

МРНТИ 29.15.19

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2021.v79.i4.04>

Ж.К. Керимкулов^{1*} , Г.Ж. Алиева^{1,2} , Ж. Мукан^{1,2} ,
Д.К. Алимов¹ , Р. Ходжаев¹ 

¹Институт ядерной физики, Казахстан, г. Алматы

²Евразийский Национальный Университет им. Гумилева, Казахстан, г. Нур-Султан

*e-mail: zh_kerimkulov@inp.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ (P,XD) НА ЯДРЕ ¹²⁰SN ПРИ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ 30 МЭВ

Впервые измерены дважды дифференциальные и интегральные сечения реакции (p,xd) на ядре ¹²⁰Sn при энергии налетающих протонов 30 МэВ. Олово является конструкционным материалом проектируемых ядерно-энергетических установок, в частности, перспективных гибридных электроядерных установках ADS (Accelerator Driven System), состоящих из высокоэнергетического ускорителя протонов и глубоко подкритического атомного реактора. Основная идея заключается в использовании ускорителей заряженных частиц высоких энергий для производства нейтронов в мишенях из тяжелых элементов. Для регистрации и идентификации продуктов реакций был использован dE-E метод, где происходит регистрация двух параметров детектируемой частицы: удельной ионизации и полной энергии. Полная ошибка измеренных дважды дифференциальных сечений не превышала 20%. После интегрирования дважды дифференциальных сечений по углу был определен интегральный энергетический спектр. Теоретический анализ выполнен в рамках расчетного кода TALYS, в основу которого заложены современные теоретические модели распада ядер. Определены механизмы ядерных реакций, отвечающие за формирование энергетического спектра вылетающих дейтронов. Полученные экспериментальные результаты восполняют отсутствующие величины сечений исследованных реакций и могут быть использованы при разработке новых подходов теории ядерных реакций, а также при конструировании гибридных ядерно-энергетических установок.

Ключевые слова: циклотрон, ядерные реакции, инклюзивные сечения реакций, предравновесный распад, составное ядро, экситонная модель.

Zh.K. Kerimkulov^{1*}, G.Zh. Alieva², Zh. Mukan^{1,2},
D.K. Alimov¹, R. Khodzhayev¹

¹Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan, Almaty

²Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan, Nur-Sultan

*e-mail: zh_kerimkulov@inp.kz

Investigation of (p,xd) reaction on ¹²⁰Sn nucleus at proton energy OF 30 MeV

For the first time, the double-differential and integral cross-sections of the reaction (p,xd) on the ¹²⁰Sn nucleus were measured at the energy of the bombarding protons of 30 MeV. Tin is the structural material of the nuclear power plants being designed, in particular, the promising ADS (Accelerator Driven System) hybrid electro-nuclear installations consisting of a high-energy proton accelerator and a deeply subcritical nuclear reactor. The main idea is to use high-energy charged particle accelerators to produce neutrons in heavy element targets. For registration and identification of reaction products, the dE-E method was used, where two parameters of the detected particle are registered: specific ionization and total energy. The total error of the measured double-differential cross sections did not exceed 20%. After integrating the double-differential cross sections by angle, the integral energy spectrum was determined. The theoretical analysis is carried out within the framework of the TALYS calculation code, which is based on modern theoretical models of nuclear decay. The mechanisms of nuclear reactions responsible for the formation of the energy spectrum of outgoing deuterons are determined. The obtained experimental results fill in the missing values of the cross-sections of the studied reactions and can be used in the development of new approaches to the theory of nuclear reactions, as well as in the design of hybrid nuclear power plants.

Key words: cyclotron, nuclear reactions, inclusive cross-sections of reactions, pre-equilibrium decay, compound nucleus, exciton model.

Ж.К. Керимкулов^{1*}, Г.Ж. Алиева^{1,2}, Ж. Мукан^{1,2},
Д.К. Алимов¹, Р. Ходжаев¹

¹Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.

²А.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ.
*e-mail: zh_kerimkulov@inp.kz

30 МэВ протон энергиясы кезінде ¹²⁰Sn ядросындағы реакцияны (p,xd) зерттеу

Энергиясы 30 МэВ тең протондардың ¹²⁰Sn ядросымен (p,xd) реакцияларының екі ретті дифференциалды және интегралдық қималары алынды. Қалайы жобаланған ядролық-энергетикалық қондырғылардың құрылымдық материалы болып табылады, атап айтқанда, жоғары энергиялы протон үдеткіші мен терең субкритикалық атом реакторынан тұратын перспективалы гибриді ADS (Accelerator Driven System) электр ядролық қондырғыларында. Негізгі идея – ауыр элементтердің нысандарындағы нейтрондарды шығару үшін жоғары энергиялы зарядталған бөлшектердің үдеткіштерін қолдану. Реакция өнімдерін тіркеу және анықтау үшін dE-E әдісі қолданылды, онда анықталатын бөлшектің екі параметрі жазылады: меншікті иондау және толық энергия. Өлшенген екі ретті дифференциалды толық қате қималар 20%-дан аспады. Екі ретті дифференциалды интеграциядан кейін бұрыш бойынша қималардың интегралды энергетикалық спектрі анықталды. Теориялық талдау TALYS есептеу коды аясында жасалды, оның негізінде ядролардың ыдырауының заманауи теориялық модельдері жатыр. Ұшатын дейтрондардың энергетикалық спектрін қалыптастыруға жауап беретін ядролық реакциялар механизмдері анықталды. Алынған эксперименттік нәтижелер зерттелген реакциялар қималарының жетіспейтін шамаларын толтырады және оларды ядролық реакциялар теориясының жаңа тәсілдерін жасауда, сондай-ақ гибриді ядролық-энергетикалық қондырғыларды құруда қолдануға болады.

Түйін сөздер: циклотрон, ядролық реакциялар, реакцияның инклюзивтік қималары, тепе-теңдік алды шашырау, құрама ядро, экситондық модель.

Введение

Использование атомной энергии является важным компонентом устойчивого развития современного человечества. Гамма-излучение, потоки нейтронов и заряженных частиц широко используются при решении задач автоматического управления производственными процессами, модификации материалов, уменьшения количества вредных промышленных выбросов, неразрушающего контроля ответственных изделий, поиска полезных ископаемых, диагностики и лечения различных заболеваний и т.д. Особое место в ряду применений атомной энергии занимает ядерная энергетика. В настоящее время в мире остро стоит проблема производства энергии в необходимых масштабах. При этом следует учесть накопление в атмосфере в большом количестве углекислого газа в результате выработки энергии из органических материалов, приводящее к изменению климата на планете.

В шестидесятых годах появилась идея использования так называемых гибридных систем (ADS), в которых процесс деления ядер в подкритических реакторах поддерживается за счет дополнительных нейтронов и легких заряженных частиц, получаемых при скалывании и делении ядер в реакциях с протонами, ускоренными

до энергий 0,8-1 ГэВ [1-3]. В таких системах высокоэнергичные протоны при взаимодействии с мишенной сборкой порождают нейтронный поток, при этом на 1 протон производится 30-40 вторичных частиц, что вполне достаточно для надежного управления режимом работы реактора. Для корректного моделирования потока нейтронов требуются данные по энергетическим и угловым распределениям вторичных легких заряженных частиц, образующихся первичным протонным пучком (обзоры [4-8]).

Исследованию непрерывных энергетических спектров легких заряженных частиц из реакций с протонами за последнее время посвящен целый ряд экспериментальных [9-14] и теоретических [15-17] работ. Стоит отметить, что особый интерес вызывают процессы, в которых во входном и/или выходном каналах находятся сложные частицы (дейтроны, тритоны, ³He и α -частицы). Описание таких взаимодействий вызывает дополнительные трудности в сравнении с нуклонами, так как в него необходимо включать дополнительные механизмы реакций, такие как прямая передача и выбивание нуклонов, неупругие процессы, включающие кластерные степени свободы, а также развал налетающей частицы [7, 8].

В качестве объекта исследования было выбрано олово, как широко используемый конструк-

ционный материал при проектировании различных перспективных ядерных установок [5]. Природное олово состоит из 10 стабильных изотопов, из них наибольшее содержание дают ^{120}Sn (32,58%), ^{118}Sn (24,22%), ^{116}Sn (14,54%), ^{119}Sn (8,59%) и ^{117}Sn (7,68%). Исследование обогащенных изотопов позволяет получить более надежную информацию о параметрах используемых теоретических моделей. В нашем исследовании был выбран изотоп ^{120}Sn .

Полученные данные необходимы для разработки концепции механизма предравновесного распада в ядерных реакциях, отражающего динамику образования и эволюции возбужденной системы к равновесному состоянию. Характерными особенностями реакции на этой стадии является образование большого количества высокоэнергетических частиц, обладающих значительной асимметрией вперед в угловых распределениях.

Методика эксперимента

Инклюзивные сечения реакции $^{120}\text{Sn}(p,xd)$ были получены на изохронном циклотроне У-150М находящемся в Институте ядерной физики (Алматы, Казахстан). После перевода в 1972 году в изохронный режим ускорения, данный ускоритель позволил получать выведенные пучки протонов с энергией до 30 МэВ [18].

Измерение сечений ядерных реакций проводились с использованием реакционной камеры, оснащенной поворотным спектрометром заряженных частиц и системами привода мишеней [19]. Спектрометр устанавливался в диапазоне углов 30° - 120° , с шагом по углу 15° . Для определения числа частиц, прошедших через мишень использовался цилиндр Фарадея.

В качестве мишени была использована самоподдерживающаяся фольга ^{120}Sn толщиной $3,8 \text{ мг/см}^2$ и обогащением 97 %. Толщина и однородность мишени определялась с помощью измерения потери энергии альфа-частиц от стандартизированного источника из изотопа ^{226}Ra (альфа-частиц с энергиями 4.782, 5.305, 5.490, 6.002 and 7.687 МэВ).

Идентификация и регистрация вылетающих вторичных дейтронов осуществлялась с использованием $\Delta E - E$ метода. На основе выполненных кинематических расчетов подобраны рабочие толщины используемых детекторов. Для регистрации дейтронов в качестве стопового использовали сцинтилляционный детектор

CsI(Tl) толщиной 25 мм. В качестве пролетного детектора был установлен полупроводниковый кремниевый детектор толщиной 100 мкм. Выбранная конфигурация телескопа позволила регистрировать вылетающие дейтроны начиная с энергии 4,2 МэВ до кинематического предела.

Для калибровки E-детектора кинетическая энергия частицы, соответствующая номеру канала X, определялась по известным состояниям остаточных ядер (мишени ^{12}C , CH_2). Вычитая из нее потерю энергии частицы в мишени и ΔE -детекторе, находилось значение энергии, поглощенной E-детектором. Такая функция, связывающая номер канала в линейных спектрах с энергией поглощенной в E-детекторе, принимается в качестве опорной калибровки. Зная ее, и восстановив по данной остаточной энергии потери в ΔE -детекторе, можно получить энергию частицы перед попаданием в телескоп детекторов. Затем, прибавив к последней потере в мишени, находим энергию частицы, покинувшей ядро.

Рассчитанные дважды-дифференциальные сечения реакции представлены на Рис. 1. Систематические ошибки измеренных сечений обусловлены, главным образом, погрешностями в определении толщины мишени (5%), калибровки интегратора тока (1%) и телесного угла спектрометра (1,2 %). Энергия пучка ускоренных частиц измерялась с точностью 1 %. Физический нуль камеры рассеяния устанавливался с точностью не хуже $0,5^{\circ}$, угол регистрации фиксировался с точностью $0,5^{\circ}$.

После интегрирования по углу дважды-дифференциальных сечений было получено интегральное сечение рассматриваемой реакции (p,xd) при энергиях налетающих протонов 22 МэВ на ядре ^{120}Sn (Рис. 2), рассчитано парциальное сечение исследуемой реакции, которое составило 24,96 мб.

Результаты и обсуждение

Теоретический анализ экспериментальных результатов был выполнен в рамках модифицированной версии экситонной модели в по программе TALYS [20]. Современная трактовка предравновесного механизма берет свое начало из экситонных моделей (ЭМ), первая из которых была предложена Гриффином [21]. С момента своего создания данная модель была существенно дополнена. Несмотря на все неоднозначности, экситонная модель остается одним из самых

мощных инструментов в описании инклюзивных спектров.

В двухкомпонентной экситонной модели протонные и нейтронные степени свободы учитываются раздельно [22] и принимается, что ядро характеризуется числами p_π , h_π , p_ν и h_ν , где p и h обозначают частичные и дырочные, а π и ν

– протонные и нейтронные степени свободы, соответственно. Разность между числом частиц и дырок в процессе перехода в равновесное состояние сохраняется.

Плотность частично-дырочных состояний берется в виде [23]:

$$\omega_{ESM}(p, p_\pi, E) = \frac{(g_{\pi 0})^{n_\pi} (g_{\nu 0})^{n_\nu} (E - A(p, p_\pi, E))^{n-1}}{p_\pi! h_\pi! p_\nu! h_\nu! (n-1)!}, \quad (1)$$

где $A(p, p_\pi, E)$ – поправка, учитывающая принципа Паули, $g_{\pi 0}$ и $g_{\nu 0}$ – плотности одночастичных состояний для протонов и нейтронов соответственно.

На следующем этапе происходит вычисление вероятностей переходов, которые переводят ядро из одной частично-дырочной конфигурации в другую. В силу предположения о малости остаточных двухчастичных взаимодействий для нахождения отнесенной к единице времени вероятности внутриядерных переходов λ используется первый порядок теории возмущения [24]:

$$\lambda = (2\pi / \hbar) \langle |M|^2 \rangle \omega, \quad (2)$$

где $|M|^2$ – среднеквадратичный матричный элемент, определяющий интенсивность внутри-

ядерных переходов, то есть переходов между состояниями с различным n , а ω – плотность конечных состояний, реально достижимых при данном переходе. Предполагается, что матричные элементы имеют одинаковую формулу и отличаются только нормализующими коэффициентами

K_{ij} [25]:

$$|M_{ij}|^2 = K_{ij} A_a g_0^{-3} \left(\frac{E}{3A_a} + 20.9 \right)^{-3}, \quad (3)$$

где A_a – масса налетающей частицы.

На любом этапе релаксации системы возможна эмиссия частиц типа b в канал с энергией ε . Скорость испускания частицы из этого состояния рассчитывается по формуле:

$$W_b(p, p_\pi, E, \varepsilon) = \frac{2s_b + 1}{\pi^2 \hbar^3} \mu_b \varepsilon \sigma_b(\varepsilon) \frac{\omega(p_\pi - Z_b, h_\pi, p_\nu - N_b, h_\nu, U)}{\omega(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu, E)}, \quad (4)$$

где Z_b и N_b – число протонов и нейтронов вылетевшей частицы, s_b – ее спин, а μ_b ее масса. Величина $\sigma_b(\varepsilon)$ – сечение инверсного процесса образования составного ядра, U – энергия возбуждения, определяемая как $U = E - \varepsilon - B_b$, где B_b – энергия связи испускаемой частицы.

Для полного описания эмиссии частиц в ядерных реакциях, в дополнение к вычислениям в рамках экситонной модели, были проведены расчеты в рамках других механизмов. При вычислении равновесного сечения учитывалась эмиссия Хаузера-Фешбаха. Определены вклады

прямых процессов (передача – выбивание нуклонов, неупругое рассеяние).

На Рис. 2 приведено сравнение теоретических и экспериментальных данных по интегральным сечениям реакций (p,xd) на ядре ^{120}Sn . Получено удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных значений в области энергий, соответствующих предравновесному механизму. Из сравнения интегральных спектров следует, что основной вклад интегрального сечения реакций на исследуемом ядре обусловлен предравновесным механизмом. Вклад механизма составного ядра в реакции незначителен.

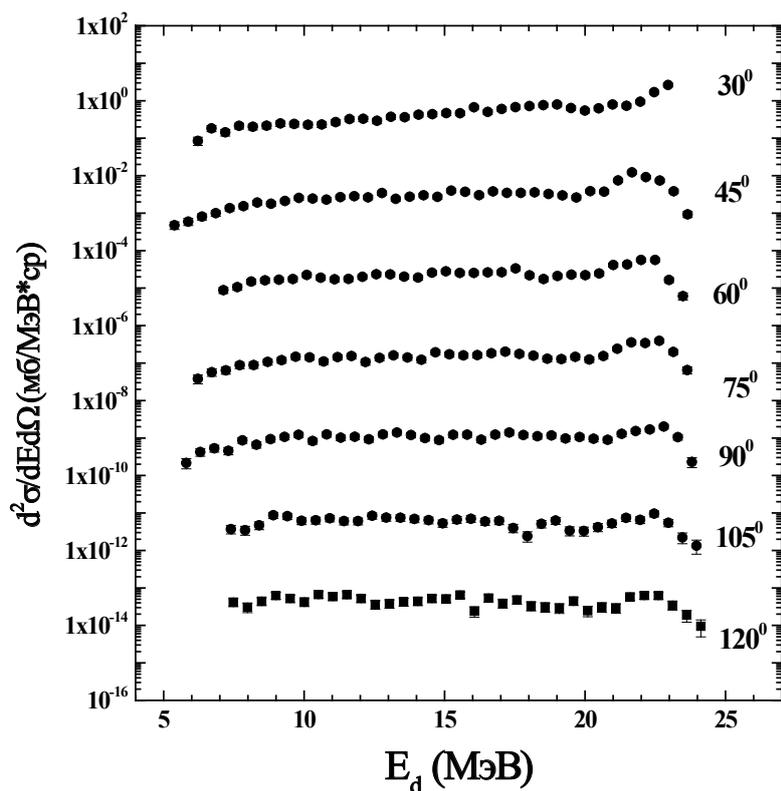
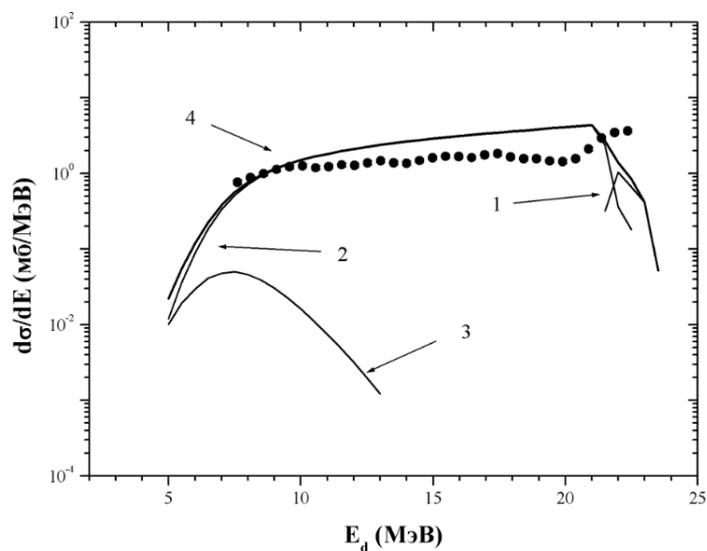


Рисунок 1 - Экспериментальные дважды-дифференциальные сечения реакций (p,xd) на ядре ^{120}Sn при энергии протонов 30 МэВ



Точки – эксперимент; линии – теоретический анализ: 1 – процесс прямых реакций, 2 – предравновесный процесс, 3 – механизм составного ядра, 4 – полное сечение

Рисунок 2 - Интегральные сечения реакций (p,xd) на ядре ^{120}Sn при энергии протонов 30 МэВ

Заключение

Впервые получены экспериментальные дважды-дифференциальные и интегральные спектры дейтронов в широком диапазоне энергий (от 4 до 25 МэВ) и углов 30° – 120° (с шагом 15°) из реакции инициированных протонами с энергией 30 МэВ на ядре ^{120}Sn . Определены экспериментальные интегральные и парциальные сечения исследованных реакций. Величина экспериментального парциального сечения реакции (p,xd) составила 24,96 мбн. Выполнены теоретические расчеты экспериментальных инклюзивных спектров на основе экситонной модели.

Установлено, что сечение реакции (p,xd) на ядре ^{120}Sn при энергии налетающих протонов 30

преимущественно формируется механизмом предравновесного распада. В высокоэнергетической части спектра, в дополнение к предравновесному, является значительным вклад прямых процессов. Полученные новые экспериментальные ядерные данные восполняют базу ядерных данных по сечениям реакции и могут быть направлены на развитие теории ядерных реакций, а также для разработки перспективных ядерных технологий.

Благодарности

Данное исследование было профинансировано Комитетом по науке Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP08955998).

Литература

- 1 Риволь Ж.-П. Электроядерная установка для уничтожения ядерных отходов // УФН. – 2003. – Т. 173, Вып. 7. – С. 747-755.
- 2 Бзнуни С.А., Барашенков В.С., Жамкочан В.М., Соснин А.Н., Полянски А., Худавердян А.Г. Перспективные электроядерные системы // ЭЧАЯ. – 2003. – Т. 34, Вып. 4. – С. 976-1032.
- 3 Bowman C.D., Arthur E.D., Lisowski P.W., Lawrence G.P., Jensen R.J., Anderson J.L., Blind B., Cappelletto M., Davidson J.W., England T.R., Engel L.N., Haight R.C., et al. Nuclear energy generation and waste transmutation using an accelerator-driven intense thermal neutron source // Nuclear Instr. and Methods in Physics Research. A. – 1992. – Vol. 320. – P. 336-367.
- 4 Игнатюк А.В., Николаев М.Н., Фурсов В.И. Развитие банка оцененных ядерных данных для современных технологий // Атомная энергия. – 2014. – Т. 116. – С. 209-216.
- 5 Ikeda Y. Nuclear Data Relevant to Accelerator Driven System // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2002. – Suppl. 2. – P. 13-18.
- 6 Koning A.J., Duijvestijn M.C. A global pre-equilibrium analysis from 7 to 200 MeV based on the optical model potential // Nucl. Phys. – 2004. – Vol. A744. – P. 15-76.
- 7 Kalbach C. Pre-equilibrium reactions with complex particle channels // Phys. Rev. – 2005. – Vol. C71. – P. 034606.
- 8 Hodgson P.E., Betak E. Cluster emission, transfer and capture in nuclear reactions // Phys. Rep. – 2003. – 374. – P. 1-89.
- 9 Guertin A., Marie N., Auduc S., Blideanu V., Delbar Th., et al. Neutron and light-charged-particle productions in proton-induced reactions on ^{208}Pb at 62.9 MeV // Eur. Phys. Journal A. – 2005. – Vol. 23. – P. 49-60.
- 10 Усабаева Г., Жолдыбаев Т.К., Садыков Б.М., Дуйсебаев Б.А., Насурлла М. Инклюзивные спектры протонов из взаимодействия альфа-частиц с энергией 29 МэВ с ядрами ^{27}Al и ^{59}Co // Вестник КазНУ, сер. физическая. – 2018. – № 2 (65). – С. 34-41.
- 11 Zholdybayev T.K., Duisebayev B.A., Sadykov B.M., Nassurlla M., Ussabayeva G., Ismailov K.M. Emission of light charged particles from reaction of ^3He ions of energy 50.0 MeV with ^{59}Co nucleus // Acta Physica Polonica B. – 2018. – Vol. 49, No. 3 – P. 693-698.
- 12 Zholdybayev T.K., Sadykov B.M., Nassurlla M., Ussabayeva G., Duisebayev B.A., Ismailov K.M., Dyachkov V.V., and Saduyev N. O. Inclusive spectra of protons and α particles from the interaction between α particles with an energy of 29 MeV and ^{27}Al and ^{59}Co nuclei // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2019. – Vol. 83, No. 9. – P. 1180-1183.
- 13 Yamaguchi Y., Sanami T., Koba., Uozumi Y. Low-energy-threshold detector for measuring proton spectra at several tens of MeV using Bragg curve spectroscopy // Nuclear Instr. and Methods in Physics Research. A. – 2020. – Vol. 953. – P. 163158.
- 14 Mukhamejanov Y., Alieva G., Alimov D., Kabdrakhimova G.D., Nassurlla M., Saduyev N., Sadykov B.M., Zholdybayev T.K., Ismailov K.M., Kucuk Y. Investigation of (p, xp) and (p, α) reactions of 30-MeV protons with the ^{103}Rh nucleus // Acta Physica Polonica B. – 2020. – Vol. 51, No 3. – P. 783-788.
- 15 Otuka N., Dupont E., Semkova V., et al. Towards a more complete and accurate experimental nuclear reaction data library (EXFOR) // Nucl. Data Sheets – 2014. – Vol. 120. – P. 272.
- 16 Han Y., Guo H., Xu Y., Zhang Zh., et al. The evaluated nuclear data library for ADS in China // EPJ Web of Conference – 2017. – Vol. 146. – P. 09033.
- 17 Sarpun I., Aydin A., Tel E. Double differential light charged particle emission cross-sections for some structural fusion materials // EPJ Web of Conference – 2017. – Vol. 146. – P. 09026.
- 18 Арзуманов А.А., Неменов Л.М., Анисимов О.И. и др. Изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов // Изв. АН КазССР, сер. физ. – мат. – 1973. – № 4. – С. 6-15.

- 19 Дуйсебаев А.Д., Иванов Г.Н., Рыбин С.Н. Камера рассеяния для исследования продуктов ядерных реакций на пучке циклотрона // Изв. АН КазССР, сер. физ. – мат. – 1983. – № 2. – С. 80–81.
- 20 Koning A.J., Rochman D., Sublet J.-Ch., Dzysiuk N., Fleming, M. and van der Marck S. TENDL: Complete Nuclear Data Library for Innovative Nuclear Science and Technology // Nucl. Data Sheets – 2019. – Vol. 155. – P. 1–55.
- 21 Griffin J.J. Statistical model of intermediate structure // Phys. Rev. Lett. – 1966. – Vol. 17. – P. 478–481.
- 22 Kalbach C. Two–component exciton model: Basic formalism away from shell closures // Phys. Rev. C. – 1986. – Vol. 33. – P. 818–833.
- 23 Williams F. C. Particle–hole state density in the uniform spacing model // Nucl. Phys. A. – 1971. – Vol. 166. – P. 231–240.
- 24 Williams F. C. Intermediate state transition rates in the Griffin model // Phys. Lett. B. – 1970. – Vol. 31. – P. 184–186.
- 25 Kalbach C. Phenomenology of continuum angular distributions. II. Griffin preequilibrium model // Phys.Rev. – 1981. – Vol. C23, № 1. – P. 124–135.

References

- 1 J.-P. Revol, UFN 173, 747-755 (2003) (in Russ).
- 2 S.A. Bznuni, V.S. Barashenkov, V.M.Zhamkochyan, A.N. Sosnin, A. Polanski, and A.G. Khudaverdyan, PEPAN 34, 976-1032 (2003) (in Russ).
- 3 C.D. Bowman, E.D. Arthur, P.W. Lisowski, G.P. Lawrence, R.J. Jensen, J.L. Anderson, B. Blind, M. Cappiello, J.W. Davidson, T.R. England, L.N. Engel, R.C. Haight, et al, NIM A320, 336–367 (1992).
- 4 A.V. Ignatyuk, M.N. Nikolaev, and V.I. Fursov, Atomic Energy 116, 209-216 (2014) (in Russ).
- 5 Y. Ikeda, Journal of Nuclear Science and Technology Suppl. 2, 13–18 (2002).
- 6 A.J. Koning, and M.C. Duijvestijn, Nucl. Phys A744, 15–76 (2004).
- 7 C. Kalbach, Phys. Rev., C71, 034606 (2005).
- 8 P.E. Hodgson, and E. Betak, Phys. Rep. 374, 1–89 (2003).
- 9 A. Guertin, N. Marie, S. Auduc, V. Blideanu, Th. Delbar, et al, Eur. Phys. Journal A23, 49–60 (2005).
- 10 G. Ussabayeva, T.K. Zholdybayev, B.M. Sadykov, B.A. Duisebayev, M. Nassurlla, Vestnik KazNU, ser. fiz. 2 (65), 34-41 (2018) (in Russ).
- 11 T.K. Zholdybayev, B.A. Duisebayev, B.M. Sadykov, M. Nassurlla, G. Ussabayeva, K.M. Ismailov, Acta Physica Polonica B49, 693–698 (2018).
- 12 T.K. Zholdybayev, B.M. Sadykov, M. Nassurlla, G. Ussabayeva, B.A. Duisebayev, K.M. Ismailov, V.V. Dyachkov, and N. O. Saduyev, Bulletin of RAS: Physics, 83, 1180–1183 (2019).
- 13 Y. Yamaguchi, T. Sanami, Y. Koba., Y. Uozumi, NIM A953, 163158 (2020).
- 14 Y. Mukhamejanov, G. Alieva, D. Alimov, G.D. Kabdrakhimova, M. Nassurlla, N. Saduyev, B.M. Sadykov, T.K. Zholdybayev, K.M. Ismailov, Y. Kucuk, Acta Physica Polonica B51, 783–788 (2020).
- 15 N. Otuka, E. Dupont, V. Semkova, et al, Nucl. Data Sheets 120, 272 (2014).
- 16 Y. Han, H. Guo, Y. Xu, Zh. Zhang, et al, EPJ Web of Conference 146, 09033 (2017).
- 17 I. Sarpun, A. Aydin, E. Tel, EPJ Web of Conference 146, 09026 (2017).
- 18 A.A. Arzumanov, L.M. Nemenov, O.I. Anisimov et al, Izv. KazSSR ser. fiz. and matem. 4, 6–15 (1973) (in Russ).
- 19 A.D. Duisebayev, G.N. Ivanov, and S.N. Rybin, Izv. KazSSR ser. fiz. and matem. 2, 80–81 (1983) (in Russ).
- 20 A.J. Koning, D. Rochman, J.-Ch. Sublet, N. Dzysiuk, M. Fleming, and S. van der Marck, Nucl. Data Sheets 155, 1–55 (2019).
- 21 J.J. Griffin, Phys., Rev. Lett. 17, 478-481 (1966).
- 22 C. Kalbach, Phys. Rev. C33, 818–833 (1986).
- 23 F. C. Williams Nucl. Phys. A166, 231–240 (1971).
- 24 F. C. Williams, Phys. Lett. B31, 184–186 (1970).
- 25 C. Kalbach, Phys.Rev C23, 124–135 (1981).