Вопрос по выбору

Симметрии в стандартной модели

Карташов Констанин Б04-005

I Обзор стандартной модели

Физика элементарных частиц на сегодняшний день прекрасно описывается стандартной моделью (СМ) фундаментальный взаимодействий, которая аккумулирует в себе все достижения последних лет. Под стандартной моделью подразумевается квантово-полевая теория, которая описывает микромир на самом фундаментальном известном на сегодня уровне. При этом элементарными полями в СМ являются кварки и лептоны, которые участвуют в четырёх видах взаимодействий: сильном, слабом, электромагнитном и юкавском, осуществляемых обменом квантами соответствующих полей. В СМ присутствует также поле спина нуль, называемое хиггсовским бозоном, взаимодействие с которым обеспечивает массы всех элементарных частиц. Гравитация, не входит в СМ.

К фермионам относятся кварки трёх поколений: **u** и **d** – первое, **c** и **s** – второе, **t** и **b** – третье, кварки типа **u** имеют проекцию слабого изоспина (слабого изотопического спина) $I_3 = +1/2$ и электрический заряд $Q = +2/3$, для кварков типа **d**: $I_3 = -1/2$, $Q = -1/3$. Кварк также имеет один из трёх цветовых зарядов (*к, с, з*), и соответствующий ему анти-кварк.

Также к фермионам относится три поколения лептона: **электрон** и **электронное нейтрино**, **мюон** и **мюонное нейтрино**, **тау-лептон** и **тау-нейтрино**. Лептоны типа электрона имеют электрически заряд $Q = -1$ и проекцию слабого изоспина $I_3 = +1/2$, нейтрино имеют $Q = 0$ и $I_3 = -1/2$.

К калибровочным бозонам относятся: фотоны – переносчики электромагнитного взаимодействия, $Z^0, W^{\pm 1}$ бозоны – переносчики слабого взаимодействия, глюоны 8 типов – переносчики сильного взаимодействия. Также в СМ входит скалярный бозон Хиггса – определяющий массы элементарных частиц.

II Симметрии стандартной модели

Многие предсказания СМ строятся на сохранении определённых симметрий. Симметриями в квантовой теории поля называются преобразования координат и (или) полевых функций, относительно которых инвариантны уравнения движения, а значит, инвариантно действие. Сами преобразования при этом образуют группу. Симметрии называются глобальными, если соответствующие преобразования не зависят от 4-координат. В противном случае говорят о локальных симметриях. Группы преобразований обычно рассматриваются в некотором представлении — элементам групп соответствуют операторные (матричные) функции параметров.

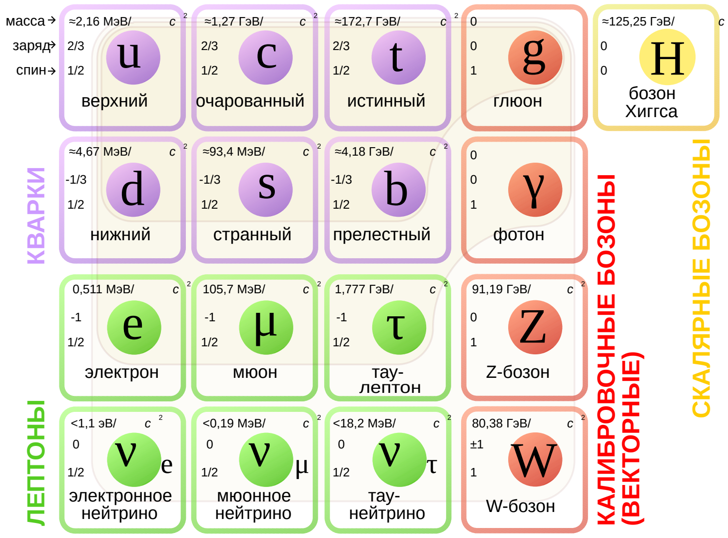

Рис. 1: Элементарные частицы стандартной модели

i CPT-теорема

Рассмотрим симметрии природы, связанные с возможностью замены правого на левое, частицы на античастицу и обращения времени. Оказывается, что все три операции – зарядового сопряжения $\hat{C}$ (замены частиц античастицами), пространственной инверсии $\hat{P}$ (замены координаты $\mathbf{r}$ на $-\mathbf{r}$) и обращения времени $\hat{T}$ (замены времени t на $-t$), взятые вместе не являются совсем независимыми. Произведённые последовательно друг на другом, преобразования $\hat{C}$, $\hat{P}$, $\hat{T}$ обязаны не менять никаких следствия теории (т.е. $\hat{C}\hat{P}\hat{T} = 1$). Это утверждение носит название CPT-теоремы.

Из CPT-теоремы, в частности следует, что массы и времена жизни частицы и античастицы равны, магнитные моменты различаются только знаком, взаимодействие частицы и античастицы с гравитационным полем одинаково. На опыте не обнаружено ни одного случая нарушения CPT-инвариантности.

В то же время мы теперь знаем, что в слабых взаимодействиях нарушаются как P- и C-инвариантности, так и CP-инвариантность. Несохранение чётности было обнаружено в 1957 г. в β-распаде ^{60}Co.

ii Локальная калибровочная U(1)-симметрия

Унитарная группа первого порядка U(1) в математике – группа преобразований полученных умножением на комплексное число по модулю равном единице: $e^{i\alpha}$. В контексте теории поля такое преобразование имеет смысл смещения фазы волновой функции, в при сохранении локальной симметрии это преобразование может зависеть от 4-координаты: $e^{i\alpha(x^\mu)}$.

В качестве примера рассмотрим комплексное скалярное поле $\phi(x^\mu)$. Лагранжиан (плотность лагранжиана) скалярного поля:

$$\mathcal{L}_{\text{scalar}}(\phi) = \partial_\mu \phi^* \partial^\mu \phi - m^2 \phi^* \phi. \tag{1}$$

При применении преобразование $\phi' = e^{iq\alpha(x^\mu)}\phi, \phi'^* = e^{-iq\alpha(x^\mu)}\phi$, в лагранжиане возникают члены $\partial_m \alpha(x^\mu)$. Для сохранения ковариантности можно ввести свободное калибровочное поле A^μ, и переписать лагранжиан (1) при помощи калибровочно-ковариантной производной:

$$D_\mu = \partial_\mu - iqA^\mu. \tag{2}$$

Согласно общему подходу для свободного калибровочного поля A^μ также необходимо ввести калибровочно-инвариантный лагранжиан, который согласно общему подходу равен:

$$\mathcal{L}_f = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu},\ F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu. \tag{3}$$

Учитывая (1), (2) и (3) получим лагранжиан для скалярного поля с локальной калибровочной U(1)-симметрией:

$$\mathcal{L} = (D_\mu\phi)^* D^\mu\phi - m^2\phi^*\phi - \frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}. \tag{4}$$

Таким образом требование локальной калибровочной U(1)-симметрии приводит к появлению калибровочного поля, например электромагнитного, и соответствующему ему калибровочному бозону - фотону. Локальная U(1)-симметрия также влечёт за собой глобальную U(1)-симметрию, что по тереме Нётер приводит к закону сохранения заряда (электрического, барионного, странности и т.д.)

iii Локальная калибровочная SU(3)-симметрия

Специальная унитарная группа порядка n SU(n) – группа преобразований осуществляемых унитарной матрицей $n \times n$ с определителем равным 1. Наблюдение SU(3)-симметрии в элементарных частицах стало основанием для предсказания предсказания новых элементарных частиц, создание кварковой модели, и создание в итоге квантовой хромодинамики.

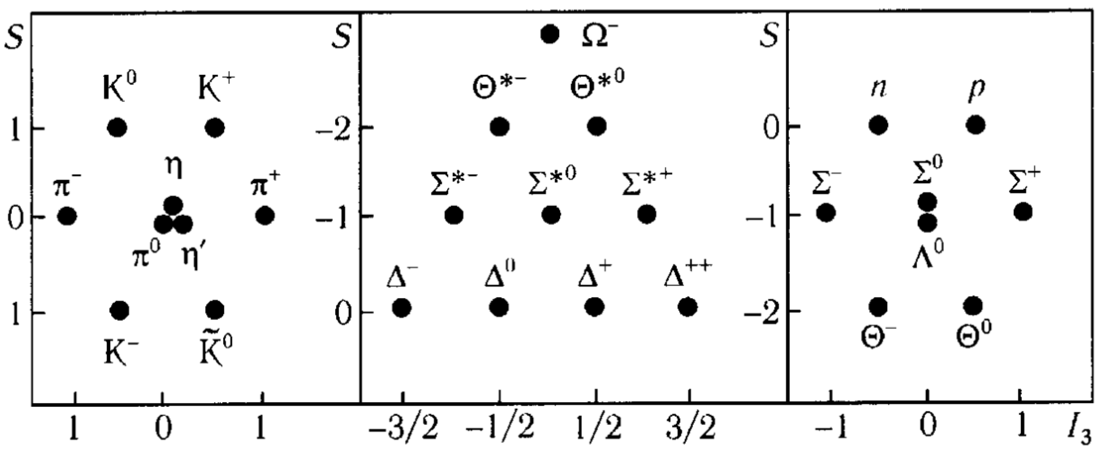

Рис. 2: Унитарные синглеты адронов: нонет мезонов, октет барионов, декуплет барионов

Внимательное рассмотрение обычных и странных адронов позволило выяснит, что изотопические мультиплеты, в свою очередь группируются в ещё большие семейства - унитарные мультиплеты. На плоскости (S, I_3) (странность, проекция изоспина) эти группы располагаются в виде симметричных относительно поворота на $120°$ фигур (рис. 2). В 1961 г. М. Гелл-Маном и Ю. Нееманом была предложена SU(3)-симметрия. Одним из простейших представлением SU(3) группы является триплет в состав которого входит частица со странностью, отличной от нуля. Мезонные нонеты в SU(3)-симметрии получаются как комбинация триплета с «антитриплетом», а барионные декуплеты – при комбинировании трёх триплетов.

На основании этой модели в 1964 г. М. Гелл-Ман и Г.Цвейг независимо сделали предположение о существовании в природе частиц с дробными значениями барионного числа и электрического заряда – названые в итоге кварками.

Квантовая хромодинамика — неабелева калибровочная теория с SU(3) группой симметрии. Она описывает дираковкие поля $\psi^i, i = 1, 2, 3$, которые представляют кварковые поля и векторные поля $A^{a\mu}, a = 1, ..., 8$ – глюонные поля, которые являются SU(3) калибровочными бозонами.

В стандартной модели SU(3)-симметрия проявляет себя как закон сохранения цветового заряда, и экранирование кварков и глюонов внутри адронов (невозможность наблюдения «цветных» частиц)

iv Локальная калибровочная SU(2)-симметрия

SU(2)-симметрия подобна SU(3)-симметрии. SU(2)-симметрия проявляет себя через наличие кварк-лептонных дублетов:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix},$$

что истолковывается как отражение существования особого квантового числа – слабого изоспина $I_3 = 1/2$. Каждый дублет соответствует поколению фермионов.

В стандартной модели калибровочное поле соответствующее SU(2)-симметрии – поле слабого взаимодействия ($W^{\pm}$, Z^0 бозоны). При этом в СМ SU(2)-симметрия применима только к левосторонним фермионам (или правосторонним анти-фермионам), существование правосторонних фермионов экспериментально не доказано, однако открытие нейтринных осцилляций, не описываемых СМ, может означать их существование.