

## Реферат роботи

«Ядерні процеси як джерело інформації про структуру ядер та ядерну взаємодію»,

що подана на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки за 2018 рік

Робота являє собою цикл наукових досліджень, які були виконані з метою знаходження нової інформації щодо ефективних ядро-ядерних взаємодій, характеристик структури атомних ядер, розробки і вдосконалення моделей перебігу ядерних реакцій за участю різних ядер, нейтронів, нуклонів та фотонів. Виконані дослідження є однією із найважливіших фундаментальних та прикладних задач сучасної нерелятивістської ядерної фізики. Вони можуть бути використані для отримання інформації про високозбуджені стани атомних ядер, ймовірності вильоту мікрочастинок і фотонів із таких станів, при аналізі астрофізичних процесів і дослідженні розповсюдження атомних ядер у Всесвіті, для отримання надійних ядерних даних, необхідних у ядерній медицині, матеріалознавстві та реакторобудуванні з метою визначення основних фізичних характеристик ядерно-енергетичних об'єктів та забезпечення їх контролю і радіаційного захисту.

Розроблені в даному циклі робіт підходи дозволили авторам стимулювати постановку низки нових експериментів і провести спільні дослідження ІЯД НАН України (м. Київ) з ХФТІ НАН України (м. Харків), Інститутом електронної фізики НАН України (м. Ужгород) і Київським національним університетом імені Тараса Шевченка, а також плідно співпрацювати з багатьма міжнародними науковими центрами, зокрема, з International Atomic Energy Agency, Los Alamos National Laboratory, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, Heavy Ion Laboratory, University of Warsaw та ін.

### **1. Стан проблеми та її актуальність**

Ядерні реакції являють собою основне джерело інформації про структуру Всесвіту на малих відстанях. Наявність низки різних моделей, які одночасно описують різноманітні ядерні процеси, свідчить про необхідність їхнього узагальнення та проведення цілеспрямованих досліджень для побудови та визначення обґрунтованих підходів, призначених для опису експериментально вимірних характеристик ядерних реакцій. Вивчення властивостей надважких ядер відкриває можливості для експериментального та теоретичного дослідження ядерної матерії в екстремальних умовах, пов'язаних із сильним кулонівським полем, великими значеннями ізоспіну, спіну та деформації форми ядер і є джерелом для уточнення та розширення фундаментальних уявлень про структуру

ядер, механізми ядерних реакцій та нуклон-нуклонні сили. Важливість дослідження перерізів взаємодії швидких нейтронів, заряджених частинок і фотонів з ядрами зумовлена необхідністю контролю радіаційного навантаження на конструкційні матеріали ядерних реакторів нового покоління, створення сховищ утилізованого ядерного палива, підкритичних систем, які керуються прискорювачами, космічних апаратів та розвитком нових ядерних технологій. Дослідження вильоту фотонів у реакціях із нейтронами є актуальними для визначення характеристик розподілу радіаційних та електромагнітних полів, які виникають при протіканні різних ядерних реакцій в процесах енерговиділення при роботі ядерних реакторів і активації їх конструкційних матеріалів.

## **2. Мета роботи**

Метою роботи є детальне визначення ядерно-ядерної взаємодії в залежності від деформації та розподілу густини ядер, що зіштовхуються, визначення характеристик різних ядерних реакцій за допомогою знайденої ядерно-ядерної взаємодії, аналіз властивостей колективних збуджень в ядрах та їхній вплив на різні характеристики ядерних реакцій, розробка теоретичного підходу для кількісного опису широкого кола явищ, що спостерігаються при взаємодії нуклонів і легких ядер проміжних енергій з атомними ядрами та проведення на його основі аналізу експериментальних даних, розробка, перевірка і застосування теоретичних методів опису та передбачення результатів взаємодії нейтронів і заряджених частинок з ядрами, дослідження усереднених характеристик  $\gamma$ -переходів між ядерними станами, а також виконання експериментальних досліджень та отримання нових даних для диференціальних перерізів пружного і непружного розсіяння та реакцій передач при взаємодії легких ядер.

## **3. Зміст роботи та основні результати**

### *3.1 Ядерні реакції та процеси поблизу бар'єра*

Ядерні реакції та процеси взаємодії ядер поблизу бар'єра являють собою невід'ємну і важливу складову ядерної фізики. У розвинутому підході на основі нових мікроскопічних та напівмікроскопічних наближень для опису ядро-ядерної взаємодії між сферичними і деформованими ядрами з'ясовано механізми різних реакцій та процесів і запропоновано нові моделі для опису динаміки ядерних процесів з урахуванням колективного та одночастинкового руху в ядрах, що зіштовхуються.

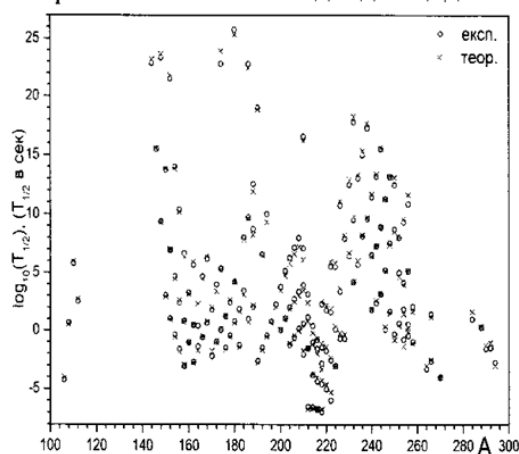
#### *3.1.1 Залежність ядерно-ядерної взаємодії від деформації та розподілу густини ядер, що зіштовхуються*

Досліджено залежності ядерно-ядерної взаємодії від деформації і розподілу густини у взаємодіючих ядрах та запропоновано нові параметризації для ядерної

частини взаємодії двох сферичних ядер з урахуванням внесків оболонкових поправок. Знайдено вираз для потенціалу кулонівської взаємодії двох аксіально-деформованих довільно орієнтованих ядер. Доведено, що бар'єри потенціалів взаємодії аксіально-деформованих ядер суттєво залежать від взаємної орієнтації ядер, що є принципово важливим для опису ядерних реакцій поблизу бар'єра. Показано, що врахування гексадекапольної деформації є важливим при обчисленні перерізу захоплення для важких ядерних систем. За допомогою знайдених потенціалів розраховано перерізи захоплення та злиття для низки взаємодіючих систем, а також астрофізичний  $S$ -фактор для процесів горіння карбону в зірках.

### 3.1.2 Дослідження ядерних реакцій поблизу бар'єра

Запропоновано нові підходи щодо вивчення механізмів перебігу різноманітних



ядерних реакцій та процесів поблизу бар'єра. Розроблено об'єднану модель  $\alpha$ -розпаду та  $\alpha$ -поглинання, яка дає змогу в єдиному підході розраховувати перерізи поглинання та періоди цих процесів. Розраховані в рамках такої моделі та експериментально виміряні логарифми періоду напіврозпаду  $\alpha$ -розпаду парно-парних ядер в залежності від масового числа  $A$  материнського ядра представлені на рисунку.

Доведено, що при зіткненні нейтронно-надлишкового ядра з ядром долини  $\beta$ -стабільності передача нейтронів значно підсилює переріз підбар'єрного злиття ядер. Розроблено багатовимірну модель динамічної деформації ядер в процесах злиття та кластерного розпаду, яка описує експериментально виміряні перерізи та періоди напіврозпаду ядер з емісією важких кластерів. Запропоновано повний ядро-ядерний потенціал як суму макроскопічної та оболонкової частин. Проаналізовано роль статичної деформації та квадрупольних коливань поверхні сферичних ядер у формуванні астрофізичного  $S$ -фактора ядерних реакцій (протонне та  $\alpha$ -поглинання, злиття ядер) у масивних зірках. Встановлено, що ядерні реакції у зірковій матерії значно прискорюються за великої статичної або динамічної деформації ядер. Побудовано модель для опису перерізу злиття надважких ядер у реакціях "холодного" синтезу, а також досліджено явище квазірезонансного обміну нуклонів між різними ядрами. Розраховано протонні та нейтронні оболонкові поправки для ядер з кількістю протонів  $76 \leq Z \leq 400$  уздовж лінії  $\beta$ -стабільності. Визначено магічні числа протонів і нейтронів для ультраважких ядер.

### 3.1.3 Колективні збудження в ядрах та їхній вплив на різноманітні характеристики ядерних реакції

Запропоновано нову узагальнену модель для опису гігантських мультипольних ізовекторних резонансів у сферичних та деформованих ядрах. Досліджено ангармонічні ефекти в енергіях гігантських монопольних резонансів у сферичних ядрах. Знайдено зсув частот резонансів, пов'язаний з урахуванням нелінійних компонент розкладу густини нуклонів. Вивчено ізоскалярні поперечні коливання в ядрах і знайдено умови їхнього існування. Знайдено вираз для поляризованого електричного дипольного моменту в сильно-деформованих дзеркально-асиметричних аксіальних та неаксіальних ядрах на основі моделі рідкої краплі для геометрично подібних протонних і нейтронних поверхонь, який приводить до підсилення ймовірності гамма-переходів у таких ядрах.

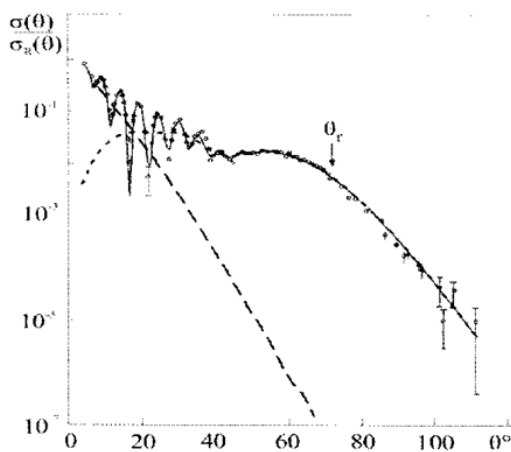
### 3.2. Дифракційні та інтерференційні процеси при взаємодії адронів з ядрами

Аналіз адрон-ядерної взаємодії в області середніх енергій проводився на основі застосування параметризованої матриці розсіяння, що дозволило здобути аналітичні вирази для амплітуд, перерізів і поляризаційних спостережуваних різноманітних ядерних процесів, з'ясувати їхній фізичний зміст і пояснити залежність спостережуваних величин від параметрів запропонованої матриці розсіяння. На основі сучасних підходів, які ґрунтуються на можливості безпосереднього розв'язання інтегральних рівнянь Фаддєєва, проведено дослідження властивостей найпростіших ядерних систем, що складаються із декількох нуклонів.

#### 3.2.1. Квантова інтерференція та ядерна дифракція

Узагальнено теорію квантової інтерференції, згідно якій можна розглядати в єдиному підході ядерне дифракційне розсіяння різних типів, а також райдужне розсіяння, що спостерігається при взаємодії ядер з ядрами.

Запропонована нова оригінальна параметризація матриці розсіяння. У єдиному підході проведено аналіз численних експериментальних даних з дифракційного та райдужного розсіяння в широкому діапазоні енергій, кутів розсіяння та масових чисел атомних ядер. Розрахований в рамках такого підходу переріз пружного розсіяння  $\alpha$ -частинок з енергією 120 MeV ядрами  $^{92}\text{Zr}$  і внески до нього від розсіяння на ближньому і дальньому (довгі та короткі штрихи)



краях ядра наведено на рисунку. Стрілка вказує на кут ядерної райдуги.

Побудовано дифракційну теорію ядерних реакцій зарядового обміну із збудженням ізобараналога основного стану в ядрі-мішені та дифракційну теорію інклюзивних реакцій передачі нуклона (реакцій зриву) за участю дейтронів і тринуклонних ядер.

### 3.2.2. Теорія дифракційного $pA$ -розсіяння

На основі теорії багаторазового дифракційного розсіяння розвинуто підхід до аналізу перерізів і повного набору спінових спостережуваних пружного та непружного розсіяння протонів і квазіпружної реакції  $(p,n)$  на ядрах в області проміжних енергій. Знайдено нові вирази для амплітуди пружного  $pA$ -розсіяння з одночасним урахуванням двонуклонних кореляцій (шляхом включення проміжних збуджень ядра-мішені) та неейкональних поправок, а також упорядкування непереставних спінових операторів відповідно до послідовності актів взаємодії між взаємодіючими нуклонами. Нуклонні густини, необхідні при цих розрахунках, були знайдені у наближеннях нерелятивістського (з силами Скірма) і релятивістського середнього поля з сучасними  $NN$ -взаємодіями. Доведено важливість урахування розглянутих поправок для коректного опису експериментальних даних.

### 3.2.3. Модель мікроскопічного оптичного потенціалу

У самоузгодженому підході розвинуто модель мікроскопічного оптичного потенціалу з використанням ефективної  $NN$ -взаємодії Скірма. Вивчено можливості застосування  $NN$ -сил Скірма для одночасного опису структури ядер, перерізів і поляризаційних спостережуваних  $NA$ -розсіяння. Знайдені нові варіанти сил Скірма як стандартної форми, так і розширеного вигляду, що містять тензорні та залежні від ядерної густини швидкісні члени. Доведено, що використання запропонованих оптимізованих сил Скірма дає змогу одночасно описати характеристики ядерної структури та дані з перерізів і поляризацій пружного розсіяння нуклонів, дейтронів і  $\alpha$ -частинок при енергіях  $E \leq 20$  МеВ/нуклон та енергетичні залежності повних перерізів реакцій цих частинок на ядрах.

### 3.2.4. Альфа-кластерна модель з дисперсією

Для легких та середніх ядер побудована  $\alpha$ -кластерна модель з дисперсією, у якій враховуються коливання альфа-кластерів відносно їх найбільш імовірних положень, що дало змогу пояснити велику кількість експериментально вимірених перерізів і поляризаційних спостережуваних характеристик для пружного та непружного розсіяння заряджених частинок і легких ядер  $\alpha$ -кластерними ядрами та отримати з такого аналізу базову інформацію про структуру взаємодіючих ядер та механізми ядерної взаємодії.

### 3.2.5. Квантова взаємодія в системах трьох і чотирьох частинок

Уперше метод інтегральних рівнянь Фадеєва узагальнено для опису системи трьох нуклонів як у зв'язаному стані (ядро тритона  ${}^3\text{H}$ ), так і у випадку розсіяння нейтрона на дейтроні з урахуванням спінової та ізоспінової залежностей взаємодії між нуклонами та їхньої totoжності. Сформульовано та розв'язано інтегральні рівняння типу Фадеєва-Якубовського для системи чотирьох нуклонів. Розраховано енергії основного і збудженого  $0^-$ -станів ядра  ${}^4\text{He}$ , синглетні і триплетні довжини розсіяння нейтрона на тритоні та нейтрона на ядрі  ${}^3\text{He}$ .

### 3.2.6. Електричні мультипольні поляризованості легких ядер

Розроблено новий підхід для визначення електричних мультипольних поляризованостей легких ядер, що ґрунтується на використанні матриці переходу в імпульсному просторі. Уперше розраховано електричну квадрупольну і октупольну поляризованості дейтрона та дипольні поляризованості ядер тритона і  $\Lambda$ -гіпертритона та знайдено, що поляризованість  $\Lambda$ -гіпертритона на порядок перевищує поляризованість звичайних тринуклонних ядер  ${}^3\text{H}$  і  ${}^3\text{He}$ .

### 3.3. Ядерні реакції за участю нуклонів та фотонів

Механізми перебігу ядерних реакцій за участю нейтронів, нуклонів та фотонів досліджувалися на основі узгодженого об'єднання методів опису процесів різної тривалості у багаточастинкових системах. Здобуто нові вирази для опису ядерних процесів різних типів, що дало змогу значно розширити фізичні уявлення про їхній перебіг.

#### 3.3.1. Статистична теорія вильоту нуклонів і гамма-квантів з рівноважних та нерівноважних станів атомних ядер

Запропоновано підхід щодо аналізу рівноважних (повільних) процесів, який базується на статистичному описі вильоту нуклонів і  $\gamma$ -квантів із збуджених станів. Нерівноважні (швидкі) процеси розглядалися з використанням різних методів опису вильоту частинок після їх взаємодії з невеликою кількістю ступенів свободи ядра.

Запропоновано новий ефективний метод обчислення середніх перерізів та кутових розподілів непружного розсіяння нуклонів ядрами, який узгоджується із спектральними властивостями гамільтоніана системи та описує результати моделювання за методом Монте-Карло. Розроблено самоузгоджену теорію передрівноважної та рівноважної емісії частинок, яка дозволила визначити взаємний вплив цих механізмів без введення додаткового параметру внеску. Розвинуто метод щодо опису вильоту  $\gamma$ -квантів з передрівноважних станів за допомогою якого було продемонстровано домінування внеску такої емісії у високоенергетичну частину  $\gamma$ -спектра у середніх та важких ядрах. Розроблено

метод урахування закону збереження повного кутового моменту для передрівноважної емісії частинок в рамках екситонної моделі, який дав змогу обчислити кутові розподіли передрівноважного компонента непружного розсіяння. Запропоновано підхід щодо опису анізотропії вильоту нуклонів на передрівноважній стадії, обумовленої кореляціями між амплітудами ймовірності їх вильоту.

### 3.3.2. *Фотопоглинання та виліт гамма-квантів в атомних ядрах*

Розроблено підхід щодо статистичного опису електромагнітних переходів між станами збуджених атомних ядер з врахуванням їх мікросканонічного розподілу та внеску різних процесів дисипації. Зокрема, вперше було отримано вираз для ймовірності  $\gamma$ -розпаду збудженого ядра як функції його лінійного відгуку на електромагнітне поле і узгоджене з ним рівняння термодинамічного стану ядра, побудовано новий напівфеноменологічний підхід для обчислення усереднених ймовірностей  $\gamma$ -переходів, який враховує мікросканонічний розподіл збуджених станів ядер, швидку зміну густин ядерних рівнів в залежності від енергії збудження та закон збереження повного кутового моменту. На основі такого підходу було розроблено метод обчислення фотонних силових функцій, які визначають характеристики процесів  $\gamma$ -розпаду та фотопоглинання ядер. В рамках даних досліджень також були обчислені ізомерні відношення виходів фрагментів фотоподілу ядер  $^{235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  і  $^{239}\text{Pu}$  гальмівними  $\gamma$ -квантами. Експериментальні значення ізомерних відношень були отримані у відділі ядерної спектроскопії Інституту ядерних досліджень НАН України, а експеримент проводився на мікротроні М-30 Інституту електронної фізики НАН України, м. Ужгород.

### 3.4. *Ядерні реакції при взаємодії легких ядер*

Механізми пружного і непружного розсіяння та реакцій передач кластерів при взаємодії легких ядер досліджувались за допомогою проведених експериментальних досліджень та їх подальшого аналізу з використанням методу зв'язаних каналів та оптичної моделі.

#### 3.4.1. *Експериментальні дослідження ядерних реакцій за участю легких ядер*

Виконано експериментальні дослідження та отримано нові дані для диференціальних перерізів пружного і непружного розсіяння та реакцій передач кластерів при взаємодії легких ядер. Експериментальні дані отримано на пучках іонів  $^3\text{He}$ ,  $^{10,11}\text{B}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14,15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$  при їх взаємодії з ядрами  $^6,7\text{Li}$ ,  $^9\text{Be}$ ,  $^{10,11}\text{B}$ ,  $^{12,13,14}\text{C}$  на циклотроні У-240 ІЯД НАН України та Варшавському циклотроні С-200Р і внесені в базу даних EXFOR (МАГАТЕ). Проведений аналіз отриманих експериментальних даних показав, що основними механізмами перебігу пружного

і непружного розсіяння та реакцій передач при взаємодії легких ядер є потенціальне розсіяння та передача кластерів.

#### 3.4.2. Енергетична залежність потенціалу взаємодії ядер

В результаті аналізу перерізів пружного і непружного розсіяння в рамках методу зв'язаних каналів з врахуванням одержаних дисперсійних співвідношень між дійсною та уявною частинами оптичного потенціалу, які є наслідком фундаментального принципу причинності, отримано енергетичні залежності потенціалів взаємодії для 26 пар ядер в інтервалі енергій  $1 \div 200$  МеВ/нуклон.

#### 4. Наукова новизна і практична значимість результатів, перспективи

Розроблено об'єднану модель, яка дозволяє одночасно розраховувати і передбачати періоди  $\alpha$ -розпаду та перерізи  $\alpha$ -поглинання. Вперше розроблено модель злиття ядер віддалених від лінії стабільності та продемонстровано значне підсилення перерізів їх підбар'єрного злиття, завдяки врахуванню збуджень низькорозташованих вібраційних станів поверхні ядер та передач нуклонів між ними. Запропоновано багатовимірну модель злиття та кластерного розпаду ядер з урахуванням їх динамічних деформацій, що дозволило передбачити перерізи злиття та описати спостережувані періоди напіврозпаду. Побудовано оригінальну модель для опису реакцій "холодного" синтезу, яка дозволила значно уточнити уявлення щодо механізмів утворення надважких елементів. Уперше досліджено та параметризовано залежність ядерно-ядерної взаємодії від базових характеристик структури ядер, зокрема, від їх деформації, взаємної орієнтації та внесків оболонкових поправок. Запропоновано оригінальну модель для опису високозбуджених колективних станів, а саме, гігантських мультипольних ізовекторних резонансів у сферичних та деформованих атомних ядрах, яка дозволила узгоджено описати та передбачити характеристики об'ємних і поверхневих мод збудження гігантських резонансів.

Запропоновано оригінальну параметризацію матриці розсіяння, яка дозволила описати та передбачити кутові розподіли розсіяння легких ядер ядрами, що містять як дифракційні, так і рефракційні ефекти різних типів. На основі  $S$ -матричного підходу, в якому запропоновано метод безмодельного вибору ядерних фаз розсіяння у вигляді розвинення за повним набором функцій, вперше передбачено і потім експериментально підтверджено існування ефектів ядерної райдуги у диференціальних перерізах реакцій перезарядки ( ${}^3\text{He}, {}^3\text{H}$ ). Запропоновано коректний метод розкладання амплітуди ядерного розсіяння на ближню і дальню складові, який дозволяє надійно визначити типи інтерференційних процесів в різноманітних ядерних реакціях. Розроблено підхід, у якому було досліджено вплив урахування полюсів Редже на рефракційні ефекти, що, зокрема, дозволило пояснити наявність двох райдужних максимумів у



перерізах пружного розсіяння  $\alpha$ -частинок і ядер  $^{16}\text{O}$  різними ядрами.

На основі теорії багаторазового дифракційного розсіяння розвинуто підхід до аналізу перерізів і повного набору спінових спостережуваних пружного та непружного розсіяння протонів і квазіпружної реакції  $(p,n)$  на ядрах в області проміжних енергій. Знайдено нові вирази для амплітуди пружного  $pA$ -розсіяння з одночасним урахуванням двонуклонних кореляцій та неефективних поправок, а також упорядкування непереставних спінових операторів відповідно до послідовності актів взаємодії між взаємодіючими нуклонами. Для опису та передбачення характеристик пружного та непружного розсіяння заряджених частинок і легких ядер побудована  $\alpha$ -кластерна модель з дисперсією, у якій враховуються коливання таких кластерів відносно їх найбільш імовірних положень, що дозволило отримати базову інформацію про структуру взаємодіючих ядер та механізми ядерної взаємодії.

Уперше метод інтегральних рівнянь Фадєєва з урахуванням спінової та ізоспінової залежностей взаємодії між нуклонами узагальнено для опису систем, які складаються з трьох нуклонів. Сформульовані та розв'язані інтегральні рівняння типу Фадєєва-Якубовського для системи чотирьох нуклонів. Розроблено новий підхід для визначення електричних мультипольних поляризованостей легких ядер, що ґрунтується на використанні матриці переходу в імпульсному просторі. Побудована непертурбативна теорія поляризаційної взаємодії в тричастинковій системі. Уперше розраховано електричну квадрупольну і октупольну поляризованості дейтрона та дипольні поляризованості ядер тритона і  $\Lambda$ -гіпертритона.

Запропоновано оригінальні методи обчислення спостережних характеристик прямих, передрівноважних і рівноважних процесів в ядерних реакціях з нуклонами, нейтронами та  $\gamma$ -квантами при нерелятивістських енергіях збудження. Уперше закон збереження кутового моменту було враховано при статистичному описі передрівноважних процесів, що дозволило в єдиному підході обчислити кутовий розподіл продуктів прекомпаунд і компаунд ядерних реакцій, а також визначити ступені анізотропії вильоту передрівноважних частинок. Уперше розроблена та застосована самоузгоджена теорія передрівноважної та рівноважної емісії частинок і  $\gamma$ -квантів без необхідності введення параметра внеску передрівноважних частинок, а також новий підхід щодо опису каскадної емісії частинок з послідовним врахуванням їх вильоту на передрівноважних стадіях. Запропоновано новий аналітичний метод врахування кореляцій вильоту частинок з рівноважних станів у різні канали реакцій з довільними ймовірностями поглинання та вперше обчислені кутові розподіли непружної взаємодії нейтронів з ядрами у присутності прямих процесів. Отримано нові математично обґрунтовані аналітичні вирази узгодженого опису процесів  $\gamma$ -розпаду ядер і фотопоглинання, які, зокрема, дозволили проаналізувати процеси дисипації в

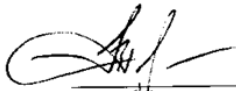


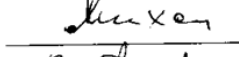
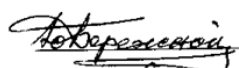
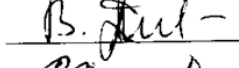
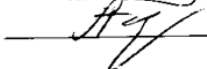

збуджених ядрах та визначити характеристики їх високозбуджених станів.

Виконано експериментальні дослідження, в яких було виміряно диференціальні перерізи пружного і непружного розсіяння та реакцій передач при взаємодії легких ядер. Показано, що основними механізмами перебігу пружного і непружного розсіяння та реакцій передач при взаємодії легких ядер є потенціальне розсіяння та передача кластерів.

В даному циклі робіт при проведенні досліджень всі запропоновані моделі були застосовані для передбачення або порівняння отриманих результатів з наявними експериментальними даними. Результати, отримані в даному циклі робіт, узгоджуються з існуючими експериментальними даними, а передбачені характеристики ядер та процесів ядерної взаємодії отримали експериментальне підтвердження. Всі експериментальні дані, які були ініційовані даними дослідженнями, або отримані в ході них, внесені в міжнародну базу ядерних даних EXFOR (МАГАТЕ).

### 5. Публікації та цитування результатів роботи

Основні результати роботи колективу з 8-ми претендентів опубліковані у 21-й монографії, 446 статтях у провідних реферованих наукових виданнях, 250 тезах вітчизняних і міжнародних конференцій та препринтах. Згідно бази даних Scopus загальна кількість посилань на публікації авторів, представлені в роботі, становить 5149, h-індекс (за роботою) = 34; згідно бази даних Google Scholar загальна кількість посилань складає 7597, h-індекс (за роботою) = 39. За даною тематикою захищено 17 докторських та 39 кандидатських дисертацій. Результати даного циклу робіт увійшли до баз ядерних даних МАГАТЕ і широко використовуються в світі при аналізі різноманітних ядерних реакцій.

	В.Ю. Денисов		В.А. Плюйко
	В.Ф. Клепиков		В.П. Михайлюк
	Ю.А. Бережной		В.В. Пилипенко
	О.А. Понкратенко		В.Ф. Харченко