

О. М. Горбаченко*, В. А. Плюйко, А. І. Кучер, В. М. Петренко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

*Відповідальний автор: gorbachenko@knu.ua

**ОПИС ФОТОПОГЛИНАННЯ ФОТОННИМИ СИЛОВИМИ ФУНКЦІЯМИ
ІЗ ЗБУДЖЕННЯМ ДВОХ РЕЗОНАНСНИХ СТАНІВ¹**

Представлено результати застосування фотонної силової функції (ФСФ) моделі двох зв'язаних осциляторів із затуханням (Two State Excitations, TSE) для опису даних з поглинання атомними ядрами дипольних γ -квантів електричного типу. На відміну від початкової моделі TSE було використано залежні від енергії ширини функції відгуку. Показано, що такий феноменологічний підхід є простим методом опису та передбачення ФСФ із збудженням станів низькоенергетичного (пігмі) дипольного резонансу (ПДР) та високоенергетичного гігантського дипольного резонансу (ГДР). Найкращий опис експериментальних даних для перерізів фотопоглинання при сталій ширині ПДР було досягнуто, коли ширина функції відгуку в області ГДР залежала від енергії γ -квантів або лінійно або квадратично і враховувався зв'язок між станами.

Ключові слова: дипольні переходи електричного типу, фотонна силова функція, гігантський дипольний резонанс, пігмі дипольний резонанс, перерізи фотопоглинання, ширини ГДР та ПДР.

1. Вступ

Електромагнітні переходи в атомних ядрах є одним з найбільш універсальних явищ, які супроводжують будь-яку ядерну реакцію. Усереднені ймовірності процесів фотопоглинання та γ -розпаду можна описати за допомогою фотонних силових функцій (ФСФ) [1 - 6]. Такі функції використовуються як для дослідження фундаментальних властивостей атомних ядер (деформацій, характеристик гігантських дипольних резонансів (ГДР), внеску компоненту сил, які залежать від швидкості тощо), так і в прикладних застосуваннях (наприклад, ядерна енергетика, медична фізика, астрофізика, врахування систематичних похибок вимірювань нейтронних спектрів [7, 8]). Дипольні електричні (Е1) γ -переходи є домінуючими, коли вони відбуваються одночасно з переходами іншої мультипольності.

Ізовекторний ГДР сильно проявляється в γ -переходах Е1 у процесах фотопоглинання та γ -розпаду атомних ядер [1 - 3]. Це дає можливість отримати значення параметрів ГДР з досліджень γ -переходів Е1 типу. Експериментальну базу даних оновлених значень параметрів ГДР з оцінками їхніх невизначеностей представлено в [3], що особливо важливо для кодів ядерних реакцій для надійного моделювання спостережуваних характеристик ядерних реакцій, а також для перевірки різних теоретичних підходів, що використовуються для опису ГДР.

В області, близькій до енергії відділення нейтрона, приблизно 1 - 2 % енергетично зваженого правила сум становить внесок від пігмі дипольного резонансу (ПДР), який наразі досліджений значно гірше, ніж ГДР. Вивчення характеристик ПДР є актуальною науковою задачею, зокрема, врахування ПДР у розрахунках швидкості поглинання нейтронів у r -процесі важливо для аналізу розповсюдженості елементів і суттєво покращує узгодження теоретичних розрахунків з експериментальними значеннями розповсюдженості елементів у Всесвіті [9].

Для Е1 ФСФ, зазвичай, використовувався вираз із двома незалежними Лоренціанами, які пов'язані із відгуком двох незалежних мод коливань – ПДР та ГДР на зовнішнє Е1 поле. Проте різні мікроскопічні та макроскопічні підходи вказують на можливість існування зв'язку між цими модами та впливу однієї моди коливань на іншу.

У даній роботі представлено та проаналізовано результати усередненого опису електричних дипольних (Е1) γ -переходів за допомогою ФСФ [1 - 6] з використанням аналітичного виразу ФСФ для Е1 γ -переходів у областях ГДР та ПДР, а саме використовується функція відгуку двох зв'язаних резонансних станів [10 - 12] з різними залежностями ширин дисипації станів від енергії.

© О. М. Горбаченко, В. А. Плюйко, А. І. Кучер, В. М. Петренко, 2023

¹ Доповідь на XXIX Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 26 - 30 вересня 2022 р.

2. ФСФ, обумовлені відгуком двох зв'язаних резонансів

ФСФ фотопоглинання $\vec{f}_{x\lambda}(E_\gamma)$ визначає середній переріз фотопоглинання $\langle \sigma_{x\lambda}(E_\gamma) \rangle$, а ФСФ γ -розпаду $\vec{f}_{x\lambda}(E_\gamma)$ дає змогу обчислити ширину $\langle \Gamma_{if}^{x\lambda}(E_\gamma) \rangle$ γ -переходів із мультипольністю λ , усереднену за великою кількістю початкових рівнів i :

$$\langle \sigma_{x\lambda}(E_\gamma) \rangle = (2\lambda + 1) \frac{(\pi\hbar c)^2}{E_\gamma^{-2\lambda+1}} \vec{f}_{x\lambda}(E_\gamma), \quad (1)$$

де E_γ - енергія γ -квантів; ρ_i , ρ_f - густини початкових та кінцевих станів нуклонів в ядрі відповідно.

ФСФ пропорційні уявній частині функції відгуку ядра $\chi(E_\gamma)$ на електромагнітне поле із частотою $\omega = E_\gamma / \hbar$, наприклад, ФСФ, яка визначає переріз поглинання γ -дипольного випромінювання електричного типу $\sigma_\gamma(E_\gamma) \equiv \langle \sigma_{E1}(E_\gamma) \rangle$, визначається співвідношенням:

$$\vec{f}_{E1}(E_\gamma) = -\text{Im}\chi(E_\gamma) \cdot 8,674 \cdot 10^{-8} / \pi.$$

Спрощені аналітичні вирази для Е1 ФСФ фотопоглинання, які обумовлені відгуком ГДР [1 - 6], зазвичай, мають вигляд декількох незалежних компонент типу функцій Лоренца, а іноді таким чином враховують і відгук низько-

розташованого колективного стану ПДР [10 - 12]. Загалом моделі відрізняються виразами для ширин ФСФ та характеристиками колективних станів.

Розроблювана нами модель TSE [10 - 12] для опису ФСФ Е1 γ -переходів у областях ГДР та ПДР базується на використанні функції відгуку системи двох зв'язаних осциляторів із затуханням на дію вимушуючої сили $E \sim \exp(i\omega t)$, що створюється зовнішнім електричним полем з частотою, що відповідає частоті коливань γ -випромінювання $\omega = E_\gamma / \hbar$:

$$\begin{cases} \ddot{y}_p + \omega_p^2 y_p + \Gamma_p \dot{y}_p + \gamma(\dot{y}_p - \dot{y}_g) = z_p E, \\ \ddot{y}_g + \omega_g^2 y_g + \Gamma_g \dot{y}_g - \gamma(\dot{y}_p - \dot{y}_g) = z_g E. \end{cases} \quad (2)$$

Тут $\omega_m = E_m / \hbar$, а E_m , z_m - енергія та внесок колективного стану типу m або $p = \text{ГДР}$, $g = \text{ПДР}$; Γ_m - ширина відгуку стану типу m . Тут вважається, що два стани зв'язані дисипацією енергії, яка подібна до сил тертя, а γ - параметр (ширина) зв'язку між станами (в одиницях $1/\hbar$).

Вираз для функції відгуку визначається формулою $\chi(\hbar\omega = E_\gamma) \equiv y_{g1}/E + y_p/E$, де y_m розв'язки виду $y_m \sim \exp(i\omega t)$. Вираз для функції відгуку двох зв'язаних осциляторів із сталими ширинами затухання був отриманий у роботі Баркера та Хопфілда [13]. Після заміни відповідних позначень він має вигляд суми двох компонентів:

$$\chi(E_\gamma) = P_{\text{ГДР}}(E_\gamma; \text{ПДР}) + P_{\text{ПДР}}(E_\gamma; \text{ГДР}) \quad 3$$

$$P_m(E_\gamma; l) = \frac{z_m + \frac{i \cdot z_l \cdot E_\gamma \gamma}{E_l^2 - E_\gamma^2 + iE_\gamma(\Gamma_l + \gamma)}}{E_m^2 - E_\gamma^2 + iE_\gamma(\Gamma_m + \gamma) + \frac{\gamma^2 E_\gamma^2}{E_l^2 - E_\gamma^2 + iE_\gamma(\Gamma_l + \gamma)}}. \quad (3)$$

Вираз TSE з нульовим значенням сили зв'язку станів ($\gamma = 0$) відповідає відгуку незалежних мод ПДР та ГДР і є сумою двох незалежних Лоренціанів.

Далі наведено результати розрахунків ФСФ за моделлю TSE у порівнянні з експериментальними даними та розрахунками методом спрощеного модифікованого Лоренціану (Simply (Simplified) Modify Lorentzian Model) [4].

У даній роботі для моделі TSE ми використали як функції відгуку (3) із сталими ширинами $\Gamma(E_\gamma) = \Gamma_{m,c} = \text{const}$, так і їхні феноменологічні розширення - залежні від енергії ширини, а саме

вирази з лінійною $\Gamma_m(E_\gamma) = \Gamma_{m,S} \cdot E_\gamma / E_m$ та квадратичною $\Gamma_m(E_\gamma) = \Gamma_{m,E} \cdot E_\gamma^2 / E_m^2$ (аналог виразу Ландау для ширини за рахунок зіткнень у моделі Фермі рідини) залежностями від енергії.

На рис. 1 представлено порівняння теоретичних розрахунків перерізів фотопоглинання з експериментальними даними [14] для ізотопів олова ^{130,132}Sn. Характеристики $E_m, \Gamma_m, z_m, \gamma$ визначалися з підгонки експериментальних даних з використанням критерію мінімуму значення найменших квадратів χ^2 для кожного з ізотопів:

$$\chi^2 = \frac{1}{N_{point} - N_{par}} \sum_{i=1}^{N_{point}} \left(\frac{\sigma_{thr}(E_{\gamma,i}) - \sigma_{exp,i}}{\Delta\sigma_{exp,i}} \right)^2,$$

де N_{par} – кількість параметрів при підгонці моделі TSE, N_{point} – кількість експериментальних значень перерізів σ_{exp} .

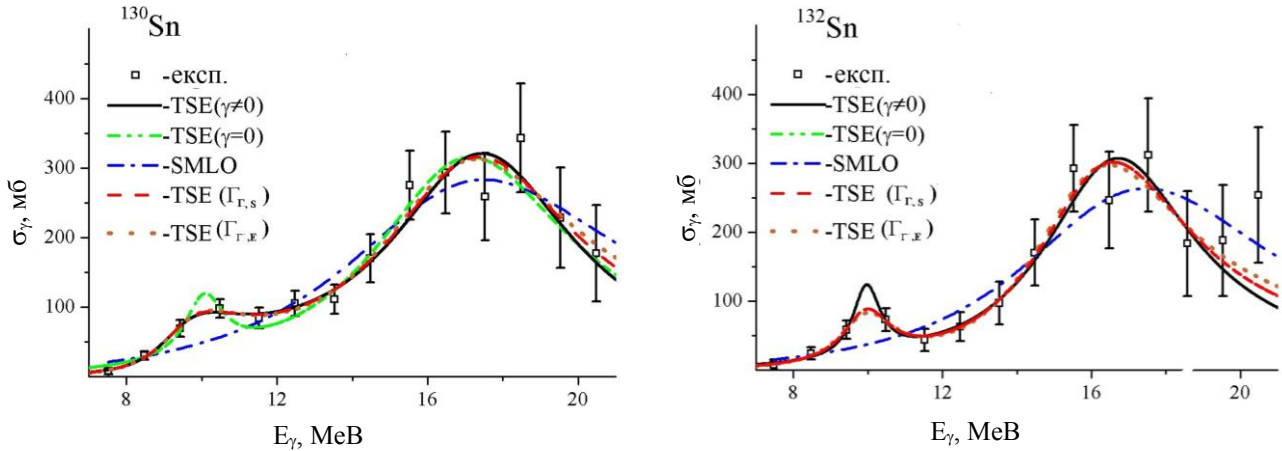


Рис. 1. Залежність перерізів фотопоглинання від енергії γ -квантів для ізоотопів $^{130,132}\text{Sn}$. Експериментальні дані взято з [14]. Ширина ПДР $\Gamma_{\Pi} = \Gamma_{\Pi,C}$, а значення характеристик станів для ядер $^{130,132}\text{Sn}$ представлено в табл. 1. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

З рис. 1 видно, що врахування зв'язку між низько- та високоенергетичними станами в моделі TSE призводить до кращого опису експериментальних даних порівняно з моделлю TSE без зв'язку і мінімальним значенням χ^2 відповідає опис із енергетичнозалежними ширинами відгуку ГДР.

Згідно з даними в табл. 1 параметр зв'язку γ між ПДР та ГДР у ядрі ^{130}Sn має більше значення, ніж у ^{132}Sn . Зараз ми не можемо дати однозначної відповіді на причини такої поведінки. Можливо, це обумовлено оболонковим ефектом, оскільки

ядро ^{132}Sn є двічі магічним $Z = 50, N = 82$, а можливо це ефект розрахунків, зв'язаний з похибками в експериментальних даних.

Порівняння середніх за ізотопами значень середньоквадратичних відхилень $\langle \chi^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{Z,A} \chi^2$

теоретичних розрахунків ФСФ за моделлю TSE від експериментальних даних для N наборів ядер з робіт [14 - 17] представлено в табл. 2. Обчислення були виконані з $\gamma = 0, \neq 0$, сталими ширинами ПДР та ширинами ГДР з різною залежністю від енергії: $\Gamma_{\Gamma,C}, \Gamma_{\Pi,C}, \Gamma_{\Gamma,S}, \Gamma_{\Pi,C}, \Gamma_{\Gamma,E}, \Gamma_{\Pi,C}$.

Таблиця 1. Характеристики ГДР та ПДР, отримані для ядер $^{130}\text{Sn}, ^{132}\text{Sn}$ з підгонки за моделлю TSE з та без врахування зв'язку між станами

Ядро	Модель	E_{Γ} , MeV	$\Gamma_{\Gamma,\alpha}$, MeV	E_{Π} , MeV	$\Gamma_{\Pi,\alpha}$, MeV	γ , MeV	χ^2
^{130}Sn	$\gamma = 0, \Gamma_{\Gamma,C}, \Gamma_{\Pi,C}$	17,2(5)	6,5(16)	10,1(2)	1,3(12)	0	1,02
	$\gamma \neq 0, \Gamma_{\Gamma,C}, \Gamma_{\Pi,C}$	17,8(5)	4,4(21)	9,4(4)	1,1(5)	1,5(10)	0,54
	$\gamma \neq 0, \Gamma_{\Gamma,S}, \Gamma_{\Pi,C}$	17,9(5)	5,6(26)	9,6(3)	1,5(5)	1,2(9)	0,46
	$\gamma \neq 0, \Gamma_{\Gamma,E}, \Gamma_{\Pi,C}$	18,2(7)	7,1(41)	9,7(3)	1,7(5)	1,1(9)	0,42
	Літ. [14]	15,9(5)	4,8(17)	10,1(7)	<3,4	–	–
^{132}Sn	$\gamma = 0, \Gamma_{\Gamma,C}, \Gamma_{\Pi,C}$	16,7(2)	5,0(7)	10,0(1)	0,9(9)	0	0,30
	$\gamma \neq 0, \Gamma_{\Gamma,C}, \Gamma_{\Pi,C}$	16,7(3)	5,0(10)	10,0(1)	0,9(11)	0,0(3)	0,34
	$\gamma \neq 0, \Gamma_{\Gamma,S}, \Gamma_{\Pi,C}$	16,8(3)	5,5(12)	10,0(2)	1,5(6)	0,0(3)	0,27
	$\gamma \neq 0, \Gamma_{\Gamma,E}, \Gamma_{\Pi,C}$	17,0(4)	6,4(17)	10,0(2)	1,8(5)	0,0(3)	0,23
	Літ. [14]	16,1(7)	4,7(21)	9,8(7)	<2,5	–	–

Таблиця 2. Середні значення $\langle \chi_x^2 \rangle$ відхилення теоретичних розрахунків від експериментальних даних для наборів ядер з [14 - 17]

Дані	N	TSE			
		$\gamma=0, \Gamma_{Г,С}, \Gamma_{П,С}$	$\gamma \neq 0, \Gamma_{Г,С}, \Gamma_{П,С}$	$\gamma \neq 0, \Gamma_{Г,С}, \Gamma_{П,С}$	$\gamma \neq 0, \Gamma_{Г,Е}, \Gamma_{П,С}$
[14]	2	0,66	0,44	0,37	0,33
[15, 16]	12	9,87	19,26	7,94	6,29
[17]	20	10,63	9,88	8,17	8,68

Вплив параметра γ на перерізи фотопоглинання представлено на рис. 2 і 3.

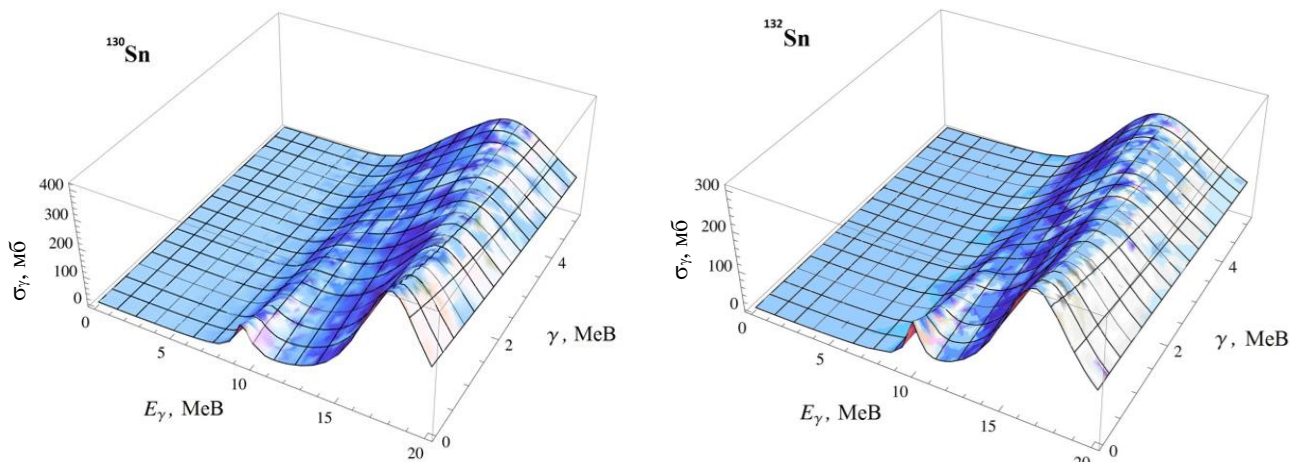


Рис. 2. Залежність перерізу фотопоглинання від енергії E_γ та параметра зв'язку γ між станами для ізоотопів $^{130,132}\text{Sn}$; ширини резонансів бралися сталими. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

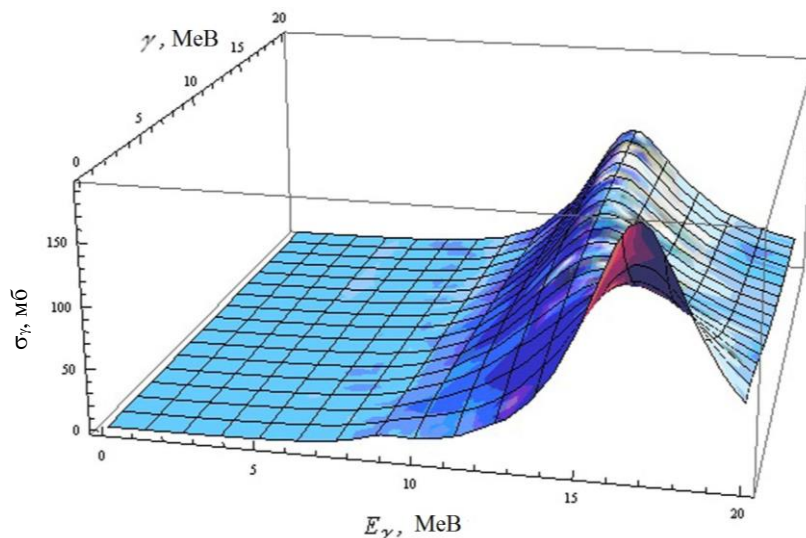


Рис. 3. Залежність розрахованого перерізу фотопоглинання від енергії E_γ та параметра зв'язку γ для ізоотопу ^{89}Y [15, 16]. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Видно, що врахування зв'язку γ призводить до перерозподілу інтенсивності перерізів і при збільшенні значення γ піки уширюються та можуть мати вигляд одного широкого резонансу.

3. Висновки

Запропонована феноменологічна модифікація методу TSE з використанням залежних від енергії ширин функції відгуку є простим практичним підходом для опису та передбачення ФСФ із збудженням низькоенергетичного та високоенер-

гетичного станів. Використання моделі TSE дає змогу більш точно визначити характеристики колективних станів та дає можливість дослідити зв'язок між ними. Врахування зв'язку між ГДР та ПДР призводить до кращого опису експериментальних даних і при збільшенні сталої зв'язку резонансні піки розмиваються та перекриваються. При сталій ширині ПДР найкращий опис експериментальних даних було досягнуто, коли ширина ГДР залежить від енергії лінійно або квадратично.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. R. Capote et al. RIPL – Reference Input Parameter Library for Calculation of Nuclear Reactions and Nuclear Data Evaluations. *Nucl. Data Sheets* 110 (2009) 3107.
2. B.L. Berman, S.C. Fultz. Measurements of the giant dipole resonance with monoenergetic photons. *Rev. Mod. Phys.* 47 (1975) 713.
3. V.A. Plujko et al. Giant dipole resonance parameters of ground-state photoabsorption: Experimental values with uncertainties. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 123-124 (2018) 1.
4. S. Goriely, V. Plujko. Simple empirical E1 and M1 strength functions for practical applications. *Phys. Rev. C* 99 (2019) 014303.
5. S. Goriely et al. Reference database for photon strength functions. *European Physical Journal A* 55(10) (2019) 172.
6. T. Kawano et al. IAEA Photonuclear Data Library 2019. *Nuclear Data Sheets* 163 (2020) 109.
7. B.M. Bondar et al. Gamma-ray spectrum from Cd induced by fast neutrons in indoor experiments. *Nucl. Phys. A* 1010 (2021) 122192.
8. V.A. Plujko et al. Reconstruction of high-energy part of the gamma-ray spectrum in thermal neutron capture by ^{113}Cd . *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 22 (2021) 221.
9. S. Goriely. Radiative neutron captures by neutron-rich nuclei and the r-process nucleosynthesis. *Phys. Lett. B* 436 (1998) 10.
10. V. Plujko et al. Improvements and testing practical expressions for photon strength functions of E1 gamma-transitions. *EPJ Web of Conf.* 146 (2017) 05014.
11. В.А. Плюйко та ін. Опис фотонних силових функцій при збудженні двох резонансних станів. У кн.: XXVIII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. Анотації до доповідей, Київ, 27 вересня - 1 жовтня 2021 року. (К.: Ін-т ядерних дослідж., 2022) с. 52 / V.A. Plujko et al. Description of photon strength functions at excitation of two resonance states. In: XXVIII Annual Scientific Conference of the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine. Abstracts of reports, Kyiv, Sept. 27 - Oct. 1, 2021. (Kyiv: Institute for Nuclear Research, 2022) p. 52.
12. В.А. Плюйко та ін. Опис процесу фотопоглинання атомними ядрами з використанням фотонних силових функцій та визначення характеристик ядерних колективних станів. У кн.: Міжнародна конференція «Ужгородська школа з атомної фізики та квантової електроніки до 100-річчя від дня народження професора Івана Прохоровича Записочного». Зб. матер. конф., Ужгород, 26 - 27 травня 2022 року (Ужгород, 2022) с. 140 / V.A. Plujko et al. Description of nuclear photoabsorption by photon strength functions and determination of characteristics of nuclear collective states. In: Uzhhorod School of Atomic Physics and Quantum Electronics to the 100th anniversary of the birth of Professor Ivan Zapisochny. Proc. of the Int. Conf., Uzhgorod, May 26 - 27, 2022 (Uzhgorod, 2022) p. 140.
13. A.S. Barker, Jr, J.J. Hopfield. Coupled-Optical-Phonon-Mode Theory of the Infrared Dispersion in BaTiO_3 , SrTiO_3 , and KTaO_3 . *Phys. Rev. A* 135 (1964) 1732.
14. P. Adrich et al. Evidence for Pygmy and Giant Dipole Resonances in ^{130}Sn and ^{132}Sn . *Phys. Rev. Lett.* 95 (2005) 132501.
15. A. Makinaga et al. Dipole strength in ^{139}La below the neutron-separation energy. *Phys. Rev. C* 82 (2010) 024314.
16. R. Schwengner et al. Pygmy dipole strength in ^{90}Zr . *Phys. Rev. C* 78 (2008) 064314.
17. H. Utsunomiya et al. γ -ray strength function method and its application to ^{107}Pd . *Phys. Rev. C* 82 (2010) 064610.

O. M. Gorbachenko*, V. A. Plujko, A. I. Kucher, V. M. Petrenko

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: gorbachenko@knu.ua

DESCRIPTION OF PHOTOABSORPTION USING PHOTON STRENGTH FUNCTION WITH THE EXCITATION OF TWO RESONANCE STATES

The results of the use of photon strength function (PSF) of the model of two coupled damped oscillators (Two State Excitations, TSE) for the description of nuclear data for photoabsorption of electric dipole gamma-rays by atomic nuclei are presented. The response function widths dependent on gamma-ray energy were used instead of constant widths in the initial TSE model. It was demonstrated that such a phenomenological approach is a simple method for the description and prediction of the PSF with excitation of both low-energy (pygmy) dipole resonance (PDR) and high-energy giant dipole resonance (GDR). The best description of the experimental photoabsorption cross-sections is obtained at constant width in the PDR range and linear or quadratic energy-dependent width in the GDR range.

Keywords: dipole electric transitions, photon strength function, giant dipole resonance, pygmy dipole resonance, photoabsorption cross-section, widths of GDR and PDR.

Надійшла/Received 17.11.2022