

Лабораторная работа №9

Рождение и распад Z -бозонов

Целью настоящей работы является изучение процессов взаимодействия элементарных частиц при высоких энергиях. Изучение таких процессов является основой физической программы современных ускорителей. В работе используется компьютерное моделирование регистрации продуктов протон-протонных столкновений при энергиях, соответствующих энергиям коллайдера LHC. Исследуются процессы рождения Z -бозонов и их последующие распады.

1. Большой адронный коллайдер (LHC) и детектор ATLAS.
2. Фундаментальные частицы и фундаментальные взаимодействия.
3. Рождение W - и Z -бозонов.
4. Распады промежуточных бозонов. Определение массы Z -бозона.
5. Краткие сведения об используемых программных продуктах.
6. Порядок выполнения работы.
7. Контрольные вопросы и задачи.

1. Большой адронный коллайдер (LHC) и детектор ATLAS

Основная задача физики высоких энергий — изучение строения материи на экстремально малых расстояниях. Для этого необходимы установки, которые могут создавать интенсивные потоки пробных частиц, обладающих как можно меньшей длиной волны де Бройля. Их взаимодействие с мишенью позволяет наблюдать особенности структуры мишени, размеры которых соизмеримы с длиной волны пробных частиц. Полная энергия частицы E и ее импульс \vec{p} связаны с приведённой длиной волны ($\lambda = \lambda/2\pi$) формулой де Бройля:

$$\lambda = \frac{\hbar}{|\vec{p}|} = \frac{\hbar c}{\sqrt{E^2 - m^2 c^4}} \Rightarrow \{\text{при } E \gg mc^2\} \Rightarrow \frac{\hbar c}{E}, \quad (1)$$

где $\hbar = 6.58 \cdot 10^{-22}$ МэВ·с — постоянная Планка. Из соотношения (1) следует, что чем меньшей длиной волны должна обладать частица, тем до больших импульсов (энергий) необходимо эту частицу ускорить. Для этой цели строят ускорители высоких энергий.

Первые ускорители высоких энергий были созданы в середине 50-х годов практически одновременно в г. Дубне Московской области, вблизи Женевы (Швейцария) и в Брукхевене (США). Основные знания о структуре микромира, об известных в настоящее время фундаментальных частицах (лептоны, кварки, калибровочные бозоны) и взаимодействиях, получены в экспериментах на ускорителях.

Ускорение частиц очень сложный и дорогостоящий процесс. Достичь значительного выигрыша в энергии можно сталкивая между собой два ускоренных пучка частиц. Для этого оба пучка нужно одновременно сфокусировать в малом объеме области соударения и создать столь высокую плотность частиц, чтобы они могли эффективно взаимодействовать. Эти проблемы были успешно решены. Ускорители такого типа были созданы и

получили название ускорителей на встречных пучках или коллайдеров (от английского ‘collide’ — «сталкивать»).

Первые коллайдеры, в которых сталкивались электроны, были запущены в 1965 г. в Институте ядерной физики под Новосибирском и в Стенфордской лаборатории (США). В 1971 г. был построен коллайдер, где сталкивались протоны, а в 1981 г в Европейской организации ядерных исследований (сокращенно CERN) вблизи Женевы был запущен коллайдер, сталкивающий протоны и антипротоны с суммарной энергией 600 ГэВ в системе центра масс (СЦМ) сталкивающихся пучков, В 1985г. в Фермиевской национальной ускорительной лаборатории (FNAL) в США был создан коллайдер протонов и антипротонов с энергией соударения 2 ТэВ в СЦМ (1 ТэВ=10¹² эВ=10³ ГэВ). В таблице 1 приведены характеристики электрон-позитронных коллайдеров, работающих (или работавших) с начала 1970-х годов. В первом столбце указано название коллайдера, во втором — название научного центра или города в котором работает ускоритель, в третьем — годы работы, в четвертом - энергии пучков в ГэВ в СЦМ. В нижней строчке таблицы приведены характеристики единственного в настоящее время электрон-протонного коллайдера.

Характеристики протон-антипротонных коллайдеров приведены в таблице 2. Эксперименты на протон-антипротонном коллайдере CERN привели к открытию в 1983 г. промежуточных *W*- и *Z*-бозонов, являющихся переносчиками слабого взаимодействия. Это открытие удостоено Нобелевской премии по физике за 1984 год. На ускорителе TEVATRON (FNAL) в 1995 г. был открыт *t*-кварк.

Таблица 1

Электрон-позитронные и электрон-протонные коллайдеры

Название коллайдера	Страна, научный центр	Годы работы	Энергия в СЦМ, ГэВ
SPEAR	США, SLAC	1972 – 1990	4 × 4
DORIS	Германия, DESY	1973 – 1993	5,6–5,6
CESR	США, Cornell Univ	1979 – н.вр.	6×6
PETRA	Германия, DESY	1978 – 1986	23.4–23.4
PEP	США, SLAC	1980 – 1990	15×15
BEPS	Пекин	1989 – н.вр.	2.2×2.2
VEPP-4М	Новосибирск, ИЯФ	1994 – н.вр.	6×6
TRISTAN	Япония, КЕК	1987 – 1995	32×32
SLC	США, SLAC	1989 – н.вр.	50×50
LEP-1	Швейцария, CERN	1989 – 1995	50×50
VEP-2М	Новосибирск, ИЯФ	1992 – н.вр.	0.7×0.7
LEP-2	Швейцария, CERN	1996 – н.вр.	100×100
HERA	Германия, DESY	1992 – н.вр.	30(<i>e</i> ⁺ , <i>e</i> ⁻) × 820(<i>p</i>)

Таблица 2

Протон-антипротонные коллайдеры

Название коллайдера	Страна, научный центр	Годы работы	Энергия в СЦМ, ГэВ
SppS	CERN	1981 – 1990	315 × 315
TEVATRON	США, FNAL	1987 – н.вр.	1000 × 1000

Эксперименты на ускорителях дали огромное количество новой информации об элементарных частицах и характере взаимодействий между ними. Эта информация стимулировала попытки теоретического описания электромагнитных, слабых и сильных взаимодействии с единых позиций формализма квантовой теории поля. Современное теоретическое описание взаимодействия элементарных частиц дается Стандартной Моделью (СМ). В настоящее время СМ согласуется со всеми известными экспериментальными данными в области физики высоких энергий. Однако по-прежнему остаются неясными некоторые вопросы, связанные как с обоснованием самой модели так и с фундаментальными вопросами физики микромира. К таким вопросам относятся:

- выяснение механизма возникновения масс элементарных частиц;
- вопрос существования различных поколений фундаментальных фермионов и их числа;
- объяснение различия масс кварков и лептонов;
- вопрос о возможной составной природе кварков и лептонов;
- измерение времени жизни протона;
- проблема нарушения CP -симметрии;
- существование симметрии высших порядков, которые предсказывают существование суперсимметричных частиц;
- наблюдение нового состояния вещества — кварк-глюонной плазмы;
- в последние годы в связи с новыми экспериментальными данными особую остроту приобрела проблема массы нейтрино.

Важность перечисленных выше проблем в изучении микромира обусловило одновременное возникновение в 80-х годах сразу нескольких проектов строительства коллайдеров с энергией соударения, достигающей десятков ТэВ. Однако сложность их реализации привела к тому, что в настоящее время сооружается лишь один такой коллайдер, где будут сталкиваться протоны с суммарной энергией соударения 14 ТэВ в СЦМ. Он носит название «Большой адронный коллайдер» (LHC — Large Hadron Collider) и создается в CERN.

На рис. 1 показана схема ускорительного комплекса CERN. Протоны и ионы через накопительные кольца поступают в протонный синхротрон PS (26 ГэВ), который инжектирует протоны в протонный синхротрон SPS (450 ГэВ). Протоны из SPS будут поступать в тоннель LHC (14 ТэВ), где до настоящего времени ускорялись встречные пучки электронов и позитронов на установке LEP. Пучки LEP и LHC расположены в одном тоннеле,

в разных магнитных системах. Инжектором электронов и позитронов является линейный ускоритель e^+e^- linacs, также показанный на рис. 1.

CERN's Chain of Accelerators

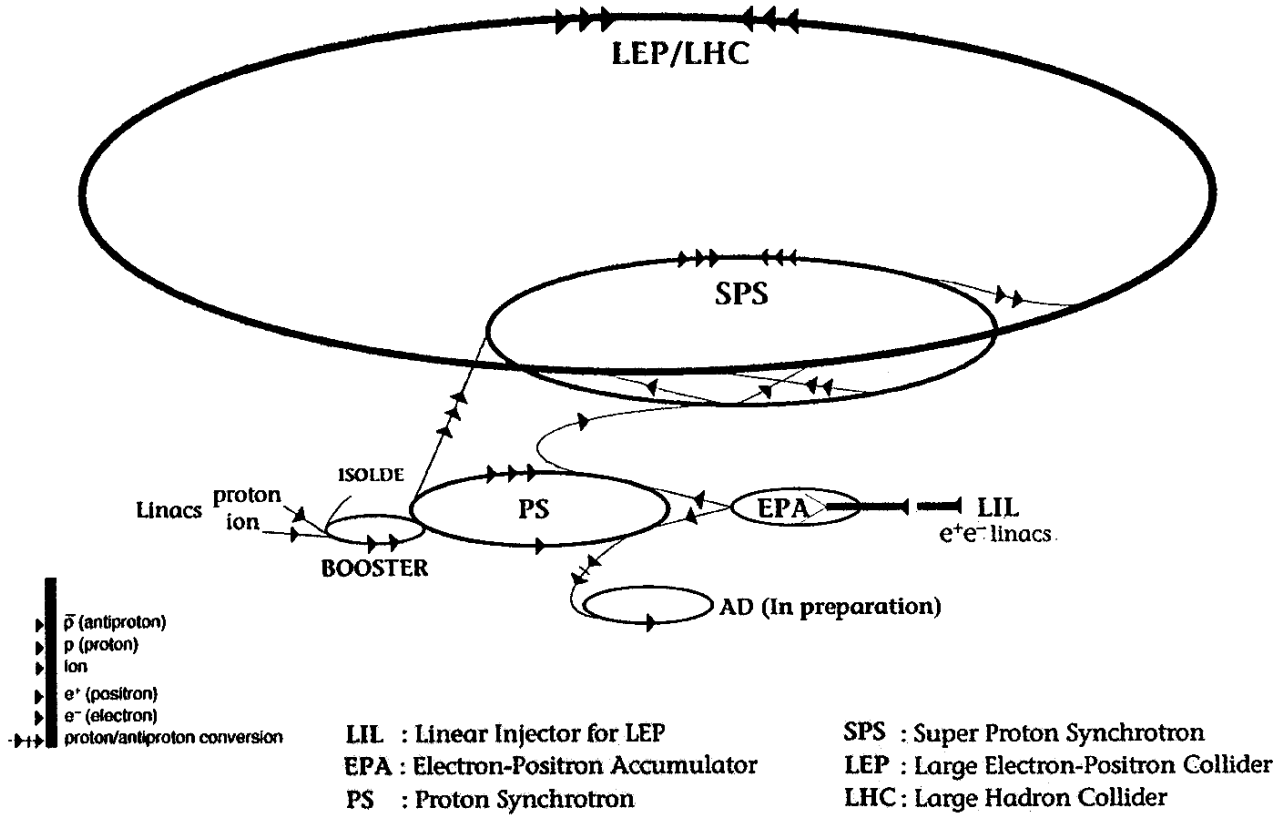


Рис. 1: Схема ускорительного комплекса CERN.

Эффективность получения физической информации с коллайдеров зависит от интенсивности столкновений встречных пучков в области их пересечения. Число столкновений R в секунду определяется произведением сечения взаимодействия пучков σ и светимости коллайдера L

$$R = \sigma L.$$

Светимость L определяется числами частиц N_1 и N_2 в сгустках ускоряемых частиц, числом сгустков в пучках n , а также площадью поперечного сечения пучков S (в предположении, что они полностью перекрываются) и частотой обращения частиц в ускорителе f :

$$L = fnN_1N_2/S$$

Значения светимостей для современных действующих коллайдеров составляют около 10^{31} – 10^{32} $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Планируемая светимость ЛHC составляет 10^{33} $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (режим низкой светимости) — 10^{34} $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (режим высокой светимости).

В 1994 г. комитет ЛHC утвердил два проекта детекторов, предназначенных для работы на новом ускорителе: ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) и CMS (Compact Muon

Solenoid). Оба они были представлены коллективами физиков почти по полторы тысячи человек каждый. Следует заметить, что ныне действующие экспериментальные установки объединяют максимум несколько сотен сотрудников. Общие принципы действия установок ATLAS и CMS совпадают. Они максимально перекрывают пространство вокруг места соударения ускоренных пучков протонов (так называемые 4π -детекторы). Решение строить два детектора для проведения физических исследований обусловлено необходимостью подтверждать каждое открытие независимыми экспериментами. Таким образом, независимо создаваемые установки должны обеспечить надежность получаемых результатов. Каждый детектор имеет свою область пересечения пучков. Всего таких областей на LHC будет четыре. Две из них предназначены для детекторов ATLAS и CMS. Две оставшиеся предназначены для детекторов ALICE (исследование соударений тяжелых ионов, поиск кварк-глюонной плазмы) и LHCb (изучение физики адронов, содержащих b -кварк). Решение об их строительстве было принято несколькими годами позже решения о строительстве установок ATLAS и CMS. Запуск ускорителя LHC и работающих на нем установок планируется осуществить в 2007 г.

Настоящая лабораторная работа посвящена моделированию экспериментов по исследованию характеристик Z -бозона на установке ATLAS. Ниже будет подробно рассказано об устройстве данной установки и физической программе, которую планируется выполнить на этой установке.

Основная задача установки ATLAS заключается в том, чтобы выяснить механизм возникновения масс фундаментальных частиц. Один из наиболее разработанных механизмов связан с предположением существования в природе частиц, называемых *хиггсовскими бозонами*. В настоящее время эти частицы еще не обнаружены экспериментально. В детекторе предусмотрена возможность их регистрации в диапазоне масс от 80 ГэВ до 1 ТэВ. Кроме того, на установке ATLAS предполагается вести поиск суперсимметричных частиц, массы которых предсказаны теоретиками в области до 1 ТэВ, изучать проблему нарушения CP -симметрии и физические свойства тяжелых кварков.

Детекторы, используемые в физике высоких энергий для регистрации частиц, состоят как правило из нескольких структур. Каждая структура рассчитана для регистрации частиц с определенными характеристиками.

Отдельные структуры детектора расположены так, чтобы частицы последовательно проходили через них, оставляя определённую информацию о прошедшей через них частице. На основе этой информации затем восстанавливаются такие характеристики частицы как её тип, энергия, импульс, характеристики распада. Частица детектируется по взаимодействию с веществом детектора или по вторичным продуктам распада. Взаимодействие различных типов частиц с отдельными структурами детектора показано на рис. 2.

Заряженные частицы, такие как протоны, пионы и каоны детектируются трековым детектором, электромагнитным и адронным калориметрами.

Электроны и позитроны детектируются трековым детектором и электромагнитным калориметром.

Нейтральные частицы, такие как нейтроны и фотоны, не детектируются в трековом детекторе. Фотоны детектируются электромагнитным калориметром, а нейтроны определяются по энергии, выделяемой в адронном калориметре.

Так как мюоны имеют максимальный пробег в веществе детектора из всех регистрируемых частиц, для их детектирования обычно используют внешние участки детектора — мюонный детектор.

Нейтрино на рис. 2 не показаны, потому что они имеют малую величину сечения

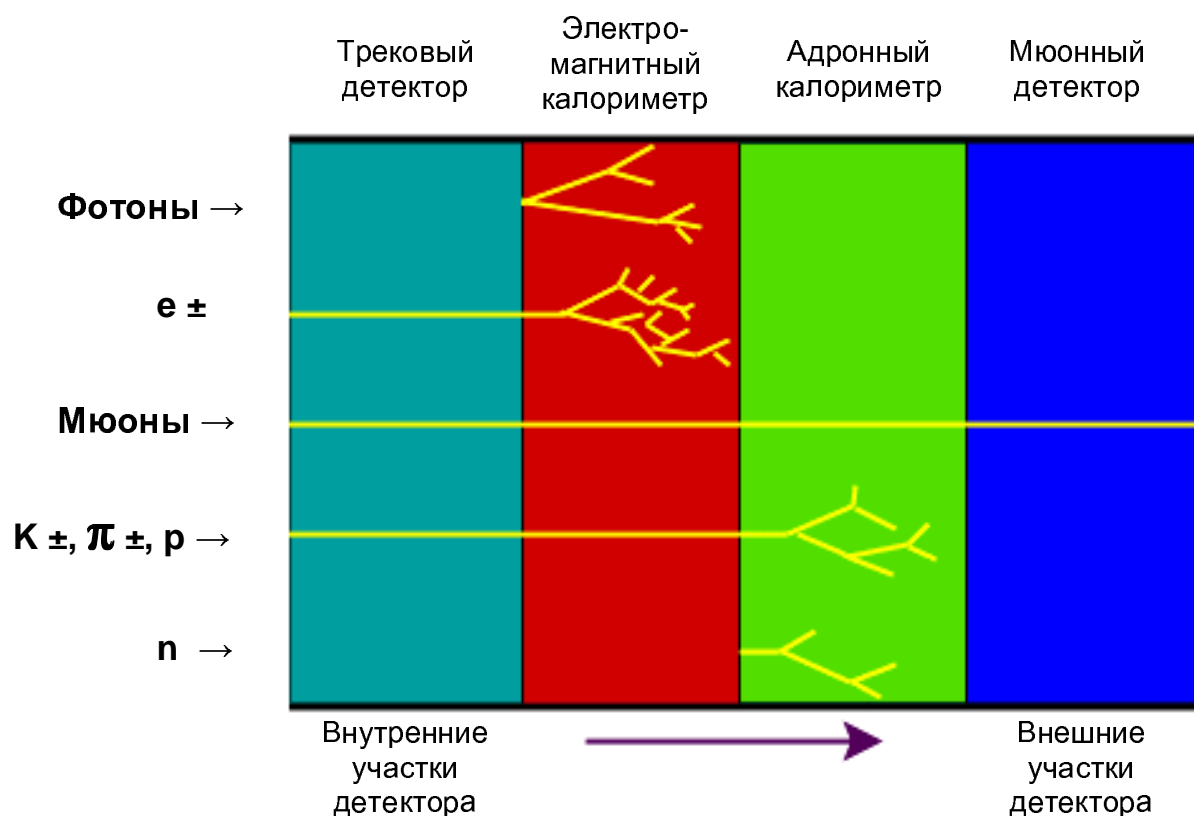


Рис. 2: Взаимодействие различных типов частиц с отдельными структурами детектора

взаимодействия с веществом, и, как правило, выходят из области детектора без взаимодействия.

Многослойная структура детектора позволяет восстановить траекторию частицы и определить точку взаимодействия с точностью несколько микрон.

Таким образом каждый тип частиц имеет свою собственную «подпись» в детекторе. Например, если частица обнаруживается **только** в электромагнитном калориметре то, скорее всего это фотон. Мюон оставляет информацию во всех структурах детектора.

Рассмотрим схему установки ATLAS (рис. 3). Область соударения пучков окружена внутренним детектором (Inner Detector). Его диаметр составляет 2 м, а длина 6,5 м. Он помещен в соленоид, который обеспечивает внутри детектора магнитное поле 2 Т. В магнитном поле треки частиц искривляются в зависимости от знака заряда частицы и ее импульса. Задача детектора - определение точки соударения протонов и траекторий вторичных частиц, которые образуются в результате соударения. Для этого применяются два типа детектирующих устройств: кремниевые детекторы, обеспечивающие точность измерения координаты частицы около 22 микрон, и детектор переходного излучения, состоящий из пропорциональных дрейфовых трубок диаметром 4 мм, между которыми находится вещество радиатора. Детекторы выполнены так, чтобы частицы пересекали их преимущественно перпендикулярно плоскости детектора или оси трубки.

Чтобы выдержать радиационные нагрузки, кремниевые детекторы должны работать при температуре 0 °С, поэтому эта часть трековой системы помещена в криостат. Траектория каждой частицы большой энергии должна иметь 6 прецизионно измеренных точек. Для этого в установке ATLAS используется 1 тысяча кремниевых детекторов.

Дрейфовые трубки повторяют геометрию цилиндра в центральной части, их длина

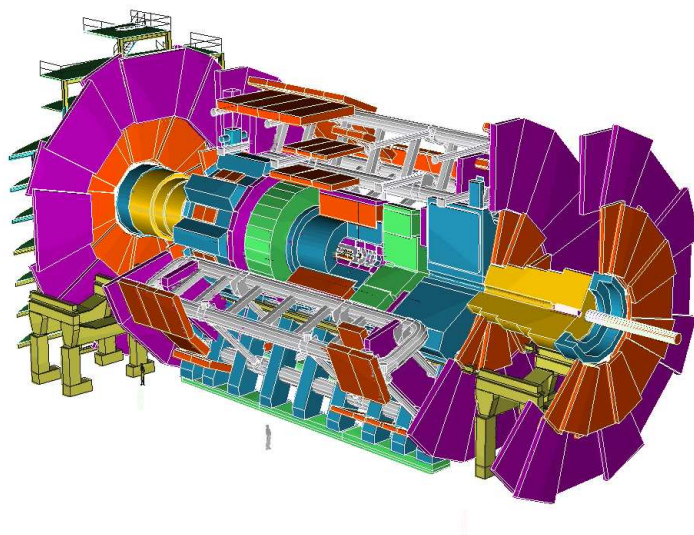


Рис. 3: Общий вид детектора ATLAS

достигает 1,6 м, и расположены в виде колец на большем расстоянии от точки соударения по оси пучка. Точность определения координаты частицы в дрейфовых трубках составляет около 150 микрон, но зато число точек измерения на один трек — 36. Кроме того, дрейфовые трубки регистрируют переходное рентгеновское излучение и, таким образом, обеспечивают идентификацию электронов. Всего в детекторе используется около 400 тысяч дрейфовых трубок. Такое большое количество трубок необходимо для того, чтобы обеспечить 4 π -геометрию установки и обусловлено требованием эффективности восстановления траекторий частиц.

Внутренний трековый детектор заключен в оболочку калориметров. Калориметрия играет основную роль в установке ATLAS. Она обеспечивает прецизионное измерение энергии электронов, фотонов, «струй» адронов, возникающих при адронизации кварков и «недостающей» энергии, уносимой нейтрино или другими нейтральными слабодействующими частицами, например, суперсимметричными партнерами уже известных частиц. Калориметры состоят из нескольких крупных модулей, предназначенных для регистрации адронов и для регистрации электромагнитного излучения в центральной области. Модули электромагнитного калориметра и торцевых адронных калориметров в качестве вещества поглотителя используют жидкий аргон, что обеспечивает необходимое быстродействие, высокое разрешение и высокую радиационную стойкость детектора. Адронный калориметр в центральной части собран из железных пластин, прослоенных сцинтилляторами. Это более дешевая и достаточно надежная конструкция по сравнению с жидкоаргонными калориметрами.

Мюонная система ATLAS расположена за калориметрами, в которых поглощаются все электроны, фотоны и адроны. Мюоны имеют высокую проникающую способность и в калориметрах поглощаются очень мало. Поэтому практически все зарегистрированные мюонной системой заряженные частицы являются мюонами. Основным типом детекторов в мюонной системе являются дрейфовые трубки диаметром 3 см. Результаты измерений, полученные с помощью мюонной системы (внешней трековой системы), «сшиваются» с данными внутреннего детектора для полной идентификации частиц.

Установка ATLAS будет размещена под землей на глубине 100 м. Соударения протонных пучков будут происходить каждые 25 наносекунд, то есть с частотой 40 МГц. При

планируемой на первом этапе светимости ускорителя 10^{33} частиц/сек⁻¹/см⁻² при каждом столкновении пучков будет происходить в среднем 2–3 протонных соударения. При светимости 10^{34} частиц/сек⁻¹/см⁻² при каждом столкновении пучков будет происходить 25 протонных соударений.

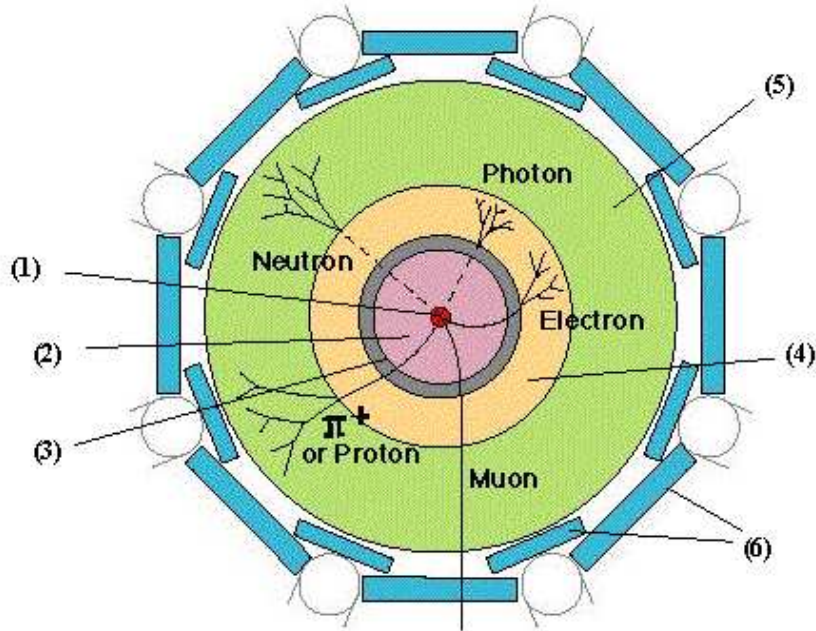


Рис. 4: Поперечное сечение детектора ATLAS. 1 — вакуумная труба, 2 — трековый детектор, 3 — соленоидальный магнит, 4 — электромагнитный калориметр, 5 — адронный калориметр, 6 — мюонный детектор.

1	Вакуумная труба (Beam Pipe)	Вакуумная труба, внутри которой перемещаются протоны, расположена вдоль центральной оси детектора. Протоны, двигающиеся навстречу друг другу, сталкиваются в центре детектора.
2	Трековый детектор	Внутренняя часть детектора заполнена чувствительными детекторами сделанными из пластинок кремния очень высокого разрешения, что позволяет с высокой точностью определить траекторию заряженной частицы и место ее рождения.
3	Соленоидальный магнит	Траектория частицы изгибается в магнитном поле. Радиус кривизны говорит об импульсе и знаке заряда частицы. Соленоидальный магнит — это огромный моток проволоки, намотанный на катушку, для того чтобы создать однородное магнитное поле внутри обмотки.
4	Электромагнитный калориметр	Это прибор для измерения полной энергии e^+ , e^- и фотонов. Эти частицы производят ливень e^+e^- -пар в веществе. e^+e^- испускают в поле ядра фотоны. Фотоны, в свою очередь, рожают e^+e^- -пару, которые затем опять испускает фотоны и т.д. Этот каскад называется «электромагнитным ливнем». Максимальное число e^+e^- -пар пропорционально энергии первичной частицы.

5	Адронный калориметр	Этот прибор измеряет полную энергию адронов. Адроны взаимодействуют с плотным веществом детектора, производя ливень заряженных частиц. Энергию, выделяемую этими заряженными частицами, затем измеряют.
6	Мюонный детектор	Только мюоны и нейтрино могут пройти так далеко. Мюоны здесь регистрируются, а слабо взаимодействующие нейтрино улетают. О присутствии нейтрино можно узнать лишь по недостающей энергии.

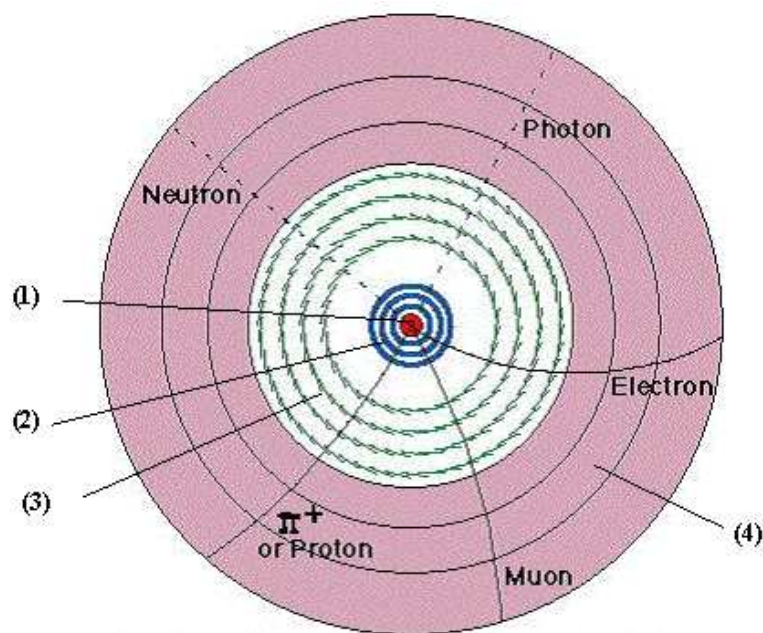


Рис. 5: Более детальный вид трекового детектора. 1 — вакуумная труба, 2 — пиксельная камера, 3 — кремниевый трекер, 4 — детектор переходного излучения

1	Вакуумная труба	
2	Пиксельная камера (Pixel Tracker)	Сектор, расположенный ближе всего к точке взаимодействия, называется пиксельной камерой. Этот детектор состоит из тонких слоев кремния, разделенного на крошечные прямоугольные области — «пиксели» — pixels. Заряженные частицы проходя через эти зоны создают сигнал, при помощи которого очень точно определяется их траектория. Т. к. пиксели очень крохотные, то их позиции достаточно для того, чтобы определить, была ли частица рождена в точке протон-протонного столкновения, или в нескольких мм. от нее. Наличие сдвига говорит о том, что из точки взаимодействия вылетела короткоживущая частица, которая, пролетев несколько мм, распалась.

3	Кремниевый трекер (Silicon Strip Tracker)	Слои кремния, объединенные в узкие полоски (стрипы), используются для обеспечения точной информации о траектории частицы. Когда заряженная частица проходит через эту секцию, можно определить какой стрип сработал. Такие стрипы позволяют точно узнать пространственные характеристики трека частицы.
4	Детектор переходного излучения	Этот детектор — проволочный газовый детектор, который состоит из маленьких трубок (похожих на солому, поэтому их и прозвали “straw”), в центре которых расположена тонкая проволочка. Они наполнены специальным газом, а высокое напряжение подается между проволочкой и металлизированной стенкой трубки. Когда частица пересекает трубку, с проволочки идет сигнал, который не только позволяет определить, какая из трубочек сработала, но и по временной зависимости определить, как далеко от проволочки расположен трек частицы.

2. Фундаментальные частицы и фундаментальные взаимодействия

Фундаментальными называют частицы, которые по современным представлениям не имеют внутренней структуры. В 1963 году М. Гелл-Маном и Цвейгом была предложена идея кварковой структуры адронов. За последние 40 лет эта идея была подтверждена целым рядом экспериментов. Экспериментально открыты 12 фундаментальных фермионов (спин $1/2$). Они приведены на рис. 6.

12 фундаментальным фермионам соответствуют 12 антифермионов.

Тип кварка (u, d, s, c, b, t) принято называть его ароматом (flavor). В таблице 3 перечислены характеристики кварков. Помимо перечисленных в таблице характеристик, кварки обладают еще одним квантовым числом, называемым «цвет» (color). Каждый из 6 ароматов кварков (u, d, c, s, b, t) существует в трех цветовых разновидностях, например: зеленой, синей и красной. Антикварки имеют соответствующий антицвет: антизеленый, антисиний, антикрасный. Адроны «бесцветны», то есть цвета составляющих их кварков перемешаны поровну и в сумме дают отсутствие цвета («белый» цвет).

Кварки в свободном состоянии не наблюдаются, они входят в состав адронов — частиц, участвующих в сильных взаимодействиях. Адроны, имеющие полуцелый спин, называются барионами. Известные барионы состоят из трех кварков (qqq) и имеют барионный заряд $B = 1$. К числу барионов относятся протон и нейтрон с кварковыми структурами $p = (uud)$, $n = (udd)$. Адроны, состоящие из кварков пяти ароматов (u, d, c, s, b), были подробно изучены с помощью ускорителей. t -кварк столь массивен, что для его образования потребовались ускорители колоссальных энергий. В апреле 1995 года он был обнаружен в экспериментах Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (FNAL).

Частицы, имеющие целый спин, называются мезонами. Они имеют барионный заряд $B = 0$. Мезоны состоят из кварка и антикварка ($q\bar{q}$).

Переносчики сильного взаимодействия — глюоны имеют не один, а два цветовых индекса (цвет и антицвет). Всего имеется 8 цветных глюонов, поскольку комбинация $3\bar{3} + c\bar{c} + k\bar{k}$ не имеет цветового заряда (т.е. является «белой») и, следовательно, не переносит сильное взаимодействие. В свободном состоянии глюоны не существуют. Они, как и кварки, «заперты» внутри бесцветных адронов.

Взаимодействие		Поколения			Заряд, Q/e		
		1	2	3			
Сильное	Электро- магнитное	Слабое	Лептоны	ν_e e	ν_μ μ	ν_τ τ	0 -1
			Кварки	u d	c s	t b	+2/3 -1/3

Рис. 6: Фундаментальные фермионы.

Таблица 3

Кварки ($J=1/2$, $B=1/3$)

Характеристика	Символ	d	u	s	c	b	t
электрический заряд	Q/e	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
изоспин	I	1/2	1/2	0	0	0	0
проекция изоспина	I_3	-1/2	+1/2	0	0	0	0
странность (strangeness)	s	0	0	-1	0	0	0
charm	c	0	0	0	+1	0	0
bottomness (beauty)	b	0	0	0	0	-1	0
topness (truth)	t	0	0	0	0	0	+1

Кроме кварков существует еще шесть типов фермионов со спином $1/2$, называемых лептонами. Они не участвуют в сильных взаимодействиях. В отличие от кварков, любой из шести лептонов наблюдается в свободном состоянии. Электрон — самый изученный лептон. Два других заряженных лептона — мюон (открыт в 1937 году в космических лучах) и τ -лептон (открыт в 1975 году на ускорителе). Остальные три лептона — это нейтрино, нейтральные частицы с очень большой проникающей способностью и, вероятно, очень малой массой (если она вообще у них есть). Каждому заряженному лептону соответствует свое нейтрино. Для каждого из шести лептонов существует антилептон с такой же массой и противоположным электрическим зарядом и лептонным квантовым числом.

Для практически полного описания окружающего мира достаточно кварков и лептонов первого поколения. Роль частиц второго и третьего поколений до конца не ясна. Предполагается, что существование трех поколений фермионов должно вести к CP -нарушению в природе и к преобладанию вещества над антивеществом, что, в конечном счете, обуславливает существование окружающего нас мира.

Таблица 4

Фундаментальные взаимодействия

Взаимодействие	Квант поля	Радиус, см	Порядок величин констант взаимодействия ($E < 1$ ГэВ)	Пример проявления
сильное	8 глюонов	10^{-13}	1	ядро, адроны
электромагнитное	γ -квант	∞	10^{-2}	атом
слабое	W, Z	10^{-16}	10^{-6}	β -распад
гравитационное	гравитон	∞	10^{-40}	сила тяжести

Взаимодействие фундаментальных частиц осуществляется за счет 4 типов взаимодействий: гравитационного, сильного, электромагнитного и слабого. Гравитационные силы практически не проявляются в физике частиц, например, интенсивность гравитационного взаимодействия двух протонов составляет около 10^{-38} интенсивности их электромагнитного взаимодействия. Порядок величин констант взаимодействий, приведенных в таблице 4, соответствует энергии взаимодействия $E < 1$ ГэВ. В области более высоких энергий величины констант взаимодействия зависят от энергии.

В дальнейшем будут обсуждаться три типа фундаментальных взаимодействий: сильное, электромагнитное и слабое.

Таблица 5

Фундаментальные (калибровочные) бозоны

Калибровочные бозоны	Масса, ГэВ	J , спин	P , четность	I , изоспин	Основные моды распада, %	Ширина распада, ГэВ
γ	0	1	-1	0, 1	стабилен	
$8g$	0	1	-1	0	стабилен	
W^+, W^-	80.41 ± 0.10	1			hadrons, 68% $e^+\nu$, 10.9% $\mu^+\nu$, 10.2% $\tau^+\nu$, 11.3%	2.06 ± 0.06
Z	91.187 ± 0.007	1			hadrons, 70% $\bar{\nu}\nu$, 20% e^+e^- , 3.37% $\mu^+\mu^-$, 3.37% $\tau^+\tau^-$, 3.36%	2.490 ± 0.007

Взаимодействия фундаментальных фермионов осуществляются за счет обмена переносчиками взаимодействия — фундаментальными (или калибровочными) бозонами. Взаимодействие частиц, имеющих электрический заряд, происходит посредством обмена квантами электромагнитного поля — фотонами (или γ -квантами). Фотон электрически нейтрален. Сильное взаимодействие осуществляется за счет обмена глюонами (g) — электрически нейтральными безмассовыми переносчиками сильного взаимодействия. Глюоны переносят цветовой заряд (смотри ниже). В слабом взаимодействии принимают участие все лептоны и все кварки. Переносчиками слабого взаимодействия являются массивные

W - и Z -бозоны. Существуют положительные W^+ -бозоны и отрицательные W^- -бозоны, являющиеся античастицами по отношению друг к другу. Z -бозон электрически нейтрален.

Одной из задач физики является объединение различных взаимодействий в рамках единого описания. В 1960-х годах слабое и электромагнитное взаимодействия были объединены в единую теорию электрослабого взаимодействия. Теория, описывающая с единых позиций электромагнитное и слабое взаимодействия кварков и лептонов, называется Моделью электрослабого взаимодействия Глэшоу–Вайнберга–Салама. Объединение происходит при энергиях порядка энергии покоя Z -бозона, т.е. при энергиях порядка 90 ГэВ. Модель электрослабого взаимодействия вместе с КХД составляют Стандартную Модель (СМ) взаимодействия элементарных частиц. В настоящее время нет ни одного экспериментального факта, противоречащего предсказаниям СМ. Возможно, что процесс дальнейшего объединения взаимодействий может быть решен при энергиях, превышающих на 10–12 порядков энергии, доступные на современных ускорителях. При таких больших энергиях теоретически оказывается возможным свести к одному взаимодействию электрослабое и сильное взаимодействия. Такая теория называется Теорией Великого Объединения (ТВО). Точнее, существует целый ряд таких теорий. Для того, чтобы сказать, какая из множества версий (если она вообще реализуется) наиболее адекватно описывает природу, требуется много дополнительной экспериментальной информации. Часть такой информации будет возможно получить на установке ATLAS.

В ТВО, помимо известных калибровочных бозонов - переносчиков сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий, возникают X - и Y -калибровочные бозоны. Взаимодействие, происходящее при помощи X - и Y -бозонов, по современным теоретическим представлениям должно нарушать законы сохранения лептонного и барионного числа, и, как следствие, могло бы приводить к распаду протона. Такие распады должны происходить крайне редко, иначе сегодня наш мир не существовал бы. Оценки показывают, что период полураспада протона превышает 10^{32} лет. Это означает, что энергии покоя X - и Y -бозонов должны превышать 10^{15} ГэВ. На современных ускорителях прямое наблюдение столь тяжелых бозонов невозможно. Для поиска распада протона строятся огромные установки, содержащие сотни и тысячи тонн вещества (обычно воды) и погруженные в это вещество детекторы (обычно — черенковские счетчики).

Теории суперсимметрии (СУСИ-теории) служат еще одним возможным кандидатом на единую теорию взаимодействия фундаментальных частиц. В СУСИ-теориях не делается различия между частицами с целым и полуцелым спинами. Каждой частице с целым спином ставится в соответствие частица с полуцелым спином и наоборот. Такие частицы называются суперпартнерами. В рамках СУСИ-теорий в общую схему взаимодействия возможно включение гравитации, что представляется трудной задачей в ТВО. Основным недостатком СУСИ-теорий является то, что из всех открытых к настоящему времени фундаментальных частиц ни одна не может рассматриваться как суперпартнер другой. Таким образом, число фундаментальных частиц сразу удваивается, причем половина их не обнаружена экспериментально.

В CERN с осени 1995 года ведутся эксперименты по обнаружению суперпартнеров W -бозонов, а в лаборатории им. Ферми — кварков и глюонов. Возможно, что наилегчайшие из нейтральных суперсимметричных частиц могут составлять до 90% темного вещества во Вселенной. Если СУСИ-теория верна, то в экспериментах на детекторах ATLAS и CMS становится возможным обнаружить некоторые легчайшие суперсимметричные частицы.

Одной из важнейших целей создания установок ATLAS и CMS является обнаружение хиггсовских частиц и изучение их свойств. Существование бозонов Хиггса чрезвычайно

важно для физики элементарных частиц. По современным теоретическим представлениям, хиггсовские бозоны имеют прямое отношение к концепции происхождения масс элементарных частиц — фундаментальному вопросу современной физики. Примечательно, что этот вопрос не поднимался до тех пор, пока не появилась Стандартная Модель.

Стандартная Модель предполагает, что существует еще одно поле, которое практически неотделимо от пустого пространства. Его принято называть полем Хиггса. Считается, что все пространство заполнено этим полем, и что частицы приобретают массу путем взаимодействия с ним. Те из них, которые сильно взаимодействуют с полем Хиггса, являются тяжелыми частицами, а слабо взаимодействующие — легкими. Этот эффект аналогичен эффекту движения тела в вязкой жидкости, когда оно за счет взаимодействия с жидкостью приобретает дополнительную эффективную массу. Еще один пример — электрон в кристалле. Из-за электромагнитного взаимодействия с атомами кристаллической решетки электрон приобретает эффективную массу, отличную от массы свободного электрона.

В силу корпускулярно-волнового дуализма полю Хиггса должна соответствовать, по крайней мере, одна частица — квант этого поля, называемая частицей Хиггса или хиггсовским бозоном. Считается, что хиггсовский бозон имеет нулевой спин. Детекторы ATLAS и CMS на ЛHC смогут детектировать хиггсовские частицы, если эти частицы существуют. Экспериментальное наблюдение хиггсовского бозона было бы одним из величайших научных открытий XXI века.

Все процессы взаимодействия частиц подчиняются законам сохранения. В приложении перечислены законы сохранения и указано, в каком типе фундаментальных взаимодействий данная характеристика сохраняется. Отметим, что некоторые законы сохранения аддитивны /А/ (т.е. в процессе сохраняется суммарная величина — например, во всех взаимодействиях сохраняется сумма энергий частиц). Ряд законов сохранения имеет мультипликативный характер /М/ — сохраняется произведение величин. Очень важно, что законы сохранения имеют глубокую связь со свойствами симметрии.

3. Рождение W- и Z-бозонов

Процессы, происходящие при соударениях частиц высоких энергий, могут быть упругими или неупругими. В упругих процессах происходит обмен импульсом (энергией) между сталкивающимися частицами, при этом не происходит изменения внутренней структуры сталкивающихся частиц. В неупругих процессах происходит образование новых частиц. Для протонов с импульсами выше 1 ГэВ/с возможны как упругие, так и неупругие процессы. Вклад неупругих процессов в полное сечение взаимодействия быстро растёт с увеличением энергии взаимодействия. Доля упругого рассеяния уменьшается до 7% для протонов с импульсом 100 ГэВ/с и далее практически не изменяется при увеличении импульсов сталкивающихся частиц. Таким образом, неупругие соударения являются основным взаимодействием протонов высоких энергий.

Рожденные в неупругих соударениях частицы, в основном, являются пионами. Странные частицы и барион-антибарионные пары имеют на один или два порядка меньшую вероятность образования. Образование адронов, содержащих *c*- и *b*-кварки, происходит с еще меньшей вероятностью порядка 10^{-3} – 10^{-5} . Для *t*-кварка эта вероятность еще меньше.

При анализе характера взаимодействия обычно импульсы вторичных частиц раскладывают на поперечную p_{\perp} и продольную p_{\parallel} компоненты относительно направления

сталкивающихся частиц. Величина поперечного импульса вторичных частиц характеризует величину импульса, переданного частице в процессе взаимодействия. Процессы неупругого взаимодействия с рождением частиц с малыми поперечными импульсами ($p_{\perp} \cong 0.4 \text{ ГэВ/с}$) относятся к «мягким» взаимодействиям. Вторичные частицы с поперечными импульсами свыше 1 ГэВ/с возникают в «жестких» соударениях, т.е. когда в процессе взаимодействия происходят большие передачи импульса.

Как известно, кварки в свободном состоянии не наблюдаются. Если в процессах взаимодействия элементарных частиц рождается кварк-антикварковая пара, то каждый из кварков сразу подхватывает себе партнера из «моря» и образует адрон. Обычно энергии каждого из кварков хватает на образование не одного, а нескольких адронов. Эти адроны имеют суммарный импульс, равный импульсу породившего их кварка, и движутся в узком конусе в направлении, в котором летел породивший их кварк. Такую группу адронов называют струей (jet). Кварки, образованные в жестких соударениях, обычно порождают струи частиц.

На рис. 7 показана диаграмма образования двухструйного события. На первом этапе при аннигиляции электрона и позитрона рождается виртуальный фотон, то есть такой фотон, для которого не выполняется равенство между квадратом его энергии и квадратом его импульса. На втором этапе виртуальный фотон распадается на кварк-антикварковую пару.

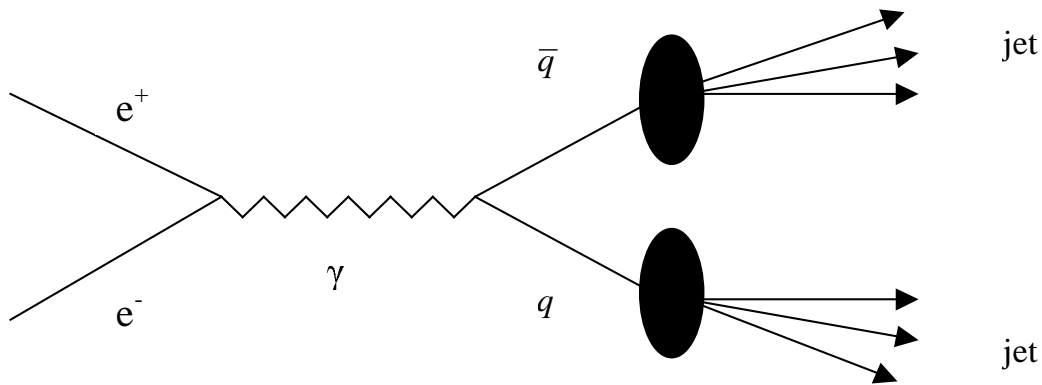


Рис. 7: Диаграмма образования двухструйного события.

Темный овал на рисунке соответствует процессу рождения кварком и антикварком множества адронов. Финальная стадия процесса изображена в виде двух адронных струй (jet). В адронные струи могут входить как заряженные, так и нейтральные частицы.

В жестких соударениях, наряду со всеми другими процессами, происходит образование промежуточных Z -бозонов. Диаграммы этих процессов показаны на рис. 8. Первая диаграмма отвечает аннигиляции кварка и антикварка в Z -бозон. Она аналогична левой части диаграммы рис. 7 для аннигиляции электрон-позитронной пары в фотон. В таком процессе при определенном подборе энергий сталкивающихся кварков Z -бозон может быть реальной, а не виртуальной частицей.

Две другие диаграммы описывают процесс образования Z -бозона с дополнительным излучением глюона при столкновении кварка и антикварка и процесс совместного образования Z -бозона и кварка при слиянии кварка и глюона. При высоких энергиях все три диаграммы дают примерно одинаковый вклад в сечение рождения Z -бозонов.

Впервые Z -бозоны наблюдались в 1983 году на ускорителе SppS CERN при столкновении пучков протонов и антипротонов. Z -бозоны образовывались при аннигиляции кварка

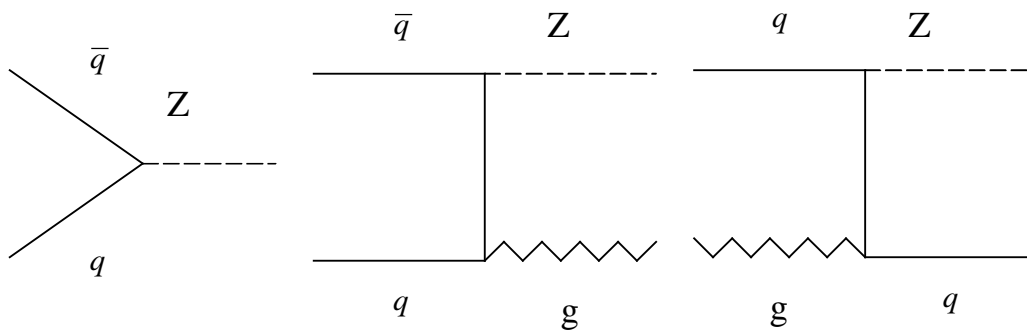


Рис. 8: Диаграммы образования Z -бозонов.

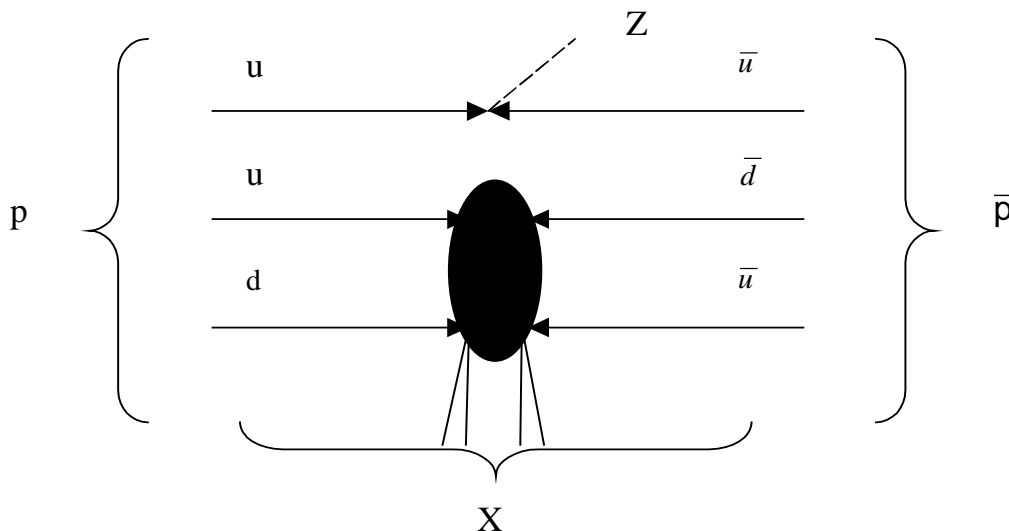


Рис. 9: Диаграмма рождения Z -бозонов в $p\bar{p}$ столкновениях.

протона с соответствующим ему антикварком антипротона. Характерная диаграмма такого процесса показана на рис. 9.

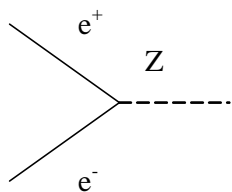


Рис. 10: Диаграмма рождения Z -бозонов в e^+e^- столкновениях.

Диаграмма рождения Z -бозона в электрон-позитронной аннигиляции показана на рис. 10.

На коллайдере LEP энергии электронного и позитронного пучков подбирались таким образом, чтобы в сумме они были равны массе Z -бозона. При этом сечение образования Z -бозона повышается на несколько порядков по сравнению с сечениями образования любых других частиц (резонансный эффект).

В протон-протонных столкновениях, которые будут происходить на LHC, основные диаграммы рождения Z -бозона те же, что и в случае протон-антипротонных столкновений. Имеется только одно отличие. В протон-антипротонных столкновениях антикварки входили в состав антипротона, в то время как в протон-протонных столкновениях антикварки возникают из кваркового «моря». Однако светимость LHC гораздо выше светимости SppS, поэтому даже в этом случае Z -бозонов на LHC будет рождаться на несколько порядков больше, чем на SppS.

4. Распады промежуточных бозонов. Определение массы Z-бозона

Слабое взаимодействие переносится массивными W^- и Z -бозонами. Обмен заряженными W^+ и W^- -бозонами приводит к изменению электрического заряда взаимодействующих фермионов. Эти процессы происходят за счет заряженных токов. Примерами таких процессов являются изображенные на рис. 11 распады мюона и нейтрона.

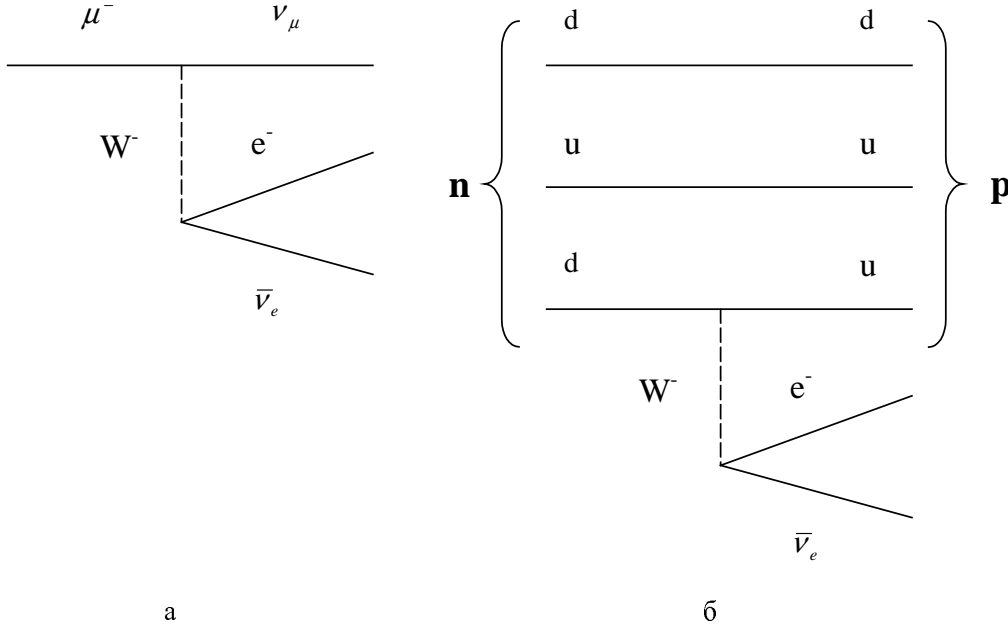


Рис. 11: Диаграммы распадов мюона (а) и нейтрона (б).

Обмен Z -бозоном не приводит к изменению электрического заряда фермионов. Эти процессы слабого взаимодействия происходят за счет нейтральных токов. Пример такого процесса показан на рисунке 12а. Эта диаграмма отражает процесс упругого рассеяния нейтрино на электроне. В упругом рассеянии лептонов участвуют и заряженные токи (рис. 12б).

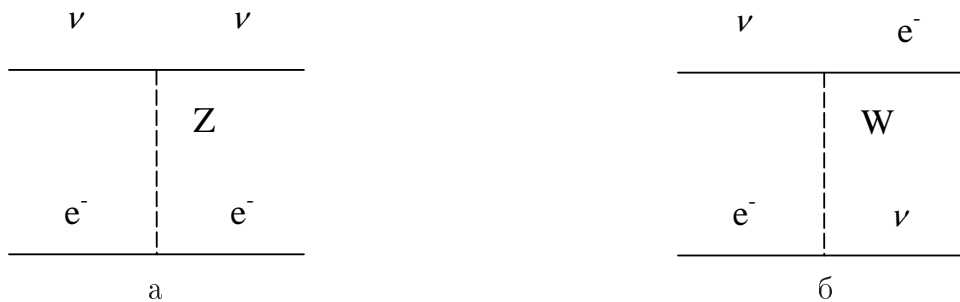


Рис. 12: Диаграммы упругого рассеяния с обменом Z - и W -бозонами.

Взаимодействие лептонов и кварков также может быть обусловлено нейтральными токами (рис. 13).

Нейтральные слабые токи, т.е. события типа изображенного на рис. 12а, были экспериментально обнаружены в 1973 г. и свидетельствовали в пользу существования, помимо

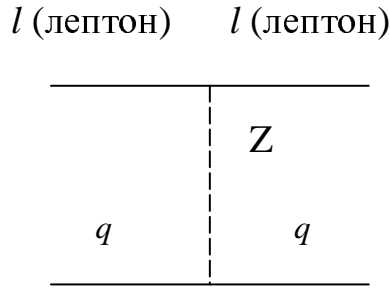


Рис. 13: Диаграмма взаимодействия лептона и кварка с обменом Z -бозоном

заряженных промежуточных W -бозонов, также нейтральных Z -бозонов — переносчиков слабого взаимодействия. Через 10 лет как заряженные W^- , так и нейтральные Z -бозоны были открыты в протон-антипротонных столкновениях в CERN.

Промежуточные бозоны имеют большую массу. Они быстро распадаются (или, что эквивалентно, имеют большие ширины распада). В таблице 5 приведены основные характеристики промежуточных W - и Z -бозонов и указаны основные каналы их распадов.

Изображенные на диаграммах 11–13 промежуточные бозоны являются в этих процессах виртуальными частицами (т.е. для них не выполняется соотношение $E^2 - c^2 p^2 = m^2 c^4$, хотя законы сохранения энергии и импульса выполняются для процесса в целом).

Однако все дискретные законы сохранения соблюдаются в любой вершине. На рис. 14 показаны диаграммы распадов промежуточных бозонов.

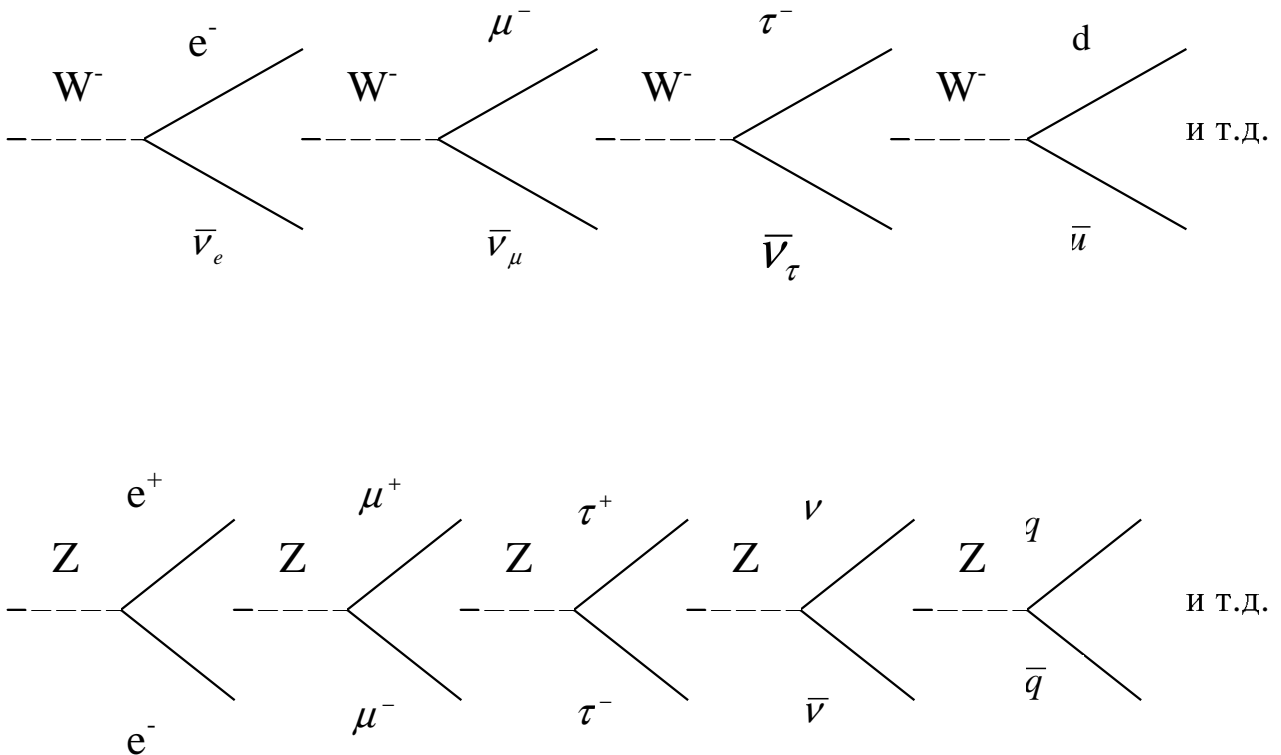


Рис. 14: Диаграммы распада W^\pm и Z -бозонов.

Распад W^- или Z -бозона на кварк и антикварк приводит к возникновению двух струй (jets), поскольку родившиеся в этом процессе «токовые» кварки немедленно обрастают

множеством «морских» кварковых пар и формируют адроны, потоки которых и наблюдаются в детекторах в виде струй.

Распады промежуточных бозонов с рождением заряженных лептонов позволяют определить массы промежуточных бозонов с более высокой точностью. В этом отношении распад Z -бозона на пары заряженных лептонов e^+e^- и $\mu^+\mu^-$ особенно удобен: энергии и импульсы обеих частиц, рождающихся в распаде, можно установить с высокой точностью. Импульс p Z -бозона является суммой импульсов заряженных лептонов (p_1 и p_2). В декартовых координатах:

$$p^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2, \quad p_x = p_{x1} + p_{x2}, \quad \text{и т. д.}$$

$$E = E_1 + E_2, \quad M_Z c^2 = (E^2 - c^2 p^2)^{1/2}.$$

Определение масс промежуточных бозонов по анализу частиц в струях менее точно, поскольку среди множества вторичных частиц некоторые ненаблюдаемы. Обычно это нейтральные частицы, которые не успевают распасться на заряженные вторичные продукты, или нейтрино от распада некоторых заряженных адронов в струе.

Большой интерес представляет изучение распада Z -бозона по чисто лептонным каналам: $Z \rightarrow \text{лептон} + \text{антилептон}$. Они позволяют установить, сколько «поколений» фундаментальных фермионов существует в природе.

Из принципа неопределенности Гейзенберга $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ следует: чем короче время существования частицы, тем неопределеннее значение ее энергии. В случае Z -бозонов это означает, что масса каждой отдельной частицы может быть измерена очень точно, но разные частицы будут иметь несколько различающиеся массы, определяемые временем жизни Z -бозона. Поэтому, если построить энергетическое (массовое) распределение Z -бозона, то оно будет иметь вид, представленный на рис. 15. Ширина резонансной кривой отражает неопределенность значения массы Z -бозона, которая непосредственно связана с его временем жизни.

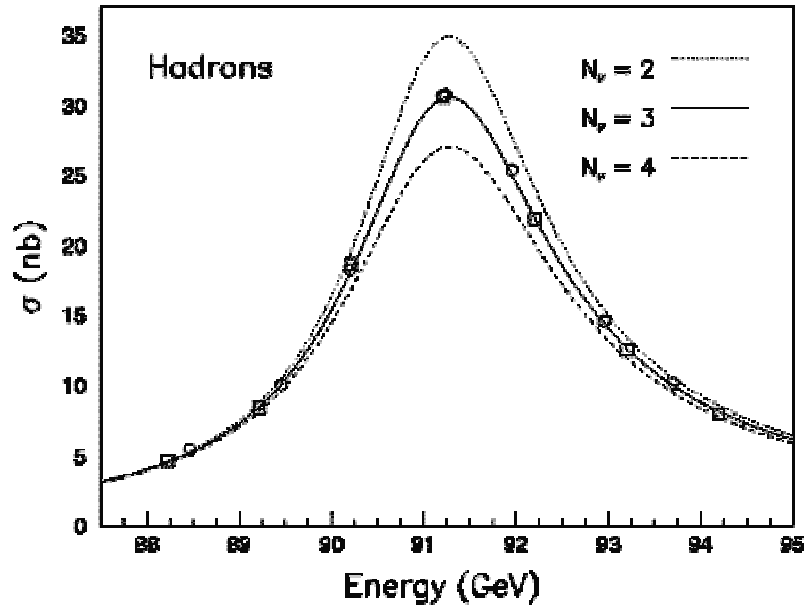


Рис. 15: Резонансная кривая Z -бозона. $M(Z) = 91.188 \pm 0.007$ ГэВ.

Z -бозон имеет много различных мод (каналов) распада, и каждая мода распада уменьшает его время жизни. Образование Z -бозонов проще всего наблюдать на встречных пучках в реакции e^+e^- -аннигиляции

$$e^+e^- \rightarrow Z.$$

В теории электрослабого взаимодействия предсказываются следующие значения вкладов различных каналов распада в полную ширину распада Z -бозона: 1.74 ГэВ для всех адронных каналов, 0.085 ГэВ для каждого канала распада на заряженные лептоны (e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$), 0.166 ГэВ для каждого нейтринного канала.

Невидимая мода распада Z -бозона включает все три известных типа нейтрино — электронные, мюонные и τ -нейтрино.

Первые эксперименты по точному определению ширины распада Z -бозона были выполнены на Стэнфордском линейном коллайдере (SLAC) и на большом электронно-позитронном коллайдере (LEP) ЦЕРНа. Результаты хорошо согласуются и заключаются в следующем. В «наблюдаемых» («нейтринных») событиях в 88% случаев электрон-позитронная аннигиляция приводит к рождению пары кварк–антикварк. Эти события наблюдаются как две струи адронов, направленные в противоположные стороны. В 12% случаев с одинаковой вероятностью ($\sim 4\%$) рождались лептон-антилептонные пары — e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$ (e , μ , τ -универсальность). При распаде Z -бозона на e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ -пары наблюдались два противоположно направленных трека заряженных лептонов (e , μ). Каждая из частиц уносила половину суммарной энергии сталкивающихся пучков. Распады Z -бозона на $\tau^+\tau^-$ идентифицировать более сложно, так как τ -лептоны распадаются на более легкие лептоны или адроны практически в районе мишени. Распады Z -бозона на нейтрино относятся к «ненаблюдаемым» событиям. Полное сечение образования Z -бозона $\sigma_{\text{полн}}(e^+e^- \rightarrow Z)$ представляет собой сумму сечений трех процессов

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{полн}}(e^+e^- \rightarrow Z) = & \sigma_{\text{полн}}(e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \text{адроны}) + \\ & + \sigma_{\text{полн}}(e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \text{лептоны}) + \sigma_{\text{полн}}(e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \text{нейтрино}). \end{aligned}$$

Полное сечение образования Z -бозона в e^+e^- -аннигиляции определялось из измерения резонансной кривой при различных энергиях сталкивающихся e^+e^- пучков в районе резонанса (массы Z -бозона). Из измерения резонансной кривой можно извлечь информацию о положении максимума (массе Z -бозона), ширине резонансной кривой (времени жизни Z -бозона) и величине сечения в максимуме. Ширина резонанса и величина сечения в максимуме связаны с числом различных типов нейтрино, на которые распадается Z -бозон. При возрастании числа типов нейтрино, т.е. количества поколений, резонансная ширина распада Z -бозона увеличивается, а величина сечения в максимуме уменьшается. Таким образом число типов нейтрино определяется по двум независимым параметрам — величине сечения в максимуме и ширине резонансной кривой e^+e^- -аннигиляции в Z -бозон.

Из эксперимента была получена следующая оценка числа возможных типов нейтрино n

$$n = 2.982 + 0.013,$$

что исчерпывается уже известными типами нейтрино.

Проведенные эксперименты показывают, что поколений всего три. Однако не нужно забывать, что полностью исключить существование четвертого поколения нельзя, оно может проявляться при энергиях, недоступных современным ускорителям.

Не вступая в противоречие с этими экспериментальными данными можно говорить о других типах нейтрино только если их масса больше половины массы Z -бозона, т.е. больше 45 ГэВ. Эта возможность маловероятна, учитывая современные ограничения на массы известных типов нейтрино:

$$m(\nu_e) < 5.1 \text{ эВ}, \quad m(\nu_\mu) < 0.27 \text{ МэВ}, \quad m(\nu_\tau) < 31 \text{ МэВ}.$$

Таким образом, полученная оценка числа типов нейтрино $n = 3$ говорит о том, что количество поколений фундаментальных фермионов равно 3.

Этот результат согласуется с данными о количестве поколений фундаментальных фермионов, полученными независимо из анализа распространенности водорода и гелия во Вселенной. Так как число типов нейтрино вносит существенный вклад в плотность энергии и скорости остывания Вселенной после Большого взрыва, оно определяет соотношение между количеством нейтронов и протонов, образующихся в момент дозвездного нуклеосинтеза и, следовательно, соотношение между количеством ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^1\text{H}$, образующихся в первые минуты эволюции Вселенной. Наблюдаемое соотношение количества изотопов ${}^4\text{He}$ и ${}^1\text{H}$ (${}^4\text{He}/{}^1\text{H} \sim 0.1$) говорит о том, что число легких типов нейтрино может быть два или три и противоречит наличию четырех и более типов нейтрино.

5. Краткие сведения об используемых программных продуктах

Система моделирования и анализа процессов рождения и распада Z -бозона состоит из двух частей.

Для моделирования процессов рождения частиц и их последующих распадов используется программный пакет RUTHIA 6.2 («Пифия»).

Обработку и визуализацию событий выполняет JAVA-applet.

5.1. RUTHIA 6.2

Для корректного моделирования процессов рождения и распада частиц необходимо учитывать условия проведения эксперимента. Это условия рождения изучаемых частиц на ускорителе при соответствующих энергиях сталкивающихся пучков, полные цепочки распадов частиц до уровня «стабильных частиц», регистрируемых детектором. Для решения этих задач применяются генераторы событий, использующие метод Монте-Карло.

Генератор RUTHIA является широко используемой в физике высоких энергий программой моделирования столкновений различных частиц в широком диапазоне энергий. Этот генератор учитывает процессы фрагментации кварков в адроны и разыгрывает сложные цепочки адронных распадов. Стартуя с заданного пользователем процесса, (столкновение двух протонов с рождением Z -бозона и т.п.) программа случайным образом (с учетом законов сохранения и, по возможности, теоретически известной структуры взаимодействия) разыгрывает конфигурацию конечных партонов, а затем моделирует т.н. процесс адронизации — процесс превращения ненаблюдаемых кварков и глюонов в реальные стабильные и нестабильные частицы с последующим распадом нестабильных частиц. На выходе программа выдает список всех частиц, родившихся в результате столкновения заданных первичных частиц, значения их компонент импульса и энергии. Кроме того, имеется возможность проследить последовательность рождений и распадов

от первичного взаимодействия до рождения данной частицы. В качестве входных параметров программы используются описания сталкивающихся частиц, их энергий и тип моделируемого процесса (например, рождение Z -бозона). Существующие версии пакета PUTHIA написаны на языке программирования FORTRAN.

Результаты генерации — характеристики вторичных частиц — записываются в файл, что позволяет в дальнейшем проводить статистическую обработку событий.

5.2. JAVA-applet

Второй частью системы является JAVA-applet. Важным этапом в подготовке любого современного эксперимента, помимо чисто теоретического изучения процессов, которые предполагается изучать, является моделирование экспериментальной установки. Полное моделирование всех детекторов и происходящих в них во время эксперимента процессов является исключительно трудоёмкой задачей, требующей громадных вычислительных мощностей. Для моделирования установки класса ATLAS, например, используются фермы из десятков современных рабочих станций и до года работы для набора достаточной статистики полностью промоделированных событий. Для подобной работы используются специализированные программы, созданные работой десятков специалистов-физиков. В программах моделирования по возможности полностью моделируются все существенные процессы прохождения частиц через детектор, процессы получения сигналов с детекторов, их последующая обработка и, наконец, процедура реконструкции параметров объекта (частицы, струи частиц, электромагнитного кластера в калориметре и т.д.) по сигналам от детекторов.

JAVA-applet выполняет:

- загрузку файлов событий с сервера и извлечение информации о событии;
- их обработку;
- построение треков частиц в соответствии с параметрами внутреннего детектора установки ATLAS;
- формирование отображения сигналов от внешних детекторов;
- статистическую обработку событий.

Использование технологии Java делает возможным функционирование клиентской части системы на любом компьютере, подключённом к сети Интернет, вне зависимости от аппаратной платформы и операционной системы, если установлена необходимая версия виртуальной машины JAVA.

6. Порядок выполнения работы

6.1. Запуск программы

Страница задачи расположена на сайте <http://nuclphys.sinp.msu.ru>.

При открытии окна браузера серым прямоугольником будет отмечена область отображения Java-applet'a. В этой области появится окно с изображением треков заряженных частиц (рис. 16).

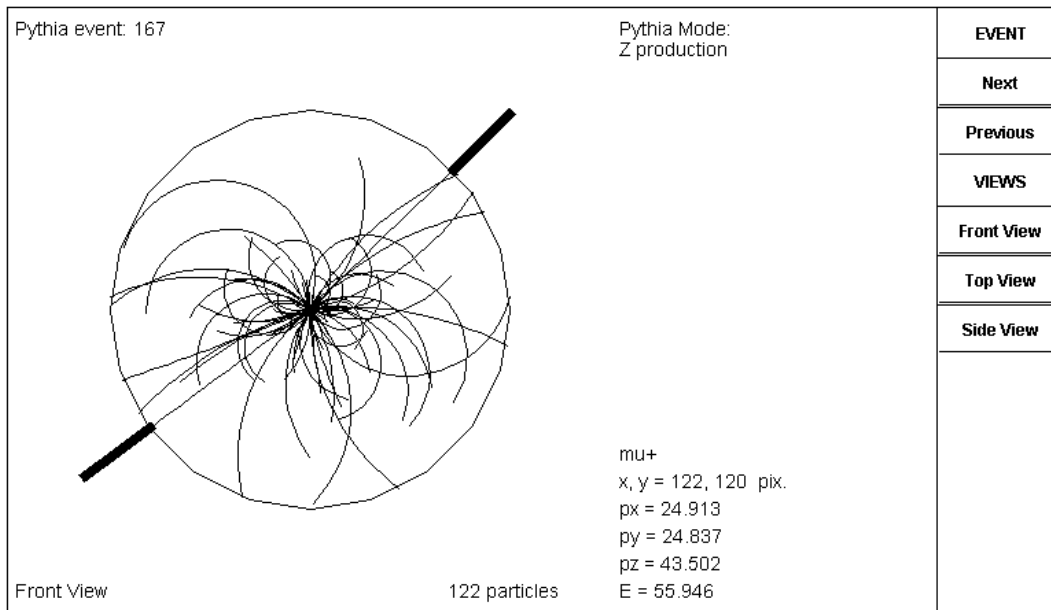


Рис. 16:

6.2. Просмотр и анализ процессов рождения и распада Z -бозонов

1. На рис. 16 слева расположено главное окно. Окружность условно изображает границу внутреннего детектора ATLAS. Заряженные частицы, которые на эксперименте могут быть восстановлены программой реконструкции, показаны желтыми линиями. Голубые линии показывают частицы, которые по каким-либо причинам не могут быть реконструированы (например, из-за маленького поперечного импульса). Цветные «столбики» вне окружности условно изображают сигналы от частиц, регистрируемых в окружающих внутренний трековый детектор калориметрах и в мюонной системе, расположенной за калориметрами:

- красные — электрон;
- зеленые — γ -квант;
- фиолетовые — мюон;
- синие — адронные струи;
- белые — нейтральные частицы, реконструируемые по недостающей массе.

Не все типы «столбиков» одновременно могут присутствовать в каждом отдельном событии.

При нажатии на кнопки, расположенные в правой части окна, в главном окне появляются соответствующие проекции — **Top View**, **Side View**, **Front View**.

Можно вращать изображение события, нажав левую кнопку мыши и, удерживая её, передвигать в разных направлениях.

Перемещение мыши вдоль оси x приводит к вращению детектора вокруг оси симметрии.

Перемещение мыши вдоль оси y приводит к вращению детектора вокруг горизонтальной оси.

Кнопка **Next** показывает следующее событие, а **Previous** — предыдущее.

2. При наведении курсора на трек в центральной части рис. 16 можно прочитать характеристики соответствующей частицы:

- название;
- компоненты импульса (ГэВ/ c);
- энергию (ГэВ).

X, Y — координаты курсора в сантиметрах.

Для частиц используются следующие обозначения:

- p — протон;
- $p\sim$ — антипротон;
- p_i — π -мезон;
- K — K -мезон;
- μ — μ -мюон;
- e — электрон;
- $\nu_e / \bar{\nu}_e$ — электронное нейтрино/антинейтрино;
- $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ — мюонное нейтрино/антинейтрино.

3. Просмотрите ~ 100 событий, пока не найдете события с двумя электронами и с двумя мюонами (два красных или фиолетовых «столбика»), разлетающимися в разные стороны т.е. под относительным углом в поперечной плоскости (**Front View**) близким к 180° .

Запишите значения энергии и всех трёх компонент импульса обоих лептонов. Вычислите значение инвариантной массы системы двух частиц.

6.3. Определение массы Z -бозона по результатам статистического анализа

На главной странице выберите пункт «статистическая обработка». При открытии окна браузера появится окно с изображением результатов статистической обработки сгенерированных событий.

По оси X гистограммы будет отложена инвариантная масса, по оси Y — число событий с инвариантной массой, попадающей в интервал, соответствующий одной «ступеньке» гистограммы:

“jet” - 2-х струй.

“m+m-” - $\mu^+\mu^-$ -пар

“ e^+e^- ” - e^+e^- -пар

На гистограмму наложена кривая аппроксимации соответствующих распределений гауссовской функцией.

Запишите среднее значение массы и дисперсию распределения. Вычислите значение среднеквадратичной погрешности определения массы Z -бозона с учетом числа событий.

Сравните и объясните различие средних значений и дисперсий полученной массы Z -бозона между собой и с табличным значением массы Z -бозона.

6.4. Анализ продуктов p - p столкновений

В центральной области окна (круге) видны треки заряженных частиц, рождающихся при протон-протонных соударениях в ускорителе LHC. Наводя курсор поочередно на все треки, запишите, какие частицы соответствуют этим трекам.

Оцените отношение числа заряженных пионов к числу заряженных K -мезонов. Запишите реакции рождения пионов и каонов в протон-протонных столкновениях. Перечислите законы сохранения, выполняющиеся в этих реакциях.

Определите величины пороговых энергий пучков протонов в коллайдере для рождения зафиксированных Вами количеств пионов и каонов.

Оцените отношение числа частиц с положительным зарядом к числу частиц с отрицательным зарядом, образующихся в p - p столкновениях.

7. Контрольные вопросы и задачи

1. Для ультрарелятивистской частицы укажите связь между длиной волны частицы λ и энергией частицы E .
2. Как зависит радиус кривизны треков частиц в детекторе от характеристик частиц?
3. Пользуясь таблицей фундаментальных фермионов, составьте таблицу фундаментальных антифермионов.
4. Укажите значения зарядов и спинов фундаментальных бозонов.
5. Какие частицы рождаются в p - p столкновениях высоких энергий с наибольшей вероятностью?
6. Нарисуйте кварковые диаграммы следующих процессов:
 - (a) $p + p \rightarrow p + p + \pi^0$;
 - (b) $p + p \rightarrow p + p + \pi^+ + \pi^-$;
 - (c) $p + p \rightarrow p + p + 2\pi^0$.
7. Могут ли в адронных струях присутствовать нейтральные частицы?
8. Нарисуйте диаграммы рождения Z -бозонов в
 - (a) электрон-позитронных столкновениях;
 - (b) протон-антипротонных столкновениях;

(с) протон-протонных столкновениях.

9. Нарисуйте диаграммы слабых распадов, в которых участвуют промежуточные бозоны.
10. Какие каналы распада Z -бозонов относятся к разряду ненаблюдаемых?
11. Оцените среднее время жизни Z -бозона по его ширине $\Gamma = 2,5$ ГэВ.
12. Почему определение массы Z -бозона по энергиям струй (jets) приводит к заниженным значениям массы?
13. Используя соотношение неопределенности и значение массы промежуточных бозонов, оцените радиус слабых взаимодействий.