

## ВІДГУК

офіційного опонента Лазура Володимира Юрійовича  
на дисертацію Роман Вікторії Іванівни  
“Автоіонізаційні та резонансні явища при електронному збудженні  
атома рубідію”,  
представленої на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка

### **Актуальність теми дисертаційного дослідження.**

Суть процесу автоіонізації полягає в спонтанному розпаді надзбудженої атомної системи на іон і вільний електрон. Відповідні автоіонізаційні стани утворюються при одночасному збудженні двох і більше електронів валентної оболонки або одного електрона з субвалентної оболонки. Саме останній процес має місце в атомах лужних металів.

При електронному збудженні субвалентних оболонок в атомах лужних металів автоіонізацію супроводжують також інші процеси. Зокрема, це обмінна та конфігураційна взаємодії, каскадні переходи, утворення негативних іонів, іонізація, взаємодія після зіткнення. Саме тому дослідження явища автоіонізації мають важливе фундаментальне значення для поглиблення наших знань про природу та перебіг внутрішньоатомних процесів.

З іншого боку, автоіонізація, як непрямий процес іонізації, може суттєво впливати на формування зарядового стану, енергетичного балансу та спектрального розподілу випромінювання різних типів плазмових середовищ, до складу яких входять атоми лужних елементів. Для кількісного опису процесів у таких плазмових середовищах необхідні дані про енергії та перерізи збудження автоіонізаційних станів, ймовірності їх каналів розпаду, кратності утворених іонів різних хімічних елементів. У цьому полягає *прикладне значення* досліджень автоіонізації.

З усієї групи лужних металів рубідій залишався донедавна єдиною атомною системою, для якої практично були відсутні дані з класифікації автоіонізаційних станів, їх енергій і перерізів збудження. Особливо це стосується характеристик процесів розсіяння у припороговій області енергій, де найбільш ефективно проявляються ефекти резонансного збудження та взаємодії після зіткнення. Така ситуація унеможлилювала загальний аналіз принципів особливостей та основних закономірностей процесу автоіонізації в атомах лужних металів, а також ускладнювала подальший розвиток теоретичних досліджень таких процесів за участю

багатоелектронних атомних систем. Все це зумовило вибір атома рубідію як основного об'єкту для дослідження процесів утворення і розпаду автоіонізаційних станів.

Актуальність проблематики досліджень підтверджується також тим, що вони виконувалися у рамках трьох науково-дослідницьких програм, затверджених розпорядженням Бюро відділення фізики і астрономії НАН України: “Експериментальне та теоретичне дослідження складних атомів та молекул при збудженні електронним ударом” – 2009-2010 рр., № Держреєстрації 0109U005602; “Процеси взаємодії моноенергетичних електронів з багатоелектронними атомними системами” – 2009-2013 рр., № Держреєстрації 0109U001499; “Фізичні процеси та явища при взаємодії електронів і фотонів з речовиною в газовому та конденсованому станах” – 2012-2016 рр., № Держреєстрації 0112U002079.

Достовірність одержаних у дисертації результатів забезпечувалася сучасним рівнем наявної у відділі електронних процесів ІЕФ НАНУ експериментальної бази, правильним вибором методики досліджень, відтворюваністю результатів та їх підтвердженням теоретичними розрахунками.

#### **Аналіз змісту дисертації.**

Дисертація Роман В.І. становить собою рукопис, який складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 122 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 132 сторінки, з яких 116 є основним текстом дисертації. Робота містить 41 рисунок і 4 таблиці.

У *вступі* обґрунтовано актуальність та доцільність теми досліджень, чітко сформульовано мету, детально визначені завдання, предмет і методи досліджень, показана наукова новизна та практична цінність одержаних результатів, наведено відомості про апробацію роботи й особистий внесок автора. Проведено стислий критичний аналіз сучасного стану експериментальних і теоретичних досліджень резонансних та автоіонізаційних явищ у процесах збудження атомів електронним ударом.

У *першому розділі* автором розглянуто основні засади експериментального дослідження явища автоіонізації та визначено найбільш оптимальну методику і експериментальні умови досліджень. Представлено принцип роботи, конструкцію та параметри монохроматора первинного електронного пучка, джерела атомного пучка, аналізатора енергій розсіяних та ежектованих електронів, систем вакуумного помпування, електроживлення та детектування корисного сигналу. Детально описано методику налаштування апаратури, проведення вимірів та обробки результатів, можливі джерела невизначеностей та їх граничні значення в проведених дослідженнях.

*Другий розділ* дисертації присвячено результатам дослідження енергетичних спектрів розсіяних та ежектованих електронів атома рубідію в широкому діапазоні енергій зіткнення 15-600 еВ. У цьому ж розділі автором проаналізовано структуру спектрів, у яких виявлено 82 лінії, та енергетичну динаміку їх збудження. Зокрема, виявлено наявність резонансних процесів утворення автоіонізаційних станів у припороговій області енергій зіткнень. З використанням параметрів автоіонізаційних станів, отриманих групою дослідників з Вільнюського університету, автором проведено ретельний аналіз та інтерпретацію одержаних даних. Такий комплексний, експериментально-теоретичний підхід дозволив здійснити найбільш повну на даний час спектроскопічну класифікацію автоіонізаційних станів в атомі рубідію, визначити схему їх енергетичного розташування та каналів розпаду. У цьому ж розділі описано виявлений у дисертаційному дослідженні автоіонізаційний стан димеру рубідію.

*Третій розділ* містить результати аналізу енергетичних залежностей перерізів збудження (функцій збудження) автоіонізаційних станів атома рубідію. На основі розробленої методики обробки спектрів ежектованих електронів одержано функції електронного збудження для 17 автоіонізаційних станів. Відносні експериментальні дані з перерізів збудження пронормовано на  $R$ -матричні розрахунки, проведені в університеті Дрейка (м. Де-Мойн, Айова, США).

Аналіз загальної форми енергетичної залежності перерізів збудження дозволив автору цілком однозначно з'ясувати тип збуджуваного стану (квартет або дублет) і, тим самим, перевірити проведену спектроскопічну класифікацію автоіонізаційних станів, встановити енергетичне розташування резонансної структури та наявність процесів каскадного заселення. Порівняння з теоретичними розрахунками перерізів збудження автоіонізаційних станів дозволило автору встановити відповідність між спостережуваною припороговою резонансною структурою та процесами формування і розпаду короткоживучих станів негативних іонів рубідію. Показано, що виявлена припорогова резонансна структура в перерізах розсіяння електронів на атомі рубідію зумовлена в основному утворенням резонансів Фешбаха.

Використання в даній роботі методу електронної спектроскопії та моноенергетичного первинного електронного пучка для збудження атомів дозволило автору ретельно дослідити інший суто кореляційний процес – ефект взаємодії після зіткнення, якому присвячено *четвертий розділ* дисертації.

Слід зазначити, що цей ефект був добре відомий і раніше, але досліджувався в основному для інертних газів та інших складних атомних

систем, в яких роль резонансних процесів у порівнянні з прямим збудженням не була такою значною, як у важких атомах лужних металів. З'ясування впливу резонансного збудження автоіонізаційних станів на енергетичну поведінку зсуву відповідних ліній у спектрах ежектованих електронів атома рубідію якраз і було одним із основних завдань автора при дослідженні ефекту взаємодії після зіткнення. За розробленою методикою вимірів у дисертаційній роботі досліджені залежності енергетичного зсуву ліній від енергії зіткнень для автоіонізаційних станів  $(4p^5 5s^2)^2P_{3/2,1/2}$ . Встановлено асимптотичний характер цих залежностей у діапазоні енергій від 0 до 5 еВ над порогом збудження та показано їх відповідність класичній моделі ефекту взаємодій після зіткнення. Досліджено також загальні закономірності і відмінності енергетичної поведінки зсуву ліній у спектрах атома рубідію та інших лужних металів натрію, калію і цезію. Зокрема, встановлено прямий зв'язок ефекту взаємодії після зіткнення з резонансним збудженням автоіонізаційних станів у припороговій області енергій зіткнення.

У *п'ятому розділі* дисертації, який є найбільшим за обсягом, представлено дані з повного перерізу автоіонізації атома рубідію. З'ясована роль окремих конфігурацій у формуванні максимального значення та енергетичної залежності перерізу автоіонізації. Порівняння цих даних з перерізом повної однократної іонізації дозволило встановити енергетичну залежність абсолютного перерізу прямої іонізації атома рубідію електронним ударом. Слід окремо відмітити проведені дисертантом розрахунки перерізів збудження та іонізації субвалентних електронних оболонок атома рубідію, що дозволило визначити відносний внесок кожної із них у формування повного перерізу однократної іонізації.

У *висновках* автор підсумовує основні результати дисертаційної роботи. Важливо підкреслити, що вони є оригінальними і одержані вперше у світовій практиці.

Аналізуючи дисертаційну роботу Роман В.І. «Автоіонізаційні та резонансні явища при електронному збудженні атома рубідію» щодо змісту та рівня основних наукових результатів, можна впевнено стверджувати, що вони мають пріоритетний характер і представляють значну наукову цінність для розвитку фундаментальних знань з внутрішньоатомних процесів та електрон-атомної взаємодії. До найважливіших практичних результатів слід віднести одержані нові дані стосовно абсолютних перерізів збудження автоіонізаційних станів, станів негативних іонів та перерізів автоіонізації.

Насамкінець зверну увагу на деякі зауваження щодо змісту роботи.

1. У вступі автор приводить досить стислий огляд стану теоретичних та експериментальних досліджень за тематикою роботи, а вже потім, на початку кожного із розділів подає більш розгорнутий аналіз літературних джерел. На

мою думку, доцільніше було б виділити огляд стану досліджень окремим розділом.

2. Більшу увагу слід було приділити стану експериментальних та теоретичних досліджень процесів електронного збудження молекули  $Rb_2$ .

3. У третьому та п'ятому розділах доцільно було провести порівняльний аналіз одержаних результатів для рубідію з аналогічними даними для інших лужних металів, зокрема, для калію та цезію, як це було зроблено у четвертому розділі дисертації.

4. Оскільки частина результатів дисертаційної роботи отримана автором за допомогою теоретичних методів дослідження (спотворених хвиль, бінарних зіткнень, Кулон-Борна і т. д.), то варто було ретельніше розглянути основні фізичні засади цих методів.

Вказані зауваження однак не впливають на загальне хороше враження від роботи та на високу оцінку її основних результатів. Одержані результати у повній мірі висвітлені в 9 наукових статтях, опублікованих у вітчизняних і закордонних фахових виданнях та в тезах доповідей багатьох міжнародних конференцій. Автореферат адекватно відображає зміст та основні положення дисертаційної роботи.

Вважаю, що дисертація Роман В.І. за обсягом виконаних досліджень, науковою і практичною цінністю отриманих результатів задовольняє усім вимогам “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року, №567, а Роман В.І. безумовно заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.04 – фізична електроніка.

Завідувач кафедри теоретичної фізики  
ДВНЗ “Ужгородський національний університет”  
доктор фізико-математичних наук, професор



Лазур В.Ю.

Підпис Лазура В.Ю. засвідчую:

Вчений секретар  
ДВНЗ “Ужгородський національний університет”  
кандидат технічних наук




Мельник О.О.