

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛИТРОПНОГО ИНДЕКСА ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОГО КОРОНАЛЬНОГО ДОЖДЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

З.М.ВАШАЛОМИДЗЕ¹, Т.В.ЗАКАРАШВИЛИ^{1,2,3}, В.Д.КУХИАНИДЗЕ¹

Поступила 23 сентября 2018

Принята к печати 12 декабря 2018

Для оценки зависимости плотности электронов и температуры до и после события коронального дождя во время активного Солнца на период времени с 20:10 UT 6 октября по 02:10 UT 7 октября 2011г., использовался метод анализа меры дифференциальной эмиссии (DEM). Наблюдательные данные получены из SDO/AIA в шести различных спектральных линиях экстремального ультрафиолетового диапазона (EUV). В данном интервале времени было проанализировано 240 различных корональных петель, также была определена средняя плотность и температура электронов. Использовались фильтры 171 Å (Fe IX) и 193 Å (Fe XII). Отношение между плотностью и температурой позволило оценить политропный индекс в солнечной короне до и после коронального дождя. Политропный индекс после окончания коронального дождя оценивался как $\gamma = 1.3 \pm 0.06$, что указывает на обычные термодинамические свойства корональной плазмы в основном состоянии. Однако политропный индекс в момент начала коронального дождя оценивался как $\gamma = 2.1 \pm 0.11$, что указывает на неустойчивый термодинамический процесс, т.е. на термическую нестабильность. Предполагается, что корональный дождь образуется вследствие неустойчивого процесса, в то время как после дождя корональная плазма возвращается в свое стабильное состояние.

Ключевые слова: *корональный дождь; солнечная корона; солнечная атмосфера*

1. *Введение.* Корональный дождь состоит из холодных плотных плазменных капель, падающих вдоль солнечных корональных петель в направлении их опорных точек. Капли быстро формируются в корональных петлях вследствие тепловой неустойчивости посредством экстремально-быстрого охлаждения, при котором радиационные потери превосходят теплоотдачу [1-7]. Murawski et al. [8] предположили, что корональный дождь может образовываться из-за энтропийных мод в нулевых точках во время нановспышек, происходящих в короне. Энтропийный режим характеризуется усилением локальной плотности и уменьшением температуры. Оттоки пересоединения уносят холодные капли из нулевых точек, формируя корональный дождь.

При аналитическом исследовании солнечной короны политропный индекс или отношение удельных теплоемкостей является ключевым параметром в

теплофизике и термодинамике. Когда теплообмен не происходит между петлями и окружающей средой, тогда политропный индекс преобразуется в адиабатический индекс. Для квазиадиабатических процессов величина политропного индекса находится в диапазоне $\gamma \in [1; 5/3]$. Однако во время термической нестабильности или связанных процессов, величина политропного индекса может превышать $\gamma = 5/3$. Первая оценка адиабатического индекса в солнечной короне была сделана Van Doorslaere et al. [9] с использованием данных EIS/Hinode. Используя зависящий от времени спектроскопический метод, они обнаружили медленные магнитоакустические колебания в электронной плотности. Известное соотношение между изменением температуры и плотности позволило оценить адиабатический индекс.

Для изучения формирования и тепловой эволюции системы корональных петель, в данной работе используется метод меры дифференциального излучения (DEM).

Первый метод DEM для исследования солнечной корональной плазмы был разработан Флудрой и Сильвестром [10]. Несколько лет спустя Brosius et al. [11] скорректировали метод итерационной аппроксимации кубическими сплайн-функциями. Время от времени использовались другие методы, такие как: метод Монте-Карло с применением цепей Маркова [12], аппроксимация одногауссовскими [13-22] и многогауссовскими функциями [14]. Автоматизированная прямая аппроксимация одногауссовского распределения DEM с автоматическим кодом обнаружения петли с большой статистикой и термическим анализом корональных петель была разработана в [22]. Мы использовали доступный в SSW (SolarSoftWare) код DEM, предложенный в [22]. Этот автоматизированный анализ данных был разработан для восстановления электронных температур, электронных плотностей и некоторых геометрических параметров корональных петель из наблюдаемого движения плазм в шести EUV-каналах солнечной динамической обсерватории (SDO).

2. Наблюдение и анализ данных. Исследуемый корональный дождь наблюдался SDO/AIA 6 октября 2011г. на восточной окраине Солнца вблизи активного региона AR 11312 в течение 6 часов между 20:10 UT 6 октября и 02:10 UT 7 октября 2011г. Мы использовали шесть экстремально ультрафиолетовых узкополосных фильтров: 171 Å, 193 Å, 211 Å, 94 Å, 335 Å и 131 Å с 1".6 эффективным пространственным разрешением [23]. Эти линии соответствуют корональной температуре от $10^{5.8}$ K до $10^{7.2}$ K. Спутниковые данные загружались стандартным пакетом SSW и анализировались с помощью автоматизированных инструментов анализа AIA, который включает в себя определение распределений DEM, температуры и излучения [22].

Формирование коронального дождя связано с быстрым охлаждением

корональных петель [24]. Карты излучения и температуры производятся по DEM-коду [14]. Карты активной области взяты 6 октября 2011г. в 20:10 UT (верхняя левая панель на рис.1). Корональные петли хорошо видны на логарифмических картах излучения в момент времени 20:10 UT (указанные белой стрелкой), но в конце коронального дождя (на нижней левой панели) к моменту времени 02:10 UT они постепенно тускнеют. Температурные карты, полученные по шести длинам волн AIA, покрывающих диапазон температур $\log(T) = 5.8 - 7.2$ К, со шкалой температур, показанной как вертикальная полоса, показывают более высокую температуру на вершине

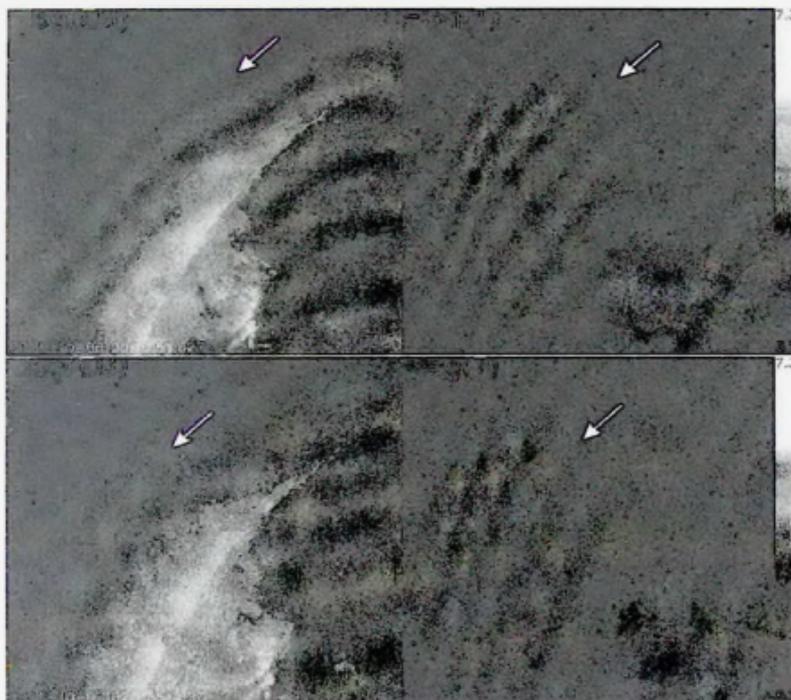


Рис.1. Карты температуры и излучения в начале и в конце коронального дождя. Карты мер эмиссии показаны на верхней и нижней панелях слева, на правой верхней и нижней панелях показаны карты температуры. В начале коронального дождя на эмиссионной карте на правой верхней панели показана (белая стрелка верхняя левая панель) высокая температура на вершине петли. В конце коронального дождя на эмиссионных картах петли почти исчезли (левая нижняя панель), но температура к концу события по-прежнему остается высокой (нижняя правая панель).

корональной петли (рис.1 правая верхняя панель). В конце коронального дождя температура по-прежнему высокая $\log(T) \approx 6.2 - 6.4$ К (рис.1, нижняя правая панель).

Программа измерения температуры и измерения излучений выполняет аппроксимацию одногауссовских распределений DEM, определяет максимальную эмиссию, максимальную температуру и температуру для каждого пикселя [22]. Общее распределение DEM для активного региона AR 11312 показывает основной пик при температуре $\log(T) \approx 6.2$ К.

3. *Автоматическое определение корональной петли и температурный анализ.* Корональный дождь связан с индивидуальной структурой корональной петли, поэтому после обработки активной области AR 11312 мы проанализировали отдельные корональные петли. Для автоматического обнаружения и анализа корональных петель мы использовали ориентированный коронный криволинейный цикл (OCCULT) код [11-12]. Код включает автоматическое обнаружение, извлечение и отслеживание линейных функций кривой, которые настроены на изображения Solar EUV и SXR [22]. В начале коронального дождя OCCULT автоматически обнаружил 240 петлеобразных объектов. Большинство петель появлялись в линиях 171 Å (Fe IX), 193 Å (Fe XII) и 211 Å (Fe XIV). Однако в течение последующих четырех часов количество петель значительно уменьшилось, очевидно, этот факт связан с уменьшением температуры корональных петель. Применяя код DEM, невозможно проследить потерянные (охлажденные) петли, если бы они появлялись на длине волны 304 Å, которая соответствует более низкой температуре.

Мы использовали следующие параметры управления: минимальный радиус кривизны петель $r_{min} = 30$ пикселей, типичная полуширина петли $\omega = 4$ пикселей, $n_{sig} = 1.0$ пороговый уровень в стандартных отклонениях потока, минимальный коэффициент заполнения структуры трассировки $g_{min} = 0.35$. Структуры трассировки комбинированного цикла на всех шести длинах волн показаны на рис.2.

Код OCCULT с автоматизированным методом установки DEM дает нам автоматически определяемые меры излучения и температуры сегментов корональной петли [19,20,22]. Анализ выполнялся для 240 автоматически обнаруженных корональных петель, которые были разбиты на 1355 подсегментов. Пример показан на длине волны AIA 171 Å (Fe IX). На рис.3 показан автоматически обнаруженный цикл с профилями поперечного сечения потока вдоль корональной петли (верхняя левая панель рис.3) и одногауссовскими параметрами аппроксимации DEM. Этот цикл включает в себя: электронную температуру вдоль корональной петли и гауссовую температурную ширину, обозначенную как полосы (интервалы) ошибок значений температуры,

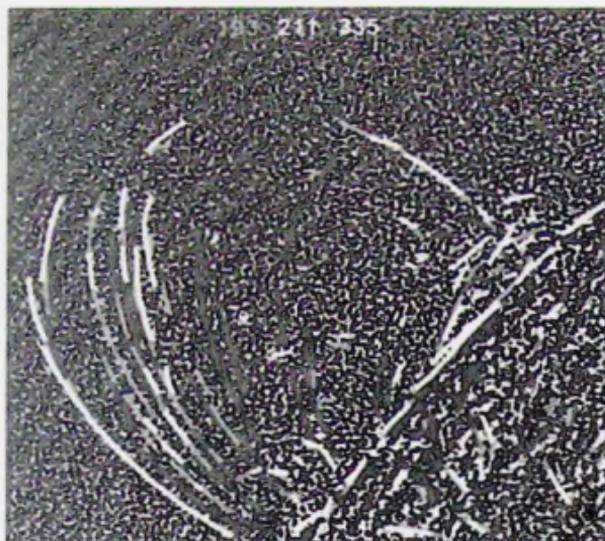


Рис.2. Корональные петли, автоматически определяемые кодом OCCULT в шести длинах волн. Разные оттенки представляют разные каналы EUV (длины волны указаны в верхней части изображения).

плотности электронов вдоль петли, ширину петли и оценку аппроксимации (рис.3, справа от средней до нижней панели). Как было указано ранее, петля лучше всего видна в фильтре 171 Å (Fe IX) [22].

Автоматизированный набор DEM в 240 прослеживаемых сегментах корональной петли в начале и конце коронального дождя показан на рис.4, 5. Статистика показывает пиковую температуру петли на $\log(T) = 6.3 - 6.6$ К (средние левые панели), плотность электронов в ней составляет около $\log(n_e) = 9.13 \pm 0.42$ см⁻³ (средняя правая панель); гауссова ширина распределения температуры DEM составляет $\sigma_T = 0.26 \pm 0.21$ (нижняя левая панель), а распределение ширины петли достигает $\omega = 3.2 \pm 1.7$ Мм. Измеренное излучение в зависимости от температуры подчиняется закону масштабирования Rosner, Tucker и Vaiana (RTV) [25], который устанавливает связь между максимальной температурой, давлением и длиной петли (диагональная полоса показывает предсказанный закон масштабирования RTV для корональных петель с длиной между 10-108 Мм и 4, и 5, верхняя левая панель).

Давление газа p определяется из закона идеального газа:

$$p = n_e k_B T, \quad (1)$$

AIA20111006_2010 - Loop#171/18

171 Å

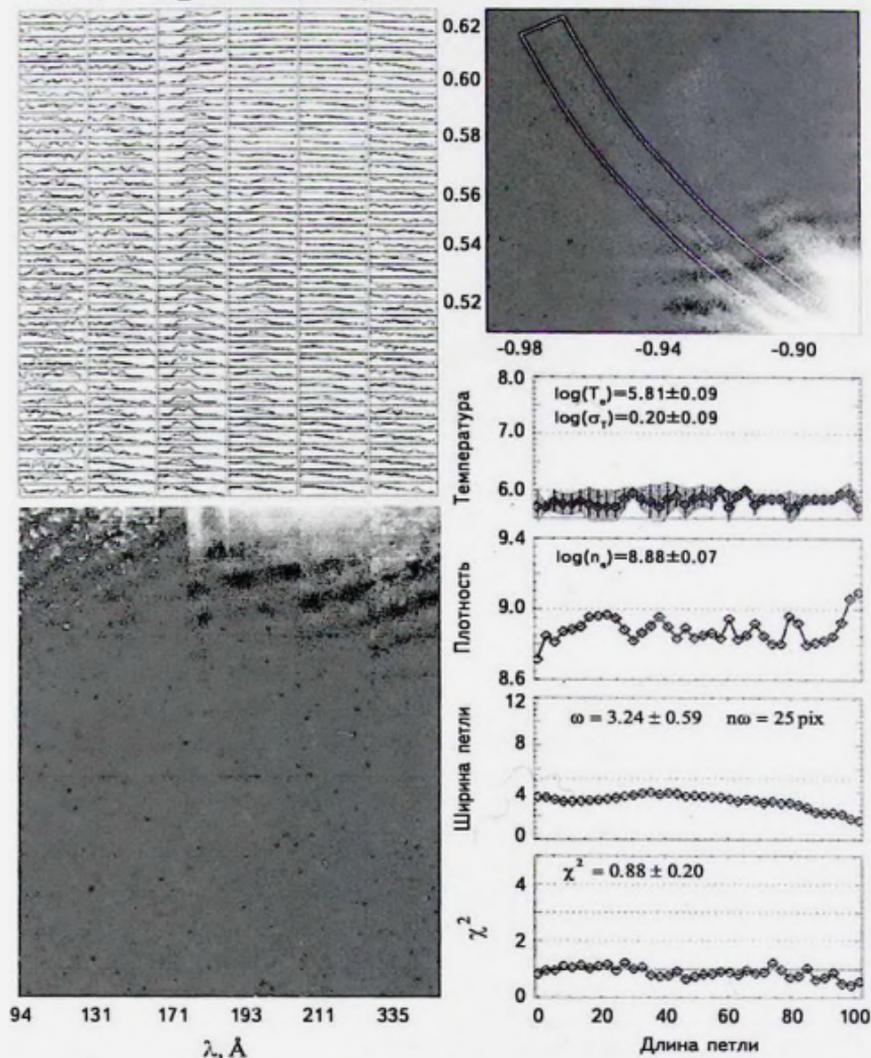


Рис.3. Верхняя правая панель: частичное изображение автоматически обнаруженного контура в 171 Å фильтре. Верхняя левая панель: профили потока поперечного сечения. Нижняя левая панель: сегменты петли выреза на разных длинах волн. Четыре нижних левых панели (сверху вниз): наилучшие значения пиковой температуры DEM, плотности электронов, ширины петли и оценки χ^2 приближения.

где k_B - постоянная Больцмана, n_e - плотность числа электронов, а T - температура. Политропные процессы описываются уравнением:

$$p^{1-\gamma} T^\gamma = \text{const}, \quad (2)$$

где γ - отношение удельных теплоемкостей и величина которой обычно

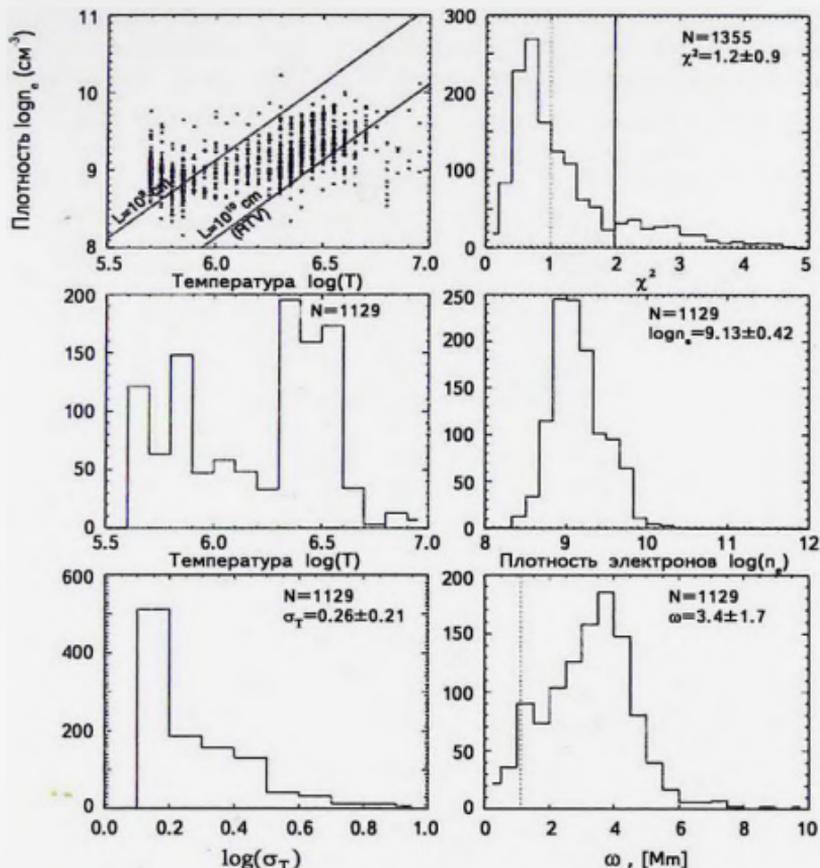


Рис.4. Статистика автоматизированного набора DEM в 240 прослеживаемых корональных петлях, разбитых на 1355 подсегментов в начале коронального дождя. В верхнем левом углу: плотность электронов относительно электронной температуры с законом скейлинга, Rosner et al. [25]. Средний ряд слева: распределение температур корональной петли. Внизу слева: распределение ширины гауссовой температуры. Вверху справа: распределение оценки χ^2 одногауссовых аппроксимаций. Средний справа: распределение плотности электронов. Внизу справа: распределение ширины шлейфа.

лежит в диапазоне $\gamma \in [1; 5/3]$. Из уравнений (1)-(2) можно получить теоретическое соотношение между численностью электронов и температурой в политронных процессах:

$$(\gamma - 1)\log(n) = \log(T) - \log \frac{\text{const}}{k^{1-\gamma}} \quad (3)$$

С другой стороны, статистические значения меры излучения и температуры во многих корональных петлях позволяют построить зависимость между плотностями электронов и температурой. На рис.6 показана зависимость

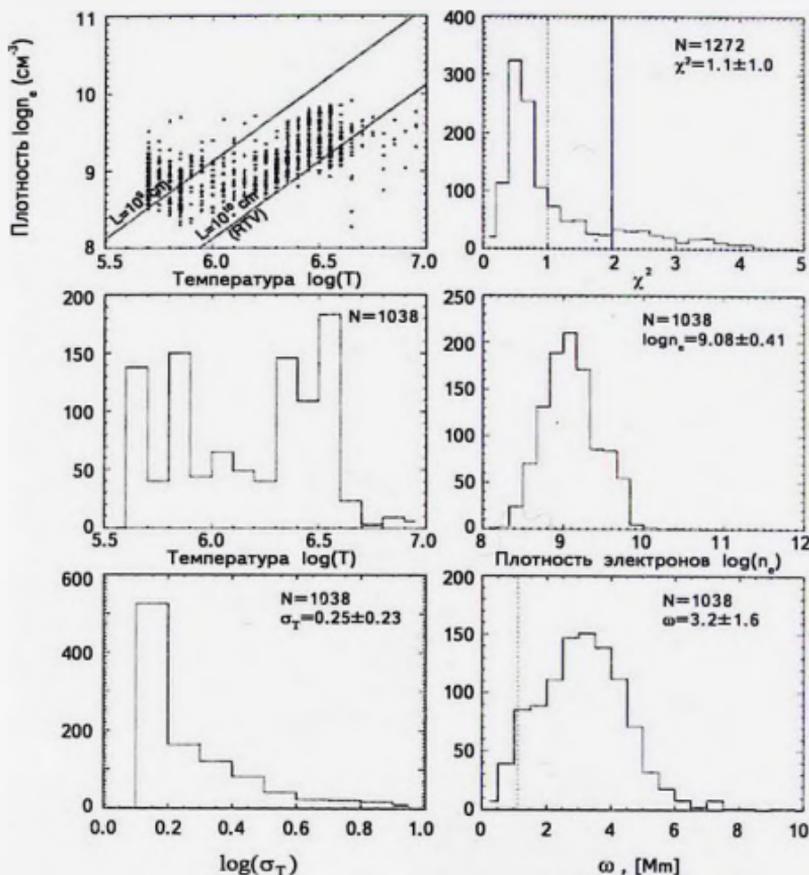


Рис.5. То же, что и на рис.4, но для окончания коронального дождя.

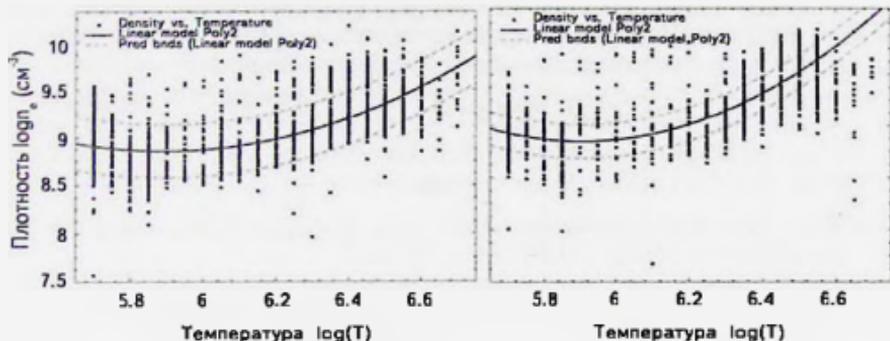


Рис.6. Плотность электронов относительно электронной температуры в начале коронального дождя с полиномиальной аппроксимацией (сплошная кривая, левая панель) и 95%-ным уровнем достоверности (пунктирные кривые, левая панель). Правая панель рисунка представляет собой плотность электронов относительно электронной температуры в конце коронального дождя с полиномиальным фитингом (сплошная кривая правой панели) и 95%-ными уровнями достоверности (штриховые кривые правой панели).

плотности электронов от электронной температуры и соответствующий фитинг полиномом второй степени в начале и конце коронального дождя. В конце коронального дождя адиабатический индекс оценивается как $\gamma = 1.3 \pm 0.06$, как и ожидалось, между изотермическими ($\gamma = 1$) и адиабатическими ($\gamma = 5/3 = 1.66$) процессами. Кроме этого, в начале коронального дождя адиабатический индекс оценивается как $\gamma = 2.1 \pm 0.11$, что означает, что процесс не квазиадиабатичен при начале формирования коронального дождя. Более высокое значение γ , вероятно, указывает на существование экстремального охлаждения.

4. Выводы. Мы проанализировали измерение температуры и эмиссии в солнечной короне вблизи активной области с автоматическим кодом AIA/SDO DEM [22]. 240 корональных петель были автоматически обнаружены и проанализированы с использованием кода DEM в шести каналах EUV во время коронального дождя, происшедшего с момента времени 20:10 UT 6 октября по 02:10 UT 7 октября 2011г. Автоматически определяемая средняя температура контура, температурная ширина, плотность электронов и ширина петли показывают значения $\log(T) = 6.3 - 6.6$ K, $\sigma_T = 0.26 \pm 0.21$, $\log(n_e) = 9.13 \pm 0.42$ см⁻³ и $\omega = 3.2 \pm 1.7$ Мм, соответственно. Контурный график распределения плотности электронов по сравнению с электронным распределением автоматически обнаруженных сегментов корональной петли позволяет оценить адиабатический индекс в начале и в конце протекания коронального дождя.

Мы получаем $\gamma = 1.3 \pm 0.06$ в конце коронального дождя, т.е. 02:10 UT 7 октября. Это число находится между изотермическими и адиабатическими значениями и, следовательно, может соответствовать устойчивой корональной плазме. В начале дождя (20:10 UT от 6 октября) индекс был оценен как $\gamma = 2.1 \pm 0.11$, что означает некоторую тепловую нестабильность, по всей видимости, связанную с экстремально-быстрым охлаждением, которое запускает механизм образования коронального дождя.

Работа была поддержана Национальным научным фондом им. Шота Руставели (SRNSF) [PhDF2016_147] и грантом 217146.

¹ Абастуманская астрофизическая обсерватория им. Е.К.Харадзе, Государственный университет им. Ильи, Тбилиси, Грузия, e-mail: zurab.vashalomidze.1@iliauni.edu.ge teimuraz.zaqarashvili@uni-graz.at vaso@iliauni.edu.ge

² Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Schmiedstrasse 6, 8042 Graz, Austria

³ IGAM-Kanzelhoehe Observatory, Institute of Physics, University of Graz, Universitätsplatz 5, 8010 Graz, Austria

MEASUREMENT OF THE POLYTROPIC INDEX DURING THE SOLAR CORONAL RAIN USING THE ELECTRON DENSITY DISTRIBUTION DIAGRAM AS A FUNCTION OF THE ELECTRON TEMPERATURE

Z.M.VASHALOMIDZE¹, T.V.ZAQARASHVILI^{1,2,3}, V.D.KUKHIANIDZE¹

We use differential emission measure (DEM) analysis tool to estimate electron density and temperature relation before and after of coronal rain event in the solar active during 20:10 UT October 6 and 02:10 UT October 7, 2011. Observational data are obtained from SDO/AIA in six different EUV spectral lines. We analysed 240 different coronal loops during this time and determined mean electron number density and temperature using 171 Å (Fe IX) and 193 Å (Fe XII) filters. Estimated relationship between density and temperature allowed us to estimate the polytropic index in the solar corona before and after coronal rain events. The polytropic index after the end of coronal rain was estimated as $\gamma = 1.3 \pm 0.06$, which shows usual thermodynamic properties of study-state coronal plasma. However, the polytropic index at the start time of coronal rain was estimated as $\gamma = 2.1 \pm 0.11$, which

indicates to unstable thermodynamic process i.g. thermal instability. Therefore, we suggest that the coronal rain is formed due to the unstable process and the coronal plasma returns to the stable state after the coronal rain.

Keywords: *Coronal Rain: Solar Corona: Solar Atmosphere*

ЛИТЕРАТУРА

1. *S.K.Antiochos, P.J.MacNeice, D.S.Spicer et al.*, *Astrophys. J.*, **512**, 985, 1999.
2. *P.Antolin, K.Shibata, G.Vissers*, *Astrophys. J.*, **716**, 154, 2010, *P.Antolin, E.Verwichte*, *Astrophys. J.*, **736**, 121, 2011.
3. *P.Antolin, L.Roupe van der Voort*, *Astrophys. J.*, **745**, 152, 2012.
4. *P.Antolin, G.Vissers, L.Roupe van der Voort*, *Sol. Phys.*, **280**, 457, 2012.
5. *G.B.Field*, *Astrophys. J.*, **142**, 531, 1965.
6. *E.N.Parker*, *Astrophys. J.*, **117**, 431, 1953.
7. *C.J.Schrijver*, *Solar Phys.*, **198**, 325, 2001.
8. *K.Murawski, T.V.Zaqarashvili, V.M.Nakariakov*, *Astron. Astrophys.*, **533**, A18, 5, 2011.
9. *T. Van Doorselaere, N.Wardle, G. Del Zanna et al.*, *ApJL*, 727:L32 (4pp), 2011.
10. *A.Fludra, J.Sylwester*, *Solar Phys.*, **105**, 323, 1986.
11. *J.W.Brosius, J.M.Davila, R.J.Thomas et al.*, *Astrophys. J. Suppl.*, **106**, 143, 1996.
12. *V.Kashyap, J.J.Drake*, *Astrophys. J.*, **503**, 450, 1998.
13. *M.J.Aschwanden, L.W.Acton*, *Astrophys. J.*, **550**, 475, 2001.
14. *M.J.Aschwanden, P.Boerner*, *Astrophys. J.*, **732**, 81, 2011.
15. *M.J.Aschwanden, P.Boerner, C.J.Schrijver et al.*, *Solar Phys.*, 283:5-30, 2013.
16. *M.J.Aschwanden, R.W.Nightingale*, Elementary loop structures in the solar corona analyzed 387 from TRACE triple-filter images. *Astrophys. J.*, **633**, 499-517, 2005.
17. *M.J.Aschwanden, C.J.Schrijver*, *Astrophys. J. Suppl.*, **142**, 269, 2002.
18. *M.J.Aschwanden*, *Physics of the Solar Corona* (Praxis/Springer, Chichester/New York), 2004.
19. *M.J.Aschwanden*, *Sol. Phys.*, **262**, 235, 2010a.
20. *M.J.Aschwanden*, *Sol. Phys.*, **262**, 399, 2010b.
21. *M.J.Aschwanden*, *Sol. Phys.*, **262**, 399, 2010.
22. *M.J.Aschwanden*, *Sol. Phys.*, 283:5-30 DOI 10.1007/s11207-011-9876-5, 2013.
23. *J.R.Lemen, A.M.Title, D.J.Akin et al.*, *Sol. Phys.*, **275**, 17, 2012.
24. *Z.Vashalomidze, V.Kukhianidze, T.V.Zaqarashvili et al.*, *Astron. Astrophys.*, **577**, id. A136, 2015.
25. *R.Rosner, W.H.Tucker, G.S.Vaiana*, *Astrophys. J.*, **220**, 643, 1978.

