

# 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.

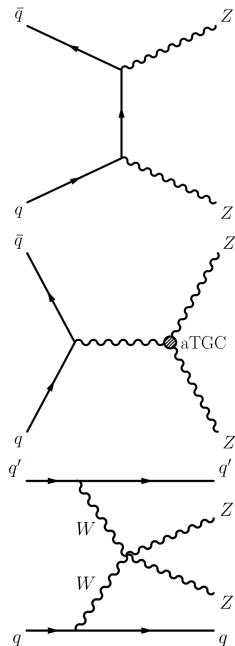
Консультант: Пятиизбянцева Д.Н.

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.

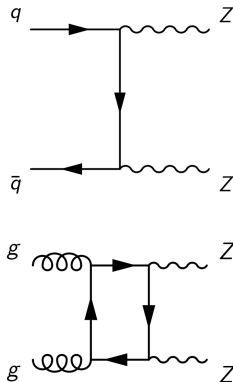
Преимущества нового метода:

- ▶ 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

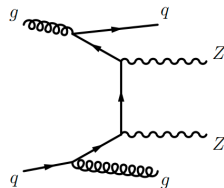
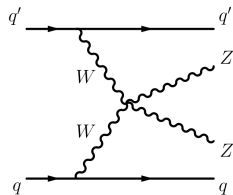
Переменная	До	После		До	После
$E_T^{miss}$ значимость	—	>10	Сигнал		
$E_T^{miss}$ , ГэВ	—	—	QCD ZZ	7596 ±28	1946 ±15
$\Delta R_{ll}$	—	<1.8	EWK ZZ	262 ±2	13.0 ±0.4
$\Delta\phi(E_T^{miss}, p_T^{ll})$	—	>2.3	Total signal	7858 ±28	1959 ±15
Число b-струй	—	<1	Фон		
$E_T^{miss} / H_T$	—	>0.5	Zj	962833 ±4057	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 <sup>3</sup>	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 <sup>3</sup>	1370 ±22

Полученные результаты приняты группой и используются в анализе

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

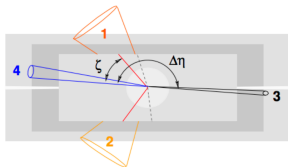
- ▶ В событии два разноименно-заряженных лептона одного аромата ( $e^+e^-$  или  $\mu^+\mu^-$ ), при этом, поперечный импульс первого больше 30 ГэВ, второго больше 20 ГэВ;
- ▶ Вето на третий заряженный лептон;
- ▶  $76 \text{ ГэВ} < M_{ll} < 106 \text{ ГэВ}$ ;
- ▶  $E_T^{\text{miss}} > 70 \text{ ГэВ}$ ;
- ▶ 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
<b>Сигнальная значимость</b>	<b><math>1.34 \pm 0.04</math></b>	<b><math>1.41 \pm 0.04</math></b>	<b><math>1.51 \pm 0.05</math></b>
<b>Число сигнальных событий</b>	<b><math>36.5 \pm 0.8</math></b>	<b><math>35.0 \pm 0.7</math></b>	<b><math>35.1 \pm 0.7</math></b>
<b>Число фоновых событий</b>	<b><math>729 \pm 31</math></b>	<b><math>609 \pm 31</math></b>	<b><math>530 \pm 30</math></b>

- ▶ 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

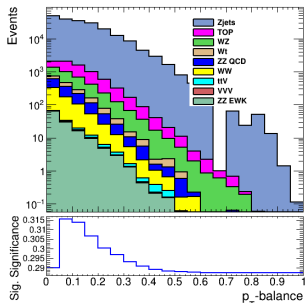
- ▶ Отказ от отбора событий условием  $Y(j_1) \times Y(j_2) < 0$
- ▶ Проводилось сравнение эффективности переменных  $\Delta Y(Z, j_{\max(\min)})$ ,  $\Delta\eta + (-)$  и  $\zeta$
- ▶  $\Delta\eta + (-) = \eta(j_{\max(\min)}) - \eta(l_{\max(\min)})$ ,  $\zeta = \left| \frac{Y(Z) - \frac{Y(j_1) + Y(j_2)}{2}}{Y(j_1)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

Переменная	$\Delta Y, \Delta\eta$ и $\zeta$	$\Delta\eta$ и $\zeta$	$\Delta\eta$	$\Delta Y$ и $\zeta$	$\Delta Y$	$\zeta$
$E_T^{miss}$ 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	—	—	—
$\zeta$	no cut	no cut	—	no cut	—	<0.5
Сигнальная значимость	$1.54 \pm 0.05$	$1.52 \pm 0.05$	$1.52 \pm 0.05$	$1.54 \pm 0.05$	$1.54 \pm 0.05$	$1.51 \pm 0.05$
Число сигнальных событий	$35.3 \pm 0.7$	$35.0 \pm 0.7$	$35.0 \pm 0.7$	$35.3 \pm 0.7$	$35.3 \pm 0.7$	$35.2 \pm 0.7$
Число фоновых событий	$513 \pm 29$	$516 \pm 29$	$516 \pm 29$	$514 \pm 29$	$514 \pm 29$	$534 \pm 29$

- ▶ 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
$E_T^{\text{miss}}$ signif.	>6	>6
$M_{j_1 j_2}$ , $\Gamma_{\text{ЭВ}}$	>550	>550
$p_T(j_1)$ , $\Gamma_{\text{ЭВ}}$	>80	>80
$p_T(j_2)$ , $\Gamma_{\text{ЭВ}}$	>40	>40
$E_T^{\text{miss}}$ , $\Gamma_{\text{ЭВ}}$	>100	>100
$p_T(Z)$ , $\Gamma_{\text{ЭВ}}$	>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	—
<b>Signal signif.</b>	<b>1.61±0.05</b>	<b>1.56±0.04</b>
<b>Total signal</b>	<b>35.0</b>	<b>39.8 ±0.8</b>
	±0.7	
<b>Total bkg.</b>	<b>460 ±25</b>	<b>641 ±26</b>

- 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  $7.43 \pm 0.03$  до  $44.7 \pm 0.4$ . 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;

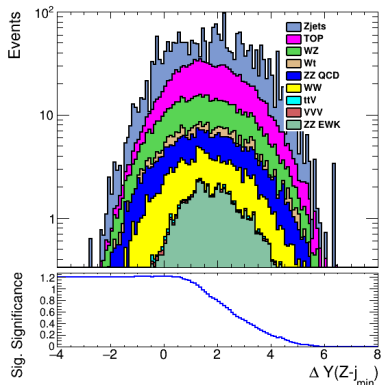
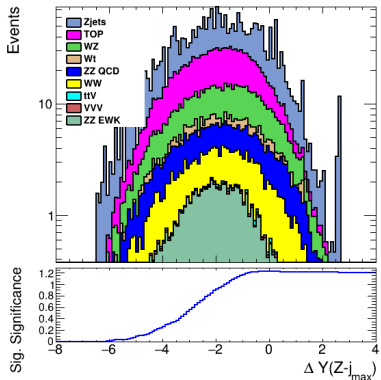
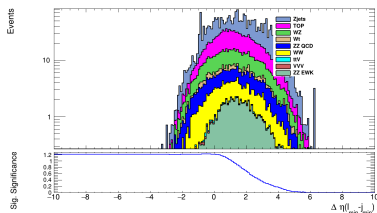
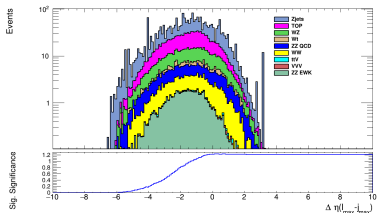
Дальнейшие планы:

- ▶ 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.

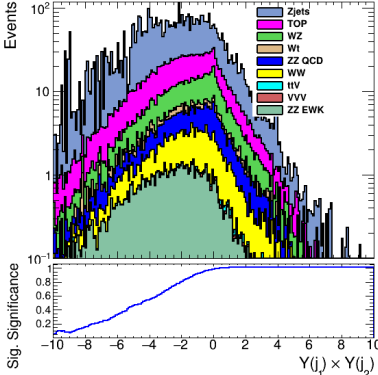
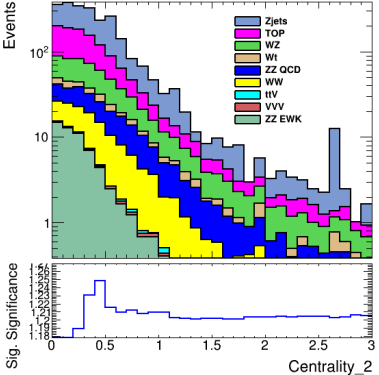
Спасибо за внимание!

back up

# back up



# back up



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

**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.	$1.49 \pm 0.4$	$1.42 \pm 0.4$	$1.36 \pm 0.3$
Total signal	$45.0 \pm 0.8$	$50.1 \pm 0.8$	$55.0 \pm 0.9$
Total bkg.	$898 \pm 34$	$1235 \pm 55$	$1614 \pm 63$

**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.