

УДК 539.172.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 7 МэВ С МЕДЬЮ

^{1,2} Муқан Ж., ^{1,3} Жолдыбаев Т.К., ¹ Садыков Б.М., ¹ Керимкулов Ж.К., ¹ Насурлла М.,
³ Усабаева Г., ² Алиева Г., ² Темір Ш.

¹ Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан

² Евразийский Национальный Университет им. Гумилева, Астана, Казахстан

³ Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Задачей данной работы являлось измерение сечения ядерных реакций ${}^{\text{nat}}\text{Cu}(p, \text{xp})$ на изохронном циклотроне У-150М Института ядерной физики при энергии протонов 7 МэВ. Анализ экспериментальных результатов выполнен в рамках экситонной модели распада ядер, представляющей из себя статистический подход, описывающий переход возбужденного ядра в равновесное состояние. Теоретический анализ экспериментальных результатов выполнен в рамках расчетного кода *PRECO-2006*. Определено, что основной вклад в формирование интегрального сечения реакций (p, xp) дает механизм образования составного ядра. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы при конструировании гибридных ядерно-энергетических установок, а также в радиационном материаловедении.

Подкритический реактор, управляемый ускорителем (accelerator-driven system – ADS) это новый тип электроядерного реактора, состоящего из подкритического реактора и высокоэнергетического протонного ускорителя, который служит для получения нейтронов, вызывающих реакцию деления, в результате которой выделяется достаточно энергии, чтобы питать ускоритель и получать дополнительную энергию [1]. При создании таких установок для корректного моделирования нейтронного потока необходимы данные по спектральному составу и угловым распределениям вторичных протонов и легких заряженных частиц, образующихся при гашении первичного пучка в мишенном устройстве в диапазоне энергий налетающих протонов от единиц до десятков и сотен МэВ. Объектом исследования выбрана медь, которая является широко применяющимся конструкционным материалом в проектируемых электроядерных установок [2]. Были измерены дважды-дифференциальные сечения на ${}^{\text{nat}}\text{Cu}$ при энергии протонов 7 МэВ.

Измерения сечений ядерных реакций ${}^{\text{nat}}\text{Cu}(p, \text{xp})$ были выполнены на изохронном циклотроне У-150М Института ядерной физики [3]. Исследование инклюзивных энергетических спектров и угловых распределений протонов из реакций (p, xp) выполнено при энергиях налетающих протонов 7 МэВ.

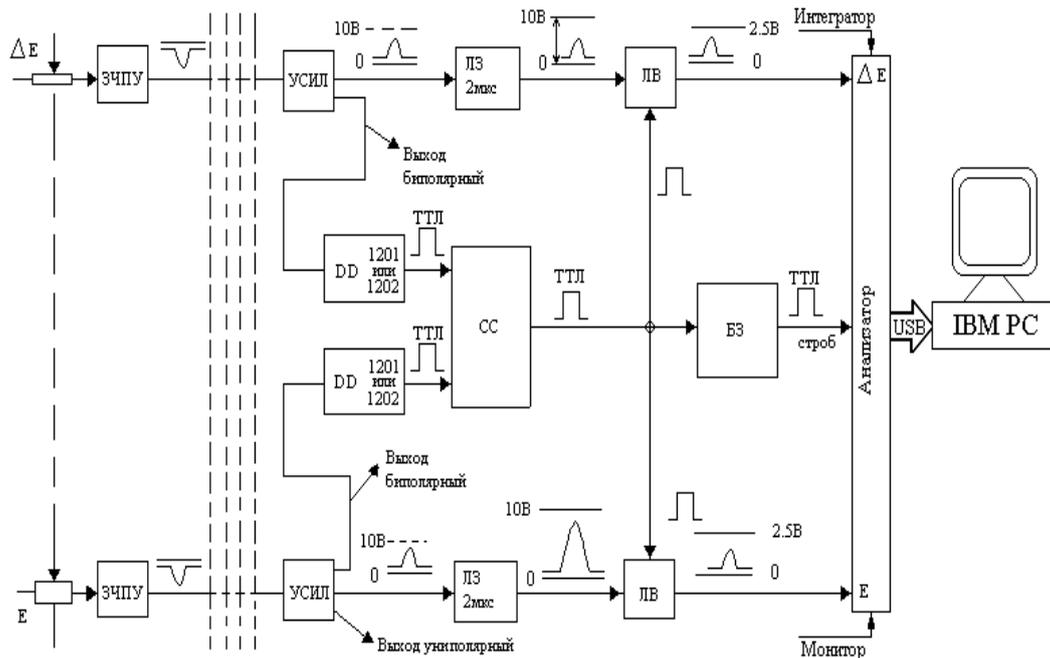
Камера рассеяния установлена на расстоянии 23,9 м от выхода пучка циклотрона. Максимальная угловая неопределенность системы коллиматоров, расположенной непосредственно перед камерой рассеяния, обеспечивала линейные размеры пучка на мишени ~3 мм. Юстировка камеры рассеяния относительно оси ионопровода осуществлялась оптическими методами. Энергетический разброс пучка составлял ~1,0%. Спектрометр частиц располагался на вращающейся крышке камеры рассеяния под углом 10° к плоскости реакции и мог быть установлен относительно оси пучка под углами $\theta_{\text{ДС}} = 10 \div 170^\circ$ с точностью $0,1^\circ$. Для определения числа частиц, падающих

на мишень, применялась система цилиндр Фарадея – интегратор тока. Погрешность в определении постоянной интегратора не превышала $\pm 1\%$. Давление во всей системе ускорения и проводки пучка составляло в среднем $5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст.

Идентификация продуктов реакций по массам и энергии проводилась на основе ($\Delta E - E$) методики и осуществляется системой многомерного программируемого анализа с использованием спектрометрических линеек на основе электроники фирм *ORTEC* и *POLON*, блок-схема которой представлена на рисунке 1. Сигналы от ΔE - и E -детекторов поступают по двум спектрометрическим трактам («E», «dE») на двумерный анализатор, выполненный на микроконтроллерах и представляющий собой выносной блок, подключаемый к USB-порту персонального компьютера. Системная программа задает режимы работы анализатора и передачу данных в компьютер, в программу для графической визуализации данных и сохранения их в его файлах. Выносной блок содержит также счетчик управляющих импульсов для оценки величины просчетов в набираемой двумерной матрице путем сопоставления их числа с интегральным количеством событий, зарегистрированных в поле матрицы, и два счетчика внешних событий (сигналов от интегратора тока пучка ускорителя и монитора мишени).

Для измерения однозарядных частиц использовали в качестве стопового полупроводниковый кремниевый детектор толщиной 2 мм, а в качестве пролетного детектора полупроводниковый кремниевый детектор с толщиной 25 мкм.

В качестве мишени использовалась самоподдерживающаяся медная фольга толщиной $3,5 \text{ мг/см}^2$ с естественным содержанием изотопов. Толщина определялась по потерям энергии α -частиц от тройного α -источника ${}^{241,243}\text{Am} + {}^{244}\text{Cm}$ при прохождении через мишень.



ЗЧПУ – зарядово-чувствительный предусилитель, Усил – усилитель, ЛЗ – линия задержки, СС – схема совпадений, ЛВ – линейные ворота, БЗ – блок задержки

Рисунок 1. Блок-схема системы регистрации и идентификации заряженных частиц

Энергетическая калибровка проводилась по пикам в исследуемых спектрах, отвечающих известным состояниям конечных ядер. Дважды дифференциальные сечения в лабораторной системе координат находились из соотношения:

$$\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon_n d\Omega_n} = \frac{A_t z_x e I_n \cos \varphi_t}{\rho_t p N_0 \Delta\Omega_n \Delta Q}, \quad (1)$$

где A_t – масса ядра мишени в а.е.м.; $z_x e$ – заряд налетающей частицы в микрокулонах; I – число отсчетов в канале n ; φ_t – угол между рамкой мишени и пучком; ρ_t – толщина мишени (мг/см); p – обогащение мишени (относительные единицы); $N_0 = 6,02217 \cdot 10^{20}$ (мг·моль)⁻¹ – число атомов в одном миллиграмм-моле вещества; $e = 1,602192 \cdot 10^{-13}$ мкКл; $\Delta\Omega_n$ – телесный угол, стягиваемый коллиматором телескопа детекторов (ср); ΔE_n – ширина канала с номером n в МэВ; ΔQ – заряд, прошедший через мишень на интегратор тока за время экспозиции (мкКл).

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%. Полная систематическая ошибка не превышала 10%.

Анализ экспериментальных результатов реакций (р,хр) на ядре ¹¹¹Сu при $E_p = 7$ МэВ выполнен в рамках экситонной модели распада ядер [4], представляющей из себя статистический подход, описываю-

щий переход возбужденного ядра в равновесное состояние. Она широко используется при интерпретации многих экспериментальных результатов. Одним из достоинств модели является то, что кинетические уравнения, на которых она основана, описывают весь процесс релаксации возбужденной ядерной системы, начиная от простейших квазичастичных конфигураций и заканчивая установлением статистического равновесия. Это, в частности, позволяет по-новому взглянуть на ставший уже традиционным механизм испускания частиц из составного ядра.

Разработанные быстрые методы решения кинетических уравнений открыли возможность изучения многочастичной эмиссии частиц. Модель описывает одновременно энергетические спектры не только нуклонов, но и сложных частиц. К тому же оказалось, что экситонная модель очень удобна для введения в нее дополнительных физических моделей и в настоящее время в ней учитываются парные корреляции нуклонов в ядре, оболочечная структура и изотопический спин.

В рамках двухкомпонентной экситонной модели 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. Принимается, что компаунд ядро формируется с частично-дырочной конфигурацией, которая учитывает только налетающие нуклоны как частичные степени свободы и не учитывает дырочные степени свободы. Такая конфигурация

обозначается как $(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu) = (Z_a, 0, N_a, 0)$, где a относится к бомбардирующей частице.

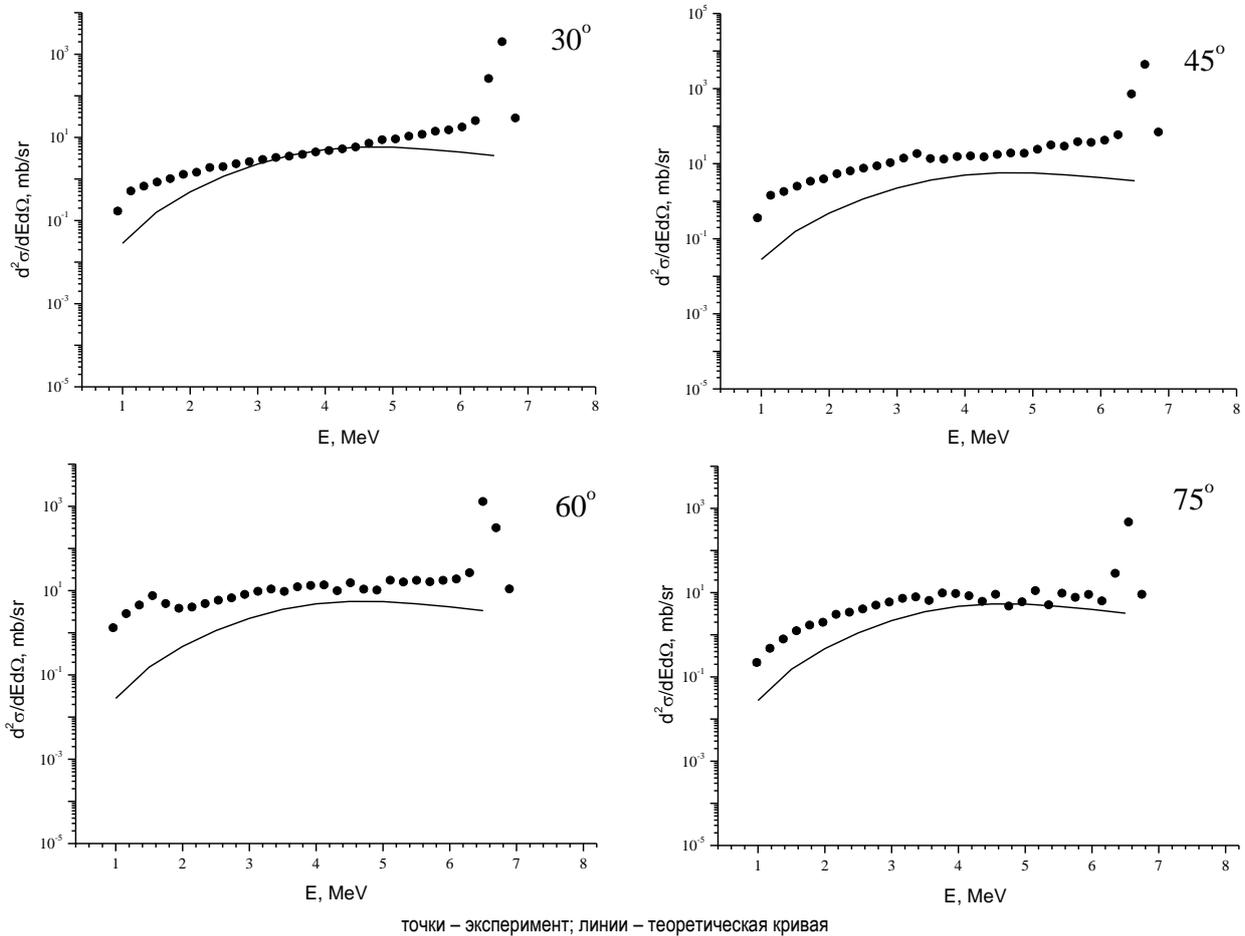
Разность между числом частиц и дырок в процессе перехода в равновесное состояние остается постоянной и для компаунд ядра $p_\pi - h_\pi = Z_a$, $p_\nu - h_\nu = N_a$ и $p - h = A_a$, где A_a массовое число налетающей частицы. Это условие не всегда верно, особенно при приближении к состоянию равновесия, но вполне адекватно для предравновесных вычислений.

Теоретический анализ экспериментальных результатов выполнен в рамках расчетного кода *PRECO-2006* [5], который был оптимизирован для рассматриваемого случая. В качестве исходной бралась $(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu) = (1, 0, 0, 0)$ частично-дырочная конфигурация. Нормировочный коэффициент K_g принимался равным 15 МэВ. При параметризации квадрата матричных элементов использовались значения нормировочных констант: $K_{\pi\pi}:K_{\pi\nu}:K_{\nu\nu} =$

$2200:900:900 \text{ МэВ}^2$. При определении сечений реакций, необходимых для расчетов, использовались параметры оптического потенциала Веччетти-Гриенлиса [6] для протонов.

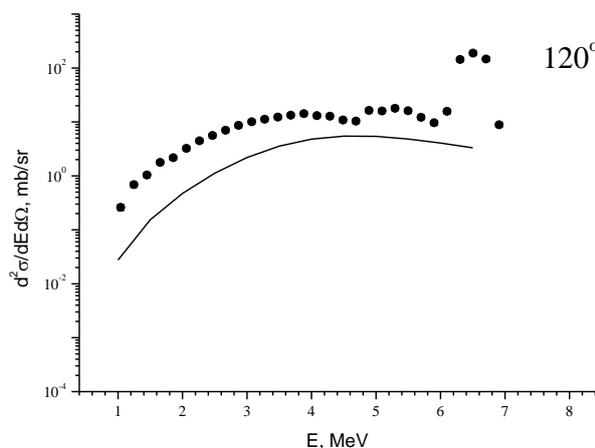
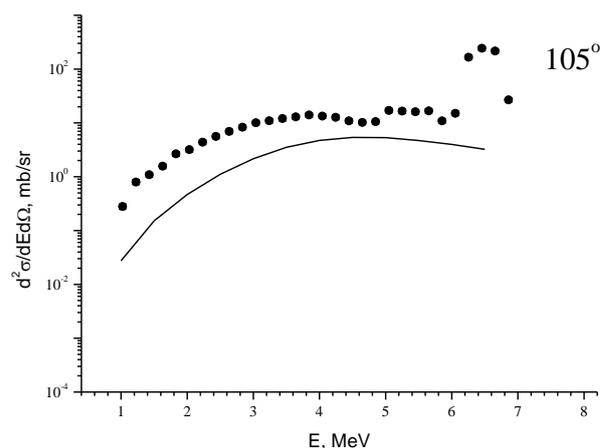
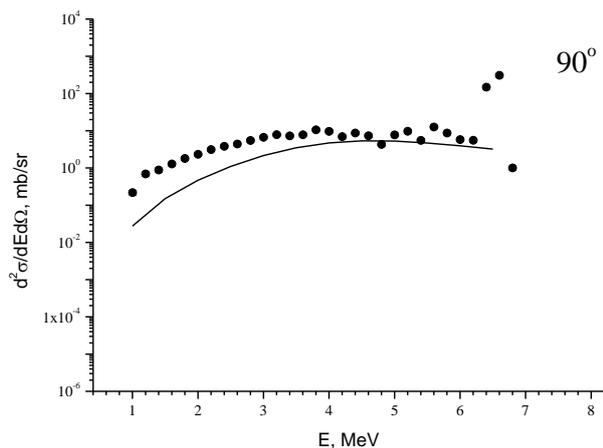
В дополнение к вычислениям в рамках экситонной модели, были проведены расчеты в рамках других механизмов ядерных реакций: прямых процессов (передача – выбивание нуклонов, неупругое рассеяние) и равновесного излучения с использованием формализма Вайскопфа распада составного ядра.

На рисунке 2 приведено сравнение теоретических и экспериментальных дважды-дифференциальных сечений реакций (p,xr) на ядре ^{nat}Cu при энергии протонов 7 МэВ. Установлено, что основной вклад в формирование интегрального сечения реакций (p,xr) дают составные процессы. Вклад одноступенчатых прямых механизмов в реакции (p,xr) незначителен.



точки – эксперимент; линии – теоретическая кривая

Рисунок 2. Сравнение экспериментальных дважды-дифференциальных сечений реакций $\text{Cu}(p,xr)$ при энергии 7 МэВ с расчетами в рамках экситонной модели



точки – эксперимент; линии – теоретическая кривая

Рисунок 2 (продолжение). Сравнение экспериментальных дважды-дифференциальных сечений реакций $\text{Cu}(p, \text{xp})$ при энергии 7 МэВ с расчетами в рамках экситонной модели

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов А.С., Киселев Г.В. Научно-технические проблемы создания электроядерных установок для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и одновременного производства энергии (российский опыт) // ЭЧАЯ. – 2001. – Вып.1, № 32. – С. 143–188.
2. Ikeda Y. Nuclear Data Relevant to Accelerator Driven System // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2002. – Suppl. 2. – P. 13–18.
3. 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.
4. Griffin J.J. Statistical model of intermediate structure // Phys.Rev. Lett. – 1966. – Vol. 17. – P. 478–481.
5. Kalbach C. PRECO-2006: Program for Calculating Pre-equilibrium and Direct Reaction Double Differential Cross-Sections. LA-10248-MS, February 2006.
6. Becchetti F.D., Greenlees G.W. Nucleon-nucleus optical-model parameters, A340, E<50 MeV // Phys. Rev. – 1969. – С 182. – P. 1190–1209.

7 МэВ ПРОТОНЫНЫҢ МЫСПЕН ӘРЕКЕТТЕСУІ

^{1,2}Ж. Муқан, ^{1,3}Т.К. Жолдыбаев, ¹Б.М. Садыков, ¹Ж.К. Керимкулов, ¹М. Насурлла,
³Г. Усабаева, ²Г. Аллева, ²Ш. Темір

¹ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

² Гумилев ат. Еуразия Ұлттық Университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

³ ал-Фараби ат. Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

Жұмыстың мақсаты энергиясы $E_p=7$ МэВ болатын $^{nat}\text{Cu}(p, \text{xp})$ ядролық реакцияларының қималарын Ядролық физика институтының У-150М изохронды циклотронында зерттеу болып табылады. ^{nat}Cu ядросының реакцияларының эксперименттік нәтижелерін талдау қозған ядроның тепе-теңдік күйге өтуін сипаттайтын статистикалық тәсіл болып табылатын ядро ыдырауының экситонды моделі аясында жүргізілді. Эксперимент нәтижелерін теориялық тұрғыдан талдау PRECO-2006 есептеу коды шеңберінде жүргізілді. Алынған эксперименттік нәтижелер үлкен ядролық-энергетикалық қондырғылады жасауда, сондай-ақ радиациялық материалтануда қоланылуы мүмкін.

INTERACTION OF 7 MeV ENERGY PROTONS WITH COOPER

^{1,2)} Zh. Mukan, ^{1,3)} T.K. Zholdybayev, ¹⁾ B.M. Sadykov, ¹⁾ Zh.K. Kerimkulov, ¹⁾ M. Nassurlla,
³⁾ G. Ussabayeva, ²⁾ G. Alieva, ²⁾ Sh. Temir

¹⁾ *Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan*

³⁾ *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

The aim of this work was to measure the cross section of nuclear reactions $^{nat}\text{Cu}(p, xp)$ on the isochronous cyclotron U-150M of the Institute of nuclear physics at the energy $E_p=7$ MeV. The analysis of the experimental results of these reactions on the ^{nat}Cu is carried out in accordance with the exciton model of nuclear decay, which is a statistical approach describing the transition of the excited core to an equilibrium state. The theoretical analysis of the experimental results was performed in the framework of the *PRECO-2006* calculation code. The obtained experimental results can be used in the design of hybrid nuclear power plants, as well as in radiation materials science.