1965 г. Июнь *Том 86, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И КВАРКИ «В ИЗЛОЖЕНИИ ДЛЯ ПЕШЕХОДОВ»

Я. Б. Зельдович

Широкие круги физиков, и даже не только физиков, знают, что в теории элементарных частиц за последние два-три года произошли весьма важные события. Это известно хотя бы из речи И. Е. Тамма на общем собрании Академии наук СССР, напечатанной в газете «Известия», из статей в популярных журналах, например «Scientific American», и прежде всего из потока статей и сообщений *) в специальных журналах (Phys. Rev., Phys. Rev. Letts., ЖЭТФ, а также УФН).

Новые достижения сравнивают с открытием периодической системы Менделеева. Трудно сопоставлять значение открытий, сделанных в совершенно различной общенаучной ситуации. Во всяком случае серьезность новых открытий видна из того, что теоретики предсказали существование и все свойства новой элементарной частицы — омега-минус-гиперона, и опыт блестяще подтвердил это предсказание.

В специальных статьях используется техника теории групп; они часто имеют отпугивающие названия, непонятные физико-химику, металловеду или теплотехнику. Можно ли объяснить сущность новых открытий, разумеется, без многих важных деталей, на более доступном уровне? В одной статье подобное объяснение было названо «изложением для пешеходов».

Возможность такого объяснения следует из работы одного из создателей новой теории, американского физика Мюррея Гелл-Манна: ту же идею независимо высказал и Цвейг (ЦЕРН). Суть идеи заключается в следующем.

Классификация элементарных частиц естественно получается из предположения, что все частицы составлены из трех сортов «самых фундаментальных» частиц, которые называют кварками. При этом каждый барион состоит из трех кварков (одинаковых или разных), каждый мезон состоит из одного кварка и одного антикварка.

Новая классификация относится только к сильно взаимодействующим частицам, которые сейчас принято называть «адронами». В нее не включены, следовательно, электроны, мюоны, нейтрино и фотоны. Это мудрое самоограничение представляется крайне существенным, именно в нем был

*) Например, только в журнале «Успехи физических наук» за последнее время были напечатаны статьи М. Гелл-Манна, А. Розенфельда, Дж. Чу «Сильно взаимодействующие частицы» (УФН 83, 695 (1964)), Я. А. Смородинского «Унитарная симметрия» (УФН 84, 3 (1964)), Дж. де-Сварта «Октетная модель элементарных частиц» (УФН 84, 651 (1964)), В. Б. Берестецкого «Динамические симметрии элементарных частиц» (УФН 85, 493 (1965)).

залог успеха. Предупреждаю активных читателей, которых вдохновит идея включить легкие частицы в классификацию: автор определенно не одобряет таких попыток *).

Понятие спина частицы, деление частиц на фермионы и бозоны, понятие частицы и античастицы будем считать известными. Заметим сразу, что, вводя новые частицы — кварки, мы предполагаем, что существуют и соответствующие античастицы — антикварки, которые также используются как строительный материал.

Понятие барионного заряда, или барионного числа, также хорошо известно; это понятие связано с точным законом сохранения числа барионов. Напомним, что барионом называется всякая частица, распадающаяся окончательно на один протон и любое число электронов, нейтрино и мезонов.

Понятие странности существует уже около 10 лет; значения числа S (от strangeness — странность) для различных частиц приведены ниже. Важность величины S связана с тем, что в сильных взаимодействиях, т. е., например, при столкновениях, идут только процессы с сохранением странности **), например $\pi^+ + p = \Sigma^+ (S = -1) + K^+ (S = +1)$, но не $\pi^- + n = \Lambda^0 (S = -1) + K^- (S = -1)$. Закон сохранения странности не является абсолютным, в отличие от закона сохранения барионов. С малой вероятностью за счет слабого взаимодействия возможны процессы с изменением странности, например распад $\Lambda^0 (S = -1) = p + \pi^-$. Однако далее рассматриваются только сильные взаимодействия. Странные барионы называют «гиперонами» ***).

Подробно понятия странности и изотопического спина и связь их рассмотрены во многих популярных статьях и книгах ****). Не так широко известны тенденции последних 3—4 лет.

Новым является смелое включение так называемых резонансов в число элементарных частиц, подлежащих классификации. В 1952 г. Ферми изучал рассеяние пионов на протонах. Он обнаружил резкий максимум («резонанс») в сечении рассеяния при энергии пиона около 200 *Мэв*. Резонанс можно понять так, что пион и протон сливаются в новую частицу (ее теперь называют «дельта» — Δ), которая затем распадается, испуская пион в другом направлении. Максимум сечения соответствует такой энергии пиона, при которой сумма энергий (включая mc^2) пиона и протона равна энергии Δ. Отсюда находим массу покоя Δ, равную 1236 *Мэв* (в энергетических единицах масса протона 938 *Мэв*, пиона 138 *Мэв*). Ширина резонанса порядка 100 *Мэв*, откуда следует время жизни 10^{-23} *сек*.

Резонанс, наблюдаемый при рассеянии π^+ на P, соответствует образованию и распаду бариона с удвоенным электрическим зарядом, т. е. частицы Δ^{++}. Резонанс в системе $\pi^+ + N$ означает существование однозарядной

---

*) Это не относится, однако, к адронам табл. III и IV (в конце статьи), не рассмотренным в данной статье, но несомненно подлежащим классификации в рамках общих идей, излагаемых ниже.

**) Частицы, у которых странность не обозначена, имеют $S = 0$.

***) Вместо «странности» в последнее время пользуются понятием гиперзаряда Y, равного сумме барионного числа и странности. Таким образом, для N, P, Δ гиперзаряд $Y = 1$, для Σ и Λ $Y = 0$, для Ξ $Y = -1$, для Ω $Y = -2$. У мезонов странность и гиперзаряд совпадают. Гиперзаряд кварков дробный: для p, n $Y = 1/3$, для λ $Y = -2/3$.

****) Сошлемся, к примеру, на статьи М. Гелл-Манна и Е. Розенбаума «Элементарные частицы» (УФН **64**, 391 (1958)), Я. Б. Зельдовича «Проблемы современной физики и астрономия» (УФН 78, 545 (1962)). Укажем также две небольшие книжки: Ю. В. Новожилов, Элементарные частицы, М., Физматгиз, 1963 и К. И. Щелкин, Физика микромира, М., Госатомиздат, 1963.

частицы Δ^+; резонанс в системе $\pi^- + P$ соответствует нейтральной Δ^0 и, наконец, резонанс $\pi^- + N$ указывает на существование Δ^-.

Время жизни и масса всех Δ с точностью эксперимента одинаковы, а спин всех Δ, как оказалось, равен 3/2. Другие резонансы наблюдаются в процессах рождения нескольких частиц: например, когда при аннигиляции $P + \bar{P}$ рождаются пять π-мезонов, $2\pi^+ + 2\pi^- + \pi^0$, оказывается, что в большой доле случаев энергия двух мезонов в системе их центра тяжести равна 763 *Мэв*. Значит, в этих случаях процесс идет в две стадии: $P + \bar{P} = \varrho^+ + 2\pi^- + \pi^+$, $\varrho^+ = \pi^+ + \pi^0$. Масса ϱ равна 763 *Мэв*, время жизни 10^{-22} *сек* соответственно ширине энергетической полосы.

Мы не будем здесь перечислять все частицы (резонансы), тем более, что каждый месяц приносит одну-две новые частицы. Вместо этого сосредоточим внимание на двух группах барионов и двух группах мезонов и покажем, как они строятся из кварков. Предполагается, что кварки (p, n, λ) имеют следующие квантовые числа (заряды) (табл. I).

Таблица I

	Электрический заряд	Странность	Барионное число	Спин
p	$+2/3$	0	1/3	1/2
n	$-1/3$	0	1/3	1/2
λ	$-1/3$	-1	1/3	1/2

Обратите внимание на то, что кварки обозначаются малыми (строчными) буквами p, n, λ, в отличие от P — протона, N — нейтрона, Λ — гиперона.

Группа из восьми барионов, к которой относятся классические частицы P и N и сравнительно долгоживущие (10^{-10} *сек*, за исключением Σ^0) гипероны *), выписана слева на схеме (1); справа показано, как каждый из ее членов строится из кварков; внизу самые легкие частицы, вверху более тяжелые:

$$\left.\begin{array}{ccc} \Xi^0 \quad \Xi^- & p\lambda\lambda & n\lambda\lambda \\ \Sigma^+ \quad \Sigma^0 \quad \Sigma^-, & pp\lambda \quad pn\lambda & nn\lambda. \\ \Lambda^0 & pn\lambda & \\ P \quad N & ppn \quad pnn & \end{array}\right\} \qquad (1)$$

Группа из десяти барионов показана на схеме (2); к ней относятся Δ-резонансы, открытые еще Ферми, выше — возбужденные странные частицы (возбуждение отмечено звездочкой); наконец, в вершине расположена Ω-частица, появившаяся на кончике пера теоретиков; справа опять дана расшифровка частиц с помощью кварков:

$$\left.\begin{array}{ccc} \Omega^- & \lambda\lambda\lambda & \\ \Xi^{0*} \quad \Xi^{-*} & p\lambda\lambda \quad n\lambda\lambda & \\ \Sigma^{+*} \quad \Sigma^{0*} \quad \Sigma^{-*} & pp\lambda \quad pn\lambda \quad nn\lambda & \\ \Delta^{++} \quad \Delta^+ \quad \Delta^0 \quad \Delta^-, & ppp \quad ppn \quad pnn \quad nnn. & \end{array}\right\} \qquad (2)$$

Схема (2) особенно стройна и наглядна. Можно просто и ясно объяснить даже ребенку, что есть 10 частиц, потому что каждая частица состоит

*) См. табл. VI в конце статьи.

из 3 кирпичиков; есть 3 сорта кирпичиков, и легко проверить, что есть 10 и только 10 разных комбинаций, перечисленных справа. Далее, предположим, что p и n имеют примерно одинаковую массу, а λ тяжелее их на 146 *Мэв*. Тогда, естественно, получится, что каждый ряд тяжелее на 146 *Мэв* по сравнению с предыдущим. Именно эта закономерность позволила предсказать массу Ω^- 1675 *Мэв*.

В обеих схемах для 8 и для 10 частиц (так называемые октет и декуплет) в нижнем ряду странность равна нулю, во втором ряду $S = -1$, в третьем $S = -2$, и, наконец, Ω^- есть единственная известная в настоящее время частица с $S = -3$.

Вернемся от схемы (2) к схеме (1). Сразу возникает целый ряд вопросов. Почему в схеме (1) нет «угловых» частиц ppp, nnn, $\lambda\lambda\lambda$? Почему комбинация $pn\lambda$ встречается в схеме (1) дважды (Σ^0, Λ^0)? Наконец, почему простая схема (2) (декуплет) реализуется в случае частиц со спином 3/2, а первая схема (октет) описывает частицы со спином 1/2?

Оказывается, что теория кварков дает простые и логичные ответы на все эти вопросы. Необходимо только предположить, что сами кварки имеют спин 1/2 и являются фермионами (подчиняются принципу Паули). Необходимо, далее, сделать одно (только одно, а схем две и частиц 18) предположение о волновой функции трех кварков. Предположим, что волновая функция полностью антисимметрична в координатах трех кварков и не имеет момента орбитального движения. Как пример можно привести волновую функцию трех внешних (валентных) электронов в атоме азота: это $(2p)^3$-электроны с $L = 0$; три электрона укладываются в трех разных состояниях с $l = 1$, а именно с $l_z = -1$, $l_z = 0$, $l_z = 1$. Функция полностью антисимметрична в координатах электронов (так как электроны отталкиваются, это энергетически выгодно) *). Такой комбинации соответствует полный момент $L = 0$. Так как функция антисимметрична в координатах, она обязана быть симметричной в спинах для всех трех электронов. Поэтому спиновый момент атома азота равен 3/2.

Мы еще прокомментируем вопрос об орбитальной функции кварков, но уже из приведенного примера видно, что в данной схеме можно взять три одинаковые частицы (ppp или nnn, или $\lambda\lambda\lambda$ по аналогии с тремя электронами) и спин 3/2, что и наблюдается в декуплете.

Теперь рассмотрим, в каких случаях возможен спин 1/2. Возьмем сначала состояние ppp, $s = 3/2$ с проекцией $s_z = +3/2$. Будем обозначать проекцию спина на ось z стрелкой:

$$\Delta^{++}, \quad s = \frac{3}{2}, \quad s_z = +\frac{3}{2} : p\uparrow p\uparrow p\uparrow.$$

Повернем одну стрелку вниз. Получим $p\uparrow p\uparrow p\downarrow$. Такое состояние в данном случае единственное, так как все три p-кварка тождественны и нельзя различить, у которого из них спин повернут вниз. Но при $s = 3/2$ должно быть, кроме состояния с $s_z = +3/2$, еще и состояние $s = 3/2$, $s_z = +1/2$; его мы и получили в виде $p\uparrow p\uparrow p\downarrow$. Эта скучная и тривиальная процедура служит введением к более интересному случаю.

Возьмем ppn, $s = 3/2$ (т. е. Δ^+). Состояние с $s_z = +3/2$ единственное: $p\uparrow p\uparrow n\uparrow$.

Но есть два разных состояния с $s_z = +1/2$: а) $p\uparrow p\downarrow n\uparrow$ и б) $p\uparrow p\uparrow n\downarrow$.

Из двух состояний можно составить две комбинации; одна из этих комбинаций есть частица Δ^+, повернутая в пространстве, т. е. со спином, отклонившимся от оси z ($s = 3/2$, $s_z = +1/2$) Вторая комбинация — нечто новое. Легко сообразить, что она описывает состояние $s = 1/2$,

*) Заметим, что $1S$- и $2S$-уровни в атоме азота уже заполнены первыми четырьмя электронами. В силу принципа Паули последние три электрона занимают $2p$-оболочку.

$s_z = +1/2$. Это есть один из членов октета, а именно P, т. е. протон. При этом мы, очевидно, предположили, что орбитальные функции кварков не изменяются; по-прежнему $L = 0$.

Если взять $pn\lambda$, то в этом случае есть одно состояние с $s_z = +3/2$: $p\uparrow n\uparrow\lambda\uparrow$.

Однако есть три разных состояния с $s_z = +1/2$:

$$p\uparrow n\uparrow\lambda\downarrow, \quad p\uparrow n\downarrow\lambda\uparrow, \quad p\downarrow n\uparrow\lambda\uparrow.$$

Очевидно, из трех состояний можно построить три линейные комбинации, из которых только одна соответствует $s = 3/2$, $s_z = +1/2$, т. е. повернутому Σ^{0*} из декуплета. Две другие соответствуют $s = 1/2$, т. е. входят в октет. Итак, мы получили структуру октета со всеми ее особенностями (спин 1/2, отсутствие углов, удвоение в центре).

Эти представления можно развить и дальше. Магнитный момент каждого члена декуплета равен просто сумме собственных магнитных моментов трех кварков. Если взаимодействие и искажает магнитные моменты (обозначаемые через μ), то это искажение одинаково для всех трех кварков и оставляет момент их пропорциональным заряду: $\mu_p = 2/3\ \mu_1$, $\mu_n = -1/3\ \mu_1$, $\mu_\lambda = -1/3\ \mu_1$, где μ_1 — неизвестная заранее величина. Отсюда

$$\mu_{\Delta^{++}} = 2\mu_1, \quad \mu_{\Delta^-} = -\mu_1, \quad \mu_{\Omega^-} = -\mu_1 \text{ и т. д.};$$

в декуплете магнитный момент просто пропорционален заряду частицы.

Обратимся к октету и вспомним, как он получался. Возьмем снова Δ^+ с $s_z = +3/2$ ($p\uparrow p\uparrow n\uparrow$) и наклоним его; вероятность получить при этом $p\uparrow p\downarrow n\uparrow$ вдвое больше вероятности получить $p\uparrow p\uparrow n\downarrow$, так как p-кварков два, а n-кварк один.

Итак Δ^+, $s = {}^3/_2$, $s_z = +{}^1/_2$ есть состояние, которое с вероятностью ${}^2/_3$ представляет собой $p\uparrow p\downarrow n\uparrow$ и с вероятностью ${}^1/_3$ $p\uparrow p\uparrow n\downarrow$:

$$\frac{2}{3}p\uparrow p\downarrow n\uparrow + \frac{1}{3}p\uparrow p\uparrow n\downarrow;$$

соответствующая волновая функция имеет вид

$$\sqrt{\frac{2}{3}}(p\uparrow p\downarrow n\uparrow) + \sqrt{\frac{1}{3}}(p\uparrow p\uparrow n\downarrow).$$

Волновая функция октета того же состава, т. е. состоящая из ppn, ортогональна функции декуплета. Она равна

$$-\sqrt{\frac{1}{3}}(p\uparrow p\downarrow n\uparrow) + \sqrt{\frac{2}{3}}(p\uparrow p\uparrow n\downarrow);$$

для вероятности найти ту или иную комбинацию получим результат, обратный декуплету; следовательно, P, $s = {}^1/_2$, $s_z = +{}^1/_2$ есть

$$\frac{1}{3}(p\uparrow p\downarrow n\uparrow) + \frac{2}{3}(p\uparrow p\uparrow n\downarrow),$$

т. е. смесь $p\uparrow p\downarrow n\uparrow$ с вероятностью ${}^1/_3$ и $p\uparrow p\uparrow n\downarrow$ с вероятностью ${}^2/_3$.

Подсчитаем среднее значение магнитного момента протона*):

$$\mu_P = \frac{1}{3}\left(+\frac{2}{3}\mu_1 - \frac{2}{3}\mu_1 - \frac{1}{3}\mu_1\right) + \frac{2}{3}\left(+\frac{2}{3}\mu_1 + \frac{2}{3}\mu_1 - \left(-\frac{1}{3}\mu_1\right)\right) = \mu_1.$$

---

*) Мы находим проекцию μ_P на ось z для протона, спин которого направлен вверх по оси: это и есть μ_P; не путать с магнитным моментом p-кварка μ_p. Орбитальный магнитный момент, очевидно, отсутствует, поскольку $L = 0$.

Аналогично получим для нейтрона:

$$N,\ s=\frac{1}{2},\ s_z=+\frac{1}{2}\ \text{есть}\ \frac{1}{3}(p\uparrow n\uparrow n\downarrow)\ \text{и}\ \frac{2}{3}(p\downarrow n\uparrow n\uparrow),$$

$$\mu_N=\frac{1}{3}\left(+\frac{2}{3}\mu_1-\frac{1}{3}\mu_1+\frac{1}{3}\mu_1\right)+\frac{2}{3}\left(-\frac{2}{3}\mu_1-\frac{1}{3}\mu_1-\frac{1}{3}\mu_1\right)=-\frac{2}{3}\mu_1.$$

Итак, теория предсказывает

$$\frac{\mu_N}{\mu_P}=\frac{-\frac{2}{3}\mu_1}{\mu_1}=-\frac{2}{3}=-0{,}667;$$

на опыте

$$\frac{\mu_N}{\mu_P}=\frac{-1{,}9103\mu_B}{2{,}7896\mu_B}=-0{,}685,$$

где $\mu_B=eh/Mc$ — ядерный магнетон Бора. Совпадение оказывается неожиданно хорошим — точность лучше 2%! Это совпадение убеждает в правильности основных положений теории. Чрезвычайно важно измерить магнитные моменты других членов октета и декуплета *). Однако эта задача является гораздо более сложной, чем измерение магнитного момента протона и нейтрона.

Превращения частиц, например $P+\gamma$-квант $=\Delta^+$, представляют собой поворот спина одного из кварков под влиянием электромагнитного поля и также предсказывается теорией.

Вкратце рассмотрим мезоны. Из трех кварков и трех антикварков можно составить 9 пар; принцип Паули допускает все возможные комбинации (античастицы обозначаем чертой сверху). Снова расположим их по величине странности (нижний ряд: $S=+1$, средний: $S=0$, верхний: $S=-1$), слева известные на опыте мезоны, справа — схему кварков:

$$\left.\begin{array}{ccccccc} & \bar{K}^0 & K^- & & \lambda\bar{n} & & \lambda\bar{p} \\ \pi^+ & (\pi^0,\eta^0,X^0) & \pi^-, & p\bar{n} & (p\bar{p}, & n\bar{n}, & \lambda\bar{\lambda}) & n\bar{p} \\ K^+ & K^0 & & p\bar{\lambda} & & n\bar{\lambda} & & \end{array}\right\}. \qquad (3)$$

Если бы мы расположили кварковую схему более естественно:

$$\left.\begin{array}{ccc} p\bar{p} & n\bar{p} & \lambda\bar{p} \\ p\bar{n} & n\bar{n} & \lambda\bar{n} \\ p\bar{\lambda} & n\bar{\lambda} & \lambda\lambda \end{array}\right\}, \qquad (4)$$

то в такой схеме строки не имели бы постоянной странности, а столбцы — постоянного заряда.

В центральной клетке схемы (3) имеется сложность: надо установить соответствие между тремя мезонами и тремя комбинациями кварков. Взаимодействие кварка с антикварком (и вообще частицы с античастицей) вносит существенно новый момент.

Взаимодействие двух разных частиц всегда можно себе представить как обмен нейтральным квантом гипотетического поля, как показано на рис. 1, *а* для взаимодействия p и n. Стрелка показывает направление времени, волнистая линия соответствует кванту, у нее нарочно не поставлена стрелка: кварк p может сперва испустить квант, который будет поглощен кварком n (рис. 1, *б*), или наоборот (рис. 1, *в*); рис. 1, *а* объединяет оба случая.

*) Магнитный момент Λ^0 равен $\mu_{\Lambda^0}=(-0{,}80\pm0{,}15)\ \mu_B$ и также согласуется с теорией.

Такая же схема относится и к взаимодействию частицы с чужой античастицей, например p с $\bar{n}$ (рис. 1, *г*). Но при взаимодействии частицы и (ее) античастицы, например p и $\bar{p}$, возникает новая возможность: аннигиляция и возрождение пары (рис. 2).

Такой процесс экспериментально изучен в случае атома позитрония, состоящего из e^+ и e^-; он приводит к наблюдаемому изменению уровней энергии.

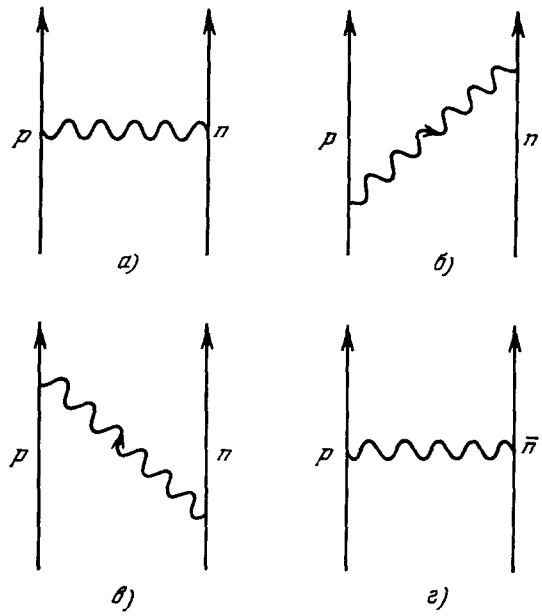

Рис. 1.

В теории кварков предполагается, что в самом грубом приближении можно считать все три кварка одинаковыми по своим свойствам сильного взаимодействия *). Именно поэтому мы могли объединить частицы в октет и декуплет. Отсюда следует, что квант нейтрального поля, получившийся при аннигиляции пары, например p, $\bar{p}$ (рис. 2), может потом возрождаться с одинаковой вероятностью в виде любой пары: $p\bar{p}$, $n\bar{n}$ или $\lambda\bar{\lambda}$.

Таким образом, теория выделяет комбинацию, в которой равновероятны все три пары:

$$\frac{1}{3}(p\bar{p})+\frac{1}{3}(n\bar{n})+\frac{1}{3}(\lambda\bar{\lambda}),$$

или в терминах волновой функции

$$\sqrt{\frac{1}{3}}(p\bar{p})+\sqrt{\frac{1}{3}}(n\bar{n})+\sqrt{\frac{1}{3}}(\lambda\bar{\lambda});$$

при аннигиляции и возрождении именно такая комбинация превращается сама в себя **). Таким образом, из 9 комбинаций выделяется одна особая, написанная выше, которую отождествляют с X-мезоном, и 8 остальных (октет мезонов: $3\pi + 2K + 2\bar{K} + \eta$).

При этом

$$\sqrt{\frac{1}{2}}(p\bar{p})-\sqrt{\frac{1}{2}}(n\bar{n})=\pi^0,$$

а комбинация

$$\sqrt{\frac{2}{3}}(\lambda\bar{\lambda})-\frac{1}{\sqrt{6}}(p\bar{p})-\frac{1}{\sqrt{6}}(n\bar{n})=\eta.$$

---

*) При этом нужно, конечно, помнить, что кварки отличаются друг от друга по странности и заряду, что только два одинаковых кварка подчиняются принципу Паули и что каждый кварк может аннигилировать только со своим собственным антикварком.

**) Такое объяснение принадлежит И. Ю. Кобзареву и Л. Б. Окуню.

Обе последние комбинации подобраны так, что они не могут превращаться в нейтральный квант: например, в случае π^0 вклады $p\bar{p}$ и $n\bar{n}$ взаимно уничтожаются (знак минус между ними в комбинации для π^0) и квант не образуется; то же относится к η.

Опыт показывает, что мезоны схемы (3) имеют спин 0. Значит, кварк и антикварк соединяются с противоположными спинами. Возможно, однако, и соединение кварка и антикварка с параллельными спинами; при этом получаются мезоны с полным спином 1. Они отождествляются с резонансами (частицами), открытыми на протяжении 1962—1964 гг.:

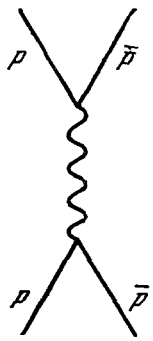

Рис. 2.

$$\left.\begin{array}{llll} K^{+*} & & K^{0*} & \\ \varrho^{+} & \varrho^0,\ \omega^0,\ \varphi^0 & & \varrho^{-}. \\ & & \overline{K^{0*}} & K^{-*} \end{array}\right\} \qquad (5)$$

Здесь также можно выделить из 9 частиц группу в 8 частиц и одну особую частицу, способную аннигилировать и возрождаться. Однако для этой особой частицы нужно другое нейтральное поле со спином 1, в отличие от предыдущего случая квантов со спином 0. Отметим, что в случае позитрония $e^+ + e^-$ все взаимодействие идет через электромагнитное поле, являющееся векторным (спин 1), так что $e^+ + e^-$ аннигилируют именно в состоянии с полным спином 1.

Идеи классификации барионов и мезонов можно продвинуть дальше. Массы частиц декуплета барионов (Δ, Ω), приведенных на схеме (2), мало отличаются от масс октета (P, N, Ξ), приведенного на схеме (1).

В каком случае можно считать различие октета и декуплета малым и объединить их в одну общую группу? Это возможно тогда, когда приближенно взаимодействие между кварками не зависит от взаимной укладки их спинов, т. е. от того, выстроились ли спины трех кварков параллельно и дали $s = {}^3/_2$ (декуплет) или уложились так, что $s = {}^1/_2$ (октет). Независимости взаимодействия от укладки спинов можно ожидать тогда, когда взаимодействие осуществляется через нейтральное скалярное поле без спина. По замечанию Л. Б. Окуня, для расщепления мезонов со спином 0 нужно другое поле, так как эти мезоны псевдоскалярны. Из-за разной четности частицы и античастицы в теории Дирака пара «частица — античастица» имеет отрицательную четность в S-состоянии. В случае позитрония это проверено на опыте.

Итак, предположим, что есть еще нейтральное псевдоскалярное поле. Такое поле расщепит 9 мезонов без спина на 8 мезонов (π, K, η в наших схемах) и один особый

$$X = \frac{1}{\sqrt{3}}(p\bar{p}) + \frac{1}{\sqrt{3}}(n\bar{n}) + \frac{1}{\sqrt{3}}(\lambda\bar{\lambda})$$

также без спина. Однако 9 мезонов со спином 1 (схема (4)) не распадутся на подгруппы 8 + 1, так как они не могут аннигилировать, когда нет нейтрального поля со спином. Напомним, что об отсутствии поля со спином мы судим на основании близости масс октета и декуплета барионов.

В этом случае можно установить новую терминологию. Кварки имеют спин 1/2; если взаимодействие не зависит от спина, то можно говорить о двух равноценных состояниях для каждого кварка, с $s_z = +{}^1/_2$ и с $s_z = -{}^1/_2$. Три кварка дают всего 6 состояний: $p\uparrow$, $p\downarrow$, $n\uparrow$, $n\downarrow$, $\lambda\uparrow$, $\lambda\downarrow$.

Взятые по три штуки, они дают 8 барионов со спином 1/2, т. е. по два состояния с $s_z = +{}^1/_2$ и с $s_z = -{}^1/_2$ на каждый барион; итого 16 состояний. Далее, они дают 10 барионов со спином 3/2 по 4 состояния с $s_z = +{}^3/_2$,

$s_z = +{}^1/_2$, $s_z = -{}^1/_2$, $s_z = -{}^3/_2$; итого 40 состояний. Всего получается $40 + 16 = 56$ состояний барионов, отличающихся составом и проекцией спина. В определенном приближении они равноценны.

Для мезонов получается 9 частиц со спином 1, по три состояния ($s_z = 1, 0 - 1$), и 9 мезонов без спина; итого 36 состояний, как и следовало ожидать для комбинаций из 6 состояний кварка с 6 состояниями антикварка. Среди 36 мезонов нужно выделить один нейтральный X^0 со спином 0, способный аннигилировать и возрождаться, и 35 остальных, не аннигилирующих и равноценных в этом приближении.

Теперь остается сказать, что идея равноценности трех кварков в сильных взаимодействиях называется «унитарной симметрией» и обозначается $SU(3)$. Идея независимости взаимодействия от спинов, т. е. равноценности перечисленных выше шести состояний, называется $SU(6)$ — см. выше, 6 состояний *). Как видите, нет никакой мистики, такой, как вращение одновременно в обычном и изотопическом пространствах — вращение, действительно способное вызвать головокружение у самой крепкой головы.

Осталось коснуться нерешенных вопросов. Вокруг чего вращаются три кварка в барионах? Скорей всего кварки попарно отталкиваются, а кварк и антикварк притягиваются. Что тогда скрепляет три кварка в барион? Возможна идея, что существует тяжелый нейтральный бозон с барионным зарядом R^0, играющий роль атомного ядра; вокруг него и вращаются три кварка в состоянии с $l = 1$. Если же изменить предположение и принять, что тяжелый бозон (протобарион) заряжен отрицательно, R^-, то кваркам можно приписать целые заряды (табл. II). Однако

Таблица II

	Электрический заряд	Странность	Барионное число	Спин
R^-	−1	0	1	0
p	+1	0	0	1/2
n	0	0	0	1/2
λ	0	−1	0	1/2

в этом варианте теория уже не дает определенного простого рецепта для вычисления магнитного момента; теряется впечатляющее согласие теории с отношением магнитных моментов нейтрона и протона. Высказывалась идея, что есть три сорта частиц типа кварков, но барионы состоят из девяти таких частиц (их назвали «барионетты», их барионное число равно 1/9). Первые шесть барионеттов соединяются в S-состоянии (как четыре нуклона в ядро гелия) с попарно противоположными спинами ($p\uparrow p\downarrow n\uparrow n\downarrow \lambda\uparrow\lambda\downarrow$). Тогда, естественно, получается, что следующие три барионетта по принципу Паули садятся в p-состояние, поскольку S-уровни уже заняты. Общая классификация октета, декуплета и мезонов во всех этих вариантах полностью сохраняется.

Наконец, последний, но немаловажный вопрос, как говорят англичане, last but not least: существуют ли кварки (или барионетты)? В вариантах с дробным зарядом по крайней мере один тип кварков должен быть стабильным в свободном состоянии.

---

*) Заметим, что числа $\sqrt{2/3}$, $\sqrt{1/3}$ и т. п. называются «коэффициенты Клебша — Гордона», а в просторечии «клебши»; мы и о них невзначай узнали.

Первой реакцией экспериментаторов на новые идеи были поиски частиц с дробными зарядами $\left(\frac{2}{3}e, -\frac{1}{3}e\right)$ на ускорителях и в космических лучах.

По-видимому, можно утверждать, что нет таких частиц с массой меньше 6 ÷ 8 *Гэв* (т. е. в 6—8 раз тяжелее нуклонов) *). Во всяком случае соединение их в барионы или мезоны сопровождается огромным выделением энергии, уменьшением массы составных частиц в десятки раз по сравнению с массой тех кирпичей, из которых частицы составлены. Предстоят увлекательные поиски стабильных кварков или ядер, присоединивших одиночный кварк, т. е. поиски остановившихся частиц с дробным зарядом в обычной материи — в атмосфере, в воде океана.

Но, может быть, в действительности кварков нет? Может быть, есть только (теперь уже бесспорная!) симметрия свойств частиц, как раз такая, как если бы кварки **) существовали? В августе 1964 г. в Дубне Гелл-Манн сказал по этому поводу: Who knows? (кто знает?). Боюсь, что нужно было бы другое перо, перо писателя, чтобы передать все, что он вложил в эти два коротких слова. Здесь звучало огромное уважение к эксперименту, который в последнем счете решает и ведет науку вперед; здесь была и присущая Гелл-Манну интеллектуальная смелость, и чувство нового, и готовность принять все, что дает природа, и создать из этого новую теорию, вызвать к жизни новые эксперименты.

Дилемму, перед которой стоит физика, можно сформулировать так: либо выяснена только классификация и свойства симметрии известных частиц, либо эта симметрия является следствием существования кварков, т. е. совершенно нового фундаментального типа материи, атомизма нового типа.

Современные физики имеют полное право повторить строки Тютчева:

Счастлив, кто посетил сей мир
В его минуты роковые:
Его призвали всеблагие.
Как собеседника на пир;
Он их высоких зрелищ зритель,
Он в их совет допущен был
И заживо, как небожитель,
Из чаши их бессмертье пил.

Можно сказать на основании всего исторического опыта, что такие открытия, свидетелями которых мы были в последние 2—3 года, как правило, кардинально перестраивают наши представления о природе.

Пусть читатель сам сделает вывод о прогнозе, на который надеется автор, из нижеследующих примеров.

О кинетической теории газов говорили, что, может быть, все происходит так, как будто есть молекулы, но никаких молекул и атомов в действительности не существует; молекулы и атомы — это только понятия, полезные для описания химических и термодинамических законов.

Смысл периодической системы, как проявление единого строения химически различных атомов из ядер и разного числа электронов, был вскрыт лишь через полвека после открытия Менделеева.

---

*) По данным, полученным на ускорителе, предел — около 4 *Гэв*; по утверждению авторов менее надежных опытов с космическими лучами, предел достигает 16 *Гэв*.

**) Заметим, что схема с R^- и нестабильными кварками (табл. II) может выжить и в том случае, если свободные кварки не будут найдены. В этой схеме кварки, рождаясь, тут же распадаются на лептоны (μ, e или ν), обнаружение которых в актах взаимодействия при сверхвысоких энергиях весьма затруднительно.

Формальная генетика, законы Менделя позволили предсказать существование генов задолго до того, как они были обнаружены и исследованы непосредственно.

Прозрение внутренних причин явлений по их внешним проявлениям может быть и есть самое важное, самое дорогое и увлекательное во всей науке.

ПРИЛОЖЕНИЕ *)

Таблица III

Мезоны

Название	Спин, четность	Масса, *Мэв*	Изоспин	Гиперзаряд (для мезонов равен странности)
π	0^-	138	1	0
K	0^-	496	1/2	1
η	0^-	549	0	0
X	0^-	960	0	0
ϱ	1^-	763	1	0
ω	1^-	783	0	0
K^*	1^-	891	1/2	1
φ	1^-	1019,5	0	0
K_c	1^+	1215	1/2	1
B	1^+, 2^-?	1215	1	0
f	2^+	1253	0	0
A_2	2^+	1310	1	0

Таблица IV

Барионы

Название	Спин, четность	Масса, *Мэв*	Изоспин	Гиперзаряд	Странность
N	$1/2^+$	939	1/2	1	0
Λ	$1/2^+$	1115,4	0	0	−1
Σ	$1/2^+$	1193,2	1	0	−1
Ξ	$1/2^+$	1317,6	1/2	−1	−2
$\Delta = N^*_{3/2}$	$3/2^+$	1236	3/2	1	0
$\Sigma^* = Y^*_1$	$3/2^+$	1382	1	0	−1
Ξ^*	$3/2^+$	1529	1/2	−1	−2
Ω^-	$3/2^+$	1675	0	−2	−3
Y^*_0	?	1405	0	0	−1
Y^{**}_0	$3/2^-$	1519	0	0	−1
$N^*_{1/2}$	$3/2^-$	1518	1/2	1	0
Y^{**}_1	$3/2^-$?	1660	1	0	−1
$N^{**}_{1/2}$	$5/2^+$	1688	1/2	1	0
Y^{***}_0	$5/2^+$?	1924	3/2	1	0
$N^{***}_{1/2}$	?	2190	1/2	1	0
$N^{***}_{3/2}$	?	2360	3/2	1	0

*) В табл. III—VI приведены для справок мультиплеты и указаны массы, средние в мультиплете, и частицы с указанием их индивидуальных масс и времен жизни. Более подробные сведения о частицах можно найти в публикуемых в этом же выпуске УФН на стр. 335 «Данных по элементарным частицам и резонансным состояниям». (*Ред.*)

Таблица V

Название	Масса покоя, *Мэв*	Время жизни, *сек*
γ	0	Стабилен
ν_e	0	Стабильно
ν_μ	0	Стабильно
e^-	0,511006	Стабилен
μ^-	105,659	$2,2\cdot10^{-6}$
π^-, π^+	139,60	$2,55\cdot10^{-8}$
π^0	135,01	$1,8\cdot10^{-16}$
K^+, K^-	493,8	$1,23\cdot10^{-8}$
K_1^0	498,0	$0,9\cdot10^{-10}$
K_2^0	498,0	$5,6\cdot10^{-8}$
η^0	548,7	10^{-22}

Таблица VI

Название	Масса, *Мэв*	Время жизни, *сек*
P	938,256	Стабилен
N	939,550	1000
Λ	1115,4	$2,6\cdot10^{-10}$
Σ^+	1189,41	$0,79\cdot10^{-10}$
Σ^0	1192,3	10^{-19}
Σ^-	1197,1	$1,58\cdot10^{-10}$
Ξ^0	1314,3	$3\cdot10^{-10}$
Ξ^-	1320,8	$1,7\cdot10^{-10}$
Ω^-	1675	$0,7\cdot10^{-10}$