

О природе нагрева звёздных корон

Что следует из наблюдений рентгеновского и радио излучения звёзд

А.В. Степанов (ГАО РАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе), В.В. Зайцев (ИПФ РАН)

- Солнце
- Красные карлики
- Ультрахолодные звёзды

"Магнетизм и активность Солнца и звезд - 2021" (Крым-2021).

Проблема нагрева звёздных корон - одна из нерешенных проблем физики звёзд

Linsky (LNPh 1991): Why are the coronae of active stars so hot? ($3 \times 10^7 - 10^8$ K)

Chandra, XMM-Newton, EUVE: Two components in X-ray emitting coronae: Cool ($\leq 3 \times 10^6$ K) & Hot ($\geq 10^7$ K)

Радио наблюдения, White et al (ApJ 1994): короны dMe звёзд с $T \approx 7 \times 10^6 - 4 \times 10^7$ K

Оценка T_{max} в теории солнечного ветра Паркера: ~ 1 МК.

Но теория Паркера (уравнения непрерывности, движения, состояния) не учитывает магнитное поле.

Современные модели: «магнитный» нагрев.

Что излучает?

Вся горячая корона или локальные области (корональные петли, например)

I. Солнце: Радиационные потери: $\sim 5 \times 10^{27}$ эрг/с,
Из-за теплопроводности: $\sim 10^{28}$ эрг/с
(потери массы: $\sim 10^9 - 10^{10}$ кг/с)

Каковы постоянные источники нагрева короны?

Фотосферная конвекция играет определяющую роль в нагреве короны и генерации электрических токов в магнитных петлях и магнитных трубках (спикулах)

Существующие механизмы нагрева короны Солнца

Всей короны:

- Акустический – звуковыми волнами, $P=3-5$ мин (Kuperus et al. ARAA 1981)
- Альфвеновскими и ММЗ волнами (Чашей, Шишов, АЖ 1989)
- Магнитным пересоединением в хромосфере (Litvinenko, ApJ 1999)
на 2-3 порядка < необходимого
- Микро- и нано-вспышками (Parker, ApJ 1988; Schmelz et al. ApJ 2009)

Локальный: нагрев корональных магнитных петель

- Аномальная диссипация эл. тока *in situ* (Rosner et al. ApJ 1978); Магнитное пересоединение. Тиринг мода (Galeev et al. ApJ 1981)
- Джоулевой диссипацией электрических токов (Spicer, Int. Conf. Heidelberg, 1991; Зайцев и Шибасаки, АЖ 2005)
- МГД-волнами (Ionson, ApJ 1982, Hollweg, Int. Conf. Heidelberg, 1991; Ofman et al. ApJ 1995, Hood, LNPh 2010)
- Вследствие параметрического резонанса (Зайцев, Кислякова, АЖ 2010).

A. Нагрев магнитными петлями (Zaitsev et al. SP 2020)

Медленные изменения тока за время \gg периода собственных колебаний контура, описываются уравнением

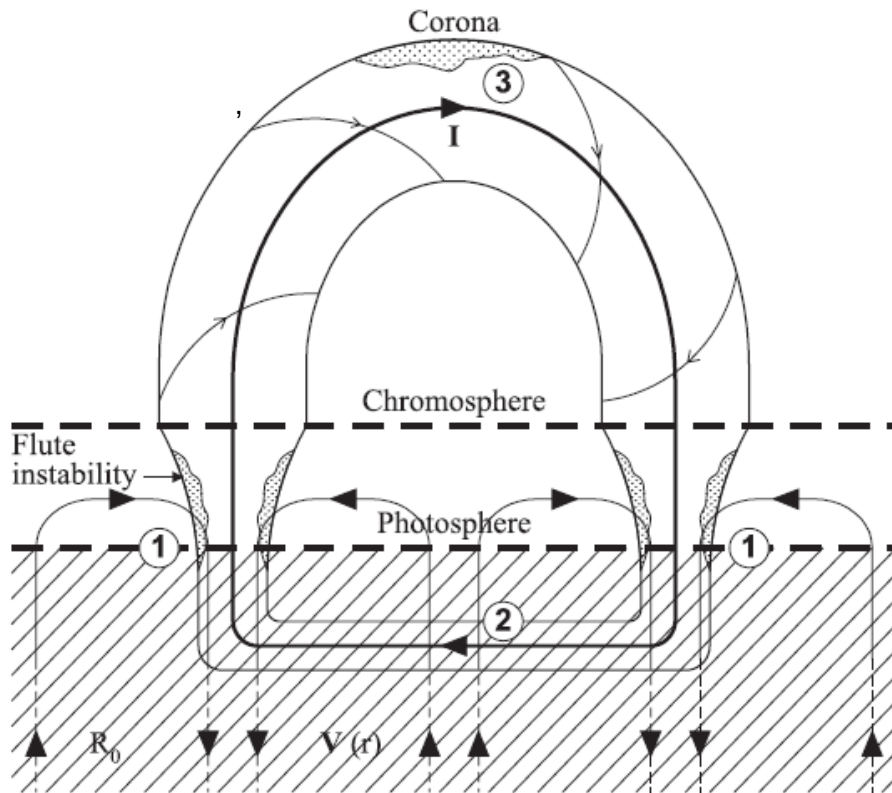
$$\frac{1}{c^2} \frac{d(LI)}{dt} + RI = \Xi$$

Величина эдс обусловлена фотосферной конвекцией в основании петли

$$\Xi = \frac{l_1}{\pi c r_1^2} \int_0^{r_1} V_r B_\phi 2\pi r dr \approx \frac{|\bar{V}_r| I l_1}{c^2 r_1}$$

В области действия фотосферной эдс:

$$R(I) = \frac{3\xi l_1 F^2 I^2}{\pi r_1^4 (2 - F) c^4 n m_i v_{ia}'}$$



Генерация электрических токов в магнитных петлях

$$\frac{L}{c^2} \frac{dI}{dt} + RI = \Xi \quad R(I) \approx \frac{1,5l_1 I^2 F_1^2}{\pi r_1^4 c^4 n_e m_i \nu'_{ia} (2 - F_1)} \quad \Xi = \frac{l_1}{\pi c r_1^2} \int_0^{r_1} V_r B_\varphi 2\pi r dr \approx \frac{|V_r| \Pi_1}{c^2 r_1}$$

$$\boxed{\frac{L}{c^2} \frac{dI}{dt} + aI^3 = bI} \quad a = \frac{3\xi l_1 F_1^2}{\pi r_1^4 (2 - F_1) c^4 n_1 m_i \nu'_{ia,1}}, b = \frac{|V_r| l_1}{c^2 r_1} - \frac{l_1}{\pi r_1^2 \sigma_1}$$

Для начального условия $t = 0, I = 0$ получим решение уравнения

$$I(t) = \left(\frac{b}{a}\right)^{1/2} \left(1 - e^{-2bc^2 t/L}\right)^{1/2}.$$

$b > 0$, т.е. процесс генерации тока в области фотосферной э.д.с. является пороговым

В стационарной петле ($\frac{d(LI)}{dt} = 0$): $I = \left[\frac{|V_r| \pi r^3 c^2 n m_i (2-F) l_1 v_{ia}}{1,5 F^2 l} \right]^{1/2}$

Скорость нагрева плазмы в петле $q \approx 2.2 \times 10^{-9} \frac{I^4}{n^2 r_0^6 T^{3/2}} \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$

Радиационные потери: $Q_{cr} \approx 10^{-21,85} n_c^2 4\pi R_\odot^2 \frac{k_B T_c}{2m_i g} \approx 5 \times 10^{27} \text{ erg s}^{-1}$, $10^5 \text{ K} < T \leq 2 \times 10^7 \text{ K}$

Поток тепла из поверхности

петли S в корону ($\omega_i \tau_i \gg 1$): $Q_{Tloop} = q_T S = 2.8 \times 10^{-16} \frac{n^2 \sqrt{T}}{\Delta r} (2\pi r_0 l_0) \text{ erg s}^{-1} \approx 1.7 \times 10^{22} \text{ erg s}^{-1}$.

Потери из-за теплопроводности: $Q_{cT} \approx 10^{28} \text{ erg s}^{-1}$

На Солнце должны постоянно «работать» $\approx 10^6$ горячих петель,
что маловероятно, особенно в периоды спокойного Солнца.

Zaitsev et al. (Solar Phys. 2020): Основное ограничение в передаче тепла из петель в корону – резкое, на 10-12 порядков, уменьшение теплопереноса поперёк \mathbf{B} .

Вывод: Тепловые потоки из горячих петель ограничены замкнутой структурой магнитного поля. Петли способны нагреть корону в лишь отдельных областях.

Брагинский (ВТП 1, 1963):

$$q_T = -\kappa_{\parallel}^i \nabla_{\parallel} T - \kappa_{\perp}^i \nabla_{\perp} T + \frac{5}{2} \frac{nT}{m_i \omega_i} [\mathbf{b} \nabla T]$$

$$\omega_i \tau_i \gg 1, \quad \omega_i = 9.6 \times 10^3 B \quad \tau_i = 0.9 T^{3/2} / n$$

$$\frac{\kappa_{\parallel}^i}{\kappa_{\perp}^i} \approx (\omega_i \tau_i)^2$$

$$(\omega_i \tau_i)^2 \approx 10^{12}$$

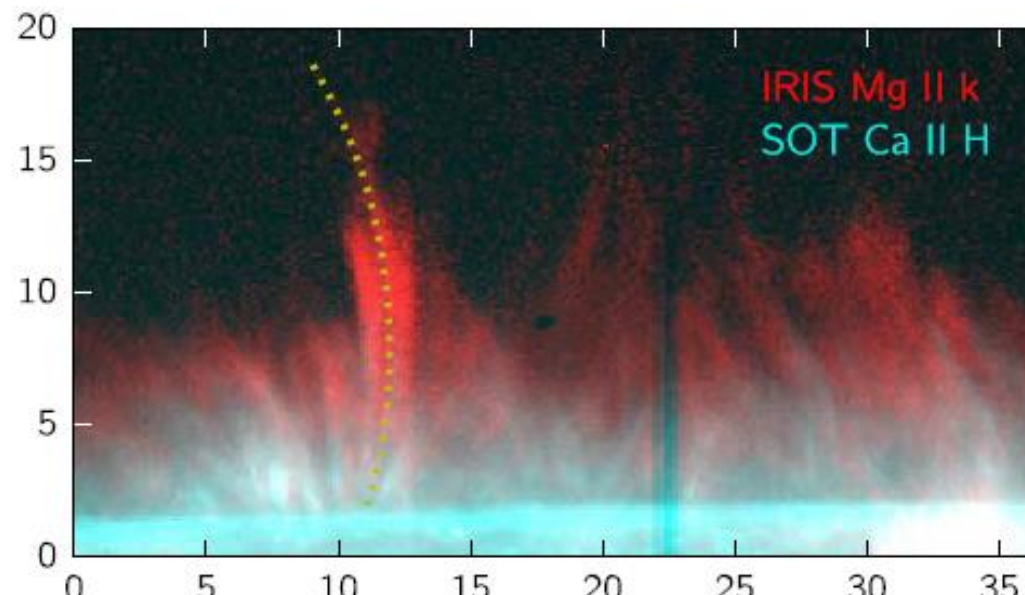
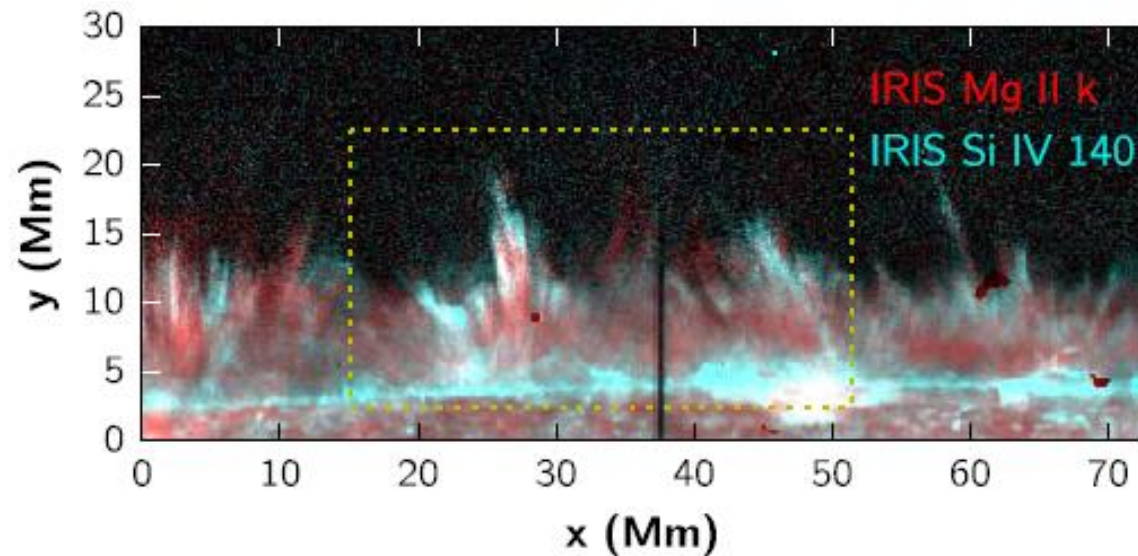
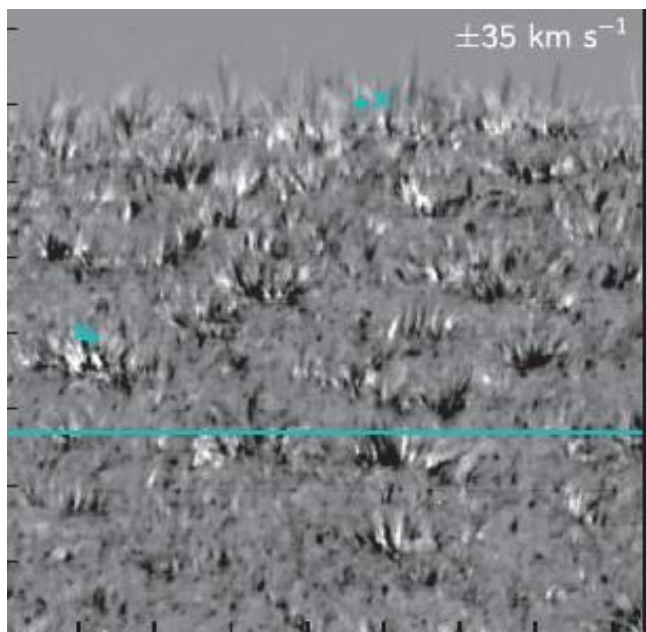
Электронная теплопроводность $\kappa_{\perp}^e \approx 10^{-2} \kappa_{\perp}^i$

Б. Нагрев спикулами

Наблюдения с High-resolution Coronal Imager (Hi-C) и Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS)

Peter et al. A&A 2013, Pereira et al. ApJ 2014:

Солнечная корона до высот 10–20 тыс. км плотно заполнена не только магнитными петлями, но и «лесом» открытых магнитных трубок, ассоциированными со спикулами



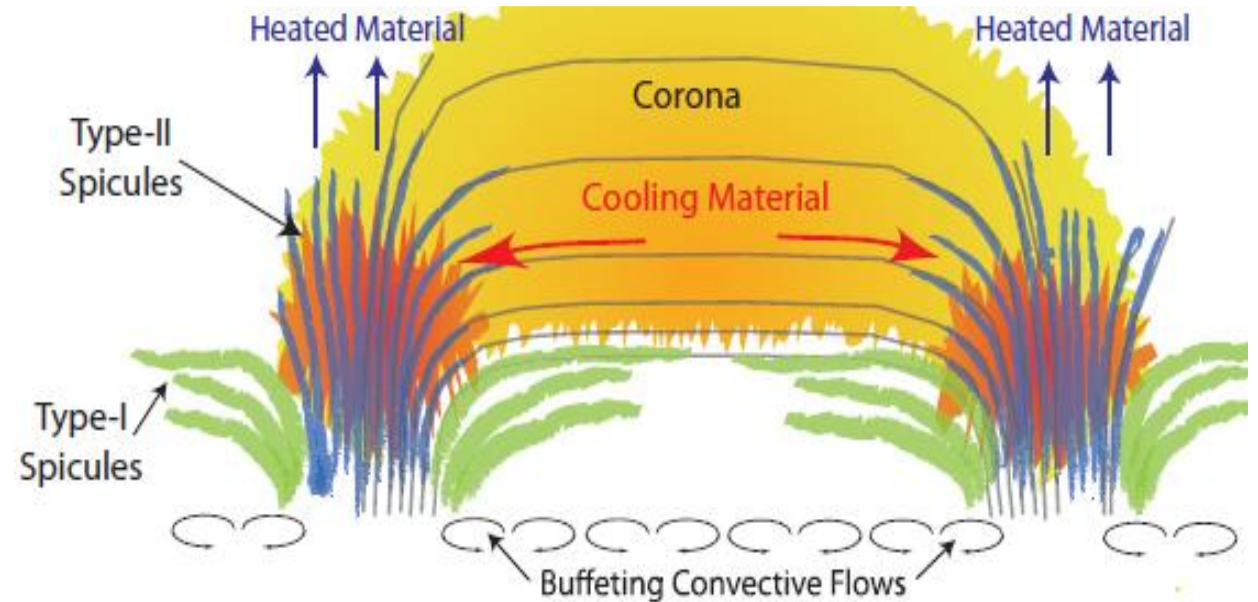
Спикулы I и II типа (De Pontieu et al. PASJ 2007, ApJ 2009)

Спикулы типа II более динамичны: они образуются за 10 с, тонкие ($D \sim 200$ км), время жизни 10–150 с и быстро нагреваются до температуры $\sim 2 \times 10^6$ К, отправляя материал через хромосферу со скоростью 50–150 км/с. Достигают длины $(1-7) \times 10^3$ км.

Спикулы типа I обычно появляются в активных областях, а спикулы типа II наблюдаются вдали от активных областей, в частности, в корональных дырах и в периоды спокойного Солнца.

De Pontieu et al. Science 2011:

Спикулы II типа – источник нагрева короны



Оба типа спикул характеризуются выбросами плазмы (jets). Скорость выбросов у спикул I типа 15-40 км/с, время жизни 3-10 мин.

Спикулы I типа с $T \sim 10^4$ К не могут нагреть корону



Но какой механизм нагрева спикул?

Спикулы II типа как открытые магнитные структуры

Из большого разнообразия моделей спикул мы выбрали модель спикулы как плазменного цилиндра (Roberts 1979; Hollweg 1982; Hirayama 1992; Henoux & Somov 1997).

Исследуя вертикальную магнитную трубку радиуса r_0 с током I_z , потоком плазмы V_z , внутренним полем B_z и слабым корональным полем B_c на поверхности, мы получили:

$$B_z(r, z) = B_c + \frac{4\pi\sigma_H V_z I_z(z)}{c^3} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right)$$

Видно, что с уменьшением $I_z(z)$ с высотой вертикальное магнитное поле B_z стремится к B_c . Этот вывод вытекает и из обобщенного критерия Беннета как условия равновесия плазменной магнитной трубки с эл.током:

$$\int_0^{r_0} \left(p + \frac{B_z^2}{8\pi}\right) 2\pi r dr = \frac{I_z^2(z)}{2c^2}$$

При условии

$\bar{p} + \frac{\overline{B_z^2}}{8\pi} > \frac{I_z^2}{2c^2}$ т.е. при уменьшении I_z равновесие невозможно и B_z и p уменьшаются до корональных значений.

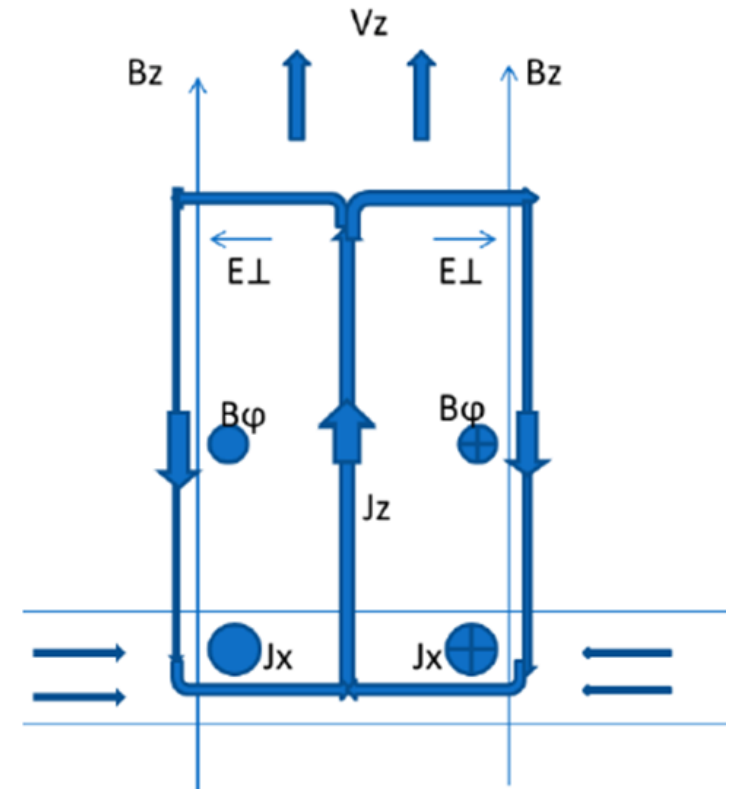


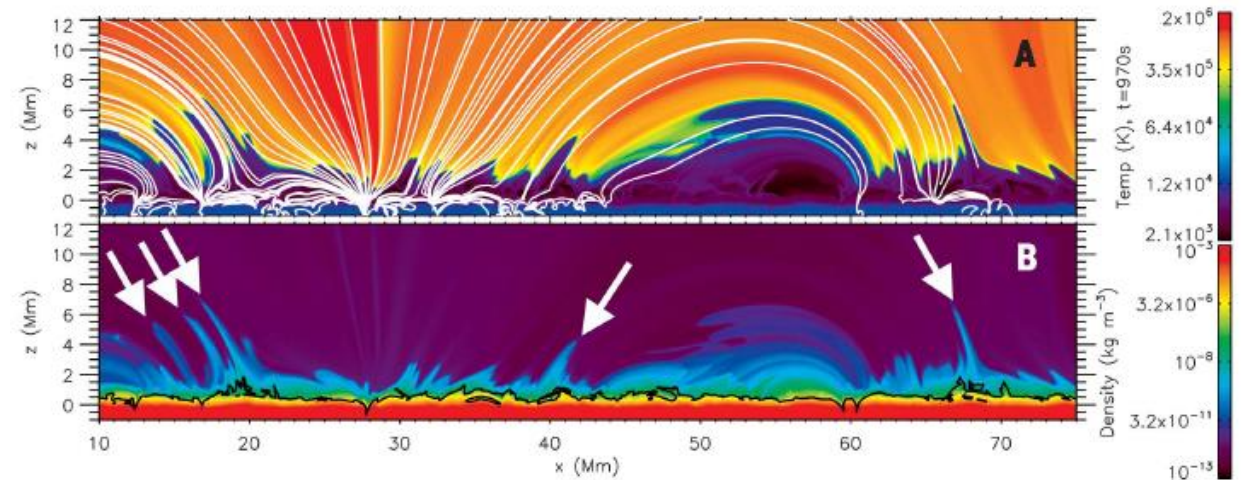
Схема эл.цепи спикулы: J_z – ток в трубке, генерируемый эдс, J_x – ток Холла, обусловленный эл. полем разделения заряда в потоке V_r фотосферной плазмы, $E_{\perp} = -(1/c) \cdot V_z B_{\phi}$ – компонента эл.поля, формирующая поверхностный ток, замыкающий цепь.

Martínez-Sykora et al. Science 2017: Моделирование спикул

Спикулы II типа играют важную роль в нагреве и пополнении вещества короны путём диссипации электрического тока и альвеновских волн.

Токи диссипируют из-за амбиполярной диффузии (сопротивления Каулинга) в хромосферной части спикул, вызывая нагрев $\sim 10^{23}$ эрг/с на событие.

Амбиполярная диффузия неэффективна при корональных температурах, но альвеновские волны способны нагреть плазму до корональных температур.



Zaitsev et al. Solar Phys. 2020: Количественный расчёт

Диссипация тока из-за сопротивления Каулинга нагревает спикулу не только в хромосфере, но и в короне (Зайцев, Шибасаки, АЖ 2005).

$$q = \frac{j_z^2}{\sigma} + \frac{F^2 B_\phi^2 j_z^2}{(2-F)c^2 n m_i v_{ia}'} \quad F(T) = \frac{\xi(T)}{T}$$

В короне $\xi(T) \approx 0,15$ при $T \geq 10^6$ K (Verner & Ferland, ApJS 1996)

Нагрев спикеры электрическими токами

Скорость нагрева: $q = \frac{j_z^2}{\sigma} + \frac{F^2 B_\phi^2 j_z^2}{(2-F)c^2 n m_i v_{iz}'} \approx 2 \cdot 10^{-9} \frac{I^4}{n^2 r_0^6 T^{3/2}}$ эрг/с см³

Радиационные потери ($10^5 K < T \leq 2 \cdot 10^7 K$): $q_r \approx \chi_0 n_e^2 T^{-1/2}$, $\chi_0 = 10^{-19}$

Из условия $q \geq q_r \rightarrow$ эл. ток греет не всю спикеру, а её верх с $n \leq 3,8 \cdot 10^2 \frac{I}{r_0^{1,5} T^{0,25}}$ см⁻³

При $I = (10^{10} - 10^{12})$ А, $r_0 = 2,5 \cdot 10^7$ см спикера нагревается до $T = 5 \cdot 10^6 K$ в верхней части с $n \leq 10^{11}, 10^{10}, \cdot 10^9$ см⁻³. Токи для нагрева значительные, если $I < 10^9$ А, то спикеры I типа.

Поток тепла из спикеры в корону: $Q_{Tsp} = \kappa_{\parallel}^e \frac{\Delta T}{\Delta z} \pi r_0^2 \approx \frac{0,9 \cdot 10^{-6} T^{\frac{7}{2}}}{\Delta z} \pi r_0^2$ эрг с⁻¹

При $T = 5 \cdot 10^6 K$, $r_0 = 3 \cdot 10^7$ см и $\Delta z = 5 \cdot 10^8$ см $Q_{Tsp} \approx 10^{24}$ эрг с⁻¹.

Для компенсации потерь тепла из короны $\sim 10^{28}$ эрг с⁻¹, достаточно $\sim 10^4$ спикер II типа, т.е. $\sim 1\%$ от количества спикер, одновременно наблюдающихся на Солнце.

II. Нагрев корон красных карликов

AD Leo (M3,5V): $R = 0.3 R_{\odot}$, $T_{\text{eff}} = 3400 \text{ K}$, $V_{\text{фот}} = 4 \text{ км/с}$, $d = 4,9 \text{ пк}$

Mullan et al (ApJS 2006), данные EUVE о мере эмиссии и затухании SXR.

На звёздах классов F и M могут существовать петли с $L \approx 0.5 R_{\odot}$, $n = 10^{11}-10^{12} \text{ 1/см}^3$, $T = 10^7-10^8 \text{ K}$.

AD Leo: SXR- вспышки с $\tau_R \sim \tau_d \sim 10^4 \text{ с}$

Zaitsev, Kronshtadtov (R&QE 2016): Природа SXR-вспышек AD Leo \rightarrow нагрев плазмы петель эл. током.

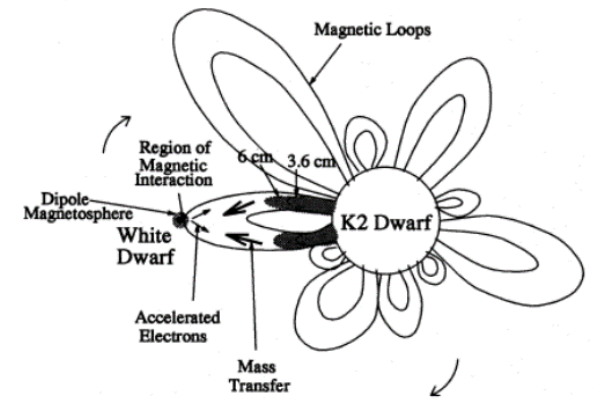
Отличие от Солнца: требуются токи $I \geq 10^{13} \text{ A}$, т.е. на 1-3 порядка больше, выше V_r .

Параметры петель: $L \approx 2 \times 10^{10} \text{ см}$, $n \approx 3 \times 10^{11} \text{ 1/см}^3$, $T \approx 2,5 \times 10^7 \text{ K}$.

Большие $\tau_R \sim \tau_d$ из-за большой индуктивности петель.

SXR- вспышки AD Leo объясняются «работой» ~ 50 петель с $I \geq 10^{13} \text{ A}$.

А как нагреть всю корону? Спикулами или многочисленными петлями (большая запятнённость)



III. Короны коричневых карликов

$$M_* < 0.1M_{\odot}$$

$$R_* \approx 0.1R_{\odot}$$

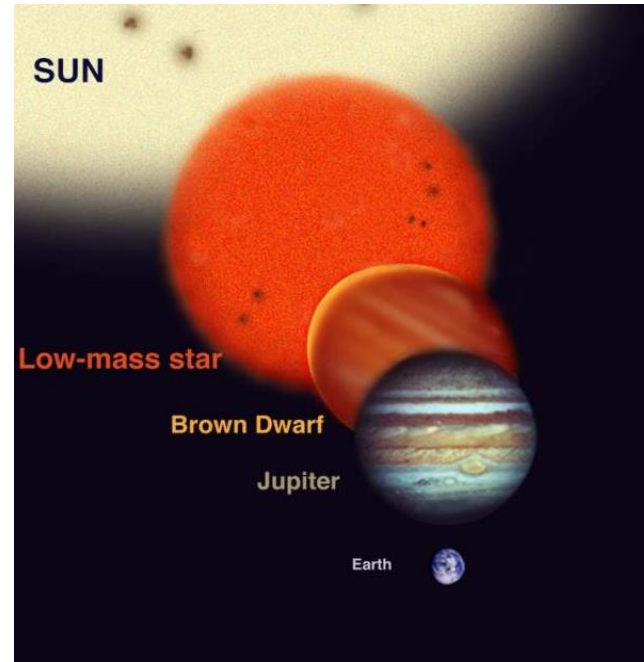
Не поддерживают
термоядерное горение
водорода.

Но: дейтерия и лития.

Планетная парадигма

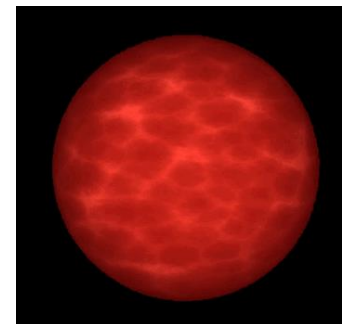
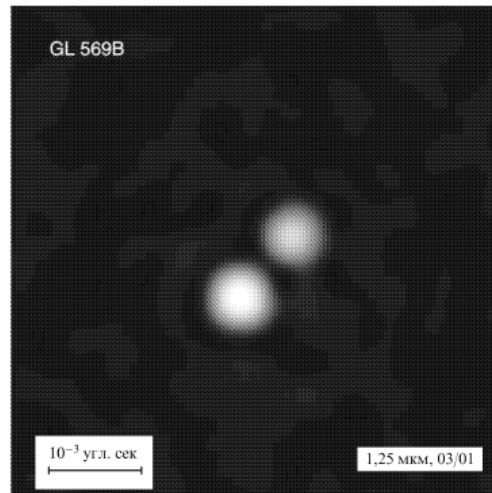
Helling et al. ApJ 2011:

грозовые разряды
формируют корону?

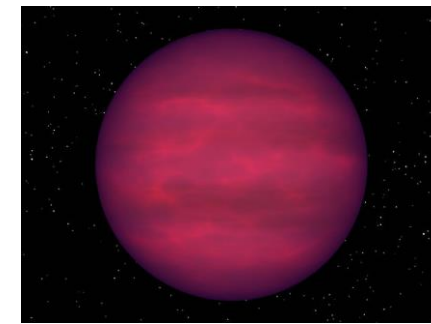


Artist's vision of a late-M dwarf, $M > 7$
 $T = 2100-3500$ K

Balega (Phys. Usp. 2002):
BTA observations.
 $d \sim 1$ AU between
components of dwarf
system GL569B.



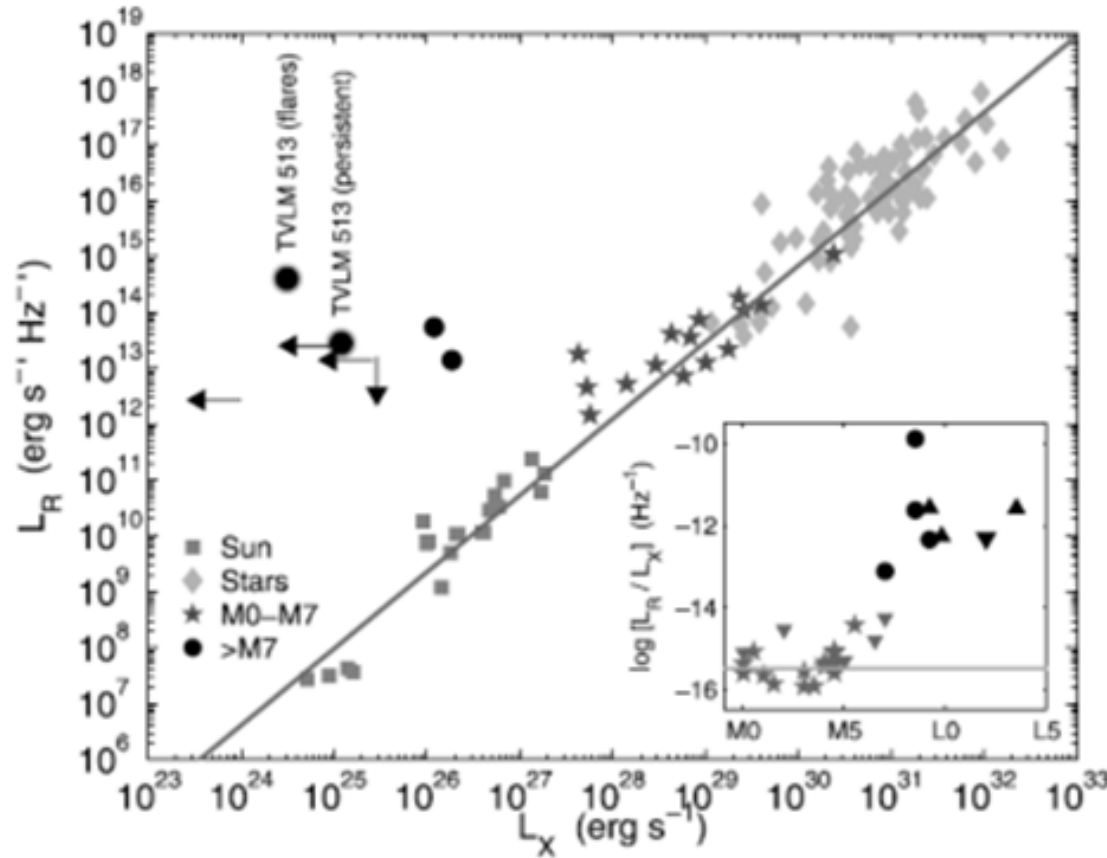
L dwarf
 $T = 1300-2100$ K



T dwarf
 $T = 600-1300$ K

Radio vs. X-ray luminosity

BERGER ET AL.



Red dwarfs and the Sun
(Güdel & Benz 1999):
 $L_R \sim L_X / 10^{15.5} \text{ Hz}^{-1}$

Brown dwarfs:
 $L_R \sim L_X / 10^{11-12} \text{ Hz}^{-1}$

M7-M9: $L_X/L_{\text{bol}} \approx 10^{-4}$

L-карлики: $L_X/L_{\text{bol}} \approx 10^{-5}$

Зайцев, Степанов (Радиофизика 2021): VB 10 и TVLM 513-46546

Chandra (0,2 -1,5 кэВ), *XMM-Newton* (0,1-15 кэВ), *EUVE* (0,016-0,163 кэВ):

- Квазистационарная X-корона звезды Ван Бисбрука VB 10 (M8). $T_1 \approx 3,5 \times 10^6$ K, $T_2 \approx 1,5 \times 10^7$ K
- Длительное (9 часов) X-излучение (0.3–2 кэВ) TVLM 513-46546 (M8,5) с $T \approx 10^7$ K (Berger et al. 2008) .

А. Горячая корона

Излучающий объём $V \approx 4\pi R_*^2 H$, $H = \frac{k_B T R_*^2}{m_i G M_*}$

Светимость короны $L_x = P(T) \bar{n}^2 V$, $P(T) = 2 \times 10^{-27} \sqrt{T} + 5 \times 10^{-25} \exp \sqrt{2,8 + 10^6 K/T}$

TVLM 513–46546: $V \approx 2,5 \times 10^{30} \text{ см}^3$, $H \approx 4 \times 10^9 \text{ см}$, $\bar{n} \approx 6 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$

VB 10: $V \approx 8,4 \times 10^{29} \text{ см}^3$, $H \approx 1,4 \times 10^9 \text{ см}$, $\bar{n} \approx 1,7 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Корона VB 10 более компактная и плотная. Это связано с менее горячей и менее протяженной короной и большей L_x у VB 10.

Наблюдательные характеристики VB 10 и TVLM 513–46546

GL752B (VB 10) спектрального класса M8

из каталога Ван Бисбрука

$$T_{\text{eff}} = 2600 \text{ K}, \quad M_* = 0,075M_{\odot}, \quad R_* \approx 0,1R_{\odot}$$

$$g = 2,1 \cdot 10^5 \text{ см/с}^2, \quad d \approx 6,1 \text{ пк}, \quad v \sin i \approx 6,5 \text{ км/с}$$

$$L_{\text{bol}} \approx 10^{-3.34} L_{\odot}, \quad L_x \approx 10^{-5} L_{\text{bol}}$$

вне вспышек

$B \approx 1.3 \text{ кГс}$ на поверхности звезды

$$T_1 \approx 3,5 \times 10^6 \text{ K} \quad T_2 \approx 1,5 \times 10^7 \text{ K}$$

TVLM 513–46546 спектрального класса M8,5V

$$T_{\text{eff}} = 2200 \text{ K}, \quad M_* = 0,07M_{\odot}, \quad R_* \approx 0,1R_{\odot}$$

$$g = 2 \cdot 10^5 \text{ см/с}^2, \quad d \approx 10,6 \text{ пк}, \quad v \sin i \approx 60 \text{ км/с}$$

$$L_x \approx 8,5 \times 10^{24} \text{ эрг/с}$$

$B \approx 100 \text{ Гс}$ в короне; $T \sim 10^7 \text{ K}$

Проблема нагрева корон ультрахолодных звёзд

Если у коричневых карликов короны горячие, то возрастают энергетические потери из-за теплопроводности.

TVLM 513–46546: потери на излучение $Q_r \approx 3 \times 10^{25}$ эрг/с

из-за теплопроводности: $Q_T \approx 10^{-6} T^{\frac{7}{2}} V H^{-2} \approx 4 \times 10^{29}$ эрг/с $\gg Q_{T\odot} \approx 10^{28}$ эрг/с

Для поддержания короны у КК необходимы более мощные источники нагрева по сравнению с Солнцем.

Какой выход. Спикулы?

Поток тепла из спикулы в корону $Q_{Tsp} = \kappa_{\parallel}^e \frac{\Delta T}{\Delta z} \pi r_0^2 \approx \frac{0,9 \times 10^{-6} T^{\frac{7}{2}}}{\Delta z} \pi r_0^2$ эрг/с

TVLM 513–46546: при $T = 10^7$ K, $r_0 = 10^7$ см, $\Delta z = 10^9$ см $Q_{Tsp} \approx 10^{24}$ эрг/с

Требуется 4×10^5 спикул с $S_{\Sigma} = 1,3 \times 10^{20}$ см² $\sim S_* = 6,2 \times 10^{20}$ см².

VB 10: необходимо $\sim 10^6$ спикул с $S_{\Sigma} \sim 0,5 S_*$

Магнитные петли как возможный источник рентгеновского излучения

Нагрев корональной части петель на примере TVLM5B-46546 (Зайцев, Степанов Радиофизика 2021)

При $T > 2 \times 10^5 \text{K}$ содержание нейтралов (водород), $F \approx \frac{0,15}{T}$

$$q_J = \frac{j_z^2}{\sigma} + \frac{F^2 B_\phi^2 j_z^2}{(2-F)c^2 n_e m_i v'_{ia}} \approx 2,2 \times 10^{-9} \frac{I^4}{n^2 n_1^6 T^{3/2}} \text{ эрг см}^{-3} \text{ с}^{-1}$$

Эффективная проводимость $\sigma_{eff} = \frac{\sigma}{1 + \frac{F^2 \omega_e \omega_i}{(2-F)v'_e v'_{ia}}}$, $\frac{F^2 \omega_e \omega_i}{(2-F)v'_e v'_{ia}} \gg 1$, $\nu \approx 100 \text{ Гс}$.

Эл. ток для нагрева петли до $T = 10^7 \text{K}$, $I = 6 \times 10^{10} \text{A}$, $n \approx 2,2 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и $EM_{loop} \approx 2 \times 10^{45} \text{ см}^{-3}$.

Меру эмиссии X-излучения обеспечат $N_{loop} = \frac{EM_*}{EM_{loop}} \approx 4,5 \times 10^2$ горячих петель.

Постоянное X-излучение TVLM5B-46546 сопровождается стабильным (годы) GS-излучением (Berger et al.2008).

По мкв-излучению (Зайцев, Степанов G&A 2018) нужно ~ 100 петель.

X и мкв-излучение TVLM 513-46546 имеют общий источник – систему петель общим числом $N_{loop} \geq 10^2$, заполненных плазмой с $T \approx 10^7 \text{K}$ и субрелятивистскими электронами.

VB 10: для нагрева до $T = 3 \times 10^6 \text{K} \rightarrow I = 1,7 \times 10^{10} \text{A}$, $n \approx 8 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$, $N_{loop} \approx 3 \times 10^4$.

Заключение

- Основной источник нагрева корон - фотосферная конвекция.
- Фотосферные потоки частично ионизированной плазмы концентрируют магнитное поле на границах супергранул до $B \sim \text{Кгс}$ и, взаимодействуя с этим полем, генерируют в магнитных петлях и трубках электрические токи $10^{10} - 10^{12}$ А.
- Диссипация токов существенно возрастает из-за неполной ионизации плазмы и связанной с ней проводимостью Каулинга. Это вызывает нагрев плазмы в спикулах II типа до $T > (2-8)$ МК
- Для компенсации потерь короны требуется 10^4 горячих спикул.
- Магнитные петли способны нагреть корону Солнца только локально.
- SXR- вспышки на красных карликах можно связать с «работой» ≥ 50 петель с $I \geq 10^{13}$ А.
- Генерация X-излучения VV 10 и TVLM 513-46546 системой петель энергетически более выгодна по сравнению с однородной горячей короной. Потери корон из-за теплопроводности, на 1-2 порядка $>$ чем в короне Солнца
- Для нагрева корон УХ-звёзд горячими спикулами необходимо $\geq 10^6$ спикул, занимающих $\geq 50\%$ поверхности звезды.

Петлями обеспечивается только локальный нагрев