

ВОЗБУЖДЕНИЕ АТОМОВ КАЛИЯ И ЦЕЗИЯ  
ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ В ИОННЫЕ СОСТОЯНИЯ*Е. Н. Постой, И. С. Алексахин и П. Г. Иванчов*

Приведены результаты исследований процесса возбуждения дискретных ионных состояний калия и цезия при электронно-атомных столкновениях. Исследования проводились методом пересекающихся электронного и атомного пучков, а в случае малоинтенсивных переходов использовалась паронаполненная ячейка.

В данной работе приводятся результаты систематических исследований процесса возбуждения дискретных ионных состояний калия и цезия при электронно-атомных столкновениях. Процесс этот исследован столь неполно, что имеющиеся частичные данные [1, 2] не позволяют сделать какие-либо выводы о закономерностях возбуждения ионных состояний. Между тем такие сведения необходимы для понимания механизма многократного возбуждения атомов электронным ударом.

Исследования проводились методом пересекающихся электронного и атомного пучков и лишь только при изучении малоинтенсивных переходов использовалась паронаполненная ячейка. Электронный пучок в обоих случаях формировался двухэлектродной электронной пушкой. При этом интенсивность его при  $E=300$  эВ была  $\sim 300$  мкА, а энергетическая неоднородность электронов пучка составляла  $\sim 0.8$  эВ при  $E=40$  эВ. Специальная конструкция приемника электронов предупреждала появление вторичных электронов в области столкновений. Изучаемые спектральные линии выделялись из спектра излучения монохроматором МДР-2 и регистрировались ФЭУ (типа 18А и 79) с последующим усилением фототока электрометрическим усилителем типа У1-7.

Измерения проводились в два этапа. Вначале тщательно исследовались энергетические зависимости эффективностей возбуждения; при фиксированных параметрах эксперимента определялось соотношение эффективностей в системе одного атома. Затем проводились измерения абсолютных значений сечений возбуждения. При этом определялась концентрация нормальных атомов  $N$  и устанавливалось соотношение между интенсивностями реперной линии<sup>1</sup> и соответствующего участка спектра эталонной лампы (СИ-8-200 и ВСФУ-3, прокалиброванной методом сравнения с первой).

С целью получения достоверных значений сечений возбуждения особое внимание уделялось определению концентрации нормальных атомов. При измерениях в пересекающихся пучках концентрация атомов в месте пересечения пучков определялась одновременно как радиотехническим методом, так и по полному ионному току с использованием известных сечений ионизации [3]. В обоих случаях величины концентраций совпадали с точностью 8%. В паронаполненной ячейке концентрация атомов определялась исходя из известной температурной зависимости давления насыщенного пара [4] и по ионному току насыщения, получаемого путем термической ионизации атомов калия и цезия на накаливаемой поверхности

<sup>1</sup> Реперные линии в таблице обозначены звездочками.

Переход	$\lambda, \text{Å}$	$E_0, \text{эВ}$	$E_{\text{max}}, \text{эВ}$	$Q_E = 100 \text{ эВ} \cdot 10^{18}, \text{ см}^2$	$Q_{\text{max}} \cdot 10^{18}, \text{ см}^2$
---------	---------------------	------------------	-----------------------------	--	--

К а л и й

$3d [^3/2]_2^0 - 4p [^1/2]_1$	5470	27.05	100	1.08	1.08
$4s' [^1/2]_1^0 - 4p [^1/2]_1$	5970	27.05	100	1.06	1.06
$3d [^5/2]_2^0 - 4p [^3/2]_2$	6012	27.67	48	8.07	8.27
$3d [^7/2]_2^0 - 4p [^3/2]_1$	6247	27.59	50	14.7	17.0
$3d [^7/2]_3^0 - 4p [^5/2]_2$	6307	27.48	55	68.5	72.1
$4s [^3/2]_1^0 - 4p [^1/2]_0$	3767	27.87	45	0.17	0.22
$4s [^3/2]_2^0 - 4p [^3/2]_2$	3898	27.67	48	2.11	2.43
$4s [^3/2]_2^0 - 4p [^5/2]_2$	4135	27.48	54	2.29	2.63
$4s [^3/2]_2^0 - 4p [^5/2]_3$	4186	27.45	55	12.3	17.0
$4s [^3/2]_1^0 - 4p [^5/2]_2$	4263	27.48	50	40.8	45.0
$3d [^1/2]_1^0 - 4p [^3/2]_1$	4340	27.59	52	1.18	1.43
$4s' [^1/2]_1^0 - 4p [^3/2]_1$	4467	27.59	50	5.77	6.55
$3d [^1/2]_1^0 - 4p [^5/2]_2$	4505	27.48	48	1.7	2.0
$4s' [^1/2]_1^0 - 4p [^3/2]_2$	4608	27.67	50	32.2	35.7
$4s [^3/2]_2^0 - 4p [^1/2]_1$	4829	27.05	100	10.1	10.1
$3d [^1/2]_1^0 - 4p [^1/2]_1$	5056	27.05	100	1.42	1.42
$4s' [^1/2]_1^0 - 4p [^3/2]_1$	4774	27.59	32	19.7	37.0
$4s' [^1/2]_1^0 - 4p [^5/2]_3$	5017	27.45	100	7.80	7.80
$4s' [^1/2]_1^0 - 4p' [^1/2]_0$	3531	27.49	80	2.46	2.73
$4s' [^1/2]_1^0 - 4p' [^3/2]_2$	4309	27.85	50	47.9	57.0
$4s' [^1/2]_1^0 - 4p' [^3/2]_1$	4149	27.80	50	13.8	17.8
$4p [^1/2]_1 - 5s [^3/2]_2^0$	3404	30.69	90	9.3	9.3
$4p [^5/2]_2 - 5s [^3/2]_1^0$	3800	30.75	95	1.16	1.2
$4p [^5/2]_3 - 5s [^3/2]_2^0$	3861	30.69	90	1.16	1.91
$4p [^3/2]_2 - 5s [^3/2]_1^0$	4025	30.75	90	1.63	1.63
$4p [^3/2]_2 - 5s [^3/2]_2^0$	4094	30.69	100	5.4	5.4
$4p' [^3/2]_2 - 5s [^3/2]_2^0$	4362	30.69	90	8.81	11.0
$4p' [^1/2]_1 - 5s [^3/2]_2^0$	4455	30.69	100	5.82	5.82
$4p' [^3/2]_1 - 5s [^3/2]_1^0$	4209	30.75	50	8.9	10.0
$4p' [^3/2]_2 - 5s' [^1/2]_1^0$	3942	31.00	100	7.16	7.16
$4p' [^1/2]_1 - 5s' [^1/2]_1^0$	4065	30.96	100	7.55	7.55
$4p [^5/2]_2 - 4d [^3/2]_2^0$	3291	31.25	48	0.23	0.27
$4p' [^3/2]_2 - 4d [^5/2]_2^0$	3384	31.52	48	2.71	6.7
$4p [^3/2]_2 - 4d [^7/2]_3^0$	3380	31.33	48	4.16	5.55
$4p' [^3/2]_1 - 4d [^3/2]_2^0$	3756	31.40	50	0.23	0.26
$4p' [^3/2]_2 - 4d [^7/2]_3^0$	3562	31.33	60	3.2	3.63

Ц е з и й

$5d [^5/2]_2^0 - 6p [^5/2]_2$	6536	19.77	100	83	83
$5d [^5/2]_2^0 - 6p [^5/2]_3$	6129	19.90	110	91	91
$5d [^7/2]_4^0 - 6p [^5/2]_3$	5926	19.90	30-40	7.9	10.6
$5d [^3/2]_1^0 - 6p [^5/2]_2$	5831	19.77	100	30.4	30.4
$5d [^5/2]_2^0 - 6p [^3/2]_2$	5563	20.10	30-40	12.6	15.8
$6s [^3/2]_2^0 - 6p [^1/2]_1$	5227	19.57	35	8.4	38.4
$6s [^3/2]_2^0 - 6p [^5/2]_2$	4830	19.77	35	6.9	8.1
$5d [^7/2]_3^0 - 6p [^3/2]_2$	4028	20.10	30-40	1.2	5.4
$5d' [^3/2]_1^0 - 6p' [^1/2]_1$	5017	21.66	100	21.2	21.2
$5d' [^3/2]_1^0 - 6p' [^3/2]_2$	5060	21.67	30	12.4	56
$5d' [^5/2]_2^0 - 6p' [^3/2]_2$	4348	21.67	120	13.4	15.3
$5d' [^3/2]_2^0 - 6p' [^3/2]_2$	4213	21.67	30	1.2	5.3
$5d [^5/2]_3^0 - 6p' [^3/2]_2$	3368	21.67	35	0.8	3.8
$5d [^5/2]_2^0 - 6p' [^1/2]_1$	3271	21.66	100	0.13	0.13
$6s [^3/2]_1^0 - 6p' [^3/2]_1$	2971	21.44	35	0.09	0.23
$6p [^3/2]_2 - 6d [^3/2]_1^0$	4670	22.75	35	0.24	1.12

Таблица (продолжение)

Переход	$\lambda$ , Å	$E_b$ , эв	$E_{\max}$ , эв	$QE = 100 \text{ эв} \cdot 10^{18}$ , см <sup>2</sup>	$Q_{\max} \cdot 10^{18}$ , см <sup>2</sup>
6p $[\frac{3}{2}]_2 - 6d [\frac{3}{2}]_2^0$	4539	22.83	—	3.5	
6p $[\frac{3}{2}]_1 - 6d [\frac{3}{2}]_1^0$	4507	22.75	28	1.1	4.8
6p $[\frac{3}{2}]_2 - 6d [\frac{7}{2}]_3^0$	4363	22.94	28	1.7	4.1
6p $[\frac{5}{2}]_3 - 6d [\frac{3}{2}]_2^0$	4221	22.83	30	1.2	2.0
6p $[\frac{5}{2}]_2 - 6d [\frac{3}{2}]_2^0$	4047	22.83	30	1.1	2.7
6p $[\frac{5}{2}]_2 - 6d [\frac{5}{2}]_2^0$	3965	22.89	30	0.1	0.24
6p $[\frac{5}{2}]_2 - 6d [\frac{5}{2}]_3^0$	3925	22.93	33	0.2	0.62
6p $[\frac{5}{2}]_2 - 6d [\frac{7}{2}]_3^0$	3906	22.94	30	1.3	2.7
—	3805	—	35	0.05	0.23
6p $[\frac{1}{2}]_1 - 6d [\frac{5}{2}]_2^0$	3732	22.89	—	0.3	
6p' $[\frac{1}{2}]_0 - 7s' [\frac{1}{2}]_1^0$	5358	24.12	100	10.7	10.7
6p' $[\frac{3}{2}]_1 - 7s' [\frac{1}{2}]_1^0$	4623	24.12	—	1.35	
6p $[\frac{1}{2}]_0 - 7s' [\frac{1}{2}]_1^0$	3329	24.12	100	0.7	0.7
6p $[\frac{5}{2}]_3 - 7s [\frac{3}{2}]_2^0$	4972	22.39	110	17.3	18.0
6p $[\frac{1}{2}]_1 - 7s [\frac{3}{2}]_2^0$	4405	22.39	100	2.0	2.0
6p' $[\frac{1}{2}]_0 - 165813_1^0$	4695	24.45	—	2.5	
6p' $[\frac{3}{2}]_1 - 168724_2^0$	3680	24.81	40	0.3	0.91
6p $[\frac{3}{2}]_2 - 158717_2^0$	3576	23.57	35	0.34	1.54
6p' $[\frac{3}{2}]_2 - 172544_3^0$	3429	25.28	—	0.72	0.72
6p' $[\frac{1}{2}]_0 - 175954_1^0$	3180	25.70	—	0.2	
6p' $[\frac{3}{2}]_1 - 173244_2^0$	3155	25.37	35	0.13	0.31
6s $[\frac{3}{2}]_1^0 - 6p [\frac{1}{2}]_1$	5371	19.57	115	18.2	18.7
6s $[\frac{3}{2}]_2^0 - 6p [\frac{3}{2}]_2$	4277	20.10	28	2.8	5.8
5d $[\frac{3}{2}]_1^0 - 6p [\frac{1}{2}]_0$	4502	20.40	30	2.3	2.8

вольфрама  $[\frac{5}{2}]$  (при этом ионизирующая поверхность находилась в непосредственной близости к области столкновений). В этих случаях наблюдалось расхождение в значениях  $N$  более чем в два раза, которое, по-видимому, связано с тем, что в ячейке не выполняются условия, для которых выведена формула температурной зависимости давления насыщенного пара. Поскольку сечение реперной линии в этих измерениях, полученное с учетом значения  $N$ , определенного по поверхностной ионизации, хорошо согласуется с сечением этой линии, полученным в пересекающихся пучках, то мы отдавали предпочтение значению концентрации, полученному методом поверхностной ионизации. Обычно концентрация нормальных атомов варьировалась в пересекающихся пучках в пределах  $10^{11} \div 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , а в ячейке —  $10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Средняя квадратичная ошибка измерения абсолютных значений сечений возбуждения (полученных в шести измерениях) составляет  $\sim 8\%$ .

Свидетельством того, что возбужденные ионы появлялись в результате однократного столкновения электронов с атомами, служила линейная зависимость между интенсивностью излучаемых спектральных линий и электронным током, а также тот факт, что энергетический порог появления этих линий равен сумме потенциалов ионизации нормального атома и возбуждения иона с его основного состояния.

При проведении экспериментов мы ставили задачу как можно более полно изучить переходы с уровней различных конфигураций. На рис. 1 и 2 приведены диаграммы уровней К II и Cs II (построенные по данным таблиц Мур  $[\frac{6}{1}]$ ) и наиболее характерные спектральные переходы.

В таблице представлены исследованные переходы, соответствующие им длины волн, энергии порогов и максимумов возбуждения, значения сечений в максимуме и при  $E=100$  эв. Функции возбуждения переходов, для которых в таблице не указаны  $E_{\max}$ , экспериментально не изучались: эффективные сечения их определены только при  $E=100$  эв. Из таблицы видно, что сечения возбуждения переходов с уровней конфигураций

$3p^5 4p$  ( $4p'$ )KII и  $5p^5 6p$  ( $6p'$ )Cs II велики и по порядку величины сравнимы с сечениями интенсивных нерезонансных переходов KI и CsI [2], причем сечения Cs II больше сечений соответствующих переходов K II.

Изученные энергетические зависимости сечений возбуждения по виду можно разделить на три класса. На рис. 3-5 приведены типичные для каж-

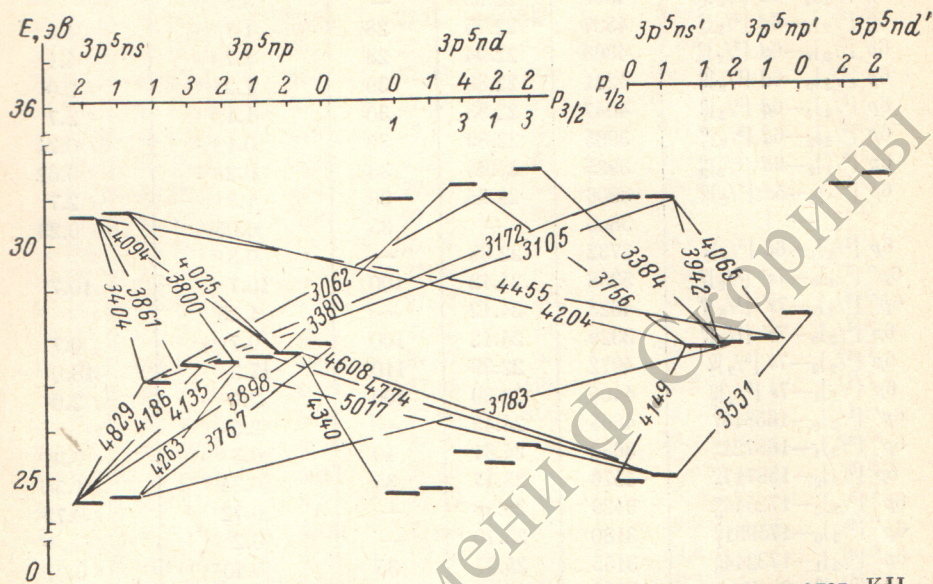


Рис. 1. Диаграмма энергетических уровней и спектральных переходов KII.

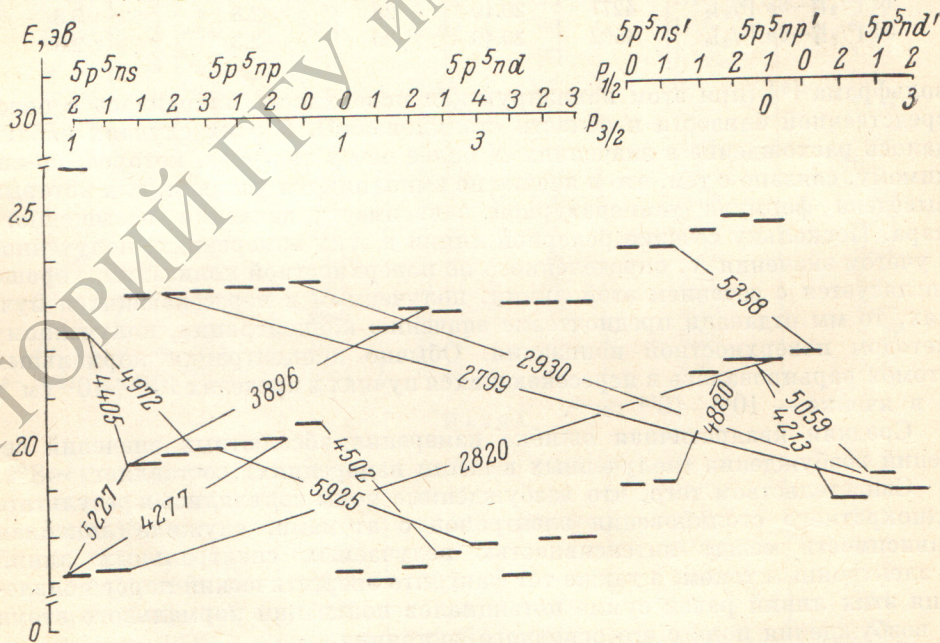


Рис. 2. Диаграмма энергетических уровней и спектральных переходов CsII. Указаны только наиболее характерные из изученных переходов.

дого класса функции переходов K II и Cs II.<sup>2</sup> Как видно из рисунков, функции возбуждения первого типа (рис. 3) характеризуются довольно плавным возрастанием эффективности с широким максимумом в области 100 эв. Для второго класса (рис. 4) характерно резкое возрастание у порога воз-

<sup>2</sup> Для удобства сравнения энергетические зависимости приведены в относительных единицах, нормированные в максимуме на одну и ту же величину.

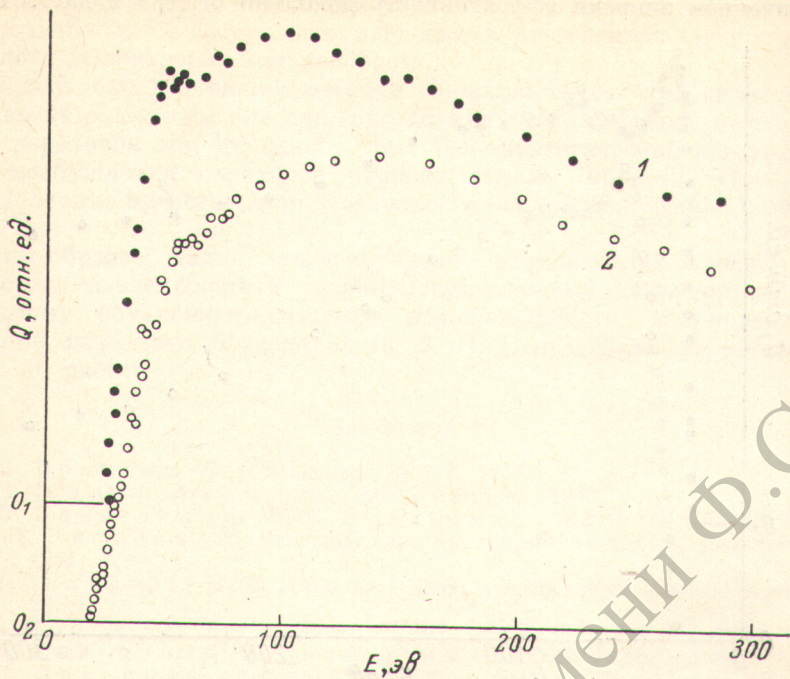


Рис. 3. Функции возбуждения спектральных переходов.

1 —  $4s [3/2]_2^0 - 4p [1/2]_1$  ( $\lambda 4829 \text{ \AA}$ ) KII,  
 2 —  $6s [3/2]_1^0 - 6p [1/2]_1$  ( $\lambda 5371 \text{ \AA}$ ) CsII.

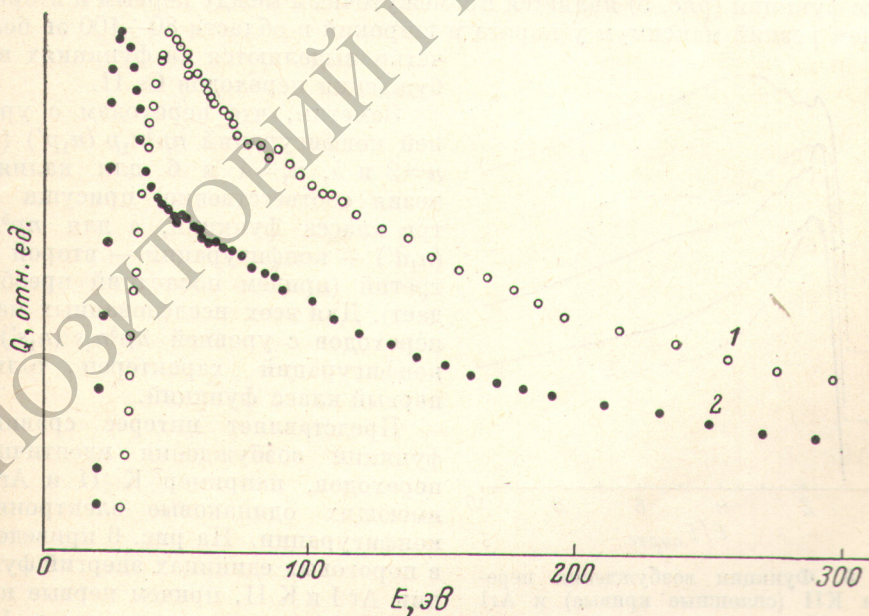


Рис. 4. Функции возбуждения спектральных переходов.

1 —  $4s [3/2]_2^0 - 4p [5/2]_3$  ( $\lambda 4186 \text{ \AA}$ ) KII,  
 2 —  $6s [3/2]_2^0 - 6p [3/2]_2$  ( $\lambda 4277 \text{ \AA}$ ) CsII.

буждения, причем максимум достигается примерно через  $0.5 E_{\text{порог}}$ . С увеличением энергии эффективность довольно быстро падает. Третий

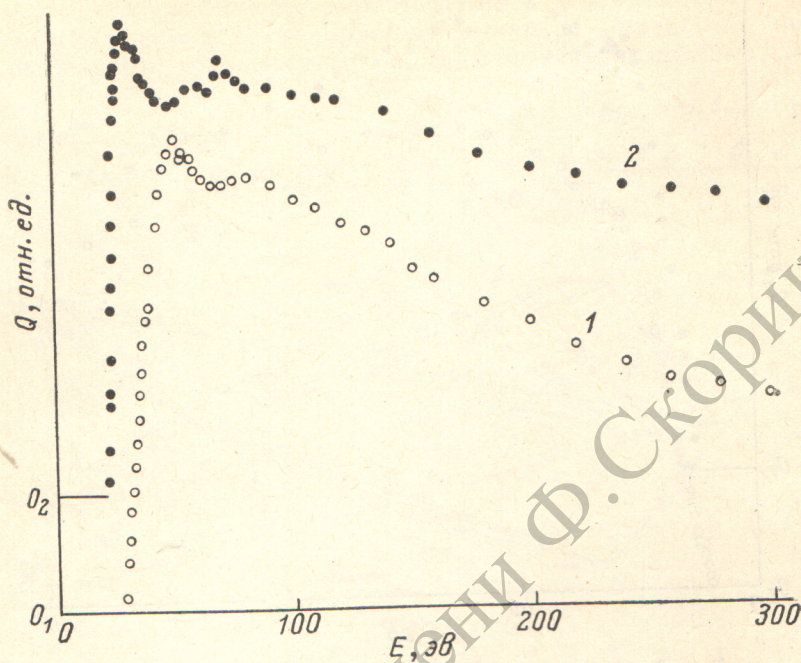


Рис. 5. Функции возбуждения спектральных переходов.

- 1 —  $4s' [1/2]_0^0 - 4p [3/2]_2$  ( $\lambda 4608 \text{ \AA}$ ) К II,  
2 —  $5d [3/2]_0^0 - 6p [1/2]_0$  ( $\lambda 4502 \text{ \AA}$ ) Cs II.

класс функций (рис. 5) является промежуточным между первым и вторым, причем резкий максимум у порога и широкий в области  $80 \div 100$  эВ более четко выделяются на функциях возбуждения переходов Cs II.

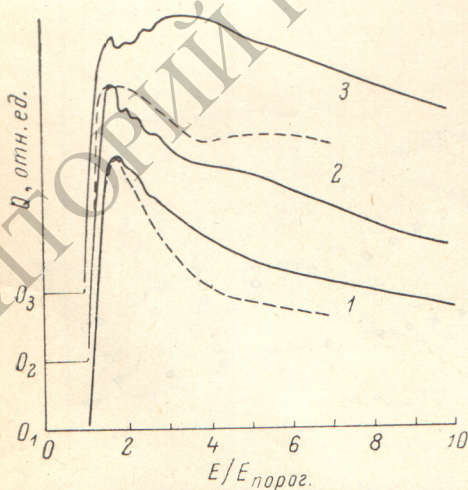


Рис. 6. Функции возбуждения переходов К II (сплошные кривые) и Ag I (штриховые кривые).

- 1 —  $4s [3/2]_0^0 - 4p' [1/2]_1$  ( $\lambda 3618 \text{ \AA}$  К II,  $\lambda 6965 \text{ \AA}$  Ag I),  
2 —  $4s [3/2]_1^0 - 4p [1/2]_0$  ( $\lambda 3767 \text{ \AA}$  К II,  $\lambda 7514 \text{ \AA}$  Ag I),  
3 —  $4s [3/2]_2^0 - 4p [1/2]_1$  ( $\lambda 4829 \text{ \AA}$  К II).

Заметим, что переходам с уровней конфигураций  $np^5n_1p (n_1p')$  (где  $n=3$  и  $5$ ,  $n_1=4$  и  $6$  для калия и цезия соответственно) присущи все три класса функций, а для  $np^5n_1d' (n_1d')$  — конфигураций — второй и третий (причем последний преобладает). Для всех исследованных нами переходов с уровнями  $np^5n_1s (n_1s')$  — конфигураций характерен только первый класс функций.

Представляет интерес сравнить функции возбуждения идентичных переходов, например К II и Ag I, имеющих одинаковые электронные конфигурации. На рис. 6 приведены в пороговых единицах энергии функции Ag I и К II, причем первые нормированы по максимуму вторых. Как видно, функции возбуждения аргона в общих чертах подобны функциям второго и третьего класса К II. Однако у аргона, хотя он довольно полно

изучен [7], не обнаружено энергетических зависимостей сечений, аналогичных первому классу функций К II. Последнее обстоятельство совместно

с тем фактом, что функции первого класса подобны функциям прямой ионизации  $p$ -электрона у щелочных атомов [8, 9], наводит на мысль, что в этом случае более эффективно идет отрыв  $p$ -электрона с возбуждением валентного  $s$ -электрона, чем наоборот.

Казалось бы, что энергетическая зависимость сечений, классифицированная нами третьим классом (рис. 5), является результатом каскадного вклада переходов второго класса (рис. 4) в энергетический ход эффективностей возбуждения переходов первого класса (рис. 3). Однако детальный анализ представленных результатов не подтверждает такой точки зрения.

Таким образом, видно, что возбуждение атомов калия и цезия в ионные состояния электронным ударом носит сложный характер, который, по-видимому, обусловлен сильным межоболочечным взаимодействием.

Авторы выражают благодарность И. П. Запесочному за постоянный интерес к работе.

#### Литература

- [1] Л. М. Волкова. Опт. и спектр., 6, 273, 1959.
- [2] Л. Л. Шимон. Автореф. канд. дисс., Ужгород, 1968.
- [3] И. П. Запесочный, И. С. Алексахин, ЖЭТФ, 55, 76, 1968.
- [4] Ан. Н. Несмеянов. Давление пара химических элементов. Изд. АН СССР, М., 1961.
- [5] Э. Я. Зандберг, Н. И. Ионов. Поверхностная ионизация. Изд. «Наука», М., 1969.
- [6] С. Е. Мооре. Nat. Bur. Stand., Circ. 467, vol. I, 1949; vol. III, 1958.
- [7] П. В. Фельцан, И. П. Запесочный. УФЖ, 12, 633, 1967.
- [8] А. К. Лиениньш. Автореф. канд. дисс., Рига, 1972.
- [9] K. Omidvar, H. L. Kyle, E. G. Sullivan. NASA preprint X-641-71—145. Coddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 1971.

Поступило в Редакцию 2 октября 1973 г.