

Московский ордена Трудового Красного Знамени физико-
технический институт (государственный университет)
Факультет общей и прикладной физики
Кафедра физики взаимодействия частиц высоких энергий

Объединенный институт ядерных исследований
Учебно-научный центр

Оргаев А.А., 724 группа

Изучение мюонных пар в эксперименте ATLAS

**Выпускная квалификационная работа на соискание степени
бакалавра по направлению «Прикладные математика и физика».**

*Научный руководитель
к.ф.-м.н. ШЕЛКОВ Г. А.*

Дубна, июнь 2011 г.

Структура

1. Введение.
2. Цель работы.
3. Средства и методы выполнения.
4. Полученные результаты.
5. Заключение.
6. Личный вклад в работу.
7. Литература.

Введение

Мюоны. Мюоны в представлении современной физики элементарных частиц — это нестабильные фундаментальные частицы из класса лептонов, обладающие электрическим зарядом -1 , полуцелым спином ($1/2$) и массой $105,7$ МэВ, что приблизительно в 207 раз превышает массу электрона.

Мюоны открыты американским экспериментатором Карлом Андерсоном в 1936 году по результатам исследования космических лучей, когда им были выявлены частицы, которые, проходя магнитное поле, претерпевали свойственное заряженным частицам отклонение в меньшей степени, чем электроны, но в большей, чем испытываемое протонами. Андерсон допустил предположение, что электрический заряд обнаруженных частиц совпадает с зарядом электрона. Тогда промежуточное отклонение данных частиц объясняется тем, что они обладают массой, заключенной между массами протона и электрона.

Как следствие, обнаруженные частицы получили первоначальное название «мезотроны» (от греческого слова *мезос*, «промежуточный»). В дальнейшем, с обнаружением всё новых частиц с промежуточной массой, было принято объединяющее их название «мезон», а упомянутая частица мезотрон получила новое обозначение « μ -мезон» (от имени двенадцатой буквы греческого алфавита μ «мю»). Однако последующие исследования показали ряд значительных отличий « μ -мезона» от других мезонов, ярчайшее из которых состоит в том, что μ -мезон не принимает участия в сильном взаимодействии. Так « μ -мезоны» прекратили относить к группе мезонов и стали называть современным названием «мюоны».

Мюон является частицей, распад которой происходит по схеме $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ и определяется слабым взаимодействием, что обуславливает весьма большое в масштабах физики элементарных частиц время жизни: $t \approx 2,2 \cdot 10^{-6}$ с. Такое обстоятельство делает мюон удобным инструментом в исследованиях.

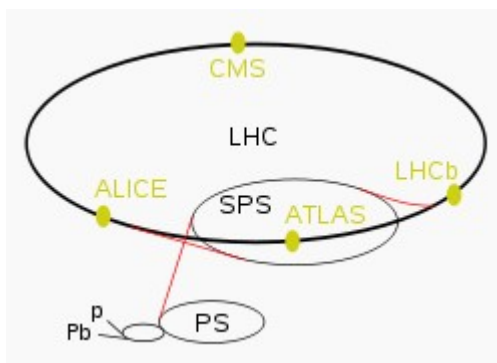


Рисунок 1: Место детектора ATLAS среди установок LHC



Рисунок 2:

Эмблема ATLAS

Детектор ATLAS Большого Адронного Коллайдера. В последние годы эксперименты на Большом Адронном Коллайдере (LHC) занимают всё большую долю среди исследований в области физики частиц высоких энергий. Именно на LHC возлагаются большие надежды на

открытие доселе неизвестных фундаментальных свойств материи и новых частиц, таких, как бозон Хиггса, на восстановление истории и выявление сценария развития

Вселенной и прочие задачи.

LHC включает в себя шесть детекторов частиц различного назначения (ALICE, ATLAS, CMS, TOTEM, LHCb, LHCf). Детектор ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) создавался как детектор общего назначения, на котором изучаются протон-протонные столкновения на энергии 7 ТэВ (14 ТэВ в проекте). Эксперименты на нём являются одними из двух основных международных коллабораций на LHC.

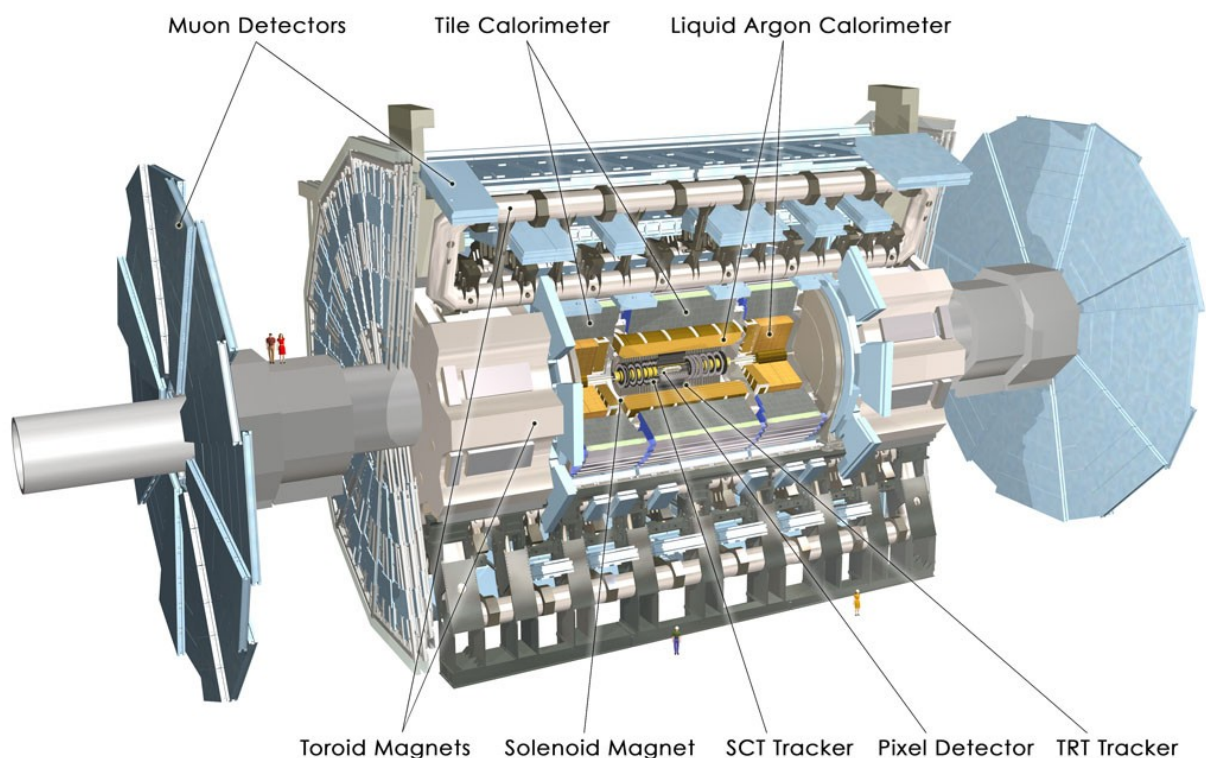


Рисунок 3: ATLAS и его составляющие подсистемы. Фигуры людей слева позволяют судить о его размерах (длина 44 метра, диаметр 27 м)

В рамках данной работы стоит сказать несколько слов о мюонном спектрометре ATLAS. Мюонный спектрометр представлен различными видами камер, предназначенных для того или иного отрезка величин углов отклонения от направления пучка, обеспечивающими прецизионные измерения координат, импульсов и моментов времени мюонов. Задача спектрометра — измерение изгиба траектории мюона, движущегося в магнитном поле. На значении поперечного импульса 1 ТэВ точность измерения должна быть не хуже 50 мкм. Нижняя граница спектра поперечных импульсов мюонов зависит от потерь энергии в калориметрах и составляет несколько ТэВ.

Цель работы

Выполнение представленной мной работы преследовало нижеперечисленные цели:

1. Получение распределения инвариантной массы частиц, распадающихся на пару «мюон-антимюон» ($X \rightarrow \mu^- + \mu^+$), на основе данных детектора ATLAS, с применением пакета библиотек и программ ROOT;
2. Отдельное рассмотрение избранных массовых диапазонов с целью убедиться в корректности выбранного метода обработки данных;
3. Получение оценки импульсного разрешения мюонного спектрометра детектора ATLAS.

Средства и методы выполнения работы

Для достижения поставленных целей мной были использованы:

1. *Измеренные данные мюонного спектрометра ATLAS.*

Данные (результаты реальных измерений мюонных струй на ATLAS в 2010 году, статистика 35 pb^{-1} , периоды с D по I) хранились на диске рабочего компьютера научного руководителя в формате деревьев .root-файлов, сгруппированных по сериям измерений. Доступ к данным и их обработка осуществлялись с рабочего места по протоколу SSH.

2. *Пакет библиотек и программ для объектно-ориентированного анализа данных ROOT.*

Пакет ROOT предназначен для анализа и обработки данных. Для хранения, чтения и изменения данных используется собственный формат файла .root и концепция их организации и представления структурой деревьев. ROOT обладает широким спектром возможностей обработки, предоставляет богатый инструментарий работы с информацией, к примеру, построение всевозможных двумерных и трёхмерных графиков, диаграмм, схем; их интеллектуальный анализ; статистика, и так далее. Прежде использовавшиеся в экспериментальной физике частиц высоких энергий программные пакеты основаны на библиотеках языка FORTRAN более, чем двадцатилетней давности. В ситуации, когда нужды современной физики элементарных частиц диктуют необходимость в обработке и анализе колоссальных объемов данных, свои преимущества демонстрирует объектно-ориентированный подход в программировании. Именно такой подход и реализуется в пакете ROOT. ROOT полностью совместим с языком C++ и включает в себя интерпретатор этого языка (CINT). При выполнении мной настоящей работы использовалась версия 5.26.

3. *Разработанный мной скрипт анализа данных на языке программирования C++ с добавлением внутренних средств ROOT.*

Скомпилированный скрипт получает при вызове имя файла, в котором

перечисляются пути ко всем используемым .root-файлам. Далее происходит их объединение в единое дерево данных, из него считаются необходимые величины, записанные в виде векторов C++ (количество мюонов в событии, их заряды, импульсы и кинетические энергии). Поскольку нас интересуют только пары «мюон-антимюон», проходят отбор те события, в которых количество мюонов равняется двум, а произведение зарядов этих двух мюонов составляет -1.

Инвариантная масса рассчитывается из закона сохранения 4-импульса с применением соотношения специальной теории относительности:

$$m^2 = (K_1 + K_2 + 2m_\mu)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2.$$

Рассчитанная масса проверяется на нахождение в четырех избранных диапазонах, которые объясняются ниже и отправляется на заполнение гистограмм, которые выводятся на экран и сохраняются в файлы .root.

Был выбран сводный диапазон масс от 0 до 100 ГэВ и три «локальных» диапазона: 0 — 5, 7 — 12, 70 — 110 ГэВ. Такой выбор объясняется тем, что именно в последних заключены пики распределения инвариантной массы трёх известных частиц: J/ψ -мезона, Υ -мезона и Z^0 -бозона.

J/ψ -мезон представляет собой первое возбужденное состояние чармония — связанного состояния с-кварка и с-антикварка. Масса 3,096 ГэВ. [1] Примечательной чертой J/ψ мезона является его чрезвычайно малая ширина распада, составляющая около 90 кэВ по расчётам. Это необычное свойство объясняется правилом Окуба-Цвейга-Иидзуки, согласно которому подавлению в наибольшей степени подвергаются те процессы с соответствующими им кварковыми диаграммами, где линии кварков и антикварков, выходящих из одного адрона, соединяясь, образуют собой блок, не связанный с остальной частью диаграммы.

Ширина распада J/ψ мезона настолько мала, что она меньше разрешения по импульсу значительной части существующих на сегодня детекторов. По этой причине выбор J/ψ мезона для расчётов дает возможность судить об измерительных возможностях мюонного спектрометра детектора ATLAS.

Υ -мезон — мезон, состоящий из b-кварка и b-антикварка (представитель группы боттомониев) с массой 9,46 ГэВ. [1]

Z^0 -бозон — один из переносчиков слабого взаимодействия, наряду с W^\pm -бозонами. В отличие от глюона и фотона, Z^0 -бозон обладает ненулевой массой 91,19 ГэВ. [1]

Полученные результаты

Переходим непосредственно к измеренным распределениям инвариантной массы.

Common

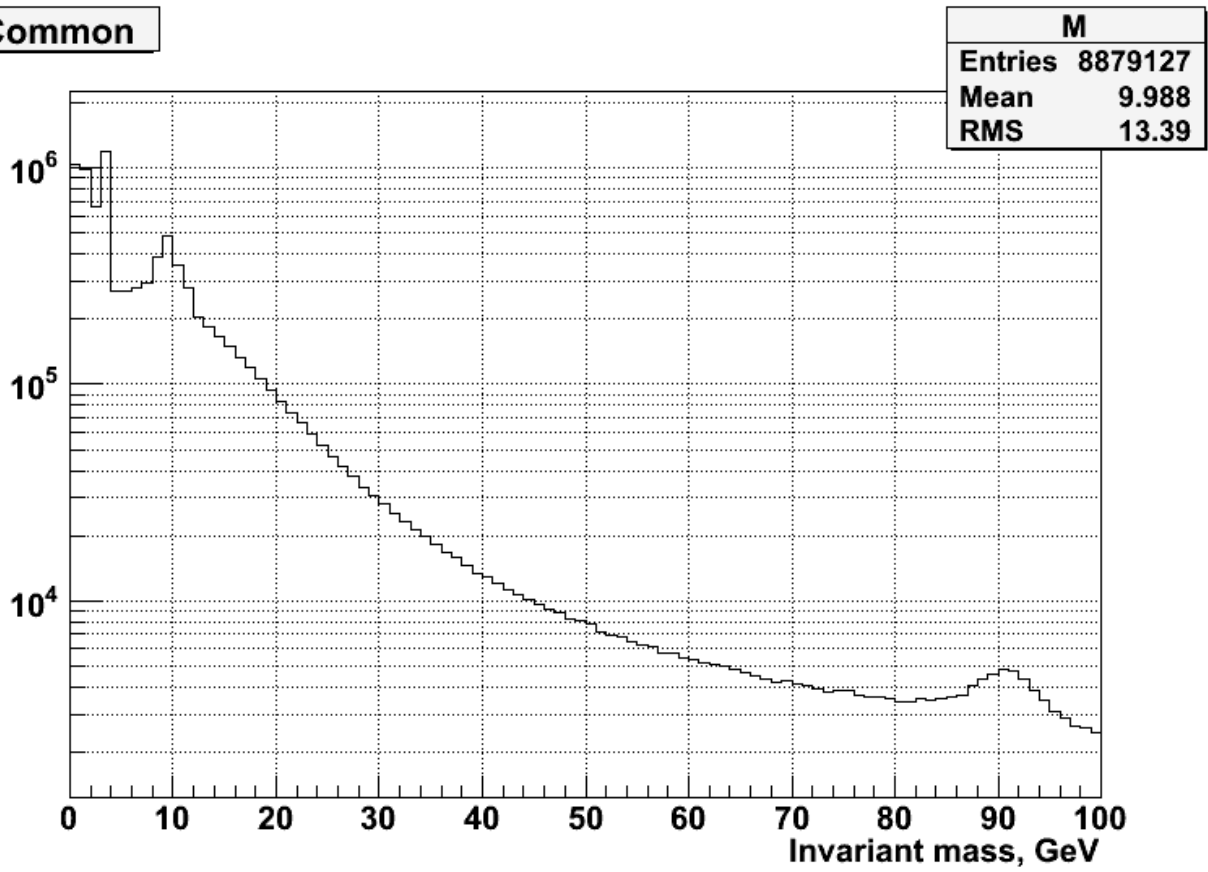


Рисунок 4: Сводное распределение масс. Отмечаются все три пика частиц контрольной группы (J/ψ -мезона, Υ -мезона и Z^0 -бозона)

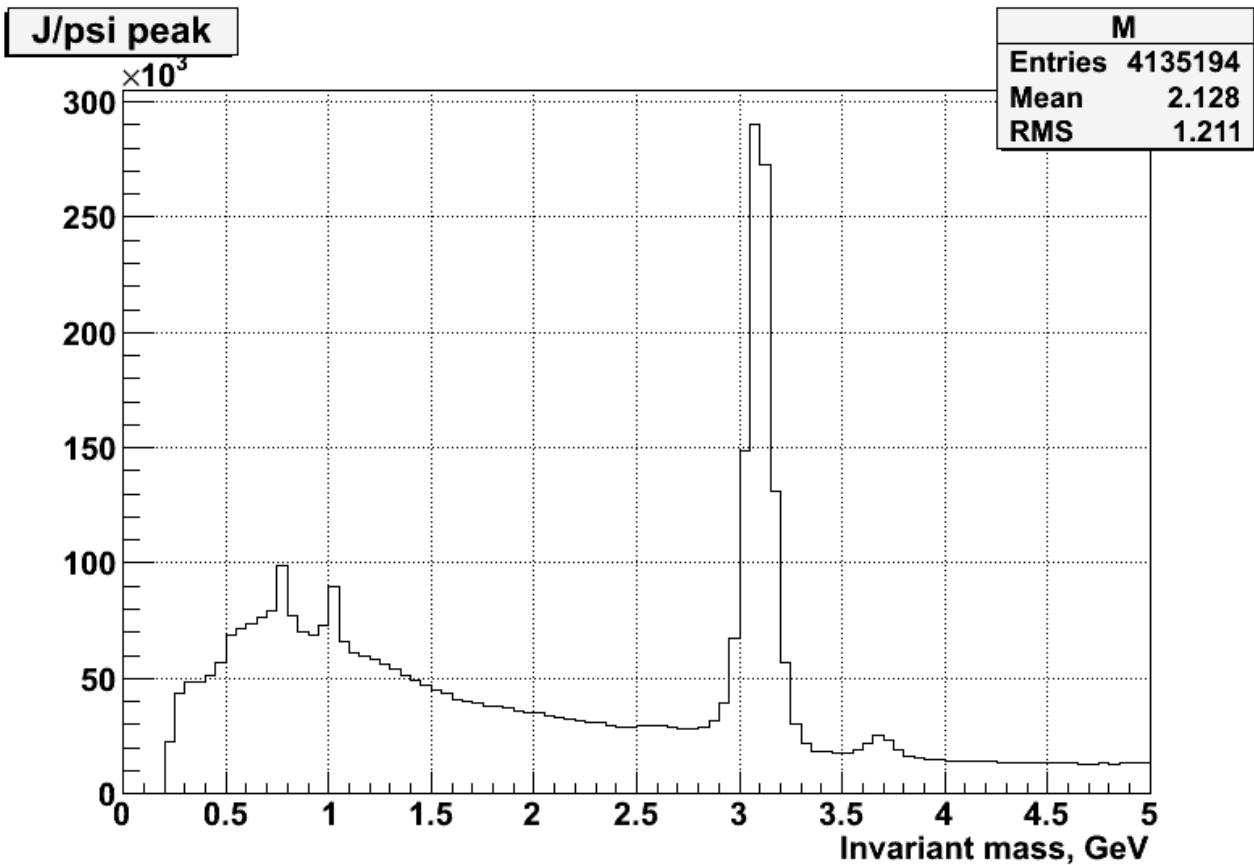


Рисунок 5: Пик инвариантной массы J/ψ-мезона.

Как уже упоминалось, реальная ширина линии J/ψ-мезона чрезвычайно мала (≈ 90 кэВ), что даёт возможность оценить импульсное разрешение мюонного спектрометра ATLAS.

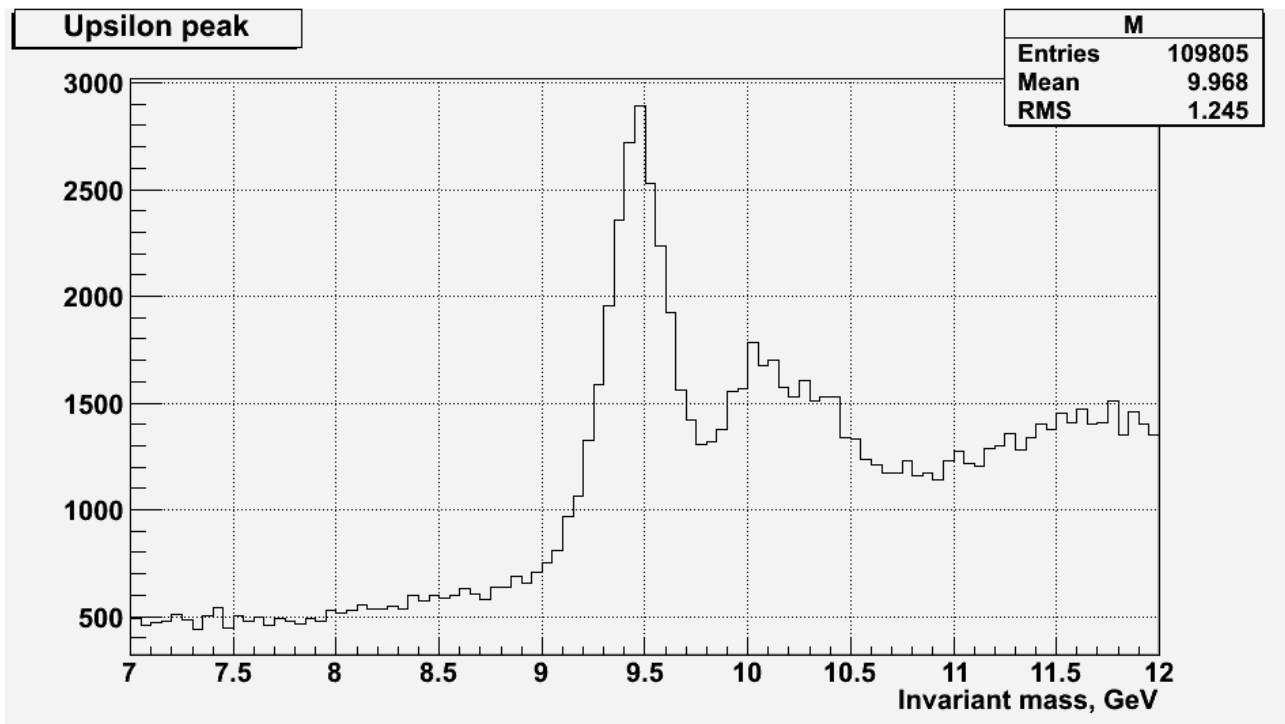


Рисунок 6: Пик инвариантной массы Υ -мезона (с учётом влияния триггерной системы ATLAS)

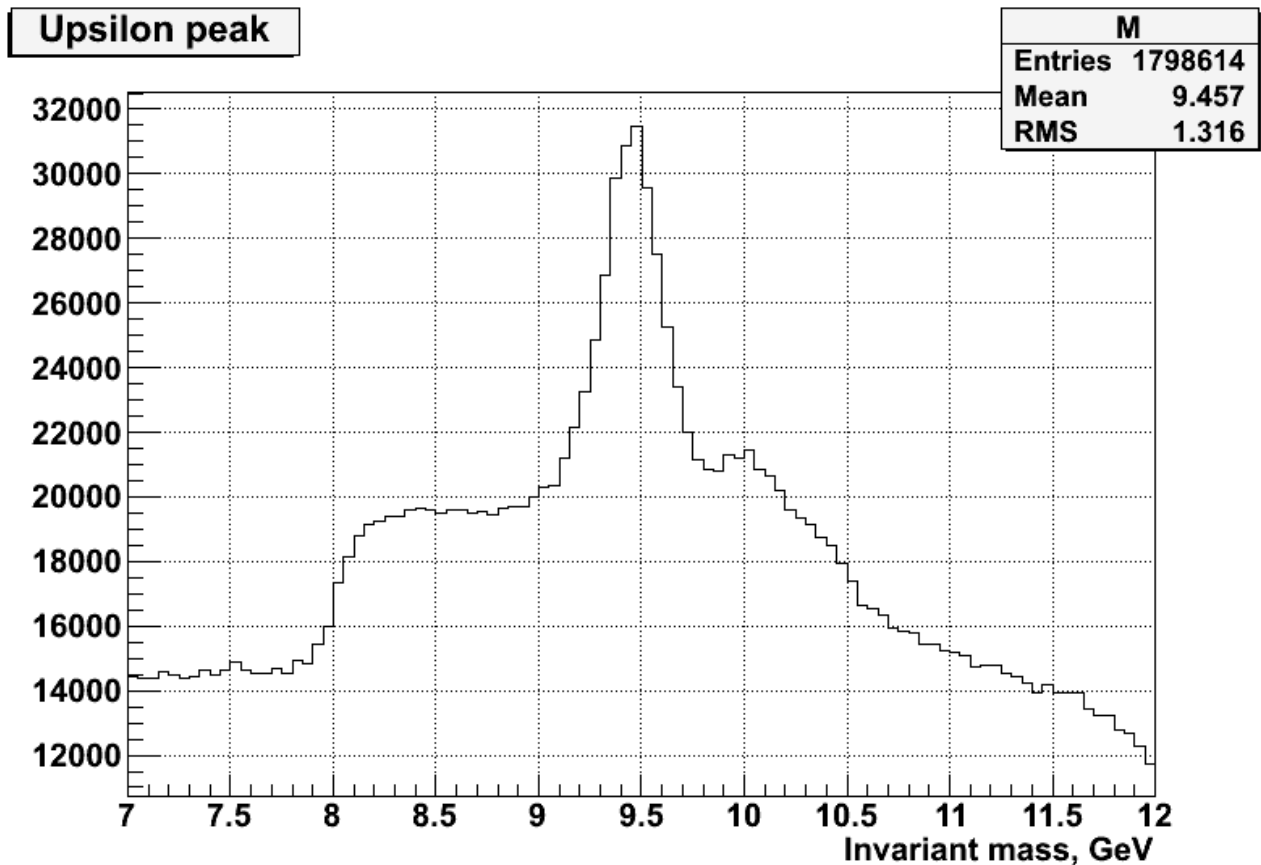


Рисунок 7: Та же картина без учёта триггера.

Неучёт влияния триггера приводит к картине, представленной на рисунке 7. Здесь соседний пик сильно размазан, а на более высоких массах имеет место крутой спуск. Слева от пика Υ -бозона наблюдается плечеобразное возвышение.

Учёт этого влияния реализован добавлением дополнительного условия отбора событий - поперечный импульс мюонов должен превышать 5 ГэВ.

Такое изменение практически не сказалось на виде двух других локальных распределений.

Z0 peak

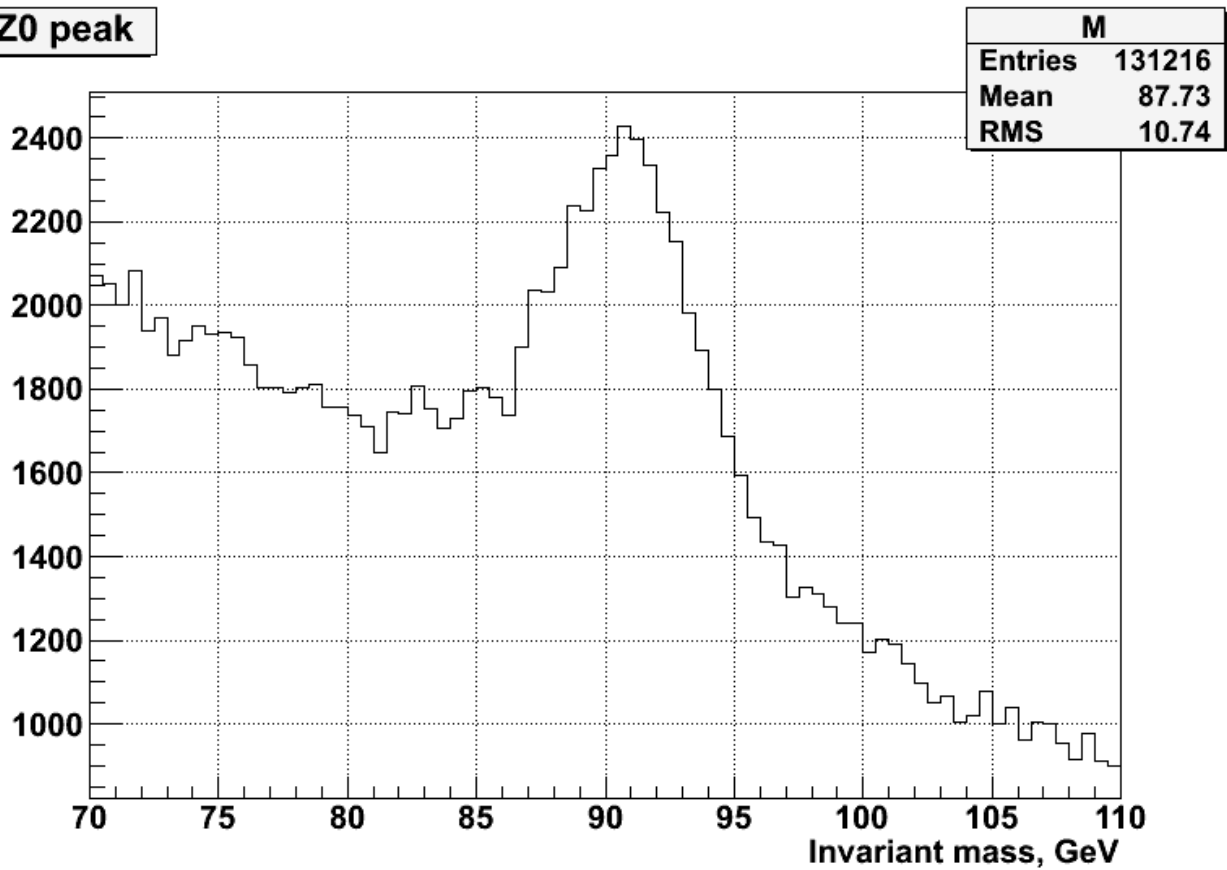


Рисунок 8: Пик инвариантной массы Z^0 -бозона

По всем .root-файлам в целом приблизительно 18,1 млн. событий, из них событий с двумя мюонами противоположного заряда 8,9 млн.

Итак, по вычисленным распределениям определяются массы 3,1; 9,5; 91 ГэВ. Сравнивая их с приводимыми в сборнике Particle Data Group значениями, видим, что программа обработки даёт верное распределение массы.

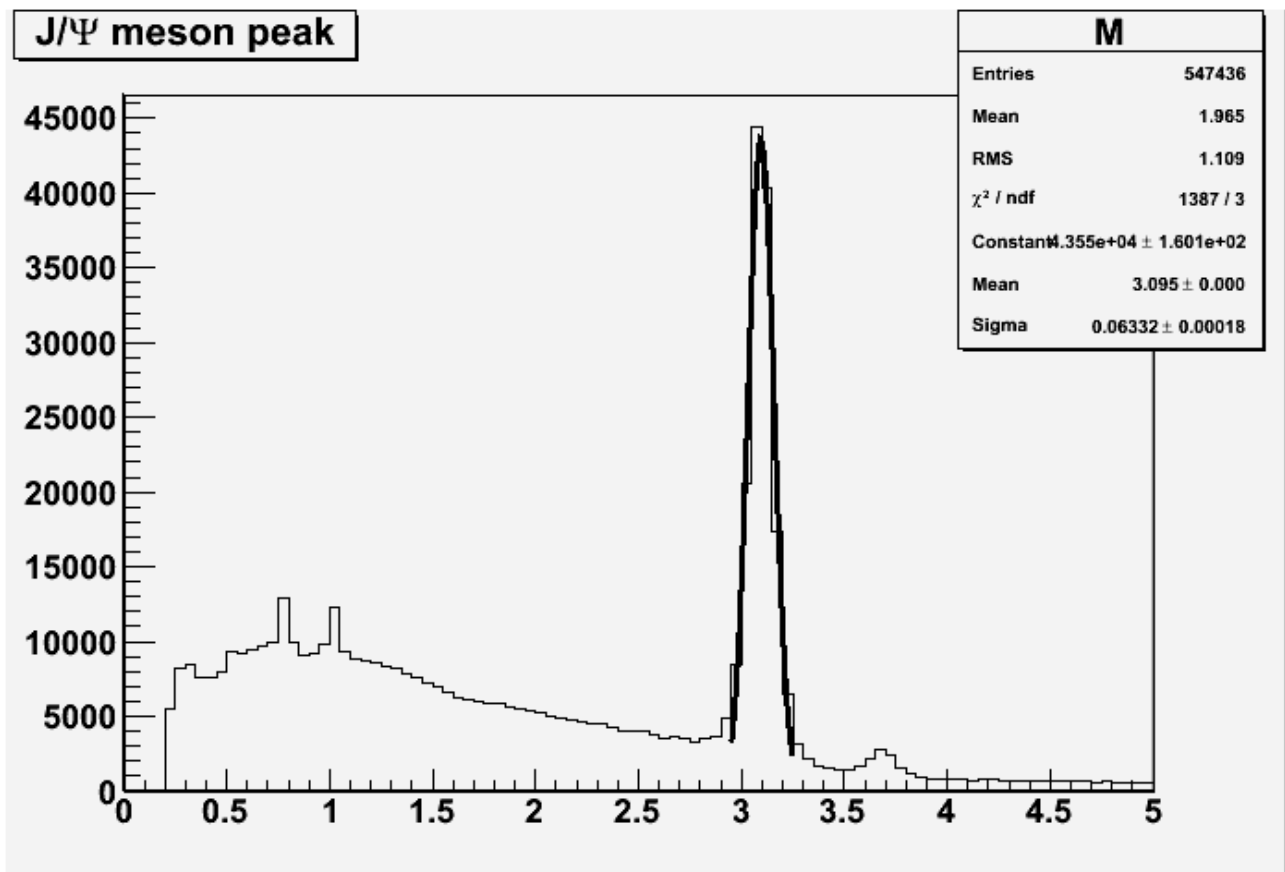
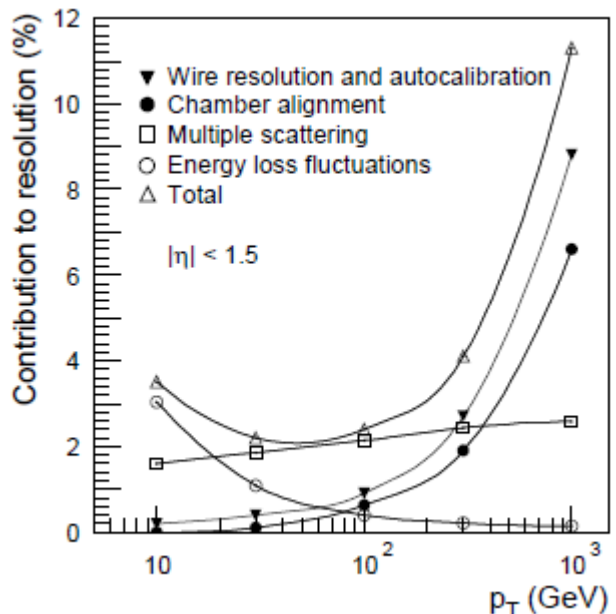


Рисунок 9: Фитированный пик J/ψ -мезона.

Фитируя пик J/ψ -мезона нормальным распределением в границах пика, устанавливаю значение его массы (3,095 ГэВ, как отражено на рисунке 9), и ширины линии (удвоенное среднеквадратичное отклонение, 0,126 ГэВ). Отображение ошибки среднего значения массы как нулевой может быть объяснено её весьма малой величиной. Для сравнения: Particle Data Group [1] приводит значение массы J/ψ -мезона, равное $3096,916 \pm 0,011$ МэВ. Кроме того, вычисляемое при фитировании среднее значение несколько зависит от выбора границ пика, что определяется фактически на глаз.

Определяя отношение ширины линии J/ψ -мезона к массе с множителем $\sqrt{2}$ (учет парности мюонов), я получил 2,8%. Принимая во внимание материал доклада [2], где приводится зависимость поперечного импульсного разрешения, обусловленного различными причинами, и экстраполируя её влево, видим, что и поперечное импульсное разрешение имеет приблизительно то же значение в диапазоне до 10 ГэВ.



Личный вклад в работу

Мной целиком осуществлена разработка, написание и отладка программы обработки данных, построены гистограммы распределений масс, дана интерпретация полученных результатов.

Заключение

На основе данных детектора ATLAS по мюонам мной построено распределение масс частиц в распадах на мюон и антимюон. Сделаны измерения масс частиц контрольной группы по построенному распределению, значения которых согласуются со справочными данными по этим частицам, что говорит о корректной обработке данных. Получена оценка импульсного разрешения мюонного спектрометра ATLAS. Я получил ценный опыт работы с пакетом ROOT.

Литература

1. Particle Data Group <http://pdg.lbl.gov/>
2. The Muon Spectrometer of the ATLAS Experiment. Sandro Palestini. ATL-COM-MUON-2003-005