Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

Кафедра физики элементарных частиц №40

Научная исследовательская работа студента на тему:

Применение методов машинного обучения и феноменологические изыскания для разделения электрослабого и КХД процессов рождения Z-бозона с фотоном

Научные руководители
к.ф.-м.н., доцент
Солдатов Евгений Юрьевич

Петухов Александр Максимович

Работа
студента 4-ого курса
Савельева Константина
Михайловича
ИЯФиТ

г. Москва 2022

Введение

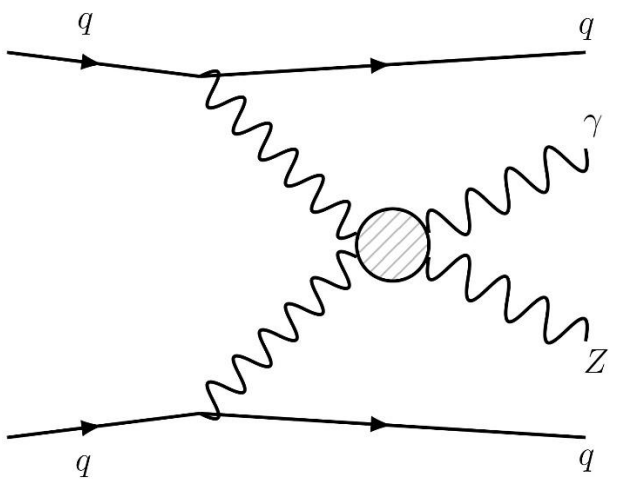


Диаграмма процесса рассеяния векторных бозонов

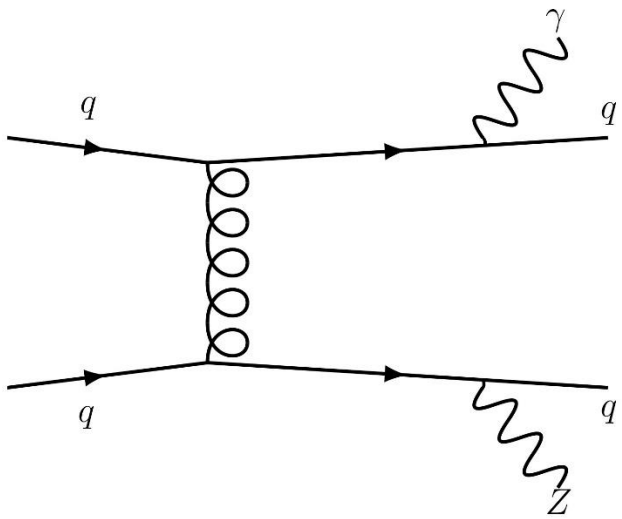


Диаграмма процесса КХД образования состояния Zγjj

- Целью работы является изучение редкого процесса рассеяния векторных бозонов с рождением *Z*-бозона, фотона и двух адронных струй с последующим распадом *Z*-бозона на нейтрино и антинейтрино.
- Подобные процессы интересны с точки зрения поиска «новой физики» из-за их редкости и высокой чувствительности к отклонениям параметров от Стандартной модели.
- Выделение этого процесса является сложной задачей из-за основного фонового процесса – КХД образования идентичного конечного состояния, сечение которого на два порядка превосходит сечение изучаемого процесса.
- Для вычисления сечения исследуемого процесса с достаточной точностью необходимо эффективно отделять сигнальные события от фоновых. Классические одномерные фиксированные отборы не дают достаточной значимости, поэтому в работе исследовалось применение алгоритмов машинного обучения к разделению событий

Значимость $\sigma = \frac{S}{\sqrt{S+B}}$

Используемые данные

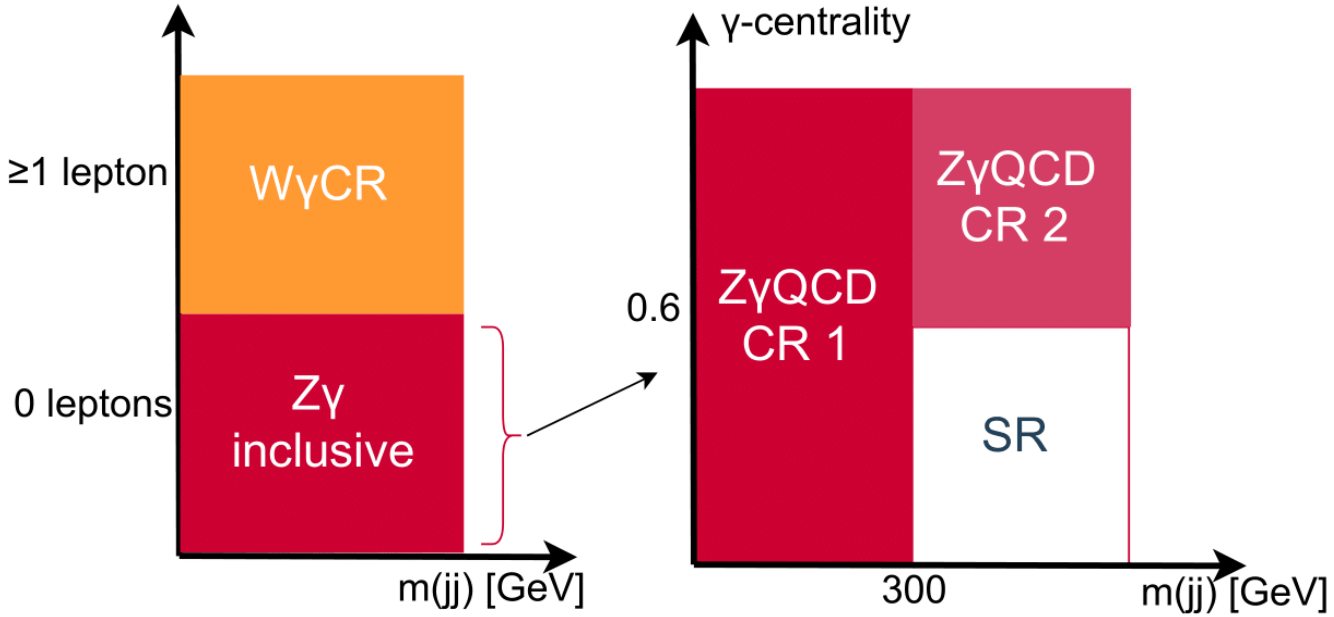
Работа производилась с Монте-Карло моделированными данными протон-протонных столкновений в детекторе *ATLAS* на БАК с энергией *13 ТэВ* и интегральной светимостью *139 фб$^{-1}$* и реальными данными, набранными в течение *2015-2018 гг*.

Предотборы, применяемые в анализе:

$E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$	> 120 ГэВ
E_{T}^{γ}	> 150 ГэВ
Кол-во жёстких фотонов	$N_{\gamma} = 1$
Кол-во струй	$N_{\mathrm{jets}} \geq 2$
Лептонное вето	$N_{\mathrm{e}}, N_{\mu} = 0$

Отборы, применяемые в анализе:

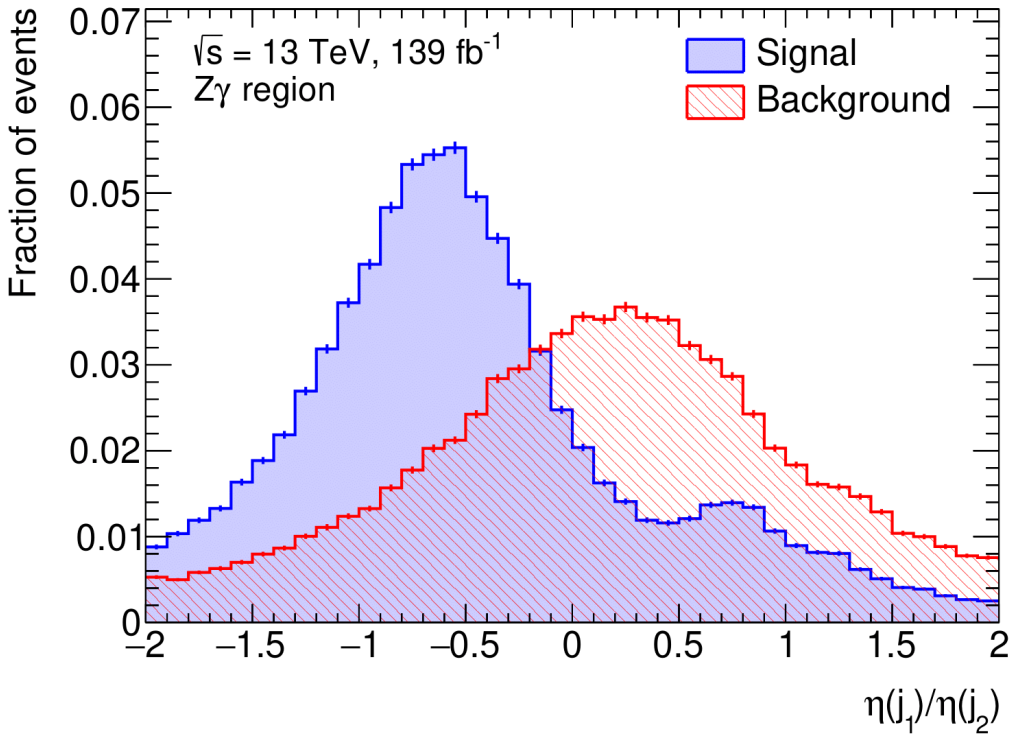
Значимость $E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$	> 12
$\lvert\Delta\phi(\gamma, \vec{p}_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})\rvert$	> 0.4
$\lvert\Delta\phi(j_1, \vec{p}_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})\rvert$	> 0.3
$\lvert\Delta\phi(j_2, \vec{p}_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})\rvert$	> 0.3
$p_{\mathrm{T}}^{\mathrm{SoftTerm}}$	< 16 ГэВ



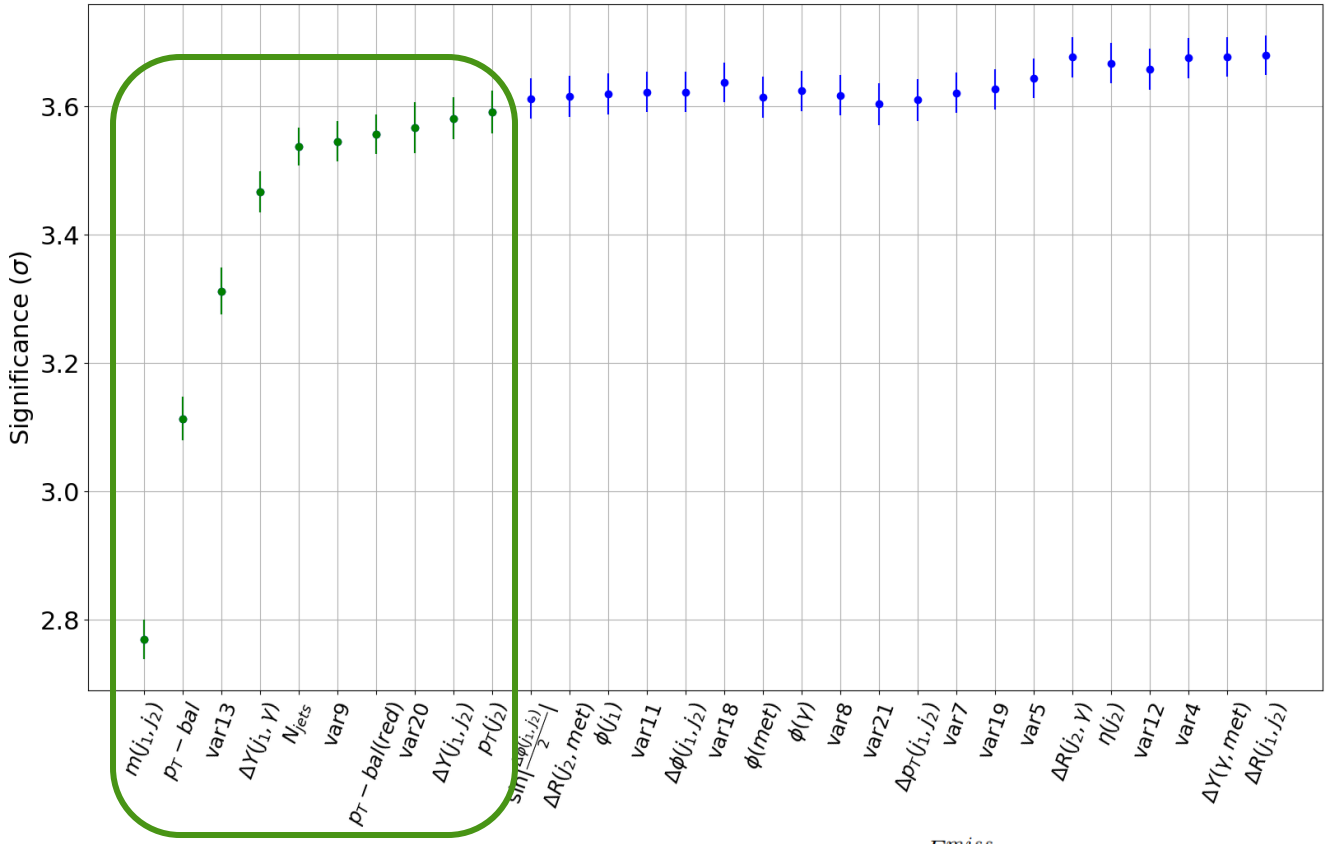
В качестве модели классификатора используется композиция деревьев решений с использованием техники градиентного бустинга (*Boosted Decision Trees, BDT*) из библиотеки машинного обучения *LightGBM*.

Обучение классификаторов производилось в *Zγ*-регионе, оценка значимости производилась в сигнальном регионе.

Отбор переменных



На основании отбора методом "N+1" было отобрано 10 переменных:



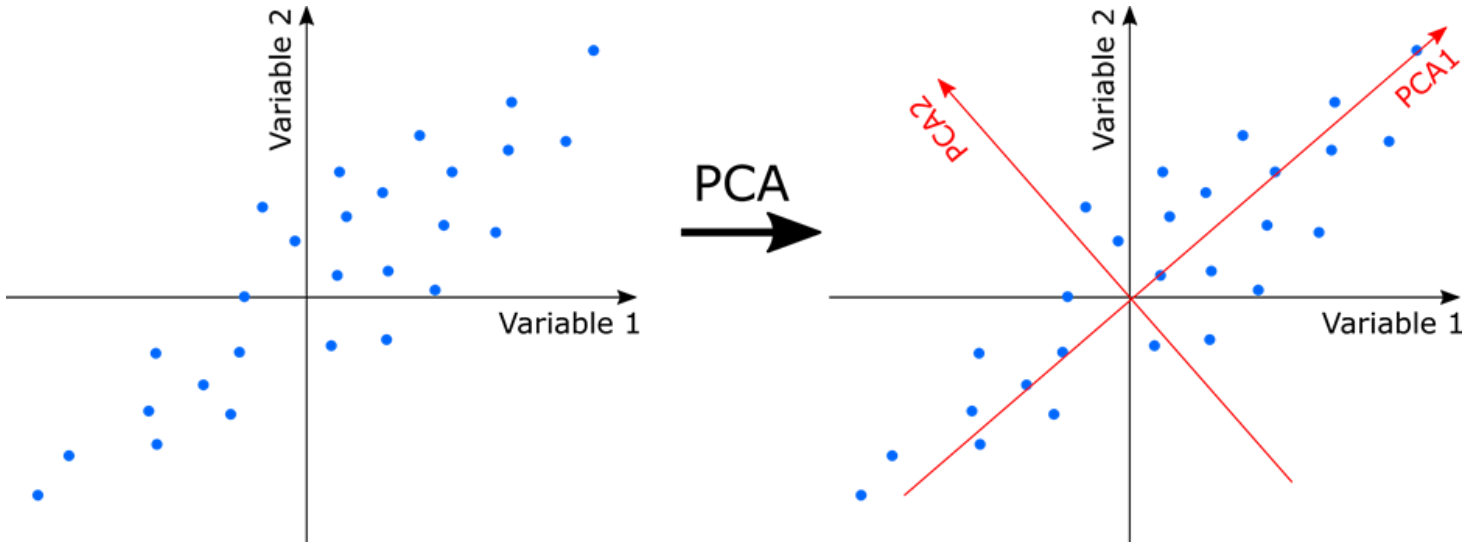
В дополнение к имеющемуся набору были составлены порядка 20 дополнительных переменных.

К примеру, в набор была добавлена переменная отношения псебдобыстрот двух лидирующих струй.

Для сигнала характерны вылеты струй в разные стороны. Также сигнал имеет меньшую дисперсию распределения.

1. m_{jj}
2. $p_T - \text{balance} = \frac{|\vec{p}_T^{\,miss}+\vec{p}_T^{\,\gamma}+\vec{p}_T^{\,j1}+\vec{p}_T^{\,j2}|}{E_T^{miss}+E_T^{\gamma}+p_T^{j1}+p_T^{j2}}$
3. $var13 = \sqrt{p_T(j_1)^2 + p_T(j_2)^2}$
4. $\Delta Y(j_1, \gamma)$
5. N_{jets}
6. $var9 = \frac{E_T^{miss}}{p_T(j_1)+p_T(j_2)}$
7. $p_T - \text{balance(red)} = \frac{|\vec{p}_T^{\,\gamma}+\vec{p}_T^{\,j1}+\vec{p}_T^{\,j2}|}{E_T^{\gamma}+p_T^{j1}+p_T^{j2}}$
8. $var20 = \frac{E_T^{miss}-p_T^{\gamma}}{p_T(j_1)+p_T(j_2)}$
9. $\Delta Y(j_1, j_2)$
10. $p_T(j_2)$

Метод главных компонент

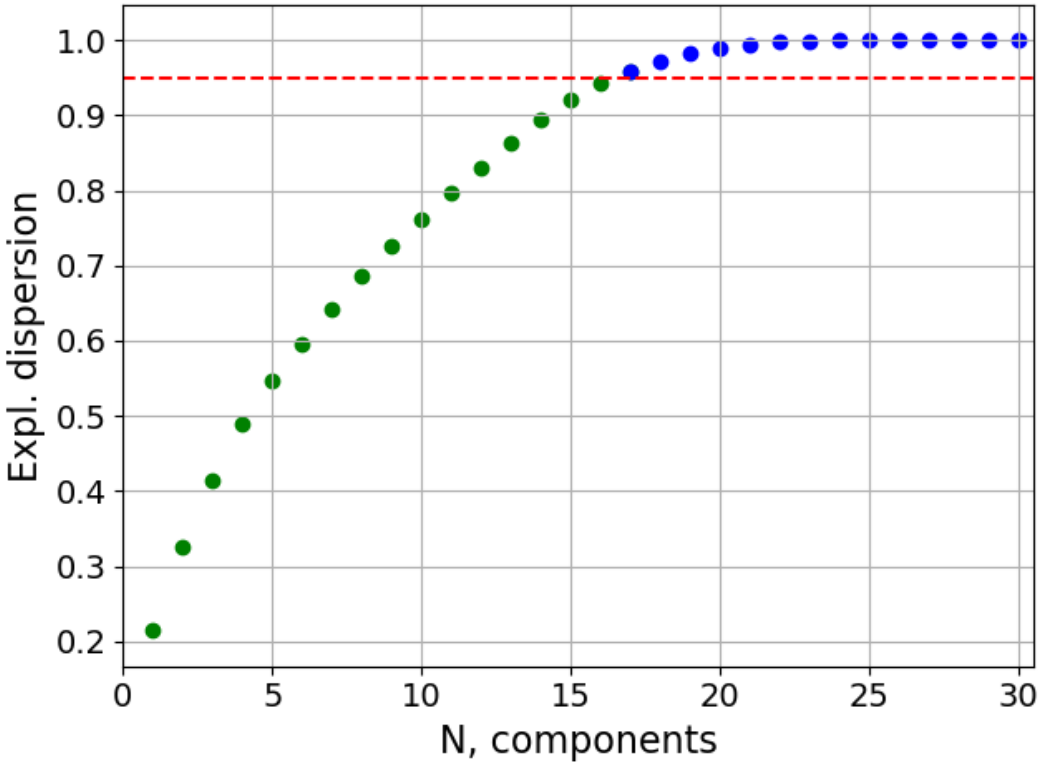


С помощью метода главных компонент, применённого к первым 30 переменным, которые были отобраны методом "N+1", было найдено 16 компонент, обеспечивающих 95% объяснённой дисперсии.

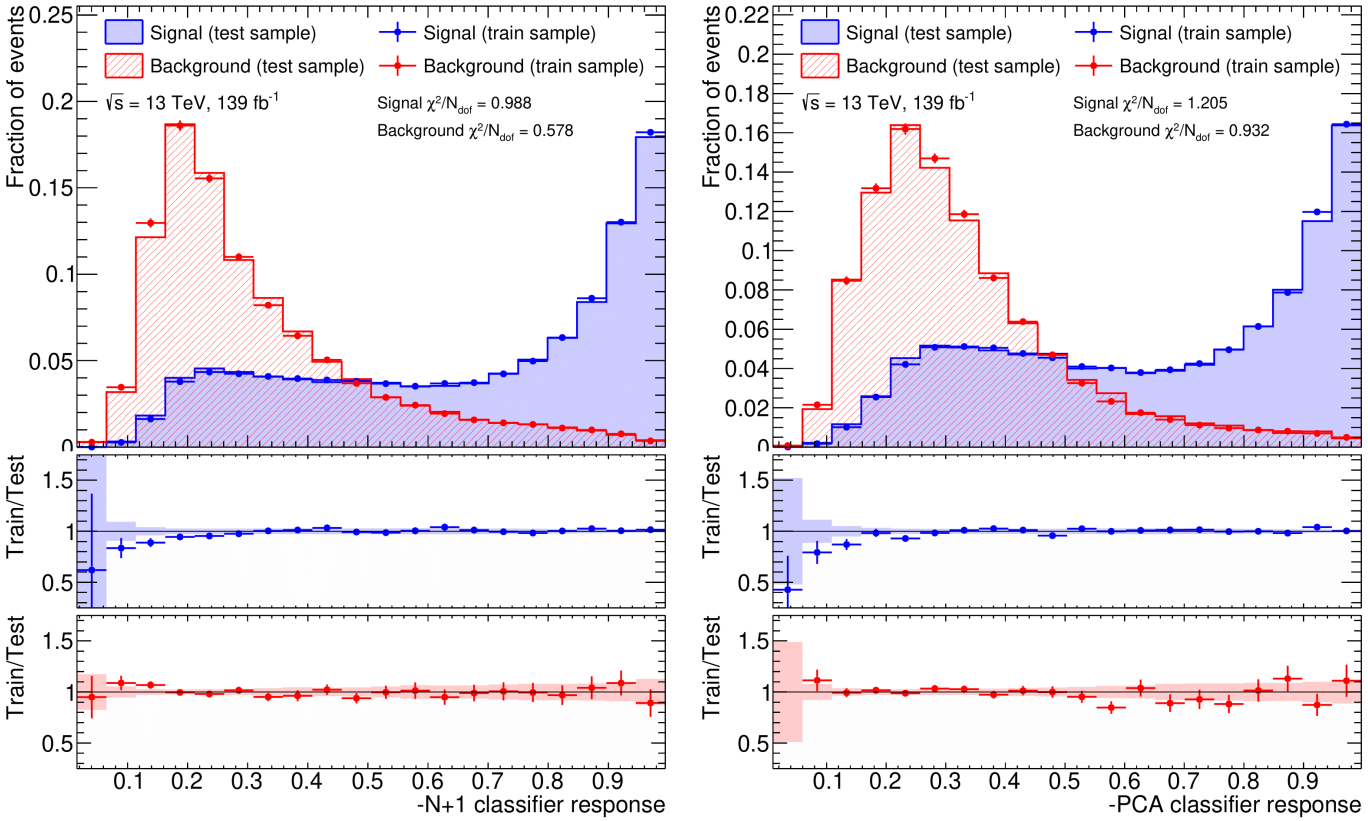
В качестве альтернативы методу "N+1" использовался метод главных компонент.

Его смысл заключается в поиске подпространства меньшей размерности, чем исходное пространство признаков с наибольшим значением дисперсии вдоль осей. То есть необходимо найти такие линейные преобразования признаков чтобы количество потерянной информации было наименьшим.

Для определения необходимого количества компонент используется график объяснённой дисперсии.



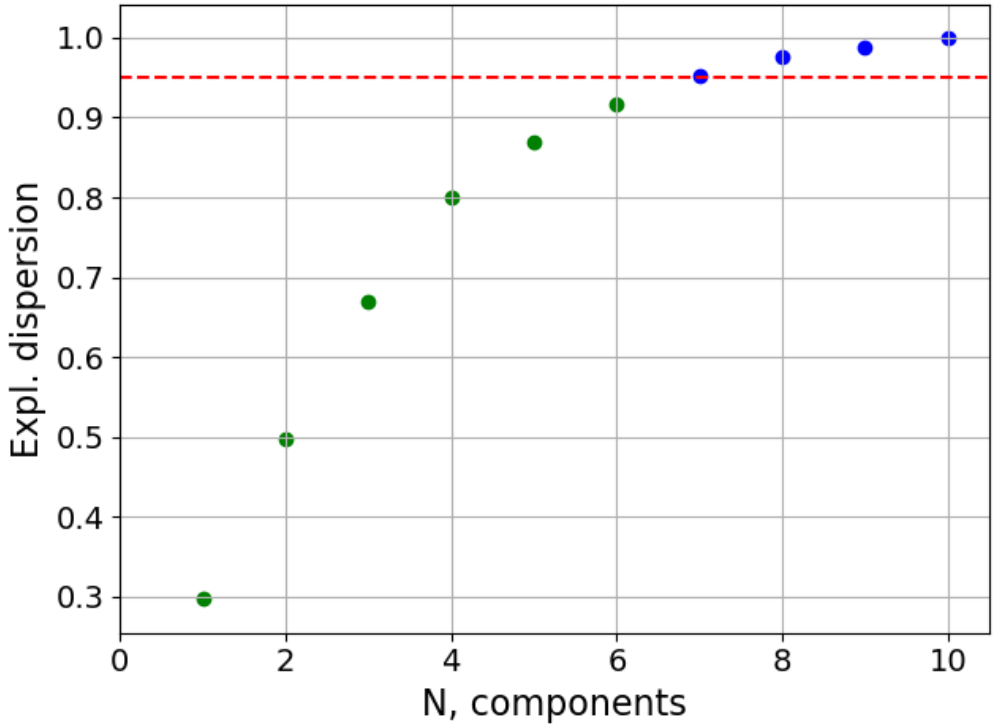
Настройка классификаторов и результаты



	Вхожд. сигнал	Вхожд. фон	Кол-во сигнала	Кол-во фона	Значимость, σ
До отборов	90035	86902	46.7 ± 0.2	304.9 ± 4.6	2.49 ± 0.02
N+1	51734	9563	26.9 ± 0.1	28.6 ± 0.9	3.61 ± 0.03
PCA	53615	11513	27.9 ± 0.1	37.8 ± 1.4	3.44 ± 0.04
PCA & N+1	50874	10411	26.4 ± 0.1	31.7 ± 1.1	3.47 ± 0.03

Использование метода главных компонент значительно ухудшает значение значимости.

Была произведена проверка возможности применения метода главных компонент к набору переменных, полученному с помощью метода "N+1".



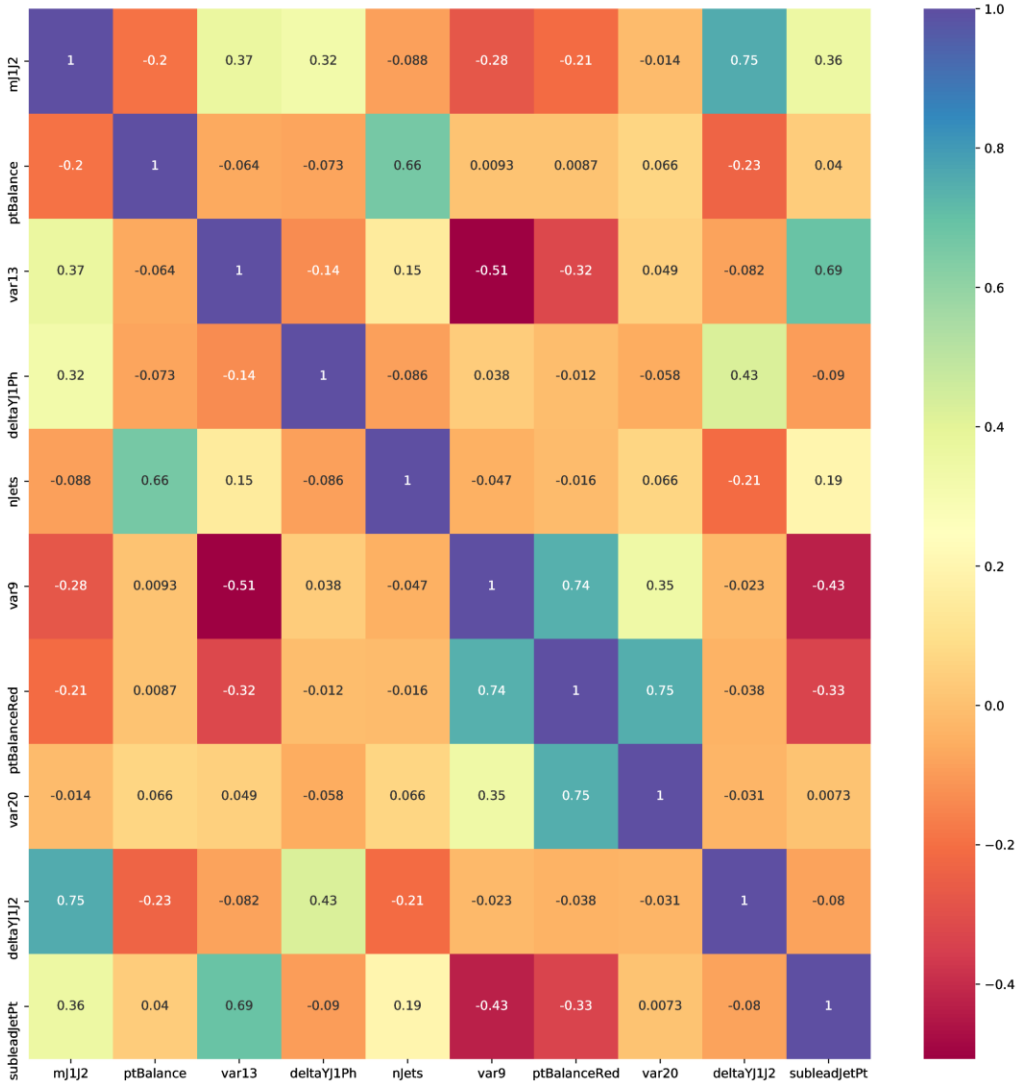
Заключение

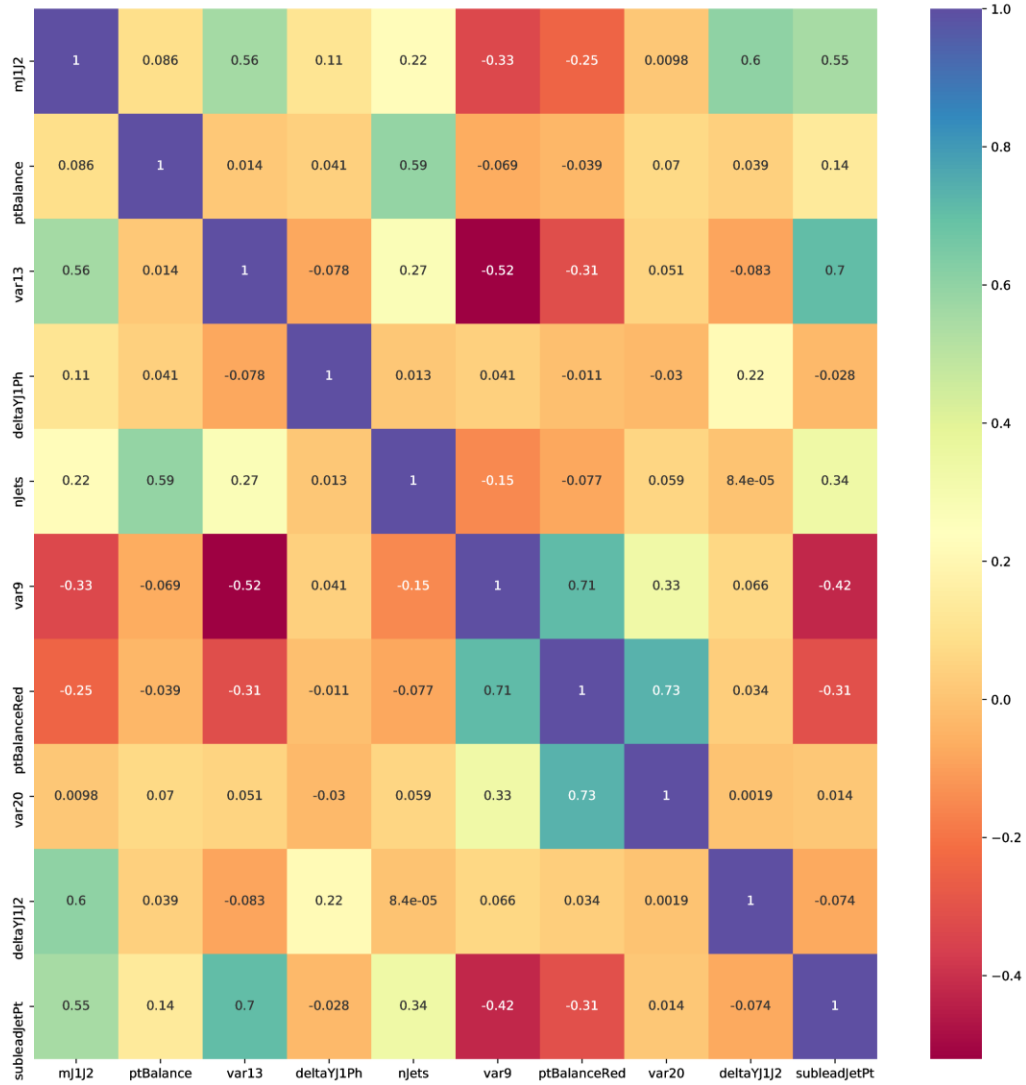
- Составлены новые переменные для обучения классификатора, из них отобраны лучшие, в числе которых, например, среднеквадратичное значение поперечных импульсов струй, хорошо показавшее себя при классификации;
- Был получен прирост значимости при применении классификатора с использованием переменных, отобранных методом "N+1" с значения значимости $(2.49\pm0.02)\sigma$ до $(3.61\pm0.03)\sigma$;
- Была осуществлена проверка метода главных компонент, позволившего получить значение значимости $(3.47\pm0.03)\sigma$, что показывает неоправданность использования данного метода;

В дальнейшем планируется использовать дополнительные параметры модели классификатора при настройке, использовать другие метрики при оптимизации настроек классификатора. Также планируется объединить текущие результаты с результатами по использованию информации о третьей по поперечному импульсу струе в событии.

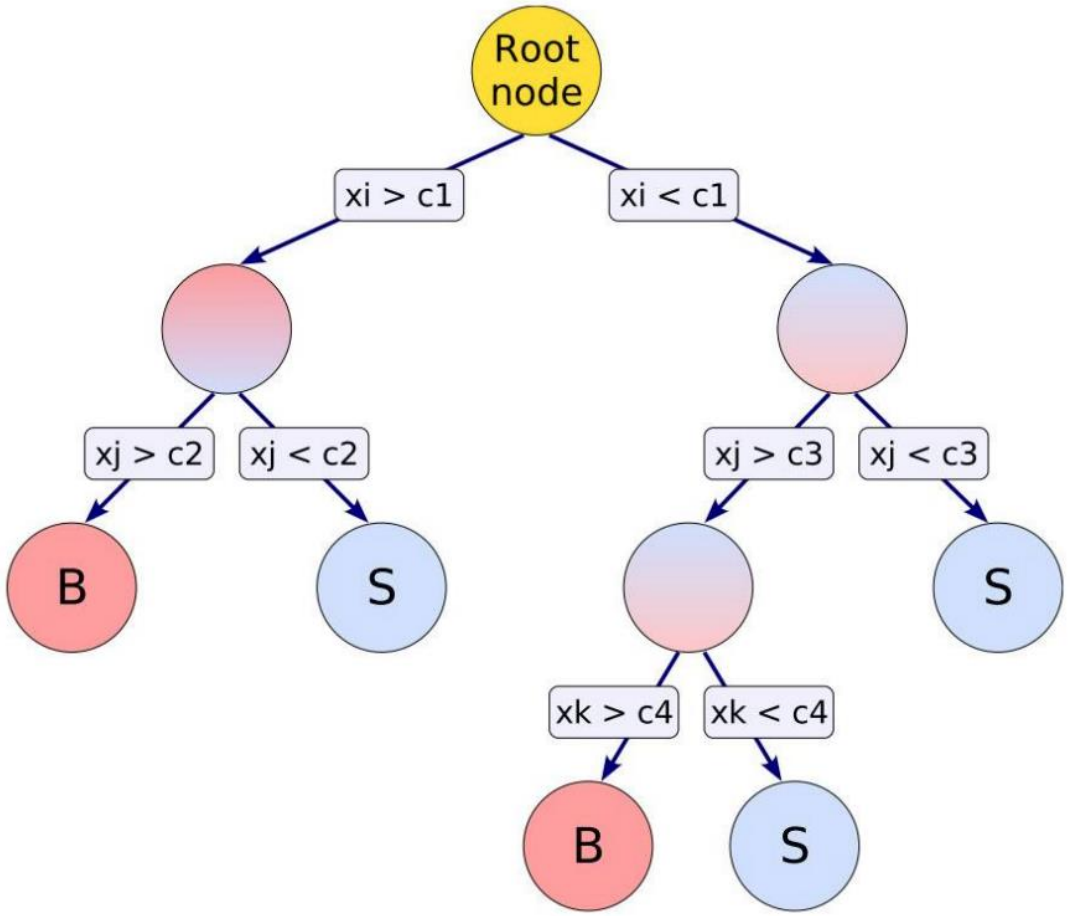
Спасибо за внимание!

Back-up


mJ1J2 1 -0.2 0.37 0.32 -0.088 -0.28 -0.21 -0.014 0.75 0.36
ptBalance -0.2 1 -0.064 -0.073 0.66 0.0093 0.0087 0.066 -0.23 0.04
var13 0.37 -0.064 1 -0.14 0.15 -0.51 -0.32 0.049 -0.082 0.69
deltaYJ1Ph 0.32 -0.073 -0.14 1 -0.086 0.038 -0.012 -0.058 0.43 -0.09
njets -0.088 0.66 0.15 -0.086 1 -0.047 -0.016 0.066 -0.21 0.19
var9 -0.28 0.0093 -0.51 0.038 -0.047 1 0.74 0.35 -0.023 -0.43
ptBalanceRed -0.21 0.0087 -0.32 -0.012 -0.016 0.74 1 0.75 -0.038 -0.33
var20 -0.014 0.066 0.049 -0.058 0.066 0.35 0.75 1 -0.031 0.0073
deltaYJ1J2 0.75 -0.23 -0.082 0.43 -0.21 -0.023 -0.038 -0.031 1 -0.08
subleadJetPt 0.36 0.04 0.69 -0.09 0.19 -0.43 -0.33 0.0073 -0.08 1
mJ1J2 ptBalance var13 deltaYJ1Ph njets var9 ptBalanceRed var20 deltaYJ1J2 subleadJetPt
1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0.0 −0.2 −0.4


mJ1J2 1 0.086 0.56 0.11 0.22 -0.33 -0.25 0.0098 0.6 0.55
ptBalance 0.086 1 0.014 0.041 0.59 -0.069 -0.039 0.07 0.039 0.14
var13 0.56 0.014 1 -0.078 0.27 -0.52 -0.31 0.051 -0.083 0.7
deltaYJ1Ph 0.11 0.041 -0.078 1 0.013 0.041 -0.011 -0.03 0.22 -0.028
njets 0.22 0.59 0.27 0.013 1 -0.15 -0.077 0.059 8.4e-05 0.34
var9 -0.33 -0.069 -0.52 0.041 -0.15 1 0.71 0.33 0.066 -0.42
ptBalanceRed -0.25 -0.039 -0.31 -0.011 -0.077 0.71 1 0.73 0.034 -0.31
var20 0.0098 0.07 0.051 -0.03 0.059 0.33 0.73 1 0.0019 0.014
deltaYJ1J2 0.6 0.039 -0.083 0.22 8.4e-05 0.066 0.034 0.0019 1 -0.074
subleadJetPt 0.55 0.14 0.7 -0.028 0.34 -0.42 -0.31 0.014 -0.074 1
mJ1J2 ptBalance var13 deltaYJ1Ph njets var9 ptBalanceRed var20 deltaYJ1J2 subleadJetPt
1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0.0 −0.2 −0.4

Композиция деревьев решений

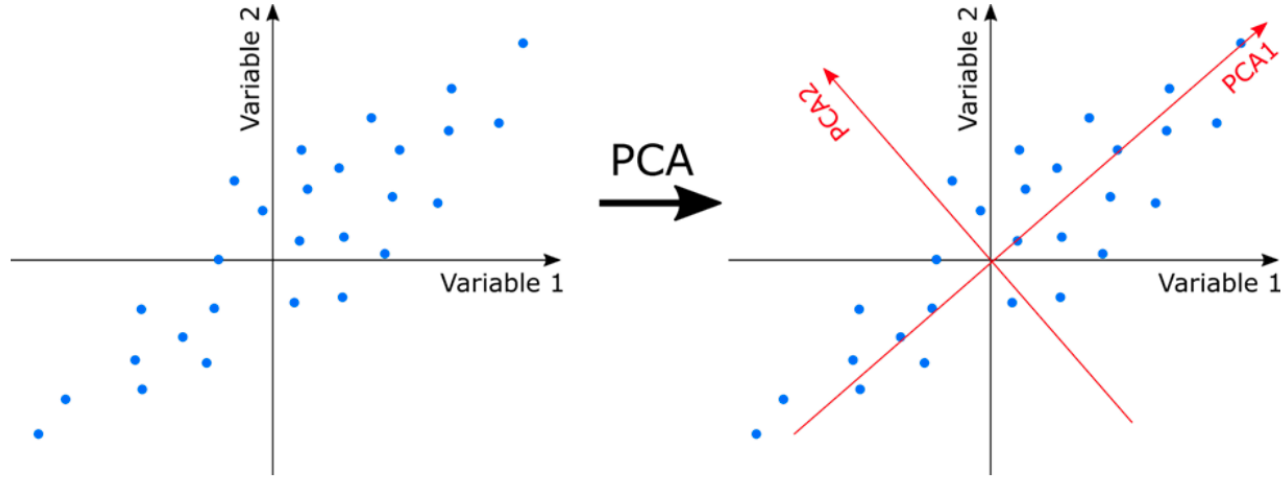


Композиция деревьев решения, созданная с помощью гр адиентного бустинга (Boosted Decision Trees, BDT) – это классификатор с бинарной древовидной структурой, позволяющий разбивать фазовое пространство на множество областей.

Основные характеристики метода:

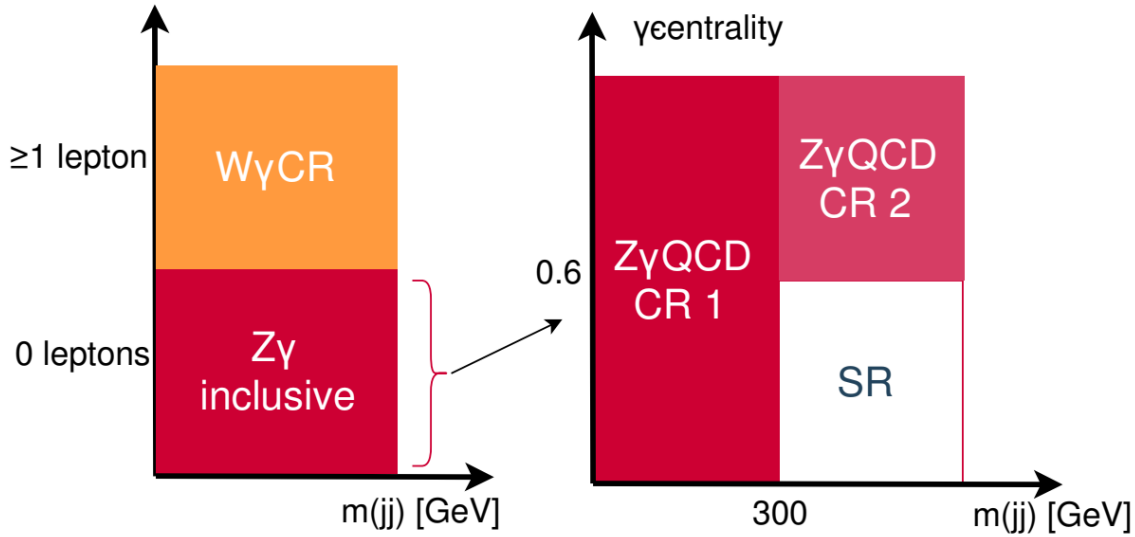
- небольшое время обучения
- не склонен к переобучению из-за
- не требует подготовки переменных

1. $\frac{\eta_{j_1}}{\eta_{j_2}} \frac{1-2\eta_\gamma}{\eta_{j_1}+\eta_{j_2}}$
2. $\left|\frac{\eta_{j_1}-\eta_{j_2}}{\eta_{j_1}+\eta_{j_2}}\right|$
3. $\left|\frac{\eta_{j_1}+\eta_{j_2}+\eta_\gamma}{\eta_{j_1}-\eta_{j_2}}\right|$
4. $\left|\frac{\eta_\gamma}{\sqrt{|\eta_{j_1}\eta_{j_2}|}}\right|$
5. $\left|\frac{\eta_\gamma-\sqrt{|\eta_{j_1}\eta_{j_2}|}}{\eta_{j_1}-\eta_{j_2}}\right|$
6. $\frac{E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}}{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{\gamma}}$
7. $\frac{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{\gamma}}{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1}+\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2}}$
8. $\frac{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{\gamma}}{\sqrt{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1}\,\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2}}}$
9. $\frac{E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}}{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1}+\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2}}$
10. $\frac{E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}}{\sqrt{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1}\,\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2}}}$
11. $\frac{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1}-\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2}}{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1}+\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2}}$
12. $\frac{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{\gamma}}{\sqrt{(\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1})^2+(\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2})^2}}$
13. $\sqrt{(\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1})^2+(\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2})^2}$
14. $\left|\frac{(\eta_\gamma)^2-\left(\frac{\eta_{j_1}+\eta_{j_2}}{2}\right)^2}{(\eta_{j_1}-\eta_{j_2})^2}\right|$
15. $\frac{E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}+\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{\gamma}}{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1}+\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2}}$
16. $\frac{\eta_\gamma}{\eta_{j_1}+\eta_{j_2}}$
17. $\left|\frac{E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}-\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{\gamma}}{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1}-\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2}}\right|$
18. $\frac{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2}}{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1}}$
19. $\frac{E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}}{\sqrt{(\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1})^2+(\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2})^2}}$
20. $\frac{E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}-\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{\gamma}}{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1}+\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2}}$
21. $\frac{E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}+\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{\gamma}}{\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j1}-\mathrm{p}_{\mathrm{T}}^{j2}}$
22. $\frac{\eta_{j1}}{\eta_{j2}}$

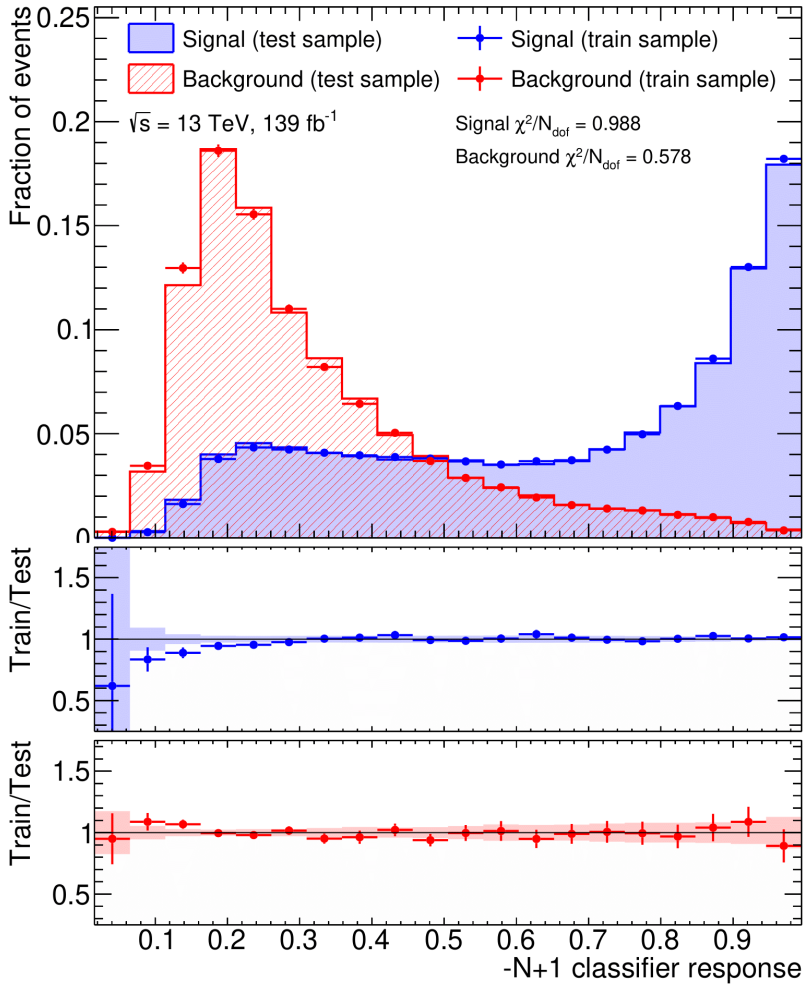


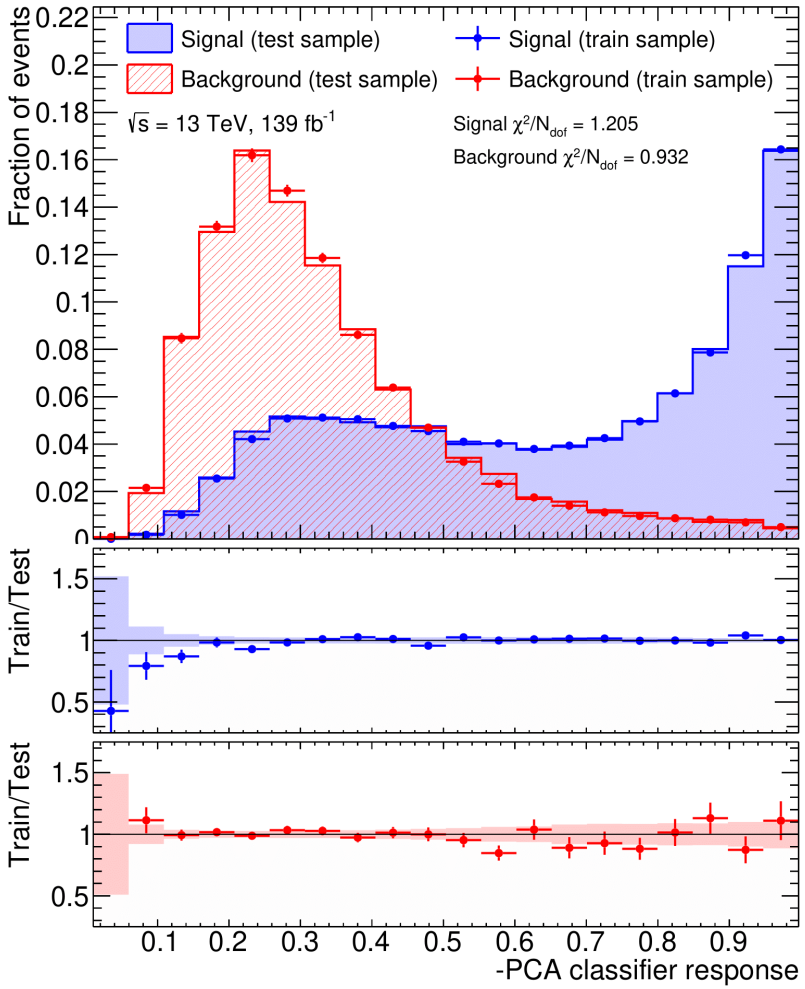
$$Z = X \begin{pmatrix} | & | & \dots & | \\ \omega_1 & \omega_2 & \dots & \omega_k \\ | & | & \dots & | \end{pmatrix} \qquad d_i = \frac{\lambda_i}{\sum \lambda_i}$$

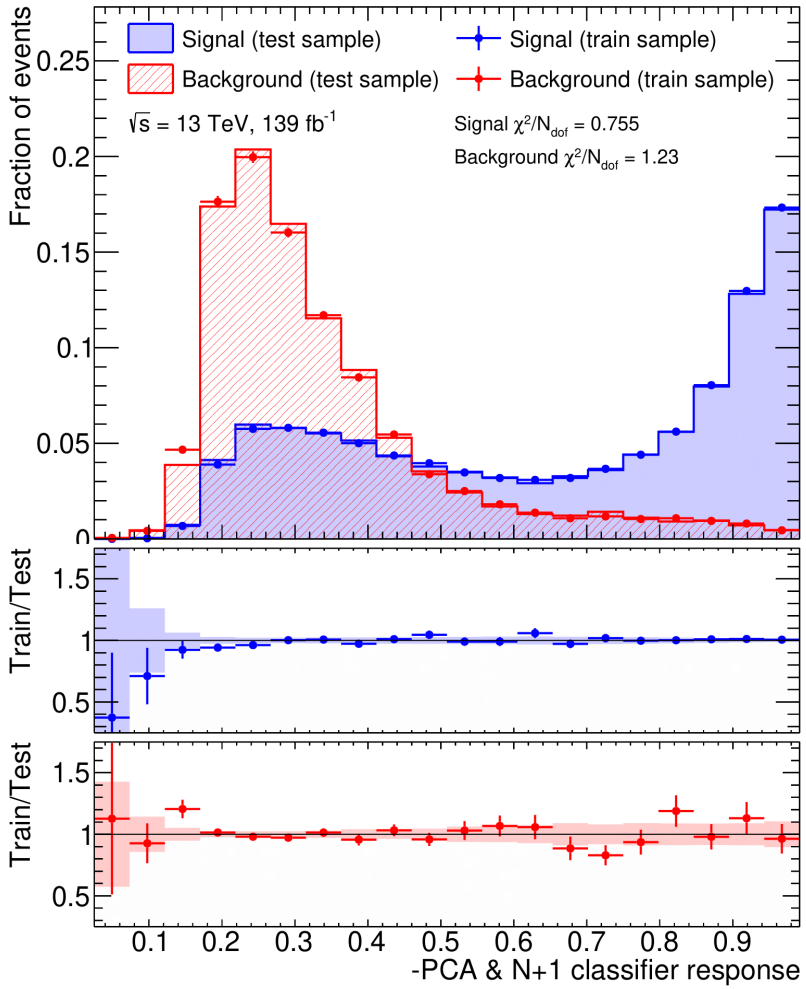
$W\gamma$ control region	
N_{leptons}	≥ 1
$Z\gamma jj$ QCD control region 1	
N_{leptons}	$= 0$
m_{jj}	< 300 GeV
$Z\gamma jj$ QCD control region 2	
N_{leptons}	$= 0$
m_{jj}	> 300 GeV
γ-centrality	> 0.6
$Z\gamma jj$ EWK signal region	
N_{leptons}	$= 0$
m_{jj}	> 300 GeV
γ-centrality	< 0.6

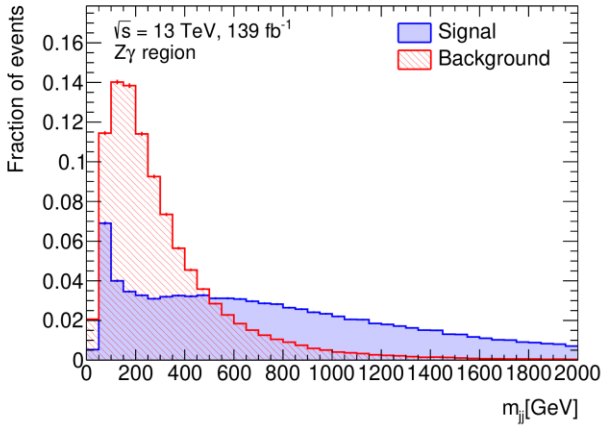


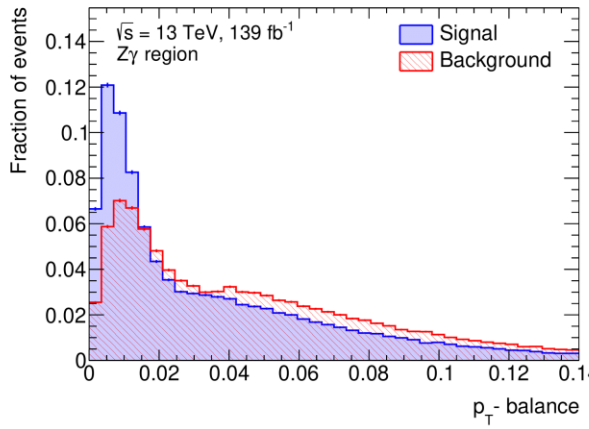
Selections	Cut Value
$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$	> 120 GeV
E_{T}^{γ}	> 150 GeV
Number of tight isolated photons	$N_\gamma = 1$
Number of jets	$N_{\text{jets}} \geq 2$
Lepton veto	$N_{\text{e}} = 0$, $N_\mu = 0$
$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$ significance	> 12
$\lvert\Delta\phi(\gamma, \vec{p}_{\text{T}}^{\text{miss}})\rvert$	> 0.4
$\lvert\Delta\phi(j_1, \vec{p}_{\text{T}}^{\text{miss}})\rvert$	> 0.3
$\lvert\Delta\phi(j_2, \vec{p}_{\text{T}}^{\text{miss}})\rvert$	> 0.3
$p_{\text{T}}^{\text{SoftTerm}}$	< 16 GeV

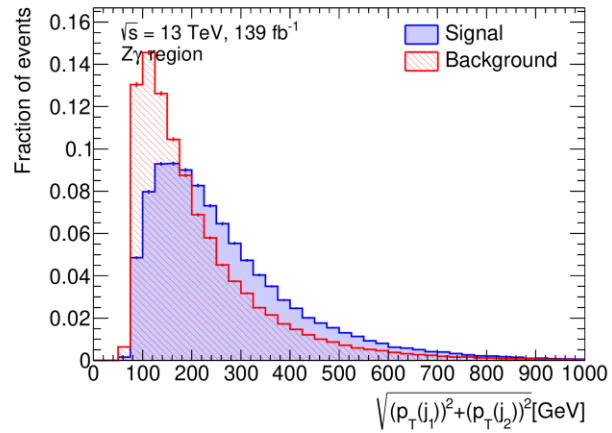

Signal (test sample)
Background (test sample)
Signal (train sample)
Background (train sample)
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Signal χ2/Ndof = 0.988
Background χ2/Ndof = 0.578
Fraction of events
Train/Test
-N+1 classifier response

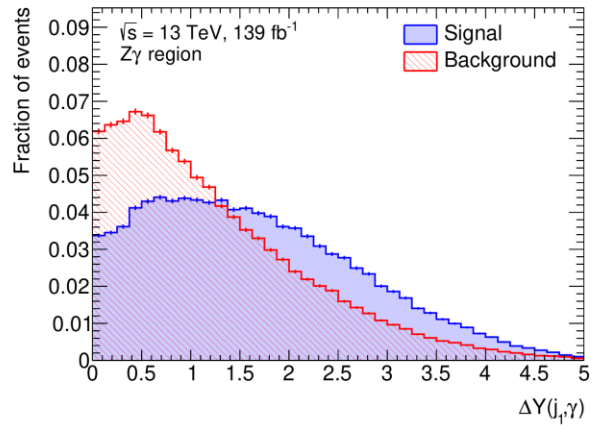

Signal (test sample)
Background (test sample)
Signal (train sample)
Background (train sample)
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Signal χ2/Ndof = 1.205
Background χ2/Ndof = 0.932
Fraction of events
Train/Test
-PCA classifier response

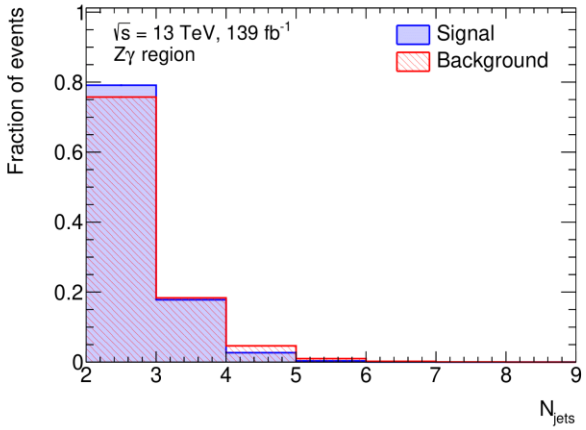

Signal (test sample)
Background (test sample)
Signal (train sample)
Background (train sample)
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Signal χ2/Ndof = 0.755
Background χ2/Ndof = 1.23
Fraction of events
Train/Test
-PCA & N+1 classifier response

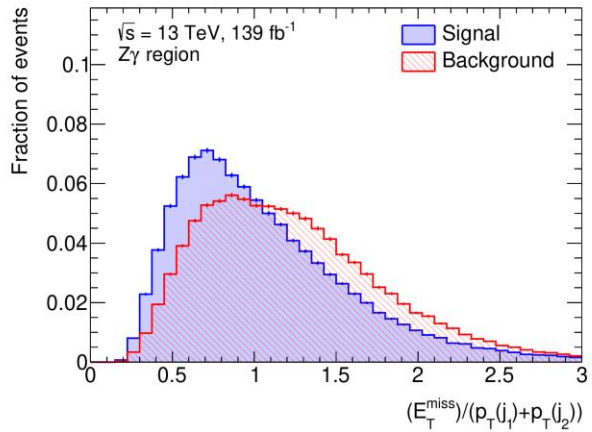

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
mjj[GeV]

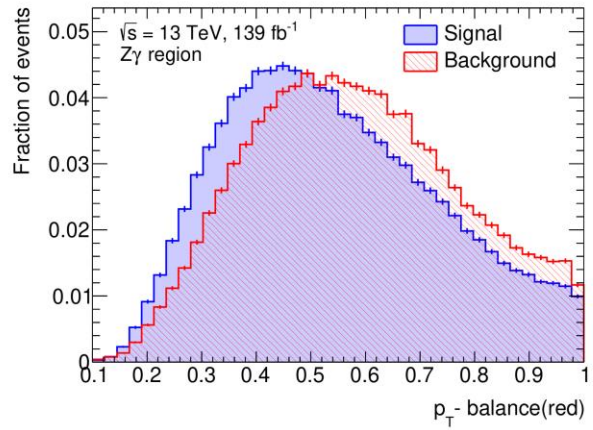

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
pT- balance

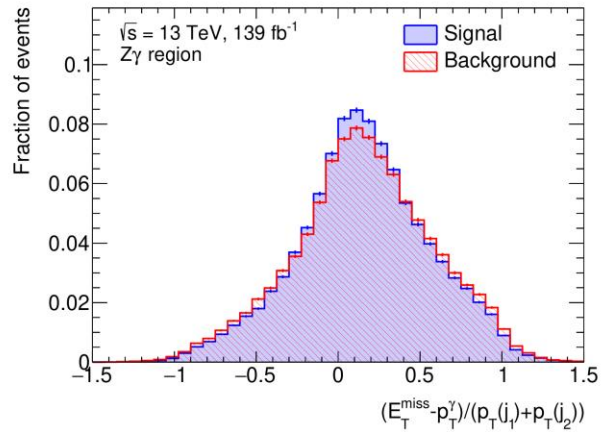

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
√(pT(j1))2+(pT(j2))2[GeV]

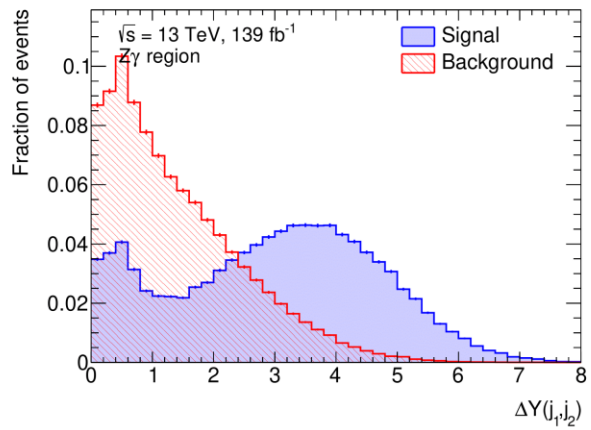

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
ΔY(j1,γ)

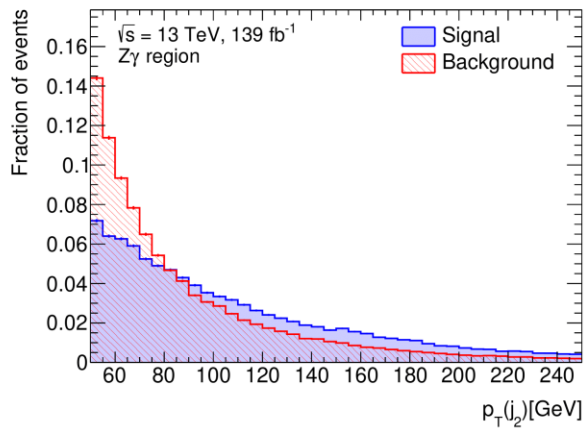

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
Njets

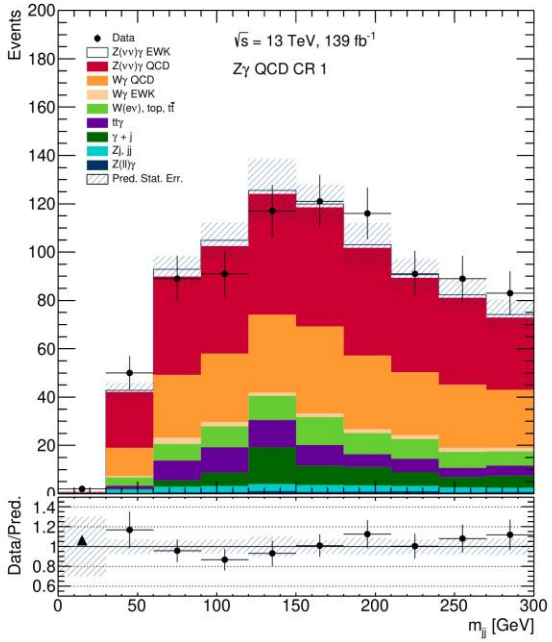

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
(ETmiss)/(pT(j1)+pT(j2))

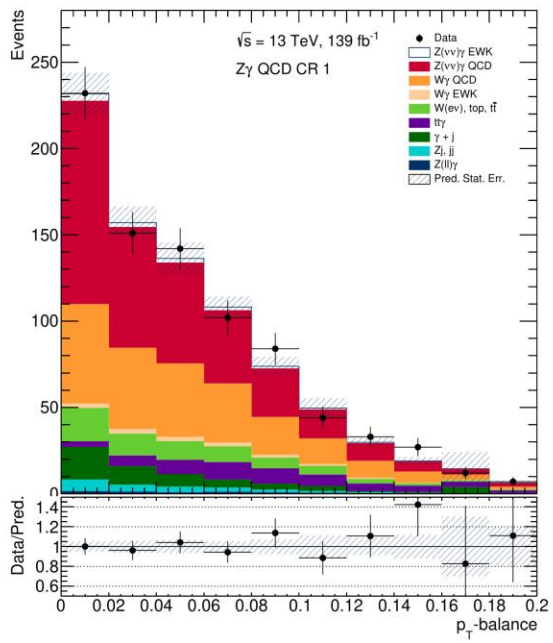

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
pT- balance(red)

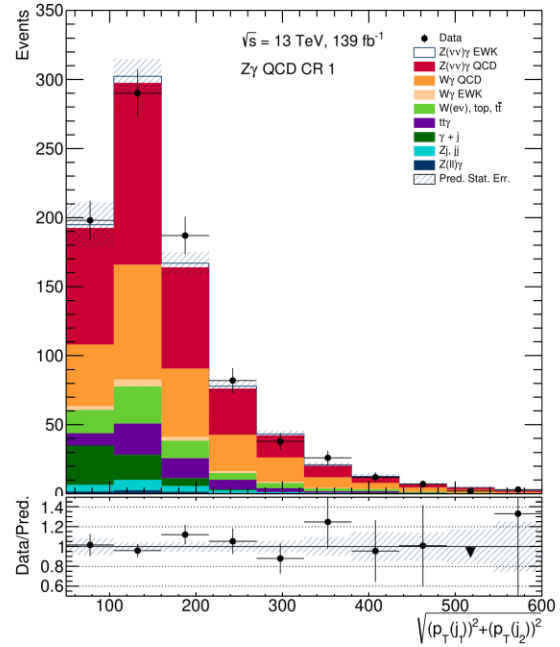

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
(ETmiss-pTγ)/(pT(j1)+pT(j2))

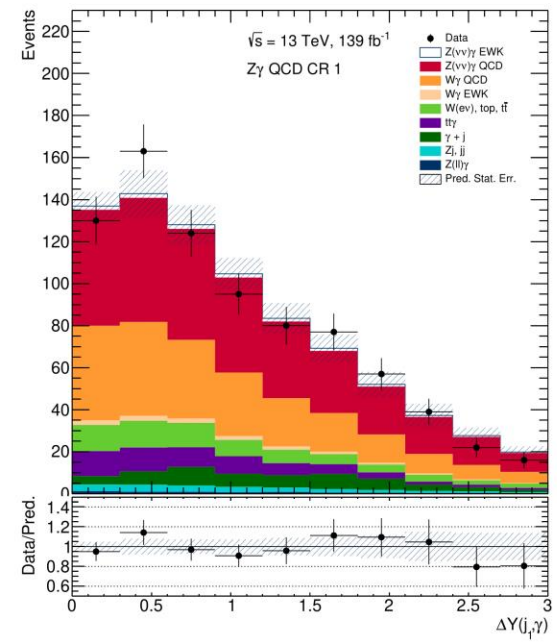

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
ΔY(j1,j2)

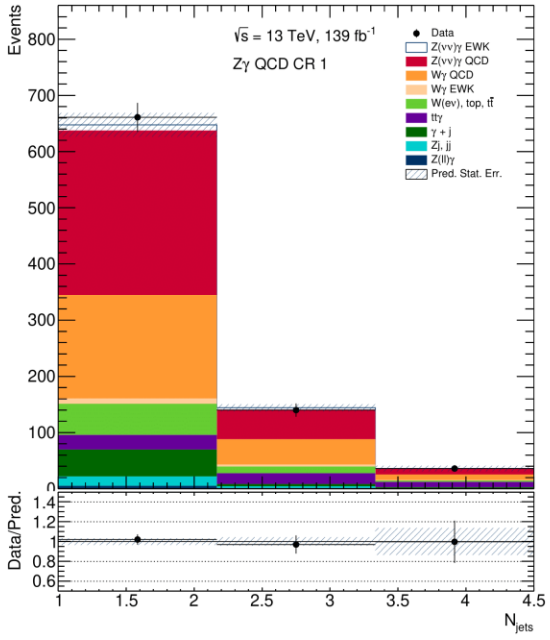

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
pT(j2)[GeV]

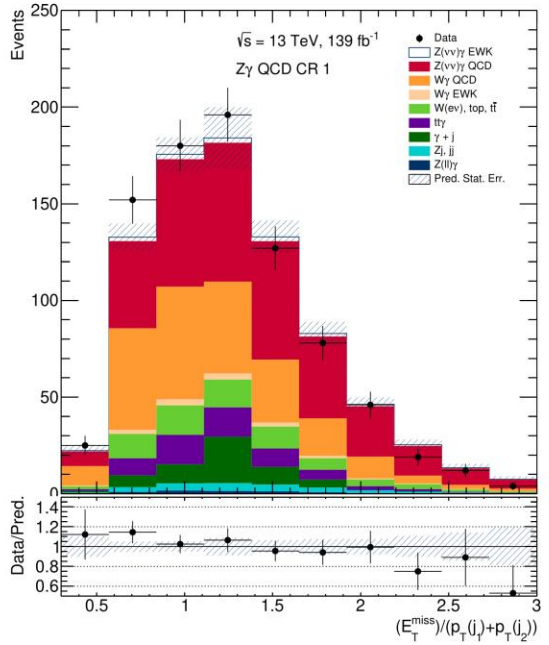

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 1
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
mjj [GeV]

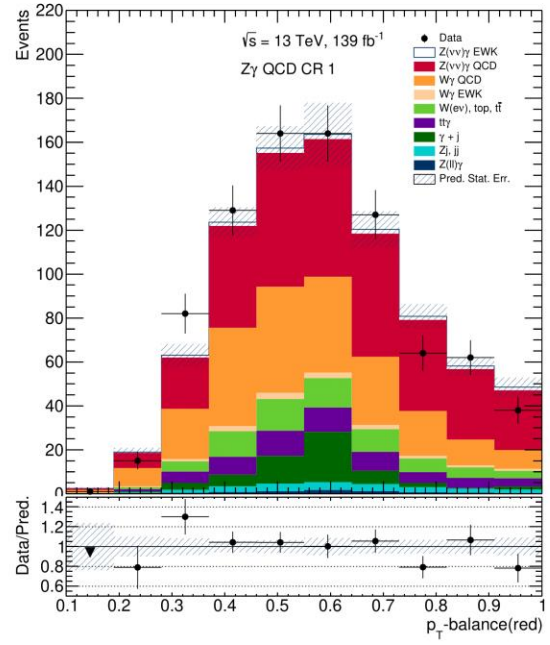

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 1
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
pT-balance

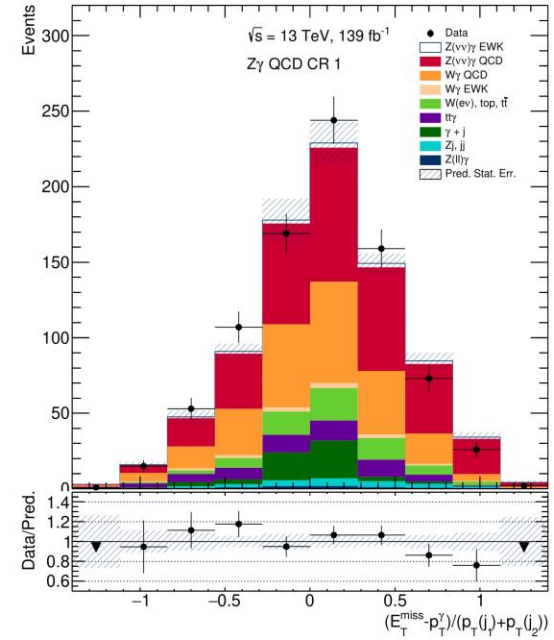

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 1
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
√(pT(j1))2+(pT(j2))2

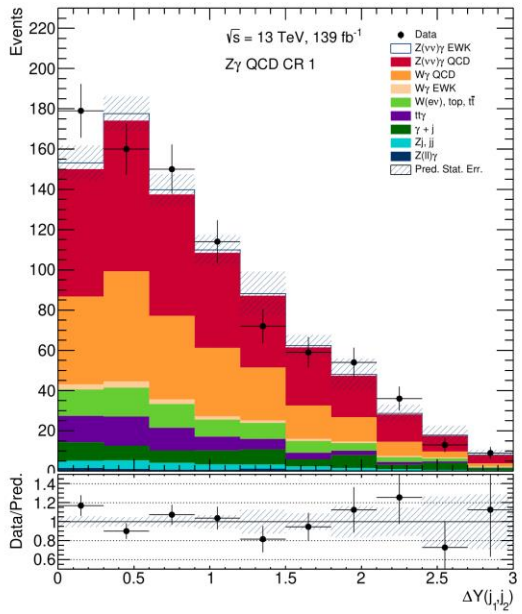

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 1
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
ΔY(j1,γ)

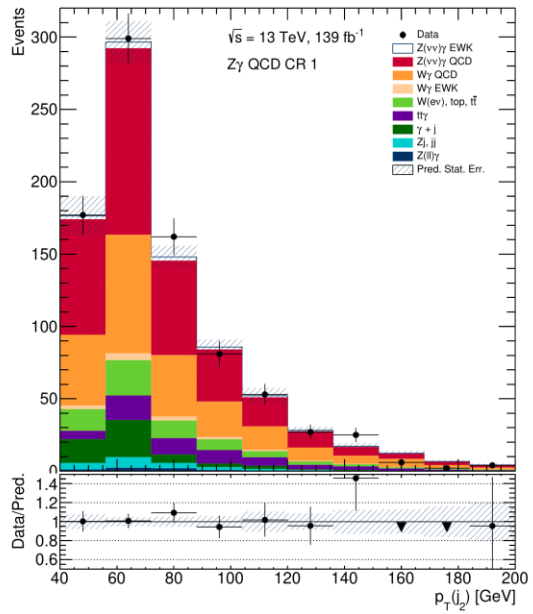

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 1
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
Njets

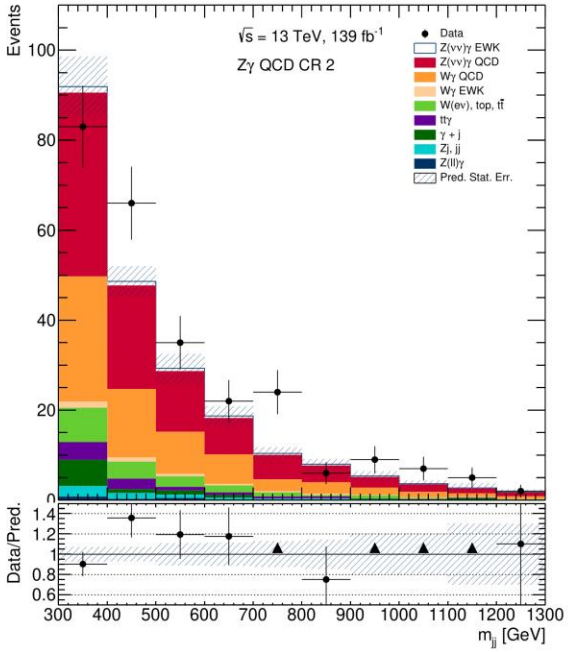

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 1
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
(ETmiss)/(pT(j1)+pT(j2))

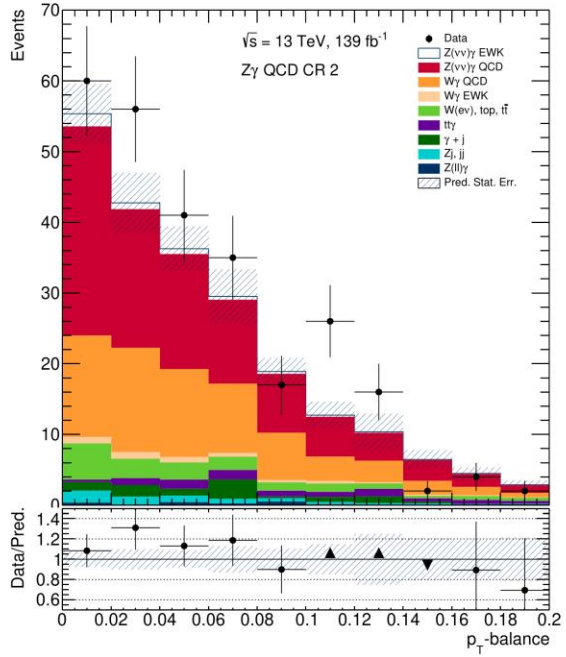

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 1
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
pT-balance(red)

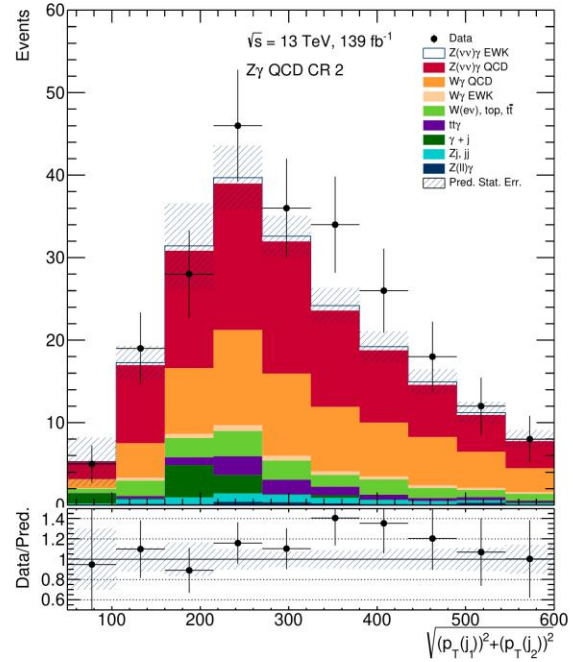

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 1
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
(ETmiss-pTγ)/(pT(j1)+pT(j2))

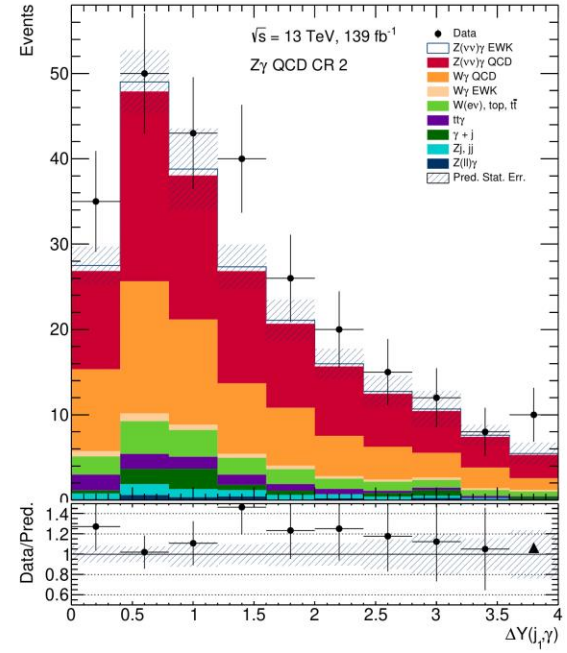

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 1
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
ΔY(j1,j2)

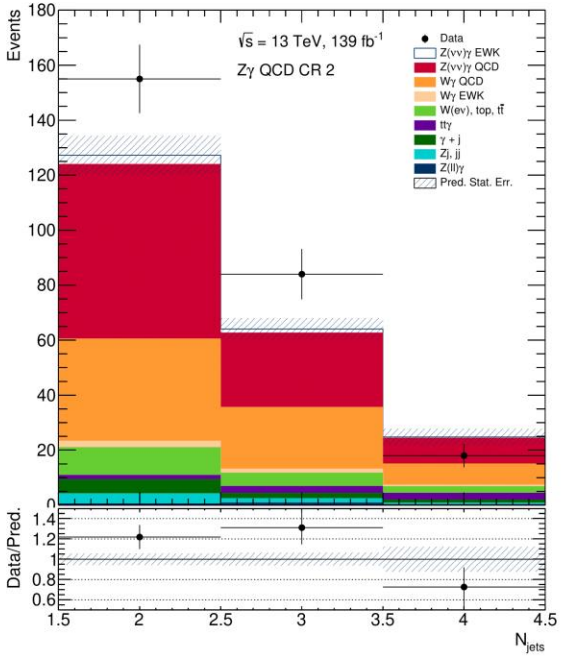

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 1
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
pT(j2) [GeV]

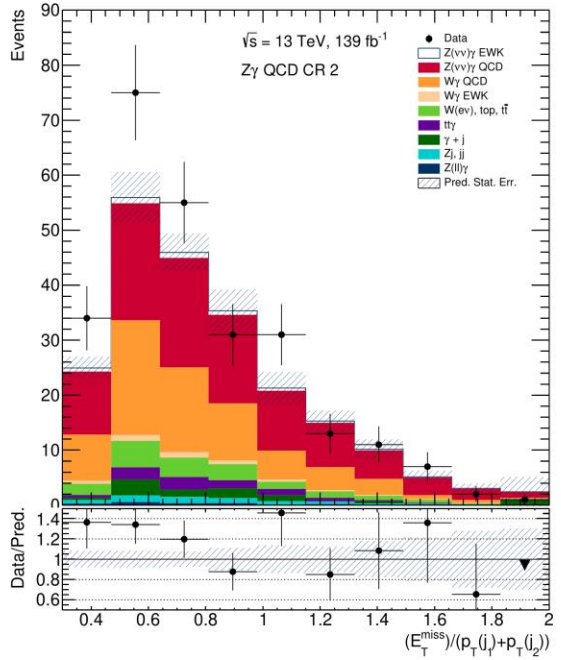

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 2
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
mjj [GeV]

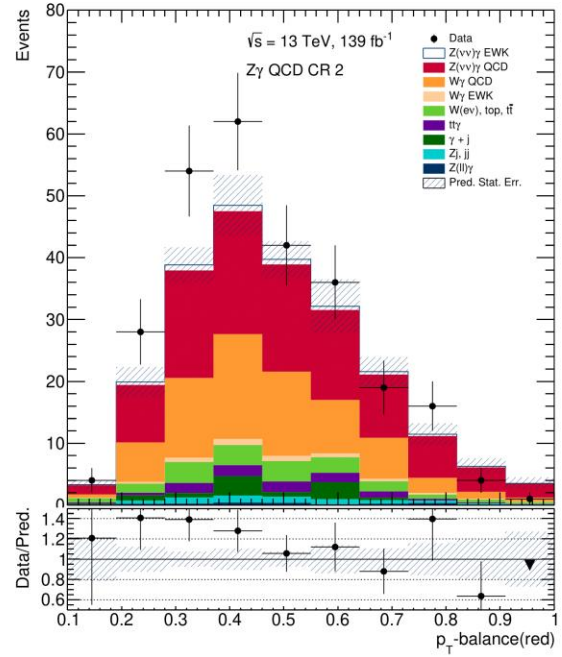

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 2
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
pT-balance

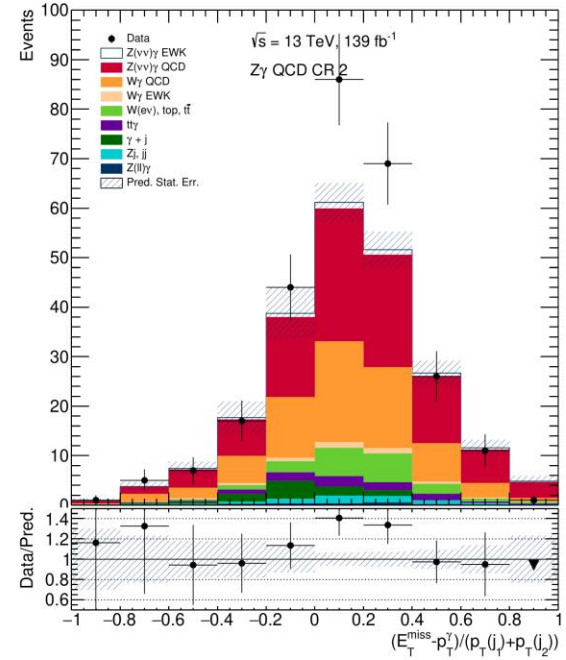

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 2
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
√(pT(j1))2+(pT(j2))2

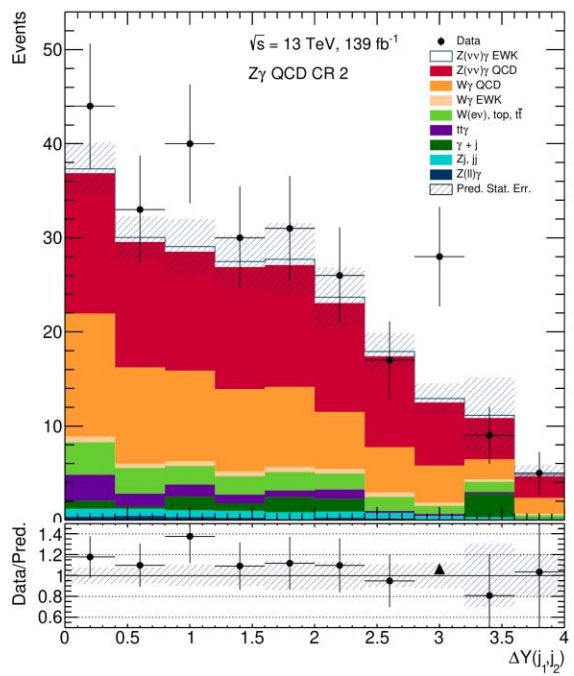

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 2
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
ΔY(j1,γ)

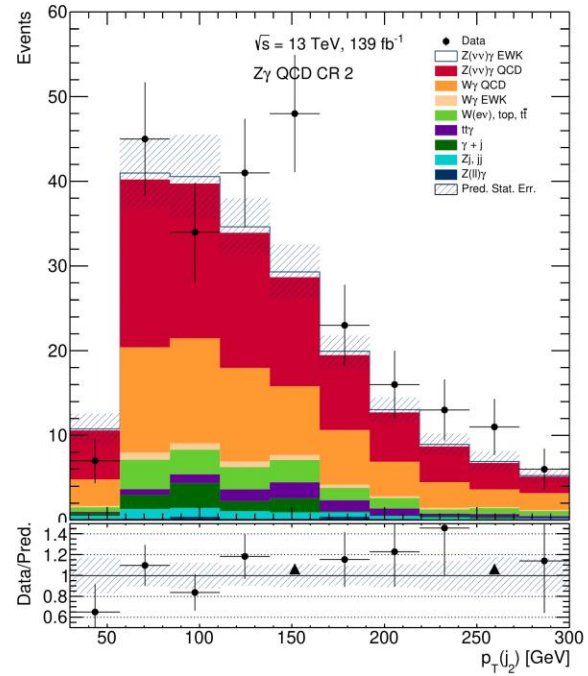

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 2
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
Njets

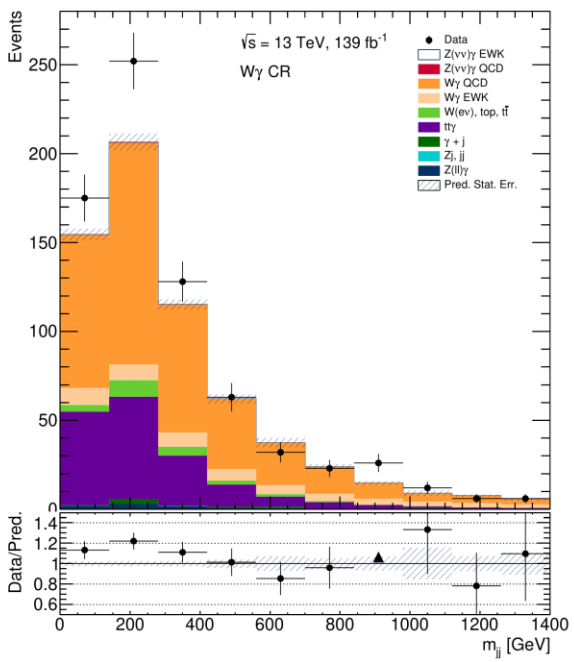

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 2
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
(ETmiss)/(pT(j1)+pT(j2))

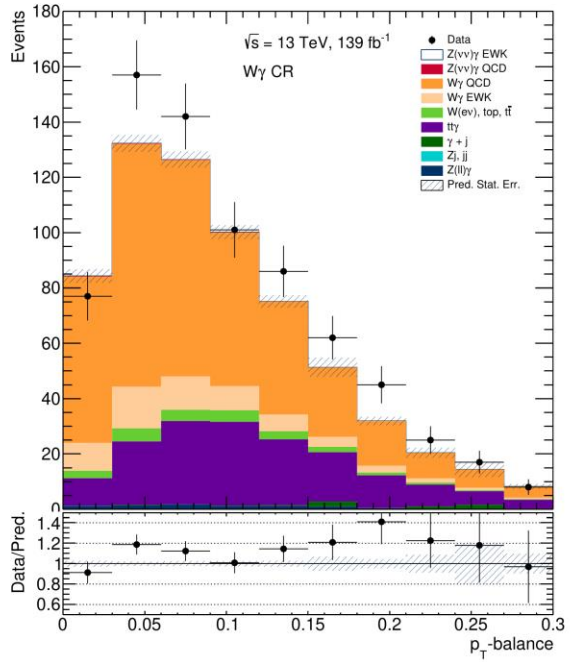

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 2
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
pT-balance(red)

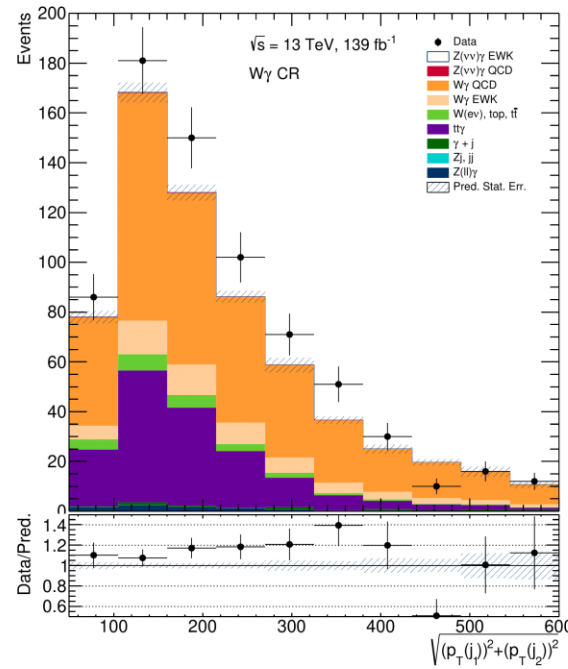

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 2
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
(ETmiss-pTγ)/(pT(j1)+pT(j2))

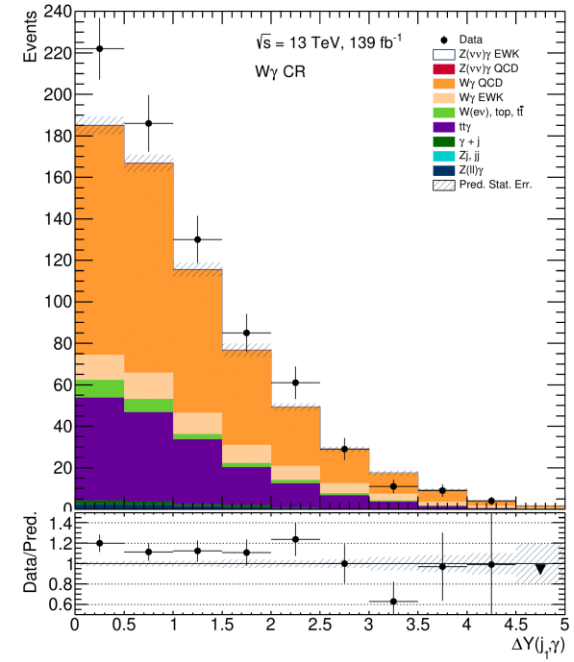

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 2
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
ΔY(j1,j2)

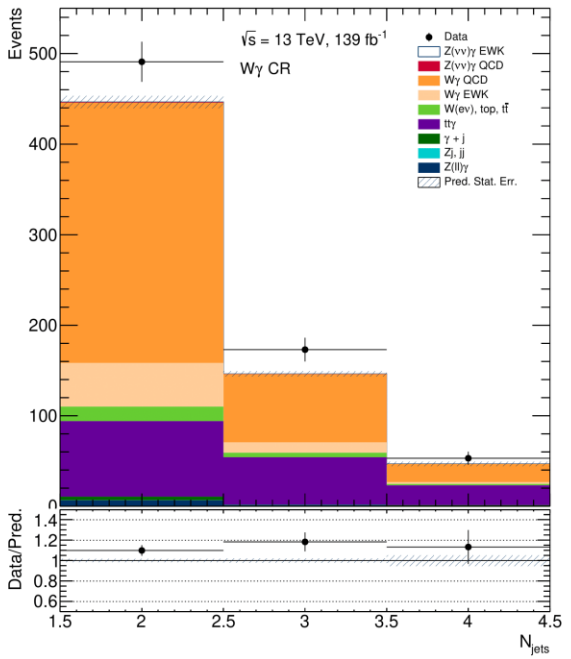

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ QCD CR 2
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
pT(j2) [GeV]

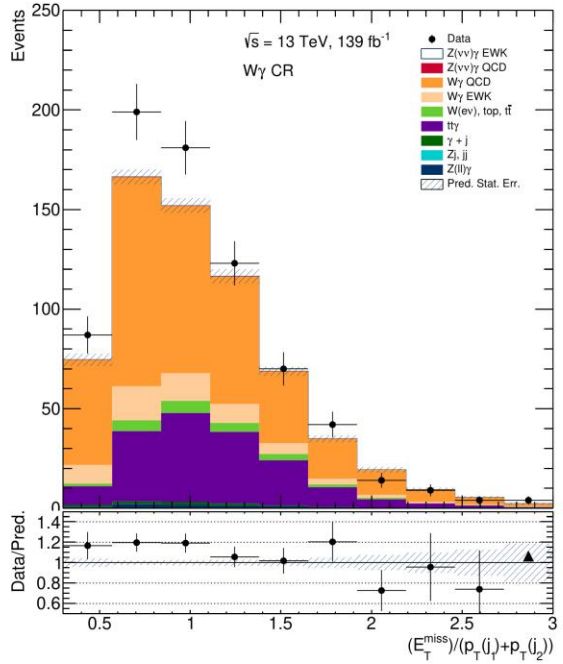

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Wγ CR
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
mjj [GeV]

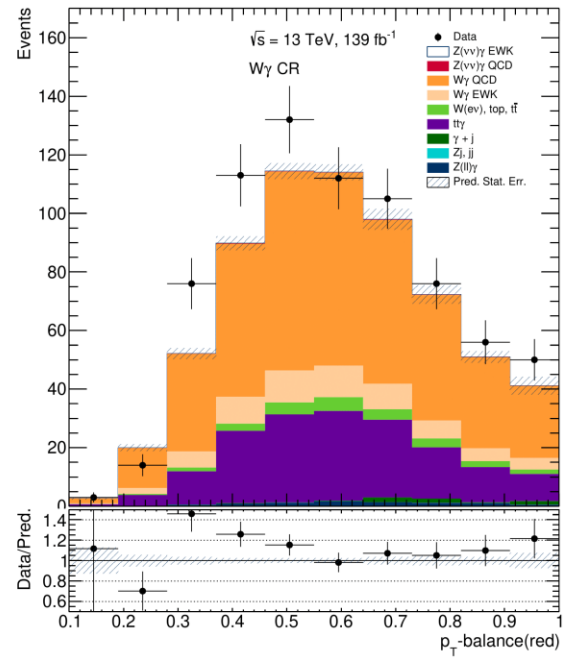

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Wγ CR
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
pT-balance

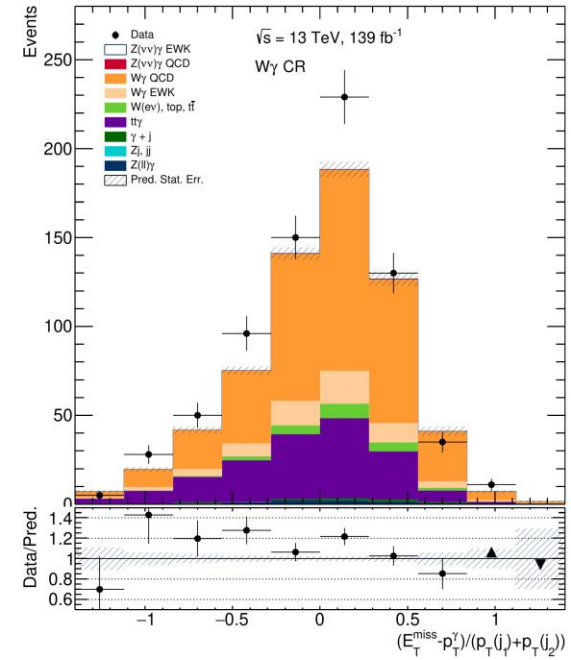

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Wγ CR
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
√(pT(j1))2+(pT(j2))2

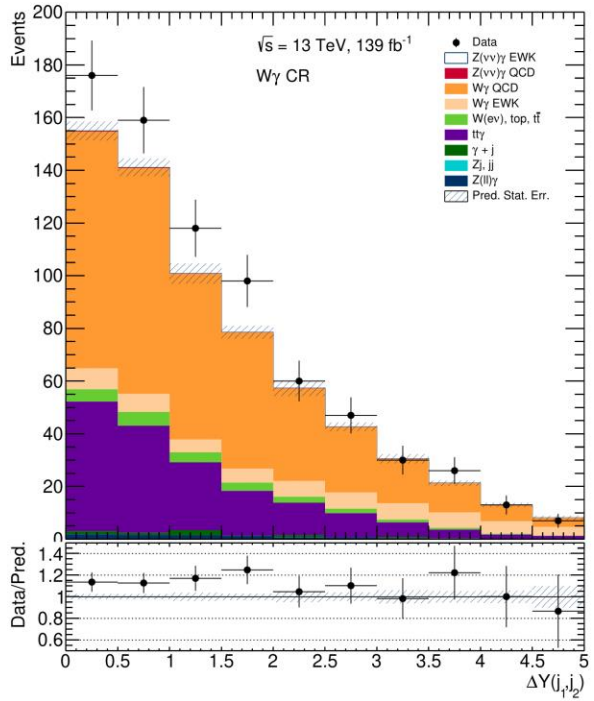

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Wγ CR
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
ΔY(j1,γ)

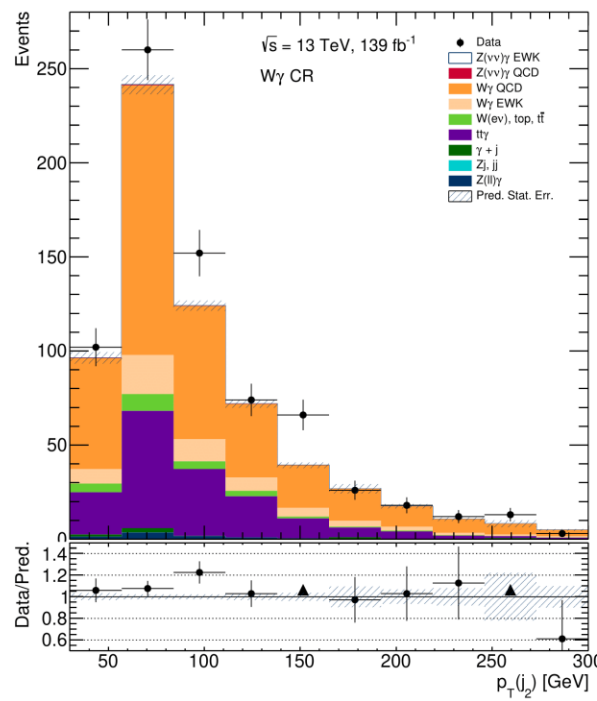

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Wγ CR
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
Njets

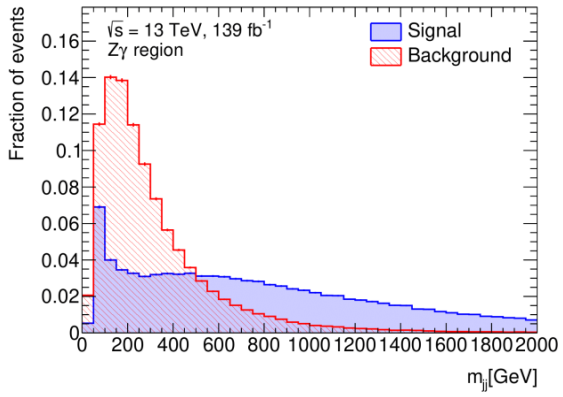

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Wγ CR
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
(ETmiss)/(pT(j1)+pT(j2))

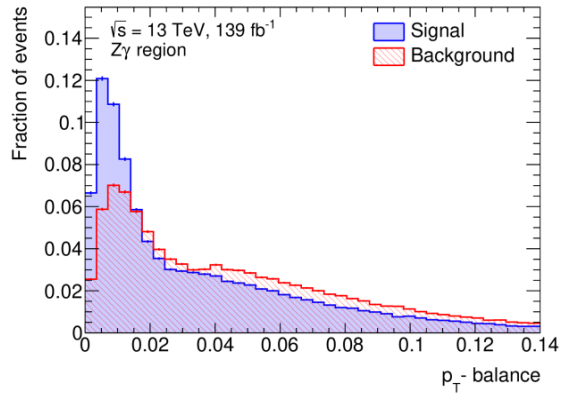

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Wγ CR
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
pT-balance(red)

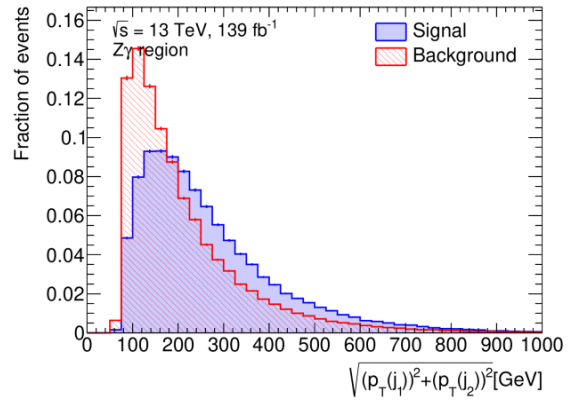

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Wγ CR
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Events
Data/Pred.
(ETmiss-pTγ)/(pT(j1)+pT(j2))

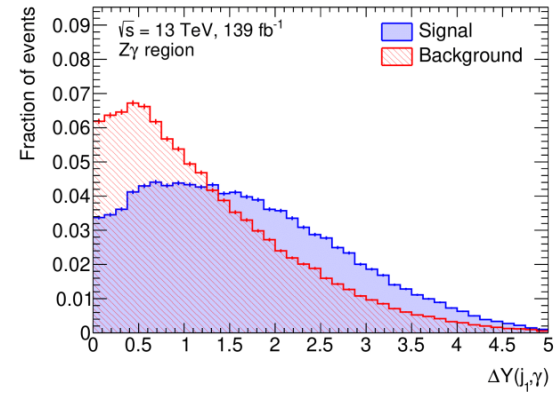

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Wγ CR
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
ΔY(j1,j2)

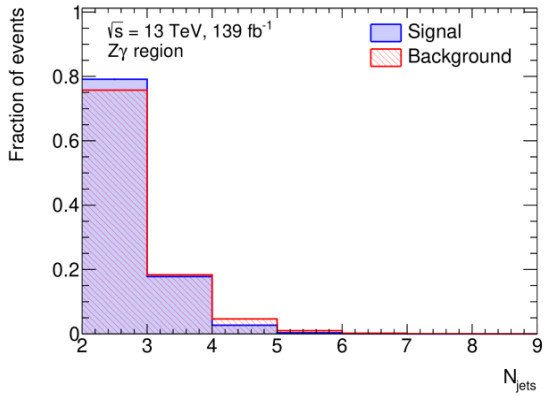

Events
√s = 13 TeV, 139 fb-1
Wγ CR
Data
Z(νν)γ EWK
Z(νν)γ QCD
Wγ QCD
Wγ EWK
W(eν), top, tt̄
ttγ
γ + j
Zj, jj
Z(ll)γ
Pred. Stat. Err.
Data/Pred.
pT(j2) [GeV]

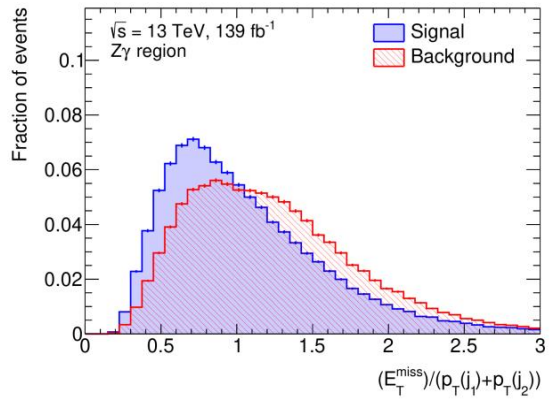

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
mjj[GeV]

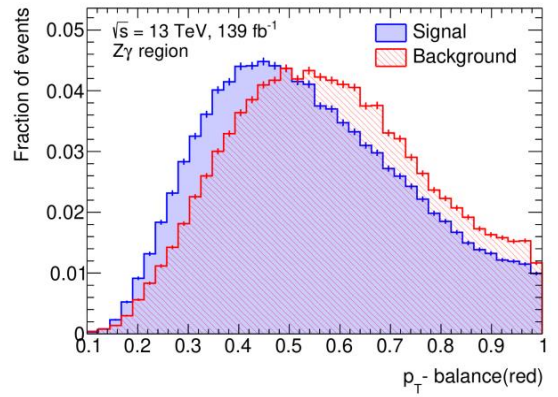

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
pT- balance

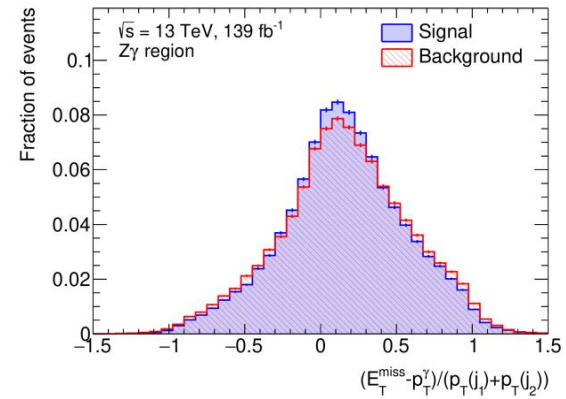

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
√(pT(j1)2+(pT(j2))2[GeV]

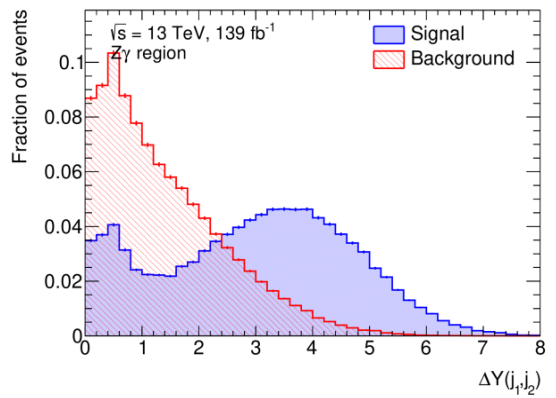

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
ΔY(j1,γ)

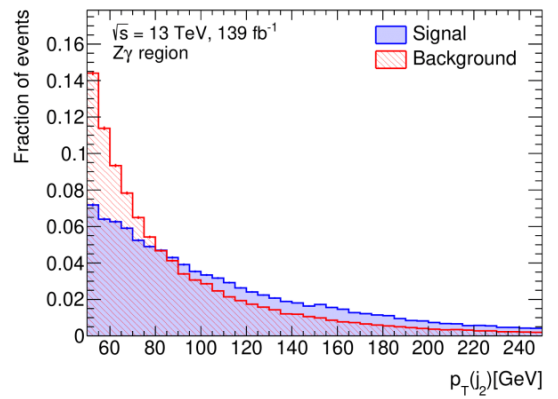

√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
Njets


√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
(ETmiss)/(pT(j1)+pT(j2))


√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
pT- balance(red)


√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
(ETmiss-pTγ)/(pT(j1)+pT(j2))


√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
ΔY(j1,j2)


√s = 13 TeV, 139 fb-1
Zγ region
Signal
Background
Fraction of events
pT(j2)[GeV]