КОРОНАЛЬНЫЕ ДЫРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ЛИНИЯХ He I И H α

Гопасюк О.С., Барановский Э.А., Штерцер Н.И.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

CORONAL HOLES FROM He I AND H α LINE OBSERVATIONS

Gopasyuk O.S., Baranovskii E.A., Shtertser N.I.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

The physical state of matter at the base of the coronal hole at the level of the chromosphere was studied from observations in the H α and He I 10830 Å lines. The polar coronal hole was observed in the northern hemisphere in 2015–2017 during 24 Carrington rotations. Boundaries of the coronal hole were determined from observations in the 193 Å line. Intensities in the lines were expressed in units of the unperturbed Sun. For the He I 10830 Å line, the relative intensity of coronal holes varied within 1.0046–1.0355, for the H α line – within 0.9676–0.9753. Models of the chromosphere explaining the observed features are calculated. Models are built based on calculations of the He I and H α line profiles in the non-LTE approximation. The difference in the atmospheres of coronal holes and the quiet Sun begins at the level of the upper photosphere at $T > 4 \cdot 10^3$ K. Throughout the chromosphere, the temperature and density in the coronal hole is lower than in the undisturbed chromosphere.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-119-122

Введение

Корональные дыры (КД) являются областями самой низкой плотности в солнечной атмосфере. Их низкая плотность и температура по сравнению с внешней короной приводят к уменьшению излучения в ультрафиолете и мягком рентгене. В фотосфере и нижней хромосфере температура и плотность в основании КД отличается от значений окружающей атмосферы незначительно. В корональных линиях не видно какого-либо значительного контраста интенсивности между областями корональных дыр и окружающей их атмосферы до тех пор, пока температура не превысит 10^5 К. Начиная с высот десятков тысяч километров над уровнем фотосферы температура в КД становится заметно ниже температуры окружающей короны и составляет порядка $1\text{--}1.5 \cdot 10^6$ К. Плотность КД на этих высотах также ниже.

В настоящей работе мы на основании наблюдений КД полученных на AIA/SDO [1], Башенном солнечном телескопе БСТ-2¹ Крымской астрофизической обсерватории РАН и данных обсерваторий сети GONG², предлагаем возможный вариант физических условий в основании КД на уровне хромосферы.

¹ <http://solar.craocrimea.ru/eng/observations.htm>

² <https://gong2.nso.edu>

SDO/AIA получает изображения полного диска Солнца в линии *SDO/AIA* в линии $193\text{\AA}$, с пространственным и временным разрешением $0''.6 \text{ pixel}^{-1}$ и 12 с, соответственно. Наземные хромосферные наблюдения в линии $\text{H}\alpha$, полученные солнечными обсерваториями сети GONG, имеют пространственное разрешение $\sim 1''$ пиксель $^{-1}$. В КрАО РАН изображения полного диска Солнца в инфракрасной линии $\text{He I } 10830 \text{ \AA}$ получают с универсальным спектрофотометром телескопа БСТ-2 [2].

Метод исследований

Исследование физических условий в основании КД проведены по данным наблюдений полярной КД, существовавшей в северном полушарии 24 кэррингтоновских оборота в июне 2015 г. – марте 2017 г. Были использованы одновременные данные наблюдений КД в трех спектральных линиях с 17.08.2015 по 09.07.2016. Изображения Солнца в каждой из линий были приведены к уровню спокойного Солнца, заведомо лишённого любой активности. Границы КД определялись по изображениям в линии $193 \text{ \AA}$ с помощью алгоритмов предложенных в работах [3, 4] и затем переносились на изображения в $\text{He I } 10830 \text{ \AA}$ и $\text{H}\alpha$. *SDO/AIA* изображения Солнца в линии $193 \text{ \AA}$ на рис. 1 показывают эволюцию полярной корональной дыры с 17.08.2015 по 09.07.2016. Сплошными контурами нанесены границы КД.

Рис. 1.

Интенсивности потока излучения в КД в линии $193 \text{ \AA}$ менялась в пределах 0.2094–0.3034, в линии $\text{He I } 10830 \text{ \AA}$ – 1.0046 – 1.0355 и в линии $\text{H}\alpha$ – 0.9676–0.9753. В линиях $193 \text{ \AA}$ и $\text{H}\alpha$ интенсивность КД понижена. И если в короне понижение составило 70–80 %, то в хромосфере, на высотах образования $\text{H}\alpha$ оно составило всего 2–3%. В то же время в хромосфере на уровне образования $\text{He I } 10630 \text{ \AA}$ интенсивность КД выше на 1–4%.

Для объяснения наблюдаемых интенсивностей корональных дыр в хромосфере были проведены вычисления яркости КД в центре линий. Увеличение яркости в центре линии означает соответствующее изменение профиля линии. Профили линий вычислялись для различных физических

условий в атмосфере Солнца от области температурного минимума до верхней хромосферы. Модель определялась ходом параметров – температуры, плотности, турбулентной и лучевой скоростей, с высотой. По вычисленным профилям определялась интенсивность в центре линии, которая сравнивалась с наблюдаемым распределением интенсивности в КД. Таким образом, подбирались модели хромосферы, в которых вычисленные интенсивности соответствуют наблюдаемым. Построение моделей проводилось по наблюдениям в линиях $\text{H}\alpha$ и $\text{He I } 10830 \text{ \AA}$ с помощью неЛТР программы, алгоритм которой представлен в работе [5].

Результаты вычислений

Восстановив профили линий по наблюдаемым интенсивностям была получена температура и плотность в основании КД в хромосфере. На рис. 2 представлен ход (а) температуры и (б) плотности в моделях хромосферы, объясняющих наблюдаемые интенсивности КД в линиях $\text{H}\alpha$ и $\text{He I } 10830 \text{ \AA}$, в зависимости от высоты в хромосфере. Ось абсцисс выражена в единицах колонковой плотности. Линия $\text{He I } 10830 \text{ \AA}$ образуется при значениях $\lg(m) = -5.8 - -5.2 \text{ г/см}^2$, $\text{H}\alpha$ образуется при $\lg(m) = -5.8 - -2 \text{ г/см}^2$. Значения $\lg(m) \approx -1 \text{ г/см}^2$ соответствуют уровню температурного минимума. Плотность представлена логарифмом числа атомов водорода. Сплошными кривыми показан ход изменения параметров T и n_{H} в невозмущенной хромосфере. Штриховыми и пунктирными кривыми показаны изменения параметров при различных наблюдаемых интенсивностях в хромосферных линиях.

Рис. 2.

Модели характеризуются увеличением температуры в КД с высотой. Диапазон изменения температур в КД составил 4580–8150 К. Плотность в КД понижается с увеличением высоты и меняется от $\lg(n_{\text{H}}) = 14.8$ в области температурного минимума до значений $\lg(n_{\text{H}}) = 9.8$ в верхней хромосфере. Как видно из рис. 2а, температура в корональной дыре ниже по

сравнению с невозмущенной хромосферой. Различие составляет 500–1500К. Самые большие различия достигаются в верхней хромосфере. Плотность в КД (рис. 2б) ниже по сравнению с невозмущенной хромосферой в 2–3 раза.

Заключение

По данным наблюдений в линиях $\text{H}\alpha$ и $\text{He I } 10830 \text{ \AA}$ определены температура и плотность в КД в виде зависимости этих величин от высоты в хромосфере. Вычисления проведены на основании расчетов профилей линий $\text{H}\alpha$ и $\text{He I } 10830 \text{ \AA}$ с помощью неЛТР программы.

На уровне хромосферы температура в КД ниже на 500–1500°К по сравнению с невозмущенной хромосферой, плотность в КД ниже по сравнению с невозмущенной хромосферой 2–3 раза.

Таким образом, мы получили, что уменьшение температуры и плотности в КД происходит по всей хромосфере, включая и верхние слои фотосферы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-42-92017 р_а.

Литература

1. *Lemen J. R. et al.* // Solar Phys. 2012. V. 275. P. 17.
2. *Stepanian N.N. et al.* // Bull. of the Crimean Astrophys. Obs. 2000. V. 96. P. 171.
3. *Rotter T., Veronig A.M., Temmer M., Vršnak B.* // Solar Phys. 2012. V. 281. P. 793.
4. *Reiss M.A. et al.* // Space Weather. 2016. V. 14.
5. *Avrett E.H., Loeser R.* // SAO. Special Report. 1969. V. 303.