

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

ОМЕЛЬЧЕНКО Сергій Олександрович



УДК 539.17+530.145

**ДОСЛІДЖЕННЯ
КОГЕРЕНТНИХ І ДИНАМІЧНИХ ЕФЕКТІВ В ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЯХ У
РАМКАХ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО АНАЛІЗУ**

01.04.16 - фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі теорії ядерних процесів Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Давидовський Володимир Володимирович,
завідувач відділу теорії ядерних процесів
Інституту ядерних досліджень НАН України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Василевський Віктор Семенович,
провідний науковий співробітник відділу теорії ядра та
квантової теорії поля
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова
НАН України

кандидат фізико-математичних наук
Горбаченко Олександр Миколайович,
завідувач науково-дослідницької лабораторії ядерної
спектроскопії фізичного факультету
Київського національного університету імені
Тараса Шевченка.

Захист відбудеться 29 квітня 2021 року о 14⁴⁵ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.167.01 при Інституті ядерних досліджень НАН України за адресою 03680, м. Київ-28, пр. Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту ядерних досліджень НАН України за адресою: 03680, м. Київ, пр. Науки, 47.

Автореферат розісланий «26» березня 2021 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук



Хоменков В.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Експериментальні й теоретичні дослідження когерентних та динамічних ефектів у процесах зіткнень малонуклонних і багатонуклонних ядер, нуклон-ядерних процесів природно тривають з середини минулого сторіччя по сьогоднішній день й будуть ще довго актуальними, крім того, завжди має сенс пошук нових моделей, бо наявні моделі можуть або не точно описувати процеси, або погано працювати у конкретному діапазоні енергій.

Когерентні ефекти в ядерних процесах завжди представляли науковий інтерес, а із введенням в дію сучасних колайдерів мають багато перспективних напрямків, наприклад, в фемтоскопічних дослідженнях зони зіткнення стосовно, наприклад, її розмірів і форми. Ці параметри можуть бути важливими при подальшому обрахуванні густини енергії при високоенергетичних зіткненнях.

Важливим в таких зіткненнях може бути також пошук динамічних ефектів, пов'язаних з нетиповою в часі поведінкою компаунд-систем, що створюються з уламків бомбардуючих частинок-снарядів та частинок-мішеней. Актуальність досліджень такої поведінки також може бути цікавою в контексті, наприклад, пошуку систем з можливим порушенням експоненційного закону розпаду Гейгера-Неттола. Більш того, для аналізу динамічних властивостей нових станів матерії, які досліджуються на колайдерах RHIC та LHC, можуть стати у нагоді і нові підходи на зразок запропонованої моделі резонансного розпаду у часі проміжної компаунд-системи.

Тому робота стосується розробки в межах просторово-часового аналізу двох напрямків/методів. По-перше, впроваджено покроковий розвиток просторово-часового методу для врахування когерентних ефектів в проміжних каналах різноманітних реакцій, а саме, спочатку (i) - бінарних реакцій розсіяння нуклонів на легких та середніх ядрах при низьких та середніх енергіях, потім (ii) - в реакціях зіткнень легких іонів, і, нарешті, (iii) - при центральних високоенергетичних зіткненнях важких іонів. По-друге, розроблено метод часових резонансів або модель резонансного розпаду проміжної високозбудженої компаунд-системи, що утворюється після зіткнення частинки та мішені, для пояснення динаміки деяких високоенергетичних реакцій, коли є експериментальні прояви нетипової експоненційно спадаючої з ростом енергії поведінки інклюзивних спектрів кінцевих фрагментів в таких реакціях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Результати досліджень, які покладені в основу дисертації, отримані при виконанні науково-дослідних тем спочатку лабораторії часового аналізу ядерних процесів і пізніше відділу теорії ядерних процесів Інституту ядерних досліджень НАН України, у яких автор був безпосереднім виконавцем, а саме: „Аналіз впливу випромінювань і деформації ядер на еволюцію ядерних систем” (ДР№0104U003885, 2004-2006 рр.); „Кінетика й часовий аналіз ядерних процесів” (ДР№0106U00114112007-2011 рр.); „Методи часового аналізу у вивченні ядерних реакцій і розпадів” (ДР№0112U004492, 2008-2012 рр.); “Методи часового аналізу у вивченні ядерних реакцій і розпадів (заключний)” (ДР№0112U007378, 2012-2016 рр.); „Дослідження динаміки й часових характеристик процесів взаємодії ядер і

елементарних частинок у широкому діапазоні енергій” (ДРН₀0116U006401017-2021 рр.) та, нарешті, „Дослідження ядерної взаємодії в різноманітних ядерних процесах за допомогою дифракційної теорії й теорії гальмового випромінювання” (ДРН₀0116U008487, 2017-2021 рр.).

Мета і завдання дослідження. Основною метою дисертаційної роботи є розробка, узагальнення і практична перевірка наявних експериментальних даних двох теоретичних методів, розроблених на базі просторово-часового підходу.

Об’єкти дослідження: бінарні процеси розсіяння нуклонів на ядрах, бінарні процеси розсіяння за участю легких і важких іонів, а також реакції за участю легких і важких іонів з трьома частинками у вихідному каналі.

Предмети дослідження: розподілені на дві категорії:

1 категорія - це спостережувані характеристики вихідних продуктів реакцій при моделюванні наявності проміжних когерентних каналів для:

- процесів розсіяння нуклонів на легких і середніх ядрах або реакцій, що відбуваються під час зіткнення легких іонів при низьких та середніх енергіях;

- реакцій, що відбуваються під час зіткнення важких іонів з мінімальним прицільним параметром при високих енергіях;

2 категорія - особливості експериментальних інклюзивних енергетичних спектрів окремих кінцевих фрагментів у високоенергетичних реакціях та нетипова динаміка розпаду проміжних високозбуджених компаунд-систем.

Методи дослідження: у дисертаційній роботі використано метод асимптотики хвильових пакетів Гольдбергера-Ватсона для побудови власного наближення просторово-часового аналізу з урахуванням моделі проміжних когерентних каналів; крім того, використовувалась власна модель резонансного розпаду в часі проміжної високозбудженої компаунд-системи.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше запропоновано розширення двох теоретичних моделей для оцінки когерентних та динамічних властивостей деяких ядерних процесів. Перша модель, що побудована в рамках просторово-часового аналізу, стосується урахування проміжних когерентних каналів в ядерних реакціях. Друга модель роз’яснює нетипову поведінку експериментальних інклюзивних спектрів поодиноких продуктів реакції в вихідному каналі та динаміку розвалу проміжної високозбудженої компаунд-системи.

2. В рамках просторово-часового аналізу вперше обраховано деякі експериментальні дані для перерізів, функцій збудження або швидкостей співпадінь та проведена оцінка важливості урахування наявності проміжних когерентних каналів протікання реакцій розсіяння протонів на ядрах ^{12}C , ^{16}O та нейтронів на ядрах ^{28}Si , ^{52}Cr , ^{56}Fe , ^{63}Cu , ^{64}Ni , ^{73}Ge з урахуванням коригуючої фази просторово-часового зсуву φ , яка враховує когерентність проміжних каналів реакцій, та без неї ($\varphi \equiv 0$).

3. Роз’яснено досить цікавий парадокс *затримки-випередження*, що проявлявся в *S*-системі (системі центру мас) у вигляді від’ємного часу протікання реакції, тобто часового випередження замість часової затримки поблизу одного (або двох) перекритих сусідніх), спотвореного нерезонансним фоном, ізольованого

компаньонд-резонансу при розсіянні нуклонів ядрами. Показано, що в L -системі (лабораторній системі) таке часове випередження компенсується часовою затримкою в розсіянні складеного ядра, що рухається від точки зіткнення до розпаду складеного ядра і середній час протікання реакції стає тривіально позитивною величиною.

4. Вперше запропоновано параметризацію амплітуди реакції, справедливу при простих умовах Базя-Ньютона та більш реалістичних Любошиця, що роз'яснює нетипову поведінку широкого класу інклюзивних спектрів кінцевих продуктів високоенергетичних реакцій зіткнення для частинок-снарядів від протонів до ядер ^{132}Xe і частинок-мішеней від ^{12}C до ^{238}U в діапазоні енергій приблизно 0.04 - 10 ГеВ/нуклон.

Практичне значення одержаних результатів. У дисертації розвинено два теоретичні методи для дослідження ядерних процесів, засновані на просторово-часовому підході, які мають перспективне практичне значення при (і) дослідженнях інтерференційних ефектів в ядерних реакціях та (ii) аналізі експериментальних інклюзивних спектрів окремо обраних кінцевих продуктів високоенергетичних реакцій, а також при моделюванні динаміки протікання таких реакцій.

Розширення досліджень когерентних впливів, запропоноване в дисертації, буде в перспективі стосуватися, наприклад, вдосконалення фемтоскопічних досліджень зони колайдерних зіткнень на основі аналізу модифікованих кореляційних функцій за допомогою параметризації Гольдхабера.

Окремої уваги заслуговує метод резонансного розпаду в часі (або метод часових резонансів) для високозбуджених компаньонд-систем, розроблений в рамках просторово-часового підходу до розгляду ядерних процесів. За допомогою цього методу можна успішно розраховувати деякі нетипові інклюзивні спектри в широкому діапазоні енергій, мішеней, бомбардуючих частинок-снарядів з мінімальною кількістю параметрів, що підбираються. Як продемонстровано в даній роботі, метод успішно роз'яснює аномальну ситуацію високотемпературної статистичної рівноваги, що має місце при зіткненнях для широкого діапазону частинок при високих енергіях.

Результати дисертаційної роботи є важливими для подальшого вивчення мало-і багато-нуклонних систем, динаміки процесів розсіяння, впливу інтерференційних ефектів у контексті розуміння внутрішніх алгоритмів їх протікання. Дуже важливим і перспективним напрямком є розширення області використання досить нестандартного методу *часових* резонансів в зону ультрарелятивістських зіткнень, як іноді вимушеної альтернативи стандартним розглядам, що базуються на математичному апараті стандартних *енергетичних* резонансів.

Ці просторово-часові методи є важливою, самодостатньою та незалежною альтернативою або базою для комбінування з різноманітними моделями розрахунків і аналізу експериментальних даних, наприклад, з моделлю фаєрбола, внутрішньоядерною каскадною моделлю або моделлю ядерної гідродинаміки, як в досліджуваних в даній дисертаційній роботі області 0.04 – 10 ГеВ/нуклон, так і поза нею.

Особистий внесок здобувача. Обрана тема дисертації базується на розробленому автором протягом певного часу просторово-часовому підході до

аналізу внутрішніх механізмів ядерних процесів і, по суті, є узагальненням зроблених за цей час відповідних досліджень та опублікованих автором 43 робіт у вигляді статей, препринтів та тез наукових конференцій.

У цих роботах автором представлено аналіз та обрахунки експериментальних даних за допомогою просторово-часового підходу для розгляду перерізів бінарних реакцій, а також реакцій з кількістю частинок більше двох у вихідному каналі при зіткненнях легких та важких іонів. Крім того, автором запропоновано новий розвиток оригінального методу часових резонансів (або інакше, моделі резонансного розпаду в часі стійкої проміжної та сильно збудженої компаунд-системи) для розрахунків деяких нетипових інклюзивних спектрів окремого кінцевого фрагменту у вихідному каналі для ядерних процесів при високих енергіях з використанням різних типів мішеней і широкого ряду бомбардуючих частинок.

Автор дисертації особисто брав участь на всіх етапах досліджень, а саме: у розробці теоретичного методу просторово-часового аналізу ядерних процесів; підготовці рукописів статей і доповідей до публікацій; в аналізі, пошуку експериментальних даних, що підтверджують ефективність розроблених методів. Автор особисто виконав увесь обсяг робіт по розрахунках щодо практичної перевірки розроблених методів на підставі наявних експериментальних даних.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, викладених у дисертаційній роботі, доповідалися на міжнародних і вітчизняних конференціях, у числі яких: International Symposium on Large-Scale Collective Motion of Atomic Nuclei, Brolo(Messina) Italy, 15-19 Oct. 1996; International Symposium New Projects and Lines of Research in Nuclear Physics (October 24-26, 2002, Messina, Italy); 52-га Міжнародна нарада з ядерної спектроскопії та структури атомного ядра (ЯДРО-2002, 18-22 червня 2002 р., м. Москва, РФ); III Міжнародна конференція "Актуальні проблеми ядерної фізики та атомної енергетики" (Київ, 2010); 4-th International Conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-2012, sept.3-7, 2012, Kyiv, Ukraine) та численні наукові щорічні конференції Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2011, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 роки).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 43 наукових праці, з яких 13 - у фахових журналах, 2 - у препринтах Інституту ядерних досліджень НАН України, 3 - в arXiv.org, 25 - у матеріалах наукових конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, трьох додатків і списку використаних джерел із 121 найменування. Дисертація містить 61 рисунок і 7 таблиць. Повний об'єм роботи – 161 сторінка, об'єм основного тексту – 116 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, показано зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і завдання досліджень, визначено наукову новизну й практичну значимість отриманих результатів, особистий внесок здобувача, наведено дані стосовно апробації та публікації результатів роботи та коротко викладено зміст кожного з чотирьох розділів.

У першому розділі вивчається вплив когерентних ефектів на перерізи бінарних процесів пружного розсіяння нуклонів на легких і середніх ядрах при низьких і середніх енергіях із застосуванням просторово-часового аналізу.

Для дослідження були обрані два когерентні канали (1.1), а саме, канал пружного розсіяння (рис. 1.1а) та затриманий канал з формуванням компаунд-ядра Z^* (рис. 1.1б), де частинки y та Y детектуються детекторами a і b в режимі схеми співпадінь:

$$x + X \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} y + Y \\ Z^* \rightarrow y + Y \end{array} \right\} \rightarrow y + Y. \quad (1.1)$$

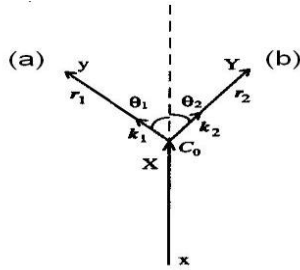


Рис. 1.1а. Діаграма прямого процесу.

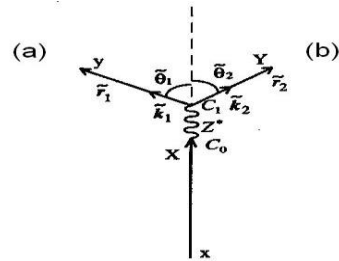


Рис. 1.1б. Діаграма процесу із складеним ядром.

Обидва процеси є макроскопічно та експериментально нерозрізненими, хоча мікроскопічно це зовсім різні процеси. Передбачалися такі експериментальні умови: квазімонохроматичність по енергії бомбардуючих нуклонів та наявність датчиків високої роздільної здатності, працюючих в режимі схеми співпадінь.

За допомогою методу асимптотики хвильових пакетів Гольдбергера та Ватсона отримано розрахункові формули для перерізів, що складаються з когерентної $\sigma_0^{(incoh)}(E, \theta)$ та некогерентної $\sigma_1^{(interf)}(E, \theta)$ складових:

$$\sigma(E, \theta) = \sigma_0^{(incoh)}(E, \theta) + \sigma_1^{(interf)}(E, \theta), \quad (1.2)$$

де

$$\sigma_0^{(incoh)} \cong \left| f_{dir}^{(L)} \right|^2 + \frac{J_{C \rightarrow L} \left| \gamma_{Z^*}^{(C)} \right|^2}{(E - E_{res})^2 + \Gamma^2 / 4} \quad (1.3)$$

і

$$\sigma_1^{(interf)} = 2 \left| f_{dir}^{(L)} \frac{J_{C \rightarrow L}^{1/2} \gamma_{Z^*}^{(C)}}{E - E_{res} + i\Gamma / 2} \right| \cos \Phi. \quad (1.4)$$

У формулі (1.4) повна фаза дається виразом

$$\Phi = \delta + \beta + \varphi, \quad (1.5)$$

$$\delta = \arg(J_{C \rightarrow L}^{1/2} \gamma_{Z^*}^{(L)}) - \arg(f_{dir}^{(L)}), \quad (1.5a)$$

$$\beta = \arg\{(E - E_{res}) + i\Gamma/2\}^{-1}, \quad (1.5b)$$

$$\varphi = k_1^0 \Delta r_1 + k_2^0 \Delta r_2, \quad (1.5b)$$

$$\Delta r_{1,2} = V_{\perp(1,2)} \tau, \quad (1.6)$$

$$f_{dir}^{(L)}(E, \theta) = \sqrt{J_{C \rightarrow L}} f_{dir}(E, \theta), \quad (1.7)$$

$$\frac{\gamma_{Z^*}^{(C)}}{E - E_{res} + i\Gamma/2} = f_{l,res}(E, \theta) \quad (1.8)$$

або

$$f_{l,res}(E, \theta) = (2ik)^{-1} (2l+1) P_l(\cos\theta) \exp(2i\eta_l) \times \\ \times \left[\exp(2i\delta_l^b) \frac{E - E_{res} - i\Gamma/2}{E - E_{res} + i\Gamma/2} - 1 \right], \quad (1.9)$$

$$f_{dir}(E, \theta) = f_{coul}(E, \theta) + (2ik)^{-1} \sum_{\lambda \neq l} (2l+1) P_\lambda(\cos\theta) \exp(2i\eta_\lambda) \times \\ \times [\exp(2i\delta_\lambda^b) - 1] \quad (1.10)$$

У виразах (1.2) – (1.10) E – енергія відносного руху у вхідному каналі в C -системі; E_{res} і Γ – енергія й повна ширина резонансного стану ядра Z^* ; l – орбітальне квантове число; τ – середня тривалість руху ядра Z^* ; $V_{\perp(1,2)}$ – проекція швидкості ядра Z^* на напрямок хвильових векторів $\vec{k}_{1,2}$ (з $k_{1,2}^0 = |\vec{k}_{1,2}|$) частинок у i Y відповідно; $\Delta r_{1,2} = |r_{1,2} - \tilde{r}_{1,2}|$ (відповідно схемам для когерентних процесів на рис. 1.1a і 1.1б); $f_{dir}(E, \theta)$ і $f_{l,res}(E, \theta)$ – амплітуди пружного розсіяння в C -системі; $f_{dir}^{(L)}$ – амплітуда пружного розсіяння в L -системі; $J_{C \rightarrow L}$ – якобіан переходу між C - та L -системами відліку; $\gamma_{Z^*}^{(C)}$ – множник амплітуди резонансу для процесу розпаду збудженого ядра Z^* ; $f_{coul}(E, \theta)$ – кулонівська амплітуда розсіяння, δ_l^b і η_l – фазові зсуви при l -розсіянні ядерним фоном й кулонівському l -розсіянні, відповідно; k – хвильове число; θ – кут розсіяння в C -системі.

Головним елементом просторово-часового аналізу, який враховує когерентні канали протікання реакції, є повна фаза $\Phi = \delta + \beta + \varphi$, що включає такі компоненти: δ – фаза резонансу, β – фаза спотворення нерезонансним фоном та φ – фаза просторово-часового зсуву, обумовлена просторово-часовим рухом компаунд-ядра в одному або декількох проміжних когерентних каналах реакції. Цей зсув є подібним

до того, який визначається у відомому оптичному ефекті ХБТ (Хенбері Брауна і Твісса), що був використаний в інтерферометрії для вимірів кутових розмірів Сиріусу.

Групою авторів було виявлено цікавий парадокс, а саме, часове випередження протікання реакції замість часової затримки поблизу спотвореного ізольованого компаунд-резонансу в низькоенергетичному розсіянні нуклонів ядрами, що проявляється в системі центру мас.

В розділі 1 показано, що в L -системі таке часове випередження компенсується часовою затримкою в розсіянні складеного ядра, що рухається від точки зіткнення до розпаду складеного ядра і середній час протікання реакції стає тривіально позитивною величиною. Таким чином, розвиток й узагальнення просторово-часового фазового аналізу в L -системі повністю вирішує та роз'яснює вищезгадане явище затримки-випередження.

Крім того, було з'ясовано, що при наявності двох або більшої кількості когерентних процесів проста трансформація формул від L -системи до C -системи та навпаки не є придатною, обов'язково необхідно враховувати просторово-часовий рух проміжних компаунд-систем до розпаду в одному (або більше) з когерентних каналів реакції (що і дало назву просторово-часовому аналізу).

Розроблений у першому розділі формалізм дозволив розрахувати перерізи $\sigma(E)$ низькоенергетичного пружного розсіяння протонів ядрами ^{12}C , ^{16}O і нейтронів ядрами ^{28}Si , ^{52}Cr , ^{56}Fe , ^{63}Cu , ^{64}Ni , ^{73}Ge в області спотворених ізольованих резонансів як з урахуванням коригуючої фази просторово-часового зсуву φ , так і без неї ($\varphi \equiv 0$).

Зокрема, на рис. 1.2а,б та 1.3а,б наведено розрахунки для ^{52}Cr та ^{56}Fe . Експериментальні дані по пружному розсіянню нейтронів та протонів були взяті з EXFOR/ENDF.

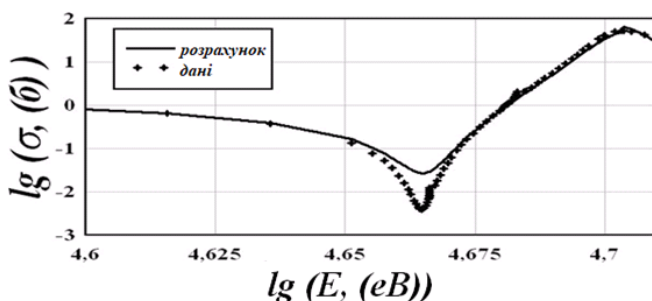


Рис. 1.2а. Функція збудження для $^{52}\text{Cr}(n,n)$ при $\varphi = 0$.

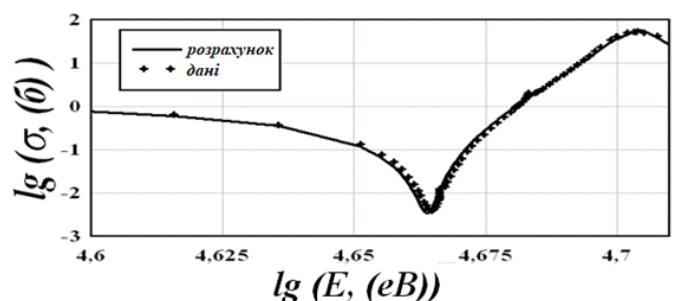


Рис. 1.2б. Функція збудження для $^{52}\text{Cr}(n,n)$ при $\varphi \neq 0$.

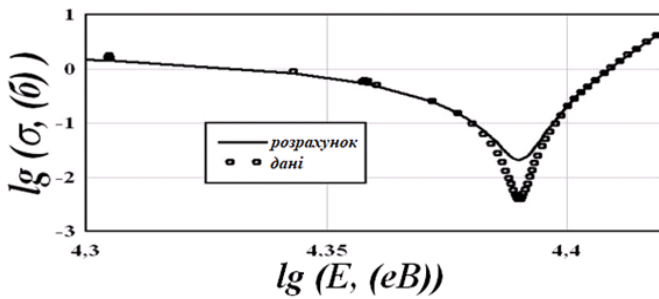


Рис. 1.3а. Функція збудження для $^{56}\text{Fe}(n,n)$ при $\varphi = 0$.

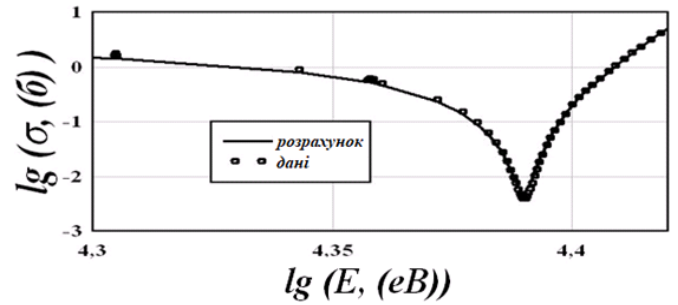
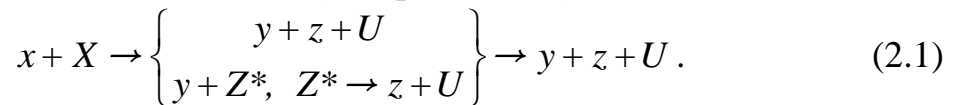


Рис. 1.3б. Функція збудження для $^{56}\text{Fe}(n,n)$ при $\varphi \neq 0$.

У другому розділі розглянутий в розділі 1 просторово-часовий аналіз бінарних реакцій модифіковано та застосовано для опису процесів зіткнення легких ядер (2.1) із трьома частинками у вихідному каналі, дві з яких (y та z) детектуються детекторами A і B в режимі схеми співпадіннь (див. рис. 2.1а,б).



Обидва когерентні процеси (подібні до тих, що були розглянуті у першому розділі, див. рис. 1.1а і 1.2а) є макроскопічно тотожними, але мікроскопічно різними. Експериментальні умови прийнято такими ж, як і у розділі 1.

Отже, в даному випадку моделювання процесу зіткнення легких іонів також передбачає наявність двох когерентних процесів, а саме, процесу пружного розсіяння (див. рис. 2.1а) та затриманого процесу з тимчасовим формуванням компаунд-ядра Z^* (див. рис. 2.1б).

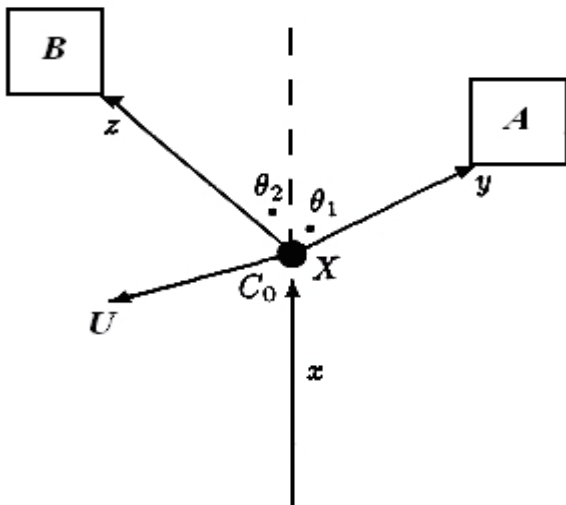


Рис. 2.1а. Канал реакції прямого процесу.

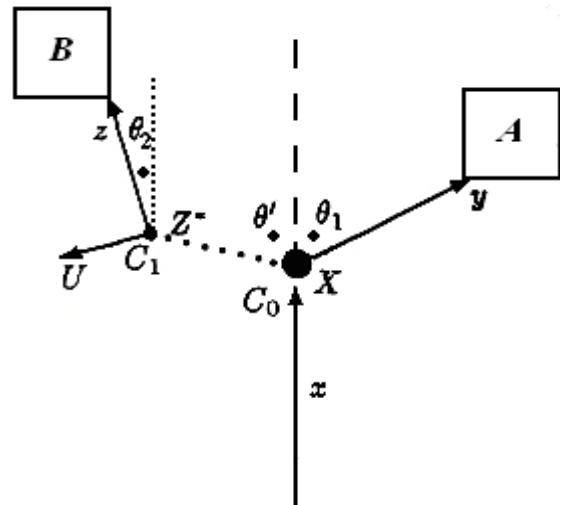


Рис. 2.1б. Канал реакції послідовного процесу.

У підрозділі 2.2 у рамках стаціонарної теорії дана ретроспектива більш ранніх досліджень без урахування і з урахуванням когерентності ідентичних частинок у кінцевому каналі деяких легко-іонних реакцій зіткнення.

За методом просторово-часового аналізу (подібно до того, як були отримані формули (1.2) – (1.10) для обрахунку перерізів у першому розділі) в підрозділі 2.3 було отримано формули для обрахунку повної швидкості співпадінь P з некогерентною P_0 та когерентною P_1 складовими, а саме:

$$P = P_0 + P_1, \quad (2.2)$$

$$P_0 = \left| f_{dir}^L \right|^2 + \frac{\left| f_{Z^*}^L \right|^2}{(\varepsilon_Z^* - \varepsilon_{res,Z})^2 + \Gamma_Z^2 / 4} \quad (2.3)$$

i

$$P_1 = 2 \left| f_{dir}^L \frac{f_{Z^*}^L}{\varepsilon_Z^* - \varepsilon_{res,Z} + i\Gamma_Z / 2} \right| \cos \Phi \quad (2.4)$$

(у довільних одиницях), де

$$\Phi = \delta + \beta + \varphi, \quad (2.5)$$

$$\delta = \arg(f_{Z^*}^L) - \arg(f_{dir}^L), \quad (2.5a)$$

$$\beta = \arg(\varepsilon_Z^* - \varepsilon_{res,Z} + i\Gamma_Z / 2)^{-1}, \quad (2.5b)$$

$$\varphi = k_2^0 \Delta r_2 + k_3^0 \Delta r_3, \quad (2.5b)$$

де принципово важливі фазові параметри просторово-часового аналізу (Φ , δ , β , φ) подібні до тих, що отримані в розділі 1 (1.5, 1.5а,б,в).

Порівнюючи ці результати з тими, що були отримані в стаціонарних моделях, огляду яких був присвячений підрозділ 2.2, можна дійти висновку, що останні витікають із запропонованого самоузгодженого просторово-часового підходу за умови $\Delta E \ll \Gamma_Z$.

У **третьому розділі** наближення на основі просторово-часового аналізу, розглянуте у випадку бінарних процесів розсіяння у розділі 1 і реакцій зіткнення легких іонів у розділі 2, застосовується для розгляду когерентних ефектів у зіткненнях важких іонів з трьома частинками у вихідному каналі, дві з яких детектуються.

Оскільки в межах роботи розглядаються лише центральні (не периферичні) зіткнення з майже нульовим прицільним параметром, то проміжними когерентними каналами обираються у даному випадку тільки затримані процеси з різними відповідними компаунд-ядрами Y^* та Z^* (див. (3.1) та рис. 3.1). Урахування каналу пружного розсіяння, характерного для периферичних зіткнень, відкладено на перспективу.

$$x + X \xrightarrow{I} W^* \xrightarrow{II} \left\{ \begin{array}{l} y + Y^*, Y^* \rightarrow z + U \\ z + Z^*, Z^* \rightarrow y + U \end{array} \right\} \equiv y + z + U \quad (3.1)$$

Експериментальні умови враховують, як і раніше, розташування детекторів a та b з режимом роботи схеми співпадінь з доброю роздільною здатністю по обидва боки напрямку бомбардування, але розкид по енергії ΔE для частинок-снарядів не є мінімальним, як у розділах 1 та 2, а є характерним для вивчення недозволених резонансів, які є характерними при зіткненнях важких іонів, а саме, $\Delta E \gg D = \rho^{-1}$, де D - відстань між рівнями й ρ - щільність ядерних рівнів для компаунд-ядер на обох етапах.

Головною ідеєю запропонованої схеми протікання реакції (3.1) є отримання просторово-часової коригуючої фази $\Delta\varphi$ (подібної до φ в (1.5в) або в (2.5в)):

$$\Delta\varphi = \exp(ik_1(r_{C_1a} - r_{C_2(k_2)a}) - ik_2(r_{C_1b} - r_{C_2(k_1)b})) \quad (3.2)$$

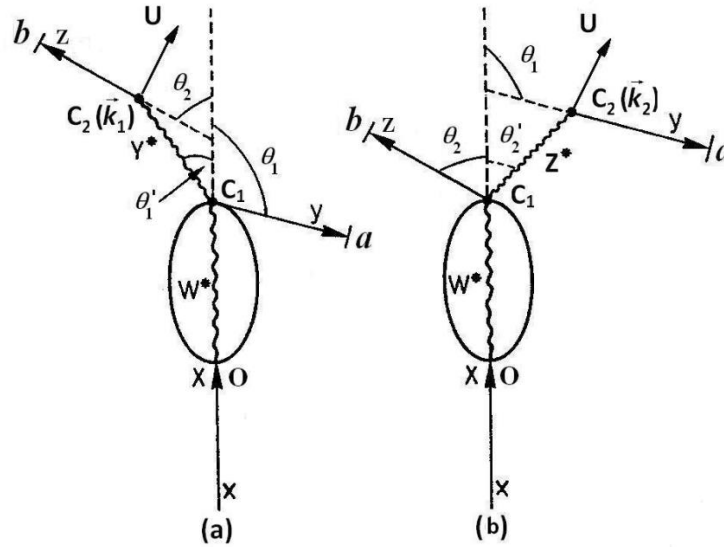


Рис. 3.1. Схеми двох нерозрізнених процесів у двоетапних реакціях (3.1) для обраної геометрії вимірювання швидкості співпадінь.

та обов'язкове її врахування при обрахунках швидкостей співпадінь для трьох можливих типів експериментальних даних з наявністю: (i) – добре розділених, ізольованих резонансів, (ii) – перекритих резонансів, і, нарешті, (iii) – сильно перекритих резонансів.

Як і у розділах 1 та 2 (див. (1.2) та (2.2)), для загального виразу швидкості співпадінь отримано величину, що складається з некогерентної P_0 та когерентної (тобто, залежної від $\Delta\varphi$) P_1 частин:

$$P = P_0 \pm P_1, \quad (3.3)$$

де тепер

$$P_1 = \text{const} \cdot \text{Re} \Phi_i(\varepsilon; k_1, k_2) \cdot \Delta\varphi, \quad (3.4)$$

а $\Phi_i(\varepsilon; k_1, k_2)$ - двочастинкова автокореляційна функція, $\varepsilon = E_2 - E_1$, а знак \pm у виразі (3.3) залежить від статистики вилітаючих частинок.

Зроблено оцінку впливу коригуючої фази $\Delta\varphi$ та ефекту близького розсіяння на загальне значення P у виразі (3.3).

У **четвертому розділі** запропоновано модель резонансного розпаду (МРР) у часі для пояснення нетипової поведінки інклюзивних спектрів кінцевого фрагменту в багатьох високоенергетичних реакціях, а також динаміки розпаду проміжних компаунд-систем, що утворюються після зіткнення з уламків частинки-мішені та бомбардуючої частинки-снаряду. МРР (або метод часових резонансів) використовує теоретичні результати, що стосуються параметризації власних станів оператора часу. Запропонована модель відштовхується від добре відомої відповідності між експоненційно-спадаючою поведінкою довільних величин (як в енергетичному, так і часовому представленні) і Лоренцевської поведінки перетворення Фур'є для тих же величин в канонічно спряженому представленні (тобто у часовому і енергетичному, відповідно).

Базовою ідеєю МРР є використання відмінної від Брейт-Вігнеровської параметризації амплітуди реакції $\alpha \rightarrow \beta$ при умовах сильно перекритих резонансних структур, які є досить характерними для високоенергетичних зіткнень, а саме:

$$f_{\alpha\beta}^n(E) = C_{\alpha\beta}^n \exp(-E\tau_n / (2\hbar) + iEt_n / \hbar) \equiv C_{\alpha\beta}^n \exp(iE[t_n + i\tau_n / 2] / \hbar) \quad (4.1)$$

в області $E_{min} < E < \infty$, де t_n і τ_n є параметрами-константами з розмірністю часу, де t_n параметризує власне значення оператора часу, комплексно спряженого до Гамільтоніану проміжної компаунд-системи, а τ_n є похибкою у визначенні t_n , $C_{\alpha\beta}^n$ – комплексні константи або гладкі функції, що залежать від E та куту вильоту Θ досліджуваного кінцевого фрагменту реакції в лабораторній системі відліку.

Амплітуда у більш загальному вигляді лінійної комбінації складових $f_{\alpha\beta}^n(E)$, що враховує іноді осцилюючий характер інклюзивних спектрів, запишеться в наступному вигляді:

$$f_{\alpha\beta} = \sum_{n=1}^{\nu} C_{\alpha\beta}^n \exp[-E\tau_n / 2\hbar + iEt_n / \hbar], \quad (4.2)$$

де величина ν - кількість пар часових параметрів t_n і τ_n . Тоді переріз процесу $\alpha \rightarrow \beta$ при, наприклад, $\nu = 2$ виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha\beta} = & \left| C_{\alpha\beta}^1 \right|^2 \exp(-E\tau_1 / \hbar) + \left| C_{\alpha\beta}^2 \right|^2 \exp(-E\tau_2 / \hbar) + \\ & + 2\text{Re}(C_{\alpha\beta}^1 C_{\alpha\beta}^{2*}) \exp[iE / \hbar((t_1 - t_2) - (\tau_1 + \tau_2) / 2)]. \end{aligned} \quad (4.3)$$

У підрозділі 4.4 аналізуються експериментальні результати деяких енергетичних спектрів кінцевих фрагментів у високоенергетичних ядерних реакціях у рамках запропонованого тут наближення часової еволюції сталої проміжної компаунд-системи до її розпаду (див., наприклад, рис. 4.1 та 4.2).

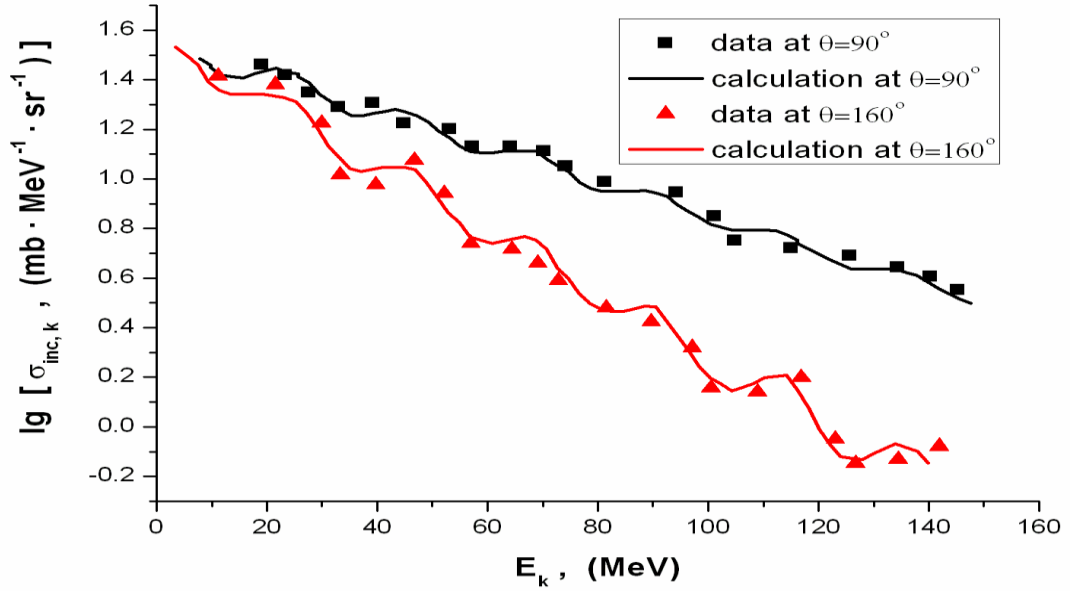


Рис. 4.1. Інклюзивний процес $p + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^7\text{Be}$ (2.1 ГеВ/нуклон).

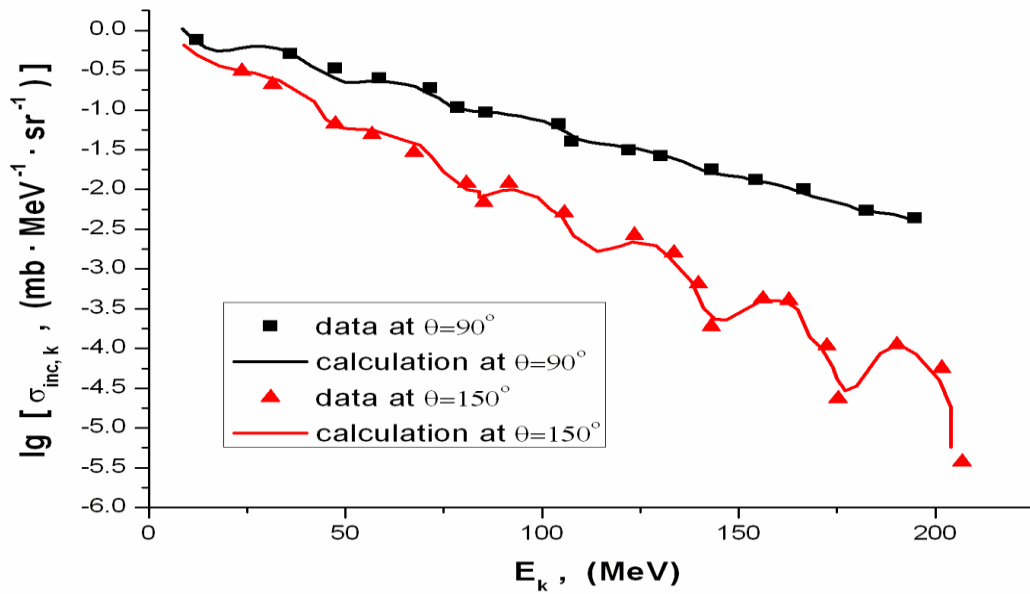


Рис. 4.2. Інклюзивний процес ${}^{20}\text{Ne} + {}^{27}\text{Al} \rightarrow p$ (393 МеВ/нуклон).

Для оцінки динаміки поведінки високозбудженої компаунд-системи в рамках МРР вперше отримано вирази для двох функцій при довільній кількості пар часових параметрів, а саме, (і) - для функції виживання (тобто, імовірності "нерозпаду") компаунд-системи від часу:

$$L_C(t) = 1 - \left(\pi \sum_{n=1}^{\nu} \frac{|C_{\alpha\beta}^n|^2}{\tau_n} \right)^{-1} \sum_{n=1}^{\nu} \left[\frac{|C_{\alpha\beta}^n|^2}{\tau_n} \left[\arctan(2(t - t_n - t_0) / \tau_n) + \pi / 2 \right] \right], \quad (4.4)$$

а також (ii) – для швидкості розпаду компаунд-системи від часу:

$$I(t) = \left(2\pi \sum_{n=1}^{\nu} \frac{|C_{\alpha\beta}^n|^2}{\tau_n} \right)^{-1} \sum_{n=1}^{\nu} \frac{|C_{\alpha\beta}^n|^2}{(t-t_n)^2 + \tau_n^2/4}. \quad (4.5)$$

Висновок, до якого можна дійти після аналізу виразів (4.4) та (4.5), спрощена візуалізація яких при $\nu=1$ схематично зображена на рис. 4.3, полягає в тому, що спостерігається стійка еволюція компаунд-системи впритул до часового околу її розпаду $t_n \pm \tau_n/2$, де вона резонансно в часі (неекспоненційно) розвалюється, а швидкість розвалу залежить від величини часового параметру τ_n .

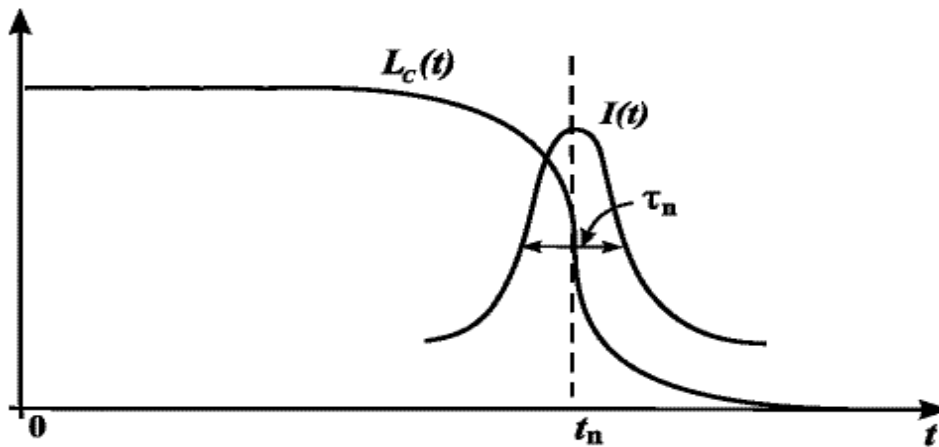


Рис. 4.3. Схематичне зображення залежностей від часу швидкості розпаду $I(t)$ і імовірності виживання $L_c(t)$ проміжної системи при $t_0 = 0$.

В розділі 4 також розглянуто аналіз меж застосування МРР та перспективи її розвитку. Фізично стійкість проміжної компаунд-системи можна пояснити легкістю взаємних внутрішніх переходів між сильно неортогональними станами при наявності зон сильно перекритих енергетичних резонансів, що є досить поширеним явищем при високоенергетичних зіткненнях. Досить широке розповсюдження проявів високотемпературної статистичної рівноваги на експериментальних енергетичних інклюзивних спектрах досліджуваних фрагментів при широкому виборі мішеней та бомбардуючих частинок-снарядів в досить широкому розглянутому діапазоні енергій (0.04 - 10 ГеВ/нуклон) дозволяє сподіватись на своєрідну універсальність МРР в контексті можливості її розширення на ультрарелятивістські зіткнення.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено результати теоретичних досліджень широкого спектру ядерних процесів, що відбуваються шляхом утворення проміжної

компанунд-системи, в широкому діапазоні енергій на основі розроблених підходів та моделей в рамках просторово-часового аналізу.

1. Побудовано самоузгоджений підхід для проведення просторово-часового аналізу бінарних процесів, що відбуваються за рахунок двох механізмів – прямого і через утворення проміжного компанунд-ядра, і в рамках цього підходу розраховано перерізи і часи протікання ряду ядерних процесів. При цьому одержано формули як для випадку збудження поодиноких резонансів, так і декількох резонансів, що перекриваються.

2. Побудований формалізм для бінарних процесів дозволив вперше врахувати рух компанунд-ядра в лабораторній системі і дозволив розв'язати парадокс «затримки-випередження», що активно обговорювався в літературі.

3. Проведені в рамках нового самоузгодженого підходу розрахунки показали, що запропонований підхід значно краще описує експериментальні дані для інтегральних перерізів ряду процесів розсіяння нуклонів на ядрах ^{12}C , ^{16}O , ^{28}Si , ^{52}Cr , ^{56}Fe , ^{63}Cu , ^{64}Ni і ^{73}Ge , ніж попередні.

4. В рамках просторово-часового підходу вперше одержано формули для розрахунку швидкості співпадінь для процесів із трьома частинками у вихідному каналі, що враховують ефекти інтерференції між різними механізмами протікання процесів – прямим й послідовним затриманим, що містить етап розпаду проміжного компанунд-ядра. Показано, що одержані формули в наближенні $\Delta E / \Gamma_Z \rightarrow 0$ добре узгоджуються з відповідними результатами стаціонарних моделей.

5. Розроблено наближення на основі просторово-часового підходу до розгляду когерентних ефектів у зіткненнях важких іонів в області недозволених резонансів із трьома частинками у вихідному каналі, дві з яких детектуються. Крім того, показано, що інтерференційні явища мають місце в наближенні випадкової фази тільки для ідентичних частинок у вихідному каналі реакції. Одержано вирази для амплітуди та інтенсивності частоти співпадінь для трьох випадків: ізольованих резонансів, резонансів, що перекриваються, та резонансів, що сильно перекриваються.

6. Вперше було розроблено модель часової еволюції, за допомогою якої вдалось описати експоненційно спадаючі енергетичні спектри, що були виміряні для інклюзивних процесів за участю різних бомбардуючих частинок (від протонів до ядер ^{132}Xe) та ядер-мішеней (від ^{12}C до ^{238}U) у широкому діапазоні енергій 0.04 - 10 ГеВ/нуклон. Побудований формалізм дозволив записати амплітуду процесу у вигляді, що допускає введення нового поняття часового резонансу. В рамках розробленої моделі одержано формули для розрахунку еволюції компанунд-ядерної функції виживання та функції швидкості розпаду.

7. Роз'яснено межі використання моделі резонансного розпаду високозбудженої компанунд-системи в часі за допомогою найпростіших умов Базя-Ньютона та більш реалістичних умов Любошиця. Показано, що часові резонанси найчастіше виникають при сильно перекритих резонансних структурах, де можливі легкі переходи між сильно неортогональними станами, що обумовлює затримку в розпаді досліджуваної компанунд-системи.

8. Використовуючи розроблену модель часової еволюції було проаналізовано експериментальні дані для таких інклюзивних процесів: $p + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^7\text{Be}$, ${}^{20}\text{Ne} + {}^{27}\text{Al} \rightarrow p$, ${}^4\text{He} + {}^{180}\text{Ta} \rightarrow t$, ${}^{20}\text{Ne} + {}^{238}\text{U} \rightarrow p$, ${}^{40}\text{Ar} + {}^{51}\text{V} \rightarrow p$, ${}^4\text{He} + {}^{238}\text{U} \rightarrow p$, ${}^{20}\text{Ne} + {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^3\text{He}$, ${}^{20}\text{Ne} + {}^{238}\text{U} \rightarrow p$, ${}^{20}\text{Ne} + {}^{238}\text{U} \rightarrow d$, ${}^{132}\text{Xe} + {}^{197}\text{Au} \rightarrow p$ і достатньо гарно описано відповідні спектри. Знайдено також часові параметри протікання зазначених процесів. За допомогою розробленої моделі вдалося проаналізувати швидкості розпаду та функції виживання для процесів ${}^{20}\text{Ne} + U \rightarrow p$ та ${}^{20}\text{Ne} + U \rightarrow {}^3\text{He}$.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Eremin N.V., Giardina G., Olkhovsky V.S., **Omelchenko S.A.** Temporal description of interference phenomena in nuclear reactions with two-particle channels // Mod.Phys.Lett. - 1994. - Vol. A9. - P. 2849 - 2856.
2. С.П. Майданюк, В.С. Ольховский, **С.А. Омельченко**. Преторново-часова модель опису гальмівного випромінювання при альфа-розпаді важких ядер // Укр.фіз.ж., 2001, 46(12), 1243-1250.
3. С.П. Майданюк, В.С. Ольховский, **С.А. Омельченко**. Подбарьерное тормозное излучение при α -распаде тяжелых ядер // Известия РАН. Серия Физическая, 2002, 66(10), 1531 – 1534.
4. С.П. Майданюк, В.С. Ольховский, **С.А. Омельченко**. Подбарьерное тормозное излучение при α -распаде ядер // Вопросы атомной науки и техники, 2002, 1(2), 11 – 15.
5. S.P. Maidanyuk, V.S.Olkhovsky, **S.A.Omelchenko**. Subbarrier bremsstrahlung in the alpha-decay of heavy nuclei // Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 66, 2026 (2002).
6. Olkhovsky V.S., Dolinska M.E., **Omelchenko S.A.** The Possibility of Time Resonance (Explosion) Phenomena in High-Energy Nuclear Reactions // Central Europ. J.Phys. - 2006. – Vol. 4(2). - P. 223 – 240.
7. V.S.Olkhovsky, M.E.Dolinska, **S.A.Omelchenko** and M.V.Romanyuk. New developments in the tunneling and time analysis of low-energy nuclear processes // Internat. J. Mod. Phys. E, 2010, v.19, doi: N 10.1142/S02183010015692, pp. 1212 - 1219.
8. V.S.Olkhovsky, M.E.Dolinska, **S.A.Omelchenko**. On scattering cross sections and durations near an isolated compound-resonance, distorted by the non-resonant background, in the center-of-mass and laboratory systems // Applied Physics Letters, 99 (2011) 244103 (1-3), doi:10.1063/1.365.
9. V.S.Olkhovsky, M.E.Dolinska, **S.A.Omelchenko**. On new experimental data manifesting the time resonances (or explosions) // Central Europ. J. Phys., 9:N4 (2011) 1131-1133.
10. V.S.Olkhovsky, **S.A.Omelchenko**. On the space-time description of interference phenomena in nuclear reactions with three particles in the final channel // The Open Nuclear and Particle Physics Journal, 4 (2011) 35 - 38.

11. В.С. Ольховский, **С.А. Омельченко**. Влияние движения составного ядра на интерференцию прямой и компаунд-ядерной амплитуд при рассеянии нейтронов атомными ядрами // Ядерна фізика та енергетика. - 2016. - Т. 17. - № 2. - С. 130 - 137.

12. **С.А. Омельченко**, В. С. Ольховский. Применение метода временных резонансов для анализа инклюзивных спектров в высоко-энергетических ядерных реакциях // Ядерна фізика та енергетика. - 2017. - Т. 18. - №3. - С. 230 - 237; <https://doi.org/10.15407/jnpae2017.03.230>.

13. **С.О. Омельченко**, В.С. Ольховський. Корректирующая фаза в приближении пространственно-временного анализа при учете интерференции в столкновениях тяжелых ионов // Ядерна фізика та енергетика. - 2019. - Т.20. – N1. - С. 18 - 25; <https://doi.org/10.15407/jnpae2019.01.018>.

Препринти:

14. Н.Л. Дорошко, М.Е. Долінська, **С.О. Омельченко**, В.О. Кива. Вивчення еволюції і часових характеристик розпаду ядер ^{14}C , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{87}Rb // Препринт КІЯД-00-3. - Київ. - 2000.

15. **S.A. Omelchenko**, N.L. Doroshko About new method of the analysis for the high-energy nuclear reactions spectra // Preprint KINR-00-4. - Kyiv. - 2000.

Електронні публікації:

16. V.S.Olkhovsky, M.E.Dolinska, **S.A.Omelchenko**. Phenomena of Time Resonances Explosions for the Compound-Clot Decays in High-Energy Nuclear Reactions // arXiv:0902.2665, 2009.

17. V.S.Olkhovsky, M.E.Dolinska, **S.A.Omelchenko**. On scattering cross sections and durations near an isolated compound-resonance, distorted by the non-resonant background, in the center-of-mass and laboratory systems // arXiv.org>nucl-th>arXiv:1101.5541 (submitted on 28 Jan 2011).

18. **S.A.Omelchenko**, V.S.Olkhovsky. Application of resonant decay method for compound-systems at analysis inclusive spectra in high-energy nuclear reactions // arXiv:1812.00747, 2018.

Тези наукових доповідей:

1. N.L. Doroshko, N.V Eremin, G. Fazio, G. Giardina, V.S. Olkhovsky, **S.A. Omelchenko**. Effects revealed in the bremsstrahlung emission and influence of the compound-nucleus motion on the interference processes in the cross-sections // Fourth International School on the Nuclear Physics, Kiev, 1994, abstract p.69.

2. Н.Л. Дорошко, В.С. Ольховський, **С.О. Омельченко**. Явище часових резонансів (вибухів) при розпаді складених ядер // Матер. щорічн. наук. конф. Інст. яд. досл. - Київ. - 1995. - С. 105.

3. Н.Л.Дорошко, **С.А.Омельченко**, В.С.Ольховский. Временной анализ интерференционных явлений в ядерных реакциях // Матер. щорічн. наук. конф. Інст. яд. досл.(зб.доп.),Київ,1995, стор. 105 - 109.

4. **S.A.Omelchenko**, V.S.Olkhovsky Joint Time-Evolution and Statistical Energy-Resonance Analysis of High-Energy Nuclear Collisions and Possible Phenomena of Time Resonances // Proc.of Internat.Symp. on Large-Scale Collective Motion of At.Nuclei, Brolo (Messina) Italy, 15-19 Oct.1996, World Sci., 1997, p.421 - 424.

5. G.Fazio, G.Giardina, **S.A.Omelchenko**, V.S.Olkhovsky. On Interference Effects in Heavy-Ion Collision with Emission of Two Particles // Proc.of Internat.Symp.

on Large-Scale Collective Motion of At.Nuclei, Brolo(Messina)Italy, 15 - 19 Oct.1996, World Sci., 1997, p. 425 - 428.

6. N.L.Doroshko, **S.A.Omelchenko**, V.S.Olkhovsky. On Results of the Joint Time-Evolution and Statistical Energy-Resonance Analysis of High-Energy Nuclear Collisions // Матер. щорічн. Наук. конф. Інст.яд.досл. 21 – 27 січня 1997), Київ, 1997, стор. 43 - 46.

7. N.V. Eremin, G. Fazio, G. Giardina, A. Lamberto, S.P. Maidanyk, V.S. Olkhovsky, **S.A. Omelchenko**, R. Palamara, A.A. Paskhalov, D.A. Smirnov, A. Taccone. “High energy bremsstrahlung emission in α -decay of heavy nuclei”, International Conference on Nuclear Physics at Border Lines, Lipari (Messina),2001, abstract p.27.

8. V.S.Olkhovsky, M.E.Dolinskaya, N.L.Doroshko, S.P.Maydanyuk, **S.A.Omelchenko**. On tunneling effects in collisions between nuclei and in nucleus decays // Proc. of Internat.Symposium New Projects and Lines of Research in Nuclear Physics (October 24-26, 2002, Messina, Italy), World Sci., 2003, pp. 319 - 326.

9. Бельчиков С. В., Майданюк С. П., Ольховский В. С., **Омельченко С. А.** Временной анализ осцилляции частицы в двухъямном симметричном потенциале // Тезисы докладов 52 совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (ЯДРО - 2002). Москва (Россия). - 2002. - С. 126.

10. V.S.Olkhovsky, M.E.Dolinska and **S.A.Omelchenko**. Time Resonances (Explosions) Phenomena in High- Energy Nuclear Reactions // in: Proc. of the International Conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, Kyiv, Ukraine, May 29-June 03, 2006, part I, Kyiv 2007, pp. 346 - 351.

11. В.С. Ольховський, М. Е. Долінська, **С.О. Омельченко**. Явище часових резонансів (вибухів) при розпаді складених ядер у високоенергетичних ядерних реакціях // Матер. щорічн. наук. конф. Інст. яд. досл. - Київ. - 2007. - С. 26.

12. V.S.Olkhovsky, M.E.Dolinska, **S.A.Omelchenko** and M.V.Romanyuk. New developments in the tunneling and time analysis of low-energy nuclear processes // Abstracts of the International Conf. Nuclear Reactions on Nucleons and Nuclei, 5 - 9 October, 2009, Messina (Italy), p.63.

13. V.S.Olkhovsky, M.E.Dolinska, **S.A.Omelchenko**. Theoretical Study of High and Low Energy Nuclear Reactions // in: Proc. of the 3-rd Internat.Conf.in Nuclear Physics and Atomic Energy, June 7-12, 2010, Kyiv,Ukraine, pp. 353 - 357.

14. L.S. Martseniuk, **S.A. Omelchenko**. The time of simultaneous tunneling of identical particles through the rectangular quantum barrier // in: Proc. of the 3-rd Internat.Conf.in Nuclear Physics and Atomic Energy, June 7-12,2010, Kyiv,Ukraine.

15. V.S. Olkhovsky, M.E. Dolinska, **S.A. Omelchenko**. New manifestations of the time resonances (or explosions) in higt-energy nuclear reactions // Матер. щорічн. наук. конф. Інст. яд. досл. - Київ. - 2011. - С. 26.

16. V.S.Olkhovsky, M.E.Dolinska, **S.A.Omelchenko**. On the cross section and duration of the neutron-nucleus scattering with a resonance,distorted by a non-resonant background, in the center-of-mass system and laboratory system // Proceedings of the 4-th Internat.Conf. Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-2012, sept.3-7, 2012, Kyiv, Ukraine), Kyiv 2013, pp. 198 - 201.

17. **S.A.Omelchenko.** Time Resonance Phenomena in High-Energy Nuclear Reactions // The 1st International Symposium on Physics of Photons (ISPP 13), sep. 27-28, 2013, Lanzhou, China.
18. **S.A.Omelchenko** Interference phenomena (the space-time description) in nuclear reactions with three particles in the final channel // International Symposium on Physics of Photons (ISPP 15), july 16-18, 2015, Lanzhou, China.
19. V.S.Olkhovsky, **S.A.Omelchenko** About temporal description of interference phenomena in light-ion collisions // International Symposium on Physics of Photons (ISPP 15), july 16 - 18, 2015, Lanzhou, China.
20. V.S.Olkhovsky, **S.A.Omelchenko.** Time resonances phenomena in nuclear reactions // International Symposium on Physics of Photons (ISPP 15), july 16-18, 2015, Lanzhou, China.
21. **С.А. Омельченко, В. С. Ольховский.** Использование метода временного анализа в ядерных реакциях вблизи изолированных резонансов, искаженных нерезонансным фоном // Тези XXIII Щорічної наукової конференції Інституту ядерних досліджень, лютий 1-5, 2016, Київ, С. 39 - 40.
22. **С.О. Омельченко, В.С. Ольховський.** Метод временных резонансов для анализа инклюзивных спектров одиночных конечных фрагментов в высокоэнергетических ядерных реакциях // Тези XXIV Щорічної наукової конференції Інституту ядерних досліджень, квітень 10-13, 2017, Київ, С. 41 - 42.
23. **С.О. Омельченко, В.С. Ольховський.** Корректирующая фаза в приближении пространственно-временного анализа при учете интерференции в столкновениях тяжелых ионов // Тези XXV Щорічної наукової конференції Інституту ядерних досліджень, квітень 16 - 20, 2018, Київ, С. 46 - 47.
24. **С.О. Омельченко, В.С. Ольховський.** Модель резонансного распада во времени промежуточной компаунд-системы для анализа экспериментальных инклюзивных спектров одиночных конечных фрагментов в высоко-энергетических ядерных реакциях, новые расчеты // Тези XXVI Щорічної наукової конференції Інституту ядерних досліджень, квітень 8 - 12, 2019, Київ, С. 31 - 32.
25. **С.О. Омельченко.** Модель резонансного розпаду в часі для аналізу деяких центральних зіткнень на коллайдерах // Тези XXVII Щорічної наукової конференції Інституту ядерних досліджень, вересень 21-25, 2020, Київ, С. 31 - 32.

АНОТАЦІЯ

Омельченко С. О. Дослідження когерентних і динамічних ефектів в ядерних реакціях у рамках просторово-часового аналізу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за фахом 01.04.16 - «Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій». - Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, 2021.

У дисертації на базі розробленого просторово-часового аналізу запропоновано два методи: (i) - просторово-часовий метод, який при обрахунках перерізів та швидкостей співпадінь враховує наявні проміжні когерентні канали в різних класах ядерних реакцій зіткнення та (ii) - метод часових резонансів або модель резонансного розпаду (МРР) проміжної компаунд-системи в часі, яка призначена

для обрахунку аномальних інклюзивних спектрів кінцевих фрагментів в деяких високоенергетичних реакціях. В межах просторово-часового аналізу запропоновано методіку розрахунків перерізів для бінарних процесів розсіяння нуклонів на легких та середніх ядрах, для реакцій зіткнення легких ядер, а також для непериферичних зіткнень важких іонів, при цьому всюди підкреслена важливість урахування когерентних ефектів. В межах МРР проведені обрахунки інклюзивних спектрів з нетиповою експоненційно спадаючою поведінкою з ростом енергії для деяких високоенергетичних реакцій та досліджена динаміка розпаду проміжних компаунд-систем.

Дисертаційна робота містить чотири наукових розділи, з яких перші три стосуються використання просторово-часового аналізу для урахування когерентних проміжних каналів протікання трьох типів реакцій: (i) бінарних процесів розсіяння нуклонів на ядрах, реакцій зіткнення (ii) легких та (iii) важких іонів. Четвертий розділ стосується розгляду вищезгаданої МРР для дослідження інклюзивних спектрів обраних кінцевих продуктів реакцій та динаміки неекспоненційного розпаду проміжних компаунд-систем.

Ключові слова: просторово-часовий аналіз, метод часових резонансів, інклюзивні спектри кінцевих фрагментів.

АННОТАЦІЯ

Омельченко С. А. Исследование когерентных и динамических эффектов в ядерных реакциях в рамках пространственно-временного анализа. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - «Физика ядра, элементарных частиц и высоких энергий». - Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, 2021.

В диссертации на базе разработанного пространственно-временного анализа предложено два метода: (i) - пространственно-временной метод, который при расчетах сечений и скоростей совпадений учитывает имеющиеся промежуточные когерентные каналы в разных классах ядерных реакций столкновения и (ii) - метод временных резонансов или модель резонансного распада (МРР) промежуточной компаунд-системы во времени, которая предназначена для расчета аномальных инклюзивных спектров конечных фрагментов в некоторых высокоэнергетических реакциях. В рамках пространственно-временного анализа предложена методика расчетов сечений для бинарных процессов рассеяния нуклонов на легких и средних ядрах, для реакций столкновения легких ядер, а также для непериферических столкновений тяжелых ионов, при этом везде подчеркнута важность учета когерентных эффектов. В рамках МРР проведены расчеты инклюзивных спектров с нетипичным экспоненциально спадающим поведением при росте энергии для некоторых высокоэнергетических реакций и исследована динамика распада промежуточных компаунд-систем.

Диссертационная работа содержит четыре научных главы, из которых первые три касаются использования пространственно-временного анализа для учета когерентных промежуточных каналов протекания трех типов реакций: (i) бинарных процессов рассеяния нуклонов на ядрах, реакций столкновения (ii) легких и (iii) тяжелых ионов. Четвертая глава касается рассмотрения вышеупомянутой МРД для исследования инклюзивных спектров выбранных конечных продуктов реакций и динамики неэкспоненциального распада промежуточных компаунд-систем.

Ключевые слова: пространственно-временной анализ, метод временных резонансов, когерентные эффекты, инклюзивные спектры конечных фрагментов.

ABSTRACT

Omelchenko S.O. Investigation of coherent and dynamic effects in nuclear reactions within the framework of space-time analysis.- Manuscript.

Ph. D. degree thesis for the physical and mathematical sciences of 01.04.16 speciality - «Nuclear physics, elementary particles and high energies». - Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine, Kiev, 2021.

In the thesis on the basis of the developed space-time analysis two methods are offered: (i) - space-time method which at calculations of cross-sections and velocities of coincidences considers available intermediate coherent channels in various classes of nuclear collision reactions and (ii) - a method of time resonances or a model of resonant decay (MRD) of an intermediate compound system over time, which is designed to calculate the anomalous inclusive spectra of the final fragments in some high-energy reactions. Within the framework of the space-time analysis, a method is proposed for calculating the cross sections for binary processes of nucleon scattering by light and medium nuclei, for collision reactions of light nuclei, as well as for non-peripheral collisions of heavy ions, with the importance of taking into account coherent effects everywhere emphasized. Within the MRD, calculations of inclusive spectra with atypical exponentially decreasing behavior with increasing energy for some high-energy reactions were performed, and the dynamics of decay of intermediate compound systems was studied.

The thesis contains four scientific sections, of which the first three concern the use of space-time analysis to take into account the coherent intermediate channels of three types of reactions: (i) binary processes of nucleon scattering by nuclei, collision reactions (ii) light ions and (iii) heavy ions. The fourth section concerns the consideration of the above-mentioned MRD for the study of inclusive spectra of the selected final reaction products and the dynamics of nonexponential decay of intermediate compound-systems.

Keywords: space-time analysis, time resonance method, coherent effects, inclusive spectra of finite fragments.