ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В БЕЛОМ СВЕТЕ

Якунина Г.В.

*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

MATTER FLOWS IN THE SOLAR CORONA ACCORDING TO OBSERVATIONS IN WHITE LIGHT

Yakunina G.V.

Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

An overview of the velocities of coronal matter in the picture plane using the results of LASCO SOHO observations is presented. General characteristics of moving coronal formations and their velocities are systematized. On the distances (2–6) $R_{\odot}$, events were detected with the movement of corona plasma both to the Sun and from its surface at speeds from tens to hundreds of km/s. The possible physical nature of the events is discussed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-325-328

Для исследования движения вещества в верхних слоях короны используются наблюдения на коронографах LASCO SOHO в белом свете (томпсоновское рассеяние света фотосферы на электронах короны).

Коронографы LASCO предоставили новую информацию о движениях корональной плазмы в верхних слоях короны на расстояниях от 2 до 30 $R_{\odot}$. Наблюдались движения со скоростями, направленными как к Солнцу, так и от него: сгустки плазмы движутся по узким траекториям, а некоторые занимают широкий диапазон по позиционным углам. Различные события, по-видимому, вызваны различными физическими механизмами. Большая часть вещества удаляется от Солнца. Однако было выявлено множество случаев, когда некоторые сгустки возвращались обратно к Солнцу. Они обычно формируются на расстояниях 3–5 $R_{\odot}$, [1]. Наблюдаемые события различаются по форме, поведению, скоростям и направлению движения.

Также наблюдались двунаправленные события. Средняя высота начала таких событий составляла около 3,7 $R_{\odot}$. Вытекающая материя обычно движется с большей скоростью, чем нисходящая, рис. 1.

Все события 06.11.1999 г. [2] имели скорость вытекания выше, чем скорость спуска. Разница в скоростях подъема/спуска составляла ~112 км/с. Для 40 рассмотренных событий рождение таких пар происходило на расстояниях от 3,1 до 4,2 $R_{\odot}$. Типичная скорость солнечного ветра (СВ) в месте начала события составляет около 60 км/с.

Основным результатом работы [2] является отождествление двунаправленных потоков массы в короне, перемещающихся внутрь и наружу

по одному и тому же радиус-вектору. События интерпретируются как взрывное высвобождение энергии в исходящем СВ в областях, где происходит магнитное пересоединение. Если эта интерпретация верна, то эти события представляют собой первое прямое наблюдение магнитного пересоединения в короне.

Рис. 1. Схема расположения плазменных сгустков 06.11.1999 г. для трех временных моментов 15:02:51 UT, 15:26:54 UT и 15:55:42 UT (по данным работы [2]). Корональные сгустки плазмы обозначены стрелками.

Рис. 2. Схематическое изображение строения стримера. Стримеры представляют собой основные крупномасштабные структуры солнечной короны, состоящие из серии закрытых петель, покрытых снаружи оболочкой открытых магнитных линий, и имеют шлемовидную форму.

Различные типы притока и оттока в верхней короне (как скорости, так и ускорения) различаются как по своим значениям, так и по физической природе. Некоторые типы движений можно объяснить процессом магнитного пересоединения, а некоторые типы движений – совместным действием сил гравитации, магнитного поля и взаимодействием с фоновой движущейся материей.

Наблюдения солнечной короны из космоса выявили множество неожиданных мелкомасштабных явлений, включая сгустки плазмы (“blobs”), которые постоянно выбрасываются из каспов стримеров. Сгустки плазмы (“blobs”) можно интерпретировать как различные проявления пересоединения линий магнитного поля, при котором происходит обмен плазмой и магнитным потоком между областями открытых и закрытых магнитных полей короны. Такие наблюдения дают новое понимание ряда важных вопросов, включая происхождение стримеров во внешней короне и источников медленного СВ.

Стримеры возникают вдоль линии раздела магнитных полей разной полярности и могут располагаться в активных областях, спокойном Солнце или вдоль канала волокна. Во время солнечного минимума, когда общее магнитное поле на поверхности источника ($2.4 R_{\odot}$) хорошо описывается полем диполя, система стримеров располагается вблизи солнечного экватора, окаймляя Солнце и образуя так называемый пояс стримеров. Форма

этой поверхности достаточно плоская. Во время максимума магнитная структура короны сложная, стримеры видны повсюду вокруг солнечного диска.

Скорость расширения внешней короны можно проследить по стримерным сгусткам (“blobs”). Эти облака плазмы вытянутой формы длиной до $1 R_{\odot}$ и в поперечных сечениях $\sim 0,1 R_{\odot}$ из-за своей повышенной плотности могут наблюдаться на фоне окружающей короны Солнца и служить трассерами СВ на близких к Солнцу расстояниях. По мере удаления от Солнца размеры “blobs” увеличиваются, достигая $4 R_{\odot}$ на расстояниях $\sim 12 R_{\odot}$. При этом в результате истечения вещества не происходит разрушения стримера или его каспа. Ряд моделей распределения электронной плотности был разработан на основе наблюдений с высоким разрешением общей яркости короны белого света с коронографов LASCO.

В работе [3] проведен анализ 11 событий с 1996 по 2009 г. Обнаружено, что “blobs” имели скорости от 203 до 845 км/с. Большинство “blobs” (58%) ускорялись, а 20% либо замедлялись, либо двигалось с почти постоянной скоростью (22%).

В работе [4] впервые исследована трехмерная структура коронального стримера, наблюдавшегося одновременно двумя коронографами: LASCO SOHO и STEREO/COR2. Структура стримера, наблюдаемого двумя космическими аппаратами, находящимися на расстоянии 90° , позволяет исследовать ситуацию для 3D-реконструкций. Используя наблюдения из нескольких точек обзора, можно реконструировать 3D-конфигурацию корональных стримеров. На рис. 16 в работе [4] приведены смоделированные виды стримера по сравнению с наблюдаемыми. Вид со STEREO/COR2 показывает узкий стебель стримера на широте -39° , стример виден с ребра. На изображениях LASCO стример имеет веерообразную структуру с радиально расширенными областями большей и меньшей яркости. Плотность вдоль азимутального направления неравномерна. Такая модель может уточнить детали в модели плотности короны и уточнить роль тонкой структуры стримеров в короне и связь с формированием медленного солнечного ветра.

Наблюдения в белом свете на коронографах LASCO SOHO показали, что стримеры представляют собой гораздо более динамичные образования, чем это представлялось раньше.

В 2018 г. был запущен космический зонд *Parker Solar Probe (PSP)*, в 2020 г. *Solar Orbiter (SolO)*. Задачей этих зондов является исследование внутренней гелиосферы, чтобы разобраться в нагреве солнечной короны и происхождении солнечного ветра.

Один из ранних результатов *PSP* – обнаружение быстрых изменений в радиальной ориентации магнитного поля (“switchbacks”). Наблюдались быстрые изменения с интервалами от секунд до десятков минут, возможно, часов. При этом отклонения поля иногда достигают полного обращения по

отношению к спирали Паркера. Такие обратные поля сопровождаются быстрым увеличением радиальной скорости ветра, и по этой причине их часто называют скачками скорости (“velocity spikes”). Вероятно, “switch-backs”, играют решающую роль в нагреве солнечной короны. Такие “переключения” направления магнитного поля увеличивают скорость СВ, [5, 6]. Их происхождение остается неясным. Зонд Parker дает беспрецедентную возможность для исследований источников медленного солнечного ветра.

Новый результат аппарата SolO – медленный СВ течет в корональном плазменном слое, являющегося продолжением экваториального стримера, с почти постоянной скоростью [7]. Самый медленный ветер (160 км/с) ограничен узким слоем повышенной плотности плазмы шириной 20° , распространяющимся на расстояние до $6 R_\odot$ в солнечную корону. Плазма СВ должна подвергнуться дальнейшим значительным процессам ускорения за пределами $6 R_\odot$, чтобы достичь своего межпланетного значения 300 км/с.

Следующее десятилетие исследований с помощью аппаратов PSP и SolO обещает быть богатым на новые открытия в области потоков стримеров и источников медленного солнечного ветра.

Литература

1. Sheeley N. R. Jr., Wang, Y.-M. // *Astrophys. J.*, 2002, **579**, 874.
2. Simnett G. M. // *A&A*, 2004, **416**, 759.
3. Song H.Q. et al. // *Solar Physics*, 2012, **276**, 261.
4. Decraemer B., Zhukov A., and Doorsselaere T. // *AphJ*, 2019, 883:152.
5. Sterling A., Moore R. // *ApJ*, 2020, 896L, 18.
6. Rouillard A. P. et al. // *ApJS*, 2020, **246** 37.
7. Romoli M., Antonucci E. et al. // 2021arXiv210613344R.