Доклады Академии наук СССР
1955. Том 103, № 2

ФИЗИКА

И. ШМУШКЕВИЧ

О ВЫВОДЕ СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ СЕЧЕНИЯМИ, ВЫТЕКАЮЩИХ ИЗ ГИПОТЕЗЫ ОБ ИЗОТОПИЧЕСКОЙ ИНВАРИАНТНОСТИ

(Представлено академиком Л. Д. Ландау 14 III 1955)

Известно, что из гипотезы об изотопической инвариантности вытекает ряд соотношений для сечений различных процессов. Сопоставление таких соотношений с опытными данными служит для проверки самой гипотезы изотопической инвариантности. Обычный способ получения упомянутых соотношений связан с использованием теоремы сложения моментов и таблиц коэффициентов Клебша — Гордана и потому практически оказывается довольно громоздким. При этом сложность и громоздкость его возрастают с увеличением числа частиц, участвующих в изучаемых реакциях. Ниже будет указан простой и общий способ получения основных изотопических соотношений между сечениями, использование которого не требует ничего, кроме простых арифметических действий.

1. Для пояснения этого способа разберем конкретный пример — рассеяние π-мезонов нуклонами. В качестве методического приема предположим, что имеется мишень, содержащая равное число невзаимодействующих протонов и нейтронов, и что в падающем пучке имеется равное число также невзаимодействующих π^+-, π^-- и π^0-мезонов. В этих условиях можно считать, что как мишень, так и пучок изотопически неполяризованы, и поэтому рассеянные π-мезоны будут также изотопически неполяризованы. Это значит, что в рассеянном пучке будет иметься равное число π^+-, π^-- и π^0-мезонов. Выпишем теперь вообще все процессы рассеяния, которые возможны при столкновениях π-частиц с нуклонами:

1) $\pi^+ + p \to \pi^+ + p$	1′) $\pi^- + n \to \pi^- + n$	3″) $\pi^0 + n \to \pi^- + p$
2) $\pi^+ + n \to \pi^+ + n$	2′) $\pi^- + p \to \pi^- + p$	3‴) $\pi^0 + p \to \pi^+ + n$
3) $\pi^+ + n \to \pi^0 + p$	3′) $\pi^- + p \to \pi^0 + n$	4) $\pi^0 + n \to \pi^0 + n$
		4′) $\pi^0 + p \to \pi^0 + p$

Процессы 1) и 1′) отличаются друг от друга заменой π^+ на π^- и n на p. Из зарядовой симметрии теории следует, что такие процессы имеют одинаковое значение. То же самое относится к процессам 2) и 2′, 3) и 3′), 3″) и 3‴), 4) и 4′). Процессы 3″) и 3‴) являются, кроме того, обратными по отношению к процессам 3) и 3′) и поэтому имеют одинаковое с ними сечение. Таким образом, имеется всего четыре различных сечения: σ_1, σ_2, σ_3, σ_4.

В табл. 1 приведены числа различных π-мезонов, образующихся в выписанных выше реакциях. Помножим теперь числа, находящиеся в первом столбце (π^+), на соответствующие сечения и полученные произведения сложим. Мы получим $n_+ = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ — это есть общее число π^+-мезонов, образующихся в рассматриваемых условиях изотопически неполяризованных мишени и пучка (отнесенное к единичному потоку падающих мезонов и одному нуклону мишени). Таким же образом найдем общие количества n_- и n_0 образующихся π^-- и π^0-мезонов: $n_- = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, $n_0 = 2\sigma_3 + 2\sigma_4$. Приравнивая друг другу, на основании сказанного ранее, n_+, n_- и n_0, получим одно соотношение между сечениями:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_3 + 2\sigma_4,$$

или, если записать более подробно:

$$\sigma_1(\pi^+ + p \to \pi^+ + p) + \sigma_2(\pi^- + p \to \pi^- + p) =$$
$$= \sigma_3(\pi^- + p \to \pi^0 + n) + 2\sigma_4(\pi^0 + p \to \pi^0 + p). \quad (1)$$

Как нетрудно убедиться, (1) совпадает с результатом, полученным ранее Гайтлером ([1]). Заметим при этом, что приравнивание числа образующихся π^+-, π^-- и π^0-мезонов дает только одно соотношение, а не два. Это обусловлено тем, что n_+ и n_- выражаются одинаковым образом через сечения, как это и должно быть на основании зарядовой симметрии.

Рассмотрим еще несколько процессов и получим соотношения между сечениями описанным выше способом. Так как техника получения этих соотношений ясна, то мы ограничимся записью возможных реакций, составлением таблиц и приведением окончательных результатов. При этом в строке таблицы, соответствующей данному сечению, мы будем сразу записывать общее число частиц в разных зарядовых

Таблица 1

		π^+	π^-	π^0
σ_1	1)	1	0	0
	1′)	0	1	0
σ_2	2)	1	0	0
	2′)	0	1	0
σ_3	3)	0	0	1
	3′)	0	0	1
	3″)	0	1	0
	3‴)	1	0	0
σ_4	4)	0	0	1
	4′)	0	0	1

Таблица 2

	π^+	π^-	π^0
σ_1	0	0	2
σ_2	1	1	0
σ_3	0	0	2
σ_4	2	2	0

Таблица 3

	π^+	π^-	π^0
σ_1	0	0	4
σ_2	2	2	0
σ_3	1	1	2
σ_4	1	1	2

Таблица 4

	π^+	π^-	π^0
σ_1	2	2	0
σ_2	0	0	4
σ_3	1	1	2

Таблица 5

	π^+	π^-	π^0
σ_1	2	2	2
σ_2	0	0	6
σ_3	1	1	4
σ_4	3	3	0

Таблица 6

	π^+	π^-	π^0
w'_1	1	1	4
w_2	3	3	0
w'_3	0	0	3
w'_4	1	1	1

состояниях, образующихся во всех реакциях с одним и тем же сечением. Это значит, что вместо четырех строк, относящихся, например, к сечению σ_3 в табл. 1, мы имели бы теперь одну строку с числами 1, 1, 2 (для π^+-, π^--, π^0-мезонов, соответственно).

2. Образование одного π-мезона при столкновениях нуклонов с нуклонами. В этих случаях мы рассматриваем как мишень, так и пучок состоящими из равного числа протонов и нейтронов.

1) $p + p \to p + p + \pi^0$ 1′) $n + n \to n + n + \pi^0$
2) $p + p \to p + n + \pi^+$ 2′) $n + n \to n + p + \pi^-$
3) $p + n \to p + n + \pi^0$ 3′) $n + p \to n + p + \pi^0$
4) $p + n \to n + n + \pi^+$ 4′) $n + p \to p + p + \pi^-$
4″) $p + n \to p + p + \pi^-$ 4‴) $n + p \to n + n + \pi^+$

$$\sigma_2(p + p \to p + n + \pi^+) + 2\sigma_4(p + n \to p + p + \pi^-) =$$
$$= 2\sigma_1(p + p \to p + p + \pi^0) + 2\sigma_3(p + n \to p + n + \pi^0) * \quad (2)$$

(см. табл. 2).

* Следует иметь в виду, что если в реакциях 4) и 4‴) одинаковы как спиновые состояния сталкивающихся протонов, так и спиновые состояния сталкивающихся нейтронов, то дифференциальные поперечные сечения реакций 4) и 4‴) равны, если

Для столкновений нуклонов с нуклонами, сопровождающихся образованием π-частиц и дейтронов, реакции 1) и 4) невозможны. Поэтому для этих процессов соотношение между сечениями имеет вид:

$$\sigma(p + p \to d + \pi^+) = 2\sigma(p + n \to d + \pi^0). \quad (3)$$

Аналогичным образом легко получаются соотношения между сечениями образования одного π-мезона при столкновениях нуклонов с дейтронами. Эти соотношения, так же как и соотношения (2) и (3), совпадают с полученными ранее в работах [2-5].

3. Образование двух π-мезонов при столкновениях нуклонов с дейтронами.

1) $p + d \to p + p + n + \pi^0 + \pi^0$	1') $n + d \to n + n + p + \pi^0 + \pi^0$
2) $p + d \to p + p + n + \pi^+ + \pi^-$	2') $n + d \to n + n + p + \pi^- + \pi^+$
3) $p + d \to p + n + n + \pi^+ + \pi^0$	3') $n + d \to n + p + p + \pi^- + \pi^0$
4) $p + d \to p + p + p + \pi^- + \pi^0$	4') $n + d \to n + n + n + \pi^+ + \pi^0$

$$2\sigma_2(p + d \to p + p + n + \pi^+ + \pi^-) = 4\sigma_1(p + d \to p + p + n + \pi^0 + \pi^0) + \sigma_3(p + d \to p + n + n + \pi^+ + \pi^0) + \sigma_4(p + d \to p + p + p + \pi^- + \pi^0). \quad (4)$$

Для процессов, при которых дейтрон не расщепляется:

$$2\sigma(p + d \to p + d + \pi^+ + \pi^-) = 4\sigma(p + d \to p + d + \pi^0 + \pi^0) + \sigma(p + d \to n + d + \pi^+ + \pi^0) \quad (5)$$

(см. табл. 3).

4. Аннигиляция нуклон-антинуклонных пар с образованием двух π-мезонов. Считая мишень состоящей из равного числа протонов и нейтронов, а пучок — из равного числа антипротонов и антинейтронов, рассматриваем следующие реакции:

1) $\tilde{p} + p \to \pi^+ + \pi^-$	1') $\tilde{n} + n \to \pi^- + \pi^+$
2) $\tilde{p} + p \to \pi^0 + \pi^0$	2') $\tilde{n} + n \to \pi^0 + \pi^0$
3) $\tilde{p} + n \to \pi^- + \pi^0$	3') $\tilde{n} + p \to \pi^+ + \pi^0$

$$2\sigma_1(\tilde{p} + p \to \pi^+ + \pi^-) = 4\sigma_2(\tilde{p} + p \to \pi^0 + \pi^0) + \sigma_3(\tilde{p} + n \to \pi^- + \pi^0) \quad (6)$$

(см. табл. 4).

Это совпадает с результатом, полученным в [6].

5. Аннигиляция нуклон-антинуклонных пар с образованием трех π-мезонов.

1) $\tilde{p} + p \to \pi^+ + \pi^- + \pi^0$	1') $\tilde{n} + n \to \pi^- + \pi^+ + \pi^0$
2) $\tilde{p} + p \to \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$	2') $\tilde{n} + n \to \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$
3) $\tilde{p} + n \to \pi^0 + \pi^0 + \pi^-$	3') $\tilde{n} + p \to \pi^0 + \pi^0 + \pi^+$
4) $\tilde{p} + n \to \pi^+ + \pi^- + \pi^-$	4') $\tilde{n} + p \to \pi^- + \pi^+ + \pi^+$

$$\sigma_4(\tilde{p} + n \to \pi^+ + \pi^- + \pi^-) = 2\sigma_2(\tilde{p} + n \to \pi^0 + \pi^0 + \pi^0) + \sigma_3(\tilde{p} + n \to \pi^0 + \pi^0 + \pi^-) \quad (7)$$

(см. табл. 5).

Это соотношение не содержит сечения σ_1, так как в соответствующей реакции образуется одинаковое число π^+-, π^-- и π^0-частиц.

импульсы и спины образующихся частиц ориентированы одинаковым образом в обеих реакциях по отношению, скажем, к протону. То же замечание относится к реакциям 4') и 4''). Поэтому соотношение (3) верно только по отношению к полным сечениям, усредненным по спинам.

6. Распад τ-мезонов на три π-мезона. Предполагая, что изотопический спин τ-мезонов равен единице, и считая, что среди распадающихся τ-частиц имеется равное число τ^+-, τ^-- и τ^0-мезонов, имеем:

1) $\tau^+ \to \pi^+ + \pi^0 + \pi^0$ 1′) $\tau^- \to \pi^- + \pi^0 + \pi^0$
2) $\tau^+ \to \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ 2′) $\tau^- \to \pi^- + \pi^- + \pi^+$
3) $\tau^0 \to \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$
4) $\tau^0 \to \pi^+ + \pi^- + \pi^0$

$$w_2(\tau^+ \to \pi^+ + \pi^+ + \pi^-) = w_1(\tau^+ \to \pi^+ + \pi^0 + \pi^0) + w_3(\tau^0 \to \pi^0 + \pi^0 + \pi^0) \quad (8)$$

(см. табл. 6).

Большинство соотношений, полученных в разобранных здесь случаях, верно только для полных сечений. Нетрудно получать соотношения также и для дифференциальных сечений, исходя попрежнему из того, что в рассматриваемых условиях в каждом направлении должно вылетать одинаковое число π^+-, π^-- и π^0-мезонов. При этом надо только иметь в виду одно обстоятельство, которое лучше всего пояснить на конкретном случае. Вернемся для этого, например, к реакциям, разобранным в п. 4, и найдем соотношение между дифференциальными сечениями. Здесь надо учесть, что дифференциальные поперечные сечения реакций 1) и 1′) равны для противоположных направлений вылета π^+-мезонов (в системе центра масс). Это обусловлено тем, что дифференциальные поперечные сечения реакций 1) и 1′) равны для одинаковых направлений вылета π^+ (по отношению к p) в реакции 1) и π^- (по отношению к n) в реакции 1′) (см. также подстрочное примечание к формуле (3)). В результате получаем

$$w_1(\tilde{p} + p \to \pi^+ + \pi^-) + \overline{w}_1(\tilde{p} + p \to \pi^+ + \pi^-) =$$
$$= 2w_2(\tilde{p} + p \to \pi^0 + \pi^0) + w_3(\tilde{p} + n \to \pi^- + \pi^0), \quad (9)$$

что совпадает с результатом, полученным в [6] (w_1 и $\overline{w}_1$ — дифференциальные сечения, соответствующие вылету π^+-мезонов в противоположных направлениях).

Отметим, наконец, что во всех рассмотренных случаях равенство чисел образующихся π^+-, π^-- и π^0-мезонов приводило лишь к одному соотношению. Равенство числа образующихся протонов и нейтронов выполнялось автоматически и поэтому не приводило ни к какому соотношению. Образование частиц с большим изотопическим спином T (если такие частицы будут обнаружены) приведет к числу изотопических соотношений, равному T или $T - {}^1/_2$, в зависимости от того, является ли T числом целым или полуцелым.

Ленинградский физико-технический институт
Академии наук СССР

Поступило
20 XII 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] W. Heitler, Proc. Roy. Irich. Akad., **51**, 33 (1946); K. M. Watson, Phys. Rev., **85**, 852 (1952). [2] J. H. Luttinger, Phys. Rev., **86**, 571 (1952). [3] R. L. Gorwin, Phys. Rev., **85**, 1045 (1952). [4] A. M. L. Messiah, Phys. Rev., **86**, 430 (1952). [5] L. Van Hove, R. Marshak, A. Pais, **88**, 1211 (1952). [6] И. Кобзарев, И. Шмушкевич, ДАН, **102**, № 5 (1955).