

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу *Понкратенка Олега Анатолійовича* «ЕНЕРГЕТИЧНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЗАЄМОДІЇ ВАЖКИХ ІОНІВ З ЛЕГКИМИ ЯДРАМИ», представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 - фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

Актуальність теми

Дослідження, пов'язані із створенням та вивченням взаємодії радіоактивних іонних пучків із атомними ядрами та відносяться до сучасних пріоритетів ядерної фізики. Вони дають цінну інформацію про природу ядерних сил та стійкість ядерної матерії шляхом вивчення, наприклад, перебігу реакцій поділу, чи синтезу важких та надважких ядер.

Ядерні реакції важких іонів при взаємодії із легкими ядрами мають значно довшу історію, теорія таких процесів добре апробована по результатах численних експериментів. Вони важливі як для розуміння природи міжядерної взаємодії, апробації наших представлень про моделі колективних, чи одночастинкових станів атомного ядра, так і для численних застосувань в астрофізиці, фізиці радіаційних факторів ближнього космосу та навіть ядерній медицині. Проте такі дослідження є дуже коштовними і у світі вони можуть проводитися лише в обмеженому числі ядерних центрів, що і пояснює високий інтерес до їх результатів.

В дисертаційній роботі Понкратенка О.А. якраз і представлені результати таких досліджень, виконаних протягом більш ніж 20 років на Київському циклотроні У-240 Інституту ядерних досліджень НАН України та циклотроні С200-Р Варшавського університету (Польща). Його дослідження стосуються вивчення енергетичної залежності та систематизації даних взаємодії легких ядер з $2 \leq A \leq 40$ у широкому діапазоні енергій налітаючого іона взаємодії $0.5 \div 340$ МеВ/нуклон.

Тому, можна говорити про *безсумнівну актуальність* таких досліджень та важливість отриманих результатів для фізики ядерних реакцій.

Зокрема, предметом дослідження Понкратенка О.А. були диференційні перерізи розсіяння і реакцій при взаємодії пучків іонів $^{10,11}\text{B}$, ^{18}O , ^{12}C , ^{14}N з ядрами ^7Li та $^{12,14}\text{C}$. Опрацьований дисертантом значний масив експериментальних даних та проведена їх систематизація дозволили зробити важливі висновки про енергетичну залежність експериментальних диференційних перерізів непружного розсіяння важких іонів на легких

ядрах, механізми взаємодії, характеристики деформації і кластеризації ядер.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Наукові положення, висновки і рекомендації, приведені в роботі О.А. Понкратенка базуються на значному масиві даних, отриманих дисертантом на протязі 1989-2016 рр. при виконанні держбюджетних, пошукових та міжнародних програм і проектів. Вони були сформовані в результаті проведення значного об'єму як власних експериментальних досліджень, теоретичного аналізу та моделювання механізмів ядерних процесів при взаємодії.

Відомо, що експериментальні дані, отримані для ядерних реакцій вимагають свого окремого аналізу, бо в кожних конкретних умовах ядро-ядерна взаємодія проявляє різні свої особливості, залежно від структури взаємодіючих ядер, а також від енергії зіткнення чи інших кінематичних умов, різні механізми взаємодії виявляються важливими чи не важливими.

Багатий досвід, набутий дисертантом при виконанні таких досліджень, дозволив йому зробити більш широкий погляд на взаємодію легких ядер і виконати в рамках єдиного підходу аналіз взаємодії легких ядер з $2 \leq A \leq 40$ та діапазону енергій налітаючого іона $0.5 \div 340$ МеВ/нуклон. Такий аналіз є дуже актуальним в сучасній фізиці ядерних реакцій, оскільки існує нагальна потреба покращити наші можливості не тільки описувати і розуміти результати експериментальних досліджень, але й передбачати, хоча б на базі феноменологічних моделей, результати ядерних реакцій при таких значеннях енергій взаємодії, які не вивчались експериментально. Особливо цікаво би було б зробити оцінку інтенсивності різних ядерних процесів для взаємодії короткоживучих ядер, для яких складно провести експериментальні дослідження. Виконуючи частину досліджень на циклотроні С200-Р докторант отримав унікальну можливість співставити отримані дані та умови ядерного експерименту.

Заключення дисертанта, наприклад, про дифракційний характер взаємодії легких ядер отримано в результаті систематичного аналізу великого масиву експериментальних даних з пружного і непружного розсіяння ядер з масами від 2 до 40 а.о.м. у широкому діапазоні енергій. Встановлені при цьому кількісні характеристики поведінки диференціальних перерізів в дифракційному діапазоні дозволяють робити обґрунтовані прогнози для перерізів розсіяння для недосліджених експериментально значень енергії і пар ядер.

Дані про енергетичні залежності дійсної та уявної частин оптичних потенціалів для широкого числа легких ядер, при різних значеннях відстані між ними отримано із експериментальних даних взаємодії ядер $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$, $^{12}\text{C} + ^{16,18}\text{O}$, $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, $^{12}\text{C} + ^{14}\text{N}$, $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$, $^9\text{Be} + ^{12}\text{C}$, $^{6,7}\text{Li} + ^{12}\text{C}$, $^4\text{He} + ^{12}\text{C}$, $^4\text{He} + ^{40}\text{Ca}$, $^6\text{Li} + ^{28}\text{Si}$. Також використані дисперсійні співвідношення між дійсною і уявною частинами оптичного потенціалу як наслідок залежності нуклон-нуклонної взаємодії від енергії, обмінних сил, кількості відкритих каналів реакцій

Отримані дисертантом результати, їх порівняння із наявними даними ядерних реакцій легких ядер отриманими іншими авторами **показали обґрунтованість та продуктивність** вибраного напрямку діяльності.

Достовірність і новизна, та практична цінність роботи

Достовірність результатів роботи О.А. Понкратенка забезпечена комплексним характером виконання досліджень на різних ядерно-фізичних установках, поєднанням теоретичних та експериментальних методів дослідження, використанням світових науково-технічних ресурсів. В роботі детально представлено обґрунтування напрямку досліджень, наявні теоретичні моделі взаємодії легких ядер, методик встановлення диференційних перерізів розсіяння ядер, точності та джерела похибок, їх тестування, автоматизацію збору та обробки апаратурних спектрів.

Враховуючи значний масив інформації, яка збирається в такого роду експериментах, цінним є використання в роботі статистичних методик обробки даних, використання параметричних функцій, що адекватно апроксимують енергетичну залежність положень дифракційних параметрів диференційних перерізів пружного розсіяння. Це саме стосується знаходження вигляду апроксимаційної функції, залежної від енергії налітаючого іона, характеристик взаємодіючих легких ядер, використовуючи один універсальний набір з восьми параметрів.

Вважаю, що оригінальність та наукова **новизна** результатів роботи О.А. Понкратенка полягає у

- використаному ним єдиному підході до систематизації даних взаємодії легких ядер для широкого діапазону їх атомних мас та енергій налітаючих іонів;
- Встановленні ізотопічних особливостей потенціалів взаємодії та розподілу ядерної речовини при взаємодії легких ядер, встановленні характерних змін потенціалу при зміні кількості нуклонів у взаємодіючих ядрах;

- Встановленні впливу оболонкових ефектів (на експериментах по взаємодії ізотопів $^{16,18}\text{O}$) на характер оптичного потенціалу при описанні ефектів пружного та непружного розсіювання легких ядер;

Результати досліджень дозволили докторанту сформулювати 9 висновків роботи, що стосуються енергетичних характеристик оптичних потенціалів взаємодії, встановленні зв'язку диференціальних перерізів взаємодії від складу ядер та параметрів дефермацій.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаної літератури.

У **першому розділі** детально описана методика проведення експериментальних вимірювань на циклотроні У-240 Інституту ядерних досліджень, і на циклотроні С200-Р Варшавського університету. Описана механічна частина установок, механізми тримання мішеней, детекторів, самі детектори (в роботі застосовувалась стандартна $\Delta E-E$ методика), електроніка і програмне забезпечення для обробки результатів вимірювань, доведення їх до даних у вигляді диференціальних перерізів розсіяння і реакцій. Представлені типові спектри зареєстрованих продуктів реакцій. У **другому розділі** викладено базовий теоретичний апарат, що застосовувався при аналізі експериментальних даних. Процеси взаємодії ядер розглядались в рамках оптичної моделі та методу зв'язаних каналів реакцій, що дозволяє розрахунки диференціальних перерізів процесів пружного, непружного розсіяння, одно- і двоступінчатих передач нуклонів і кластерів. Кластерна структура ядер описувалась в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонок, яка є потужним інструментом розрахунку спектроскопічних амплітуд нуклонів і кластерів у ядрах. Основним носієм інформації про ядро-ядерну взаємодію у такому підході є оптичний потенціал. Оскільки в представленій роботі аналізувалась залежність оптичного потенціалу від енергії, то тут детально описані дисперсійні співвідношення між дійсною та уявною частинами оптичного потенціалу, які є фундаментальними, бо є прямим наслідком принципу причинності, а тому обов'язково мають бути враховані в коректному цілісному аналізі. **Третій розділ** містить результати численних експериментальних досліджень процесів розсіяння і реакцій, представляє детальний аналіз як своїх експериментальних даних так і даних інших авторів, висновки про взаємодію і структуру і взаємодію досліджуваних ядер, що отримуються з такого аналізу. Виконано дослідження взаємодії ізотопів літію ^7Li та ^6Li з різними ізотопами бору, берилію, кисню та вуглецю, ізотопів вуглецю ^{12}C , ^{13}C та ^{14}C з ядрами кисню, берилію, азоту при різних значеннях енергії зіткнення. В результаті аналізу отримано інформацію про механізми і потенціали взаємодії, деформацію ядер, їх кластерну структуру. Варто відзначити, що потенціали взаємодії деяких пар ядер отримувались з аналізу вихідних каналів реакцій, і отримані потенціали є досить

близькими до таких же отриманих з аналізу пружного розсіяння. Це дозволяє вірити в адекватність потенціалів отриманих для нестабільних ядер, для яких експериментальне дослідження пружного розсіяння неможливе. В представленій роботі таким методом наприклад отримано потенціали взаємодії ядер ${}^8\text{Be} + {}^9\text{Be}$, і вони виглядають цілком розумно поряд з потенціалами взаємодії подібних ядер. При цьому порівняння потенціалів взаємодії близьких ядер дозволяє зробити певні висновки про зміну розподілу ядерної речовини при додаванні чи відніманні до ядра одного-двох нуклонів. Порівняння ж отриманих потенціалів для різних енергій дає інформацію про енергетичну залежність параметрів оптичних потенціалів, певні тенденції якої виявляються досить типовими для різних ядер, що стає досить непоганою основою для подальших узагальнень і побудови повноцінних енергетично залежних потенціалів. У **четвертому розділі** представлено детальний аналіз дифракційної картини в перерізах пружного розсіяння легких ядер. Показано, що експериментальні диференціальні перерізи пружного розсіяння (аналізувалось понад 500 кутових розподілів для 26 пар взаємодіючих ядер масами від 2 до 40 а.о.м., зокрема ${}^{16}\text{O} + {}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O}$, ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$) демонструють виразно дифракційну поведінку в діапазоні переданих імпульсів до $3\text{-}4 \text{ фм}^{-1}$ у всьому діапазоні енергій налітаючої частинки від $1\text{-}2$ до $100\text{-}200 \text{ MeV}$ на нуклон, що аналізувався. Зміна цієї картини зі зміною енергії взаємодії є плавною, що видно як візуально при зіставленні перерізів при різних енергіях, так і з ретельного кількісного аналізу характерних вузлових точок такої дифракційної картини – положень максимумів і мінімумів у диференціальних перерізах, значень перерізів у цих максимумах (і мінімумах). Всі ці характеристики змінюються з енергією досить плавно, їх поведінку вдається параметризувати досить простими аналітичними функціями, що з одного боку переконує нас у чисто дифракційному механізмі взаємодії ядер у всьому діапазоні переданих імпульсів від 0 до $3\text{-}4 \text{ фм}^{-1}$ та енергій від $1\text{-}2$ до $100\text{-}200 \text{ MeV}$ на нуклон, а з іншого дає можливість досить впевненого прогнозу диференціальних перерізів пружного розсіяння досліджених пар ядер у дифракційному кінематичному діапазоні для практично довільного значення енергії. Виконано також певні дослідження дифракційної картини в перерізах непружного розсіяння деяких пар ядер, де також виявлені подібні закономірності.

У **п'ятому розділі** дисертації представлено детальний аналіз енергетичної залежності оптичних потенціалів взаємодії легких ядер, що базується на багатій базі експериментальних даних, накопиченій до сьогодення у світі, та на істотному об'ємі емпіричних знань, набраних при аналізі взаємодії багатьох пар ядер при багатьох значеннях енергії зіткнення. В результаті побудовано несуперечливі (тобто такі, що задовольняють теоретичні вимоги, що витікають з принципу причинності)

енергетичнозалежні потенціали взаємодії для багатьох пар легких ядер, що аналізувались, наприклад, для взаємодії $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$. Показано, що отримані потенціали забезпечують задовільний опис експериментальних даних пружного і непружного розсіяння у всьому аналізованому діапазоні енергій, як мінімум у дифракційній області. Потенціали відтворюють всі особливості енергетичної еволюції дифракційної картини, що спостерігається в експериментальних даних. Виконано детальний аналіз властивостей отриманих потенціалів, їх характерних ознак і новизни. Наприклад, дуже важливою їх ознакою є те, що вони вперше задовольняють згадані дисперсійні співвідношення у повному обсязі – для кожного значення відстані між ядрами r . Ще однією цікавою властивістю побудованих потенціалів є можливість їх побудови на основі фолдінг-потенціалів, що потенційно дає можливість для обґрунтованих передбачень перерізів реакцій за участі навіть радіоактивних і нестабільних ядер, база експериментальних даних для яких є дуже обмеженою. Крім того потенціали можуть містити складові, залежні від кутового моменту відносного руху, що дає можливості для успішного опису резонансних процесів. Загалом, побудовані автором потенціали взаємодії мають можливості для подальшого розвитку.

В якості зауваження можна привести занадто загальну назву роботи. Суттєвих негативних зауважень до отриманих автором результатів немає, але варто відмітити, що можна висловити немало зауважень до їх оформлення. В тексті дисертації і автореферату зустрічається багато граматичних і стилістичних помилок, помилкові посилання на рисунки, на яких показані не ті величини, які обговорюються в тексті. Обговорення певних результатів, наприклад поведінки дифракційної картини, відверто переобтяжене кількістю рисунків і кількістю кривих показаних на рисунках.

Автореферат дисертації адекватно відображає її зміст.

У вигляді *побажання* – враховуючи важливість та енциклопедичний характер виконаних дисертантом досліджень, вважаю за необхідне видати матеріали дисертації О.А. Понкратенка у вигляді окремої монографії.

Зроблені зауваження не впливають на хороше враження від дисертаційної роботи О.А. Понкратенка, та не ставлять під сумнів наукові та практичні результати та значення його роботи для розвитку астрофізики, радіоастрономії та технологій дистанційних аерокосмічних досліджень. Дисертант є відомим спеціалістом у даних галузях, гідно представляв нашу країну на профільних міжнародних конференціях. Вибір теми дослідження, проведений об'єм досліджень, їх комплексність та обґрунтованість отриманих результатів свідчать про високу фахову підготовку дисертанта.

Вважаю, що дисертаційна робота на тему «ЕНЕРГЕТИЧНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЗАЄМОДІЇ ВАЖКИХ ІОНІВ З ЛЕГКИМИ ЯДРАМИ» цілком відповідає встановленим вимогам ДАК України, а її автор, Понкратенко О.А. заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 - фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій..

Завідувач відділом фотоядерних процесів
Інституту електронної фізики НАН України,
професор, д.ф.-м. н.


В.Т Маслюк

Підпис зав. відділом ІЕФ НАН України, д.ф.-м.н. Маслюка В.Т. засвідчую:

Вчений секретар ІЕФ НАН України, к.ф.-м.н.  В.І. Торич

02.02.2017 р.

