

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ МОДЕЛИ ЭРУПТИВНОГО ПРОТУБЕРАНЦА

**Купряков Ю.А.^{1,2}, Бычков К.В.², Белова О.М.²,
Горшков А.Б.², Kotrč P.¹**

¹*Астрономический институт Академии наук Чешской Республики,
Ондřejов, Чешская Республика*

²*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

ANALYSIS AND CALCULATION OF AN ERUPTIVE PROMINENCE MODEL

**Kupryakov Yu.A.^{1,2}, Bychkov K.V.², Belova O.M.²,
Gorshkov A.B.², Kotrč P.¹**

¹*Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic,
Ondřejov, Czech Republic*

²*Sternberg Astronomical Institute, M.V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia*

Some types of eruptive prominences are closely related to solar flares and sometimes even form part of the flare process. When these objects are observed at the edge of the visible solar disk, they are very difficult to distinguish from each other. Only detailed spectral studies allow us to decide what we have observed, a prominence or a flare. We present an analysis of the event that occurred on the eastern limb on April 21, 2015 at 13:05–13:58 UT, which was observed by a horizontal telescope and a spectrograph (Ondřejov observatory). The studied eruption of a strongly curved prominence was preceded by a limb flare in the same active region starting at 10:30 UT. The eruption of a strongly curved prominence was accompanied by the appearance of a soft X-ray source and strong heating of the prominence plasma. The purpose of this work is to study the behavior of the emission intensity curves in the H CaII, H β , D $_3$, H α , and Ca IR 8542 Å lines during the development of the prominence and compare the results with calculated values. Calculations are performed in the lines of hydrogen, the CaII ion, and the helium atom, taking into account the main processes that determine the radiation of an opaque gas in spectral lines. The results are discussed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-185-188

Введение

Некоторые типы эруптивных протуберанцев тесно связаны с солнечными вспышками, а иногда даже составляют часть процесса вспышки. Когда эти объекты наблюдаются на краю видимого солнечного диска, их очень трудно отличить друг от друга. Только детальные спектральные исследования позволяют решить вопрос, что же мы наблюдали, протуберанец или вспышку. Эруптивные события на лимбах дают хорошую возможность интерпретировать спектры. Мы представляем анализ события на восточном лимбе 21 апреля 2015 г. в 13:05–13:58 UT [1], которое наблюдалось спектрографами HSFA2 и MFS на Ondřejov Observatory. Изучаемому

извержению сильно искривленного протуберанца предшествовала лимбовая вспышка в той же активной области, начиная с 10:30 UT. Затем появилась вспышечная аркада петель и надлимбовые источники мягкого рентгеновского излучения. После чего последовал сильный нагрев плазмы протуберанца [2].

Наблюдения и обработка

Мы идентифицировали структуры, наблюдаемые в спектрах H α , с деталями на фильтрограммах, и проанализировали эволюцию скоростей доплеровских компонент. На рис. 1 видно, что синяя и красная составляющие достигают скорости более 100 км/с. Вся система вращается.

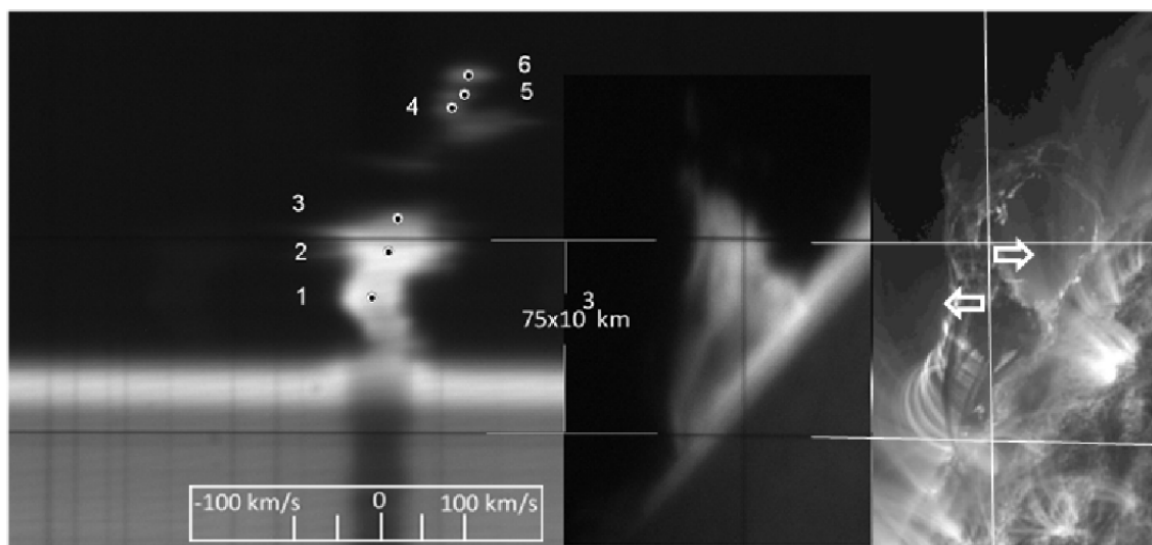


Рис. 1. Спектр H α на момент 13:21:11 UT (слева). Цифры соответствуют фотометрическим разрезам. Внизу шкала скоростей. В центре — изображение на щели в линии H α . Справа — изображение SDO 304 Å с отмеченным положением щели спектрографа и доплеровскими компонентами скорости.

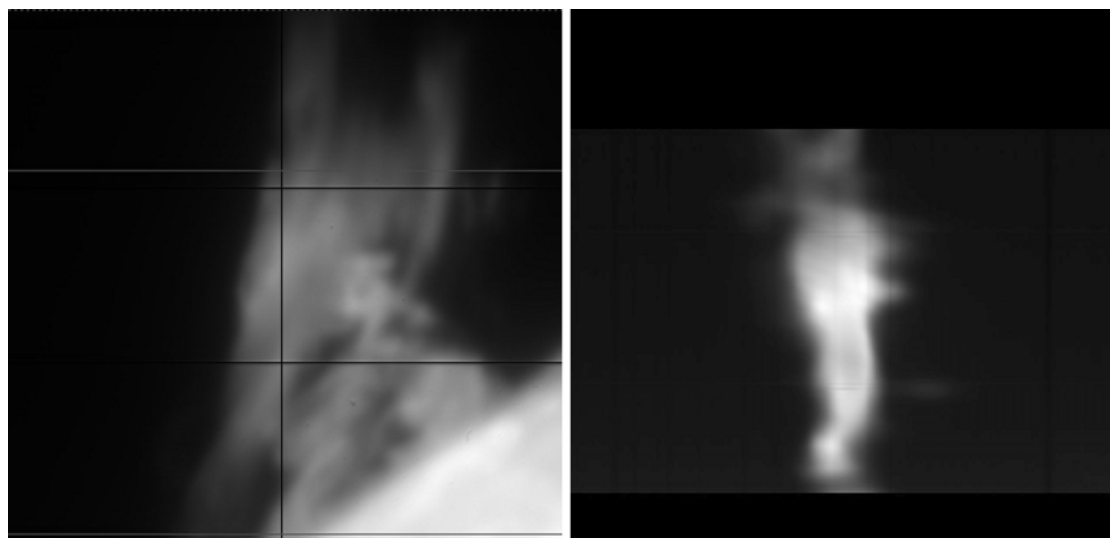


Рис. 2. Фильтрограмма SJ, спектр в линии H α на момент 13:27:40 UT.

Целью работы было изучение поведения кривых интенсивности излучения в линиях H CaII, H β , D $_3$, H α и Ca IR 8542 Å в процессе развития вспышки и сравнение результатов с расчетными значениями. Для определения возможных механизмов свечения в линиях был рассчитан поток излучения. Мы выполнили расчёты в рамках модели набора однородных слоёв газа, подбирая их параметры таким образом, чтобы теоретические потоки излучения оказались близки наблюдаемым. После редукции данных были получены профили линий в активной и спокойных областях хромосферы и определены значения потоков излучения. Значения потоков во всех спектральных линиях в эрг см⁻² с⁻¹ на моменты 13:16:24, 13:27:40, 13:42:58 UT приведены в таблице 1.

Таблица 1.

UT, чмс	H α	H β	α/β	H CaII 3968	IR CaII 8542	D $_3$ HeI 5876
13:16:24	6.07e+7	3.31e+7	1.83	2.39e+7	1.43e+7	4.39e+6
13:27:40	6.14e+7	3.09e+7	1.72	2.19e+7	9.09e+6	1.16e+7
13:42:58	8.81e+7	3.55e+7	2.48	2.37e+7	5.48e+6	3.43e+7

Результаты расчетов

Наблюдаемые спектры излучения бальмеровской серии водорода и линии D $_3$ гелия подтверждают сильную неоднородность газа и значительный разброс скоростей, что согласуется с общей картиной развития протуберанца. Первые два эпизода, 13:16:24 и 13:27:40 UT, могут быть объяснены [3] в модели двух стационарных слоёв: ближнего к наблюдателю (Б) и дальнего от него (Д). Излучение слоёв складывается, причём ближний слой частично поглощает излучение дальнего в линиях бальмеровской серии и CaII. Теоретические параметры всех трёх эпизодов различаются не сильно, приведём их для первого эпизода (таблица 2).

Таблица 2.

Слой	N , см ⁻³	T_e , K	Δv , км/с	h , 10 ³ км	τ_a
Б	5.9e+12	8000	35	10	163
Д	4.0e+11	100 000	50	100	1.7

Относительно плоский бальмеровский декремент (1.8) является следствием самопоглощения в линии H α .

В третьем эпизоде крутой бальмеровский декремент (2.48) свидетельствует о небольшой, близкой к единице, оптической глубине в линии H α

водорода. Для объяснения такого декремента (таблица 3) необходим набор из трёх слоёв: ближнего (Б), среднего (С) и дальнего (Д).

Таблица 3.

Слой	$N, \text{см}^{-3}$	T_e, K	$\Delta v, \text{км/с}$	$h, 10^3 \text{ км}$
Б	3.5e+11	15 000	80	4
С	6.5e+12	6500	50	1
Д	3.0e+12	70 000	50	100

В горячем дальнем слое формируются линия HeI 5876 Å и большие потоки в линиях бальмеровской серии. Средний слой поглощает бальмеровские линии и создаёт излучение в линиях иона CaII. Ближний слой создаёт основную мощность излучения прозрачного газа в бальмеровских линиях.

Выводы

1) Наблюдаемые потоки в линиях водорода, гелия и кальция могут быть объяснены в модели стационарного излучения газа с учётом непрозрачности в спектральных линиях.

2) Относительные интенсивности линий свидетельствуют о неоднородности излучающего газа, причём рядом друг с другом могут находиться области, температуры которых различаются на порядок величины.

Литература

1. Kotrč, P., Bárta, M., Kupryakov, Y.A., Kashapova, L.K. 2013, Central European Astrophysical Bulletin, 37, 513.
2. Kotrč, P., Bárta, M., Schwartz, P., et al. 2013, Solar Physics, 284, 447.
3. Белова О.М., К.В. Бычков. 2017, Астрофизика, 61, № 1, с. 119–130.