

УДК 523.62.726

СТРУКТУРА ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

К. В. Владимирский, Н. А. Лотова¹, О. А. Корелов²

Наблюдения рассеяния радиоволн на околосолнечной плазме с использованием нескольких естественных источников одновременно позволяют выявить крупномасштабную картину течения солнечного ветра. Струйная структура течения обсуждается в связи с механизмом ускорения околосолнечной плазмы.

Работа посвящена исследованию структуры течения межпланетной плазмы в области формирования сверхзвукового солнечного ветра. Необходимость детального исследования этой структуры выяснилась далеко не сразу после самого открытия истечения вещества из верхних слоев атмосферы Солнца в межпланетное пространство. Принятая в ранних теоретических исследованиях [1] картина квазирадiallyного сферически симметричного течения подверглась значительным изменениям только в результате обширных исследований с использованием радиотелескопов и систем космической связи. Выяснилось, что в околосолнечной плазме отклонения от симметрии течения очень велики, неоднородности потока сравнимы со средними величинами, ускорение плазмы и переход через скорость звука происходят в протяженной области, переходной области солнечного ветра [2, 3]. Важным следствием результатов наблюдений является своеобразная качественная картина течения в переходной области [2]. Между дозвуковым потоком вблизи Солнца и сформировавшимся сверхзвуковым потоком лежит протяженная область смешанного течения [4], в которой сосуществуют и взаимодействуют дозвуковые и сверхзвуковые потоки плазмы. Известная из теории неустойчивость таких

¹ИЗМИРАН, Троицк, Моск. обл.

²НИРФИ, Нижний Новгород.

течений согласуется с основным результатом измерений, проведенных методом просвечивания – переходная область обнаруживается как область повышенного рассеяния радиоволн, повышенного уровня пространственных флуктуаций электронной концентрации. Ниже приводятся результаты наблюдений, позволившие выявить крупномасштабную структуру течения в переходной области.

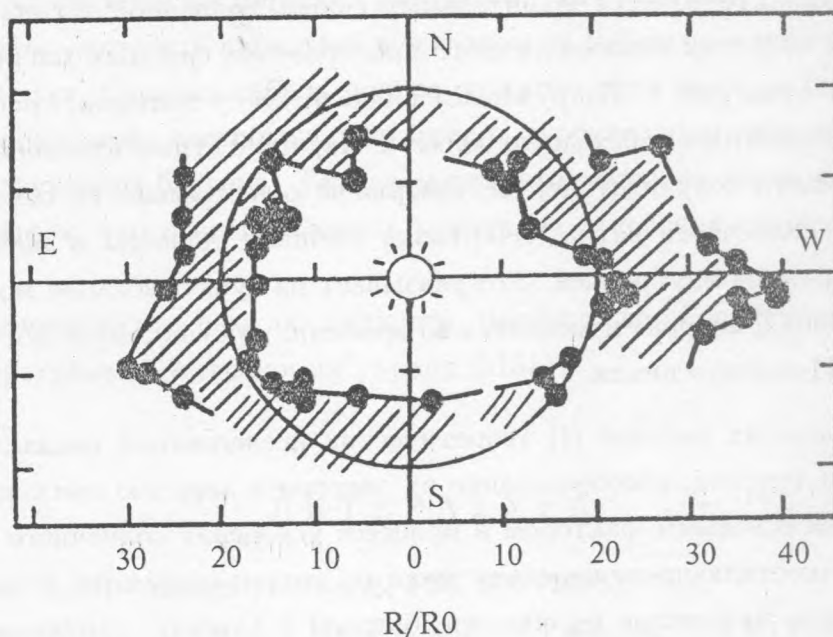


Рис. 1. Радиокарта переходной области солнечного ветра по наблюдениям 1993 г.

Наблюдения рассеяния радиоволн с использованием естественных источников проводились на крупных радиотелескопах Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, г. Пуцзино. Методика наблюдений и обработки данных опубликована ранее [2, 5]. На радиотелескопе ДКР-1000 в схеме интерферометра наблюдались квазары, определялся измененный рассеянием видимый размер источника. На радиотелескопе РТ-22 наблюдались мерцания мазерных источников линии водяного пара. Получаемая в длительных сериях ежедневных наблюдений радиальная зависимость рассеяния позволяет локализовать переходную область, определить внутреннюю и внешнюю ее границы. Начиная с 1987 года проводятся одновременные наблюдения нескольких источников, проходящих вблизи Солнца на различных гелиоширотах, результаты наблюдений объединяются в виде радиокарт, двумерных отображений переходной области [6, 7]. На рис. 1 представлена радиокарта, построенная по результатам наблюдений 1993 года. Границы пере-

ходной области определялись с использованием источника 3C144 (компактный источник в Крабовидной туманности), квазаров 3C133, 3C152, 3C154, 3C162, 3C166, 3C172, 3C192, 3C208, 3C212, 3C215, 3C225, 3C228, 3C275, 3C279, мазерных* источников S252A, W31 (2).

В годы максимума солнечной активности аналогичные наблюдения давали форму переходной области, изрезанную, но в целом близкую к сферически симметричной [6, 7]. Год 1993-й характеризуется значительным спадом солнечной активности, появлением в полярных областях околосолнечного пространства сильных магнитных полей. В соответствии с этим рис. 1 обнаруживает сплюснутую у полюсов, простирающуюся в плоскости гелиоэкватора переходную область. Наряду с этими изменениями структура переходной области сохраняет черты, говорящие о неизменности основных механизмов ускорения солнечного ветра. Очертания внешней границы в значительной мере повторяют очертания внутренней. Это указывает на существование мощной струйной структуры течения, которая изменяется во времени, но существует постоянно, независимо от фазы 11-летнего цикла.

Развитие начатых работой [1] теоретических исследований показало, что именно неоднородности течения, преобразование их энергии в энергию движения плазмы как целого, является основным фактором в процессе ускорения солнечного ветра. В качестве звена, осуществляющего передачу энергии, рассматриваются плазменные волны различных типов, исходящие из области, близкой к Солнцу, и отдающие энергию в результате необратимых процессов, диссипации, в зоне основного ускорения, на расстоянии 10-20 солнечных радиусов от Солнца. В модельных вычислениях, описывающих конкретные виды волновых процессов [8, 9], введено важное уточнение – эффективный механизм диссипации, связанный с образованием ударных волн. Такой механизм диссипации имеет более общий характер, является основным в области смешанного течения, при скоростях солнечного ветра, близких к звуковому барьеру (ср. [4]). Более того, есть основания полагать, что ускорение солнечного ветра представляет собой самоподдерживающийся процесс. Нелинейности магнитогидродинамических уравнений приводят к образованию ударных волн, быстрой диссипации возмущений и ускорению потоков плазмы. В свою очередь, возрастание скорости способствует развитию нелинейных процессов. Об этом говорит прежде всего сохранение общей картины процесса ускорения при значительных изменениях в состоянии околосолнечной среды в целом. Как показывает анализ радиоастрономических данных за длительный период [10], расстояние внутренней границы переходной области от Солнца, то есть ширина области

дозвукового течения, изменяется в ходе 11-летнего цикла в два раза, от 10 до 20 солнечных радиусов. Так же значительны изменения ширины переходной области. В то же время сохраняется приближенное равенство ширин дозвуковой области и переходной, сохраняются корреляционные связи этих параметров с уровнем турбулентности плазмы в дозвуковой области и со значением скорости солнечного ветра на больших расстояниях от Солнца. По-видимому, также сохраняется известный из результатов измерений, выполненных с применением космических аппаратов [11], "взрывной" характер ускорения солнечного ветра – скорость нарастает в основном на небольшом участке шириной 2-3 солнечных радиуса. Сколько-нибудь полное описание этих явлений связано со значительными трудностями, поскольку речь идет о турбулентном течении в сжимаемой среде вблизи звукового барьера. Тем не менее, высказанные выше соображения позволяют надеяться, что основные звенья механизма ускорения солнечного ветра уже известны.

Работа выполнена в рамках научного проекта по Государственной научно-технической программе "Астрономия", грант 4-151.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Parker E. N. *Astrophys. Journ.*, **128**, 664 (1958).
- [2] Lotova N. A., Blums D. F., and Vladimirov K. V. *Astronom. Astrophys.*, **150**, 266 (1985).
- [3] Лотова Н. А. *Геомагн. и аэроном.*, **26**, 6 (1986).
- [4] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Гидродинамика*, М., Наука, 1988.
- [5] Лотова Н. А., Владимирский К. В., Рашковецкий А. А. и др. *Геомагн. и аэроном.*, **28**, 722 (1988).
- [6] Лотова Н. А., Юровская И. Ю., Писаренко Я. В. и др. *Астроном. журн.*, **69**, 173 (1992).
- [7] Лотова Н. А., Владимирский К. В., Фомичев В. В. и др. *Геомагн. и аэроном.*, **35**, 30 (1995).
- [8] Malaga F. et. al. *Astrophys. Journ.*, **396**, 297 (1992).
- [9] Malaga F., Primavera L., and Veltri P. Abstract 0-1-04 from COSPAR Colloquium Solar Wind 8, Dana Point, USA, 1995.
- [10] Лотова Н. А., Владимирский К. В., Юровская И. Ю., Корелов О. А. *Астроном. журн.*, **72**, 757 (1995).

[11] Efimov A. I. Space Sci. Rev., **70**, 397 (1994).

Поступила в редакцию 13 ноября 1995 г.