

МЕДЛЕННО МЕНЯЮЩАЯСЯ КОМПОНЕНТА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ ЗВЕЗД

Зайцев В.В.¹, Степанов А.В.²

¹*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

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

SLOWLY VARYING COMPONENT OF RADIO EMISSION OF ULTRACOOLO STARS

Zaitsev V.V.¹, Stepanov A.V.²

¹*Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, Russia*

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

It is shown that a source generating a slowly varying component of radio emission from ultracool stars such as the brown dwarf TVLM 513-46546 can be the gyrosynchrotron radiation from the magnetic loops system distributed quasi-uniformly over the stars' surface. Such a model explains the low modulation of the radio flux and makes it possible to understand the pumping mechanism of magnetic loops by high energy electrons. The main parameters of magnetic loops generating a slowly varying component are determined using the information on microwave radiation from the brown dwarf TVLM 513-46546.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-177-180

1. Введение

Ультрахолодные звезды типа коричневых карликов, т.е. звезды спектрального класса позднее L7, отличаются от других звезд поздних спектральных классов существенно большей активностью в радиодиапазоне. Для них отношение светимостей в радио и рентгеновском диапазонах приблизительно на четыре порядка больше, чем для звезд спектральных классов от F до M [1]. Одним из известных представителей ультрахолодных звезд является коричневый карлик TVLM 513-46546. У TVLM 513-46546 наблюдается две компоненты микроволнового излучения. Одна компонента имеет высокую яркостную температуру (больше 10^{11} K, [2]), узкую диаграмму направленности, полностью поляризована и обычно интерпретируется на основе электронного циклотронного мазера [3] либо плазменного механизма радиоизлучения [4]. Вторая компонента, которую принято называть спокойной, имеет яркостную температуру около 10^9 K ([5, 6]), небольшую степень циркулярной поляризации ($< 15\%$) и наблюдается непрерывно, показывая лишь слабую модуляцию с периодом, близким к периоду вращения звезды (около двух часов). Слабая модуляция спокойной компоненты при вращении звезды свидетельствует о том, что соответствующие источники радиоизлучения равномерно распределены в атмосфере TVLM 513-46546 и их суммарная площадь может быть сравнима с площадью поверхности коричневого карлика. Кроме того, соответствующую

щие источники радиоизлучения должны непрерывно пополняться энергичными частицами, чтобы компенсировать потери, связанные с уходом частиц в конус потерь, и обеспечивать наблюдаемую яркостную температуру. Предполагается, что спокойная компонента возникает в результате гиротронного излучения умеренно релятивистских электронов в магнитных полях коричневого карлика [7]. При этом, как правило, рассматривается излучение в дипольном магнитном поле звезды, и постулируются параметры быстрых электронов (концентрация n_e и показатель спектра δ) без обсуждения их происхождения. Вместе с тем, некоторые свойства «спокойной» компоненты радиоизлучения позволяют сделать более определенные выводы о параметрах источников и характере их распределения в короне коричневого карлика. Спокойное радиоизлучение коричневого карлика TVLM 513-46546 в микроволновом диапазоне длин волн показывает практически неизменные характеристики на протяжении многих лет наблюдений, что свидетельствует о стабильности этой компоненты на временной шкале порядка нескольких лет [6].

2. Данные наблюдений

Исследования "спокойной" компоненты, проведенные на VLA 24 января 2004 года, дают следующие значения потоков радиоизлучения на длинах волн 20 см, 6 см и 3,6 см [5]:

$$F(20\text{см}) = 260^{+46}_{-46} \mu\text{Jy}, \quad F(6\text{см}) = 284^{+13}_{-13} \mu\text{Jy}, \quad F(3,6\text{см}) = 228^{+11}_{-11} \mu\text{Jy}$$

Степень циркулярной поляризации потока на волнах 3,6 и 6 см составляла $V/I < 15\%$. Определенный в [6] спектральный индекс $F \sim \nu^\alpha$ в диапазоне 20–6 см имеет значительный разброс, в среднем положителен и равен $\alpha = 0,1^{+0,2}_{-0,2}$. В диапазоне 6–3,6 см спектральный индекс отрицателен и имеет величину $\alpha = -0,4^{+0,1}_{-0,1}$. Изменение знака спектрального индекса свидетельствует о том, что спектр "спокойного" излучения имеет максимум, причем частота максимума ν_m находится в диапазоне [5]

$$\nu_m = 1,4\text{--}4,8 \text{ ГГц} \quad (\lambda = 20\text{--}6 \text{ см}).$$

Изменение знака спектрального индекса в рамках гиротронного механизма излучения означает переход от оптически толстого к оптически тонкому режиму излучения. Другими словами, источник радиоизлучения в диапазоне 4,8–8,4 ГГц является, по всей вероятности, оптически тонким, что важно для дальнейших оценок.

Данные спутника *Chandra* ACIS-S3 показали также, что спокойное радиоизлучение коричневого карлика TVLM 513-46546 сопровождается мягким рентгеновским излучением в диапазоне энергий 0,3–2 кэВ [6], что может свидетельствовать о наличии в источнике радиоизлучения горячей плазмы с температурой $T \approx 10^7 \text{ К}$. Светимость рентгеновского излучения в

указанном диапазоне составляла $L_x \approx 8,5 \cdot 10^{24}$ эрг с^{-1} , что соответствует мере эмиссии $ME \approx 1,8 \cdot 10^{48}$ см^{-3} .

3. Модель источника

Слабая модуляция интенсивности и спектрального индекса спокойной компоненты при вращении звезды свидетельствует о квазиравномерном распределении источников радиоизлучения по поверхности звезды. В качестве таких источников мы будем предполагать многочисленные магнитные петли с электрическим током, формируемые в атмосфере звезды в результате действия фотосферной конвекции (рис. 1). Конвекция на звездах поздних спектральных классов играет основную роль при переносе энергии от центра звезды к поверхности. Идея корональных магнитных петель как источников радиоизлучения привлекательна тем, что в корональных петлях реализуется постоянный механизм накачки их объемов энергичными электронами вследствие генерации индукционных электрических полей при колебаниях электрического тока [4], в результате чего поддерживается постоянная генерация радиоизлучения спокойной компоненты.

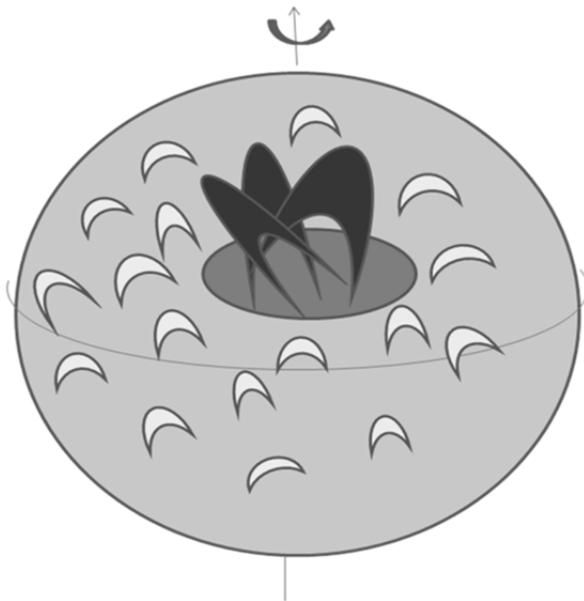


Рис. 1. Активная область, генерирующая интенсивную полностью поляризованную компоненту радиоизлучения (центральная часть рисунка), и распределенные источники генерации спокойной компоненты радиоизлучения.

Для модели источника спокойной компоненты, изображенной на рис. 1, определим видимую площадь источника как

$$S \approx N_{loop} l d, \quad (1)$$

где N_{loop} – число магнитных петель (элементарных источников радиоизлучения) на видимой полусфере, d и l – характерная толщина и длина отдельной петли. При степенном распределении энергичных электронов с показателем энергетического спектра δ поток гиросинхротронного излучения F_ν из оптически тонкого источника, частоту максимума ν_{peak} в спек-

тре гиротронного излучения и степень поляризации r_c можно представить в виде [8]:

$$F_\nu = 3,3 \cdot 10^{-24} 10^{-0,52\delta} (\sin \vartheta)^{-0,43+0,65\delta} \left(\frac{\nu}{\nu_c} \right)^{1,22-0,9\delta} (n_e d) B \frac{S}{R^2} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ Гц}^{-1}. \quad (2)$$

$$\nu_{peak} = 2,72 \cdot 10^3 10^{0,27\delta} (\sin \vartheta)^{0,41+0,03\delta} (n_e d)^{0,32-0,03\delta} B^{0,68+0,03\delta} \quad (3)$$

$$r_c = 1,26 \cdot 10^{0,035\delta} 10^{-0,071 \cos \vartheta} \left(\frac{\nu}{\nu_c} \right)^{-0,782+0,545 \cos \vartheta} \quad (4)$$

Здесь ϑ – угол между магнитным полем и направлением на наблюдателя, $\nu_c = 2,8 \cdot 10^6 B$ – гирочастота электронов, B – магнитное поле, n_e – концентрация энергичных электронов в источнике, d – толщина источника в проекции на наблюдателя, S – видимая площадь источника, R – расстояние до источника радиоизлучения. Для коричневого карлика TVLM 513-46546 расстояние $R = 10,6 \text{ пс} = 3,26 \cdot 10^{19} \text{ см}$. Формулы (2) и (4) справедливы в интервале углов $\vartheta = 20^\circ - 80^\circ$ и для оптической толщины $\tau_\nu = \kappa_\nu d < 1$, где

$$\kappa_\nu = 1,4 \cdot 10^{-9-0,22\delta} (\sin \vartheta)^{-0,09+0,72\delta} \left(\frac{\nu}{\nu_c} \right)^{-1,30-0,98\delta} \frac{n_e}{B}. \quad (5)$$

Формула (2) позволяет по спектральному индексу оптически тонкого радиоизлучения из соотношения $\alpha = 1,22 - 0,90\delta$ определить показатель спектра энергичных электронов, откуда находим $\delta \approx 1,8 \pm 0,1$, т.е. спектр электронов является достаточно жестким. Полагая $\vartheta \approx 80^\circ$, что достаточно вероятно для рассматриваемой модели источника, из формулы (4) для степени круговой поляризации можно определить магнитное поле в корональных магнитных петлях – источниках гиротронного излучения. Полагая $\delta = 2$, $r_c = 0,15$, $\nu = 8,4 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ получим $B \approx 1,07 \cdot 10^2 \text{ Гс}$. Найденные значения магнитного поля и показателя спектра энергичных электронов вместе с условием оптически тонких источников на частоте $8,4 \text{ ГГц}$, т.е. $\tau_{8,4} = \kappa_{8,4} d < 1$, накладывают ограничение на величину $n_e d$, определяющую поток радиоизлучения (2): $n_e d \leq 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Аналогичное значение дает формула (3), для частоты максимума, если предположить $\nu_{peak} \leq 1,4 \text{ ГГц}$. Формирование магнитных петель в короне коричневого карлика TVLM 513-46546, обусловленное наличием фотосферной конвекции, было исследовано в [8]. Полагая $d \approx 2 \cdot 10^8 \text{ см}$, $l \approx (2,5 - 5) \cdot 10^9 \text{ см}$ получим площадь всех элементарных источников $S \approx (0,5 - 1,0) \cdot 10^{18} N_{loop}$, а из формулы (2) для потока $F_{\nu=8,4} = 228 \pm 11 \mu\text{Jy}$ оценим количество источников спокойного радиоизлучения на видимой полусфере, необходимое для объяснения наблюдаемого потока: $N_{loop} = (0,5 - 1,0) \cdot 10^{18} / n_e d \approx 25 - 50$. Фактор заполнения поверхности звезды источниками составляет 15–30%. Концентрацию плазмы n в элементарных источниках – магнитных петлях можно оценить по мере эмис-

сии мягкого рентгеновского излучения, сопровождающего радиоизлучение спокойной компоненты, предполагая, что источником рентгеновского излучения являются магнитные петли, заполненные горячей плазмой с температурой $T \approx 10^7 \text{ K}$. Полный объем горячей плазмы, генерирующей мягкое рентгеновское излучение, составляет $V \approx \pi d^2 l N_{loop} / 4 \approx (2-8) 10^{27} \text{ см}^3$. Тогда из условия $ME = n^2 V \approx 1,8 \cdot 10^{48} \text{ см}^{-3}$ находим концентрацию плазмы в магнитных петлях $n \approx (1,4-3) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Концентрацию энергичных частиц находим из условия оптически тонкого источника на частоте 8.4 ГГц, $n_e d \leq 10^{16} \text{ см}^{-2}$, что дает $n_e \leq 5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$.

4. Заключение

Таким образом, рассмотренная модель объясняет слабую модуляцию потока радиоизлучения при вращении звезды и позволяет понять механизм накачки магнитных петель энергичными электронами [4]. Этот механизм связан с колебаниями электрического тока в магнитной петле как эквивалентном электрическом контуре. Генерация электрического тока обусловлена электродвижущей силой в основании петли, возникающей в результате взаимодействия фотосферной конвекции с магнитным полем петли. При колебаниях электрического тока возбуждается индукционное электрическое поле, ускоряющее электроны. Фотосферная конвекция поддерживает непрерывный автоколебательный процесс [9], обеспечивая постоянную накачку магнитной петли энергичными электронами. Оценки [4] показывают, что при токах $7 \cdot 10^9 \text{ A}$ автоколебания сопровождаются генерацией индукционных электрических полей напряженностью $E \approx 7 \cdot 10^{-4} \text{ В см}^{-1}$. В таком электрическом поле электроны на масштабе петли приобретают энергию 700–1500 кэВ. При этом стационарная концентрация энергичных электронов зависит от отношения ускоряющего поля E к полю Драйзера E_D и от скорости диффузии частиц в конус потерь. В нашем случае отношение $E/E_D \approx 0.1$, что приводит к значениям $n_e \leq 10^8 \text{ см}^{-3}$. Это не противоречит приведенным выше оценкам на основе потока радиоизлучения. Возникает вопрос, почему в источниках медленно меняющейся компоненты не реализуются когерентные механизмы излучения – электронный циклотронный и плазменный механизмы. Электронный циклотронный мазерный механизм не эффективен вследствие умеренного магнитного поля в петлях, в результате чего циклотронная частота оказывается существенно меньше плазменной и соответствующие инкременты меньше порога неустойчивости. Что касается плазменного механизма, то соответствующее излучение могло не попадать в частотный интервал проводимых наблюдений на VLA. Другая причина может быть связана с полным заполнением конуса потерь в результате диффузии энергичных электронов на кулоновских столкновения, в результате чего инкременты неустойчивости на

плазменных волнах становятся ниже порога возбуждения. Этот вопрос, однако, требует отдельного исследования.

Работа выполнена при частичной поддержке программы президиума РАН № 28 «Космос: исследование фундаментальных процессов и их взаимосвязей», грантов РНФ № 16-12-10448 (разделы 1, 2), № 16-12-10528 (раздел 3), а также гранта РФФИ № №17-02-00091а (раздел 4) и госконтракта (тема № 0035-2014-0029).

Литература

1. *Guedel, M., Benz, A.O.* Similar X-Ray/Microwave Ratios in Solar Flares and Coronae of Active Stars // *ApJ*, 1993, vol. 405, pp. L63–L66.
2. *Hallinan, G., Bourke, S., Lane, C., et al.* Periodic Bursts of Coherent Radio Emission from an Ultracool Dwarf // *ApJ. Lett.*, 2007, vol. 663, pp. L25–L28.
3. *Yu, S., Hallinan, G., Doyle, J.G., et al.* Modelling the radio pulses of an ultracool dwarf // *A&A*, 2011, vol. 525, pp. A39–A49.
4. *Зайцев, В.В., Степанов, А.В.* О происхождении интенсивного радиоизлучения коричневых карликов // *Известия вузов, Радиофизика*, 2016, Т. 59, С. 966–976.
5. *Osten, Rachel A., Hawley Suzanne L., Bastian Timothy S., Reid, I. Neill.* The Radio Spectrum of TVLM 513-46546: Constraints on the Coronal Properties of a Late M Dwarf // *ApJ*, 2006, vol. 637, pp. 518–521.
6. *Berger, E., Gizis, J.E., Giampapa, M.S., et al.* Simultaneous Multiwavelength Observations of Magnetic Activity in Ultracool Dwarfs. I. The Complex Behavior of the M8.5 Dwarf TVLM 513-46546 // *ApJ*, 2008, vol. 673, pp. 1080–1087.
7. *White, S.M., Kundu, M.R., Jackson, P.D.* Simple non-thermal models for the quiescent radio emission of dMe flare stars // *A&A*, 1989, vol. 225, pp. 112–124.
8. *Dulk, G.A.* Radio emission from the Sun and stars // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1985, vol. 23, pp. 169–224.
9. *Зайцев, В.В.* Незатухающие колебания электрического тока в корональных магнитных петлях и в аркадах магнитных петель / *Солнечная и солнечно-земная физика-2017, Труды, ГАО РАН, СПб*, 2017, С. 153–156.