

Превращения частиц не исчерпываются рождением и аннигиляцией пар. Иного типа, например, известное уже нам превращение $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$. Эти превращения описаны в следующем параграфе.

§ 73. Превращения микрочастиц

За одним-единственным исключением (второй тип нейтрино), все еще не описанные нами частицы обладают большой массой покоя и неустойчивы. Они рождаются при соударениях частиц высокой энергии. Впервые такие частицы были обнаружены при изучении космических лучей, на природе которых мы коротко остановимся.

Космические лучи представляют собой поток частиц большой энергии (от 10^9 до 10^{18} эв на частицу), приходящих на Землю из космического пространства. Впервые они были обнаружены по вызываемой ими ионизации, а значит, и проводимости сухого воздуха, растущей с подъемом от поверхности Земли. В энергетическом балансе Земли космические лучи никакой роли не играют, так как количество частиц невелико. Интерес представляет их происхождение и те процессы, которые разыгрываются в результате их столкновений с атомами земной атмосферы: в лабораторных условиях еще не достигнут предел в 10^{12} эв на частицу, в то время когда среди космических частиц имеются обладающие в миллион раз большей энергией.

Согласно современным гипотезам исходным источником космических частиц является феномен «сверхновых» (В. Л. Гинзбург и др.) — гигантские взрывы звезд, при которых их светимость в течение нескольких десятков часов возрастает в 10^5 — 10^7 раз, убывая затем до обычного уровня за несколько лет. По-видимому, при таких взрывах звезда выбрасывает огромные количества самых различных частиц — электронов, протонов, ядер различных масс, с энергией до 10^{10} эв. Дальнейшая судьба электронов и тяжелых частиц различна.

В космическом пространстве имеются гигантские облака холодного межзвездного газа, с которым связано слабое магнитное поле. Отклоняясь в этом поле, электроны испускают тормозное излучение (см. т. II, § 53) очень малой частоты — радиоизлучение. На это радиоизлучение и расходуется постепенно энергия электронов. Протоны и тяжелые ядра, обладая большой массой, испытывают в этих же условиях столь малые ускорения, что энергии на тормозное излучение практически не теряют. Как показал впервые Э. Ферми, в результате многочисленных взаимодействий с магнитными полями межзвездной материи эти частицы постепенно ускоряются.

При этом существенно наличие двух конкурирующих процессов: ускорения в магнитных полях и потери энергии при столкновениях с атомами вещества межзвездного облака. В силу того, что поперечное сечение столкновения убывает с возрастанием энергии частиц, эффективное увеличение энергии возможно, только если в начальный момент энергия частиц будет уже достаточно велика. Для протонов минимальная энергия $\sim 10^{10}$ эв. Максимальная энергия, которую могут приобрести эти частицы, $\sim 10^{18}$ эв. При больших энергиях они будут столь мало отклоняться в магнитных полях, что покинут нашу Галактику.

Быстрые заряженные частицы, в основной массе протоны (на втором месте — ядра гелия, затем в небольшом числе другие, среди них и тяжелые ядра), приходящие на Землю из космоса, называются первичной компонентой космических лучей.

Воздушный океан, окутывающий Землю, предохраняет ее поверхность от прямого воздействия первичных космических лучей. Атмосферное давление на поверхности Земли, равное 1 кг/см^2 , показывает, что над каждым квадратным сантиметром расположен воздушный столб с общей массой 1 кг и общим числом атомов азота и кислорода

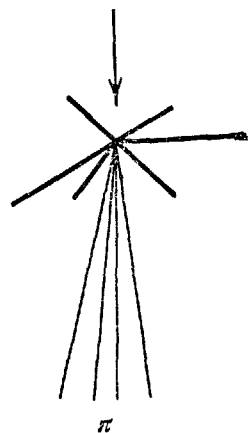


Рис. 3.36.

$$N \approx \frac{1000}{15} \cdot 6 \cdot 10^{23} \left[\frac{g/\text{см}^2 \cdot 1/g\text{-атом}}{g/g\text{-атом}} \right] = 4 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-2}.$$

Оценивая поперечное сечение этих ядер величиной $\sim 0,4 \text{ барн} = 0,4 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$, приходим к заключению, что поверхность Земли экранируется как бы сплошным шестнадцатикратным слоем атомных ядер:

$$4 \cdot 10^{25} \cdot 0,4 \cdot 10^{-24} = 16,$$

или, иначе, сплошным слоем ядерного вещества толщиной $\sim 110 \text{ ферми}$. Поэтому частицы первичной компоненты испытывают столкновения с ядрами атомов атмосферы на высоте в десятки километров. Процессы, происходящие при таких столкновениях, фиксируются с помощью стопок толстослойной фотозмульсий (см. § 58), поднятых на большую высоту с помощью шаров-зондов или ракет.

На рис. 3.36 показана типичная схема такого столкновения. Движение первичной частицы гигантской энергии показано стрелкой: при скорости, почти неотличимой от скорости света, она не

успевают ионизовать атомы на своем пути и, значит, не дают видимого следа. Ядро, претерпевшее удар, мгновенно испаряется. Быстрые протоны, нейтроны, иногда более тяжелые осколки, разлетаются в разные стороны. Заряженные частицы оставляют жирные следы, образующие характерную фигуру «звезды». В малом телесном углу в направлении движения первичной частицы видны следы нескольких «новорожденных» частиц — π -мезонов (или пионов). Это — кванты ядерного поля, излучаемые при ускорении ядерных частиц — носителей ядерного заряда, наподобие того как фотоны — кванты электромагнитного поля — излучаются при ускорении частиц, несущих электрический заряд. Существенное различие состоит в том, что масса покоя фотона равна нулю, поэтому фотоны могут обладать любой, сколь угодно малой энергией. Масса же покоя пиона превышает массу покоя электрона примерно в 270 раз, так что для рождения пиона нужна энергия, не меньшая $\sim 140 \cdot 10^6$ эв. Вот почему они не могут возникать при радиоактивных превращениях атомных ядер и рождаются лишь при столкновениях частиц достаточно большой энергии.

Пионы бывают электрически заряженные, π^+ и π^- (частица и античастица), и нейтральные, π^0 . Спин пионов равен нулю. Все пионы «сильно» взаимодействуют с нуклонами и, следовательно, могут поглощаться ядрами. Вероятность захвата ядром пиона возрастает с уменьшением энергии последнего. При этом, поскольку сильное взаимодействие проявляется лишь на расстояниях порядка $3 \cdot 10^{-13}$ см, на судьбе пиона существенно сказывается знак его электрического заряда. Медленные π^+ -мезоны не имеют возможности подойти к ядру достаточно близко, так как отталкиваются от него электрическими силами. Наоборот, π^- -мезоны притягиваются ядрами и на излете часто поглощаются одним из них.

В самом ядре квант ядерного поля как частица существовать не может (как не существует фотон в электронной оболочке поглотившего его атома). Его энергия — порядка 140 Мэв — распределяется между частицами ядра, которое немедленно испаряется. В результате возникает небольшая звезда, связанная с первой следом пиона (рис. 3.37, а).

Судьба π^+ -мезона, потерявшего свою энергию на ионизацию и на излете потерявшего возможность поглотиться ядром, показана на рис. 3.37, б. Он распадается на две частицы, о которых мы еще не упоминали — мюон (μ) и мюонное нейтрино (ν_μ):



Разумеется, если π^- -мезон не поглотится ядром, то его ожидает та же участь. Поскольку π^+ - и π^- -мезоны относятся друг к другу

как частица и античастица, при распаде π^- -мезона появятся частицы μ^- и $\bar{\nu}_\mu$:



(этот распад можно записать так: $\bar{\pi}^+ \rightarrow \bar{\mu}^+ + \bar{\nu}_\mu$).

Среднее время жизни неподвижного π^\pm -мезона составляет $2,55 \cdot 10^{-8}$ сек*).

Прежде чем перейти к характеристике новых частиц, остановимся коротко на свойствах π^0 -мезона. Его масса несколько мень-

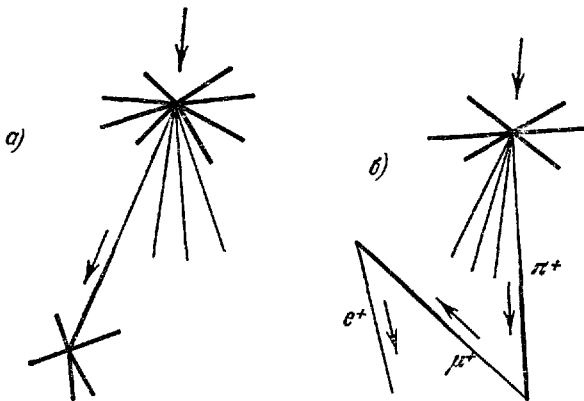


Рис. 3.37.

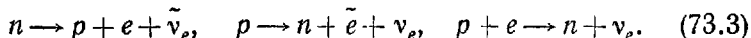
ше массы заряженных пионов (точные данные о всех мезонах приведены ниже в таблице мезонов), среднее время жизни чрезвычайно мало, порядка 10^{-16} сек. Распадается он чаще всего на два γ -кванта, иногда на γ -квант и пару электрон и позитрон.

Перейдем теперь к описанию мюона и мюонного нейтрино. Обе частицы не относятся к сильно взаимодействующим. Вместе с электроном и электронным нейтрино они образуют особую группу частиц — л е п т о н ы. Спин всех лептонов равен $\hbar/2$; эти частицы подчиняются статистике Ферми—Дирака, т. е. являются фермионами. Мюонное нейтрино отличается от описанного ранее выделяющегося при β -распадах процессах электронного

*) Если частица быстро движется, то время жизни ее возрастает в отношении $\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ (см. § 29), что относится, конечно, к частицам любой природы.

В дальнейшем, говоря о среднем времени жизни частицы или ее периоде полураспада, мы будем для определенности указывать эту величину для покоящейся частицы.

нейтрино, которое мы в дальнейшем будем обозначать ν_e :



Открытие того факта, что эти нейтрино не тождественны и представляют собой совершенно различные частицы, явилось одним из самых сенсационных открытий последних лет. Эксперимент был поставлен так. Пионы с энергией $\sim 3 \cdot 10^9$ эв получались при обстреле бериллия протонами, ускоренными до энергии в $1,5 \cdot 10^{10}$ эв. Пионы пролетали в вакууме 20 м. На этом пути примерно 1/10 их часть успевала распасться согласно (73.1), (73.2). Далее на пути частиц находилась стальная стена толщиной в 13,5 м: этот «фильтр» совершенно прозрачен для нейтрино, но не пропустит ни одной другой частицы! В очищенном таким образом потоке ν_μ удалось наблюдать реакции

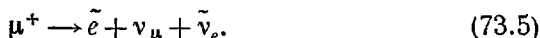


но никогда



как это согласно (73.3) имело бы место, если бы ν_μ и ν_e были тождественны.

На рис. 3.37, б представлено не только рождение, но и гибель мюона, распадающегося следующим образом:



Среднее время жизни мюона составляет $2,21 \cdot 10^{-6}$ сек.

Поскольку все известные лептоны нами уже перечислены, соберем данные о них в таблицу. Так как свойства античастицы однозначно определяются свойствами частицы, античастицы в таблицу не включены. Напомним еще раз: массы покоя, спины, средние времена жизни частицы и античастицы тождественны. Все

Лептоны

Частица	Электрич. заряд в ед. ядрах + e	Спин в единицах \hbar	Масса покоя		Среднее время жизни, в секундах	Продукты распада
			в $M_{\text{э}}$	в массах покоя электрона, $m_{\text{э}}$		
ν_e	0	1/2	0	0	∞	—
ν_μ	0	1/2	0	0	∞	—
e^-	-1	1/2	$0,510976 \pm \pm 0,000007$	1	∞	—
μ^+	+1	1/2	105,65	$206,765 \pm 0,002$	$(2,210 \pm 0,002) \times \times 10^{-6}$	$\tilde{e} + \nu_\mu + \tilde{\nu}_e$

заряды античастицы отличаются от зарядов частицы знаком. Распадаются они также совершенно одинаково, но только все частицы, образующиеся при распаде частицы, в случае античастицы следует заменить античастицами; так, из распада (73.1) следует распад (73.2), из распада (73.5) следует распад

$$\mu^- \rightarrow e + \tilde{\nu}_\mu + \nu_e \quad (73.6)$$

и так для всех без исключения частиц.

Частицы, образующиеся в результате ударов первичных космических частиц, называются вторичным космическим излучением. Мюоны представляют «жесткую» часть этого излучения: их проникающая способность очень велика. Их масса значительно больше массы электронов, в электрических полях атомов они испытывают в сотни раз меньшее ускорение, чем электроны и позитроны, следовательно, их потери энергии на тормозное излучение (см. т. II, § 53) сравнительно очень малы. При большой скорости единственный вид потери энергии — на ионизацию атомов по пути — также невелик. В результате мюоны, время жизни которых растянуто той же большой скоростью, не только достигают поверхности земли, но и проникают на большую глубину под землю или под воду (на сотни метров).

Мягкая компонента вторичного космического излучения представлена электронами, позитронами и фотонами. «Мягкость», т. е. относительно слабая проникающая способность этих частиц, обусловлена причинами, которые выясняются из дальнейшего. «Родоначалниками» мягкой компоненты являются γ -кванты больших энергий, образующиеся при распаде π^0 -мезонов.

γ -кванты большой энергии («жесткие» γ -кванты) в поле атомных ядер легко превращаются в пары электрон — позитрон, следующие практически в том же направлении. Образовавшиеся таким образом легкие заряженные частицы — электроны и позитроны — в силу своей малой массы сильно ускоряются в поле встречных ядер и теряют много энергии на тормозное излучение, испускаемое ими. Возникающие таким образом γ -кванты также обладают еще весьма большой энергией и в свою очередь обращаются в пары электрон — позитрон. Эти частицы в свою очередь испускают γ -кванты, превращающиеся в пары, и т. д. В результате каждый π^0 -мезон большой энергии оказывается родоначальником множества легких частиц — γ -квантов, электронов и позитронов, число которых нарастает лавинообразно. Описанный процесс носит название каскадного огибающего. Нарастание ливня происходит до тех пор, пока энергия γ -квантов достаточна для образования пары, т. е. превышает 1 Мэв . Так как энергия первичной частицы делится между всеми ее потомками (а также тратится на производимую ими ионизацию по пути), то в конце концов размножение

частиц прекращается. Образовавшиеся позитроны, замедлившись, аннигилируют со встречными электронами, порождая γ -кванты малой энергии, поглощаемые обычным образом веществом.

Каскадный ливень можно воспроизвести в камере Вильсона, если обеспечить легким частицам достаточное количество столкновений с ядрами атомов. Для этого камера перегораживается несколькими свинцовыми пластинками. На рис. 3.38 приведена схема образования каскадного ливня. Путь первичной частицы показан стрелкой, γ -кванты изображены волнистыми линиями, ядра — кружочками со знаком «+», электрон и позитрон — точками со знаками «—» и «+» соответственно. На рис. XII (в конце книги) приведена фотография такого ливня, полученная с помощью камеры Вильсона.

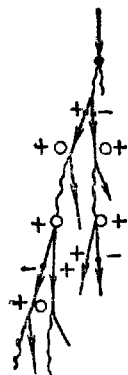


Рис. 3.38

В силу того, что γ -кванты легко превращаются в веществе в пары, а легкие заряженные частицы теряют энергию не только на ионизацию, но и, в значительно большей степени, на тормозное излучение, они не могут проходить большой толщи вещества, что и объясняет их «мягкость». Частицы жесткой компоненты в тех же условиях, в силу

большой своей массы, слабо ускоряются и, следовательно, не порождают тормозного излучения. Их энергия тратится много меньше — лишь на ионизацию по пути. Поэтому они и могут проходить большую толщ вещества.

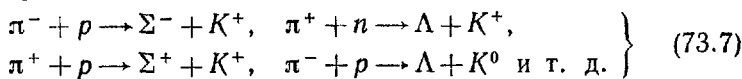
В настоящее время ускорители позволяют получать в лабораторных условиях мощные потоки пионов большой энергии. С помощью этих частиц можно в свою очередь получить (при столкновениях) новые неустойчивые частицы — K -мезоны или каоны, а также неустойчивые фермионы, обладающие барионным зарядом — гипероны. Известны следующие гипероны (индекс вверху «+» или «—» показывает наличие у частицы электрического заряда, равного $+e$ или $-e$ соответственно):

$$\Lambda; \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-; \Xi^-, \Xi^0; \Omega^-; \Delta^-, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}.$$

Вместе с нуклонами n и p они составляют класс частиц «барионов», несущих барионный заряд. Каждой из этих частиц отвечает своя античастица. Подчеркнем, что Σ^+ и Σ^- не есть частица и античастица: у них одинаковый барионный заряд, разные массы покоя.

Характеристики этих частиц и пути их распадов даны в приводимой ниже таблице барионов. Характеристики и способы распада антигиперонов читатель получит сам, воспользовавшись совершенно универсальным, а следовательно, применимым и к

гиперонам правилом, приведенным перед формулой (73.6). Обилие реакций, при которых возникают эти частицы, лишает нас возможности описать их. Любые из этих частиц могут рождаться либо в виде пар частица — античастица, либо возникнуть в результате превращений частиц при столкновениях. Приведем несколько превращений последнего типа:



Любопытно, что при таких реакциях K^- -мезоны не появляются, и, например, реакция



запрещена. Это привело Гелл-Манна и Нишиджиму к идее введения еще одной квантовой величины — «странности» (ибо представлялось весьма странным отсутствие таких превращений), которая сохраняется при сильных взаимодействиях, но может не сохраняться при взаимодействиях электромагнитных и слабых. Нуклоны и пионы имеют странность, равную нулю. Для гиперонов и каонов имеем: $S_{\Sigma} = -1$, $S_{\Lambda} = -1$, $S_{K^+} = +1$. Странность античастиц отличается от странности частиц знаком: $S_{\bar{\Sigma}} = +1$, $S_{\bar{\Lambda}} = +1$, $S_{\bar{K}^+} \equiv S_{K^-} = -1$. Превращения (73.7) обусловлены сильным взаимодействием — странность сохраняется: суммарная странность слева нуль, справа — нуль. В (73.8) суммарная странность слева нуль, справа — 2: закон сохранения странности запрещает это превращение.

О том, как определяется странность и другие величины, употребляемые для описания и систематики сильно взаимодействующих частиц, будет рассказано в следующем параграфе.

Каоны распадаются множеством способов; все известное о них собрано в таблице мезонов. Отметим лишь, что хотя K^0 -мезон частица абсолютно нейтральная, ее античастица не тождественна с ней — удивительное обстоятельство, которое подтверждает факт сложного строения этих частиц. Различие между ними определяется какими-то особенностями их внутренней структуры. Поскольку это единственный случай такого рода, а в наших таблицах по указанным ранее причинам античастицы не содержатся, мы не будем разделять в таблице и способов распада этих двух частиц. Проблема их различия весьма интересна, но ее рассмотрение выходит далеко за рамки нашей книги.

Мы включили в таблицу мезонов фотон и гравитон, которые в электромагнитных и гравитационных взаимодействиях играют ту же роль, что и пионы и каоны в сильных. Тем самым в класс мезонов включены все частицы с целочисленным спином — б о з о н ы,

Частица	Электрич. заряд в единицах e	Спин в единицах \hbar	Масса покоя		Среднее время жизни в секундах	Продукты распада	%
			в $M_{\text{эв}}$	в массах покоя элементарона $m_{\text{эв}}$ (и пиона m_{π^0})			
МЕЗОНЫ							
ρ^0	0	2	(гравитон) 0	0	∞	$\mu^+ + \nu_{\mu}$	100
γ	0	1	0	0	∞	$\gamma + \nu$	98,8
π^+	+1	0	$139,58 \pm 0,05$	$273,16 \pm 0,10$	$(2,55 \pm 0,03) \cdot 10^{-8}$	$\gamma + e + \bar{e}$	1,2
π^0	0	0	$134,97 \pm 0,05$	$270,80 \pm 0,10$	$(1,05 \pm 0,18) \cdot 10^{-16}$	$\mu^+ + \nu_{\mu}$	64,2
K^+	+1	0	$493,98 \pm 0,14$	$996,74 \pm 0,30$ (3,539)	$(1,227 \pm 0,008) \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ + \pi^0$	18,6
						$\mu^+ + \pi^0 + \nu_{\mu}$	4,8
						$e^+ + \pi^0 + \nu_e$	5,0
						$\pi^+ + \pi^+ + \pi^-$	5,7
						$\pi^+ + \pi^0 + \pi^0$	1,7
K^0			$497,9 \pm 0,6$	$971,4 \pm 1,2$ (3,57)	$(0,90 \pm 0,02) \cdot 10^{-10}$	$\pi^+ + \pi^-$	69,4
					$(6,3 \pm 1,6) \cdot 10^{-8}$	$\pi^0 + \pi^0$	30,6
						$\pi^0 + \pi^0 + \pi^0$	38,7 \pm 7
						$\pi^- + e + \bar{\nu}_e$	}
						$\pi^+ + e + \bar{\nu}_e$	
						$\pi^+ + e + \bar{\nu}_e$	}
						$\pi^- + \mu^+ + \nu_{\mu}$	
						$\pi^+ + \mu^- + \bar{\nu}_{\mu}$	28,3 \pm 6
						$\pi^+ + \mu^- + \bar{\nu}_{\mu}$	25,0 \pm 6
НЕКОТОРЫЕ МЕЗОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ							
ω	0		317 ± 6	(2,3)		$\pi^+ + \pi^-$	100
ψ_1^0	+2		330	(2,4)		$\pi^+ + \pi^+$	
ψ_2^0	0		330	(4,5)		$\pi^+ + \pi^-$	
δ^0	-1		645 ± 25	(5,4)		$\pi^- + \pi^0$	
ψ_4^0	0		760	(5,4)		$\pi^+ + \pi^-$	
	+2					$\pi^+ + \pi^+$	

Продолжение

Частица	Электрич. заряд в единицах e	Спин в единицах \hbar	Масса покоя		Среднее время жизни в секундах	Продукты распада	%
			в $M_{\text{эв}}$	в массах покоя заряженного пиона $m_{\pi^{\pm}}$			
ψ_4^0	0					$\pi^+ + \pi^-$	60 ± 16
K_1^*	-1	1	888 ± 3	6,4		$K^0 + \pi^-$	40 ± 16
K_1^{*0}	0	1	990	7,2		$K^- + \pi^0$	
ψ_6	+2					$K^- + \pi^+$	
ψ_5^0	0					$K^0 + \pi^0$	
K_4^*	+2		1150 ± 50	8,2		$\pi^+ + \pi^+$	100
f	0	2	1253 ± 20	9,0		$\pi^- + \pi^+$	
						$K^0 + \pi^+ + \pi^+$	
						$\pi^- + \pi^+$	
БАРИОНЫ							
p	+1	1/2	$938,213 \pm 0,01$	6,722	∞	$p + e + \bar{\nu}_e$	100
n	0	1/2	$939,507 \pm 0,01$	6,731	1013 ± 26	$p + \pi^-$	66 ± 4
Λ	0	1/2	$1115,4 \pm 0,1$	7,991	$(2,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-10}$	$n + \pi^0$	34 ± 4
Σ^+	+1	1/2	$1189,4 \pm 0,2$	8,52	$(0,78 \pm 0,03) \cdot 10^{-10}$	$p + \pi^0$	$50,7 \pm 3$
Σ^0	0	1/2	$1191,5 \pm 0,5$	8,54	$10^{-11} < \tau < 10^{-23}$	$n + \pi^0$	$49,3 \pm 3$
Σ^-	-1	1/2	$1195,96 \pm 0,3$	8,57	$(1,59 \pm 0,05) \cdot 10^{-10}$	$\Lambda + \gamma$	100
						$n + \pi^-$	100

Продолжение

Частица	Электрич. заряд в единицах +e	Спин в единицах \hbar	Масса покоя		Среднее время жизни в секундах	Продукты распада	%
			в Мэв	в массах покоя заряженного пикона, m_{\pm}			
Σ^-	-1	1/2	$1320,8 \pm 0,4$	9,46	$(1,4^{+0,6}_{-0,2}) \cdot 10^{-10}$	$\Lambda + \pi^-$	100
Σ^0	0	1/2	1316	9,43	$(3,9^{+1,4}_{-0,9}) \cdot 10^{-10}$	$\Lambda + \pi^0$	100
Σ^-	-1	3/2	1686 ± 12	12,1	$\sim 10^{-11}$	$\Sigma^0 + \pi^-$	
НЕКОТОРЫЕ БАРИОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ							
N	-1	3/2	1237	8,86		$\pi^- + n$	100
N	0					$\pi^- + p$	
N	+1					$\pi^0 + n$	
N	+2					$\pi^0 + p$	
N	+2					$\pi^+ + n$	
Y	-1	3/2	1520 ± 3	10,89		$\pi^+ + p$	
Y	0	3/2				$\Sigma^- + \pi^0$ и др.	
Y	0	5/2	1815	13,0		$K^0 + n$	
						$\Lambda + \pi^- + \pi^0$	
						$p + K^-$	
						$p + K^-$	
						и др.	

не подчиняющиеся запрету Паули. Среди них лишь фотон и гравитон абсолютно устойчивы — неспособны к самопроизвольным превращениям.

Отметим, что некоторые гипероны могут замещать нуклоны в атомных ядрах, неустойчивых образованиях, получивших название «г и п е р ф р а г м е н т о в», в которых гипероны и были обнаружены впервые.

Среди барионов единственная абсолютно устойчивая частица — протон. Читатель, познакомившись с таблицей мезонов и барионов, должен был бы обратить внимание на то, что все мезоны и гипероны распадаются за время, характерное для слабых взаимодействий. Сейчас список известных микрочастиц быстро пополняется за счет частиц, распадающихся за время, характерное для сильных взаимодействий: 10^{-23} — 10^{-22} сек. Естественно, что это время недостаточно (даже если оно растянуто за счет большой скорости движения частицы), чтобы частица дала след заметной длины (даже при времени жизни 10^{-18} сек и скорости порядка скорости света длина следа будет порядка $10^{-18} \cdot 3 \cdot 10^{10} = 3 \cdot 10^{-8}$ см — порядка атомного диаметра). Как обнаруживаются эти частицы?

Поясним это на примере первой из них, открытой в 1952 г. Э. Ферми, исследовавшим рассеяние быстрых π^+ -мезонов на протонах (в жидком водороде). Задача состояла в определении относительного

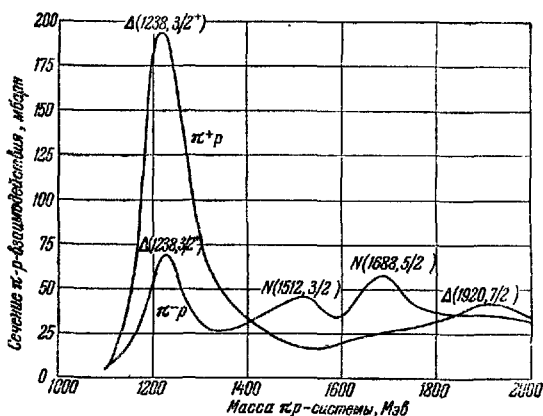


Рис. 3.39.

числа пионов, которые меняют направление своего движения — «рассеются» на протонах — при различных энергиях пионов. На рис. 3.39 результаты экспериментов Ферми приведены в виде графиков. На оси абсцисс приведена энергия системы пион —

протон в координатах центра инерции (подвижная система отсчета, в которой пион и протон движутся друг другу навстречу с равными по величине импульсами: суммарный их импульс равен нулю, центр инерции — неподвижен). На оси ординат откладывается поперечное сечение (см. § 60) пион-протонного взаимодействия. Обе кривые, как для системы $\pi^+ - p$, так и для $\pi^- - p$, дают ряд максимумов, которые трактуются следующим образом.

Когда энергия системы достигает нужного, «резонансного», значения, образуется новая частица, которая затем весьма быстро распадается, внося свой вклад в наблюдаемое рассеяние. Из сказанного ясно, почему эти новые частицы были названы **резонансами**. На графике у максимумов кривых обозначены массы (в *Мэв*) и спины соответствующих резонансов.

В настоящее время известны десятки мезонных и барионных резонансов. Некоторые из них, в отличие от всех ранее описанных нами частиц, обладают двойным электрическим (положительным и отрицательным) зарядом. В конце таблиц мезонов и барионов мы привели сведения о небольшом числе мезонных и барионных резонансов.

§ 74. Классификация микрочастиц

При изобилии ныне известных микрочастиц невозможно описать их свойства и превращения без какой-либо их систематизации. Конечно, наилучшей была бы систематизация, построенная на основе строгой теории. Но теории микрочастиц нет, это дело будущего, причем невозможно сказать, сколь отдаленного. Однако и феноменологическая систематика полезна, и не только ради сегодняшнего удобства, но и для будущей теории: вспомним роль таблицы Менделеева в развитии современной квантовой механики.

Приведем те величины, с помощью которых ныне систематизируют микрочастицы.

1. **Массовое или барионное число A** — характеризует наличие у частицы барионного заряда. У всех барионов, приведенных в нашей таблице, это число равно единице. У всех антибарионов $A = -1$. Кратными значениями барионного числа обладают сложные частицы (и, может быть, какие-нибудь еще не открытые резонансы?), например, для ядра или атома кислорода O_{16}^{16} имеем: $A = 16$. У всех мезонов и лептонов барионное число равно нулю.

2. **Электрический заряд Q** . Речь идет о заряде не как динамической величине, а как о величине маркировочной (может быть, лучше было бы говорить «электрическое число»), представляет собой число единиц электрического заряда (в единицах положительного заряда протона), присущего частице.