

УДК 539.186.188

О.О. Боровик

Інститут електронної фізики НАН України, 88017, Ужгород, вул. Університетська, 21
e-mail: sasha@aborovik.uzhgorod.ua

РЕЗОНАНСНЕ ЗБУДЖЕННЯ АВТОІОНІЗАЦІЙНИХ СТАНІВ АТОМІВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ ЕЛЕКТРОННИМ УДАРОМ

У роботі розглянуті основні результати досліджень процесів утворення та розпаду автоіонізаційних станів атомів лужних металів при електронно-атомних зіткненнях. Зокрема, приведені дані з динаміки збудження субвалентних оболонок в області енергій зіткнень від мінімального порогу до 600 еВ, з яких випливає, що в припороговій області енергій електронне збудження цих оболонок відбувається виключно через процес утворення резонансів негативних іонів. В області середніх значень енергії зіткнень для нижніх автоіонізаційних рівнів суттєву роль відіграють також каскадні процеси заселення, пов'язані з резонансним збудженням і наступним радіаційним розпадом верхніх рівнів. Шляхом порівняння з теоретичними розрахунками визначені абсолютні ефективні перерізи збудження автоіонізаційних станів та резонансів негативних іонів. Одержані абсолютні перерізи автоіонізації атомів лужних металів та визначений внесок автоіонізації як непрямого процесу в процес прямої іонізації електронним ударом.

Ключові слова: атом, іон, автоіонізація, резонанси, іонізація, ефективний переріз.

Вступ

Збудження одного електрона з субвалентної оболонки, або двох і більше електронів з валентної оболонки призводить до переходу атома в енергетичні стани, що розташовані вище потенціалу його іонізації. Такі стани є дуже нестабільними у часі і, як правило, розпадаються з утворенням однозарядного іона та вільного електрона. Вони одержали назву автоіонізаційних, а відповідний процес їх розпаду – автоіонізації атома.

Аналіз результатів попередніх досліджень автоіонізаційних процесів показує, що з широкою гамою різного типу експериментів найбільш плідними слід вважати спектроскопію фотопоглинання та електронну спектроскопію, поєднану з технікою атомних та електронних пучків, що перетинаються. Зокрема, достатньо повно було досліджено електронні автоіонізаційні спектри та спектри фотопоглинання атомів лужних та лужноземельних металів, інертних газів, а також найпростіших молекул (див. роботи [1-3] та посилання в них). У деяких випадках було здійснено спектроскопічну класифікацію ліній, зроблено оцінку перерізів збудження та часів життя

автоіонізаційних станів (АІС). У той же час ці результати показали, що для надійної інтерпретації даних та, особливо, для встановлення механізму утворення та розпаду АІС необхідні виміри енергетичних залежностей перерізів збудження (т.з. функції збудження (ФЗ)) біля порогу процесу з використанням моноенергетичних електронних пучків.

Дослідження автоіонізації атомів металів з використанням методу електронної спектроскопії були започатковані на кафедрі квантової електроніки за ініціати-ви **Івана Прохоровича Запісочного** ще на початку 70-х років минулого століття. Проведені за період 1975-80 рр. систематичні дослідження збудження зовнішньої p^6 оболонки в атомах лужно-земельних елементів виявили збільшення ефективності цього процесу в припороговій області енергій [4]. Саме ці результати, а також одержані на той час дані з енергетичних залежностей перерізів збудження автоіонізаційних рівнів, що розпадаються в оптичному каналі [5], дозволяли припустити, що припорогове збудження субвалентної p^6 оболонки в атомах лужних металів має мати виразний резонансний характер.

На це опосередковано вказували також дані з перерізів електронної іонізації цих металів [6, 7], де спостерігалось різке зростання перерізу в порозі збудження p^6 оболонки.

За ініціатииви І.П. Запісочного та І.С. Алексахіна на кафедрі квантової електроніки фізичного факультету УжДУ були розпочаті дослідження функцій збудження АІС атомів калію з використанням методу електронної спектроскопії. Ці роботи одержали свій подальший розвиток у відділі електронних процесів Ужгородського відділення ІЯД НАН України, де вперше для збудження АІС був використаний моноенергетичний електронний пучок та впроваджена автоматизована система детектування сигналу. Остання дала змогу виконувати математичну обробку електронних спектрів з метою визначення інтенсивності ліній.

На рис. 1 наведені результати цих досліджень для низькоенергетичних АІС ($3p^5 4s^2$) $^2P_{3/2}$, ($3p^5 3d(1P)4s$) 2P , ($3p^5 3d4s$) $^4P_{3/2}$, $^4D_{1/2}$ в атомі калію [8, 9]. Як бачимо, припорогове електронне збудження АІС дійсно має виразний резонансний характер, пов'язаний з утворенням станів негативного іона калію. Ці перші дані показали також недоліки в методиці вимірів, а саме, широкий крок у зміні енергії та невелику точність методу калібрування енергетичної шкали. Окремо постало питання визначення абсолютних значень ефективних перерізів збудження АІС. Це було зроблено шляхом нормування експериментальних відносних перерізів на дані теоретичних розрахунків [10]. Важливу роль у подальшому розвитку цих досліджень зіграла теоретична робота [11], де було ґрунтовно проаналізовано можливості методу R -матриці для розрахунку збудження субвалентної p^6 оболонки в атомах лужних металів, а також був визначений напрям експериментальних досліджень – важкі атоми лужних металів та використання у вимірах моноенергетичних електронних пучків.

Для проведення досліджень була суттєво модернізована експериментальна установка. Зокрема, в монохроматорі для попередження перефокусування пучка змінено вихідну лінзову систему. Також покращено колімацію атомного пучка,

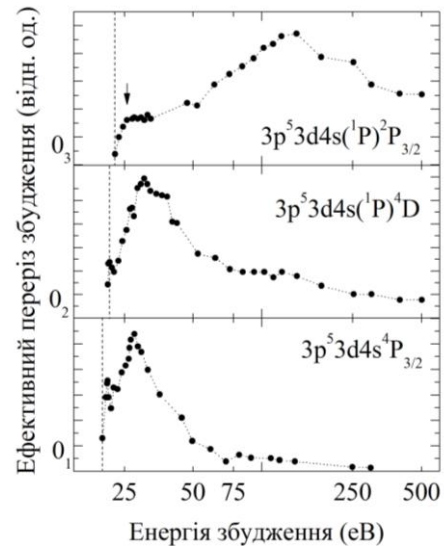


Рис. 1. Функції електронного збудження АІС атомів калію.

створено нову систему детектування сигналу та контролю за процесом вимірів, розроблено методику роботи з хімічно високоактивними рубідієм та цезієм. Також була налагоджена тісна співпраця з теоретичними групами Вільнюського університету (Литва) та університету Дрейка (США). Як результат, за період 2000-2012 рр. були проведені систематичні дослідження динаміки електронного збудження АІС для всієї групи лужних металів: від літію до цезію.

Експериментальна установка та методика проведення вимірів

На рис. 2 представлена блок-схема експериментальної установки для дослідження електронного збудження АІС атомів металів методом електронної спектроскопії [12]. Одним з найбільш відповідальних вузлів установки є джерело атомного пучка (рис. 3), яке мало забезпечувати стабільний пучок необхідної густини на протязі кількох десятків годин неперервної роботи і одночасно не впливати своїм магнітним полем на процес розсіювання в камері зіткнень.

Методика досліджень включала виміри спектрів електронів (автоіонізаційних) електронів для значень енергії первинних електронів від найнижчого порогу збудження до 600 еВ, їх математич

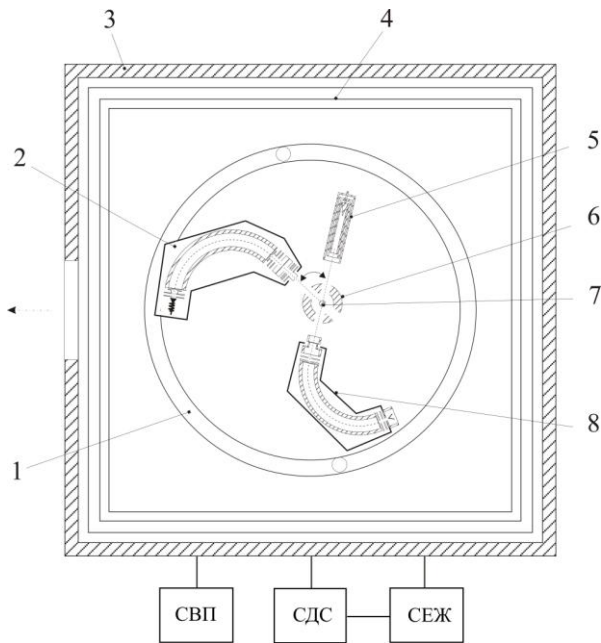


Рис. 2. Блок-схема експериментальної установки: 1- базовий фланець, 2, 8 – аналізатор та монохроматор електронів, 3 - вак. камера, 4 – екран, 5 - циліндр Фарадея., 6, 7 – камера та центр зіткнень, СВП, СДС, СЕЖ – системи pompування, детектування корисного сигналу та живлення.

ну обробку з метою визначення інтенсивності ліній, калібрування енергетичних шкал [13]. Для автоматичного нормування інтенсивності спектрів на струм первинного електронного пучка використовувався перетворювач “струм-частота”. Спектри вимірювались під “магічним” кутом спостереження $\theta=54.7^\circ$, що дозволяло, принаймні в першому наближенні, вважати ізотропним кутовий розподіл електронів і тим самим ототожнювати одержувані перерізи з повними ефективними перерізами збудження АІС [14].

Результати досліджень та їх обговорення

На рис. 4 представлені функції електронного збудження найнижчих АІС атомів лужних металів [13, 15-17]. Спільним для цих даних є наявність сильної резонансної структури в енергетичній області зразу за порогом збудження. Не важко також побачити, що в більшості випадків переріз резонансного збудження перевершує переріз прямого (потенційного) збудження як для дублетних, так і кватерних станів. Проведені методом R -

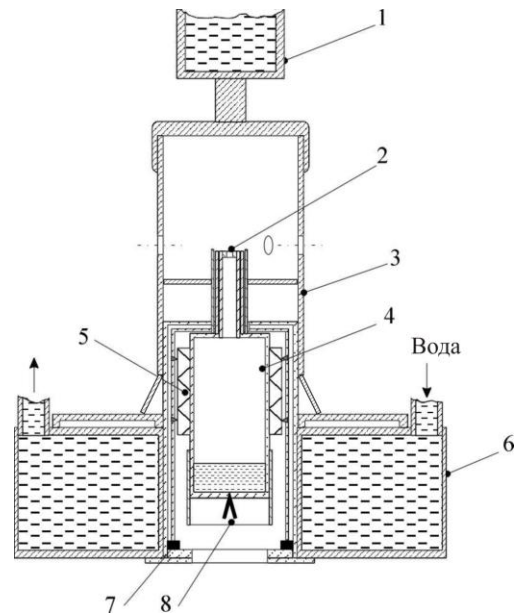


Рис. 3. Конструкція джерела атомного пучка: 1- охолоджувана пастка для парів металу, 2 – вихідний канал тиглю, 3 - камера зіткнень, 4 – тигель з досліджуваним лужним металом, 5 - нагрівач, 6- водяна сорочка охолодження, 7 - тефлонова ізоляційна перекладка, 8 – термопара.

матриці теоретичні розрахунки резонансної структури в межах похибки вимірів добре узгоджуються з експериментом, а також, і що особливо варто підкреслити, з розрахунками перерізів збудження в області великих енергій зіткнень, виконаних методами Борна та спотворених хвиль [13, 18].

В області проміжних енергій зіткнень (≈ 10 - 20 eV над порогом) на функціях збудження верхніх АІС спостерігається помітне зростання перерізу у вигляді широких максимумів (на рис. 3 позначені стрілками). Як показав теоретичний аналіз структури енергетичних рівнів, їх перерізів та часів життя, каскадний внесок в заселення АІС за рахунок радіаційних переходів не мав би перевершувати 3-4% [19, 20]. Значна величина спостережуваного зростання перерізу (до 100% для натрію) та його енергетична поведінка вказують на можливу присутність тут резонансних процесів, зокрема, резонансного збудження верхніх каскадних рівнів. Як вже зазначалось вище, перерізи однократної іонізації атомів калію, рубідію та цезію виявляють сильний вплив розпаду АІС, що утворюються при збудженні зовнішньої p^6

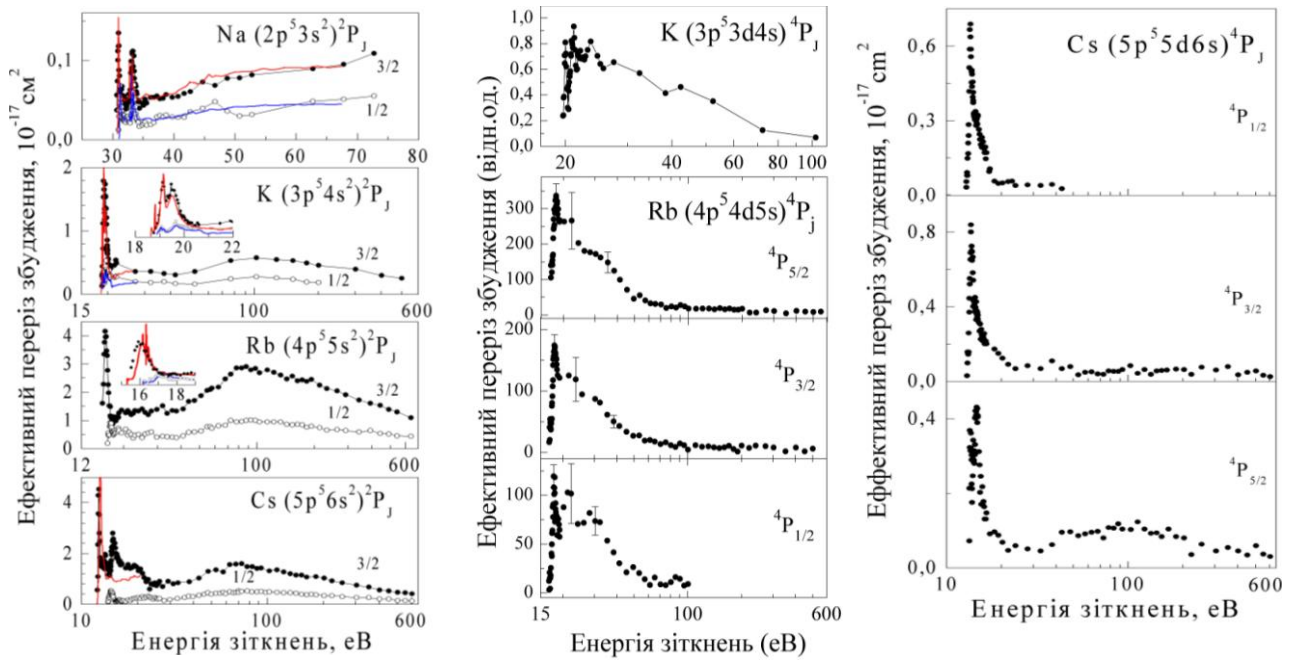


Рис. 4. Функції електронного збудження дублетних та кватретних АІС атомів лужних металів.

оболонки [6, 7]. Безпосередньо визначити цей автоіонізаційний внесок (відносний або абсолютний) традиційними експериментальними методами досліджень іонізації практично неможливо через те, що кінцеві продукти процесів іонізації і автоіонізації (електрони та іони) є нерозрізненими за своїми параметрами. Оскільки на даний час відсутні надійні теоретичні методи розрахунку парціальних перерізів іонізації, не має змоги визначити автоіонізаційний внесок і шляхом віднімання таких перерізів від експериментального повного перерізу іонізації [21].

З іншого боку, повна інтенсивність автоіонізаційного електронного спектру для даного значення енергії зіткнень та кута спостереження у випадку одноканального розпаду АІС характеризує властивість даного атома автоіонізуватись. Кількісною характеристикою цього процесу є так званий переріз збудження-автоіонізації, або переріз автоіонізації атома [22]. У даній роботі, шляхом знаходження повної інтенсивності автоіонізаційних спектрів, одержаних для різних значень енергії зіткнень, був визначений абсолютний переріз автоіонізації та його енергетична залежність для всіх досліджених атомів [23-26]. Приклади функцій автоіонізації атомів літію, натрію, калію,

рубідію та цезію наведені на рис. 5. Порівняння цих даних з функціями збудження АІС на рис. 4 показує, що резонансні процеси та загальна динаміка збудження дублетних і кватретних АІС повністю визначають енергетичну залежність перерізу автоіонізації.

При дослідженні припорогового електронного збудження АІС необхідно брати до уваги існування ефекту взаємодії після зіткнення (ВПЗ), тобто електростатичної взаємодії повільного розсіяного електрона з автоіонізаційним електроном.

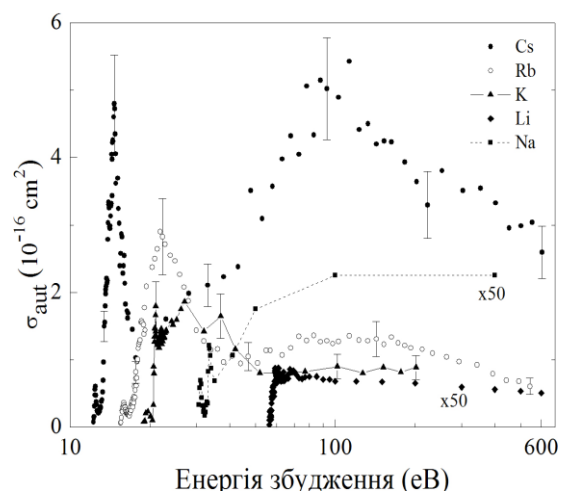


Рис. 5. Перерізи автоіонізації σ_{aut} атомів лужних металів.

Наслідком цього ефекту є не тільки енергетичний зсув лінії в електронному спектрі, але і зміна її форми [27]. В останньому випадку, без належного врахування цієї зміни, процедура визначення інтенсивності лінії може виявитись некоректною. Аналіз одержаних електронних спектрів у припороговій області енергій зіткнув виявив існування ефекту ВПЗ для всіх досліджених атомів [28-31]. Максимальне значення енергетичного зсуву 300 меВ спостерігалось для лінії, що відповідає розпаду найнижчого АІС $(1s2s^2)^2S_{1/2}$ в атомі літію [28]. Мінімальне значення ВПЗ зсуву 60 меВ було визначено для ліній $(2p^53s^2)^2P_{3/2}$, $(4p^55s^2)^2P_{3/2}$ в спектрах атомів натрію [29] та рубідію [31].

Окремо слід зупинитися на динаміці ефекту ВПЗ у припороговій області енергій. На рис. 6 наведені енергетичні залежності ВПЗ-зсуву ліній АІС $(2p^53s^2)^2P_{3/2}$ для натрію та $(3p^54s^2)^2P_{3/2}$ для калію. Як бачимо на відміну від степеневі залежності $\varepsilon = kW(E_1)^{-0.5}$, що впливає з класичної моделі ВПЗ (суцільна лінія), поведінка зсуву має складний характер. Її порівняння з енергетичною залежністю перерізу збудження σ відповідних станів вказує на існування певної кореляції між цими даними. Дійсно, енергетичний зсув набуває додатних значень (ежектований електрон збільшує свою енергію) лише в тих енергетичних областях, де на перерізі збудження відсутня резонансна структура. Наявність резонансу в перерізі відповідає від'ємному значенню зсуву ВПЗ (ежектований електрон зменшує свою енергію). Оскільки класична модель ВПЗ, яка ґрунтується суто на кулонівській взаємодії розсіяного і ежектованого електронів, не дає пояснення спостережуваному ефекту, нами була запропонована якісна модель, яка ґрунтується на базовому принципі формування резонансів негативних іонів – наявності в атомі сильного поляризаційного потенціалу [32]. Саме висока поляризаційна здатність лужних металів (α змінюється від 50 у літію до 350 у цезію) пояснює наявність сильних резонансів негативних іонів у перерізах збудження досліджених АІС (див. рис. 4). Розглянемо процес збудження та розпаду АІС у

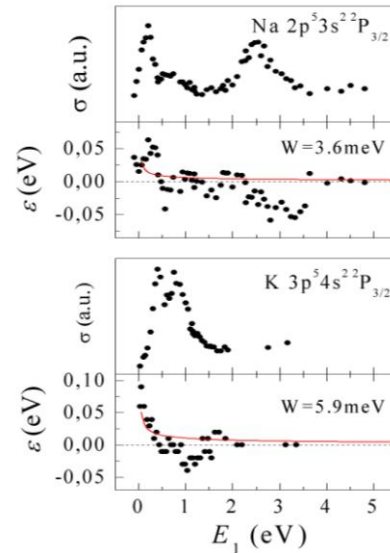
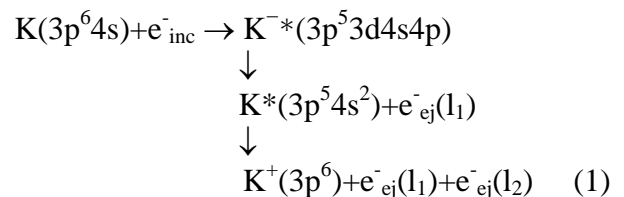


Рис. 6. Перерізи електронного збудження σ та зсув ВПЗ ε для АІС $n^5(n+1)s^2P_{3/2}$ атомів Na ($n=2$) та K ($n=3$).

припороговій області енергій на прикладі стану $3p^5 4s^2$ в атомі калію:



На першому етапі, внаслідок розпаду стану негативного іона K^- , атом калію знову переходить на збуджений автоіонізаційний рівень і утворюється повільний ежектований електрон з деяким значенням кутового моменту l_1 . До моменту розпаду автоіонізаційного рівня цей електрон знаходиться в полі, що є комбінацією відштовхувального відцентрового потенціалу $l_1(l_1+1)/2r^2$ та притягувального поляризаційного потенціалу $-\alpha/r^4$. Оскільки електронні переходи відбуваються, як правило, зі збільшенням кутового моменту [33], можна вважати, що $l_1 \geq 3$. У цьому випадку відцентровий бар'єр буде достатньо високим для утримання електрона в потенціальній ямі на деякій відстані r_0 . На другому етапі, після автоіонізації, поляризаційний потенціал $-\alpha/r^4$ змінюється на притягальний кулонівський потенціал $-1/r$. В цій ситуації обмін енергією між електронами $e^-_{ej}(l_1)$ і $e^-_{ej}(l_2)$ буде визначатися різницею $\Delta\varepsilon \approx \alpha/r^4 - 1/r_0$ (в першому наближенні), яка може бути додатною або

від'ємною залежно від положення точки r_0 по відношенню до точки перетину потенційних кривих початкового і кінцевого станів. Зроблені в роботі [30] оцінки показують, що перший мінімум зсуву $\Delta\epsilon$ (див. рис. 6) має бути спричинений резонансом, розташованим при енергії 19.11 eV. Саме при цій енергії знаходиться перший резонанс негативного іона калію в перерізі збудження стану $^2P_{3/2}$.

Важливим результатом проведених досліджень є також визначення порогів збудження та спектроскопічна класифікація метастабільних рівнів в атомах калію [34] та рубідію [35]. На початок цих досліджень в цьому питанні існувала неоднозначність як в енергетичному положенні, так і спектроскопічній класифікації таких рівнів. В даній роботі, для з'ясування цього питання були досліджені спектри енергетичних втрат розсіяних електронів при збудженні зовнішньої p^6 оболонки при енергіях зіткнень, близьких до очікуваних порогів збудження метастабільних станів. На рис. 7 представлено порівняння спектра

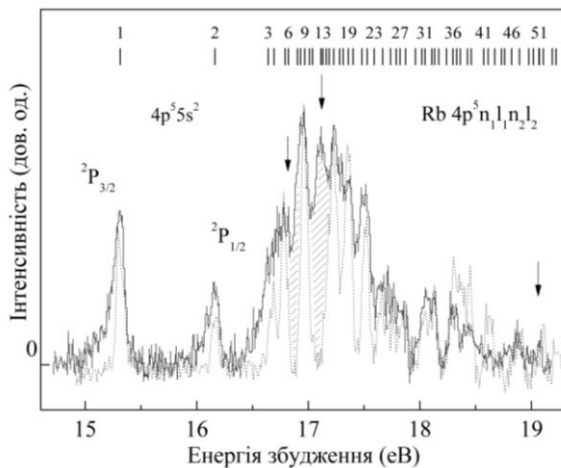


Рис. 7. Спектр енергетичних втрат (суцільна лінія) та спектр ежектованих (пунктир) електронів при збудженні станів $4p^5 n_1 n_2$ в атомі рубідію.

енергетичних втрат розсіяних електронів (суцільна лінія), та спектра ежектованих електронів (пунктир) атомів рубідію,

виміряних в одному експерименті при енергії зіткнень 25.5 eV. Як видно, областям спектру ежектованих електронів з мінімальною інтенсивністю (позначені стрілками) в спектрі втрат відповідають сильні максимуми. Така відповідність однозначно вказує на наявність у відповідних енергетичних діапазонах метастабільних по відношенню до автоіонізації станів. Проведені теоретичні розрахунки енергій, перерізів та швидкостей розпаду АІС в атомах рубідію [25] підтвердили даний висновок (див. таблицю 1).

Таблиця 1
Експериментальні E_{exp} та розраховані E_{cal} енергії метастабільних рівнів в атомах Rb

Лінія	E_{exp}	E_{cal}	Рівень
6	16.82;	16.463	$5s(^3P)5p^4D_{7/2}$
13	17.13;	17.097	$4d(^3F)5s^4F_{9/2}$
51	19.07	18.957	$5s(^3P)5d^4F_{9/2}$

Висновки

Представлені в даній роботі результати з резонансного збудження АІС атомів лужних металів електронним ударом дають підстави змінити цілий ряд існуючих фундаментальних уявлень про характер і роль ефектів міжелектронної кореляції в атомах. Зокрема, виявилось, що внаслідок визначальної ролі поляризаційної взаємодії ці ефекти є суттєвими навіть у таких системах як лужні метали, де здавалось би заздалегідь можна виділити лише одну "активну" частинку слабозв'язаний валентний електрон. Виявилось також, що кореляційні ефекти багаторазово підсилюються в області припорогових енергій під впливом динаміки процесу взаємодії, зокрема, завдяки зв'язку поляризаційного потенціалу розсіювання з кореляційною взаємодією та відповідним потенціалом в атомі (утворення короткоживучих станів негативного іона в системі електрон-лужний атом).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pejcev V. *et al.* High-resolution ejected-electron spectrum of caesium vapour autoionising levels excited by 30 to 400 eV electrons. *J. Phys. B.* – 1977. – V.10, – №14. – С. 2935.
2. Hasted J.B. *Electron Scattering Spectro-*

- scopy. *Contemp. Phys.* – 1973. – V.14, – №4. – С. 357.
3. King G.C. in “Electron-molecule scattering and photoionization”. Edited by P.G. Burke and J.B. West (Plenum Publishing Corporation), – 1988, – P. 99.
 4. Боровик А.А. Разработка методики, аппаратуры и исследование электронных спектров автоионизационных состояний атомов при электронно-атомных столкновениях. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. Ужгород, – 1981. – 176 с.
 5. Алексахин И.С., Богачев Г.Г., Запесочный И.П., Угрин С.Ю. Экспериментальное исследование радиационного распада автоионизационных состояний щелочных и щелочноземельных элементов. *ЖЭТФ* – 1981. - Т. 53. - С. 2187.
 6. Zapesochny I.P., Aleksakhin I.S. Ionization of alkali metal atoms by slow electrons. - *Sov. Phys.: JETP.* – 1969. – V. 28. – P. 41.
 7. Nygaard K.J. Electron impact auto-ionization of heavy alkali metals // *Phys. Lett. A.* – 1975. – V. 51. – P. 171.
 8. Borovik A.A., Breza E.A., Zapesochny I.P. Investigation of the excitation functions of potassium autoionising levels by monoenergetic electrons. Abstracts of Contributed Papers XVI ICPEAC, New-York, USA, 1989. - P. 875.
 9. Боровик А.А., Бреза Э.А., Запесочный И.П. Возбуждение автоионизационных состояний калия и стронция моноэнергетическим электронным пучком. Тезисы докладов 4-го Всес. совещ. “Автоионизационные явления в ато-мах”, Москва, Россия, 1990, С. 18-21.
 10. Borovik A.A., Grum-Grzhimailo A.N., Zatsarinny O.I. Excitation of potassium autoionising state $3p^5 4s^2 \text{P}_{3/2}$ by electrons: experiment and theory. Abstracts of Contributed Papers XVIII ICPEAC, Aarhus, Denmark, 1993. - P.168.
 11. Grum-Grzhimajlo A.N., Bartschat K. Excitation of the $3p^5 4s^2 \text{P}$ autoionizing state in potassium by electron impact at low energies: an *R*-matrix calculation // *J. Phys. B.* – 2000. – V. 33. – P. 1843.
 12. Borovik A.A. Measurements of excitation functions for non-radiatively decaying autoionizing states // *Ukr. Phys. J.* – 2000. – V. 45. – P. 1270.
 13. Borovik A.A. *et al.* Electron impact excitation of the $(3p^5 4s^2)^2 \text{P}_{3/2,1/2}$ autoionizing states in potassium // *J. Phys. B.* – 2005. – V. 38. – P. 1081.
 14. Berezhko E.G., Kabachnik N.M. Theoretical study of inner-shell alignment of atoms in electron impact ionisation: angular distribution and polarisation of x-rays and Auger electrons // *J. Phys. B.* - 1977. – V. 10. – P. 2467.
 15. Borovik A.A., Krasilinec V.N. Electron impact excitation functions of autoionizing states in lithium atoms // *J. Phys. B.* – 1999. – V. 32. – P. 1941.
 16. Borovik A., Zatsarinny O., Bartschat K. Near-threshold electron-impact excitation of the $(2p^5 3s^2)^2 \text{P}_{3/2,1/2}$ autoionizing states in sodium // *J. Phys. B.* – 2008. – V. 41. – P. 035206.
 17. Borovik A. *et al.* The $4p^6$ autoionization cross section of Rb atoms excited by low-energy electron impact // *J. Phys. B.* – 2012. – V. 45. – P. 045204.
 18. Borovik A., Zatsarinny O., Bartschat K. Resonance effects in electron and photon impact excitation of the p^6 subvalence subshell in alkali atoms // *J. Phys. B.* – 2009. – V. 42. – P. 044010.
 19. Borovik A., Kupliauskiene A., Zatsarinny O. Excitation cross sections and spectroscopic classification of autoionizing levels in cesium atoms // *J. Phys. B.* – 2011. – V. 44. – P. 145203.
 20. Kupliauskiene A. *et al.* The role of cascade processes in electron-impact excitation of the $(3p^5 4s^2)^2 \text{P}_{3/2,1/2}$ autoionizing levels in potassium // *J. Phys. B.* – 2006. – V. 39. – P. 5912.
 21. Lukomski M. *et al.* Electron-impact ionization cross section out of the ground and $6 \text{ } ^2\text{P}$ excited states of cesium // *Phys. Rev. A.* - 2006. – V. 74. – P. 032708.
 22. Mitnik D. *et al.* Excitation-autoionization through $3d-4l$ inner-shell excitation in Cu- to Kr-like ions and the effect on fractional-ion-abundance balance in coronal plasmas // *Phys. Rev. A.* - 1994. - V. 50. - P. 4911.

23. Боровик А.А. Сечение автоионизации атомов лития при возбуждении электронным ударом. *Опт. Спектр.* – 2010. – Т. 109. - № 3. – С. 355.
24. Боровик А.А. Сечение автоионизации атомов калия при возбуждении электронным ударом // *ЖТФ.* – 2012. – Т. 82. - вып. 8. – С. 18.
25. Borovik A., Roman V., Kupliauskiene A. The $4p^6$ autoionization cross section of Rb atoms excited by low-energy electron impact // *J. Phys. B.* – 2012. – V. 45. – P.045204.
26. Borovik A., Kupliauskiene A. The $5p^6$ autoionization cross section of cesium atoms: contribution to the single ionization by electron impact // *J. Phys. B.* – 2009. – V. 42. – P. 165202.
27. Kuchiev M.Yu., Sheinerman S.A. Resonant scattering with low-velocity outgoing charged particles // *J. Phys. B.* – 1988. – V. 21. – P. 2027.
28. Borovik A.A., Ogurtsov G.N. Excitation dynamics and post-collision interaction for lowest autoionizing states in Li and Li_2 excited by electron impact // *J. Phys. B.* – 2010. – V. 43. – P. 165203.
29. Borovik A.A., Ogurtsov G.N. The post-collision energy shift of the $(np^5(n+1)s^2)^2P_{3/2}$ lines in ejected-electron spectra of sodium ($n=2$) and caesium ($n=5$) atoms excited by electron impact // *J. Phys. B.* – 2010. – V. 43. – P. 045204.
30. Borovik A.A., Ogurtsov G. N. Dynamics of post-collision interaction in the near-threshold electron excitation of the $(3p^54s^2)^2P_{3/2,1/2}$ autoionizing levels in potassium // *J. Phys. B.* – 2009. – V. 42. – P. 105202.
31. Borovik A., Roman V., Ogurtsov G.N. The post-collision interaction effect in autoionizing spectra of alkali atoms excited by electron impact // *J. Phys. B.* – 2013. – V. 446. – P. 055203.
32. Месси Г. Отрицательные ионы. М.: Мир, 1979. – 454 с.
33. Fano U. Spectral Distribution of Atomic Oscillator Strengths // *Rev. Mod. Phys.* – 1968. – V. 40. – P. 441.
34. Borovik A.A., Rojas H., King G.C., Remeta E.Yu. Electron-impact excitation of potassium autoionizing levels in the near-threshold region // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 1999. – V. 32. – P. 4225.
35. Hrytsko V., Roman V., Kupliauskiene A., Borovik A. The $4p^6$ electron energy-loss spectrum of Rb atoms. Proc. 28-th Int. Conf. on Physics of Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC), Lanzhou, China, 2013, ID: 17243.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2012

O.O. Borovik

Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine,
88017, Uzhhorod, Universitetska Str., 21

RESONANCE EXCITATION OF AUTOIONIZING STATES IN ALKALI ATOMS BY ELECTRON IMPACT

In the work, the main results on excitation and decay processes of autoionizing states in alkali atoms are considered. As follows from the data on excitation dynamics of subvalence shells in an impact energy region from the lowest excitation threshold up to 600 eV, at threshold energies their electron excitation results exclusively from the formation of negative-ion resonances. At mean impact energies, the cascade population processes due to resonance excitation and subsequent radiative decay of the upper states play an essential role for the low-lying autoionizing states. By comparing with theoretical data, the absolute excitation cross sections for autoionizing states and negative-ion resonances were determined. The absolute autoionization cross sections as well as the autoionization contribution to the total single ionization cross section were also determined.

Keywords: atom, ion, autoionization, resonances, ionization, effective cross section.

А.А. Боровик

Институт электронной физики НАН Украины,
88017, Ужгород, ул. Университетская, 21
e-mail: sasha@aborovik.uzhgorod.ua

РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ АВТОИОНИЗАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

В работе рассмотрены основные результаты исследования процессов образования и распада автоионизационных состояний атомов щелочных металлов при электронно-атомных столкновениях. В частности, приведены данные по динамике возбуждения субвалентных оболочек в области энергий столкновений от минимального порога до 600 эВ, из которых следует, что в припороговой области энергий их электронное возбуждение происходит исключительно через процесс образования резонансов отрицательных ионов. В области средних энергий столкновений для нижних автоионизационных уровней существенную роль играют также каскадные процессы заселения, связанные с резонансным возбуждением и последующим радиационным распадом верхних уровней. Путем сравнения с теоретическими расчетами, определены абсолютные эффективные сечения возбуждения автоионизационных состояний и резонансов отрицательных ионов. Получены абсолютные сечения автоионизации атомов щелочных металлов и определен вклад автоионизации как непрямого процесса в процесс прямой ионизации электронным ударом.

Ключевые слова: атом, ион, автоионизация, резонансы, ионизация, эффективное сечение.