

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Interferometric Investigations of the Solar Corona

Abstract. Results of interferometric observations of the solar corona during several total eclipses since 30 May 1965 are briefly reviewed. Directed and turbulent velocities in the green (λ 5303 Å) and red (λ 6374 Å) monochromatic corona and their relation with magnetic field topology are analyzed. Characteristics of $H\alpha$ cold coronal inclusions are considered. The temperature of the cold coronal component has been evaluated.

Наземные исследования динамики плазмы в нижней короне, где зарождается солнечный ветер и многочисленные взрывные процессы, представляются актуальными до сих пор. В ГАИШ использовался интерферометрический метод. Интерферограмма – это аналог спектрограммы с очень близким наложением порядков интерференции. Установка с эталоном Фабри–Перо была собрана в ГАИШ и впервые использована при наблюдении затмения 30 мая 1965 г. Сначала наблюдения проводились в зелёной и красной корональных линиях, позднее использовались также линии $H\alpha$ и K Ca II. Для слежения за Солнцем на разных затмениях использовались различные способы монтировки телескопических труб-рефракторов. Подробнее описание оптической установки дано, например, в (А.В. Delone, Е.А. Makarova, *Solar Phys.*, **9**, 116, 1969; А.В. Delone, М.И. Divlekeev, А.В. Gorshkov, Г.А. Porfir'eva, О.В. Smirnova, Е. Sukhanov, Г.В. Yakunina, Т.А. Birulia, *Proc. Int. Conf. "First results of 1999 total solar eclipse observations"*, 11–15 Sept. 2000, Varna, Bulgaria, 49, 2001).

Эта установка использовалась неоднократно во время наблюдения полных солнечных затмений. Основная цель состояла в исследовании движений в различных структурных образованиях короны. На рис. 1 представлена интерферограмма в λ 5303 (22 сентября 1968 г.), радиальный разрез системы интерференционных колец и примеры профилей линий (А.В. Delone, Е.А. Makarova, *Solar Phys.*, **45**, 157, 1975). Смещение наблюдаемого кольца относительно эталонного положения, получаемого по лабораторному источнику, позволяет определить лучевые скорости V_D в короне. Анализ профилей линий дает сведения о нетепловых (турбулентных) скоростях ξ . Фон белой короны образуется благодаря непрерывному излучению короны, проходящему через интерференционный фильтр, играющий роль предмонохроматора.

Первые наблюдения в 1965 и 1968 гг. показали, что нижняя корона более динамичная, чем это представлялось ранее: скорости V_D лежат в пределах от нескольких км с⁻¹ до нескольких десятков км с⁻¹, достигая в некоторых случаях 80–100 км с⁻¹, и могут быть направленными как к наблюдателю, так и от наблюдателя. По наблюдениям красной короны в 1965 г. величины лучевых скоростей варьируют в пределах от 10 до 70 км с⁻¹. Большая часть скоростей направлена к наблюдателю. Средняя скорость порядка –10 км с⁻¹. Всего получено около 150 значений. Профили достаточно широкие, что предполагает или более высокую температуру по сравнению с обычно

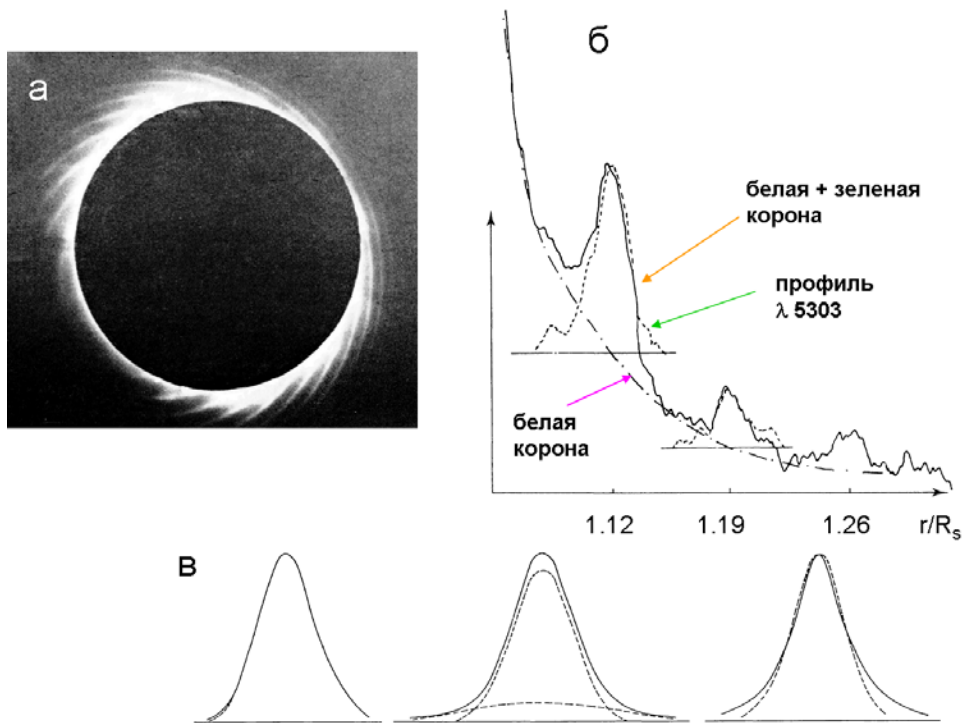


Рис. 1: 22 сентября 1968 г. а) интерферограмма в $\lambda 5303 \text{ \AA}$; б) фотометрический разрез (Delone, Makarova, Solar Phys., 1975); в) профили красной корональной линии 30 мая 1965 г. слева – гауссовский, в центре – сложный профиль (сумма двух гауссовских), справа – негауссовский (Delone, Makarova, Solar Phys., 1969).

принимаемой или наличие в короне турбулентных скоростей, сравнимых по величине с доплеровскими скоростями (А.В. Delone, Е.А. Макарова, Solar Phys., **9**, 116, 1969).

Согласно наблюдениям зелёной короны в 1968 г., получено более 900 профилей, большая часть из них или является гауссовскими или раскладывается на сумму гауссовских профилей. Наблюдались как положительные, так и отрицательные скорости. Примерно в 30% случаев $|V_D| < 15 \text{ км с}^{-1}$, для 10% случаев $|V_D| > 100 \text{ км с}^{-1}$. Подавляющее большинство скоростей лежат в пределах от 25 до 40 км с^{-1} (А.В. Delone, Е.А. Макарова, Solar Phys., **45**, 157, 1975).

В таблице приведены данные о лучевых скоростях (взятых по модулю), полученные по ряду затмений (А. Delone, М. Divlekeev, О. Smirnova, G. Yakunina, Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso, **28**, 268, 1999). Если учесть также результаты наблюдения затмения 7 марта 1970 г. (А.В. Делоне, Е.А. Макарова, АЦ, № 772, 1, 1973), то можно сделать вывод, что более 60% элементов в короне имеют скорости, не превышающие 30–40 км с^{-1} .

Полное солнечное затмение 31 июля 1981 г. наблюдалось в нескольких местах на территории СССР, в том числе группой из Словацкой АН в Братске (долгота 102°E) с узкополосными интерференционными фильтрами 5303 (2 \AA) и 6374 (6 \AA), и двумя группами из ГАИШ МГУ в пос. Шортанды Целиноградской области (долгота 71°E) и пос. Мариинское Хабаровского края (долгота 140°E), что давало разницу во времени порядка 1^{h} . Тем самым представилась уникальная возможность сравнить изображе-

Таблица 1: Число случаев N с лучевыми скоростями V (км/с)

Дата наблюдений	Место наблюдений	Длина волны, λ	$N(V_i - V_j)$			
			15–45	45–75	75–105	105–145
30.05.1965	О-ва Мануа	6374	60	4	13	1
22.09.1968	Озеро Балхаш, СССР	5303	225	66	80	19
31.07.1981	Хабаровский край, СССР	5303	67	34	8	0
22.07.1990	Чукотка, СССР	5303	73	53	19	8
09.03.1997	Читинская область, СССР	6374	72	14	15	0

ния, сфотографированные в разное время, и получить скорости в картинной плоскости по фильтрограммам и по лучу зрения по интерферограммам, полученным с эталоном Фабри–Перо. Это позволило определить полные скорости подъема корональных арок, наблюдавшихся на западном лимбе Солнца. Белая корона наблюдалась на коронографе экспедицией ВАГО и МГПИ имени В.И. Ленина в пос. Каргополь Павлодарской области. Наибольшая активность наблюдалась на западном лимбе Солнца, где на изофотах прослеживались три корональных конденсации (А.Н. Ушаков и др., АЦ, № 1340, 2, 1984). В красной и зелёной короне наблюдались разные структуры с разными скоростями. Структуры, видимые в монохроматической короне, не прослеживались в белой короне, что, по-видимому, скорее всего было связано с изменениями температуры, а не электронной плотности в определенных объёмах короны. Скорости составляли 10–25 км с⁻¹ (А.В. Delone, Е.А. Makarova, J. Sýkora, *Sov. Astron. Lett.*, **10**, 129, 1984; А.В. Delone, Е.А. Makarova, J. Sýkora, *Publ. Debrecen Heliophys. Observ.*, **5**, 517, 1983). Вероятно, одна из этих арок наблюдалась позднее в белом свете на высоте большей R_{\odot} на коронографе ИСЗ Р 78-1 (coronal transient). Этот транзиент зародился в активной области (АО) 17751 (17° S), ушедшей за лимб и сохранившей, по-видимому, свою активность, проявившуюся в виде нескольких вспышек при прохождении АО по диску Солнца.

Наблюдаемые профили линий хорошо представлялись гауссовским профилем или суммой гауссовских профилей. Чаще всего наблюдаемые профили оказываются шире, чем можно было бы ожидать, если бы их ширины определялись только тепловыми движениями излучающих ионов. Этот «излишек» обычно приписывают наличию нетепловых (турбулентных) движений вещества. Доплеровские полуширины связаны известным соотношением с температурой ионизации T_i и турбулентной скоростью ξ :

$$\Delta\lambda_D = \lambda/c \sqrt{2kT_i/m + \xi^2}.$$

Остальные обозначения общепринятые. Непосредственно из наблюдений T_i не определяется. Часто за T_i принимается величина температуры, соответствующая максимуму числа ионов в данной степени ионизации в зависимости от электронной температуры T_e , а величина T_i принимается равной T_e и в дальнейшем будет обозначаться просто буквой T .

Интерферограммы, получаемые на протяжении нескольких десятилетий во время ряда полных солнечных затмений сотрудниками ГАИШ, позволили проанализировать

динамику турбулентных скоростей в различных корональных структурах – корональных дырах (СН), корональных полостях вокруг спокойных протуберанцев (СQP) и спокойной короне (QC).

Во время затмения 11 августа 1999 г. наблюдались два спокойных протуберанца, а по данным SGD близко к восточному лимбу располагались две корональные дыры. Турбулентные скорости, полученные по профилям линии 5303 \AA , разные для разных структурных образований: $\xi_{\text{CQP}} = 14 \text{ км с}^{-1}$, $\xi_{\text{QC}} = 20 \text{ км с}^{-1}$, $\xi_{\text{СН}} = 28 \text{ км с}^{-1}$. Также были пересмотрены материалы наблюдений ($\lambda 5303 \text{ \AA}$) затмений 1968 и 1981 гг. (А.Б. Делоне, Г.А. Порфирьева, О.Б. Смирнова, Г.В. Якунина, Труды VII Пулковской междунар. конфер. по физике Солнца, ГАО РАН, Санкт-Петербург, 135, 2003). По интерферограмме в линии 5303 \AA , полученной Е.А. Макаровой на затмении 22 сентября 1968 г., по 26 профилям, измеренным вокруг спокойного протуберанца, $\xi_{\text{CQP}} = 24 \text{ км с}^{-1}$, в соседней спокойной короне $\xi_{\text{QC}} = 32 \text{ км с}^{-1}$, а над южным полюсом, где, по-видимому, существовала корональная дыра $\xi_{\text{СН}} = 50 \text{ км с}^{-1}$. По полуширинам линии 5303 \AA , полученным во время затмения 1981 г., для корональной полости вокруг спокойного протуберанца ξ на $\sim 25\%$ меньше, чем в спокойной короне. Подробнее результаты представлены в таблице 1 (А.В. Delone, G.V. Yakunina, G.A. Porfir'eva, O.B. Smirnova, Int. J. Geomagn. Aeron., **7**, No. 2, 2007), где приведены также результаты, полученные другими авторами по наземным и космическим наблюдениям. Средние значения, вычисленные нами по всем данным, представленным в табл. 1, $\xi_{\text{CQP}} = 16 \text{ км с}^{-1}$, $\xi_{\text{QC}} = 20.4 \text{ км с}^{-1}$, $\xi_{\text{СН}} = 40.5 \text{ км с}^{-1}$, т.е. $\xi_{\text{CQP}} < \xi_{\text{QC}} < \xi_{\text{СН}}$. Сведения о спокойной короне, полученные в видимой области спектра по наземным наблюдениям, подтверждаются наблюдениями из космоса в EUV. Как показано в (А.Б. Делоне, Г.В. Якунина, Г.А. Порфирьева, Изв. АН сер.физ., 2003, **67**, 381), среднее значение турбулентной скорости в спокойной невозмущенной короне, вычисленное нами по большому массиву данных, равно $\xi = 18.0 \pm 0.35 \text{ км с}^{-1}$, что близко к значению $\xi_{\text{QC}} = 20.4 \text{ км с}^{-1}$, приводимому в настоящем обзоре.

Сравнивая нетепловые скорости в корональной плазме в окрестности протуберанцев, в спокойной невозмущенной короне и корональных дырах, можно сделать вывод, что различие в турбулентности вызвано различием магнитных полей в рассматриваемых структурах. Турбулентность усиливается в корональных дырах, где магнитное поле имеет открытую конфигурацию и изменчиво по своей топологии и потоку по сравнению с областями невозмущенной короны и корональными полостями вокруг долгоживущих спокойных протуберанцев, которые характеризуются относительно стабильными магнитными полями закрытой конфигурации. Хотя истинная природа турбулентности до конца не изучена, но наиболее перспективным механизмом представляется МГД-турбулентность. Прохождение МГД-волн облегчено в полях с открытой конфигурацией.

Корона не однородна ни по своей плотности, ни по температуре. В ней существуют корональные конденсации и области со слабой $\text{H}\alpha$ -эмиссией с $T \sim 10^4 - 10^5 \text{ К}$. Впервые холодную эмиссию удалось наблюдать в 1968 г., и в последующие годы предпринимались неоднократные попытки получить достоверные сведения об $\text{H}\alpha$ -эмиссии (Léroy J.-L., Solar Phys., **25**, 413, 1972; Evans C.D., Solar Phys., **14**, 157, 1970; Gurtovenko E.A., Alikaeva K.V., Solar Phys., **21**, 325, 1971; Alikaeva K.V., Solar Phys., **41**, 89, 1975; Dermendjiev V.N., Mouradian Z., Duchlev P., Léroy J.-L., Sol. Phys., **149**, 267, 1994). Группе сотрудников из ГАИШ под руководством А.Б. Делоне удалось наблюдать холодную эмиссию во время затмения 9 марта 1997 г. (Первомайск Читинской области) и 11 августа 1999 г. в поселке Камен Бряг (Болгария).

В Первомайске использовалась одна труба со сменной оптикой для корональной линии 6374 и линии $H\alpha$ 6563. $H\alpha$ -кольца хорошо видны на интерферограмме на западном лимбе Солнца. В окрестности одного из протуберанцев и в конденсации над ним видна холодная эмиссия. Красная корона наблюдалась как на западном, так и на восточном лимбе. Гистограммы для лучевых скоростей в красной короне 9 марта 1997 г. показывают, что абсолютные величины скоростей $10 < V_D < 20$ км с⁻¹ на западном лимбе и $10 < V_D < 40$ км с⁻¹ на восточном лимбе. Элементы со скоростями от 40 до 70 км с⁻¹ составляют $\sim 10\%$ от общего числа движущихся элементов (А.В. Delone, М. Divlekeev, О. Smirnova, G. Yakunina, Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso, **28**, 268–271, 1999.). Лучевые скорости в холодной короне, видимой на высоте 8×10^4 км на западном лимбе Солнца, примерно такие же, как и в горячей красной короне. По оценкам турбулентные скорости могут быть порядка 20–40 км с⁻¹, а температура около 4.3×10^5 К (А. Delone, М. Divlekeev, О. Smirnova, G. Yakunina, Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso, **28**, 268, 1999).

В Болгарии в 1999 г. использовалась горизонтальная солнечная установка, состоящая из двух целостатов и двух параллельно расположенных труб с идентичной оптикой и системами регистрации. Использовались три эталона Фабри–Перо и три ИФ на линии $H\alpha$, К Ca II и Fe XIV. Полуширины фильтров, используемых в качестве предмонохроматоров, составляли: $\Delta\lambda(H\alpha) \sim 15$ Å, $\Delta\lambda(K Ca II) \sim 40$ Å, $\Delta\lambda(Fe XIV) \sim 15$ Å.

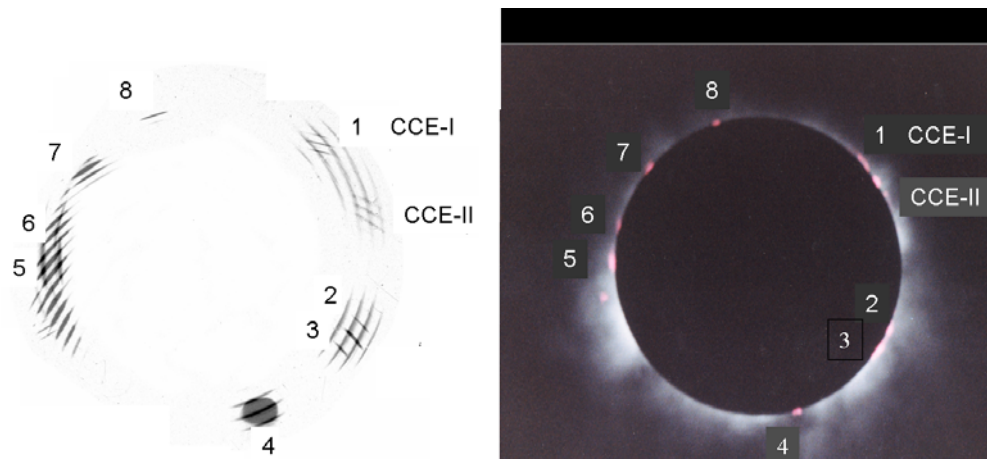


Рис. 2: Наложение интерферограммы в линии $H\alpha$ и К Ca II (слева). Корона и протуберанцы 11 августа 1999 г. (справа), (Делоне А.Б., Горшков А.Б., Смирнова О.Б., Якунина Г.В. The 10th European Solar Physics Meeting “Solar variability: from core to outer frontier” 9–14 September 2002. Prague. P. 589).

На рис. 2 приведено изображение короны, снятое с маленькой экспозицией в момент второго контакта, и интерферограммы в линиях $H\alpha$ и К Ca II, наложенные друг на друга. Для удобства сравнения, протуберанцы, видимые на лимбе Солнца на изображении нижней короны, пронумерованы. Положение цифр на интерферограммах приблизительно соответствует позиционным углам протуберанцев. Эмиссия в $H\alpha$ и К Ca II наиболее интенсивна в области протуберанца 1, но холодная эмиссия ССЕ (cold coronal emission) не связана с протуберанцем 1 и располагается на расстоянии $\sim 150''$ от лимбом Солнца. Слабое свечение, обнаруженное на интерферограммах вне области протуберан-

цев, – это искомая ССЕ. Кольца разных длин волн различаются по диаметру. Установки были сцентрированы по-разному, чтобы получить точки пересечения колец общие для линий $H\alpha$ и $K\ Ca\ II$. Центр системы $H\alpha$ колец расположен в области протуберанца 4. Центр $K\ Ca\ II$ колец – вблизи центра диска Солнца.

В области ССЕ фотометрирование проводилось вдоль 16 разрезов. Получено более 60 профилей и их доплеровских полуширин для каждой из интерферограмм. Для контроля измерены профили в 16 пересекающихся сегментах ССЕ. На рис. 3 приведены доплеровские полуширины $\Delta\lambda_D$ в зависимости от величины турбулентной скорости ξ , вычисленные в предположении разных температур T корональной плазмы. Для $Ca\ II$ величина T мало влияет на вид зависимости (т.к. Ca является тяжёлым элементом, его атомная масса $m = 40$). Для $H\alpha$ ($m = 1$) получается семейство кривых для набора температур $1 \times 10^4 < T < 1.5 \times 10^5\ K$ (G. Yakunina, O. Smirnova, A. Delone, A. Gorshkov, G. Porfir'eva, J. Phys. Studies, **6**, № 4, 429, 2002).

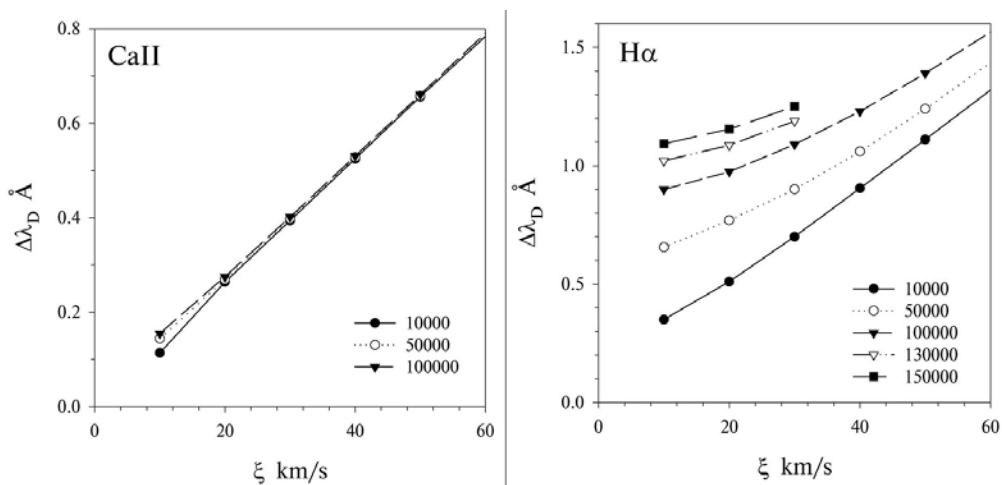


Рис. 3: Связь доплеровских полуширин $\Delta\lambda_D$ и турбулентной скорости ξ для линии $K\ Ca\ II$ (слева) и $H\alpha$ (справа) в зависимости от температуры (G. Yakunina, O. Smirnova, A. Delone, A. Gorshkov, G. Porfir'eva, J. Phys. Studies, **6**, № 4, 429, 2002).

По средней полуширине линии $K\ Ca\ II$, полученной из наблюдений, вычислялась средняя турбулентная скорость ξ . Полагая, что излучение линий $H\alpha$ и $K\ Ca\ II$ образуется в одном и том же объёме короны, мы можем воспользоваться турбулентной скоростью, полученной по полуширине линии $K\ Ca\ II$. Имея две величины – турбулентную скорость $\xi = 20\ km\ s^{-1}$, найденную по профилям линии Ca , и среднюю доплеровскую полуширину $\Delta\lambda_D = 1.07\ \text{Å}$, определённую по полуширинам линии $H\alpha$, мы можем выбрать определённую температурную кривую в семействе кривых $\Delta\lambda_D - \xi$, рассчитанных для линии $H\alpha$. В данном случае температура получается равной $T \sim 10^5\ K$. Учитывая разброс значений в наблюдаемых $\Delta\lambda_D$ и соответствующий разброс в турбулентных скоростях $17 < \xi < 28\ km\ s^{-1}$ (вызванных, по-видимому, несколькими различными условиями в разных частях ССЕ), получаем, что T может иметь значения от $5 \times 10^4\ K$ до $(1 - 1.5) \times 10^5\ K$ на расстояниях от лимба Солнца порядка 100 000 км.

Заключение. В 1960-х годах для наблюдения солнечной короны была создана установка с эталоном Фабри–Перо, которая успешно использовалась на протяжении нескольких десятков лет. Получены наблюдения короны в красной и зелёной линиях и холодных корональных конденсаций в линиях $H\alpha$ и $K\text{ Ca II}$. Впервые в 1965 г. в короне наблюдались высокие скорости до $80\text{--}100\text{ км с}^{-1}$. Данные о высокой динамичности короны подтвердились впоследствии при наблюдениях из космоса. По наблюдениям 1997 и 1999 гг. определены доплеровские и турбулентные скорости в области холодной $H\alpha$ -эмиссии. Они могут достигать нескольких десятков км с^{-1} . Оценена также температура в этой области порядка $1 \times 10^5\text{ К}$. Найдены турбулентные скорости в разных структурных образованиях в короне.

Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический
институт имени П.К. Штернберга,
Университетский пр. 13,
Москва 119991, Россия
galina-porfirieva@yandex.ru
yakunina@sai.msu.ru

Г.А. Порфирьева
G.A. Porfir'eva
О.Б. Смирнова
O.B. Smirnova
Г.В. Якунина
G.V. Yakunina

Поступила в редакцию 13 февраля 2013 года.