

# Лаборатория адронной физики ОФВЭ ПИЯФ

## Участие в физической программе эксперимента ATLAS

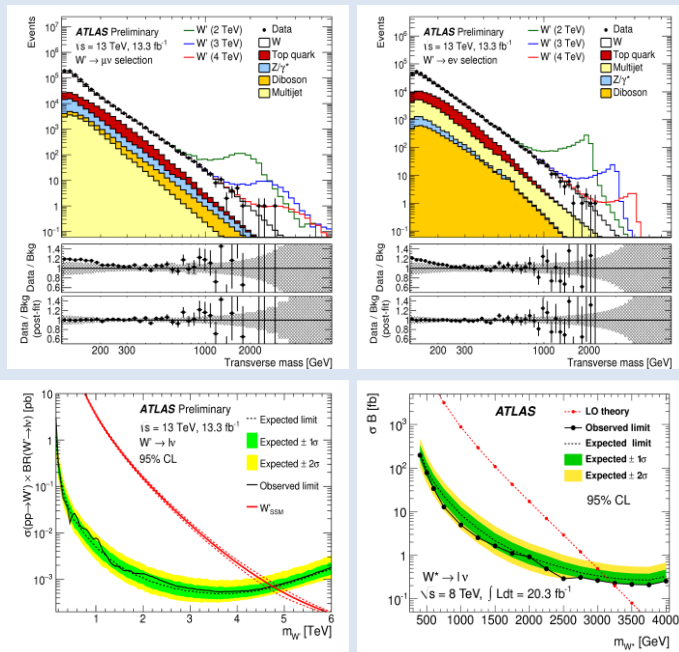
Наиболее значительным достижением в области физики элементарных частиц является открытие в 2012 году в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере (LHC) новой частицы с характеристиками хиггсовского бозона – последней из предсказанных Стандартной моделью (СМ) частиц. С началом нового этапа работы ускорителя LHC при увеличенной энергии протон-протонных взаимодействий до  $\sqrt{s}=13$  ТэВ и светимости  $\sim 1.1 \times 10^{34}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> эксперимент ATLAS продолжит изучение процессов СМ электрослабых взаимодействий наряду с поиском явлений «новой физики», в частности, частиц тёмной материи и новых тяжёлых бозонов.

### Поиск новых векторных бозонов: $W/W^*$ , $Z/Z^*$

Попытки решить существующие в СМ проблемы зачастую приводят к необходимости существования новых частиц. В ряде моделей таких как **теории Великого объединения** (Grand Unified Theory – GUT), «**Последовательная**» СМ (Sequential Standard Model – SSM) или **Лево-право симметричная модель** (Left-Right Symmetric Model – LRSM) появляются дополнительные тяжёлые калибровочные бозоны с общим названием  **$Z'/W'$ -бозоны**. Другие модели, пытающиеся решить проблему иерархии масс, вводят тяжёлые векторные частицы, взаимодействующие с частицами СМ тензорным образом –  **$Z''/W''$ -бозоны**. В качестве реперной модели обычно используется SSM модель, в которой вводится дополнительный калибровочные бозоны  $Z'$  и  $W'$  со свойствами  $Z$ - и  $W$ -бозона Стандартной модели, но с массой  $\sim 1$  ТэВ. Сотрудники лаборатории принимают участие в поиске тяжёлых бозонов в лептонной моде их распада.

### Поиск $W/W^*$ бозонов

Тяжёлые заряженные  $W'$ - и  $W^*$ -бозоны могут распадаться на лептон и нейтрино ( $W'/W^* \rightarrow e\nu$ ,  $W'/W^* \rightarrow \mu\nu$ ), которое не регистрируется детектором. Поэтому в качестве наблюдаемой величины для поиска этих процессов используется «поперечная» масса бозона, которая может быть определена как  $m_T = \sqrt{2 p_T E_T^{miss} (1 - \cos \phi_{\nu})}$ , где  $p_T$  – поперечный импульс электрона,  $E_T^{miss}$  – недостающая поперечная энергия и  $\phi$  – азимутальный угол между электроном или мюоном и нейтрино. Для поиска распадов таких бозонов отбираются события с большим поперечным импульсом лептона  $p_T$  и большой недостающей поперечной энергией  $E_T^{miss}$ . Поиск превышения в наблюдаемых данных над предсказаниями СМ осуществляется в области больших масс  $m_T$  ( $>250$  ГэВ).



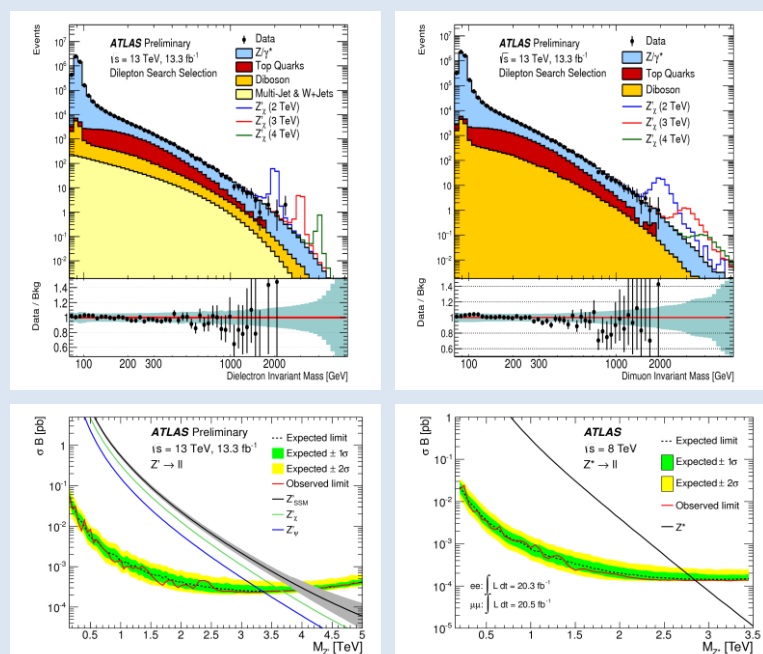
Основными источниками фона являются процессы:  $W$ +jets,  $Z$ +jets,  $ZZ$ ,  $WZ$ ,  $WW$ , а также рождение  $t$ -кварка и многоструйные процессы. Оценка вклада фоновых событий проводилась с помощью Монте-Карло моделирования (за исключением многоструйных событий, для которых оценка производилась с использованием данных).

	$m_{W'} \text{ lower limit [TeV]}$	
	Expected	Observed
$W^*$	3.12	3.21
$W'$	4.77	4.74

**В результате анализа данных, накопленных в 2011-2015 годах, отклонений от предсказаний СМ не обнаружено. Установлены пределы на сечения рождения и нижние ограничения на массы  $W'$ - и  $W^*$ -бозонов.**

### Поиск $Z/Z^*$ бозонов

Для поиска  $Z'$ - и  $Z^*$ -бозонов в лептонном канале их распада  $Z'/Z^* \rightarrow ee$ ,  $Z'/Z^* \rightarrow \mu\mu$  анализируются распределения по инвариантной массе двух лептонов. Отклонения от предсказаний Стандартной модели ожидаются в области больших масс.

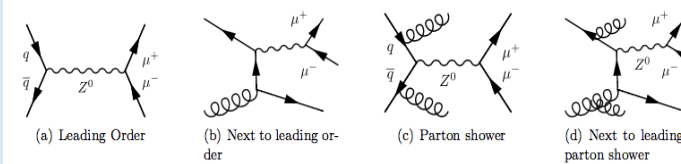


Учёт вклада фоновых процессов, к которым относятся  $Z$ +jets,  $ZZ$ ,  $WZ$ ,  $WW$ , процессы с рождением  $t$ -кварка, проводился с помощью Монте-Карло моделирования. Вклад многоструйных событий оценивался с использованием данных.

	$m_{Z'} \text{ lower limit [TeV]}$	
	Expected	Observed
$Z^*$	2.82	2.85
$Z'_{SSM}$	4.05	4.06
$Z'_{\chi}$	3.66	3.67
$Z'_{\psi}$	3.36	3.35

**В результате анализа данных, накопленных в 2011-2015 годах. Отклонений от предсказаний СМ не обнаружено. Установлены нижние пределы на массы  $Z'$ - и  $Z^*$ -бозонов.**

### Измерение поляризационных угловых коэффициентов в распаде $Z$ -бозона



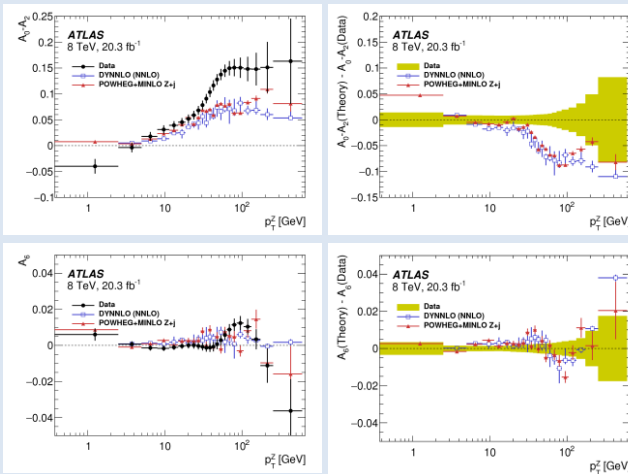
#### Основные цели работы:

- Проверка пертурбативной КХД
- Непертурбативные эффекты
- Эффекты «партонных ливней»
- Проверка Монте-Карло генераторов

Полное сечение процесса  $p+p \rightarrow Z+X$  определяется 8 угловыми поляризационными коэффициентами – отношениями сечений с определенной спиральностью к неполяризованному сечению. Угловые коэффициенты зависят от поперечного импульса лептонной пары  $p_T^{ll}$ , быстроты  $Y^{ll}$  и инвариантной массы  $M_{ll}$ .

$$\frac{d\sigma}{dp_T^2 dy^2 dm^2 d\cos\vartheta d\varphi} = \frac{3}{16\pi} \frac{d\sigma^{U+L}}{dp_T^2 dy^2 dm^2} \left\{ (1 + \cos^2 \vartheta) + \frac{1}{2} A_0 (1 - 3 \cos^2 \vartheta) + A_1 \sin 2\vartheta \cos \varphi + \frac{1}{2} A_2 \sin^2 \vartheta \cos 2\varphi + A_3 \sin \vartheta \cos \varphi + A_4 \cos \vartheta + A_5 \sin^2 \vartheta \sin 2\varphi + A_6 \sin 2\vartheta \sin \varphi + A_7 \sin \vartheta \sin \varphi \right\}$$

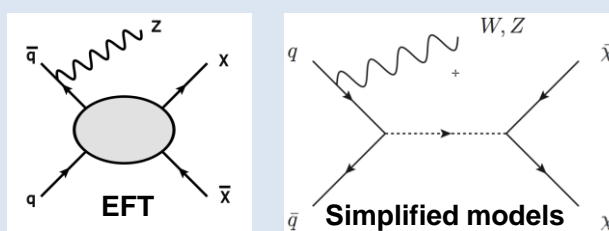
Впервые выполнены прецизионные измерения полного набора поляризационных угловых коэффициентов лептонных пар, рождающихся в процессе Дрелла-Яна, в области масс  $Z$ -бозона в протон-протонных столкновениях с энергией  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ, путем измерения угловых распределений лептонов (электронов и мюонов) от распадов  $Z$ -бозонов, как функции поперечного импульса  $p_T^{Z}$   $Z$ -бозона вплоть до 600 ГэВ интегрально по всему диапазону быстрот и в нескольких диапазонах быстрот  $Y^Z$ .



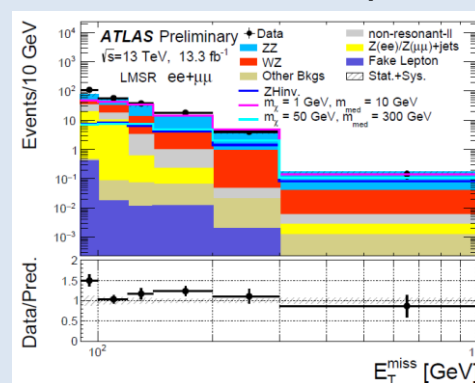
- Обнаружено **значительное отклонение** величины  $A_0$ - $A_2$  от расчетов в NNLO ( $O(\alpha_s^2)$ ) приближении, следовательно, необходимо учитывать теоретические поправки более высоких порядков.
- Показано, что коэффициенты  $A_5, A_6$  и  $A_7$  **не равны нулю**, как это и ожидалось из NNLO теоретических расчетов.
- Полученные результаты позволяют выполнить **более точное определение** таких параметров СМ, как например угол Вайнберга и масса  $W$ -бозона.

### Поиск частиц тёмной материи

Как следует из астрономических наблюдений, барионная материя составляет не более 4% массы Вселенной. Остальные 96% приходятся на тёмную материю и тёмную энергию. Одним из кандидатов на роль частиц тёмной материи являются WIMP («слабо взаимодействующие массивные частицы»). На ускорителе LHC WIMP могут рождаться в результате аннигиляции частиц Стандартной модели. WIMP не могут быть зарегистрированы непосредственно с помощью детекторов, так как они практически не взаимодействуют с веществом. Поэтому для поиска WIMP используются события с излучёнными в начальном состоянии  $Z$ -бозоном, а факт образования WIMP определяется по наличию большой поперечной недостающей энергии в событии.



#### Распределение по недостающей энергии после окончательного отбора событий



**Анализ данных, накопленных в 2016 году соответствующих интегральной светимости 13.3 fb<sup>-1</sup>, отклонений от предсказаний СМ не обнаружил. Установлены пределы на возможные значения масс медиатора (промежуточной частицы) и частицы тёмной материи.**

Поскольку принцип взаимодействия частиц тёмной материи с веществом неизвестен, для моделирования рождения WIMP на коллайдерах используются простые кинематические модели - эффективная теория поля (EFT) и simplified models (упрощённые модели).

Основным фоном в данной работе является процесс рождения  $ZZ$ , когда один из  $Z$ -бозонов распадается на два нейтрино. Учёт вклада этого и других фоновых процессов, таких как  $WZ$ ,  $WW$ , процессы с рождением  $t$ -кварка, проводился с помощью Монте-Карло моделирования. Вклад  $Z$ +jets оценивался с использованием данных.

