

ISSN 1991-346X

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

Х А Б А Р Л А Р Ы

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА
СЕРИЯСЫ



СЕРИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ



PHYSICO-MATHEMATICAL
SERIES

1 (305)

ҚАҢТАР – АҚПАҢ 2016 ж.
ЯНВАРЬ – ФЕВРАЛЬ 2016 г.
JANUARY – FEBRUARY 2016

1963 ЖЫЛДЫҢ ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА
АЛМАТЫ, НАН РК
ALMATY, NAS RK

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі,

Мұтанов Г. М.

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әшімов А.А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байғұнчекөв Ж.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Жұмаділдаев А.С.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Мұқашев Б.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Өтелбаев М.О.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Тәкібаев Н.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Харин С.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Жантаев Ж.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Косов В.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мұсабаев Т.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Ойнаров Р.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Рамазанов Т.С.** (бас редактордың орынбасары); физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Темірбеков Н.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Өмірбаев У.У.**

Р е д а к ц и я к ең е с і:

Украинаның ҰҒА академигі **И.Н. Вишневский** (Украина); Украинаның ҰҒА академигі **А.М. Ковалев** (Украина); Беларусь Республикасының ҰҒА академигі **А.А. Михалевич** (Беларусь); Әзірбайжан ҰҒА академигі **А. Пашаев** (Әзірбайжан); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **И. Тигиняну** (Молдова); мед. ғ. докторы, проф. **Иозеф Банас** (Польша)

Главный редактор

академик НАН РК

Г. М. Мутанов

Редакционная коллегия:

доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.А. Ашимов**; доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **Ж.Ж. Байгунчеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.С. Джумадильдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Б.Н. Мукашев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **М.О. Отелбаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Н.Ж. Такибаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **С.Н. Харин**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.Ш. Жантаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **В.Н. Косов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.А. Мусабаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Р. Ойнаров**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.С. Рамазанов** (заместитель главного редактора); доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.М. Темирбеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **У.У. Умирбаев**

Редакционный совет:

академик НАН Украины **И.Н. Вишневский** (Украина); академик НАН Украины **А.М. Ковалев** (Украина); академик НАН Республики Беларусь **А.А. Михалевич** (Беларусь); академик НАН Азербайджанской Республики **А. Пашаев** (Азербайджан); академик НАН Республики Молдова **И. Тигиняну** (Молдова); д. мед. н., проф. **Иозеф Банас** (Польша)

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая». ISSN 1991-346X

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,

www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2016

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

Editor in chief

G. M. Mutanov,
academician of NAS RK

Editorial board:

A.A. Ashimov, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **Zh.Zh. Baigunchekov**, dr. eng. sc., prof., academician of NAS RK; **A.S. Dzhumadildayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **T.S. Kalmenov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **B.N. Mukhashev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.O. Otelbayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **N.Zh. Takibayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **S.N. Kharin**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.Sh. Zhantayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **V.N. Kosov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.A. Mussabayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **R. Oinarov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.S. Ramazanov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **N.M. Temirbekov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **U.U. Umirbayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

I.N. Vishnievski, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.M. Kovalev**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.A. Mikhalevich**, NAS Belarus academician (Belarus); **A. Pashayev**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **I. Tighineanu**, NAS Moldova academician (Moldova); **Joseph Banas**, prof. (Poland).

News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.
ISSN 1991-346X

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,

www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2016

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 1, Number 305 (2016), 66 – 74

**ANALYSIS OF ELASTIC AND INELASTIC SCATTERING
OF α -PARTICLES AND ^3He IONS FROM ^9Be , ^{13}C NUCLEI
AND DEUTERONS FROM ^{11}B NUCLEI AT LOW ENERGIES**

**N. Burtebayev¹, B. A. Duisebayev¹, Zh. K. Kerimkulov¹,
Y. S. Mukhamejanov², D. K. Alimov², D. M. Janseitov³, N. O. Saduev²,
N. V. Gluschenko¹, S. B. Sakuta⁴, R. J. Peterson⁵, L. I. Galanina⁶**

¹INP, Almaty, Kazakhstan, ²KazNU Almaty, Kazakhstan,
³ENU, Astana, Kazakhstan, ⁴NRC “Kurchatov institute”, Moscow, Russia,
⁵University of Colorado, Boulder, USA, ⁶TNP MSU, Moscow, Russia.
E-mail: nburtebayev@yandex.ru; janseit.daniar@gmail.com

Keywords: elastic and inelastic scattering, light charged particles, coupled channels method, deformation parameters, optical potential.

Abstract. Processes of elastic and inelastic scattering of light charged particles from ^9Be , ^{11}B , ^{13}C nuclei at energies $E_\alpha = 29, 40$ MeV, $E_h = 50, 60$ MeV and $E_d = 14,5$ MeV were studied in this paper. Angular distributions of elastic and inelastic scattering of deuterons at energy $E_d = 14,5$ MeV from ^{11}B nuclei were analyzed within coupled channels method, as a result of this analysis deformation parameters of the ^{11}B nucleus were obtained. Optimal parameters of the semi-microscopic potentials for $^9\text{Be} + ^3\text{He}$, $^{11}\text{B} + d$, ^9Be , $^{13}\text{C} + \alpha$ systems were calculated by fitting calculated values of the cross sections to experimental data.

УДК 539.171

**АНАЛИЗ УПРУГИХ И НЕУПРУГИХ РАССЕЙНИЙ α -ЧАСТИЦ
И ИОНОВ ^3He НА ЯДРАХ ^9Be , ^{13}C И ДЕЙТРОНОВ НА ЯДРАХ ^{11}B
ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ**

**Н. Буртебаев¹, Б. А. Дуйсебаев¹, Ж. К. Керимкулов¹,
Е. С. Мухамеджанов², Д. К. Алимов², Д. М. Джансейтов³, Н. О. Садуев²,
Н.В. Глущенко¹, С. Б. Сакута⁴, Р. Ж. Петерсон⁵, Л. И. Галанина⁶**

¹РГП ИЯФ, Алматы, Казахстан, ²КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
³ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан, ⁴РНИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия,
⁵Колорадский университет, Боулдер, США, ⁶НИИЯФ МГУ, Москва Россия

Ключевые слова: упругое и неупругое рассеяние, легкие заряженные частицы, метод связанных каналов, параметры деформации, оптический потенциал.

Аннотация. В работе исследованы процессы упругого и неупругого рассеяния легких заряженных частиц на ядрах ^9Be , ^{11}B , ^{13}C при энергиях $E_\alpha = 29, 40$ МэВ, $E_h = 50, 60$ МэВ и $E_d = 14,5$ МэВ. Проведен анализ угловых распределений неупругого рассеяния дейтронов при энергии $E_d = 14,5$ МэВ на ядрах ^{11}B по методу связанных каналов, в результате которого получены значения параметров деформации ядра ^{11}B . Вычислены оптимальные параметры полумикроскопических потенциалов для систем $^9\text{Be} + ^3\text{He}$, $^{11}\text{B} + d$, ^9Be , $^{13}\text{C} + \alpha$ из подгонок величин расчетных сечений к экспериментальным данным.

Введение. Измерение упругого и неупругого рассеяния легких заряженных частиц низких энергий на ядрах является важным источником информации о параметрах деформации распределения масс в ядре и переходных плотностях.

Среди ядер 1р-оболочки ядра ${}^9\text{Be}$ и ${}^{11}\text{B}$ являются сильно деформированным. Исследованию структуры состояний, даже самой нижней ротационной полосы этих ядер посвящено достаточно мало работ. Имеются работы по исследованию квадрупольной деформации ${}^{11}\text{B}$ с помощью процессов рассеяния ионов ${}^3\text{He}$ [1] и протонов [2]. Полученные данные о состояниях ядра ${}^{11}\text{B}$ далеко неоднозначны.

Поэтому в данной работе мы исследовали квадрупольную и гексадекапольную деформацию ядер ${}^9\text{Be}$ и ${}^{11}\text{B}$ с помощью упругих и неупругих рассеянии легких заряженных частиц при низких энергиях на нижних состояниях основной ротационной полосы $3/2^-$. Проведены соответствующие анализы по методу связанных каналов углового распределения неупругих рассеяний дейтронов на ядрах. Для сравнения приведены анализ данных по упругому рассеянию альфа-частицу на ядрах ${}^{13}\text{C}$ при энергии 29 МэВ.

Ядро ${}^9\text{Be}$ нечетное, сильно деформированное. Подходящая модель для описания – деформированный остов ${}^8\text{Be}$ + нейтрон. В спектре выделяются вращательные полосы, построенные на основном $3/2^-$ -(осн.с.), $5/2^-$ (2.43 МэВ), $7/2^-$ (6.38 МэВ) и возбужденных состояниях остова $1/2^-$ (2.78 МэВ), $3/2^-$ (5.59 МэВ), $5/2^-$ (7.94 МэВ), $7/2^-$ (11.28 МэВ). Полосы между собой связаны за счет кориолисова взаимодействия. В этих состояниях последний нейтрон находится в нижнем состоянии. Эти вращательные уровни можно считать с помощью компьютерных кодов CHUCK, ECIS, FRESCO.

Реакция ${}^9\text{Be}({}^3\text{He},\alpha){}^8\text{Be}$, как и другие реакции подхвата одного нейтрона, например (p,d) и (d,t) , широко используется для исследования дырочных состояний ядер. В сравнении с ними реакция $({}^3\text{He},\alpha)$ имеет свои особенности, делающие ее весьма ценным инструментом ядерной спектроскопии. Во-первых, она сильно экзотермична, поскольку в выходном канале образуется сильно связанное ядро ${}^4\text{He}$. Так энергия реакции в $({}^3\text{He},\alpha)$ на ~ 18 МэВ выше, чем в (p,d) и на ~ 14 МэВ, чем в (d,t) . Поэтому с помощью $({}^3\text{He},\alpha)$ можно исследовать сильно возбужденные состояния конечных ядер даже при сравнительно небольшой энергии пучка.

1. Экспериментальная методика и результаты измерений. Экспериментальные угловые распределения упругого и неупругих рассеяний α -частиц, ионов ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^9\text{Be}$, ${}^{13}\text{C}$ и дейтронов на ядрах ${}^{11}\text{B}$ измерены на выведенных пучках изохронного циклотрона У-150М Института ядерной физики Республики Казахстан при энергиях $E_\alpha = 29, 40$ МэВ, $E_n = 50, 60$ МэВ и $E_d = 14.5$ МэВ.

Толщины мишеней определяли на линейном ускорителе УКП-2-1 РГП ИЯФ РК. Для примера определения толщины бора производились путем измерения кривых выхода реакции ${}^{27}\text{Al}(p,\gamma){}^{28}\text{Si}$ в районе резонанса $E_p = 992$ кэВ [3] с использованием алюминиевой фольги и напыленной мишени. Смещение этого резонанса в реакции ${}^{27}\text{Al}(p,\gamma){}^{28}\text{Si}$, обусловленное потерей протонами энергии при прохождении пленки ${}^{11}\text{B}$, составило 62,0 кэВ, чему соответствовала толщина мишени 320 мкг/см². Такой метод позволил определить толщину мишени с погрешностью не более 5%. Толщины мишеней из бериллия и углерода определялись аналогичным образом.

Регистрация и идентификация рассеянных частиц осуществлялась стандартной ΔE - E методикой. В качестве счетчиков использовались кремниевые полупроводниковые детекторы фирмы ORTEC. Величина тока на мишени изменялась в зависимости от угла в пределах от нескольких единиц до 100 нА. Примерный энергетический спектр рассеянных α -частиц и дейтронов представлен на рисунке 1.

Угловые распределения упругого и неупругого рассеяния измерялись в диапазоне углов $\theta_{\text{лаб}}$ от 10 до 120 - 170° с шагом 1-2° для передней полусферы и 3-5° - для обратной. Телесный угол системы регистрации составлял 4.22×10^{-5} ср. Энергетическое разрешение E детектора при малых углах находилось в пределах (200-250) кэВ, а при больших - в пределах (300-350) кэВ и определялось, в основном, разбросом энергии в пучке циклотрона и толщиной мишени.

На рисунке 2 представлены дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния α -частиц на ${}^9\text{Be}$, ${}^{13}\text{C}$. На рисунке 3 приведены экспериментальные данные по рассеянию дейтронов на ядрах бора при трех энергиях. Характерным для них является проявление дифракционной структуры во всем угловом диапазоне.

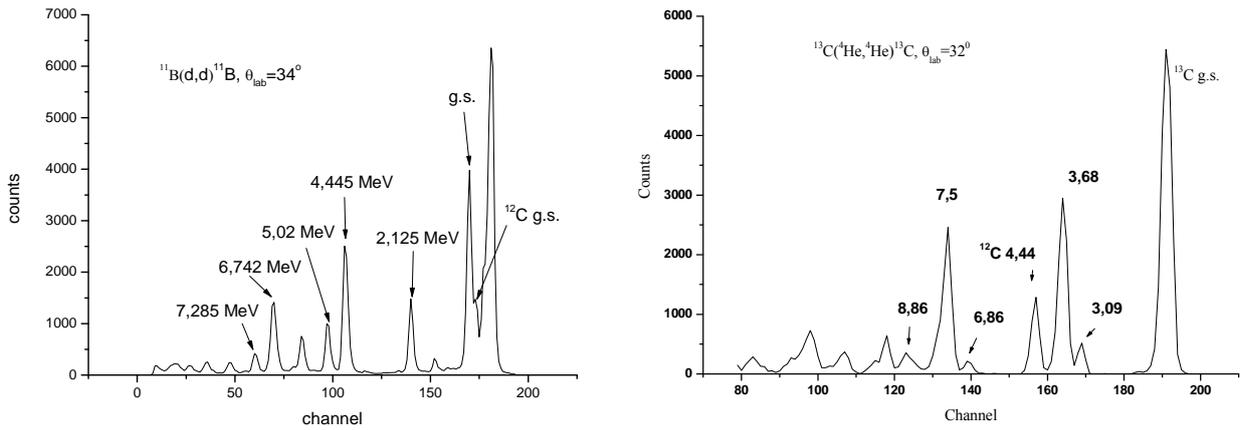


Рисунок 1 – Энергетические спектры рассеянных дейтронов на ядрах ^{11}B и α -частиц на ядрах ^{13}C

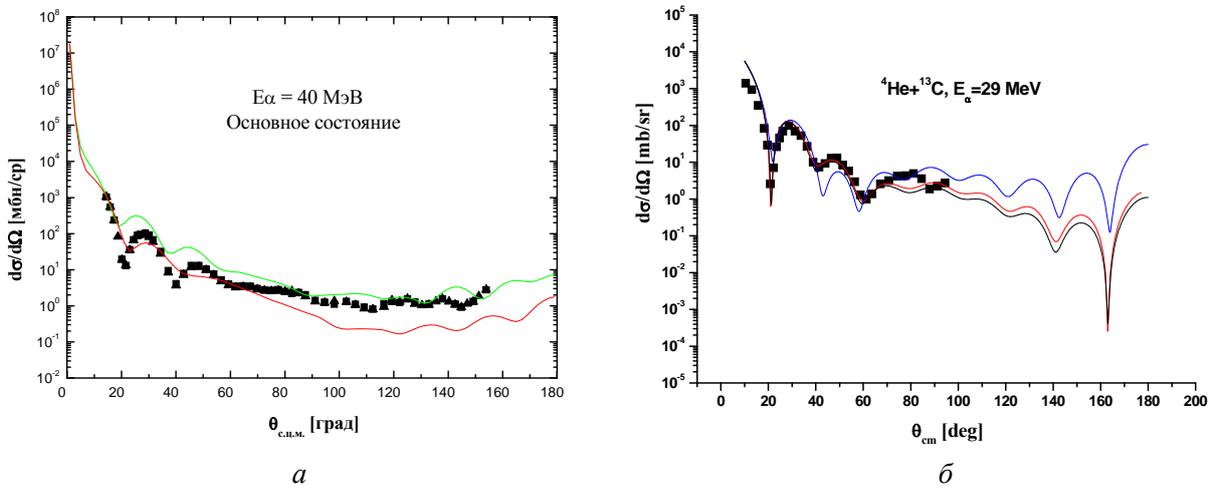


Рисунок 2 – Дифференциальные сечения упругого рассеяния альфа-частиц на ядрах ^9Be и ^{13}C при энергиях $E = 40$ МэВ и $E = 29$ МэВ, соответственно. Сплошными кривыми приведены расчеты в рамках оптической модели ядра и модели двойной свертки с параметрами, взятыми из таблицы 1

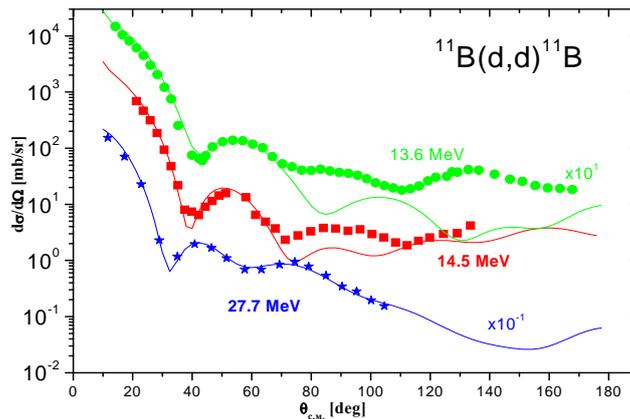


Рисунок 3 – Угловые распределения упругого рассеяния дейтронов на ядре ^{11}B при энергиях 13.6 [4], 14.5, 27.7 [5] МэВ. Символы – экспериментальные данные по упругому рассеянию; сплошная кривая – расчет по ОМ

2. Анализ экспериментальных данных по упругому рассеянию. 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. В рамках этой модели упругое

рассеяние описывается комплексным потенциалом взаимодействия с радиальной зависимостью в форме Вудс-Саксона:

$$U(r) = -Vf(x_v) - i[Wf(x_w)] + V_C(r), \quad (1)$$

где $f(x_i) = (1 + \exp(x_i))^{-1}$, $x_i = (r - R_i) / a_i$, $R_i = r_i A^{1/3}$, $V_C(r)$ - кулоновский потенциал равномерно заряженной сферы радиусом $R = 1,28 A^{1/3}$ фм. Учитывая компактные размеры налетающей частицы, мы ограничились объемным типом потенциала поглощения для мнимой части.

Параметры оптических потенциалов (ОП) подбирались таким образом, чтобы достичь наилучшего согласия между теоретическими и экспериментальными угловыми распределениями. Теоретические расчеты выполнялись по программе FRESCO. Автоматический поиск оптимальных параметров ОП производился путем минимизации величины χ^2/N . Для ограничения дискретной неоднозначности в параметрах ОП были использованы рекомендации, данные в работе [6] для α -частичного рассеяния. Значения радиальных параметров потенциала взаимодействия, полученные в этой работе из глобальной зависимости параметров ОП, r_v и r_w были зафиксированы, и подгонка теории к эксперименту осуществлялась при вариации остальных 4 параметров ОП (V_R , W , a_R и a_W). Параметры ОП для ядра ${}^9\text{Be}$ были рассчитаны с использованием глобальной систематики Nolte et al [6].

Таблица 1 – Параметры оптических потенциалов для α -частичного рассеяния на ядрах ${}^9\text{Be}$ и ${}^{13}\text{C}$

Набор	V_R , МэВ	r_R , Фм	a_R , Фм	N_r	W , (МэВ)	r_w , Фм	a_w , Фм	r_c , Фм
A (${}^9\text{Be}$)	102.81	1.245	0.799		17.09	1.57	0.65	1,28
A (${}^{13}\text{C}$)	147,22	1,112	0,736		12,844	1,6	0,267	1,28
B (${}^{13}\text{C}$)	142,23	1,57	0,762		15,77	1,57	731	1,28
DF (A)				1,284	16,635	1,6	731	1,28

Таблица 2 – Параметры оптических потенциалов для рассеяния дейтронов на ядрах ${}^{11}\text{B}$

E , МэВ	V , МэВ	r_v , фм	a_v , фм	W , МэВ	r_w , фм	a_w , фм	χ^2/N
13.6	80.70	1.17	0.993	33.94	1.322	0.516	32.33
14.5	86.8	1.17	0.993	7.040	1.322	0.945	30.17
27.7	83.13	1.17	0.844	16.251	1.322	0.813	27.7

Данные по упругому рассеянию ионов ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^9\text{Be}$ при энергиях $E_h = 50$ и 60 МэВ анализировались с использованием ОП из работы [7] в качестве стартовых параметров. В расчетах был применен поверхностный тип поглощения. Оптимальные наборы приведены в таблице 3. Результаты описания данных по упругому рассеянию ионов ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^9\text{Be}$ показаны на рисунке 4. Как видно из рисунка, оптическая модель корректно воспроизводит дифференциальные сечения упругого рассеяния в передней полусфере, где доминирует потенциальное рассеяние. Подъем сечения в задней полусфере удастся воспроизвести с учетом вклада механизма передачи кластера ${}^3\text{He}$. Вклад механизма передачи кластера в сечения упругого рассеяния было рассчитано в рамках метода искаженных волн с использованием программы DWUCK5.

Таблица 3 – Оптимальные параметры оптических потенциалов для рассеяния ионов ${}^3\text{He}$ на ядрах ${}^9\text{Be}$

E , МэВ	V_R , эВ	r_R , Фм	a_R , Фм	W_s , (МэВ)	r_w , Фм	a_w , Фм	r_c , Фм
50	93.4	1.15	0.72	11.9	1.50	0.80	1.28
60	114.0	1.15	0.87	13.7	1.59	0.80	1.28

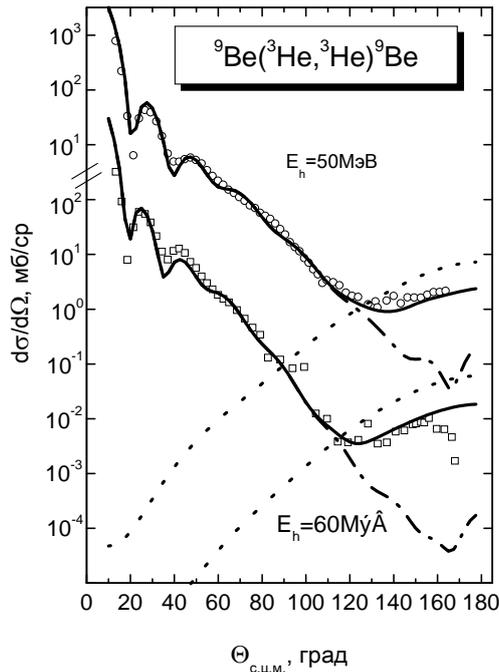


Рисунок 4 – Символы – экспериментальные данные, сплошная линия расчет по ОМ с набором ОП В, пунктирная – расчет сечений тяжелого срыва с тем же набором. Сплошная линия – сумма двух сечений

3. Анализ рассеяния дейтронов, α -частиц ионов ^3He по методу связанных каналов. Для анализа данных по рассеянию на сильно деформированных ядрах, у которых первые возбужденные уровни имеют коллективную природу, целесообразно использовать версию метода связанных каналов (МСК), в которой действительная часть оптического потенциала задается в следующем виде:

$$V(\vec{r}) = V_0 \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r - R(\theta, \varphi)}{a_0}\right)}, \quad (2)$$

Так, например, в рамках ротационной модели возбужденное ядро предполагается постоянно деформированным, и радиус половинного спада потенциала определяется как

$$R(\theta) = R_0 \left[1 + \sum_l \beta_l Y_{l0}(\theta) \right], \quad (3)$$

где β_l – параметры деформации.

В формуле (2) сферически-симметричная часть потенциала описывает упругое рассеяние, а последующие члены, соответствующие отклонению потенциала от сферически-симметричного, описывают неупругие переходы.

Расчеты угловых распределений для возбужденных состояний ^{11}B проведено при двух значениях энергии с использованием наборов ОП из таблицы по схеме связи $3/2^- + 5/2^- + 7/2^-$ с использованием программы ECIS88.

Удовлетворительное согласие данных по неупругому рассеянию дейтронов на ядрах ^{11}B для основной полосы (рисунок 5) достигнуто при следующих параметрах деформации: $\beta_2 = 0.4$ и $\beta_4 = 0.1$, величины которых находятся в согласии с литературными данными.

Описание данных по неупругому рассеянию альфа-частиц на ядрах бериллия представлено на рисунке 6 для возбужденных уровней основной полосы отрицательной четности – $5/2^-(2.43 \text{ МэВ})$, а также второй полосы положительной четности – $1/2^+(1.68 \text{ МэВ})$, $5/2^+(3.05 \text{ МэВ})$, $3/2^+(4.70 \text{ МэВ})$. Уровни для второй полосы идентифицируются как нейтронное гало состояния для возбужденных уровней ядра ^9Be . Расчеты дифференциальных сечений выполнены по программе FRESKO с

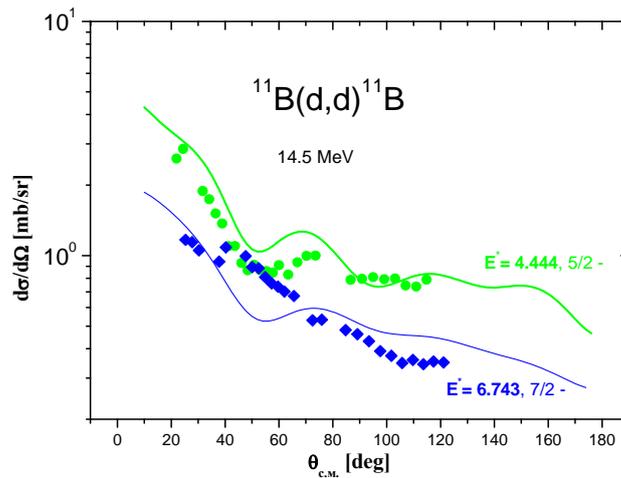


Рисунок 5 – Угловые распределения дифференциальных сечений и неупругого рассеяния дейтронов на ядре ^{11}B . Символы – экспериментальные данные, сплошные линии – расчет по МСК

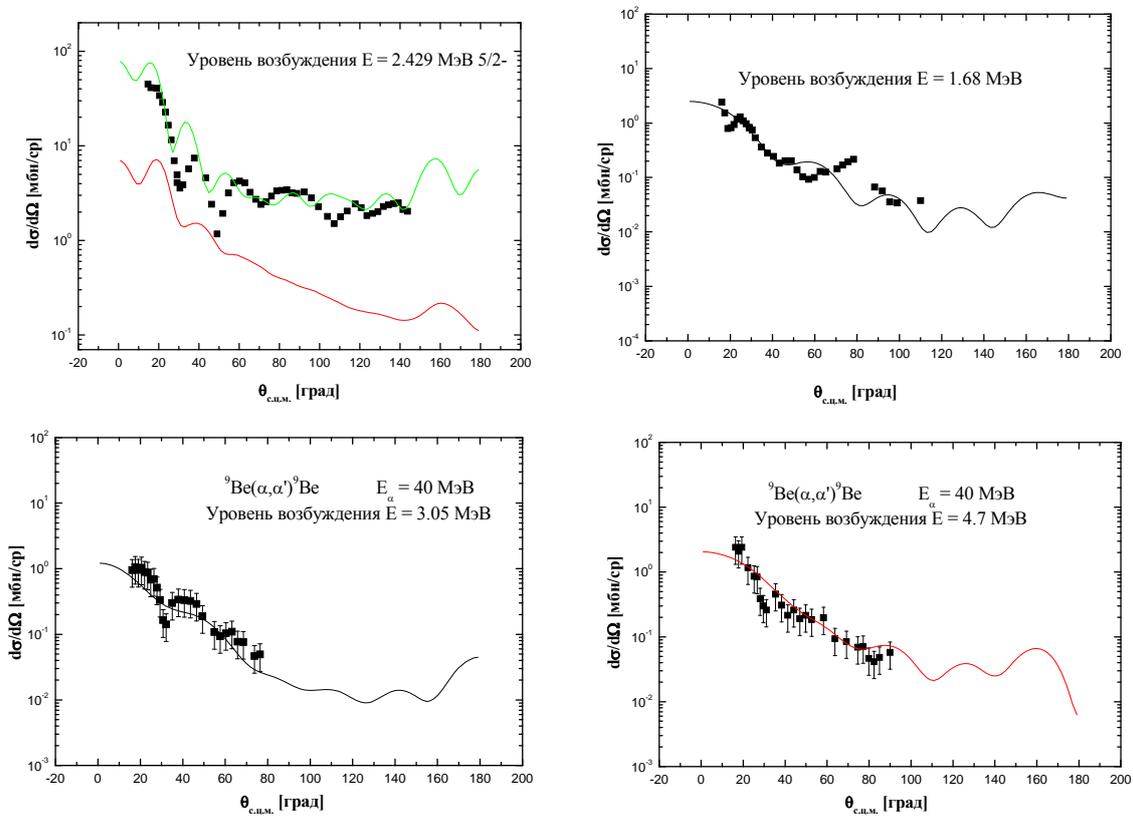


Рисунок 6 – Угловые распределения неупругого рассеяния альфа-частиц на ядрах ^9Be при энергии 40 МэВ. Символы – экспериментальные данные по упругому рассеянию; сплошная кривая – расчет по FRESKO

использованием ОП из таблицы 1. Достигнуто удовлетворительное согласие расчетных величин с экспериментальными сечениями как для полосы отрицательной, так и для полосы аномальной четностей.

4. Анализ данных $^9\text{Be}(^3\text{He},\alpha)^8\text{Be}$ в рамках метода связанных каналов для реакций. Жесткой части энергетического спектра α -частиц из реакции $^9\text{Be}(^3\text{He},\alpha)^8\text{Be}$ наблюдаются два малоинтенсивных пика, соответствующие переходам в основное (0^+) и первое возбужденное ($E_x = 3.04$ МэВ, 2^+) состояния ядра ^8Be . В мягкой части спектра видны очень интенсивные переходы в области энергий возбуждения 16.0 – 20 МэВ.

Первая группа состояний, очевидно, соответствует подхвату валентного слабо связанного в ${}^9\text{Be}$ $p_{3/2}$ –нейтрона (энергия отделения $\varepsilon_n = 1.67$ МэВ). Подхват более связанного $p_{3/2}$ или $p_{1/2}$ – нейтрона дает спектр состояний с $J^\pi = 1^+, 2^+$ и 3^+ . В области, где наблюдаются интенсивные пики, известны состояния с такими характеристиками – это 16.626 МэВ (2^+), 16.922 (2^+), 17.640 МэВ (1^+ , $T=1$), 18.150 (1^+ , $T=0$), 19.07 МэВ (3^+ , $T=1$) и 19,240 МэВ (3^+ , $T=0$) [8 257]. Первые два уровня сильно смешаны по изоспину.

Таким образом, спектр возбуждения ядра ${}^8\text{Be}$, образующегося в результате реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He},\alpha){}^8\text{Be}$, свидетельствует в пользу преобладания одноступенчатого механизма подхвата в этой реакции.

Сильная разница в интенсивностях переходов в жесткой и мягкой частях спектра есть кинематический эффект, связанный с рассогласованием траекторий во входном и выходном каналах при переходе в состояния с низкими энергиями возбуждения ($Q_{\text{очн.сост.}} = +18.912$ МэВ), что и объясняет их малую величину сечения. С ростом энергии возбуждения, когда $Q \sim 0$, эффект рассогласования пропадает и сечения сильно возрастают.

В угловых распределениях реакций (${}^3\text{He},\alpha$) на ${}^9\text{Be}$ при энергиях 50 и 60 МэВ наблюдаются значительный подъем сечения под обратными углами. Проведенный анализ реакции (${}^3\text{He},\alpha$) на ${}^9\text{Be}$ с переходом в основное состояние ядра ${}^8\text{Be}$ показал, что простой механизм подхвата одного нейтрона (диаграмма *a*, рисунок 7) не в состоянии описать поведение дифференциальных сечений в полном угловом диапазоне. Вместе с тем является очевидным, что из-за сравнительно малой энергии связи ядра ${}^9\text{Be}$ относительно развала на $\alpha + {}^5\text{He}$ ($\varepsilon_\alpha = 2.47$ МэВ) велика вероятность вылета α -частицы из ядра мишени с передачей ${}^5\text{He}$ налетающей частице (диаграмма *б*, рисунок 7).

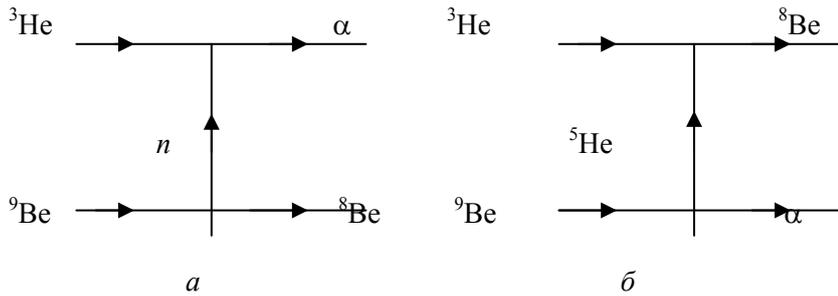


Рисунок 7 – Механизм передачи кластера

Как известно, подобный механизм объяснил аномальный рост сечений под большими углами в рассеянии ${}^3\text{He}$ на легких сильно кластеризованных ядрах (см. выше).

Процесс, в котором конечная частица вылетает из ядра мишени, принято называть обменным или тяжелым срывом. Он физически не отличим от механизма подхвата нейтрона, так как в конечном состоянии образуются одни и те же частицы (α и ${}^8\text{Be}$). Дифференциальные сечения реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He},{}^8\text{Be})\alpha$ рассчитывались по формуле

$$(d\sigma/d\Omega)_{\text{эксп}} = S_1 S_2 (d\sigma/d\Omega)_{DW}, \quad (4)$$

где $(d\sigma/d\Omega)_{DW}$ – сечения, вычисленные по программе FRESKO, а S_1 и S_2 – кластерные спектроскопические факторы в представлении ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^5\text{He}$ и ${}^8\text{Be} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^5\text{He}$. Сравнение рассчитанных сечений с экспериментальными данными приведено на рисунке 8.

Спектроскопические факторы могут быть рассчитаны в рамках трехчастичной *aal* модели [9] или на основе многочастичной модели оболочек [10]. В настоящей работе их значения были получены в рамках трансляционно-инвариантной модели оболочек с помощью программы DESNA в [11]. Для основного состояния ${}^8\text{Be}$ спектроскопический фактор оказался равным 1.1, а для ${}^9\text{Be}$ – 0.81.

Для расчета искажений во входном (${}^3\text{He} + {}^9\text{Be}$) и выходном (${}^4\text{He} + {}^8\text{Be}$) каналах использовались потенциалы, приведенные в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры ОП для входного и выходного каналов реакций ($^3\text{He}, \alpha$) на ядре ^9Be

	$-V$, МэВ	r_V , фМ	a_V , фМ	$-W$, МэВ	r_W , фМ	a_W , фМ
$^3\text{He}+^9\text{Be}$	93.44	1.15	0.72	11.9*	1.5	0.80
$^4\text{He}+^8\text{Be}$	89.4	1.245	0.800	20.0	1.57	0.652

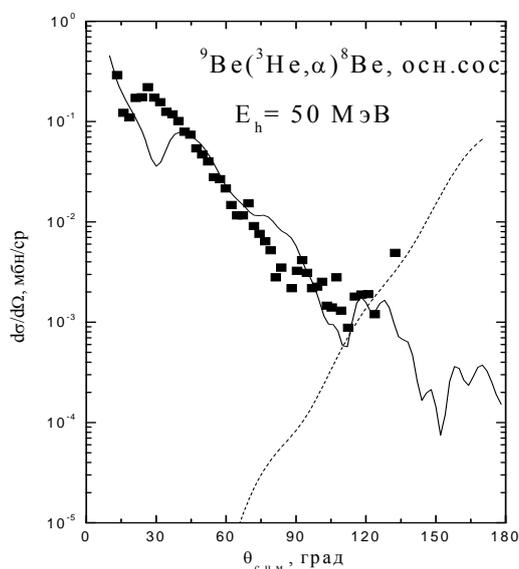


Рисунок 8 – Дифференциальные сечения реакций ($^3\text{He}, \alpha$) на ядре ^9Be . Символы – эксперимент, сплошная кривая – расчет по FRESKO реакции подхвата нейтрона, штриховая расчет – реакции тяжелого срыва

Таким образом, одновременный учет вклада двух механизмов в формировании сечения реакций ($^3\text{He}, \alpha$) на ядре ^9Be в рамках программы FRESKO позволил описать экспериментальные данные в полном угловом диапазоне.

Заключение. Были измерены экспериментальные угловые распределения упругого и неупругого рассеяния дейтронов на ядрах ^{11}B ; $^3\text{He}, \alpha + ^9\text{Be}, \alpha + ^{13}\text{C}$ при энергии $E_d = 14,5$ МэВ, $E_\alpha = 29, 40$ МэВ, $E_h = 50$ МэВ.

В рамках МСК получены значения параметров деформации ядра ^{11}B из анализа экспериментальных данных по упругому и неупругому рассеянию дейтронов.

Достигнуто удовлетворительное согласие расчетных дифференциальных сечений с экспериментальными, полученными из данных по неупругому рассеянию альфа-частиц на ядрах бериллия, как для отрицательной полосы, так и для полосы аномальной четности.

Вычислены оптимальные параметры полумикроскопических потенциалов для систем $^3\text{He}, \alpha + ^9\text{Be}, d + ^{11}\text{B}, \alpha + ^{13}\text{C}$ из подгонок расчетных величин сечений с экспериментальными данными. Таким образом, как показывают анализы экспериментальных данных по упругим и неупругим рассеяниям α -частиц, ионов ^3He и дейтронов на ядрах $^9\text{Be}, ^{11}\text{B}$ и ^{13}C все данные можно описать глобальными параметрами потенциалов взаимодействия в форме Вудс-Саксона с учетом кластерных характеристик исследуемых ядер.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] O.Aspelund, D.Ingham, A.Djaloeis, H.Kellerer and C.Mayer-Borricke, Nucl.Phys., A231,115, (1974).
- [2] B.Goeffrion *et al.*, Nucl.Phys., A116,209, (1968).
- [3] Bulter J.W. Table of (p, γ) resonances by proton energy: $E = 0.163 - 3.0$ MeV. // U.S. Naval Research Laboratory. NRL Report. – 1959. – P. 5282-5299.
- [4] A.N.Vereshchagin, I.N.Korostova, L.S.Sokolov, V.V.Tokarevskii, I.P.Chernov Investigation of elastic scattering of deuterons on light nuclei with 13.6 MeV energy. // Bull. Russian Academy of Sciences – Physics. 1969.-Vol.32. p.573.
- [5] R.J.Slobodrian Scattering of 27.2 MeV deuterons on beryllium and boron // Nuclear Physics. 1962.Vol.32, p.684.

- [6] Nolte M., Machner H., Bojowald J. Global optical potential for α -particles with energies above 80 MeV // *Phys.Rev.*, 1987, C36, P.1312-1320.
- [7] Trost H.-J., Schwarz A., Feindt U., Heimlich F., Heinzel S., Hintze J., Korber F., Lekebusch R., Lezoch P., Mock G., Paul W., Roick E., Wolff M., Worzeck J. and Strohbush U. Mass Dependence of ^3He Optical Potentials and Volume Integrals in the Range from Light to Medium Weight Nuclei: Selection of a "physical" potential family // *Nucl.Phys.*, 1980, A337, P.377-388.
- [8] F. Ajenberg-Selove. Energy levels of light nuclei // *Nucl.Phys.*, 1988, A490, P.1.
- [9] Кукулин В.И. и др. Спектры ядер ^9Be и ^9B в трехчастичной мультикластерной модели. // *Изв. РАН, Сер. физ.* 1993, Т.53, N5, С.170-179.
- [10] Balashov V.V., Boyarkina A.N., Rotter J. Fragmentation theory in the quasi-elastic scattering of fact particles on light nuclei // *Nucl. Phys.*, 1964, V.59, N 3, P.417-443.
- [11] Rudchik A.T., Koshvhy E.I., Budzanowski A., Sindak R., Szczurek A., Mashkarov Yu., Turkiewicz L., Zalynbovsky I.I., Ziman V., Burtbaev N., Duisebaev A., Adodin V.V. Strong coupled-channel effects in the $^9\text{Be}(^3\text{He}, ^3\text{He})$, $^9\text{Be}(^3\text{He}, ^7\text{Be})$ and $(^3\text{He}, ^6\text{Li})$ reactions at $E(^3\text{He})=60$ MeV // *Nuc.Phys.*, 1996, A609, P.147-162.

REFERENCES

- [1] O.Aspelund, D.Ingham, A.Djaloeis, H.Kellerer and C.Mayer-Boricke, *Nucl.Phys.*, A231,115, (1974)
- [2] B.Geoffrion *et al.*, *Nucl.Phys.*, A116,209, (1968)
- [3] Bulter J.W. Table of (p,γ) resonances by proton energy: $E = 0.163 - 3.0$ MeV. // U.S. Naval Research Laboratory. NRL Report. – 1959. – P. 5282-5299
- [4] A.N.Vereshchagin, I.N.Korostova, L.S.Sokolov, V.V.Tokarevskii, I.P.Chernov Investigation of elastic scattering of deuterons on light nuclei with 13.6 MeV energy. // *Bull. Russian Academy of Sciences – Physics.* 1969.-Vol.32. p.573
- [5] R.J.Slobodrian Scattering of 27.2 MeV deuterons on beryllium and boron // *Nuclear Physics.* 1962.Vol.32, p.684
- [6] Nolte M., Machner H., Bojowald J. Global optical potential for α -particles with energies above 80 MeV // *Phys.Rev.*, 1987, C36, P.1312-1320.
- [7] Trost H.-J., Schwarz A., Feindt U., Heimlich F., Heinzel S., Hintze J., Korber F., Lekebusch R., Lezoch P., Mock G., Paul W., Roick E., Wolff M., Worzeck J. and Strohbush U. Mass Dependence of ^3He Optical Potentials and Volume Integrals in the Range from Light to Medium Weight Nuclei: Selection of a "physical" potential family // *Nucl.Phys.*, 1980, A337, P.377-388.
- [8] F. Ajenberg-Selove. Energy levels of light nuclei // *Nucl.Phys.*, 1988, A490, P.1.
- [9] Kukulini V.I., et al. The spectra of the nuclei ^9Be and ^9B in the three-body multi-cluster model. // *Math. Russian Academy of Sciences, Ser. nat.* 1993 V.53, N5, p.170-179. (in Russ.).
- [10] Balashov V.V., Boyarkina A.N., Rotter J. Fragmentation theory in the quasi-elastic scattering of fact particles on light nuclei // *Nucl. Phys.*, 1964, V.59, N 3, P.417-443.
- [11] Rudchik A.T., Koshvhy E.I., Budzanowski A., Sindak R., Szczurek A., Mashkarov Yu., Turkiewicz L., Zalynbovsky I.I., Ziman V., Burtbaev N., Duisebaev A., Adodin V.V. Strong coupled-channel effects in the $^9\text{Be}(^3\text{He}, ^3\text{He})$, $^9\text{Be}(^3\text{He}, ^7\text{Be})$ and $(^3\text{He}, ^6\text{Li})$ reactions at $E(^3\text{He})=60$ MeV // *Nuc.Phys.*, 1996, A609, P.147-162.

ТӨМЕН ЭНЕРГИЯЛАРДА ^9Be , ^{13}C ЯДРОЛАРЫНАН α -БӨЛШЕКТЕР МЕН ^3He ИОНДАРЫНЫҢ ЖӘНЕ ^{11}B ЯДРОСЫНАН ДЕЙТРОНДАРДЫҢ СЕРПІМДІ ЖӘНЕ СЕРПІМСІЗ ШАШЫРАУЫН ТАЛДАУ

Н. Буртебаев¹, Б. А. Дуйсебаев¹, Ж. К. Керимкулов¹, Е. С. Мухамеджанов², Д. К. Алимов², Д. М. Джансейтов³, Н. О. Садуев², Н. В. Глущенко¹, С. Б. Сакута⁴, Р. Ж. Петерсон⁵, Л. И. Галанина⁶

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

³Л. Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан, ⁴ҰЗЦ “Курчатов институты”, Мәскеу, Ресей,

⁵Колорадо университеті, Боулдер, АҚШ, ⁶ЯФҒЗИ ММУ, Мәскеу, Ресей

Тірек сөздер: серпімді және серпімсіз шашырау, жеңіл зарядталған бөлшектер, байланысқан арналар әдісі, деформация параметрлері, оптикалық потенциал.

Аннотация. Осы жұмыста зарядталған жеңіл бөлшектердің $E_a=29, 40$ МэВ, $E_h = 50, 60$ МэВ және $E_d = 14.5$ МэВ энергияларда ^9Be , ^{11}B , ^{13}C ядроларымен әсерлесуінің серпімді және серпімсіз шашырауы процестері зерттелді. $E_a=14,5$ МэВ энергияда дейтрондардың серпімді және серпімсіз шашырауының эксперименталдық мәліметтерінен ^{11}B ядросы үшін деформация параметрінің мәні алынды және байланысқан арналар әдісі бойынша серпімсіз шашыраудың бұрыштық таралуына талдау жүргізілді. $^9\text{Be}+^3\text{He}$, $^{11}\text{B}+d$, ^9Be , $^{13}\text{C}+\alpha$ жүйелері үшін эксперименталды мәліметтер қималарына жартылай микроскопиялық потенциалдың оптималды параметрлері есептелді.

Поступила 13.01.2016 г.

**Publication Ethics and Publication Malpractice
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

[www:nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)

<http://www.physics-mathematics.kz>

Редактор *М. С. Ахметова*
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 16.01.2016.
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.
10,7 п.л. Тираж 300. Заказ 1.