

РАСЧЕТЫ И ИЗМЕРЕНИЯ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА ЯДРАХ  
СВИНЦА В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ НЕЙТРОНОВ 13,7 - 15 МэВ

Б. А. Бенецкий, В. В. Нефедов, Р. П. Радев, В. А. Розовский,  
И. В. Штрах

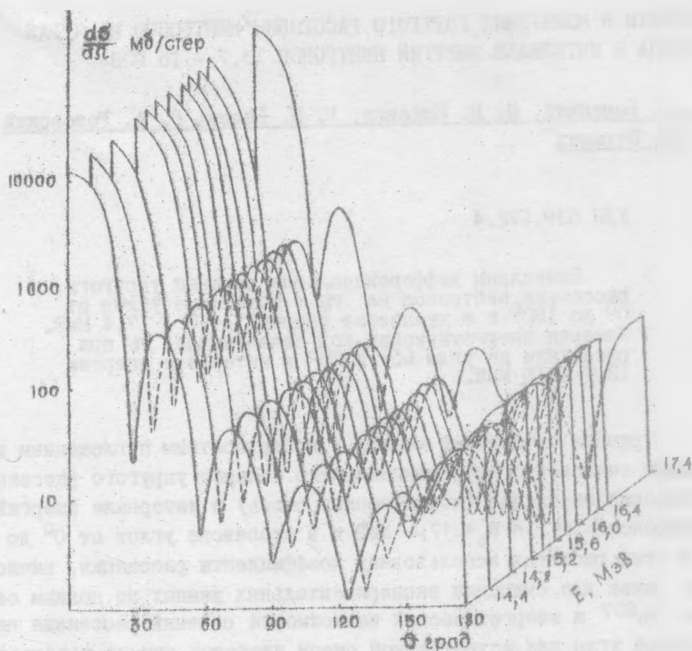
УДК 539.172.4

Вычислены дифференциальные сечения упругого рассеяния нейтронов на  $Pb$  в интервале углов от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  и в диапазоне энергий 14,0 - 17,4 МэВ. Измерен энергетический ход сечений для  $Pb$  при рассеянии на углах  $65^\circ$  и  $70^\circ$  в интервале энергии 13,7 - 15 МэВ.

В рамках оптической модели с поверхностным поглощением проведены вычисления дифференциального сечения упругого рассеяния нейтронов на свинце (естественная смесь) в интервале энергий нейтронов  $14,0 \leq E_n \leq 17,4$  МэВ и в диапазоне углов от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . При этих расчетах использованы коэффициенты рассеяния, вычисленные ранее для описания экспериментальных данных по полным сечениям для  $Pb^{207}$  и энергетической зависимости сечений рассеяния на некоторые углы для естественной смеси изотопов свинца в области  $15,5 \leq E_n \leq 17$  МэВ [1,2]. Упомянутые расчеты находятся в хорошем согласии с экспериментом. Они проводились в приближении бесспинового ядра с действительной частью потенциала в форме Вудса-Саксона, мнимой частью в лоренцевой форме и с учетом спин-орбитального взаимодействия. Совокупность полученных результатов показана на рис. 1.

Они сопоставляются с измерениями дифференциальных сечений рассеяния нейтронов, проведенными на сцинтилляционном спектрометре, ранее применявшемся при измерениях полных сечений [3-5]. В этих опытах использовался коллиматор быстрых нейтронов типа описанного в [6]. Для повышения точности и исключения систематических погрешностей спектры рассеянных нейтронов измерялись ко-

роткими сериями с использованием автоматической системы управления экспериментом. Рассеиватель из естественного РЬ изготовлен в форме одной трети тора с внутренним радиусом 11 см, внешним

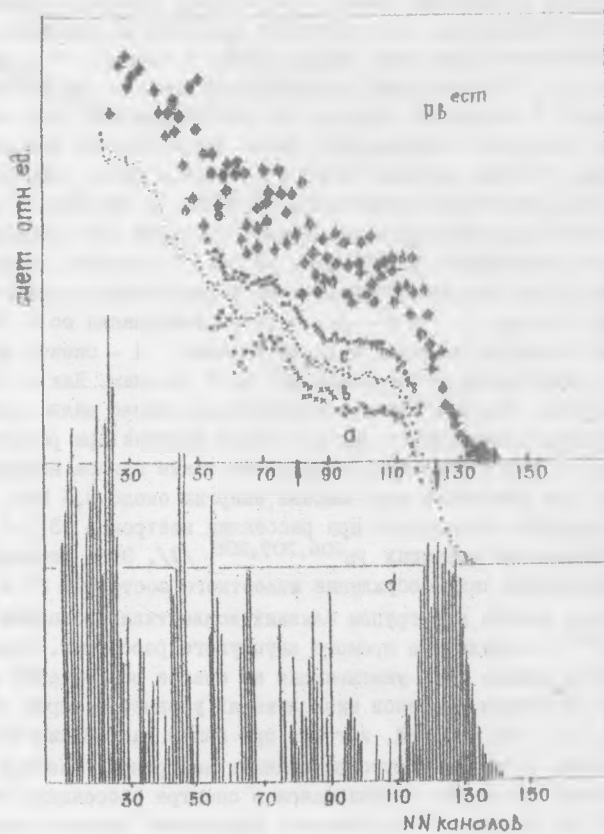


Р и с. 1. Угловая и энергетическая зависимость дифференциального сечения упругого рассеяния нейтронов на свинце (расчет)

радиусом 18 см и толщиной 3,5 см. Источником нейтронов служила толстая широчиваго-тригивая мишень, облучаемая потоком дейтронов с энергией около 120 кэВ. Изменение энергии первичных нейтронов осуществлялось поворотом коллиматора вокруг мишени. Средний энергетический разброс падающих на рассеиватель нейтронов составлял примерно  $\pm 70$  кэВ. Угловое разрешение зависит от угла рассеяния  $\theta$  и составляло в среднем величину  $\Delta\theta = \pm 7^\circ$ . Энергетическое разрешение рассеянных нейтронов порядка 800 кэВ.

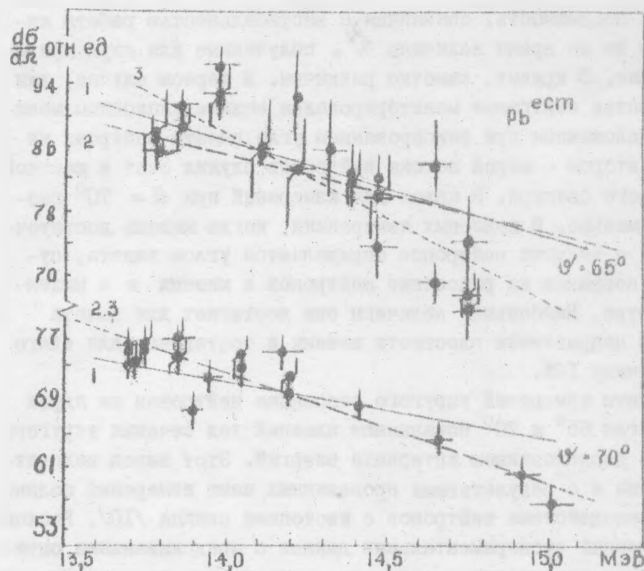
В процессе измерений регистрировались: суммарный спектр (при облучении рассеивателя), разностный спектр (разность спектров, измеренных с рассеивателем и без него) и спектр фона. На рис. 2 показан разностный спектр, т.е. спектр протонов отдачи от рассеянных нейтронов. При получении результатов использовалась статистическая обработка аппаратурных спектров с помощью ЭВМ МИР-I, т.е. "сглаживание" аппаратурных спектров на основе метода  $\min \chi^2$ . В основу ее положено то обстоятельство, что энергетическая дисперсия спектрометра много больше ширины канала анализатора. Поэтому разброс точек в небольшом числе каналов является лишь следствием статистики отсчетов, а ход кривой определяется совокупностью средневзвешенных значений для интервала порядка энергетического разрешения. На рис. 2 показаны экспериментальный спектр рассеянных нейтронов и результаты указанной обработки. Спектры а, б и с - результаты сглаживания по 5, 9 и 13 каналам (спектры раздвинуты по вертикали), д - спектр производных, относящийся к "сглаживанию" по 9 каналам. Как в сглаженном спектре, так и в спектре производных хорошо видна линия, соответствующая нейтронам с малой потерей энергии при рассеянии. В спектрах а, б и с отчетливо выделяется также группа нейтронов, передавших при рассеянии ядру-мишени энергию около 2,6 МэВ. Аналогичная картина наблюдалась при рассеянии нейтронов 13,7 и 14,0 МэВ на разделенных изотопах  $\text{Pb}^{206,207,208}$  /7/. Этот результат интерпретировался как возбуждение известного состояния  $3^-$  в четных изотопах свинца или группы близких коллективизированных уровней в  $\text{Pb}^{207}$  в результате прямого неупругого рассеяния. Кроме того имеются данные /8/, указывающие на слабое возбуждение при неупругом рассеянии нуклонов низколежащих уровней в ядрах  $\text{Pb}^{206}$  и  $\text{Pb}^{207}$ , т.е. тех уровней, которые при нашем разрешении способны дать вклад в группу упруго рассеянных нейтронов. Поэтому мы предполагаем, что четко выделяющаяся в спектре рассеянных нейтронов линия (д на рис. 2) в основном, определяет сечение упругого рассеяния.

Нами был измерен относительный ход энергетической зависимости сечения упругого рассеяния нейтронов на угли  $66^0$  и  $70^0$  для естественной смеси изотопов, содержащей  $\text{Pb}^{208}$  в количестве 52%. На рис. 3 приведены экспериментальные данные, полученные в интервале энергий нейтронов 13,7 - 15,0 МэВ. Пунктирные линии на рисун-



Р и с. 2. Экспериментальный спектр рассеянных нейтронов и результат его "сглаживания" по 5 (а) и 9 (б) и 13 (в) каналам. д — спектр экспериментальных производных

ке проведены по методу  $\min \chi^2$ . Величины  $\chi^2$  составляют 2,59 для  $\vartheta = 65^\circ$  и 1,56 для  $\vartheta = 70^\circ$ , соответственно. Сплошные линии - предсказания оптической модели на основании проведенных расчетов.



Р и с. 3. Энергетический ход дифференциального сечения упругого рассеяния нейтронов на Рв. Расчеты по оптической модели: 1 - результаты данной работы, 2 - результаты работы /10/, и 3 - обработка экспериментальных данных по  $\min \chi^2$

На том же рис. 3 показаны результаты расчетов по оптической модели, проведенных в работе /9/. Оба расчета в соответствии с экспериментальными условиями усреднены по углам, в нашем случае  $\pm 10^\circ$ , соответственно энергетическому разрешению.

Так как подобного рода измерения связаны с необходимостью вычитания значительного вклада фоновых нейтронов, обработкой интегрального спектра протонов отдачи, измеренного с не слишком хорошей статистикой, и введением ряда экспериментальных поправок, полезно рассмотреть источники возможных погрешностей.

Показанные на рис. 3 ошибки вычислены из среднеквадратичного разброса отдельных серий измерений. Они примерно втрое превышают среднеквадратичную ошибку, определенную из полного числа зарегистрированных отсчетов. Таким образом, сравнительно надежно оценивается погрешность, связанная с нестабильностью работы аппаратуры. В то же время величины  $\chi^2$ , полученные для двух приведенных на рис. 3 кривых, заметно различны. В первом случае, для  $\vartheta = 65^\circ$ , поток нейтронов мониторировался сцинтилляционным монитором, расположенным при фиксированном угле вылета нейтрона из мишени. Во втором — мерой потока нейтронов служил счет в жесткой части фонового спектра. В целом для измерений при  $\vartheta = 70^\circ$  разброс точек меньше. В подобных измерениях, когда мишень достаточно толстая, а энергия нейтронов определяется углом вылета, существенна поправка на рассеяние нейтронов в мишени и в мишенном устройстве. Наибольшей величины она достигает для вылета нейтронов в направлении плоскости мишени и составляет для этого случая величину 16%.

Результаты измерений упругого рассеяния нейтронов на ядрах свинца на углы  $65^\circ$  и  $70^\circ$  показывают плавный ход сечения упругого рассеяния в исследованном интервале энергий. Этот вывод находится в согласии с результатами проведенных нами измерений полных сечений взаимодействия нейтронов с изотопами свинца /10/. Расхождение полученных экспериментальных данных с предсказаниями оптической модели, не выходящее, впрочем, существенно за пределы точности измерений (линия I на рис. 3), вероятно, легко может быть уменьшено при небольшой вариации оптических параметров. Это вполне может быть объяснено тем, что в ранее проведенных расчетах, на основании которых получены показанные на рис. 3 кривые, не учитывалась зависимость параметров оптической модели от энергии.

Институт ядерных исследований

АН СССР

Поступила в редакцию  
17 мая 1978 г.

## Л и т е р а т у р а

1. А. В. Клячко, В. И. Назарук, "Алгоритмы и программы", ВНИИ-центр, № 2, 40, ПООИ215 (1976).
2. Б. А. Бенецкий, А. В. Клячко, Краткие сообщения по физике ФИАН № 10, 20 (1974); № 4, 9 (1974).
3. Б. А. Бенецкий, В. В. Нефедов, И. В. Штраших, И. М. Франк, Краткие сообщения по физике ФИАН № 3, 75 (1972).
4. Б. А. Бенецкий, В. В. Нефедов, И. В. Штраших, И. М. Франк, Краткие сообщения по физике ФИАН № 12, 82 (1970).
5. Б. А. Бенецкий, В. В. Нефедов, И. В. Штраших, И. М. Франк, Ядерная физика, 17, 21 (1973).
6. С. А. Мячкова, В. В. Нефедов, И. В. Штраших, Труды ФИАН, 53, 107 (1972).
7. Г. Е. Беловицкий, Л. Н. Колесникова, И. М. Франк, Тезисы докладов на XIII Советании по ядерной спектроскопии и структуре ядра, Киев, 1972 г., стр. 13-14; Ядерная физика, 15, 622, 666 (1972).
8. В. Л. Cohen, A. G. Rubin, Phys. Rev., 111, 1568 (1958).
9. Г. Е. Беловицкий, Л. Н. Колесникова, Л. В. Сухов, И. М. Франк, Краткие сообщения по физике ФИАН № 11, 69 (1970).
10. Б. А. Бенецкий, А. В. Клячко, В. В. Нефедов, И. М. Франк, И. В. Штраших, "Нейтронная физика", ч. 2, М., 1977 г., стр. 44 и 47.