

УДК 523 164 4

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ЗВЕЗД

(Обзор)

В. В. Железняков

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение
2. Звезды-сверхгиганты
3. Молодые звезды типа Т Тельца
4. Магнитные Ap-звезды
5. Вспыхивающие звезды типа UV Кита
6. Антарес
7. Двойные системы типа RS Гончих Псов
8. Заключительные замечания

1. ВВЕДЕНИЕ

В этом кратком обзоре речь будет идти о радиоизлучении «обычных» звезд, располагающихся на диаграмме Герцшпрунга—Рессела в области главной последовательности, а также гигантов и сверхгигантов. Мы не станем рассматривать радиоизлучение вырожденных звезд — белых карликов и нейтронных звезд. Поэтому в стороне останутся такие экзотические объекты, как SS 433 (см. о них, например, статью [1]) и радиопульсары, которым посвящены монографии [2, 3].

В настоящее время интерес к радиоизлучению звезд резко возрос. Прежде всего это связано с наблюдениями, проведенными на борту рентгеновских спутников, в особенности на борту летающей обсерватории «Эйнштейн». Чувствительность аппаратуры, установленной там для измерений точечных источников в мягком рентгене (0,2—4,0 кэВ), на три порядка превосходит чувствительность установок, с помощью которых проводились предыдущие обзоры космических источников в рентгеновском диапазоне.

В результате обзора на спутнике «Эйнштейн» было установлено [4, 5], что среди звезд практически всех спектральных классов, располагающихся на диаграмме Герцшпрунга—Рессела, есть интенсивные рентгеновские источники со светимостью L_x в пределах от 10^{26} до 10^{33} эрг·с⁻¹. Это обстоятельство иллюстрируется рис. 1, на котором изображена диаграмма Герцшпрунга—Рессела, содержащая звезды — интенсивные рентгеновские источники, а также рис. 2, на котором указаны пределы светимостей L_x для звезд разных классов. Точками на рис. 2 отмечены пределы наблюдаемых значений L_x для звезд данного класса; горизонтальные отрезки характеризуют среднее значение L_x для звезд из соответствующего спектрального интервала; кривыми a , b , c указаны рентгеновские потоки, рассчитанные в предположении об акустическом нагреве звездных корон конвективными слоями (a , b — по статье [5], c — по статье [7]).

Обнаруженное излучение естественным образом объясняется тормозным излучением горячей плазмы с мерой эмиссии $EM = \int N^2 dV \ll$

$\leq 10^{54} \text{ см}^{-3}$ и кинетической температурой $T \leq 10^7 \text{ К}^*$. Сказанное означает, что у звезд есть короны — реальный источник радиоизлучения.

Старые представления [7], согласно которым основной причиной горячих корон служит акустический нагрев плазмы от конвективных зон в звездах, оказались неверными. Согласно этому представлению короны могут существовать только у звезд классов F, G и K; они должны отсутствовать у звезд позднего B и раннего A классов и у звезд класса M. Данные, полученные на «Эйнштейне», указывают на наличие горячих плазменных образований (звездных корон) среди звезд всех классов, за исключением холодных звезд, относящихся к позднему M классу.

Вторая причина повышенного внимания к исследованию радиоизлучения звезд — ввод в действие новых радиоастрономических антенных систем, обладающих высокой чувствительностью. Здесь прежде всего следует указать на VLA (Very Large Array) — систему апертурного синтеза, составленную из двадцати семи параболических антенн диаметром 25 м, размещенных в форме буквы Y на расстоянии в 21 км. Эта система в сантиметровом диапазоне имеет угловую разрешающую способность в $0'',15$ и чувствительность по потоку около $0,1 \text{ мЯн}$

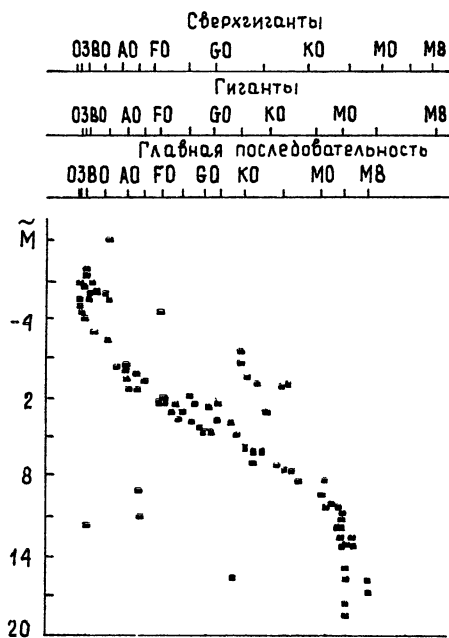


Рис. 1.

Рис. 1. Диаграмма Герцшпрунга—Рессела (спектральный класс — абсолютная звездная величина \tilde{M}), на которой отмечены звезды с рентгеновским излучением, зарегистрированным на спутнике «Эйнштейн» [4].

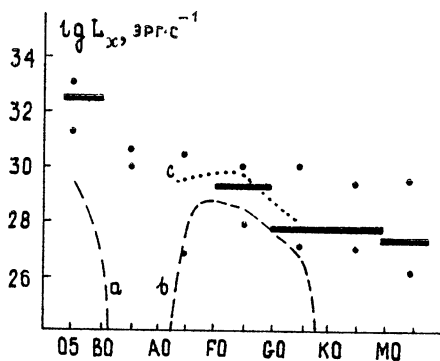


Рис. 2.

Рис. 2 Рентгеновская светимость L_x (в эрг.с^{-1}) в полосе $0,2\text{—}4 \text{ кэВ}$ для звезд разных классов [4]

($1 \text{ мЯн} = 10^{-26} \text{ эрг.см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$). Системы типа VLA и несколько менее чувствительные антенны (ПАНАН-600, Боннский радиотелескоп, система в Вестерборке и др.) обеспечивают реальные возможности регистрации радиоизлучения звезд.

В наши дни состояние исследований радиоизлучения звезд напоминает стадию развития солнечной радиоастрономии 45—50-х годов — время первых наблюдений радиоизлучения Солнца и первых гипотез о происхождении этого излучения.

* При этом мера эмиссии выражается через рентгеновскую светимость L_x в интервале $0,2\text{—}4,0 \text{ кэВ}$ и кинетическую температуру T соотношением $EM = 10^{19} T^{1/2} L_x \text{ см}^{-3}$ [6].

Исходным пунктом при оценке перспектив радиоастрономических исследований звездных корон и хромосфер служит то обстоятельство, что регистрация радиоизлучения «спокойного» Солнца на межзвездных расстояниях лежит ниже пределов возможностей современных радиоастрономических средств. Именно, на волнах $\lambda \sim 1 \div 10$ см поток радиоизлучения «спокойного» Солнца $S_\nu \leq 10^{-2} \div 10^{-1}$ мЯн на расстояниях $R \geq 1,5$ пс. Ситуация на более длинных волнах еще хуже. Поэтому уверенные радионаблюдения возможны только для звезд больших размеров (радиусом $R_* \gg R_\odot$ — радиуса Солнца), для звезд с высокой яркостной температурой $T_b \gg T_\odot$ (на сантиметровых волнах яркостная температура «спокойного» Солнца $T_\odot \sim 10^4 \div 5 \cdot 10^4$ К) и, наконец, для звезд, обладающих высоким уровнем активности.

2. ЗВЕЗДЫ-СВЕРХГИГАНТЫ

Примером уже изученной в радиоастрономии звезды больших размеров служит Бетельгейзе (α Ori) — красный сверхгигант класса М 2,5 I ab с радиусом $R_* \approx 350 R_\odot$ (другой пример — одна из звезд в системе Антарес, см. ниже разд. 6). Частотный спектр α Ori, приведенный на рис. 3, построен по данным, суммированным в статье [8]. Значения потока относятся к минимальному уровню излучения на каждой частоте: в некоторые периоды (особенно на 10,7 ГГц) наблюдаемые потоки были несколько выше указанных на рисунке.

Из рис. 3 ясно, что на частотах $\nu \geq 20$ ГГц наблюдаемые значения спектрального потока S_ν соответствуют спектру излучения черного диска с температурой $T \approx 3600$ К и угловым диаметром $d^* = 0'',075$. На более низких частотах спектр более пологий. Имеющиеся данные не противоречат предположению о том, что в диапазоне $\nu < 20$ ГГц спектр степенной ($S_\nu \sim \nu^\alpha$), со спектральным индексом $\alpha = 0,6$.

Высокочастотная компонента спектра, очевидно, связана с излучением тех слоев атмосферы Бетельгейзе, которые лежат близко к фотосфере звезды. Температура последней, судя по оптическим измерениям [9], лежит в пределах 3200—4000 К. Диаметр звезды, как показывают измерения методами оптической интерферометрии, равен $0'',044$ — $0'',079$ (см. [10] и приведенную там литературу). На низких частотах $\nu < 10$ ГГц вклад этих слоев в наблюдаемое радиоизлучение незначителен. Здесь, по всей вероятности, определяющую роль играет внешняя оболочка α Ori.

В этой связи отметим, что в процессе рентгеновского обзора [4] корона у Бетельгейзе не обнаружена. Можно утверждать, что ее свечимость в мягком рентгене L_x не выше $10^{30,2}$ эрг·с⁻¹. Источником радиоизлучения с пологим спектром в области $\nu < 10 \div 20$ ГГц может быть переходная область от фотосферы к хромосфере, которая простирается на расстояние в 2—3 радиуса звезды, или расширяющаяся оболочка звезды, образованная звездным ветром [8].

Модель со звездным ветром станет более реальной, если в процессе дальнейших наблюдений будет установлено, что аппроксимация

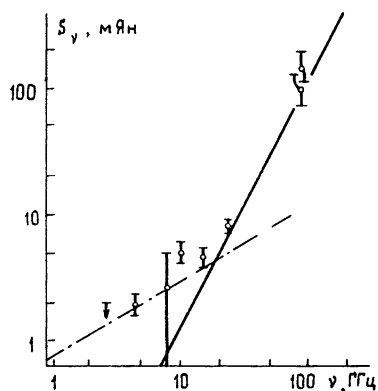


Рис 3 Частотный спектр микроволнового излучения Бетельгейзе Наряду с результатами и ошибками наблюдений отмечены: сплошной линией — спектр излучения черного тела диаметром $d^* = 0'',075$ с температурой $T = 3600$ К, штрихпунктиром — степенной спектр звездного ветра с индексом $\alpha = 0,6$ [8]

спектра в диапазоне $\nu < 10 \div 20$ ГГц степенным законом с индексом $\alpha = 0,6$ достаточно точна. Как следует из рис. 3, в настоящее время такой уверенности нет.

Зависимость $S_\nu \sim \nu^{0,6}$ выделена в том отношении, что она описывает частотный спектр тормозного излучения из оптически толстой плазмы, имеющей сферически симметричное распределение плотности по закону $1/r^2$ (в нашем случае r — расстояние от центра звезды). Закон $1/r^2$ описывает распределение электронной концентрации в изотермической оболочке, расширяющейся с постоянной скоростью.

В сказанном нетрудно убедиться, учитывая, что спектральный поток излучения «черной» сферы радиуса r_s , нагретой до температуры T , равен

$$S_\nu = (\nu^2 \kappa T / 2\pi c^2) (r_s / R)^2. \quad (2.1)$$

Коэффициент тормозного поглощения в плазме $\mu \propto (N/\nu)^2$ (см., например, [11]), и, следовательно, оптическая толщина для центрального луча в сферически-симметричной плазме с распределением $N \propto 1/r^2$ определяется следующим соотношением:

$$\tau = \int_r^\infty \mu dr \propto 1/\nu^2 r^3. \quad (2.2)$$

Эффективно излучающая сфера на частоте ν соответствует значению $\tau \simeq 1$. Согласно (2.2), ее радиус $r_s \propto \nu^{-2/3}$. Отсюда и из (2.1) следует, что [12]

$$S_\nu \propto \nu^{2/3} \simeq \nu^{0,6}. \quad (2.3)$$

3. МОЛОДЫЕ ЗВЕЗДЫ ТИПА Т ТЕЛЬЦА

Эти звезды находятся в фазе эволюции до главной последовательности. Их возраст порядка $3 \cdot 10^6$ лет, масса $M_* \sim M_\odot$, оптическая светимость $L \sim 10 \div 10^2 L_\odot$ (M_\odot и L_\odot — соответствующие величины для Солнца). Наличие эмиссионных линий, инфракрасного и ультрафиолетовых избытков в спектре свидетельствует о существовании протяженных оклозвездных оболочек, созданных в результате аккреции на звезду или вследствие истечения материи из звезды (звездного ветра). Детальная структура звезд типа Т Тельца пока не ясна.

Наблюдения на волне 6 см, проведенные в Вестерборке [12], обнаружили радиоизлучение от звезд RW Aur, AS 205, V 1121 Oph, VY Mon, относящихся к обсуждаемому типу. В спокойной фазе спектральный поток $S_\nu \sim 1,5 \div 2$ мЯн. Если предположить, что эффективный радиус источника сравним с радиусом звезды: $r_s \sim R_* \sim 5R_\odot$, то яркостная температура T_b составит $(1 \div 3) \cdot 10^9$ К. Излучение столь высокой температуры может быть создано лишь нетепловыми механизмами. Более вероятным представляется другой вариант [12], согласно которому радиоизлучение — тепловое тормозное; оно создается оптически толстым источником с температурой $T \sim 10^4$ К. В этом случае наблюдаемые значения S_ν будут обеспечены, если радиус источника $r_s \sim (350 \div 1770)R_\odot$. Последнее означает, что источником служит протяженная оболочка вокруг звезды.

О характере этой оболочки можно судить по частотному спектру радиоизлучения. Если источник оптически толстый, со звездным ветром, то, как было выяснено в предыдущем разделе, его спектр должен быть близок к $S_\nu \propto \nu^{0,6}$. В случае аккреции, проходящей в режиме свободного падения, следует ожидать более пологой зависимости $S_\nu \propto \nu^{0 \div 0,1}$ [26]. Наблюдения Т Тельца на нескольких частотах в интервале между 2,7 и 15 ГГц [13] дают значения $\alpha \simeq 0,6 \div 1,0$, что свиде-

тельствует в пользу звездного ветра. Модель звездного ветра для Т Тау подтверждается и оптическими наблюдениями — смещением эмиссионной линии H_{α} в фиолетовую сторону.

Внешние оболочки еще более молодых объектов — протозвезд, находящихся на стадии сжатия вещества из газовой-пылевой комплекса, активно изучаются радиоастрономическими методами. При наблюдениях исследуется мощное мазерное излучение в линиях молекул гидроксидов OH , воды H_2O и оксид кремния SiO . В этом обзоре результаты наблюдений в спектральных радиолниях не обсуждаются; читателей, интересующихся указанной проблемой, мы отсылаем к обзорам [50, 51] и цитированной там литературе.

4. МАГНИТНЫЕ Ар-ЗВЕЗДЫ

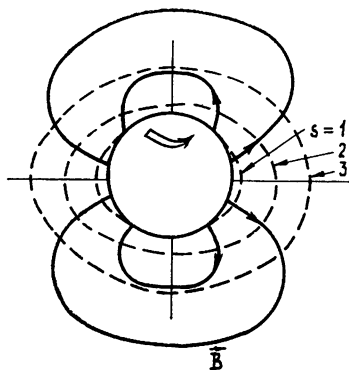
Пекулярные звезды (Ар-звезды) располагаются на главной последовательности и принадлежат классу А (точнее, В8-А-F0). Их пекулярность заключается в неоднородном распределении ряда химических элементов (Mn, Cr, Sr и редких земель) по фотосфере. Эта неоднородность проявляется в периодических вариациях профиля и интенсивности спектральных линий при вращении звезды. У Ар-звезд с узкими линиями по эффекту Зеемана обнаружены сильные магнитные поля (до нескольких десятков тысяч гаусс). Форма профиля линий указывает на то, что магнитные поля Ар-звезд не имеют локального характера типа полей солнечных пятен, а принадлежат звезде в целом. Наиболее адекватной моделью магнитного поля Ар-звезд служит наклонный ротатор с магнитным диполем, расположенным в центре звезды. Возможными вариантами являются также диполи, несколько смещенные от центра звезды, а также диполи с примесью мультиполей. Эти модели стали основными с переходом к более корректным фотоэлектрическим измерениям магнитных полей звезд в водородной линии H_{α} (см. статью [14] и др.).

Вопрос о наличии корон у магнитных звезд в настоящее время окончательно не решен. Согласно [15], звезды класса А — сильно переменные рентгеновские источники, изменяющие свою светимость в десятки и сотни раз, причем магнитные звезды среди них не выглядят в X-лучах как аномально сильные или слабые объекты. По данным [4], для звезд класса А величина $L_x \sim 10^{26} \div 10^{31} \text{ эрг} \cdot \text{с}^{-1}$. Верхний предел L_x для четырех Ар-звезд, попавших в обзор на спутнике «Эйнштейн», составил $10^{28,1-29,3} \text{ эрг} \cdot \text{с}^{-1}$. Однако корреляция рентгеновских источников с магнитными звездами специально не изучалась, хотя подобное исследование внесено в программу будущих обзоров. Вместе с тем работа [4] содержит данные о рентгеновском излучении в двойной системе α Гончих Псов (αCVn , класс A0p + F), удаленной от нас на расстояние около 40 пс. Согласно этим данным, $L_x \sim 10^{29} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-1}$ и $T \sim 10^7 \text{ К}$. Компонента $\alpha^2 \text{CVn}$ этой двойной системы — магнитная звезда с полем на полюсах $B_0 \sim 10^4 \text{ Гс}$ (см. [14]). К сожалению, компоненты двойной системы в рентгене не разрешены и принадлежность горячей короны именно к $\alpha^2 \text{CVn}$, а не к ее компаньону, однозначно не установлена.

Ожидаемые спектр и поляризация микроволнового излучения магнитных звезд при условии, что последние окружены горячими коронами, изучены в работе [16]. Поскольку размеры магнитных звезд $R_* \sim (1 \div 4) R_{\odot}$, а концентрация частиц в коронах А-звезд порядка значений, типичных для внутренней короны Солнца (10^9 см^{-3}), ясно, что тормозное излучение магнитных звезд находится на солнечном уровне. В настоящее время мало надежд его обнаружить даже от ближайших Ар-звезд (см замечания, сделанные во Введении). Однако в коронах магнитных звезд должно существовать эффективное циклотронное из-

лучение, частоты которого располагаются в микроволновом диапазоне. Если оптическая толщина короны по циклотронному поглощению не мала по сравнению с единицей, яркостная температура радиоизлучения поднимается до уровня $T_b \sim T_c \sim 10^7$ К. Это обстоятельство открывает возможность обнаружения радиоизлучения магнитных звезд.

Теория микроволнового излучения магнитных звезд строится по аналогии с теорией S-компоненты солнечного радиоизлучения (см. [17, 18]). Как и в случае S-компоненты, на магнитных звездах вклад в циклотронное излучение на данной частоте ν



вносят гирорезонансные слои, в которых электронная гирочастота $\nu_B \equiv eB/2\pi mc = \nu/s$, где s — номер циклотронной гармоники. Для магнитного поля, созданного диполем, локализованным в центре звезды, такие гирорезонансные слои будут окружать звезду замкнутыми оболочками, представленными на рис. 4. Если гирорезонансный слой оптически толстый ($\tau_s > 1$), то яркостная температура излучения из этого слоя $T_b \simeq T_c \sim 10^7$ К. Если же $\tau_s \ll 1$ (а τ_s падает с ростом s примерно как $(\chi T_c/mc^2)^{2s}$, см. [11]), то $T_b \ll T_c$, и излучением таких слоев можно пренебречь. Фактически излучает только самый верхний оптически толстый гирорезонансный слой, так как излучение нижних слоев с меньшими номерами s не выходит наружу, поглощаясь в верхнем слое. Расчеты по-

Рис 4 Модель звезды с дипольным магнитным полем (диполь в центре звезды) Пунктиром указаны тонкие гирорезонансные слои, в которых гирочастота $\nu_B = \nu/s$

казывают, что излучает слой $s=5$ на необыкновенных и слой $s=4$ на обыкновенных волнах. Частотный спектр излучения имеет вид [16]

$$S_\nu = \begin{cases} \frac{\chi T_c}{c^2} \frac{\pi R_*^2}{R^2} \left(\frac{s\nu_0}{2} \right)^{23} \nu^{4/3}, & \nu \leq s\nu_0/2 \\ \frac{4}{3} \frac{\chi T_c}{c^2} \frac{\pi R_*^2}{R^2} \left[1 - \left(\frac{\nu}{s\nu_0} \right)^2 \right] \nu^2, & s\nu_0/2 \leq \nu \leq s\nu_0 \end{cases} \quad (4.1)$$

(ν_0 — значение гирочастоты ν_B на магнитном полюсе). Этот спектр изображен пунктиром на графике рис. 5 для $s=4; 5$.

Более точный расчет, учитывающий вклад в циклотронное излучение вышележащих гирорезонансных слоев, а также существование областей прозрачности в тех частях гирорезонансного слоя, где магнитное поле ориентировано вдоль луча зрения, дает несколько иную форму частотного спектра, также указанную на рис. 5. На рисунке приведены спектры отдельно в необыкновенном (S_I) и обыкновенном излучении (S_{II}), а также спектр $S = (S_I + S_{II})/2$, который будет регистрироваться на антенну, принимающую линейно-поляризованное излучение. Из рисунка ясно, что результирующий спектр $S(\nu)$ близок к спектру излучения четвертого гирорезонансного слоя $S_4(\nu)$, построенного в предположении, что его оптическая толщина везде много больше единицы. Максимум излучения приходится на частоту $\nu_{\max} \simeq 4\nu_0/\sqrt{2}$. Далее, на рис. 6 приведены частотные спектры циклотронного излучения в случае, когда магнитный диполь ориентирован перпендикулярно лучу зрения.

Из сопоставления рис. 5 и 6 следует, что если звезда является наклонным ротатором (т. е. магнитный диполь составляет отличный от

нуля угол с осью вращения звезды), то в процессе вращения возникает модуляция излучения. Она будет обусловлена изменением частотного спектра в зависимости от ориентации магнитного диполя относительно наблюдателя.

На рис. 5 указана также степень поляризации P , достигающая $\sim 25\%$ в максимуме спектра. Поляризация также будет меняться при вращении звезды — наклонного ротатора, исчезая в моменты, когда магнитный диполь располагается в плоскости, ортогональной лучу зрения.

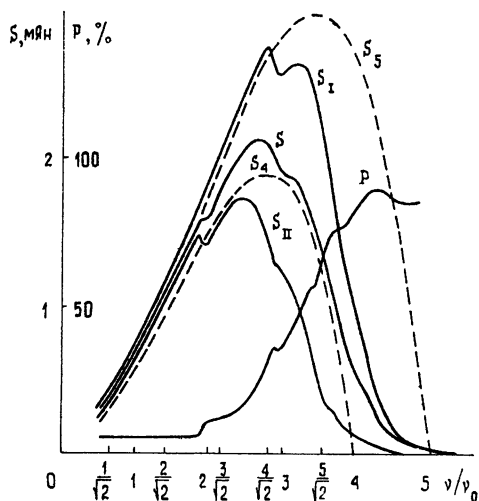


Рис. 5.

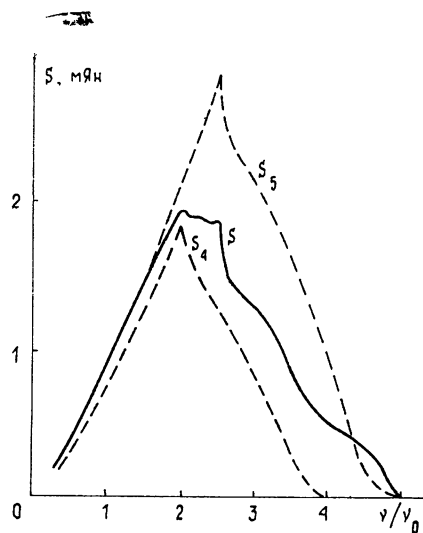


Рис. 6.

Рис. 5. Частотные спектры и поляризация P циклотронного излучения магнитной звезды (ось диполя направлена на наблюдателя) [16]

Пунктирные кривые — спектры излучения оптически толстых гиррезонансных слоев с номерами $s = 4$ и $s = 5$, $S_1(v)$ и $S_{II}(v)$ — корректные спектры необыкновенного и обыкновенного радиоизлучения, регистрируемый антенной с линейной поляризацией

Рис. 6 Частотные спектры циклотронного излучения магнитной звезды (ось диполя ориентирована перпендикулярно лучу зрения)

Пунктирные кривые — спектры излучения оптически толстых гиррезонансных слоев $s = 4$ и $s = 5$, $S(v)$ — корректный частотный спектр излучения при приеме на антенну, регистрирующую линейную поляризацию [16]

Результаты расчета частотных спектров и поляризации радиоизлучения магнитных Ар-звезд, представленные на рис. 5, 6, относятся к модели с центрально-симметричным распределением электронной концентрации в звездной короне. Вообще говоря, не исключено, что лучшим приближением к реальным условиям на магнитных звездах служит модель, в которой корональная плазма занимает не всю окрестность звезды, а сосредоточена в нескольких магнитных трубках, опирающихся на фотосферу. В пользу такой модели свидетельствует сильная нестабильность рентгеновского излучения корон А-звезд, на которую указывалось в [4, 15]. Эта нестабильность может быть связана с активными формами короны, характерными для Солнца [15]. Впрочем, аналогия с Солнцем здесь не может быть особенно глубокой, так как в солнечных условиях структура короны в значительной степени отражает и повторяет структуру локальных магнитных полей, связанных с пятнами. На Ар-звездах, напротив, магнитное поле, по всем данным, имеет иной характер.

Вернемся теперь к обсуждению микроволнового излучения звезд с дипольным магнитным полем и симметричной короной. Проблема

обнаружения такого излучения существенно зависит от величины ожидаемых спектральных потоков. Оценки показывают [16], что для звезды α^2 CVn поток излучения S_ν может составлять 1,2 мЯн на 15 ГГц и 8 мЯн на 80 ГГц (последнее значение S_ν относится к максимуму частотного спектра). При оценках учитывалось, что для α^2 CVn радиус звезды $R_* \simeq 3,7 R_\odot$, магнитное поле на полюсе $B_0 \simeq 10^4$ Гс (см. [14]) и расстояние до звезды $R \simeq 42$ пс. Если у звезды ϵ Большой Медведицы, удаленной от нас на расстояние $R \simeq 20$ пс, есть магнитное поле (по данным [19] можно заключить, что ее магнитное поле $B_0 \sim \sim 3 \cdot 10^3$ Гс), то ожидаемые потоки S_ν составят 1,4 мЯн на 15 ГГц и 2 мЯн в максимуме циклотронного излучения (на 23 ГГц).

Потоки излучения такого же порядка были указаны много лет назад при обсуждении возможности регистрации радиоизлучения звезд [20, 21]. В то время эти значения S_ν лежали далеко за пределами чувствительности радиоастрономических систем. Позднее было сделано несколько безуспешных попыток обнаружить радиоизлучение Ар-звезд (см. [47-49]). Среди них отметим наблюдения [40] тринадцати Ар-звезд (включая α^2 CVn и ϵ UMa) на частоте 15 ГГц с помощью 100-метрового Боннского радиотелескопа. Однако предел обнаружения (от 3 до 8 мЯн) был выше ожидаемых значений потока на той же частоте, которые были найдены на основе теории теплового циклотронного излучения магнитных звезд. В настоящее время, как уже отмечалось во Введении, положение существенно изменилось благодаря вводу в действие радиоастрономических систем высокой чувствительности. Регистрация потоков в несколько десятых миллиардных с их помощью стала вполне осуществимой задачей.

Важным обстоятельством является тот факт, что циклотронное излучение с потоками указанной величины будет сохраняться практически неизменным при значительном уменьшении электронной концентрации в короне звезды. Дело в том, что смена эффективно излучающего слоя (скажем, $s=3$ вместо $s=4$) происходит при изменении N более чем на два порядка. При этом поток тормозного рентгеновского излучения, пропорциональный N^2 , изменится на пять порядков. Поэтому вполне реальна ситуация, когда магнитная звезда, окруженная достаточно разреженной короной, остается эффективным источником микроволнового циклотронного излучения, в то время как тормозное рентгеновское излучение окажется ниже чувствительности приемной аппаратуры.

Обнаружение и исследование радиоизлучения магнитных звезд позволит по частоте максимума частотного спектра ν_m установить величину $s\nu_0$, т. е. произведение sB_0 , где B_0 — магнитное поле на полюсе звезды. Номер эффективно излучающего гирорезонансного слоя s зависит от величины электронной концентрации в короне, которая может быть установлена в результате рентгеновских измерений. Последнее, впрочем, не особенно необходимо вследствие отмечавшей выше слабой зависимости номера s от концентрации N . В результате по известной ν_m можно найти величину магнитного поля звезды B_0 , что особенно существенно для звезд с широкими спектральными линиями, к которым неприменима обычная методика измерений магнитных полей по зееманскому расщеплению. Более детальные данные о распределении магнитного поля в окрестности звезды и об ориентации магнитного диполя можно получить, изучая вариации частотного спектра и степени поляризации в процессе вращения звезды. Далее, по наблюдаемому уровню излучения по данной частоте (например, на частоте ν_m) можно определить $T_c R_*^2 / R^2$. Зная угловые размеры звезды (величину R_*/R), найдем кинетическую температуру короны T_c .

5. ВСПЫХИВАЮЩИЕ ЗВЕЗДЫ ТИПА UV КИТА

Эта группа, типичным представителем которой служит двойная звезда UV Кита (UV Ceti), удаленная от нас на сравнительно небольшое расстояние (2,7 пс), объединяет звезды класса dMe — красные карлики на главной последовательности. Звезды, о которых идет речь, отличаются высокой вспышечной активностью в хромосферных линиях Ca II и обнаруживают синдром ВУ Дракона. Последний заключается в появлении «фотометрических волн» — периодических изменений потока излучения в непрерывном спектре с амплитудой в десятки процентов. Синдром ВУ Dга объясняется наличием на фотосфере звездных пятен, аналогичных солнечным, но покрывающих значительно большую площадь — до 10—20% площади фотосферы.

В процессе звездного обзора на спутнике «Эйнштейн» было обнаружено рентгеновское излучение горячей плазмы в окрестности звезд типа UV Кита (т. е. звездные короны). Например, рентгеновская светимость самой UV Кита составляет $10^{27,5}$ эрг·с⁻¹.

Общее магнитное поле во вспышечных звездах не зарегистрировано с точностью до 100—160 Гс [22]. Сложные профили спектральных линий ВУ Dга связаны не с магнитным полем, как это предполагалось ранее в [23], а обусловлены суперпозицией линий двойной системы (в которую входит ВУ Dга), сдвинутых одна относительно другой за счет эффекта Доплера при орбитальном движении. Этот отрицательный результат, однако, не исключает существования сильных локальных полей (до 10^4 — $1,5 \cdot 10^4$ Гс) в звездных пятнах. Такие поля, по-видимому, обнаружены, но не во вспышечных звездах типа UV Кита, а в G-звездах солнечного типа ξ Boo A и 70 Ori A. Величина полей составляет 1800—2600 Гс [24].

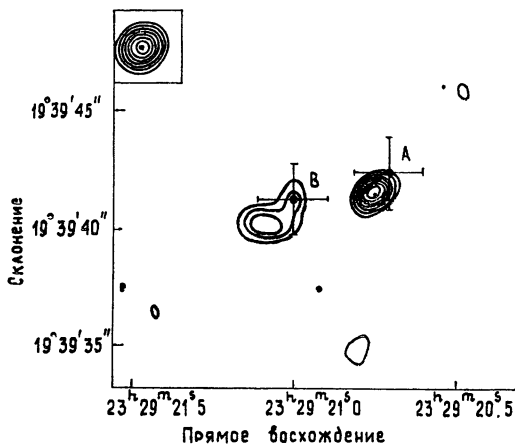


Рис. 7.

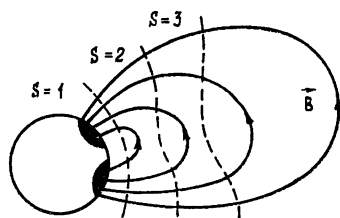


Рис. 8.

Рис 7. Радиоизофоты компонент А и В двойной системы EQ Пегаса, полученные на VLA ($\lambda = 6$ см) [6].

Рис 8. Модель циклотронного источника радиоизлучения UV Кита и χ^1 Орiona. Пунктиром указаны гиросрезонансные слои, в которых гирочастота $\nu_B = \nu/s$ ($s=1, 2, 3, \dots$)

Радиоизлучение от звезд типа UV Кита зафиксировано и в отсутствие вспышек. Его уровень при этом составляет единицы или доли миллианских: $S_\nu = 1,55 \pm 0,27$ мЯн для UV Ceti [25], $S_\nu = 0,69 \pm 0,1$ мЯн и $0,4 \pm 0,1$ мЯн на волне $\lambda = 6$ см для компонент А и В двойной системы EQ Peg соответственно [6]. В этой системе обе звезды класса dM3,5e и dM4,5e, разнесенные на 24 а.е. одна от другой, относятся к типу UV Ceti. При наблюдениях на VLA их радиоизлучение было разрешено благодаря достаточно большому угловому расстоянию между компонентами А и В (см. радиоизофоты EQ Peg на рис. 7).

Изофоты построены через 0,1 от максимальной интенсивности излучения, начиная с 0,3 этой величины. Точками отмечены положения обеих компонент системы, полученные из оптических наблюдений; здесь же указаны неопределенности в их координатах. В верхней левой части рисунка изображена синтезированная антенная диаграмма.

Заметим, что в серии наблюдений [25] на VLA было обнаружено также излучение от звезды солнечного типа χ^1 Ori (класс GOV, расстояние до Земли $R \approx 10$ пс, рентгеновская светимость $L_x \approx 10^{29,6}$ эрг·с⁻¹). Поток радиоизлучения от этой звезды на 6 см составил $0,6 \pm 0,27$ мЯн.

Радиоизлучение звезд типа UV Кита и χ^1 Ori в спокойные периоды интерпретируется в [6, 25] по аналогии с теорией излучения локальных источников S-компоненты на Солнце [27] как циклотронное излучение корональных электронов в магнитном поле звездных пятен. Если на $\lambda = 6$ см яркостная температура источников достигает температуры короны $T_c \sim 10^7$ К, то размеры источников, обеспечивающие наблюдаемые значения потока радиоизлучения, оказываются следующими: $r_s \sim R_\odot$ для UV Ceti (радиус звезды $R_* \approx 0,24 R_\odot$) и $r_s \sim (2 \div 3) R_\odot$ для χ^1 Ori (у которой $R_* \approx 1,16 R_\odot$). Таким образом, в обоих случаях источники значительно больше самой звезды. Это может быть оправдано высокими значениями напряженности магнитных полей звездных пятен, благодаря которым оптически толстые гирорезонансные слои выносятся далеко за пределы звезды (см. рис. 8).

Наиболее полные наблюдения радиоизлучения звезд типа UV Кита во время вспышки были проведены группой авторов статьи [28]. Они относились к звезде YZ CMi класса dM 4,5e и имели комплексный характер — одновременно велась регистрация радио-, оптического и рентгеновского излучения. Результаты представлены на рис. 9. Рентгеновские данные, полученные на спутнике «Эйнштейн», включают в себя зависимости температуры T горячей плазмы во время вспышки, меры эмиссии $EM = \int N^2 dV$ и потока X-лучей в полосе 0,2—4,0 кэВ (точнее, числа отсчетов рентгеновских счетчиков в секунду-величины I_x) от времени t . В оптике получены профили интенсивности вспышки в непрерывном спектре (U -полоса), а также в линиях H_β , H_γ и в континууме 4680 Å. Радиоданные представлены наблюдениями в Джодрелл-Бэнк на частоте 408 МГц, проведенными с помощью интерферометра из антенн диаметром 76 и 25 м (время накопления 2 мин). Спектральный поток радиоизлучения S_ν на нижнем графике представлен с расширенной шкалой времени t . Радиоизлучение появилось с запаздыванием в 17 мин после импульсной фазы вспышки. Заметим, что аналогичное явление, но с меньшим запаздыванием, наблюдалось ранее во время вспышек UV Ceti [29].

Максимальный зарегистрированный поток радиоизлучения от вспышки YZ CMi составил 60 мЯн (см. рис. 9). Для источника размером $r_s \sim R_*$ (т. е. порядка нескольких десятых от радиуса Солнца R_\odot) необходимая для обеспечения такого потока яркостная температура T_b составит $2 \cdot 10^{12}$ К. Это исключает тепловые механизмы излучения; скорее всего, по мнению авторов [28], здесь реализуется нетепловой синхротронный механизм, аналогичный механизму генерации радиоизлучения IV типа на Солнце. Впрочем, длительность излучения (~ 10 мин) более характерна для всплесков II типа, хотя временной сдвиг в 17 мин (особенно с учетом малых размеров звезды — красного карлика) представляется аномально большим. Более уверенные заключения о механизме радиоизлучения вспыхивающих звезд можно будет сделать, только располагая более полной информацией о свойствах этого излучения (прежде всего, о его динамическом спектре).

Выше рассматривались объекты, радиоизлучение которых напоминает солнечное радиоизлучение, хотя масштабы явлений — размеры пятен и связанных с ними радиоисточников, мощность и частота вспышек, величина магнитного поля — могут быть значительно больше. Так, например, в спокойные периоды радиоизлучение EQ Peg на три порядка превышает уровень излучения «спокойного» Солнца; рентгеновский поток при этом на полтора порядка больше солнечного и т. д. [6].

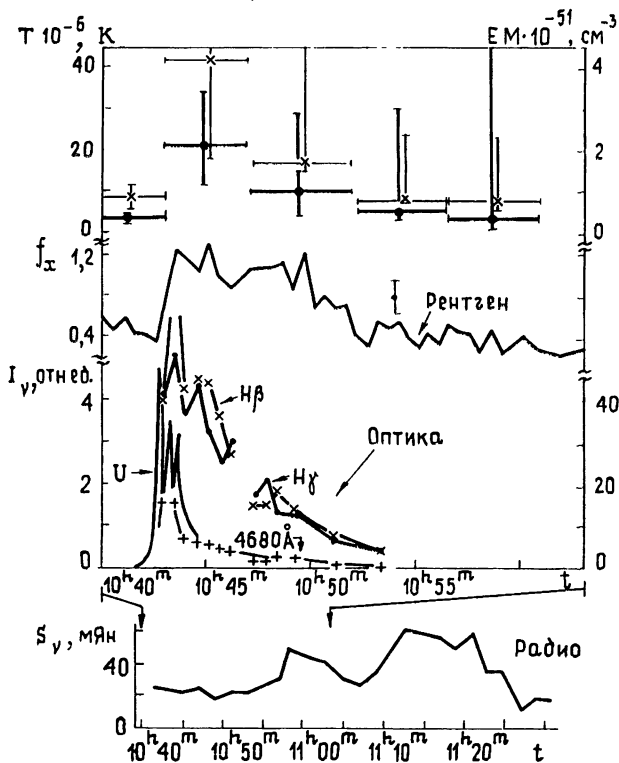


Рис 9. Поток рентгеновского, оптического и радиоизлучения звезды YZ CMi 25 октября 1979 г

Точками на верхнем графике отмечены значения кинетической температуры T , крестиками — мера эмиссии EM . Фотометрические данные в U -полосе и интенсивность континуума 4680 \AA приведены в относительных единицах, отмеченных на шкале I_v . Излучение в линиях H_β и H_γ характеризуется потоком S в полосе $\Delta\lambda = \text{\AA}$ [28]

Теперь приведем пример объекта, в котором модель генерации радиоизлучения, по-видимому, существенно отличается от моделей, принятых для объяснения солнечного радиоизлучения.

6. АНТАРЕС

Антарес ($\alpha \text{ Sco}$) — двойная система, в состав которой входит переменная звезда — сверхгигант класса $M1,5 \text{ Ia-b}$ с сильным звездным ветром из нейтрального газа и горячая звезда $B2,5 \text{ V}$ главной последовательности, движущаяся сквозь звездный ветер вокруг первой звезды. В-звезда ионизирует звездный ветер, создавая вокруг себя область НII с концентрацией $N \sim 5 \cdot 10^4 \text{ эл. см}^{-3}$ и температурой $T \sim 500 \text{ K}$. Параметры области НII были установлены путем анализа околозвездных абсорбционных линий в ультрафиолетовом спектре Антареса [30]. Расположение обеих звезд во время наблюдений вместе с областью НII

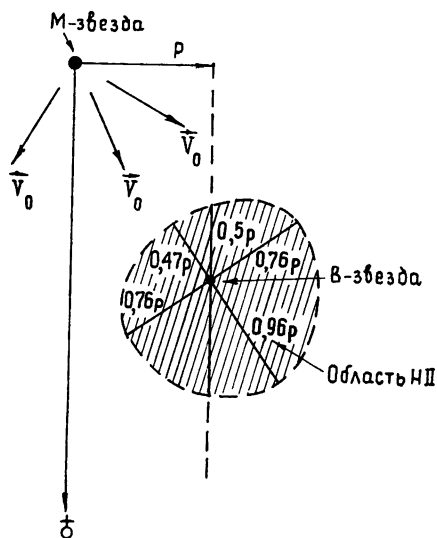
изображено на рис. 10, взятом из статьи [30]. Расположение звезд относительно наблюдателя меняется весьма медленно, так как орбитальный период в системе Антареса составляет около 3070 лет.

Данные о радионаблюдениях Антареса приведены в статьях [31–33]. Обе компоненты Антареса были разрешены на VLA [31]. Как и Бетельгейзе, сверхгигант Антарес А обнаружил явную переменность. Уровень радиоизлучения 21 и 22 июля 1978 г. составил 2 *мЯн* на $\lambda=6$ см, но был ниже предела обнаружения на $\lambda=21$ см. Другие попытки зафиксировать радиоизлучение Антареса А, предпринятые в течение пяти июльских дней, остались безуспешными: излучение оставалось ниже предела обнаружения (1 *мЯн*) на обеих волнах.

В отличие от компоненты А радиоисточник Антарес В не обнаруживает заметной переменности. Поток от Антареса В измерены на обеих волнах: 9 *мЯн* на 21 см и 3 *мЯн* на 6 см. Если спектр степенной, $S_\nu \sim \nu^\alpha$, то его спектральный индекс α , определенный по двум точкам, равен минус единице. Отрицательный наклон частоты спектра делает затруднительной интерпретацию наблюдаемого излучения от Антарес В в рамках теплового тормозного механизма.

Угловой диаметр источника, связанного с компонентой В (меньше 1"), соответствует линейным размерам излучающей области < 180 ае. (расстояние до Антареса 180 пс) Это заметно меньше размеров области

Рис 10 Двойная система α Sco (Антарес) Положение В-звезды относительно сверхгиганта класса М и луча зрения, а также форма области III вокруг В-звезды. Отрезок p на графике соответствует 522 ае, V_0 — звездный ветер [30]



ионизированного водорода III вокруг В-звезды (≈ 500 ае)⁴.

В работе [34] радиоизлучение Антареса В связывается с головной ударной волной, возникающей при движении звездного ветра от массивного сверхгиганта — Антареса А мимо звезды Антарес В. Эта волна формируется в области III, если указанное движение существенным образом возмущается Антаресом В. Причиной сильного возмущения может быть собственное магнитное поле или звездный ветер В-звезды. В ударной волне за счет появления плазменной турбулентности электроны ускоряются до релятивистских энергий. Их синхротронное излучение в межзвездных магнитных полях регистрируется на Земле как радиоизлучение Антареса В.

В настоящее время трудно судить о реальности указанной схемы излучения. Можно лишь отметить, что ряд этапов этой схемы не имеет достаточно прочных теоретических оснований (проблемы возникновения и уровня плазменной турбулентности в указанных волнах, проблема ускорения заряженных частиц турбулентностью до релятивистских энергий недостаточно разработаны). С другой стороны, не очевидно, что сложная, зависящая от многих параметров схема генерации [34] способна обеспечить относительное постоянство потока излучения Антареса В. Вопрос о том, может ли эта схема обеспечить наблюдаемый уровень радиоизлучения и его спектр, также остается открытым.

⁴ 1 ае (астрономическая единица) равна $1,5 \cdot 10^{13}$ см

В этой связи следует обратить внимание на существование теплового тормозного излучения из ионизированной области III вокруг горячей звезды [35]. Оценки оптической толщины τ по тормозному поглощению показывают, что $\tau \sim 1$ на волне $\lambda_{кр} \approx 3$ см (для температуры $T \approx 500$ К, электронной концентрации $N \sim 5 \cdot 10^{14}$ эл. см³, длины луча в ионизированной области $L \approx 500$ а. е. $\approx 7,5 \cdot 10^{15}$ см). Это означает, что на $\lambda > \lambda_{кр}$ яркостная температура T_b области III приближается к $T \approx 500$ К. Наблюдаемый поток излучения (на одну поляризацию) $S_v = \kappa T_b \Omega / \lambda^2$, где Ω — телесный угол, стягиваемый источником. В нашем случае поперечный размер области III $L \approx 500$ а. е. соответствует (на расстоянии от Земли $R \approx 180$ пс) углу $3''$, так что $\Omega \approx 2 \cdot 10^{-10}$. На $\lambda = 6$ см $T_b \approx T$ и, следовательно, ожидаемый поток тормозного излучения $S_v \sim 4 \cdot 10^{-27}$ эрг · с⁻¹ · см⁻² · Гц⁻¹ = 40 мЯн. Согласно [25] наблюдаемый поток на порядок меньше: $S_v \approx 3$ мЯн. Это обстоятельство, по-видимому, связано с завышенными значениями электронной концентрации N в области III, принятыми в модели [30, 34] и использованными выше для оценок величины $\lambda_{кр}$. Фактические значения N в области III должны быть на порядок меньше, чем это предполагалось в [30, 34], если наблюдаемое излучение В-звезды представляет собой тепловое тормозное излучение области III (это мало вероятно, если определенный в [31] наклон частотного спектра $\alpha = -1$ соответствует действительности). Поэтому электронная концентрация в области III, по-видимому, должна быть еще ниже; от ее конкретных значений зависит яркость ореола вокруг компактного источника Антарес В. Более подробное обсуждение роли тормозного излучения области III вокруг Антареса В проведено в [35].

В настоящее время зарегистрировано также радиоизлучение от других двойных систем, содержащих холодный и горячий компоненты — так называемых симбиотических звезд. Оптические спектры этих объектов отличает присутствие полос поглощения окиси титана, характерных для холодных звезд, и эмиссионных линий высокого возбуждения. Холодный компонент относится к красным гигантам класса М, горячий компонент по своим характеристикам близок к ядрам планетарных туманностей (см. подробнее обзор [52]). Радиоизлучение имеет перемешанный характер и наблюдается, как правило, от групп симбиотических звезд, содержащих значительное количество пыли. Уровень излучения симбиотической звезды V 1016 при наблюдениях [53, 54] на частотах около 10 ГГц достигал 50—100 мЯн. Спектр этого объекта, а также спектры RR Tel и H1-36 аппроксимируются степенной зависимостью с индексом $\alpha \approx 0,6$ (см. [52]). Как было отмечено в разд. 2, это обстоятельство указывает на тепловой тормозной механизм радиоизлучения, действующий в изотермической плазме, распределенной по закону $1/r^2$. Такое распределение реализуется при истечении материи из горячей звезды с постоянной скоростью (см. в этой связи интерпретацию радионаблюдений симбиотической звезды AG Peg [55]).

7. ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ ТИПА RS ГОНЧИХ ПСОВ

Группа объектов типа RS Гончих Псов (RS CVn) лишь недавно (в 1976 г.) была выделена среди двойных звездных систем [36]. Эту группу отличают следующие признаки. Спектральный тип более горячей звезды — от позднего F до G, а более холодная компонента относится к классу KO IV (субгигант). Двойные системы RS CVn имеют малый период обращения — всего лишь от одного до четырнадцати дней, т. е. эти системы — тесные, с расстоянием между звездами порядка нескольких звездных радиусов. Однако звезды еще не заполняют свои полости Роша, и поэтому обмен материей между ними происходит только посредством звездного ветра [37]. Более характерен для рассматриваемых

мых систем период обращения $P \leq 20$ дней, так как в этом случае благодаря мощным приливным силам активная звезда К повернута всегда одной и той же стороной к G-звезде (как наша Луна к Земле). В системах с $P > 20^d$ это не всегда так. Для K-звезды характерен синдром VY Drg — фотометрические волны, связанные с присутствием звездных пятен, покрывающих до 0,1 площади фотосферы. Эти волны аналогичны наблюдаемым у вспыхивающих звезд типа UV Кита (см. разд. 5). Интенсивное свечение CaII (в линиях H и K) свидетельствует о существовании у активной звезды хромосферы, а высокая рентгеновская светимость $L_x \sim 10^{31}$ эрг·с⁻¹, зарегистрированная на «Эйнштейне» у этих объектов, указывает на существование короны с мерой эмиссии $EM \sim 10^{53}$ см⁻³ и кинетической температурой $T \sim 10^7$ К (последняя определена по линиям высокоионизированного железа Fe XVII, Fe XVIII) [38].

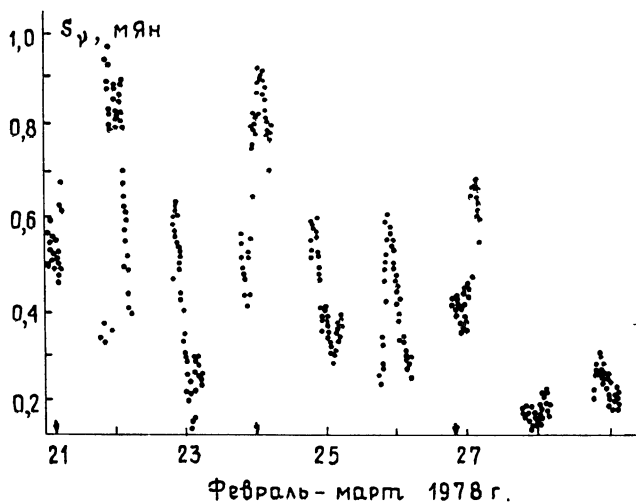


Рис. 11. Поток радионизлучения S_v на частоте 10,5 ГГц во время активного периода HR 1099 (февраль—март 1978 г.)
 Ошибка измерений потока ± 13 мян. Стрелками указаны моменты нулевой орбитальной фазы, соответствующие нижнему соединению активной звезды [39].

Интенсивное излучение объектов типа RS CVn в радиодиапазоне началось с обнаружения в 1978 г. сильной всплешечной активности двойной звезды HR 1099 (в другом обозначении V711 Tau) [39]. При этом было установлено детальное развитие во времени нескольких радиовспышек на частоте 10,5 ГГц. При наблюдениях использовался 46-метровый радиотелескоп обсерватории Алгонкин (приемник с шумовой температурой 150 К в полосе 115 МГц, время накопления 5 мин). Результаты наблюдений в период с 20 февраля по 1 марта 1978 г. приведены на рис. 11. Из рисунка ясно, что излучение отличается сильной нестационарностью и высокими значениями потока (до 1 Ян). Примерно такие же максимальные потоки зафиксированы у другого члена группы RS CVn — двойной звезды AR Lac ($S_v \simeq 0,55$ Ян) и несколько меньшие — у более удаленных объектов RT Lac ($S_v \simeq 28$ мян) и SZ Psc ($S_v \simeq 85$ мян).

Высокие значения наблюдаемых максимальных потоков облегчают задачу изучения объектов типа RS CVn в радиодиапазоне. Однако в активной фазе с высоким потоком радионизлучения эти объекты находятся относительно редко. Так, например, наблюдения HR 1099 авторами [39] начались с конца 1976 года, но только в начале 1978 г. был

зарегистрирован активный период, отличающийся высокими значениями потока микроволнового излучения (в спокойные периоды наименьший поток HR 1099 составляет лишь 15 мЯн [40]).

Шкала временных изменений потока радиоизлучения, по данным [39], занимает несколько часов, хотя есть указания на более короткие флуктуации в течение 2—10 мин. Корреляция потока радиоизлучения с фазами орбитального движения и фотометрической волны в спокойные периоды не отмечена [40], хотя во время активности она, возможно, и существует. Потоки рентгеновского излучения, напротив, обнаруживают отчетливую корреляцию с фазой орбитального движения [38]. Изучение этой корреляции позволило заключить, что источник X-лучей расположен близ поверхности активной звезды. Протяженность источника по долготе не превышает 120° , а его высота меньше $0,1 R_*$ (R_* — радиус звезды для обеих компонент HR 1099 примерно равный $3R_\odot$). Отсутствие такой корреляции или слабая корреляция в радиодиапазоне означает, что микроволновой источник имеет большие размеры ($r_s > R_*$) и не затмевается при вращении звезды. Отсутствие радиозатмений, впрочем, способствует и сравнительно сильный наклон плоскости орбитального движения HR 1099 к лучу зрения (около 60°).

Поляризация микроволнового излучения имеет сложный характер. В спокойный период (по данным [40] на частоте $4,9 \text{ ГГц}$) излучение HR 1099 частично поляризовано по правому кругу (степень поляризации 20%). Согласно [41] в активный период (во время вспышки в феврале 1978 г.) радиоизлучение HR 1099 на частотах $2,7$ и $8,1 \text{ ГГц}$ циркулярно поляризовано, хотя знаки поляризации могут быть противоположны. Степень поляризации P обычно больше на $2,7 \text{ ГГц}$, где она достигает 40% (на частотах около 10 ГГц $P \sim 10 \div 20\%$). Во время одного из активных периодов в течение нескольких часов поток изменялся вдвое на $2,7 \text{ ГГц}$ в поляризации одного знака, тогда как уровень противоположно поляризованного излучения сохранялся неизменным. Наблюдалась также синусоидальная модуляция потока в одной поляризации с периодом 4 мин^* . Высокая степень поляризации $P \sim 10\%$ отмечалась при орбитальной фазе около 0° (когда активная звезда располагалась между Землей и второй компонентой системы HR 1099). Остается неясным, насколько полно и надежно установлены указанные поляризационные свойства радиоизлучения HR 1099 и типичны ли они для других источников. Здесь явно необходимы дальнейшие наблюдения и сопоставление поляризации излучения объектов этой группы. Дополнительные данные о поляризации HR 1099 и другого объекта UX Aг1 можно найти в статьях, которые вместе с [39, 41] помещены в тематический выпуск журнала [42], посвященный двойным системам типа RS CVn.

Примеры частотных спектров HR 1099 в активный период 23 и 24 февраля 1978 г. приведены на рис. 12 [39]. На низких частотах $\nu < 15 \text{ ГГц}$ спектральный поток убывает с уменьшением частоты; в диапазоне высоких частот $\nu > 15 \text{ ГГц}$ он падает с ростом частоты. Если объединить спектры рис. 12а и 12б (полученные в разные дни), то приходим к вероятному заключению о наличии пологого максимума в спектре вспышки HR 1099 на частотах $\nu \simeq 10 \div 15 \text{ ГГц}$.

Обсуждение возможного механизма радиоизлучения двойных систем типа RS CVn проведено в [39, 40] на примере HR 1099. Судя по наблюдаемому потоку излучения на 10 ГГц , поверхностная яркость источника с размерами $r_s \sim 5 \cdot 10^{11} \text{ см}$ достигает значений $T_b \sim 10^{10} \text{ К}$. Последняя величина не позволяет объяснить радиоизлучение HR 1099 в терминах теплового излучения горячей плазмы. Поэтому в [39, 40] предпола-

* Квазипериодические осцилляции с периодом $56 \pm 5 \text{ с}$ отмечены также на $\lambda = 6 \text{ см}$ у звезды L 726-8A (класс dM 5,5e), входящей в состав двойной UV Кита [44].

гаются, что действует нетепловой синхротронный или гиротронный механизм излучения, а размеры источника $r_s \gg R_* \sim 2 \cdot 10^{11}$ см, но сравнимы с расстоянием между компонентами двойной системы ($\sim 8 \cdot 10^{11}$ см).

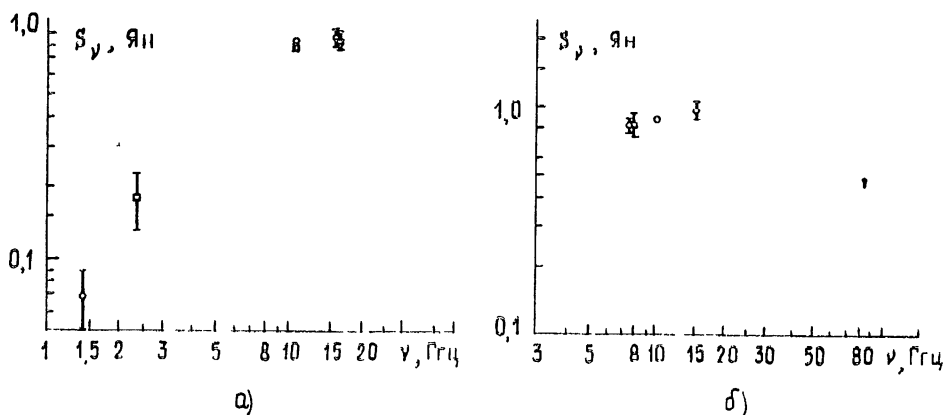


Рис 12 а) Спектр HR 1099 в 21^h40^m (кружки) и в 22^h05^m (квадраты) 23 февраля 1978 г Там, где ошибки измерений не указаны, они меньше использованных символов б) То же, что на рис 12а, в 01^h00^m 24 февраля 1978 г (время всемирное) [39]

Высокий процент круговой поляризации не позволяет объяснить радиоизлучение синхротронным механизмом релятивистских электронов, если их энергия $\mathcal{E} \gg mc^2$. Наблюдаемая степень круговой поляризации 10% на 8 ГГц (в районе максимума спектра) возможна только за счет синхротронного излучения мягких электронов ($\mathcal{E} \leq 10 mc^2$).

Частицы такой энергии дадут излучение с максимумом на частотах 10 ГГц в магнитном поле $B \gtrsim 30$ Гс. Если предположить, что время затухания радиовспышки 10^4 с совпадает с характерным временем жизни релятивистских электронов (из-за синхротронных потерь), то магнитное поле в источнике составит 75 Гс. Согласно [36] это поле связано с гигантскими звездными пятнами на поверхности активной звезды.

Отметим, что в случае, если низкочастотный завал в спектре радиоизлучения HR 1099 обусловлен синхротронной реабсорбцией, радиус источника $r_s \simeq 1,7 \cdot 10^{11} B^{1/4} \simeq 5 \cdot 10^{11}$ см (для $B \simeq 75$ Гс). Эта величина $r_s > R_*$, но сравнима с линейным размером двойной системы. Вместе с тем значение $r_s \sim 5 \cdot 10^{11}$ см не противоречит оценке сверху $r_s < 2 \cdot 10^{12}$ см, полученной по наблюдаемым вариациям потока с характерным временем порядка минуты. Величина $2 \cdot 10^{12}$ см соответствует угловым размерам источника $0''{,}002$; такой источник обеспечивает появление интерференционной картины, зарегистрированной на интерферометре с большой базой $5,75 \cdot 10^6$ λ на 8,4 ГГц (см. [43]).

Магнитное поле 75 Гс в источнике радиуса $5 \cdot 10^{11}$ см обладает энергией порядка 10^{33} эрг. Общая энергия, заключенная в релятивистских электронах, примерно на четыре порядка меньше. Однако их энергия остается на несколько порядков большей, чем в сильных солнечных вспышках.

В целом решение проблемы происхождения радиоизлучения двойных систем типа RS CVn является делом будущего. В настоящее время мы располагаем слишком ограниченными и неопределенными данными о характере радиоизлучения. Оптические и рентгеновские исследования объектов типа RS CVn также, по существу, только начинаются (см в этой связи [42]).

8. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Из содержания обзора* ясно, что в настоящее время исследования радиоизлучения звезд находятся в начальной стадии. В ближайшие годы следует ожидать дальнейшего прогресса в этой области. Он зависит от успехов в поиске новых радиоисточников, связанных, например, с магнитными звездами, и углубленного изучения известных, уже обнаруженных радиозвезд (прежде всего, их частотных спектров и поляризации). Без анализа этих характеристик невозможно сделать обоснованный выбор модели излучающей области и механизма радиоизлучения и, как следствие, невозможно получить данные о физических условиях в источниках излучения. Здесь очевидна также важность комплексных наблюдений звезд в широком интервале частот, включающем радио-, оптический и рентгеновский диапазоны. Такие исследования позволяют получить наиболее полное представление о процессах в верхних атмосферах и ближайших окрестностях звезд.

При исследовании радиоизлучения звезд (и вообще при изучении звездной активности и вспышечных процессов) мы имеем перед собой сравнительно хорошо изученный образец — наше Солнце. Однако было бы ошибкой механически переносить те модели и представления, которые развиты применительно к солнечным условиям, на другие звезды путем простого изменения масштабов.

Для иллюстрации сказанного напомним два примера того, как правила, привычные для Солнца, не являются законом для других звезд. Одним примером служат короны, обнаруженные у звезд, лишенных конвективных оболочек. На Солнце же конвективное движение подфотосферных слоев рассматривается обычно как основная причина нагрева (и, следовательно, существования) короны. Другой пример — очевидная связь солнечных вспышек с солнечными пятнами. Однако среди звезд есть объекты (HD 216803 и HD 218738), лишенные вспышек, но обладающие отчетливыми фотометрическими волнами (т. е. имеющими пятна), существуют также звезды (например AD Leo), у которых нет фотометрических волн, но есть вспышки. Таким образом, солнечно-звездные аналогии следует проводить с осторожностью даже в тех случаях, когда звезда обнаруживает явления, похожие на солнечные. И вместе с тем отсутствие во многих случаях прямых параллелей между солнечными и звездными явлениями вносит новый аспект в исследование солнечной активности.

Наряду с явлениями «солнечного» типа на звездах группы UV Кита, G-звездах, а возможно и в активных двойных системах RS CVn исследование радиоизлучения звезд приводит к объектам, модели источников радиоизлучения которых существенно отличаются от солнечных. Среди них можно отметить молодые звезды типа T Тельца и двойную систему Антарес, источники радиоизлучения в которых связаны со звездным ветром. Последний может служить также источником радиоизлучения в горячих O-звездах и звездах типа Вольф—Райе, отличающихся большими потерями массы. Наконец, с общим магнитным полем может быть связано еще не обнаруженное циклотронное излучение Ар-звезд. Во всех этих объектах следует подчеркнуть своеобразие моделей излучения, но не его механизмов. Практически все известные механизмы излучения в классической космической плазме (из которой состоят верхние атмосферы и окрестности многочисленного семейства «обычных» звезд) так или иначе уже исследовались в применении к Солнцу. Однако условия реализации этих механизмов на звездах могут существенным образом отличаться от соответствующих условий на Солнце.

* Среди зарубежных обзорных работ по радиоизлучению звезд обратим внимание читателя на публикации [45, 46]

ЛИТЕРАТУРА

1. Margon B, Grandi S., Downes R A.—*Astrophys J*, 1980, **241**, p 306.
- 2 Смит Ф. Г Пульсары.— М: Мир, 1979
3. Манчестер Р, Тейлор Дж. Пульсары — М: Мир, 1980
- 4 Vaiana G. S et al —*Astrophys J*, 1981, **245**, p 163.
- 5 Mewe R—*Space Sci Rev*, 1979, **24**, p 101.
- 6 Торка К, Marsh K, A —*Astrophys J*, 1982, **254**, p 641
7. Landini M, Monsignori-Fossi B C—*Astron. Astrophys.*, 1973, **25**, p. 9.
- 8 Altenhoff W. J, Oster L, Wendker H. J—*Astron Astrophys*, 1979, **73**, p 21
9. Tsuji T—*Publ. Astron Soc. Japan*, 1976, **28**, p 567.
- 10 Lynds C R, Worden S P., Harvey J. W—*Astrophys J*, 1976, **207**, p. 174.
11. Железняков В. В Электромагнитные волны в космической плазме.— М: Наука, 1977.
12. Felli M et al—*Astron. Astrophys*, 1982, **107**, p 354.
13. Bertout C, Thum C—*Astron Astrophys*, 1982, **107**, p. 368.
- 14 Borra E F., Landstreet J. D—*Astrophys J, Suppl Ser*, 1980, **42**, p 421.
15. Lynsky J L—*In Solar Phenomena in Stars and Stellar Systems /Eds R. M Bonnet and A K Dupree*, 1981
16. Железняков В В, Тихомиров Ю. В Препринт № 54 ИПФ АН СССР, 1982.
17. Железняков В. В —*Астрон журн*, 1962, **39**, с 5; 1963, **40**, с 829.
- 18 Какимата Т, Swagur G—*Astrophys J*, 1962, **136**, p. 975.
19. Глаголевский Ю. В, Бычков В Д, Ивлиев И Х, Романюк И И, Чулакова Н М —*Письма в Астрон журн*, 1982, **8**, с 26
20. Гельфрейх Г. Б, Кузнецов Б. Г—*Уч записки Лен. ун-та Сер матем наук*, 1968, № 337, с. 54.
- 21 Гельфрейх Г. Б, Госачинский И В, Парийский Ю Н—*Изв ГАО*, 1972, № 188, с. 188
- 22 Vogt S S—*Astrophys J*, 1980, **240**, p 567
- 23 Anderson C M et al—*Astrophys J*, 1976, **204**, L51
- 24 Robinson R. D., Worden S. P., Harvey J W—*Astrophys J.*, 1980, **236**, L155.
- 25 Gary D E, Lynsky J L—*Astrophys J*, 1981, **250**, p 284
26. Bertout C Proc V European Regional Meeting in Astronomy «Variability in stars and galaxies», 1981, p. E 11.
- 27 Железняков В В. Радиоизлучение Солнца и планет — М.: Наука, 1964.
- 28 Kahler S et al—*Astrophys. J*, 1982, **252**, p 239
29. Lovell B., Mauridis L W., Contadakis M. E.—*Nature*, 1974, **250**, p 124
- 30 Van der Hucht K A, Bernat A P, Kondo Y.—*Astron Astrophys.*, 1980, **82**, p 14
31. Gibson D M—*Bull Amer Astron Soc.*, 1978, **10**, p. 631
32. Wade C. M, Hjellming R M—*Astrophys. J*, 1971, **163**, L105.
- 33 Hjellming R M, Wade C M—*Astrophys J.*, 1971, **168**, L115.
- 34 Klinkhamer F. R, Kuijpers J—*Astron Astrophys*, 1981, **100**, p. 251
- 35 Железняков В В, Злотник Е Я —*Письма в-Астрон журн (в печати)*
- 36 Hall D S—*In: Multiply Periodic Phenomena in Variable Stars/Ed. W. S. Fitch—Dordrecht. Reidel*, 1976
37. Popper D M, Ulrich R. K—*Astrophys. J*, 1977, **212**, L131.
- 38 Walter F. M et al—*Astrophys J*, 1980, **236**, p 212
39. Feldman P. A. et al—*Astron. J.*, 1978, **83**, p 1471.
40. Gibson D. M, Hicks P. D, Owen F N—*Astron J*, 1978, **83**, p. 1495.
- 41 Brown R L, Crane P C.—*Astron. J*, 1978, **83**, p 1504
- 42 *Astronomical Journ*, 1978, **83**, № 12.
- 43 Hall D S—*Astron J*, 1978, **83**, p 1469
44. Gary D E, Lynsky J L, Dulk G A. Preprint, Univ Colorado, Boulder, 1982.
- 45 Feldman P. A, Sun Kwok —*J Roy Astron Soc Can*, 1979, **73**, p. 271.
- 46 Hjellming R M, Gibson D M—*In Radio Physics of the Sun/Eds. M. R Kundu and T E Gergeli, Reidel Publ Comp*, 1980, p 209
- 47 Kodaira K, Formalont E B—*Astrophys J*, 1970, **161**, p. 1169.
- 48 Trasco J D, Wood A J, Roberts M S—*Astrophys. J*, 1970, **161**, p L129.
- 49 Altenhoff W, Pfeleiderer J, Weiss W Report on IAU Colloquium, № 32, 1976
- 50 Дж М Моран—В сб. На переднем крае астрофизики. /Под ред. Ю Эвретта — М: Мир, 1979, с. 405
51. Варшавович Д. А — В сб: Астрофизика и космическая физика /Под ред Сюняева Р. А — М: Наука, 1982, с 135

- 52 Боярчук А. А.—В сб.: Итоги науки и техники Сер. Астрономия /Под ред. Р. А. Сюняева—М.: ВИНТИ, 1983, 22
- 53 Purton C R, Feldman P A, Marsh K A—Nature Phys Sci, 1973, 245, p 5
- 54 Altenhoff W J, Wendker H J—Nature, 1973, 241, p 37
- 55 Gregory P C, Kwok S, Seaquist E R—Astrophys J, 1977, 211, p 429

Институт прикладной физики
АН СССР

Поступила в редакцию
8 декабря 1982 г

ИНФОРМАЦИЯ

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ т. 59, вып. 2, 1982 г.

Аннотации статей, представляющих интерес для читателей «Радиофизики»

Госачинский И. В., Херсонский В. К. Распределение нейтрального водорода в области туманности «Розетка» и звездной ассоциации Единорог OB 2

Приведены результаты наблюдений радиолинии H I, полученных с разрешением $2',1 \times 20' \times 6,3$ км/с на радиотелескопе РАТАН-600. Обнаружена тонкая оболочка H I диаметром 130 пс, окружающая остаток сверхновой в Единороге, ассоциацию Mop OB 2 и туманность «Розетка». Масса оболочки $2 \cdot 10^5 M_{\odot}$. Оболочка расширяется со скоростью около 20 км/с. В предположении, что оболочка образовалась в результате однократного взрыва сверхновой, определены энергия взрыва — $2 \cdot 10^{52}$ эрг, и возраст сверхновой — $1,8 \cdot 10^6$ лет. Сделаны некоторые заключения о возможной связи оболочки с наблюдаемыми в этой области объектами.

Лехт Е. Е., Пашенко М. И., Рудницкий Г. М., Сороченко Р. Л. Наблюдения переменности источников H_2O , связанных с областями звездообразования

Представлены результаты наблюдений источников мазерного излучения в линии $\lambda = 1,35$ см молекулы воды в областях звездообразования за период с ноября 1979 г по июнь 1981 г. Наблюдения проводились на радиотелескопе РТ-22 Радиоастрономической станции Физического института им П. Н. Лебедева (ФИАН) в Пушино. Подробно рассмотрены данные, полученные по четырем источникам NGC 2071 (G 205,1—14,1), W 44 S, W 75 N, Ser A У всех этих объектов наблюдались значительные вариации профиля линии H_2O в целом, а также плотности потока и лучевой скорости отдельных деталей профиля. Обсуждаются эволюционный статус и динамика наблюдавшихся источников.

Боровик В. Н., Лившиц М. А. Изменение радиуса Солнца с появлением на лимбе корональной дыры

Тщательный отбор ежедневных радиосканов, полученных на Большом пулковском радиотелескопе (БПР) в 1973 г, а также в 1974—1976 гг в см-диапазоне, позволил изучать эффекты, связанные с корональными дырами, на фоне спокойного Солнца. На этом фоне дыры — слабоконтрастные образования. По двум независимым методам: абсолютным определениям расстояния от центра оптического диска до радиолимба и измерениям расстояния от лимба до локального радиоисточника при его перемещении по диску Солнца — получено, что при выходе корональной дыры на лимб наблюдается уменьшение радиуса на волне 9,0 см на 3—6%. Эффект подтверждается статистическим изучением ширин радиосканов для 1974—1976 гг. Заметный эффект близ лимба свидетельствует о том, что наблюдаемое увеличение радиуса при переходе от 3 к 9 см связано с влиянием высоких корональных петель, существующих не только в активной, но и в невозмущенной короне.

(Окончание см. с. 740)