

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР ПО НАЗЕМНЫМ И КОСМИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Степанян Н. Н., Малащук В. М.

НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория», п. Научный, Крым, Украина

По наблюдениям 104 корональных дыр в линиях He I 10830 Å, Fe IX, X 171 Å, Fe XII 195 Å и в линии Fe XV 284 Å выделены две группы корональных дыр, отличающихся характером изменения их площади с высотой. Корональные дыры первой группы являются областями с открытой магнитной конфигурацией. Для корональных дыр второй группы магнитная структура на корональном уровне не может считаться полностью открытой. Для корональных дыр первой группы изменение площади распространяется снизу. Во второй группе изменения площади на разных уровнях часто не связаны друг с другом. Полученные результаты важны при разработке методов прогноза характеристик солнечного ветра. Использование наблюдений корональных дыр только в линии He I 10830 Å для прогноза недостаточно. Необходимо привлечение данных наблюдений короны из космоса.

1. Введение

Корональной дырой (КД) по наблюдениям в линии He I 10830 Å называется солнечное образование, на 2-4 % превышающее по яркости невозмущенный диск и имеющее пониженный контраст. Эти наблюдения относятся к переходной зоне между хромосферой и короной. В короне по наблюдениям в ультрафиолетовых и рентгеновских линиях, в частности в рассматриваемых дальше линиях 171, 195 и 284 Å, КД имеют вид темных образований. Изучение КД представляет интерес не только для фундаментальной науки, но важно и с точки зрения прикладных исследований. Известно, что КД являются местом возникновения высокоскоростных потоков солнечного ветра. Но связь КД с этими потоками неоднозначна и требует дальнейшего изучения. Одним из условий выхода потоков солнечного ветра является «открытость» магнитной конфигурации области на Солнце. Магнитную конфигурацию КД принято считать открытой. Этот вывод сделан на основе двух наблюдательных фактов. 1. Сравнение КД с фотосферными фоновыми магнитными полями показало, что каждая КД находится в области фонового поля одного знака. 2. Первые наблюдения КД на космическом аппарате «Skylab» [1] показали, что, как правило, каждой КД, наблюдаемой в линии гелия, соответствует КД такого же размера в короне при наблюдениях в мягком рентгене. Только некоторому количеству КД небольшого размера, наблюдаемых в линии гелия, в рентгене нет соответствующей КД.

Дальнейшие исследования КД показали, что представление об открытой магнитной конфигурации в КД не всегда справедливо. Так, в работе Маланушенко и Степанян [2] найдено, что изменение площади с высотой различно в разных КД. Площади КД могут достигать максимума на разных высотах. Часть КД наблюдается только на нижнем уровне и отсутствует на верхнем. Эти результаты были получены по ограниченному материалу. Те же авторы в работе [3] показали, что такой, казалось бы, неоспоримый факт, как расположение КД в структуре фонового магнитного поля одного знака, не

подтверждается для больших высот в атмосфере Солнца. На расстоянии 2.5 радиуса Солнца (на поверхности источников) только в 75 % случаев над КД магнитное поле имеет тот же знак, что и в фотосфере. Целью настоящей работы является исследование высотной стратификации КД и ее изменений со временем.

2. Наблюдения и их обработка

Исходным материалом нам послужили изображения полного диска Солнца, полученные в нескольких спектральных диапазонах: в линии He I λ 10830 Å (далее He I), в линии Fe IX, X λ 171 Å (далее 171 Å), в линии Fe XII λ 195 Å (далее 195 Å) и в линии Fe XV λ 284 Å (далее 284 Å). Наблюдения в He I получены нами на Башенном Солнечном телескопе БСТ-2 НИИ КрАО с универсальным спектрофотометром [4]. Остальные данные получены на КА SOHO с прибором EIT и взяты нами из архивов INTERNET для дней наблюдений на БСТ-2. Описание прибора EIT дано в [5]. Там же приведены температуры, характерные для этих линий. Линии Fe IX, X λ 171 Å соответствует температура $1.3 \cdot 10^6$ К, Fe XII λ 195 Å — $1.6 \cdot 10^6$ К, Fe XV λ 284 Å — $2.0 \cdot 10^6$ К.

По наблюдениям КрАО в 2000 году были отобраны изображения Солнца, на которых имелись корональные дыры. С 29.02.2000 по 10.08.2000 гг. всего отобрано 104 корональные дыры. Сюда входят одиночные наблюдения и серии - наблюдения одной и той же КД в течение нескольких дней.

Изображения, полученные на SOHO прибором EIT, совмещались с изображениями в He I и нормировались таким образом, что яркость невозмущенного диска принималась за единицу.

3. Площади КД на разных уровнях в атмосфере Солнца и их изменение со временем

Само понятие «площадь КД» достаточно неопределенно. Во-первых, в большинстве случаев у КД нет четких границ. И во-вторых, в каждой КД разброс интенсивностей отдельных точек достаточно велик. Заранее неизвестно, какие интенсивности соответствуют КД, а какие – вкраплениям темных и ярких элементов. Поэтому при определении площади КД неизбежно принятие какого-то соглашения. Аналогично тому, как это было сделано в работе Маланушенко, Степанян [2], сначала мы определили интервал значений относительных интенсивностей, характерных для КД в каждой спектральной линии. Для нормированных данных (интенсивность невозмущенного Солнца равна 1) минимальные границы таких интервалов для линий 171 Å, 195 Å, 284 Å и максимальную границу для линии He I принимаем за граничные значения интенсивностей КД I_{ch1} . За второе граничное значение интенсивности принимаем $I_{ch2} = 1 + 0.2 (I_{ch1} - 1)$. Чтобы унифицировать данные для всех линий, мы преобразовали все нормированные значения интенсивности (I_{old}) по формуле

$$I_{new} = 0.5 + 0.5(I_{old} - 1)/(I_{ch1} - 1).$$

При этом новое значение интенсивности для невозмущенного диска $I_{\text{new}} = 0.5$, первое граничное значение интенсивности КД I_{ch1} преобразуется в 1, а I_{ch2} — в 0.6. Таким образом, мы получаем, что для изображений во всех рассматриваемых линиях интенсивности, характерные для корональных дыр, лежат в интервале 0.6–1.

Теперь можно сформулировать понятие площади корональной дыры. Площадью КД в некотором выделенном участке поверхности Солнца мы называем суммарную площадь элементов, имеющих интенсивность, характерную для КД. Практически определение площади сводится к выделению прямоугольника на изображении Солнца, заведомо включающего КД на всех четырех видах изображения, и определения для каждого изображения числа пикселей с интенсивностью КД. Дальнейший учет размера пикселя в секундах дуги и расстояния КД от центра Солнца позволяет получить площадь в квадратных километрах. Чтобы не загромождать графики, в качестве единицы площади мы будем использовать пиксели. Площадь одного пикселя равна $5.26 \cdot 10^7 \text{ км}^2$. На рис. 1 представлены результаты измерения площадей 104 КД в четырех линиях. По оси абсцисс отложены площади на изображениях в линии He I. По оси ординат разными значками представлены площади на изображениях в линиях 171 Å, 195 Å и 284 Å.

На графике можно выделить 3 области расположения точек.

1. Область, в которой площади $S > 1000$ и в линиях 171 Å, 195 Å и 284 Å. Они больше или равны площади в линии He ($S_{\lambda} \geq S_{\text{He}}$). Отнесем КД этой области к первой группе.
2. Область, в которой $S > 1000$ и площади в линиях 171 Å, 195 Å и 284 Å меньше площади в линии He ($S_{\lambda} < S_{\text{He}}$). Отнесем КД этой области ко второй группе.
3. Область малых площадей, $S < 1000$ для всех видов данных и всех линий.

Рассмотрим КД групп 1 и 2. Большинство КД, входящих в группу 1 ($S_{\lambda} \geq S_{\text{He}}$), представляют собой на всех уровнях большие аморфные образования без заметных вкраплений элементов, отличающихся по яркости от элементов КД. Аморфность этих КД относительна. Практически везде видны элементы разной яркости, прослеживается супергрануляция. КД второй группы на уровне He I во многих случаях практически не отличаются от КД первой группы. В некоторых из них можно видеть вкрапление темных точек, а в редких случаях и коротких темных петель. На более высоких уровнях, в линиях 171 Å и 195 Å, картина существенно изменяется. На темном фоне КД видны яркие петли и точки. Если в He I были видны петли и точки, то на верхних уровнях также видны петли, но более протяженные, чем в He I. Количество ярких точек на верхних уровнях существенно больше, чем темных на нижнем уровне.

Определение средней интенсивности элементов КД первой и второй групп в каждой из трех линий (He I, 171 Å и 195 Å) показало, что различия в интенсивностях малы и лежат в пределах ошибок.

Аморфность и малая контрастность КД первой группы на всех рассматриваемых уровнях свидетельствует о достаточно простой и однородной магнитной структуре КД.

Отсутствие волоконных структур на всех уровнях позволяет предполагать открытую магнитную конфигурацию в КД.

На уровне верхней хромосферы (в линии He I) вид КД 1-й и 2-й групп практически одинаков. С ростом высоты (по наблюдениям в линиях 171 Å и 195 Å) в КД второй группы количество структурных элементов увеличивается, петельные структуры усложняются. Это свидетельствует об усложнении структуры магнитного поля с высотой. В КД 2-й группы трудно предположить наличие открытой магнитной конфигурации.

На основании сравнения КД первой и второй групп приходим к выводу, что разное изменение их площадей с высотой можно объяснить различием магнитной структуры атмосферы Солнца в области КД этих групп. Для КД первой группы характерна открытая магнитная конфигурация на всех уровнях. В КД второй группы на уровне верхней хромосферы силовые линии, в основном, вертикальны. Верхние слои КД частично закрыты корональными петельными структурами, основания которых находятся вне КД.

Для КД, наблюдавшихся более одного дня, мы определили суточное изменение их площади на трех высотах в течение суток $\Delta S_{\text{He I}}$, ΔS_{171} , ΔS_{195} . Метод наименьших квадратов позволяет представить зависимости этих площадей в виде следующих формул

$$\Delta S_{171} = 0.68 \Delta S_{\text{He I}} \quad \Delta S_{195} = 0.63 \Delta S_{\text{He I}}$$

Коэффициент корреляции для этих двух пар линий составили $R=0.697$ для ΔS_{171} и $\Delta S_{\text{He I}}$ и $R=0.626$ для ΔS_{195} и $\Delta S_{\text{He I}}$. Суточные изменения площадей КД на уровне He I составляют 300–500 пкл.

На рис. 2 приведено несколько примеров изменения площади КД, наблюдавшихся более 4 дней. Как видно, характер изменений площади КД со временем на разных высотах не всегда одинаков. Изменения площадей на разных высотах для КД первой группы происходят практически синхронно ($R > 0.62$) или с наибольшим запаздыванием 0.5-1 сут. на больших высотах по сравнению с уровнем наблюдения линии He I. Это говорит о том, что причина изменения площади КД находится в нижних слоях. Анализ наблюдений показывает, что для КД первой группы изменения площади чаще всего связаны с выходом нового магнитного потока или с исчезновением имеющихся вкраплений магнитного поля.

Для КД второй группы синхронность изменения площадей наблюдается реже. Часто изменения на верхних уровнях происходят при неизменной площади КД на уровне He I. По-видимому, такие изменения можно связать с изменениями магнитного поля соседних активных областей на больших высотах, например с корональными арочными структурами, их ростом или изменением наклона.

4. Выводы

На большом наблюдательном материале были выделены две группы корональные дыр, отличающихся характером изменения площади с высотой, что можно объяснить различием магнитной структуры атмосферы Солнца в области корональные дыр этих

групп. Корональные дыры первой группы являются областями с открытой магнитной конфигурацией. Корональные дыры второй группы содержат на верхних уровнях петельные структуры, яркие точки, и их магнитная структура не может считаться полностью открытой. Изменение площади корональные дыр в сутки составляет в среднем $2 \cdot 10^{10}$ км². Для корональные дыр первой группы изменение площади распространяется снизу. Для второй группы картина более сложная, часто изменения площади на разных уровнях не связаны друг с другом. Это свидетельствует о том, что свечение в линии He I не может быть полностью объяснено влиянием коронального излучения.

Полученные результаты важны при разработке методов прогноза солнечного ветра. Они показывают, что использование для прогноза наблюдений корональные дыры только с Земли в линии He I 10830A недостаточно. Необходимо привлечение наблюдений короны из космоса.

1. Kahler S. W., Davis J. M. and Harvey J. W. // Sol. Phys., 1983, v 87, p.47-56.
2. Malanushenko E. V, Stepanian N. N., 1997, Comparison of Physical Conditions in Coronal Holes on Different Heights of Solar Atmosphere. In: Proc. Solar and Heliospheric plasma Physics, 13-18 May 1996. Thessaloniki, Greece, p. 38.
3. Степанян Н. Н., Маланушенко Е. В. . Связь корональных дыр с окружающими магнитными полями // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории, 2001, т. 97, с.69-75.
4. Степанян Н. Н., Долгополова Е. В., Елизаров А. И. и др., Солнечный универсальный спектрофотометр // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории, 2001, т.96, С. 194-204.
5. The SOHO Mission, ed. Fleck D, Domingo V., Poland A. I. Kluwer Academic Publishers, 1995, pp. 291–312.

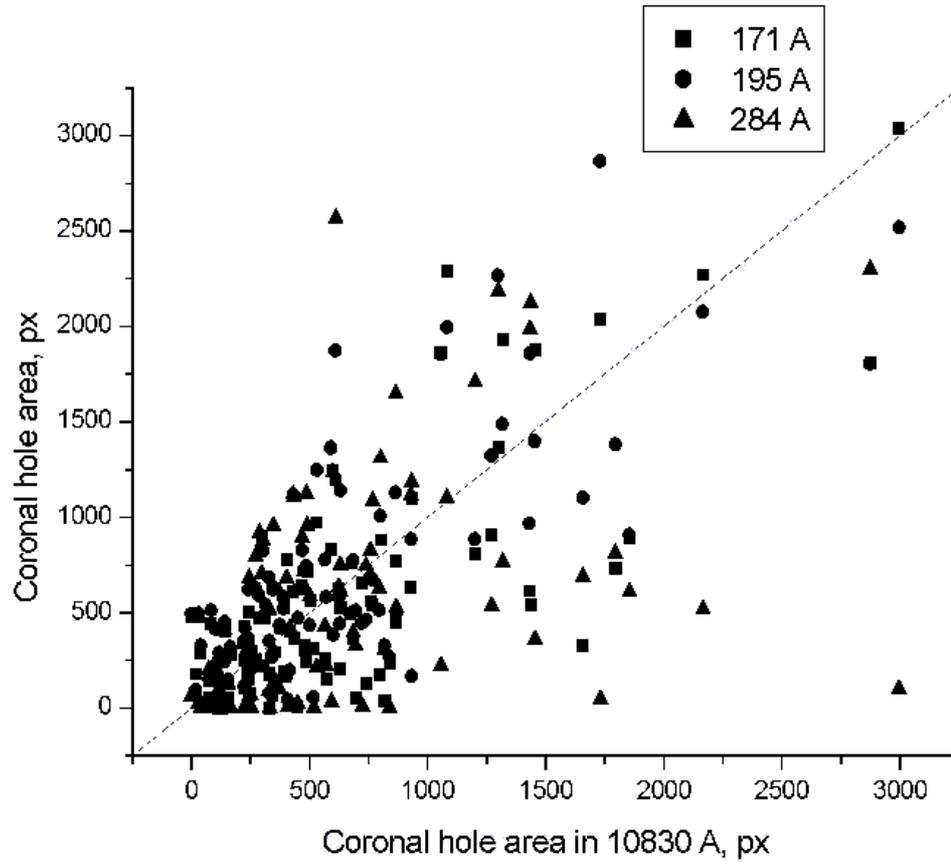


Рис. 1. Площади 104 корональних дыр по наблюдениям в линиях He I, $\lambda 171 \text{ \AA}$ и $\lambda 195 \text{ \AA}$

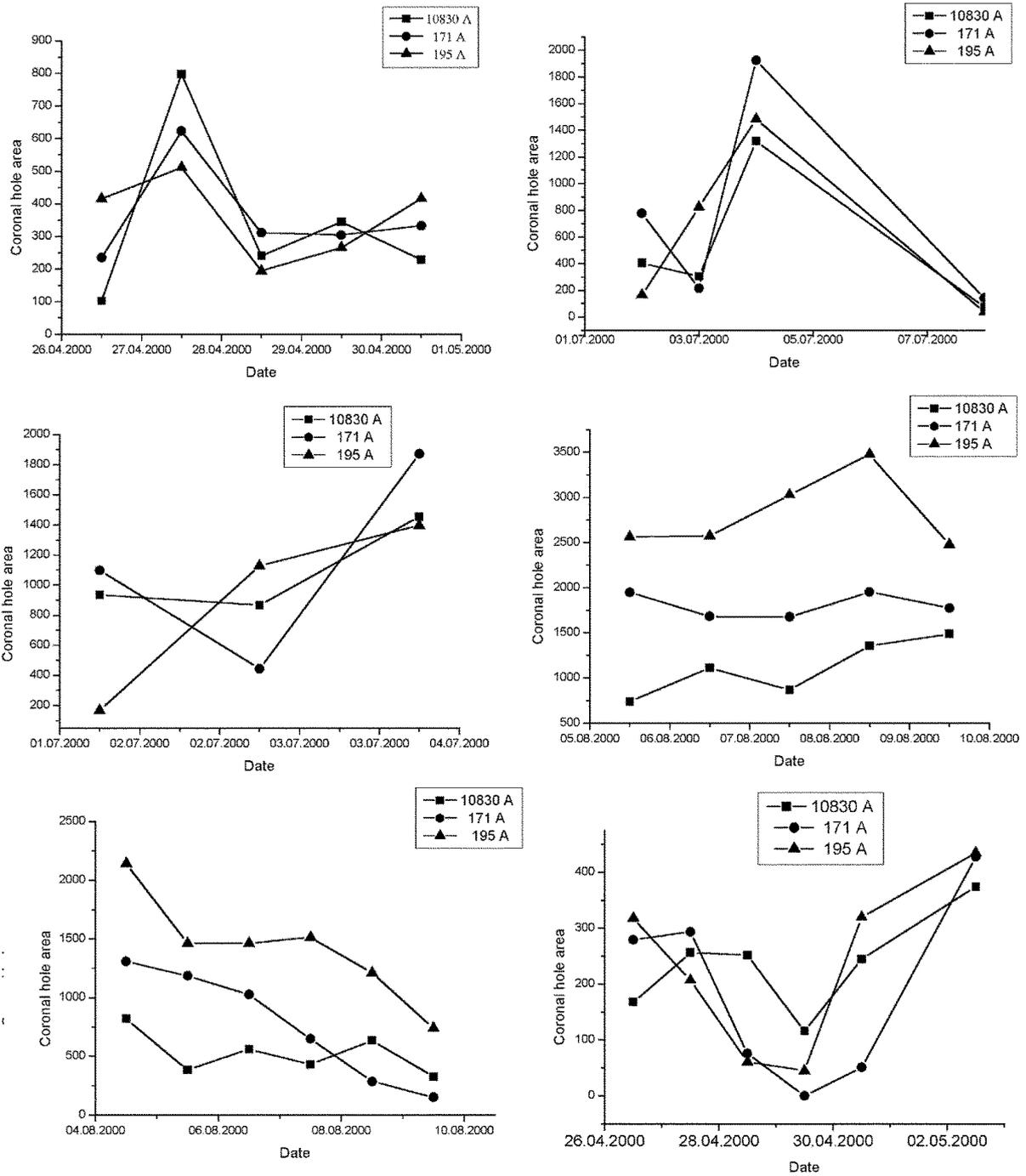


Рис. 2. Примеры изменения площади КД со временем в линиях He I, λ 171Å и λ 195Å