

ДЛИНЫ ВОЛН НЕКОТОРЫХ ЛИНИЙ В РЕНТГЕНОВСКОЙ ОБЛАСТИ
ДЛЯ He-И Li-ПОДОБНЫХ ИОНОВ

Л. А. Вайнштейн, У. И. Сафронова

В рентгеновском излучении солнечной короны и некоторых других астрофизических объектов наблюдаются линии многократно ионизованных ионов. В работе /1/ был проведен расчет длин волн ряда переходов, причем отличие расчетных и экспериментальных данных не превышало 0,01%. Фактически точность расчета оказывается не ниже точности измерений длин волн для этих переходов (при $Z > 6$). В настоящей работе проведен расчет длин волн для He- и Li-подобных ионов. Не останавливаясь на деталях (см., например, /2/), изложим лишь общую идею расчета.

Используя теорию возмущений на базе водородоподобных функций, можно представить матричный элемент гамильтониана в виде ряда по $1/Z$ (Z - заряд ядра). Ограничиваясь при расчете релятивистской части оператором Брейта (т.е. учетом членов, пропорциональных $\alpha^2 = (e^2/\hbar c)^2$), представим матричный элемент в виде:

$$\langle \alpha | H | \beta \rangle = E_0 Z^2 + \Delta E_1 Z + \Delta E_2 + \dots (\alpha^2/4) (\epsilon_0 Z^4 + \Delta \epsilon_1 Z^3 + \dots). \quad (I)$$

Каждый из коэффициентов ΔE_n и $\Delta \epsilon_n$ представляется суммой вкладов фейнмановских диаграмм. Расчет вкладов от диаграмм формально можно разделить на два этапа: проведение суммирования по проекциям моментов и суммирование по главным квантовым числам. Суммирование по проекциям моментов, хотя и довольно громоздко, но проводится в общем виде для всех диаграмм /2/. Суммирование по главным квантовым числам было проведено на ЭВМ. В настоящей работе рассчитаны $\Delta E_1, \Delta E_2$ для нерелятивистской части энергии и ϵ_0 и $\Delta \epsilon_1$ для релятивистской части.

Используя рассчитанные параметры и проводя диагонализацию матриц для каждого значения J , были вычислены энергии уровней

Таблица I.

Длины волн переходов, Å

Переходы	LSJ	Z = 8	Z = 10	Z = 12	Z = 16	Z = 20
$1s2p(\text{LSJ}) - 1s^2 1S_0$	1P_1	21,604	13,448	9,169	5,038	3,177
	3P_1	21,800	13,552	9,230	5,066	3,192
	3P_2	21,797	13,549	9,227	5,062	3,188
$1s2s(\text{LSJ}) - 1s^2 1S_0$	3S_1	22,097	13,698	9,314	5,101	3,211
$2s2p[^1P]1s(\text{LSJ}) - 1s^2 2s 2S_{1/2}$	$^2P_{1/2}$	21,842	13,566	9,236	5,066	3,191
	$^2P_{3/2}$	21,842	13,565	9,235	5,065	3,190
$2s2p[^3P]1s(\text{LSJ}) - 1s^2 2s 2S_{1/2}$	$^2P_{1/2}$	22,027	13,655	9,286	5,087	3,202
	$^2P_{3/2}$	22,025	13,653	9,284	5,085	3,200
	$^4P_{1/2}$	22,375	13,837	9,392	5,133	3,226
	$^4P_{3/2}$	22,374	13,836	9,391	5,132	3,225
	$^4P_{5/2}$	22,372	13,834	9,389	5,130	3,222
$1s2p^2(\text{LSJ}) - 1s^2 2p 2P_{1/2}$	$^2S_{1/2}$	21,781	13,536	9,218	5,058	3,185
	$^2P_{1/2}$	22,066	13,676	9,298	5,091	3,203
	$^2P_{3/2}$	22,063	13,673	9,294	5,087	3,200
	$^2D_{3/2}$	22,125	13,707	9,315	5,098	3,206
	$^2D_{5/2}$	22,126	13,708	9,316	5,098	3,205
	$^4P_{1/2}$	22,331	13,820	9,383	5,128	3,223
	$^4P_{3/2}$	22,329	13,818	9,382	5,127	3,221
	$^4P_{5/2}$	22,328	13,817	9,380	5,125	3,219

Продолжение таблицы I

Переходы	LSJ	Z = 8	Z = 10	Z = 12	Z = 16	Z = 20
$1s2p^2(LSJ) -$ $- 1s^2 2p^2 P_{3/2}$	$2S_{1/2}$	21,784	13,539	9,222	5,061	3,189
	$2P_{1/2}$	22,068	13,679	9,301	5,095	3,208
	$2P_{3/2}$	22,066	13,676	9,298	5,091	3,203
	$2D_{3/2}$	22,127	13,710	9,319	5,102	3,210
	$2D_{5/2}$	22,129	13,712	9,320	5,102	3,210
	$4P_{1/2}$	22,334	13,823	9,387	5,132	3,227
	$4P_{3/2}$	22,332	13,821	9,385	5,131	3,225
	$4P_{5/2}$	22,331	13,820	9,384	5,129	3,223

Таблица 2.

Длины волн, вероятности безизлучательного распада верхнего уровня (Γ) и вероятности переходов (A) для ионов $FeXIV$ и $FeXXIV$.

Переходы	LSJ	$\lambda, \text{\AA}$	$\Gamma, 10^{-13} \text{сек}^{-1}$	$A, 10^{-13} \text{сек}^{-1}$
$1s2p(LSJ) - 1s^2 1S_0$	$1P_1$	1,8499		47,9
	$3P_1$	1,8589		4,38
	$3P_2$	1,8549		$6,5 \cdot 10^{-4}$
$1s2s(LSJ) - 1s^2 1S_0$	$3S_1$	1,8678		$2,1 \cdot 10^{-5}$
$2s2p[1P]1s(LSJ) -$ $- 1s^2 2s^2 S_{1/2}$	$2P_{1/2}$	1,8568	4,46	18,3
	$2P_{3/2}$	1,8558	6,02	0,09.
$2s2p[3P]1s(LSJ) -$ $- 1s^2 2s^2 S_{1/2}$	$2P_{1/2}$	1,8631	1,60	32,6
	$2P_{3/2}$	1,8606	0,01	49,8
	$4P_{1/2}$	1,8744	0,01	0,5
	$4P_{3/2}$	1,8733	0,04	1,6
	$4P_{5/2}$	1,8701	0	0

Таблица I.

Длины волн переходов, Å

Переходы	LSJ	Z = 8	Z = 10	Z = 12	Z = 16	Z = 20
$1s2p(LSJ) - 1s^2 1S_0$	$1P_1$	21,604	13,448	9,169	5,038	3,177
	$3P_1$	21,800	13,552	9,230	5,066	3,192
	$3P_2$	21,797	13,549	9,227	5,062	3,188
$1s2s(LSJ) - 1s^2 1S_0$	$3S_1$	22,097	13,698	9,314	5,101	3,211
$2s2p[1P]1s(LSJ) -$ $- 1s^2 2s 2S_{1/2}$	$2P_{1/2}$	21,842	13,566	9,236	5,066	3,191
	$2P_{3/2}$	21,842	13,565	9,235	5,065	3,190
$2s2p[3P]1s(LSJ) -$ $- 1s^2 2s 2S_{1/2}$	$2P_{1/2}$	22,027	13,655	9,286	5,087	3,202
	$2P_{3/2}$	22,025	13,653	9,284	5,085	3,200
	$4P_{1/2}$	22,375	13,837	9,392	5,133	3,226
	$4P_{3/2}$	22,374	13,836	9,391	5,132	3,225
	$4P_{5/2}$	22,372	13,834	9,389	5,130	3,222
$1s2p^2(LSJ) -$ $- 1s^2 2p 2P_{1/2}$	$2S_{1/2}$	21,781	13,536	9,218	5,058	3,185
	$2P_{1/2}$	22,066	13,676	9,298	5,091	3,203
	$2P_{3/2}$	22,063	13,673	9,294	5,087	3,200
	$2D_{3/2}$	22,125	13,707	9,315	5,098	3,206
	$2D_{5/2}$	22,126	13,708	9,316	5,098	3,205
	$4P_{1/2}$	22,331	13,820	9,383	5,128	3,223
	$4P_{3/2}$	22,329	13,818	9,382	5,127	3,221
	$4P_{5/2}$	22,328	13,817	9,380	5,125	3,219

Продолжение таблицы 2

Переходы	LSJ	$\lambda, \text{\AA}$	$\Gamma, 10^{13} \text{сек}^{-1}$	$A, 10^{13} \text{сек}^{-1}$
$1s2p^2(\text{LSJ}) -$ $- 1s^22p^2P_{1/2}$	$2S_{1/2}$	I,8520	I,63	I9,2
	$2P_{1/2}$	I,8624	0,04	40,4
	$2P_{3/2}$	I,8574	2,09	28,4
	$2D_{3/2}$	I,8627	7,20	5,5
	$2D_{5/2}$	I,8611	8,03	0
	$4P_{1/2}$	I,8718	0,02	0,15
	$4P_{3/2}$	I,8695	0,05	0,53
	$4P_{5/2}$	I,8679	I,31	0
$1s2p^2(\text{LSJ}) -$ $- 1s^22p^2P_{3/2}$	$2S_{1/2}$	I,8563	I,63	7,2
	$2P_{1/2}$	I,8668	0,04	31,8
	$2P_{3/2}$	I,8618	2,09	36,0
	$2D_{3/2}$	I,8671	7,20	31,7
	$2D_{5/2}$	I,8655	8,03	22,0
	$4P_{1/2}$	I,8762	0,02	2,0
	$4P_{3/2}$	I,8739	0,05	0,51
	$4P_{5/2}$	I,8723	I,31	3,53

Таблица 3.

Сравнение экспериментальных и теоретических данных

Элемент	Переход	Наст. раб.	Экспер.
O	$1s2p \ ^1P_1 - 1s^2 \ ^1S_0$	21,604	21,602 /5/
	$1s2p \ ^3P_1 - 1s^2 \ ^1S_0$	21,800	21,804 /5/
	$1s2p1s \ ^2P_{1/2} - 1s^2 2s \ ^2S_{1/2}$	22,026	22,02 /7/
	$1s2p^2 \ ^2P - 1s^2 2p \ ^2P$	22,06-7	22,05 /7/
	$1s2p^2 \ ^2D - 1s^2 2p \ ^2P$	22,12-3	22,11 /7/
	$1s2p^2 \ ^4P - 1s^2 2p \ ^2P$	22,33	22,33 /7/
S	$1s2p \ ^1P_1 - 1s^2 \ ^1S_0$	5,038	5,039 /8/ 5,044 /6/
	$1s2p \ ^3P_{2,1} - 1s^2 \ ^1S_0$	5,062-6	5,065 /8/ 5,068 /6/
	$2s2p1s \ ^2P - 1s^2 2s \ ^2S$	5,085-7	5,083 /8/ 5,094 /6/
	$1s2s \ ^3S_1 - 1s^2 \ ^1S_0$	5,101	5,100 /8/ 5,105 /6/
Ar	$1s2p \ ^1P_1 - 1s^2 \ ^1S_0$	3,948	3,944 /9/ 3,950 /6/
	$1s2p \ ^3P_{1,2} - 1s^2 \ ^1S_0$	3,968-9	3,963 /9/ 3,969 /6/
	$1s2p^2 \ ^2D_{5/2} - 1s^2 2p \ ^2P_{3/2}$	3,993	3,989 /9/
	$2s2p1s \ ^2P_{3/2} - 1s^2 2s \ ^2S_{1/2}$	3,981	3,984 /9/ 3,98 /6/
	$1s2p^2 \ ^2P_{3/2} - 1s^2 2p \ ^2P_{3/2}$	3,985	

для конфигураций $1s2l, 1s2p2l$ *). Одновременно были получены ширины автоионизационных уровней Γ (минимые части энергий), а также вероятности дипольных излучательных переходов. Отметим, что недиагональные матричные элементы электростатического взаимодействия могут возникать как между различными конфигурациями, так и между двумя одинаковыми термами одной конфигурации, например, между термами $(2s2p^1P)1s^2P$ и $(2s2p^3P)1s^2P$.

В таблице I приведены длины волн для переходов $1s2p - 1s^2, 1s2s - 1s^2, 1s2p2s - 1s^22s, 1s2p^2 - 1s^22p$. Из-за недостатка места приведены результаты только для некоторых элементов, представленных в атмосфере Солнца. В таблице 2 даны длины волн и вероятности излучательного перехода Λ и безизлучательного распада верхнего уровня Γ для представляющих особый интерес ионов Fe. Результаты для $\Lambda(1s2p^3P_2 - 1s^2^1S_0, 1s2s^3S_1 - 1s^2^1S_0)$ взяты соответственно из /3/ и /4/.

В таблице 3 проведено сравнение некоторых длин волн с имеющимися в настоящее время экспериментальными данными (лабораторными и солнечными). Как видно, различие между расчетными и экспериментальными значениями порядка тысячных ангстрема. Того же порядка расхождение между различными экспериментами и, что очень важно, расхождение меняется хаотически от иона к иону. Таким образом, точность эксперимента пока недостаточна. Высокая точность результатов для $Z = 8$ позволяет, однако, рассчитывать на точность $\sim 0,001 \text{ \AA}$ при $Z > 15$.

Поступила в редакцию
12 ноября 1971 г.

*) В /1/ недиагональные матричные элементы между $3P_1$ и $1P_1$ не учитывались.

Л и т е р а т у р а

1. Л. А. Вайнштейн, У. И. Сафронова. Астр. журн., 48, 223 (1970).
2. У. И. Сафронова, В. В. Толмачев. Лит. Физ. Сб., 7, 303 (1967);
У. И. Сафронова. Опт. и Спектр., 28, 1039, 1050 (1970).
3. R. H. Garstang. Astr. Soc. Pac., 81, 488 (1969).
4. И. Л. Бейгман, У. И. Сафронова. ЖЭТФ, 60, 2045 (1971).
5. R. L. Kelly. N. R. L. Report 6648 (1968).
6. W. M. Neupert. Sol. Phys., 18, 474 (1971).
7. A. H. Gabriel, C. Jordan. Nature, 221, 947 (1969).
8. A. B. C. Walker, H. R. Ruge. Astron. Astrophys., 2, 4 (1970).
9. N. J. Peacock, R. J. Speer, M. G. Hobby. J. Phys., E2, 798 (1969).