

符慧山, 曹晋滨, 张铁龙等. 太阳风在地球激波前兆区减速的统计研究. 地球物理学报, 2009, 52(4): 895~901, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.005

Fu H S, Cao J B, Zhang T L, et al. Statistical study of the solar wind deceleration in the Earth's foreshock region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(4): 895~901, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.005

## 太阳风在地球激波前兆区减速的统计研究

符慧山<sup>1,2</sup>, 曹晋滨<sup>1</sup>, 张铁龙<sup>1,3</sup>, H. Reme<sup>4</sup>, E. Lucek<sup>5</sup>

1 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100080

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, 8042 Graz, Austria

4 Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, 31028, Toulouse, France

5 The Blackett Laboratory, Imperial College, London, SW7 2BZ, United Kingdom

**摘 要** 本文首次利用完全相同两颗卫星(CLUSTER C1 和 C3)的数据对地球激波前兆区太阳风的减速和偏转特性进行了统计研究. 结果表明, 在激波前兆坐标系中, 太阳风减小的速度随观测点到激波的距离  $D_{BS}$  增大而减小, 随行星际磁场与激波法向夹角  $\theta_{BN}$  增大也减小, 在 ULF 波动区深度  $D_{WS}$  小于  $6R_e$  ( $R_e$  为地球半径) 的范围内最为显著; 伴随着太阳风减速的另外一个现象——太阳风的偏转, 也存在相似的规律. 其最大减速和最大偏转角度分别为  $10 \text{ km/s}$  和  $3^\circ$ . 太阳风减速和偏转, 以及随之变化的太阳风动压, 可能会引起地球磁层顶位置和形状发生改变, 同时也为激波前兆区弥散(diffuse)离子的起源及加热提供了一种可能的机制.

**关键词** 相同卫星, 太阳风减速, 太阳风偏转, 激波前兆坐标系

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.005

中图分类号 P353

收稿日期 2008-04-21, 2009-03-16 收修定稿

### Statistical study of the solar wind deceleration in the Earth's foreshock region

FU Hui-Shan<sup>1,2</sup>, CAO Jin-Bin<sup>1</sup>, ZHANG Tie-Long<sup>1,3</sup>, H. Reme<sup>4</sup>, E. Lucek<sup>5</sup>

1 State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, 8042 Graz, Austria

4 Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, 31028, Toulouse, France

5 The Blackett Laboratory, Imperial College, London, SW7 2BZ, United Kingdom

**Abstract** The data from two same satellites (CLUSTER C1 and C3) were used to make a statistical study of the solar wind deceleration and deflection in the Earth's foreshock region for the first time. In the foreshock coordinates, the magnitude of deceleration is inversely proportional to  $D_{BS}$  measuring the distance between the satellite and the bow shock along the interplanet magnetic field (IMF), and also inversely proportional to  $\theta_{BN}$  (the angle between the IMF and the bow shock normal). The decelerations mainly occur when  $D_{WS}$  (the distance from satellite to the ULF wave boundary along X direction) is less than  $6R_e$ . On the other hand, the solar wind deflection, displays a similar feature. The largest values of deceleration and deflection are, respectively, estimated as  $10 \text{ km/s}$  and  $3^\circ$ . These decelerations and deflections not only lead to a variation of the magnetopause's position and shape, but also supplies a possible generation

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40621003 和 40523006), 973 项目(2006CB806305)和国家重点实验室专项基金资助.

**作者简介** 符慧山, 男, 1983 年生, 中国科学院空间天气学国家重点实验室在读博士研究生, 主要从事地球激波前兆区以及相关的研究.

E-mail: hsfu@spaceweather.ac.cn

mechanism of the diffuse ions in the foreshock region.

**Keywords** Same satellites, Solar wind deceleration, Solar wind deflection, Foreshock coordinates

## 1 引言

地球激波前兆区(foreshock)位于地球弓激波的上游. 作为太阳风和地球磁场相互作用的第一个区域,它给我们提供了一个天然的等离子体实验场所. 这里存在着丰富的等离子体波,各种各样的粒子,以及大量的扰动事件. 这其中太阳风减速和偏转便是一个重要的物理现象.

当太阳风在流经地球弓激波到达激波下游的磁鞘时,其速度由激波上游的超声速变为亚声速. 这是由磁流体力学规律决定的. 离磁层顶越近,流速越小,在磁层顶日下点处流速甚至可以为零,其他点则绕流而过. 但是观测显示,太阳风速度可能在激波上游的激波前兆区就已经开始减速了.

这一现象首先发现于 1976 年, Formisano 和 Amata<sup>[1]</sup>通过对比 Explorer33 和 Heos1 的实验数据,观测到了约为 30 km/s 的减速. 然而 Bame 等人<sup>[2]</sup>发现的减速却只为 7~10 km/s,并且认为这种减速与激波前兆区的弥散离子和甚低频 ULF(10~60 s)波动密切相关,是动量传递的结果. 计算机模拟也证明这种弥散的环流离子可以激发多种低频波动<sup>[3~7]</sup>. 同期, Bonifazi 等人<sup>[8]</sup>通过比较 ISEE2 和 IMP8 的数据之后,也得出了类似的结论. 他们还发现,太阳风减速的大小和太阳风本身的速度有关. 太阳风速度越大,减速越多. 在减速的过程中,至少有一部分的太阳风动能传递给了激波前兆区的波和反射离子. Zhang 等人<sup>[9]</sup>利用 ISEE 的数据,研究了太阳风在激波前兆区的减速与观测点相对于激波前兆区的位置之间的关系. 结果显示,太阳风减速主要发生在准平行弓激波的上游,且越接近弓激波,减速越大. 在沿着磁力线到弓激波上游 5 $R_e$  之外的地方,太阳风的减速基本消失.

以往的观测结论或者是建立在一颗卫星数据的基础上(Bame<sup>[2]</sup>, Zhang<sup>[9]</sup>),或者是建立在两颗相距较远(>10 $R_e$ )的不同配置的卫星数据基础上(Formisano<sup>[1]</sup>, Bonifazi<sup>[8]</sup>). 这样来自于太阳风本身的时间和空间变化将会对数据分析的结果有重要影响. 不同的人用同样的方法对不同时间的太阳风进行研究甚至会得到相反的结论. Diodato 和

Moreno<sup>[10]</sup>用与 Bonifazi 同样的方法进行研究时,却发现太阳风在激波前兆区域没有显著的减速. 而且对于不同卫星仪器观测结果的比较,仪器本身的系统误差也会影响有关结论. Moreno 和 Signorini<sup>[11]</sup>指出,两颗不同的卫星之间观测到的数据会存在很大的差异. 这使得两颗不同卫星之间的数据比对很不可信. 在 Bonifazi 等人的工作中,虽然对两颗卫星的数据作过校正,但校正值(8~10 km/s)已经接近他们观测到的太阳风减速值(7~10 km/s),这样得到的结果可能存在较大的误差.

正是因为上述问题的存在,使得太阳风减速这一问题到现在为止还一直充满争议.

欧洲空间局的 Cluster 计划为研究激波前兆区太阳风的减速提供了绝好的机会<sup>[12]</sup>. Cluster 由四颗相同的卫星组成. 在激波前兆区卫星之间的间距为 1 $R_e$ ~2 $R_e$ . 这样对不同卫星之间的太阳风速度特性进行比较,可以避免太阳风本身时间和空间变化带来的误差. 而且四颗卫星都搭载着相同的仪器,仪器间本身的系统误差也几乎可以忽略. 最近 Cao 等人就利用位于激波前兆区内外的两颗 Cluster 卫星发现了太阳风减速的直接证据<sup>[13]</sup>,并且显示了太阳风离子在减速的过程中相空间速度分布了变化.

太阳风减速既涉及到微观的波粒相互作用,又涉及到宏观的太阳风-磁层相互作用,因而具有重要的科学意义. 此外由于太阳风动压对磁层顶位置有着重要影响,因而也具有较大的应用价值. 本文的目的是:利用 Cluster 两颗卫星(CLUSTER C1 和 C3)的太阳风观测数据,研究太阳风在激波前兆区的减速和偏转,以及这种减速和偏转在整个激波前兆区的分布规律.

## 2 数据和坐标系

本文的数据均来自于 CLUSTER 卫星簇中的 C1 和 C3 两颗卫星,其中磁场数据来自于卫星上的 FGM 仪器<sup>[14]</sup>,速度数据则来自于 CIS-HIA 探测仪<sup>[15]</sup>,精度均为 4 s. 所选择的事件都是 2003 年或是 2006 年的,在这两年里,CLUSTER 在激波前兆区的间隔较大,有利于我们观测到较大的减速. 为了对这两颗卫星的数据进行同时性的比较,我们将其

中一颗卫星的数据,根据太阳风的对流时间进行了平移,以达到和另外一颗卫星具有最大的相关性(平移时间约为 10~20 s).

研究太阳风在激波前兆区的减速和偏转,必须首先确定卫星相对于激波的位置.为此我们引入激波前兆坐标系.这是一个二维的坐标系,不考虑纬度所带来的影响.它可以通过如下方式建立:

首先,将原始 GSE 坐标系旋转  $4^\circ$  之后得到一个修正 GSE 坐标系(aberrated GSE),其目的是消除地球公转所带来的影响<sup>[9]</sup>,使太阳风在此坐标系中的流向为  $-X$  方向.在此坐标系中,太阳风速度可以看作是一个一维量.第二,激波前兆区是一个依赖于弓激波而存在的区域,激波前兆区的位置当然也就受到弓激波位置的影响.对于弓激波位置,我们采用的是考虑到太阳风动压影响之后的修正 Fairfield 模型<sup>[16]</sup>,其参数设置和 Zhang 等人<sup>[9]</sup>的一样.第三,为了让问题得到更进一步的简化,将修正 GSE 坐标系旋转到 IMF 所在的平面内,使 IMF 的  $Z$  分量消失,从而得到一个二维的磁场量.这样得到的坐标系称为 GIPM(Geocentric Interplanetary Medium)坐标系<sup>[17,18]</sup>,即太阳风 V-B 坐标系.第四,为了消除来自纬度的影响,建立一个二维的激波前兆区,或者说只考虑同纬度面上的太阳风减速情况,我们采用 Crawford 等人<sup>[19]</sup>的方法,把所有纬度面上的弓激波面都投影到黄道面上,使之和黄道面上的弓激波相重合.卫星位置在这一过程中也同样地投影到了黄道面上.这样建立的坐标系即是激波前兆坐标系.

在激波前兆坐标系中,我们用  $D_{BS}$ ,  $\theta_{BN}$  和  $D_{WS}$  来确定卫星在激波前兆区的位置.如图 1,其中,激波距离  $D_{BS}$  代表内侧卫星沿着 IMF 方向到弓激波的距离. $\theta_{BN}$  代表 IMF 与弓激波法向的夹角, $\theta_{BN}$  小于  $45^\circ$  代表卫星处于准平行弓激波的上游,而当  $\theta_{BN}$  接近  $90^\circ$  时卫星则处于准垂直弓激波的上游. ULF 波动区深度  $D_{WS}$  表示内侧卫星沿着  $X$  方向到甚低频波动区边界的距离.这和 Zhang 等人所用的到离子激波前兆区边界的距离(Foreshock Depth)有所不同<sup>[9]</sup>.后面我们可以看到,使用  $D_{WS}$  来确定卫星位置比 Foreshock Depth 能更好地反映太阳风减速的特点.图 1 中,介于甚低频波动区和电子激波前兆区之间的区域(绿色部分)称为场向束流区(Field Aligned Beam Region),这一区域中包含有大量的来自弓激波的反射离子,它和甚低频波动区一起构成了离子激波前兆区.只有当行星际锥角大于  $45^\circ$  时,甚低频波动区边界(ULF Wave Boundary)才可以被确

定<sup>[20]</sup>.这时它和弓激波交于  $\theta_{BN} = 50^\circ$  的地方,并且与 IMF 存在夹角<sup>[20]</sup>  $\alpha = \arctan(\sin\theta_{BX}/1.4)$ ,这里  $\theta_{BX} = \arctan(B_Y/B_X)$ .研究太阳风在激波前兆区的减速/偏转分布特点就是研究它们分别随  $D_{BS}$ ,  $\theta_{BN}$  以及  $D_{WS}$  的变化关系.

### 3 太阳风减速

2003 年 2 月 2 日 Cluster 卫星观测到了一个太阳风在激波前兆区减速的事件.图 2 中给出了 C1 和 C3 两颗卫星的等离子体参数,从上到下依次为太阳风离子数密度,速度,减速值,行星际磁场  $B_X$ ,  $B_Y$ ,  $B_Z$  分量,以及离子温度,卫星位置  $D_{BS}$ ,  $\theta_{BN}$  和  $D_{WS}$ .其中  $D_{BS}$ ,  $\theta_{BN}$ ,  $D_{WS}$  中没有数据的地方是由以下两个原因造成的:其一,两颗卫星在这些时刻都已经不在激波前兆区,而进入行星际空间了,这可能是因为卫星的运动或者是行星际磁场的变化引起的.其二,在这些时刻磁场的行星际锥角已经小于  $45^\circ$ .在这种情况下,甚低频波动区边界不能被确定.黑线和绿线分别代表 C1 和 C3 独自观测到的减速(其方法与 Zhang 等人<sup>[9]</sup>的一样),蓝线代表两颗卫星观测到的减速(外侧卫星测到的太阳风速度减去内侧卫星测到的太阳风速度).从图中可以看到在 03:04~03:07UT 和 03:09~03:20UT 两个时段内卫星都看到了明显的太阳风减速.其最大值约为 40~50 km/s.与此同时两颗卫星观测到的太阳风密度相等.在这两个时段内,两颗卫星所在位置的行星际磁场与激波法向夹角  $\theta_{BN}$  都小于  $45^\circ$ (见图 2i),说明两颗卫星都位于准平行激波上游,太阳风减速都发生在 ULF 波动区.在 03:04~03:07UT 时段,虽然 C3 也位于 ULF 波动区内,但 C3 并没有观测到太阳风减速.所以相反的结论是不成立的,即太阳风减速肯定发生在 ULF 波动区,但在 ULF 波动区太阳风并不一定减速.在 03:08~03:20UT 时段, C1 和 C3 两颗卫星都观测到减速.但是由于 C1 离激波更近(C1 的激波距离小于 C3 的激波距离,见图 2h),C1 测量到的太阳风经过了更长的减速路程(C1 的激波前兆深度大于 C3 的激波前兆深度,见图 2j),所以 C1 观测到的太阳风速度低于 C3 观测到的太阳风速度.

图 2g 显示:在太阳风减速的时候,C1 观测到的太阳风温度急剧增加,而 C3 测到的却没有增加很多或者根本就没有增加.这意味着太阳风减速是一个与太阳风热化相联系的过程,在减速的过程中一

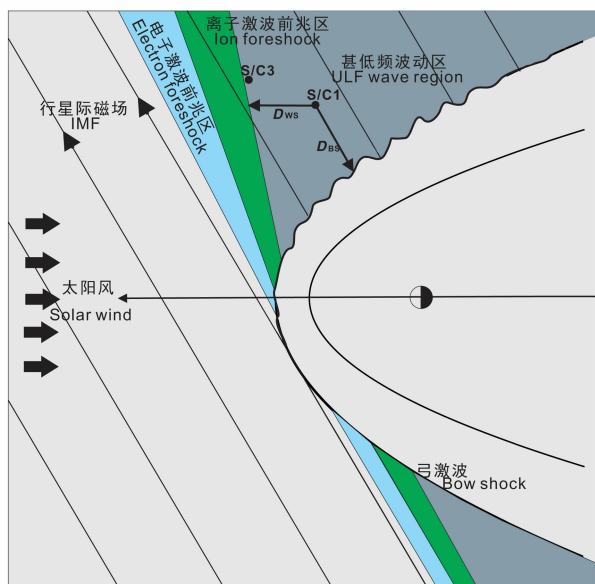


图 1 地球激波前兆区示意图

Fig. 1 Schematics of foreshock geometry

部分的太阳风动能转化成了热能. 这个转化是通过太阳风离子与 ULF 波相互作用进行的.

为了统计太阳风减速在整个激波前兆区分布的特点, 找到减速随  $D_{BS}$ ,  $\theta_{BN}$ ,  $D_{WS}$  的变化关系, 我们对 2003 年和 2006 年太阳风在激波前兆区的减速特性进行了统计研究.

图 3 给出了太阳风减速随激波距离  $D_{BS}$  的变化关系. 可以看到越接近弓激波, 减速中值越大. 最大的减速中值约为 8 km/s. 减速主要集中在  $D_{BS}$  小于  $12R_e$  的区域, 随着  $D_{BS}$  的增加, 减速逐渐消失. 这是因为在激波前兆区, 越靠近弓激波, 波的活动越剧

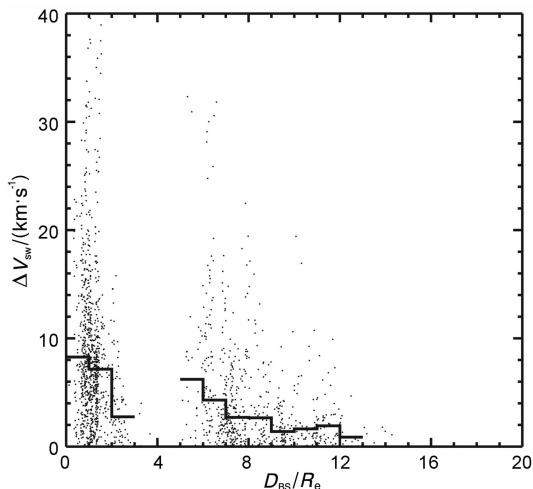


图 3 太阳风减速随  $D_{BS}$  变化的分布图

实线代表的是每  $R_e$  的距离内的减速中值.

Fig. 3 Solar wind deceleration as a function of  $D_{BS}$

The solid lines represent medians of decelerations in every  $R_e$ .

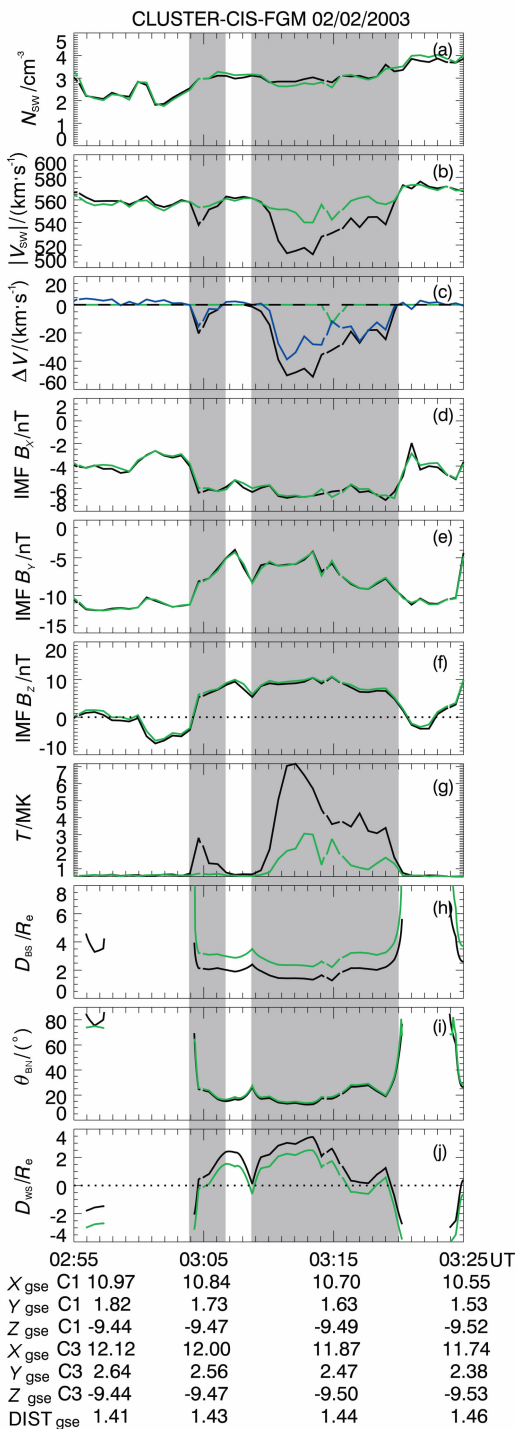


图 2 CLUSTER C1 (黑色) 和 C3 (绿色) 同时观测到的太阳风减速事件

(c) 中的黑线和绿线分别代表 C1 和 C3 各自观测到的减速, 蓝线代表两颗卫星观测到的减速. 阴影区是减速区域. 底部是 C1 和 C3 在 GSE 坐标系中的位置和它们之间的间隔, 单位为  $R_e$ .

Fig. 2 A deceleration event observed simultaneously by CLUSTER C1 (black) and C3 (green)

The black and green lines drawn in (c) denote the deceleration observed by C1 and C3 singly, and the blue line denotes two satellite's observation. Those shadows represent the regions where the solar wind is decelerated. The positions of C1 and C3 in GSE coordinate and their interdistances with unit  $R_e$  are shown at the bottom.

烈,产生的减速效应越显著.离弓激波较远时,减速效应太小,减速的时间较短,相应地太阳风减速也较小,很难被观测到.

图 4 显示的是太阳风减速随行星际磁场与激波法向夹角  $\theta_{\text{BN}}$  的变化关系.可以看到太阳风减速主要集中在准平行弓激波的上游区域.行星际磁场与激波法向夹角越小,太阳风减速越大.随着  $\theta_{\text{BN}}$  的增加,减速逐渐消失.当  $\theta_{\text{BN}} > 45^\circ$  时,减速很小,当  $\theta_{\text{BN}} > 80^\circ$  时,基本上观测不到减速了.这是因为当  $\theta_{\text{BN}} > 80^\circ$  时,卫星基本上是在准垂直激波上游.而在准垂直激波上游,没有强烈的 ULF 波活动.因而也没有太阳风减速发生.

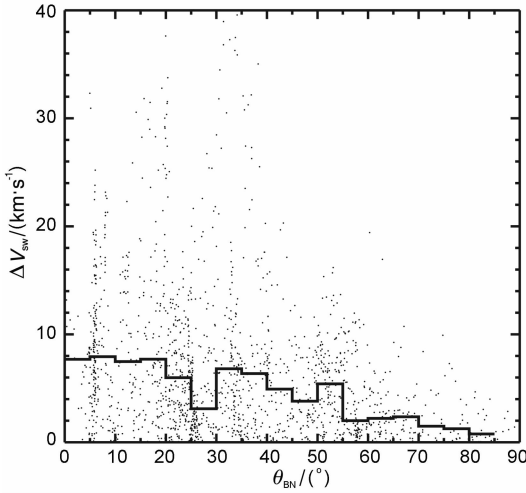


图 4 太阳风减速随  $\theta_{\text{BN}}$  变化的分布图

实线代表的是每  $5^\circ$  的范围内的减速中值.

Fig. 4 Solar wind deceleration as a function of  $\theta_{\text{BN}}$

The solid line represents medians of decelerations in every bin of  $5^\circ$ .

图 5 显示的是太阳风减速随 ULF 波动区深度  $D_{\text{WS}}$  的变化关系.减速主要发生在  $-1R_e < D_{\text{WS}} < 6R_e$  的区域.在 ULF 波动区之外 ( $D_{\text{WS}} < 0$ ),太阳风的减速中值很小.值得注意的是,可能由于理论模型和实际观测之间存在一定的差距,导致在  $0 \sim -1R_e$  的范围内也观测到了较大的减速.减速的最大值主要发生在  $D_{\text{WS}} = 2R_e \sim 3R_e$  的地方,说明太阳风减速与 ULF 波动存在重要的关系. Zhang 等人<sup>[9]</sup>在 1995 年用离子激波前兆区深度来研究太阳风减速的统计特性,发现减速最大值主要发生在  $6R_e \sim 10R_e$  的离子激波前兆区深度的地方.这也说明用  $D_{\text{WS}}$  来确定卫星的位置比 Zhang 等人用的 Foreshock Depth 更具有优越性,更能反映太阳风减速的原因.减速的最大中值约为  $10 \text{ km/s}$ ,较之前的两个最大中值都大,

从这一点上也可以看出  $D_{\text{WS}}$  比  $D_{\text{BS}}$  和  $\theta_{\text{BN}}$  更能反映太阳风减速的特点.

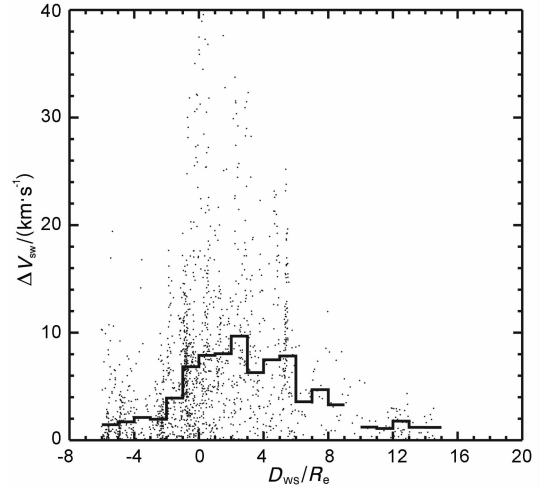


图 5 太阳风减速随  $D_{\text{WS}}$  变化的分布图

实线代表的是每  $R_e$  的距离内的减速中值.

Fig. 5 Solar wind deceleration as a function of  $D_{\text{WS}}$

The solid lines represent medians of decelerations in every  $R_e$ .

## 4 太阳风偏转

伴随太阳风减速的另外一个现象是:太阳风在流经地球激波前兆区时方向发生了偏转.在激波前兆坐标系里,太阳风在黄道面上的流向角可以用  $\theta_{\text{swf}}$  来表示,其定义为

$$\theta_{\text{swf}} = \arctan\left(\frac{v_{y_i}}{v_{x_i}}\right), \quad (1)$$

式中  $v_{y_i}$  和  $v_{x_i}$  是  $V_{\text{SW}}$  在激波前兆坐标系中的两个分量,  $v_{y_i}$  通常很小,因而  $\theta_{\text{swf}}$  是个很小的角度.若  $\theta_{\text{swf}}$  为正,表示太阳风的流向偏向晨侧,若为负,则表示流向偏向昏侧.应用同样的分析方法,可以得到太阳风流向偏转的绝对大小  $|\Delta\theta_{\text{swf}}|$  随  $D_{\text{BS}}$ ,  $\theta_{\text{BN}}$  和  $D_{\text{WS}}$  的变化关系.如图 6,可以看到,太阳风偏转和太阳风减速有着相似的规律.最大偏转角约为  $3^\circ$ ,主要发生在  $0 < D_{\text{BS}} < 9R_e$ ,  $0^\circ < \theta_{\text{BN}} < 45^\circ$  或  $3R_e < D_{\text{WS}} < 6R_e$  的区域以内.当  $D_{\text{BS}}$  和  $\theta_{\text{BN}}$  增加时,偏转的角度随之减小,偏转都是向两侧的.

比较图 5 和图 6,我们可以发现一个值得注意的现象:太阳风减速先发生,差不多  $3R_e$  之后才出现偏转.而且最大的偏转 ( $D_{\text{WS}} \sim 5R_e$  处)也大约出现在最大减速 ( $D_{\text{WS}} \sim 2R_e$  处)之后  $3R_e$  的地方.从  $\theta_{\text{BN}}$  的分布图上也能发现,最大的减速出现在平行激波前兆区 ( $\theta_{\text{BN}} = 0^\circ$ ),而最大的偏转则出现在  $10^\circ < \theta_{\text{BN}} < 15^\circ$  的地方,也是向后推移了一段距离.可以说

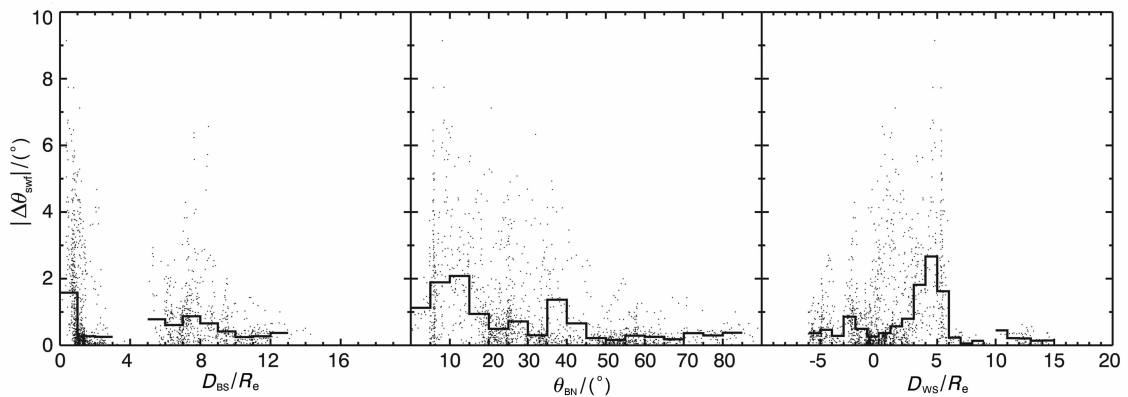


图 6 太阳风偏转分别随  $D_{BS}$ ,  $\theta_{BN}$ ,  $D_{WS}$  变化的分布图

实线代表的分别是每  $R_e$ ,  $5^\circ$ ,  $R_e$  的范围内的平均偏转角度。

Fig. 6 Solar wind deflection as a function of  $D_{BS}$ ,  $\theta_{BN}$ , and  $D_{WS}$

The solid lines represent medians of deflection in every  $R_e$  for  $D_{BS}$ , every  $5^\circ$  for  $\theta_{BN}$  and every  $R_e$  for  $D_{WS}$ , respectively.

偏转的延迟不是一个偶然的现象,是太阳风离子与 ULF 波相互作用的结果. 在 ULF 波的作用下,太阳风离子主要经历了能量扩散和投掷角扩散两个物理过程. 太阳风减速是能量扩散和投掷角扩散共同作用的结果,而太阳风偏转主要与投掷角扩散有关. 太阳风减速和太阳风偏转的最大值发生在不同的区域说明太阳风离子能量扩散和投掷角扩散最强烈的地方是不同的. 完整的阐述这个问题需要对 ULF 的特性(极化、传播方向、相速度)进行详细的分析. 这也是我们未来工作的主要重点.

## 5 结论和讨论

本文首次利用完全相同的、在太阳风流线方向上相距不远的两颗卫星 (CLUSTER C1 和 C3) 的磁场和离子探测数据,对太阳风在地球激波前兆区的减速和偏转进行了统计研究,发现太阳风减速主要集中在激波前兆区的  $0 < D_{BS} < 12R_e$ ,  $0^\circ < \theta_{BN} < 55^\circ$ ,  $0 < D_{WS} < 6R_e$  区域内. 越接近弓激波,减速越大. 随着  $D_{BS}$  的增加,减速逐渐消失. 从角度  $\theta_{BN}$  看,这种减速集中在准平行弓激波的上游区域,当行星际磁场与激波法向夹角越小时,减速越大. 随着  $\theta_{BN}$  的增加,减速逐渐消失. 当  $\theta_{BN} > 45^\circ$  时,减速很小,而当  $\theta_{BN} > 80^\circ$  时,减速基本上已观测不到. 在 ULF 波动区之外 ( $D_{WS} < 0$ ), 太阳风的减速也很小. 减速的最大值主要集中在  $2R_e \sim 3R_e$  的 ULF 波动区深度的地方,约为  $10 \text{ km/s}$ ,意味着太阳风减速与 ULF 波动存在重要的关系. 太阳风在减速的同时,也有向两侧偏转的趋势. 这种偏转与减速有着相似的特征,主要集中在

$0 < D_{BS} < 9R_e$ ,  $0^\circ < \theta_{BN} < 45^\circ$ ,  $3R_e < D_{WS} < 6R_e$  的区域内,最大值为  $3^\circ$ .

太阳风减速/偏转和 ULF 波的相关性很好,表明 ULF 波动是造成减速/偏转的原因. 伴随着太阳风减速/偏转的还有离子温度的增加. 意味着在这一过程中,有一部分的动能转化成了热能,从而引起温度的升高,并在经历了投掷角散射后,向各向同性化发展. 这为弥散离子的起源以及加热提供了一种新的可能的机制. 现有的一种观点认为弥散离子是太阳风离子在激波处反射之后,经过速度扩散形成的. 如果太阳风离子在激波前兆区的温度已经升高(相对于未扰动太阳风),这意味着太阳风离子在未反射时就已经具有了一定程度的弥散. 当然在减速和偏转这一过程中,还有一些问题是未知的. 譬如减速/偏转是怎么发生的? ULF 波和离子是如何相互作用的等等. 这些问题都会在以后的工作中得到逐步的论证. 只有这些问题都得到解决,太阳风在激波前兆区减速/偏转这一现象才能被真正地认识. 在这里我们也注意到太阳风离子与激波前兆区弥散离子产生的 ULF 波相互作用问题是与彗星弓激波附近太阳风离子与 ULF 相互作用问题有很多相似之处. 彗星附近观测到的(新生)离子环束流、回旋各向异性离子、ULF 波、太阳风质量加载(mass loading)等现象都可以在地球激波前兆区发现<sup>[21~25]</sup>. 所以有关彗星附近等离子体物理过程的研究可以给我们很多启示.

太阳风减速和偏转对磁层日侧的宏观结构有着重要影响. 太阳风减速,以及随之改变的太阳风动压,可能会引起地球磁层顶位置和形状的变化. 并且

减速在晨侧和昏侧的不同还可能导致磁层顶在晨昏两侧的不对称性. 因而太阳风减速的研究对于深入了解磁层宏观结构和优化磁层顶模型都有着重要的影响.

### 参考文献(References)

- [1] Formisano V, Amata E. Solar wind interaction with the Earth's magnetic field 4. preshock perturbation of the solar wind. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**:3907~3912
- [2] Bame S J, Asbridge J R, Feldman W C, et al. Deceleration of the solar wind upstream from the Earth's bow shock and the origin of diffuse upstream ions. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**(A6):2981~2990
- [3] Winske D, Wu C S, Li Y Y, et al. Coupling of newborn ions to the solar wind by electromagnetic instabilities and their interaction with the bow shock. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**(A3):2713~2726, doi:10.1029/JA090iA03p02713
- [4] Li Y, Yoon P H, Wu C S, et al. Ion pitch-angle scattering by Alfvén waves. *Phys. Plasmas*, 1997, **4**(11):4103~4117, doi:10.1063/1.872530
- [5] Cao J B, Zhou G C, Wang X Y. Generalized ion ring instability driven by ions on partial shell distribution. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**:1499~1501
- [6] Cao J B, Mazelle C, Zhou G C. Phase angle diffusion of nongyrotropic newborn ions in the self-consistently generated fields. *Physics of Plasma*, 2000, **7**(2):696~700
- [7] Cao J B, Mazelle C. Simulations of the generation of partial nongyrotropy of newborn ions. *Adv. Space Res.*, 2006, **37**:1556~1560
- [8] Bonifazi C, Moreno G, Lazarus A J, et al. Deceleration of the solar wind in the Earth's Foreshock Region: ISEE2 and IMP8 observations. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**(A11):6031~6038
- [9] Zhang T L, Schwingenschuh K, Russell C T. A study of the solar wind deceleration in the earth's foreshock region. *Adv. Space Res.*, 1995, **10**:137~140
- [10] Diodato L, Moreno G. A two spacecraft study of the preshock perturbations of the solar wind protons. *J. Geophys. Res.*, 1977, **82**:3615~3622
- [11] Moreno G, Signorini C. Comparison of interplanetary plasma experiments. *ELDO/ESRO Scient. Techn. Rev.*, 1973, **5**:401
- [12] Escoubet C P, Fehringer M, Goldstein M. The Cluster mission. *Ann. Geophys.*, 2001, **19**:1197~1200
- [13] Cao J B, Fu H S, Zhang T L, et al. Direct evidence of solar wind deceleration in the foreshock of the Earth. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**, A02207, doi:10.1029/2008JA013524
- [14] Balogh A, Carr C M, Acuña M H, et al. The Cluster magnetic field investigation: overview of in-flight performance and initial results. *Ann. Geophys.*, 2001, **19**:1207~1217
- [15] Rème H, Aoustin C, Bosqued J M, et al. First multispacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster ion spectrometry (CIS) experiment. *Ann. Geophys.*, 2001, **19**:1303~1354
- [16] Fairfield D H. Average and unusual locations of the Earth's magnetopause and bow shock. *J. Geophys. Res.*, 1971, **76**:6700~6716
- [17] Peredo M, Slavin J A, Mazur E, et al. Three-dimensional position and shape of the bow shock and their variation with Alfvénic, sonic and magnetosonic Mach numbers and interplanetary magnetic field orientation. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(A5):7907~7916
- [18] Merka J, Szabo A, Slavin J A, et al. Three-dimensional position and shape of the bow shock and their variation with upstream Mach numbers and interplanetary magnetic field orientation. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, A04202, doi:10.1029/2004JA010944
- [19] Crawford G K, Strangeway R J, Russell C T. Statistical imaging of the Venus foreshock using VLF wave emissions. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A6):11985~12003
- [20] Le G, Russell C T. A study of ULF wave foreshock morphology-1: ULF foreshock boundary. *Planet Space Sci.*, 1992, **40**(9):1203~1213
- [21] Brinca A L. Cometary linear instabilities: from profusion to perspective. In: Johnstone A ed. Cometary Plasma Processes. AGU, 1991, **61**:211~221
- [22] Coates A J, Johnstone A D, Wilken B, et al. Velocity space diffusion and nongyrotropy of pickup water group ions at Comet Grigg-Skjellerup. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:20985~20994, doi:10.1029/93JA02535
- [23] Mazelle C, Cao J B, Belmont G, et al. Compressive character of low frequency waves driven by newborn ions at Comet Grigg-Skjellerup. *Adv. Space Res.*, 1997, **20**:267~270
- [24] Cao J B, Mazelle C, Belmont G, et al. The nongyrotropy of heavy newborn ions at Comet Grigg-Skjellerup and corresponding instability. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**:23379~23388
- [25] Cao J B, Mazelle C, Belmont G, et al. Oblique ring instability driven by nongyrotropic ions: application to observations at Comet Grigg-Skjellerup. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:2055~2064

(本文编辑 何 燕)