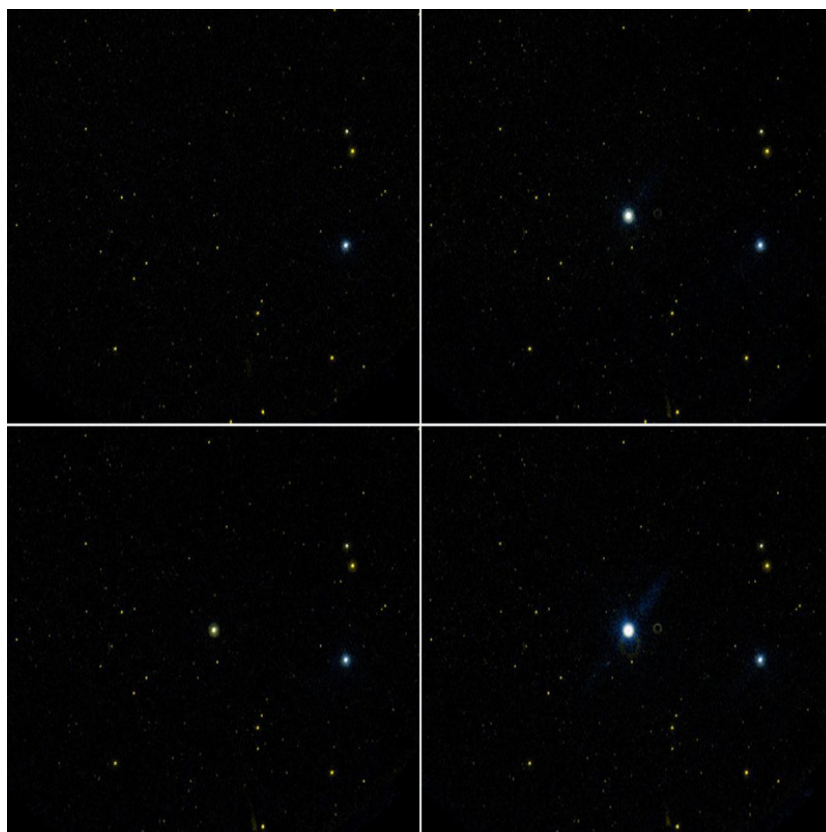


Санкт-Петербургский государственный университет  
Математико-механический факультет  
Кафедра астрофизики  
Физические проявления эволюции звезд

Смирнов Антон Александрович

### Звезды типа UV Кита

Руководитель семинара:  
д.ф.-м.н., доцент Холтыгин А. Ф.



Санкт-Петербург - 2015

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Наблюдательные данные</b>	<b>3</b>
2.1	Физические параметры . . . . .	3
2.2	Вспышки . . . . .	5
2.3	Спектральный анализ . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Моделирование</b>	<b>12</b>
3.1	Механизмы возникновения вспышек . . . . .	12
3.2	Синтетические спектры . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Супер вспышки</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Заключение</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Литература</b>	<b>18</b>

# 1 Введение

Вспыхивающие звезды типа UV Кита - явление, открытое в первой половине XX века Эйнарсом Герцшпрунгом и позже переоткрытое Джеймсом Карпентером. Ими были получены снимки звезд, которые на короткой временной шкале, порядка нескольких минут, способны были менять свой блеск на 2-3 звездных величины.

Вспышки звезд типа UV Кита похожи на солнечные вспышки, однако энергия, излучаемая во вспышках на 5-6 порядков больше средней энергии, излучаемой во время вспышки на Солнце. Кроме того, звезды типа UV Кита принадлежат поздним спектральным классам  $K - M$ , и поэтому имеют светимость в спокойном состоянии меньше солнечной. Поскольку вспышки на Солнце и звездах типа UV Кита похожи, то все проблемы, связанные с описанием и моделированием вспышек на Солнце переходят по наследству к звездам типа UV Кита.

При наличии вспышечной активности звезды типа UV Кита имеют невысокую температуру и являются звездами поздних спектральных классов, поэтому почти вся звезда является конвективной и внутри звезды образуются молекулы. По этой причине, моделирование звезды даже в спокойном состоянии является непростой задачей, которая до сих пор не решена.

## 2 Наблюдательные данные

### 2.1 Физические параметры

Один из самых активных исследователей вспыхивающих звезд Гершберг Роальд Евгеньевич - советский и украинский астроном. Долгое время он работал в Крымской обсерватории, написал несколько монографий по звездам типа UV Кита. Во время работы в Крымской обсерватории им были получены различные статистические данные о вспыхивающих звездах. Хотя считается, что звезды типа UV Кита - звезды главной последовательности поздних спектральных классов, в основном  $K - M$ , Гершберг предложил расширить определение и относить к вспыхивающим звездам более ранние спектральные классы. Физические параметры вспыхивающих различных спектральных классов приведены в таблице 2. Сама звезда-прототип UV Кита - красный карлик спектрального класса  $M6.0V$ , массой  $M = 0.1M_{\odot}$ , радиусом  $R = 0.14R_{\odot}$  и температурой  $T = 2670K$ .

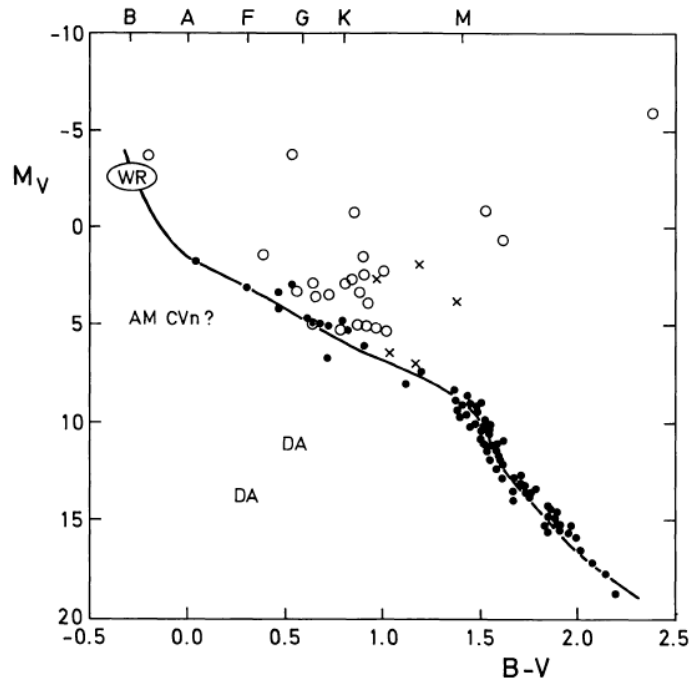


Рис. 1: Pettersen, V. R., 1989. Диаграмма Г.-Р. для вспыхивающих звезд. Черные кружки – вспыхивающие, крестики – молодые звезды, открытые кружки – гиганты.

Spectra	F	G0-G9	K0-K3	K4-K8	M0-M3	M4-M8
$\langle L_*/L_\odot \rangle$	3	0.9	0.4	0.2	0.05	0.006
$\langle R_*/R_\odot \rangle$	1.2	1.0	0.8	0.7	0.5	0.2
Number of the UV Cet-type stars in GKL99		10	19	25	146	212
Number of the UV Cet-type stars in GTSh10	10	13	23	66	224	230

Рис. 2: Гершберг Р. Е., 2015, материалы по наблюдениям в Крымской обсерватории.

В среднем вспыхивающие звезды имеют массы  $0.1-0.6 M_\odot$  и размеры  $0.1-0.8 R_\odot$ . Их средний возраст  $(3 - 4) \cdot 10^9$  лет. Большинство из них находятся в двойных системах. Они занимают правый нижний угол диаграммы Герцшпрунга-Рассела (рис. 1). В спокойном состоянии вспыхивающие звезды имеют блеск 5-19 зв. вел.

## 2.2 Вспышки

Отличительной особенностью вспыхивающих звезд, являются, естественно, вспышки. Однако, по своей продолжительности, скорости нарастания и спадения блеска, амплитуде вспышки, они отличаются. При средней величине изменения блеска звезды  $\Delta m_{ave} = 1-2$  зв. вел. во время вспышки, для сильных вспышек максимальное изменение блеска  $\Delta m_{max}$  может составить 6-7 зв. вел. Продолжительность вспышки может составлять минуты, часы, сутки. Стандартный профиль вспышки изображен на рис. 3. Как видно из рисунка, наблюдается слабое поярчение звезды до вспышки, затем происходит вспышка, затем после спадения блеска возможна небольшие вторая и даже третья вспышки.

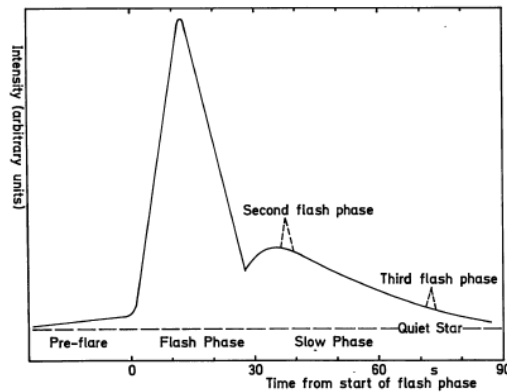


Рис. 3: Стандартный профиль вспышки UV Кита, W. Haupt & W. Schlosser, 1974. Пунктиром обозначен уровень интенсивности в спокойном состоянии. Сплошной линией – изменение интенсивности во время вспышки.

В наблюдениях разделяют два типа вспышек. Вспышки I типа – короткие вспышки с быстрым нарастанием блеска, вспышки II типа – вспышки, которые похожи на вспышки I типа, но нарастание и спадение блеска у них происходит примерно в 10 раз медленнее. Иногда выделяют вспышки с маленьким вторичным всплеском. Перечисленные типы представлены на рис. 4.

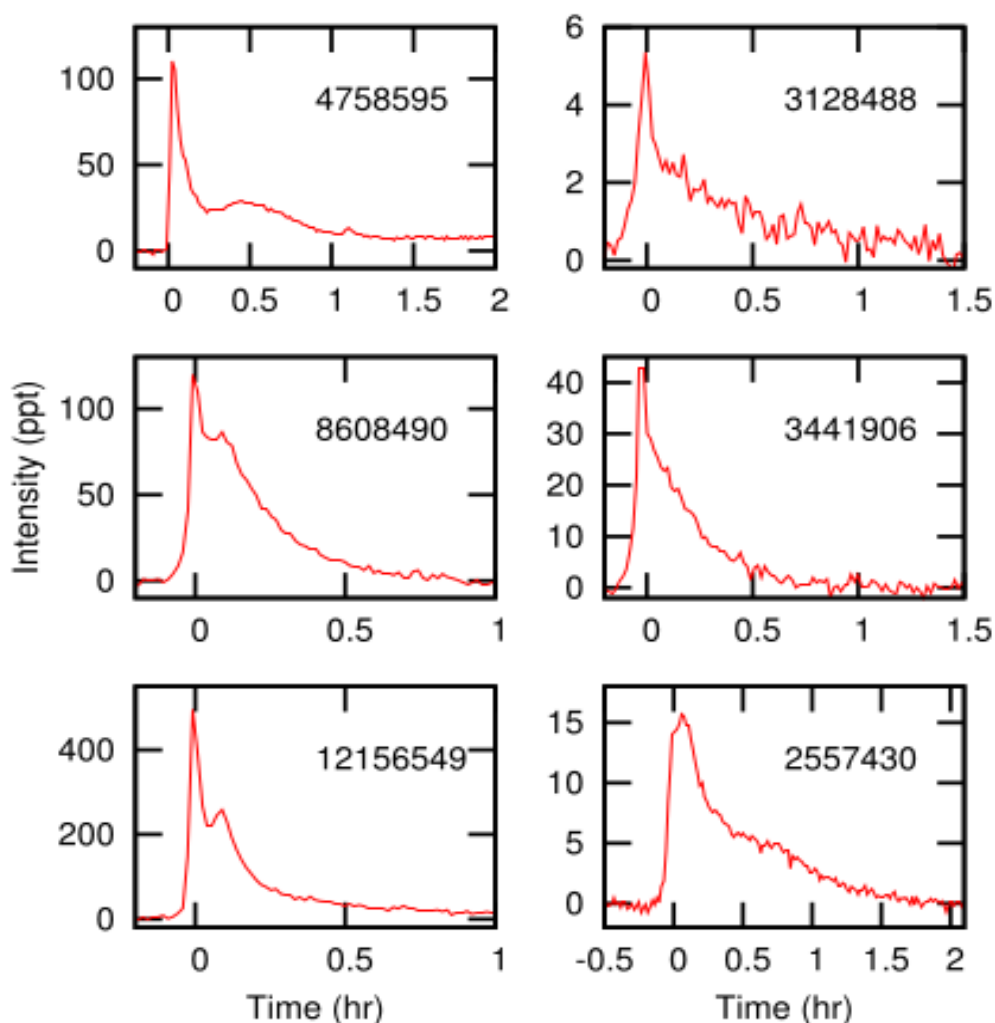


Рис. 4: Изображения разных видов вспышек из Kepler Input Catalogue, нумерация по каталогу, Balona L. A., 2015. 2 панели сверху - вспышки I типа, посередине слева - вспышка II типа со вторичным всплеском, посередине справа - вспышка I типа, внизу слева - вспышка I типа со вторичным всплеском, внизу справа - вспышка II типа.

### 2.3 Спектральный анализ

В спектрах вспыхивающих звезд наблюдаются эмиссионные линии Ca II, III, He I и абсорбционные линии молекул. Наиболее заметны линии окиси титана TiO. Во время вспышки могут меняться профили линий, могут образовываться новые линии, линии из абсорбционных могут стать эмиссионными. На рис. 5 показан спектр вспыхивающей звезды AD Leo в

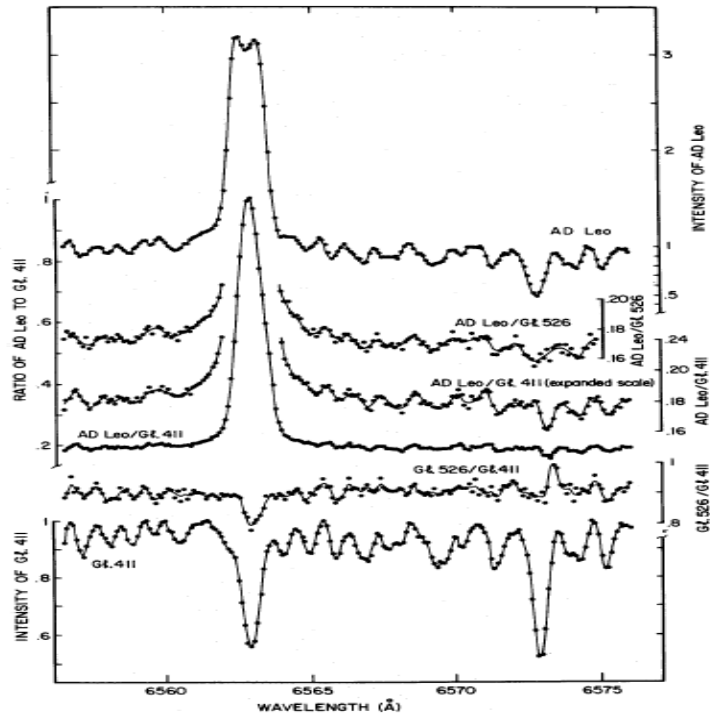


Рис. 5: Pettersen B. R. & Cleman L. A., 1981. Профиль Na у AD Льва в сравнении с профилями этой линии у не вспыхивающих звезд того же спектрального класса.

сравнении со спектрами двух звезд GL 411 и GL 526 - не вспыхивающими звездами того же спектрального класса. При вспышке может происходить усиление эмиссионных линий (см. рис. 6 и 7). Естественно, во время вспышек профили линий, могут и не изменяться, как видно, например, из рис. 8.

Для вспышек всегда соблюдается неравенство для потоков в полосах U, B и V:

$$\Delta U > \Delta B > \Delta V, \quad (1)$$

где символом  $\Delta$  обозначено изменение потока в соответствующей полосе во время вспышки. Результаты наблюдений вспышек типичных представителей AD Leo и EV Lac в разных полосах приведены на рис. 9 и 10.

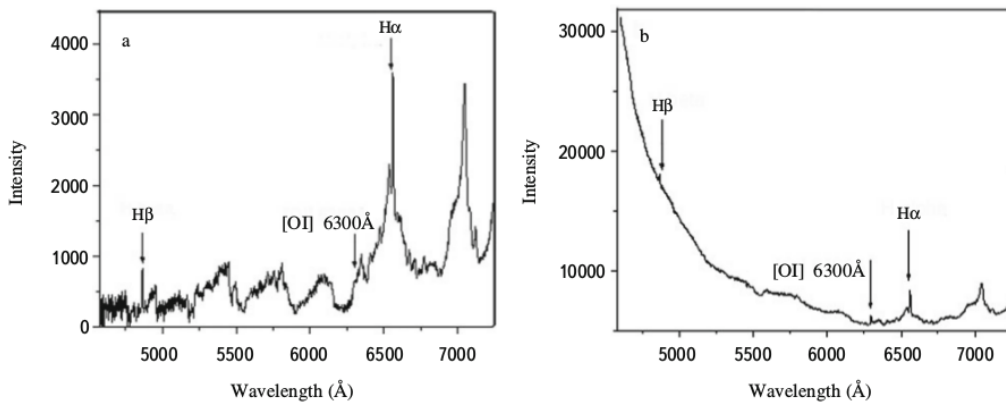


Рис. 6: Спектры до вспышки (слева) и во время вспышки (справа) типичной вспыхивающей WX Uma, Melikian et al. (2013).

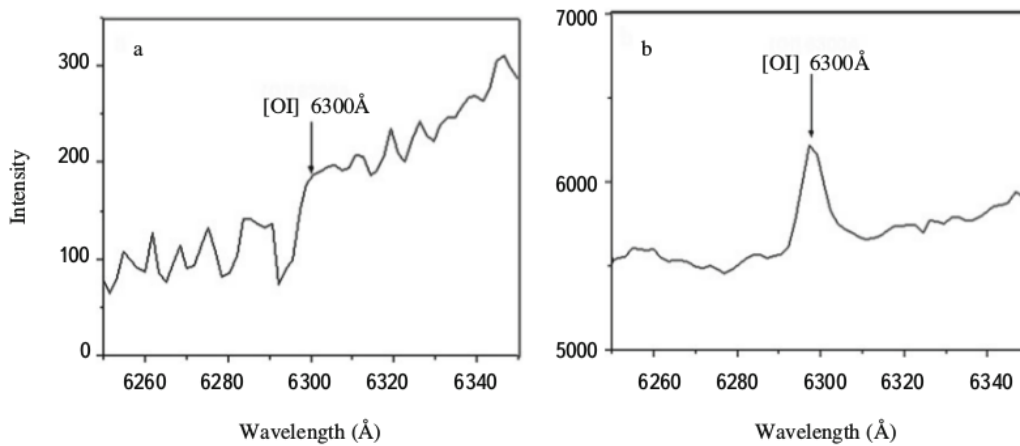


Рис. 7: Профили линии OI до вспышки (слева) и во время вспышки (справа) типичной вспыхивающей WX Uma, Melikian et al. (2013).



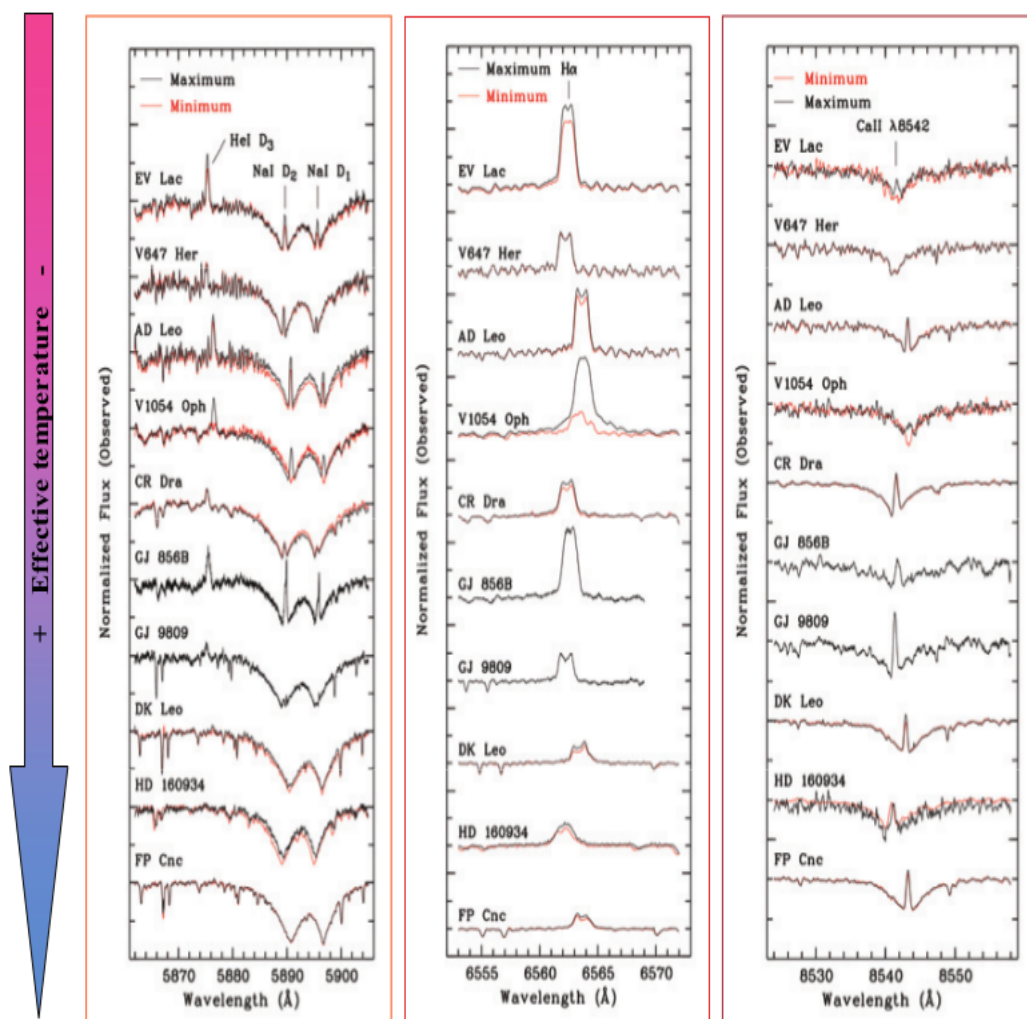


Рис. 8: Максимум (черный) и минимум (красный) излучения в линиях He I, Na I, дуплет (слева), H $\alpha$  (центр), Ca II,  $\lambda 8542rA$  (справа), из постера к конференции "Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun XIV", Crespo-Chacon I. et al., 2006.

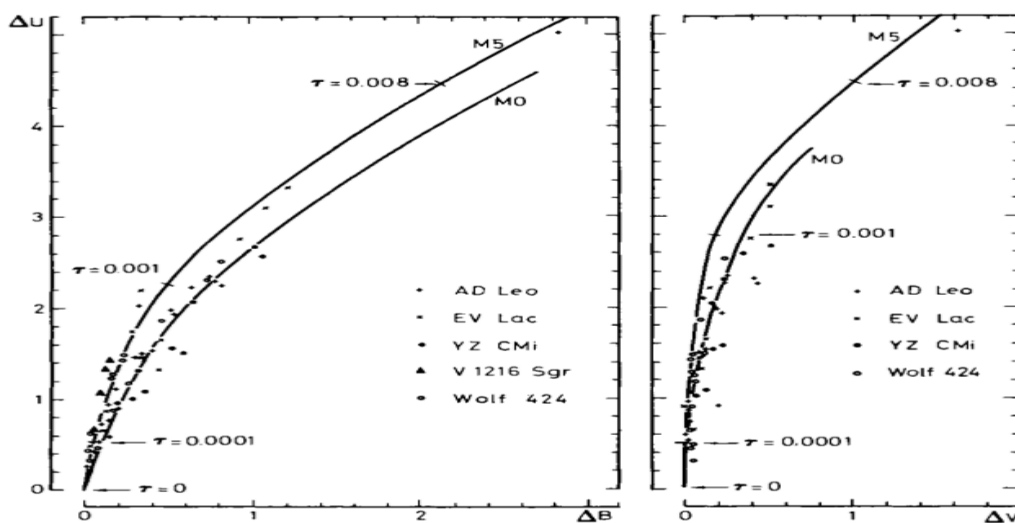


Рис. 9: Garzadyan&Terzian, 1980. Сравнение изменений в блеске в полосах U, B, V во время вспышек. Слева -  $\Delta U$  от  $\Delta B$ , справа -  $\Delta U$  от  $\Delta V$ . Вогнутость кривой говорит о том, что изменение блеска в полосе U больше изменений в полосах B и V. Сплошная линия - теоретические предсказание на основании теории быстрых электронов. Подробнее см. работу Garzadyan&Terzian, 1980.

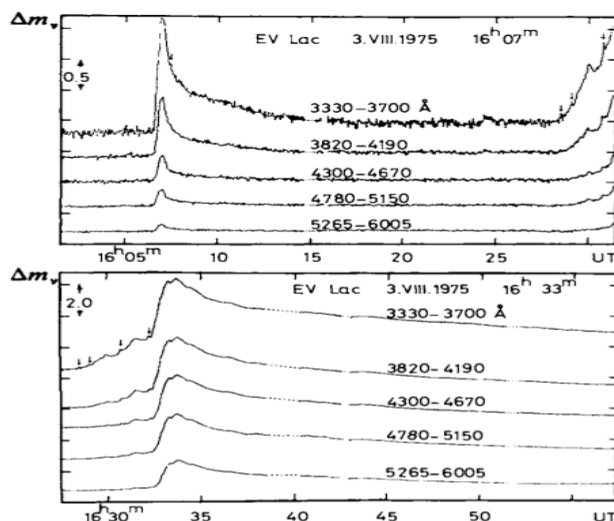


Рис. 10: Kodaria K. at al., 1976. Изменение блеска EV ящерицы в разных длинах волн.

Вспышки наблюдаются не только в видимой части спектра, но и в рентгеновском и радио диапазонах. Spangler и Moffett (1976) обнаружи-

ли тенденцию вспышек в метровом диапазоне длин волн следовать за вспышками в оптическом диапазоне. Однако, систематическая корреляция между вспышками в разных диапазонах отсутствует по крайней мере до 10 ГГц. На рис. 11 приведены сравнительные наблюдения вспышек в радио диапазоне и полосе U.

Вспышки в радио диапазоне имеют температуру  $\geq 10^6$  К и демонстрируют степень поляризации  $\geq 30\%$ . Для разных вспыхивающих наблюдается как круговая, так и линейная поляризация. Например, излучение звезды AD Leo во время вспышек на частоте 1.4 ГГц имеет круговую поляризацию почти 100%. Нетепловая температура излучения в радио диапазоне и высокая степень поляризации для всех вспышек говорит о синхротронном механизме возникновения излучения.

Интересно, что для близких по массе и светимости вспыхивающих, амплитуда вспышек может быть сильно различной. Например, система UV Кита, в которой на самом деле 2 звезды и обе являются красными карликами классов M5.5V и M6V. Как видно из рис. 12, амплитуда вспышек в рентгеновском диапазоне UV Кита В больше почти на порядок амплитуды вспышек компаньона UV Кита А. Авторы работы, в которой представлены данные наблюдения, связывают различие во вспышках со скоростями вращения компонент - UV Кита В вращается быстрее, чем UV Кита А.

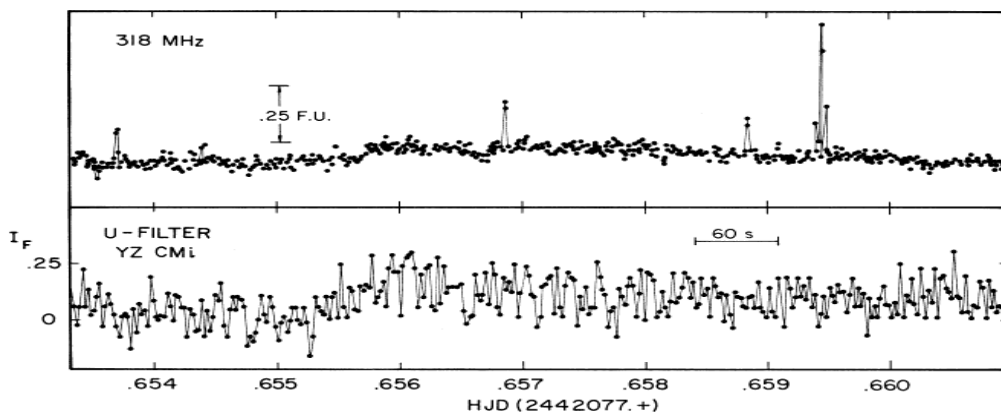


Рис. 11: Spangler S. R. et al., 1974, вспышки в радио диапазоне для YZ Малого Пса в сравнении с оптическими измерениями в полосе U.

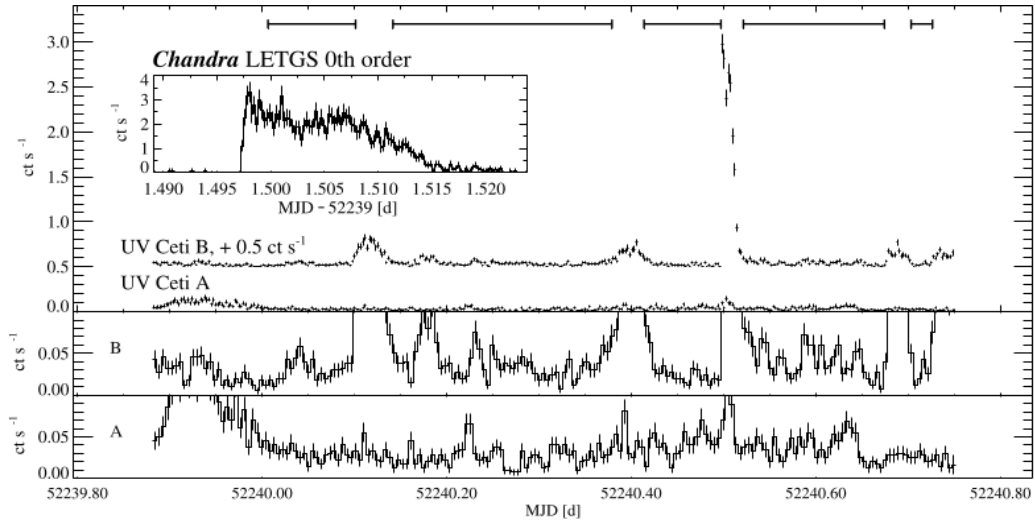


Рис. 12: Audard M. et al., 2003, данные наблюдений двойной системы UV Кита с телескопа “Chandra”.

## 3 Моделирование

### 3.1 Механизмы возникновения вспышек

Вспышки на Солнце обусловлены взаимодействием вещества и магнитного поля. За счет пере замыкания силовых линий частицы приобретают кинетическую энергию, которое идет на нагрев хромосферы. Скорее всего, вспышки в звездах UV Кита обусловлены так же магнитным полем. Поэтому для моделирования вспышек необходимо использовать магнитную гидродинамику, что даже для Солнца весьма не просто. Кроме того, магнитное поле, как и на Солнце, может иметь сложную топологию. Например, маленькие радио “уши” (см. рис 13) в системе UV Кита в работе В. J. Kellet et al (2002) объясняются наличием тороидальной компоненты магнитного поля и возникающей при этом магнитной ловушке. Промоделировать точно вспышку сложно, если не невозможно, поэтому в литературе часто встречаются полуэмпирические оценки. Приведу некоторые из них. Если предположить, что величина поля одинакова для вспыхивающих звезд, то энергия вспышки пропорциональна объему активного региона:  $E \propto V_{ar}$ . Недавно были опубликованы данные о зависимости энергии вспышек от радиуса звезды (рис 14), которая хорошо согласуется с этим предположением:

$$\log E = 3 \log R/R + 34.14, \quad (2)$$

то есть  $E \propto R^3$  или  $E \propto V$ .

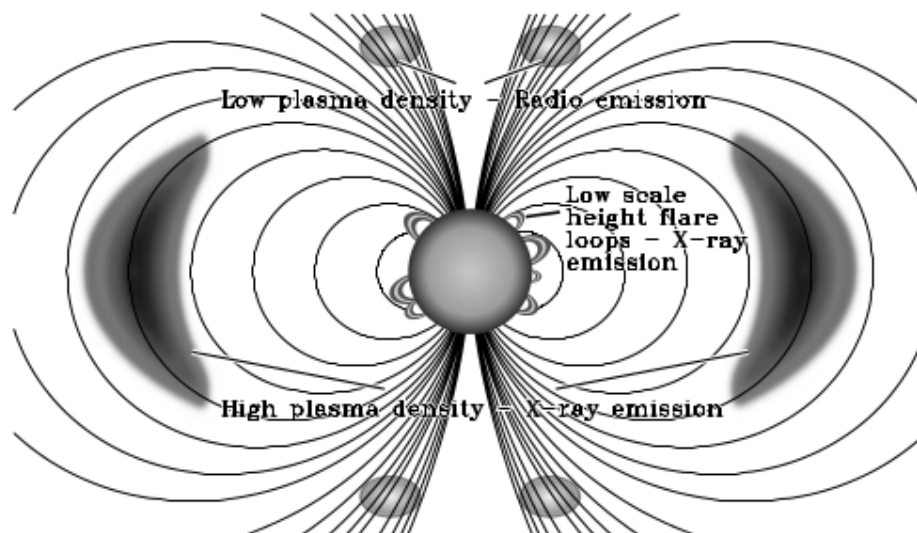


Рис. 13: Схематическое изображение источников радио излучения в системе UV Кита

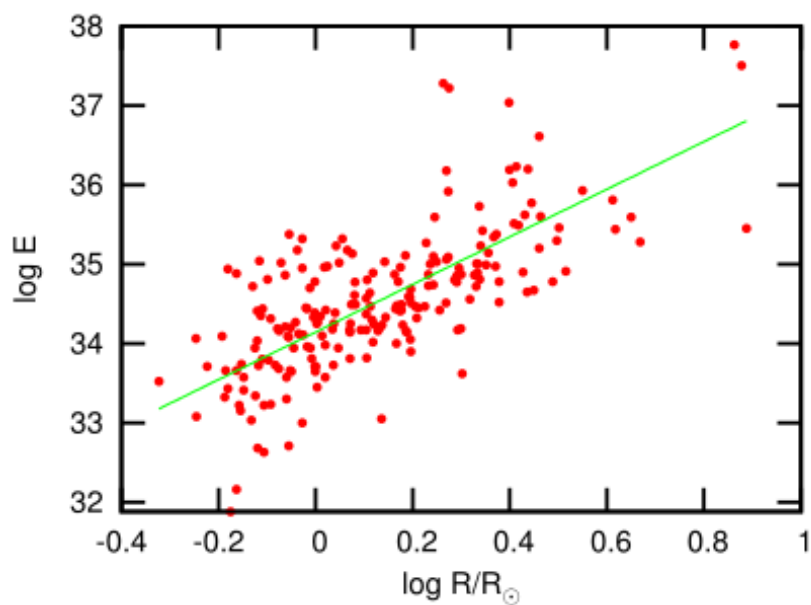


Рис. 14: Valona L. A., 2015. Зависимость энергии вспышек (эрги) от радиуса звезды (в радиусах Солнца).  $E = 3 \log(R/R_{\odot}) + 34.14$

Еще до того, как был известен механизм разгона частиц, , были сделаны попытки промоделировать процесс остывания после вспышки. Пусть быстрые электроны после вспышки начинают уходить из системы. Это ведет к уменьшению оптической глубины. Если предположить, что электроны уходят сферически симметрично, то оптическую глубину в момент времени  $t$  можно представить как:

$$\tau = t \frac{\tau_0}{1 + (t/t_0)^2}, \quad (3)$$

где  $\tau_0$  - оптическая глубина в максимуме вспышки, а  $t_0$  - параметр, имеющий размерность времени, который можно получить из наблюдений. Уравнение (3) задает форму кривой спадения блеска после вспышки. Оказалось, что такая полуэмпирическая теория дает в некоторых случаях неплохое согласие с наблюдениями, см. рис. 15.

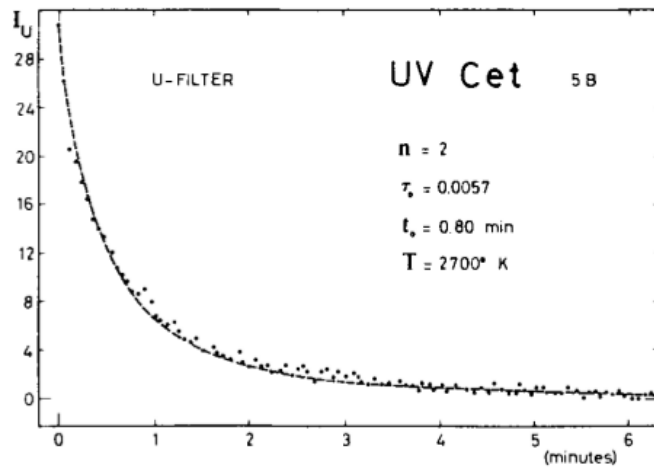


Рис. 15: Garzadyan D. A., 1980. Падение блеска UV Кита, сплошная линия – наблюдения, точки – теория, с учетом эффекта “испарения” быстрых электронов

### 3.2 Синтетические спектры

Кроме моделирования вспышек есть проблема моделирования звезды в спокойном состоянии. При расчете синтетических спектров необходимо решать задачу построения атмосферы, где нет локального термодинамического равновесия, почти вся звезды конвективная и должно быть молекулярные соединения (TiO, FeH, H<sub>2</sub>O...). На рис 16 приведены примеры расчетов спектры звезды GL 752 B, сп. класс M8V (Allard F. at

al., 1993). Заметно, что в полосе  $0.5-1 \mu m$  есть полное рассогласование теории и наблюдений. Авторами было предпринята попытка разделить участки спектров и провести расчеты для более узких полос, после этого (см. рис. 12) было получено лучшее согласие, однако, это скорее от безысходности. Задача моделирования вспыхивающих звезд в спокойном состоянии еще далека от разрешения.

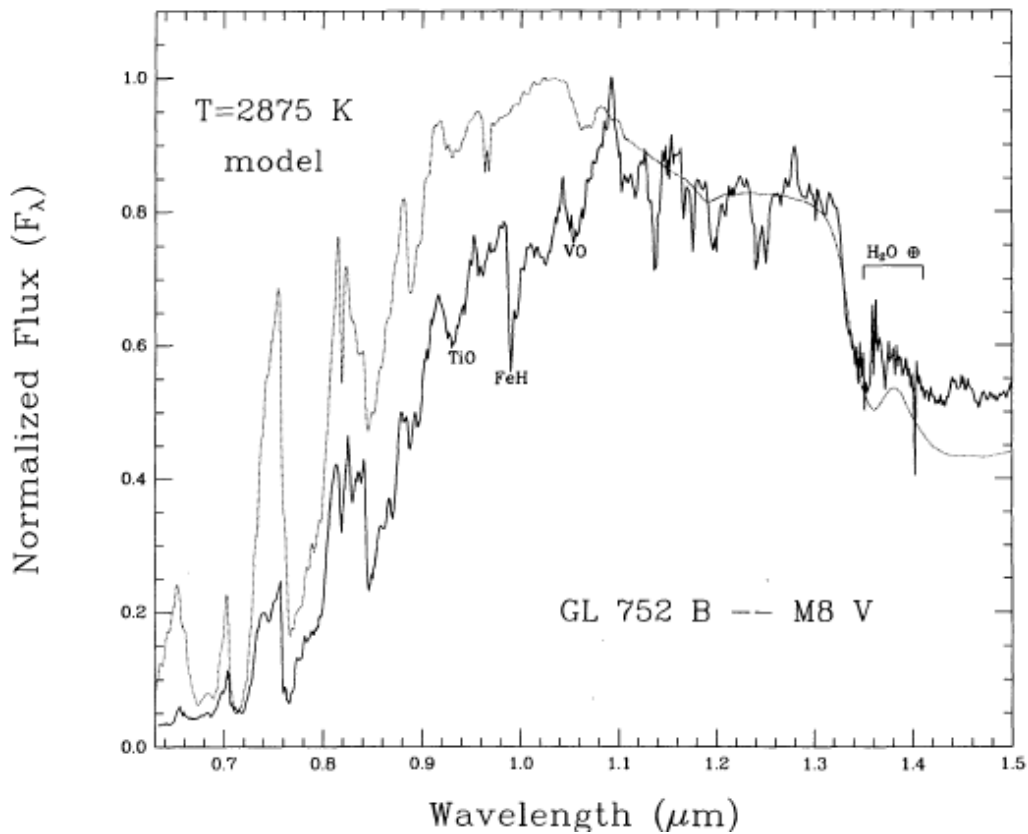


Рис. 16: Allard F. et al., 1993. Сравнение теоретического (пунктиром) и наблюдаемого (сплошная линия) спектров звезды GL 752 B, сп. класс M8V.

## 4 Супер вспышки

Оказалось, что у некоторых звезд спектральных классов G и F существуют супер вспышки, то есть вспышки, энергии которых  $E = 10^{32} - 10^{36}$  эрг (рис. 18). Интересно, что вспышки во вспыхивающих звездах имеют примерно такую же энергию, см. рис. 19, а энергия вспышек на Солнце

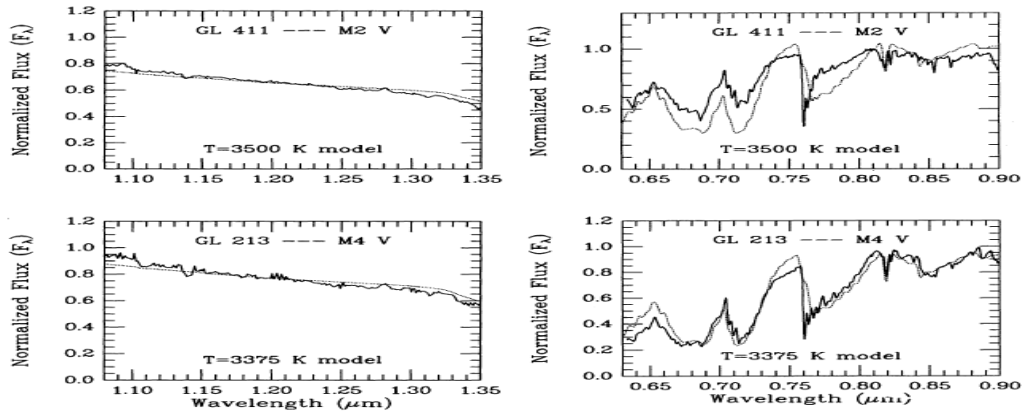


Рис. 17: Allard et al., 1993. Сравнение теоретических (пунктиром) и наблюдаемых (сплошная линия) спектров звезды GL 411 (сверху) и GL 213 (снизу). Представлены 2 участка спектра: 0.55–0.9 мкм (слева) и 1.0 – 1.35 мкм (справа).

на порядки меньше  $E = 10^{27} - 10^{31}$  эрг. Если такая вспышка возникнет на Солнце, то не нужно будет третьей мировой войны.

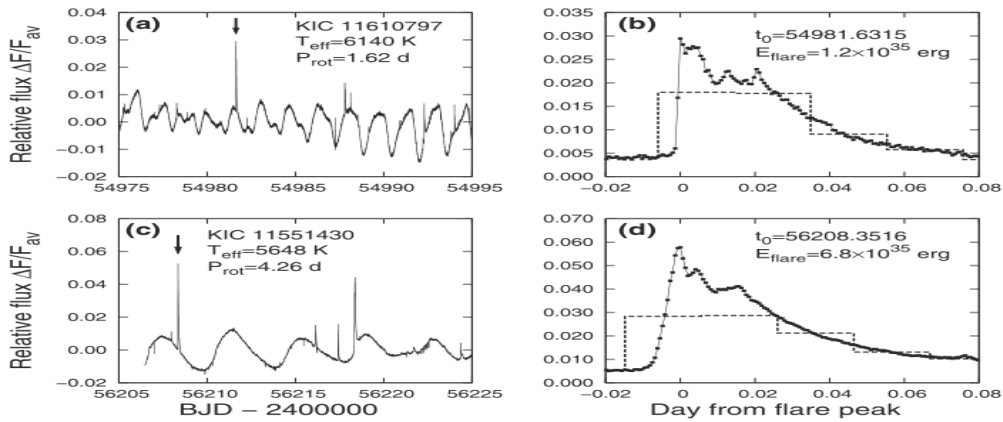


Рис. 18: Maehara H. et al., 2015. Зависимость относительного потока в супер вспышках от времени в Ю. д. (слева) и сутках (справа).



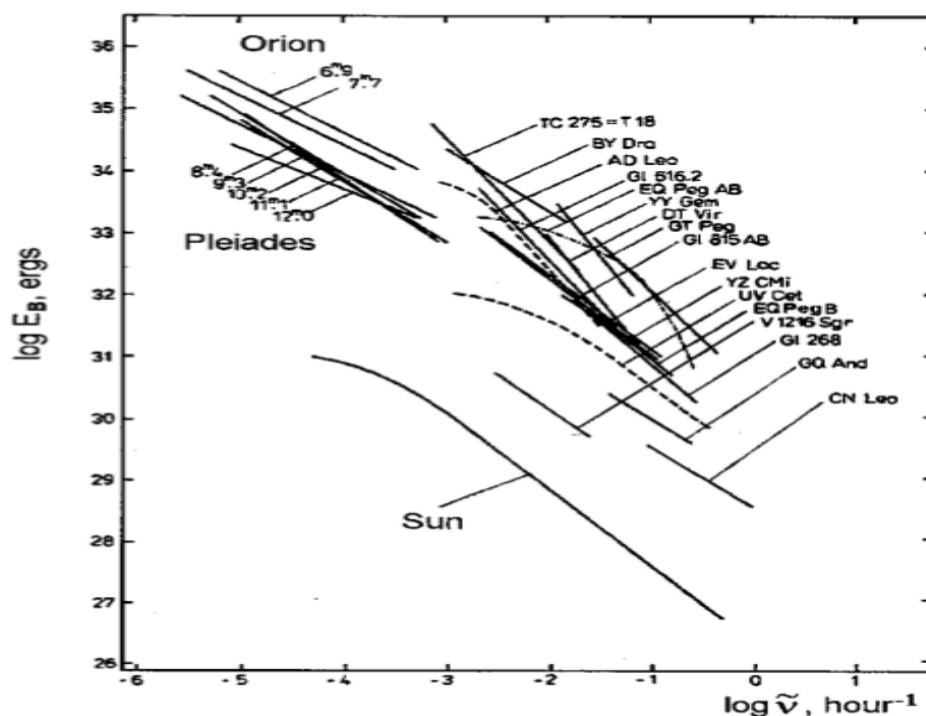


Рис. 19: Гершберг Р. Е. и др., 1987. Зависимость энергии вспышек от количества вспышек с такой энергией в единицу времени.

## 5 Заключение

Моделирование вспыхивающих звезд важно по нескольким причинам. Вспышки возникают благодаря наличию у звезды магнитного поля. Если бы на основании параметров звезды мы могли рассчитать магнитное поле, то возможно было бы сравнение теории генерации магнитного поля и наблюдений. Конечно, для решения этой задачи у нас есть звезда более близкая - Солнце. Однако это может стать еще одной проверкой теории. Кроме того, особенно интересны открытые не так давно супервспышки. Когда, почему, при каких условиях они могут возникнуть? Эти вопросы не только интересны с научной точки зрения, но еще и с точки зрения чисто практической. Если такая вспышка произойдет на Солнце, то человечеству нужно быть к этому готовым. Помимо разработки теории вспышек, не решена еще задача о построении модели вспыхивающих звезд в спокойном состоянии. Однако, эта задача пока что не так интересна, как, например, моделирование коричневых карликов или звезд типа Т Тельца, потому что с качественной точки зрения все эф-

факты понятны (нет ЛТР, молекулы, конвекция), и, скорее всего, ничего принципиально нового решение этой задачи не даст.

## 6 Литература

1. Амбарцумян В. А., *Астрофизика*, 6, 31-38, 1970.
2. Гершберг Р. Е., “Вспышки звезд типа UV Кита”, *Успехи физических наук*, 92, 1, 1967.
3. Гоффмейстер К., Рихтер Г. Венцель В., Москва “Наука”, “Переменные звезды”, 1990.
4. Цесевич В. П., “Переменные звезды и их наблюдение”, Москва “Наука”, 1980.
5. Allard F. at al., *AJ*, 402, 634-654, 1993.
6. Audard M. at al., *AJ*, 589, 983-987, 2003.
7. Balona L. A., *MNRAS*, 447, 2714-2725, 2015.
8. Crespo-Chacon I. at al., poster, “Cool stars XIV”, 2006.
9. Gershberg R. E., International conference of VarSITI SCOSTEP “Superflares and Activity of the Sun in the Cycle Formation Epoch”, poster, 2015.
10. Gershberg R.E., Mogilevsky E.I., Obridko V.N., *Cinematics and physics of celestial bodies*, 3, 5, 1987.
11. Gudel M. at al., *AJ*, 415, 236-239, 1993.
12. Gurzadyan G. A., “Flare stars”, 1980.
13. Haish B. at al., *Annu. Rev. A&A*, 29:275-324, 1991.
14. Haupt W., Schlosser W., *A&A*, 37, 219-223, 1974.
15. Hiroyuki M. at al., *Earh, Planets and Space*, 67-59, 2015.
16. Mirzoyan A. V., *Astrophysics*, 36, 2, 170:191, 1993.
17. Pettersen B. R., “Solar and stellar flares”, 1988.
18. Poveda A. at al., *A&A*, 308, 55-65, 1996.
19. Spangler S. R., at al., *AJ*, 203, 497-508, 1976.
20. Starnberg B. K., PhD dissertation, 2003.