

РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ ПРОТОНОВ ЯДРАМИ ИЗОТОПОВ ХРОМА

С. Н. Утенков, К. В. Шебеко

ННЦ "Харьковский физико-технический институт", Харьков, Украина

Анализ парциальных сечений (ПС) реакций радиационного захвата протонов ядрами ^{52}Cr и ^{54}Cr выполнен для переходов в основные и низколежащие возбужденные состояния ядер ^{53}Mn и ^{55}Mn . Измерения проведены на электростатическом ускорителе ЭСУ-5 ННЦ ХФТИ в интервале энергий ускоренных протонов от 1,5 до 3,2 МэВ на ядрах ^{52}Cr и от 1,5 до 2,5 МэВ на ядрах ^{54}Cr . Расчеты ПС реакций $^{52}\text{Cr}(p,\gamma)^{53}\text{Mn}$ и $^{54}\text{Cr}(p,\gamma)^{55}\text{Mn}$ выполнены в рамках статистической теории с привлечением различных теоретических подходов для вычисления дипольных радиационных силовых функций (РСФ). Показано, что без привлечения современных теоретических моделей, учитывающих как температуру ядра, так и структуру низколежащих возбужденных состояний дочерних ядер, не удается адекватно описать РСФ во всем исследуемом интервале энергий γ -квантов.

Как было показано в ряде работ [1, 2] исследования, связанные с изучением парциальных сечений (ПС) радиационного захвата протонов на ядрах среднего атомного веса ($40 < A < 80$), являются весьма плодотворными, поскольку наряду с традиционной спектроскопической информацией (сечения, схемы уровней, спины состояний) позволяют получить информацию об абсолютной величине и энергетической зависимости радиационной силовой функции (РСФ) [3, 4]. Необходимо отметить, что с помощью данного метода может быть исследовано поведение РСФ в области энергий γ -квантов ниже порога вылета нуклона, для которой практически отсутствуют альтернативные источники информации. Знание поведения РСФ в данной энергетической области, наряду с ценностью этих данных в различных практических приложениях, позволяет сделать выводы о применимости различных современных теоретических моделей для расчета Е1-РСФ при энергии γ -квантов ниже максимума гигантского дипольного резонанса (ГДР).

При изучении ПС реакции $^{52}\text{Cr}(p,\gamma)^{53}\text{Mn}$ в работе [5] и реакции $^{54}\text{Cr}(p,\gamma)^{55}\text{Mn}$ в работе [6] не удалось описать переходы на все наблюдаемые нижние состояния конечных ядер. В последующих работах [1, 4] было показано, что завышение расчетных данных о ПС по отношению к экспериментальным связано с использованием в качестве Е1-РСФ экстраполяции лоренциана в исследуемую область энергий γ -квантов.

Целью настоящей работы является изучение радиационного захвата протонов ядрами $^{52,54}\text{Cr}$ в рамках статистической модели с использованием для расчета РСФ различных современных теоретических подходов. Нами обоснованно выбраны статистический подход Сироткина (СПС) [7] и приближение модифицированного лоренциана, предложенного Плюйко [8, 9].

Измерения выполнены на электростатическом ускорителе ЭСУ-5 ННЦ ХФТИ в интервале энергии ускоренных протонов от 1,5 до 3,2 МэВ на ядрах ^{52}Cr и от 1,5 до 2,5 МэВ на ядрах ^{54}Cr . Обогащенные мишени ^{52}Cr (~ 99,5 %) толщиной 1,16 мкм и ^{54}Cr (~ 70 %) толщиной 0,42 мкм были изготовлены методом электролитического осаждения на золотую подложку толщиной 100 мкм. Охлаждение мишени водой, имеющей непосредственный контакт с подложкой, позволило использовать ток пучка протонов до 10 мкА без повреждения мишени при длительных экспозициях. Спектры высокоэнергетических γ -лучей, соответствующих первичным переходам из области составного ядра на основные и нижние возбужденные состояния $^{53,55}\text{Mn}$, регистрировались с помощью парного γ -спектрометра, построенного на базе Ge(Li)-детектора с чувствительным объемом 63 см³, окруженного четырехсекционным кольцевым детектором NaI(Tl). Для калибровки эффективности парного спектрометра использовались γ -лучи из реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ и от стандартных источников γ -излучения ОСГИ-11.

Толщина мишеней была выбрана, исходя из критерия $D_\lambda \ll \Delta E_p < D_f$, где D_λ – среднее расстояние между уровнями составного ядра, D_f – расстояние между нижними уровнями дочерних ядер, ΔE_p – потери энергии протонов на толщине мишени. Для уменьшения погрешностей, обусловленных Портер-Томасовскими флуктуациями ширины, до величины, сравнимой с экспериментальной ошибкой (~ 20 %), было выполнено сложение измеренных спектров со сдвигом по энергии, равным толщине мишени.

Погрешность в определении парциальных сечений из спектра γ -лучей определялась главным образом экспериментальной ошибкой, которая состоит из ошибки в определении эффективности парного γ -спектрометра (~ 15 %), статистической ошибки (~ 8 %), ошибки в определении толщины мишени (~ 7 %) и ошибки в определении заряда, выделившегося на мишени (~ 7 %).

Метод анализа ПС (p, γ)-реакции многократно был описан нами в предыдущих работах [1, 2], где приведены основные выражения для сечений, радиационной силовой функции, а также описан метод определения экспериментальной РСФ из данных о ПС. Поэтому здесь мы приводим лишь основные параметры модели, наиболее влияющие на конечный результат.

Нами был использован оптический потенциал Бечетти - Гринлесса [10] со следующими параметрами для протонов (в авторской нотации): ($V_{OR} = 54,0$; $W_{OS} = 11,8$; $W_V = 0$; $V_{S0} = 6,2$) МэВ, ($r_{S0} = 1,01$; $a_{S0} = 0,75$; $r_R = 1,17$; $a_R = 0,75$; $r_I = 1,32$; $a_I = 0,54$) фм, и для нейтронов: ($V_{OR} = 56,3$; $W_{OS} = 13,0$; $W_V = 0$; $V_{S0} = 6,2$) МэВ, ($r_{S0} = 1,01$; $a_{S0} = 0,75$; $r_R = 1,17$; $a_R = 0,75$; $r_I = 1,26$; $a_I = 0,58$) фм.

Плотность уровней вычислялась в рамках модели ферми-газа с обратным смещением. Расчеты выполнены с параметрами $a = 4,64$ МэВ⁻¹ и $\Delta = -1,20$ МэВ для ядра ⁵³Mn и $a = 4,74$ МэВ⁻¹ и $\Delta = -1,51$ МэВ для ядра ⁵⁵Mn при значении момента инерции равном половине твердотельного момента инерции [11]. Данные о ГДР взяты из работы [12], в которой сечения фотопоглощения измерены на мишенях из естественного марганца в интервале энергий γ -квантов от 10 до 24 МэВ. Двугорбый лоренциан для ядер ^{53,55}Mn имеет следующие характеристики: ширины резонансов $\Gamma_{R1} = 4,33 \pm 0,63$ МэВ и $\Gamma_{R2} = 4,09 \pm 1,07$ МэВ; положения резонансов $E_{R1} = 16,82 \pm 0,10$ МэВ и $E_{R2} = 20,09 \pm 0,12$ МэВ; сечения в максимуме $\sigma_{max1} = 51,4 \pm 4,1$ мбн и $\sigma_{max2} = 45,2 \pm 2,6$ мбн.

На рис. 1 точками представлены экспериментальные сечения, соответствующие прямым переходам из высоковозбужденных состояний составного ядра в основное состояние $0(7/2^-)$ и первое возбужденное состояние 378 кэВ ($5/2^-$) ядра ⁵³Mn, а также кривые, представляющие расчеты ПС по различным теоретическим моделям.

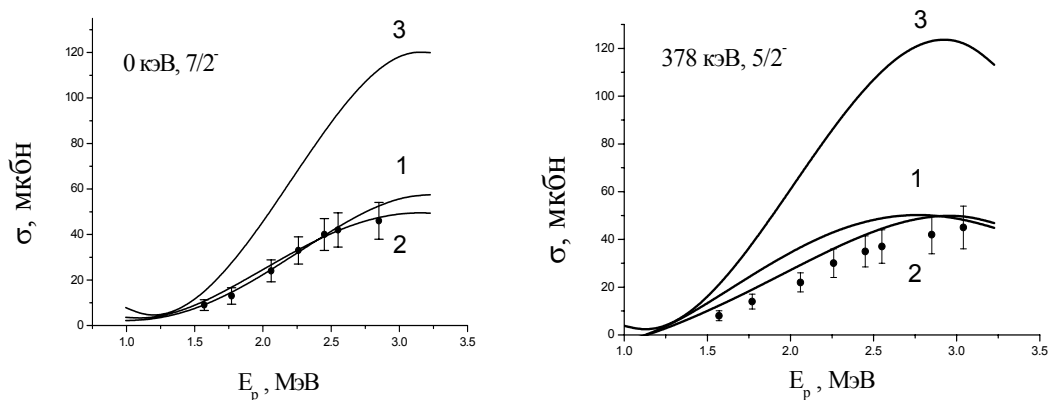


Рис. 1. Парциальные сечения реакции ⁵²Cr(p, γ)⁵³Mn.

Кривая 1 на рис. 1 соответствует теоретическим расчетам ПС с использованием модельной РСФ из СПС [7], кривая 2 – с использованием в качестве модельной РСФ приближение модифицированного лоренциана [8, 9], а кривая 3 – результат экстраполяции стандартного лоренциана из области максимума ГДР в исследуемую область энергий. Из рис. 1 видно, что парциальные сечения, рассчитанные с использованием выражения для радиационной силовой функции из моделей Сироткина и Плюйко, достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. В то же время использование в качестве модельной РСФ стандартного лоренциана приводит к многократному завышению расчетных значений ПС по сравнению с экспериментом.

На рис. 2 приведены экспериментальные сечения, соответствующие прямым переходам из высоковозбужденных состояний составного ядра в основное состояние $0(5/2^-)$ и четыре нижних возбужденных состояния ⁵⁵Mn: 126 кэВ ($7/2^-$), 1528 кэВ ($3/2^-$), 2253 кэВ ($3/2^-$), 2565 кэВ ($3/2^-$). Сплошными кривыми показаны результаты вычисления сечений в рамках статистической модели. Резкое уменьшение сечения при энергии протонов больше 2,2 МэВ обусловлено открытием конкурентного канала (p, n)-реакции, для которой пороговое значение $Q_{pn} = -2,158$ МэВ.

Можно констатировать, что наилучшего согласия с экспериментальными данными удастся достичь, если силовая функция S_γ вычислена в рамках статистического подхода Сироткина (кривая 1). Кривая 2 на рис. 2 соответствует выбору Е1-РСФ в виде экстраполяции ГДР в область энергий γ -квантов ниже 12 МэВ. Как видно из рис. 2, при таком варианте расчета наблюдается значительное завышение по сравнению с экспериментальными сечениями, что было нами показано на примере других ядер рf-оболочки в ряде предшествующих работ [1, 4, 13].

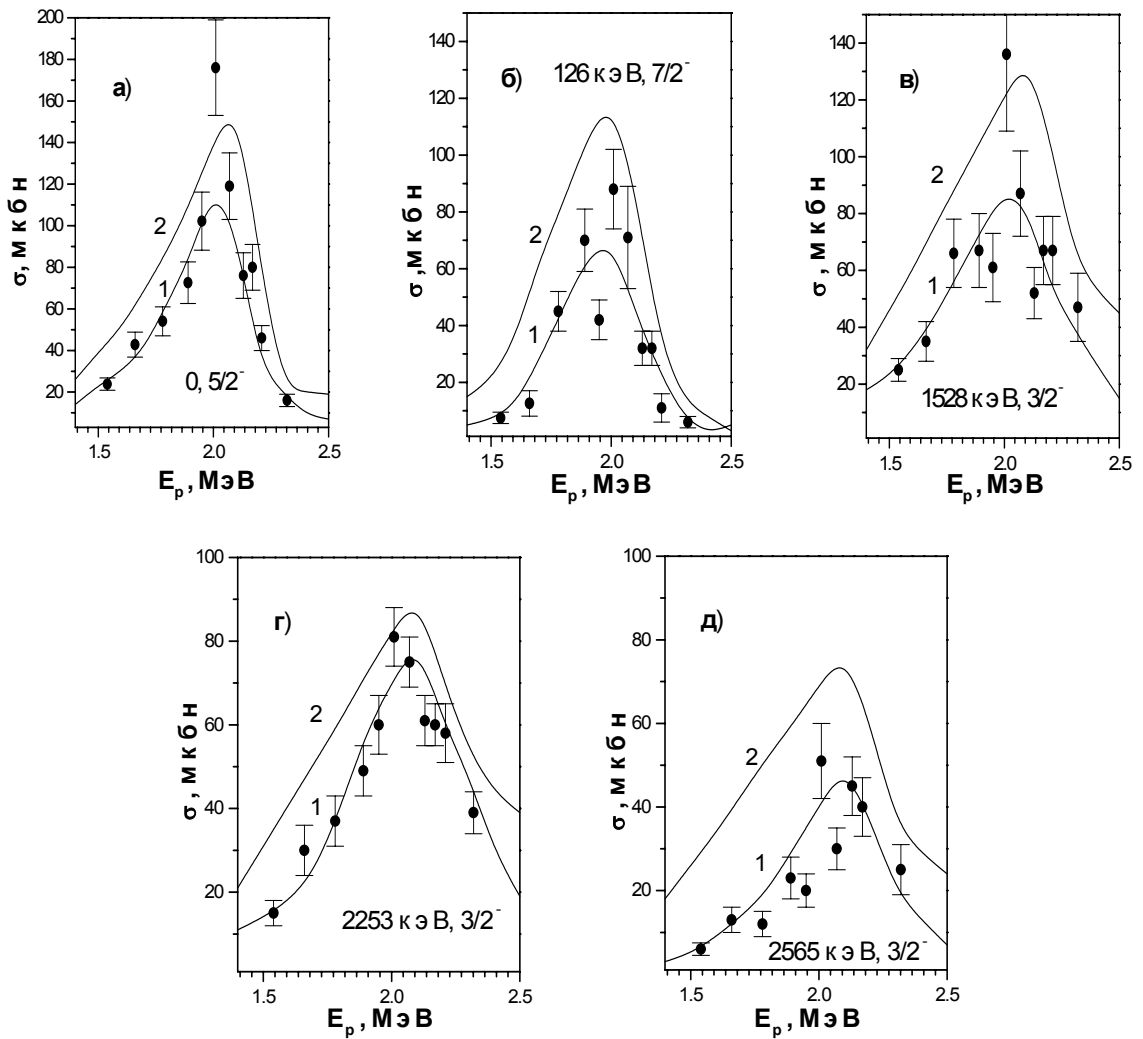


Рис. 2. Парциальные сечения реакции $^{54}\text{Cr}(p, \gamma)^{55}\text{Mn}$.

Необходимо отметить, что вклад М1-переходов, составляющий около 12 – 15 %, на рис. 1 и 2 не выделен и может быть оценен в рамках предложенного Сироткиным [14] выражения

$$S^{\text{E}1}_{\gamma} / S^{\text{M}1}_{\gamma} = 0,03A(E_{\gamma}^2 + (\pi T)^2) / B_n^2, \quad (1)$$

где B_n - энергия связи нейтрона; T – ядерная температура.

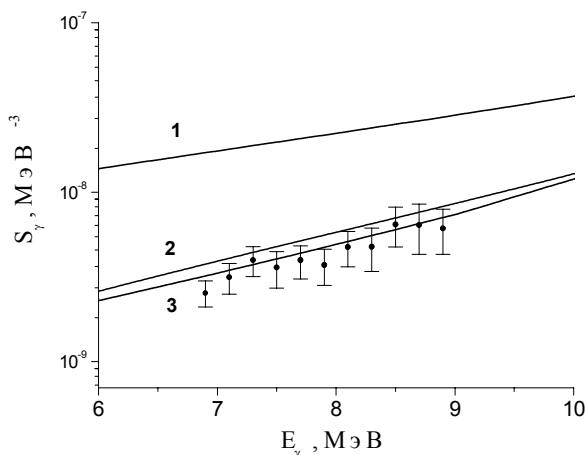


Рис. 3. Радиационная силовая функция для ядра ^{55}Mn .

Добившись описания ПС и зафиксировав таким образом набор параметров статистической модели, нами также была решена обратная задача, а именно вычислена РСФ для ядра ^{55}Mn в интервале энергий γ -квантов от 6,8 до 8,9 МэВ. Данный расчет был выполнен методом однопараметрической оптимизации относительно S_{γ} .

На рис. 3 приведена полученная радиационная силовая функция для ядра ^{55}Mn . Кривая 1 соответствует экстраполяции лоренциана, полученного в результате анализа экспериментальных данных из работы [12] по фотоядерному рассеянию на ядре ^{55}Mn . Кривая 2 – результат расчета в рамках СПС с учетом оболочечных поправок и температуры ядра [7], кривая 3 – расчет в рамках приближения модифицированного лоренциана, предложенного Плюйко [8, 9].

E1-РСФ, рассчитанная в рамках данных статистических подходов, совпадая с лоренцианом в области максимума ГДР, сильно различается с ним в области более низких энергий γ -квантов. Как видно из рис. 3, полученную в результате анализа ПС радиационную силовую функцию нельзя адекватно описать распределением Лоренца (кривая 1). Наилучшего согласия с экспериментальными данными удастся достичь, если воспользоваться современными теоретическими моделями, такими как статистический подход Сироткина (кривая 2), учитывающий температуру ядра и влияние оболочечной структуры на спектр одночастичных состояний и числа заполнения 2p-2h уровней, а также приближение модифицированного лоренциана, предложенного Плюйко (кривая 3).

Полученная энергетическая зависимость РСФ приводит к нарушению известной гипотезы Бринка - Акселя [15, 16]. В её новой, переформулированной версии, ГДР может быть построен на любом возбужденном состоянии ядра только лишь с учетом его структуры и ядерной температуры, что было отмечено в работах [4, 13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Немашкало Б.А., Сироткин В.К., Шебеко К.В.* Анализ парциальных и полных сечений реакции $^{48,50}\text{Ti}(p, \gamma)^{49,51}\text{V}$ // Ядер. физика. - 1992. - Т. 55, вып. 1. - С. 123 - 129.
2. *Купцов Г.Н., Немашкало Б.А., Шебеко К.В.* Заселение состояний ^{64}Zn первичными γ -переходами в реакции (p, γ) // Ядер. физика. - 1990. - Т. 52, вып. 4 (10). - С. 922 - 926.
3. *Федорец И.Д.* Парциальные радиационные силовые функции для дипольных переходов в ядрах $^{49,51}\text{V}$ // Ядер. физика. - 2002. - Т. 65, № 10. - С. 1865 - 1876.
4. *Немашкало Б.А., Утенков С.Н., Раткевич С.С., Федорец И.Д.* Фотонные силовые функции для ядра ^{64}Zn в районе 10 МэВ // Изв. РАН. Сер. физ. - 2003. - Т. 67, № 11. - С. 1556 - 1560.
5. *Бондаренко В.И., Немашкало Б.А., Сторижко В.Е. и др.* Парциальные сечения реакции $^{52}\text{Cr}(p, \gamma_i)^{53}\text{Mn}$ и радиационные силовые функции в ядре ^{53}Mn // Ядер. физика. - 1988. - Т. 48, вып. 3 (9). - С. 623 - 628.
6. *Немашкало Б.А., Мельник Ю.П., Сторижко В.Е., Шебеко К.В.* Радиационный захват протонов ядрами ^{54}Cr и ^{64}Ni вблизи порога (p, n) -реакции // Ядер. физика. - 1983. - Т. 37, вып. 1. - С. 3 - 13.
7. *Сироткин В.К.* Радиационные силовые функции нейтронных резонансов // Ядер. физика. - 1986. - Т. 43, вып. 3. - С. 570 - 578.
8. *Plujko V.A.* An Investigation of Interplay Between Dissipation Mechanisms in Heated Fermi Systems by Means of Radiative Strength Functions // Nucl. Phys. - 1999. - Vol. A649. - P. 209 - 213.
9. *Plujko V.A.* A New Closed-Form Thermodynamic Approach for Radiative Strength Functions // Acta Phys. Polonica. - 2000. - Vol. B31, No. 2. - P. 435 - 441.
10. *Becchetti F.D., Jr., Greenlees G.W.* Nucleon-Nucleus Optical-Model Parameters, $A > 40$, $E < 50$ MeV // Phys. Rev. - 1969. - Vol. 182, No. 4. - P. 1190 - 1209.
11. *Dilg W., Schantl W., Vonach H., Uhl M.* Level Density Parameters for the Back-Shifted Fermi Gas Model in the Mass Range $40 < A < 250$ // Nucl. Phys. - 1973. - Vol. A217. - P. 269 - 298.
12. *Alvarez R.A., Berman B.L., Faul D.D. et al.* Photoneutron Cross Sections for ^{55}Mn and ^{59}Co // Phys. Rev. C. - 1979. - Vol. 20, No. 1. - P. 128 - 138.
13. *Немашкало Б.А., Шебеко К.В., Раткевич С.С., Федорец И.Д.* Парциальные фотонные силовые функции ядра ^{66}Zn // Изв. РАН. Сер. физ. - 2003. - Т. 67, № 11. - С. 1561 - 1564.
14. *Залюбовский И.И., Немашкало Б.А., Раткевич С.С. и др.* Парциальные сечения реакции $^{45}\text{Sc}(p, \gamma_i)$ и радиационная силовая функция в ядре ^{46}Ti вблизи энергии связи нуклона // Ядер. физика. - 1994. - Т. 57, № 5. - С. 777 - 783.
15. *Brink D.M.* // Argonne Nat. Lab. Rep. ANL-6797. Argonne, 1963. - P. 194.
16. *Axel P.* Electric Dipole Ground-State Transition Width Strength Function and 7-MeV Photon Interactions // Phys. Rev. - 1962. - Vol. 126, No. 2. - P. 671 - 683.

RADIATIVE CAPTURE OF PROTONS BY NUCLEI OF THE CHROMIUM ISOTOPES

S. N. Utenkov, K. V. Shebeko

The analysis of partial cross-sections (PCS) of the radiative capture of protons by nuclei ^{52}Cr and ^{54}Cr is carried out for transitions in basics and low-lying excited states of nuclei ^{53}Mn and ^{55}Mn . The measurements were fulfilled in NSC KIPT using a Van de Graaf accelerator in an interval of energy of the accelerated protons from 1,5 up to 3,2 MeV on ^{52}Cr and from 1,5 up to 2,5 MeV on ^{54}Cr . The calculation PCS of reactions $^{52}\text{Cr}(p, \gamma)^{53}\text{Mn}$ and $^{54}\text{Cr}(p, \gamma)^{55}\text{Mn}$ is carried out within the framework of the statistical theory with attracting of various theoretical estimations for calculation of dipole radiative strength functions (RSF). It is exhibited, that without attracted modern theoretical models, which are taking into account temperature and structure of the low-lying excited states of a daughter nucleus, it fails to describe RSF in all an explored energy rang of γ -quantums.

РАДІАЦІЙНЕ ЗАХОПЛЕННЯ ПРОТОНІВ ЯДРАМИ ІЗОТОПІВ ХРОМУ

С. Н. Утєнков, К. В. Шебеко

Аналіз парціальних перерізів (ПС) реакцій радіаційного захоплення протонів ядрами ^{52}Cr та ^{54}Cr виконано для переходів в основні й низьколежачі збуджені стани ядер ^{53}Mn і ^{55}Mn . Вимірювання проведено на електро-статичному прискорювачі ЭСУ-5 ННЦ ХФТІ в інтервалі енергій прискорених протонів від 1,5 до 3,2 МеВ на ядрах ^{52}Cr і від 1,5 до 2,5 МеВ на ядрах ^{54}Cr . Розрахунки ПС реакцій $^{52}\text{Cr}(p, \gamma)^{53}\text{Mn}$ та $^{54}\text{Cr}(p, \gamma)^{55}\text{Mn}$ виконано в рамках статистичної теорії із залученням різних теоретичних підходів для обчислення дипольних радіаційних силових функцій (РСФ). Показано, що без залучення сучасних теоретичних моделей, що враховують як температуру ядра, так і структуру низьколежачих збуджених станів дочірніх ядер, не вдається адекватно описати РСФ у всьому досліджуваному інтервалі енергій γ -квантів.