ПОЛЯРНЫЕ И ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ КОРОНАЛЬНЫЕ ДЫРЫ: ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Гопасюк О.С., Барановский Э.А., Тарашчук В.П., Штерцер Н.И.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

POLAR AND EQUATORIAL CORONAL HOLES: PHYSICAL CONDITIONS

Gopasyuk O.S., Baranovskii E.A., Tarashchuk V.P., Shtertser N.I.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

Coronal holes (CH) are usually studied using data on extra-atmospheric short-wavelength radiation and this ignores the processes in the chromosphere, at the base of the CH. Observations in the $H\alpha$ and HeI 10830 Å lines allowed us to determine the physical conditions in the CH at the level of the chromosphere. Polar and equatorial CH were observed in 2015–2017 at the decline phase of the 24th cycle of solar activity. The polar coronal hole was located in the northern hemisphere. During this time, its relative intensity varied in the range of 1.0046–1.0355 for the HeI 10830 Å line and 0.9676–0.9866 for the $H\alpha$ line. The intensity of the equatorial CH varied over 1.0102–1.0377 for the HeI 10830 Å line and 0.9509–0.9819 for the $H\alpha$ line. Chromosphere models are calculated to explain the observed features of the studied CH. The models are constructed as a result of calculations of the profiles of the lines $H\alpha$ and HeI 10830 Å using a non-LTR program. Models have shown that the kinetic temperature in the equatorial CH is similar to the kinetic temperature of the polar CH and also increases depending on the height in the chromosphere. In both cases, the difference between the atmospheres of the CH and the quiet Sun is already noticeable at the upper photosphere - lower chromosphere level. The CH temperature is lower by 1000–2000 K compared to the undisturbed chromosphere.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-69-72

Введение

Корональные дыры (КД) представляют собой крупномасштабные структуры в солнечной короне. КД наблюдаются на всех широтах, от полюсов до экватора. Исходя из продолжительности жизни и расположения, можно выделить три основные категории КД [1, 2]: полярные, неполярные (низкоширотные, изолированные) и транзитные (корональные димминги), связанные с эруптивными событиями. Какого-либо значительного контраста интенсивности между областями КД и окружающей их атмосферой не видно до тех пор, пока температура не превысит $6\text{--}7 \cdot 10^5$ К [3]. Согласно эмпирическим моделям атмосфер спокойного Солнца и КД существенное отличие температуры в КД начинается на уровне слоя с температурой, превышающей 10^5 К [4]. На уровне хромосферы в полярной КД, по сравнению с невозмущенной хромосферой, температура ниже на 500–1500 К, а плотность ниже в 2–3 раза [5].

В настоящей работе мы провели расчеты физических условий в хромосфере на двух разных широтах, которые могут помочь в объяснении наблюдаемой картины поведения вещества в основании полярных и экваториальных КД, наблюдавшихся на фазе спада 24 цикла солнечной активности в 2015–2017 гг.

Моделирование физических условий КД

Мы использовали одновременные наблюдения КД в линиях FeXII 193 Å (*SDO/AIA* [6]), HeI 10830 Å (данные телескопа БСТ-2 КрАО РАН с универсальным спектрофотометром [7]) и H α (данные обсерваторий сети GONG¹). Были проанализированы наблюдения полярной и пяти экваториальных КД во время прохождения ими центрального меридиана. Полярная КД существовала в северном полушарии в течение 24 кэррингтоновских оборотов. Расчет моделей хромосферы этой КД для трех моментов ее эволюции показал, что по всей высоте хромосферы температура и плотность в КД ниже, чем в невозмущенной хромосфере [5]. В настоящем исследовании ряд наблюдательных данных полярной КД был расширен. Экваториальные КД представляли собой сравнительно небольшие изолированные КД, наблюдавшиеся на низких широтах.

Рис. 1.

Границы КД, определенные по изображениям верхних слоев солнечной атмосферы в FeXII 193 Å, переносились на изображения в HeI 10830 Å и H α . Интенсивности в каждой из линий были приведены к уровню невозмущенного Солнца. Участки КД, в которых определились средние относительные интенсивности, располагались на расстоянии $\pm 10^\circ$ от центрального меридиана и на широтах 40° – 43° для полярной КД и -5° – 5° для экваториальных КД. Средние относительные интенсивности полярных (кружки; полые – данные из [5]) и экваториальных (треугольники) КД представлены

¹ <https://gong2.nso.edu>

на рис. 1. По сравнению с невозмущенной хромосферой во всех КД интенсивность в линии $\text{H}\alpha$ понижена на 2–4%. В то же время на уровне образования HeI 10830 Å интенсивность КД превышает интенсивность невозмущенной хромосферы на 1–4%.

Чтобы объяснить наблюдаемые интенсивности КД в линиях $\text{H}\alpha$ и HeI 10830 Å были проведены вычисления профилей этих линий для разных моделей хромосферы. Модели задавались ходом температуры, плотности, турбулентной и лучевой скоростей с глубиной в хромосфере. С помощью вычисленных профилей определялась интенсивность в центре линии, которая сравнивалась с наблюдаемым распределением интенсивности в КД. Таким образом подбирались модели хромосферы в которых вычисленные интенсивности соответствовали наблюдаемым. Вычисление моделей проводилось с помощью не-ЛТР программы, алгоритм которой представлен в работе [8], и модели для фотосферы и хромосферы (VALC) [9]. В расчетах использовалась модель атома водорода с 9 уровнями и модель атома гелия с 11 уровнями. Для КД была использована обычная схема полубесконечной среды.

Восстановленные с помощью наблюдаемых интенсивностей профили линий позволили получить кинетическую температуру T в основании КД в хромосфере. На рис. 2 представлен ход температуры T в хромосфере полярной (рис. 2а) и экваториальных (рис. 2б) КД в зависимости от изменения колонковой плотности m . Модели для невозмущенной хромосферы представлены кривыми 1. При вычислениях был задан начальный уровень температуры в невозмущенной хромосфере, от которого велся счет моделей с изменением значений T . Кривые 2 представляют уровень нижней границы значений кинетической температуры T , полученные для полярной и экваториальных КД. Анализ моделей показал, что по всей протяженности хромосферы температура как в полярной, так и в экваториальных КД

Рис. 2.

ниже по сравнению с невозмущенной хромосферой и увеличивается с увеличением высоты в хромосфере. Диапазон изменений температуры в полярной и экваториальных КД практически идентичен и составил 4000–9000 К. Различия между невозмущенной хромосферой и КД начинаются при температуре $\sim 4500\text{--}5000$ К. Самые большие различия температуры приходятся на верхнюю хромосферу. Линия HeI 10830 Å образуется при значениях колонковой плотности $m = 1.58 \cdot 10^{-6} \text{--} 6.31 \cdot 10^{-6}$ г·см⁻², H α образуется при $m = 1.58 \cdot 10^{-6} \text{--} 0.01$ г·см⁻². Значения $m \approx 0.1$ г·см⁻² соответствуют уровню температурного минимума.

Заключение

Наблюдения в линиях H α и HeI 10830 Å позволили нам определить физические условия в полярной и экваториальных КД на уровне хромосферы. Рассчитанные нами модели хромосферы показали, что кинетическая температура в экваториальных КД аналогична кинетической температуре полярной КД и также увеличивается в зависимости от высоты в хромосфере. В обоих случаях различие атмосфер КД и спокойного Солнца отмечено уже на уровне верхняя фотосфера – нижняя хромосфера. Температура КД ниже на 1000–2000 К по сравнению с невозмущенной хромосферой. По данным радионаблюдений [10] и SOHO/CDS [11] корональная температура экваториальных КД аналогична температуре областей полярных КД, что соответствует нашим результатам для хромосферы. Однако, как показали исследования [12], экваториальный и полярный быстрый солнечный ветер – это две отдельные подкатегории быстрого ветра, и эти различия могут быть связаны с особенностями полярных и экваториальных КД, которые в действительности являются двумя отдельными типами регионов, а не одним и тем же типом региона, который наблюдается на разных широтах.

Литература

1. Harvey K.L. // in Proc. 8th International Solar Wind Conference, AIP Conf. Ser., 382, Eds. D. Winterhalter et al., Melville, NY: AIP, 9, 1996.
2. Harvey K.L., Recely F. // Solar Phys., 211, 31, 2002.
3. Stucki K. et al. // Astron. Astrophys., 381, 653, 2002.
4. Borovik V.N. et al. // Sov. Astron., 34, 522, 1990.
5. Baranovskii E.A. et al. // Astrophysics, 62, 226, 2019.
6. Lemen J.R. et al. // Solar Phys., 275, 17, 2012.
7. Степанян Н.Н. и др. // Изв. Крым. Астрофиз. Obs., 96, 171, 2000.
8. Avrett E.H., Loesser R. // SAO, Special Report, 303, 1969.
9. Vernazza J.E. et al. // Astrophys. J. Suppl. Ser., 45, 635, 1981.
10. Chiuderi Drago F. et al. // Astron. Astrophys., 348, 261, 1999.
11. Del Zanna G., Bromage B.J.I. // J. Geophys. Res., 104, A059753, 1999.
12. Zhao L., Landi E. // Astrophys. J., 781, 110, 2014.