

УДК 539.172.3

В.С. Бохінюк, В.І. Жаба, О.М. Парлаг

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54

e-mail: viktorzh@meta.ua

ДО ПИТАННЯ ПРО ЕНЕРГЕТИЧНУ ЗАЛЕЖНІСТЬ ПЕРЕРІЗУ РЕАКЦІЇ (γ, γ')

Проведено дослідження впливу різних методів згладжування експериментальної кривої виходу на енергетичну залежність перерізу реакції (γ, γ'). На прикладі реакції $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ показано, що згладжування методом ітерацій і методом апроксимації дають три варіанти енергетичної залежності диференціального перерізу.

Ключові слова: фотоядерна реакція, вихід, переріз, згладжування, метод Пенфольда-Лейса.

Метою більшості фізичних досліджень, що проводяться на гальмівних пучках електронних прискорювачів, є вивчення енергетичної залежності перерізів різних фотоядерних процесів. Однак, через те, що спектр отриманих від прискорювачів γ -квантів має неперервний характер, безпосередньо в експерименті вимірюють не переріз реакції, а так званий вихід, що являє собою інтенсивність фотоядерного процесу, віднесена до одиниці дози γ -квантів, що пройшли через мішень із досліджуваної речовини при різних значеннях верхньої межі гальмівного спектру [1-5].

Як правило, всі перерізи фотоядерних реакцій носять резонансний характер, а відповідні криві виходів мають вид наростаючої кривої з перегином в районі резонансу і подальшим переходом на плато.

У тих випадках, коли крива виходу поміряна з недостатньою точністю, розрахунок перерізів може привести до від'ємних значень або до такого великого розкиду точок, що через них взагалі не можна провести гладку криву.

Щоб отримати фізично осмислені результати, доводиться згладжувати експериментальні криві виходів, що вносить значний елемент суб'єктивності у кінцевий результат – енергетичну залежність перерізу реакції [6, 7].

В переважній більшості робіт розрахунок перерізів проводився методом оберненої матриці – так званий метод

Пенфольда-Лейса [1, 8]. Він вимагає, щоб виміри виходів проводились від порогу реакції, що не завжди можливо. Так, у випадку збудження ізомерних станів в реакції непружного розсіювання γ -квантів поріг становить кілька десятків кеВ.

Якщо огляд робіт по вивченню поведінки перерізу непружного розсіювання фотонів на ядрах вказує на наявність піку в перерізі при енергії 8-9 МеВ, то в області гігантського дипольного резонансу приведені результати взаємовиключаючі. Згідно одних досліджень після 10 МеВ переріз різко зменшується практично до нуля, а згідно інших – навпаки, після 15 МеВ він зростає або до десятка мб, або спостерігається другий пік в області 20-22 МеВ [3].

В даній роботі досліджено як впливає метод згладжування експериментальної кривої виходу на енергетичну залежність і величину ефективного перерізу реакції (γ, γ') при розрахунках його методом Пенфольда-Лейса.

Для цього були використані дві криві виходу реакції $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ – отримана нами на гальмівних пучках мікротрона (область енергій 6–9 МеВ) і бетатрона (11–26 МеВ) та взята з роботи [4], де виміри проведено на мікротроні М-30 в області енергій 4-16 МеВ.

Недоліком отриманої нами кривої виходу є те, що тут зшито результати двох незалежних експериментів, що могло внести систематичну похибку із-за відмінностей в геометрії опромінення і

дозиметрії пучка. Крім того, не було можливості провести виміри виходів для енергій нижче 6 МеВ та області 9-11 МеВ. Із-за малої інтенсивності пучка бетатрона також складно провести виміри виходів з високою точністю в області 11–13 МеВ.

Цих недоліків частково позбавлена крива виходу з роботи [4]. Але і там мінімальна енергія опромінення 4 МеВ, при порозі реакції 0,04 МеВ. Як уже згадувалось, метод Пенфольда–Лейса вимагає значень виходу від порогу реакції.

Для розрахунків енергетичної залежності перерізу використано прикладну програму КРОС [8]. Згладжування експериментальних кривих виходу реакції проведено двома методами: методом ітерацій і методом апроксимації. Зокрема, апроксимація залежностей виходу від енергії $Y(E)$ проводилася із використанням чотирьох пікових функцій. При апроксимації кривої виходу для даних чотирьох пікових функцій f_1, f_2, f_3, f_4 значення величини функції вибірки χ^2 були меншими, ніж для інших апроксимаційних функцій. Аналітичний запис використаних нами апроксимаційних пікових функцій наступний:

Пікова функція Грама-Шарльє:

$$f_1 = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} \left(1 + \left| \sum_{i=3}^4 \frac{a_i}{i!} H_i(z) \right| \right),$$

де $z = \frac{x - x_C}{w}, \quad H_3 = z^3 - 3z,$

$$H_4 = z^4 - 6z^2 + 3.$$

Експоненціально модифікований гаусіан:

$$f_2 = y_0 + \frac{A}{t_0} \exp\left(\frac{1}{2}\left(\frac{w}{t_0}\right)^2 - \frac{x - x_C}{t_0}\right) \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy,$$

де $z = \frac{x - x_C}{w} - \frac{w}{t_0}.$

Пікова функція Еджворта-Крамера:

$$f_3 = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-0.5z^2} \left(1 + \frac{a_3}{3!} z(z^2 - 3) + \frac{a_4}{4!} (z^4 - 6z^2 + 3) + \frac{10a_3^2}{6!} (z^6 - 15z^4 + 45z^2 - 15) \right) \right\},$$

де $z = \frac{x - x_C}{w}.$

Асиметричний подвійний сигмоїдал:

$$f_4 = y_0 + A \cdot \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{x - x_C + w_1/2}{w_2}\right)} \times \left[1 - \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{x - x_C - w_1/2}{w_3}\right)} \right].$$

Значення функції вибірки χ^2 , коефіцієнта визначення R^2 і параметрів для використаних нами апроксимаційних функцій f_1, f_2, f_3, f_4 для згладжування експериментальної кривої виходу реакції приведено у таблиці 1.

Таблиця 1
Значення χ^2, R^2 і параметрів для апроксимаційних функцій

Функція	χ^2	R^2	Параметри
f_1	0,00107	0,99087	$y_0=0,2974$ $x_C=15,43711$ $A=10,87542$ $w=6,28868$ $a_3=0,51993$ $a_4=-1,39239$
f_2	0,00130	0,98826	$y_0=-0,00482$ $A=33,99898$ $x_C=8,63599$ $w=2,77626$ $t_0=32,12903$
f_3	0,00147	0,98743	$y_0=-0,0903$ $x_C=23,35275$ $A=7,90916$ $w=5,97326$ $a_3=0,26208$ $a_4=3,99296$
f_4	0,00149	0,98727	$y_0=-0,02265$ $x_C=8,69905$ $A=2,10467$ $w_1=1,66E-11$ $w_2=1,68807$ $w_3=20,42298$

Стандартний спосіб визначення найкращої функції - вибрати параметри таким чином, щоб сума квадратів відхилень теоретичної кривої f від експериментальних точок для цілого ряду незалежних змінних

$$\chi^2(p_1, p_2, \dots) = \frac{1}{n-p} \sum_i w_i [y_i - f(x_i; p_1, p_2, \dots)]^2$$

досягала свого мінімуму. n – число експериментальних точок, p – число параметрів. Згідно таблиці 1 мінімальне значення χ^2 є для функції f_1 (тобто найкраще описує експериментальну криву виходу), а максимальне – для функції f_4 .

На рис. 1 приведено отриману нами експериментальну криву виходу і вказано точки, отримані згладжуванням методом апроксимації за допомогою функцій f_1, f_2, f_3, f_4 . Як видно, всі варіанти згладжування дають близькі між собою результати в межах похибок експерименту (1–5 %).

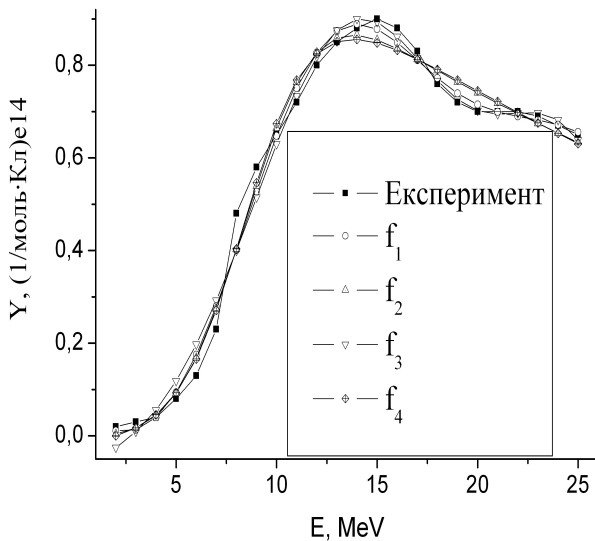


Рис. 1. Експериментальна крива виходу та її згладжування методом апроксимації за допомогою функцій f_1, f_2, f_3, f_4 .

На рис. 2 приведено енергетичну залежність перерізів, отриманих з кривої виходу, яка була згладжена функціями f_1, f_2, f_3, f_4 .

Тут результати дуже суттєво відрізняються між собою. Згладжування по функціям f_1 і f_3 дають для перерізу один максимум при енергії $E=10$ MeV і далі практично плато, а згладжування по функціям f_2 і f_4 – два максимуми при енергіях 10 MeV і 22 MeV, але з різним співвідношенням значень перерізів.

На рис. 3 приведено енергетичну залежність перерізів, отриманих з кривої

виходу, який згладжено методом ітерацій. Для числа ітерацій більше 5 ми отримуємо стабільний розв'язок: в енергетичній залежності наявні два максимуми при енергіях 10 і 22 MeV.

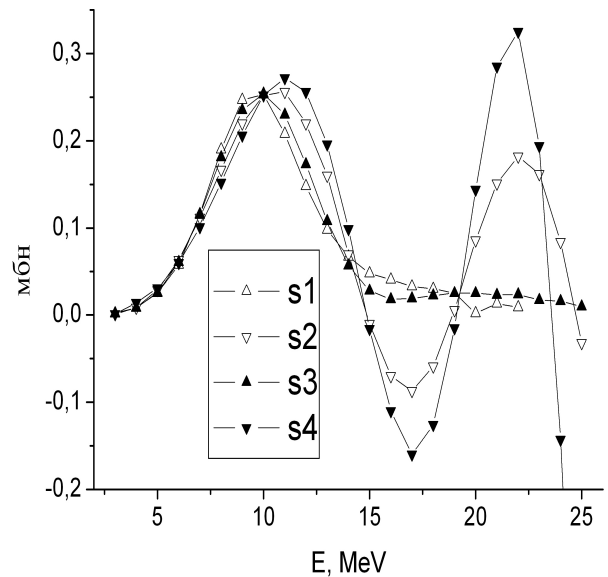


Рис. 2. Енергетична залежність перерізів, отриманих з кривої виходу, яка згладжена функціями f_1, f_2, f_3, f_4 .

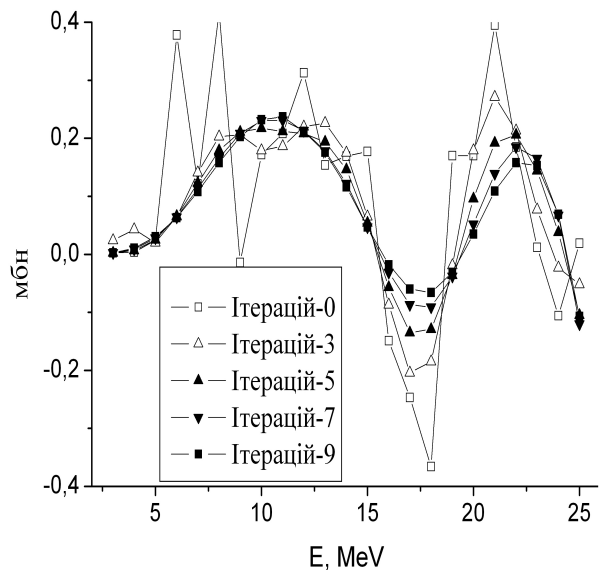


Рис. 3. Енергетична залежність перерізів, отриманих з кривої виходу, який згладжено методом ітерацій.

На рис. 4 приведено криву виходу отриману в [4] і згладжену за допомогою вищевказаних функцій. Значення функції вибірки χ^2 , коефіцієнта визначення R^2 і параметрів апроксимаційних функцій для згладжування кривої виходу реакції з [4] приведено у таблиці 2. Згідно таблиці 2

мінімальне значення χ^2 є для функції f_4 , тобто найкраще описує експериментальну криву виходу з [4].

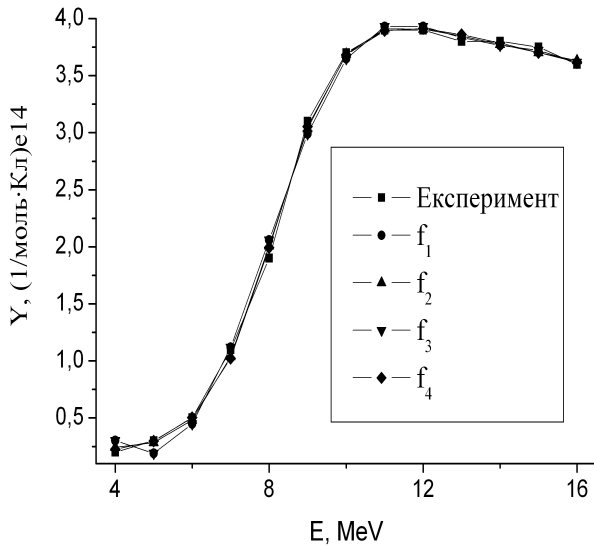


Рис. 4. Крива виходу отримана в [4] і згладжена функціями f_1, f_2, f_3, f_4 .

Таблиця 2
Значення χ^2, R^2 і параметрів для апроксимаційних функцій

Функція	χ^2	R^2	Параметри
f_1	0,01005	0,99751	$y_0=1,74694$ $x_C=11,47123$ $A=23,92414$ $w=3,34861$ $a_3=0,00833$ $a_4=-1,80628$
f_2	0,00352	0,999	$y_0=0,23581$ $A=194,59134$ $x_C=8,16164$ $w=1,40748$ $t_0=48,82382$
f_3	0,01005	0,99751	$y_0=1,74694$ $x_C=11,47175$ $A=23,92635$ $w=3,34882$ $a_3=0,00864$ $a_4=-1,8062$
f_4	0,00346	0,99914	$y_0=0,19065$ $x_C=8,21826$ $A=8,19738$ $w_1=2,86E-11$ $w_2=0,87094$ $w_3=23,55711$

На рис. 5 приведено отримані з цих кривих виходу енергетичні залежності

перерізів. S-it5, S-it7 і S-it11 – результат згладжування кривої виходу методом ітерацій з числом ітерацій рівним 5, 7 і 11 відповідно. І якщо після згладжування кривої виходу методом ітерацій розрахований переріз має один широкий пік з центром 9-10 MeV з подальшим спадом до нуля, то згладжування методом апроксимації приводять до суттєво інших результатів: S1 і S3 (відповідають функціям f_1 і f_3) дають вузький пік з центром при енергії $E=9$ MeV і подальшим зростанням, а S2 (згідно функції f_2) дає два чіткі максимуми при енергіях 9 MeV і 15 MeV.

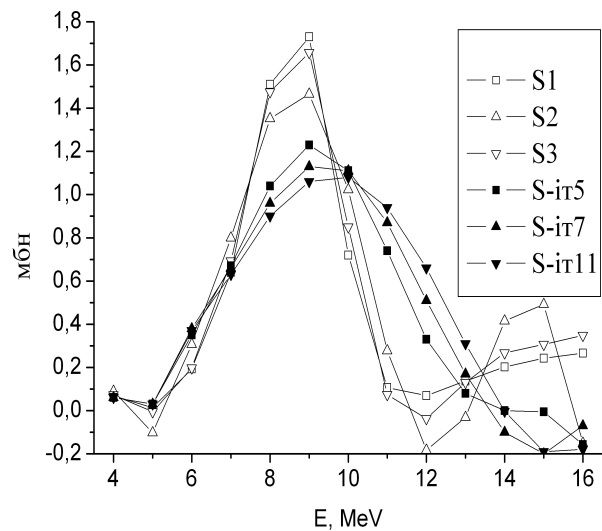


Рис. 5. Енергетична залежність перерізів, отриманих з кривої виходу з [4], який згладжено методом ітерацій і методом апроксимації.

Отже, можна зробити висновок, що використовуючи різні методи згладжування одної експериментальної кривої виходу, отримуємо дуже різні енергетичні залежності перерізів: а) один максимум при $E=9$ MeV і подальший спад до нуля; б) подальший ріст перерізу після 11 MeV; в) два максимуми на перерізі. Тобто, маємо ті самі три варіанти енергетичної залежності перерізу, що приводяться в огляді робіт. Тому було б доцільно перерахувати енергетичні залежності перерізів, використавши інші методи рішення інтегрального рівняння: трьох точковий метод, метод регуляризації, метод найменшої структури Кука [1]. І, можливо, тоді можна буде зробити остаточний висновок про відсутність чи наявність в перерізі другого максимуму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Капитонов И.М.. Фотоядерные реакции. Современный статус экспериментальных данных. - М.: Университетская книга, 2008. - 304с.
2. Walker M., Carrol J.J. Nuclear isomers Recipes from the Past and Ingredient for the Future // Nucl. Phys. - 2007. - Vol. 17, iss. 2. - P. 11–15.
3. Джилавян Л.З., Кучер Н.П., Рыжих Г.Г., Чуприков А.Ю. О существовании большого пика в сечении реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ при $E_\gamma=27$ МэВ. - М., 1987. - (Препр. / АН СССР. Ин-т ядерных исслед.; П-0515).
4. Мазур В.М., Соколюк И.В., Биган З.М. Сечения возбуждения ядерных изомеров в реакциях (γ, γ') в области 4-16 МэВ // ЯФ. - 1993. - Т. 56. - № 1. - С. 20–25.
5. Демехина Н.А., Данагулян А.С., Карапетян Г.С. Замечания к вопросу образования изомерных состояний в (γ, γ') -реакциях в районе гигантского резонанса // ЯФ. – 2001. – Т.64. – № 10. – С. 1879-1881.
6. Findley D.J.S. A modification to the Penfold-Leiss method of cross section unfolding // Nucl. Instr. and Meth. - 1983. - Vol. 213. – P. 353-358.
7. Yves Moriceau. Instabilites des solutions numeriques d'equations integrales de Fredholm et Voltterra de premiere espece – resolution par les polynomes de Tchebyeff – application aux sections efficaces photonucleaires // Rapport CEA-R-3427. – 1968. – P. 45.
8. Кузьменко В.С., Ранюк Ю.Л. Вычисление сечений фотоядерных реакций // Препринт ХФТИ АН УССР. ХФТИ 71–26, Харьков. 1971. С. 15.

Стаття надійшла до редакції 14.09.2011

V.S. Bohinyuk, V.I. Zhaba, A.M. Parlag

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin Str., 54

ON THE REACTION CROSS SECTION ENERGY DEPENDENCE (γ, γ')

The influence of different methods of smoothing the experimental curve entering the energy dependence of cross section of reaction (γ, γ') . On the example of the reaction $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ shown that by smoothing iterations, and the method of approximation gives three options of energy dependence of the differential cross section.

Key words: photonuclear reactions, output, section, smoothing, method Penfolda-Leis.

В.С. Бохинюк, В.И. Жаба, А.М. Парлаг

Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54

К ВОПРОСУ ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ (γ, γ')

Проведено исследование влияния различных методов сглаживания экспериментальной кривой выхода на энергетическую зависимость сечения реакции (γ, γ') . На примере реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ показано, что сглаживание методом итераций и методом аппроксимации дают три варианта энергетической зависимости дифференциального сечения.

Ключевые слова: фотоядерная реакция, выход, сечение, сглаживание, метод Пенфольда-Лейса.