

УДК 539.171.016; 539.171.12; 539.143.5; 539.141; 539.17.02

ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В УПРУГОМ РАССЕЯНИИ  $p+^{11}\text{Li}$  ПРИ 62 МэВ<sup>1)</sup> Галанина Л.И., <sup>2)</sup> Морзабаев А.К., <sup>2)</sup> Алибаева А.Г.<sup>1)</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва, Россия<sup>2)</sup> Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

Настоящая работа представляет собой расчет дифференциального сечения упругого рассеяния ядер водорода на экзотических ядрах нейтроноизбыточного изотопа лития-11 методом определения оптимальных параметров оптического потенциала с помощью программного обеспечения FRESKO 2.8, используя метод сильно связанных каналов ядерной реакции с включенными спин-орбитальным и кулоновским взаимодействием. Для лития было выбрано состояние с  $J^P=3/2^-$ . Формы элементов рассеивающего потенциала были выбраны в вудс-саксоновском виде. Подбор параметров потенциала основывался на данных, извлеченных из эксперимента по рассеянию  $p+^{11}\text{Li}$ , проведенному при энергии 62 МэВ в лабораторной системе координат на циклотроне RIKEN в Японии в 1992 году. В настоящей работе было обнаружено, что объемная и спин-орбитальная части потенциала, а также диффузность взаимодействия имеют значения нулевые либо близкие к нулевым. Полученное сечение в передней полусфере рассеяния в 70–75 раз превосходит по величине соответствующее резерфордское сечение, а в задней полусфере, наоборот, доминируют кулоновские силы. Теоретические значения уверенно совпадают с экспериментальными.

## ВВЕДЕНИЕ

Изотоп  $^{11}\text{Li}$  является наиболее ярким представителем экзотических гало-ядер. С самого начала [1] он привлекал большое внимание огромного количества исследователей. Множество научных трудов было посвящено исследованию свойств этого ядра, но многие его характеристики до сих пор еще слабо изучены. Наиболее удобным способом изучения структуры ядра, как известно, является рассеяние на нем протонов. Настоящая работа представляет собой небольшое очередное исследование дифференциального сечения упругого рассеяния  $p+^{11}\text{Li}$  методом определения оптимальных параметров оптического потенциала [2] с помощью программного обеспечения FRESKO 2.8 [3], использующего метод сильно связанных каналов ядерной реакции с включенным спин-орбитальным и кулоновским взаимодействием. Для лития было выбрано состояние со спин-четностью  $J^P=3/2^-$ . Форма потенциала была выбрана в вудс-саксоновском виде [4], уверенно работающем в данном диапазоне ядер и энергий. Выбор величины энергии был продиктован интересом к недавней научной статье [5], посвященной изучению  $^{11}\text{Li}$  на установке IRIS в Канаде при 66 МэВ в лабораторной системе координат. Прежде чем приступить к этой задаче в неупругом рассеянии, было решено предварительно опробовать настройки используемого кода на аналогичном упругом рассеянии [6], проведенном при 62 МэВ на циклотроне RIKEN. Результаты оказались несколько интригующими, поэтому было решено опубликовать их данным отдельным трудом.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В [6] были изложены полученные экспериментальные данные дифференциального сечения наряду с другими величинами, это сечение было описано с помощью оптического потенциала, а также было за-

мечено, что найденный набор параметров оптического потенциала не является единственно возможным. Авторы настоящей работы разделяют эту точку зрения и представляют свой набор параметров. В таблице 1 приведены найденные в [6] параметры оптического потенциала для удобства сравнения с аналогичными результатами настоящей работы, представленными в таблице 2. В таблицах использованы следующие обозначения:

 $V$  – действительная часть оптического потенциала; $r_v$  – ее радиус действия; $a_v$  – его диффузность; $W_v$  – объемная мнимая часть потенциала; $W_s$  – поверхностная мнимая часть потенциала; $W$  – мнимая часть потенциала; $r_w$  – ее радиус действия; $a_w$  – его диффузность; $V_{so}$  – спин-орбитальный потенциал; $r_{so}$  – его радиус действия; $a_{so}$  – его диффузность; $r_c$  – кулоновский радиус.

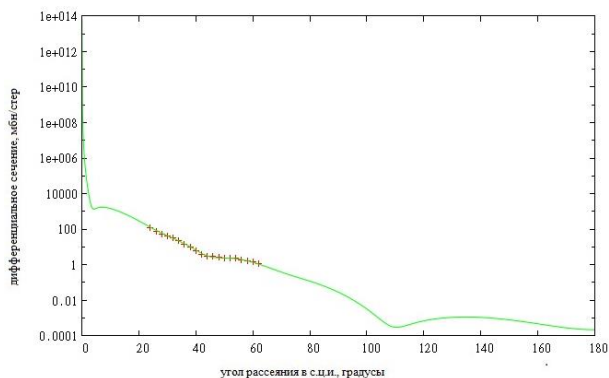
В таблице 2 сразу видно, что объемная часть потенциала абсолютно не участвует в формировании ядерных сил взаимодействия рассматриваемых ядер. Это можно объяснить сугубо упругим характером реакции, когда протоны рассеиваются исключительно поверхностью ядра мишени. Также в таблице заметно отсутствие вклада спин-орбитального взаимодействия. Из этого можно заключить, что орбитальный момент системы равен нулю. Для этого необходимо предположить эйкональность траектории рассеяния, что для 62 МэВ звучит интригующе. Еще более интригующим является обнаруженное отсутствие диффузности. Пространное гало лития-11 заставляло предполагать, соответственно, наличие большой диффузности. Но, как видно из таблицы, подобранные параметры, наоборот, дают четкую поверхность.

Таблица 1. Параметры оптического потенциала в упругом рассеянии  $p+^{11}\text{Li}$  при 62 МэВ из работы [6]

| V<br>(МэВ) | $r_v$<br>(фм) | $a_v$<br>(фм) | $W_v$<br>(МэВ) | $W_s$<br>(МэВ) | $r_w$<br>(фм) | $a_w$<br>(фм) | $V_{so}$<br>(МэВ) | $r_{so}$<br>(фм) | $a_{so}$<br>(фм) | $r_c$<br>(фм) |
|------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|-------------------|------------------|------------------|---------------|
| 18,06      | 1,385         | 0,546         | 4,26           | 4,60           | 0,56          | 1,16          | 5,9               | 0,8              | 0,63             | 1,29          |

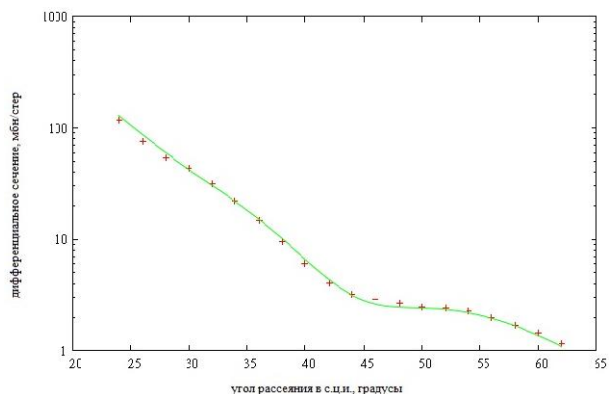
Таблица 2. Параметры оптического потенциала в упругом рассеянии  $p+^{11}\text{Li}$  при 62 МэВ из настоящей работы

|               | V<br>(МэВ) | $r_v$<br>(фм) | $a_v$<br>(фм) | W<br>(МэВ) | $r_w$<br>(фм) | $a_w$<br>(фм) | $V_{so}$<br>(МэВ) | $r_{so}$<br>(фм) | $a_{so}$<br>(фм) | $r_c$<br>(фм) |
|---------------|------------|---------------|---------------|------------|---------------|---------------|-------------------|------------------|------------------|---------------|
| Объемный      | 0          | 0             | 0             | 0          | 0             | 0             | 0                 | 0                | 0                | 0,7           |
| Поверхностный | 18         | 0,5           | 0             | 0,8        | 2,2           | 0             |                   |                  |                  |               |



крестики – экспериментальные данные [6];  
сплошная линия – результат настоящей работы

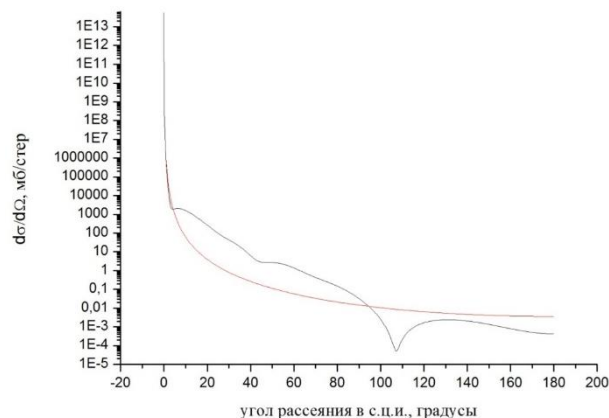
Рисунок 1. Угловая зависимость дифференциального сечения в упругом рассеянии  $p+^{11}\text{Li}$  при 62 МэВ



обозначения те же, что и на рисунке 1

Рисунок 2. Дифференциальное сечение упругого рассеяния  $p+^{11}\text{Li}$  при 62 МэВ в угловом диапазоне 20–30 градусов

Из выбранных параметров потенциала с помощью FRESKO рассчитано дифференциальное сечение (рисунки 1–4). На рисунках 1–2 сравнивается найденное теоретическое значение сечения с соответствующими экспериментальными данными [6]. На рисунке 1 показано сечение в полном угловом диапазоне, тогда как на рисунке 2 – только в угловом диапазоне экспериментальных данных для лучшей демонстрации совпадения.



красная сплошная линия – сечение Резерфорда;  
серая сплошная линия – результат настоящей работы

Рисунок 3. Угловая зависимость дифференциального сечения в упругом рассеянии  $p+^{11}\text{Li}$  при 62 МэВ.

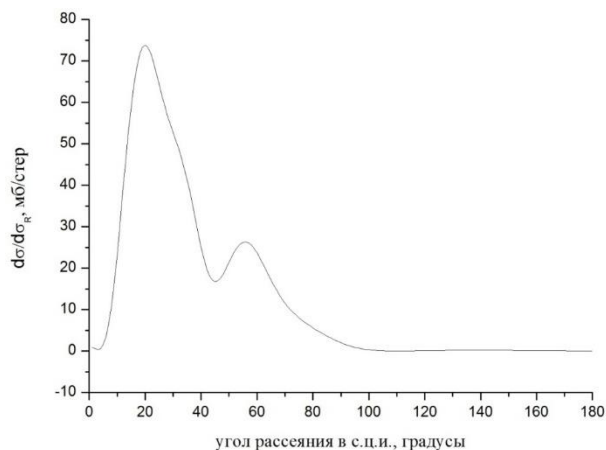


Рисунок 4. Угловая зависимость дифференциального сечения упругого рассеяния  $p+^{11}\text{Li}$  при 62 МэВ, отнесенного к сечению Резерфорда

На рисунках 3 и 4 представлено сравнение теоретического сечения с резерфордовским [7]. Из рисунка 3 видно, что в передней полусфере кулон-ядерные силы преобладают над чисто кулоновскими, а в задней полусфере – наоборот. Рисунок 4 соотносит рассчитанное сечение к резерфордовскому для точной количественной демонстрации данных рисунка 3.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В настоящей работе были найдены оптимальные параметры оптического потенциала для теоретического описания угловой зависимости дифференциального сечения упругого рассеяния протонов на ядрах изотопа лития-11. Было обнаружено, что объемная и спин-орбитальная часть потенциала, а также диффузность имеют значения нулевые либо близкие к нуле-

вым. Полученное сечение в передней полусфере рассеяния в 70–75 раз превосходило по величине соответствующее резерфордское сечение. В задней полусфере, наоборот, доминировали дальнедействующие отталкивающие кулоновские силы. Теоретические значения уверенно совпали с экспериментальными.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. I. Tanihata et al. Measurements of Interaction Cross-Sections and Nuclear Radii in the Light  $p$  Shell Region // Phys. Rev. Lett. 55 (1985) 2676.
2. H. Feshbach, C.E. Porter, V.F. Weisskopf. Model for Nuclear Reactions with Neutrons // Phys. Rev. 96 (1954) 448–464.
3. <https://fresco.org.uk>
4. Roger D. Woods and David S. Saxon. Diffuse Surface Optical Model for Nucleon-Nuclei Scattering // Phys. Rev. 95, 577.
5. J. Tanaka et al. Halo-induced large enhancement of soft dipole excitation of  $^{11}\text{Li}$  observed via proton inelastic scattering // Phys. Lett. B 774 (2017) 268.
6. C.-B. Moon et al. Measurements of  $^{11}\text{Li} + p$  and  $^9\text{Li} + p$  elastic scatterings at 60 MeV // Physics Letters B 297 (1992) 39–43.
7. E. Rutherford. The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom // Philosophical Magazine 21 (1911) 669.

## 62 МэВ КЕЗІНДЕ $p+^{11}\text{Li}$ СЕРПІМДІ ШАШЫРАУЫНЫҢ ОПТИКАЛЫҚ ПОТЕНЦИАЛДЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІ

<sup>1)</sup> Л.И. Галанина, <sup>2)</sup> А.К. Морзабаев, <sup>3)</sup> А.Г. Алибаева

<sup>1)</sup> ММУ ядролық физика ғылыми-зерттеу институты, Мәскеу, Ресей

<sup>2)</sup> Л.Н. Гумилев атындағы Еуразиялық ұлттық университеті, Нур-Сұлтан, Қазақстан

Бұл жұмыс спин-орбиталдық және кулондық өзара әсерлесумен ядролық реакцияның қатты байланысқан арналарының әдісін пайдалана отырып, FRESKO 2.8 бағдарламалық қамтамасыз ету көмегімен оптикалық потенциалдың оптимальды параметрлерін анықтау әдісімен нейтрондар саны артық литий-11 изотоптарының экзотикалық ядроларындағы сутегі ядроларының серпімді шашырауының дифференциалдық қимасын есептеу болып табылады. Литий үшін  $J^P=3/2^-$  күйі таңдалды. Шашырау потенциал элементтерінің формалары вудс-саксондық түрде алынды. Потенциал параметрлерін таңдау, 1992 жылы Жапонияда RIKEN циклотронындағы лабораториялық координаттар жүйесінде 62 МэВ энергиясы кезінде жүргізілген  $p+^{11}\text{Li}$  шашырауы бойынша эксперименттен алынған деректерге негізделген. Осы жұмыста потенциалдың көлемдік және спин-орбиталдық бөліктері, сонымен қатар әсерлесу диффузиялығының мәні нөлдік немесе нөлдік деңгейге жақын екені анықталды. Алдыңғы жартылай сферадағы шашыраудан алынған қима шамасы тиісті резерфорд қима шамасынан 70–75 есе асып түседі, ал артқы жартылай сферада, керісінше кулондық күштер басым. Теориялық мәндер эксперименталды мәндермен нақты сәйкес келеді.

## PARAMETERS OF OPTICAL POTENTIAL IN $p+^{11}\text{Li}$ ELASTIC SCATTERING AT 62 MeV

<sup>1)</sup> L.I. Galanina, <sup>2)</sup> A.K. Morzabayev, <sup>3)</sup> A.G. Alibayeva

<sup>1)</sup> Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2)</sup> L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

This paper is a calculation of the differential cross section for the elastic scattering of hydrogen nuclei on exotic nuclei of a neutron-rich lithium-11 isotope by determining the optimal parameters of optical potential via the FRESKO 2.8 software using the strongly coupled nuclear reaction channel method with the spin-orbit and Coulomb interaction included. For lithium, the  $J^P=3/2^-$  state was selected. The shapes of the elements of the scattering potential were chosen in the Woods-Saxon form. The selection of the parameters of the potential was based on the data extracted from the  $p+^{11}\text{Li}$  scattering experiment conducted at 62 MeV in the laboratory coordinate system on the RIKEN cyclotron in Japan in 1992. In this work, it was found that the volume and spin-orbital parts of the potential, as well as the diffusion of the interaction, have values of zero or close to zero. The resulting cross section in the forward hemisphere of scattering is 70–75 times larger than the corresponding Rutherford cross section, and in the rear hemisphere, on the contrary, Coulomb forces dominate. The theoretical values confidently coincide with the experimental ones.