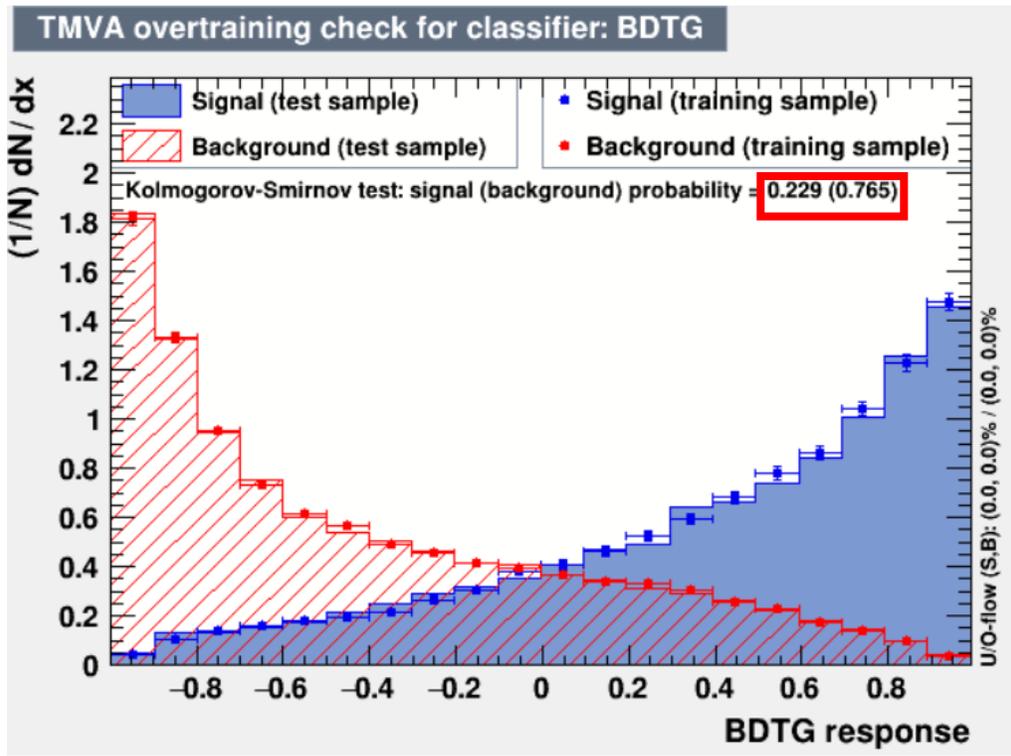
Этот показатель, измеряемый от -1,0 до 1,0, является вероятностной мерой того, что событие является сигнальным (выход = 1,0) или фоновым (выход = -1,0).



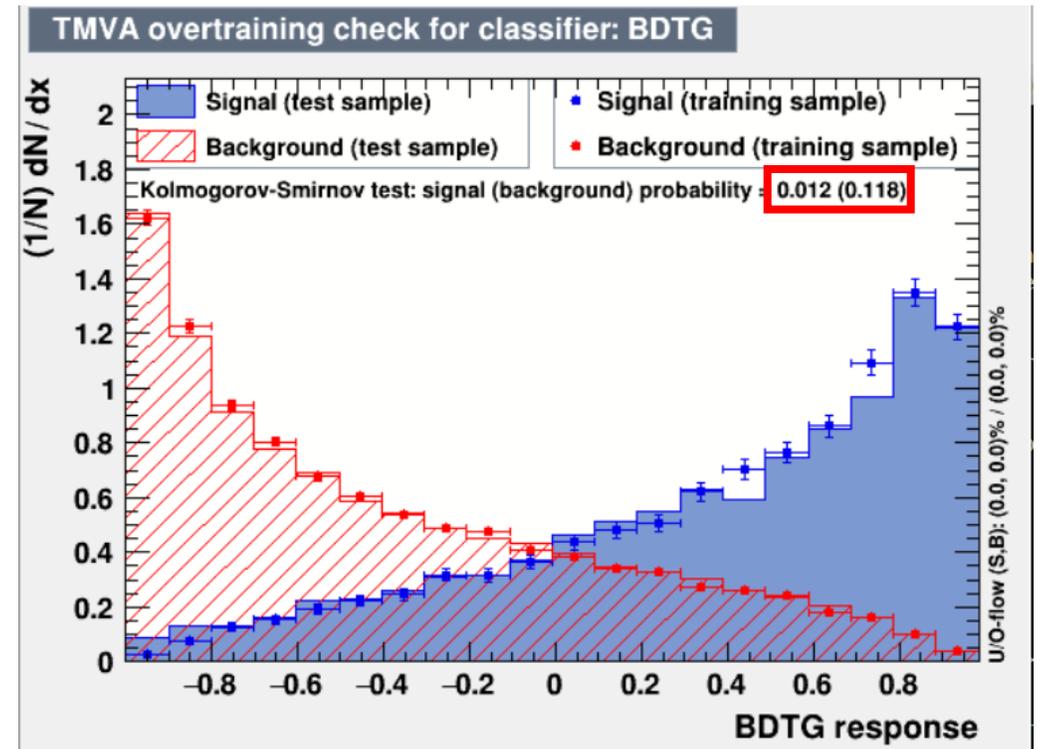
Таким образом в результате BDT , идеальный классификатор классифицировал бы все сигнальные события как смещенные вправо, а все фоновые события (показаны смещенным влево).

распределения BDT для сигнальных и фоновых событий в моно-Z анализе H(inv).

# Kolmogorov-Smirnov test



Var 1 : with old variables

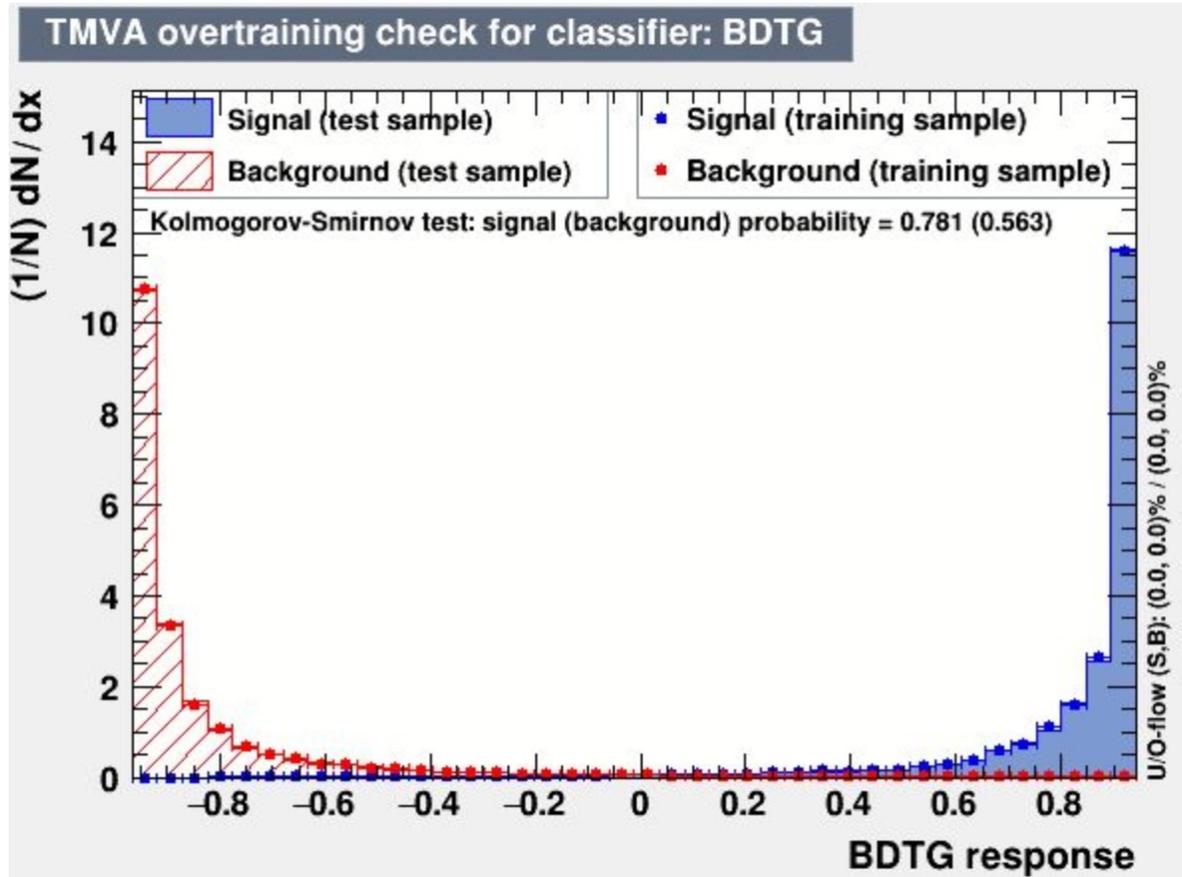


Var 2: old+ new variables

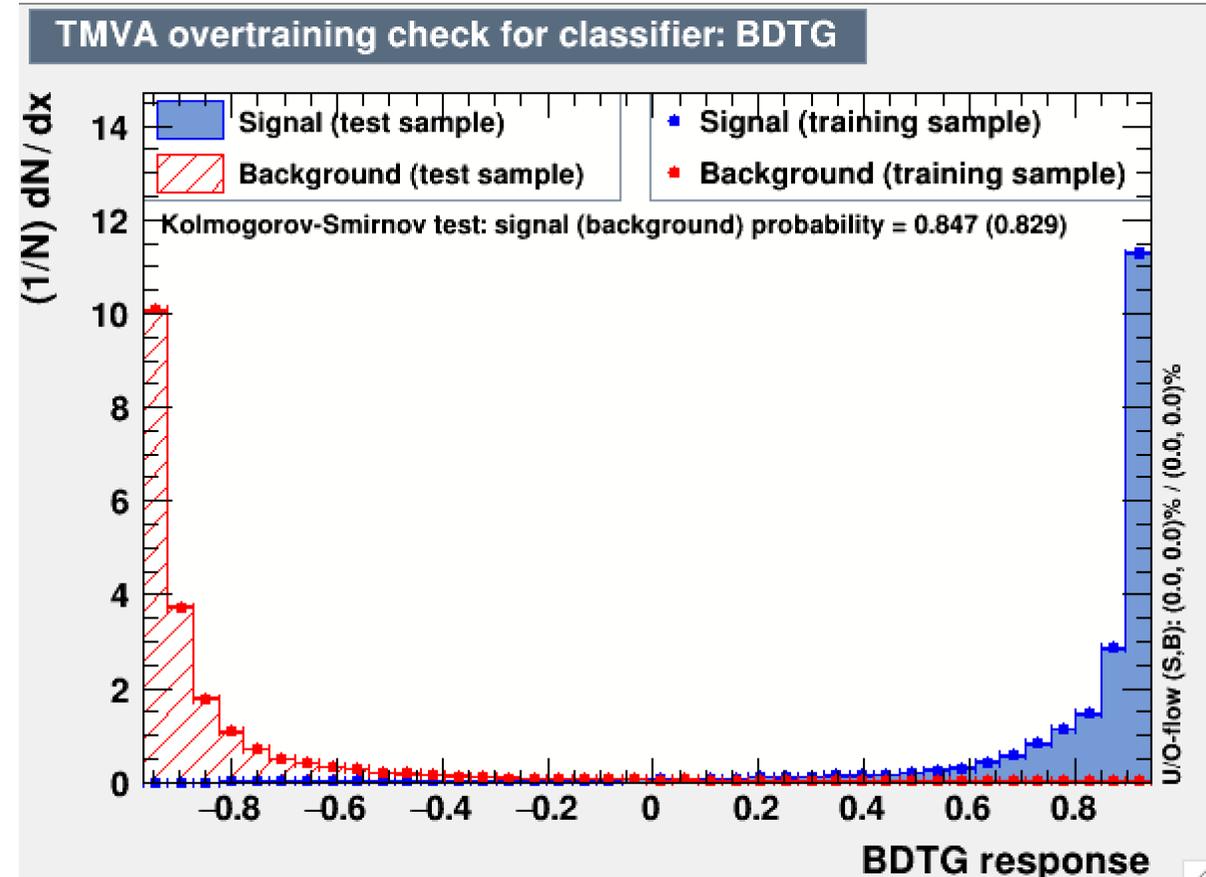
- A Kolmogorov Smirnov test is applied between the training and the test output distribution.
- In case the two distributions are compatible a random value between 0 and 1 should be obtained, if they are not you will observe a difference and this might be an indication of overtraining.
- So a very small value is not good.
- A value which is not small is good, while a value too close to 1 is also not so good, because it indicates that the statistical fluctuations are too small, and this can be also an indication of some potential problems.

# signal + multijet bkg (with 1.0 weight)

23 vars



optimized



DataSet	MVA	
Name:	Method:	ROC-integ
datasetBkg0	BDTG	: 0.995

DataSet	MVA	
Name:	Method:	ROC-integ
datasetBkg0	BDTG	: 0.995

Table 3: Triggers used for 2015-2018 data taking. The years and run numbers where thresholds were changed are noted.

Period	Trigger
All 2015	HLT_xe70_mht
2016, Runs $\leq$ 302872	HLT_xe90_mht_L1XE50
2016, Runs $>$ 302872	HLT_xe110_mht_L1XE50
2015–2016	HLT_noalg_J400
2017 Runs	HLT_xe110_pufit_L1XE55
2018 Runs	HLT_xe110_xe70_L1XE50

Table 4: List of single lepton triggers.

Period	Electron	Muon
All 2015	HLT_e24_lhmedium_L1EM20VH	HLT_mu20_iloose_L1MU15 HLT_mu50
	HLT_e60_lhmedium	
	HLT_e120_lhloose	
2016 Runs $\leq$ 304008	HLT_e24_lhtight_nod0_ivarloose	HLT_mu50 HLT_mu26_ivarmedium
	HLT_e60_lhmedium_nod0	
	HLT_e140_lhloose_nod0	
2016 Runs $>$ 304008	HLT_e26_lhtight_nod0_ivarloose	HLT_mu50 HLT_mu26_ivarmedium
	HLT_e60_lhmedium_nod0	
	HLT_e140_lhloose_nod0	
2017 Runs	HLT_e26_lhtight_nod0_ivarloose	HLT_mu26_ivarmedium HLT_mu50 HLT_mu60_0eta105_msonly
	HLT_e60_lhmedium_nod0	
	HLT_e140_lhloose_nod0	
	HLT_e300_etcut	
2018 Runs	HLT_e26_lhtight_nod0_ivarloose	HLT_mu26_ivarmedium HLT_mu50 HLT_mu60_0eta105_msonly
	HLT_e26_lhtight_nod0	
	HLT_e60_lhmedium_nod0	
	HLT_e140_lhloose_nod0 HLT_e300_etcut	

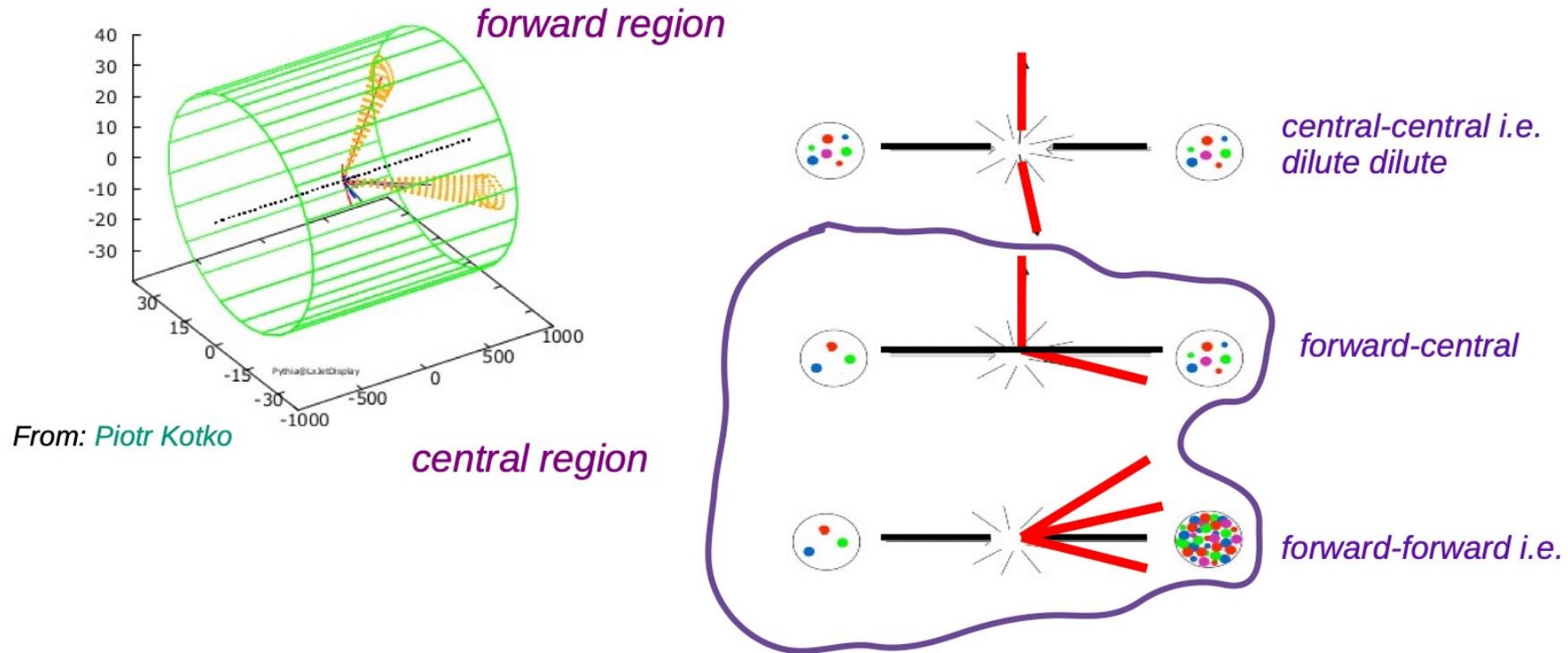
Table 5: List of di-lepton triggers.

Period	Electron	Muon
2015	HLT_2e12_lhloose_L12EM10VH	HLT_mu18_mu8noL1
2016	HLT_2e17_lhvloose_nod0	HLT_mu22_mu8noL1
2017	HLT_2e24_lhvloose_nod0	HLT_mu22_mu8noL1
2018	HLT_2e17_lhvloose_nod0_L12EM15VHI	HLT_mu22_mu8noL1

Table 1: Summary of generators used for simulation. The details and the corresponding references are provided in the body of the text.

Process	Generator	ME order	PDF	Parton shower	Tune
Strong $V$ +jets	SHERPA 2.2.1 and SHERPA 2.2.7 ( $m_{ij}$ -filtered)	NLO (up to 2 jets), LO (up to 4 jets)	NNPDF3.0 <sub>NNLO</sub>	SHERPA MEPS@NLO	SHERPA
Electroweak $V$ +jets	HERWIG 7.2.1	NLO (for 2 jets)	MMHT2014 <sub>NLO</sub>	HERWIG angular-order and PYTHIA 8 dipole recoil	HERWIG 7.2
$V$ +jets $\alpha_{EW}^3$ interference	MADGRAPH5_AMC@NLO	LO	PDF4LHC15	PYTHIA 8	
Strong $VV$ +jets (including $gg \rightarrow VV$ +jets)	SHERPA 2.2.1 or SHERPA 2.2.2	NLO (up to 1 jet), LO (up to 3 jets)	NNPDF3.0 <sub>NNLO</sub>	SHERPA MEPS@NLO	SHERPA
Electroweak $VV$ +jets	SHERPA 2.2.1 or SHERPA 2.2.2	LO	NNPDF3.0 <sub>NNLO</sub>	SHERPA MEPS@LO	SHERPA
$t\bar{t}$	POWHEG BOX v2	NLO	NNPDF3.0 <sub>NLO</sub>	PYTHIA 8	A14
QCD multijet	PYTHIA 8.230	LO	NNPDF2.3 <sub>LO</sub>	PYTHIA 8	A14
ggF Higgs	POWHEG NNLOPS	NNLO	PDF4LHC15 <sub>NNLO</sub>	PYTHIA 8	AZNLO
VBF Higgs	POWHEG	NLO	PDF4LHC15	PYTHIA 8 dipole recoil	AZNLO
$VH$ Higgs	POWHEG BOX v2	NLO	PDF4LHC15	PYTHIA 8	AZNLO

# Forward jets



*There is certain class of processes where one can assume that partons in one of hadrons are just collinear with hadron and in other are not*