

УДК 524.33

Звездные вспышки

Р.Е. Гершберг

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” КНУ им. Т. Шевченко, Научный,
АР Крым, Украина, 98409
gershber@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 28 октября 2013 г.

Аннотация. Кратко обсуждаются различные аспекты звездных вспышек как одного из явлений активности звезд различной близости к явлениям солнечной активности: такие, для понимания которых достаточно простое масштабирование солнечных явлений, либо такие, каких нет на Солнце, но известные солнечные закономерности позволяют понять эти звездные явления, либо явления на звездах, физический смысл которых остается не понят по сей день.

STELLAR FLARES, *by R.E. Gershberg.* Different aspects of stellar flares as one of events of stellar activity of different closeness to the solar activity phenomena are shortly discussed: those which are understandable by means of scaling of the solar events, or those which are absent on the Sun but general solar features allow us to understand them, or such stellar events which have not been understood yet up to the present day.

Ключевые слова: красные карлики, вспышки

Несколько слов о юбиляре и о себе

Вся моя трудовая жизнь – а 1 октября ей пойдет 59-й год – связана с Крымской астрофизической обсерваторией, и персональная ответственность за это лежит на Андрее Борисовиче Северном: он был председателем комиссии по приему в аспирантуру в далеком 1955 году и выбрал из 8 претендентов Э.А. Барановского, меня и Д.Н. Рачковского. Через 15 лет, когда обсуждалась моя докторская диссертация, он смог оценить свой выбор. А диссертация у меня была очень хорошая. И не удивительно: в моих руках был третий в мире телескоп ЗТШ, установленный на нем грамотно сделанный в КраО спектрограф и прекрасный трехкаскадный ЭОП. Мне оставалось только знать, куда наводить и терпеливо ждать, пока Павел Федорович Чугайнов, следивший за блеском звезды на Шайновской камере 640 мм, не сообщит мне о начале вспышки. Ко времени обсуждения диссертации в КраО ее основные результаты уже были опубликованы в Астрономическом журнале, доложены в Москве у В.Л. Гинзбурга, в Праге на съезде МАС В.А. Амбарцумян помогал мне с английским во время доклада, уже вышла моя первая книжка по вспыхивающим звездам и я получил заявку на ее перевод из Северной Ирландии. И когда на нашем Ученом совете диссертацию стали захваливать, Андрей Борисович произнес незабываемую фразу: “Что же вы хотите, Гершберг же ходил на все наши семинары”. И я ему бесконечно благодарен – и за выбор в 1955 году, и за отличные семинары, где можно было “расти над собой” после аспирантуры у С.Б. Пикельнера. Вот и все мои запомнившиеся личные контакты с нашим юбиляром.

* * *

Вспышки красных карликовых звезд типа UV Cet были открыты, как выяснилось много лет спустя, в 1924 году, но многие годы они не вызывали особого интереса. В 1956 году П.Ф. Чугайнов начал в КраО систематические фотоэлектрические наблюдения таких объектов. В 1964 году для фокуса Нэсмита ЗТШ в КраО был построен спектрограф СПЭМ и на нем были получены первые в мире спектры вспышек с временным разрешением в доли минуты, тогда как раньше экспозиции обычно перекрывали всю вспышку и длились час-два, а то и больше. Затем эти объекты стали изучать по-новому с каждым новым шагом в технике астрономических наблюдений: в радио, ближнем и далеком инфракрасных диапазонах, в ближнем и дальнем ультрафиолете, в разных рентгеновских диапазонах.

Но еще в 1972 году на основе фотометрических и радионаблюдений С.Б. Пикельнер и я выдвинули идею об идентичности физической природы активности Солнца и вспыхивающих красных карликовых звезд (Гершберг и Пикельнер, 1972). Сейчас эта концепция общепринята, и трудно представить, что 40 лет назад у нее было более полудюжины конкурентов. Более того, теперь эта концепция обобщена на все объекты, в которых имеет место конвективный перенос энергии в их внешних слоях или охватывает звезду по всей глубине, то есть звезды спектральных типов от F до M и L.

В дальнейшем я представлю ряд рисунков, которые иллюстрируют явления звездных вспышек разной близости к солнечным явлениям: в лучшем случае для понимания этих звездных явлений достаточно масштабирования солнечных явлений, в других — на Солнце нет аналогов, но известны закономерности, позволяющие их понять, либо, наконец, явления на звездах, физический смысл которых остается до сих пор не ясен.

* * *

С точки зрения физики, звездные вспышки — самые сложные явления активности солнечного типа, с точки зрения энергетики — самые мощные. Не считая пятен, они имеют самую длительную историю изучения: от визуального просмотра фотографий до нынешних автоматических космических фотометров и спектрометров, как COROT, KEPLER, SWIFT и другие. Сложность явления вспышки обусловлена их скоротечностью и тем обстоятельством, что они охватывают всю звездную атмосферу по глубине, а с учетом существенной стратификации атмосферы на разных ее уровнях происходят разные процессы, которые доступны наблюдениям с помощью разных методов и различной техники. Звездные вспышки наблюдаются во всем диапазоне электромагнитного излучения. При исследовании вспышек звезда как точечный источник имеет определенные преимущества перед Солнцем: с помощью простого фотометра можно получить кривую блеска всей вспышки сразу и оценить по ней полную энергию в каждый момент развития, тогда как для получения такой информации с Солнца требуется довольно кропотливое интегрирование двумерной структуры. Благодаря этому обстоятельству сейчас накоплены несколько тысяч кривых блеска звездных вспышек.

На рис. 1 представлены кривые блеска восьми вспышек UV Cet, записанных в течение 2.5 часов на 6-м телескопе БТА.

На рис. 2 — самые короткие вспышки разных звезд, полученные на том же телескопе; не уверен, что существуют такие же данные о солнечных вспышках длительностью в считанные секунды.

Самые продолжительные оптические вспышки на Солнце и на звездах длятся часами. Солнечные вспышки излучают в оптическом диапазоне от 1027 до 1032 эрг, у звезд этот диапазон простирается до 1035 эрг. В обоих случаях энергетический спектр вспышек имеет вид степенной функции со спектральным индексом около 0.8 — рис. 3.

Оптические кривые блеска вспышек резко асимметричны: как правило, быстрый подъем заканчивается непродолжительным максимумом, после которого имеет место фаза быстрого затухания, при которой блеск звезды возвращается до уровня 0.3–0.5 начального подъема, и затем происходит гораздо более медленное затухание; на этой фазе часто наблюдаются вторичные всплески яркости. На рис. 4 и рис. 5 представлены такие типичные кривые блеска.

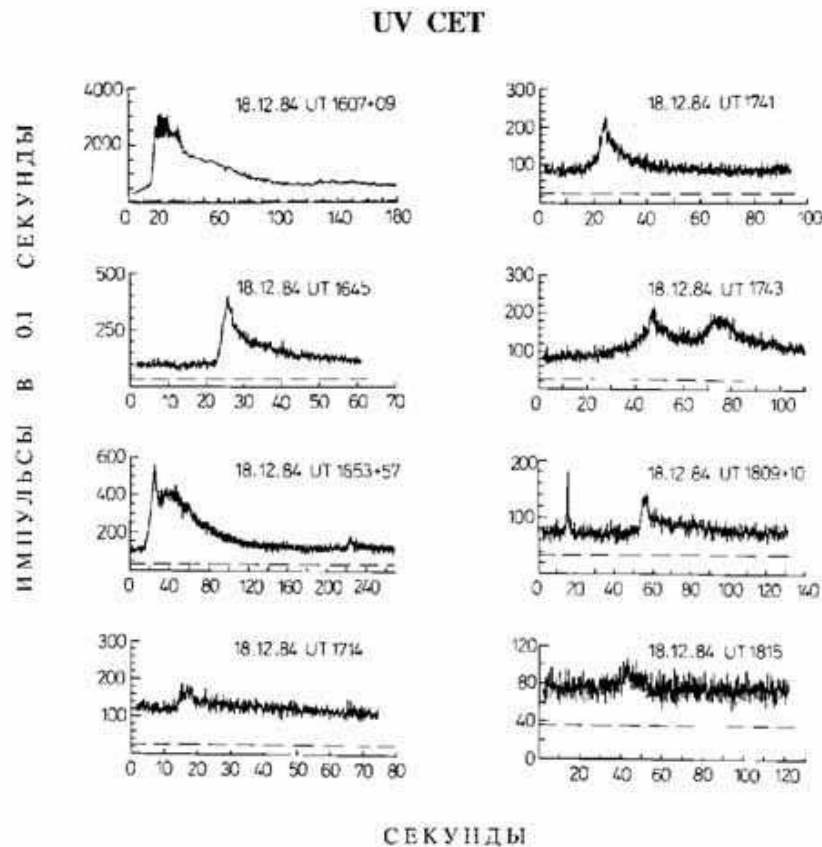


Рис. 1. Кривые блеска вспышек UV Ceti, зарегистрированных на 6-м БТА 18.12.84 в течение 2.5 часов патрульных фотозлектрических наблюдений в полосе U (Бескин и др., 1988)

Во время развития звездной вспышки спектральный состав ее излучения существенно меняется. В начале вспыхивают Бальмеровские линии и линии гелия, в максимуме появляется сильный континуум, который был уверенно отождествлен в КраО как чернотельный (Ловкая, 2012, 2013).

Температура этого максимума обычно несколько превышает 20000 К, а фаза быстрого затухания после него соответствует быстрому падению чернотельной температуры — рис. 6.

После максимума смена спектральных деталей происходит в обратном порядке. Дольше всего затухают линии CaII и MgII. Анализ спектров позволил оценить характерную электронную температуру вспышечной плазмы после максимума как 8000 К, электронную плотность как $10^{10} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, скорости турбулентных движений от 20 до 70 км/с.

Первым неоптическим диапазоном, в котором были зарегистрированы вспышки красных карликов, был диапазон метровых радиоволн — рис. 7. Существенное запаздывание радиовспышки относительно оптической вспышки было обусловлено временем прохождения возмущения от хромосферы до уровня короны, на котором частота радионаблюдений совпадала с собственной частотой корональной плазмы.

В 80-е годы были проведены интенсивные наблюдения звездных вспышек в радио-, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, которые дали сведения о хромосфере, переходной зоне к короне и короне во время вспышек. На рис. 8 представлены результаты исключительно удачного сеанса одновременных наблюдений Prox Cen в двух диапазонах. Рентгеновские наблюдения позволили оценить температурный ход вспышечной плазмы в короне, который в максимуме превысил

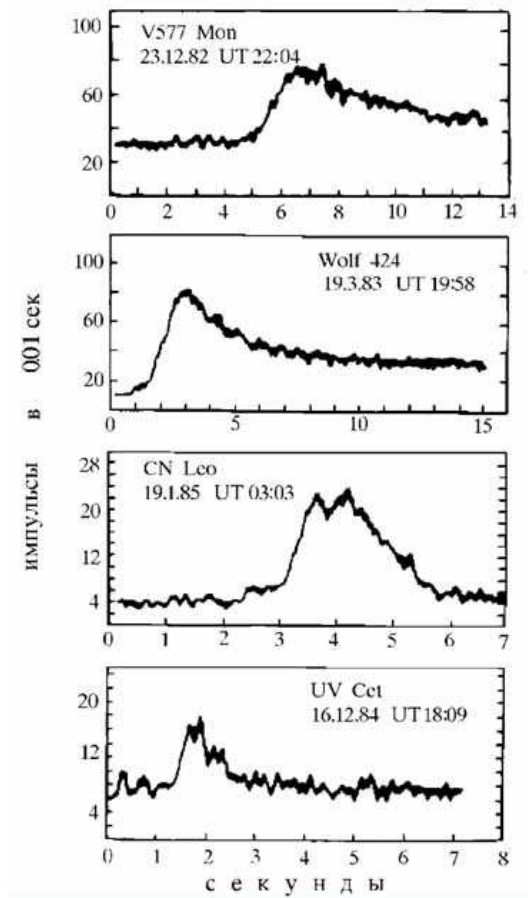


Рис. 2. Быстрые вспышки четырех разных звезд типа UV Кита, записанные на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории с помощью измерительного комплекса МАНИЯ (Бескин и др., 1988)

20 миллионов К, ультрафиолетовые наблюдения обнаружили существенное усиление эмиссионных линий переходной зоны и хромосферы. С качественной точки зрения все эти результаты близки к солнечным. С количественной — существенно их превосходят по энергии.

Через два десятилетия рентгеновская аппаратура дала несравненно более богатые сведения о вспышечной корональной плазме — рис. 9: кривая блеска вспышки EV Lac 13.7.98, зарегистрированная аппаратом ASCA, была разделена на 9 интервалов, каждый из них был проанализирован методами конца века и для каждого были получены изменения в корональной плазме температуры, меры эмиссии и металличности; первые две зависимости описывают высвечивание корональной плазмы аналогично солнечной, а третья обнаруживает так называемый FIP-эффект, плохо понятые вариации содержания элементов с низкими первыми потенциалами ионизации; они наблюдаются и на Солнце, но их физический смысл остается неясным.

Во время спектральных наблюдений EV Lac на ЗТШ 31.08/1.09.94 было зарегистрировано расщепление линии ионизованного гелия λ 4686 Å на 400 км/с — рис. 10; по-видимому, это единственный до сих пор случай наблюдения на звезде явления типа солнечных корональных выбросов.

В радионаблюдениях 80-х годов был освоен микроволновый диапазон и там было обнаружено значительное разнообразие радиоизлучения вспыхивающих красных карликов. На рис. 11 даны кривые блеска звезды L726-8 Å, записанные в разных поляризациях. Такое нетепловое когерент-

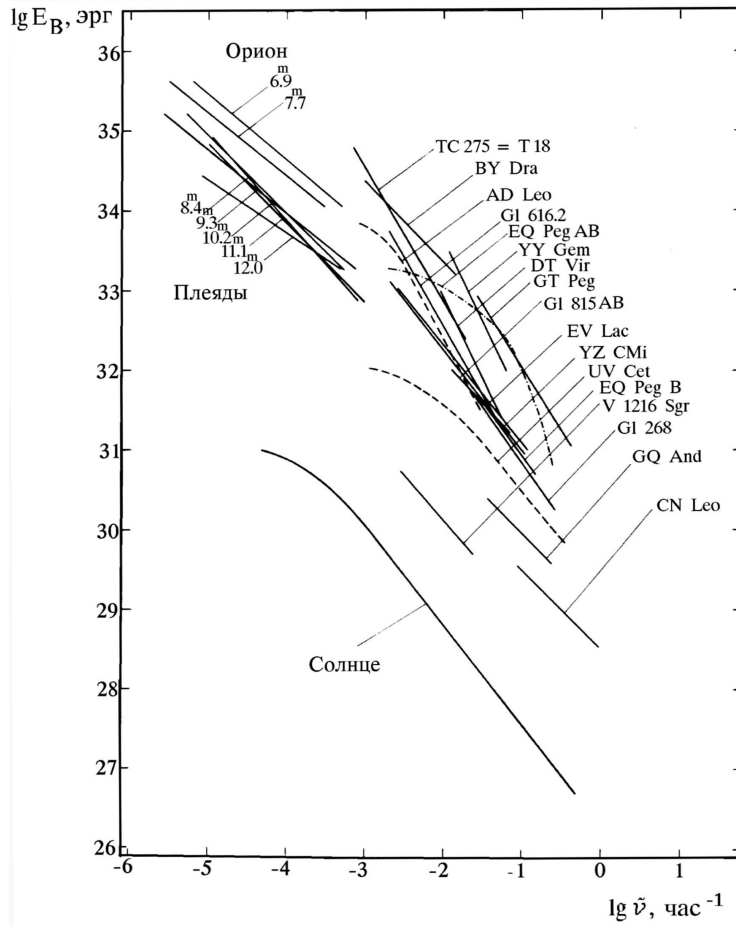


Рис. 3. Энергетические спектры вспышек звезд солнечной окрестности, звезд в скоплениях Плеяд и Ориона и солнечных вспышек – физически значимые части интегральных спектров выше изломов, обусловленных наблюдательной селекцией (Гершберг и др., 1987)

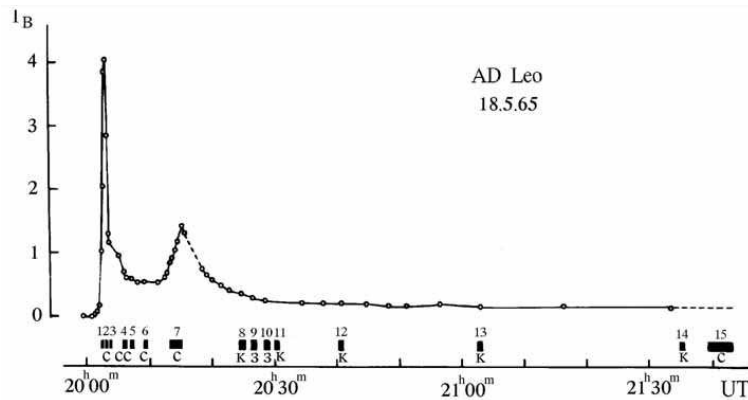


Рис. 4. Вспышка AD Leo 18.5.65 (Гершберг и Чугайнов, 1966)

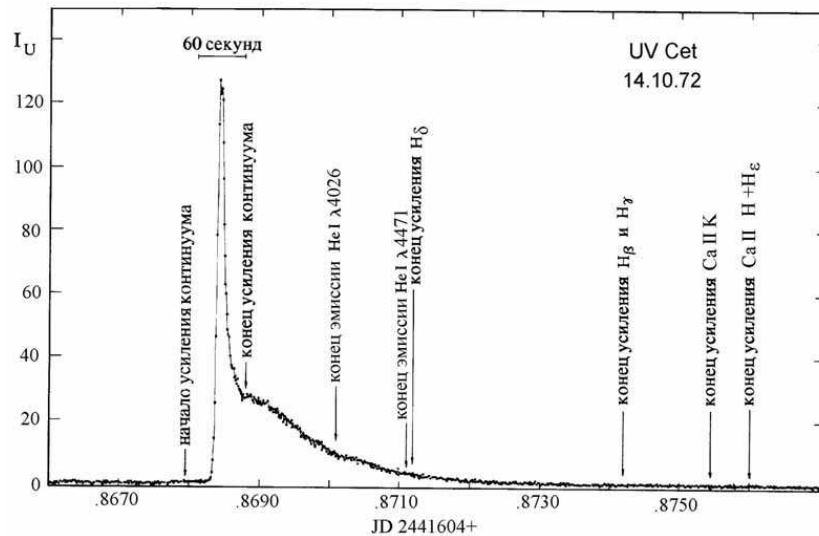


Рис. 5. Вспышка UV Cet 14.10.72 (Бопп и Мофсет, 1973)

ное излучение плохо коррелирует с оптическими и другими электромагнитными эмиссиями и, по-видимому, обусловлено неустойчивостью пучков энергичных электронов.

До сих пор продолжаются дискуссии о начальном энерговыделении в солнечных и звездных вспышках. Согласно последним теоретическим разработкам, при перезаключении вещество, сжимаемое встречными полями, разбивается на волокна, и они служат источниками быстрых электронов. Так или иначе появляются потоки быстрых электронов, которые локально нагревают вещество, от него вверх и вниз движутся гидромагнитные возмущения, которые в свою очередь вызывают наблюдаемые эффекты во всех диапазонах электромагнитных волн.

Оценка звездных вспышек максимальной энергии недавно была получена в космических исследованиях. Маехара и др. (2012) проанализировали 365 сильных вспышек с энергией более 1033 эрг, зарегистрированных на 148 G-карликах при наблюдении 83000 звезд в эксперименте KEPLER в течение 120 суток в 2009 году. Типичная длительность таких вспышек составляла несколько часов, амплитуда – 0.1–1 % болометрической светимости звезды; при энергетических оценках предполагалось, что вспышки излучают как абсолютно черные тела при температуре 10000 К. Были получены оценки болометрической светимости таких вспышек от $9 \cdot 10^{29}$ до $4 \cdot 10^{32}$ эрг/с и полной энергии от 10^{33} до 10^{36} эрг; неопределенность этих оценок достигает 60 %. Обнаруженная Маехарой и др. квазипериодичность свидетельствует о большем, чем на Солнце, числе пятен. Максимальная энергия вспышек не коррелирует с периодами вращения, но мощные вспышки чаще происходят на звездах с быстрым вращением.

Исходя из полученных оценок, Маехара и др. (2012) оценили, что столь мощные вспышки должны происходить на G-звезде раз в 350 лет. На медленно вращающихся звездах, как Солнце, такие вспышки должны происходить раз в 800 лет, а вспышки с энергией 10^{35} эрг – раз в 5000 лет. Эти оценки не противоречат результатам, полученным по многолетним наземным наблюдениям наиболее активных вспышкающих звезд (Гершберг и др., 1987). Но если это верно, то Земля пережила уже миллион (!) таких грандиозных вспышек на Солнце, и человечеству не следует опасаться сильных солнечных вспышек.

В заключение о вспышках несколько слов о явлении, не известном на Солнце и плохо понятом до сих пор.

Еще в 60-е годы наблюдатели заметили, что оптическим вспышкам средней мощности часто предшествует непродолжительное понижение блеска звезды до $0.^m1$ ниже нормального уровня. За-

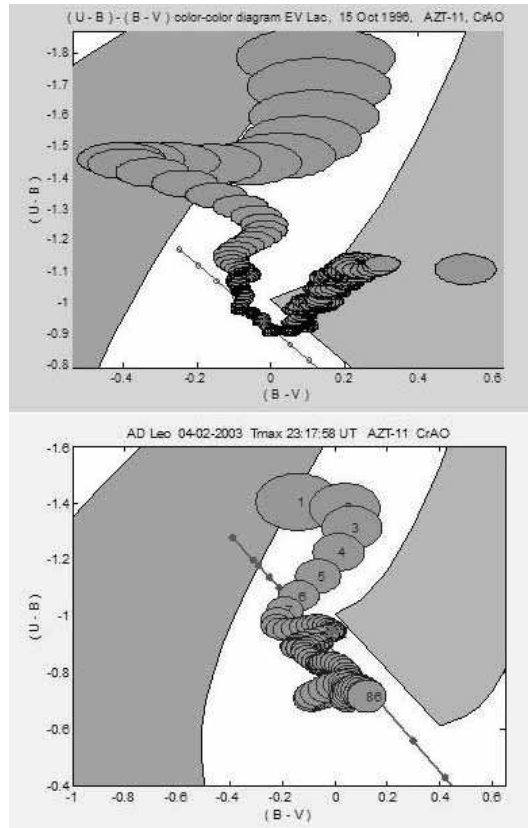


Рис. 6. Треки на диаграмме (U-B, B-V) вспышек красных карликовых звезд EV Лас и AD Leo (Ловкая 2012, 2013)

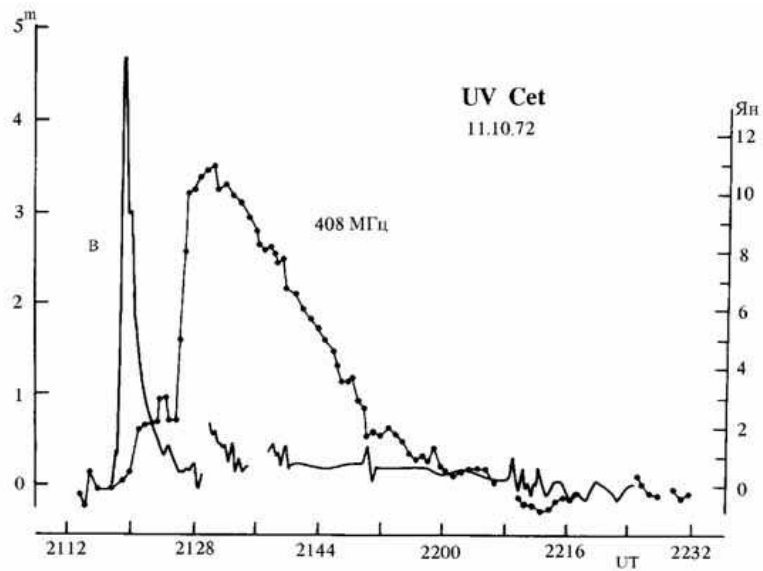


Рис. 7. Вспышка UV Cet 11.10.72, зарегистрированная в полосе В и в радиодиапазоне (Ловелл и др., 1974)

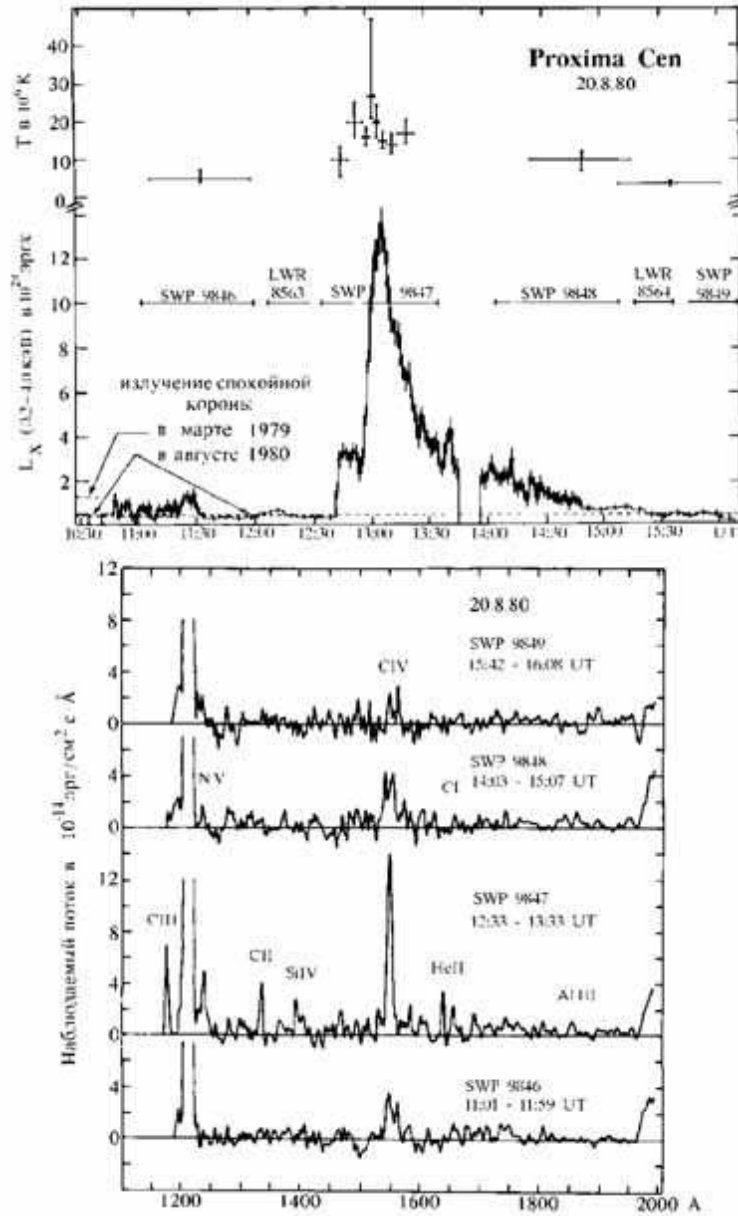


Рис. 8. Вспышка Proxima Cen 20.8.80. Вверху – кривая блеска в области мягкого рентгена, полученная на обсерватории Эйнштейна, и временные интервалы спектрографирования звезды в ультрафиолетовой области на спутнике IUE. Внизу – регистрограммы ультрафиолетовых спектров (Хайш и др., 1983)

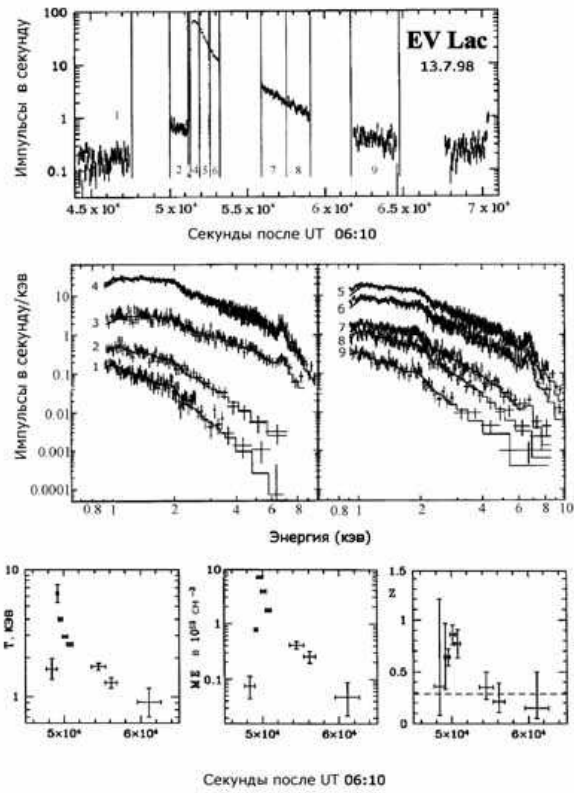


Рис. 9. Вспышка EV Lac 13.7.98, зарегистрированная аппаратом ASCA. Верхняя панель – кривая блеска; средняя панель – спектры на выделенных участках кривой блеска; нижняя панель – результаты анализа спектров: ход температуры, меры эмиссии и содержания тяжелых элементов (Фавата и др., 2000)

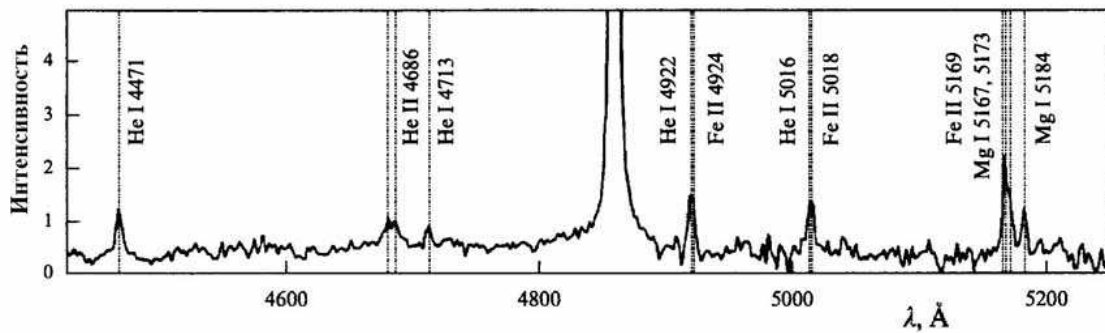


Рис. 10. Результаты спектрального патрулирования вспыхивающей красной карликовой звезды EV Lac в ночь с 31 августа на 1 сентября 1994 года в Крыму: суммарный спектр активных состояний звезды (Абранин и др., 1998)

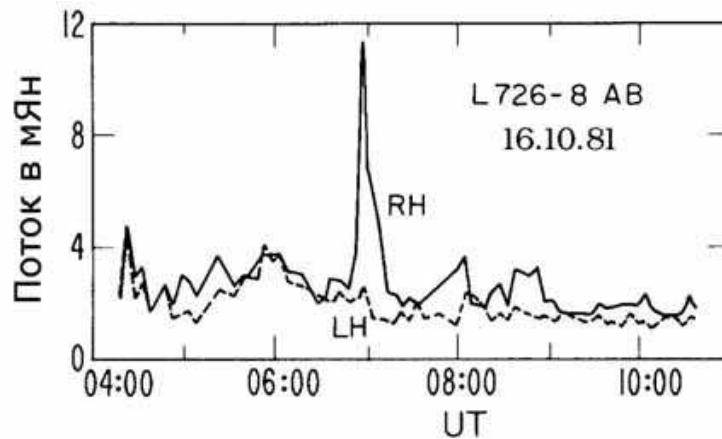


Рис. 11. Вспышка L 726-8 Å 16.10.81, записанная в право- и левополяризованном по кругу излучении на 6 см, RH и LH соответственно (Гэри и др., 1982)

тем была обнаружена значительная зависимость этого эффекта от длины волны, и в некоторых вспышках аналогичные особенности — понижения блеска ниже нормального уровня — были отмечены на нисходящих ветвях кривых блеска. После этого такое явление получило название — с применением спектроскопических терминов — как “эмиссионный пик в абсорбционном блюдец”. На рис. 12 хорошо виден “эмиссионный пик” в полосе U и “абсорбционное блюдец” в полосе R. Несмотря на несколько попыток, надежной теории этого явления не существует.

По инициативе Жилиева, с начала 2000-х годов в Греции, Болгарии и в Крыму был накоплен значительный объем наблюдений по высокочастотным осцилляциям блеска звезд, этот эффект был обнаружен и в спокойном состоянии некоторых звезд, но во время вспышек он заметно усиливается — как по амплитудам, так и по появлению новых частот — рис. 13. Речь идет о квазипериодических колебаниях блеска с амплитудами в несколько процентов блеска и периодами в десятки секунд. По-видимому, это эффект колебаний силовых трубок звездных атмосфер; сходные явления обнаружены и на Солнце, а на звездах аналогичные явления изучены также и в радиодиапазоне.

* * *

По существу, все явления звездной активности солнечного типа — пятна, вспышки, горячие верхние атмосферы, звездный ветер, циклы активности, протуберанцы — так или иначе связаны с магнитными полями. Всесторонний анализ всего многообразия явлений этой активности приводит к отождествлению этих явлений к макроскопическим нелинейным процессам в замагниченной плазме, к концепции самоорганизации вещества на разных пространственных и временных масштабах: звезда в целом — это диссипативная система наибольшего масштаба, в которой за счет энергии вращения и конвективных движений самоорганизуются глобальные магнитные звездные поля, тогда как в структурах малых размеров реализуются диссипативные системы, приводящие к звездным вспышкам и другим явлениям, связанным с локальными магнитными полями.

Звездно-солнечная физика — одна из наиболее активно развивающихся ветвей современной астрофизики, включающая данные, которые получают в многочисленных наземных системах и космических экспериментах.

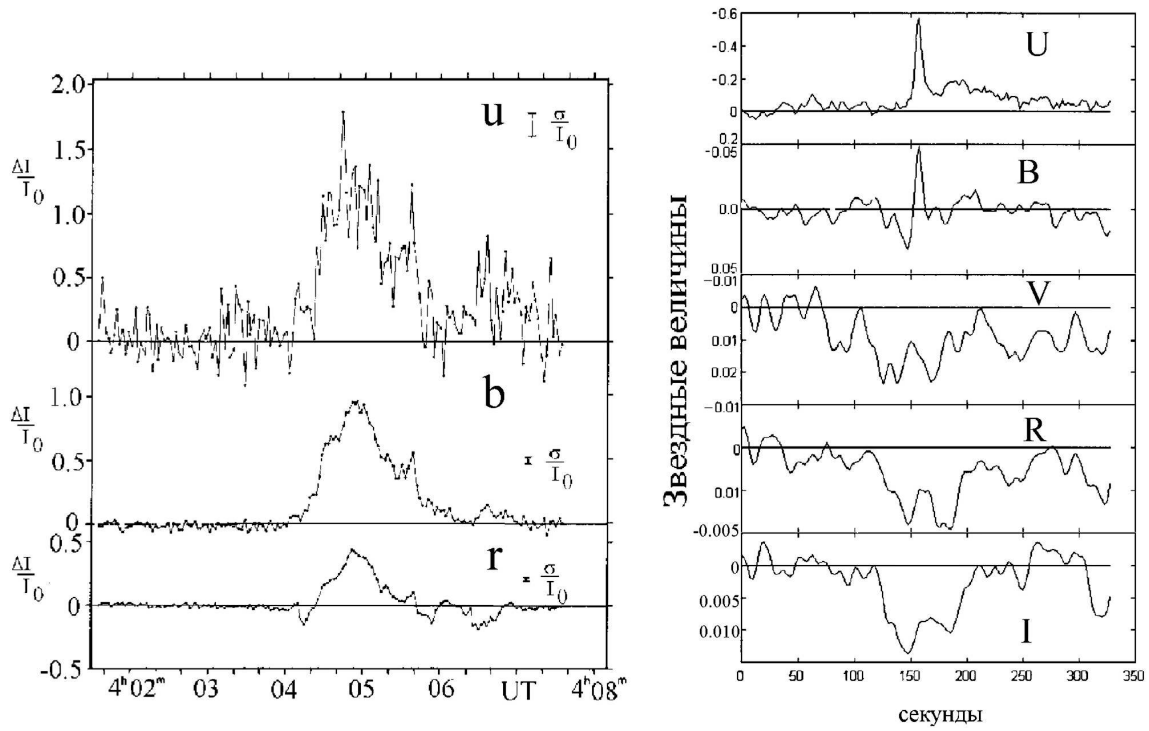


Рис. 12. Предвспышечные ослабления блеска EV Lac или “эмиссионный пик в абсорбционном блюде”: слева — вспышка 9.10.73 по наблюдениям Флеша и Оливера (1974) в фиолетовых, синих, красных лучах; справа — вспышка 5.10.96 в полосах UBVR I (Жиляев и др., 1998)

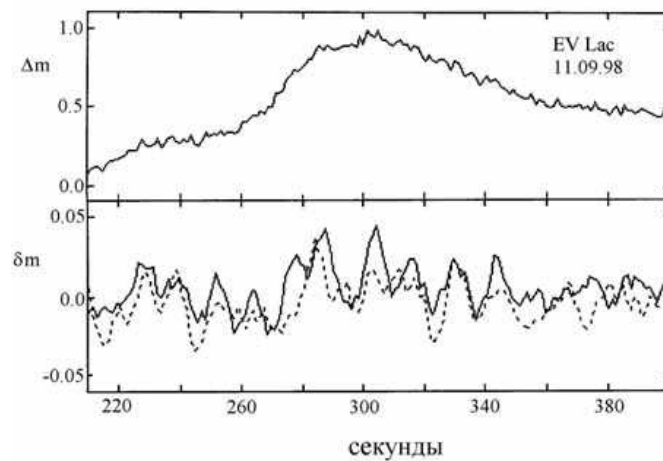


Рис. 13. Квазипериодические колебания блеска звездных вспышек. Кривая блеска вспышки EV Lac 11.09.98 UT 21:55 и остаточная кривая блеска этой вспышки после вычитания из исходной кривой сглаженного компонента: сплошная линия — наблюдения в Крыму, штриховая линия — наблюдения в Греции (Жиляев и др., 2000)

Литература

- Абранин и др. (Abranin E.P., Alekseev I.Yu., Avgoloupis S., et al.) // *Astron. Astrophys. Trans.* 1998. V. 17. P. 221.
- Бескин Г.М., Неизвестный С.И., Плахотниченко В.Л. и др. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1988. Т. 79. С. 71.
- Бопп, Моффет (Bopp В.W., Moffet T.J.) // *Astrophys. J.* 1973. V. 185. P. 239.
- Гершберг Р.Е., Чугайнов П.Ф. // *Астрон. журн.* 1966. Т. 43. С. 1168.
- Гершберг Р.Е., Пикельнер С.Б. // *Comments Astrophys. Space Phys.* 1972. V. 4. P. 113.
- Гершберг Р.Е., Могилевский Э.И., Обридко В.Н. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 1987. Т. 3. № 5. С. 3.
- Гэри и др. (Gary D.E., Linsky J.L., Dulk G.A.) // *Astrophys. J.* 1982. V. 263. L79.
- Жилияев и др. (Zhilyaev B.E., Verlyuk I.A., Romanyuk Ya.O., et al.) // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 334. P. 931.
- Жилияев и др. (Zhilyaev B.E., Verlyuk I.A., Romanyuk Ya.O., et al.) // *Кинем. и физ. небесн. тел.* Приложение № 3. 2000. С. 339.
- Ловелл и др. (Lovell B., Mavridis L.N., Contadakis M.E.) // *Nature.* 1974. V. 250. P. 124.
- Ловкая М.Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2012. Т. 108. С. 1.
- Ловкая М.Н. // *Астрон. журн.* 2013. Т. 90. № 8. С. 1.
- Маехара и др. (Maehara H., Shibayama T., Notsu S., Notsu Y., et al.) // *Nature.* 2012. V. 485. P. 478.
- Фавата и др. (Favata F., Reale F., Micela G., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 353. P. 987.
- Флеш, Оливер (Flesh T.R., Oliver J.P.) // *Astrophys. J.* 1974. V. 189. P. 127.
- Хайш и др. (Haisch B.M., Linsky J.L., Bornmann P.L., et al.) // *Astrophys. J.* 1983. V. 267. P. 280.