

Дуйсебаев А., Дуйсебаев Б.А.,
Жолдыбаев Т.К., Садыков Б.М.,
Исмаилов К.М., Насурлла М.,
Бактораз А., Силыбаева А.,
Исмаилов Н.

Предравновесная эмиссия протонов и α -частиц в реакциях на ядре ^{59}Co при $E_p = 30$ МэВ

Duisebayev A., Duisebayev B.A.,
Zholdybayev T.K., Sadykov B.M.,
Ismailov K.M., Nassurlla M.,
Baktoraz A., Silybayeva A.,
Ismailov N.

Preequilibrium emission of protons and α -particles in reactions on ^{59}Co nucleus at proton energy of 30 MeV

Дүйсебаев Ә., Дүйсебаев Б.Ә.,
Жолдыбаев Т.К., Садыков Б.М.,
Исмаилов К.М., Насурлла М.,
Бақтораз А., Силыбаева А.,
Ысмайлов Н.

$E_p = 30$ МэВ ^{59}Co ядросындағы реакцияларда протондар мен α -бөлшектердің тепе-теңдік алдындағы эмиссиясы

Измерены дважды-дифференциальные сечения реакций (p, xp) и (p, α) на ядре-мишени ^{59}Co при энергии протонов $E_p = 30$ МэВ, ускоренных на изохронном циклотроне У-150М Института ядерной физики РК. Измерения проводились в угловом диапазоне от 30° до 135° с шагом 15° . Объектом исследования выбран ^{59}Co , являющейся кандидатом на конструкционный материал в ядерных установках. Из дважды-дифференциальных сечений определены экспериментальные интегральные и парциальные сечения исследованных реакций. Величина экспериментального парциального сечения реакции (p, xp) на ядре ^{59}Co составила $1002,0 \pm 1,5$ мб, $(p, \alpha) - 57,0 \pm 0,5$ мб. Анализ экспериментальных результатов выполнен в рамках экситонной модели распада ядер с использованием расчетного кода PRECO-2006, описывающего переход возбужденной системы в равновесное состояние. Рассчитаны вклады в формирование интегральных сечений составных, предравновесных и прямых механизмов. Полученные результаты представляют интерес, как для фундаментальной ядерной физики, так и для различных прикладных областей, в частности, ядерной трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов.

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

Double differential cross sections of the reactions (p, xp) and (p, α) on target nucleus ^{59}Co with a proton accelerated by the isochronous cyclotron U-150M (Institute of Nuclear Physics of Republic of Kazakhstan) to the energy of $E_p = 30$ MeV were measured. These measurements were performed in the angular range from 30° to 135° with the steps of 15° . The selected object of study ^{59}Co , is a candidate for a structural material in nuclear plants. The experimental integral and partial cross-sections of the investigated reactions were defined from the double differential cross sections. The value of the experimental cross section of the partial reactions (p, xp) on ^{59}Co nucleus was equal to 1002.0 ± 1.5 mb, $(p, \alpha) - 57.0 \pm 0.5$ Mb. The analysis of experimental results carried out within exciton model of nuclei decay using code PRECO-2006 that described the transition of the excited system to equilibrium. The contributions in the formation of the integral cross sections of compound, pre-equilibrium and direct mechanisms were estimated. The obtained results are of interest to both fundamental nuclear physics and different application areas, in particular, nuclear transmutation of long-lived radioactive wastes.

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

ҚР Ядролық физика институтының У-150М изохронды циклотронында үдетілген $E_p = 30$ МэВ протондар энергиясында ^{59}Co ядро-нысанасында (p, xp) және (p, α) реакциялардың екі мәрте -дифференциалдық қималары өлшенген. Өлшеулер 15° қадамымен 30° бастап 135° дейін бұрыштық ауқымында өткізілді. Зерттеу нысаны ретінде ядролық қондырғыларда конструкциялық материалға кандидат болып табылатын ^{59}Co таңдалды. Екі мәрте-дифференциалдық қималардан зерттелген реакциялардың эксперименттік интегралдық және үлестік қималары анықталды. ^{59}Co ядросындағы (p, xp) реакцияның эксперименттік үлестік қиманың шамасы $1002,0 \pm 1,5$ мб, $(p, \alpha) - 57,0 \pm 0,5$ мб. құрды. Эксперименттік нәтижелер талдауы қозған жүйенің тепе-теңдік күйге өтуін сипаттайтын PRECO-2006 есептік кодты пайдалана отырып, ядролар ыдырауының экситондық моделінің шеңберінде орындалды. Құрама, тепе-теңдік алды және тура механизмдердің интегралдық қималарының қалыптасуында үлестері есептелген. Алынған нәтижелер іргелі ядролық физика және де, әртүрлі қолданбалы салалар үшін, негізінен ұзақ ғұмырлы радиоактивті қалдықтардың ядролық трансмутациясы мүделлі болып табылды.

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

¹Дуйсебаев А., ¹Дуйсебаев Б.А., ^{1*}Жолдыбаев Т.К.,
¹Садыков Б.М., ²Исмаилов К.М., ^{1,3}Насурлла М.,
³Бактораз А., ³Силыбаева А., ⁴Исмаилов Н.

¹Институт ядерной физики МЭ РК, Республика Казахстан, г. Алматы

²Назарбаев Университет, Республика Казахстан, г. Алматы

³Казахский национальный университет имени аль Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы

⁴Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Алматы

*E-mail: zholdybayev@inp.kz

ПРЕДРАВНОВЕСНАЯ ЭМИССИЯ ПРОТОНОВ И α -ЧАСТИЦ В РЕАКЦИ- ЯХ НА ЯДРЕ ^{59}Co ПРИ $E_p = 30$ МЭВ

Введение

В последние годы, при обсуждении будущего глобальной энергетики важным пунктом является проблема эффективной утилизации отработавшего ядерного топлива. В качестве альтернативного и перспективного способа решения этой проблемы ведущие мировые державы начали серьезно рассматривать использование электроядерных систем (Accelerator Driven Systems – ADS в международной терминологии) [1-3]. Ключевой в физическом сценарии работы гибридных ядерных установок является проблема константного обеспечения, практически отсутствующая информация о сечениях ядерных реакций, образованных в реакциях с заряженными частицами и нейтронами в широком диапазоне энергий возбуждения и нуклонного состава.

Результаты, представленные в настоящей работе, являются продолжением исследований по определению дважды дифференциальных и интегральных сечений реакций, инициированных протонами с $E_p=30$ МэВ с образованием вторичных протонов и альфа-частиц на ряде конструктивных элементов ядерно-энергетических систем [4-6]. Выбор энергии протонов в 30 МэВ обусловлен тем, что при этой энергии открыто много каналов реакций, а полное сечение реакций для исследуемого ядра достигает своего максимума. Объектом исследования выбран ^{59}Co , являющейся кандидатом на конструкционный материал в ядерных установках [7].

Экспериментальная часть

Экспериментальные данные по дважды-дифференциальным сечениям реакций (p, xp) и (p, α) на ядре ^{59}Co при энергии падающих протонов 30 МэВ получены на выведенном пучке изохронного циклотрона Института ядерной физики [8]. Измерения выполнены в угловом диапазоне $30 - 135^\circ$ с шагом 15° .

В качестве ядра-мишени использовалась самоподдерживающиеся фольга изотопа ^{59}Co . Толщина определялась по изме-

нению потери энергии α -частиц от радиоактивного источника ^{226}Ra (в спектре которого есть пять α -линий с энергиями 4.782, 5.305, 5.490, 6.002 и 7.687 МэВ) при прохождении через мишень и составила 4 мг/см².

Электронная установка измерительного комплекса состояла из трех трактов:

1) мониторный, состоящий из сцинтилляционного счетчика, расположенного в плоскости реакции под углом 30° относительно падающего пучка;

2) цилиндр Фарадея – интегратор тока для измерений полного числа частиц, прошедших через мишень;

3) тракт поворотного детектора – телескопа, состоящего из пролетного счетчика ΔE и счетчика полного поглощения E . Сигналы, вызванные прошедшей через оба детектора частицей, проходят спектрометрическую линейку и их дальнейшая обработка осуществляется системой двухмерного программируемого анализа [9].

Для измерения сечений ядерных реакций (p , xp) использовался телескоп, состоящий из пролетного ΔE кремниевого детектора с толщиной 100 мкм и E детектора полного поглощения на основе сцинтиллятора (монокристалл цезия йодистого, активированных таллием) CsI(Tl) толщиной 2,5 см. Телесный угол телескопа составил $\Omega = 2.62 \times 10^{-5}$ стерадиан. Для измерения реакций (p, α), телескоп состоял из пролетного ΔE кремниевого детектора толщиной 25 мкм, и E кремниевого детектора полного поглощения толщиной 1 мм. Телесный угол телескопа составил $\Omega = 5.34 \times 10^{-5}$ стерадиан. Энергетическая

калибровка спектрометра проводилась по наблюдаемым уровням конечных ядер в исследуемых реакциях, а также из данных по рассеянию и реакциям на углеродной и полиэтиленовой мишенях.

Систематические ошибки измеренных сечений обусловлены, главным образом, погрешностями в определении толщины мишени (<5 %), калибровки интегратора тока (1 %) и телесного угла спектрометра (1,3 %). Энергия пучка ускоренных частиц измерялась с точностью 1,2 %. Величина отношения числа отсчетов монитора к интегратору сохранялась постоянной в пределах 1 %. «Физический нуль» устанавливался с точностью не хуже 0,5°, угол регистрации фиксировался с точностью 0,5°. Полная систематическая ошибка не превышала 10 %.

Статистическая ошибка, величина которой зависела от типа и энергии регистрируемых частиц, составляла для протонов 1 – 4 %, а для α -частиц – 1 – 8 %.

Полученные дважды-дифференциальные сечения реакции (p , xp) и (p , α) на ядре ^{59}Co , представлены на рисунках 1 – 2.

Экспериментальные данные по дважды-дифференциальным сечениям реакции (p , xp) и (p , α) на ядре ^{59}Co при энергии протонов 30 МэВ проинтегрированы в измеренном угловом диапазоне. Полученные интегральные сечения, усредненные в диапазоне энергий 0,5 МэВ, представлены на рисунках 3 – 4. Величина экспериментального парциального сечения реакции (p, xp) на ядре ^{59}Co составила $1002,0 \pm 1,5$ мб, (p , α) – $57,0 \pm 0,5$ мб.

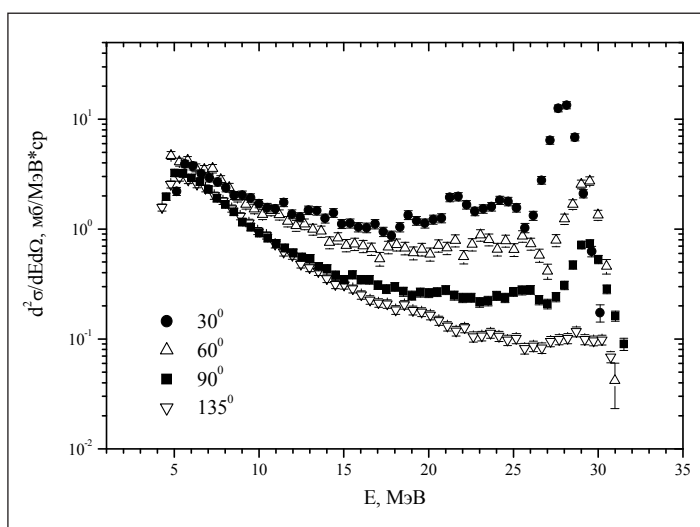


Рисунок 1 – Угловые распределения экспериментальных дважды-дифференциальных сечений реакции $^{59}\text{Co}(p, xp)$ при $E_p = 30$ МэВ

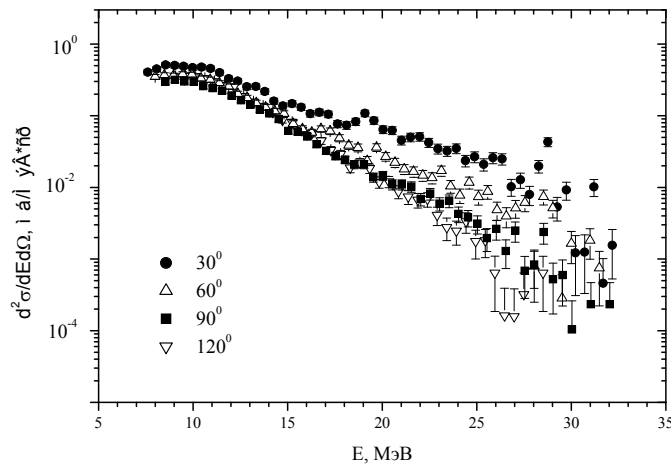


Рисунок 2 – Угловые распределения экспериментальных дважды-дифференциальных сечений реакции $^{59}\text{Co}(p, \alpha)$ при $E_p = 30$ МэВ

Анализ данных

Анализ экспериментальных результатов реакции $^{59}\text{Co}(p, xp)$ и (p, α) выполнен в рамках экситонной модели распада ядер [10], которая по своей сути является статистическим подходом, описывающим переход возбужденного ядра в равновесное состояние. В двухкомпонентной экситонной модели протонные и нейтронные степени свободы учитываются отдельно [11] и принимается, что ядро характеризуется параметрами 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. Компаунд ядро формируется с частично-дырочной конфигурацией, которая учитывает только налетающие нуклоны как частичные степени свободы и не учитывает дырочные. Такая конфигурация обозначается как $(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu) = (Z_a, 0, N_a, 0)$, где a относится к бомбардирующей частице. Разность между числом частиц и дырок в процессе перехода в равновесное состояние сохраняется. Расчеты плотности одночастичных состояний рассчитываются отдельно для протонов $g_{\pi 0}$ и нейтронов $g_{\nu 0}$:

$$g_{\pi 0} = \frac{Z}{K_g}, \quad (1)$$

$$g_{\nu 0} = \frac{N}{K_g}, \quad (2)$$

где K_g – нормировочный коэффициент. Плотность частично-дырочных состояний [12]:

$$\omega_{ESM}(p, p_\pi, E) = \frac{(g_{\pi 0})^{n_\pi} (g_{\nu 0})^{n_\nu} (E - A(p, p_\pi, E))^{n-1}}{p_\pi! h_\pi! p_\nu! h_\nu! (n-1)!}, \quad (3)$$

где $A(p, p_\pi, E)$ – поправка, учитывающая выполнение принципа запрета Паули. Эти плотности используются для вычисления 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 [13]:

$$\lambda = (2\pi / \hbar) \langle |M|^2 \rangle \omega, \quad (4)$$

где $|M|^2$ – среднеквадратичный матричный элемент, определяющий интенсивность внутриядерных 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} [14]:

$$|M_{ij}|^2 = K_{ij} A_a g_0^{-3} \left(\frac{E}{3A_a} + 20.9 \right)^{-3}, \quad (5)$$

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:

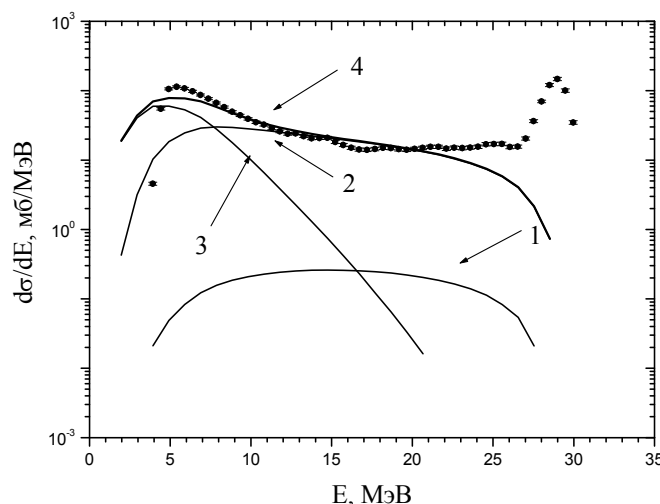
$$W_b(p, p_\pi, E, \varepsilon) = \frac{2s_b + 1}{\pi^2 h^3} \mu_b \varepsilon \sigma_b(\varepsilon) \frac{\omega(p_\pi - Z_b, h_\pi, p_v - N_b, h_v, U)}{\omega(p_\pi, h_\pi, p_v, h_v, E)}, \quad (6)$$

где Z_b и N_b – число протонов и нейтронов вылетевшей частицы, s_b – ее спин, а i_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.

Теоретические расчеты проведены в рамках компьютерного кода PRECO-2006 [15], оптимизированного для рассматриваемого случая. В качестве исходной бралась $(p_\pi, h_\pi, p_v, h_v) = (2, 0, 1, 0)$ частично-дырочная конфигурация. Нормировочный коэффициент K_g принимался равным 15 МэВ. При параметризации квадрата матричных элементов использовались значения нормировочных констант: $K_{\pi\pi} : K_{\pi v} : K_{vv} = 2200 : 900 : 900$ МэВ². При определении $\sigma_{a,pre}$ использовались параметры оптического потенциала Becchetti-Greenlees [16] для протонов и Huizenga [17] для α -частиц.

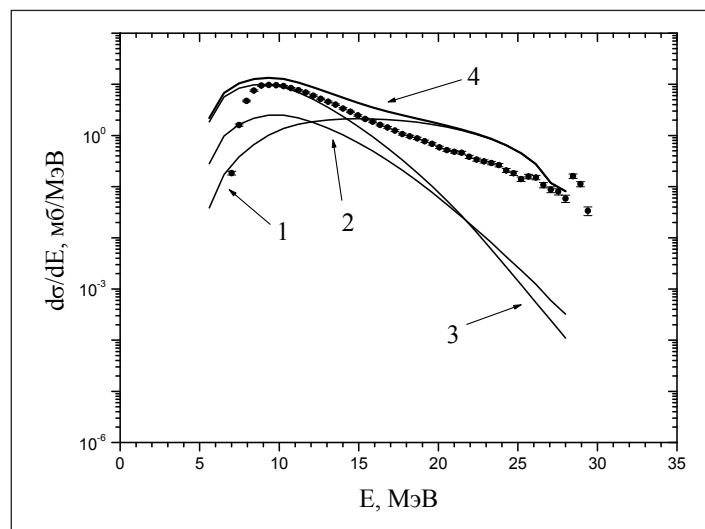
На рисунках 3 – 4 приведено сравнение экспериментальных и теоретических данных по интегральным сечениям реакций (p, xp) и $(p, \alpha\alpha)$ на ядре ^{59}Co при $E_p = 30$ МэВ. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных значений в области энергий, соответствующих предравновесному механизму. Установлены вклады механизмов ядерных реакций в формирование инклюзивных спектров, численные значения которых приведены в таблице.

Установлено, что интегральные сечения в реакциях (p, xp) и $(p, \alpha\alpha)$ на ядре ^{59}Co в низкоэнергетической области формируются механизмом распада из составного ядра. Высокоэнергетическая область в случае реакции (p, xp) формируется преимущественно предравновесным способом. В случае реакции $(p, \alpha\alpha)$ основной вклад в сечение дают одноступенчатые прямые процессы.



Символы – эксперимент, линии – теоретические расчеты:
1 – одноступенчатые процессы, 2 – предравновесная компонента,
3 – эмиссия частиц из равновесного состояния,
4 – суммарное интегральное сечение.

Рисунок 3 – Сравнение экспериментального интегрального сечения реакции $^{59}\text{Co}(p, xp)$ с расчетами в рамках экситонной модели



Символы – эксперимент, линии – теоретические расчеты:
1 – одноступенчатые процессы, 2 – предравновесная компонента,
3 – эмиссия частиц из равновесного состояния,
4 – суммарное интегральное сечение.

Рисунок 4 – Сравнение экспериментального интегрального сечения реакции $^{59}\text{Co}(p, \alpha)$ с расчетами в рамках экситонной модели

Таблица – Вклады механизмов ядерных реакций в формирование интегральных спектров (p, xp) и (p, α) на ядре ^{59}Co при $E_p = 30$ МэВ

Реакция	Энергетический диапазон, МэВ	Механизмы ядерных реакций			
		прямой, мб	предравновесный, мб	равновесный, мб	сумма, мб
(p, xp)	2,0 – 28,5	4,4 (0,6%)	442,3 (55,2%)	354,3 (44,2%)	801,0 (100%)
(p, α)	5,6 – 29,9	29,2 (25,6%)	18,6 (16,4%)	66,1 (58,0%)	114,0 (100%)

Заключение

Получены экспериментальные дважды дифференциальные спектры протонов и α -частиц в широком диапазоне энергий (от 4 до 30 МэВ) и углов $30 - 135^\circ$ (с шагом 15°) из реакций, инициированных протонами с энергией 30 МэВ на ядре ^{59}Co . Определены экспериментальные интегральные и парциальные сечения исследованных реакций. Величина экспериментального парциального сечения реакции (p, xp) на ядре ^{59}Co составила $1002,0 \pm 1,5$ мб, $(p, \alpha) - 57,0 \pm 0,5$ мб.

Выполнен теоретический анализ полученных экспериментальных инклюзивных сечений реакций (p, xp) и (p, α) на ядре ^{59}Co при энергии налетающих протонов 30 МэВ на основе экситонной модели предравновесного распада.

Из сравнения экспериментальных и теоретически рассчитанных интегральных спектров следует, что основной вклад в формирование сечения реакций (p, xp) обусловлен предравновесным механизмом. Из рассмотрения вкладов механизмов, формирующих инклюзивные сечения реакции (p, α) , следует, что образование α -частиц идет преимущественно через прямые одноступенчатые процессы, за исключением низкоэнергетического диапазона, где становится существенной эмиссия частиц из равновесного состояния.

Полученные экспериментальные результаты восполняют базу ядерных данных по сечениям реакций и могут быть использованы при конструировании гибридных ядерно-энергетических установок.

Литература

- 1 Carminati F., Klapisch R., Revol J.P., Roche C., Rubio A., Rubbia C. An energy amplifier for cleaner and inexhaustible nuclear energy production driven by a particle beam accelerator // Tech. Rep. CERN-AT-93-47-ET, CERN. – 1993.
- 2 Bowman C.D., Arthur E.D., Lisowski P.W. et al. Nuclear energy generation and waste transmutation using an accelerator-driven intense thermal neutron source // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1992. – Vol.A.320. – P.336-367.
- 3 it Abderrahim H.A., Kupschus P., Malambu E. et al. MYRRHA: A multipurpose accelerator driven system for research & development// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2001. – Vol.A.463. – P.487-494.
- 4 Duisebayev A., Ismailov K.M., Bostosun I. Inclusive spectra of (p,xp) and (p,xd) reactions on $^{90,92}\text{Zr}$ and ^{92}Mo nuclei at $E_p = 30.3$ MeV // Phys. Rev. – 2003. – Vol.C67. – P.044608-1 – 044608-8.
- 5 Дуйсебаев А., Исмаилов К.М. Компоненты сечений инклюзивных спектров реакций (p,xp), (p,xd) и (p,x α) на ядрах $^{90,92}\text{Zr}$, ^{92}Mo и ^{56}Fe // Вестник КазНУ, сер.физ. – 2006. – №2(22). – С.124-132.
- 6 Duisebayev A., Duisebayev B.A., Zholdybayev T.K., Sadykov B.M. and Ismailov K.M. Inclusive Spectra of Protons and α -Particles from Reactions Induced by Protons with an Energy of 30.0 MeV on the ^{209}Bi Nucleus // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – 2014. – Vol.78, № 7. – P.601-604.
- 7 Ikeda Y. Nuclear data relevant to accelerator driven system // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2002. – Suppl. 2. – P. 13.
- 8 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.
- 9 Буртебаев Н.Т. и др. Система многомерного анализа для исследования ядерных реакций на циклотроне ИЯФ АН КазССР // Изв. АН КазССР, сер. физ.-мат. – 1975. – №2. – С.65-68.
- 10 Griffin J. J. Statistical model of intermediate structure // Phys. Rev. Lett. – 1966. – №9. – P.478-481.
- 11 Kalbach C. Two-component exciton model: Basic formalism away from shell closures // Phys. Rev. – 1986. – Vol.C33. – P.818-833.
- 12 Williams F.C. Particle-hole state density in the uniform spacing model // Nucl. Phys. – 1971. – Vol.A166. – P.231-240.
- 13 Williams F.C. Intermediate state transitions in the Griffin model // Phys. Lett. – 1970. – Vol.B31, №4. – P.184-186.
- 14 Kalbach C. Preequilibrium reactions with complex particle channels // Phys. Rev. – 2005. – Vol.C71. – P. 034606-1 - 034606-23.
- 15 Kalbach C., PRECO-2006: Program for Calculating Pre-equilibrium and Direct Reaction Double Differential Cross-Sections // LA-10248-MS, February 2006.
- 16 Becchetti F.D., Greenlees G.W. Nucleon-nucleus optical-model parameters, A340, $E < 50$ MeV // Phys.Rev. – 1969. – Vol. 182. – P.1190-1209.
- 17 Huizenga J.R., Igo G. Theoretical reaction cross sections for alpha particles with an optical model. // Nuclear Physics. – 1969. – Vol.29. – P. 462-473.

References

- 1 F. Carminati, R. Klapisch, J.P. Revol, C. Roche, A. Rubio, C. Rubbia An energy amplifier for cleaner and inexhaustible nuclear energy production driven by a particle beam accelerator, Tech. Rep. CERN-AT-93-47-ET, CERN, 1993.
- 2 C.D. Bowman, E.D. Arthur, P.W. Lisowski et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A.320, 336-367, (1992).
- 3 H.A. it Abderrahim, P. Kupschus, E. Malambu et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.463, 487-494, (2001).
- 4 A. Duisebayev, K.M. Ismailov, I. Bostosun, Phys. Rev. C67, 044608(8), (2003).
- 5 A. Duysebayev, K. Ismailov, Vestnik KazNU, ser.fiz., 2(22), 124-132, (2006). (in russ).
- 6 A. Duisebayev, B.A. Duisebayev, T.K. Zholdybayev, B.M. Sadykov and K.M. Ismailov, Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 78(7), 601-604, (2014).
- 7 Y. Ikeda, Journal of Nuclear Science and Technology, Suppl. 2, 13, (2002).
- 8 A.A. Arzumanov, L.M. Nemenov, O.I. Anisimov i dr., Izv. AN KazSSR, ser. fiz.-mat., 4, 6-15, (1973). (in russ).
- 9 N.T. Burtebayev i dr., Izv. AN KazSSR, ser. fiz.-mat., 2, 65-68, (1975). (in russ).
- 10 J.J. Griffin, Phys. Rev. Lett. 9, 478-481, (1966).
- 11 C. Kalbach, Phys. Rev. C33, 818-833, (1986).
- 12 F.C. Williams, Nucl. Phys. A166, 231-240, (1971).
- 13 F.C. Williams, Phys. Lett. B31, 4, 184-186, (1970).
- 14 C. Kalbach, Phys. Rev. C71, 034606(23), (2005).
- 15 C. Kalbach, PRECO-2006: Program for Calculating Pre-equilibrium and Direct Reaction Double Differential Cross-Sections, LA-10248-MS, February 2006.
- 16 F.D. Becchetti, G.W. Greenlees, Phys.Rev. C 182, 1190-1209, (1969).
- 17 J.R. Huizenga, G. Igo, Nuclear Physics, 29, 462-473, (1969).