



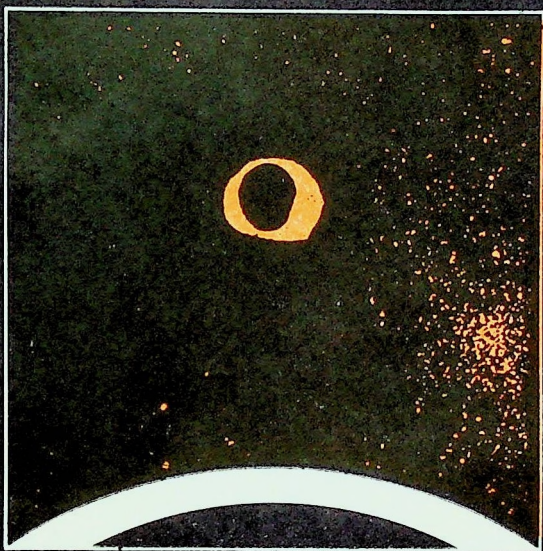
Новое
в жизни,
науке,
технике

Подписная
научно -
популярная
серия

7'90

Р.Е.Гершберг
СОЛНЕЧНАЯ
АКТИВНОСТЬ
В МИРЕ
ЗВЕЗД

КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

7/1990

Издается ежемесячно с 1971 г.

Р. Е. Гершберг

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В МИРЕ ЗВЕЗД



Издательство «Знание» Москва 1990

ББК 22.652
Г 42

Редактор ВНРКО Н. Г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Звездные вспышки	6
Пятна на звездах	33
Звездные хромосферы	45
Звездные короны	54
Цикличность активности звезд	57
Заключение	60
Литература	64

- Гершберг Р. Е.
Г 42 Солнечная активность в мире звезд. — М.: Зна-
ние, 1990. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке,
технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 7).
ISBN 5-07-000520-0
15 к.

Рассматриваются характеристики солнечной активности наряду с разнообразными явлениями звездной переменности и систематически описываются проявления такой активности в мире звезд. Последовательно излагаются результаты исследований активных звезд в широком диапазоне длин волн, физические характеристики различных явлений активности, их теоретические модели.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся звездной астрономией.

1605060000

ББК 22.652

ISBN 5-07-000520-0

© Гершберг Р. Е., 1990 г.

ВВЕДЕНИЕ

Солнце — типичная звезда. Как известно, этот тезис восходит к Джордано Бруно и к более далеким временам. За прошедшие века он преодолел традиционный для научной истины путь от «еретической мысли» до «общезвестного факта», до главного и, быть может, единственного положения, которое уверенно выносится из школьного курса астрономии. Строго говоря, таких, как наше Солнце — так называемых желтых карликов, — менее процента среди всего звездного населения, и чем точнее мы определяем температуру, газовое давление, химический состав и другие параметры внешних слоев Солнца, тем труднее найти для него звезду-близнеца. Но Солнце определенно занимает срединное положение в мире звезд: есть звезды в десятки раз более массивные и в десятки раз менее массивные, чем Солнце, в десятки тысяч раз более яркие и во столько же раз менее яркие, чем Солнце, звезды, размеры которых в сотни раз больше и в сотни раз меньше размеров Солнца. В последние десятилетия выяснилось, однако, что Солнце является типичной звездой не только в отношении этих (внешних) параметров, но и в части внутренней структуры и процессов, определяющих весьма сложное строение его видимой поверхности — фотосферы — и сравнительно скоротечные явления на этой поверхности. Иными словами, выяснилось, что Солнце типично прежде всего своей активностью.

Солнечная активность — это совокупность многочисленных и разнообразных процессов, охватывающих всю солнечную атмосферу и значительную часть недоступных прямому наблюдению подфотосферных слоев до глубины $\frac{1}{10}$ или даже $\frac{1}{5}$ радиуса Солнца. Эти процессы проявляются в таких нестационарных локальных явлениях, как темные солнечные пятна и скоротечные

выпишки, активные области и протяженные фоновые магнитные поля, короткоживущие структуры хромосферы и короны и потоки частиц в межпланетном пространстве. Такое определение «перечислением» типично для начального этапа развития научной мысли. Здесь уместно сравнение с погодой на Земле. Если воспользоваться определением указанного типа, то погода — это совокупность ураганов и штилей, жары и холода, дождя и ведро, суховеев, муссонов, пассатов и метелей, которые одновременно происходят в различных точках нашей планеты. Но в терминах науки погода — это физическое состояние воздушной оболочки Земли в некоторый момент времени. В конечном счете это состояние определяется излучением Солнца, приходящим на Землю, и все разнообразие погоды обусловлено различиями в освещенности и в коэффициентах поглощения и отражения различных участков земной поверхности, т. е. разными углами падения солнечных лучей на Землю и разнообразием физических свойств элементов земной поверхности — океанов и морей, гор, пустынь, степей, лесов, ледников. Непосредственно же состояние воздушной оболочки Земли определяется существующими в ней градиентами температуры и давления, и оно уже неплохо предсказуемо, особенно, когда начальные условия задаются мозаикой широкоугольных снимков Земли из космоса, а использование мощных ЭВМ позволяет учитывать многочисленные структуры и термодинамические свойства атмосферы. К сожалению, исследования солнечной активности — погоды на Солнце — не привели еще к столь же цельной концепции этого сложного явления, здесь нет пока таких общих исходных физических принципов, как в современной метеорологии, а преобладает накопление экспериментальных данных и построение частных моделей отдельных процессов и структур.

Очевидно, однако, что, независимо от степени нашего понимания солнечной активности, на звездах, сходных с Солнцем, следует ожидать и активности, сходной с солнечной. Два важных обстоятельства долгое время препятствовали обнаружению на звездах такого рода активности. Во-первых, ни у одной звезды мы не видим диск и, следовательно, не можем увидеть отдельные структуры на звездной поверхности, как на Солнце. Во-вторых, даже от самой близкой к Солнцу звезды

Проксимы Центавра число приходящих в единицу времени видимых квантов света в 10^{15} раз меньше, чем соответствующее число солнечных квантов. Эти обстоятельства делают практически невозможным исследование Солнца и звезд с помощью одних и тех же приборов и обуславливают существенные эффекты наблюдательной селекции, без учета которых сравнительное изучение Солнца и звезд невозможно.

Тем не менее усилиями исследователей переменных звезд и специалистов по солнечной активности 15—20 лет назад начало формироваться новое направление астрофизических исследований, для обозначения которого наиболее подходящим представляется название этой брошюры — солнечная активность в мире звезд. Такое направление оказалось весьма плодотворным: с одной стороны, огромный объем накопленных данных по Солнцу дает путеводную нить для понимания все новых явлений звездной переменности, которые обнаруживаются по мере совершенствования техники изучения звезд средних и малых масс; с другой стороны, рассмотрении явлений, свойственных Солнцу, на звездах разных светимостей, различных масс и возрастов, на звездах одиночных и входящих в кратные системы, на быстро и медленно вращающихся звездах дает возможность более общего физического и эволюционного подхода к процессам солнечной активности, позволяет уверенно выделить факторы, которые являются решающими в таких процессах. С начала 80-х годов регулярно проводятся международные конференции по солнечной активности в мире звезд, что свидетельствует о широком интересе к такого рода исследованиям.

В последующих разделах этой брошюры систематически описаны открытые к настоящему времени звездные аналоги различных явлений солнечной активности — скоротечных вспышек, темных пятен, горячих областей атмосферы (хромосферы и короны), циклического характера активности в целом; в каждом разделе сперва напоминаются основные свойства рассматриваемого явления на Солнце, затем описывается, как был обнаружен соответствующий звездный аналог, и, наконец, это проявление активности обсуждается в рамках упомянутого выше общего солнечно-звездного подхода. В заключение сделана попытка сформулировать некоторую общую концепцию активности Солнца и звезд.

ЗВЕЗДНЫЕ ВСПЫШКИ

Солнечные вспышки. Они были открыты в середине XIX в., но их интенсивное изучение началось в 40-х годах нашего столетия. При визуальных наблюдениях солнечные вспышки обнаруживаются как быстрые повышения яркости небольших — малые доли процента солнечного диска — участков вблизи групп солнечных пятен. Если вести наблюдения через специальный светофильтр, выделяющий излучение красной водородной линии, то контраст вспышек на фоне спокойной поверхности Солнца многократно возрастает и соответственно возрастает частота регистрируемых вспышек. После быстрого возгорания обычно наступает сравнимая по длительности фаза максимального свечения вспышки, которую плавно сменяет в несколько раз более продолжительная стадия затухания.

Визуальные наблюдения и кинофильмы обнаруживают чрезвычайное разнообразие солнечных вспышек: видимые картины развития таких вспышек практически неповторимы, их временные и энергетические характеристики весьма разнообразны. Так, типичная вспышка длится около часа, но самые быстрые успевают вспыхнуть и потухнуть за минуты, а самые мощные длятся несколько часов. Полная энергия оптического излучения самых слабых регистрируемых на Солнце вспышек составляет 10^{26} — 10^{27} эрг, а в самых мощных излучается до 10^{30} — 10^{31} эрг. Несмотря на это разнообразие, найдены важные закономерности в морфологии вспышек и их связь со структурой магнитного поля солнечных пятен: в сильных вспышках четко обнаруживаются две параллельные яркие ленты, ориентированные определенным образом относительно пятен различной полярности.

В оптическом диапазоне вспышек интенсивно излучают нагретые нижние слои солнечной атмосферы — хромосфера. Поэтому пока такие вспышки изучались лишь в оптике, их называли хромосферными. Но последующие радиоастрономические и рентгеновские наблюдения показали, что оптическая картина вспышки отражает лишь вторичные эффекты этого сложного явления. Как теперь установлено, в основе солнечных вспышек лежат магнитогидродинамические и плазменные процессы, связанные с сильными магнитными по-

лями солнечных пятен. Такие пятна противоположной полярности попарно соединяются в атмосфере Солнца магнитными силовыми трубками, и вспышки начинаются непосредственно с появления в вершинах арок, образованных силовыми трубками, большого числа заряженных частиц высокой энергии, которые обнаруживаются по мощному всплеску нетеплового рентгеновского излучения. Двигаясь по силовым трубкам вниз, эти частицы нагревают заключенную в трубках плазму до высоких температур и вызывают более длительное тепловое свечение вспышек в рентгеновском диапазоне. Когда возмущение опускается до еще более глубоких и плотных слоев, начинается оптическое свечение нижней хромосферы. В некоторых случаях во вспышках появляются частицы столь высокой энергии, что возникают ядерные реакции, о чем свидетельствует регистрируемая в области гамма-квантов спектральная линия, соответствующая аннигиляции электрон-позитронных пар.

Потоки частиц высокой энергии, появляющиеся в начале солнечной вспышки в вершинах арок магнитных силовых трубок, вызывают также возмущения, распространяющиеся вверх по солнечной короне. Эти возмущения обнаруживаются в виде нетеплового радиоизлучения в широком диапазоне длин волн (от сантиметров и дециметров до десятков метров), причем реализуется несколько различных типов радиоизлучения, отличающихся механизмом, местом и временем генерации, поляризационными и частотными характеристиками, их изменениями во времени.

Во время солнечных вспышек происходят разнообразные движения вещества. Еще за десяток минут до начала вспышки высоко над областью, где произойдет оптическая вспышка, приходят в движение протуберанцы — причудливые структуры сравнительно холодной плазмы, «висящие» в горячей короне; эти характерные движения протуберанцев являются одним из наиболее надежных предвестников вспышки. На кинофильмах, вспышек, снятых в лучах красной линии водорода, хорошо видны быстрые движения вещества в нижней хромосфере. Но наиболее существенны, по-видимому, связанные со вспышками выбросы вещества, которые прослеживаются от уровня фотосферы до межпланетного пространства.

Таким образом, во время солнечных вспышек скоро-

течные процессы охватывают огромное пространство — от видимой поверхности Солнца до орбит ближайших к нему планет. В общей энергетике вспышки вклад радиоизлучения минимален, сравнимы по порядку величины полные энергии излучения в оптическом и рентгеновском диапазонах, но кинетическая энергия охваченного вспышкой вещества на порядок величины превосходит энергию электромагнитного излучения.

Нет сомнения, что непосредственная причина солнечных вспышек — структурные изменения локальных магнитных полей на Солнце, но полная теория таких процессов еще не построена.

Звезды переменной яркости. В мире звезд существует много различных типов объектов, которые время от времени увеличивают свой блеск. Когда такие изменения происходят быстро и достигают заметной амплитуды, говорят о вспышке звезды.

Всем памятливы многочисленные публикации в газетах весной 1987 г., когда на южном небе в Большом Магеллановом Облаке — ближайшей к нашей Галактике звездной системе — вспыхнула видимая невооруженным глазом сверхновая звезда. Такие вспышки неоднократно наблюдали еще в глубокой древности, о чем до нас дошли свидетельства летописцев разных народов и даже наскальные рисунки североамериканских индейцев. К настоящему времени установлено, что вспышка сверхновой звезды соответствует окончанию плавной эволюции звезды большой массы, в этот момент происходит грандиозный термоядерный взрыв, во время которого излучается энергия, сравнимая с той, что Солнце излучает за многие миллиарды лет, образуются тяжелые химические элементы и появляется мощный всплеск излучения нейтрино. После такого взрыва остается нейтронная звезда — пульсар — и газовая оболочка, расширяющаяся со скоростью в несколько тысяч км/с. Полная энергия вспышки сверхновой достигает 10^{60} — 10^{52} эрг. К счастью, такие процессы на Солнце невозможны (из-за его малой массы), и солнечные вспышки не имеют с ними ничего общего.

Осенью 1975 г. очертания известного созвездия Лебедя были искажены вспыхнувшей в нем новой звездой. Благодаря телескопическим наблюдениям, вспышки новых звезд регистрируются в Галактике до дюжины в

год *. К настоящему времени надежно установлено, что вспышки новых звезд происходят на поздних стадиях развития двойных звезд, т. е. систем, состоящих из двух гравитационно связанных и вращающихся вокруг общего центра тяжести компонентов.

Как известно, в ходе медленной эволюции звезд не слишком больших масс — не более 2—3 масс Солнца — в их недрах сперва водород превращается в гелий, затем выгорает гелий. На заключительной стадии такого термоядерного горения внешние слои звезды быстро — за тысячелетия — расширяются и в конечном счете теряют связь с плотным ядром, которое превращается в горячий белый карлик. Если звезда одиночная, то монотонное остывание белого карлика длится миллионы лет. Если же звезда двойная и массы ее компонентов различны, то, поскольку темп звездной эволюции существенно зависит от массы звезды, часто должна реализовываться такая ситуация, когда звезда большей массы уже достигла состояния белого карлика, а со звезды меньшей массы еще происходит интенсивное истечение вещества — сброс ее внешних слоев. Это вещество, богатое водородом, частично выпадает на остывающий белый карлик, и когда его накопится достаточное количество, может произойти непродолжительная термоядерная вспышка — это и есть вспышка новой звезды. Поскольку такая вспышка не устраняет причины перетекания вещества в системе, то вспышки новых звезд повторяются: в зависимости от масс компонентов и разделяющего их расстояния такие вспышки повторяются через десятилетия или многие тысячелетия. Во время вспышки новой звезды в межзвездное пространство выбрасывается со скоростью около сотни км/с масса газа, в десятки или сотни раз превышающая массу Земли. Совокупность явлений в двойных звездных системах, обусловленных перетеканием вещества, очень разнообразна, семейство новых звезд весьма обширно. В последние десятилетия выяснилось, что новым звездам физически родственны многие звездные источники рентгеновского и гамма-излучения и даже уникальный обь-

* Термин «новая звезда» и производный от него «сверхновая звезда» — дань традиции и уважения к заблуждениям древних и средневековых наблюдателей звездного неба, поскольку появляющиеся «на глазах» звезды в действительности весьма старые объекты.

ект SS 433, где газ, излучающий нормальный оптический спектр, выбрасывается из системы со скоростью, равной $\frac{1}{4}$ скорости света. Полная энергия излучения вспышки типичной новой звезды достигает 10^{45} эрг. Очевидно, что вспышки новых звезд и родственных им объектов тоже не имеют ничего общего со вспышками на Солнце.

В настоящее время известно более 35 000 звезд, блеск которых не постоянен, и большинство из них относится к двум типам: пульсирующим и затемненным переменным звездам. В обоих случаях изменения блеска происходят периодически, но причины этих изменений совершенно различны. Структура пульсирующих звезд такова, что выделяемая в недрах звезды энергия не может проходить всю ее толщину и излучаться с поверхности в постоянном темпе: эта энергия периодически накапливается на некоторой глубине и тем самым вызывает расширение внешних слоев звезды, при этом расширении расходуется накопленный избыток энергии и затем звезда возвращается в исходное состояние. Характерное время таких звездных пульсаций составляет от нескольких часов до многих сотен суток, а амплитуды блеска пульсирующих звезд заключены в диапазоне от нескольких сотых его среднего уровня до многих тысяч раз. Заметим, что структура пульсирующих звезд, ответственная за их столь активное существование, возникает в результате естественной эволюции звезд постоянного блеска. Затемненные же переменные звезды — это двойные системы, ориентированные в пространстве таким образом, что их видимый блеск периодически меняется из-за затмения одного компонента другим. Ясно, что периодические колебания блеска пульсирующих и затемненных переменных звезд не имеют ничего общего со спорадическими солнечными вспышками.

Список типов звезд, причиной переменности блеска которых являются процессы, заведомо отличные от солнечной активности, можно расширить. Следовательно, вспышки на Солнце — это лишь один из большого числа процессов, которыми может быть обусловлена переменность звездного блеска. В такой ситуации стратегия поисков звездных вспышек типа солнечных, казалось бы, очевидна: отобрать по возможности сходные с Солнцем звезды, т. е. желтые карлики спектрального класса G2, и терпеливо исследовать поведение их блеска во

времени. Но эта «очевидная стратегия» не является наилучшей и не имеет ничего общего с реальной историей обнаружения вспышек солнечного типа на звездах. Дело в том, что светимость Солнца составляет 4×10^{33} эрг/с, а максимальная светимость солнечных вспышек не превышает 10^{29} эрг/с; иными словами, ожидаемый эффект не превышает 10^{-4} от регистрируемого потока. За счет разумного выбора спектральной полосы наблюдений этот эффект можно повысить на один-два порядка величины. Но длительные наблюдения блеска звезды с точностью до 1% — задача не из легких, и лишь в самое последнее время появились сообщения о такой прямой регистрации вспышек солнечного типа на звездах, сходных с Солнцем.

Реальная история обнаружения на звездах вспышек солнечного типа такова. Еще в 1924 г. датчанин Э. Герцшпрунг обнаружил непродолжительное, но сильное — в 5—6 раз — поярчение слабой красной звездочки в созвездии Киля и отнес это поярчение за счет падения на звезду астероида. Несколько аналогичных звездных вспышек были также случайно зарегистрированы еще в конце 30-х — начале 40-х годов. Систематически изучать такие вспышки первым стал американский исследователь В. Лютен: в 1947 г. он организовал всестороннее изучение красной карликовой звезды UV Кита, в ходе которого на ней были зарегистрированы скоротечные вспышки и получены первые спектры таких вспышек. Позднее эта звезда стала прототипом нового класса переменных звезд — вспыхивающих звезд типа UV Кита. Число зарегистрированных звездных вспышек такого рода и число переменных звезд типа UV Кита стали быстро расти с середины 50-х годов, когда началось широкое внедрение техники фотоэлектрических измерений блеска звезд, которая позволила на телескопах умеренных размеров регистрировать блеск слабых звезд с точностью до нескольких процентов и с временным разрешением в несколько секунд. В конце 50-х годов Б. Ловелл на крупнейшем в то время радиотелескопе в Джодрелл Бэнк (Англия) зарегистрировал радионизлучение от вспышек звезд типа UV Кита, а в 1965 г. в Крыму и в Техасе на специально построенных спектрографах были получены первые спектрограммы таких вспышек с высоким временным разрешением. В результате в оптическом и радиодиапазонах были об-

наружены важные аналогии между звездными и солнечными вспышками, и это обстоятельство позволило в начале 70-х годов выдвинуть гипотезу об идентичности физической природы вспышек на Солнце и на звездах типа UV Кита. Последующие внеатмосферные наблюдения в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах полностью подтвердили эту гипотезу.

Почему же вспышки солнечного типа были обнаружены на красных карликовых звездах, размер, масса, светимость и температура поверхности у которых заметно меньше, чем у Солнца? Очевидно, дело здесь в том, что, во-первых, процессы солнечной активности вообще и скоротечные вспышки в частности свойственны не только желтым карликам, но почти всем звездам солнечных и меньших масс, т. е. желтым, оранжевым и красным карликовым звездам, и, во-вторых, вспышки одинаковой мощности легко обнаружимы на фоне спокойного излучения красного карлика, который светит в сотни и тысячи раз слабее желтого карлика, но теряются на фоне спокойного блеска звезд солнечного типа. Иными словами, сочетание широкой распространенности вспышечной активности солнечного типа и существенного эффекта наблюдательной селекции ответственно за то, что на звездах вспышки типа солнечных называются вспышками звезд типа UV Кита.

В ближайших к Солнцу окрестностях сейчас известно около ста звезд типа UV Кита, и с удалением от Солнца пространственная плотность таких объектов быстро уменьшается. Это обстоятельство — тоже эффект наблюдательной селекции: светимость красных карликовых звезд столь низка, что они доступны наблюдениям на расстоянии не более 2—3 десятков парсек. Однако истинное число слабых звезд гораздо больше, чем число ярких звезд, и если учесть количественно эту селекцию наблюдений, то оказывается, что вспыхивающими типа UV Кита являются от 60 до 90% всех звезд Галактики. Этот вывод подтверждается прямыми наблюдениями: процент вспыхивающих звезд, действительно, очень высок среди ближайших к Солнцу объектов, которые известны наперечет и среди которых мы наблюдаем вообще самые слабые звезды, а также в ближайших звездных скоплениях, например в Плеядах, где в результате многих сотен часов фотографических наблюдений было установлено, что вспыхивающими

звездами является подавляющее большинство членов скопления.

Итак, вспышки солнечного типа — это наиболее распространенная форма звездной переменности. Рассмотрим важнейшие наблюдаемые свойства таких процессов и некоторые их статистические характеристики. В дальнейшем под термином «звездные вспышки» мы всюду будем иметь в виду именно такие вспышки солнечного типа.

Звездные вспышки. На рис. 1 представлены непрерывные записи блеска одной из звезд типа UV Кита — EV Ящерицы (записи получены И. В. Ильиным и Н. И. Шаховской в Крымской астрофизической обсерватории в течение 5 ночей в сентябре 1986 г. и 4 ночей в сентябре 1987 г. — в конце лета эта звезда видна на небе практически всю ночь). На графиках четко видны спорадические всплески разной длительности и разной амплитуды — это и есть звездные вспышки. Хорошо видно быстрое возгорание и в несколько раз более медленное угасание вспышек, неперIODичность появления таких событий во времени, случайное распределение амплитуд; хотя приведенные наблюдения недостаточны для серьезных статистических заключений, создается впечатление, что в 1986 г. средняя частота вспышек была выше, а их длительности меньше, чем в 1987 г. Отметим, что период осевого вращения EV Ящерицы составляет 4,38 суток, так что в последовательные ночи наблюдаются существенно различные части звездной поверхности, и во время каждого из двух сезонов звезду рассмотрели со всех сторон. Звездное вращение затрудняет анализ временного распределения локальных вспышек. Тем не менее детальное рассмотрение наблюдений, выполненных в течение многих сотен часов, привело к выводу об отсутствии периодичности в появлении вспышек; как и на Солнце, звездные вспышки распределены во времени случайным образом, хотя одна вспышка иногда провоцирует возгорание через несколько минут другой.

Традиционные наблюдения Солнца не дают непосредственно временной ход интегрального излучения вспышки, так называемые кривые блеска, аналогичные тем, что представлены на рис. 1. Поскольку мы видим детали солнечного диска, то обычно измеряется ход со временем площади, занимаемой вспышкой, и ее яркость

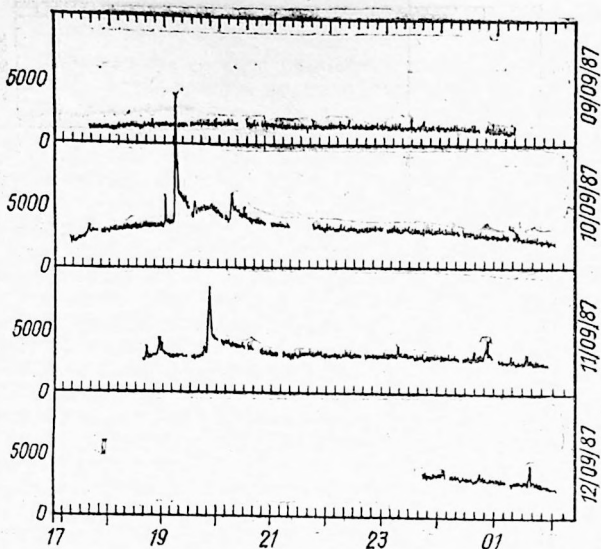
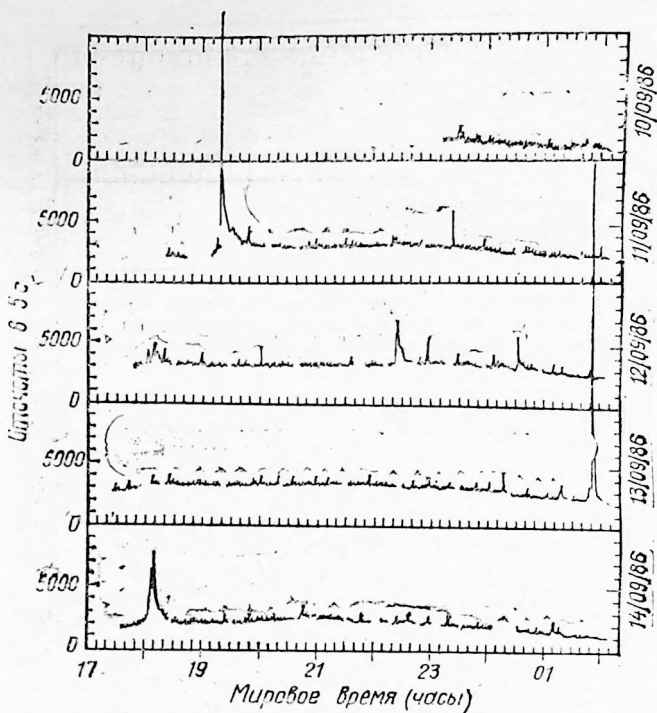


Рис. 1. Кривые блеска звезды EV Ящерицы, записанные И. В. Ильным и Н. И. Шаховской в Крыму

в тех или иных точках; вычисление же излучения вспышки требует интегрирования яркости по всей ее площади и выполняется весьма редко. Этот пример довольно типичен, он показывает, что, как правило, аналогичность солнечных и звездных вспышек может быть обнаружена не из непосредственного сопоставления прямых данных наблюдений, а лишь из всестороннего анализа явления, на основе выводов о механизме излучения, физических параметров излучающего вещества и т. д. Пользуясь этим же примером, заметим, что предельно слабые вспышки, обнаружимые на Солнце, определяются минимальным обнаружимым контрастом на фоне яркости поверхности спокойного Солнца, тогда как самые слабые звездные вспышки определяются минимальной измеримой амплитудой потока излучения от всего звездного диска. Это обстоятельство наглядно показывает необходимость учета эффектов наблюдатель-



ной селекции при сравнительном изучении Солнца и звезд.

Как следует из рис. 1, амплитуда сильных вспышек EV Ящерицы достигает 10—20 раз, а самые слабые вспышки теряются в естественных флуктуациях спокойного блеска звезды. Среди самых слабых звезд типа UV Кита были зарегистрированы даже стократные возращения блеска. Конечно, когда буквально на глазах — а в начале изучения таких звезд, действительно, проводилось много визуальных наблюдений — звезда за минуту становится в сто раз ярче, это производит сильное впечатление! Но амплитуда — величина относительная, и захватывающее зрелище сильной спорадической

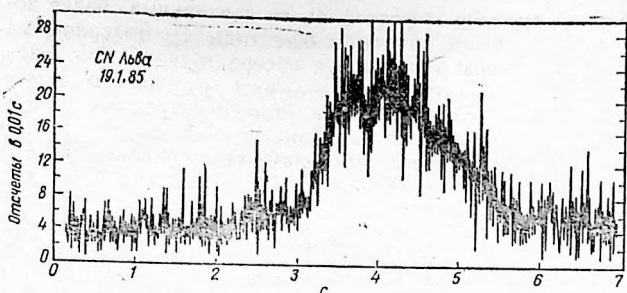


Рис. 2. Кривая блеска очень быстрой вспышки звезды CN Льва, записанная группой В. Ф. Шварцмана на 6-м телескопе на Северном Кавказе

вспышки звезды может быть обусловлено как мощностью самой вспышки, так и слабостью блеска звезды в спокойном состоянии. Если же с учетом известных расстояний до звезд оценить абсолютную энергию излучения вспышек, то оказывается, что в момент максимума блеска звездные вспышки излучают в оптическом диапазоне длин волн до 10^{29} эрг/с, а полная энергия излучения в течение всей вспышки достигнет 3×10^{35} эрг; последнее значение на 3—4 порядка величины превышает соответствующие параметры самых сильных солнечных вспышек. С другой стороны, недавно в ходе наблюдений на 6-метровом телескопе на Северном Кавказе, проводившихся группой советских исследователей под руководством В. Ф. Шварцмана, были зарегистрированы звездные вспышки, сравнимые по энергетике с самыми слабыми солнечными вспышками.

Как и на Солнце, на звездах типа UV Кита были обнаружены вспышки, длящиеся несколько часов, но большинство из них затухает за несколько минут. В течение долгого времени оставалась неясной природа нередко наблюдавшихся «мгновенных» всплесков блеска звезд, сравнимых по продолжительности с временным разрешением регистрирующей аппаратуры: было не ясно, звездная активность или аппаратурные помехи ответственны за такие всплески. Упомянутые выше наблюдения группы В. Ф. Шварцмана убедительно показали реальность звездных вспышек длительностью в несколько секунд; на рис. 2 приведена кривая блеска одной из

таких очень быстрых вспышек, зарегистрированная на звезде CN Льва с временным разрешением около 0,01 с.

Итак, на звездах наблюдаются не только такие же вспышки, как на Солнце, но и гораздо более мощные и значительно более скоротечные. Однако и вспыхивающие звезды сами по себе тоже весьма разнообразны: здесь есть и желтые, и оранжевые, и красные карлики, т. е. звезды спектральных типов G, K и M, звезды солнечного типа и звезды с меньшей в тысячу раз светимостью, в десятки раз меньшими массой и размером. Сопоставление этих общих параметров вспыхивающих звезд со средними характеристиками происходящих на них вспышек показало, что в среднем наиболее мощные вспышки происходят на оранжевых карликах, на них же и наиболее высока истинная частота вспышек, хотя частота регистрируемых вспышек из-за более низкого порога их обнаружения заметно выше на красных карликах. Наконец, продолжительность вспышек, по-видимому, в среднем меньше на вспыхивающих звездах меньших масс и размеров.

Что же светится в солнечных и аналогичных им звездных вспышках, каков конкретный механизм мощного оптического излучения в этих скоротечных процессах?

Как уже упоминалось, вспышки на Солнце лучше всего видны при наблюдениях в узких спектральных участках, «центрированных» на эмиссионные линии водорода или ионизованного кальция. Это означает, что излучение идет не с поверхности Солнца, не от отдельных сильно нагретых участков солнечной фотосферы, а из расположенных над ней локальных газовых образований, которые прозрачны для излучения фотосферы, но сами излучают главным образом в отдельных эмиссионных линиях. Лишь в очень редких случаях на Солнце наблюдаются так называемые «вспышки белого света», во время которых, кроме мощной линейчатой эмиссии, регистрируется также непрерывное излучение вспышек.

Спектрограммы звезды AD Льва, полученные с высоким временным разрешением на шайновском телескопе в Крыму, показывают, что спектр AD Льва в спокойном состоянии — типичный спектр красного карлика с многочисленными линиями поглощения нейтральных атомов и молекулярными полосами окиси титана.

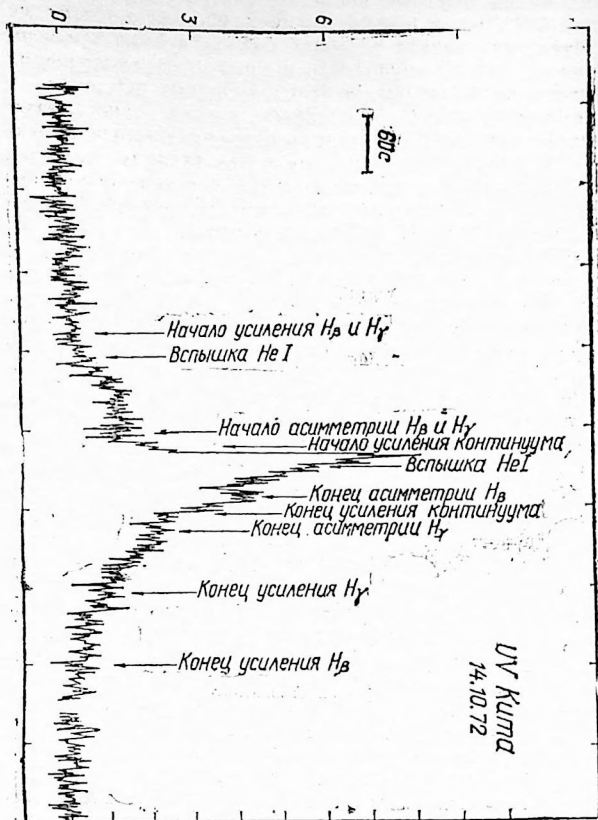


Рис. 3. Кривая блеска вспышки звезды UV Кита с разметкой последовательности появления и исчезновения основных спектральных особенностей (согласно Б. Боплу и Т. Моффету, обсерватория Мак-Дональд, США)

На этот спектр холодной фотосферы накладываются хорошо заметные эмиссионные линии водорода и ионизованного кальция. Во время вспышки интенсивности этих эмиссионных линий резко возросли, заметно уве-

личились их ширины. Но в отличие от спектров обычных солнечных вспышек в синей области спектра не прерывное излучение вспышки AD Льва было столь интенсивно, что оно практически полностью «залило» излучение самой звезды; в зеленой и красной областях фотосферный спектр был лишь слегка завуалирован непрерывным излучением вспышки (правда, эти снимки были получены уже в период ее затухания). Заметим, что сам факт сохранения видимости спектра поглощения холодной фотосферы звезды во время вспышки был одним из первых аргументов в пользу представления о локальности звездных вспышек, хотя, как уже упоминалось, мы не видим диск звезды и регистрируем лишь ее суммарный спектр.

На рис. 3 на кривой блеска вспышки UV Кита, зарегистрированной в обсерватории Мак-Дональд (США) одновременно на фотометрической и спектральной аппаратуре, стрелками отмечены моменты появления и исчезновения различных спектральных особенностей вспышки. Из рисунка следует, что вспышка началась с усиления эмиссионных линий водорода и гелия, ее максимум обусловлен главным образом резким всплеском непрерывного излучения и затухание вспышки было наиболее продолжительным снова в отдельных спектральных линиях. Такая ситуация характерна для звездных вспышек.

Сильное непрерывное излучение в фазе максимального блеска звездных вспышек долгое время оставалось одной из наиболее интригующих характеристик этих явлений: ему не было очевидной аналогии в солнечных вспышках. С другой стороны, прямые спектральные исследования такого излучения весьма трудны и поэтому малочисленны, а многочисленные наблюдения его цветовых свойств не давали однозначного ответа на вопрос о физической природе этого излучения. Выдвигались различные гипотезы о тепловых и нетепловых механизмах, ответственных за оптическое излучение. Но упоминавшиеся выше наблюдения вспыхивающих звезд, проведенные недавно на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории (было достигнуто временное разрешение в доли микросекунды), однозначно показали, что даже самые быстрые значимые изменения блеска вспышек имеют характерные времена в несколько десятых секунды, что соответствует ожи-

даемым значениям в тепловом источнике излучения, и не имеют более быстрых вариаций, которые следует ожидать при нетепловых механизмах излучения.

Таким образом, все оптическое излучение звездных вспышек обусловлено свечением нестационарного горячего газа, который, как и на Солнце, формируется в средней части звездной атмосферы — в хромосфере. Возмущенные вспышкой более высокие слои звездной атмосферы эффективнее излучают в других диапазонах длин волн: верхняя хромосфера и узкая переходная область между хромосферой и короной — в ультрафиолетовой области спектра, звездная корона — в рентгеновской области и в радиодиапазоне.

Раньше других — еще в конце 50-х годов — было обнаружено радионизлучение звездных вспышек; это открытие принадлежит английскому ученому Б. Ловеллу. Как уже отмечалось, связанные с оптическими вспышками на Солнце явления в радиодиапазоне чрезвычайно разнообразны, их качественное разнообразие несравненно богаче оптических вспышек. Это обстоятельство связано с огромным диапазоном частот, входящих в радиодиапазон, со значительным разнообразием физических условий в различных областях солнечной короны, из которых выходит регистрируемое радионизлучение, и с широким набором плазменных механизмов излучения, которые реализуются в этих условиях. По-видимому, столь же разнообразны и явления в радиодиапазоне, связанные со звездными вспышками. Действительно, на звездах были зарегистрированы события, когда радионизлучение начиналось практически одновременно с оптической вспышкой, или на несколько минут запаздывало, или даже предшествовало оптическому всплеску. На звездах, как и на Солнце, наблюдался дрейф радионизлучения в течение вспышки в сторону низких частот. Наблюдалась и довольно сложная поляризационная картина радионизлучения. К сожалению, число зарегистрированных звездных радиовспышек составляет пока лишь несколько десятков, наблюдения проводятся, как правило, лишь на одной-двух частотах, на разных радиотелескопах исследуются различные области радиодиапазона. Эти обстоятельства не позволили еще однозначно установить механизмы возбуждения наблюдаемого радионизлучения и его физическую связь с опти-

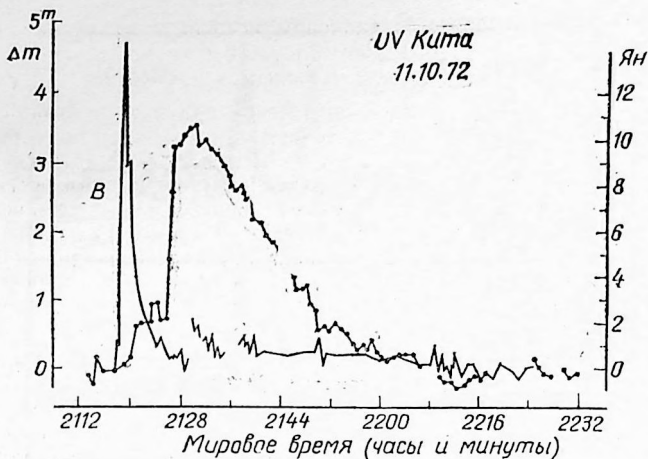


Рис. 4. Кривые блеска вспышки звезды UV Кита, записанные в синей области спектра (в Греции) и в радиодиапазоне (в Англии) — согласно Б. Ловеллу с коллегами

ческими вспышками. Вот несколько примеров радиовспышек на красных карликах.

На рис. 4 представлены оптическая и радиовспышка самой UV Кита, зарегистрированная в синей области спектра (полоса В) в Греции и в радиодиапазоне — в обсерватории Джодрелл Бэнк в Англии. На левой вертикальной оси отложена широко применяемая в астрономии логарифмическая шкала звездных величин: разность блеска в одну звездную величину (обозначается как $\Delta m = 1^m$, 0) соответствует логарифму отношения интенсивностей, равному 0,4, причем большая яркость соответствует меньшей звездной величине; таким образом, амплитуда вспышки, близкая к 5^m , означает, что звезда стала ярче примерно в сто раз. На правой вертикальной оси в линейной шкале отложена плотность потока радиоизлучения, измеренная в принятых в радиоастрономии единицах: 1 Янски = 10^{-26} Вт/м²·Гц. Рис. 4 показывает, что подъем излучения в обоих диапазонах начался примерно одновременно, но максимум радиоизлучения имел место уже после почти полного угасания оптического излучения и длительность радиовспыш-

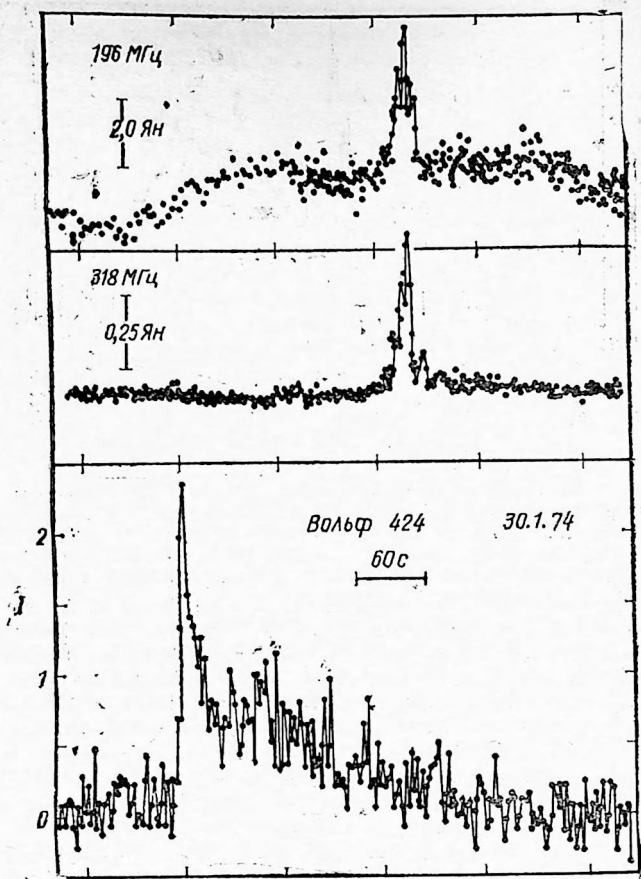


Рис. 5. Кривые блеска вспышки звезды Вольф 424, записанные в фиолетовой области спектра на обсерватории Мак-Дональд и в радиодиапазоне на обсерватории Аресибо, США (согласно Т. Моффету и С. Шпэнглеру)

ки во много раз превзошла длительность оптического всплеска. На рис. 5 представлены результаты патрулирования звезды Вольф 424, выполненного на двух частотах на радиотелескопе в Пуэрто-Рико и на оптиче-

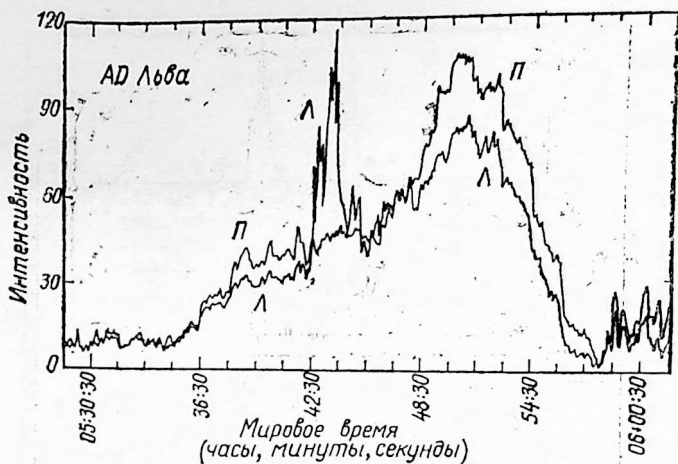


Рис. 6. Кривые блеска вспышки звезды AD Льва, наблюдавшейся на обсерватории Аресибо (согласно К. Лэнгу с коллегами)

ском телескопе обсерватории Мак-Дональд. Как и в предыдущем случае, максимум радиоизлучения здесь тоже имел место через несколько минут после оптического максимума, но продолжительности всплесков оптического и радиоизлучения в этой вспышке сравнимы, а кривые блеска на двух довольно близких радиочастотах обнаруживают заметные отличия. На рис. 6 представлена вспышка AD Льва, записанная отдельно для двух поляризованных по кругу компонентов радиоизлучения. Рисунок обнаруживает две особенности: во-первых, возгорание радиовспышки длилось дольше ее затухания и, во-вторых, на довольно плавную кривую радиояркости накладываются быстрые всплески со 100% круговой поляризацией. Последнее обстоятельство — прямое свидетельство разнообразия физических механизмов, ответственных за радиоизлучение звездных вспышек. Наконец, примерно от десятка звездных вспышек зарегистрировано микроволновое излучение в диапазоне от 2 до 20 см. По-видимому, радиоизлучение в этом диапазоне возникает в более глубоких слоях звездной атмосферы и теснее коррелирует с оптическим

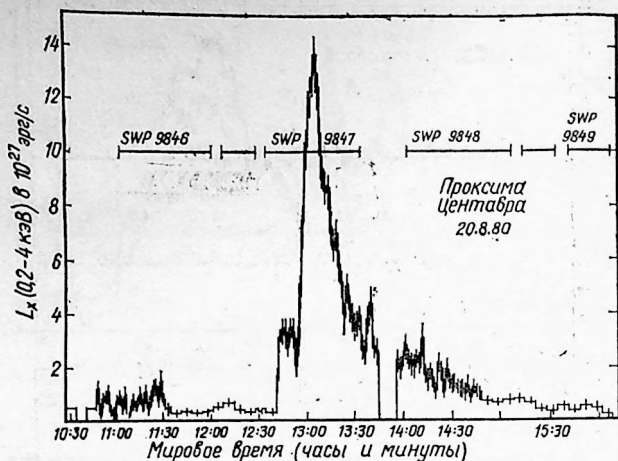


Рис. 7. Зарегистрированная со спутника «Эйнштейн» кривая блеска вспышки звезды Проксима Центавра в рентгеновских лучах (согласно Б. Хайшу с коллегами)

излучением вспышек, чем радионизлучение на более длинных волнах.

Изучение звездных вспышек в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах было начато лишь в последние 15 лет, когда развитие космической техники позволило выводить на орбиту аппараты, способные исследовать такие сравнительно слабые объекты, как вспыхивающие звезды.

На рис. 7 и 8 приведены результаты исключительно удачных одновременных наблюдений вспышки ближайшей к Солнцу звезды Проксимы Центавра, выполненных с двух космических аппаратов: результаты рентгеновских наблюдений с американской космической обсерватории «Эйнштейн» и ультрафиолетовых наблюдений с международного спутника ИУЕ. На рис. 7 приведена кривая блеска вспышки этой звезды в области мягкого рентгеновского излучения: примерно посередине шестичасового интервала патрульных наблюдений произошел мощный всплеск, который затухал более

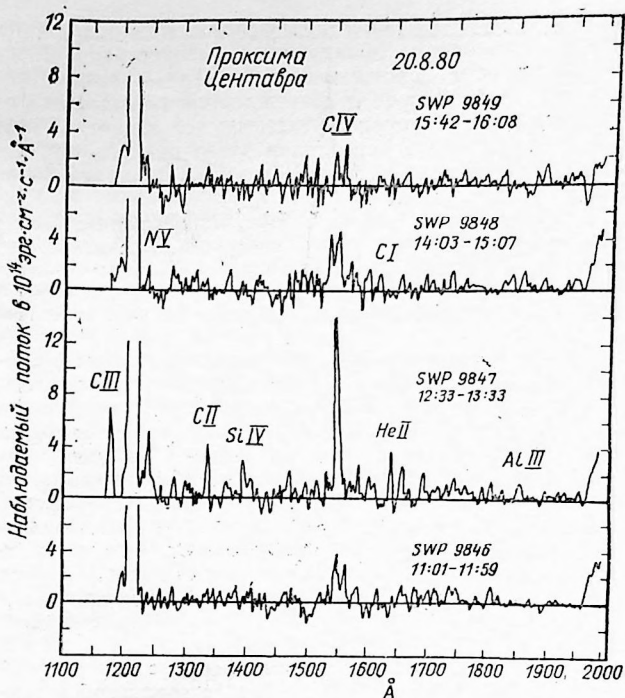


Рис. 8. Зарегистрированные со спутника ИЕУ спектры звезды Проксима Центавра (согласно Дж. Линскому с коллегами)

двух часов. Общий вид кривой блеска рентгеновской вспышки напоминает кривые блеска оптических вспышек: быстрое возгорание, острый максимум и более медленное затухание. Но не следует, конечно, преувеличивать значение этого сходства, поскольку структуры, излучающие в этих диапазонах, весьма различны: в оптическом диапазоне мы наблюдаем свечение вещества в нижней хромосфере при температуре 7000—10 000 К и концентрации 10^{13} — 10^{15} см⁻³, тогда как в мягком рентгене регистрируется излучение корональной плазмы в тысячу раз более горячей и в тысячи раз менее плот-

ной, чем вещество нижней хромосферы. Радионизлучение вспышки позволяет обнаружить распространение по звездной короне возмущающего агента — потока частиц или волн, которое сопровождается нетепловым радионизлучением, а тепловое рентгеновское излучение возникает в результате диссипации этого возмущения, перехода энергии возмущающего агента в тепловую энергию корональной плазмы.

Число звездных вспышек, зарегистрированных одновременно в оптическом и рентгеновском диапазонах, невелико, и эта небогатая статистика показывает, что полное излучение вспышки в оптическом диапазоне близко по порядку к полному рентгеновскому излучению вспышки.

На рис. 7 горизонтальными отрезками отмечены временные интервалы, когда на спутнике ИУЕ проводилась регистрация ультрафиолетовых спектров звезды, на рис. 8 представлены полученные 4 записи в области от 1150 до 2000 Å. Самая заметная деталь на всех регистраграммах — это водородная линия Лайман-альфа, но она обусловлена свечением геокороны и гелиосферы, внутри которых движется спутник, и не имеет отношения к исследуемой звезде. Кроме этой линии на предвспышечном спектре над шумами регистрации уверенно обнаруживается лишь резонансная линия трижды ионизованного углерода (C IV). Как и на Солнце, в спокойном состоянии звезды эта линия возникает в тонкой переходной области между хромосферой с характерной температурой около 10^4 К и короной с характерной температурой 10^6 К, так как эта линия эффективно возбуждается при температуре 10^5 К. Во время вспышки эта эмиссия резко усиливается, появляются и другие высокотемпературные линии (трижды ионизованного кремния, четырежды ионизованного азота, ионизованного гелия), а также некоторые линии, соответствующие более низким температурам, т. е. возбужденной хромосфере. На двух последних спектрах видно плавное возвращение звезды в исходное состояние. К настоящему времени на спутнике ИУЕ зарегистрировано около дюжины звездных вспышек, и описанная картина довольно типична для ультрафиолетовых спектров таких вспышек.

Наблюдения вспыхивающих звезд с ИУЕ проводились с временным разрешением, как правило, в десят-

ки минут, поэтому полученные записи дают представление лишь об усредненном по вспышке ультрафиолетовом спектре. В связи с этим следует отметить результаты наблюдений сильной вспышки звезды EV Ящерицы с советской астрофизической станции «Астрон», проведенные 6.2.86 с временным разрешением 0,6 с. Эти наблюдения показали, что всплеск излучения в линии трижды ионизованного углерода и всплеск «белой вспышки» разделены интервалом времени всего лишь в несколько секунд. Это означает, что во вспышке высокотемпературная область заметно опускается от своего нормального уровня переходной зоны хромосфера — корона, приближаясь к нижней хромосфере, где формируется вспышка белого света.

Одно из наиболее успешных одновременных наблюдений вспышек звезд типа UV Кита в нескольких диапазонах длин волн было проведено при патрулировании звезды YZ Малого Пса, которая наблюдалась 25.10.79 в 4 полосах оптического диапазона, на дециметровых волнах и в области мягкого рентгеновского излучения. Эта вспышка началась примерно одновременно в оптике и в рентгене, она была наиболее скоротечной в оптическом континууме, примерно вдвое дольше светилась в линиях водорода H_α и H_γ и примерно столько же в области мягкого рентгена; радиовспышка началась с заметным запозданием, но была наиболее продолжительна. Наблюдения на спутнике «Эйнштейн» проводились в нескольких участках рентгеновского диапазона, что позволило определить температуру излучающей плазмы: вблизи максимума вспышки она достигла 20 млн. К.

Число столь детально изученных звездных вспышек составляет лишь несколько единиц: для получения оптических спектров вспышек необходимы довольно крупные телескопы, а обнаружение их радиоизлучения и изучение их ультрафиолетовых и рентгеновских свойств возможно лишь с помощью современной уникальной аппаратуры; поэтому всеволновые наблюдения требуют тщательно согласованной программы с участием исследователей из разных стран и многих обсерваторий. Невозможные при этом организационные трудности и обуславливают ограниченность одновременных всеволновых наблюдений звездных вспышек.

Дополним перечисленные астрофизические данные

некоторыми статистическими результатами по звездным вспышкам. Статистику вспышек естественно строить на фотометрических исследованиях, поскольку только здесь выборка достаточно обширна: много сотен кривых блеска вспышек были зарегистрированы при точных фотоэлектрических наблюдениях звезд в окрестностях Солнца и несколько тысяч звездных вспышек обнаружены в ходе патрульных фотографических наблюдений таких звездных скоплений, как Плеяды, Гиады, скопление в Орионе и некоторых других. Фотоэлектрические наблюдения выполняются на обычных телескопах средних размеров, и такие исследования проводятся более чем на двух десятках обсерваторий многих стран; для фотографических наблюдений скоплений необходимы достаточно большие и широкоугольные телескопы, и практически все такие данные получены лишь на нескольких обсерваториях: в Тонантцингле (Мексика), Асьяго (Италия), Бюракане (Армения), Рожене (Болгария), Матре (Венгрия) и Абастумани (Грузия).

На рис. 9 представлен сводный график энергетических спектров вспышек звезд, т. е. зависимость частоты вспышек с некоторой полной энергией излучения от значения этой полной энергии. На рисунке используется так называемая накопленная частота, т. е. средняя частота вспышек с энергией, превышающей заданное значение энергии. Нижняя кривая на рисунке соответствует Солнцу, при ее построении использованы наблюдения более 15 000 солнечных вспышек; расположенная выше группа линий — это индивидуальные энергетические спектры вспышек звезд в окрестности Солнца, а совокупность линий в левом верхнем углу — групповые энергетические спектры вспышек звезд в скоплениях, построенные в предположении, что звезды одинаковой яркости из одного скопления, будучи объектами одного возраста и сходной эволюции, должны обладать одинаковой вспышечной активностью. Рассмотрим этот рисунок внимательно.

Во-первых, рис. 9 показывает, что обсуждаемые процессы перекрывают 8—9 порядков величины по энергии и 5—6 порядков величины по частотам — это и есть количественные оценки наблюдаемого разнообразия звездных вспышек. Во-вторых, совокупность всех линий на этом рисунке намечает некую полосу, довольно четко ограниченную сверху. Очевидно, что огибающая сверху,

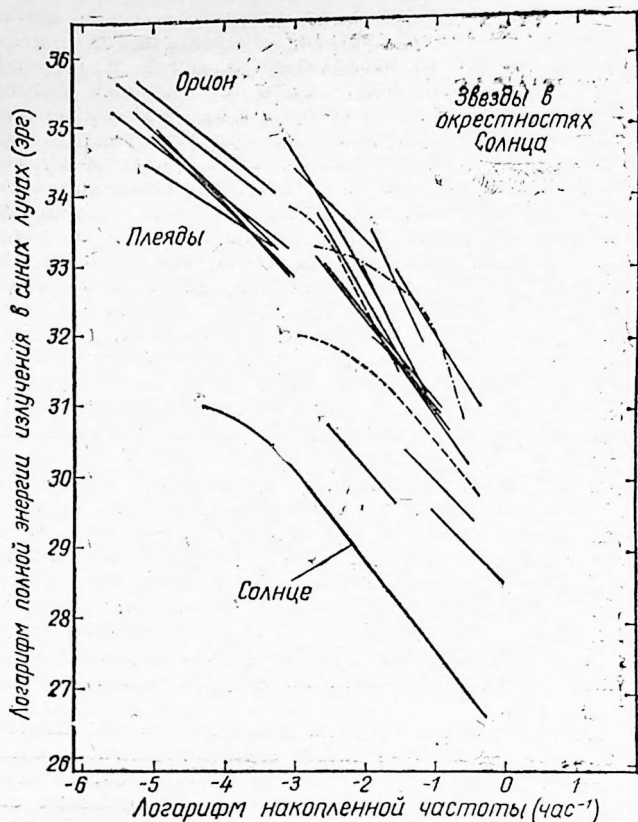


Рис. 9. Энергетические спектры вспышек

этой полосы соответствует максимальной вспышечной активности на звездах. Исследователи вспыхивающих звезд стремятся, естественно, наблюдать часто вспыхивающие, наиболее активные объекты, и ниже указанной полосы должны располагаться энергетические спектры вспышек менее активных объектов, которые не привлекают внимания исследователей. Именно среди таких малоактивных звезд и находится Солнце, на 3—4 поряд-

ка величины уступающее по энергии вспышек самым активным звездам. В-третьих, энергетический спектр вспышек каждой из исследованных звезд в широком диапазоне энергий может быть представлен простой степенной зависимостью, которая в двойном логарифмическом масштабе рисунка дает прямую линию. С помощью такого представления были оценены полные энергетические потери на оптическое излучение вспышек. Было доказано, что истинная частота вспышек на оранжевых карликах выше, чем на красных, а также были получены свидетельства, что в ходе эволюции доминирующая роль во вспышечной активности звезды переходит от многочисленных слабых вспышек к более редким, но мощным событиям. В-четвертых, в верхней части кривой «Солнце» на рис. 9 намечается плавный загиб; именно так должен вести себя энергетический спектр вспышек при приближении к вспышкам максимальной энергии, возможным на рассматриваемой звезде; и прямые исследования Солнца действительно показывают, что величина $3 \cdot 10^{31}$ эрг близка к максимальной энергии излучения солнечных вспышек. Поэтому аналогичные загибы в верхних частях 2—3 энергетических спектров звездных вспышек (штрих и штрих-пунктир) дают основание считать, что и здесь мы приближаемся к вспышкам максимальной энергии. К сожалению, общая продолжительность наблюдений большинства вспыхивающих звезд еще не достаточна, чтобы обнаружить такие особенности на энергетических спектрах их вспышек.

Итак, звездные вспышки экспериментально изучены в огромном диапазоне частот электромагнитного спектра — от метровых радиоволн до мягкой рентгеновской области, и во всем этом диапазоне исследования солнечных вспышек дают нам путеводную нить, чтобы разобраться, что же мы видим, что и где светится в звездных вспышках. Глубокое качественное сходство с солнечными вспышками, значительная близость количественных параметров и общность статистических особенностей не оставляют сомнений в тождестве физической природы солнечных и звездных вспышек. Но эта путеводная нить не приводит к теории звездных вспышек, поскольку нет еще полного понимания вспышек на Солнце.

Конечно, солнечные вспышки — это наиболее изу-

ченный нестационарный процесс в космической плазме; к настоящему времени накоплены наблюдения сотен тысяч таких вспышек, причем к данным по электромагнитному спектру, расширенному по сравнению со звездными исследованиями на области жесткого рентгена, γ -лучей и дециметровых радиоволн, добавляются важные наблюдения потоков частиц, выбрасываемых солнечными вспышками и регистрируемых как непосредственно в космических экспериментах, так и наземными астрофизическими и геофизическими методами. К настоящему времени достаточно полно поняты различные механизмы излучения солнечных вспышек: механизмы оптического излучения сравнительно плотной плазмы в хромосфере, теплового коронального излучения в мягком рентгене и нетеплового импульсного излучения в жестком рентгене, различные плазменные механизмы радиоэмиссии и линейчатое аннигиляционное γ -излучение; выявлены основные особенности движения вещества в хромосфере, тесная связь вспышек со структурой локальных магнитных полей на уровне фотосферы, арочная структура магнитных силовых трубок в короне. Согласно общепринятым представлениям на ранней стадии солнечной вспышки в нижней короне имеет место перестройка структуры магнитного поля, в результате которой развиваются плазменные неустойчивости, происходит формирование потоков быстрых заряженных частиц и выделение тепла. Частицы, идущие вверх, возбуждают радиоизлучение и нагревают корону, а потоки, идущие вниз, приводят к формированию ударной волны, которая достигает нижних слоев хромосферы и эффективно высвечивается в оптическом диапазоне из-за быстрого нарастания плотности вещества. В этой картине наиболее неопределенным остается «спусковой механизм», провоцирующий перестройку магнитного поля, и форма и место накопления энергии, которая затем выделяется во вспышке.

Для решения этих вопросов с середины 50-х годов наиболее интенсивно разрабатывается концепция так называемого токового слоя, предложенная английским ученым П. Свитом и плодотворно развитая группой советских физиков под руководством С. И. Сыроватского. В рамках этой модели удается представить некоторые временные характеристики солнечных вспышек, свойства их рентгеновского и радиоизлучения. Но возникают

трудности с накоплением энергии для сильных солнечных вспышек, трудности, которые, по-видимому, непреодолимы в случае применения этой модели к сильным звездным вспышкам. Создается впечатление, что токовые слои — это не исходный резервуар, из которого черпается энергия вспышки, а лишь промежуточное хранилище такой энергии, конечный же резервуар — это сложные подфотосферные магнитогидродинамические структуры, изучение которых только начинается. Существуют и некоторые прямые данные наблюдений о переносе энергии во время солнечных вспышек из подфотосферных слоев; таковы, например, упоминавшиеся уже потоки вещества, выходящие до начала оптической вспышки из слоев, которые лежат ниже уровня токовых слоев, и несущие больше кинетической энергии, чем полная энергия излучения вспышки.

Незавершенность теории солнечных вспышек, с одной стороны, и существование значительного разнообразия физически идентичных процессов на звездах — с другой, позволяют выдвинуть следующий тезис: лишь та теория солнечных вспышек может быть верна, которая при вариациях входящих в нее существенных параметров сможет представить также и гораздо более мощные и более скоротечные вспышки на звездах. Построение такой полной теории вспышек — дело будущего, но общий солнечно-звездный подход к этим процессам уже начинает давать результаты. Так, рассматривая формирование и движение вниз высвечивающейся ударной волны, инициированной движущимся сверху к фотосфере потоком быстрых заряженных частиц, советские исследователи М. М. Кацова, А. Г. Косовичев и М. А. Лившиц показали, что в условиях солнечной атмосферы такая ударная волна, как правило, остается прозрачной для непрерывного оптического излучения, тогда как в условиях более плотных звездных атмосфер такая волна должна быть непрозрачна. Это обстоятельство объясняет, почему вспышки белого света на Солнце весьма редкое явление, но всплеск непрерывного излучения регулярно имеет место в сильных вспышках на звездах. Заметим, что оцененные этими исследователями физические параметры вещества в таких вспышках, найденные из решения задачи радиационной газодинамики, близки к значениям соответствующих параметров, найденным В. П. Грининым и В. В. Соболевым при

наиболее рафинированном анализе цветовых свойств наблюдаемого непрерывного излучения звездных вспышек. Другой пример успешного звездно-солнечного подхода — это результат, недавно полученный в Специальной астрофизической обсерватории Л. А. Пустильниковым: он показал, что степенной вид энергетического спектра вспышек звезд и Солнца, который широко использовался при анализе различных статистических свойств вспышек как чисто наблюдательный факт, естественным образом вытекает из предположений, что энергия вспышек в конечном счете черпается из энергии магнитных полей, чья структура определяется турбулентными движениями в активных областях.

ПЯТНА НА ЗВЕЗДАХ

«И на Солнце есть пятна!» — известное оправдание несовершенства всего сущего. Открытие «несовершенства» Солнца и явилось, по существу, обнаружением солнечной активности. Для современной науки это произошло сразу после изобретения телескопа, хотя есть свидетельства, что о солнечных пятнах знали еще жрецы Древнего Вавилона.

Солнечные пятна — это сравнительно небольшие, диаметром до 10—20 тыс. км участки поверхности нашего дневного светила с пониженной яркостью, обусловленной более низкой температурой: у нормальной солнечной фотосферы температура близка к 6000 К, в пятнах — к 4500 К. В результате этого поверхностная яркость пятен во много раз ниже яркости нормальной фотосферы; на глаз они выглядят просто черными на фоне яркой фотосферы.

Как правило, солнечные пятна существуют не по одиночке, а парами или в еще более сложных группах. В зависимости от локализации на поверхности Солнца, от размера и от того, в сколь сложную группу входит пятно, время его жизни составляет от нескольких часов до нескольких месяцев, т. е. до нескольких оборотов Солнца вокруг своей оси. Именно солнечные пятна позволили определить период вращения Солнца, а тщательные их наблюдения — на разных гелиографических широтах — привели к открытию дифференциального вращения Солнца: период вращения на экваторе на не-

сколько процентов меньше, чем в близполюсных зонах.

Как наиболее наглядное проявление солнечной активности, солнечные пятна характеризуются двумя важнейшими свойствами: цикличностью в степени общей запятненности Солнца и сильным магнитным полем в каждом пятне, определяющем его строение и эволюцию.

Степень запятненности диска Солнца меняется циклически с характерным интервалом около 11 лет — это так называемый солнечный цикл. В начале цикла пятна появляются на гелиографических широтах около 40° одновременно в обоих полушариях, затем области их рождения смещаются в сторону экватора и в конце цикла достигают широт $5-10^\circ$. В фазе максимума пятнообразования на диске Солнца одновременно видны десятки пятен и их групп, в фазе минимума — лишь единицы; Солнце, совершенно свободное от пятен, наблюдается крайне редко. Линейная комбинация чисел видимых пятен и их групп называется числом Вольфа — по имени швейцарского ученого XVIII в., открывшего солнечный цикл, — и является простейшим количественным индексом уровня солнечной активности в момент наблюдений.

Обычно солнечные пятна появляются не «на пустом месте», а в так называемых активных областях — это до 150 000 км в диаметре участки солнечной поверхности, температура которых на 200—300 К выше, чем в спокойной фотосфере, в которых обнаруживаются магнитные поля напряженностью 100—200 Гс и над которыми расположены области более плотной хромосферы и короны. Именно в активных областях происходят солнечные вспышки, частота которых, как и всех других явлений солнечной активности, модулируется 11-летним циклом. Продолжительность солнечного цикла не строго фиксирована, она меняется от цикла к циклу, иногда весьма заметно; существуют и другие, более продолжительные циклы или периоды длительностью около 80—90 лет и, возможно, в несколько столетий.

Магнитные поля в солнечных пятнах открыл в начале XX в. американский астроном Дж. Хейл. Согласно современным измерениям, напряженности этих полей достигают 2—4 кГс, причем уже при рождении пятна, когда его размер еще весьма мал, напряженность

поля в нем уже превышает 1 кГс и близка к той, которая будет иметь место в фазе максимального развития этого пятна. В парах пятен магнитные поля имеют разную полярность, причем если в одном полушарии в данном цикле все восточные компоненты таких пар имеют, скажем, северную полярность и все западные компоненты — южную, то в другом полушарии картина обратная. В следующем 11-летнем цикле ситуация меняется на противоположную, так что если с фотометрической точки зрения Солнце имеет цикл длительностью около 11 лет, то с точки зрения магнитометрической — вдвое больший.

Согласно современным представлениям солнечные пятна — это области, где сильные локальные магнитные поля выходят из подфотосферных глубин на поверхность. Физические условия в силовых трубках таких полей и, следовательно, в пятнах существенно отличаются от условий в невозмущенных областях, так как давление магнитного поля в этих трубках сравнимо с газовым давлением, что резко меняет условия конвективного и турбулентного переноса энергии.

Над группами пятен, содержащими три и более пятен обеих полярностей, возникает весьма сложная система магнитных силовых линий, и именно в таких условиях развиваются мощные солнечные вспышки.

Пятнистость красных карликовых звезд была открыта в 1950 г. американским исследователем Дж. Кроном: при наблюдениях затменной двойной системы YY Близнецов он обнаружил некоторую дополнительную к эффектам затмения деформацию в строго периодической кривой блеска. Вскоре были обнаружены еще несколько сходных объектов. Все они оказались более яркими, чем известные тогда звезды типа UV Кита, оранжевыми карликами, и такого рода переменные стали называть звездами типа ВУ Дракона. Позднее аналогичная пятнистость была обнаружена и на одиночных звездах.

Дальнейшие исследования показали, что вспыхивающие звезды типа UV Кита и пятнистые звезды типа ВУ Дракона не отличаются природой происходящих на них процессов, а то обстоятельство, что они были выделены как «носители» различных проявлений активности солнечного типа, объясняется просто эффектами наблюдательной селекции. Действительно, для обнару-

жения вспышки желателен низкий уровень излучения звезды, и таким излучением обладают звезды наименьшего размера и самой низкой температуры, т. е. красные карлики. А для обнаружения пятен, т. е. регистрации небольших деформаций кривой блеска звезды, уровень ее нормального блеска необходимо определять с высокой степенью точности, для чего этот уровень должен быть заметно выше минимального, и мы естественно приходим к более ярким оранжевым карликам. Эти качественные рассуждения подтверждаются экспериментально: к настоящему времени практически на всех пятнистых звездах, подвергнутых достаточно продолжительному фотометрическому патрулированию, были зарегистрированы скоротечные вспышки. С другой стороны, обнаружение пятен на активных вспыхающих звездах — более сложная задача, так как, кроме слабого блеска звездной фотосферы, частые спорадические вспышки затрудняют обнаружение периодических изменений блеска малой амплитуды. Для решения этой задачи обычно меняют спектральную область наблюдений; если звездные вспышки наиболее эффективно регистрируются в фиолетовых лучах, то исследования пятнистости проводят в оптике и более длинноволновых участках спектра.

Методически исследования пятнистости и звездных вспышек тоже существенно отличаются. Для регистрации вспышек чаще всего применяется непрерывный фотоэлектрический патруль блеска звезды с высоким временным разрешением. При этом задача обычно состоит в обнаружении вспышки и в определении общего характера ее кривой блеска; в качестве фотометрического стандарта здесь может служить уровень блеска звезды до и после вспышки, который с точностью, достаточной для оценки амплитуды вспышки и абсолютной энергии ее оптического излучения, может быть принят равным среднему блеску звезды вне вспышек. Исследования же пятнистости звезды — несравненно более тонкая задача, поскольку речь идет об эффектах порядка процентов среднего блеска. Здесь нет необходимости ни в непрерывном патруле, ни в высоком временном разрешении, достаточно 2—3 измерений за ночь, но каждое из них проводится с тщательной «привязкой» к одной или двум звездам сравнения с известным и заведомо постоянным блеском и каждое из них исправ-

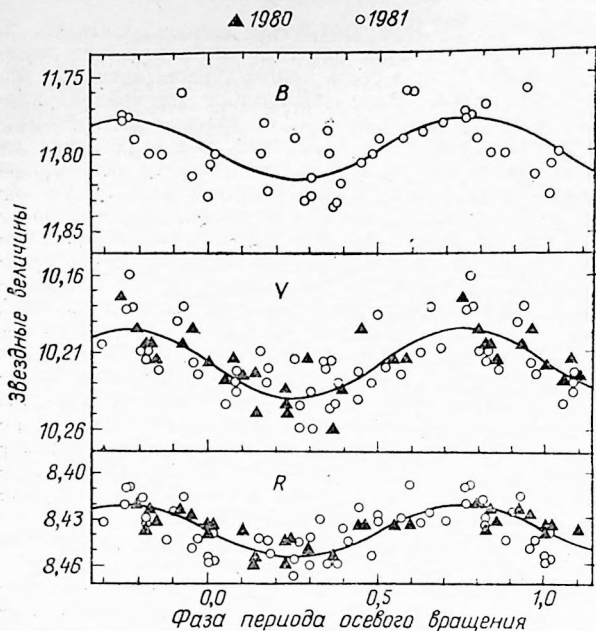


Рис. 10. Эффект пятнистости звезды EV Ящерицы, по Г. Ш. Ройзману

ляется за эффект ослабления блеска звезды в земной атмосфере. Совокупность таких «вынесенных за атмосферу» оценок блеска анализируется на предмет возможного присутствия периодических изменений малой амплитуды.

На рис. 10 представлены результаты исследования пятнистости вспыхивающей звезды EV Ящерицы, выполненные Г. Ш. Ройзманом (Караганда) в течение двух лет в трех участках длин волн: в синих (B), визуальных (V), красных (R) лучах. Рисунок показывает прежде всего, что в течение двух наблюдательных сезонов сохранялся период вращательной модуляции блеска звезды (4,38 суток) и его фаза. Следовательно, звезд-

ные пятна на EV Ящерицы живут дольше солнечных по крайней мере в десять раз либо они постоянно появляются и исчезают в столь долгоживущих активных областях на звезде. Далее, естественно, что красная карликовая звезда наиболее ярка в красном из трех рассмотренных диапазонов длин волн, и в этих лучах на рис. 10 разброс точек минимален и эффект пятнистости виден особенно четко. При переходе к визуальным лучам звезда слабеет и заметно возрастает разброс измерений; тем не менее нет сомнений, что амплитуда колебаний блеска в визуальных лучах больше, чем в красных. Наконец, при переходе к синим лучам нет дальнейшего роста амплитуды колебаний блеска звезды, скорее, даже ее небольшое уменьшение. По-видимому, дело здесь в том, что, как и на Солнце, звездные пятна холоднее (и следовательно, темнее) спокойной фотосферы, но в синих лучах в общем излучении звезды уже заметен вклад нефотосферного излучения — вклад спокойной хромосферы, которая вблизи пятен имеет повышенную яркость, т. е. находится в противофазе с яркостью фотосферы, что и может понизить амплитуду колебаний наблюдаемого суммарного блеска.

Сейчас известно около трех десятков пятнистых звезд с четко определенными периодами и амплитудами блеска. Периоды у таких звезд составляют, как правило, несколько суток, амплитуды блеска до 0^m , 10— 0^m , 15. Обнаружение звездной переменности с существенно меньшими амплитудами, скажем, 0^m , 01 — задача крайне сложная, требующая весьма длительных наблюдений, но нет оснований полагать, что искомый эффект сохраняется на больших отрезках времени.

Обнаруженные максимальные амплитуды блеска пятнистых звезд на 2—3 порядка величины превышают фотометрический эффект солнечных пятен в фазе наибольшей запятненности Солнца. Это обстоятельство тем более важно, что на Солнце мы имеем возможность определить полный фотометрический эффект пятен, тогда как на звездах определяется разность блеска наиболее и наименее запятненных полушарий. Если сравнивать максимальный блеск звезды в течение многих лет, то в принципе можно найти эпоху минимальной абсолютной запятненности звезды, но такие исследования не привели еще к каким-либо определенным результатам.

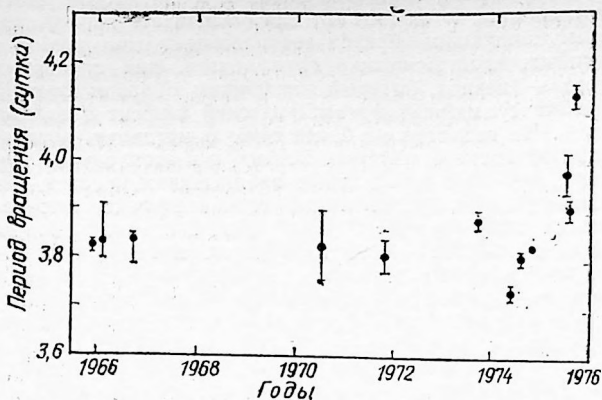


Рис. 11. Вариации периода обращения пятен на звезде ВУ Дракона, по С. Фоггу

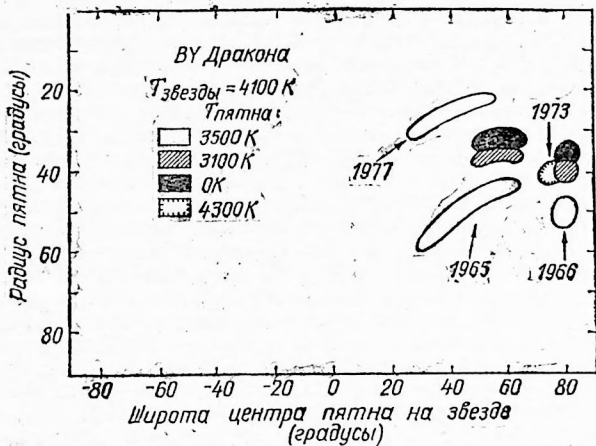


Рис. 12. Моделирование пятнистости на ВУ Дракона, по С. Фоггу

Итак, период вращения Солнца и пятнистых звезд определяется по их пятнам: для Солнца это период, который наилучшим образом воспроизводит узор наиболее крупных, долгоживущих групп пятен, для пятнистых звезд — период, который наилучшим образом воспроизводит суммарный фотометрический эффект звездных пятен. Но несмотря на более грубую методику, доступную при анализе звездных данных, и в этом случае при достаточно продолжительных наблюдениях удастся, по-видимому, обнаружить такой тонкий эффект, как изменение периода обращения пятен вокруг оси звезды (рис. 11). Наблюдаемая картина качественно соответствует результату совместного действия дрейфа области пятнообразования по звездной широте и дифференциального вращения звезды, и если здесь действительно имеет место полная аналогия с ситуацией на Солнце, то можно говорить об эффективном смещении области пятнообразования в 1975—1976 гг. с быстро вращающейся экваториальной зоной звезды к более медленно вращающимся средним широтам, т. е. о наступлении нового цикла пятнообразования.

Неразличимость деталей звездного диска серьезно затрудняет определение реальных свойств звездных пятен. Главная неопределенность состоит в том, что мы не знаем, сколько пятен дает наблюдаемый фотометрический эффект. Даже в приближении чернотельного (т. е. планковского) излучения пятен и нормальной фотосферы этот эффект определяется значительным числом свободных параметров: размером, формой, температурой и положением на диске каждого из пятен. Рис. 12 иллюстрирует те неопределенности, которые остаются при анализе наблюдений самой ВУ Дракона в рамках простейшей модели одного чернотельного круглого пятна: на графике нанесен вероятный радиус такого пятна в зависимости от удаления его центра от звездного экватора при различных предположениях о температуре пятна. (Заметим, что, несмотря на простоту физической модели, ее построение связано с весьма кропотливыми расчетами, так как искомые эффекты пятнистости могут быть найдены лишь после тщательного учета блеска второго компонента рассматриваемой двойной системы и нормальных эффектов затмения в наблюдаемой кривой блеска системы.) Обсудим подробнее две важные особенности рис. 12.

Во-первых, согласно рисунку звездное пятно может достигать в диаметре $40\text{--}120^\circ$, тогда как диаметры самых больших солнечных пятен не превышают $5\text{--}7^\circ$; с учетом различий размеров Солнца и оранжевого карлика получаем превышение линейного размера звездного пятна в $4\text{--}6$ раз. Что же имеет место в действительности: модель одиночного пятна суммирует эффект десятков пятен солнечного типа или на звездах пятна гораздо крупнее солнечных, но число их не слишком велико? По-видимому, второй вариант более правдоподобен, так как при большом числе пятен трудно ожидать заметный дифференциальный эффект между полушариями звезды, и звездные вспышки, энергия которых на таких звездах на порядки величины превосходит энергию солнечных вспышек, связаны, можно думать, и с более крупными пятнами. Эти качественные соображения не позволяют, конечно, конкретизировать число пятен, которые определяют наблюдаемый фотометрический эффект.

Во-вторых, на рис. 12 показано, что данные наблюдений 1973 г. приводят к выводу о существовании пятна, на 200 К более горячего, чем нормальная фотосфера. В связи с этим следует отметить, что советский астрофизик С. Б. Пикельнер впервые обратил внимание на существенную неоднозначность влияния магнитного поля на конвективный перенос энергии: слабые поля усиливают такой перенос, что и обеспечивает повышенную температуру и яркость активных областей на Солнце, а сильные поля подавляют конвекцию, что и вызывает появление темных солнечных пятен. Поэтому простейшая интерпретация данных 1973 г. — это полярная активность на звезде. На Солнце активных областей с темными пятнами в близполюсных областях не бывает; следует, однако, напомнить, что, помимо «классических» темных пятен, на Солнце существуют также так называемые полярные факелы — горячие области фотосферы, возникающие на широтах более 45° . Области их рождения дрейфуют в течение солнечного цикла к полюсу. Но по данным 1966 г., на звезде имели место и темные приполярные пятна. Таким образом, здесь нет еще даже качественного понимания ситуации: либо модель одного пятна существенно недостаточна, либо в отношении пятен солнечные явления не охватывают всего разнообразия процессов на рассматриваемых хо-

лодных карликовых звездах.

Отметим, наконец, что если температура пятна заметно меньше температуры спокойной фотосферы, то конкретное значение предполагаемой температуры пятна уже не влияет на результаты модельных расчетов. Об этом говорит близость положений пятен на рис. 12 для температур 3100 и 0 К.

Итальянский исследователь М. Родоно и его коллеги разработали алгоритм расчета по фотометрическим наблюдениям модели звезды с двумя пятнами; естественно, что введение второго пятна увеличивает число свободных параметров задачи и при этом удается улучшить представление наблюдений, но и в этом случае в околополярной области сохраняются большие холодные пятна.

Очевидно, что принципиальный момент в изучении звездных пятен — это измерение их магнитных полей. Традиционная со времен Дж. Хейла методика таких измерений состоит в сравнении двух спектров, полученных в скрещенных плоскостях поляризации: расстояние между зеемановскими компонентами спектральной линии пропорционально напряженности магнитного поля, в котором находится излучающее вещество. Эта методика весьма эффективна при изучении отдельных солнечных пятен, где магнитные поля той или иной полярности достаточно однородны, но при наблюдениях пятнистой звезды, на диске которой могут находиться несколько пятен обеих полярностей, четкое расщепление зеемановских компонент должно «замываться». Успешные магнитометрические наблюдения пятнистых звезд были проведены с помощью недавно предложенного Р. Робинсоном нового метода. В этом методе магниточувствительные спектральные линии наблюдаются в неполяризованном свете в спектре пятнистой звезды и звезды, лишенной каких-либо признаков активности, т. е. в спектре объекта, где можно предполагать отсутствие заметного магнитного поля; затем проводятся расчеты ожидаемой деформации профиля линии за счет магнитного поля, имеющего некоторую эффективную напряженность и занимающего определенную долю поверхности звезды, и этими двупараметрическими расчетами исходный невозмущенный профиль подгоняется к наблюдаемому в спектре пятнистой звезды.

Результаты такого анализа наблюдений звезды

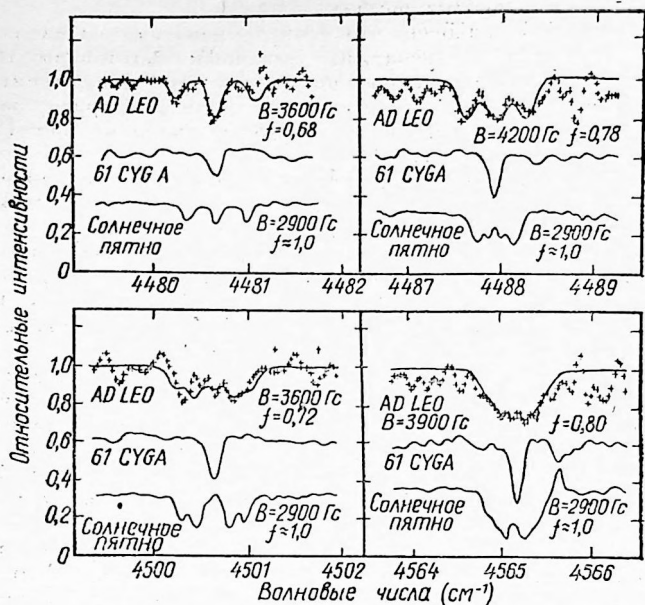


Рис. 13. Сравнение профилей магниточувствительных линий в спектрах вспыхивающей звезды AD Льва, неактивной звезды 61 А Лебеда и солнечного пятна, по С. Саару и Дж. Линскому

AD Льва, выполненного американскими исследователями С. Сааром и Дж. Линским, представлены на рис. 13. Для каждой из 4 изученных спектральных линий нейтрального титана в ближней инфракрасной области на рисунке представлены наблюдаемые профили в спектре AD Льва, в спектре неактивного А-компонента двойной системы 61 Лебеда и в спектре солнечного пятна. Рисунок показывает хорошее соответствие профилей линий в спектрах AD Льва и солнечного пятна и их существенное отличие от профилей линий в спектре 61 Лебеда А. Крестиками на рис. 13 представлены результаты вычислений ожидаемых профилей линий при указанных для каждой линии значениях эффективной напряженности магнитного поля (B) и доли поверхности звезды (f), занятой таким полем; из рисунка следует бли-

зость величин B и f , полученных из независимого анализа различных спектральных линий.

Для наблюдений пятнистых звезд методом Робинсона необходима весьма совершенная техника, позволяющая получать высокодисперсные спектры слабых звезд с большим отношением сигнал/шум. Тем не менее число изученных таким образом объектов превышает уже два десятка. Во всех случаях получено эффективное поле в несколько килогаусс и величина f от 0,5 до 0,8. Такие напряженности магнитного поля лишь в несколько раз превышают максимальные напряженности полей в солнечных пятнах, и именно такие значения B следовало здесь ожидать, исходя, скажем, из условия, что давление магнитного поля в звездных пятнах не должно превышать газовое давление в фотосфере холодных карликовых звезд. Что же касается полученных оценок величины f , которая в десятки или даже сотни раз превышает соответствующую величину для Солнца, то именно при такой высокой магнитной запятненности следует ожидать найденную фотометрически дифференциальную запятненность с амплитудой до 0^m , $10-0^m$, 15 . Но высокая степень магнитной запятненности с неизбежностью приводит к двум заметным отличиям звездных пятен от солнечных. Во-первых, из-за более тесного расположения звездных пятен в их окрестностях гораздо чаще, чем на Солнце, должны возникать ситуации, приводящие к мощным вспышкам. Во-вторых, поскольку между запятненными и «чистыми» холодными карликовыми звездами нет существенных различий в абсолютной светимости, то звездные пятна должны быть не столь темными, как на Солнце. Точнее, они должны быть не столь контрастны на фоне невозмущенной звездной фотосферы, как солнечные пятна на фоне солнечной фотосферы.

Этот вывод довольно важен, так как теория солнечного и звездного магнетизма пока еще не может построить модель пятна «из первых принципов», предсказать, скажем, температуру пятен на звездах с различными фотосферами. В дискуссиях по звездным пятнам обычно рассматриваются две модели: модель с температурой пятна около $2500-3000$ К, не зависящей от температуры звездной фотосферы, и модель с постоянной разностью T (фотосферы) — T (пятна) ≈ 1500 К. По-видимому, первая из них ближе к реальности, так

как именно она предсказывает уменьшение контраста пятна и спокойной фотосферы по мере перехода от Солнца к более холодным звездам.

В заключение этого раздела отметим, что, кроме холодных карликовых звезд, пятна обнаружены фотометрически еще на переменных звездах двух типов: звездах типа Т Тельца и типа RS Гончих Псов. Звезды первого типа — это объекты в самой ранней стадии звездной эволюции, второго типа — звезды, в недрах которых водород уже в значительной степени выгорел, и они переходят в заключительные стадии развития. Весьма вероятно, что в обоих случаях пятнистость имеет одну и ту же физическую природу, но на самых ранних стадиях звездной эволюции и после ухода с главной последовательности, где происходит выгорание водорода, в звездной активности могут обнаруживаться качественно новые свойства, поэтому здесь необходима определенная осторожность в переносе известных на Солнце явлений на эти переменные звезды. Заметим, однако, что упомянутый выше алгоритм расчета модели с двумя пятнами на поверхности звезды был разработан как для анализа переменных типа BY Дракона, так и типа RS Гончих Псов.

ЗВЕЗДНЫЕ ХРОМОСФЕРЫ

Солнечная хромосфера — это средние слои атмосферы, лежащие над фотосферой, видимой «поверхностью» Солнца. Хромосфера была открыта во время полных солнечных затмений, когда вокруг темной Луны появлялось красноватое свечение. С точки зрения эксперимента начало атмосферы соответствует резкому краю солнечного диска, и в специальных телескопах — коронографах установлена так называемая искусственная Луна — устройство, которое позволяет моделировать условия солнечного затмения и проводить регулярные наблюдения хромосферы.

С физической точки зрения, солнечная хромосфера тоже начинается довольно резко, хотя никакой твердой поверхностью внутренние слои Солнца, естественно, не ограничены. Резкий переход к хромосфере обусловлен следующими обстоятельствами. По мере продвижения наружу из солнечных глубин температура вещества монотонно падает; также плавно уменьшается и плот-

ность вещества, величина которой в каждой точке определяется равновесием газового давления, давления излучения, силы тяжести и давления конвективных движений в областях, где такие движения существуют. В атмосфере же, прозрачной для фотосферного излучения, имеет место равновесие сил газового давления и гравитации, что приводит к более быстрому уменьшению плотности по барометрическому закону. Но конвективные движения в подфотосферных слоях возбуждают в атмосфере различного рода гидродинамические волны. Поток энергии этих волн ослабевает с высотой сравнительно медленно, и сочетание быстрого уменьшения плотности вещества и медленного ослабления потока энергии волн, эффективно поглощаемых этим веществом, приводит к росту температуры. В результате на Солнце имеет место сравнительно узкая по высоте — около 100 км — область температурного минимума, над которой и начинается хромосфера. Физические условия в основной массе хромосферы определяются балансом нагрева за счет поглощения энергии волновых движений и охлаждения за счет излучения в линиях водорода, ионизованного кальция и ионизованного магния. При этом основная масса хромосферы имеет температуру около 8000—9000 К, а заметные отклонения от этой величины существуют лишь на ее границах вблизи температурного минимума, где температура хромосферы опускается до 5000 К, и в самых верхних слоях, где скачивается теплопроводность от более горячей короны и температура достигает 20 000 К. Свечение самой сильной видимой красной линии водорода и определяет красноватый цвет хромосферы, а также само название этой оболочки солнечной атмосферы.

На первый взгляд описанная схема соответствует спокойному Солнцу и не имеет отношения к его активности. Но, как уже отмечалось, локальные солнечные магнитные поля существенным образом меняют характер подфотосферных конвективных движений и, следовательно, **характер** и мощность выходящих в атмосферу волновых **возмущений**, что приводит к резкому изменению яркости и структуры солнечной хромосферы. Таким образом, исследования хромосферы дают весьма богатый материал по солнечной активности.

Хромосферное излучение активных красных карликов легко обнаруживается на спектрограммах, получен-

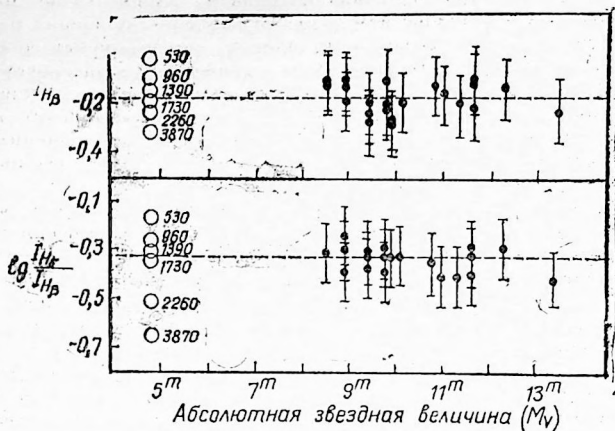


Рис. 14. Относительные интенсивности эмиссионных линий водорода в хромосферах вспыхивающих звезд и Солнца, по Н. И. Шаховской

ных даже с весьма умеренной дисперсией. Это обстоятельство обусловлено большим контрастом линейчатой эмиссии этих хромосфер по отношению к непрерывному излучению соответствующих фотосфер. Однако поскольку свечение хромосферы происходит в условиях само-согласованного баланса поглощаемой и излучаемой энергии, то оно обладает некоторыми внутренними характеристиками, не зависящими, например, от абсолютной светимости звезды. Так, на рис. 14 показаны отношения интенсивностей эмиссионных линий бальмеровской серии водорода $I_{H\gamma} / I_{H\beta}$ и $I_{H\delta} / I_{H\gamma}$ для более чем двух десятков вспыхивающих звезд, которые были измерены Н. И. Шаховской в Крыму; по оси абсцисс отложены абсолютные звездные величины рассматриваемых объектов, т. е. звездные величины, которые имели бы эти объекты, будучи удалены от нас на стандартное расстояние, в 2 млн. раз превышающее расстояние от Земли до Солнца. Хотя абсолютные звездные величины рассматриваемых звезд заключены в диапазоне $\Delta M_V = 5^m$ (т. е. самая яркая из них в сто раз ярче самой слабой), указанные отношения интенсивностей линий практически одинаковы. У левого края рис. 14

кружками представлены наблюдения солнечной хромосферы во время затмения на разных высотах (в км) над краем лимба. Из рисунка следует, что усредненные по диску звезды отношения интенсивностей линий соответствуют тем, что наблюдаются на высоте около 1500 км над краем солнечного диска. Количественный анализ водородных эмиссионных линий показал, что электронная плотность в хромосферах вспыхивающих звезд на порядок выше, чем в солнечной хромосфере.

Важные данные о звездных хромосферах были получены в результате наблюдений холодных карликов в ультрафиолетовой области спектра с международного спутника ИУЕ; эти данные были суммированы Дж. Линским. Эмиссионные линии, обнаруженные на спектрограммах, возникают на разных уровнях звездной атмосферы — от нижней хромосферы до переходной зоны между хромосферой и короной. Анализ этих линий показал, что звезды солнечного типа имеют практически такую же хромосферу, как Солнце, а хромосферы активных красных карликов существенно мощнее солнечной хромосферы. Более того, у многих активных карликов усредненные по диску потоки в хромосферных линиях и в линиях переходной зоны хромосфера—корона заметно превышают не только средние потоки от спокойного Солнца, но даже средние потоки от солнечных активных областей. Иными словами, если бы эти звезды были даже сплошь покрыты такими активными областями, какие существуют на Солнце, то и в этом случае мы не могли бы получить потоки наблюдаемой интенсивности. Это означает, что на самых активных красных карликовых звездах активные области излучают в высокотемпературных эмиссионных линиях гораздо сильнее, чем в солнечных активных областях. По-видимому, это связано с большей плотностью атмосфер таких карликовых звезд.

Наконец, третье направление исследования звездных хромосфер — это анализ временных изменений интенсивности самых ярких в видимой области спектра хромосферных линий H и K ионизованного кальция. Если в фокальной плоскости спектрографа установить две щели на линии H и K CaII, а две другие — на участки непрерывного спектра, то, сравнивая интенсивности выходящих через эти щели потоков излучения, можно очень точно оценить отношение интенсивностей хромо-

сферной эмиссии и фотосферного континуума. Такие исследования были начаты в 60-е годы О. Вилсоном на 1,5 м солнечном телескопе в обсерватории Маунт Вилсон (США) и активно продолжены группой его последователей в последнее десятилетие. В результате накоплен богатый материал по хромосферным вариациям на многих десятках звезд. Поскольку такие наблюдения ведутся с высоким спектральным разрешением в фиолетовой области спектра, то они возможны лишь для сравнительно ярких и не слишком холодных звезд; эта наблюдательная селекция выделяет бело-желтые, желтые и оранжевые объекты спектральных классов F—G—K, т. е. звезды солнечного и соседних с ним спектральных типов. Таким образом, если для обнаружения вспышек наиболее подходящими являются красные карликовые звезды, заметно отличающиеся от Солнца по размерам, массе и светимости, для обнаружения фотосферных пятен — более близкие к Солнцу оранжевые карлики, то для исследования звездных хромосфер — желтые карлики, звезды солнечного типа.

На рис. 15 представлены результаты измерений относительных интенсивностей линии K CaII в течение ста суток на 6 звездах. В 4 случаях четко видна периодичность изменения интенсивности этой линии, которую естественно связать с вращением звезды, имеющей неоднородную поверхностную яркость в лучах этой линии. В этих случаях на 100 сутках укладывается от 3 до 5 периодов, т. е. периоды осевого вращения этих звезд близки к периоду вращения Солнца, а размах колебаний интенсивности хромосферной эмиссии достигает 10—15%. В двух последних случаях, где нет четкого проявления периодичности, средний уровень интенсивности линии K CaII минимален, и здесь тоже нельзя исключить периодическое изменение интенсивности этой линии с меньшей амплитудой, но большим периодом.

Наблюдения хромосферной эмиссии у многих десятков звезд дали интересные результаты не только по части активности звезд, но и относящиеся к структуре звездных атмосфер в целом. Как уже упоминалось, хромосферы существуют за счет того, что во внешних частях не слишком массивных звезд перенос энергии осуществляется конвективными движениями, и такие движения в подфотосферных слоях вызывают волновые процессы и нерадиативный перенос в звездных атмосфе-

Относительная интенсивность эмиссионных хромосферных
линий и фотосферного непрерывного излучения

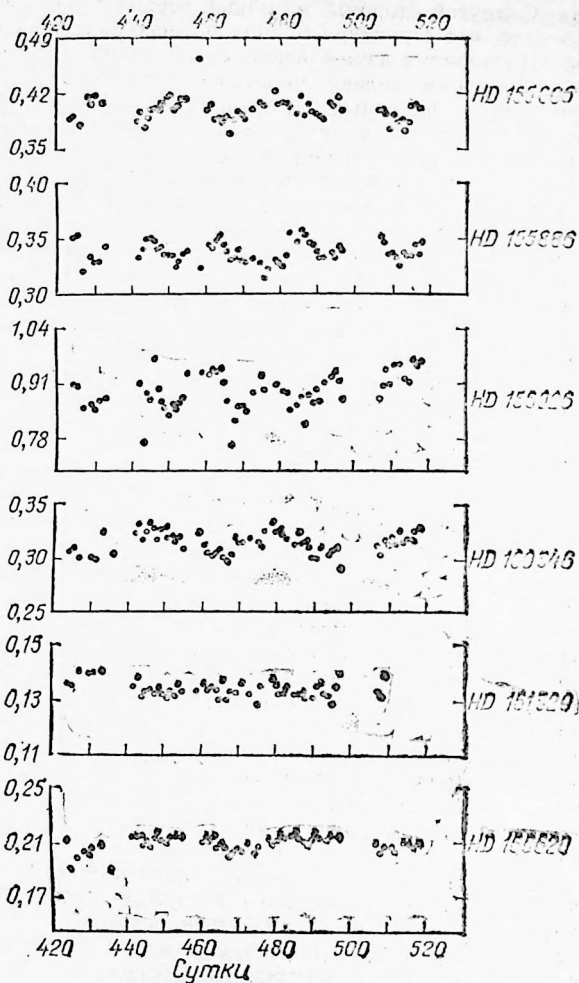


Рис. 15. Временные вариации хромосферной эмиссии звезд на интервале ста суток, по С. Бальюнас и А. Вогану

рах. С другой стороны, из общей теории строения звезд известно, что структура одиночной невращающейся звезды определяется двумя основными параметрами: ее массой и средним молекулярным весом. У звезд с массой более двух солнечных температура внутренних слоев столь велика, что в них не возникает конвекция, перенос энергии всюду осуществляется излучением, и у таких звезд нет хромосферы солнечного типа. Если идти в сторону менее массивных звезд, то подфотосферные слои с конвективным переносом энергии — так называемые конвективные оболочки — появляются у белых карликовых звезд спектрального класса F; у Солнца эта оболочка простирается уже на глубину до четверти радиуса, а красные карликовые звезды с массой менее 0,2—0,3 солнечных масс полностью конвективны. Поскольку по мере эволюции звезд не слишком малых масс в их центральных областях происходит термоядерное выгорание водорода, то средний молекулярный вес звездного вещества систематически увеличивается, и структура звезды должна определяться ее массой и возрастом. Далее, из наблюдений известно, что с возрастом замедляется вращение звезд. Поскольку вращение тесно связано с магнетизмом звезды, а магнитное поле, в свою очередь, существенным образом влияет на характер конвективного переноса и в конечном счете на структуру хромосферы, то масса звезды и ее возраст должны определять полную светимость хромосферы звезды. Эти качественные соображения подтверждаются рис. 16, на котором представлены измеренные абсолютные светимости звезд в линии K CaII (L_K) в зависимости от масс этих звезд в двух скоплениях — в Плеядах, возраст которых около $5 \cdot 10^7$ лет, и в Гиадах, возраст которых в 12 раз больше. Рисунок обнаруживает четкую зависимость величины L_K от массы звезды и позволяет достаточно уверенно разделить объекты, относящиеся к разным скоплениям. Попадание двух звезд наименьших масс в «чужое» скопление обусловлено, по-видимому, двойственностью этих объектов, которая, как установлено, замедляет угасание звездной активности; приливные движения вещества в компонентах двойных систем могут долгое время вызывать гидродинамические эффекты, сходные с теми, которыми обусловлен магнетизм быстро вращающихся одиночных звезд.

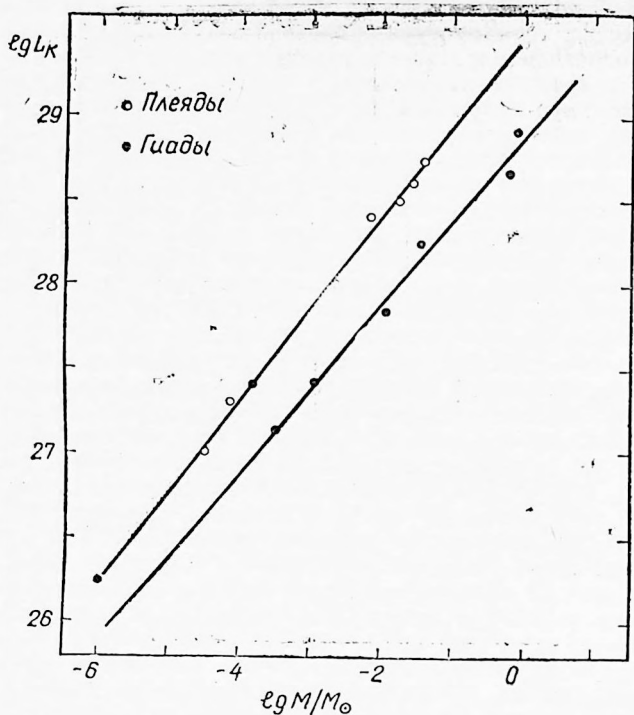


Рис. 16. Зависимость хромосферной эмиссии от массы и возраста карликовых звезд в звездных скоплениях Плеяды и Гиады, по С. Каталано и Е. Марилли

В заключение этого раздела остановимся на двух интересных наблюдательных фактах, которые не вписываются пока в жесткую схему «что есть на вспыхивающих звездах, то есть и на Солнце».

Как уже упоминалось, наблюдения с целью обнаружения спорадических вспышек и звездных пятен проводятся по-разному: в первом случае осуществляется непрерывная запись блеска звезды и стандартом при калибровке блеска вспышки служит сама звезда в спокойном состоянии, тогда как при поисках пятен делаются 2—3 измерения за ночь, но при каждом из них блеск исследуемой звезды тщательно сравнивается с блеском

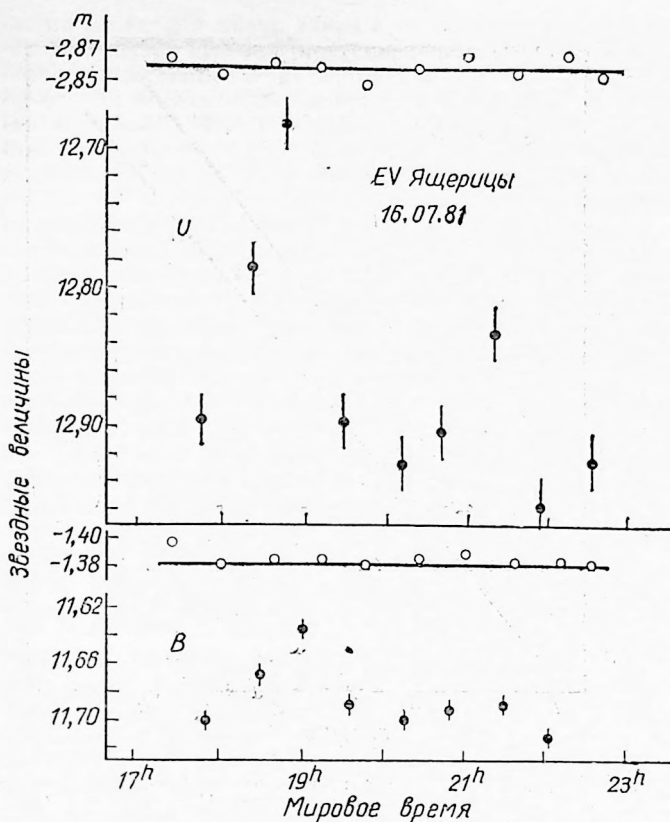


Рис. 17. Внешневспышечная активность звезды EV Ящерицы, по Г. Ш. Ройзману

постоянных звезд. Советский исследователь Г. Ш. Ройзман провел наблюдения вспыхивающих звезд по нетрадиционной методике: он вел непрерывный патруль, как при поиске вспышек, но примерно каждые полчаса оценивал блеск звезды, как при поиске пятен. В результате был обнаружен новый тип фотометрической переменности красных карликовых звезд. Рис. 17 демонстрирует эту переменность: многочасовые плавные поярчения EV Ящерицы с амплитудой до $0^m, 25$ в фиолетовых лу-

чах и в 2—3 меньшей — в синих лучах. Светлыми кружками отмечены наблюдения контрольных звезд: они показывают, что изменения блеска EV Ящерицы реальные, а не обусловлены, скажем, вариациями атмосферной прозрачности. Обнаруженные Г. Ш. Ройзманом повышения блеска не показывают периодичности и, следовательно, не могут быть отнесены за счет вращения звезды.

Далее, еще 20 лет назад группа исследователей в Катанин (Италия) под руководством Дж. Годоли обнаружила, что во многих случаях непосредственно перед началом сильной вспышки происходит уменьшение блеска звезды в течение нескольких минут на несколько сотых или одну-две десятых звездной величины; позднее в Ташкенте и в Крыму нашли, что это явление чаще регистрируется в ближней инфракрасной области. Поскольку этот эффект был обнаружен в ходе непрерывного патрулирования блеска звезды, то считалось, что происходит понижение блеска звезды ниже его нормального уровня, и это обстоятельство породило различные гипотезы. Но, согласно Г. Ш. Ройзмана, такие быстрые и непродолжительные падения блеска перед вспышкой происходят на фоне плавного предвспышечного подъема, так что блеск звезды не опускается ниже своего нормального уровня.

Оба отмеченные эффекты — непериодические плавные повышения блеска и кратковременные предвспышечные ослабления блеска — не имеют четких аналогов на Солнце. Но возможно, что дело не в реальном отсутствии таких явлений на Солнце, а в том, что Солнце еще не наблюдалось способом, который позволил бы обнаружить их. По-видимому, мы имеем дело с процессами в хромосфере активных областей, и необходимы наблюдения (с фотоэлектрической точностью) яркости протяженных солнечных активных областей в спектральной области, включающей сильные хромосферные линии.

ЗВЕЗДНЫЕ КОРОНЫ

Солнечная корона известна с глубокой древности: во время каждого полного солнечного затмения вокруг темного диска Луны на несколько минут на небе вспыхивает серебристое сияние, простирающееся на несколь-

ко радиусов Солнца. Но физика солнечной короны начала развиваться лишь в 40-е годы нашего столетия, когда основные линии в спектре короны были отождествлены с линиями многократно ионизованных атомов железа, кальция и никеля, и тепловое излучение очень горячей разреженной плазмы, где только и могут возникать такие спектральные линии, было непосредственно зарегистрировано первыми радиотелескопами.

К настоящему времени хорошо изучена общая структура солнечной короны, ее характерные изменения в течение цикла солнечной активности, разнообразные механизмы электромагнитного излучения в оптическом, рентгеновском и радиодиапазонах длин волн. Установлено, что корона — это динамическое образование, переходящее в солнечный ветер, который в значительной степени определяет физику межпланетного пространства. Как и хромосфера, солнечная корона чутко реагирует на процессы солнечной активности, происходящие в нижних слоях атмосферы.

Звездные короны сперва были обнаружены по радиоизлучению звездных вспышек: дрейф радиоэмиссии во время таких событий был интерпретирован как результат распространения возмущения по плазме корональной плотности в сторону уменьшения этой плотности. Однако массовое обнаружение звездных корон было выполнено с американской космической обсерватории «Эйнштейн»: установленная на этой обсерватории аппаратура регистрировала непосредственно рентгеновское излучение в диапазоне энергий от 0,2 до 4 кэВ, на который приходится максимум излучения оптически тонкой плазмы при корональной температуре в несколько миллионов градусов. Благодаря высокой чувствительности этой аппаратуры было зарегистрировано тепловое излучение корон у нескольких десятков звезд низкой светимости. Как и ожидалось, температуры корон карликов поздних спектральных классов близки к температуре солнечной короны, но интенсивности излучения корон таких звезд оказались существенно более высокими, чем предсказывали теоретические расчеты. Это обстоятельство заставило отказаться от долгое время существовавших представлений о том, что нерадиативный перенос энергии в звездную атмосферу осуществляется главным образом акустическими волнами, и перейти к более тщательному рассмотрению возможностей

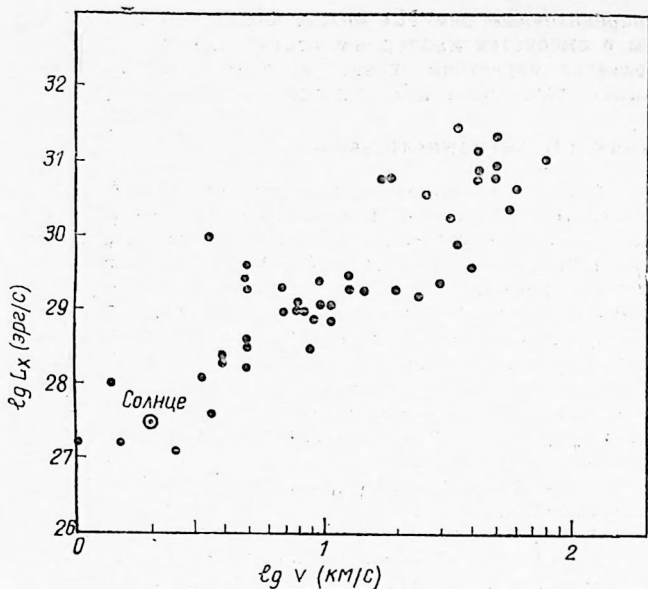


Рис. 18. Корреляция рентгеновской светимости и скорости вращения карликовых звезд, по Р. Паллавичини с коллегами

различных гидромагнитных волн. Однако проблема нагрева звездных корон до сих пор не получила еще общепризнанного решения.

На рис. 18 (Р. Паллавичини и др., Италия) сопоставлены скорости вращения карликовых звезд спектральных классов от F до M и измеренные абсолютные светимости рентгеновского излучения их корон. Скорости вращения рассмотренных объектов заключены в диапазоне от 1 до 100 км/с, светимости звездных корон — от 10^{27} до $3 \cdot 10^{31}$ эрг/с. Рисунок обнаруживает уверенную положительную корреляцию между этими параметрами звезд, причем Солнце хорошо вписывается в общую зависимость. Аналогичные корреляции существуют также между скоростью вращения звезд и их светимостями в линиях Ca II хромосферы и в линиях C IV переходной зоны хромосфера—корона. Нет сомнений,

что «передаточным ремнем» между вращением холодной звезды и высокотемпературным излучением ее атмосферы является магнетизм звезды, хотя конкретная «конструкция» этого «привода» остается не ясной.

ЦИКЛИЧНОСТЬ АКТИВНОСТИ ЗВЕЗД

11-летний цикл Солнца синхронизирует все проявления солнечной активности: фаза этого цикла определяет средний уровень запятненности солнечного диска, среднюю гелиографическую широту пятен, частоту вспышек, число и размеры активных областей, структуру и протяженность короны*. Естественно, что с фазой цикла изменяются и все геофизические эффекты солнечной активности — частота и интенсивность магнитных бурь и полярных сияний, фон космических лучей, состояние ионосферы и т. д. Продолжительность научных исследований солнечных пятен, по которым наиболее наглядно и четко фиксируются минимумы и максимумы активности Солнца, лишь немногим превышает два столетия, но благодаря хорошо выраженной зависимости толщины годовых колец деревьев от уровня солнечной активности к настоящему времени построена так называемая дендрохронологическая шкала, которая позволила проследить солнечные циклы в течение многих тысячелетий. Существуют и другие процессы на Земле, «хранящие память» о циклах солнечной активности. Анализ всех этих данных убедительно показал, что продолжительность циклов не постоянна, она заметно меняется даже от одного цикла к другому и существенно изменя-

* На фоне этих давно и хорошо известных общих соотношений отметим эффект, недавно обнаруженный Иркутскими исследователями В. В. Касинским и Р. Т. Сотниковой. Они построили энергетические спектры солнечных вспышек в области мягкого рентгеновского излучения для каждого года отдельно — с 1972 по 1974 и с 1977 по 1987 — и нашли четкую корреляцию с фазой солнечного цикла всех характеристик таких спектров: спектральных индексов, минимальных, средних и максимальных полных энергий зарегистрированных вспышек, их частот и др. Заметим, что с методической точки зрения рентгеновские наблюдения солнечных вспышек более удобны для статистического анализа, так как они аналогичны наблюдениям звездных вспышек, где сразу получается кривая блеска, и имеют преимущество перед оптическими солнечными наблюдениями, где необходимо проводить интегрирование по поверхности вспышек.

ется глубина модуляции количественных характеристик активности.

Понять физическую природу циклического явления всегда значительно сложнее, чем разобраться в строго периодических процессах, скажем, переменности блеска затменных систем. И теории солнечных циклов, действительно, еще не существует. Более того, до сих пор, наряду с начатыми в 40-х годах нашего столетия М. Вальдмайером поисками чисто внутренних причин такого характера солнечной активности, продолжается обсуждение выдвинутой в середине XVIII в. Р. Вольфом идеи об определяющей роли внешних возмущений — приливного взаимодействия Солнца с Юпитером и Сатурном. Ясно, что в такой ситуации весьма заманчиво обнаружение звездных аналогов солнечных циклов.

С целью найти цикличность в степени запятненности красных карликов американский ученый Л. Хартманн и его коллеги проанализировали сотни снимков неба в Гарвардской стеклотеке с начала XX в. и у двух из полдюжины рассмотренных объектов нашли искомый эффект: звезда BD+26°730 обнаружила фотометрический цикл длительностью около 60 лет с амплитудой блеска не менее $0^m,5$, т. е. в фазе максимальной запятненности звезда в полтора раза слабее, чем в фазе с наименьшим числом пятен. На звезде ВУ Дракона найден несколько более короткий цикл — около 40 лет — и вдвое меньшая амплитуда блеска; но ВУ Дракона — двойная звезда, так что максимальная запятненность ее активного компонента может быть такой же, как в предыдущем случае.

Более богатые сведения о звездных циклах были получены из анализа упоминавшихся выше многолетних наблюдений хромосферных линий кальция в спектрах многих десятков звезд солнечного и близких к солнечному типов. На рис. 19 представлены относительные потоки хромосферного и фотосферного излучений 9 карликовых звезд спектральных классов от F до M в течение почти двух десятилетий. На многих графиках хорошо видны циклические изменения длительностью от 7 до 11 лет. Если на рис. 15 циклические изменения хромосферной эмиссии с характерной длительностью в несколько суток и амплитудой в несколько процентов дали возможность оценить периоды вращения звезд, то на рис. 19 амплитуды изменений составляют десятки

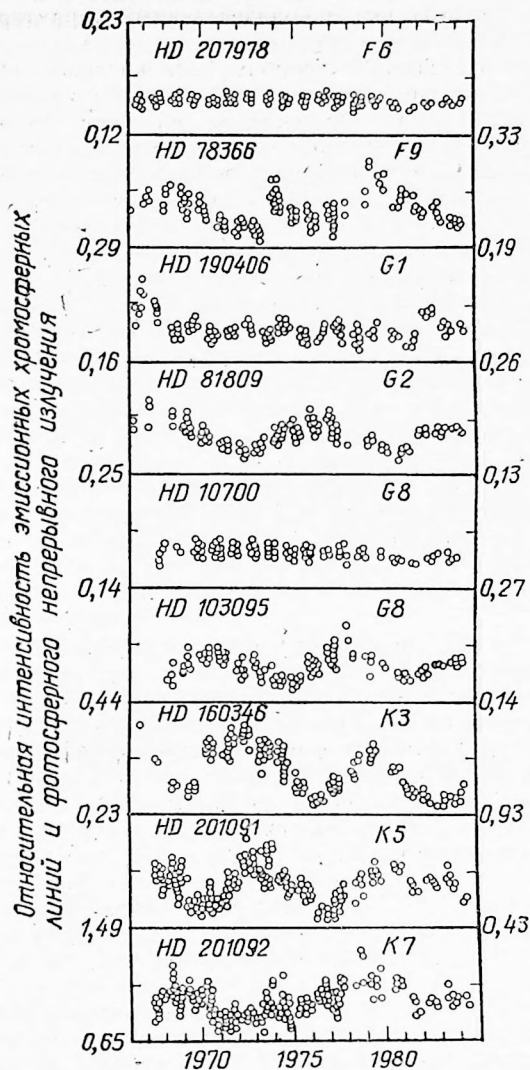


Рис. 19. Временные вариации хромосферной эмиссии звезд на интервале 18 лет, по С. Бальюнас и А. Вогану

процентов, а у двух звезд, где цикличность не заметна, хромосферная эмиссия минимальна, т. е., как и на рис. 15, возможная периодичность может быть скрыта ошибками измерений.

К настоящему времени цикличность активности установлена на дюжине карликовых звезд. Хотя этих данных еще не достаточно для серьезных заключений, следует отметить, что найденные длительности циклов хорошо коррелируют с так называемыми числами Россби и в эту корреляцию хорошо вписывается Солнце. Число Россби — это отношение скорости конвективных движений в подфотосферных слоях, которая определяется теоретическими расчетами внутреннего строения звезды и получаемой из наблюдений скорости вращения звезды: число Россби определяет степень взаимодействия конвекции и вращения и, следовательно, эффективность генерации звездного магнитного поля. То обстоятельство, что длительность цикла активности коррелирует в конечном счете с эффективностью генерации магнитного поля, служит аргументом в пользу представлений о внутренних причинах цикличности в активности звезд и Солнца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в ходе астрофизических исследований последних десятилетий на звездах были обнаружены многочисленные свидетельства процессов, свойственных солнечной активности. И такие свидетельства были найдены не только на звездах солнечного типа, но в гораздо более широком классе объектов: на звездах с массами от вдвое больших до в 20 раз меньших, чем масса Солнца, т. е. на звездах, во внутреннем строении которых конвективный перенос энергии играет заметную, существенную или определяющую роль. Эффекты наблюдательной селекции приводят к такому положению, что различные проявления солнечной активности с большей или меньшей вероятностью регистрируются на звездах разных масс. Так, на звездах солнечного типа и более массивных (на бело-желтых и желтых карликах) легче всего обнаружить хромосферы и, следовательно, определяемые по этой атмосферной структуре неоднородности поверхности звезды, период ее осевого вращения, цикличность активности. На звездах с массами, не-

сколькими меньшими солнечной, — на оранжевых карликах — удобнее всего обнаружить фотометрические эффекты пятен; на звездах самых малых масс — красных карликах — наиболее эффективны поиски скоротечных вспышек. Тепловое излучение звездных корон обнаруживается прежде всего у близких звезд независимо от их масс и светимости в оптическом диапазоне длин волн. В связи с такой избирательностью на многих звездах нам известны лишь одно-два явления из полного набора, рассмотренного в предыдущих разделах брошюры. Но нет сомнений, что в действительности имеет место именно полный набор. И эта уверенность уже неоднократно подтверждалась экспериментом: многие красные и оранжевые карлики — после того как в их спектре были обнаружены свойственные мощным хромосферам интенсивные эмиссионные линии водорода — были подвергнуты фотоэлектрическому патрулированию блеска и на всех них без исключения были зарегистрированы скоротечные вспышки; точно так же вспышки были обнаружены в ходе независимых наблюдений норвежским исследователем Б. Петтерсеном и крымским астрономом И. В. Ильиным на звезде BD+26°730 после того, как на ней был найден максимальный эффект звездных пятен.

Если на первых порах исследователи переменных звезд использовали известные явления активности Солнца в качестве ориентиров при интерпретации открываемых явлений на звездах, то к настоящему времени изучение солнечной активности в мире звезд превратилось в улицу с двухсторонним движением. Действительно, в ходе исследований звезд были зарегистрированы не только явления, весьма сходные с солнечными, но и гораздо более мощные и более скоротечные вспышки, чем на Солнце, обнаружены темные пятна, занимающие гораздо большую часть фотосферы, чем солнечные пятна, найдены более мощные хромосферы и короны, открыты циклы активности как сходные по продолжительности с солнечным, так и в несколько раз более длительные. Наконец обнаружены определенные зависимости между некоторыми общими параметрами звезд и их активностью, найдены четкие эволюционные эффекты в уровне активности, различия в темпах векового затухания активности одиночных звезд и компонентов двойных систем. Все это дает основание для более

общего — солнечно-звездного — подхода к обсуждаемым явлениям. И можем ли мы теперь в рамках такого подхода сформулировать определение рассматриваемой активности небесных тел не перечислением, как это было сделано во Введении, а в терминах физической науки?

В настоящее время нет сомнений в том, что вся активность Солнца и звезд обусловлена их магнетизмом, процессами формирования, развития и распада локальных магнитных структур во внешних слоях и в атмосферах этих объектов. Это утверждение можно рассматривать и как общее определение активности, и как первый шаг «от чувственного восприятия к теоретическому мышлению».

Как известно, основы теории звездного магнетизма — магнитная гидродинамика — были заложены выдающимся шведским ученым Х. Альвеном в 40-е годы. За прошедшие десятилетия в рамках этой теории найдены решения многих задач физики Солнца, межзвездной среды, геофизики; магнитная гидродинамика широко используется в лабораторных исследованиях плазмы, и существуют перспективы создания мощных магнитогидродинамических генераторов, в которых тепловая энергия будет непосредственно и весьма эффективно преобразовываться в электрическую. Тем не менее теория звездного магнетизма еще далека от полноты и завершенности. Фрагментарность этой теории обнаруживается не только при анализе столь различных по структуре и эволюционному состоянию астрономических объектов, как Солнце, магнитные звезды, поляры, пульсары, но даже при рассмотрении на Солнце сильных локальных магнитных полей пятен и протяженных слабых полей: соответствующие теоретические модели строятся практически независимо друг от друга.

Наименее разработан вопрос о генезисе локальных магнитных полей. На Солнце и на сходных с ним звездах такие магнитные поля во многих отношениях достаточно успешно описываются теорией динамо, первый, чисто качественный вариант которой был предложен американским астрономом Х. Бэббаком в начале 60-х годов. Смысл динамо-теории состоит в построении конкретной модели взаимодействия дифференциального вращения звезды и конвекции, приводящего к появлению локальных магнитных структур. Точнее говоря, эта

модель описывает не генерацию поля «на пустом месте», а поддержание динамического равновесия системы локальных магнитных структур, подверженных диссипации, на достаточно продолжительном интервале. Однако даже в самом развитом варианте динамо-теория не может предсказать, какие, скажем, характерные линейные масштабы магнитных структур возникнут во вновь образовавшейся звезде определенной массы и, естественно, не применима к звездам заметно больших масс, чем у Солнца, у которых нет конвективных подфотосферных зон, но среди которых встречаются объекты с локальными магнитными структурами весьма высокой напряженности. Не дает ответа эта теория и на вопрос о том, всегда ли должны существовать циклы активности или возможны и аperiodические режимы динамо.

По-видимому, решение проблемы формирования локальных магнитных структур требует нового подхода к внутреннему строению звезд. Действительно, в рамках традиционного подхода одиночная невращающаяся звезда, стационарное состояние которой обусловлено равновесием силы тяжести и газового давления и давления излучения, должна быть сферически симметрична и однородна как на уровне фотосферы, так и на любой концентрической сферической поверхности в глубине. Вращение звезды должно привести к меридиальной циркуляции — к регулярному отклонению от сферической симметрии; к сходным отклонениям от сферичности должны приводить также приливные взаимодействия с не слишком близким компонентом в двойной системе. Иная ситуация предсказывается термодинамикой открытых систем.

Как известно, главный вывод такой термодинамики состоит в том, что открытая нелинейная система с метастабильными состояниями должна находиться в одном из таких состояний с высокой степенью вероятности. Очевидна приложимость этого общего заключения к звездам. Действительно, открытость этих систем видна невооруженным глазом. Нелинейность уравнений внутреннего строения имеет место даже в простейшей статической модели и резко возрастает при включении в рассмотрение вращения, конвекции и гравитационного взаимодействия в двойной системе. Наконец, предположение о существовании в массивном газовом шар

метастабильных энергетических состояний весьма вероятно: если даже в лаборатории — даже на кухне! — при нагреве плоского слоя жидкости в ней происходит самоорганизация и возникают кинематические ячейки Бенара, то тем более такой эффект можно ожидать в звездах, где потоки проходящей энергии гораздо мощнее, диапазон значений физических параметров гораздо шире и система существенно трехмерна. Далее, естественно ожидать, что кинематические структуры в неоднородном плазменном теле должны вызывать электрические токи и, следовательно, локальные магнитные структуры. Таким образом, самоорганизация внутренних областей звезд как открытых нелинейных систем может быть общей и конечной причиной звездного магнетизма вообще и активности Солнца и звезд в частности.

ЛИТЕРАТУРА

Бочкарев Н. Г. Магнитные поля в космосе. — М.: Наука, 1985.

Витинский Ю. И. Солнечная активность. — М.: Наука, 1983.

Гершберг Р. Е. Вспыхивающие звезды малых масс. — М.: Наука, 1978.

Кацова М. М., Лившиц М. А. Активность молодых звезд. — М.: Знание, 1986.

Северный А. Б., Степанян Н. Н. Солнечные вспышки. — М.: Знание, 1976.

Физика космоса / Под ред. Р. А. Сюняева. — М.: Советская энциклопедия, 1986.

Научно-популярное издание

Гершберг Рояльд Евгеньевич

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В МИРЕ ЗВЕЗД

Гл. отраслевой редактор Л. А. Ерлыкин. Редактор И. Г. Вирко. Мл. редактор С. С. Патрикеева. Обложка художника К. С. Гуреева. Худож. редактор К. А. Вечерин. Техн. редактор Н. В. Клецкая. Корректор В. И. Гуляева.

ИБ № 10581

Сдано в набор 17.04.90. Подписано к печати 19.07.90. Т-09180. Формат бумаги 84×108¹/₂. Бумага тип. № 127. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,87. Уч.-изд. л. 3,45. Тираж 28 278 экз. Заказ 708. Цена 15 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 904207. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Уч 23-8

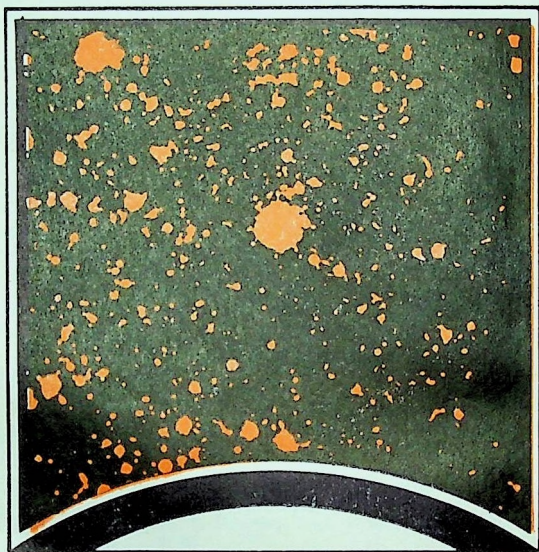
Дорогой читатель!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку.

Подписка на брошюры издательства «Знание» ежеквартальная, принимается в любом отделении «Союзпечати».

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в «Каталоге советских газет и журналов» в разделе «Центральные журналы», рубрика «Брошюры издательства «Знание»

Цена подписки на год 1 руб. 80 коп.



Наш адрес:
СССР,
Москва,
Центр,
проезд Серова, 4