

СУБ-ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВЕЗДНЫХ ВСПЫШЕК

Цап Ю.Т.¹, Степанов А.В.², Копылова Ю.Г.²

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

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

SUB-TERAHERTZ EMISSION FROM FLARING STARS

Tsap Yu.T.¹, Stepanov A.V.², Kopylova Yu.G.²

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

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

A comparative analysis of flares on red dwarf Prox Cent was carried out. ALMA observations show that sub-terahertz radiation from stars is an order of magnitude greater than typical values observed on the Sun. Besides, flaring stars have decreasing with increasing frequency spectral flux and a relatively high degree of linear polarization. This suggests on the synchrotron origin of sub-terahertz emission and the effective acceleration of ultra-relativistic electrons. Possible reasons for the weak relationship between radio-, optical, and X-ray stellar flare radiation are discussed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-291-294

Введение

Красные карлики – наиболее распространенные звезды Галактики, обладающие с высокой долей вероятности планетами, сопоставимыми по размерам с Землей в зоне обитаемости. Хотя вспышки на Солнце и звездах имеют много общего, тем не менее, энергия звездных вспышек зачастую на несколько порядков превосходит солнечные, а светимость звезд в ходе вспышечного энерговыделения может возрасти в десятки раз. При этом звездные вспышки происходят гораздо чаще солнечных, и, в отличие от последних, зачастую корреляция временных профилей вспышечного излучения в различных волновых диапазонах не обнаруживается [1, 2]. Это предполагает, что механизмы энерговыделения и излучения, несмотря на общую магнитную природу звездных и солнечных вспышек, существенно различаются.

Среди красных карликов особое место занимает Проксима Центавра (Prox Cent) – ближайшая к нам звезда спектрального класса M5.5 с периодом вращения около 83 дней [3]. Этот типичный красный карлик ($T_{eff} = 3040$ К, $M_{star} = 0.12M_{sun}$, $R = 0.15R_{sun}$) является полностью конвективной звездой и характеризуется частыми рентгеновскими вспышками. В частности, темп возникновения мощных вспышек, превосходящих в 10 раз уровень излучения в спокойном состоянии, составляет одно событие за несколько дней [3–7]. При этом постоянная рентгеновская переменность на уровне шумов, вероятно, связана со слабыми вспышками. Обратим также внимание на обнаруженную на спутнике XMM-Newton сильную рентге-

новскую вспышку на Prox Cent длительностью 10 мин с пиковой светимостью 3.9×10^{28} эрг/с и полной энергией в мягком рентгеновском диапазоне 5×10^{32} эрг [4].

В оптике частота возникновения вспышек имеет приблизительно ту же частоту возникновения, что и в мягком рентгене – несколько вспышек в день. Причем, согласно оценкам [7], экстраполяция предполагает 8 супервспышек в год с энергией $> 10^{33}$ эрг.

Заметный прогресс в понимании природы звездных вспышек может быть достигнут благодаря наблюдениям в суб-терагерцовом (суб-ТГц) диапазоне. Однако в этом случае следует ожидать, что потоки радиоизлучения будут достаточно малы. Это предполагает необходимость использования инструментов с высокой чувствительностью, в частности, таких как ALMA (Atacama Large Millimeter Array).

Наблюдения и интерпретация

Рассмотрим суб-ТГц вспышку Prox Cent (рис. 1), наблюдавшуюся на ALMA 24 марта 2017 г., которая длилась около одной минуты, а спектральный поток излучения достигал $L = 100$ мЯн [1], что соответствует 2×10^{14} (эрг/с)/(см² Hz) (см. также [8]).

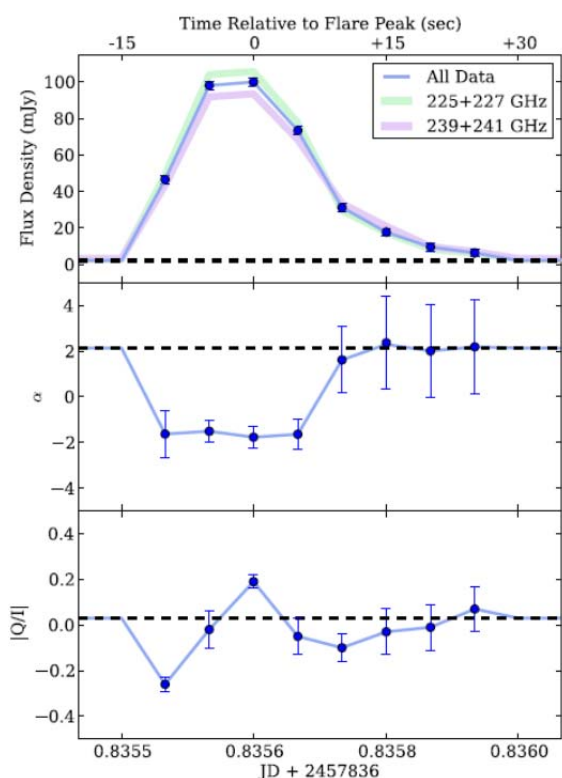


Рис. 1. Временные профили вспышки 24 марта 2017 г. на Prox Cent для плотности потока излучения F_ν (верхняя панель): спектрального индекса α ($F_\nu \sim \nu^\alpha$, средняя панель) и линейной поляризации $|Q/I|$ (нижняя панель). Пунктирная линия соответствует фоновым значениям. На верхней панели изображены плотности потока для спектральных окон 225+227 ГГц и 239+241 ГГц, а также полного окна. Рисунок взят из работы [1].

Полученные характеристики суб-ТГц излучения: отрицательный показатель спектра $\alpha \approx -1.8$ и линейная поляризация ($\approx 20\%$) свидетельствуют в пользу синхротронной природы суб-ТГц излучения. Выполним некоторые оценки.

Максимум синхротронного излучения релятивистского электрона с полной энергией E приходится на частоту [9]

$$\nu \approx 1.2 \times 10^6 B \gamma^2 \text{ [Гц]}, \quad (1)$$

где $\gamma = E/(mc^2)$ – Лоренц-фактор ($mc^2 = 511$ кэВ – энергия покоя электрона), B [Гс] – магнитное поле. Тогда, из уравнения (1) нетрудно получить выражение

$$\gamma \approx 10^{-3} \sqrt{\nu/B}. \quad (2)$$

Полагая частоту $\nu = 2.3 \times 10^{11}$ Гц и $B = 10^3$ Гс, из (2) получим $\gamma \approx 15$, что соответствует энергии электрона $E \approx 7.5$ МэВ.

Скорость синхротронных потерь энергии равна [10]

$$dE/dt = 1.6 \times 10^{-15} B^2 \gamma^2 \text{ [эрг/с]}. \quad (3)$$

Следовательно, согласно (1) и (3), характерное время потерь

$$\tau_s \approx E/(dE/dt) \approx 7.5 \times 10^{20}/(\nu B) \text{ [с]}. \quad (4)$$

Полагая $E = 10$ МэВ и магнитное поле $B = 10^3$ Гс, получим $\tau_s \approx 50$ с, что хорошо согласуется с длительностью наблюдаемых суб-ТГц всплесков на Prox Cent.

В предположении квази-изотропного распределения релятивистских электронов число энергичных частиц N_s с учётом (4) можно оценить как $N_s \approx L/(dE/dt) \approx \hat{L} \tau_s / E$, где $\hat{L}$ – светимость в суб-ТГц диапазоне. Положив $\hat{L} \approx L \nu \approx 5 \times 10^{25}$ эрг/(см²с) [9], $E = 10$ МэВ ($\approx 1.7 \times 10^{-5}$ эрг) и $\tau_s = 50$ с, из последнего выражения находим $N_s \approx 1.5 \times 10^{32}$. Полученная оценка числа релятивистских электронов представляется вполне адекватной. Действительно, полное число тепловых электронов, содержащихся в источнике, можно оценить как $N_{th} \sim n l^3 \sim 3 \times 10^{40}$ (мы приняли характерный масштаб $l = 3 \times 10^9$ см⁻³, а концентрацию тепловых электронов $n = 10^{12}$ см⁻³, что более чем на восемь порядков больше N_s . За ускорение ультрарелятивистских электронов могут быть ответственны, например, супердрайсеровские электрические поля, генерируемые в частично ионизованной плазме [10].

Обсуждение и выводы

Обратим внимание еще на два суб-ТГц события, наблюдавшихся на Prox Cen с помощью ALMA, а именно, 1-го и 6-го мая 2019 г. [2, 8]. Благодаря многоволновым наблюдениям были установлены два важных обстоятельства. Во-первых, событие 1 мая 2019 г. не сопровождалось радиоизлучением на частотах меньших нескольких ГГц, несмотря на хорошую корреляцию с ультрафиолетовыми данными, полученными на космическом телескопе «Хаббл». Во-вторых, для события 6 мая 2019 г. какой-либо убедительной связи с мягким рентгеновским излучением выявить не удалось.

Таким образом получены свидетельства о слабой связи между суб-ТГц, мягким рентгеновским и дециметровым радиоизлучением, что противоречит стандартной модели солнечных вспышек, предполагающей тесную корреляцию между данными типами излучений.

На наш взгляд, такие особенности излучения можно объяснить тем, что основной процесс вспышечного энерговыделения на Prox Cent происходил в более плотных, чем на Солнце, слоях солнечной атмосферы. Во-первых, это объясняет отсутствие низкочастотного радиоизлучения, поскольку при концентрации тепловых электронов $> 10^{10} \text{ см}^{-3}$ излучение на частотах $< 1 \text{ ГГц}$ не может выйти из источника. Во-вторых, ввиду высокой плотности плазмы и, соответственно, больших радиационных потерь, нагрев плазмы до высоких температур в области ускорения/энерговыделения заряженных частиц оказывается проблематичным. Действительно, если принять поток энергии электронов $F = 10^{11} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \text{с})$ [11] и характерный масштаб взаимодействия ускоренных электронов с плазмой $h = 10^8 \text{ см}$, то скорость нагрева $Q_h \approx F/h \approx 10^3 \text{ эрг}/(\text{см}^3 \text{с})$. В свою очередь, радиационные потери $Q_r \approx 3.6 \times 10^{-22} n n_H \text{ эрг}/(\text{см}^3 \text{с})$, где n_H – концентрация атомов водорода или протонов [12], то при $n = n_H = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ получим $Q_r \approx 4 \times 10^2 \text{ эрг}/(\text{см}^3 \text{с})$. Поскольку $Q_r \sim Q_h$, ускоренные в плотной плазме электроны едва ли смогут прогреть вещество до высоких температур, а значит, корреляция между суб-ТГц и мягким рентгеновским излучением будет нарушена.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (N20-52-26006), РНФ (No. 22-12-0030) и Минобрнауки (НИР №0831-2019-0006).

Литература

1. MacGregor M.A., Weinberger A.J., D.J. Wilner D.J. et al. // *ApJ*, 2018, 855, L2.
2. MacGregor M.A., Weinberger A.J., L.R.O. Parke et al. // *ApJ*, 2021, 911, 25.
3. Haisch, B.M., Linsky, J.L., Bornmann, P.L. et al. // *ApJ*, 1983, 267, 280.
4. Güdel M., Audard M., Reale F. et al. // *A&A*, 2004, 416, 713.
5. Fuhrmeister, B., Lalitha, S., Poppenhaeger K. et al. // *A&A*, 2011, 534, A133.
6. Kowalski A.F., Mathioudakis M., Hawley S.L. et al. // *ApJ*, 2016, 820, 95.
7. Davenport J.R.A., Kipping D.M., Sassellov D. et al. // *ApJL*, 2016, 829, L31.
8. Howard W. S., MacGregor M.A., Osten R. et al. eprint arXiv:2209.05490.
9. Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. – Происхождение космических лучей. – М.: АН СССР, 1963, 384 с.
10. Zaitsev V.V., Kronshtadtov P.V., Stepanov A.V. // *Solar Phys.*, 2016, 291, 3451.
11. Namekata K., Maehara H., Sasaki R et al. // *PASJ*, 2020, 72, 68.
12. Пруст Э.Р. Солнечная магнитогидродинамика. – М: Мир, 1985, 592 с.