

УДК 523.94-98

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ И КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР НА СОЛНЦЕ

Л. М. Козлова

(ГАИШ)

E-mail: klm@sai.msu.ru

Исследуются спектры в ИК-линии He I 10830 Å, изображения в мягком рентгене со спутника Yohkoh и магнитная структура в местах ярких активных областей, где наблюдается сильный корональный нагрев в отсутствие вспышек. Установлены некоторые особенности взаимодействия активной области с сильным магнитным широм и соседствующей с ней корональной дырой. Предполагается, что в результате процессов магнитного пересоединения, протекающих непрерывно между открытыми силовыми линиями магнитного поля корональной дыры и в основном замкнутыми силовыми линиями активной области, возникают яркие корональные структуры.

Введение

Проблема изучения процессов нагрева и поддержания горячей корональной плазмы с температурой выше 10^6 К поставлена давно, однако до сих пор не решена и остается проблемой первостепенной важности в астрофизике. Еще наблюдения на спутнике Skylab корональных изображений в мягком рентгене, XUV и EUV в комбинации с магнитограммами показали, что корональный нагрев является магнитным феноменом [1]. Была установлена положительная корреляция яркости рентгеновских изображений короны с величиной магнитного поля нижерасположенных фотосферных активных областей с пятнами. Современные данные со спутника Yohkoh, полученные с более высоким пространственным разрешением [2], подтвердили тот факт, что самые яркие корональные структуры образуются над областями сильного магнитного поля. Однако наблюдения показывают, что в активных областях имеются и другие места, где поле такое же сильное или еще сильнее, но корона над ним неяркая, демонстрируя, что нагрев там много меньше. Это говорит о том, что усиление нагрева в короне над активными областями зависит не только от силы магнитного поля, но и от некоторых других факторов магнитного окружения. Исследования рентгеновских изображений активных областей вне вспышек в совокупности с векторными магнитограммами, полученными в наземных обсерваториях [2], обнаружили, что в отсутствие каких-либо вспышек магнитные поля с сильным широм указывают на существование корональных структур с усиленным нагревом в окрестностях этих активных областей (АО). Более широкое исследование 5 активных областей [3] показало, что около 80% всех ярких корональных структур возникает в областях вблизи нейтральной силовой линии с сильным широм (угол шира $\geq 45^\circ$). И в то же время 40% протяженных ($\geq 10\,000$ км) участков нейтральных силовых линий

со слабым широм также имеют яркие корональные структуры над собой или вблизи. На основании этих результатов можно сделать предварительный вывод о том, что большинство устойчивых корональных петель с усиленным нагревом над активными областями, как правило, требуют выполнения следующих условий: во-первых, наличия сильного магнитного поля вблизи линии инверсии полярности поля и, во-вторых, наличия сильного шира в центре магнитного поля вдоль нейтральной силовой линии.

Цель настоящей работы — показать, что, по-видимому, существует третье необходимое условие для наблюдения ярких устойчивых корональных петель, а именно: большую помощь в усилении коронального нагрева оказывает присутствие рядом с биполярной активной областью корональной дыры. Мы предполагаем, что процессы магнитного пересоединения, происходящие непрерывно в фотосфере на границе между открытыми силовыми линиями магнитного поля корональной дыры и замкнутыми силовыми линиями активной области, являются основными процессами, обеспечивающими усиление коронального нагрева над активными областями в отсутствие вспышек.

Наблюдения и данные анализа

Настоящая статья — прямое продолжение наших предыдущих работ [4–6]. В работе [4] показано, что в областях корональных дыр в центре линии He I 10830 Å наблюдается увеличение интенсивности излучения, сопровождаемое уменьшением размеров и контраста хромосферной сетки по сравнению с сеткой спокойных фоновых областей. По исследованиям в линии He I 10830 Å [5, 6] обнаружены «темные точки» в виде цепочек, окружающих корональные дыры. Наблюдения в линии H_α и ее крыльях ($H_\alpha \pm 0.5$ Å) демонстрируют увеличение лучевых скоростей подъема плазмы в «темных точках» по сравнению со скоростями внутри корональной

дыры и в спокойных областях [6]. Высказывается предположение, что усиление потоков солнечной плазмы из темных точек возникает в результате пересоединения противоположно направленных магнитных полей биполей хромосферной сетки и в основном униполярного и открытого магнитного поля внутри корональной дыры. Данные электрофотометрического сканирования диска Солнца в линиях He I 10 830 Å и водородной линии H_{α} показывают, что, по-видимому, подобные процессы магнитного пересоединения имеют место в области температурного минимума при определенных условиях на границе между корональной дырой и биполярной активной областью. В результате пересоединения из хромосферы в корону поднимаются высокоскоростные потоки плазмы, достаточные для формирования устойчивых ярких петельных структур [6].

Настоящая работа демонстрирует, что сравнение наших спектральных наблюдений верхней хромосферы в ИК-линиях He I 10 830 Å с изображениями короны в мягком рентгеновском излучении, полученными со спутника Yohkoh, а также с векторными магнитограммами исследуемых АО [3] и картами корональных дыр в линиях Fe X и Fe XIV, публикуемыми в сборниках «Solar Geophysical Data» (далее SGD), может дать новую информацию о корональном нагреве над активными областями в отсутствие вспышек.

Фотоэлектрические наблюдения проводились на горизонтальном солнечном телескопе Кучинской обсерватории ГАИШ МГУ. Основные параметры установки, техника и методика исследований описаны нами в работах [4, 5]. В настоящей работе подробно

исследуются две активные области 7220 и 7222 NOAA, наблюдавшиеся в линии He I 10 830 Å на диске Солнца 12, 13 и 15 июля 1992 г. Отбор данных определялся желанием сравнить результаты квазиблизких по времени данных в ИК-линии He I с векторными магнитограммами (Marshall Space Flight Center) и изображениями короны в мягком рентгене, полученными со спутника Yohkoh [3]. На рис. 1 слева представлена карта магнитного шира для активных областей 7220 и 7222 NOAA, наблюдавшихся примерно в центре диска Солнца 12 июля 1992 г. в 10:31 UT (см. рис. 8 в [3]). Здесь простыми черточками показаны величины поперечной составляющей наблюдаемого магнитного поля (≥ 150 Гс), а черточками со стрелками — величины и направления поперечной составляющей того же поля, вычисленные из наблюдаемых лучевых компонент поля. Магнитный шир, характеризующий степень непотенциальности поля, определяется здесь как точный угол между этими двумя черточками в каждой пространственной локализации. Область, где угол шира $\geq 45^\circ$, считается областью с сильным широм, а $< 45^\circ$ — со слабым широм. На рис. 1 справа в белой рамке показано изображение в мягком рентгене тех же АО, полученное со спутника Yohkoh примерно в то же время. Участки вблизи нейтральных силовых линий, имеющие сильный шир, показаны светлыми, участки со слабым широм — серыми или темными. Из сравнения левой и правой частей рис. 1 следует, что над участками с сильным широм на изображениях в SXR видны яркие корональные образования типа корональных петель (образования B, C, D, E) или ярких оснований петель (например, образование A).

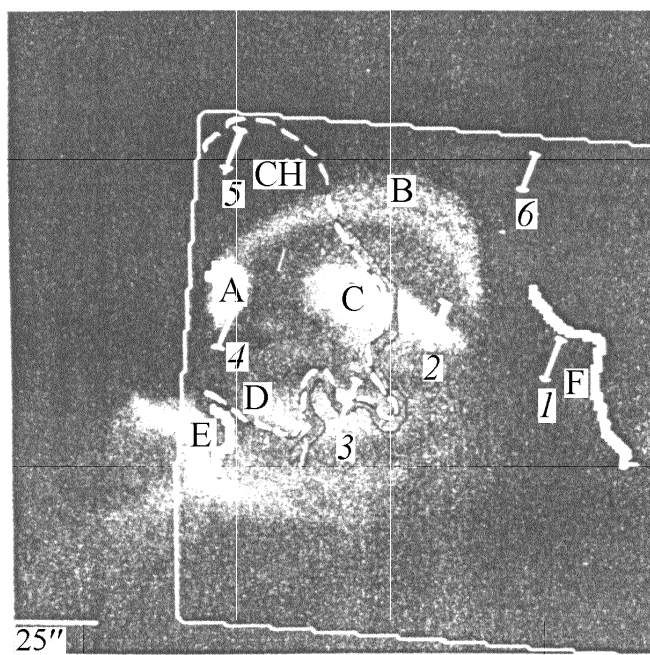
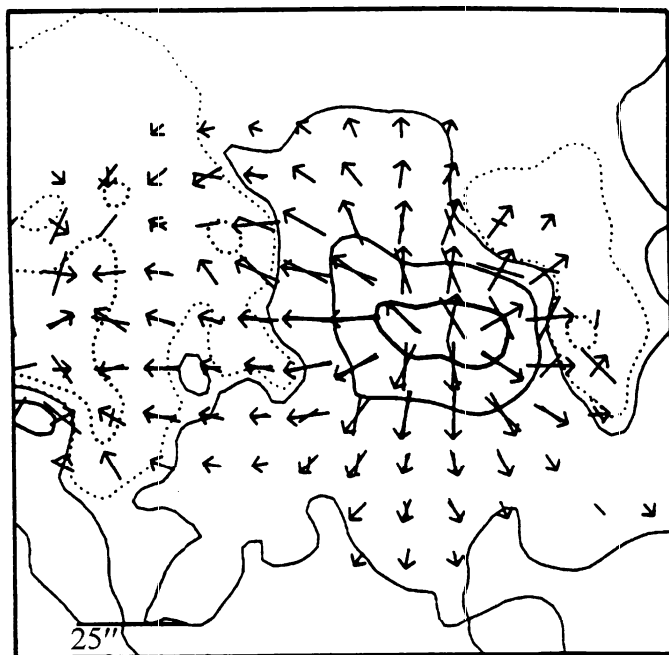


Рис. 1. Слева — карта магнитного шира для активных областей 7220 и 7222 NOAA, наблюдавшихся 12 июля 1992 г. в 10:31 UT [3], справа — изображение тех же АО, полученное на SXT со спутника Yohkoh. Светлые штрихи и цифры вблизи них — положения входной щели спектрографа

Приведенный пример демонстрирует существование важной закономерности: сильный корональный нагрев наблюдается над областями с сильным магнитным широм. Однако при более тщательном изучении этих АО обнаруживается еще один интересный факт. Область, отмеченная на рис. 1 справа буквой F , хотя и имеет сильный магнитный шир, не обнаруживает над собой каких-либо признаков усиленного коронального нагрева. По-видимому, области, подобные F , являются исключением из вышеобнаруженной закономерности. Таких исключений в цитируемой работе [3] довольно много (примерно 20% от всех исследуемых случаев). Попытаемся на основе наших наблюдений и карт корональных дыр (из SGD) подтвердить обнаруженную закономерность и объяснить исключения.

На рис. 1 справа светлыми штрихами и цифрами около них показаны положения входной щели спектрографа нашего телескопа при записи спектров. Записывалась спектральная область в окрестности $\lambda 10\,830 \text{ \AA}$. Щель в положении 1 пересекала активную область 7220 вблизи нейтральной силовой линии F , где наблюдался высокий шир, согласно магнитограмме, изображенной слева. В положении 2 щель пересекала яркую область C , в положении 3 щель проходит через верхнюю область неяркой диффузной петли D . Щель 4 располагалась вблизи яркой точки A у основания большой петли B . Щель 5 находилась в области корональной дыры, которая отмечена пунктирной линией и обозначена СН. Эта большая корональная дыра примыкала к активной области 7222 слева [7]. Положение щели спектрографа 6 соответствует спокойной, невозмущенной поверхности Солнца вблизи исследуемых АО.

На рис. 2 представлены спектры, полученные в окрестности $\lambda 10\,830 \text{ \AA}$ при соответствующих положениях щели спектрографа, обозначенных цифрами 1–6 около спектров. Анализ спектров показывает, что наибольшей глубины линия He I $10\,830 \text{ \AA}$ до-

стигает в тех местах хромосферы, над которыми в короне наблюдаются уярчения или яркие петли (спектры 2–4). Спектр 5, полученный в области корональной дыры, примыкающей к АО 7222 NOAA с запада (см. рис. 1 и [7]), имеет самое низкое значение центральной глубины линии He I $10\,830 \text{ \AA}$ — всего около 3% от интенсивности локального непрерывного спектра.

В рамках модифицированной классической модели хромосферы [8] из полного анализа спектров были определены основные важные физические параметры хромосферы при различных положениях щели, т. е. в разных пространственных структурах исследуемых активных областей, корональной дыры и спокойной области. Эти параметры представлены в таблице для описанных выше положений щели спектрографа. В первых трех строчках таблицы указаны параметры спектров, по которым производились расчеты: глубина в центре сильного компонента линии $R_0(10\,830)$, глубина в центре слабого компонента $R_0(10\,829)$ и полная полуширина сильного компонента $\Delta\lambda_{0.5}(10\,830)$. Далее по этим параметрам [8] определялись оптическая толщина в центре главного компонента $\tau_0(10\,830)$, доплеровская полуширина $\Delta\lambda_D$. В следующих строках представлены радиальные составляющие полной кинетической скорости V_0 , турбулентной V_{turb} и тепловой V_{th} скоростей, температура возбуждения T_{th} , эффективная кинетическая температура T_{kin} , фактор заполнения щели поглощающими элементами f_s и число атомов гелия на нижнем метастабильном уровне N_{23S} . Наиболее высокие кинетические температуры и скорости отмечены в областях 2–4 (рис. 1). Смещение линии He I в красную область на спектре 2 указывает на опускание вещества в петле C , а смещение линии в синюю область в спектре 4 указывает на подъем вещества вблизи яркой точки A со средней скоростью $\approx 2.4 \text{ км/с}$. Таким образом, наши наблюдения

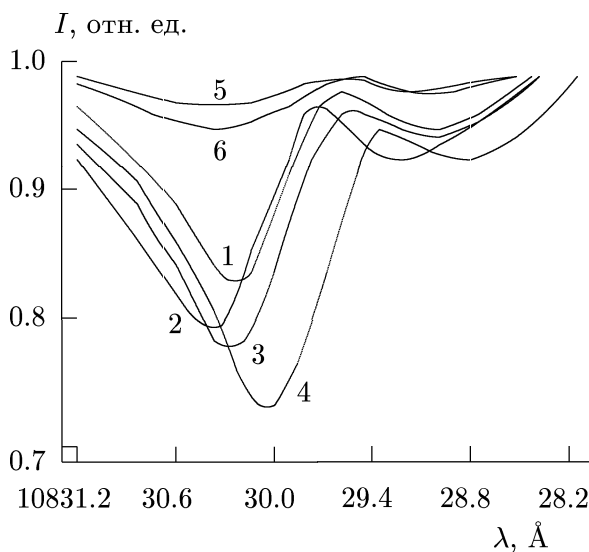


Рис. 2. Спектры в окрестности $\lambda 10\,830 \text{ \AA}$ при положениях щели 1–6

Параметры спектров и соответствующие им физические параметры хромосферы, наблюдаемые при положениях щели 1–6

Положение щели	1	2	3	4	5	6
$R_0(10\,830)$	0.176	0.212	0.230	0.271	0.035	0.053
$R_0(10\,829)$	0.052	0.076	0.059	0.076	0.010	0.012
$\Delta\lambda_{0.5}(10\,830), \text{ \AA}$	0.75	1.00	0.88	0.95	0.80	0.80
$\tau_0(10\,830)$	2.60	3.40	2.00	2.45	2.40	1.60
$\Delta\lambda_D, \text{ \AA}$	0.30	0.38	0.38	0.40	0.33	0.36
$T_{\text{th}}, \text{ K}$	5500	5500	5400	5300	6000	5900
$T_{\text{kin}}, \text{ K}$	17 000	26 700	26 700	29 300	20 000	24 000
$V_0, \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$	8.3	10.5	10.5	11.0	9.1	10.0
$V_{\text{turb}}, \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$	6.8	9.3	9.4	9.9	7.6	8.7
$V_{\text{th}}, \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$	4.8	4.8	4.7	4.7	5.0	4.9
f_s	0.40	0.47	0.52	0.55	0.55	0.48
$N_{23S} \cdot 10^{12}$	2.5	4.4	2.6	3.3	2.7	2.0

в линии He I 10 830 Å в хромосфере дополняют картину корональных изображений, полученных в мягком рентгене со спутника, показывая положительную корреляцию основных параметров.

Рассмотрим подробнее область, отмеченную положением щели 1 в наших спектральных наблюдениях. Спектры, записанные при положении щели 1, попадают в область F , характеризующуюся большим углом шира (рис. 1 слева) и отсутствием признаков уярчения в короне (рис. 1 справа). Отметим, что корональная дыра не достигает этой области (СН на рис. 1 справа), что, на наш взгляд, играет определяющую роль в отсутствии коронального уярчения. Комплексное исследование активных областей и их окрестностей позволяет выявить и объяснить некоторые особенности взаимодействия активных областей и корональных дыр, а именно: на границе корональной дыры и биполярной АО с большим магнитным широм, т.е. с сильно непотенциальным полем, наблюдаются внизу на уровне хромосферы поднимающиеся вверх потоки плазмы, которым в короне соответствует усиление нагрева, проявляющееся в ярких корональных петлях. Таким образом, высокая степень непотенциальности магнитного поля, выражающаяся большим углом шира магнитных силовых линий, по-видимому, не является единственной необходимой и достаточной характеристикой усиления коронального нагрева во вневысшечных активных областях. Как мы видим, необходимо еще присутствие рядом корональной дыры и взаимодействие петельных магнитных структур АО с открытыми магнитными силовыми линиями корональной дыры. Возможный сценарий такого взаимодействия в виде магнитного пересоединения представлен в работе [6] на рис. 5. В результате такого магнитного пересоединения на границе биполярной АО с корональной дырой образуются высокоскоростные потоки плазмы, поднимающиеся из хромосферы, а возможно, и из фотосферы вверх в корону в виде ярких корональных образований. Для других же частей активной области, имеющих такой же высокий шир, отсутствие рядом корональной дыры не дает эффекта усиления коронального нагрева. Это и наблюдается в окрестностях структуры F на рис. 1, где есть высокий шир, но из-за отсутствия рядом корональной дыры нет и признаков усиления коронального нагрева.

В качестве еще одного примера на рис. 3 представлены результаты наших наблюдений в линии He I 10 830 Å большого протуберанца П на EN лимбе 20.08.1997 г. Этот протуберанец возник за лимбом на невидимой стороне Солнца, на границе активной области 8076 NOAA и большой, протянувшейся через весь диск корональной дырой (обозначена как КД на рис. 3 изолиниями в линии Fe XIV).

Другим ярким примером влияния корональной дыры на усиление коронального нагрева является уярчение в АО 6982 NOAA, наблюдавшееся

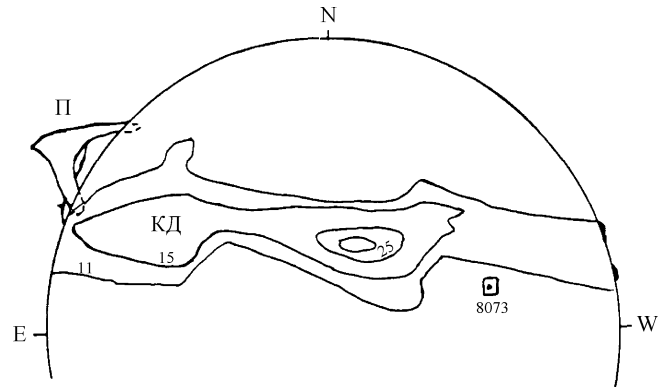


Рис. 3. Наблюдения в линии He I 10 830 Å протуберанца 20.08.1997 г.

26.12.1991 г. в течение ≈ 50 мин с орбиты Yohkoh на SXT (см. рис. 2, 3 и 4 в работе [3]).

Подтверждения наших выводов были получены недавно в работе [9], авторы которой на основе морфологического анализа проследили за изменениями на границах трех долгоживущих корональных дыр и их взаимодействием с биполярными активными областями. Приведенные в этой работе наблюдательные данные однозначно свидетельствуют об активизации биполярных АО на границах с корональными дырами.

Заключение

На примере двух активных областей 7220 и 7222 NOAA, одна из которых имеет общую границу с корональной дырой, а другая нет и обе АО, согласно фотосферным магнитограммам, имеют сильный магнитный шир, показаны различия хромосферных и корональных проявлений активности. По-видимому, усиление магнитного поля и увеличение непотенциальности этого поля, проявляющееся в увеличении угла шира магнитных силовых линий, не являются единственными условиями наблюдения усиления коронального нагрева в виде ярких корональных петель. Показано, что важную роль в усилении хромосферной и корональной активности, по-видимому, играет взаимодействие, происходящее в виде магнитного пересоединения на границе активной области с корональной дырой. В результате такого взаимодействия образуются поднимающиеся вверх потоки солнечной плазмы, достаточные для формирования ярких корональных образований, часто наблюдаемых в мягком рентгеновском излучении со спутников. Этот вывод подтверждается результатами наших предыдущих наблюдений и данными других авторов.

Литература

1. Webb D.F., Zirin H. // Solar Phys. 1981. **69**. P. 99.
2. Moore R., Porter J. // Proc. Symposium: A New Look at the Sun with Emphasis on Advanced Observations of Coronal Dynamics and Flares / Eds. S. Enome, T. Hirayama (Nagano: Nobeyama Radio Obs.). 1994. P. 89.

3. *Falconer D.A., Moore R.L., Porter J.G. et al.* // *Astrophys. J.* 1997. **482**. P. 519.
4. *Козлова Л.М.* // *Физика Солнца и космическая электродинамика / Тр. ГАИШ.* 2001. **71**. С. 199.
5. *Козлова Л.М., Сомов Б.В.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1999. **63**, № 8. С. 1537.
6. *Козлова Л.М., Сомов Б.В.* // *Астрон. журн.* 2000. **77**, № 6. С. 460.
7. *Solar Geophys. Data.* 1992. N 577. Part 1. P. 48, 49, 63.
8. *Сомов Б.В., Козлова Л.М.* // *Астрон. журн.* 1998. **75**, № 6. С. 926.
9. *Kahler S.W., Hudson H.S.* // *Astrophys. J.* 2002. **574**, № 1. P. 467.

Поступила в редакцию
29.12.03