

А. А. НИКИТИН

# О ЗАПРЕЩЕННЫХ ЛИНИЯХ $\text{Ca}^+$ В СПЕКТРЕ СОЛНЦА

(Представлено академиком Г. А. Шайном 15 IV 1954)

Как известно, оценка интенсивностей тех или иных запрещенных линий, возникающих при переходах между уровнями одной или двух смежных электронных конфигураций, дает возможность определить содержание атомов ряда элементов с высоким потенциалом ионизации как в атмосфере Солнца, так и некоторых других небесных объектов (<sup>1</sup>).

Уровень  $3^2D$  для  $\text{Ca}^+$  является метастабильным. Переходы на нижний уровень  $3^2D_{1/2} - 4^2S_{1/2}$  и  $3^2D_{3/2} - 4^2S_{1/2}$  с длинами волн  $\lambda$  7291,46 и 7323,88, соответственно, являются квадрупольными переходами.

Можно предполагать, поскольку  $\text{Ca}^+$  весьма обилен в солнечной атмосфере, что указанные выше линии достаточно интенсивны для того, чтобы быть обнаруженными в спектре Солнца.

В настоящей работе делается попытка оценить их возможные интенсивности как в поглощении, так и эмиссии.

Определим в начале вероятности этих квадрупольных переходов.

На основании (<sup>2</sup>) имеем

$$A(mn) = \frac{\sigma^2 S(mn)}{2J_m + 1} 2773;$$

$S(mn)$  — сила линии, прочие обозначения обычные.

Несложный расчет, следуя (<sup>3</sup>), даст для силы линий выражения

$$S(3d_{1/2} - 4s_{1/2}) = \frac{4}{5} \rho^2,$$

$$S(3d_{3/2} - 4s_{1/2}) = \frac{8}{15} \rho^2,$$

где

$$\rho = \left| - \int_0^\infty P(4s) P(3d) r^2 dr \right|.$$

Для вычисления  $\rho$  воспользуемся волновыми функциями Хартри (<sup>4</sup>), которые для удобства расчетов аппроксимируем аналитически. Поскольку она может быть полезна и для других атомных расчетов, связанных с  $\text{Ca}^+$ , приведем ее:

$$P(3d) = r^3 [ae^{-br} + ce^{-dr} + \epsilon e^{-fr}],$$

причем

$$a = 3,103; \quad c = 0,157; \quad \epsilon = 20,130;$$

$$b = 2,1217; \quad d = 0,9081; \quad f = 5,3890;$$

$$P(4s) = \alpha e^{-\beta r} - r^2 [\gamma e^{-\delta r} + \varepsilon e^{-kr}] + mr^3 e^{-\lambda r} - r^4 [f_1 e^{-\varphi r} + n^{-pr}];$$

$$\alpha = 4,852; \quad \varepsilon = 1,317; \quad f_1 = 0,152;$$

$$\beta = 20,2390; \quad k = 7,1920; \quad \varphi = 1,1130;$$

$$\gamma = 15,056; \quad m = 6,440; \quad n = 1,208;$$

$$\delta = 7,8300; \quad \lambda = 2,7114; \quad p = 2,0712.$$

Используя эти выражения, находим, что  $\rho \approx 10,32$ , и отсюда вероятности переходов для соответствующих компонент будут

$$A(3d_{3/2} - 4s_{1/2}) = 0,91;$$

$$A(3d_{5/2} - 4s_{1/2}) = 1,21.$$

Эквивалентная ширина указанных выше линий с достаточной точностью может быть выражена формулой

$$W = \frac{2J+1}{2J'+1} \frac{A(mn) \lambda^4}{4\pi c} N,$$

где  $N$  — число ионов кальция в столбе сечением  $1 \text{ см}^2$  в солнечной атмосфере;  $J$  и  $J'$  — полные моменты верхнего и нижнего состояний.

Обратимся теперь к наблюдательным данным. К сожалению, обе линии блендированы:  $\lambda 7291,46$  с линией  $\lambda 7291,48$  и  $\lambda 7323,88$  с атмосферной линией  $\lambda 7323,97$ .

Во всех доступных нам каталогах линий солнечного спектра эти бленды не разделены <sup>(5)</sup>. Оценка эквивалентных ширин этих бленд (они равны 20 и 17 мÅ соответственно) позволяет установить только верхнюю границу содержания  $\text{Ca}^+$  в атмосфере Солнца  $N < 10^{20}$ . Указанная величина хорошо согласуется с оценками, полученными из других соображений, дающими для  $N$  величину от  $6 \cdot 10^{18}$  до  $2 \cdot 10^{19}$ .

Накопление  $\text{Ca}^+$  на метастабильном уровне  $3^2D$ , повидимому, может, при известных условиях, привести также к появлению указанных выше линий в эмиссии. Не останавливаясь подробно на проблеме появления запрещенных линий в спектре хромосферы, которая еще далеко не решена, оценим только возможный порядок отношения интенсивностей этих линий и линий инфракрасного триплета  $\text{Ca}^+$   $\lambda 8542,089$ ;  $8662,140$  и  $8498,018$  перехода  $3^2D - 4^2P$ .

Населенности уровней  $3^2D$  и  $4^2P$  можно приближенно оценить по эквивалентным ширинам линий, имеющих эти уровни своими нижними уровнями. Это линии триплета  $4^2P - 4^2D$   $\lambda 3179,332$ ;  $3158,869$ ;  $3181,275$  и упомянутого выше инфракрасного триплета. Все эти линии хорошо наблюдаются в поглощении и на основе данных <sup>(5)</sup> их эквивалентная ширина по порядку примерно равна 100 мÅ и 5 Å, соответственно.

Используя для оценки населенностей этих уровней обычные формулы для эквивалентных ширин (причем для уровня  $3^2D$  нужно пользоваться формулой, выведенной для толстого слоя) и полагая, что приближенно сила осциллятора перехода  $4^2P - 4^2D$  равна единице, получаем:

$$\frac{I_{8498}}{I_{7291}} \approx 3 \cdot 10^2.$$

Так как линии инфракрасного триплета весьма интенсивны в спектре вспышки, то возможно, что запрещенные линии  $\lambda 7291$  и  $7323 \text{ Ca}^+$  могут быть в спектре верхних слоев хромосферы (первая линия

имеет бленду с линией Ni, но линии Ni наблюдаются только невысоко, не более чем  $10^3$  км над основанием хромосферы, и вторая линия как слабый эмиссионный кант на красном краю атмосферной линии  $\lambda$  7323,97).

Наблюдение линий инфракрасного триплета  $\text{Ca}^+$  и линий квадрупольного перехода  $3^2D-4^2S$  представляет несомненный интерес, поскольку интенсивности этих линий могут служить индикатором интенсивности  $L_\alpha$ -радиации (ионизационный потенциал уровня  $3^2D$  почти равен потенциалу возбуждения  $L_\alpha$ ). В спектрах многих нестационарных звезд линии триплета  $\text{Ca}^+$  весьма интенсивны и обладают многими до сих пор не объяснимыми особенностями.

Ленинградский  
государственный университет  
им. А. А. Жданова

Поступило  
15 IV 1954

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> I. Bowen, Rev. Mod. Phys., **20**, 109 (1948). <sup>2</sup> Е. Кондон, Г. Шортли, Теория атомных спектров, ИЛ, 1949. <sup>3</sup> A. Rubinstein, Zs. f. Phys., **65**, 662 (1930). <sup>4</sup> W. Hartri, D. Hartri, Proc. Roy. Soc., A, **164**, No. 917 (1938). <sup>5</sup> St-John and oth., Publications, No. 396, Carnegie Inst. (1928); H. Babcock, ibid., No. 579 (1947); M. Minnaert and oth., Photometric Atlas of Solar Spectrum, Amsterdam, 1947.