

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**

4 (302)

ШІЛДЕ – ТАМЫЗ 2015 ж.

ИЮЛЬ – АВГУСТ 2015 г.

JULY – AUGUST 2015

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 е ң 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, 2015

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, 2015

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 4, Number 302 (2015), 159 – 166

**DESCRIPTION OF SCATTERING PROCESSES ^3He ISOTOPES $^{28,30,32}\text{Si}$
STRONG COUPLING METHOD CHANNELS OF NUCLEAR REACTIONS****K. Baktybaev¹, A. Dalekhankyzy¹, N. O. Koilyk¹, M. K. Baktybaev²**¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,²Institute of nuclear physics RK, Almaty, Kazakhstan.**Keywords:** nucleus, nuclear states, nuclear reactions, the Hamiltonian.**Abstract.** The processes of interaction of ^3He particles with collective states of nuclei $^{28,30,32}\text{Si}$ by strongly-connected channels of nuclear reactions are studied. As the collective Hamiltonian able to take the expression patterns of the interacting bosons model (IBM).

УДК 539.12/.17

**ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАССЕЯНИЯ ^3He НА ИЗОТОПАХ $^{28,30,32}\text{Si}$
МЕТОДОМ СИЛЬНОЙ СВЯЗИ КАНАЛОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ****К. Бактыбаев¹, А. Далелханкызы¹, Н. О. Койлык¹, М. К. Бактыбаев²**¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,²Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан**Ключевые слова:** ядро, ядерные состояния, ядерные реакции, гамильтониан.**Аннотация.** Изучаются процессы рассеяния ^3He на коллективных состояниях сферических изотопов $^{28,30,32}\text{Si}$ методом сильной связи каналов ядерных реакций. В качестве Гамильтониана коллективных состояний ядер-мишени взяты оператор модели взаимодействующих бозонов.**I. Введение.** В настоящее время имеется большое количество экспериментальных данных по различным типам ядерных реакций, упругое и неупругое рассеяния ядерных частиц при низких и средних энергиях налетающей частицы.

Во многих ядрах имеются низколежащие состояния, которые обладают сильной коллективной природой, сечение неупругого рассеяния ядерных частиц на них имеют довольно большую величину. Возбуждение таких сложных процессов коллективного типа должно рассматриваться посредством метода сильной связи каналов (МССК).

По этому методу в качестве гамильтониана коллективных состояний ядер-мишеней, использовалось гамильтониан Бора-Маттельсона [1, 2]. На основе такого подхода было выполнено большое количество работ по описанию взаимодействия различных ядерных частиц с многими ядерными системами при низких и средних энергиях налетающей частицы.

В работе содержание этой теории МССК мы несколько видоизменили, приняв для описания коллективных состояний ядер-мишеней модель взаимодействующих бозонов (МВБ), в которой самые нижние состояния ядер рассматриваются как возбуждения взаимодействующих бозонов. Поскольку в работе изучается рассеяние ядерных частиц на сферических ядрах, то в гамильтониане МВБ оставляются члены, описывающие вибрационные состояния с SU(5)-симметрией. Для расчета используется та же программа ECIS 88 [3] несколько видоизмененная с заменой потенциала связывания каналов реакции на оператор взаимодействия частиц с бозонными коллективными возбуждениями ядер-мишеней.

Основной целью исследования является изучение процессов взаимодействия налетающих ядерных частиц с коллективными состояниями ядер-мишеней легкого и среднего атомного веса и извлекать необходимую информацию о свойствах и структуре взаимодействующих ядер.

В первой части работы излагается краткое содержание теории рассеяния частиц на коллективных состояниях ядер методом МССК с использованием МВБ, описывающей коллективные возбуждения как состояния взаимодействующих бозонов.

Теория МССК прилагается к исследованию рассеяния ${}^3\text{He}$ на основных состояниях легких ядер ${}^{28,30,32}\text{Si}$, при энергии налетающей частицы $E = 60,0 \pm 0,6$ МэВ. Точно учитывается влияние первых возбужденных состояний 2_1^+ ядер на процессы рассеяния основным уровнем 0_1^+ . Влияние других высоко лежащих возбужденных состояний на изучаемые процессы учитывается эффективно слабым изменением параметров оптического потенциала. Параметры оптического потенциала взяты из систематики С.М.Перей [4] и Института Ядерной физики [5]. Слабые изменения параметров не превышали квадратичных ошибок указанных систематик.

Теория рассеяния ${}^3\text{He}$ частиц на сильно связанных состояниях указанных легких ядер дает удовлетворительное описание процессов.

II. Краткое содержание теории МССК. Гамильтониан процессов рассеяния записывается в виде:

$$H = T + H_i + V(r, \theta, \varphi) = T + H_i + V_d + V_c, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия налетающей частицы и H_i – Гамильтониан движения внутренних нуклонов мишени-ядра.

Потенциал взаимодействия налетающей частицы с мишенью разделим на диагональную часть V_d и часть связывания каналов рассеяния частицы V_c .

$$V(r, \theta, \varphi) = V_d + V_c. \quad (2)$$

Волновая функция системы ψ определяется равенством:

$$\psi = r^{-1} \sum_{J_n \ln J_n} R_{J_n \ln J_n}(r) (Y_{\ln J_n} \otimes \Phi_{I_n})_{JM} = r^{-1} \sum_{J_n \ln J_n} R_{J_n \ln J_n}(r) \sum_{m_j M_n} (j_n I_n m_j M_n | JM) Y_{\ln j_n} \Phi_{I_n M_n}, \quad (3)$$

в которой канал, соответствующий n -состоянию мишени со спином $I_n M_n$ связывается с парциальной волной налетающей частицы $j_n m$ в полный угловой момент $J_n M_n$ системы, где $\Phi_{I_n M_n}$ – волновая функция ядра-мишени в n -состоянии, которая определяется из решения уравнения:

$$H_i \Phi_{I_n M_n} = \omega_n \Phi_{I_n M_n}. \quad (4)$$

Подставляя (1, 2, 3, 4) в полное уравнение Шредингера и умножая его на $(Y_{\ln j_n} \otimes \Phi_{I_n})_{JM}^*$ с левой стороны и интегрируя по всем координатам, за исключением радиальной переменной r и наконец, деля равенство на E_n , получаем уравнение:

$$\left(\frac{d^2}{d\rho_n^2} - \frac{\ln(\ln+1)}{\rho_n^2} - \frac{1}{E_n} + 1\right)R_{J_n \ln j_n} = E_n^{-1} \sum_{n \ln j_n} \left\langle \left(Y_{\ln j_n} \otimes \Phi_{I_n} \right)_{JM} \left| V_{cs} \left(Y_{\ln j_n'} \otimes \Phi_{I_n'} \right)_{JM} \right\rangle R_{J_n' \ln j_n'}(r) \quad (5)$$

где $\rho_n = k_n r$; k_n - волновое число.

Это уравнение представляет набор n связанных между собой уравнений.

Уравнение (5) является самым общим уравнением и не зависит от природы налетающей частицы или ядра-мишени. Эта система (5) носит название системы уравнений метода сильной связи каналов, а величины на правой стороне называются матричными элементами связи каналов. Через величины $V_c(\vec{r})$ происходит “зацепление” одночастичных уравнений.

Если в системе (5) $n=1,2,..$, т.е. учитываются только V_{12} и V_{21} недиагональные матричные элементы. Тогда получаем систему из двух уравнений:

$$\left[\frac{d^2}{d\rho_1^2} - \frac{l_1(l_1+1)}{\rho_1^2} + \frac{1}{E_1} V_{11} - 1 \right] R_1(\vec{r}) = -\frac{1}{E_1} V_{12} R_2(\vec{r}) \quad (6)$$

$$\left[\frac{d^2}{d\rho_2^2} - \frac{l_2(l_2+1)}{\rho_2^2} + \frac{1}{E_2} V_{22} - 1 \right] R_2(\vec{r}) = -\frac{1}{E_2} V_{21} R_1(\vec{r})$$

Эта система соответствует задаче об описании упругого и неупругого рассеяния, в которых участвуют кроме основного состояния еще одно возбужденное состояние ядра мишени при наличии сильной связи упругого и неупругого каналов. Это двухканальное приближение применимо, если среди состояний ядра-мишени можно выделить одно, наиболее сильно связанное с основным состоянием, и связь с остальными состояниями можно пренебречь.

Чтобы применить формализм МССК к описанию неупругого рассеяния ядерных частиц на коллективных состояниях ядер в качестве гамильтониана коллективных состояний использовалась так называемая геометрическая модель О.Бора и Б. Маттельсона [1]. В данной работе в качестве гамильтониана коллективных возбуждений используем гамильтониан модели взаимодействующих бозонов (МВБ) $SU(5)$ симметрии, который имеет вид:

$$H_i = H_0 + \varepsilon(d^+ d)^{(0)} + \frac{1}{2} \sum_{L=0,2,4} C_L (2L+1) [d^+ \cdot d^+]^{(L)} [d \cdot d]^{(L)} \quad (7)$$

где H_0 и $\varepsilon(d^+ d)$ – энергии основного и первого возбужденного состояния. А при учете большего количества d -бозонов с их взаимодействиями, то приходится включить следующий третий член равенства (7).

Явление взаимодействия налетающей частицы с ядром будем рассматривать феноменологически посредством оптического потенциала, который является комплексным и включает в себя, кроме общей ядерной частью, спин-орбитального и кулоновского взаимодействия. Кроме того, радиальная зависимость потенциала предполагается, имеет вид Вудс-Саксоновской функции.

$$V_d = (-V + iW)(1 + e)^{-1} - 4iW_D e'(1 + e')^{-2} - V_{so} \left(\frac{\lambda^2}{ar} \right) (\vec{\sigma} \cdot \vec{l}) e(1 + e)^{-2} + \frac{ZZ'e^2}{2R_e} \left(3 - \frac{r^2}{R_e^2} \right) \theta(R_e - r) - \frac{ZZ'e^2}{r} \theta(r - R_e). \quad (8)$$

В этом равенстве введено обозначение:

$$e = \exp\left(\frac{r - R_0}{a}\right); \quad e' = \exp\left(\frac{r - R_0'}{a'}\right)$$

где R_0, R_0' - средние радиусы оптического потенциала $R_0 = r_0 A^{1/3}$, $R_0' = r_0' A^{1/3}$; V, W, W_D, V_{so} - параметры оптического и спин-орбитального потенциалов взаимодействия.

Потенциал связи каналов можно в общей форме записать в виде:

$$V_c = \sum_{i,\lambda} v_\lambda^{(i)}(r)(Q_\lambda^{(i)} \cdot Y_x) \quad (9)$$

Q_λ - оператор, действующий только на координаты ядра-мишени. Вычисление матричных элементов этого оператора дает:

$$\langle (Y_{ij} \otimes \Phi_I)JM | V_c | (Y_{i'j'} \otimes \Phi_{I'})JM \rangle = \sum_{i,\lambda} v_\lambda^{(i)}(r) \langle I || Q_\lambda^{(i)} || I' \rangle A(l_j I, l'_j I', \lambda J) \quad (10)$$

где

$$A(l_j I, l'_j I', \lambda J) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} (-)^{J-I'-I+l+i'} \sqrt{(2l+1)(2l'+1)(2j+1)(2j'+1)} (ll'00(\lambda 0)W(jl_j I'; J\lambda))$$

где

$$Q_{\lambda_\mu}^{(1)} = d_{\lambda\mu}^+ d, \quad Q_{\lambda_\mu}^{(2)} = \frac{\sqrt{4\pi}}{(2\lambda_1+1)(2\lambda_2+1)} (\lambda_1 \lambda_2 00 | \lambda 0) C_L(2L+1) (d^+ d^+)^L (dd)^L \quad (11)$$

Волновые функции различных вибрационных состояний со спином IM и с одним и двумя бозонами:

$$|1; IM \rangle = d_{IM}^+ |0 \rangle; \quad |2; IM \rangle = \frac{1}{\sqrt{1+\delta_{\lambda_1 \lambda_2}}} (d_{\lambda_1}^+ d_{\lambda_2}^+)_{JM} |0 \rangle.$$

Для сферических ядер радиальная часть $v^{(\lambda)}(r)$ имеет вид.

$$v^{(\lambda)}(r) = 4\pi \int_0^1 \frac{-(v+iw)}{1 + \exp[(r-R_0(1 + \sum \beta_\lambda \varphi_{\lambda\mu}(\theta)/a)]} + \frac{-4iW_D \exp[(r-R_0(1 + \sum \beta_\lambda \varphi_{\lambda\mu}(\theta)/a)]}{[1 + \exp[(r-R_0(1 + \sum \beta_\lambda \varphi_{\lambda\mu}(\theta)/a)]]} \times Y_{\lambda\mu}(\theta) d \cos(\theta). \quad (12)$$

Кроме того, V_d имеет такой же вид, как и (8), за исключением, что первый член в (8) должен быть заменен на $v^{(\lambda)}(r)$ выраженному в (12).

Решение системы зацепляющихся дифференциальных уравнений для радиальных функции $R_{l_n j_n J}(\vec{r})$, с определенными граничными условиями, дает возможность найти элементы S-матрицы и построить сечения упругого и неупругого рассеяния.

Тогда для дифференциального сечения рассеяния получаем выражение:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\pi^2}{\hbar^4} \mu^2 \frac{k'}{k} \frac{1}{2S+1} \sum_L B_L P_L(\cos \theta), \quad (13)$$

где

$$B_L = \sum_{l'l'j'l'_j} \sum_{j_1 j_1'} (-)^{l'-l} (2J+1)(2J_1+1) Z \left(l j l_1 j_1 | \frac{1}{2} L \right) Z \left(l' j' j_1' l'_j | \frac{1}{2} L \right) W(j j_1 J_1 | IL) W(j' j_1' J_1 | I'L) \cdot \left| \langle JM l' j' I' | T | J_1 M_1 l'_j j_1' I'_1 \rangle \langle J_1 M_1 l'_j j_1' I'_1 | T | JM l j I \rangle \right|^2 \quad (14)$$

и

$$\langle \vec{K}' S \mu'_S I' M'_A | T | \vec{K} S \mu_S I M_A \rangle = i^{l'-l} Y_{IM-M_A-\mu_S}^* (\vec{K}) Y_{I'M-M'_A-\mu'_S} (\vec{K}') (IM - M_A - \mu_S S \mu_S | jM - M_A) \cdot (IM_A jM - M_A | JM) (I'M - M'_A - \mu'_S S \mu'_S | j'M - M'_A) (I'M'_A j'M - M'_A | JM) \cdot \langle l' j' I' JM | T | l j I JM \rangle. \quad (15)$$

Здесь Z – коэффициенты Благга-Виденхарна, W – коэффициенты Рака.

Отметим, что дифференциальное сечение (13) является общим и не зависит от того, в какой модели вычисляются элементы T- или S-матрицы. Это может быть оптическая модель для упругого рассеяния, метод связанных каналов или искаженных волн для неупругих процессов.

Метод связанных каналов в ядерных реакциях можно намного упростить, при использовании так называемого адиабатического приближения.

III. Приложения теории к рассеянию ^3He -частиц на легких ядрах $^{28,30,32}\text{Si}$ и сравнение их с экспериментальными данными. Теория рассеяния частиц ^3He с учетом связывания каналов рассеяния, приложена к процессам, происходящим на самых нижних состояниях сферических легких ядер $^{28,30,32}\text{Si}$. Мы рассмотрели рассеяния частиц ^3He с энергиями близкими к 60 МэВ на основных состояниях указанных ядер. Для облегчения компьютерного счета и с целью анализа возможности теории учитывались влияние только первых возбужденных состояний с $J = 2^+$ на основное состояние ядер. Такое рассмотрение связи каналов в этих ядрах можно считать приемлемым, поскольку, остальные возбужденные состояния находятся довольно высоко, примерно на 3 МэВ выше первого возбужденного состояния. Свойства этого процесса на многих ядрах легкой и средней атомной массы изучалась экспериментально неоднократно. Вместе с тем проводились теоретические анализы результатов экспериментов с использованием оптического потенциала различной модификации, фолдинг-потенциалов и методами искаженных волн.

Поскольку, мы учитываем взаимосвязь только двух нижних состояний, основного и первого возбужденного уровней, мы оставляем связанные между собой только два уравнения (6). Известно, что рассеяние частиц ^3He на основных состояниях ядер описывается, в общем, оптической моделью, с использованием комплексного Вудс-Саксоновского потенциала обычно получают разумное соответствия вычисленных сечений с экспериментальными данными [5, 6]. Для того, чтобы анализировать упругое рассеяние частиц ^3He на большие углы на некоторых работах [8, 9] приходилось обобщить Вудс-Саксоновский потенциал с добавлением к нему еще член, содержащий высокого порядка обычного потенциала Вудс-Саксоновского типа.

По описываемому нами методу сильной связи каналов мы провели теоретические вычисления дифференциальных сечений процессов рассеяния частиц ^3He на ядрах $^{28,30,32}\text{Si}$ на всем угловом диапазоне от 12 до 172°.

На рисунках 1, 2 и 3 представлены угловое распределение дифференциальных сечений. На них сплошными линиями изображены экспериментальная картина рассеяния ^3He частиц на ядрах $^{28,30,32}\text{Si}$ при энергии налетающей частицы $E = 60,0 \pm 0,6$ МэВ. Теоретические значения сечений даны пунктирной линией. Рассеяние происходит на основном состоянии 0^+ ядер с учетом влияния первых возбужденных состояний 2_1^+ .

Экспериментальные данные по сечениям процессов взяты из массива экспериментальных данных Института Ядерной физики Республики Казахстан [3-5], выполненных на изохронном циклотроне Института. Измерения $d\sigma/d\theta$ выполнены на благоприятных для эксперимента угловых расстояниях от 2 до 2,5°, в промежутках углов от 12 до 175°. Теоретические вычисления $d\sigma/d\theta$ выполнены через каждые 2,5° углов в общем диапазоне от 10 до 175°.

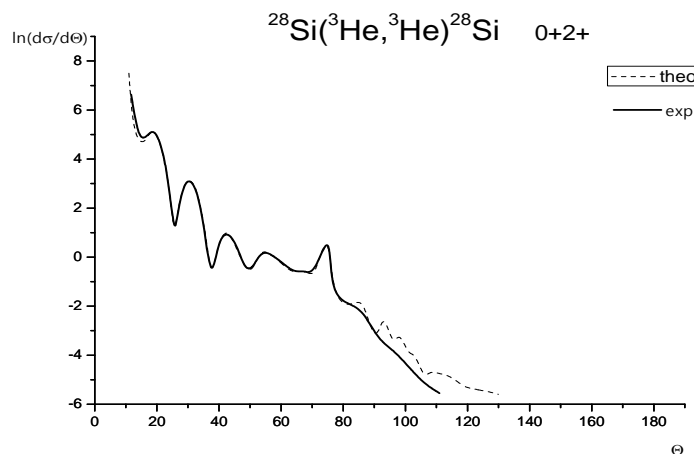


Рисунок 1 – Рассеяния ^3He на основном состоянии ^{28}Si

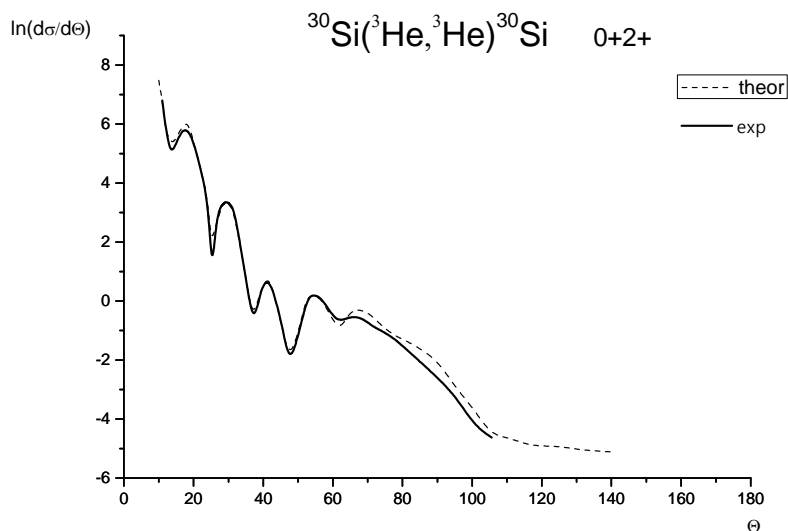


Рисунок 2. – Рассеяния ^3He на основном состоянии ^{30}Si

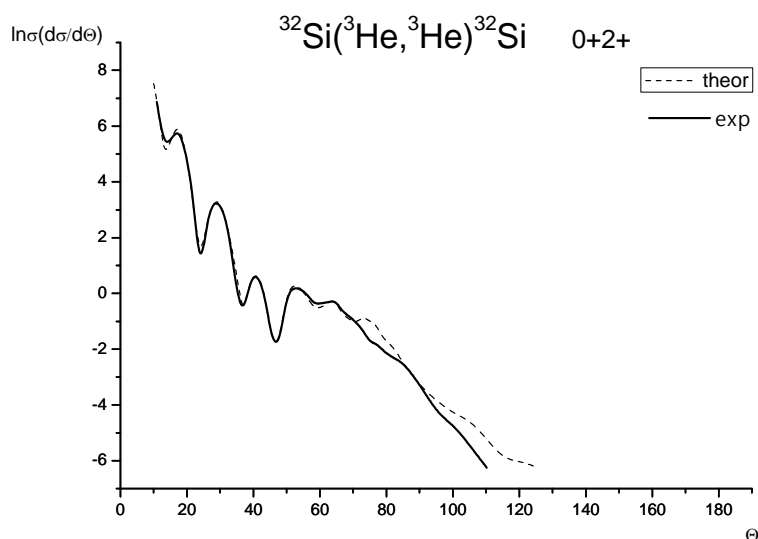


Рисунок 3. – Рассеяния ^3He на основном состоянии ^{32}Si

В качестве параметров потенциалов взяты компиляции феноменологических оптико-модельных параметров, выполненных группой Перель [3], и из данных ИЯФ РК [4, 5]. В таблице даны оптимальные параметры процессов взаимодействия при соответствующих энергиях налетающей частицы.

Оптимальные параметры взаимодействия частиц ^3He с ядрами

Ядро	V_0 (МэВ)	r_0 (Фм)	a_0 (Фм)	W_V (МэВ)	r_v (Фм)	a_v (Фм)	χ_R (МэВ·Фм ³)
^{28}Si	117,0	1,26	0,81	29,74	1.420	0,73	354
^{30}Si	115.7	1.155	0.805	12.92	1.449	0.997	10.21
^{32}Si	126.0	1.02	0.842	4.326	2.176	0.669	19.99

Численные вычисления проводились по компьютерной программе ECIS -88, созданной группой j. Raynal (Saclay, Франция) [3]. При этом в программе было осуществлено небольшое изменение, связанное с заменой свойств коллективных состояний, описываемых геометрической теорией О. Бара и Б. Моттельсона на физические величины описываемые моделью взаимодействующих бозонов.

Как видно из графиков 1, 2 и 3 при сравнении вычисленных сечений рассеяния с их экспериментальными значениями получим вполне согласованную картину. Особенно хорошее согласие имеется в диапазоне углов от начала координат до углов $125\text{--}130^\circ$ в пределах средне-квадратичных ошибок экспериментального измерения $\sigma(\theta)$. Однако теоретические величины сечения значительно отличаются от их экспериментальных значений на задних углах рассеяния в диапазоне больших углов от 125 до 175° . С самого начала можно было бы считать, что общее согласие по всему диапазону углов получим, если несколько изменим параметры оптических потенциалов. Однако, как показано аналогичные исследования, что получив удобное согласие на задних углах рассеяния, в передних углах картина несколько изменится. В некоторых исследованиях для получения общей согласованной картины рекомендует добавить дополнительный член в выражении оптического потенциала. Однако в таком случае растет число подгоночных параметров. Подчеркнем, что теоретические угловые распределения сечений рассеяния получены нами при тех же значениях параметров, которые использовались в других анализах процессов по другим подходам, особенно, по оптической модели.

Одним из важных путей улучшения выше указанной ситуации было бы использование разложения волновых функций, по некоторой линейной комбинацией функций гармонических колебаний поверхности ядра. По-видимому, следовало бы сделать к однобозонным волновым функциям малый добавок двух и даже трех бозонных функций возбуждения.

В то же время, следует помнить, что в процессах рассеяния на задних углах лежит известная физическая причина, связанная с поглощением частиц ${}^3\text{He}$. Но это явление, по-видимому лежит вне возможности теории сильно-связанных каналов.

Но в целом, метод сильно-связанных каналов, хорошо описывает упругие и неупругие рассеяния частиц ${}^3\text{He}$ на четно-четных легких ядрах, при этом следует учесть, то обстоятельство, что в нашем варианте теории в качестве операторов и волновых функций коллективного движения нуклонов в ядре-мишени использовались гамильтониан модели взаимодействующих бозонов и его собственные функции. Наш вариант теории, в целом, удовлетворительно работает при объяснении свойств упругих и неупругих взаимодействий налетающих частиц с коллективными состояниями ядер-мишеней.

IV. Заключение.

1. Получена совокупность N сильно-связанных уравнений взаимодействия налетающих ядерных частиц с коллективными состояниями четно-четных сферических ядер. В качестве гамильтониана и их собственных функций коллективных состояний ядер взяты гамильтониан уравнения движения модели взаимодействующих бозонов. Потенциалы ядерного и спин-орбитального взаимодействия ядерных частиц выбраны в виде оптического комплексного потенциала.

2. Вычислены матричные элементы операторов V_c связи различных каналов рассеяния налетающих частиц с коллективными состояниями ядер-мишеней и найдены решения системы уравнений Шредингера с учетом матричных элементов оператора связи каналов.

3. Определены дифференциальные и интегральные сечения взаимодействия налетающих ядерных частиц с коллективными состояниями ядер.

Для численного расчета принята программа, ECIS-88 с некоторыми изменениями, связанными с взаимодействием ядерных частиц с коллективными бозонными состояниями. Для облегчения расчета учитывались только s - и d -бозоны в системе.

4. Развиваемая теория рассеяния сильно-связанных каналов приложена к исследованию взаимодействия ${}^3\text{He}$ частиц с основными состояниями легких ядер ${}^{28,30,32}\text{Si}$ при энергии налетающей частицы $E = 60,0$ МэВ. При этом решались система неоднородных уравнений, связывающая первое возбужденное состояния 2_1^+ ядер с основными уровнями 0_1^+ . Слабое влияние других возбужденных уровней, находящихся на большой высоте порядка 3 МэВ учитывались эффективно корреляцией параметров оптического ядерного потенциала. В то же время эти параметры взяты из систематики С.М. Перей и Института Ядерной физики РК. Теоретически найденные угловые распределения сечений процессов в пределах углов от 10 по 175° сравнены с их экспериментальными величинами.

5. Исследования показывают, что используемый метод связанных каналов взаимодействия налетающих частиц ${}^3\text{He}$ с коллективными состояниями ядер хорошо описывает процессы рассеяния частиц на четных изотопах легких ядер ${}^{28,30,32}\text{Si}$, особенно в угловом диапазоне от начала координат до углов $120\text{--}125^\circ$. Однако, в областях обратного рассеяния частиц наблюдаются расхождения между теоретическими и экспериментальными величинами. Эти расхождения объясняются поглощением налетающих частиц ядрами мишенями.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бор. О., Маттelson Б. Структура атомных ядер. – М, 1972.
- [2] Tamura T. Analyses of the Scattering of Nuclear Particles by Collective Nuclei in Terms of the Coupled-Channel Calculation // Rev. Mod. Phys. -1965, -Vol. 37. -P. 679-708.
- [3] Reynal J. Coupled Channel Calculations and Computer Code ECIS-88. NEA Data Bank. CE-Saclay. F-91190.
- [4] Perey C. M., Perey F. G. Compilation of Phenomenological optical-model parameters // Atomic Data and Nucl. Data Tables, -1976. - №17, -P. 3-7, 20-43.
- [5] Буртебаев Н.Т., Дуйсебаев А.Д., Иванов Г.Н. Упругое рассеяние 50 МэВ α -частиц на ядрах ${}^{14}\text{N}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$ и ${}^{28}\text{Si}$ // Изв. АН КазССР. Сер. физ.-мат. – 1984. – №6. – С.49-53.
- [6] K.Baktybaev, A. Dalelkhankyzy, M.K.Baktybaev, N.Koilyk «The study of inelastic scattering of α – particles on nuclei ${}^{20}\text{ne}$, ${}^{24}\text{mg}$ by methods strongly-connected channels ». Adv. Studies Theor. Phys., Vol. 8, 2014, no. 28. –P. 1205-1212.
- [7] Abele H., Hauser H.J. et. al. Measurement and Folding-Potential Analysis of the Elastic α -scattering on Light Nuclei // Z. Phys. A. Atomic Nuclei. -1987. -Vol. 326 -P. 373-381.
- [8] Michel F., Vander poorten R. Differential cross sections for the α - ${}^{16}\text{O}$ scattering over a wide energy range// Phys. Rev. -1977. - C. 16. -P.142.
- [9] Michel F. et. al. magic closed shell nucleus ${}^{16}\text{O}$ has an α + ${}^{16}\text{O}$ cluster structure // Phys. Rev. -1983. - C.28. -P.1904.

REFERENCES

- [1] Bor. O., Mattelson B. Structure of atomic nuclei. - Moscow, 1972. (in Russ.).
- [2] Tamura T. Analyses of the Scattering of Nuclear Particles by Collective Nuclei in Terms of the Coupled-Channel Calculation // Rev. Mod. Phys. -1965, -Vol. 37. -P. 679-708.
- [3] Reynal J. Coupled Channel Calculations and Computer Code ECIS-88. NEA Data Bank. CE-Saclay. F-91190.
- [4] Perey C. M., Perey F. G. Compilation of Phenomenological optical-model parameters // Atomic Data and Nucl. Data Tables, -1976. - №17, -P. 3-7, 20-43.
- [5] Burtebaev N.T., Duisebayev A.D., Ivanov G.N. Elastic scattering of 50 MeV α -particles on nuclei ${}^{14}\text{N}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$ and ${}^{28}\text{Si}$. News. KazSSR. Ser. phys.-math. 1984. - №6. - p.49-53. (in Russ.).
- [6] Baktybaev K., Dalelkhankyzy A., Baktybaev M.K., Koilyk N. The study of inelastic scattering of α – particles on nuclei ${}^{20}\text{ne}$, ${}^{24}\text{mg}$ by methods strongly-connected channels. Adv. Studies Theor. Phys., Vol. 8, 2014, no. 28. –P. 1205-1212.
- [7] Abele H., Hauser H.J. et. al. Measurement and Folding-Potential Analysis of the Elastic α -scattering on Light Nuclei // Z. Phys. A. Atomic Nuclei. -1987. -Vol. 326 -P. 373-381.
- [8] Michel F., Vander poorten R. Differential cross sections for the α - ${}^{16}\text{O}$ scattering over a wide energy range// Phys. Rev. -1977. - C. 16. -P.142.
- [9] Michel F. et. al. magic closed shell nucleus ${}^{16}\text{O}$ has an α + ${}^{16}\text{O}$ cluster structure // Phys. Rev. -1983. - C.28. -P.1904.

ЯДРОЛЫҚ РЕАКЦИЯЛАРДЫҢ КҮШТІ БАЙЛАНЫСҚАН КАНАЛДАР ӘДІСІ БОЙЫНША ${}^3\text{He}$ БӨЛШЕКТЕРІНІҢ ${}^{28,30,32}\text{Si}$ ИЗОТОПТАРЫНДАҒЫ ШАШЫРАУ ПРОЦЕССИ

Қ. Бақтыбаев¹, А. Дәлелханқызы¹, Н. О. Қойлық¹, М. К. Бақтыбаев²

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
²ҚР Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Тірек сөздер: ядро, ядро күйлері, ядролық реакция гамильтониан.

Аннотация. Ядролық реакциялардың күшті байланған каналдар әдісі бойынша ${}^3\text{He}$ бөлшектерінің ${}^{28,30,32}\text{Si}$ сфералық изотоптары коллективтік күйлеріндегі шашырауы зерттеледі. Ядро-нысананың коллективтік күйлері Гамильтонианы ретінде әсерлесуші бозондар моделінің энергетикалық операторы алынған.

Поступила 07.07.2015 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.physics-mathematics.kz>

Редактор *М. С. Ахметова*

Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 14.07.2015.

Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.

17,25 п.л. Тираж 300. Заказ 4.