

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

**СОЛОДОВНИК Катерина Миколаївна**



**УДК 539.17**

**ФОТОННІ СИЛОВІ ФУНКЦІЇ  
ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ УСЕРЕДНЕНОГО ОПИСУ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХОДІВ В АТОМНИХ ЯДРАХ**

01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

**Київ – 2020**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі ядерної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка та у відділі структури ядра Інституту ядерних досліджень НАН України

**Науковий керівник:**

доктор фізико-математичних наук, професор  
**ПЛЮЙКО Володимир Андрійович**,  
професор кафедри ядерної фізики  
Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка

**Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**АБРОСИМОВ Валерій Іванович**,  
провідний науковий співробітник  
відділу теорії ядра  
Інституту ядерних досліджень НАН України

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**НЕСТЕРОВ Олександр Володимирович**,  
старший науковий співробітник  
лабораторії структури атомних ядер  
відділу теорії ядра і квантової теорії поля  
Інституту теоретичної фізики імені  
М.М. Боголюбова НАН України

Захист відбудеться 17 вересня 2020 року о 14<sup>45</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.167.01 Інституту ядерних досліджень НАН України за адресою: 03028, м. Київ, проспект Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту ядерних досліджень НАН України, 03028, м. Київ, проспект Науки, 47.

Автореферат розісланий «11» серпня 2020 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат фізико-математичних наук



Хоменков В.П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Усереднені ймовірності електромагнітних переходів є однією з фундаментальних характеристик атомних ядер, які, зокрема, дають змогу визначити характеристики їх високозбуджених станів, параметрів деформації атомних ядер тощо. Такі ймовірності переходів можна описати за допомогою фотонних силових функції (ФСФ).

Однією із важливих областей практичного застосування ФСФ є розрахунки спостережуваних характеристик ядерних реакцій, зокрема перерізів фотопоглинання в області ізовекторного гігантського дипольного резонансу (ГДР).

В останні роки суттєво зросла потреба у надійних даних по ФСФ, що пов'язано із інтенсивним розширенням області їх практичних застосувань. В астрофізиці вони застосовуються для аналізу розповсюдженості елементів у Всесвіті, у медичній фізиці - для розрахунку поглинутої пацієнтом дози при радіотерапії, в атомній енергетиці - для аналізу радіаційних полів та розрахунків радіаційної стійкості матеріалів.

Фотонні силові функції та характеристики ГДР використовуються в якості вхідних параметрів для розрахунку ядерних реакцій. Вони, наприклад, є складовою частиною бібліотеки МАГАТЕ Reference Input Parameter Library (*P. Oblozinsky et al., 1998; T. Belgya et al., 2006; R. Capote et al., 2009*). Бази експериментальних ФСФ (*P. Dimitriou et al., 2018*) та прості аналітичні вирази, що засновані на сучасних теоретичних уявленнях, використовуються у ядерно-фізичних комп'ютерних кодах для перевірки та удосконалення обчислення гамма-переходів та моделювання ядерних реакцій. Тому необхідним є перевірка та уточнення виразів для ФСФ та побудова уточнених баз даних ФСФ та ГДР у зв'язку із появою нових експериментальних даних.

Мікроскопічно обґрунтовані спрощені моделі ФСФ використовуються у комп'ютерних кодах для прискорення довготривалих розрахунків, у зв'язку з чим важливою задачею є знаходження найкращої моделі опису ФСФ та її параметрів для застосування у кодах, а також знаходження систематик параметрів для розрахунку ФСФ для випадків, коли експериментальні дані відсутні.

Процеси ядерного поділу вивчаються тривалий час, проте до сьогодні існують невирішені питання стосовно його динаміки. Визначення кутових моментів та ізомерних відношень виходів фрагментів поділу дозволяють досліджувати зміну властивостей ядер при переході від сідлової точки до точки розриву. В роботі перевірявся можливий вплив використання різних моделей ФСФ на точність визначення кутових моментів з ізомерних відношень, які в даному дослідженні були отримані експериментально.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження представленої дисертаційної роботи проводились в рамках кількох держбюджетних тем, що виконувалися на кафедрі ядерної фізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка та міжнародних науково-дослідницьких проектів з МАГАТЕ (м. Відень, Австрія),

співвиконавцем яких був здобувач: 1) Бюджетна тема №19БФ051-09 “Дослідження фундаментальних проблем фізики нейтрино, космофізики та фізики ядра” (ДР № 0119U100311), 2019-2021 рр.; 2) Бюджетна тема №16БФ051-05 “Дослідження фундаментальних проблем фізики ядра, елементарних частинок та космофізики” (ДР № 0116U002562), 2016-2018 рр.; 3) Бюджетна тема №11БФ051-01 “Фундаментальні дослідження в галузі фізики конденсованого стану і елементарних частинок, астрономії і матеріалознавства для створення основ новітніх технологій” підрозділ 5: “Модернізація експериментальної установки для генерування та формування спектрів нейтронів та комплексні дослідження властивостей частинок, атомних ядер для фундаментальних і прикладних застосувань” (ДР № 0111U004954), 2011-2015 рр.; 4) Науково-дослідницький проект МАГАТЕ (Відень, Австрія) “Updating the Photonuclear Data Library and generating a Reference Database for Photon Strength Functions ” (IAEA CRP No.F41032, 2016-2019 рр.).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є знаходження спрощеного мікроскопічно обґрунтованого виразу для електричних дипольних фотонних силових функцій для усередненого опису E1 гамма-переходів в процесах фотопоглинання та гамма-розпаду. Досягнення поставленої мети передбачало вирішення таких завдань:

- 1) провести аналіз і тестування аналітичних моделей E1 ФСФ та визначити найкращу модель опису експериментальних даних з фотопоглинання і гамма-розпаду на основі математичних критеріїв;
- 2) визначити найбільш надійні експериментальні дані для перерізів фотопоглинання з використанням бази EXFOR;
- 3) знайти уточненні характеристики ГДР та їх невизначеності;
- 4) протестувати та, у разі необхідності, розширити моделі ФСФ для опису даних фотопоглинання на область вище 30 MeV;
- 5) розрахувати ізомерні відношення виходів та середні кутові моменти уламків фотоподілу  $^{238}\text{U}$  та  $^{235}\text{U}$ , перевірити чутливість їх значень до ФСФ та густин ядерних рівнів.

**Об’єкт дослідження:** гамма-переходи у атомних ядрах та їх усереднені ймовірності.

**Предмет дослідження:** E1 переходи в процесах фотопоглинання та гамма-розпаду, ізомерні відношення виходів ядер при фотоподілі.

**Методи дослідження.** Для реалізації мети дисертаційної роботи та вирішення поставлених задач було застосовано комп’ютерні обчислення із використанням мови програмування FORTRAN та метод найменших квадратів при описі фотоядерних даних різними моделями ФСФ; для проведення вимірювань ізомерних відношень використовувалась активаційна методика; обробка гамма-спектрів проводилась із використанням програмного коду WINSPECTRUM, обрахунок ізомерних відношень проводився із використанням коду IZOMER, теоретичні розрахунки середніх кутових моментів первинних фрагментів фотоподілу, а також теоретичні розрахунки парціальних перерізів фотопоглинання виконано із застосуванням програмних кодів EMPIRE 3.2 та TALYS 1.6 (M. Herman et al., 2007; A.J. Koning et al., 2008).

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у знаходженні спрощеного мікроскопічно обґрунтованого виразу для Е1 фотонних силових функцій для усередненого опису Е1 електромагнітних переходів в процесах фотопоглинання та гамма-розпаду.

**Вперше:**

- підготовлено базу експериментальних Е1 ФСФ фотопоглинання із систематичною похибкою менше 10 %;
- запропоновано простий метод наближеного узгодження моделей ФСФ з енергетично залежними ширинами з енергетично зваженим правилом сум;
- побудовані нові систематики характеристик ГДР з використанням уточнених значень та похибок характеристик ГДР (енергії, ширини, сили) для 144 ізотопів від  ${}^6\text{Li}$  до  ${}^{239}\text{Pu}$ , що були визначені з експериментальних даних;
- запропоновано розширену модель модифікованого Лоренціану (SMLOe) для розширення опису перерізів фотопоглинання на область енергій гамма-квантів вище 30 MeV та показано, що така модель SMLOe може використовуватися без перевизначення параметрів ГДР;
- проведено порівняння якості опису даних фотопоглинання та гамма-розпаду із використанням різних аналітичних моделей ФСФ та показано, що моделі на основі методу модифікованого Лоренціану MLO (спрощена модель модифікованого Лоренціану SMLO та розширена модель модифікованого Лоренціану SMLOe) є найточнішими для опису експериментальних даних як фотопоглинання, так і гамма-розпаду за допомогою точних математичних критеріїв (методи найменших квадратів та мінімуму фактору логарифмічного відхилення);
- отримані ізомерні відношення виходів фрагментів  ${}^{95}\text{Nb}$  (при граничній енергії 12.5 MeV),  ${}^{97}\text{Nb}$  (при граничних енергіях 12.0 та 18.0 MeV),  ${}^{133}\text{Xe}$  (при граничній енергії 12.5 MeV) і  ${}^{135}\text{Xe}$  (при граничній енергії 12.0 MeV) після обробки експериментальних даних в реакціях фотоподілу ядер  ${}^{235}\text{U}$  та  ${}^{238}\text{U}$  гальмівними гамма-квантами;
- користуючись отриманими значеннями ізомерних відношень, обчислені розподіли станів первинних ядер-фрагментів за кутовими моментами та визначені середні кутові моменти уламків фотоподілу  ${}^{235}\text{U}$  та  ${}^{238}\text{U}$ , а також перевірена чутливість їх значень до ФСФ та густин ядерних рівнів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати даної роботи можуть бути використані для усередненого опису процесів  $\gamma$ -розпаду та фотопоглинання атомних ядер в області енергії ГДР та для області вище за 30 MeV. Отримані уточнені значення характеристик ГДР та їх похибки також можна використовувати для аналізу надійності теоретичних моделей опису гігантських резонансів. Побудована база для ФСФ фотопоглинання. Визначена найкраща аналітична модель ФСФ, яка може бути рекомендована до використання у сучасних кодах для розрахунку спостережуваних характеристик

ядерних реакцій та для передбачення значень ФСФ у ядрах, для яких експериментальні дані відсутні.

**Особистий внесок здобувача.** Постановка задачі дисертаційної роботи належить науковому керівнику доктору фізико-математичних наук, професору Плюйку Володимиру Андрійовичу. Основні положення та результати дисертаційної роботи автором було отримано самостійно. Робота містить теоретичні та методичні положення і висновки, сформульовані особисто дисертантом. Використані в дисертації ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають відповідні посилання.

Здобувач безпосередньо: проводила збір та аналіз існуючих даних за перерізами фотопоглинання; підготувала базу даних E1 ФСФ із систематичною похибкою менше 10%; проводила тестування та перевірку програмних кодів для розрахунку систематичної похибки при обчисленні ФСФ фотопоглинання із застосуванням коду TALYS. Здобувачем написано програмний код на мові FORTRAN для отримання експериментальних даних перерізів фотопоглинання з бази даних EXFOR МАГАТЕ та їх порівняння з описом різноманітними теоретичними виразами з використанням математичних критеріїв якості опису.

Здобувач брала участь у розробці розширеної моделі модифікованого Лоренціану для опису електричних дипольних ФСФ. Автор дисертації проводила аналіз та підготувала файли даних з отриманими значеннями характеристик ГДР та їх похибок, які були передані до секції ядерних даних МАГАТЕ. Дисертант брала участь у експериментальних вимірюваннях апаратурних гамма-спектрів для розрахунку ізомерних відношень і виконувала обробку гамма-спектрів та розраховувала значення ізомерних відношень виходів ядер  $^{95}\text{Nb}$  та  $^{97}\text{Nb}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  та  $^{135}\text{Xe}$ , проводила аналіз середніх кутових моментів уламків поділу. Здобувач працювала над підготовкою та оформленням усіх отриманих результатів та брала участь у підготовці рукописів наукових статей.

**Апробація результатів дисертації.** Результати даної дисертаційної роботи були представлені автором або співавторами на 13 конференціях:

- чотири щорічні наукові конференції Інституту ядерних досліджень НАН України: XXIII (1-5 лютого 2016 р.), XXIV (10-13 квітня 2017 р.), XXV (16-20 квітня 2018 р.), XXVI (8-12 квітня 2019 р.), м. Київ, Україна;
- міжнародна конференція “2-nd International Conference on Nuclear Photonics” (24-29 червня 2018 р.), м. Брашов, Румунія;
- дві міжнародні конференції “International Conference of Nuclear Data for Science and Technology”: ND2016 (11-16 September 2016 р.) м. Брюгге, Бельгія, ND2019 (19-24 травня 2019 р.), м. Пекін, Китай;
- дві міжнародні наради “Workshop on Nuclear Level Density and Gamma Strength”: 6<sup>th</sup> (8-12 May 2017), 7<sup>th</sup> (27-31 May 2019), м. Осло, Норвегія;
- міжнародна конференція “International Conference Astronomy and Space Physics in Kyiv University” (28-31 травня 2019 р.), м. Київ, Україна;
- три міжнародні науково-координаційні наради МАГАТЕ “Research Coordination Meeting of the CRP on Updating the Photonuclear Data Library and

generating a Reference Database for Photon Strength Functions”: 1<sup>st</sup> (4-8 April 2016), 2<sup>nd</sup> (16-20 October 2017), 3<sup>rd</sup> (17-21 December 2018), м. Відень, Австрія.

**Публікації.** Всього за темою дисертації опубліковано 35 робіт, з них: 8 – статті у реферованих наукових журналах, що індексуються наукометричною базою Scopus [1 – 8], 1 – стаття у науковому фаховому виданні України [9], 9 – електронні публікації [10 – 18], 17 – тези доповідей на конференціях [19 – 35]. Scopus ID - 57191427979, h-індекс здобувача – 2, квартиль-формула рейтингу журналів з публікаціями 1Q1-2Q3-4Q4-2. Всі публікації виконані у співавторстві, особистий внесок здобувача вказаний вище.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 169 найменувань (на 23 стор.), чотирьох додатків, 27 рисунків, 13 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 214 стор. (з них основного тексту – 116 стор.).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дисертаційної роботи висвітлено актуальність тематики дослідження, мету та задачі, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, зв’язок роботи з науковими програмами та темами, зазначено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** розкрито сучасні підходи до усередненого опису електромагнітних переходів в атомних ядрах за допомогою ФСФ, описані та проаналізовані моделі Е1 ФСФ, а також вказані феноменологічні моделі опису магнітних М1 гамма-переходів.

Для усередненого опису процесів емісії фотонів із високозбуджених станів ядра в області неперервного спектру та процесів фотопоглинання використовують ФСФ гамма-розпаду  $\bar{f}$  та ФСФ фотопоглинання  $\vec{f}$ , які визначаються таким чином:

$$\bar{f}_{X\lambda}(\varepsilon_\gamma) = \frac{\langle \Gamma_{if}^{X\lambda}(\varepsilon_\gamma) \rangle \rho_i}{\varepsilon_\gamma^{2\lambda+1} \rho_f}, \quad \vec{f}_{X\lambda}(\varepsilon_\gamma) = \frac{\varepsilon_\gamma^{-2\lambda+1} \langle \sigma_{X\lambda}(\varepsilon_\gamma) \rangle}{(\pi\hbar c)^2 (2\lambda+1)}, \quad (1)$$

де  $\langle \Gamma_{if}^{X\lambda}(\varepsilon_\gamma) \rangle$  - парціальна ширина гамма-переходів із мультипольністю  $\lambda$ , усереднена по великій кількості початкових рівнів  $i$ ,  $\rho_i$ ,  $\rho_f$  - густини початкових та кінцевих станів відповідно,  $\varepsilon_\gamma$  - енергії гамма-випромінювання,  $\langle \sigma_{X\lambda}(\varepsilon_\gamma) \rangle$  - середній переріз фотопоглинання.

Спрощений аналітичний вираз для Е1 ФСФ фотопоглинання може бути представлений у вигляді декількох компонент типу функцій Лоренца:

$$\vec{f}_{E1}^\alpha(\varepsilon_\gamma) = \frac{\sigma_{TRK}}{3 \cdot (\pi\hbar c)^2} \sum_{j=1}^{j_m} s_j^\alpha \frac{2}{\pi} \frac{\varepsilon_\gamma \Gamma_j^\alpha}{(\varepsilon_\gamma^2 - (E_{r,j}^\alpha)^2)^2 + (\Gamma_j^\alpha \varepsilon_\gamma)^2}, \quad (2)$$

де індексом  $\alpha$  позначено модель опису ФСФ, індекс  $j$  нумерує кількість нормальних мод коливань:  $j_m = 1$  для сферичного ядра,  $j_m = 2$  для аксіально-симетричного та  $j_m = 3$  для ядра з формою тривісного еліпсоїда, фактор  $s_j^\alpha$  є

ваговим множником  $j$ -ої моди коливання,  $\sigma_{TRK}$  є значенням правила сум Томаса-Райха-Куна (ТРК),  $E_{r,j}^\alpha$ ,  $\Gamma_j^\alpha$  - параметри резонансних енергії та ширини кривої.

Найбільш широко вживаними та протестованими моделями ФСФ є моделі стандартного Лоренціану (Standard Lorentzian Model, SLO) (*D.M. Brink, 1955; P. Axel, 1962*), узагальненого Лоренціану (Generalized Lorentzian Model, GLO), підсиленого узагальненого Лоренціану (Enhanced Generalized Lorentzian Model, EGLO) (*С.Г. Кадменский, В.П. Маркушев, В.И. Фурман, 1982; J. Kopecky, M. Uhl, 1990*), підходи модифікованого Лоренціану (Modify Lorentzian Model, MLO) (*V.A. Plujko, 1999; V.A. Plujko et al., 2000*), потрійного Лоренціану (Triple Lorentzian Model, TLO) (*Y. Alhassid, B. Bush, 1990; A.R. Junghans et al., 2008*) та спрощеного модифікованого Лоренціану (*Simply (Simplified) Modify Lorentzian Model, SMLO*) (*V.A. Plujko, 2000; S. Goriely, V. Plujko, 2019*). Загалом, моделі відрізняються виразами для ширин і параметрами ГДР.

У моделі SLO ширина кривої є енергетично незалежною, в моделі GLO ширина обрана феноменологічно із квадратичною залежністю від енергії:  $\Gamma_j^{GLO} = \varepsilon_\gamma^2 \Gamma_{r,j}^{SLO} / (E_{r,j}^{SLO})^2$ . Для ФСФ гамма-розпаду в моделях GLO та EGLO було додано компонент, який відповідає моделі Кадменського-Маркушева-Фурмана і виправляє поведінку ФСФ SLO за малих значень енергії гамма-квантів. Одним з недоліків підходів GLO та EGLO є неузгодженість із принципом детального балансу для гамма-переходів між компаунд-компаунд станами.

На відміну від вказаних моделей в роботі (*В.А.Плюйко, 1990*) загальний вираз для ФСФ був отриманий з обчислення середньої ширини гамма-переходів між збудженими станами атомного ядра з початковими станами, що належать мікроканонічному ансамблю:

$$\bar{f}_{X\lambda}(\varepsilon_\gamma) = \frac{L(\varepsilon_\gamma, T_f)}{3(\pi\hbar c)^2} \cdot \left( -\frac{1}{\pi} \cdot \text{Im} \chi(\varepsilon_\gamma, T_f) \right), \quad (3)$$

$$L(\varepsilon_\gamma, T_f) \equiv \frac{1}{1 - \exp(-\varepsilon_\gamma / T_f)} \xrightarrow{\varepsilon_\gamma \ll U_i} \frac{T_i}{\varepsilon_\gamma}, \quad L(\varepsilon_\gamma, T = 0) = 1$$

де  $\text{Im} \chi(\varepsilon_\gamma, T_f)$  є уявною частиною функції відгуку ядра на електромагнітне поле,  $L(\varepsilon_\gamma, T_f)$  є фактором низькоенергетичного підсилення ФСФ,  $\varepsilon_\gamma$  - енергія гамма-випромінювання,  $T_i(T_f)$  - температура початкових (кінцевих) станів,  $U_i$  - початкова енергія збудження. Такий загальний вираз було використано в підході MLO, у якому розраховувалась функція відгуку з напівкласичного рівняння Ландау-Власова із врахуванням запізнювання в інтегралі зіткнень та зі збудженням одного сильно колективізованого стану. В результаті отримується аналітичний вираз для залежності ширини функції Лоренца від енергії гамма-випромінювання та температури. Одним із варіантів спрощеного виразу для ширини є використовуваний в підході SMLO вираз із лінійною залежністю від



енергії гамма-випромінювання та квадратичною залежністю від температури:

$$\Gamma_j^{SMLO}(\varepsilon_\gamma, T) = \frac{\Gamma_{r,j}^{SMLO}}{E_{r,j}^2} (E_{r,j} \cdot \varepsilon_\gamma + 4\pi^2 T^2).$$

У підходах SLO, GLO, EGLO, MLO та SMLO всі деформовані ядра розглядаються як аксіально-деформовані ядра ( $j_m = 2$  у формулі (2)) з деяким ефективним значенням параметру квадрупольної деформації. В моделі TLO ядро розглядається як тривісний еліпсоїд обертання ( $j_m = 3$  у формулі (2)), а параметри енергії та ширини функцій Лоренца знаходяться згідно з гідродинамічною моделлю (*W.D. Myers et al., 1977*) та визначаються довжинами півосей еліпсоїда обертання як  $E_{r,j}^{TLO} = E_0(R_0/R_j)$ ,  $\Gamma_j^{TLO} = \Gamma_0(E_{r,j}^{TLO}/E_0)^\delta = 0.045(E_{r,j}^{TLO})^{1.6}$ . В дисертаційній роботі для проведення розрахунків в рамках моделі TLO довжини півосей ядра розраховувалися з використанням параметризації Бора із параметрами деформації з роботи (*J.-P. Delaroche et al., 2010*) (модель з вказаними параметрами позначена як TLO(1) та TLO(2)) та із використанням параметризації Хілла-Віллера з експериментально визначеними параметрами (*A.R. Junghans et al., 2008*) (модель позначено як TLO(3)).

В дисертаційній роботі було отримано уточнені систематики характеристик ГДР та представлено їх порівняння. А саме, із використанням уточнених значень характеристик ГДР (Розділ 2 дисертаційної роботи) було отримано систематики значень резонансних енергій  $E_{r,sys}^\alpha$ , ширин  $\Gamma_{r,j,sys}^\alpha$  та сил  $s = 1.2$ , використовуючи отримані нами та рекомендовані експериментальні значення ширин ГДР сферичних ядер та ядер з області масових чисел  $150 < A < 190$  та  $220 < A < 253$ , де ядра можна розглядати як аксіально-деформовані. Загальний вираз, який використовувався для підгонки резонансних енергій у сферичних ядрах та середньої резонансної енергії у аксіально-деформованих ядрах, був таким (*E. Lipparini, S. Stringari, 1988; V.I. Abrosimov, O.I. Davidovska, 2001*):

$$E_{r,sys}^\alpha = \frac{e_1^\alpha (1 - I^2)^{1/2} A^{-1/3}}{(1 + e_2^\alpha A^{-1/3})^{1/2}} \quad (\text{MeV}). \quad (5)$$

Для систематик ширин було використано вираз зі ступеневою залежністю (*M. Danos, W. Greiner, 1965*):

$$\Gamma_{r,j,sys}^\alpha = \tilde{c}(\alpha)(E_{r,j})^{d(\alpha)} \quad (\text{MeV}). \quad (6)$$

Мінімізація проводилась за допомогою програмного коду MINUIT (*CERN*). Було отримано такі значення параметрів підгонки для моделі SLO:  $e_1^{SLO} \approx 130.0 \pm 0.9$ ,  $e_2^{SLO} \approx 9.0 \pm 0.2$ ,  $\tilde{c}^{SLO} = 0.32 \pm 0.03$ ,  $d^{SLO} = 0.98 \pm 0.03$ ; для моделі SMLO:  $e_1^{SMLO} \approx 128.0 \pm 0.9$ ,  $e_2^{SMLO} \approx 8.5 \pm 0.2$ ,  $\tilde{c}^{SMLO} = 0.42 \pm 0.05$ ,  $d^{SMLO} = 0.90 \pm 0.04$ . Порівняння систематик параметрів в різних моделях ФСФ показано на рис. 1.

Із систематики для енергії ГДР були обчислені об'ємний (J) та поверхневий (Q) коефіцієнти енергії симетрії, які для результатів SMLO близькі до значень з роботи (*W.D. Myers et al., 1977*).

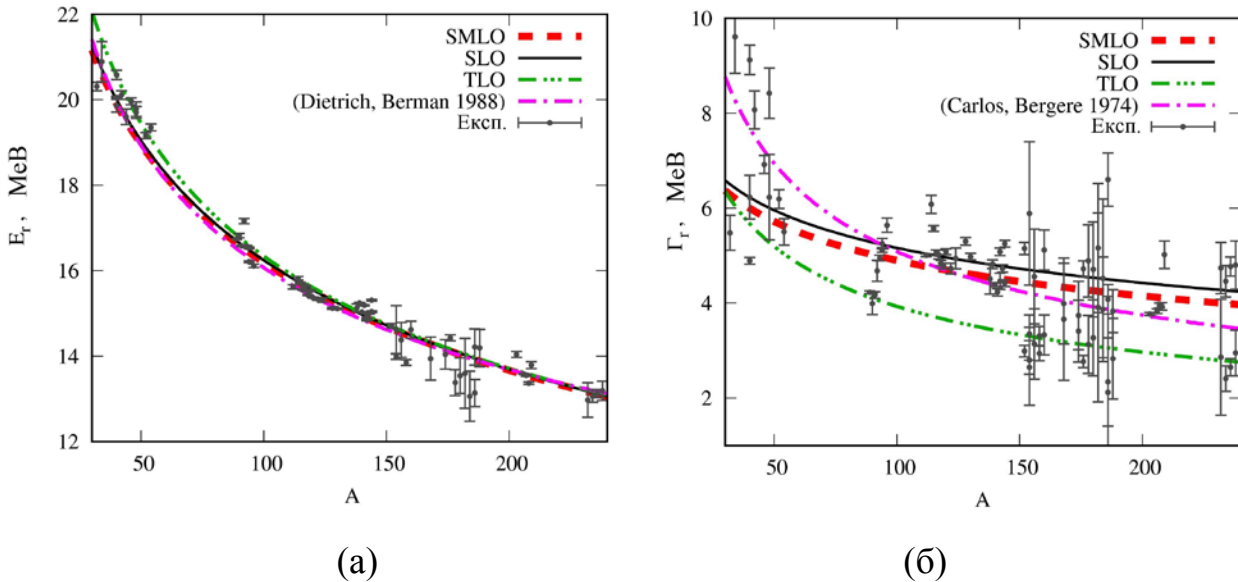


Рис.1. (а) Порівняння експериментальних значень середньої енергії ГДР (отримані в даній дисертаційній роботі) ( $E_r^\alpha$ ) та теоретичних значень із розрахунків на основі систематики в моделях SLO та SMLO та в гідродинамічній моделі рідкої краплини. (б) Порівняння експериментальних значень ширини ГДР для сферичних та аксіально-деформованих ядер із розрахунками за систематику для моделей SLO та SMLO ( $\Gamma_{r,sys}^{SLO(SMLO)}$ ) та із розрахунками відповідно до моделі TLO ( $\Gamma_r^{TLO}$ ).

У **другому розділі** – “Застосування фотонних силових функцій для опису перерізів фотопоглинання та гамма-розпаду” – проаналізовано можливості опису даних перерізів фотопоглинання та ФСФ гамма-розпаду за допомогою існуючих моделей ФСФ та запропоновано розширення даних моделей.

Спочатку було представлено розроблений метод підготовки бази експериментальних даних з перерізів фотопоглинання із бази EXFOR, які можна використовувати для надійного визначення Е1 ФСФ фотопоглинання. Е1 ФСФ пов’язані із повним перерізом фотопоглинання  $\sigma(\gamma, abs)$ , тому саме і був проведений пошук та аналіз даних з перерізів фотопоглинання, представлених в EXFOR. Як правило, існуючі дані перерізів є перерізами ( $\bar{\sigma}(\gamma, abs)$ ), які не включають внеску від  $(\gamma, \gamma)$  каналу  $\sigma_t(\gamma, \gamma)$ , внесок якого може бути значним при енергіях в околі енергії відділення нейтрону  $S_n$ . Коректним є розрахунок ФСФ на основі даних  $\bar{\sigma}(\gamma, abs)$  лише в області енергій, що віддалені від  $S_n$ . Для визначення початкової енергії для обчислення ФСФ було запропоновано критерій, що внесок перерізу  $(\gamma, \gamma)$  каналу повинен бути вдесятеро нижчий за внесок перерізу із випроміненням частинок:

$$\delta\sigma(\varepsilon_{\gamma, \min} = S_n + \Delta\varepsilon) = \frac{\sigma_t(\gamma, \gamma)}{\sigma(\gamma, abs)} = 0.1. \quad (7)$$

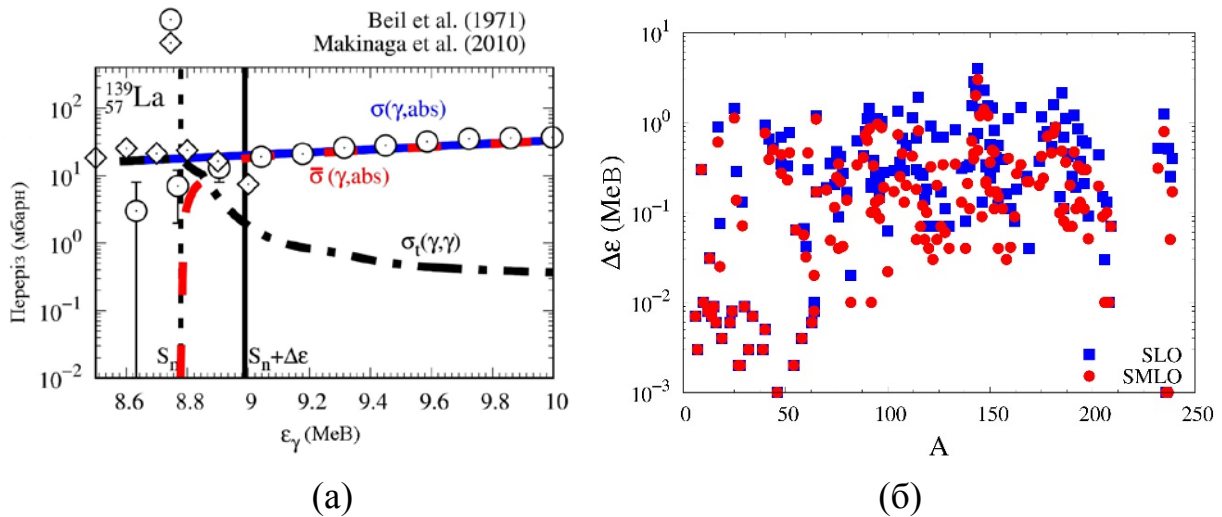


Рис.2. (а) Порівняння теоретичних розрахунків парціальних перерізів  $\sigma_t(\gamma,\gamma)$ ,  $\bar{\sigma}(\gamma,abs)$  та повного перерізу фотопоглинання  $\sigma(\gamma,abs)$  із експериментальними даними (Н. Beil et al., 1971; А. Makinaga et al., 2010). Вертикальними лініями позначено енергію відділення нейтронів  $S_n$  та значення енергії  $\varepsilon_{\gamma, \min} = S_n + \Delta\varepsilon$ , для якої  $\delta\sigma = 0.1$ . Приведені величини розраховано із застосуванням моделі SMLO для ФСФ у кодї TALYS. (б) Значення розрахованих енергетичних інтервалів  $\Delta\varepsilon$  в залежності від масового числа  $A$ .

Для застосування такого критерію було проведено теоретичний розрахунок внесків парціальних перерізів до повного перерізу фотопоглинання із використанням коду TALYS (A.J.Koning et al., 2008). За даними теоретично обрахованих перерізів, для кожного ізотопу оцінено величини енергетичного інтервалу  $\Delta\varepsilon$  відповідно до критерію (7). Цей критерій  $\delta\sigma$  можна розглядати як величину систематичної похибки наближення повного перерізу фотопоглинання  $\sigma(\gamma,abs)$  перерізом фотопоглинання  $\bar{\sigma}(\gamma,abs)$ , а отже як систематичну похибку при розрахунку ФСФ на основі даних фото-частинкових перерізів. На рис.2 приведено порівняння теоретично розрахованих парціальних та повних перерізів для  $^{139}\text{La}$  та приведено отримані значення енергетичного інтервалу  $\Delta\varepsilon$  в залежності від масового числа  $A$ .

Використовуючи відібрані дані, здобувачем було створено базу даних експериментальних Е1 ФСФ фотопоглинання. База ФСФ містить 475 наборів даних ФСФ фотопоглинання для 144 ізотопів від  $^6\text{Li}$  до  $^{238}\text{Pu}$  та дані для 19 елементів природного складу.

На основі усіх експериментальних даних по перерізах фотопоглинання були уточнені значення та похибки характеристик ГДР (енергії, ширини, сили) шляхом підгонки теоретично розрахованих перерізів фотопоглинання із використанням ФСФ в рамках моделей SLO та SMLO до експериментальних даних. Таблиці нових значень характеристик ГДР були передані до МАГАТЕ.

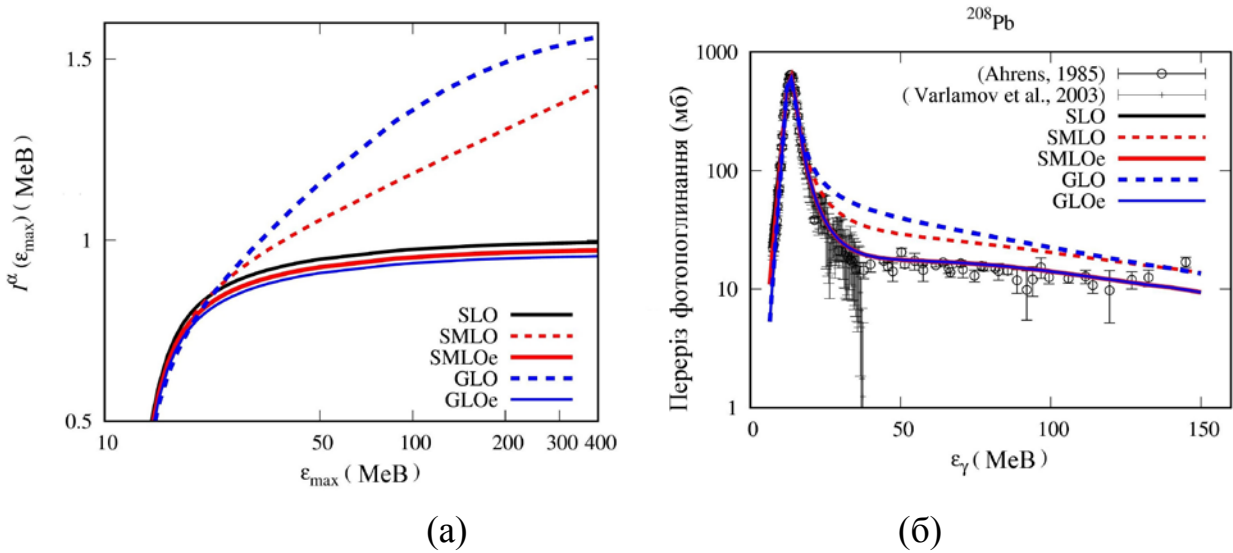


Рис.3. (а) Значення інтегралу  $I^\alpha$ , розрахованого для таких моделей ФСФ: SLO, SMLO, GLO, SMLOe, GLOe. (б) Переріз фотопоглинання для ядра  $^{208}\text{Pb}$  в залежності від енергії гамма-квантів. Приведено результати теоретичних обрахунків в моделях SLO, SMLO, GLO, SMLOe, GLOe. Експериментальні дані взято із робіт (J.Ahrens, 1985; V.Varlamov et al., 2003).

Запропоновано простий метод наближеного узгодження моделей ФСФ з енергетично залежними ширинами з енергетично зваженим правилом сум (ЕЗПС,  $S_{EWSR}$ ). Енергетично зважене правило сум для електричних дипольних гамма-переходів обмежує значення інтегралу від повного перерізу фотопоглинання  $\sigma_{E1}(\epsilon_\gamma)$  по енергії гамма-випромінювання

$\sigma_{\text{int}} = \int_0^\infty \sigma_{E1}(\epsilon_\gamma) d\epsilon_\gamma = \frac{8\pi\alpha}{3} S_{EWSR} = \sigma_{TRK} \cdot s$ , тут фактор  $s$  визначає відхилення  $\sigma_{\text{int}}$  від правила сум ТРК (у нерелятивістських потенціалах взаємодії за відсутності внеску сил, що залежать від швидкості та обмінних сил  $s=1$ , а при їх врахуванні  $s \sim 1.2$ ),  $\alpha = e^2 / \hbar c$  - стала тонкої структури, внаслідок чого вимагається рівність одиниці інтегралу від функції форми лінії:

$$I_j^\alpha(\epsilon_{\text{max}}) = \int_0^{\epsilon_{\text{max}}} \bar{F}_j^\alpha(\epsilon_\gamma) d\epsilon_\gamma = (\epsilon_{\text{max}} \rightarrow \infty) \Rightarrow 1 \quad (8)$$

На рис.3 показано, що в моделях з енергетично залежними ширинами ця вимога не виконується. В даній роботі запропоновано модифікувати поведінку ширини  $\Gamma_j(\epsilon_\gamma)$  для моделей SMLO та GLO, вважаючи ширину сталою при енергіях, вищих за резонансну енергію ГДР  $\epsilon_\gamma > E_{r,j}$ :

$$\Gamma_j^{\bar{\alpha}}(\epsilon_\gamma) = \begin{cases} \Gamma_j^\alpha(\epsilon_\gamma), & \epsilon_\gamma \leq E_{r,j}^\alpha \\ \Gamma_j^\alpha(E_{r,j}^\alpha) = \Gamma_{r,j}^\alpha, & \epsilon_\gamma > E_{r,j}^\alpha \end{cases} \quad (9)$$

Дана модифікація дозволяє досягти узгодження із ЕЗПС. Моделі з модифікованою шириною позначені SMLOe та GLOe. На рис.3 представлено порівняння опису перерізу фотопоглинання для ядра  $^{208}\text{Pb}$  із використанням таких моделей ФСФ: SLO, GLO, SMLO, SMLOe, GLOe із врахуванням внеску

від квазідейтронного фотопоглинання (*M.V. Chadwick et al., 2000*). Видно, що використання моделей із модифікованим виразом для ширини дозволяє описати експериментальні дані в області енергій гамма-випромінювання вище за 30 MeВ.

Проведено дослідження по визначенню найкращої моделі ФСФ фотопоглинання для опису експериментальних даних перерізів. Порівняння проведено для моделей SLO, GLO, SMLO, SMLOe, TLO(1), TLO(2), TLO(3) та використано усі наявні експериментальні дані для парно-парних ядер з бази EXFOR. Парно-парні ядра були обрані для можливості порівняння із моделлю TLO, для розрахунків за якою необхідними є параметри деформації. Ці параметри були взяті з роботи (*J.-P. Delaroche et al., 2010*).

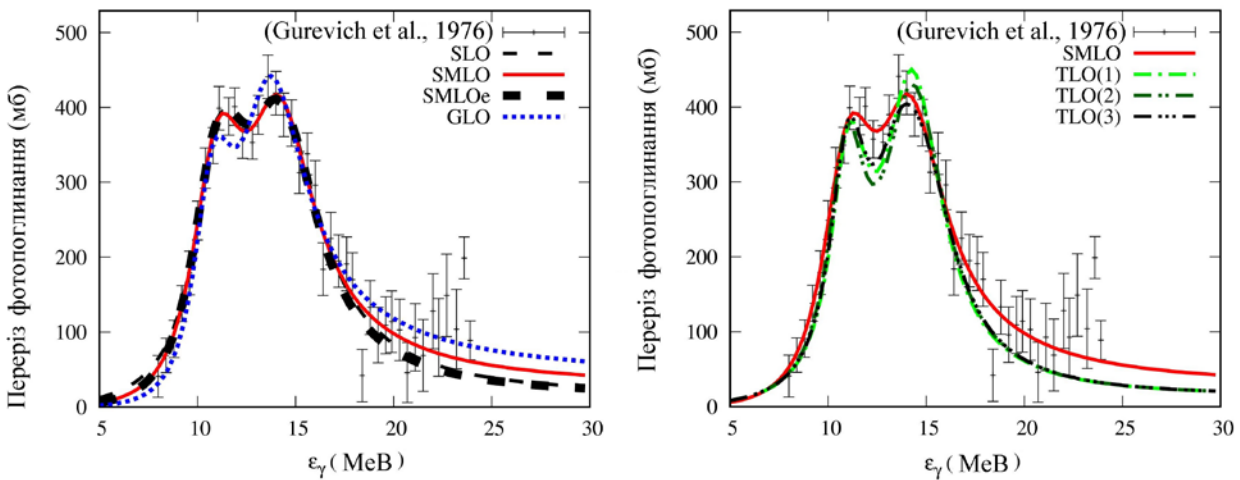


Рис.4. Експериментальні дані перерізів фотопоглинання (*G.M. Gurevich et al., 1976*) для ядра  $^{238}\text{U}$  у порівнянні із розрахунками, виконаними із використанням різних теоретичних моделей для ФСФ.

Для порівняння було використано такі математичні критерії: 1) мінімум значення відхилення за методом найменших квадратів  $\chi_\alpha^2$  та 2) мінімум середньоквадратичного фактору відхилення  $f_\alpha$ :

$$\chi_\alpha^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{\text{exp}}(\varepsilon_i) - \sigma_{\text{the}}^\alpha(\varepsilon_i))^2}{(\Delta\sigma(\varepsilon_i))^2}, \quad (10)$$

$$f_\alpha = \exp\{\chi_{\ln,\alpha}\}, \quad (\chi_{\ln,\alpha})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{\ln \sigma_{\text{the}}^\alpha(\varepsilon_i) - \ln \sigma_{\text{exp}}(\varepsilon_i)\}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln^2 \left( \frac{\sigma_{\text{the}}^\alpha(\varepsilon_i)}{\sigma_{\text{exp}}(\varepsilon_i)} \right), \quad (11)$$

де  $\sigma_{\text{the}}^\alpha(\varepsilon_i) = \sigma_{\text{GDR}}^\alpha(\varepsilon_i) + \sigma_{\text{qd}}(\varepsilon_i)$  - теоретичні значення перерізу фотопоглинання в залежності від енергії гамма-випромінювання  $\varepsilon_i$ ;  $\sigma_{\text{exp}}(\varepsilon_i)$  - експериментальне значення перерізу фотопоглинання з бази даних EXFOR;  $\Delta\sigma(\varepsilon_i)$  - похибка експериментального визначення перерізу;  $n$  - кількість експериментальних точок.

На рис.4 подано розраховані теоретичні перерізи фотопоглинання  $\sigma_{\text{the}}^\alpha(\varepsilon_\gamma)$  та відповідні експериментальні дані  $\sigma_{\text{exp}}(\varepsilon_i)$  для ядра  $^{238}\text{U}$ .

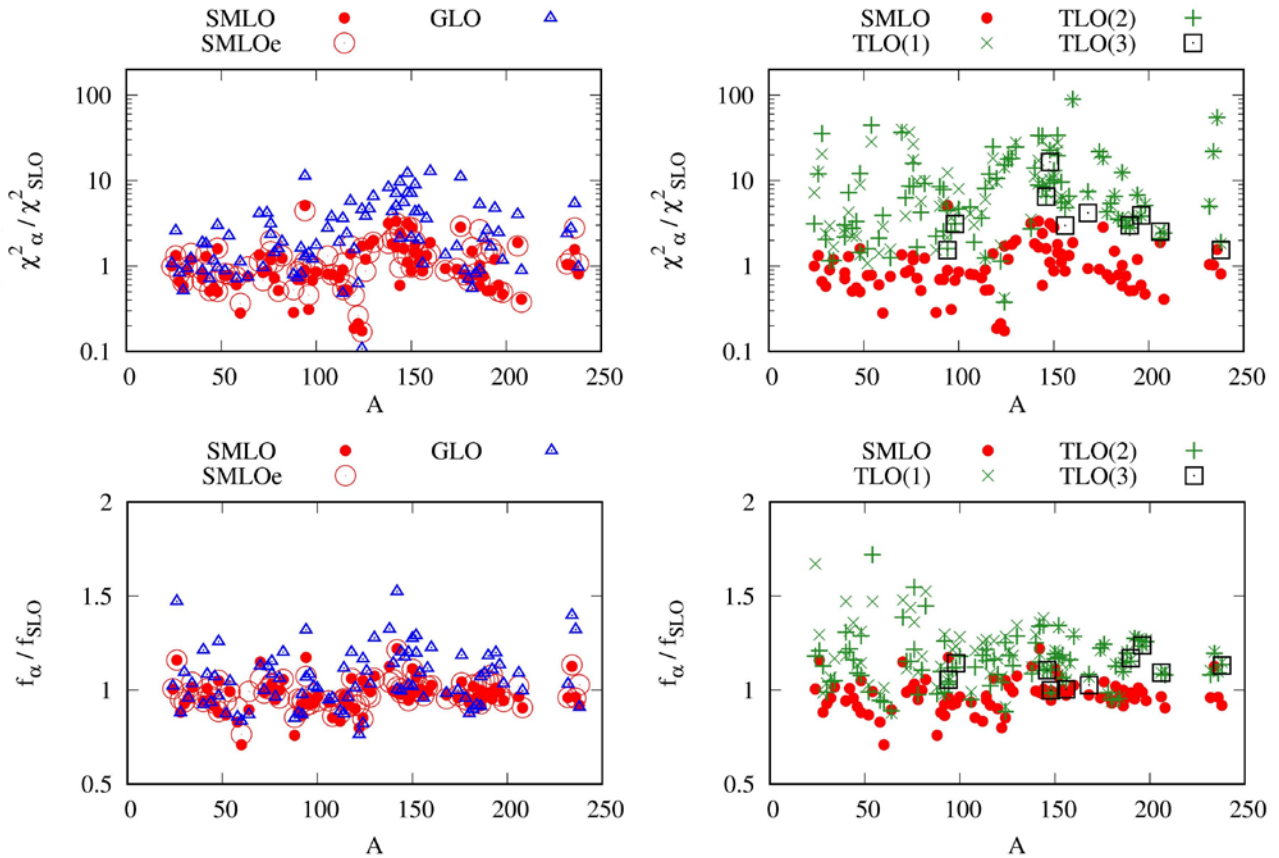


Рис.5. Відносні значення найменших квадратів  $\chi_\alpha^2 / \chi_{SLO}^2$  та фактору логарифмічного відхилення  $f_\alpha / f_{SLO}$  для парно-парних ядер, розраховані з використанням різних моделей ФСФ при описі експериментальних даних перерізів фотопоглинання. Результати представлено в залежності від масового числа  $A$  для широкого інтервалу по енергіях гамма-випромінювання та із врахуванням експериментальних похибок.

На рис.5 представлено середні арифметичні значення критеріїв  $\chi_\alpha^2$  та  $f_\alpha$ , розрахованих із використанням експериментальних похибок, даних у широкому діапазоні енергій гамма-випромінювання. Із рис.5 видно, що значення критеріїв  $\chi_\alpha^2 / \chi_{SLO}^2$  та  $f_\alpha / f_{SLO}$  мають найменші значення для моделей SMLO та SMLOe. Таким чином показано, що моделі на основі методу MLO є найточнішими для опису експериментальних даних. Значення критеріїв в моделях SMLO та SMLOe є близькими, тому можна зробити висновок, що модель SMLOe може використовуватися без перевизначення параметрів ГДР.

В дисертаційній роботі також проаналізована застосовність аналітичних моделей E1 ФСФ для опису даних з ФСФ гамма-розпаду. Використовувалися експериментальні дані гамма-розпаду, отримані групою Осло (*Oslo database of Level Densities and Gamma-Ray Strength Functions*, URL: <https://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/about/infrastructure/ocl/nuclear-physics-research/compilation/>).

На рис.6 подано в якості прикладу порівняння моделей ФСФ для опису експериментальних даних  $^{106}\text{Pd}$ . Теоретичні ФСФ враховували внесок від M1 та E1 компоненти:  $\bar{f}_{E1+M1}^\alpha = \bar{f}_{E1}^\alpha + \bar{f}_{EM1}^\alpha$ . За допомогою методів найменших квадратів та мінімуму фактора логарифмічного відхилення  $f$  було показано, що моделі на основі методу MLO (SMLO, SMLOe) також є найточнішими і для опису експериментальних даних з гамма-розпаду.

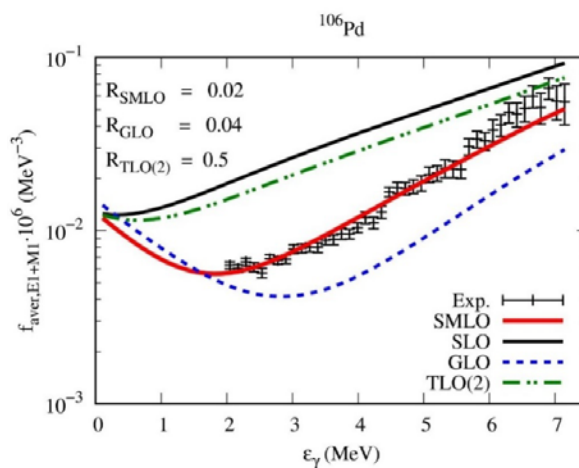


Рис.6. Експериментальні значення ФСФ гамма-розпаду типу E1+M1 для ядра  $^{106}\text{Pd}$  (*Oslo database of Level Densities and Gamma-Ray Strength Functions*) у порівнянні із теоретично розрахованими ФСФ в рамках різних моделей.

У **третьому розділі** – “Ізомерні відношення та середні кутові моменти уламків фотоподілу” – представлено методику вимірювання ізомерних відношень виходів уламків поділу та визначення їх середніх кутових моментів та проведено їх обчислення для ядер  $^{97}\text{Nb}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  в реакціях фотоподілу  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$ .

Вимірювання ізомерних відношень виходів ядер проводилися із використанням варіанту активаційної методики реалізованого у відділі структури ядра ІЯД НАНУ (*В.О. Желтоножський, 1995*). Опромінення зразків  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$  проводилося на мікротроні М-30 (в ІЕФ НАНУ, м. Ужгород)  $\gamma$ -квантами гальмівного спектру електронів з граничною енергією гальмівних гамма-квантів  $E_e$ , що становила 10.5; 12.0; 12.5 та 18.0 МеВ. Після опромінення та транспортування зразків проводилося вимірювання гамма-спектрів за допомогою спектрометра на базі HPGe детектора. Роздільна здатність спектрометра становила 2.0 кеВ по  $\gamma$ -переходу з  $\epsilon_\gamma = 1332.5$  кеВ у ядрі  $^{60}\text{Co}$ . Спектри записувалися через кожні 60 секунд протягом усього часу вимірювання. Обробка апаратурних гамма-спектрів проводилась із застосуванням програмного пакету Winspectrum (*М.В. Стрільчук, 1987*).

За допомогою програми IZOMER (*В.О. Желтоножський, М.В. Стрільчук, 2000*) проводилось обчислення ізомерних відношень виходів шляхом числового розв’язку системи кінетичних рівнянь, яка визначає зміну з часом кількості

досліджуваного ядра-фрагменту, що утворилося в основному і метастабільному станах при первинному поділі, а також враховує утворення і розпад ізобарного ядра-попередника, який може приводити до значного додаткового напрацювання досліджуваного ядра.

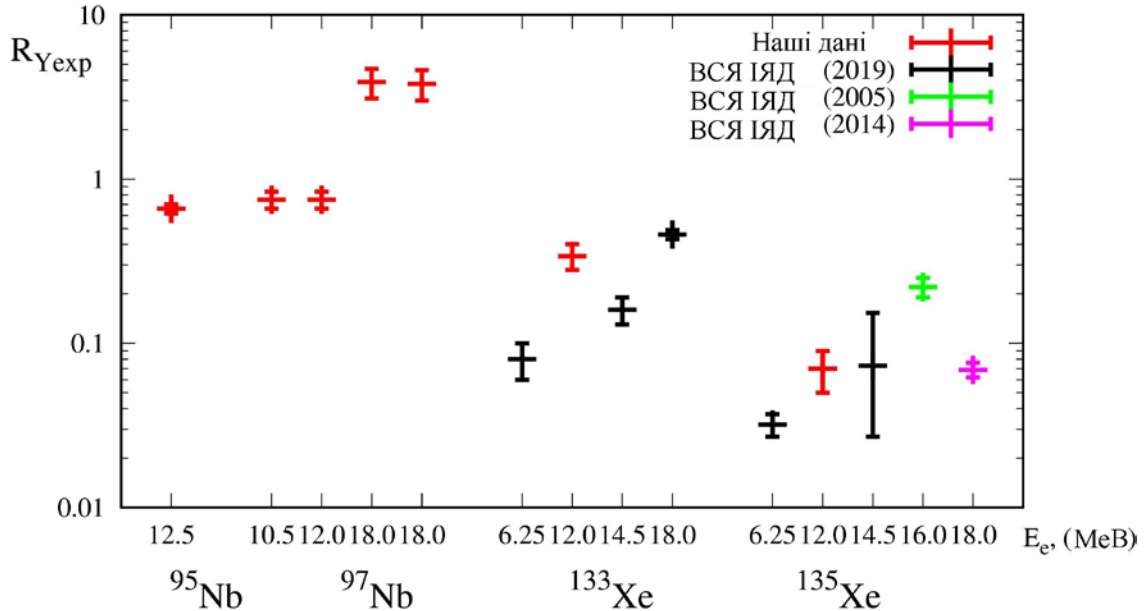


Рис.7. Порівняння експериментальних даних ізомерних відношень виходів досліджуваних ядер.

Отримані дані ізомерних відношень виходів досліджуваних ізотопів наведено у Таблиці 1, а їх порівняння із попередніми експериментальними даними для інших енергій опромінення наведено на рис.7.

На основі отриманих значень ізомерних відношень  $R_Y$  проводився розрахунок величин середніх кутових моментів уламків поділу  $\bar{J}$ .

Спочатку з підгонки теоретичних значень ізомерних значень до експериментальних були визначені параметри розподілів станів первинних ядер-фрагментів за кутовими моментами, а потім із отриманих розподілів обчислювався середній кутовий момент первинного фрагменту.

Для теоретичного розрахунку ізомерних відношень використовувалася статистична модель, яку було розроблено на кафедрі ядерної фізики КНУ імені Тараса Шевченка (В.А. Плюйко, О.М. Горбаченко, К.М. Солодовник, 2015):

$$R_{th}(x) = \frac{\sum_{i=0}^2 w(A_f + i, Z_f) \int_{U_{min}^{(i)}}^{U_{max}^{(i)}} \sum_J g_g^{(i)}(U, J) \cdot \varphi_i(U) \cdot P^{(i)}(J, x) dU}{\sum_{i=0}^2 w(A_f + i, Z_f) \int_{U_{min}^{(i)}}^{U_{max}^{(i)}} \sum_J g_m^{(i)}(U, J) \cdot \varphi_i(U) \cdot P^{(i)}(J, x) dU}. \quad (12)$$

Тут функція  $w(A_f + i, Z_f)$  визначає розподіл первинних ядер-фрагментів за масовим числом (враховувалася можливість заселення станів досліджуваного ядра від розпаду ізотопів із більшою кількістю нейтронів  $i \leq 2$ );  $g_g^{(i)}(U, J)$



$(g_m^{(i)}(U, J))$  - ймовірності заселення основного (ізомерного) рівня досліджуваного ядра-фрагменту, які були розраховані в кодах EMPIRE 3.2 та TALYS 1.6;  $\varphi_i(U)$  - функція розподілу по енергії збудження;  $P^{(i)}(J)$  - є функція розподілу за спінами початкових станів у первинному фрагменті ( $A_f + i, Z_f$ ).

Таблиця 1. Експериментальні результати розрахунку ізомерних відношень виходів у реакціях фотоподілу  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$  та середніх кутових моментів уламків поділу

Досліджуваний Ізотоп	Ядро-мішень	Гранична енергія $\gamma$ - квантів (MeV)	Ізомерне відношення		Середній кутовий момент первинного уламку поділу
			$R_Y = Y_{high} / Y_{low}$	Значення	
$^{95}\text{Nb}$	$^{238}\text{U}$	12.5	$Y_g / Y_m =$ $Y_{9/2} / Y_{1/2}$	$0.66 \pm 0.04$	$0.5 \pm 0.5$
$^{97}\text{Nb}$	$^{235}\text{U}$	10.5	$Y_g / Y_m =$ $Y_{9/2} / Y_{1/2}$	$0.75 \pm 0.09$	$1.5 \pm 0.5$
		18.0		$3.90 \pm 0.8$	$5.2 \pm 0.8$
	$^{238}\text{U}$	12.0		$0.75 \pm 0.09$	$1.5 \pm 0.5$
		18.0		$3.80 \pm 0.6$	$5.1 \pm 0.7$
$^{133}\text{Xe}$	$^{238}\text{U}$	12.5	$Y_m / Y_g =$ $Y_{11/2} / Y_{9/2}$	$0.34 \pm 0.06$	$3.0 \pm 1.0$
$^{135}\text{Xe}$	$^{238}\text{U}$	12.0	$Y_m / Y_g =$ $Y_{11/2} / Y_{9/2}$	$0.07 \pm 0.02$	$1.5 \pm 0.5$

Були використані такі вирази для розподілу станів первинних ядер-фрагментів за кутовими моментами:

$$P^{(i)}(J, \lambda) = (2J + 1) \exp\left\{-\frac{J(J+1)}{2B^2} - \lambda J\right\},$$

$$P^{(i)}(J, \mu) = (2J + 1) \exp\left\{-\frac{J(J+1)}{2(B + \mu)^2}\right\}. \quad (13)$$

Параметри  $x = \lambda, \mu$  визначалися з підгонки теоретичних значень ізомерних відношень (12) до експериментальних даних. Після визначення параметрів в функціях спінового розподілу обчислювався середній кутовий момент первинного фрагменту ( $A_f, Z_f$ ) в одиницях  $\hbar$  за формулою:

$$\bar{J} = \frac{\sum_J J P^{(0)}(J, x)}{\sum_J P^{(0)}(J, x)}. \quad (14)$$

Отримані значення середніх кутових моментів приведено в Таблиці 1. При розрахунках заселеності в області дискретного спектру були використані існуючі

експериментальні дані з характеристик дискретних рівнів, які є невід'ємною частиною числових кодів EMPIRE 3.2 та TALYS 1.6. Гамма-переходи в області неперервного спектру обчислювалися з використанням для ФСФ моделей SLO, EGLO, MLO (SMLO). Для густин ядерних рівнів використовувалися моделі Хартрі-Фока-Боголюбова, Гілберта-Камерона та узагальненої моделі надплинної рідини. Розрахунки також були проведені з врахуванням можливості заселення станів від ізотопів з більшою кількістю нейтронів (до трьох).

Показано, що значення середніх кутових моментів не суттєво залежать від виду ФСФ та густин ядерних рівнів, а також врахування заселення станів від ізотопів після вильоту різної кількості нейтронів (принаймні до трьох), і при варіації цих характеристик відповідні значення середніх кутових моментів збігаються в межах похибок.

У **висновках** сформульовано основні результати даної дисертаційної роботи та висновки з них.

У **додатку 1** приведено таблицю посилань на експериментальні дані перерізів фотопоглинання з бази EXFOR.

У **додатку 2** наведені обчислені інтервали енергій  $\Delta\varepsilon$ , вищих за енергію відділення нейтрону  $S_n$ , при яких систематична похибка визначення повного перерізу фотопоглинання з даних фоточастинкового перерізу не перевищує 10 %.

У **додатку 3** представлено отримані значення характеристик математичних критеріїв якості опису експериментальних даних фотопоглинання із використанням різних теоретичних моделей E1 ФСФ.

У **додатку 4** представлено порівняння перерізів фотопоглинання та їх теоретичного опису із використанням різних моделей ФСФ.

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено результати дослідження по знаходженню найбільш достовірного виразу для E1 фотонних силових функцій (ФСФ) для усередненого опису E1 електромагнітних переходів в процесах фотопоглинання та гамма-розпаду.

Отримані результати дають підстави сформулювати такі відповідні висновки та рекомендації, що мають теоретичне й практичне значення.

1. Продемонстровано, що спрощені моделі на основі підходу MLO (SMLO, SMLOe) є найточнішими для опису експериментальних даних як фотопоглинання, так і гамма-розпаду.

2. Підготовлено базу експериментальних E1 ФСФ із систематичною похибкою менше 10 %.

3. Отримано уточнені значення та похибки характеристик ГДР (енергії, ширини, сили) і отримані їх систематики.

4. Запропоновано простий метод наближеного узгодження моделей ФСФ з енергетично залежними ширинами з енергетично зваженим правилом сум при високих енергіях, а саме модель SMLOe, що розширює застосовність моделі SMLO на область енергій гамма-квантів вище 30 MeV. Показано, що модель SMLOe може використовуватися без перевизначення значень характеристик ГДР.

5. Отримано ізомерні відношення виходів в реакціях фотоподілу ядер  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$  під дією гальмівного випромінювання з граничними енергіями відповідно  $E_e = 12.5$  (для  $^{95}\text{Nb}$ ), 10.5, 12.0 та 18.0 (для  $^{97}\text{Nb}$ ); 12.5 (для  $^{133}\text{Xe}$ ); 12.0 MeV (для  $^{135}\text{Xe}$ ), обчислені розподіли станів первинних ядер-фрагментів за кутовими моментами та визначені середні кутові моменти уламків. Показано, що значення кутових моментів не суттєво залежать від внеску від розпаду ізотопів із надлишком нейтронів та виразів для ФСФ і для густин ядерних рівнів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. V. Plujko, O. Gorbachenko, K. Solodovnyk, Description of nuclear photoexcitation by Lorentzian expressions for electric dipole photon strength function, *Eur. Phys. J. A* **55** (11), 210 (2019).

2. V.A. Plujko, O.M. Gorbachenko, S. Goriely, K.M. Solodovnyk, Test of models for photon strength functions of electric dipole photoexcitation, *Nucl. Phys. At. Energy* **20**, 213-220 (2019).

3. V. Plujko, O. Gorbachenko, I. Kadenko, K. Solodovnyk, Improvements and testing practical expressions for photon strength functions of E1 gamma-transitions, *EPJ Web of Conf.* **146**, 05014 (2017).

4. В.О. Желтоножський, А.М. Саврасов, К.М. Солодовник, В.А. Плюйко, О.М. Горбаченко, О.І. Давидовська, Ізомерні відношення та середні кутові моменти первинних фрагментів  $^{97}\text{Nb}$  при фотоподілі  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$ . *УФЖ* **62** (4), 285-293 (2017).

5. В.О. Желтоножський, А.М. Саврасов, В.А. Плюйко, О.М. Горбаченко, К.М. Солодовник, Фотоподіл  $^{238}\text{U}$  гальмівним випромінюванням у широкому інтервалі значень граничної енергії, *Ядерна фізика та енергетика* **20**(2), 126-130 (2019).

6. І.М. Вишневський, В.О. Желтоножський, А.М. Саврасов, В.А. Плюйко, О.М. Горбаченко та К.М. Солодовник, Середні кутові моменти фрагментів фотоподілу  $^{238}\text{U}$  гальмівним випромінюванням, *Ядерна фізика та енергетика* **19** (1), 5-13 (2018).

7. І.М. Kadenko, V.A. Plujko, V.M. Bondar, O.M. Gorbachenko, V.Y. Leshchenko, K.M. Solodovnyk, Prompt gamma-rays from fast neutron capture in  $^{nat}\text{Ni}$ , *Nucl. Phys. At. Energy* **17** (2), 122-129 (2016).

8. I.M. Kadenko, V.A. Plujko, B.M. Bondar, O.M. Gorbachenko, B.Y. Leshchenko, K.M. Solodovnyk, Gamma-rays from  $^{nat}\text{Sn}$  and  $^{nat}\text{C}$  induced by neutrons, Nucl. Phys. At. Energy **17** (4), 349-353 (2016).
9. O.M. Gorbachenko, B.M. Bondar, K.M. Solodovnyk, O.I. Tkach, I.M. Kadenko, B.Y. Leshchenko, V.A. Plujko, V.A. Zheltonozhskyyi, Impact of gamma-decay description on nuclear reaction characteristics, Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics **40** (2), 113-121 (2016).
10. V. Plujko, O. Gorbachenko, K. Solodovnyk, Improvements and Testing Practical Expressions for Photon Strength Functions of E1 Gamma-Transitions. Paper presented at 1st Research Coordination Meeting of the CRP on Updating the Photonuclear Data Library and generating a Reference Database for Photon Strength Functions: Research Coordination Meeting, 4-8 April 2016 (IAEA Nuclear Data Services, Vienna, Austria, 2016), [https://www-nds.iaea.org/CRP-photonuclear/docs/Plujko\\_1RCM.pdf](https://www-nds.iaea.org/CRP-photonuclear/docs/Plujko_1RCM.pdf).
11. V.A. Plujko, O.M. Gorbachenko, K.M. Solodovnyk, To the Simplest Expression for E1 PSF and renewed databases for GDR parameters. Paper presented at 2nd Research Coordination Meeting of the CRP on Updating the Photonuclear Data Library and generating a Reference Database for Photon Strength Functions: Research Coordination Meeting, 16-20 October 2017. (IAEA Nuclear Data Services, Vienna, Austria, 2017), <https://www-nds.iaea.org/CRP-photonuclear/docs2/Plujko2017b.pdf>.
12. V.A. Plujko, O.M. Gorbachenko, K.M. Solodovnyk, Updating Photonuclear Data Library and Phenomenological Photon Strength Functions. Paper presented at 3rd Research Coordination Meeting of the CRP on Updating the Photonuclear Data Library and generating a Reference Database for Photon Strength Functions: Research Coordination Meeting, 17-21 December 2018. (IAEA Nuclear Data Services, Vienna, Austria, 2018), <https://www-nds.iaea.org/CRP-photonuclear/docs3/Plujko2018-2.pdf>.
13. V.A. Plujko, O.M. Gorbachenko, R. Capote, P. Dimitriou, K.M. Solodovnyk, Renewed database of GDR parameters of ground-state photoabsorption. Paper presented at 2-nd International Conference on Nuclear Photonics 24-29 June 2018. <http://nuclearphotonics2018.eli-np.ro/talks/07.4%200.%20Gorbachenko.pdf>.
14. V. Plujko, O. Gorbachenko, K. Solodovnyk, Description of nuclear photoexcitation by Lorentzian expressions for electric dipole photon strength function. (Cornell University Library arxiv.org, 2019), <https://arxiv.org/pdf/1911.12134.pdf>.
15. O. Gorbachenko, I. Kadenko, V. Plujko, K. Solodovnyk, Comparison of Practical Expressions for E1 Photon Strength Functions. (Cornell University Library arxiv.org, 2019), <https://arxiv.org/pdf/1911.12107.pdf>.
16. I. Kadenko, V. Plujko, B. Bondar, O. Gorbachenko, B. Leshchenko, K. Solodovnyk, O. Tkach, V. Zheltonozhskyyi Effect of gamma-strength on nuclear reaction calculations. (Cornell University Library arxiv.org, 2016), <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.04108.pdf>.

17. I.M.Kadenko, V.A.Plujko, B.M.Bondar, O.M.Gorbachenko, B.Yu. Leshchenko, K.M. Solodovnyk, Gamma-rays from  $^{nat}\text{Sn}$  and  $^{nat}\text{C}$  induced by neutrons. (Cornell University Library arxiv.org, 2016), <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/611/1611.02893.pdf>.

18. V. Plujko, O. Gorbachenko, I. Kadenko, K. Solodovnyk, Improvements and Testing Practical Expressions for Photon Strength Functions of E1 Gamma-Transitions. (Cornell University Library arxiv.org, 2016) <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1611/1611.00914.pdf>.

19. О.М. Горбаченко, О.М. Ткач, В.А. Плюйко, О.І. Давидовська, К.М. Солодовник, Б.М. Бондар, Обчислення середніх кутових моментів та їхніх систематик у первинних фрагментах поділу з використанням ізомерних відношень, в *XXIII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України 01-05 лютого 2016 р: тези доповідей* (Київ, 2016), С.21.

20. В.А. Желтоножский, А.Н. Саврасов, Е.Н. Солодовник, В.А. Плюйко, А.Н. Горбаченко, О.И. Давыдовская, Исследование изомерных отношений  $^{97m,g}\text{Nb}$  при фотоделении  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , в *XXIII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, 01-05 лютого 2016: тези доповідей* (Київ, 2016), С. 51-52.

21. V. Plujko, O. Gorbachenko, I. Kadenko, K.Solodovnyk, S. Zaitseva, Improvements and testing practical expressions for photon strength functions of E1 gamma-transitions (#R390), in *ND2016 International Conference of Nuclear Data for Science and Technology, Bruges, Belgium 11-16 September 2016: Programme & Abstract Book* (Bruges, Belgium, 2016), P. 261.

22. В.А. Желтоножский, И.Н. Вишнеvский, О.И. Давыдовская, А.Н. Саврасов, Е.Н. Солодовник, В.А. Плюйко, А.Н. Горбаченко, Исследование изомерных отношений  $^{95m,g}\text{Nb}$  и  $^{133m,g}\text{Xe}$  при фотоделении  $^{238}\text{U}$ , в *XXIV Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України 10 - 13 квітня 2017: тези доповідей* (Київ, 2017), С. 66

23. I.M.Kadenko, V.A.Плюйко, Б.М.Бондар, О.М.Горбаченко, Б.Ю.Лещенко, К.М.Солодовник, Гамма-кванти при взаємодії швидких нейтронів з ядрами  $^{nat}\text{Sn}$  та  $^{nat}\text{C}$ , в *XXIV Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, 10 - 13 квітня 2017: тези доповідей* (Київ, 2017), С. 68-69.

24. В.А. Плюйко, О.М. Горбаченко, К.М. Солодовник, Опис фотонної силової функції аналітичними виразами, в *XXIV Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, 10-13 квітня 2017: тези доповідей* (Київ, 2017), С. 44.

25. V. Plujko, O. Gorbachenko, E. Solodovnyk, Test of Recent Expressions for Photon Strength Functions, in *6th Workshop on Nuclear Level Density and Gamma Strength 8-12 May 2017: Book of Abstracts* (Oslo, 2017), P. 35.

26. В.А. Плюйко, О.М. Горбаченко, К.М. Солодовник, Р. Капоте, П. Дімітріу, Характеристики гігантських дипольних резонансів в атомних ядрах, в *XXV Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України 16-20 квітня 2018: тези доповідей* (Київ, 2018), С. 47-48.

27. В.А. Плюйко, О.М. Горбаченко, К.М. Солодовник, Аналітичні вирази для опису E1 фотонних силових функцій в атомних ядрах, в *XXV Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України 16-20 квітня 2018: тези доповідей* (Київ, 2018), С. 48-49.

28. V.A. Plujko, O.M. Gorbachenko, K.M.Solodovnyk, Comparison of Practical Expressions for E1 Photon Strength Functions, in *2-nd International Conference on Nuclear Photonics 24-29 June 2018: Abstract Book* (Brasov, 2018), P. 179.

29. V.A. Plujko, O.M. Gorbachenko, R. Capote, P. Dimitriou, K.M. Solodovnyk, Renewed database of GDR parameters of ground-state photoabsorption, in *2-nd International Conference on Nuclear Photonics 24-29 June 2018: Abstract Book* (Brasov, 2018), P. 62.

30. В.А. Плюйко, О.М. Горбаченко, К.М. Солодовник, Тестування та модифікація фотонних силових функцій з використанням даних фотопоглинання та гамма-розпаду, в *XXVI Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України 8 -12 квітня 2019: тези доповідей* (Київ, 2019), С.32-33.

31. В.М. Bondar, O.M.Gorbachenko, V.Yu.Leshchenko, I.M.Kadenko, V.A.Plujko, K.M.Solodovnik, Study of gamma-spectrum discrepancy in  $^{nat}\text{Cd}(n,\gamma)$  reaction, в *XXVI Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України 8 -12 квітня 2019 : тези доповідей* (Київ, 2019), С.41.

32. O. Gorbachenko, S. Goriely, V.Plujko, K.Solodovnyk, Systematic Uncertainties of E1 Photon Strength Functions Extracted from Photodata (#R013), in *ND2019 Intern. Conf. Nucl. Data for Science and Technology 19-24 May 2019: Programme & Abstract Book* (Beijing, China, 2019), P. 8.

33. O.Gorbachenko, I.Kadenko, V.Plujko, K.Solodovnyk, Comparison of Practical Expressions for E1 Photon Strength Functions (#R024), in *ND2019 Intern. Conf. Nucl. Data for Science and Technology 19-24 May 2019: Programme & Abstract Book* (Beijing, China, 2019), P.15.

34. K.Solodovnyk, V. Plujko, S. Goriely, O. Gorbachenko, Test of Practical Expressions for E1 Photon Strength Functions on Photoabsorption and Photodecay Data, in *7th Workshop on Nuclear Level Density and Gamma Strength 27 – 31 May 2019: Book of Abstracts* (Oslo, 2019), P. 39-40.

35. O.M. Gorbachenko, V.A. Plujko, K.M. Solodovnyk, Comparison of E1 photon strength function expressions, in *International Conference Astronomy and Space Physics in Kyiv University 28 - 31 May 2019: Book of Abstracts* (Kiev, 2019), P.30-31.

## АНОТАЦІЯ

**Солодовник К.М. Фотонні силові функції та їх застосування до усередненого опису електромагнітних переходів в атомних ядрах. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок та високих енергій. Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, Київ, 2020.

В дисертації представлені результати пошуку спрощеного мікроскопічно обґрунтованого виразу для фотонних силових функцій (ФСФ) для усередненого опису електричних дипольних (E1) переходів в атомних ядрах. Розглянуто процеси фотопоглинання та гамма-розпаду. Проаналізовано аналітичні моделі E1 ФСФ: стандартний Лоренціан (SLO), узагальнений Лоренціан (GLO, EGLO), потрійний Лоренціан (TLO) та підхід спрощеного модифікованого Лоренціану (SMLO).

Для тестування ФСФ фотопоглинання, а також їх подальшого використання вперше підготовлено базу даних експериментальних значень E1 ФСФ із систематичною похибкою менше 10%, використовуючи усі наявні дані значення перерізів фотопоглинання у міжнародній базі EXFOR. База ФСФ містить 475 наборів даних ФСФ фотопоглинання для 144 ізотопів від  ${}^6\text{Li}$  до  ${}^{238}\text{Pu}$  та дані для 19 елементів природного складу.

Отримано уточнені експериментальні значення характеристик гігантського дипольного резонансу (ГДР) (енергії, ширини, сили резонансів та їхні похибки) для 144 ізотопів від  ${}^6\text{Li}$  до  ${}^{239}\text{Pu}$  із застосуванням методу найменших квадратів. Нова база даних розширює та уточнює всі раніше опубліковані дані. Отримано уточнені систематики характеристик ГДР та представлено їх порівняння в різних моделях. Запропоновано простий метод наближеного узгодження моделей ФСФ з енергетично залежними ширинами з енергетично зваженим правилом сум (модель SMLOe). Теоретичні моделі порівняно з експериментальними даними з фотопоглинання та гамма-розпаду. За допомогою математичних критеріїв показано, що моделі на основі підходу модифікованого Лоренціану (SMLO, SMLOe) є найточнішими для опису експериментальних даних, а також для передбачення ФСФ за їхньої відсутності.

Із застосуванням активаційної методики вперше для енергій  $E_e = 10.5, 12.0, 18$  MeV виміряно ізомерні відношення для ядер  ${}^{95}\text{Nb}$ ,  ${}^{97}\text{Nb}$ ,  ${}^{133}\text{Xe}$  та  ${}^{135}\text{Xe}$  в реакції фотоподілу  ${}^{235,238}\text{U}$ . Із використанням цих результатів були обчислені функції розподілу за спінами в досліджуваних фрагментах та визначені їхні середні кутові моменти. Показано, що використання різних підходів до обрахунку ФСФ та густини ядерних рівнів має незначний вплив на середні кутові моменти фрагментів.

Ключові слова: фотонні силові функції, дипольні гамма-переходи, фотопоглинання, гамма-розпад, гігантський дипольний резонанс, ізомерні відношення.

## АННОТАЦИЯ

**Солодовник Е.Н. Фотонные силовые функции и их использование для усредненного описания электромагнитных переходов в атомных ядрах. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (доктора философии) по специальности 01.04.16 – Физика ядра, элементарных частиц и высоких энергий. Институт ядерных исследований Национальной академии наук Украины, Киев, 2020.

В диссертации представлены результаты поиска упрощенного микроскопически обоснованного выражения для фотонных силовых функций (ФСФ) для усредненного описания электрических дипольных (E1) переходов в атомных ядрах. Рассмотрены процессы фотопоглощения и гамма-распада. Проанализированы аналитические модели E1 ФСФ: стандартный Лоренциан (SLO), обобщенный Лоренциан (GLO, EGLO), тройной Лоренциан (TLO) и подход упрощенного модифицированного Лоренциана (SMLO).

Для тестирования ФСФ фотопоглощения, а также для их дальнейшего использования впервые подготовлено базу данных экспериментальных значений E1 ФСФ с систематической погрешностью менее 10% с использованием всех имеющихся данных значений сечений фотопоглощения в международной базе EXFOR. База ФСФ содержит 475 наборов данных ФСФ фотопоглощения для 144 изотопов от  ${}^6\text{Li}$  до  ${}^{238}\text{Pu}$  и данные для 19 элементов природного состава.

Получены уточненные экспериментальные значения характеристик гигантского дипольного резонанса (ГДР) (энергии, ширины, силы резонансов и их погрешности) для 144 изотопов от  ${}^6\text{Li}$  до  ${}^{239}\text{Pu}$  с использованием метода наименьших квадратов. Новая база расширяет и уточняет все ранее опубликованные данные. Получены уточненные систематики характеристик ГДР и представлено их сравнение в различных моделях. Предложен простой метод приближенного согласования моделей ФСФ с энергетически зависимыми ширинами с энергетически взвешенным правилом сумм (модель SMLOe). Теоретические модели сравнены с экспериментальными данными фотопоглощения и гамма-распада. При помощи математических критериев показано, что модели на основе подхода модифицированного Лоренциана (SMLO, SMLOe) являются наиболее точными для описания экспериментальных данных, а также для предвидения ФСФ при их отсутствии.

С использованием активационной методики впервые для энергий  $E_e = 10.5, 12.0, 18$  MeV измерены изомерные отношения для ядер  ${}^{95}\text{Nb}$ ,  ${}^{97}\text{Nb}$ ,  ${}^{133}\text{Xe}$  и  ${}^{135}\text{Xe}$  в реакции фотоделения  ${}^{235,238}\text{U}$ . С использованием этих результатов были рассчитаны функции распределения по спинам в исследуемых фрагментах и определены их средние угловые моменты. Показано, что использование разных подходов к расчёту ФСФ и плотности ядерных уровней имеет незначительное влияние на средние угловые моменты фрагментов.



Ключевые слова: фотонные силовые функции, дипольные гамма-переходы, фотопоглощение, гамма-распад, гигантский дипольный резонанс, изомерные отношения.

## ANNOTATION

**Solodovnyk K.M. Photon strength functions and their usage for averaged description of electromagnetic transitions in atomic nuclei. – Manuscript.**

Thesis for candidate (Doctor of Philosophy) degree (Physics and Mathematics) by specialty 01.04.16 – Nuclear, Particle and High Energy Physics. Institute for Nuclear Research, National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis is the result of search for the simplified microscopically based expression for the photon strength functions (PSF) for the averaged description of the electric dipole transitions (E1) in atomic nuclei. The processes of photoabsorption and gamma-decay were considered. The analytical models for E1 PSF were analyzed, namely the standard Lorentzian model (SLO), generalized Lorentzian model (GLO, EGLO), triple Lorentzian model (TLO) and simplified modified Lorentzian approach (SMLO).

For testing of PSF for photoabsorption and for their further usage, the database with experimental values of E1 PSF with systematical error less than 10% were prepared for the first time using all data for photoabsorption cross section from the international EXFOR database. The PSF database contains 475 datasets on PSF for photoabsorption for 144 isotopes from  ${}^6\text{Li}$  to  ${}^{238}\text{Pu}$  and data for 19 elements of natural isotopic composition.

The updated experimental values of the giant dipole resonance (GDR) characteristics (energy, width and strength) were obtained for 144 isotopes from  ${}^6\text{Li}$  to  ${}^{239}\text{Pu}$  using the least-square method. This new database extends and updates all previously published data. The updated values of systematics of the GDR parameters were obtained and compared. For energy-dependent PSF models simple consistent with energy weighted sum rule was given (SMLOe model). Theoretical models were compared with experimental data on photoabsorption and gamma-decay. With the use of mathematical criteria, it was shown that the models based on the modified Lorentzian approach (SMLO, SMLOe) are the most accurate for the description of experimental data as well as for the prediction of the PSF in their absence.

For activation technique, the isomeric ratios were measured for the first time for the gamma-ray energies  $E_e = 10.5, 12.0, 18$  MeV for the nuclei  ${}^{95}\text{Nb}$ ,  ${}^{97}\text{Nb}$ ,  ${}^{133}\text{Xe}$  and  ${}^{135}\text{Xe}$  for the photofission reaction of  ${}^{235,238}\text{U}$ . With these results, the spin distribution functions of the investigated fragments were calculated and the mean angular momentum were obtained. It was demonstrated that the use of different PSF and nuclear level densities has only a slight effect on mean angular momenta of fragments.

Keywords: photon strength functions, dipole gamma-transitions, photoabsorption, gamma-decay, giant dipole resonance, isomeric ratio.