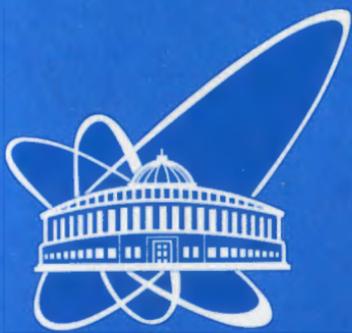


02-89



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

55499

P2-2002-89

А. И. Аношин*

НУМЕРОЛОГИЯ МАСС ЛЕГКИХ ЧАСТИЦ

*НИИЯФ МГУ

1. Введение

Природа происхождения массы покоя частиц является одним из кардинальных и еще нерешенных вопросов теории. Пропорциональность энергии массе ($E = mc^2$) позволяет выражать массу в энергетических единицах. В качестве единицы обычно пользуются количеством энергии, равным 1 МэВ. Эта энергия почти равна массе покоя электрон-позитронной пары, т.е. пары частиц с минимальной массой. Для создания представления о масштабе значений масс частиц их величины (m_p) так и выражаются в количестве ($n_p \geq 1$) электронных масс (m_e) простейшей формулой

$$m_p = n_p \cdot m_e. \quad (1)$$

Зная **экспериментальное** значение m_p , можно написать множество других формул, столь же справедливых, как и формула (1), например в следующем виде:

$$m_p = \sum n_{pi} \cdot m_{pi}, \quad (2)$$

где m_{pi} – массы некоторых других частиц, выполняющие роль единиц измерения массы, а n_{pi} – алгебраические числа – части суммарной массы m_p , выраженной в *соответствующих единицах*. Числа n_{pi} могут быть также выражены посредством некоторых формул, оперирующих с некоторыми мировыми физическими и широко используемыми числовыми константами. Аддитивный характер формул (1) и (2) обусловлен, с одной стороны, аддитивностью энергии, с другой – максимальной простотой формул, так как гипотеза о простоте устройства Природы является главной движущей силой науки. Цель составления формул типа (2) заключается в построении дополнительного стимулирующего материала для теоретических спекуляций, поэтому формулы могут иметь эвристическую ценность.

При составлении подобных формул вольно или невольно вносятся некоторые **гипотетические** модельные представления о природе масс частиц. Отсюда следует, что приписывание известного физического смысла некоторым компонентам формул (величины которых определяются из сопоставления экспериментальных значений масс частиц и описывающих их формул) также носит характер гипотезы. Попадание этих величин в **диапазон** значений, определенных с помощью известных моделей из экспериментальных данных, может служить указанием на правдоподобность гипотезы. Более того, при высокой точности формул типа (2), последнее дает основание считать **точным** численное значение физической величины, использованной в формуле. Таким образом, даже до создания теории эмпирические массовые формулы способны давать

количественную физическую информацию, превосходящую по точности достигнутую известными теоретическими методами. Окончательный же приговор гипотезам и теориям может быть вынесен только на основании так называемых "решающих экспериментов".

В данной работе применен универсальный метод анализа размерности. "Реальная ценность метода заключается в том, что он позволяет извлекать максимальное количество информации, связанной с естественными соотношениями, существующими между переменными нерешенной задачи, когда математическая теория чересчур сложна, неразрешима обычными методами математического анализа или вообще отсутствует... До тех пор пока рассматриваемое явление не выражено посредством уравнения или формулы, нет оснований отвергать помощь, которую приносит знание экспериментальных результатов или соотношений, подсказанных интуицией." [1].

Поиск и публикация эмпирических соотношений, вне зависимости от активности в этой области развития науки, всегда были актуальными задачами, решению которых способствовал и журнал ЭЧАЯ. Примером этого является опубликование обзора Р.М.Мурадяна [2]. В нём, в частности, приведены различные соотношения между массами частиц, "которые не вытекают из существующих в настоящее время теорий и поэтому их следует рассматривать как **нумерологические** (цифровые) совпадения... Некоторые из этих соотношений выполняются с высокой степенью точности [2]". Автором обзора ожидалось, "что некоторые из приведенных ... соотношений не случайны и вскоре будут теоретически объяснены". Это ожидание в некоторой степени оправдалось в области космологии, чего пока нельзя сказать о физике частиц. Этим объясняется то, что в 1992 г. Particle Data Group [3], представляя данные о массах кварков, пишет следующее: "Since the subject of their masses is controversial, the purpose of this table is to provoke discussion. We ask that our readers send us comments and references (particularly on quark mass definitions and values)". Ситуация с точными значениями масс токовых кварков мало изменилась и по сей день.

2. Эмпирические формулы для масс частиц и токовых кварков

2.1. Ещё в работе П.С.Исаева и В.С.Мурзина (1956 г.) [4] отмечалось, что энергии распада Q известных тогда частиц можно записать в следующем виде:

$$Q = n \cdot q, \quad q = (1/2)m_e \cdot \alpha^{-1}, \quad (3)$$

и предсказывалось, что новые частицы следует искать среди массовых чисел M , удовлетворяющих соотношению

$$M \sim n_1 \cdot q + \delta m, \quad (4)$$

где n и n_1 – величины, близкие к целым числам; $\alpha = e^2 / (\hbar c)$ – постоянная тонкой структуры. Ниже мы воспользуемся следующими тремя эмпирическими соотношениями, взятыми из [2]:

$$m_\mu \cong m_e \cdot (3/2)\alpha^{-1} \quad (\text{Nambu Y., 1952}). \quad (5)$$

$$m_\pi \cong m_e \cdot (2\alpha^{-1}), \quad (6)$$

$$(m_\pi - m_\rho) / (m_\Lambda - m_p) \cong \alpha \quad (\text{Tomazawa Y., 1974}). \quad (7)$$

В массовых формулах (3) - (6) присутствует величина

$$m_e c^2 \cdot \alpha^{-1} = \hbar c / r_e = M_0 \cdot c^2 = 70.025270(2) \text{ МэВ}, \quad (8)$$

где $r_e = 2.8179380(70)$ фм – так называемый "классический радиус электрона", определяемый выражением $m_e c^2 = e^2 / r_e$. Последнее предполагает, что масса покоя электрона обусловлена электрической энергией макроскопического шара с зарядом e и радиусом $a_e = (1/2)r_e$ при поверхностном или $a_e = (3/5)r_e$ при объемном распределении заряда [5]. Видно, что величина a_e весьма близка к радиусу действия **сильных** взаимодействий, а $m_\pi \cong \hbar c / a_e$. Одной из причин отказа от гипотезы электромагнитного происхождения массы электрона была неделимость заряда e . Однако успешное использование теории кварков, обладающих дробными электрическим и барионным зарядами, делает указанную причину менее обоснованной.

2.2. При составлении нумерологических формул для масс частиц m_{exp} , представленных в табл. 1, мы использовали: цифры от 1 до 4; числа e и φ^{-1} – основания натуральных и десятичных логарифмов соответственно; величины масс токовых u -, d -, s -кварков (МТК), входящие в КХД лагранжиан и подлежащие уточнению, обозначены как m_u , m_d , m_s . Там же приведены экспериментальные значения масс m_{exp} и значения $|\delta| = 1 - (m_{emp} / m_{exp})$ – относительной погрешности эмпирических формул. Для наибольших долей массы нуклонов и гиперонов введены следующие обозначения:

$$M_N = M_0 \cdot (4/3) \cdot \varphi^{-1} = M_0 \cdot (40/3) = 933.670246 \text{ (МэВ)}. \quad (9)$$

$$M_{\Sigma} = M_0 \cdot [(4/3) \cdot \varphi^{-1} + 1 + \varphi(1/2 - \varphi)], \quad (10)$$

$$M_{\Xi} = M_0 \cdot [(4/3) \cdot \varphi^{-1} + e^{-1} + \varphi^2(1 + \varphi/2)], \quad (11)$$

$$M_{\Xi^0} = M_0 \cdot [(4/3) \cdot \varphi^{-1} + e^{-1} - \varphi^2(1 + \varphi/2)], \quad (12)$$

$$M_{\Omega} = M_0 \cdot [(4/3) \cdot \varphi^{-1} + 3 - \varphi^2], \quad (13)$$

где M_0 определена в (8).

Используя значения m_{exp} для протона (m_p), нейтрона (m_n), Λ -гиперона (m_Λ), $\Delta m_N = m_n - m_p = 1,293318(9)$ МэВ [3] и эмпирические формулы табл. 1 для этих частиц, мы вычислили "точные" значения масс m_u , m_d , m_s и соотношений между ними, которые приведены в табл. 2 вместе со значениями, взятыми из обзоров [3] и [6]. В [3] говорится, что m_u , m_d , m_s и отношения m_u / m_d и m_d / m_s , "были получены из масс пиона и каона с использованием киральной симметрии; оценки масс m_u и m_d не являются бесспорными и остаются предметом активного исследования, в литературе имеются даже указания на то, что $m_u = 0$; величина m_s оценена из SU(3) расщепления адронных масс". Малая величина $|\delta|$ для m_p , m_n , m_Λ и высокая точность в определении значений МТК с помощью эмпирических формул обусловлена точностью экспериментального значения Δm_N , превышающей точность в определении масс самих нуклонов. Найденные таким образом значения МТК подставлены во все формулы, включающие их. Из табл. 2 видно, что полученные значения величин находятся в "осторожных" пределах, принятых в настоящее время.

Подстановка в (7) формул для m_p , m_n , m_Λ из табл. 1 позволяет выразить массу s -кварка через массы u - и d -кварков (см. (14)), а подстановка значений m_u и m_d из табл. 2 в эту формулу для величины m_s -кварка даёт значение, весьма близкое к полученному нами в табл. 2:

$$m_s \equiv (m_d - m_u)(2\alpha^{-1} - 1) / 6 \equiv (m_d - m_u)(2\alpha^{-1} - 1) / (\varphi^{-1} - 4) = 176,59 \pm 0,01 \text{ (МэВ)}, \quad (14)$$

что обусловлено большой точностью эмпирической формулы (7). Используя данные табл. 2 и формулу (14), можно записать следующие выражения для МТК:

$$m_u = m_c \cdot \{\varphi^{-1} + e\varphi - [2(2 - \varphi) - \alpha / 2]\}, \quad (15)$$

$$m_d = m_c \cdot \{\varphi^{-1} + e\varphi + [2(2 - \varphi) - \alpha / 2]\}, \quad (16)$$

$$m_s \equiv m_c \cdot (2\alpha^{-1} - 1) \cdot [2(2 - \varphi) - \alpha / 2] / 3. \quad (17)$$

3. Пример использования полученных значений масс токовых кварков

Для установления механизма нарушения киральной $SU(3) \otimes SU(3)$ -симметрии необходимо вычисление пион-нуклонного $\sigma_{\pi N}$ -члена, являющегося параметром этого нарушения. Для точного вычисления необходимо знание точных значений МТК. В противном случае, из-за неопределенностей в различных методиках, возможно получение лишь оценок $\sigma_{\pi N}$.

В [7] говорится, что киральная $SU(3) \otimes SU(3)$ -симметрия нарушается $(3, 3) \otimes (3, 3)$ -механизмом:

$$\bar{q}Mq = \bar{q}_L M q_R + \bar{q}_R M q_L,$$

где массовая матрица "голых" (токовых) кварков

$$M = \begin{pmatrix} m_u & 0 & 0 \\ 0 & m_d & 0 \\ 0 & 0 & m_s \end{pmatrix} = c_0 \lambda^0 + c_3 \lambda^3 + c_8 \lambda^8;$$

$$c_0 = (1/\sqrt{6})(m_u + m_d + m_s); \quad c_3 = (1/2)(m_u - m_d); \quad c_8 = [1/(2\sqrt{3})](m_u + m_d - 2m_s).$$

Подставляя сюда найденные выше значения МТК, получаем

$$c_0 = 76,43 \pm 0,02 \text{ (МэВ)}, \quad c_3 = -1,94 \pm 0,00014 \text{ (МэВ)}, \quad c_8 = -98,99 \pm 0,02 \text{ (МэВ)},$$

и "точное значение"

$$c_8 / c_0 = -1,2952 \pm 0,0004, \quad (18)$$

превосходящее по модулю значения, полученные ранее другими способами:

в рамках алгебры токов и гипотезы частичного сохранения аксиального тока (PCAC) для соотношения c_8 / c_0 была рассчитана [8] оценка

$$c_8 / c_0 = -1,25, \quad (19)$$

а в рамках алгебры токов и PCAC с учетом нарушения $SU(3)$ -симметрии вакуума получен [9 - 11] интервал

$$-1,26 < c_8 / c_0 < -1,22. \quad (20)$$

После введения феноменологического параметра нарушения правила Окубо - Цвейга - Инзуки

$$\beta = \langle N | \bar{s} s | N \rangle / \left[\langle N | (\bar{u} u + \bar{d} d) / \sqrt{2} | N \rangle \right] = (0,09 \pm 0,13) \quad (21)$$

выражение для пион-нуклонного σ -члена имеет следующий вид [7]

$$\sigma_{\pi N} = \left[1 + \sqrt{2} / (c_8 / c_0) \right] \left[(M_\Lambda^2 - M_\Xi^2) / 2m_N \right] / (1 - \beta\sqrt{2}). \quad (22)$$

Подставляя сюда $m_N = 0,5(m_n + m_p)$, $M_{\Xi} = 0,5(M_{\Xi^-} + M_{\Xi^0})$ и c_n / c_0 из (18), с учетом разброса в значениях β (21), получаем $\sigma_{\pi N} = (29 \pm 1)$ МэВ. Эта величина согласуется с доверительным интервалом $\sigma_{\pi N} = (30 - 50)$ МэВ, установленным в [7], и оставляет справедливым вывод о $(3, 3^+) \otimes (3^+, 3)$ -механизме нарушения киральной $SU(3) \otimes SU(3)$ -симметрии в соответствии с моделью Гелл-Манна – Оакса - Реннера и КХД".

Автор благодарен Ф.А.Гарееву, В.А.Никитину, М.К.Сулейманову, Л.И.Сарычевой, С.П.Игнатовой за поддержку и интерес к работе и Н.П.Карпинской за помощь при подготовке текста к печати.

Таблица 1

Эмпирические формулы для масс частиц, m_{emp}

Частица	m_{emp}	m_{exp} , (МэВ) [40]	$ \delta $
e^{\pm}	$M_0 \alpha$	0,51099906(15)	0
μ^{\pm}	$M_0[(3/2) + \alpha(1+2\varphi)]$	105,658389±0,000034	$7 \cdot 10^{-5}$
π^{\pm}	$M_0[2 - \alpha(1 + \varphi/2)]$	139,5679±0,00007	$2 \cdot 10^{-5}$
π^0	$M_0(2 - \alpha\varphi^{-1})$	134,9743±0,00008	$3 \cdot 10^{-4}$
k^{\pm}	$M_0(\varphi^{-1} - 3 + \varphi/2)$	493,646±0,009	$7 \cdot 10^{-5}$
k^0	$M_0[\varphi^{-1} - 3 + \varphi(1 + \varphi/\sqrt{2})]$	497,671±0,031	$7 \cdot 10^{-6}$
$\Delta(1232)$	$M_0(\varphi^{-1}\sqrt{3} + \varphi \cdot 2\sqrt{2})$	1230±1234	$6 \cdot 10^{-4}$
p	$M_N + (1/3)(2m_n + m_d)$	938,27231±0,00028	10^{-8}
n	$M_N + (1/3)(m_p + 2m_d)$	939,56563±0,00028	$7 \cdot 10^{-8}$
Λ	$M_N + (1/2)(m_n + m_d) + m_s$	1115,63±0,05	$9 \cdot 10^{-7}$
Σ^0	$M_{\Sigma} + m_n + m_d + m_s$	1192,55±0,10	10^{-3}
Σ^+	$M_{\Sigma} + 2m_n + m_s$	1189,37±0,07	$4 \cdot 10^{-4}$
Σ^-	$M_{\Sigma} + 2m_d + m_s$	1197,43±0,06	10^{-4}
Ξ^-	$M_{\Xi} + m_d + 2m_s$	1321,32±0,13	$4 \cdot 10^{-4}$
Ξ^0	$M_{\Xi^0} + m_n + 2m_s$	1314,9±0,6	$4 \cdot 10^{-4}$
Ω^-	$M_{\Omega} + 3m_s$	1672,43±0,32	$3 \cdot 10^{-5}$

Величины масс и соотношений между ними для токовых кварков

Величина	В этой работе	[3]	[6]
m_u (МэВ)	$3.3088 \pm 0,0002$	2+8	1,5+5
m_d (МэВ)	$7,1888 \pm 0,0002$	5+15	3+9
m_s (МэВ)	$176,71 \pm 0,05$	100+300	60+170
m_u / m_d	$0,40627 \pm 0,00003$	0,25+0,70	0.20+0.70
m_d / m_s	$0,04681 \pm 0,00001$	0,04+0,06	
m_c / m_d	$24,581 \pm 0,007$		17+25
$m' = (m_u + m_d) / 2$	$5,2488 \pm 0,0001$		2+6
$(m_c - m') / (m_d - m_u)$	$44,19 \pm 0,01$		34+51

Литература

- Huntley H.E. "Dimensional Analysis". Dover Publications, Inc. New York 1967. Пер. Хаунтли Г. "Анализ размерностей" Изд. "Мир", М., 1970.
- Мурадян Р.М. – ЭЧАЯ, 1977, т.8, вып.1, с.175.
- Particle Properties Data Booklet. June 1992. Physical Review D. Part II. Particles and fields. 1992, vol.45. Third series, Num.11.
- Исаев И.С., Мурзин В.С. – ЖЭТФ, 1956, том 31, вып. 4(10), с.715 .
- Френкель Я.И. "Принципы теории атомных ядер" Изд. АН СССР, М.-Л., 1950.
- Particale Physics Booklet. July 1998. Review of Particle Physics. C.Caso et al. European Physical Journal C3 (1998) 1.
- Ефросинин В.П., Заикин Д.А. – ЭЧАЯ, 1985, т.16, вып.6, с.1330.
- Gell-Mann M., Oakes R.J., Renner B. – Phys. Rev., 1968, v.175, p.2195.
- Ефросинин В.П., Заикин Д.А. – ЯФ, 1983, т. 37, с. 1532.
- Ефросинин В.П., Заикин Д.А. – ЯФ, 1984, т. 40, с. 250.
- Efrosinin V.P., Zaikin D.A. – Z. Phys. Ser. C, 1984.

Получено 22 апреля 2002 г.