

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

БАБАК Олександр Вікторович

УДК 539.17

**ОПТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСУ ВЗАЄМОДІЇ ЧАСТИНОК І
СЛАБКОЗВ'ЯЗАНИХ ЯДЕР З ЯДРАМИ В ОБЛАСТІ НИЗЬКИХ І
СЕРЕДНІХ ЕНЕРГІЙ**

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 у відділі структури ядра Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
Михайлюк Вадим Петрович,
завідувач лабораторії теорії ядерних взаємодій та процесів відділу структури ядра,
Інститут ядерних досліджень НАН України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Єжов Станіслав Миколайович,
професор кафедри фізики металів,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
доктор фізико-математичних наук, професор
Харченко Владислав Федорович,
головний науковий співробітник,
Інститут теоретичної фізики імені М.М. Боголюбова НАН України

Захист відбудеться 3 грудня 2020 р. о 14⁴⁵ 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 «30» листопада 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

кандидат фізико-математичних наук



Хоменков В.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Взаємодія частинок та легких ядер з ядрами інтенсивно вивчається протягом багатьох років. При теоретичній інтерпретації таких процесів використовуються різноманітні моделі та підходи, які можуть доповнювати один одного.

Однією з таких моделей є оптична модель. Оптична модель розсіяння адронів і слабкозв'язаних частинок ядрами з використанням комплексного оптичного потенціалу є важливою фундаментальною проблемою ядерної фізики. Така модель описує рух однієї частинки в середньому полі, яке створюється нуклонами, що входять до складу ядра. Середнє поле, у якому рухається налітаюча частинка, зазвичай описується простим феноменологічним одночастинковим потенціалом. Таке наближення дає змогу перейти від задачі багатьох тіл до задачі одного тіла в полі комплексного потенціалу, суттєво спрощує розрахунки перерізів взаємодії та знаходить підтвердження як в узгодженні теоретично розрахованих спостережуваних характеристик розсіяння з існуючими експериментальними даними, так і в низці багатьох інших важливих фундаментальних фізичних проблем.

Згідно до оптичної моделі, розсіяння ядер можна описати подібно до розсіяння світла напівпрозорим середовищем. За такої концепції взаємодія налітаючої частинки з нуклонами ядра-мішені усереднюється полем, яке описується потенціалом з дійсною та уявною частинами. Цей квантово-механічний підхід дає змогу описати реакцію взаємодії налітаючих частинок, які можуть бути розсіяні, передані або поглинені потенціалом. Оптичний потенціал є ефективним інструментом, який використовується не тільки для пружного розсіяння, але і як інгредієнт для прогнозування перерізів та кутових розподілів багатьох процесів прямих ядерних реакцій, і тому він відіграє важливу роль у ядерній фізиці.

Нині накопичено значний експериментальний матеріал щодо взаємодії частинок і легких, в тому числі радіоактивних нейтронадлишкових, ядер (${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{9,11,14}\text{Be}$ та ін.), з ядрами в області низьких та середніх енергій. Теоретичні дослідження подібних реакцій свідчать про необхідність синтезу підходів, які використовуються при вивченні ядерних реакцій та структури ядер.

Тому побудова моделей, які описують ядерні реакції з оглядом на особливості як внутрішньої структури налітаючих частинок, так і процесів, які протікають під час ядерної взаємодії, є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Інституті ядерних досліджень НАН України в рамках наукових тем відділу теорії ядерних реакцій «Кластерні аспекти структури легких екзотичних та гіпер-ядер» (№ державної реєстрації 0106U005595), «Дослідження структурних особливостей легких ядер за допомогою ядерних реакцій» (№ державної реєстрації 0111U001945) та в рамках наукових тем відділу структури ядра НАН України «Дослідження структури ядер, механізмів ядерних реакцій та фізичних процесів в пучках

заряджених частинок» (№ державної реєстрації 0117U002847), «Дослідження поділу ядер в низькоенергетичній області, розробка нових методів реєстрації продуктів поділу ядер та вивчення фізичних процесів в пучках заряджених іонів» (№ державної реєстрації 0116U004450), в яких автор був відповідальним виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Основною метою дисертаційної роботи є розвиток теоретичних підходів, які дають змогу дослідити взаємодію частинок і слабкозв'язаних ядер з ядрами в області низьких і середніх енергій з урахуванням як характерних властивостей налітаючої частинки, так і з урахуванням типу реакції.

Для досягнення цієї мети в роботі було розвинуто оптичну модель для опису наступних реакцій: пружне розсіяння дейтроноподібних частинок важкими ядрами за підбар'єрних енергій, розщеплення дейтроноподібних частинок при розсіянні на ядрах за надбар'єрних енергій, а також поляризація протонів при розсіянні на ядрах за середніх енергій.

Об'єкт дослідження: розсіяння та супутні реакції частинок та легких ядер з ядрами в області низьких та середніх енергій.

Предмет дослідження: спостережувані характеристики для реакцій нуклонів і дейтронів з важкими ядрами, їхній зв'язок з оптичними потенціалами, теоретичні підходи та моделі для таких реакцій.

Методи дослідження: у дисертаційній роботі використано наступні методи обчислення амплітуди пружних та непружних ядерних процесів: оптична модель, метод деформованих хвиль і Борнове наближення.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. На основі адіабатичної моделі пружного розсіяння легких нейтронадлишкових ядер ядрами за підбар'єрних енергій з використанням електричного оптичного потенціалу запропоновано модель для врахування впливу ядерного поля важкого ядра-мішені за умови поляризованості налітаючої частинки в кулоновому полі ядра.

2. Здобуто аналітичний вираз для електричного оптичного потенціалу в області поворотних точок, досліджено його властивості для випадку розсіяння дейтронів та іонів ${}^6\text{He}$ ядрами ${}^{208}\text{Pb}$ і доведено, що критерій використаного наближення виконується до границі ядра-мішені.

3. Запропоновано схему побудови ядерного оптичного потенціалу з урахуванням поляризованості дейтроноподібної налітаючої частинки в області поворотних точок і доведено, що такий потенціал дає змогу задовільно описати перерізи пружного розсіяння дейтронів ядрами ${}^{208}\text{Pb}$, ${}^{124}\text{Sn}$ та ${}^{58, 62}\text{Ni}$ за підбар'єрних енергій.

4. Знайдено, що врахування поляризованості налітаючих дейтронів посилює ядерний оптичний потенціал у периферійній області, що дає змогу пояснити причину виникнення нефізичних параметрів традиційних оптичних потенціалів при теоретичній інтерпретації даних із пружного розсіяння.

5. Досліджено вплив ядерного оптичного потенціалу на перерізи реакції розщеплення дейтронів ядрами за надбар'єрних енергій та запропоновано модель ядерного оптичного потенціалу, в якій потенціал

взаємодії дейтронів з ядрами-мішенями вибирався як згортка ядерних оптичних потенціалів складових дейтрона.

6. На основі методу деформованих хвиль запропоновано модель, в якій емпірично враховувалася внутрішня структура налітаючого дейтрона, виконано порівняння розрахованих перерізів реакції розщеплення дейтронів ядрами ^{12}C , ^{40}Ca та ^{90}Zr з наявними експериментальними даними та доведено, що врахування внутрішньої структури дейтрона суттєво впливає на поведінку розрахованих характеристик реакції розщеплення за надбар'єрних енергій.

7. Уперше здобуто аналітичні вирази для амплітуд і спостережуваних характеристик пружного розсіяння протонів ядрами ^{40}Ca у другому Борновому наближенні. Доведено, що використання другого Борнового наближення обумовлено тим, що поляризація нуклонів при їхньому розсіянні ядрами, розрахована в першому Борновому наближенні з ермітовим потенціалом, дорівнює нулю.

8. Доведено, що врахування другого Борнового наближення дає змогу задовільно описати наявні експериментальні дані в області енергій $150 \div 800$ MeV.

9. Виконано порівняння теоретичних розрахунків із застосуванням другого Борнового наближення та оптичної моделі та доведено, що обидва використані підходи дають змогу задовільно описати наявні експериментальні дані при енергіях 150 та 200 MeV.

Практичне значення отриманих результатів. У дисертації розвинуто підхід, який дає змогу дослідити спостережувані характеристики різноманітних реакцій взаємодії частинок і слабкозв'язаних дейтроноподібних легких ядер з ядрами в області низьких та середніх енергій. За допомогою запропонованого підходу описано низку експериментальних даних із пружного та непружного розсіяння протонів, дейтронів і дейтроноподібних частинок легкими, середніми та важкими ядрами. Важливе наукове значення мають описані перерізи пружного розсіяння дейтронів ядрами ^{208}Pb , ^{124}Sn та $^{58, 62}\text{Ni}$ за підбар'єрних енергій. Запропоноване узагальнення методу деформованих хвиль, в якому емпірично враховувалась внутрішня структура налітаючого дейтрона, дає змогу в подальшому вивчати перерізи реакції розщеплення слабкозв'язаних дейтроноподібних легких ядер ядрами за надбар'єрних енергій. Важливими є розраховані диференціальні перерізи, а також розраховані та передбачені поляризаційні характеристики, які спостерігаються в пружному розсіянні протонів ядрами ^{40}Ca . Запропонований підхід та здобуті в дисертаційній роботі результати можуть бути застосовані для планування та аналізу майбутніх експериментальних досліджень, а також вони є важливими для подальшого вивчення структури легких слабкозв'язаних дейтроноподібних ядер і механізмів ядерної взаємодії.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційну роботу увійшли результати досліджень, викладені в роботах [1-12].

У роботах [1-3], [8-10] автором дисертації було здобуто аналітичний вираз для електричного оптичного потенціалу слабкозв'язаного дейтроноподібного ядра в полі ядра-мішені та запропоновано схему побудови

ядерного оптичного потенціалу з урахуванням поляризованості налітаючої частинки. На основі запропонованого підходу виконано розрахунки та аналіз перерізів пружного підбар'єрного розсіяння дейтронів важкими ядрами.

У роботах [4], [6,7] автором досліджувались реакції розщеплення дейтронів ядрами за надбар'єрних енергій. З використанням різних моделей оптичного потенціалу розроблено алгоритм для розрахунків перерізів реакції розщеплення дейтронів ядрами та запропоновано модель, у якій враховується внутрішня структура налітаючої частинки.

У роботах [5], [11,12] автором дисертації знайдено аналітичні вирази для амплітуд і спостережуваних характеристик пружного розсіяння протонів середніх енергій ядрами в другому Борновому наближенні.

Апробація результатів дисертації. Результати, наведені в дисертації, доповідалися на наступних міжнародних конференціях та школах: XVIII–а Міжнародна конференція з фізики радіаційних явищ і радіаційного матеріалознавства (Алушта, Україна, 2008 р.); щорічних наукових конференціях Інституту ядерних досліджень НАН України у 2007, 2009, 2014 та 2015 роках. Результати дисертації доповідалися на наукових семінарах Інституту ядерних досліджень НАН України.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 12 наукових роботах, з них 5 статей у фахових реферованих вітчизняних та міжнародних журналах [1-5] та в 7-х тезах наукових конференцій [6-12]. До бази Scopus включено 5 статей [1–5].

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів основного тексту, висновків, списку використаних джерел із 144 найменувань, 49 рисунків і 6 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 138 стор. (з них основного тексту 124 стор.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовується актуальність тематики дослідження, формулюється мета та задачі, наводиться наукова новизна та практичне значення здобутих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами та темами, зазначено особистий внесок здобувача, апробація результатів та публікації.

У **першому розділі** розглянуто задачу підбар'єрного розсіяння слабкозв'язаних ядер важкими ядрами. Наведено огляд адіабатичної моделі поляризованості слабкозв'язаних дейтроноподібних ядер з використанням концепції електричного оптичного потенціалу (ЕОП).

У такому підході дійсна частина ЕОП відповідає просторовій поляризованості зарядженої і нейтральної складових дейтроноподібної частинки у кулоновому полі ядра-мішені, а уявна частина ЕОП відповідає за вихід частинки з каналу пружного розсіяння внаслідок розщеплення на складові.

Зі зростанням кінетичної енергії налітаючої частинки поворотні точки траєкторії наближаються до границі ядерного поля ядра-мішені, і для розрахунку ЕОП в області таких точок застосовано рівномірне наближення.

Отримано аналітичний вираз для ЕОП

$$\Delta V = 2\varepsilon_0 \frac{\operatorname{Re} d_0 + i \operatorname{Im} d_0}{1 + 2i S'_0 \varepsilon_0 \operatorname{Im} d_0}, \quad (1)$$

де ε_0 - енергія зв'язку дейтроноподібної частинки.

Похідна від інтегралу дії в кулоновому полі дорівнює

$$S'_0 = 2 \left(\frac{dS}{d\Delta V} \right)_{\Delta V=0} = \frac{1}{V_c} \frac{2\eta}{\rho} \left\{ S_0 + 2\rho \sqrt{\frac{2\eta}{\rho} - 1} \right\}, \quad (2)$$

де $V_c = Z_p Z_T e^2 / R$ - кулоновий потенціал, R - координата центру мас налітаючого

ядра, $\eta = \frac{m_p Z_p Z_T e^2}{\hbar^2 \sqrt{2\mu \hbar^2 (V_c - \varepsilon_0)}}$ і $\rho = \frac{m_d}{m_n} \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} (V_c - \varepsilon_0) R}$, а параметр d_0 виражається через

кулонові функції наступним чином:

$$d_0 = 1 - \left[H_0(\eta, \rho) F_0(\eta, \rho) - H'_0(\eta, \rho) F'_0(\eta, \rho) \right]. \quad (3)$$

За підбар'єрної енергії в кулоновому полі ядра-мішені, розсіювана частинка просторово поляризується, деформується і взаємодіє з ядерним полем ядра-мішені. З урахуванням (1) для ЕОП, можна розрахувати ядерний оптичний потенціал (ЯОП). В такому підході рівняння Шредінгера для хвильової функції центра мас розсіюваної частинки має вигляд

$$\left[E_d - \hat{K}_R - \bar{V}_N(R) - \Delta V(R) + V_c(R) \right] \chi_d(\mathbf{R}) = 0, \quad (4)$$

де $\bar{V}(R) = \langle \Phi_R(\mathbf{r}) | V_n(\mathbf{r}_n) + V_p(\mathbf{r}_p) | \Phi_R(\mathbf{r}) \rangle$ - потенціал ядерної взаємодії нейтрона з ядром-мішенню в моделі однократної згортки, $\Phi_R(\mathbf{r})$ - функція внутрішнього стану частинки, яка параметрично залежить від відстані до ядра-мішені. Оптичні потенціали нейтронів V_n і протонів V_p бралися з експериментальних даних по пружному розсіянню нейтронів і протонів на відповідних ядрах-мішенях.

Згортка по функціям внутрішнього стану частинки, з урахуванням поляризованості налітаючої частинки, призводить до значного посилення ядерної взаємодії в області поворотних точок траєкторії.

В дисертаційній роботі доведено, що далекодіючий характер взаємодії легких слабкозв'язаних дейтроноподібних частинок з важкими ядрами мішеней є причиною нефізичної поведінки параметрів уявної частини оптичних потенціалів (занадто великі радіуси або дифузності), одержаних при підгонці диференціальних перерізів пружного розсіяння таких частинок за традиційною оптичною моделлю.

На рис. 1. представлено розраховані ЯОП для випадку розсіяння дейтронів ядрами ^{208}Pb .

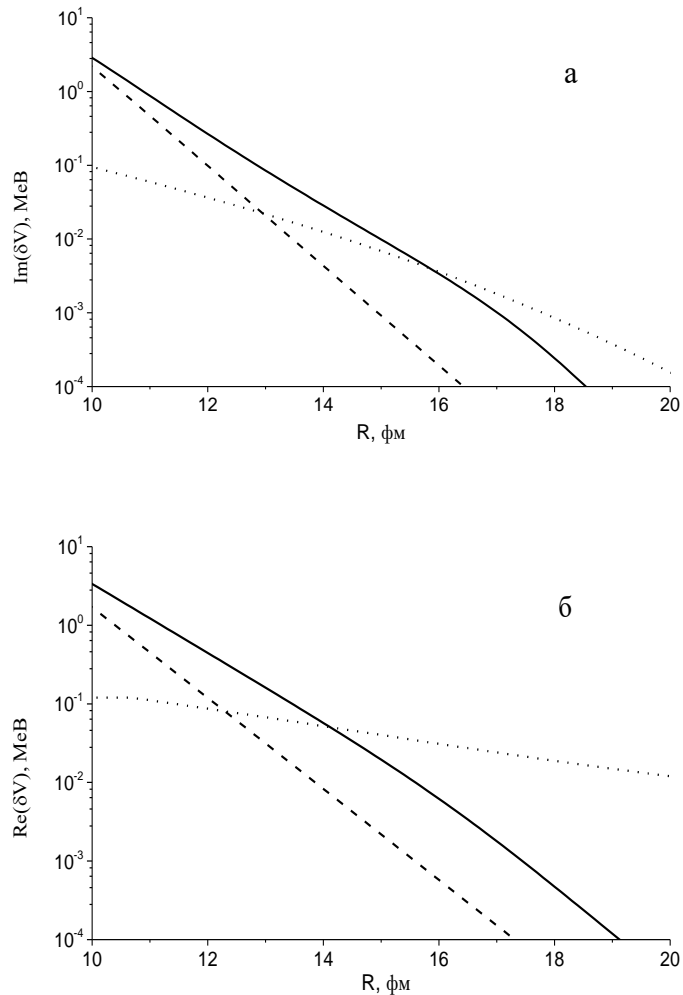


Рис.1. Уявна (а) та дійсна (б) частини суми оптичних потенціалів протона та нейтрона в логарифмічному масштабі. Суцільні криві - потенціал у моделі згортки, штрихові криві – модель “точкового” дейтрона, пунктирні криві – ЕОП.

З рис. 1 видно, що в області точки повороту (~ 16 фм) ядерний оптичний потенціал в моделі згортки більш ніж у десять разів перевищує оптичний потенціал в моделі “точкового” дейтрона. Хоча на такій відстані від ядра мішені дійсна частина ЕОП домінує над ядерним потенціалом, нівелюючи внесок моделі згортки, уявна частина ЕОП є одного порядку з ядерним оптичним потенціалом в моделі згортки.

Практично в усій області простору для розглянутих систем ядер виконується умова адіабатичності $|\Delta V / \varepsilon_0| \ll 1$.

Представлений підхід було використано для опису наявних експериментальних даних для диференціальних перерізів пружного розсіяння дейтронів за енергій 4, 5,5 та 5 MeV ядрами ^{124}Sn (рис. 2), 3,5, 4,5 та 5,16 MeV ядрами $^{58,62}\text{Ni}$ (рис. 3) і 7, 7,3 та 8 MeV ядрами ^{208}Pb (рис. 4-5).

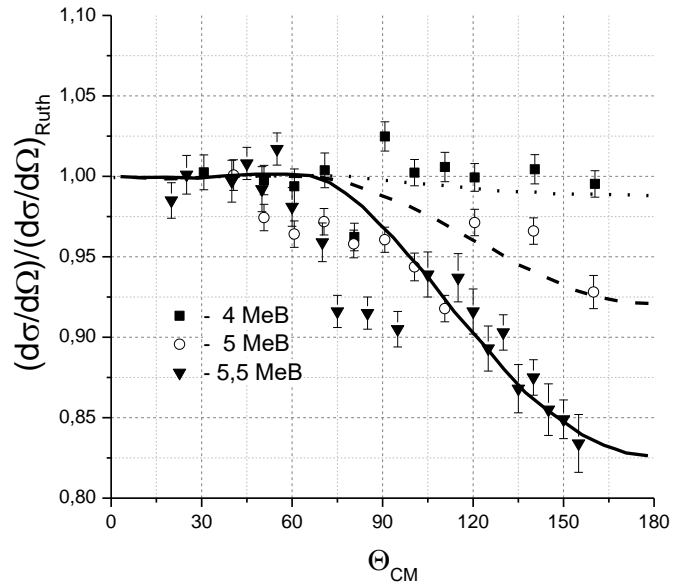


Рис. 2. Диференціальні перерізи пружного розсіяння дейтронів на ядрах ^{128}Sn за енергій 4 МеВ (пунктирна крива), 5 МеВ (штрихова крива) і 5,5 МеВ (суцільна крива).

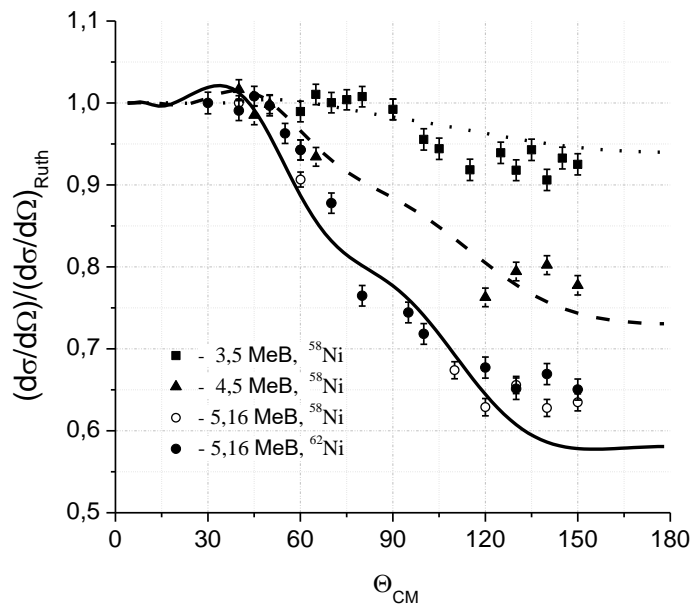


Рис. 3. Диференціальні перерізи пружного розсіяння дейтронів на ядрах $^{58}, ^{62}\text{Ni}$ за енергій 3,5 МеВ (пунктирна крива), 4,5 МеВ (штрихова крива) і 5,16 МеВ (суцільна крива).

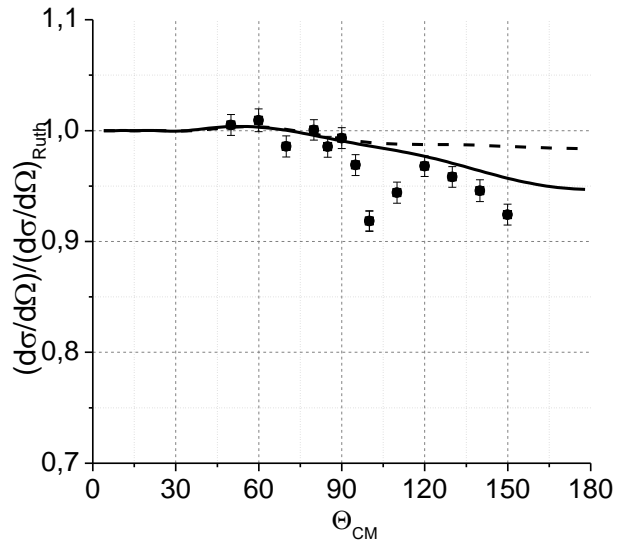


Рис. 4. Кутова залежність перерізу пружного розсіяння дейтрона за енергії 7.3 МеВ ядрами ^{208}Pb , віднесеного до резерфордівського. Штрихова крива - розрахунки лише з урахуванням впливу поляризованості та розщеплення дейтрона, суцільна крива - з ядерними оптичними потенціалами в моделі згортки.

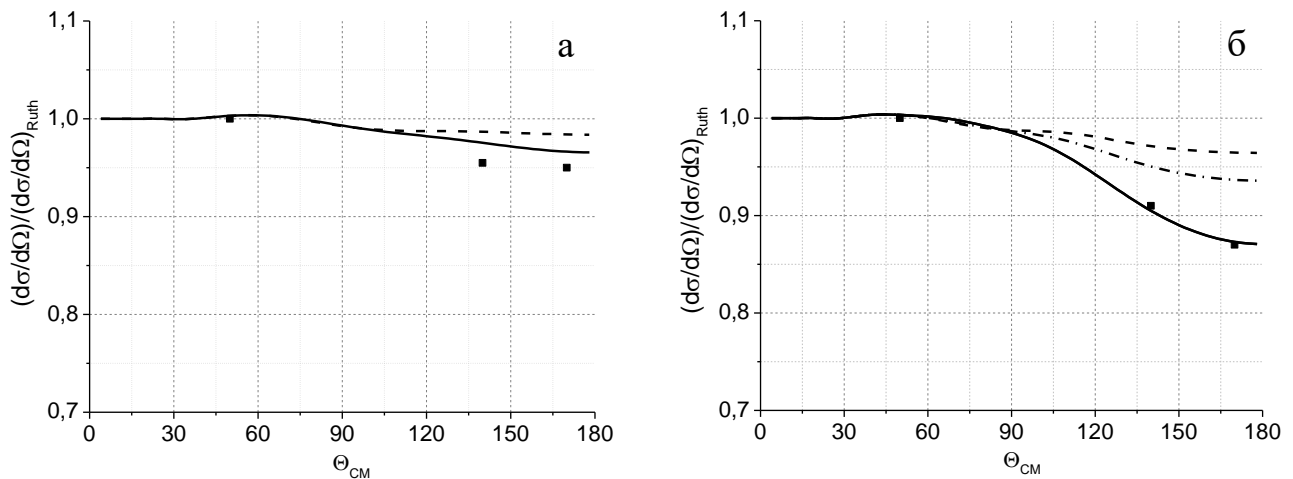


Рис. 5. Кутова залежність перерізу пружного розсіяння дейтрона за енергії 7 (а) 8 (б) МеВ ядрами ^{208}Pb . Штрих-пунктирна крива - розрахунок з ядерним оптичним потенціалом без процедури згортки.

З рис.4 - 5 видно, що саме згортка по функціям поляризованого дейтрона дає значний внесок і дозволяє задовільно описати наявні експериментальні дані.

З наведених рисунків видно, що диференціальні перерізи в моделі згортки у порівнянні з розрахунками, виконаними в моделі ЕОП, зі зростанням кута розсіяння починають різко спадати. Зі зростанням кута розсіяння, точка повороту наближається до границі ядерного поля ядра мішені, з яким дейтрон починає взаємодіяти. За рахунок поляризованості в кулоновому полі дейтрон значно ефективніше взаємодіє з ядерним потенціалом мішені.

Другий розділ присвячено дослідженню взаємодії дейтронів з ядрами за надбар'єрних енергій.

В попередньому розділі розглядалось пружне розсіяння легких нейтронадлишкових ядер на ядрах-мішенях за підбар'єрних і білябар'єрних енергій. При більш високих енергіях налітаючих частинок ($E \geq 10$ МеВ/нуклон) має помітно проявлятися вплив ядерної взаємодії та зростає вплив непружних каналів реакції, таких як розщеплення дейтрона ($d, n+p$) та зрив нуклонів в реакціях (d, n), (d, p). Такі реакції не описуються адіабатичною моделлю в зв'язку з тим, що кулоновий потенціал зростає з наближенням частинки до ядра-мішені надто швидко, порушуючи умову адіабатичності. Окрім того, поворотні точки за таких енергій можуть лежати глибоко в області дії ядерного поля ядра-мішені, що порушує умови використання рівномірного наближення.

Реакцію розщеплення дейтронів при розсіянні ядрами ^{12}C , ^{40}Ca та ^{90}Zr в роботі досліджено в рамках методу деформованих хвиль. За такого підходу амплітуда реакції розщеплення має наступний вигляд

$$T = \left\langle \chi_{pt}^{(-)}(\mathbf{r}_{pt}) \chi_{nt}^{(-)}(\mathbf{r}_{nt}) \left| V_{np}(r) \right| \chi_{dt}^{(+)}(\mathbf{R}) \varphi_0(r) \right\rangle, \quad (5)$$

де $\chi_{dt}^{(+)}(\mathbf{R})$, $\chi_{pt}^{(-)}(\mathbf{r}_{pt})$, $\chi_{nt}^{(-)}(\mathbf{r}_{nt})$ - функції центра мас дейтрона, протона і нейтрона в оптичному потенціалі ядра-мішені.

За підбар'єрних енергій, коли розщеплення дейтрона переважно відбувається в кулоновому полі, а потім продукти розщеплення взаємодіють з ядром-мішеню, перерізи реакції розщеплення добре описуються методом деформованих хвиль.

За надбар'єрних енергій, коли кути вильоту протона і нейтрона знаходяться по одну сторону пучка, узгодження значно погіршується, а при кутах вильоту близьких до нуля розраховані перерізи розщеплення перевищують експериментальні дані приблизно в два рази.

Виконані розрахунки свідчать про те, що врахування ядерного оптичного потенціалу призводить до суттєвого завищення диференціальних перерізів у порівнянні як з експериментальними даними, так і з розрахунками, виконаними лише з урахуванням кулонової взаємодії. Такий значний вплив ядерної взаємодії на поведінку перерізів реакції розщеплення викликає подив і може бути пов'язаний в першу чергу з використаними в моделі параметрами оптичного потенціалу.

В представленому підході було використано оптичні потенціали з параметрами, отриманими з порівняння експериментальних даних по пружному розсіянню дейтронів ядрами на великі кути ($\theta > 20^\circ$), в той час як реакція розщеплення дейтрона за енергії 56 MeV проходить переважно з вильотом продуктів реакції під малими кутами. За таких умов реакція розщеплення являється в основному периферійною і визначається переважно кулоною взаємодією.

В дисертаційній роботі при розрахунках диференціальних перерізів реакції розщеплення дейтронів ядрами використовувались наступні модельні наближення для оптичних потенціалів: модель згортки по функціям основного стану дейтрона в формі Хюльтена (МЗ) та модель “точкового” дейтрона (МТД).

Оптичний потенціал в МЗ та МТД моделях визначається формулами

$$V_d^{(M3)}(\mathbf{R}) = \langle \phi_0(r) | V_p(\mathbf{r}_p) + V_n(\mathbf{r}_n) | \phi_0(r) \rangle, \quad (6)$$

$$V_d^{(MTD)}(\mathbf{R}) = V_p(\mathbf{R}) + V_n(\mathbf{R}). \quad (7)$$

Результати розрахунків з використанням таких потенціалів представлено на рис. 6.

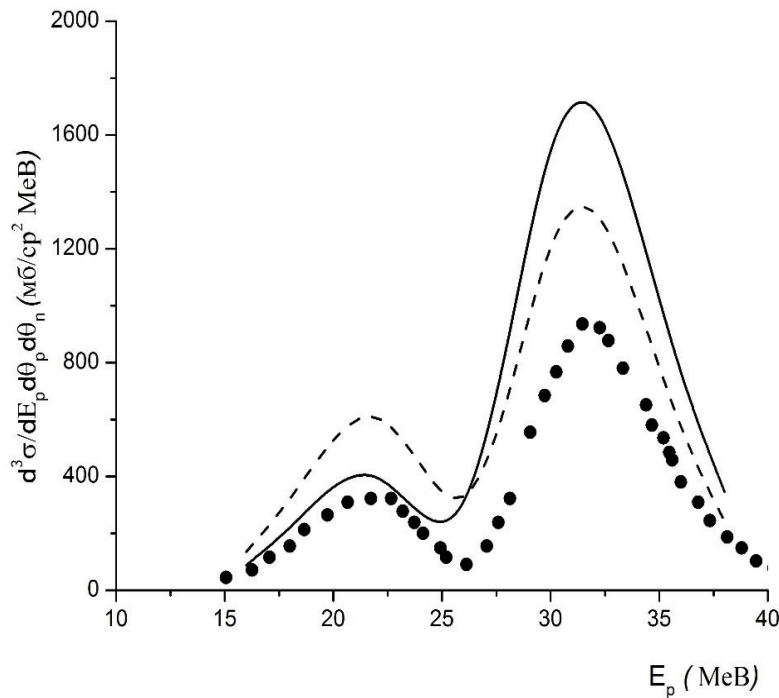


Рис. 6. Диференціальний переріз розщеплення дейтронів ядрами ^{40}Ca за енергії 56 MeV. Суцільна крива розрахована з використанням потенціалу у формі (6), а штрихова крива – з потенціалом у формі (7).

З рис. 6 видно, що використання в представленому підході оптичного потенціалу (6) дозволяє дещо краще узгодити виконані розрахунки з наявними експериментальними даними в області енергій $E_p < E_n$, однак в області енергій $E_p \geq E_n$ суттєвих змін у поведінці розрахованого перерізу не спостерігається.

Також з рис. 6 видно, що використання в представленому підході оптичного потенціалу в формі (7) не дозволяє узгодити виконані розрахунки з наявними експериментальними даними в розглядуваній області енергій.

Результати виконаних досліджень свідчать про те, що без урахування внутрішньої структури налітаючого дейтрона описати наявні експериментальні дані доволі складно.

Для врахування внутрішньої структури налітаючого дейтрона використано наступне наближення

$$\chi_p^{(-)}(\mathbf{r}_p)\chi_n^{(-)}(\mathbf{r}_n) \approx \chi_p^{(-)}(\mathbf{R})\chi_n^{(-)}(\mathbf{R})e^{-ik_n r/2}. \quad (8)$$

В такому підході вважається, що розщеплення дейтрона в полі ядра-мішені в основному відбувається за рахунок кулонової взаємодії протона з ядром, а нейтрон при цьому рухається вільно з відносним імпульсом $k_n/2$.

Амплітуди розщеплення дейтронів представлялась у вигляді

$$\begin{aligned} T &\approx \langle \chi_p^{(-)}(\mathbf{k}_p, \mathbf{R})\chi_n^{(-)}(\mathbf{k}_n, \mathbf{R}) | \chi_d^{(+)}(\mathbf{k}_d, \mathbf{R}) \rangle \langle e^{ik_n r/2} | V_{np}(r)\varphi_0(r) \rangle = \\ &= \langle \chi_p^{(-)}(\mathbf{k}_p, \mathbf{R})\chi_n^{(-)}(\mathbf{k}_n, \mathbf{R}) | \chi_d^{(+)}(\mathbf{k}_d, \mathbf{R}) \rangle \frac{\beta^2}{\beta^2 + k_n^2/4} D_0, \end{aligned} \quad (9)$$

де $\beta = \mu + \alpha = 1.4 \text{ фм}^{-1}$ - параметри потенціалу Хюльтена.

Результати виконаних в такому підході розрахунків представлено на рис. 7, 8. Суцільні та штрихові криві на даних рисунках розраховано за формулою (9) з використанням оптичного потенціалу, який обирався у формі Вудса-Саксона з параметрами, взятими з підгонки експериментальних даних для пружного розсіяння.

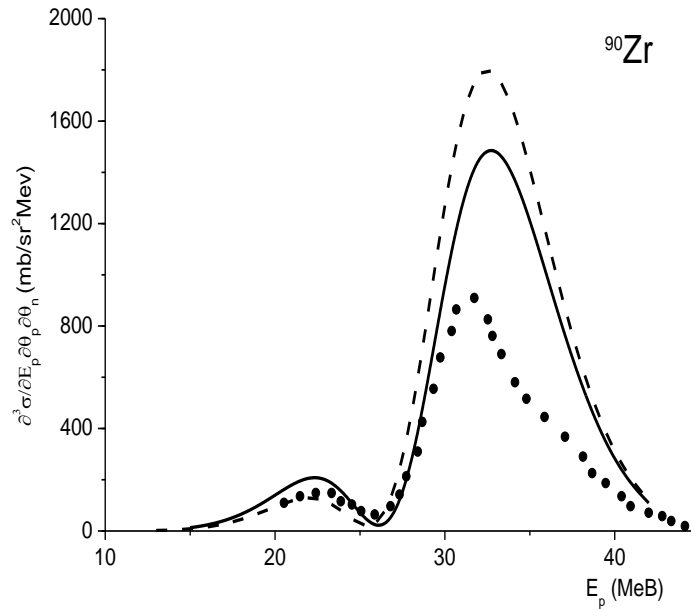


Рис. 7. Диференціальний переріз розщеплення дейтронів ядрами ^{90}Zr за енергії 56 MeV.

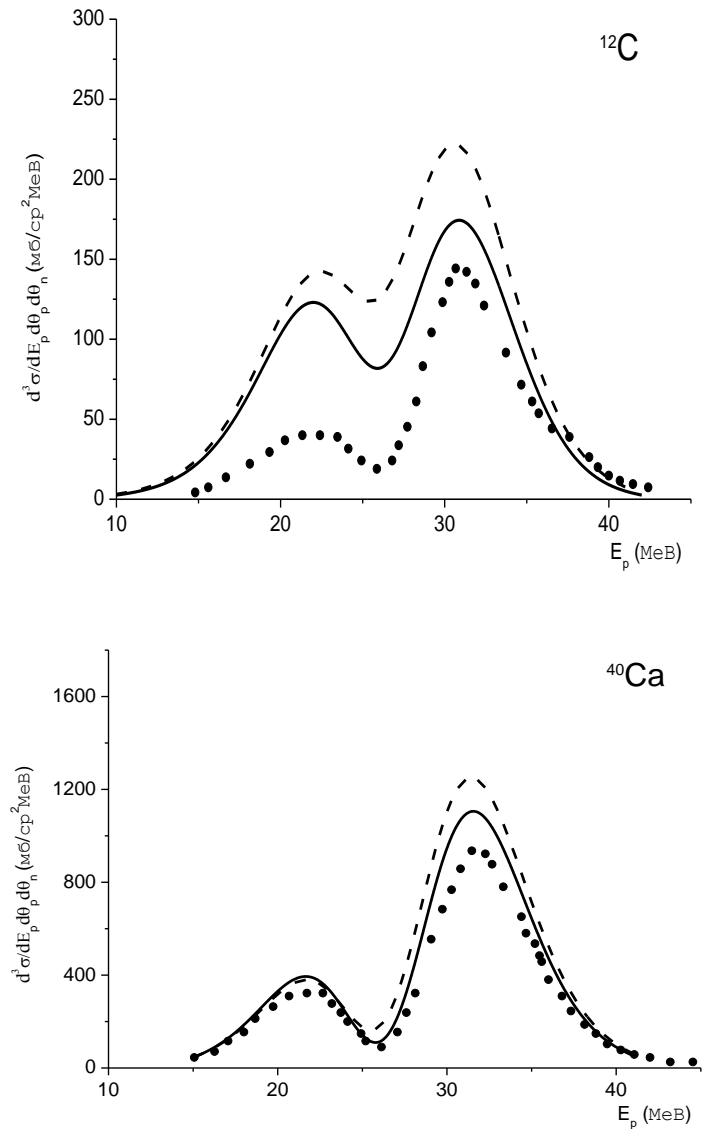


Рис. 8. Диференціальні перерізи розщеплення дейтронів ядрами ^{12}C та ^{40}Ca .

Представлені результати свідчать про те, що врахування ядерного оптичного потенціалу суттєво впливає на поведінку диференціальних перерізів реакції взаємодії дейтронів та його складових з ядрами за надбар'єрних енергій, а поведінка диференціального перерізу реакції розщеплення суттєво залежить від вибору моделі ядерного оптичного потенціалу дейтрона.

У третьому розділі виконано розвиток оптичної моделі для вивчення взаємодії адронів середніх енергій з ядрами.

У даному розділі з урахуванням 2-го Борнового наближення (БН) отримано аналітичні вирази для амплітуд розсіяння, диференціального перерізу та поляризаційних характеристик пружного розсіяння протонів ядрами ^{40}Ca та доведено, що поляризація нуклонів, розрахована в 1-му БН з ермітовим потенціалом, дорівнює нулю. Тому, для визначення поляризаційних характеристик розсіяння використовувалось 2-ге БН.

Амплітуда розсіяння частинки ядром в загальному випадку визначається формулою

$$f(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \int d\mathbf{r} e^{-i\mathbf{k}'\mathbf{r}} U(\mathbf{r}) \psi_{\mathbf{k}}^{(+)} \quad (10)$$

де $m = m_p m_t / (m_p + m_t)$ - зведена маса, \mathbf{k} і \mathbf{k}' - хвильові вектори налітаючого та розсіяного нуклона, а $\psi_{\mathbf{k}}^{(+)}$ - хвильова функція, яка в асимптотиці має плоску та сферично розбіжну хвилю.

Метод ітерацій дозволяє отримати з формули (10) вирази для амплітуд розсіяння в 1-му та 2-му БН

$$f^{(1)}(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \int d\mathbf{r} e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}} U(\mathbf{r}), \quad (11)$$

$$f^{(2)}(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \int d\mathbf{r} d\mathbf{r}' e^{-i\mathbf{k}'\mathbf{r}} U(\mathbf{r}') G_0^{(+)}(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) U(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}}, \quad (12)$$

де $\mathbf{q} = \mathbf{k} - \mathbf{k}'$ ($|\mathbf{q}| = 2k \sin(\theta/2)$) - переданий імпульс, а функція Гріна визначається наступним виразом

$$G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \frac{e^{ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}. \quad (13)$$

Тоді для амплітуди розсіяння (10) в БН отримуємо

$$f_B^{(2)}(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = f^{(1)}(\mathbf{k}, \mathbf{k}') + f^{(2)}(\mathbf{k}, \mathbf{k}'). \quad (14)$$

В формулах (11), (12) потенціал взаємодії налітаючої частинки з урахуванням спінової взаємодії обирається у вигляді

$$U(\mathbf{r}) = U_c(r) + U_s(r) \boldsymbol{\sigma} \mathbf{l}, \quad (15)$$

де $U_c(r)$ і $U_s(r)$ - центральна і спінової частини оптичного потенціалу, $\boldsymbol{\sigma} \mathbf{l}$ - скалярний добуток оператора спіну і орбітового моменту налітаючої частинки, $\mathbf{l} = -i\mathbf{n} \frac{d}{d\theta}$, а \mathbf{n} - вектор нормалі до площини реакції.

В дисертаційній роботі радіальна залежність центральної $U_1(r)$ та спінової $U_2(r)$ частини оптичного потенціалу $U(\mathbf{r})$ представлялися у вигляді розкладу по функціям $g_j(r)$, які обирались у формі Вудса-Саксона з урахуванням відмінностей між параметрами для дійсної, уявної і спінової частин

$$g_j(r) = \frac{1}{1 + e^{(r-R_j)/d_j}}, \quad j = v, w, s. \quad (16)$$

В такому підході амплітуда розсіяння в 2-му БН може бути представлена в вигляді

$$f^{(2)}(\vec{q}) = f_{cc}(q) + f_{ss}(q) + 2f_{cs}(q)(\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}). \quad (17)$$

де $f_{cc}(q)$, $f_{ss}(q)$, $f_{cs}(q)$ - комбінації центральної і спінової частини амплітуди (12).

На основі запропонованого підходу було виконано розрахунки диференціальних перерізів, поляризації і функції повороту спіну для пружного розсіяння протонів ядрами ^{40}Ca в широкій області енергій $E_p = 150 \div 800$ MeV. Отримані результати узгоджуються з наявними експериментальними даними.

Також в дисертаційній роботі проведено порівняння виконаних теоретичних розрахунків із результатами, які можна отримати з використанням стандартної оптичної моделі а також з наявними експериментальними даними за енергій $E_p = 150$ та 200 MeV. Результати таких розрахунків представлено на рис. 9.

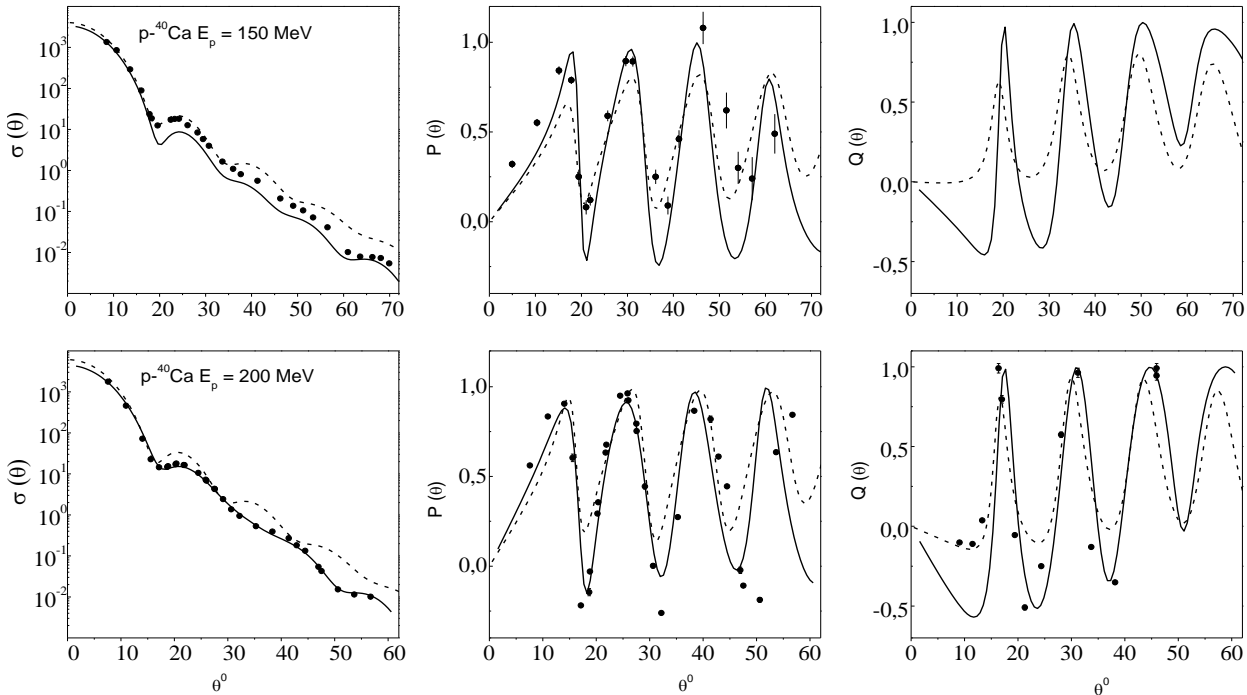


Рис. 9. Диференціальні перерізи $\sigma(\theta) \equiv d\sigma(\theta)/d\Omega$ (мб/ср), поляризація $P(\theta)$ і функція повороту спіну $Q(\theta)$ для пружного розсіяння протонів ядрами ^{40}Ca за енергій 150 та 200 MeV. Суцільні криві - результати розрахунків, виконаних в 2-му БН, а штрихові криві - в рамках стандартної оптичної моделі.

З рис. 9 видно, що результати розрахунків диференціальних перерізів і поляризаційних характеристик пружного розсіяння протонів ядрами в даній області енергій з використанням 2-го БН задовільно описують наявні експериментальні дані та є близькими до результатів, які можна отримати з використанням стандартної оптичної моделі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено результати теоретичних досліджень взаємодії слабкозв'язаних дейтроноподібних частинок з важкими ядрами за

підбар'єрних і надбар'єрних енергій, виконано розвиток оптичної моделі для вивчення взаємодії адронів середніх енергій з ядрами.

1. На основі адіабатичної моделі пружного розсіяння легких нейтронадлишкових ядер ядрами за підбар'єрних енергій, з використанням електричного оптичного потенціалу, запропоновано модель для врахування впливу ядерного поля важкого ядра мішені за умови поляризованості налітаючої частинки в кулоновому полі.

2. Уперше здобуто аналітичний вираз для електричного оптичного потенціалу в області поворотних точок, досліджено його властивості для випадку розсіяння дейтронів та іонів ${}^6\text{He}$ ядрами ${}^{208}\text{Pb}$ і доведено, що критерій використаного наближення виконується до границі ядра-мішені.

3. Уперше побудовано ядерний оптичний потенціал, який враховує поляризованість налітаючої дейтроноподібної частинки в області поворотних точок і доведено, що такий потенціал дає змогу задовільно описати перерізи пружного розсіяння дейтронів ядрами ${}^{208}\text{Pb}$, ${}^{124}\text{Sn}$ та ${}^{58, 62}\text{Ni}$ за підбар'єрних енергій.

4. Знайдено, що врахування поляризованості налітаючих дейтронів посилює ядерний оптичний потенціал у периферійній області, що дає змогу пояснити причину виникнення нефізичних параметрів традиційних оптичних потенціалів при теоретичній інтерпретації даних із пружного розсіяння.

5. Досліджено вплив ядерного оптичного потенціалу на перерізи реакції розщеплення дейтронів ядрами за надбар'єрних енергій та запропоновано модель ядерного оптичного потенціалу, в якій потенціал взаємодії дейтрона з ядром розраховувався в моделі згортки.

6. Доведено, що поведінка перерізу реакції розщеплення суттєво залежить від вибору моделі ядерного оптичного потенціалу дейтрона.

7. На основі методу деформованих хвиль запропоновано модель, у якій емпірично враховувалася внутрішня структура налітаючого дейтрона, виконано порівняння розрахованих перерізів реакції розщеплення дейтронів ядрами ${}^{12}\text{C}$, ${}^{40}\text{Ca}$ та ${}^{90}\text{Zr}$ з наявними експериментальними даними та доведено, що врахування внутрішньої структури дейтрона помітно впливає на поведінку розрахованих характеристик реакції розщеплення за надбар'єрних енергій.

8. Уперше знайдено аналітичні вирази для амплітуд і спостережуваних характеристик пружного розсіяння протонів ядрами ${}^{40}\text{Ca}$ у другому Борновому наближенні. Доведено, що використання другого Борнового наближення обумовлено тим, що поляризація нуклонів при їхньому розсіянні ядрами, розрахована в першому Борновому наближенні з ермітовим потенціалом, дорівнює нулю.

9. Доведено, що врахування другого Борнового наближення дає змогу задовільно описати наявні експериментальні дані в області енергій $150 \div 800$ MeV.

10. Проведено порівняння теоретичних розрахунків, виконаних із застосуванням другого Борнового наближення та оптичної моделі та доведено, що обидва використані підходи дають змогу задовільно описати наявні експериментальні дані при енергіях 150 та 200 MeV.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *К.О. Теренецький, А.В. Бабак, В.П. Вербицький, О.Д. Григоренко.* Оптический потенциал для подбарьерного упругого рассеяния легких слабосвязанных дейтроноподобных ядер // Ядерна Фізика та Енергетика. – 2007. – №3(21). С. 47.
2. *О.В. Бабак, В.П. Вербицький, О.Д. Григоренко.* Потенціали ядерної взаємодії дейтронів з важкими ядрами в моделі однократної згортки // Ядерна Фізика та Енергетика. – 2013. – №3(14). С. 247.
3. *Yu.N. Pavlenko, V.P. Verbytskyi, O.I. Rundel, O.V. Babak, O.K. Gorpinich, V.V. Ostashko, Yu.Ya. Karlyshev, O.D. Grygorenko, T.A. Korzina, A.V. Stepaniuk, I.P. Dryapachenko, E.M. Mozhzhukhin.* Deuteron interaction with ^{124}Sn nuclei at sub-barrier energies // Ядерна Фізика та Енергетика. – 2015. – №1(16). С. 15
4. *О.В. Бабак, V.P. Mikhailyuk.* Розщеплення дейтронів ядрами ^{40}Ca при енергії 56 MeV // Ядерна Фізика та Енергетика. – 2019. – №4(20). С. 375
5. *О.В. Бабак, Yu.A. Berezhenou, V.P. Mikhailyuk.* Born approximation for polarization observables of protons by ^{40}Ca // Український Фізичний Журнал. – 2020. – №5(65). С. 367.
6. *О.В. Бабак, В.П. Вербицький, К.О. Теренецький.* Розрахунок амплітуди розщеплення слабкозв'язаних частинок при взаємодії з важкими ядрами мішеней // XIV Щорічна наукова конференція ІЯД НАН України. – 2007. – С. 57 – 58.
7. *К.О. Теренецький, О.В. Бабак.* Розвал дейтрона з урахуванням ефектів другого порядку // XVI Щорічна наукова конференція ІЯД НАН України. – 2009
8. *Ю.М. Павленко, В.М. Пугач, В.Л. Шаблов, О.К. Горпинич, А.В. Степанюк, Т.О. Корзина, Ю.Я. Карлишев, В.П. Вербицький, О.В. Бабак, В.В. Осташко, І.П. Дряпаченко, Е. М. Можжухін, В.О. Кива, Д.В. Касперович, Л.Л. Дулгер.* Розпад першого збудженого стану ядра ^8Be в реакції $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$ при $E_p = 3,75$ MeV // XXI Щорічна наукова конференція ІЯД НАН України. – 2014. – С. 72
9. *Ю.М. Павленко, В.П. Вербицький, О.В. Бабак, О.І. Рундель, О.К. Горпинич, О.Д. Григоренко, А.В. Степанюк.* Дослідження взаємодії дейтронів з ядрами ^{124}Sn при підбар'єрних енергіях // XXI Щорічна наукова конференція ІЯД НАН України. – 2014. – С. 75
10. *Ю.М. Павленко, В.П. Вербицький, О.В. Бабак, О.І. Рундель, О.К. Горпинич, О.Д. Григоренко, А.В. Степанюк, Т.О. Корзина.* Пружне розсіяння дейтронів на ядрах $^{58, 62}\text{Ni}$ за підбар'єрних енергій // XXII Щорічна наукова конференція ІЯД НАН України. – 2015. С. 70
11. *О.В. Бабак, В.П. Михайлюк.* Дослідження реакції розвалу дейтронів при розсіянні на ядрах ^{40}Ca // XXVI Щорічна наукова конференція ІЯД НАН України. – 2019, С. 18

12. **О. В. Бабак, Ю. А. Березной, В. П. Михайлюк.** Борнове наближення для поляризаційних характеристик розсіяння протонів ядрами ^{40}Ca // XXVII Щорічна наукова конференція ІЯД НАН України. – 2020, С. 13.

АНОТАЦІЯ

Бабак О.В. Оптична модель для опису взаємодії частинок і слабкозв'язаних ядер з ядрами в області низьких і середніх енергій. – 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.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню взаємодії частинок і легких ядер з ядрами на основі оптичної моделі ядерного розсіяння. В роботі отримано аналітичний вираз для електричного оптичного потенціалу (ЕОП), який описує просторову поляризованість налітаючої частинки в кулоновому полі ядра-мішені. На основі ЕОП побудовано ядерний оптичний потенціал (ЯОП) для розсіяння дейтроноподібної частинки, без підгонки параметрів, за допомогою моделі згортки, в якій параметри ЯОП складових частинок знаходяться з використанням наявних експериментальних даних. Розраховано перерізи пружного розсіяння дейтронів за енергій 7, 7,3 та 8 МеВ ядрами ^{208}Pb , 4, 5,5 та 5 МеВ ядрами ^{124}Sn , а також 3,5, 4,5 та 5,16 МеВ ядрами $^{58, 62}\text{Ni}$. Отримано задовільний опис експериментальних даних, що підтверджує застосовність запропонованої моделі, дає змогу пояснити причину виникнення нефізичних параметрів традиційних оптичних потенціалів при теоретичній інтерпретації даних із пружного розсіяння.

Досліджено взаємодію дейтронів з ядрами за надбар'єрних енергій, для реакції розщеплення дейтрона на нейтрон і протон з вильотом продуктів реакції під малими кутами. Доведено, що урахування лише кулонового механізму реакції розщеплення незадовільно описує наявні експериментальні дані, а врахування стандартних ЯОП дейтрона та його складових погіршує розбіжність розрахунків з експериментальними даними. Запропоновано модель, в якій враховувалась внутрішня структура налітаючого дейтрона, що дозволило задовільно описати наявні експериментальні дані щодо перерізів реакції розщеплення дейтронів за енергії 56 МеВ ядрами ^{12}C , ^{40}Ca та ^{90}Zr .

Розроблено оптичну модель для вивчення взаємодії адронів середніх енергій з ядрами, з урахуванням спин-орбітальної взаємодії. З урахуванням 2-го Борнового наближення вперше здобуто аналітичні вирази для амплітуди розсіяння, диференціального перерізу, поляризації, функції повороту спіна та кута повороту спіна за розсіяння протонів ядрами ^{40}Ca , що дало змогу явно визначити залежність спостережуваних характеристик від параметрів оптичного потенціалу. Проведено порівняння теоретичних розрахунків, виконаних із застосуванням Борнового наближення та оптичної моделі.

Доведено, що використані підходи дозволяють задовільно описати наявні експериментальні дані при енергіях 150 - 800 МеВ.

Ключові слова: підбар'єрні енергії, надбар'єрні енергії, оптична модель, метод деформованих хвиль, Борнове наближення, середні енергії, пружне розсіяння, поляризаційні спостережувані.

АННОТАЦІЯ

Бабак А.В. Оптическая модель для описания взаимодействия частиц и слабосвязанных ядер с ядрами в области низких и средних энергий. На правах рукописи.

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

Диссертационная работа посвящена исследованию взаимодействия частиц и легких ядер с ядрами на основе оптической модели ядерного рассеяния. В работе получено аналитическое выражение для электрического оптического потенциала (ЭОП), который описывает пространственную поляризуемость налетающей частицы в кулоновском поле ядра-мишени. На основе ЭОП построено ядерный оптический потенциал (ЯОП) для рассеяния дейтроноподобной частицы, без подгонки параметров, с помощью модели свертки, в которой параметры ЯОП составляющих частиц находятся с использованием имеющихся экспериментальных данных. Проведены расчеты сечений упругого рассеяния дейтронов при энергиях 7, 7,3 и 8 МэВ ядрами ^{208}Pb , 4, 5,5 и 5 МэВ ядрами ^{124}Sn , а также 3,5, 4,5 и 5,16 МэВ ядрами $^{58, 62}\text{Ni}$. Получено удовлетворительное описание экспериментальных данных, что подтверждает применимость предложенной модели, позволяет объяснить причину возникновения нефизических параметров традиционных оптических потенциалов при теоретической интерпретации данных из упругого рассеяния.

Исследовано взаимодействие дейтронов с ядрами при надбарьерных энергиях, для реакции расщепления дейтрона на нейтрон и протон с вылетом продуктов реакции под малыми углами. Доказано, что учет только кулоновского механизма реакции расщепления неудовлетворительно описывает имеющиеся экспериментальные данные, а учет стандартных ЯОП дейтрона и его составляющих ухудшает расхождение расчетов с экспериментальными данными. Предложена модель, в которой учитывалась внутренняя структура налетающего дейтрона, что позволило удовлетворительно описать имеющиеся экспериментальные данные по сечениям реакции расщепления дейтронов при энергии 56 МэВ ядрами ^{12}C , ^{40}Ca и ^{90}Zr .

Разработано оптическую модель для изучения взаимодействия адронов средних энергий с ядрами, с учетом спин-орбитального взаимодействия. С учетом 2-го Борновского приближения впервые получены аналитические выражения для амплитуды рассеяния, дифференциального сечения,

поляризации, функции поворота спина и угла поворота спина при рассеянии протонов ядрами ^{40}Ca , что позволило явно определить зависимость наблюдаемых характеристик от параметров оптического потенциала. Проведено сравнение теоретических расчетов, выполненных с применением Борновского приближения и оптической модели. Доказано, что использованные подходы позволяют удовлетворительно описать имеющиеся экспериментальные данные при энергиях 150 - 800 МэВ.

Ключевые слова: подбарьерные энергии, надбарьерные энергии, оптическая модель, метод искаженных волн, Борновское приближение, средние энергии, упругое рассеяние, поляризационные наблюдаемые.

ABSTRACT

Babak O.V. The optical model for the description of the particles and weakly-bound nuclei interaction with nuclei in the region of low and middle energy. – Manuscript.

Thesis for Doctor of Philosophy (candidate) degree (Physics and Mathematics) by specialty 01.04.16 «Physics of Nucleus, Elementary Particles and High Energies» – Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

Optical model was developed to describe the following reactions: elastic scattering of deuteron-like particles at heavy nuclei at sub-barrier energies; the break-up of deuteron, scattering at the nuclei by the above-barrier energies; and polarization of protons by scattering at nuclei at intermediate energies.

In the sub-barrier energy scattering reactions, the nuclear optical potential (NOP) of a weakly coupled particle, obtained from the fit of the experimental data, has non-physical parameters (large values of potential shape parameters, like radii or diffusivity). For the theoretical construction of the optical potential that can predict the magnitudes of the elastic scattering cross sections of such particles, the proposed model has a simple physical content: a weakly bound deuteron-like particle is considered as a composite particle, which is polarized in the Coulomb field, which causes the neutron to fall into the field of action target nuclei. Particle polarization is described by an electrical optical potential within an adiabatic model that has no fitting parameters. For the first time, an analytical expression for electrical optical potential (EOP) has been obtained for the calculations of the elastic scattering of light weakly bound deuteron nuclei in the electric field of heavy nuclei in the area of turning points.

Using of EOP allows the construction of the deuteron-like particle nuclear optical potential without parameter fitting, within the folding model, on the basis of constituent particles ("proton" and "neutron") optical potentials, which are obtained from experimental data on the elastic scattering of these particles. Using the EOP, the wave function of the polarized deuteron in the region of turning points was calculated, and the NOP was obtained as a folding of the sum of the NOP of the proton and neutron with the function of the distribution of these particles in the polarized

deuteron. This model allows the use of global optical potentials of nucleons to describe reactions with such composite, weakly-bound particles as deuteron,⁶He et al.

The cross-sections for deuterons elastic scattering at the energies of 7, 7.3, and 8 MeV on ²⁰⁸Pb nuclei were calculated; for scattering energies of 4, 5.5 and 5 MeV at ¹²⁴Sn nuclei; for scattering energies of 3.5, 4.5, and 5.16 MeV at ^{58, 62}Ni nuclei. It is shown that taking into account the polarization enhances the nuclear optical potential in the peripheral region and gives a satisfactory description for the experimental data on the scattering of deuterons on nuclei. This confirms the applicability of the proposed model, makes it possible to explain the cause of non-physical parameters of traditional optical potentials in the theoretical interpretation of the data from elastic scattering.

Interaction of deuterons with heavy nuclei by above-barrier energy was investigated. At such energy, the adiabatic approximation is not applicable, since the turning points lie deep in the nuclear field of the target nucleus. The interaction of the deuteron with the target nucleus was considered as an example of the deuteron break-up to a neutron and a proton, with the scattering of the reaction products at small angles. Under this condition, the reaction is predominantly elastic and has been investigated in the Distorted Wave Born Approximation (DWBA). Taking into account only the Coulomb mechanism of the break-up reaction does not sufficiently describe the available experimental data, taking into account the standard NOP of the deuteron and its components further impress the divergence of the calculations with the experiment data. In the proposed approach, the effect of deuteron and its constituents on reaction cross sections was investigated. A zero-point model of a deuteron NOP is proposed, where the interaction potential of a deuteron with a target nucleus is expressed by the sum of the neutron-proton NOP and the folding model of the neutron-proton NOP by the Hülten function of the deuteron ground state.

It is shown that the shape of the break-up reaction cross-section depends on the choice of the model of the deuteron EOP model, but the absolute value of the cross-section exceeds the experimental data almost twice. The model that empirically considered the deuteron internal structure was proposed and gave a satisfactory description of the data. Comparison of the calculated cross sections of the deuteron splitting reaction at 56 MeV with ¹²C, ⁴⁰Ca and ⁹⁰Zr nuclei is compared with the available experimental data, and it is shown that taking into account the internal structure of the deuteron significantly influences the behavior of the calculated characteristics of the splitting reaction at the above-barrier energies.

The optical model at medium energies requires the use of an optical potential with spin-orbital interaction part, which allows to describe experimental data on hadron-nuclear elastic scattering, including the observation of particle polarization. The 2nd Born approximation is used to investigate proton-nuclear scattering in the region of intermediate energies. The use of such an approximation is due to the fact that the scattering amplitude calculated in the 1st Born approximation with the hermitian potential is real, and as a result, the nucleon nuclei polarization is equal to zero. Therefore, for the correct calculation of spin polarization, which takes into account the contribution from the imaginary part of the potential, it is necessary to use the second Born approximation.

Analytical expressions were obtained for the scattering amplitude, polarization (analyzing power), spin-rotation function, which made it possible to clearly determine the dependence of the observed characteristics on the parameters of the optical potential. Thus, at least the 2nd Born approximation should be used in the calculations of the polarization characteristics of the hadron scattering by nuclei. The parameters of the optical potential were obtained from the comparison of experimental data with theoretical calculations. The observed characteristics of elastic scattering of protons by ⁴⁰Ca nuclei in the 1st and 2nd Born approximations, and comparisons of theoretical calculations with experimental data were performed in the region from 200 MeV up to 800 MeV. Obtained results indicate that the calculations in the 2nd BA allow to describe better the available experimental data, in comparison with the same results obtained in the 1st Born approximation.

Keywords: sub-barrier energies, below-barrier energies, optical model, Distorted Wave Born Approximation, Born approximation, intermediate energies, elastic scattering, polarization observables.