

ДЛИНЫ ВОЛН И ЭНЕРГИИ УРОВНЕЙ ДИЭЛЕКТРОННЫХ  
САТЕЛЛИТОВ ЛИНИЙ ГЛАВНОЙ СЕРИИ ГЕЛИЕПОДОБНЫХ  
ИОНОВ

Л. А. Вайнштейн, М. А. Мазинг, А. П. Шевелько

УДК 535.338.3 + 539.184

Экспериментально изучена энергетическая структура диэлектронных сателлитов линий главной серии гелиеподобных ионов кальция и титана. Сопоставление с теоретическими данными показывает, что сравнительно простой экстраполяционный метод расчета дает структуру спектра, хорошо согласующуюся с экспериментом.

В рентгеновских спектрах гелиеподобных ионов, возбуждаемых в высокотемпературной плазме, наиболее интенсивным является резонансный переход  $1s^2 - 1s2p$  с прилегающей к нему группой линий — так называемых диэлектронных сателлитов, соответствующих радиационному распаду автоионизационных состояний  $1s2l'nl$  с переходом "внутреннего" ( $2l'$ ) электрона:  $1s^2nl - 1s2l'nl$ . Радиационный распад состояний  $1s2l'nl$  с переходом "внешнего" ( $nl$ ) электрона  $1s^22l' - 1s2l'nl$  приводит к появлению сателлитов у линий главной серии гелиеподобного иона  $1s^2 - 1snp$ . В лазерной плазме линии главной серии наблюдались в гелиеподобных ионах с зарядом ядра до  $Z_N = 17 / I$ . Сателлитная структура таких спектров мало изучена.

Мы измерили длины волн и исследовали интенсивности линий главной серии и сопутствующих им сателлитов для гелиеподобных ионов лазерной плазмы кальция и титана ( $Z_N = 20, 22$ ). Первые результаты были представлены в /2/. В настоящей работе приводятся результаты измерений и сопоставление с расчетными данными длин волн линий. В эксперименте наблюдались линии главной серии до  $n = 8$  в ионах  $Ca_{XIX}$  и  $Ti_{XXI}$ . Вблизи линий

наблюдались группы спутников  $1s^2 2l^m - 1s 2l^m n l$ , отчетливо различные до  $n = 5$ . (В дальнейшем для краткости под [He]-ионом будем понимать гелиеподобный ион; к опорной линии и соответствующим спутникам будем относить переходы с одним и тем же квантовым числом  $n$ .)

Для создания плазмы использовался лазер на неодимовом стекле с энергией импульса 25 – 30 Дж и длительностью 5 нс. Излучение лазера фокусировалось на плоскую мишень линзой  $f/6$  в пятно диаметром 25 – 30 мкм /3/.

Все спектры были получены за одну вспышку лазера при помощи спектрографа, выполненного по схеме Гамаша /4/ (радиус изгиба кристалла слюды 20 мм, регистрация на фотопленку УФ-ВР /5/). Область перехода с  $n = 2$  приходилось ослаблять в 20–30 раз по интенсивности, чтобы плотность почернения на фотопленке в этом участке спектра не превышала 2 – 2,5.

Таблица I.

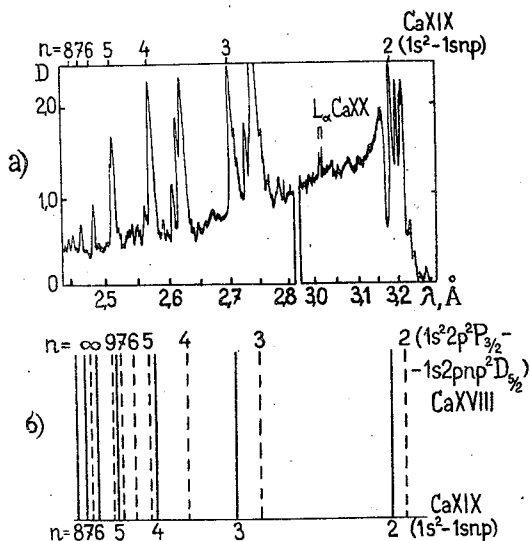
Длины волн (в Å) линий главной серии  $1s^2 - 1snp$  [He]-ионов СаХІХ и ТіХХІ (точность измерений  $\lambda \pm 0,001 \text{ Å}$ ).

СаХІХ			ТіХХІ		
n	измерение	расчет	n	измерение	расчет
2	3,1764 *	3,1764 *	2	2,6097 *	2,6097 *
3	2,7048 *	2,7048 *	3	2,2208 *	2,2208 *
4	2,571	2,5709	4	2,111	2,1105
5	2,514	2,5133	5	2,064	2,0630
6	2,484	2,4830	6	2,038	2,0381
7	2,466	2,4652	7	2,024	2,0234
8	2,455	2,4537	8	2,014	2,0139

\* Длины волн, использованные в качестве реперов.

Результаты определения длин волн линий [He]-иона при  $n = 4 - 8$  приведены в табл. I. В качестве реперов использовались линии [He]-иона при  $n = 2$  и 3 (расчетные данные для длин волн приведены в /6/).

Одновременно были проведены теоретические расчеты длин волн и вероятностей радиационного (A) и автоионизационного (Г) распадов для опорных линий и сателлитов ионов CaXIX и TiXXI. Расчет проводился методом теории возмущений по I/Z /6/. Коэффициенты разложения матрицы энергии по степеням I/Z были рассчитаны для состояний с  $n = 3$ . Для  $n > 3$  использовались асимптотические формулы с сохранением членов вида  $C_2/n^2$  и  $C_3/n^3$ . При этом параметры  $C_3$  определялись путем приравливания асимптотического выражения при  $n = 3$  известному значению соответствующего коэффициента разложения. Полученное таким об-



Р и с. I. а) Денситограмма спектра CaXIX - CaXVIII. Область перехода  $n = 2$  ослаблена в 20 раз. б) Теоретически рассчитанный спектр CaXIX - CaXVIII. Сплошными линиями показано положение линий главной серии [He]-иона CaXIX, пунктирными - положение наиболее интенсивных сателлитов к линиям с главным квантовым числом  $n$  (Ca XVIII)

разом значение  $C_3$  отличается от точного асимптотического. Однако такая процедура позволяет надеяться на частичную компенсацию погрешности асимптотической формулы при  $n = 4 - 5$ , а при больших  $n$  вклад членов  $\sim 1/n^3$  мал. Более подробно метод изложен в /7/, где приведены также результаты расчетов для [Н]- и [Не]-ионов магния и железа.

Интенсивности опорных линий с ростом  $n$  убывают приблизительно как  $1/n^3$  ввиду соответствующего уменьшения сечения возбуждения. Можно показать, что интенсивность сателлитов меняется по тому же закону, если конкурирующий переход  $2l^{\circ}$ -электрона запрещен каким-либо правилом отбора.

На рис. 1а приведена денситограмма спектра СаXVIII - СаXIX. При  $n \geq 3$  наиболее интенсивные сателлиты образуют узкую группу, четко отделенную от опорной линии. Это связано с тем, что при переходе  $n1 - 1s$  меняется скачком экранировка оптического электрона  $2l^{\circ}$ -электроном. Это обстоятельство позволяет использовать для диагностики плазмы спектральные приборы умеренного разрешения, что особенно важно для астрофизических приложений. Из рис. 1а видно, что с ростом  $n$  расстояние сателлитов от опорной линии медленно растет, а их интенсивность остается сравнимой с интенсивностью опорной линии. На рис. 1б показано расчетное положение наиболее интенсивных линий. При  $n \geq 6$  сателлиты попадают в область "чужих" опорных линий, а область между линиями [Не]-ионов с  $n = 6$  и 7 соответствует предельному положению сателлитных линий при  $n \rightarrow \infty$ . Заметим, что в спектре Са при  $n = 5$  длина волны наиболее сильного сателлита в пределах ширины линии совпадает с длиной волны опорной линии с  $n = 4$ . В спектре титана эти линии четко разделены.

Мы измерили расстояния в частотах  $\Delta\nu$  от опорных линий [Не]-иона до наиболее интенсивных сателлитов при  $n = 2 - 4$  в спектре Са и при  $n = 2 - 5$  в спектре Тi (табл. 2). Как видно из табл. 2, достаточно простая экстраполяция при проведении теоретических расчетов позволяет получить структуру спектра, хорошо согласующуюся с результатами эксперимента.

Предельное положение автоионизационных состояний  $1s2l^{\circ}n1$  при  $n \rightarrow \infty$  соответствует уровням [Не]-иона  $1s2l^{\circ}$ . Анализ расчетных данных показывает, что уже при  $n \geq 5$  автоионизационные уровни разделяются на группы  $L_1S_1J_1$ , имеющие своим пре-

КОНТИКЕТОВО ОН ОЖЖМ, "6A УНИКЕВ РРЖЕМН, МОССОС ИММТ  
 ЭКНЕВНА АГНЛЕДНО ВНОМ-[eH] АНДО МОНАМТ КИВНУ ЕДУТЮДТО  
 .qS<sup>5</sup>af КИМКОТОО ВМ ВНОМ-[Li] КИПЕННОМ ЭЛЕМЕНТОМ

Таблица 2.

Расстояния в частотах (в ед.  $10^3 \text{ см}^{-1}$ ) между линиями главной  
 серии [Ne]-иона и наиболее интенсивными спутниками:  $\Delta\nu =$

$$= \nu(1s^2 - 1snp) - \nu(1s^2 2p - 1s2l'nl)$$

... .. (878) 11 01, чет. 1978)

n	измерение	сравнение	измерение	расчет
2	324 ± 2	323,709 (18e1)	363 ± 2	365,036
3	600 ± 5	601,061	667 ± 5	667,182
4	773 ± 5	772,599	853 ± 5	855,361
5	880 ± 5	883,581	951 ± 5	946,839
...	-	...	-	...
∞	-	1006,453	∞	1112,760

делом уровни [Ne]-иона  $1s2l'(L_1S_1J_1)$ . Предельная величина рас-  
 стояния группы от своей опорной линии (для краткости  $L_1S_1J_1$   
 опускаем) равна:

$$h\Delta\nu = E(1snl - 1s^2) - E(1s2l'nl - 1s^2 2l')_{n \rightarrow \infty} - I(1s2l') -$$

$$- I(1s^2 2l'),$$

т.е. соответствует разности энергий ионизации I состояния  $1s2l'$   
 [Ne]-иона и состояния  $1s^2 2l'$  [Li]-иона.

Заметим, что предельная величина расстояния в частотах  $\Delta\nu^*$   
 от резонансной линии [Ne]-иона до исследуемых спутников со-  
 ответствует энергии ионизации состояния  $1s^2 2p$  [Li]-иона:

$$h\Delta\nu^* = E(1s2pnl - 1s^2 2p) - E(1s2p - 1s^2)_{n \rightarrow \infty} - E(1s^2) -$$

$$- E(1s^2 2p) = I(1s^2 2p).$$

Таким образом, измеряя величину  $\Delta\nu^*$ , можно по спутниковой структуре линий главной серии [Ne]-иона определить значение потенциала ионизации [Li]-иона из состояния  $1s^2 2p$ .

Поступила в редакцию  
2 августа 1982 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. V. A. Voiko, A. Ya. Faenov, S. A. Pikuz, J. Quant. Spectr. Rad. Transfer, 19, 11 (1978).
2. M. A. Mazing et al., Europ. Conf. on Atomic Phys., Book. of Abstr., Heidelberg, 1981, p. 104.
3. Л. М. Горбунов и др., Препринт ФИАН № 126, М., 1979 г.
4. М. А. Мазинг, А. П. Шевелько, Препринт ФИАН № 155, М., 1980 г.
5. М. А. Мазинг и др., ПТЭ, № 5, 188 (1981).
6. L. A. Vainshtein, U. I. Safronova, Atomic Data and Nuclear Data Tables, 21, 49 (1978); 25, 311 (1980).
7. Л. А. Вайнштейн, У. И. Сафронова, В. Н. Шлящев, Препринт ФИАН № 27, М., 1982 г.