

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ПЛАЗМЫ ОТ ХРОМОСФЕРЫ ДО НИЖНЕЙ КОРОНЫ ПО УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЦА

Е.Ю. Голодков, Д.В. Просовецкий

INVESTIGATION OF LINE-OF-SIGHT PLASMA VELOCITIES FROM THE CHROMOSPHERE TO THE LOWER CORONA ACCORDING TO UV DATA

E.Yu. Golodkov, D.V. Prosovetsky

Исследованы лучевые скорости ионов с температурами от хромосферных до корональных, формирующихся над участками спокойного Солнца по наблюдениям инструмента SUMER/SOHO. Обнаружено, что наблюдаются скорости ионов, направленные как в сторону Солнца, так и от него, а максимальные скорости вещества по направлению к наблюдателю в переходной области и короне достигают 50 км/с. Полученные данные позволяют предположить наличие положительного и отрицательного ускорения частиц солнечного ветра на различных участках переходной области и короны с ограниченными по площади источниками.

Line-on-sight velocities of ions with temperatures equal to those from the chromosphere to the corona above the quiet Sun areas were investigated from SUMER/SOHO data. It was found that ion velocities were directed both toward the Sun and from it. Maximum plasma velocities are up to 50 km/s toward the observer in the transition zone and corona. It is supposed that positive and negative accelerations of the solar wind particles exist at different levels of the transition region and corona with limited area sources.

Исследования распределения скоростей солнечного ветра (СВ) в зависимости от расстояния до Солнца показывают, что быстрая компонента СВ имеет сверхзвуковые скорости на расстоянии $\sim 1R_{\odot}$, а скорость медленной компоненты становится сверхзвуковой на расстоянии $\sim 10R_{\odot}$ [Cranmer, 2004].

Наблюдения показывают, что ускорение СВ начинается в верхней хромосфере и переходной области. На этих высотах источником информации о характеристиках СВ являются наблюдения доплеровского сдвига спектральных линий в оптическом и УФ-диапазонах. Было показано, что в областях спокойного Солнца наблюдается доминирующее красное смещение хромосферной линии CIV 1548 Å (10^5 К) и синее смещение корональной линии NeVIII 770 Å ($6.3 \cdot 10^5$ К). В корональных дырах (КД) обе линии имеют доминирующее синее смещение, указывающее на отток плазмы [Peter, 1999]. В работе [McIntosh, 2011] по наблюдениям в линиях CIV 1548 Å и NeVIII 770 Å над экваториальной КД было показано, что красное смещение линии CIV 1548 Å дает значение скорости ~ 6 км/с, а синее смещение в линии NeVIII 770 Å эквивалентно скоростям ~ 10 км/с. Значения доплеровских скоростей для трех ионов [Tu et al., 2005] указывают на ускорение СВ в переходной зоне: ионы SiII ($2 \cdot 10^4$ К) имеют скорости ~ 2 км/с от наблюдателя, скорости ионов SiIII (10^5 К) примерно равны нулю, а ионы NeVIII ($6 \cdot 10^5$ К) уже имеет скорости ~ 10 км/с по направлению к наблюдателю. Подобные характеристики скоростей СВ были найдены и в ряде других работ (см., например, обзор [Cranmer, 2004]).

Однако данные, полученные по измерениям скоростей одного или двух ионов, не дают значений скоростей на различных высотных уровнях солнечной атмосферы и, следовательно, нет полной картины формирования СВ. В данной работе использованы данные шелевого спектрометра SOHO/SUMER [Wilhelm K., 1988], полученные в северной полярной области 06.09.1997 и над экваториальной КД 28.05.1999 (рис 1). Спектральные изображения северной полярной области были получены над лимбом и на диске Солнца.

Эмиссионные линии спектральных изображений SUMER идентифицировались по спектральному атласу SUMER [Curdt et al, 2004]. Выделялись спектральные линии, не смешанные с другими линиями, выделяющиеся относительно фона и имеющие известную температуру формирования по базе данных спектральных линий Chianti. Для исследования были выбраны линии излучения ионов SiII 1036, MgX 624, NIV 765, NV 1238, NeVIII 770, OII 833, OV 758, OVI 1037, SiII 1253, SiIV 1062, SV 786, CI 1252, FeXII 1241, NV 1242 Å. Спектральная шкала калибровалась по фотосферной линии SiI, имеющей известную низкую скорость ионов 0 ± 2 км/с.

Каждое спектральное изображение корректировалось согласно методике, изложенной в работе [Davey, 2006]. Центр наблюдаемой спектральной линии определялся по положению максимума вписанной в профиль линии гауссианы, из которой бралось значение максимума. Скорость вещества

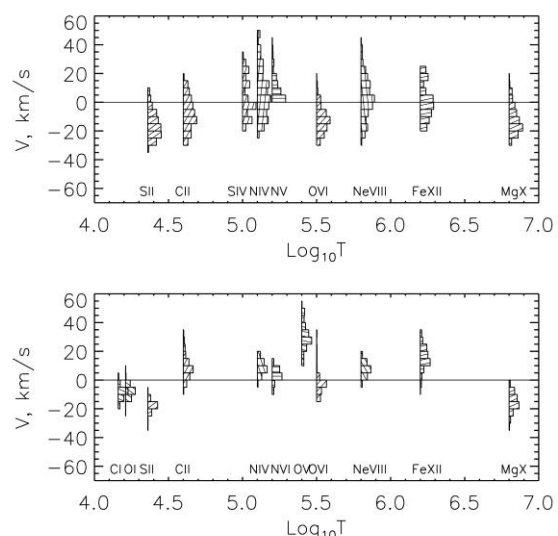


Рис. 1. Скорости ионов в зависимости от температур формирования спектральных линий по наблюдениям 06.09.1997 за лимбом Солнца (вверху) и на диске Солнца (внизу).

определялась по доплеровскому сдвигу линии. Вычислялась доплеровская скорость для каждой пространственной точки щели спектрометра.

На рис. 1 для каждой спектральной линии показаны гистограммы распределения скоростей ионов с различными температурами формирования за лимбом Солнца (вверху) и на диске (внизу) по наблюдениям северной полярной области 06.09.1997. Гистограммы отражают количество точек с определенной доплеровской скоростью на изображении щели спектрографа, т. е. относительную площадь поля скоростей данного диапазона в картинной плоскости. Положительные значения скоростей на рисунке соответствуют направлению к наблюдателю (синее смещение линии), отрицательные – от наблюдателя (красное смещение).

Соотношение площадей с положительными и отрицательными скоростями неодинаково при наблюдениях за лимбом и на диске. Максимумы частотного распределения скоростей в линиях, формирующихся в переходной области и короне, сдвинуты в положительную область при наблюдениях на диске Солнца. Это свидетельствует о доминировании областей ускорения СВ в корональных дырах, ускорении СВ лишь на части участков внутри КД и о значительном влиянии проекционных эффектов за лимбом.

Как видно из рис. 1, в исследованном диапазоне температур имеются как положительные, так и отрицательные скорости ионов с максимальными абсолютными значениями до 50 км/с. Это согласуется с результатами работы [McIntosh et al., 2011], где для линий, формирующихся в переходной области, были зафиксированы скорости с красным и синим доплеровскими сдвигами со значениями в десятки километров в секунду. Наличие скоростей СВ обоих направлений говорит в пользу существования закрытого магнитного потока в наблюдаемых областях. Наблюдаемые в переходной области отрицательные скорости также могут быть связаны со структурами, в которых плазма начинает двигаться вниз в результате охлаждения после достижения максимальной высоты [Peter, 1999]. Скорости ионов с температурами формирования до $2.5 \cdot 10^4$ К при наблюдениях на диске имеют преимущественно отрицательные значения. Это означает, по-видимому, что процесс ускорения частиц СВ в хромосфере еще не начался.

Максимальные скорости частиц и положения частотных максимумов распределения скоростей при температурах, соответствующих переходной области и короне с температурами до $1.5 \cdot 10^6$ К не возрастают монотонно, как это могло бы следовать из моделей распространения СВ. Значения доплеровских скоростей в линиях с большей температурой формирования могут быть меньше, чем в линиях с меньшей температурой. Этот наблюдательный факт может означать наличие как положительных, так и отрицательных ускорений частиц в переходной области и короне. Отрицательные ускорения, возможно, связаны с радиальным расширением открытых магнитных полей, которые могут значительно влиять на кинетические характеристики плазмы, истекающей при температурах выше 10^5 К [Peter, 1999].

Из полученных данных видно, что ускорения частиц СВ с высокими температурами не происходит.

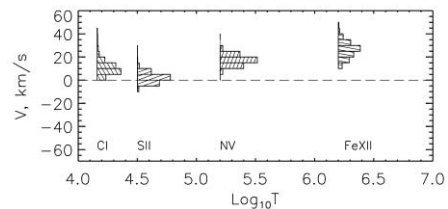


Рис. 2. Скорости ионов в соответствии с температурами формирования спектральных линий. Наблюдение экваториальной КД 28.05.1999.

В линии MgX, формирующейся при температуре $6.3 \cdot 10^6$ К, положительные скорости зафиксированы только при наблюдениях за лимбом. Скорости частиц при наблюдении на диске направлены от наблюдателя. Данный результат может быть объяснен движением частиц в горячих вершинах магнитных петель в направлении, квазипараллельном поверхности Солнца. В случае наблюдений за лимбом вектор скорости направлен на наблюдателя в результате проекционного эффекта.

В наблюдениях экваториальной КД 28.05.1999 (рис. 2) отмечен рост скорости в переходной области и короне, свидетельствующий о начале ускорения СВ [Stucki, 1998]. Можно отметить спад скорости в хромосфере при температуре $\sim 3 \cdot 10^4$ К, т. е. при более низких температурах, чем при наблюдениях полярной КД 06.09.1997. Кроме того, красное доплеровское смещение наблюдалось только в спектральной линии SiII. Отсутствие красного доплеровского сдвига в остальных линиях может свидетельствовать о расположении источников излучения в нижних слоях солнечной атмосферы и о наличии непрозрачного слоя над ними.

В заключение выразим надежду, что полученные данные о кинематических характеристиках СВ в областях его формирования позволят уточнить механизмы ускорения СВ и нагрева короны и послужить основой для непротиворечивых моделей солнечной атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Cranmer S.R. Coronal heating versus solar wind acceleration // Proc. SOHO 15 Workshop «Coronal Heating». 6–9 September 2004, St. Andrews, Scotland, UK (ESA SP-575).
- Curdt W., Landi E., Feldman U. The SUMER spectral atlas of solar coronal features // Astron. Astrophys. 2004. V. 427. P. 1045.
- Davey A.R., McIntosh S.W., Hassler D.M. Investigating SUMER coronal hole observations: a robust method of raster reduction // ApJS. 2006. V. 165, Iss. 1. P. 386–399.
- McIntosh S.W., Leamon R.J., De Pontieu B. The spectroscopic footprint of the fast solar wind // Astrophys. J. 2011. V. 727, Iss. 1. P. 7–23.
- Peter H., Judge P.G. On the Doppler shifts of solar ultraviolet emission lines // Ibid. 1999. V. 522, iss. 2. P. 1148–1166.
- Stucki K., Solanki S. K., Rüedi I. et. al Coronal hole versus normal quiet Sun observed with SUMER // Astrophys. Space Sci. 1998. V. 264, Iss. 1/4. P. 53–61.
- Tu C.Y., et al. Solar wind origin in coronal funnels // Science. 2005. V. 308. P. 519–523.
- Wilhelm K., Axford W. I., Curdt W., et. al. SUMER: Solar ultraviolet measurements of emitted radiation. ESA, The SOHO Mission. Scien. and Tech. Aspects of the Instruments. 1988. P. 31–37.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия