

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1986/8

**М.М. Кацова
М.А. Лившиц
АКТИВНОСТЬ
МОЛОДЫХ ЗВЕЗД**



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

8/1986

Издается ежемесячно с 1971 г.

М. М. Кацова,

М. А. Лившиц,

кандидаты физико-математических наук

АКТИВНОСТЬ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД

в приложении этого номера:

НОВОСТИ АСТРОНОМИИ



Издательство «Знание» Москва 1986

На последней странице обложки представлена фотография активной области на Солнце, полученная 4 июля 1974 г. на обсерватории Дебрецен (ВНР). В полутени пятна видна белая вспышка.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Коротко о физике Солнца	7
Прогнозы, прогнозы...	18
Рентгеновское излучение звездных корон	22
Активный — значит молодой	28
Хромосфера и переход к короне	37
Вспышки на звездах	48
Заключение	58
Рекомендуемая литература	60
НОВОСТИ АСТРОНОМИИ	61

Кацова М. М., Лившиц М. А.

К 30 Активность молодых звезд.—М.: Знание, 1986.— 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 8).

11 к.

Последнее десятилетие ознаменовалось многими астрономическими открытиями, среди которых немаловажное значение имеет обнаружение активности ряда звезд, по своим масштабам превосходящей солнечную активность. В брошюре приводятся различные сведения о звездной активности, как правило, связанной с молодостью звезд и поэтому позволяющей узнать больше о солнечной активности не только в современную эпоху, но и в далеком прошлом.

Брошюра рассчитана на всех, интересующихся современными проблемами астрофизики.

1705010000

ББК 22.6

ВВЕДЕНИЕ

Астрофизикам второй половины XX в. необычайно повезло. Технический прогресс позволил расширить то окно, через которое человечество и астрофизики в первую очередь смотрят на окружающий их мир. Каждые два-три года появлялись неожиданные результаты наблюдений в радио-, инфракрасном, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, они будоражили воображение ученых, не укладываясь в рамки сложившихся представлений. Проходило несколько лет, прежде чем стихали горячие споры на страницах научных журналов, семинарах и просто там, где встречалось больше двух астрофизиков.

С легкой руки известного советского астрофизика И. С. Шкловского этот период времени (60—70-е годы) принято характеризовать как вторую революцию в астрономии, изменившую лицо современной астрофизики. Дело не только в том, что были открыты такие новые явления и объекты, как реликтовое излучение, рентгеновские источники и аккреция, барстеры, квазары, пульсары и нейтронные звезды. «Астрономия, — по выражению И. С. Шкловского, — стала насквозь эволюционной: стало понятным место большинства астрофизических объектов в общей картине эволюционирующей Вселенной».

Основные исследования, определившие лицо произошедшей революции, хорошо отражены в популярной литературе. Однако ряд проблем обойдены вниманием, и, в частности, это случилось с темой нашей брошюры. Поговорим сначала о звездах вообще. Свет, идущий к нам от звезд, исходит из весьма тонкой оболочки звездной атмосферы, называемой «сферой света» или фотосферой. Излучение фотосферы беспрепятственно прохо-

дит через лежащие выше слои — внешнюю атмосферу звезды, и эти слои, практически никак не проявляющие себя в оптическом спектре, долгое время оставались неисследованными. Лишь с внешними слоями атмосферы одной звезды мы знакомы со школьной скамьи. Это, конечно, Солнце. Во время коротких моментов полных солнечных затмений фотосферное излучение экранируется Луной и появляется серебристое свечение солнечной короны.

Внешние слои солнечной атмосферы изучены весьма подробно. И как только появилась техническая возможность изучать внешние атмосферы других звезд, возникла задача по проверке одной из существовавших рабочих гипотез: «У всех ли звезд внешние атмосферы устроены по единственно известному нам образцу?» Очень скоро, однако, оказалось, что изучение вместо одного объекта примерно сотни ему подобных позволило решить не только эту узкую задачу, но и продвинуться в понимании гораздо более общих астрофизических проблем.

За последнее десятилетие наблюдалось излучение внешних атмосфер почти у 200 звезд. Температура плазмы в этих слоях, как и на Солнце, заключена в пределах от 10^4 до 10^6 К, и поэтому основное излучение здесь сосредоточено в коротковолновом и рентгеновском диапазонах спектра. Земная атмосфера не позволяет регистрировать излучение в этих диапазонах на поверхности Земли, и поэтому большинство наблюдений этого излучения, представляющих собой основу дальнейшего изложения, было проведено с помощью аппаратуры, размещенной на спутниках и ракетах. Разумеется, в первых таких спутниковых и ракетных экспериментах исследовались либо наиболее яркие, либо ближайшие объекты, легко доступные приборам, поднимаемым на большие высоты.

В настоящее время собрано достаточное количество астрофизических данных, содержащих потоки излучения и спектры звезд в коротковолновом и рентгеновском диапазонах. Если очень приблизительно оценить содержащуюся в них информацию, то только около 10% ее было очевидной, т. е. ожидаемой на основе предыдущих исследований, и ученым чуть-чуть не хватило фантазии для предсказания новых эффектов, выяснившихся по ходу дела.

Что же оказалось неожиданным?

Были обнаружены внешние атмосферы у звезд, более горячих, чем Солнце, а этого согласно теоретическим воззрениям не должно было бы быть. Выяснилось, что их природа весьма необычна: это истечение газа с очень высокими скоростями, которое возникает, по-видимому, под действием давления излучения горячих звезд на частицы внешних слоев атмосфер.

Подробно исследовались внешние слои атмосфер массивных холодных звезд-гигантов и сверхгигантов. Очень слабый нагрев газа в этих слоях при малой силе тяжести на этих звездах, в десятки и сотни раз превосходящих Солнце по своим размерам, обуславливает довольно медленное истечение всей звездной атмосферы наружу. Эти расширяющиеся оболочки в несколько раз больше фотосфер звезд, и их разреженный газ нагревается в истекающих потоках до температур 10^4 — 10^5 К. Наблюдаемое в настоящее время его излучение в коротковолновом диапазоне и послужило источником информации об этих расширяющихся атмосферах.

Наиболее интересные результаты получены для ряда звезд-карликов, к которым, собственно говоря, принадлежит и Солнце. Оказалось, что на некоторых звездах, имеющих массу, близкую или несколько меньшую солнечной (для краткости будем их называть звездами типа Солнца), явления активности необычайно мощны и охватывают не малую долю поверхности, а практически всю звезду. Эти явления связаны с возникновением, выходом на поверхность, развитием и исчезновением магнитных полей.

Наиболее сильно явления активности выражены именно в разреженных внешних слоях, т. е. во внешней атмосфере звезд типа Солнца. Поэтому изучение звездной активности и внешних атмосфер оказалось пересекающимся, тесно связанным друг с другом. В частности, это относится и к обнаруженному новому классу объектов, наблюдаемых в рентгеновском диапазоне, — двойным системам типа RS CVn, один или оба компонента которых обладают активными внешними атмосферами.

Исследования, о которых пойдет речь, начались с более глубокого изучения физики Солнца, с поисков явлений, известных специалистам-солнечникам, на разных похожих на Солнце звездах. Так, на звездах обнаружилась почти полная номенклатура подобных явлений, в

том числе даже и недавно найденные на Солнце. Однако все эти исследования бумерангом вернулись к Солнцу. Некоторые гипотезы, столь привычные для гелиофизики, не выдержали проверки на сотне примеров и канули в Лету. Другие же остались справедливыми и вопреки ожиданиям оказались широко распространенными в мире звезд. С этим связан прогресс в наших знаниях о физике Солнца; например, неожиданно изменились наши представления о механизмах нагрева солнечной короны.

Далее мы подробнее рассмотрим конкретные новые открытия, появившиеся проблемы и их решения, но об одном — основном — из этих открытий нельзя не сказать уже сейчас. Обладателями активных внешних атмосфер оказались звезды, почти ничем не отличающиеся от других звезд малых масс (типа Солнца). Решение загадки пришло с необычной для исследователей, но с житейски такой понятной стороны: «активный» — просто значит «молодой»!

В последнее время, в основном благодаря успехам радиоастрономии, удалось выявить очаги звездообразования — протозвезды, а из классических, оптических исследований нам многое сейчас известно о мире звезд, имеющих, например, возраст несколько миллиардов лет (для звезд небольшой массы). Новая же, т. е. обсуждаемая здесь информация, касается промежуточной стадии — молодости звезд с возрастом свыше 1 млн. лет. Иначе говоря, теперь получены сведения о недостающем звене, и уже ясен (хотя бы в общих чертах) весь эволюционный путь звезд от рождения до их смерти.

Важно подчеркнуть, что все это касается не только теоретических расчетов, каждая теоретическая стадия эволюции уже проверяется на основе астрофизических наблюдений. Ну а применительно к Солнцу предоставилась уникальная возможность заглянуть в его прошлое и выяснить, каковы были активность и другие его свойства в тот момент, например, когда планеты еще только зарождались.

Таким образом, речь дальше пойдет о молодости звезд — очень интересном и активном периоде их жизни. А поскольку звездный магнетизм играет в эту эпоху очень важную роль, то вольно или невольно будут затрагиваться и проблемы, касающиеся его природы.

КОРОТКО О ФИЗИКЕ СОЛНЦА

**хромосфера, арочная структура короны,
локальные магнитные поля и солнечная активность**

Для понимания дальнейшего изложения необходимо хотя бы немного познакомиться с физикой процессов, происходящих в солнечной атмосфере. Чтобы не прибегать каждый раз к разъяснениям по различным проблемам, рассмотрим здесь строение атмосферы и различные проявления солнечной активности. Больше внимание, естественно, уделим тем вопросам физики Солнца, которые используются (или начинают использоваться) для истолкования явлений, происходящих на звездах, при объяснении активности в их внешних атмосферах.

В центральных частях Солнца в результате ядерных реакций превращения водорода в гелий (ядерного горения водорода) выделяется громадная энергия, которую уносят фотоны жесткого электромагнитного излучения. Они путешествуют из центра наружу, многократно рассеиваясь, и примерно за 1 млн. лет достигают расстояния около $0,8 R_c$ (где R_c — радиус Солнца). Дальнейшему же их продвижению будет мешать то, что вследствие падения температуры полная ионизация водорода (основного элемента Вселенной и Солнца тоже) сменяется частичной, а такой газ сильно непрозрачен для фотонов, переносящих основную энергию.

Поглощение фотонов приводит к нагреву газа, и поэтому в вышележащих слоях развивается система конвективных движений, т. е. перемещения вещества вдоль радиуса Солнца. Причины появления конвекции здесь те же, что и при появлении подобных движений в поставленной на плиту кастрюле с жидкой рисовой кашей. Правда, имеются и некоторые особенности, присущие развитию явлений в газах. Во всяком случае, начиная с расстояния около $0,8 R_c$ от центра и до почти самой поверхности Солнца энергия, производимая ядерным горением, переносится движущимися массами газа (явление солнечной грануляции и есть отражение этой конвекции).

В поверхностных слоях фотоны уже могут уносить энергию прочь от звезды. Эти слои и есть наблюдаемая фотосфера. Она излучает основную энергию в оптическом и так называемом ближнем инфракрасном ($0,74—2,5$ мкм) диапазонах. Спектр излучения является непре-

рванным (без спектральных линий) и аналогичен спектру излучения тела, нагретого до определенной температуры. Поэтому распределение энергии в непрерывном спектре Солнца близко к тому, которое наблюдается в спектре абсолютно черного тела.

Если приравнять поток излучения с единичной площади поверхности Солнца σT^4 (что характерно для излучения абсолютно черного тела), то этим можно определить так называемую эффективную температуру $T_{\text{эф}} \approx 5800$ К, которая близка к реальной температуре тех слоев фотосферы, откуда как раз и выходит наблюдаемое излучение с непрерывным спектром. Во всяком случае, различный цвет звезд на небе — голубой, белый, желтый, красный — связан именно с различной температурой их фотосфер (от 20—30 до 2—3 тыс. К).

В фотосфере при переходе от глубоких слоев к поверхностным температура медленно уменьшается. Однако после достижения минимального значения (4000—4500 К для Солнца) снова начинается рост температуры. Это обстоятельство не может быть связано с нагревом фотосферы, ибо ни одно тело не способно своим излучением нагреть другое до температуры большей, чем его собственная. Поэтому требуется, чтобы существовал некоторый источник нагрева внешних слоев, но его природа, несмотря на усилия нескольких поколений астрономов, так и остается пока невыясненной до конца.

Атмосфера звезд, простирающаяся выше слоя с температурным минимумом, подразделяется на хромосферу и корону. В хромосфере температура медленно растет с увеличением расстояния от поверхности, но не превышает 10 000 К. На Солнце протяженность хромосферы составляет по высоте всего 1500 км, и в отдельных точках атмосферы вещество хромосферы в виде отдельных струй со скоростью 20 км/с вторгается в солнечную корону. Эти струи — хромосферные спикулы — достигают высот 6000 км, а иногда и 10 000 км.

Над хромосферой температура практически скачком переходит к очень высоким значениям и удерживается выше 1 млн. К на всем протяжении короны. Необходимо, правда, подчеркнуть, что корональное вещество чрезвычайно разрежено: если в 1 см³ фотосферы содержится примерно 10^{17} частиц, а в хромосфере — 10^{13} частиц, то на малых высотах в короне имеется всего около

$3 \cdot 10^8$ частиц, и поэтому плотность вещества резко падает с удалением от края солнечного диска.

Напомним, что химический состав и физические условия в атмосферах небесных тел астрономы определяют по спектру излучения этих тел (главным образом по спектральным линиям). Спектр фотосферы содержит около 30 000 темных линий, т. е. линий поглощения различных элементов, а спектр хромосферы с температурой менее 10 000 К — линии излучения водорода (бальмеровская серия в видимой области и лаймановская в далеком ультрафиолетовом диапазоне, 100—200 нм, и т. д.), линии гелия (с длинами волны 587,6 и 1083 нм), ионизованного кальция (линии H и K), ионизованного магния (линии h и k в ближней ультрафиолетовой области — 200—400 нм).

Если заэкранировать излучение фотосферы — во время затмений или при закрытии изображения фотосферы «искусственной» Луной, — то эти линии будут видны как яркие эмиссионные в спектре собственно излучения хромосферы. Самые нижние слои хромосферы можно наблюдать не только вблизи края солнечного диска, но и в проекции на этот диск: для этого при помощи монохроматора или фильтра выделяют в спектре область длин волн, соответствующую какой-либо из линий излучения.

Вещество короны (точнее, электроны) рассеивает солнечный свет. Поэтому когда фотосфера оказывается закрытой Луной (во время затмения), наблюдается свечение около Солнца. Спектр этого свечения, так же как и фотосферы, является непрерывным, но интенсивность этого рассеянного излучения в миллион раз меньше фотосферного из-за разреженности короны. Основная часть излучения газа с температурой 1 млн. К приходится на рентгеновскую область спектра: как излучение с непрерывным спектром, так и излучение в ряде линий многократно ионизованных элементов (железа, кислорода и др.). В оптическом диапазоне это излучение горячей плазмы также представлено несколькими эмиссионными линиями (так называемыми запрещенными), излучаемыми только очень разреженными газами.

Поскольку фотосфера с температурой около 6000 К практически не излучает в рентгеновском диапазоне, снимки Солнца в этих лучах представляют собой фотографии собственно короны Солнца. Прогресс в наших

знаниях о Солнце как раз связан во многом с тем, что рентгеновские наблюдения дали нам возможность изучать корональные образования непосредственно на солнечном диске (а не только на его краю), а также с использованием более простых методов для определения физических условий в этих слоях.

Ионизация газа в фотосфере незначительна. Однако при переходе от фотосферы к более высоким слоям температура вещества становится больше, и, как и в более глубоких слоях, вещество становится все в большей степени ионизованным, т. е. представляет собой плазму. Проводимость (электропроводность) вещества при этом растет, и электромагнитные явления, начиная с соответствующих слоев, определяют структуру и динамику атмосферы.

В основном это связано с тем, что при высокой проводимости космической плазмы магнитные силовые линии сказываются как бы «вмороженными» в плазму, движутся вместе с ней: движения вещества разрешены вдоль силовых линий магнитного поля и затруднены поперек их.

Процессы переноса энергии (например, распространение тепла) также происходят вдоль силовых линий магнитного поля. Причем в конвективной зоне, о которой говорилось раньше, происходит усиление слабых магнитных полей, силовые линии которых образуют отдельные пучки (трубки), «всплывающие» на поверхность. При выходе в фотосферу достаточно сильного вертикального поля тормозятся горизонтальные движения (поперек силовых линий) в конвективных ячейках, и перенос энергии конвекцией здесь уменьшается. В месте выхода большой вертикальной магнитной трубки температура фотосферных слоев падает примерно на 2000 К, поэтому и образуются темные солнечные пятна.

Структура магнитных полей на Солнце весьма сложна. Прежде всего можно выделить «квазидипольное» поле всего Солнца с напряженностью близ полюсов около 1 Э. Знак поля около каждого из полюсов меняется примерно каждые 11 лет, так что Солнце можно определить как магнитопеременную звезду с периодом около 22 лет.

Помимо этого слабого (фонового) поля на гелиоцентрических широтах $\pm 30^\circ$, в так называемой зоне королевских широт, развиваются более сильные локальные

магнитные поля, занимающие области угловым диаметром до около $4'$. Появление этих локальных полей приводит к кардинальным изменениям структуры атмосферы на всех высотах такой активной области, или центра активности. Вид же хромосферы непосредственно над пятном с угловым диаметром около $1'$ напоминает картину расположения опилок на стекле над полюсом магнита. Различные по величине пятна в группе соединяются причудливыми светлыми и темными нитями.

Вся эта картина медленно изменяется, прерываясь, однако, моментами внезапных бурных событий: выбросами облаков плазмы, вспышками. Некоторые наблюдатели навсегда оказываются под впечатлением той неповторимой панорамы явлений, развивающейся на протяжении эволюции каждого индивидуального центра активности и обусловленной влиянием магнитных полей на движения и нагрев хромосферной и корональной плазмы.

В фотосфере активная область проявляется как группа пятен (иногда как изолированное пятно), окруженная волокнами более ярких факелов (см. последнюю страницу обложки). Магнитные поля пятен достигают значений от 1200 Э (в самых малых образованиях — порых) до 4500 Э, и направление силовых линий практически перпендикулярно поверхности Солнца, причем в факелах напряженность магнитного поля на порядок меньше. Излучение же хромосферных слоев в активной области (флоккуле) и в лежащей выше корональной конденсации усиливается в основном за счет увеличения плотности плазмы на соответствующих уровнях внешней атмосферы.

Процесс периодического появления активных областей на диске Солнца и называется циклом активности. Его длительность составляет около 11 лет. Центры активности имеют тенденцию объединяться в комплексы на избранных «активных» гелиоцентрических долготах. В эпоху, близкую к максимуму активности, пятна занимают около 0,0015 миллионных долей полусферы, факелы — примерно вдвое больше, флоккулы не очень малой яркости — до 1% площади полусферы (несколько процентов площади солнечного диска).

Входящие наверх магнитные поля определяют петельную (арочную) структуру внутренних слоев короны. Системы арок отчетливо проявляются на снимках Солн-

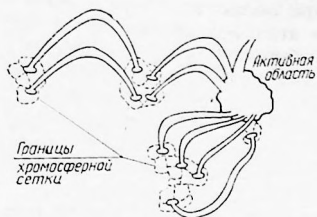


Рис. 1. Схематическое изображение корональных арок, соединяющих «холмы» магнитных полей противоположных полярностей (толщина арок 5—10 тыс. км, длина 10—100 тыс. км). Плотные горячие арки, располагающиеся непосредственно в активной области, здесь не показаны

ца, полученных в рентгеновских лучах. Обычно арки соединяют «холмы» нижележащего магнитного поля противоположной полярности, распространяясь от центра активности и оккупируя в два-три раза большую площадь (рис. 1). Горячие и более плотные арки с температурой вплоть до 10 млн. К лежат в непосредственной близости от группы пятен (между ними, но не входя в тень пятна) и не поднимаются выше высот 20—30 тыс. км.

Самый распространенный тип арок с температурой 2 млн. К и концентрацией частиц около 10^9 см^{-3} располагается на периферии центра активности. Иногда активные области соединяются арками, простирающимися вплоть до $1 R_c$ и даже пересекающими экватор. Существует предположение, что вся внутренняя корона (слои на высотах до $\frac{1}{4} R_c$ от края диска), т. е. не только активные, но и спокойные области, представляет собой совокупность арок.

Вопрос о том, почему основная часть корональной плазмы оказывается заключенной в отдельные арочные образования, так и не нашел пока своего решения. Сейчас, пожалуй, ясен лишь механизм поступления вещества в арку. Действительно, представим себе, что в корону вышло нижележащее магнитное поле, и его силовые линии заполнили все пространство над этой областью. Если же теперь в вершине какой-либо выделенной трубки силовых линий случайно увеличится нагрев, то в оба основания петли вдоль силовых линий будет распространяться тепло, которое испаряет газ из нижележащих плотных слоев.

В устанавливаемом стационарном состоянии нагрев уравнивается излучением, уходящим из корональной арки наружу, и потоком тепла вниз. Трубка с

большим по каким-либо причинам уровнем нагрева оказывается более плотной из-за описанного выше процесса испарения и начинает выделяться на общем фоне рентгеновского излучения. Этот процесс является основным для образования корональных конденсаций — верхней, корональной части центров активности.

Рентгеновские наблюдения показали, что физические параметры — давление (p), температура (T) и длина петель (L) фактически всегда связаны так называемым соотношением подобия: $T \sim (pL)^{1/3}$. Расчеты показывают, что это соотношение вполне согласуется с рассмотренными представлениями об энергетическом балансе в арке. Подробному же обсуждению этого соотношения посвящено поистине бесчисленное количество теоретических работ.

Арочная структура является характерной особенностью именно внутренней короны, простирающейся от поверхности в высоту всего на 0,2—0,3 R_c (140—210 тыс. км). Эта высота примерно равна протяженности большой активной области на поверхности Солнца. При удалении от источника магнитного поля вверх влияние поля и усиленного нагрева уменьшается, и плазма оказывается подвержена влиянию в основном двух сил: давления горячего газа и тяготения.

Аналогично тому, как это свойственно земной атмосфере, в короне устанавливается так называемое гидростатическое равновесие: движения здесь практически отсутствуют, а плотность вещества монотонно падает по мере продвижения наружу. Однако при некотором удалении от Солнца (на несколько его радиусов) сила тяжести значительно уменьшается. Давление горячего газа, уже не удерживаемого силой тяжести, стремится увеличить объем, занимаемый этим газом, т. е. приводит к расширению короны. Поэтому постепенно формируется направленный наружу поток плазмы. Это и есть солнечный ветер, который с 1960 г. непосредственно регистрируется в межпланетном пространстве.

Причудливый вид солнечной короны, который наблюдается во время полной фазы затмений (рис. 2), объясняется взаимодействием магнитных полей и потоков высокопроводящей плазмы. Очевидно, например, что арки образуются там, где есть два магнитных полюса, т. е. где силовые линии являются замкнутыми. Магнитное поле над этими областями часто препятствует фор-

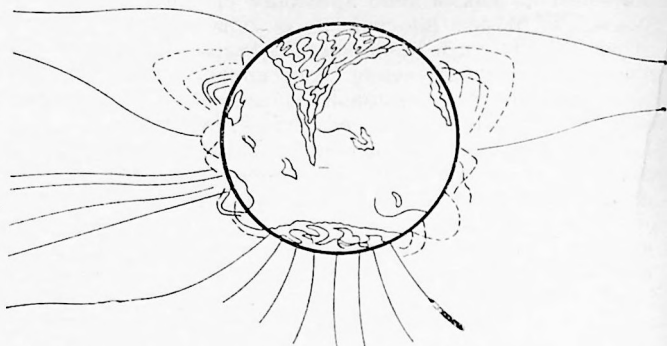


Рис. 2. Схематическое изображение солнечной короны в конце июня 1973 г. На диске видны корональная дыра, простирающаяся от северного полюса через весь диск, и арки, заполненные плазмой с температурой 2 млн. К. Сплошными линиями показаны такие же арки за краем диска, а пунктиром — более холодные арки. Видны также уходящие на большие расстояния корональные лучи белой короны

мированию потока плазмы, истекающего наружу, т. е. поперек силовых линий. Однако в обширных областях короны силовые линии магнитного поля близ Солнца могут быть разомкнутыми, а вернее, они замыкаются в далеких просторах межпланетного пространства.

Эти области довольно неожиданно были обнаружены на рентгеновских изображениях Солнца как протяженные темные участки — корональные дыры. Последнее объясняется просто. Ведь различие между областями с замкнутыми и открытыми силовыми линиями прежде всего состоит в том, что из последних истечение типа солнечного ветра может беспрепятственно выходить наружу. Отток энергии (из-за ухода частиц) наружу приводит к уменьшению температуры, а кроме того, концентрации частиц в корональных дырах также оказываются ниже средних. Все это и приводит к понижению яркости таких участков на рентгеновских изображениях Солнца.

Дипольный характер общего магнитного поля Солнца приводит к тому, что вблизи магнитных полюсов, находящихся недалеко от точек пересечения оси враще-



Рис. 3. Распределение межпланетного магнитного поля в меридиональном разрезе. Удаляющаяся от Солнца волнистая линия изображает гофрированный токовый слой (масштаб указан положением Земли)

ния с поверхностью Солнца, почти всегда имеются области с открытой магнитной конфигурацией. Иначе говоря, полярные шапки Солнца — это две корональные дыры. Солнечный ветер «выносит» магнитное поле наружу, и при этом северная полусфера межпланетного пространства оказывается заполненной полем одного знака, а южная — другого (рис. 3).

Такое регулярное распределение межпланетного магнитного поля сохраняется в течение ряда лет. Северный и южный магнитные потоки в Солнечной системе оказываются разделенными поверхностью, по которой течет ток (токовый слой). Вследствие ряда обстоятельств плоская поверхность токового слоя искажается, «гофрируется», а вращение Солнца закручивает силовые линии межпланетного магнитного поля в спираль. Предполагают, что на расстоянии около 100 а. е. солнечный ветер с «вмороженным» магнитным полем взаимодействует с межзвездной средой, образуя ударную волну.

Пока речь здесь шла о так называемых квазистационарных явлениях в солнечной атмосфере. Наблюдатель изучает их развитие при помощи наземного инструмента (в среднем по 12 ч в сутки летом, если позволяет погода) или телескопа, установленного на борту спутника. Причем в течение многих часов на поверхности Солнца либо вовсе ничего не меняется, либо эти изменения происходят, но крайне медленно. Постоянно наблюдаются лишь причудливые движения в холодных облаках — протуберанцах, плавающих в короне. Изменение их подчас необычной формы вносит разнообразие в эту статическую картину.

Однако на Солнце могут быстро, за секунды и минуты начать вдруг развиваться процессы, которые зачастую охватывают всю активную область как по площади (около 200 000 км²), так и по высоте (от 200 000 км

до десятков солнечных радиусов). В некоторых случаях такие процессы, начавшись в одном центре активности, могут продолжиться в другом. И наблюдателю приходится в десятки раз увеличивать частоту фотосъемки, чтобы уследить за происходящими изменениями.

Наблюдаемые с помощью оптических инструментов нестационарные процессы развиваются в хромосфере, или, как говорят, происходят на уровне хромосферы. Их можно наблюдать в лучах одной из линий водорода или ионизованного кальция, излучаемых в этих слоях (здесь эти слои уже непрозрачны в центрах указанных линий и становятся наблюдаемыми). В частности, в лучах первой линии из бальмеровской серии водорода $H\alpha$ иногда (весьма редко) одновременно проявляются несколько типов нестационарных процессов.

Развитие большой вспышки на Солнце согласно наблюдениям в хромосферной линии $H\alpha$ начинается с появления нескольких ярких точек в центре активности. Эти точки располагаются вблизи так называемой нейтральной линии, которая разделяет области с противоположной полярностью магнитного поля и проходит между пятнами с полями противоположной полярности. В некоторых больших вспышках эти точки соединяются по каждую из сторон нейтральной линии в длинные волокна, которые со временем резко расходятся. От начала вспышки до ее максимума, когда яркие волокна расходятся, проходит всего несколько минут. Затем яркие волокна большой вспышки могут «гореть», постепенно затухая, от 1 до 10 ч (см. раздел о вспышках).

Сложная структура магнитных полей в центрах активности приводит к чрезвычайному разнообразию как форм рассматриваемых $H\alpha$ -вспышек, так и особенностей их развития во времени. Очень долго это не позволяло делать какие-либо обобщения и разобраться хоть в каких-то сторонах этого явления. Определенный прогресс в изучении вспышек был достигнут лишь благодаря внеатмосферным рентгеновским исследованиям, когда стало возможным проследивать развитие вспышек не только на уровне хромосферы. Оказалось, что основной очаг энерговыделения вспышки сосредоточен в самых верхних слоях хромосферы или в нижней короне. В этом «котле» по причинам, пока остающимся загадочными, происходят интенсивный нагрев газа и ускорение частиц, причем настолько эффективно, что частицы уско-

ряются порою до релятивистских энергий, протекают ядерные реакции «при пролете» частиц, возникает излучение в гамма-диапазоне и в линиях, соответствующих возбужденному состоянию атомных ядер.

То, что наблюдается при этом в хромосфере, является лишь «откликом» нижележащих плотных слоев атмосферы на произошедший наверху «взрыв». В частности, два волокна — это просто основания аркады петель, заполненной горячей плазмой и составляющей своеобразный коридор над нейтральной линией магнитного поля. (Подробнее об этом будет сказано позже, в разделе, посвященном вспышкам.)

Отметим здесь лишь то, что излучение обычной солнечной вспышки представлено в оптическом диапазоне линиями водорода, гелия и ионизованного кальция. Излучение в этих линиях является типичным для хромосферных слоев. Излучение в линиях более тяжелых элементов (металлов), генерируемое нижними слоями хромосферы, наблюдается лишь иногда в мощных вспышках. И очень редко происходит усиление еще и оптического излучения с непрерывным спектром, возникающего вследствие того, что при вспышках образуются области излучения с плотностью вещества, характерной для фотосферы.

С 1859 г., когда впервые наблюдалось событие с непрерывным оптическим спектром — так называемая белая вспышка, зарегистрировано всего 50 таких явлений. Белая вспышка характеризуется появлением одного или нескольких ядер в окрестностях пятна или даже в его полутени. Их угловые размеры составляют 1—3" (в то время как площадь, охватываемая H α -вспышкой, — в десятки раз больше). Можно сказать, что возникновение белого свечения во время вспышки означает наибольшее по мощности энерговыделение при происходящем процессе. С момента появления ядер до максимума вспышки проходит несколько минут. Подобные явления, как мы увидим дальше, развиваются и на поверхности других звезд.

С помощью работающих в космосе (до нескольких месяцев) приборов, в которых тщательно экранировалось яркое излучение фотосферы, были получены фотографии солнечной короны до весьма больших расстояний от поверхности Солнца — 5—20 R $_{\odot}$. На большинстве снимков лучистая структура внешних слоев короны оста-

валась неизменной. Однако иногда, в годы высокой активности, примерно один раз в сутки наблюдались гигантские выбросы, заполняющие в короне и межпланетном пространстве сектор с раствором до 40° . Эти явления получили название корональных транзиев.

Обычно скорость большого выброса быстро возрастает от 100 до 500 км/с на интервале расстояний от поверхности до $2 R_c$, а далее остается примерно постоянной. Около двух третей всех корональных транзиев связано с появлением гигантских корональных петель. Причем выбрасывается вещество либо самой петли, либо всей области, ограниченной системой петель. Остальная одна треть корональных транзиев возникает вследствие серьезной перестройки структуры короны с движениями вещества вдоль лучей. Большой транзент уносит в межпланетное пространство до 0,1 массы всей солнечной короны и обладает энергией около 10^{32} эрг (такая же энергия характерна для наиболее мощных солнечных вспышек). Самая большая ГЭС на Земле — Саяно-Шушенская — для выработки такой энергии должна была бы работать 500 млн. лет.

Происхождение этих явлений связано с перестройкой магнитных полей во всем объеме корональной конденсации и с формированием движущейся наружу ударной волны. Детали этих процессов в настоящее время интенсивно изучаются. Причем происходящие на Солнце явления начинают наблюдаться сейчас и во внешних атмосферах других звезд.

ПРОГНОЗЫ, ПРОГНОЗЫ...

переход от Солнца к звездам, конвекция
и нагрев плазмы во внешней атмосфере,
звездные ветры и охлаждение корон

Нам вспоминается середина 60-х годов, когда космическая техника делала первые шаги и, казалось, что вот-вот появятся первые измерения излучения звездных корон. Все окунулись в работу по прогнозированию потоков излучения и ожидаемых эффектов. Постановка задачи была простой: есть объект — Солнце, о котором «известно все»; строится по аналогии модель внешней атмосферы звезды и т. д. Необходимо было лишь учесть некоторые отличия конкретной звезды от Солнца. Уже в начале нашего века важнейшие характеристики звезд

были выяснены. Основной из них является масса звезды, заключенная в пределах от 0,1 до 100 M_{\odot} (где M_{\odot} — масса Солнца). Именно масса в основном определяет полное количество энергии, излучаемое звездной фотосферой, а также светимость звезды. В то же время размеры звезды определяются не только массой, но зависят еще и от конкретного типа звезды.

Наибольшее число звезд располагается на диаграмме спектр — светимость (диаграмме Герцшпрунга — Рессела) на кривой, называемой главной последовательностью. Спектр излучения звезд фактически определяется температурой их поверхности: горячие звезды спектральных классов O, B и A, традиционно называемых ранними, имеют эффективные температуры поверхности от порядка 40 тыс. К (класс O) до 10 тыс. К (класс A), тогда как звезды поздних спектральных классов F, G, K и M являются более холодными. Соответственно изменяются и цвета звезд — от голубого к белому и от желтого к красному.

Радиусы звезд главной последовательности лежат в интервале от 20 R_{\odot} для звезд наиболее ранних спектральных классов до около 0,1 R_{\odot} для звезд самых поздних спектральных классов. Однако радиусы небольшого числа звезд поздних классов достигают 10—100 R_{\odot} (так называемые гиганты), а иногда и 1000 R_{\odot} (сверхгиганты). На диаграмме спектр — светимость они лежат выше главной последовательности, в области больших светимостей. Громадные светимости этих звезд не дают им потеряться в просторах Вселенной, а звездное небо украшают многочисленные представители этого типа звезд: например, к ним относятся Бетельгейзе, Антарес, Арктур — ярчайшие звезды в созвездиях соответственно Ориона, Скорпиона и Волопаса.

Важно здесь отметить, что из-за различий в размерах звезд сила тяжести на поверхности гигантов в десятки раз, а на поверхности сверхгигантов примерно в 1000 раз меньше значения этой величины на поверхности Солнца.

Нагрев внешних слоев солнечной атмосферы можно связать с потоком механической энергии, идущей из верхней части конвективной зоны в подфотосферных слоях. Теоретические расчеты показывали, что такая конвекция близ поверхности может развиваться только у звезд поздних спектральных классов, охватывая об-

ласть до 0,5 радиуса красных карликов (M) и выходя на поверхность у звезд спектрального класса F. Из-за сравнительно больших скоростей конвекции у поверхности звезд класса F ожидалось весьма значительными как поток этой механической энергии, так и их внешние атмосферы. Считалось также, что из-за заметного вращения звезд более ранних классов (O, B, A и F) они вследствие центробежных сил не смогут удерживать сколько-нибудь заметную внешнюю атмосферу.

Предсказание условий во внешних атмосферах звезд основывалось на работе советского астрофизика С. Б. Пикельнера. Им предполагалось, что, подобно условиям и на Солнце, истечение частиц должно «термостатировать» звездную корону, т. е. ограничивать рост ее температуры даже при мощном нагреве. Иначе говоря, более интенсивный нагрев должен увеличивать скорость движения всех частиц газа, и при этом все больше частиц (самые быстрые из них) станут покидать корону звезды. Связанные с этим потери энергии как раз и не позволяют температуре короны подниматься выше определенной величины.

Фактически предположение С. Б. Пикельнера означало, что отношение потенциальной к кинетической энергии газа постоянно как в случае солнечной, так и звездной корон. Остается одинаковым и распределение плотностей в коронах Солнца и звезд, определяемое гидростатическим равновесием, хотя плотности вещества в самой короне могли различаться в широких пределах. Максимальная же температура короны звезды* определяется по простой формуле:

$$T = T_{\odot} \frac{M/M_{\odot}}{R/R_{\odot}},$$

где M и R — масса и радиус звезды.

Первое предсказание теории сводилось к тому, что у гигантов поздних спектральных классов и особенно у сверхгигантов горячие короны должны отсутствовать. Действительно, для этих звезд отношение M/R мало, ибо массы не превышают $10 M_{\odot}$ для большинства рассматриваемых объектов, а радиусы массивных звезд очень велики. Указанная формула для T поэтому приводит к низким значениям температур корон гигантов и сверхгигантов.

Плотность внешних атмосфер можно также связать

с потоком механической энергии из конвективной зоны. Наибольшие скорости конвекции в поверхностных слоях ожидалось согласно теории конвекции в звездах спектрального класса F5—G0, и соответственно внешние атмосферы звезд таких спектральных классов (как гигантов, так и карликов) должны быть наиболее мощными и плотными.

На основании всех этих представлений, фактически полученных по образу и подобию солнечной атмосферы, были построены модели внешних атмосфер звезд и рассчитаны потоки их излучения в коротковолновом и рентгеновском диапазонах (отметим, что значению температуры 1 млн. К соответствует энергия фотонов около 0,3 кэВ. Светимость звездных корон, пропорциональная так называемой мере эмиссии $EM = n_e^2 V$ (где n_e — электронная плотность, V — объем), оценивалась значением порядка 10^{30} эрг/с в диапазоне энергий $\geq 0,3$ кэВ. Этими вопросами занимались несколько ученых, прежде всего К. де Ягер в Нидерландах и Г. М. Никольский у нас в стране.

Надо сказать, что все, о чем говорилось в этом разделе, наилучшим образом подходило для звезд спектральных классов от F до M. В звездах более ранних спектральных классов конвекция отсутствует, и поэтому неясно было, каков механизм нагрева в их внешних атмосферах. Кроме того, звезды этих ранних классов довольно быстро вращаются, вследствие чего частицы во внешних слоях, не удерживаемые силой тяжести, должны отбрасываться центробежными силами от звезд. Оба этих соображения всегда высказывались как аргументы в пользу отсутствия корон у звезд ранних спектральных классов.

Вспоминая теперь, уже после получения результатов рентгеновских наблюдений корон, горячие споры 60-х годов о внешних атмосферах звезд, надо сказать, что все тогда допускали некоторое увеличение потоков рентгеновского излучения за счет явлений типа солнечной активности в звездах. Правда, реальная солнечная активность вносит весьма мало в обычный (вневышесолнечный) поток излучения Солнца в основном из-за малой относительной площади, занимаемой активными областями.

Таким образом, чуть-чуть не хватило фантазии предположить, что сотни звезд могут быть гораздо активнее

Солнца, а их поверхности почти полностью покрываться активными областями (вместо тысячной доли, занятой активными областями на Солнце). Ну и, конечно, до начала второй научно-технической революции в астрономии как-то не привыкли еще обращаться к соображениям, основанным на эволюции небесных тел. Во всяком случае прогноз относительно рентгеновского излучения звезд оказался не бесполезным, но и не таким удачным, как хотелось бы.

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВЕЗДНЫХ КОРОН

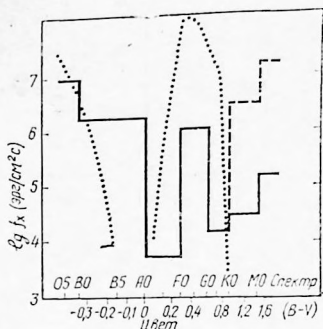
звезды ранних спектральных классов, ожидаемый максимум у F-звезд, два уровня рентгеновского излучения красных карликов, связь с осевым вращением

После регистрации рентгеновского излучения Солнца и обнаружения (18 июня 1962 г.) первого галактического рентгеновского источника (Скорпион X-1) чувствительность бортовой аппаратуры (ракет и спутников) в довольно мягком диапазоне рентгеновского излучения достигла уровня, позволяющего изучать источники светимостью порядка 10^{31} эрг/с, находящихся на расстояниях ближайших звезд (порядка 10 пк). И вот во время ракетного запуска 5 апреля 1974 г. наряду с излучением мощных рентгеновских источников в диапазоне 0,2—1,6 кэВ было зарегистрировано излучение Капеллы¹ — системы из двух гигантов поздних спектральных классов, ничем, кроме своей яркости, не примечательной в оптическом диапазоне.

Мощные галактические рентгеновские источники, которые в основном являются двойными звездными системами, где происходит аккреция (падение) газа на нейтральную звезду или белый карлик, изучались с помощью американского спутника «Ухуру», советских спутников серии «Прогноз», «Астрон», приборов станций «Салют-4 и -7». Однако массовое изучение звездных коронок стало возможным после 13 ноября 1978 г., когда был запущен спутник «ХЕАО-Би», названный орбитальной обсерваторией «Эйнштейн». На борту этой обсерватории были установлены не счетчики с коллиматорами,

¹ Удачное расположение Капеллы на расстоянии всего 13 пк от Земли во многом способствовало ее использованию в качестве своеобразного эталона и помогло решить ряд проблем (о чем будет сказано позже).

Рис. 4. Приведены наблюдаемые потоки рентгеновского излучения близ поверхности звезд в зависимости от показателя цвета и спектра для звезд главной последовательности. Виден максимум рентгеновского излучения для звезд спектрального класса G5 и два уровня (второй показан пунктиром) излучения у звезд класса M. Точечными кривыми представлены теоретические расчеты для звезд классов F и G (прогноз) и более ранних классов



применявшиеся на прежних аппаратах, а телескоп с зеркалом диаметром 60 см.

Последнее сразу позволило получать изображение областей с угловым размером $25'$ и измерять потоки излучения источников в диапазоне 0,2—4,5 кэВ. Эти источники регистрировались отдельно один от другого при удалениях друг от друга на расстояние больше $12''$ — угловое разрешение инструмента. Кроме того, весьма совершенная приемная аппаратура позволяла получать спектр рентгеновских источников в диапазоне 0,1—4,5 кэВ (при угловых размерах $3'$ и при размере поля зрения $75'$). Около 200 источников (5% зарегистрированных) оказались связанными с излучением звездных корон. Необходимо сказать, что немаловажное значение имело и получение спектров звезд в диапазоне 0,16—0,28 кэВ с помощью нидерландского спутника «АНС».

Короны звезд являются самыми слабыми источниками на «рентгеновском» небе (табл. 1). Регистрировались, конечно, либо ближайšie звезды, либо наиболее мощные из них. А до обнаружения излучения корон совсем спокойных звезд (типа Солнца) дело не дошло и по сей день. С другой стороны, наблюдались звезды всех спектральных классов.

Кстати, для звезд главной последовательности вблизи спектрального класса F5 обнаружился предсказанный максимум рентгеновского потока (рис. 4). Кроме того, от ближайших к нам гигантов спектральных классов F и G были зарегистрированы потоки мягкого рентгеновского излучения, а от сверхгигантов поздних клас-

Результаты наблюдений звезд на обсерватории «Эйнштейн» *

Объект	$\lg L_{\gamma}$ эрг/с	$\lg L_{i\gamma}$ эрг/с	$-\lg(L_{\gamma}/L_{\text{сол}})$	$-\lg(L_{\gamma}/L_{\text{сол}})$	$\lg f_{\gamma}$ эрг·(см ² ·с) ⁻¹
ОВ-карлики	31—33	32,5	5 — 8	6	6 — 7,6
А-карлики	26—31	29	4 — 9		3 — 7
F-карлики	28—30	28	4 — 7	5—5,5	5 — 7,5
GK-карлики	26—30	26,5	4,5—7,5	6	4,5—7
Солнечные впадины		29,3	7		8,5
Солнечные активные области		29,3		4,3	6,5
Спокойное Солнце		27,8		6	5
Солнечные корональные дыры		26,8		7	4
М-карлики	26—30		3 — 5	4	4,5—7,5
Вспышки	28—31	34			
О-сверхгиганты	28—30		6 — 7,3		
G-гиганты					
М-сверхгиганты					
α Ori (M2 Ia b)	29,3			8	1
α Sco (M1 Ib)	30,3—31,3		2,5—5		
Системы RS CVn					

* Здесь приняты следующие обозначения: L_{γ} — светимость в рентгеновском диапазоне, даны пределы изменений и средние значения; $L_{\text{сол}}$ — болометрическая светимость (во всех длинах волн); f_{γ} — поток рентгеновского излучения с единичной поверхности.

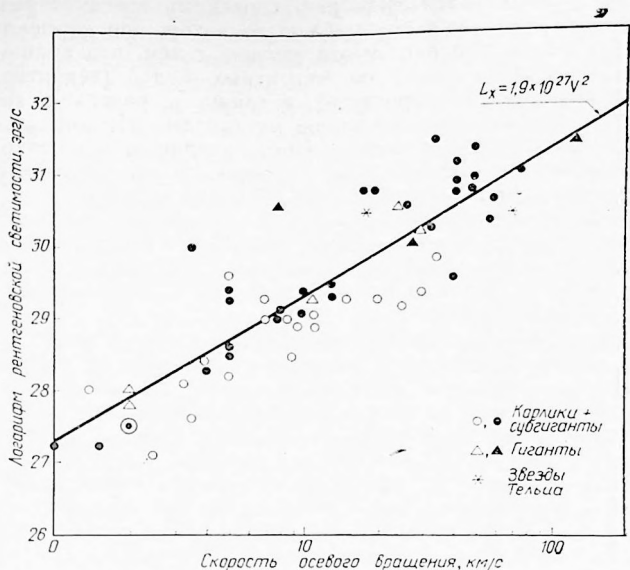


Рис. 5. Зависимость рентгеновской светимости от скорости осевого вращения для звезд поздних спектральных классов

сов (с малым отношением M/R) — нет. Иначе говоря, этими наблюдениями подтверждались представления С. Б. Пикельнера о том, что уменьшение силы тяжести будет приводить к появлению мощного истечения газа наружу, препятствуя существованию горячих корон.

Не обошлось без неожиданностей. При переходе от карликов класса F к карликам класса M ожидалось, что рентгеновские потоки должны резко падать. Однако одни красные карлики действительно были невидимыми на «рентгеновском» небе, зато другие оказались даже, наоборот, хорошо заметны. Стало ясно, что для этого типа звезд, да и вообще для большинства слабых рентгеновских источников существует еще одна причина, не принятая во внимание и приводящая к усилению рентгеновского излучения. Вскоре стало понятно, что еще одним определяющим фактором здесь является достаточно быстрое вращение звезды.

Действительно, между рентгеновскими светимостями и скоростями вращения наблюдается хорошая корреляция (рис. 5). Физически это связано с тем, что вращение приводит к усилению магнитных полей (вероятно, вследствие динамо-процесса), а также к развитию явлений, аналогичных солнечной активности. Но насколько мощны эти процессы — этого не предвидел никто. Оказалось несущественным, вращаются ли маленькие звезды (с радиусами около $0,1 R_{\odot}$) или гиганты (с радиусами около $10 R_{\odot}$) — и у тех и у других все равно всегда формируются мощные короны. С быстрым осевым вращением оказалось связано и излучение звезд, входящих в двойные системы типа RS CVn (о чем будет сказано позже).

Карлики поздних спектральных классов с высоким уровнем рентгеновского излучения в отличие от других карликов обладают эмиссионными спектральными особенностями в оптическом и коротковолновом диапазонах (за исключением нескольких спокойных звезд, рентгеновское излучение которых регистрируется только благодаря их необычной близости к Земле). Ранее астрономы приписывали таким звездам при их обозначении букву «e» (например, dMe — эмиссионный красный карлик). Наличие же эмиссионных особенностей говорит о том, что активность захватывает не только корону, но и расположенную ниже хромосферу звезды.

Другой сенсацией стало обнаружение рентгеновского излучения от корон звезд ранних спектральных классов (O, B и A). Стационарных корон типа солнечной у таких звезд нет, и поэтому рентгеновское излучение здесь должно образовываться в горячих оболочках, разлетающихся наружу от звезд. В звездных ветрах этих звезд существуют, вероятно, холодные, изолированные облака газа — своеобразные аналоги солнечных протуберанцев. Так же как и в случае выбросов протуберанцев на Солнце, перед быстро летящими облаками формируются ударные волны, за фронтами которых газ может нагреваться до температуры 3 млн. К.

Сейчас существование мощных ветров в звездах ранних спектральных классов связывается с эффективным ускорением частиц световым давлением. Для звезд спектральных классов A0 — B7 скорость истекающего потока на больших расстояниях от поверхности звезды примерно равна параболической скорости — скорости

ухода частиц из гравитационного поля звезды. При переходе к еще более ранним звездам (вплоть до классов O8—O5) скорость потока уже в 3 раза больше параболической. Это приводит к большой потере массы этими звездами — порядка 10^{-5} — 10^{-6} M_{\odot} в год.

В настоящее время происхождение коронального излучения в истекающих наружу потоках звездного ветра подтверждается результатами прямых измерений. Так, образующиеся там коротковолновые линии оказываются сдвинутыми из-за эффекта Доплера в синюю часть спектра. Например, по линиям CIV и SiIV в спектре сверхгиганта ζ Ori (O9.5 Ia) измеряются скорости потока примерно 2000 км/с при параболической скорости 600 км/с.

Сейчас рассматриваются даже и некоторые более частные вопросы, посвященные строению таких корон. Недавно, например, американский астрофизик Р. Хаммер обратил внимание на то, что, если фотоны передают большую часть своего импульса частицам ускоряемой ими короны, то они в довольно большом количестве должны и возвращаться назад — к поверхности звезды. Поглощаясь там, эти фотоны должны немного нагревать фотосферу, изменяя тем самым ее свойства (или спектральный класс звезды).

Некоторая часть рентгеновского излучения звезд спектральных классов O и B генерируется более горячим газом с температурой порядка 10 млн. К. Соответствующий источник располагается в короне, в основании потока истекающей наружу плазмы. Это излучение несколько ослабляется в веществе звездного ветра.

Рентгеновские источники, связанные с звездами спектрального класса A, оказались более слабыми. Несколько интенсивных источников среди этих звезд, а также пекулярных так называемых Ap-звезд (часто обладающих большими магнитными полями) в мягком рентгеновском диапазоне меняют свою яркость в 100 и более раз. В ряде случаев подозревают, что рентгеновское излучение здесь связано с существованием невидимого компаньона — звезды спектрального класса K.

Итак, у вращающихся звезд ранних спектральных классов обнаружены короны иной, отличной от солнечной природы. Хотя связь со звездными ветрами выявлена надежно, предстоит еще определенная работа по детальному исследованию этого явления.

АКТИВНЫЙ — ЗНАЧИТ МОЛОДОЙ

от протозвезды к звезде главной последовательности, стадия звезд типа Т Тау, связь рентгеновского излучения с возрастом, петли в звездных коронах, замедление вращения из-за звездного ветра

Рентгеновские наблюдения «совершенно печально» выделили совокупность звезд всех поздних спектральных классов (от F до M) различных светимостей, но в основном карликов, входящих в различные звездные агрегаты. Их отличительные особенности — осевое вращение и связанные с этим мощные короны и развитие поверхностной активности.

С чем же связано большое вращение?

Оказалось (и это было понято не сразу), что вращение определяется сравнительно небольшим возрастом этих объектов. Здесь мы вынуждены хоть ненадолго остановиться на теории эволюции звезд. Радио- и инфракрасные наблюдения последних лет позволили обнаружить в нашей Галактике несколько тысяч гигантских молекулярных облаков с массами 10^3 — 10^5 M_{\odot} . Возможно, эти облака входят в состав еще больших газопылевых комплексов. Эти области на несколько порядков плотнее областей нейтрального водорода (HI), регистрируемых в радиолинии 21 см, и температура в них ($T \approx 10$ K) несколько ниже средней температуры межзвездной среды. Из-за неустойчивости первоначальное облако со временем разбивается на ряд фрагментов с массами порядка солнечной. Эти образования формируются более или менее равномерно по всему объему облака, тогда как более массивные фрагменты (будущие более горячие звезды) образуются по периферии облака.

Сжимающееся облако межзвездного газа с температурой 10—20 K очень быстро становится непрозрачным для собственного инфракрасного излучения. Это уже и есть протозвезда. Ее светимость вначале резко падает из-за роста непрозрачности, т. е. из-за того, что затрудняется выход фотонов из глубоких слоев наружу. Однако это приводит к росту температуры в центральных частях протозвезды и к изменению физического состояния газа: диссоциации молекул, а затем к ионизации газа. По ряду причин все это инициирует быстрое сжатие (коллапс) протозвезды.

Расчеты, проведенные японским ученым С. Хаяши для облака с массой порядка солнечной, показали, что примерно через 10 лет после начала быстрого сжатия вся протозвезда оказывается охваченной конвекцией, эффективно переносящей энергию от центральных частей к поверхности. В этот период ее светимость максимальна.

Большим достижением последних лет явилось то, что, кроме регистрации областей звездообразования (газопылевых комплексов) в радиодиапазоне, по-видимому, протозвезды в момент своей максимальной светимости наблюдаются в оптическом диапазоне. Эти объекты иногда называют фуорами (по названию объекта FU Ori). Они увеличивают свой блеск на несколько звездных величин в течение 1—6 мес, а также изменяют за несколько лет свой спектральный класс.

Теоретические расчеты показывают, что в дальнейшем «полностью конвективная» протозвезда продолжает сжиматься, превращаясь за 1 млн. лет в звезду. Звезда — это газовый шар, в котором энергия, выделяемая в центральных частях, излучается поверхностными слоями. Обычно при этом предполагается, что эта энергия выделяется в термоядерных реакциях, протекающих в центре звезды. Мы же под понятием «звезда» будем рассматривать и молодые звезды, где источником энергии является гравитационное сжатие.

Молодые звезды с возрастом около 1 млн. лет по своим характеристикам очень близки к известным переменным звездам типа Т Тау. Они располагаются в областях звездообразования, в спектрах этих звезд ярко выражены признаки существования мощных хромосфер. Прежде всего это излучение в бальмеровских линиях водорода и линиях металлов. Профили линий очень сложны и сильно меняются во времени, что говорит о бурных процессах в хромосферах. Из анализа спектров вытекает, что эти звезды сильно теряют массу, однако вблизи экваториальной плоскости в некоторых случаях возможны движения вещества в противоположную сторону к звезде (т. е. движения типа аккреции). Дополнительное излучение в инфракрасной области свидетельствует о том, что эти звезды окружены оболочками из пыли (и газа).

Существование хромосфер в этих звездах является следствием хорошо развитой конвекции на этих объек-

тах, обуславливающей генерацию энергии, необходимой для формирования и нагрева внешней атмосферы. Звезды в стадии Т Тау еще весьма быстро вращаются (не менее 100 км/с). Это отражает тот факт, что при сжатии протозвездного облака почти весь его момент вращения переходит к звезде. Звезда типа Т Тау за время своего существования не успевает затормозиться. На этой стадии, несмотря на присутствие мощной хромосферы, короны звезд, как правило, еще не образуются. Этому препятствует, вероятно, сильное истечение газа с поверхности звезды.

Гравитационное сжатие звезды с массой порядка солнечной продолжается до возраста порядка 10 млн. лет, затем начинают действовать ядерные реакции, и лишь через 100 млн. — 1 млрд. лет такая звезда, наконец, оказывается на стадии главной последовательности. Это довольно большой промежуток времени, и в данную эпоху существует достаточно много объектов, не достигших еще стадии главной последовательности. Если раньше они практически ускользали от наблюдателя, то внеатмосферные исследования вывели их на свет «божий». Условно мы будем называть их здесь активными карликами (спектральный класс позднее F5).

Эти звезды малых масс долго (около 1 млрд. лет) в ходе своей эволюции перемещаются по диаграмме Герцшпрунга—Рессела от места своего образования к главной последовательности. Поэтому стадия их активности продолжительна, и при достаточно высокой частоте их рождаемости эти объекты встречаются не так уж редко. Например, в окрестности Солнца радиусом 30 пк находится около 100 таких объектов с рентгеновской светимостью более 10^{26} эрг/с.

В противоположность этому звезд более ранних спектральных классов, не достигших еще главной последовательности, гораздо меньше. Прежде всего это связано с тем, что эти звезды более массивны, и их эволюция происходит существенно быстрее.

В некоторых участках неба было обнаружено довольно много слабых рентгеновских источников, которые оказались скоплениями звезд, располагающимися от Солнца на расстояниях от десятков до сотен парсек. Ансамбль звезд, входящих в скопление, образовался в одну и ту же эпоху, и возраст входящих в скопление членов чаще всего определяется по интенсивности спек-

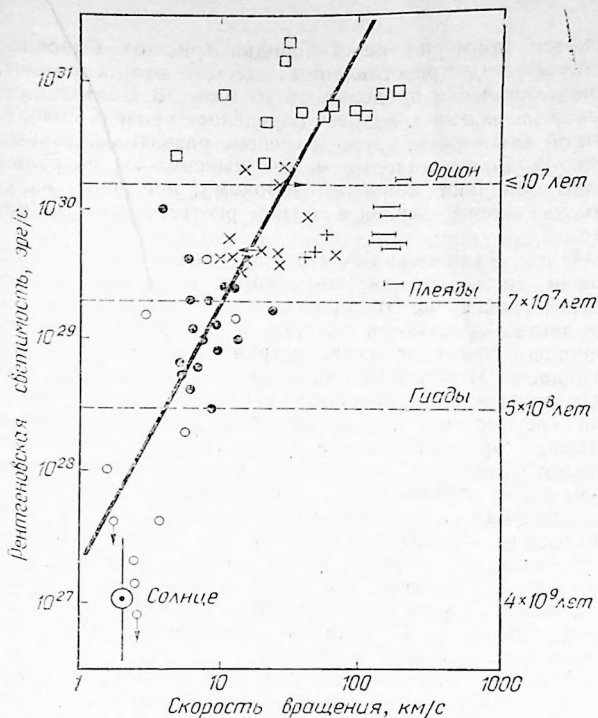


Рис. 6. Зависимость рентгеновской светимости от осевого вращения (величины $v \sin i$) для звезд молодых скопления. Кружками обозначены звезды поля, черными точками — звезды скопления Гиад, крестиками — звезды классов G и K скопления Плеяд, квадратиками — звезды класса G скопления в созвездии Ориона, черточками — звезды тесных двойных систем типа W UMa (последние приведены для сравнения). Помимо зависимости рентгеновской светимости от возраста звезд, из этих данных видно, что скорость осевого вращения возрастает при переходе к более молодым объектам

ральной линии лития — элемента, не успевшего еще выгореть в начинающихся в центре звезды термоядерных реакциях.

Рентгеновские светимости звезд, находящихся в солнечной окрестности и в скоплениях молодых звезд, от-

личаются примерно на 4 порядка (рис. 6). Основное различие звезд, представленных здесь, — это их возраст, оценивающийся в пределах от 10 млн. до 1 млрд. лет. Физически, конечно, возраст определяет уровень поверхностной активности, число и степень развития активных областей. Более молодые и, как выяснилось, активные звезды обладают мощными коронами, постоянно излучающими много энергии в мягком рентгеновском диапазоне.

Из рис. 6 также видно, что скорость вращения задает уровень светимости звездных корон в мягком рентгеновском диапазоне. Это просто связано с тем, что молодые звезды вращаются быстрее, а это определяет эволюционное состояние звезды и уровень ее поверхностной активности. Можно даже попытаться описать связь скорости вращения v с возрастом звезды t и ее рентгеновской светимостью L_x . Зависимость скорости осевого вращения пропорциональна $t^{-1/2}$ и иногда называется законом Скуманича (в последнее время она уточнена и имеет более сложный вид). Рентгеновская светимость пропорциональна квадрату скорости (см. рис. 5) и, следовательно, обратно пропорциональна возрасту звезды.

Заметим, что разброс точек на рис. 6 связан не с ошибками наблюдений, а с тем, что хотя осевое вращение и является определяющим, но не единственным фактором, влияющим на величину светимости короны в мягком рентгеновском диапазоне.

Связь рентгеновского излучения с осевым вращением носит более общий характер. Если по каким-либо причинам звезда позднего спектрального класса (точнее, обладающая конвективной зоной) оказывается вращающейся, например, из-за своей принадлежности двойной системе и т. д., то вокруг не всегда образуется корона, излучающая в рентгеновском диапазоне. Для карликов в соответствии с существующей уже 30 лет теорией конвекции это характерно для звезд спектрального класса позже F5, а для гигантов — позже G5.

Последнее сейчас достаточно хорошо подтверждается наблюдениями. Действительно, рентгеновское излучение практически пропадает при переходе к карликам, спектральный класс которых более ранний, чем F5, и к гигантам со спектральными классами раньше G5 (возникновение рентгеновского излучения у звезд ранних спектральных классов связано, как уже говорилось, с други-

ми эффектами). Отсюда и вытекает уверенность в том, что для развития активных процессов существование конвективной зоны действительно является необходимым.

Более того, очень интересным оказалось изучение нескольких объектов, являющихся исключением из обсуждаемого правила. По ряду причин у двух-трех звезд более ранних спектральных классов, чем граница появления активности, видимо, существуют конвективные зоны. Поскольку переход к звездам ранних спектральных классов означает и ускорение осевого вращения, то и эти звезды должны иметь заметное вращение. В соответствии с общим правилом эти уникальные объекты оказались рентгеновскими источниками со всеми признаками поверхностной активности. Разумеется, у всех аналогичных звезд, но у которых конвективных зон нет, никакой активности не было обнаружено.

Все, о чем говорилось в этом разделе, является результатом предварительного, статистического изучения проблемы. Предстоит еще выяснить физику происходящих процессов: чем отличается физическое строение корон у звезд различных поздних классов, какова взаимосвязь активности и вращения, что приводит к постепенному торможению вращения звезд поздних спектральных классов. Эти проблемы сейчас интенсивно изучаются. Несмотря на то что ряд моментов может быть уточнен в дальнейшем, мы не можем не коснуться здесь этих вопросов.

Итак, о физике корон активных карликов поздних спектральных классов. Как уже говорилось, внутренняя корона Солнца представляет собой совокупность больших арок, петель, заполненных горячей плазмой. Самые плотные горячие арки располагаются в активных областях (см. рис. 1), а эти области, и в том числе «магнитные острова» — пятна, занимают на Солнце малую долю площади.

В последнее время стали измерять, хотя и с очень большим трудом, магнитные поля звезд, в частности, активных карликов поздних спектральных классов. Выясняется, что напряженность магнитного поля в пятнах на звездах примерно такая же, как в солнечных. Но пятна на этих звездах занимают в десятки и сотни раз большую площадь, особенно, если ее сравнивать с площадью

поверхности самих звезд, радиусы которых в 2—3 раза меньше солнечного.

Таким образом, в настоящее время можно выделить последовательность звезд (например, в солнечной окрестности) с постепенным ростом уровня активности и увеличением доли объема, занимаемой петлями в короне. Кроме некоторых звезд, похожих в этом смысле на Солнце (α Cen A и др.), в рассматриваемую последовательность входят некоторые карлики спектрального класса K (такие, как ϵ Eri и др.) со средним уровнем активности и красные карлики («пятнистая» звезда BY Dra, AD Leo и др.), где площадь активных областей и пятен превышает 50% площади видимого диска звезды.

Короны некоторых активных красных карликов с радиусами, еще превосходящими $0,3 R_{\odot}$ (спектральный класс этих звезд близок к M0), почти целиком заполнены крупными корональными арками. Эти петли аналогичны тем, которые появляются на Солнце только в непосредственной близости от больших пятен.

Итак, на некоторых карликах спектрального класса M0 процессы активности достигают такого развития, когда вся корона оказывается заполненной самыми плотными, крупными петлями из когда-либо наблюдаемых на Солнце за достаточно долгое время (т. е. вне кратковременных вспышечных процессов). Температура петель на различных звездах, как правило, сильно не превышает температуру плазмы в солнечных петлях (2 млн. K). Более высокотемпературная плазма с температурой порядка 10 млн. K появляется в небольшом количестве петель в звездных коронах сравнительно редко. Концентрация частиц в петлях на активных звездах превосходит 10^{10} см^{-3} , что на 2 порядка выше средней концентрации частиц в солнечной короне и на порядок выше концентрации частиц в петлях активных областей.

Вообще говоря, в приведенных характеристиках плазмы в корональных петлях звезд нет ничего удивительного, кроме того, что такой уровень активности никто не предполагал до проведения наблюдений в рентгеновском диапазоне. Еще одно необычное обстоятельство касается неожиданно больших размеров этих петель. В некоторых двойных системах, состоящих из звезд поздних спектральных классов, наблюдались необычные вспышки. Скорее всего эти вспышки возникают в ре-

зультате взаимодействия корональных петель, принадлежащих различным компонентам системы (см. первую страницу обложки). А это означает, что корональные петли простираются на расстояние почти 1 а. е. — случай, кажущийся фантастическим для Солнечной системы (ведь 1 а. е. — это расстояние Земли от Солнца).

Корональные петли карликов спектральных классов G и K аналогичны солнечным, но их количество значительно больше. По-видимому, аналогичны и механизмы нагрева короны в активных областях на Солнце и в коронах этих звезд. Правда, общепринятый взгляд на нагрев короны за счет превращения механической энергии оказался практически непригодным для плотных корональных петель. Был предложен ряд механизмов, связанных с превращением энергии магнитного поля в тепло. Однако сложный характер плазменных процессов в короне, ограниченность наших наблюдательных возможностей не позволяют пока (даже для Солнца!) убедиться в справедливости того или иного конкретного механизма нагрева короны.

Своеобразная особенность строения имеется у коры красных карликов спектральных классов M3—M6, охлаждающих самой низкой светимостью и являющихся, как правило, вспыхивающими звездами. В коронах этих звезд крупные корональные петли как бы дробятся на множество мелких, и взаимодействие последних приводит к частым вспышкам. Недавно обнаружено, что рентгеновское излучение этих звезд представляет собой набор очень большого числа отдельных импульсов длительностью 10—30 с. Есть основания предполагать, что основным механизмом нагрева корон этих звезд и являются многочисленные, очень слабые вспышки.

В заключение этого раздела рассмотрим вопрос о причинах торможения вращения активных карликов. Хотя само усиление магнитных полей, а следовательно, и развитие активности связано с вращением звезд, эти процессы, в свою очередь, влияют и на скорость вращения. С возрастом объектов скорость вращения постепенно уменьшается, и причина этого замедления состоит в том, что звездный ветер, уносящий из короны плазму с магнитным полем, уменьшает также и момент вращения. Поясним это на примере солнечного ветра, изученного к настоящему времени с помощью прямых оп-

ределений его характеристик в межпланетном пространстве.

Солнечный ветер является практически радиальным истечением вещества с очень незначительной и нерегулярной азимутальной составляющей скорости. Следовательно, сам по себе он почти не влияет на момент вращения Солнца. Однако из-за эффекта «вмороженности» силовых линий магнитного поля в плазму солнечные магнитные поля «выносятся» в межпланетное пространство. Измерения, проведенные с помощью космических аппаратов в пространстве от орбиты Меркурия до орбиты Урана, показали, что силовые линии межпланетного поля следуют по спирали Архимеда—теоретически предсказанному закону для радиального истечения с «вмороженным» в плазму полем и примерно с постоянной скоростью.

Итак, можно считать, что во всем межпланетном пространстве вращается «каркас» магнитных силовых линий. Представим теперь, что «прорыв» радиального ветра внес возмущение в некоторый участок силовой линии магнитного поля, находящейся в межпланетном пространстве. Если скорость распространения возмущения вдоль магнитного поля, так называемая альвеновская скорость, велика, то к Солнцу будет передаваться импульс, влияющий на момент его вращения.

Поскольку именно вращение Солнца закручивает магнитное поле, ясно, что и само существование «замагниченного» солнечного ветра тормозит вращение Солнца. Вклад в уменьшение момента вращения за счет «магнитных натяжений» по сравнению с уменьшением из-за влияния азимутальной скорости солнечного ветра определяется отношением альвеновской скорости v_A , пропорциональной напряженности магнитного поля, к скорости потока на больших расстояниях от Солнца v_∞ .

Процесс торможения вращения Солнца «замагниченным» солнечным ветром при $v_A/v_\infty \rightarrow 1$ оказывается весьма эффективным. За время существования Солнца солнечный ветер мог полностью затормозить его вращение; например, от скорости вращения около 80 км/с до современного значения около 2 км/с. Тем более что на ранних стадиях эволюции солнечный ветер мог быть более интенсивным. Потеря массы за то же время составила всего бы $10^{-4} M_\odot$, т. е. была бы пренебрежимо малой величиной.

В настоящее время есть много указаний на то, что торможение вращения звездным ветром (при наличии хотя бы слабых магнитных полей) существенно для ряда одиночных и двойных звезд. Так, звезды типа Т Тау при скорости потери вещества порядка $10^{-7} M_{\odot}$ в год теряют за время своей эволюции одновременно и массу (порядка $1 M_{\odot}$) и момент вращения. Это, конечно, не перечеркивает то часто высказываемое мнение, что для изменения момента вращения существенным может оказаться образование планетной системы вокруг некоторых звезд.

Любопытно, что эти данные позволяют оценить уровень солнечной активности 4,4 млрд. лет назад, например, когда нашему центральному светилу было «только» 100 млн. лет. Высокий уровень рентгеновского излучения вне вспышек, потоки фотонов и частиц высоких энергий были в ту эпоху существенно выше. Некоторые ученые связывают с этим обстоятельством повышенное содержание ксенона и отношение содержаний изотопов $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ в лунном грунте, а также объясняют избыток изотопа ^{26}Ar в метеоритах.

ХРОМОСФЕРА И ПЕРЕХОД К КОРОНЕ

коротковолновое излучение звезд, циклы активности, активность в хромосфере и переходной области от хромосферы к короне, истечение вещества в поздних гигантах и сверхгигантах

Хромосфера и слои, лежащие между хромосферой и короной звезд излучают в некоторых линиях оптического (H и K CaII) и более коротковолнового диапазонов (длины волн от 100 до 200 нм), а также область около длины волны 280 нм (линия MgII). В этих коротковолновых спектральных диапазонах работал европейский спутник «ИУЭ». В спектрах наблюдавшихся звезд (рис. 7) обнаружены как хромосферные линии излучения атомов и ионов в низких стадиях ионизации (CI, CII, OI, SiII, MgII), так и линии CIII, CIV, NV, излучаемые плазмой с температурой порядка 100 000 К.

Результаты, полученные с помощью спутника «ИУЭ», позволили быстро сделать ряд общих выводов. Во-первых, из наблюдений в коротковолновом диапазоне для ряда наиболее ярких звезд спектральных классов O и B (светимость которых примерно в 10^4 раз превышает

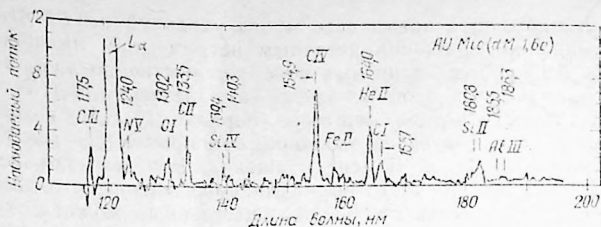


Рис. 7. Спектр звезды AU/Mic, полученный с помощью спутника «ИУЭ» в диапазоне длин волн 115—195 нм

солнечную) обнаружены линии OVI (на спутнике «Коперник») и NV с длиной волны 124 нм, излучаемые короной. В отличие от рентгеновских данных здесь уверенно измеряется доплеровское смещение спектральных линий, которое прямо указывает на то, что корона горячих звезд — это истекающий наружу звездный ветер (темп истечения вещества здесь очень велик).

Во-вторых, нашли свое подтверждение прежние результаты, основанные на изучении с поверхности Земли линий CaII (H и K): очень мощные хромосферы красных гигантов и сверхгигантов проявляли себя во всех хромосферных линиях. Природа этих хромосфер оказалась иной по сравнению с солнечной (истекающие наружу холодные звездные ветры).

В-третьих, выяснилось, что поверхностная активность сильно влияет не только на корону, но и на хромосферу и переходную область между ними, т. е. на все слои внешней атмосферы звезд поздних спектральных классов.

Наиболее обширные данные были получены для звезд поздних спектральных классов. Прежде всего многолетнее патрулирование излучения хромосфер в линиях CaII (H и K) выявило наличие циклов активности, аналогичных солнечному 11-летнему циклу. Такие изменения хромосфер происходят у некоторых звезд поздних спектральных классов (в основном нижней части главной последовательности). Длительность циклов активности изменяется от нескольких лет до примерно 11 лет (рис. 8). Более длинные циклические изменения, если и наблюдаются, то у очень малого числа звезд.

Светимости звезд в рентгеновском диапазоне изме-



Рис. 8. Связь длительности циклов активности с периодом осевого вращения для звезд спектрального класса К

ияются сильнее, чем в коротковолновых линиях. Это указывает на то, что явления активности в короне выражены сильнее, чем в нижележащих слоях переходной области и хромосферы.

Для некоторых звезд отношение $L_X/L_{\text{бол}}$ достигает значений порядка 10^{-3} . Специальное исследование, проведенное Р. Е. Гершбергом и Н. И. Шаховской, показало, что для активных красных карликовых звезд потери энергии на излучение в рентгеновском диапазоне близки к энергии излучения хромосфер этих звезд в балмеровских линиях и к общим энергетическим затратам, необходимым для обеспечения вспышечной активности этих звезд. Отсюда вытекает, что для нагрева внешней атмосферы действительно необходим поток нерадиативной (не в излучении) энергии, обеспечивающий энергозатраты, превышающие для всей звезды величину порядка $10^{-3} L_{\text{бол}}$. Последнее значение достаточно велико, и его объяснение встречает ряд затруднений; во всяком случае динамо-механизм и последующее преобразование магнитной энергии в тепло должны быть чрезвычайно эффективными.

Как уже говорилось, поверхностная активность заметнее у более молодых звезд. Это надежно прослеживается и по данным спутника «ИУЭ». Так, потоки в линиях SiII, SiIV, HeII и NV уменьшаются примерно в 1000 раз при переходе от звезд поздних спектральных классов в скоплении Ориона (возраст порядка 1 млн. лет) к так называемым звездам поля (вне скоплений), возраст которых превышает 1 млрд. лет. Кроме карликовых звезд, с помощью спутника «ИУЭ» наблюдалось и несколько быстро вращающихся гигантов. Для примера можно назвать FK Com, EG And (M2e III), а также уникальную звезду HR 5999 спектрального класса A7e.

Иногда, как, например, у звезды EG And, активность вызывает появление высокотемпературных областей, обычно отсутствующих у гигантов поздних спектральных классов. Быстровращающаяся звезда HR 5999 вследствие своей молодости, вероятно, не успела еще лишиться своей конвективной зоны. Поэтому стало возможным развитие на ней динамо-процессов и активности. Хотя причина быстрого вращения у некоторых гигантов не выяснена до конца, очевидно, что развитие активных процессов на этих звездах приводит к необычайному усилению соответствующих эмиссий.

Другими проблемами, требующими своего разрешения, являются собственно строение внешней атмосферы звезд и его связь с потерей ими массы. Возвращаясь к строению солнечной атмосферы, укажем, что переходная область между хромосферой и короной Солнца формируется за счет большого потока тепла из короны вниз. Поскольку теплопроводность ионизованной плазмы очень резко меняется с температурой, толщина этой переходной области в отсутствие каких-либо движений (например, направленных вверх) оказывается очень малой: над данной точкой солнечной поверхности она простирается всего на несколько километров.

Удивительным результатом анализа спектров звезд в диапазоне длин волн 115—195 нм явилось то, что резкость перехода от короны к хромосфере здесь сохраняется для всех карликов поздних классов. Это говорит об общности физических процессов, происходящих во внешних атмосферах этих звезд и Солнца. С переходом от звезд-карликов к субгигантам и гигантам (т. е. с уменьшением величины M/R) строение внешней атмосферы изменяется.

Авторы не могут не рассказать об удивительной системе Капелле, изучение которой для рассматриваемых здесь проблем сыграло роль, похожую на роль Крабовидной туманности в развитии современной астрофизики. Эта система состоит из двух гигантов спектрального класса G6 и F9 и удалена от Земли всего на 13 пк. Расстояние между звездами в ней составляет 0,8 а. е., что больше 10 радиусов этих звезд. От системы Капеллы мягкое рентгеновское излучение было зарегистрировано раньше, чем от других звезд поздних спектральных классов.

Из первых, во многом предварительных соображений

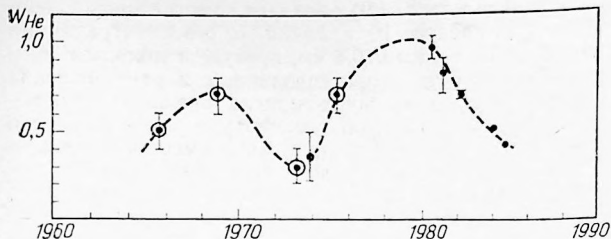


Рис. 9. Изменение полного поглощения в инфракрасной линии нейтрального гелия для Капеллы на протяжении 20 лет (кружками показаны результаты Г. Зирина до 1975 г., точками — данные Крымской астрофизической обсерватории АН СССР)

нами в 1978 г. было высказано предположение о том, что рентгеновское и коротковолновое излучения этой системы возникают не на главном, более ярком компоненте — звезде спектрального класса G6 (как это принималось традиционно), а на другом компоненте — звезде класса F9. Для опровержения этой гипотезы американские исследователи под руководством Дж. Линского впервые использовали высокое спектральное разрешение (около 0,02 нм) спутника «ИУЭ» в области длин волн 115—195 нм. Анализируя доплеровское смещение спектральных линий, обусловленное орбитальным движением компонентов двойной системы, они смогли выделить вклад каждой из звезд в коротковолновое излучение системы.

В результате этих исследований была прямо доказана доминирующая роль вторичного компонента Капеллы — гиганта F9, который, как оказалось, вращается значительно быстрее своего компаньона G6. Это стимулировало исследования таких явлений, впервые обнаруженных на Капелле, как активность на вращающихся звездах спектральных классов, «пятенная» активность на звездах типа RS CVn и т. д. В частности, по наблюдениям хромосферной линии нейтрального гелия с длиной волны 1083 нм, проводящимся в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР, по-видимому, удалось обнаружить цикл активности (рис. 9).

Наличие поверхностной активности на Капелле хорошо согласуется с тем, что возраст вторичного компо-

нента (гиганта класса F9) оказался заметно меньше солнечного. Это следует из наличия в его спектре линии лития с длиной волны 670,8 нм, присущей молодым звездам. Совокупность коротковолновых и рентгеновских данных позволяет построить модель внешней атмосферы этой звезды, у которой температура основной части короны составляет 3—4 млн. К, хотя имеется и небольшое количество более горячего газа. Так, толщина переходной области между хромосферой и короной здесь должна превышать 1000 км. Хотя сама эта величина не слишком велика для желтого гиганта, все же здесь мы имеем дело с переходной областью «несолнечного» типа: теплопроводность не может сформировать такой протяженный слой.

Коротковолновые спектры Капеллы и еще нескольких звезд, полученные с высоким спектральным разрешением, позволили обнаружить и начать изучать необычное явление во внешних атмосферах поздних звезд, получившее название «антиветра». По доплеровскому смещению линий обнаружено движение газа вниз, к поверхности звезды. Причем из корональных, т. е. более высокотемпературных слоев, газ падает вниз быстрее, чем из хромосферных слоев.

Явление это гораздо более заметно на поздних гигантах и сверхгигантах, нежели на карликах. Часто «антиветер» сосуществует на звезде одновременно с обычным истечением, т. е. звездным ветром. Физическая природа «антиветра» пока неясна.

Итак, в звездах-гигантах с уменьшением скорости ускользания частиц из гравитационного поля звезды начинается сильное истечение плазмы наружу, т. е. горячие короны не удерживаются около этих звезд. Как только у них появляется поток плазмы наружу, теплопроводность уже не в состоянии сформировать узкий переходный слой между хромосферой и короной, и толщина такого слоя увеличивается до нескольких тысяч километров.

Интенсивность излучения в коротковолновых линиях при этом велика, а смещение спектральных линий понов, образующихся при высокой температуре, таких, как NV, SiIV, CIV, существующих в верхней части переходной области (с длинами волн соответственно 124, 139,4 и 154,9 нм), непосредственно указывает на истечение вещества. Вокруг нескольких таких звезд с протяжен-

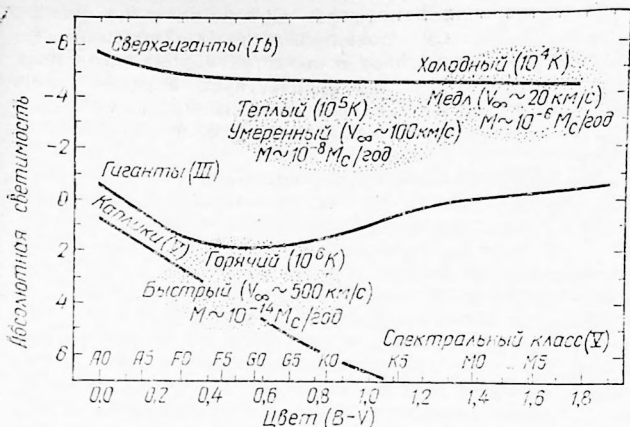


Рис. 10. Характеристики звездного ветра и скорость потери массы для различных звезд. Заметен переход от звезд типа Солнца с потерей массы около $10^{-14} M_{\odot}$ в год к сверхгигантам спектрального класса М с темпом истечения около $10^{-6} M_{\odot}$ в год (напомним, что горячие короны у массивных холодных звезд при этом исчезают)

ными переходными областями по рентгеновским данным обнаруживаются также и короны. Эти звезды называют «гибридными».

У остальных звезд с яркими линиями переходной области температура во всей внешней атмосфере не превышает 10^5 К — горячие короны вокруг них отсутствуют. Здесь интересно отметить, что для большинства звезд типа Т Тау доля коронального излучения по отношению к эмиссиям переходной области и хромосферы сравнительно невелика, что сближает их с субгигантами и гигантами поздних спектральных классов. Возможно, это есть следствие общей закономерности, связывающей существование протяженной хромосферы именно с присутствием развитой конвективной зоны.

Эффекты истечения становятся наиболее сильными среди звезд поздних классов, особенно у сверхгигантов (это видно из рис. 10). Действительно, наличие конвекции, т. е. источника нагрева внешней атмосферы, а также возможность ухода частиц наружу (вследствие уменьшения гравитации) приводит к радикальному из-

менению строения атмосферы. Специалисты по физике Солнца столкнулись с появлением таких изменений, изучая верхнюю хромосферу в областях корональных дыр. Там магнитное поле не препятствует возникновению истечения вещества, а нагрев лишь несколько уменьшается, и поэтому протяженность верхней хромосферы растет.

Эти эффекты начинают проявляться уже у гигантов спектрального класса К. Так, по данным об излучении в линиях CII с длинами волн 232,5 и 133,5 нм концентрация частиц в хромосферах этих звезд может достигать около $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$, а толщина хромосферы уже вдвое превосходит радиус звезды (заметим, что толщина хромосферы на Солнце составляет всего $1/30 R_{\odot}$).

Свойства хромосфер и характер их истечения подробно изучены для нескольких сверхгигантов спектральных классов К и М, входящих в двойные системы, где их спутником является звезда спектрального класса В. Эти данные получены из анализа кривых изменения блеска во время затмений звезды спутником, когда внешняя атмосфера сверхгиганта просвечивается насквозь излучением более горячей звезды.

Размеры хромосфер сверхгигантов спектрального класса К доходят до $100 R_{\odot}$, скорости звездного ветра в системах ζ Aur и 31 Cyg соответственно 40 и 80 км/с (для этих звезд темп потери вещества составляет порядка $10^{-8} M_{\odot}$ в год). Для сверхгигантов спектрального класса М, входящих в подобные системы, скорости ветра уменьшаются до 30 км/с (у нескольких ярких гигантов класса М2 в системе ζ Sge) и 10 км/с (у сверхгиганта класса М1 в системе Boss 1985). Однако за счет увеличения размера звезд темп потери массы здесь возрастает примерно до $10^{-7} M_{\odot}$ в год.

Этот необычный феномен — истекающие наружу хромосферы — наиболее ярко проявляется у нескольких сверхгигантов поздних спектральных классов. Например, для Бетельгейзе (α Ori) с массой около $10 M_{\odot}$ и радиусом порядка $10^3 R_{\odot}$ при незначительном нагреве хромосферы, сравнимым с существующим на Солнце, появляется истечение с очень медленным падением концентрации частиц до расстояний примерно $5 R_{\odot}$. Размер хромосферного источника оказывается большим, например в линиях CII более $30 R_{\odot}$. Источник таких размеров с температурой около 8000 К становится уже за-

метным в радиодиапазоне (горячие короны карликов и других звезд с температурами порядка 1 млн. К практически недоступны для радионаблюдений из-за малой площади источника излучения).

Истечение газа наружу прослеживается по форме профилей спектральных линий, излучаемых хромосферами звезд. Потеря массы Бетельгейзе составляет 10^{-5} — $10^{-6} M_{\odot}$ в год, на восемь порядков превосходя соответствующее значение для Солнца. Горячая корона здесь просто «сдувается» постоянно существующим потоком вещества.

Говоря о столь больших потерях массы, необходимо отметить, что есть свидетельства о резком возрастании или уменьшении темпа истечения вещества в определенные моменты времени. Так, у одной из самых больших звезд позднего спектрального класса ρ Cas (сверхгигант класса F8) в 1957 г. начался выброс оболочки, а к 1959 г. интенсивное истечение уже закончилось (размер оболочки здесь оценивается в $1200 R_{\odot}$). В некоторых случаях вещество оболочки, по-видимому, падает обратно на поверхность звезды.

Итак, при возрастании величины M/R структура внешней атмосферы желтых и красных звезд постепенно изменяется. Красные карлики, звезды типа Т Тау, гиганты и, наконец, сверхгиганты образуют последовательный ряд, характеризующийся переходом от внешней атмосферы типа солнечной к истекающей наружу хромосфере и с постепенным исчезновением короны. Заметим, что если для Солнца и красных карликов истечение является сверхзвуковым на больших расстояниях от звезды (скорости могут достигать нескольких сот километров в секунду), то поток в истекающих наружу хромосферах имеет меньшие скорости (10—20 км/с), сравнимые со скоростью звука. Изменение характера газодинамического потока существенно для условий в межзвездной среде, окружающей звезду.

Сверхзвуковой ветер типа солнечного порождает в межзвездной среде ударную волну, которая представляет собой границу между холодным межзвездным газом и горячим ветром. Поскольку эта граница располагается достаточно далеко от звезды (от Солнца на расстоянии нескольких сот астрономических единиц), вещество звездного ветра, которого не так уж и много, не накапливается вблизи звезды. В случае истечения хромосфе-

ры наружу потоки газа с очень большой плотностью вещества (по сравнению с солнечным ветром) имеют небольшие скорости истечения. Несмотря на слабость гравитационного поля в последнем случае, вещество накапливается около сверхгигантов, имеющих большую потерю массы, образуя околосветные оболочки. Эти оболочки холодного газа отчетливо проявляются в спектре таких звезд по узким линиям поглощения (MgII , CaII и др.).

Например, газовая оболочка вокруг Бетельгейзе хорошо наблюдается в лучах резонансной линии калия (длина волны 769,9 нм). В общем случае оболочки удалены от звезды на расстояние в несколько звездных радиусов, причем при переходе к звездам большей светимости увеличивается размер оболочек и расстояние, отделяющее их от звезды. У сверхгигантов поздних спектральных классов оболочка удалена от звезды на расстояние порядка 10 ее радиусов. Концентрация нейтральных атомов водорода в ней составляет порядка 10^6 — 10^8 см^{-3} и практически не зависит от спектрального класса таких звезд. За счет больших размеров оболочек на луче зрения их набирается до 10^{22} см^{-2} — это очень большая величина. Оболочки, вероятно, расширяются со скоростями 15—25 км/с вокруг сверхгигантов спектрального класса М, а поскольку на пылинках, присутствующих здесь же, могут конденсироваться тяжелые элементы (металлы), то в этих оболочках должен ощущаться дефицит этих элементов.

В последние годы около сверхгигантов поздних спектральных классов с большой потерей массы стали наблюдаться пылевые оболочки наряду с газовыми. Например, у Бетельгейзе около половины всего излучения пыли, наблюдаемой в инфракрасной области около 11 мкм, исходит из зоны размером 30 радиусов звезды, разреженная часть оболочки простирается до 600 радиусов звезды. Размер же газовой оболочки вокруг Бетельгейзе по наблюдениям в лучах линии калия близок к пылевой.

До сих пор речь шла главным образом о звездах сравнительно небольшого возраста, и именно с этим связывалось наличие поверхностной активности звезд. Наблюдения же свидетельствуют о связи активности звезд с их осевым вращением независимо от того, какова причина этого вращения. Дело в том, что осевое вращение

присуще не только молодым объектам, но и звездам, входящим в состав двойных систем. Причем звезды в двойной системе, как правило, движутся таким образом, что их орбитальное и осевое вращение «синхронизируются»: угловые скорости обоих видов движений стремятся совпасть. Иначе говоря, энергия орбитального движения в двойных системах передается собственному вращению звезды вокруг своей оси до тех пор, пока угловые скорости этих движений не выравниваются.

Именно по этой причине в рентгеновском диапазоне наблюдались карлики поздних спектральных классов, входящие в тесные двойные системы типа W UMa. Из-за больших приливных воздействий входящие в эти пары звезды имеют, видимо, грушевидную форму. Период вращения этих систем близок к 10 ч.

Системы с большим периодом орбитального вращения образовали класс переменных звезд типа RS CVn. Вторичный, менее яркий компонент системы — обычно это субгигант спектрального класса K — характеризуется высоким уровнем поверхностной активности, иногда самым высоким среди звезд поздних спектральных классов. Явления, протекающие на поверхности этих звезд, можно изучать благодаря тому, что в ряде таких систем наблюдаются затмения звезд друг другом. Пятна оказываются холоднее фотосфер звезд примерно на 1000 K и занимают 10—40% площади звездного диска.

Поскольку осевое вращение в данном случае не связано с молодостью объекта, а с наличием спутника, активность может продолжаться довольно долго. Этот интересный вопрос об активности на двойных системах заслуживает отдельного обсуждения. Отметим, что в тесных двойных системах уже начинают сильно проявляться эффекты, связанные с перетеканием вещества от одного компонента к другому, вторжением газовых струй от одной звезды в атмосферу другой. Примером здесь являются системы типа Алголя, а также те, у которых один из компонентов либо белый карлик, либо нейтронная звезда. Это, однако, совсем другой класс рентгеновских источников, излучение которых обусловлено в основном аккрецией вещества. Это относится уже к конечным стадиям эволюции звезд, несколько более массивных, чем Солнце, т. е. к проблемам, которые нами здесь не затрагиваются.

ВСПЫШКИ НА ЗВЕЗДАХ

характеристики вспышек, физика импульсных явлений, вспышки на гигантах, коротко о радиоизлучении звезд поздних спектральных классов

Вспышки — одно из самых удивительных явлений в атмосферах звезд. В последние годы, снова благодаря проведению рентгеновских наблюдений, приоткрылась завеса, скрывавшая физическую сущность этого явления, во многом еще и сейчас остающегося загадочным.

Как мы уже говорили, структура внутренних частей корон красных карликов и Солнца, во многом сходна. Горячее вещество корон сосредоточено в системы отдельных арок, очерчивающих пучки магнитных силовых линий. Отдельная арка соединяет магнитные полюса противоположной полярности на поверхности звезды. Самые плотные и, вероятно, более горячие арки располагаются в местах выхода более сильных (локальных) магнитных полей.

Для Солнца, как это уже сейчас ясно, в начале вспышки в некоторой области арки внезапно выделяется громадная энергия — порядка 10^{30} эрг (рис. 11), причем в мягкой рентгеновской области излучение вспышки на один или более порядков превосходит излучение всего Солнца в этом диапазоне. При этом первичном «взрыве» происходит ускорение электронов (а иногда и протонов) до больших энергий и нагрев плазмы до температур 20—30 млн. К. Потоки тепла и частиц устремляются вдоль арки к ее основаниям, уходящим в глубь хромосферы. Именно в этих плотных слоях возникает свечение хромосферы при вспышке.

Помимо этого часть плотного газа в основании арки сильно нагревается и начинает «испаряться» вверх, в корональную часть арки. Все эти явления, длящиеся в одной петле несколько секунд, образуют одно «элементарное» событие. Обычно же в начале вспышки происходит несколько таких событий в близко расположенных петлях. В первые минуты вспышки петли, «загорающиеся» таким способом, как правило, низкие, не поднимающиеся выше 10 тыс. км. Промежуток времени в несколько минут (часто всего за 1—2 мин), в течение которых происходит ускорение частиц, называют жесткой или импульсной фазой вспышек.

В последующие моменты времени горячая плазма

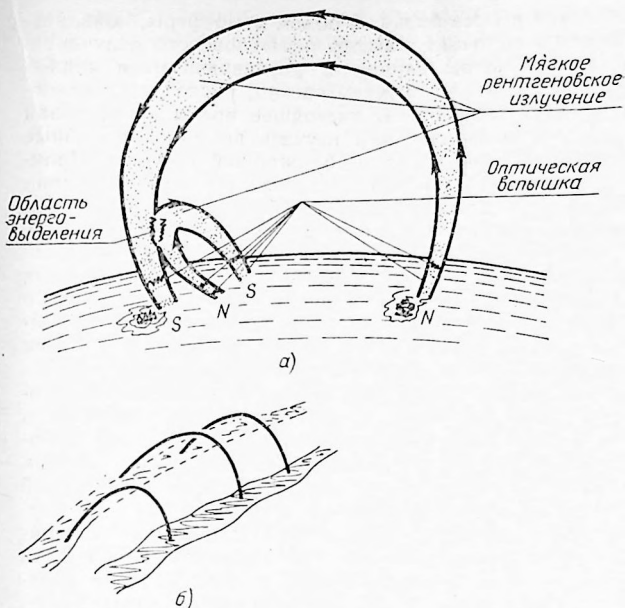


Рис. 11. Схема возникновения различных видов излучения при вспышках на Солнце и на красных карликах (а). События развиваются сначала в малой низкой петле, а затем распространяются и на высокие петли. Основное энерговыделение и ускорение частиц происходят в довольно высоких частях арок. Процесс постепенно охватывает систему корональных арок; их основания наблюдаются на солнечном диске в виде двух ярких вспышечных лент (б)

заполняет все более высокие корональные петли. В это время также происходит выделение энергии, однако этот процесс уже не столь бурный. Часто совокупность вспышечных корональных петель образует анфиладу арок — своеобразный туннель, располагающийся над линией раздела полярностей магнитного поля. Основания этих арок «горят» в хромосфере в виде двух лент в течение одного или нескольких часов (при мощных событиях на Солнце).

Поскольку плотной горячей плазмой оказывается за-

полненным весьма большой объем атмосферы, появляется мощный источник мягкого рентгеновского излучения. На это излучение, наряду с развивающимися движениями плазмы и ускорением частиц, расходуется основная энергия вспышки. В настоящее время всеволновая астрономия позволяет нам изучать вспышки, подобные солнечным, только на самой ближайшей звезде — Проксиме Центавра (α Cen C). У других карликов поздних спектральных классов таких «слабых» вспышек, какими являются мощные солнечные, нам увидеть еще не дано.

Звездная вспышка — это внезапное увеличение блеска звезды иногда в сотни раз (на несколько звездных величин), более сильное в синей области оптического спектра, чем в других участках. Например, при вспышке на звездах типа UV Cet за время около 1 с блеск звезды резко возрастает, а затем со скоростью в 1,5—3 раза меньшей происходит резкий спад до уровня, составляющего примерно $\frac{1}{3}$ максимального (событие в ряде случаев имеет два максимума). Далее с характерным временем 100 с идет плавное затухание события.

Описанная «идеальная» кривая блеска импульсной звездной вспышки реализуется далеко не во всех случаях. На нисходящем участке вспышки подчас появляются вторичные максимумы, часто возгорание вспышки затягивается до порядка 10 мин, а само явление длится несколько часов. Сейчас складывается впечатление, что медленные события нельзя рассматривать как суперпозицию ряда импульсных и что природа этих двух типов вспышек может быть различной.

Отличительной особенностью звездных вспышек является кратковременное усиление оптического излучения с непрерывным спектром. Поскольку эффективную температуру, характерную для этого излучения, мы знаем (около 10 тыс. К), из наблюдаемого потока излучения можно получить, что площадь вспышки на звезде этого типа (порядка $3 \cdot 10^{18}$ см²) в десятки раз превышает площадь белой вспышки на Солнце. Это отличие становится еще более разительным, если вспомнить, что те красные карлики, на которых в основном и наблюдаются эти явления, имеют радиусы в 3—10 раз меньшие, чем у Солнца.

Излучение вспышки в спектральных линиях, например, в бальмеровской серии водорода или в линиях H и K ионизованного кальция, продолжается гораздо дол-

ше, чем излучение с непрерывным спектром. В момент максимума вспышки подавляющая часть ее энергии (до 90%) заключена в излучении с непрерывным спектром, но на фазе спада за счет указанного более медленного угасания свечения в спектральных линиях заключенная в них энергия излучения вспышки может достигать 40% и более. Линии излучения водорода при вспышках на звездах в несколько раз шире, чем в спектрах солнечных вспышек, что свидетельствует о большей плотности вещества в области излучения, а иногда и о более быстрых движениях вещества.

Вообще говоря, кроме непрерывного спектра, другие спектральные характеристики излучения звездной вспышки (особенности отдельных линий, отношения их интенсивностей, асимметрия формы) схожи с соответствующими параметрами для солнечной вспышки. Помимо регулярного появления оптического излучения с непрерывным спектром, отличием звездных вспышек от солнечных является и то, что энергия процесса может быть на несколько порядков выше. На многих звездах типа UV Cet вспышки происходят часто (около одной в течение часа), но эти события слабы, и их энергия близка к энергии обычных солнечных вспышек. При переходе к звездам большей светимости растет и средняя мощность регистрируемых на них вспышек (от $3 \cdot 10^{26}$ эрг/с для звезд с абсолютной звездной величиной $M_v^m = 16^m$ до 10^{29} эрг/с для звезд с $M_v^m = 7^m$).

Иногда происходят очень мощные вспышки. Такие вспышки являются, по-видимому, типичными для вспыхивающих звезд, входящих в молодые скопления в созвездии Ориона и в Плеядах. Так, суммарная энергия одной вспышки на звездах скопления в созвездии Ориона обычно составляет 10^{35} — 10^{36} эрг, что на 3—4 порядка превышает самые мощные вспышки на Солнце. Мощность в максимуме блеска здесь порядка 10^{32} эрг/с, и при такой звездной вспышке только в оптическом диапазоне за 1 с высвечивается столько энергии, сколько расходуется во время самой мощной солнечной вспышки на излучение (во всех диапазонах), движение плазмы и ускорение частиц.

С 1974 г. в рентгеновском диапазоне было зарегистрировано около 10 звездных вспышек, причем некоторые из них удалось наблюдать одновременно в других диапазонах (в радио- и оптическом). Возрастание пото-

ков в мягком рентгеновском и оптическом диапазонах происходит практически одновременно, но когда всплеск в оптическом диапазоне (в синем фильтре U и около длины волны 468 нм) заканчивается, свечение в мягком рентгеновском диапазоне и в линиях еще продолжается (затухает оно практически одновременно).

В общем, физические и другие характеристики солнечных и звездных вспышек схожи, если исходить из их рентгеновского излучения. Значения температуры плазмы в области звездной вспышки около $2 \cdot 10^7$ К и меры эмиссии около $4 \cdot 10^{51}$ см⁻³ являются типичными и для солнечных вспышек (это, конечно, есть следствие близости светимостей в рентгеновском диапазоне). Весь же объем излучающей области составляет $5 \cdot 10^{28}$ см³. Эта величина настолько велика, что позволяет связать появление мягкого рентгеновского излучения именно с заполнением горячей плазмой такого большого объема, вероятнее всего, системы корональных петель.

Первый максимум радиовсплеска (в метровом диапазоне) достигается на 15 мин позже, чем максимум самой вспышки. Запоздывание на 5—30 мин является вообще типичным для звездных вспышек.

Несколько вспышек также наблюдалось в коротковолновом диапазоне с помощью спутника «ИУЭ». Хотя усиление излучения в линиях ионов, требующих температур 10 тыс. — 1 млн. К, зарегистрировано уверенно, низкое временное разрешение не позволяет пока получать необходимую информацию о быстропротекающих процессах, происходящих на вспыхивающих звездах. Однако в этом диапазоне у систем типа RS CVn обнаружено усиление интенсивностей линий, сохраняющееся в течение нескольких суток. Изучение этих «сверхдлительных» вспышек весьма интересно и в настоящее время только начинается.

Прежде чем переходить к описанию физических явлений, происходящих при вспышках, кратко рассмотрим сам класс вспыхивающих звезд (подробнее см. книгу Р. Е. Гершберга, ссылка на которую дана в списке рекомендуемой литературы). В окрестностях Солнца этот класс представлен всего несколькими карликами спектрального класса G и K, а его подавляющая часть — это красные карлики спектрального класса M. Разумеется, не все красные карлики вспыхивают, а толь-

ко, как правило, те из них, в спектре которых наблюдаются хромосферные эмиссионные линии.

Доля таких объектов, обозначаемых Me, составляет несколько процентов среди звезд спектрального класса M0, более 50% среди звезд класса M5 и практически 100% среди звезд со спектральным классом позже M5.5. Таким образом, самая нижняя часть главной последовательности представлена именно вспыхивающими звездами.

Все вспыхивающие звезды обладают развитыми конвективными зонами. Если бы можно было также утверждать, что и осевое вращение их значительно, то были бы выполнены условия, необходимые для объяснения поверхностной активности. К сожалению, прямые спектроскопические определения скорости вращения этих объектов затруднительны, поскольку они «слабы» и в их спектрах очень много разнообразных линий и полос поглощения. Тем не менее число прямых измерений все растет, и они показывают, что скорости вращения красных карликов заключены в пределах от 5 до 50 км/с. Это существенно превышает скорости осевого вращения спокойных звезд тех же спектральных классов.

Кроме того, согласно М. Родоно, процент двойных среди вспыхивающих звезд значительно выше, чем среди ближайших звезд низкой светимости. Распространенность явления двойственности — первое, что бросается в глаза всем, кто начинает заниматься вспыхивающими звездами. Благодаря синхронизации движений, о которой говорилось ранее, ряд вспыхивающих звезд в двойной системе очень долго сохраняет свое вращение. Отметим здесь, что еще до начала эры рентгеновского изучения этих звезд В. Кункель в 1975 г. показал, как двойственность статистически должна продлевать фазу вспышечной активности звезды.

Вопрос о возрасте вспыхивающих звезд не так прост. Конечно, вспыхивающие звезды самого молодого скопления в созвездии Ориона располагаются на диаграмме спектр—светимость выше главной последовательности. Однако с переходом к более старым скоплениям область, занимаемая этими звездами на диаграмме спектр—светимость расширяется, и часть слабых звезд попадает и под главную последовательность. Наблюдательные данные указывают на большой разброс в значениях возрастов вспыхивающих звезд. Большин-

ство из них действительно являются молодыми, но есть и такие, которые можно считать ровесниками Галактики. Здесь, конечно, нужно помнить о том, что звезды малой массы претерпевают эволюцию от протозвезды до стадии главной последовательности очень медленно, а двойственность еще более продлевает фазу вспышечной активности. Разумеется, у более массивных звезд спектрального класса К фаза вспышечной активности должна быть заметно короче, чем у звезд спектрального класса М (массы которых составляют $0,15-0,05 M_{\odot}$), что согласуется с наблюдательными данными.

Итак, поверхностная активность красных карликовых звезд связана с факторами, обычными для звезд поздних классов, и заключается в появлении и развитии локальных магнитных полей и связанных с ними явлений. Существуют, однако, определенные отличия между проявлениями активности на Солнце, на «пятнистых» звездах спектральных классов G и K и на типичных карликах позднего класса M. На «пятнистых» звездах образуются большие пятна, наблюдается вращательная модуляция излучения, а вспышки происходят редко. На карликах класса M много мелких пятен (либо их и вовсе нет), а вспышки возникают весьма часто.

Рентгеновские наблюдения позволяют, хотя бы частично, понять причину указанного различия в поверхностной активности звезд спектральных классов G и Me. Внешняя атмосфера звезд dMe состоит из хромосферы (более развитой и плотной, чем у Солнца), тонкого переходного слоя и короны. Меры эмиссии корон велики, а сами звезды маленькие. Поэтому приходится допускать, что корональные петли с плазмой при концентрации вещества порядка 10^{10} см^{-3} упакованы во внешней атмосфере весьма плотно (в проекции на диск звезды все заполнено петлями активных областей). Взаимодействие этих петель и приводит, по-видимому, к частым вспышкам. Какие факторы мешают магнитному полю собираться в большие жгуты, что приводит к раздроблению полей на типичных вспыхивающих звездах — это остается пока загадкой.

Вернемся теперь собственно к вспышкам и рассмотрим быстрые импульсные явления. Рентгеновские наблюдения вспышек на звездах показывают, что первичный «взрыв» с выделением энергии происходит на поверхности звезды. Можно даже предположить, что при

этом ускоряется некоторое число электронов (до умеренных энергий порядка 100 кэВ). В таком случае по аналогии с жесткой фазой солнечных вспышек можно рассмотреть соответствующий вторичный процесс в атмосфере звезды.

Потоки тепла и ускоренных частиц из источника вспышечного энерговыделения движутся вдоль магнитных силовых линий и вторгаются в плотные слои звездной хромосферы вблизи оснований арки. Здесь происходит своеобразный «ожог» хромосферы и возникает, как это впервые в 1974 г. показали для солнечных вспышек Н. Д. Костюк и С. Б. Пикельнер, движущаяся вниз ударная волна. Вообще говоря, прохождение сильной ударной волны приводит к нагреву газа. Но в хромосфере газ при этом сильно излучает, поэтому начинает охлаждаться и сжиматься. Таким образом, прохождение ударной волны с излучением вызывает сильное сжатие газа за ее фронтом, при этом происходит некоторое повышение температуры в этой области хромосферы.

Так формируется источник низкотемпературного (порядка 10 тыс. К) свечения в жесткой фазе вспышек. Заметим, что этот источник оказывается очень тонким. Его толщина согласно расчетам составляет всего 30 км на Солнце. Ранее при анализе излучения солнечных вспышек в бальмеровских линиях приходилось делать допущение о таком тонком плотном «листе» (оболочке), допущение, нашедшее естественное объяснение в газодинамической модели Костюк—Пикельнера. Эта оболочка в основаниях нескольких петель, возможно, находящаяся в каждой петле на несколько различающейся высоте, должна покрывать весьма большую площадь.

На Солнце этот процесс способен объяснить только появление излучения в хромосферных линиях водорода, пониженного кальция и др.

Для возникновения же оптического свечения с непрерывным спектром при звездных вспышках требуется, как это впервые показали в 1977 г. В. П. Гринин и В. В. Соболев, чтобы плотность вещества в источнике энергии вспышки была еще больше, приближаясь уже к плотности вещества в фотосфере. А. Г. Косовичев и авторы этих строк провели расчет аналогичного газодинамического процесса в атмосфере красного карлика (хромосфера у этих звезд до вспышки характеризуется большей плотностью, чем в случае Солнца). Оказалось,

что достаточно лишь немного увеличить интенсивность «ожога» (по сравнению с солнечной вспышкой), чтобы в этом процессе, развивающемся на звезде, за фронтом ударной волны образовалась область с концентрацией атомов водорода, приближающейся к 10^{16} см^{-3} , т. е. почти характерной для фотосферы. Если такой процесс происходит на площади 10^{18} см^2 , то мы получим всплеск оптического излучения с непрерывным спектром.

Из сопоставления теоретических результатов с наблюдениями легко удалось объяснить общие характеристики вспышечного континуума для моделируемого не очень мощного события. Форма самого импульса — резкий подъем к максимуму и затем лишь немного менее резкий спад — связана с образованием уплотнения за фронтом ударной волны и обеспечением поступления энергии внутрь него, достаточной для компенсации значительных потерь на излучение. Ударная волна, распространяющаяся в веществе в направлении роста его плотности, проходит при этом всего несколько шкал высот во вневышечной хромосфере.

Характерное время этого процесса (около 1 с) и плавное развитие описанных газодинамических процессов не допускают существенно более быстрых, например миллисекундных, изменений яркости. Этим рассматриваемая тепловая модель отличается от целого ряда нетепловых моделей. Отметим, что развиваемая здесь точка зрения находит подтверждение в наблюдениях на самых больших телескопах с наилучшим спектральным и временным разрешением.

Ранее уже говорилось о вторичных процессах при импульсных вспышках. Вопрос о первопричине явления, об источнике первичного энерговыделения является весьма сложным даже для явлений на Солнце. Энергия вспышки, по-видимому, черпается из энергии магнитных полей. Сложные процессы в плазме, которые и приводят к вспышке, в прошедшие два десятилетия интенсивно изучались. Большой вклад в исследование этой проблемы внес советский астрофизик С. И. Сыроватский.

Вспышечные явления на звездах, несомненно, более разнообразны, чем рассмотренные солнечные аналоги. Например, упомянутые в начале раздела медленные вспышки можно, конечно, пытаться интерпретировать как суперпозицию событий в отдельных петлях. Предел разумности такой «деятельности» достигается весьма

быстро: временные шкалы, энергетика, соотношение интенсивностей в различных спектральных диапазонах свидетельствуют о непригодности такой схемы. Действительно, если мы медленно выделяем в короне не слишком большую энергию, то отклик хромосферы на такое возмущение заведомо не приводит к появлению необходимых экстремальных условий, когда может излучаться оптический континуум.

Сравнительно недавно обнаружены вспышечноподобные явления на субгигантах — компонентах двойных систем типа RS CVn, а также на ряде гигантов и сверхгигантов поздних спектральных классов. Эти явления, совсем уже непохожие на солнечные вспышки (например, на RS-системах), вызывают небольшое, двухкратное усиление рентгеновского излучения с нарастанием интенсивности излучения в течение 1—2 ч и спадом на протяжении 2 сут и более. Изменения блеска в оптическом диапазоне невелики 0,1—0,2^m, но нет уверенности в том, что в начале событий не пропущены моменты больших изменений.

Однако в коротковолновой области спектра и в радиодиапазоне — это мощные события. Так, например, на системе UX Aг1 поток излучения в линиях ионов, требующих для своего существования температур $2 \cdot 10^4$ — 10^5 К, усилился в 5—6 раз и сохранялся на высоком уровне почти 2 сут. Только в этих линиях излучается мощность 10^{31} эрг/с да еще в течение столь длительного времени.

На красных гигантах иногда наблюдаются изменения излучения в хромосферных линиях, свидетельствующие о процессах, мощность которых типична для вспышечных событий на красных карликах. Однако длительность этих явлений может достигать нескольких суток. Очень мощный продолжительный радиовсплеск наблюдался на красном гиганте α Cef. На сверхгиганте Бетельгейзе обнаружены изменения в поляризации оптического излучения, и это происходило одновременно с изменениями яркости картины на инструменте, измерявшем диаметр Бетельгейзе в лучах линии H α . Таким образом, на звездах большой светимости происходят, правда весьма редко и совершенно непредсказуемо, вспышечноподобные явления мощностью 10^{30} — 10^{36} эрг/с, которые могут длиться от нескольких часов до нескольких суток.

Данных о вспышках на звездах высокой светимости

явно недостаточно, чтобы сделать какое-либо обоснованное суждение о природе этих явлений. Идеи, упоминающиеся в научной литературе, сводятся к процессам взаимодействия корональных петель, принадлежащих различным компонентам RS-систем, к привлечению транзитных явлений или явлений типа ударных волн в межпланетном пространстве, вращающихся вместе с Солнцем.

Новую информацию начинают в последнее время давать наблюдения в радиодиапазоне.

Итак, хотя нестационарные процессы на звездах и имеют некоторые общие черты с солнечными, их различие не ограничивается большим масштабом и энергетикой явления, различна и физика явлений. Понимание этих процессов — дело будущего, надеемся, не слишком далекого.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Картина мироздания, какой она представляется сегодня, существенно отличается от той, с которой нынешнее поколение астрономов знакомилось по университетским учебникам первых курсов. И дело здесь не только в том, что значительно расширились границы изученной части Вселенной и обнаружен целый «спектр» новых объектов. Звезды и подобные им объекты — это уже не статичный мир взаимно несвязанных небесных тел и разреженной среды. Сейчас уже не догадки, а теория эволюции объединяет большинство этих объектов, причем ключевые моменты теоретических представлений подтверждены в настоящее время астрономическими наблюдениями. В этом, по выражению И. С. Шкловского, и состоит смысл второй революции в астрономии.

Звезды — это основные эволюционирующие объекты Вселенной. Сейчас удастся проследить за рождением звезд, их эволюцией к стадии главной последовательности и последующими стадиями эволюции вплоть до превращения в безжизненные остатки (например, нейтронные звезды). Выясняется и взаимосвязь межзвездной среды (пыли и газа) и звезд, их взаимопревращение друг в друга и развитие в составе звездной системы — галактики.

Результаты наблюдений внешних атмосфер звезд позволили выяснить ряд насущных проблем, касающихся

звездного мира. Так, среди звезд малых масс наблюдения выявили и позволили понять свойства молодых объектов, имеющих возраст «всего» от 1 млн. лет до около 3 млрд. лет. Эта стадия молодости звезд, которую долгое время практически невозможно было изучать ранее из наблюдений, соединила всю эволюционную последовательность от рождения звезды до стадии ее зрелости, т. е. стадии главной последовательности.

Молодые звезды оказались вращающимися объектами, на которых «вихри огненные кружатся» и, похоже, гораздо более мощные, чем давно известные по солнечной атмосфере. Взаимодействие конвективных движений и вращения действительно приводит к усилению магнитных полей не только на Солнце, но и на многочисленных звездах не очень большой массы. Уровень возникшей при этом активности, наиболее сильно проявляющейся во внешних атмосферах, сильно зависит от возраста объекта. Если существуют причины, поддерживающие осевое вращение (например, если звезда входит в состав двойной системы), то активность может не затухать весьма длительное время (порядка миллиардов лет). Заметим, что источником энергии на этой фазе эволюции звезды небольшой массы является гравитационное сжатие.

Многие выводы в обсуждаемой здесь картине оказалось получить легче, если основываться на результатах, известных уже из физики Солнца. В свою очередь, данные о молодых звездах поздних спектральных классов позволили заглянуть и в далекую предисторию Солнца, представить себе уровень его активности, условия в газопылевом околосолнечном облаке в ту эпоху, когда только еще происходило образование планет.

Приоткрылась фактически новая страница в изучении магнетизма: магнетизма звезд. Магнитное поле выступает как один из наиболее важных факторов, действующих на ранних этапах эволюции звезд малых масс. Часть энергии, поддерживающей жизнь молодой звезды, расходуется на генерацию магнитных полей и далее рассеивается, вызывая ряд активных процессов в различных слоях атмосферы. Этим, однако, дело не ограничивается. Магнитное поле осуществляет связь между звездой и истекающей наружу «замагниченной» плазмой. Звездный ветер, «уносящий» магнитное поле, при-

водит к потере момента вращения звездой, к ее торможению.

И наконец, о звездном ветре вообще. Весьма впечатляющие выводы сейчас получены не только для звезд малой массы, а прежде всего для объектов более массивных, чем Солнце. Изучен удивительный феномен улетающих наружу корон у звезд классов О, В и А, причем ускорение разреженной плазмы, вероятно, связано со световым давлением.

В случае гигантов и сверхгигантов поздних спектральных классов исследователи встретились с другим явлением — истекающими наружу хромосферами. Здесь поток механической энергии, генерирующийся в верхней части конвективной зоны, немного нагревает слои, лежащие непосредственно над фотосферой. Формирующийся постепенно, медленный поток холодной плазмы в несколько раз увеличивает размер этих и без того гигантских звезд. Изучение оболочек вокруг массивных звезд приносит первые, весьма любопытные данные о взаимодействии газа и пыли, о возникновении и разрушении крупных молекул, в том числе и органических.

Практически все, о чем шла речь в брошюре, — это новые, недавно возникшие проблемы астрофизики. Их детальное изучение — дело будущего.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Амнуэль П. Р. Небо в рентгеновских лучах. М., Наука, 1984.

Бургин М. С. Ультрафиолетовая астрономия. М., Знание, 1983.

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

Ефремов Ю. Н. В глубины Вселенной. М., Наука, 1984.

Каплан С. А. Физика звезд. М., Наука, 1977.

Каплан С. А., Пикельнер С. Б., Цытович В. Н. Физика плазмы солнечной атмосферы. М., Наука, 1977.

Шкловский И. С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. М., Наука, 1984. Его же. Проблемы современной астрофизики. М., Наука, 1982.

Уолкер А. Золотой век физики Солнца. — В сб.: Физика за рубежом. Серия А. М., Мир, 1984.

НОВОСТИ АСТРОНОМИИ

ТАК ЛИ БЫЛ НЕПРАВ А. ЭЙНШТЕЙН?

То, что Вселенная должна расширяться, впервые теоретически показал советский ученый А. А. Фридман в 20-х годах, исходя из общей теории относительности, и вскоре его предсказание блестяще подтвердилось из наблюдений галактик благодаря работам американского астронома Э. Хаббла. Однако сам А. Эйнштейн при создании общей теории относительности ошибочно считал Вселенную статичной, и поэтому, чтобы как-то согласовать выводы теории с идеей о статичности Вселенной, он ввел в свои уравнения так называемый Λ -член, или, как еще говорят, космологическую постоянную. Дело в том, что при положительной величине постоянной Λ это соответствует введению сил отталкивания неизвестной природы, нейтрализующих действие сил притяжения, создаваемых гравитационным взаимодействием вещества Вселенной. Впоследствии, когда идея о нестационарности Вселенной получила всеобщее признание, А. Эйнштейн согласился с выводами А. А. Фридмана, а введение космологической постоянной посчитал «самой грубой ошибкой в своей жизни». Однако ученые не спешили с отказом от космологической постоянной Λ , поскольку она неоднократно их стала выручать в различных кризисных ситуациях при сопоставлении выводов теории с результатами наблюдений.

Уже вскоре после получения Э. Хабблом неопровержимых свидетельств в пользу «разбегания» галактик во все стороны с относительной скоростью, пропорциональной расстоянию между галактиками (закон Хаббла), обнаружилось, что продолжительность такого «разбегания» галактик должна быть меньше возраста Земли. В результате ряд ученых даже предлагали отказаться от общей теории относительности, однако ее сторонники «спасли» эту теорию, вновь вернувшись к космологической постоянной. Дело в том, что при достаточно малой величине Λ теория не противоречила наблюдаемому сейчас расширению Вселенной, но наличие $\Lambda \neq 0$ приводило к силам, ускоряющим космологическое расширение и удлиняющим время его продолжения. Потребовалось несколько десятилетий, прежде чем выяснилось, что получавшаяся небольшая продолжительность космологического расширения при $\Lambda = 0$ была вызвана ошибкой при определении постоянной Хаббла (коэффициента пропорциональности в законе Хаббла). Правильное же значение постоянной Хаббла давало достаточно большую продолжительность расширения даже в случае $\Lambda = 0$, и поэтому дальнейшее использование космологической постоянной большинство ученых посчитали ненужным. Правда, время от времени некоторые теоретики, чтобы разрешить те или иные космологические проблемы (распределение квазаров в пространстве, проблема горизонта событий и т. д.), «вспоминали» о космологической постоянной Λ , причем не только обсуждали применение случая $\Lambda \neq 0$, но и возможное объяснение сил отталкивания.

В 1968 г. академик Я. Б. Зельдович обратил внимание на то, что введение космологической постоянной соответствует представлениям о своеобразных проявлениях физического вакуума, представляющего собой согласно квантовой теории наименее энергетическое состояние всех полей взаимодействия. Квантовая теория физического вакуума предполагает полное отсутствие в нем реальных

частиц, образование которых связывается со своего рода фазовыми превращениями. В последнее время ряд теоретиков стали все больше и больше склоняться к предположению, что в начальной эпохе космологического расширения среда находилась в состоянии именно физического вакуума. Причем это расширение объяснялось особым характером проявления сил гравитации: для физического вакуума они являются силами отталкивания, что адекватно случаю с $\Lambda > 0$. Состояние физического вакуума обычно приписывается самым начальным стадиям космологического расширения, в ходе которого среда благодаря фазовым превращениям переходит в состояние реального вещества. В результате начинает действовать фридмановская теория расширения Вселенной при не равной нулю космологической постоянной. Таким образом, введение космологической постоянной для описания первых стадий расширения Вселенной согласуется с квантовым характером различных взаимодействий в то время, а, кроме того, позволяло устранить некоторые проблемы космологических теорий. Причем состояние физического вакуума предполагалось весьма непродолжительным, и это предположение давало результаты для современной эпохи расширения Вселенной, незначительно отличающиеся от полученных при $\Lambda = 0$.

Однако в последнее десятилетие все больше стало возникать признаков того, что складывается ситуация, весьма схожая с той, которая была на заре внегалактической астрономии. Уточнение постоянной Хаббла приводило к некоторому снижению продолжительности космологического расширения, тогда как оценка возраста некоторых шаровых скоплений звезд — самых старых образований в галактиках — давали значения, сравнимые с этой продолжительностью в пределах ошибок определения. Тем не менее в стане астрономов вплоть до недавнего времени царил относительное спокойствие, поскольку методика оценки возраста шаровых скоплений была не столь уж совершенна, а к тому же оценки возраста самих галактик с помощью более точных методик соответствовали вполне приемлемым значениям, существенно меньшим продолжительности космологического расширения. В частности, оценка возраста нашей Галактики базируется на теории синтеза в ней тяжелых химических элементов, развитие которой во многом обязано работам американского астрофизика У. Фаулера, за что он в 1983 г. был удостоен Нобелевской премии. Однако совсем недавно достигнутый прогресс в области ядерной физики позволил уточнить эту теорию, в результате чего Г. Клапдор и К. Гротц из института М. Планка (ФРГ) получили возраст Галактики, значительно превосходящий предыдущие оценки (*Astrophys. J. Letts.*, 1986, т. 301, № 2). Причем западногерманские ученые считают, что только предположение о космологической постоянной, не равной нулю в настоящее время, может спасти возникшую ситуацию.

Итак, в очередной раз появилась необходимость в привлечении космологической постоянной, обуславливающей увеличение продолжительности космологического расширения. Кстати, Г. Клапдор и К. Гротц ссылаются на то, что их результат согласуется с выводами о большей продолжительности космологического расширения, полученными некоторыми астрономами на основании статистических исследований квазаров. Однако следует подчеркнуть, что западногерманские ученые связывают наличие не равной нулю космологической постоянной с проявлением физического вакуума и в нашу эпоху, а это трудно сопоставимо с существующими представления-

ми. Но, может, космологическая постоянная определяется действием сил отталкивания иной природы, о которой пока еще никто не подозревает?

ПУЗЫРЧАТАЯ МЕТАГАЛАКТИКА

Идею о том, что крупномасштабная структура наблюдаемой части Вселенной, Метагалактики, состоит из огромных пустых ячеек, обрамленных отдельными галактиками, их группами, скоплениями и сверхскоплениями, впервые выдвинули советские ученые на основе теоретических расчетов (С. Ф. Шандарин и др.) и анализа распределения галактик и их скоплений вблизи сверхскопления Персея—Рыб (Я. Э. Эйнасто и др.). Предложенная около 10 лет назад идея поражала своей необычностью, но вскоре, в 1981 г., Р. Киришер и другие американские астрономы сообщили, что ими обнаружена огромная «дыра» в Метагалактике размером не менее 80 Мпк, где почти нет галактик. Затем Н. Бакалл и Р. Сонейра выявили еще одну такую «дыру» размером по лучу зрения уже не менее 100 Мпк. И все же многие астрономы хотя и стали признавать существование «пустот» («зон избегания» галактик) в Метагалактике, но считали, что ее крупномасштабная структура является клочковатой с наличием волокон как основных элементов. Дело в том, что наиболее крупные структурные образования из галактик, называемые сверхскоплениями, имеют весьма вытянутую форму и порою напоминают длинные цепочки из галактик и их скоплений. Например, недавно американские ученые Д. Батуски и Дж. Бернс обнаружили, что сверхскопление Персея—Рыб (названное так по созвездиям, в которых оно наблюдается) вместе с близлежащими к нему группами и скоплениями галактик представляет собой гигантское волокно, протянувшееся в длину на 400 Мпк.

Однако так называемое Локальное сверхскопление, в состав которого входит и наша Галактика, помимо своей вытянутой формы является еще и довольно плоской системой, видимой на небесной сфере как «Млечный Путь» галактик, перпендикулярный Млечному Пути звезд. Как известно, звездный Млечный Путь образуется пересечением небесной сферы плоскостью нашей Галактики, и так же, видимо, объясняется галактический «Млечный Путь», однако в отличие от Галактики Локальное сверхскопление обладает только этой своей плоской составляющей. Собственно говоря, отсюда легко понять, что если далекие сверхскопления по форме подобны Локальному, то наблюдаемые «с ребра» они действительно должны напоминать тонкие волокна, хотя на самом деле они вполне могут представлять собой стенки гигантских пустых ячеек, или «дыр», в Метагалактике. Но до недавнего времени отсутствовала какая-либо информация о том, действительно ли волокна замыкаются друг с другом в пространстве, образуя своеобразные соты. Требовались более тщательные исследования распределения скоплений и сверхскоплений в пространстве, и эту работу предприняли В. Лаппарент, М. Геллер и Дж. Хукра из Астрофизического центра в Кембридже (США). Недавно эти ученые опубликовали первые результаты своей работы, которая еще продолжается. И уже эти результаты свидетельствуют о том, что идея о ячеистой структуре Метагалактики, выдвинутая советскими учеными, блестяще подтверждается (Astrophys. J. Lettes., 1986, т. 302, № 1).

Американские ученые обследовали обширный участок неба

(свыше 700 кв. градусов), включая район северного галактического полюса и сверхскопление Волос Вероники (по названию созвездия). Обнаружилось, что распределение галактик и их скоплений действительно образует ячейки с типичным размером не менее 25 Мпк при максимальном размере не менее 50 Мпк. Причем стенки ячеек настолько тонки, что, видимые «с ребра», они выглядят как тонкие волокна, а наблюдаемые «анфас» и вовсе неразличимы на фоне других галактик и их скоплений. Это обстоятельство позволило американским ученым окрестить ячейки как «пузыри». В частности, по-видимому, наша Галактика находится на поверхности одного из таких «пузырей», представляющегося нам в виде Локального сверхскопления. Остается выяснить, являются ли «пузыри» пустыми внутри или они «наполнены» достаточным количеством межгалактического газа, не обнаруживаемого в оптическом диапазоне. Это имеет важное значение для оценки средней плотности вещества Метагалактики. Ведь от этой величины зависит дальнейшая судьба Вселенной: если «пузыри» действительно пустые, то средняя плотность вещества должна быть довольно незначительной (а именно это предпологают американские ученые), и в этом случае космологическая теория предсказывает, что расширение Вселенной будет продолжаться вечно и никогда не сменится сжатием.

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Напоминаем, что брошюры этой серии в розничную продажу не поступают и распространяются только по подписке, которая принимается во всех отделениях связи (индекс «Союзпечати 70101»).

Научно-популярное издание

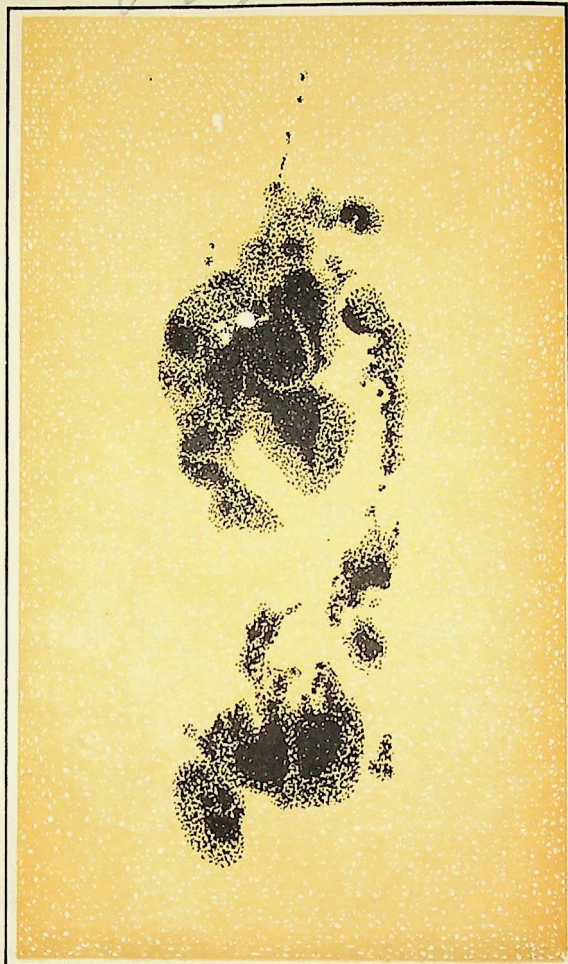
Мария Михайловна Кацова
Моисей Айзикович Лившиц

АКТИВНОСТЬ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД

Гл. отраслевой редактор Л. А. Ерышкин
Редактор Е. Ю. Ермаков
Мл. редактор Е. Е. Куликова
Обложка художника А. А. Астрецова
Худож. редактор Т. С. Егорова
Техн. редактор Н. В. Лбова
Корректор В. И. Гуляева

ИБ № 8210

Сдано в набор 20.06.86. Подписано к печати 11.07.86. Т 02041. Формат бумаги 84×108¹/₂. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,61. Тираж 31 060 экз. Заказ 1203. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 864209. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.



СЕРИЯ **КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ**