

СЕРЕДНІ РЕЗОНАНСНІ ПАРАМЕТРИ ЯДЕР Ni I Zn

М.М. ПРАВДИВИЙ, І.О. КОРЖ, М.Т. СКЛЯР

УДК 539.171.4
© 2010Інститут ядерних досліджень НАН України
(Просп. Науки, 47, Київ, 03680; e-mail: sklyar@kinr.kiev.ua)

Отримано повні набори середніх резонансних параметрів S_0 , S_1 , R'_0 , R'_1 , $S_{1,3/2}$ для ядер нікелю і цинку з природним складом ізотопів. Їх визначено з аналізу середніх експериментальних диференціальних перерізів пружного розсіяння нейтронів низьких енергій розробленим авторами методом. Проведено аналіз отриманих результатів, рекомендованих параметрів та деяких літературних даних, на основі якого зроблено висновок, що рекомендовані для обох ядер параметри S_1 є заниженими у два рази.

1. Вступ

За час проведення досліджень середніх резонансних параметрів ядер опубліковано уже п'яту редакцію "Атласу рекомендованих резонансних параметрів" [1]. У порівнянні з попередньою редакцією [2] з'явилося досить багато нових експериментальних даних, які дозволили помітно впорядкувати залежності параметрів S_0 , S_1 , R'_0 від атомної ваги A та зменшити розбіжності між параметрами окремих ядер і розрахунками за оптичною моделлю. Однак лишилися невирішеними проблеми в мінімумах параметрів S_0 ($A \sim 100-140$) і S_1 ($A \leq 70$). У цих областях величини параметрів сусідніх ядер відрізняються в 5–10 разів, що не відповідає ідеології оптичної моделі і стримує її вдосконалення.

Ізотопи нікелю й цинку розташовані в тій області A , де величини силових функцій S_1 багатьох ядер мають значні розбіжності з розрахунками за оптичною моделлю. Для них рекомендовано параметри S_0 , S_1 і R'_0 , R'_1 , із яких розраховано середньозважені величини для ядер із природним складом ізотопів. Їх порівняння з даними роботи [3] показало, що величини параметрів S_0 і S_1 відрізняються у 2–5 разів. У зв'язку з цим здійснено перевірку узгодженості згаданих параметрів із експериментальними даними та визначено нові набори параметрів за допомогою розробленого нами методу із аналізу диференціальних перерізів пружного розсіяння нейтронів низьких енергій. Раніше цей метод було успішно використано для визначення резонансних параметрів парних ізотопів кадмію і олова [4] та деяких інших ядер.

2. Методика визначення середніх резонансних параметрів

Розсіяння нейтронів ядрами при енергіях до ~ 450 кеВ здійснюється переважно з орбітальними моментами $l = 0$ і $l = 1$. У цьому випадку диференціальні перерізи пружного розсіяння можна розкласти за поліномами Лежандра у вигляді

$$\sigma_{el}(\mu) = \frac{\sigma_{el}}{4\pi} \{1 + \omega_1 P_1(\mu) + \omega_2 P_2(\mu)\}, \quad (1)$$

де $\mu = \cos\theta$, θ – кут розсіяння; σ_{el} – інтегральний переріз пружного розсіяння; P_l – поліноми Лежандра; ω_1 і ω_2 – коефіцієнти розкладу диференціальних перерізів. Ці коефіцієнти називаються кутовими моментами індикатриси розсіяння і дорівнюють $\omega_l = (2l + 1)\bar{P}_l$, де \bar{P}_l – поліноми Лежандра, усереднені по кутах із вагою диференціального перерізу розсіяння. Для парно-парних ядер за умови, що $\sigma_t \approx \sigma_{el}$, було отримано вирази для коефіцієнтів розкладу [5]:

$$\omega_1 = \frac{6\pi\lambda^2}{\sigma_{el}} (1 - \eta_{0Re} - \eta_{1Re} + \eta_{0Re}\eta_{1Re} + \eta_{0Im}\eta_{1Im}), \quad (2)$$

$$\omega_2 = \frac{2}{\sigma_{el}} (\sigma_{s1} + \pi\lambda^2 T_{1,3/2}), \quad (3)$$

де $\eta_l = \eta_{lRe} + i\eta_{lIm}$ – діагональні елементи середньої матриці розсіяння; σ_{s1} – перерізи потенціального розсіяння нейтронів із $l = 1$; $T_{1,3/2}$ – коефіцієнти проникності для $l = 1$ і $j = 3/2$.

В оптичній моделі перерізи σ_{el} складаються з відповідних парціальних перерізів компаундного і потенціального розсіяння нейтронів: $\sigma_{el} = \sigma_{c0} + \sigma_{c1} + \sigma_{s0} + \sigma_{s1}$, які виражаються через матричні елементи η_l . У резонансній теорії середні перерізи також складаються з відповідних перерізів резонансного і потенціального розсіяння, які, в свою чергу, виражаються через середні резонансні параметри. У випадку вузьких резонансів ($\Gamma \ll D$) парціальні перерізи оптичної моделі збігаються з відповідними перерізами резонансної теорії [6]. Це дозволяє матричні елементи η_l виразити через резонансні параметри. Таким чином, якщо у рівняннях (1)–(3) величини σ_{el} , ω_1 , ω_2

виразити через середні резонансні параметри, то підгонкою розрахованих величин σ_{el} , ω_1 , ω_2 до їх експериментальних значень можна визначити середні резонансні параметри $S_0, S_1, R'_0, R'_1, S_{1,3/2}$, які є параметрами підгонки. Із співвідношення $S_1 = 1/3(S_{1,1/2} + 2S_{1,3/2})$ можна визначити параметр $S_{1,1/2}$. Для проведення розрахунків було використано відповідну програму підгонки по мінімуму χ^2 . Підгонку здійснювали одночасно до трьох величин: σ_{el} , ω_1 , ω_2 , а контроль по χ^2 можна було спостерігати для кожної величини окремо. Більш детально методику визначення середніх резонансних параметрів викладено в роботі [5].

3. Визначення резонансних параметрів та їх аналіз

Повні набори середніх резонансних параметрів $S_0, S_1, R'_0, R'_1, S_{1,3/2}$ ядер нікелю і цинку з природним складом ізотопів визначено із підгонки розрахованих величин σ_{el} , ω_1 , ω_2 до експериментальних, взятих із роботи [7] (на початку діапазону енергії було проведено додаткове усереднення даних). До цих же даних здійснювали усі згадані нижче підгонки та оцінки якості їх опису за допомогою резонансних параметрів інших авторів. Для перевірки надійності даних роботи [7] та для загальної оцінки стану експериментальних даних у досліджуваній області енергії нижче на рисунках також наведено наявні експериментальні дані інших авторів.

Для ізотопів нікелю і цинку рекомендовано параметри S_0, S_1, R'_0 [1], із яких нами було вираховано середньозважені величини для ядер із природним складом ізотопів і при їх фіксації з підгонки отримано решту параметрів із повного набору. Крім того, проведено розрахунки величин σ_{el} , ω_1 , ω_2 з наборами параметрів роботи [3], які отримано із тих же експериментальних даних роботи [7], але іншим методом. Якість опису експериментальних даних у всіх випадках оцінювали за величиною χ^2 та візуально на графіках.

^{28}Ni . На рис. 1 для ядер нікелю наведено енергетичні залежності експериментальних величин σ_{el} , ω_1 , ω_2 , отриманих у роботах [7–10]. Для покращання наочності рисунка енергетичної залежності σ_{el} першу і третю точки роботи [7] зменшено в 2 рази, другу – в 4 рази. Слід зауважити, що в досліджуваному діапазоні енергії у повних перерізах резонансна структура тільки починається [11], і в перерізах σ_{el} роботи [7] резонанси проявляються при енергіях ~ 15 кеВ та ~ 65 кеВ, що свідчить про їх недостатнє усереднення. Крім того, автори зазначають, що до енергії ~ 80 кеВ виміряні перерізи занижені внаслідок суттєвого

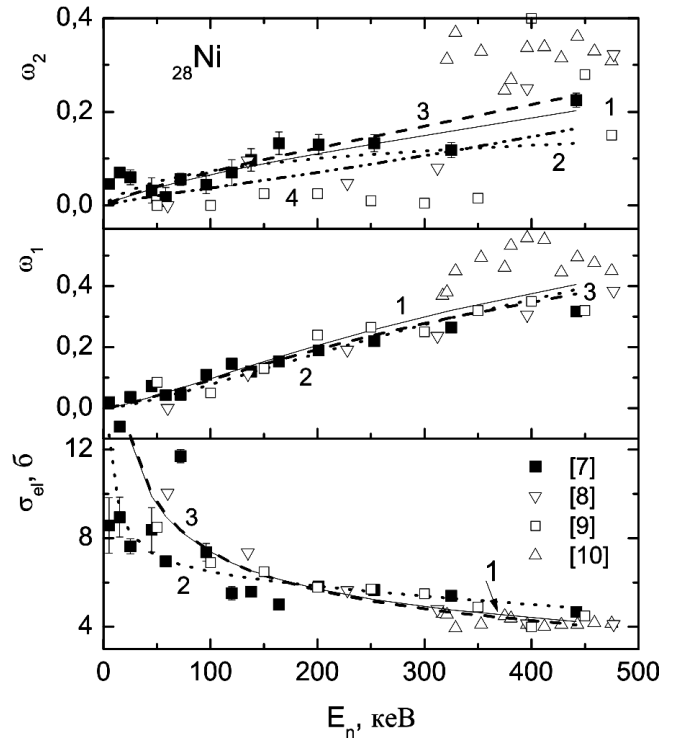


Рис. 1. Енергетична залежність величин σ_{el} , ω_1 , ω_2 для ядра ^{28}Ni . Значки – експериментальні дані, криві – результати розрахунків з різними наборами резонансних параметрів

резонансного самоекранування. Із рисунка видно, що між експериментальними даними різних авторів спостерігаються помітні розбіжності, особливо значні у величин ω_1 , ω_2 . За допомогою кривих на рисунку зображено результати розрахунків із різними наборами резонансних параметрів.

Кривими 2 наведено величини σ_{el} , ω_1 , ω_2 , розраховані з набором параметрів роботи [3]: $S_0 = 1,40(30)$; $S_1 = 2,49(52)$; $R'_0 = 5,90(49)$, $R'_1 = -0,11(50)$; $S_{1,3/2} = 1,44(23)$ (тут і далі параметри S_l і R'_l наведено в одиницях 10^{-4} та Фм відповідно; у дужках вказано похибки). Із рисунка видно, що із експериментальних даних задовільно описано лише ω_1 , у решти даних помітні значні розбіжності. Зокрема, розраховані перерізи на початку діапазону енергії менші за експериментальні, що можна пояснити малою величиною параметра S_0 .

Для нікелю рекомендовано середньозважені величини параметрів: $S_0 = 3,59$; $S_1 = 0,50$; $R'_0 = 6,49$ [1]. Із підгонки визначено решту параметрів: $R'_1 = 3,79$; $S_{1,3/2} = 1,52$. Розраховані з цим набором параметрів величини σ_{el} , ω_1 , ω_2 на рис. 1 наведено кривими 3. Видно, що опис експериментальних даних загалом задовільний і кращий, ніж першим набором. Проте із

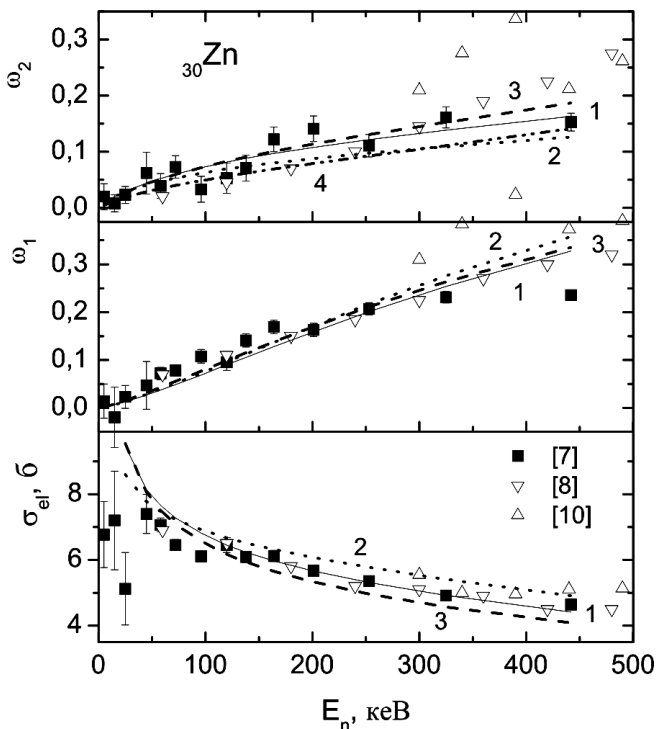


Рис. 2. Енергетична залежність величин σ_{el} , ω_1 , ω_2 для ядра ^{30}Ni

співвідношення $S_1 = (S_{1,1/2} + 2S_{1,3/2}) \cdot 1/3$ впливає, що $S_{1,1/2} = -1,54$. За формулою (3) опис величин ω_2 визначається в основному параметрами R'_1 і $S_{1,3/2}$. Внесок параметра R'_1 внаслідок його малої величини помітний лише при енергіях $\sim > 200$ кеВ. Практично параметр $S_{1,3/2}$ визначається із експериментальних ω_2 однозначно і з рис. 1 видно, що в даному випадку його величина оптимальна. Тому причиною нефізичного значення параметра $S_{1,1/2}$ є мала величина параметра S_1 . Щоб переконатись у цьому, було проведено додаткові розрахунки. За умови, що $S_{1,1/2} = 0$ і $S_{1,3/2} = 1,52$, величина S_1 не може бути меншою за 1,01. Якщо вважати, що $S_1 = 0,50$ і $S_{1,1/2} = 0$, то маємо $S_{1,3/2} = 0,75$. При фіксації параметрів $S_0 = 3,59$; $S_1 = 0,50$; $R'_1 = 6,49$ та $S_{1,3/2} = 0,75$ із підгонки було отримано $R'_1 = 4,03$. Розраховані величини ω_2 на рисунку наведено кривою 4 (величини σ_{el} і ω_1 близькі до кривих (3)). Видно, що вони не описують ні дані роботи [7], ні дані робіт [8,9], залежність від енергії яких має аномальний вигляд і взагалі не може бути описана резонансними параметрами. Таким чином, є підстави вважати рекомендовану величину параметра S_1 заниженою.

Недостатнє усереднення даних роботи [7] та заниження перерізів на початку діапазону енергії внаслідок

док резонансного самоекранування зумовили взаємну неузгодженість між собою величин σ_{el} , ω_1 , ω_2 , що при їх описі проявилось у значних величинах χ^2 , особливо у перерізів. За таких умов χ^2 являється ненадійним критерієм якості опису експериментальних даних і визначення з них резонансних параметрів шляхом автоматичної підгонки не може дати надійних результатів. Про це свідчать дані роботи [3], у яких величини параметрів S_0 і S_1 у кілька разів відрізняються від рекомендованих для цієї області A [1], а опис експериментальних даних досить сумнівний. Тому визначення резонансних параметрів нами здійснено шляхом поетапних розрахунків σ_{el} , ω_1 , ω_2 з поступовими змінами величини кожного із параметрів для досягнення оптимального опису експериментальних даних. Оцінку опису здійснювали як візуально на графіках, так і за величиною χ^2 . У результаті отримано такі параметри: $S_0 = 3,80$; $S_1 = 0,95$; $R'_0 = 6,25$; $R'_1 = 3,36$; $S_{1,3/2} = 1,40$. Розраховані величини σ_{el} , ω_1 , ω_2 на рисунку наведено кривими 1. За величиною χ^2 опис експерименту кращий, ніж із параметрами роботи [3]. Отримані параметри добре узгоджуються з їх залежностями від A , крім параметра S_1 , величина якого, однак, узгоджується з новими даними для сусідніх ядер [1, 2].

^{30}Zn . На рис. 2 наведено енергетичні залежності експериментальних величин σ_{el} , ω_1 , ω_2 , отриманих у роботах [7, 8, 10]. Для покращання наочності рисунка з перерізами σ_{el} друга і третя точки роботи [7] зменшені в 2 рази. Автори зазначають, що виміряні до ~ 50 кеВ перерізи є заниженими внаслідок резонансного самоекранування. Із рис. 2 видно, що в кінці діапазону енергії між величинами ω_1 , ω_2 , отриманими в різних роботах, спостерігаються помітні розбіжності. Криві на рис. 2 відображають результати розрахунків із різними наборами резонансних параметрів.

Криві 2 на рис. 2 відображають результати розрахунків із параметрами роботи [3]: $S_0 = 1,15(9)$; $S_1 = 1,42(22)$; $R'_0 = 6,73(12)$; $R'_1 = 0,75(35)$; $S_{1,3/2} = 1,23(15)$. З усіх даних задовільно описано лише ω_1 , у решті даних помітні розбіжності з експериментом.

Для ядер цинку рекомендовано середньозважені параметри: $S_0 = 2,00$ і $S_1 = 0,58$. Із підгонки було визначено решту параметрів: $R'_0 = 6,35$; $R'_1 = 2,11$; $S_{1,3/2} = 1,34$. Розраховані величини σ_{el} , ω_1 , ω_2 на рисунку наведено кривими 3. Як видно, перерізи σ_{el} при енергіях $> \sim 150$ кеВ помітно менші за експериментальні, а величини ω_1 і ω_2 описані задовільно. Але, як і у ядер нікелю, виникає питання про величину параметра S_1 . Із отриманого набору параметрів впливає, що $S_{1,1/2} = -0,94$. Якщо вважати, що $S_1 =$

Середні резонансні параметри ядер Ni і Zn

Ядро	$S_0 \cdot 10^4$	$S_1 \cdot 10^4$	R'_0 , Фм	R'_1 , Фм	$S_{1,1/2} \cdot 10^4$	$S_{1,3/2} \cdot 10^4$
^{28}Ni	3,80(35)	0,95(26)	6,25(26)	3,36(75)	0,05(1,0)	1,40(32)
^{30}Zn	1,80(25)	0,95(20)	6,50(25)	1,27(90)	0,05(0,9)	1,40(35)

0,58 і $S_{1,1/2} = 0$, то тоді $S_{1,3/2} = 0,87$ є максимально можливою величиною. При фіксації параметрів $S_0 = 2,00$; $S_1 = 0,58$ та $S_{1,3/2} = 0,87$ із підгонки було отримано решту параметрів: $R'_0 = 6,35$ і $R'_1 = 2,18$. Опис величин σ_{el} і ω_1 практично не змінився. Розраховані величини ω_2 на рис. 2 наведено кривою 4. Як бачимо, опис ω_2 помітно погіршився і візуально, і за величиною χ^2 . Це означає, що $S_{1,3/2} = 0,87$ дуже мало для задовільного опису величин ω_2 , з чого можна зробити висновок, що рекомендована величина параметра S_1 є заниженою.

Визначення нового набору резонансних параметрів було здійснено в такий же спосіб, як і для ядер нікелю. У результаті було отримано такі параметри: $S_0 = 1,80$; $S_1 = 0,95$; $R'_0 = 6,50$; $R'_1 = 1,27$; $S_{1,3/2} = 1,40$. На рисунку результати розрахунків наведено кривими 1. Як видно, опис експериментальних даних помітно поліпшився порівняно з попередніми наборами як візуально, так і за величиною χ^2 . Отримані параметри S_0 і R'_0 добре узгоджуються з їх залежностями від A [1], але параметр S_1 , як і у нікелю, майже у два рази більший. Отримані результати для обох ядер наведено у таблиці.

Таким чином, отримані нами для обох ядер величини параметра S_0 підтвердили рекомендовані і не підтвердили дані роботи [3]. Отримані параметри S_1 не підтвердили ні рекомендовані, ні дані роботи [3]. Підтверджено рекомендовану величину параметра R'_0 ядер нікелю. Із рекомендованих для ізотопів ^{64}Zn і ^{66}Zn (їх 77% у природній суміші) отримано середньозважену величину параметра $R'_0 = 5,58$, що значно менше рекомендованих для цієї області A [1]. При фіксації його та рекомендованих параметрів S_0 і S_1 із підгонки визначено решту параметрів $R'_1 = 2,41$ і $S_{1,3/2} = 1,31$. В отриманому наборі знову залишилась проблема з величиною параметра S_1 , та, крім того, він зовсім не описує експериментальні перерізи – розраховані перерізи значно менші за експериментальні. Параметри R'_1 і $S_{1,3/2}$ у трьох наборів загалом у межах похибок узгоджуються між собою.

4. Висновки

У даній роботі із аналізу експериментальних диференціальних перерізів пружного розсіяння нейтронів низьких енергій визначено нові повні набори сере-

дніх резонансних параметрів S_0 , S_1 , R'_0 , R'_1 , $S_{1,3/2}$ для ядер нікелю і цинку з природним складом ізотопів. Загалом резонансні параметри є характеристиками конкретних ядер і визначаються для ізотопів ядер. Однак дані для природної суміші ізотопів також є дуже важливими, зокрема, для уточнення залежностей параметрів від A та для вдосконалення теоретичних розрахунків за оптичною моделлю. У результаті проведеного аналізу встановлено, що рекомендовані для обох ядер резонансні параметри S_1 є заниженими приблизно у два рази. І, нарешті, у даній роботі було доведено, що наявні експериментальні дані можна описати краще без різких і необґрунтованих змін параметрів S_0 і S_1 , як це було зроблено в роботі [3].

1. S.F. Mughabghab, *Atlas of Neutron Resonances (Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. Z = 1–100)*, 5th edition (Elsevier, Amsterdam, 2006).
2. S.F. Mughabghab, M. Divadeenam, N.E. Holden, *Neutron Cross Sections* (New York, Academic Press, 1981), Vol. 1, Part A.
3. А.Б. Попов, Г. С. Самосват, Краткие сообщ. ОИЯИ, N 18-86 (Дубна, 1986), с. 30.
4. I.O. Korzh, M.M. Pravdivy, and M.T. Sklyar, in *Proceedings of the International Conference on Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-2006)*, May 29–June 03, Kyiv, Ukraine (Kyiv, 2007), Part 2, p. 599.
5. M.M. Pravdivy, I.O. Korzh, M.T. Sklyar, *Ukr. J. Phys.* **49**, 627 (2004).
6. А.А. Лукьянов, *Структура нейтронных сечений* (Атомиздат, М., 1978)
7. Зо Ин Ок, В.Г. Николенко, А.Б. Попов, Г.С. Самосват, Препр. ОИЯИ РЗ-85-133 (Дубна, 1985).
8. A. Langsdorf, R.O. Lane, and J.E. Monahan, *Phys. Rev.* **107**, 1077 (1957).
9. R.A. Zuhr and K. Min, *Nucl. Phys. A* **237**, 29 (1975).
10. A.B. Smith, in *Angular Distributions in Neutron-Induced Reactions*, compiled by D.I. Garber *et al.*, 3rd edition (BNL 400, 1970), Vol. 2, p. 28-0-26, 30-0-30.
11. V. McLane, C. Dunford, and P.F. Rose, *Neutron Cross Sections* (New York, Academic Press, 1988), Vol. 2.

Одержано 24.06.09

СРЕДНИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ЯДЕР Ni И Zn

Н.М. Правдивый, И.А. Корж, Н.Т. Скляр

Резюме

Получены полные наборы средних резонансных параметров S_0 , S_1 , R'_0 , R'_1 , $S_{1,3/2}$ для ядер никеля и цинка с естественным составом изотопов. Они определены из анализа средних экспериментальных дифференциальных сечений упругого рассеяния нейтронов низких энергий разработанным авторами методом. Проведен анализ полученных результатов, рекомендованных параметров и некоторых литературных данных, в результате которого сделан вывод, что рекомендованные для обоих ядер параметры S_1 занижены в два раза.

AVERAGE RESONANCE PARAMETERS OF Ni AND Zn
NUCLEI

M.M. Pravdivy

Institute for Nuclear Research, Nat. Acad. of Sci. of Ukraine
(47, Nauky Ave., Kyiv 03680, Ukraine;
e-mail: sklyar@kinr.kiev.ua)

Summary

The complete sets of average resonance parameters S_0 , S_1 , R'_0 , R'_1 , and $S_{1,3/2}$ for nickel and zinc nuclei with a natural isotope composition have been obtained. They were determined by analyzing the average experimental differential cross-sections of low-energy neutron elastic scattering with the help of a method developed by the authors. The analysis of obtained results, recommended parameters, and some literary data has been carried out. The conclusion has been made that the recommended values of the parameter S_1 are underestimated by a factor of two for both nuclei concerned.