

## Что такое солнечный ветер

В.Б.БАРАНОВ

31.03.2001 Соровский образовательный журнал  
<http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1168514&s=>

### <Фрагменты статьи>

Прошло почти 40 лет с тех пор, как американский физик Е. Паркер [1] теоретически предсказал явление, которое получило название "солнечный ветер" и которое через пару лет было подтверждено экспериментально группой советского ученого К. Грингауза при помощи приборов, установленных на космических аппаратах "Луна-2" и "Луна-3". Солнечный ветер представляет собой поток полностью ионизованной водородной плазмы, то есть газа, состоящего из электронов и протонов примерно одинаковой плотности (условие квазинейтральности), который с большой сверхзвуковой скоростью движется от Солнца. На орбите Земли (на одной астрономической единице (а.е.) от Солнца) скорость  $V_E$  этого потока равна примерно 400-500 км/с, концентрация протонов (или электронов)  $n_e = 10-20$  частиц в кубическом сантиметре, а их температура  $T_e$  равна примерно 100 000 К (температура электронов несколько выше).

Кроме электронов и протонов в межпланетном пространстве были обнаружены альфа-частицы (порядка нескольких процентов), небольшое количество более тяжелых частиц, а также магнитное поле, средняя величина индукции которого оказалась на орбите Земли порядка нескольких гамм ( $1 \gamma = 10^{-5}$  Гс).

В течение не столь уж длительной истории теоретической астрофизики считалось, что все атмосферы звезд находятся в гидростатическом равновесии, то есть в состоянии, когда сила гравитационного притяжения звезды уравновешивается силой, связанной с градиентом давления в ее атмосфере (с изменением давления на единицу расстояния  $r$  от центра звезды). Если распределение температуры  $T$  в атмосфере задано, то из уравнения равновесия и уравнения состояния для идеального газа легко получается так называемая барометрическая формула. Из этой формулы видно, что при  $r \rightarrow \infty$ , то есть на очень больших расстояниях от звезды давление  $p$  стремится к конечному пределу, который зависит от значения давления  $p_0$ , которое представляет собой давление у основания атмосферы звезды (при  $r = r_0$ ).

Считалось, что солнечная атмосфера, так же как и атмосферы других звезд, находится в состоянии гидростатического равновесия. Учитывая необычное и до конца еще непонятое явление резкого возрастания температуры примерно от 10 000 градусов на поверхности Солнца до 1 000 000 градусов в солнечной короне, Чепмен (см., например, [2]) развил теорию статической солнечной короны, которая должна была плавно переходить в межзвездную среду, окружающую Солнечную систему.

Однако в своей пионерской работе [1] Паркер обратил внимание на то, что давление на бесконечности, получаемое из формулы для статической солнечной короны, оказывается почти на порядок величины больше значения давления, которое оценивалось для межзвездного газа на основе наблюдений. Чтобы устранить это расхождение, Паркер предположил, что солнечная корона не находится в состоянии статического равновесия, а непрерывно расширяется в

окружающую Солнце межпланетную среду. При этом вместо уравнения равновесия он предложил использовать гидродинамическое уравнение движения, где в системе координат, связанной с Солнцем, величина  $V$  представляет собой радиальную скорость движения плазмы.

При заданном распределении температуры  $T$  предложенная Паркером система уравнений имеет решения типа представленных на рис. 1. На этом рисунке через  $a$  обозначена скорость звука, а  $r^*$  - расстояние от начала координат, на котором скорость газа равна скорости звука ( $V = a$ ). Очевидно, что только кривые 1 и 2 на рис. 1 имеют физический смысл для проблемы истечения газа из Солнца, поскольку кривые 3 и 4 имеют неединственные значения скорости в каждой точке, а кривые 5 и 6 соответствуют очень большим скоростям в солнечной атмосфере, что не наблюдается в телескопы. Паркер проанализировал условия, при которых в природе осуществляется решение, соответствующее кривой 1. Он показал, что для согласования давления, получаемого из такого решения, с давлением в межзвездной среде наиболее реален случай перехода газа от дозвукового течения (при  $r < r^*$ ) к сверхзвуковому (при  $r > r^*$ ), и назвал такое течение солнечным ветром. Однако это утверждение оспаривалось в работе [3] Чемберленом, который полагал наиболее реальным решение, соответствующее кривой 2, описывающей всюду дозвуковой "солнечный бриз". При этом первые эксперименты на космических аппаратах (см., например, [4]), обнаружившие сверхзвуковые потоки газа от Солнца, не казались, судя по литературе, Чемберлену достаточно достоверными.

**Примечание М.Х.Ш.** В недавно показанном (2007 г.) телевизионном фильме компании BBC, посвященном исследованиям с помощью американских космических аппаратов, содержится эпизод, в котором сам Паркер в довольно энергичных выражениях рассказывает чуть ли не о травле по отношению к нему со стороны консервативной среды его коллег в этот период, что, однако, не поколебало его уверенности в своей правоте.

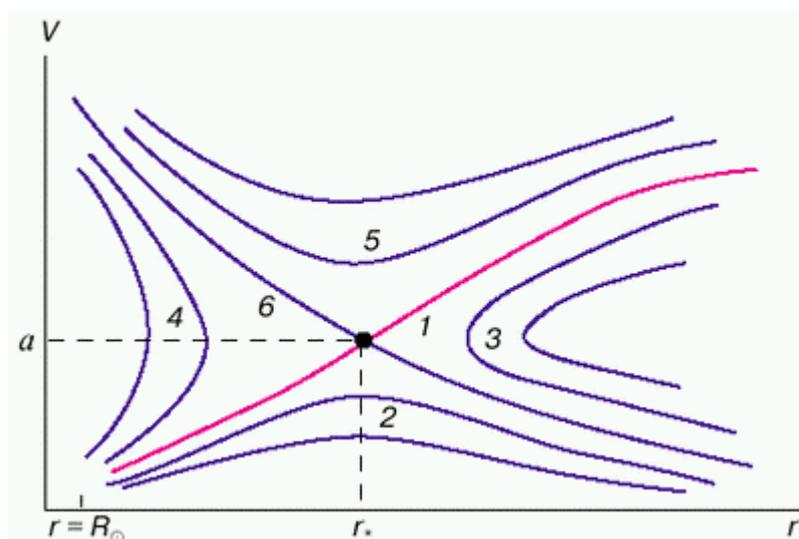


Рис. 1. Возможные решения одномерных уравнений газовой динамики для скорости  $V$  течения газа от поверхности Солнца в присутствии силы гравитации. Кривая 1 соответствует решению для солнечного ветра. Здесь  $a$  - скорость звука,  $r$  - расстояние от Солнца,  $r^*$  - расстояние, на котором скорость газа равна скорости звука,  $R_{\odot}$  - радиус Солнца.

История экспериментов в космическом пространстве блестяще доказала правильность представлений Паркера о солнечном ветре. Подробный материал о теории солнечного ветра можно найти, например, в монографии [5].

Как изменяются характеристики солнечного ветра с удалением от Солнца? Изменение скорости солнечного ветра определяется двумя силами: силой солнечной гравитации и силой, связанной с изменением давления. Расчеты показывают, что на достаточно больших расстояниях от Солнца (практически уже с 1 а.е.) давление почти не изменяется по величине, то есть его изменение очень мало, и сила, связанная с давлением, практически отсутствует. Сила гравитации убывает как квадрат расстояния от Солнца и тоже мала на достаточно больших гелиоцентрических расстояниях. Поскольку обе силы становятся очень малы, то, согласно теории, скорость солнечного ветра становится почти постоянной и при этом значительно превосходит звуковую (как говорят, течение гиперзвуковое). Американские космические аппараты "Вояджер-1 и -2" и "Пионер-10 и -11", запущенные еще в 70-х годах, экспериментально подтвердили теоретические представления о солнечном ветре. В частности, его скорость оказалась в среднем почти постоянной, а плотность убывает как  $1/r^2$  в соответствии с уравнением сохранения массы для сферически-симметричного случая.

Температура же не следует адиабатическому закону, что означает существование каких-то источников тепла. Такими источниками могут быть диссипация волн или нейтральные атомы водорода, проникающие из межзвездной среды в Солнечную систему (этот процесс подробно рассматривался в [8]).

Очевидно, что скорость солнечного ветра не может быть до бесконечности постоянной, как это следует из решения уравнений газовой динамики (см., например, рис. 1), поскольку Солнечная система окружена межзвездным газом с конечным давлением. Поэтому солнечный ветер на больших расстояниях от Солнца должен тормозиться газом межзвездной среды. Эта проблема подробно рассмотрена в [8]. Здесь только отметим, что плавное торможение газодинамического потока от сверхзвуковых скоростей до дозвуковых невозможно: обязательно должен образоваться скачок параметров газа в виде ударной волны. Аналогичная ситуация может возникнуть и в солнечном ветре. Торможение солнечного ветра из-за противодействия межзвездной среды должно происходить через ударную волну торможения (в английской терминологии *termination shock* или сокращенно TS). Ее положение сильно зависит от параметров межзвездной среды. Согласно теоретическим расчетам, ударная волна TS находится на расстоянии примерно от 80 до 100 а.е. от Солнца (см. [8]), что позволяет в течение ближайших нескольких лет детектировать ее измерительными приборами, установленными на космических аппаратах "Вояджер".

## Литература

- [1] Parker E. // *Astrophys. J.* 1958. V. 128. No 3.
- [2] Chapman S. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1959. V. 15. No 1/2.
- [3] Chamberlain J. // *Astrophys. J.* 1961. V. 133. No 2.
- [4] Грингауз К.И., Безруких В.В., Озеров В.Д., Рыбчинский Р.Е. // Докл. АН СССР. 1960. Т. 131. No 6.
- [5] Баранов В.Б., Краснобаев К.В. Гидродинамическая теория космической плазмы. М.: Наука, 1977.
- [6] Weber E., Davis L. // *Astrophys. J.* 1967. V. 148. No 1. Pt. 1.
- [7] Паркер Е. Динамические процессы в межпланетной среде. М.: Мир, 1965.
- [8] Баранов В.Б. Влияние межзвездной среды на строение гелиосферы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. No 11. С. 73-79.