

Работа 4. Принципы анализа физических событий в эксперименте ATLAS

Цель – знакомство с основами анализа реальных физических событий в эксперименте ATLAS с помощью специальной демонстрационной программы.

Введение

Данная работа посвящена восстановлению масс бозонов по продуктам их распадов с помощью программы визуализации событий в эксперименте ATLAS на LHC. В работе будут рассмотрены распады $W \rightarrow e\nu$, $W \rightarrow \mu\nu$, $Z \rightarrow e^+e^-$, $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ и $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$, и для каждого канала будет определена масса родительской частицы. В качестве контрольного задания предлагается идентифицировать распады заранее неизвестных бозонов.

ATLAS – многоцелевой детектор физики высоких энергий, который включает в себя детектирование, измерение и идентификацию как заряженных, так и нейтральных частиц, рождённых при столкновении пучков протонов на ускорителе LHC. ATLAS состоит из четырёх взаимодополняющих детекторов. Наиболее близко к оси пучков расположен трековый детектор, предназначенный для точного восстановления треков частиц, измерения импульса и знака заряда, а также измерения параметров вершин взаимодействий. За трековым (внутренним) детектором расположены электромагнитный и адронный калориметры, которые измеряют позицию и энергию частиц, взаимодействующих с веществом калориметров. Наконец, на наибольшем удалении от оси пучков расположен мюонный спектрометр, реконструирующий треки мюонов и измеряющий их импульс.

В простейшем случае частицу можно идентифицировать по её следу в различных детекторах. Так, на рис. 4.1 показаны следы (сигнатуры) разных частиц в перечисленных выше детекторах ATLAS. Пунктирной линией показаны сегменты трека частиц, когда она «невидима» для конкретного детектора. Например, заряженные частицы, такие как электроны, регистрируются как в трековом детекторе, так и в электромагнитном калориметре. Треки же нейтральных частиц, таких как нейтронов и фотонов, невозможно наблюдать в трековом детекторе — эти частицы регистрируют только благодаря их взаимодействию с веществом калориметров. Фотоны идентифицируют по энергии ливня в электромагнитном калориметре, а нейтроны — в адронном. Нейтрино невозможно напрямую наблюдать ни в одном из детекторов, а мюоны наблюдаются в каждом детекторе.

Таким образом, если частица, например, оставила след только в электромагнитном калориметре, то можно с уверенностью сказать, что это фотон. Если след также виден и в трековом детекторе, то это был электрон или позитрон. Если след есть в мюонной системе, то это может быть только мюон, и так далее.

Распады всех бозонов, о которых будет идти речь в этой работе, можно разделить на два вида: распады нейтрального бозона на пару заряженных лептонов ($Z \rightarrow e^+e^-$ или $Z \rightarrow$

$\mu^+ \mu^-$) и распады заряженного бозона на заряженный лептон и нейтрино ($W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$). Первый тип распадов идентифицируется по наличию двух треков и по их инвариантной массе, которая должна совпадать с массой Z бозона. Второй тип характеризуется высокой недостающей поперечной энергией E_T^{miss} , что будет свидетельствовать о наличии в событии нейтрино, а также инвариантной массой заряженного лептона и нейтрино, которая должна совпадать с массой W-бозона.

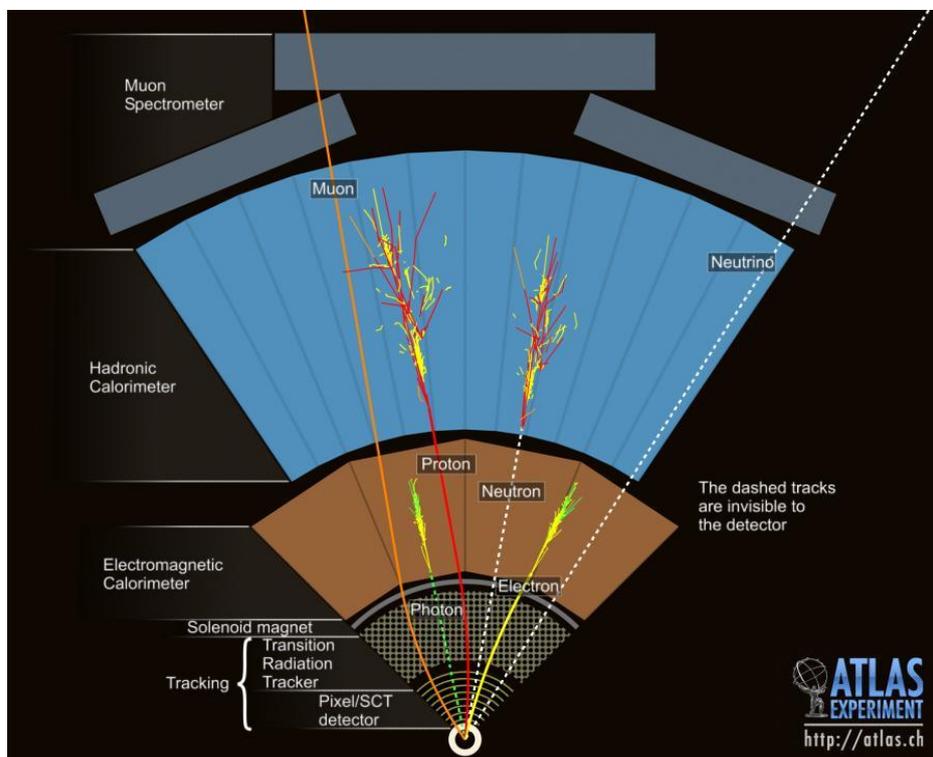


Рис. 4.1. Следы, оставляемые различными частицами в детекторах ATLAS.

Для визуализации треков и вычисления недостающей энергии и инвариантной массы в данной работе используется программа HYPATIA 7.4 (Hybrid pupil's analysis tool for interactions in ATLAS). Для её запуска кликните по её иконке на рабочем столе. Программа состоит из четырёх окон:

- окно инвариантных масс для выбранной комбинации частиц (рис. 4.2),
- окно импульсов частиц (показывает знак заряда, полный импульс P , поперечный импульс p_T , азимутальный угол ϕ и полярный угол θ для каждого трека в событии; также в данном окне приводится значение вычисленной недостающей поперечной энергии E_T^{miss} в событии) (рис. 4.3),
- окно, в котором собственно прорисовываются треки и элементы детектора с различных ракурсов (рис. 4.4),
- окно управления, в котором можно задавать, какие данные будут прорисовываться и с какими ограничениями (рис. 4.5). Также здесь можно включать и выключать показ различных элементов детектора и управлять функциями курсора.

File Name	ETMis [GeV]	Track	P [GeV]	+/-	Pt [GeV]	φ	η	M(2) [GeV]	M(eeee) [GeV]	M(eemm) [GeV]	M(mmmm) [GeV]	elm/g
JiveXML_166466_26885689.xml	0,755	Tracks 0	214,9	+	38,7	0,626	-2,398	88,202				m
		Tracks 1	69,1	-	36,7	2,475	-1,247					m

Рис. 4.2. Окно инвариантных масс.

Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	φ	θ
Tracks 0	+	214,85	38,74	-0,626	2,960
Tracks 1	-	69,11	36,68	2,475	2,582
Tracks 2	-	8,52	3,72	-2,283	0,452
Tracks 6	+	5,23	1,30	1,081	0,252
Tracks 7	-	1,57	1,47	1,478	1,923

Рис. 4.3. Окно импульсов частиц.

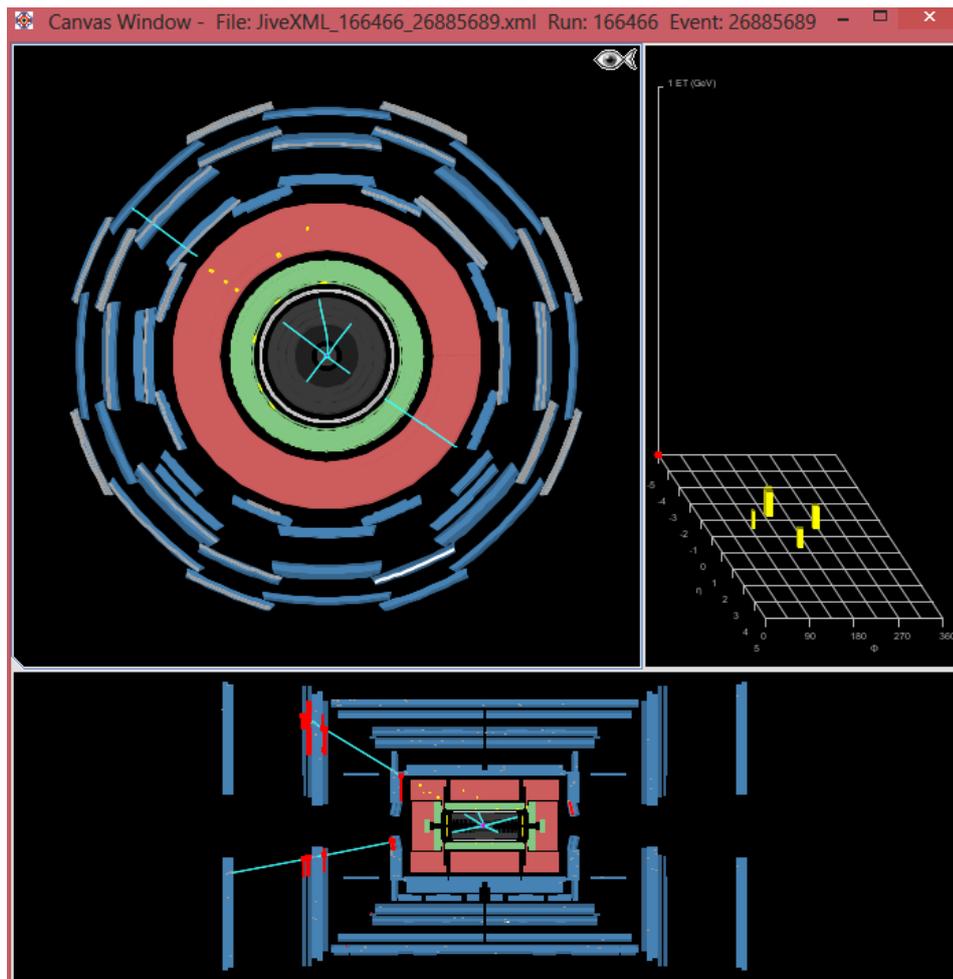


Рис. 4.4. Окно прорисовки.

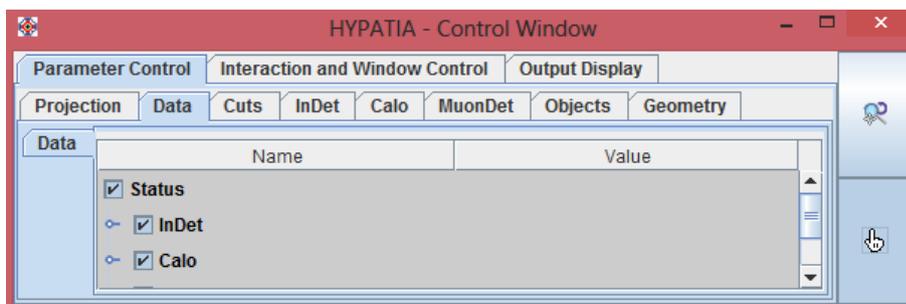


Рис. 4.5. Окно управления.

В окне инвариантных масс (рис. 4.2) вычисляются необходимые для выполнения этой работы значения $M(2)$, $M(eeee)$, $M(eemm)$ и $M(mmmm)$. Первая величина – инвариантная масса частицы, распадающейся на два заряженных лептона, а остальные – массы частицы, распадающейся на четыре заряженных лептона по каналам $X \rightarrow e^+e^-e^+e^-$, $X \rightarrow e^+e^-\mu\bar{\mu}$ и $X \rightarrow \mu\bar{\mu}\mu\bar{\mu}$ соответственно. Для вычисления одной из этих величин необходимо выбрать трек в окне импульсов частиц (рис. 4.3) (или выбрать его в окне прорисовки (рис. 4.4), заранее переключившись в режим выбора объектов, нажав на

пиктограмму  в окне управления (рис. 4.5)) и добавить его в окно инвариантных масс,

нажав на кнопку  для добавления электрона или позитрона или же  для добавления мюона или антимюона. При добавлении двух частиц вычисляется только $M(2)$, четырёх – $M(eeee)$, $M(eemm)$ или $M(mmmm)$ в зависимости от того, какие частицы были добавлены. Инвариантная масса заряженной частицы, распадающейся на заряженный лептон и нейтрино, вычисляется по поперечному импульсу заряженного лептона и недостающей в событии поперечной энергии. Для этого необходимо в окно инвариантных масс добавить одну заряженную частицу (мюон/антимюон/электрон/позитрон) и открыть гистограмму $M(1)$ в меню Histograms окна инвариантных масс: вхождение в гистограмму покажет величину инвариантной массы такой частицы.

В окне прорисовки (рис. 4.4) изображены части детектора, восстановленные треки, энерговыделения в калориметрах и отдельные хиты. При использовании стандартной цветовой схемы оттенками серого обозначен трековый детектор, зелёным – электромагнитный калориметр, тёмно-красным – адронный калориметр, синим – элементы мюонной системы. Треки частиц обозначены синими прямыми, энерговыделения в калориметрах – жёлтым, хиты в мюонном спектрометре – красным, направление недостающей энергии – красным пунктиром. Для приближения к центру детектора потяните мышкой с нажатой левой кнопкой от центра детектора, для отдаления – потяните

к центру. Для увеличения какой-либо области нажмите на пиктограмму  на вкладке Interaction and Window Control окна управления, затем перейдите в окно прорисовки, выберите интересующую вас прямоугольную область левой кнопкой мыши, и кликните на Zoom в появившемся контекстном меню. Чтобы вернуть окно в стандартный вид, необходимо кликнуть правой кнопкой мыши в любой точке выбранного прямоугольника и выбрать Unzoom Full в контекстном меню.

Задание 1

Идентификация распадов $W \rightarrow e\nu$

1. Загрузите в HYPATIA первый по алфавиту файл с расширением xml из папки /home/user1/Yandex.Disk/Laba4/events/Wenu. В этой папке находятся 5 файлов, в каждом – по одному событию с распадом W -бозона.
2. Для каждого из пяти событий (переход на следующее событие из следующего по алфавиту файла осуществляется кнопкой ) по гистограмме $M(1)$ определите, какой из заряженных лептонов в событии родился в результате распада W -бозона, и запишите величину поперечной массы W -бозона, а также p_T родившегося лептона и значение E_T^{miss} в событии. Перед переходом к следующему событию удаляйте все треки из окна инвариантных масс. Заполните следующую таблицу:

№ события	Лептон (e^+/e^-)	p_T лептона	$M(1)$	E_T^{miss}

Задание 2

Идентификация распадов $W \rightarrow \mu\nu$

1. Загрузите в HYPATIA первый по алфавиту файл с расширением xml из папки /home/user1/Yandex.Disk/Laba4/events/Wmunu. В этой папке находятся 5 файлов, в каждом – по одному событию с распадом W -бозона.
2. Для каждого из пяти событий по гистограмме $M(1)$ определите, какой из мюонов (или антимюонов) в событии родился в результате распада W -бозона, и запишите величину поперечной массы W -бозона, а также p_T родившегося мюона (антимюона) и значение E_T^{miss} в событии. Перед переходом к следующему событию удаляйте все треки из окна инвариантных масс. Заполните следующую таблицу:

№ события	Лептон ($\mu/\bar{\mu}$)	p_T лептона	$M(1)$	E_T^{miss}

3. На основании данных в столбцах M(1) таблиц из заданий 1 и 2 оцените среднюю массу W-бозона. Объясните, почему результат не сходится с табличной массой $M_W=80.4$ ГэВ.

Задание 3

Идентификация распадов $Z \rightarrow ee$

1. Начните новую сессию HYPATIA (выйдите из программы и зайдите в неё).
2. Загрузите в HYPATIA первый по алфавиту файл с расширением xml из папки /home/user1/Yandex.Disk/Laba4/events/Zee. В этой папке находятся 5 файлов, в каждом – по одному событию с распадом Z-бозона. При переходе к следующему событию не удаляйте треки из окна инвариантных масс – масса Z-бозона записывается в столбец M(2) [GeV] окна инвариантных масс и одновременно в гистограмму M(ee) Histogram. Заполните следующую таблицу:

№ события	pt электрона	pt позитрона	Mz

3. Для каждого из пяти событий по величине M(2) определите, какие заряженные частицы в событии родились в результате распада Z-бозона, и запишите величину инвариантной массы Z-бозона, а также pt родившихся электрона и позитрона.

Задание 4

Идентификация распадов $Z \rightarrow \mu\bar{\mu}$

1. Загрузите в HYPATIA первый по алфавиту файл с расширением xml из папки /home/user1/Yandex.Disk/Laba4/events/Zmumu. В этой папке находятся 5 файлов, в каждом – по одному событию с распадом Z-бозона.
2. Для каждого из пяти событий по величине M(2) определите, какие заряженные частицы в событии родились в результате распада Z-бозона, и запишите величину инвариантной массы Z-бозона, а также pt родившихся мюона и антимюона. При переходе к следующему событию не удаляйте треки из окна инвариантных масс – масса Z-бозона записывается в столбец M(2) [GeV] окна инвариантных масс и одновременно в гистограмму M(mm) Histogram. Заполните следующую таблицу:

№ события	pt мюона	pt антимюона	Mz

- Сравните значения E_T^{miss} в событиях из заданий 3 и 4 со значениями из двух первых заданий.
- Сейчас в гистограмме $M(2)$ должны содержаться восстановленные массы десяти Z-бозонов из заданий 3 и 4. Оцените среднюю массу Z-бозона. Объясните, почему результат не сходится с табличной массой $M_Z=91.2$ ГэВ.

Задание 5

Идентификация распадов $H \rightarrow eeee$, $H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$, $H \rightarrow ee\mu\mu$

- Загрузите в HYPATIA первый по алфавиту файл с расширением xml из папки /home/user1/Yandex.Disk/Laba4/events/Higgs. В этой папке находятся 5 файлов, в каждом – по одному событию с распадом Хиггс-бозона.
- Для каждого из этих событий по величинам $M(eeee)$, $M(ee\mu\mu)$ или $M(\mu\mu\mu\mu)$ определите, по какому из трёх каналов распался бозон Хиггса, и запишите получившиеся значения его инвариантной массы.

№ события	Канал распада	M_H

Задание 6

Идентификация контрольных распадов

- Начните новую сессию HYPATIA (выйдите из программы и зайдите в неё).
- Загрузите в HYPATIA первый по алфавиту файл с расширением xml из одной из папок groupA, groupB, groupC или groupD (преподаватель назначает по одной папке с файлами каждой группе студентов), находящихся в папке /home/user1/Yandex.Disk/Laba4/events/. В каждой из этих четырёх папок находится по 50 файлов, в каждом – распад заранее неизвестного бозона.
- По наличию и свойствам финальных частиц, а также недостающей в событии поперечной энергии идентифицируйте все распады (в некоторых событиях может не быть ни одного распада бозона – это фоновые события). Используя результаты всех

предыдущих заданий, вы можете сразу ставить ограничения снизу на поперечные импульсы лептонов и на величины E_T^{miss} . Заполните следующую таблицу:

№ файла	Характеристики заряженного(-ых) лептона(-ов), на которые распался бозон: тип (e^\pm/μ^\pm) и p_T , ГэВ	Величина недостающей в событии поперечной энергии, ГэВ	Распавшийся бозон (W/Z/H) и канал его распада	Инвариантная масса бозона (M(1)/M(2)/M(eeee)/M(eemm)/M(mmmm)), ГэВ
1.				
2.				
3.				
...				
50.				

4. После того, как все бозоны идентифицированы, откройте по очереди гистограммы, содержащие величины инвариантной массы Z-бозона: M(ee) Histogram и M(mm) Histogram в меню Histograms окна инвариантных масс. Отличаются ли средние и ширины двух набранных спектров масс? Почему?

Контрольные вопросы

1. Если наблюдается ливень в адронном калориметре, причём трековый детектор не восстановил соответствующий этому ливню трек, то какая это была частица?
2. Как можно измерить массу частицы, если она практически мгновенно распадается?
3. Дайте определение понятию недостающей энергии. Как оно связано с наличием нейтрино?
4. На основании анализа распадов $W \rightarrow e\nu$ и $W \rightarrow \mu\nu$ определите минимальную величину недостающей поперечной энергии, которая свидетельствует о наличии в событии нейтрино.
5. Пользуясь полученными в шестом задании данными, вычислите средние инвариантные массы W, Z и H-бозонов и их статистические погрешности.