СПЕКТРЫ ЗВЕЗДНЫХ ВСПЫШЕК: ПРОГРЕСС В ПОНИМАНИИ ФИЗИКИ ЯВЛЕНИЙ

М. М. Кацова, М. А. Лившиц

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова Москва 119991, Россия
e-mail: maria@sai.msu.ru

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН Троицк 142190, Московской обл., Россия
e-mail: maliv@mail.ru

Обсуждается прогресс в области наземных и внеатмосферных спектральных исследований звёздных вспышек и развитие представлений о физических процессах, происходящих во время мощных нестационарных явлений на активных звёздах поздних спектральных классов.

ВВЕДЕНИЕ

Открытие законов спектрального анализа кардинальным образом изменило многие направления научных исследований. В частности, в XX веке спектры позволили определить обилия элементов в космосе, измерить магнитные поля солнечных пятен, определить скорости вращения различных космических объектов и т. д.

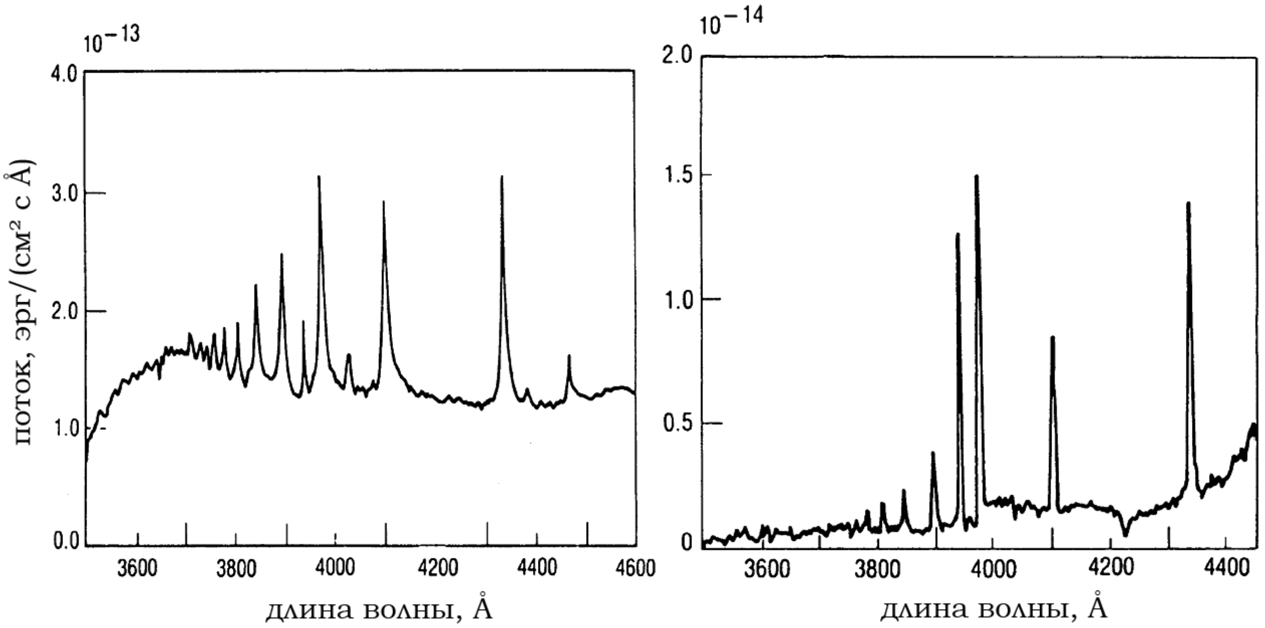
Как известно, “в середине 60-х годов на Шайновском рефлекторе в Крыму и на телескопе Струве в Техасе были зарегистрированы первые щелевые спектры вспышек звезд типа UV Кита с высоким временным разрешением” [1]. С тех пор началось детальное изучение этих нестационарных явлений многими научными коллективами, часть из которых вошла в группу, названную Flare Star Consortium. Среди координаторов и участников этой кооперативной программы были Р. Е. Гершберг, П. Ф. Чугайнов, Н. И. Шаховская, W. E. Kunkel, M. Rodono, B. R. Pettersen, P. B. Byrne, S. L. Hawley, а также и многие другие.

Вспыхивающие звезды – тип переменных звезд, блеск которых может усиливаться внезапно вплоть до 100 раз в фиолетовых лучах (в фильтре U) и до десятка раз в видимой области спектра. Вспышки длятся от долей секунды до десятков минут и могут происходить достаточно часто: на некоторых звездах каждые 20 мин, но самые мощные происходят гораздо реже, раз в месяц или год. Большинство из изученных 460 вспыхивающих звезд располагаются в окрестности Солнца на расстояниях от 1.3 пк (Proxima Cen = V645 Cen) до 25 пк. Это красные карликовые звезды спектрального класса М с массами от 0.5 до 0.1 массы Солнца и радиусами от 0.7 до 0.1 солнечного. Они составляют наиболее многочисленное звездное население Галактики.

Активность солнечного типа обнаружена также на некоторых звездах спектральных классов F, G и K. Циклы, подобные 11-летнему солнечному, наиболее отчетливо выявляются у K-звезд. В отличие от M-карликов вспышки на других поздних звездах происходят значительно реже и продолжаются значительно дольше. Длительные вспышки развиваются, в основном, не на карликах, а на звездах повышенной светимости – поздних субгигантах и гигантах. Вспышки на этих звездах характеризуются усилением мягкого рентгеновского излучения, и, в отличие от событий на M-карликах, не сопровождаются всплеском непрерывного оптического излучения. Весь комплекс явлений активности солнечного типа на звездах малых масс подробно изложен в монографии Р. Е. Гершберга [1].

Вспышка на звезде позднего спектрального класса – это внезапное усиление её блеска. В оптическом спектре при этом наблюдается значительный подъём интенсивности континуума и более длительное свечение линий водорода, гелия, ионизованного кальция и иногда некоторых других атомов и ионов. Основные эффекты наблюдаются в синей области спектра (рис. 1), где отчетливо видны значительное усиление континуума и линий. Этот пример иллюстрирует мощную вспышку ($\Delta U > 5^m$), хотя такое поведение присуще большинству вспышек с амплитудой от нескольких десятых звёздной величины до 7^m. Однако в спектрах отдельных событий проявляются некоторые индивидуальные особенности. Так, в данной вспышке линия K Ca II была ослаблена вплоть до максимума вспышки. Причины этой и некоторых других особенностей оптических спектров стали выясняться только в последнее время.

Оптические спектры звёздных вспышек наглядно показали, что при вспышке образуется достаточно холодный и плотный источник с физическими условиями, типичными для хромосфер Солнца и звёзд (поэтому ранее такие явления на Солнце и звёздах называли хромосферными вспышками). Близость



а б

Рис. 1. Распределение энергии в спектре звезды UV Cet в максимуме вспышки 8 сентября 1979 г. (*а*) и в спокойном состоянии (*б*) по [2]

характеристик вспышечного источника к хромосферным следовала из двух наблюдательных фактов – характерному изменению бальмеровского декремента и показателя цвета дополнительного свечения в течение вспышки [3, 4]. Температуры в источнике оптического свечения в большинстве случаев были близки к 10 000 К, а электронные плотности – 10^{13}–10^{14} см$^{-3}$. Как по декременту, так и по профилям бальмеровских линий оптическая толщина источника в линии L_α оказалась превосходящей 10^6 при плотностях $n_e > 10^{13}$ см$^{-3}$.

Однако низкая температура в источнике вспышечного континуума была подтверждена окончательно только после наблюдений звёздных вспышек в далекой ультрафиолетовой области. Такие наблюдения были проведены на спутнике International Ultraviolet Explorer (IUE), и затем – на космическом телескопе им. Э. Хаббла (Hubble Space Telescope – HST). Так, по спектру HST, осредненному с интервалом 30 Å и центрированному на длину волны 1469 Å, измерен вспышечный поток излучения на звезде AD Leo 13 марта 2003 г. [5]. Вместе с оптическим континуумом эти потоки, измеренные в далекой ультрафиолетовой области, хорошо описываются функцией Планка. Тем самым, окончательно выяснена тепловая природа непрерывного и линейчатого оптического излучения звёздных вспышек. При этом температура различных вспышек в оптическом диапазоне оценивается 10–20 тыс. К в максимум блеска и 6–10 тыс. К при затухании явления. Подчеркнем, что вывод о тепловой природе позволяет наиболее точно оценивать площадь источника оптического континуума при вспышке. Её характерная величина составляет 10^{17}–10^{18} см^2 для красных карликов при вспышках разной мощности. Площадь свечения в бальмеровских линиях превышает площадь свечения оптического континуума примерно на порядок величины.

Повышение временно́го разрешения спектральных наблюдений позволило изучить изменения различных эмиссий в ходе звездной вспышки, т.е. эволюцию источников вспышечного свечения с различающимися температурами. Это не находило объяснения в рамках представлений о хромосферной природе вспышек.

КОРОТКО О ФИЗИКЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Рассмотрим кратко основные физические процессы, происходящие при вспышках на Солнце. К настоящему времени имеются наблюдения свыше 60 000 рентгеновских солнечных вспышек, некоторые из них детально изучены в различных диапазонах с высоким пространственным и временным разрешением. Каждая вспышка является частью нестационарного процесса, источником энергии которого служит магнитное поле. Нестационарное явление начинается чаще всего с развития неустойчивостей МГД-конфигурации. Это сопровождается нагревом плазмы, слабым крупномасштабным выбросом массы – CME. Затем происходит мощное импульсное энерговыделение, дающее начало собственно вспышке. При этом частицы ускоряются до высоких энергий, и часть вещества дополнительно выбрасывается наружу.

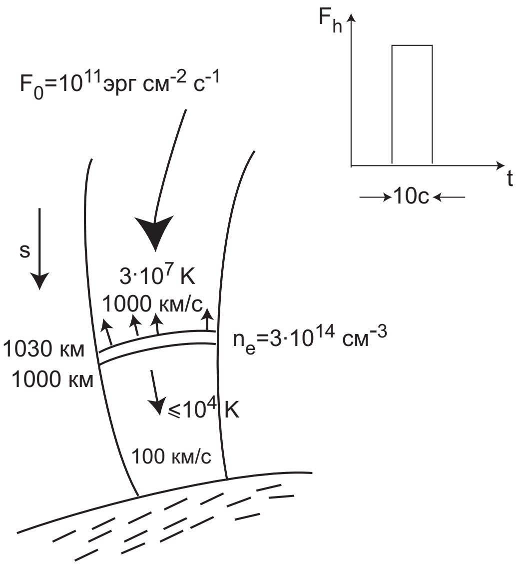


Рис. 2. Отклик солнечной атмосферы на нагрев потоком ускоренных электронов. Указаны поток энергии, его десятисекундный профиль, физические параметры плазмы. Величина s – лагранжева координата, рассчитываемая вдоль петли от ее вершины

Обилие наблюдений и развитие теории позволяют понять некоторые общие физические закономерности развития нестационарных явлений на Солнце. Импульсные процессы, происходящие в одной петле, описываются следующим сценарием. Частицы, ускоренные в корональной части петли, распространяются вдоль петли, достигая нижележащих плотных слоев хромосферы. Температура, а следовательно, и давление в этой области близ основания петли сильно повышается, и от нее вверх и вниз идут два возмущения (рис. 2 – модель Костюк–Пикельнера [6] и ее последующее развитие). Петля постепенно заполняется горячей плазмой, которая сильно излучает в мягком рентгеновском диапазоне. Системы таких петель и являются наиболее характерной особенностью вспышки.

Такой сценарий однако хорошо описывает слабые импульсные явления. Наблюдения дают возможность вычислить меру эмиссии и соответственно количество горячей плазмы в петлях. Сравнение газодинамических расчетов с наблюдениями вспышек средней мощности (мощнее M1), показывает во многих случаях, что количество плазмы, испаряющейся из оснований петель, совершенно недостаточно для объяснения наблюдений. Поэтому приходится изыскивать дополнительные возможности заполнения петель необходимым количеством вещества. Для соответствующих быстрых импульсных вспышек был даже введен специальный термин *компактные вспышки*, поскольку они не выходят за пределы активной области. Эта возможность была указана Коппом и Пнойманом в 1976 г. [7], которые показали, что CME, формирующийся после импульса, раскрывает часть замкнутых магнитных силовых линий. Последующая релаксация (восстановление) МГД-конфигурации приводит к образованию коронального токового слоя и процессу пересоединения магнитных силовых линий. Под действием натяжения магнитных силовых линий петли, располагающиеся под токовым слоем, сжимаются (shrinkage effect), в то время как вышележащая плазма выбрасывается наружу (рис. 3 [8]). При этом формируются три источника рентгеновского излучения, два из которых располагаются близ оснований петли и третий – около вершины петли ("каспа"), где энергия поступает из токового слоя в петлю (эти источники показаны на рис. 3 в диапазоне 25-50 кэВ). В событиях достаточной мощности весь процесс быстро распространяется вдоль нейтральной линии раздела полярностей магнитного поля, и тем самым формируется постэруптивная аркада петель.

Итак, большое количество солнечных вспышек, преимущественно слабых, развивается по определённому "каноническому" закону [9]. Ранее такие вспышки назывались компактными. В этих событиях самыми существенными являются два процесса. Первый из них включает небольшое ускорение частиц и соответствующий газодинамический отклик хромосферы. Второй представляет собой упомянутый выше процесс, описанный впервые Коппом и Пнойманом, реализация которого подтверждена сейчас многоволновыми наблюдениями солнечных вспышек.

Мощные солнечные вспышки представляют собой последовательность явлений, разнесенных в пространстве и времени. Лишь в некоторых случаях они могут быть представлены просто суперпозицией отдельных канонических вспышек. Одной из особенностей больших вспышек является возникновение мощного импульсного энерговыделения, природа которого до конца не ясна. Кроме того, в ходе

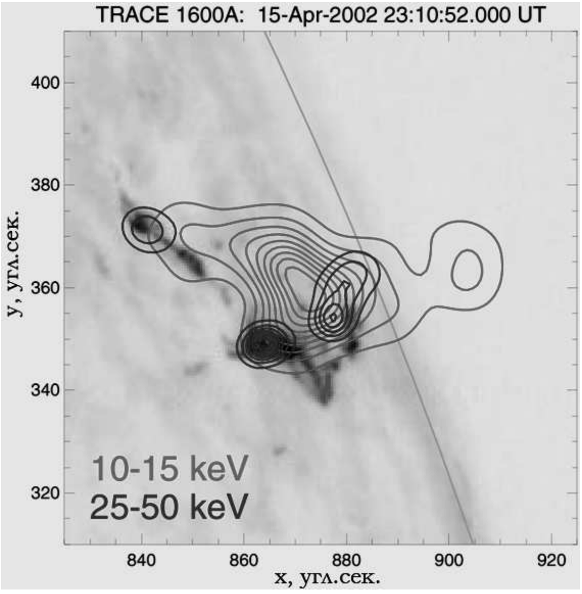


Рис. 3. Изолинии рентгеновского излучения, зарегистрированного на КА RHESSI, на фоне изображения в диапазоне 1600 Å спутника TRACE (по [8]).

постэруптивной фазы формируется гигантская система вспышечных петель, объединяющая все образования, сформировавшиеся в отдельных эпизодах всего нестационарного процесса. Эти соображения необходимо учитывать при анализе гораздо более мощных звёздных вспышек.

РЕНТГЕНОВСКИЕ И *EUV*-НАБЛЮДЕНИЯ ЗВЕЗДНЫХ ВСПЫШЕК НА КРАСНЫХ КАРЛИКОВЫХ ЗВЁЗДАХ

Активные процессы на Солнце происходят в условиях фиксированных параметров одной звезды, таких как масса, радиус, сила тяжести, температура фотосферы и др. Это существенно ограничивает понимание того, насколько общими являются получаемые гелиофизические выводы, присущи ли они исключительно Солнцу или справедливы для более широкого класса звёзд.

Множество быстрых вспышек на красных карликовых звездах, наблюдающихся одновременно в различных спектральных диапазонах, можно понять в рамках описанной выше газодинамической модели Кацовой и др. [10]. Как и при быстрых вспышках на Солнце, сразу после воздействия пучка ускоренных электронов в хромосфере образуется область высокого давления, от которой вниз к фотосфере и вверх в корону распространяются два возмущения. Образующаяся за фронтом ударной волны с излучением низкотемпературная конденсация является источником оптического излучения. При этом максимальные плотности нейтрального и ионизованного газа в источнике оптического свечения на звезде примерно в 100 раз больше, чем на Солнце. Температура оптического источника звёздной вспышки (около 10^4 K) лишь незначительно превосходит соответствующее солнечное значение. Такое различие физических условий приводит к тому, что оптическая толщина конденсации в области 5000 Å начинает превышать 0.1; этим и объясняется появление белого свечения при звёздных вспышках и его отсутствие во время вспышек на Солнце.

Общность процессов при импульсных вспышках на Солнце и красных карликах подтверждена результатами наблюдений вспыхивающих звезд с очень высоким временны́м разрешением, проведенных в 1982–1985 гг. на 6-м телескопе САО РАН [11]. При этом удалось понять не только то, что длительность импульса связана с временем жизни движущейся вниз низкотемпературной конденсации (см. рис. 2), но и убедиться в том, что рост яркости при вспышке происходит не быстрее, чем характерное газодинамическое время, пропорциональное отношению шкалы высот в хромосфере к скорости звука. Это время обратно пропорционально силе тяжести звезды и составляет несколько десятых долей секунды. Таким образом, сравнение результатов газодинамического моделирования с наблюдениями позволяет сделать надёжный вывод о том, что оптическое излучение импульсных вспышек на красных карликах является тепловым излучением источника, формирующегося в ходе отклика хромосферы на импульсный нагрев (см. обзор [12]).

Кроме того, имеется ряд наблюдательных особенностей, которые также могут быть связаны с развитием газодинамических процессов. Прежде всего, это относится к быстрым изменениям коротковолнового излучения. Например, всплеск излучения в дублете C IV 1550 Å наблюдался на спутнике АСТРОН на заключительной стадии импульсной вспышки на красном карлике EV Lac. Его длительность не превышала временного разрешения аппаратуры – 0.6 с [13]. Наш анализ показал, что этот всплеск связан с процессом формирования движущейся вниз ударной волны с излучением. По некоторым причинам этот всплеск произошел не в том основании петли, где имело место первичное энерговыделение, а во втором ее основании [14].

Описанная выше газодинамическая модель применима к событиям даже достаточно мощным, но продолжающимся в оптике не дольше нескольких минут. Однако не все мощные быстрые звёздные вспышки описываются представлениями, развитыми для одного элементарного события (см. рис. 2). Примером интерпретации одновременных наблюдений звёздных вспышек является анализ события на звезде EQ Peg [15], зарегистрированного на спутнике ROSAT в мягком рентгеновском диапазоне и на наземной обсерватории в полосе около 4500 Å. Полная длительность вспышки немного превышала 10 минут. Максимум мягкого рентгеновского излучения достигался через 5 минут после максимума оптического блеска. На оптической кривой блеска вспышки прослеживаются несколько пиков, которые условно можно рассматривать как отдельные акты импульсного энерговыделения. Согласно нашим расчётам, в течение одного элементарного события, длящегося 4 секунды, выбрасывается 10^{20} частиц/см^2. Рассматривая импульсную вспышку как совокупность нескольких элементарных событий и принимая значение площади вспышки 10^{19} см^2, определяем меру эмиссии рентгеновского источника, которая оказывается на два порядка меньше наблюдаемой в мягком рентгене. Отсюда следует вывод о том, что в этом событии образуются горячие корональные петли, однако их свечение быстро затухает. Такие вспышки на красных карликах происходят довольно часто и являются аналогом не импульсных, а компактных вспышек на Солнце. Заметим, что работа по вспышке на звезде EQ Peg [15] появилась прежде, чем представления о канонических солнечных вспышек были четко сформулированы [9].

Существенные прогресс в изучении внешних атмосфер звёзд и нестационарных процессов был достигнут за прошедшие 30 лет благодаря спектральным исследованиям за пределами земной атмосферы. При этом удалось расширить спектральный диапазон от инфракрасной области до рентгеновской с длиной волны 1.85 Å, где зарегистрирован комплекс линий водородоподобного и гелиеподобного ионов железа. Отметим здесь работу двух космических обсерваторий Chandra и XMM-Newton, запущенных в 1999 году. Так, аппаратура Chandra имеет телескоп косого падения с диаметром 1.2 м и фокусным расстоянием 10 м и обеспечивает угловое разрешение $1''$ при поле зрения 16 угловых минут; спектры получаются в интервале энергий 0.1–10 кэВ.

На втором космическом аппарате XMM-Newton установлены детекторы рентгеновского излучения, состоящие из прибора The EPIC (European Photon Imaging Camera) и двух спектрометров с отражающими дифракционными решетками (Reflection Grating Spectrometers – RGS1 and RGS2). Первый инструмент обеспечивает получение изображений и спектров в интервале энергий 0.15–15 кэВ с хорошим угловым и умеренным спектральным разрешением. Работающие одновременно с прибором EPIC спектрометры RGS1 и RGS2 выполняют спектральные наблюдения с высоким разрешением в интервале энергий 0.35–2.5 кэВ (5–35 Å) с $E/\Delta E$ от 200 до 800, и спектральное разрешение – около 0.06 Å. Для наблюдений звёздных вспышек всегда важно сопровождение в оптическом диапазоне, которое в случае отсутствия одновременных наблюдений обеспечивает фотометр, установленный на борту КА XMM-Newton.

Наземные спектральные наблюдения звёзд дали возможность определять содержание элементов и использовались для развития моделей фотосферы и нижней хромосферы в спокойном состоянии и во время вспышек. Появление внеатмосферных спектральных наблюдений позволило исследовать хромосферу, переходную область и корону и определить содержание элементов там. Отметим три наиболее важных направления. Во-первых, предложен метод определения плотности плазмы в переходной области и короне. Во-вторых, удалось найти распределение дифференциальной меры эмиссии от температуры – DEM(T) на разных стадиях нестационарных процессов. В-третьих, появилась некоторая информация о скоростях движения горячей плазмы во время вспышек.

Метод определения плотностей был предложен ещё в 1969 г. Gabriel и Jordan [16] и развит далее в работах R. Mewe и его учеников [17, 18]. Он относится к гелиеподобным ионам (рис. 4) и использует отношение интенсивностей запрещённой и интеркомбинационной линий, чувствительное к плотности плазмы в области формирования этих линий. Это отношение f/i для линий одного и того же иона выражается следующей формулой

$$\frac{f}{i} = \frac{R_0}{1 + n_e/N_c + \phi/\phi_c}$$

и зависит от двух параметров R_0 и N_c, значения которых теоретически вычисляются для различных гелиоподобных ионов. Заметим, что последний член в знаменателе приведенной формулы ϕ/ϕ_c, учитывающий возбуждение перехода $3S_1 - 3P_1$ ультрафиолетовым (UV) излучением нижележащих слоев, для большинства источников оказывается пренебрежимо малым. Этот метод использовался ранее

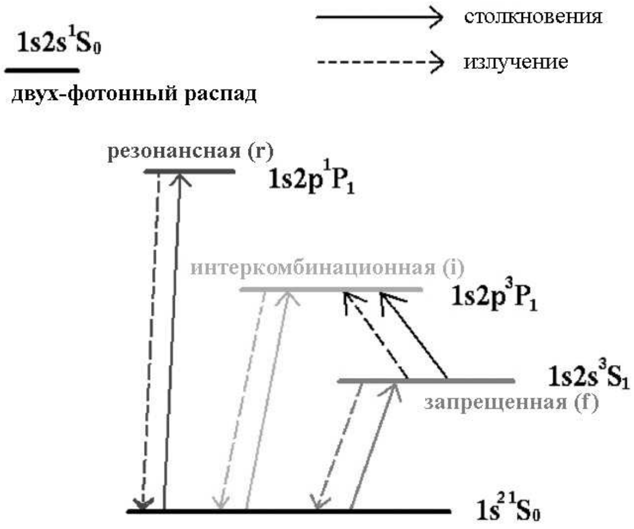


Рис. 4. Схема уровней гелиеподобных ионов

для линий в крайней ультрафиолетовой области, но с появлением новых данных был адаптирован к рентгеновскому диапазону. Кроме использования линий ионов Ne IX около 13 Å и O VII около 22 Å, электронная плотность определяется также по линиям C V 40 Å, Mg IX 9 Å, Si XIII 7 Å.

Основной новый результат внеатмосферных наблюдений в диапазоне 2–30 Å состоит в том, что кроме линий зарегистрирован псевдоконтинуум, простирающийся в областях 10–20 Å у активных звезд главной последовательности и 5–15 Å у поздних субгигантов и гигантов. Это означает прямую регистрацию теплового излучения горячих образований в коронах активных поздних звёзд. По спектрам определено распределение дифференциальной меры эмиссии от температуры и показано, что горячие вкрапления в коронах занимают сравнительно малые объёмы и характеризуются электронными плотностями, превышающими 10^{11} см$^{-3}$. Физические условия в звёздных коронах определяются уровнем активности, который существенно зависит от возраста. Заметим, что эти высокотемпературные особенности хорошо выражены у звезд повышенной светимости, входящих в состав двойных систем типа RS CVn.

Рентгеновские наблюдения звёзд малой массы подтвердили, что вспышечный процесс, как и на Солнце, развивается главным образом в короне. После импульсного энерговыделения, петли достаточно быстро заполняются горячей плазмой. Мера эмиссии горячего газа при звёздных вспышках на несколько порядков больше, температуры плазмы во вспышечном источнике могут достигать 70 миллионов K. Однако изменение DEM(T) от времени свидетельствует о достаточно быстром охлаждении плазмы, связанном с теплопроводностью вдоль петель и радиационным охлаждением. Основные черты явлений на Солнце и активных карликах оказываются, таким образом, общими с точки зрения временных профилей и последовательности развития событий в различных энергетических диапазонах. Однако полная энергия этих нестационарных процессов на красных карликах на несколько порядков выше, чем на Солнце.

В последние годы повышение чувствительности рентгеновских телескопов позволяет наблюдать на ближайших звездах явления с энергетикой, близкой к большим вспышкам на Солнце. Так, на ближайшей вспыхивающей звезде Proxima Cen вспышка зарегистрирована 12 августа 2001 г. одновременно в мягком рентгеновском диапазоне и в оптическом континууме в области около 3600 Å. Рис. 5 [19] показывает, что после импульса – максимума излучения в фильтре U – появляется мощное рентгеновское излучение, которое длится около двух часов. В физике Солнца такое поведение мягкого рентгеновского излучения часто называют проявлением закона Нойперта. Второй максимум мягкого рентгена связан с постэруптивной фазой, обычно развивающейся в солнечных вспышках. На рис. 5 приведены также области спектра около линий некоторых гелиеподобных линий для четырех временных интервалов развития этой вспышки. Электронные плотности, найденные по отношению линий, оказались на порядок больше, чем на Солнце. По-видимому, отчасти это связано с меньшим масштабом всей вспышечной структуры на красном карлике.

ВСПЫШКИ НА ЗВЁЗДАХ ПОВЫШЕННОЙ СВЕТИМОСТИ

Вспышки продолжительностью несколько часов наблюдаются на красных карликах изредка [20], тогда как на поздних субгигантах нестационарные процессы, длящиеся сутки или более происходят

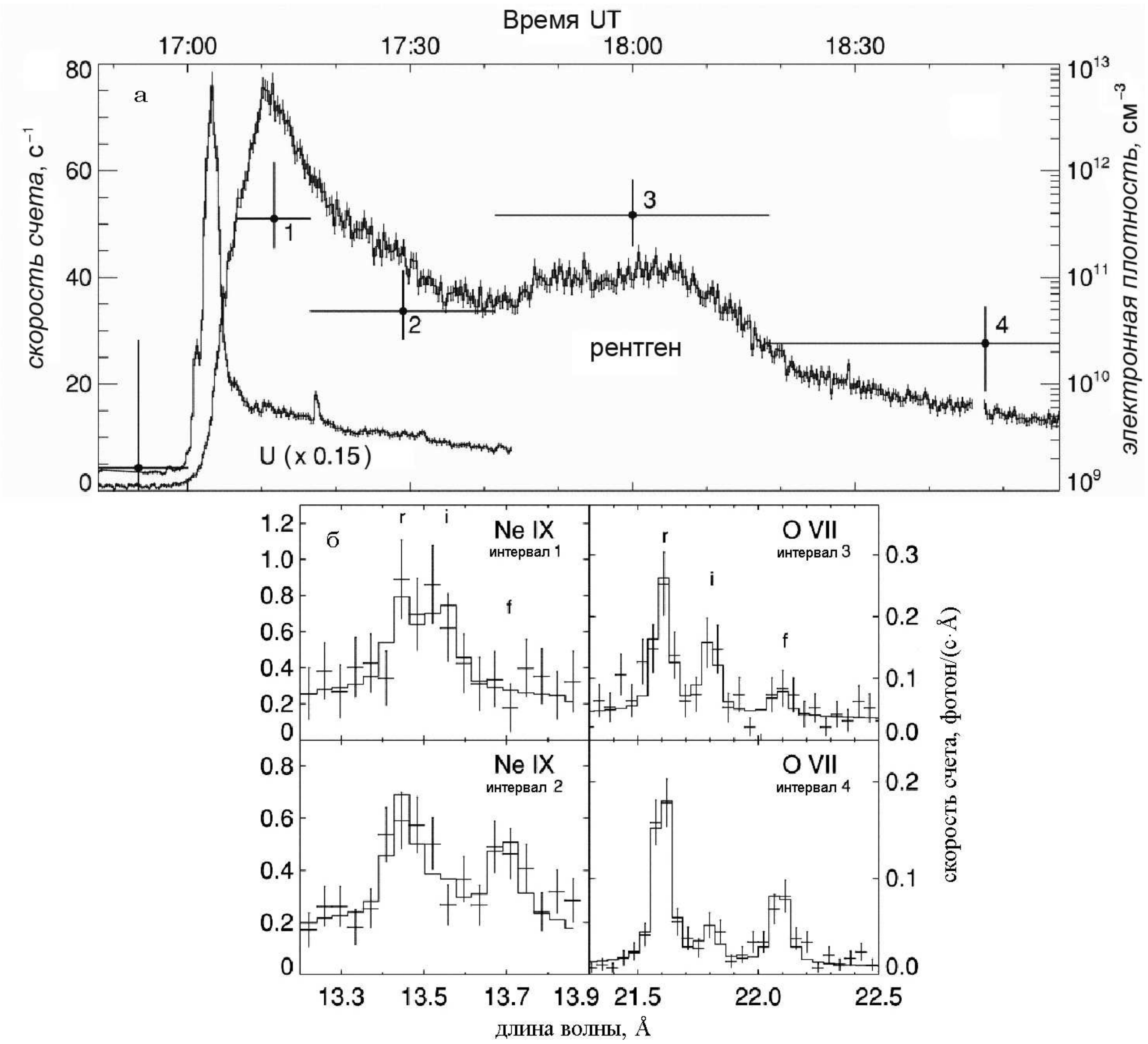


Рис. 5. Профили рентгеновского и оптического (в фильтре U) излучения вспышки на звезде Proxima Cen 12 августа 2001 г. На правой шкале – скорость счета, на левой – электронная плотность в источнике рентгеновского излучения перед вспышкой и для четырех моментов времени в ходе ее развития (*а*). Приведены спектры в области гелиеподобных ионов для указанных выше моментов (*б*) (по [19])

чаще. Большинство длительных вспышек происходит на субгигантах и гигантах, которые являются компонентами двойных систем типа RS CVn. Импульсная фаза в этих вспышках явно не проявляется, и наблюдается лишь длительное свечение в мягком рентгене и крайнем ультрафиолете (а также в низкотемпературных линиях водорода, гелия и ионизованного кальция). Свечение в оптическом континууме появляется лишь в исключительных случаях.

В качестве примера можно упомянуть вспышку, мягкое рентгеновское излучение зарегистрировано спутником Беппо SAX. Двойная система UX Ari состоит из G5-карлика и активного K0-субгиганта. Излучение 1.8–10.5 кэВ длилось более суток. Спектры, полученные на том же спутнике, аппроксимировались излучением плазмы с температурой от 100 МК в максимуме с ее последующим спадом [21].

Значительное возрастание температуры в ходе таких вспышек на звездах повышенной светимости наиболее наглядно проявляется в современных рентгеновских спектрах. Так на рис. 6 [22] приведен спектр одиночного G-гиганта HD 9024 OU And в спокойном состоянии и во время вспышки, длящейся

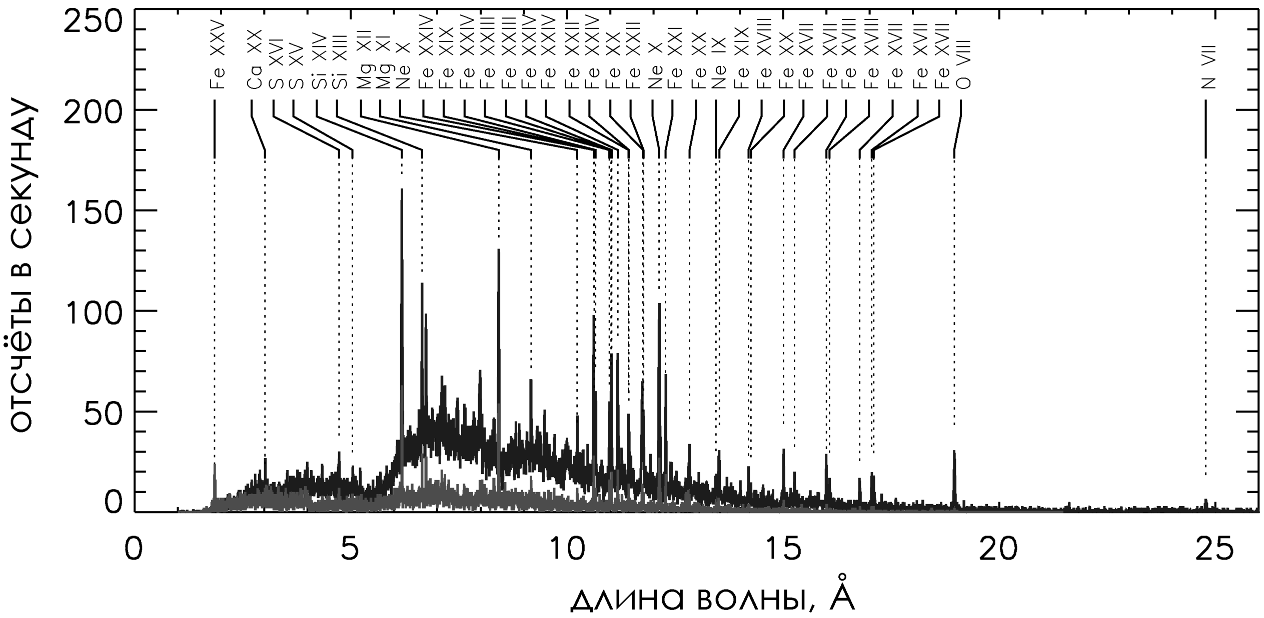


Рис. 6. Спектр одиночного гиганта OU And в спокойном состоянии и во время вспышки [22]

около 10 часов. Радиус этой звезды спектрального класса G1 III, находящейся на расстоянии 135 парсек, составляет 13.6 солнечных радиусов, масса – 2.9 солнечной и скорость осевого вращения 23.25 дня. На фоне горячей короны отчетливо виден “квазиконтинуум” с усилением некоторых линий. Авторы полагают, что полная длина вспышечной петли близка к радиусу этого гиганта.

Анализ показывает, что вспышки на поздних звёздах повышенной светимости представляют собой систему гигантских арок, заполненных горячей плазмой. Здесь сценарий Коппа–Пноймана реализуется наиболее отчетливо. Постепенный рост высоты петель связан, вероятнее всего, с подъемом токового слоя. Проведенное численное моделирование газодинамических процессов во время длительных звездных вспышек [23, 24] показывает, что эти процессы развиваются при условии, что в верхнюю часть петли непрерывно поступает небольшое количество энергии, и теплопроводность является основным фактором, передающим энергию вдоль петли. Прослеживается полная аналогия с развитием постэруптивной фазы больших солнечных вспышек.

Масштаб этих явлений существенно больше, чем на Солнце, что отражает существенную роль крупномасштабных магнитных полей этих звезд. Полная энергия этих явлений может достигать 10^{37} эрг.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Таким образом, к настоящему времени звёздные вспышки изучены в широком диапазоне длин волн. Поведение во времени излучения в различных диапазонах и особенности спектров вспышек в основных чертах близки к наблюдаемым на Солнце. Полная энергия и мощность большинства звёздных вспышек существенно выше соответствующих величин, наблюдаемых при самых больших солнечных вспышках. В последние годы на ближайших красных карликах удается регистрировать слабые нестационарные явления, энергия которых сравнима с солнечными рентгеновскими вспышками балла X. Поскольку самые слабые солнечные вспышки балла A на 5 порядков менее энергичны, чем X-вспышки, а звёздные вспышки еще примерно на 5 порядков мощнее солнечных X-вспышек, то возникла непрерывная последовательность сходных нестационарных явлений, диапазон энергий которых перекрывает 10 порядков величины.

Благодаря одновременным наблюдениям звёздных вспышек за пределами земной атмосферы и с помощью очень больших наземных телескопов, позволяющих достигать высокого временнóго и спектрального разрешения, сейчас появляется возможность изучать движение вспышечной плазмы на различных высотах во внешней атмосфере звезды. При этом во время самых мощных звёздных вспышек с $\Delta U > 7^m$ поле скоростей хромосферного газа сильно отличается от того, что наблюдается при солнечных вспышках. Мы полагаем, что в данном случае использование солнечно-звёздных аналогий уже не применимо, и интерпретация современных спектральных наблюдений требует развития новых представлений.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 09-02-01010, 08-02-00872 и НШ 1685.2008.2, 4573.2008.2.

[1] *Гершберг Р. Е.* Активность солнечного типа звёзд главной последовательности. – Одесса: Астропринт, 2002. – 688 с.

[2] *Eason E. L., Giampapa M. S., Radick R. R., et al.* Spectroscopic and photometric observations of a five-magnitude flare event on UV Ceti // Astron. J. – 1992. – **104**. – P. 1161–1173.

[3] *Кацова М. М.* Анализ бальмеровских декрементов красных карликов в спокойном состоянии и во время вспышек // Астрон. журн. – 1990. – **67**. – P. 1219–1232.

[4] *de Jager C., Heise J., van Genden A. M., et al.* Coordinated observations of a large impulsive flare on UV Ceti // Astron. and Astrophys. – 1989. – **211**. – P. 157–172.

[5] *Hawley S. L., Allred J. C., Johns-Krull C. M.* Multiwavelength Observations of Flares on AD Leonis // Astrophys. J. – 2003. – **597**. – P. 535–554.

[6] *Костюк Н. Д., Пикельнер С. Б.* Газодинамика вспышечной области, прогреваемой потоком ускоренных электронов // Астрон. журн. – 1974. – **51**. – С. 1002–1016.

[7] *Kopp R. A., Pneuman G. W.* Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon // Solar Phys. – 1976. – **50**. – P. 85–98.

[8] *Krucker S., Lin R. P.* New insights into solar physics from RHESSI // Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun: Proc. 13th Cambridge Workshop. – Hamburg, 2005. – ESA SP-560. **I**. – P. 101–106.

[9] *Raftery C. L., Gallagher P. T, Milligan R. O, Klimchuk J. A.* Multi-wavelength observations and modelling of a canonical solar flare // Astron. and Astrophys. – 2009. – **494**. – P. 1127–1136.

[10] *Katsova M. M., Boiko A. Ya., Livshits M. A.* The gas-dynamic model of impulsive stellar flares // Astron. and Astrophys. – 1997. – **321**. – P. 549–556.

[11] *Бескин Г. М., Неизвестный С. И., Плахотниченко В. Л. и др.* // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1988. – **79**. – С. 71.

[12] *Кацова М. М., Лившиц М. А.* Звёздные вспышки: импульсные процессы в атмосфере поздних карликов // Астрон. журн. – 1991. – **68**, № 1. – С. 131–157.

[13] *Бурнашева Б. А., Гершберг Р. Е., Зверева А. М. и др.* // Астрон. журн. – 1989. – **66**, № 2. – С. 328.

[14] *Кацова М. М., Лившиц М. А.* К интерпретации наблюдений вспышек звезды EV Lac на Астроне // Астрон. журн. – 1989. – **66**, № 2. – С. 307–316.

[15] *Katsova M. M., Livshits M. A., Schmitt J. H. M. M.* The Large Flare on EQ Peg Simultaneously Observed in the X-Rays and Optical Wavebands // Stellar Coronae in the Chandra and XMM-Newton Era / Eds F. Favata, J. Drake. – ASP Conf. Ser. – 2002. – **277**. – P. 515–520.

[16] *Gabriel A. H., Jordan C.* Interpretation of solar helium-like ion line intensities // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1969. – **145**. – P. 241–248.

[17] *Mewe R., Raassen A. J. J., Drake J. J., et al.* CHANDRA-LETGS X-ray observations of Capella. Temperature, density and abundance diagnostics // Astron and Astrophys. – 2001. – **368**. – P. 888–900.

[18] *Ness J.-U., Mewe R., Schmitt J. H. M. M., Raassen A. J. J.* Influence of radiation fields on the density diagnostics *Chandra*-LETGS observations of Algol and Procyon // Stellar Coronae in the Chandra and XMM-NEWTON Era. – ASP Conf. Ser. – 2002. – **277**. – P. 545–550.

[19] *Guedel M., Audard M., Reale F., et al.* Flares from small to large: X-ray spectroscopy of Proxima Centauri with XMM-Newton // Astron. and Astrophys. – 2004. – **416**. – P. 713.

[20] *Katsova M. M., Drake J. J., Livshits M. A.* New insights into the large 1993 July 15-17 flare on AU Mic: the first detection of post-eruptive energy release on a red dwarf star // Astrophys. J. – 1999. – **510**. – P. 986–998.

[21] *Pallavicini R., Tagliaferri G.* Stellar coronae with BeppoSAX // Highlights of X-ray astronomy / Eds B. Aschenbach, M. J. Freyberg. – MPE Report. – 1999. – **272**. – P. 378–382.

[22] *Testa P., Reale F., Garcia-Alvarez D., Huenemoerder D. P.* Detailed diagnostics of an X-ray flare in the single giant HR 9024 // Astrophys. J. – 2007. – **663**. – P. 1232–1243.

[23] *Лившиц И. М., Лившиц М. А.* Происхождение длительных рентгеновских вспышек на активных поздних звездах // Астрон. журн. – 2002. – **79**. – С. 364–376.

[24] *Livshits I. M., Livshits M. A., Pallavicini R.* New Modelling of a Large Long-Duration X-ray Flare on UX Ari // Adv. Space Res. – 2003. – **32**, N 6. – P. 1181–1186.