

АКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ТИПА У ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

И.Ю. Алексеев

SOLAR-LIKE ACTIVITY ON THE LATE-TYPE STARS

I.Yu. Alekseev

Представлены методы и результаты исследований проявлений солнечной активности у различных звезд поздних спектральных типов: G-карликов солнечного типа и более холодных карликов типа BY Dra, двойных систем типа RS CVn, гигантов типа FK Com, молодых T Tau и post T Tau звезд. Такая активность проявляется во всех слоях звездной атмосферы – от холодных фотосферных пятен до звездных корон – и наблюдается во всех длинах волн – от жесткого рентгена до декаметрового радиоизлучения. Около половины звезд демонстрирует циклы активности, качественно аналогичные солнечному. Все эти явления качественно аналогичны активности Солнца, порой превышая ее по масштабам в десятки раз, и также основаны на звездном магнетизме, возникающем из-за нетвердотельного вращения. Отмечена тенденция зависимости всех индикаторов активности от темпа вращения звезды и глубины конвективной оболочки.

We present methods and results of the study of the solar-type activity displaying on the following types of cool stars: solar-type G dwarfs and BY Dra-type dwarfs, RS CVn systems, fast rotating FK Com-type giants, and young T Tau and post T Tau stars. Such activity displays in all atmospheric layers from photospheric spots to the stellar corona and shown at all wavelength from hard X-rays to decametric radiation. A half of all stars show activity cycles, which are the similar to the solar one. All these phenomena are qualitatively similar to the solar ones, but their energies are two-three orders greater than the solar ones. As well as the solar phenomena, the stellar activity is based on the stellar magnetism, originating from the non solidbody-type rotation. We note a dependence of all stellar activity indicators on the stellar rotation rate and the convective envelope depth.

1. Введение

Активность солнечного типа на звездах разных масс и возрастов – одна из актуальных проблем современной астрофизики, которую часто выделяют в самостоятельное направление звездно-солнечной физики. Основное достижение этого направления состоит в утверждении, что в основе всего обширнейшего разнообразия наблюдаемых нестационарных явлений на Солнце и других звездах с конвективным переносом энергии (вспыхивающие звезды типа UV Cet, двойные системы типа RS CVn и W UMa, быстро вращающиеся гиганты типа FK Com, некоторые T Tau звезды) лежит звездный магнетизм, обязанный своим происхождением нетвердотельному вращению звезд [1].

Проявления солнечной активности на звездах весьма разнообразны: это и холодные пятна на звездной поверхности типа темных солнечных пятен, и активные верхние атмосферы звезд – их хромосферы и короны, и мощные спорадические вспышки, регистрируемые во всех диапазонах электромагнитного излучения – от декаметровых радиоволн до жесткого рентгена. Конечная задача исследований таких звезд состоит в построении общей модели магнитной активности, включающей все разнообразие наблюдаемых явлений, и в выяснении зависимости этих явлений от глобальных характеристик и эволюционного статуса звезд.

2. Пятна

Темные пятна на Солнце – первое проявление активности, известное еще жрецам древнего Вавилона. Открытые у других звезд в середине прошлого века [2], они сейчас активно изучаются с помощью трех категорий методов – спектральных, фотометрических и поляриметрических. Прямыми спектральными методами измерения температур и площадей пятен являются исследование молекулярных полос TiO, CO, OH, VO (которые образуются в ат-

мосферах звезд низкой температуры) и измерение относительных интенсивностей фотосферных линий железа. Самым же прогрессивным спектральным методом исследования звездных пятен является доплеровское картирование. Идея метода основана на различии профиля спектральной линии, даваемого элементом поверхности с аномальной температурой или химическим составом, и профиля элемента нормальной фотосферы. Результирующий профиль звезды содержит особенность, сдвинутую эффектом Доплера в зависимости от фазы вращения на некоторую величину. Метод налагает очень строгие ограничения не только на наблюдательную аппаратуру, но и на выбор исследуемых объектов. В настоящее время он был применен к пяти десяткам активных звезд разных типов [3], прежде всего к ярким и быстро вращающимся переменным звездам типа RS CVn, запятненным T Tau и post T Tau звездам и звездам типа FK Com.

Наблюдения линейной поляризации излучения запятненных звезд дают нам информацию об эффектах рассеяния света в неоднородно освещенной атмосфере (у запятненных гигантов, обладающих протяженной атмосферой) и зеемановской поляризации линий поглощения в присутствии сильного магнитного поля (доминирует для всех типов активных звезд) [4]. Комбинирование доплеровского картирования с зеемановской спектроскопией высокого разрешения позволяет проводить картирование не только холодных пятен, но и распределения магнитных полей по звездной поверхности [5].

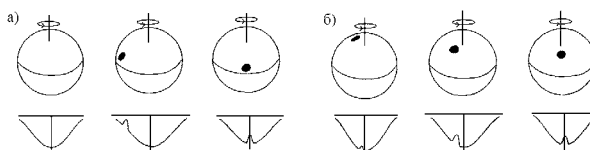


Рис. 1. Спектральный эффект холодного пятна.

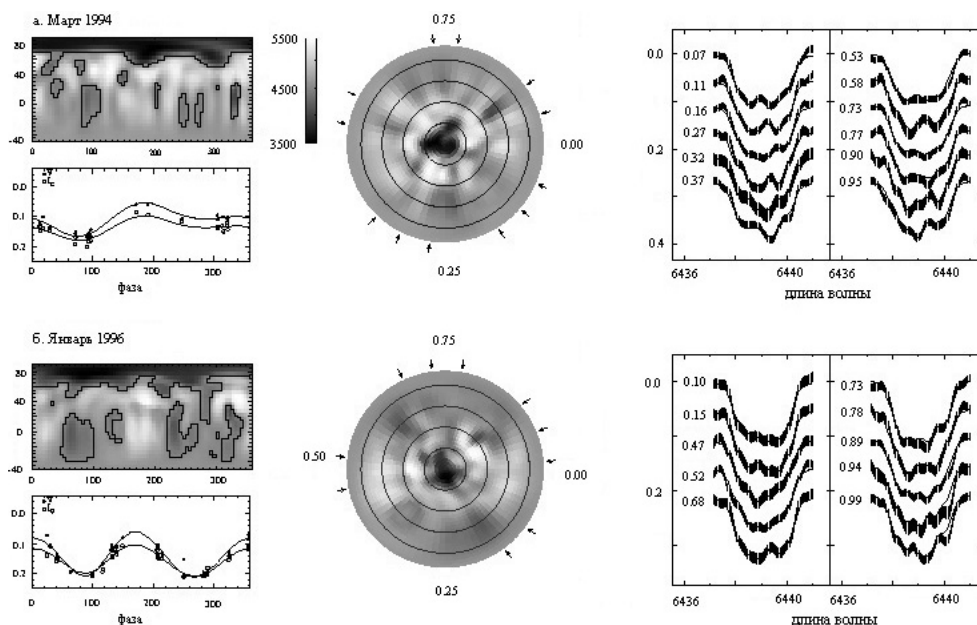


Рис. 2. Пример доплеровской карты активной звезды UZ Lib.

Фотометрические методы исследования запятненности налагают меньшие ограничения на наблюдательную аппаратуру и выбор программных звезд, чем спектральные, и позволяют проводить более массовые исследования, прежде всего для вспыхивающих звезд малой светимости [6]. Все три группы методов согласуются в оценке площадей и температур пятен. Площадь запятненных областей может достигать до 50 % поверхности звезды. Она показывает тенденцию роста к более быстровращающимся звездам (с уменьшением числа Россби). Температура пятен составляет, независимо от типа переменности звезды, 2500–4500 К и растет к более горячим звездам. Разность температур фотосферы и пятен изменяется от 1000–2200 К у горячих G-карликов, горячих компонент систем типа RS CVn и звезд типа FK Com до 300 К у самых холодных M-звезд. Получаемые широтные распределения пятен зависят от применяемого метода – доплеровское картирование дает практически для всех присутствие гигантских околополярных пятен в сочетании с рядом других

деталей, распределенных по всем широтам, в то время как фотометрические методы говорят о средне- и низкоширотных пятнах. Для ряда наиболее изученных переменных длительные ряды наблюдений позволяют делать выводы о циклической активности звезды, движениях пятен и дифференциальном вращении [7].

3. Циклы активности и активные долготы

Одиннадцатилетняя циклическая солнечная запятненности была открыта в середине XIX века Генрихом Швабе. Сейчас известно, что цикл Швабе регулирует и другие параметры солнечной активности: размеры активных областей хромосферы, частоту и мощность вспышек, структуру и излучение короны, характеристики солнечного ветра и проявление солнечно-земных связей. Кроме 11-летнего цикла известен также вековой (80–90 лет) цикл Глайсберга и цикл Маундера (маундеровские минимумы, наступающие каждые 2–3 столетия). Первые данные о возможных циклах активности звезд-карликов появились при рассмотрении их долговременной фотометрии.

Циклические изменения среднего блеска иллюстрируют пятнообразовательную деятельность звезды. При моделировании ее запятненности отмечаются циклические изменения полной площади пятен и их средней широты. Большинство звезд показывает при этом аналог солнечной диаграммы «бабочек» – широтный дрейф пятен к экватору по мере их развития. Характерная длина таких циклов обычно составляет несколько лет (от 3 до 20), т. е. близка к длительности цикла Швабе.

У большинства запятненных звезд, независимо от эволюционного статуса (в том числе у Солнца), обнаруживаются две выделенные устойчивые долготы, разнесенные примерно на полпериода. Вблизи этих долгот отмечается концентрация не только наибольшей запятненности, но также и областей повышенной хромосферной активности, выходов

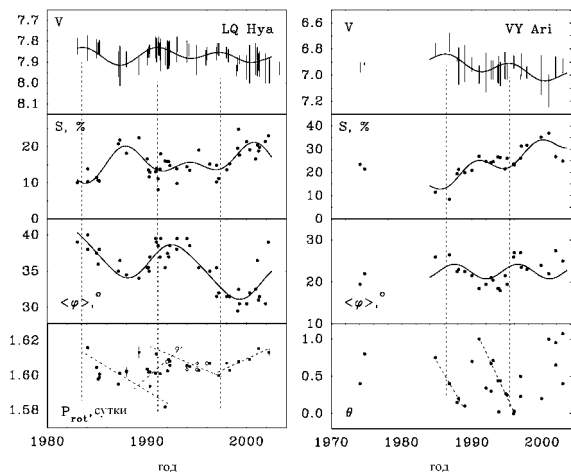


Рис. 3. Циклические изменения звездных пятен: кривая блеска, колебания полной площади пятен, их средней широты и фотометрического периода (фазы наименьшего блеска).

локального магнитного поля и наиболее мощных вспышек. Происходящие время от времени переключения доминирующей активной долготы с одной на другую (так называемый эффект flip-flop) часто показывают тенденцию к цикличности [8], хотя у некоторых звезд они могут происходить и нерегулярно. Длительности циклов переключения активных долгот не совпадают с циклом пятнообразования, но соотносятся как целые числа $P_{\text{cyc}}/P_{\text{flip-flop}} = 3:1, 2:1, 3:2, 5:4$ и пр. Вероятно, такие отношения выражают взаимодействие различных мод звездного динамо. Анализ старых фотопластинок обнаружил для ряда активных

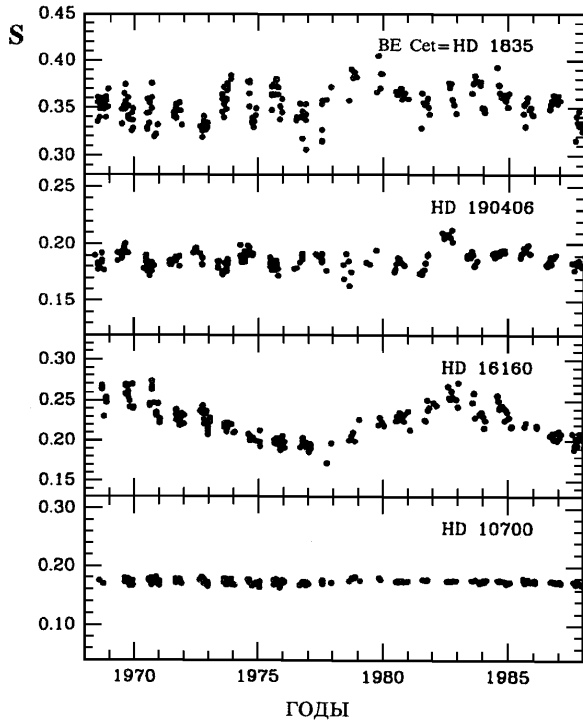


Рис. 4. Колебания потока в линиях CaII H&K активных звезд проекта.

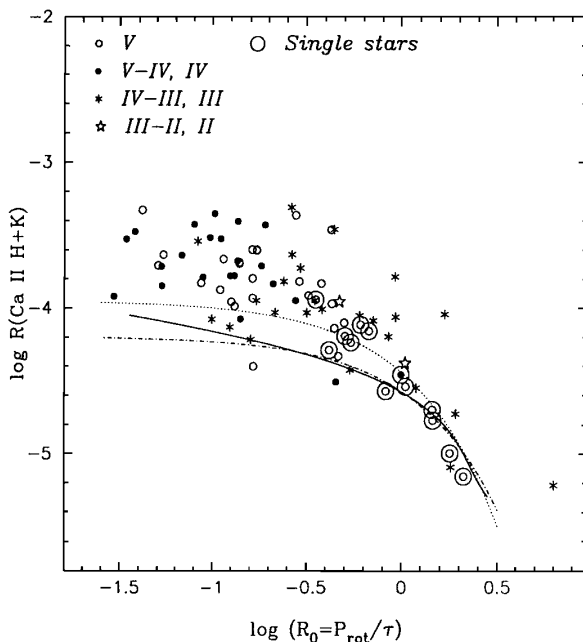


Рис. 5. Зависимость потока в хромосферных линиях CaII H&K от числа Россби.

звезд длительные циклические изменения с большой амплитудой ($0.^m3-1.^m0$) и характерным временем 50–80 лет, аналогичные циклу Глайсберга.

Циклические изменения были обнаружены нами также в вариациях вспышечного энерговыделения звезд EV Lac, AD Leo и YZ CMi, а также в излучении хромосферной линии H_{α} . Однако наиболее надежные и многочисленные (более сотни программных звезд) определения цикличности активности звезд получены по измерениям потока в линиях CaII H&K (проект Вильсона). У половины звезд выборки обнаружены циклы. Найденные длительности цикла заключены в диапазоне от 3 до 25 лет, хотя хорошо определенные достоверные периоды превышают 7 лет.

Длительность циклов активности не показывает явных зависимостей от показателя цвета, глубины конвективной зоны, периода вращения или числа Россби. Однако существует общая зависимость $\lg(P_{\text{cyc}}/P_{\text{rot}})$ от $\lg(1/P_{\text{rot}})$, в которую хорошо укладываются циклы, определенные всеми методами, и даже циклические вариации орбитальных периодов у алголей и RS CVn-звезд. Из всего множества циклов мы можем выделить три последовательности – цикл Глайсберга, цикл Швабе и наблюдаемый у ряда звезд короткий (3–5 лет) цикл, не имеющий солнечных аналогов.

В то время как у Солнца цикл Швабе синхронизирует все процессы активности, то для других звезд такой однозначной картины нет. Например, если у звезды к Cet фотометрический цикл совпадает с кальциевым, то для HN Peg и DX Leo это совпадение хуже, а у переменной BE Cet фотометрический и кальциевый циклы не коррелируют. Известный у активной вспыхивающей звезды EV Lac 7-летний цикл вспышечной активности плохо согласуется с пятнообразованием (показывает нерегулярную переменность) и долговременными вариациями показателя цвета U–B (зависит от хромосферной эмиссии). У ряда звезд пятенный цикл достаточно плохо согласуется и с излучением хромосферы в линии H_{α} (LQ Hya, VY Agi, EV Lac). Вероятно, это связано с тем, что рассматриваемые звезды существенно моложе Солнца, и их циклическая активность еще не установилась [9].

4. Хромосферы

Звездные хромосферы были открыты в самом начале спектральных исследований звезд средних и поздних спектральных классов по сильной эмиссии резонансного дублета CaII H&K и водородной эмиссии H_{α} . Линии кальция – одна из наиболее изученных деталей в спектре Солнца. Начиная с 1966 г. в обсерватории Маунт Вилсон проводится систематическое измерение интенсивностей эмиссионных ядер этих линий для сотни холодных звезд. Исследования этих линий показали следующие результаты.

У ряда звезд обнаружена вращательная модуляция интенсивности линий. Для некоторых звезд с вращательной модуляцией найдены активные долготы и признаки дифференциального вращения, прежде всего – изменения периода от сезона к сезону. У 12 звезд этот эффект был интерпретирован как дрейф активных областей в течение цикла к эквато-

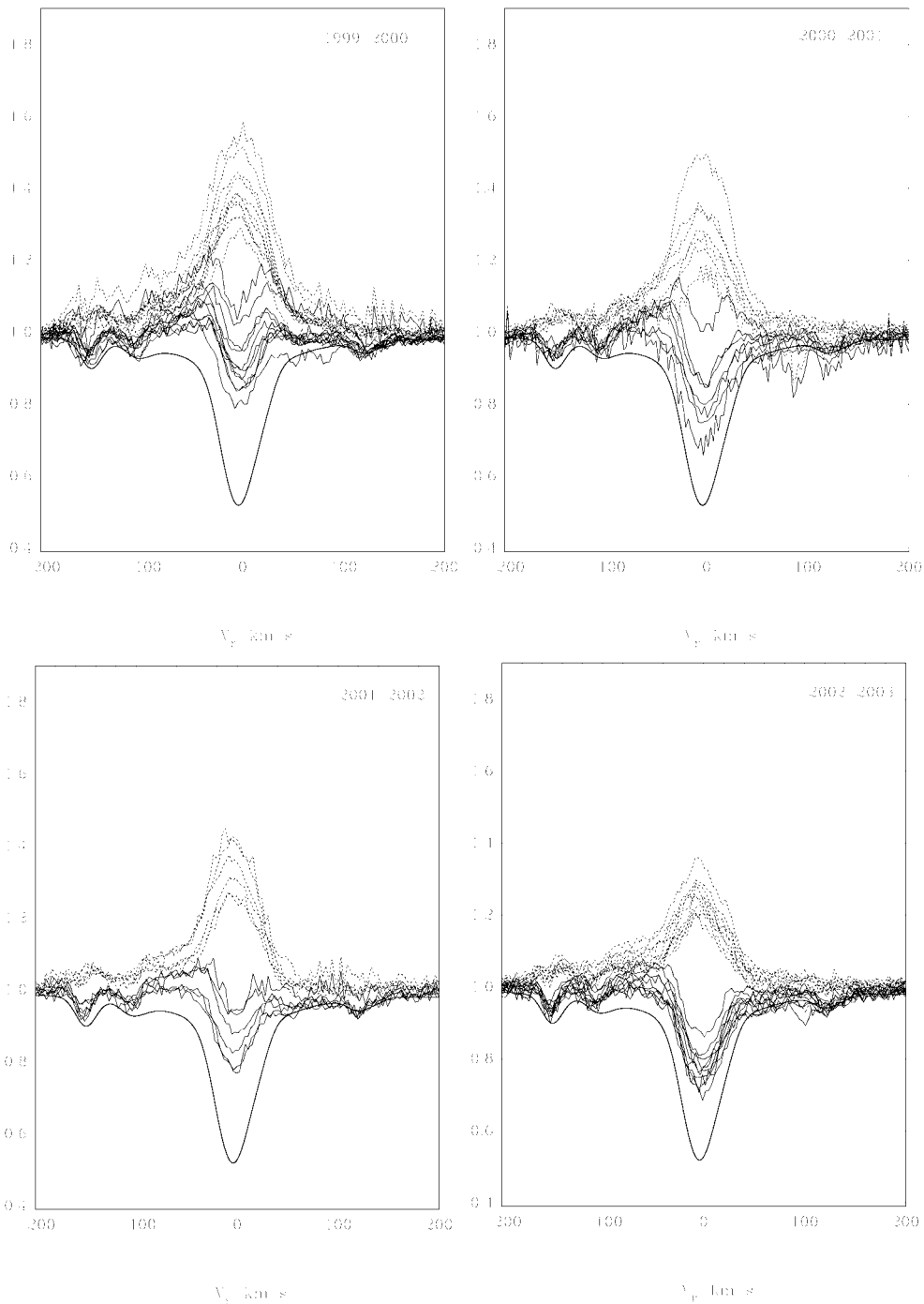


Рис. 6. Хромосферная линия H_{α} звезды VY Agi в различные сезоны.

ру (как и на Солнце), у 6 звезд был заподозрен дрейф к полюсу, а у 4 звезд – смена направления дрейфа в течение цикла.

Найден рост потоков в линиях кальция в зависимости от скорости вращения, общий для звезд разных спектральных типов, одиночных звезд и компонент двойных систем. Для каждого спектрального класса существует некоторый базовый уровень хромосферы, присущий всей поверхности звезды и обусловленный немагнитным нагревом (например в центре солнечных супергранул вдали от факельных областей). Помимо базового уровня наблюдается магнитная компонента, относящаяся к активным областям и хромосферной сетке, показывающая тесную зависимость от числа Россби.

Другим известным признаком хромосферной активности является водородная эмиссия H_{α} . Если у активных областей Солнца и звезд солнечного типа наблюдается просто небольшое замытие абсорбции с $EW = 0.02-0.03 \text{ \AA}$, то у холодных звезд это хорошо видимая эмиссия с эквивалентной шириной в несколько ангстрем.

Такое различие вызвано разной интенсивностью фотосферной подложки. Общей особенностью эмиссионных красных карликов является двухвершинный профиль линии. Причина этого – оптически толстая в центре линия с электронной плотностью хромосферы около $10^{11}-10^{13} \text{ см}^{-3}$. При такой плотности в формировании линии столкновительные процессы преобладают над фотоионизационными,

что качественно отличается от солнечной ситуации. Синий пик профиля обычно всегда выше красного, кроме того часто синее крыло более протяженное. Это говорит о собственном поле скоростей в хромосфере (истечение вещества со скоростями около 100 км/с). Профиль линии показывает вращательную модуляцию, связанную с неоднородностью хромосферы. Обычно наиболее плотные области хромосферы связаны с наиболее запятненными областями звезды. Избыток излучения в линии H_{α} , получаемый вычитанием фотосферного профиля, показывает систематический рост с уменьшением периода вращения звезды и ее числа Россби.

Основными деталями ультрафиолетового спектра активных звезд являются водородная эмиссия Ly_{α} , сильный резонансный дублет CIV 1548/51 Å (формируются в переходной зоне при температуре в сотни тысяч кельвинов), бленда $FeII$ 2600 Å и сильная резонансная эмиссия $MgII$ 2800 Å (формируется в хромосфере при десятках тысяч кельвинов). Дублет магния является основным источником радиативных потерь хромосферы без учета водородной эмиссии. Значительные (до 10^{30} эрг/с) радиативные потери переходных зон и нижних корон звезд приходится на область крайнего ультрафиолета (60–1000 Å), где доминирует излучение запрещенных линий многократно ионизованного железа FeX – $XXVI$, OIV и $HeII$ 304 Å, возбуждаемых электронным ударом. Все эти индикаторы активности также показывают рост избытка излучения с уменьшением периода вращения звезды и числа Россби. Такой рост показывает для всех линий эффект насы-

щения при достижении некоторого критического значения числа Россби. Это критическое значение для каждой линии свое, оно зависит от высоты формирования эмиссии (уменьшается от хромосферы к короне). Полные радиативные потери звездных хромосфер показывают четкую зависимость от поглощаемого звездными пятнами дефицита потока.

Хромосферы активных звезд показывают существенные неоднородности и состоят, по крайней мере, из двух компонент – спокойной хромосферы и активных областей (plages). Такие области занимают десятки процентов звездной поверхности (для разных линий фактор заполнения разный) и показывают неоднородное распределение по долготе. Все линии хромосферы демонстрируют вращательную модуляцию, причем максимум излучения в линии обычно приходится на наиболее запятненную часть звезды, что говорит о пространственной связи активных областей с холодными пятнами. Электронная плотность в таких областях повышена в несколько раз. Таким образом, мы можем говорить о присутствии на звездах в некоторые эпохи центров активности, аналогичных солнечным.

5. Короны

Информацию о звездных коронах мы получаем, прежде всего исследуя их тепловое излучение в мягком рентгене. Оно было впервые обнаружено на спутнике HEAO-1 (1977), а дальнейшие исследования звездных корон проводились спутниками EINSTEIN (1978–1981), EXOSAT (1983–1986), ROSAT (1990–1997), ASCA (1993), BeppoSAX (1996) и др. Обзоры неба показали, что корональное излучение в мягком рентгене присутствует на карликах со спектральными классами позже F0, т. е. со внешними конвективными зонами. Начало излучения короны довольно резкое, а потом отношение L_X/L_{bol} слабо за-

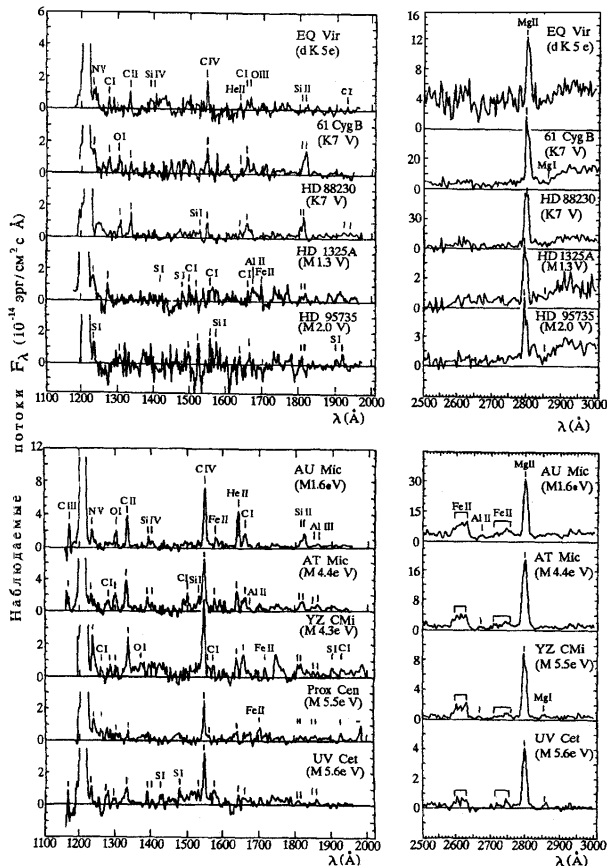


Рис. 7. Ультрафиолетовые линии хромосфер активных звезд.

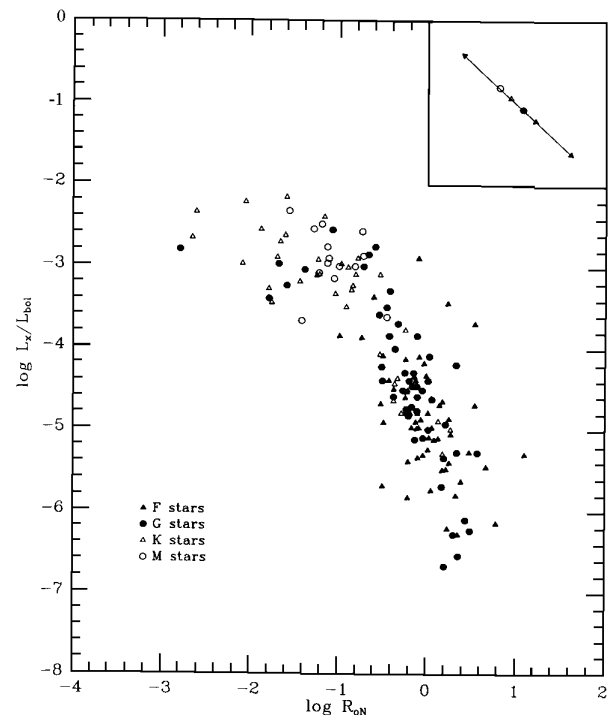


Рис. 8. Зависимость рентгеновского излучения корон активных звезд от числа Россби.

висит от эффективной температуры. В среднем рентгеновские светимости корон активных звезд составляет 10^{27} – 10^{28} эрг/с, на неэмиссионных звездах короны систематически холоднее и слабее, чем на активных.

Для различных выборок ближайших звезд был обнаружен рост рентгеновской светимости со скоростью вращения звезды и уменьшением числа Россби. Найденная корреляция выполняется для вспыхивающих звезд, систем RS CVn и T Tauri звезд всех спектральных классов и перекрывает три порядка величины по числу Россби и четыре по рентгеновской светимости. При достижении критической скорости вращения 35 км/с, как и для переходной области, наступает режим насыщения, при котором независимо от вращения $L_X/L_{bol} = 10^{-3.23}$. Рост рентгеновского потока у более активных звезд происходит не за счет фактора заполнения, а за счет увеличения характерной плотности светящегося вещества.

Как и в случае хромосферной эмиссии, можно говорить о существовании базового уровня рентгеновского излучения короны, обусловленного, как у спокойного Солнца в минимуме, эмиссией ярких рентгеновских точек. Рентгеновское излучение короны показывает хорошую корреляцию со светимостью хромосферы в линиях CaII H&K, H α , HeII 1640 Å, CIV 1550 Å, средним вспышечным излучением звезды, задерживаемой звездными пятнами энергией и магнитным потоком. Найденные корреляции коронального излучения с другими индикаторами активности говорят о том, что вся звездная атмосфера нагревается одним источником нерадиативной энергии.

Короны звезд представляют собой оптически тонкую горячую плазму низкой плотности. В ее излучении доминируют линии высокоионизованных атомов, возбуждаемые электронным ударом, а вклад непрерывных свободно-свободного, рекомбинационного и двухфотонного излучений невелик. При температурах больше 10^7 К начинает преобладать свободно-свободное излучение водорода и гелия. Рентгеновский спектр звездной короны имеет двугорбую структуру, которая объясняется тем, что корона звезды состоит, по крайней мере, из двух компонентов – низкотемпературного (единицы МК) и высокотемпературного (десятки МК). Жесткий компонент отвечает за основную часть наблюдаемых вариаций рентгеновского излучения и требует больших (порядка звездного радиуса) размеров петель при малом (0.1) факторе заполнения, он формируется в компактных вспышечных образованиях. Мягкий компонент формируется в активных областях в петлях малого (10^8 см) размера, покрывающих большую часть поверхности. Оценки электронных плотностей в основании короны показывают систематический рост к более холодным звездам от солнечных значений 3×10^8 см $^{-3}$ (в спокойных областях) до 10^{11} см $^{-3}$, что соответствует самым плотным корональным конденсациям на Солнце. Как и хромосферы, короны ряда звезд также показывают неоднородность по долготе, причем вариации рентгеновского потока меньше, чем у Солнца. Температуры плазмы остаются постоянными, и все вариации вызваны изменениями меры эмиссии. Для ряда звезд можно заподозрить и наличие малоамплитудных рентгеновских циклов, синхронных с хромосферными.

Радиоизлучение звездных корон вне вспышек обнаружено примерно у половины активных звезд, в основном при наблюдениях в сантиметровом диапазоне на VLA (2, 6, 20 см) и 64-метровом телескопе в Парксе (2, 3.6, 6 см). Активная RS CVn система UX Ari, PMS звезда AB Dor, запятненные карлики YY Gem и AU Mic, «молодое Солнце» EK Dra показали сильную вращательную модуляцию радиоизлучения, с усилением потока на наиболее запятненных долготах. Размер радиоизображения короны, согласно данным VLBI, составляет около двух диаметров звезды. Основным механизмом сантиметрового излучения спокойной короны является, по видимому гиротронная эмиссия нетепловых электронов в магнитных полях над активными областями. Эти электроны наполняют корону в результате вспышек или шумовых бурь, подтверждая наличие у звезды постоянного микровспышечного фона.

6. Вспышки

Скоротечные вспышки – наиболее доступное для наблюдений проявление звездной активности, присутствующее как собственно вспыхивающим звездам-карликам, так и звездам типа RS CVn и T Tauri звезд. В ходе вспышки оптическая светимость звезды возрастает в десятки раз. Характерная длительность звездных вспышек около нескольких минут, самые скоротечные из зарегистрированных вспышек имеют продолжительность 0.3 с, самые длительные оптические и рентгеновские вспышки могут длиться несколько часов, а в крайнем ультрафиолете – до полутора суток.

Вспышки излучают во всех диапазонах электромагнитного излучения, но наиболее изучены в оптике. В коротковолновой области оптического спектра возникает непрерывная эмиссия, заливающая абсорбционные детали, и резко возрастает интенсивность эмиссионных линий, прежде всего водорода. В быстрых всплесках преобладает непрерывное излучение, в то время как в медленных вспышках существенный вклад дают линии. Как правило, континуум затухает много быстрее, чем линии, максимум свечения в линиях отстает по времени от максимума континуума, в максимуме блеска и на стадии начального быстрого затухания континууму принадлежит наибольший вклад (96 %), а на плавной стадии затухания растет доля линий (до 17 %). Наилучший

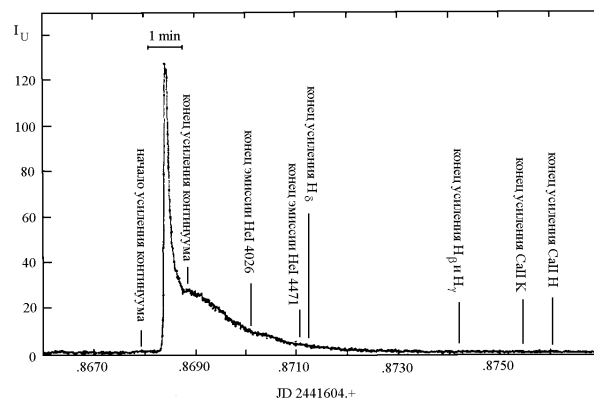


Рис. 9. Оптическая кривая блеска вспышки AD Leo в полосе U.

контраст вспышки отмечается в более синих лучах. Излучение звездных вспышек неполяризовано. Непрерывное излучение вспышек близко к чернотельному с температурой около 10 тыс. К с добавкой свободно-свободного излучения плазмы корональной температуры. Измерения относительных интенсивностей бальмеровских линий позволяют оценить параметры излучающей плазмы: $T = 15\text{--}20$ тыс. К, $n_e = 10^{12}\text{--}10^{14}$ см⁻³, $\tau(Ly_\alpha) = 10^4\text{--}10^5$. Вспышки в водородных линиях занимают проценты поверхности звезды и превышают в среднем в несколько раз площади вспышек в континууме. Эмиссия в линиях CaII НК усиливается позднее и в меньшей степени, чем водородные линии, а затухает медленнее (запаздывание относительно континуума от 4 до 52 мин). Она в значительной степени обусловлена радиативной накачкой эмиссией близкой линии H ϵ . Обнаруживаются эмиссии нейтрального и (много реже) ионизованного гелия и многочисленные линии FeI и FeII. Во время вспышки происходит сильное уширение бальмеровских линий (штарковское в высоких членах серии и связанное с самопоглощением в нижних). Вблизи максимума вспышки часто наблюдается красная асимметрия с характерными скоростями около 100 км/с, связанная с движением вниз хромосферной конденсации, которое инициируется потоком энергичных частиц. В предмаксимальной стадии возможны и синие аномалии. Детальное представление некоторых профилей говорит о сильной (до 700 км/с) кинематической неоднородности излучающего вещества. Светимости вспышек в оптике составляют до 10³² эрг/с, а полная максимальная энергия вспышки в оптике доходит до 10³⁴ эрг, в то время как на Солнце это значение составляет всего 10²⁷ эрг.

В рентгеновской области мы наблюдаем при вспышке тепловое свечение оптически тонкого газа, который появляется в результате первичного выделения энергии. Высвечивание этого газа определяется либо теплопроводностью, либо радиативными потерями, либо длительным подогревом на фазе затухания. В наиболее мощных вспышках горячий газ заполняет магнитные петли размером до радиуса звезды, а общая энергия его рентгеновского излучения сравнима с оптической и достигает 10³⁴ эрг. Температура излучающего газа доходит до нескольких десятков МК, а электронная плотность до 10¹⁰–10¹² см⁻³. Область рентгеновского излучения вспышки занимает несколько процентов звездной поверхности.

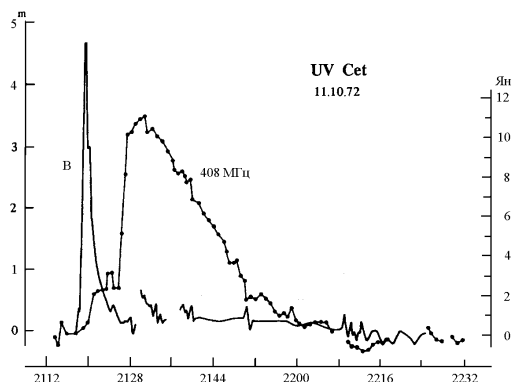


Рис. 10. Кривые блеска вспышки звезды UV Cet (оптический и радио-диапазон).

Возникающее в звездных коронах радиоизлучение вспышек имеет нетепловую природу. Хотя там выделяется пренебрежимо малая доля энергии вспышек (около процента оптической энергии), она говорит о независимом компоненте в короне — об ускоренных частицах. Открытие радиоизлучения вспышек и их начальное изучение происходили в метровом диапазоне. Вспышки показали высокую яркостную температуру, большие спектральные индексы и высокую поляризацию излучения, характерные для направленного когерентного излучения. В сочетании с систематическим запаздыванием относительно оптики эти вспышки были сопоставлены с солнечными всплесками II и IV типов. В сантиметровом диапазоне радиособытия показали большое разнообразие временных, яркостных и поляриметрических характеристик, широкополосности и степени корреляции с оптикой. В качестве возможных механизмов обсуждаются плазменные колебания и неустойчивости электронно-циклотронного мазера. Вспышки в декаметровом диапазоне до сих пор не были однозначно сопоставлены с оптическими событиями. Для них также рассматриваются мазерный и плазменный механизмы.

В ультрафиолетовом диапазоне во время вспышек наблюдается многократное усиление хромосферных линий CIV 1550 Å, NV, HeII, CII, CI, SiIV, CIII, AlIII, дублета MgII 2800 Å и бленды FeII 2600 Å. Степень усиления линий во вспышках возрастает с температурой их формирования, в эту зависимость попадает и Солнце. Между амплитудой оптических вспышек и эффектом в ультрафиолете нет однозначной связи, что вызвано пространственным разделением источников их излучений. Ультрафиолетовая вспышка обычно длится дольше, чем в оптическом континууме. Во время сильных вспышек, кроме усиления линий, появляется ультрафиолетовый континуум вплоть до 1200 Å, вероятно вызванный рекомбинацией на SiI. Усиление линии Ly α , в отличие от других линий, на звездах меньше, чем на Солнце, вероятно, из-за большей оптической толщины звездных атмосфер в этой линии. Энергия вспышек в ультрафиолете сравнима с оптической. В области крайнего ультрафиолета (60–1000 Å), примыкающей к мягкому рентгену, энергия вспышек превышает оптическую в несколько раз. Наблюдается запаздывание начала вспышки в крайнем ультрафиолете относительно полосы U. В излучении вспышек доминируют линии многократно ионизованного железа FeIX–XXIV и HeII 304 Å. Энергия вспышек превышает оптическую в несколько раз. Характерные плотности излучающего вещества в переходной зоне около 10¹⁰ см⁻³, объем излучающего газа примерно такой же, как в рентгене. Характерные размеры вспышечных петель оцениваются как 10¹⁰ см.

До сих пор не существует цельной теории звездных вспышек. Понятно только, что, по аналогии со вспышками на Солнце, источником их энергии является энергия магнитного поля и начальная фаза вспышки состоит в формировании пучков частиц высокой энергии. Эти пучки устремляются из короны вниз вдоль магнитных линий. При спуске они излучают микроволновую эмиссию и тормозной жесткий

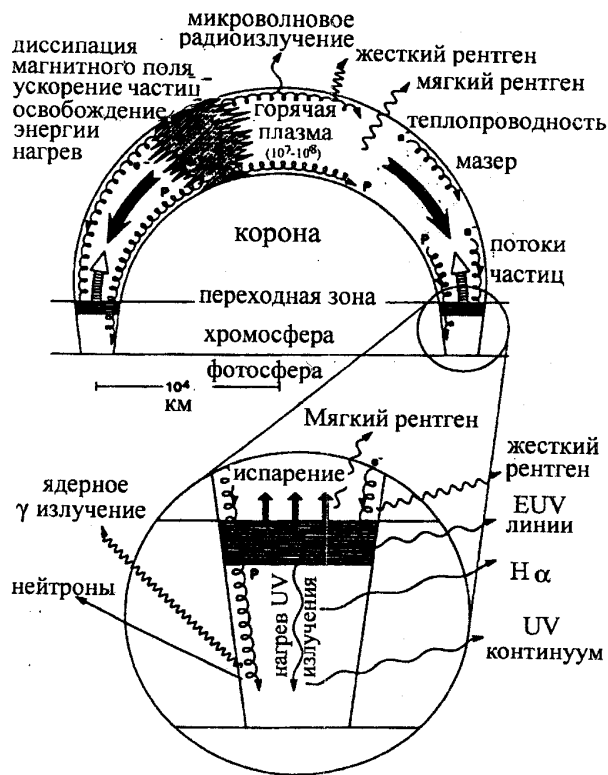


Рис. 11. Модель звездной вспышки.

рентген, нагревая вещество хромосферы до 10–20 МК. Нагретая плазма, испаряясь, заполняет магнитные петли и излучает в мягком рентгене. Окончательное высвечивание происходит в нижележащих плотных слоях.

Для начальной фазы вспышки обычно используется магнитогидродинамическая модель с перезамыканием магнитных силовых линий и образованием токового слоя. Альтернативой является контурная модель с токнесущей магнитной петлей. Возникающий поток быстрых частиц приводит к образованию на уровне верхней хромосферы слоя высокотемпературной плазмы, от которого вверх и вниз распространяются два гидродинамических возмущения. Идущее вниз возмущение состоит из скачка температуры и ударной волны. Перед медленно движущимся скачком температуры идет ударная волна, за фронтом которой из-за сильного высвечивания формируется уплотнение с перепадом плотности на два порядка. Скорость уплотнения плавно уменьшается со временем (от 200 км/с через 0.4 с после начала вспышки до 20 км/с через 10 с). При толщине до 10 км (на порядок меньше, чем на Солнце) уплотнение достигает заметной оптической толщины в континууме и формирует непрерывное излучение вспышки. Плотность вещества в уплотнении достигает 10^{16} см⁻³, а температура 10^4 К, условия в уплотнении близки к ЛТР. При таких условиях профили бальмеровских линий расширены эффектом Штарка и дают красную асимметрию. Источник непрерывного излучения находится на высоте в хромосфере.

В идущем вверх возмущении скорость, наоборот, постепенно растет от 200 до 1000 км/с. Ионная температура сперва сильно отстает от электронной, но где-то через 6 с после начала вспышки они сравни-

ваются на уровне 30 МК. Испаряющаяся при этом хромосфера заполняет петлю. После испарения хромосферы интенсивность частиц в этом месте быстро падает. Если энерговыделение прекращается в максимуме вспышки, то в остывающей плазме формируются конденсации, которые со скоростью в несколько сотен километров в секунду достигают основания петли; если же энерговыделение продолжается и после максимума, плазма остывает медленно. Испарение хромосферы со скоростью в несколько сотен километров в секунду приводит к опусканию переходной зоны и сжатию газа в основании петли.

7. Нагрев звездных атмосфер

Таким образом, мы видим, что все характеристики активности показывают рост с усилением вращения и уменьшением числа Россби и достигают насыщения при некоторой критической скорости, зависящей от высоты атмосферного слоя: быстрее всего насыщение достигается в рентгене, потом в эмиссии переходной зоны, затем в хромосфере, и наконец – в пятнах. Найденные корреляции выполняются не только для звезд-карликов, но и для гигантов типа RS CVn, T Tau и PMS-звезд со слабыми линиями и звезд типа FK Com. Соответственно существуют тесные, но нелинейные корреляции между светимостями хромосферы, переходной зоны, короны, магнитным потоком и поглощаемой в пятнах энергией. Наблюдаемый при этом эффект насыщения связан, скорее всего, не только с заполнением всей поверхности активными областями, но и с происходящей при этом перестройкой механизма динамо и включением некоторой обратной связи с конвекцией и дифференциальным вращением, которая ограничивает рост потока нерадиативной энергии и препятствует дальнейшему нагреву атмосферы [10].

С другой стороны, на звездах отмечается наличие центров активности, когда выходы локальных магнитных полей, максимумы запятненности, активные области в короне, переходной зоне и хромосфере, области наибольшего вспышечного энерговыделения располагаются на одних и тех же активных долготах. То обстоятельство, что на Солнце и звездах активные области в хромосфере, переходной зоне и короне расположены над магнитными областями и между соответствующими радиативными потоками и магнитными потоками активных областей существуют достаточно четкие корреляции, привело к заключению о магнитном нагреве звездных атмосфер. Однако конкретная форма механизма этого нагрева до сих пор не ясна.

По-видимому, базовый минимальный уровень излучения хромосферы, переходной зоны и короны, не зависящий от вращения звезды, но зависящий от спектрального класса и наблюдаемый на старых звездах и в центре солнечных супергранул, обеспечивается за счет акустических волн. Наблюдаемая интенсивность магнитного компонента излучения и его слабая зависимость от спектрального класса соответствует альфвеновским или медленным МГД-волнам, выходящим в атмосферу из конвективных подфотосферных слоев. По-видимому, нагрев хро-

мосферы осуществляется медленными МГД-волнами при диссипации ударных волн, а короны – альфвенскими. Большой вклад в нагрев короны вносит и пересоединение магнитных линий. Дополнительно к волновому происходит нагрев звездной атмосферы вспышками и микровспышками, объясняющий линейную связь рентгеновского излучения короны и оптической светимости вспышек. Фон микровспышек вносит заметный вклад в излучение балмеровских линий, а также линий переходной зоны. Известны рентгеновские микровспышки на Солнце, а температура горячего компонента звездных корон близка к температуре солнечных вспышек. Из обнаруженных нами корреляций дефицита болометрического потока, создаваемого пятнами, и радиативных потерь атмосферы видно, что для активных звезд, в отличие от Солнца, излучение внешних атмосфер не может скомпенсировать поглощаемую пятнами энергию. Вероятно, она уходит на глобальную перестройку верхних атмосфер, аналогичную локальной перестройке атмосфер во время вспышек.

8. Солнце – прошлое, настоящее, будущее

Выдвинутая в середине века идея молодости звезд типа UV Ceti и найденная потом связь активности с вращением дали начало идее о вековом магнитном торможении молодых звезд с конвективными оболочками, которое вызывается постоянной потерей углового момента в корональном ветре (этот ветер сам является продуктом магнитной активности). По современным представлениям, главную роль в эволюционном снижении активности одиночной звезды играет не просто уменьшение вращения, а рост числа Россби. Вначале, на фазе звезды типа T Tauri, главный механизм ослабления активности – уменьшение толщины конвективной зоны, потом – собственно торможение вращения. Из-за разных значений критического числа Россби для разных слоев атмосферы темпы этого понижения разные для различных индикаторов активности: эмиссии хромосферных линий CaII и MgII угасают медленнее, чем эмиссии переходной зоны CIV и SiIV, а те угасают медленнее, чем рентгеновское излучение короны.

Солнце в возрасте 10^6 лет было звездой типа T Tauri со слабыми линиями (WTTS). На этой стадии оно имело спектральный класс около K5IV, было наполовину покрыто пятнами, которые вызывали его фотометрическую переменность, уровень хромосферной активности молодого Солнца в 50 раз превышал современный, а рентгеновское и радиоизлучение – на 3 порядка. Рентгеновское и радиоизлучение Солнца было сильнопеременным из-за мощной вспышечной активности звезды.

К возрасту 10–20 млн лет Солнце сжалось до современного размера, но при этом оно вращалось с периодом около 5 сут и было покрыто пятнами на четверть. В возрасте около млрд лет в переменности блеска молодого Солнца по-прежнему доминировали

пятна. Оно показывало сильную переменную хромосферную эмиссию, короткопериодическую или иррегулярную, как у VE Ceti (0.6 млрд лет) или EK Dra (0.07 млрд лет) без пребывания в состояниях маундеровских минимумов. В рентгеновском спектре присутствовали хорошо видимая горячая (20–30 МК, как у солнечных вспышек) компонента, которая постепенно исчезала. Также в возрасте около миллиарда лет у звезды постепенно исчезают постоянный фон микровспышек и микроволновое излучение. При торможении до периода вращения 14 сут (около 2 млрд лет) фотометрическая переменность становится неразличимой. В ней начинают преобладать факелы, хромосферная активность понижается и показывает плавные циклы и маундеровские минимумы. Такое плавное понижение активности происходит до стадии современного Солнца (4.6 млрд лет) и далее.

Вероятное будущее Солнца – звезда β Hydri, только сошедшая с ГП (G2IV, 9.5 млрд лет). Радиус этой звезды в полтора раза больше солнечного, период осевого вращения около 45 сут, локальные магнитные поля меньше примерно вдвое. Звезда обладает вдвое меньшей слабопеременной (на пределе обнаружения) кальциевой эмиссией, цикл активности около 15–18 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гершберг. Активность солнечного типа звезд Главной последовательности. Одесса: Астропринт, 2002. 688 с.
2. Kron G.E. The probable detection of patches of varying brightness on AR Lacertae B // Publ. Astron. Soc. Pacif. 1947. V. 59. P. 261.
3. Strassmeier K.G. Latest results in Doppler imaging // Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun. Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser. 2001. V. 223. P. 271.
4. Алексеев И.Ю. Обнаружение широкополосной линейной поляризации излучения активных звезд // Труды 32-й конференции «Физика космоса». Уральский университет, 2003. С. 242.
5. Donati J.F., Semel M., Carter B.D., et al. Spectropolarimetric observations of active stars // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1997. V. 291. P. 658.
6. Алексеев И.Ю. Запятненные звезды малых масс. Одесса: Астропринт, 2001. 137 с.
7. Алексеев И.Ю. Пятенная активность поздних звезд. Методы и результаты // Астрофизика. 2006. Т. 49. С. 303.
8. Berdyugina S.V., Tuominen I. Permanent active longitudes and activity cycles on RS CVn stars // Astron. Astrophys. 1998. V. 336. P. 25.
9. Alekseev I.Yu. Starspots, activity cycles, and differential rotation on cool stars // Sol. Phys. 2004. V. 224. P. 187.
10. Алексеев И.Ю., Гершберг П.Е., Кацова М.М., Лившиц М.А. О дефиците излучения звездных пятен // Астрон. журн. 2001. Т. 78. С. 558.