

ЦВЕТ КОНТИНУУМА КАК ИНДИКАТОР РАСШИРЕНИЯ КОРОНЫ

Ким И.С., Крусанова Н.Л., Попов В.В.

ГАИШ МГУ, Москва, Россия

e-mail: iraida.kim@gmail.com

CONTINUUM COLOR AS AN INDICATOR OF CORONA EXPANDING

Kim I.S., Krusanova N.L., Popov V.V.

Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

The 2D distribution of the relative color index for the corona of July 11, 1991 reveal the reddening effect for the whole corona. This is interpreted as the shift of the corona continuum to the red as compared with the photosphere spectrum and is explained by the outward bulk flow speed of the coronal electrons.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-211-214

1. Введение

Кратко напомним терминологию, используемую ниже. Состав коронального вещества: электроны, ионы, нейтралы. Речь будет идти об электронной составляющей, так называемой К-короне (далее – короне), излучающей в видимом континууме, свечение которой обусловлено томсоновским рассеянием. Классическое томсоновское рассеяние подразумевает рассеяние низкочастотных квантов излучения фотосферы на свободных покоящихся электронах, не зависит от длины волны. В последнюю декаду термин томсоновское рассеяние часто применяют при описании рассеяния на нерелятивистских электронах короны. Определение “цвета” (далее без кавычек) континуума короны основано на сравнительном анализе распределений энергии континуумов короны и фотосферы спектральными или фильтровыми методами. При идентичности распределений принято говорить о белом цвете (белой короне), при смещении в синюю область спектра – о “посинении”, в красную – о “покраснении” (далее – без кавычек). Обзоры по определению цвета континуума представлены Шкловским [1953], Никольским и др. [1983], а также в серии статей чешских и словацких астрономов. Сообщалось о посинении, покраснении в определенных областях, тождественности спектров. При этом покраснение интерпретировалось вкладом пылевой составляющей (пылевых колец).

Возрождение интереса к сравнению континуумов короны и фотосферы обусловлено появлением работы Стам [1976], который теоретически показал возможность получения информации о скорости электронов (V_e) и электронной температуре (T_e) из таких измерений. Через 20 лет Ichimoto et al. [1976] экспериментально подтвердили такую возможность, определив

T_e и V_e электронов по результатам наблюдений полного солнечного затмения (ПСЗ) 1994 г. Reginald and Davila [2000] модифицировали подход. Недостатки спектральных методов: получение информации только вдоль направления щели; возможное искажение результатов сравнения непрерывных спектров фотосферы и короны вследствие инструментальной поляризации спектрографа [Липский 1958]. Последний фактор никем не учитывается. И, наконец, эпохальная, на наш взгляд, работа Reginald, Cyr, Davila et al. [2009], в которой теоретически показано, что при наличии потоков электронов, распространяющихся от Солнца, для наблюдателя на Земле должно регистрироваться смещение континуума короны в красную сторону **по всей короне**. В нашей работе мы обсуждаем только тепловые электроны. Возможность диагностики нетепловых электронов из сравнительного анализа континуумов короны и фотосферы показана Koutchmy and Nikoghossian [2002].

2. Относительный показатель цвета континуума для короны 1991 г.

В реальной короне рассеивают движущиеся потоки электронов. Для нерелятивистских электронов можно ожидать смещение рассеянного спектра, обусловленное эффектом Доплера. Спектры в области 300–1000 нм, аппроксимированные функцией Планка ($T = 5800$ К) для фотосферы, для электрона, движущегося со скоростью 10000 км/с от Солнца и к Солнцу, рассчитанные нами, представлены в [Kim et al., 2017].

До настоящего времени определение цвета континуума короны возможно только по материалам, полученным во время полных солнечных затмений (ПСЗ). Корона регистрируется во время полной фазы, фотосфера – во время частных фаз. Промежуток времени составляет 30–60 минут. Для получения наблюдательных подтверждений теории Reginald et al. [2009] по всей короне мы отказались от традиционных методов, основанных на калибровках во время частных фаз, использовании радиальных фильтров и разрезов и т.д. Обосновали использование фильтрового метода (одновременное фотографирование короны в красной и синей областях спектра) для получения 2D распределений для всей короны. Применение цветных пленок или цветных ПЗС приемников обеспечивает регистрацию на один кадр изображений короны в красной, зеленой и синей областях спектра с шириной “фильтров” (FWHM – полная ширина на половинном пропускании) ≤ 100 нм. В качестве репера используем область, для которой радиальная скорость электронов, по нашему мнению, минимальна. Это слабая составляющая нашего подхода, которая, тем не менее, значительно “сильнее” калибровки по фотосфере. Ввели показатель цвета C , определяемый отношением интенсивности в красной области к синей. Ожидаемое значение $C = 1.10$ (0.93) для электрона, движущегося со скоростью $V_e = 100000$ км/с от Солнца или к Солнцу соответственно. Ввели относительный пока-

затель цвета RCI , определяемый выражением $RCI = \frac{C^{cor}}{C^{ref}} = \frac{I_{red}^{cor} / I_{blue}^{cor}}{I_{red}^{ref} / I_{blue}^{ref}}$, где C^{ref}

– показатель цвета для реперной области. Все величины в выражении получают одновременно на одном кадре во время полной фазы. Описание нашего подхода, оборудования, процедуры наблюдений ПСЗ, обработки данных представлены в [Kim et al., 2011].

2D распределения RCI для короны 29.03.2006 г. выявили наличие диффузной и структурной составляющих и покраснение с расстоянием по всей короне [Kim et al., 2017]. Область размером $[37.5'' \times 37.5'']$, локализованная между плюмами с координатами $P = 1^\circ$, $R = 1.13 R_\odot$, была выбрана в качестве репера. Это первое наблюдательное подтверждение теории Reginald et al. [2009]. В диапазоне расстояний $< 1.2 - 1.3 R_\odot$ наблюдается посинение, интерпретация которого будет рассмотрена в отдельной статье.

На рисунке 1 (слева) представлено 2D распределение RCI для короны 11.07.1991 г. Показаны направления N и E, центр диска Солнца (крестик), шкалы RCI (на диске Луны, темные тона соответствуют посинению, светлые – покраснению), лимбы Солнца (пунктир) и Луны (сплошная линия), проекции эклиптики (белая прямая линия) и гелиосферного токового слоя (черная прямая линия). В правом верхнем углу в увеличенном масштабе показан фрагмент области короны над северным полюсом с указанием реперной области (черный квадратик). Справа – представлена структура короны. В правом верхнем углу в увеличенном масштабе показан фрагмент

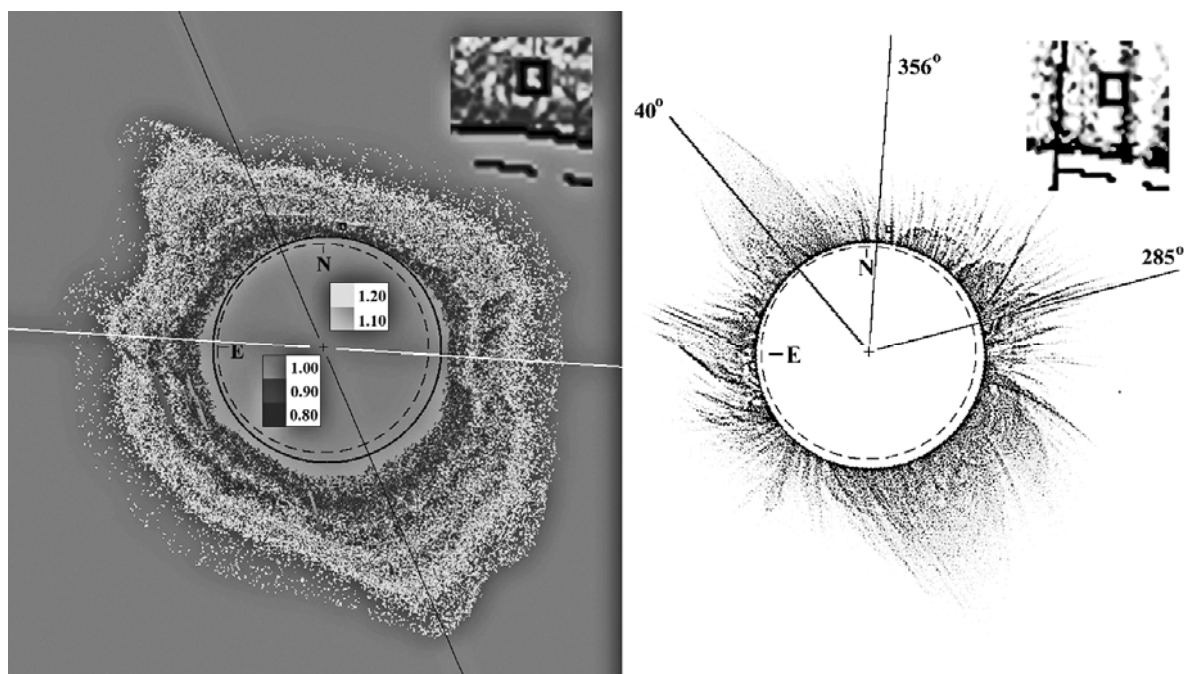


Рис. 1.

короны, содержащий реперную область (квадратик), локализованную между плюмами. Полученное распределение выявляет покраснение с рас-

стоянием по всей короне на всех позиционных углах. В диапазоне $<1.2\text{--}1.3 R_{\odot}$ наблюдается посинение.

3. Заключение

Нет тождественности в распределениях энергии в континуумах короны и фотосферы. 2D распределения относительного показателя цвета континуума короны для короны 11.07.1991 г. и 29.03.2006 г. выявляют покраснение с расстоянием по всей короне на всех позиционных углах и являются первыми наблюдательными подтверждениями теоретических расчетов Reginald et al. [2009] о смещении спектра континуума в красную сторону вследствие потоков электронов, распространяющихся от Солнца.

Поэтому цвет континуума можно рассматривать как индикатор расширения короны.

2D распределения относительного показателя цвета выявляют наличие диффузной и структурной составляющих. Различные корональные структуры характеризуются различными значениями RCI.

Напомним, что до настоящего времени исследования цвета коронального континуума возможны только во время ПСЗ или из космоса.

Литература

- Липский Ю.Н. 1958. АЖ, 35, 662.
- Никольский Г.М., Кучми С., Несмянович И.А. 1983, Солнечные данные, № 4, 67.
- Шкловский И.С. 1962, Физика солнечной короны – Государственное издательство физ.-мат. литература, Москва.
- Cram, L.E. 1976, Solar Phys., **48**, 3–19, doi: 10.1007/BF00153327.
- Ichimoto, K., K. Kumagai, I. Sano, T. Kobiki, T. Sakurai, A. Munoz. 1996, Publ. Astron. Soc. Japan, **48**, 545–554.
- Kim I.S., I.V. Alexeeva, O.I. Bugaenko, V.V. Popov, and E.Z. Suyunova. 2013a, Solar Phys., **288**, 651, doi: 10.1007/s11207-013-0419-0.
- Kim I.S., N.L. Kroussanova, M.V. Pavlov, V.V. Popov, and M.I. Divlekeev. 2011, ASP CS, **437**, 211.
- Kim I.S., Nasonova L.P., D.V. Lisin, V.V. Popov, N.L. Kroussanova. 2017, Journal of Geophysical Research: Space Physics., **122**, # 2, 77, doi: 10.1002/2016JA022623.
- Koutchmy, S., and A.G. Nikoghossian. 2002, Astron. Astrophys., **395**, 983, doi: 10.1051/0004-6361:20021269.
- Reginald, N.L., and J.M. Davila. 2000, Solar Phys., **195**, 111.
- Reginald, N.L., O.C. St. Cyr, J.M. Davila, D.M. Rabin, M. Guhathakurta, and D.M. Hassler. 2009, Solar Phys., **260**, 347, doi: 10.1007/s11207-009-9457-z.