ЦВЕТ СТРУКТУР СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Ким И.С., Крусанова Н.Л.

ГАИШ МГУ, Москва, Россия

COLOUR OF SOLAR CORONA STRUCTURES

Kim I.S., Krusanova N.L.

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

2D distributions of the relative color index, RCI, are presented for the corona of July 11, 1991 and March 29, 2006. They reveal the absence of identity in energy distributions in the continua of the K-corona and photosphere. The quasi-symmetry of RCI distributions relative to the projection of the heliospheric current sheet in “the sky plane” excludes the contribution of the dust component. Reddening with distance over the entire corona at all positional angles is the first observational confirmation of theoretical calculations by Reginald et al. [8]. Therefore, the RCI can be considered as an indicator of the expansion of the corona. Different coronal structures have different RCI values. The existence of diffuse and structural components, correlation with the coronal structure, and bluing in the range $<1.2-1.3 R_{\odot}$ are noted.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-209-212

1. Введение

До настоящего времени исследования цвета континуума солнечной короны проводятся только во время полных солнечных затмений (ПСЗ). Речь будет идти об электронной составляющей, так называемой К-короне, излучающей в видимом континууме, свечение которой обусловлено томсоновским рассеянием. Классическое томсоновское рассеяние, подразумевающее рассеяние низкочастотных квантов электромагнитного излучения фотосферы свободными покоящимися электронами, не зависит от длины волны, λ . Определение цвета континуума К-короны основано на сравнительном анализе распределения энергии континуумов короны и фотосферы спектральными или фильтровыми методами. При идентичности распределений принято говорить о белом цвете, при смещении в синюю область спектра – о “посинении”, в красную – “покраснении”. Обзоры работ по определению цвета континуума [1–3], выполненных до 2000-х гг., свидетельствуют о противоречивости результатов.

В 1976 Стам [4] теоретически показал возможность получения информации о скорости электронов, V_e , и электронной температуре, T_e , из спектральных измерений отношения интенсивностей на 410 и 390 нм. Через 20 лет японцы [5], позднее американцы [6] экспериментально подтвердили такую возможность по наблюдениям спектров во время ПСЗ. К недостаткам спектральных методов можно отнести получение информации не по всей короне, а только вдоль направления щели, а также возможный

вклад инструментальной поляризации спектрографа [7], которая, как правило, никем не учитывается. В 2009г. появилась уникальная, на наш взгляд, работа Reginald et al. [8], в которой впервые теоретически показано, что при наличии потоков электронов, распространяющихся от Солнца (солнечного ветра), для наблюдателя на Земле должно регистрироваться смещение континуума К-короны в красную сторону по всей короне.

2. Относительный показатель цвета континуума

Для поиска наблюдательных подтверждений теории Reginald et al. [8] мы использовали широкополосный фильтровый метод, подразумевающий регистрацию короны в красной и синей областях спектра на один кадр. Описание метода представлено в [9]. Отказались от абсолютной калибровки по серпу Солнца во время частных фаз. Использовали реперную 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 понятия показателя цвета C и относительного показателя цвета RCI , определяемые выражениями:

$$C = \frac{I_{red}^{cor} / I_{blue}^{cor}}{I_{red}^{ph} / I_{blue}^{ph}}, \quad C_{ref} = I_{red}^{ref} / I_{blue}^{ref}, \quad RCI = \frac{I_{red}^{cor} / I_{blue}^{cor}}{C_{ref}}.$$

I_{red}^{ph} , I_{blue}^{ph} , I_{red}^{cor} и I_{blue}^{cor} – интенсивности в красном и синем спектральных интервалах спектра фотосферы и короны соответственно, C_{ref} – показатель цвета реперной области. Все величины в выражениях получаются одновременно на один кадр во время полной фазы.

Оценим ожидаемые значения показателя цвета C . В реальной короне рассеивают электроны с $V_e \neq 0$. Для нерелятивистских электронов можно ожидать смещение рассеянного спектра, обусловленное эффектом Доплера. На рисунке 1 слева показаны спектры фотосферы (сплошная черная кривая) и рассеянные электроном, движущимся от Солнца со скоростью 10000 км/с (пунктир) и к Солнцу со скоростью 10000 км/с (серый штрих-пунктир), аппроксимированные функцией Планка. Вертикальные точечные линии соответствуют положениям λ_{max} коронального континуума в красной и синей областях. Справа сверху вниз показаны спектр континуума К-короны (I), эффективные кривые широкополосных фильтров (S), корональный континуум в красной и синей областях спектра (I'). Значение $C = 1.10$ (0.93) для $V_e = 100000$ км/с. Ожидаемые скорости на порядок меньше. Поэтому введение относительного показателя цвета RCI может улучшить точность определения до одного порядка.

На рис. 2 показаны уточненные 2D распределения RCI для корон 2006 (справа) и 1991 гг. (слева), выявляющие покраснение с расстоянием по всей короне на всех позиционных углах. Это первые наблюдательные подтверждения теории Reginald et al. [8]. Справа сверху в увеличенном мас-

штабе показаны реперные области, локализованные между полярными плюмами на расстоянии $\approx 1.1 R_{\odot}$. В центре – шкала относительного показателя цвета RCI : светло серый фон соответствует белому цвету, светлый – покраснению, темный – посинению. Отметим наличие диффузной и структурной составляющих, корреляцию со структурой короны и эффект усиления в нижней короне в диапазоне расстояний $< 1.2\text{--}1.3 R_{\odot}$.

Рис. 1.

Рис. 2.

Наблюдения поля лучевых скоростей околосолнечной пыли [10] показали, что основная масса пыли сосредоточена в плоскости эклиптики. Для оценки возможного вклада пыли в изменение цвета излучения К-короны определили для каждого ПСЗ положения средней плоскости гелиосферного токового слоя (ГТС) и плоскости эклиптики. Положение ГТС определя-

лось по данным Wilcox Solar Observatory. Детали определения положения плоскости эклиптики будут описаны в отдельной работе. На рисунке 2 белой линией отмечены положения проекции плоскости эклиптики, черной линией – положения проекции ГТС. Квази-симметрия 2D распределений *RCI* относительно проекции ГТС исключает вклад пылевой составляющей.

3. Заключение

2D распределения относительного показателя цвета *RCI* континуума К-короны для корон 11.07.1991 г. и 29.03.2006 г. выявляют следующее.

- Отсутствие тождественности в распределениях энергии в континуумах К-короны и фотосферы.
- Квази-симметрия 2D распределений *RCI* относительно проекции ГТС исключает вклад пылевой составляющей.
- Покраснение с расстоянием по всей короне на всех позиционных углах является первым наблюдательным подтверждением теоретических расчетов Reginald et al. [8]. Поэтому цвет континуума можно рассматривать как индикатор расширения короны.
- Различные корональные структуры имеют различные значения *RCI*. Детальный анализ посинения в нижней короне в диапазоне расстояний $<1.2\text{--}1.3 R_{\odot}$ будет выполнен в отдельной работе.

Литература

1. Шкловский И.С. Физика солнечной короны. – М.: Государственное издательство физ.-мат. литературы. 1962.
2. Никольский Г.М., Кучми С., Несмянович И.А. // Солнечные данные, 1983, № 4, 67.
3. Dorotovich I., Rybansky M. // Solar Phys. 1997, vol. 172, 207.
4. Cram, L.E. // Solar Phys., 1976, vol. 48, 3. doi 10.1007/BF00153327.
5. Ichimoto, K., Kumagai K., Sano I., et al. // Publ. Astron. Soc. Japan, 1996, vol. 48, 545.
6. Reginald, N. L., Davila J.M. // Solar Phys., 2000, vol. 195, 111.
7. Лунский Ю.Н. // АЖ, 1958, 35, 662.
8. Reginald, N.L., Cyr O.C. St., Davila J.M., et al. // Solar Phys., 2009, vol. 260, 347. doi 10.1007/s11207-009-9457-z.
9. Kim I.S., Nasonova L.P., D.V. Lisin, et al. Journal of Geophysical Research: Space Physics., 2017, vol. 122, # 2, 77. doi 10.1002/2016JA022623.
10. Shestakova L.I. // Astron. Letters, 1995, vol. 21, 196.