

будет сохраняться. При этом слабый заряд адронов аддитивно складывается из слабых зарядов кварков и не зависит от структуры конкретного адрона, определяемой сильным взаимодействием. Др. следствием изовекторной структуры слабого векторного тока является совпадение слабого векторного *формфактора* с изовекторной частью эл.-магн. формфактора.

**Нарушение изотопической инвариантности.** Изотопич. симметрия явилась первым примером т. н. нарушенной симметрии. Ещё при обнаружении изотопич. симметрии было ясно, что она должна нарушаться эл.-магн. взаимодействиями, зависящими от электрич. зарядов адронов (или третьей компоненты изоспина) и, следовательно, неинвариантными относительно вращений в изотопич. пространстве. Поэтому можно было ожидать нарушения И. и. на уровне  $10^{-2}$ — $10^{-3}$ , что в общем соответствует эксперим. данным. Однако гипотеза о том, что нарушение И. и. полностью обусловливается лишь эл.-магн. взаимодействиями, приводила к ряду трудностей. В частности, было трудно объяснить, почему масса некоторых нейтральных адронов (напр., нейтрона,  $K^0$ -мезона) больше (а не меньше) массы их заряд. изотопич. партнёров (протона,  $K^+$ -мезона), хотя для последних определ. положит. вклад в массу должна давать собств. эл.-магн. (кулоновская) энергия. Ответ был получен после создания кварковой модели адронов и заключения о том, что масса  $d$ -кварка на 2—3 МэВ больше массы  $u$ -кварка. Это заключение было сделано для т. н. токовых кварков. Поскольку наблюдаемый спектр адронов объясняется их строением из конститuentных (валентных) кварков с массами  $m_u \approx m_d \approx (300-350)$  МэВ, гипотеза «утяжеления»  $d$ -кварка на (2—3) МэВ по сравнению с  $u$ -кварком объясняет как различие масс адронов внутри одного и того же изотопич. мультиплета, так и масштаб нарушения И. и., к-рый оказывается на уровне, вызываемом эл.-магн. взаимодействиями. [Напр., указанным различием масс  $u$ - и  $d$ -кварков количественно объясняется вероятность запрещённого по  $G$ -чётности (и, следовательно, по изоспину) распада  $\eta' \rightarrow 3\pi^0$ .]

Экспериментально установлено, что изотопич. симметрия является частью более широкой нарушенной симметрии  $SU(3)$ , а изотопич. мультиплеты входят в состав унитарных мультиплетов  $SU(3)$ , включающих странные частицы. Масштаб нарушения  $SU(3)$ -симметрии определяется тем, что масса странного кварка на 120—150 МэВ больше массы  $u$ - и  $d$ -кварков и может составлять 20—30%. Для более тяжёлых  $c$ -,  $b$ - и т. д. кварков различия в массах с  $u$ -,  $d$ -,  $s$ -кварками настолько велики, что симметрия полностью нарушается и остаётся лишь подобие в классификации адронных состояний на основе их кваркового строения. Возможно, однако, что симметрия между кварками разл. типов (ароматов) восстанавливается на очень малых расстояниях (т. е. при достаточно высоких энергиях) в тех явлениях, где можно пренебречь массами кварков. Поскольку не выяснен механизм, обуславливающий разности масс кварков разл. ароматов, близость масс  $u$ - и  $d$ -кварков, на к-рой основана изотопич. симметрия, представляется «случайной», связанной скорее всего с тем, что оба соответствующих токовых кварка — лёгкие (практически безмассовые).

Лит.: Ш в е б е р С., Введение в релятивистскую квантовую теорию поля, пер. с англ., М., 1963; Н и ш и д ж и м а К., Фундаментальные частицы, пер. с англ., М., 1965; О к у н ь Л. В., Лептоны и кварки, М., 1981.

С. С. Герштейн, А. А. Комар.

**ИЗОТОПИЧЕСКАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ** ядерных сил — состоит в том, что в ядерных взаимодействиях протон и нейтрон можно рассматривать как 2 состояния одной частицы (нуклона), отличающиеся проекцией  $T_z$  изотопического спина  $T$  ( $T_z = +1/2$  и  $T_z = -1/2$ ). И. и. — частный случай общего свойства *изотопической инвариантности* сильного взаимодействия. И. и. даёт возможность приписывать определ. значения изоспина  $T$  разл. состояниям ядра, причём изоспин ядра складыв-

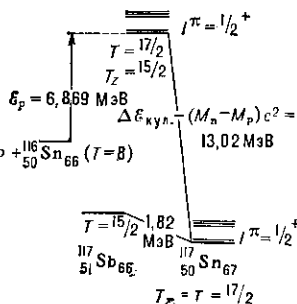
ается из изоспинов отд. нуклонов по тем же правилам, что и обычный спин, и может принимать значения от  $1/2(N-Z)$  до  $1/2(N+Z)$ , где  $N$  и  $Z$  — числа нейтронов и протонов в ядре. Как правило, осн. состояние ядра имеет мин. изоспин  $1/2(N-Z)$ .

И. и. проявляется в существовании изотопич. мультиплетов, или *аналоговых состояний*, у лёгких ядер с одинаковым числом нуклонов  $A$  (изобары). Эти состояния относятся к разным ядрам, но имеют одинаковую структуру и одинаковые квантовые числа (спин  $I$ , чётность  $\pi$ , изоспин  $T$ ), а их энергии отличаются лишь за счёт энергии кулоновского взаимодействия и разности масс протона и нейтрона. Пример изотопич. мультиплета — триплет состояний с  $T=1$ ; осн. состояния  $^{14}\text{C}$  и  $^{14}\text{O}$  и первое возбуждённое состояние  $^{14}\text{N}$ .

Из И. и. следует закон сохранения изоспина в ядерных реакциях. Напр., в реакции  $^{16}\text{O} + ^2\text{H} \rightarrow ^{14}\text{N} + ^4\text{He}$ , где изоспин ядер  $^{16}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  и  $^4\text{He}$  равен 0, вероятность возбуждённого состояния  $^{14}\text{N}^*$  (2, 31 МэВ) с  $T=1$  составляет доли % от вероятности образования осн. состояния  $^{14}\text{N}$  с  $T=0$ .

И. и. нарушается за счёт эл.-магн. взаимодействия нуклонов, зависящего от заряда частиц (т. е. от проекции  $T_z$  изоспина), сила к-рого составляет  $\sim 1\%$  от сильного взаимодействия. В лёгких ядрах эффекты эл.-магн. взаимодействия малы и их можно рассматривать как поправки, приводящие гл. обр. к небольшим различиям в энергиях уровней ядер, принадлежащих одному изотопич. мультиpletу. В тяжёлых ядрах кулоновское поле ( $\sim 20$  МэВ) сравнимо со ср. полем ядерного взаимодействия и изоспин перестаёт быть хорошим (сохраняющимся) квантовым числом. Тем не менее для низколежащих состояний тяжёлых ядер большие кулоновские

Уровни ядра  $^{117}\text{Sb}_{66}$ , основное состояние которого имеет  $T = 15/2$ ; группа уровней с  $T = 17/2$ , наблюдаемых как резонансы в реакциях упругого рассеяния:  $^{116}\text{Sn}(p, p')$ , является изобарическим аналогом низколежащих уровней ядра  $^{117}\text{Sn}_{66}$  ( $T=8$ ). Разница в  $p$  и  $n$  энергиях между состояниями с  $T_z = 17/2$  и  $T_z = 15/2$ , принадлежащих мультиpletу с  $T = 17/2$ , обусловлена разностью кулоновских энергий  $\Delta \mathcal{E}_{\text{кул}} = 13,8$  МэВ и различием масс протона  $M_p$  и нейтрона  $M_n$ ;  $\mathcal{E}_p$  — энергия налетающих протонов.



силы слабо нарушают изотопич. симметрию, проявляющуюся в наличии резонансов, к-рые можно интерпретировать как аналоговые состояния, нестабильные относительно распада с испусканием нуклонов (рис.).

И. и. нарушается также из-за разности масс и констант связи заряженных и нейтральных частиц, в частности пионов, обмен к-рыми ответствен за сильное взаимодействие нуклонов (на кварковом уровне — из-за разности масс  $u$ - и  $d$ -кварков). В ряде случаев это приводит к большим наблюдаемым эффектам. Напр., разница длин  $pp$ - и  $pn$ -рассеяний в синглетном состоянии составляет  $5,8 \pm 0,1$  Фм при значении длины  $pp$ -рассеяния 17,9 Фм.

Велика предсказательная сила И. и., напр., из факта отсутствия связанных уровней в синглетном состоянии системы  $pp$  следует их отсутствие и в системах  $pn$ ,  $pp$  и т. п.

Лит.: Б о р О., М о т т е л ь с о н Б., Структура атомного ядра, пер. с англ., т. 1, М., 1971; Легкие и промежуточные ядра вблизи границ нуклонной стабильности, М., 1972.

В. М. Кольбасов.

**ИЗОТОПИЧЕСКИЙ МУЛЬТИПЛЕТ** — семейство адронов, одинаковым образом участвующих в сильном взаимодействии, имеющих приблизительно равные массы, один и те же барионное число, спин, чётность, странность и др. квантовые числа и отличающихся только