

ВІДГУК офіційного опонента
на дисертаційну роботу Буяджи Василя Володимировича
“РЕЛЯТИВІСТСЬКА СПЕКТРОСКОПІЯ ЗА РАХУНОК ЗІТКНЕНЬ
В ЕЛЕКТРОН- ТА ІОН-АТОМНИХ СИСТЕМАХ:
ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД”, яка представлена на здобуття наукового
ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05
– оптика, лазерна фізика (104 – Фізика та астрономія)

Метою дисертаційної роботи Буяджи В.В. є розробка теоретичних основ нової прецизійної релятивістської оптики і спектроскопії за рахунок зіткнень для електрон-іонних систем, розвитку нового релятивістського підходу до опису та обчислення основних енергетичних та спектральних характеристик процесів зіткнень для електрон-іон-атомних систем з одночасним, ефективним урахуванням складних обмінно-кореляційних ефектів впливу плазмового середовища у дебаєвській плазмі (зокрема, багатозарядних іонів), а також додаткового накладеного на систему зовнішнього електромагнітного поля.

Актуальність вказаної теми і взагалі класів задач, пов'язаних із дослідженням широкого кола як низько- так й високо-енергетичних процесів збудження, іонізації, зіткнень у комбінованих і навіть гібридних атомних системах (електронів, атомів, іонів і фотонів) в останні роки різко виріс, що природно обумовлено, з одного боку, безпрецедентним прогресом у розвитку сучасної експериментальної техніки (технологій), зокрема, різким збільшенням інтенсивності, потужності, якості джерел лазерного випромінювання (варто нагадати, що сучасні лазерні системи та комплекси можуть випромінювати імпульси от декількох до десятків фемтосекунд з можливостями досягнення пікових інтенсивностей від 10^{19} В/см² до перспективних $\sim 10^{23}$ В/см²; найбільш характерні приклади таких систем - лазери на вільних електронах, типу TESLA, XFEL та інші), іонних колайдерів, нейтронних джерел і таке інше. Нові потужні експериментальні технології дозволяють вийти на рівень безпрецедентно високої точності вимірювань фундаментальних параметрів та властивостей процесів зіткнень в атомних системах (електронів, атомів, іонів і фотонів), що в свою чергу однозначно стимулює і розвиток та використання принципово прецизійних теоретичних методів релятивістської оптики і спектроскопії за рахунок зіткнень для електрон-атомних та іонних систем, у тому числі, систем багатозарядних іонів в плазмі. Це аспект також уявляється надто актуальним й для розв'язання дуже важливих задач побудови нових квантово-кінетичних моделей лазерної генерації у короткохвильовому діапазоні, побудові нових принципів та технологій діагностики як низькотемпературної, так і високо-температурної плазми, лабораторної, астрофізичної, лазерної (ядерної) плазми тощо.



Зв'язок з пріоритетними науковими програмами, напрямками. Матеріали дисертаційної роботи представлені у планах та звітах 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» (2011-2015 рр.), «Розвиток та застосування нових обчислювальних методів в задачах математичної фізики, теорії ядра та адронних атомів, квантової геометрії» (2014-2018 рр.), «Розвиток та застосування нових методів обчислювальної математики, математичної фізики в задачах теоретичної квантової оптики, атомної, молекулярної спектроскопії» (2016-2020 рр.), «Розрахунок енергетичних та спектроскопічних характеристик рідбергівських атомів та багатозарядних іонів на основі релятивістської багаточастинкової теорії збурень» (2019-2023 рр.), «Розвиток та застосування хаос-геометричних та квантово-динамічних методів дослідження спектрів і динаміки лазерних систем та приладів надвисокочастотної електроніки» (2019-2023 рр.), 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» (2015-2017 рр.), «Комплекс нових стохастично-гідродинамічних та атомно-діагностичних моделей моніторингу антропогенного забруднення атмосфери промислових міст...» (2017-2019 рр.) і проекту Стипендіат Кабінету Міністрів України (2018-2020 рр.) «Релятивістська спектроскопія за рахунок зіткнень в електрон- та іон-атомних системах» (згідно з постановою президії Комітету з ДПУ в галузі науки і техніки 23.05.2018, №3).

Зміст роботи. Дисертація складається з вступу, шістьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку (списку робіт здобувача за темою дисертації).

Перший розділ присвячений загальному огляду теоретичних та експериментальних методів вивчення характеристик електрон-іонних зіткнень, процесів з участю електронів, фотонів, атомів, іонів.

Другий розділ присвячений розробці принципово нового оптимізованого релятивістського енергетичному підходу до розв'язання широкого класу задач в атомній спектроскопії за рахунок зіткнень, розрахунку характеристик (перерізи збудження електронним ударом, сили зіткнень та інші) процесів електрон-іонних та електрон-атомних зіткнень з використанням адіабатичного формалізму Гелл-Мана і Лоу та релятивістської багаточастинкової теорії збурень з оптимізованим нульовим наближенням Дірака-Кона-Шема та Дебая-Хюккеля. Розроблені процедури акуратного урахування ефектів плазмового екранування, а також поляризаційної взаємодії зовнішніх квазічастинок: електронів і вакансій через поляризо-

ваний остов і взаємного екранування або антиекранування зовнішніх квазічастинок як ефектів вищих порядків релятивістської теорії збурень.

Третій та четвертий розділи роботи містять результати масових розрахунків серій енергетичних, радіаційних та спектроскопічних характеристик (напр., енергетичних спектрів, ймовірностей та сил осциляторів радіаційних переходів в спектрах багатозарядних іонів, перерізів збудження електронним ударом, сил електрон-іон-атомних зіткнень, швидкісних параметрів збудження, іонізації, розпаду для цілої групи достатньо складних атомів та іонів, у тому числі, для цілого ряду берилій-, фтор-неон-натрій-подібних іонів в широкому інтервалі змінення величин зарядів атомного ядра, а також різних параметрів плазмового середовища (температури та густини) і, нарешті, параметрів енергетики зіткнень. Зокрема, представлені результати 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 берилій-, фтор-подібних іонів з $Z = 19-26$ і показано, що наш підхід забезпечує цілком фізично розумну узгодженість теорії з експериментом, енергій і ймовірностей радіаційних переходів, сил осциляторів E1, E2, M1, M2 переходів в спектрах Ne-подібних іонів з $Z=20-83$ між рівнями конфігурацій $2s^2 2p^5 3s, 3p, 3d, 4s, 4p, 4d$ і $2s 2p^6 3s, 3p, 3d, 4s, 4p, 4d$.

П'ятий розділ дисертації присвячений представленню результатів розрахунку диференціальних і інтегральних перерізів збудження станів конфігурації в стани $2p^5 3s$ нейтрального неону (при енергії електрона, що налітає, до 120 eV), спектрів, сил осциляторів E1 переходів, перерізів збудження електронним ударом станів для конфігурацій $1s^2 2s^2 2p^5 3s, 3p, 3d$ Ne-подібного іона кріптонію з основного стану (при енергії електрона, що налітає, до 6,8 keV), ефективних сил зіткнень для плазмової температур до 3×10^7 K та електронної густини 10^{14}cm^{-3} .

Шостий розділ присвячений фактично узагальненню релятивістського енергетичного підходу формалізму в теоретичній атомній спектроскопії за рахунок зіткнень для електрон-іонних систем на випадок класу задач із накладенням зовнішнього електромагнітного поля (поля лазерного випромінювання) та розрахунку деяких параметрів електрон-атомних зіткнень в присутності поля лазерного випромінювання, зокрема, багатофотонних диференціальних перерізів ($e, 2e$) реакції для атома неону при параметрах відповідно поля та електрон-атомного зіткнення $\varepsilon_0 = 2 \cdot 10^8$ В/см, $E_l = 100$ eV. Дисертантом відкритий незвичайний оптичний феномен різної поведінки перерізів ($e, 2e$) реакцій для різних умов, зокрема, паралельності і перпендикулярності вектору поляризації лазерного випромінювання і хвильового вектору електрона.

Заключні розділи присвячені основним висновкам дисертаційної роботи, а також списку літературних джерел.

Наукова новизна положень, результатів, висновків дисертації.

Дисертантом вперше розроблений комплекс нових методів розрахунку фундаментальних енергетичних, радіаційних, спектроскопічних параметрів процесів е-атом-іонних зіткнень в релятивістській спектроскопії суттєво багатоелектронних атомів та багатозарядних іонів в дебаєвській плазмі в широкому інтервалі параметрів атомів, іонів, плазми, зовнішніх електромагнітних полів, а також динаміки процесів зіткнень, зокрема:

i) вперше розроблений принципово новий оптимізований релятивістський енергетичний підхід до розрахунку характеристик (перерізи збудження електронним ударом, сили зіткнень та інші) процесів електрон-іонних та електрон-атомних зіткнень з використанням адіабатичного формалізму Гелл-Мана і Лоу та релятивістської багаточастинкової теорії збурень з оптимізованим нульовим наближенням Дірака-Кона-Шема та Дебая-Хюккеля;

ii) вперше розроблені нові прецизійні процедури ефективного урахування багаточастинкових обмінно-кореляційних ефектів, включаючи ефекти поляризаційної взаємодії зовнішніх квазічастинок, електронів і вакансій через поляризований остов і ефекти взаємного екранування або антиекранування зовнішніх квазічастинок та нова методика для урахування станів континууму для іонів в дебаєвській плазмі;

iii) вперше із спектроскопічною точністю представлені досить широкі набори даних для енергетичних спектрів, ймовірностей та сил осциляторів радіаційних переходів в спектрах багатозарядних іонів, перерізів збудження електронним ударом, сил електрон-іон-атомних зіткнень, швидкісних параметрів збудження, іонізації, розпаду для цілої групи складних атомів та іонів, у тому числі, ряду берилій-, фтор-неон-натрій-подібних іонів з урахуванням ефектів впливу плазмового середовища.

iv) вперше розроблено принципово нове узагальнення релятивістського енергетичного підходу формалізму в теоретичній атомній спектроскопії за рахунок зіткнень для електрон-іонних систем на випадок класу задач із накладенням зовнішнього електромагнітного поля (поля лазерного випромінювання), представлені дані розрахунку деяких диференціальних параметрів електрон-атомних зіткнень в присутності поля лазерного випромінювання, зокрема, багатофотонних перерізів $(e,2e)$ реакції для атома неону і відкритий незвичайний новий оптичний феномен різної поведінки перерізів $(e,2e)$ реакцій.

Практичне значення наукових результатів дисертації уявляється дійсно вагомим, оскільки на підставі розрахунків у межах розвинутого дисертантом

комплексу нових методів та підходів до опису процесів зіткнень для електрон-іон-атомних систем з одночасним, кількісно послідовним урахуванням складних обмінно-кореляційних ефектів у вільному стані, з урахуванням впливу плазмового середовища у дебаєвській плазмі багатозарядних іонів, а також при наявності додаткового зовнішнього поля лазерного випромінювання отримані важливі для різноманітних прикладних заснувань набори даних для фундаментальних енергетичних, радіаційних та спектроскопічних характеристик зіткнень для значної групи атомів та багатозарядних іонів у тому числі у дебаєвській плазмі. Шукані набори даних, частина з котрих із спектроскопічною точністю отримана вперше, можуть бути використані у широкому колі додатків, у т.ч., у фізиці атомів, молекул, зіткнень плазми, лазерів, для розв'язання дуже важливих задач побудови нових квантово-кінетичних моделей лазерної генерації у короткохвильовому діапазоні, побудові нових принципів та технологій діагностики як низькотемпературної, так і високо-температурної плазми, лабораторної, астрофізичної, лазерної (ядерної) плазми тощо.

Ступінь обґрунтованості наукових результатів і їх достовірність підтверджені докладним порівнянням розрахованих автором на підставі своїх нових підходів, що базуються на послідовних методах релятивістської спектроскопії за рахунок зіткнень в електрон-, іон-атомних системах для ряду добре досліджених станів та переходів у спектрах атомних систем, багатозарядних іонів, з відповідними надійними експериментальними даними та їх добрим узгодженням. Крім цього, дисертантом застосовані самі послідовні та коректні методи квантової механіки і квантової електродинаміки для чисельного моделювання параметрів електрон-атомних зіткнень, атомів та багатозарядних іонів в плазмі.

Зауваження до роботи. Як зауваження до роботи відзначимо такі:

По-перше, дисертант розробляє новий метод в спектроскопії зіткнень з використанням формалізму Гелл-Мана і Лоу та теорії збурень, фактично зорієнтований на вивчення відповідних характеристик зіткнень електронів з рядом берилій-, фторнеон-подібних іонів, нейтральними атомами. Тобто, в основному в роботі фігурують так звані одно- або двовалентні іони, точніше, одно- та двочастинкові системи. Природним є питання стосовно меж застосування нового підходу. Наприклад, дуже цікава точка зору дисертанта щодо перспектив використання його нового підходу в спектроскопії атомів лантаноїдів або актиноїдів, важких атомів, де взагалі є відсутньою яка-небудь інформація щодо фізики зіткнень.

По-друге, автор запропонував новий метод розрахунку сил зіткнень для іонів в дебаєвській плазмі і отримав надто важливі дані про відповідні параметри: сили та перерізи електрон-іонних зіткнень для низки іонів. Автором отримано відмінне узгодження його теоретичних даних для параметрів електрон-іонних зіткнень з

тестовими експериментальними даними для ряду іонів в дебаєвській плазмі. Також виникає питання стосовно меж застосування такого підходу. Яка думка дисертанта стосовно перспектив використання його нового підходу у розрахунках характеристик електронних зіткнень в умовах недебаєвської плазми.

По-третє, відмінна риса методу дисертанта пов'язана із ефективним урахуванням дуже складних обмінно-поляризаційних поправок. Уявляється, що було б корисно більш докладно вказати суттєві переваги та декотрі деталі виводу використаних поляризаційних функціоналів (2.37)-(2.40).

По-четверте, відмінна риса роботи пов'язана із проведеними дисертантом дуже детальними порівняннями та аналізом даних розрахунків на основі його методу та найбільш потужних сучасних альтернативних підходів, у тому числі, R матричним методом. Уявляється, було б корисно більш докладно вказати декотрі деталі останнього.

По-п'яте, в розділі 2.5, присвяченому питанням енергетичного підходу в теорії е-іонних зіткнень для іонів у плазмі, для перерізу діелектронного захоплення дисертант приводить аналітичне продовження сили е-іонного зіткнення. Формули (2.90,93) було б корисно пояснити більш детально.

По-шосте, отримані дисертантом дані мають важливе значення для задач створення лазерних систем нового класу з плазмою багатозарядних іонів як активним середовищем. Корисно було б знати його точку зору щодо спектроскопії та кінетики цих систем, пошуку кращих кандидатів на реалізацію лазерного ефекту.

По-сьоме, автор використовує як мінімум три системи фізичних одиниць, зокрема, атомні, релятивістські та кулонові. Є стилістично не зовсім коректні вирази. Дуже багато скорочень, особливо англійських.

Наведені зауваження носять виключно характер рекомендацій і ні в якому разі не стосуються основних положень цієї інноваційної та надто важливої з практичної точки зору роботи.

Висновок. З точки зору поставленої мети та вирішених задач, наукової новизни, теоретичної та практичної значущості отриманих результатів дисертаційна робота Буяджи В.В. є завершеною роботою, в якій вирішена наукова проблема, а саме розвинутий новий релятивістський енергетичний підхід до опису процесів зіткнень, який дозволяє розв'язувати нові високоенергетичні класи задач фізики атомів, плазми, лазерів тощо.

Зміст автореферату відповідає основним положенням роботи, які досить повно опубліковані у відомих наукових журналах (особливо слід відзначити значну кількість публікацій у міжнародних фахових журналах та виданнях, у т.ч. видавництва Springer, з досить високим імпаکت-фактором, що входять до міжнародних науково-метричних баз) і апробовані на відомих, як правило, міжнародних кон-

ференціях та конгресах. Результати роботи Буяджи В.В. можуть бути використані у наукових програмах досліджень низки державних установ, у тому числі, університетів, інститутів МОН України, НАН України, а також організацій, де займаються розв'язанням широкого кола задач атомної, молекулярної, лазерної фізики, фізики плазми, астрофізики, радіоастрономії тощо.

Дисертаційна робота Буяджи Василя Володимировича «Релятивістська спектроскопія за рахунок зіткнень в електрон- та іон-атомних системах: Енергетичний підхід» за своїми показниками щодо актуальності, новизни, науковою цінністю та ін. відповідає вимогам пунктів 9-14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів від 24.07.2013 р. № 567, а автор роботи, Буяджи Василь Володимирович, без сумніву заслуговує на присудження наукового ступеню доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Офіційний опонент:

Професор

кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики

Сумського державного університету

доктор фізико-математичних наук,

професор

Лопаткін Ю.М.

Підпис доктора фізико-математичних наук,
професора Лопаткіна Ю.М засвідчую:

Лопаткін Ю.М.
Михайлюк Дмитро І.
Косович Сергій В.

