

# СПЕКТРОСКОПІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ ЗАМКНЕНИХ ОБОЛОНОК АТОМІВ

## Ca, Sr, Ba ЕЛЕКТРОННИМ УДАРНОМ

С. Ю. Угрин

Ужгородський національний університет, 294000, Ужгород, вул.Волошина, 54

На високовакуумній установці з електронним і атомним пучками, що переминаються, в 70-х роках під керівництвом І.С. Алексахіна досліджено емісійні спектри та енергетичні залежності перерізів збудження ліній Ca, Sr і Ba у спектральній області 40-120 нм. Виявлено ефективно збудження резонансних ліній дво- і тризарядних іонів та зареєстровано невідомі раніше лінії, що відповідають випромінюванню розпаду автоіонізаційних станів атомів та іонів. Зроблено висновок, що при електронно-атомних зіткненнях утворення багатозарядних іонів визначається головним чином одноелектронними процесами

### ВСТУП

Збудження зовнішніх замкнених оболонок атомів Ca, Sr і Ba електронним ударом, що веде до випромінювання ліній у ВУФ області спектру, до 70-х років минулого століття не досліджувалось. За методикою, описаною у праці [1], проведено систематичні дослідження збудження спектральних ліній кальцію, стронцію і барію в області 40 - 120 нм.

Саме на цю область припадають лінії, що виникають при збудженні р-електронів їх зовнішніх замкнених оболонок. За величиною порогової енергії збудження всі вивчені в цих дослідках лінії у даній області ВУФ спектру можна віднести до трьох груп. До першої групи належать лінії, пороги збудження яких перевищують енергію двократної іонізації атомів  $E^{2+}$ , але в той же час є меншими від енергії найглибших збуджених рівнів двозарядних іонів  $E^{2+*}$ . Це лінії 53,4 і 51,1 нм (CaII), 62,4 і 58,4 нм (SrI) та 71,2 нм (BaII). До другої групи віднесемо лінії, пороги збудження яких перевищують енергію  $E^{2+*}$ , але є меншими від енергії трикратної іонізації атомів  $E^{3+}$ . Сюди належать резонансні лінії двозарядних іонів: 49,1; 44,0; 41,0; 40,4 нм (Ca), 56,3; 51,4; 50,7; 49,2 і 43,7 нм (Sr), 74,3; 65,3; 64,7; 58,7 і 55,5 нм (Ba). До третьої групи віднесемо всі ті лінії, пороги збудження яких перевищу-

ють енергію трикратної іонізації  $E^{3+}$ . У нашому випадку це резонансні лінії 66,5 і 71,0 нм SrIV та лінія 69,5 нм надзбудженого атома барію. Резонансні лінії CaIV та BaIV не спостерігались.

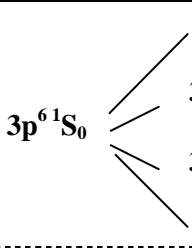
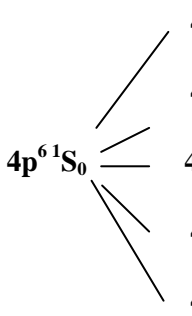
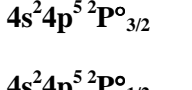
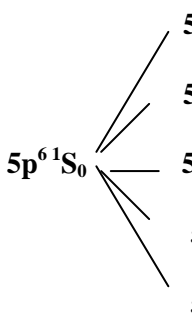
Нижче для кожного з досліджуваних елементів наведено спектри, записані автоматично електронним потенціометром при таких трьох енергіях збуджуючих електронів, які дали б змогу прослідкувати динаміку появи ліній. Для найбільш інтенсивних ліній також дано енергетичні залежності перерізів збудження – функції збудження (ФЗ). Для кожного атома визначено відносну інтенсивність ліній, розраховану за спектральною чутливістю установки, одержаної з використанням синхротронного випромінювання [2].

### 1. КАЛЬЦІЙ

На рис.1.1 приведено ВУФ спектри кальцію [3,4], збуджені електронами різних енергій, з якого видно, що найінтенсивніші лінії спостерігаються в області 40 - 55 нм.

З таблиці та схеми рівнів (рис.1.2), побудованої за відомими таблицями спектральних ліній [5, 6] та даними праці [7], видно, що лінії з довжинами хвиль 49,1; 44,0; 41,0 і 40,4 нм (лінії другої групи) є резонансними лініями двозарядного іона кальцію. Спектр А (рис.1.1) записано при

Таблиця

	$\lambda$ , нм	Перехід	$E_{зб.}$ , еВ	$E_{макс.}$ , еВ	$I_{відн.}$	
<b>CaIII</b>	49,1	$3p^6 1S_0$ 	$3p^5(2P^o_{3/2})3d[1/2]^o_1$	43,25	65;110	100
	44,0		$3p^5(2P^o_{3/2})3d[3/2]^o_1$	46,84	70;110	53
	41,0		$3p^5(2P^o_{3/2})4s[3/2]^o_1$	48,22	65;110	207
	40,4		$3p^5(2P^o_{1/2})4s[1/2]^o_1$	48,69		
<b>CaII</b>	53,4	$3p^6 3d^2 D_{5/2} - 3p^5 4s 3d^4 F_{7/2}$	31,0	39	71	
	51,1	$3p^6 3d^2 D_{5/2} - 3p^5 4s 3d^4 P_{5/2}$	32,1	40	18	
<b>SrIII</b>	56,3	$4p^6 1S_0$ 	$4p^5(2P^o_{3/2})4d[1/2]^o_1$	38,74	70;160	100
	51,4		$4p^5(2P^o_{3/2})5s[3/2]^o_1$	40,82	75;160	177
	50,7		$4p^5(2P^o_{3/2})4d[3/2]^o_1$	41,16	90;160	42
	49,2		$4p^5(2P^o_{1/2})5s[1/2]^o_1$	41,92	80;150	184
	43,7		$4p^5(2P^o_{1/2})4d[3/2]^o_1$	45,07	95;160	107
<b>SrIV</b>	66,5	$4s^2 4p^5 2P^o_{3/2}$ 	$4s 4p^6 2S_{1/2}$	78,24	130;200	6
	71,0			$4s^2 4p^5 2P^o_{1/2}$	78,24	?
<b>SrI</b>	58,4	$4p^6 5s 4d^3 D_3 - 23,4 \text{ eB}$	24,8	30;90	5	
	62,4	$4p^6 5s 6s^3 S_1 - 23,45 \text{ eB}$	22,1	28;130	2	
<b>BaIII</b>	74,3	$5p^6 1S_0$ 	$5p^5(2P^o_{3/2})5d[1/2]^o_1$	31,89	50;120;180	100
	65,3		$5p^5(2P^o_{3/2})5d[3/2]^o_1$	34,18	65;110;200	88
	64,7		$5p^5(2P^o_{3/2})6s[3/2]^o_1$	34,36	80;110;190	87
	58,7		$5p^5(2P^o_{1/2})6s[1/2]^o_1$	36,30	75;120;190	171
	55,5		$5p^5(2P^o_{1/2})5d[3/2]^o_1$	37,52	70;120;190	54
<b>BaII</b>	71,2	—	23,3	27	54	
<b>BaI</b>	69,5	—	88,3	120;190	48	

Примітка:  $\lambda$  - довжина хвилі;  $E_{зб.}$  - порогова енергія збудження;  $E_{макс.}$  - енергії, при яких на функціях збудження спостерігаються максимуми;  $I_{відн.}$  - відносна інтенсивність ліній

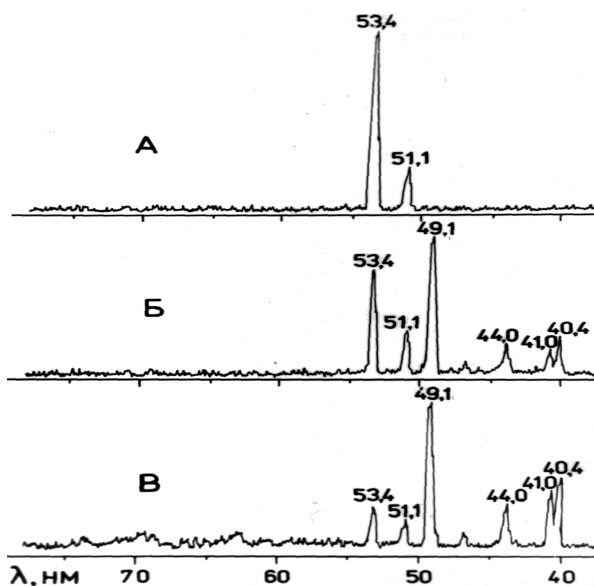


Рис. 1.1. ВУФ спектри випромінювання кальцію, збуджені електронами енергій  $E=35$  еВ (А), 55 еВ (Б) і 100 еВ (В) [3, 4]

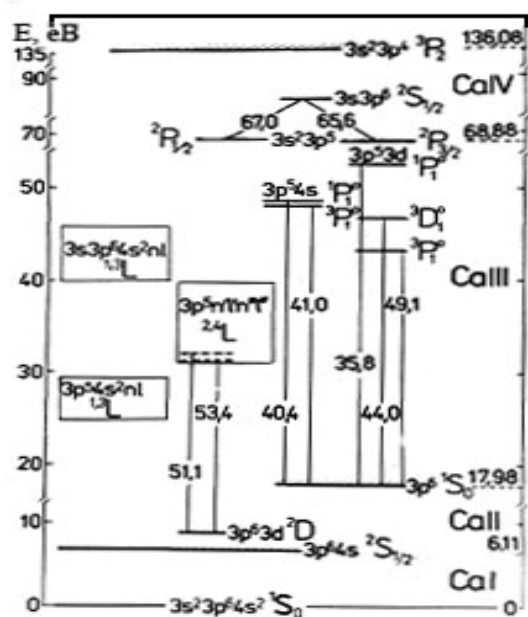


Рис.1.2. Схема енергетичних рівнів кальцію [2]

35 еВ, що менше від енергії найнижчого зі збуджених станів двозарядного іона кальцію (рис.1.2). Тому лінії 54,3 і 51,1 нм (перша група) даного спектру не можуть належати CaIII. Аналіз довжин хвиль та порогів збудження цих ліній засвідчує, що вони зумовлені збудженням автоіонізаційних станів (AIC) CaII і подібні до ліній,

виявлених у [8] для ізоелектронного з ним KI (лінії 72,3 і 75,5 нм). Пороги збудження ліній 53,4 і 51,1 нм визначалися як у [2].

Ліній третьої групи для кальцію не виявлено. Їх інтенсивності, очевидно, значно менші від інтенсивностей спостережених резонансних ліній CaIII, а також ліній першої групи.

Функції збудження резонансних ліній CaIII 41,9; 44,0 та 41,0 нм + 40,4 нм, виміряні від порогів до 300 еВ (рис.1.3), виявляють подібність в основних рисах незалежно від конфігурації вихідного рівня.

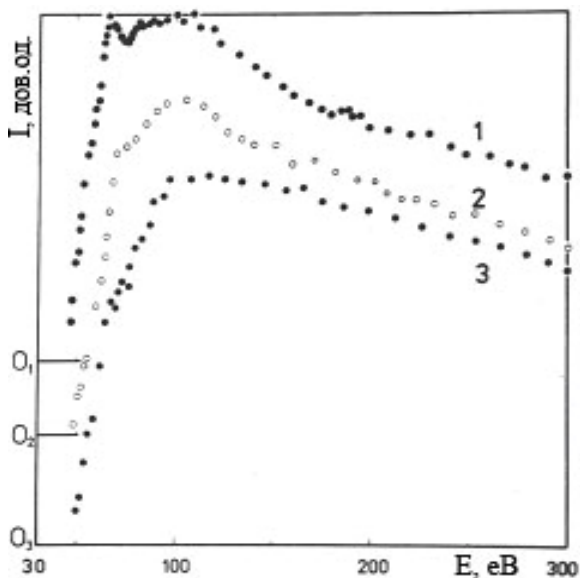


Рис.1.3. Функції збудження резонансних ліній CaIII [3, 4]:

1 – 49,1; 2 – 44,0; 3 – 41,0 нм + 40,4 нм

Характерним для них є основний широкий максимум при енергії  $\sim 110$  еВ та додатковий максимум при енергії  $\sim 65$  еВ, котрий на різних функціях проявляється по-різному (на кривій 3 є тільки злом). Енергія появи останнього максимуму близька до енергії зв'язку 3s-електрона Ca [9 – 11]. ФЗ „автоіонізаційних ліній” 53,4 і 51,1 нм CaII [3,12] на вигляд практично однакові і різко відрізняються від ФЗ резонансних ліній Ca-III. Для них є характерною гранична простота: один відносно вузький максимум, за яким спочатку швидко, а далі – все повільніше спадання. ФЗ лінії 53,4 нм показано на рис.1.4 (разом з такими ж лініями Sr і Ba).

## 2. СТРОНЦІЙ

Для стронцію інтенсивні лінії спостерігалися у спектральній області 40 – 80 нм (рис.2.1). Видно, що найбільша кількість ліній появляється у спектрі В [13,14].

Дані про довжини хвиль, пороги збудження, відносні інтенсивності, значення енергії, при яких ФЗ ліній мають максимуми, та ідентифікація тих ліній, котрі вдалося ототожнити, вміщено в таблицю. Для стронцію спостерігалися лінії всіх трьох груп. Довжини хвиль ліній другої групи, узгоджуються з даними спектроскопічних праць з ВУФ спектрів стронцію,

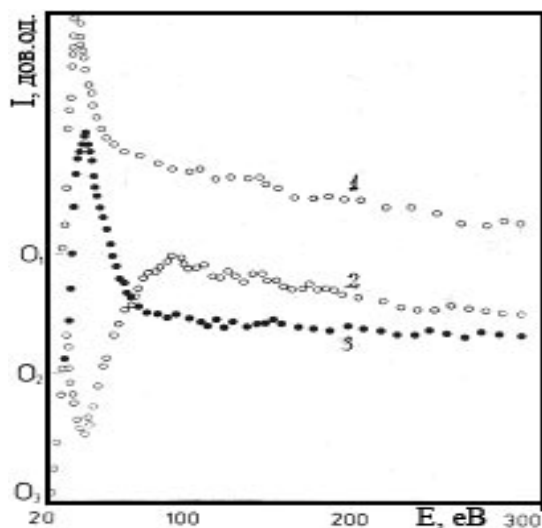


Рис.1.4. Функції збудження ліній, що виникають при випромінювальному розпаді автоіонізаційних станів [18] 1 – 71,2 нм (Ba); 2 – 58,4 нм (Sr); 3 – 53,4 нм (Ca)

що появилися в 70-х роках [15-17]. Це всі дозволені переходи з найнижчих збуджених станів з  $J=1$  конфігурацій  $4p^5 4d$  і  $4p^5 5s$  у основний стан двозарядного іона стронцію, тобто резонансні переходи SrIII.

Лінії третьої групи спостерігаються у спектрі В. Це резонансні лінії SrIV, вихідним для яких є рівень  $4s4p^6 \ ^2S_{1/2}$ . Лінії першої групи (спектр А) не вдається ототожнити з відомими лініями стронцію [15-17].

Наведені на рис.2.2 ФЗ резонансних ліній SrIII (ліній другої групи) в основних рисах подібні: характерним для них є ос-

новний максимум при енергії ~70 - 95 еВ та менш помітний додатковий максимум біля 160 еВ. Останній має поріг ~ 130 еВ і є близьким до енергії зв'язку електронів  $3d^{10}$ - підоболонки [9-11]

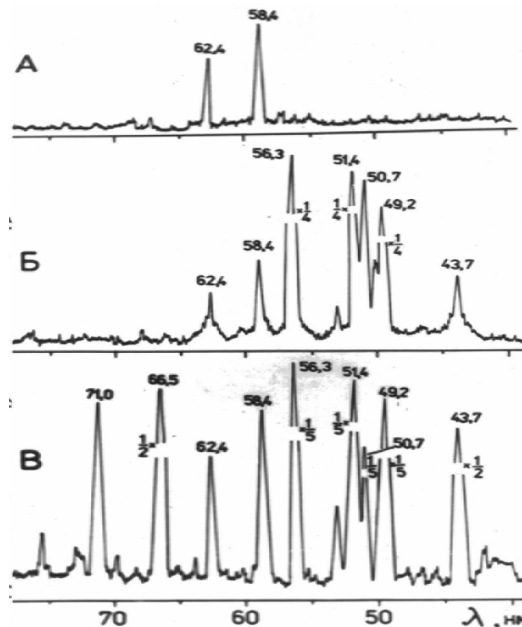


Рис.2.1. ВУФ спектри випромінювання стронцію, збуджені електронами енергій  $E=28$  еВ (А),  $55$  еВ (Б) і  $100$  еВ (В) [2]

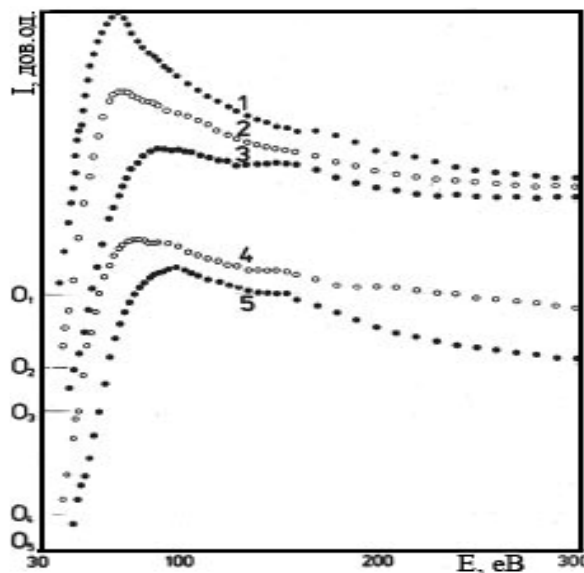


Рис.2.2. Функції збудження резонансних ліній SrIII [13] : 1 – 56,3 нм; 2 – 51,4 нм; 3 – 50,7 нм; 4 – 49,2 нм; 5 – 43,7 нм

Функція збудження „автоіонізаційної лінії”  $58,4$  нм SrI [12,18] показана на рис.1.4.

### 3. БАРІЙ

Для барію інтенсивні спектральні лінії спостерігалися в області довжин хвиль 50 - 75 нм, яка краще, ніж для Ca і Sr співпадає з областю високої чутливості спектрометра [19-21]. На рис.3.1 представлені спектри барію, збуджені електронами трьох різних енергій: 26 еВ (А), 50 еВ (Б) і 100 еВ (В).

Видно, що найбільша кількість інтенсивних ліній появляється у спектрі В: 74,3; 65,3; 64,7; 58,7; 55,5; 71,2 і 69,5 нм.

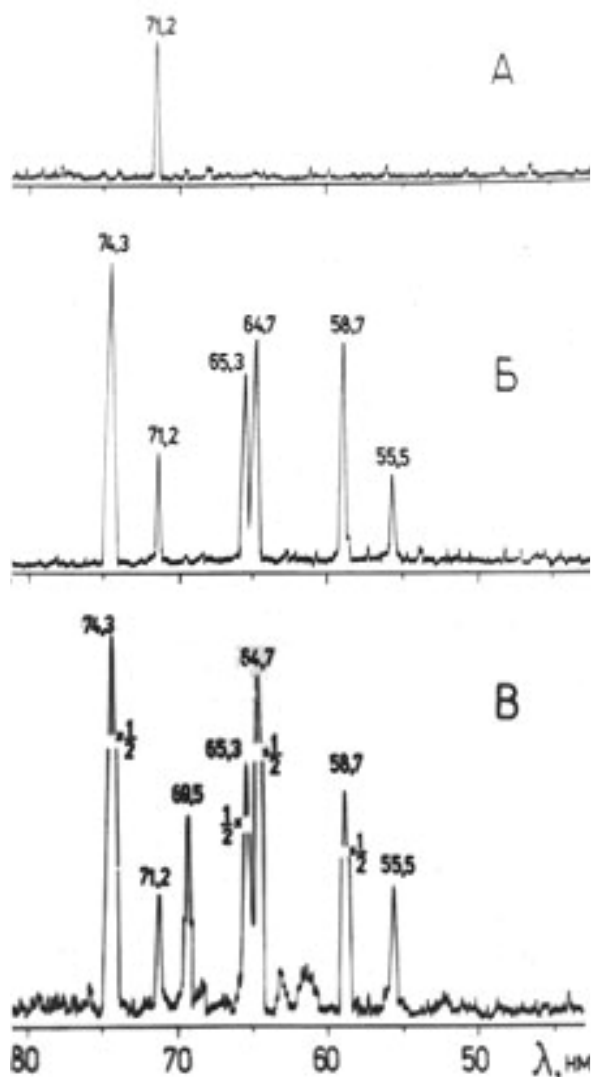


Рис.3.1. ВУФ спектри випромінювання барію, збуджені електронами енергій : E=26 еВ (А), 50 еВ (Б) і 100 еВ (В) [20]

Найінтенсивніші лінії барію легко отожнити з резонансними лініями двозаряд-

ного іона барію [22,23], що є комбінаціями основного стану  $5p^6 \ ^1S_0$ . ВаIII із станами конфігурацій  $5p^5 5d$  і  $5p^5 6s$ , для яких  $J=1$ .

ФЗ резонансних ліній ВаIII (рис.3.2) мають доволі складну структуру, яка свідчить про існування різноманітних процесів, що супроводять їх збудження.

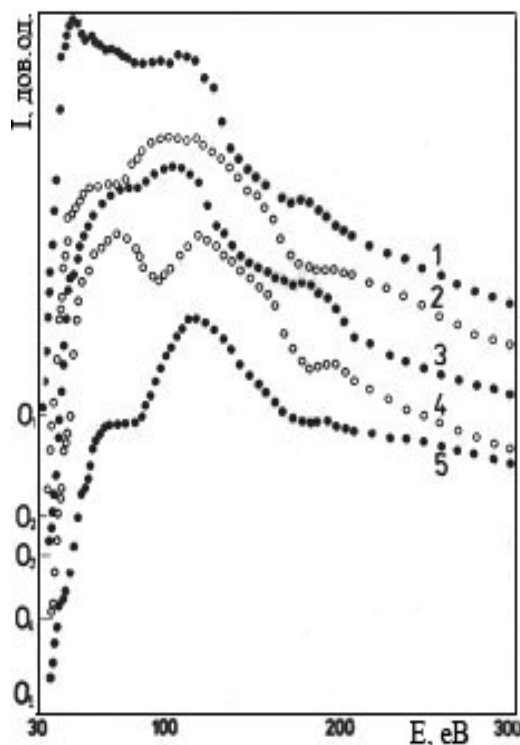


Рис.3.2. Функції збудження резонансних ліній ВаIII [20]: 1 – 74,3 нм; 2 – 65,3 нм; 3 – 64,7 нм 4 – 58,7 нм 5 – 55,5 нм

На всіх кривих чітко проявляються максимуми приблизно при однакових енергіях: 50, 70, 120 і 190 еВ. Найпримітнішим є максимум при 120 еВ. Відзначимо, що величини енергій зв'язку  $5s$ -,  $4d$ - і  $4p$ -електронів атома барію добре узгоджуються з енергіями порогів першого, третього й четвертого максимумів. Отже, наявність цих максимумів свідчить про суттєвий вплив збудження підоболонки  $5s^2$ ,  $4d^{10}$  і  $4p^6$  на процес збудження  $5p^6$ -підоболонки, що приводить до утворення двозарядного іона барію. Другий максимум (при енергії 70 еВ) слід зв'язати зі збудженням саме  $5p$ -електрона.

Функція збудження „автоіонізаційної лінії” барію 71,2 нм (крива 1, рис.1.4), як і ФЗ лінії 53,4 нм кальцію (крива 3), біля порогу має яскраво виражений гострий максимум, що далі зі збільшенням енергії збуджуючих електронів швидко спадає. ФЗ цих ліній суттєво відрізняються від ФЗ лінії 58,4 нм стронцію (крива 2), в якій найбільш гострий припороговий максимум, а починаючи з енергії  $\sim 36$  еВ наявне ще й друге зростання ефективності збудження, що досягає максимуму при енергії  $\sim 100$  еВ.

Однак спектральні лінії 71,2 і 69,5 нм не вдається ототожнити ні з якими з відомих спектральних ліній барію. Перша з них наявна у всіх трьох спектрах – А, Б, В, а друга – тільки у спектрі В (див. рис.3.1). Отримані для цих ліній експериментальні дані свідчать, що вони зумовлені випромінювальним розпадом АІС однозарядного іона (лінія 71,2 нм) і нейтрального атома (лінія 69,5 нм) барію.

Як і для Са та Sr, найінтенсивнішою у даних спектрах барію є резонансна лінія ВаШ, що відповідає переходу із синглетного стану  $^1P_1$  конфігурації  $5p^56s$  (див. табл.). Не можна нічого сказати про резонансні лінії 65,4 і 74,0 нм тризарядного іона барію. Якщо вони й появляються у спектрі В, то зливаються з резонансними лініями двозарядного іона барію відповідно.

## ВИСНОВКИ

1. Вивчено вакуумні ультрафіолетові спектри кальцію, стронцію і барію, збуджені електронним ударом та виміряно функції збудження найінтенсивніших ліній. З урахуванням спектральної чутливості установки знайдено відносні інтенсивності ліній у спектрі кожного елемента.

2. Виявлено ефективне збудження резонансних ліній дво- і тризарядних іонів та виявлено низку раніше невідомих ліній, що відповідають випромінювальному розпаду АІС атомів, які виникають за участі електронів зовнішніх  $pr^6$ -підоболонок.

3. Показано, що при електрон-атомних зіткненнях утворення багатозарядних іонів як в основному, так і в збуджених станах визначається головним чином однокелекtronними процесами.

4. Висловлено припущення, що в припороговій області характер збудження виявлених у роботі автоіонізаційних станів також визначається однокелекtronними процесами з обміном.

## ЛІТЕРАТУРА

1. И.С. Алексахин, Г.Г. Богачев, И.П. Запесочный, С.Ю. Угрин, ЖЭТФ 80, 2187 (1981).
2. С.Ю. Угрин, Спектроскопическое исследование возбуждения внешних замкнутых оболочек атомов кальция, стронция и бария электронным ударом (канд. дисс., Рига, 1979).
3. С.Ю. Угрин, ЖПС 29, 153 (1978).
4. С.Ю. Угрин, Г.Г. Богачев, И.С. Алексахин, ВУФ-78 (Материалы семинара, 139, Ленинград, 1978).
5. С.Е. Moore, Atomic Energy Levels (Circular of the National Bureau of Standards 467, Washington, v.1 (1949), v.2 (1952), v.3 (1958)).
6. А.Р. Стриганов, Н.С. Свентицкий, Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов (Атомиздат, М. 1966).
7. Borgstrom, Arkiv Fys. 38, 243 (1968).
8. Г.Г. Богачов, УФЖ 19, 2061 (1974).
9. W. Lotz, J. Opt. Soc. Amer. 60, 206 (1970).
10. J.C. Slater, Phys. Rev. 98, 1039 (1955).
11. К. Зигбан и др., Электронная спектроскопия (Мир, М., 1971).
12. I.S. Aleksakhin, A.A. Borovik, G.G. Bogachov, I.P. Zapesochny, S.Yu. Ugrin, Sixth international conference on the Atomic Physics (Abstr. of papers, 400, Riga, 1978).
13. И.С. Алексахин, Г.Г. Богачев, С.Ю.Угрин, Т.А. Шишова, УФЖ 23,274 (1978).
14. С.Ю. Угрин, Г.Г. Богачев, И.С. Алексахин, IV Всесоюзная конференция по спектроскопии вакуумного ультрафио-

- лета и взаимодействию излучения с веществом (Тез. докл., 74, Ужгород, 1975).
15. W. Persson, S. Valind, Phys. Letters 35A, 69 (1971).
16. J. Reader, G.L. Epstein, J.O. Ekberg, J. Opt. Soc. Amer. 62, 273 (1972).
17. W. Persson, S. Valind, Phys. Scr. 5, 187 (1972).
18. И.С. Алексахин, Г.Г. Богачев, И.П. Запесочный, С.Ю. Угрин, ДАН УССР Сер.А, 4, 327 (1978).
19. И.С. Алексахин, Г.Г. Богачев, С.Ю. Угрин, VI ВКЭАС (Тез. докл., 94, Тбилиси, 1975).
20. И.С. Алексахин, Г.Г. Богачев, С.Ю. Угрин, Оптика и спектр. 43, 804 (1977).
21. I.S. Aleksakhin, G.G. Bogachov, I.P. Zapesochnyi, S.Yu. Ugrin, X ICPEAC (Abstr. of papers, 1300, Paris, 1977).
22. J. Reader, G.L. Epstein, J. Opt. Soc. Amer. 65, 638 (1975).
23. P. Hellentin, Phys. Scr. 13, 155 (1976).

## **SPECTROSCOPIC INVESTIGATION OF OUTER CLOSED SHELL EXCITATION OF THE Ca, Sr and Ba ATOMS BY ELECTRON IMPACT**

S.Yu. Ugrin

Uzhgorod State University, 88000, Uzhgorod, Voloshin str., 54

In the 70<sup>th</sup> under I. S. Aleksakhin leading the Ca, Sr, and Ba emission spectra between the 40-120 nm as well as cross-section energy dependences of their spectral lines have been investigated using high-vacuum setup with electron and atom crossed beams. The effective excitation of the resonance lines of the two- and three-charged ions have been established. A number of earlier unknown lines attributed to radiative decay of atomic and ionic autoionizing states have been found. The conclusion about dominating role of one-electron processes when creating of multiply-charged ions due to electron-atom collisions has been made.