

АНАЛИЗ ПАРЦИАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИИ $^{68}\text{Zn}(p,\gamma)^{69}\text{Ga}$ **Б.А. Немашкало, И.Д. Федорец*, Р.П. Слабоспицкий, К.В. Шебеко, С.Н. Утенков**

Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", ул. Академическая, 1, Харьков, 61108

*Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина, пл. Свободы, 4, Харьков, 61077

Поступила в редакцию 29 июля 2003 г.

Данная статья представляет экспериментальные результаты изучения реакции $^{68}\text{Zn}(p,\gamma)^{69}\text{Ga}$. Исследования механизма реакции захвата протонов ядрами ^{68}Zn проведены, используя парный γ -спектрометр на основе Ge(Li)-детектора. Измерения парциальных сечений (ПС) данной реакции были выполнены на ускорителе Ван-де-Граафа с энергиями протонов от 1,5 до 3,0 МэВ. ПС получены для первичных γ -переходов в ядрах ^{69}Ga . Ширины наблюдаемых пиков соответствуют потерям энергии протонов в мишени. Парциальные сечения проанализированы в рамках статистической модели, используя глобальные усредненные параметры с учетом температуры ядра и оболочечных эффектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиационный захват протонов, парциальные сечения, радиационная силовая функция, статистическая теория, возбужденные состояния.

В настоящее время статистическая теория является одним из наиболее точных количественных методов в ядерной физике. Она основана на представлениях об образовании составного ядра, случайности распределения фаз матричных элементов высоковозбужденных состояний, факторизации сечений, сохранении углового момента и четности, применении оптической модели для вычисления сечений образования составного ядра, использовании современных теоретических подходов при расчете полных и парциальных радиационных ширин.

В ряде работ [1,2] было показано, что адекватного описания парциальных сечений реакции радиационного захвата протонов ядрами с $A > 40$ удается достичь, если использовать для вычисления радиационной силовой функции (РСФ) статистический подход Сироткина [3,4], который рассматривает компаунд-состояния как результат взаимодействия одночастичных резонансов с многочастичными, учитывает температуру возбужденного состояния ядра, оболочечную структуру спектра одночастичных уровней и влияние температуры на числа их заполнения. Данный подход является в настоящее время наиболее апробированным. Его использование позволяет [5,6] добиться наилучшего описания, как парциальных сечений, так и поведения РСФ ниже порога вылета нуклона.

Целью настоящей работы является попытка описать парциальные сечения реакции радиационного захвата протонов ядрами ^{68}Zn в рамках статистической модели без использования свободных параметров и дополнительных предположений об абсолютной величине и энергетической зависимости РСФ, что не удалось сделать ранее [7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения выполнены на электростатическом ускорителе ННЦ ХФТИ ЭСУ-4,5 при энергиях налетающих протонов от 1,5 до 3,0 МэВ. Энергетический разброс в пучке составлял около 0,1%. Очищенный и сформированный пучок протонов попадал в камеру рассеяния, потенциал которой был поднят до - 300 В для подавления вторичной эмиссии электронов. Это необходимо для более точного определения тока пучка, что в свою очередь осуществлялось интегратором тока.

Мишень из обогащенного до 95,7% ^{68}Zn толщиной 1,4 мкм изготовлена методом напыления в вакууме на золотую подложку толщиной 100 мкм. Мишень охлаждалась проточной водой, что позволило поднять ток протонного пучка до 5 мкА без повреждения материала мишени при длительных экспозициях.

Гамма-лучи регистрировались парным γ -спектрометром, состоящим из центрального Ge(Li)-детектора коаксиального типа с чувствительным объемом 70 см^3 , окруженным четырехсекционным кольцевым детектором NaI(Tl). Весь детектирующий блок помещен в свинцовую защиту толщиной от 50 до 70 мм, а Ge(Li)-детектор дополнительно защищен медным экраном для подавления мягкого γ -излучения. Электронная схема спектрометра собрана из стандартных блоков (предусилители, усилители, формирователи импульсов и др. элементы), за исключением широкополосного фильтра и схемы логического анализа импульсов. Временное разрешение спектрометра составляло ~ 30 нс и в основном ограничивалось характеристиками Ge(Li)-детектора. Спектрометр располагался под углом 55° к направлению пучка. Учет просчетов электроники был реализован с помощью ($\beta^+\gamma$)-источника ^{22}Na , помещенного в конвертор на передней стенке Ge(Li)-детектора в центре кольцевого детектора NaI(Tl). Это позволило регистрировать совпадения аннигиляционных пар с γ -квантами, испускаемыми источником ^{22}Na ($E_\gamma = 1,274$ МэВ).

Калибровка γ -спектрометра была выполнена с помощью γ -линий из реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ и стандартных источников γ -излучения ОСГИ-11. Эффективность парного γ -спектрометра контролировалась в процессе

каждой экспозиции по отношению площадей под пиками двойной утечки в однокристалльном и парном γ -спектрах. Средняя эффективность регистрации пар составила $\sim 20\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Толщина мишени выбрана таким образом, чтобы потери энергии протонов в ней ΔE_p не превышали среднего расстояния между нижними уровнями ядра ^{69}Ga и одновременно возбуждалось большое число состояний составного ядра, т.е. толщина удовлетворяла условию $D_\lambda \ll \Delta E_p < D_f$, где D_λ - среднее расстояние между уровнями составного ядра, а D_f - расстояние между уровнями конечного ядра. На рис. 1 и рис. 2 приведены прямой и парный γ -спектры реакции $^{68}\text{Zn}(p,\gamma)^{69}\text{Ga}$, измеренные при фиксированной энергии протонов 2,63 МэВ.

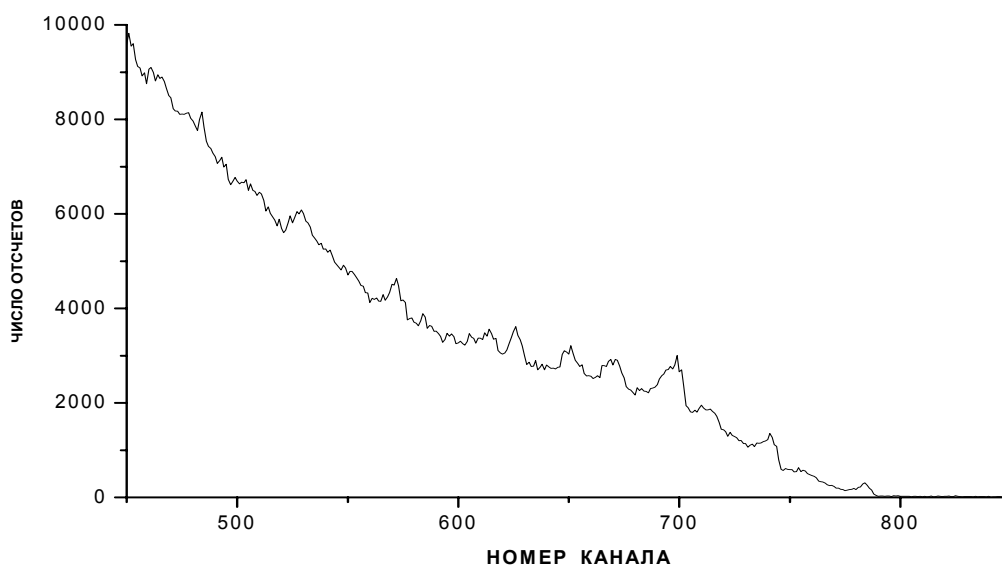


Рис. 1. Прямой γ -спектр из реакции $^{68}\text{Zn}(p,\gamma)^{69}\text{Ga}$ при энергии протонов 2,63 МэВ

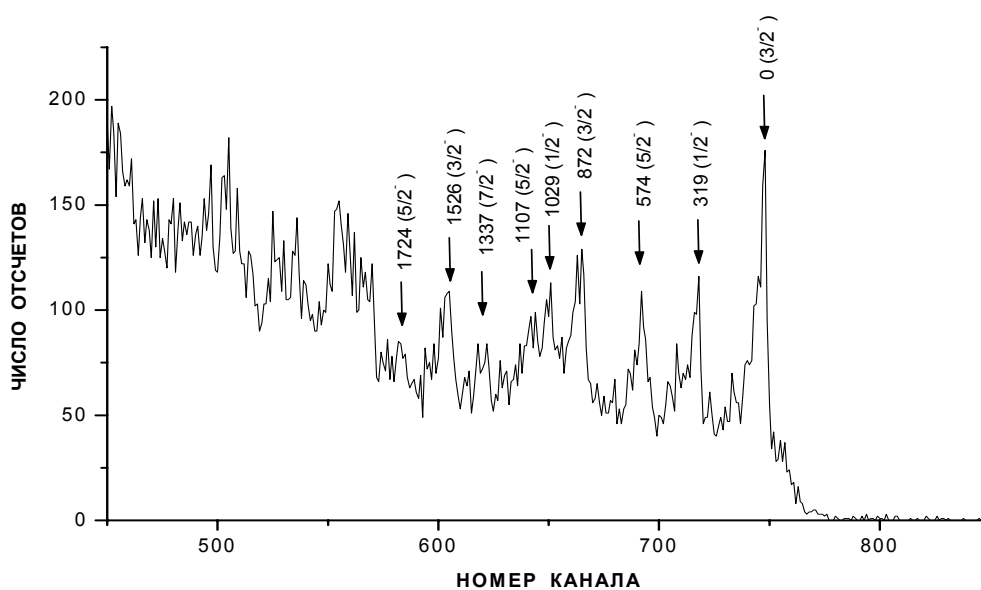


Рис. 2. Парный γ -спектр из реакции $^{68}\text{Zn}(p,\gamma)^{69}\text{Ga}$ при энергии протонов 2,63 МэВ

Полученные спектры затем суммировались, чтобы добиться усреднения на интервале 200 кэВ. Это позволило уменьшить погрешность, обусловленную разбросом интенсивностей γ -переходов в низколежащие состояния ^{69}Ga , связанную с распределением Портера – Томаса.

Парциальные сечения определялись по выходу жестких γ -линий с учетом эффективности спектрометра по формуле

$$\sigma_{p,\gamma}^{\text{экс}} = 2,66 \cdot 10^{-7} \frac{A \cdot \cos \varphi_n}{Q \cdot t \cdot k \cdot \epsilon} Y_f, \quad (1)$$

где A – среднее массовое число мишени, φ_n – угол между нормалью к поверхности мишени и пучком, Y_f – выход γ -линии (площадь под пиком), Q – заряд, выделившийся на мишени (мкКл), t – толщина мишени ($\text{мкг}/\text{см}^2$), k – процентное содержание изотопа в мишени, ϵ – эффективность регистрации γ -квантов.

Погрешность в определении парциальных сечений составила 12-15%. Основными источниками погрешности измерений явились:

1. Погрешность определения площади под пиком ~ 5 -7%.
2. Систематическая ошибка определения толщины мишени ~ 5 %.
3. Погрешность определения величины абсолютной эффективности спектрометра $\Delta \epsilon(E_\gamma) \sim 8$ -12%.
4. Систематическая ошибка измерения заряда на мишени $\Delta Q \sim 2$ %.

Определенные по выходам γ -лучей парциальные сечения (ПС) реакции $^{68}\text{Zn}(p,\gamma)^{69}\text{Ga}$ приведены на рис. 3. Они соответствуют прямым переходам из состояний составного ядра в основное состояние $0(3/2^-)$ и нижние возбужденные состояния ^{69}Ga : 319 кэВ ($1/2^-$), 574 кэВ ($5/2^-$), 872 кэВ ($3/2^-$), 1029 кэВ ($1/2^-$), 1107 кэВ ($5/2^-$), 1337 кэВ ($7/2^-$), 1526 кэВ ($3/2^-$), 1724 кэВ ($5/2^-$). Сплошными кривыми представлены результаты вычислений ПС в рамках статистической теории. Кривая 1 соответствует парциальным сечениям, вычисленным путем экстраполяции лоренциана в область энергий возбуждения ниже 11 МэВ, а кривая 2 – ПС, расчет которых выполнен на основе статистического подхода Сироткина.

Коэффициенты проницаемости для протонов, определяющие сечение образования составного ядра, вычислялись с использованием обобщенных параметров потенциала оптической модели [8] с мнимой частью 12,2 МэВ для $p+^{68}\text{Zn}$.

Еще одну составляющую статистического описания – плотность уровней, вычисляли в модели ферми-газа с обратным смещением. Расчеты проводились с параметрами $a = 8,0 \text{ МэВ}^{-1}$ и $\Delta = -0,5 \text{ МэВ}$ [9]. Эти значения параметров обеспечивали удовлетворительное согласие вычисленной плотности уровней с экспериментальными данными для широкой области энергии возбуждения [10].

РСФ для E1-переходов в настоящей работе вычислялась в рамках статистического подхода Сироткина [3,4] по формуле

$$S_{\gamma}^{E1} = 8,674 \cdot 10^{-8} 2\pi [1 + \exp(-E_\gamma/T)]^{-1} \times \sum_{i=1}^2 \frac{\sigma_i E_i^2 \Gamma_{R(i)}(E_\gamma)}{(E_\gamma^2 - E_i^2)^2 + E_i \Gamma_{R(i)}(E_\gamma)}, \quad (2)$$

где

$$\Gamma_{R(i)}(E_\gamma) = \Gamma_i \rho_{2p-2h}(E_\gamma, T) / \rho_{2p-2h}(E_i, T).$$

Здесь T – температура ядра в конечном состоянии, σ_i , E_i и Γ_i – сечения, положения и ширины максимумов двугорбого гигантского дипольного резонанса, которые выбирались такими, чтобы наилучшим образом привязать лоренцеву кривую к наблюдаемому в работе [11] максимуму в сечении реакции (γ, n) на Ga. Величина $\rho_{2p-2h}(E_i, T)$ дает плотность состояний типа 2 частицы - 2 дырки, при вычислении которых учитывалась оболочечная структура спектра одночастичных уровней и влияние температуры ядра на числа заполнения этих уровней. В расчеты включали только те состояния, переход между которыми был разрешен принципом Паули.

Вклад магнитных переходов учитывался исходя из результатов работы [4], где для вычисления РСФ E1 и M1-переходов предложено выражение:

$$S_{\gamma}^{E1} / S_{\gamma}^{M1} = 0,03 A (E_\gamma^2 + (\pi T)^2) / B_n^2, \quad (3)$$

где V_n - энергия связи нейтрона. Вклад М1-переходов на рис.3 не выделен, но он составляет от 10% до 15% для различных состояний ^{69}Ga .

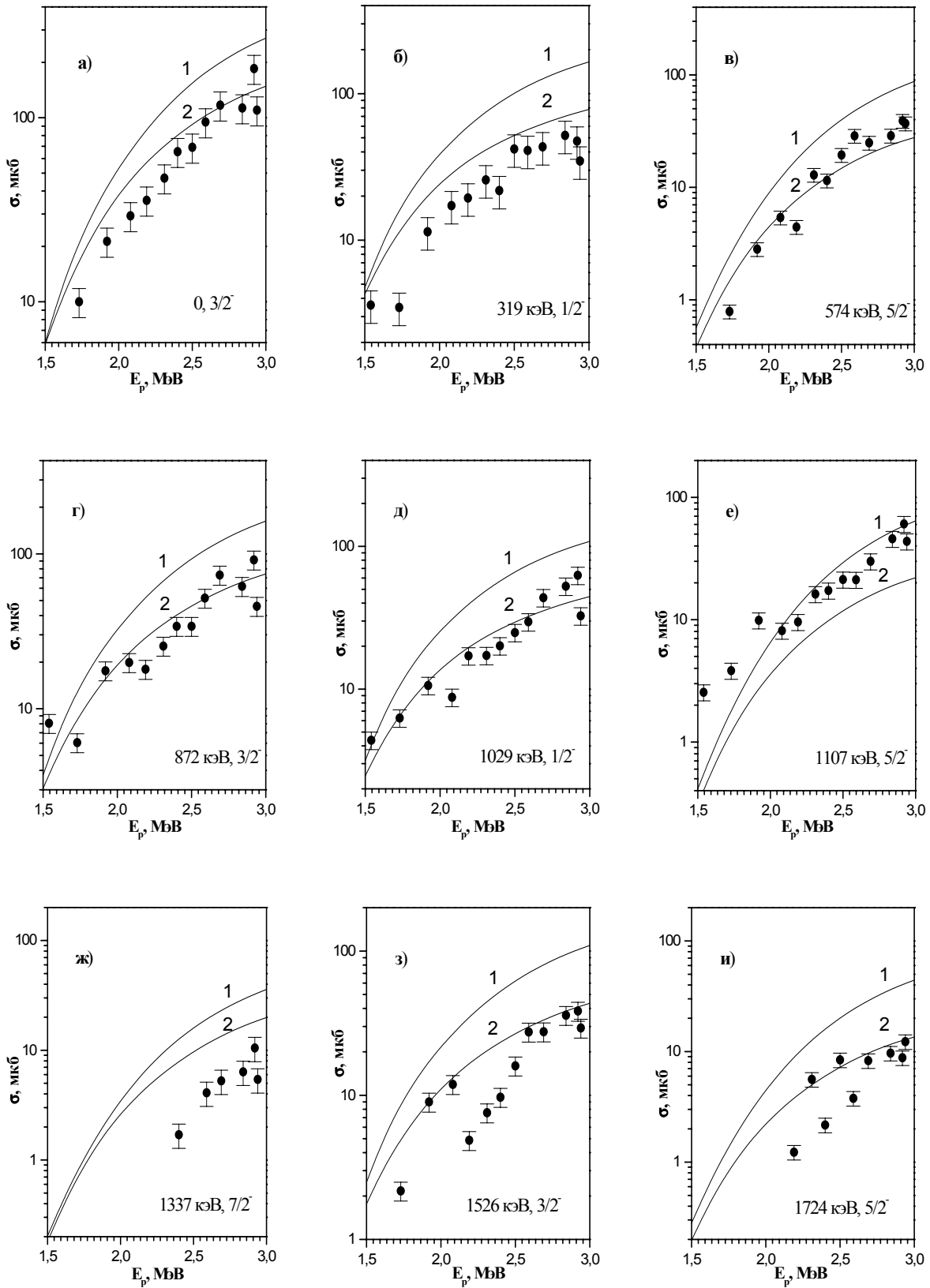


Рис. 3. Экспериментальные и вычисленные в рамках статистической теории парциальные сечения реакции $^{68}\text{Zn}(p,\gamma)^{69}\text{Ga}$ для нижних состояний ^{69}Ga . Кривая 1 соответствует вычислениям с использованием РСФ в виде лоренцевой зависимости,

кривая 2 – вычислениям с РСФ, полученным на основе статистического подхода [3,4] с учетом температуры и оболочечной структуры ядра.

ВЫВОДЫ

Как видно из рис. 3, зафиксированный таким образом набор параметров статистической модели позволяет однозначно описать экспериментальные ПС. Все данные взяты из независимых экспериментов и не содержат каких-либо свободных параметров и предположений. Необходимо отметить особое значение выбора выражения для расчета РСФ E1-переходов. Так использование лоренциана для вычисления S_{γ}^{E1} не позволяет описать парциальные сечения (кривая 1), давая значения S_{γ}^{E1} значительно выше необходимых для адекватного описания эксперимента, что и было отмечено авторами в [7]. В то же время расчет РСФ в рамках статистического подхода Сироткина (кривая 2) для большинства состояний позволяет удовлетворительно описать экспериментальные сечения во всем исследуемом интервале энергий протонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Немашкало Б.А., Сироткин В.К., Шебеко К.В.// ЯФ.-1992.-Т.55.-Вып.1.-С.123-129.
2. Залюбовский И.И., Немашкало Б.А., Раткевич С.С. и др.// ЯФ.-1994.-Т.57.-№5.-С.777-783.
3. Сироткин В.К.// ЯФ.-1986.-Т.43.-С.570-578.
4. Зарецкий Д.Ф., Сироткин В.К.// Изв. АН СССР. Сер. Физ.-1988.-Т.52.-№5.-С.984-990.
5. Немашкало Б.А., Раткевич С.С., Сироткин В.К. и др.// ЯФ.-1996.-Т.59.-№11.-С.1925-1928.
6. Раткевич С.С., Немашкало Б.А., Федоренко И.Д.// ЯФ.-1997.-Т.60.-№5.-С.804-810.
7. Немашкало Б.А., Сторижко В.Е.// ЯФ.-1882.-Т.36.-Вып.3(9).-С.561-571.
8. Vecchetti F.D., Greenlees G.W.// Phys. Rev.-1969.-V.182.-N4.-P.1190-1209.
9. Dilg W., Schantl W., Vonach H. et al.// Nucl. Phys. A.-1973.-V.217.-P.269-298.
10. Батий В.Г., Скакун Е.А.// Изв. АН СССР. Сер. Физ.-1986.-Т.50.-№10.-С.777-782.
11. Carlos P., Beil H., Bergere R. et al.// Nucl. Phys. A.-1976.-V.258.-P.365-388.

ANALYSIS PARTIAL CROSS SECTIONS OF REACTION $^{68}\text{Zn}(p,\gamma)^{69}\text{Ga}$

B.A. Nemashkalo, I.D. Fedorets*, R.P. Slabospitsky, K.V. Shebeko, S.N. Utenkov

National science center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Akademicheskaya Str. 1, Kharkov, 61108

**V.N.Karazin Kharkov National University, Svoboda Sq. 4, Kharkov, 61077*

The paper presents experimental results of the reaction $^{68}\text{Zn}(p,\gamma)^{69}\text{Ga}$ study. Investigations the mechanism of proton capture reaction on the ^{68}Zn were performed using the pair gamma-spectrometer based on the Ge(Li)-detector. The measurements of partial cross sections (PCS) were carried out on the Van de Graaf accelerator with the proton energies from 1.5 to 3 Mev. The PCS were obtained from the yields of the primary gamma-transition in ^{69}Ga nuclei. The widths of the observed peaks corresponded mainly with the proton energy losses in the target. The PCS were analyzed in frameworks of statistical model using the global averaged parameters with the account for the nuclei temperature and shell effects.

KEY WORDS: proton capture, partial cross sections, radiative strength function, statistical theory, excited states.