КОРОНАЛЬНЫЕ ПЕТЛИ И ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВСПЫХИВАЮЩИХ ЗВЕЗД

**Цап Ю.Т.^{1,2}, Степанов А.В.², Копылова Ю.Г.²,
Ахтемов З.С.¹, Малащук В.М.¹**

¹*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Крым, Россия*

²*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

CORONAL LOOPS AND OPTICAL EMISSION FROM FLARING STARS

**Tsap Yu.T.^{1,2}, Stepanov A.V.², Kopylova Yu.G.²,
Akhtemov Z.S.¹, Malashchuk V.M.¹**

¹*Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia*

²*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

The possibility of optical flare emission from coronal loops of solar type stars and M dwarfs is considered. It has been shown that that existence of high density ($> 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) coronal loops contradicts to the standard model of solar flares. The possible alternative scenarios have been proposed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-431-434

Введение

В настоящее время благодаря наблюдениям звезд, в первую очередь, поздних спектральных классов в оптическом, радио- и жестком рентгеновском диапазонах имеется много указаний, свидетельствующих о единой природе звездных и солнечных вспышек [1, 2]. При этом полная энергия звездных событий W может значительно превосходить энергию солнечных, достигая 10^{33} – 10^{38} эрг, что намного превосходит максимальную энергию солнечных вспышек $\sim 10^{32}$ эрг. Интерес к оптическим супервспышкам в белом свете особенно усилился после их обнаружения на солнцеподобных звездах в континууме в диапазоне 4300–8300 Å с помощью спутника Kepler [2]. Звездные события пространственно не разрешаются, поэтому вопрос о возможных вспышечных сценариях, несмотря на общепринятую парадигму о связи вспышек с магнитным полем, все еще остается открытым.

Среди механизмов излучения вспышек в белом свете обычно выделяют два: захват нейтральными атомами водорода электронов и рекомбинация в атомах водорода (континуум Пашена из-за свободно-связанных переходов). Не следует также исключать возможный существенный вклад теплового тормозного излучения водородной плазмы и томсоновское рассеяние на свободных электронах фотосферного излучения для лимбовых событий [3]. Обычно считается, что оптический континуум солнечных со-

бытий генерируется на уровне фотосферы/хромосферы Солнца, в частности, в низкотемпературной конденсации, возникающей в результате газодинамического отклика хромосферной плазмы на импульсный нагрев потоком ускоренных электронов [4]. Однако такая интерпретация встречает ряд трудностей, среди которых можно отметить проблему генерации обратного тока, препятствующему проникновению энергии в глубокие слои хромосферы. Возможное ее решение может быть связано с тем, что заметный вклад в оптическое излучение звезд прямо или опосредовано могут давать плотные крупномасштабные корональные петли с концентрацией плазмы $n > 10^{12}-10^{13} \text{ см}^{-3}$ и температурой $T > 10^4 \text{ К}$ [5, 6].

Цель настоящей работы – показать, что предположение о высокой плотности вспышечных корональных петель противоречит стандартной модели солнечных вспышек. Откуда следует необходимость привлечения иных более адекватных подходов.

Магнитные пятна и стандартная модель вспышек

Как известно, вспышки на Солнце происходят в активных областях, где концентрируются фотосферные солнечные пятна, напряженность которых пропорциональна их площади [7]. Поскольку запятненность звезд поздних спектральных классов может достигать 50% [8], то было бы естественно предположить, что напряженности магнитных полей звездных пятен существенно превышают характерные солнечные значения. В связи с этим особую важность приобретают исследования зависимости средней напряженности пятен от фазы солнечного цикла. В частности, отсутствие такой зависимости предполагает, что значения магнитного поля пятен непосредственно не связаны с эффективностью генерации поля посредством динамо-механизма в конвективной зоне. Скорее они зависят от газового давления и динамики плазмы на уровне фотосферы.

Используя данные, полученные на БСТ-2 КРАО РАН, мы исследовали связь усредненных напряженностей магнитных полей солнечных пятен с фазой 24 цикла за период с 2010 по 2018 гг., ограничившись ежегодными данными наблюдений на БСТ-2 КРАО с мая по сентябрь, когда погодные условия наиболее благоприятны для проведения наблюдений. Как видно из рис. 1, усредненные поля с напряженностями $> 1500, 2000$ и 2500 Гс существенно не меняются от цикла к циклу. Поэтому на звездах, несмотря на большую площадь пятен, они едва ли могут существенно отличаться от солнечных. Следовательно, именно значительные пространственные масштабы области вспышечного энерговыделения должны определять более выраженную энергетику звездных событий.

В свете сказанного выше предположим, что вспышечное энерговыделение локализовано в короне на масштабах $L = 10^{10} \text{ см}$, сопоставимых или меньшими радиуса звезд R . Тогда, положив $B = 300-1000 \text{ Гс}$, для запасенной магнитной энергии получим

$$W \approx \frac{B^2}{8\pi} L^3 \approx (3-10) \times 10^{33} \text{ эрг.}$$

Эта явно завышенная с точки зрения эффективности оценка свидетельствует, что в случае супервспышек с $W > 10^{36}$ эрг характерные размеры аркад L должны превосходить 10^{11} см, т.е., по меньшей мере, в разы превышать R .

Рис. 1.

Теперь, следуя стандартной модели солнечных вспышек, предположим, что источник первичного энерговыделения находится в вершине магнитных аркад. В этом случае из-за кулоновских столкновений только те электроны могут достигнуть основания аркад, у которых энергия

$$E > E_{loop} \approx 10 \sqrt{N_{19}/\mu}, \quad (1)$$

где

$$N_{19} = 10^{-19} nL/2.$$

Полагая в (1) концентрацию плазмы $n = 10^{12} \text{ см}^{-3}$, характерную длину петель $L = 10^{10} \text{ см}$ и питч-угол $\mu = 0.5$, получим $E_{loop} = 300 \text{ кэВ}$. Приведенная оценка свидетельствует, что ускоренные высоко в короне электроны должны практически полностью терять свою энергию из-за кулоновских столкновений в корональной части аркад. Действительно, если задать спектр нерелятивистских электронов в виде

$$N(E) = AE^{-\delta}, E > E_0,$$

то содержащаяся в низкоэнергичных электронах энергия равна

$$W_L(E_0 \leq E \leq E_{loop}) = \int_{E_0}^{E_{loop}} N(E) E dE \approx A \frac{E_0^{2-\delta}}{(\delta-2)}.$$

Между тем, оценивая энергию высокоэнергичной части спектра электронов следующим образом

$$W_H(E \geq E_{loop}) = \int_{E_{loop}}^{\infty} N(E) E dE \approx A \frac{E_{loop}^{2-\delta}}{(\delta-2)},$$

нетрудно найти следующее важное соотношение

$$\frac{W_L(E_0 \leq E \leq E_{loop})}{W_H(E \geq E_{loop})} \sim \left(\frac{E_{loop}}{E_0} \right)^{\delta-2}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что если значение E_{loop} хотя бы в несколько раз превосходит E_0 , то при $\delta > 3$ практически вся энергия ускоренных электронов должна передаваться тепловой плазме корональных петель, что явно противоречит стандартной модели солнечных вспышек, предполагающей эффективный нагрев хромосферы/фотосферы ускоренными частицами.

Полезно также обратить внимание на трудности, связанные и с генерацией нетеплового гиротронного микроволнового излучения в плотных корональных арках из-за эффекта Разина. Так, излучение на частотах $\nu < 20n_e / B$ должно быть подавлено, что при концентрации электронов $n_e = 10^{12}-10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $B = 300-1000 \text{ Гс}$ соответствует $\nu = 20-600 \text{ ГГц}$.

Выводы

Нами было показано, что предположение о существовании плотных ($> 10^{12} \text{ см}^{-3}$) корональных петель сталкивается с трудностями, если исходить из стандартной модели солнечных вспышек. В частности, в этом случае ускоренные электроны не в состоянии эффективно передавать энергию хромосферной/фотосферной плазме, ответственной, как считается, за генерацию наблюдаемого оптического излучения. Одно из возможных решений этой проблемы может быть связано с контурной моделью солнечных и звездных вспышек [10].

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ N 18-02-00856-а, Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006) и программы ПРАН П-12 “Вопросы происхождения и эволюции Вселенной”.

Литература

1. Benz, A.O. & Guedel M. // Ann. Rev. Astron. Astrophys., 2010, 48, 241.
2. Maehara H. et al. // Nature, 2012, 485, 478.
3. Heinzel P. et al. // Astrophys.J., 2017, 847, 48.
4. Katsova M. & Livshits M. // Solar Phys., 2015, 290, 3663.
5. Heinzel P. & Shibata T. // Astrophys.J., 2018, 859, 143.
6. Nizamov B.A. // Mon. Not. R. Astron. Soc., 2019, 489, 4338.
7. Bray R.J. & Loughhead R.E. Sunspots. – Moscow, Mir, 1967.
8. Savanov I.S. // Astron. Rep., 2014, 58, 478.
9. Tsap Yu.T., Motorina G.G., Kopylova Yu.G. // G&Ae, 2016, 56, 1104.
10. Zaitsev V.V. & Stepanov A.V. // Solar Phys., 1992, 139, 343.