

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 2, Number 306 (2016), 55–60

INVESTIGATION OF ELASTIC SCATTERING OF ^3He IONS FROM ^{13}C NUCLEI AT 50 AND 60 MeV IN OPTICAL AND FOLDING MODELS

N. Burtebayev¹, Zh.K. Kerimkulov¹, A.S. Demyanova²,
A.N. Danilov², D.M. Janseitov³, T.K. Zholdybayev¹, D.K. Alimov⁴

¹Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan,

²NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia,

³ENU, Astana, Kazakhstan,

⁴KazNU, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: janseit.daniar@gmail.com

Key words: elastic scattering, optic model, folding potential, normalization coefficients, FRESCO.

Abstract. Processes of elastic scattering of ^3He ions from ^{13}C nuclei at energies 50 and 60 MeV were studied in this paper. The differential cross sections were measured at laboratory system in the range 10^0 - 170^0 . Analysis of elastic scattering was made within optical model. Both microscopic double folding potentials and phenomenological potentials were used for real part of complex nuclear potential. Imaginary part had the shape of phenomenological surface Woods-Saxon potential. The calculated theoretical cross sections are in good agreement with experimental data.

УДК 539.171

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ИОНОВ ${}^3\text{He}$ НА ЯДРАХ ${}^{13}\text{C}$ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 50 И 60 МэВ В РАМКАХ ОПТИЧЕСКОГО И ФОЛДИНГ МОДЕЛЕЙ

Н. Буртебаев¹, Ж.К. Керимкулов¹, А.С. Демьянова²,
А.Н. Данилов², Д.М. Джансейтов³, Т.К. Жолдыбаев¹, Д.К. Алимов⁴

¹Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

²НИЦ Курчатовский Институт, Москва, Россия

³ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

⁴КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: упругое рассеяние, оптическая модель, фолдинг потенциал, нормировочные коэффициенты, FRESKO.

Аннотация. В данной работе исследованы процессы упругого рассеяния ионов ${}^3\text{He}$ при энергиях 50 и 60 МэВ. Дифференциальные сечения измерены в диапазоне углов 10^0 - 170^0 в лабораторной системе координат. Анализ упругого рассеяния был проведен в рамках оптической модели. В расчетах для действительной части комплексного ядерного потенциала были использованы как микроскопические потенциалы двойной свертки, так и феноменологические потенциалы. Мнимая часть имела форму феноменологического поверхностного Вудс-Саксонского потенциала. Теоретически рассчитанные сечения хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Введение. Рассеяние нуклонов и сложных ядерных частиц (дейтроны, α -частицы, тяжелые ионы) на ядрах является важным источником информации о ядерной структуре [1]. Но параметры оптического потенциала (ОП) взаимодействия частиц с легкими ядрами при низких и средних энергиях, извлекаемые из анализа дифференциальных сечений упругого рассеяния в рамках оптической модели (ОМ), подвержены неоднозначностям и требуют надежных оценок.

С целью получения достоверной информации о потенциале ядерного взаимодействия, полученные на циклотроне ИЯФ РК экспериментальные данные [2] по рассеянию ионов ${}^3\text{He}$ с энергией 50,5 и 60 МэВ на ядрах ${}^{13}\text{C}$ анализируются как в рамках стандартной оптической модели с заданием потенциала в параметризованной форме и нахождением его параметров из сравнения теоретических сечений с экспериментальными, так и в рамках микроскопической модели, в которой потенциалы строятся на основе эффективных нуклон-нуклонных сил [3].

В данной работе проводится сопоставительный анализ упругого рассеяния ионов ${}^3\text{He}$ с ядрами ${}^{13}\text{C}$ в рамках оптической и фолдинг модели.

Методика и результаты эксперимента. Экспериментальные угловые распределения упругого рассеяния ионов ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^{13}\text{C}$ измерены на выведенных пучках изохронного циклотрона У-150М Института ядерной физики (г. Алматы, Казахстан) при энергиях $E_h = 50$ и 60 МэВ [2].

В эксперименте использовалась самонесущая мишень углеродной пленки толщиной $1,2 \text{ мг/см}^2$ обогащенного изотопом ${}^{13}\text{C}$ до 86%. Регистрация и идентификация рассеянных продуктов реакции регистрировались ΔE - E телескопом кремниевых полупроводниковых детекторов, чьи толщины для ΔE телескопа 100 мкм, для E телескопа 2 мм соответственно. Дифференциальные сечения упругого рассеяния были измерены в лабораторной системе координат в диапазоне 10^0 - 170^0 для $E_h = 50$ МэВ и 10^0 - 150^0 для $E_h = 60$ МэВ.

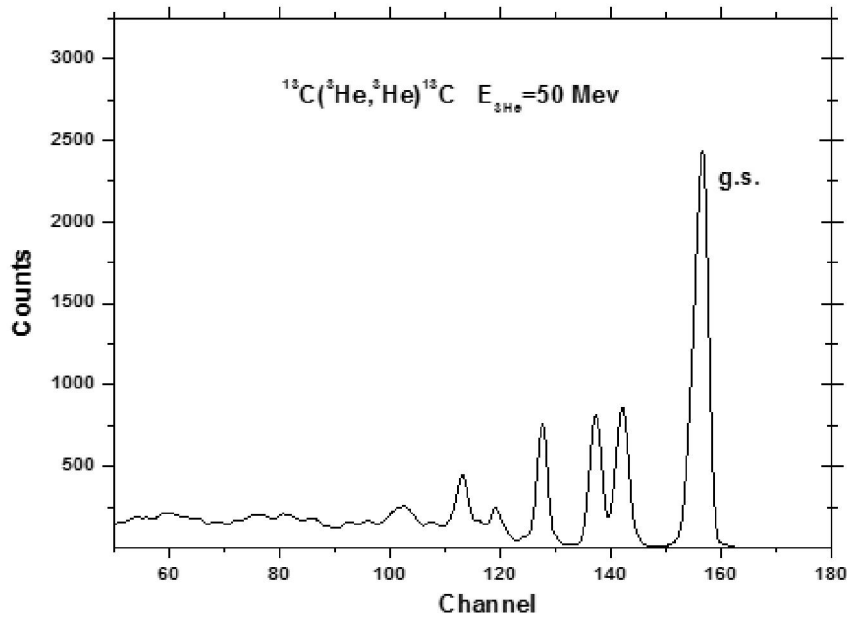


Рисунок 1 – Типичный спектр рассеянных ионов гелия на ядрах углерода при E = 50,5 МэВ (42⁰)

Анализ экспериментальных данных по оптической модели ядра. Анализ экспериментальных данных проводился в несколько этапов. На первом этапе данные по упругому рассеянию анализировались в рамках стандартной оптической модели ядра, в которой влияние неупругих каналов учитывается феноменологическим введением мнимой поглощающей части в потенциал взаимодействия между сталкивающимися ядрами. Расчеты проводились с центральным потенциалом без спин-орбитального взаимодействия:

$$U(r) = -Vf(r) - i4a_w W_d \frac{df_w(r)}{dr} + V_{so} \left(\frac{\hbar}{m\pi c}\right)^2 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f_{so}(r) (L\sigma) + V_C(r) \tag{1}$$

Первые два члена отвечают за ядерное взаимодействие с поверхностным поглощением. Радиальная зависимость $f_i(r)$ описывается Вудс-Саксоновским [4] формфактором с радиусом r_i и диффузностью a_i (i = V, W):

$$f_i = \left[1 + \exp((r - r_i A^{1/3}) / a_i) \right]^{-1} \tag{2}$$

V_C – кулоновский потенциал равномерно заряженной сферы с радиусом R_C . При $r > R_C$, кулоновское взаимодействие между двумя ядрами равно

$$V_C = Z_p Z_t e^2 / r \tag{3}$$

где Z_p, Z_t – заряды налетающей частицы (p) и мишени (t). Во всех наших расчетах использовалось: $R_C = r_C A_t^{1/3}$ с $r_C = 1.3 \text{ фм}$.

Учитывая компактные размеры налетающей частицы, мы ограничились поверхностным типом потенциала поглощения для мнимой части. Параметры оптических потенциалов (ОП) подбирались таким образом, чтобы достичь наилучшего согласия между теоретическими и экспериментальными угловыми распределениями.

Расчеты выполнены по программе FRESKO [5]. Значения оптического потенциала представлены в таблице 1. Также рассчитаны объёмные интегралы для действительной части (J_V) и мнимой части (J_D) оптического потенциала при заданных энергиях.

Таблица 1 - Параметры оптического потенциала

	E_b (МэВ)	V_0 (МэВ)	r_0 (фм)	a_0 (фм)	W_d (МэВ)	r_w (фм)	a_0 (фм)	J_V (МэВфм ³)	J_D (МэВфм ³)
³ He+ ¹³ C	50.5	111,04	1,150	0,737	13,30	1,378	0,80	423,1	150,3
	60.0	108,48	1,150	0,726	15,32	1,186	0,80	410,633	108,4

Фолдинг модель. Для ограничения дискретной неоднозначности оптического потенциала дополнительно был проведен анализ данных в рамках фолдинг модели. Потенциал двойной свертки (фолдинг потенциал) рассчитывается с учетом распределения ядерной материи как налетающего ядра, так и ядра мишени с использованием эффективного потенциала нуклон-нуклонного (v_{NN}) взаимодействия. Таким образом, фолдинг потенциал представляется в виде:

$$V_{DF}(\mathbf{r}) = \int d\mathbf{r}_1 \int d\mathbf{r}_2 \rho_p(\mathbf{r}_1) \rho_t(\mathbf{r}_2) v_{NN}(\mathbf{r}_{12}) \quad (4)$$

где $\rho_p(\mathbf{r}_1)$ и $\rho_t(\mathbf{r}_2)$ – плотности ядерной материи налетающего ядра и ядра мишени, соответственно.

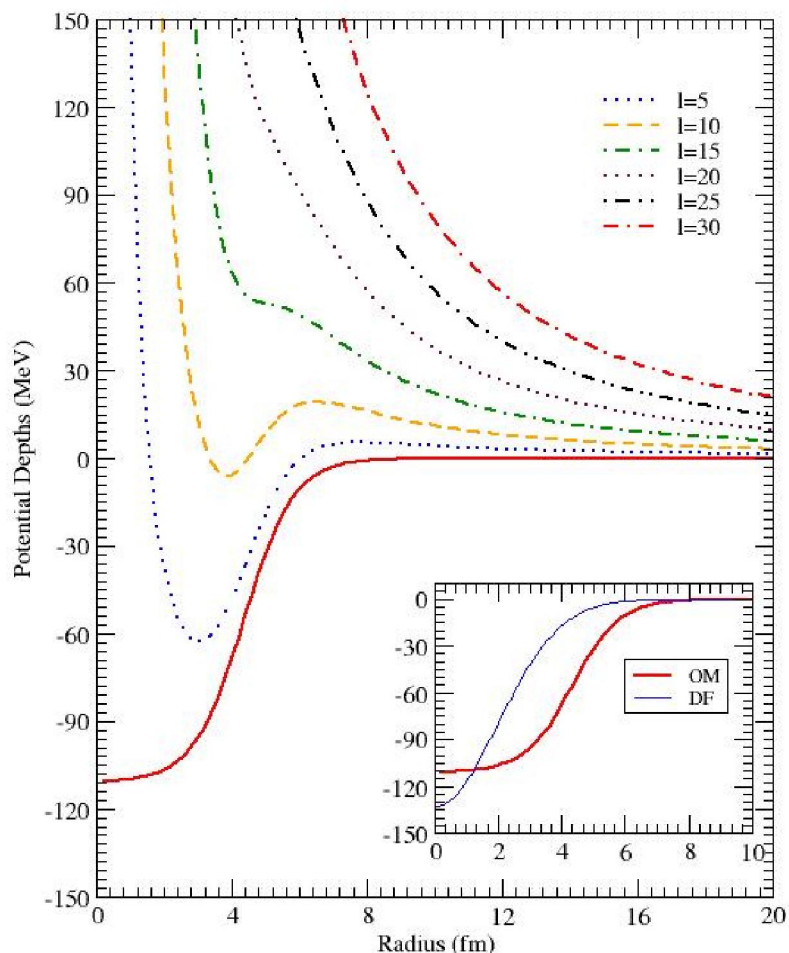


Рисунок 2 – Потенциал взаимодействия ионов ${}^3\text{He}$ с ядрами ${}^{13}\text{C}$ для различных значений орбитального момента квантового числа l

Гауссово распределение плотности для обоих ядер определяется как

$$\rho(r) = \rho_0 \exp(-\beta r^2) \quad (5)$$

где β корректируется таким образом, чтобы воспроизвести экспериментальное значение для среднеквадратичного радиуса ядер ${}^{13}\text{C}=2.44$ фм и ${}^3\text{He}=1.91$ фм [6]. Значения ρ_0 могут быть получены из условия нормировки:

$$\int \rho(r) r^2 dr = \frac{A}{4\pi} \quad (6)$$

где A массовое число. В расчетах эффективное нуклон-нуклонное (v_{NN}) взаимодействие бралось в форме МЗУ-взаимодействия, заданным как

$$v_{NN}(r) = 7999 \frac{\exp(-4r)}{4r} - 2134 \frac{\exp(-2.5r)}{2.5r} + J_{00}(E) \delta(r) \text{ MeV} \quad (7)$$

где

$$J_{00}(E) = 276[1 - 0.005 E_{Lab}/A_p] \text{ MeV fm}^3$$

На втором этапе оптимальное согласие теории с экспериментом достигалось варьированием параметров мнимой части и нормировочного коэффициента "N" микроскопической вещественной части, найденной из анализа в рамках оптической модели (таблица 1). Отличие N от единицы может свидетельствовать о вкладе членов второго порядка по эффективным силам в реальную часть оптического потенциала. Анализ проводился с использованием программы FRESKO [5]. Найденные параметры фолдинг потенциала и значения N представлены в таблице 2. Также в таблице 2, представлены рассчитанные объёмные интегралы для действительной части (J_V) с соответствующими нормировочными коэффициентами для фолдинг-потенциала. Сумма ядерной, кулоновской и центробежной составляющих фолдинг и феноменологического Вудс-Саксоновского потенциалов для различных орбитальных моментов представлена на рисунке 2. На рисунке 3 показано сравнение экспериментальных сечений с сечениями, вычисленными в рамках оптической модели ядра и фолдинг модели.

Таблица 2 - Параметры фолдинг-потенциала и нормировочные коэффициенты

	E_b (МэВ)	W_d (МэВ)	r_W (фм)	a_W (фм)	V_{so} (МэВ)	r_{so} (фм)	a_{so} (фм)	J_V (МэВфм ³)	N_r
${}^3\text{He}+{}^{13}\text{C}$	50.5	13,30	1,378	0,80	2	1,07	0,66	410,66	1,03
	60.0	15,32	1,186	0,80	2	1,07	0,66	433,2	1,1

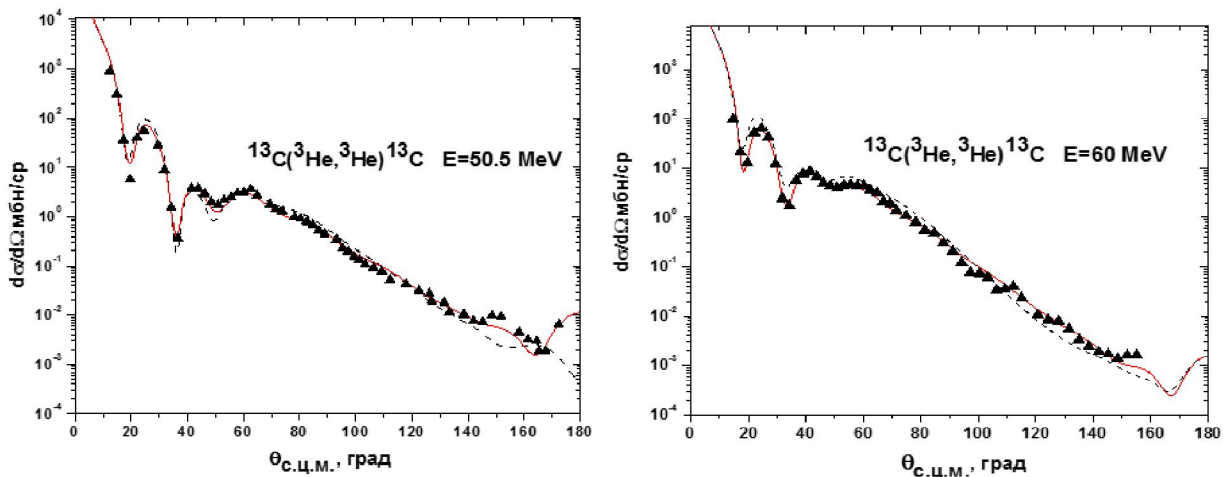


Рисунок 3 – Сравнение экспериментальных и теоретических дифференциальных сечений упругого рассеяния ионов ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^{13}\text{C}$ при энергиях 50,5 и 60 МэВ. Треугольники – экспериментальные данные, сплошная линия – сечения, рассчитанные в рамках оптической модели ядра, пунктирная линия – сечения, рассчитанные в рамках фолдинг модели

Вывод. Проведен анализ полученных данных в рамках стандартной оптической модели ядра. В рамках модели двойной свертки на основе полного МЗУ-эффективного взаимодействия построены потенциалы для ионов ${}^3\text{He}$, взаимодействующих при энергиях 50,5 и 60 МэВ с ядрами ${}^{13}\text{C}$. Проведен анализ угловых распределений упругого рассеяния ионов ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^{13}\text{C}$ с использованием потенциалов двойной свертки. Получено удовлетворительное описание экспериментальных данных с нормировочными коэффициентами для вещественной части оптического потенциала. Показано, что оба потенциала коррелируют между собой и дают схожее описание экспериментальных данных. Полученные потенциалы будут полезны при исследовании дифференциальных сечений реакций с участием исследуемых ядер.

Работа была поддержана грантом МОН РК №1460 ГФ4.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Satchler G.R., Direct Nuclear Reactions. N. Y. - Oxford: Oxford Univ. Press, 1983.
- [2] Burtbaev N., Duisebaev A., Duisebaev B. A., and Sakuta S. B. Elastic Scattering of ${}^3\text{He}$ Nuclei on ${}^{13}\text{C}$ Nuclei at 50 and 60 MeV and V - W Ambiguity in Choosing Optical Potentials // Physics of Atomic Nuclei **63**, 4 (2000).

- [3] Satchler G.R., Love W.G. Folding model potentials from realistic interactions for heavy-ion scattering // Phys. Rep. **55** (1979).
- [4] Ходгсон П.Е. Оптическая модель упругого рассеяния // М.: Атомиздат, 1966. 232 с.
- [5] Thompson I.J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comput. Phys. Rep. **7** (1988)
- [6] De Vries H., De Jager C.W. and De Vries C. Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering // Atomic Data and Nucl. Data Tables **36** 495 (1987).

REFERENCES

- [1] Satchler G.R. Direct Nuclear Reactions. N.Y.- Oxford: Oxford Univ. Press, **1983**.
- [2] Буртебаев Н., Дуисебаев А., Дуисебаев В. А., and Sakuta S. B. Elastic Scattering of ^3He Nuclei on ^{13}C Nuclei at 50 and 60 MeV and V - W Ambiguity in Choosing Optical Potentials // Physics of Atomic Nuclei **63**, 4 (2000).
- [3] Satchler G.R., Love W.G. Folding model potentials from realistic interactions for heavy-ion scattering // Phys. Rep. **55** (1979).
- [4] Hodgson P.E. The Optical Model of Elastic Scattering / – Oxford: Clarendon Press, **1963** – VIII, p.211.
- [5] Thompson I.J. Coupled reaction channels calculations in nuclear physics // Comput. Phys. Rep. **7** (1988)
- [6] De Vries H., De Jager C.W. and De Vries C. Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering // Atomic Data and Nucl. Data Tables **36** 495 (1987).

ОПТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ФОЛДИНГ МОДЕЛЬДЕР АЯСЫНДА 50 ЖӘНЕ 60 МЭВ ЭНЕРГИЯЛАРДА ^3He ИОНДАРЫНЫҢ ^{13}C ЯДРОЛАРЫНДА СЕРПІМДІ ШАШЫРАУ ПРОЦЕССТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Н. Буртебаев¹, Ж.К. Керимкулов¹, А.С. Демьянова², А.Н. Данилов²,
Д.М. Джансейтов³, Т.К. Жолдыбаев¹, Д.К. Алимов⁴

¹Ядролық Физика Институты, Алматы, Қазақстан,

²ҰЗО Курчатов Институты, Мәскеу, Ресей,

³Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан,

⁴әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

Түйін сөздер: серпімді шашырау, оптикалық модель, фолдинг потенциал, нормалау коэффициенттері, FRESKO.

Аннотация. Осы жұмыста 50 және 60 МэВ энергияларда ^3He иондарының серпімді шашырау процесстері зерттелген. Дифференциалдық қималар 10^0 - 170^0 арасында зертханалардың координаттар жүйесінде өлшенді. Серпімді шашырау оптикалық модель аясында талданды.

Есептеулерде комплексті ядролық потенциалдың нақты бөлігі үшін микроскопиялық потенциалымен (фолдинг потенциал) қоса, феноменологиялық потенциалдар да қолданылды. Потенциалдың жорамал бөлігі үшін Вудс-Саксон потенциалының беттік феноменологиялық түрі қолданылды. Теориялық есептелген қималар, тәжірибелік мәліметтермен жақсы үйлеседі.

Поступила 15.03.2016 г.