

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Буяджи Василя Володимировича

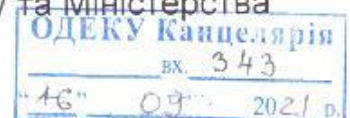
«Релятивістська спектроскопія за рахунок зіткнень в електрон- та іон-атомних системах: Енергетичний підхід», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – «Оптика і лазерна фізика»

**Актуальність теми.** В останні роки в оптиці та спектроскопії атомів та багатозарядних іонів спостерігається справжній суттєвий прогрес, пов'язаний як з цілою низкою відомих фундаментальних теоретичних досягнень, так й з розвитком нових експериментальних технологій. Широке використання прискорювачів, колайдерів важких іонів, джерел синхротронного випромінювання, нейтронних джерел та ін. відкриває принципово нові можливості у сучасній оптиці та спектроскопії за рахунок зіткнень атомів та багатозарядних іонів, у тому числі іонів у плазмі. З іншого боку, необхідність дослідження все більш енергетичних процесів в задачах електрон-іон-атомних зіткнень стимулює і розвиток нових теоретичних методів атомної спектроскопії за рахунок зіткнень.

Традиційно, значний інтерес до цих задач, а також авжеж відповідних наборів енергетичних та спектроскопічних характеристик обумовлений і потребами цілого ряду традиційних наукових та технологічних додатків, які включають задачі атомної оптики та спектроскопії, астрофізики, ядерної і молекулярної фізики плазми, квантової електроніки та лазерної фізики, зокрема, у сенсі пошуку нових «оптимальних» кандидатів для лазерної генерації у короткохвильовому діапазоні, побудови нових квантово-кінетичних моделей і відповідно нових лазерних схем ВУФ і рентгенівського діапазону, побудові нових принципів діагностики як низько-температурної, так і високо-температурної плазми, лабораторної, астрофізичної, лазерної (ядерної) плазми тощо.

Відкриття і інтенсивне експериментальне дослідження цілої низки нових нелінійно-оптичних явищ, обумовлених високоенергетичною взаємодією атомів із зовнішнім електромагнітним полем, інтенсивною взаємодією електронів та іонів в плазмі, мультігенерації гармонік, незвичайного розсіювання електронів на атомах в присутності інтенсивного ЛВ, тощо, стимулює розвиток нових, прецизійних методів опису і розрахунку властивостей процесів розсіювання та зіткнень за участю атомів, іонів електронів, фотонів. Між тим, сучасний рівень розвитку теорії, навіть з урахуванням досягнень останніх років, не дозволяє адекватно, з високою точністю описувати процеси у релятивістських атомних системах, тому не має сумніву, що актуальність теми дисертації Буяджи В.В. є очевидно безпрецедентно високою.

**Зв'язок з науковими програмами, пріоритетними напрямками розвитку техніки.** Дослідження, виконані в роботі, увійшли до планів 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, 2011-2015), «Розвиток та застосування нових обчислювальних методів в задачах математичної фізики, теорії ядра та адронних атомів, квантової геометрії» (№ держр. 0114U005145, 2014-2018рр.), «Розвиток та застосування нових методів обчислювальної математики, математичної фізики в задачах теоретичної квантової оптики, атомної, молекулярної спектроскопії» (№ держр. 0116U002097, 2016-2020рр.), «Розрахунок енергетичних та спектроскопічних характеристик рідбергівських атомів та багатозарядних іонів на основі релятивістської багаточастинкової теорії збурень» (2019–2023), «Розвиток та застосування хаос-геометричних та квантово-динамічних методів дослідження спектрів і динаміки лазерних систем та приладів надвисокочастотної електроніки» (2019–2023), а також 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, 2015-2017рр.), «Комплекс нових стохастично-гідродинамічних та атомно-діагностичних моделей моніторингу антропогенного забруднення атмосфери промислових міст та “Green City” технологія» (№ держр. 0117U000622, 2017-2019рр.) і проекту Стипендіату Кабінету Міністрів України (2018-2020 «Релятивістська спектроскопія за рахунок зіткнень в електрон- та іон-атомних системах» згідно з постановою президії Комітету з Державних премій України в галузі науки і техніки від 23.05.2018).

**Зміст дисертації.** Дисертація Буяджи В.В. містить вступ, шість розділів, основні результати та висновки і список використаних літературних джерел. В **першому** розділі наданий огляд сучасних теоретичних та експериментальних методів вивчення характеристик електрон-іонних зіткнень, процесів за участю електронів, фотонів, атомів, іонів із використанням експериментальних технологій (джерел ЛВ, синхротронного випромінювання, ЕВІТ, прискорювачі, колайдерів важких іонів та ін.), що відкриває нові можливості вивчення усе більш енергетичних процесів. Наданий фундаментальний аналіз базових робіт по обчисленню характеристик елементарних процесів електрон-іонних зіткнень. Проаналізовано точність і послідовність теоретичних методів розрахунку основних характеристик електрон-іонних зіткнень, зокрема, перерізів та сил зіткнень, швидкісних коефіцієнтів тощо, підкреслюється, нездатність зі спектроскопічною точністю описати фундаментальні характеристики елементарних процесів е-іонних зіткнень при відносно невисоких енергіях зіткнень, дуже складні проблеми коректного обліку як релятивістських, так і обмінно-кореляційних ефектів. У **другому розділі** розроблено принципово новий формалізм, а саме оптимізований енергетичний підхід, до розв'язання широкого класу задач в спектроскопії, викладені основи но-



вого релятивістського енергетичного підходу у спектроскопії за рахунок зіткнень релятивістських, суттєво багатоелектронних електрон-іонних та атомних систем, у т.ч. у плазмі багатозарядних іонів. У **третьому** розділі наведені результати розрахунку на основі нового методу енергій рівнів, зсуви енергій, сил осциляторів радіаційних переходів в спектрах багатозарядних іонів, перерізів збудження за рахунок електронного зіткнення, сил електрон-іонних зіткнень, для цілого ряду Be-, F-подібних іонів, дані релятивістських обчислень з урахуванням обмінно-кореляційних поправок, значення сил електронних зіткнень для збудження переходу між рівнями тонкої структури ( $2p^2P_{3/2}-2P_{1/2}$ ) основного стану Be- та F-подібних іонів тощо. В **четвертому** розділі дані масових обчислень на основі релятивістської багаточастинкової теорії збурень з оптимізованим нульовим дірак-кон-шемівським та дебай-хюккелівським наближенням енергій і імовірностей радіаційних переходів, сил осциляторів E1, E2, M1, M2 переходів між рівнями конфігурацій  $2s^22p^53s, 3p, 3d, 4s, 4p, 4d$  і  $2s2p^63s, 3p, 3d, 4s, 4p, 4d$ , в спектрах Ne-подібних іонів з  $Z \sim 20-83$ . Наведені експериментальні дані енергій (в  $10^2 \text{ см}^{-1}$ ; повний кутовий момент  $J=1$ ) рівнів конфігурації  $2s^22p^53s, 3d, 4s, 4d$  і  $2s2p^63p, 4p$  в спектрі іона Ni XIX, а також результати розрахунку на основі різних теоретичних підходів, зокрема: методом МКДФ (Froese Fischer, 2004), релятивістської ТЗ (РБТЗ) (Safronova et al, 2005), релятивістської ТЗ з емпіричним "0" наближенням (РТЗМП) (Ivanova-Glushkov (1986). Наведені дані по енергіях рівнів конфігурації  $2p^53s3p, 2p^53p^2$  в іоні Ar VIII (в  $10^3 \text{ см}^{-1}$ ;  $J=3/2$ ). В **п'ятому** розділі представлені дані щодо диференціальних і інтегральних перерізів збудження станів конфігурації в стани  $2p^53s$  конфігурації ( $2p^53s[3/2]_0^2, 2p^53s[1/2]_0^0, 2p^53s[1/2]_1^0, 2p^53s[3/2]_1^0$ ) нейтрального неону при енергії електрона, що налітає  $E_i = 10-120 \text{ eV}$ , отримані дані щодо спектрів, сил осциляторів електричних дипольних переходів і перерізів збудження електронним ударом станів для конфігурацій  $1s^22s^22p^53s, 3p, 3d$  Ne-подібного іона  $Kr^{26+}$  з основного стану (енергія налітаючого електрона  $4.082 \text{ keV}$  та  $6.80 \text{ keV}$ ), вперше представлені із спектроскопічною точністю теоретичні дані по ефективних силах зіткнень для Ne-подібного іона  $Kr^{26+}$  для температур  $T=5 \times 10^6-3 \times 10^7 \text{ K}$  та електронної густини (типова густина в плазмі токамака)  $n_e=10^{14} \text{ см}^{-3}$ . У **шостому** розділі викладені основи нової версії релятивістського енергетичного підходу в теоретичній атомній спектроскопії за рахунок зіткнень для електрон-іонних систем у додатковому зовнішньому електромагнітному полі, наведені дані обчислення багатофотонних диференціальних перерізів ( $e, 2e$ ) реакції для атома неону. Параметри поля лазерного випромінювання обрані таким чином: напруженість  $\mathcal{E}=2 \cdot 10^8 \text{ V/cm}$ , частота  $\hbar\omega = 1.17 \text{ eV}$  (ці параметри відповідають лазеру Nd:YAG), а енергія досить швидкого налітаючого електрона  $E_i=100 \text{ eV}$ . Далі обчислена  $l$ -залежність ( $l$  - число фотонів, обмін якими супроводжує електрон-атомне зіткнення) багатофотонного диференціального перерізу іонізації [ $(e, 2e)$  реакція] атома неону  $1s^22s^22p^6 \ ^1S_0$  електронним ударом в присутності поля випромінювання лазера Nd: YAG і наведені результати



для залежності від кута розсіювання багатофотонних диференціальних перерізів іонізації [(e,2e) реакція] атому Ne електронним ударом. Роботу завершує розділ «висновки» і розділ списку використаних джерел.

**Наукова новизна положень, результатів та висновків роботи** пов'язана з розвитком нового напрямку у сучасній теоретичній атомній оптиці та спектроскопії, зокрема, прецизійної релятивістської оптики і спектроскопії за рахунок зіткнень для електрон-іон-атомних систем у вільному стані, у дебаєвській плазмі з урахуванням впливу ефектів плазмового середовища, а також при наявності додаткового зовнішнього поля лазерного випромінювання. Здобувачем вперше розвинуті теоретичні основи нового релятивістського підходу до обчислення енергетичних та спектроскопічних характеристик процесів електрон-атом-іонних зіткнень (у т.ч. перерізів, сил електрон-іонних зіткнень, швидкостей процесів зіткнень тощо) для атомів та багатозарядних іонів з урахуванням впливу плазмового середовища в широкому інтервалі параметрів атомів і іонів (мішеней) і налітаючого електрона (включаючи випадок повільних зіткнень). Вперше з спектроскопічною точністю виконані обчислення енергій та імовірностей радіаційних переходів, сила осциляторів, перерізів збуджень для Be-подібних та фтор-подібних іонів із зарядом атомного ядра  $Z=6-36$ , з урахуванням ефектів впливу плазмового середовища, енергій і імовірностей радіаційних переходів, сил осциляторів низки переходів спектрах Ne-подібних іонів з  $Z\sim 20-83$ , ряді Na-подібних іонів, диференціальних і інтегральних перерізів збудження в ряд станів атома неону, спектрів, сил осциляторів E1 переходів і перерізів збудження електронним ударом для ряду станів Ne-подібного іонів  $Kr^{26+}$  та  $Ar^{8+}$ . Здобувачем вперше розвинута нова версія релятивістського енергетичного підходу до визначення перерізів та сил зіткнень для e-іонних систем у зовнішньому полі лазерного випромінювання і вперше передбачені нові фізичні ефекти стосовно поведінки перерізів реакцій типу (e,2e) при певних умовах.

**Ступінь обґрунтованості наукових результатів, висновків та їх достовірність.** Рівень достовірності та обґрунтованості розвинутих здобувачем нових теорії та методів обчислення характеристик процесів зіткнень для e-іон-атомних систем з одночасним, послідовним урахуванням складних обмінно-кореляційних ефектів, впливу плазмового середовища забезпечений, насамперед, досить добрим узгодженням даних тестових прецизійних теоретичних обчислень для низки добре вивчених процесів зіткнень для певних e-іон-атомних систем та високоточних даних експерименту, а також використанням найсучасніших і послідовних методів релятивістської квантової теорії поля, квантової механіки та квантової електродинаміки, атомної спектроскопії, та авжеж нових коректних теорії самого здобувачу.

**Практичне значення.** Практичне значення роботи є очевидно вкрай великим особливо в плані використання нових методів в теорії електрон-атом-іонних зіткнень в плазмі, а також нових результатів, отриманих у роботі, у численних фізичних теоретичних та прикладних



застосуваннях, зокрема, для розв'язання задач лазерної, разерної та гразерної фізики, квантової електроніки, різноманітних астрофізичних задач, у тому числі, вивчення характеристик астрофізичної плазми, досліджень з керованого термоядерного синтезу, і насамперед, побудови нових ефективних технологій діагностики термоядерної плазми, лазерної, лабораторної плазми, плазми токамака. Нові прецизійні дані щодо характеристик е-іон-атомних зіткнень можуть служити добрим додатковим засобом вивчення законів міжчастинкових взаємодій в складних електрон-атомних системах. На кінець, розвинуті методи очевидно дозволять отримувати адекватну, досить прецизійну інформацію щодо характеристик процесів розсіювання електронів на атомах, електрон-атомних та електрон-іонних зіткнень, процесів діелектронної рекомбінації в дебаєвській плазмі тощо.

**Зауваження до дисертації.** Слід зазначити, що дисертаційна робота Буяджи В.В. вражає і низкою нових теоретично послідовних підходів і значною кількістю дійсно нових спектроскопічних результатів, і у цьому сенсі нижче наведені зауваження мають частковий, редакційний характер і ні в якій мірі не чіпають основних положень безумовно цікавої і нової роботи.

До зауважень можна віднести таке:

1. У першому розділі роботи здобувачем наданий досить докладний огляд авжеж найбільш потужних теоретичних методів в спектроскопії е-іонних та е-атомних зіткнень. В той же час, здається очевидним, що переважна частина теоретичних підходів природно узагальнюється й на випадок атом-,іон-атомних зіткнень, зіткнень з молекулами. Тому, на мій погляд, здобувачу слід було б надати хоча б короткі коментарі з цього приводу, тим більш, що далі цей аспект демонструє й нові перспективні можливості нових методів здобувачу, як до речі також не зазначені.
2. У другому розділі роботи при викладенні нового енергетичного формалізму в спектроскопії за рахунок зіткнень релятивістських, суттєво багатозарядних електрон-іонних та атомних систем, у т.ч. у плазмі багатозарядних іонів, здобувачем надані й визначення характеристик електрон-іонних зіткнень, зокрема, перерізу, сили зіткнення, причому у розділі здобувачем використані одночасно й атомні й кулонівські одиниці. Цілком доречним тут було б більш докладне пояснення їх вибору.
3. В розділі 2 при узагальненні нового підходу до опису процесів електрон-іонних зіткнень за участю багатозарядних іонів у плазмі здобувач, на мій погляд вперше на високому рівні фізичної послідовності визначає фактично термалізовану енергетичну зону рідбергівських і автоіонізаційних рідбергівських станів, що збігаються до порогу іонізації кожного іону у плазмі. Цілком доречним тут було б більш докладне пояснення вибору нижньої межі континууму і обліку перелічених станів.
4. Здобувач у третьому розділі наводить свої дані по силам осциляторів для ряду переходів в Ве-подібних іонах і дає цілком коректний коментар щодо схеми їх обчислення з точки зору використання відповідних каліб-



ровок фотонного пропагатору амплітудах зіткнень. Цілком доречним тут було б більш докладне пояснення відповідної процедури мінімізації так званих калібрувальних-неінваріантних внесків. Також цікаво, яке значення цієї методології взагалі в сучасній спектроскопії за рахунок зіткнень

5. До числа безумовно нових результатів відноситься дані здобувача стосовно перерізів електронного збудження за рахунок зіткнень переходів типу  $[2s^2\ ^1S - (2s2p\ ^1P_0)]$  в спектрах ряду Be- подібних іонів й докладне порівняння з наявними даними прецизійного експерименту MEIBEL. Хоча, дана робота очевидно є суттєво теоретичною, аде на мій погляд, цілком доречним тут було б більш докладне пояснення деяких деталей проведення експерименту MEIBEL і більш розгорнутий аналіз саме експериментальних даних.

6. В четвертому розділі при аналізі даних обчислень енергій переходів в спектрах Ne-, а також Na-подібних іонів здобувач приходить до цілком вірного і важливого висновку, що урахування вищих порядків змішує абсолютне положення всіх рівнів внаслідок неповної компенсації поправок вищого порядку. На мій погляд, тут цілком доречним тут було б більш докладне пояснення, про які саме поправки йде мова. Цікаво також, чи є цей феномен універсальним для атомної спектроскопії взагалі?

**Використання результатів дисертації.** Результати дисертації Буяджи В.В. слід рекомендувати для використання у наукових дослідженнях університетів, науково-дослідних інститутів Міністерства освіти та науки України, Національної академії наук України, а організацій і підприємств, де вивчають проблеми фізики е-іон-атомних зіткнень, фізики плазми, атомної оптики і спектроскопії, лазерної фізики, квантової електроніки тощо.

**Висновок:** Дисертаційна робота Буяджи В.В. є безумовно новою, докладно та ретельно обґрунтованою завершеною роботою, в якій розвинуто низку принципово нових теоретичних підходів до визначення та у багатьох випадків передбачення фундаментальних характеристик електрон-іонних зіткнень в плазмі, розроблені теоретичні основи нового наукового напрямку, а саме прецизійної релятивістської оптики і спектроскопії за рахунок зіткнень для електрон-іон-атомних систем у вільному стані, у дебаєвській плазмі з урахуванням впливу ефектів плазмового середовища, а також при наявності додаткового інтенсивного поля лазерного випромінювання. Основні положення дисертації Буяджи В.В. досить докладно та повно відображені в значній кількості публікацій у всесвітньо відомих міжнародних наукових журналах, а також тезах та матеріалах доповідей на провідних міжнародних конференціях, конгресах, школах по оптиці та спектроскопії, лазерній фізиці. Реферат дисертації цілком відповідає її змісту.

Я вважаю, що дисертація Василя Володимировича Буяджи «Релятивістська спектроскопія за рахунок зіткнень в електрон- та іон-атомних системах: Енергетичний підхід» задовольняє всім вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук пунктів 9, 10, 12-14

«Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів від 24.07.2013 р. №567 (плюс наказу МОН України від 12.01.2017 р. № 40 щодо оформлення дисертацій), а здобувачу без сумніву може бути присуджений науковий ступень доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика та лазерна фізика (104- Фізика та астрономія).

**Офіційний опонент:**  
**професор кафедри фінансів,**  
**банківської справи та страхування**  
**Одеського національного університету**  
**ім. І.І. Мечникова**  
**доктор фіз.-мат. наук, професор**

**Тюрін О.В.**

Підпис професора Тюріна Олександра Валентиновича засвідчую:

**Вчений секретар ОНУ ім. І.І. Мечникова**



**Курандо С.В.**