

Удивительные закономерности среди масс элементарных частиц

С.А. Зимов

В соответствии со стандартной моделью элементарные частицы состоят из кварков.

Самые легкие кварки – нижний d и верхний u , они близки по массе. Масса странного кварка s больше, очарованного c еще больше. А самый большой это прелестный кварк b .

В химическом мире масса молекул равна массе атомов, из которых они состоят. Поэтому, например, масса молекулы этанола равна сумме масс молекул водорода, метана и угарного газа.

А вот массы элементарных частиц из массы кварков не собираются. Поэтому предполагается, что их масса это в основном масса энергии связей между кварками.

А теперь посмотрим на массу элементарных частиц свежим взглядом. Воспользуемся обновленной сводкой всех элементарных частиц (<https://pdg.lbl.gov/>). Выберем из этой сводки все мезоны. Это частицы, состоящие из какого-то кварка и какого-то антикварка.

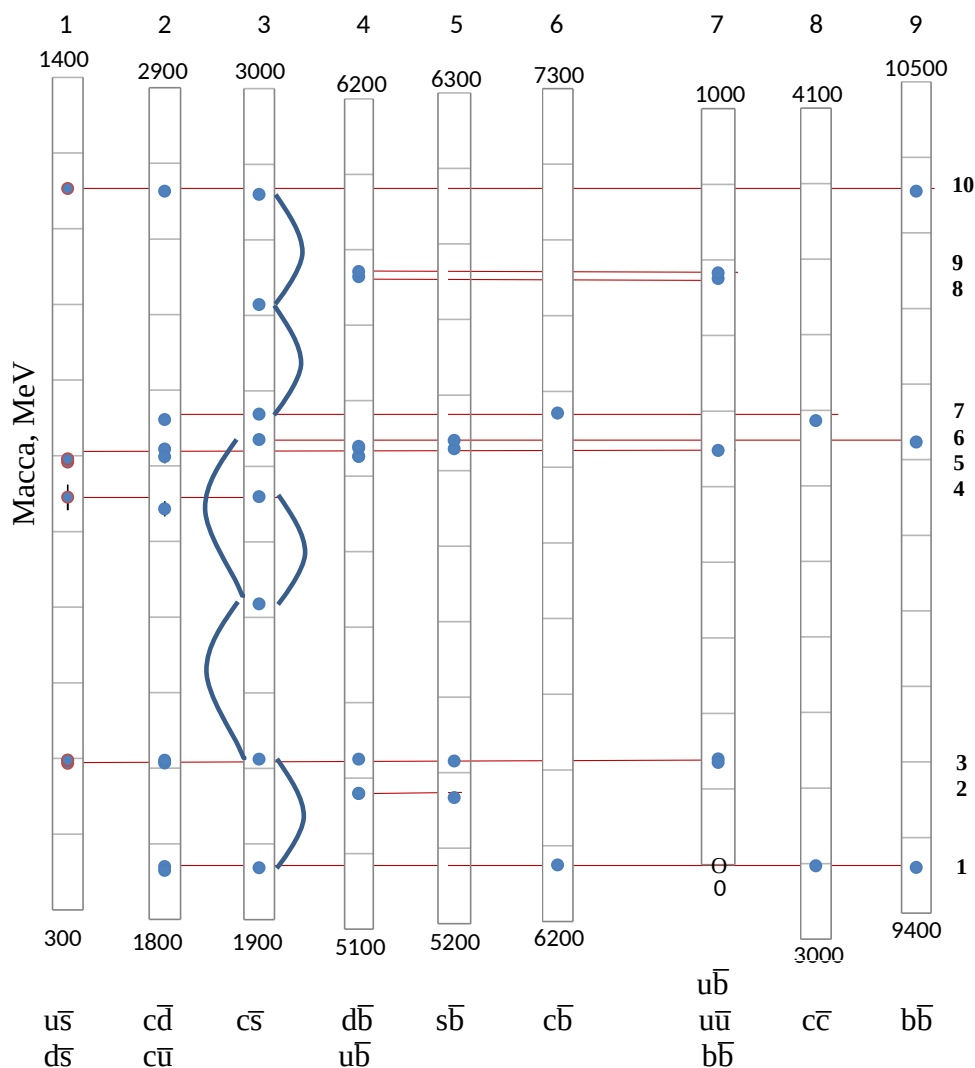


Рис. Массы мезонов и их резонансов

В сводке мезонов 9 таблиц. Все данные из них перенесены на рисунок. Каждой таблице соответствует свой столбец. Под столбцами показано из каких кварков состоят мезоны этого столбца.

В столбцах 1-6 кварки и антикварки разные. Аннигиляция между ними невозможна. И поэтому они живут относительно долго. Самая нижняя точка в каждом из этих столбцов это базовое долгоживущее состояние. А выше лежат мезоны «резонансы». Считается, что это возбужденные состояния базовой частицы.

В столбце 7 нижние две слившиеся точки это самые легкие мезоны – нейтральный и заряженный пионы. Их масса 134,98 и 139,57 МэВ. Считается, что нейтральный пион это суперпозиция нижних и верхних кварков, их непрерывное взаимопревращение. Точки, лежащие выше, это их

«резонансы». В таблице для этого столбца и столбца 1 есть и более массивные «резонансы», но они не вошли в размер рисунка.

В основании двух крайних правых столбцов (8 и 9) показаны главные очарованные и прелестные мезоны кварконии, которые состоят из кварка и его антикварка. Поэтому они быстро аннигилируют, и время жизни этих мезонов всего около 10^{-20} сек. Выше точками показаны их главные резонансы. Их время жизни такое же. У этих мезонов есть еще множество «резонансов», живущих на порядки меньше. Чтобы не перегружать столбцы 8 и 9, они не показаны.

У всех мезонов, показанных на рисунке, масса измерена весьма точно, лишь у двух «резонансов» (в 1 и 2 столбце) погрешность измерений выступает за пределы точки.

А теперь на этом рисунке попробуем увидеть закономерности. Начнем со сравнения столбцов 4 и 5. Они похожи. Всем точкам пятого столбца соответствуют точки четвертого. Похожи между собой и столбцы 4 и 7. Похожи между собой столбцы 2 и 3. Здесь напротив всех точек второго столбца лежат точки третьего столбца.

На рисунке видно, что все взаимосвязано. Напротив каждой точки лежат одна, две, три и даже пять точек в других столбцах. На выделенные горизонтальные линии, показывающие границы ритмов, не попали лишь два «резонанса» в третьем столбце. Но и они попадают в те же ритмы. Чтобы это увидеть, надо подвигать этот столбец вверх и вниз. В третьем столбце правыми скобками показаны 4 одинаковых ритма. Он равен массе пиона. Все горизонтальные линии пронумерованы. Линия 3 проходит через точки пиона в столбце 7. Поэтому ширина полосы между линиями 1 и 3 равна массе пиона.

Расстояние между линиями 10 и 7 равно расстоянию между линиями 9 и 4. Оно равно двум пионам.

Равно между собой расстояние между линиями 10 и 9 и между 7 и 4, а еще и между 2 и 1, но с меньшей точностью. Этот ритм равен мюону.

Интересное совпадение – среди значений масс мезонов присутствует масса лептона (тяжелого электрона). Она равна 105,66 МэВ. На рисунке можно увидеть массу мюона и в других случаях. Так, расстояние между линиями 9 и 6, и 8 и 5 одинаково и равно двойному мюону. А еще в 3 столбце видно два ритма, равные массе пары мюонов (левые скобки).

Расстояние между линиями 6 и 3 такое же, как между линиями 10 и 4. Оно равно четырем мюонам.

Расстояние между линиями 4 и 3 равно расстоянию между линиями 10 и 5. Оно равно сумме двух мюонов и пиона.

Ритм, равный двум пионам и трем мюонам, отмечен пять раз. Четыре раза между линиями 7 и 1 и еще один раз, со сдвижкой на пион, он повторен в третьем столбце. Во всем этом возможны и случайные совпадения, но их не может быть много. А среди мезонов ритмы везде. Причем, все они численно равны массе, собранной из массы самых легких частиц – пионов и мюонов.

А теперь основные мезоны. Главный очарованный мезон кварконий J/Ψ в соответствии со стандартной моделью состоит из очарованного кварка и его антикварка (нижняя точка в столбце 8), а главный прелестный мезон кварконий $\Upsilon(1S)$ – соответственно, из прелестного кварка и его антикварка (нижняя точка в столбце 9). Можно представить, что половина массы этих мезонов приходится на кварк, а вторая половина на антикварк. Запишем массы для этих половинок в МэВ:

$$J/\Psi:2=1548.45 \quad \Upsilon(1S):2=4730.15$$

Долгоживущий мезон B_c^+ - это нижняя точка столбца 6 на рисунке. Он в соответствии со стандартной моделью состоит из прелестного кварка и очарованного антикварка. Просуммируем массы половинок этих мезонов и сравним с массой прелестно-очарованного мезона:

$$J/\Psi:2 + \Upsilon(1S):2 = 6278.60$$

$$6274.47 = B_c^+$$

Получается, что масса этого мезона складывается из массы половинок, из которых он состоит.

А теперь покажем, какие элементарные частицы можно собрать, добавляя к очарованной или прелестной половинке мюоны.

Массу мезона с очарованным кварком (это нижняя точка в столбце 2) получаем, добавляя к очарованной половинке три мюона:

$$J/\Psi:2 + 3\mu = 1865.43$$

$$1864.84 = D^0$$

Массу мезона с очарованным кварком и странностью (это нижняя точка в столбце 3) получаем, добавляя к очарованной половинке четыре мюона:

$$J/\Psi:2 + 4\mu = 1971.09$$

$$1968.35 = D_s^+$$

Массу мезона с прелестным кварком (это нижняя точка в столбце 5) получаем, добавляя к прелестной половинке шесть мюонов:

$$\Upsilon(1S):2 + 6\mu = 5364.11$$

$$5366.92 = B_s^0$$

Барион с очарованным кварком собирается из очарованной половинки и семи мюонов:

$$J/\Psi:2 + 7\mu = 2288.07$$

$$2286.46 = \Lambda_c^+$$

Барион с двумя очарованными кварками получается из двух очарованных половинок с добавлением пяти мюонов:

$$J/\Psi:2 + J/\Psi:2 + 5\mu = 3625.2$$

$$3621.6 = \Xi_{cc}^{++}$$

Базовых мезонов и барионов с очарованным или прелестным кварками всего 7. И для 5 из них, как мы видим, масса собирается добавлением к тяжелым половинкам мюонов.

А теперь еще один пример. На рисунке в столбцах 8 и 9 верхние точки это мезоны резонансы, в которых есть очарованные и прелестные кварки и их антикварки, и еще что-то. Вот массы их половинок:

$$\Psi(2S):2 = 1843.05 \quad \Upsilon(3S):2 = 5177.6$$

А теперь запишем массы барионов с очарованным и прелестным кварками. В них тоже есть очарованные и прелестные кварки и еще что-то.

$$\Lambda_c^+ = 2286.46$$

$$\Lambda_b^0 = 5619.6$$

А теперь для этих половинок мезонов и барионов напомним простое соотношение:

$$\Upsilon(3S):2 - \Psi(2S):2 = 3334.55$$

$$\Lambda_b^0 - \Lambda_c^+ = 3333.14$$

Из этого весьма точного совпадения следует, что у мезонов и барионов кроме очарованного и прелестного кварка есть еще что-то одинаковое по массе.

В столбце 7 показаны три резонанса пиона. Их тоже можно разделить на половинки:

$$\eta:2=273.93 \quad \rho:2=387.63 \quad \omega:2=391.33$$

Из них тоже можно попытаться собирать мезоны и барионы.

Самые легкие мезоны-каоны – это нижние точки в первом столбце. Они получаются добавлением к половинкам мезонов массы одного мюона:

$$\rho:2 + \mu = 493.29$$

$$\omega:2 + \mu = 497.00$$

$$493.677 = K^+$$

$$497.611 = K^0$$

Протон и нейтрон, согласно стандартной модели, состоят из трех легких кварков. Их массы тривиально собираются из половинок трех легких мезонов:

$$\eta:2 + \eta:2 + \rho:2 = 935.49$$

$$\eta:2 + \eta:2 + \omega:2 = 939.19$$

$$938.27 = p$$

$$939.57 = n$$

Масса протона получилась с меньшей точностью, чем масса нейтрона. Но протон заряженная частица, и его масса состоит из собственной массы и массы его электрического поля. С учетом этого, у нас получилось весьма близкое соответствие.

А это численное совпадение для бариона с прелестным кварком:

$$\Upsilon(1S):2 + \omega + \mu = 5618.47$$

$$5619.6 = \Lambda_b^0$$

А это совпадение для мезона с прелестным кварком (это нижняя точка в четвертом столбце на рисунке):

$$\Upsilon(1S):2 + \eta = 5278.01$$

$$5279.34 = B^+$$

В итоге получилось, что массы всех долгоживущих мезонов и барионов, где-то тривиально, где-то более сложно, можно собрать из небольшого набора масс половинок мезонов кваркониев и мюонов. Так как мезон η по массе близок массе 4 пионов, а 2 мюона по массе близки трем половинкам пионов, то возможны и другие комбинации

А теперь о самых массивных частицах.

Это промежуточные векторные бозоны $W = 80377 \pm 12$ и $Z = 91187.6 \pm 2.1$;

Бозон Хигса $H = 125250 \pm 170$

Свободный кварк $t = 172690 \pm 300$.

Массы этих частиц и их половинок не очень точно, но весьма просто взаимосвязаны:

$$W + Z = 171564.6$$

$$W + Z:2 = 125970.8$$

$$172690.0 = t$$

$$125250.0 = H$$

Еще один пример, показывающий совпадения в соотношениях для масс разных классов частиц. Кроме электрона и мюона есть еще один самый тяжелый лептон – тау-лептон: $\tau = 1776.86 \pm 0.12$. Разделим его массу на массу протона, а ниже запишем отношение для сверхтяжелых частиц – свободного кварка и бозона Z:

$$\tau:p = 1.89376$$

$$t:Z = 1.893788$$

Получается совпадение. Можно привести и другие совпадения, как то отношение нейтрон – нейтральный каон и отношение очарованный мезон и заряженные каоны:

$$n:K^0 = 1.88816$$

$$D^0:2K^+ = 1.88872$$

Набор элементарных частиц небольшой, а совпадений много. Все они не могут быть случайностью.

Еще раз посмотрите на рисунке на пару столбцов 4 и 5. Они очевидно похожи. Похожи и столбцы 4 и 7; и столбцы 2 и 1. А масса очарованно-прекрасного мезона тривиально равняется сумме масс очарованной и

прекрасной половинок. Уже эти примеры показывают, что массы элементарных частиц могут быть сложены из масс более простых элементов.