

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Исследование механизмов нагрева корон  
звёзд поздних спектральных классов»**

**Аспирант:** Кронштадтов Павел Валерьевич

---

*(подпись аспиранта)*

**Научный руководитель:**

Зайцев Валерий Васильевич, д.ф.-м.н., профессор,  
зав. сектором 133

---

*(подпись научного руководителя)*

**Направление подготовки:**

03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки:**

01.04.03 Радиофизика

**Форма обучения:** очная

Нижний Новгород  
2018

## Введение

Проблема нагрева звездных корон – одна из актуальных в астрофизике [1-3]. Для короны Солнца ( $T \approx 10^6$  К) необходима скорость нагрева  $\sim 10^3$  эрг/см<sup>3</sup>с. Для звезд поздних спектральных классов с температурами корон  $\sim 10^7$ - $10^8$  К требуются ещё более мощные источники нагрева. В качестве возможных механизмов нагрева в литературе рассматривались омическая диссипация электрических токов, текущих вдоль магнитного поля [4,5], тиринг-неустойчивость [6,7], микровспышки [8,9], резонансная диссипация волн [10], испарение хромосферной плазмы [11,12].

В настоящее время общепризнанной является точка зрения, что солнечная корона структурирована и состоит из заполненных плазмой магнитных петель, температура и давление в которых изменяются в широких пределах [13-15]. В случае звезд прямое наблюдение магнитных петель пока невозможно, хотя в некоторых благоприятных случаях использование VLBI позволяет наблюдать их диски. Тем не менее, наличие магнитных петель в коронах других звезд, прежде всего – звезд поздних спектральных классов, предполагается и они активно исследуются непрямыми методами, например, путем анализа рентгеновского и радио излучения. Например, в работе [16] определены параметры петель для 44 звезд спектральных типов от F до M с помощью данных о мере эмиссии и времени затухания излучения в мягком рентгеновском излучении, полученных на Extreme Ultraviolet Explorer. Результаты исследования показали, что на всех указанных типах звезд могут существовать петли с длиной  $\leq 0,5 R_*$ , плотностью плазмы  $10^{11}$  -  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> и температурой  $10^7$  –  $10^8$  К.

Целью настоящей работы является исследование механизма нагрева плазмы в магнитных петлях и приложение полученных результатов к объяснению активности звезд поздних спектральных классов в рентгеновском и радио диапазонах. Мы обращаем внимание на важную роль конвективных потоков плазмы в фотосферных основаниях магнитных петель. Взаимодействие конвекции с магнитным полем приводит к генерации значительного электрического тока в магнитной петле. Диссипация этого тока за счет ионно-атомных столкновений в частично ионизованной плазме солнечной и звездных атмосфер создает мощный источник нагрева, который, в конечном итоге, приводит к нагреву плазмы в магнитной петле до «рентгеновских» температур. В работе предложена методика определения электрических токов в магнитных петлях и исследован их нагрев вследствие диссипации токов. На этой основе исследовано происхождение длительных вспышек мягкого рентгеновского излучения на красном карлике AD Leo, наблюдавшихся спутником Extreme Ultraviolet Explorer (EUVE) в период 1993-2000 гг. [16], проведен анализ

«модификации» прижатых атмосфер на звездах типа коричневых карликов, открывающий возможность реализации плазменного механизма радиоизлучения в коронах этих объектов. Кроме того, исследована генерация супердрейсеровских электрических полей в корональных магнитных петлях, обеспечивающих появление интенсивных потоков ускоренных электронов, и дано объяснение феномена постоянства толщины магнитных петель на больших масштабах в солнечной короне.

В первой главе рассмотрена общая структура магнитной петли с током. В частности рассмотрены процессы формирования магнитной петли, как результат увеличения локального потока магнитного поля, замороженного в фотосферную плазму, в узлах ячеек супергрануляции и генерации электрического тока в основании магнитной петли за счёт фотосферной конвекции.

Вторая глава посвящена методу описания корональной магнитной арки как эквивалентного электрического контура. Рассмотрен нагрев корон на звёздах поздних спектральных классов за счёт диссипации электрических токов корональных магнитных петель. Рассмотрена роль ионно-атомных столкновений в процессе нагрева корональной плазмы. Также рассмотрен тепловой баланс в магнитной петле с учётом нагрева плазмы электрическими токами, теплопроводности и потерь на излучение. Изложенный подход применён для объяснения физической природы рентгеновских вспышек и радиоизлучения красного карлика AD Leo и коричневого карлика TVLM 513-46546.

В третьей главе исследуется процесс ускорения частиц в магнитных петлях. По данным рентгеновских наблюдений в магнитных петлях присутствует большое число ускоренных электронов, которое не может быть объяснено процессами ускорения в короне. Поэтому было решено рассмотреть ускорение электронов в хромосфере, где концентрация плазмы выше, за счёт механизма с большой эффективностью, основанного на ускорении супердрейсеровскими электрическими полями. Рассмотрен процесс ускорения в результате развития неустойчивости Рэлея-Тейлора в основании магнитных петель, приводящий к генерации импульса электрического тока, распространяющегося вдоль магнитной петли. Показано, что на фронте импульса электрического тока может происходить генерация индукционных электрических полей достаточно большой величины, для того чтобы электроны находились в режиме «убегания», что приводит к ускорению значительной доли электронов до субрелятивистских скоростей. Кроме того, показана возможность ускорения ионов.

Четвёртая глава посвящена исследованию зависимости толщины токонесущей магнитной петли от высоты в солнечной короне. Рассмотрена проблема постоянства поперечного сечения корональных магнитных петель. Учитываются два инварианта –

сохранение потока продольного магнитного поля через поперечное сечение трубки и сохранение величины электрического тока через поперечное сечение. Показано, что если газокINETическое давление внутри трубки мало по сравнению с давлением продольного магнитного поля, то толщина трубки не меняется с высотой в короне, что характерно для большинства наблюдаемых в солнечной короне магнитных петель. В противоположном случае, когда газокINETическое давление превышает давление продольного магнитного поля, толщина трубки увеличивается с высотой с масштабом удвоенной шкалы высоты неоднородной атмосферы.

Основные результаты работы опубликованы в шести статьях [17-22] в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах: Известия Высших Учебных Заведений. Радиофизика, Geomagnetism and Aeronomy, Solar Physics, Astronomical Society of the Pacific: Conference Series;

а также докладывались и обсуждались на следующих конференциях [23-30]:

1. XIII Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy "Multi-wavelength Study of Stellar Flares and the Properties of Active Galactic Nuclei" (St.Petersburg, Russia, 25-29 May 2015);
2. Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2015» (Санкт-Петербург, 5-9 октября 2015), «Солнечная и солнечно-земная физика 2016» (Санкт-Петербург, 10-14 октября 2016), «Солнечная и солнечно-земная физика 2017» (Санкт-Петербург, 9-13 октября 2017);
3. XVII научной школы «Нелинейные волны – 2016» (Нижний Новгород, 27 февраля – 4 марта 2016), XVIII научной школы «Нелинейные волны – 2018» (Нижний Новгород, 26 февраля – 4 марта 2018).

## **Основные результаты**

1. Исследован механизм генерации электрических токов в атмосферах звезд поздних спектральных классов. Показано, что электрические токи возникают в результате наличия фотосферной конвекции, которая «сгребает» магнитное поле в тонкие магнитные трубки и формирует в фотосферных основаниях трубок электродвижущую силу в результате «зацепления» скорости конвекции и магнитного поля трубки. Предложен самосогласованный метод определения величины электрических токов, а также исследована эффективность их диссипации с учетом частичной ионизации плазмы в звездных атмосферах.

2. Исследовано происхождение длительных вспышек мягкого рентгеновского излучения на звезде AD Leo, наблюдавшихся спутником Extreme Ultraviolet Explorer.

Рассмотрен нагрев плазмы в корональных магнитных петлях звезды в результате диссипации электрических токов, генерируемых фотосферной конвекцией. Большая индуктивность петель как эквивалентных электрических контуров определяет значительное время нарастания тока в источнике и объясняет наблюдаемое время нагрева плазмы и время нарастания интенсивности рентгеновского излучения. Показано, что параметры рентгеновских источников в атмосфере AD Leo можно объяснить в предположении одновременной «работы» большого количества петель ( $N_L \geq 50 - 10^2$ ) с электрическими токами  $I \geq 10^{13} \text{ A}$ , которые на 1-3 порядка превышают электрические токи в корональных магнитных петлях на Солнце. Такое превышение может быть связано с повышенными значениями скорости фотосферной конвекции на звездах поздних спектральных классов по сравнению с Солнцем.

3. Установлена возможность существования в активных областях ультрахолодных звёзд (коричневых карликов) системы горячих корональных петель ( $B \sim 1 \text{ кГс}$ ) с электрическим током (до  $10^{12} \text{ A}$  в каждой), генерируемым фотосферной конвекцией. Доказана эффективность нагрева плазмы до  $2 \times 10^7 \text{ K}$  внутри петель за счёт диссипации этого тока, что позволяет объяснить мягкое рентгеновское и радиоизлучение таких звёзд. Для коричневого карлика TVLM 513-46546 определена характерная высота модифицированной атмосферы  $H \approx 5 \times 10^9 \text{ см}$ , которая оказалась в тысячу раз выше высоты приведённой атмосферы, т.е. порядка радиуса звезды  $R_* \approx 7 \times 10^9 \text{ см}$ . В результате этого на корональных уровнях плазменная частота превышает величину электронной гирочастоты – условие, необходимое для реализации плазменного механизма излучения.

4. Исследована генерация электрического поля на фронте импульса тока, возникающего в корональной магнитной петле при развитии в ее основаниях магнитной неустойчивости Рэля-Тейлора. В результате развития неустойчивости вдоль магнитной петли начинает распространяться импульс электрического тока, на фронте которого возможна генерация индукционного электрического поля  $E_z$ , направленного вдоль оси магнитной трубки, т.е. способного ускорять частицы. В случае достаточно больших токов, возникает нелинейный режим распространения импульса электрического тока и генерируется относительно большое продольное электрическое поле, которое в зависимости от величины электрического тока может превышать поле Драйзера. Для параметров атмосферы, соответствующих оптическим вспышкам на Солнце, супердрайзеровские электрические поля возникают, если электрические токи в корональных магнитных петлях превышают  $2 \times 10^{10} \text{ A}$ . В этом случае на фронте импульса тока ускоряется большое

количество электронов, достаточное для объяснения наблюдаемой интенсивности жесткого рентгеновского излучения.

5. Рассмотрено изменение с высотой толщины корональных магнитных петель, вдоль которых протекает электрический ток. Учитываются два инварианта – сохранение потока продольного магнитного поля через поперечное сечение трубки и сохранение величины электрического тока через поперечное сечение. Показано, что если газокINETическое давление внутри трубки мало по сравнению с давлением продольного магнитного поля, то толщина трубки не меняется с высотой в короне, что характерно для большинства наблюдаемых в короне магнитных петель. В противоположном случае, когда газокINETическое давление превышает давление продольного магнитного поля, толщина трубки увеличивается с высотой с масштабом удвоенной шкалы высоты неоднородной атмосферы. Увеличение толщины с высотой характерно для некоторых послевспышечных петель, характеризующихся повышенными значениями температуры и концентрации плазмы. Существование магнитных петель с неизменной толщиной свидетельствует о существовании внутри них больших электрических токов, играющих важную роль в активности солнечной и звездных корон.

## Список литературы

- [1] Priest E. R. ASP Conf.Ser., 158, 321 (1999)
- [2] Linsky J. L. Lecture Notes in Physics, 380, 452 (1991)
- [3] Linsky J. L. ASP Conf. Ser., 158, 401 (1999)
- [4] Holman G. D. Astrophys.J., 293, 584 (1985)
- [5] van Balegooijen A. A. Astrophys.J., 311 1001 (1986)
- [6] Spicer D. S. Solar Phys., 71, 115 (1981)
- [7] Galeev A. A. et al., Astrophys.J., 243, 301 (1981)
- [8] Guedel M. Astrophys.J., 480, L121 (1997)
- [9] Krucker S., Benz A. O. Solar Phys., 191, 341 (2000)
- [10] Айянсон. Astrophys.J, 276, 357 (1984)
- [11] Antonucci E., et al. Solar Phys., 78, 107 (1982)
- [12] Doschek G. A., Mariska J. T., Sakao T. Astrophys.J., 459, 823 (1996)
- [13] Vaiana G.S., Krieger A.S., & Timothy A.F. 1973, Sol. Phys., 32, 81
- [14] Rosner R., Tucker W.H., Vaiana G.S. 1978, Ap.J., 220 , 643-665
- [15] Aschwanden M.J., Schriver C.J., & Alexander, D. 2001, Ap.J., 550, 1036
- [16] Mullan D.J., Mathioudakis M., Bloomfield D.S., Christian D.F. 2006, ApJ, 164, 173-201
- [17] В.В. Зайцев, П.В. Кронштадтов, О нагреве магнитных петель в короне красного карлика AD Leo, Известия Высших Учебных заведений. Радиофизика, т. 59, № 3, стр. 189-197, 03.2016.
- [18] Zaitsev V.V., Kronshtadtov P.V., Stepanov A.V., Generation of superDreicer electric fields in the solar chromosphere, Geomagnetism and Aeronomy, Volume 56, Issue 7, pp. 903–907, 12.2016.
- [19] Zaitsev V.V., Kronshtadtov P.V., Stepanov A.V., Rayleigh-Taylor instability and excitation of super-Dreicer electric fields in the solar chromosphere, Solar Physics, Volume 291, Issue 11, pp. 3451–3459, 11.2016.
- [20] Zaitsev V.V., Kronshtadtov P.V., Stepanov A.V., Modification of “Pressed” Atmospheres in Active Regions of Ultracool Stars, Geomagnetism and Aeronomy, Volume 57, Issue 7, pp. 859–863, 12.2017.
- [21] Zaitsev V.V., Kronshtadtov P.V., On the Constancy of the Width of Coronal Magnetic Loops, Geomagnetism and Aeronomy, Volume 57, Issue 7, pp. 841–843, 12.2017.
- [22] Stepanov A.V., Zaitsev V.V., Kronshtadtov P.V., On the Origin of Intense Radio Emission from Ultracool Stars, Astronomical Society of the Pacific: Conference Series, Volume 510, Stars: From Collapse to Collapse, pp. 284-288, 06.2017.

- [23] В.В. Зайцев В.В., П.В. Кронштадтов, А.В. Степанов, Генерация супердрайсеровских электрических полей в солнечной хромосфере, Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2015», Санкт-Петербург, 5-9 октября 2015, стр. 149-152
- [24] В.В. Зайцев, П.В. Кронштадтов, А.В. Степанов, О модификации "прижатых" атмосфер в активных областях ультрахолодных звёзд, Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2016», Санкт-Петербург, 10-14 октября 2016, стр. 121-124
- [25] V.V. Zaitsev, P.V. Kronshtadtov, X-ray loops in the corona of the red dwarf AD Leo, Abstracts of the XIII Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy "Multi-wavelength Study of Stellar Flares and the Properties of Active Galactic Nuclei", St.Petersburg, Russia, 25-29 May 2015, pp. 25-26
- [26] В.В. Зайцев, П.В. Кронштадтов, А.В. Степанов, Генерация супердрайсеровских электрических полей в солнечной хромосфере, Тезисы Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2015», Санкт-Петербург, 5-9 октября 2015, стр. 30-31
- [27] П.В. Кронштадтов, Рентгеновские петли в короне красного карлика AD Leo, Тезисы докладов молодых учёных XVII научной школы «Нелинейные волны – 2016», Нижний Новгород, 27 февраля – 4 марта 2016, стр. 84
- [28] В.В. Зайцев, П.В. Кронштадтов, А.В. Степанов, О модификации "прижатых" атмосфер в активных областях ультрахолодных звёзд, Тезисы Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2016», Санкт-Петербург, 10-14 октября 2016, стр. 46
- [29] В.В. Зайцев, П.В. Кронштадтов, О постоянстве поперечного сечения корональных магнитных петель, Тезисы Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2017», Санкт-Петербург, 9-13 октября 2017, стр. 56
- [30] П.В. Кронштадтов, В.В. Зайцев, Постоянство поперечного сечения корональных магнитных петель, Тезисы докладов молодых учёных XVIII научной школы «Нелинейные волны – 2018», Нижний Новгород, 26 февраля – 4 марта 2018, стр. 83