Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УДК 539.12

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ Z-БОЗОНА С ФОТОНОМ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ATLAS

Научный руководитель
доц. к.ф-м.н. _____ Е. Ю. Солдатов

Студент _____ Л. Л. Симбирятин

Москва 2021

Содержание

Введение **3**

1 Детектор ATLAS **4**
1.1 Координатная система 5
1.2 Внутренний детектор 5
1.3 Калориметры 6
1.4 Мюонная система 7

2 Программное обеспечение **7**
2.1 Подготовка данных 7
2.2 Фреймворк 8
2.3 CMake 8
2.4 Git 8

3 Изучение эффективности реконструкции **8**
3.1 Анализ полученных результатов 10
3.2 Следующие этапы 10

Список использованных источников **10**

Введение

Под *элементарными частицами* понимаются микрообъекты, которые, исходя из современных знаний, невозможно расщепить на более универсальные составные части. Элементарные частицы участвуют в фундаментальных взаимодействиях четырех типов: гравитационном, электромагнитном, сильном и слабом. На сегодняшний день признанной теорией, описывающей строение и взаимодействие элементарных частиц наиболее полно, является *Стандартная модель* (СМ), основным инструментом которой является квантовая теория поля. СМ была разработана в 70-х годах и была признана после открытия предсказанных ей t- и b-кварков. Открытие H-бозона в 2012 стало последним, среди предсказанных СМ. СМ является экспериментально проверенной теорией, она позволяет предсказывать свойства различных процессов с элементарными частицами.

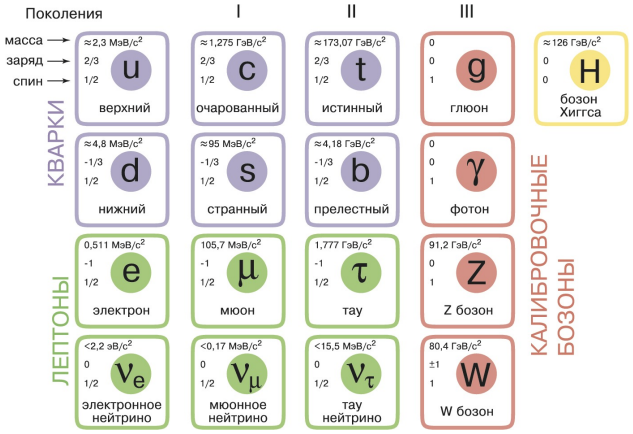


Рис. 1 —Фундаментальные частицы СМ
(изображение взято с сайта https://bigenc.ru)

Однако, несмотря на все достигнутые благодаря СМ успехи, она не может считаться завершенной про ряду причин:

- Проблема иерархии
- Масса нейтрино (по предсказанию нулевая) отлична от нуля
- СМ не описывает гравитационное взаимодействие, частицы темного вещества и т.д.

СМ принято считать пределом некоторой более общей теории, установление которой называется поиском физики за рамками СМ, или поиском новой физики.

В частности, проявления новой физики можно ожидать в электрослабом секторе СМ, расчеты в котором можно провести наиболее точным образом. Новая физика проявляется в виде новых частиц. Зарегистрировать их на текущем уровне энергии столкновений ($\sqrt{s} = 13$ ТэВ) в БАК не представляется возможным. Однако косвенно судить о наличии таких частиц на более высоких энергетических уровнях можно по их влиянию на те процессы, которые в данный момент доступны для наблюдения. Так, если экспериментально измерить сечение какого-либо процесса и обнаружить, что полученная величина лежит вне области, допускаемой СМ, то можно заключить, что обнаружено указание на существование новой физики.

В качестве процесса, сечение которого подлежит измерению, может быть выбрано рождение пары Z-бозона и фотона. Распад Z-бозона может протекать по нескольким

каналам, среди которых наибольшей вероятностью обладает адронный. Однако, регистрация таких событий требует наложения строгих критериев отбора в связи с высоким уровнем фона от адронный струй, и в результате эффективность регистрации существенно уменьшается. Среди же каналов распада в лептоны нейтринный канал обладает наибольшей вероятностью, а фоновые процессы поддаются контролю, что делает его выбор наиболее предпочтительным. Изучаемый процесс происходит в pp столкновениях с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Подробнее мотивация этого исследования описана в статье [1].

Целью проделанной работы являлось изучение соответствующей литературы и програмного обеспечения, ознакомление с устройством детектора, а также получение первых практически результатов: изучалась эффективность реконструкции описанного выше процесса. Для этого сравнивались истинные значения заданных физических величин, сгенерированные в Монте-Карло генераторе событий (truth-level), и их реконструированные значения (reco-level).

1 Детектор ATLAS

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) - один из экспериментов CERN. Детектор ATLAS является многоцелевым: список его задач варьируется от точных измерений процессов СМ до поисков новой физики (поиск новых бозонов, измерение свойств t-кварка, тестирование элетрослабого сектора СМ и т.д.).

Расположение элементов ATLAS является типичным для эксперимента со сталкивающимися частицами: детекторы расположены цилиндрическими слоями вокруг пучка и в виде двух эндкапов по краям. Схематическое изображение детектора ATLAS приведено на рис. 2.

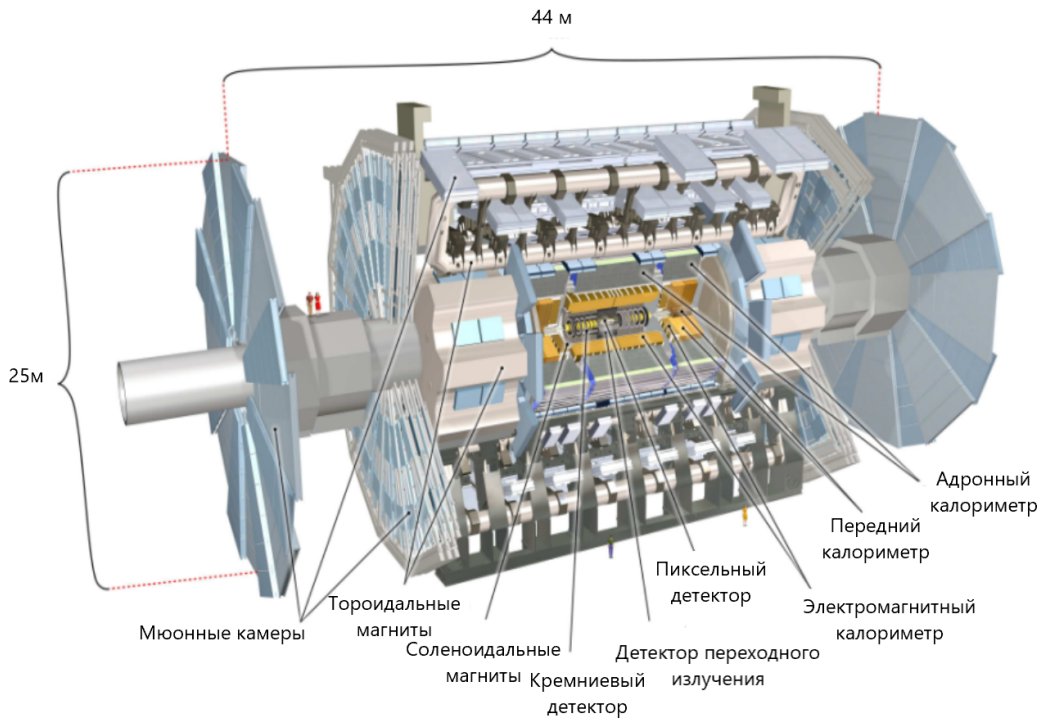


Рис. 2 —Схема ATLAS детектора

Четырьмя основными компонентами детектора в порядке их удаления от пучка являются:

- Внутренний детектор
- Электромагнитные калориметры
- Адронные калориметры
- Мюонная система

Частицы, участвующие в электромагнитном или сильном взаимодействии, регистрируются детектором (фотоны, электроны, мюоны, тау, адронные струи). Некоторые частицы, в частности Z-бозон, распадаются, не достигая элементов детектора. Такие частицы могут быть идентифицированы по продуктам их распада. Частицы, не взаимодействующие с детектором, регистрируются через недостающий импульс (missing p_T).

В центре детектора происходят протон-протонные столкновения с частотой 40 МГц. Записать такое количество событий не представляется возможным, поэтому производится отбор лишь интересных с точки зрения физики событий. Для снижения частоты записи данных (и отбора интересных событий) существует триггерная система. Входную частоту она понижает до порядка 1 КГц.

Триггерная система подразделяется на две части: низкоуровневый триггер (L1 триггер) и высокоуровневый триггер (HLT). L1 триггер построен аппаратно. Он производит базовую реконструкцию событий с малой задержкой (2.5 мс) на основе сигналов мюонной системы и калориметров и отбирает те, значения параметров которых превосходят установленные пороги. HLT основан на программном обеспечении. Он производит отбор из событий, одобренных L1 триггером. На этом этапе производится более детальная реконструкция события, задержка порядка сотен мс.

1.1 Координатная система

Используется правая система координат с началом отсчета в точке, где имело место взаимодействие (в центре детектора). Ось z направлена по пучку, ось x – к центру кольца БАК, а ось y – вверх.

В поперечной к пучку плоскости используются цилиндрические координаты (r, θ, ϕ), где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние от оси пучка, θ – полярный угол, измеряемый от положительного направления оси z, ϕ – азимутальный угол. Псевдобыстрота определяется через полярный угол θ следующим образом:

$$\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right) \tag{1}$$

Начальные импульсы сталкивающихся частиц направлены вдоль оси z, в то время как поперечные их компоненты равны 0. Таким образом, согласно закону сохранения 4-импульса, нулевой будет и сумма поперечных компонент после столкновения. В этом смысле удобно рассматривать:

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} = p \cdot \sin\theta \qquad\qquad E_T = E \cdot \sin\theta \tag{2}$$

1.2 Внутренний детектор

Внутренний детектор перекрывает диапазон $|\eta| < 2.5$ и позволяет восстановить траектории, импульсы и заряды заряженных частиц. Он состоит из трех детекторов, работающих на взаимодополняющих принципах и помещенных в соленоидальный магнит.

Магнитное поле соленоидального магнита (2T) искривляет траектории заряженных частиц в направлении ϕ. Частицы, проходя через элементы детектора, взаимодействуют с ними и оставляют так называемые хиты. На основе хитов восстанавливаются траектории частиц.

Наиболее близко к пучку (от 33 до 120 мм) находится пиксельный детектор, состоящий из 2024 пискельных модулей. Модули расположены в виде 4-х цилиндрических слоев и 3-х дисков на каждом из концов. Пиксельный детектор производит наиболее точную реконструкцию вершин взаимодействий.

Далее следует (от 299 до 514 мм) кремниевый микростриповый детектор, работающий на технологии обратного p-n перехода. Если заряженная частица проходит через запирающий слой, то появляется пара электрон-дырка, которая растаскивается приложенным напряженим. В результате, по краям полоски создаются избытки зарядов, которые можно регистрировать. Детектор состоит из 4088 кремниевых полосок, расположенных в виде 4-х цилиндрических словев и 9-ти дисков на каждом из концов.

Треки с $|\eta| < 2$, восстановленные пиксельным и микростриповыми детекторами, продлеваются в детектор перехоного излучения (от 554 до 1082 мм). Он состоит из 350848 трубок диаметром 4 мм. Трубки образуют 3 цилиндрических слоя и 40 дисков на каждом из концов.

Детектор переходного излучения позволяет различать электроны и пионы с поперечным импульсом от 100 ГэВ на основе излучения ультрарелятивистских частиц.

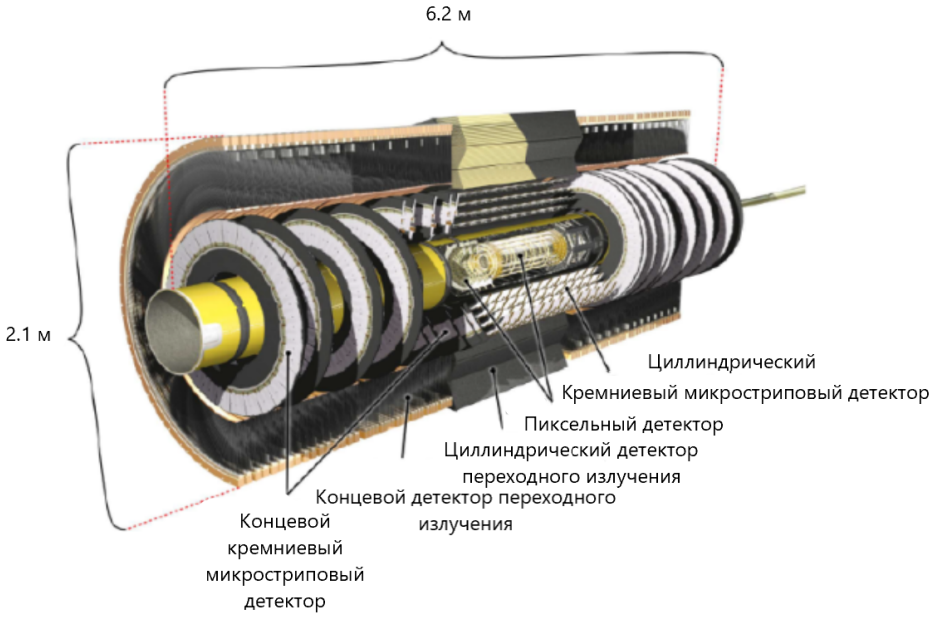


Рис. 3 —Схема внутреннего детектора

1.3 Калориметры

Система калориметров расположена за внутренним детектором и соленоидальным магнитом. Калориметры предназначены для определения энергии высокоэнергетических частиц и регистрации их точного положения.

Частица, попавшая в калориметр, вызывает ливень вторичных частиц. Энергия этого ливня пропорциональна энергии исходной частицы и может быть измерена.

Калориметр представляет собой чередующиеся слои абсорбера и активного вещества. Абсорбер вызывает ливни частиц, а активное вещество используется для измерения их энергии (н-р испускание фотонов сцинтиллятором или прохождение тока через ионизованный благородный газ). Используются разные виды абсорберов, т.к. частицы могут участвовать во взаимодействиях разной природы (сильное, электромагнитное).

Калориметрическая система ATLAS подразделяется на две чести: электромагнитные калориметры и адронные калориметры. Электромагнитные калориметры регистрируют заряженные частицы и фотоны. Электромагнитный ливень состоит из электронов, позитронов и фотонов, его энергия может быть целиком восстановлена. Адронный калориметр регистрирует адроны. Адронный ливень содержит гораздо больше сортов частиц, не все из которых могут быть зарегистрированы (н-р, нейтрино, мюоны), что требует применения особых алгоритмов учета этих потерь.

1.4 Мюонная система

Мюонная система является наиболее удаленным от пучка компонентом детектора ATLAS. Она предназначена для реконструкции траекторий мюонов, изменения их импульсов и передачи сигналов мюонному триггеру в диапазоне $|\eta| < 2.7$. Мюоны – единственный сорт заряженных частиц, способный пройти сквозь калориметры. Принцип работы мюонной системы схож с работой внутреннего детектора. Поле тороидальных магнитов искривляет траектории мюонов в направлении η. Мюоны, взаимодействуя с веществом детектора, оставляют хиты. По этим хитам производится реконструкция траектории (трека).

Более подробное описание элементов детектора можно найти в статье [2].

2 Программное обеспечение

Анализ данных эксперимента ATLAS требует базовых навыков в области языков программирования C++ и Python, пакета Root [3], работы в терминале unix-систем. Анализ строится на базе фреймворка Athena и его производных.

Подробное описание программного обеспечения приведено по ссылке [4].

2.1 Подготовка данных

Подготовка данных подразумевает все то, что происходит с ними от момента записи в детекторе до получения конкретных наборов, пригодных для анализа. Как уже было указано выше, данные, подходящие для записи, выделяются триггерной системой. Т.к. сам детектор представляет из себя реальный объект, параметры которого могут меняться в зависимости от текущих условий, то "сырые"данные необходимо калибровать, чтобы учесть влияние отклонений параметров детектора от идеальных. Далее следует этап реконструкции, в ходе которого сигналы с детектора преобразуются к реальным физическим объектам (фотоном, мюонам и т.п.) и записываются в xAOD (Analysis Object Data) файл. Эти файлы все еще неудобны для анализа, т.к. содержат множество вспомогательной информации (например, с триггеров) и представляют из себя набор произвольных событий. Для того, чтобы убрать вспомогательную информацию и выделить события, потенциально интересные данной группе исследователей, производится процесс деривации, итогом которого становится xDAOD (Derived AOD) файл.

2.2 Фреймворк

Основным фреймворком для реконструкции и анализа данных является Athena. Athena представляет собой набор инструментов (Tools) и классов. Практичной версией для итерации по событиям является EventLoop. С помощью этих фреймворков (чаще всего) получают итоговые деревья (n-tuples), дальнейшая работа с которыми происходит в пакете Root.

На базе EventLoop строится фреймворк HGammaCore, использовавшийся для получения truth- и reco-деревьев, анализ части содержания которых будет далее рассмотрен.

2.3 CMake

CMake предназначен для сборки проектов. Работа CMake построена следующим образом: из каталога с кодом проекта считывается файл CMakeLists.txt, содержащий его описание, на выходе инструмент генерирует файлы проекта для конечной системы построения. Основные возможности CMake:

- Простое подключение библиотек, построение зависимостей
- Поиск библиотек (пакетов) в системе
- Инструмент является кроссплатформенным

2.4 Git

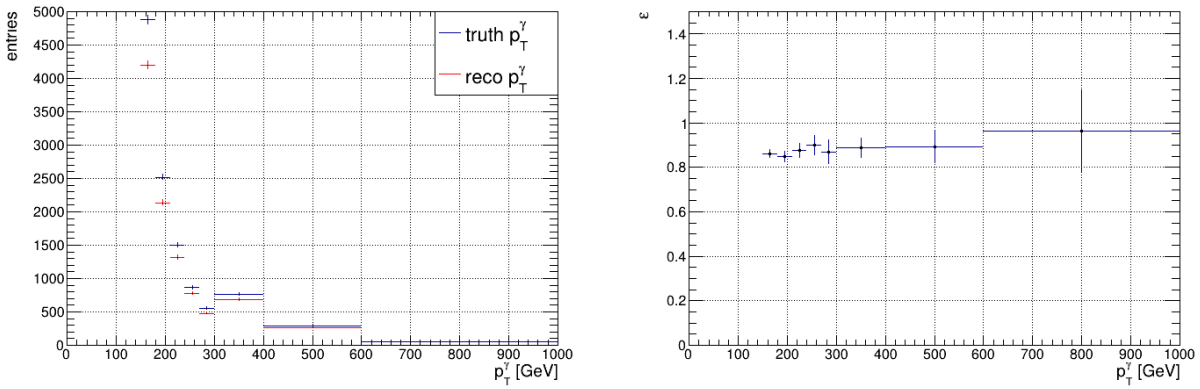
Git является инструментом контроля версий проекта. Контроль версий становится существенным при разрастании проекта и наличии нескольких разработчиков. Удобно хранить исходный код в удаленном репозитории в сети, доступ к которому будут иметь все участники проекта. Репозитории ATLAS находятся на ресурсе Gitlab.

3 Изучение эффективности реконструкции

Для определения эффективности реконструкции используются Монте-Карло симуляции рождения Z-бозона с фотоном. Данные, разыгранные генераторами, проходят через алгоритм восстановления и отбора, и полученные значения сравниваются с исходными. Во введении было указано, что изучается эффективность регистрации пары Z-бозона с фотонам по нейтринному каналу распада Z-бозона. Конкретно, эффективность изучается в зависимости от следующих переменных:

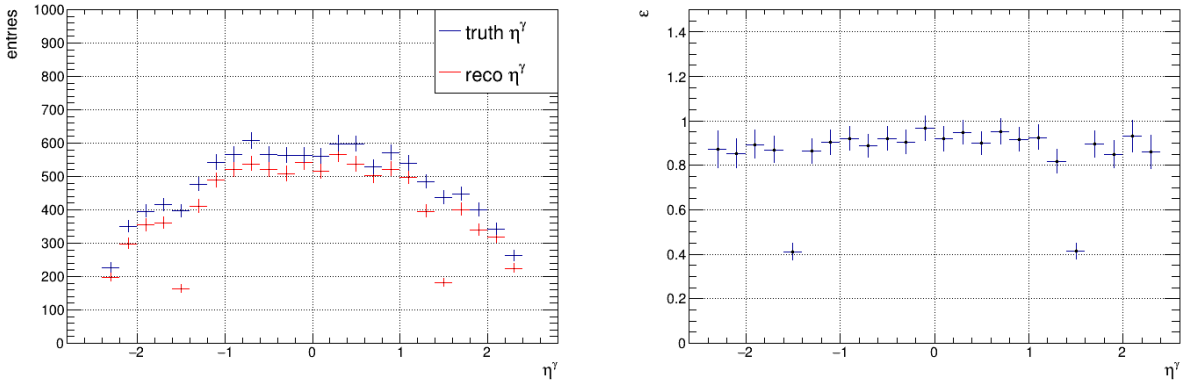
- Поперечный импульс фотона p_T^γ
- Псевдобыстрота фотона η^γ
- Недостающий поперечный импульс E_T^{miss}
- Азимутальный угол недостающего поперечного импульса $\varphi(\vec{p}_T^{miss})$
- Число струй N_{jets}

Результаты представлены на приведенных ниже гистограммах.



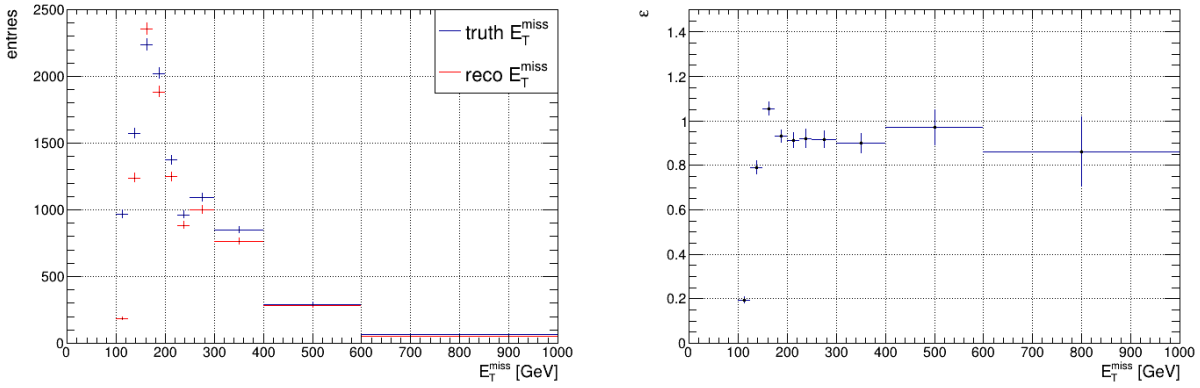
а б

Рис. 4 —Реконструкция по переменной p_T^γ



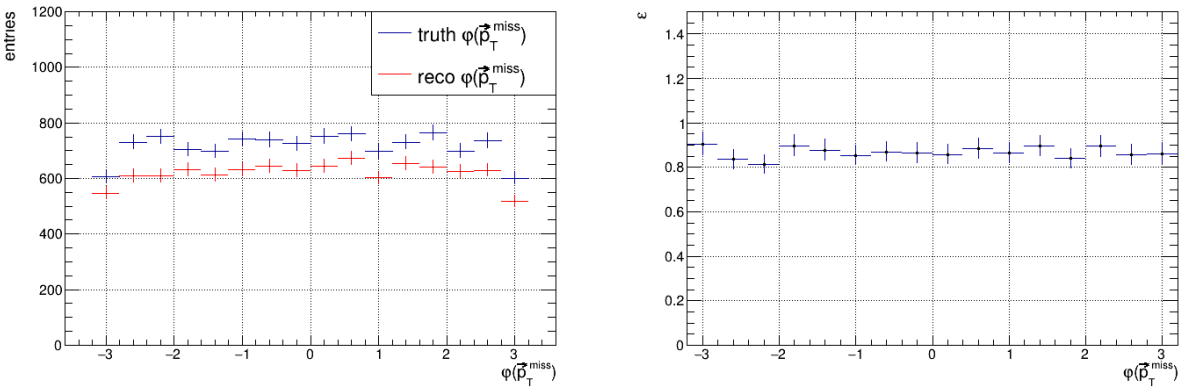
а б

Рис. 5 —Реконструкция по переменной η^γ



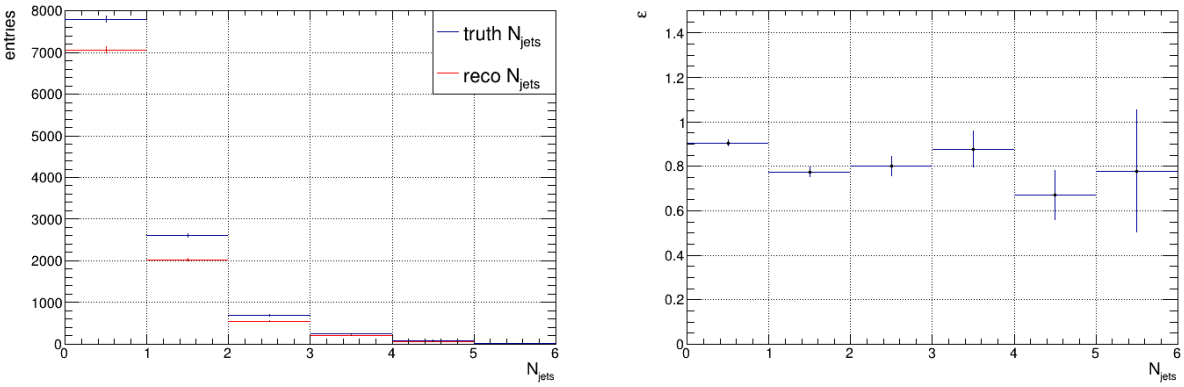
а б

Рис. 6 —Реконструкция по переменной E_T^{miss}



а б

Рис. 7 —Реконструкция по переменной $\varphi(\vec{p}_T^{miss})$



а б

Рис. 8 —Реконструкция по переменной N_{jets}

3.1 Анализ полученных результатов

Эффективность реконструкции по переменным p_T^γ, $\varphi(\vec{p}_T^{miss})$ и N_{jets} является постоянной.

Эффективность реконструкции по переменной η^γ снижается в районе областей $\eta = \pm 1.5$, что связано с геометрией детектора. Здесь имеет место переходный регион (по модулю η от 1.37 до 1.52) на месте стыка баррельной и эндкапной частей калориметра. В остальных областях по этой переменной эффективность реконструкции постоянна.

Эффективность реконструкции по переменной E_T^{miss} является постоянной при $E_T^{miss} > 200$ ГэВ.

3.2 Следующие этапы

Проделанная работа является вводным шагом, позволившим погрузиться в тему, ознакомиться с установкой и программным обеспечением, получить первые результаты. Далее планируется изучить эффективность отборов рассматриваемого процесса, попытаться её улучшить. Окончательная задача научной работы - измерение сечения рождения Z-бозона с фотоном на данных эксперимента ATLAS.

Список использованных источников

[1] ATLAS Collaboration (Aaboud, Morad and others) *Measurement of the* $Z\gamma \to \nu\bar{\nu}\gamma$ *production cross section in pp collisions at* $\sqrt{s} = 13$ *TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous triple gauge-boson couplings*, JHEP 12 (2018), doi:10.1007/JHEP12(2018)010.

[2] ATLAS Collaboration, *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, JINST 3 (2008) S08003.

[3] Root Documentation [Электронный ресурс]
url: https://root.cern (Дата обращения 20.12.21)

[4] ATLAS Software Documentation [Электронный ресурс]
url: https://atlassoftwaredocs.web.cern.ch (Дата обращения: 19.12.21)

[5] Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц, Москва «Наука», 1988.