

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.75

## СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР \*)

Э. Паркер

Сильный ветер водорода непрерывно дует в солнечной системе. Возникая на Солнце, он проносится мимо Земли со скоростью 400 км/сек (около 1 400 000 км/час), достигает удаленных планет и уходит в межзвездное пространство. Подобно метле, он выметает газы, истекающие из планет и комет, мелкие частицы метеоритной пыли и даже космические лучи. Этот ветер является ответственным за внешние области радиационных поясов Ван-Аллена около Земли, за полярные сияния в земной атмосфере и за геомагнитные бури. Он может даже играть определенную роль в формировании общей картины погоды на Земле.

Существование этого солнечного ветра давно уже предполагалось и теперь подтверждено исследованиями на космических кораблях. Они измерили скорость ветра и его плотность. Исследования другими методами позволили раскрыть тайну его происхождения и понять обусловленные им эффекты.

Представление о существовании солнечного ветра возникало постепенно, в течение нескольких десятилетий. Первое четкое утверждение, что нечто, кроме света, приходит к Земле от Солнца, было высказано в 1896 г. норвежским физиком Олафом К. Биркеландом. Он предположил, что полярное сияние может быть создано электрически заряженными «корпускулярными лучами», выбрасываемыми с Солнца и «втягиваемыми» магнитным полем Земли около полюсов. Он пришел к этому заключению на основе того факта, что полярные сияния (рис. 1) очень похожи на электрический разряд в недавно изобретенных тогда трубках, генерирующих потоки заряженных частиц («катодные лучи»).

Идея Биркеланда была использована норвежским математиком Карлом Штёрмером, который продолжил расчеты траекторий, по которым должны следовать потоки солнечных заряженных частиц при вхождении в магнитное поле Земли. Как это часто случается, его теоретическая схема петлеобразных и спиральных траекторий оказалась похожей на картину, наблюдаемую в полярных сияниях, но это сходство было

---

\*) E. N. Parker, The Solar Wind, Scient. American 210 (4), 66 (1964). В оригинале — резюме: «Хвосты комет и некоторые другие явления указывают на то, что разреженный, горячий газ солнечных частиц протекает мимо Земли со сверхзвуковой скоростью. Этот газ является не чем иным, как расширяющейся короной Солнца». Перевод Л. И. Дормана и Н. С. Каминера. Примечания и литература добавлены переводчиками.

лишь случайным совпадением; его теория оказалась ошибочной. До настоящего времени еще не существует полной теории, объясняющей, как солнечный ветер создает полярные сияния, хотя и появились некоторые интересные идеи. Однако остается фактом, что Биркеланд и Штёрмер

находились на правильном пути и положили начало важному новому направлению, обратив внимание на возможность прихода от Солнца заряженных частиц.



Рис. 1. Это полярное сияние, которое возникает в результате взаимодействия солнечного ветра с земной атмосферой, было сфотографировано в Аляске У. Чесслером из Университета в Аляске.

Силовые линии магнитного поля Земли образуют воронку, вдоль которой солнечные частицы входят в атмосферу на высоких широтах.

Излучение Солнца является более разумным объяснением. В 1930 г. Чепмен и Ферраро выполнили ряд расчетов и показали, что облако выброшенных с Солнца ионов, двигаясь со скоростью 1000 или 2000 км/сек, достигнет Земли через 1—2 суток и, проходя мимо нее, вызовет возмущения геомагнитного поля (рис. 2). Их теоретическая картина такого возмущения поля настолько хорошо совпадала с действительными флуктуациями во время магнитной бури, что идея Чепмена получила широкое распространение.

Третье проявление солнечных корпускул было замечено в 40-х годах. В эти годы они стали предметом обсуждения в связи с изучением флуктуаций интенсивности космических лучей на Земле. Скотт Э. Форбуш из Института Карнеги в Вашингтоне обнаружил, что интенсивность космического излучения, достигающего Земли, была низкой в период высокой солнечной активности 11-летнего цикла и часто резко уменьшалась во время магнитных бурь. Другими словами, чем выше была активность Солнца, тем меньшее количество частиц космических лучей попадало на Землю (рис. 3). Сначала было высказано предположение, что этот эффект может быть обусловлен флуктуациями земной атмосферы и связанными с солнечной активностью изменениями магнитного поля

## МАГНИТНЫЕ БУРИ

Следующее доказательство корпускулярного излучения Солнца появилось при изучении другого явления (и на много лет позже). Этим явлением оказались магнитные бури, с которыми связаны нарушения телефонной, телеграфной и радиосвязи. Бури очевидным образом связаны с флуктуациями магнитного поля Земли. Так как они обычно возникают через два дня после вспышки на поверхности Солнца, их возникновение сначала приписывалось всплеску ультрафиолетового излучения вспышки или другой аналогичной причине. Затем английский геофизик Сидней Чепмен высказал предположение, что корпускулярное

Земли, приводящими к дополнительному отклонению космических лучей от Земли \*). Но Джон А. Симпсон из Чикагского университета, который начал регистрировать вариации космических лучей с помощью созданного им в это время нейтронного монитора, вскоре обнаружил, что флуктуации были значительно больше, чем предполагалось. Они не могли возникнуть только из-за изменений каких-либо параметров на Земле, а должны были отражать общее увеличение и уменьшение интенсивности космических лучей во всем пространстве солнечной системы \*\*).

По-видимому, что-то в излучении Солнца стремится препятствовать вхождению космических лучей в солнечную систему, и эта помеха возрастает, когда Солнце становится особенно активным. Что может быть

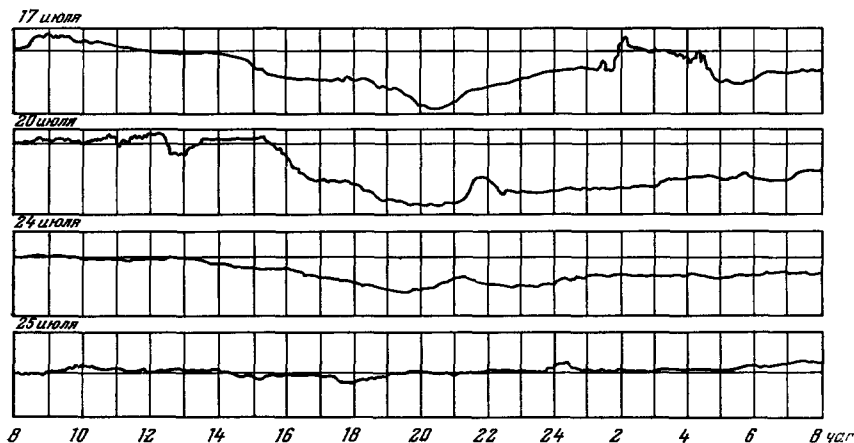


Рис. 2. Магнитное поле Земли флуктуирует в соответствии с изменениями солнечного ветра.

Эти вариации напряженности горизонтальной компоненты земного поля за четыре полных дня зарегистрированы в июле 1961 г. в г. Гонолулу.

таким мешающим агентом? Общий механизм был найден в магнитогидродинамической теории шведского физика Ханнеса Альвена. Он отметил, что движущийся ионизованный газ должен нести магнитное поле. Если это так, то, как предположили Филип Моррисон из Корнельского университета и другие, поток солнечных заряженных корпускул, несущий магнитное поле, будет стремиться выместить частицы космических лучей из солнечной системы; этот эффект будет тем сильнее, чем интенсивнее

\*) Впоследствии было обнаружено, что действительно имеется непосредственное влияние изменений геомагнитного поля на космические лучи. Однако его действие оказалось обратным тому, что предполагал С. Чепмен<sup>1</sup>. А именно, с увеличением возмущенности геомагнитного поля, т. е. с увеличением солнечной активности, интенсивность космических лучей не уменьшалась, а увеличивалась. Особенно значителен этот эффект во время главной фазы магнитной бури<sup>2,3</sup>. Более того, из изучения вариаций космических лучей удалось показать, что под влиянием солнечного ветра магнитосфера Земли несимметрична и вытянута в направлении от Солнца<sup>3,4</sup>, что подтвердилось прямыми измерениями на спутниках.

\*\*) Непосредственные измерения космических лучей в межпланетном пространстве на советских и американских космических ракетах показали, что основная часть изменений интенсивности космических лучей во время магнитных бурь и в связи с 11-летним циклом солнечной активности происходят синхронно на Земле и на больших расстояниях от нее, исчисляемых многими миллионами километров (обзор этих результатов см. в работе<sup>5</sup>).

солнечное корпускулярное излучение. Такая теория может объяснить флуктуации космических лучей.

Приблизительно в это же время появилось четвертое убедительное доказательство существования корпускулярного излучения с Солнца. В течение веков было известно, что хвосты комет всегда направлены от Солнца. Независимо от того, в какой точке орбиты находится комета при ее движении через солнечную систему, ее голова всегда направлена к Солнцу, а газовый хвост устремлен в противоположную сторону (рис. 4). Почему это так? До недавнего времени почти повсеместное распространение имела теория, согласно которой давление солнечного света, отталкивающего крайне разреженное вещество кометы, поворачивало хвост

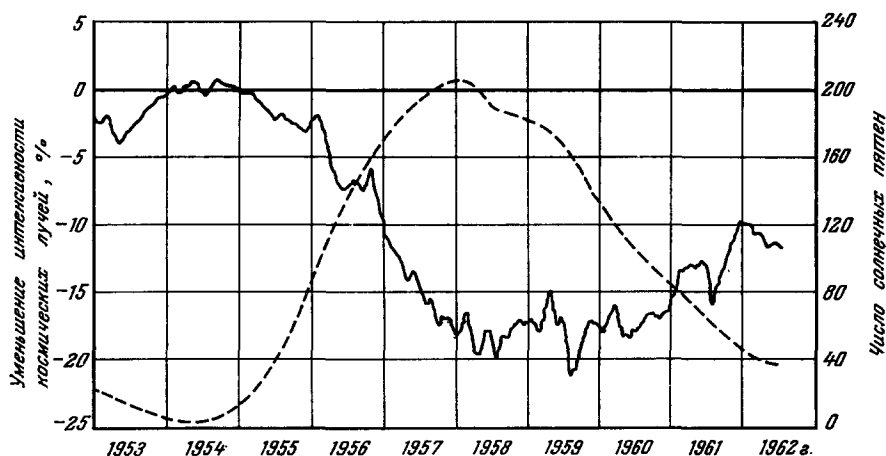


Рис. 3. Поток космических лучей на Земле уменьшается с усилением ветра и солнечной активности в течение 11-летнего цикла солнечной активности.

Сплошная кривая показывает изменения интенсивности космических лучей относительно максимума в 1954 г. Штриховая кривая дает изменения солнечной активности, определяемой по числу солнечных пятен. Пятна являются другим проявлением процессов на Солнце, которые обуславливают флуктуации солнечного ветра.

в противоположном Солнцу направлении. Но в 50-х годах Людвиг Ф. Бирман из университета в Гёттингене показал, что давление солнечного света недостаточно для объяснения стремительного истечения кометных газов. Он показал, что единственным видом солнечного излучения, которое могло бы объяснить отталкивание кометных хвостов, является поток корпускул. Кроме того, наличие такого корпускулярного излучения от Солнца естественно объясняет также существование возбужденных, излучающих свет ионов, наблюдаемых в кометных хвостах.

Открытие Бирмана обнаружило нечто новое, имевшее важное влияние на решение вопроса о том, как возникает это солнечное корпускулярное излучение. До этого времени различного рода гипотезы исходили в основном из двух возможностей: либо корпускулы испускались солнечными вспышками (которые, как было известно, испускают также очень энергичные протоны, т. е. ядра водорода, так называемые солнечные космические лучи), или они выбрасывались в виде потоков из солнечных пятен (каким-то неизвестным электромагнитным ускоряющим процессом). Но аргументы Бирмана ясно показали, что корпускулярное излучение не может приходить только в виде всплесков или изолированных потоков. Кометные хвосты показали, что излучение распространяется от Солнца непрерывно во всех направлениях. Кометные хвосты являются, по существу,



Рис. 4. «Ударная волна солнечного ветра» — хвост кометы, всегда направленная от Солнца, выдувается быстрым потоком водорода в космическое пространство. Комета Мркоса была сфотографирована в августе 1957 г. 5-дюймовой камерой на г. Паломар. Нерегулярности, наблюдаемые в кометном хвосте, вероятно создаются турбулентными образованиями солнечного ветра.

межпланетными «ударными волнами ветра», доказывающими существование устойчиво движущегося, заполняющего все пространство корпускулярного излучения. Истечение частиц может усиливаться, когда Солнце становится особенно активным, но оно имеется все время, независимо от того, имеются солнечные пятна и вспышки или их нет.

### КОРОНА И ВЕТЕР

Представлялось, что истечение корпускул должно происходить из чего-то, что непрерывно существует на всей поверхности Солнца. Солнце должно непрерывно выбрасывать мелкий град снарядов во всех направлениях в окружающее пространство. Какой процесс может быть причиной этого? Предположение о возможном ответе на этот вопрос возникло однажды после полудня в 1957 г., когда я находился у Чепмена в лаборатории в обсерватории Боулдер (Колорадо), где он тогда работал.

Чепмен исследовал солнечную корону с точки зрения того, может ли она быть ответственной за нагревание внешних областей земной атмосферы. Зондирование верхней атмосферы привело к обнаружению любопытного факта, что атмосфера с увеличением высоты становится не холоднее, а горячее. Это заставило предположить, что верхние слои воздуха нагревались горячими газами внешнего космического пространства. Чепмен высказал догадку, что эти горячие газы могли бы удерживаться солнечной короной.

Корона представляет собой разреженную внешнюю атмосферу Солнца. Это видно из того, что даже вблизи Солнца она содержит только около  $10^8$ — $10^9$  атомов водорода в  $1 \text{ см}^3$ ; эта плотность составляет  $10^{-11}$  от плотности воздуха, которым мы дышим. Однако температура короны, измеренная по скорости ее атомов, очень высока: около миллиона градусов вблизи Солнца. При такой высокой температуре корональный газ полностью ионизован и поэтому состоит из отдельных протонов и электронов.

Из-за того, что корона столь разрежена, она не светится, хотя температура ее очень высока. Однако она становится видимой благодаря тому, что ее атомы рассеивают свет яркой солнечной фотосферы, так же как частицы пыли в земной атмосфере становятся видимыми из-за рассеяния солнечного света. Когда яркий свет самого Солнца исчезает при солнечном затмении, можно видеть, как белая корона простирается далеко от закрытого солнечного диска. Фотографии короны (рис. 5, а, б) показывают, что она распространяется на миллионы километров от Солнца, и если бы не было маскирующего действия дымки и света неба, то мы могли бы, вероятно, видеть ее более слабое сияние на значительно большем расстоянии.

Чепмен из своих теоретических исследований свойств ионизованных газов нашел, что разреженный ионизованный газ при температуре в миллион градусов должен обладать необычайно высокой теплопроводностью. Согласно его вычислениям, перенос тепла через ионизованный газ возрастает почти пропорционально четвертой степени температуры. При температуре в миллион градусов это дает большой поток тепла. Чепмен вычислил, что если корона простирается вплоть до земной орбиты, ее температура вдали от Солнца благодаря ее высокой теплопроводности будет около  $2 \cdot 10^5$  градусов. Эта величина представляла большой интерес, подтверждая его предположение, что корона может нагревать верхние слои земной атмосферы.

Но Чепмен сделал и другое открытие, которое произвело на меня большое впечатление, когда он рассказывал мне о своих результатах в нашем послеполуденном разговоре. Он продолжил некоторые расчеты для определения того, действительно ли корона достигает Земли. Для

этого он использовал барометрическое уравнение, которое констатирует очевидный факт, что в атмосфере давление на любой определенной высоте должно быть достаточным, чтобы поддерживать вес выпележащей атмосферы (если бы это не выполнялось, то атмосфера бы сжалась). Используя известную плотность короны вблизи Солнца (что можно приближенно определить), он мог оценить ее плотность на расстоянии орбиты Земли. Оказалось, что плотность составляет приблизительно от 100 до 1000 атомов

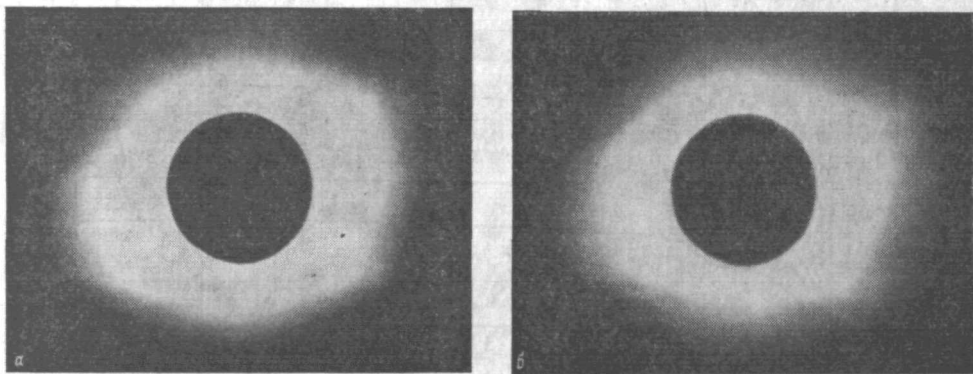


Рис. 5. Солнечная корона, источник солнечного ветра, находилась в достаточно спокойном состоянии во время затмения 20 июля 1963 г.

Фотография а) была сделана в Талкитне, Аляска, экспедицией обсерватории Боулдер, Колорадо. Фотография б) сделана на 115 минут позже другой группой обсерватории Боулдер на горе Кадиллак, Мэн. Тщательные измерения указывают на движение солнечных опал: существовали или поперечные смещения, или «эффективные» движения, обусловленные появлением и исчезновением смежных опал.

водорода в  $1 \text{ см}^3$ . Другими словами, хотя корона на таком расстоянии очень разрежена, она все же простирается от Солнца до Земли и дальше.

Итак, начальная идея заключалась в следующем. Земля при своем движении по орбите находится внутри горячей солнечной короны. Корона не является ограниченной оболочкой, окружающей Солнце наподобие земной атмосферы; наоборот, корона заполняет всю солнечную систему.

### КОРОНА В ДВИЖЕНИИ

Потребовалось время, чтобы вникнуть в выводы Чепмена. Когда это произошло, я вспомнил, как Бирман описывал корпускулярное излучение, которое отклоняет кометные хвосты от Солнца. Таким образом, по-видимому, необходимо было подумать над двумя сторонами солнечного окружения: стабильная солнечная корона и поток частиц, уходящих от Солнца с большой скоростью. Однако это было невозможно. В магнитном поле один поток заряженных частиц не может свободно проходить через другой, тогда как известно, что пространство солнечной системы заполнено магнитными полями\*). Поэтому корона и солнечный поток не могли раздельно существовать. Они должны составлять одно целое. Корона, подобная статической атмосфере вблизи Солнца, должна превращаться в быстрый поток водорода при удалении в межпланетное пространство. Как это может происходить?

Я исследовал более детально выражение барометрического закона и увидел, что при отсутствии большого давления внутри солнечной системы высокотемпературная корона должна распространяться от Солнца. Чтобы

\*) Это следовало из изучения космических лучей.

определить природу этого движения, я использовал гидродинамические уравнения течения газа. Эти нелинейные уравнения настолько сложны, что

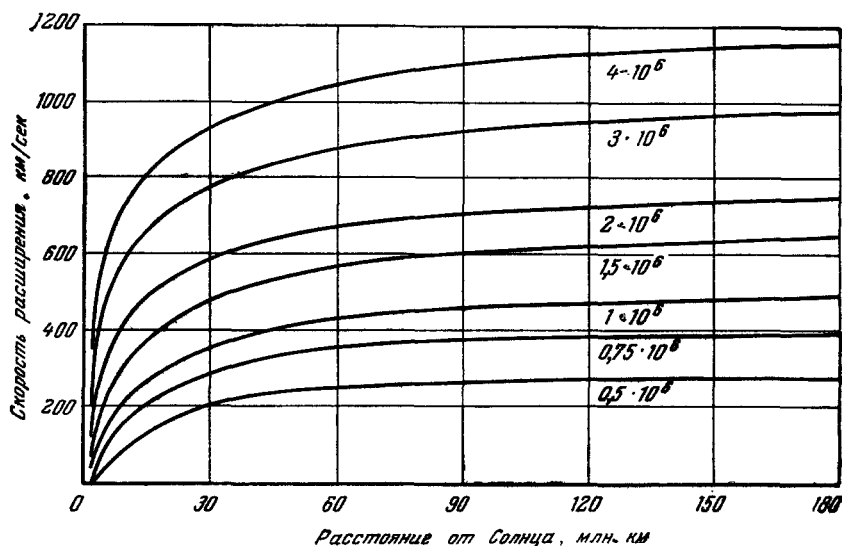


Рис. 6. Скорость расширения солнечного ветра в космическое пространство зависит частично от температуры короны.

Значения температуры указаны около каждой кривой от 500 000 (внизу) до 4 миллионов градусов. Орбита Земли находится на расстоянии 150 миллионов километров.

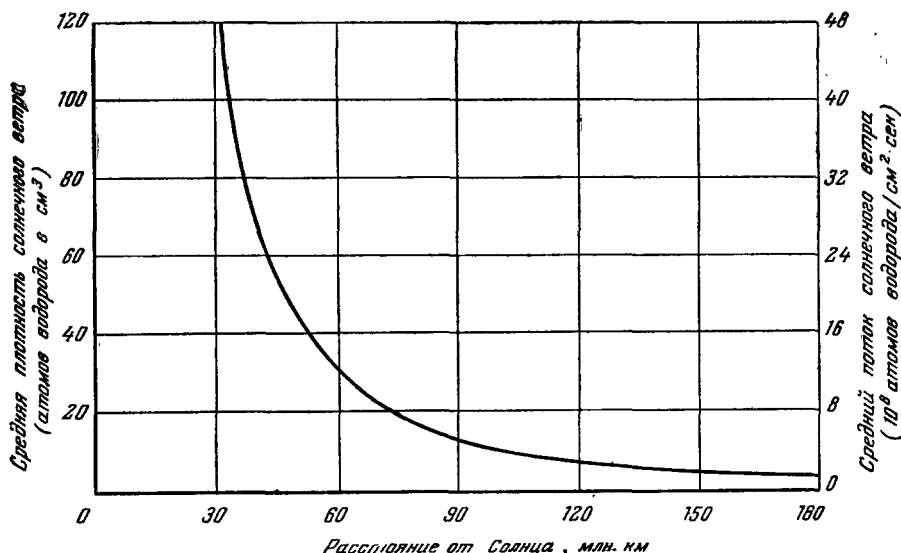


Рис. 7. Плотность и поток солнечного ветра как функции расстояния от Солнца, построенные на основании расчетов (шкалы приведены слева и справа соответственно).

Поток ветра определяется как число атомов водорода, проходящих через площадку в один квадратный сантиметр за секунду.

не могло быть и речи о нахождении общего решения, охватывающего все возможные предположения; я рассмотрел простой случай, который при-

близительно совпадал с тем, что делал Чепмен; именно, предполагалось, что температура короны остается высокой на расстоянии в несколько миллионов километров от Солнца и затем понижается до меньшего значения. Это значительно уменьшает математические трудности.

Математическое решение уравнений давало результат, который можно считать неожиданным в свете традиционных представлений о короне как статической атмосфере. Это решение показывало, что с увеличением расстояния от Солнца корона стремится все быстрее расширяться (рис. 6). Сначала расширение должно быть медленным, но затем, с увеличением расстояния, давление в короне постепенно начинает преодолевать вес лежащего выше газа и начинается быстрое расширение. На расстоянии в 10 миллионов километров от Солнца корона расширяется со скоростью в несколько сотен км/сек, быстрее, чем скорость звука. На таких расстояниях ее можно рассматривать скорее как сверхзвуковой ветер, чем как солнечную атмосферу. Корона продолжает ускоряться и достигает скорости, в несколько раз превышающей скорость звука, когда она покидает пределы гравитационного поля Солнца (рис. 7 и 8).

Анализ уравнений показал, что при удалении от Солнца первоначальная корона должна быстро расширяться и превращаться в быстрый поток. Я назвал его «солнечным ветром», так как мне кажется, что это более точное описание явления, чем ранее существовавшие представления о статической «атмосфере» или о «корпускулярной радиации». Кометные хвосты Бирмана представляют собой ударные волны «солнечного ветра», указывающие направление и скорость расширения короны.

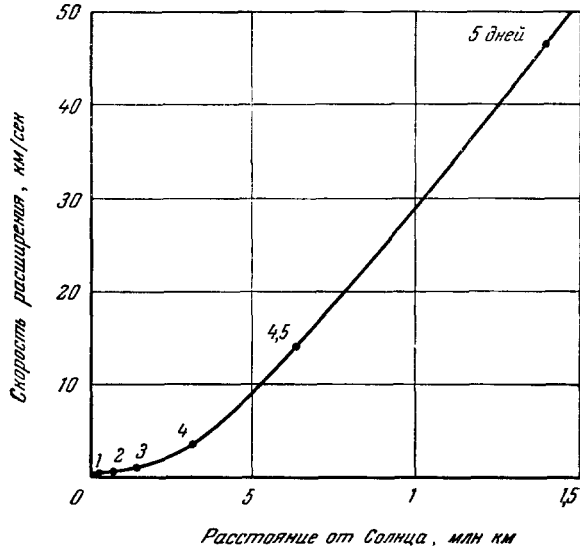


Рис. 8. Скорость расширения солнечной короны около Солнца быстро увеличивается после относительно медленного начального расширения. Это происходит потому, что частицы не испытывают торможения в космическом пространстве.

## ТЕПЛО ВЕТРА

Расширение короны происходит вследствие того, что ее температура на Солнце достигает приблизительно миллиона градусов. Что делает ее такой горячей? Мы знаем, что температура в фотосфере Солнца составляет только 6000 градусов, и может казаться, что находящаяся за пределами фотосферы корона должна быть холоднее. Но около 15 лет назад Мартин Шварцшильд из Принстонского университета и Бирман независимо дали общепринятое теперь объяснение парадокса высокой температуры короны. Корона настолько разрежена, что нужно очень мало тепла для повышения ее температуры. Шварцшильд и Бирман предположили, что турбулентные движения газа на поверхности Солнца генерируют низкочастотные волны, которые имеют достаточно энергии для нагревания

короны до миллиона градусов (рис. 9). Это действие немного похоже на действие мальчика, который создает достаточно тепла, чтобы зажечь путем трения две деревянные палочки, температура которых при этом

достигает нескольких сотен градусов, хотя собственная температура мальчика составляет только  $37^{\circ}\text{C}$ .

Наши теоретические расчеты не могут дать достаточно точных значений скорости и плотности солнечного ветра, так как для этого необходимо точно знать температуру и плотность короны вблизи Солнца, однако для этих величин у нас имеются только грубые оценки. Но если мы предположим, что температура в основании короны составляет миллион градусов, можно получить следующую приближенную картину возникновения и развития солнечного ветра. В основании короны газ почти стационарный (в космических масштабах); он движется от солнечной поверх-

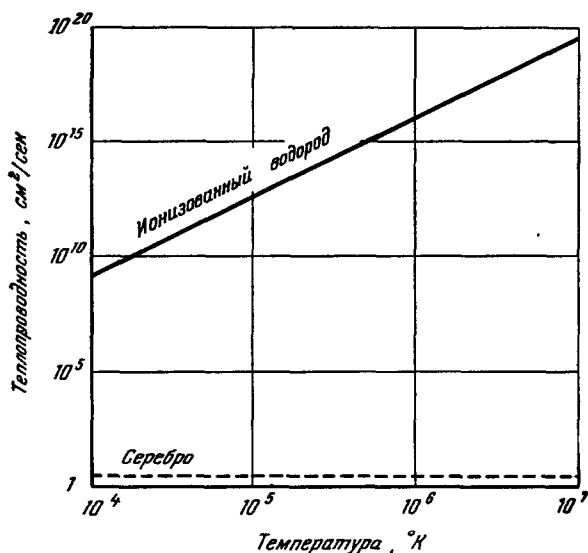


Рис. 9. Способность солнечного ветра переносить тепло указана термометрической проводимостью ионизованного водорода при типичных для нижней части короны давлениях.

Пунктирная горизонтальная линия дает приближенные значения для твердого серебра, которое не может существовать при таких температурах.

ности со скоростью, не превышающей нескольких сотен метров в секунду. Когда он уходит, на его место приходит газ, поднимающийся снизу, из фотосферы. Медленно вытекающий корональный газ постепенно ускоряется; проходит около пяти суток, газ удаляется приблизительно на миллион километров, и только после этого его скорость достигает сотен  $\text{км}/\text{сек}$ , и еще через четверо суток он проходит расстояние до Земли (150 млн.  $\text{км}$ ). Газ, который наблюдался в воскресенье в основании короны, будет проходить через орбиту Земли приблизительно во вторник на следующей неделе. Через две недели после того, как этот газ дойдет до Земли, он будет проходить мимо Юпитера.

### МАГНЕТИЗМ ВЕТРА

Солнечный ветер уносит с собой магнитное поле, так как газ ионизован (он остается ионизованным на всем пути через солнечную систему, даже если температура его сильно понизится; газ настолько разрежен, что отдельные протоны и электроны имеют очень малую вероятность рекомбинации). Какова природа этого магнитного поля? По-видимому, его источником является общее магнитное поле Солнца. Корона не может уносить концентрированные солнечные локальные поля, связанные с солнечными пятнами и активными областями, так как они настолько сильны, что будут удерживать части короны вблизи Солнца, не допуская их ухода. Напряженность общего поля Солнца значительно меньше и вряд ли превышает одного-двух гаусс (напряженность земного поля около 0,5  $\text{гс}$ ).

Если бы Солнце не вращалось (а оно совершает полный оборот за 25 суток), солнечный ветер увлекал бы его общее магнитное поле в космическое пространство в радиальном направлении, так что силовые линии этого поля вытягивались бы радиально от Солнца и стрелка компаса в межпланетной среде всегда была бы направлена к Солнцу или от него

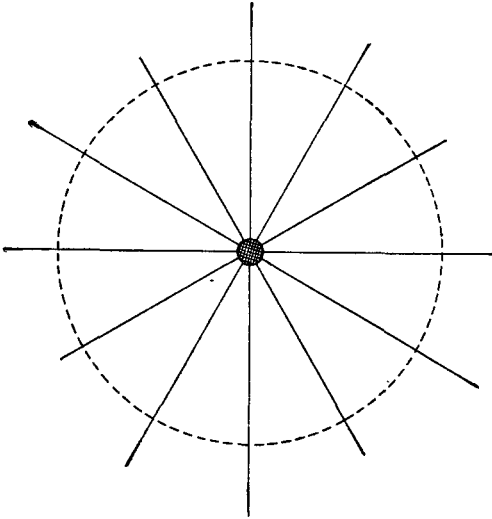


Рис. 10. Магнитные силовые линии, связанные с солнечным ветром, имели бы такую конфигурацию, если бы Солнце не вращалось. Линии расположены в экваториальной плоскости Солнца. Пунктирный круг изображает орбиту Земли, находящуюся на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца.

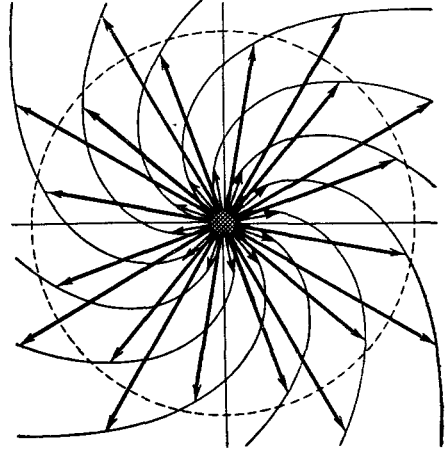


Рис. 11. Реальные силовые линии являются спиралями, возникшими в результате солнечного вращения.

Они показывают, как была бы направлена стрелка компаса в каждой точке. Стрелки изображают траектории частиц солнечного ветра. Здесь предполагается, что ветер движется в космическом пространстве с постоянной скоростью 300 км/сек.

(рис. 10). Однако солнечное вращение приводит к сложению радиального и кругового полей, в результате чего поле солнечного ветра принимает спиральную форму (рис. 11).

Напряженность радиального магнитного поля, так же как и гравитационного, уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Поэтому можно вычислить, что на расстоянии орбиты Земли магнитное поле солнечного ветра должно уменьшиться приблизительно до  $(3 \div 4) \cdot 10^{-5}$  гс.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ НА КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЯХ

Что показали космические ракеты в отношении солнечного ветра? Многие из них имели аппаратуру для регистрации заряженных частиц в космическом пространстве. Прежде всего, можно отметить, что они определенно подтвердили существование ветра. Это было зарегистрировано и измерено советскими космическими ракетами «Лунник-1» и «Лунник-2» и несколькими американскими ракетами, включая «Маринер-2» и искусственный спутник «Эксплорер-10». Они показали, что ветер дует непрерывно во всем космическом пространстве, которое пересекали эти ракеты, и что вблизи Земли ветер движется с ожидаемой скоростью около 400 км/сек. Он дует прямо от Солнца, иногда устойчиво, а иногда порыв-

вами. Он становится турбулентным \*) и более быстрым, когда активность Солнца возрастает.

«Лунник-1» и «Лунник-2» обнаружили поток около  $10^8$  протонов/см<sup>2</sup>сек \*\*). «Эксплорер-10» и «Маринер-2» показали, что большую часть времени средняя плотность ветра около Земли составляет от 1 до 10 протонов/см<sup>3</sup>. Это согласуется с моделью короны, в которой предполагается, что ее температура близка к миллиону градусов во всем объеме газа на значительном расстоянии от Солнца.

Кроме того, измерения на космических ракетах магнитного поля в межпланетном пространстве разъяснили теоретическую картину солнечного ветра. «Маринер-2» и «Пионер-5» измеряли поля напряженностью в несколько гамм, и «Маринер-2» показал, что в среднем поле имело ожидаемую спиральную форму. Наблюдались также петли и изгибы поля, но это только подтверждало, что солнечный ветер дует иногда порывами. На основании всех этих фактов относительно природы солнечного ветра мы можем ответить на ряд интересных вопросов. Например, какое количество энергии и массы уносится ветром в межпланетное пространство? Можно рассчитать, что водород уносится ветром от Солнца со скоростью около миллиона тонн в секунду. Это не является существенной потерей для Солнца; за предполагаемые 15 миллиардов лет жизни Солнца это составляет только немногим больше 0,01% солнечной массы. Аналогично этому энергия, расходуемая при расширении короны до скорости солнечного ветра, составляет только миллионную часть излучаемой Солнцем энергии. Энергия ветра на единицу объема так мала, что ее недостаточно, чтобы заметно нагреть тело, находящееся в космическом пространстве.

#### КАК ДАЛЕКО ДУЕТ ВЕТЕР?

Представляет также интерес вопрос о том, как далеко проникает в космическое пространство солнечный ветер. Это значительно более интересно, чем вопрос об истощении Солнца, так как это открывает возможность использовать солнечный ветер как зонд в межзвездном пространстве.

Плотность ветра должна падать пропорционально квадрату расстояния от Солнца. В конце концов, ветер должен стать настолько разреженным, что он будет остановлен другими газами и магнитными полями в межзвездном пространстве. Общее магнитное поле в нашей галактике составляет по оценкам не более  $2 \cdot 10^{-5}$  гс. Если взять это максимальное значение как меру сопротивления солнечному ветру, используя в качестве типичного значения плотности ветра наименьшее значение, измеренное вблизи Земли (1 атом/см<sup>3</sup>), можно вычислить, что солнечный ветер прекращается на расстоянии около 12 а. е. от Солнца, т. е. немного дальше Сатурна. В другом крайнем случае, если взять наименьшую оценку тормозящего магнитного поля ( $5 \cdot 10^{-6}$  гс) и максимальное измеренное значение плотности ветра вблизи Земли (10 атомов/см<sup>3</sup>), ветер будет проходить около 160 а. е. — в четыре раза больше расстояния до наиболее удаленной планеты, Плутона. Таким образом, установлены верхний

\*) Турбулентные элементы солнечного ветра, представляющие собой вихри магнитного поля, могут, согласно Э. И. Могилевскому <sup>6</sup>, иметь бессильную структуру, когда  $[\mathbf{j} \times \mathbf{H}] = 0$ , где  $\mathbf{j}$  — плотность тока,  $\mathbf{H}$  — напряженность магнитного поля. Во всяком случае, прямые измерения <sup>7</sup> на космической ракете «Маринер-2», не противоречат этому предположению <sup>8</sup>.

\*\*) При скорости ветра около 400 км/сек это дает плотность около 2—3 протонов/см<sup>3</sup>.

и нижний пределы: солнечный ветер проходит расстояние не меньше 12 и не больше 160 а. е. от Солнца.

Имеются две возможности для исследования крайних пределов действия ветра. Одна из них основана на том факте, что, как следует из наблюдений, водород в возбужденном состоянии в межзвездном пространстве испускает слабое ультрафиолетовое излучение. Недавний анализ такого излучения Томасом Н. Паттерсоном, Фрэнсисом С. Джонсоном и Вильямом Б. Хансоном показывает, что солнечный ветер, возможно, прекращается на расстоянии 20 а. е. от Солнца.

Вторая возможность проистекает из того факта, что магнитное поле солнечного ветра стремится вымести космические лучи из солнечной системы. В годы высокой солнечной активности интенсивность космических лучей, приходящих к Земле, уменьшается по крайней мере в два раза. Мы вычислили, что это уменьшение означает, что солнечный ветер простирается далеко за орбиту Юпитера (5 а. е.). Симпсон недавно представил прямое доказательство, что ветер, вероятно, проходит по крайней мере, 40 или 50 а. е. Анализируя понижение и восстановление интенсивности космических лучей в течение 11-летнего цикла солнечной активности, он нашел, что увеличение интенсивности высокоэнергичных частиц космических лучей отстает по крайней мере на шесть месяцев относительно падения солнечной активности. Очевидно, временное запаздывание является мерой максимальной протяженности солнечного ветра. Так же, как требуется определенное время, чтобы данное возмущение, возникшее в середине водоема, достигло края водоема, необходимо определенное время, чтобы и увеличение или уменьшение силы солнечного ветра передалось к внешним границам ветра. Поэтому имеется запаздывание между уменьшением солнечной активности, с последующим ослаблением солнечного ветра, и приходом ослабленного ветра к границам пространства, где он действует как барьер, мешающий прохождению космических лучей в солнечную систему. Так как Симпсон нашел, что запаздывание длится по крайней мере шесть месяцев и ветер движется со скоростью в одну астрономическую единицу за четыре дня, простые расчеты показывают, что расстояние до границы солнечного ветра составляет по крайней мере от 40 до 50 а. е.

Наблюдения дают значительно больше, чем только значение расстояния. Флуктуации интенсивности космических лучей представляют собой естественный зонд для исследования магнитных полей и других условий в космическом пространстве вплоть до границ солнечной системы и за ее пределами, как так флуктуации приносят информацию об удаленных полях.

Существует ли ветер, подобный солнечному, у других звезд? Вполне вероятно. Основное требование заключается в том, чтобы звезда имела горячую корону. Корона нашего Солнца генерируется турбулентностью и конвекцией газа в фотосфере. Согласно теоретическому представлению о внутреннем строении звезд конвекция над поверхностью, вероятно, происходит в любой обычной водородной звезде с поверхностной температурой менее 6400 градусов. Большинство звезд в нашей Галактике попадает в этот класс и поэтому звездные ветры должны быть общим явлением.

Свет от удаленных звезд не может сказать нам, имеют ли они корону или нет. Необходимо находиться в области действия ветра, чтобы обнаружить его. Основные наши сведения о ветрах звезд должны быть получены из изучения ветра ближайшей звезды, Солнца. \*)

\*) Детальное изложение рассматриваемых в статье вопросов читатель сможет найти в книге Э. Паркера «Динамические процессы в межпланетном пространстве», перевод которой готовится издательством «Мир».

## ЛИТЕРАТУРА

1. S. С h a r m a n, Nature **140**, No. 3540,423 (1937).
  2. И. К о н д о, К. Н а г а ш и м а, С. И о ш и д а, М. В а д а, Тр. Межд. конф. по космическим лучам, т. IV, М., Изд-во АН СССР, 1960, стр. 210.
  3. Л. И. Д о р м а н, Я. Л. Б л о х, Н. С. К а м и н е р, в сб. «Космические лучи», № 4, М., Изд-во АН СССР, 1961, стр. 5.
  4. Л. И. Д о р м а н, О. И. И н о з е м ц е в а, Геомагнетизм и аэрономия **2** (3), 453 (1962).
  5. Л. И. Д о р м а н, Вариации космических лучей и исследование космоса, М., Изд-во АН СССР, 1963.
  6. Э. И. М о г и л е в с к и й, Геомагнетизм и аэрономия **2** (2), 48 (1962).
  7. C. W. S p u d e r, M. N e u g e b a u e r, Space Research, IV Symposium COSPAR, Warsaw, 1963.
  8. Э. И. М о г и л е в с к и й, Геомагнетизм и аэрономия **4**(2), 213 (1964).
-