第3卷 第1期 空间科学学报 Vol. 9, No. 1
1989 年 1 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 1989

强磁云与共转高速流的相互作用两例

章 公 亮
(中国科学院空间科学与应用研究中心)

摘 要

本文利用行星际观测数据，分析了 1978 年 8、9 月间同一起源的共转高速流两次与磁云发生的相互作用. 8 月 27 日，强磁云为共转高速流所追赶，磁云前半部为磁云本体，具有强磁云的基本特征，但后半部则为高速流追赶磁云的相互作用区，流速图象具有明显的双台阶特征. 9 月 25 日另一异常强磁云追赶再次重现的共转高速流，磁云前部为相互作用区，后部为磁云本体，但结构特征较简单磁云复杂；磁云前部流速峰值超过 900km/s，而在磁云本体 Alfvén 波速峰值在 600km/s 以上，非常接近局部太阳风速. 此两事例进一步说明了 Alfvén 波速增强对磁云加速的重要作用. 此外，还就磁云引起的磁暴和宇宙线下降的特性进行了讨论.

一、引 言

磁云是引起行星际及地球扰动的一种重要的行星际大尺度瞬变结构. Burlaga 等最早发现并讨论了磁云现象[1-5]. 由于观测数据的限制，他们较多地注意了第 20 周太阳活动下降及极小时期磁云的统计特性. 最近我们利用第 21 太阳周极大时期的行星际观测资料，研究了与磁云相关的磁暴和宇宙线下降的统计特征[6]. 且对两个典型的强磁云进行个例分析，详细讨论了它们的 MHD 动力学结构特征[7].

磁云研究的一个重要方面是它在行星际空间运动时与背景太阳风的相互作用. 弄清楚这个问题有助于了解磁云离开太阳时的结构，从而建立起正确的理论模型. 目前尚未有人讨论这个问题. 我们从 1975 年至 1982 年大量行星际观测数据中找出少见的两个强磁云与同一起源的大型重现高速流相互作用的事件. 这两股磁云分别发生在该高速流的前沿及流速峰附近. 它们的出现为研究相互作用提供了难得的机会. 由于强磁云是强磁场稀薄等离子体，而磁云的几何尺度远比大型高速流的尺度小. 尤其是极少数的行星际飞船难以观测到同一磁云，目前尚不能描绘出磁云的几何形状. 在这种情况下，进行 MHD 模型计算似难以得到好的结果. 因此本文的主要内容是分析这两个事件的观测数据，并提出初步的解释.

二、强磁云为共转高速流所追赶

1978 年 8 月 27 至 28 日有一股强磁云出现在重现性大型高速流的前沿(图 1). 该高

本文于 1988 年 3 月 3 日收到.

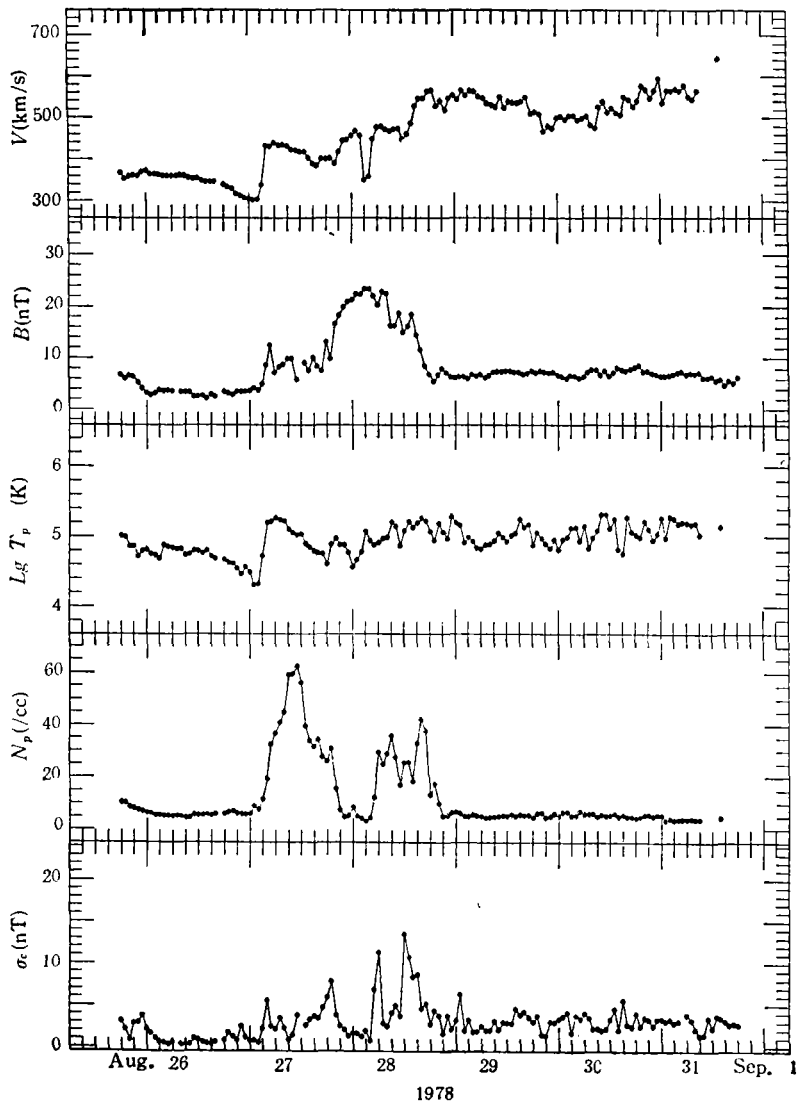


图1 (a)

速流在第 1982 至 1984 三个相继的 Bartels 旋转周内重现. 在磁云出现的前一周，即第 1982 周,流速在 8 月 2 日开始升高，至 8 月 6 日缓慢地达到极大值 570km/s. 而在后一周，即 1984 周，流速在 9 月 25 日开始增高，至 9 月 30 日达到极大值 900 km/s 左右. 因此该高速流系共转流. 在第 1983 周,流速极大值为 600km/s，出现在 9 月 1 日. 按 27 天重现性计算,如不出现磁云，流速似应在 8 月 29 日开始增高,但实际上在 8 月 27 日就开始增高了. 在磁云通过期间，流速由 300km/s 增高至 500km/s 以上. 因此 8 月 28 日至 29 日正是高速流与磁云相互作用的时期，此磁云也就具有与文献[7]讨论的简单磁云有所不同的某些特点.

与磁云相关的强磁场区出现在 8 月 27 日 18 时至 8 月 28 日 18 时，磁场强度峰值达

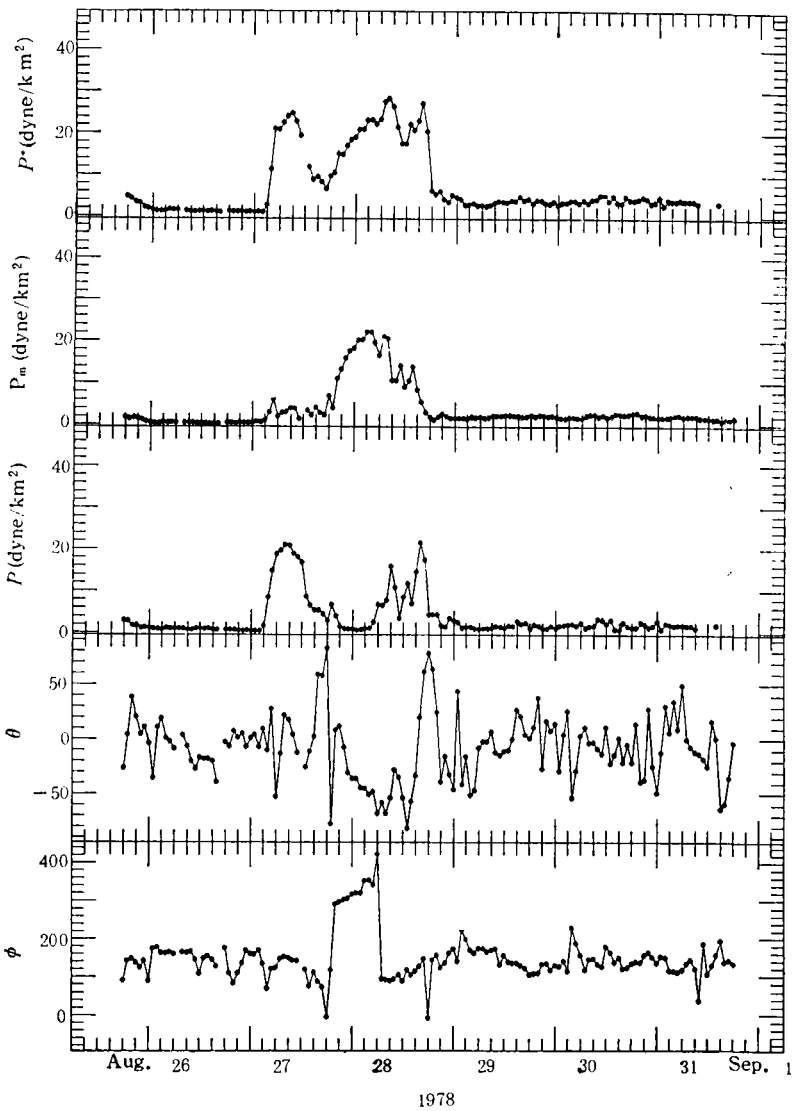


图 1 (b)

25nT 左右，与此相应磁压力峰值为 23dyn/km^2. 8 月 27 日 18 时至 8 月 28 日 6 时，磁场单调增强，磁场矢量倾角由 +82° 下降至 −82°，磁方位角则突跳 180° 以上，说明在此期间的太阳风流与背景太阳风并非属于同一磁场体系. 8 月 28 日 6 时以后，磁场开始从极大值下降，磁方位角则突跳回原来状态，而磁场倾角则回升，至 8 月 28 日 18 时达到极值 +80° 左右.

与文献[7]所示的简单磁云相似，强磁场区前有一高密度结构，密度峰值达 65 个粒子每立方厘米. 而在磁方位角反转期间则为低密度区，同时温度也略低于磁云前. 但与简单磁云不同的是另有一高密度结构出现在磁场恢复下降区，而不是出现在强磁场区之外. 此后随高密度结构的密度峰值为 40 粒子每立方厘米，比简单磁云[7]要高；与此相应，温度

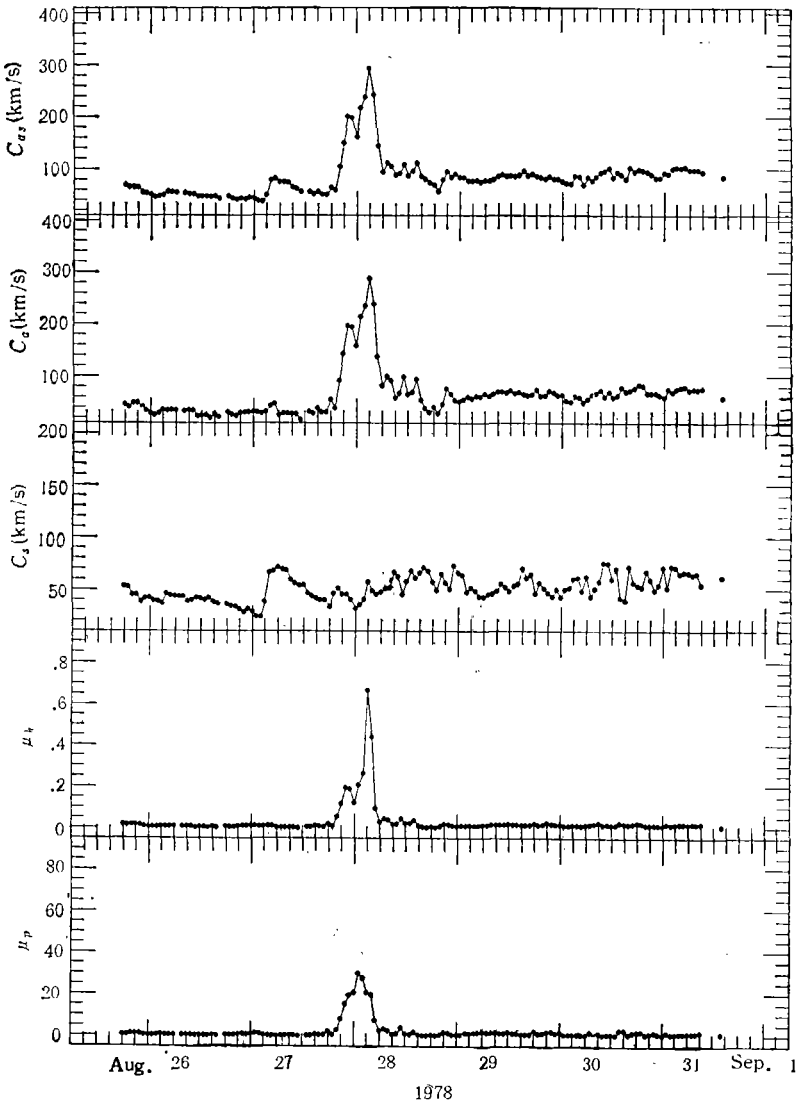


图1 (c)

也有所增高．热压力的分布是与密度分布相对应的，接近于以磁压力极大值为对称中心的双峰分布．

由此看来，强磁场区可分为性质不同的两部分．前部为磁场单调增强区，具有强磁场、低温、低密度、磁倾角基本上单调下降等磁云的基本特征，可以称为磁云本体．在后部，磁场由极大值恢复下降，从磁场增强及倾角变化来看，类似磁云本体；但从磁场虽强，而温度、密度都有所升高，磁方位角极性与强磁场区后高速流一致等特点来看，它又具有重现高速流的特征．我们认为，强磁场区后部是重现高速流与磁云相互汇合的相互作用区．

在磁云本体内，Alfvén 波速 C_a、垂直磁声波速 C_{as}、磁能相对于动能密度比 μ_k、以

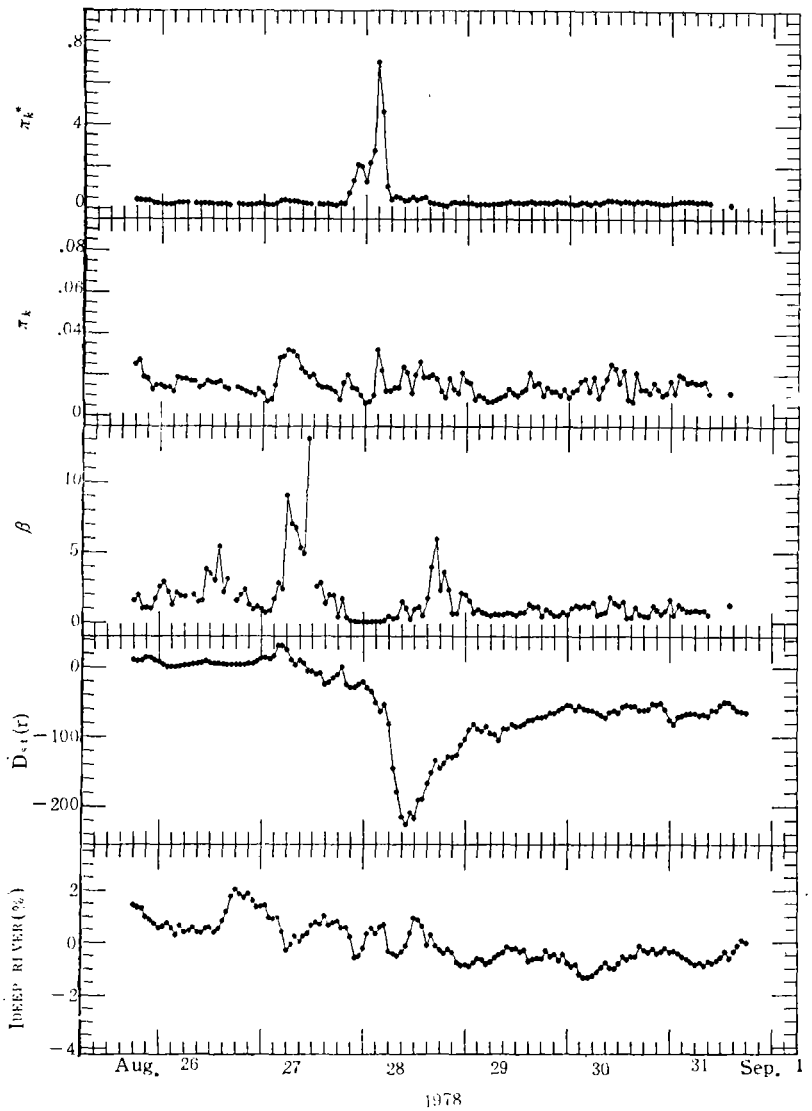


图1 (d)

(a) Solar wind velocity V, magnetic intensity B, proton temperature T_p, proton number density N_p, rms of magnetic field component fluctuations σc. (b) Total pressure P^*, magnetic pressure P_m, thermal pressure P, magnetic inclination θ and azimuth angle ϕ. (c) Perpendicular magnetosonic speed C_{as}, Alfvenic speed C_a, adiabatic sonic speed C_s, ratios of magnetic pressure to kinetic energy density and thermal pressure μ_k and μ_p respectively. (d) Ratios of total and thermal pressures to kinetic energ density π^*_k and π_k, respectively, plasma B parameter, geomagnetic Dst index, Deep River cosmic ray intensity I.

图1　1978年8月27日事件，一股强磁云为共转太阳风高速流所追赶

Fig.1 The August 27, 1978 event, an intense magnetic cloud overtaken by a corotating high-speed solar wind stream

及磁压相对于热压力之比 μ_p 都有很大的增长. 波速 Ca 和 Cas 的极大值达 300km/s，而 μ_k 和 μ_p 则分别达到 0.7 和 30 倍左右. 因此与简单磁云的情形相同，磁场在磁云本体内

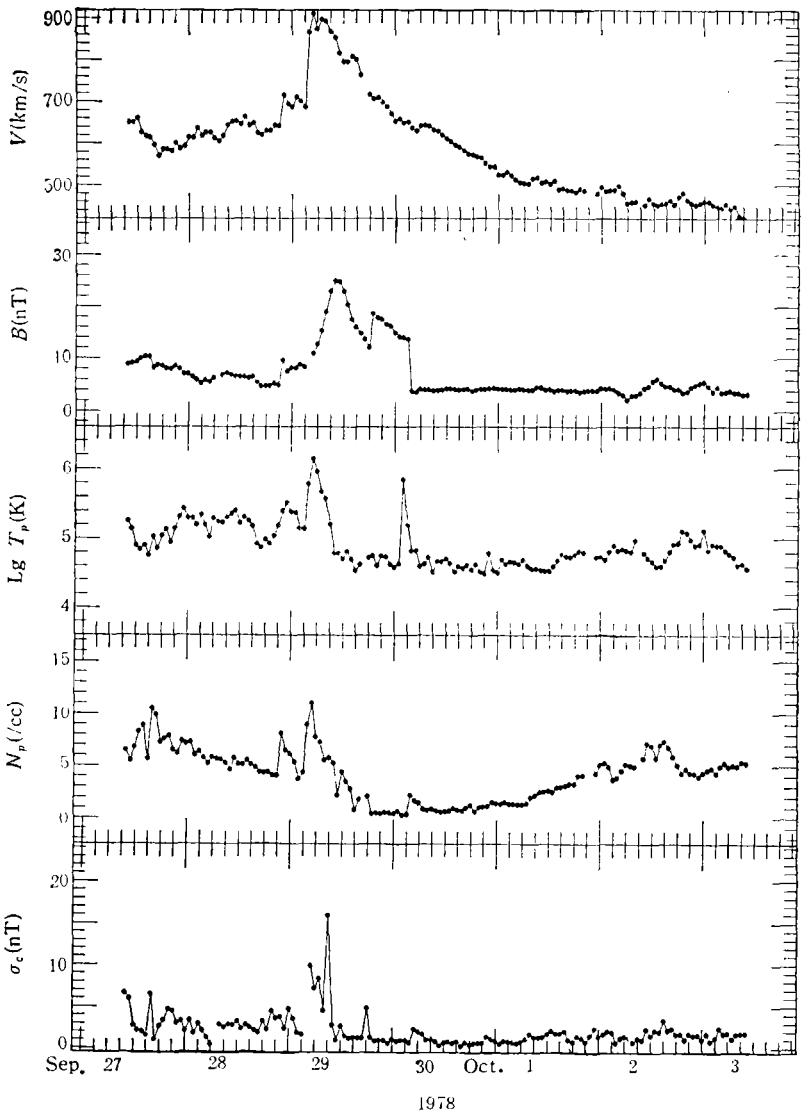


图2 (a)

起着主导的作用. 而在磁云本体后的高速流与磁云相互作用区内,密度和温度增加,μ值迅速恢复至磁云前的水平,磁场虽仍强但其作用相对地减弱.在此相互作用区内, Alfvén波速虽远低于磁云本体,但仍略高于磁云前的值.

与前一太阳旋转周相比, 重现高速流的太阳风速度峰值是接近的. 但流速的图象明显地具有双台阶状位形. 从8月27日03时至8月28日13时为第一台阶, 随后为第二台阶. 这种结构甚象高速流前沿扰动演化产生的激波对间的流速双台阶图象[9]. 在前一太阳旋转周,密度和磁场强度峰出现在流速峰之前 (8月3日),但峰值稍低,分别为40粒子每立方厘米和12nT左右. 磁场和密度的变化接近于同步,峰后迅速下降, 峰前无明显的激波迹象,在此事件中的磁场及密度峰值均大为增高,但磁场变化并不与密度同步. 相

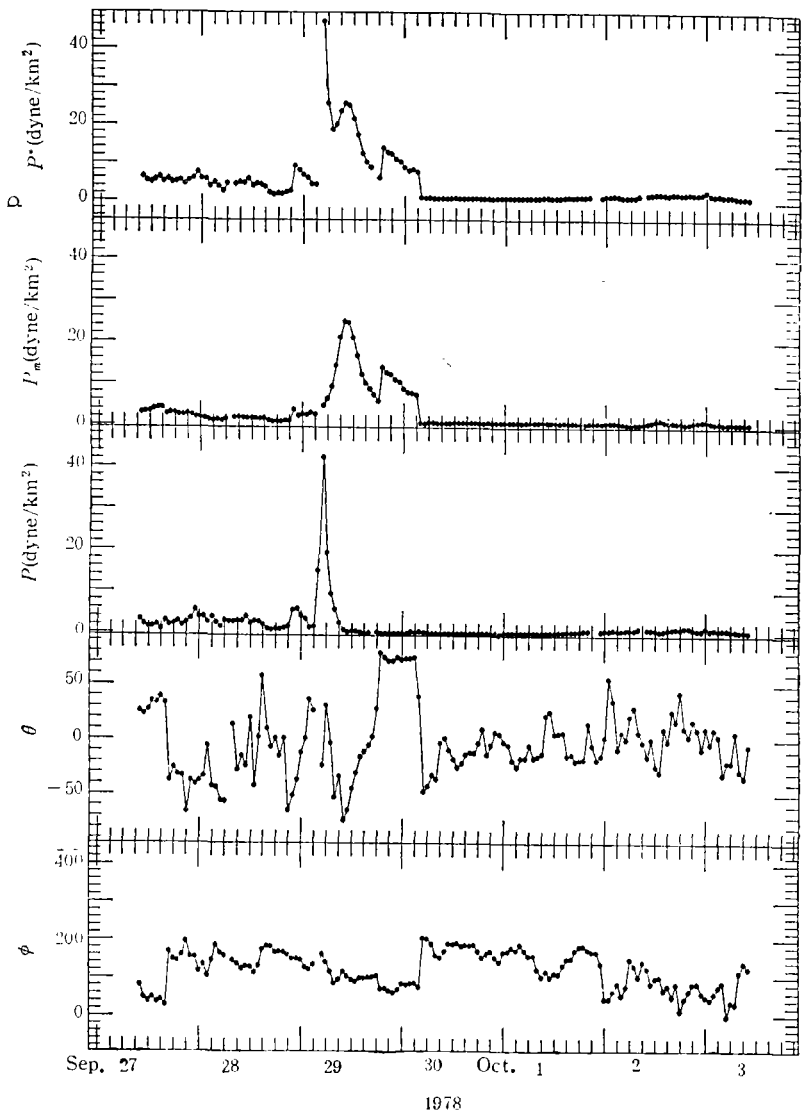


图2 (b)

反，磁场峰介于一对密度双峰之间．8 月 27 日 3 时，流速、磁场强度、温度和密度都有突增，说明存在顺风激波，地磁急始的出现，也支持激波的存在．看来此高密度结构中密度和温度的增高和顺风激波的出现是与磁云的出现有关的，我们认为它是强磁云驱动背景太阳风所形成的．顺风激波与磁云本体之间的受激太阳风区是磁云与背景太阳风的相互作用区，构成了第一级台阶．由于此事例的背景太阳风速度较低，日地行驶时间长，激波超越磁云距离更远，即磁云前相互作用区变宽了．在 8 月 28 日 16 时至 18 时，当磁云本体后高速流与磁云相互作用区的后边界通过时，总压力和密度均有突降，而流速则缓增至第二台阶．这说明可能存在逆风传播的压缩扰动．由于缺乏高时间分辨率的数据，目前尚无法判断是否有逆风激波存在，或者是正在成长为逆风激波的逆风扰动．

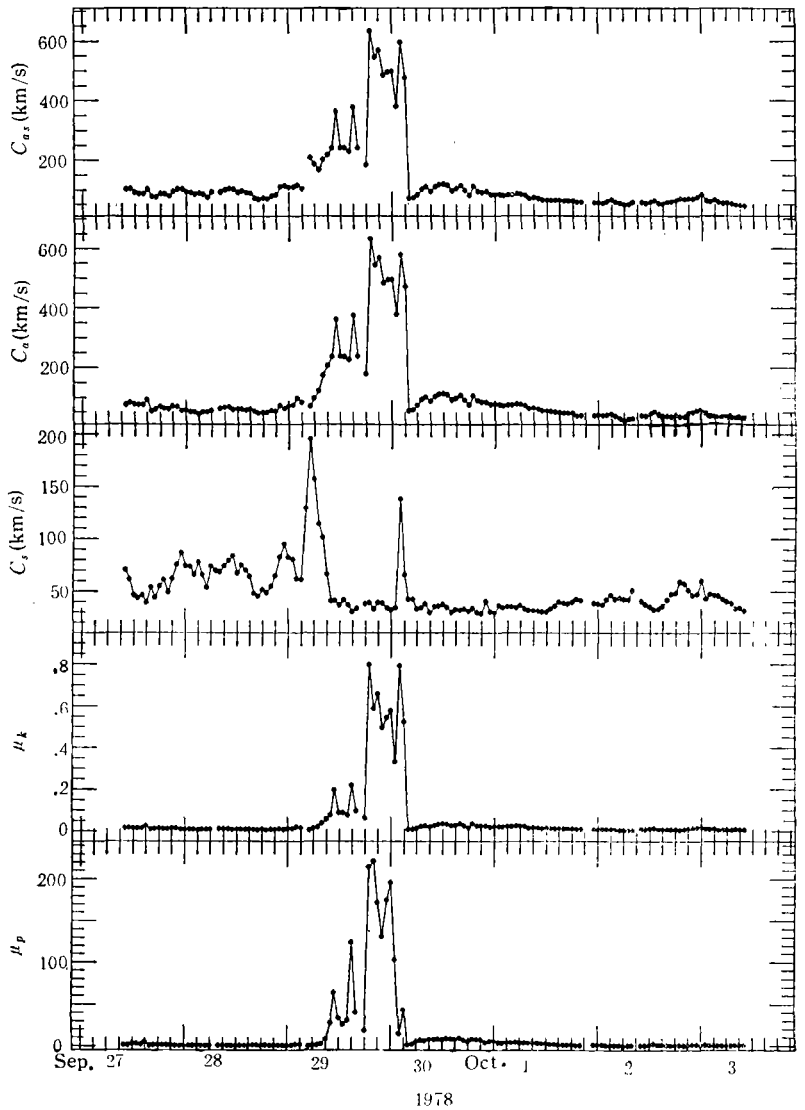


图2 (c)

值得注意的另一种现象是，8 月 28 日 04 时附近，当磁压力 P_m、Alfvén 波速 C_a 及磁场比值 μ 达到极大值时，流速突然降低 100km/s. 在外日球太阳风结构演化的事件中，也可观测到这种流速低谷的现象(参见论文[10]).在两个汇合相互作用区联合时，低谷发生在由逆风激波组成的后边界上. 演化的理论尚不能预测这种低谷的精细结构现象.

三、强磁云逼近共转高速流峰

1978 年 9 月 25 日至 10 月 3 日，上述的共转高速流再次通过地球. 9 月 29 日至 30 日有一股非常强的磁云通过此共转高速流(图 2). 在此以前，9 月 27 日 14 时 28 分至 17

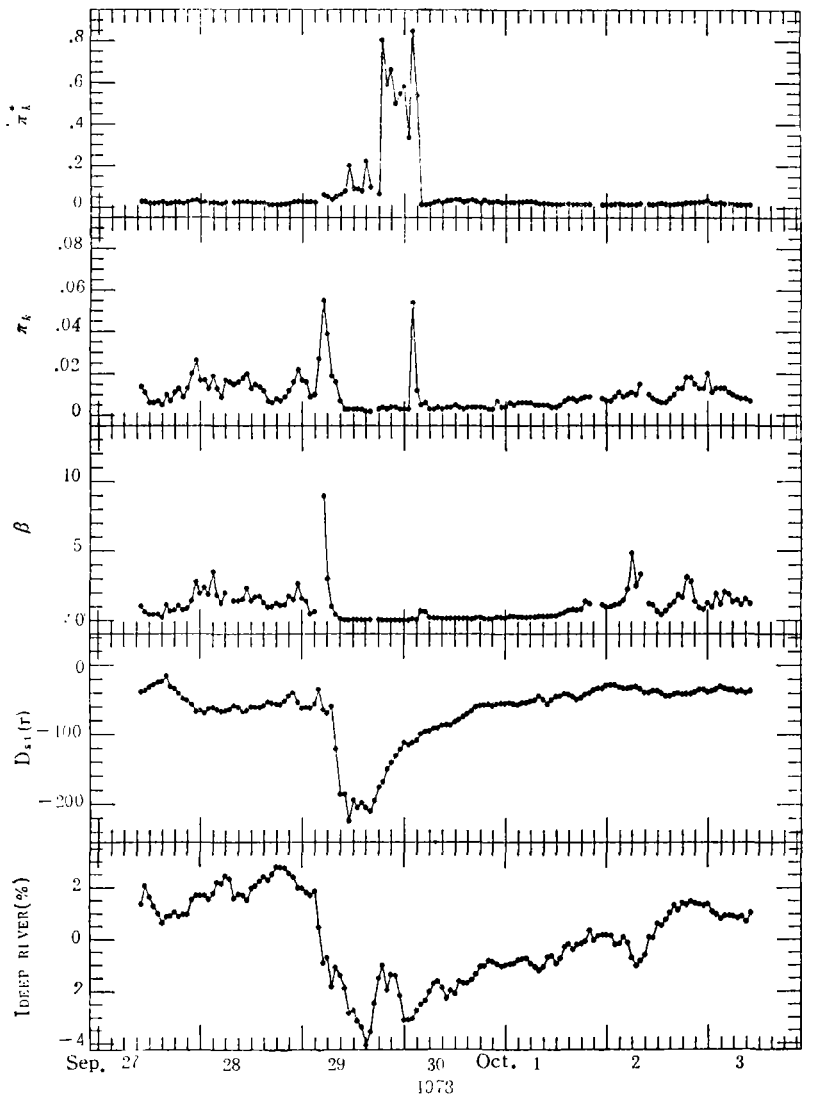


图 2　(d)

参数含意同图 1 (The meaning of the parameters are as same as figure 1)

图 2　1978 年 9 月 25 日事件，一股强磁云追赶共转太阳风高速流

Fig.2　The Sept.25, 1978 event, an intense magnetic cloud overtakivg a corotating high-speed solar wind stream

时 04 分在日面 N27°，W20° 位置发生一2B 级耀斑．根据耀斑引起的日球及地磁扰动的统计规律[14−16]，可以判定磁云是此耀斑引起的．在磁云出现前，9 月 28 日 21 时有一顺风激波，太阳风速、磁场、温度和密度都有跃增，这可能是其它瞬变活动引起的，我们不予以注意．9月 29 日 03 时又有第二个顺风激波通过．速度由 686 km/s 跃增至 866km/s，温度由 1.38×10^5K 跃增至 6.09×10^5K，密度则由每立方厘米 4.4 个粒子跃增至 8.9 个粒子．这些参量在一、二小时内又分别达到极大值 912km/s，1.39×10^6K 和 11.0粒子

每立方厘米，然后快速地降低至低于激波前的水平．与此相应，激波后的热压力和总压力都达到异常高的数值，分别为 43 和 47dyn/km²．

当第二个激波通过时，磁场断缺数据，但激波过后磁场继续增强，于 9 月 29 日 10 时达到极大值 25nT，相应的磁压力和总压力峰值为 25dyn/km²．在第二个激波与磁场峰之间，磁场扰动 σ_c 有很大的增长．因此在 9 月 29 日 03 时与 10 时之间为磁云前高密度前鞘结构，其中发生着磁云与共转流的相互作用，密度、温度和磁场湍流都有较大增强．

在高密度结构后为强磁场、低温、低密度的磁云本体．根据本体内各参量的变化特征，磁云本体又可以分为前、后两部分．从 9 月 29 日 10 时至 19 时为磁云前部，倾角 θ 由大幅度的起伏演变为单调向北旋转，由 −74°增大至 +79°，而磁场强度、磁压力以及总压力均逐渐降低．自 9 月 29 日 19 时至 9 月 30 日 03 时为磁云本体后部，磁场倾角维持在最北纬度 +75°左右，最后突跳回负值．离开磁云本体后，倾角逐渐恢复．在磁云后部磁场有突然增强，然后随倾角突降而突降．与此同时，温度、密度，因而热压力均降低至最低值．因此磁云前后这两部分的性质是不同的．下面还会看到波速及无量纲 μ 值也有明显的差别．在磁云本体内磁场的方位角虽无明显的极性突跳，但仔细观察可以看到从第二个激波开始方位角逐渐偏离激波前的平均位形，总偏离量达 100° 左右．最后在离开磁云本体后边界时，又突跳回激波前的状态．这说明在高密度结构及磁云本体内出现的高速流与共转流的磁场位形是有区别的．

分析磁云本体内高速流的特征可以帮助我们了解它的起源．在前两卡林顿旋转周，共转流的风速最大值为 600 余 km/s；而在本事例中，磁云本体内的流速最高值超过 800 km/s．不仅如此，太阳风流性质也与前两周有所不同．我们对共转高速流的统计研究结果说明[11]，共转高速流是低马赫数流．在前一旋转周(图 1)中，高速流的热压动能比 π_k 的增高，即低马赫数流，说明它们是共转流．但是在本事例中磁云本体内的热压动能比 π_k 低于激波前的背景太阳风共转流，也就是说它们是马赫数较高的太阳风流，这一点正是与强耀斑相关的太阳风流的特征*．因此在磁云本体内，高速流的性质与共转流是不同的，它们象是与耀斑活动相联系的高速流．

在磁云本体后半部，由于密度和温度非常低，Alfvén 波速达到异常高的数值，峰值在 600km/s 以上，非常接近当时的太阳风速度，约为后者的 0.9 倍．与此同时，磁能相对于动能之比高达 0.8 倍以上，而磁压相对于热压之比则可达 230 倍左右．垂直磁声波速与 Alfvén 波速非常接近，磁压力也与总压力非常接近．因此在磁云本体后部，磁场起着绝对优势的动力作用．在磁云本体前部，太阳风也是强磁场、低温、低密度流．由于相互作用的结果，磁能部分地转化为动能和内能，μ_k 和 μ_p 值比磁云本体后部有所降低，但仍显著地高于磁云前高密度前鞘区中的数值，分别为 0.2 和 100 倍左右．

波速及垂直磁声波速的分布亦与此相似，最高值达 350 至 400km/s，与前一事件仍是可以相比拟的．因此与前文讨论过的简单磁云[7]及本文上节讨论过的磁云相比，本事件有其独特的特点，即磁云本体前部磁场矢量单调旋转区并非 Alfvén 波速及 μ 值最高的区域，而磁场动力作用最强的区域则在磁云后部，即磁场维持很高倾角的区域．这种结构

* 耀斑瞬变流的 MHD 特征，已投天体物理学报．

是否能把太阳风加速到非常高的速度，是要进一步探讨的问题.

值得注意的是磁云本体内 Alfvén 波速的巨增对太阳风加速的可能贡献. 在日球惯性参考系内，顺风扰动的传播速度是由 $V + C_{as}$ 决定的. 在磁云本体内，Alfvén 波速与流体速度非常接近，顺风扰动的最高传播速度可达 1300km/s 左右. 在磁云前的高密度结构内，尽管太阳风速很高，但 Alfvén 波速很低，扰动总传播速度只有 1100km/s，而在背景共转太阳风中则只有 700km/s. 因此来自磁云后方及在磁云本体边界上形成的扰动能迅速向前方传播，最后集结在高密度结构内. 扰动方差 σ_c 集中在高密度结构内，也说明我们的这种分析是正确的. 我们认为，在高密度结构内波动能量的集中和耗散对太阳风进行加速和加热[12]，是在本事件中太阳风速度和温度异常高的重要原因之一.

此外，磁云本体后部的一对间断面的性质也是非常值得注意的. 9 月 29 日 18 时，在磁云本体后部的前边界上，磁场有突增，温度无明显变化，但密度都是突降的；9 月 30 日 03 时，在其后边界上，磁场有突降，温度从脉冲尖峰上突降，但密度却是突增的. 从普通 MHD 间断面来看，前一间断可以解释为逆风慢激波，但无法说明后一间断的性质. 由于磁云本体是 μ 值很高的稀薄强磁场等离子体，对于在这种等离子体中的波动和间断面的特性我们还缺乏了解，有待于进一步进行研究.

四、磁暴和宇宙线下降

9 月 29 日磁云引起的磁暴急始发生在 29 日 3 时，强主相开始在 7 时，最大幅度约 200nT. 根据我们的 Kp 类型分类，此磁暴属于 SA 型强烈磁暴，这类磁暴是传播速度很快的行星际扰动引起的[14]. 此事件是由太阳耀斑引起的，从耀斑发生到磁暴急始共经历 37 小时，这正是较强 SA 型磁暴的日地传播时间[15]. 从太阳风速度变化可知磁云是在高速流中运动的，可以预料有短的日地传播时间. 8 月 27 日磁云引起的磁暴则属于另一种类型，急始发生在 8 月 28 日 3 时，主相虽也很强，约 200nT 以上，但比急始延迟一天才出现. 根据磁暴 Kp 分类，它属于 SC 型延迟主相磁暴，这类磁暴是传播速度较慢的行星际扰动引起的[14]. 此磁云虽未找到符合我们定义标准的主要耀斑[16]，但是磁云是在低速流中运动的，因此应该有较长的日地传播时间. 这两个磁云引起的磁暴类型差别，说明我们关于磁暴类型依赖于日地扰动的传播时间[14]这个论断是正确的.

这两个磁云引起的宇宙线强度也有非常明显的差异. 9 月 29 日的宇宙线强度是典型的强 Forbuth 下降，但是 8 月 27 日的下降则象是共转高速流引起的缓降. 现在还难以确定是什么行星际因素形成这两次下降特性的差异. 与文献[7]中讨论过的 1980 年 3 月 19 日事件相比，背景太阳风流速是相近的，磁云都是在低速流中运动的；而 1978 年 8 月 27 日事件的磁场强度 B 和磁场扰动均方根差 σ_c 的峰值比 1980 年 3 月 19 日事件高；但是前者的宇宙线强度下降则小得多.或许值得注意的是 μ 参数的变化特征，前者 μ 值增高的时间要比后者短得多，也就是说强磁场区的空间尺度要小得多，对宇宙线的调制作用也要小. 因此太阳风扰动对宇宙线调制作用不能用简单的太阳风速度、磁场强度或扰动均方差这些简单的参量来描述，有必要进一步弄清楚它们的规律，并在此基础上发展新的理论模式.

致谢：感谢 Y. C. Whang 和 L. F. Burlaga 的有益的讨论。

参 考 文 献

[1] Burlaga, L. F., *Space Sci. Rev.*, Vol. **39**, p. 255, 1984.
[2] Burlaga, L. F., E. Sittler, F. Mariani and R. Schwann, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, p. 6673, 1981.
[3] Burlaga, L. F. and K. W. Behannon, *Solar Phys.*, Vol. **81**, p. 181, 1982.
[4] Klein, L. K. and L. F. Burlaga, *J. Geophys. Res.*, Vol. **87**, p. 613, 1982.
[5] Burlaga, L. F. et al., *Geophys. Res. Lett.*, Vol. **9**, p. 1317, 1982.
[6] Zhang, G. and L. F. Burlaga, *J. Geophys. Res.*, Vol. **93**, p. 2511, 1988.
[7] 章公亮，空间科学学报，第 **8** 卷，第 172 页，1988.
[8] Couzens, D. A. and J. H. King, Interplanetary Medium Data Book, Supplement 3, 1977—1985, NSSDC/WDC-A-R & S, 86-04, 1986.
[9] Whang, Y. C., *J. Geophys. Rev.*, Vol. **89**, p. 7367, 1984.
[10] Whang, Y. C., *J. Geophys. Res.*, Vol. **91**, p. 13341, 1986.
[11] 章公亮、高玉芬和陆晨，空间科学学报，第 5 卷，第 155 页，1985.
[12] Tu, C. Y., *Solar Phys.*, Vol. **109**, p. 149, 1987.
[13] 朗道和栗弗席兹，连续介质力学(彭旭麟译)，第 2 册，人民教育出版社，1978 年版.
[14] 章公亮，地球物理学报，第 **25** 卷，第 10 页，1982.
[15] 章公亮和徐元芳，地震地磁观测与研究，第 **4** 卷，第 1 页，1983.
[16] 章公亮，中国科学 A 辑，第 3 期，第 254 页，1984.

TWO EVENTS SHOWING THE INTERACTION OF INTENSE MAGNETIC CLOUD WITH COROTATING HIGH SPEED STREAMS

Zhang Gong-liang

(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

Two intese magnetic clouds interacted with same corotating high-speed solar wind stream recurring in two successive rotations during the fall of 1978. For the August 27, 1978 event, an intense magnetic cloud was overtaken by a corotating high speed stream, the first half of the cloud can be identified with the cloud body that still retains the basic properties of a simple intense cloud; while the second half is the interaction region resulted from the overtaking magnetic cloud by the high speed stream, the speed profile of which displays a two-steps feature. For the September 25, event, another extraordinary intense magnetic cloud was overtaking the corotating high speed stream recurring again, the first half of the cloud can be identified with an interaction region; while the second half is the cloud body itself with a rather complex structure than the simple cloud without interactions. In the second case, the bulk velocity reached a very high peak value greater than 900 km/s in the interaction region, also the Alvénic speed a very high value above 600 km/s in the cloud body which was very close to the local solar wind speed. These two events discussed in this paper show further the important role played by an enhancement of the Alfvénic speed in accelerating the magnetic cloud. The properties of the geomagnetic storm and the cosmic ray decrease caused by the clouds are also briefly discussed in association with the *Kp* category of geomagnetic storm proposed by he author.