

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Гедеона Сергія Вікторовича на тему  
«Метод  $R$ -матриці з  $B$ -сплайнами в теорії низькоенергетичного розсіяння  
електронів на складних атомах» представленої на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка

Теоретичні дослідження енергетичної структури багатоелектронних атомних систем, атомів та іонів, та зіткнень електронів з ними є дуже актуальними як у фундаментальному плані – розвиток та апробація теоретичних методів, так і у плані їх широкого практичного застосування у фізиці та хімії плазми, у квантовій електроніці, у фізиці атмосфери, фізиці та хімії поверхні та твердого тіла, у керованому термоядерному синтезі. Важливими тут є прецизійний розрахунок енергій та хвильових функцій різноманітних стаціонарних основних та збуджених станів атомів, позитивних та негативних іонів, в тому числі таких як автоіонізаційні та автовідривні стани. Дуже важливими також є розрахунки динамічних характеристик взаємодії атомних систем з налітаючими електронами – амплітуд процесів пружного розсіювання, збудження, іонізації. На їх основі досліджують особливості енергетичних і кутових залежностей відповідних інтегральних та диференціальних перерізів, параметрів поляризації та асиметрії. Найчастіше перебіг цих процесів відбувається через резонансні стани, т.зв. резонанси Фано та Фешбаха.

Важливо зауважити наступне. У 2000-2004 роках, великий та нетривіальний внесок у розвиток  $R$ -матричної теорії та запровадження нових ідей і підходів до неї зробив наш колега О.І. Зацаринний, коли він почав працювати у США. Саме на цих його нових міркуваннях – неортогональність орбіталей та сплайн-представлення для хвильових функцій – було створено новий  $R$ -матричний метод і першу програму (БСР), яку він постійно вдосконалював, разом з багатьма своїми співавторами. Завдяки цим розробкам, він став визнаним у всьому світі вченим саме з прецизійних, хоча і дуже трудомістких, розрахунків характеристик різноманітних процесів у сучасній теоретичній атомній фізиці.

Вищевикладене показує актуальність теми дисертаційної роботи С.В. Гедеона, яка присвячена певній розробці версії  $R$ -матричного методу. Ця версія теж базується на застосуванні залежних від терму неортогональних орбіталей та сплайн-представлень для радіальних частин одноелектронних хвильових функцій. На цій основі проведено прецизійні розрахунки хвильових функцій основних і збуджених станів відповідних атомних систем та теоретичні дослідження процесів за участю електронів та фотонів. А саме, прецизійно досліджено взаємодію повільних електронів з атомами (кальцію і алюмінію) та фотонів з негативними іонами цих атомів.

Дисертаційна робота пов'язана з напрямком наукових досліджень кафедри теоретичної фізики УжНУ. Дослідження, результати яких включені в дисертаційну роботу, виконані згідно з науково-дослідними темами ДВНЗ «Ужгородський національний університет»:

«Аналітична теорія процесів з перерозподілом у непружних зіткненнях атомних частинок» (2005–2007 рр., шифр ДБ-521, № ДР-0103U001696);

«Релятивістські та квантово-електродинамічні ефекти при взаємодії багатозарядних іонів з важкими атомами та з постійними електричним і магнітним полями» (2012–2014 рр., шифр ДБ-806, № ДР-0112U001552);

«Інтегральні рівняння Додда-Грейдера в теорії одно- та двоелектронних процесів з перерозподілом у високоенергетичних іон-атомних зіткненнях» (2015–2017 рр., шифр ДБ-847, № ДР-0115U001099);

«Теорія R-матриці і точні чисельні розрахунки елементарних процесів зіткнення електронів і фотонів зі складними атомами» (2018–2020 рр., шифр ДБ-880, № ДР-0118U000173).

Результати дисертаційної роботи отримані добре апробованими підходами та методами і тому сумнівів в їхній достовірності немає. Такими методами є: різні варіанти теорії R-матриці; комбінація теоретичних підходів і нових обчислювальних методів; їх реалізація у вигляді пакетів прикладних програм.

Основні результати представлені в 29 наукових працях – 10 статей у фахових наукових журналах (з них 2 у “*Physical Review A*” та 2 у “*Journal of Physics B: At. Mol. Opt. Phys.*”) та 19 тез міжнародних наукових конференцій (основні це ICPEAC, ECAMP, EGAS, CEPAS та конференції IEF).

Дисертаційна робота Гедеона С.В. являє собою рукопис, який складається зі вступу, шести розділів, висновків та списку використаних джерел із 185 найменувань і двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 256 сторінок. Робота містить 44 рисунків та 11 таблиць.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і визначено завдання досліджень, вказано інформацію про об’єкт, предмет і методи дослідження, відображено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача, дана інформація про апробацію матеріалів роботи.

У **першому розділі** представлено огляд сучасного стану теорії зіткнення повільних електронів з атомами та іонами – резонансне розсіювання, уявлення про сильний зв’язок каналів, т.зв. дискретна квантова теорія розсіювання. Розглянуто теоретичні методи, які знайшли широке застосування в останні роки і ґрунтуються на ідеї дискретизації континууму квантовомеханічної системи “атом+налітаючий електрон” – алгебраїчні підходи, збіжний метод сильного зв’язку. Огляд дав підставу вважати, що найбільш ефективним і точним методом дослідження ефектів, що відбуваються при зіткненні повільних електронів з багатоелектронними атомами та іонами, є R-матричний підхід та його подальше вдосконалення для широких застосувань.

У **другому розділі** дисертації систематично викладено фізичні основи методу сильного зв’язку каналів та методу R-матриці. Розглянуто їх модифікації – застосування залежних від терму неортогональних орбіталей та базисних B-сплайнів. У підрозділі 2.1 детально розглядається багатоканальна квантова задача розсіювання повільного електрона на N-електронному атомі у рамках методу сильного зв’язку каналів. Дано такі важливі визначення: гамільтоніану та повної хвильової функції (N+1)-електронної системи “атом+налітаючий електрон”; гамільтоніана N-електронного атома; N-

електронних хвильових функцій мішені; функцій каналів та квадратично інтегрованих кореляційних функцій, які описують зв'язані стани  $(N+1)$ -електронної системи; умови ортогональності. У цих поняттях розглянуто систему зв'язаних інтегро-диференціальних рівнянь для каналних функцій електрона у континуумі. У підрозділі 2.2 дано основи стандартного методу R-матриці та його модифікацій. Тут задача діагоналізації гамільтоніана на просторі як відкритих, так і закритих каналів зводиться до розв'язування системи алгебраїчних рівнянь. Відмітна риса цього методу полягає в тому, що конфігураційний простір  $(N+1)$ -електронної системи розбивається на дві області: внутрішню, де усі частинки системи (електрони та ядро) ефективно взаємодіють – пряма, обмінна і кореляційна взаємодії – між собою, і зовнішню, в якій розсіяний електрон взаємодіє з атомом завдяки локальному потенціалу – поляризаційна взаємодія. У підрозділі 2.3 дано основи БСР-версії методу R-матриці та розглянуто: неортогональність радіальних функцій континууму орбіталям мішені; враховування резонансних ефектів без залучення кореляційних функцій; використання залежних від терму неортогональних орбіталей; В-сплайни та їх властивості у якості базисних функцій. Для опису характеристик розсіювання розглянуто відповідні матриці – переходу  $T$ , розсіювання  $S$ , дійсна  $K$  – та співвідношення між ними.

**Третій розділ** представляє результати систематичного дослідження процесів розсіювання електрона на атомі кальцію та фоторозщеплення негативного іона  $\text{Ca}^-$ . Розглянуто низькі, до 4 еВ, енергії електрона та фотона. Використано описану розширену БСР-версію R-матричного методу. Хвильові функції мішені розраховано у багатоконфігураційному методі Хартрі-Фока з набором залежних від терму неортогональних орбіталей. У якості кору використано іон  $\text{Ca}^{2+}$ . Розклад сильного зв'язку включає 39 зв'язаних станів атома кальцію, що охоплюють усі стани від основного до збуджених  $4s8s\ ^1S$ . Детально досліджено та інтерпретовано складну резонансну структуру повного та пружного інтегральних перерізів розсіювання електрона. Аналіз фазових зсувів показав, що наявність великого максимуму в перерізах пружного розсіювання є наслідком утворення резонансу форми  $4s^23d\ ^2D$ . Розраховані характеристики даного резонансу – енергія 1.187 еВ та ширина 0.678 еВ – добре узгоджуються з експериментальними даними.

Для вивчення процесу фоторозщеплення негативного іона  $\text{Ca}^-$  обчислено повний і парціальні інтегральні перерізи. Енергетична поведінка перерізів добре узгоджуються з експериментальними даними та теоретичними результатами інших авторів за положенням різкого максимуму, трохи вище  $4s4p\ ^1P^o$ -порога та за абсолютною величиною. Точно відтворено положення мінімуму Купера (при 1.24 еВ) і порогові резонансні особливості. Встановлені найбільш важливі внески від парціальних хвиль у повний переріз фоторозщеплення іона. Резонансна структура, різкі піки у  $^2S$ -,  $^2P$ -,  $^2D$ -парціальних перерізах фоторозщеплення при енергіях 2.943, 2.936, 2.940 еВ, обумовлена резонансами форми  $(4s4p\ ^1P^o)$ кр.

**Четвертий розділ** представляє результати розрахунку та аналізу поведінки інтегральних, диференціальних перерізів збудження нижніх станів атома кальцію, синглетного  $4s4p\ ^1P^o$ , триплетного метастабільного  $4s4p\ ^3P^o$  та  $4snd\ ^{1,3}D$  ( $n=3-5$ ), електронним ударом. При енергіях електрона 10, 20, 25, 35 еВ

розраховано параметри Стокса, що описують поляризаційні властивості електромагнітного випромінювання при спонтанному розпаді збуджених  $4s4p\ ^1P^o$  рівнів. Отримані перерізи та параметри порівнюються з експериментальними та іншими теоретичними даними. Результати розрахунків дозволили провести детальний аналіз впливу різних типів електронних кореляцій, ефектів зв'язку каналів, поляризаційних явищ. Так, з'ясовано, що важливим є роль внесків та вплив каскадних переходів з вищих збуджених станів на перерізи збудження цих рівнів. Також встановлено, що: перерізи збудження синглетного стану  $4s4p\ ^1P^o$  у значній мірі більш чутливі до врахування кореляційних ефектів в атомі-мішені, ніж до короткодіючої взаємодії з налітаючим електроном; навпаки, перерізи збудження метастабільного стану  $4s4p\ ^3P^o$  дуже чутливі до короткодіючої взаємодії та резонансних ефектів; вплив зв'язку каналів та їх кількість є слабшими на збудження синглетного рівня, ніж на триплетний; непряме заселення вказаних рівнів внаслідок каскадних переходів з вищих збуджених станів є більш важливим для триплетного  $4s4p\ ^3P^o$  рівня, ніж для синглетного  $4s4p\ ^1P^o$ .

**П'ятий розділ** більш деталізує результати розділів 3 та 4 дисертації і також представляє нові дані з особливостей взаємодії електрона, що налітає, з атомом кальцію – з процесів пружного розсіювання на основному та збуджених станах; з резонансної структури перерізів; з розсіювання при наднизьких енергіях; зі збудження з основного стану у стани, що згруповані у серії; збудження станів з метастабільного  $4s4p\ ^3P^o$ ; з ефективних сил зіткнень. Цей розділ відображає комплексний характер розрахунків у даному методі та їх повноту. Так, розділ містить БСР-розрахунки енергетичних, кутових та енергетично-кутових, у 3-вимірному графічному представленні, залежностей диференціальних перерізів пружного розсіювання та збудження п'яти нижчих станів  $4s4p\ ^3P^o$ ,  $4s3d\ ^1,3D$ ,  $4s4p\ ^1P^o$ ,  $4s5s\ ^1S$  атома кальцію електронним ударом. Результати розрахунків кутових залежностей диференціальних перерізів пружного розсіювання добре узгоджуються з наявними експериментальними даними для енергій зіткнення 20, 40, 60 та 100 еВ. Підтверджено наявність

виявленого в експерименті локального мінімуму (при  $\sim 2\text{eV}$ ) в енергетичній

залежності диференціальних перерізів пружного  $e+\text{Ca}$  розсіювання на кут  $90^\circ$ . Проаналізовано структуру 3-вимірних поверхонь диференціальних перерізів. Їх відмітною особливістю є наявність чітких екстремумів поблизу порогів збудження резонансних рівнів, кількість яких корелює з кількістю відкритих каналів розсіювання. Встановлено енергії  $E_c$  та кути  $\theta_c$  критичних точок, в яких диференціальні перерізи розсіювання досягають своїх екстремальних, найбільших чи найменших, значень.

**Шостий розділ** представляє результати розрахунків викладеним методом інтегральних перерізів процесів пружного і непружного, збудження та іонізація, розсіювання електрона на атомі алюмінію та фоторозщеплення негативного іону алюмінію. Для досягнення хорошого опису структури атома-мішені використовувався комбінований метод багатоконфігураційного ХФ и БСР з В-

сплайнами як базисними функціями. При цьому внутрішні підоболонки атома алюмінію було обрано у якості кору – конфігурація атома неона  $1s^2 2s^2 2p^6$ . Для електронів субвалентної  $3s^2$ - та валентної  $3p$ -підоболонок було враховано міжелектронну взаємодію у полі кору. Це дозволило найбільш повно врахувати міжелектронні кореляції між цими підоболонками. Розраховані енергії зв'язку основного та 13 збуджених станів атома алюмінію добре узгоджуються з наявними експериментальними даними. Обчислені сили осциляторів для 26 найважливіших переходів в атомі алюмінію у формах довжини і швидкості практично збігаються, що є свідченням адекватності розрахованих хвильових функцій. Сили осциляторів добре узгоджуються з даними, рекомендованими NIST. Досліджено складну енергетичну залежність інтегральних перерізів пружного  $e+Al$  розсіювання, зумовлену різними парціально-хвильовими та резонансними внесками. Показано, що при низьких енергіях електрона, менше 0.2 eV,  $(3s^2 3p^2) \ ^1S$ -резонанс призводить до утворення глибокого мінімуму в енергетичній залежності перерізу, тоді як  $(3s 3p^3) \ ^3D^0$ -резонанс Фешбаха проявляється у вигляді різкого піку при 3.7 eV. Для адекватності опису перерізів розрахунки проведено у чотирьох варіантах методу – БСР10, БСР32, БСР81 та БСР587. Завдяки більшій кількості врахованих зовнішніх станів останні два варіанти вважають за основні. Розраховані характеристики розсіювання демонструють: узгодженість результатів БСР81 та БСР587 варіантів опису; залежність енергій рівнів  $(3s^2 3p^2) \ ^3P$ ,  $^1D$  та  $^1S$  негативного іона алюмінію до кореляційних поправок у хвильові функції N-електронної мішені та до N+1-електронної системи; вплив поляризації атома алюмінію на інтегральні перерізи пружного розсіювання, збудження та іонізації електронним ударом. Наведено інтегральні перерізи збудження з основного стану найбільш важливих дипольно-дозволених  $ns \ ^2S$  ( $n = 4, 5, 6$ ),  $nd \ ^2D$  ( $n = 3, 4, 5$ ),  $3s 3p^2 \ ^2S$ ,  $3s 3p^2 \ ^2P$  та недипольних  $np \ ^2P^o$  ( $n = 4, 5, 6$ ) рівнів. Аналогічно розраховано перерізи збудження рівнів на таких недипольних  $4s \ ^2S - ns \ ^2S$  ( $n = 5, 6$ ),  $3p \ ^2P^o - 4f \ ^2F^o$  та обмінних  $4s \ ^2S - 3s 3p^2 \ ^4P$ ,  $3s 3p^2 \ ^4P - 4p \ ^2P^o$ ,  $3s 3p^2 \ ^4P - nd \ ^2D$  ( $n = 3, 4$ ) переходах. Це дало змогу виявити сильний вплив ефектів зв'язку каналів на поведінку перерізів як для переходів з основного стану, так і для переходів між збудженими станами. За варіантом БСР587 опису розсіювання проведено дослідження іонізації атома алюмінію з основного стану  $(3s^2 3p) \ ^2P$  електроном з енергіями зіткнення до 110 eV. Показано, що процес прямої іонізації атома супроводжується непрямим резонансним процесом, який зобов'язаний утворенню квазістаціонарних автоіонізаційних станів  $(3s 3p^2) \ ^2P$  і  $^2S$ . Автоіонізаційний розпад цих станів дає суттєвий внесок у іонізацію атома алюмінію. Вперше досліджено резонансні ефекти, що пов'язані зі збудженням цих станів та розраховано енергії резонансів. БСР587 розрахунки перерізів іонізації атома алюмінію електронним ударом добре узгоджуються з експериментальними даними та іншими теоретичними розрахунками.

В підрозділі 6.2 розраховано і проаналізовано повні інтегральні перерізи фоторозщеплення основного  $(3s^2 3p^2) \ ^3P$  і збудженого  $(3s^2 3p^2) \ ^1D$  станів негативного іона алюмінію. Виявлено складну резонансну структуру в енергетичних залежностях повного та парціальних перерізах фоторозщеплення основного стану іона. Вона зумовлена утворенням т.зв. автовідривних станів іона –  $3s^2 4s 4p \ ^3P^o$ ,  $(3s 3p^3) \ ^{3,1}D^o$ ,  $^{3,1}P^o$  та  $^3S^o$ ,  $(3s^2 4p 5s) \ ^1D^o$ ,  $(3s^2 3d 4p) \ ^3P^o$ . Визначено

енергії і ширини цих станів та дана їх спектроскопічна класифікація. Дана інтерпретація прояву резонансної структури у перерізах фоторозщеплення збудженого стану  $(3s^23p^2) \ ^1D$  аніону алюмінію в околі енергії фотонів 6 еВ – це сукупний внесок двох станів  $(3s3p^3) \ ^1P^o$  та  $^1D^o$ .

У **висновках** автор підсумовує основні результати дисертаційної роботи.

Результати дисертаційної роботи мають наукову новизну і науково цінні. **Наукова новизна** результатів дослідження дисертаційної роботи полягає у наступному:

Розвинена розширена версія теорії R-матриці на основі В-сплайнів, яка дозволяє прецизійно розраховувати відповідні хвильові функції станів та характеристики процесів взаємодії повільних електронів з багатоелектронними атомами (іонами) та фотонів з негативними іонами та досліджувати їх поведінку.

Пропонована БСР-версія має три важливі переваги: застосування залежних від терму неортогональних орбіталей як ефективний спосіб урахування резонансних ефектів – без кореляційних функцій та без збільшення системи інтегро-диференціальних рівнянь сильного зв'язку; представлення квантовомеханічних операторів, після їх дискретизації у В-сплайновому базисі, сильно розрідженими стрічковими матрицями скінченого рангу – це суттєво спрощує розв'язання алгебраїчних рівнянь; локальні властивості та повнота скінченої системи базисних сплайнів забезпечують гарантовану збіжність R-матричного розкладу.

Запропоновано новий метод дискретизації континууму, який базується на одноразовій діагоналізації матриці повного гамільтоніана компаунд системи “атом+налітаючий електрон” у В-сплайновому базисі, для задачі розсіювання.

Вперше обчислено перерізи збудження при малих енергіях чотирьох найнижчих синглетних та триплетних (метастабільних) станів  $4s4p \ ^{1,3}P^o$ ,  $3d4s \ ^{1,3}D$  атома Са електронним ударом. Проаналізовано внески від цих станів у повні інтегральні перерізи розсіювання.

Отримано нові дані для інтегральних та диференціальних перерізів збудження  $4s4p \ ^{1,3}P^o$  станів з основного стану атома кальцію електроном при енергіях до 60 еВ. Розраховано (псевдо-) параметри Стокса випромінювання для переходу з резонансного  $4s4p \ ^1P^o$  стану у основний стан.

Вперше проведено систематичні розрахунки та детальний аналіз інтегральних перерізів розсіювання електрона на атомі алюмінію. Вивчено низку явищ та резонансних ефектів в процесах пружного розсіювання, збудження та іонізації атома алюмінію електронним ударом. Так, у випадку пружного розсіювання: дано кількісне пояснення складної енергетичної залежності перерізу – утворення та розпад автовідривних станів  $(3s^23p^2) \ ^1S$  та  $(3s3p^3) \ ^1D^o$  його негативного іона; визначальна роль  $(3s^23pks) \ ^3P^o$ -каналу та поляризації мішені; сильний вплив ефекту Рамзауера на поведінку парціального перерізу  $^3P^o$ -хвилі.

Вперше розраховано і дано аналіз енергетичних залежностей перерізів збудження рівнів по найважливішим дипольним, недипольним та обмінним переходам атома алюмінію. Виявлено сильний вплив ефектів зв'язку каналів на поведінку перерізів як для переходів з основного стану, так і для переходів між збудженими станами. Вперше досліджено резонансні ефекти, які пов'язані зі

збудженням автоіонізаційних станів  $(3s3p^2)^2P, ^2S$  атома алюмінію та їх роль на процес іонізації електронним ударом. Виявлено домінуючу роль ефектів зв'язку каналів в процесах збудження рівнів за недипольними переходами –  $3s^2np\ ^2P^o$  ( $n = 4, 5, 6$ ) і  $3s^24f\ ^2F^o$  з основного та  $3s^2ns\ ^2S$  ( $n=5,6$ ) зі збудженого  $3s^24s\ ^2S$  станів.

Виявлено та проаналізовано складну резонансну структуру енергетичних залежностей повного та парціальних перерізів фоторозщеплення основного стану  $(3s^23p^2)^3P$  негативного іона алюмінію. Вона зумовлена утворенням та розпадом автовідривних станів іона:  $3s^24s4p\ ^3P^o$ ,  $(3s3p^3)^{3,1}D^o$ ,  $^{3,1}P^o$  та  $^3S^o$ ,  $(3s^24p5s)^1D^o$ ,  $(3s^23d4p)^3P^o$ . Розраховано енергії і ширини цих станів.

Вперше розраховано і детально проаналізовано повні перерізи фоторозщеплення негативного іона алюмінію у збудженому стані  $(3s^23p^2)^1D$ . Встановлено, що помітна резонансна структура в околі 6 еВ зумовлена сукупним внеском двох станів  $(3s3p^3)^1P^o$  та  $(3s3p^3)^1D^o$  негативного іона. Вказано на прояв структур, що зобов'язані відкриттю нових каналів.

В цілому можна сказати, що викладений у дисертації методичний і теоретичний матеріал закладає основи математичної теорії R-матриці.

Результати, наведені в дисертаційній роботі Гедеона С.В., мають важливе перспективне практичне та методичне значення у сучасній теоретичній атомній фізиці, у фізиці плазми, астрофізики, фізики верхніх шарів атмосфери, термоядерної енергетики. Розроблена та ретельно апробована БСР-версія R-матричного методу може бути використана для розрахунків характеристик розсіювання електрона багатоелектронними системами. Так, отримані в дисертації дані про характеристики збуджених станів атомів кальцію і алюмінію і процесів взаємодії повільних електронів з ними та фотонів з їх негативними іонами необхідні у багатьох розділах та напрямках сучасної фізики. Зокрема, для кількісного аналізу спектрів зірок, атмосфер планет. Атоми кальцію мають привабливі властивості для їх застосування в оптичних стандартах частоти. В свою чергу, процеси розсіювання електронів атомами алюмінію відіграють важливу роль в плазмовому шарі реакторів термоядерного синтезу. Результати БСР-розрахунків перерізів розсіювання цими атомами неодноразово використовувалися дослідницькими групами у їх експериментальних та теоретичних дослідженнях.

Отже, зроблені автором висновки разом з приведеними в дисертації результатами підтверджують наукову та практичну цінність роботи, а також її новизну.

Загалом дисертаційна робота Гедеона С.В. є завершеним науковим дослідженням, містить важливі результати і має наукову новизну. Автореферат розкриває основні результати і положення, що захищаються та вірно відображає зміст дисертаційної роботи.

До дисертаційної роботи Гедеона С.В. слід зробити, на мою думку, наступні зауваження і побажання:

- у розділі 3 можна було б привести розраховану величину дипольної статичної поляризованості основного стану атома кальцію та його негативного іона, як додаткове свідчення якості розрахунків хвильових функцій;
- треба було б більш чітко та коротко показати особливості розрахунків хвильових функцій негативного іона кальцію.

– у розділі 5 є згадка про критичні точки – як мінімуми та максимуми у диференціальних перерізах пружного розсіювання. Доцільно було б скористатися відомим поняттям критичних мінімумів у цих перерізах – у яких дійсна та уявна частини амплітуди розсіювання рівні та мають дуже малі або навіть нульові значення при певній енергії зіткнення  $E_c$  та куті розсіювання  $\theta_c$ . У атомах, де проявляється спін-орбітальна взаємодія у цих точках поляризація пучка електронів може досягати 100%;

– можна було б навести формули для ефективних сил зіткнень, їх залежності від температури електронів;

– у розділі 6 для порівнянь поведінки інтегральних перерізів іонізації атома алюмінію від порогу до енергій більше 100 еВ, доцільно було представити перерізи іонізації розраховані за достатньо простими формулами, наприклад Лотца, Гризінського. Це дозволило б оцінити ступінь впевненості при використанні цих формул.

По всій роботі для перерізів доцільно було б використовувати однакові одиниці  $\text{cm}^2$ ,  $\text{cm}^2/\text{sr}$ ,  $\text{m}^2$ ,  $\text{m}^2/\text{sr}$ , а не змішано, як, наприклад, у  $\text{cm}^2$  та мегабарнах.

У тексті дисертації та авторефераті зустрічаються, хоча і дуже мало, граматичні помилки, описки, нечіткі висловлювання та сленгові наукові вирази.

Але, ці зауваження та побажання носять, в основному, методичний характер та не ставлять під сумнів цінність, новизну і правильність наукових результатів дисертаційної роботи та не впливають на дуже хороше враження від неї.

Вважаю, що дисертаційна робота Гедеона С.В. на тему “Метод  $R$ -матриці з  $B$ -сплайнами в теорії низькоенергетичного розсіювання електронів на складних атомах” за значенням і новизною отриманих наукових результатів в повній мірі відповідає вимогам "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567, а її автор **Гедеон Сергій Вікторович** заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка.

Офіційний опонент,  
Інституту електронної фізики НАН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник

Є.Ю. Ремета

Підпис Ремети Є.Ю. засвідчую

Вчений секретар ІЕФ НАН України  
кандидат хімічних наук

Л.Г. Романова

