

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 2, Number 306 (2016), 5 – 9

UDC 539.171

INVESTIGATION OF THE ELASTIC SCATTERING OF ^3He IONS ON ^{14}N AT ENERGIES 50 AND 60 MeV

N. Burtabayev¹, A. Duisebayev¹, Zh.K. Kerimkulov¹, D.K. Alimov^{1,2}, A.V. Yushkov²,
T.K. Zholdybayev¹, B. Sadikov¹, Y.S. Mukhamejanov², D.M. Janseitov³, S.B. Sakuta⁴

¹INP, Almaty, Kazakhstan, ²KazNU, Almaty, Kazakhstan, ³ENU, Astana, Kazakhstan,

⁴NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

e-mail: diliyo@mail.ru

Keywords: elastic scattering, light charged particles, diffuseness, optical potential, folding potential, nuclear rainbow.

Abstract. In this paper we studied the elastic scattering of ^3He ions on nuclei ^{14}N at energies 50 and 60 MeV. An analysis of the angular distributions is carried out using an optical model of the nucleus and folding models. A good description of the experimental data in the full range of angles with potentials having the volume integrals of the real part close to 400-500 MeV fm³. In the measured angular distributions of the elastic scattering there are clearly visible effects of the nuclear rainbow caused by the refractive properties of a real nuclear potential.

УДК 539.171

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ИОНОВ³ НЕ НА ЯДРАХ ^{14}N ПРИ ЭНЕРГИЯХ 50 И 60 МЭВ

Н. Буртебаев¹, А. Дуйсебаев¹, Ж.К. Керимкулов¹, Д.К. Алимов^{1,2}, А.В. Юшков², Т.К.
Жолдыбаев¹, Б. Садыков¹, Е.С. Мухамеджанов², Д.М. Джансейтов³, С.Б. Сакута⁴

¹ИЯФ, Алматы, Казахстан, ²КазНУ, Алматы, Казахстан, ³ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,

⁴НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

Ключевые слова: упругое рассеяние, легкие заряженные частицы, диффузность, оптический потенциал, фолдинг потенциал, ядерная радуга.

Аннотация. В данной работе исследовано упругое рассеяние ионов ^3He на ядрах ^{14}N при энергиях 50 и 60 МэВ. Анализ угловых распределений проведен с использованием оптической модели ядра и фолдинг модели. Получено хорошее описание экспериментальных данных в полном диапазоне углов с потенциалами, имеющими объемные интегралы реальной части вблизи 400-500 МэВ фм³. В измеренных угловых распределениях упругого рассеяния отчетливо видны эффекты ядерной радуги, вызванные рефракционными свойствами реального ядерного потенциала.

Введение. Анализ данных рассеяния по оптической модели является основным источником информации о потенциалах ядро-ядерных взаимодействий. Известно, однако, что для сложных снарядов с $A \geq 2$, такой анализ является неоднозначным. Особенно сложная ситуация возникает

при низких энергиях ($E < 10$ МэВ/нуклон). Многочисленные исследования показали, что неоднозначность извлеченных параметров действительной части ядерного потенциала может быть как непрерывной и дискретной.

Если глубина действительной части ядерного потенциала велика по сравнению с энергией налетающей частицы (при энергиях $E/\text{нуклон} < 10$ МэВ), то при достаточно малых прицельных параметрах воздействия, в связи с влиянием ядерного притяжения, угол отклонения рассеянной частицы может превышать 180 градусов. В этом случае дифракционная картина наблюдается во всем диапазоне углов углового распределения. Тем не менее, при более высоких энергиях падающая частица может быть отражена на угол, не превышающий определенный предел. Согласно классической механике, сечение в этой точке должно стать бесконечным. В квантовой механике, однако, сечение конечно, но при не очень сильном поглощении, должен наблюдаться максимум, а затем экспоненциальный спад сечений на больших углах. Этот эффект возникает из-за преломляющих свойств вещественной части ядерного потенциала и является аналогом явления радуги в оптике. Величина и угловая зависимость сечений наблюдаемой ядерной радуги очень чувствительны к действительной части ядерного потенциала, как было впервые показано в работах [1, 2]. Анализ таких данных с использованием оптической модели позволяет устранить дискретную неоднозначность глубины реальной части ядерного потенциала.

Литературных данных по упругому рассеянию ионов ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^{14}\text{N}$ при энергиях выше 20 МэВ немного. Угловые распределения были ранее измерены при энергиях 26,3 МэВ [3] и 72 МэВ [4] в передней полусфере рассеяния. Эффект ядерной радуги наблюдался только при энергии 72 МэВ. Ранее нами были опубликованы результаты измерений упругого рассеяния на 50 и 60 МэВ энергий [5] с предварительным анализом в рамках оптической модели.

Целью данной работы является изучение упругого рассеяния ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^{14}\text{N}$ при энергиях 50 - 60 МэВ. Здесь эффекты ядерной радуги начинают проявляться отчетливо. Такие энергии являются достаточно высокими, чтобы избежать наихудших осложнений, связанных с составными ядерными эффектами.

1. Экспериментальная методика и результаты измерений. Измерения проводились на выведенных пучках ионов ${}^3\text{He}$ изохронного циклотрона У-150М Института ядерной физики (Алматы, Казахстан). Энергия ионов ${}^3\text{He}$ составляла 50 и 60 МэВ. В качестве мишени использовался естественный газ азота (99,61% от ${}^{14}\text{N}$) давление которого было около 1 атмосферы. Эффективная толщина мишени была в диапазоне от 1 до 7 мг/см², в зависимости от угла измерения. Неопределенность в оценке толщины не более 3%. Более подробно конструкция мишени описана в работе [6].

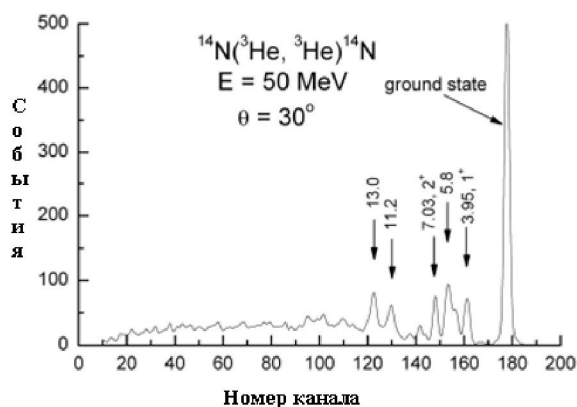


Рисунок 1 – Энергетический спектр ${}^3\text{He}$, рассеянных при энергии 50 МэВ на ядрах ${}^{14}\text{N}$ оцениваются под углом 30°

В экспериментах использовалась ΔE - E методика регистрации и идентификации заряженных частиц. Рассеянные частицы регистрировались телескопом, состоящим из двух кремниевых детекторов с толщиной 100 микрон (ΔE) и 2 мм (E). Общее энергетическое разрешение варьировалось от 400 до 500 кэВ, в зависимости от угла рассеяния, и определялось в основном разбросом энергии в пучке и толщиной мишени.

Дифференциальные сечения упругого рассеяния были измерены в диапазоне углов от 10° до 170° в лабораторной системе координат. Угловые распределения, как видно из рисунка 1, имеют дифракционную структуру вплоть до углов $60^\circ - 70^\circ$. С увеличением угла наблюдается широкий максимум, а затем спад без выраженных осцилляций. Статистические погрешности измеренных дифференциальных сечений не превышали 10%.

2. Анализ и обсуждение результатов. Измеренные угловые распределения упругого рассеяния были проанализированы в рамках оптической модели ядра. Расчеты проводились с центральным потенциалом без спин-орбитального взаимодействия:

$$U(r) = -Vf(r) - i4a_w W_D \frac{df_w(r)}{dr} + V_C(r)$$

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

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

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

$$V_C = Z_p Z_t e^2 / r,$$

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 $r_C = 1.3 \text{ фм}$.

Теоретические расчеты выполнялись по программе SPI-GENOA [7]. Параметры ОП подбирались таким образом, чтобы достичь наилучшего согласия между теоретическими и экспериментальными угловыми распределениями. Автоматический поиск оптимальных параметров ОП производился путем минимизации величины χ^2 / N методом наименьших квадратов. В качестве исходных были взяты параметры потенциала, предложенные в работе [8]. Для уменьшения неоднозначности мы старались не уходить далеко от рекомендованных значений геометрических параметров (r_V, a_V) реального потенциала. Для лучшего согласия с экспериментальными данными глубина мнимой части (W_D) лишь незначительно уменьшалась. Окончательные параметры потенциалов приведены в таблице 1.

Для ограничения неоднозначности оптического потенциала дополнительно был проведен анализ 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 взаимодействия (v_{NN}). Таким образом, фолдинг потенциал представляется в виде:

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

где $\rho_p(\mathbf{r}_1)$ и $\rho_t(\mathbf{r}_2)$ – плотности ядерной материи налетающего ядра и ядра мишени, соответственно. Гауссово распределение плотности для обоих ядер определяется как

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

где β корректируется таким образом, чтобы воспроизвести экспериментальное значение для среднеквадратичного радиуса ядер $^{14}\text{N} = 2.58 \text{ фм}$ и $^3\text{He} = 1.91 \text{ фм}$ [9]. Значения ρ_0 могут быть получены из нижеследующего условия нормировки

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

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

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

где

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

Оптимальное согласие теории с экспериментом достигалось варьированием нормировочного коэффициента N вещественной части и параметров мнимой части, найденных 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 [10]. Найденные параметры фолдинг потенциала и значения N представлены в таблице-1.

Таблица 1 – Параметры оптического (ОП) и фолдинг потенциала (ФП) с коэффициентом нормализации $N_r = 1$

a + A	E, МэВ	V, МэВ	Γ_V , фм	a_V , фм	W_{D_2} , МэВ	Γ_{W_2} , фм	a_{W_2} , фм	J_V , МэВ фм ³	J_{W_2} , МэВ фм ³
³ He+ ¹⁴ N	ОП 50	100	1.225	0.725	11	1.56	0.69	409.8	142.6
	ФП 50				11	1.56	0.69		
	ОП 60	102	1.225	0.725	13	1.56	0.69	418	168.5
	ФП 60				13	1.56	0.69		

Из предсказаний микроскопической теории (фолдинг модель) и результатами глобального анализа упругого рассеяния ³He в диапазоне энергий 10-200 МэВ[11, 12] следует, что для взаимодействия ионов ³He с ядрами 1p-оболочки наиболее разумными значениями объемного интеграла являются $J_V \sim 400$ МэВ фм³. Как видно из таблицы 1, объемные интегралы реальной части (J_V) найденные нами, находятся в пределах 400 - 500 МэВ фм³. На рисунке 2 представлено сравнение экспериментальных данных (квадраты) с сечениями рассчитанными в рамках оптической модели ядра (сплошная линия) и фолдинг модели (штрих-пунктирная линия). Видно, что оба потенциала коррелируют между собой и дают схожее описание эксперимента.

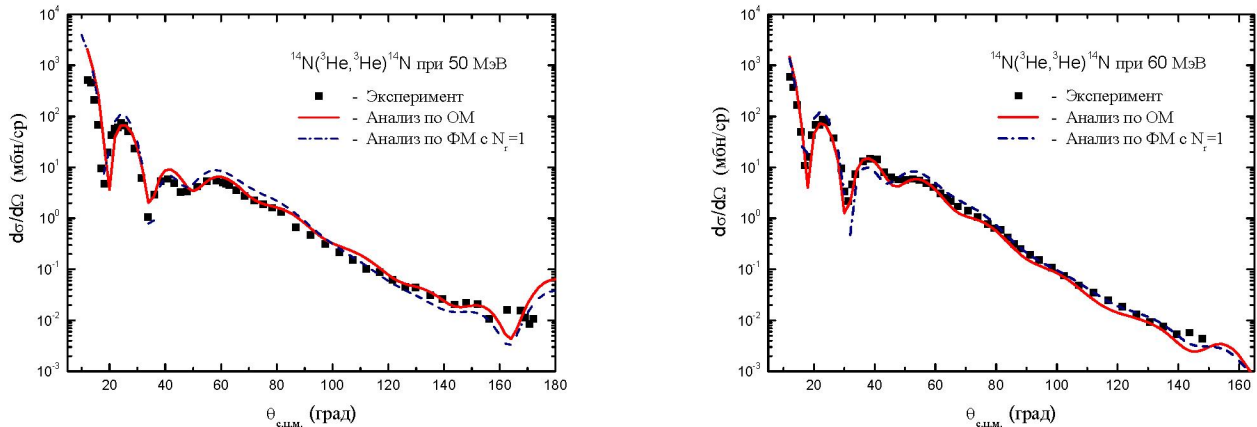


Рисунок 2 – Угловые распределения упругого рассеяния ³He при энергиях 50 и 60 МэВ на ядрах ¹⁴N

Таким образом, в упругом рассеянии ³He на ядрах ¹⁴N при энергиях около 50 МэВ, отчетливо наблюдаются эффекты ядерной радуги, вызванные преломляющими свойствами ядерного потенциала.

Заключение. Исследовалось упругое рассеяние ³He на ядрах ¹⁴N при энергиях 50 и 60 МэВ. Измеренные угловые распределения были проанализированы в рамках оптической модели ядра и фолдинг модели.

Объемные интегралы, найденные для реальной части потенциалов находятся в пределах интервала 400-500 МэВ фм³, что согласуется с предсказаниями микроскопической теории и с результатами глобального анализа упругого рассеяния ³He в диапазоне энергий 10-200 МэВ. Эффекты ядерной радуги отчетливо наблюдаются в измеренных угловых распределений упругого рассеяния. Об этом свидетельствуют следующее:

1. Наличие фраунгоферовской дифракции в передней полусфере. Дифракция особенно сильна при углах, где амплитуды рассеяния ближней и дальней компоненты сопоставимы.

2. Наличие в угловых распределениях широкого максимума и последующего монотонного спада сечений при больших углах. Это связано с существованием предельного угла в функции отклонения рассеянной частицы в поле ядра.

Эта работа была частично поддержана грантом МОН РК, проекта "Экспериментальное и теоретическое исследование упругих и квазиупругих процессов взаимодействия ^3He и d ионов с р- и sd-оболочки ядер".

ЛИТЕРАТУРА

- [1] D.A. Goldberg, S.M. Smith, *Phys. Rev. Lett.* **29**, 500 (1972).
 [2] D.A. Goldberg, S.M. Smith, G.E. Burdzik, *Phys. Rev.* **C10**, 1362 (1974).
 [3] A.M. Mukhamedzhanov, P. Bem, B.A. Braun, V. Burjan, C.A. Gagliardi, V. Kroha, J. Novak, F.M. Nunes, S. Piskoř, F. Pirlpesov, E. Simeckova, R.E. Tribble, J. Vincour, *Phys. Rev.* **C67**, 65804 (2003).
 [4] A.S. Demyanova, A.A. Ogloblin, S.N. Ershov, F.A. Gareev, P.S. Kurmanov, E.F.Svinareva, S.A. Goncharov, V.V. Adodin, N. Burtebaev, J.M. Bang, J.S. Vaagen, *Phys. Scr.* **T32**, 89 (1990).
 [5] V.V. Adodin, N.T. Burtebaev, A.D. Duiysebaev, *Yad. Fiz.* **55**, 577 (1992).
 [6] A.D. Duiysebaev, G.N. Ivanov, N.T. Burtebaev et al. *Izv. AN Kaz. SSR, ser. fiz.-mat.* **4**, 73, 1984.
 [7] F. Perey, SPI-GENOA. *An optical model search code (unpublished)*.
 [8] G.R. Satchler, W.G. Love, *Phys. Rep.* **55**, 183 (1979).
 [9] De Vries H., De Jager C.W., De Vries C. Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering // Atomic Data and Nuclear Data Tables
 [10] I.J. Thompson, *Comput. Phys. Rep.* **7**, 167 (1988), available at: <http://www.fresco.org.uk/>
 [11] R. Girgen, F. Hinterberger, R. Jahn, et al., *Nucl. Phys.* **A320**, 296 (1979).
 [12] H.-J. Trost, P. Lezoch, and U. Strohhbusch, *Nucl. Phys.* **A462**, 333 (1987).

REFERENCES

- [1] D.A. Goldberg, S.M. Smith, *Phys. Rev. Lett.* **29**, 500 (1972).
 [2] D.A. Goldberg, S.M. Smith, G.E. Burdzik, *Phys. Rev.* **C10**, 1362 (1974).
 [3] A.M. Mukhamedzhanov, P. Bem, B.A. Braun, V. Burjan, C.A. Gagliardi, V. Kroha, J. Novak, F.M. Nunes, S. Piskoř, F. Pirlpesov, E. Simeckova, R.E. Tribble, J. Vincour, *Phys. Rev.* **C67**, 65804 (2003).
 [4] A.S. Demyanova, A.A. Ogloblin, S.N. Ershov, F.A. Gareev, P.S. Kurmanov, E.F.Svinareva, S.A. Goncharov, V.V. Adodin, N. Burtebaev, J.M. Bang, J.S. Vaagen, *Phys. Scr.* **T32**, 89 (1990).
 [5] V.V. Adodin, N.T. Burtebaev, A.D. Duiysebaev, *Yad. Fiz.* **55**, 577 (1992).
 [6] A.D. Duiysebaev, G.N. Ivanov, N.T. Burtebaev et al. *Izv. AN Kaz. SSR, ser. fiz.-mat.* **4**, 73, 1984.
 [7] F. Perey, SPI-GENOA. *An optical model search code (unpublished)*.
 [8] G.R. Satchler, W.G. Love, *Phys. Rep.* **55**, 183 (1979).
 [9] De Vries H., De Jager C.W., De Vries C. Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering // Atomic Data and Nuclear Data Tables
 [10] I.J. Thompson, *Comput. Phys. Rep.* **7**, 167 (1988), available at: <http://www.fresco.org.uk/>
 [11] R. Girgen, F. Hinterberger, R. Jahn, et al., *Nucl. Phys.* **A320**, 296 (1979).
 [12] H.-J. Trost, P. Lezoch, and U. Strohhbusch, *Nucl. Phys.* **A462**, 333 (1987).

50 ЖӘНЕ 60 МЭВ ЭНЕРГИЯЛЫ ^3He ИОНДАРЫНЫҢ ^{14}N ЯДРОЛАРЫНАН СЕРПІМДІ ШАШЫРАУЫН ЗЕРТТЕУ

Н. Буртебаев¹, А. Дуйсебаев¹, Ж.К. Керимкулов¹, Д.К. Алимов^{1,2}, А.В. Юшков²,
 Т.К. Жолдыбаев¹, Б. Садықов¹, Е.С. Мухамеджанов², Д.М. Джансейтов³, С.Б. Сақута⁴

¹ЯФИ, Алматы, Қазақстан, ²эл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан,

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

⁴ҰЗО "Курчатов институты", Мәскеу, Ресей

Түйін сөздер: серпімді шашырау, зарядталған жеңіл бөлшектер, диффуздық, оптикалық потенциал, фолдинг потенциал, ядролық қосақ.

Аннотация. Осы жұмыста 50 және 60 МэВ энергиялы ^3He иондарының ^{14}N ядроларынан серпімді шашырауы зерттелді. Ядроның фолдинг және оптикалық үлгілері қолданылып, бұрыштық таралу талдауы жүргізілді. 400-500 МэВ fm^3 төңірегінде потенциалдың нақты бөлігінің көлемдік интегралы үшін тәжірибелік мәліметтерден толық бұрыштық диапазонда жақсы сипаттамалар алынды. Өлшенген серпімді шашыраудың бұрыштық таралуларында ядролық қосақтың әсері байқалады.

Поступила 15.03.2016 г