

# Тайны солнечного ветра



И.С.Веселовский

**Н**аверняка каждый из нас когда-то с увлечением рисовал румяное лучистое Солнце. Наивный детский рисунок правильно передает общее впечатление от того, как «дует Солнце». Однако многие детали картины до сих пор еще не нарисованы, скрыты от наблюдений и не известны не только детям, но и взрослым. Наше светило постоянно «дышит», а иногда «чихает», будто оно живое. А его окружение, в том числе Земля и жизнь на ней, тонко ощущают причудливое дыхание Солнца, иногда замечая его, иногда нет. Это дыхание определяет собой «космическую погоду».

Любопытно, что современное Солнце хорошо «умеет» делать упражнения на «выдох» различной длительности, от часов до многих лет. Похоже, что оно почему-то не может ни на минуту «полностью задержать свое дыхание» или сделать «вдох». Когда-то очень-очень давно все было иначе — юное и растущее Солнце строилось и активно вдыхало в себя межзвездный газ вместе с пылью. Каким было это дыхание, мы можем сейчас только догадываться. Что же мы имеем на сегодняшний день?

## Удивительное «дыхание» Солнца

Переходя от образных аналогий к более строгим научным категориям, напомним: вся Солнечная система до расстояний  $\sim 100$  а.е.



**Игорь Станиславович Веселовский**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики им.Д.В.Скобелевца МГУ и старший научный сотрудник Института космических исследований РАН. Область научных интересов — физика космической плазмы, процессы в атмосфере Солнца и гелиосфере, солнечный ветер.

от центра заполнена плазмой, непрерывно истекающей из Солнца, — солнечным ветром. Составляют его главным образом протоны и электроны, но встречаются также ионы гелия и высокоионизованные ионы кислорода, кремния, серы, железа и других элементов. Средняя скорость солнечного ветра на орбите Земли составляет около 400 км/с, плотность числа протонов  $5-7 \text{ см}^{-3}$ , температура  $\sim 10^5$  К. Расстояние от Солнца до Земли при такой скорости преодолевается за четыре дня. Более быстрый, разреженный и горячий солнечный ветер с типичной скоростью 700—800 км/с всегда дует из обширных корональных дыр и покрывает это расстояние за меньшее время. Потоки вещества в виде полностью ионизованной водородно-гелиевой плазмы с примесью других ионов постоянно уходят отсюда в межпланетное пространство. Они существуют там месяцами и годами на протяжении многих оборотов Солнца, образуя причудливо изменяю-

щийся спиральный узор наподобие того, что мы видим, когда течет струя воды из вращающегося шланга. Только струи в этом случае гораздо шире. Солнечный ветер и его изменчивость свидетельствуют об отсутствии механического и термодинамического равновесия на Солнце.

Иногда быстрый ветер может возникать и в других местах на Солнце, двигаясь даже с еще большей скоростью и усиливаясь в несколько раз на несколько часов при мощных корональных выбросах массы. Эти возмущения бывают настолько сильными и резкими, что возникают распространяющиеся ударные волны, пробегающие по всей гелиосфере\*. До Земли такой удар добегает за сутки, в самых ред-

\* Гелиосферой называют область около-солнечного пространства, в которой солнечный ветер движется относительно Солнца со сверхзвуковой скоростью. Иногда при этом подразумевают еще более обширную область, занятую потоками вещества от Солнца, пусть даже они уже сильно затормозились при взаимодействии с межзвездной средой.

ких известных случаях даже за 12 ч, а до границ гелиосферы — за несколько месяцев.

Основным двигателем быстрого ветра, ускоряющим движение плазмы и выбрасывающим ее против силы тяжести в верхней солнечной атмосфере, служат магнитные силы, хотя еще совсем недавно многие исследователи думали, что главную роль играет нагрев короны и газовое давление наподобие процессов в обычном реактивном двигателе. Оказалось, однако, что газовое давление в солнечной короне в целом меньше магнитных натяжений. Сила Ампера при этих условиях ускоряет движение плазмы гораздо эффективнее, чем газодинамическое давление.

Как и почему дует солнечный ветер — один из увлекательных и важных вопросов современной астрофизики и физики космоса. Насколько удалось продвинуться в решении этой задачи?

### Загадки без разгадок

О том, что Солнце временами «чихает», люди узнали намного раньше, чем догадались о его постоянном, медленном и плавном «дыхании». До поры до времени этого процесса вообще не замечали или не обращали на него внимания. Самые первые «улики», выдающие присутствие постоянного потока солнечной плазмы, обнаружили Л.Бирман и его коллеги в 1940-х годах при изучении плазменных хвостов комет; тогда же немецкие исследователи пустили в ход словосочетание «солнечный ветер». Сейчас во всем мире ученые думают о том, как устроены «органы дыхания» Солнца и как они работают.

Происхождение медленного солнечного ветра до сих пор не установлено. На орбите Земли его скорость практически никогда не опускается ниже 200—300 км/с, оставаясь выше скорости звука и альвеновской скоро-

сти\*, каждая из которых обычно составляет несколько десятков километров в секунду. Не вполне понятен этот нижний предел скорости солнечного ветра и сам факт постоянного существования потока наружу без возвратных течений в гелиосфере. Точно так же неизвестно, когда он вообще возник на эволюционной шкале времени, сменив процесс накопления вещества при формировании нашей звезды на сбрасывание его обратно в межзвездное пространство, и как это произошло. Для нынешнего Солнца потеря массы, обусловленная солнечным ветром, намного меньше потерь его массы покоя вместе с излучением в белом свете. Однако потоки импульса при этом сравнимы. Случайно ли данное совпадение? Есть и другой неясный вопрос: какую роль играют подфотосферные процессы в долговременных изменениях параметров солнечного ветра?

Солнечный ветер сильно изменчив, но наблюдается везде и всюду в гелиосфере как сверхмагнитозвуковой поток вплоть до встречи с каким-либо тормозящим препятствием — будь то планета, комета, астероид или межзвездная среда. Потоки солнечного ветра направлены приблизительно радиально в сторону от нашего светила. Мы уже привыкли к этим основным знаниям о солнечном ветре и представлениям об истечении плазмы, накопленным в основном за космическую эру. Почти за полвека прямых измерений в космосе получена огромная информация о солнечном ветре и хорошо изучены его статистические свойства, созданы различные теории и модели, но до сих пор мы не вполне отдаем себе отчет, почему все обстоит именно так, а не иначе.

Физические представления о солнечном ветре и его измен-

\* Альвеновская скорость  $V_A = B(4\pi\rho)^{-1/2}$  определяется напряженностью магнитного поля  $B$  и плотностью плазмы  $\rho$ . Скорость звука  $c_s \sim \sqrt{T}$  зависит от температуры плазмы  $T$ .

чивости в последнее время заметно расширились и трансформировались [1—3]. Рассмотрим несколько исторических и современных эпизодов борьбы идей в раскрытии тайн природы.

### Поиски истины

История исследований в области солнечного ветра и солнечно-земной физики полна забавных курьезов. Первым в мире непосредственным наблюдением плазмы солнечного ветра в межпланетном пространстве ныне признаны данные, которые были получены К.И.Грингаузом с сотрудниками на первых советских ракетах, запущенных к Луне в 1959 г. Известный советский астрофизик И.С.Шкловский, приглашенный Грингаузом для интерпретации этих результатов, в своей книге [4] резко критиковал теоретические представления о перманентном сверхзвуковом расширении солнечной короны, считая их следствием теоретических ошибок. Но заблуждался не он один. Выдающийся английский геофизик С.Чепмен, который ввел в научный обиход термин «геомагнетизм», еще в 20-е годы прошлого столетия правильно понял и впервые рассчитал спиральный узор потоков вещества из вращающегося Солнца, но также настаивал на том, что солнечная корона в целом статична. Придерживались подобных взглядов и другие видные специалисты, которые развивали теоретические модели статической короны и экстраполировали их слишком далеко от Солнца, вплоть до орбиты Земли и далее. Это была серьезная физическая ошибка, которая сдерживала развитие правильных представлений, хотя «истина» была уже известна некоторым не столь маститым ученым.

Научные споры не затихали на протяжении многих лет, в том числе даже и тогда, когда огромное количество фактов

(в первую очередь, наблюдения кометных хвостов, вариаций галактических космических лучей и геомагнитных возмущений, а затем и прямые данные космических измерений в межпланетном пространстве) уже свидетельствовали об обратном, о перманентном и динамическом характере движений во внешней короне и межпланетной плазме, которая служит ее продолжением в виде солнечного ветра. Ученые в основной своей массе поверили в постоянное существование солнечного ветра и в отсутствие покоящегося газа в межпланетном пространстве лишь в начале 1960-х годов — после того, как в течение нескольких месяцев американский космический аппарат «Mariner-2» измерял по пути от Земли к Венере скорость, плотность и температуру плазмы, а также магнитное поле. Переворот в массовом сознании произошел практически мгновенно — через год-другой все вдруг заговорили о «солнечном ветре».

Но и здесь не обошлось без курьеза. В своей первой публикации в престижном физическом журнале американские исследователи заявили, что они зарегистрировали на космическом аппарате «Mariner-2» галактическое магнитное поле. Сейчас мы знаем, что измеренное ими магнитное поле вовсе не галактическое, а создано электрическими токами в гелиосфере и сильно зависит от связи с Солнцем, меняясь с его активностью. Это поле называется межпланетным. В среднем на орбите Земли оно составляет несколько нанотесла. Главный и наиболее мощный гелиосферный электрический ток, создающий это поле, сосредоточен в тонком токовом слое, поверхность которого имеет сложную форму двойной спирали, вращающейся вместе с Солнцем вокруг его оси и обращаемой в перпендикулярном к ней направлении вместе с общим магнитным полем.

## Магнитные метаморфозы гелиосферы

На рис.1 представлены кадры из кинофильма, иллюстрирующего общую картину вращения и изменение наклона гелиосферного токового слоя так, как мы ее сейчас представляем. Солнце вместе с наклонным токовым слоем равномерно вращается вокруг своей оси с периодом около 27 дней. «Опрокидывание» дипольного поля на Солнце и всей картины в перпендикулярном направлении происходит за 22 года — это так называемый магнитный цикл Хейла. Процесс переполусовки общего поля идет медленно в годы минимума и низкой активности, когда магнитная ось Солнца близка к оси его вращения. Затем это отклонение увеличивается и меняется все быстрее, магнитная ось сильно флуктуирует, проходя через плоскость солнечного экватора в максимуме активности, и вновь занимает свое более устойчивое положение на несколько лет, но с противоположным направлением поля в следующем минимуме активности. Полный магнитный цикл на Солнце длится 22 года и охватывает два одиннадцатилетних цикла солнечной активности по числам солнечных пятен. Магнитная структура в области формирования солнечного ветра накладывает свой отпе-

чаток в виде квазистационарных и транзитных потоков в гелиосфере. Одни из них преобладают при спокойном Солнце, другие — при активном.

Гелиосферный токовый слой разделяет все околосолнечное пространство на положительные и отрицательные сектора по знаку радиального магнитного поля в них. Он же «упорядочивает и организует» трехмерную картину течения и магнитных полей в невозмущенном состоянии. Электрические токи на этой поверхности текут сначала напоподобие тонкого кольцевого тока вдоль гиперболической спирали, совершающей много оборотов вокруг Солнца, а затем на больших расстояниях за орбитой Земли становятся радиальными. Подчеркнем еще раз, что околосолнечное и межпланетное пространство вовсе не пустое. Высокоскоростные потоки солнечного ветра всегда существуют вокруг магнитных полюсов Солнца, мощность и положение которых меняются вместе с активностью светила, а медленный ветер сосредоточен вблизи магнитного экватора. Благодаря этому мы видим 27-дневную и 11-летнюю периодичность солнечного ветра в гелиосфере, а в 1999 г. при самой последней переполусовке отчетливо наблюдали мощный поток из единственной обширной циркумполярной корональной дыры вокруг одного из маг-

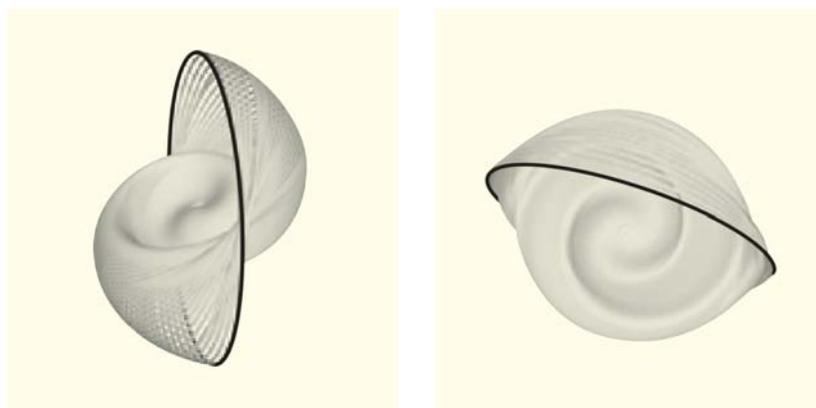


Рис.1. Форма поверхности гелиосферного токового слоя в модели быстрой переполусовки [5]. На левой и правой картинках показаны виды сбоку и сверху, соответственно.

нитных полюсов, который в это время находился в положении около географического экватора. Другой магнитный полюс Солнца вовсе отсутствовал из-за большого квадрупольного момента в это время. Многие в данной картине и трехмерной структуре гелиосферы прояснили измерения, выполненные вне плоскости эклиптики на космическом аппарате «Ulysses». О галактическом же магнитном поле в ближайшем окружении Солнца до сих пор имеются лишь гипотетические и косвенные сведения, хотя измерения на некоторых космических аппаратах производились на огромном расстоянии, порядка сотни астрономических единиц от Солнца. Эти сведения постоянно уточняются при исследовании внешних областей гелиосферы, которые в первую очередь «чувствуют» на себе влияние Галактики.

Отметим попутно еще один интересный исторический парадокс. Магнитосфера Земли\*, представление о которой впервые ввели С.Чепмен и Ю.Бартельс в середине 1930-х годов как о транзитном (временном) образовании для объяснения геомагнитных бурь, оказалась, как мы теперь понимаем, перманентным феноменом, как и сами корпускулярные потоки от Солнца. Задумываясь о достижениях и ошибках исследователей, мы можем учиться лучшему пониманию природы явлений и способности не столь остро относиться к смене «непримиримых» парадигм и образов в науке, да и в жизни.

## Взрывы и грибовидные облака

С древних времен человек интересовался влиянием Солнца на земные процессы. Сегодня исследователи пытаются познать

\* Магнитосфера — полость в корпускулярном потоке от Солнца, проникнуть в которую частицам мешает магнитное поле Земли.

природу быстро движущихся облаков в атмосфере ближайшей к нам звезды. Эти облака возникают при взрывных процессах и могут распространяться в гелиосфере.

Эруптивные процессы при сильных солнечных вспышках и корональных выбросах массы часто сопровождаются уходом вещества в межпланетное пространство. Скорость солнечного ветра при этом может превышать 2 тыс. км/с, поэтому выброшенное вещество вместе с несомыми им довольно сильными магнитными полями долетает от Солнца до Земли иногда за 0.5 сут и производит целый ряд возмущений в околоземном космическом пространстве и на самой поверхности Земли. Наиболее изученные последствия — ионосферные и геомагнитные бури.

Впервые солнечная вспышка была описана в научной литературе после наблюдения уникальных по своей силе событий на Солнце 1 сентября 1859 г., когда ее независимо обнаружили английские наблюдатели Р.Кэррингтон и П.Ходжсон на изображениях Солнца в белом свете. Однако в ту пору еще не было достаточно полных и точных представлений о солнечном ветре, которые сложились лишь спустя столетие. Не вполне понятной была и связь с солнечной вспышкой сильной геомагнитной бури, последовавшей спустя примерно 12 ч после нее. Поэтому английский наблюдатель Кэррингтон в своей заметке тогда лишь очень осторожно заметил по этому поводу: «одна ласточка весны не делает». Известный английский физик лорд Кельвин вообще категорически отвергал возможность существования причинно-следственной связи между событиями на Солнце и геомагнитными бурями. Он основывался на ошибочных оценках и тогдашних представлениях, что вокруг Солнца пустота, а все электрические токи не выходят за его пределы. Сейчас мы знаем, что это не так.

Образование грибовидного облака после сильного взрыва в земной атмосфере — хорошо известное и всесторонне изученное искусственное явление. Нечто похожее происходит и в естественных условиях, когда быстро поднимающееся и растущее грозное облако или облако от вулканического взрыва принимает форму наковальни. Независимо от происхождения облака в атмосфере, такая сплюснутая сверху форма возникает по очень простой причине: из-за его сильного торможения окружающим газом. Сходные явления наблюдаются и на Солнце (рис.2).

Важное отличие состоит в том, что движущие силы таких взрывов на Солнце имеют совсем иную физическую природу, а торможение или ускорение плазменных облаков в движущемся солнечном ветре не столь легко заметить. Это удалось надежно сделать лишь в последние годы. Сложное происхождение данных явлений, их магнитогидродинамическая и кинетическая природа сейчас тщательно изучается. Несомненно, что наиболее мощные взрывы и сильные корональные выбросы массы порождаются процессами уже в самих недрах, т.е. под поверхностью видимого нам Солнца. Поэтому их подготовка и начальное развитие скрыты от прямого наблюдения, проследить их можно лишь методами гелиосейсмологии, которые сейчас успешно развиваются. На поверхности Солнца, в его фотосфере и хромосфере, в переходном слое к короне наблюдаются сложные и разнообразные сопутствующие явления — предвестники. Может быть, мы научимся лучше использовать их для прогноза.

Корональные выбросы массы в поле зрения коронографов или радиогелиографов появляются на некоторой высоте в короне как бы из ничего. Но это лишь иллюзия. Они быстро растут, расширяются во все стороны, их куполообразная или

арочная вершина поднимается в поле зрения коронографов и уносится в межпланетное пространство вместе с потоком солнечного ветра, иногда опережая его, а иногда отставая. Масса такого облака может составлять более  $10^{15}$  г. Скорость движения достигает 1–2 тыс. км/с, а иногда и более, поэтому движение сопровождается ударными волнами и ускорением энергичных частиц. Температура внутри облака неоднородна, некоторые участки его нагреты до корональных температур, измеряемых миллионами градусов, а другие могут содержать в себе также и в 100 раз более холодное и плотное вещество солнечных протуберанцев. Такие холодные «вкрапления» не успевают прогреться и прийти в термодинамическое равновесие при быстром пролете через корональную среду с температурой в миллион градусов. По своему составу это та же плазма, что и в солнечном ветре. Причем гелий, встречающийся чаще других элементов (не считая водорода), может быть ионизован двукратно или однократно, давая прекрасный «термометр» в руки исследователей.

Постоянное наблюдение Солнца в линиях ультрафиолетового излучения и с помощью коронографов в белом свете, базирующихся в космосе, позволило создать огромные архивы кинофильмов и совершенно по-новому осмыслить физические процессы во время солнечных вспышек и корональных выбросов массы. Если ранее шли дискуссии о «первичности» или «вторичности» одного из этих явлений, то сейчас стало ясно, что оба они — лишь два «параллельных» канала для выделения свободной энергии в виде электромагнитного излучения и движений плазмы. Относительная доля одного и другого характеризуется некоторым безразмерным параметром, который может принимать в различных случаях соответственно большие и малые значения. Дру-

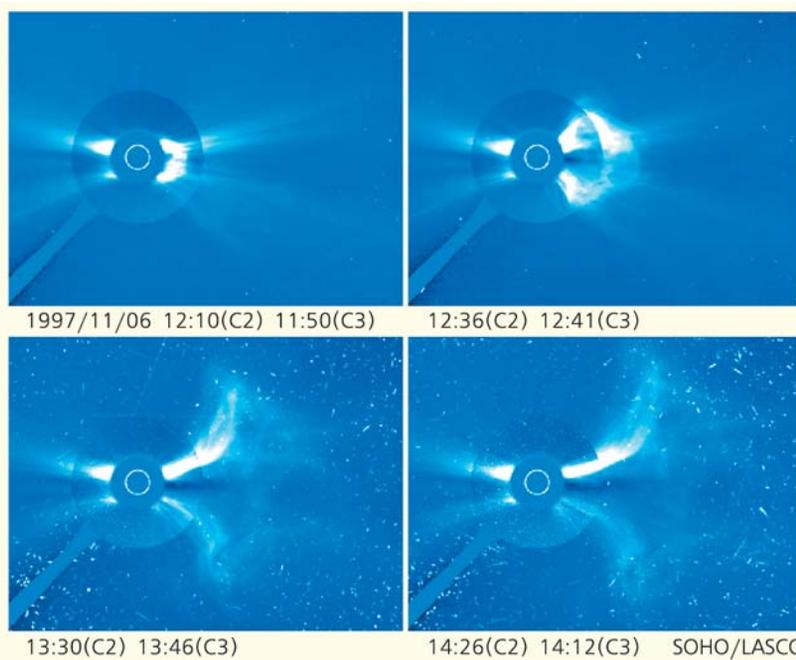


Рис.2. Корональные выбросы массы в виде расширяющихся грибовидных облаков. Кадры из кинофильмов, снятых коронографами LASCO C2 и C3 на космическом аппарате SOHO.

Фото NASA

гой важный вывод состоит в том, что рассмотрение корональных выбросов массы и солнечного ветра в отдельности имеет лишь ограниченный смысл и не всегда оправдано.

Важным достижением стало обнаружение глобальных выбросов вещества, охватывающих в месте своего развития в солнечной короне не только одну активную область, а сразу несколько таких областей, иногда находящихся в разных полушариях, вплоть до всего видимого диска. Так могут выглядеть наиболее мощные и обширные явления на Солнце, охватывающие весь диск (рис.3, сверху слева), по сравнению с более слабыми и компактными (внизу справа).

### Стереоскопический взгляд в будущее

25 октября 2006 г. в рамках космической миссии STEREO (NASA) были запущены два космических аппарата с идентичным оборудованием, в том чис-

ле с коронографами и телескопами. Их основная задача — вести с орбиты Земли наблюдения за Солнцем и окружающей его внутренней гелиосферой одновременно из двух разных точек (рис.4).

Примерно так же мы смотрим на мир двумя глазами под разными углами зрения и воссоздаем трехмерный образ окружающего нас объемного пространства. Лучше всего нам это удается сделать для объектов на расстоянии 25 см от нашего носа, а в остальных случаях мы не всегда уверены на 100%, иногда можем ошибаться в своих выводах о геометрической форме рассматриваемых предметов, особенно, если мы с ними не знакомы и ранее никогда не видели. Даже если нам они когда-то встречались, все равно могут возникать ложные иллюзии и картины-«обманки». Кстати, этим приемом умело пользовались некоторые выдающиеся художники средневековья.

В ходе выполнения миссии STEREO впервые были получены

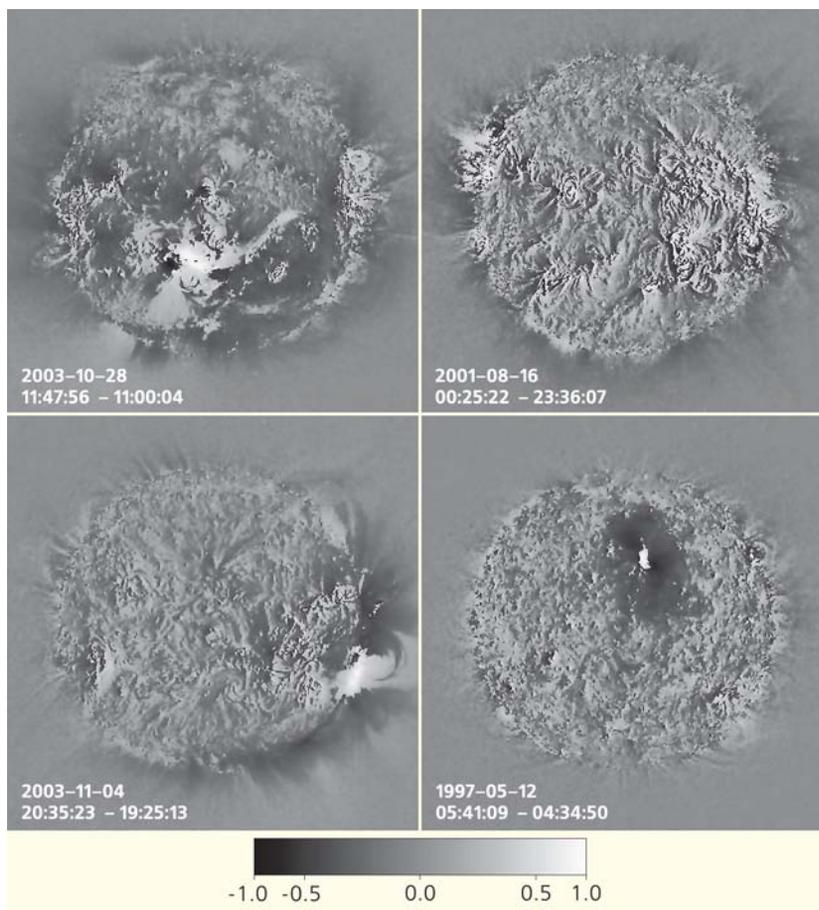


Рис.3. Корональные выбросы массы. Они хорошо видны как темные образования в разностных рентгеновских и ультрафиолетовых изображениях как на лимбе, так и на диске. При мощных событиях они могут иметь глобальный характер, охватывая сразу две-три активных области и больше половины Солнца [6].

стереоскопические изображения и кинофильмы движущихся облаков на Солнце и в солнечном ветре, позволившие уточнить представления об их весьма разнообразной геометрической форме.

Солнечный ветер и корональные выбросы массы нельзя достаточно полно понять в отдельности от других проявлений активности Солнца. Сейчас продолжают успешно работать солнечная и гелиосферная обсерватория SOHO и ряд других космических аппаратов и спутников, созданных для более детального исследования солнечной и гелиосферной активности. Очень интересные результаты в этом отношении дали отечественные искусственные спутники Земли

серии «Коронас». Самый недавний из них был запущен в 2009 г.; он нацелен на детальное исследование наиболее быстро протекающих процессов. Этот год оказался уникальным по своему спокойствию на Солнце и в гелиосфере, что позволило получить ценную научную информацию о самых слабых вспышках (сейчас она обрабатывается). 11 февраля 2010 г. в США была выведена на орбиту вокруг Земли новая Динамическая солнечная обсерватория (SDO) с более совершенной аппаратурой для исследования влияния Солнца на Землю и окружающее ее пространство. Сбор новых данных продолжается.

Здесь мы не успели коснуться многих интересных и важных

вопросов. Назовем несколько из них. Прежде всего, почему нынешнее Солнце преимущественно отдает свое вещество, а не получает его из межзвездного газа? «Насосы» и двигатели вещества могли бы работать и в обратную сторону, продолжая закачивать вещество из межзвездной среды на Солнце. Такая возможность не противоречит никаким законам физики. Более того, есть основания полагать, что она реализуется в природе для других звездных объектов.

То, что теория не исключает подобных вариантов, было впервые показано в 1952 г. английским астрофизиком Х.Бонди, развивавшим представления Ф.Хойла об аккреции вещества на звезду типа Солнца. Тогда одно время даже думали, что с их помощью можно будет объяснить нагрев солнечной короны. Действительно, скорость свободного падения на Солнце составляет 617.7 км/с, что вполне достаточно для этого.

Но в реальности вместо падения на Солнце плазма во внешней короне на расстояниях в несколько солнечных радиусов улетает от него примерно с той же скоростью по порядку величины. Особое внимание на возможность сверхзвукового истечения в чисто теоретическом плане обратил молодой американский астрофизик Ю.Паркер в 1957 г. в рамках той же самой математической идеализации, по-видимому, сам не зная того, что он изучал в точности ту же самую политропную модель, что и Бонди. Решения для скорости в обоих случаях отличаются лишь знаком, как в хорошо известном со школы алгебраическом квадратном уравнении. Вопрос, почему надо выбрать решения со знаком плюс или минус, решает физика, природа, а не математика. Неслучайно «физика» и «природа» в греческом языке — однокоренные слова. Так какова же эта природа? Достаточно полного ответа на главный вопрос пока

нет. Ответ могут дать только дальнейшие исследования.

Природа щедра и разнообразна. Не исключено, что одиночные звезды типа Солнца «со знаком плюс или минус» будут обнаружены при наблюдениях доплеровских сдвигов в линиях ионов в ультрафиолетовом диапазоне. Вполне мыслимы и более сложные объекты с переменным знаком скорости над разными участками поверхности или во времени. В настоящее же время пока имеются лишь некоторые первые измерения в крыльях линии Лайман-альфа атомарного водорода, которые предстоит осмыслить и правильно интерпретировать в рамках модельных представлений, не являющихся вполне исчерпывающими и однозначными для всех звезд. Тогда в ответ на ставший уже традиционным для специалистов вопрос, почему дует солнечный ветер, придется вспомнить забытые рассуждения. Не только о необходимых граничных условиях для стационарного истечения — высоком давлении горячего газа в короне и низком давлении холодного разреженного межзвездного газа в ближайшем к нам межзвездном окружении (т.е. о мгновенных значениях), но и о принципиально нестационарной и эволюционно обусловленной природе истечения солнечного ветра.

Перечислим еще несколько проблем, которые ждут своего решения. Каково соотношение между прямыми и обратными каскадами энергии от больших неоднородностей и связанных с ними длительных процессов к мелким и быстрым пространственно-временным событиям на Солнце и в гелиосфере? Как происходит взаимодействие солнечного ветра с межзвездной средой? Какую роль играет закон сохранения углового момента в эволюции солнечного ветра? Как же все-таки греется солнечная корона «в целом» и ускоряется солнечный ветер, такой разнообразный по своим

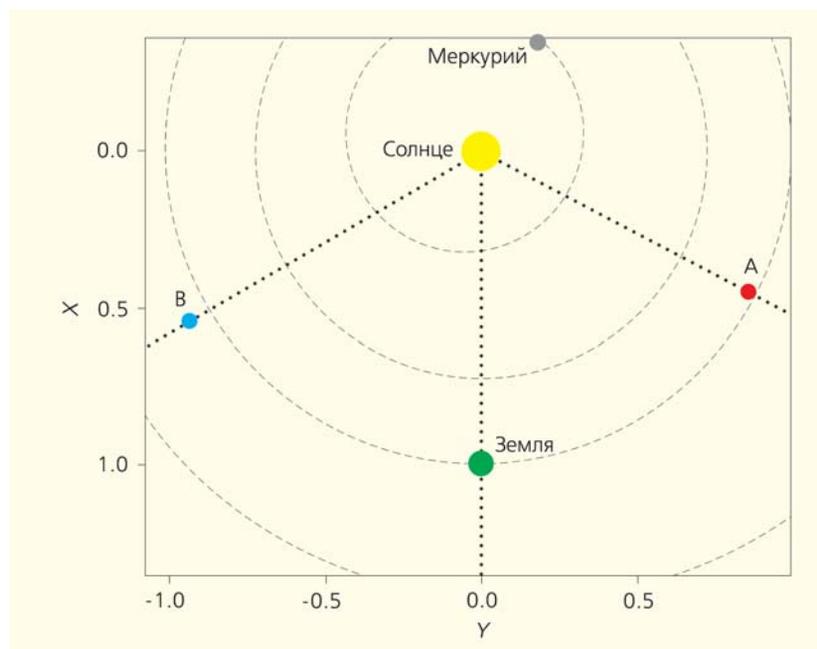


Рис.4. Расположение космических аппаратов STEREO (A, B) относительно Солнца и Земли, каким оно было 25 октября 2009 г., т.е. через три года после их запуска. В дальнейшем угол зрения на Солнце будет продолжать увеличиваться (<http://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/where/>). X, Y — оси солнечно-земной эллиптической системы координат.

свойствам? Какие из многочисленных предложенных механизмов нагрева и ускорения плазмы на Солнце являются главными?

Наконец, почему в солнечном ветре за всю многолетнюю историю измерений его состава приборами на космических аппаратах никогда не наблюдалось обогащение гелием выше 30—40% по отношению к протонам при среднем содержании 4—5%? Что препятствует этому? По-видимому, этот факт указывает на некоторое регулирующее действие и преобладание процессов турбулентного перемешивания над процессами электромагнитной, диффузионной и гравитационной сепарации по составу. Необходимость построения новых, более адекватных моделей формирования солнечного ветра и его ионного состава в турбосфере вокруг Солнца сейчас очевидна. Не менее очевидна и потребность в дополнительных экспериментальных данных.

### Ближе к Солнцу

Мечта послать космический зонд в корону Солнца для исследования происходящих там физических процессов была высказана более 40 лет назад. Рассматривалось несколько вариантов для облета по полярной, наклонной или экваториальной орбите вокруг Солнца на расстояниях хотя бы до 10 солнечных радиусов. Это позволило бы приблизиться к разгадке многих тайн, что были упомянуты парой абзацев выше, а также впервые выполнить многие другие интересные исследования вблизи нашей звезды (на расстоянии 4 солнечных радиусов все материалы превратились бы в пар). Такой престижный, но технически очень сложный и дорогостоящий проект до сих пор не был осуществлен. В настоящее время в NASA он известен под названием «Solar Probe Plus». Для него сейчас выбрана схема многократных, но кратковремен-

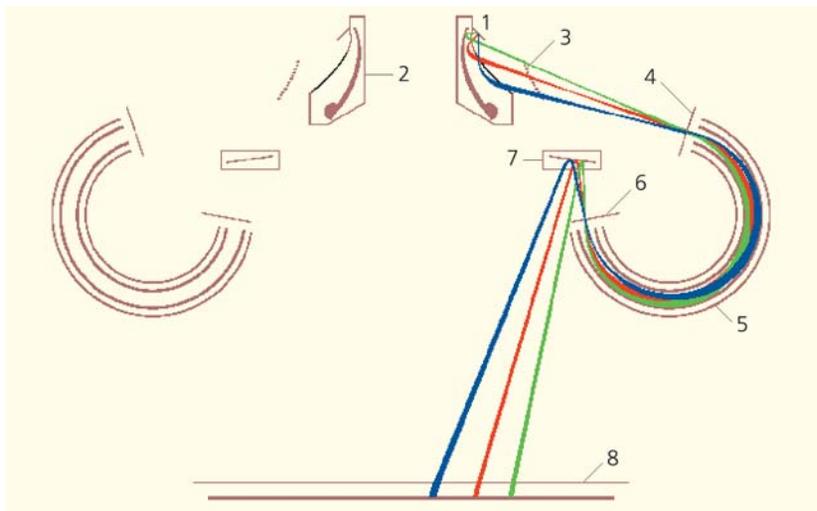


Рис.5. Принципиальная схема тороидального электростатического анализатора ионов: 1 — входное окно ионного анализатора, 2 — первичное зеркало, 3 — ворота, 4 — диафрагма, 5 — ионный электростатический анализатор, 6 — диафрагма, 7 — зеркало, 8 — детектор ионов (микроканальная пластина). Цветами показаны траектории трех пучков ионов, входящих в прибор под разными полярными углами: 0° (зеленый), 45° (красный) и 90° (синий). Ширина энергетического интервала ионов ~10%.

ных сближений с Солнцем по сложной траектории полета с последовательными разворотами около Венеры в течение нескольких лет. Ключевым для успеха миссии будет выбор надежной аппаратуры с надлежащими характеристиками. Одна из важнейших в данном слу-

чае — быстрота проведения измерений, поскольку наиболее интересные участки сближения занимают всего лишь десятки часов из-за огромной скорости движения аппарата вблизи Солнца. Если измерительный прибор будет работать медленно, то все смажется.

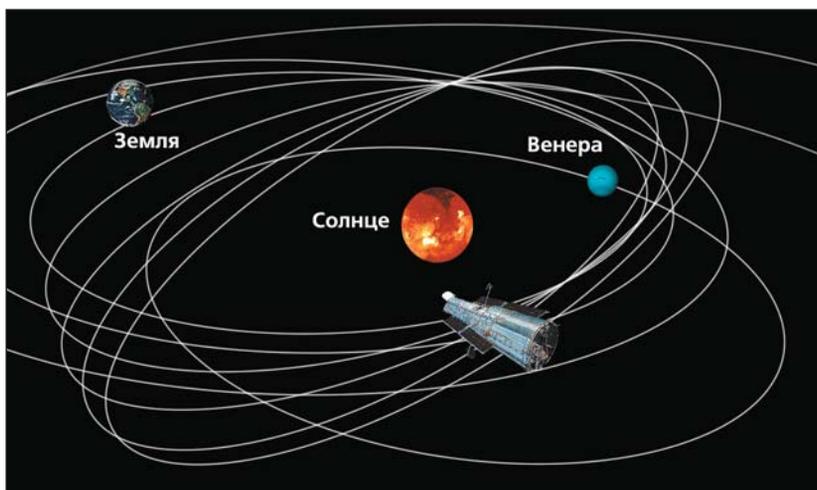


Рис.6. Российский проект «Интергелиозонд». Аппарат будет двигаться вокруг Солнца, испытывая множественные гравитационные развороты при сближении с Венерой для выхода из плоскости эклиптики и постепенного увеличения наклона орбиты. Максимальное сближение с Солнцем вплоть до гелиосинхронной зоны около 30 солнечных радиусов.

Российские ученые и инженеры могли бы внести заметный вклад в реализацию этого проекта, основываясь на своем богатом опыте теоретических и практических работ. В Институте космических исследований РАН имеются разработки по проведению надежных и быстрых плазменных измерений в космосе и достигнуты успехи в их осуществлении. Под руководством профессора О.Л.Вайсберга был создан прототип электростатического анализатора ионов, пригодный в данном случае (рис.5). Наиболее привлекательная и оригинальная особенность, отличающая его конструкцию от зарубежных аналогов, — возможность одновременного панорамного обзора потока частиц плазмы с различными энергиями в широком телесном угле, а не более медленное сканирование путем переключений.

Планируются и разрабатываются другие интересные проекты, связанные с проникновением ближе к Солнцу для исследования тех участков внутренней гелиосферы, где еще не бывали космические аппараты. В России это «Интергелиозонд» (руководители проекта академик Л.М.Зеленый, ИКИ РАН и доктор физико-математических наук В.Д.Кузнецов, ИЗМИРАН) (рис.6), в Европе — «Solar Orbiter», есть и некоторые другие. Эти проекты менее дороги, но также могут дать по-своему уникальные сведения благодаря наклону орбиты, иному составу аппаратуры и более благоприятным условиям для работы, поскольку речь идет об областях, не столь близких к Солнцу, как в случае «Solar Probe», а лишь в районе гелиосинхронной зоны (около 30 солнечных радиусов). Пока же наиболее близкие к Солнцу участки гелиосферы посещались специально созданными для этого двумя европейскими космическими аппаратами «Helios» в середине 70-х годов только до расстояний ~0.3 а.е. (около 60 радиусов Солнца) [1].

## Мир внутри гелиосинхронного пояса

Гелиосинхронный пояс представляет собой сферическую оболочку вокруг Солнца, расположенную на расстоянии около 30 его радиусов, толщиной несколько радиусов. Здесь и еще ближе к Солнцу находится очень интересная область, о которой мы пока знаем не так много, как хотелось бы и как этого требует должное понимание солнечно-земной физики. Космические тела, движущиеся по круговой орбите вокруг Солнца внутри гелиосинхронного пояса, могут подолгу «зависать» над одной и той же точкой солнечной поверхности. Это явление аналогично так называемому геосинхронному движению. Оно умело используется на Земле. Спутник Земли, находящийся на расстоянии около 36 тыс. км, вращается вместе с ней с одной угловой скоростью и видит под собой (или его «видят») одни и те же участки на поверхности планеты. Геосинхронная орбита сейчас плотно населена спутниками связи, ретранслирующими программы телевидения в определенные регионы и т.п.

Гелиосинхронное движение по круговой орбите также заманчиво использовать для длительного и непрерывного наблюдения за одними и теми же объектами на Солнце. Это было бы очень интересно и полезно для исследования рождения и эволюции активных областей,

корональных дыр, протуберанцев, различных волн и движений. Нуждается в таких наблюдениях и гелиосейсмология. Пока ученые лишены такой возможности. Реализовать подобную схему в полной мере не удастся из-за больших технических сложностей, но приблизиться к желаемому будет можно.

Одно из отличий Солнца от Земли состоит в том, что оно не твердое, а газообразное. Экваториальные участки поверхности вращаются вокруг оси Солнца быстрее, чем полярные. Один оборот занимает на экваторе около 25 дней, а на высоких гелиоширотах он на несколько дней дольше. Поэтому речь идет о гелиосинхронном поясе, а не об одной орбите, как в случае твердой Земли.

При выходе космического аппарата из гелиосинхронного пояса может произойти очень интересное явление: двойное пересечение одного и того же коронального луча, вращающегося совместно с Солнцем. Сначала аппарат «догонит» и пересечет этот луч на малых расстояниях от Солнца внутри зоны, а затем сам вращающийся луч «догонит» аппарат и произойдет повторное пересечение, — вне зоны и в обратном направлении. Возможно, таким способом удастся «дважды войти в одну воду» и проследить за радиальными движениями и другими изменениями плазмы в пространстве и во времени.

Не исключено, что радиальные лучи, тянущиеся в короне

от Солнца и видимые на коронаграфических изображениях, теряют свою целостность именно в гелиосинхронном поясе, а может быть, где-то за его пределами — из-за совместного действия вращения, магнитных сил и других факторов. Сейчас мы этого не знаем, так же, как не знаем, откуда берутся резкие скачки плотности в солнечном ветре на орбите Земли. То ли они идут от самого Солнца, то ли возникают где-то по дороге. Эти вопросы стали особенно актуальными после измерений на ИСЗ «Интербол». Толщина наблюдаемых плазменных фронтов оказалась очень маленькой и соизмеримой с ларморовским радиусом ионов, лишь в несколько раз превосходя его. На орбите Земли ларморовский радиус теплового движения протонов в солнечном ветре составляет несколько десятков километров. Чтобы подробно исследовать такие мелкие детали, понадобились очень быстрые плазменные измерения с рекордной скоростью. В короне Солнца эти масштабы значительно меньше из-за более высокой напряженности магнитного поля.

Когда реализуются готовящиеся ныне космические миссии, мы наверняка получим новые открытия и теории. Более подробно о современных достижениях и проблемах в исследовании солнечного ветра можно узнать из книг [2, 3] и огромного количества текущих научных публикаций и сообщений. ■

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проекты 07-02-00147, 09-02-11510.**

## Литература

1. Physics of the Inner Heliosphere. 1. Large Scale Phenomena. 2. Particles, Waves and Turbulence / Eds R.Schwenn, E.Marsch. Berlin, 1990, 1991.
2. Плазменная гелиогеофизика. Т.1, 2 / Под ред. Л.М.Зеленого и И.С.Веселовского. М., 2008.
3. Модель космоса: Научно-информационное издание. Т.1: Физические условия в космическом пространстве / Под ред. М.И.Панасюка и Л.С.Новикова. М., 2007.
4. Шкловский И.С. Физика солнечной короны. М., 1962.
5. Веселовский И.С., Жуков А.Н., Панасенко О.А. // *Астрономический вестник*. 2002. Т.36. №1. С.88—92.
6. Zbukov A.N., Veselovsky I.S. // *Astrophysical Journal*. 2007. V.664. №2. P.L131—L134.