

***KLM* - ПЕРЕХОДЫ ОЖЕ В ЛЕГКИХ АТОМАХ: ${}_{23}V, {}_{31}Ga$**

М.И. Бабенков, В.С. Жданов, С.А. Стародубов

Исследованы *KLM*-спектры Оже ванадия и галлия. Установлено, что в легких атомах вероятности *KLM*-переходов описываются теорией, основанной на приближении промежуточной связи. Энергии *KLM*-переходов, включающих *3d*-оболочку, в полуэмпирических расчетах ¹ существенно завышены.

Относительные интенсивности *KLM*-переходов Оже в атомах с $Z > 35$ удовлетворительно описываются релятивистскими расчетами в схеме *jj*-связи ². Экспериментальные исследования для $Z < 35$ не проводились. Представлялось, что, поскольку атом в результате *KLM*-перехода остается ионизованным в разных оболочках, схема *jj*-связи окажется приемлемой и для легких атомов. Нами проведены измерения *KLM*-спектров ванадия ($Z = 23$) и галлия ($Z = 31$) и выполнены нерелятивистские расчеты вероятностей соответствующих переходов в приближении промежуточной связи ³. Установлено, что для описания *KLM*-переходов в области атомов $Z < 35$ схема *jj*-связи не пригодна.

Спектры *KLM*-электронов Оже исследовались методами ядерной спектроскопии. Измерения проводились на магнитном бета-спектрометре с позиционно-чувствительным детектором в фокальной плоскости ⁴. Применение этого однокоординатного детектора, состоящего из шеврона микроканальных пластин, почти на два порядка увеличило скорость измерений спектров при значительном улучшении отношения эффект/фон.

K-оже переходы сопровождают электронный захват в ${}_{54}^{24}Cr$ и ${}_{32}^{71}Ge$. Бета-источники получены термическим испарением на неэквипотенциальные подложки облученных в потоке реакторных нейтронов $\sim 1,2 \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ металлических мишеней ${}_{24}^{50}Cr$ (содержание изотопа 88%) и ${}_{32}^{70}Ge$ (содержание изотопа 96%). Поверхностная плотность бета-источников составляла десятые доли мкг $\cdot \text{см}^{-2}$.

Для удобства сравнения с теорией измеренные интенсивности отнесены к $10^{-3} \cdot \sum KL_{1-3} M_{1-3}$. В таблице приведены результаты релятивистских хартри-фок-слейтеровских (ХФС) расчетов в схеме *jj*-связи ⁵ и нерелятивистских ХФС расчетов в приближении промежуточной связи ³. В ³ для вычислений использовались интегралы Слейтера из ¹ и амплитуды переходов, табулированные в ⁶.

Из сравнения следует, что:

1. В пределах погрешностей измерений интенсивности *KLM*-переходов в ванадии согласуются с НХФС расчетами в промежуточной связи ³. Возможный вклад корреляционных эффектов не превышает величин ошибок измерений.

2. В галлии ($Z = 31$) заметно проявление релятивистских эффектов. Измеренные относительные интенсивности $KL_1 M_{1-}$ и $KL_1 M_{2,3}$ линий превышают нерелятивистские оценки.

3. На переходы, приводящие к конечной конфигурации "дырок" $(2p)^{-1} (3p)^{-1}$, релятивистские эффекты влияют слабо, но для них наиболее важна роль промежуточной связи. Этот

Линии	Ванадий, Z = 23					Галлий, Z = 31				
	Интенсивности			Отн. энергии, эВ		Интенсивности			Отн. энергии, эВ	
	Эксп.	Теория	3	5	Эксп.	Расчет	3	5	Эксп.	Расчет
KL_1M_1	89 ± 3	88	88	93	- 138,5 ± 1,1	- 138,2	84	102	- 209,8 ± 0,8	- 209,6
$KL_1M_{2,3}$	149 ± 5	141	141	169	- 108,3 ± 0,8	- 105,6	140	150	- 154,0 ± 1,2	- 152,0
KL_2M_1	60 ± 9	56	56	45	- 28,9 ± 1,3	- 28,6	47	38	- 54,3 ± 1,2	- 51,2
KL_3M_1	71 ± 10	74	74	83	- 21,1 ± 1,4	- 21,4	78	84	- 24,4 ± 1,3	- 25,1
$KL_2M_{2,3}$	411 ± 11	397	397	206	0	0	308	213	0	0
$KL_3M_{2,3}$	221 ± 9	244	244	403	8,9 ± 0,8	7,1	344	413	23,3 ± 0,6	26,4
$KL_2M_{4,5}N$	12 ± 2	-	-	-	39,1 ± 1,5	55,0	-	22	88,5 ± 1,5	95,7
$KL_3M_{4,5}N$	29 ± 2	-	-	-	50,6 ± 0,9	62,5	-	40	111,4 ± 1,2	122,5

вывод следует и из анализа нерелятивистской теории с jj -связью, показывающего, что в ней отношение интенсивностей групп линий $KL_2M_{2,3}$ и $KL_3M_{2,3}$ равно 0,5.

Измеренные относительные энергии сильнейших KLM -линий с точностью 2 – 3 эВ согласуются с результатами полуэмпирических расчетов Ларкинса ¹. Однако для переходов, включающих $3d$ -электроны, данные ¹ явно завышены. В частности, энергии $KL_2M_{4,5}$ - и $KL_3M_{4,5}$ -групп линий ванадия согласно ¹ превышают энергии рентгеновских K_{α_2} - и K_{α_1} -переходов, что противоречит закону сохранения энергии.

В ¹ энергии переходов Оже формируются из эмпирических энергий связи электронов в атомных подоболочках, а также рассчитанных для полностью заполненных оболочек интегралов Слейтера и поправок, учитывающих адиабатическую релаксацию и частичное экранирование "дырок" электронами из валентной зоны. Первая из них вычислялась для конечной конфигурации "дырок" $(2s)^{-1}(3s)^{-1}$ и предполагалось, что ее величина почти не зависит от орбитальных квантовых чисел "дырок". Указанные поправки увеличивают энергию KLM -переходов на ~ 20 эВ в ванадии и на ~ 30 эВ в галлии.

Подробный анализ выражений для энергий $KL_{2,3}M_{4,5}$ -переходов показывает, что, хотя в случае ванадия $3d$ -оболочка не заполнена, разногласия между расчетами ¹ и результатами измерений не могут быть вызваны только непригодностью метода вычислений интегралов Слейтера, развитого Ларкинсом ¹ для заполненных оболочек. В случае галлия все $3d$ -состояния заняты и тем не менее энергии этих переходов остаются в ¹ значительно завышенными. Представляется, что разногласия являются следствием того, что поправка на адиабатическую релаксацию для KLM -переходов, включающих $3d$ -электроны, в области атомов с $Z \lesssim 30$ заметно отличается от принятой в ¹.

Литература

1. *Larkins F.P.* At. Data Nucl. Data Tables, 1977, 20, 311.
2. *Babnikov M.I., Bobykin B.V., Zhdanov V.S., Petukhov V.K.* Second International Conference on Inner Shell Ionization Phenomena: Abstract Contributed Paper, Freiburg, 1976, p. 134.
3. *Бабенков М.И., Жданов В.С., Петухов В.К., Стародубов С.А.* Тезисы докладов 36 Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Ленинград: Наука, 1986, с. 268.
4. *Бабенков М.И., Жданов В.С., Стародубов С.А.* Тезисы докладов 36 Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Ленинград: Наука, 1986, с. 529.
5. *Chen M.H., Crasemann B., Mark H.* At. Data Nucl. Data Tables, 1979, 24, 13.
6. *Walters D.L., Bhalla C. P.* At. Data, 1971, 3, 301.