

УДК 539.17

Н. БУРТЕБАЕВ¹, С. Б., ДУБОВИЧЕНКО², А. Д. ДУЙСЕБАЕВ¹,
 В. ДЖАЗАИРОВ-КАХРАМАНОВ¹, Г. С. ЖУРЫНБАЕВА¹

ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ УПРУГОГО ⁴He⁴He РАССЕЯНИЯ

Экспериментально исследовано упругое ⁴He⁴He рассеяние при энергии 49,9 МэВ. Описана методика эксперимента и его результаты. Выполнен фазовый анализ упругого ⁴He⁴He рассеяния при энергии 49,9 МэВ и других энергиях.

Множество задач ядерной физики требует знания фаз упругого рассеяния ядерных частиц, которые могут быть определены из анализа экспериментальных данных по упругим сечениям рассеяния. Задача определения ядерных фаз из упругих сечений обычно называется фазовым анализом, и в процессе ее решения возникает немало специфических проблем. В частности, для определения фаз рассеяния приходится решать многопараметрическую вариационную задачу минимизации функционала χ^2 в поле многих параметров, число которых может достигать 10–20. В процессе такой минимизации мы можем надеяться найти несколько локальных минимумов при каждой энергии и выбрать из них тот, параметры которого, т.е. фазы рассеяния, удовлетворяют определенным физическим требованиям, а именно имеют плавное поведение в нерезонансной энергетической области и при $E=0$ начинаются с нуля или 180° , в зависимости от наличия или отсутствия связанных состояний в рассматриваемой парциальной волне. Именно этим результатам, т.е. фазовому анализу в упругом рассеянии ⁴He⁴He частиц, посвящена настоящая статья, которая начинает цикл статей по фазовому анализу упругого рассеяния частиц с разным спином.

Экспериментальное оборудование, техника и методы измерения. Для измерения угловых распределений продуктов ядерных реакций с заряженными частицами использовалась вакуумная камера, полное описание которой приведено в работе [1]. Камера оснащена спектрометрами частиц и мониторами на основе полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов, системами привода мишеней двух модификаций, набором коллиматоров и цилиндров Фарадея. Спектрометр частиц, расположенный на подвижной части камеры, может быть установлен под любым углом относительно направления пучка падающих на мишень частиц от 10 до 170° в л. с.к. с точностью $0,05^\circ$.

Для установки исследуемых ядер-мишеней в камере рассеяния использовались два варианта держателей и систем их привода. Один из них представляет собой диск, несущий восемь мишеней, последовательно устанавливаемых под пучок и фиксирующий их относительно его направления под углами 45° ; 90° и -45° . Для измерений на газовых мишенях было разработано совместное с камерой рассеяния устройство. Оно состоит из корпуса, системы вентиля для прокачки исследуемых газов и манометра. Для прохождения пучка бомбардирующих частиц сквозь газовый объем служат два окна (диаметром 12 мм) из железной фольги толщиной 7 мг/см^2 . Для выхода вторичных частиц имеется четвертькольцевое окно с лавсановой пленкой шириной 10 мм.

Предполагая, что пучок частиц бесконечно тонкий, легко показать, что видимая детектором его часть зависит от угла рассеяния θ и изменяется следующим образом:

$$t = \left(R - \frac{d_1 l}{d_1 + d_2} \right) \sin \alpha \left(\frac{1}{\sin(\theta + \alpha)} + \frac{1}{\sin(\theta - \alpha)} \right).$$

Определяемое таким образом значение расчетной толщины газового шнура занижено от реального на 3 % под углом 90° и 1–2 % под углом 170° в л.с.к.

В основу системы регистрации и идентификации продуктов реакций положен ($\Delta E-E$) метод, основанный на одновременном измерении удельных потерь энергии заряженной частицы в веществе dE/dx и ее полной кинетической энергии E . Уравнение Бете–Блоха, из которого исходит этот метод, при определенных условиях сводится к простому соотношению $(dE/dx)E \cong kMZ^2$, где k – коэффициент, величина которого не зависит от массы M и заряда частицы Z . Из этого соотношения видно, что при одновременном измерении E и dE/dx каждый сорт частиц занимает свою гиперболу в координатном пространстве $E-\Delta E$.

Все операции по установке угла спектрометра, калибровочного источника α -частиц, мишеней, контроль их положения относительно пучка, а также режима электронной аппаратуры, расположенной в экспериментальном зале циклотрона, проводятся дистанционно с пульта измерительного центра лаборатории.

Использованием данной экспериментальной установки были измерены упругое рассеяние альфа-частиц на ядрах гелия и углерода при энергии 50 МэВ на циклотроне У-150М ИЯФ НЯЦ РК для углов от 10–170° в л.с.к.

Методы расчета и результаты. Рассмотрим методы решения задачи рассеяния для простейшей системы ядерных частиц ${}^4\text{He}^4\text{He}$, которые имеют нулевой спин и в фазовом анализе нужно учитывать только четные парциальные волны. В случае упругого рассеяния нетождественных бесспиновых частиц сечения рассеяния выражаются через фазы ядерного рассеяния следующим образом [2]:

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = |f(\theta)|^2, \quad (1)$$

где амплитуда рассеяния представляется в виде суммы кулоновской и ядерной амплитуд

$$f(\theta) = f_c(\theta) + f_N(\theta) \quad (2)$$

и выражается через ядерные $\delta_L \rightarrow \text{Re}\delta_L + i\text{Im}\delta_L$ и кулоновские σ_L фазы рассеяния [2]:

$$f_c(\theta) = -\left(\frac{\eta}{2k\text{Sin}^2(\theta/2)}\right) \times \exp\{i\eta \ln[\text{Sin}^{-2}(\theta/2)] + 2i\sigma_0\}, \quad (3)$$

$$f_N(\theta) =$$

$$= \frac{1}{2ik} \sum_L (2L+1) \exp(2i\sigma_L) [S_L - 1] P_L(\cos\theta),$$

где $S_L(k) = \eta_L(k) \exp[2i\delta_L(k)]$ – матрица рассеяния, которая может быть представлена в виде

$$\frac{(S_L - 1)}{2i} = \eta_L \sin\delta_L \exp(i\delta_L),$$

а $\eta_L(k) = \exp[-2\text{Im}\delta_L(k)]$ – параметр неупругости, зависящий от мнимой части ядерной фазы, $P_L(x)$ – полиномы Лежандра

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n,$$

$x = \cos\theta$, η – кулоновский параметр, μ – приведенная масса, k – волновое число относительно движения частиц – $k^2 = 2\mu E/h^2$, E – энергия сталкивающихся частиц в центре масс.

В случае рассеяния тождественных бозонов, например при рассеянии ядер ${}^4\text{He}^4\text{He}$, формула сечения преобразуется к виду

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = |f(\theta) + f(\pi - \theta)|^2,$$

где $f(\theta)$ определено по формулам (1) и (2). Такая запись позволяет учитывать эффекты, которые дает симметризация волновых функций системы тождественных частиц. Поскольку $\cos(\pi - \theta) = -\cos\theta = -x$ и $P_L(-x) = (-1)^L P_L(x)$, то величина ядерной амплитуды просто удваивается. Суммирование в (8.3) идет только по четным L , поскольку нечетные парциальные волны не дают вклада в суммарное сечение.

Зная дифференциальные сечения, которые определяются экспериментальным путем, можно найти некоторый набор фаз, способный с той или иной точностью передать поведение этих сечений. Качество описания экспериментальных данных на основе некоторой функции (функционала нескольких переменных) можно оценить по методу χ – квадрат, который записывается в виде [2]

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\sigma_i^t(\theta) - \sigma_i^e(\theta)}{\Delta\sigma_i^e(\theta)} \right]^2, \quad (4)$$

где σ^e и σ^t – экспериментальное и теоретическое, т.е. расчетное при некоторых заданных значениях фаз δ_{sL}^j , рассеяния, сечение упругого рассеяния ядерных частиц для i -го угла рассеяния, $\Delta\sigma^e$ – ошибка экспериментальных сечений.

Чем меньше величина χ^2 , тем лучше описание экспериментальных данных на основе выбранного теоретического представления. Обычно результаты расчетов можно считать вполне удовлетворительными, если χ^2 порядка единицы, т.е. отклонение расчетных от экспериментальных величин примерно равно величине экспериментальных ошибок.

Для поиска ядерных фаз рассеяния по экспериментальным сечениям нужно выполнить процедуру минимизации функционала χ^2 как функции $2N$ переменных, каждая из которых является фазой δ_L определенной парциальной волны рассеяния и неупругостью η_L в этой волне. Отметим,

что задача поиска минимума функционала многих переменных не имеет общего решения, поэтому ищется минимум в некоторой ограниченной области значений переменных. В частности, величина η_L может принимать только значения от 0 до 1, а фазы δ_L обычно ищут в области 0–180°.

Для фазового анализа была написана компьютерная программа на языке BASIC для компи-

лятора Turbo Basic версии 1.0 фирмы Borland [3]. Программа проверялась по выполненному ранее фазовому анализу из работы [4]. Приведем здесь вариант контрольного счета, который выполнен для ${}^4\text{He}^4\text{He}$ рассеяния при энергии 29,5 МэВ. В работе [4] даны экспериментальные сечения при энергиях 18–30 МэВ и результаты фазового анализа, которые показаны в табл. 1 для $E = 29,5$ МэВ.

Таблица 1. Результаты фазового анализа из работы [4]

E, МэВ	δ_0 , град	δ_2 , град	δ_4 , град	δ_6 , град	δ_8 , град
29,5	150,88 ±0,17	86,90±0,13	121,19±0,17	2,20±0,11	0,11±0,08

В работе [4] для среднего χ^2 была получена величина 0,68, но методы ее расчета несколько отличаются от изложенных выше, поэтому значение 0,68 нельзя напрямую сравнивать с нашими результатами.

В результате наших расчетов с фазами из табл. 1 получено $\chi^2 = 1,086$ – среднее по всем точкам и $\sigma_s = 1044,66$ – полное сечение упругого рассеяния. Если учесть весовые множители из [4] и поделить среднее χ^2 на степени свободы, как это делается в работе [4], то можно получить величину 0,6, вполне согласующуюся с результатами [4].

Далее, представляется интересным выяс-

нить, насколько хорошо был выполнен фазовый анализ сечений, и можно ли получить меньший χ^2 , варьируя фазы из работы [4]. Были выполнены подробные расчеты по нашей программе сечений σ_i при 29,5 МэВ с точными значениями углов рассеяния из работы [4] и сравнением с экспериментальными данными σ_e [4], вычислением χ_i^2 на каждую точку и среднего χ^2 по всем точкам.

Для среднего χ^2 было получено 0,602, т.е. наблюдается улучшение описания экспериментальных данных в два раза при очень незначительном изменении значений самих фаз, которые показаны в табл. 2.

Таблица 2. Полученные в результате наших расчетов фазы рассеяния

E, МэВ	δ_0 , град	δ_2 , град	δ_4 , град	δ_6 , град	δ_8 , град
29,5	150,71	86,37	120,71	2,02	0,013

Теперь более подробно рассмотрим результаты фазового анализа, которые получаются из упругих сечений для ${}^4\text{He}^4\text{He}$ системы при разных энергиях. Анализ различных работ, в которых извлекаются фазы рассеяния из экспериментальных дифференциальных сечений, показывает, что при энергии 37–47 МэВ фазовый анализ вообще не проводился. Эта область энергий была рассмотрена в работе [5], где выполнен поиск оптического потенциала для этой области энергий, а затем из него были получены фазы рассеяния. Следует отметить, что оптическая подгонка параметров таких потенциалов была выполнена сравнительно плохо, а в качестве фаз рассеяния определялась только их действительная часть. Поэтому представляется интересным выполнить точный и максимально полный фазовый анализ

экспериментальных сечений в этой области энергий, но вначале мы остановимся на более низких энергиях и сравним наши результаты по фазовому анализу с данными, полученными ранее.

Энергия 31,8 МэВ была рассмотрена в работе [6], где на рисунках приведены фазы рассеяния (сечения приведены в табл.). Используя эти фазы рассеяния в качестве начальных фаз, т.е. входных параметров, выполним варьирование по нашей программе с 10 итерациями. В результате получим $\chi^2=2,0$, а для фаз рассеяния найдены следующие величины $\delta_{re} = 143,78; 78,43; 125,73; 0,0002; 0,0002$, а качество описания дифференциальных сечений показано на рис. 1.

Энергия 34,2 МэВ также была рассмотрена в работе [6], где на рисунках приведены фазы рассеяния $145 \pm 5^\circ, 65 \pm 5^\circ, 145 \pm 10^\circ, 5 \pm 2^\circ$. С этими

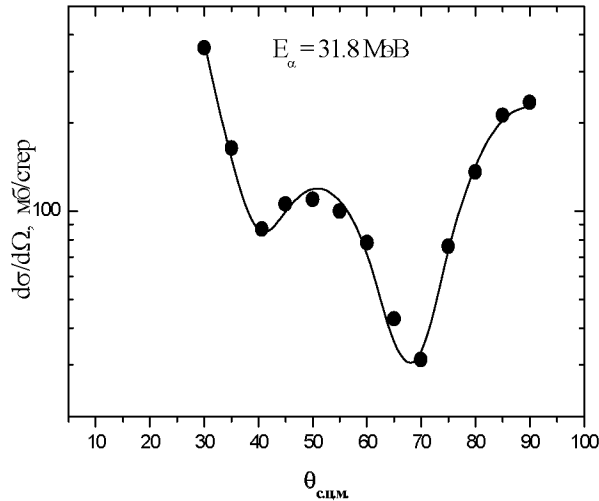


Рис. 1. Дифференциальные сечения упругого рассеяния альфа-частиц на ядре гелия при энергии 31,8 МэВ [6]. Точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет сечений с найденными фазами

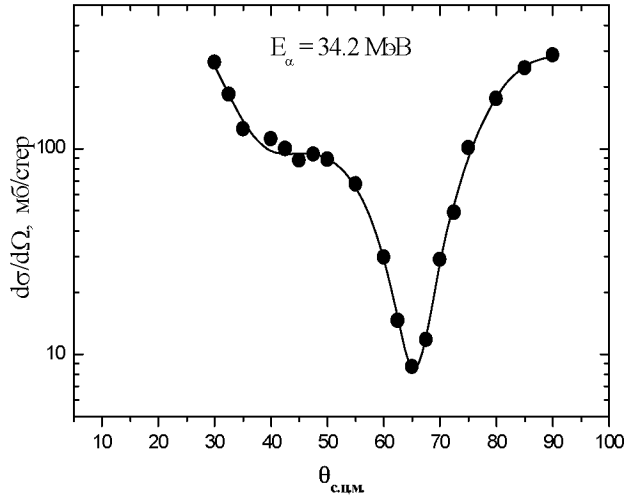


Рис. 2. Дифференциальные сечения упругого рассеяния альфа-частиц на ядре гелия при энергии 34,2 МэВ [6]. Точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет сечений с найденными фазами

фазами по нашей программе можно получить $\chi^2=6,4$. Выполняя далее варьирование с 10 итерациями и включая восьмую парциальную волну, получаем заметное улучшение описания экспериментальных данных $\chi^2 = 0,970$.

Для фаз рассеяния были получены следующие величины $\delta_{Re} = 145,35; 69,41; 143,86; 4,41; 0,76$, а качество описания экспериментальных дифференциальных сечений показано на рис. 2.

В этой же работе [6] была рассмотрена и энергия 38,4 МэВ, где на рисунках приведены следующие фазы рассеяния: $135 \pm 5^\circ, 75 \pm 5^\circ, 170 \pm 10^\circ, 5 \pm 2^\circ$. С такими значениями фаз по нашей программе без варьирования их значений получается $\chi^2 = 19,518$, что следует, по-видимому, считать сравнительно плохим результатом.

Варьируя теперь эти значения фаз с 10 итерациями, получаем существенное улучшение описания эксперимента при восьми парциальных волнах и $\chi^2 = 1,425$. Для фаз рассеяния были получены следующие значения $\delta_{Re} = 137,01; 89,16; 175,00; 5,96; 0,0002$, а качество описания дифференциальных сечений, полученных в результате расчетов, показано на рис. 3.

Далее, в работе [7] была рассмотрена энергия 41,9 МэВ. Измеренные сечения приведены в табл., а фазы извлекались только для энергии 40,77 МэВ [5] из оптических потенциалов. В результате для фаз рассеяния были получены 94,4; 21,8; 86,0; 5,4; $0,38^\circ$. С такими фазами рассеяния при энергии 41,9 МэВ по нашей программе

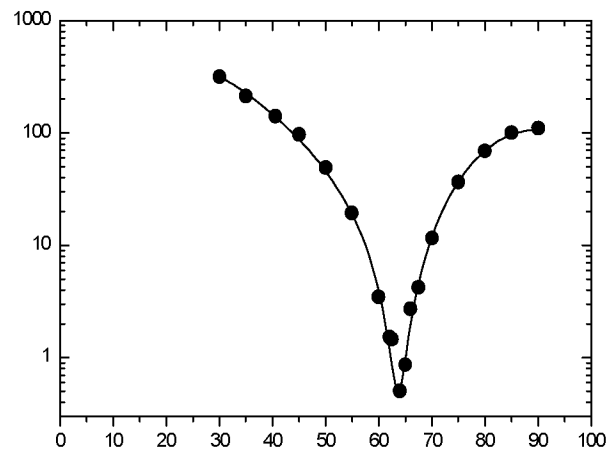


Рис. 3. Дифференциальные сечения упругого рассеяния альфа-частиц на ядре гелия при энергии 38,4 МэВ [6]. Точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет сечений с найденными фазами

можно получить только очень большое значение $\chi^2 = 1300,2$.

Видно, что полученные в [5] фазы плохо описывают экспериментальные сечения упругого рассеяния, что и наблюдается на рисунках, приведенных в этой статье. Уточнение параметров по нашей программе с 10 итерациями приводит к следующему результату для фаз рассеяния, которые уже имеют мнимую часть $\delta_{Re} = 108,91; 56,36; 110,12; 12,53; 2,44$ и $\delta_{Im} = 22,7406; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0$. Величина $\chi^2 = 10,3$, а качество описания экспериментальных сечений показано на рис. 4.

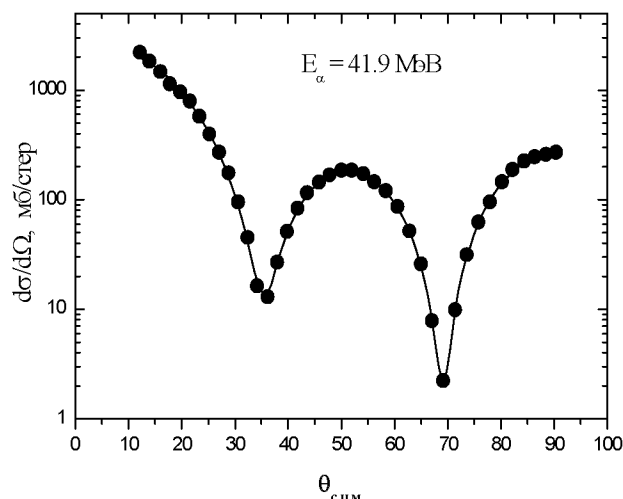


Рис. 4. Дифференциальные сечения упругого рассеяния альфа-частиц на ядре гелия при энергии 41,9 МэВ [7]. Точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет сечений с найденными фазами

В работе [7] приведены данные по дифференциальным сечениям для энергии 47,1 МэВ. Измеренные сечения даны в таблицах, а извлечение фаз [5] приводит к следующим действительным фазам рассеяния: 99; 51,8; 145,5; 18,7; 2,8°. Наши вычисления с такими фазами дают результат для $\chi^2 = 156$.

Видно, что согласие с экспериментом достаточно плохое, потому что при такой энергии, как и в предыдущем случае, уже возможны неупругие каналы, а мнимая часть фаз в работе [5] не приводится.

Используем методику варьирования фаз по нашей программе с включением их дополнительной мнимой части и 10 итерациями. Поскольку фазы при такой энергии становятся комплексными, то появляется сечение неупругих процессов или реакций σ_r и учет мнимой части фаз позволяет улучшить согласие с экспериментом почти на полтора порядка, получив $\chi^2 = 2,63$, а описание экспериментальных сечений показано на рис. 5. Для фаз рассеяния при такой энергии получены следующие значения $\delta_{re} = 105,34; 55,05; 140,60; 18,85; 2,84$ и $\delta_{im} = 5,48; 0,52; 0,78; 0,85; 0,03$.

Рассмотрим теперь энергию 51,1 МэВ. Сечения были измерены в работе [8], а фазовый анализ вообще не проводился. Поэтому используем в качестве начальных фаз результаты работы [9] при 53,4 МэВ, где для реальной части фаз получено $\delta_0 = 104,8 \pm 2,4^\circ$, $\delta_2 = 47,9 \pm 1,7^\circ$, $\delta_4 = 137,9 \pm 1,3^\circ$, $\delta_6 = 27,5 \pm 0,6^\circ$, $\delta_8 = 2,0 \pm 0,5^\circ$. Для мнимой части

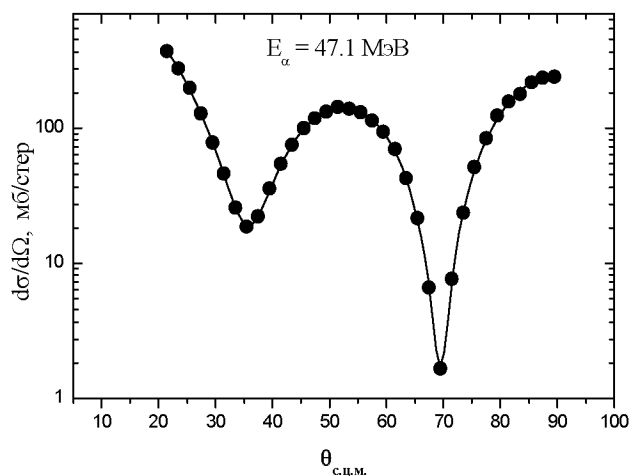


Рис. 5. Дифференциальные сечения упругого рассеяния альфа-частиц на ядре гелия при энергии 47,1 МэВ. Кружки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет сечений с найденными фазами

найдено $12,1 \pm 3,1^\circ$, $22,1 \pm 1,7^\circ$, $16,3 \pm 1,1^\circ$, $3,2 \pm 0,5^\circ$, $0 \pm 0,4^\circ$.

Выполняя по нашей программе варьирование начальных фаз с десятью итерациями и $L = 10$, получаем $\chi^2 = 1,12$. Фазы рассеяния даны в сводной табл. 3, а результаты расчета сечений показаны на рис. 6. В качестве экспериментальных ошибок использовались ошибки определения сечений из рисунка, которые составляют примерно 5–10%.

И в заключение проведем фазовый анализ экспериментальных данных при энергии 49,9 МэВ [10, 11], принимая в качестве начальных фаз

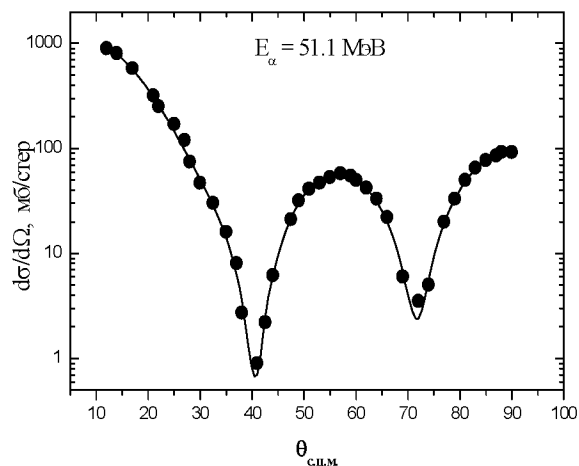


Рис. 6. Сечения упругого ${}^4\text{He}^4\text{He}$ рассеяния при энергии 51,1 МэВ. Кружки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет сечений с найденными фазами

Рис. 7. Сечения упругого ${}^4\text{He}^4\text{He}$ рассеяния при энергии 49,9 МэВ.
Кружки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет сечений с найденными фазами

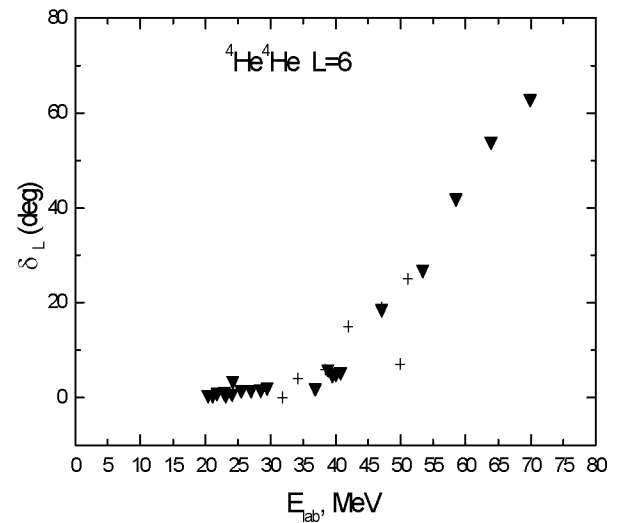
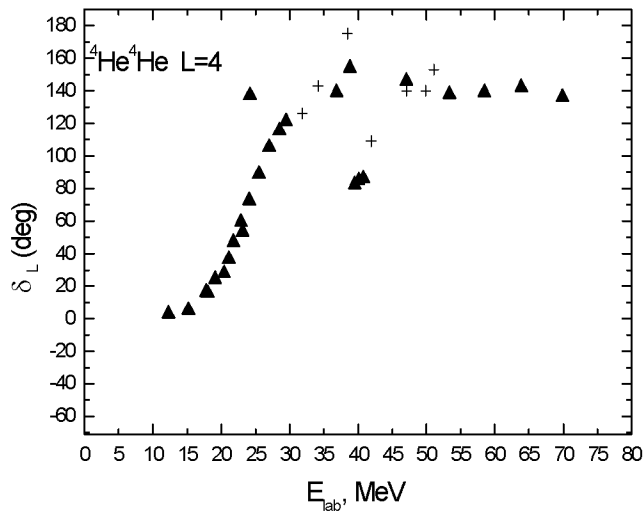
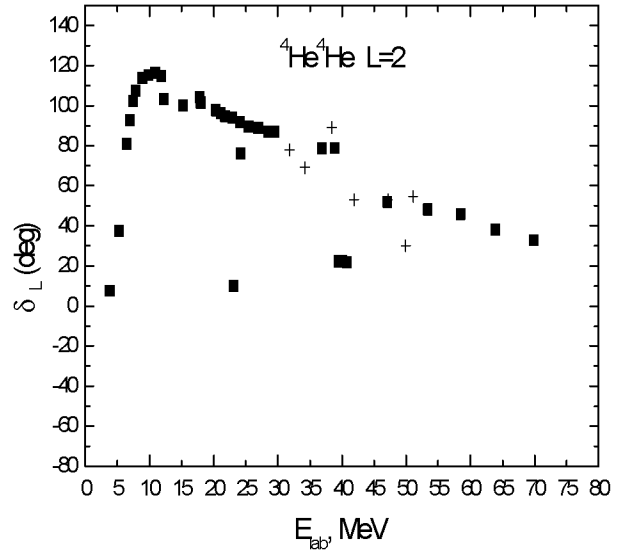
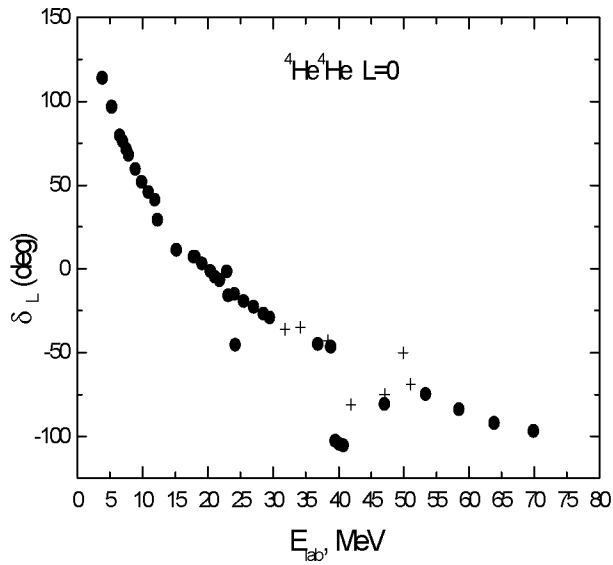
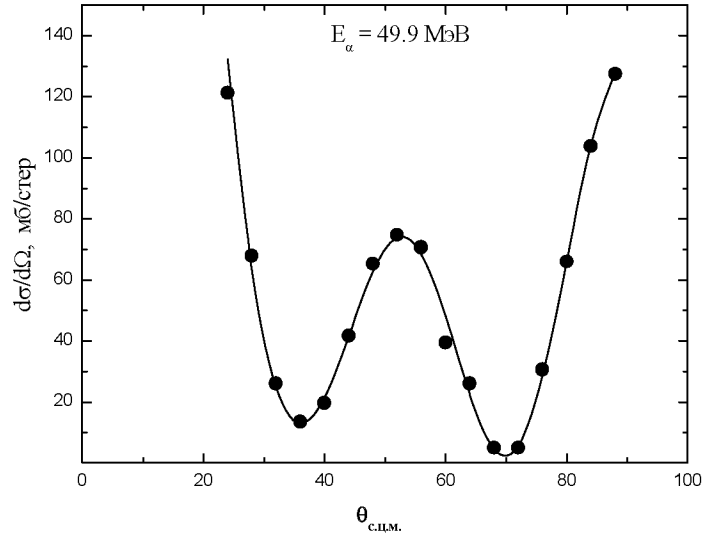


Рис. 8. Фазы упругого ${}^4\text{He}^4\text{He}$ рассеяния

результаты предыдущего анализа. Результаты расчетов по нашей программе с 10 итерациями и $L=20$ показаны на рис. 7, а для χ^2 получено 20,9. Для фаз рассеяния найдено

$$\delta_{Re} = \begin{matrix} 129,9977 & 27,8589 & 139,1172 & 7,3834 \\ 0,0000 & 0,9054 & 3,0910 & 1,0595 & 4,7206 \\ 2,6720 & 0,0000 \end{matrix}$$

$$\delta_{Im} = \begin{matrix} 22,5036 & 21,6487 & 5,6705 & 0,0105 & 4,3876 \\ 6,1065 & 4,6878 & 0,0000 & 1,5585 & 1,1667 \\ 0,2852 \end{matrix}$$

Величина χ^2 сравнительно велика из-за мало-

сти экспериментальных ошибок определения самих дифференциальных сечений, но в целом удается хорошо описать имеющиеся экспериментальные данные.

Приведем теперь сводную табл. 3 для фаз рассеяния, полученных в наших расчетах при рассмотренных здесь энергиях. На рис. 8 приведено сравнение полученных нами фаз (крестики) в тех областях энергий, где отсутствовал фазовый анализ с имеющимися результатами фазовых анализов при других энергиях (кружки, квадраты и треугольники).

Таблица 3. Сводная таблица фаз рассеяния

E, МэВ		δ_0	δ_2	δ_4	δ_6	δ_8	χ^2
29,5	Re δ_L	150,7	86,4	120,7	2,0	0,01	0,2
31,8	Re δ_L	143,8	78,4	125,7	0,0	0,0	2,0
34,2	Re δ_L	145,3	69,4	143,9	4,4	0,8	1,0
38,4	Re δ_L	137,0	89,2	174,9	5,9	0,0	1,4
41,9	Re δ_L	108,9	56,4	110,1	12,5	2,4	10,3
	Im δ_L	22,7	0	0	0	0	
47,1	Re δ_L	105,3	55,1	140,6	18,8	2,8	2,6
	Im δ_L	5,5	0,5	0,78	0,85	0,03	
49,9	Re δ_L	130,0	27,8	139,1	7,4	0,0	20,9
	Im δ_L	22,5	21,6	5,7	0,0	4,4	
51,1	Re δ_L	111,3	54,8	152,8	25,0	3,3	1,12
	Im δ_L	14,0	20,0	23,4	1,9	0,3	

В качестве сравнения приведем теперь результаты подгонки теоретического сечения рассеяния к экспериментальному, полученные путем варьирования параметров опти-

ческого потенциала. На рис. 9, 10 приведены результаты подгонки для реакции ${}^4\text{He}^{12}\text{C}$ и ${}^4\text{He}^4\text{He}$ при энергии налетающей частицы 50,5 МэВ.

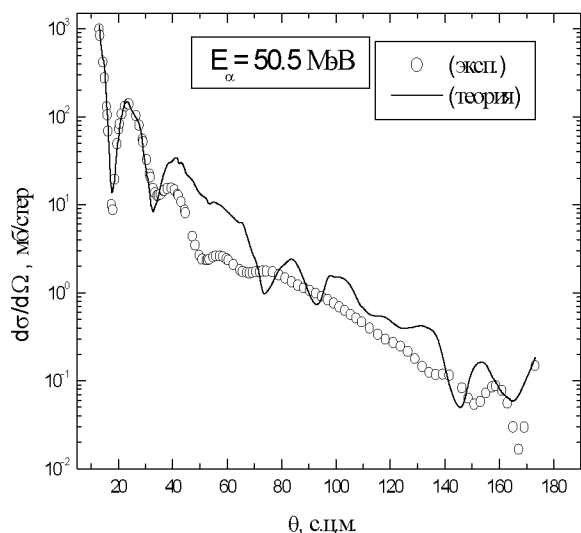


Рис. 9. Дифференциальные сечения упругого рассеяния альфа-частиц на ядре углерода при энергии 50,5 МэВ. Кружки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет по оптической модели

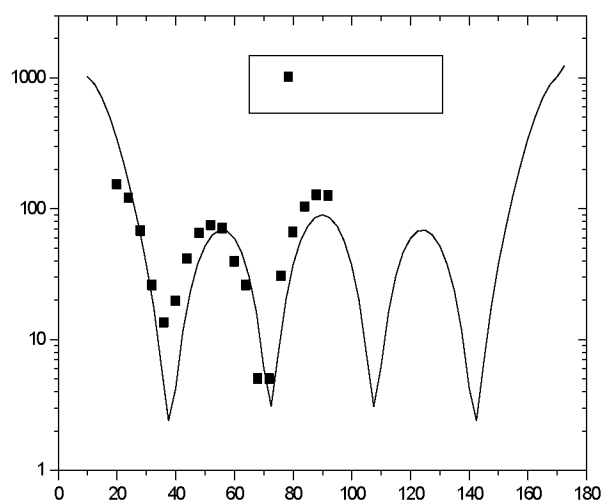


Рис. 10. Дифференциальные сечения упругого рассеяния альфа-частиц на ядре гелия при энергии 49,9 МэВ. Квадраты – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет по оптической модели

Таблица 4. Параметры оптических потенциалов

${}^4\text{He}$ E, МэВ	Мишень	V_{R^2} MeV	r_{V^2} ферми	a_{V^2} ферми	W_{R^2} MeV	r_{R^2} ферми	a_{R^2} ферми
50,5	${}^{12}\text{C}$	104,4	2,85	0,797	23,2	3,594	0,646
49,9	${}^4\text{He}$	111,12	1,152	0,745	11,24	1,291	0,56

В табл. 4 приведены параметры оптического потенциала для упругого рассеяния α -частиц на ядрах ${}^4\text{He}$ и ${}^{12}\text{C}$ при энергии налетающей частицы 49,9 и 50,5 МэВ соответственно.

Из этих результатов видно, что предложенная компьютерная программа позволяет вполне успешно выполнять минимизацию функционала χ^2 в поле многих вариационных параметров (действительных и комплексных фаз рассеяния) при всех рассмотренных энергиях сталкивающихся ядерных частиц. При некоторых энергиях выполнено уточнение известных значений ядерных фаз ${}^4\text{He}^4\text{He}$ рассеяния [12]. Фазовый анализ при энергиях 41,9; 49,9 и 51,1 МэВ приводит нас к вполне разумным результатам и в целом согласуется с данными других работ. Сравнение результатов вычислений для фазового анализа и вариаций с параметрами оптического потенциала показывает, что оба метода хорошо описывают упругое рассеяние на легких ядрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дуйсебаев А.Д., Иванов Г.Н., Рыбин С.Н. и др. Камера рассеяния для исследования продуктов ядерных реакций на пучке циклотрона // Изв. АН КазССР. Сер. физ.-мат. 1983. №2. С. 80-81.
2. Ходгсон П.Е. Оптическая модель упругого рассеяния. М.: Атомиздат, 1966. 230 с.
3. Дубовиченко С.Б. Компьютерная программа для фазового анализа упругого ${}^4\text{He}$ рассеяния. // Труды конференции «Современные проблемы и задачи информатизации в Казахстане». Алматы, 2004. С. 327-351.
4. Chien W., Brown R. // Phys. Rev. 1975. V. C10. P. 1767.
5. Igo G. Optical model analysis of the scattering of alpha particles from helium // Phys. Rev. 1960. V. 117. P. 1079-1085.

6. Bredin D.J. et al. The scattering of alpha particles by helium // Proc. Roy. Soc. 1959. V. A251. P. 144-155.

7. Conzett H. et al. Alpha-alpha scattering in the 36.8 to 47.3 MeV // Phys. Rev. 1950. V. 117. P. 1075-1079.

8. Van Niftrik G.J.C. et al. // Compt. Congr. Int. Phys. Nuc. Paris, 1964. V. 2. P. 858.

9. Darriculat P. et al. Elastic scattering of ${}^4\text{He}^4\text{He}$ between 53 and 120 MeV // Phys. Rev. 1965. V. 137. P. B315-325.

10. Буртебаев Н.Т., Дуйсебаев А.Д. и др. Сечения упругого альфа-альфа рассеяния при 49.9 МэВ // Тезисы докл. XXX совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л., 1980. С. 393.

114. Буртебаев Н., Дуйсебаев А.Д., Иванов Г.Н., Канашевич В.И. и др. // Препринт ИЯФ. №88 – 01. Алма-Ата, 1988. 54 с.

152. Дубовиченко С.Б. Программа поиска ядерных фаз упругого рассеяния бесспиновых частиц // Труды КАУ. Алматы, 2004. №5. С. 101-109.

Резюме

49,9 МэВ энергиясы бар а-бөлшектердің ${}^4\text{He}$ ядросынан серпімді шашырауы эксперименталды түрде зерттелді. Эксперименттің әдістемесі және оның нәтижелері қарастырылады. 49,9 МэВ және басқа да энергиялардағы ${}^4\text{He}^4\text{He}$ серпімді шашырауы үшін фазалық анализ орындалды.

Summary

The experimental investigation for ${}^4\text{He}^4\text{He}$ elastic scattering at energy 49.9 MeV has been carried out. The experimental technique and results were listed. The phase analysis of ${}^4\text{He}^4\text{He}$ elastic scattering at 49.9 MeV and other energies has been performed.

¹Институт ядерной физики
НЯЦ РК, г. Алматы;

²Казахская академия труда
и социальных отношений,
г. Алматы

Поступила 12.11.06г.