

ЧТО МЫ ЗНАЕМ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ ЛОКАЛЬНОЙ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ

В. Б. БАРАНОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

WHAT DO WE KNOW ABOUT LOCAL INTERSTELLAR MEDIUM AROUND SOLAR SYSTEM?

V. B. BARANOV

The up-to-date views on the local interstellar medium adjacent to the Solar system, which forms the heliosphere, the latter being actively investigated by means of spacecrafts, are presented. The experimental methods to determine the parameters of local interstellar gas (bulk velocity, temperature, number density, chemical composition, etc.) are qualitatively described. The role of theoretical models in determination of not-easily-measurable parameters is explained.

Изложены современные представления о ближайших к Солнечной системе областях локальной межзвездной среды, которые формируют гелиосферу, активно изучаемую в настоящее время при помощи космических аппаратов. Качественно описаны методы определения параметров локального межзвездного газа (скорости, температуры, концентрации, химического состава и т.д.). Показана роль теоретических моделей в определении плохо измеряемых величин.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

В статьях [1, 2] мы подробно рассматривали газодинамическую теорию взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой, которая непосредственно примыкает к Солнечной системе. Такую межзвездную среду обычно называют локальной (в английской литературе Local Interstellar Medium или LISM). Как было показано в [1, 2], параметры газа локальной межзвездной среды (ЛМС) во многом определяют структуру и размер гелиосферы, граница которой (гелиопауза) определяет область распространения плазмы солнечного происхождения и поэтому в [2] определена как граница Солнечной системы. В частности, важными параметрами являются скорость газа ЛМС относительно Солнца, его температура, химический состав, концентрация составляющих газ сортов частиц, степень ионизации, величина и направление магнитного поля и т.п.

Как же определяются эти параметры, какое в настоящее время представление об окружающем Солнечную систему межзвездном газе? Эти вопросы являются главной темой статьи. Мы представим основные результаты таких исследований, лишь коротко останавливаясь на основных физических принципах определения параметров ЛМС и не вдаваясь подробно в экспериментальную методику их получения.

КАК ВПЕРВЫЕ СТАЛО ИЗВЕСТНО О ДВИЖЕНИИ ЛМС ОТНОСИТЕЛЬНО СОЛНЦА

До начала эры космических исследований все сведения о межзвездном газе извлекали из наземных наблюдений в видимой части спектра и радиодиапазоне, то есть в тех частях спектра, для которых земная атмосфера является прозрачной. Такими наземными наблюдениями удавалось определять параметры межзвездного газа, осредненные по очень большим расстояниям (порядка и больше среднего расстояния между звездами $3,08 \times 10^{18}$ см = 1 пк). Это обстоятельство создавало трудности в интерпретации данных наблюдений применительно

к ЛМС, примыкающей к Солнечной системе. Трудности такой интерпретации хорошо разобраны в книге [3]. Тем не менее не было никаких сомнений в том, что окружающее Солнечную систему пространство не является вакуумом, а заполнено межзвездным газом, присутствие которого обнаруживается, например, по поглощению им излучения от звезд. Открытие поглощения в линиях кальция явилось первым доказательством наличия вещества в межзвездном космическом пространстве. При этом до начала 1970-х годов считалось, что межзвездный газ в среднем находится в покое.

Последнее привело к тому, что первые модели взаимодействия солнечного ветра с ЛМС исходили из наблюдаемого в астрономии движения звезд относительно друг друга. В частности, в работе [4] предполагалось, что межзвездный газ движется относительно Солнечной системы вследствие движения Солнца по направлению к апексу со скоростью 20 км/с. Это направление составляет угол $\sim 53^\circ$ к плоскости эклиптики.

Первым экспериментальным доказательством движения межзвездного газа относительно Солнечной системы были измерения рассеянного солнечного излучения на длине волны 1216 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$). Поскольку излучение на этой длине волны не достигает поверхности Земли (атмосфера для нее непрозрачна), то измерения были выполнены на спутнике OGO-5 [5]. Принципиальная схема таких измерений демонстрируется на рис. 1 и заключается в том, что прибором, устанавливаемым на космическом аппарате (КА), измеряется интенсивность не прямого солнечного излучения на данной длине волны ($h\nu$ – квант такого излучения на рис. 1), а отраженного (рассеянного) движущимися атомами водорода. По интенсивности попадающего в прибор излучения можно определить концентрацию этих атомов, а по анализу доплеровского смещения оценить величину и направление их средней скорости. Интерпретация экспериментальных данных, полученных на аппарате OGO-5, привела к выводу, что межзвездные атомы H движутся относительно Солнца со скоростью $V \approx 20 \text{ км/с}$, а их концентрация соответствует величине $n_H \approx 0,05 \text{ см}^{-3}$. Однако вектор измеренной средней скорости оказался лежащим почти в плоскости эклиптики, а не под углом в 53° к ней. Последнее обстоятельство показывало, что имеется движение межзвездного газа, которое не обусловлено движением Солнца относительно ближайших звезд, – собственное движение. Позже на борту советских КА “Прогноз” стали устанавливать усовершенствованные приборы, которые позволяли не только проводить более точные измерения концентрации и скорости, но и определять температуру движущегося межзвездного газа. Температура атомов H оказалась $T_H \approx 10^4 \text{ К}$. Более детально с методикой таких измерений можно познакомиться в [6].

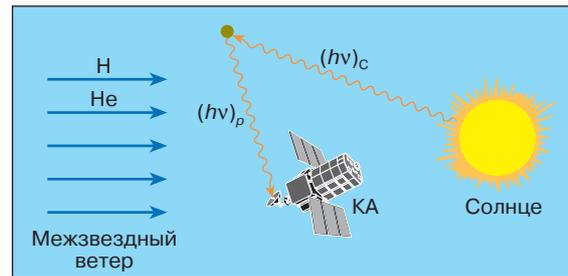


Рис. 1. Качественная схема измерений рассеянного солнечного излучения на атомах, движущихся из локальной межзвездной среды (межзвездный ветер) в Солнечную систему. Здесь $(h\nu)_c$ – излучение, идущее от Солнца, $(h\nu)_p$ – рассеянное на атоме солнечное излучение, детектируемое прибором, установленным на космическом аппарате (КА)

Скорость в 20 км/с при температуре 10^4 К оказывается больше скорости звука в ЛМС. Именно поэтому модель взаимодействия солнечного газа со сверхзвуковым потоком ЛМС, изложенная в [1, 2], наиболее адекватно описывает рассматриваемое физическое явление. Интересно, что несколько позже движение ЛМС относительно Солнечной системы подтвердили спутниковые измерения параметров He по рассеянному солнечному излучению на длине волны 584 \AA [7].

О ПРОНИКНОВЕНИИ АТОМОВ ВОДОРОДА, ГЕЛИЯ И ДРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЛМС В СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ

Сравнение измеренных по рассеянному солнечному излучению на длинах волн 1216 и 584 \AA параметров водорода и гелия неожиданно показало, что средняя скорость атомов гелия выше, а температура ниже, чем соответствующие параметры водорода. При этом оказалось, что отношение $n_{He}/n_H \approx 0,5$, где n_{He} – измеренная концентрация гелия, почти в пять раз превосходит принятое в астрономии отношение 0,1 в межзвездной среде. Этот факт нашел свое объяснение [1, 2] в рамках газодинамической модели взаимодействия солнечного ветра с ЛМС. Дело в том, что для интерпретации экспериментальных данных по рассеянному солнечному излучению до середины 1980-х годов привлекали так называемую горячую модель, согласно которой атомы водорода и гелия проникают из межзвездной среды в Солнечную систему, находясь под действием сил солнечного притяжения и радиационного отталкивания, а также подвергаясь процессам их убывания вследствие перезарядки с протонами (обмена зарядом) солнечного ветра и фотоионизации солнечным излучением. При этом полностью игнорировали тот факт, что в потоке межзвездной среды присутствует плазменная компонента,

состоящая из протонов и электронов (межзвездный газ является частично ионизованной средой) и эффективно взаимодействующая с плазмой солнечного ветра, образуя, в частности, гелиопаузу (НР на рис. 2, см. также [1, 2]). Естественно при этом, что в горячей модели не учитывался эффект фильтра (эффект перезарядки межзвездных атомов на протонах ЛМС) в области сильного торможения плазменной компоненты (в области между головной ударной волной BS и гелиопаузой НР на рис. 2). Именно этот процесс наиболее эффективен в изменении параметров атомов водорода, проникающих из ЛМС в Солнечную систему. Поскольку атомы гелия имеют существенно меньшую по сравнению с атомами водорода вероятность перезарядки с протонами (как говорят, малое эффективное сечение перезарядки), то они проникают в Солнечную систему, практически не изменяя свои параметры.

Таким образом, спутниковые измерения рассеянного солнечного излучения на длинах волн 1216 и 584 Å и их интерпретация дают значения параметров Н и Не не в ЛМС, а после прохождения этих атомов через область взаимодействия солнечного ветра с плазменной компонентой межзвездной среды. Эта область отсутствует в горячей модели и не рассматривалась в [6]. Таким образом, расхождение значений параметров водорода и гелия (по скорости и температуре) и увеличенное содержание гелия по сравнению с его космическим со-

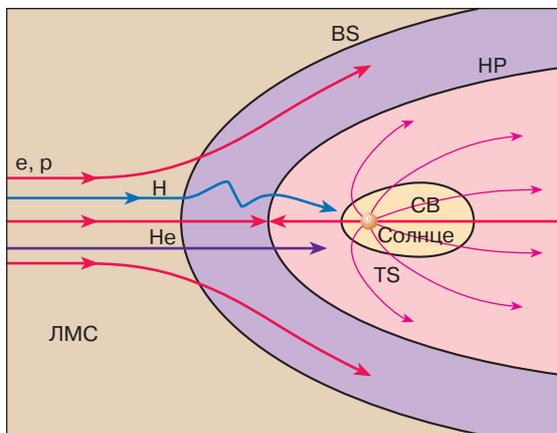


Рис. 2. Качественная картина взаимодействия солнечного ветра и локальной межзвездной среды (ЛМС) (см. также [1, 2]). Здесь BS – головная ударная волна, НР – гелиопауза, отделяющая плазму солнечного ветра от плазменной компоненты межзвездной среды, ТС – ударная волна торможения солнечного ветра. Синей линией показана траектория атомов водорода, на которую воздействуют процессы перезарядки, а фиолетовой линией – траектория атомов гелия, на которую процессы перезарядки практически не оказывают влияния

держанием, полученное из этих измерений, легко объясняются наличием плазменной компоненты ЛМС и косвенно подтверждают присутствие гелиопаузы НР.

Недавно на космическом аппарате “Улисс”, запущенном Европейским космическим агентством в октябре 1990 года и в настоящее время совершающем облет Солнца в плоскости, перпендикулярной плоскости эклиптики (см. рис. 7 в [1]), были проведены прямые измерения параметров гелия и косвенные измерения параметров водорода (по изучению параметров протонов, образовавшихся в результате перезарядки атомов Н межзвездного происхождения). Эти измерения, проведенные на расстоянии от Солнца в несколько астрономических единиц (а.е.), также показали существенную разницу значений температуры и средней скорости атомов Н и Не, а также уменьшенное (по сравнению с космическим содержанием) отношение их концентраций. В частности, скорость атомов Не оказалась равной ~25 км/с, а атомов водорода ~20 км/с. Появилась необходимость независимого измерения параметров межзвездного газа, окружающего Солнечную систему. Эти измерения вместе с измерениями параметров частиц, проникших в Солнечную систему, позволили бы определить роль структуры гелиосферы в таком проникновении, и в частности присутствие гелиопаузы, которая является, как мы уже отметили, следствием присутствия плазменной компоненты в ЛМС.

Следует заметить, что из межзвездной среды в Солнечную систему кроме атомов Н и Не проникают и другие элементы, среди которых легче всего обнаруживаются атомы кислорода. Кислород, так же как и водород и гелий, можно изучать на основе интерпретации рассеянного солнечного излучения. Его концентрация в ЛМС в тысячу раз меньше концентрации водорода, а эффект фильтра для атомов О также оказывается существенным.

Для косвенного определения физических особенностей области, разделяющей плазменную компоненту межзвездной среды и солнечный ветер (области между BS и ТС на рис. 2), и, в частности, ее роли в проникновении нейтральных атомов из ЛМС в Солнечную систему, требуется детальное исследование параметров окружающей Солнечную систему межзвездной среды.

НАБЛЮДЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО МЕЖЗВЕЗДНОГО ОБЛАКА

Революция в наших представлениях о локальной межзвездной среде, непосредственно влияющей на характеристики гелиосферы, произошла после опубликования в 1992 году результатов классических астрономических наблюдений, проведенных французскими учеными П. Лаллеменом и Р. Бертин. С высоким для наземных

наблюдений разрешением они исследовали спектры ближайших к Солнцу звезд в линии CaII при помощи 1,52-м телескопа. Оказывается, что наше Солнце находится внутри одного из так называемых диффузных облаков. В научной литературе его называют локальным межзвездным облаком (Local Interstellar Cloud или LIC). Было также показано, что оно движется относительно Солнца со скоростью порядка 25–26 км/с. Поясним коротко основной принцип определения скорости облака.

На рис. 3 схематично изображены гелиосфера, погруженная в LIC, и три ближайшие к Солнцу звезды, которые, в свою очередь, могут находиться внутри диффузных облаков, движущихся с некоторыми скоростями. Локальный газ изучается по линиям поглощения, которые образуются в спектре этих звезд при прохождении их излучения через такие облака. Поскольку эти облака движутся с различными скоростями, то соответствующие излучению данной звезды линии поглощения будут иметь различные доплеровские смещения. Таким образом, на пути к ближайшей звезде число линий поглощения будет равно $k + 1$, а именно сумме внешних облаков плюс наше локальное облако (LIC). Если LIC имеет однородное движение со скоростью V_{LIC} , то доплеровский сдвиг его линии поглоще-

ния по направлению к данной звезде есть просто проекция вектора скорости на это направление (на луч зрения). Имея проекции вектора скорости V_{LIC} на три таких направления, можно восстановить сам вектор.

Пусть, например, в декартовой системе координат $Oxyz$ с началом в точке наблюдения O (почти совпадающей с Солнцем) вектор e_i ($i = 1, 2, 3$) есть единичный вектор в направлении на данную звезду (рис. 3), а V_i — проекции вектора скорости V_{LIC} на эти направления. Тогда для определения компонент (u, v, w) вектора скорости LIC в этой системе координат будем иметь следующую систему алгебраических уравнений:

$$u \cos(e_1, x) + v \cos(e_1, y) + w \cos(e_1, z) = V_1,$$

$$u \cos(e_2, x) + v \cos(e_2, y) + w \cos(e_2, z) = V_2,$$

$$u \cos(e_3, x) + v \cos(e_3, y) + w \cos(e_3, z) = V_3.$$

Здесь введены обозначения (e_i, x) , (e_i, y) и (e_i, z) для углов единичного вектора e_i с координатными осями Ox , Oy и Oz соответственно. Из этих уравнений легко определить компоненты вектора V_{LIC} , зная доплеровские сдвиги V_i ($i = 1, 2, 3$) в газе LIC по направлению к каждой из трех звезд (см. рис. 3), то есть зная правые части этих уравнений и углы между направлениями на звезды и осями координат.

В последнее время более точные измерения спектров поглощения в ультрафиолетовой линии (линии поглощения FeII и MgII), проведенные на аппарате “Хаббл Спейс Телескоп” (Hubble Space Telescope или HST), подтвердили основные выводы, полученные французскими астрономами. Более точные измерения скорости LIC привели к значению $V_{LIC} \approx 25,6$ км/с, а оценка температуры газа в нем соответствовала величине $T_{LIC} \approx 6700$ К, что с большой степенью точности совпало с измеренной температурой гелия в Солнечной системе с помощью аппарата “Улисс”.

Таким образом, независимыми астрономическими наблюдениями были подтверждены экспериментальные данные по рассеянному солнечному излучению и прямым измерениям параметров гелия на аппарате “Улисс”, которые доказали, что имеется движение межзвездного газа относительно Солнечной системы. При этом средняя скорость LIC, ее направление, а также температура локального облака с большой степенью точности совпадают со скоростью, ее направлением и температурой, измеряемыми для гелия в Солнечной системе. Уменьшенная скорость атомов водорода в Солнечной системе и их большая температура легко объясняются процессами перезарядки на границе гелиосферы, о чем упоминалось выше.

Диффузные облака, размеры которых составляют величину в несколько парсек, представляют собой довольно холодные (с температурой от $5 \cdot 10^3$ до 10^4 К) и

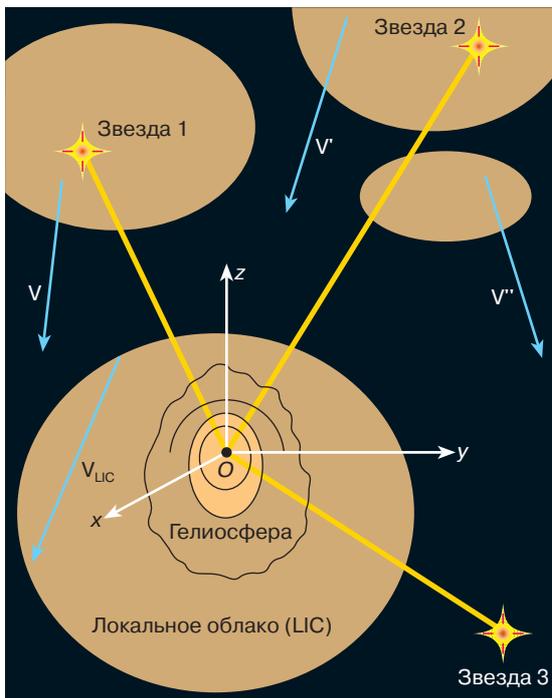


Рис. 3. Качественная картина положения Солнца в локальном облаке (LIC). Изучение поглощения излучения от ближайших звезд 1, 2 и 3 дает возможность определить движение LIC относительно Солнца

плотные (концентрация числа частиц в них от от 0,05 до $0,5 \text{ см}^{-3}$) образования, которые, в свою очередь, находятся внутри очень горячего (с температурой $T \sim 10^6 \text{ К}$) и с низкой плотностью числа частиц ($\sim 0,005 \text{ см}^{-3}$) локального пузыря (local bubble), поперечный размер которого около 80 пк. Локальный же пузырь, по утверждению некоторых астрономов, достался нам в наследство от взрыва сверхновой звезды примерно миллиард лет тому назад.

В настоящее время нет сомнения, что наиболее распространенным элементом не только во всем космическом пространстве, но и в ЛМС является водород, за которым следуют гелий, кислород, углерод и другие элементы. Хотя и в малых количествах, но даже органические соединения обнаруживаются в межзвездной среде при изучении спектров от звезд. При этом ЛМС является достаточно сильно ионизованной средой.

КОСВЕННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОХО ИЗМЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Какие параметры ЛМС являются важными для получения количественных результатов на основе теоретической модели взаимодействия солнечного ветра и межзвездной среды, изложенной в [1, 2], и для суждения об адекватности этой модели реальному физическому явлению? Для определения теоретической структуры возникающего течения, гелиоцентрического расстояния до границы Солнечной системы (гелиопаузы НР), головной ударной волны BS и ударной волны торможения TS, а также их геометрической формы (см. рис. 2) необходимо знать скорость ЛМС, ее температуру, концентрацию атомов водорода n_H и степень ионизации (концентрацию электронов n_e или протонов). И если скорость и температура измеряются (см. предыдущий раздел) с определенной степенью точности как методами исследования спектров поглощения излучения ближайших звезд, так и измерениями на аппарате “Улисс”, то такие параметры, как концентрация электронов n_e или межзвездное магнитное поле ЛМС, являются очень плохо определяемыми параметрами, а концентрация n_H определяется с недостаточной степенью точности. Плохое знание концентрации электронов в ЛМС приводит, в частности, к неопределенности в оценке эффективности рассмотренного выше фильтра (области между НР и BS), ответственного за проникновение атомов водорода, гелия, кислорода и других элементов в Солнечную систему.

Одним из основных методов определения, например, n_e в межзвездной среде является метод пульсарных измерений. Этим методом концентрация электронов определяется по измерению меры дисперсии пульсарных радиосигналов (запаздыванию импульсов излучения на низких частотах по сравнению с высокими частотами).

Однако этот метод дает величину n_e , осредненную по расстояниям в 100 пк и более, что, конечно, не может дать надежное значение для ЛМС. Осредненная не только по расстояниям, но и по различным пульсарам средняя величина $n_e \approx 0,04 \text{ см}^{-3}$. Однако в последнее время наземный анализ некоторых оптических эмиссионных линий и интерпретация линий поглощения нейтральных атомов магния, детектированных прибором, установленным на HST, приводят к оценке $n_e \geq 0,1 \text{ см}^{-3}$. Следовательно, в настоящее время считается вероятным, что степень ионизации водорода в ЛМС может быть достаточно высока и достигать величины порядка 50%, хотя и с большой степенью неточности.

Именно поэтому очень важным является косвенный метод определения плохо измеряемых параметров в ЛМС путем использования сравнительно надежных измерений типа изучения спектров поглощения ближайших звезд или прямых измерений параметров. Не на аппарате “Улисс” с результатами теоретической модели, в которой плохо измеряемый параметр является свободно варьируемым, а достаточно надежно измеряемые фиксируются. Если при некотором значении варьируемого параметра, например концентрации n_e в ЛМС, результаты экспериментов, проводимых в Солнечной системе на космических аппаратах (например, по рассеянному солнечному излучению), совпадают с результатами теории, то можно говорить, что такая концентрация электронов в ЛМС наиболее вероятна. В настоящее время такие расчеты были проведены и было показано, что наиболее приемлемые концентрации электронов в ЛМС лежат в пределах $0,07-0,2 \text{ см}^{-3}$ (при $n_H \approx 0,2 \text{ см}^{-3}$).

В конце раздела заметим, что совсем плохо обстоят дела с измерением величины и направления магнитного поля в ЛМС. Получаемые методикой, связанной с расщеплением спектральных линий под действием на излучающее вещество магнитного поля (так называемый эффект Зеемана), эти характеристики приближительны и могут быть в основном распространены на масштабы, сравнимые с масштабом Галактики. Для ЛМС такие измерения не являются достоверными. Можно считать, что направление вектора магнитной индукции вблизи Солнечной системы в настоящее время неизвестно, а грубые оценки его величины дают примерно 10^{-6} Гс . Однако надежная теоретическая модель, учитывающая магнитное поле в ЛМС, до сих пор не построена.

ВЫВОДЫ

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы.

1. Солнечная система погружена в локальное межзвездное облако (LIC) размером в несколько парсек, которое движется относительно Солнца со скоростью порядка 26 км/с и температурой примерно 7000 К. Этот поток является сверхзвуковым, что делает теоретическую модель сверхзвукового обтекания солнечного ветра межзвездной средой, изложенную в [1, 2], особенно актуальной.

2. Важными параметрами локальной межзвездной среды (ЛМС) для оценки размеров и структуры гелиосферы (области, заполненной газом солнечного происхождения) являются концентрации атомов водорода n_H и электронов n_e (или равной ей концентрации протонов). Хотя измерения этих величин в ЛМС и затруднены методическими причинами, тем не менее их оценка дает наиболее вероятные в настоящее время величины $n_H \approx 0,2 \text{ см}^{-3}$ и $0,07 < n_e < 0,2 \text{ см}^{-3}$.

3. Ни величина, ни направление магнитного поля в ЛМС в настоящее время надежно не известны, хотя оценка величины вектора магнитной индукции дает значение порядка 10^{-6} Гс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов В.Б. Влияние межзвездной среды на строение гелиосферы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 11. С. 73–79.

2. Баранов В.Б. Где находится граница Солнечной системы // Там же. 1998. № 9. С. 73–78.

3. Бочкарев Н.Г. Местная межзвездная среда. М.: Наука, 1990.

4. Баранов В.Б., Краснобаев К.В., Куликовский А.Г. // Докл. АН СССР. 1970. Т. 194, № 1. С. 41.

5. Bertaux J.-L., Blamont J.E. // Astron. and Astrophys. 1971. Vol. 11, № 2. P. 200; Thomas G.E., Krassa R.F. // Ibid. P. 218.

6. Курт В.Г. Солнце и межзвездная среда // Соросовский Образовательный Журнал. 1999. № 1. С. 61–66.

7. Weller C., Meier R. // Astrophys. J. 1974. Vol. 193. P. 471.

Рецензент статьи А.М. Черепашук

* * *

Владимир Борисович Баранов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета МГУ, зав. лабораторией физической газовой динамики Института проблем механики РАН, член редколлегии журнала "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 около 100 статей и двух монографий.