

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНЕВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ОПТИМИЗАЦИЯ ОТБОРОВ В $ZZ \rightarrow ll\nu\nu$ АНАЛИЗЕ

Руководитель НИРС,
к.ф-м.н.

_____ Солдатов Е.Ю.
подпись

Студент гр. М20-115

_____ Зубов Д.В.
подпись

Консультант

_____ Пятиизбянцева Д.Н.
подпись

Консультант

_____ Петухов А.М.
подпись

Москва 2022

Содержание

Введение	2
1 Экспериментальная установка ATLAS	3
2 Оптимизация отбора событий	5
2.1 Алгоритм BDTG	5
2.2 Оптимизация отборов в процессе инклюзивного рождения пары Z -бозонов и последующего распада на пару заряженных лептонов и пару нейтрино.	6
2.3 Предотбор событий «жесткими» условиями	7
2.4 Предотбор событий расслабленными условиями	8
2.5 Настройка классификатора.	10
3 Измерение силы сигнала.	14
3.1 Описание метода фитирования.	14
3.2 Описание контрольных и сигнального регионов.	14
3.3 Результаты фитирования.	15
4 Заключение	16

Введение

Стандартная модель (СМ) физики элементарных частиц объясняет большинство явлений и процессов в физике высоких энергий, а ее предсказания подтверждались во множестве экспериментах. Однако, Стандартная модель считается неполной, поскольку она не отвечает на многие фундаментальные вопросы. В связи с чем предполагается, что СМ является частью более универсальной теории и обнаружение отклонений от предсказаний СМ может подтвердить или отбросить новые теории.

Рождение пар векторных бозонов тесно связано с неабелевой природой электрослабой теории и спонтанным нарушением калибровочной симметрии. Кроме того, предсказывается широкий спектр новых явлений за пределами Стандартной модели (СМ) физики частиц, связанный с рождением двубозонной пары. Изучение процессов рождения векторных бозонов является краеугольным камнем электрослабой теории и возможных сценариев физики за пределами СМ и составляет существенную часть физической программы Большого адронного коллайдера (БАК).

Среди всех двубозонных процессов рождение пары Z -бозонов имеет наименьшее сечение, но, тем не менее, процесс вполне перспективен для измерения параметров СМ и поиска «новой» физики благодаря хорошему соотношению сигнал/фон в канале распада на четыре заряженных лептона. Соотношение сигнал/фон несколько хуже в канале распада на пару заряженных лептонов и пару нейтрино, но вероятность таких распадов выше[1].

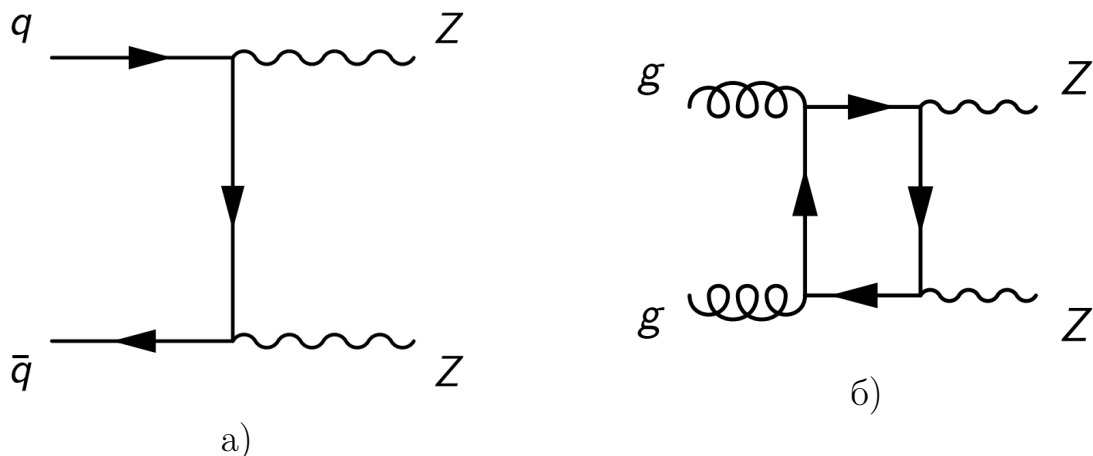


Рис. 1: Диаграммы процессов КХД рождения двух Z бозонов

В работе показана оптимизация отбора событий с использованием алгоритмов машинного обучения для инклюзивного рождения пары Z -бозонов и последующего распада на два заряженных лептона и два нейтрино. В результате оптимизации может быть достигнута максимальная значимость отбора событий, что позволит измерить сечение рождения пары Z бозонов с большей точностью.

1 Экспериментальная установка ATLAS

Эксперимент ATLAS[2] (ATLAS — A Toroidal LHC ApparatuS) многоцелевой детектор, покрывающий почти полный телесный угол. В эксперименте ATLAS используется прямоугольная система координат. Ось z направлена по оси пучка, x - к центру кольца, y - вверх, ϕ - азимутальный угол в плоскости xOy , перпендикулярной пучку, отсчитывается от оси x , θ - полярный угол, отсчитывается от оси Z . В основном при работе используется величина, зависящая от полярного угла $\eta = -\ln\left(\text{tg}\frac{\theta}{2}\right)$, называемая псевдобыстротой, т.к. она аддитивна относительно преобразований Лоренца.

Эксперимент ATLAS включает в себя внутренний детектор (ВД), систему калориметров, мюонный спектрометр (МС), магнитную и триггерную системы (Рис. 1).

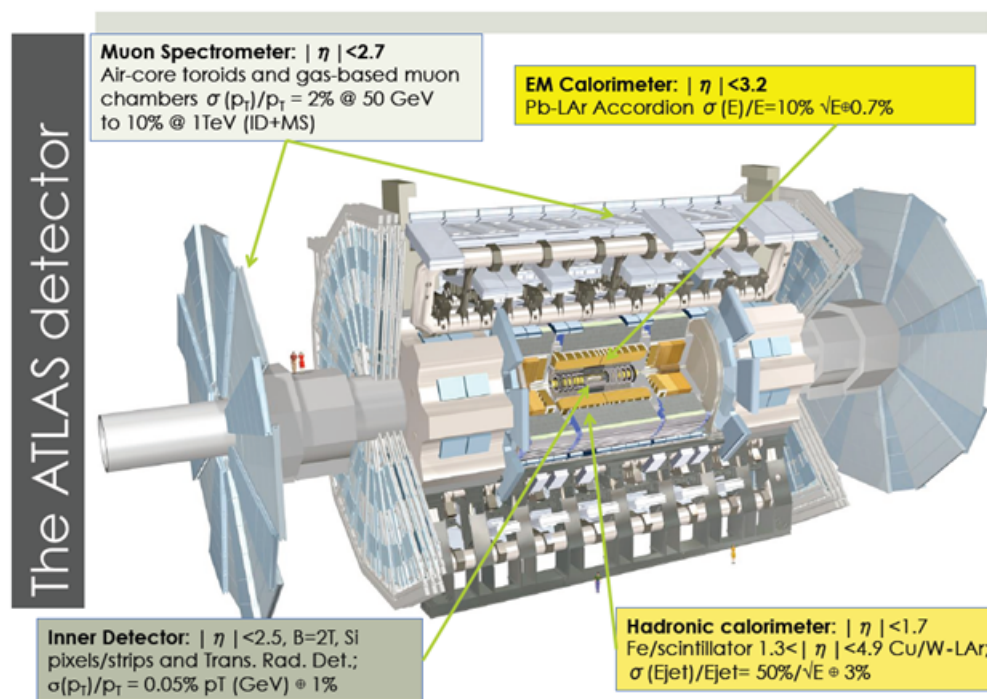


Рис. 2: Детектор ATLAS

Основная задача внутреннего детектора - восстановление треков заряженных частиц. ВД состоит из трех подсистем: пиксельного (Pixel) и силиконового (SCT) микростриповых детекторов, а также трекера переходного излучения (TRT). Пиксельный детектор состоит из трех цилиндрических слоев и трех торцевых пластин и в общем содержит 80 миллионов пикселей. Ближайший к пучку слой называют В-слоем. Он находится на расстоянии 3.3 см от пучка и имеет важную роль в восстановлении треков. SCT детектор включает 4 цилиндрических слоя и 9 дисков в каждом торце, состоящих из силиконовых микрострипов. Силиконовый и пиксельный детекторы покрывают область псевдобыстроты $|\eta| < 2.5$. TRT, состоящий из тонких трубок,

наполненных смесью Хе и Аг, покрывает область псевдобыстрот $|\eta| < 2.0$].

Калориметрическая система состоит из электромагнитной (ЭМК) и адронной составляющей. ЭМК играет решающую роль в идентификации электронов и фотонов. Он состоит из слоев свинца и жидкого аргона и имеет геометрию аккордеона. ЭМК делится на центральную часть, покрывающую область псевдобыстрот $|\eta| < 1.475$, и две торцевые части (каждая из которых состоит из двух коаксиальных колёс), покрывающие область псевдобыстрот $1.375 < |\eta| < 3.2$. В области псевдобыстрот $1.37 < |\eta| < 1.52$ находится технический зазор, в котором измерения не проводятся. Адронный калориметр состоит из 3-х различных систем: Tile-калориметр, торцевой LAr-калориметр и передний LAr-калориметр. Tile-калориметр размещается снаружи корпуса ЭМ-калориметра. Он состоит из органических сцинтилляторов и позволяет регистрировать энергии адронов в области с псевдобыстротой $|\eta| < 1.7$]. Торцевой LAr-калориметр, рабочим веществом которого является жидкий аргон, расположен за торцевым ЭМ-калориметром. Он перекрывает область псевдобыстрот $1.5 < |\eta| < 3.2$. Передний LAr-калориметр, также основанный на жидком аргоне, создает однородность калориметрии и поглощает фон перед мюонными камерами. Его область псевдобыстрот: $3.1 < |\eta| < 4.9$.

МС восстанавливает импульс и треки пролетающих мюонов с максимально возможным разрешением. Состоит из четырёх подсистем, использующих разные технологии: Мониторируемые Дрейфовые Трубки, Катодные Стриповые Камеры, Резистивные Плоские Камеры и Тонко-Зазорные Камеры. Эти подсистемы погружены в магнитное поле, генерируемое тремя тороидами: один центральный покрывает диапазон по псевдобыстроте $|\eta| < 1.5$ обеспечивая поле в 0.5 Тл и ещё два, расположенные в области большей псевдобыстроты $|\eta| > 1.5$ генерируют поле в 1 Тл.

Для предварительного отбора «интересных» столкновений используется система триггеров. В результате её, при номинальной частоте столкновений 40 МГц, интересные события поступают со средней частотой 200 Гц.

Для измерения импульсов создана специальная система магнитов, создающая электромагнитное поле, которое искривляет траектории заряженных частиц. Она состоит из 4-х сверхпроводящих магнитов: соленоида и трёх тороидов. Подразделяется на 2 основных составляющих – внутреннюю (соленоид) и внешнюю (тороидальные магниты).

2 Оптимизация отбора событий

2.1 Алгоритм BDTG

Оптимизация отбора событий происходила с использования алгоритма BDTG реализованного в пакете TMVA [4]. BDTG - это «Композиция деревьев решений» (Boosted Decision Trees) [5] использующая градиентный бустинг [6,7]. Принцип работы алгоритма состоит в поочерёдном применении ограничений по различным переменным, в ходе чего строится дерево решений. Отборы по переменным производятся так, чтобы максимизировать коэффициент разделение сигнала и фона. Затем из этих отборов выбирается тот, который обеспечивает максимальное разделение событий. Процесс повторяется для каждого дочернего узла до тех пор, пока количество событий в каком-либо из них не станет меньше установленного. Далее все узлы классифицируются как сигналоподобные или фоноподобные в зависимости от коэффициента чистоты или от преобладания в них сигнальных, либо фоновых событий.

Недостатком деревьев решений является их чувствительность к флуктуациям в исходных данных и склонность к перетренированности. Бустинг решает эту проблему. Суть этого алгоритма заключается в создании леса деревьев решений. При последовательном создании каждого дерева веса событий тренировочного образца изменяются таким образом, чтобы максимизировать влияние на построение дерева тех переменных, которые были неправильно классифицированы на предыдущих шагах. При этом каждому дереву присваивается вес, который отражает его эффективность в разделении событий.

При применении классификатора к набору данных, события поступают на вход каждому дереву решений, его отклик равен 1, если событие сигнальное и -1, – если фоновое. Отклик классификатора – непрерывная величина, лежащая в пределах $[-1;1]$ и являющаяся взвешенной суммой откликов всех деревьев в лесу. Распределение по отклику можно использовать для разделения сигнальных и фоновых событий.

Для оценки эффективности разделения сигнала и фона классификатором использовались сигнальная значимость (1) и площадь под ROC-кривой, которая является функцией зависимости эффективности отбора сигнала (signal efficiency) (2) и фонового подавления (background rejection) (3) как функций от значения ограничения по отклику. Эффективность сигнала определяется как доля сигнальных событий, которая остаётся после применения классификатора. Подавление фона – это доля фоновых событий, исключаемых из исходного набора.

$$Z = \sqrt{2 \times [(S + B) \times \ln(1 + (S/B)) - S]}, \quad (1)$$

где Z - сигнальная значимость, S - число сигнальных событий, B - число фоновых событий.

$$\varepsilon = \frac{S}{S_{init.}}, \quad (2)$$

$$\kappa = 1 - \frac{B}{B_{init.}}, \quad (3)$$

где $S_{init.}$ и $B_{init.}$ - число сигнальных и фоновых событий в исходном наборе соответственно.

2.2 Оптимизация отборов в процессе инклюзивного рождения пары Z -бозонов и последующего распада на пару заряженных лептонов и пару нейтрино.

Среди всех двубозонных процессов рождение пары Z -бозонов имеет наименьшее сечение, но хорошее соотношение сигнал/фон в канале распада на четыре заряженных лептона. Соотношение сигнал/фон несколько хуже в канале распада на пару заряженных лептонов и пару нейтрино, но вероятность таких распадов выше.

Сигнатурой этого процесса в детекторе ATLAS являются события, содержащие пару разноименно заряженных лептонов (e^+e^- или $\mu^+\mu^-$) и большой потерянный поперечный импульс, который соответствуют Z -бозону, распавшемуся на пару нейтрино. Схожую сигнатуру имеет ряд других фоновых процессов.

Оптимизация отборов проводилась на данных Монте-Карло симуляции работы детектора ATLAS в течении второго сеанса набора данных. Сигнальные и фоновые процессы описаны в таблице 1.

Кандидаты в сигнальные события должны удовлетворять следующим критериям:

- В событии два разноименно-заряженных лептона одного аромата (e^+e^- или $\mu^+\mu^-$), при этом, поперечный импульс первого больше 30 ГэВ, второго больше 20 ГэВ;
- Вето на третий заряженный лептон;
- $76 \text{ ГэВ} < M_{ll} < 106 \text{ ГэВ}$, где M_{ll} - инвариантная масса двух заряженных лептонов;
- $E_T^{miss} > 70 \text{ ГэВ}$.

Сигнал	
QCD ZZ	КХД рождение двух Z-бозонов и последующий распад в $ll\nu\nu$
EWK ZZ	Электрослабое рождение двух Z-бозонов и последующий распад в $ll\nu\nu$
Фон	
Zj	рождение Z-бозона и струи, с распадом Z-бозона в пару заряженных лептонов и большим ложным потерянными поперечным импульсом
WZ	рождение пары бозонов Z и W, с распадом Z-бозона в пару заряженных лептонов и лептонным распадом W
tt	рождение пары топ-кварков и последующим распадом включающим конечное состояние $ll\nu\nu$ (не резонансное рождение $ll\nu\nu$)
WW	рождение пары W с распадом в $ll\nu\nu$ (не резонансное рождение $ll\nu\nu$)
Wt	рождение W и топ-кварка и распадом в конечное состояние, содержащее $ll\nu\nu$ (не резонансное рождение $ll\nu\nu$)
VVV	рождение трех векторных бозонов ($V = W$ или Z)
Other (ttV, ttVV)	рождение пары топ-кварков и одного или двух векторных бозонов

Таблица 1: Сигнальные и основные фоновые процессы для процесса инклюзивного рождения ZZ и последующего распада в $ll\nu\nu$

2.3 Предотбор событий «жесткими» условиями

Перед непосредственным использованием алгоритма BDTG проводился предварительный отбор событий ограничениями на переменные, найденными в ходе cut based оптимизации переменных. В таблице 2 представлены отборы, полученные в ходе cut based оптимизации, значение сигнальной значимости, отношение числа сигнальных событий к фоновым, число фоновых и сигнальных событий, до и после оптимизации. В таблице 3 представлены числа сигнальных и фоновых процессов для каждого источника сигнала и фона до и после cut based оптимизации.

Переменная	До	После
E_T^{miss} значимость	—	>10
E_T^{miss} , ГэВ	—	—
ΔR_{ll}	—	<1.8
$\Delta\phi(\vec{E}_T^{miss}, \vec{p}_T^{ll})$	—	>2.3
Число b-струй	—	<1
E_T^{miss}/H_T	—	>0.5
Сигнальная значимость	7.43 ± 0.03	44.7 ± 0.4
Сигнал/Фон	0.007	1.43
Число сигнальных событий	7858 ± 28	1959 ± 15
Число фоновых событий	$(1123 \pm 4) \cdot 10^3$	1370 ± 22

Таблица 2: Результаты cut based оптимизации инклюзивного рождения ZZ

	До	После
Сигнал		
QCD ZZ	7596 \pm 28	1946 \pm 15
EWK ZZ	262 \pm 2	13.0 \pm 0.4
Total signal	7858 \pm 28	1959 \pm 15
Фон		
Zj	962833 \pm 4057	181 \pm 20
WZ	11338 \pm 29	945 \pm 8
tt	123340 \pm 73	131 \pm 2
WW	5093 \pm 13	64.0 \pm 1.5
Wt	10251 \pm 41	41 \pm 3
VVV	41.8 \pm 0.3	7.88 \pm 0.10
Other	282 \pm 2	0.79 \pm 0.11
Total bkg.	(1123 \pm 4)·10 ³	1370 \pm 22

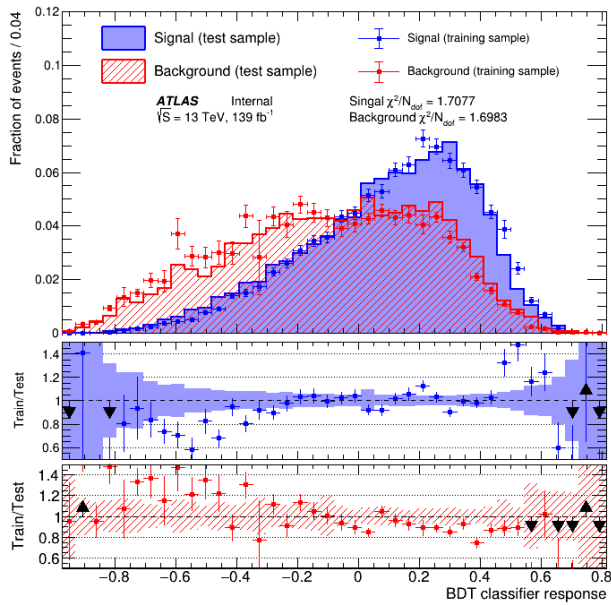
Таблица 3: Числа сигнальных и фоновых процессов для каждого источника сигнала и фона до и после cut based оптимизации.

Список переменных, их распределения и корреляционные матрицы представлены в приложении. На рисунке 4 показаны результаты работы классификатора. Из распределения по отклику классификатора и ROC-кривой видно низкая эффективность работы алгоритма на выделенном наборе данных. Полученный результат объясняется использованием «жестких» предварительных отборов, которые также являются результатом оптимизации.

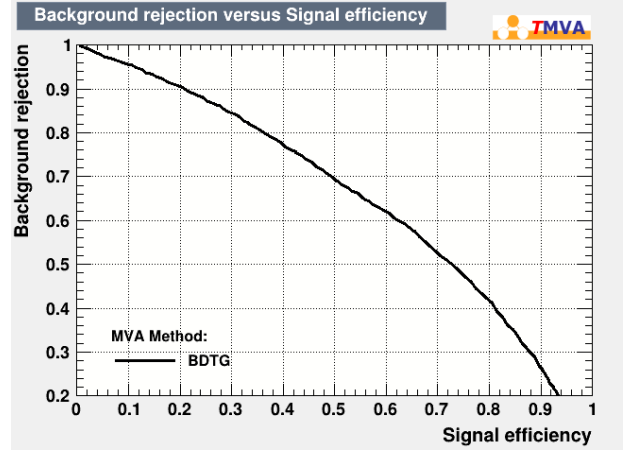
Тем не менее осуществлялись попытка улучшить работу классификатора удаляя скоррелированные переменные и фоны, вносящие большой вклад в статистическую ошибку числа событий. К положительным результатам эти действия не привели, подробное сравнение классификатора с разными опциями представлены в приложении.

2.4 Предотбор событий ослабленными условиями

В целях увеличения разделительной способности переменных и улучшения качества работы классификатора обучение производилось на событиях отобранных с помощью ослабленных условий на переменные. Эти отборы были получены с помощью метода cut based оптимизации поиском максимума сигнальной значимости при условии, что число сигнальных событий больше 4000. В таблице 4 представлены «жесткие» и ослабленные отборы, значение сигнальной значимости, отношение числа сигнальных событий к фоновым, число фоновых и сигнальных событий. В таблице 5 представлены числа сигнальных и фоновых процессов для каждого источника сигнала и фона для «жесткого» и ослабленного вариантов преселекции.



а)



б)

Рис. 3: Распределение сигнала и фона по переменной функции отклика классификатора слева и ROC-кривая справа при жесткой преселекции.

Переменная	Расслабленный отбор	Жесткий отбор
E_T^{miss} значимость	7	>10
ΔR_{ll}	<2.2	<1.8
$\Delta\phi(\vec{E}_T^{miss}, \vec{p}_T^{ll})$	>2.3	>2.3
Число b-струй	<1	<1
E_T^{miss} / H_T	>0	>0.5

Таблица 4: Условия расслабленного и жесткого отбора событий

Процесс	Расслабленный отбор	Жесткий отбор
Сигнал		
QCD ZZ	4409 \pm 23	1946 \pm 15
EWK ZZ	57.8 \pm 0.9	13.0 \pm 0.4
Total signal	4467 \pm 23	1959 \pm 15
Фон		
Zj	12184 \pm 290	181 \pm 20
WZ	3116 \pm 15	945 \pm 8
tt	2829 \pm 11	131 \pm 2
WW	1352 \pm 7	64.0 \pm 1.5
Wt	729 \pm 10	41 \pm 3
VVV	1771 \pm 0.17	7.88 \pm 0.10
Other	4.46 \pm 0.26	0.79 \pm 0.11
Total bkg.	20439 \pm 291	1370 \pm 22

Таблица 5: Числа сигнальных и фоновых событий для каждого источника сигнала и фона при расслабленном и жестком отборе.

При обучении «расслабленного» классификатора использовались те же переменные, что и при обучении «жесткого». Распределения переменных при расслабленной преселекции представлено в приложении. На рисунке 4 показаны результаты работы классификатора. Из распределения отклика классификатора видна улучшенная разделительная способность классификатора. Сравнение распределения тренировочной и тестовой выборки критерием Пирсона показывает отсутствие переобучения.

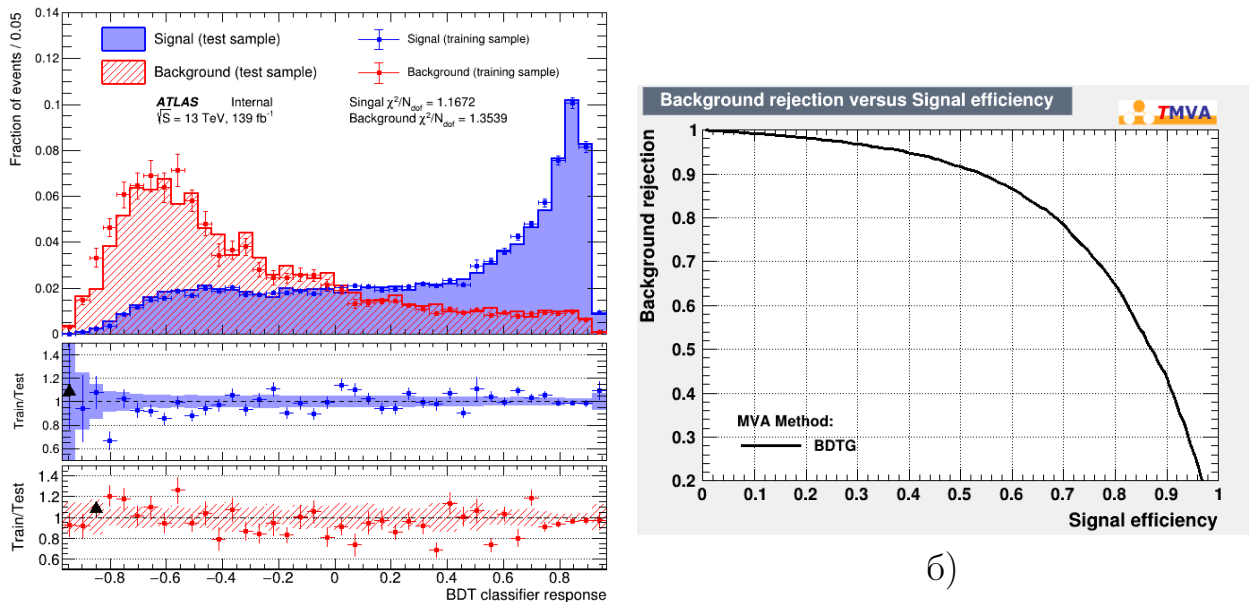
Аналогично производились сравнения классификаторов с удалением скоррелированных переменных. Из сравнения распределений отклика классификаторов видно, что при удалении скоррелированных переменных значение χ^2/NDF уменьшается, а значит согласие распределения тренировочной и тестовой выборки возрастает.

2.5 Настройка классификатора.

В целях увеличения разделяющей способности и стабильности алгоритма классификации был проведен ряд исследований по поиску наилучших настроек.

Выбор критерия разделения.

Для определения наилучшего критерия разделения производилась тренировка нескольких классификаторов, отличающихся только критерием разделения. При остальные настройки, такие как гиперпараметры и ис-



a)

б)

Рис. 4: Распределение сигнала и фона по переменной функции отклика классификатора слева и ROC-кривая справа при расслабленной преселекции.

пользуемые переменные, оставались одинаковыми в каждом тренируемом алгоритме. В ходе исследования были рассмотрены следующие критерии разделения:

- Индекс Гини (критерий по умолчанию), определяемый как $p \cdot (1 - p)$;
- Перекрестная энтропия, определяемая как $-p \cdot \ln(p) - (1 - p) \cdot \ln(1 - p)$;
- Ошибка мисклассификации, определяемая как $1 - \max(p, 1 - p)$;
- Статистическая значимость, определяемая как $S/\sqrt{S + B}$.

Сравнения показали, что отличие производительности классификатора минимально при вариации критерия разделения. Везде далее использован в качестве критерия индекс Гини.

Оптимизация гиперпараметров классификатора.

Подбор оптимальных настроек (гиперпараметров) классификатора, таких как число деревьев, число бинов и глубина дерева, производился методом поиска по сетке. При этом в циклически классификатор обучался со всевозможными настройками классификатора и отбирался лучший, соответствующий максимуму площади под ROC-кривой.

Ниже показаны оптимизируемые гиперпараметры и диапазон рассматриваемых значений:

Option	Default	Best
NTrees	400	200
Shrinkage	0.1	0.3
MaxDepth	3	2
MinNodeSize	5%	0.2%

Таблица 6: Значения гиперпараметров используемых по умолчанию и полученных в ходе оптимизации

- NTrees: 100, 200, 400, 600, 800, 1000
- MaxDepth: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
- Shrinkage: 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0
- MinNodeSize: 0.2%, 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20%

В таблице 6 приведены значения стандартных и полученных в ходе оптимизации настроек, а также максимальные сигнальные значимости, доступные при применении ограничения на значения отклика классификатора. На рисунках 5а и 5б показаны распределения сигнала и фона по отклику классификатора, а также зависимость сигнальной значимости от порога на отклик классификатора. На рисунках 6а и 6б показаны нормированные на единицу распределения сигнала и фона по отклику классификатора для тренировочной и тестовой выборок.

Таким образом в ходе оптимизации гиперпараметров классификатора удалось повысить максимально достижимую сигнальную значимость с 44.3 ± 0.4 до 46.1 ± 0.4

Отбор переменных.

Отбор переменных необходим для выделения максимально эффективных переменных, и исключения неэффективных и скореллированных, которые могут не только не улучшить, а даже ухудшить перфоманс алгоритма. Также исключение неэффективных переменных разгружает классификатор, уменьшает время, необходимое на его обучение и снижает вероятность перетренированности.

В данной работе для отбора переменных использовался алгоритм $N + 1$. Идея метода в том, чтобы измерить важность переменной, глядя на сколько увеличивается $auROC$, когда переменная добавляется. Отбор начинается с одной переменной с наибольшим $auROC$ и последовательно добавляет переменную из оставшихся $N - n$ с самым высоким $auROC$. Это предполагает обучение BDT для каждого из $N - n$ комбинации для определения $auROC$ и нахождения лучшей комбинации.

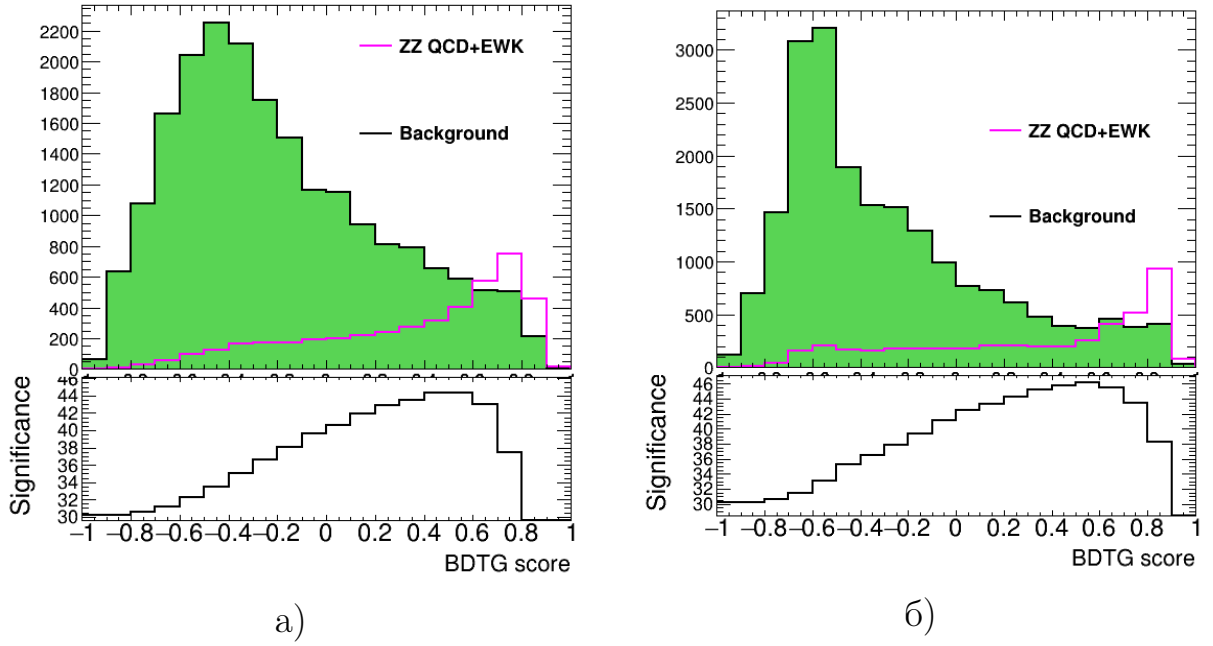


Рис. 5: Распределения сигнала и фона по переменной функции отклика классификатора слева и зависимости сигнальной значимости от порога ну функцию отклика классификатора для стандартных и полученных в ходе оптимизации настроек.

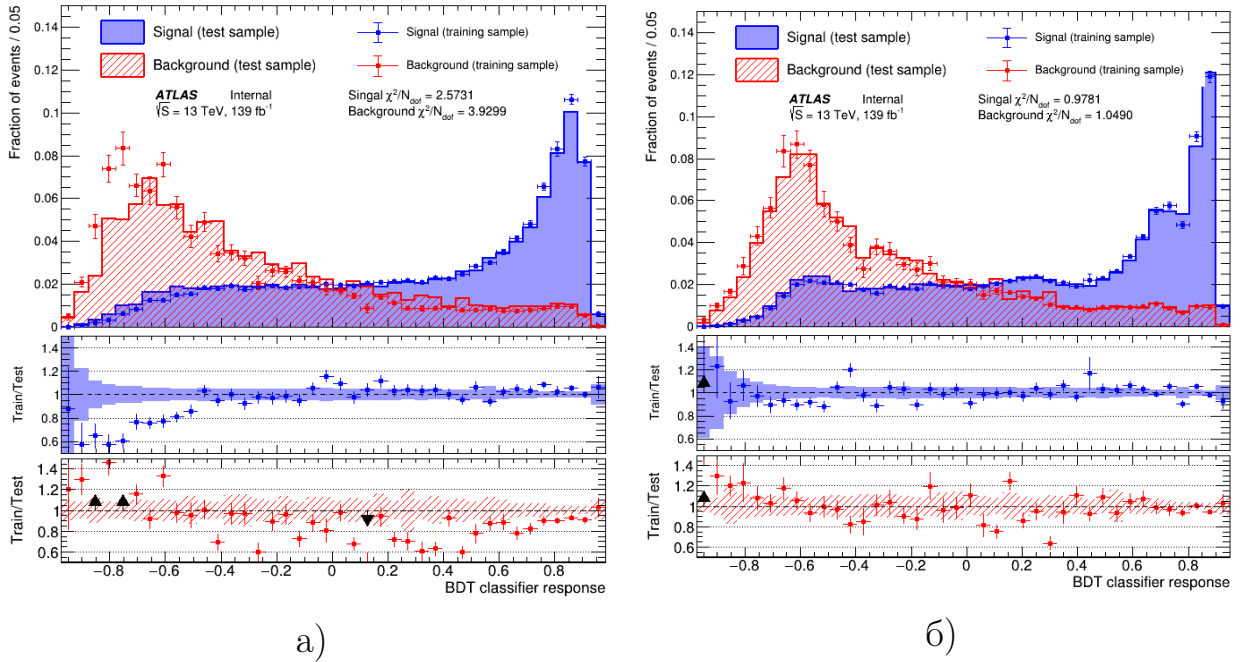


Рис. 6: Нормированные распределения сигнала и фона по переменной функции отклика классификатора для тренировочной и тестовой выборки.

В таблице 7 показан процесс отбора переменных и как менялось значение $auROC$ при добавлении каждой переменной. Из таблицы видно, что после добавления переменной $fracpT$, последующие добавляемые переменные не улучшают производительность классификатора. Таким образом бы-

ло отобрано 9 переменных. При этом максимально достижимая сигнальная значимость увеличилась с 46.1 ± 0.4 до 46.8 ± 0.4 .

3 Измерение силы сигнала.

Полученный классификатор использовался для оценки числа сигнальных событий путем фитирования распределения отклика классификатора. В данной главе описывается методика одновременного фитирования данных в контрольных и сигнальном регионах, а также показано сравнение результатов фитирования распределения отклика классификатора в ослабленном фазовом пространстве и переменной p_T^Z в сигнальном регионе в фазовом пространстве с жесткими предотборами.

3.1 Описание метода фитирования.

В ходе процедуры фитирования для сигнального и основных фоновых процессов вводятся так называемые параметры интереса они же нормфакторы — μ . При фитировании с помощью метода максимального правдоподобия ищутся значения этих нормфакторов.

В данной работе фитирование производилось в два этапа. Во-первых, производился фит только контрольных регионах для оценки числа фоновых событий. С найденными нормировочными коэффициентами далее производился фит к данным Азимова во всех рассматриваемых регионах. Таким образом извлекалась сила сигнала и статистическая погрешность. Метод реализовывался на базе пакета TRExFitter[12].

3.2 Описание контрольных и сигнального регионов.

Сигнальный регион.

Сигнальный регион (CP) - регион фазового пространства, в котором доля сигнальных событий максимальна. CP для ослабленного фазового пространства и фазового пространства с жесткими предотборами определяется порогами описанными в таблице 4 и ограничения описанными в секции 2.2.

Zj регион

Zj - регион фазового пространства, в котором доля событий процесса Zj максимална. Zj - регион определяется ровно так же, как и сигнальный, но с отличием в ограничении переменной E_T^{miss} значимость: для ослабленного ФП E_T^{miss} значимость < 7 , для жесткого E_T^{miss} значимость < 9 .

Нерезонансный контрольный регион.

Нерезонансный контрольный регион (НР) или $e\mu$ -регион - регион фазового пространства, в котором доля событий процессов нерезонансного рождения l^+l^- максимальна. $e\mu$ -регион выделяется ровно так же как и сигнальный, с той лишь разницей, что лептоны отираются разного аромата.

WZ регион.

WZ регион или $3l$ -регион - регион фазового пространства, в котором доля событий процесса WZ максимальна. В WZ регион попадают события с тремя лептонами, в нем нет ограничений на переменные ΔR_{ll} и $\Delta\phi(\vec{E}_T^{miss}, \vec{p}_T^{ll})$, но есть условие на поперечную массу W-бозона $m_T^W > 60$ ГэВ.

3.3 Результаты фитирования.

На рисунках 8 представлены распределения событий до и после фита по регионам. Подробные распределения для каждого региона находятся в приложении. На рисунках 7а и 7б показаны полученные значения нормфакторов со статистической погрешностью. Можно видеть, что с использованием распределения по отклику BDT уменьшились статистические погрешности на значения нормфакторов. Также значительно возросла значимость с 23.0 до 36.5.

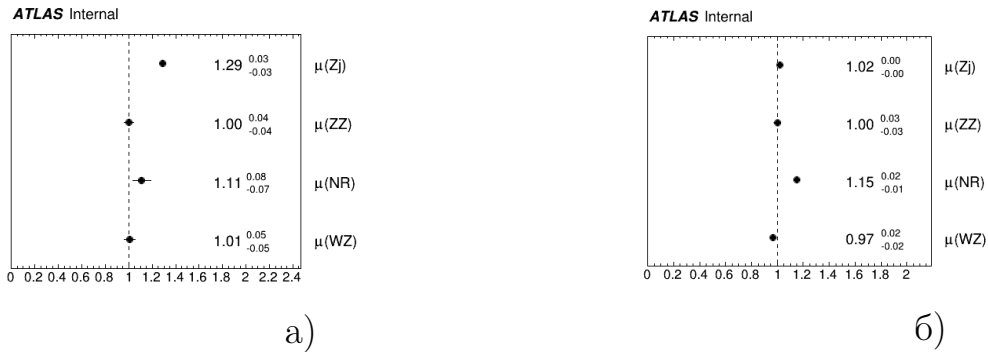


Рис. 7: Нормфакторы полученные при фите в ФП со строгими отборами (слева) с расслабленными отборами (справа)

4 Заключение

В ходе работы была произведена настройка и оптимизация классификатора, получен стабильный классификатор. По форме распределения отклика классификатора производился фит в сигнальном регионе. С фитом по отклику классификатора удалось достичь бОльшей значимости ($23.0 \rightarrow 36.5$) и уменьшить стат. ошибку для $\mu(ZZ)$ ($0.04 \rightarrow 0.03$) по сравнению с фитом по переменной p_T^Z .

В дальнейшем планируется добавить систематические погрешности в фитб использовать в фите оценки фонов, оцениваемых data driven методами.

Список используемых источников

1. Measurement of ZZ production in the $ll\nu\nu$ final state with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV / M. Aaboud // Journal of High Energy Physics.2019., No 10. ISSN 1029-8479.
2. ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST 3 (2008) S08003.
3. ATLAS Computing : technical design report [Text]: Technical Design Report ATLAS (17) / ATLAS Collaboration. - Geneva : CERN, 2005. - 234 p.
4. Hoecker A. [et al.]. TMVA - Toolkit for Multivariate Data Analysis. — 2007. — arXiv: physics/0703039 [physics.data-an].
5. L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen, et al., Classification and regression trees, 1983.
6. Y. Freund and R. E. Schapire, A short introduction to boosting, in In Proceedings of theSixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann, 1999, pp. 1401–1406
7. Friedman J. H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine // Ann. Stat. — 2001. — Vol. 29, no. 5. — P. 1189–1232.
8. Sinervo P. K. Signal significance in particle physics // Conference onAdvanced Statistical Techniques in Particle Physics. 2002. с. 64-76. arXiv:hep-ex/0208005.
9. Observation of electroweak production of two jets and aZ -boson pair with the ATLAS detector at the LHC. 2020. arXiv:2004.10612 [hep-ex].
10. Collaboration A. Observation of electroweak production of two jets andaZ-boson pair with the ATLAS detector at the LHC. 2020. arXiv:2004.10612 [hep-ex].
11. Rainwater D., Szalapski R., Zeppenfeld D. Probing color-singlet exchange in Z+2-jet events at the CERN LHC // Physical Review D. 1996. т.54, No 11. с. 6680-6689. ISSN 1089-4918
12. TReXFitter documentation, <https://trexfitter-docs.web.cern.ch/trexfitter-docs/> (2021), accessed: 2021-02-19