

磁暴形态类型与行星际磁云特征*

章 公 亮

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

摘 要

本文分析了6个不同特征的行星际磁云所引起的急始型磁暴形态的类型差别, 得到的主要结论是: 磁云前高密度结构是决定磁暴初相特征的重要因素; 在磁云磁场强度相近的条件下, 背景太阳风及磁云的速度均影响着磁暴主相的发展; 磁暴强主相的开始及恢复决定于磁云磁场矢量相对于黄道面倾角的指向; 强正磁云引起的磁暴的主要特征是主相长时间的延迟; 磁云过后, 太阳风流速仍继续影响着磁暴主相的恢复。

关键词: 磁暴, 行星际磁云, 日地能量传输, 日地关系

一、引 言

在60年代初, 我们提出过一种根据地磁 K_p 指数分类急始型磁暴的方法, 它考虑了磁暴的初相和主相这两个基本过程之间的关系^[1]。对磁暴和磁扰的形态类型与太阳耀斑作相关统计研究, 发现了磁扰强度和形态类型特征之间有着明显的依赖于耀斑位置的东西及南北不对称性^[1-3]。磁暴的类型与日地扰动的传播速度也有一定的关系^[1]。由于当时尚处于空间探测时代初期, 我们不可能研究清楚造成这种磁暴形态差异的原因。

自从行星际飞船探测得到关于太阳风和行星际磁场的数据以来, 许多学者都非常注意研究地磁扰动对行星际参数的响应。其中最重要的有两个结果: 一是太阳风速与 K_p 指数日总和有很好的相关, 另一是磁层亚暴与行星际磁场南向分量有很好的相关(参阅 Akasofu 的评论及其中所引文献^[4])。Akasofu 综合了这两种重要因素, 引入能量耦合函数 ϵ 来表达太阳风与磁层的相互作用^[4]。我们对太阳耀斑引起的日球扰动的统计研究说明, 太阳风对磁层的相互作用有强和弱两种形式。一种是 $K_p \geq 6$ 级的强扰动, 它与行星际磁场, 尤其是其南向分量增强有密切的关系, 与太阳风速增强也有一定的相关; 另一种是 $K_p = 4, 5$ 的中等扰动, 它与太阳风速增强相关性强, 而与行星际磁场增强相关性较差^[5-7]。 ϵ 函数反映的是强相互作用, 对于中等或弱扰动的反映并不灵敏^[7]。即使在前一种情况下, 地磁指数与 ϵ 函数的相关也并不优于它与行星际磁场总强度或其南向分量的相关^[7]。尤其是 ϵ 函数中并未包括太阳风密度, 因而动压力这一因素, 不能反映磁暴初相的特征。由此可见, 关于地磁扰动对行星际参量

本文 1989 年 10 月 5 月收到, 1990 年 3 月 2 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

的响应问题仍未有定论,是有待于进一步研究的问题。

所有上述研究,均局限于把地磁指数与行星际参数进行数量上的相关统计,未能注意行星际参数的变化并非随机的信号,而是一种有序的序列。这种序列反映了太阳风扰动的空间结构。不同结构的太阳风与磁层的相互作用过程是不相同的。对于一个特定的行星际扰动事件来说,它可能包含着某几种性质不同的结构,决定着磁暴过程是否并且在什么时间出现强扰动,扰动又如何恢复等等。认识这种不同的行星际扰动结构的组合、出现规律以及它们如何引起磁暴形态类型的差异,无论是对于在理论上研究太阳风能量输入磁层的过程,还是从实用上解决磁暴类型预报方法的研究都是十分重要的。

Burlaga 等发现行星际磁云^[8,9]为解决上述问题提供了可能性。所谓磁云是指行星际磁场强度异常地高于背景值,并且磁场矢量由很大的指南(或指北)纬度单调地旋转至指北(或指南)纬度的行星际结构。磁云到达地球,提供了较长时间的行星际磁场向南的条件,从而有助于磁暴强扰动的形成。因此磁云与磁暴关系的研究颇引人注意^[8,10]。章公亮和 Burlaga 把磁云分为负、正两类,即行星际磁场矢量先指南或先指北,发现这两类磁云所引起的磁暴的平均形态特征是不相同的^[11]。除了磁云外,行星际空间还有高密度结构^[12,13],这种结构对磁暴形成的作用尚未有人注意。

关于磁暴类型对行星际参量的响应,我们曾利用第 20 太阳周的资料作过一些初步的探讨,但当时尚未引入磁云及高密度结构的概念^[14]。对磁云结构及其与高速流相互作用的研究说明^[15,16],当不存在大型高速流相互作用时,简单强磁云的基本结构是以行星际激波为先导的磁场湍流、高温、高密度前鞘结构,接着是低温、低密度、强磁场且其倾角单调旋转的磁云本体。可以预料,这些不同的结构会引起不同成分的地磁扰动。例如激波引起地磁场急始脉冲;高密度结构由于它施加的附加动量流,能形成磁场增强的磁暴初相;磁云本体与磁暴主相对应等等。磁云这些结构的不同特性如何引起磁暴类型特性的差异是值得研究的课题。

本文的目的是利用第 21 太阳周极大年前后比较完整的行星际资料,选出典型事例进行分析,以求对行星际磁云的不同特征如何影响着磁暴的形态类型有一系统的认识。为了突出磁云及磁暴的主要特征,这里只讨论 6 个最有代表性的事件。关于磁暴类型的划分,仍采用文献[1]中所定的标准。由于过去的标准是在未有行星际观测资料时制定的,故本文略作修正。文中各图均用相同的格式,自上至下画出太阳风速 V 、行星际磁场总强度 B 及其相对于黄道面的倾角 θ 、质子数密度 N_p 以及地磁 D_{st} 指数和 K_p 指数。竖线划出激波的时间,小三角表示磁暴急始。行星际资料取自文献[7]。

二、强(烈)主相的形成

根据文献[1]的约定,磁暴的强主相是指 K_p 指数超过 6 级,但一般不超过 8 级,并且至少持续 3 个 K_p 时段(3h 为一时段)。如果 K_p 不小于 8 级且持续 2 个以上 K_p 时段,就算作强烈主相。我们的磁暴类型分类并不是简单的强度分类,而是考虑了磁暴的急始和主相这两个过程之间的关系。如果强(烈)主相紧随急始而发生,我们就称之为快速强(烈)主相磁暴,或简称为强(烈)磁暴,分别用符号 $S(B)$ 和 $S(A)$ 表示之。与太阳耀斑的相关统计说明^[1], $S(A)$ 型强烈磁暴是传播速度最快的日地扰动所引起的,出现在耀斑发生后第一天的概率最高; $S(B)$ 型强磁暴次之,出现在耀斑后第二天的概率最高。下面通过两个典型事例来说明

强(烈)主相的形成。

1. S(A) 型强烈磁暴与极高速强负磁云

图 1 是 1978 年 9 月 29 日的行星际-地磁扰动事件。一股极高速强负磁云在共转高速流中运动,引起 S(A) 型强烈磁暴^[6]。磁云前的背景太阳风速已经很高,接近 700 km/s。磁云驱动的激波于 9 月 29 日世界时(下同)03 时通过地球,引起磁暴急始。在激波与磁云本体之间的高密度结构内,粒子密度为每立方厘米 11.0 个粒子,速度高达 912 km/s,时间尺度为 4h。从 D_{st} 指数的变化看,磁暴的初相持续时间与高密度结构的时间尺度是相当的。行星际磁云本体是高速、强磁场、低密度结构。本体流速极高,达 800 km/s,最大磁场强度为 25nT,最低粒子密度每立方厘米只有 0.9 个粒子,磁能相对于动能密度的比值 μ_k 和它相对于热压力的

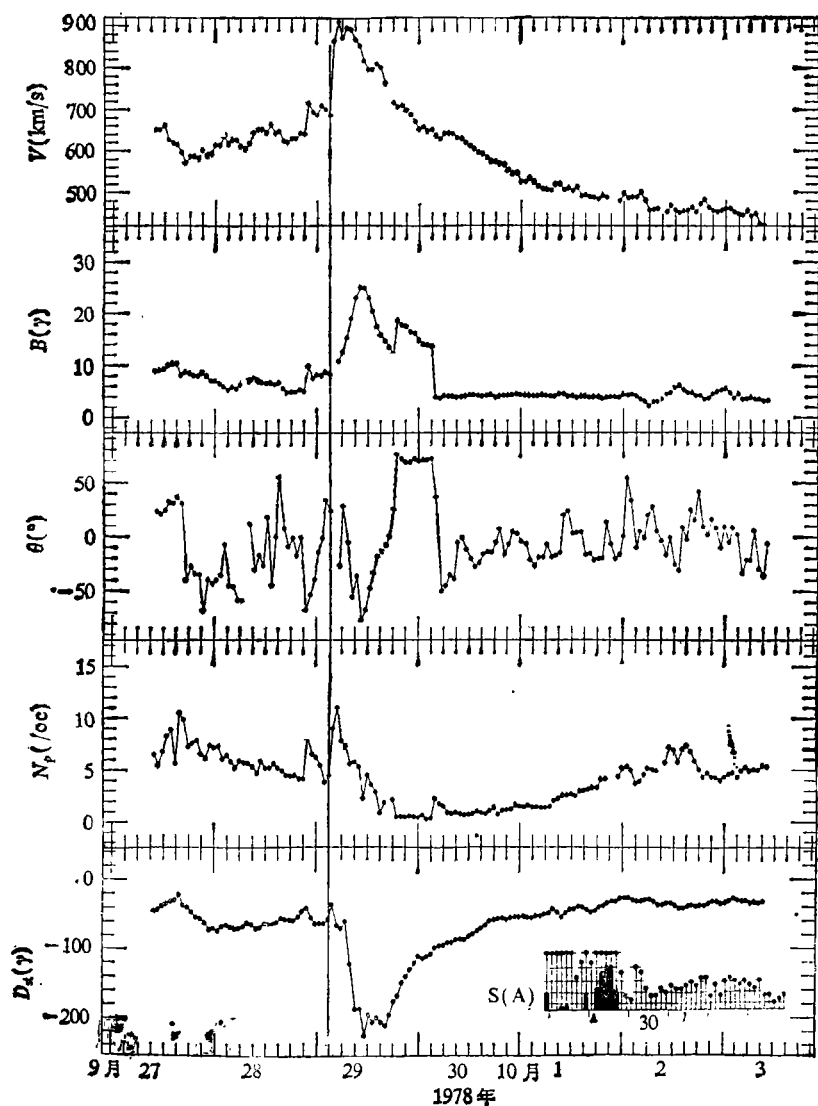


图 1 在高速流中运动的极高速强负磁云引起 S(A) 型强烈磁暴

比值 μ_p 均极高, 分别为 0.8 和 230, 比背景值高出 1 至 2 个量级。磁云磁场矢量倾角 θ 由 -74° 单调旋转至 79° 。当 θ 取负值时, 太阳风能量大量输入磁层, 而低密度流又有可能使磁层向外膨胀, 加快了磁暴主相的发展, 形成了强烈主相。急始后不久, D_{st} 指数迅速下降, 最低值 -224nT 出现在 29 日 11 时。 K_p 指数最大扰动为 $8-8^+8$, 因此达到了 S(A) 型强烈磁暴的标准^[1]。29 日 16 时, 磁云倾角由向南负值变为向北正值时, 主相开始恢复, K_p 指数迅速下降。磁暴的恢复期分为两个阶段。在 9 月 30 日 03 时磁云本体通过前为第一阶段, 主相恢复受磁云磁场影响较大, 恢复率较快。磁云本体过后, 行星际磁场恢复正常, 但太阳风速仍高达 640 km/s , 主相恢复率变缓, D_{st} 指数有随太阳风速降低而恢复的趋势。此事例说明当背景太阳风速度及强负磁云速度都非常高时会形成快速发展的强烈主相。

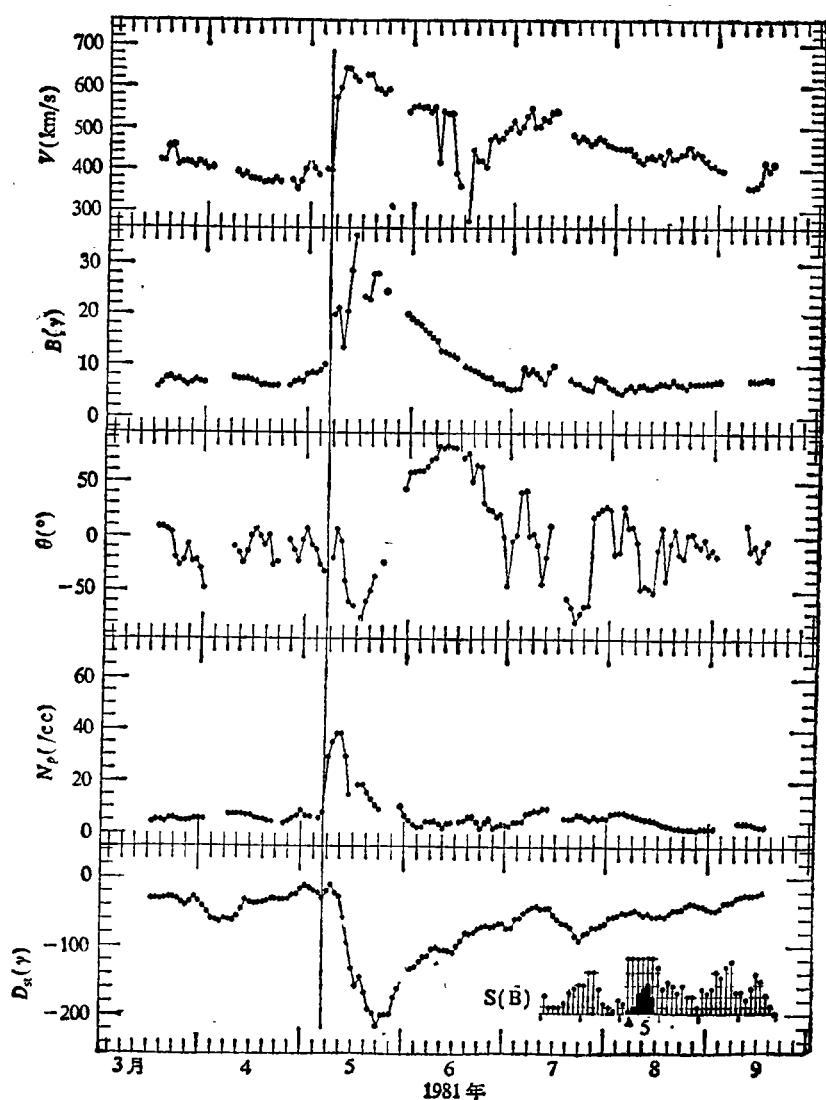


图 2 在低速流中运动的高速强负磁云引起 S(B) 型强磁暴

2. S(B) 型强磁暴与高速强负磁云

图 2 画出 1981 年 3 月 5 日的扰动事件, 一股高速强负磁云在太阳风低速流中运动, 引起 S(B) 型强磁暴。背景太阳风速度平均约 400 km/s, 比上例要低。5 日 05 时行星际激波通过后, 出现高密度结构, 其最大密度达每立方厘米 38.4 个粒子。随后, 地球进入磁云本体, 13 时磁云磁场矢量达到最高纬度 -73° , 磁场最大强度为 35 nT, 磁能对动能密度比 μ_k 和磁压对热压比 μ_p 峰值分别达到 0.2 和 56.6。6 日 09 时, 磁场矢量转至最北纬度 87° , 流速出现陡降, 象是磁云后边界。磁云磁场于 5 日 18 时前后开始缓降, 至 7 日凌晨到达低于背景值, 但后边界磁场变化特征并不明显。磁暴初相的持续时间与行星际高密度结构的时间尺度也是相当的。主相的开始恢复则与磁云磁场从峰值降落及倾角转向北方相对应。由于磁云后边界磁场特征并不明显, 主相恢复率的变化并不明显。但恢复期的结束显然与行星际磁场恢复正常相对应。从 D_{st} 指数的发展过程看, 最低值为 -215 nT, 与上例相近, 似可列为同一类磁暴。但是 K_p 指数的发展则完全不同, 最大扰动为 7^-7^+ , 出现在急始后 4h, 因此与上例不同, 属 S(B) 型强磁暴。就磁云磁场条件而言, 与上例大体相近。但上例的流速远高于本例, 从而形成发展更为迅速而强烈的磁暴。此两事件说明, 我们的 K_p 类型分类比用 D_{st} 变幅分类更能反映行星际扰动结构特征。也说明了我们从耀斑相关统计中得到的 S(A) 型磁暴对应的日地扰动传播速度最快, S(B) 型次之的推论是正确的。

三、强(烈)主相的延迟

在我们的 K_p 类型中有一类称之为 S(C) 型延迟强(烈)主相的磁暴。它的判据是: 急始后只有中等扰动, K_p 指数基本上不超过 5 级, 而 K_p 不小于 6 级的强(烈)主相至少延迟 3 个 K_p 时段才出现。与这种磁暴对应的日地扰动传播速度慢, 出现在耀斑后第 2 天至 3 天的概率最高。我们曾用活塞气体驱动激波的超前时间随活塞速度降低而增长来解释这种延迟主相磁暴的成因^[1]。

对磁云的研究, 启示我们需要考虑更多的因素。前两负磁云的例子说明磁暴主相是紧随高密度结构而发生的, 高密度结构的时间尺度决定了磁暴初相的长度。高密度结构的时间尺度又决定于它的空间尺度和运动速度, 前者又受到磁云及背景太阳风速的影响。磁云与高密度结构的相互作用既能使其压缩, 又能加速, 从而减小其时间尺度。因此, 可以设想当磁云及背景太阳风速变小时, 高密度结构的时间尺度将会变长, 相应的磁暴主相就会延迟。另一种重要的因素是正磁云, 由于其磁倾角先北后南, 也会使主相延迟, 甚至是长时间的延迟。下面通过两个典型事件来说明这些特性。

1. S(C) 型延迟强(烈)主相磁暴与中速负磁云

图 3 画出 1978 年 12 月 19 日行星际地磁扰动事件。一股中速强负磁云在低速太阳风流中运动引起 S(C) 型延迟强主相磁暴。19 日 05 时行星际激波前背景太阳风速略低于 400 km/s, 与图 2 中的事件大体相近。激波后的高密度结构内粒子密度峰为每立方厘米 52.9 个粒子, 比前两例显著地高; 但速度在 500 km/s 左右, 比前两例低; 它的时间尺度为 8h, 显得长得多。与此相对应, 磁暴的初相也长达 8h, D_{st} 指数显著地高于急始前。磁云本体于 19 日 14 时开始通过地球, 倾角由 -63° 单调旋转至 $+87^\circ$, 磁场强度呈坪状分布, 坪值高达 35 nT, 前后边界非常明显。磁云流速平均约为 500 km/s, μ_k , μ_p 分别为 0.6 和 90。由于磁场坪值高,

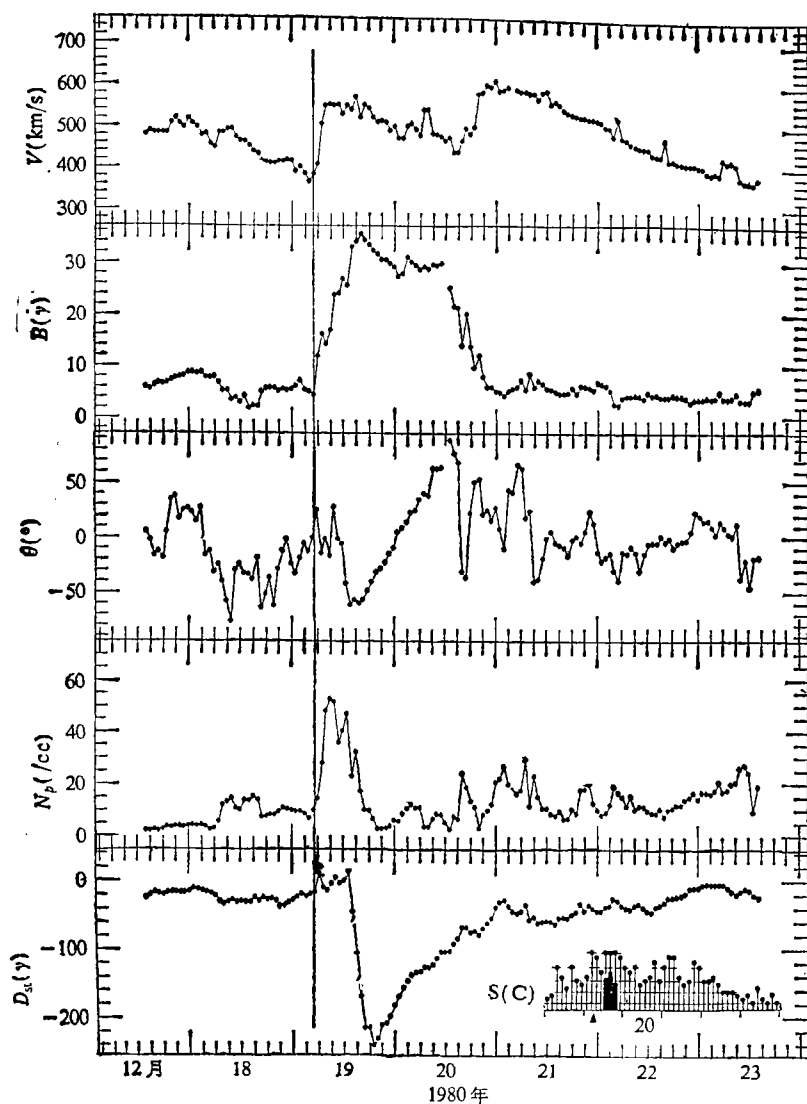


图 3 在低速流中运动的中速强负磁云引起 S(C) 型延迟强主相磁暴

引起磁暴主相比上例强。 D_{st} 指数最低值为 -240 nT。急始后 8h, K_p 指数出现 $7^+8^-7^0$ 的扰动, 可列入强主相的范畴。但由于主相延迟时间已落入第三时段, 可定为 S(C) 型延迟强主相磁暴¹⁾。主相的恢复开始于磁云磁场倾角向北转之际。磁云后边界通过后, 行星际磁场恢复正常, 主相恢复率也有变化。

2. S(C) 型延迟强(烈)主相磁暴与中速强正磁云

图 4 画出 1978 年 8 月 27 日行星际地磁扰动事件, 一股中速强正磁云在极低速流中运动, 并为后随共转高速流所追赶, 引起了非常典型的长延迟强烈主相 S(C) 型磁暴。27 日 03 时激波前的太阳风流速极低, 接近于 300 km/s。激波后的高密度结构的密度峰值为每立方厘米

1) 在文献 [15] 中, 此磁暴曾划为 S(B) 型, 但考虑到主相延迟时间已足够长, 定为 S(C) 型更为合适。

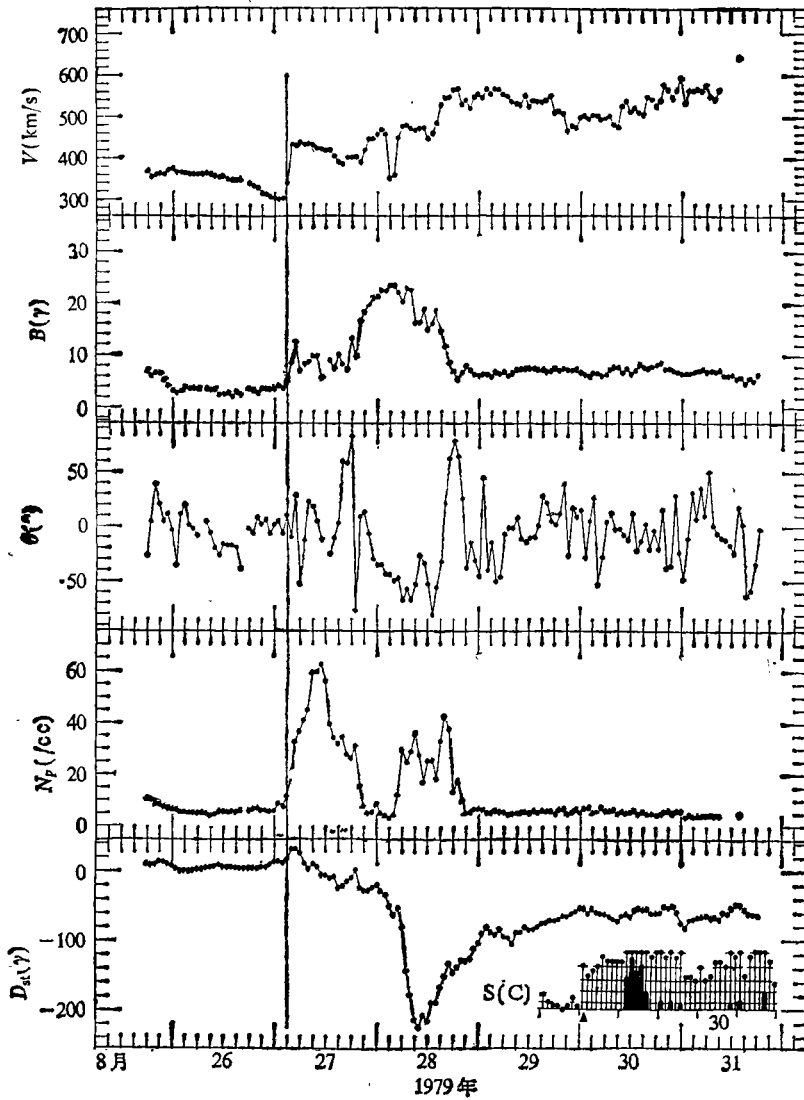


图 4 在极低流速中运动的中速强正磁云引起 S(C) 型延迟强烈主相磁暴

62.5 个粒子,流速在 430 km/s 左右。可能是背景太阳风速极低的缘故,激波与磁云之间的距离被拉开了,高密度结构的时间尺度长达 15h,磁云本体出现在 27 日 18 时,倾角由 $+82^\circ$ 下降,至 28 日 13 时达到最南值 -82° ,然后又较快地回升,至 18 时达 $+78^\circ$ 。在此期间,行星际磁场强度由 10nT 左右增强至峰值 23.6nT,然后又回复至背景值。磁云磁场峰区流速为 450 km/s 左右。 μ_k 和 μ_p 分别是 0.7 和 30,仍属强磁云。此磁云引起的地磁扰动的重要特征是强烈主相延迟时间非常长。从北京地磁台磁照图上可以识别出初相时间长达 16h,与高密度结构时间尺度相当。由于正磁云倾角先正后负,强主相进一步推迟到 28 日 04 时才开始, D_{st} 指数于 28 日 10 时达到最低值 -226 nT。主相的恢复与磁云磁场自最南倾角向北回升相对应,磁云边界过后,恢复率明显降低。从 K_p 指数看,急始的初相及主相缓降阶段 K_p 均在 4 至

5 级水平, 最大 K_p 为 $8^+8^-8^0$, 属强烈主相。但它比急始延迟了 8 个时段, 成为非常典型的长时间延迟主相磁暴。磁云本体过后, 地球仍处于后随共转高速流中, D_{st} 指数及 K_p 指数均未恢复至急始前的水平。这里我们要再次强调形态分类的重要性。图 1, 3, 4 中 3 个磁暴的 D_{st} 下降幅度最低值及最大 K_p 都是非常接近的。如果只考虑强度, 不考虑形态特征, 就容易把它们划入同一类磁暴。但根据我们的 K_p 类型, 就能把它们区分开来。而这种类型差异正是行星际扰动结构不同所引起的。因此我们提出的分类方法是有重要的物理涵义的。

四、弱主相及其延迟

上面 4 个例子说明, 在磁云磁场条件相近的条件下, 随着背景太阳风及磁云流速的降低,

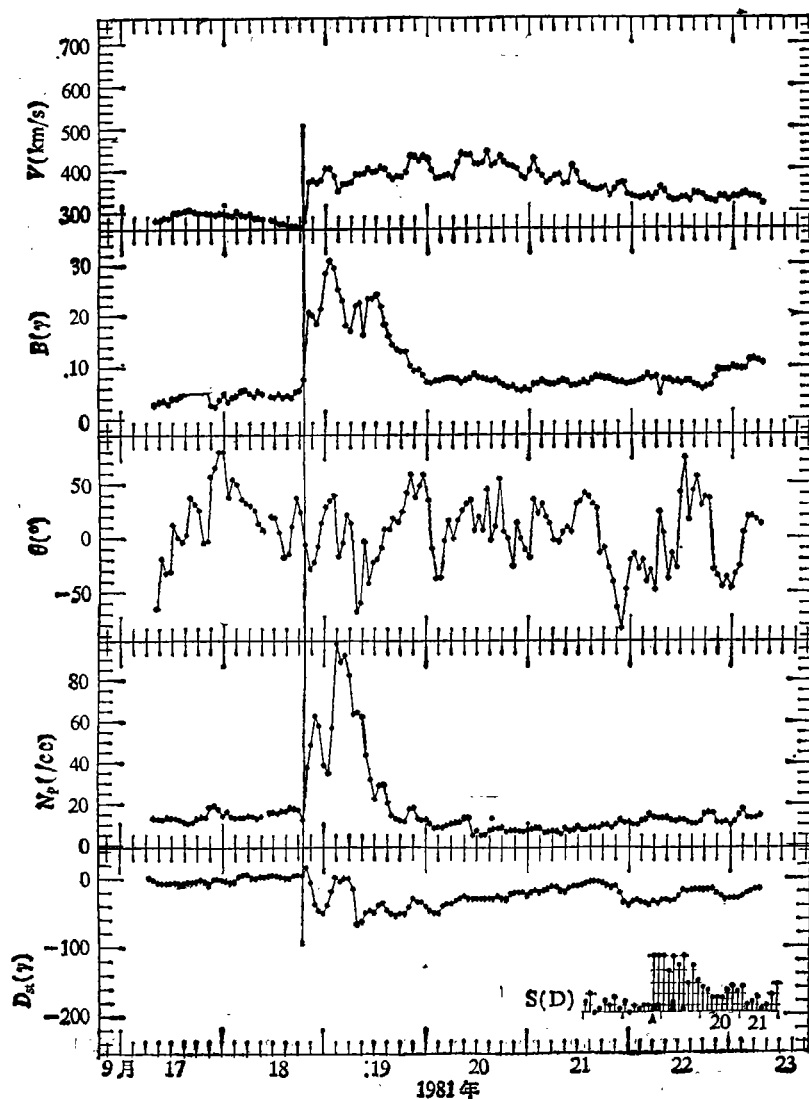


图 5 在极低速流中运动的低速高密度负磁云引起 S(D) 型弱主相磁扰

强烈主相可以减弱为强主相或者延迟。可以预料,当背景太阳风及磁云速度进一步降低时,强主相将退化为弱主相或扰动。在我们的分类中有一类 S(D) 型中等磁扰,它的特点是急始后 K_p 指数基本上不超过 5 级的中等水平,但至少维持在半天以上,其持续时间较长者,扰动指数的变化甚象重现性磁扰^[1]。这类磁扰的主相比较弱,因此可称为弱主相磁扰或中等磁扰。它们与耀斑的统计关系较差,出现在耀斑发生后第三天的概率稍高。下面举例说明引起磁暴主相减弱并延迟的行星际因素。

1. S(D) 型弱主相磁扰与低速负磁云

图 5 是 1981 年 9 月 18 日的行星际地磁扰动事件,一股低速 ($\sim 400 \text{ km/s}$) 高密度磁云在极低速 ($\sim 270 \text{ km/s}$) 流中运动并引起 S(D) 型弱主相磁扰。此事件的高密度结构密度

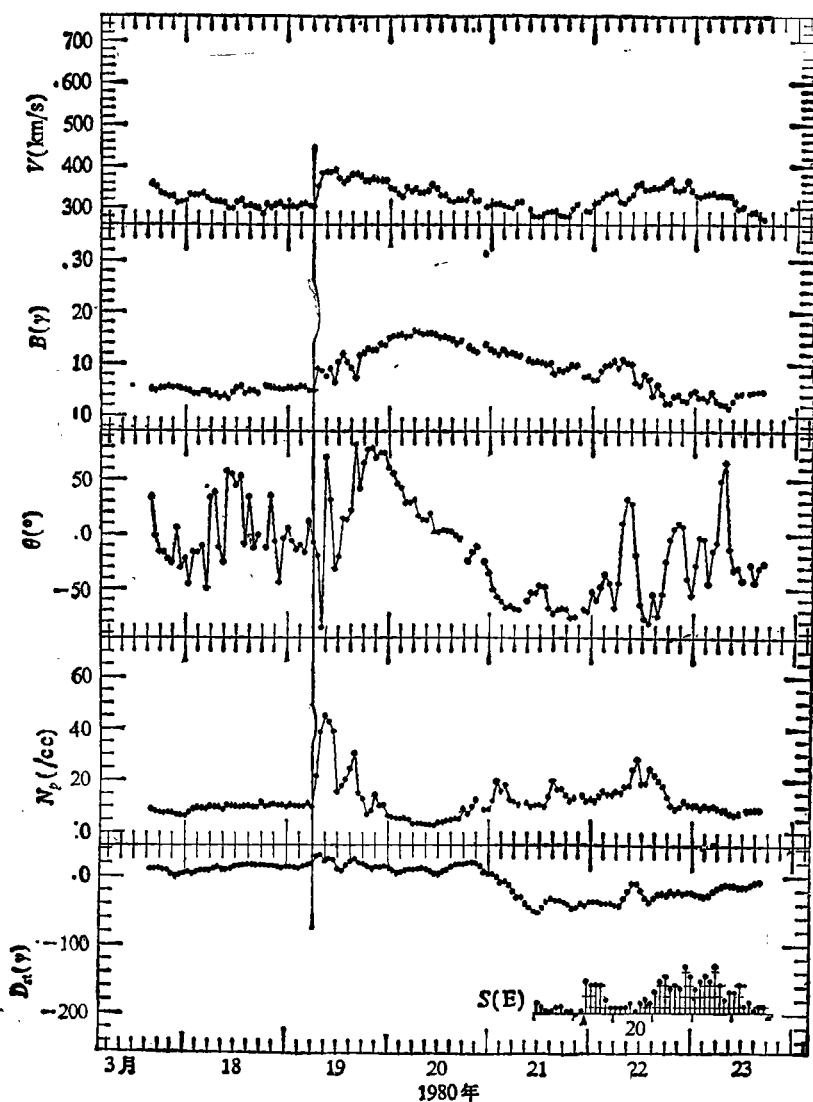


图 6 在极低速流中运动的低速强正磁云引起 S(E) 型延迟弱主相磁扰

峰值异常地高,达每立方厘米 97.7 个粒子,是文献[11]入选的事件中密度最高的事件,时间尺度也长达 15h。与前几个事件不同,行星际磁场峰值出现在密度峰之前,而且磁场增强部分大体上与高密度结构是融合的。因此磁云磁场虽强,峰值为 30.8nT,但 μ 值并不高。急始后 D_{st} 就发生小的下降,但很快又随高密度结构通过而回升,清楚地显示了高密度结构对磁层的压缩作用。磁暴主相很弱, D_{st} 指数最低值为 -65nT。 K_p 指数基本上不大于 5 级,只有几次断续出现的 6 级扰动,构不成强主相,也难区分出初相与主相两个阶段。因此属于 S(D) 型中等磁扰或弱主相磁扰。

2. S(E) 型延迟弱主相磁扰与低速强正磁云

图 6 画出 1980 年 3 月 19 日行星际地磁扰动事件。一股低速 (~ 390 km/s) 强正磁云在极低速流 (~ 300 km/s) 中运动并引起延迟弱主相磁扰(或中等磁扰)。高密度结构密度峰值为每立方厘米 44.6 个粒子,时间尺度为 11h, D_{st} 指数有与高密度结构相对应的增加。从北京地磁台磁照图查出初相结束于 19 日 16 时,与高密度结构的时间尺度相当。正磁云本体开始于同一小时,倾角由 $+84^\circ$ 至 21 日 19 时下降至 -77° ,最强磁场出现在 20 日 06 时,密度最低值为每立方厘米 2.6 个粒子, μ_x 和 μ_y 峰值分别为 0.37 和 30,仍属强磁云。19 日 18 时至 20 日 21 时之间,磁云磁矢量指北期间,地磁场相当平静。接着磁云磁矢量指南,开始一弱主相, D_{st} 指数最低值为 -52nT,与上例相当。主相恢复缓慢,但在 22 日 7 至 14 时,又有与磁云后密度增强相联系的隆起。从 K_p 指数看,急始后初相期最大扰动为 3 级,其后是 K_p 等于 1 级的平静期持续 7 个时段。如果不联系行星际资料,就容易把 20 日的扰动与 19 日的急始分开,而把 19 日的扰动定为 S(d) 型急始弱扰动^[4]。但从磁云结构看是一个完整的扰动过程,它是 S(C) 型延迟强主相退化而成的。因此我们定义了一种新的类型,即 S(E) 型延迟弱主相磁扰(或中等磁扰),即急始后 K_p 等于 4, 5 级的扰动延迟很长时间才出现的磁扰。

五、结 论

(1) 在磁云磁场强度相近的条件下,背景太阳风及磁云的速度影响着磁暴的类型。当流速从极高到低变化时,强负磁云分别依次引起 S(A) 和 S(B) 型快速强(烈)主相磁暴、S(C) 型延迟强(烈)主相磁暴和 S(D) 型弱主相磁扰。

(2) 强正磁云引起的磁暴的主要特性是主相长时间的延迟。背景太阳风及流速的高低仍影响着所引起的磁暴的延迟主相的强弱,决定是 S(C) 型延迟强(烈)主相磁暴还是 S(E) 型延迟弱主相磁扰。

(3) 磁云前的高密度结构是决定磁暴初相特征的重要因素。在磁云内部,密度增强会减弱磁暴主相,而低密度结构则有助于强主相的形成。

(4) 磁暴强(烈)主相的开始取决于磁云磁矢量指南。而其恢复在磁云内部受磁云磁场控制,恢复率快;磁云过后,恢复率变慢,仍受太阳风流的影响。

作者对 Burlaga, L. F. 和 Whang, Y. C. 的有益讨论,美国宇航局世界资料中心 A-R & S 提供行星际资料,联邦德国 Göttingen 大学地球物理研究所提供 K_p 图资料,一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 章公亮,地球物理学报, 25(1982), 10.
- [2] —, 同上, 11(1962), 92.
- [3] —, 同上, 12(1963), 32.
- [4] Akasofu, S.I., *Space Sci. Rev.*, 28(1981), 121.
- [5] 章公亮,陆晨,空间科学学报, 3(1983), 58.
- [6] —, 中国科学A辑, 1984, 3: 254.
- [7] 章公亮,陆晨,地震地磁观测与研究, 6(1985), 1.
- [8] Burlaga, L.F. et al., *Journ. Geophys. Res.*, 86(1981), 6673.
- [9] Klein, L.K. & Burlaga, L. F., *Journ. Geophys. Res.*, 87(1982), 613.
- [10] Wilson, R. M., *Planet. Space Sci.*, 35(1987), 329.
- [11] Zhang, G. & Burlaga, L. F., *Journ. Geophys. Res.*, 93(1988), 2511.
- [12] 章公亮,中国科学A辑, 1989, 5: 502.
- [13] —, 空间物理与探测技术, 3(1988), 8.
- [14] —, 徐元芳,地震地磁观测与研究, 4(1983), 1.
- [15] —, 空间科学学报, 8(1988), 261.
- [16] —, 同上, 9(1989), 1.
- [17] Couzens, D. A. & King, J. H., *Interplanetary Medium Data Book, Supplement 3, 1977—1985, NSSDCI WDC-A, R&S, 86—04, 1986.*