

К 100-летию со дня открытия вспыхивающих красных карликов
**«Звёзды с активностью солнечного типа –
исследования последних лет»**

Тезисы

26-27 февраля 2024 г., Научный, Крым

ОГЛАВЛЕНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЯТЕННОЙ АКТИВНОСТИ ПОЗДНИХ ЗВЁЗД В КРАО	2
<i>И. Ю. Алексеев, А. В. Кожеевникова, В. П. Кожеевников</i>	
ПЯТЕННАЯ АКТИВНОСТЬ КАРЛИКОВОЙ ЗВЕЗДЫ V772 HER	3
<i>И. Ю. Алексеев, А. В. Кожеевникова, В. П. Кожеевников</i>	
О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОДОЛЬНОГО КОМПОНЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ У ЗВЁЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА	4
<i>В. В. Бутковская, С. И. Плачинда</i>	
ЗВЁЗДЫ С АКТИВНОСТЬЮ СОЛНЕЧНОГО ТИПА: ИССЛЕДОВАНИЯ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ	5
<i>Р. Е. Гершберг</i>	
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ НА ВСПЫШЕЧНУЮ АКТИВНОСТЬ ЗВЁЗД	6
<i>М. А. Горбачев</i>	
ЗВЕЗДА ЭЙНАРА ГЕРЦШПРУНГА – DH CAR	7
<i>М. А. Горбачев, А. А. Шляпников</i>	
РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК	8
<i>Л. К. Кашапова</i>	
ДИНАМО ЗВЁЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА: ПОВЕДЕНИЕ ЗВЁЗД СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАССА G2	9
<i>Н. Клиорин, Р. Е. Гершберг, К. М. Кузаян, Н. Т. Сафиуллин, В. Н. Обриджо, И. Рогачевский, С. В. Поршнев</i>	
ПРЕДСКАЗАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СОЛНЕЧНОЙ ДИНАМО МОДЕЛИ	10
<i>Н. Клиорин, К. М. Кузаян, Н. Т. Сафиуллин, В. Н. Обриджо, И. Рогачевский, С. В. Поршнев, Р. А. Степанов</i>	
МЕХАНИЗМ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЭКЗОПЛАНЕТАХ ТИПА ГОРЯЧИЙ ЮПИТЕР С ОТНОСИТЕЛЬНО СЛАБЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ	11
<i>А. А. Кузнецов, В. В. Зайцев, В. Е. Шапошников, Т. В. Симонова</i>	
МНОГОВОЛНОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗВЁЗДНЫХ СУПЕРВСПЫШЕК: СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ТЕПЛОВЫМ И НЕТЕПЛОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	12
<i>А. А. Кузнецов</i>	
О КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ВО ВСПЫШКАХ В КОНТЕКСТЕ СОЛНЕЧНО-ЗВЁЗДНЫХ АНАЛОГИЙ	13
<i>Е. Г. Куприянова</i>	
К ВОПРОСУ О ПРОИСХОЖДЕНИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗЕ ВСПЫШЕК dMe ЗВЁЗД	14
<i>Е. С. Морченко</i>	
ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ НА ФАЗЕ СПАДА СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК	15
<i>И. Д. Мотык</i>	
АКТИВНОСТЬ ЗВЁЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА С ЭКЗОПЛАНЕТАМИ	16
<i>И. С. Саванов</i>	
КАТАЛОГ ЗВЁЗД С АКТИВНОСТЬЮ СОЛНЕЧНОГО ТИПА – CSSTA	17
<i>А. А. Шляпников</i>	
СУБ-ТГЦ ИЗЛУЧЕНИЕ PROX CEN ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ALMA И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ	18
<i>Ю. Т. Цап, А. В. Степанов, В. Ф. Мельников</i>	
ТЕМПЕРАТУРА КОРОН ВСПЫХИВАЮЩИХ ЗВЁЗД И ИХ АКТИВНОСТЬ – СОЛНЕЧНО-ЗВЁЗДНАЯ АНАЛОГИЯ	19
<i>Ю. Т. Цап, В. Ф. Мельников</i>	

Исследования пятенной активности поздних звёзд в КраО

И. Ю. Алексеев¹, Н. И. Бондарь¹, Р. Е. Гершберг¹, А. В. Кожевникова², О. В. Козлова¹

¹КраО РАН

²АО УрФУ

ilya-alekseev@mail.ru

Представлены результаты проводимых в КраО исследований пятенной активности холодных звёзд различных стадий эволюции от молодых *post T Tauri* звёзд до одиночных гигантов асимптотической ветви. Рассмотрены результаты фотометрических наблюдений от открытия П. Ф. Чугайновым переменных типа *VY Dra* до наших дней; моделирование звёздной запятнённости на основе многолетних фотометрических наблюдений по разработанной в КраО зональной модели; поиски циклов пятенной активности; результаты параллельных фотометрических и спектральных наблюдений избранных звёзд.

Пятенная активность карликовой звезды V772 Her

И. Ю. Алексеев¹, А. В. Кожевникова², В. П. Кожевников²

¹КрАО РАН

²АО УрФУ

ilya-alekseev@mail.ru

Рассмотрено фотометрическое поведение запятнённого первичного компонента затменной системы красных карликов V772 Her (G0V + M5V) по многолетним многоцветным фотоэлектрическим наблюдениям. Общий фотометрический эффект, вызванный пятнами, доходит до 0.19. Отмечается цикличность изменений блеска с характерными временами около 30 лет. Проведенное нами моделирование показало, что площадь запятнённых областей может достигать до 13% полной поверхности звезды. Пятна холоднее невозмущенной фотосферы на 1800 К и располагаются в низких широтах.

О точности измерения продольного компонента магнитного поля у звёзд солнечного типа

В. В. Бутковская, С. И. Плачинда

Крымская астрофизическая обсерватория РАН

vb@crao.crimea.ru

Обзорные наблюдения позволили установить факт существования супервспышек у звёзд солнечного типа. Супервспышки родительской звезды могут влиять на эволюцию жизни в её планетной системе, вплоть до уничтожения. Чтобы оценить вероятность существования жизни на землеподобной планете возле данной звезды, необходимо знать, возможны ли у этой звезды супервспышки.

Вопрос об источниках энергии супервспышек у солнцеподобных звёзд пока остается открытым. Одним из возможных источников может являться магнитное поле. Знание геометрии магнитного поля звезды позволит оценить энергетическую ёмкость общего магнитного поля звезды и определить, достаточно ли этой энергии для объяснения энергетики супервспышек.

Распределение продольного компонента по поверхности звезды моделируется рядом авторов методом зееман-доплеровского картирования и его модификациями. Этот метод требует плотного покрытия наблюдениями периода вращения звезды. С другой стороны, задача исследования изменения продольного компонента с глубиной формирования спектральных линий еще не решена.

На ведущих телескопах мира накоплены большие архивы спектрополяриметрических наблюдений с высоким спектральным разрешением. На примере синтетических солнцеподобных спектров и величины общего магнитного поля Солнца как звезды, мы рассчитали уровень сигнала для поляризованных по кругу спектральных линий разной глубины и с разной магнитной чувствительностью, необходимый для высокоточных измерений магнитного поля по отдельным спектральным линиям.

Оказалось, что спектрополяриметрические наблюдения солнцеподобных звёзд, ведущиеся на разных телескопах мира, имеют накопленный сигнал на два порядка меньше требуемого. Поэтому, по существующим наблюдениям невозможно оценить по отдельным спектральным линиям величину продольного компонента магнитного поля и исследовать ее изменение с глубиной в фотосфере звезды. Следовательно, для повышения точности измерений по существующим спектрополяриметрическим наблюдениям нужно использовать наборы спектральных линий. В докладе мы расскажем об этой методике и её первых результатах.

Звёзды с активностью солнечного типа: исследования последних лет

Р. Е. Гершберг

КрАО РАН

gershberg@craocrimea.ru

В работе систематизированы и обобщены основные результаты исследований звёзд с активностью солнечного типа – от красных и коричневых карликов до солнцеподобных звёзд. Рассматриваются исследования, которые были проведены преимущественно в 20-е годы, и полученные результаты сгруппированы по разделам: базы данных и каталоги, фотосферы и звёздные пятна, вращение, хромосфера, корона, вспышки, магнитные поля, циклы активности и экзопланеты.

Статистический анализ влияния экзопланет на вспышечную активность звёзд

М. А. Горбачев^{1,2}

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

mgorbachev17@gmail.com

Вспышки являются наиболее яркими индикаторами магнитной активности звёзд. В эпоху исследования экзопланет анализ вспышечной активности звёзд-хозяев представляет большой интерес, поскольку вспышки могут оказывать существенное влияние на возможность формирования жизни. В работе представлены исследования, связанные с возможным влиянием экзопланет на вспышечную активность звёзд. На основе базы данных экзопланет NASA, а также данных наблюдений обсерватории TESS, отобрано 2167 звёзд. Анализ доступных кривых блеска с 120-секундным временным разрешением позволил выделить 1509 вспышек на 109 звёздах. Диапазон энергий зафиксированных вспышек лежит в пределах от 10^{30} до 10^{36} эрг. Кроме того, обнаружено более 100 симметричных кратковременных повышений блеска, объясняемых прохождением по изображению звёзд астероидов.

В работе исследована зависимость вспышечной активности от гравитационного потенциала, создаваемого планетой на поверхности звезды и другие параметры взаимодействия звёзд и экзопланет. Делаются выводы о возможном влиянии экзопланет на вспышечную активность звёзд.

Звезда Эйнара Герцшпрунга – DH Car

М. А. Горбачев^{1,2}, А. А. Шляпников

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

mgorbachev17@gmail.com

В сообщении представлена краткая историческая справка об открытии первой вспыхивающей звезды М-типа. Сообщается известная информация и идентификации DH Car по базам данных и каталогам. Представлен её спектр. Отдельно рассмотрены наблюдения области DH Car в рентгеновском и радиодиапазонах. По наблюдениям, выполненным обсерваторией TESS, впервые найден период осевого вращения звезды. Сообщается об исследовании вспышечной активности DH Car. Представлена информация об энергии вспышек и продемонстрированы наиболее характерные из них. Дан обзор публикаций по DH Car.

Радиоизлучение солнечных вспышек

Л. К. Кашанова

Институт солнечно-земной физики СО РАН

lkk@iszf.irk.ru

Радиоизлучение сопровождает все стадии развития солнечных вспышек от появления предвспышечных всплесков до последних моментов фазы спада. Оно может генерироваться как тепловой плазмой, так и ускоренными электронами, что позволяет отслеживать изменения параметров плазмы и механизмов генерации излучения. Понимание взаимосвязи наблюдений в разных диапазонах позволяет выявить направление переноса энергии во время вспышки. В докладе обсуждаются особенности радиоизлучения солнечных вспышек и в частности микроволнового излучения, используемые для диагностики процессов во время вспышек, достижения и вопросы, появившиеся благодаря новым инструментам. Особое внимание будет уделено результатам, полученным с помощью Сибирского радиогелиографа и возможностям исследования вспышечных процессов, которые появились благодаря появлению этих инструментов.

Динамо звёзд солнечного типа: поведение звёзд спектрального класса G2

Н. Клиорин^{1,2}, *Р. Е. Гершберг*³, *К. М. Кузанян*^{4,2}, *Н. Т. Сафиуллин*^{2,5}, *В. Н. Обриджо*^{4,2},
*И. Рогачевский*¹, *С. В. Поршнев*⁵

¹Ben Gurion University, Beer-Sheva, Israel

²ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия

³КрАО, пос. Научный, Крым, Россия

⁴ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

⁵Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия

nat@bgu.ac.il

В докладе приводятся результаты моделирования магнитной активности звёзд поздних спектральных классов. Наш теоретический и численный анализ показал, что для маломассивных звёзд главной последовательности (спектральных классов от M5 до G2), вращающихся значительно быстрее, чем Солнце, генерируемое крупномасштабное магнитное поле вызвано, в основном, α^2 -динамо среднего поля. При этом временное поведение в линейном приближении α^2 -динамо заметно модифицируется даже слабым дифференциальным вращением. В нелинейном приближении в присутствии дифференциального вращения, поведение магнитной активности резко меняется от аperiodического режима к нелинейным колебаниям, сопровождающимся хаотическим поведением по мере роста дифференциального вращения. Периоды магнитных циклов уменьшаются с увеличением дифференциального вращения и их длительность меняется от тысяч до десятков лет. Такое долговременное поведение магнитных циклов может быть связано с характерным временем эволюции плотности спиральности мелкомасштабного магнитного поля. Выполненный анализ основан на численном моделировании $\alpha^2\Omega$ динамо среднего поля в рамках «по г» модели динамо и аналитическом развитии нелинейной маломодовой модели α^2 -динамо.

Работа поддержана грантом РФФ № 21-72-20067.

Литература

1. Kleeorin N., Rogachevskii I., Safiullin N., Gershberg R., Porshnev S. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2023, v. 526, 1601-1612.

Предсказание солнечной активности с помощью солнечной динамо модели

*Н. Клиорин^{1,2}, К. М. Кузанын^{3,2}, Н. Т. Сафиуллин^{2,4}, В. Н. Обриджо^{3,2}, И. Рогачевский¹,
С. В. Поршнев⁴, Р. А. Степанов²*

¹Ben Gurion University, Beer-Sheva, Israel

²ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия

³ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

⁴Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия

nat@bgu.ac.il

Развита нелинейная динамическая модель альфа-Омега динамо учитывающая эволюцию магнитной спиральности. Модель непосредственно опирается на систематические наблюдения солнечной активности [1]. На основе этой модели мы разработали метод, позволяющий предсказывать 13-месячные сглаженные значения числа солнечных пятен с высокой точностью. Наш метод использует нелинейную динамическую модель динамо в качестве источника управляющего сигнала для нейронной сети. Разработанная нейронная сеть фактически играет роль дополнительного звена, связывающего нашу динамо модель с массивом имеющихся и вновь поступающих наблюдательных данных.

Ежемесячный прогноз производится начиная с конца 2017 года (и ежемесячно выкладывается в сеть <https://github.com/rogorovskiy/solar-activity> начиная с октября 2021 г.) и действительно демонстрирует высокую точность. Мы провели качественное сравнение наших результатов с результатами других методов прогнозирования.

Мы показали, что вполне возможен прогноз 13-месячных сглаженных средних с заблаговременностью на 6 – 12 – 18 месяцев даже, при отсутствии коррекции этих прогнозов по текущим наблюдениям; его точность остается на уровне существующих методов, разработанных другими авторами. Примечательно, что использование нейронной сети в совокупности с нелинейной динамической динамо-моделью для, коррекции этих прогнозов по текущим наблюдениям 13-месячных сглаженных средних, позволяет достичь точности предсказаний на горизонте 6 – 18 месяцев, сравнимой с точностью ежемесячных прогнозов.

Работа поддержана грантом РНФ №21-72-20067.

Литература

1. Safiullin, N.; Kleeorin, N.; Porshnev, S.; Rogachevskii, I.; Ruzmaikin, A. // Journal of Plasma Physics, 2018, Volume 84, Issue 3, article id. 735840306.

Механизм ускорения электронов на экзопланетах типа горячий юпитер с относительно слабым магнитным полем

А. А. Кузнецов, В. В. Зайцев, В. Е. Шапошников, Т. В. Симонова

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

kuznetsov.alexey@ipfran.ru

Анализ радиоизлучения от экзопланет может стать эффективным способом изучения их плазмосфер. По аналогии с радиоизлучением планет Солнечной системы можно ожидать, что на радиоизлучение экзопланет существенное влияние оказывают процессы, обусловленные взаимодействием звёздного ветра центральной звезды с плазмосферой экзопланет. В частности, это взаимодействие может являться источником энергии для частиц, генерирующих радиоизлучение. В докладе рассматривается механизм ускорения электронов в плазмосфере экзопланет типа «горячий юпитер» со слабым магнитным полем. Планеты типа «горячий юпитер» обладают высокой массой $\gtrsim M_J$ (M_J – масса Юпитера), а их орбиты расположены крайне близко (0.1 а.е. к центральной звезде. Следствием близости орбит «горячих юпитеров» к центральной звезде является сильное влияние звёздного ветра на плазмосферу экзопланет [1]. Как показано в работе [2], благодаря плазменному механизму в плазмосфере экзопланет со слабым магнитным полем возможна генерация интенсивного радиоизлучения. В докладе предлагается механизм ускорения электронов, обусловленный взаимодействием магнитного поля звёздного ветра с плазмосферой экзопланеты. Благодаря слабости собственного магнитного поля горячих юпитеров магнитопауза может находиться внутри экзопланетной плазмосферы [3]. Это приводит к тому, что поток набегающего звёздного ветра достигает области плазмосферы с достаточным количеством нейтральных частиц, столкновения с которыми электронов и ионов звёздного ветра при определенных условиях существенно различаются. Последнее проявляется, в конечном счете, в появлении электрического поля разделения зарядов, имеющего компоненту вдоль магнитного поля звёздного ветра. Важную роль в возникновении электрического поля разделения зарядов играет анизотропия проводимости плазмы, находящейся в магнитном поле. Вследствие анизотропии проводимости электрическое поле \vec{E}_i , индуцированное благодаря относительному движению звёздного ветра и плазмосферы экзопланеты, генерирует не только педерсеновские токи, направленные по \vec{E}_i , но стремится возбудить также холловский ток, ортогональный поверхности экзопланеты. Поскольку холловский ток не может замыкаться на поверхность экзопланеты в силу наличия вблизи поверхности слоя с большим количеством нейтралов, то в плазмосфере возникает электрическое поле разделения зарядов, имеющее проекцию на направление магнитного поля. В докладе обсуждается возможность реализации описанного выше механизма ускорения электронов и демонстрируется выполнение необходимых критериев для HD 189733b. Для этой планеты была оценена величина и характерный масштаб ускоряющего электрического поля, а также энергия и концентрация ускоренных электронов. Продемонстрирована энергетическая достаточность обсуждаемого механизма ускорения для наблюдения современными средствами радиоизлучения этой экзопланеты. Показано, что у экзопланет WASP-12b и Osiris (HD 209458b) формируется ударная волна, препятствующая реализации предлагаемого механизма.

Работа поддержана грантом РФФ № 23-22-00014.

Литература

1. M. S. Rumenskikh, I. F. Shaikhislamov, M. L. Khodachenko et al. // *Astrophys. J.* 2022, V. 927, P. 238.
2. V.V. Zaitsev, V.E. Shaposhnikov // *MNRAS* 2022. V. 513. P. 4082.
3. A. G. Zhilkin, D. V. Bisikalo // *Astronomy Reports* 2019. V. 63, P. 550.

Многоволновые наблюдения звёздных супервспышек: соотношения между тепловым и нетепловым излучением

А. А. Кузнецов

ИСЗФ СО РАН, Иркутск

a_kuzn@iszf.irk.ru

Солнечные и звёздные вспышки являются источниками интенсивного излучения практически во всём электромагнитном спектре. Для более глубокого понимания природы вспышек необходимы одновременные наблюдения в различных спектральных диапазонах, поскольку они отражают различные процессы в различных областях солнечной/звёздной атмосферы. В частности, мягкое рентгеновское излучение является тепловым излучением горячей плазмы в короне; с другой стороны, излучение в белом свете и УФ диапазоне генерируется в более глубоких слоях атмосферы, нагретых нетепловыми частицами. Я представляю результаты одновременных многоволновых наблюдений вспышек на звёздах поздних классов: 9 вспышек с энергиями более 10^{33} эрг на трёх различных звёздах были зарегистрированы одновременно инструментами Kepler в белом свете и XMM-Newton в рентгеновском диапазоне; 5 вспышек с энергиями 10^{31} – 10^{32} эрг в системе AT Mic наблюдались инструментом AstroSat одновременно в рентгеновском и УФ диапазонах. В большинстве проанализированных вспышек (за одним исключением) основной вклад в наблюдаемую энергетику вспышки вносило излучение вспышечных лент (излучение в оптическом континууме), что согласуется с наблюдениями солнечных вспышек. В большинстве вспышек (но не во всех) наблюдался эффект Нойперта – задержка теплового излучения по отношению к нетепловому. Установленное ранее для солнечных вспышек соотношение между полной энергией вспышки и её классом по GOES с достаточно высокой точностью выполняется и для гораздо более мощных звёздных супервспышек. Сделан вывод, что супервспышки на других звёздах по своей природе идентичны солнечным вспышкам, но возникают в активных областях большего размера, что и определяет их энергетику. С другой стороны, статистика параметров звёздных супервспышек существенно зависит от временного разрешения инструмента.

О квазипериодических процессах во вспышках в контексте солнечно-звёздных аналогий

Е. Г. Куприянова

ГАО РАН

elenku@bk.ru

Принцип солнечно-звёздных аналогий основан на предположении о сходстве физических процессов во вспышечных областях на Солнце и магнитоактивных звёздах. В ходе многолетних исследований вспышечно-активных звёзд найдены различные свидетельства, подтверждающие это предположение. Одно из таких свидетельств было найдено относительно недавно. Оно заключается в том, что квазипериодические пульсации (КПП), наблюдаемые во временных профилях излучения, обладают схожими свойствами для солнечных и звёздных вспышек. В докладе будет представлен обзор новейших исследований в этой области. Будут рассмотрены преимущества и трудности использования КПП для проверки упомянутого принципа.

К вопросу о происхождении оптического излучения в импульсной фазе вспышек dMe звёзд

Е. С. Морченко

Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова

morchenko@physics.msu.ru

После появления современных спектральных и фотометрических наблюдений вспышек красных карликовых звёзд (Р. Е. Гершберг, S. L. Hawley, Б. Е. Жиляев и др.) одной из ключевых проблем физики звёздных вспышек явилась необходимость самосогласованной теоретической интерпретации происхождения NUV-, «голубого» и «красного» компонентов континуума, а также – долгоживущего излучения в линиях бальмеровской серии H β .

Наблюдения мощных вспышек dMe звёзд (Kowalski et al., 2013) свидетельствуют о существовании во время фазы затухания вспышек двух областей с различной временной динамикой: одна остывает быстрее, а другая – медленнее (Mendoza et al., 2022). Кроме того (Гершберг, 2005), наилучшее согласие теоретических (для различных механизмов излучения) и наблюдаемых показателей цвета звёздных вспышек достигается для комбинации *короткоживущего* квазичернотельного излучения вблизи максимума блеска вспышки, соответствующего в голубой области спектра планковской кривой с T порядка 1 эВ, и долгоживущего излучения водородной плазмы с температурами и плотностями несколько выше, чем в невозмущенной хромосфере.

Также, непосредственно после максимума блеска вспышек происходит быстрое охлаждение плазмы (Гершберг, 2014), «голубой» и «красный» компоненты оптического континуума демонстрируют связь между собой, причём, красный компонент *доминирует* во время фазы медленного угасания. Наконец, в максимуме блеска вспышек наблюдаются пологие и даже инверсные бальмеровские декременты характерные для слоя плотной водородной плазмы вблизи состояния ЛТР (Гринин, 1984).

Эти результаты – ключевые требования к теоретической интерпретации оптических спектров вспышек dMe звёзд.

В докладе аргументируется, что приведённым наблюдательным данным соответствует «синтез» модели Гринина и Соболева (1977), свидетельствующей о локализации непрерывного оптического излучения звёздных вспышек вблизи фотосферы звезды, и модели Костюк и Пикельнера (гидродинамический и излучательный отклик хромосферы красного карлика на импульсный нагрев).

Обоснована возможность применения неподвижного однородного *изотермического* плоского слоя водородной плазмы для приближенного анализа характеристик непрерывного излучения хромосферных конденсаций в газодинамических моделях вспышек («мгновенный» снимок). Показано, что утверждение о *прозрачности* в оптическом континууме такого слоя в расчётах, выполненных А. Г. Косовичевым (1980), *не противоречит* результатам численного моделирования Allred et al. (программный пакет RADYN). Акцентировано внимание на роль давления магнитного поля, *препятствующего* сжатию газа на два порядка в результате высвечивания за фронтом нестационарной хромосферной ударной волны (температурная волна II рода). Показана определяющая роль газодинамических процессов и учёта теплопроводности по сравнению с процессами, происходящими в зоне высвечивания (тепловой релаксации).

В заключительной части доклада аргументируется, что интерпретация «белого» континуума звёздных вспышек Kowalski et al. (2015), использующая экстремально высокий поток энергии в пучке ускоренных электронов, *противоречит* приведённым выше результатам наблюдений. А именно, такой подход: приводит к сокращению «времени жизни» бальмеровских линий H β , не даёт объяснение физической природы красного компонента оптического континуума мощных звёздных вспышек, равно как и континуума *слабых* вспышек – с планковской температурой в максимуме блеска порядка 0.5 эВ (Жиляев и др., 2012), предсказывает *инверсный* градиент плотности в возмущённой хромосфере красного карлика, что, в свою очередь, свидетельствует о «перегреве» плазмы.

Энерговыделение на фазе спада солнечных вспышек

И. Д. Мотык

ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия

motykilya@mail.iszf.irk.ru

Большинство исследований вспышек (особенно солнечных) направлены на изучение фазы роста. Считается, что именно в это время происходит основное энерговыделение, определяющее дальнейшее развитие вспышки. На фоне таких предположений роль фазы спада вспышек выглядит вторичной и мало интересной. Однако, количество энергии, выделяемое во время фазы спада, сравнимо с энергией, выделяющейся во время фазы роста. Кроме того, для фазы спада характерно возникновение волновых процессов и быстрых процессов ускорения частиц, которые могут повлиять на энергетический баланс вспышки.

В докладе обсуждаются современное состояние исследований фазы спада, модели, описывающие фазу спада и результаты исследований временных профилей фазы спада в разных спектральных диапазонах. Также представлены некоторые результаты, полученные с использованием наблюдений Сибирского Радиогелиографа – инструмента нового поколения, наблюдающего в диапазоне частот 3 – 24 ГГц.

Активность звёзд солнечного типа с экзопланетами

И. С. Саванов

ИНАСАН

igs231@mail.ru

Представлены результаты исследований проявлений магнитной активности звёзд с планетными системами, их вспышечной и пятенной активности, взаимодействия центральной звезды с планетной системой (вспышки, корональные выбросы массы). Важнейшей целью исследования является предоставление оценок проявления активности родительской звезды для теоретических подходов к исследованиям процессов образования и эволюции планетных атмосфер в системах звезда-планета на основе систематических спектроскопических и фотометрических наблюдений в разных диапазонах длин волн, включая высокоточные фотометрические космические наблюдения.

Свойства локальной окружающей среды экзопланеты (включая зону потенциальной обитаемости планетной системы) во многом определяются ее родительской звездой. Как известно, звёзды холоднее Солнца, имеют повышенную активность по отношению к подобным Солнцу звёздам, что выражается в повышенной вспышечной активности, корональных выбросах массы (КВМ), высоких потоках излучения в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом (УФ) диапазонах спектра и магнитных полей. Такие свойства повышенной активности, как правило, ослабевают с увеличением возраста звезды и замедлением её скорости вращения.

Все указанные выше эффекты имеют несомненное влияние на образование планет и их потенциальную обитаемость. Звёздные вспышки связаны с повышенным уровнем УФ излучения, а потоки заряженных частиц также связаны с повышенным уровнем КВМ, что, в итоге, может приводить к сжатию планетной магнитосферы и росту скорости эрозии атмосферы. УФ поток от вспышки или фоновое излучение звёзд могут повлиять на нагрев и химический состав атмосферы.

Звёздная активность потенциально влияет на атмосферные биомаркеры и в некоторых экстремальных случаях может привести к разрушению озонового слоя в атмосфере, являющегося важным элементом защиты планеты от жесткой радиации. Планетные магнитосферы важны для защиты планеты от потенциальной эрозии атмосферы за счёт заряженных частиц с высокими энергиями из звёздного ветра. Размер магнитосферы планеты в значительной степени зависит от положения родительской звезды, и, в частности, от её звёздного ветра и магнитных полей.

Широкий круг исследований вспышечной и пятенной активности звёзд с планетными системами выполнен нами на основе высокоточных фотометрических наблюдений, полученных с космическим телескопом Кеплер, миссии TESS. Проведен обобщённый анализ двух независимых выборок звёзд с планетными системами. Используя оценку радиусов звёзд (данные архива телескопа Кеплер), получены величины A площади пятен на поверхности звёзд в миллионных долях видимой полусферы Солнца. Найдено хорошее согласие оценок характеристик пятен на поверхности звёзд с экзопланетами по данным наблюдений основной миссии Кеплер и её продолжения K2. Из нашего списка, в котором более 700 объектов с планетными системами для дальнейшего рассмотрения были отобраны 76 звёзд с эффективными температурами T_{eff} , отличающимися от солнечной на 100 К. Для них были сделаны заключения об уменьшении активности объектов с периодами вращения более 10 – 12 суток. Из рассмотрения соотношения запятнённости объектов A и их возраста t (установленного по гирохронологическому соотношению) получен вывод о том, что звёзды с возрастом менее 1 млрд. лет являются самыми активными. Для одного сета наблюдений (Q3) миссии Кеплер выполнен предварительный анализ фотометрических наблюдений 9 объектов, обладающих наибольшими значениями параметра запятнённости A (более 10000 в миллионных долях видимой полусферы Солнца). Отмечены переменность их кривых блеска на временах, сопоставимых с периодами вращения, и её заметная амплитуда, указывающая на повышенную площадь пятен на поверхности.

Выполнены детальные исследования отдельных планетных систем, в том числе планетных систем звёзд солнечного типа. Например, рассмотрены свойства планетной системы TOI-1422, в которой две планеты типа нептун обращаются около малоактивной звезды солнечного типа возраста около 5 млрд. лет. Первоначально нами был проведен анализ проявлений активности звезды TOI-1422. По данным многолетнего фотометрического обзора Kamogata Wide-field Survey (KWS) был проведён анализ проявлений активности TOI-1422 и высказано предположение о существовании возможных циклов активности 1650-1680 сут. и 2450 сут. Вероятная величина периода вращения P звезды лежит в интервале 27(+19, -8) сут., наблюдения обзора KWS в фильтре V указывают на наиболее возможное значение для $P = 32$ сут.

Внутренняя планета TOI-1422b относится к типу горячих непунов, она обращается по орбите с периодом около 13 суток и имеет равновесную температуру $T_{\text{eq,b}} = 867$ К. По выполненным расчетам по модели потери атмосферы с ограничением по энергии для TOI-1422b была найдена величина оттока вещества атмосферы 9.4×10^8 г/с. Внешняя планета системы TOI-1422c также может рассматриваться как горячий нептун, она имеет орбитальный период 29.3 суток, её минимальная масса, $M_c \sin i$, составляет $11.1 M_{\oplus}$, а равновесная температура $T_{\text{eq,c}} = 661$ К. Для оценки радиуса TOI-1422c нами были использованы эмпирическое соотношение $M - R$. Найдено, что потеря вещества атмосферы планеты TOI-1422c составляет 7.8×10^7 г/сек. и, с учётом погрешностей её параметров, она может находиться в диапазоне от 6.1×10^7 г/сек. до 9.7×10^7 г/сек.

Каталог звёзд с активностью солнечного типа – CSSTA

А. А. Шляпников

aas@craocrimea.ru

С момента опубликования второй версии представляемого Каталога, описание которого дано в [1], прошло более трёх лет. Мировые астрономические базы данных пополнились за прошедшее время большим объёмом информации, что потребовало внесения изменений и дополнений в новую – третью версию «Каталога звёзд с активностью солнечного типа» (CSSTA-3 – Catalogue of Stars with Solar-Type Activity).

Ревизия данных позволила уточнить типы переменности звёзд и изъять из второй версии CSSTA те, которые не соответствуют определённым критериям. В новую версию каталога включена информация об амплитудах переменности, периодах обращения объектов и возможных циклах активности звёзд – как следствие долговременных малоамплитудных изменений блеска, опубликованная в третьей реализации обработки данных наблюдений обсерватории GAIA [2]. Выполнено сравнение ранее содержащихся в CSSTA данных и вновь найденных. Увеличено число, соответствующее обнаруженным и кандидатам в экзопланеты, которые обращаются вокруг звёзд, представленных в CSSTA-3. Последнее должно способствовать уточнению типов переменности объектов [3].

Каталог содержит 314618 объектов со следующими данными: главное обозначение объекта, его экваториальные координаты, основной тип объекта, его тип переменности, звёздная величина V по разным источникам, величины в минимуме и в максимуме, спектральный тип из разных источников, эмиссионные линии, индекс хромосферной активности, присутствие пятен или их параметры, ультрафиолет или вспышки в ультрафиолете, инфракрасное излучение, радиоэмиссия или радиовспышки, эффективная температура, оценки радиуса и светимости, период активности по разным источникам, длительность цикла активности, присутствие экзопланет и их число. Подробное описание новой версии Каталога дано в книге [4].

Основной акцент в докладе будет сделан на практическом применении CSSTA-3.

Литература

1. Гершберг Р.Е., Клиорин Н.И., Пустильник Л.А., Шляпников А.А. // «Физика звёзд средних и малых масс с активностью солнечного типа», Москва, 2020, 768 с.
2. Gaia Collaboration. Gaia Early Data Release 3 (Gaia EDR3) // VizieR Online Data Catalog, 2020 – <https://cdsarc.cds.unistra.fr/vizier/query.do?ident=1336>
3. Shlyapnikov A.A. Stars of the Lower Part of the Main Sequence with Discovered Exoplanets and Candidates. Periods of Rotations or Revolutions? // Geomagnetism and Aeronomy, 2024, V. 63, I. 8, p.1308-1312.
4. Gershberg R.E., Kleeorin N.I., Pustilnik L.A., Airapetian V.S., Shlyapnikov A.A. // «Physics of mid- and low-mass stars with solar-type activity and their impact on exoplanetary environments», Симферополь: ООО «Форма», 2024, 764 с.

Суб-ТГц излучение Prox Cen по данным наблюдений ALMA и их интерпретация

Ю. Т. Цан¹, А. В. Степанов², В. Ф. Мельников²

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург

yur_crao@mail.ru, stepanov@gaoran.ru, vic-meln@mail.ru

На примере красной карликовой звезды Проксима Центавра (Prox Cen) проведен сравнительный анализ звёздных и солнечных вспышек в суб-миллиметровом диапазоне длин волн. Основное внимание уделено результатам наблюдений на радиоинтерферометре Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), которые свидетельствуют, что поток суб-ТГц излучения звёздных вспышек, несмотря на короткую (~ 10 с.) длительность, на порядок больше солнечных, уменьшается с частотой излучения и имеет степень линейной поляризации, превышающую десятки процентов. Показано, что за суб-ТГц излучение может быть ответственен синхротронный механизм, связанный с ускорением электронов до ультрарелятивистских энергий. Обсуждается наблюдаемая связь между суб-ТГц, радио- и рентгеновским излучением звёздных вспышек. Подавление низкочастотного (< 1 ТГц) радиоизлучения по крайней мере для некоторых событий позволяют предположить, что вспышечное энерговыделение сосредоточено в плотных слоях звёздной атмосферы.

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки (НИР №122022400224-7) и Российского научного фонда (№22-12-00308).

Температура корон вспыхивающих звёзд и их активность – солнечно-звёздная аналогия

Ю. Т. Цан¹, В. Ф. Мельников²

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург

yur_crao@mail.ru, vic-meln@mail.ru

Как известно, потоки мягкого рентгеновского излучения солнечных вспышек лежат в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-4} Вт/м², тогда как максимальные температуры корональной плазмы варьируются от 5 до 30 МК. Столь существенная разница в диапазоне значений предполагает, что высокая температура вспышечной корональной плазмы является неотъемлемым атрибутом вспышечного энерговыделения. В частности, это может свидетельствовать о наличии тесной связи между значением температуры солнечной корональной плазмы и ускорением заряженных частиц, включая вспыхивающие звёзды.

Сравнительно недавно Hudson et al. [1] получили указания о предимпульсном нагреве плазмы до температуры 10-15 МК для четырёх вспышек на Солнце, включая микровспышку рентгеновского класса В9.4. Статистические исследования da Silva et al. [2] также по данным GOES показали, что 75% из 745 вспышечных событий, наблюдавшихся с 2010 по 2011 гг., имели температуру плазмы на предимпульсной фазе в пределах 20 с от начала вспышки, превышающую 8.6 МК. Горячие предвестники импульсной фазы также были получены по данным Solar Orbiter/STIX and GOES для вспышек рентгеновского класса В1.2 - X6.9 [3]. В связи с этим возникает вопрос о возможных причинах наличия связи между высокой температурой корональной плазмы Солнца и ускорением заряженных частиц.

Мы рассмотрели влияние температуры максвелловской плазмы на эффективность ускорения быстрых квазитепловых электронов корональных петель. Показано, что рост температуры приводит к резкому (на порядки величины) увеличению квазитепловых электронов, способных преодолеть кулоновский барьер потерь энергии. Это предполагает необходимость нагрева области ускорения в короне Солнца до температуры ~ 10 МК. Предложенный подход позволяет лучше понять не только происхождение, но и роль рентгеновских горячих источников в предимпульсной фазе солнечных вспышек. Исходя из солнечно-звёздной аналогии, обсуждается природа наблюдаемой корреляции между температурой звёздных корон и вспышечным энерговыделением.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (№22-12-00308) и Минобрнауки (НИР №122022400224-7).

Литература

1. Hudson, H. S., Simões, P. J. A., Fletcher, L. et al. // MNRAS 2021. V. 501. P.1273.
2. da Silva, D. F., Hui, L., Simões, P. J. A. et al. // MNRAS 2023. V. 525. 4143.
3. Battaglia A. F., Hudson, H., Warmuth, A. et al. // A&A 2023. V. 679. id.A139.