

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



C-482

14/5.74

P2 - 7436

Б.Словинский

150/2-74

КВАЗИСВОБОДНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В СТОЛКНОВЕНИЯХ БЫСТРЫХ ПИОНОВ
С АТОМНЫМИ ЯДРАМИ

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

P2 - 7436

Б.Словинский

КВАЗИСВОБОДНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В СТОЛКНОВЕНИЯХ БЫСТРЫХ ПИОНОВ
С АТОМНЫМИ ЯДРАМИ

Направлено в ЯФ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

В физике высоких энергий значительное место занимают исследования взаимодействий быстрых адронов с атомными ядрами. Кроме ряда прикладных задач, в этой области имеются уникальные возможности решения очень важных проблем физики элементарных частиц, таких, как изучение взаимодействий короткоживущих частиц с нуклонами и так называемых групповых взаимодействий частиц ^{1/1}. Зондирование атомных ядер быстрыми адронами используется также с целью исследования ядерных структур и т.д.

К настоящему времени накоплено значительное количество экспериментальных данных, касающихся адрон-ядерных взаимодействий при высоких энергиях. Основным источником этой информации являются ядерные эмульсии и пузырьковые камеры, в особенности ксеноновые пузырьковые камеры.

Несмотря на большое количество и разнообразие каналов реакций, возникающих при соударении быстрых адронов с атомными ядрами, можно выделить такие, которые, как кажется, имеют особое практическое и эвристическое значение. К ним следует отнести упругое или квазиупругое рассеяние, когерентное рождение и широкий класс так называемых квазисвободных взаимодействий.

В настоящей работе приведены основные экспериментальные сведения, относящиеся к квазисвободным взаимодействиям пионов с ядрами ксенона в области энергий ≥ 1 Гэв и дана простая статистическая интерпретация этого процесса.

Основные итоги экспериментальных исследований

Определенность ядра-мишени и возможность изучать характеристики π^0 -мезонов, испускаемых в адрон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях в полном интервале импульсов и углов эмиссии, делает экспериментальную информацию, получаемую с ксеноновых пузырьковых камер, особенно предпочтительной для интерпретации. Важным дополнением являются также сведения о характеристиках нейтральных странных частиц и заряженных частиц, в особенности медленных π^+ -мезонов и протонов, которые были получены при использовании этой методики.

Основные результаты исследований взаимодействий π^+ - и π^- -мезонов с ядрами ксенона в области энергий ≥ 1 ГэВ изложены в работах ^{/2,3/}. Там же даны ссылки на другие, более ранние работы. В дальнейшем мы остановимся вкратце, в основном, лишь на этих результатах.

Среди множества каналов взаимодействий быстрых пионов с ядрами ксенона особый интерес вызывают те, которые ведут к возникновению небольших чисел N вторичных заряженных частиц в конечном состоянии. Было установлено ^{/2,3/}, что эти взаимодействия не отличаются от соответствующих им пион-нуклонных взаимодействий при тех же энергиях в отношении характеристик вторичных частиц: угловых и импульсных распределений π^0 -мезонов, средних чисел вторичных частиц, а также импульсного распределения протонов. Экспериментальным критерием выделения этого класса так называемых квазиэлементарных взаимодействий было число $N : N \leq 3$ в π^+-Xe -взаимодействиях при 2,34 ГэВ/с и $N \leq 4$ в $\pi^- - Xe$ -взаимодействиях при 5 и 9 ГэВ/с.

В таблице приведены значения частоты реализации квазисвободных взаимодействий по отношению ко всем неупругим реакциям $\pi-Xe$ при разных энергиях. Там же даны аналогичные величины, полученные при исследовании столкновений протонов с импульсом 8,7 ГэВ/с ^{/4/} π^- -мезонов с импульсом 16,3 ГэВ/с ^{/5/} и 67 ГэВ/с ^{/6/} с ядрами эмульсии.

Таблица

Относительная частота P квазисвободных взаимодействий в различных реакциях и при различных энергиях взаимодействий

Реакция	Импульс /ГэВ/с/	P /%/
$\pi^+ - Xe$	2,34	33,6±3,0
$\pi^- - Xe$	5	27,2±3,2
$\pi^- - Xe$	29	27,2±3,7
P -ядра эмульсии	8,7	25 ^{/4/}
π^- -ядра эмульсии	16,3	<39 ^{/5/}
π^- -ядра эмульсии	67	>17 ^{/6/}

Из приведенных данных можно заключить, что частота P взаимодействий квазисвободного типа в реакциях π -мезонов с ядрами ксенона не зависит, в пределах ошибок эксперимента, от энергии взаимодействия и равна примерно 30% всех неупругих реакций $\pi-Xe$. Этот вывод не противоречит соответствующим данным, полученным при помощи ядерной эмульсии ^{/4-6/}.

Наконец, были определены значения эффективных сечений неупругих $\pi^+ - Xe$ и $p - Xe$ взаимодействий при 2,34 ГэВ/с. Они равны:

$$\sigma_{in}^{tot} (\pi^+ - Xe) = 1238 \pm 30 \text{ мб},$$

$$\sigma_{in}^{tot} (p - Xe) = 1344 \pm 50 \text{ мб}.$$

Модель квазисвободных взаимодействий

Перечисленные выше экспериментальные результаты, касающиеся взаимодействий быстрых пионов с ядрами ксенона, можно истолковать, привлекая весьма простое и довольно очевидное представление о статистическом характере процесса диффузии частиц внутри ядра /например, ^{/1/}.

В рамках этого представления можно следующим образом записать выражение для функции плотности вероятности проникновения быстрой частицы /например, π^- -мезона/ через ядро, когда эта частица испытывает одно неупругое соударение с внутриядерным нуклоном, а образованные в этом акте вторичные частицы не претерпевают до выхода из ядра неупругих взаимодействий*:

$$f(r_0) = 2\sigma_N \int_0^{\sqrt{R-r_0}} \rho(\sqrt{r_0^2 + x^2}) \cdot \exp \left\{ -2 \left[\sigma_N \int_0^x \rho(\sqrt{r_0^2 + x^2}) dx + \sum_i \sigma_N^{(i)} \int_{(\phi_i, \Phi_i)} \rho(\sqrt{r_0^2 + x^2}) dx \right] \right\} dx. \quad /1/$$

σ_N - полное сечение взаимодействия падающей частицы с нуклоном; $\sigma_N^{(i)}$ - полное сечение неупругих взаимодействий i -й частицы, рожденной в квазисвободном акте, с внутриядерным нуклоном; r_0 - параметр соударения; R - радиус ядра-мишени; (ϕ_i, Φ_i) обозначает траекторию i -й частицы, рожденной в квазисвободном акте, определяемую углом эмиссии ϕ_i и азимутальным углом

Φ_i ; $\rho(\sqrt{r_0^2 + x^2})$ - функция плотности нуклонов в ядре.

Нетрудно видеть, что доля P квазисвободных, в указанном выше смысле, взаимодействий выражается следующим образом через функцию $f(r_0)$:

$$P = \frac{2\pi}{\sigma_{in}^{tot}} \int_0^R f(r_0) r_0 dr_0, \quad /2/$$

σ_{in}^{tot} - полное эффективное сечение неупругих каналов.

*Наличие вторичного упругого рассеяния в этом случае практически нельзя обнаружить экспериментально, даже располагая очень большим статистическим материалом.

Численный расчет функции $f(r_0)$ в /1/ и доли P в /2/ был выполнен для реакции $\pi^+ - \text{Xe}$ при 2,34 Гэв/с. Было принято

$$\rho_0, \quad r \leq r_1, \\ \rho(r) = \begin{cases} \frac{\rho_0}{R-r_1} (R-r), & R \geq r \geq r_1, \\ 0, & r > R, \end{cases} \quad /3/$$

$$\rho_0 = 0,174 \cdot 10^{39} \text{ см}^{-3}, \quad R = 7,2 \cdot 10 \text{ см},$$

$$r_1 = 3,75 \cdot 10^{-13} \text{ см}.$$

При этом удовлетворено условие нормировки:

$$4\pi \int_0^R \rho(r) r^2 dr = 131. \quad /4/$$

Принято также, что функции плотности распределения протонов и нейтронов в ядре ксенона совпадают /7/.

В расчетах были использованы известные значения сечений нуклон-нуклонных и пион-нуклонных взаимодействий /11/. Расчет частично выполнялся по методу Монте-Карло. Это относится к вычислению значений экспоненты

$$\exp \left\{ -2 \sum_i \sigma_N^{(i)} \int_{(\phi_i, \Phi_i)} \rho(\sqrt{r_0^2 + x^2}) dx \right\},$$

для чего были использованы экспериментальные данные о реакции $\pi^+ + p$ при 2,34 Гэв/с /8/, любезно предоставленные нам М.Д.Шафрановым. Учитывалось также внутриядерное фермиевское движение нуклонов, для которого было принято следующее распределение по импульсам:

$$W(p) \approx \exp \left\{ -p^2 / 2 p_0^2 \right\}, \quad /5/$$

$$p_0 = 170 \text{ Мэв/с}.$$

График функции $f(r_0)$ для случая $\pi^- - \text{Xe}$ взаимодействий при 2,34 Гэв/с представлен на рисунке.

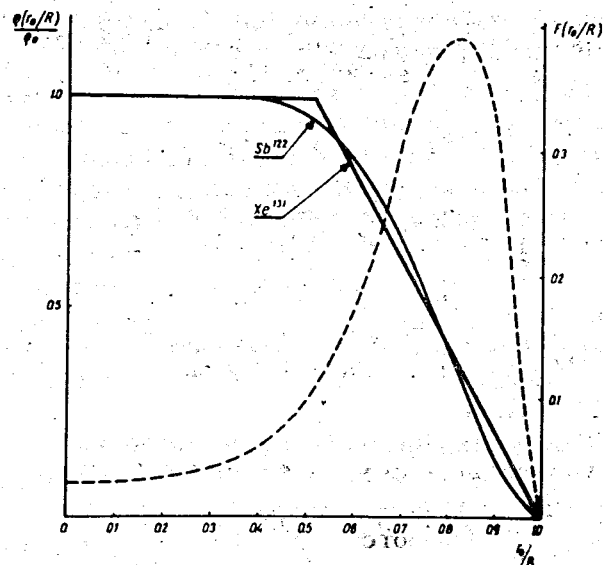


График функции $f(r_0)$ вероятности квазисвободных взаимодействий π^+ -мезонов с ядрами ксенона при 2,34 Гэв/с /пунктир/. Сплошными линиями обозначены распределение нуклонов в ядре ^{131}Xe , которое принято при расчете функции $f(r_0)$, и распределение нуклонов в ядре ^{122}Sb /./

Вычисленное согласно /2/ значение относительной частоты квазисвободных реакций равно 29%, что хорошо согласуется с полученным экспериментально значением $/p \approx 30\%$. Интересно отметить, что половина всех квазисвободных взаимодействий происходит в области параметров соударения $r_0 \geq 0,8 \cdot R$.

Полагая $\sigma_N^{(i)} = 0$ в /1/ и $P=1$ в /2/, получаем выражение для полного сечения неупругих процессов

$$\sigma_{in}^{tot} = 2\pi \int_0^R \{1 - \exp[-2\sigma_N \int_0^{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \rho(\sqrt{r_0^2 + x^2}) dx]\} r_0 dr_0 \quad /6/$$

Это выражение совпадает с аналогичным выражением, вытекающим из оптической модели, если пренебречь эффектом преломления в ядре /9,12/.

Рассчитанное по /6/ значение полного сечения неупругих π^+ -Xe соударений при 2,34 Гэв/с равно $\sigma_{in}^{tot} = 1194$ мб и не отличается, в пределах ошибок, от соответствующего значения, определенного экспериментально: $\sigma_{in}^{tot}(\pi^+ - \text{Xe}) = 1238 \pm 30$ мб.

Следует подчеркнуть, что вид функции $f(r_0)$ в /1/ несущественно зависит от конкретного канала реакции $\pi^+ + p$ при 2,34 Гэв/с. Это обстоятельство может быть использовано при исследовании вопроса о различии в распределениях плотности протонов и нейтронов на периферии атомного ядра.

Так как функция $f(r_0)$ в /1/, при фиксированном ядре-мишени, практически зависит только от сечений неупругих столкновений адронов с нуклонами, которые в области больших энергий меняются относительно незначительно, то доля квазисвободных взаимодействий должна оставаться примерно постоянной в широком интервале энергий взаимодействия. Можно также ожидать, что доля квазисвободных взаимодействий при больших энергиях не будет сильно зависеть от ядра-мишени, по крайней мере для средних и тяжелых ядер, так как в этом случае локализация квазисвободных актов по параметру соударения обусловлена в основном геометрическим фактором. Подтверждением правильности приведенных соображений могут служить данные, представленные в таблице.

Любопытно отметить, что функция плотности вероятности квазисвободных взаимодействий, определенная формулой /1/, проявляет тот же характер зависимости от параметра соударения, что и аналогичная функция, определенная в рамках теории многократного дифракционного рассеяния Глаубера и описывающая вклад процессов квазиупругого рассеяния сложными ядрами /10/. Однако максимум функции $f(r_0)$ в /1/ заметно сдвинут в сторону больших значений параметра соударения r_0 . Возможность интерпретировать функцию $f(r_0)$ в выражении типа /2/ как плотность вероятности появляется и при строгом рассмотрении процесса рассеяния быстрых частиц на

ядерной мишени в пределе очень больших энергий, когда амплитуда рассеяния становится чисто мнимой /11/. Величине $N(r_0) = f(r_0) / \sigma_N$ можно приписать весьма определенное значение, а именно, значение числа внутриядерных нуклонов, принимающих участие в квазисвободном взаимодействии в ядре-мишени.

В заключение следует подчеркнуть, что относительно большая величина сечения квазисвободных взаимодействий /для ксенона она составляет примерно 360 мб/ делает их удобным и полезным орудием для исследования адрон-нуклонных взаимодействий и взаимодействий резонансов с нуклонами, а также для исследования структуры периферической области атомных ядер.

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить профессоров З.С.Стругальского и М.И.Соловьева за интерес к работе и поддержку, а также доктора А.Томашевича за помощь при выполнении вычислений на ЭВМ и ст.научного сотрудника М.Д.Шафранова за содействие в реализации данной темы.

Литература

1. В.С.Барашенков, В.Д.Тонеев. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. Атомиздат, Москва, 1972.
2. Б.Словинский, З.Стругальский. Препринт ОИЯИ, P1-6408, Дубна, 1972.
3. Б.Словинский, З.Стругальский. Сообщение ОИЯИ, P1-6557, Дубна, 1972.
4. Т.Б.Жданов, В.В.Максименко, М.И.Трепьякова, М.Н.Щербакова. ЖЭТФ, 37, 620 /1959/.
5. P.J.Finey, J.V.Major. Nuovo Cimento 41A, 77 (1966).
6. М.Г.Антонова, О.Е.Бадави и др. Сообщение ОИЯИ, P1-6504, Дубна, 1972.
7. Z.S.Strugalski. Nucl.Phys., 87, 280 (1966).
Ф.А.Денисов, В.Н.Мехедов. Ядерные реакции при высоких энергиях. Атомиздат, Москва, 1972.
8. Н.Ангелов, И.М.Граменицкий, Х.Каназирски, П.Керачев, Р.Ледницки, А.М.Моисеев, А.Прокеш, Л.А.Тихонова, А.Б.Фенюк, М.Христов, М.Д.Шафранов. Сообщение ОИЯИ, P1-4611, Дубна, 1969;
Н.Ангелов, И.М.Граменицкий, Х.Каназирски, А.М.Моисеев, А.Прокеш, Л.А.Тихонова, А.Б.Фенюк, М.Д.Шафранов. Сообщение ОИЯИ, P1-4271, Дубна, 1969.

9. Л.Элтон. Размеры ядер. ИЛ, Москва, 1962.
10. G.J.Glauber. High Energy Physics and Nuclear Structure (S.Devons, Ed.), p. 207, Plenum Press, N.Y. (1970).
11. W.Czyz. Report No 678/PL/PH. Krakow, 1969.
12. В.В.Гусева, С.А.Дубровина, А.М.Лебедев, А.Е.Морозов, Л.А.Санько, В.В.Соколовский, С.А.Славатинский, Б.В.Толкачев. Изв. АН СССР, сер.физ., 28, 1761 /1964/.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 августа 1973 года.