

УДК 523.62-726

## КИНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ МЕЖЗВЕЗДНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ: АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО РАССЕЯННОМУ ЛАЙМАН-АЛЬФА ИЗЛУЧЕНИЮ

© 2011 г.

*О.А. Катушкина*

Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова  
Институт космических исследований РАН, Москва

okat@iki.rssi.ru

*Поступила в редакцию 24.08.2011*

Исследуется влияние кинетических эффектов в распределении межзвездных атомов водорода внутри гелиосферы на спектральные свойства рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения. На основе разработанной кинетической модели вычисляется распределение межзвездных атомов по пространству и скоростям. Проводится анализ экспериментальных данных, полученных на космическом аппарате SOHO/SWAN.

*Ключевые слова:* гелиосфера, межзвездные атомы водорода, рассеянное Лайман-альфа излучение.

### Введение

При взаимодействии солнечного ветра с локальной межзвездной средой (ЛМС) образуется сложная газодинамическая структура гелиосферного ударного слоя, состоящая из двух (гелиосферной и внешней) ударных волн и контактной поверхности (гелиопаузы), отделяющей плазму солнечного ветра от плазмы межзвездной среды. Однако межзвездные атомы водорода, которые являются основной компонентой ЛМС, имеют большие длины свободного пробега, сравнимые с характерным размером гелиосферного ударного слоя. Поэтому атомы водорода относительно свободно проникают из ЛМС внутрь гелиосферы, и часть из них попадает в окрестность Солнца, где они измеряются с помощью прямых или косвенных методов на различных космических аппаратах (КА). Во время своего движения через гелиосферный ударный слой атомы водорода взаимодействуют с протонами посредством процесса перезарядки ( $H+H^+ \leftrightarrow H^++H$ ). При этом происходит обмен электроном между атомом и протоном. В результате рождается новый (вторичный) атом, имеющий скорость начального протона, а также новый протон, имеющий скорость начального атома. Распределение вторичных атомов водорода в гелиосфере зависит от свойств плазмы в области гелиосферного ударного слоя. Таким образом, проникая внутрь гелиосферы, атомы водорода несут в своем распределении ценную информацию как о параметрах локальной межзвездной среды, так и о структуре границы гелиосферы.

Основным косвенным методом определения

параметров атомов водорода в гелиосфере является измерение рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения (на КА SOHO, HST, Voyager 1,2, New Horizons и др.). Солнечные фотоны линии Лайман-альфа (длина волны в центре линии составляет 121.6 нм) рассеиваются на межзвездных атомах водорода, оказавшихся в гелиосфере, причем сечение рассеяния пропорционально проекции функции распределения атомов водорода на направление луча зрения наблюдателя. Поэтому спектр рассеянного излучения напрямую зависит от пространственного и скоростного распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере. В [1] показано, что процесс перезарядки в области гелиосферного ударного слоя приводит к изменению функции распределения атомов водорода по сравнению с их распределением в ЛМС. В частности, на расстоянии 90 а.е. от Солнца (т.е. вблизи гелиосферной ударной волны) функция распределения существенно отличается от максвелловской. В дальнейшем в [2] было установлено, что немаксвелловский характер функции распределения атомов водорода вдали от Солнца оказывает значительное влияние на параметры атомов (особенно на кинетическую температуру) на орбите Земли. Цель настоящей работы – теоретическое исследование влияния немаксвелловских эффектов в распределении атомов, связанных с границей гелиосферы, на параметры рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения, измеряемого на орбите Земли. Такое исследование, а также сравнение с имеющимися экспериментальными данными позволит извлечь дополнительную информацию о структуре и свойствах границы

гелиосферы из многочисленных экспериментальных данных по рассеянному Лайман-альфа излучению.

### Постановка задачи

Внутри гелиосферы на атом водорода действуют силы гравитационного притяжения Солнца  $\mathbf{F}_g$  и радиационного отталкивания  $\mathbf{F}_{rad}$ . Эти силы противоположны и пропорциональны  $1/r^2$ , где  $r$  – гелиоцентрическое расстояние. Введем безразмерный параметр  $\mu = |\mathbf{F}_g|/|\mathbf{F}_{rad}|$ , определяющий баланс между силами гравитационного притяжения и радиационного отталкивания, тогда результирующая сила, действующая на единицу массы, представляется в следующем виде:

$$\mathbf{F} = (1 - \mu)\mathbf{F}_g = -\frac{(1 - \mu)GM_s}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r},$$

где  $G$  – гравитационная постоянная,  $M_s$  – масса Солнца,  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки. В общем случае параметр  $\mu$  зависит от времени, гелиошироты ( $\lambda$ ), а также от радиальной компоненты скорости  $v_r$ . Функция распределения атомов водорода по скоростям  $f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t)$ , находится из решения кинетического уравнения:

$$\frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t)}{\partial t} + \mathbf{w} \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t)}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{F}(r, t, \lambda) \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t)}{\partial \mathbf{w}} = -\beta(r, t, \lambda)f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t). \quad (1)$$

Правая часть уравнения (1) выражает потерю частиц за счет перезарядки и фотоионизации. Коэффициент  $\beta(r, t, \lambda)$  представляет собой эффективную частоту ионизации и равен сумме частот ионизаций двух рассматриваемых процессов. Задача имеет нестационарный и трехмерный характер, поскольку параметры солнечного ветра и солнечной ионизации (а именно, коэффициенты  $\mu$  и  $\beta$ ) существенно меняются в течение 11-летнего цикла солнечной активности, а также зависят от гелиошироты. При построении граничного условия для функции распределения атомов на расстоянии 90 а.е. от Солнца нужно учитывать глобальные эффекты, связанные с изменением функции распределения межзвездных атомов при их прохождении через область гелиосферного ударного слоя. Поэтому в граничном условии были использованы результаты самосогласованной кинетико-газодинамической модели области взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой [3], а также некоторые ее более поздние модификации. Описанная кинетическая модель позволяет эффективно находить детальное распределение атомов водорода в гелиосфере по пространству и скоростям с учетом всех основных физических процессов.

### Результаты

На основе найденных распределений атомов водорода в гелиосфере были вычислены параметры рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения, измеряемого на орбите Земли в радиальных направлениях. Для выявления роли глобальных эффектов, связанных с границей гелиосферы, было проведено сравнение полученных результатов с результатами более простых моделей, не учитывающих (или учитывающих не полностью) немаксвелловский характер функции распределения атомов на расстоянии 90 а.е. от Солнца. Сравнение показало, что наиболее чувствительной к кинетическим свойствам распределения атомов характеристикой является ширина спектра рассеянного излучения. Вид зависимости ширины спектра от направления луча зрения наблюдателя качественным образом меняется при изменении функции распределения атомов вдали от Солнца. При этом ширина линии спектра рассеянного излучения измеряется на КА SOHO/SWAN. Это обстоятельство позволяет использовать многочисленные измерения Лайман-альфа излучения как дополнительный способ диагностики свойств границы гелиосферы.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №10-02-01316-а, 10-02-93113-НЦНИЛ-а), а также при поддержке фонда «Династия».*

### Список литературы

1. Izmodenov V.V., Gruntman M., Malama Yu.G. // J. Geophys. Research. 2001. V. 106. Is. A6. P. 10681–10690.
2. Катушкина О.А., Измоленов В.В. // Письма в Астрономич. ж. 2010. Т. 36, №4. С. 310–319.
3. Baranov V.B., Malama Y.G. // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 15157–15163.

---

**KINETIC EFFECTS IN THE DISTRIBUTION OF THE INTERSTELLAR HYDROGEN ATOMS  
IN THE INTERPLANETARY SPACE: ANALYSIS OF THE DATA ON THE BACKSCATTERED  
LY-ALPHA RADIATION**

*O.A. Katushkina*

The influence of the kinetic effects in hydrogen distribution inside the heliosphere on spectral properties of the backscattered solar Ly-alpha radiation is studied. Spatial and velocity distributions of the interstellar hydrogen atoms are calculated based on the newly developed kinetic model. The experimental data obtained by SOHO/SWAN spacecraft is analyzed.

*Keywords:* heliosphere, interstellar hydrogen, backscattered Ly-alpha radiation.