

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ГЕОМАГНЕТИЗМ
И
АЭРОНОМИЯ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

6

МОСКВА • 1987

К. И. Трингасов
об авторе
28.04.68

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 523.745

ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ПО УГЛОВОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ИОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, ПОЛУЧЕННЫХ НА «ПИОНЕРЕ-VI»

М. З. Хохлов

Недавно [1] с помощью электростатического анализатора заряженных частиц, установленного на космической ракете «Пионер-VI», были получены довольно детальные сведения об угловом распределении ионов солнечного ветра.

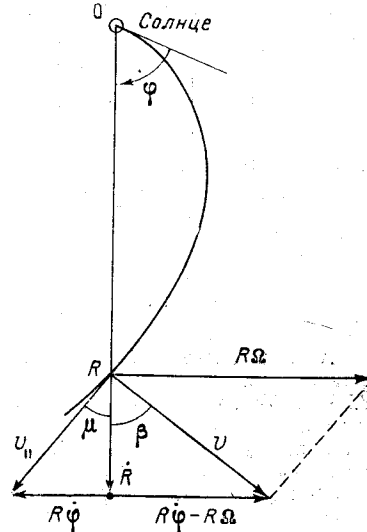
Легко показать, что если распределение скоростей ионов в системе координат, связанной с ветром, изотропно, то для любой фиксированной энергии максимум распределения числа частиц по углу β (угол между направлением наблюдения и направлением на Солнце) расположен при $\beta_{max} = 0$. В действительности наблюдалась сильная зависимость угла β_{max} от величины скорости ионов, что истолковано как наличие заметной анизотропии температур относительно направления магнитного поля, возникновение которой в [2] объяснено как следствие сохранения первого адиабатического инварианта. По мере удаления от Солнца T_{\perp} уменьшается, а T_{\parallel} вследствие приближительного выполнения условия $dT_{\parallel} = -2dT_{\perp}$ [2] соответственно увеличивается, что и приводит к анизотропии температур. Следует отметить, что силы инерции, которые стремятся уменьшить T_{\parallel} , при этом не учитывались. Однако вблизи орбиты Земли степень анизотропии $K = T_{\parallel} / T_{\perp}$ может быть еще достаточно велика.

Для количественной интерпретации данных по угловому распределению ионов солнечного ветра в [1, 2] было использовано выражение для функции распределения в системе координат, связанной с ветром, в виде произведения двух максвелловских распределений с температурами соответственно T_{\perp} и T_{\parallel}

$$f \propto \exp\left(-\frac{mv_{\perp}^2}{2kT_{\perp}} - \frac{mv_{\parallel}^2}{2kT_{\parallel}}\right). \quad (1)$$

Переходя к системе координат, жестко связанной с измерительным прибором, и варьируя выражение для f по β при фиксированных v и K , можно получить семейство кривых, сопоставление которых с наблюдательными данными позволяет в принципе определить величину K при различных предположениях о направлении магнитного поля и скорости солнечного ветра в точке наблюдения. В [1] был рассмотрен простейший случай магнитного поля, силовые линии которого не имеют компоненты, перпендикулярной к плоскости эклиптики, и солнечного ветра, направленного строго радиально [1, ф-ла (3)]. По-видимому, при выводе (3) в [1] допущена ошибка, что видно, например, из анализа следующего простого предельного случая. Пусть силовые линии магнитного поля лежат в плоскости эклиптики и описываются спиралью Архимеда $R = (v_0 / \Omega)\phi$ (фиг. 1). Магнитное поле составляет с направлением солнечного ветра угол μ . Пусть далее $T_{\perp} = 0$, т. е. $T_{\parallel} = \infty$. В этом случае имеет место жесткая связь между скоростью ионов солнечного ветра в неподвижной системе координат v и углом β , а именно

$$v / v_0 = \sin \mu / \sin (\mu - \beta). \quad (2)$$



Фиг. 1

Действительно, при $T_{\perp} = 0$ скорости ионов направлены вдоль силовой линии магнитного поля и в системе координат, вращающейся вместе с Солнцем с угловой скоростью Ω , в обозначенных фиг. 1 равны v_{\parallel} . При переходе к системе спутника радиальная скорость \dot{R} сохраняется, а трансверсальная $v_{\perp} = R\dot{\varphi} - R\Omega$ (скоростью спутника $V \approx 30$ км/сек пренебрегаем). Используя соотношения $R\dot{\varphi} = \dot{R}\varphi$, $R\Omega = v_0\varphi$ и $\varphi = \operatorname{tg} \mu$, справедливые для траектории в форме спирали Архимеда, и $R = v \cos \beta$, найдем

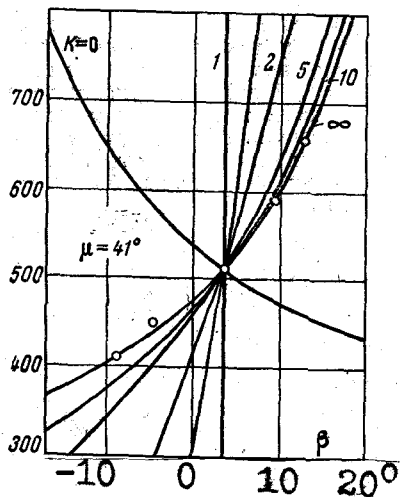
$$\operatorname{tg} \beta = \frac{R\dot{\varphi} - R\Omega}{\dot{R}} = \operatorname{tg} \mu \left(1 - \frac{v_0}{v \cos \beta} \right),$$

что эквивалентно (2). Легко видеть, что выражение (3) из [1] к этому выражению не приводится. Правильное выражение для зависимости $v/v_0 = f(\beta, K)$ при сделанных в [1] предположениях имеет вид

$$v/v_0 = \frac{\cos \mu}{\cos(\mu - \beta)} + \frac{2 \sin \beta}{(1 - 1/K) \sin 2(\mu - \beta)}, \quad (3)$$

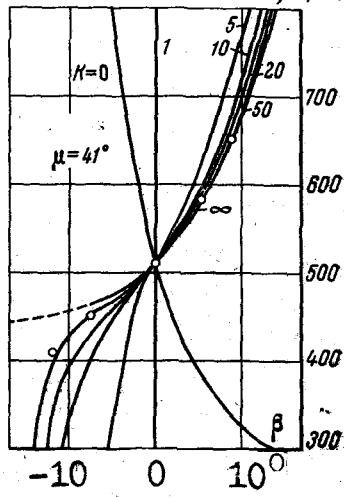
отличающийся от приведенного в [1] коэффициентом 2 при втором слагаемом. При $K = \infty$ (3) переходит в (2).

v , км/сек



Фиг. 2а

v , км/сек



Фиг. 2б

Анализ экспериментальных данных, приведенных в [1], с использованием (3) приводит к заметно отличающимся результатам. Для спектра, полученного 26.XII 1965 г. в 22 ч. 30 м. UT в [1] было найдено $K = 5 \div 7$ и $\mu = 65^\circ$, в то время как экспериментальное значение μ составляло $\sim 43^\circ$ [3], а $v_0 = 510$ км/сек. (Этому значению v_0 соответствует значение $\mu = 41^\circ$.) В [2] указано, что более детальное рассмотрение спектра, полученного 26.XII 1965 г., скорее приводит к значению $K = 2 \div 2,5$, чем $5 \div 7$, что находится в лучшем согласии с данными по анизотропии температур, полученными на спутнике «Вела» [4].

При использовании выражения (3) наилучшее согласие с экспериментальными данными [1] достигается при значении $\mu \approx 41^\circ$, близком к наблюдавшемуся в действительности, но при значительно больших, чем в [1, 2], значениях $K > 10 \div 20$ (фиг. 2а; при построении этого графика принято $v_0 = 510$ км/сек и $V = 30$ км/сек).

Важно отметить, что в действительности во время снятия рассматриваемого спектра магнитное поле было наклонено к плоскости эклиптики под углом $\theta \approx 50^\circ$ [3].

Каким образом удастся удовлетворительно согласовать экспериментальные данные с результатами расчета, в котором не был принят во внимание наклон силовых линий магнитного поля к плоскости эклиптики? Наиболее вероятно предположение, что вся область сильно наклоненного поля переносится вместе с солнечным ветром. При таком предположении размер рассматриваемой неоднородности по данным [3] составит $\sim 5 \cdot 10^{11}$ см, что соответствует размерам неоднородностей, принимаемым для объяснения скорости диффузии солнечных космических лучей.

Расчет углового распределения ионов солнечного ветра для функции распределения в форме (1) и реальной ориентации магнитного поля при снятии этого спектра ($\mu = 41^\circ$, $\theta = 50^\circ$) приведен на фиг. 2 б (здесь принято, что $V = 0$; $v_0 = 510$ км/сек), причем для каждого фиксированного β проведено интегрирование по углу в плоскости, перпендикулярной плоскости эклиптики, так как используемый на «Пионере-VI» прибор имел в этой плоскости менее высокое разрешение по углу (не лучше $\sim 15 \div 20^\circ$).

Учет наклона магнитного поля к плоскости эклиптики приводит к значительно более резкой зависимости хода расчетных кривых от параметра K (для $v < v_0$). Поэтому измерения в условиях, когда силовые линии магнитного поля заметно наклонены к плоскости эклиптики, позволяют, по-видимому, получать более надежные оценки величины K . Как видно, в этом случае согласие между экспериментальными данными и расчетными кривыми даже лучше, чем при использовании формулы (3), а получающаяся степень анизотропии снова очень велика (~ 50). Таким образом, расхождение в оценке степени анизотропии в [1] и [4], по-видимому, остается.

Приведенные данные показывают, что в рассматриваемом случае при сделанных предположениях относительно функции распределения анизотропия температур относительно направления силовых линий магнитного поля была весьма велика ($\sim 10 \div 50$). Такая высокая степень анизотропии температур могла быть достигнута, если процесс установления анизотропии начался довольно рано, по крайней мере с расстояния $35 \div 40 R_\odot$ и если роль рассеяния частиц на магнитных неоднородностях достаточно мала. Следует заметить, что при движении магнитных неоднородностей вместе с ветром область спектра неоднородностей, существенных для рассеяния, сужается, и роль рассеяния падает.

При оценке степеней анизотропии температур ионов солнечного ветра не учитывались отклонения функции распределения ионов от максвелловской, неизбежно возникающие при принятом механизме установления анизотропии. Возможно, это обстоятельство, а также ограниченные возможности разрешения регистрируемых частиц в использовавшихся приборах по их энергии и углам прихода могут частично объяснить расхождения в оценке степеней анизотропии температур по спектрам, полученным на «Пионере-VI» [1, 2] и спутнике «Вела» [4].

Следует еще отметить, что в том случае, когда силовые линии магнитного поля наклонены к плоскости эклиптики, угловое распределение становится несимметричным не только по β , но и по углу θ . Возможно, с этим связана наблюдавшаяся в рассматриваемом спектре несимметрия в распределении скоростей ионов в направлении север — юг [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. I. H. Wolf, R. W. Silva, D. D. McKibbin, R. H. Mason. J. Geophys. Res., 1966, 71, 3329.
2. F. L. Scart, I. H. Wolf, R. W. Silva. J. Geophys. Res., 1967, 72, 993.
3. N. R. Ness, C. Cantarno, C. Scerce. J. Geophys. Res., 1966, 71, 3305.
4. A. J. Hundhausen, I. R. Asbridge, S. J. Bance, H. E. Gilbert, I. B. Strong. J. Geophys. Res., 1967, 72, 87.

Радиотехнический институт
АН СССР

Статья поступила
6 апреля 1967 г.