

ВИВЧЕННЯ ВТОРИННИХ ГАММА-ПЕРЕХОДІВ З РЕАКЦІЇ $^{155}\text{Gd}(n,\gamma)^{156}\text{Gd}$ ПРИ РІЗНИХ ЕНЕРГІЯХ ФІЛЬТРОВАНИХ ПУЧКІВ НЕЙТРОНІВ

А. В. Мурзін, П.М. Русінко, Є.В Корбецький., О.О. Грицай

Проведено теоретичну та експериментальну оцінку можливості отримання інформації про спіни збуджених станів ядер при вивченні вторинних γ -переходів з реакції радіаційного захоплення квазімоноенергетичних нейтронів різних енергій. Попередні експериментальні результати підтверджують залежність співвідношення інтенсивностей вторинних γ -переходів, отриманих при різних енергіях падаючих нейтронів, від спінів початкових рівнів цих переходів та можливість описання цього ефекту γ -каскадною моделлю.

Важливою інформацією про властивості атомного ядра є схема його збуджених станів. Одним з методів отримання інформації про характеристики збуджених станів ядра, а саме про енергії та спіни, є вивчення первинних γ -переходів при усередненому по резонансах захваті нейтронів (ARC-Average Resonance Capture). Залежно від природи первинних переходів ($E1$, $M1$, $E2$), а також від можливості заселення кінцевих станів з резонансів з різними спінами інтенсивності первинних γ -переходів відрізняються від двох до десяти разів, сильно залежачи від спіну кінцевого стану. Наприклад, згідно з [1], при енергії нейтронів $E_n = 2$ кеВ (s -хвиля) віднормовані приведені інтенсивності первинних γ -переходів ядра ^{156}Gd на рівні зі спінами 1^+ , 2^+ десь вдвічі більші, ніж на рівні зі спінами 0^+ , 3^+ . Однак розділити між собою ці пари рівнів, виходячи тільки з первинних γ -переходів, практично неможливо.

Можливість визначення спінів ядер з дослідження вторинних γ -переходів при захваті нейтронів на окремі резонанси було докладно викладено в роботах [2 - 6], проте цей метод має ряд обмежень. Вивчення γ -переходів при захваті нейтронів на окремі резонанси потребує або використання моноенергетичних джерел нейтронів із змінною енергією, або методу збігу при вимірах методом часу прольоту. В обох випадках виникає проблема, яка пов'язана з малою інтенсивністю джерела та поганими фоновими умовами.

У роботі [1] відмічається, що існує можливість отримання інформації про спіни збуджених станів ядер з аналізу вторинних γ -переходів при ARC реакції на нейтронах різних енергій. При цьому використовується той факт, що інтенсивність γ -квантів, що випромінюються при розпаді будь-якого рівня, пропорційна заселеності цього рівня. При зростанні енергії нейтронів, що захоплюються в ARC реакції, збільшується вклад p , а потім і d нейтронних хвиль, що приводить до збільшення кількості захватів на резонанси з більш високими спінами. Це в свою чергу веде до збільшення заселеності збуджених рівнів з вищими спінами. Тому, вивчаючи відношення інтенсивностей одних і тих же вторинних γ -переходів при ARC реакції з нейтронами різних енергій, можна отримати інформацію про спіни збуджених станів ядер.

Метою даної роботи є експериментальна перевірка можливості визначення спінів низькорозташованих рівнів на ядрах ^{156}Gd та спроба теоретичного опису заселеності рівнів, що виникають при γ -розпаді ядер, збуджених в ARC реакції.

Заселеність рівнів ^{156}Gd розраховувалась по γ -каскадній моделі за допомогою програми, розробленої А.М.Суховим (ОІЯД, Дубна), що подібна програмі, описаній у роботі [2]. Згідно з цією моделлю, до певної енергії збудження система рівнів та їх схема розпаду вважається відомою та береться з літератури. Для вищих енергій збуджені стани моделюються за допомогою функції густини рівнів. Розпад кожного високозбудженого рівня моделюється методом Монте-Карло з урахуванням правил відбору, ймовірності переходу

відповідної мультипольності та густини рівнів, нижчих по енергії від рівня, що розглядається. Співвідношення середніх радіаційних ширин переходів різної мультипольності та вид залежності ймовірності переходу від енергії E_γ беруться з експериментальних даних або з врахуванням систематик рівнів та модельних уявлень.

При розрахунках рівні, нижче 1638 кеВ, вважали відомими [6] і їх енергії збудження, спіни, парності та радіаційні ширини переходів було явно введено в програму. Моделювання невідомої частини системи рівнів проводилось за допомогою функції густини збуджених станів $\rho(E, J^\pi)$, взятої згідно з моделлю Ділґа (моделі зі зворотним зміщенням) [7]:

$$\rho(E, J, \pi) = \left[\frac{2J+1}{24^4 \sqrt{4aU^5} \sigma^3} \right] \exp\left(2\sqrt{aU} - \frac{(J+1/2)^2}{2\sigma^2} \right),$$

де $U = E$ – ефективна енергія збудження рівня; σ – спіновий фактор відрізки, що брався незалежним від E і прирівнювався до 4; $a = \pi^2 g/6$; g – густина одночасткових станів на поверхні Фермі.

Враховувались тільки $E1$, $M1$ та $E2$ переходи, силові функції $E1$ бралися згідно з моделлю гігантського дипольного резонансу (ймовірність $E1$ переходу $\sim E_\gamma^5$), ймовірності $M1$ та $E2$ переходів, пропорційних E_γ^3 , відношення $\Gamma_{E1}/\Gamma_{M1} = 9.8 \pm 0.8$ і $\Gamma_{E2}/\Gamma_{M1} = 35 \pm 7$ було взято з роботи [1]. Парціальні перерізи захвату нейтронів з енергіями 0.025 еВ, та 2, 58, 144 кеВ залежно від переданого кутового моменту I , спіну та парності J^π резонансу, на який захоплюється нейтрон, $\sigma_{I\pi}(E_n)$ розраховувались на основі моделі Хаузера – Фешбаха окремою програмою, дані для якої взято з [8].

Результати розрахунків показали, що найбільшу чутливість до спінової залежності мають відношення заселеностей низькорозташованих рівнів, заселених каскадами в результаті ARC нейтронів з енергією 2 кеВ $P(E_n = 2 \text{ keV})$ до заселеностей P_{th} при тепловій енергії нейтронів $R = \frac{P(E_n = 2 \text{ keV})}{P_n}$ та відношення заселеностей $P(E_n = 144 \text{ keV})$ при 144 кеВ до

заселеностей при енергіях нейтронів 2 кеВ $R = \frac{P(E_n = 144 \text{ keV})}{P(E_n = 2 \text{ keV})}$, які показано на рис. 1.

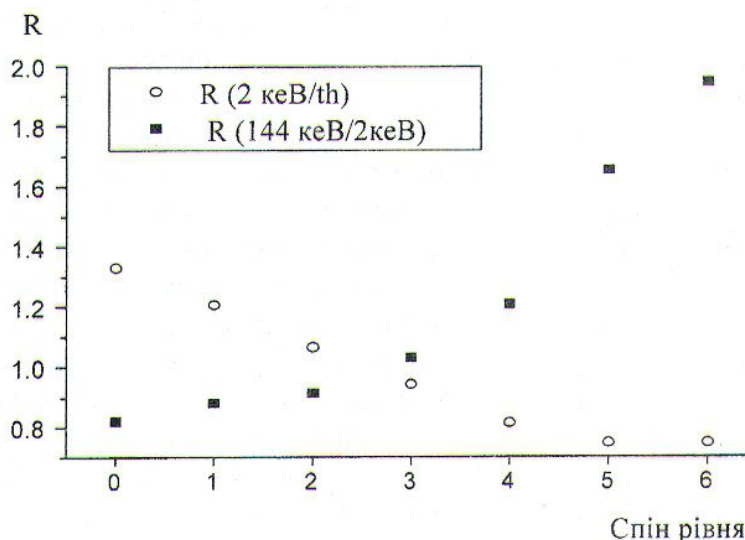


Рис. 1. Розраховані значення відношень заселеностей R , усереднені по рівнях з однаковим спіном.

Аналіз даних, одержаних при розрахунках, показує, що спираючись на сукупність трьох експериментів - на теплових нейтронах та при $E_n = 2$ і 144 кеВ, можна достатньо надійно визначити спіни рівнів 0, 1 та 4 - 6 за умови, що відносні похибки значень R будуть менші 10 %. Наприклад, можна чітко розділити спіни 0 і 3, які не розділяються при вивченні первинних γ -переходів. Деякі проблеми можуть виникнути при розділенні спінів 2 і 3, проте ці спіни легко визначаються за допомогою первинних γ -переходів.

Виміри проводилися на дев'ятому експериментальному горизонтальному каналі (ЕГК) дослідницького реактора ВВР-М на спектрометрі з Ge(Li)-детектором об'ємом 30 см^3 . Для врахування фону, обумовленого нейтронами, розсіяними зразком Gd, використовувались вуглецеві зразки-розсіювачі, що по $n_a \sigma_s$ дорівнювали зразку при відповідних енергіях нейтронів.

При проведенні експерименту було використано:

зразок Gd_2O_3 (збагачення по $^{155}\text{Gd} - 91.9 \pm 0.3 \%$) у контейнері зі сплаву САВ-1Т: $\varnothing 28.25$ мм, довжина 34.1 мм, торцеві стінки 0.1 мм; маса Gd_2O_3 50.65 г;

зразок ^{10}B для контролю потоку нейтронів у контейнері зі сплаву САВ-1Т: $\varnothing 28.25$ мм, товщина 0.2 г/см^2 ;

вуглецеві зразки-розсіювачі, виготовлені з реакторного графіту: $\varnothing 28.25$ мм. Сумарна маса зразка-розсіювача для енергій нейтронів 2 та 144 кеВ - 16.78 г, для теплових нейтронів - 45.8 г. Зразки розміщено в контейнерах, аналогічних до контейнера зразка.

Квазімоноенергетичні пучки нейтронів отримувались за допомогою інтерференційних нейтронних фільтрів, розміщених у дисках шибєру та виносному коліматорі, і мали в своєму складі:

для 2 ± 0.6 кеВ - Sc (350 мм) + ^{60}Ni (100 мм) + ^{10}B (0.2 г/см^2) + S (36.77 г/см^2);

для 144 ± 24 кеВ - ^{10}B (0.2 г/см^2) + Si (961 см) + Ti (3 см);

для 0.025 еВ - S ($36,5 \text{ г/см}^2$) + Si (961 см) + Ti (3 см).

Фільтри розміщувались у комбінованій колімації (почергово свинець та парафін).

Щоб сфокусувати нейтрони з вхідного отвору ЕГК на зразок, використовувалась звужуюча колімація з ухилом близько 0.02 (тобто на кожні 100 мм довжини фільтра діаметр зменшувався приблизно на 2 мм).

В експерименті було набрано спектри γ -переходів з реакції $^{155}\text{Gd}(n,\gamma)^{156}\text{Gd}$ та фонові спектри при середніх енергіях фільтрованих пучків нейтронів 0.025 еВ, 2 та 144 кеВ. Спектр γ -переходів ядра ^{156}Gd для ідентифікації брався з роботи [1]. При необхідності проводилась корекція інтенсивностей γ -переходів з рівнів ^{156}Gd на фонові інтенсивності. Для спектрів, набраних при різних енергіях нейтронів, проведено нормування на однакову кількість захватів. В експерименті чітко визначено 28 γ -переходів з рівнів ядра ^{156}Gd . Із них один перехід відноситься до рівня із спіном 0, три - із спіном 1, п'ять - із спіном 2, чотири - із спіном 3, три - із спіном 4, один - із спіном 5 та один - із спіном 6. Крім цього в спектрі спостерігаються нерозділені дублети переходів з рівнів з різними спінами.

Аналізувались експериментально отримані значення відношень інтенсивностей γ -переходів з реакції $^{155}\text{Gd}(n,\gamma)^{156}\text{Gd}$ при відповідних середніх енергіях фільтрованих нейтронів $R^{144}_{/2} = I_\gamma(E_n = 144 \text{ кеВ})/I_\gamma(E_n = 2 \text{ кеВ})$ та $R^2_{/th} = I_\gamma(E_n = 2 \text{ кеВ})/I_\gamma(E_n = 0.025 \text{ еВ})$. Залежні від спіну рівня для всіх визначених рівнів $R^{144}_{/2}$ та $R^2_{/th}$ показані на рис. 2 та 3. На рисунках відмічено дублети та вказано спіни рівнів, з яких відбуваються нерозділені переходи, знаком ? відмічено перехід з рівня, спін якого остаточно не з'ясовано.

Як видно з рис. 2 та 3, загальний хід експериментально отриманих співвідношень інтенсивностей визначених рівнів якісно співпадає з теоретичними розрахунками заселеностей (див. рис. 1).

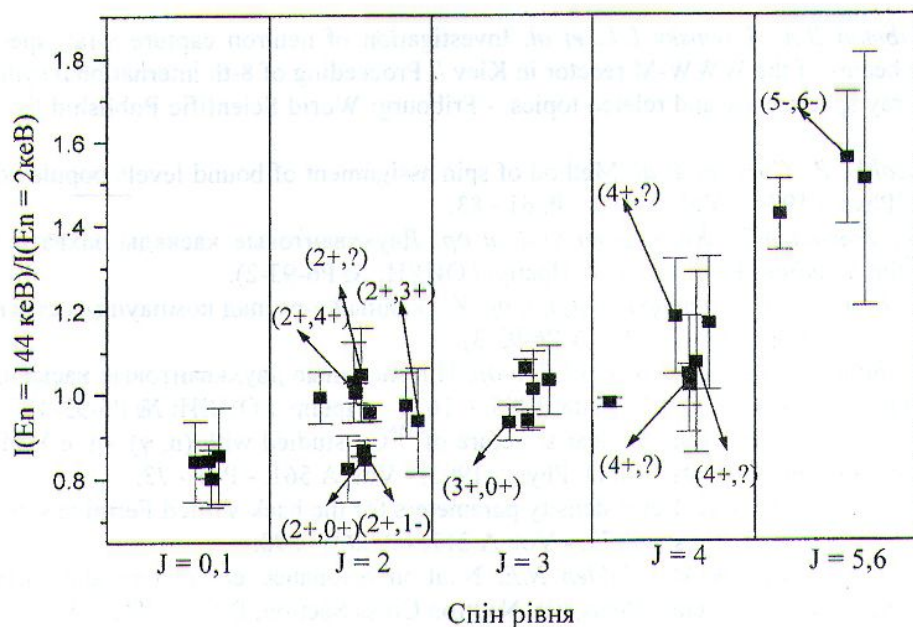


Рис. 2. Відношення $R_{144/2}$ інтенсивностей γ -переходів з реакції $^{155}\text{Gd}(n,\gamma)^{156}\text{Gd}$ залежно від спіну рівня.

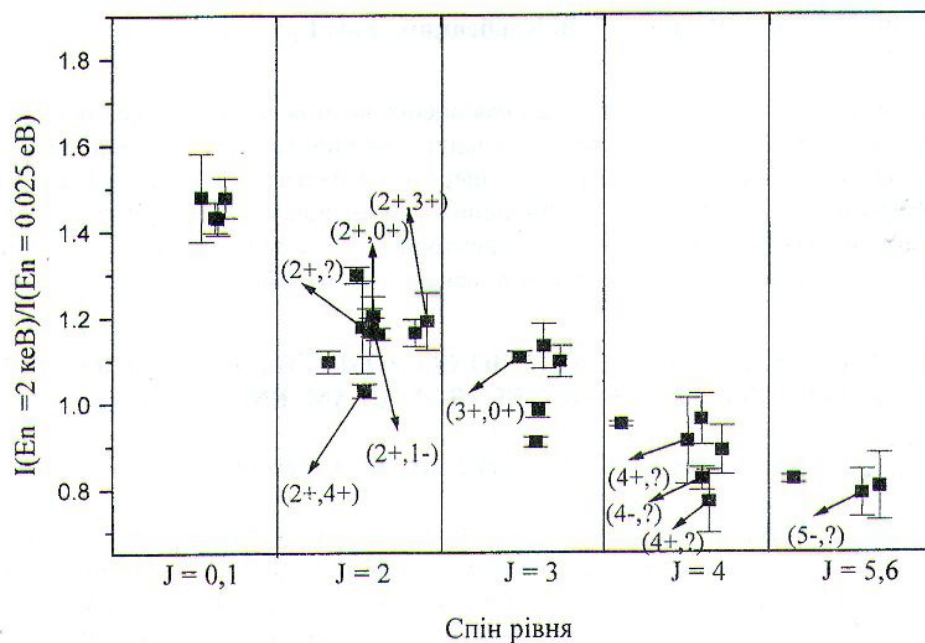


Рис. 3. Відношення $R_{2/0}$ інтенсивностей γ -переходів з реакції $^{155}\text{Gd}(n,\gamma)^{156}\text{Gd}$ залежно від спіну рівня.

У цілому отримано експериментальне підтвердження залежності відношення інтенсивностей γ -переходів при ARC реакції з нейтронами різних енергій від спіну початкового рівня. Однак для впевненого визначення спінів невідомих рівнів цим методом необхідно проводити виміри γ -спектрів на антикомptonівському спектрометрі з кращою роздільною здатністю. Моделювання спінової залежності цих відношень за допомогою каскадної моделі дає непогане якісне описання цього ефекту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. *Murzin A.V., Libman B.A., Litvinsky L.L. et al.* Investigation of neutron capture γ -ray spectra at the filtered neutron beams of the WWW-M reactor in Kiev // Proceeding of 8-th international symposium in capture gamma ray spectrscopy and related topics. - Fribourg: World Scientific Publishid Co. Pte. Ltd., 1993. - P. 924.
2. *Coceva C., Giacobbe P., Corvi F. et al.* Method of spin assignment of bound levels populated by (n, γ) reations // Nucl. Phys. - 1974. - Vol. A 218. - P. 61 - 83.
3. *Васильева Э.В., Войнов А.В., Кестарова О.Д. и др.* Двухквантовые каскады захвата тепловых нейтронов в ^{149}Sm // Дубна, 1993. - 18 с. - (Препр. / ОИЯИ; № Р6-93-2).
4. *Васильева Э.В., Войнов А.В., Кестарова О.Д. и др.* Каскадный γ -распад компаунд-состояния ^{156}Gd . // Дубна, 1993. - 20 с. - (Препр. / ОИЯИ; № Р6-93-3).
5. *Васильева Э.В., Войнов А.В., Кестарова О.Д. и др.* Интенсивные двухквантовые каскады и схема распада компаунд-состояния ^{164}Dy // Дубна, 1993. - 16 с. - (Препр. / ОИЯИ; № Р6-93-4).
6. *Klora J., Börner, T. von Egidy ut al.* Nuclear structure of ^{156}Gd studied with (n, γ), (n, e^-), (d, p), (d, t) reactions and lifetime measurements // Nucl. Phys. - 1993. - Vol. A 561. - P. 1 - 73.
7. *Dilg W., W.Schantl and Vonach H.* Level density parameters for the back-shifted Fermi gas model in the mass range $40 < A < 250$ // Nucl. Phys. - 1973. - Vol. A 217. - P. 269 - 298.
8. *Mughabghab S.F., Divadeenam M., Holden N.E.* Neutron resonance parameters and thermal cross sections. P. b. // New York: Academic Press, ser. Neutron Cross Section, INC. - 1981. - Vol. 1.

ИЗУЧЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ГАММА-ПЕРЕХОДОВ ИЗ РЕАКЦИИ $^{155}\text{Gd} (n,\gamma) ^{155}\text{Gd}$ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЭНЕРГИЯХ ФИЛЬТРОВАННЫХ ПУЧКОВ НЕЙТРОНОВ

А.В. Мурзин,

П.М. Русинко, Е.В. Корбецкий, Е.А. Грицай

Проведена теоретическая и экспериментальная оценка возможности получения информации о спинах возбужденных состояний ядер при изучении вторичных γ -переходов при захвате квазимоноэнергетических нейтронов различных энергий. Предварительные экспериментальные результаты подтверждают зависимость соотношения интенсивностей вторичных γ -переходов, полученных при различных энергиях падающих нейтронов, от спинов начальных уровней этих переходов и возможность описания этого эффекта γ -каскадной моделью.

THE STUDY SECONDARY GAMMA-TRANSITIONS FROM $^{155}\text{Gd} (n,\gamma) ^{155}\text{Gd}$ REACTION FOR DIFFERENT FILTERED NEUTRON BEAM ENERGIES

A.V. Murzin,

P.M. Rusinko, E.V. Korbetsky, O.O. Grizay

The theoretical and experimental estimations of the possibility to obtain the information about the excited level spins from secondary capture γ -ray studies for different quasimonoenergetic neutron beam energies were fulfilled. The preliminary experimental results confirm the dependence of the secondary γ -ray intensities ratios, taken for the different neutron energies, from the spin of decaying level, and the possibility to describe this effect using the γ -cascade model.