

d -кварками, одного s -, c - или b -кварка означает, что соответствующий адрон странный ($S = -1$), очарованный ($C = +1$) или прелестный ($b = -1$). В состав бариона может входить два и три s -кварка (соответственно c - и b -кварка), т. е. возможны дважды и трижды странные (очарованные, прелестные) барионы. Допустимы также сочетания разл. числа s - и c -, b -кварков (особенно в барионах), к-рые соответствуют «гибридным» формам адронов (странно-очарованным, странно-прелестным). Очевидно, что чем больше s -, c - или b -кварков содержит адрон, тем он массивнее. Если сравнивать основные (не возбуждённые) состояния адронов, именно такая картина и наблюдается (табл. 1).

Поскольку спин кварков равен $1/2$, приведённая выше кварковая структура адронов имеет своим следствием целочисленный спин у мезонов и полуцелый — у барионов, в полном соответствии с экспериментом. При этом в состояниях, отвечающих орбитальному моменту $l=0$, в частности в осн. состояниях, значения спина мезонов должны равняться 0 или 1 (для антипараллельной $\uparrow\downarrow$ и параллельной $\uparrow\uparrow$ ориентации спинов кварков), а спина барионов: $1/2$ или $3/2$ (для спиновых конфигураций $\uparrow\uparrow\downarrow$ и $\uparrow\uparrow\uparrow$). С учётом того, что внутр. чётность системы кварк — антикварк отрицательна, значения J^P для мезонов при $l=0$ равны 0^- и 1^- , для барионов: $1/2^+$ и $3/2^+$. Именно эти значения наблюдаются у адронов, имеющих наименьшую массу при заданных значениях l и S, C, b .

В качестве иллюстрации в табл. 3 и 4 приведён кварковый состав мезонов с $J^P = 0^-$ и барионов $J^P = 1/2^+$ (всюду предполагается необходимое суммирование по цветам кварков).

Табл. 3.— Кварковый состав изученных мезонов с $J^P = 0^-$ ($\uparrow\downarrow$)

Частица	Состав	Частица	Состав	Частица	Состав
π^+	$u\bar{d}$	η	$\frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$	D_s^+	$c\bar{s}$
π^0	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$	η'	$\frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$	D_s^-	$\bar{c}s$
π^-	$\bar{u}d$	η_c^+	$c\bar{c}$	η_b^+	$b\bar{b}$
K^+	$u\bar{s}$	D^0	$d\bar{c}$	B^+	$u\bar{b}$
K^0	$d\bar{s}$	D^+	$u\bar{c}$	B^0	$d\bar{b}$
K^-	$\bar{u}s$	D^-	$d\bar{c}$	B^-	$\bar{u}b$
\bar{K}^0	$\bar{d}s$	\bar{D}^0	$u\bar{c}$	\bar{B}^0	$\bar{d}b$

Табл. 4.— Кварковый состав изученных барионов с $J^P = 1/2^+$ ($\uparrow\uparrow\downarrow$)

Частица	Состав	Частица	Состав	Частица	Состав
p	uud	Ξ^0	uss	Ξ_c^+	$[us]c$
n	udd	Ξ^-	dss	Ξ_c^0	$[ds]c$
Λ^0	$[ud]s$	Λ_c^+	$[ud]c$	Ω_c^0	ssc
Σ^+	uus	Σ_c^{++}	uuc	Λ_b^0	$[ud]b$
Σ^0	$\{ud\}s$	Σ_c^+	$\{ud\}c$		
Σ^-	dds	Σ_c^0	ddc		

Примечание. Символ $\{ \}$ означает симметризацию по перенным частицам; символ $[]$ — антисимметризацию.

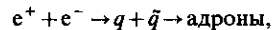
Т. о., кварковая модель естеств. образом объясняет происхождение осн. групп адронов и их наблюдаемые квантовые числа. Более детальное динамическое рассмотрение позволяет также сделать ряд полезных заключений относительно взаимосвязи масс внутри разл. семейств адронов.

Правильно передавая специфику адронов с наименьшими массами и спинами, кварковая модель естеств. образом объясняет также общее большое число адронов и преобладание среди них резонансов. Многочисленность адронов есть отражение их сложного строения и возможности су-

ществования разл. возбуждённых состояний кварковых систем. Все возбуждённые состояния кварковых систем неустойчивы относительно быстрых переходов за счёт сильного взаимодействия в нижележащие состояния. Они-то и образуют осн. часть резонансов. Небольшую долю резонансов составляют также кварковые системы с параллельной ориентацией спинов (за исключением Ω_c^-). Кварковые конфигурации с антипараллельной ориентацией спинов, относящиеся к осн. состояниям, образуют квазистабильные адроны и стабильный протон.

Возбуждения кварковых систем происходят как за счёт изменения вращат. движения кварков (орбитальные возбуждения), так и за счёт изменения их пространств. расположения (радиальные возбуждения). В первом случае рост массы системы сопровождается изменением суммарного спина J и чётности P системы, во втором случае увеличение массы происходит без изменения J^P .

При формулировке кварковой модели кварки рассматривались как гипотетич. структурные элементы, открывающие возможность очень удобного описания адронов. В последующие годы были проведены эксперименты, к-рые позволяют говорить о кварках как о реальных материальных образованиях внутри адронов. Первыми были эксперименты по рассеянию электронов на нуклонах на очень большие углы. Эти эксперименты (1968), напоминающие классич. опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц на атомах, выявили наличие внутри нуклона точечных заряж. образований (см. *Партонь*). Сравнение данных этих экспериментов с аналогичными данными по рассеянию нейтрино на нуклонах (1973—75) позволили сделать заключение о ср. величине квадрата электрич. заряда этих точечных образований. Результат оказался близким к ожидаемым дробным значениям $(2/3)^2 e^2$ и $(1/3)^2 e^2$. Изучение процесса рождения адронов при аннигиляции электрона и позитрона, к-рый предположительно идёт через следующие стадии:



указало на наличие двух групп адронов, т. н. струй (см. *Струя адронная*), генетически связанных с каждым из образующихся кварков, и позволило определить спин кварков. Он оказался равным $1/2$. Общее число рождённых в этом процессе адронов свидетельствует также о том, что в промежуточном состоянии каждый тип кварка представлен тремя разновидностями, т. е. кварки трёхцветны.

Т. о., квантовые числа кварков, заданные на основании теоретич. соображений, получили всестороннее эксперим. подтверждение. Кварки фактически приобрели статус новых Э. ч. и являются серьёзными претендентами на роль истинно Э. ч. для сильновзаимодействующих форм материи. Число известных видов кварков невелико. До длин $\leq 10^{-16}$ см кварки выступают как точечные бесструктурные образования. Бесструктурность кварков, конечно, может отражать лишь достигнутый уровень исследования этих материальных образований. Однако ряд специфич. особенностей кварков даёт известные основания предполагать, что кварки являются частицами, замыкающими цепь структурных составляющих сильновзаимодействующей материи.

От всех других Э. ч. кварки отличаются тем, что в свободном состоянии они, по-видимому, не существуют, хотя имеются чёткие свидетельства их существования в связанном состоянии. Эта особенность кварков, скорее всего, связана со спецификой их взаимодействия, порождаемого обменом особыми частицами — глюонами, приводящего к тому, что силы притяжения между ними не ослабевают с расстоянием. Как следствие, для отделения кварков друг от друга требуется бесконечная энергия, что, очевидно, невозможно (теория т. н. конфайнмента или пленения кварков; см. *Удержание цвета*). Реально при попытке отделить кварки друг от друга происходит образование дополнит. адронов (т. н. адронизация кварков). Невозможность наблюдения кварков в свободном состоянии делает их совершенно новым типом структурных единиц вещества. Неясно, напр., можно ли в этом случае ставить вопрос