

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Терновського Валентина Борисовича
«Релятивістська спектроскопія важких атомів з урахуванням
обмінно-кореляційних та радіаційних ефектів», яка
представлена на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Дисертаційна робота Терновського Валентина Борисовича присвятна розв'язанню комплексу дуже актуальних складних та надто важливих з точки зору й теоретичної спектроскопії й різноманітних прикладних застосувань проблем сучасної атомної оптики і спектроскопії, а саме розробці теоретичних основ нової прецизійної релятивістської спектроскопії важких звичайних багатоелектронних та екзотичних адронних систем з одночасним коректним урахуванням ядерних, радіаційних, обмінно-кореляційних ефектів, а також нового ефективного релятивістського підходу до розрахунку параметрів β -розпаду (дозволенних переходів) важких систем в межах кооперативної електронно- β -ядерної спектроскопії атомних систем.

Актуальність такої тематики дослідження зумовлена багатьма чинниками, серед яких традиційно можна виділити, по-перше, незадовільний по багатьох критеріях рівень розвитку сучасної теорії опису енергетичних і спектроскопічних параметрів важких і надважких атомів та іонів (у т.ч. рівнів енергії, сил осциляторів, параметрів надтонкої структури (НТС) і т.д.). По-друге, варто нагадати про потреби у надійній інформації, що стосується важких атомів та іонів, потрібна для дуже широкого класу прикладних застосувань, у т.ч. в атомній, лазерній, молекулярній спектроскопії, квантовій оптиці та електроніці, астрофізиці, фізиці та хімії плазми, дослідженнях з керованого термоядерного синтезу, з'ясування оптичних та інших властивостей різноманітних плазмових середовищ, де саме спектроскопічні методи залишаються найбільш надійними методами діагностики таких середовищ. По-третє, методи теоретичної спектроскопії релятивістських атомних систем можуть бути корисні не тільки при проведенні досліджень енергетичних, радіаційних, спектроскопічних властивостей звичайних багатоелектронних атомів, але й у випадку так званих екзотичних, адронних систем. Зрозуміло, що сучасні експериментальні дослідження з використанням нових, напр., іонних технологій вимагають детального вивчення спектрів важких і надважких атомів та іонів, в тому числі багатозарядних іонів. Крім того, постає питання про точність й достовірність існуючих методів розрахунку енергетичних і спектроскопічних властивостей багатоелектронних атомів та іонів. З цієї точки зору обрана Терновським В.Б. тема дисертації є, **без сумніву, актуальною й затребуваною в даний час та повній мірі відповідає спеціальності – 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.**

ОДЕКУ Кам'янець
192
9

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. У дисертації наведено результати досліджень, виконаних дисертантом самостійно. Базовими для підготовки та подання дисертаційної роботи були НДР Одеського державного екологічного університету та Міністерства освіти і науки України: "Розвиток і застосування нових методів обчислювальної математики і математичної фізики в задачах теоретичної квантової оптики і атомної та ядерної спектроскопії" (№ держр. 0111U005225), "Розвиток та застосування нових обчислювальних методів в задачах математичної фізики, теорії ядра та адронних атомів, квантової геометрії" (№ держр. 0114U005145), "Розвиток та застосування нових методів обчислювальної математики, математичної фізики в задачах теоретичної квантової оптики, атомної, молекулярної спектроскопії", № держр. 0116U002097), "Розрахунок енергетичних та спектроскопічних характеристик рідбергівських атомів та багатозарядних іонів на основі релятивістської багаточастинкової теорії збурень", "Розвиток та застосування хаос-геометричних та квантово-динамічних методів дослідження спектрів і динаміки лазерних систем та приладів надвисокочастотної електроніки" , а також ряду проектів фундаментальних досліджень МОН України: "Прогнозування стану і безпеки навколишнього середовища з урахуванням антропогенного, радіоактивного забруднення, радіаційно-екологічних наслідків аварій на АЕС: Нові моделі і технології" (№ держр. 0115U000632) та інші.

Основний зміст дисертації. Представлена дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і переліку використаних джерел, який налічує 456 найменувань, а також анотацій українською та англійською мовами. У додатку наведено перелік робіт дисертанта, який містить 54 публікації. Кожен розділ дисертації має короткий вступ і завершується формулюванням висновків до нього.

У **вступі** обґрунтовано актуальність, чітко сформульовано мету, завдання досліджень, які було виконано. Акцентую увагу на науковій новизні роботи, яка складається з одинадцяти пунктів. **Перший розділ** є цілком оглядовим, в ньому дано детальний і ґрунтовний аналіз теоретичних методів розрахунку спектрів і спектроскопічних властивостей багатоелектронних атомів та іонів, а також сформульовано постановку задач дослідження. Показано, що існуючі найбільш послідовні методи врахування обмінно-кореляційних та радіаційних поправок в розрахунках спектрів важких атомних систем не дозволяють в достатній мірі отримати повну інформацію для багатьох атомних об'єктів та для їх будь-якого обраного стану. **Другий розділ** є найбільш важливим розділом дисертації, який містить низку розроблених дисертантом принципово нових методів, зокрема у розділі представлений новий метод комбінованої релятивістської багаточастинкової теорії збурень (RMBPT) для послідовного опису енергетичних, радіаційних і спектроскопічних властивостей важких звичайних багатоелектронних

атомних систем з прецизійним урахуванням релятивістських, ядерних ефектів та радіаційних КЕД поправок. При побудові нового формалізму RMBPT за основу взято адіабатичний формалізм Гелл-Мана та Лоу і апарат *ab initio* ТЗ з використанням феніманівської діаграмної техніки. Принципі-альна відмінність нового підходу полягає у виборі в якості нульового наближення оптимізованого Dirac-Fock потенціалу. Для урахування станів континууму дисертантом реалізована нова релятивістська версія методу штурмовських розкладань. На основі нового формалізму RMBPT дисертанту успішно вдалося узагальнити техніку обчислення матричних елементів оператора міжелектронної взаємодії. **Третій розділ** роботи містить нові результати щодо застосування релятивістського енергетичного підходу та оптимізованої, калібровочно-інваріантної КЕД ТЗ з прецизійним урахуванням обмінно-кореляційних поправок до опису енергетичних, радіаційних і спектроскопічних властивостей групи важких атомних систем. **Четвертий розділ** містить нові результати по спектроскопії важких екзотичних каонних атомних систем. Тут дисертант застосовує новий релятивістський підхід до розрахунку спектрів на основі релятивістських рівнянь Klein-Gordon-Fock (каон) та Dirac (електронна підсистема). Для опису радіаційних КЕД поправок, зокрема, поправок за рахунок урахування власно-енергетичної частини лембівського зсуву і ефекту поляризації вакууму використано метод релятивістських функцій Гріна з комплексною енергією та метод узагальненого радіаційного потенціалу FGRP типу Flambaum-Ginges. В якості нового елемента даної теорії дисертант використав оптимізоване одноквазічастинкове уявлення релятивістської теорії спектрів важких атомів, отримане ним на основі принципу мінімізації калібрувальних неінваріантних внесків в радіаційну ширину рівнів, обумовлених послідовністю складних обмінно-поляризаційних діаграм другого та вищих порядків теорії збурень. Дисертантом виконано значний обсяг обчислень енергетичних, спектроскопічних властивостей різних каонних атомів, у т.ч., розрахунки енергетичних (електромагнітних) внесків в енергії $8i-7h$, $8k-7i$, $7h-6g$ каонного азоту, важких каонних атомів вольфраму ^{184}W , свинцю ^{207}Pb та урану ^{238}U . **П'ятий розділ** дисертації присвячений новому підходу багаточастинкової теорії збурень до розрахунку параметрів β -розпаду (випадок дозволених переходів). Аналіз розрахунків параметрів бета-розпаду дозволив виявити закономірність зростання функції f для відповідних розпадів при переході від визначення функції Фермі $F(E, Z)$ за функціями на межі ядра до визначення $F(E, Z)$, яке обчислюється за амплітудами при нулі. Представлені дані обчислення функції Фермі для β^- -розпаду при виборі різних визначень цієї функції. Цікавими є результати, які пояснюють вплив вибору виду атомного поля на властивості β -розпаду, а також вплив урахування обмінно-кореляційних ефектів у хвильових функціях дискретного та неперервного спектру на значення функцій Фермі та інтегральних функцій Фермі.

Наукова новизна одержаних результатів. Всі результати, які виносяться на захист, є новими і базуються на своєчасно опублікованих дисертантом наукових працях в провідних світових і вітчизняних фахових виданнях. Треба відзначити, що дисертантом дисертації отримано цілий ряд принципово нових результатів і наукових положень, чітко сформульованих у висновках. Головними, найбільш пріоритетними результатами є такі:

1. Вперше розроблено новий ефективний метод опису енергетичних, радіаційних і спектроскопічних властивостей важких звичайних багатоелектронних та каонних атомних систем з послідовним, максимально прецизійним урахуванням релятивістських, ядерних ефектів та радіаційних поправок.

2. Вперше запропоновано та досліджено новий послідовний релятивістський підхід до розрахунку спектрів та спектроскопічних властивостей важких каонних атомних систем, який дозволяє послідовно виконати одночасне урахування електромагнітної взаємодії та сильної каон-ядерної взаємодії з використанням модифікованого методу оптичного потенціалу.

3. Вперше в межах прецизійної кооперативної електронно- β -ядерної спектроскопії атомних систем розвинуто новий релятивістський підхід до розрахунку параметрів β -розпаду (дозволенних переходів) важких систем.

Ступень обґрунтованості наукових результатів, висновків та їх достовірності. Всі наукові результати та положення, які містяться в дисертаційній роботі, достатньо науково обґрунтовані, а отримані висновки є достовірними. Обґрунтованість досліджень та висновків, сформульованих у дисертаційній роботі, підтверджується виконанням досліджень із застосуванням відомих теоретичних та числових методів, коректним припущенням та постановкою завдань, збігом теоретичних і експериментальних даних по декотрим спектральним параметрам досліджених атомів, зокрема талію, свинцю, європія, ітербію, тулія, та інших елементів, опублікуванням результатів роботи та їх обговоренням на наукових конференціях.

Практичне значення отриманих результатів полягає, насамперед, у тому, що одержані в роботі нові дані по спектральним параметрам низки важких атомів та іонів можуть бути корисними при застосуванні у різноманітних додатках в атомній, лазерній, ядерній спектроскопії, квантовій оптиці та електроніці, астрофізиці, фізиці та хімії плазми, дослідженнях з керованого термоядерного синтезу, з'ясуванні оптичних та інших властивостей різноманітних плазмових середовищ, нарешті, у задачах сучасної лазерної фізики та техніки, наприклад, для побудови нового класу лазерних систем без інверсної заселеності. Окремі результати можуть бути важливими також з точки зору подальшого розвитку методів розрахунку енергетичних і спектроскопічних властивостей багатоелектронних атомів та іонів.

Зауваження до дисертації. До зауважень, які мають виключно частковий, редакційний характер, і ні в якій мірі не стосуються основних результатів, положень та висновків безумовно нової роботи можна віднести таке:

1. Однією з перших переваг даної роботи є констатація дисертантом необхідності послідовного урахування релятивістських, ядерних ефектів, у т.ч. ефектів Breit-Rosenthal-Crawford-Schawlow, а також Bohr-Weisskopf тощо. В той же час дисертант, на мій погляд, не надає ретельних пояснень стосовно фізичних особливостей перелічених ядерних ефектів. На мій погляд, доречно було б докладніше визначити, чим це зроблено дисертантом, перелічені назви ядерних ефектів.

2. Однією з переваг роботи є подальший розвиток дисертантом так званого релятивістського енергетичного підходу в теорії радіаційного розпаду звичайних й особливо екзотичних атомів, який має дуже вагомні переваги над відомим у стандартній квантовій механіці атомів звичайним амплітудним методом, що використовує золоте правило Фермі. Будується калібрувально-інваріантна схема генерації одноквазічастинкового уявлення плюс унікальний метод диференціальних рівнянь для розрахунку складних матричних елементів, напр., для поляризаційного оператора. На мій погляд, мова йде про нові теоретичні методи в спектроскопії атомів й доречно було б докладніше, чим це зроблено дисертантом, вказувати на них як безумовні елементи новизни. Це ж стосується й абсолютно нового оптичного явища гігантського уширення рідбергівських (як правило автоіонізаційних) резонансів в спектрах важких атомів лантанідів, актинідів, урану, трансуранових та можливо надважких елементів, відкритого дисертантом.

3. У розділі 2 дисертант приводить докладні вирази для радіальних інтегралів які фігурують у виразах для кулонівської та брейтівської частин релятивістського потенціалу. Можливо, варто було б додатково пояснити різницю між кулонівськими та брейтівськими радіальними інтегралами.

4. В підр. 2.3 при побудові унікальної калібрувально-інваріантної процедури генерації базисів орбіталей в теорії збурень з оптимізованим дірак-фоківським нульовим наближенням дисертант вводить у розгляд так званий біспінор, компоненти якого є розв'язками спеціальних релятивістських рівнянь типу Дірака. Доречно було б докладніше прокоментувати різницю між ним і аналогічним біспінором, використаним у серії робіт Глушкова-Іванова-Летохова з багатофотонної спектроскопії атомів та іонів.

5. Дисертантом запропоновані достатньо ефективні процедури урахування обмінно-кореляційних ефектів, зокрема, ефектів поляризаційної взаємодії та взаємного екранування квазічастинок, а також тиску континууму, але декотрі технічні моменти слід було методично представити інакше, чим це зроблено в роботі. Це ж стосується і формули (2.70), що визначає калібрувально-неінваріантний внесок в радіаційну ширину.

6. На стор. 139 (підр.3.2.1) наведені дані по імовірностям E_1 переходів в іоні ртуті Hg^+ . На мій погляд, доречно було б докладніше пояснити різницю у двох дірак-фоківських результатах (дані DF і DF_{exp} . з використанням експериментальної енергії переходу) і з цієї точки зору оцінити свій оригінальний результат, акцентуючи далі увагу, як зроблено, на величній так званого калібрувальній-неінваріантності внеску в радіаційну ширину атомного рівня.

7. Щодо редакційних або методичних недоліків. Дисертант використовує декілька систем одиниць, зокрема, атомну та кулонівську системи одиниць. Можливо окремо варто було б надати відповідну мотивацію. Деякі дані варто було б надати скоріше у графічній формі, ніж табличній. Можливо, варто було б більш стисло викладати деякі технічні аспекти, скажемо, обчислення матричних елементів на багаточастинкових хвильових функціях в рамках методу Фано тощо.

Загальний висновок: Дисертаційна робота Терновського В.Б. є завершеною науковою працею, яка містить нові науково обґрунтовані результати. В дисертації розв'язано важливу проблему сучасної оптики та спектроскопії важких атомів: розробка теоретичних основ нової прецизійної релятивістської спектроскопії важких звичайних багатоелектронних та екзотичних адронних (каонних) систем з одночасним коректним урахуванням ядерних, радіаційних, обмінно-кореляційних ефектів на основі формалізму комбінованої калібрувальній-інваріантної релятивістської багаточастинкової теорії збурень з оптимізованим дірак-фоківським нульовим наближенням та узагальненого енергетичного підходу, нового ефективного релятивістського підходу до розрахунку параметрів β -розпаду (дозволеніх переходів) важких систем в межах прецизійної кооперативної електронно- β -ядерної спектроскопії атомних систем. Розвинені в даній роботі вперше в теоретичній атомній оптиці та спектроскопії принципово нові підходи і отримані на їх основі в переважній більшості із спектроскопічною точністю вперше оригінальні наукові результати в сукупності закладають основи нового наукового напрямку в сучасній теоретичній оптиці і спектроскопії важких атомних систем.

Автореферат докторської дисертації Терновського В.Б. відповідає змісту роботи й повністю відображає всі результати, положення й висновки, що виносяться на захист.

На підставі викладеного вище можна констатувати, що з точки зору актуальності, наукової новизни, теоретичної та практичної значущості, дисертаційна робота Терновського В. Б. «Релятивістська спектроскопія важких атомів з урахуванням обмінно-кореляційних та радіаційних ефектів» безумовно відповідає вимогам пунктів 9,10,12-14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів від 24.07.2013 р. №567 і наказу МОН України від 12.01.2017 р. № 40 щодо оформлення дисертацій, а самому дисертанту, Терновському Валентину Борисовичу, безумовно може бути присуджений науковий ступінь доктора фізико-математичних наук за спец.01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Використання результатів роботи. Одержані в роботі нові наукові результати по енергетичним, радіаційним та спектроскопічним властивостям досліджених квантових систем можуть бути рекомендовані до використання у навчальній, науковій та науково-технічній діяльності провідних вітчизняних університетів та НДІ Міністерства освіти і науки України, Національної Академії наук України, а також науково-технічних установ, які спеціалізуються в оптиці і спектроскопії атомних та молекулярних систем і т.і.

Офіційний опонент:

професор кафедри технологічної та професійної освіти Південноукраїнського національного педагогічного університету ім. К.Д. Ушинського
доктор фіз.-мат. наук, професор



Усов В.В.

Підпис проф. Усова Валентина Валентиновича засвідчую:

