

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗУЗg

A-918

5252/2-76

31-772

P15 - 10076

Ф.Асфур, М.И.Кривопустов, И.А.Ломаченков,
З.Салех, И.В.Сизов

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ
ИОНОВ ${}^3\text{He}$ НА ЯДРАХ ${}^9\text{Be}$

1976

P15 - 10076

Ф.Асфур, М.И.Кривоустов, И.А.Ломаченков,
З.Салех, И.В.Сизов

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ
ИОНОВ ${}^3\text{He}$ НА ЯДРАХ ${}^9\text{Be}$

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени выполнено большое число экспериментов по упругому рассеянию ядерных частиц с теоретическим анализом данных по оптической модели. Ядерная оптическая модель в основном правильно описывает рассеяние ядрами не только нуклонов, но и сложных частиц, включая тяжелые ионы. Такое описание возможно в широком энергетическом интервале от 1 до 50-70 МэВ^{/1/}.

Исследованию упругого рассеяния ионов гелия-3 на легких ядрах ($A < 16$) посвящено сравнительно мало работ, и данных для систематики оптических параметров, описывающих экспериментальные результаты, сейчас недостаточно. В значительной мере это обусловлено тем, что применение оптической модели к анализу упругого рассеяния ионов ^3He на легких ядрах менее разработано, чем, например, для рассеяния нуклонов на средних и тяжелых ядрах. Существенной причиной этого затруднения является малое число нуклонов в ядрах мишени и сложная (составная) структура гелия-3^{/2/}. Систематическое экспериментальное исследование обсуждаемой задачи и накопление сведений о потенциале оптической модели важно как для описания процесса упругого рассеяния, так и для применения метода искаженных волн в борновском приближении при анализе ядерных реакций, вызванных ионами ^3He .

Экспериментальные данные о функциях возбуждения и угловых распределениях гелия-3, упруго рассеянного на ядрах бериллия-9, которые измерены в энергетических интервалах 1,6+2,4 МэВ^{/3/} и 4+18 МэВ^{/4,5/}, были приемле-

мо описаны по оптической модели с учетом (и без учета) спин-орбитального взаимодействия. В угловых распределениях при энергиях больше 4 МэВ наблюдаются признаки дифракционной картины, усиливающиеся с увеличением энергии. В энергетической области от 2,4 до 4 МэВ нет никакой информации об упругом рассеянии ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^9\text{Be}$.

Настоящая работа выполнена с целью восполнения этого пробела и получения экспериментальных данных в интервале энергий от 2 до 4 МэВ, их описания в рамках оптической модели, а также систематизации данных о параметрах оптического потенциала.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Исследование реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^3\text{He}){}^9\text{Be}$ в области энергий от 2 до 4 МэВ выполнено на электростатическом генераторе ЭГ-5 Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (Дубна). Пучок ионов гелия-3 после выхода из ускорительной трубки, прохождения магнитного анализатора, системы фокусирующих линз и отклоняющего магнита направлялся в камеру рассеяния. Калибровка энергетической шкалы ускорителя осуществлялась по резонансам реакции ${}^{27}\text{Al}(p, \gamma){}^{28}\text{Si}$. Точность калибровки была лучше 0,1%.

Многодетекторная камера рассеяния для исследования ядерных реакций и методика приготовления мишеней подробно описаны в работах (см. /6а, б/). Для измерений сечений использовались самоподдерживающиеся бериллиевые мишени. Спектры заряженных частиц регистрировались с помощью четырех кремниевых полупроводниковых детекторов, смонтированных на двух подвижных кронштейнах. Импульсы от детекторов попадают в предварительный и основной усилители и далее передаются в измерительно-вычислительный комплекс лаборатории. Для выполнения данного эксперимента использовались многоканальный амплитудный анализатор импульсов АИ-4096 (8 групп по 512 каналов), графикопостроитель, цифровая печать и ЭВМ БЭСМ-4 с осциллографом и световым карандашом.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящей работе исследовались функции возбуждения и угловые распределения гелия-3 в реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^3\text{He}){}^9\text{Be}$. Рис. 1 иллюстрирует спектры частиц из реакций гелия-3 с ядрами мишени, измеренные при энергии бомбардирующих ионов 4 МэВ и углах рассеяния 50° и 130° . В подавляющем большинстве спектров удавалось провести надежное выделение пика упругого рассеяния гелия-3 на бериллии.

Для мониторинга на бериллиевые мишени напылялся тонкий слой серебра (~ 15 мкг/см²). Известно, что упругое рассеяние частиц малых энергий на ядрах серебра является чисто Резерфордским. С учетом этого факта надежность работы спектрометрических трактов контролировалась измерением выхода N реакции ${}^{108}\text{Ag}({}^3\text{He}, {}^3\text{He}){}^{108}\text{Ag}$ во всем интервале энергии $E_{3\text{He}}$ и углов рассеяния θ . Результаты этих контрольных проверок показывают, что величины $N \cdot E_{3\text{He}}^2 \cong \text{const}$ и $N \cdot \sin^4 \frac{\theta}{2} \cong \text{const}$. Поэтому выход упругого рассеяния ${}^3\text{He}$ на ${}^9\text{Be}$ всегда нормировался на выход упругого рассеяния ${}^3\text{He}$ на ${}^{108}\text{Ag}$. Такая нормировка исключала необходимость определения числа ионов, падающих на мишень. Для уменьшения числа просчетов анализатора измерения спектров проводились на достаточно тонких мишенях ($40\text{--}50$ мкг/см²) и при малых интенсивностях ионного пучка ($\sim 0,1$ мкА).

На рис. 2 показаны энергетические зависимости отношения сечений реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, {}^3\text{He}){}^9\text{Be}$ $(d\sigma/d\Omega)/(d\sigma/d\Omega)_R$ в диапазоне от 2 до 4 МэВ при углах $70, 80, 110$ и 140° (энергии и углы в лабораторной системе координат). Из этих зависимостей видно, что при больших углах имеет место отклонение сечения от Резерфордского.

При измерении угловых распределений выход реакции нормировался на показания мониторингового детектора, установленного под углом 90° . В энергетическом интервале $2\text{--}4$ МэВ было измерено 8 угловых зависимостей дифференциальных сечений $d\sigma/d\Omega$ в мб/ср, которые

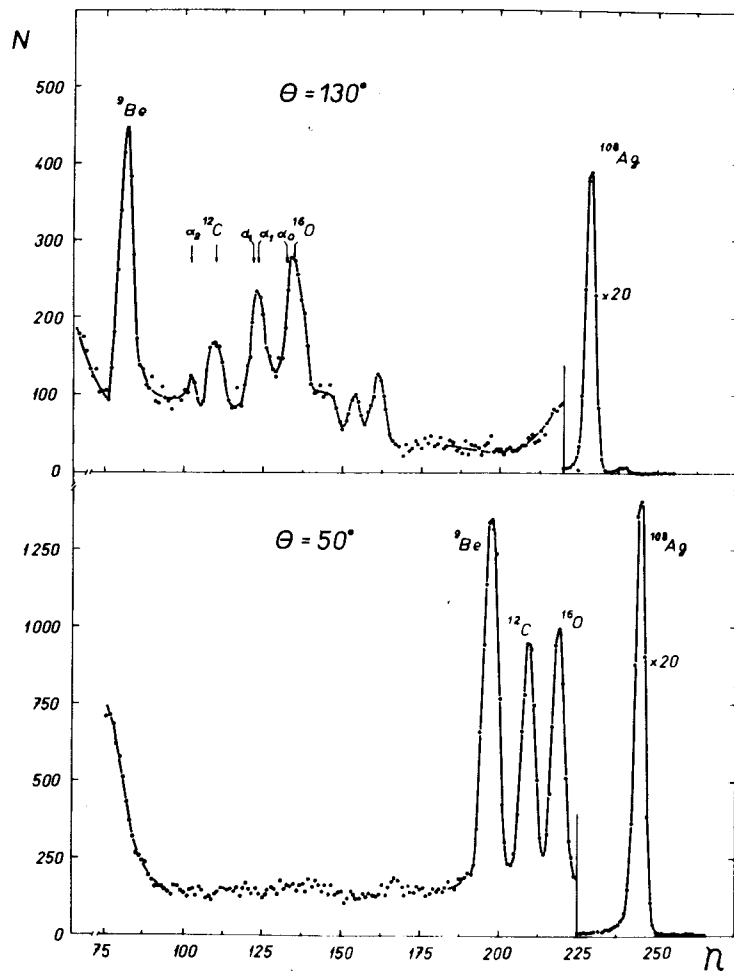


Рис. 1. Энергетические спектры частиц (d_1 , ^3He , α_0 , α_1 и α_2) из реакции гелия-3 с ядрами мишени, измеренные при энергии $E_{^3\text{He}} = 4$ МэВ и углах $\theta = 50^\circ$ и 130° (энергия и углы в лабораторной системе координат). По оси абсцисс - номер канала амплитудного анализатора, по оси ординат - число отсчетов.

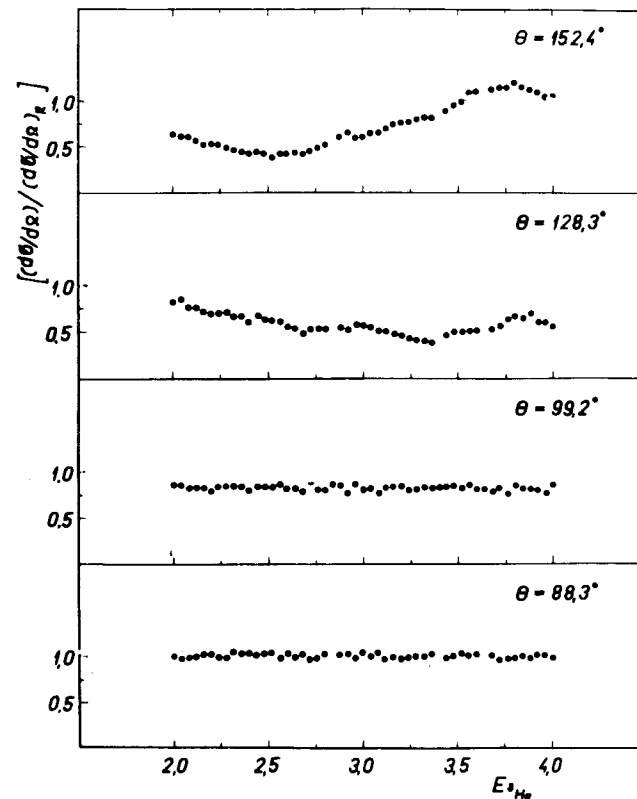


Рис. 2. Энергетические зависимости отношения экспериментальных сечений реакции $^9\text{Be}(^3\text{He}, ^3\text{He})^9\text{Be}$ к резерфордскому (энергия $E_{^3\text{He}}$ - в лабораторной системе координат, в МэВ; угол θ - в системе центра масс).

показаны на рис. 3. При углах рассеяния $\theta > 120^\circ$ с ростом энергии происходит постепенное изменение формы угловых распределений.

Относительная ошибка определения абсолютных дифференциальных сечений не превышала 15%, причем большинство экспериментальных точек на рис. 3 имеет

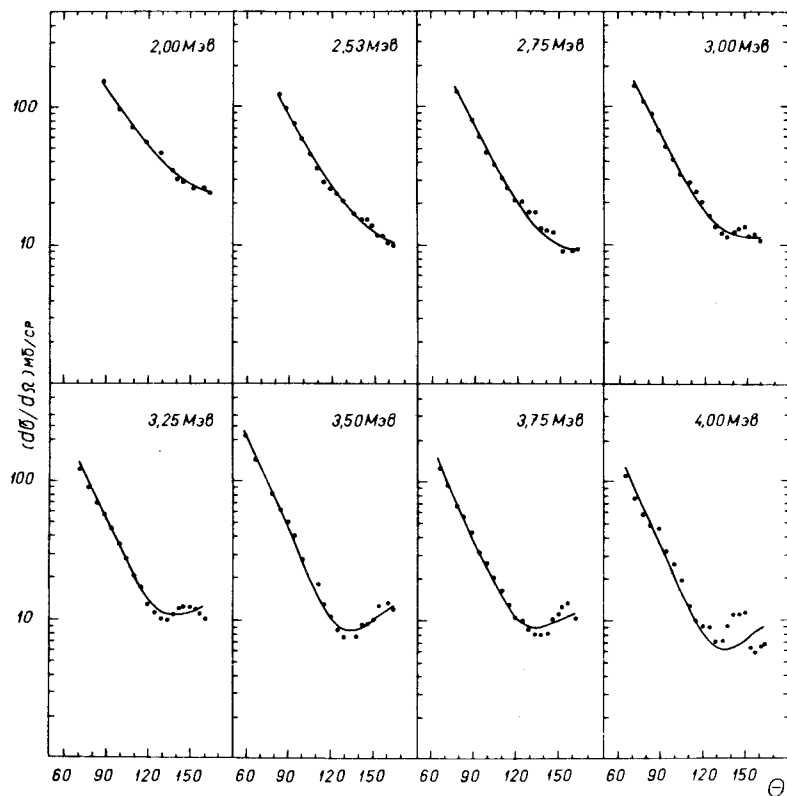


Рис. 3. Сравнение угловых распределений упруго рассеянного гелия-3 на бериллии-9, рассчитанных по оптической модели (сплошная линия), с экспериментальными (точки). Угол θ и сечение $d\sigma/d\Omega$ даны в системе центра масс.

ошибку в пределах 8–12%. Эта ошибка складывалась из статистической ошибки и ошибок выделения пика и определения толщины мишени.

Полученные в настоящей работе угловые распределения при энергиях 2,0 и 4,0 МэВ хорошо согласуются с данными работ [3,5].

4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Данные по упругому рассеянию ^3He на ядрах ^9Be были проанализированы на основе оптической модели ядра. Соответствующий потенциал имеет вид

$$V(r) = \text{Re}V_N(r) + i \text{Im}V_N(r) - V_c(r) + V_{s.o.}(r), \quad (1)$$

где реальная часть $\text{Re}V_N(r)$ ядерного потенциала имеет форму Вудса-Саксона

$$\text{Re}V_N(r) = V \cdot f_{WS}(r, R_R, a_R) = V \left[1 + \exp \frac{r - R_R}{a_R} \right]^{-1}. \quad (2)$$

Выражение для мнимой части потенциала в общем случае можно записать в виде

$$\text{Im}V_N(r) = W[(1-t)f_{WS}(r, R_I, ca_I) + tf_p(r, R_I, a_I)]. \quad (3)$$

Первый член потенциала (3) соответствует объемному поглощению Вудса-Саксона, тогда как второй член f_p имеет поверхностный характер и может быть записан либо в форме производной от реальной части

$$f_d(r) = -4a_I df_{WS}(r, R_I, a_I)/dr, \quad (4)$$

либо в гауссовой форме

$$f_g(r) = \exp - \left[(r - R_I)/a_I \right]^2. \quad (5)$$

Тот или иной вид поглощения реализуется соответствующим выбором параметра t . Предполагается, что кулоновский потенциал $V_c(r)$ имеет вид потенциала равномерно заряженной сферы радиуса $r_c = r_{0c} A^{1/3}$, где A - массовое число ядра-мишени.

Спин-орбитальная часть $V_{s.o.}(r)$ потенциала (1) записывается в форме

$$V_{s.o.}(r) = \langle \vec{\ell} \vec{s} \rangle V_{s.o.} \frac{2}{r} df_{WS}(r, R_R, a_R)/dr. \quad (6)$$

Заметим, что в формулах (2)-(6) $R_R = r_{0R} \cdot A^{1/3}$,
 $R_I = r_{0I} \cdot A^{1/3}$.

Теоретические значения угловых распределений ^3He , упруго рассеянного на ядрах ^9Be , были рассчитаны с помощью программы ELASTIC /7/ на электронно-вычислительной машине БЭСМ-6. Значения параметров определялись путем минимизации критерия χ^2 , имеющего вид

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\sigma_{\text{th}}(\theta_i) - \sigma_{\text{exp}}(\theta_i)}{\Delta\sigma_{\text{exp}}(\theta_i)} \right]^2. \quad (7)$$

Здесь N - число экспериментальных точек; $\sigma_{\text{th}}(\theta_i)$ - вычисленное значение дифференциального сечения; $\sigma_{\text{exp}}(\theta_i)$ - экспериментальное значение сечения; $\Delta\sigma_{\text{exp}}(\theta_i)$ - соответствующая экспериментальная ошибка.

При расчетах принималось, что $\Delta\sigma_{\text{exp}}(\theta_i)$ составляет 10% от $\sigma_{\text{exp}}(\theta_i)$. Процедура поиска осуществлялась с помощью подпрограммы SEARCH /7/. Значения параметров r_{0R} , r_{0I} и r_{0c} фиксировались и принимались равными, соответственно, 1,20; 1,20 и 1,40 ферми (см. работу /5/).

При каждом значении энергии был организован поиск для следующих наборов параметров:

(А) поиск оптимальных значений параметров a_R , a_I и V с объемным поглощением со спин-орбитальным взаимодействием;

(Б) поиск оптимальных значений параметров a_R , a_I и V с поверхностным поглощением в форме производной и со спин-орбитальным взаимодействием;

(В) то же без спин-орбитального взаимодействия;

(Г) поиск оптимальных значений параметров a_R , a_I , V и W с поверхностным поглощением в форме производной и со спин-орбитальным взаимодействием;

(Д) поиск оптимальных значений параметров a_R , a_I и V с поверхностным поглощением в гауссовой форме и со спин-орбитальным взаимодействием;

(Е) то же для параметров a_R , a_I , $V_{\text{s.o.}}$, V и W .

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

При проведении расчетов стартовые (начальные) значения параметров a_R , a_I и V оптического потенциала $V(r)$ для описания углового распределения при энергии гелия-3, равной 4,0 МэВ, были взяты из работы /5/. Из всех вариантов (А) - (Е) поиска наборов параметров приемлемое согласие результатов расчета и эксперимента, показанных на рис. 3, получено для потенциала с поверхностным поглощением в гауссовой форме и со спин-орбитальным взаимодействием (вариант Д). Значения наборов параметров для этого варианта и соответствующие им величины χ^2 приведены в табл. 1.

Рис. 4 иллюстрирует энергетические зависимости параметров V , a_R и a_I (линии на рисунке проведены лишь для соединения точек). Отметим, что в интервале энергий бомбардирующих ионов гелия-3 от 2,7 до 10 МэВ параметры плавно зависят от энергии. Данные работы /3/, в которой исследовались угловые распределения в области энергий от 1,6 до 2,4 МэВ, свидетельствуют о нерегулярном изменении параметров в зависимости от энергии. Наши результаты при энергиях 2,00 и 2,53 МэВ находятся в соответствии с отмеченной выше нерегулярностью в поведении параметров.

Информация о параметрах оптического потенциала, описывающего экспериментальные данные об упругом рассеянии гелия-3 на ядрах бериллия-9, может быть использована при анализе ядерных реакций по методу искаженных волн в борновском приближении, а также для выяснения общих зависимостей параметров оптического потенциала от энергии, массы ядер и т.п. и связи этих параметров с фундаментальными характеристиками ядра и ядерного взаимодействия.

Таблица I

Параметры оптического потенциала для описания угловых распределений гелия-3, упруго рассеянного на ядрах бериллия-9

E_{He}^3	V	W	$V_{\text{s.o.}}$	a_R	a_I	χ^2
2,00	178,4	14,60	5,5	0,510	0,676	0,265
2,53	171,4	14,60	5,5	0,538	1,030	0,480
2,75	188,6	14,60	5,5	0,426	0,613	0,755
3,00	191,6	14,60	5,5	0,429	0,751	0,453
3,25	192,0	14,60	5,5	0,433	0,727	0,743
3,50	188,2	14,60	5,5	0,449	0,742	0,817
3,75	192,4	14,60	5,5	0,426	0,904	0,953
4,00	184,9	14,60	5,5	0,447	0,947	5,480

Примечание: В данной таблице значения E_{He}^3 , V, W, $V_{\text{s.o.}}$ даны в МэВ, a_R и a_I — в ферми.

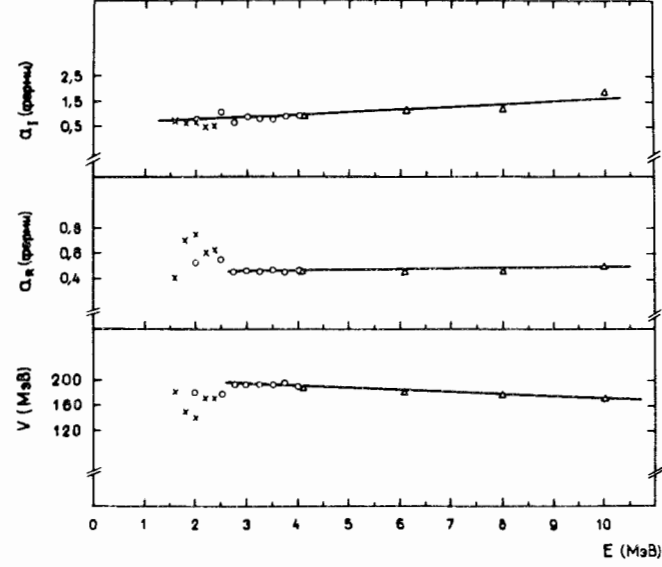


Рис. 4. Энергетическая зависимость параметров оптического потенциала, описывающего упругое рассеяние ^3He на ядрах ^9Be (x — $^{-3/}$, o — настоящая работа, Δ — $^{-5/}$).

В заключение авторы выражают благодарность И.А.Чепурченко, Г.Н.Зимину, В.А.Владимирову и операторам ускорителя и измерительно-вычислительного комплекса за помощь при проведении экспериментов и расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. П.Е.Ходгсон. Оптическая модель упругого рассеяния. М., Атомиздат, 1966.
2. С.Г.Кадменский, В.Е.Калечиц, С.И.Лопатко, В.И.Фурман, В.А.Хлебостров. ЯФ, 10, 730 (1969).

3. L. Bondouk, Z. A. Saleh, F. Machali, D. A. Darwish. Rev. Roumaine de Physique, 19, 653 (1974).
4. L. G. Earwaker. Nucl. Phys. A90, 56 (1967).
5. J. Y. Park, J. L. Duggan, P. D. Miller, M. M. Duncan, R. L. Dangle. Nucl. Phys. A134, 277 (1969).
6. а) М.И.Кривоустов, И.В.Сизов, Г.Ширмер, Г.Элер. Препринт ОИЯИ, Р15-3504, Дубна, 1967.
б) М.И.Кривоустов. Автореферат. ОИЯИ, 15-8792, Дубна, 1975.
7. W. R. Smith. Computer Physics Communications 1, 106; 135; 198 (1969).

Рукопись поступила в издательский отдел
31 августа 1976 года.