

УДК 539.184/186

PACS 34.80.Dp

DOI 10.24144/2415-8038.2018.43.81-88

В.О. Боровик<sup>1</sup>, І.І. Шафраньош<sup>1</sup>, О.О. Боровик<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Ужгородський національний університет, вул. Волошина, 54, 88000, Ужгород, Україна<sup>2</sup> Інститут електронної фізики НАН України, вул. Університетська, 21, 88017, Ужгород, Україна, e-mail: vladimir.borovik@uzhnu.edu.ua

## ПЕРЕРІЗИ АВТОІОНІЗАЦІЇ АТОМІВ ЦЕЗІЮ ТА БАРІЮ ПРИ ЗБУДЖЕННІ 5p<sup>6</sup> ОБОЛОНКИ ЕЛЕКТРОННИМ УДАРНОМ

Експериментально одержано перерізи автоіонізації атомів цезію і барію при збудженні 5p<sup>6</sup> оболонки електронами в діапазоні енергій від першого автоіонізаційного порога до 600 еВ. Дані отримані шляхом визначення сумарної інтенсивності ліній в електронних спектрах, що утворюються при розпаді атомних автоіонізаційних станів 5p<sup>5</sup>n<sub>1</sub>l<sub>1</sub>n<sub>2</sub>l<sub>2</sub> у цезію і 5p<sup>5</sup>n<sub>1</sub>l<sub>1</sub>n<sub>2</sub>l<sub>2</sub>n<sub>3</sub>l<sub>3</sub> у барію. Поведінка перерізів характеризується наявністю структури у вигляді вузьких максимумів у припороговій області 12-23 еВ і широкого максимуму поблизу 100 еВ. Максимальні значення перерізів складають 4.2·10<sup>-16</sup> см<sup>2</sup> для цезію і 6.7·10<sup>-16</sup> см<sup>2</sup> для барію. Проведено аналіз процесів, які обумовлюють величину і енергетичну залежність одержаних перерізів автоіонізації.

**Ключові слова:** електрон, цезій, барій, підоболонка, стан, конфігурація, автоіонізація, поперечний переріз.

### Вступ

Збудження і наступний електронний розпад автоіонізаційних станів (АІС) або т.зв. процес "збудження-автоіонізація" призводить до збільшення перерізу іонізації атомної системи (атом, іон) і тим самим змінює зарядовий склад і температуру як лабораторної, так і астрофізичної плазми [1, 2]. Роль автоіонізації стає особливо суттєвою при збудженні зовнішніх замкнутих невалентних електронних оболонок [3]. Так, електронний розпад АІС  $np^5n_1l_1n_2l_2$  і  $np^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$  дає основний внесок в переріз іонізації лужних атомів К ( $n = 3$ ), Rb ( $n = 4$ ), Cs ( $n = 5$ ) [4–6] і лужноземельних атомів Ca ( $n = 3$ ), Sr ( $n = 4$ ) і Ba ( $n = 5$ ) [7, 8].

Методика розглянутих вище, а також інших відомих до теперішнього часу експериментальних досліджень електронної іонізації базується, як правило, на вимірі повного числа іонів  $N^+ = N^+_{\text{ion}} + N^+_{\text{aut}}$ , утворених в області взаємодії атомного та електронного пучків [9]. Оскільки в таких вимірах іонізаційна  $N^+_{\text{ion}}$  і автоіонізаційна  $N^+_{\text{aut}}$  компоненти не розрізняються, то вплив автоіонізації виявляється як аномальне збільшення повного іонного струму в області порога збудження тієї чи

іншої електронної оболонки. Інтегральний характер таких даних дозволяє приблизно оцінити тільки відносну величину автоіонізаційного внеску. В той же час, як показали дослідження збудження 3p<sup>6</sup> оболонки в атомі калію [10], виміри електронних автоіонізаційних спектрів в широкому діапазоні енергій зіткнень і визначення їх повної інтенсивності дозволяє отримати з прийнятною точністю не тільки абсолютне значення автоіонізаційного внеску (тобто переріз процесу "збудження-автоіонізація" або далі "переріз автоіонізації"), але і його енергетичну поведінку. Ця методика була використана в роботі [11] для дослідження перерізу автоіонізації атома цезію в обмеженій енергетичній області від порогу збудження 5p<sup>6</sup> оболонки до 17 еВ.

Відомо, що наявність у лужноземельних атомів замкнутої валентної оболонки робить процеси їх збудження і іонізації в цілому набагато складнішими, ніж у подібних за структурою внутрішніх електронних оболонок атомів лужних металів [1]. З метою пошуку закономірностей і відмінностей перебігу автоіонізаційних процесів в цих двох групах атомів, цікавою є задача порівняння їх

перерізів автоіонізації. Дослідження останніх для атомів лужноземельної групи до останнього часу не проводилися.

В даній роботі перерізи автоіонізації атомів цезію та барію при збудженні електронним ударом досліджено в діапазоні енергій зіткнень від порогів збудження  $5p^6$  оболонки до 600 еВ.

### Апаратура і методика вимірів

Виміри електронних автоіонізаційних спектрів атомів цезію і барію проведені на експериментальній установці, докладно описаній раніше [12, 13]. До складу електронного спектрометра входили джерело первинного електронного пучка, аналізатор енергій електронів і джерело пучка нейтральних атомів. Для енергетичного аналізу розсіяних і автоіонізаційних електронів застосовувався  $127^\circ$ -ний електростатичний циліндричний дефлектор з енергетичною і кутовою роздільною здатністю 0.07 еВ і  $3^\circ$  відповідно. Як джерело первинних електронів використовувалася п'яти електродна гармата з довгофокусною трьох лінзовою системою [14]. Моноенергетичність електронного пучка була не гірше 0.4 еВ і оцінювалася за шириною піка пружного розсіювання в спектрах втрат розсіяних електронів. Похибки шкал енергій первинних і автоіонізаційних електронів становили  $\pm 0.1$  еВ і  $\pm 0.05$  еВ відповідно.

Електронні автоіонізаційні спектри вимірювалися для різних значень енергії електронного пучка, починаючи з порогів збудження оболонки  $5p^6$ , рівних 12.31 еВ (Cs) [15] і 15.61 еВ (Ba) [13], до 600 еВ. Мінімальний крок зміни енергії становив 0.1 еВ у припороговій області. Для мінімізації впливу анізотропії кутового розподілу автоіонізаційних електронів, виміри проводилися під "магічним" кутом спостереження  $54.7^\circ$  [16]. Приклади електронних автоіонізаційних спектрів атомів цезію і барію представлені на рисунках 1, 2.

Порівняння спектрів атома Cs показує, що при низьких енергіях зіткнень їх повна інтенсивність визначається групами ліній 2-18 та 25-41, більшість з яких відповідає електронному розпаду дипольно-заборонених АІС  $5p^5n_1l_1n_2l_2$  [18]. Висока інтенсивність лінії 1, що відповідає розпаду стану  $(5p^56s^2) \ ^2P_{3/2}$ , вказує на його

визначальну роль у формуванні перерізу автоіонізації у всьому дослідженому діапазоні енергій зіткнень.

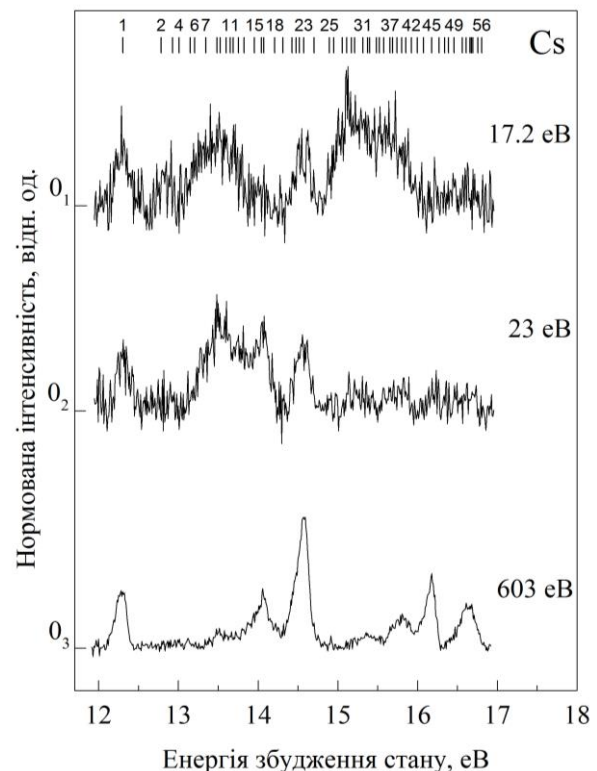


Рис. 1. Спектри ежектованих електронів атома Cs для різних значень енергії зіткнень. Нумерація ліній згідно роботи [17].

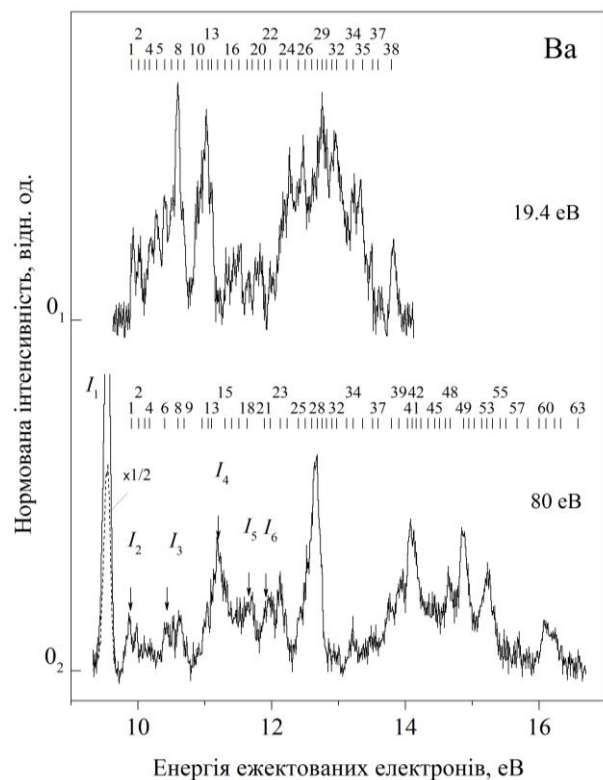


Рис. 2. Спектри ежектованих електронів атома Ba для різних значень енергії зіткнень. Нумерація ліній згідно роботи [13].

з аналізу представлених на рис. 2 спектрів атома Ba випливає, що повна

інтенсивність спектра при енергії зіткнень 19.4 еВ в основному визначається групами ліній 1-13 та 22-38. Згідно спектроскопічної класифікації ліній [13], більшість з зазначених ліній відповідає розпаду АІС  $5p^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$  з порогами збудження нижче 19.4 еВ і утворених внаслідок дипольно-заборонених переходів з основного стану атома. Спектр при 80 еВ має більш складну структуру, оскільки містить крім атомних ліній 1-63, також лінії I<sub>1</sub>-I<sub>6</sub>, які утворюються при розпаді іонних АІС  $5p^5n_1l_1n_2l_2$  з порогами збудження вище 21 еВ. Найбільш інтенсивні лінії 23, 28, 39-41, 49, 53, 60 відповідають розпаду атомних дипольно-дозволених АІС [13].

Відповідно до методики [10, 11], перерізи автоіонізації атомів цезію та барію визначалися як приведена до одиниці струму первинного електронного пучка сума інтенсивностей ліній, що відповідають розпаду атомних АІС  $5p^5n_1l_1n_2l_2$  (Cs) і  $5p^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$  (Ba) спостережуваних в спектрах, вимірюваних для різних значень енергії зіткнень. В спектрах барію іонні лінії I<sub>1</sub>-I<sub>6</sub> виключалися з розгляду. У випадку атома барію слід також зазначити одну особливість застосування методики [10, 11]. Наявність в барію двоцвалентної s-оболонки знижує поріг збудження іонних АІС до 21 еВ, що створює для високоенергетичних атомних станів  $5p^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$  додатковий канал електронного розпаду з утворенням іонних АІС  $5p^5n_1l_1n_2l_2$ . Як було показано раніше [13], саме цей канал розпаду відповідальний за незначну інтенсивність або повну відсутність в спектрах ліній, пов'язаних з розпадом АІС з енергетичними порогами вище 22 еВ. Таким чином, при енергіях зіткнень вище 22 еВ одержуваний переріз автоіонізації атома барію буде свідомо менше повного перерізу процесу "збудження-автоіонізація". Однак, як показав порівняльний аналіз повного перерізу іонізації і перерізу двократно іонізації атома барію [8], в зазначеній області енергій частка даного каналу розпаду в повному перерізі автоіонізації не повинна перевищувати 5%.

З урахуванням статистичної похибки вимірювання інтенсивності ліній в спектрах і флуктуацій експериментальних умов, повна відносна помилка у визначенні перерізів автоіонізації не перевищувала

30% в області до 7 еВ вище порогів збудження оболонки  $5p^6$  і становила 25% при більш високих енергіях зіткнень. Отримані у відносних одиницях перерізи автоіонізації нормувалися на розраховані абсолютні значення перерізів збудження станів  $(5p^56s^2)^2P_{3/2}$  (лінія 1 на рисунку 1) [19] і  $(5p^55d6s^2)^3D_1$  (лінія 28 на рисунку 2) [13] при енергії зіткнень 600 еВ.

### Результати й обговорення

На рис. 3 наведені одержаний в даній роботі переріз автоіонізації атома Cs (а), а також його порівняння з перерізом однократно іонізації електронним ударом (б) [20]. Як можна бачити, має місце добре узгодження перерізів як за положенням, так і за величиною в області енергій вище порогу збудження  $5p^6$  оболонки при 12.31 еВ. Слід зазначити, що резонансна ділянка перерізу автоіонізації пов'язана виключно зі збудженням рівнів, що розташовані між 12.3 і 17.0 еВ [11]. Широкий максимум приблизно при 100 еВ (а) відображає високу ефективність збудження дублетних рівнів в конфігурації  $5p^55d6s$ .

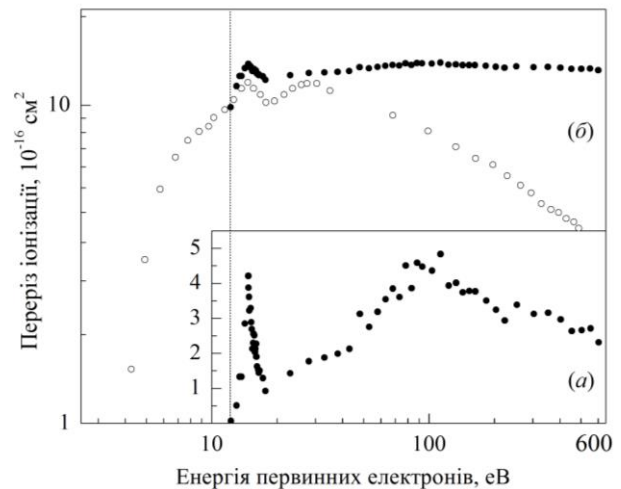


Рис. 3. Переріз автоіонізації атома Cs (а) і його порівняння (б) з перерізом однократно іонізації електронним ударом [20]. Вертикальною лінією позначено поріг збудження  $5p^6$  оболонки при 12.31 еВ [15].

На рисунку 4 (а) представлено переріз автоіонізації атомів барію в діапазоні енергій зіткнень 10-600 еВ. Як видно, в припороговій області енергій 15.6-22.7 еВ поведінка перерізу носить виражений резонансний характер. Ця ділянка показана на вставці, де чітко видно "тонку" структуру у вигляді максимумів *a*, *b*, *c* при енергіях 17.4, 19.6 і 21.4 еВ відповідно. Переріз досягає свого максимального

значення  $6.7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  при енергії 17.4 еВ (максимум *a*). Після 40 еВ переріз починає зростати, формуючи широкий максимум в районі 80 еВ. З подальшим збільшенням енергії зіткнень переріз монотонно зменшується до значення  $0.9 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  при 600 еВ. Оскільки кожна точка в одержаному перерізі є сумою перерізів збудження окремих атомних АІС  $5p^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$  для певного значення енергії зіткнень, отже, його енергетична залежність є, по суті, результуючою функцією збудження всієї сукупності АІС, що беруть участь в його формуванні.

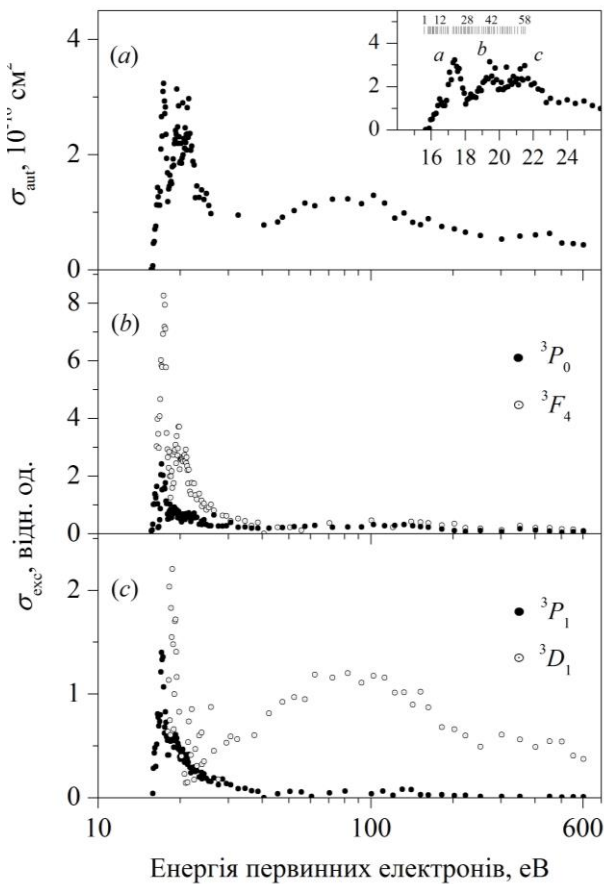


Рис. 4. Переріз автоіонізації  $\sigma_{\text{aut}}$  атома Ва (а) і його порівняння з перерізами збудження  $\sigma_{\text{exc}}$  дипольно-заборонених (б) та дипольно-дозволених (в) рівнів в конфігурації  $5p^55d6s^2$ .

На рисунках 4 (b), (c) представлені функції збудження дипольно-заборонених (b) і дипольно-дозволених (c) АІС, розпаду яких в спектрах на рисунку 2 відповідають найбільш інтенсивні лінії 6, 12 і 8, 28. Як видно, незалежно від типу всі стани мають резонансний характер збудження в припороговій області. На функціях збудження дипольно-заборонених станів відносно невеликий максимум перерізу спостерігається також в області 100 еВ. У

той же час у дипольно-дозволеного стану ( $5p^55d6s^2$ )  $^3P_1$  (лінія 8) аналогічний максимум перерізу практично відсутній. Обидві особливості поведінки перерізів цілком ймовірно пов'язані з ефектом змішування конфігурацій, який в атомі барію проявляється особливо помітно при збудженні  $5p^6$  оболонки [13, 21].

Порівнюючи переріз автоіонізації  $\sigma_{\text{aut}}$  і перерізи збудження  $\sigma_{\text{exc}}$  добре видно кореляцію в їх енергетичній поведінці. Так, загальний для обох типів станів виразний резонансний характер збудження в припороговій області енергій обумовлює таку ж резонансну поведінку перерізу автоіонізації. Широкий максимум перерізу  $\sigma_{\text{aut}}$  в області 80 еВ добре корелює зі зростанням перерізу збудження дипольно-дозволених АІС при енергіях вище 50-60 еВ. Детальний розгляд припорогової ділянки перерізу автоіонізації (див. вставку на рис. 4 (a)) показує, що в його формуванні беруть участь 58 станів, що належать конфігураціям  $5p^56s^2nl$ ,  $5p^55d^2nl$  і  $5p^55d6s^2nl$  [13] з порогоми збудження нижче 22 еВ. При цьому початкове швидке зростання перерізу в межах 1 еВ над порогом збудження  $5p^6$  оболонки обумовлений резонансним збудженням низькоенергетичних АІС 1-13 в конфігураціях  $5p^55d6s^2$  і  $5p^55d^26s$ . Формування максимумів *a*, *b*, *c* відбувається за рахунок резонансного збудження трьох груп АІС, а саме 15-23 (конфігурація  $5p^55d^26s$ ), 36-44 (конфігурації  $5p^55d^26s, 6p, 7s$ ) і 55-58 (конфігурації  $5p^55d^26s, 5p^55d6s6d, 7d, 5p^56s^27d$ ).

На рис. 5 наведено порівняння перерізів автоіонізації атомів Cs та Ва в діапазоні енергій зіткнень 10-600 еВ. Як видно, ці дані подібні тільки за загальним виглядом енергетичних залежностей. В атомі цезію низька ефективність резонансного збудження високоенергетичних АІС [18] призводить до спрощення структури перерізу автоіонізації в припороговій області енергій. Менш істотна по відношенню до барію роль ефекту змішування конфігурацій [15, 18] призводить до зростання ефективності потенційного розсіювання, зокрема, до ефективного збудження дублетних АІС. Як результат, переріз автоіонізації атома цезію досягає максимального значення в області 100 еВ.

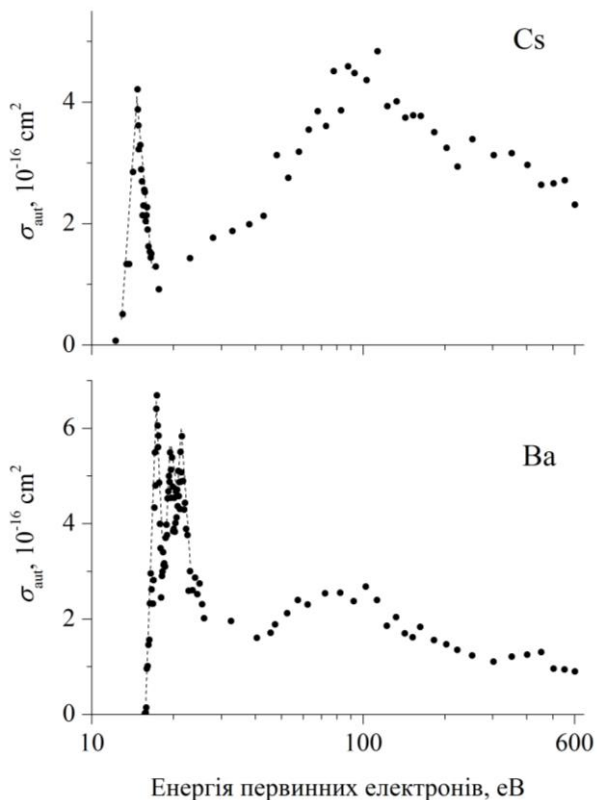


Рис. 5. Перерізи автоіонізації атомів цезію і барію. Пунктирними лініями виділені контури припорогових максимумів.

У барію ефективність резонансного збудження  $5p^6$  оболонки майже в три рази перевищує ефективність прямого збудження, а структура припорогового максимуму помітно більш складна. Причиною цього є висока ефективність резонансних процесів а також вплив ефекту змішування конфігурацій [13, 21]. Як показали розрахунки електронного збудження  $5p^6$  оболонки [13], коефіцієнти в хвильовому розкладанні для більшості станів  $5p^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$  не перевершують 0.5 незалежно від схеми складання векторних

моментів.

Це нівелює різницю в характері збудження синглетних і триплетних станів і зміщує загальну ефективність збудження  $5p^6$  оболонки в бік низьких енергій. Це добре видно на функціях збудження АІС, представлених на рисунках 4 (b) і 4 (c).

### Висновки

Представлені перерізи автоіонізації атомів Cs і Ba при збудженні  $5p^6$  підоболонки електронами в діапазоні енергій зіткнень від порогів збудження до 600 еВ. Дані одержані у вигляді нормованих повних інтенсивностей спектрів ежектованих електронів, що утворюються при розпаді автоіонізаційних станів  $5p^5n_1l_1n_2l_2$  в цезію і  $5p^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$  в барію. Розглянуто роль окремих електронних конфігурацій у формуванні перерізів автоіонізації. Зокрема встановлено, що сильне резонансне збудження нижніх рівнів в конфігураціях  $5p^56s^2$ ,  $5p^55d6s$  в атомі цезію та  $5p^55d6s^2$ ,  $5p^55d^26s, 6p, 6d, 7d$ ,  $5p^56s^26p, 7s, 7d$ ,  $5p^55d6s6p$ ,  $7s, 7d$  в атомі барію визначають резонансну поведінку обох перерізів при низьких енергіях зіткнень. Форма і значення перерізів при великих енергіях зіткнень визначаються внеском дублетних рівнів в атомі цезію та дипольно-дозволеними та синглетними рівнями конфігурацій  $5p^55d6s^2$ ,  $5p^55d^26s$  в атомі барію.

Автори висловлюють подяку к.ф.-м.н. Л.О. Бандуриній та к.ф.-м.н. В.І. Роман за корисні поради та продуктивне обговорення результатів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Electron Impact Ionization, edited by T.D. Märk and G.H. Dunn. Springer-Verlag, New-York, 1985. 379 p.
2. Moores D.L., Reed K.J. Indirect Processes in electron impact ionization of positive ions // Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics. – 1994. – V. 34, – P. 301-426.
3. Mitnik D., Mandelbaum P., Schwob J. L., Bar-Shalom A., Oreg J., Goldstein W. H. Excitation-autoionization through 3d-4l inner-shell excitations in Cu- to Kr-like ions and the effect on fractional-ion-abundance balance in coronal plasmas // Phys. Rev. A. – 1994. – V. 50, – P. 4911-4929.
4. Kaneko Y. Single and double ionization of Na, K and Mg by electron impact // J. Phys. Soc. Jap. – 1961. – V. 16, – P. 2288-2293.
5. Okudaira S. Multiple ionization of Ca, Sr and Ba by electron impact // J. Phys. Soc. Jap. – 1970. – V. 29, – P. 409-415.
6. Okuno Y. Ionization cross section of Ca, Sr and Ba by electron impact // J. Phys. Soc. Jap. – 1971. – V. 31, – P. 1189-1195.

7. Veinshtein L. A., Ochkur V. I., Rakhovskii V. I., Stepanov A. M. Absolute values of electron impact ionization cross sections for magnesium, calcium, strontium and barium // *Sov. Phys. – JETP.* – 1972. – V. 34, – P. 271-275.
8. Dettmann J-M., Karstensen F. Absolute ionisation functions for electron impact with barium // *J. Phys. B.* – 1982. – V. 15, – P. 287-300.
9. Kiffer L. J., Dunn G. H. Electron impact ionization data // *Rev. Mod. Phys.* – 1966. – V. 38, – No. 1. – P. 1-35.
10. Evrij M. J., Borovik A. A. (Jr), Shimon L. L., Kontros J. E., Borovik A. A. Resonance excitation of the  $3p^6$ -subshell in potassium: Contribution to the single ionization // *Nucl. Instrum. Methods B.* – 2005. – V. 233, – P. 280-283.
11. Borovik A., Kupliauskiene A. The  $5p^6$  autoionization cross section of cesium atoms: contribution to single ionization by electron impact // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2009. – V. 42, – P. 165202(5).
12. Borovik A. A., Grum-Grzhimailo A. N., Bartschat K., Zatsarinny O. Electron impact excitation of the  $(3p^5 4s^2)^2P_{3/2,1/2}$  autoionizing states in potassium // *J. Phys. B.* – 2005. – V. 38, – P. 1081-1092.
13. Hrytsko V., Kerevicius G., Kupliauskiene A., Borovik A. The  $5p$  autoionization spectra of Ba atoms excited by electron impact: identification of lines // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2016. – V. 49, – P. 145201(12).
14. Borovik A.A. An electron spectrometer for studying the autoionization processes in metal vapors // *Ukr. Phys. Journal.* – 2008. – V. 53, – No 10. – P. 1021-1027.
15. Connerade J. P., Mansfield M. W. D., Newsom G. H., Tracy D. H., Baig M. A., Thimm K. A study of  $5p$  excitation in atomic barium I. The  $5p$  absorption spectra of Ba I, Cs I and related elements // *Phil. Trans. R. Soc. A.* – 1979. – V. 290, – No 1371. – P. 327-352.
16. 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. 2467-2477.
17. Pejchev V., Ross K.J. High-resolution ejected-electron spectrum of caesium vapour autoionising levels excited by 30 to 400 eV electrons // *J. Phys. B.* – 1977. – V. 10, – P. 2935-2941
18. Borovik A., Kupliauskiene A., Zatsarinny O. Excitation cross sections and spectroscopic classification of autoionizing levels in a caesium atom // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2011. – V. 44, – P. 145203(6).
19. 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. 144010(11).
20. Tate J.T., Smith P.T. Ionization Potentials and Probabilities for the Formation of Multiply Charged Ions in the Alkali Vapors and in Krypton and Xenon // *Phys. Rev.* – 1934. – V. 46, – No.1. – P. 773–776.
21. Zatsarinny O.I., Bandurina L.A., Gedeon V.F. *R*-matrix calculations of the integral electron-impact excitation cross sections of the ground state of the barium atom // *Opt. Spectrosc.* – 2004. – Vol. 97, No 4. – P. 499-507.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2018.

В.А. Боровик<sup>1</sup>, И.И. Шафраньш<sup>1</sup>, А.А. Боровик<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Ужгородський національний університет, ул. Волошина, 54, Ужгород, 88000, Україна

<sup>2</sup> Інститут електронної фізики НАНУ, ул. Университетская, 21, Ужгород, 88000, Україна, e-mail: vladimir.borovik@uzhnu.edu.ua

## СЕЧЕНИЯ АВТОИОНИЗАЦИИ АТОМОВ ЦЕЗИЯ И БАРИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ $5p^6$ ОБОЛОЧКИ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

Измерены сечения автоионизации атомов цезия и бария при возбуждении  $5p^6$  оболочки электронами в диапазоне энергий от первого автоионизационного порога

до 600 эВ. Данные получены путем определения суммарной интенсивности линий в электронных спектрах, образующихся при распаде атомных автоионизационных состояний  $5p^5n_1l_1n_2l_2$  в цезии и  $5p^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$  в барии. Поведение сечений характеризуется наличием структуры в виде узких максимумов в припороговой области 12-23 эВ и широкого максимума вблизи 100 эВ. Максимальные значения сечений составляют  $4.2 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup> для цезия и  $6.7 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup> для бария. Проведен анализ процессов, обуславливающих величину и энергетическую зависимость полученных сечений автоионизации.

**Ключевые слова:** электрон, цезий, барий, подоболочка, состояние, конфигурация, автоионизация, поперечное сечение.

V.O. Borovik<sup>1</sup>, I.I. Shafranyosh<sup>1</sup>, O.O. Borovik<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Uzhgorod National University, Ukraine, 88000, Uzhgorod, Universytetska Str., 21

<sup>2</sup> Institute of Electron Physics. NAS of Ukraine, Ukraine, 88000, Uzhgorod, Voloshina Str., 54

## AUTOIONIZATION CROSS-SECTIONS OF CESIUM AND BARIUM ATOMS FOR $5p^6$ SHELL EXCITED BY ELECTRON IMPACT

**Background:** The presence of a closed valence shell in alkaline-earth atoms makes the processes of their excitation and ionization as a whole much more complicated than for neighboring alkali atoms. In order to find patterns and differences in the course of autoionization in these two groups of atoms, it is interesting to compare their autoionization cross sections. Studies of the latter for alkaline-earth atoms have not been conducted until recently. In this paper, the  $5p^6$  autoionization cross sections of cesium and barium atoms excited by electrons were investigated in the impact-energy range from the excitation threshold of the  $5p^6$  subshells to 600 eV.

**Methods:** The measurements of the ejected-electron spectra of Cs and Ba atoms were carried out by using an electron spectrometer consisted of a source of the incident electron beam, an electron energy analyzer (of 127° electrostatic type) and an atomic beam source. To minimize the influence of the anisotropy of the angular distribution of ejected electrons, the measurements were carried out at a "magic" observation angle of 54.7°. The incident and ejected-electron energy resolutions were about 0.4 eV and 0.07 eV, respectively. The increment step of the incident electron energy was 0.1 eV in the near-threshold energy region. The autoionization cross section of Cs and Ba atoms were determined as the normalized total intensities of ejected-electron spectra measured at different impact energies.

**Results:** The autoionization cross sections for  $5p^6$  subshells in Cs and Ba atoms were determined in an incident-electron energy range from the lowest autoionization thresholds up to 600 eV. The energy behavior of both cross sections is characterized by the presence of the strong resonance structure in the threshold region of 12-23 eV and a broad maximum at approximately 100 eV. The cross sections reach their maximum value of  $4.2 \cdot 10^{-16}$  cm<sup>2</sup> for cesium and  $6.7 \cdot 10^{-16}$  cm<sup>2</sup> for barium at 14.8 eV and 17.4 eV, respectively. An analysis is made of the excitation and decay processes of the  $5p^5n_1l_1n_2l_2$  (Cs) and  $5p^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$  (Ba) autoionizing states that determine the magnitude and the energy behavior of the autoionization cross sections.

**Conclusions:** The strong resonant excitation of the lowest levels in  $5p^56s^2$ ,  $5p^55d6s$  configurations in cesium and  $5p^55d6s^2$ ,  $5p^55d^26s, 6p, 6d, 7d$ ,  $5p^56s^26p, 7s, 7d$  and  $5p^55d6s6p; 7s, 7d$  configurations in barium determines the resonant behavior of the measured autoionization cross sections at low impact energies. The shape and magnitude of the cross sections at high impact energies are determined by the total contribution from doublet autoionizing states in cesium and dipole-allowed autoionizing states in the lowest configurations  $5p^55d6s^2$  and  $5p^55d^26s$  in barium.

**Keywords:** electron, Cs atom, Ba atom, subshell, state, configuration, autoionization, cross section.

**PACS:** 34.80.DP

### REFERENCES

1. Electron Impact Ionization, edited by T.D. Märk and G.H. Dunn. Springer-

- Verlag, New-York, 1985. 379 p.
2. Moores D.L., Reed K.J. Indirect Processes in electron impact ionization of positive ions // *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics*. – 1994. – V. 34, – P. 301-426.
  3. Mitnik D., Mandelbaum P., Schwob J. L., Bar-Shalom A., Oreg J., Goldstein W. H. Excitation-autoionization through 3d-4l inner-shell excitations in Cu- to Kr-like ions and the effect on fractional-ion-abundance balance in coronal plasmas // *Phys. Rev. A*. – 1994. – V. 50, – P. 4911-4929.
  4. Kaneko Y. Single and double ionization of Na, K and Mg by electron impact // *J. Phys. Soc. Jap.* – 1961. – V. 16, – P. 2288-2293.
  5. Okudaira S. Multiple ionization of Ca, Sr and Ba by electron impact // *J. Phys. Soc. Jap.* – 1970. – V. 29, – P. 409-415.
  6. Okuno Y. Ionization cross section of Ca, Sr and Ba by electron impact // *J. Phys. Soc. Jap.* – 1971. – V. 31, – P. 1189-1195.
  7. Veinshtein L. A., Ochkur V. I., Rakhovskii V. I., Stepanov A. M. Absolute values of electron impact ionization cross sections for magnesium, calcium, strontium and barium // *Sov. Phys. – JETP*. – 1972. – V. 34, – P. 271-275.
  8. Dettmann J-M., Karstensen F. Absolute ionisation functions for electron impact with barium // *J. Phys. B*. – 1982. – V. 15, – P. 287-300.
  9. Kiffer L. J., Dunn G. H. Electron impact ionization data // *Rev. Mod. Phys.* – 1966. – V. 38, – No. 1. – P. 1-35.
  10. Evrij M. J., Borovik A. A. (Jr), Shimon L. L., Kontros J. E., Borovik A. A. Resonance excitation of the 3p<sup>6</sup>-subshell in potassium: Contribution to the single ionization // *Nucl. Instrum. Methods B*. – 2005. – V. 233, – P. 280-283.
  11. Borovik A., Kupliauskiene A. The 5p<sup>6</sup> autoionization cross section of cesium atoms: contribution to single ionization by electron impact // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2009. – V. 42, – P. 165202(5).
  12. Borovik A. A., Grum-Grzhimailo A. N., Bartschat K., Zatsarinny O. Electron impact excitation of the (3p<sup>5</sup>4s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>P<sub>3/2,1/2</sub> autoionizing states in potassium // *J. Phys. B*. – 2005. – V. 38, – P. 1081-1092.
  13. Hrytsko V., Kerevicius G., Kupliauskiene A., Borovik A. The 5p autoionization spectra of Ba atoms excited by electron impact: identification of lines // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2016. – V. 49, – P. 145201(12).
  14. Borovik A.A. An electron spectrometer for studying the autoionization processes in metal vapors // *Ukr. Phys. Journal*. – 2008. – V. 53, – No 10. – P. 1021-1027.
  15. Connerade J. P., Mansfield M. W. D., Newsom G. H., Tracy D. H., Baig M. A., Thimm K. A study of 5p excitation in atomic barium I. The 5p absorption spectra of Ba I, Cs I and related elements // *Phil. Trans. R. Soc. A*. – 1979. – V. 290, – No 1371. – P. 327-352.
  16. 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. 2467-2477.
  17. Pejchev V., Ross K.J. High-resolution ejected-electron spectrum of caesium vapour autoionising levels excited by 30 to 400 eV electrons // *J. Phys. B*. – 1977. – V. 10, – P. 2935-2941
  18. Borovik A., Kupliauskiene A., Zatsarinny O. Excitation cross sections and spectroscopic classification of autoionizing levels in a caesium atom // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2011. – V. 44, – P. 145203(6).
  19. Borovik A., Zatsarinny O., Bartschat K. Resonance effects in electron and photon impact excitation of the p<sup>6</sup> subvalence subshell in alkali atoms // *J. Phys. B*. – 2009. – V. 42, – P. 144010(11).
  20. Tate J.T., Smith P.T. Ionization Potentials and Probabilities for the Formation of Multiply Charged Ions in the Alkali Vapors and in Krypton and Xenon // *Phys. Rev.* – 1934. – V. 46, – No.1. – P. 773–776.
  21. Zatsarinny O.I., Bandurina L.A., Gedeon V.F. R-matrix calculations of the integral electron-impact excitation cross sections of the ground state of the barium atom // *Opt. Spectrosc.* – 2004. – Vol. 97, No 4. – P. 499-507.