

служить следующие группы частиц с одинаковыми значениями J^P (т. е. с одинаковыми парами значений J и P):

$$J^P \begin{matrix} \nearrow 0^- & \pi^+ & \pi^0 & \pi^- & \eta & K^+ & K^0 & K^- & \bar{K}^0 \\ \rightarrow 1/2^+ & \Sigma^+ & \Sigma^0 & \Sigma^- & \Lambda & p & n & \Xi^- & \Xi^0 \\ \searrow 3/2^+ & \Delta^{++} & \Delta^+ & \Delta^0 & \Delta^- & \Sigma^{*+} & \Sigma^{*0} & \Sigma^{*-} & \Xi^{*-} & \Xi^{*0} & \Omega^- \end{matrix}$$

Унитарная симметрия менее точная, чем изотопич. симметрия. В соответствии с этим различие в массах частиц, входящих в октеты и декуплеты, довольно значительно. По этой же причине разбиение адронов на супермультиплеты сравнительно просто осуществляется для Э. ч. не очень больших масс. При больших массах, когда имеется много разл. частиц с близкими массами, это разбиение осуществить сложнее.

Обнаружение среди адронов выделенных супермультиплетов фиксированных размерностей, отвечающих определ. представлениям унитарной группы $SU(3)$, явилось ключом к важнейшему заключению о существовании у адронов особых структурных элементов — кварков.

Гипотеза о том, что наблюдаемые адроны построены из частиц необычной природы — кварков, несущих спин $1/2$, обладающих сильным взаимодействием, но в то же время, не принадлежащих классу адронов, была выдвинута Дж. Цвейгом (G. Zweig) и независимо Гелл-Маном в 1964 (см. *Кварковые модели*). Идея кварков была подсказана матем. структурой представлений унитарных групп. Матем. формализм открывает возможность описания всех представлений группы $SU(n)$ (и, следовательно, всех связанных с ней мультиплетов адронов) на основе перемножения самого простого (фундам.) представления группы, содержащего n компонент. Необходимо только допустить существование особых частиц, связанных с этими компонентами, что и было сделано Цвейгом и Гелл-Маном для частного случая группы $SU(3)$. Эти частицы были названы кварками.

Конкретный кварковый состав мезонов и барионов был выведен из того факта, что мезоны, как правило, входят в супермультиплеты с числом частиц, равным 8, а барионы — 8 и 10. Эта закономерность легко воспроизводится, если предположить, что мезоны составлены из кварка и антикварка, символически: $M=(q\bar{q})$, а барион — из трёх кварков, символически: $B=(qqq)$. В силу свойств группы $SU(3)$ 9 мезонов разбиваются на супермультиплеты из 1 и 8 частиц, а 27 барионов — на супермультиплеты, содержащие 1, 10 и дважды по 8 частиц, что и объясняет наблюдаемую выделенность октетов и декуплетов.

Т. о., выявленное экспериментами 60-х гг. существование супермультиплетов, составленных из обычных и странных адронов, позволило сделать вывод о том, что все эти адроны построены из 3 кварков, обычно обозначаемых u, d, s (табл. 2). Вся совокупность известных к тому моменту фактов прекрасно согласовывалась с этим предложением.

Табл. 2.— Характеристики кварков

Кварк	Символ	J	I	I_3	B	S	C	b	T	Q	$m_{эф.}$, ГэВ
q_1^+	u^+	1/2	1/2	+1/2	1/3	0	0	0	0	+2/3	≈0,005
q_2^+	d^+	1/2	1/2	-1/2	1/3	0	0	0	0	-1/3	≈0,0075
q_3^+	s^+	1/2	0	0	1/3	-1	0	0	0	-1/3	≈0,150
q_4^+	c^+	1/2	0	0	1/3	0	1	0	0	+2/3	≈1,5
q_5^+	b^+	1/2	0	0	1/3	0	0	-1	0	-1/3	≈5
q_6^+	t^+	1/2	0	0	1/3	0	0	0	1	+2/3	≈175*

* Предварительная экспериментальная оценка.

Последующее обнаружение пси-частиц, а затем ипсилон-частиц, очарованных и прелестных адронов показало, что для объяснения их свойств трёх кварков недостаточно и необходимо допустить существование ещё двух типов кварков c и b , несущих новые квантовые числа: очарование и прелесть. Это обстоятельство не поколебало, однако, основные положения кварковой модели. Был сохранён, в частности, центр. пункт её схемы строения адронов:

$M=(q\bar{q}), B=(qqq)$. Более того, именно на основе предположения о кварковом строении пси- и ипсилон-частиц удалось дать физ. толкование их во многом необычным свойствам.

Исторически открытие пси- и ипсилон-частиц, равно как и новых типов очарованных и прелестных адронов, явилось важным этапом в утверждении представлений о кварковом строении всех сильно взаимодействующих частиц. Согласно совр. теоретич. моделям (см. ниже), следовало ожидать существования ещё одного — шестого t -кварка, к-рый и был обнаружен в 1995.

Указанная выше кварковая структура адронов и матем. свойства кварков как объектов, связанных с фундам. представлением группы $SU(n)$, приводят к следующим квантовым числам кварков (табл. 2). Обращают на себя внимание необычные (дробные) значения электрич. заряда Q , а также B , не встречающиеся ни у одной из изученных Э. ч. С индексом α у каждого типа кварка q_i ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$) связана особая характеристика кварков — цвет, к-рой нет у наблюдаемых адронов. Индекс α принимает значения 1, 2, 3, т. е. каждый тип кварка (q_i) представлен тремя разновидностями q_i^α [Н. Боголюбов с сотрудниками, 1965, Й. Намбу (Y. Nambu) и М. Хан (M. Khan), 1965, И. Миямото (Y. Miyamoto), 1965]. Квантовые числа каждого типа кварка не меняются при изменении цвета, поэтому табл. 2 относится к кваркам любого цвета. Как было показано позднее, величины q^α (для каждого i) при изменении α с точки зрения их трансформ. свойств следует рассматривать как компоненты фундам. представления ещё одной группы $SU(3)$, цветовой, действующей в цветовом трёхмерном пространстве [см. *Цветовая симметрия SU(3)*].

Необходимость введения цвета вытекает из требования антисимметрии волновой ф-ции системы кварков, образующих барионы. Кварки, как частицы со спином $1/2$, должны подчиняться статистике Ферми — Дирака. Между тем имеются барионы, составленные из трёх одинаковых кварков с одинаковой ориентацией спинов: Δ^{++} ($u_1u_1u_1$), Ω^- ($s_1s_1s_1$), к-рые явно симметричны относительно перестановки кварков, если последние не обладают дополнительной свободой. Такой дополнит. степенью свободы и является цвет. С учётом цвета требуемая антисимметрия легко восстанавливается. Уточнённые ф-лы структурного состава мезонов и барионов выглядят при этом следующим образом:

$$M_{ik} = 1/\sqrt{3} \sum_{\alpha=1}^3 (q_i^\alpha \bar{q}_k^\alpha)$$

$$B_{\alpha\beta\gamma} = 1/\sqrt{6} \sum_{\alpha,\beta,\gamma=1}^3 (\epsilon_{\alpha\beta\gamma} q_1^\alpha q_2^\beta q_3^\gamma)$$

где $\epsilon_{\alpha\beta\gamma}$ — полностью антисимметричный тензор (*Левы-Чивиты символ*) ($1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{6}$ — нормировочные множители). Важно отметить, что ни мезоны, ни барионы не несут цветовых индексов (лишены цвета) и являются, как иногда говорят, «белыми» частицами.

В табл. 2 приведены лишь «эффективные» массы кварков. Это связано с тем, что кварки в свободном состоянии, несмотря на многочисленные тщательные их поиски, не наблюдались. В этом, кстати, проявляется ещё одна особенность кварков как частиц совершенно новой, необычной природы. Поэтому прямых данных о массах кварков нет. Имеются лишь косвенные оценки величин масс кварков, к-рые могут быть извлечены из их разл. динамических проявлений в характеристиках адронов (включая массы последних), а также в разл. процессах происходящих с адронами (распады и т. п.). Для массы t -кварка дана предварительная эксперим. оценка.

Всё многообразие адронов возникает за счёт разл. сочетаний u, d, s, c и b -кварков, образующих связанные состояния. Обычным адронам соответствуют связанные состояния, построенные только из u - и d -кварков [для мезонов с возможным участием комбинаций ($s\bar{s}$), ($c\bar{c}$) и ($b\bar{b}$)]. Наличие в связанном состоянии, наряду с u - и