

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 120, № 3, 12–17 (2024)

УДК 523.9

Анализ событий в ходе вспышки M 2.5 7 июня 2011 года

Ю.А. Купряков^{1,2}, В.А. Малотин¹, К.В. Бычков¹, О.М. Белова¹, А.Б. Горшков¹¹ Астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Университетский пр., 13, Москва, 119234, Россия² Astronomical Institute AS CR, Fričova 298, 25165 Ondřejov, Czech Republic
kupry@asu.cas.cz

Поступила в редакцию 10 августа 2024 г.

Аннотация. Объектом изучения являются фрагменты падающего вещества в ходе вспышки класса M2.5 7 июня 2011 г. в активной области NOAA 11226. Наблюдения проводились на горизонтальной солнечной установке HSFA-2 и многокамерном вспышечном спектрографе MFS (Ondřejov Observatory). Следы фрагментов были обнаружены в линиях CaII H, H α и H β . После редукции спектров линий были вычислены потоки поглощения для четырех моментов времени, а затем решалась система уравнений баланса для населенностей дискретных уровней и состояния ионизации атома водорода и иона CaII. Излучение рассматривалось в приближении однородного слоя нагретого газа. Параметры газа подбирались таким образом, чтобы наблюдаемые и теоретические потоки совпали с точностью лучше 5%. Расчеты показали, что диапазон температуры рассматриваемого сгустка T варьируется от 7 до 12 тысяч К, колонковая концентрация N составляет $1\text{--}5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$, турбулентная скорость изменяется от 6 до 21 км/с.

Ключевые слова: хромосферная вспышка, протуберанец, поток излучения однородного слоя нагретого газа

1 Введение

Вспышечные процессы в нижней солнечной атмосфере обычно наблюдаются в виде двух параллельных лент с излучением в широком диапазоне электромагнитного спектра. Эмиссию из таких лент можно стимулировать высыпанием ускоренных частиц, джоулевым нагревом за счет электрических токов, тепловым потоком электронов из места первичного энерговыделения или сочетанием этих процессов, действующих совместно. Стандартная модель вспышки (Brown, 1971) предполагает, что первичное энерговыделение происходит за счет магнитного пересоединения. Процесс происходит высоко в короне. Явления в нижних слоях атмосферы представляют собой реакцию на это энерговыделение. Однако есть свидетельства того, что выделение энергии может происходить непосредственно в нижних областях солнечной атмосферы (Fletcher et al., 2011). В этом случае ленты вспышек также могут генерироваться первоначальным энерговыделением в нижних слоях солнечной атмосферы. Вспышечная аркада имеет большое значение для понимания солнечных вспышек, поскольку скорость рассеяния возможных источников тепла сильно зависит от величины так называемого коэффициента заполнения излучающей плазмы. Важное значение имеет тонкая структура вспышки, давно подмеченная в Severnyi (1957). Недавно Krucker et al. (2011) обсуждали результаты оптических наблюдений вспышечных лент с помощью Hinode для модели “толстой мишени”. Потоки нетепловых электронов на единицу площади, оцененные в рамках этой модели, могут быть объяснены только предположением о неожиданно высокой плотности ускоренных электронов. В данной ситуации меньшие значения коэффициента заполнения могут привести к еще более экстремальным значениям плотности потока нетепловых частиц. Кроме того, рентгеновское, микроволновое и радиоизлучение явно состоят из множества организованных тонких петель (Zimovets et al., 2013), которые также наблюдаются TRACE в УФ-диапазоне (Xu et al., 2012). Таким образом, следует исследовать и обсудить наблюдения вспышечных ядер в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

2 Наблюдения

Вспышка SOL2011-06-07 наблюдалась нами на двух спектрографах MFS и HSFA-2 (Ondřejov Observatory). Начало вспышки приходится на 6:16 UT, импульсная фаза продолжается с 6:16 UT примерно до 6:45 UT, а фаза затухания длится более двух часов. На рис. 1 показан монтаж изображений: спектр в линии $H\alpha$; снимок хромосферы SJ (slit jaw – изображение на щели) и положение протуберанца; спектр и снимок хромосферы на момент 06:40:34 UT; снимок протуберанца на момент 08:00:35 UT. Все изображения получены на спектрографе MFS.

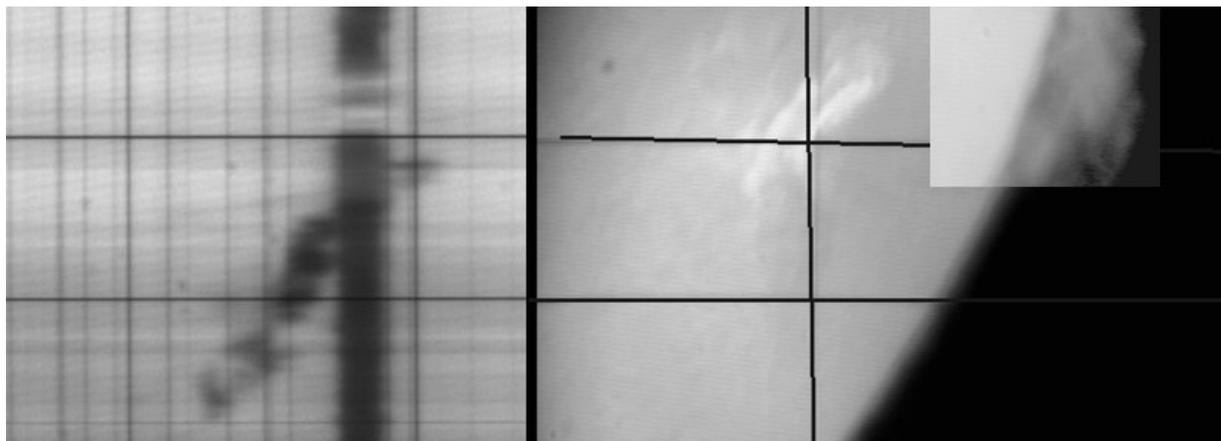


Рис. 1. Монтаж кадров с MFS (слева направо): спектр $H\alpha$, SJ, протуберанец

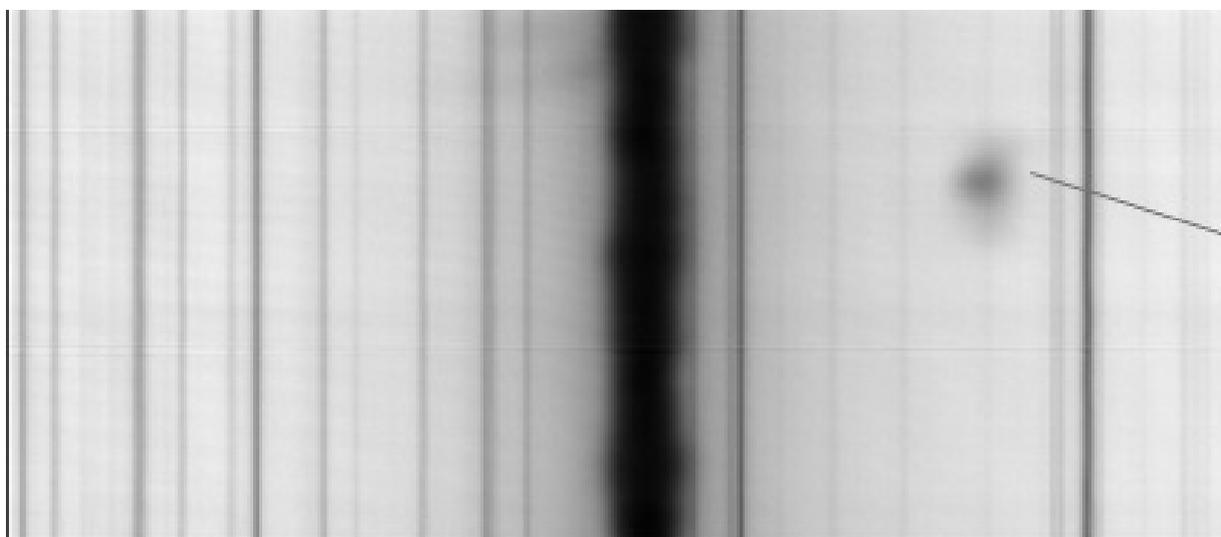


Рис. 2. Спектр в линии $H\alpha$ и след от фрагмента протуберанца (положение отмечено отрезком). Значение лучевой скорости составляет 270 км/с

На рис. 2 приведен спектр в линии $H\alpha$, полученный на спектрографе HSFA-2 (хорошо заметен падающий фрагмент протуберанца). Этот спектрограф позволяет наблюдать одновременно в линиях $CaII H$, $H\epsilon$, $H\beta$, $D3$, $H\alpha$ и $CaIR 8542 \text{ \AA}$. Для обработки были выбраны четыре момента с хорошо заметным изображением фрагмента протуберанца на SJ. После учета снимков плоского (flat-field frame) и темного поля (dark frame) были построены профили линий с учетом излучения подложки

хромосферы (см. рис. 3). Видно, что только в линиях CaII H, H β и H α удалось обнаружить следы этих фрагментов. Затем определены значения потоков в эрг/с/см² (таблица 1).

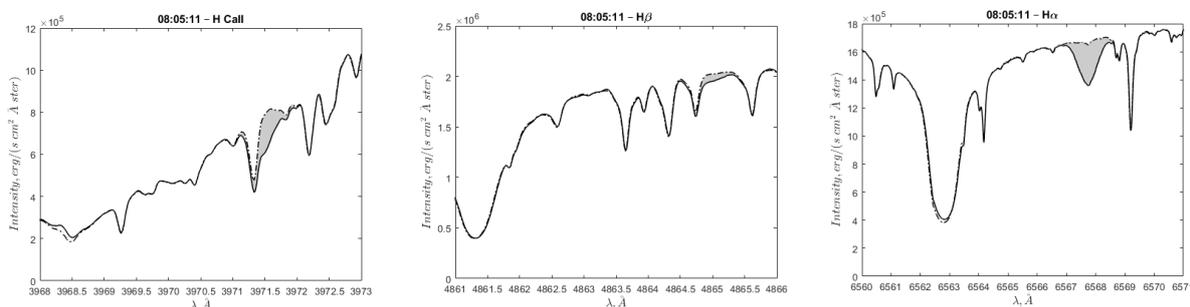


Рис. 3. Профили линий CaII H, H β и H α (заштрихованные области соответствуют потокам в эрг/с/см²)

Таблица 1. Измеренные значения потоков для четырех моментов времени, эрг/с/см². Ошибка вычислений: H α , CaII H – < 5%, H β – < 10%. В скобках указан десятичный порядок числа

| Time | 07:52:46 | 08:01:46 | 08:02:03 | 08:05:11 |
|------------|----------|----------|----------|----------|
| H α | 1.73(+6) | 1.18(+6) | 2.68(+6) | 3.03(+6) |
| H β | 5.50(+5) | 1.60(+5) | 5.90(+5) | 5.90(+5) |
| CaII H | 6.52(+5) | 3.02(+5) | 6.14(+5) | 8.07(+5) |

3 Методика расчетов

Решалась система уравнений для населенностей дискретных уровней и состояния ионизации атома водорода и иона CaII. Учитывались основные элементарные процессы заселения уровней: связанно-связанные, связанно-свободные и свободно-связанные ударные и радиационные переходы в поле фотосферного излучения (считается чернотельным с температурой $T_{\text{ph}} = 5500$ К). Модель атома водорода включает 18 дискретных уровней, иона кальция – 22 уровня. Учет рассеяния в спектральных линиях сделан в приближении вероятности выхода кванта. Атомные данные атома H I взяты из Johnson (1972). Атомные данные иона CaII взяты из следующих источников: NIST (энергии уровней и силы осцилляторов в поглощении), TOPBASE, Cunto, Mendoza (1992) (сечения фотоионизации), Melendez et al. (2007) (ударное возбуждение и деактивация), Seaton (1964) (ударная ионизация). Профиль коэффициента поглощения в линиях водорода определялся сверткой контуров Доплера и Хольцмарка, а в линиях кальция – профилем Фойгта. Излучение рассматривалось в приближении однородного слоя нагретого газа. Параметры газа подбирались таким образом, чтобы наблюдаемые и теоретические потоки совпали с точностью лучше 5%. Параметры включают концентрацию газа n (см⁻³), толщину слоя L (км), колонковую плотность N (см⁻²) (является произведением предыдущих двух), температуру T (К), турбулентную скорость v_{turb} (км/с), а также T_{Ca} (К) – параметр, который имитирует вклад лаймановской серии (старше Ly β) в скорость фотоионизации кальция, по смыслу является температурой черного тела.

4 Результаты расчетов

В таблице 2 приведены интервалы параметров газового слоя: τ_{α} – оптическая толщина в линии H α ; τ_{H} – оптическая толщина в линии CaII H; $F(\text{H})$, $F(8542)$ – потоки в линии CaII H и инфракрасной линии кальция.

При объяснении излучения в исследуемых линиях источником нагрева и свечения газа считается джоулева диссипация. Из таблицы 2 видно, что даже при анализе эмиссии в трех оптических

Таблица 2. Расчетные параметры излучающего газа для каждого момента наблюдений

| Параметр | 7:52:46 | 8:01:46 | 8:02:03 | 8:05:11 |
|------------------------------|---------|----------|------------|------------|
| N (10^{19} см $^{-2}$) | 3.0–5.0 | 0.9–1.2 | 2.2–4.5 | 2.0–4.4 |
| T (10^3 K) | 6–8 | 6–18 | 8–11 | 10–12 |
| v_{turb} (км/с) | 6–7 | 9–10 | 15–18 | 20–21 |
| T_{Ca} (10^3 K) | 6.4–6.6 | 6.35–6.6 | 6.85–7.0 | 6.8–6.9 |
| τ_{α} | 1.4–1.5 | 0.2–0.3 | ~ 0.9 | ~ 0.7 |
| τ_{H} | 1.0–2.4 | 0.1–0.16 | 0.1–0.14 | ~ 0.1 |
| $F(\text{H})/F(8542)$ | 2.0–4.0 | 9.0–10.6 | 11.2–11.5 | 11.0–11.3 |

линиях удастся существенно ограничить диапазон параметров газового слоя. В рамках конкретного момента времени диапазон разброса колонковой плотности составляет около двух раз, а остальных входных параметров (T , v_{turb} , T_{Ca}) – гораздо меньше. Исключение составляет момент времени 08:01:46 UT, при котором слабые потоки ($F(\text{H}\beta)$, $F(\text{H CaII}) \sim 10^5$ эрг/с/см 2) и большое отношение $F(\text{H}\alpha)/F(\text{H}\beta)$ допускают большой диапазон параметров. Широкий набор реализуемых значений колонковой плотности вызван прозрачностью рассматриваемых линий: так, кроме первого момента наблюдений 7:52:46 UT, оптическая толщина в трех зарегистрированных линиях меньше единицы (см. столбцы τ_{α} , τ_{H} таблицы 2). О прозрачности газа также сообщает отношение потоков в бальмеровских линиях $F(\text{H}\alpha)/F(\text{H}\beta)$. Рост этого отношения со временем объясняется увеличивающейся прозрачностью в линии $\text{H}\alpha$, которая в свою очередь вызвана ростом микротурбулентной скорости v_{turb} . Надежным ограничителем возможных значений входных параметров является отсутствие зарегистрированного излучения в линии гелия HeI D3 и инфракрасной линии кальция $\text{CaII IR } \lambda = 8542 \text{ \AA}$. Так, верхняя граница значений колонковой плотности и температуры в таблице 2 зафиксирована именно исходя из теоретических значений потока в линии D3, которые в расчетах ограничивались на отметке $\sim 10^5$ эрг/см 2 /с. Именно такой порядок величины имеют самые слабые наблюдаемые потоки. В таблице 3 приведены конкретные примеры входных параметров газового слоя и других рассчитанных величин.

Таблица 3. Примеры расчетных потоков и параметров газа, потоки приведены в единицах эрг/с/см 2 . В скобках указан десятичный порядок числа

| Параметр | 7:52:46 | 8:01:46 | 8:02:03 | 8:05:11 |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| n (10^{10} см $^{-3}$) | 8.2 | 1.0 | 2.2 | 2.3 |
| L (10^3 км) | 4.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| T (10^3 K) | 7.0 | 10.0 | 9.5 | 12.0 |
| v_{turb} (км/с) | 6.5 | 9.0 | 16.2 | 20.0 |
| T_{Ca} (10^3 K) | 6.5 | 6.4 | 6.9 | 6.85 |
| $F(\text{H}\alpha)$ | 1.73(+6) | 1.20(+6) | 2.69(+6) | 3.03(+6) |
| $F(\text{H}\beta)$ | 5.49(+5) | 1.57(+5) | 5.94(+5) | 5.89(+5) |
| $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ | 3.16 | 7.63 | 4.52 | 5.15 |
| $F(\text{H})$ | 6.55(+5) | 3.02(+5) | 6.18(+5) | 8.08(+5) |
| $F(\text{H})/F(8542)$ | 2.17 | 11.1 | 11.3 | 11.1 |
| τ_{α} | 1.49 | 0.26 | 0.89 | 0.71 |
| τ_{H} | 2.16 | 0.15 | 0.11 | 0.10 |

5 Выводы

В рамках модели нагретого газа по излучению в трех линиях водорода и иона CaII получены параметры вещества исследуемого протуберанца (таблица 2) на интервале времени 7:52:46–08:05:11 UT. При анализе результатов можно сделать следующие выводы:

1. Потоки во все четыре момента времени удается объяснить в рамках тепловой модели однородного газа.
2. Увеличение крутизны декремента (отношение $F(\text{H}\alpha)/F(\text{H}\beta)$) объясняется уменьшением оптической толщины в $\text{H}\alpha$, которое является следствием увеличения турбулентной скорости $v_{\text{турб}}$.
3. Температура газа увеличивается от 6–8 до 10–12 тысяч К.
4. Колонковая плотность газа не меняется, что показывает малую роль испарения.
5. Температура T_{Ca} увеличивается, что говорит о росте потока лаймановских квантов.
6. Достаточно большие величины отношений потоков $F(\text{H})/F(8542)$ и ничтожные вычисленные потоки в HeI D3 не противоречат наблюдениям, в ходе которых не было зарегистрировано линии гелия и инфракрасной линии кальция.

Авторы благодарят коллективы Solar Dynamics Observatory, GOES и Ondřejov Observatory за предоставленную возможность проведения наблюдений и использование данных.

Литература

- Brown J.C., 1971. *Solar Phys.*, vol. 18, p. 489.
Cunto W., Mendoza C., 1992. *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.* vol. 23, p. 107.
Fletcher L. et al., 2011. *Space Sci. Rev.*, vol. 159, p. 19.
Johnson L.C., 1972. *Astrophys. J.*, vol. 174, p. 227.
Krucker S. et al., 2011. *Astrophys. J.*, vol. 739, p. 96.
Melendez M., Bautista M.A., Badnell N.R., 2007. *Astron. Astrophys.*, vol. 469, no. 3, p. 1203.
Seaton M.J., 1964. *Planetary Space Sci.*, vol. 12, pp. 55–74.
Severnyi A.B., 1957. *Soviet Astron.*, vol. 1, p. 668.
Xu Y., Cao W., Jing J., Wang H., 2012. *Astrophys. J.*, vol. 750, p. L7.
Zimovets I.V., Kuznetsov S.A., Struminsky A.B., 2013. *Astron. Lett.*, vol. 39, p. 267.

Analysis of events during the M 2.5 flare on June 7, 2011

Yu.A. Kupryakov^{1,2}, V.A. Maliutin¹, K.V. Bychkov¹, O.M. Belova¹, A.B. Gorshkov¹

¹ Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Universitetsky pr. 13, Moscow 119234, Russia

² Astronomical Institute AS CR, Fričova 298, 25165 Ondřejov, Czech Republic

kupry@asu.cas.cz

Abstract. The object under study is the falling fragments of prominence after the M 2.5 flare in the NOAA AR 11226 on June 7, 2011. Observations were carried out on the horizontal solar installation HSFA-2 and the multi-camera flare spectrograph MFS (Ondřejov Observatory). Traces of fragments were found in the CaII H, H α , and H β lines. After reducing the line spectra, absorption fluxes were calculated for four moments of time, and a system of equations was solved for the populations of discrete levels and the ionization state of the hydrogen atom and CaII ion. The radiation was considered in the approximation of a homogeneous layer of heated gas. The gas parameters were selected in such a way that the observed and theoretical flows coincided with an accuracy of better than 5%. Calculations have shown that the temperature range T varies from 7 to 12 thousand K, the column concentration N is $1\text{--}5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$, and the turbulent speed varies from 6 to 21 km/s.

Key words: chromospheric flare, prominence, radiation flux, homogeneous layer of heated gas