УДК 539.12

Закономерности ряда масс элементарных частиц и теоретический расчет масс нейтрино

О.Г. Верин

К.т.н., 101000, г. Москва, РФ, verinog@list.ru

Аннотация

Простые дроби вида N_1/N_2, где N_1 и N_2 - небольшие целые числа, поразительно широко представлены в закономерностях микромира. В частности, это дробные заряды кварков и некоторые квантовые характеристики, такие как спин частиц. Упомянем также дробный квантовый эффект Холла, открытие которого в 1982г. (Даниэль Цуи и Хорст Штёрмер) и создание теории эффекта в 1983г. (Роберт Лафлин) были отмечены в 1998 году Нобелевской премией по физике.

Кроме того, в 2021 году было опубликовано сенсационное открытие, в результате которого установлено, что эффективные главные квантовые числа водородоподобных состояний атомов и ионов, то есть, с учетом квантового дефекта (поправки Ридберга), помимо целых чисел, могут быть выражены простыми дробями. В 2022 году было опубликовано строгое доказательство справедливости этого фундаментального открытия в атомной физике.

В данной статье показано, что в основе ряда масс элементарных частиц также лежат закономерности, описываемые простыми дробями. Оказалось, что взаимные соотношения частот элементарных частиц, за некоторыми исключениями, выражаются через простые дроби. Открытая закономерность оставалась незамеченной в течение многих десятилетий, так как в квантовой теории осциллирующий множитель волновой функции неподвижной частицы, хотя и имеет частоту, пропорциональную массе покоя частицы, но эта связь в действительности не является такой однозначной.

Исходя из этого открытия, произведена теоретическая оценка масс нейтрино.

Ключевые слова: элементарная частица, ряд масс, простые дроби, нейтрино.

Elementary particles mass spectrum regularities and the theoretical calculation of neutrino's masses

O.G. Verin

Abstract

Common fractions N_1/N_2, where N_1 and N_2 are the small integers, are surprisingly widespread in the microcosm regularities. In particular, it is fractional charges of quarks and some quantum characteristics, such as particle spin. Let's also mention fractional quantum Hall effect which opening in 1982 (Daniel Tsui and Horst Störmer) and the theory development in 1983 (Robert Laughlin) were awarded in 1998 by the Nobel Prize on physics.

Moreover in 2021 the sensational discovery was published, as a result of which it become known, that the effective main quantum numbers of hydrogen-like states of atoms and ions, that is, in view of quantum defect (Rydberg correction), besides the integers, can be expressed in common fractions. In 2022 the rigorous proof of the validity of this fundamental discovery in atomic physics was also published.

In this paper is shown, that in the basis of elementary particles mass spectrum there are regularities as well expressed by common fractions. It has appeared that the ratios of fundamental particles frequencies, with some exceptions, are expressed in common fractions. The discovered regularity remained unnoticed for many decades, because in the quantum theory an oscillating factor of a fixed particle wave function, though has frequency value proportional to a rest mass of a particle, but this relation actually is not so definite.

Using this discovery theoretical calculation of neutrino's masses was carried out.

Keywords: elementary particle, spectrum of masses, common fractions, neutrino.

Введение

Благодаря экспериментам на ускорителях открыты сотни элементарных частиц, массы которых очень сильно отличаются друг от друга [1, 2]. Однако закономерности ряда масс элементарных частиц не вполне ясны и представляют с фундаментальной точки зрения несомненный интерес [3].

Принципиальные подходы к решению данной проблемы были намечены в релятивистской теории Дирака, опубликованной еще в 1928 году [4]. Напомним, что уравнение Дирака описывает частицы со спином ½, такие как электрон, мюон, таон, а также, в какой-то степени, кварки и нейтрино. Было установлено, что волновая функция элементарной частицы в неподвижном состоянии зависит только от времени в

виде осциллирующего множителя, частота которого определяется энергией-массой покоящейся частицы:

$$\Psi = \Psi(0) \cdot e^{-i\omega_0 t}, \qquad \omega_0 = \frac{E_0}{\hbar} = \frac{m_0 c^2}{\hbar}. \qquad (1)$$

Здесь $h = 2\pi\hbar \approx 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ *Дж·с* - постоянная Планка.

Другим основополагающим результатом теории Дирака является вывод о том, что магнитный момент элементарной частицы (в данном случае - электрона) выражается формулой для магнетона Бора

$$\mu_e \approx \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}. \qquad (2)$$

Следовательно, масса элементарной частицы и ее магнитный момент связаны обратно пропорциональной зависимостью. Экспериментальные значения величины магнитного момента «истинно» элементарных частиц - электрона, мюона и таона несколько превышают (приблизительно на 0,1%) величину магнетона по формуле (2), в знаменателе которой должна быть величина массы соответствующей частицы. Это превышение малозначительно и связано с аномальным магнитным моментом частиц, который с большой точностью рассчитан теоретически.

Что же касается сложных частиц, таких как протон и нейтрон, то их магнитные моменты не отвечают формуле (2), так как они зависят от внутреннего строения, а массы покоя таких частиц оказываются существенно меньше из-за энергии внутренних взаимодействий, вызывающих так называемый «дефект массы». Поэтому частота частицы в этом случае связана с ее массой покоя более сложным образом.

Эти особенности привели к тому, что закономерности ряда масс элементарных частиц оказались далеко не очевидными, и они в течение многих десятилетий оставались фактически незамеченными. Только тщательный анализ накопленных экспериментальных данных с опорой на выводы квантовой теории Дирака позволил установить, что взаимные соотношения частот элементарных частиц, за некоторыми исключениями, выражаются через простые дроби.

Данная ситуация напоминает недавнее сенсационное открытие в атомной физике, опубликованное в 2021 году [5]. Тогда была установлена закономерность, относящаяся к теории водородоподобных состояний атомов и ионов, которая также выражается простыми дробями, и которая оставалась незамеченной.

Немаловажно, что в 2022 году было опубликовано строгое доказательство справедливости этого открытия [6].

Столь широкое присутствие простых дробей в закономерностях микромира в значительной степени связано с нелинейностью процессов на этом уровне, в результате чего, помимо основных частот колебаний, эти процессы сопровождаются образованием огромного количества кратных частот.

Предположим, что между двумя частицами происходит резонансное взаимодействие на некоторой общей частоте, но для каждой из частиц эта частота является одной из многочисленных гармонических составляющих, производных от ее основной частоты. Если для одной из частиц эта *частота взаимодействия* совпадает с N_1 – ой гармоникой ее основной частоты ω_1, а для другой частицы та же частота совпадает с N_2 – ой гармоникой ее основной частоты ω_2, то основные частоты взаимодействующих частиц являются соизмеримыми величинами:

$$\omega = N_1\omega_1 = N_2\omega_2, \qquad \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{N_2}{N_1}. \tag{3}$$

Следует особо подчеркнуть, что анализ частот лептонов существенно усложняется из-за влияния нейтрино, которые во всех реакциях сопровождают электрон и его тяжелые аналоги (мюон и таон). Но именно эта особенность лептонов дает возможность теоретически рассчитать массы нейтрино с использованием квантово-механических методов. Речь идет об анализе комбинированных состояний, возникающих в результате интерференции амплитуд нескольких элементарных частиц. При этом сами эти сложные состояния из-за нелинейных эффектов могут находиться в резонансном взаимодействии с исходным набором частиц. Примером такой связи, вероятно, является формула Коидэ [7], которая была получена эмпирически в 1983 г.

Сделав эти предварительные общие замечания, перейдем к исследованию закономерностей ряда масс элементарных частиц.

Согласно сложившейся удобной практике, массы и частоты частиц мы будем выражать через энергию (в э*В*).

1. Основная частота и дефект массы нуклонов

Всего три вида элементарных частиц - электроны, протоны и нейтроны составляют вещество. Они удивительным образом образуют все многообразие таблицы химических элементов Д.И. Менделеева.

Кроме них широко распространены легкие и почти неуловимы электронные нейтрино, например, излучаемые Солнцем, а также менее распространенные мюонные и таонные нейтрино. К элементарным частицам относятся также все античастицы и

фотоны, или кванты электромагнитной энергии, движущиеся со скоростью света и присутствующие во всех частях Вселенной.

Остальные элементарные частицы являются нестабильными и встречаются относительно редко. Они возникают либо в результате воздействия на вещество мощных космических лучей, либо искусственно на ускорителях частиц [8, 9].

Учитывая большую массу и распространенность протонов и нейтронов в окружающей нас части Вселенной, можно предположить, что эти две частицы задают основу для всей системы частотных взаимодействий в микромире. Поэтому рассмотрим подробнее строение и характеристики нуклонов.

Известно, что протоны и нейтроны состоят из двух видов кварков, которые принято обозначать как верхний *u* и нижний *d*. Протоны состоят из двух кварков *u* и одного *d*, а нейтроны соответственно - из двух кварков *d* и одного кварка *u*.

Протоны и нейтроны имеют одно общее название – нуклоны, так как они составляют ядра атомов и при этом так мало отличаются друг от друга по массе, что могут превращаться друг в друга в результате слабого взаимодействия (с участием электронов, позитронов, электронного нейтрино и антинейтрино). Протон и нейтрон, учитывая эти особенности, принято даже рассматривать как одну и ту же частицу в разных состояниях. Действительно, масса нейтрона равна $m_n \approx 939{,}57$ *МэВ* и превышает массу протона $m_p \approx 938{,}28$ *МэВ* всего на *1,29 МэВ*.

Входящие в состав нуклонов кварки определяют заряды и магнитные моменты этих сложных частиц. Протон имеет положительный заряд и положительный магнитный момент:

$$\mu_p = 2{,}793\,\mu_N. \qquad (4)$$

Нейтрон имеет нулевой заряд и отрицательный магнитный момент:

$$\mu_n = -1{,}913\,\mu_N. \qquad (5)$$

Здесь μ_N - ядерный магнетон (определяется, исходя из массы протона m_p), используемый при обозначении величин магнитных моментов массивных частиц:

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}. \qquad (6)$$

Магнитные моменты протона и нейтрона (4, 5), исходя из входящих в них кварков, должны были бы соответственно равняться $3\mu_N$ и $-2\mu_N$. Наблюдаемое отклонение реальных магнитных моментов нуклонов от указанных целочисленных величин объясняется энергией связи (дефектом массы) и внутренним движением кварков в составе нуклонов. Из-за дефекта массы реальная величина массы m_p в

знаменателе (6) оказывается меньше, чем некоторая условная расчетная величина массы, при которой магнитные моменты нуклонов были бы целочисленными. Соответственно магнитные моменты, измеряемые с использованием этой несколько «увеличенной» единицы измерения μ_N, оказываются меньше предполагаемых целочисленных значений.

Отметим также, что энергия связи кварков в нуклонах имеет одинаковую природу и должна давать одинаковый дефект массы в протонах и нейтронах. Однако, как легко заметить, отношения, показывающие степень воздействия дефекта массы нуклонов на отклонения магнитных моментов от соответствующих целочисленных величин, имеют существенный разброс, который, по всей вероятности, вызван внутренним движением кварков в составе нуклонов:

$$\frac{3\mu_N}{2{,}793\mu_N} \approx 1{,}074, \qquad \frac{2\mu_N}{1{,}913\mu_N} \approx 1{,}045. \tag{7}$$

Каким образом можно определить частоты нуклонов, используя отношения (7)?

Дело в том, что взаимодействие, действующее между кварками в адронах, настолько сильно связывает кварки между собой, что превращает их в неделимую единую систему, которая характеризуется единой частотой. Об этом свидетельствует анализ всей совокупности экспериментальных данных, проведенный в данной работе. То есть, кварки в составе адрона имеют «согласованную», одинаковую частоту. *Эту единую основную частоту мы будем отождествлять с эффективной массой кварка адрона*. Если умножить эффективную массу кварка на количество кварков в конкретном адроне, то мы получим *эффективную массу адрона* (не путать с частотой адрона, которая равна эффективной массе кварка!). Следовательно, дефект массы адрона может быть определен как разность эффективной массы адрона и его реальной массы. Соответственно можно ввести определение *коэффициента дефекта массы адрона k* как отношение его эффективной массы к реальной массе.

Исходя из этих определений, отношения (7) должны соответствовать величинам коэффициентов дефекта массы протона и нейтрона ($k_p = 1{,}074$, $k_n = 1{,}045$). Из-за разницы этих коэффициентов частоты протона и нейтрона несколько отличаются друг от друга. В результате этого должны возникать так называемые биения двух близких частот, при которых наблюдается низкочастотная модуляция амплитуды суммарных колебаний (с разностной частотой нейтрона и протона $\omega_n - \omega_p$), а высокочастотное наполнение должно соответствовать среднему арифметическому значению частот нуклонов $(\omega_n + \omega_p)/2$:

$$\sin\omega_n t + \sin\omega_p t = 2\sin\left(\frac{\omega_n + \omega_p}{2}t\right)\cdot\cos\left(\frac{\omega_n - \omega_p}{2}t\right) \qquad (8)$$

Поэтому, чтобы получить усредненную величину эффективной массы кварка (средней частоты) нуклонов, исходя из соотношений (7, 8), оказалось достаточно простой арифметической процедуры усреднения:

$$m_q^* = \frac{1}{6}\left(m_p \cdot \frac{3}{2{,}793} + m_n \cdot \frac{2}{1{,}913}\right). \qquad (9)$$

В результате расчета по формуле (9) была получена следующая величина эффективной массы (частоты) кварка нуклонов:

$$m_q^* \approx 331{,}7 МэВ. \qquad (10)$$

Дальнейший анализ имеющихся экспериментальных данных полностью подтвердил эту величину: оказалось, что через m^*_q посредством простых дробей могут быть выражены частоты других адронов.

Логично начать этот анализ с мезонов (частиц, состоящих из двух кварков), фактически не имеющих дефекта массы, вследствие чего они могут распадаться на фотоны [8]. Массы и частоты таких частиц должны быть соизмеримыми с полученным значением эффективной массы кварков нуклонов ($m^*_q \approx 331{,}7$ *МэВ*).

Расчеты показали, что наиболее ярко это проявляется у нейтрального K^o - мезона:

Масса K^o - мезона (497,67 МэВ) в пределах точности измерений совпадает с 3/2 от m^*_q или 497,55 МэВ. Отношение массы K^o к (3/2)m^*_q равно ≈1,00024.

Таким образом, частота K^o – мезона (эффективная масса кварка) равна ¾ m^*_q. Маловероятно, чтобы такое удивительное по точности совпадение имело случайный характер. И действительно, обнаруженная закономерность полностью подтверждается результатами анализа характеристик не только других адронов, но и лептонов.

Масса K^o – мезона является прямым свидетельством правильности расчета эффективной массы кварка нуклонов ($m^*_q \approx 331{,}7$ *МэВ*), что, в свою очередь, дает возможность непосредственно оценить величину дефекта массы протона и нейтрона, которая составляет порядка 6%, или около *56 МэВ*. Следовательно, энергия взаимодействия кварков в составе нуклонов оказывается почти на порядок больше, чем энергия взаимодействия, приходящаяся на один нуклон в составе ядер атомов [8].

Кроме того, мы получили прямое подтверждение предположения о том, что существование в адронах сильного взаимодействия между кварками приводит, образно говоря, к согласованию частот кварков и формированию единой частоты у каждого

адрона. В рассмотренном примере нелинейной связи нуклонов с K^o – мезоном, формирование единой частоты у K^o – мезона происходит с участием *странного* кварка.

2. Массы и частоты адронов

Помимо *странного* K^o – мезона, имеется еще несколько мезонов, у которых дефект массы практически отсутствует и частоты которых также оказываются напрямую связанными с основной частотой нуклонов дробными соотношениями.

В эту подгруппу с условным *нулевым уровнем дефекта массы* входят мезоны:

π^o*(134,96 МэВ)* и $\pi^{\pm}$*(139,57 МэВ),* частоты которых определяются половиной их массы и равны 1/5 от m^*_q (соответственно расчетные значения равны: 0,203 и 0,210).

η^o*(548,8 МэВ)* - странный мезон, имеет эффективную массу кварка 5/6 ≈ 0,833 от $m^*_q \approx 331{,}7$ *МэВ* (расчетная величина: 0,827).

$F^{\pm}$*(1971),* очарованный странный мезон, имеет эффективную массу кварка 3 m^*_q (расчетная величина равна 2,971). Это подтверждается и отношением массы мезона $F^{\pm}$ (*1971 МэВ*) к массе мезона $K^{\pm}$ (*493,67 МэВ*), которое равно $3{,}992 \approx \mathbf{4}$.

Таким образом, подгруппа мезонов с условным нулевым уровнем дефекта массы, с одной стороны, имеет величины масс, которые непосредственно указывают на неслучайный характер обнаруженной связи между мезонами и нуклонами, а, с другой стороны, подтверждают правильность расчета частоты нуклонов m^*_q. Одновременно подтверждается и эффект выравнивания частот кварков в адронах из-за сильной связи. Это явление, как оказалось, имеет место не только в адронах, содержащих обычные верхний (u) и нижний (d) кварки, но и у более тяжелых адронов, содержащих странные и очарованные кварки.

При анализе частот барионов, как уже отмечалось выше, важным ориентиром для определения коэффициента дефекта массы являются отклонения магнитных моментов частиц от соответствующих целочисленных значений (подобно тому, как это было показано в случае нуклонов).

В таблице 1 приведены магнитные моменты некоторых барионов, измеренные как в ядерных магнетонах, так и в магнетонах, рассчитанных исходя из масс самих частиц, что дает возможность сделать соответствующие оценки дефектов масс.

Однако, в отличие от нуклонов, магнитные моменты которых измерены с высокой точностью, магнитные моменты короткоживущих частиц определить с хорошей точностью не удается, а соответствующие теоретические расчеты с использованием

КХД также не отличаются высокой точностью результатов. Поэтому расчетные уровни дефектов масс этих частиц могут рассматриваться только как ориентировочные.

В частности, в табл. 1 данные о магнитных моментах барионов Σ^+ и Ξ^- приведены из разных источников, чтобы показать, насколько значительным может быть разброс экспериментальных результатов.

Из таблицы следует, что дефекты масс барионов в результате усреднения могут быть распределены по величине на три уровня. У нуклонов имеется относительно небольшой дефект массы (~6%) – первый уровень; у Ξ – гиперонов он приблизительно в два раза больше (~13%) – второй уровень; и, наконец, очень большой дефект массы наблюдается у Λ, Σ, и Ω - гиперонов (~34%) – это третий уровень дефекта массы, составляющий фактически 1/3 от массы покоя.

Таблица 1. Характеристики барионов

Барион	Масса, *МэВ*	Магнитный момент в μ_N	Магнитный момент в магнетонах частицы (μ)	Коэффициент дефекта массы $k \sim (1/\mu)$		Уровень дефекта массы
n	*939,57*	*-1,913*	*-1,913*	*1,045(2/1,913)*	*Усредн. 1,06*	*1*
p	*938,28*	*2,793*	*2,793*	*1,074(3/2,793)*		*1*
Λ^0	*1115,6*	*-0,613*	*-0,729*	*1,37(1/0,729)*	*Усредн. 1,34*	*3*
Σ^+	*1189,36*	*2,379* [8]	*3,016*	*1,33(4/3,016)*		*3*
Σ^+	*1189,36*	*2,458* [10]	*3,12*	*1,28(4/3,12)*		*3*
Σ^-	*1197,34*	*-1,165*	*-1,487*	*1,34(2/1,487)*		*3*
Ω^-	*1672,45*	*-2,02*	*-3,60*	*1,39 (5/3,6)*		*3*
Ξ^0	*1314,9*	*-1,25*	*-1,75*	*1,14(2/1,75)*	*Усредн. 1,13*	*2*
Ξ^-	*1321,32*	*-1,85* [8]	*-2,61*	*1,15(3/2,61)*		*2*
Ξ^-	*1321,32*	*-0,65* [10]	*-0,92*	*1,09(1/0,92)*		*2*

Обнаруженная градация энергии внутреннего взаимодействия в адронах, возможно, вызвана разными сочетаниями «цветов» входящих кварков и глюонов.

Определить уровень дефекта массы (и частоту) частицы удается не только, используя ее магнитный момент, но и путем сравнения с массами частиц, дефекты масс которых уже удалось определить. У частиц, имеющих одинаковые коэффициенты дефектов масс, отношения частот и масс должны выражаться через простые дроби:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{m_1^*}{m_2^*} = \frac{k_1 M_1 / n_1}{k_2 M_2 / n_2} = \frac{M_1 n_2}{M_2 n_1}, \qquad (k_1 = k_2). \tag{11}$$

Здесь m^*_1, m^*_2 – эффективные массы кварков сравниваемых адронов;

n_1, n_2 – количество кварков в первом и втором адронах; M_1, M_2 – массы адронов.

Таким образом, исходя из правила (11), можно выделить подгруппы частиц, имеющих одинаковый уровень дефекта массы.

В частности, в подгруппу адронов с $k \approx 1{,}06$, кроме нуклонов, входят *очарованные нестранные* D^0 и $D^{\pm}$ мезоны. Массы мезона $D^{\pm}$ (*1869,4 МэВ*) и протона $m_p \approx 938{,}28$ *МэВ* относятся приблизительно как два к одному - $1{,}992 \approx \mathbf{2}$, также как и отношение масс D^0 (*1864,7 МэВ*) и нейтрона $m_n \approx 939{,}57$ *МэВ* равно $1{,}985 \approx \mathbf{2}$. Таким образом, частота D^0 и $D^{\pm}$ мезонов равна $\mathbf{3}\ m^*_q$. (Пример расчета для D^0: 1864,7·1,06/(2·331,7) = 2,98 ≈ 3).

Следующая подгруппа адронов имеет коэффициент дефекта массы $k \approx 1{,}13$. В эту подгруппу входят *странные* барионы Ξ^0(*1314,9 МэВ*), Ξ^-(*1321,32 МэВ*) и *прелестные* мезоны B^+(*5270,8 МэВ*), B^o (*5274,2 МэВ*), так как массы этих барионов и мезонов с большой точностью относятся как один к четырем (***0,249 – 0,251***). Следовательно, барионы Ξ^0(*1314,9 МэВ*), Ξ^-(*1321,32 МэВ*) имеют частоту (***3/2***) m^*_q, а мезоны B^+(*5270,8 МэВ*), B^o (*5274,2 МэВ*) имеют частоту $\mathbf{9}\ m^*_q$. (Пример: 5274,2·1,13/(2·331,7) = 8,98 ≈ 9).

И, наконец, четвертую подгруппу адронов составляют частицы, имеющие самый большой третий уровень дефекта массы – в среднем $k \approx 1{,}34$. В эту подгруппу входят только барионы: *странные* барионы Σ^+(*1189,36 МэВ*), Σ^-(*1197,34 МэВ*), Σ^0(*1192,5 МэВ*), Λ^0(*1115,6 МэВ*), Ω^-(*1672,45 МэВ*); и *нестранный очарованный* барион Λ^+_c (*2282,2 МэВ*). Принадлежность этих частиц к одной подгруппе, кроме данных по величинам магнитных моментов, подтверждается также и отношениями масс частиц. В частности, отношение масс Ω^- (*1672,45 МэВ*) и Λ^o (*1115,6 МэВ*) равно $1{,}4995 \approx \mathbf{3/2}$. Отношение масс Λ^0(*1115,6 МэВ*) и Λ^+_c(*2282,2 МэВ*) равно $0{,}489 \approx \mathbf{1/2}$, что свидетельствует о третьем уровне дефекта массы Λ^+_c бариона.

Приведем соответствующие расчеты частот адронов этой подгруппы в долях m^*_q.

Барион Σ^+(*1189,36 МэВ*) имеет частоту ***8/5*** от m^*_q: 1189,36·1,34/(3·331,7) = 1,602;

барион Σ^-(*1197,34 МэВ*) имеет частоту ***8/5*** от m^*_q: 1197,34·1,34/(3·331,7) = 1,612;

барион Σ^0(*1192,5 МэВ*) имеет частоту ***8/5*** от m^*_q: 1192,5·1,34/(3·331,7) = 1,606.

Барион Λ^0(*1115,6 МэВ*) имеет частоту ***3/2*** от m^*_q:1115,6·1,34/(3·331,7) = 1,502.

Барион Ω^-(*1672,45 МэВ*) имеет частоту ***9/4*** от m^*_q: 1672,45·1,34/(3·331,7) = 2,252.

Барион Λ^+_c (*2282,2 МэВ*), имеет частоту $\mathbf{3}\ m^*_q$: 2282,2·1,34/(3·331,7) = 3,07.

В табл. 2 сведены результаты расчета частот адронов, выраженных в долях m^*_q.

Выбор простой дроби, ближайшей к расчетной величине, можно наглядно проиллюстрировать графически. Действительно, принимая во внимание, что

используемые в табл. 2 простые дроби имеют знаменатели не более 6, мы получаем достаточно компактное множество простых дробей на отрезке 0 – 1 (табл. 3). На рисунке представлены дроби этого множества в виде утолщенных горизонтальных линий, а расчетные величины частот в долях m^*_q (целые части чисел отброшены для удобства сравнения) изображены в виде маркеров и расположены в порядке возрастания. На рисунке не показаны частоты, выражающиеся целочисленными отношениями к частоте нуклонов m^*_q.

Как следует из рисунка, взаимосвязь расчетных величин частот адронов в долях частоты нуклонов m^*_q с множеством простых дробей не является случайной.

Таблица 2. Массы и частоты барионов и мезонов.

Адроны	Частицы	Масса, *МэВ*	Дефект массы		Эффективная масса (частота) кварка в ед. m^*_q	
			Уровень дефекта массы	Коэфф. дефекта массы	Расчетное значение	Фактическое значение
Барионы	n	939,57	1	1,06	1	1
	p	938,28	1	1,06	1	1
	Ξ^0	1314,9	2	1,13	1,493	3/2
	Ξ^-	1321,32	2	1,13	1,500	3/2
	Σ^+	1189,36	3	1,34	1,602	8/5
	Σ^-	1197,34	3	1,34	1,612	8/5
	Σ^0	1192,5	3	1,34	1,606	8/5
	Λ^0	1115,6	3	1,34	1,502	3/2
	Ω^-	1672,45	3	1,34	2,252	9/4
	Λ^+_c	2282,2	3	1,34	3,073	3
Мезоны	π^o	134,96	0	1	0,203	1/5
	$\pi^\pm$	139,57	0	1	0,210	1/5
	η^o	548,8	0	1	0,827	5/6
	K^o	497,67	0	1	0,750	3/4
	K^+	493,67	0	1	0,744	3/4
	D^0	1864,7	1	1,06	2,979	3
	$D^\pm$	1869,4	1	1,06	2,987	3
	$F^\pm$	1971	0	1	2,971	3
	B^+	5270,8	2	1,13	8,978	9
	B^o	5274,2	2	1,13	8,984	9

Таблица 3. Множество простых дробей N_1/N_2 на отрезке $0 – 1$ ($N_2 \leq 6$).

	1	2	3	4	5	6
1	*1*					
2	*0,5*	*1*				
3	*0,333333*	*0,666667*	*1*			
4	*0,25*	*0,5*	*0,75*	*1*		
5	*0,2*	*0,4*	*0,6*	*0,8*	*1*	
6	*0,166667*	*0,333333*	*0,5*	*0,666667*	*0,833333*	*1*

Наблюдаемое жесткое ограничение ($N_2 \leq 6$) на величину знаменателя простых дробей, определяющих частоты частиц, вероятно, вызвано тем, что по мере увеличения номера гармоники частоты, на которой происходит взаимодействие частиц, амплитуда этого взаимодействия резко падает.

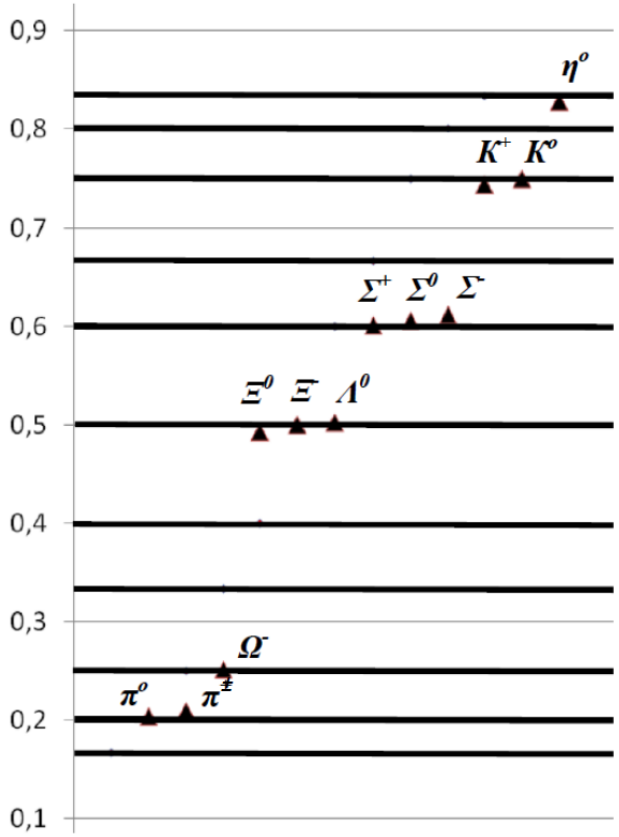

Рис. Представленное в табл. 3 множество простых дробей N_1/N_2 ($N_2 \leq 6$) показано на рисунке в виде утолщенных горизонтальных линий, а представленные в табл. 2 расчетные величины частот адронов в долях m^*_q (целые части чисел отброшены для удобства сравнения) изображены в виде маркеров и расположены в порядке возрастания. На рисунке не показаны частоты адронов, кратные целым числам m^*_q.

Таким образом, анализ экспериментальных данных убедительно свидетельствует о том, что частоты всех адронов соизмеримы с частотой нуклонов $m^*_q \approx 331{,}7$ *МэВ*, то есть, связаны через простые дроби или целые числа. Поэтому взаимные отношения частот адронов также выражаются через простые дроби, или целые числа.

Правильность расчета коэффициентов дефектов масс барионов (табл. 1), исходя из отклонений величин их магнитных моментов от целочисленных значений по аналогии с расчетом этого параметра для нуклонов, также нашла свое подтверждение в результатах анализа (табл. 2). В итоге была установлена четкая градация дефектов масс адронов по энергии внутреннего взаимодействия между кварками в составе частиц.

Отметим еще один интересный факт: у мезонов отсутствует третий уровень дефекта массы, а у барионов, наоборот, отсутствует нулевой уровень дефекта массы.

3. Связь лептонов с нуклонами и метод амплитуд

Из-за большой массы протонов и нейтронов, и их главенствующей роли в строении материи окружающей нас части Вселенной, именно нуклоны, как мы убедились выше, задают основу всей системы частотных взаимодействий в микромире. Теперь мы убедимся, что параметры лептонов также подтверждают обнаруженную закономерность ряда масс элементарных частиц.

Прежде чем приступить к дальнейшему анализу заметим, что в формуле (1) есть неточность, которая также многие годы оставалась незамеченной.

По нескольким соображениям частота осциллирующего множителя волновой функции свободной неподвижной частицы ω_0 должна быть в два раза больше.

Действительно, ввиду того что элементарные частицы подчиняются квантовым закономерностям, частота в низшем энергетическом состоянии должна удовлетворять известному соотношению для квантового осциллятора:

$$E_0 = \frac{\hbar\omega_0}{2}, \qquad \omega_0 = \frac{2E_0}{\hbar}. \tag{12}$$

С другой стороны, этот формальный вывод подтверждается известным экспериментальным фактом образования электрон-позитронной пары из кванта электромагнитной энергии. Данный резонансный процесс имеет место при частоте исходного кванта, соответствующей удвоенной энергии-массе электрона:

$$\hbar\omega_0 = 2m_0c^2, \qquad \omega_0 = \frac{2m_0c^2}{\hbar}. \tag{13}$$

Поэтому частоты образующихся частиц должны определяться частотой резонанса и соответствовать формуле (13).

И, наконец, пожалуй, самое веское доказательство необходимости удвоения частоты в формуле (1) волновой функции основано на известном факте возникновения пространственных волн у движущейся частицы (волн де Бройля). Они возникают из-за того, что масса, а вместе с этим и частота движущейся частицы, увеличиваются в сравнении с частицами, находящимися в неподвижном состоянии. Полагая скорость частицы достаточно малой по отношению к скорости света, с учетом формулы (13) получаем:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \approx m_0\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right), \qquad \omega = \frac{2mc^2}{\hbar} \approx \omega_0 + \frac{m_0 v^2}{\hbar}. \qquad (14)$$

Некоторое превышение частоты движущейся частицы в сравнении с окружающими частицами приводит к низкочастотным биениям, частота которых Ω равна разности этих частот. Соответственно из (14) следуют известные выражения для волнового коэффициента и длины волны де Бройля:

$$\Omega = \omega - \omega_0 = \frac{m_0 v^2}{\hbar}, \qquad k = \frac{\Omega}{v} = \frac{m_0 v}{\hbar} = \frac{p}{\hbar}, \qquad \lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{h}{p}. \qquad (15)$$

Таким образом, формула (13), содержащая множитель 2, дает правильные характеристики волн де Бройля.

Переходя к анализу частот лептонов, заметим, что влияние нейтрино существенно усложняет эту задачу, так как во всех реакциях нейтрино сопровождают электрон и его тяжелые аналоги (мюон и таон). В частности, присутствие нейтрино проявляется в том, что массы покоя электрона, мюона и таона имеют, условно говоря, некоторый «дефицит массы» в сравнении с их эффективной массой (частотой).

С другой стороны, именно эта особенность лептонов дает возможность теоретически рассчитать массы нейтрино с использованием квантово-механических амплитуд. Речь идет об анализе комбинированных энергетических состояний, возникающих в результате интерференции амплитуд нескольких элементарных частиц.

Сравним сначала массу покоя мюона $m_\mu \approx 105{,}66$ *МэВ* с эффективной массой кварка нуклона $m^*_q \approx 331{,}7$ *МэВ*. Эти величины приблизительно относятся как один к трем (≈0,32). Следовательно, если исходить из того, что эффективная масса (частота) мюона равна 1/3 от m^*_q, или *110,57 МэВ*, то, используя эти характеристики мюона, можно оценить массу мюонного нейтрино.

Будем полагать, что влияние нейтрино на массу мюона вызвано наложением условных амплитуд этих частиц друг на друга. Для описания комбинированных состояний частиц воспользуемся методом квантово-механических амплитуд [3, 4].

Так как реальный физический смысл имеет только квадрат амплитуды волновой функции, то квадрат очень малой амплитуды нейтрино x положим равным массе нейтрино, а квадрат амплитуды η будем считать равным эффективной массе (частоте) мюона. Тогда масса покоя мюона, с учетом наложения амплитуд мюона и нейтрино и в соответствии с принципом минимума энергии в системе мюон-нейтрино, равна квадрату разности амплитуд η и x

$$m_\mu = (\eta - x)^2 = \eta^2\left(1 - \frac{x}{\eta}\right)^2, \qquad x^2 = \eta^2\left(1 - \frac{m_\mu^{1/2}}{\eta}\right)^2. \tag{16}$$

Так как $\eta^2 = 110{,}57$ *МэВ*, а $m_\mu = 105{,}66$ *МэВ*, то из (10) получаем искомую величину массы нейтрино:

$$m_{\nu\mu} = x^2 \approx 0{,}0557\,\text{МэВ}. \tag{17}$$

В справочнике [8] находим ограничение на величину массы мюонного нейтрино ($m_{\nu\mu} < 0{,}5$ *МэВ*). Согласно современным оценкам ограничение ближе к (17) и составляет $m_{\nu\mu} < 0{,}17$ *МэВ*.

Что касается тяжелого лептона - таона ($m_\tau \approx 1776{,}82$ *МэВ*), то его частота предположительно равна шести эффективным массам кварка нуклона m^*_q, то есть, $m^*_\tau \approx 331{,}7 \cdot 6 \approx 1990{,}2$ *МэВ*. В этом случае оценка массы таонного нейтрино, сделанная по аналогии согласно формуле (16), дает следующий результат:

$$m_{\nu\tau} = x^2 \approx 6{,}048\,\text{МэВ}. \tag{18}$$

Там же [8] находим, что ограничение на величину массы таонного нейтрино составляет очень большую величину $m_{\nu\tau} < 164$ *МэВ*, в то время как современные оценки ближе к (18): $m_{\nu\tau} < 18{,}2$ *МэВ*.

Что касается массы покоя электрона m_e, то ее происхождение может быть установлено, исходя из известной реакции превращения нейтрона в протон. Очевидно, m_e не может превышать величину разности масс нуклонов. Собственно, поэтому электрон является столь легкой частицей. Учитывая отмеченную выше нелинейность микромира (3), легко убедиться, что масса электрона m_e (*0,511 МэВ*) также подчиняется открытой закономерности и близка к *2/5* от разности масс нейтрона и протона:

$$m_e \approx \frac{2}{5} \cdot (m_n - m_p) = 0{,}516\,\text{МэВ}. \tag{19}$$

Логично предположить, что частота электрона, или его эффективная масса (*0,516 МэВ*) определяется низкочастотными биениями близких частот кварков *u* и *d* протонов и нейтронов. Кроме того, простая дробь 2/5 в выражении (19) свидетельствует, как уже упоминалось выше, о нелинейности процессов взаимодействия частиц.

Небольшое превышение полученного значения собственной частоты электрона над его массой покоя *0,516 – 0,511 = 0,005* (*МэВ*) объясняется влиянием электронного нейтрино, подобно тому, как это происходит в случае мюона и таона. Именно поэтому вместе с электроном всегда рождается парная античастица – антинейтрино. Однако масса покоя электрона m_e (*0,511 МэВ*) оказывается меньше его частоты (*0,516 МэВ*) всего на 1%, что говорит о чрезвычайно малой массе, а, следовательно, об очень малом влиянии электронного нейтрино:

$$\frac{2}{5}\cdot(m_n - m_p)\cdot\frac{1}{m_e} \approx \frac{0{,}516 МэВ}{0{,}511 МэВ} \approx 1{,}01. \qquad (20)$$

В соответствии с формулой (16) можно также оценить массу электронного нейтрино. Так как $\eta^2 = 0{,}516$ *МэВ*, а $m_e = 0{,}511$ *МэВ*, то согласно (16) получаем искомую величину массы нейтрино:

$$m_{\nu e} = x^2 \approx 12\,эВ. \qquad (21)$$

В справочнике [8], изданном в 1991 г., экспериментальное значение массы нейтрино имеет ограничение $m_{\nu e} < 46$ *эВ*. Кроме того, 1980 г. были также проведены эксперименты по определению нижней границы массы нейтрино и установлено, что $m_{\nu e} > 14$ *эВ* [9, 11]. Более поздние данные, полученные с применением других методик, дают меньшие значения (эксперимент в Троицке: $m_{\nu e} < 2{,}5$ *эВ*). В целом, сейчас еще рано говорить об окончательном результате продолжающихся экспериментов по определению масс нейтрино. С учетом многих неточностей измерений в научной и учебной литературе дают, например, такую оценку: $m_{\nu e} < (10 - 15)$ *эВ*.

Для наглядности результаты расчетов сведены в табл. 1.

Как уже отмечалось выше, изучение проблемы нейтрино еще далеко от завершения, и делать окончательные выводы рано. Но в целом полученные оценки масс нейтрино представляются реалистичными и по порядку величин близки к данным экспериментов.

Кроме того, они подчиняются общему правилу увеличения массы лептона с каждым следующим поколением (отношение масс нейтрино и соответствующего лептона приведено в последнем столбце табл. 4).

Таблица 4. Связь лептонов с нуклонами и расчетные массы нейтрино.

Характеристики нуклонов	Массы и частоты лептонов	Расчетные массы нейтрино
$m_n \approx 939{,}57$ МэВ $\mu_n \approx -1{,}913\mu_N$	$m_e = 0{,}511$ МэВ $m^*_e = (2/5)(m_n - m_p) \approx 0{,}516$ МэВ	$m_{\nu e} \approx 12$ эВ $(2{,}35\cdot 10^{-5}\, m_e)$
$m_p \approx 938{,}28$ МэВ $\mu_p \approx 2{,}793\mu_N$	$m_\mu \approx 105{,}66$ МэВ $m^*_\mu = (1/3)\cdot m^*_q \approx 110{,}57$ МэВ	$m_{\nu\mu} \approx 0{,}056$ МэВ $(5{,}27\cdot 10^{-4}\, m_\mu)$
$m_n - m_p \approx 1{,}29$ МэВ $m^*_q \approx 331{,}7$ МэВ	$m_\tau = 1776{,}82$ МэВ $m^*_\tau = 6\cdot m^*_q \approx 1990{,}2$ МэВ	$m_{\nu\tau} \approx 6{,}048$ МэВ $(3{,}4\cdot 10^{-3}\, m_\tau)$

Заметим, что использованный выше метод суперпозиции амплитуд лептонов одновременно дает возможность понять смысл эмпирической формулы Коидэ [6]:

$$m_e + m_\mu + m_\tau = \frac{2}{3}(\sqrt{m_e} + \sqrt{m_\mu} + \sqrt{m_\tau})^2. \qquad (22)$$

Это соотношение предположительно говорит о том, что комбинированное состояние, возникающее в результате интерференции трех амплитуд частиц семейства лептонов (с правой стороны равенства), связано нелинейным резонансным взаимодействием (множитель 2/3) с суммой состояний этих же частиц. Вполне возможно, что такая взаимосвязь, устанавливает определенные рамки для семейства лептонов и препятствует его расширению.

Следует также подчеркнуть, что открытые закономерности ряда масс элементарных частиц носят объективный характер, так как они получены в результате достаточно простых и логичных вычислений, в которых были использованы только экспериментальные характеристики частиц. Поэтому эти закономерности, несомненно, должны стать предметом тщательного теоретического осмысления.

4. Заключение

Исследование частотных характеристик элементарных частиц показало, что доминирующими в микромире являются частоты (включая гармонические составляющие), создаваемые протонами и нейтронами, которые образуют почти всю массу вещества в окружающей нас части Вселенной.

Принципиальная нелинейность процессов на уровне микромира создает условия для взаимодействия частиц, как на основных, так и на кратных гармонических

составляющих. Этим, вероятно, и объясняется присутствие простых дробей в соотношениях масс и частот элементарных частиц.

Исключением является частота электрона, которая образуется вследствие нелинейного взаимодействия этой частицы с низкочастотными биениями, создаваемыми близкими частотами кварков двух видов, из которых состоят протоны и нейтроны. В этом, очевидно, заключена причина столь малой массы электрона.

Все остальные частицы взаимодействуют с усредненной частотой кварков нуклонов ($m^*_q \approx 331{,}7$ *МэВ*) и гармоническими составляющими этой частоты.

Проведенный анализ эффективных масс (частот) элементарных частиц оказался чрезвычайно результативным, так как дал возможность обнаружить ранее не известные закономерности в физике элементарных частиц.

При решении этой задачи квантовая теория Дирака является надежной основой и для изучения частотных свойств элементарных частиц, и для описания частиц как квантово-механических систем, которые могут образовывать энергетические состояния в виде суперпозиции волновых функций частиц.

Одним из примеров такого взаимодействия, вероятно, является связь энергии комбинированного состояния в виде суперпозиции амплитуд лептонов с суммарной энергией этих же частиц. Формула Коидэ описывает именно этот нелинейный резонанс. Возможно, что данная взаимосвязь, формирует конфигурацию семейства лептонов и препятствует его расширению.

Метод суперпозиции амплитуд волновых функций позволил получить теоретически массы электронного, мюонного и таонного нейтрино. Эти значения по порядку величины близки к имеющимся экспериментальным данным, а также удовлетворяют известному правилу увеличения массы лептонов с каждым последующим поколением (*12 эВ*; *0,056 МэВ; 6,048 МэВ* соответственно).

Рассмотренные закономерности ряда масс элементарных частиц многие десятилетия оставались фактически незамеченными, так как в квантовой теории осциллирующий множитель волновой функции неподвижной частицы, хотя и имеет частоту, пропорциональную массе покоя частицы, но эта связь в действительности не является такой однозначной даже для лептонов.

Частоты адронов зависят от дефекта их массы, вызванного энергией внутреннего взаимодействия. В свою очередь, дефект массы у разных адронов может сильно отличаться, что, вероятно, происходит из-за различных комбинаций «цветов» кварков и глюонов, входящих в состав адронов.

Используя данные о магнитных моментах барионов с учетом соотношений между массами адронов, было показано, что частицы по уровню дефекта массы делятся на четыре подгруппы. А именно, ряд мезонов составляет подгруппу частиц с нулевым уровнем дефекта массы, то есть, фактически его не имеют. Остальные мезоны и барионы имеют дефект массы либо на первом относительно небольшом уровне, как у нуклонов (~6%), либо на втором уровне (~13%), и большая подгруппа барионов имеет третий уровень дефекта массы (~34%).

В процессе исследования было подтверждено предположение о том, что из-за сильной связи кварков в адронах происходит согласование (выравнивание) частот кварков, в результате чего каждый адрон имеет единую основную частоту.

Прямым и наиболее очевидным проявлением этих закономерностей являются свойства мезонов, не имеющих дефекта массы. Массы таких мезонов непосредственно связаны с эффективной массой (частотой) кварков нуклонов $m^*_q \approx 331,7$ *МэВ*.

В частности, масса нейтрального K^o - мезона (*497,67 МэВ*) в пределах точности измерений совпадает с *3/2* от m^*_q или *497,55 МэВ*. Отношение массы K^o мезона к $(3/2)m^*_q$ равно $\approx 1,00024$. Такая удивительная точность соотношения свидетельствует о нелинейной резонансной связи этих частиц и, очевидно, не может быть случайным совпадением. Об этом свидетельствует и вся совокупность полученных результатов.

Обнаруженные экспериментальные закономерности ряда масс элементарных частиц, несомненно, будут способствовать постижению принципиальных основ микромира, структуры и свойств материи.

Литература

1. Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. – 2-е изд., переработанное и дополненное. – М.: Наука, 1988. – С. 272.
2. Ахиезер А.И., Рекало М.П. Элементарные частицы. М.: «Наука» 1986.
3. Фейнман Р. КЭД странная теория света и вещества. Гл. ред. физ.-мат. литературы. - М.: Наука, 1988. – С. 144.
4. Dirac P.A.M. The Quantum Theory of the Electron. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. 1928. Vol. 117, No. 778, pp. 610 – 624.
5. Верин О.Г. Квантовый дефект и простые дроби // Известия вузов. Физика. 2021. Т. **64**, №1. С. 29-34.

6. Верин О.Г. Эффективные главные квантовые числа водородоподобных состояний принадлежат множеству простых дробей// Известия вузов. Физика. 2022. Т. **65**, №4. С. 113-128.
7. Y. Koide. (1983). New view of quark and lepton mass hierarchy. Physical Review D. T. 28. №1. – С. 252 - 254.
8. Физические величины. Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 1232.
9. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. 2-е изд. перераб. – М.: Наука. ГРФМЛ. 1985. – С. 512.
10. https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-quark-model.pdf
11. Зельдович Я.Б., Хлопов М.Ю. Масса нейтрино в физике элементарных частиц и космологии ранней Вселенной// УФН, 1981, Т. 135, вып. 1 с. 45 – 77.