

УДК 523.98

О ВОЗМОЖНОСТИ «ЛОКАЛЬНЫХ» ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ ПО ДАННЫМ SOHO/LASCO

¹В.Г. Файнштейн, ²В.А. Леонович

ON A POSSIBILITY OF «LOCAL» MEASUREMENTS OF ELECTRON DENSITY IN THE SOLAR CORONA ACCORDING TO SOHO/LASCO DATA

¹V.G. Fainshtein, ²V.A. Leonovich

Для двух изображений короны по данным LASCO определены максимальные по лучу зрения («локальные») концентрации электронов в лучах повышенной яркости и между лучами пояса корональных стримеров. Сделан вывод, что некоторые лучи повышенной яркости обусловлены главным образом не увеличением в них плотности плазмы, а либо примыканием к поясу стримеров участков цепочек стримеров, либо изгибами пояса стримеров. Предложена модель изгиба пояса стримеров, адекватно описывающая наблюдаемые характеристики некоторых лучей повышенной яркости.

The maximum electron densities along the line-of-sight («local») in rays of higher brightness and between rays of coronal streamer belt were determined from LASCO data for two corona images. We concluded that some rays of high brightness are caused not by plasma density increase, but either by streamer chains' adjacency to the streamer belt or by streamer belt bends. A new model of a streamer belt bend reflecting main observable characteristics of some high brightness rays is proposed.

Введение

Измерение концентрации электронов корональной плазмы N_e в зависимости от координат и времени относится к числу ключевых задач диагностики солнечной атмосферы.

Наиболее развитые методы нахождения концентрации электронов в короне базируются на регистрации излучения либо солнечного, либо внесолнечного происхождения, интенсивность или другая характеристика которого связана интегральным соотношением с N_e [1–3]. Интегрирование производится вдоль луча зрения. В этом случае можно определить либо среднюю по лучу зрения концентрацию электронов, либо локальное значение N_e в плоскости неба в предположении сферической или осевой симметрии короны – весьма грубого приближения для сильно неоднородной и неизотропной короны. Поэтому разработка более точных методов определения концентрации электронов остается актуальной задачей солнечной физики.

Такая попытка предпринята в данной работе. Определены «локальные» значения концентрации электронов N_e в поясе корональных стримеров. Это оказалось возможным осуществить в протяженных по широте участках пояса стримеров, которые располагаются вблизи плоскости неба и параллельны ей. В этом случае вследствие малой толщины пояса стримеров интегрирование коронального излучения вдоль луча зрения упрощается и в результате можно определить максимальные значения N_e в поясе стримеров на различных расстояниях R от центра Солнца в плоскости неба.

Данные и методы анализа

Для нахождения концентрации электронов в возмущенной корональной плазме использовалось свечение белой короны, регистрируемое коронографом LASCO C2. При этом использовались калиброванные данные, в которых минимизировано влияние рассеянного света, виньетирования и других искажений изображений (см. [4]).

С концентрацией электронов связана яркость К-короны (B_K):

$$B_K \propto \int N_e(l)G(R,l)dl,$$

где l – координата вдоль луча зрения, $G(R, l)$ – геометрический фактор, независимый от N_e . Полная поверхностная яркость белой короны равна сумме яркостей двух компонент коронального излучения: яркости К-короны (B_K) и яркости F-короны. Для разделения яркости К- и F-короны использовался новый метод [4]. Конфигурация пояса стримеров определялась по форме рассчитанной в Стэнфордской обсерватории (WSO) в потенциальном приближении нейтральной линии магнитного поля на поверхности источника (<http://quake.stanford.edu/~wso/coronal.html>). Для оценки толщины пояса стримеров наряду с другими методами использовались измерения параметров плазмы в поясе стримеров на орбите Земли (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

Результаты

1. Для анализа были отобраны два случая, когда протяженный по широте участок пояса стримера был почти перпендикулярен плоскости солнечного экватора и находился в ближайшей окрестности плоскости неба: 05.11. (Е-лимб) и 15.12.1999 (W-лимб). На рис. 1 для иллюстрации показано изображение короны для одной из выбранных дат (http://lasco-www.nrl.navy.mil/daily_mpg/).

2. На рис. 2 приведены распределения яркости К-короны, полученные методом [4] для 05.11.1999 на $R=4R_\odot$ и $R=6R_\odot$ (здесь R_\odot – радиус Солнца). В вершинах характерных лучей повышенной яркости и во впадинах между такими лучами были определены концентрации электронов в поясе стримеров. Для этого предварительно из полной яркости К-короны был вычтен фон – яркость, обусловленная свечением части короны (вдоль луча зрения) вне пояса стримеров. Вычитание фона проводилось разными способами. В данном случае использовался вариант, когда фоном полагалась яркость ниже прямой линии, соединяющей значения яркости на полюсах. Для нахождения концентрации электронов на расстоянии R использовалась формула:

$$\max N_e(R) = 1.38 \cdot 10^{14} [B_K(R)/B_0][R/R_\odot]/\Delta\lambda, \text{ см}^{-3}$$

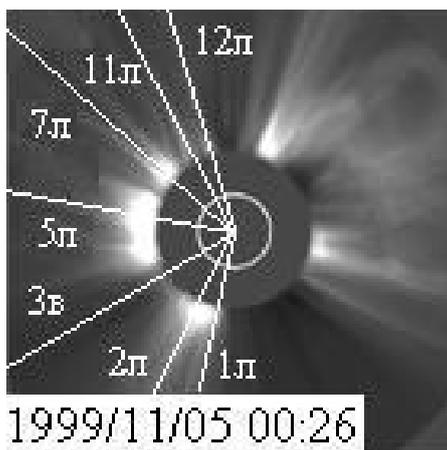


Рис. 1. Изображение короны по данным LASCO C2. Показаны некоторые лучи повышенной яркости и впадины (области пониженной яркости) между ними.

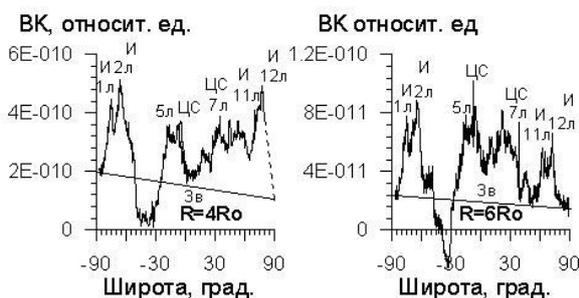


Рис. 2. Распределения по широте яркости К-короны на $R=4R_{\odot}$ и $R=6R_{\odot}$. Отмечены некоторые лучи и впадины между ними. ЦС – вероятные цепочки стримеров, И – лучи, связанные с изгибом пояса стримеров.

(детали см. в [6]).

Здесь $\max N_e(R)$ – максимальная концентрация электронов в поясе стримеров на расстоянии R ; $B_k(R)/B_0$ – относительная яркость К-короны, $\Delta\lambda$ – толщина пояса стримеров (в радианах) вдоль долготы.

3. На рис. 3 для изображения 05.11.1999 показаны примеры рассчитанных концентраций электронов $\max N_e(R)$ для лучей повышенной яркости и впадин между ними на $R=4R_{\odot}$ и $R=6R_{\odot}$. Приведены результаты расчетов для толщины пояса стримеров $\Delta\lambda=10^\circ$, близкой характерной (см. ниже). Значения $\max N_e$ на этих двух радиусах соединены линиями, соответствующими степенному закону спада $\max N_e(R)$ (аппроксимация). Линии, проходящие от $R=20R_{\odot}$ до орбиты Земли ($R=215.5R_{\odot}$) показывают область возможного изменения $N_e(R)$ на этих расстояниях (см. [4]). Линия, соединяющая значение $\max N_e(6R_{\odot})$ и верхнюю линию из группы линий, начинающихся на $R=20R_{\odot}$, проведена для оценки «правильности» найденных значений $\max N_e(R)$. Мы исходим из того, что в невозмущенной короне $N_e(R)$ и производная этой функции по радиусу $dN_e(R)/dR$ являются монотонными функциями ([4]). Сравнивая наклоны линий на участках $R=(4-6)R_{\odot}$, $R=(6-20)R_{\odot}$ и $R=(20-215.5)R_{\odot}$, можно сделать вывод о монотонности производной $\max N_e(R)$ по R . В тех случаях, когда производная не монотонная, мы считаем, что рассчитанные на

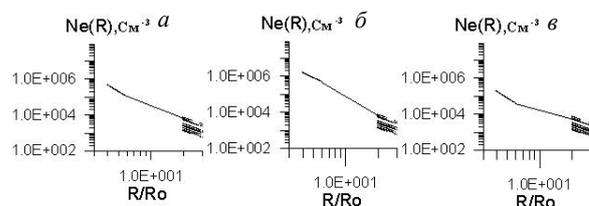


Рис. 3. Примеры расчета концентрации электронов. *a* – пример нахождения «правильных» (см. текст доклада) значений концентрации электронов $N_e(R)$; *b* – пример нахождения «неправильных» значений $N_e(R)$; *c* – пример расчета концентрации электронов во впадинах.

$R=4R_{\odot}$ и $R=6R_{\odot}$ концентрации электронов существенно отличаются от реальных значений $N_e(R)$. На рис. 3, *a* показан пример «правильных» расчетов $N_e(R)$, а на рис. 3, *b* – «неправильных». В последнем случае рассчитанные значения $N_e(R)$ могут на порядок превышать реальные.

Использовались три критерия (выполняющиеся одновременно) правильности значений $N_e(R)$.

1. Эти значения с точностью до 2–3 согласуются со значениями электронной концентрации, измеренной в поясе стримеров в предшествующих работах (см., например, [3, 4]). Указанные значения 2–3 могут быть обоснованы;

2. Зависимости $N_e(R)$ и $dN_e(R)/dR$ – монотонные функции R в промежутке $[4R_{\odot}; 215.5R_{\odot}]$;

3. Пролонгированные с расстояния $R=6R_{\odot}$ на $R=215.5R_{\odot}$ значения N_e попадают в диапазон измеряемых на орбите Земли концентраций протонов.

Наш анализ показал, что правильные значения N_e при толщине пояса стримеров $\Delta\lambda=10^\circ$ оказываются в относительно небольших по интенсивности лучах повышенной яркости К-короны и практически во всех впадинах яркости. Неправильные (завышенные) значения N_e оказались в большинстве самых интенсивных пиков яркости К-короны.

4. Для определения характерной толщины пояса стримеров $\Delta\lambda$ использовались два метода:

- По распределениям в зависимости от широты яркости К-короны $B_k(\theta)$ для случаев, когда участок пояса стримеров был практически перпендикулярен плоскости неба и находился вблизи экватора. Для этих изображений были определены характерные толщины пояса стримеров. Наименьшая толщина оказалась равной приблизительно $7-10^\circ$. Пример такого распределения $B_k(\theta)$ и способ нахождения $\Delta\lambda$ показан на рис. 4.

- По данным солнечного ветра в квазиперпендикулярной плоскости экватора участках пояса стримеров на орбите Земли. Оба метода дают близкие значения для $\Delta\lambda$.

5. Были проанализированы возможные причины появления лучей повышенной яркости в поясе корональных стримеров, которые не связаны с повышенными в них значениями N_e (лучи с неправильными рассчитанными значениями N_e). Анализировались три причины:

- 1) локальные утолщения пояса стримеров;
- 2) изгиб пояса стримеров;

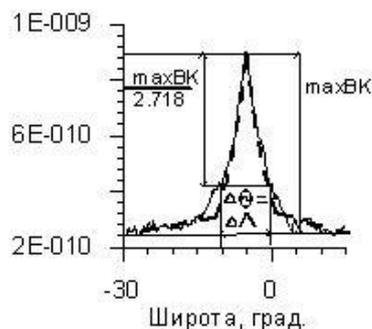


Рис. 4. Пример определения толщины пояса стримеров с помощью распределения яркости К-короны по широте. Участок пояса стримеров почти перпендикулярен плоскости неба и расположен вблизи солнечного экватора. Линией, соединяющей яркость на полюсах, выделяется свечение пояса стримеров (распределение яркости над этой линией). Толщина пояса стримеров $\Delta\Lambda$ определяется на высоте $\max B_K/2.718$. Штриховая линия – аппроксимация измеренной $B_K(\theta)$ элементарными функциями.

3) примыкание к поясу стримеров квазипараллельного экватору участка цепочки корональных стримеров.

Напомним, что цепочки стримеров разделяют корональные дыры с одинаковой преимущественной полярностью магнитного поля [5]. Анализ показал, что несколько рассмотренных лучей повышенной яркости могут быть связаны с цепочками стримеров. Изгиб пояса стримеров таким образом, что к наблюдателю будет направлен относительно протяженный

участок пояса, также приводит к образованию видимых лучей повышенной яркости К-короны. Такие изгибы могут возникать как на краях квазивертикального участка пояса стримеров, так и внутри этого участка. Мы смоделировали «внутренний» изгиб пояса стримеров и показали, что такие изгибы действительно могут приводить к образованию лучей повышенной яркости с угловым размером по широте и относительной яркостью К-короны, адекватным наблюдаемым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schwenn R., Marsch E. (eds.). Physics of the Inner Heliosphere, 1. Large-scale phenomena. Springer-Verlag, Berlin. 1990.
2. Aschwanden M.J. Physics of the solar corona. An Introduction. ISBN 3-540-22321-5 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 2004.
3. Hayes A.P., Vourlidas A., Howard R.A. Deriving the electron density of the solar corona from the inversion of total brightness measurements // *Astrophys. J.* 2001. V. 548. P. 1081–1086.
4. Файнштейн В.Г. Новый метод разделения яркости К- и F-короны по данным LASCO/SOHO // *Солнечно-земная физика.* 2007. Т. 10. С. 44–53.
5. Eselevich V.G., Fainshtein V.G., Rudenko G.V. Study of the structure of streamer belts and chains in the solar corona // *Solar Phys.* 1999. V. 188. P. 277–297.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск
²Иркутский государственный университет, Иркутск