

ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА: АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ И ПЛАЗМЕННО-ФИЗИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ

И.С. Веселовский

ORIGIN OF THE SOLAR WIND: ASTROPHYSICAL AND PLASMA-PHYSICAL ASPECTS OF THE PROBLEM

I.S. Veselovsky

Один из основных нерешенных вопросов в астрофизическом аспекте проблемы происхождения солнечного ветра (СВ) состоит в том, на какой стадии эволюции Солнца как звезды закончилось накопление его вещества из межзвездной среды и началось преимущественное истечение потоков СВ. Неизвестно, когда и как это произошло в деталях, хотя начало термоядерных реакций в недрах Солнца, несомненно, играло важнейшую роль в энергетике и динамике звезды, что могло привести к такой смене режимов. В связи с этим выдвигается гипотеза о том, что наличие аккреции или истечения плазмы из звезды определяется предшествующей эволюцией, т. е. «памятью», а не просто распределением мгновенных значений плотности, температуры, магнитного поля и других макроскопических параметров системы, состоящей из данной звезды, ее ближайшего звездного окружения и межзвездного газа. В зависимости от этого, соседние звезды могут служить донорами или акцепторами межзвездного газа. Некоторые из них могут одновременно или попеременно играть и ту, и другую роль. Политропное решение для центрально-симметричных течений, полученное Бонди, вырождено по знаку радиальной скорости. Оно пригодно для описания квазистационарных режимов обоих типов. Однако теория переходных процессов не развита, поэтому ответ на вопрос о том, существуют ли звезды, похожие по своему внутреннему строению и параметрам на современное Солнце, но без испускания звездного ветра или даже с аккрецией межзвездного газа, может быть получен лишь наблюдательным путем. Возможность существования таких звезд не исключена, она не противоречит никаким законам природы. Плазменно-физический аспект проблемы происхождения СВ касается гораздо меньших интервалов времени, чем основная эволюционная шкала, измеряемая миллиардами лет. Поэтому данный аспект проблемы гораздо лучше изучен, хотя также достаточно сложен и во многих деталях еще не решен из-за многомасштабного характера процессов формирования потока. Солнечный ветер как перманентное сверхмагнитозвуковое истечение плазмы в радиальном направлении возникает на фоне гораздо более мощных неравновесных и нестационарных движений, которые лишь частично упорядочены в верхней атмосфере и короне Солнца (турбосфера). Мгновенное состояние СВ контролируется потоками свободной энергии, вещества и импульса, поступающими в корону из нижележащих слоев солнечной атмосферы и конвективной зоны. Хотя основные физические механизмы переноса свободной энергии электромагнитного поля и плазмы в целом хорошо известны, они нуждаются в количественном исследовании применительно к конкретным реализациям при частых и редких столкновениях частиц в короне Солнца для выяснения нелокальных процессов формирования полей и плазменных течений, в том числе и СВ.

One of the unsolved questions in the astrophysical aspect of the problem of origin of the solar wind is when, during the evolution of the Sun as a star, the accumulation of its matter from the interstellar medium has been finished, and the dominant outflow of solar wind streams started. It is unknown in detail when and how it happened, though the commencement of thermonuclear reactions in the Sun's interior was of considerable importance in energetics and dynamics of the star; and this could result in such a change of the regimes. In this connection it is hypothesized that the accretion or plasma outflow from the star was dictated by the preceding evolution; i.e., by «memory» rather than by distribution of instantaneous densities, temperature, magnetic field, and other macroscopic parameters of the system that consists of this star, its nearest star environment, and interstellar gas. Depending on this, neighboring stars can be interstellar donors or accepters. Some of them can simultaneously or alternately fulfill both roles. The polytropic solution for centrally symmetrical flows derived by Bondi is degenerated in terms of a sign of radial velocity. It is capable of describing quasistationary regimes of both types. However, the transient process theory is still undeveloped. Thus the question as to whether there are stars that resemble the present-day Sun in their internal structure and parameters, but without stellar-wind emission or even with interstellar-gas accretion, may be only answered through observations. It is possible that such stars exist. This does not contradict to any laws of nature. Plasma-physical aspect of the problem of origin of the solar wind covers much shorter time intervals than the main evolution billion-year scale does. Therefore this aspect is better understood, though it is also rather complicated and still unsolved in many details, because of a multi-scale character of processes of flow formation. The solar wind as a permanent supermagnetosonic plasma outflow in the radial direction appears on the background of much more powerful irregular and unsteady motions, which are only partially ordered in the upper atmosphere and Sun's corona (turbosphere). The instantaneous solar-wind state is controlled by fluxes of free energy, matter, and impulse that enter the corona from the convective zone and solar atmosphere underlayers. Although the main physical mechanisms of transfer of free energy of the electromagnetic field and plasma are well-known, they need a quantitative investigation as applied to specific realizations in frequent and rare particle collisions in the Sun corona to determine non-local processes of formation of fields and plasma flows including the solar wind as well.

Введение

Проблема происхождения солнечного ветра (СВ) возникла более полувека назад, когда благодаря наземным наблюдениям комет, вариаций космических лучей и геомагнитных возмущений постепенно стал ясен перманентный сверхзвуковой характер потоков вещества от Солнца, впоследствии надежно подтвержденный и ныне детально исследуемый прямыми измерениями с помощью многочисленных космических аппаратов и спутников. Первое недоуме-

ние исследователей выражалось простым вопросом: почему вообще существует СВ? Достаточно глубокий полный ответ отсутствует и поныне, несмотря на огромный прогресс в исследовании конкретных свойств СВ за последние десятилетия. Значительная доля остающегося недоумения обусловлена не только объективными причинами, связанными с недостатком необходимых сведений, но и субъективными факторами, в частности, широким распространением так называемой стандартной модели Солнца.

Указанная модель является достаточно грубой в этом отношении, а само ее название неудачно, так как при этом существует намек на некоторую общность и универсальность использования в задачах физики Солнца. В действительности же, в стандартной модели фактически не рассматриваются тонкие детали строения Солнца, его атмосферы и проявления солнечной активности, которые связаны с отсутствием полного механического и термодинамического равновесия. Одним из таких проявлений и является СВ. Поэтому ответ на поставленный вопрос следует искать вне рамок стандартной модели.

Первоначальное теоретическое описание этого явления носило стационарный гидродинамический характер, затем были разработаны нестационарные и газокINETические модели, которые связывали происхождение СВ с существованием горячей короны Солнца и ее неоднородностей. Уже на этой ранней стадии исследований стало ясно, что процессы нагрева солнечной короны и ускорения СВ тесно связаны между собой уравнениями энергетического баланса. Дальнейшие исследования плазмы и электромагнитных полей в гелиосфере подтвердили сверхмагнитозвуковой характер СВ и необходимость тщательного рассмотрения роли магнитных полей и электрических токов в нестационарной динамике СВ. Появились магнитогидродинамические модели этого явления. Возникли вопросы о балансе массы, импульса и энергии вещества, о взаимосвязи с переносом излучения, генерацией электрических и магнитных полей в атмосфере Солнца и его недрах. Постепенно стал вырисовываться крайне сложный и многообразный характер проблемы, которая в настоящее время не имеет достаточно полного теоретического и экспериментального решения в отношении плазменной динамики. Цель данного сообщения – краткий анализ астрофизического и плазменно-динамического аспекта в проблеме происхождения СВ.

Солнечный ветер как глобальное астрофизическое явление

Турбулентный и ламинарный перенос энергии и вещества в солнечной атмосфере в среднем по пространству и времени происходит снизу вверх. Интересной и не до конца понятной особенностью такого переноса в хромосфере, переходной области и солнечной короне является то, что на некотором расстоянии от Солнца поток уходящего наружу вещества становится сверхмагнитозвуковым и покидает Солнце – формируется СВ. Принципиально нестационарная и турбулентная картина формирования этого потока в виде струйных течений не может быть достаточно полно и правильно описана в рамках ламинарных теорий, развивавшихся в недавнем прошлом.

Многие важные стороны этого сложного астрофизического и плазменно-физического явления к настоящему времени уже неплохо изучены благодаря многочисленным прямым измерениям на космических аппаратах и спутниках, а также разнообразной косвенной информации, дистанционным наблюдениям и теоретическим исследованиям [1]. Несмотря на быстро растущий объем и все более высокое качество этой

информации, до сих пор все еще отсутствует достаточно глубокое физическое понимание связей между наблюдаемыми явлениями и структурами на Солнце и в гелиосфере, заполненной СВ.

Можно рассматривать СВ с разных точек зрения: как глобальное эволюционное явление в физике звезд, как крупномасштабное долговременное квазистационарное течение или как динамический плазменный процесс с множеством нелинейно взаимодействующих между собой плазменных и электродинамических структур, находящихся в транзитном состоянии. Разграничение между квазистационарными и транзитными течениями, принимаемое обычно на основании безразмерного числа Струхала, носит условный характер, так как оно не инвариантно относительно выбора системы отсчета и наблюдателя.

Астрофизический и плазменный аспекты тесно связаны между собой. Мы попытаемся обозначить и выявить эти связи для лучшего понимания режимов слабой, умеренной и сильной турбулентности в динамике СВ на различных пространственно-временных масштабах. Говоря об астрофизическом аспекте проблемы, мы подразумеваем, в первую очередь, возможную роль СВ на ранней стадии эволюции Солнца как звезды. В настоящее время отсутствует ответ на самый, казалось бы, простой вопрос: когда и как произошел переход от накопления (аккреции) вещества на Солнце к его потере (диссипации)? Ответ на этот вопрос может оказаться принципиально важным для более глубокого понимания процессов звездобразования, космогонических сценариев и объяснения наблюдаемых закономерностей в распределении и составе вещества в Солнечной системе. Мы можем лишь уточнить постановку вопроса и возможные способы его решения, не имея в виду детальных разработок из-за отсутствия необходимых экспериментальных сведений на этот счет в существующей литературе. Итак, на какой стадии эволюции Солнца, каким образом мог возникнуть СВ как перманентное явление? Ответ на этот вопрос в известной нам литературе отсутствует (например, недавний обзор по вопросам формирования звезд [2]).

Для уверенного ответа на этот вопрос нужны наблюдательные данные, которые можно было бы интерпретировать в рамках теоретических сценариев и моделей на основе решения нестационарных гидродинамических, магнитогидродинамических и кинетических задач с зависящими от времени граничными и начальными условиями, отвечающими различным гипотезам об эволюции протосолнечного и оклосолнечного межзвездного облака, в котором формировалось и существует нынешнее Солнце. В результате такого рассмотрения в будущем могут стать более ясными допустимые и недопустимые предположения о возможных процессах, приведших к прекращению аккреции и смене ее СВ на определенной стадии эволюции Солнца.

Звезды-доноры и звезды-акцепторы межзвездного вещества

Солнце в настоящее время является донором вещества для ближнего межзвездного пространства. В ка-

ком состоянии находятся ближайшие звезды, являются они донорами или акцепторами – неизвестно. Возможно, что в настоящее время среди них существуют только доноры, также пополняющие межзвездную среду своим веществом, либо существуют как доноры, так и акцепторы. То, что на определенной стадии неравномерной эволюции могут соседствовать друг с другом звезды обоих типов – очевидная возможность, так же как и возможность преимущественного окружения того или иного типа. Все зависит от неоднородности начальных условий. Это открывает пути для рассмотренных разнообразных эволюционных сценариев с обменом вещества между компонентами звездной системы и межзвездного газа в ее окружении. Количество физически не запрещенных и не исследованных вариантов велико. В частности, мы не исключаем такие ситуации, когда звезды одинакового типа со сходной внутренней структурой и динамикой недр будут иметь различные атмосферы – убегающие, как в случае Солнца, или накапливающиеся из межзвездного газа и поглощающиеся поверхностью звезды. Экспериментальное обнаружение звезд, подобных Солнцу, но находящихся в стадии аккреции, несмотря на наличие у них горячей короны, представляло бы большой интерес для расширения наших представлений об эволюции звездных систем. Можно думать, что такие звезды существуют. Их внешние атмосферы могли бы приближенно описываться решениями Бонди [3] с отрицательным знаком радиальной скорости.

Наконец, интенсивность обмена веществом с окружающей межзвездной средой может быть относительно невелика по сравнению с потоками вещества, циркулирующими вверх-вниз вокруг звезды. Тогда мыслимы звезды с мощной турбосферой, простирающейся до межзвездной среды. Такие «астросферы» были бы совсем не похожи на нашу гелиосферу. В случае Солнца турбосфера «прижата» силой тяжести до высот короны, за пределами которой направленные вниз потоки вещества ничтожно малы по сравнению с уходящими от Солнца потоками.

Смена режимов аккреции и истечения на данной стадии эволюции определяется предыдущей эволюцией в сочетании с граничными условиями вблизи и вдали от звезды. Поэтому полный ответ на вопрос о том, почему существует СВ, должен содержать в себе упоминание не только о горячей короне с высоким давлением и о разреженной межзвездной среде с низким давлением, но и об эволюционном пути самой звезды, ее предыстории. В этом отношении гидродинамическая теория Паркера совершенно недостаточна для физического объяснения рассматриваемого явления. В теоретическом плане отсутствует ответ на вопрос: как следует изменить условия в межзвездной среде, чтобы современное Солнце стало акцептором? Существуют ли наблюдательные данные, которые могли бы пролить свет на то, как происходят переходы между состояниями накопления и потери вещества у звезд? Могут ли эти процессы быть осциллирующими или они монотонны?

Крупномасштабная и долговременная структура солнечного ветра

Основной вывод из современных исследований СВ

состоит в том, что СВ – нестационарное явление на всех мыслимых масштабах времени – от самых длительных изменений на шкале порядка времени существования Солнца (миллиарды лет) до самых быстрых измеряемых ныне вариаций (малые доли секунды), связанных с локальными плазменными и электродинамическими характеристиками. Все эти пространственные и временные изменения в конечном счете обусловлены эволюционным состоянием и динамикой Солнца, Солнечной системы, гелиосферы и межзвездной среды. К настоящему времени о СВ известно уже многое, но далеко не все необходимое для понимания и количественной оценки этих взаимосвязей, которые носят крайне сложный нелинейный и нелокальный характер. Об актуальности этой проблемы говорит тот факт, что на ее решение направлен целый ряд законченных, текущих и планируемых космических проектов и миссий, таких как SOHO, WIND, ACE, STEREO, SDO, «Solar Orbiter», «Solar Probe» и другие.

Взаимная связь между макроскопическими движениями, магнитными полями и нагревом солнечной короны также была осознана довольно давно, однако многие важные детали этой связи предстоит еще выяснить. Например, до сих пор в литературе иногда обсуждается вопрос – что является причиной, а что следствием на Солнце: вспышки или корональные выбросы массы? В действительности эти явления лишь сопутствуют друг другу, будучи связаны с одними и теми же источниками свободной энергии, выделяющейся в виде электромагнитного излучения (вспышка) или движения вещества (корональный выброс).

Плазменно-физический аспект проблемы происхождения СВ понимается ныне на основе современного уровня знаний в этой области в следующем более конкретном виде. Необходимо ответить на актуальные вопросы о нелокальной связи квазистационарных процессов переноса энергии излучения, потоков электромагнитной энергии и плазмы в энергетическом балансе солнечной атмосферы в среднем за большие интервалы времени, сравнимые с длительностью солнечных циклов, а также в нестационарных явлениях, связанных с гелиосферной динамикой и корональными выбросами массы различной длительности. Для этой цели используются адекватные кинетические и магнитогидродинамические модели, а также методы безразмерного масштабного анализа с привлечением всей совокупности экспериментальных данных о СВ и гелиосферном магнитном поле. Анализируются как самые новые, так и архивные материалы наблюдений на спутниках и космических аппаратах, а также данные, полученные косвенными наземными методами. Ожидаемый результат состоит в выяснении нерешенных вопросов о связи процессов в нижней атмосфере Солнца – фотосфере и хромосфере – с процессами в солнечной короне и гелиосфере.

Горячая корона, аккреция и солнечный ветер

В самых первых попытках объяснения существования горячей солнечной короны, предпринятых сразу после ее открытия, это явление связывали с

диссипацией энергии механических движений. В начале 1950-х гг. иногда предполагалась аккреция как источник нагрева короны для современного Солнца. Физическая идея казалась простой и привлекательной: разреженный межзвездный газ падает с ускорением в поле тяжести звезды, достигает ее атмосферы, тормозится и отдает свою кинетическую энергию, что приводит к нагреву короны. Основопологающие теоретические работы Бонди, выполненные в этом направлении для описания сферически симметричной аккреции [3], фактически создали математическую основу также и для сферически симметричной политропной модели СВ. Дело в том, что в результирующее уравнение Бернулли входит лишь квадрат скорости. Поэтому каждому решению с течением вещества к центру (отрицательный знак радиальной скорости) соответствует полностью аналогичное решение с течением от центра (положительный знак скорости) – задача вырождена. Любопытно отметить, что полная математическая идентичность семейства политропных решений для этих случаев не была отмечена, а критическое решение с положительным знаком радиальной скорости было выбрано для Солнца лишь через несколько лет в другой работе и другим автором [4], полностью повторившим те же самые математические выкладки, что и Бонди [3].

Аналогичная, но значительно более сложная и разнообразная ситуация имеет место для двухжидкостных моделей СВ и экзосферных моделей в бесстолкновительной кинетике. Число параметров и эффективных степеней свободы в кинетике значительно больше, чем в гидродинамике. В этом случае траектории всех частиц подразделяются на уходящие, приходящие и финитные. Последние, в принципе, могут пересекать или не пересекать поверхность Солнца, что создает дополнительный произвол в постановке граничных условий на характеристиках, не пересекающих заданную границу вокруг Солнца. Возникает возможность образования виртуальных электродов. Степень нелокальности условий и неоднозначности решений подобна той, что встречается в задачах газовой электроники, теории зондов Ленгмюра и других похожих задачах, подробно исследованных в литературе [5]. Если реализуется простейшая ситуация с отсутствием финитных частиц, не пересекающих поверхность Солнца, то удастся построить и проанализировать относительно простые и однозначные аналитические и численные решения, что было сделано ранее в ряде работ применительно к задачам описания СВ. Результаты показывают, что каждому «аккреционному» решению и в этой модели также соответствует «ветровое» решение. Вырождение существует и в этом случае. Оно устраняется лишь при учете столкновений и диссипации за счет излучения.

В простейшем случае непрерывных функций распределения в фазовом пространстве удастся при этом качественно и полуколичественно оценить величину испаряющегося потока плазмы с поверхности звезды наружу или поступающего потока извне при определенных граничных условиях. Таким способом можно получить для современного Солнца правильные порядки величин уносимой массы и энергии СВ. Скорость СВ на бесконечности при этом по порядку вели-

чины оказывается равной среднему геометрическому значению тепловых скоростей электронов и ионов в короне на уровне экзобазы. Для реального случая изотермической водородной плазмы это означает увеличение скорости испарения (или аккреции) по сравнению с нейтральным газом при той же кинетической температуре приблизительно в сорок раз (корень из отношения масс протонов и электронов). Этот эффект связан с особенностями движения плазмы в возникающем самосогласованном электрическом поле, ускоряющем ионы и тормозящем электроны таким образом, чтобы в плазме поддерживалось условие квазинейтральности и нигде на Солнце и вокруг него не накапливался большой электрический заряд. Плазма в этом смысле оказывается более «текучей» и легче ускоряемой по сравнению с нейтральным газом. Последствия этого явления для аккреции, по-видимому, в литературе не обсуждались.

Что касается роли магнитных полей, то их учет представляет значительные трудности. Действие электромагнитных сил представляется принципиально важным, так как они могут работать как вместе, так и против сил тяжести и сил газового давления. «Электромагнитные насосы» в короне Солнца могут прокачивать и прокачивают вещество в любом направлении. То, что на Солнце в настоящее время преобладает такая конструкция, при которой вещество выбрасывается из его атмосферы, – следствие эволюционного состояния. Вполне допустима и противоположная ситуация, когда свободная энергия звезды расходуется на приобретение новой массы из межзвездной среды. Весь вопрос в том, как устроены эти насосы, каковы МГД-режимы.

Нелинейная динамическая связь между процессами на Солнце и в солнечном ветре

Солнечный ветер существует потому, что на Солнце нет полного механического и термодинамического равновесия. Такой ответ, в общем, правильный, кратко резюмирует накопленные экспериментальные сведения и результаты имеющихся более частных теоретических моделей. Однако он проясняет лишь принципиальную физическую картину, но не ее детали, и не проясняет основные интересующие нас нерешенные вопросы: 1) на какой стадии эволюции Солнца и Солнечной системы возник СВ; 2) какова конкретная физическая природа неравновесных и нестационарных процессов, вовлеченных в формирование современного СВ и гелиосферы?

Эти два основных нерешенных вопроса представляются взаимосвязанными, важными и актуальными. Мы исходим при этом из современных общетеоретических положений о нелокальных и нелинейных взаимодействиях в открытой плазменной и электродинамической системе, какой является Солнце и гелиосфера в их совокупности. Предыдущими исследованиями установлена тесная причинно-следственная связь между структурами и процессами в этой системе на различных пространственно-временных масштабах.

Согласно современным представлениям, Солнце и Солнечная система сформировались из некоторого

протосолнечного вещества на шкале времени порядка миллиардов лет. Современная теория формирования Солнца и Солнечной системы в настоящее время находится в сложном положении, в особенности в связи с открытием больших планет типа Юпитера на малых расстояниях вокруг многих звезд. Планетная космогония в ближайшее время, по-видимому, должна обогатиться новыми физическими идеями и сценариями, которые позволят ей дать объяснение новым неожиданным фактам, представляющим ныне большой астрофизический интерес.

Обсуждение

Существует точка зрения, согласно которой конечным источником энергии всей цепочки активности (переменности) у Солнца и сходных с ним звезд является вращение звезды [6]. Действительно, имеющиеся, пока еще не очень многочисленные наблюдения как будто указывают, что в ряде случаев чем больше вращение, тем больше активность. Однако этот принцип выполняется не во всех случаях – имеется значительный разброс данных. Кроме того, существование такой статистической зависимости само по себе еще не может служить доказательством причинной связи, поэтому, а также исходя из общих физических соображений можно высказать предположение, что дело не только во вращении – причина наблюдаемой солнечной и звездной активности связана с неравновесными процессами в недрах звезды. В этом случае было бы неудивительно обнаружить звездные объекты со слабым вращением или даже вовсе без него, но с заметными проявлениями всех разновидностей активности, в том числе горячих корон с истечением плазмы. Не исключено, что дело обстоит именно таким образом, и подобные звездные объекты могут быть обнаружены при более тщательном анализе уже имеющихся и новых наблюдений.

Современный темп потери вещества Солнца на испускание СВ составляет порядка $2 \cdot 10^{18}$ г/с, т. е. порядка 10^{-14} массы Солнца в год. Эта величина ныне ничтожно мала в общем балансе массы на современном этапе эволюции Солнца как звезды. При современной массе около $2 \cdot 10^{33}$ г и предполагаемом возрасте порядка 10^{10} лет основные потери массы покоя Солнца связаны с испусканием света, а не СВ. Однако подобные оценки не следует экстраполировать в очень далекое прошлое и будущее.

Область пространства, занятую потоками плазмы от Солнца, ныне называют гелиосферой. Согласно современным представлениям, она имеет кометоподобную форму с вытянутым хвостом в направлении течения межзвездного газа. Размеры и форма точно не известны, но в качестве характерного масштаба до точки остановки СВ давлением межзвездной среды обычно принимают величину порядка сотни астрономических единиц. Ясно, что течение плазмы в пограничных с межзвездной средой участках и в хвосте должно носить турбулентный характер, так же как и в самом СВ. Никаких постоянных и неподвижных границ здесь ожидать не приходится вследствие больших запасов свободной энергии в неоднородных и переменных потоках плазмы с магнитными полями.

Достаточно детальное и корректное теоретическое описание такой ситуации затруднительно. В настоящее время оно отсутствует, имеются лишь некоторые квазистационарные и ламинарные модели, разработанные в целом ряде случаев весьма детально. О том, каким образом и насколько интенсивно происходит здесь перемешивание межзвездного вещества с веществом солнечного происхождения, практически ничего не известно из наблюдений, а существующие современные гипотезы об отсутствии такого перемешивания вряд ли могут быть сколько-нибудь надежно обоснованы теоретически.

Мы полагаем, что должна существовать буферная зона, где такое перемешивание имеет место. Вещество СВ проникает в виде отдельных струй, перемешивается и становится плохо различимой частью межзвездного газа. В этом случае из-за процессов турбулентного перемешивания уже трудно говорить о происхождении этого вещества. Образно можно сказать, что потоки СВ как бы «размешиваются и растворяются» в некотором межзвездном резервуаре, содержащем гораздо большую массу газа, протекающего через него в виде межзвездного ветра.

Ячейка пространства с характерным размером порядка расстояния между ближайшими к Солнцу звездами составляет несколько световых лет, т. е. 10^{18} – 10^{19} см. В такой ячейке содержится 10^{54} – 10^{57} частиц при плотности межзвездного газа порядка 1 см^{-3} , что может быть сравнимо, а, скорее всего, меньше числа частиц, из которых состоит Солнце. Обновление вещества в такой ячейке за счет межзвездного ветра со скоростью несколько десятков километров в секунду происходит за десятки тысяч лет. Роль СВ в этом балансе ничтожна. Вещество СВ постоянно расширяется и поступает из гелиосферы в межзвездную среду в виде относительно небольшой по концентрации примеси. Оно полностью смешивается с межзвездным ветром благодаря турбулентной и молекулярной диффузии уже на гораздо меньших расстояниях, чем расстояние между звездами. Межзвездная среда, так или иначе, поглощает в себе частицы СВ. Даже очень приблизительная оценка необходимого для этого пути и времени перемешивания затруднительна. Она не обладает устойчивостью, что вообще свойственно задачам об увлечении потока из слабого источника более мощным течением.

Заключение

Проблема происхождения СВ остается не до конца решенной и даже не очень четко сформулированной, хотя само явление было обнаружено довольно давно и интенсивно исследуется как экспериментально, так и теоретически на протяжении десятков лет. Эта проблема имеет два аспекта: астрофизический и плазменно-физический. Существенный прогресс в обоих направлениях возможен только при сочетании новых наблюдений с теорией – вместе они могли бы дать отсутствующие ныне сведения и физические представления о природе этого интересного и важного явления.

Работа поддержана грантами РФФИ 07-02-00147, 06-05-64500, INTAS 03-51-6202 и Междисциплинарным научным проектом МГУ. Она является так-

же частью исследований по программам фундаментальных исследований Президиума РАН «Происхождение и эволюция звезд и галактик» (П-04); «Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля» (П16, часть 3) и ОФН РАН «Плазменные процессы в Солнечной системе» (ОФН-16).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веселовский И.С. Солнечный ветер и гелиосферное магнитное поле // Модель космоса. Научно-информационное издание / Под ред. Панасюка М.И., Новикова Л.С. Т. 1. Физические условия в космическом пространстве. М.: КДУ, 2007. С. 314–359.
2. McKee C.F., Ostriker E.C. Theory of star formation // Annual Review of Astronomy & Astrophysics. 2007. V. 45, Is. 1. P. 565–687.
3. Bondi H. On spherically symmetric accretion // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1952. V. 112. P. 195–204.
4. Parker E.N. Dynamics of interplanetary gas and magnetic fields // Astrophys. J. 1958. V. 128. P. 664–676.
5. Альперт Я.Л., Гуревич А.В., Питаевский Л.П. Движение искусственных спутников в разреженной плазме. М.: Физматгиз, 1964.
6. Гершберг Р.Е. Активность солнечного типа звезд главной последовательности. Одесса: Астропринт, 2002. С. 12.

*Научно-исследовательский институт ядерной физики им.
Д.В. Скобельцына, МГУ, Москва
Институт космических исследований РАН, Москва*