

WHERE A BOUNDARY OF THE SOLAR SYSTEM IS

V. B. BARANOV

Heliopause is a surface separating the solar wind and the plasma component of the interstellar medium. We assume that it is a boundary of the solar system. Existing methods of this boundary detection are analysed. Heliocentric distance of the heliopause is estimated.

Под гелиопаузой обычно понимают границу, отделяющую солнечный ветер от плазменной компоненты межзвездной среды. По определению, принятому в статье, именно гелиопауза считается границей Солнечной системы. Анализируются существующие методы определения структуры этой границы и расстояния до нее.

ГДЕ НАХОДИТСЯ ГРАНИЦА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

В. Б. БАРАНОВ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Что мы понимаем под Солнечной системой? Маленькая энциклопедия “Физика космоса” [1, с. 61] дает следующее ее определение: “Солнечная система состоит из планет с их спутниками, астероидов (малых планет), комет, мелких метеорных тел, космической пыли и межпланетного газа. Происхождение, эволюция, законы движения всех этих тел неразрывно связаны с центральным телом системы — Солнцем...” Принимая в основном такое определение Солнечной системы, нам хотелось бы не так, как в энциклопедии, определить ее границу.

Ниже будет рассматриваться только одна компонента Солнечной системы, а именно межпланетный газ, или солнечный ветер, который с большой сверхзвуковой скоростью движется от Солнца. Солнечный ветер представляет собой поток полностью ионизированной водородной плазмы (газа, состоящего из протонов и электронов), имеющий в районе орбиты Земли среднюю скорость $V_E = 450$ км/с, температуру $T_E = 10^5$ К и плотность числа частиц $n_E = 10$ см⁻³. Подробно о солнечном ветре можно прочитать в [2]. Возникают естественные вопросы: чем ограничен солнечный ветер, где он начинает взаимодействовать с окружающей его межзвездной средой, каков характер этого взаимодействия, на каком расстоянии от Солнца находится его граница? На часть этих вопросов ответ можно найти в [3]. В частности, граница, разделяющая область, заполненную плазмой солнечного ветра и плазмой межзвездного происхождения, мы в [3] назвали гелиопаузой. Именно гелиопаузу в дальнейшем будем считать границей Солнечной системы.

Когда автор настоящей статьи вместе со своими коллегами опубликовали в 1970 году работу [4], в которой предлагалась газодинамическая модель взаимодействия солнечного ветра со сверхзвуковым потоком межзвездного газа, они не представляли себе, что уже на следующий год измерения рассеянного солнечного излучения на спутнике OGO-5 подтвердят наличие такого сверхзвукового движения относительно Солнца, а запуск в середине 70-х годов американских космических аппаратов (КА) “Вояджер 1 и 2” и “Пионер 10 и 11”, основной целью которых является исследование внешних областей Солнечной системы, сделает эту модель особенно актуальной. Авторами работы [4] руководило лишь чувство неудовлетворенности математическим

решением для солнечного ветра, полученным Е. Паркером (см. в [2]). Из этого решения следовало, что за орбитой Земли солнечный ветер движется с постоянной сверхзвуковой скоростью вплоть до бесконечности. Последнее противоречило физической реальности, поскольку окружающая межзвездная среда не является вакуумом, а заполнена газом с конечным давлением. Следовательно, солнечный ветер должен тормозиться на межзвездной среде, а его скорость не может быть до бесконечности постоянной. Приняв во внимание, что Солнце движется относительно ближайших звезд со скоростью 20 км/с, и предположив, что межзвездный газ движется относительно Солнца с той же скоростью, авторы работы [4] и построили свою модель, «сшив» решение Е. Паркера с решением для поступательного, сверхзвукового потока межзвездного газа (более подробно об этой модели см. в [3]).

С тех пор прошло более 25 лет. Все это время ни на минуту не ослабевала наша работа над усовершенствованием предложенной в 1970 году модели, что, как надеюсь, позволило нам сохранить лидерство в этой области научных исследований. Мы включали в нее все новые и новые физические явления, добивались все большей точности и корректности расчетов. Особенно нас вдохновляло то обстоятельство, что энергетического ресурса измерительных приборов, установленных на космических аппаратах «Вояджер» и «Пионер», достаточно, чтобы передавать научную информацию вплоть до 2010 года. В настоящее время эти аппараты, находясь на расстояниях в несколько десятков астрономических единиц (одна астрономическая единица (а.е.) равна расстоянию от Земли до Солнца), приближаются к границе Солнечной системы. На рис. 1, а изображены проекции на плоскость эклиптики траекторий космических аппаратов «Вояджер 1 и 2» и «Пионер 10 и 11» вплоть до 2000 года (межзвездный газ движется относительно Солнечной системы слева направо), а на рис. 1, б – их гелиографическая широта. Все аппараты, кроме «Пионера 10», удаляются от Солнца в сторону набегающего потока межзвездной среды (подветренная сторона). «Пионер 10» движется в «хвост» гелиосферы. Эти аппараты удаляются от Солнца в среднем со скоростью 2–3 а.е. в год. Это означает, что, находясь в настоящее время на гелиоцентрических расстояниях в несколько десятков астрономических единиц, к 2010 году они будут передавать информацию с расстояний более сотни астрономических единиц, то есть с тех расстояний, на которых, как предсказывает описанная в [3] модель, наиболее сильно проявляются эффекты взаимодействия солнечного ветра с межзвездным газом. К сожалению, запуск в конце 90-х годов в США специализированного космического аппарата под названием «Межзвездный зонд» (об этом зонде шла речь в [3]), основной целью которого как

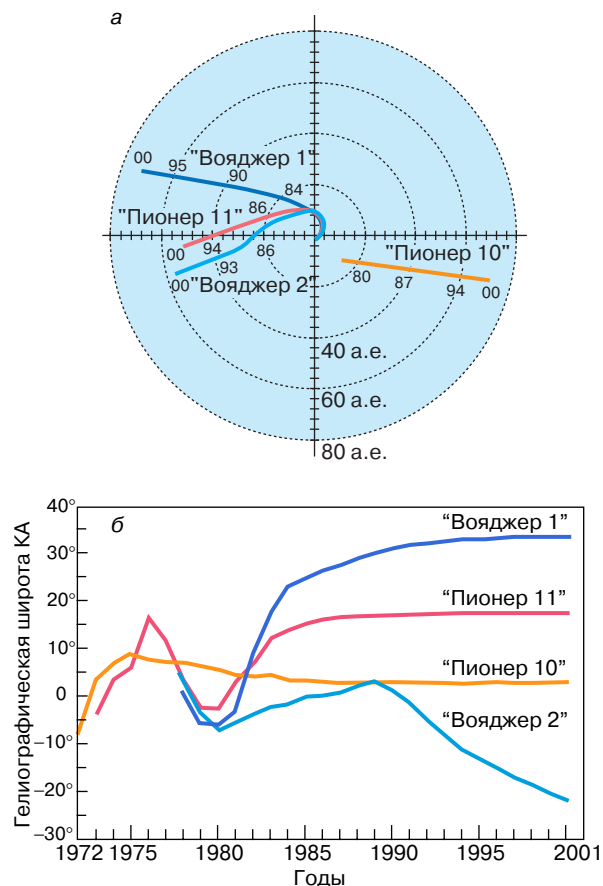


Рис. 1. а – траектории космических аппаратов «Вояджер» и «Пионер» в проекции на плоскость эклиптики, б – их гелиографическая широта

раз и является исследование таких удаленных областей околосолнечного космического пространства, отложен на более поздний срок.

Мы проанализируем экспериментальные методы, при помощи которых предпринимаются попытки определить расстояние до гелиопаузы, то есть до границы Солнечной системы в соответствии с определением, данным выше. Но сначала разясним некоторые физические понятия, которые были введены в статью [3].

КАКОВ ХАРАКТЕР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С МЕЖЗВЕЗДНЫМ ГАЗОМ

Согласно модели взаимодействия солнечного ветра с межзвездным газом, изложенной в [3], картина взаимодействия имеет вид, качественно представленный на рис. 2. Солнечный ветер, имеющий, как было отмечено, уже на орбите Земли большую сверхзвуковую скорость, наталкивается на сверхзвуковой поток межзвездного газа, движущийся относительно Солнца со скоростью $V_{\infty} = 25$ км/с (при

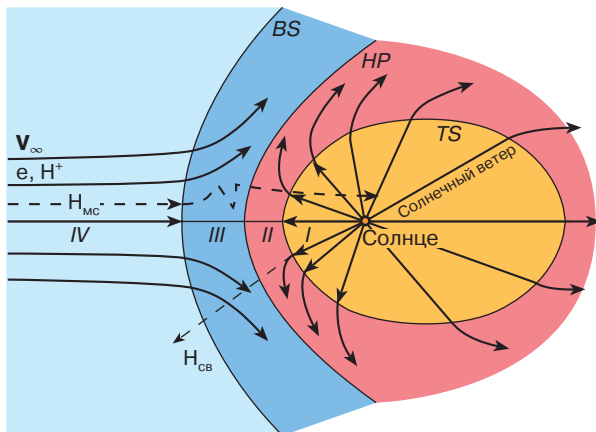


Рис. 2. Общая картина взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой. *BS* – головная ударная волна, *HP* – гелиопауза или граница Солнечной системы, *TS* – ударная волна в солнечном ветре, N_{MC} – атомы водорода, проникающие в солнечный ветер из межзвездной среды, N_{CB} – атомы водорода, возникшие после перезарядки N_{MC} на протонах солнечного ветра

температуре межзвездного газа $T_{\infty} = 8000$ К число Маха, которое определяется как отношение скорости газа к скорости звука, равно $M_{\infty} = 2$). В аэромеханике известно, что затормозить сверхзвуковой поток газа до дозвуковых скоростей невозможно без образования в этом потоке ударной волны, то есть поверхности, на которой скорость резко падает, а температура резко возрастает (ускорить же поток газа от дозвуковой скорости к сверхзвуковой без скачка параметров возможно, например, в сопле Лаваля [2]). Отсюда следует, что при столкновении сверхзвукового потока газа от точечного источника (Солнце) со сверхзвуковым плоскопараллельным потоком (межзвездный газ) должны возникнуть четыре сильно различающиеся по своим параметрам области течения: область *I*, заполненная обычным солнечным ветром; область *II*, ограниченная ударной волной *TS* (от англ. termination shock), которая образуется в солнечном ветре при его торможении на межзвездном газе, и поверхность *HP* (от англ. heliopause), которая отделяет солнечный ветер, разогретый и заторможенный в ударной волне *TS*, от газа межзвездной среды; область *III* между гелиопаузой *HP* и головной ударной волной *BS* (от англ. bow shock), которая образуется в результате торможения межзвездного газа на солнечном ветре, и область *IV*, заполненная сверхзвуковым потоком межзвездной среды, не прошедшим через ударную волну *BS*.

Чтобы пояснить образование, например, головной ударной волны BS , представим себе сверхзвуковой самолет, летящий в воздухе. Сидя в кабине такого самолета мы окажемся в том положении, когда воздух будет обтекать корпус самолета со

сверхзвуковой скоростью. Летчики знают, что перед таким самолетом обязательно образуется ударная волна, в которой воздух резко (скачком параметров) тормозится и сильно разогревается (по этой причине часто приходится даже наносить специальные теплозащитные покрытия на корпус самолета). Аналогом корпуса такого самолета является гелиопауза *HP*, которая и обтекается сверхзвуковым потоком газа межзвездной среды (только вместо твердого препятствия этот газ наталкивается на солнечный ветер).

Поскольку теоретическая гидроаэромеханика имеет дело с модельным представлением газа как сплошной среды, то два потока таких газов (области *I* и *II*) не могут проникнуть друг в друга. Граница их раздела как раз и есть гелиопауза, которая, по терминологии гидроаэромеханики, является тангенциальным разрывом. Именно гелиопаузу мы и будем считать границей Солнечной системы, поскольку поток газа, истекающий из Солнца, не может выйти за эту границу, то есть заполняет только области *I* и *II* на рис. 2.

Как было описано в [3], нейтральные частицы (атомы водорода H, гелия He, кислорода O и др.) представляют собой газ, движение которого не может быть описано в рамках модели сплошной среды. Именно поэтому такие частицы могут проникать из межзвездной среды в Солнечную систему, в той или иной степени взаимодействуя с плазменной компонентой, структура течения которой представлена на рис. 2. Таким образом, нейтральные частицы межзвездного происхождения могут пересекать поверхности BS , HP , TS и проникать в Солнечную систему, где и обнаруживаются при помощи космических аппаратов (методы их регистрации будут изложены ниже). Их траектории на рис. 2 изображены штриховой линией.

Нейтральные атомы и молекулы, проникая из межзвездной среды в Солнечную систему, подвергаются влиянию различных физических процессов: фотоионизации солнечным излучением, процессам перезарядки (см. [2]) с протонами, ударной ионизации вследствие столкновений с электронами и т.п. На них также действуют сила гравитационного притяжения Солнца и сила солнечного радиационного давления (сила отталкивания). Поэтому нейтральные частицы межзвездного происхождения претерпевают существенные изменения по мере их вторжения в Солнечную систему. Последнее обстоятельство наводит на мысль, что возможно косвенное определение местоположения гелиопаузы (границы Солнечной системы) по регистрации таких изменений. В частности, атомы водорода весьма эффективно взаимодействуют с плазменной компонентой через посредство их перезарядки с протонами, в то время как взаимодействие атомов He с протонами пренебрежимо мало. Это означает, что атомы гелия, вторгаясь в Солнечную систему, почти не изменяют

свои параметры (например, температуру и плотность), а параметры атомов водорода должны быть подвергнуты существенным изменениям. Например, область между *BS* и *HP* на рис. 2 должна быть своеобразным фильтром, уменьшающим плотность атомов водорода, входящих в Солнечную систему. Сравнивая параметры соответствующего элемента, измеряемые путем астрономических наблюдений в межзвездной среде, с аналогичными измеряемыми параметрами в Солнечной системе, можно судить о физическом механизме изменения этих параметров. Интересно, что атомы кислорода также довольно эффективно взаимодействуют с плазменной структурой и так же, как и водород, подвергаются сильному ее влиянию при своем движении из межзвездной среды.

Наши расчеты показывают [3], что ударная волна *TS* в солнечном ветре и гелиопауза *HP* отстоят от Солнца в подветренной стороне на расстояниях примерно 90 и 120 а.е. соответственно. При этом расстояние до ударной волны *TS* на противоположной стороне от Солнца примерно в два раза больше, а гелиопауза вообще отсутствует, то есть в области за Солнцем нет четкой границы, отделяющей солнечный ветер от межзвездной плазмы.

ВОЗМОЖНЫЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ ГРАНИЦЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Методы экспериментального изучения характеристик области сильного взаимодействия солнечного ветра и межзвездной среды можно условно разделить на две группы: (а) косвенные измерения параметров течения, для интерпретации которых требуется привлечение какой-либо реальной теоретической модели, и (б) прямые их измерения, как, например, непосредственное измерение скачка параметров плазмы в ударной волне *TS*. Для реализации прямых измерений космическому аппарату требуется непосредственно достичь тех областей, выявление физических особенностей которых представляет научный интерес. К таким относятся области *II* и *III* на рис. 2, и, как видно из рис. 1, космические аппараты могут достичь их только в следующем столетии. Тем не менее уже сейчас прямые измерения скорости солнечного ветра в области *I* на аппаратах “Вояджер” и “Пионер” указывают на его замедление и разогрев с увеличением гелиоцентрического расстояния. Эти эффекты предсказывались ранее теоретически и объяснялись как следствие воздействия на солнечный ветер протонов, образовавшихся в результате перезарядки атомов *H*, движущихся из межзвездной среды, на протонах солнечного ветра.

Однако до сих пор наибольшую информацию о характере взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой дали косвенные измерения, которые удобны тем, что можно судить о физических процессах в областях, сильно удаленных от места

измерения. Например, можно многое сказать об области перехода от солнечного ветра к межзвездной среде, проводя измерения на 1 а.е. В качестве иллюстрации можно отметить, что начиная с 1971 года эксперименты по рассеянному солнечному излучению, проводившиеся на космических аппаратах OGO-5, “Венера”, “Марс” и др., показали, что из межзвездной среды в солнечный ветер проникают атомы водорода и гелия (для длин волн в 1216 и 584 Å соответственно), вектор скорости которых находится почти в плоскости эклиптики и равен по величине 20–25 км/с, а их температура порядка 8000–10 000 К (сверхзвуковое течение). Концентрации атомов *H* и *He* в межзвездной среде из этих экспериментов оценивались как $n(H) = 0,05 \text{ см}^{-3}$, $n(He) = 0,01 \text{ см}^{-3}$ соответственно.

В чем заключается принцип таких измерений? В частности, атомы водорода, движущиеся из межзвездной среды, рассеивают солнечное излучение на длине волны 1216 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ см}$). Это рассеянное излучение можно детектировать прибором, установленным на борту космического аппарата, вышедшего за пределы земной атмосферы, например на борту спутника Земли. На рис. 3 показана принципиальная схема таких измерений, проводившихся на спутниках “Прогноз”. По интенсивности принимаемого сигнала можно судить о плотности рассеивающих частиц, а по эффекту Доплера – о направлении их движения. Чтобы получить величину скорости и температуру газа, представляющего собой атомы *H*, прибор, который был установлен на борту “Прогноза”, имел специальную “кювету” с

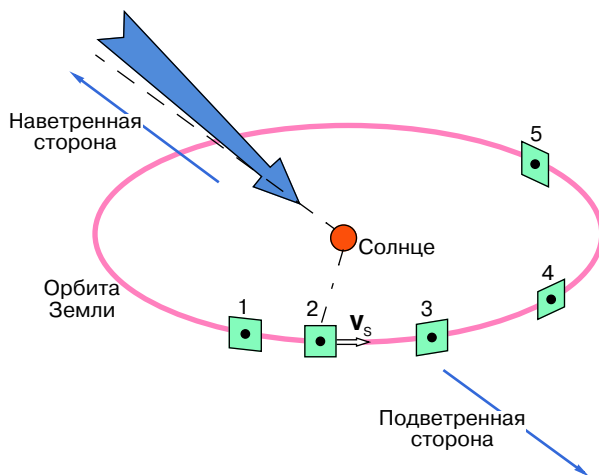


Рис. 3. Принципиальная схема измерений рассеянного солнечного излучения прибором, установленным на борту спутника Земли. Стрелка указывает направление движения атомов межзвездной среды, которые проникают в Солнечную систему. Белый квадрат указывает на плоскость, в которой вращается прибор, установленный для измерений, V_s – вектор скорости Земли, 1–5 – положения прибора в пяти сеансах

известной величиной поглощаемого излучения на длине волны 1216 Å (излучение на этой длине волны часто называют лайман-альфа-излучением). Аналогичные измерения, но на длине волны 584 Å можно проводить для определения параметров атомов He, проникающих в Солнечную систему из межзвездной среды. Очевидно, что интерпретация таких измерений сильно зависит от принятой модели течения. Так, например, первые интерпретации измерений параметров атомов H не принимали в расчет эффект “фильтра” в области сильного взаимодействия между солнечным ветром и плазменной компоненты межзвездной среды (области между *BS* и *TS*).

Интересно, что астрофизические оценки космического содержания гелия по отношению к водороду дают величину $n(\text{He})/n(\text{H}) \approx 0,1$, а измеряемое по рассеянному солнечному излучению то же отношение в Солнечной системе дает величину существенно большую. Естественно, что интерпретация полученного расхождения давала повод для размышления. Сомнения были мгновенно рассеяны после того, как в работах Макса Уоллиса (Кардифф-колледж) и автора этих строк с сотрудниками было показано, что область *III* на рис. 2 играет важную роль (роль своеобразного “фильтра”) в проникновении некоторых атомов, и в частности атомов водорода, из межзвездной среды в Солнечную систему, и не учитывалась при первых интерпретациях рассеянного солнечного излучения. Этот “фильтр” важен для атомов H вследствие большой эффективности их перезарядки с протонами (подробнее см. в [3]) и практически не влияет на движение атомов гелия, поскольку эффективность перезарядки атомов He много меньше. Это и приводит к увеличенному отношению $n(\text{He})/n(\text{H})$ в Солнечной системе. Таким образом, удастся косвенным образом подтвердить наличие области *III*, где взаимодействие солнечного ветра с межзвездной средой проявляется наиболее сильно. Тот же эффект, но другими методами был недавно подтвержден измерениями на уникальном космическом аппарате “Улисс”, запущенном Европейским космическим агентством в октябре 1990 года для проведения экспериментов вне плоскости солнечной эклиптики. Здесь надо отметить, что область *II* в принципе также является “фильтром” для атомов H вследствие их перезарядки с протонами солнечного ветра. Однако этот “фильтр” малоэффективен из-за того, что концентрация протонов в этой области существенно меньше концентрации протонов межзвездной среды в области *III*.

На борту космических станций “Вояджер” также проводятся измерения рассеянного солнечного лайман-альфа-излучения. Результаты этих измерений невозможно было объяснить на основе теории, не учитывающей плазменную компоненту межзвездной среды: оказывается, что интенсивность измеренного излучения падает с удалением от Солнца существенно медленнее, чем предсказывается этой

теорией. Открытый теоретически в работе [5] эффект немоного изменения концентрации атомов водорода вблизи границы Солнечной системы, то есть вблизи гелиопаузы, позволил объяснить это явление. На рис. 4 показано распределение с подветренной стороны безразмерной плотности атомов H, движущихся из межзвездной среды в Солнечную систему. Чтобы получить размерную плотность (в см^{-3}), надо умножить на 0,14. Максимум этого распределения, получивший название водородной стенки, и является своеобразной характеристикой границы Солнечной системы, а рассеяние на ней солнечного излучения дает эффект более медленного убывания интенсивности лайман-альфа-излучения, измеряемого на “Вояджерах”. Интересно отметить, что спектры поглощения излучения в линии 1216 Å, полученные на HST (Hubble Space Telescope) учеными из Боулдерского университета (США), привели к выводу о том, что объяснение результатов эксперимента возможно только при привлечении эффекта водородной стенки (водородная стенка дает дополнительную линию поглощения в полученных спектрах). Этим самым ученые из Боулдерского университета, проводившие эти измерения, заявили об экспериментальном подтверждении наличия водородной стенки вблизи границы Солнечной системы.

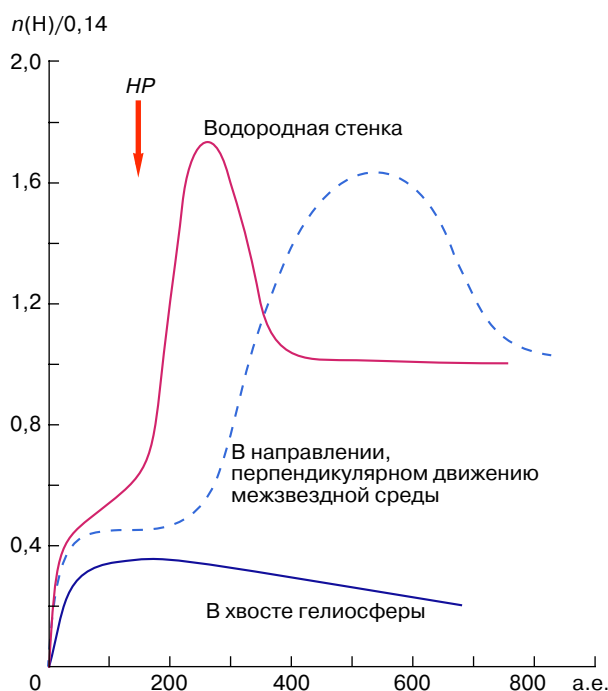


Рис. 4. Рассчитанное теоретически распределение с подветренной стороны плотности атомов H, движущихся из межзвездной среды. Пик этого распределения, находящийся вблизи гелиопаузы, положение которой отмечено через HP, назван водородной стенкой

Год назад российская телевизионная программа “Время” неожиданно объявила о том, что американскими учеными обнаружена граница Солнечной системы, расстояние до которой оценивалось в 120–150 а.е. Как часто доверчивый слушатель принимает разного рода недостоверные сведения за истину в последней инстанции! Нам, естественно, тоже хотелось поверить в это сообщение, поскольку наши оценки размеров Солнечной системы совпадали с сообщенными в программе “Время” (расстояние до гелиопаузы оценивалось в 120 а.е.). Однако оказалось, что это сильное утверждение было связано с измерениями на аппаратах “Вояджер” низкочастотного радиоизлучения вблизи 2 кГц. Одна из его интерпретаций привела к выводу о том, что колебание измеряемого электрического поля с такой частотой может быть следствием идущего от гелиопаузы сигнала, который возникает из-за ее взаимодействия с возмущениями, проникающими сюда из солнечного ветра. Зная скорость распространения этого сигнала и время его прохождения, можно определить расстояние до гелиопаузы *HP*, то есть расстояние до границы Солнечной системы. Ясно, что эта оценка сильно зависит от модели течения, носит весьма косвенный характер и не является вполне достоверной, хотя причина возникновения самого сигнала может быть рассмотрена как разумная гипотеза.

Большие надежды в экспериментальном плане возлагаются на прямые измерения плазменных параметров на космических аппаратах “Вояджер 1 и 2” и “Пионер 10 и 11”. В частности, имеется надежда, что в недалеком будущем некоторые из них смогут пересечь ударную волну в солнечном ветре *TS* (аппарат “Пионер 10” удаляется от Солнца вдоль вектора скорости межзвездного газа, то есть он находится в хвосте гелиосферы, где расстояние до *TS* в два раза больше, чем в подветренной стороне). Что касается косвенных измерений, то наши надежды связываются с проводимым в настоящее время французскими учеными экспериментом SWAN по рассеянному солнечному излучению, на борту спутника SOHO, запущенного в конце прошлого года, и с экспериментами на борту космического аппарата “Улисс”, о котором шла речь в статье [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы видели, что теоретическая модель строения гелиосферы, ограниченной гелиопаузой, приводит к оценке размера Солнечной системы в сотню и более астрономических единиц. Однако модельные представления требуют все новых экспериментальных подтверждений. При этом наиболее интересными для физики рассмотренного в нашей статье явления окажутся расхождения, которые, очевидно, появятся при сравнении предсказаний теории с

результатами экспериментов. Усовершенствование теоретической модели путем введения в нее новых физических компонент, таких, например, как межпланетное и межзвездное магнитные поля, галактическая и аномальная составляющие космических лучей и т.п., поможет выявить новые физические явления и устранить возможные расхождения. Предстоит еще исследовать влияние солнечной активности на структуру гелиосферы и проникновение различных атомов и молекул из межзвездной среды в Солнечную систему. Последняя проблема может иметь и прикладное значение, поскольку вполне возможно, что испарение некоторых элементов из атмосфер планет, включая нашу Землю, восполняется за счет их притока из межзвездной среды.

В настоящий момент под влиянием все новых экспериментальных данных наша группа активно работает над усовершенствованием модели, первый вариант которой предложен еще в 1970 году в работе [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Физика космоса. М.: Сов. энциклопедия, 1976.
2. Баранов В.Б. Что такое солнечный ветер // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 12. С. 81–86.
3. Баранов В.Б. Влияние межзвездной среды на строение гелиосферы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 11. С. 73–79.
4. Баранов В.Б., Краснобаев К.В., Куликовский А.Г. Модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой // Докл. АН СССР. 1970. Т. 194, вып. 1. С. 41–44.
5. Baranov V.B., Lebedev M.G., Malama Yu.G. The Influence of the Interface between the Heliosphere and the Local Interstellar Medium on the Penetration of the H-atoms to the Solar System // Astrophys. J. 1991. Vol. 375. P. 347–351.

* * *

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 редколлегий журналов “Известия РАН. Механика жидкости и газа”. Лауреат премии АН СССР им. С.А. Чаплыгина. Область научных интересов: аэромеханика и газовая динамика, магнитная гидродинамика и динамика плазмы. Автор более 90 статей и двух монографий.