

О. О. Грицай, А. К. Гримало*, В. А. Пшеничний

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: grimalo.a@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСУ ^{52}Cr З НАБОРУ НЕЙТРОННИХ ПРОХОДЖЕНЬ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЗСУВУ СЕРЕДНЬОЇ ЕНЕРГІЇ ФІЛЬТРОВАНИХ НЕЙТРОНІВ

Визначено параметри E_R , Γ_n та R' резонансу ^{52}Cr при енергії 50 кеВ з набору експериментальних усереднених проходжень, отриманих методом зсуву середньої енергії фільтрованих нейтронів. Для розрахунку параметрів E_R та Γ_n було використано програмний код MCNP 4C та власну програму ROZPREG. У подальшому цю програму було взято за основу для нової програми ROZPREGA, за допомогою якої визначено три параметри E_0 , Γ_n та R' резонансу ^{52}Cr . Отриманий набір параметрів резонансу порівняно з результатами інших авторів та даними з бібліотек оцінених ядерних даних (БОЯД).

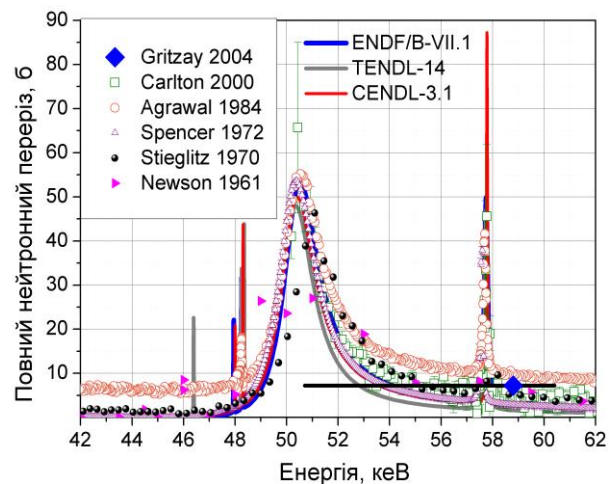
Ключові слова: проходження нейтронів, параметри резонансу, ^{52}Cr , фільтровані пучки нейтронів, реактор.

1. Вступ

Дана робота є продовженням циклу робіт із розробки методики визначення параметрів резонансу з набору усереднених повних нейтронних перерізів $\langle\sigma_i\rangle$, отриманих на тому самому фільтрі, але при незначній зміні середньої енергії нейтронів фільтрованого пучка. Для зміни середньої енергії фільтрованих нейтронів використовувався метод зсуву енергії нейтронів, який базується на залежності енергії розсіяних нейтронів від кута розсіяння. Детальний опис проведених експериментів, а також опис двох незалежних методів обробки експериментальних даних, розроблених для визначення повних нейтронних перерізів із вимірювань проходжень нейтронів, розсіяних на ядрах водню (які входять до складу двокомпонентного розсіювача CH_2) через досліджуваний зразок ($T_{52\text{Cr}}^H$), представлено в наших роботах [1, 2].

Набір проходжень $T_{52\text{Cr}}^H$, отриманий у роботі [2], було використано для визначення параметрів E_0 , Γ_n та R' резонансу ^{52}Cr при енергії 50 кеВ. Вибір в якості досліджуваного зразка ізотопу хрому ^{52}Cr обумовлювався наступним: 1) у всіх БОЯД у повному нейтронному перерізі ^{52}Cr в області енергії 50 кеВ присутній широкий s-резонанс, який є зручним для відпрацювання нової методики; 2) значення повних нейтронних перерізів у БОЯД для ^{52}Cr в області енергії 40 - 60, а також у роботах [3, 4] відрізняються за величиною дуже сильно, відмінності сягають близько 50 %, тому визначення перерізів у цій області енергій є актуальним як для фундаментальної ядерної фізики, так і для фізики ядерних реакторів, оскільки ^{52}Cr використовується в якості конструкційного матеріалу в ядерних реакторах.

На рисунку наведено повні нейтронні перерізи ^{52}Cr із трьох сучасних найбільш відмінних БОЯД (діапазон енергії 42 - 62 кеВ) та експериментальні дані із світової бази даних EXFOR. Нейтронні перерізи з БОЯД JEFF-3.2 та JENDL-4 не представлено на рисунку, оскільки останні збігаються з перерізом із бібліотеки ENDF/B-VII.1.



Повні нейтронні перерізи ^{52}Cr із сучасних БОЯД для області енергії 42 - 62 кеВ та експериментальні результати зі світової бази експериментальних даних EXFOR.

2. Визначення параметрів E_0 , Γ_n та R' резонансу ^{52}Cr при енергії 50 кеВ

Параметри E_0 , Γ_n та R' резонансу ^{52}Cr було визначено з набору проходжень представлених у роботі [2].

Підбір параметрів резонансу ^{52}Cr при енергії 50 кеВ проводився з використанням методу найменших квадратів (МНК). Цей метод вимагає, щоб сума квадратів відхилень експерименталь-

© О. О. Грицай, А. К. Гримало, В. А. Пшеничний, 2018

них величин та величин, отриманих із використанням теоретичної залежності, з урахуванням ваги окремих точок була мінімальною [5, 6].

$$\sum_i^N p_i \cdot (T_{розр}(E_i) - T_{експ})^2 = \min, \quad (1)$$

де $p_i = \frac{1}{\Delta T_{експ}^2}$ – вага точки, $\Delta T_{експ}$ – абсолютна похибка пропускання.

Використання МНК можливе в тому випадку, коли два параметри, що визначаються, входять у теоретичну залежність лінійно. Припускаючи, що поправки малі в порівнянні з величинами

$$\sum_i^N \frac{1}{\Delta T_{експ}^2} \left[T_{розр}(E_i, E_0, \Gamma_n) + \frac{\partial T_i}{\partial E_0} dE_0 + \frac{\partial T_i}{\partial \Gamma_n} d\Gamma_n - T_{експ} \right]^2 = \min. \quad (3)$$

Величини $T_{розр}(E_i, E_0, \Gamma_n)$ та $T_{експ}$ – розрахункове та експериментальне значення пропускання для енергії E_i ; N – кількість експериментальних значень пропускань $T_{експ}$, $i = 1 \dots N$. У подальшому для скорочення запису формул будемо позначати $T_{розр}(E_i, E_0, \Gamma_n)$ як T_i (тобто $T_i \equiv T_{розр}(E_i, E_0, \Gamma_n)$).

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N p_i \cdot \left(\frac{\partial T_i}{\partial E_0} \right)^2 dE_0 + \sum_{i=1}^N p_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial E_0} \cdot \frac{\partial T_i}{\partial \Gamma_n} d\Gamma_n = \sum_{i=1}^N p_i \cdot (T_{експ} - T_{розр}) \cdot \frac{\partial T_i}{\partial E_0} \\ \sum_{i=1}^N p_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial E_0} \cdot \frac{\partial T_i}{\partial \Gamma_n} dE_0 + \sum_{i=1}^N p_i \cdot \left(\frac{\partial T_i}{\partial \Gamma_n} \right)^2 d\Gamma_n = \sum_{i=1}^N p_i \cdot (T_{експ} - T_{розр}) \cdot \frac{\partial T_i}{\partial \Gamma_n} \end{cases} \quad (4)$$

Часткові похідні $\frac{\partial T_i}{\partial E_0}$ та $\frac{\partial T_i}{\partial \Gamma_n}$ можливо визначити двома способами: перший – використовуючи аналітичні вирази для цих похідних [6], другий – визначивши похідні, провівши розрахункове моделювання експерименту для конкретної геометрії. Нами було використано другий спосіб, причому моделювання виконувалось із застосуванням двох незалежних програм: а) за допомогою коду MCNP 4с [7], б) за допомогою власних програм В. А. Пшеничного ROZPREG (для визначення двох параметрів E_0 , та Γ_n) та ROZPREGA (для визначення трьох параметрів E_0 , Γ_n та R').

3. Використання програми MCNP 4с для визначення параметрів E_0 та Γ_n резонансу ⁵²Cr

За допомогою програмних засобів коду MCNP 4с відтворюється геометрія експерименту і проводиться розрахунок $T_i(E_0, \Gamma_n)$ з викорис-

параметрів, можна розкласти T в ряд Тейлора, тобто

$$\begin{aligned} T_{розр}[E_i, E_0 + dE_0, \Gamma_n + d(\Gamma_n)] &\cong \\ &\cong T_{розр}[E_i, E_0, \Gamma_n] + \frac{\partial T_i}{\partial E_0} dE_0 + \frac{\partial T_i}{\partial \Gamma_n} d\Gamma_n. \end{aligned} \quad (2)$$

Величини dE_0 , та $d\Gamma_n$ входять лінійно у вираз (2) і тому їх можна визначити за допомогою МНК.

Враховуючи вираз (2) та умову (1), можна переписати вираз як

Для виконання умови (3) необхідно, щоб часткові похідні функціоналу у виразі (3) по параметрах E_0 та Γ_n дорівнювали 0. Таким чином отримаємо систему рівнянь із двома невідомими dE_0 та $d\Gamma_n$:

танням бібліотеки з MCNP 4с, в якій указані початкові параметри резонансу E_0 та Γ_n . Потім у другому файлі відповідної первісної БОЯД параметри резонансу змінювались на величини δE_0 та $\delta \Gamma_n$ (δE_0 та $\delta \Gamma_n$ брались на рівні 1 - 2 % від початкових величин E_0 та Γ_n), за допомогою програмного пакета NJOY 99 [8] розраховувалась нова MCNP 4с бібліотека і кодом MCNP 4с прораховувались нові проходження $T_i(E_0 + \delta E_0, \Gamma_n)$ з параметрами резонансу $E_0 + \delta E_0, \Gamma_n$ та $T_i(E_0, \Gamma_n + \delta \Gamma_n)$ з параметрами $E_0, \Gamma_n + \delta \Gamma_n$.

Часткові похідні визначались за допомогою таких виразів:

$$\frac{\partial T_i}{\partial E_0} = \frac{T_i(E_0 + \delta E_0, \Gamma_n) - T_i(E_0, \Gamma_n)}{\delta E_0}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial \Gamma_n} = \frac{T_i(E_0, \Gamma_n + \delta \Gamma_n) - T_i(E_0, \Gamma_n)}{\delta \Gamma_n}. \quad (6)$$

Для визначення dE_0 та $d\Gamma_n$ з набору експериментально отриманих проходжень за МНК було створено програму PAR2 (на мові Turbo Basic, автор В. А. Пшеничний) та її аналог PAR2_P&G (на мові Fortran 90, автор О. О. Грицай). Програми працюють наступним чином.

Вхідними даними для програм (PAR2 та PAR2_P&G) є: $T_i(E_0, \Gamma_n)$, $\frac{\partial T_i}{\partial E_0}$, $\frac{\partial T_i}{\partial \Gamma_n}$ та експериментальні значення проходжень $T_{експ_i} \pm \Delta T_{експ_i}$.

Вихідними даними програм є:

$$E_0^{кінц} \pm \Delta E_0^{кінц}, dE_0, \Gamma_n^{кінц} \pm \Delta \Gamma_n^{кінц}, d\Gamma_n, \chi^2 \text{ та } k,$$

де $E_0^{кінц}$ – отримане значення енергії резонансу; $\Delta E_0^{кінц}$ – відповідне значення абсолютної похибки; dE_0 – визначена поправка до початкового (вхідного) значення енергії резонансу; $\Gamma_n^{кінц}$ – отримане значення нейтронної ширини; $\Delta \Gamma_n^{кінц}$ – відповідне значення абсолютної похибки; $d\Gamma_n$ – визначена поправка до початкового значення нейтронної ширини; χ^2 – отримане значення величини розподілу; k – кількість ступенів вільності: $k = n - r - 1$, n – кількість експериментальних точок; r – кількість параметрів, що визначається (в даному випадку $r = 2$).

Якщо $\chi^2 < 2k$, програма більше не запускається – вважається, що визначення параметрів завершено.

Якщо ця умова не виконується, то знову за допомогою програмного пакета NJOY 99 розраховується нова MCNP 4с бібліотека з новими параметрами $E_0^{кінц}$ та $\Gamma_n^{кінц}$, потім кодом MCNP 4с прораховуються проходження $T_i(E_0^{кінц}, \Gamma_n^{кінц})$, $T_i(E_0^{кінц} + \delta E_0, \Gamma_n^{кінц})$ та $T_i(E_0^{кінц}, \Gamma_n^{кінц} + \delta \Gamma_n)$, визначаються нові $\frac{\partial T_i}{\partial E_0}$, $\frac{\partial T_i}{\partial \Gamma_n}$ та знову запускається програма PAR2 чи PAR2_P&G. Звичайно δE_0 та $\delta \Gamma_n$ кожного разу можуть вибиратися довільним чином.

Така процедура повторюється доти, поки не буде досягнута умова $\chi^2 < 2k$.

4. Програма ROZPREG для визначення параметрів E_0 та Γ_n резонансу ^{52}Cr

При написанні програми ROZPREG використовувалась математична модель, яка відтворює реальний експеримент по розсіянню, який було

проведено на ГЕК-8 київського дослідницького реактора ВВР-М [9]. У цій моделі розсіювач та детектор розбиваються на окремі елементи, прораховуються відстані між ними та кути розсіяння нейтронів і відповідно енергії взаємодії нейтрона з речовиною зразка. Такий підхід, який можна назвати розрахунково-накопичувальним, є альтернативним розрахунку процесів розсіяння нейтронів на основі методу статистичних випробувань (методу Монте-Карло).

Надалі для визначення параметрів резонансів використовувався «метод форми», достатній досвід роботи з яким автори мали при визначенні параметрів резонансів у тепловій області енергії [6]. Загальна формула Брейта - Вігнера має вигляд

$$\sigma = \frac{\sigma_0(\cos 2\alpha + x \sin 2\alpha)}{1 + x^2} + 4\pi\lambda^2 \sin^2 \alpha, \quad (7)$$

де $\sigma_0 = 4\pi\lambda^2 g \frac{\Gamma_n}{\Gamma}$, $x = \frac{E - E_0}{\Gamma/2}$, $\alpha = \frac{R'}{\lambda}$; E – енергія нейтрона (кеВ), що взаємодіє з матеріалом зразка; λ – дебройлівська довжина хвилі нейтрона з енергією E , поділена на 2π , в 10^{-12} см.

Для s-нейтронів при низьких енергіях (< 1 кеВ), коли $\alpha \ll 1$, використовується однорівнева формула Брейта - Вігнера у вигляді

$$\sigma(E) = 4\pi R'^2 + \frac{652 \cdot g\Gamma_n\Gamma}{E \cdot [(\Gamma/2)^2 + (E_0 - E)^2]} - \frac{181 \cdot R'g\Gamma_n(E_0 - E)}{\sqrt{E} \cdot [(\Gamma/2)^2 + (E_0 - E)^2]}. \quad (8)$$

Цей вираз дає повний переріз в барнах (б), якщо величини E , $g\Gamma_n$ та Γ задано в кеВ.

У виразі (8) E_0 – енергія резонансу, кеВ; Γ_n – нейтронна ширина резонансу, виражає ймовірність випромінення нейтрона з енергією E із складеного ядра, кеВ; Γ – повна ширина резонансу, виражає ймовірність розпаду складеного ядра через усі процеси. Для більшості ядер при низьких енергіях (окрім тих, що діляться) Γ є сумою Γ_n та Γ_γ – радіаційної ширини, кеВ; g – статистичний ваговий фактор, який залежить від J (кутовий момент складеного ядра), виражає ймовірність утворення ядра із спіном J , якщо ядро-мішень має спін I , $g = \frac{2J+1}{2(2I+1)}$, для

s-нейтронів ($l = 0$) $J = I \pm \frac{1}{2}$; R' – ефективний радіус ядра; $4\pi R'^2$ називається потенційним розсіянням і відповідає прямому розсіянню на ядрі,

як на твердій сфері радіусом R' без утворення складеного ядра (виражається в одиницях 10^{-12} см).

В області нейтронних фільтрів до ~ 150 кеВ необхідно враховувати те, що величина α може досягати 0,5, тому для розрахунку перерізів резонансів потрібна дещо інша формула. У загальній формулі (7) розкладаючи $\sin 2\alpha$ та $\cos 2\alpha$ в ряд Тейлора до четвертого члена, формула (8) для поперечного перерізу s-резонансу приймає вигляд

$$\sigma(E) = 4\pi R'^2 \cdot FAP + \frac{652 \cdot g \Gamma_n \Gamma \cdot FAR}{E \cdot [(\Gamma/2)^2 + (E_0 - E)^2]} - \frac{181 \cdot R' g \Gamma_n (E_0 - E)}{\sqrt{E} \cdot [(\Gamma/2)^2 + (E_0 - E)^2]} \cdot FAI, \quad (9)$$

де $\alpha = \frac{R'}{\lambda} = R' \cdot 0,06943 \cdot \sqrt{E}$,

$$FAP = 1 - \frac{1}{3}\alpha^2 + \frac{2}{45}\alpha^4,$$

$$FAR = 1 - 2\alpha^2 + \frac{2}{3}\alpha^4 - \frac{4}{45}\alpha^6,$$

$$FAI = 1 - \frac{2}{3}\alpha^2 + \frac{2}{15}\alpha^4.$$

Для коректного визначення параметрів E_0 та Γ_n резонансу ⁵²Cr при енергії 50 кеВ у програмі враховуються внески двох сусідніх r-резонансів при енергіях 48,24 та 57,678 кеВ, поперечний переріз яких розраховувався за формулою

$$\sigma(E) = \frac{652 \cdot g \cdot \Gamma_n \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right) \cdot \Gamma}{E \cdot ((\Gamma/2)^2 + (E_0 - E)^2)}, \quad (10)$$

Таблиця 1. Порівняння експериментальних проходжень зразка ⁵²Cr товщиною 0,0173 ядер/б з розрахованими проходженнями, що отримані за допомогою програм MCNP 4с та ROZPREG

Кут, °	Енергетичний діапазон, кеВ	Проходження		
		Експеримент	MCNP 4с	ROZPREG
15	48,6 ÷ 57,7	0,8605 ± 0,0129	0,8698	0,8679
20	45,8 ÷ 55,3	0,7397 ± 0,0159	0,7268	0,7420
25	42,5 ÷ 52,3	0,8889 ± 0,0164	0,9069	0,8934

У програмі ROZPREG (як і в програмі MCNP 4с) використовувався розрахунковий спектр фільтра із середньою енергією 59 кеВ, отриманий за допомогою програми FILTER_7 [10]. Енергетична ширина фільтра 50 ÷ 61 кеВ.

Для проведення розрахунків двох параметрів E_0 та Γ_n у програму ROZPREG вводяться вхідні параметри резонансу, близькі до даних з БОЯД, використаній при створенні MCNP бібліотеки. Також уводився набір експериментальних про-

де $\Gamma = \Gamma_n \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right) + \Gamma_\gamma$.

Створюючи програму для розрахунку усередненого проходження нейтронів через досліджуваний зразок, у методиці, що використовує зсув середньої енергії фільтра при розсіянні, слід враховувати «погану» геометрію експерименту: відстань між зразком і детектором незначна, що було обумовлено необхідністю забезпечити достатню світлосилу експерименту. Під цим ми розуміємо такий процес: після визначення товщини перетину зразка в напрямку від елемента розсіювача до елемента детектора треба враховувати, що частина нейтронів, що провазаємодіяли з атомами досліджуваного зразка, усе ж потрапляє в детектор. У використаному нами накопичувально-розрахунковому методі такий підхід призводить до підвищення кратності інтегрування, по якому розраховується усереднене проходження, але це призводить до збільшення часу розрахунку. Ми використали інтегральний підхід для оцінки цього процесу, однак щоб впевнитися в коректності результатів їх було порівняно з результатами, отриманими за допомогою коду MCNP 4с, де цей процес враховується автоматично.

У табл. 1 наведено експериментальні проходження зразка ⁵²Cr товщиною 0,0173 ядер/б для однієї із серій вимірювань, а також проходження, отримані за допомогою програм MCNP 4с та ROZPREG. Як видно з таблиці, розрахункові проходження в межах експериментальних статистичних похибок чудово збігаються між собою, що вказує на те, що умови «поганої» геометрії розраховуються в ROZPREG коректно. Тому програму ROZPREG можна використовувати для визначення двох параметрів E_0 та Γ_n .

ходжень зразка ⁵²Cr з товщиною 0,0173 ядер/б для кутів розсіяння 15 ÷ 25°, отриманих двома незалежними методами обробки експериментальних даних [2]. Результатом роботи програми ROZPREG є пораховані значення проходжень T_i зразка ⁵²Cr та часткових похідних $\frac{\partial T_i}{\partial E_0}$ та $\frac{\partial T_i}{\partial \Gamma_n}$.

табл. 2 наведено результати розрахунків параметрів резонансу E_0 та Γ_n за допомогою програм MCNP 4с та ROZPREG.

Таблиця 2. Параметри E_0 та Γ_n резонансу ^{52}Cr при енергії 50 кеВ, отримані за допомогою програм MCNP 4с та ROZPREG

Параметри резонансу	MCNP 4с (формула Рейха - Мура)	ROZPREG (однорівнева формула Брейта - Вігнера)
E_0 , кеВ	$49,99 \pm 0,20$	$50,06 \pm 0,07$
Γ_n , кеВ	$1,54 \pm 0,03$	$1,52 \pm 0,05$
R' , 10^{-12} см	0,5445*	0,5445*
χ^2 на одну ступінь свободи	1,1	0,7

* При визначенні параметрів E_0 , та Γ_n значення параметра R' взято з БОЯД ENDF/B-VII і дорівнювало $0,5445 \cdot 10^{-12}$ см.

Із табл. 1 та 2 видно, що програми MCNP 4с та ROZPREG дають близькі результати, що вказує на коректний математичний опис експерименту в програмі ROZPREG. Тому в подальшому цю програму було взято за основу для нової програми ROZPREGA, що дало змогу визначити три параметри E_0 , Γ_n та R' резонансу.

5. Програма ROZPREGA для визначення параметрів E_0 , Γ_n та R' резонансу ^{52}Cr

У програмі ROZPREGA для визначення трьох параметрів E_0 , Γ_n та R' для розрахунку перерізів використовується формула (8), а для визначення часткової похідної $\frac{\partial T_i}{\partial R'}$ використовується та сама процедура, що і для похідних $\frac{\partial T_i}{\partial E_0}$ та $\frac{\partial T_i}{\partial \Gamma_n}$.

Застосування програми ROZPREGA з використанням експериментальних даних для проходження нейтронів через зразок ^{52}Cr товщиною 0,01731 ядер/б дало такі параметри резонансів: $E_0 = 49,96 \pm 0,14$ кеВ, $\Gamma_n = 1,47 \pm 0,13$ кеВ та

$R' = (0,61 \pm 0,06) 10^{-12}$ см. Як видно з табл. 2, похибка Γ_n стала в 2,5 раза більша, а R' визначається з похибкою, близькою до 10 %. Щоб уточнити значення параметрів E_0 , Γ_n та R' , було також використано експериментальні дані з більш товстим зразком ^{52}Cr (0,03024 ядер/б), а також включено до розгляду дані, отримані у вимірюваннях при куті розсіювання 30° (відповідає енергетичній області $38,1 \div 48,6$ кеВ – район інтерференційного мінімуму, де переріз більш чутливий до величини R').

Результати розрахунку з використанням експериментальних даних для проходження нейтронів через зразок ^{52}Cr товщиною 0,03024 ядер/б при кутах розсіювання $15, 20$ та 25° представлено в табл. 3. Як видно, похибка визначення параметра Γ_n дещо краща, однак похибка визначення параметра R' стала ще гіршою. При введенні в обробку проходження для кута розсіювання 30° похибка визначення параметрів резонансу значно покращується. Отримані значення параметрів наведено в останній колонці табл. 3

Таблиця 3. Параметри резонансу ^{52}Cr при енергії 50 кеВ. Кути розсіювання $15, 20$ та 25°

Параметри резонансу	ROZPREGA (однорівнева формула Брейта - Вігнера)		
	Зразок $0,01731 \pm 0,00006$ ядер/б (3 кути)	Зразок $0,03024 \pm 0,00010$ ядер/б (3 кути)	Зразок $0,03024 \pm 0,00010$ ядер/б (4 кути)
E_0 , кеВ	$49,96 \pm 0,14$ (0,3 %)	$50,34 \pm 0,22$ (0,4 %)	$50,24 \pm 0,12$ (0,2 %)
Γ_n , кеВ	$1,47 \pm 0,12$ (8,2 %)	$1,58 \pm 0,12$ (7,6 %)	$1,51 \pm 0,06$ (4,0 %)
R' , 10^{-12} см	$0,61 \pm 0,06$ (9,8 %)	$0,50 \pm 0,08$ (16 %)	$0,50 \pm 0,04$ (8,0 %)
χ^2	0,7	0,7	0,5

Порівняння параметрів резонансу, отриманих у нашій роботі, з параметрами, представленими в роботах [3, 4, 11 - 14], та з параметрами з БОЯД наведено в табл. 4 та 5 відповідно.

Як видно з табл. 4, спостерігається деяка відмінність між значеннями параметрів, особливо Γ_n , визначеними різними авторами. На жаль, проаналізувати причини цих відмінностей доволі проблематично, можливо, вони пов'язані з тим, що фактично всі автори, окрім нас, використовували

вали в дослідженнях зразки у вигляді оксиду хрому Cr_2O_3 , тому в цих роботах повинні бути введені поправки на вміст кисню в зразку, що могло суттєво вплинути на величину кінцевих результатів. Нагадаємо, що ми використовували зразки ^{52}Cr , виготовлені з металічного порошку, який запаковано в алюмінієвий контейнер (збагачення по ^{52}Cr становило 99,3 % (^{50}Cr - 0,1, ^{53}Cr - 0,5, ^{54}Cr - 0,1%)), – вважаємо це однією з переваг нашої роботи.

Таблиця 4. Порівняння параметрів резонансу ^{52}Cr при енергії 50 кеВ, отриманих у нашій роботі з експериментальними даними інших авторів

Параметри резонансу	E. G. Birpuch (1961) [11]	R. R. Spencer (1972) [12]	R. G. Stieglitz (1970) [13]	H. M. Agrawal (1984) [4]	G. Rohr (1988) [14]	R. F. Carlton (2000) [3]	Середнє за результатами вимірювань двох зразків
$E_0 \pm \Delta E_0$, кеВ	$51,0 \pm 0,5$	$50,19 \pm 0,16$	$50,2 \pm 0,3$	$50,358 \pm 0,015$	$50,30 \pm 0,06$	50,293	$50,15 \pm 0,08$ (0,2 %)
$\Gamma_n \pm \Delta \Gamma_n$, кеВ	$1,55 \pm 0,15$	$1,71 \pm 0,02$	$1,75 \pm 0,12$	$1,81 \pm 0,09$	$1,62 \pm 0,06$	$1,562 \pm 0,150$	$1,52 \pm 0,05$ (3,3 %)
R' , 10^{-12} см	$0,54 \pm 0,06$	–	$0,57 \pm 0,03$	–	–	–	$0,53 \pm 0,03$ (5,7%)

Таблиця 5. Порівняння параметрів резонансу ^{52}Cr при енергії 50 кеВ, отриманих у нашій роботі з параметрами з БОЯД

Параметри резонансу	ENDF/B-VII.1 JEFF-3.2, JENDL-4.0 (формула Рейха - Мура)	ENDF/B-VII (формула Рейха - Мура)	CENDL-3.1 (багаторівнева формула Брейта - Вігнера)	BROND-2 (формула Рейха - Мура)	ROSFOND-10 (формула Рейха - Мура)	TENDL-2014 (багаторівнева формула Брейта - Вігнера)	За результатами вимірювань двох зразків
E_0 , кеВ	50,33	50,16	50,30	50,30	50,33	50,29	$50,15 \pm 0,08$ (0,2 %)
Γ_n , кеВ	1,62	1,53	1,62	1,70	1,62	1,62	$1,52 \pm 0,05$ (3,3 %)
R' , 10^{-12} см	0,53	0,54	0,52	0,52	0,58	0,54	$0,53 \pm 0,03$ (5,7 %)

Як видно з табл. 5, значення параметрів резонансу E_0 , Γ_n та R' , отримані нами з набору усереднених проходжень зразків ^{52}Cr фільтрованими нейтронами, розсіяними на кутах 15, 20, 25 та 30°, непогано узгоджуються з величинами, представленими в БОЯД.

6. Висновки

Розроблений нами метод зсуву середньої енергії фільтрованих нейтронів дозволяє визначати з набору усереднених проходжень параметри ізольованого резонансу навіть при достатньо великій енергетичній ширині фільтрованої нейтронної лінії (до 10 кеВ). Це має надзвичайно важливе значення для дослідження ядерно-фізичних характеристик взаємодії нейтронів з ядрами, оскільки для нейтронів в області енергій від декількох одиниць до декількох сотень кеВ даних дуже небагато. Так, наприклад, для ^{52}Cr лише у двох роботах [13, 15] R' було визначено раніше,

наш результат є третім. Визначення чи навіть уточнення параметрів ізольованих резонансів актуальне не лише з точки зору фундаментальної ядерної фізики та вдосконалення БОЯД, а й точки зору прикладних застосувань, бо, як відомо, БОЯД – це інформаційна основа для створення спеціалізованих баз даних для будь-яких технологічних розрахунків, у тому числі й у реакторобудуванні.

Ще один висновок, хоч і не дуже глобальний, але важливий для застосування методики в подальших експериментах. Створені нами програмні продукти ROZPREG, ROZPREGA доволі добре моделюють експеримент навіть в умовах «поганої» геометрії і можуть бути використані для визначення параметрів резонансу за даними експериментальних усереднених проходжень. Використання цих програмних продуктів суттєво зменшує час обробки експериментальних результатів (порівняно із застосуванням MCNP 4c та NJOY 99).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. О.О. Грицай, А.К. Гримало, В.А. Пшеничний. Аналітичні вирази для розрахунків виходів розсіяних нейтронів із зразка-розсіювача під малими кутами. *Ядерна фізика та енергетика* 16(3) (2015) 303.
2. О.О. Грицай, А.К. Гримало, В.А. Пшеничний. Визначення повних нейтронних перерізів із використанням методу зсуву середньої енергії

- нейтронів фільтрованого пучка. *Ядерна фізика та енергетика* 17(4) (2016) 411.
3. R.F. Carlton et al. Neutron resonance spectroscopy for $n+^{52}\text{Cr}$: Total and differential elastic scattering cross section. *Physical Review C* 62 (2000) 014608.
 4. H.M. Agrawal, J.B. Garg, J.A. Harvey. Parity dependence of the level densities of ^{53}Cr and ^{55}Cr at high excitation. *Physical Review C* 30 (1984) 1880.
 5. Ю.В. Линник. *Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений*. Изд. 2-е (Москва, Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962) 349 с.
 6. В.А. Пшеничний. Программы обработки нейтронных резонансов "Методом формы". Препринт Ин-та ядерных исслед. АН УССР КИЯИ-74-16 (Киев, 1974) 34 с.
 7. J.F. Briesmeister (Ed.). *MCNP – A General Monte Carlo N-particle Transport Code. Version 4C*. Los Alamos National Laboratory, NM (USA). Report No. LA-13709-M, March 2000. 788 p.
 8. R.E. McFarlane, D.W. Muir. *The NJOY Nuclear Data Processing System, User's Manual*. LA-12740-M, UC-413, October 1994.
 9. В.А. Пшеничний. Математична модель вимірів кутових розподілів розсіяння нейтронів. *Ядерні та радіаційні технології* 5(3) (2005) 5.
 10. O.O. Gritzay, M.M. Vakulenko. Development of the code for filter calculation. *Proc. of the 4-th Int. Conf. "Current Problems in Nucl. Phys. and At. Energy"*, Kyiv, Ukraine, September 3 - 7, 2012 (Kyiv, 2013) p. 426.
 11. I.G. Bilpuch et al. s- and p-Wave Neutron Spectroscopy. Part VII. Widths of Neutron Resonances. *Annals of Physics* 14 (1961) 387.
 12. R.R. Spencer, H. Beer, F.H. Froehner. The Total Neutron Cross Sections of Cr-50, Cr-52, Ni-62 and Ni-64 in the Energy Region 10 - 300 keV. *Kernforschungszentrum Karlsruhe Reports, No. 1517* (1972).
 13. R.G. Stieglitz, R.W. Hockenbury, R.C. Block. keV neutron capture and transmission measurements on ^{50}Cr , ^{52}Cr , ^{53}Cr , ^{54}Cr , ^{60}Ni and V. *Nucl. Phys. A* 163 (1971) 592.
 14. G. Rohr et al. Nonstatistical effects observed with $^{52}\text{Cr} + n$ resonances. *Physical Review C* 39 (1989) 426.

О. А. Грицай, А. К. Гримало*, В. А. Пшеничний

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

*Ответственный автор: grimalo.a@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСА ^{52}Cr ИЗ НАБОРА НЕЙТРОННЫХ ПРОПУСКНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СМЕЩЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ФИЛЬТРОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ

Определены параметры E_R , Γ_n и R' резонанса ^{52}Cr при энергии 50 кэВ из набора экспериментальных усредненных прохождений, полученных методом сдвига средней энергии фильтрованных нейтронов. Для расчета параметров E_R и Γ_n был использован программный код MCNP 4C и собственная программа ROZPREG. В дальнейшем эта программа была взята за основу для новой программы ROZPREGA, с помощью которой определены три параметра E_0 , Γ_n и R' резонанса ^{52}Cr . Полученный набор параметров резонанса сравнен с результатами других авторов и данными из библиотек оцененных ядерных данных (БОЯД).

Ключевые слова: пропускание нейтронов, параметры резонанса, ^{52}Cr , фильтрованные пучки нейтронов, реактор.

О. О. Gritzay, А. К. Grymalo*, V. A. Pshenychnyi

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: grimalo.a@gmail.com

DETERMINATION OF THE ^{52}Cr RESONANCE PARAMETERS FROM A SET OF THE NEUTRON TRANSMISSIONS OBTAINED BY AVERAGE ENERGY SHIFT METHOD FOR FILTERED NEUTRONS

The parameters E_R , Γ_n and R' for ^{52}Cr resonance at the energy of 50 keV were determined from the set of the experimental average transmissions obtained by the shifting of average energy of the filtered neutrons. For E_R and Γ_n parameters calculations, MCNP 4C code and own ROZPREG code were used. In the future, this code was taken as a basis for the new ROZPREGA program, which determined three parameters E_R , Γ_n and R' for ^{52}Cr resonance. The obtained set of resonance parameters was compared with the results of other authors and data from the evaluated nuclear data libraries (ENDL).

Keywords: neutron transmission, resonance parameters, ^{52}Cr , filtered neutron beams, reactor.

REFERENCES

1. O.O. Gritzay, A.K. Grymalo, V.A. Pshenychnyi. Analytical expressions for calculations of scattered neutrons from the sample (scatterer) at small angles. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 16(3) (2015) 303. (Ukr)
2. O.O. Gritzay, A.K. Grymalo, V.A. Pshenychnyi. Determination of the total neutron cross section using average energy shift method for filtered neutron beam. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 17(4) (2016) 411. (Ukr)
3. R.F. Carlton et al. Neutron resonance spectroscopy for $n+^{52}\text{Cr}$: Total and differential elastic scattering cross section. *Physical Review C* 62 (2000) 014608.
4. H.M. Agrawal, J.B. Garg, J.A. Harvey. Parity dependence of the level densities of ^{53}Cr and ^{55}Cr at high excitation. *Physical Review C* 30 (1984) 1880.
5. Yu.V. Linnik. *The Method of the Smallest Squares and the Foundations of the Mathematical-Statistical Theory of Processing Observations*. 2-nd edition. (Moskva, Gosudarstvennoe Izdatelstvo Fiziko-Matematicheskoy Literatury, 1962) 349 p. (Rus)
6. V.A. Pshenychnyi. Neutron resonance processing programs "Form method". Preprint of the Institute for Nuclear Research AS of Ukraine KINR-74-16 (Kyiv, 1974) 34 p. (Rus)
7. J.F. Briesmeister (Ed.). *MCNP – A General Monte Carlo N-particle Transport Code. Version 4C*. Los Alamos National Laboratory, NM (USA). Report No. LA-13709-M, March 2000. 788 p.
8. R.E. McFarlane, D.W. Muir. *The NJOY Nuclear Data Processing System, User's Manual*. LA-12740-M, UC-413, October 1994.
9. V.A. Pshenychnyi. Mathematical model of measurements of angular distributions of neutron scattering. *Yaderni ta Radiatsiini Tekhnologiyi* 5(3) (2005) 5. (Ukr)
10. O.O. Gritzay, M.M. Vakulenko. Development of the code for filter calculation. Proc. of the 4-th Int. Conf. "Current Problems in Nucl. Phys. and At. Energy", Kyiv, Ukraine, September 3 - 7, 2012 (Kyiv, 2013) p. 426.
11. I.G. Bilpuch et al. s- and p-Wave Neutron Spectroscopy. Part VII. Widths of Neutron Resonances. *Annals of Physics* 14 (1961) 387.
12. R.R. Spencer, H. Beer, F.H. Froehner. The Total Neutron Cross Sections of Cr-50, Cr-52, Ni-62 and Ni-64 in the Energy Region 10 - 300 keV. *Kernforschungszentrum Karlsruhe Reports*, No. 1517 (1972).
13. R.G. Stieglitz, R.W. Hockenbury, R.C. Block. keV neutron capture and transmission measurements on ^{50}Cr , ^{52}Cr , ^{53}Cr , ^{54}Cr , ^{60}Ni and V. *Nucl. Phys. A* 163 (1971) 592.
14. G. Rohr et al. Nonstatistical effects observed with $^{52}\text{Cr} + n$ resonances. *Physical Review C* 39 (1989) 426.

Надійшла 22.02.2018
Received 22.02.2018