

СЕПАРАЦИЯ α - ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Предложена модель, объясняющая причины аномально высокой концентрации α -частиц, наблюдаемой в плазме солнечных вспышек.

Известно, что солнечные космические лучи состоят в основном из протонов с небольшой долей ядер гелия (α -частиц) и совсем малой долей иных элементов. Однако в корональных выбросах массы (КВМ) доля α -частиц существенно возрастает и достигает 10–15% [1]. Изучение потоков корпускулярных частиц, более известных как «солнечный ветер», с помощью космических аппаратов показало наличие у солнечного ветра определенной структуры. В межпланетной среде могут одновременно распространяться несколько различных типов течений солнечного ветра, характеризующихся набором параметров, которые внутри каждого из течений меняются сравнительно мало или определенным образом [2, 3]. Различают квазистационарные и возмущенные течения. В любом случае концентрация заряженных частиц в течениях существенно превышает среднюю концентрацию частиц солнечного ветра.

Регулярные наблюдения концентрации α -частиц в солнечном ветре ведутся с 1962 г., начиная с космического эксперимента на спутнике

Mariner 2 [4]. Вариации изменения доли α -частиц в общем излучении Солнца на сегодняшний день не имеют полного объяснения. В 1970–1974 гг. [5, 6] Робинсоном и другими по данным наблюдений со спутника *Vela 3* была обнаружена *положительная корреляция между концентрацией α -частиц и скоростью солнечного ветра* и определены коэффициенты линейной регрессии этих параметров. Было выдвинуто несколько гипотез, объясняющих эту зависимость:

1. В цикле солнечной активности увеличивается среднее число α -частиц в солнечном ветре в зависимости от числа пятен и независимо от скорости солнечного ветра, т. е. возрастает член B линейной функции $n_{\alpha}/n_p = (Av_p + B)$.

2. В максимуме солнечной активности увеличивается число событий, в которых наблюдается более высокая концентрация α -частиц (возрастает коэффициент A).

Вторая гипотеза более распространена, и в работе [7] была выявлена линейная зависимость концентрации α -частиц от скорости. На основании этих данных выведена формула связи кон-

центрации α -частиц с температурой солнечного ветра:

$$\frac{n_\alpha}{n_p} 10^2 = 0,28(\sqrt{T_p [10^3 K]} + B). \quad (1)$$

Других оценок связи концентрации α -частиц и скорости их движения (температурой) опубликовано не было, и Ю.И.Ермолаев [8] делает вывод, что содержание гелия зависит от механизма выхода плазмы из Солнца в межпланетное пространство и/или от его содержания в тех областях солнечной атмосферы, откуда идут наблюдаемые частицы. Для достоверного выяснения связи содержания α -частиц с параметрами их движения он считает необходимым более детальное изучение распределения кинетической температуры и концентрации частиц в потоках.

Вместе с тем был обойден вниманием один из механизмов, способный объяснить ряд вариаций доли α -частиц в составе солнечного ветра. Выброс массы из атмосферы Солнца в период солнечной вспышки представляет собой некий «сгусток плазмы», движущийся с существенно более высокой скоростью, чем обычный солнечный ветер. Фактически более плотная плазма очень быстро попадает в среду с меньшей плотностью, что приводит к началу процесса амбиполярной диффузии. При этом диффузия более легких протонов будет происходить быстрее, чем диффузия более тяжелых α -частиц. Известно, что соотношение скоростей (коэффициентов) диффузии протонов и α -частиц (при условии, что их концентрация значительно превышает концентрацию ионов в окружающей среде), называемое «идеальным коэффициентом разделения», обратно пропорционально корням квадратным из их атомных весов

$$\frac{D_p}{D_\alpha} = \sqrt{\frac{m_\alpha}{m_p}} = 1,993. \quad (2)$$

Использование данного эффекта для разделения газовых смесей было предложено Релеем еще в конце XIX в. Поскольку, что плотность плазмы солнечных вспышек на орбите Земли составляет около 100 ионов на кубический сантиметр, а средняя плотность плазмы солнечного ветра – около 6 ионов, процесс разделения ионов за счет газовой диффузии должен идти на всем протяжении от поверхности Солнца до орбиты Земли.

За время, за которое плазма достигает орбиты Земли, ее концентрация падает с $n \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (для хромосферных вспышек) до $\sim 10^2 \text{ см}^{-3}$. Исходя из известных данных о плотности плазмы в момент солнечной вспышки и ее плотности на орбите Земли, можно рассчитать коэффициент ее обогащения α -частицами. Этот процесс идет неравномерно, но соблюдаются некоторые закономерности. Так, в работе [9] было показано, что в процессе расширения в пространстве локализованного плазменного сгустка функция распределения ионов со временем сохраняет подобие их первоначальному распределению.

Предположим, что в первом приближении первоначальный закон распределения ионов близок к гауссову:

$$n(x) = \frac{A}{b\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2b^2}}, \quad (3)$$

где A – нормирующий множитель пропорциональный начальной концентрации ионов; b – зависящий от времени параметр, характеризующий ширину распределения (линейные размеры плазменного образования).

Так как скорость изменения концентрации ионов в плазме подчиняется второму закону Фика

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2},$$

то, проведя дифференцирование

левых и правых частей этого уравнения, в соответствии с [10] получим выражение для определения коэффициента диффузии $D = b \frac{\partial b}{\partial t}$ и выражение для скорости изменения концентрации ионов

$$\frac{dn}{dt} = D \frac{A}{b^3 \sqrt{2\pi}}. \quad (4)$$

Поскольку у протонов и α -частиц разные коэффициенты диффузии и начальные концентрации, отношение скоростей изменения концентрации α -частиц и протонов можно выразить уравнением

$$\frac{dn_\alpha}{dn_p} = \frac{D_\alpha}{D_p} \frac{A_\alpha}{A_p} \frac{b_p^3}{b_\alpha^3}, \quad (5)$$

где коэффициенты α и p показывают принадлежность параметров к распределению α -частиц и протонов соответственно.

В данной формуле первый множитель является константой и определен выражением (2). Второй множитель фактически представляет собой соотношение концентраций α -частиц и протонов в начальный момент времени, и его можно принять равным концентрации ионов гелия по отношению к протонам в солнечном веществе в среднем, т. е. около 0,04. Значит, изменение концентраций должно происходить пропорционально изменению объемов плазменного облака. В начальный момент расширения, когда параметры b для протонов и α -частиц практически равны, скорость уменьшения концентрации будет определяться начальным соотношением ионов и протонов, и она начнет уменьшаться у протонов в 1,993 раза (2) быстрее, чем у α -частиц.

Коэффициенты диффузии являются параметрами, изменяющимися во времени, как и геометрические размеры плазменного образования, поэтому прямое решение этого уравнения затруднительно. Для аналитического решения задачи о динамике изменения относительной концентрации различных компонентов плазмы во времени можно воспользоваться методом, предложенным в [11] для решения задачи о взаимной диффузии смеси из нескольких газов, находящихся в двух сосудах, объединенных перемычкой. Аналитическое выражение для коэффициента диффузии каждого из компонентов смеси выглядит следующим образом:

$$D_i^{\text{эф}} = \frac{L_{\text{эф}}}{St} \frac{1}{\left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2}\right)} \ln \frac{\Delta n_{i0}}{\Delta n_{it}}. \quad (6)$$

Здесь $L_{\text{эф}}$ и S – длина и площадь диффузного канала; V_1 и V_2 – объемы сообщающихся сосудов; Δn_{i0} и Δn_{it} – разности концентраций компонентов смеси газов в смежных сосудах в начальный и конечный моменты времени; t – время протекания процесса.

Сделаем следующие допущения. Будем считать объемом первого сосуда первоначальный объем плазменного выброса, а объемом второго – бесконечность. Так как разница концентраций ионов в плазменном выбросе существенно превышает концентрацию ионов в солнечном ветре (по крайней мере, до орбиты Земли включительно), то можно перейти от разницы концент-

раций к собственно концентрациям протонов и α -частиц. Тогда уравнение примет вид

$$D_i^{\text{эф}} = \frac{L_{\text{эф}}}{St} V_1 \ln \frac{n_{i0}}{n_{it}}. \quad (7)$$

Выразив соотношение постоянных параметров через единый коэффициент пропорциональности $\frac{L_{\text{эф}} V_1}{S} = K$ и преобразовав уравнение (7),

получим

$$n_{it} = n_{i0} e^{\frac{D_i t}{K}}. \quad (8)$$

Тогда изменение соотношения концентраций α -частиц и протонов во времени можно описать выражением

$$\left(\frac{n_{\alpha}}{n_p}\right)_t = \left(\frac{n_{\alpha}}{n_p}\right)_0 e^{\frac{D_{\alpha} - D_p}{K} t}. \quad (9)$$

Выразив коэффициент диффузии α -частиц через коэффициент диффузии протонов, а время достижения вспышки орбиты Земли – через скорость плазменного образования ($t=R/v$), получим

$$\left(\frac{n_{\alpha}}{n_p}\right)_t / \left(\frac{n_{\alpha}}{n_p}\right)_0 \approx e^{\frac{D_p R}{2K v}}. \quad (10)$$

Необходимо учитывать то, что коэффициент диффузии сам по себе является отрицательной величиной. Таким образом, за счет процессов газовой диффузии относительная концентрация более тяжелых частиц должна со временем возрастать. Приняв, что коэффициенты диффузии со временем меняются не очень значительно, так как вплоть до орбиты Земли сохраняется значительное превышение концентрации вещества во вспышечном образовании относительно средней для солнечного ветра, можно достаточно просто рассчитать коэффициент K .

Средний коэффициент диффузии протонов $2 \cdot 10^{13} \text{ м}^2/\text{с}$. Зафиксированное в экспериментах возрастание концентрации α -частиц около 4, зна-

чит, $-\frac{D_p R}{2K v} = \ln 4 = 1,386$. При скорости вспышечного плазменного образования около 1000 км/с коэффициент пропорциональности $K \approx 1,1 \cdot 10^{21} \text{ м}^2$.

Работа выполнена по собственной инициативе в ходе реализации программ фундаментальных исследований (шифры Ф.0351; Ф.0264).

ЛИТЕРАТУРА

1. Застенкер Г.Н., Зеленый Л.М. Солнечные магнитные облака атакуют Землю // <http://www.roscosmos.ru>, 2004 г.
2. Паркер Е. Динамические процессы в межпланетной среде // Солнечный ветер. М., 1968.
3. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. М., 1976.
4. Neugebauer M., Snyder C.W. The mission of Mariner: planetary observation. // Solar plasma experiment. Science, 1962. V.138. P.1095.
5. Neugebauer M., Snyder C.W. Mariner2 observation of the solarwind // 1. Average Properties, J.Geophys.Res. 1966. V.71. P. 4469.
6. Richardson I.G., Berdichevsky D., Desch M.D., Farrugia C.J., Solar cycle variation of low density solarwind during more than three solar cycles // Geophys.Res.Lett. 2000. V. 27. N23. P.3761.
7. Ogilvie K.W. Helium abundance variations // J.Geophys.Res., 1972. V.77. P.4227.
8. Ермолаев Ю.И. Экспериментальное изучение крупномасштабной структуры солнечного ветра: Дис. ...докт. физ.-мат. наук. М., 2002. 306 с.
9. Дорожкина Д.С., Семенов В.Е. Точное решение задачи о квазинейтральном расширении в вакуум локализо-

ванной бесстолкновительной плазмы с холодными ионами // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67, вып. 8. С. 543-547.

10. Ганжерли Н.М., Маурер И.А., Гранский П.В. Исследование массопереноса белков методом голографической спектроскопии реального времени // Журнал технической физики. 2004. Т. 74, вып.1. С. 68-71.

11. Косов, В.Н., Жаврин Ю.И., Поярков И.В. О проведении экспериментов по изучению диффузионного процесса в многокомпонентных газовых смесях // Химия и компьютерное моделирование. Бултеровские сообщения. Приложение к спецвыпуску. 2002. № 10. С. 184-185.

Резюме

Күн жарқылдарының плазмасында байқалатын альфа-бөлшектердің концентрациясының шамадан тыс жоғары болуының себебін түсіндіретін модель ұсынылған.

Summary

It is suggested a model, which explains reasons for anomalous high concentration of alfa-particles observed in the solar flare plasma.

Институт ионосферы МОН РК,
г. Алматы