

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ СТРУЙ

Якунина Г.В.

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

CORONAL JETS RESEARCH

Yakunina G.V.

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

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-377-380>

The results of older and modern observations of coronal jets on the Sun are briefly considered. There is growing evidence that coronal jets can play a key role in providing the corona and the solar wind with mass and momentum and can provide enough energy to power the solar wind. Collaborative observations of the Parker Solar Probe and Solar Orbiter spacecrafts have provided new knowledge about coronal jets.

Наиболее распространенные явления в атмосфере Солнца – это корональные струи. Они тесно связаны с выбросами корональной массы, ускорением частиц в солнечном ветре и нагреве короны. Струи наблюдаются в корональных дырах (КД), активных областях, в хромосфере и в короне.

Струи стали подробно изучаться с момента запуска спутника *Yohkoh* в 1991 г. Было выявлено множество рентгеновских струй (X-ray jets) в солнечной короне. Типичный размер струй составляет $5 \cdot 10^3$ – $4 \cdot 10^5$ км, скорость 30–300 км с⁻¹, кинетическая энергия 10^{25} – 10^{28} эрг. Для объяснения свойств рентгеновских струй была предложена модель рентгеновской струи, основанная на магнитном пересоединении [1].

Рентгеновский телескоп XRT *Hinode* (2006 г.) обнаружил рентгеновские струи, наблюдаемые в полярных КД. В день в полярной КД происходит около 30 джетов. Длина струй $\approx 5 \cdot 10^4$ км, ширина $\approx 8 \cdot 10^3$ км, время жизни ≈ 10 мин, скорости ≈ 160 км с⁻¹. Считается, что они играют ключевую роль в переносе массы и энергии в солнечную корону. Рентгеновские струи обычно имеют поярчания в основаниях, которые были названы "jet bright point" (JBP).

Постоянное улучшение пространственно-временного разрешения за последние десятилетия, на космических телескопах *Yohkoh*, *SOHO*, *STEREO*, *Hinode*, *SDO*, *IRIS* позволили получить подробности о зарождении и эволюции корональных струй. Исследована динамика, морфология струй и их связь с другими корональными структурами. Получены данные о скоростях струй, частоте их возникновения и взаимосвязи с выбросами корональной массы (CME). Струи в КД быстрее и длиннее, чем струи в спокойных областях Солнца. Это может быть следствием различных магнитных конфигураций в этих областях. Многие струи связаны со вспышками в

ярких рентгеновских точках, областями всплывающего магнитного потока (EFRs), активными областями.

По сравнению со вспышками струи это маломасштабные энергетические события. Число струй не зависит от фазы солнечного цикла. Однако механизмы возникновения струй все еще обсуждаются.

Совместные наблюдения IRIS и SDO позволили сделать шаг вперед в понимании возникновения струй и взаимосвязи между горячими струями и холодными всплесками. Одновременные наблюдения IRIS, SDO и Hinode подтвердили спиральную природу повторяющихся струй. Использование векторных магнитограмм SDO/HMI для моделирования помогло понять, как возникающие потоки связаны с эволюцией короны. При одних и тех же наблюдениях возможны разные интерпретации, основанные на разных подходах. Механизмы запуска струй основаны на магнитном пересоединении в зависимости от магнитной конфигурации области.

Хотя энергия корональных струй меньше, чем энергия солнечных вспышек и CME, струи имеют много общих свойств с этими явлениями. Кроме того, струи могут указывать на основной процесс нагрева короны и ускорения солнечного ветра (СВ). Следовательно, их изучение дает нам возможность рассмотреть широкий спектр солнечно-гелиосферных проблем.

В 2018 г. был запущен космический зонд Parker Solar Probe (PSP), а в 2020 г. Solar Orbiter (SolO). Задачей этих зондов является исследование внутренней гелиосферы, чтобы разобраться в нагреве солнечной короны и происхождении СВ. Уникальные наблюдения зондов PSP и SolO с высоким разрешением предоставили дополнительную информацию об источниках ускорения СВ и нагреве солнечной короны.

Один из ранних результатов PSP – обнаружение быстрых изменений в радиальной ориентации магнитного поля (“switchbacks”). PSP наблюдал большое количество скачков радиальной скорости и связанных с ними разворотов или переключений в локальном радиальном магнитном поле. Быстрые изменения наблюдались с интервалами от секунд до десятков минут. При этом отклонения поля иногда достигали полного обращения по отношению к спирали Паркера. Такие обратные поля сопровождаются быстрым увеличением радиальной скорости ветра, их часто называют скачками скорости (“velocity spikes”). Ранее Ulysses, WIND и Helios наблюдали развороты магнитного поля на 90° , но их было мало, и они наблюдались на больших расстояниях от Солнца. Измерения PSP отличаются большим количеством таких событий. Вероятно, “switchbacks”, играют решающую роль в нагреве солнечной короны. Переключения направления магнитного поля увеличивают скорость СВ [2, 3], но их происхождение остается неясным. Измерения PSP вблизи Солнца показывают высокоструктурированный солнечный ветер. PSP также дает возможность для исследований источников медленного солнечного ветра, природы мед-

ленного солнечного ветра. Зонд PSP во время своего первого перигелия 6 ноября 2018 зафиксировал медленный СВ, выходящий из экваториальной КД [4].

Первые наблюдения в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне (EUI) на борту SolO выявили сложные мелкомасштабные корональные структуры чрезвычайно малых размеров, вплоть до 400 км. Это самые маленькие корональные струи, наблюдаемые на спокойном Солнце, которые называются “campfires” (кострами). “Campfires” – общий термин, который включает различные типы мелкомасштабных солнечных динамических характеристик. Костры имеют “сложную” структуру. Большинство напоминают мелкомасштабные струи, точки или петли. Среднее время жизни 20–100 сек, скорость 62 км/с, высота над фотосферой 1000–500 км. Были оценены температуры костров около $\log T = 6,1$. Это корональные температуры, однако, высота костров удивительно мала. Такие струи могут способствовать нагреву короны и значительному потоку массы в солнечный ветер [6]. Струйки также могут объяснить происхождение быстрого солнечного ветра в КД [7]. Распространенность струй предполагает, что солнечный ветер из КД может возникать в виде прерывистого истечения.

Впервые костры обнаружены SolO 30 мая 2020 г. на снимках южного полюса Солнца. Каждая струя длилась от 20 до 100 сек и выбрасывала плазму со скоростью ~100 км/с. Эти струи могут быть источником солнечного ветра.

В настоящее время нет четкого выбора в качестве наилучшей модели. Среди всех моделей магнитное пересоединение остается наиболее важным механизмом. На рис. 1 приведены примеры структуры магнитного поля. Выброс струй в результате магнитного пересоединения, очевидно, является фундаментальным процессом на Солнце.

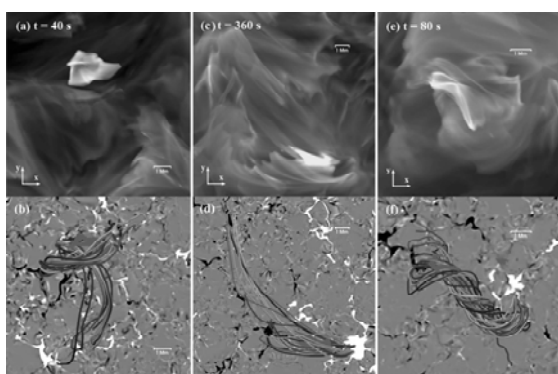


Рис. 1. Костры и их связь с магнитным полем. Структуру магнитного поля можно разделить на три группы:

- (1) пересекающиеся пучки линий поля,
- (2) разветвляющиеся пучки силовых линий поля и
- (3) сильно скрученные жгуты.

По рис. 4 из работы [8].

Небольшие струйные выбросы в атмосфере Солнца представляют новый интерес для PSP, поскольку они могут развиваться в структуру солнечного ветра из плазмы и магнитного поля, называемую обратными переключениями, обнаруженными PSP, [9].

25 марта 2022 г. SolO впервые в истории дистанционно наблюдал быстрые изменения в радиальной ориентации магнитного поля. Активная

область АО 12972 была источником “switchback”. Все другие переключения наблюдали, когда космический телескоп пролетал через возмущенные магнитные области.

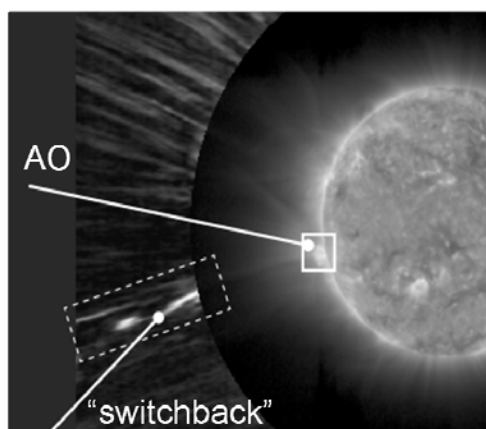


Рис. 2. “Switchback” на поверхности Солнца. Наблюдение SolO 25 марта 2022 г. (телескоп EUV и коронограф Metis). Над юго-восточным краем Солнца отчетливо виден своеобразный S-образный излом в потоке плазмы, вытекающей из Солнца. По рис. 1 из работы [10].

Многие вопросы о струях все еще остаются открытыми и нуждаются в уточнении. Их изучение является важным для решения вопросов, касающихся нагрева короны, источников солнечного ветра, ускорения частиц и узких выбросов корональной массы. Скоординированные наблюдения космических аппаратов Parker Solar и Solar Orbiter с высокоточными наземными приборами, например, DKIST, EST, будут способствовать прорыву в наших знаниях о солнечных струях и связанных с ними явлениях.

Литература

1. Shibata et al. // ASJ, 1992, **44**, L173.
2. Sterling A.C., Moore R.L. // ApJL, 2020, **896**: L18.
3. Rouillard A.P., Kouloumvakos A., Vourlidas A. et al. // ApJS, 2020, **246**:37.
4. Bale S.D., Badman S.T., Bonnell J.W., et al. // Nature, 2019, **576**, 237.
5. Berghmans D., Auchère F., Long D.M. et al. // A&A, 2021, **656**, L4.
6. Kumar, P., Karpen, J. T., Uritsky, V. M., et al. // ApJ, 2023, **951**: L15.
7. Raouafi N. E., Stenborg G., Seaton D. B. et al. // ApJ., 2023, **945**, 28 .
8. Chen Y., Przybylski D., Peter H. et al. // A&A, 2021, **656**, L7.
9. Lee J., Yurchyshyn V., Wang H. et al. // ApJL, 2022, **935**, L27.
10. Telloni D., Zank G., Stangalini M. et al. // ApJL, 2022, **936**: L25 (9pp).