

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XVIII

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

4

МОСКВА · 1980

*М. А. Грунтман***НЕЙТРАЛЬНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
У ОРБИТЫ ЗЕМЛИ**

Интерес к характеристикам нейтральной составляющей солнечного ветра у орбиты Земли обусловлен способностью составляющих ее достаточно энергичных (~ 1 кэВ) нейтральных атомов водорода свободно проникать в магнитосферу Земли и оказывать определенное влияние на состояние ионосферы и верхней атмосферы. За счет процессов рекомбинации в расширяющейся солнечной короне плотность потока нейтральных атомов может достигать, по оценкам, нескольких сотен частиц на квадратный сантиметр в секунду на расстоянии 1 а.е. от Солнца [1]. Другим источником нейтральных частиц в солнечном ветре является перезарядка протонов солнечного ветра на нейтральных атомах межзвездного газа (МЗГ), состоящего, как полагают, примерно на 90% из атомов водорода и на 10% из атомов гелия и движущегося со скоростью ~ 20 км/с относительно Солнечной системы. При определении характеристик потока атомов водорода в солнечном ветре [1, 2] обычно считалось, что вклад, даваемый в этот поток перезарядкой на межзвездном гелии, пренебрежимо мал по сравнению с перезарядкой на межзвездном водороде. Ниже будут представлены показывающие несправедливость этого предположения результаты расчета обусловленной перезарядкой на МЗГ плотности потока атомов в зависимости от положения наблюдателя на орбите Земли и температуры невозмущенного МЗГ T_0 .

Движущиеся под действием сил солнечного гравитационного притяжения и радиационного отталкивания атомы МЗГ ионизируются солнечным излучением и перезаряжаются на протонах солнечного ветра. Значения констант скоростей и сечений этих процессов взяты из [3]. Следует, однако, заметить, что имеющиеся в литературе значения сечения перезарядки протонов на атомах гелия противоречивы (см., например, [4, 6]). Вектор скорости невозмущенного МЗГ предполагается коллинеар-

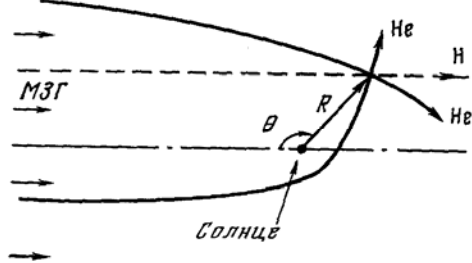


Рис. 1

Рис. 1. Втекание в Солнечную систему атомов МЗГ

Сплошные линии — траектории потоков межзвездного гелия (гравитационная сила много больше силы радиационного отталкивания), штриховая — межзвездного водорода (силы уравновешены)

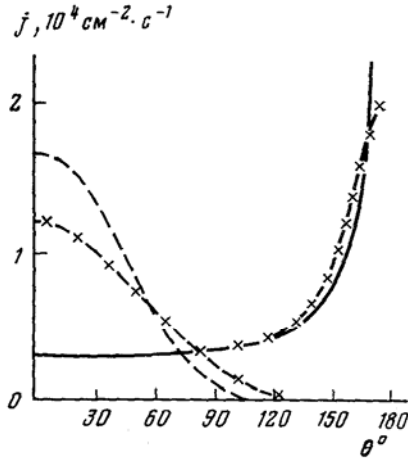


Рис. 2

Рис. 2. Зависимости плотностей потоков нейтральных атомов водорода в солнечном ветре на орбите Земли, полученных перезарядкой на межзвездном водороде (штриховые линии) и межзвездном гелии (сплошные линии) при температуре невозмущенного МЗГ $T_0=100$ и $10\,000$ К (выделены крестиками). Для гелия при $\theta < 100^\circ$ величина потока практически не зависит от T_0

ным плоскости эклиптики, а плотности потоков солнечного ветра и солнечного излучения — спадающими с расстоянием от Солнца по закону $1/R^2$ и не зависящими от времени. Эти упрощающие предположения не вносят существенной ошибки в количественное определение величины потока и тем более не скажутся на качественной зависимости его параметров.

При условии относительной малости образующейся нейтральной компоненты плотность потока атомов водорода в солнечном ветре на орбите Земли в зависимости от положения на орбите равна

$$j(\theta) = N_0 V_{\text{св}} \int_{R_0}^{R_0} P(R) (n^{\text{H}}(R, \theta) \sigma_{\text{H}^+ - \text{H}} + n^{\text{He}}(R, \theta) \sigma_{\text{H}^+ - \text{He}}) dR,$$

где $N_0=5 \text{ см}^{-3}$ — плотность протонов солнечного ветра на орбите Земли, $V_{\text{св}}=400 \text{ км/с}$ — скорость солнечного ветра, R_0 — радиус Солнца, R_0 — радиус орбиты Земли, $n^{\text{H}}(R, \theta)$, $n^{\text{He}}(R, \theta)$ — плотности атомов H и He в МЗГ в точке с координатами (R, θ) , $\sigma_{\text{H}^+ - \text{H}}=2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ — сечение перезарядки протонов на водороде и $\sigma_{\text{H}^+ - \text{He}}=0,15 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ — сечение перезарядки протонов на межзвездном гелии. $P(R)$ — вероятность образовавшихся путем перезарядки на расстоянии R от Солнца быстрых атомов водорода долететь до орбиты Земли, не погибнув в поле ультрафиолетового излучения Солнца. Угол θ отсчитывается от направления, антипараллельного вектору скорости невозмущенного МЗГ V_0 (рис. 1).

Заметим, что рассматриваемые плотности потока обладают симметрией $j(\theta) = j(2\pi - \theta)$. При температуре невозмущенного МЗГ $T_0=0$ метод расчета $n^{\text{He}}(R, \theta)$, а для межзвездного гелия сила радиационного отталкивания пренебрежимо мала по сравнению с гравитационной силой, неоднократно обсуждался в литературе (например, [5]). Для водорода можно считать, что радиационная и гравитационная силы уравновешивают друг друга, и траектория частиц — прямые, что существенно упрощает расчет. Расчет для случая с $T_0 \neq 0$ проводился численным интегрированием в предположении максвелловского распределения по скоростям частиц МЗГ. Так как величина рассматриваемого потока пропорциональна плотности невозмущенного МЗГ, то, полагая плотность водорода $n_0^{\text{H}}=1 \text{ см}^{-3}$, получающиеся значения $j(\theta)$ можно рассматривать как нормированные на величину n_0^{H} .

На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости плотности потока атомов водорода в солнечном ветре на орбите Земли в зависимости от положения на орбите наблюдателя, возникающие при перезарядке на межзвездных водороде и гелии при различных температурах невозмущенного МЗГ. Суммой этих вкладов и будет определяться нейтральная компонента солнечного ветра, обусловленная пере-

зарядкой на атомах МЗГ. Видно, что не учитывавшийся ранее вклад, получаемый перезарядкой на межзвездном гелии, составляет в области малых значений θ примерно пятую часть суммарного потока, а в области больших значений полностью определяет его величину, достигая при $\theta=180^\circ$ весьма больших значений, что обусловлено гравитационной фокусировкой межзвездного гелия в эту область. При увеличении температуры МЗГ с 100 до 10 000 К величина потока при $\theta=0^\circ$ уменьшается на $\sim 30\%$. Так же уменьшается и острота пика при $\theta=180^\circ$. К уменьшению этого пика приведет и неколлинеарность вектора скорости МЗГ V_0 плоскости эклиптики.

Энергия атомов водорода, полученных перезарядкой на межзвездном гелии, будет на ~ 10 эВ меньше энергии атомов водорода, образованных перезарядкой на межзвездном водороде, что обусловлено нерезонансным характером процесса в первом случае. Этот же эффект приведет и к увеличению температуры потока, так как нерезонансная перезарядка сопровождается относительно большим отклонением сталкивающихся частиц.

Представленные результаты расчета характеристик нейтральной компоненты солнечного ветра на орбите Земли дают возможность более точно оценить его влияние на состояние ионосферы и верхней атмосферы Земли и, кроме того, указывают на возможность косвенного определения характеристик МЗГ.

Дата поступления
16 апреля 1979 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. E. Holzer. Rev. Geophys. Space Sci., 15, 467, 1977.
2. P. W. Blum, H. J. Fahr. Astron. and Astrophys., 4, 280, 1970.
3. W. I. Azford. Solar Wind, NASA SP-308, 1973, p. 609.
4. C. Benoit-Garzon. L'univ. de Paris, Thèse, 1976.
5. H. J. Fahr. Astrophys. Space Sci., 2, 474, 1968.
6. J. S. Risley, R. D. Britt. 11th Int. Conf. on Phys. of El. and At. Coll. Abstracts of Contributed Papers, Kyoto, 1979, p. 478.