

EFFECT OF THE INTERSTELLAR MEDIUM ON THE HELIOSPHERE STRUCTURE

V. B. BARANOV

The problem of the solar wind interaction with the local interstellar medium, surrounding the Solar system, is considered. From the gas dynamic point of view this problem is reduced to a problem of interaction between two supersonic flows: interstellar gas flow, moving relative to the Solar system and plasma flow from source (Sun).

Рассматривается проблема взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, окружающей Солнечную систему. С газодинамической точки зрения проблема сводится к построению модели взаимодействия двух сверхзвуковых потоков: межзвездного газа и потока плазмы от источника (Солнце).

ВЛИЯНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ НА СТРОЕНИЕ ГЕЛИОСФЕРЫ

В. Б. БАРАНОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Скоро исполнится сорок лет с тех пор, как космические аппараты начали исследовать окружающее нас космическое пространство. Уже первые прямые измерения параметров межпланетной плазмы при помощи космических аппаратов “Луна-2”, “Луна-3” и “Венера-1” привели к замечательному экспериментальному открытию, сделанному группой К.И. Гринауза, — обнаружению явления солнечного ветра, которое в 1958 году было теоретически предсказано американским физиком Е. Паркером.

Солнечный ветер представляет собой поток полностью ионизованной водородной плазмы, которая с большой сверхзвуковой скоростью (больше 400 км/с) вытекает из Солнца в межпланетную среду, заполняя ее. Температура солнечного ветра около нескольких сот градусов по Кельвину. В настоящее время космические аппараты “Вояджер-1 и -2”, “Пионер-10 и -11” изучают межпланетную среду на расстояниях в несколько десятков астрономических единиц (а.е.) от Солнца (астрономическая единица — расстояние от Земли до Солнца). И для правильного понимания происходящих в межпланетной среде процессов необходимо понять характер ее взаимодействия с окружающей Солнечную систему межзвездной средой. Это взаимодействие может быть существенным на таких больших гелиоцентрических расстояниях. В частности, солнечный ветер может быть ограничен давлением межзвездного газа. Область, заполненную плазмой солнечного происхождения, принято называть *гелиосферой*.

Как взаимодействует солнечный ветер с межзвездной средой? Еще в 1961 году Е. Паркер [1] предположил, что на Солнечную систему набегают потоки газа межзвездной среды, который газодинамическим образом взаимодействует с плазмой солнечного ветра. Он предположил также, что для описания картины возникающего при этом течения справедливы гидродинамические уравнения Эйлера. Построенная Паркером модель делит всю область течения на три подобласти: сверхзвуковой солнечный ветер, дозвуковой солнечный ветер, прошедший через гелиосферную ударную волну, и поток несжимаемого (его скорость много меньше скорости звука) межзвездного газа, который отделяется от солнечного

ветра контактной поверхностью, названной впоследствии *гелиопаузой*.

Автору этих строк совместно с сотрудниками и коллегами удалось построить альтернативную модель, основанную на сверхзвуковом обтекании Солнечной системы межзвездным газом. При этом в своих первых работах мы исходили из предположения, что направление движения межзвездного газа относительно Солнечной системы и его скорость совпадают с направлением и скоростью движения Солнца (относительно ближайших звезд) к апексу. Эта скорость равна 20 км/с, а ее направление на апекс составляет угол 53° к плоскости эклиптики. При температуре межзвездного газа порядка 10000 К величина скорости 20 км/с является сверхзвуковой с числом Маха $M = 2$. В такой модели по сравнению с моделью Паркера добавлен еще один физический элемент, а именно головная ударная волна, которая создает дополнительную область сжатого в этой ударной волне межзвездного газа. Уже первые эксперименты по рассеянному солнечному лайман-альфа-излучению на космических аппаратах показали [2], что из межзвездной среды в Солнечную систему движется поток атомов водорода H со скоростью примерно 20 км/с и температурой порядка 10000 К, то есть скорость потока оказывается сверхзвуковой.

С тех пор наша научная группа занимается развитием предложенной нами в 1970 году модели [3] для корректной интерпретации экспериментальных данных, получаемых на космических аппаратах “Вояджер”, “Пионер”, “Улисс” и др., исследующих отдаленные области Солнечной системы. В конце настоящего столетия в США намечается запуск специального зонда (“Interstellar probe”), одной из основных целей которого будет прямое исследование области непосредственного контакта межпланетной и межзвездной сред. На рис. 1 изображены гелиоцентрические расстояния космических аппаратов в различные моменты времени. В 2012 году, как видно из рис. 1, аппараты “Вояджер-1” и “Межзвездный зонд” будут примерно на одинаковом расстоянии 120 а.е. от Солнца. Именно на таких расстояниях, как предсказывает газодинамическая теория, находится область наиболее сильного взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, определяющая границы гелиосферы. Физическая же граница гелиосферы является довольно тонкой по сравнению с ее размерами, если верно газодинамическое приближение, и называется гелиопаузой. Перспектива достижения этой границы космическими аппаратами в ближайшем будущем придаст особое значение предсказательным возможностям газодинамических моделей, которым и посвящена настоящая статья.

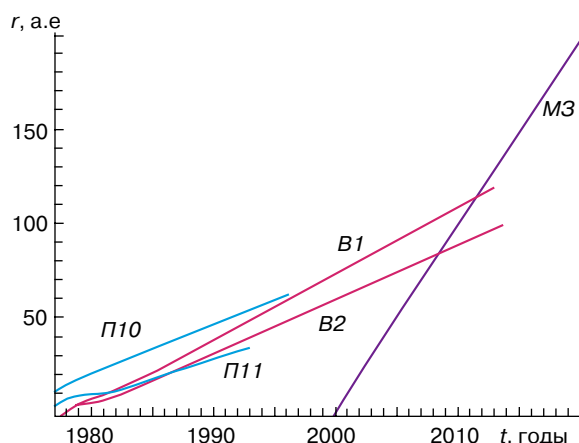


Рис. 1. Гелиоцентрическое расстояние r американских космических аппаратов “Вояджер-1” ($B1$), “Вояджер-2” ($B2$), “Пионер-10” ($П10$) и “Пионер-11” ($П11$) как функции времени. Показана также траектория космического аппарата “Межзвездный зонд” ($M3$) (предполагаемый запуск в США в 1999 году).

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Создание теоретической модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, которая могла бы удовлетворительно объяснить наблюдаемые физические явления, актуально по двум причинам. Во-первых, правильная интерпретация наблюдаемых физических явлений, таких, например, как рассеянное солнечное излучение на длинах волн 1216 и 584 Å (для атомов H и He соответственно) или модуляция галактических космических лучей, возможна только на основе адекватной теоретической модели. Во-вторых, внутренне непротиворечивая теоретическая модель дает возможность, пользуясь значениями хорошо измеряемых величин в физическом эксперименте, определять плохо измеряемые (или вообще неизмеряемые). К числу последних относятся, например, степень ионизации и магнитные поля локальной межзвездной среды.

Как указано во введении, впервые количественная газодинамическая модель взаимодействия звездного ветра (аналогичного солнечному) с межзвездным газом была предложена в [1]. В то время еще не было наблюдений движения межзвездного газа относительно звезд, и в частности Солнца. Поэтому Паркер рассмотрел три возможные модели: истечение а) сверхзвукового звездного ветра в межзвездный газ, находящийся в покое; б) в межзвездный газ, движущийся с очень маленькой дозвуковой скоростью, при которой этот газ можно считать несжимаемой жидкостью, и в) в однородное магнитное поле, давление которого много больше давления

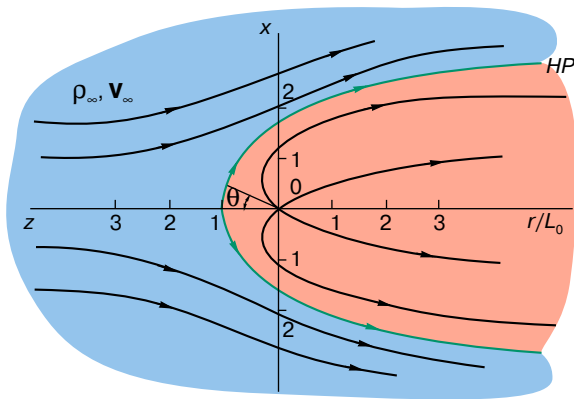


Рис. 2. Общая картина обтекания солнечного ветра межзвездным газом в дозвуковой модели Е. Паркера. Солнце как источник солнечного ветра находится в начале координат. Поверхность, отделяющая газ межзвездной среды с плотностью и скоростью от солнечного ветра, изображена линией *HP* (гелиопаузой). С газодинамической точки зрения гелиопауза представляет собой тангенциальный разрыв. Здесь r – расстояние от Солнца, L_0 – расстояние до гелиопаузы, $z = 1$ – безразмерное расстояние до гелиопаузы вдоль оси симметрии.

газа (как статического, так и динамического). На рис. 2 показана картина течения в модели б) теории Паркера. На ней изображены линии тока межзвездного газа, текущего слева направо, и солнечного ветра, источником которого является Солнце, помещенное в начало координат. Линия *HP*, соответствующая границе, отделяющей межзвездный газ от плазмы солнечного ветра, и есть гелиопауза, гелиоцентрическое расстояние которой вдоль оси симметрии (оси Oz) равно L_0 . Торможение солнечного ветра до дозвуковой скорости должно происходить в рассмотренном Паркером случае обязательно через ударную волну, которая в приближении несжимаемого межзвездного газа должна быть сферической. На рис. 2 она не обозначена, поскольку в данной модели ее гелиоцентрическое расстояние много меньше расстояния L_0 до гелиопаузы.

В 1970 году в [3] была предложена модель сверхзвукового обтекания солнечного ветра межзвездным газом. Чтобы обосновать гидродинамический подход к рассматриваемому физическому явлению, авторы предположили, что межзвездный газ представляет собой полностью ионизированный водород. Однако обнаруженное в 1971 году по рассеянному солнечному лайман-альфа-излучению вторжение в Солнечную систему атомов H привело к необходимости пересмотра предложенной в [3] модели. Оценки, проведенные в [4], показали, что процесс перезарядки атомов H и протонов может привести к существенной корректировке количественных выводов, полученных в [3]. Кроме того, в [4] было показано, что процесс перезарядки является своеобраз-

разным фильтром для проникновения атомов H из межзвездной среды в солнечный ветер, что, в свою очередь, может привести к корректировке интерпретации экспериментальных данных по рассеянному солнечному лайман-альфа-излучению.

Качественная картина возникающего в результате течения представлена на рис. 3. Здесь через *BS* (bow shock) обозначена головная ударная волна, образующаяся в плазменной компоненте межзвездного газа, скорость которого направлена слева направо. Через *TS* (termination shock) обозначена гелиосферная ударная волна, образующаяся в плазме солнечного ветра при его торможении на межзвездной среде. Атомы водорода проникают через тангенциальный разрыв (гелиопаузу), взаимодействуя с плазменной компонентой во всей области течения вследствие процессов перезарядки. Физический смысл перезарядки, посредством которой происходит обмен импульсом и энергией между плазменной компонентой и атомами H, изображен на рис. 4.

Модель взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, учитывающая конечную степень ионизации последней, построена в [5] только в 1993 году. Основные физические результаты модели представлены в следующем разделе.

СОВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ ОБТЕКАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА МЕЖЗВЕЗДНЫМ ГАЗОМ

Эксперименты по рассеянному солнечному излучению доказали наличие движения атомов H и He относительно Солнца. Это движение является

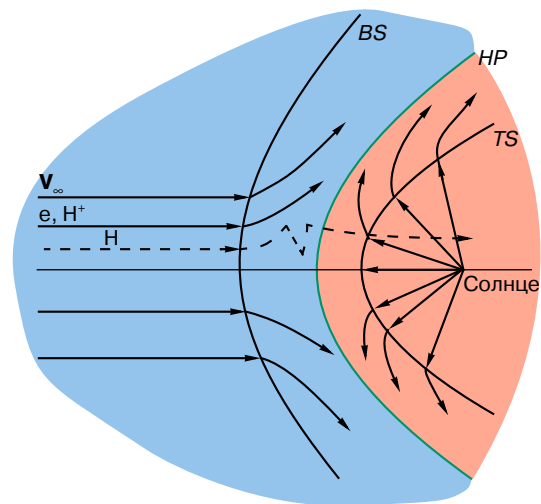


Рис. 3. Общая картина обтекания солнечного ветра сверхзвуковым потоком межзвездного газа, состоящим из плазменной компоненты (электроны e и протоны H^+) и нейтральных атомов водорода H. Как и на рис. 2, *HP* – гелиопауза, а Солнце находится в начале координат. Штриховой линией показана возможная траектория атома водорода.

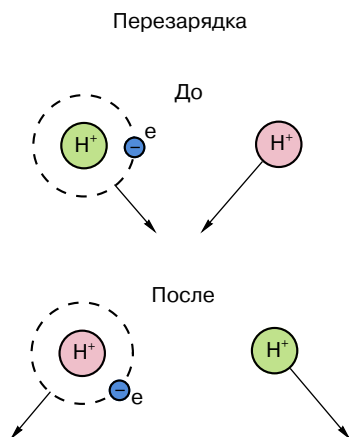


Рис. 4. Качественная картина, поясняющая физический процесс перезарядки.

сверхзвуковым (его скорость около 25 км/с, температура около 10000 К), а вектор скорости лежит почти в плоскости эклиптики. Последнее обстоятельство приводит к выводу, что имеет место собственное движение межзвездного газа, то есть его движение относительно Солнечной системы не является только следствием движения звезд относительно друг друга, как это было предположено в первых моделях.

В настоящее время нет сомнения, что межзвездный газ является частично ионизованным. При этом для математического описания взаимодействия плазменной компоненты межзвездной среды (электронов и протонов) с солнечным ветром есть достаточные основания, чтобы использовать гидродинамическое приближение, то есть приближение, основанное на уравнениях Эйлера. Длина же свободного пробега атомов H сравнима с размерами гелиосферы. Поэтому описание движения межзвездного водорода на основе гидродинамических представлений не будет корректным. В.Б. Баранов и Ю.Г. Малама [5] для количественного описания взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой применили гидродинамический подход для плазменной компоненты и метод Монте-Карло для получения средних характеристик потока атомов водорода. При этом использовали уравнения Эйлера с «источниковыми» членами, отражающими добавление к плазменной компоненте импульса и энергии вследствие процессов перезарядки протонов с атомами водорода. Эти источниковые члены вычисляли путем разыгрывания траекторий атомов H в поле гидродинамических параметров плазмы, в поле сил солнечной гравитации и солнечного радиационного давления — методом Монте-Карло. Последний метод идентичен применению кинетического уравнения Больцмана для описания движения нейтральных атомов водорода. Здесь следует отметить, что атомы гелия, движущиеся из межзвездной

среды в Солнечную систему, практически не взаимодействуют с плазменной компонентой из-за малого эффективного сечения перезарядки с протонами. Качественная картина возникающего течения показана на рис. 3.

Для полного решения задачи было необходимо поставить граничные условия. В качестве граничных условий использовали соотношения Гюгоню на ударных волнах *BS* и *TS*, условия равенства нулю нормальной к *HP* компоненты скорости плазмы и равенство давлений на этой поверхности, а также заданные значения параметров солнечного ветра на орбите Земли. В качестве граничного условия для атомов водорода задавалось максвелловское распределение по скоростям в межзвездной среде. Гидродинамическая часть задачи решалась численным методом, разработанным С.К. Годуновым. При этом рассматривалось осесимметричное, стационарное течение, в котором ось симметрии совпадает с направлением вектора скорости межзвездного газа.

На рис. 5 представлена геометрическая картина течения, полученная в результате численных расчетов. Штриховыми линиями изображена картина течения при отсутствии нейтральных атомов H в межзвездной среде, в то время как сплошными линиями — головная ударная волна *BS*, гелиосферная

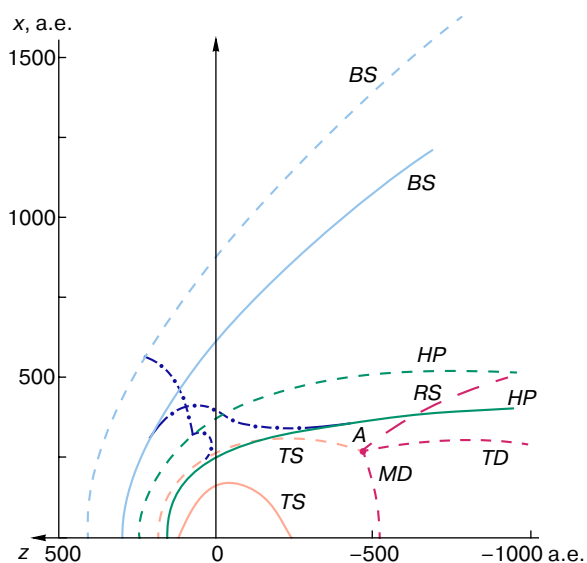


Рис. 5. Количественные результаты расчетов осесимметричной модели В.Б. Баранова и Ю.Г. Маламы [5] обтекания солнечного ветра сверхзвуковым потоком межзвездного газа. Штриховые линии относятся к расчетам без учета процессов перезарядки (см. рис. 4), сплошные линии относятся к расчетам, учитывающим этот процесс. Все обозначения такие же, как и на рис. 3, но в хвостовой области картина течения усложняется наличием диска Маха (*MD*), тангенциальным разрывом (*TD*) и отраженной ударной волной (*RS*) в тройной точке *A*.

ударная волна *TS* и гелиопауза *HP* при концентрации атомов водорода в межзвездной среде, равной $0,14$ частицы в 1 см^3 . Для плазмы принимали следующие значения параметров в межзвездной среде (индекс ∞) и на орбите Земли (индекс E):

$$n_E(\text{H}^+) = 7 \text{ см}^{-3}, \quad V_E = 450 \text{ км/с}, \quad M_E = 10,$$

$$n_\infty(\text{H}^+) = 7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-3}, \quad V_\infty = 25 \text{ км/с}, \quad M_\infty = 2.$$

Здесь n , V и M – концентрация, скорость и число Маха соответственно.

На рис. 5 видно, что наличие атомов водорода приводит к существенному изменению всей картины течения. Во-первых, процессы перезарядки приводят к довольно сильному уменьшению размеров гелиосферы, при котором все скачки плазменных параметров становятся доступными прямым измерениям при помощи космических аппаратов. В частности, гелиосферная ударная волна оказывается на расстоянии примерно 100 а.е. Как видно из рис. 1, космические аппараты “Вояджер-1”, “Вояджер-2” и “Межзвездный зонд” будут находиться на таких расстояниях в первом десятилетии следующего столетия, и можно надеяться на их прямое пересечение гелиосферной ударной волны. Концентрация протонов в локальной межзвездной среде является плохо определяемым параметром в отличие от концентрации атомов H , которая довольно надежно измеряется при помощи измерений рассеянного солнечного лайман-альфа-излучения. Поэтому протонная концентрация может изменяться в довольно широких пределах. В частности, увеличение значения этого параметра в межзвездной среде приводит к еще большему (по сравнению с представленными на рис. 5 результатами) уменьшению размеров гелиосферы. Во-вторых, наличие процессов перезарядки существенно меняет течение в хвосте гелиосферы (именно в этом направлении движется космический аппарат “Пионер-10”) и в области между гелиопаузой и гелиосферной ударной волной. В последней области течение становится полностью дозвуковым из-за разогрева плазмы вследствие процессов перезарядки (в случае отсутствия атомов H на рис. 5 изображены звуковые линии, отделяющие дозвуковое течение в лобовой части от сверхзвукового в крыльях гелиосферы). В хвостовой же области сложная картина течения, состоящая из диска Маха MD , тангенциального разрыва TD и отраженной ударной волны RS в тройной точке A , заменяется гладкой гелиосферной ударной волной TS .

Дальнейшие расчеты показали, что при уменьшении концентрации протонов в межзвездной среде увеличивается количество атомов водорода, проникающих в солнечный ветер из межзвездной среды, то есть уменьшается своеобразная роль “фильтра”, которую играет область между ударной волной BS и гелиопаузой HP (если бы заряженные частицы от-

сутствовали в межзвездной среде, то этот фильтр не мог бы образоваться из-за отсутствия в этом случае гелиопаузы и головной ударной волны). Увеличение концентрации атомов H межзвездной среды в солнечном ветре приводит к увеличению торможения последнего еще до гелиосферной ударной волны. В случае если концентрация протонов в локальной среде окажется достаточно малой, этот эффект может быть наблюдаем космическими аппаратами до пересечения ими гелиосферной ударной волны.

Чтобы лучше ориентироваться в реальной возможности пересечения космическими аппаратами поверхностей сильных разрывов параметров плазмы (ударных волн BS , TS и гелиопаузы HP), мы рассчитали их положение в “подветренной” стороне и вдоль оси симметрии как функции концентраций протонов и атомов H в локальной межзвездной среде. Результаты этих расчетов представлены на рис. 6.

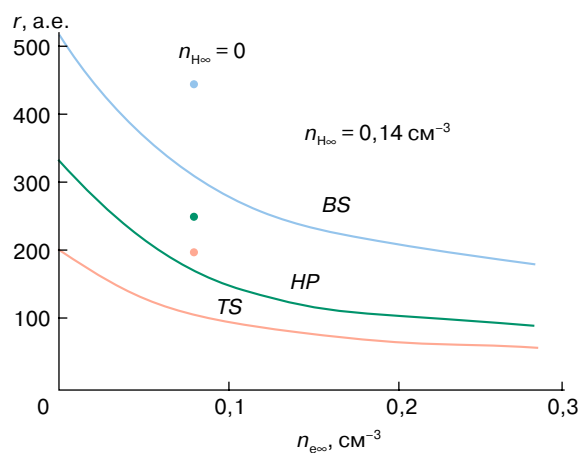


Рис. 6. Расстояния до поверхностей BS , TS и HP , изображенных на рис. 3 и 5, вдоль оси симметрии и в “подветренном” направлении как функции электронной концентрации в межзвездной среде n_∞ при концентрации $n_{\text{H}\infty} = 0,14 \text{ см}^{-3}$ атомов водорода в ней. Точками обозначены те же расстояния, но при $n_{\text{H}\infty} = 0$ и $n_\infty = 0,07 \text{ см}^{-3}$.

НАУЧНАЯ ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕЛИОСФЕРЫ

Научную программу исследования гелиосферы и влияние на нее локальной межзвездной среды можно условно разделить на две части: прямые измерения параметров и косвенные. К последним относятся, например, упомянутые выше измерения параметров (скорости, плотности и температуры) нейтральных атомов водорода и гелия по измерениям рассеянного солнечного излучения на длинах волн 1216 и 584 \AA соответственно. Для правильного определения параметров в такого рода измерениях требуется теоретическая модель, реально описывающая рассматриваемый физический объект (в данном

случае структуру возникающего течения в результате взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой). При этом наиболее информативными для определения параметров атомов H оказались эксперименты, проводившиеся на космических аппаратах “Прогноз-5” и “Прогноз-6” группой В.Г. Курта в России и группой Ж. Берто и Р. Лаллемен во Франции, поскольку прибор, измерявший лайман-альфа-рассеяние, был оснащен специальной “кюветой”, позволявшей определять не только концентрацию, но и скорость и температуру. На аппаратах “Вояджер” и “Пионер” надежно измеряется только концентрация атомов водорода.

Асимметрия картины обтекания солнечного ветра межзвездной средой относительно направления набегающего потока (см. рис. 3 и 5) приводит к другим косвенным возможностям определения формы и размера гелиосферы. Так, например, на космических аппаратах “Вояджер” и “Пионер” систематически наблюдается изменение со временем (модуляция) характеристик галактических космических лучей. При этом измерения на разных аппаратах позволяют определять (хотя и очень грубо) радиальные, широтные и долготные градиенты их интенсивности, которые могут быть различными в разных направлениях. Модуляция галактических космических лучей связывается с процессами их диффузии в гелиосфере, а наличие гелиосферной ударной волны является важным фактором в изменении их спектра и интенсивности. Спектры и интенсивность галактических космических лучей должны сильно различаться в головной и хвостовой частях гелиосферы из-за отмеченной выше асимметрии картины обтекания. В частности, спектры космических лучей, получаемые в настоящее время на аппаратах “Вояджер-1” и “Вояджер-2”, удаляющихся от Солнца в сторону набегающего потока межзвездной среды (в “подветренную” сторону), должны отличаться от спектров, получаемых на аппарате “Пионер-10”, идущем в хвост гелиосферы. Оценки, проведенные на основе таких измерений, дают размер области сильного изменения физических характеристик галактических космических лучей от 50 а.е. и более, что соответствует расстоянию до гелиосферной ударной волны. Однако эти оценки сильно зависят от уровня солнечной активности, спектра галактических лучей в межзвездной среде, который плохо известен, а также от принятой модели обтекания солнечного ветра межзвездным газом.

Полеты аппаратов типа “Вояджер” и “Пионер” предоставляют уникальную возможность прямых измерений параметров плазмы, магнитного поля, космических лучей и т.п. на очень больших гелиоцентрических расстояниях в несколько десятков и сот астрономических единиц. В связи с этим становится особенно актуальной проблема построения адекватной газодинамической модели, позволяющей, во-первых, предсказывать результаты будущих

экспериментов и, во-вторых, правильно интерпретировать уже полученные данные. В частности, прямые измерения средних параметров плазмы и магнитного поля при помощи аппаратов “Вояджер” и “Пионер” на расстояниях от Солнца до 50 а.е. подтвердили основные выводы теории солнечного ветра: его скорость носит гиперзвуковой характер и не зависит от гелиоцентрического расстояния, а плотность электронов падает обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца. Оказалось, что и межпланетное магнитное поле ведет себя в полном соответствии с теорией Паркера, согласно которой оно подчиняется закону спирали Архимеда. Согласно нашей модели взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой, это совпадение вполне естественно, поскольку влияние атомов водорода, проникающих в солнечный ветер, вследствие эффектов перезарядки не существенно на таких гелиоцентрических расстояниях.

Измерения параметров межпланетной плазмы при помощи космических аппаратов в течение длительного времени проводились почти в плоскости эклиптики. Для измерения параметров солнечного ветра вне плоскости эклиптики в октябре 1990 года под эгидой Европейского космического агентства был запущен космический аппарат “Улисс”. На рис. 7 изображены траектория этого аппарата и вре-

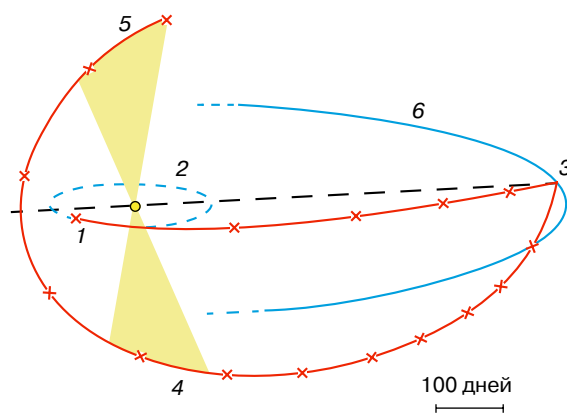


Рис. 7. Траектория космического аппарата “Улисс”, запущенного в октябре 1990 года для исследования межпланетного космического пространства вне плоскости эклиптики. Пояснения в тексте.

мя прохождения характерных областей межпланетного космического пространства. Здесь 1 – запуск аппарата “Улисс” (октябрь 1990 года), 2 – орбита Земли, 3 – момент встречи с Юпитером (февраль 1992 года), 4 – прохождение южной полярной области около Солнца (май–сентябрь 1994 года), 5 – прохождение северной полярной области около Солнца (май–сентябрь 1995 года), 6 – орбита Юпитера. Измерения параметров плазмы и межпланет-

ного магнитного поля вне плоскости эклиптики могут дать ответ на важный для газодинамической теории ответ на вопрос о степени несферичности солнечного ветра. В заключение хотелось бы отметить, что наличие одновременных измерений на разнесенных в пространстве космических аппаратах “Вояджер-1”, “Вояджер-2”, “Пионер-10”, “Пионер-11” и “Улисс” дает уникальную возможность определения (хотя и очень грубого) пространственной структуры гелиосферы.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ БУДУЩЕГО РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ

Современные модели взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой не учитывают многих физических явлений, которые могли бы оказать влияние на количественные результаты. Так, например, наиболее продвинутая модель, рассмотренная подробно выше с учетом одного из самых главных эффектов – эффекта присутствия в межзвездной среде нейтральных атомов водорода, не принимает во внимание возможное влияние межзвездного магнитного поля. Хотелось бы понять влияние аномальной компоненты космических лучей на характеристики модели (оценки показывают, что влияние галактических космических лучей не существенно). Если измерения на аппарате “Улисс” покажут, что течение солнечного ветра в среднем сильно отклоняется от сферически-симметричного, то необходимо будет развивать трехмерную модель его взаимодействия с межзвездной средой. Нестационарные процессы, происходящие на Солнце, приводят к необходимости развивать модели, зависящие от времени. Очевидно, что усовершенствования теоретической модели следует делать в тесном контакте с результатами экспериментов, которые проводятся сейчас и которые будут проводиться в ближайшем будущем.

ационарные процессы, происходящие на Солнце, приводят к необходимости развивать модели, зависящие от времени. Очевидно, что усовершенствования теоретической модели следует делать в тесном контакте с результатами экспериментов, которые проводятся сейчас и которые будут проводиться в ближайшем будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Parker E.N.* // *Astrophys. J.* 1961. V. 134. № 1.
2. *Bertaux J.L., Blamont J.E.* // *Astronomy and Astrophysics.* 1971. V. 11. № 2. P. 200; *Thomas G.E., Krassa R.F.* // *Ibid.* P. 218.
3. *Баранов В.Б., Краснобаев К.В., Куликовский А.Г.* // Докл. АН СССР. 1970. Т. 194. № 1. С. 4
4. *Wallis M.* // *Nature.* 1975. V. 254. № 5497.
5. *Baranov V.B., Malama Yu.G.* // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. № A9.

* * *

Владимир Борисович Баранов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, зав. лабораторией физической газовой динамики Института проблем механики РАН. Член редколлегии журнала “Известия РАН. Механика жидкости и газа”. Область научных интересов: аэромеханика и газовая динамика, магнитная гидродинамика и динамика плазмы. Автор более 80 статей и двух монографий.