О ПРИРОДЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОРИЧНЕВЫХ КАРЛИКОВЫХ ЗВЁЗД

Степанов А.В.¹, Зайцев В.В.²

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

ON THE ORIGIN OF X-RAY EMISSION OF BROWN DWARFS

Stepanov A.V.¹, Zaitsev V.V.²

¹Central Astronomical Observatory at Pulkovo, St. Petersburg, Russia

²Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, Russia

Using the brown dwarfs TVLM 513-46546 and VB 10 as examples, two possibilities of the origin of stationary X-ray radiation from ultracool stars have been investigated: (i) radiation from hot corona as a whole and (ii) radiation from a set of magnetic loops with a dense hot plasma heated due to the dissipation of electric currents. It is shown that, for the brown dwarfs under consideration, the generation of X-rays by a set of hot loops is energetically more favourable than in the case of a hot corona.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-245-248

1. Введение

Важным источником информации о звёздных коронах является рентгеновское излучение корон [1]. Коричневые карлики спектральных классов $M \geq 7$ (эффективная температура 2000–3500 K) и L (1500–2000 K), излучают в мягком рентгеновском диапазоне, что свидетельствует о наличии у звезд либо горячих корон, либо локальных магнитных структур, заполненных горячей плазмой. Характеристики рентгеновского излучения коричневых карликов были получены с помощью ряда рентгеновских обсерваторий. Излучение звезд классов $M > 7$ часто содержит две тепловые компоненты: «мягкую» с температурой $T \approx (2 - 4) \cdot 10^6$ K и «жесткую» с $T \approx 10^7$ K [2]. Настоящая работа посвящена определению природы рентгеновского излучения коричневых карликов на примере TVLM 513–46546 и VB 10.

Ультрахолодная звезда TVLM 513–46546 спектрального класса M8,5V имеет эффективную температуру фотосферы $T_{\text{eff}} = 2200$ K, массу $M_* = 0,07M_{\odot}$, радиус $R_* = 0,1R_{\odot}$ и удалена от Земли на расстояние $d \approx 10,6$ пк. Гравитационное ускорение на поверхности звезды $g = 2 \cdot 10^5$ см/с², скорость вращения $v \sin i \approx 60$ км/с. Квазипостоянное рентгеновское излучение в диапазоне 0.3–2 кэВ соответствует температуре источника $T \sim 10^7$ K, наблюдаемому потоку $F_x \approx 6,3 \cdot 10^{-16}$ эрг/см²с и полной светимости $L_x = 4\pi d^2 F_x \approx 8,5 \cdot 10^{24}$ эрг/с [3]. Величина магнитного поля в короне звезды по данным о радиоизлучении $B \approx 100$ Гс [3].

Ультрахолодная звезда GL752B (VB 10) класса M8 с $T_{\text{eff}} = 2600 \text{ K}$, $M_* = 0,075 M_{\odot}$, $R_* \approx 0,1 R_{\odot}$, $g = 2,1 \cdot 10^5 \text{ см/с}^2$, $d \approx 6,1 \text{ пк}$ имеет более низкую скорость вращения $v \sin i \approx 6,5 \text{ км/с}$. Величина магнитного поля на поверхности звезды $B \approx 1.3 \text{ кГс}$ [4]. Квазипостоянное излучение в диапазоне 0,3–2 кэВ свидетельствует о температуре источника $T_1 \approx 3,5 \cdot 10^6 \text{ K}$ и о наличии второй компоненты с $T_2 \approx 1,5 \cdot 10^7 \text{ K}$. Поток рентгеновского излучения $F_x \approx 3,7 \cdot 10^{-15} \text{ эрг/см}^2 \text{ с}$ соответствует полной светимости $L_x = 4\pi d^2 F_x \approx 1,5 \cdot 10^{25} \text{ эрг/с}$ [4].

Мы исследуем два возможных источника квазистационарного рентгеновского излучения: (а) излучение горячих корон и (б) излучение магнитных петель, сформированных в короне конвективными потоками фотосферной плазмы.

2. Излучение горячих корон коричневых карликов

Если источником квазистационарного рентгеновского излучения является корона с температурой T , то излучающий объем $V \approx 4\pi R_*^2 H$, где $H = k_B T R_*^2 / m_i G M_*$, k_B – постоянная Больцмана, $G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{гс}^2$ – гравитационная постоянная. Светимость короны в рентгеновском излучении

$$L_x = P(T) \bar{n}^2 V, \quad (1)$$

где $P(T) = 2 \cdot 10^{-27} \sqrt{T} + 5 \cdot 10^{-25} \exp \sqrt{2,8 + 10^6 K/T}$ эргсм³/с [2], $\bar{n}$ – средняя концентрация электронов (ионов) в объеме V . С помощью (1) определим объем излучающих корон V и средние значения концентрации частиц в коронах по наблюдаемым значениям светимости излучения и корональной температуры. Для TVLM 513–46546 находим $V \approx 2,5 \cdot 10^{30} \text{ см}^3$, масштаб высоты $H \approx 4 \cdot 10^9 \text{ см}$ и среднюю концентрацию плазмы в короне $\bar{n} \approx 6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$. Для VB 10 получаем $V \approx 8,4 \cdot 10^{29} \text{ см}^3$, $H \approx 1,4 \cdot 10^9 \text{ см}$, $\bar{n} \approx 1,7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Видно, что излучающая корона VB 10 более компактная и плотная, что при практически одинаковых массах и радиусах обоих объектов связано с менее горячей и менее протяженной короной и большей рентгеновской светимостью VB 10 по сравнению с TVLM 513–46546 [3, 5].

Вследствие горячих корон у коричневых карликов заметно возрастают энергетические потери из-за теплопроводности. Например, потери на излучение у TVLM 513–46546 составляют величину $Q_r \approx 3 \cdot 10^{25} \text{ эрг/с}$, тогда как энергетические потери из-за теплопроводности $Q_T \approx 0,92 \cdot 10^{-6} T^{7/2} V H^{-2} \approx 4 \cdot 10^{29} \text{ эрг/с}$ существенно превышают аналогичные потери короны Солнца, $Q_{T\odot} \approx 10^{28} \text{ эрг/с}$. Поэтому для поддержания короны TVLM 513–46546 с $T \approx 10^7 \text{ K}$ необходимы более мощные источники нагрева по сравнению с Солнцем. Этот вывод справедлив и для VB 10.

Предположим, что в коронах коричневых карликов существуют, как и в короне Солнца, спикулы II типа. Тогда поток тепла из спикулы в корону из-за электронной теплопроводности вдоль магнитного поля спикулы [6]

$$Q_{Tsp} \approx \frac{0,9 \times 10^{-6} T^{\frac{7}{2}}}{\Delta z} \pi r_0^2 \text{ эрг/с}. \quad (2)$$

За радиус магнитной трубки r_0 для звезд $M \geq 8$ можно принять размер грануляционной ячейки $\approx 10^7$ см. Тогда для $T = 10^7$ К и длины спикулы $\Delta z = 10^9$ см получим $Q_{Tsp} \approx 10^{24}$ эрг/с. Поэтому для компенсации энергетических потерь из короны TVLM 513–46546 требуется $\sim 4 \cdot 10^5$ горячих спикул, суммарная площадь оснований которых порядка площади поверхности звезды (6×10^{20} см²), что значительно отличается от Солнца, где спикулы занимают $\approx 1\%$ поверхности. Для VB 10 необходимая площадь 10^6 спикул составляет половину поверхности звезды.

3. Магнитные петли как источник рентгеновского излучения

Перенос энергии от центра звезды к поверхности у коричневых карликов осуществляется конвекцией. На уровне фотосферы скорость конвекции $V \approx 10^4$ – 10^5 см/с. Полутолщина магнитных петель порядка размера ячейки грануляции $r_1 \approx D \approx 10^6$ – 10^7 см. При взаимодействии радиальной компоненты скорости конвекции V_r с азимутальной компонентой магнитного поля петли в фотосферных основаниях петли возникает ЭДС, генерирующая электрический ток, текущий от одного основания петли через корональную часть к другому основанию и замыкающийся в плотных слоях атмосферы, образуя замкнутый электрический контур [7]. При этом стационарное значение тока в петле определяется формулой [7]

$$I \approx 0,8[|V_r| \pi r_1^3 c^2 n_e m_i v'_{ia} (2 - F_1) F_1^{-2}]^{1/2} \text{ сГс}, \quad (3)$$

Здесь $v'_{ia} \approx 1,6 \cdot 10^{-11} n_a \sqrt{T}$ Гц – эффективная частота столкновений ионов с нейтралами, $F_1 = n_a / (n_e + n_a)$ – относительная концентрация нейтралов, n_e – концентрация электронов. Для рассматриваемых коричневых карликов в области «работы» фотосферной ЭДС плотность атомов $n_a \approx 5 \cdot 10^{16}$ – 10^{17} см⁻³, $n_e \approx 5 \cdot 10^9$ – 10^{10} см⁻³, $T \approx 2200$ К. В этом случае для скорости фотосферной конвекции $V_r \approx 10^4$ – 10^5 см/с и $r_1 \approx 10^6$ – 10^7 см получаем оценки величины тока: $I \approx 7 \cdot 10^8$ ÷ $7 \cdot 10^{10}$ А. На корональных уровнях для оптически тонкой среды при температурах $T > 2 \cdot 10^5$ К основной вклад в нейтральную компоненту дает водород [8], при этом в интересующем нас интервале температур 10^6 – 10^7 К справедлива аппроксимация $F \approx 0,15/T$. Скорость джоулевой диссипации тока в единице объема петли определяется формулой [7]

$$q_J = \frac{j_z^2}{\sigma} + \frac{F^2 B_\phi^2 j_z^2}{(2 - F) c^2 n_e m_i v'_{ia}} \approx 2,2 \cdot 10^{-9} \frac{I^4}{n^2 r_1^6 T^{3/2}} \text{ эрг/см}^3 \text{ с}. \quad (4)$$

В корональной части петли основной вклад в диссипацию тока дает второе слагаемое в (4). Несмотря на относительно малую плотность нейтральных атомов, $F \ll 1$, включается эффективный канал диссипации, связанный с проводимостью Каулинга и сильной зависимостью энерговыделения от величины электрического тока. Нагрев магнитной петли определяется балансом джоулевой диссипации, теплопроводности и потерь на излучение. Решение соответствующего уравнения переноса дает значение температуры и концентрации в петле с характерной длиной l коэффициентами $\kappa_e = 0,92 \cdot 10^{-6}$, $\chi_0 = 10^{-19}$ [7]:

$$T \approx 2 \cdot 10^{-2} \frac{(lL)^{\frac{4}{9}}}{r_1^{\frac{2}{3}}} K, \quad n_1 = \frac{1}{3} \left(\frac{2\kappa_e}{\chi_0} \right)^{1/2} \frac{T_1^2}{L} \text{ см}^{-3}, \quad L = l/2. \quad (5)$$

Определим количество горячих петель в короне TVLM 513-46546, обеспечивающих необходимую меру эмиссии рентгеновского излучения. По аналогии с солнечной короной считаем, что толщина петель не меняется с высотой т.е. $r_1 \approx 10^7$ см. Тогда из (5) находим электрический ток, необходимый для нагрева плазмы в петле, $I = 6 \cdot 10^{10}$ А, концентрацию плазмы $n_1 \approx 2,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и меру эмиссии отдельной петли $EM_{loop} \approx 2 \cdot 10^{45} \text{ см}^{-3}$. Для обеспечения наблюдаемой меры эмиссии необходимо, чтобы в короне коричневого карлика присутствовало $N_{loop} = \frac{EM_*}{EM_{loop}} \approx 4,5 \cdot 10^2$ горячих петель. Для VB 10 при $r_1 \approx 10^7$ см, $L \leq 2,2 \cdot 10^9$ см, $T_1 \approx 3,5 \cdot 10^6$ К получаем $I = 1,7 \cdot 10^{10}$ А, $n_1 \approx 8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, $N_{loop} \approx 2,8 \cdot 10^4$.

Таким образом, мы показали, что генерация рентгеновского излучения ультрахолодных звёзд VB 10 и TVLM 513-46546 системой магнитных петель энергетически более выгодна по сравнению с однородной горячей короной. Основной источник нагрева петель – фотосферная конвекция, которая концентрирует магнитное поле на границах супергранул и, взаимодействуя с этим полем, генерируют в магнитных петлях электрические токи 10^9 – 10^{11} А – источники нагрева плазмы.

Работа поддержана грантом РФФ № 20-12-00268 (раздел 3), грантом РФФИ № 20-02-00108 (раздел 1, 2), а также Госзаданием (темы 0035-2019-0002 и 0041-2019-0019).

Литература

1. Гершберг Р.Е., Клиорин Н.И., Пустильник Л.А., Шляпников А.А. // Физика звёзд средних и малых масс с активностью солнечного типа. – М.: Физматлит. 2020.
2. Giampapa M.S., Rosner R., Kashyap V. et al. // Astrophys. J. 1996. V. 463. P. 707.
3. Berger E., Gizis J.E., Giampapa M.S. et al. // Astrophys. J. 2008. V. 673. P.1080.
4. Berger E., Basri G., Gizis J.E. et al. // Astrophys. J. 2008. V. 676. P.1307.
5. Fleming T.A., Giampapa M.S., Garza D. // Astrophys. J. 2003. V. 594. P. 982.
6. Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Kronshtadtov P.V. // Sol. Phys. 2020. V. 295. P. 166.
7. Степанов А.В. Зайцев В.В. // Магнитосферы активных областей Солнца и звёзд. – М.: Физматлит. 2018.
8. Verner D.A., Ferland G.J. // Astrophys. J. Suppl. 1996. V. 103. P. 467.