

УДК 523.98

А. Н. Бабин, А. Н. Коваль

Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»
98409 Крым, Научный

Тонкая структура поля скоростей во вспышке балла 2В/М2.3

Исследуется поле скоростей во вспышечной области в течение импульсной фазы вспышки балла 2В/М2.3 26 июня 1999 года. Спектральные H α -наблюдения с высоким временным и пространственным разрешением получены на коронографе КГ-2 Крымской астрофизической обсерватории. При определении скоростей использовался метод бисекторов. Получено, что поле скоростей во вспышечной области и вспышечном “ядре” во время импульсной фазы очень сложное, имеет тонкую структуру и быстро изменяется со временем. Сдвиги линии в разных вспышечных элементах имеют различные значения и даже различные направления. Это указывает на то, что в тонкоструктурных элементах вспышки происходят локальные доплеровские движения.

ТОНКА СТРУКТУРА ПОЛЯ ШВИДКОСТЕЙ У СПАЛАХУ БАЛУ 2В/М2.3, Бабін А. М., Коваль О. М. — Досліджується поле швидкостей в області спалаху під час імпульсної фази спалаху балу 2В/М2.3 26 червня 1999 року. Спектральні H α -спостереження з високим часовим і просторовим розділенням отримані на коронографі КГ-2 Кримської астрофізичної обсерваторії. При визначенні швидкостей використовувався метод бісекторів. Отримано, що поле швидкостей в області спалаху і спалаховому “ядрі” під час імпульсної фази дуже складне, має тонку структуру і швидко змінюється з часом. Зміщення лінії в різних спалахових елементах мають різні значення і навіть різні напрямки. Ці особливості указують на те, що в тонкоструктурних елементах спалаху відбуваються локальні доплерівські рухи.

FINE STRUCTURE OF THE VELOCITY FIELD IN AN IMPORTANCE 2В/М2.3 FLARE, by Babin A. N., Koval' A. N. — The velocity field in the flare region during the impulsive phase of the solar flare with on 26 June 1999 was investigated. Spectral H α observations of the flare with high temporal and spatial resolution were made on the coronagraph KG-2 of the

Crimean Astrophysical Observatory. We estimated the velocities using the bisector method. The following results were obtained: the velocity fields in the flare region and in the flare kernel during the impulsive phase are very complicated, have fine structure and vary rapidly with time. Different flare elements exhibit line shifts of different magnitude and even of different directions. These facts indicate that the local Doppler motions exist in the fine structural flare elements.

ВВЕДЕНИЕ

Среди разнообразных видов движений хромосферного вещества, происходящих во время вспышечного процесса, особое значение имеют движения, наблюдаемые в самом вспышечном веществе, так как они могут иметь непосредственное отношение к процессу выделения энергии. Спектральные проявления движений хромосферного вспышечного вещества, наблюдаемые как асимметрия профиля линии H α , были обнаружены в самом начале спектральных наблюдений вспышек [13, 25, 27]. Одной из основных особенностей H α -профилей в солнечных вспышках есть красная асимметрия, хотя в некоторых случаях наблюдается также синяя асимметрия [7, 19, 26]. Красная асимметрия в настоящее время чаще всего интерпретируется как доплеровский сдвиг профиля линии вследствие направленных вниз движений вспышечного хромосферного вещества со скоростями несколько десятков км/с [3, 4, 7, 8, 10, 14, 20, 21, 28, 29]. Возникновение таких движений связывают с импульсным нагревом хромосферы мощным потоком нетепловых электронов или теплопроводности, который приводит к испарению хромосферы и образованию движущейся вниз хромосферной конденсации [5, 9, 15—18, 22, 24]. Хотя в настоящее время модель испарения хромосферы является наиболее привлекаемой для объяснения динамики коронального и хромосферного вещества вспышки, многие данные наблюдений не могут быть в деталях объяснены в рамках этой простой модели [3, 10—12, 14].

Различия между наблюдениями и моделью могут быть связаны с недостаточным пространственным разрешением наблюдений. В частности, во вспышках наблюдается большая продолжительность движений, чем предсказанная моделью, что может быть объяснено наличием нескольких неразрешимых хромосферных конденсаций, которые образуются не одновременно [15]. Поэтому очень важно изучить структуру поля скоростей во вспышечных узлах. Если качество изображений позволяет разрешить тонкую структуру вспышки, то можно увидеть, что вспышечные ленты и даже так называемые вспышечные ядра (kernels) состоят из локальных узелков усиленной яркости, размеры которых порядка 1'' [1, 6]. Поэтому наблюдаемая асимметрия профилей линий может определяться движениями в этих элементарных структурах.

НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследуемая вспышка балла 2В/М2.3 26 июня 1999 г. произошла в активной области NOAA 8598 вблизи центра солнечного диска (координаты N23, E03). Согласно данным [23] вспышка началась в 5:09 UT и достигла максимума в 5:12 UT. Фотографические спектральные наблюдения активной области на коронографе КГ-2 НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» были начаты в 4:50 UT и охватывают предвспышечную, начальную, импульсную и частично постепенную фазу вспышки (4:50:00—5:15:30 UT). Спектрограммы в области линии H во время вспышки получались с интервалом 5—10 с с экспозициями 0.1 с. Качество изображений позволяло получить на лучших кадрах пространственное разрешение меньше 1". Одновременно со спектрами при помощи камеры РФК-5 и H-фильтра регистрировалось изображение Солнца на щели спектрографа, что давало возможность отождествить положение щели спектрографа в активной области при каждой экспозиции.

По структуре вспышку можно отнести к классу компактных, в которых вспыхивают уже существующие петли и системы петель. По характеру развития вспышка представляла собой сложный процесс энерговыделения. Морфологические, эволюционные и спектральные особенности, а также энергетика белой вспышки исследованы в [2]. Изучение динамики движений хромосферного вспышечного вещества в течение развития вспышки путем анализа асимметрии H-профилей проведено в работе [3].

Основная задача этой работы заключается в исследовании тонкой структуры поля скоростей в одном из узлов вспышки, а также во вспышечном ядре, в котором было зарегистрировано излучение в оптическом континууме, на основании анализа профилей линии H во время импульсной фазы.

Спектрограмма вспышечного узла в момент максимума излучения в оптическом континууме (5:11:57 UT) приведена на рис. 1. Пространственное разрешение позволяет идентифицировать отдельные вспышечные образования и исследовать асимметрию профиля линии H в отдельных деталях вспышечного узла. Связанное со вспышкой жесткое рентгеновское излучение в каналах L (14—23 кэВ) и M2

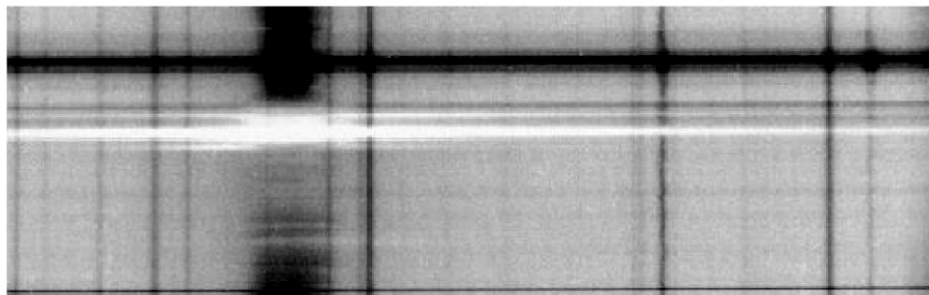


Рис. 1. Спектр исследуемого узла вспышки в 5:11:57 UT

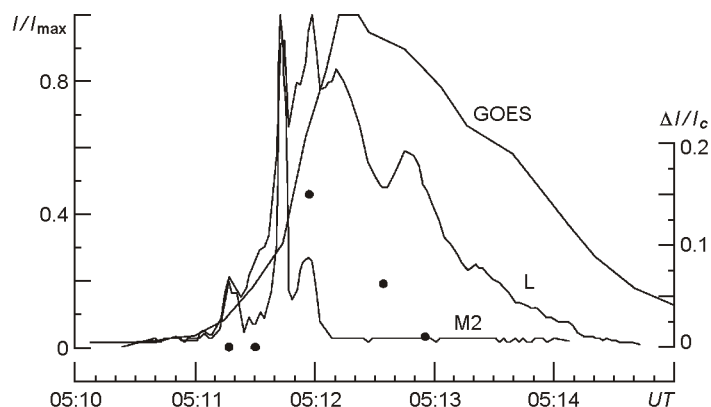
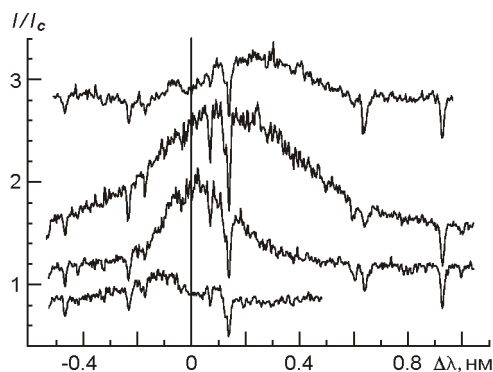


Рис. 2. Световые кривые вспышки в континууме (точки, правая шкала), в мягком (GOES, 0.05—0.4 нм) и жестком рентгене (YONKON, каналы L и M2) — левая шкала

Рис. 3. Наблюдаемые Н-профили эмиссионных деталей вспышечного узла на спектрограмме вспышки в 5:11:30 UT. Профили произвольно сдвинуты по оси ординат. Нуль на оси абсцисс соответствует положению центра невозмущенной линии Н



(33—53 кэВ) по наблюдениям YONKON и мягкое рентгеновское излучение (0.05—0.4 нм, GOES) представлено на рис. 2. Там же приведена световая кривая излучения вспышечного узла в белом свете.

На рис. 3 представлены Н-профили эмиссионных деталей вспышечного узла на спектрограмме в 5:11:30 UT, расположенных вдоль щели спектрографа на протяжении 11 . Видно, что поле скоростей очень тонкоструктурное: в эмиссионных деталях вспышки, расположенных в этом интервале, наблюдаются элементы как с синей, так и с красной асимметрией. Определенные по смещению бисекторов профилей линии Н скорости в этих вспышечных структурах заключались в пределах от -35 до +77 км/с. Это указывает на то, что во вспышечной области в тонкоструктурных элементах есть локальные доплеровские движения.

Кроме того, в определенных участках профилей Н во вспышечных ядрах наблюдаются резкие изменения плавного хода $dI/d\lambda$, что может являться следствием наложения нескольких неразрешаемых вспышечных эмиссий. Рассмотрим структуру поля скоростей во вспышечном ядре в момент максимума излучения в оптическом континууме в 5:11:57 UT. С этой целью было сделано 16 разрезов спектра мощной эмиссии вдоль дисперсии с высотой щели фотометра 0.7 при

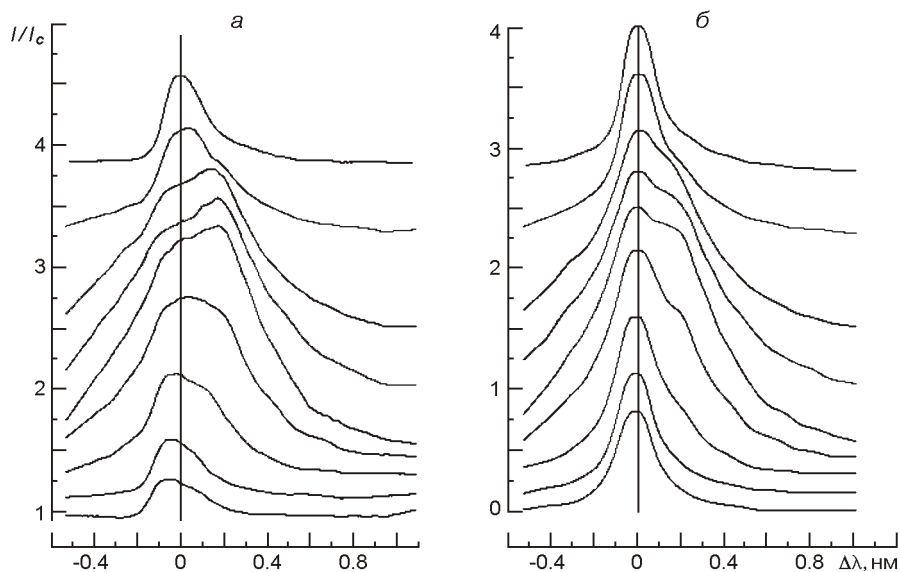


Рис. 4. Сглаженные профили линии Н в последовательных разрезах эмиссионного ядра в 5:11:57 UT через 1 : *а* — наблюдения, *б* — «чистая» эмиссия. Профили произвольно сдвинуты по оси ординат

последовательном смещении щели в каждом разрезе на 0.5 перпендикулярно к направлению дисперсии. На рис. 4 представлены 9 (из 16) профилей Н в последовательных точках эмиссионного ядра, расположенных вдоль щели через 1, слева приведены наблюдения, справа — «чистая» эмиссия (наблюдения минус невозмущенный контур).

Видно, что эмиссия состоит из яркого внутреннего ядра размером около 3.5 (разрезы 4, 5, 6, 7, нумерация снизу вверх) и внешней, менее яркой, оболочки (разрезы 1, 2, 3, 8, 9). Как в ядре, так и в оболочке профили Н сложные. На расстоянии около +0.2 нм от центра линии наблюдается вторичный максимум интенсивности эмиссии. Отношение интенсивности вторичного максимума к интенсивности эмиссии в центре линии изменяется от разреза к разрезу даже во внутреннем ядре. В синем крыле профилей (разрезы 4—7) на расстоянии -0.3 нм от центра линии на некотором участке длин волн происходит изменение плавного хода dl/d .

Характер асимметрии эмиссии, определяемый положением бисектора, во внутреннем ядре и в оболочке различный. Во внутреннем ядре наибольшее смещение бисектора наблюдается в центральной части и уменьшается в крыле. Во внешней оболочке с одной стороны от внутреннего ядра (разрезы 8 и 9) профили показывают преобладание интенсивности красного крыла при небольшом смещении в красную сторону спектра центральной части профиля. Во внешней оболочке с другой стороны от ядра (разрезы 1—3) центральная часть контура смещена в синюю область спектра, а в крыле наблюдается красная асимметрия. Такую сложную картину асимметрии трудно объяснить

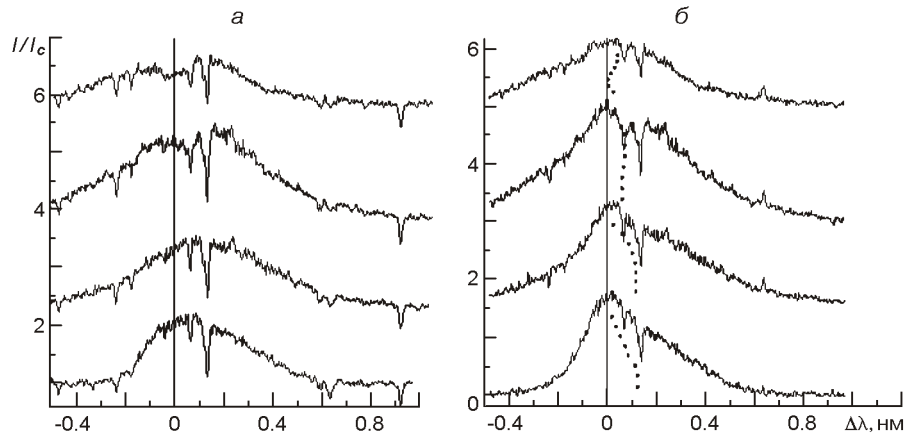


Рис. 5. Изменение со временем асимметрии профиля линии Н во время импульсной фазы вспышки (*a* — наблюдаемые профили, *б* — разностные). Снизу вверх: 5:11:17 UT; 5:11:30 UT; 5:11:57 UT; 5:12:33 UT. Точками нанесены бисекторы

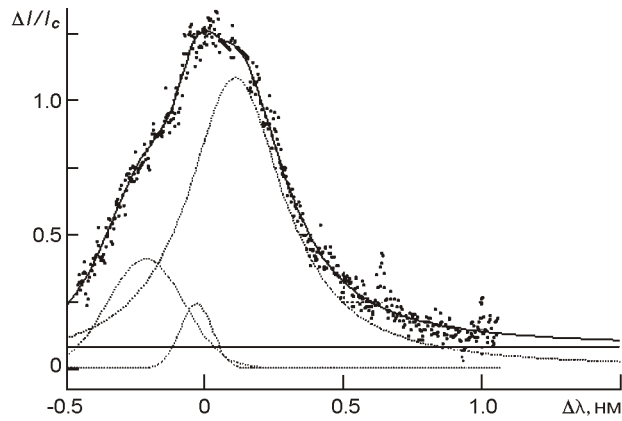


Рис. 6. Представление профиля «чистой» эмиссии линии Н в 5:12:33 UT наложением нескольких эмиссионных компонентов

без предположения о наличии тонкой структуры поля скоростей во вспышечном ядре.

Как следует из наблюдений, в исследуемом вспышечном ядре в импульсной фазе профиль Н и его асимметрия испытывали быстрые изменения со временем. На рис. 5 приведены наблюдаемые (*a*) и разностные (*б*) профили линии Н во вспышечном ядре в разные моменты импульсной фазы. Особый интерес представляет дополнительная эмиссия в синем крыле профиля Н. Признаки ее появления намечаются в 5:11:57 UT и становятся отчетливо видны в 5:12:33 UT. Это может быть следствием того, что наблюдаемая эмиссия в каждый момент определялась наложением эмиссий, представляющих короткоживущие тонкоструктурные элементы вспышки, вклад которых в общую эмиссию изменялся со временем. Например, профиль Н в

5:12:33 UT можно представить наложением трех компонентов (плюс непрерывная эмиссия), которые имеют разную интенсивность и разные сдвиги (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование поля скоростей во вспышке, наблюдения которой получены с высоким временным и пространственным разрешением, показало: а) поле скоростей во вспышке тонкоструктурное и сложное, в тонкоструктурных элементах вспышки есть локальные доплеровские движения; б) вспышечные ядра состоят из «сердцевин» и внешней оболочки, структура поля скоростей в «сердцевине» и оболочке различная; в) наблюдаются быстрые изменения асимметрии профиля линии H со временем, которые могут быть объяснены, если предположить, что наблюдаемая асимметрия определяется полем скоростей в неразрешимых короткоживущих тонкоструктурных элементах вспышки, вклад которых в общую эмиссию изменяется со временем.

1. Бабин А. Н. Развитие и тонкая структура вспышки 14 июля 1970 г. // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1974.—**50**.— С. 152—158.
2. Бабин А. Н., Коваль А. Н. Морфологические, эволюционные и спектральные особенности и энергетика белой вспышки 26 июня 1999 г. // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2005.—**101**.—С. 107—119.
3. Бабин А. Н., Коваль А. Н. Исследование движений хромосферного вещества во вспышке 26 июня 1999 г. // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2010.— **106**.
4. Кондрашова Н. Н., Прокудина В. С. Движения хромосферного вещества в мощной солнечной вспышке // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—**22**, № 4.— С. 271—282.
5. Костюк Н. Д., Пикельнер С. Б. Газодинамика вспышечной области, прогреваемой потоком ускоренных частиц // Астрон. журн. 1974.—**51**.—С. 1002—1016.
6. Северный А. Б. Исследование тонкой структуры эмиссии активных образований и нестационарных процессов на Солнце // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1957.—**17**.—С. 129—161.
7. Canfield R. C., Kiplinger A. L., Penn M. J., Wulser J.-P. H spectra of dynamic chromospheric processes in five well observed X-ray flares // Astrophys. J.—1990.— **363**.—P. 318—325.
8. Cauzzi G., Falchi A., Falciani R., Smaldone L. A. Coordinated observations of solar activity phenomena. II. The velocity field pattern in an elementary flare // Astron. and Astrophys.—1996.—**306**.—P. 625—637.
9. Cheng C.-C., Oran E. S., Doschek G. A., et al. Numerical simulations of loop heated to flare temperatures. I. Gasdynamics // Astrophys. J.—1983.—**265**.—P. 1090—1119.
10. De la Beaujardiere J. F., Kiplinger A. L., Canfield R. C. Coordinated spectral and temporal H observations of a solar flare // Astrophys. J.—1992.—**401**.— P. 761—767.
11. Ding M. D., Fang C., Huang Y. R. Analysis of 2 D flare spectra: velocity fields derived from H -line asymmetries // Solar Phys.—1995.—**158**, N 1.—P. 81—93.
12. Doschek G. A., Antiochos S. K., Antonucci E., et al. Chromospheric explosions // Energetic Phenomena on the Sun / Eds M. R. Kundu, B. Woodgate, E. J. Shmahl. — NASA Conf. Publ., 1986.— Chapter 4.— P. 307—375.

13. *Ellison M. A.* Characteristic properties of chromospheric flares // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1949.—**109**.—P. 3—27.
14. *Falchi A., Falciani R., Smaldone L. A.* Analysis of the optical spectra of the solar flares. VI. Velocity field in the 13 June 1980 flare area // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**256**.—P. 255 - 263.
15. *Fisher G. H.* Dynamics of flare-driven chromospheric condensations // *Astrophys. J.*—1989.—**346**.—P.1019—1029.
16. *Fisher G. H., Canfield R. C., McClymont A. N.* Flare loop radiative hydrodynamics. V. Response to thick-target heating // *Astrophys. J.*—1985.—**289**.—P. 414—424.
17. *Fisher G. H., Canfield R. C., McClymont A. N.* Flare loop radiative hydrodynamics. VI. Chromospheric evaporation due to heating by nonthermal electrons // *Astrophys. J.*—1985.—**289**.—P. 425—433.
18. *Fisher G. H., Canfield R. C., McClymont A. N.* Flare loop radiative hydrodynamics. VII. Dynamics of the thick-target heated chromosphere // *Astrophys. J.*—1985.—**289**.—P. 434—441.
19. *Heinzel P., Karlicky M., Kotrc P., Svestka Z.* On the occurrence of blue asymmetry in chromospheric flare spectra // *Solar Phys.*—1994.—**152**.—P. 393—408.
20. *Ichimoto K., Kurokawa H.* H red asymmetry of solar flares // *Solar Phys.*—1984.—**93**.—P. 105—121.
21. *Ji G. P., Kurokawa H., Fang C., Huang Y. R.* High-resolution spectral observations during the impulsive phase of a flare // *Solar Phys.*—1994.—**149**.—P. 195—203.
22. *Livshits M. A., Badaljan O. G., Kosovichev A. G., Katsova M. M.* The optical continuum of solar and stellar flares // *Solar Phys.*—1981.—**73**.—P. 269—288.
23. *Solar Geophysical Data.*—1999.—**664**.—Pt. 2.
24. *Somov D. V., Syrovatskii S. I., Spektor A. R.* Hydrodynamic response of solar chromosphere to an elementary flare burst. I. Heating by accelerated electrons // *Solar Phys.*—1981.—**73**.—P. 145—156.
25. *Svestka Z.* The Ha emission from chromospheric flares. II. General features of the asymmetry // *BAC.*—1951.—**2**.—P. 100—103.
26. *Svestka Z., Kopecky M., Blaha M.* Qualitative discussion of the 244 flare spectra. II. Line asymmetry and helium lines // *BAC.*—1962.—**13**.—P. 37—41.
27. *Waldmeier M.* Ergebnisse und probleme der Sonnenforschung. — Leipzig, 1955.—390 p.
28. *Wulser J.-P., Canfield R. C., Acton L. W., et al.* Multispectral observations of chromospheric evaporation in the 1991 November 15 X-class solar flare // *Astrophys. J.*—1994.—**424**.—P. 459—465.
29. *Wulser J.-P., Marti H.* High time resolution observations of H line profiles during the impulsive phase of a solar flare // *Astrophys. J.*—1989.—**341**.—P. 1088—1096.

Поступила в редакцию 08.04.09