

АСТРОНОМИЯ

УДК 523.345 + 524.316

О ХРОМОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА

Е. А. Бруевич

(ГАИШ)

Параметры квазипериодических вариаций потоков излучения от звезд поздних спектральных классов в хромосферных линиях H и K ионизованного кальция получены с использованием методов прогнозирования циклических вариаций потоков излучения от Солнца.

Введение

Важным направлением в исследовании звездных атмосфер является анализ временных изменений интенсивности самых ярких линий в видимой области спектра: хромосферных линий H и K ионизованного кальция.

Наличие в спектрах звезд поздних спектральных классов этих линий указывает на присутствие достаточно развитой активной атмосферы солнечного типа. Одной из самых длительных научных программ по наблюдению звезд главной последовательности с активными атмосферами в линиях H и K ионизованного кальция является программа «НК Project» на обсерватории Маунт Вилсон, начатая в 1968 г. [1]. В результате многолетних наблюдений были получены обширные сведения о периодическом изменении потоков соответствующего излучения у многих десятков звезд поздних спектральных классов.

Наблюдения организованы следующим образом: две щели звездного спектрографа совмещаются с центром линий H и K ионизованного кальция (396,8 и 393,4 нм), а две другие — с областью соседнего с этими линиями непрерывного спектра (390,1 и 400,1 нм).

Стандартным обозначением для потока излучения в линиях $Ca II$ является $F_{Ca II}$, а для отношения потоков в хромосферных линиях $Ca II$ к потоку в близлежащем континууме (т. е. для нормированного потока в линиях H и K ионизованного кальция) — $S_{Ca II}$.

В разряд звезд с активными атмосферами попадают сравнительно яркие и не слишком холодные звезды: бело-желтые (спектрального класса F), желтые (G) и оранжевые (K) карликовые звезды.

К настоящему времени цикличность вариаций потоков хромосферного излучения наблюдается у десятков карликовых звезд. Найденные длительности циклов коррелируют с числами Россби, и эта корреляция, в частности, выполняется для Солнца. Число Россби — это отношение скорости конвективного перемешивания в подфотосферных слоях (определяемой из теоретических расчетов по теории внутреннего строения звезд) к величине скорости вращения звезды, полученной из наблюдений. Число Россби определяет степень взаимодействия конвекции и вра-

щения и, следовательно, эффективность генерации звездного магнитного поля [2]. То обстоятельство, что длительность цикла активности коррелирует в конечном счете с эффективностью генерации магнитного поля, служит аргументом в пользу внутренних причин циклического изменения потоков излучения звезд и Солнца, связанных с процессами в их атмосферах [3].

Анализ эмиссионных линий, возникающих на разных уровнях звездной атмосферы (от нижней хромосферы до переходной зоны между хромосферой и короной), показал, что звезды солнечного типа обладают такой же хромосферой, что и Солнце [4]. Хромосферы, как известно, существуют за счет того, что во внешних частях не слишком массивных звезд перенос энергии осуществляется с помощью конвекции. Это генерирует волновые процессы и нерадиационный перенос энергии в верхней части атмосфер Солнца и звезд.

С увеличением возраста звезды (по мере выгорания вещества) ее среднемолекулярный вес увеличивается и вращение звезды замедляется. Поскольку вращение тесно связано с конвекцией и магнитным полем (формирующим структуру хромосферы), то масса звезды и ее возраст довольно точно определяют полную светимость хромосферы звезды. Это говорит о важности задачи исследования характеристик излучения хромосфер в линиях ионизованного кальция или, что то же самое, исследования величины $S_{Ca II}$.

Таким образом, имея набор звезд разного возраста — аналогов Солнца по массе и химическому составу, мы можем как бы проследить эволюцию Солнца и в прошлом, и в будущем: звезды, имеющие сходные начальные характеристики по массе и химическому составу, эволюционируют в довольно жестких рамках по определенному сценарию.

Методики наблюдений и их интерпретация, связанные с активностью атмосферы, достаточно хорошо отработанные при наблюдениях Солнца, могут успешно применяться для постановки звездных наблюдений и их дальнейшей обработки.

1. Цикличность вариаций потоков излучения Солнца как звезды с развитой атмосферой

Согласно многолетним наблюдениям, среднее время между соседними максимумами в пятнообразова-

нии на Солнце составляет примерно 11 лет. Активность Солнца, связанная с пятнами, количественно характеризуется числом Вольфа: $R = k(10G + N)$, где G — число групп пятен, N — полное число пятен во всех группах на видимом диске Солнца, k — эмпирический коэффициент, выводимый из сравнения различных рядов наблюдений. Числа Вольфа R часто сопоставляются с другими, более современными характеристиками (индексами) солнечной активности.

На основе результатов ежедневных наземных наблюдений Солнца в течение последних 35 лет (чисел Вольфа R , потоков радиоизлучения на волне 10,7 см $F_{10,7}$ и флоккулярных индексов в линии ионизованного кальция) проводится анализ зависимости этих индексов солнечной активности друг от друга. Показано [4], что имеет место высокая (более 0,9) корреляция между индексами $F_{10,7}$, F_{CaII} и числами Вольфа R , что позволяет заменять один индекс на другой для удобства обработки и интерпретации наблюдений Солнца.

При переходе от предыдущего 11-летнего цикла к последующему в обоих полушариях Солнца полярность ведущих пятен в группах меняется на противоположную, т. е. выделяется 22-летний цикл. Два следующих друг за другом 11-летних цикла называются нечетным и четным, различия их основных динамических характеристик лежат в пределах точности их определения. Четные и нечетные циклы часто объединяют и говорят только об 11-летнем цикле. Согласно наблюдениям, практически все явления на Солнце связаны с 11-летним циклом.

Происхождение 11-летних циклов активности связывается, например в [5], с эволюцией глобального магнитного поля Солнца и с системой гигантских конвективных магнитных трубок, которые формируются у полюсов с интервалом в 11 лет и мигрируют к экватору за время около 22 лет. Для того, чтобы прогнозировать солнечное излучение в различных диапазонах длин волн в зависимости от фазы солнечного цикла, строятся полуэмпирические модели: так называемые двух- и трехкомпонентные (что соответствует определению двух и трех независимых параметров), с помощью которых удается с хорошей точностью вычислять средние значения потоков солнечного излучения в различных диапазонах длин волн. В настоящее время можно считать общепризнанным, что индексы, связанные с солнечными пятнами, наименее пригодны при моделировании вариаций рентгеновского и ультрафиолетового излучения, а также параметров ионосферы и верхней атмосферы Земли. Поэтому в современных солнечных моделях, как правило, используют кальциевые индексы или индекс $F_{10,7}$. Существенно, что как раз в линиях H и K ионизованного кальция проводились самые длительные непрерывные наблюдения звезд солнечного типа по программе «НК Project».

В последние годы успешно развиваются методы построения моделей образования и динамики звездных пятен в атмосферах звезд поздних спектральных классов [6], причем в основу такого моделирования закладываются физические процессы, аналогичные

процессам на Солнце. Двух- и трехкомпонентные модели, описывающие вариации солнечного излучения в зависимости от фазы 11-летнего цикла активности, построены, в основном, с использованием индекса $F_{10,7}$ [7]. В случае звезд возможно применение методики построения двух- и трехкомпонентных моделей на основе наблюдений в линиях H и K ионизованного кальция, так как потоки излучения в этих линиях и поток излучения на волне 10,7 см коррелируют между собой с коэффициентом корреляции выше 0,9.

Можно выделить два основных фактора, вызывающих вариации излучения Солнца и звезд (вне вспышек) как в радиодиапазоне, так и в коротковолновой области излучения. Первый связан с изменением фонового излучения невозмущенной поверхности светила, второй — с возникновением, эволюцией и движением по солнечному диску активной области (областей). В радиодиапазоне (для потока $F_{10,7}$) первому фактору ставится в соответствие фоновый вклад $P_{10,7}$, а второму — вклад от активных областей, равный разности $(F_{10,7} - P_{10,7})$.

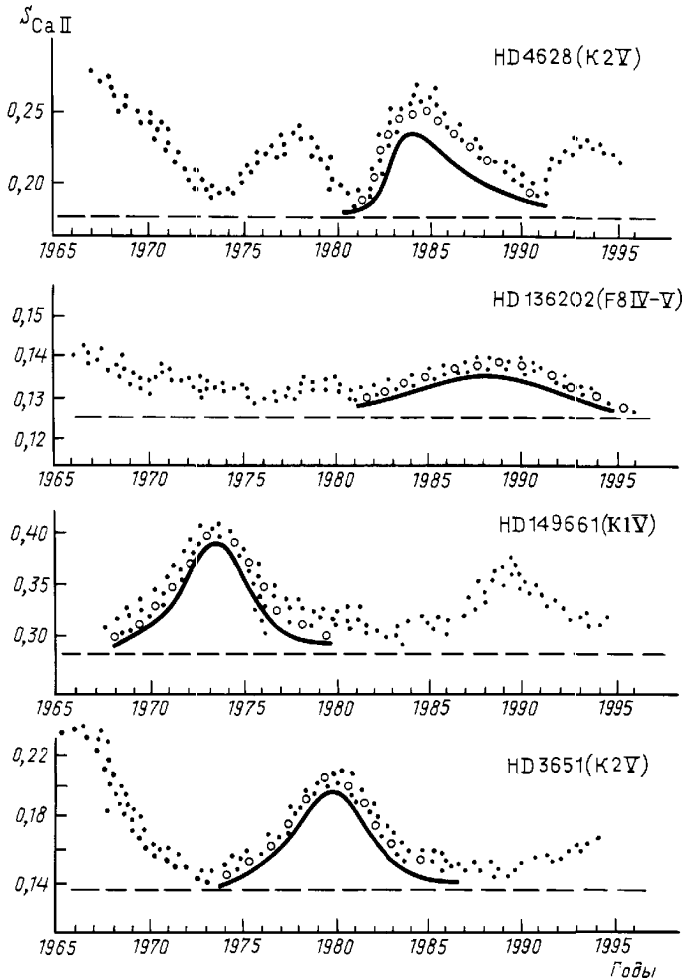
Наиболее изучено в связи с 11-летним циклом солнечной активности поведение фонового потока радиоизлучения Солнца [7]: независимо от номера цикла активности величина $P_{10,7}$ медленно меняется от 60 до 120 (в единицах 10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹).

Подобные вариации фонового излучения Солнца наблюдались также в оптическом (линии Ca II) и ультрафиолетовом диапазонах спектра. Высокая корреляция между потоками излучения Солнца в оптическом и радиодиапазоне позволяет утверждать, что можно построить по аналогии с двухкомпонентной моделью радиоизлучения $F_{10,7}$ [7] двухкомпонентную модель зависимости потока излучения F_{CaII} (нормированного потока $S_{10,7}$) от фазы цикла солнечной активности.

2. Вариации потока излучения звезд, обладающих долгопериодической хромосферной активностью. Прогноз величины потока в зависимости от фазы цикла

В рамках программы наблюдений «НК Project» были исследованы 111 звезд, из них 50 звезд имеют ярко выраженный период по вариациям величины S_{CaII} . Отношение потока излучения в хромосферных линиях H и K ионизованного кальция к потоку излучения в близлежащем континууме S_{CaII} является надежным индикатором хромосферной активности звезд. На рисунке приводятся среднеемесячные значения величины S_{CaII} за 30 лет для четырех выбранных звезд: HD 4628 (спектральный класс $K2$), HD 136202 (спектральный класс $F8$), HD 149661 (спектральный класс $K1$), HD 3651 (спектральный класс $K2$).

Для прогнозирования потока излучения Солнца в отдельной линии или спектральном диапазоне чаще всего используют двухкомпонентную модель вариаций излучения в зависимости от фазы цикла солнечной активности. В случае радиоизлучения на волне



Зависимость $S_{CaII} = F_{CaII}/F_{cont}$ от времени для четырех звезд: точки — наблюдаемые значения величины S_{CaII} [1], пунктир — P^{min} (постоянное значение, свое для каждой звезды), сплошная линия — вычисленные значения P_{CaII} , кружочки — вычисленные в данной работе значения S_{CaII}

10,7 см двухкомпонентная модель, использующая аналитически аппроксимируемые значения фонового радиоизлучения $P_{10,7}$ в зависимости от фазы цикла хромосферной активности, позволяет прогнозировать потоки излучения Солнца [7]. В настоящей работе при расчетах вариаций потоков излучения S_{CaII} у звезд нами используется та же идеология, что и авторами в двухкомпонентной модели для $F_{10,7}$ в [7]. Аналитическая аппроксимация величины фонового излучения P_{CaII} для звезд, выполненная в данной работе, имеет вид

$$P_{CaII} = P^{min} \left(1 + \sin^4 \frac{\pi t}{T} \right) e^{-2t/T}, \quad (1)$$

где P^{min} — минимальное значение фонового потока в линии, соответствующее наименьшему значению потока излучения в течение цикла хромосферной активности (см. рисунок), T — период цикла хромосферной активности (для звезд T изменяется от 8 до 23 лет), t — текущее время с начала цикла, выраженное в долях цикла.

Прогнозируемый поток S_{CaII} для звезд ищем в виде регрессионного соотношения

$$S_{CaII} = aP_{CaII} + b, \quad (2)$$

где коэффициенты a и b вычисляются с помощью стандартных регрессионных методов. В таблице представлены результаты расчета коэффициентов a и b для звезд, наблюдаемых по программе «НК Проект» и имеющих четко выраженную циклическую переменность потока излучения S_{CaII} .

Объект	T (годы)	Спектральный класс	a	b
HD 4628	8,6	K2 V	1,105	0,0008
HD 149661	16	K1 V	0,588	0,157
HD 136202	23	F8 IV-V	1,034	-0,0002
HD 3651	14,6	K2 V	0,901	0,023

Для того чтобы вычислить интенсивность излучения звезды, используя данные из таблицы, в некоторый момент t (выраженный в долях текущего цикла хромосферной активности), вычисляем с помощью уравнения (1) величину P_{CaII} . Неизвестную величину P^{min} , равную минимальному значению потока излучения в линиях H и K ионизованного кальция и согласно модельным представлениям не изменяющуюся от цикла к циклу, определяем из данных наблюдений, представленных на рисунке. Из рисунка также можно определить моменты начала хромосферного цикла и t (долю периода T) для интересующего нас момента времени. Затем с помощью уравнения (2) вычисляем прогнозируемую величину S_{CaII} .

Выводы

Моделирование величин потоков в линиях H и K ионизованного кальция, проведенное в данной работе с учетом физических процессов, протекающих в хромосфере светила, выглядит предпочтительнее простой интерполяции наблюдательных данных. Моделирование поддается наглядной физической интерпретации, и возможна оценка погрешностей моделирования при «обратном» восстановлении величин потоков.

Вариации потоков коротковолнового излучения Солнца и звезд существенно отличаются по амплитуде от вариаций в линиях оптического диапазона. Излучение в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах более сильно реагирует на наличие активных областей, количество которых довольно сильно изменяется (согласно прямым наблюдениям потоков солнечного излучения) в течение цикла хромосферной активности и практически не поддается заблаговременному прогнозу.

Интерпретация полученных наблюдений показывает, что отношение величины потока излучения в хромосферных линиях к величине потока излучения в близлежащем континууме S_{CaII} — важная величина, характеризующая хромосферную активность звезды солнечного типа с активной атмосферой.

В работе [4] на основании ежедневных наземных наблюдений Солнца в течение последних 35 лет анализировалась связь между различными индексами солнечной активности. Высокая корреляция между индексами активности в оптическом, радио- и коротковолновом участках спектра дает возможность в дальнейшем прогнозировать с достаточно хорошей точностью потоки излучения не только от Солнца, но и от многих звезд солнечного типа во всех интересующих нас участках спектра.

Моделирование потоков излучения позволяет ликвидировать пробелы в рядах регулярных астрономических наблюдений и проводить экстраполяцию данных наблюдений.

Работа выполнена при поддержке Федеральной программы «Астрономия» (грант 1.4.3.4).

Автор выражает благодарность М. М. Кацовой и М. А. Лившицу за полезные обсуждения проблемы.

Литература

1. *Balinas S.L., Donahue R.A., Soon W.H.* // *Astrophys. J.* 1995. **438**. P. 269.
2. *Noyes R.W., Weiss N.O., Vaughan A.H.* // *Astrophys. J.* 1984. **287**. P. 769.
3. *Pallavicini G., Wilson R.F., Lang K.P.* // *Astron. Astrophys.* 1985. **149**. P. 95.
4. *Lean J.L., Brueckner B.V.* // *Astrophys. J.* 1989. **337**, No. 1, Pt. 1. P. 568.
5. *Snowgrass H.B., Wilson P.R.* // *Nature.* 1987. **328**, No. 6132. P. 677.
6. *Алексеев И.Ю., Гершберг П.Е.* // *Астрон. журн.* 1996. **73**, № 4. С. 579.
7. *Бочарова Н.Ю., Нусинов А.А.* // *Солнечные данные.* 1983. № 1. С. 106.

Поступила в редакцию
16.11.98

УДК 539.591.16

О СТЕРЕОВОЗМОЖНОСТЯХ СИСТЕМЫ ИЗ ДВУХ ГАММА-ТЕЛЕСКОПОВ, РЕГИСТРИРУЮЩИХ УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

А. М. Анохина, В. И. Галкин, Г. П. Кузнецова, Т. М. Роганова, А. А. Степанян^{*)}

(НИИЯФ)

Статистическое моделирование процесса регистрации гамма- и фонового излучения сверхвысокой энергии черенковским гамма-телескопом ГТ-48 Крымской астрофизической обсерватории показало, что невозможно эффективное выделение атмосферных ливней, вызываемых гамма-квантами, по глубине максимума черенковского излучения. Увеличение расстояния между телескопами не приведет к повышению эффективности отбора гамма-событий.

Во многих экспериментах источники гамма-излучения сверхвысокой энергии наблюдаются одновременно несколькими, разнесенными на некоторое расстояние друг от друга, телескопами, регистрирующими угловое распределение черенковского излучения атмосферных ливней. Можно попытаться использовать возможности такой стереосистемы для оценки глубины максимума интенсивности черенковского излучения и, следовательно, для отбора гамма-событий на фоне первичных ядер. Такой способ отбора гамма-ливней был предложен в работах [1, 2].

Для определения возможностей этого метода было проведено моделирование процесса регистрации черенковским стереотелескопом Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) ГТ-48 гамма- и ядерных атмосферных ливней с использованием монте-карловского кода CORSIKA [3].

Моделируемая установка ГТ-48 КрАО состоит из двух идентичных секций, расположенных на расстоянии 20 м друг от друга в направлении север-юг на высоте 570 м над уровнем моря. Площадь зеркал, установленных на каждой из секций, 13,5 м². В фокусе зеркал установлены связки из 37 ФЭУ, с помощью

которых регистрируются изображения черенковских вспышек в атмосфере. Полный угол обзора каждой связки светоприемников 3° [1, 4].

На смоделированные черенковские образы гамма- и ядерных ливней был наложен флуктуирующий фон ночного неба (в среднем 50 черенковских фотонов на угловую ячейку), учтены флуктуации числа фотоэлектронов в ФЭУ, смоделировано триггерное условие. Из рассмотрения исключались события, для которых хотя бы в одном детекторе ячейка с максимальным сигналом располагалась во внешнем кольце связки из 37 угловых ячеек; исключались и события, в которых хотя бы в одной ячейке регистрировался сигнал, превышающий предельный для данной установки порог — 255 ед. «дискрета» (1 «дискрет» — 0,7 фотоэлектрона).

Модельные расчеты были откалиброваны путем сравнения параметров черенковских пятен от первичных протонов и ядер, полученных в эксперименте и смоделированных [5, 6]. Сравнились следующие характеристики черенковских образов: длина и ширина пятна, величина сигнала в максимальной ячейке

^{*)} Крымская астрофизическая обсерватория.