

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет



**Разработка программного обеспечения для поиска новых тяжелых
векторных бозонов Z' в эксперименте ATLAS на ускорителе LHC**

Диссертация на соискание ученой степени магистра физики
студента дневного отделения

Пацёра Вячеслава Михайловича

Научный руководитель:

к. ф.-м. н., доц. **Немнюгин С.А.**

Рецензент:

к. ф.-м. н., н. с. ФГБУ "ПИЯФ" **Левченко М.П.**

Санкт-Петербург

2017

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Эксперимент ATLAS на LHC и поиск Z'-бозона	5
1.1. Поиск новых тяжелых калибровочных Z' -бозонов	5
1.2. Большой адронный коллайдер	6
1.3. ATLAS	7
Глава 2. Вычислительная модель ATLAS	13
2.1. Сбор, обработка и анализ данных	13
2.2. Event Data Model	16
2.3. Event Data Model xAOD и DxAOD	17
2.4. ROOT и ROOTCore	19
Глава 3. Разработка ПО для поиска Z'-бозона	21
3.1. Архитектура ПО	21
3.2. Отбор событий	24
3.3. Поправочные коэффициенты	28
Глава 4. Результаты	31
4.1. Проверка работы отборов	31
4.2. Построение распределений	33
Заключение	35
Список литературы	36
Приложение А.	39

Введение

Стандартная Модель [1] (СМ) физики частиц — теория, описывающая три из четырех известных фундаментальных взаимодействий (электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия) и классифицирующая все известные элементарные частицы. На сегодняшний день предсказания Стандартной Модели с высокой точностью подтверждаются экспериментальными данными. Одно из последних достижений СМ — открытие бозона Хиггса в экспериментах ATLAS [2] и CMS [3] на ускорителе LHC (англ. Large Hadron Collider, Большой адронный коллайдер) в ЦЕРН (фр. Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire, Европейский совет по ядерным исследованиям). Однако существует ряд экспериментов, результаты которых не могут быть объяснены в рамках СМ и тем самым указывают на её неполноту [4]. СМ не описывает, в частности, барионную асимметрию Вселенной, расширение Вселенной, существование небарионной тёмной материи. Также в рамках самой теории существуют проблемы, например, СМ не включает в себя гравитационное взаимодействие, она никак не объясняет проблему калибровочной иерархии, заключающуюся в несоответствии характерных масштабов электрослабого и гравитационного взаимодействия. В связи с этим предпринимаются попытки построить теоретические модели, расширяющие СМ, которые решали бы эти проблемы. Такие расширения в большинстве случаев предсказывают существование новых частиц.

Новые нейтральные бозоны, возникающие в моделях с дополнительной $U(1)'$ калибровочной симметрией, таких как SSM (Sequential Standard Model) или модели на основе E_6 калибровочной группы, имеют общее название Z' -бозон [5]. Такие бозоны могут быть обнаружены в экспериментах, проводимых на ускорителях заряженных частиц. До появления ускорителей с энергией, достаточной для прямого поиска Z' -бозонов, их поиск осуществлялся косвенными методами. Косвенные методы заключались в поиске проявлений

эффектов интерференции Z бозона СМ и Z' -бозона [6], а также в прецизионных измерениях массового спектра и угловых распределений пар лептонов и поиск отклонений таких распределений от предсказаний СМ [7]. С запуском протон-антипротонного коллайдера Tevatron (Fermilab, США) с энергией столкновений в системе центра масс 1.96 ТэВ стали возможными прямые поиски Z' -бозонов [8]. Наиболее строгие ограничения на массу Z' -бозона, полученные в экспериментах CDF и DØ, составили 0.97 ТэВ (CDF) и 1.02 ТэВ (DØ). С запуском LHC начался новый этап поиска Z' -бозонов. Так по итогам обработки данных накопленных в 2011 году экспериментом ATLAS был установлен предел на минимальную массу Z' -бозона 2.22 ТэВ, а по итогам работы LHC в 2012 году этот предел был увеличен до 2.87 ТэВ.

Данная работа посвящена разработке программного обеспечения для поиска Z' -бозонов в эксперименте ATLAS в данных, накопленных в 2016 году в протон-протонных столкновениях при энергии в с.ц.м. 13 ТэВ на ускорителе LHC. В ходе работы:

- были разработаны и реализованы классы, необходимые для поиска Z' -бозона;
- для верификации работы ПО было произведено сравнение event cutflow с другими научными группами;
- для событий, отобранных из экспериментальных данных, накопленных в 2016 году в протон-протонных столкновениях при энергии в с.ц.м. 13 ТэВ на ускорителе LHC, и смоделированных событий по методу Монте-Карло, после применения соответствующих поправочных коэффициентов, были построены распределения по дилептонной инвариантной массе.

Эксперимент ATLAS на LHC и поиск Z' -бозона

1.1. Поиск новых тяжелых калибровочных Z' -бозонов

В данной работе в качестве метода обнаружения Z' -бозона используется поиск резонансных пиков в распределениях по инвариантной массе пар лептонов (электронов или мюонов), возникающих в процессе столкновения протонов. Для этого распределения, полученные из экспериментальных данных, сравниваются с распределениями для событий, смоделированных методом Монте-Карло для всех фонов, предсказываемых СМ. Инвариантная масса пары лептонов m_{ll} вычисляется по формуле^[1]:

$$m_{ll} \approx \sqrt{2 \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot (1 - \cos \varphi)}, \quad (1.1)$$

где p_1 и p_2 импульсы первого и второго лептонов соответственно, а φ — угол между ними.

Для построения распределений необходимо реализовать отбор событий, в которых в результате столкновения протонов возникают пары электронов или мюонов с определёнными кинематическими характеристиками. Для отобранных смоделированных событий необходимо ввести ряд поправок, учитывающих неточности моделирования. Таким образом, для решения задачи поиска Z' -бозонов ставятся следующие цели:

- реализация отбора лептонных событий;
- реализация вычисления поправочных коэффициентов для смоделированных событий;
- построение и сравнение распределений по дилептонной инвариантной массе для экспериментальных данных и смоделированных событий;

^[1] В случае высоких импульсов, когда массами лептонов можно пренебречь.

Разрабатываемое программное обеспечение предназначено для обработки и анализа данных, накопленных в 2016 году экспериментом ATLAS в протон-протонных столкновениях с энергией в системе центра масс 13 ТэВ на ускорителе LHC.

1.2. Большой адронный коллайдер

Большой адронный коллайдер (LHC) [9] — самый мощный на настоящий момент ускоритель частиц, расположенный в ЦЕРН (Швейцария) в тоннеле длиной 27 км, проложенном на глубине 100 м на границе Швейцарии и Франции недалеко от Женевы. LHC предназначен для ускорения протонных пучков до энергии 6.5 ТэВ и их столкновений при светимости^[2] 10^{34} см⁻²сек⁻¹. Схема ускорительного комплекса ЦЕРН, включающего LHC, показана на рисунке 1.1.

На LHC работают четыре основных эксперимента: ATLAS, CMS, LHCb и ALICE. Детекторы ATLAS и CMS — многоцелевые детекторы, предназначенные для широкого круга физических задач — от поиска бозона Хиггса и прецизионных измерений процессов SM, до поиска суперсимметрии и других проявлений физики за рамками SM. LHCb и ALICE — детекторы, оптимизированные для конкретных задач: ALICE — эксперимент, изучающий взаимодействие вещества в ион-ионных столкновениях, в частности проявления кварк-глюонной плазмы; LHCb в свою очередь оптимизирован для изучения взаимодействий с участием одного или нескольких b -кварков.

^[2] Светимость — число взаимодействий в единицу времени на единицу площади при пересечении пучков.

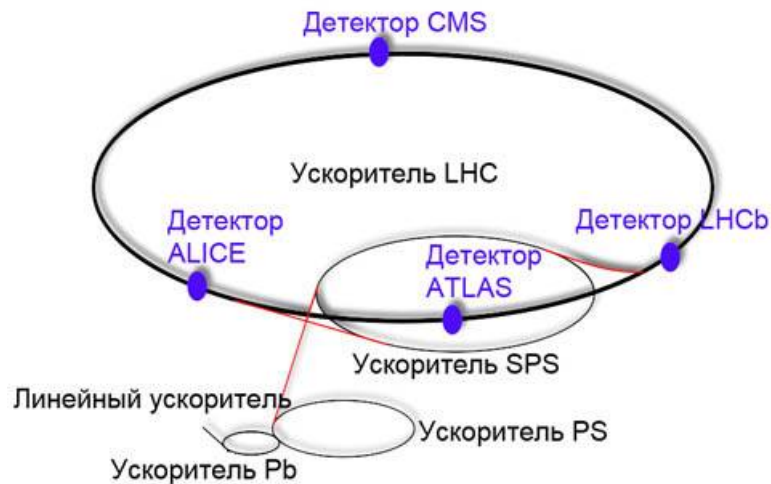


Рис. 1.1. Схема расположения ускорителей и основных детекторов LHC

1.3. ATLAS

Эксперимент ATLAS (от англ. A Toroidal LHC ApparatuS) [10] — один из четырех основных экспериментов на LHC.

Эксперимент был спроектирован для поиска бозона Хиггса, который был обнаружен в 2012 году [2]. После обнаружения бозона Хиггса основными задачами эксперимента стали:

- измерение свойств обнаруженного бозона Хиггса,
- прецизионное измерение процессов SM,
- поиск суперсимметрии,
- поиск частиц тёмной материи,
- другие проявления физики за пределами SM.

Исходя из задач, для которых предназначен эксперимент ATLAS, детектор ATLAS должен обладать следующими характеристиками:

- быстродействие,

- высокое пространственное и импульсное разрешение,
- высокое энергетическое разрешение,
- высокая эффективность триггирования интересующих физических процессов,
- высокая эффективность регистрации и идентификации частиц,
- радиационная стойкость,
- охват максимально возможного телесного угла.

Для наиболее полного соответствия предъявляемым требованиям детектор ATLAS состоит из комплементарных концентрических подсистем, каждая из которых решает свои задачи. Схематический вид детектора ATLAS показан на рисунке 1.2.

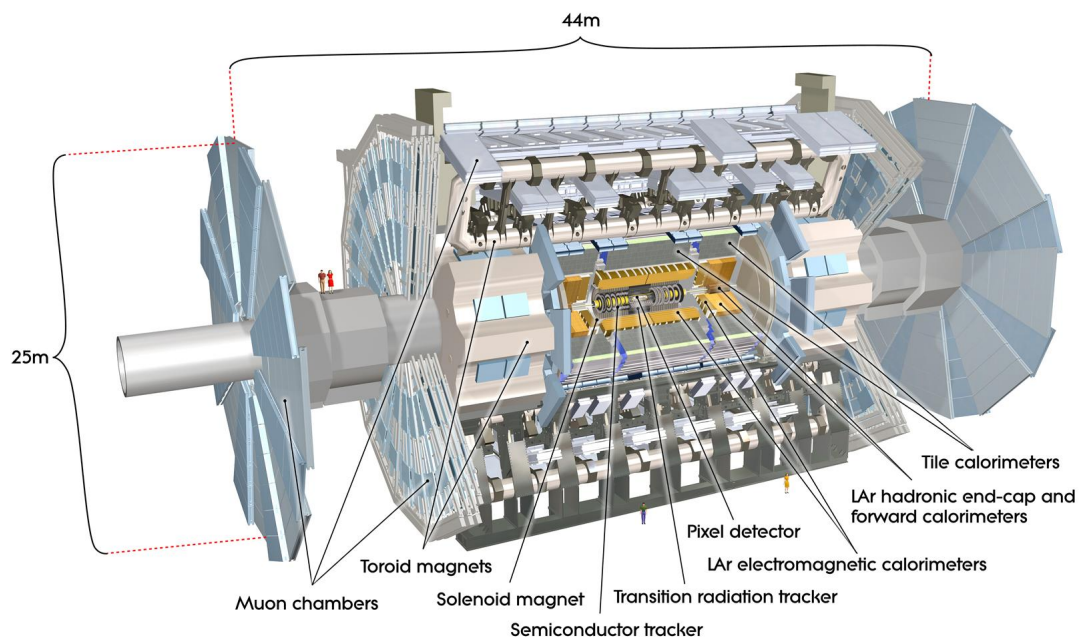


Рис. 1.2. Схематичное изображение детектора ATLAS со всеми компонентами и указанием размеров [10]

Внутренний детектор

Внутренний детектор (англ. Inner Detector, ID) [11] — ближайший к точке взаимодействия детектор, предназначенный для регистрации треков заряженных частиц в диапазоне по псевдобыстроте^[3] до $|\eta| < 2.5$. Схема Внутреннего детектора изображена на рисунке 1.3. Чтобы обеспечить прецизионное восстановление точки взаимодействия и необходимое импульсное разрешение, требуется точное измерение координат трека во многих пространственных точках. Внутренний детектор ATLAS состоит из трех подсистем.

Пиксельный детектор (англ. Pixel Detector) — детектор, расположенный максимально близко к точке взаимодействия и обладающий очень высоким пространственным разрешением 10 - 15 мкм. Вокруг пиксельного детектора расположен микростриповый детектор (англ. Semiconductor Tracker, SCT), обладающий разрешением 20 - 30 мкм. Эти два детектора дают 7 - 11 прецизионных измерений координат трека заряженной частицы, что позволяет с высокой точностью восстановить точку взаимодействия. Последняя подсистема Внутреннего детектора — детектор переходного излучения (англ. Transition Radiation Tracker, TRT). Это детектор на основе дрейфовых трубок. Он обеспечивает измерения 30 - 40 точек на треке с точностью ≈ 130 мкм. TRT состоит из слоёв дрейфовых трубок, наполненных газовой смесью на основе ксенона. Между слоями дрейфовых трубок расположены наборы пропиленовых пленок, образующих радиаторы. Когда высокоэнергетичная заряженная частица (с Лоренц-фактором $\gamma > 10^3$) пересекает границу двух сред, она испускает кванты переходного излучения энергией ≈ 6 кэВ (отсюда и название — переходное излучение). Регистрация переходного излучения позволяет определить, что пролетевшая частица — электрон, поскольку при энергиях ЛНС найти другую заряженную частицу с таким Лоренц-фактором малове-

^[3] Псевдобыстрота — безразмерная величина, описывающая угол между направлением движения частицы и осью пучка, определяющаяся по формуле $\eta = -\ln(\tan(\frac{\theta}{2}))$, где θ — полярный угол между направлением импульса частицы \mathbf{p} и осью пучка.

роятно.

Внутренний детектор расположен в магнитном поле напряженностью 2 Тл, направленным вдоль оси пучка. Поле создается соленоидальным сверхпроводящим магнитом [12]. Наличие продольного магнитного поля позволяет измерить поперечный импульс заряженной частицы по кривизне ее траектории.

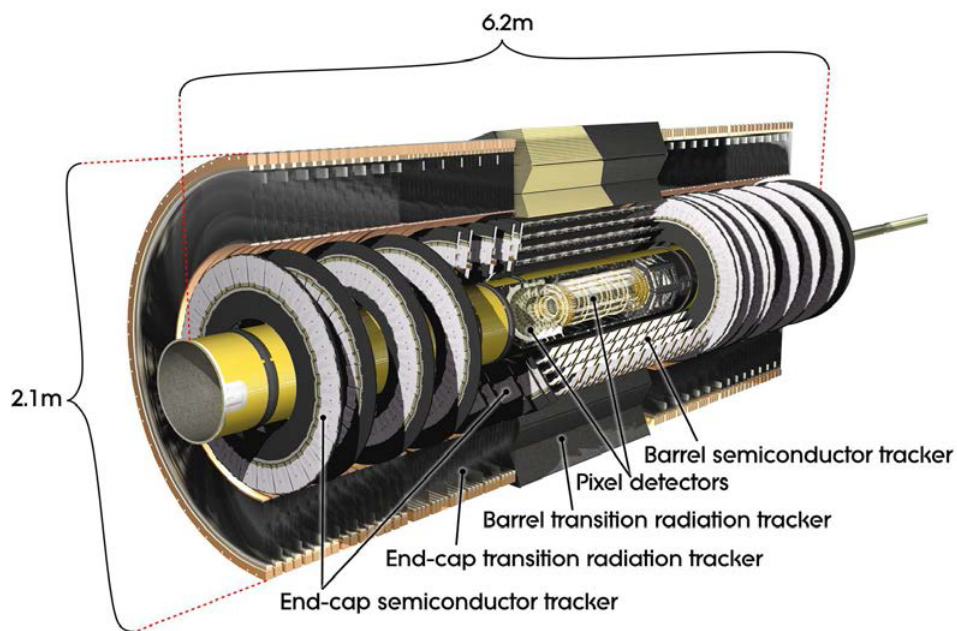


Рис. 1.3. Общая схема внутреннего детектора ATLAS [10]

Калориметры

Измерение энергии частиц в детекторе ATLAS осуществляется калориметрической системой [13], расположенной за соленоидом вокруг Внутреннего детектора. Она состоит из нескольких подсистем. Измерение энергии электронов и фотонов обеспечивается высокогранулированным электромагнитным калориметром с толщиной поглощения до 40 радиационных длин. В электромагнитном калориметре используется жидкоаргоновая технология с так называемой «аккордеонной» геометрией: в качестве активного вещества используется жидкий аргон, который расположен между каптоновыми электродами, имеющими форму «гармошки», а в качестве поглотителя ис-

пользуется свинец. Электромагнитный калориметр обеспечивает измерения энергии в диапазоне псевдобыстрот $|\eta| < 3.2$. Измерения энергии адронов обеспечиваются системой из калориметров двух типов: калориметром со сцинтиллятором из пластика и поглотителем из стали в центральной части детектора ($|\eta| < 1.7$) — tile-калориметр, и жидкоаргоновым калориметром в торцевых частях детектора ($|\eta| > 1.5$). Измерение энергии летящих вперёд частиц ($|\eta| < 4.9$), как электронов с фотонами, так и адронов, осуществляется специальным передним калориметром, использующим жидкоаргоновую технологию. Общий вид калориметрической системы детектора ATLAS представлен на рисунке 1.4.

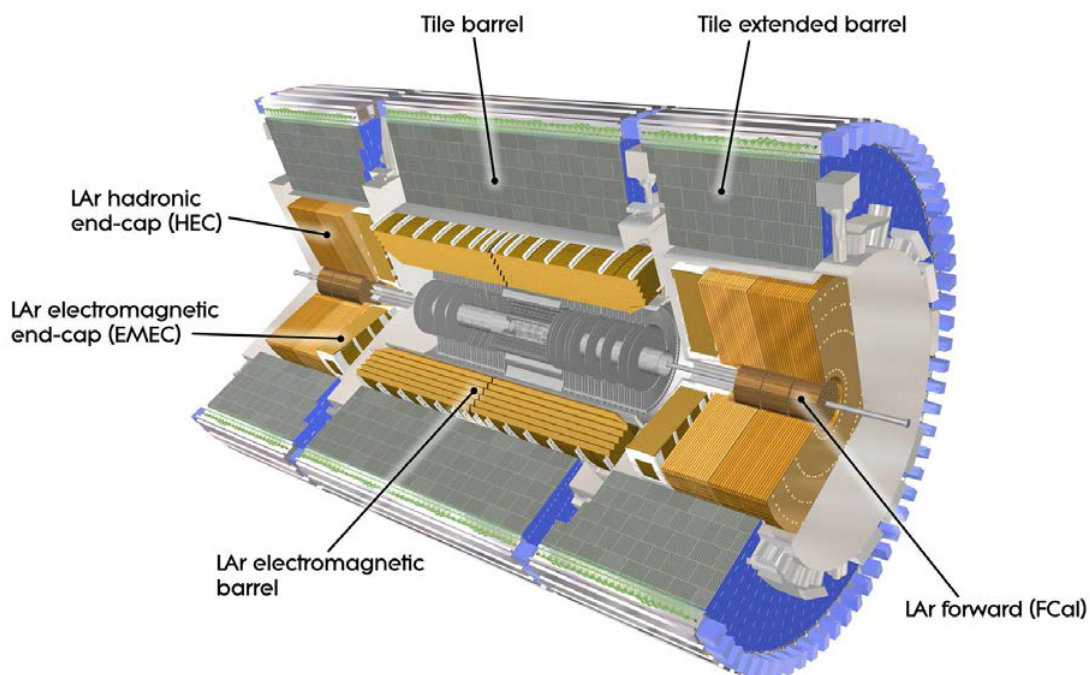


Рис. 1.4. Общая схема системы калориметров детектора ATLAS [10]

Мюонный спектрометр

Вокруг калориметра расположен мюонный спектрометр [14]. Задача мюонного спектрометра — прецизионное измерение координат трека мюона и определение импульса мюона по искривлению его траектории в магнитном поле в диапазоне $|\eta| < 2.7$. Магнитное поле создаётся сверхпроводящим воз-

душным тороидом с протяжённой центральной частью и двумя торцевыми тороидами [15] [16]. Магнитная система детектора ATLAS обладает большой отклоняющей способностью при относительно малом весе и небольшом количестве вещества, что минимизирует эффекты многократного рассеяния. Координаты трека измеряются прецизионными координатными детекторами на основе дрейфовых трубок в центральной части спектрометра и на внешних радиусах торцевых частей, где загрузки не очень высоки. На малых радиусах торцевых частей, в области высоких загрузок, измерения обеспечиваются пропорциональными камерами со стриповыми катодами. Триггерная система мюонного спектрометра основана на плоско-резистивных камерах (англ. Resistive-plate chamber, RPC) в центральной части спектрометра и тонкозазорных пропорциональных камерах (англ. Thin-gap chamber, TGC) в торцевых частях спектрометра. Триггерные камеры мюонного спектрометра обеспечивают временное разрешение 1.5 - 4 нс, в зависимости от типа камер и их загрузки. Схема мюонного спектрометра детектора ATLAS показана на рисунке 1.5.

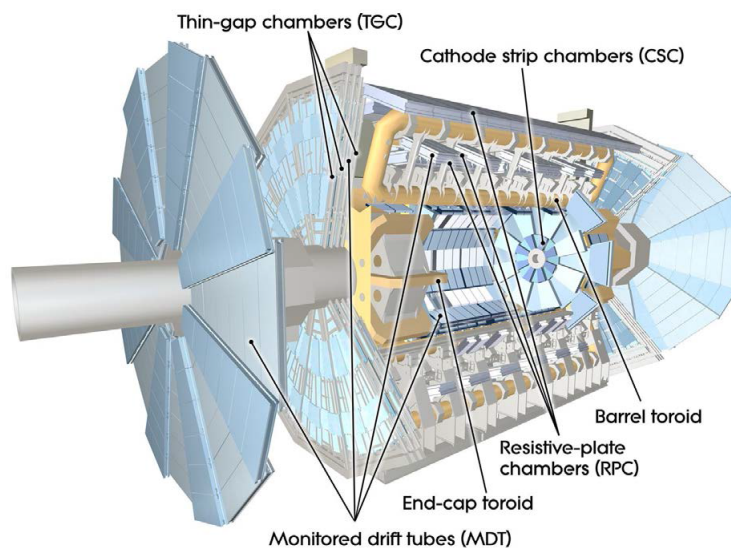


Рис. 1.5. Общая схема мюонного спектрометра детектора ATLAS [10]

Вычислительная модель ATLAS

2.1. Сбор, обработка и анализ данных

Детектор производит огромное количество данных — около 1 Мбайт на событие (в исходном виде) на каждое из 40 миллионов пересечений пучков в секунду в центре детектора, что даёт в общей сложности 40 Тбайт исходных данных в секунду.

Триггерная система и система для сбора данных (TDAQ, Trigger and Data Acquisition systems) были разработаны для эффективного сбора детектором ATLAS событий. Триггерная система уменьшает количество данных, предназначенных для хранения, до приемлемого уровня, а система сбора данных отслеживает поток данных и записывает события на диск.

Триггерная система [17], которая схематически показана на рисунке 2.1, использует информацию с подсистем детектора ATLAS, которую можно быстро обработать, чтобы отбирать в режиме реального времени интересные для физики события для того, чтобы сохранить их для подробного анализа. Начиная с 2015 года триггерная система делится на два уровня: низкоуровневый, основанный на специализированных электронных системах в детекторах (Level-1) и триггер высокого уровня (англ. High Level Trigger, HLT), основанный на программном отборе.

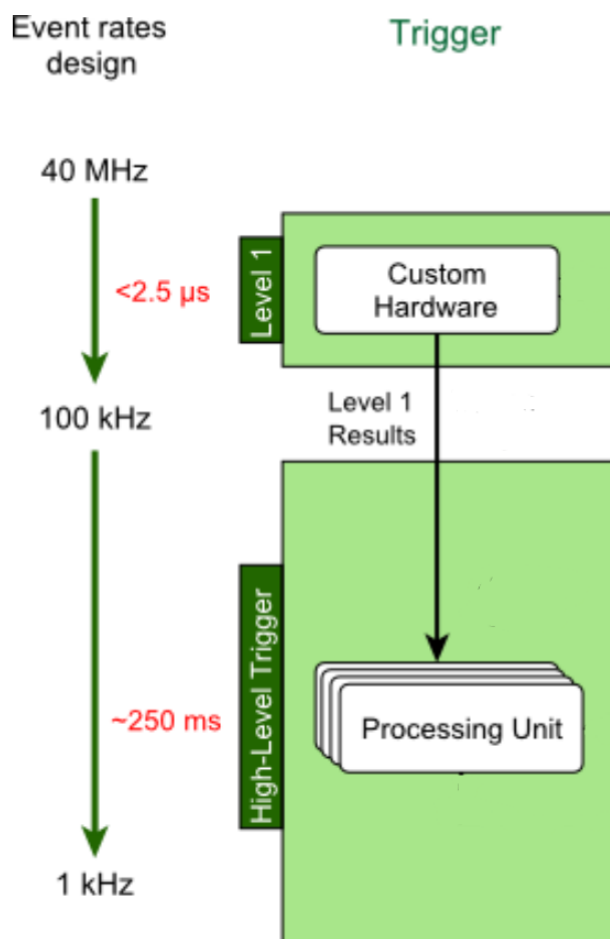


Рис. 2.1. Схема отбора событий с помощью триггерной системы ATLAS [18]

Level-1 триггер осуществляет поиск лептонов, фотонов и струй с большим поперечным импульсом p_T , а так же событий с большой поперечной энергией E_T или большой недостающей поперечной энергией E_T^{miss} . Level-1 триггер получает упрощенную информацию от подсистем детектора: в частности мюоны с большим поперечным импульсом p_T фиксируются триггерными камерами RPC и TGC, которые обладают худшим пространственным разрешением, но более быстродействующие. После триггера первого уровня каждую секунду отбирается около 100 000 событий из 40 000 000, время принятия решения составляет 2.5 мкс.

В качестве входных данных триггер высокого уровня получает набор так называемых областей интереса (англ. Regions of Interest, RoI) — области детектора, обозначенные Level-1 триггером как возможно содержащие представляющие интерес объекты. После высокоуровневого триггера каждую се-

кунду отбирается около 1000 событий, время принятия решения составляет 200 мс. Таким образом, после всех отборов ожидаемый поток данных с детектора ATLAS составляет 0.8 - 1 Гб/с.

Для всех записанных событий выполняется offline-реконструкция, которая преобразует сигналы от детекторов в физические объекты, такие как адронные струи, фотоны и лептоны. Для реконструкции событий используются вычисления в LHC Computing Grid (LCG) [19], позволяющие параллельно использовать компьютерные сети университетов и лабораторий во всем мире для ресурсоёмкой (в смысле использования процессорного времени) задачи приведения больших количеств исходных данных к форме, подходящей для физического анализа. Компьютеры LHC Computing Grid разделены на 4 уровня:

- нулевой — датацентр ЦЕРН, хранит необработанные данные с детекторов, производит первые шаги в реконструкции событий, распределяет необработанные данные и реконструированные события первому уровню грида;
- первый уровень состоит из 13 вычислительных центров и выступает хранилищем части данных, ответственен за обработку данных и хранение результатов, распределяет данные второму уровню грида, хранит часть моделируемых вторым уровнем данных;
- второй уровень обычно состоит из университетов и научных институтов, которые могут хранить достаточные объемы данных и обеспечить вычислительные мощности для некоторых задач;
- третий уровень — локальные кластеры университетских кафедр или отдельные ПК, строгого регламента для третьего уровня нет.

Главные составляющие инфраструктуры ПО, разработанной коллаборацией ATLAS:

Фреймворк Athena, включающий в себя необходимое ПО для

- моделирования событий,
- реконструкции событий,
- физического анализа,

и инструменты для распределённых вычислений в гриде:

- система распределенного управления данными (DDM, Distributed Data Management),
- фреймворки Ganga/pAthena для распределенного анализа в гриде,
- обслуживающие утилиты.

DDM это центральное звено между всеми компонентами, так как доступ к данным необходим для любого шага обработки и анализа.

2.2. Event Data Model

Event Data Model — описание классов (интерфейсов и типов) и их взаимоотношений, которые вместе обеспечивают представление события, зафиксированного детектором ATLAS, и упрощает манипуляции с ним. Другими словами — описание того, как представляются в памяти физические объекты (электроны, мюоны, струи и т.д.), каким образом они хранятся на диске и как их можно использовать.

Цели, с которыми создаётся EDM:

- одинаковое описание физических объектов различными научными группами;
- возможность использования одного и того же ПО различными группами;

- улучшение качества ПО — чем больше людей использует одно и то же ПО, тем быстрее обнаруживаются и исправляются ошибки.

ATLAS Event Data Model определяет набор различных форматов данных:

- RAW — необработанный поток данных с детекторов, ≈ 1.6 Мб на событие;
- ESD (Event Summary Data) — полный вывод реконструкции в объектном (ROOT/POOL) формате, номинально ≈ 1 Мб на событие;
- AOD (Analysis Object Data) — неполная информация о реконструкции события, включающая «физические» объекты (электроны, мюоны, струи и т.д.), номинально ≈ 100 Кб на событие;
- D3PD (Derived Physics Data) — skimmed/slimmed/thinned события + другая полезная «пользовательская» информация, получаемая из AOD и данных с условиями, номинально ≈ 10 Кб на событие;
- xAOD — объектно-ориентированный формат, сочетающий функциональность AOD и D3PD;
- TAG — файлы базы данных, используемые для быстрого выбора событий в AOD и/или ESD файлах.

2.3. Event Data Model xAOD и DxAOD

xAOD создавалась с использованием принципов объектно-ориентированного программирования, которые естественным образом могут быть применены при создании EDM: например, концепция наследования реализуется в наследовании класса Electron от класса Lepton, который в свою очередь наследуется от класса Particle (в дальнейшем концепция полиморфизма может

быть реализована как перебор по всем объектам-наследникам Particle), а инкапсуляция реализуется описанием класса Electron с полями Cluster и Track.

Требования, которые выдвигались при создании xAOD:

- возможность использования как в задачах Athena, так и в ROOT задачах — AOD практически пригоден для использования только в Athena;
- обеспечить настолько простой интерфейс, насколько это возможно — EDM в основном создаётся для анализа данных, поэтому более оптимальным с вычислительной точки зрения, но сложным для понимания структурам предпочитают более простые;
- обеспечить наибольшую возможную скорость работы;
- обеспечить наибольшую возможную гибкость — например, позволить пользователю добавлять/удалять переменные в объектах (контейнерах) во время выполнения.

Главная идея, лежащая в основе xAOD — разделение всех объектов на два типа — объекты-интерфейсы (предоставляют пользовательский интерфейс, но не хранят в себе данные) и вспомогательные объекты-хранилища (объекты, выделяющие память для данных и позволяющие объектам-интерфейсам оперировать с данными). Одним из достоинств данного подхода является возможность реализовать неполное копирование объектов (англ. shallow copy): при копировании объекта происходит копирование объекта-интерфейса и создание неполного объекта-хранилища ShallowAuxContainer; запись новых переменных в объект-копию происходит в ShallowAuxContainer, при запросе данных сначала происходит чтение из ShallowAuxContainer и при отсутствии в нем данных происходит перенаправление на оригинальный объект-хранилище AuxContainer [20].

DxAOD

Так как для решения многих задач зачастую не нужна полная информация с детектора о всех событиях за сессию работы ускорителя или о всех объектах в событии, существует возможность удалить часть данных. Это существенно уменьшает объем входных данных, тем самым упрощая работу с ними. Также иногда необходимо добавить результаты промежуточных вычислений или другую полезную информацию. В результате определенных ниже 4 операций получают данные в форматах, объединенных под общим названием DxAOD (англ. Derived xAOD):

Skimming удаление событий целиком;

Thinning удаление объектов из событий, но сами события не удаляются;

Slimming удаление информации из объектов, но сами объекты в событиях не удаляются;

Augmentation добавление данных.

2.4. ROOT и ROOTCore

ROOT [21] — объектно-ориентированный фреймворк, написанный на языке C++, для решения задач в области анализа данных физики высокой энергии. В частности, ROOT предоставляет следующие возможности:

- построение и преобразование гистограмм, аппроксимация их кривыми;
- визуализация данных;
- запись на диск большого количества объектов одного класса в сжатом виде с оптимизированной скоростью доступа к ним с помощью класса TTree.

ROOTCore — фреймворк на основе ROOT, который к функциональности последнего добавляет инструменты для работы с данными, полученными от детектора ATLAS. В частности, ROOTCore делает возможным:

- работу с данными в форматах xAOD и DxAOD;
- отбор событий по различным кинематическим характеристикам физических объектов;
- учет поправок для моделированных методом Монте-Карло событий;

Таким образом, ROOTCore предоставляет все возможности, необходимые для разработки программного обеспечения для поиска Z' -бозона.

Глава 3

Разработка ПО для поиска Z' -бозона

3.1. Архитектура ПО

Приведем последовательность действий, необходимых для поиска Z' -бозона в виде псевдокода:

Listing 3.1. Псевдокод алгоритма работы ПО для поиска Z' -бозонов

```
1  for (data_file: data_set)    //цикл по файлам с данными
2  for (event: data_file)      //цикл по событиям в каждом файле
3  {
4      if(!passPreSelection()) //если событие не проходит предварительные
5                              //отборы
6          continue;          //перейти к следующему
7      if(!passSelection())    //если лептоны не проходят отборы
8                              //по характеристикам физических объектов
9          continue;          //перейти к следующему
10     if(isMC)                 //для событий, сгенерированных
11                              //по методу Монте-Карло
12         doCorrections();     //применить поправочные коэффициенты
13     fillHists();             //заполнить гистограммы
14                              //в частности распределение по дилептонной
15                              //инвариантной массе
16     fillTree();              //записать информацию в TTree, необходимую
17                              //для последующей установки пределов
18                              //на массу  $Z'$  бозона
19 }
```

Для реализации приведённого алгоритма с использованием фреймворка ROOTCore на языке C++ были спроектированы и реализованы классы, изображенные на рисунке 3.1.

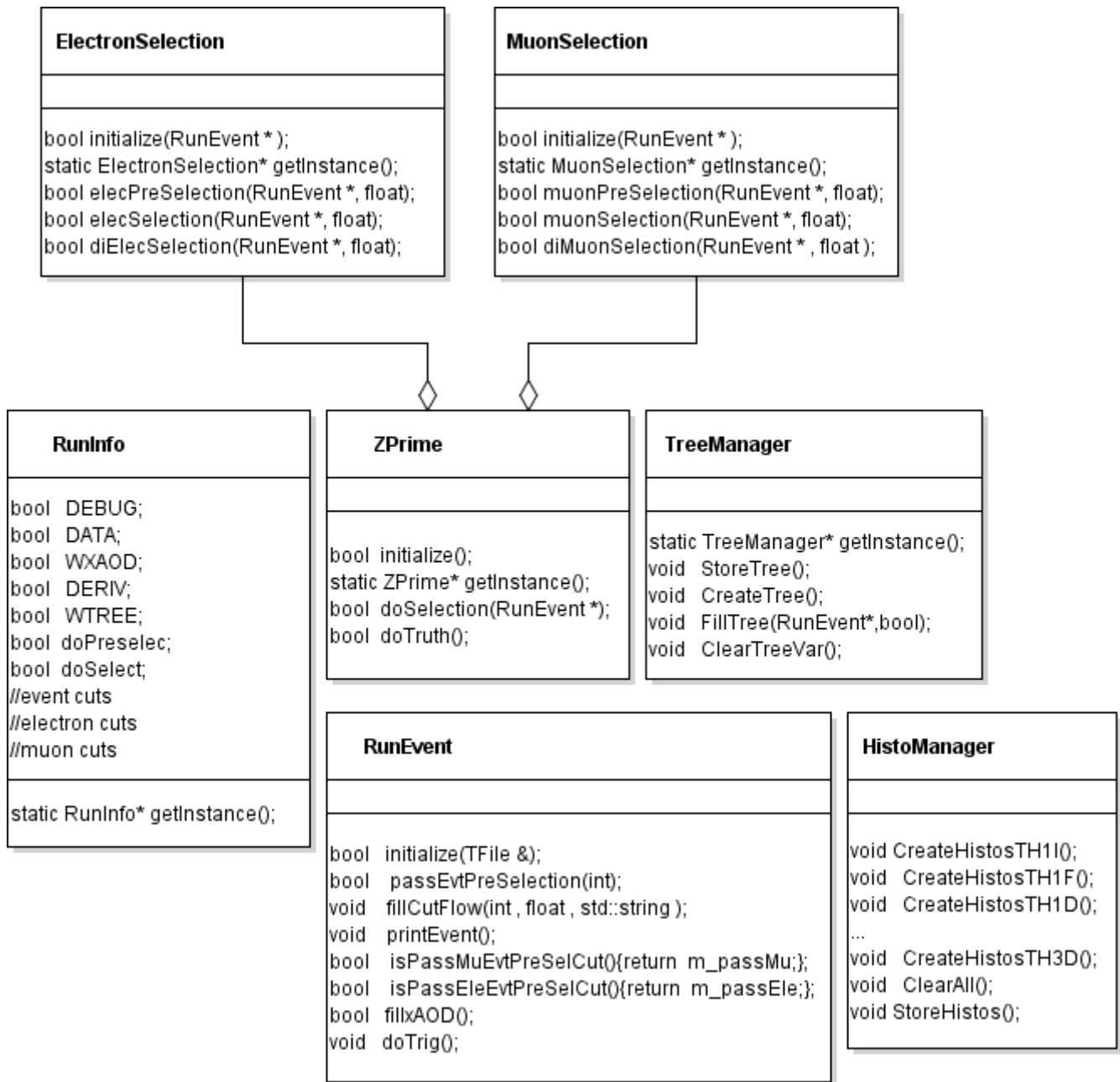


Рис. 3.1. Диаграмма с основными классами. На диаграмме представлена только основная функциональность.

RunInfo задаёт режим работы (режим отладки, тип входных данных и т.п.), а также определяет отборы для электронных и мюонных событий, которые необходимо проводить для поиска Z' -бозоов.

ZPrime реализует отбор событий, интересных для поиска Z' -бозона, используя **ElectronSelection** и **MuonSelection**.

ElectronSelection реализует отбор электронных событий.

MuonSelection реализует отбор мюонных событий.

HistoManager заполняет гистограммы по заданным пользователем распределениям для отобранных событий.

TreeManager сохраняет необходимую для дополнительной или повторной обработки информацию об отобранных событиях в TTree.

RunEvent класс-«обертка» для одного события.

Используя разработанные классы, можно переписать псевдокод для поиска Z' -бозонов следующим образом:

Listing 3.2. Псевдокод алгоритма работы ПО для поиска Z' -бозонов с использованием разработанных классов

```
1   for (data_file: data_set)           //цикл по файлам с данными
2   for (event: data_file)             //цикл по событиям в файле
3   {
4       if(runInfo->doPreSelec)         //предварительные отборы
5           if(!event->passEvtPreSelection()) //если событие
6               //не проходит отборы
7               continue;              //перейти к следующему
8       if(runInfo->doSelect)           //отборы по лептонам
9           if(!zPrime->doSelection(event)) //если лептоны
10              //не проходят отборы
11              continue;              //перейти к следующему событию
12       if(!runInfo->DATA)              //применение поправочных
13              //коэффициентов
14           zPrime->doCorrections(event); //к событиям Монте-Карло
15       histoManager->fillHists(event); //заполнение гистограмм
16       treeManager->FillTree(event);   //заполнение TTree
17   }
```

В связи с общим характером основных классов важным преимуществом данного подхода является простота модификации кода для решения других физических задач.

3.2. Отбор событий

В данном разделе более подробно описаны необходимые для поиска Z' -бозона отборы событий.

Электронный канал

Отбор на уровне событий:

- событие содержится в GRL;

При физических измерениях мы должны быть уверены в том, что данные удовлетворяют нашим стандартам качества — возможны ситуации, когда при наборе данных какие-нибудь части детектора были неисправны или выключены. Для определения «хороших» данных используются так называемые GRL (Good Runs List) — файлы в формате XML, в которых указаны блоки, которые следует использовать для анализа данных.

- на событие сработал триггер `2e17_lhloose`;

`2e17_lhloose` [22] — основной диэлектронный триггер, отбирающий события с двумя электронами с поперечной энергией $E_T > 17$ ГэВ, прошедшими идентификационный отбор `loose`. Существует три набора критериев идентификации электронов, основанных на анализе функции правдоподобия (англ. *likelihood*), с эффективностями 95%, 90% и 80% для электронов с поперечной энергией $E_T \approx 40$ ГэВ, и называющиеся соответственно `loose`, `medium` и `tight` (указаны в порядке увеличения степени подавления фона) [23].

- событие не помечено как неполное и данные с жидкоаргонового калориметра (LAr), адронного `tile`-калориметра и полупроводникового детектора не повреждены;

- событие содержит как минимум 2 электрона.

Отбор на уровне электронов:

- электроны попадают в области калориметра $|\eta| < 2.47$, которые позволяют проводить прецизионные измерения, исключая переходные области калориметра $1.37 < |\eta| < 1.52$;
- электроны реконструированы без использования калориметрических кластеров, в которых зарегистрировано превышение фона pile-up либо происходили сбои электроники;

Под pile-up эффектами [24] подразумевается ряд эффектов, заключающихся в том, что детекторы помимо интересующего процесса регистрируют события от соседних по времени пересечения пучков, от фона частиц пучка рассеянных на элементах ускорителя, от нейтронного фона в области детектора, а также от космических частиц. Влиянию этого эффекта подлежат все физические объекты и последствия могут различаться — для мюонов с высоким импульсом это ошибки в реконструкции фона, для струй это дополнительные вклады энергии.

- поперечная энергия $E_T > 30$ ГэВ — исключение диапазона поперечной энергии электрона с быстро меняющейся эффективностью триггера;
- электроны удовлетворяют следующему требованию внутреннего детектора по качеству трека: $d_0^{BL}/\sigma < 5$, где поперечный прицельный параметр d_0^{BL} — наименьшее расстояние от трека до оси пучка, σ — разрешение по d_0^{BL} ;
- электроны удовлетворяют следующему требованию внутреннего детектора по качеству трека: $|\Delta z_0 \sin\theta| < 0.5$ мм, где продольный прицельный параметр $z_0 \sin\theta$ — проекция расстояния от точки, определяющей

перечный прицельный параметр, до вершины взаимодействия жесткого рассеяния на ось пучка;

Два предыдущих требования гарантируют, что лептоны относятся к соответствующим вершинам.

- электроны удовлетворяют критерию идентификации «Likelihood Medium» (90% эффективность идентификации для электронов с $E_T \approx 40$ ГэВ [23]);
- электроны удовлетворяют критерию изоляции «Loose».

Изоляция — параметр, ассоциированный с плотностью частиц (трековая изоляция) или энергии (калориметрическая изоляция) в конусе вокруг данной частицы. Алгоритмы изоляции [25] позволяют отсеивать корректно реконструированные лептоны, рожденные в адронном или τ распаде. Для критерия «Loose» эффективности калориметрической и трековой изоляций составляют 99% во всем диапазоне поперечных энергий электрона.

Отбор на уровне пар электронов:

- выбирается пара электронов с наибольшими поперечными энергиями E_T ;
- диэлектронная инвариантная масса $m_{ee} > 80$ ГэВ.

Мюонный канал

Отбор на уровне событий:

- событие содержится в GRL;
- на событие сработал триггер mu26_ivarmedium или триггер mu50;

`mu26_ivarmedium` — основной триггер одиночных мюонов, использующийся в большинстве физических анализов, рассматривающих мюоны. Этот триггер отбирает мюоны с поперечным импульсом $p_T > 26$ ГэВ, удовлетворяющие критерию изолированности и прошедшие идентификационный отбор `medium`. `mu50` — основной триггер неизолированных одиночных мюонов, отбирающий мюоны с поперечным импульсом больше 50 ГэВ. Последний используется совместно с `mu26_ivarmedium`, чтобы ослабить эффекты изоляции в области спектра с высоким поперечным импульсом p_T . [22]

- событие не помечено как неполное и данные с жидкоаргонового калориметра (LAr), адронного tile-калориметра и полупроводникового детектора не повреждены;
- событие содержит как минимум 2 мюона;
- событие не содержит мюонов с плохим пространственным разрешением в мюонном спектрометре.

Отбор на уровне мюонов:

- поперечный импульс $p_T > 30$ ГэВ;
- мюоны удовлетворяют критериям `High- p_T` , основанным на данных с внутреннего детектора и мюонного спектрометра;

`High- p_T` критерии отбирают мюоны с поперечным импульсом $p_T > 100$ ГэВ, обладающие наилучшим разрешением, накладывая следующие требования:

1. Успешная реконструкция Внутренним детектором и мюонным спектрометром.
2. Трек пересекает как минимум три прецизионных области мюонного спектрометра.

3. Мюон не пересекает камеры с плохой выстройкой и промежуточные области мюонного спектрометра.
 4. Импульсы, измеренные Внутренним детектором и мюонным спектрометром, отличаются не больше чем на 7σ .
- мюоны удовлетворяют требованиям внутреннего детектора по качеству трека: $|d_0/\sigma| < 3$ и $|\Delta z_0 \sin\theta| < 0.5$ мм;
 - мюоны удовлетворяют критерию изоляции «Loose Track-Only».

Для критерия «Loose Track-Only» не учитывается калориметрическая изоляция, а эффективность трековой изоляций составляет 99%.

Отбор на уровне пар мюонов:

- выбирается пара мюонов с наибольшим значением суммы поперечных импульсов $\sum p_T$;
- пара должна содержать противоположно заряженные мюоны;
- димюонная инвариантная масса $m_{\mu\mu} > 80$ ГэВ.

3.3. Поправочные коэффициенты

Для корректного сравнения экспериментальных данных и моделированных методом Монте-Карло событий необходимо учесть неточности моделирования и реконструкции данных. Это осуществляется с помощью поправочных коэффициентов.

К экспериментальным данным применяется единственная коррекция – энергетическая калибровка. Она необходима, поскольку параметры измерительных систем, от которых зависит вычисление энергии электрона или импульса мюона, могут меняться во времени. Такая калибровка измеряет реконструированную массу Z -бозона, сравнивает с табличным значением и вычисляет поправочный коэффициент к энергии лептона:

$$E_{meas} = E_{truth} \cdot (1 + \alpha_i), \quad (3.1)$$

где E_{meas} — измеренная энергия лептона, E_{truth} — истинная энергия лептона, α_i — поправочный коэффициент для конкретной области детектора. Для энергетической калибровки следует воспользоваться:

- `EgammaCalibrationAndSmearingTool` для электронов;
- `MuonCalibrationAndSmearingTool` для мюонов.

К моделированным событиям применяются поправки, учитывающие разницу в поведении экспериментальных данных и моделированных событий.

Поскольку разрешение детектора, измеренное в данных, отличается от разрешения, заложенного при моделировании, то к моделированным событиям применяются поправки, учитывающие это отличие. Они вычисляются из сравнения ширины Z пика, измеренного в данных и в моделированных событиях. Для этого следует воспользоваться:

- `EgammaCalibrationAndSmearingTool` для электронов;
- `MuonCalibrationAndSmearingTool` для мюонов.

Многие свойства детектора, такие как разрешение, энергетическая калибровка, идентификационные качества, зависят от числа взаимодействий за одно пересечение пучков. Поэтому распределение событий по этой величине в данных и в моделированных событиях должны совпадать. Однако, при моделировании событий, которое осуществлялось до набора данных, невозможно предсказать распределение данных по `pile-up`. Для учёта этого несоответствия производится первзвешивание моделированных событий по этому параметру. Для данного первзвешивания необходимо воспользоваться `PURewightingTool`.

Моделирование не совсем точно описывает взаимодействие частиц с детектором. Поэтому эффективности триггера, реконструкции лептонов и их идентификации, а также изоляционных отборов в данных и в моделированных событиях несколько отличаются. Для учёта этих отличий используются масштабные коэффициенты (англ. Scale factor). Эти коэффициенты вычисляются с помощью:

- `AsgElectronEfficiencyCorrectionTool` для электронов;
- `MuonEfficiencyScaleFactors` и `MuonTriggerScaleFactors` для мюонов.

Для сравнения с данными распределения моделированных событий нормируются на сечения соответствующих процессов. Однако, современные генераторы пока не способны учесть вклад высших порядков по теории возмущений в моделируемый процесс. Для учёта таких поправок используются масс-зависимые коэффициенты – так называемые К-факторы. Для вычисления и применения К-факторов необходимо воспользоваться `LPXKfactorTool`.

Все перечисленные поправки применяются как весовые коэффициенты к моделированным событиям. При этом поправки, учитывающие свойства события как такового (pile-up, эффективность триггера, К-фактор) применяются к событию в целом, а поправки, учитывающие свойства объекта (разрешение, реконструкция, идентификация и изоляция) применяются к каждому объекту.

В приложении [A](#) приведен код для учета всех описанных выше поправочных коэффициентов.

Результаты

4.1. Проверка работы отборов

Для проверки правильности отборов событий научные группы коллаборации ATLAS, занимающиеся одной и той же задачей, но использующие независимое ПО, используют так называемые event cutflow. Для набора данных с относительно небольшим количеством событий (порядка 50 тысяч) составляется таблица, в которую последовательно вносится количество событий, оставшееся после каждого отбора [26], далее таблицы сравнивают между собой на предмет расхождений. Ниже приведены сравнения event cutflow для отборов электронных и мюонных событий с различными научными группами.

Таблица 4.1. Event cutflow для электронных событий

dataset mc15_13TeV.301012.PowhegPythia8EvtGen_AZNLOCTEQ6L1_
DYee_2500M2750.merge.DAOD_EXOT0.e3649 _s2576_s2132_r7772_r7676
_p2669

	Пацёра В. СПбГУ/ПИЯФ, Россия	T. Berry RHUL, Великобритания	P. Mastrandrea LAPP Аннесу, Франция
Исходное количество событий	50000	50000	50000
PreSkim	50000	50000	50000
PostSkim	50000	50000	50000
GRL	50000	50000	50000
триггер	43243	43243	43243
требования об ошибках	43243	43243	43243
≥ 2 электрона	43235	43235	43235
η	42463	42463	42463
качество объектов	42394	42394	42394
p_T	39808	39808	39808
$ d_0/\sigma $	39724	39724	39724
$ \Delta z_0 \sin\theta $	39587	39587	39587
идентификация	37464	37464	37464
изоляция	36865	36865	36865
масса	36865	36865	36865

Таблица 4.2. Event cutflow для мюонных событий

dataset mc15_13TeV.301032.PowhegPythia8EvtGen_AZNLOCTEQ6L1_
DYmumu_2500M2750.merge.DAOD_EXOT0.e3649_s2576_s2132_
r7772_r7676_p2669

	Пацёра В. СПбГУ/ПИЯФ, Россия	S. Rettie SFU/TRIUMF, Канада	Y. Liu USTC, Китай
Исходное количество событий	49800	49800	49800
PreSkim	49800	49800	49800
PostSkim	49800	49800	49800
GRL	49800	49800	49800
триггер	45965	45965	45965
требования об ошибках	45965	45965	45965
≥ 2 мюона	44774	44774	44774
p_T	41486	41486	41486
ID/MS Hits	24114	24114	24114
$ d_0/\sigma $	24013	24013	24013
$ \Delta z_0 \sin\theta $	23977	23977	23977
изоляция	23763	23763	23763
заряд	23756	23756	23756
масса	23756	23756	23756

4.2. Построение распределений

Для событий, отобранных из экспериментальных данных, накопленных в 2016 году в протон-протонных столкновениях при энергии в с.ц.м. 13 ТэВ на ускорителе ЛНС, и смоделированных событий по методу Монте-Карло, после

применения соответствующих поправочных коэффициентов, были построены распределения по дилептонной инвариантной массе.

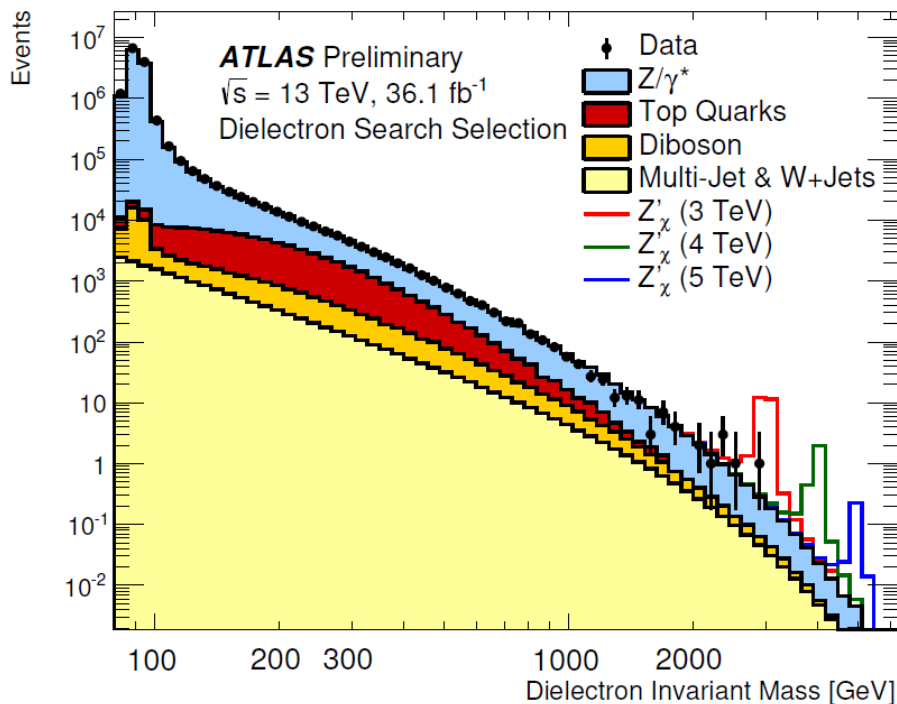


Рис. 4.1. Распределение по диэлектронной инвариантной массе m_{ee} после отбора событий

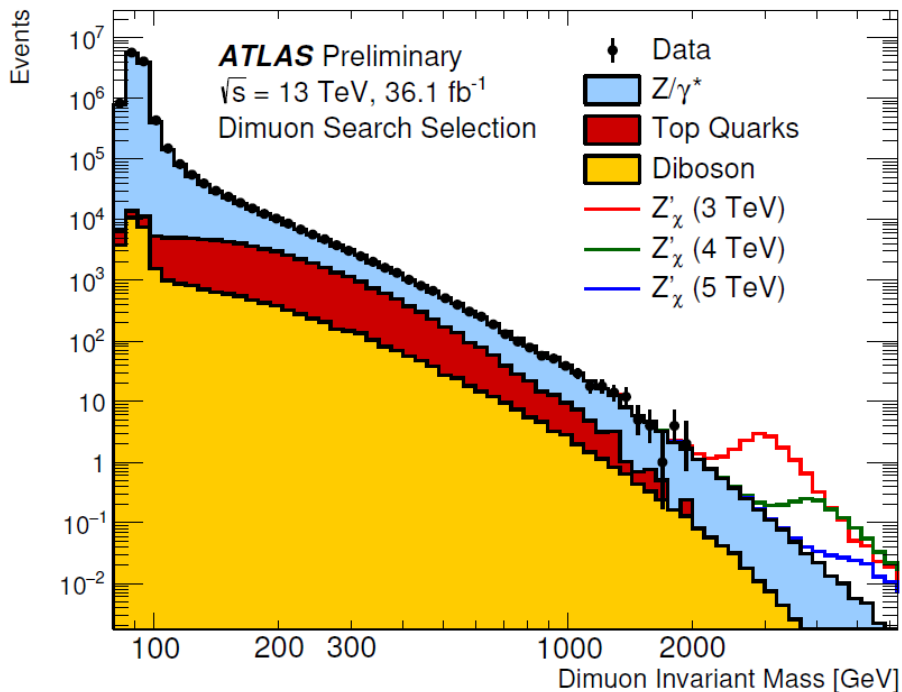


Рис. 4.2. Распределение по димюонной инвариантной массе $m_{\mu\mu}$ после отбора событий

На приведенных распределениях видимые отклонения от СМ не были обнаружены.

Заключение

В ходе работы было разработано программное обеспечение для поиска Z' -бозонов в эксперименте ATLAS в данных, накопленных в 2016 году в протон-протонных столкновениях при энергии в с.ц.м. 13 ТэВ на ускорителе LHC. В качестве проверки правильности отборов лептонных событий было проведено сравнение Event cutflow с другими научными группами, при их сравнении расхождения не были обнаружены. Были построены распределения по дилептонной инвариантной массе для событий, отобранных из экспериментальных данных, и смоделированных по методу Монте-Карло, с применением соответствующих поправочных коэффициентов. Видимых отклонений от СМ не было обнаружено.

В качестве следующего шага данной работы следует реализовать учет систематических ошибок.

Список литературы

1. Langacker P. The Standard Model and Beyond. 1 edition. CRC PRESS, 2009. ISBN: [9781420079067](#).
2. ATLAS Collaboration. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC // [Physics Letters B](#). 2012. Vol. 716.
3. The CMS Collaboration. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC // [Physics Letters B](#). 2012. Vol. 716.
4. Рубаков В. Физика частиц и космология: состояние и надежды // [Успехи физических наук](#). 1999.
5. Langacker P. The Physics of Heavy Z' -Gauge Bosons // [Reviews of Modern Physics](#). 2009. Vol. 81.
6. P. Osland, A. A. Pankov. Z' -interference effects from TRISTAN to LEP2 // [Physics Letters B](#). 1997. Vol. 403.
7. W. Ma, L. Sun, Y. Liu, Y. Jiang, C. Chang. The Forward-backward asymmetry with Z' -effects in the process $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ // [J.Phys. G20](#). 1994.
8. M. Carena, A. Daleo, B. Dobrescu, T. Tait. Z-prime Gauge Bosons at the Tevatron // [PHYSICAL REVIEW D](#). 2004. Vol. 70.
9. T. Pettersson P. L. The Large Hadron Collider : conceptual design. <https://cdsweb.cern.ch/record/291782>. 1995.
10. ATLAS Collaboration. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // [Journal of Instrumentation](#). 2008. Vol. 3.
11. CERN. Geneva. LHC Experiments Committee; LHCC. ATLAS inner detector: Technical Design Report, 1. <https://cds.cern.ch/record/331063/files/ATLAS-TDR-4-Volume-I.pdf?version=1>. 1997.
12. CERN. Geneva. LHC Experiments Committee; LHCC. ATLAS central solenoid: Technical Design Report. <https://cds.cern.ch/record/331067/files/cer-000254567.pdf?version=1>. 1997.

13. Puzo P. ATLAS calorimetry // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2002. Vol. 494.
14. Palestini S. The muon spectrometer of the ATLAS experiment // *Nuclear Physics B*. 2003. Vol. 125.
15. Badiou, J P; Beltramelli, J; Baze, J M; Belorgey, J. ATLAS barrel toroid: Technical Design Report. <https://cds.cern.ch/record/331065/files/cer-000254565.pdf?version=1>. 1997.
16. CERN. Geneva. LHC Experiments Committee; LHCC. ATLAS end-cap toroids: Technical Design Report. <https://cds.cern.ch/record/331066/files/cm-p00051824.pdf?version=1>. 1997.
17. Martinez A. R. The Run-2 ATLAS Trigger System. <https://cds.cern.ch/record/2133909/files/ATL-DAQ-PROC-2016-003.pdf>. 2016.
18. Vazquez W. P. The ATLAS Run 2 DAQ System. https://indico.cern.ch/event/471309/contributions/1981068/attachments/1256346/1854780/The_ATLAS_Run_2_DAQ_System.pdf. 2016.
19. The LCG TDR Editorial Board. LHC Computing Grid: Technical Design Report. <https://cds.cern.ch/record/840543/files/lhcc-2005-024.pdf>. 2005.
20. The ATLAS Collaboration . Implementation of the ATLAS Run 2 event data model. <https://cds.cern.ch/record/2014150/files/ATL-SOFT-PROC-2015-003.pdf?version=1>. 2015.
21. ROOT Data Analysis Framework. <https://root.cern.ch/>.
22. Hryn'ova K., T; Nagano. Trigger Menu Strategy for Run 2. <https://cds.cern.ch/record/1703730/files/ATL-COM-DAQ-2014-054.pdf>. 2014.
23. The ATLAS Collaboration. Electron identification measurements in ATLAS using $\sqrt{s} = 13$ TeV data with 50 ns bunch spacing. <https://cds.cern.ch/record/2048202/files/ATL-PHYS-PUB-2015-041.pdf?version=1>. 2015.
24. (for the ATLAS Collaboration) Z. M. Simulation of Pile-up in the ATLAS Experiment // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. Vol. 513.

25. ATLAS Collaboration. Electron, Photon and Muon Isolation in Run 2. <https://cds.cern.ch/record/2256658/files/ATL-COM-PHYS-2017-290.pdf?version=1>. 2017.
26. Dilepton Search Event Challenge 2016. https://docs.google.com/spreadsheets/d/1qY_9-VaCokc1ikNW1Usfq1XvxmqJZuEfsC9PqoVTSUQ/edit#gid=2113146977.

Приложение А

Использование EgammaCalibrationAndSmearingTool

```
1 //...
2 //инициализация
3 m_egammaCalibrationAndSmearingTool = new
    CP::EgammaCalibrationAndSmearingTool("m_egammaCalibrationAndSmearingTool");
4 m_egammaCalibrationAndSmearingTool->setProperty("ESModel",
    alginf->ESModel.c_str());
5 m_egammaCalibrationAndSmearingTool->
6   setProperty("decorrelationModel",
7     alginf->DecorrelationModel.c_str());
8 m_egammaCalibrationAndSmearingTool->initialize()
9 //...
10 //применение к событию
11 if(isMC) {
12   m_egammaCalibrationAndSmearingTool->applyCorrection(**elItr);
13 }
14 //...
```

Использование MuonCalibrationAndSmearingTool

```
1 //...
2 //инициализация
3 m_muonCalibrationAndSmearingTool = new
    CP::MuonCalibrationAndSmearingTool("MuonCorrectionTool");
4 m_muonCalibrationAndSmearingTool->initialize();
5 //...
6 //применение к событию
7 if(isMC) {
8   m_muonCalibrationAndSmearingTool->applyCorrection(**muItr);
9 }
```

```
10 //...
```

Использование LPXKfactorTool

```
1 //...
2 //инициализация LPXKfactorTool
3 auto m_kFTool = new LPXKfactorTool("LPXKfactorTool");
4 m_kFTool->setProperty("isMC15",true);
5 m_kFTool->initialize();
6 //...
7 //применение к событию
8 if(isMC) {
9     auto m_evtInfo = event->evtInfo();
10    auto m_kFTool = event->getkFTool();
11    m_kFTool->execute();
12    auto kFWeight = m_evtInfo->auxdata<double>( "KfactorWeight" );
13 }
14 //...
```

Использование PileupReweightingTool

```
1 //...
2 //инициализация PileupReweightingTool
3 auto m_pileup = new CP::PileupReweightingTool("Pileup");
4 m_pileup->setProperty("ConfigFiles",confFiles);
5 m_pileup->setProperty("LumiCalcFiles",lcalcFiles);
6 m_pileup->setProperty("DataScaleFactor",1.0/1.09);
7 m_pileup->initialize();
8 //...
9 //применение к событию
10 if(isMC){
11     m_pileup->apply(*evtInfo,true);
```



```
12     auto w_PU = evtInfo->auxdata<Float_t>("PileupWeight");
13     //...
14 }
```

Использование AsgElectronEfficiencyCorrectionTool

```
1     //...
2     //инициализация
3     //для внутреннего детектора
4     m_electronSFToolID = new AsgElectronEfficiencyCorrectionTool("ID_SF");
5     m_electronSFToolID->setProperty("CorrectionFileNameList",inputFilesID);
6     m_electronSFToolID->setProperty("CorrelationModel", "TOTAL" );
7     m_electronSFToolID->setProperty("ForceDataType",isMC);
8     m_electronSFToolID->initialize();
9     //...
10    //для триггеров
11    m_electronSFToolTrigger = new
        AsgElectronEfficiencyCorrectionTool("Trig_SF");
12    m_electronSFToolTrigger->setProperty("CorrectionFileNameList",inputFilesTrig);
13    m_electronSFToolTrigger->setProperty("CorrelationModel", "TOTAL" );
14    m_electronSFToolTrigger->setProperty("ForceDataType", isMC);
15    m_electronSFToolTrigger->initialize();
16    //...
17    //для изоляции
18    m_electronSFToolIso = new AsgElectronEfficiencyCorrectionTool("Iso_SF");
19    m_electronSFToolIso->setProperty("CorrectionFileNameList",inputFilesIso);
20    m_electronSFToolIso->setProperty("CorrelationModel", "TOTAL" );
21    m_electronSFToolIso->setProperty("ForceDataType",isMC);
22    m_electronSFToolIso->initialize();
23    //...
24    //для реконструкции
25    m_electronSFToolReco = new AsgElectronEfficiencyCorrectionTool("Reco_SF");
26    m_electronSFToolReco->setProperty("CorrectionFileNameList",inputFilesReco);
```

```

27     m_electronSFToolReco->setProperty("CorrelationModel", "TOTAL" );
28     m_electronSFToolReco->setProperty("ForceDataType",isMC);
29     m_electronSFToolReco->initialize();
30     //...
31     //вычисление
32     //...
33     if(isMC){
34         //ID
35         m_electronSFToolID->getEfficiencyScaleFactor(**elItr,weightIDSF);
36         // Trigger
37         m_electronSFToolTrigger->
38             getEfficiencyScaleFactor(*m_electronGoodContainer->at(0),
39                                     m_weightElTrig);
40         // Iso
41         m_electronSFToolIso->getEfficiencyScaleFactor(**elItr,weightIsoSF);
42         // Reco
43         m_electronSFToolReco->getEfficiencyScaleFactor(**elItr,weightRecoSF);
44     }
45     //...

```

Использование MuonEfficiencyScaleFactors

```

1     //...
2     //инициализация
3     //для изоляции
4     m_muonSFToolIso = new CP::MuonEfficiencyScaleFactors("Iso_SF");
5     m_muonSFToolIso->setProperty("WorkingPoint",alginf->MuSFToolWP.c_str() );
6     m_muonSFToolIso->setProperty("DataPeriod",alginf->MuSFToolDataPeriod.c_str()
7         );
8     m_muonSFToolIso->initialize();
9     //...
10    //для триггеров
11    m_electronSFToolTrigger = new CP::MuonTriggerScaleFactors("Trig_SF");

```

```
11     m_electronSFToolTrigger->setProperty("MuonQuality", "HighPt");
12     m_electronSFToolTrigger->setProperty("MC", "mc15c" );
13     m_electronSFToolTrigger->setProperty("Year", "2016" );
14     m_electronSFToolTrigger->initialize();
15     //...
16     //для реконструкции
17     m_electronSFToolReco = new CP::MuonEfficiencyScaleFactors("Reco_SF");
18     m_electronSFToolReco->setProperty("WorkingPoint", "HighPt");
19     m_electronSFToolReco->initialize();
20     //...
21     //вычисление
22     //...
23     if(isMC){
24         // Trigger
25         m_electronSFToolTrigger->getTriggerScaleFactor(**muItr,weightTrigSF)
26         // Iso
27         m_muonSFToolIso->getEfficiencyScaleFactor(**muItr,weightIsoSF)
28         // Reco
29         m_electronSFToolReco->getEfficiencyScaleFactor(**muItr,weightRecoSF)
30     }
31     //...
```
