МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Курсовая работа на тему:

«Прецизионные измерения параметров Z-бозона»

Выполнил:
студент 204 группы
Дьяков Роман

Руководитель:
д.ф.-м.н., проф. А.Г. Ольшевский

Москва, 2018 г.

Оглавление

Введение. 3

Эксперимент DELPHI. 5

Коллайдер LEP. 5

Детектор DELPHI. 6

Трековые детекторы. 8

Электромагнитные калориметры и сцинтилляционные счетчики. 10

Расчет асимметрий. 10

Адронные калориметры. 11

Определение заряженных адронов. 11

Измерение светимости. 12

Результаты измерений на LEP. 14

Интерпретация измерений сечений и асимметрий в рамках стандартной модели. 14

Глобальная проверка стандартной модели. 15

Проверка лептонной универсальности. 15

Число поколений нейтрино. 16

Дальнейшая проверка Стандартной модели. 17

Заключение. 18

Литература. 19

Введение.

Важной задачей современной физики высоких энергий является проверка стандартной модели – теоретической системы в физике элементарных частиц, объединяющей электрослабое и сильное взаимодействия и квантовую хромодинамику.

Стандартная модель состоит из следующих положений:

1. Всё вещество состоит из 12 фундаментальных квантовых полей спина ½, квантами которых являются фундаментальные частицы – фермионы, которые можно объединить в три поколения фермионов: 6 лептонов (электрон, мюон, тау-лептон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино), 6 кварков (u, d, s, c, b, t) и 12 соответствующих им античастиц.

2. Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях; заряжённые лептоны (электрон, мюон, тау-лептон) – в слабых и электромагнитных; нейтрино – только в слабых взаимодействиях.

3. Наш мир симметричен относительно трёх типов калибровочных преобразований, в следствие этого существует 3 типа взаимодействий. Частицами-переносчиками взаимодействий являются бозоны: 8 глюонов для сильного взаимодействия, 3 тяжёлых калибровочных бозона (W^+, W^-, Z^0) для слабого взаимодействия, один фотон для электромагнитного.

Для экспериментального подтверждения Стандартной модели необходимо изменить все параметры стандартной модели, включающие фермионные и бозонные массы, константы связи и углы смешивания. Большая часть параметров была измерена на ускорителях еще в прошлом веке. Среди последних экспериментально установленных констант – масса Z^0 бозона M_Z, его полное и парциальные ширины Г, сечение σ.

Для экспериментального подтверждения существования Z^0 и $W^\pm$ бозонов и последующего измерения их параметров был построен коллайдер LEP (Large Electron-Positron Collider) – ускоритель заряженных частиц: электронов и

позитронов, который был построен в международном научно-исследовательском центре CERN и работавший с 1989 по 2000 годы. LEP за одиннадцать лет работы подарил физикам много интересных результатов, самые важные из которых – всестороннее изучение W и Z бозонов. Эксперименты на LEP позволили показать, что слабое и электромагнитное взаимодействия имеют сходную природу и могут быть объединены в рамках одного взаимодействия — электрослабого.

На коллайдере, в числе прочих, проводился эксперимент DELPHI (Detector with Lepton, Photon and Hadron Identification), в котором участвовали и российские ученые из Объединенного Института Ядерных Исследований.

Целью данной курсовой работы является изучение конструкции детектора DELPHI и консолидация итогов работы экспериментов на LEP.

Эксперимент DELPHI.

Коллайдер LEP.

Эксперимент DELPHI начался с момента запуска LEP в августе 1989 года и продлился до ноября 2000 года. С 2000 года и по настоящий момент продолжается обработка экспериментальных данных, полученных в эксперименте.

LEP – электрон-позитронный ускоритель на встречных пучках, представляющий собой коллайдер длинной окружности в 27 км. На LEP есть 4 области столкновений, в которых расположены различные детекторы (DELPHI, ALEPH, L3 и OPAL) задача которых – фиксировать вторичные частицы, появившиеся в результате электрон-позитронной коллизии.

В коллайдере LEP Z-бозоны рождаются в e^+e^- – столкновениях. Диаграммы для изучаемого двухфермионного процесса показана на Рис. 1.

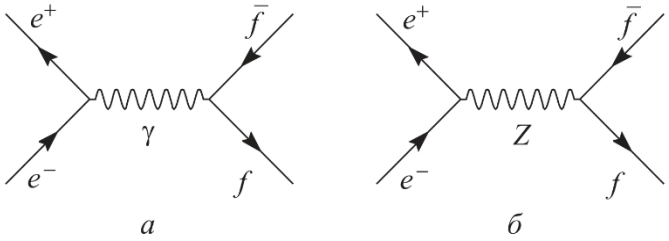

Рис. 1 - Диаграммы, описывающие процесс $e^+e^- \to f\bar{f}$ с обменом а) гамма квантом б) Z-бозоном.

Эти процессы происходят с различной вероятностью, зависящей от энергий налетающих частиц. При некотором значении энергии E подавляющий вклад в сечение реакцию $e^+e^- \to f\bar{f}$ вносит Z-канал (Рис. 2).

Пик на Рис. 2 называется Z-резонансом, область энергий которого близка к массе Z^0-бозона. В борновском приближении этот пик описывается брейтвингеровской формулой (1), а пиковое сечение определено формулой (2):

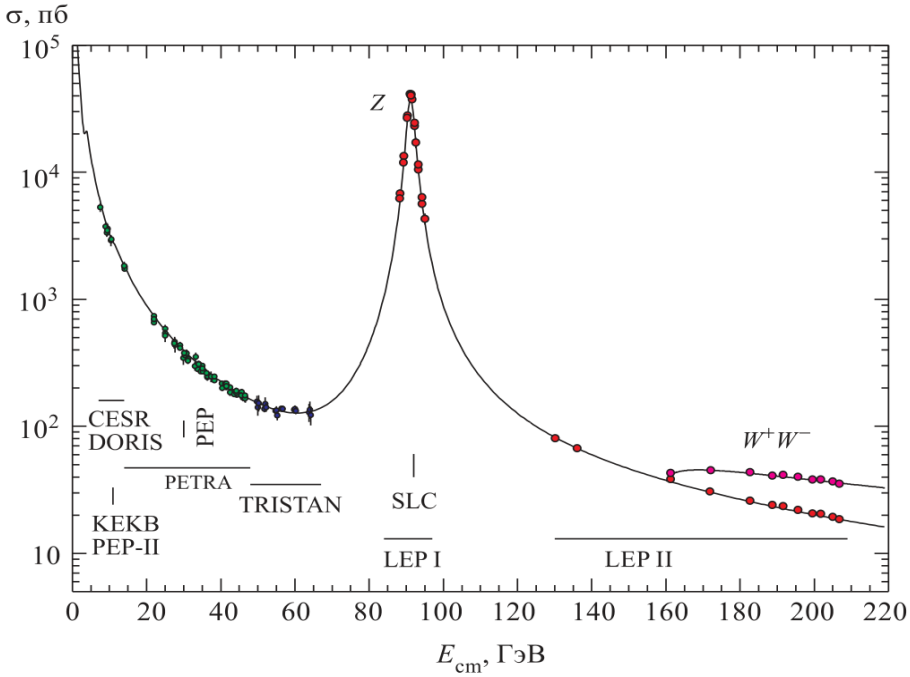

Рис. 2 - Зависимость сечения процесса $e^+e^- \to$ адроны от энергии в СЦМ.

$$\sigma_{ff}^{z} = \sigma_{ff}^{0} \frac{s\Gamma_Z^2}{\left(s-M_Z^2\right)^2+s^2\Gamma_Z^2/M_Z^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{ff}^{0} = \frac{12\pi}{M_Z^2} \cdot \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{f\bar{f}}}{\Gamma_Z^2}, \quad (2)$$

где s – квадрат энергии в Системе Центра Масс (СЦМ), M_z и Γ_z – масса и полная ширина Z-бозона соответственно. Первоначальная энергия столкновений на LEP была выбрана равной около 91 ГэВ, что позволяло получать в реакциях аннигиляции частицу Z^0.

Z-бозон – очень короткоживущая частица, поэтому зарегистрировать непосредственно ее затруднительно. Ее присутствие на коллайдере LEP следует выводить из фрагментов ее дезинтеграции. Одним из детекторов для поиска вторичных частиц является DELPHI.

Детектор DELPHI.

DELPHI – высокоточный детектор общего назначения на LEP, идентифицирующий все виды заряженных частиц (лептонов и адронов), а также фотонов на большей части полного телесного угла. Это возможно благодаря получению данных с черенковских детекторов кольцевого изображения или RICH-детекторов, имеющих усовершенствованный

кремниевый детектор, обеспечивающий очень точное отслеживание, главным образом для обнаружения частиц с очень малым временем жизни путем экстраполяции треков назад к точке взаимодействия. При проектировании детектора особый акцент делался на получение информации в трех измерениях, высокую степень детализации и точное определение вершин треков.

Проектирование DELPHI заняло более 7 лет. Собранный детектор представляет собой центральный цилиндр более 10 метров в диаметре с двумя торцевыми секциями, весящие в сумме около 3500 тонн. Общий вид детектора DELPHI изображен на Рис. 3. Он состоит из более, чем 20 подсистем:

1. дополнительные мюонные камеры;
2. передние мюонные камеры;
3. передний годоскоп;
4. передний адронный калориметр;
5. передняя электромагнитная камера;
6. передняя камера B;
7. передний RICH-детектор;
8. передняя камера A;
9. центральная мюонная камера;
10. центральный адронный калориметр;
11. сцинтилляторы;
12. сверхпроводящий магнит;
13. проекционная камера с высокой плотностью;
14. внешний детектор;
15. центральный RICH-детектор;

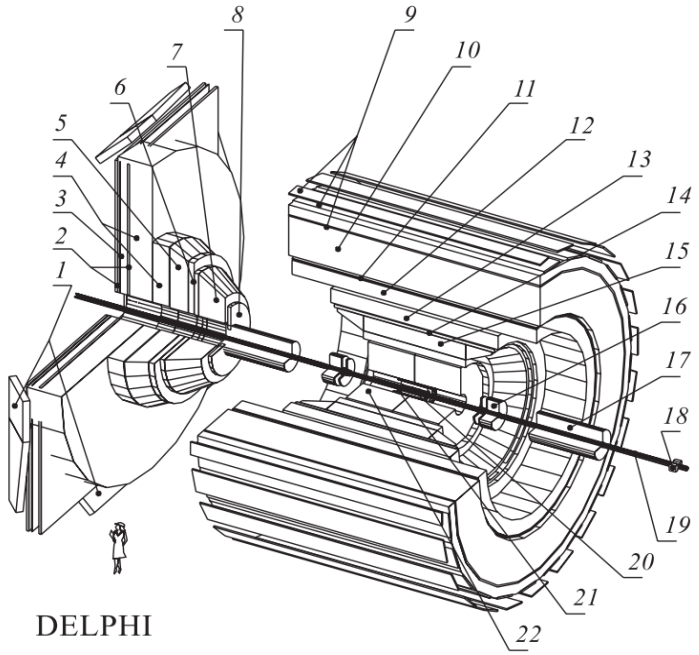

Рис. 3 - Общий вид установки DELPHI.

16. STIC-детектор;
17. квадруполь;
18. VSAT-детектор;
19. вакуумная труба;
20. вершинный детектор;
21. внутренний детектор;
22. времяпроекционная камера.

Пучки электронов и позитронов движутся по вакуумной трубе (19) в противоположных направлениях. Иногда они проходят так близко друг к другу, что сталкиваются и аннигилируют, а продукты реакции вылетают радиально наружу. Огромный сверхпроводящий соленоид (12) создает мощное магнитное поле (порядка 1,23 Тесла) параллельное вакуумной трубе. Это отклоняет траекторию каждой заряженной частицы в спираль, радиус которой пропорционален импульсу частицы.

Трековые детекторы.

В центральной части детектора находятся следующие детекторы: вершинный детектор (20), внутренний детектор (21), времяпроекционная камера (22), внешний детектор (14) и центральная мюонная камера (9).

Вершинный детектор – ближайший к точке столкновения – это современный кремниевый детектор, обеспечивающий очень точное отслеживание, главным образом для обнаружения очень короткоживущих частиц путем экстраполяции треков назад к точке взаимодействия. Он состоит из трех коаксиальных цилиндрических слоев ленточных детекторов с кремниевой полосой переменного тока при средних радиусах 6,3, 9,0 и 10,9 см. В настоящее время охват полярного угла простирается до 25 градусов.

Внутренний детектор обеспечивает информацию о частицах с средним временем жизни и их точном положении. Состоит из двух частей: JET-камеры и триггерных слоев (TL). Измеряет треки в области от 12 до 23 см, охват полярного угла составляет 15 градусов.

Времяпроекционная камера – основное устройство слежения на DELPHI. Позволяет идентифицировать заряженные частицы путем измерения падения энергии за единицу длины траектории dE/dX. Представляет из себя цилиндр

2x130 см, расположенный между радиусами 29 см и 122 см. Детектор обеспечивает точки на траектории частицы при радиусах от 40 до 110 см между полярными углами от 39 до 141 градуса.

Внешний детектор состоит из пяти слоев дрейфовых трубок, расположенных между радиусами 197-206 см. Активная длина детектора соответствует полярным углам от 42 до 138 градусов. Он обеспечивает окончательное точное измерение положения и направления.

В торцевых частях находятся: передние камеры А и В (8 и 6), детектор VFT, передняя и центральная мюонные камеры (2 и 9).

Передняя камера А отдалена от точки столкновения на 160 вдоль трубы. Камеры на передней и задней торцевых частях охватывают углы от 11 до 32 и от 148 до 169 градусов.

Передняя камера В представляет собой дрейфовую камеру на среднем расстоянии в 275 см от точки столкновения. Чувствительная область камеры охватывает углы между 11 и 36 и между 144 и 169 градусами.

3 мюонные камеры наиболее удалены от точки столкновения, т.к. мюоны – единственные частицы, которые могут перемещаться сквозь железо и свинец обоих калориметров без значительного влияния с их стороны. Ожидается, что большинство мюонов импульсов выше 2 ГэВ/с будут проникать в Мюонные камеры, тогда как другие заряженные частицы останавливаются этим материалом.

Регистрация мюонов достигается благодаря сравнению экстраполированных треков из центральной (9, углы от 53,0 до 88,5 градусов и от 91,5 до 127,0 градусов) и торцевых (2, углы от 20 до 42 градусов и от 138 до 160 градусов) мюонных камер. В 1994 году были установлены дополнительные мюонные камеры (1), которые перекрывали угол между центральной и торцевыми мюонными камерами.

В центральной части детектора точность измерений траекторий составляет от 5-10 микрометров в вершинном детекторе, до доли миллиметра во времяпроекционной камере, до 1-3 мм в центральной мюонной камере.

Все эти детекторы служат для точного измерения траекторий заряженных частиц, и, следовательно, точному определению их направлений и импульсов.

Электромагнитные калориметры и сцинтилляционные счетчики.

Определение электронов происходит преимущественно в системе электромагнитных калориметров. Она представлена проекционной камерой с высокой плотностью (13), передней электромагнитной камерой (5) и несколькими малыми калориметрами.

Проекционная камера с высокой плотностью – это калориметр в центральной части DELPHI, представляющий собой цилиндрический слой на наружной части Внешнего Детектора. Представляет собой цилиндр 2x254 см, толщиной 52 см, по большей части состоящий из свинца. Угловое покрытие составляет от 43 до 137 градусов.

Передняя электромагнитная камера – электромагнитный калориметр, состоящий из 2 дисков из свинцового стекла диаметром по 4 метров каждый. Они расположены на расстоянии 284 см от точки столкновения и покрывают углы 8-35 и 145-172 градуса.

Чтобы достичь полной герметичности для детектирования фотонов высокой энергии, в области кабельных каналов были установлены дополнительные сцинтилляторы.

Расчет асимметрий.

Зарядовая асимметрия вперед-назад определяется с помощью чисел событий N_f и N_b в которых лептон от распада Z, имеющий отрицательный заряд, был зарегистрирован в передней и задней полусферах соответственно по отношению к направлению начального электрона:

$$A_{fb} = \frac{N_f - N_b}{N_f + N_b}. \quad (3)$$

По сравнению с измерением полных сечений измерение асимметрий требует дополнительной информации о заряде и угле вылета лептонов. Систематические ошибки возникают, в основном, от неточности определения заряда.

Измерение асимметрии является надежным с экспериментальной точки зрения, т.к. сама асимметрия определена как отношение числа событий и многие неопределенности при ее вычислении полностью или частично сокращаются. Так, например, асимметрия не зависит от распределения светимости, а детекторные эффекты, влияющие на эффективность регистрации, вносят вклад только если они не симметричны по заряду и углу.

Адронные калориметры.

Адронные калориметры (4, 10) – газовые детекторы, встроенные в магнитные скобы, состоящие из металла. Центральный адронный калориметр покрывает область 42,6-137,4 градуса, передние адронные калориметры – между 11,2 и 48,5, 131,5-168,8 градусами.

Адронный калориметр обеспечивает калориметрические измерения энергии заряженных и нейтральных адронов (сильно взаимодействующих частиц). Калориметры позволяют получить подробную картину адронных ливней, различать ливни частиц, вызванные нейтральными и заряженными адронами, с высокой точностью идентифицировать мюоны. Результат совместной работы трековых детекторов и электромагнитных калориметров представлен на Рис. 4.

Определение заряженных адронов.

Идентификация заряженных адронов в DELPHI заключается в измерении удельных потерь энергии на ионизацию за единицу длины пробега частицы dE/dX в времяпроекционной камере, в черенковском детекторе. Черенковские детекторы кольцевого изображения (RICH детекторы) основаны

на наблюдении черенковского излучения, вызванного частицами. DELPHI RICH содержит два сцинтиллятора с различными показателями преломления. Жидкостный сцинтиллятор используется для нахождения частиц с энергиями от 0,7 до 9 ГэВ/с, газовые детекторы используются на энергиях в диапазоне от 2,5 до 25 ГэВ/с. Полный охват угла обеспечивается двумя независимыми детекторами, один в торцевых зонах и один в центральной части детектора.

Центральный RICH-детектор (15) расположен между времяпроекционной камерой и внешним трековым детектором. Он представляет собой цилиндр длиной 350 см с внутренних радиусов 123 см, и внешним 197 см, разделенный на 2 половины центральной поддерживающей стенкой толщиной 6,5 см. Покрывает полярный угол между 40 и 140 градусами.

Передний RICH-детектор (7) – диск, расположенный на расстоянии 170-270 см от точки контакта м покрывает полярный угол в диапазоне 15-35 и 145-165 градусов

Измерение светимости.

Точное измерение светимости, необходимое для вычисления сечения, проводилось в каждом эксперименте с помощью нормировки на процесс малоуглового баба-рассеяния. Этот процесс имеет большое сечение, которое с

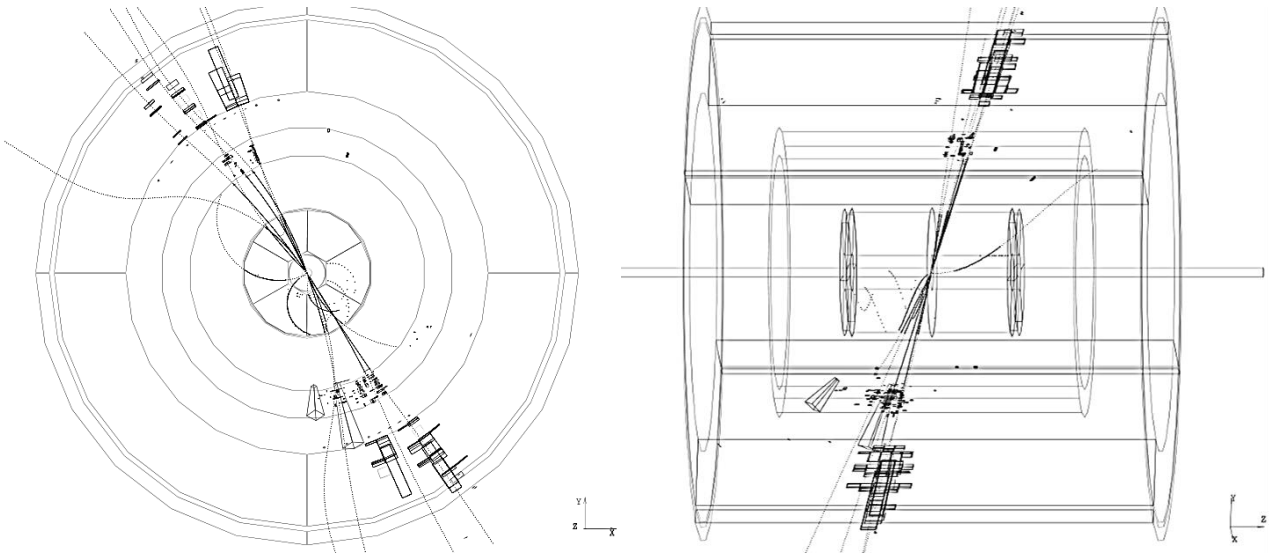

Рис. 4 - Детектирование распада Z-бозона в 2 джета.

высокой точностью рассчитывается в квантовой электродинамике. На DELPHI абсолютная светимость измерялась на STIC и VSAT детекторах.

STIC – The Small angle TIle Calorimeter (16) – это свинцовый сцинтилляторный калориметр, образованный двумя цилиндрическими детекторами, расположенными по обе стороны от области взаимодействия DELPHI на расстоянии 220 см, и охватывает угловую область между 29 и 185 мрад в полярном угле (от 6,5 до 42 см в радиус). Точность измерений на STIC составила: 0,09% - экспериментальная систематическая ошибка, 0,06 – теоретическая.

VSAT – The Very Small Angle Tagger (18) – состоит из 4-х калориметрических модулей. Каждый такой модуль состоит из 12 кремниевых диодов. Он обнаруживает электроны и позитроны, исходящие от Баба-рассеяния между 5 и 7 мрад. Использование VSAT позволило уменьшить систематическую ошибку определения полной ширины Z-бозона.

Экспериментальное определение сечения процесса $e^+e^- \to f\bar{f}$ производилось по обычной формуле:

$$\sigma_{f\bar{f}}(E_{cm}) = \frac{N_{ev} - N_{bg}}{\epsilon L}, \quad (4)$$

где $\sigma_{f\bar{f}}(E_{cm})$ – сечение в зависимости от энергии столкновений в СЦМ, $E_{cm} = \sqrt{s}$; N_{ev} – полное число зарегистрированных событий, N_{ev} – число ожидаемых фоновых событий; ϵ – эффективность регистрации; L – интегральная светимость. Определение энергии производилось централизованно для всех четырех экспериментов на LEP, остальные величины измерялись непосредственно на самих установках.

За годы работы в области Z-резонанса интегральная светимость LEP составила порядка 210 пб$^{-1}$ в каждом из экспериментов.

Результаты измерений на LEP.

Интерпретация измерений сечений и асимметрий в рамках стандартной модели.

Измеренные при энергиях LEP вблизи Z-резонанса адронные и лептонные сечения и лептонные асимметрии использовались для определения параметров Z-бозона. В качестве параметров были выбраны:

- масса Z^0 M_Z и его полная ширина Γ_Z;
- пиковое адронное сечение σ_{had}^{pole};
- отношения парциальных ширин $R_e \equiv \frac{\Gamma_{had}}{\Gamma_{ee}}, R_\mu \equiv \frac{\Gamma_{had}}{\Gamma_{\mu\mu}}, R_\tau \equiv \frac{\Gamma_{had}}{\Gamma_{\tau\tau}}$, которые случае лептонной универсальности представлены только одним параметром $R_l \equiv \frac{\Gamma_{had}}{\Gamma_{ll}}$;
- пиковые лептонные асимметрии $A_{FB}^{0e}, A_{FB}^{0\mu}, A_{FB}^{0\tau}$, которые в случае лептонной универсальности представлены параметром A_{FB}^{0l}.

Выбор таких параметров был продиктован практическим соображением минимальных корреляций между параметрами. Это делает процедуру фитирования данных более устойчивой, а также более очевидной становится интерпретация ошибок параметров и процедура объединения результатов с другими экспериментами LEP.

Основными источниками корреляций систематических ошибок измерений были: ошибки определения энергии LEP, ошибки определения светимости и ошибки самой процедуры измерения сечения и асимметрии для определения конечного состояния адронов и лептонов.

В результате фитирования данных были получены значения параметров Z-бозона, приведенные в таблицах 1-3.

Таблица 1 - Параметры Z-бозона,
полученные из измерений на DELPHI
без предположения лептонной универсальности

Параметр	Значение
M_Z, ГэВ	$91{,}1864 \pm 0{,}0028$
Γ_Z, ГэВ	$2{,}4876 \pm 0{,}0041$
σ_{had}^{pole}, нб	$41{,}578 \pm 0{,}069$
R_e	$20{,}88 \pm 0{,}12$
R_μ	$20{,}65 \pm 0{,}08$
R_τ	$20{,}84 \pm 0{,}13$
A_{FB}^{0e}	$0{,}0171 \pm 0{,}0049$
$A_{FB}^{0\mu}$	$0{,}0165 \pm 0{,}0025$
$A_{FB}^{0\tau}$	$0{,}0141 \pm 0{,}0039$

Таблица 2 - Параметры Z-бозона,
полученные из всех данных LEP
без предположения лептонной универсальности

Параметр	Значение
M_Z, ГэВ	$91{,}1876 \pm 0{,}0021$
Γ_Z, ГэВ	$2{,}4952 \pm 0{,}0023$
σ_{had}^{pole}, нб	$41{,}541 \pm 0{,}037$
R_e	$20{,}804 \pm 0{,}050$
R_μ	$20{,}785 \pm 0{,}033$
R_τ	$20{,}764 \pm 0{,}045$
A_{FB}^{0e}	$0{,}0145 \pm 0{,}0025$
$A_{FB}^{0\mu}$	$0{,}0169 \pm 0{,}0013$
$A_{FB}^{0\tau}$	$0{,}0188 \pm 0{,}0017$

Таблица 3 - Параметры Z-бозона,
полученные из измерений на DELPHI
в предположении лептонной универсальности

Параметр	Значение
M_Z, ГэВ	$91{,}1863 \pm 0{,}0028$
Γ_Z, ГэВ	$2{,}4876 \pm 0{,}0041$
σ_{had}^{pole}, нб	$41{,}578 \pm 0{,}069$
R_l	$20{,}730 \pm 0{,}060$
A_{FB}^{0l}	$0{,}0187 \pm 0{,}0019$

Измеренные параметры для разных лептонных конечных состояний хорошо согласуются друг с другом в пределах ошибок, подтверждая тем самым гипотезу лептонной универсальности. В предположении лептонной универсальности набор параметров, описывающих данные, сокращается до пяти, из которых 3 остаются практически теми же (Таблица 3). Эти измерения параметров Z-бозона в дальнейшем используются в глобальном анализе мировых данных, который проводится для проверки стандартной модели.

Глобальная проверка стандартной модели.

Проверка лептонной универсальности.

Результаты измерений параметров Z-бозона, приведенные выше, могут быть представлены в терминах парциальных ширин. При этом парциальная

ширина распада Z на все типы нейтрино может быть вычислена через баланс измеренных полной и парциальной адронной и лептонной ширин: $\Gamma_{inv} = \Gamma_Z - \Gamma_{had} - \Gamma_{ee} - \Gamma_{\mu\mu} - \Gamma_{\tau\tau}$. Результаты измерений парциальных ширин представлены в Таблица 4.

Для более ясного представления об уровне количественной проверки гипотезы лептонной универсальности результаты измерений были также представлены в виде отношений парциальных ширин:

$$\frac{\Gamma_{\mu\mu}}{\Gamma_{ee}} = 1{,}0009 \pm 0{,}0028, \quad (5)$$

$$\frac{\Gamma_{\tau\tau}}{\Gamma_{ee}} = 1{,}0009 \pm 0{,}0032. \quad (6)$$

Оба этих измерения хорошо согласуются с единицей в пределах ошибок, что подтверждает гипотезу лептонной универсальности.

Таблица 4 - результаты измерений парциальных ширин Z-бозона.

Параметр	**Среднее, МэВ**
Без предположения лептонной универсальности	
Γ_{had}	1745,8 ± 2,7
Γ_{ee}	83,92 ± 0,12
$\Gamma_{\mu\mu}$	83,99 ± 0,18
$\Gamma_{\tau\tau}$	84,08 ± 0,22
Γ_{inv}	497,4 ± 2,5
В предположении лептонной универсальности	
Γ_{had}	1744,4 ± 2,0
Γ_{ll}	83,984 ± 0,086
Γ_{inv}	499,0 ± 1,5

Число поколений нейтрино.

В Стандартной модели измеренная невидимая ширина Γ_{inv} отождествляется с распадами Z-бозона на нейтрино разного типа. Таким образом, используя предсказание Стандартной модели для парциальной ширина распада на один из типов нейтрино $\Gamma_{\nu\nu}$, измерения Γ_{inv} можно представить как измерение числа типов нейтрино N_ν или числа поколений фундаментальных фермионов:

$$R_{inv} \equiv \frac{\Gamma_{inv}}{\Gamma_{ll}} = N_\nu \frac{\Gamma_{\nu\nu}}{\Gamma_{ll}} \quad (7)$$

Откуда, и из теоретического значения $\frac{\Gamma_{\nu\nu}}{\Gamma_{ll}} = 1{,}9912 \pm 0{,}0012$, получаем количество поколений фундаментальных фермионов:

$$N_{nu} = 2{,}9841 \pm 0{,}0083, \quad (8)$$

что с высокой точностью подтверждает существование только трех уже известных поколений.

Дальнейшая проверка Стандартной модели.

После четкого установления всех типов квантовых поправок вся совокупность экспериментальных данных может быть использована для общего анализа, в котором наилучшим образом будут определены другие параметры стандартной модели. Полный список всех измерений приведен в Таблица 5.

Анализ всех измерений также позволил найти верхнюю границу массы бозона Хиггса. Она, на 95% уроне точности, составляет:

$$M_H < 196\text{ГэВ}, \quad (9)$$

что находится в непосредственной досягаемости на новом коллайдере LHC.

Таблица 5 - Полный набор измерений для проверки Стандартной модели.

Параметр	Измерение и полная ошибка	Сист. ошибка	Значение в СМ	Откло-нение
$\Delta\alpha_{\rm had}$	$0,02761 \pm 0,00036$	$0,00035$	$0,02774$	$-0,3$
M_Z, ГэВ	$91,1875 \pm 0,0021$	$0,0017$	$91,1874$	$0,0$
Γ_Z, ГэВ	$2,4952 \pm 0,0023$	$0,0013$	$2,4963$	$-0,5$
$\sigma_{\rm had}^{\rm pole}$, нб	$41,540 \pm 0,037$	$0,028$	$41,481$	$1,6$
R_l	$20,767 \pm 0,025$	$0,007$	$20,739$	$1,1$
$A_{\rm FB}^{0l}$	$0,0171 \pm 0,0010$	$0,0003$	$0,0165$	$0,7$
$\mathcal{A}_l$ (SLD)	$0,1513 \pm 0,0021$	$0,0010$	$0,1483$	$1,5$
$\mathcal{A}_l$ (P_τ)	$0,1465 \pm 0,0033$	$0,0009$	$0,1483$	$-0,5$
R_b	$0,21646 \pm 0,00065$	$0,00056$	$0,21573$	$1,1$
R_c	$0,1719 \pm 0,0031$	$0,0028$	$0,1723$	$-0,1$
$A_{\rm FB}^{0b}$	$0,0990 \pm 0,0017$	$0,0010$	$0,1039$	$-2,9$
$A_{\rm FB}^{0c}$	$0,0685 \pm 0,0034$	$0,0019$	$0,0743$	$-1,7$
$\mathcal{A}_b$	$0,922 \pm 0,020$	$0,017$	$0,935$	$-0,6$
$\mathcal{A}_c$	$0,670 \pm 0,026$	$0,016$	$0,668$	$0,1$
$\sin^2\theta_{\rm eff}^{\rm lept}$ $(q\bar{q})$	$0,2324 \pm 0,0012$	$0,0008$	$0,23136$	$0,9$
$m_{\rm top}$, ГэВ $(p\bar{p})$	$174,3 \pm 5,1$	$4,0$	$175,8$	$-0,3$
M_W, ГэВ $(p\bar{p})$	$80,454 \pm 0,060$	$0,050$	$80,398$	$0,9$
M_W, ГэВ (LEP2)	$80,450 \pm 0,039$	$0,030$	$80,398$	$1,3$
$\sin^2\theta_W$ (νN)	$0,2255 \pm 0,0021$	$0,0010$	$0,2226$	$1,2$
Q_W(Cs)	$-72,5 \pm 0,7$	$0,6$	$-72,9$	$0,6$

Заключение.

Планирование и проведение эксперимента DELPHI заняло в сумме более 30 лет. За это время произведена колоссальная работа по проектированию детектора, сбору данных и обработке полученной информации.

Детектор DELPHI – сложная система по проведению комплексных измерений на e^+e^- коллайдере LEP, состоящий из более чем 20 подсистем. Он содержит все необходимые субдетекторы для идентификации всех вторичных частиц распада Z-бозона: фермионов, адронов и фотонов.

В ходе работы LEP с высокой точностью измерены: масса Z-бозона, полная и парциальные ширины Z-бозона и их отношения, сечение Z-бозона в реакциях $e^+e^- \rightarrow$ адроны, а также лептонные пространственные асимметрии вперед-назад.

В тоже время были проверены предположение о лептонной универсальности и количество поколений фундаментальных фермионов, предсказанные Стандартной моделью. Вся совокупность экспериментальных данных, полученных на LEP, может быть использована для общего анализа, в котором наилучшим образом будут определены другие параметры стандартной модели.

Полученные результаты с высокой точностью подтверждают справедливость стандартной модели – теории в физике элементарных частиц, доказавшей свою надежность и применимость вплоть до самой высокой точности измерений, доступной в современных экспериментах.

Литература.

1. *Прецезионная проверка стандартной модели в экспериментах на LEP.* **Ольшевский, А.Г.** 2003 г., Физика элементарных частиц и атомного ядра, стр. 1090-1124.

2. **Капитонов, И.М.** *Введение в физику ядра и частиц.* Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010.

3. **НИИЯФ МГУ.** *Ядерная физика в интернете.* [В Интернете] http://nuclphys.sinp.msu.ru/.

4. ***DELPHI Experiment.*** **[Online] http://delphiwww.cern.ch/.**