

ОПТИМИЗАЦИЯ ОТБОРА СОБЫТИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА $ZZ \rightarrow \ell\nu\nu$ НА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА ATLAS С $\sqrt{S} = 13$ ТэВ

Зубов Д.В.

НИЯУ МИФИ

Научный руководитель: Солдатов Е.Ю.

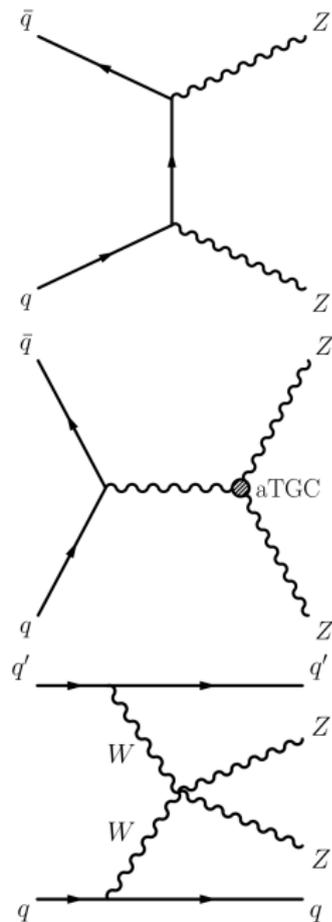
Консультант: Пятиизбянцева Д.Н.

Москва, 2021

Введение

Актуальность и мотивация:

- ▶ Прецизионное измерение двухбозонных процессов один из способов проверки Стандартной модели и пертурбативной КХД на масштабе энергий несколько ТэВ
- ▶ Измерение $aTGC$ и $aQGC$ является косвенным поиском новой физики
- ▶ Многие расширения СМ предсказывают новые скалярные, векторные или тензорные резонансы, которые могут распадаться на пары электрослабых бозонов.
- ▶ Векторное рассеяние бозонов (VBS) - ключевой процесс для исследования механизма нарушения электрослабой симметрии.



Методика оптимизации

Оптимизация заключается в:

- ▶ поиске таких переменных, ограничение которых приводит к подавлению фона при максимальном сохранении сигнала
- ▶ поиске оптимального порога на переменные, при котором наблюдается наилучшее подавление фона при наилучшем сохранении сигнала

Критерием наилучшего соотношения сигнал/фон является сигнальная значимость $S.S. = \sqrt{2 \times [(S + B) \times \ln(1 + (S/B)) - S]}$

В ходе работы был предложен модернизированный метод оптимизации, который представляет сигнальную значимость как функцию нескольких переменных.

Модернизированный метод оптимизации ищет вектор отборов, при котором достигается максимум сигнальной значимости.

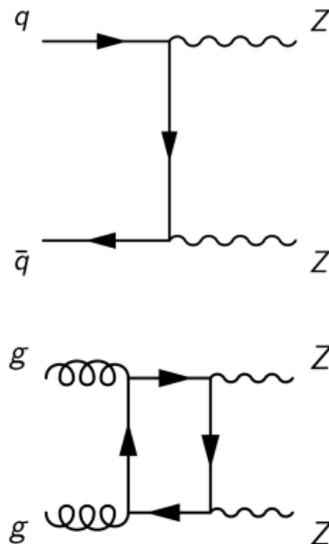
Преимущества нового метода:

- ▶ Нет зависимости от порядка, в котором оптимизируются переменные
- ▶ Всегда находится наилучшее решение из всех возможных вариантов
- ▶ Метод позволяет накладывать дополнительные условия, которым должно удовлетворять найденное решение

Инклюзивный процесс $ZZ \rightarrow ll\nu\nu$

- ▶ 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;
- ▶ $76 \text{ ГэВ} < M_{ll} < 106 \text{ ГэВ}$;
- ▶ $E_T^{\text{miss}} > 70 \text{ ГэВ}$.

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



Результаты оптимизации инклюзивного процесса $ZZ \rightarrow ll\nu\nu$

В ходе оптимизации искался максимум сигнальной значимости как функции 6-ти переменных

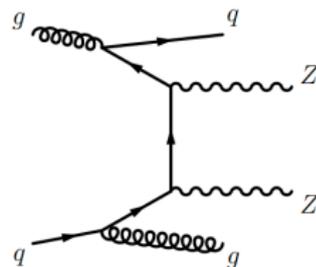
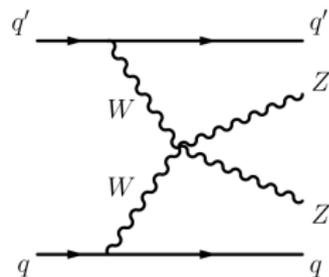
Переменная	До	После		До	После
E_T^{miss} значимость	—	>10	Сигнал		
E_T^{miss} , ГэВ	—	—	QCD ZZ	7596 ±28	1946 ±15
ΔR_{ll}	—	<1.8	EWK ZZ	262 ±2	13.0 ±0.4
$\Delta\phi(E_T^{miss}, p_T^{ll})$	—	>2.3	Total signal	7858 ±28	1959 ±15
Число b-струй	—	<1	Фон		
E_T^{miss}/H_T	—	>0.5	Zj	962833 ±4057	181 ±20
			WZ	11338 ±29	945 ±8
Сигнальная значимость	7.43±0.03	44.7±0.4	tt	123340 ±73	131 ±2
Число сигнальных событий	7858 ±28	1959 ±15	VVW	5093 ±13	64.0 ±1.5
Число фоновых событий	(1123 ±4)·10 ³	1370 ±22	Wt	10251 ±41	41 ±3
			VVV	41.8 ±0.3	7.88 ±0.10
			Other	282 ±2	0.79 ±0.11
			Total bkg.	(1123 ±4)·10 ³	1370 ±22

Полученные результаты приняты группой и используются в анализе

Электрослабый процесс $ZZjj \rightarrow ll\nu\nu jj$

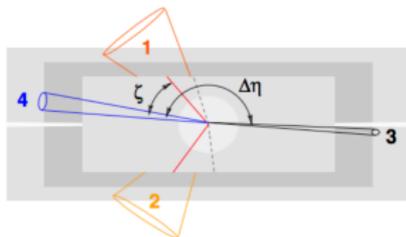
- ▶ В событии два разноименно-заряженных лептона одного аромата (e^+e^- или $\mu^+\mu^-$), при этом, поперечный импульс первого больше 30 ГэВ, второго больше 20 ГэВ;
- ▶ Вето на третий заряженный лептон;
- ▶ $76 \text{ ГэВ} < M_{ll} < 106 \text{ ГэВ}$;
- ▶ $E_T^{miss} > 70 \text{ ГэВ}$;
- ▶ Две и более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

Сигнал	
EWK ZZ	Электрослабое рождение двух Z-бозонов и последующий распад в $ll\nu\nu$
Фон	
QCD ZZ	КХД рождение двух Z-бозонов и последующий распад в $ll\nu\nu$
Zj	рождение Z-бозона и струи, с распадом Z-бозона в пару заряженных лептонов и большим ложным потеряннным 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



Исследование различных вариантов выбора tag-струй

- ▶ Сигнатура VBF/VBS процессов - две высокоэнергетичные струи, в противоположных торцах детектора с большой быстротой.
- ▶ Сравнивались три варианта выбора tag-струй



Переменная	Выбор tag-струй по Y	Выбор tag-струй по E	Выбор tag-струй по p_T
E_T^{miss} значимость	>7	>7	>7
M_{jj} , ГэВ	>550	>550	>550
$\Delta\eta(j_1j_2)$	>0.8	>1.0	>1.0
$Y(j_1) \times Y(j_2)$	<2.2	<2.4	<2.2
$p_T(j_1)$, ГэВ	>40	>60	>80
$p_T(j_2)$, ГэВ	>40	>40	>50
Сигнальная значимость	1.34 ± 0.04	1.41 ± 0.04	1.51 ± 0.05
Число сигнальных событий	36.5 ± 0.8	35.0 ± 0.7	35.1 ± 0.7
Число фоновых событий	729 ± 31	609 ± 31	530 ± 30

- ▶ Наилучший вариант выбора tag-струй - выбор двух струй с наибольшим p_T
- ▶ Исследование планируется продолжить на truth уровне

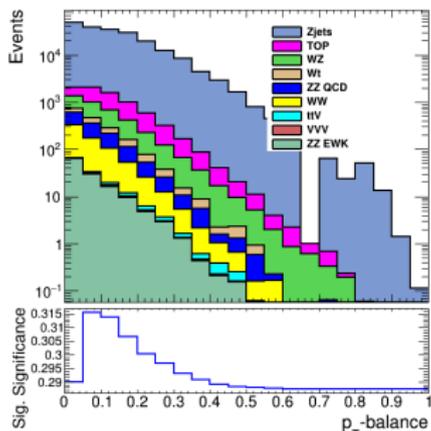
Сравнение переменных, характеризующих вылет видимого Z-бозона относительно tag-струй

- ▶ Отказ от отбора событий условием $Y(j_1) \times Y(j_2) < 0$
- ▶ Проводилось сравнение эффективности переменных $\Delta Y(Z, j_{\max(\min)})$, $\Delta\eta + (-)$ и ζ
- ▶ $\Delta\eta + (-) = \eta(j_{\max(\min)}) - \eta(l_{\max(\min)})$, $\zeta = \left| \frac{Y(Z) - \frac{Y(j_1) + Y(j_2)}{2}}{Y(j_1) - Y(j_2)} \right|$

Переменная	$\Delta Y, \Delta\eta$ и ζ	$\Delta\eta$ и ζ	$\Delta\eta$	ΔY и ζ	ΔY	ζ
E_T^{miss} значимость	>6	>6	>6	>6	>6	>6
M_{jj} , ГЭВ	>600	>600	>600	>600	>600	>600
$p_T(j_1)$, ГЭВ	>90	>80	>80	>90	>90	>100
$p_T(j_2)$, ГЭВ	>50	>50	>50	>50	>50	>50
$\Delta Y(Z, j_{\max})$	<-0.3	—	—	<-0.3	<-0.3	—
$\Delta Y(Z, j_{\min})$	>-0.3	—	—	>-0.3	>-0.3	—
$\Delta\eta+$	<0.9	<0.0	<0.0	—	—	—
$\Delta\eta-$	>-1.2	>-0.5	>-0.5	—	—	—
ζ	no cut	no cut	—	no cut	—	<0.5
Сигнальная значимость	1.54 ± 0.05	1.52 ± 0.05	1.52 ± 0.05	1.54 ± 0.05	1.54 ± 0.05	1.51 ± 0.05
Число сигнальных событий	35.3 ± 0.7	35.0 ± 0.7	35.0 ± 0.7	35.3 ± 0.7	35.3 ± 0.7	35.2 ± 0.7
Число фоновых событий	513 ± 29	516 ± 29	516 ± 29	514 ± 29	514 ± 29	534 ± 29

- ▶ Отличие результатов разных вариантов оптимизации не превосходит их погрешности
- ▶ Для дальнейшего анализа были выбраны переменные $\Delta Y(Z, j_{\max(\min)})$

Исследование эффективности переменной p_T -balance



Распределение сигнала и фона по переменной p_T -balance и зависимость сигнальной значимости от верхнего порога на переменную p_T -balance.

$$p_T\text{-balance} = \frac{|\vec{E}_T^{\text{miss}} + \vec{p}_T^Z + \vec{p}_T^{j_1} + \vec{p}_T^{j_2}|}{E_T^{\text{miss}} + p_T^Z + p_T^{j_1} + p_T^{j_2}}$$

Variable	All	No p_T -balance
E_T^{miss} signif.	>6	>6
$M_{j_1 j_2}$, ГЭВ	>550	>550
$p_T(j_1)$, ГЭВ	>80	>80
$p_T(j_2)$, ГЭВ	>40	>40
E_T^{miss} , ГЭВ	>100	>100
$p_T(Z)$, ГЭВ	>20	>20
$\Delta Y(Z, j_{\text{max}})$	<0.3	<0.3
$\Delta Y(Z, j_{\text{min}})$	>-0.3	>-0.3
p_T -balance	<0.14	—
Signal signif.	1.61±0.05	1.56±0.04
Total signal	35.0 ±0.7	39.8 ±0.8
Total bkg.	460 ±25	641 ±26

- ▶ Предложенная переменная p_T -balance способна значительно подавлять фоновые события, сохраняя при этом сигнальные.

Заключение

Полученные результаты:

- ▶ Произведена оптимизация фазового пространства для инклюзивного процесса $ZZ \rightarrow ll\nu\nu$, при этом сигнальная значимость увеличилась с 7.43 ± 0.03 до 44.7 ± 0.4 . Предложенные отборы были приняты группой и использовались в дальнейшем анализе.
- ▶ В ходе изучения электрослабого процесса $ZZjj \rightarrow ll\nu jj$:
 - ▶ были рассмотрены три способа выбора tag-струй и выбран наиболее эффективный;
 - ▶ было произведено сравнение переменных, характеризующих вылет Z-бозона относительно tag-струй;
 - ▶ была предложена переменная p_T -balance и продемонстрирована ее эффективность;

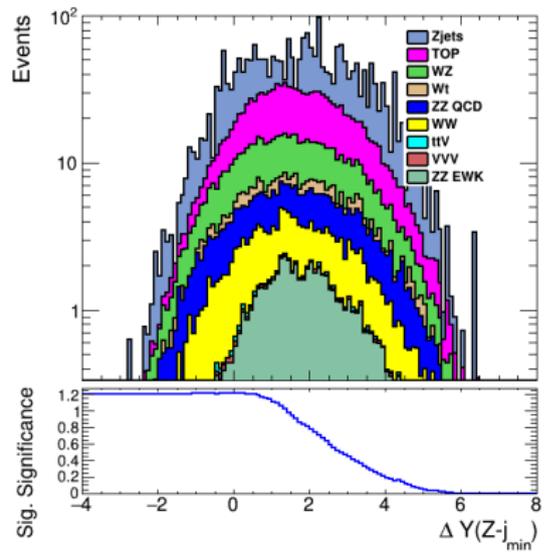
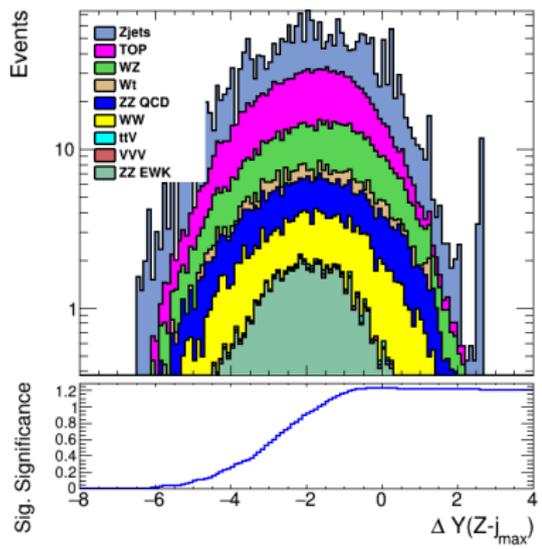
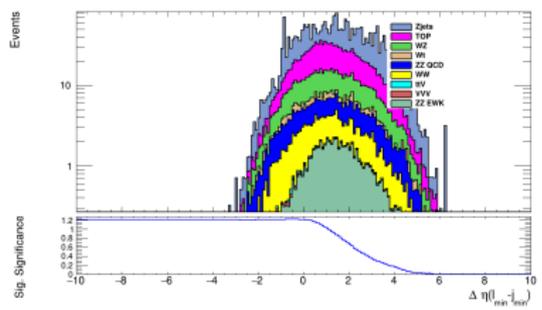
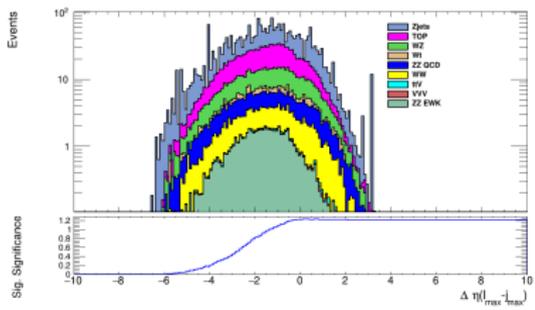
Дальнейшие планы:

- ▶ Продолжение исследования способа наилучшего отбора tag-струй на truth уровне для электрослабого процесса $ZZjj \rightarrow ll\nu jj$;
- ▶ Улучшение оптимизации отбора с помощью методов машинного обучения для инклюзивного и электрослабого процесса.

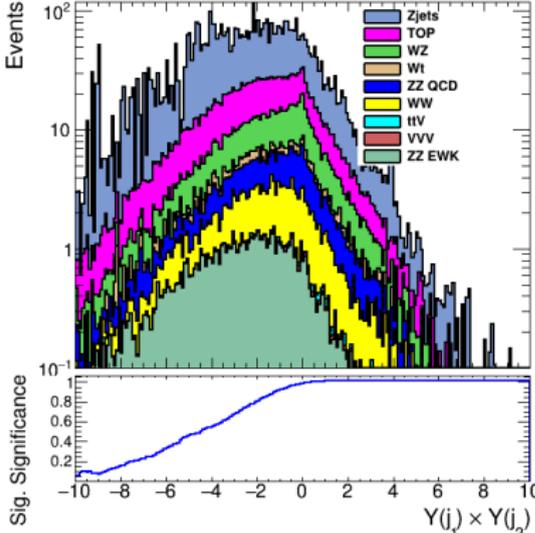
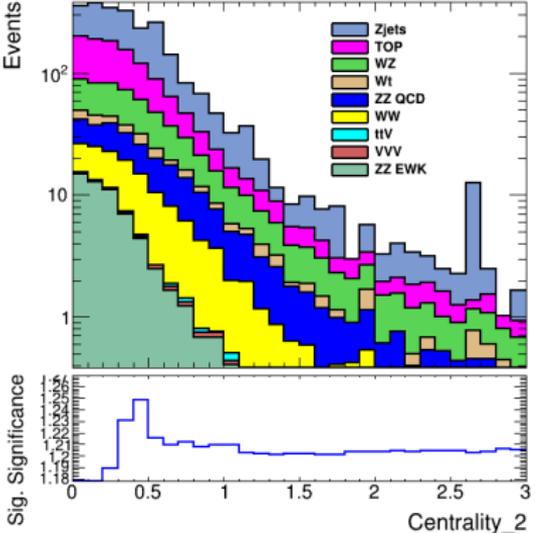
Спасибо за внимание!

back up

back up



back up



Variable	No p_T -balance
$E_T^{miss} \text{ signif.}$	>8
$M_{j_1 j_2}, \Gamma \Delta B$	>700
$p_T(j_1), \Gamma \Delta B$	>60
$p_T(j_2), \Gamma \Delta B$	>40
ζ	<0.5
$\Delta\eta_+$	<-0.1
$\Delta\eta_-$	—
p_T -balance	<0.02
Signal signif.	2.5 ± 0.6
Total signal	9.3 ± 0.3
Total bkg.	11 ± 7

Таблица: Результаты оптимизации электрослабого рождения ZZ без ограничения минимального числа сигнальных событий и поиском максимальной сигнальной значимости.

back up

Variable	signal>45	signal>50	signal>55
E_T^{miss} signif.	>6	>6	>6
$M_{j_1 j_2}$, ГЭВ	>500	>400	>400
$p_T(j_1)$, ГЭВ	>80	>90	>80
$p_T(j_2)$, ГЭВ	>40	>30	—
E_T^{miss} , ГЭВ	>90	>90	>90
$p_T(Z)$, ГЭВ	>10	>20	>10
$\Delta Y(Z, j_{max})$	<0.3	<0.3	<0.3
$\Delta Y(Z, j_{min})$	>-0.3	>-0.3	—
p_T -balance	<0.28	<0.3	<0.32
Signal signif.	1.49 ± 0.4	1.42 ± 0.4	1.36 ± 0.3
Total signal	45.0 ± 0.8	50.1 ± 0.8	55.0 ± 0.9
Total bkg.	898 ± 34	1235 ± 55	1614 ± 63

Таблица: Результаты оптимизации электрослабого рождения ZZ с различными ограничениями минимального числа сигнальных событий.

Signal			
EWK ZZ	45.0±0.8	50.1±0.8	55.0±0.9
Background			
QCD ZZ	55.6 ±0.9	84.3 ±1.3	110.9 ±1.6
Zμμ	209 ±22	254 ±22	375 ±33
Zee	108 ±25	118±50	199 ±53
Zττ	2.1 ±0.4	3.5 ±0.7	4.2 ±0.8
WZ	146.8 ±1.1	213.4 ±1.4	257.5 ±1.6
tt	312 ±4	452 ±4	531 ±5
WW	42.9 ±1.2	73.6 ±1.6	90.6 ±1.7
Wt	20.7 ±1.7	33.6 ±2.3	42.3 ±2.5
VVV	1.06 ±0.07	1.58 ±0.8	1.93 ±0.8
Other	0.85 ±0.14	1.23 ±0.18	1.49±0.19
Total bkg.	898±34	1235±55	1614±63

Таблица: Число сигнальных и фоновых событий для каждого источника сигнала и фона для разных результатов оптимизации электрослабого рождения ZZ с различными ограничениями минимального числа сигнальных событий.