

УДК: 524.316—62

ЭМИССИОННЫЙ ДУБЛЕТ 2800 Mg II В СПЕКТРАХ  
ХОЛОДНЫХ ЗВЕЗД

В. Г. ЧОЛАКЯН

Поступила 1 декабря 1987

Принята к печати 4 марта 1988

Приведены результаты по детектированию и измерению абсолютного энергетического потока  $f$  (Mg II) в единицах  $\text{эрг/см}^2\text{с}$ , излучаемого хромосферой холодных звезд в эмиссионном дублете 2800 Mg II. Использованы спектральные снимки «Ориона-2» с высокой плотностью фотометрического почернения на  $\lambda = 2800 \text{ \AA}$ . Описана методика построения калибровочной кривой. Хромосферы детектированы у 8 звезд поздних спектральных классов (K5—M5) из 48 изученных в области неба вокруг Капеллам ( $\alpha \text{ Aur}$ ). Для этих звезд найдены численные значения  $f$  (Mg II), а также относительные мощности «магниевого хромосфер»  $R$ .

1. Введение. Эмиссионный дублет ионизованного магния 2800 Mg II, возбуждаемый в хромосферах холодных звезд, является наиболее сильной эмиссионной структурой в спектрах звезд поздних классов в области ближнего ультрафиолета. Благодаря своей исключительной информативности этот дублет используется в качестве надежного, а подчас и единственного средства для детектирования и исследования звездных хромосфер, имея в виду, что на его долю приходится около трети всей излучаемой способности хромосферы, и часто термин «магниевого хромосфера» характеризует всю хромосферу звезды в целом.

Первые дублет 2800 Mg II в эмиссии был зарегистрирован в 1972 г. с помощью ОАУ-2, с разрешением 25  $\text{\AA}$ , в спектрах нескольких холодных гигантов [1]. Спустя год при помощи «Ориона-2» было получено массовым способом большое количество спектральных снимков в ультрафиолете для слабых звезд, в том числе и поздних классов. В спектрах трех, сравнительно ярких «орионовских» звезд типа G-M Г. А. Гурзаян [2] выявил и измерил сильные эмиссионные линии 2800 Mg II, с помощью которых ему удалось оценить мощность «магниевого хромосферы» этих звезд. В последующее десятилетие, с привлечением более тонких средств внеатмосферных наблюдений (BUSS, Cornepicus, IUE) дублет 2800 Mg II в эмиссии удается зарегистрировать и измерить с высоким спектральным

разрешением ( $\sim 0.1 \text{ \AA}$ ) в спектрах около 200 звезд поздних классов — позднее F0. Анализ этого наблюдательного материала, равно как и первый «Каталог магниевых хромосфер», приведен в [3]. При этом речь идет о хромосферах преимущественно ярких звезд (ярче  $7^m$ ).

Подавляющая часть наблюдательного материала «Ориона-26» относится, однако, к слабым звездам (до  $12^m$ ), среди которых очень много звезд поздних классов. Между тем, изучение этих звезд в области ближнего ультрафиолета должно представлять особый интерес ввиду того, что вероятность детектирования эмиссионного дублета  $2800 \text{ Mg II}$  велика как раз в спектрах холодных звезд. Обнаружение и измерение эмиссии в линиях  $2800 \text{ Mg II}$  у звезд класса К-М представляется наиболее перспективным также из-за слабости самого фотосферного излучения у холодных звезд в области короче  $3000 \text{ \AA}$  (при спектральном разрешении  $\sim 25 \text{ \AA}$  на  $2800 \text{ \AA}$ ).

Детектированию и измерению эмиссионного дублета ионизованного магния  $2800 \text{ Mg II}$  в «орионовских» спектрах группы звезд спектральных классов К5—М5 и посвящена настоящая статья.

2. *Нахождение абсолютных энергетических потоков в линиях  $2800 \text{ Mg II}$ .* Целью работы является измерение суммарного энергетического потока  $f$  ( $\text{Mg II}$ ) на границе земной атмосферы в абсолютных энергетических единицах  $\text{эрг/см}^2\text{с}$ , излучаемого хромосферой холодных звезд в линиях  $2800 \text{ Mg II}$ , на основании наблюдательного материала «Ориона-2». Особенность ситуации заключается в том, что по плотности фотометрического почернения область вблизи  $2800 \text{ \AA}$  в спектрах интересующих нас звезд находится вне прямолинейного участка характеристической кривой пленки, и поэтому традиционный способ измерения спектров в данном случае не может быть применен.

Для решения поставленной задачи Г. А. Гурзядяном [4] было предложено построить и использовать калибровочную кривую зависимости между величиной потока  $f$  ( $\text{Mg II}$ ) от звезды с известным абсолютным распределением энергии в ее спектре, в фиксированном узком диапазоне длин волн (диафрагмы сканирования) с центром на  $2800 \text{ \AA}$ , и степенью почернения, в данном случае величиной отброса пера самописца микрофотометра от нулевого уровня фона астронегатива  $l$  ( $\text{Mg II}$ ) в миллиметрах, в спектре той же звезды и в том же спектральном диапазоне.

Коль скоро нашей целью является измерение эмиссии в линиях  $2800 \text{ Mg II}$  после того, как она выявлена, то ширина диафрагмы сканирования не должна превышать полуширины эмиссионной линии, вернее бленды  $2800 \text{ Mg II}$ . Согласно низкодисперсионным наблюдениям IUE [5], полуширина линии  $2800 \text{ Mg II}$  в спектрах звезд спектральных классов К5—М5

в среднем порядка 15 А. Учитывая дисперсию «орионовских» спектрограмм (420 А/мм на  $\lambda = 2800$  А), при 20-кратном проецировании астронегатива на экран микрофотометра ИФО-451, ширина диафрагмы сканирования оказывается порядка  $\sim 0.7$  мм. Высота диафрагмы сканирования равна 1 мм, что несколько меньше ширины спектрограмм звезд в области нормального почернения.

Численные значения потока  $E_\lambda$  в абсолютных энергетических единицах для каждой из калибровочных звезд, использованных для построения зависимости  $f(\text{Mg II}) \sim I(\text{Mg II})$ , были взяты из «Каталога спектров «Ориона-2» [6], причем  $f(\text{Mg II}) = E_{2800} \cdot 15$  А. Для построения калибровочной кривой было использовано 25 звезд спектральных классов В-А5, имея в виду, что в интересующем нас диапазоне длин волн непрерывные спектры у этих классов звезд еще достаточно развиты, а депрессия, вызванная наличием абсорбционного дублета 2800 Mg II, незначительна [7]. Кроме того, наличие надежных теоретических бланкетинг-моделей звезд ранних классов [8], хорошо согласующихся с наблюдениями, позволило нам в случае, когда непрерывный спектр калибровочной звезды не доходил до  $\lambda = 2800$  А, проводить его экстраполяцию путем привязки существующей модели к рассчитанному в [6] распределению энергии в спектре данной звезды в области длин волн 2900—3000 А.

Необходимым условием для применения изложенного метода — назовем его условно «методом слабых почернений» — является полная однородность используемого и исследуемого материалов и неизменный режим обработки, а именно:

— все звезды, как калибровочные, так и исследуемые, должны находиться на одном и том же астронегативе;

— все измерения должны проводиться на одном и том же микрофотометре и с одной и той же диафрагмой сканирования.

По существу это тот же метод, который обычно применяется при энергетической калибровке рентгеновских фотопленок.

Построенная таким образом эмпирическая кривая зависимости  $f(\text{Mg II}) \sim I(\text{Mg II})$  для кадра F21 «Ориона-2» приведена на рис. 1, где по ординате нанесено значение  $f(\text{Mg II})$  в абсолютных энергетических единицах ( $\text{эрг}/\text{см}^2 \text{ с}$ ), а по абсциссе —  $I(\text{Mg II})$  в миллиметрах. Как следует из рисунка, нижний порог чувствительности данного метода применительно к кадру F21 равен приблизительно  $6.5 \cdot 10^{-13}$   $\text{эрг}/\text{см}^2 \text{ с}$ , что соответствует отбросу пера самописца ИФО-451 от нулевого уровня фона почернения  $I(\text{Mg II}) = 8$  мм.

3. Обсуждение результатов. На «орионовском» кадре F21 нами было отобрано 48 классифицированных О. В. Оганесяном [9] звезд спектраль-

ных классов К5—М5. При этом нуль-пункт шкалы длин волн на исследуемых спектрограммах определялся по изложенной в [11] методике. Во избежание наложения и перекрытия флукуаций почернения фона астронегатива с реальным наличием эмиссии дублета 2800 Mg II в спектре данной звезды, существование линий—бленды 2800 Mg II считается реальным, а измерения потока в линии достоверными лишь в случаях, когда  $I(\text{Mg II}) > 3\sigma$ , где  $\sigma$  — средняя ошибка измерений флукуаций фона астронегатива в непосредственной близости от сканируемой звезды. Исходя из этого, звезды с потоком в линиях 2800 Mg II меньше порогового  $6.5 \cdot 10^{-13}$  эрг/см<sup>2</sup> с нами не рассматривались, в результате чего число отобранных для дальнейшего исследования звезд сократилось до 8.

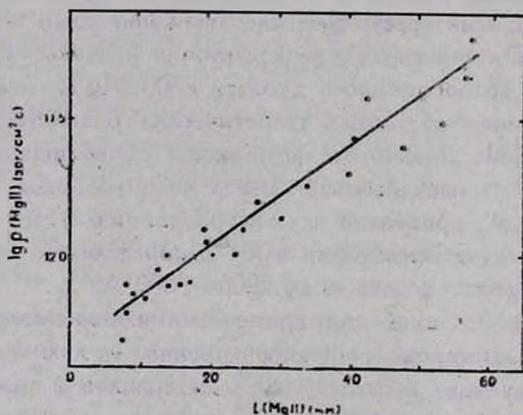


Рис. 1. Эмпирическая зависимость — калибровочная кривая — между суммарным потоком  $f(\text{Mg II})$  (эрг/см<sup>2</sup> с) от звезды в спектральном диапазоне шириной 15 Å с центром на 2800 Å на границе земной атмосферы и степенью почернения астронегатива в спектре той же звезды в том же спектральном диапазоне  $I(\text{Mg II})$  (в нм). Точки — результаты обработки «орлоновских» спектральных снимков звезд классов В—А, использованных для построения калибровочной кривой.

В качестве примера на рис. 2 приведено факсимиле микрофотометрической записи спектра звезды ГЛКА 783, спектрального класса М0, где четко просматривается эмиссия на длине волны 2800 Å, и которая принадлежит дублету 2800 Mg II. Усомниться в отождествлении нет оснований, так как по многочисленным высокодисперсионным наблюдениям BUSS, Sorognicus, IUE следует считать достоверно установленным полное отсутствие сколь-нибудь ощутимой эмиссии в других спектральных линиях, кроме 2800 Mg II. Находя  $I(\text{Mg II})$  непосредственно из микрофотометрических записей исследуемых звезд, затем при помощи калибровочной кривой (рис. 1) был определен искомый наблюдаемый поток хромосферной эмиссии звезды  $f(\text{Mg II})$  в единицах эрг/см<sup>2</sup> с на границе земной атмосферы.

Основные данные об исследуемых звездах, наряду с найденными значениями  $f(\text{Mg II})$  сведены в табл. 1, где приведены последовательно: номер звезды по списку ГЛКА [10], спектральный класс [9], видимая звездная величина  $V$  [9], эффективная температура  $T_{eff}$  [12], усредненное для каждого спектрального класса значение показателя цвета  $(V-R)_0$

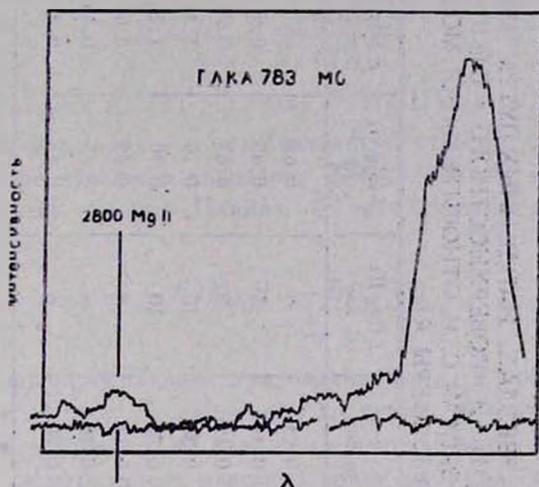


Рис. 2. Пример, иллюстрирующий применение «метода слабых почернений»: эмиссионный дублет 2800 Mg II, выделенный в спектре звезды ГЛКА 783 класса M0.

[13], видимый угловой диаметр звезды  $\varphi$  в миллисекундах дуги, численное значение  $l(\text{Mg II})$  в мм, величина потока в линиях 2800 Mg II на границе земной атмосферы  $f(\text{Mg II})$  и на поверхности звезды  $F(\text{Mg II})$  в  $\text{эрг/см}^2\text{с}$ . В последнем столбце таблицы приведена относительная (безразмерная) мощность «магниевого хромосферы»  $R$ , даваемая соотношением

$$R = \frac{F(\text{Mg II})}{\sigma T_{eff}^4}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана. Здесь величину  $F(\text{Mg II})$  мы определим из следующего соотношения:

$$\frac{F(\text{Mg II})}{f(\text{Mg II})} = \left( \frac{4.125 \cdot 10^8}{\varphi} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\varphi$  — угловой диаметр звезды. Для звезд с  $(V-R) \geq 0.8$  величину  $\varphi$  можно определять с достаточной точностью из следующего эмпирического соотношения, не зависящего от класса светимости звезды [14, 15]:

$$\lg \varphi = 0.7594 - 0.2 V + 0.642 (V - R)_0. \quad (3)$$

Таблица 1

СВОДКА ОСНОВНЫХ ДАННЫХ ОБ ИССЛЕДУЕМЫХ ЗВЕЗДАХ, НАЙДЕННЫХ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЙ  
 ЗНАЧЕНИЙ  $I$  (Mg II) ВЕЛИЧИН НАБЛЮДАЕМОГО  $f$  (Mg II) И ПОВЕРХНОСТНОГО  $F$  (Mg II) ПОТОКОВ В  
 ЭМИССИОННОЙ ЛИНИИ 2800 Mg II В ЕДИНИЦАХ ЭРГ/СМ<sup>2</sup> С, И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ  
 «МАГНИЕВОЙ» ХРОМОСФЕРЫ  $R$

Звезда ГЛКА	Спектр	$V$	$T_{eff}$	$(V-R)_0$	$\varphi$ м сек	$I$ (Mg II) мм	$f$ (Mg II) $\times 10^{-12}$	$F$ (Mg II) $\times 10^6$	$R$ $\times 10^{-5}$
1952	K5	10 <sup>m</sup> 5	4000	1 <sup>m</sup> 1	0.23	8	0.65	2.1	10
1655	K5	9.7	4000	1.1	0.34	8	0.65	0.96	3
1995	K7	11.3	3900	1.2	0.19	9	0.67	3.20	21
1996	K7	10.6	3900	1.2	0.30	10	0.70	1.34	7.5
783	M0	10.4	3800	1.25	0.31	10	0.70	1.24	8
906	M0	11.5	3800	1.25	0.19	8	0.65	3.66	24
2024	M0	9.4	3800	1.25	0.48	8	0.65	0.48	2.5
1720	M5	11.0	3400	2.00	0.70	8	0.65	0.23	3

Классы светимости исследуемых звезд нам неизвестны. Возникающая отсюда неопределенность в оценке численного значения линейного радиуса звезды  $D$  и расстояния до звезды  $r$  практически исключают возможность использования, с приемлемой точностью, еще одной формулы для определения  $R$ :

$$R = \left(\frac{r}{D}\right)^2 \frac{f(\text{Mg II})}{\sigma T_{eff}^4}. \quad (4)$$

В найденную нами из (2) величину  $F(\text{Mg II})$  кроме собственно потока 2800 Mg II входит, хотя и в незначительной степени, также поток в непрерывном спектре звезды в диапазоне 2790—2810 Å, в первом приближении описываемый законом Планка. С учетом этого факта выражение (1) запишется в виде:

$$R = \frac{F(\text{Mg II}) - B(\lambda, T)}{\sigma T_{eff}^4}, \quad (5)$$

где  $B(\lambda, T)$  — функция Планка для заданной  $T_{eff}$  и при  $\lambda = 2800$  Å.

Как следует из табл. 1, найденные значения относительной мощности «магниевого хромосферы»  $R$  не находится в какой-либо явно выраженной зависимости от спектрального класса. Скорее всего наоборот, относительная мощность хромосфер у звезд одного и того же класса (скажем, M0) варьирует в широких пределах — от  $2.5 \cdot 10^{-5}$  до  $24 \cdot 10^{-5}$  т. е. разброс на порядок. Эти два обстоятельства подтверждают сделанный ранее Г. А. Гурзвандом вывод о случайной природе звездных хромосфер [3].

В спектрах семи звезд, ГЛКА 713, 1218, 1714, 2024, 2064, 2143, 2169 спектральных классов M0—M5 эмиссия на 2800 Å в виде слабой бленды хотя и просматривается, но поскольку для них  $I(\text{Mg II}) < 3\sigma$ , однако с оценкой верхнего значения потока  $\sim 10^{-12}$  эрг/см<sup>2</sup> с.

Звезда ГЛКА 906, 1195, 1952, у которых найденные значения  $R \geq 10$  (в единицах  $10^{-5}$ ), попадают в класс, так называемых, звезд со сверхмощными хромосферами [3]. Эти звезды, как правило, двойные, и представляют собой системы типа RS CVn. Маловероятно, чтобы столь сильная эмиссия могла бы генерироваться в хромосфере составляющих, эта эмиссия генерируется скорее всего в газовой среде между внешними слоями атмосфер обоих компонентов двойной системы [16]. Мы не располагаем данными относительно двойственности указанных выше трех звезд со «сверхмощными» хромосферами, и поэтому вопрос об их природе нуждается в дополнительном рассмотрении.

Из более чем 200 звезд с известными значениями  $R$ , звезд со сверхмощными хромосферами известно около 16, т. е. приблизительно с соотношением 1:10. В нашем же случае у почти половины из исследуемых

звезд хромосферы оказались сверхмощными, что следует объяснить в первую очередь наблюдательной селекцией низкодисперсионных «орионовских» снимков, а также тем, что «Орион-2» фиксирует на одном кадре одновременно большое число спектрограмм звезд, в результате чего удельная доля звезд с  $R \geq 10$  в произвольной выборке звезд повышается.

Сделанный вывод подтверждается характером зависимости  $R$  от  $V$  для звезд одного и того же класса при одном и том же значении  $f$  (Mg II); для звезд спектральных классов K5, M0, M5 эта зависимость представлена графиком на рис. 3, из которого следует, что в случае «Ориона-2» у слабых звезд при прочих равных условиях легче выявляются сверхмощные хромосферы. В случае же сравнительно ярких звезд ( $< 9^m$ ) данный метод позволяет регистрировать хромосферы менее мощные. В нашем же списке звезды в основном слабые, поэтому и доля звезд с  $R \geq 10$  высока. Очевидно также, что вероятность регистрации хромосфер средней мощности при уменьшении порога чувствительности данного метода возрастает.

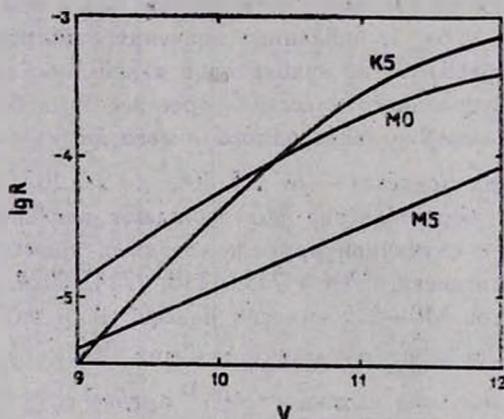


Рис. 3. Зависимость относительной мощности «магневой хромосферы»  $R$  от видимой звездной величины  $V$  при пороговом наблюдаемом потоке  $f$  (Mg II) =  $6.5 \cdot 10^{-13}$  эрг/см<sup>2</sup> с в линии 2800 Mg II для звезд спектральных классов K5, M0 и M5.

Применение «метода слабых почернений» для выявления эмиссии 2800 Mg II у звезд ранее K5 представляется нецелесообразным, так как в этом случае на найденные значения  $f$  (Mg II) в эмиссии будут оказывать все возрастающее влияние как непрерывный спектр звезды, так и дублет 2800 Mg II в абсорбции; в этом случае речь идет о так называемых «комбинированных» профилях 2800 Mg II, изучение которых требует много подхода.

Таким образом, первая попытка по применению «метода слабых почернений» измерений спектрограмм в отношении 48 звезд поздних клас-

сов, ультрафиолетовые спектральные снимки которых были получены с помощью «Ориона-2», привела к детектированию дублета 2800 Mg II в эмиссии, а следовательно и хромосфер средней и высшей мощности по крайней мере у восьми звезд классов K5—M5. Тем самым была продемонстрирована эффективность метода при измерении спектрограмм с низкой плотностью фотометрического почернения по крайней мере в тех случаях, когда речь идет о детектировании хромосфер холодных звезд.

Автор статьи выражает глубокую благодарность профессору Г. А. Гурзadyану за постановку задачи, интерес к работе, ценные замечания и полезные дискуссии.

Ереванский политехнический  
институт

## THE EMISSION DOUBLET 2800 Mg II IN THE SPECTRA OF COOL STARS

V. G. CHOLAKYAN

The results for the determination and measurements of the absolute energetic flux  $f(\text{Mg II})$  in the units of  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  in the ultraviolet emission doublet 2800 Mg II, which is generated by the chromospheres of cool stars, are presented. The spectrograms with low photometric density on  $\lambda = 2800 \text{ \AA}$  have been obtained by means of the space observatory "Orion-2". The chromospheres were detected for the 8 late type stars (K5—M5) out of 48 observed stars, scattering in the field around Capella ( $\alpha \text{ Aur}$ ). The observed flux  $f(\text{Mg II})$  and relative power of the "magnesium chromospheres"  $R$  for these stars were also determined.

### ЛИТЕРАТУРА

1. L. R. Doherty, *Astrophys. J.*, 178, 495, 1972.
2. G. A. Gurzadyan, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 172, 617, 1975.
3. Г. А. Гурзadyан, Звездные хромосферы или дублет 2800 Mg II в астрофизике, Наука, М., 1984.
4. Г. А. Гурзadyан, Частное сообщение, Ереван, 1987.
5. C. C. Wu, T. B. Ake, A. Bogges, R. C. Bohlin, C. L. Imhoff, A. V. Holm, Z. G. Levay et al., IUE Ultraviolet Spectral Atlas, NASA, Newsletter 22, 1983.
6. Г. А. Гурзadyан, Дж. Б. Оганесян, С. С. Рустамбекова, Р. А. Епремян, «Орион-2». Каталог ультрафиолетовых спектров 900 слабых звезд, Изд. АН Арм.ССР, Ереван, 1985.
7. Дж. Б. Оганесян, *Сообщ. Бюро экв. обсерв.*, 48, 68, 1976.

8. R. L. Kurucz, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 40, 1, 1979.
9. О. В. Оганесян, *Сообщ. Бюракан. обсерв.*, 48, 14, 1976.
10. Г. А. Гурвадян, *Сообщ. Бюракан. обсерв.*, 48, 5, 1976.
11. Г. А. Гурвадян, В. Г. Чолакян, *Астрон. ж.*, 1987, (в печати).
12. V. Stritzys, G. Kurillene, *Astrophys. and Space Sci.*, 80, 353, 1981.
13. H. L. Johnson, J. W. MacArthur, R. I. Mitchell, *Astrophys. J.*, 152, 465, 1968.
14. J. L. Linsky, P. L. Bornmann, K. G. Carpenter, R. F. Wing, *Astrophys. J.*, 260, 670, 1982.
15. T. G. Barnes, D. S. Ivans, T. J. Moffett, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 183, 285, 1978.
16. G. A. Gurzadyan, *Astrophys. and Space Sci.*, 123, 67, 1986.