

Проверка Стандартной модели с помощью прецизионных измерений параметров Z-бозона

Verification the Standard Model with precision measurements parameters of the Z-boson

Курсовая работа - Галкина Евгения

Научный руководитель - Ольшевский Александр Григорьевич

МГУ им. М.В.Ломоносова, 2018

Введение

На сегодняшний день Стандартная модель считается устойчивым аппаратом для описания с единой позиции всех четырех типов взаимодействий фундаментальных частиц. Стандартная Модель (СМ) физики частиц базируется на квантовой электродинамике, квантовой хромодинамике и кварк-партонной модели. При существующих энергиях ускоренных частиц хорошо выполняются все положения КХД и тем более КЭД.

История создания Стандартной модели — это история удивительных успехов, как в наблюдении новых частиц, так и в построении теории. Прорывом в развитии Стандартной Модели стала теория кварковой структуры адронов, предложенная в 1963 году [М. Гелл-Маном](#) и [Цвейгом](#), которая позволила провести первичную классификацию частиц и взаимодействий. Дальнейшее развитие было стимулировано открытием в 1970-х годах новых частиц — с «очарованным» c -кварком, «прелестным» b -кварком и t -лептона. СМ были предсказано существование переносчиков взаимодействий — калибровочных бозонов W , Z -кварка, обладающего большой массой порядка ГэВ, а также бозона, реализующего механизм генерации всех частиц. Вместе с этим возникла потребность доказать существование данных частиц.

В 1980-х годах экспериментальное наблюдение переносчиков слабых взаимодействий, W - и Z -бозонов на ускорителе SPS в CERN послужило блестящим показателем справедливости основ СМ. Подтверждение существования в 1990-х годах t -кварка окончательно сформировало сегодняшнюю конфигурацию СМ. Последней частицей, предсказанной в рамках СМ, был бозон Хиггса, открытый в 2012 году. Экспериментальные проверки СМ были реализованы на большом электронно-позитронном коллайдере (LEP), CERN. Этот ускоритель встречных электрон-позитронных пучков за все свое время работы позволили провести статистику млн. распадов Z - и W -бозонов, что позволило измерить параметры распадов, а также провести поиски хиггс-бозона и новых частиц. Высокий уровень точности экспериментов на LEP позволяет провести сравнение измерений с предсказаниями теории с точностью около 10^{-3} .

В данном обзоре будет рассмотрен эксперимент по проверке полноты Стандартной модели на LEP(CERN).

Целью обзора является обзор проведения проверки Стандартной Модели с помощью определения числа поколений нейтрино в экспериментах на LEP(CERN).

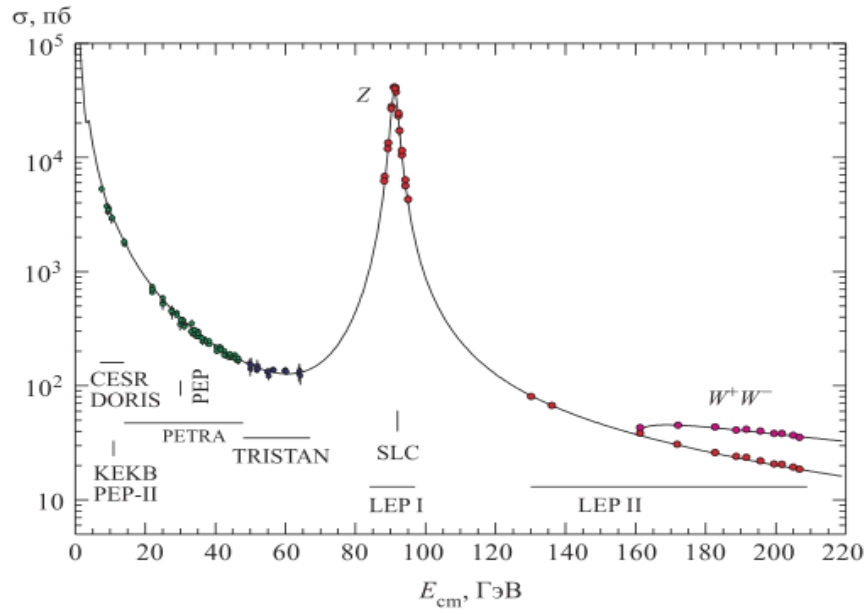
Определение числа поколений фермионов на LEP

В процессе e^+e^- аннигиляции происходит рождение Z-бозонов, измерение параметров распадов которых имеет особое значение в проверке Стандартной Модели и уточнении её параметров.

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

Наиболее прецизионные данные о Z-бозоне были получены на двух e^+e^- -коллайдерах LEP (CERN, Швейцария). Одним из наиболее существенных результатов этих исследований было определение числа лептонных поколений. Было показано, что существует только три поколения фундаментальных фермионов.

Время жизни Z-бозона крайне мало ($\tau \approx 10^{-25}$ с) и его рождение можно зафиксировать только по распаду на другие частицы: кварковые пары, образующие адроны, пары заряженных лептонов, нейтринные пары. (Моды распада показаны на рисунке). Отбор событий распада Z-бозона в определенное конечное состояние проводился по критериям, учитывающие энергетические характеристики частиц. Распад 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, направленных в противоположные стороны. Адронные распады Z отличаются множественностью (88% событий) и суммарной энергией заряженных частиц. В 12% случаев с одинаковой вероятностью (~4%) рождаются 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 представляли "не наблюдаемые" события и представляют особый интерес в определении числа поколений фермионов.



Процесс рождения Z -бозона (или процесс его обмена при аннигиляции электрон-позитрона) наблюдается в виде резонанса в кривой зависимости числа распадов Z -бозона от энергии столкновения e^+e^- . Сечение процесса образования Z -бозона в борновском приближении определяется брейтвингеровской формулой:

$$\sigma_{ff}^Z = \sigma_{ff}^0 \frac{s\Gamma_Z^2}{(s - M_Z^2)^2 + s^2\Gamma_Z^2/M_Z^2},$$

Максимум числа распадов приходится на энергию $E_{e^+} + E_{e^-} = m_Z c^2 \approx 91$ ГэВ и его «пиковое» сечение определяется, как:

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

Ширина Γ резонанса в сечении e^+e^- взаимодействия связана с временем жизни резонанса τ соотношением: $\Gamma \times \tau \approx \hbar$.

Парциальные ширины распада, соответственно $\Gamma_{\text{hadron}}, \Gamma_{e\mu\tau}$. Полная ширина распада Z -бозона, есть .

В данном случае полные и парциальные ширины являются выгодными параметрами в проверке СМ, так как мы можем измерить их экспериментально или же данные величины могут быть теоретически предсказаны на базе других измеренных параметров.

В соответствии со Стандартной Моделью заряженные лептоны всех поколений одинаково участвуют в слабых взаимодействиях. Поэтому лептоны e, μ, τ вносят одинаковый вклад Γ_ν в парциальную ширину $\Gamma_{e\mu\tau}$. Это свойство слабого взаимодействия подтверждено экспериментально и носит название *e $\mu\tau$ -универсальность*. В соответствии с этим можно записать

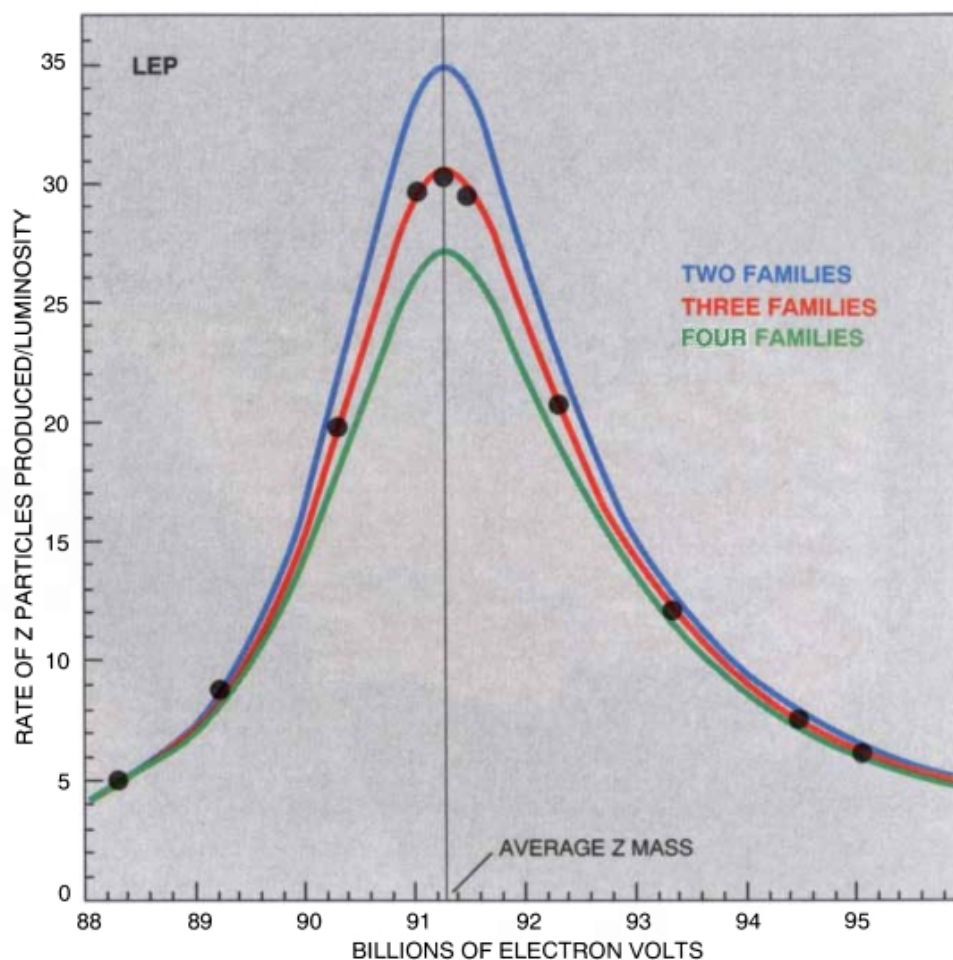
$$\Gamma_{inv} = N_\nu \Gamma_{\nu\nu}$$

Именно сравнение парциальной ширины распада Z-бозона на нейтрино и антинейтрино, предсказанное СМ и вычисленное с помощью «видимых» ширин распада бозона позволит нам определить количество поколений нейтрино. На практике требуется знание предсказанной величины с лучшей точностью отношение парциальных ширин:

$$R_{inv} \equiv \frac{\Gamma_{inv}}{\Gamma_U} = N_\nu \frac{\Gamma_{\nu\nu}}{\Gamma_U}$$

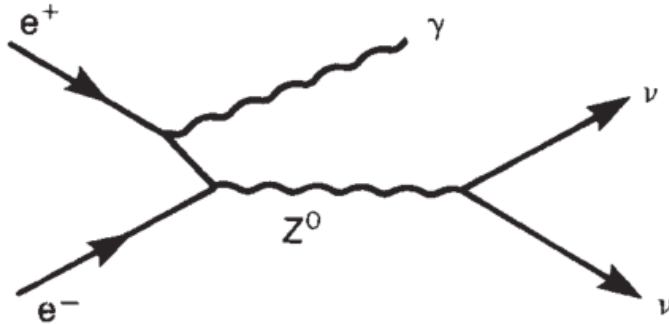
$$N_\nu = 2,9841 \pm 0,0083 \approx 3$$

, прекрасно согласуется с вычислениями в рамках СМ с тремя поколениями нейтрино, что видно на рис., на котором приведено сравнение измеренного сечения аннигиляции e^+e^- как функция полной энергии пары e^+e^- с теорией в разных предположениях о числе поколений нейтрино.



Определение числа поколений фермионов в эксперименте L3 на LEP.

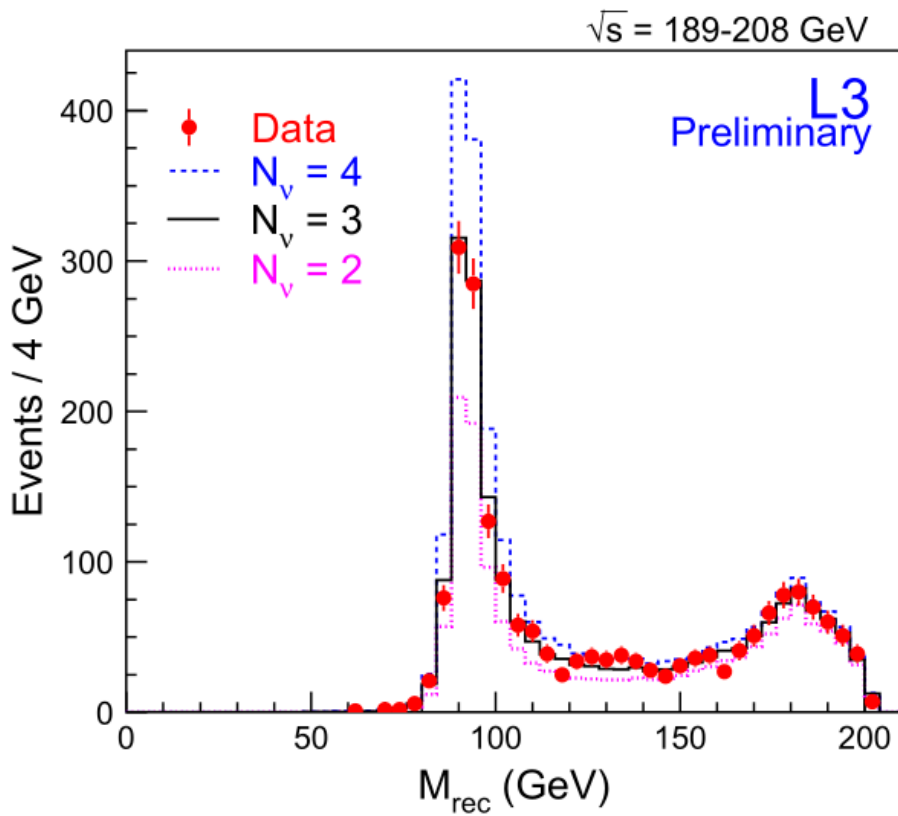
$$e^+e^- \rightarrow \gamma(\gamma) + \text{invisible particles}$$



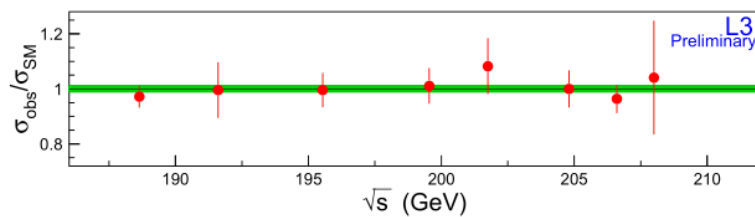
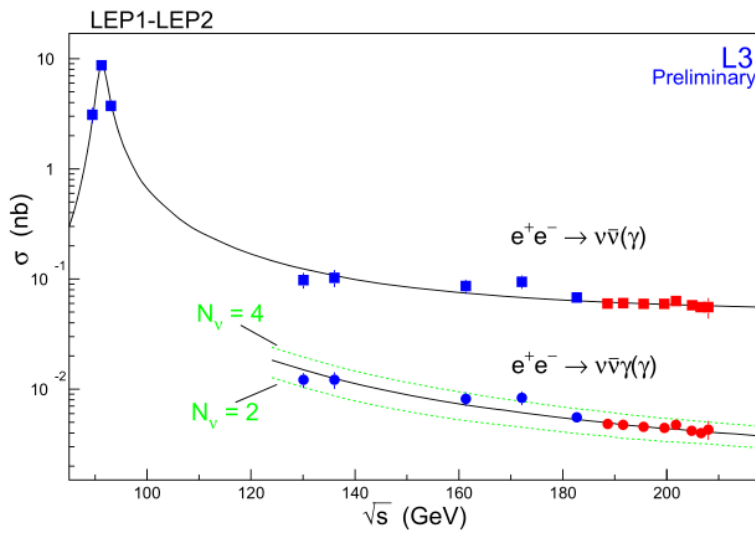
В стандартной модели полное затухание с Из Z прогнозируется около 2,56 Гэв. Это может быть измеренный с точностью около 50 MeV на LEP, который к сравните с частично шириной спада 170 MeV в нейтринные виды. Таким образом точность LEP в полном спаде Ширина соответствует, однако, если Ширина затухания оказалось, что больше, чем ожидалось, мы не могли сразу предположим, что это было связано с одним (или несколькими) дополнительными видами нейтрино.

Возможно, были и другие неожиданные режимы распада Z, а следовательно, будет пара leppainstaking экспериментальной работы потребуются расхлебывать 18-20 них. Один альтернативная стратегия подсчета нейтрино состоит в том, чтобы взять данные при энергии на несколько Гэв выше массы Z и искать излучательную продукцию Z вечную Z, где только Фотон (ν) с энергией нескольких Гэв видно, и Z распадается на невидимое слабо взаимодействующие частицы, как видно в Рис.3. В стандартной модели, поперечное сечение за-Е-Г ничего не видно в эти энергии прямо пропорциональна N. в этом так, как оно должно быть можно измерить N, независимо со статистической точностью $\Delta N \approx 0.3$. Как уже упоминалось ранее, мы должны быть открыты к возможности, что очевидное значение N не будет целым числом, из-за Z распадаются на другие ненаблюдаемые нейтральных частиц. Например, в минимальном суперсимметричном расширении стандартной модели можно иметь видимый N, от 3,1 до 37.

$$=2,95$$



Определение числа поколений нейтрино с помощью измерения полного сечения событий будет уступать по точности способу определения спектра масс, но имеет место существовать и будет рассчитываться в соответствии с формулами, приведенными в определении N_ν в двухфермионном процессе.



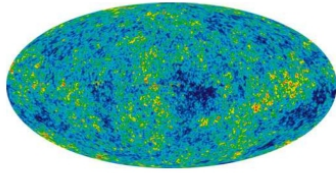


Рис. 5: Температурная карта реликтовых фотонов за вычетом их средней температуры и дипольной компоненты, связанной с движением Солнечной системы. Температура меняется от $-200\mu\text{K}$ до $200\mu\text{K}$ (темно-синие и красные области соответственно в цветном рисунке).

На графике видно, что энергия продуктов распада более по массе чем масса в пиковом сечении, но высвобождая образовавшуюся энергию в соответствии с законом сохранения происходит радиационный возврат обеспечивая скачок высвободившейся энергии в результате чего может быть зафиксирован пик резонанса распада на моды нейтрино. Метод измерений совершенно схож с обобщенным экспериментом.

Космологический подход к проверке СМ:

Заключение о существовании трёх поколений фундаментальных фермионов согласуется с данными о количестве поколений фундаментальных фермионов, полученными независимо из анализа распространенности водорода и гелия во Вселенной. Результат Z соответствует космологическому доказательству супергалактического масштаба.

После Большого Взрыва, при расширении Вселенной материя была настолько большой температуры, что нейтрон был способен распастись в протон-электронную пару, поскольку последний должен был объединиться, чтобы сформировать нейтрон. Но, так как при расширении происходило охлаждение, более тяжелые нейтроны легче переходили в протоны, чем протоны превращались в нейтроны. Поэтому соотношение нейтрон-протон неуклонно падало. Когда расширение привело к тому, что температура Вселенной ниже одного миллиарда кельвинов, протоны и нейтроны впервые смогли сплавиться, образуя некоторые из более легких элементов, главным образом гелия. Полученные в результате численность критически зависят от отношения нейтронов к протонам во время формирования легких элементов. Это соотношение, в свою очередь, зависит от скорости расширения и охлаждения Вселенной. На этом этапе каждое семейство световых нейтрино, то есть любое, составляющие которого имеют массу, меньшую, чем около 10^6 эВ, значительно снижает плотность энергии и скорость охлаждения. Т.е. число типов нейтрино вносит существенный вклад в плотность энергии и скорость остывания Вселенной после Большого взрыва, оно определяет соотношение между количеством нейтронов и протонов, образующихся в момент дозвездного нуклеосинтеза и, следовательно, соотношение между количеством ядер ^4He и ^1H , образующихся “в первые минуты” эволюции Вселенной. Наблюдаемое соотношение ядер ^4He и водорода ^1H , равное примерно 0.1 , говорит о том, что число легких типов нейтрино может быть два или три и противоречит наличию четырех и более типов нейтрино.

Независимая проверка Стандартной Модели

Как известно, сейчас Вселенная заполнена реликтовыми фотонами с распределением по энергии хорошо описываемым планковским спектром с температурой . Фотоны имеют плотность и энергию: . Не смотря на постоянство температуры в каждой точке Небесного пространства ,измерив температуру более точно мы обнаружим, что в направлении на сверхскопление Гидра-Центавра фотоны приходят немного «горячее», примерно на 10^{-3}K . Эта анизотропия, называемая дипольной, объясняется эффектом Доплера, возникающим вследствие того, что Солнечная система движется в направлении на сверхскопление Гидра-Центавра со скоростью относительно изотропного Планковского поля излучения, искажает этот спектр излучения с Температурой:

Увеличивая точность измерений и вычитая эффект Доплера, получим увеличение температуры фотонов с различных направлений примерно на 10^{-5}K .

Измерения анизотропии температуры реликтовых фотонов с наилучшей точностью провела коллаборация WMAP. Наилучший фит данных WMAP вместе с другими астрофизическими данными дает:

Не смотря на то, что Космологические подходы проверки уступают в несколько порядков точности и экспериментальным измерениям на LEP, они также подтверждают существование не более трех поколений нейтрино, что является позитивным фактором в справедливости Стандартной модели.

Заключение:

Итогом многолетней работы установок LEP являются измеренные параметры Z-бозона, такие как сечения рождения и вероятности распада Z-бозона. Сравнение данных с теоретическими предсказаниями СМ позволили совершить ее проверку и определить число поколений легких нейтрино. Справедливость данного предположения подтверждается великолепным согласием результатов с уже известным числом поколений нейтрино, а также совпадением значений различных экспериментов на LEP с учетом погрешностей; Несомненно позитивный вклад вносят космологические независимые проверки, основанные на

представление эволюции Вселенной, в следствие чего получаем согласования с данной теорией, что является дополнительным фактом справедливости теории.

	Объединенные результаты
$=2,95-$	L3
4	Независимая проверка
$N_{\nu}=3$	Теоретическое предположение

Литература:

1. Olshevskii AG Precision check of the standard model in experiments on LEP. // *Physics of Elementary Particles and the Atomic Nucleus*,. T.4, Vol. 5, .str 1091,1124. (2003)
2. L3 Collab., M. Acciarri et al., Single and Multi-Photon Events with Missing Energy in ee collisions at $s=189$ GeV.// *Phys.Lett.* (1999)
3. John Ellis,Physics opportunities at LEP.//*Nature*,277(1989)
4. Guido Altarelli, Ronald Kleiss and Claudio Verzegnassi.// *Z PHYSICS AT LEP1. Geneva 1989.*
5. Gary J. Feldman and Jack Steinberger.// *The Number of Families of Matter, SCIENTIFIC AMERICAN*(1991)
6. D.V. Naumov.Introduction to neutrino physics, //J.I. N. R., Dubna(2010)
7. Lecture,MSU, Dubna the Standard model of particles//archive