arXiv:2601.18553v1 [astro-ph.SR] 26 Jan 2026

传播前震波边缘的不同瞬态现象

Primož Kajdič [1, *], Xóchitl Blanco-Cano [1], Diana Rojas-Castllo [1] 和, Nojan Omidi[2]。

2026年1月27日

[1] Departamento de Ciencias Espaciales，墨西哥国立自治大学地球物理研究所，墨西哥墨西哥城

[2] Solana Scientific Inc.，美国加利福尼亚州索拉纳海滩

摘要

过去的动力学模拟和航天器观测表明，行进型 foreshock（TF）由前弓压缩边界（FCB）或弓前区泡（FB）中的一种结构所界定。本文介绍了四个在其某一边缘出现不同类型结构的传播前震波。其中两个由 Cluster 任务观测到，并由热流异常（HFA）界定。在其中一个案例中，只有距离弓形激波最近的航天器观测到了 HFA，而另外三个探测器观测到了 FCB。此外，MMS 航天器还观测到另外两个由一种我们称为类 HFA 压缩边界的结构所界定的传播前震波。在航天器数据中，这些结构呈现出与热流异常（HFA）相似的特征：磁场强度和太阳风密度降低、等离子体流减速并偏转，以及温度升高。然而，对这些事件的详细检查显示，太阳风束并未发生加热。相反，太阳风束在这些事件内部几乎完全消失，等离子体矩受到超热粒子的强烈影响。我们认为，类 HFA 压缩边界与行星际磁场方向不连续面的演化和结构有关，其厚度大于超热离子的回旋半径。我们还表明，单个移动 foreshock 可能与多种不同类型的瞬态上游中尺度结构共同出现，这引发了一个问题：它们的综合作用将如何影响弓形激波下游区域。

1 引言

地球弓形激波上游区域高度动态，存在多种不同现象。其中之一是地球的前兆区 [12] ，它形成于弓形激波的准平行区域上游；在该处，上游行星际磁场（IMF）与激波局部法向量之间的夹角 θ_{BN}小于 45°。在前兆区中，原始太阳风（SW）粒子与从弓形激波泄漏或被其反射并获得能量的超热离子群共存。根据前兆区内的位置不同，超热离子可呈现为场向离子束 [FAB，例如 14, 39, 28], 回旋粒子群 [3, 16, 27] 和弥散离子 [40, 7, 8, 58]。太阳风与超热离子之间的相互作用会引发等离子体和磁场不稳定性，进而形成超低频（ULF）波。研究最多的

其中包括所谓的30秒波 [10, 11], , 它们最初是准单色横波，随后被太阳风携带着向弓形激波传播。随着超低频波接近弓形激波，它们会变陡并变得更具压缩性 [19, 31, 46, 18]。

人们常观测到，前兆区由一种称为前兆区压缩边界 [FCB 的结构所界定，例如 52, 35, 44]。场向电流片将充满压缩性超低频波的前兆区部分与未受扰动的太阳风或充满场向束流、但没有超低频波的前兆区区域分隔开来。在航天器数据中，其特征包括：磁场较平静的一侧磁场强度和等离子体密度同时上升，随后在湍动侧二者均减小。过去的研究表明，场向电流片会影响弓形激波下游区域：观测发现，它们会导致磁层顶局部变形，并在磁层中引起瞬态磁场和等离子体密度扰动 [20]。

过去的航天器观测揭示了前兆区空腔（FC）的存在。这种结构的形成，是由于一条小尺度行星际磁场线磁通量管以准平行方式连接到弓形激波的名义准垂直（$\theta_{BN} \geq 45°$）区域 [FC，例如 51, 5, 6]。根据 [52],，航天器数据中的某些前兆区空腔特征可能是由于航天器有限时段地进入和离开前兆区所致。为区分这两种可能性， [34] 和 [23] 将与磁通量管相关的前兆区空腔称为移动前兆区（TF）。在航天器数据中，移动前兆区呈现出“典型”前兆区的所有特征，但其边界由两个行星际磁场方向不连续面构成，表明航天器从一条磁通量管穿越到了另一条。研究表明，移动前兆区会激发磁层 Pc1 波和电磁离子回旋波 [55], , 导致向阳侧磁层发生瞬态压缩，并成为准垂直磁鞘中磁鞘喷流的来源 [53, 24]。

弓形激波上游常见的另一种结构是热流异常 [HFA， 17, 41, 48, 30]。当星际磁场方向不连续面与弓形激波相交，且至少一侧的对流电场（$-\mathbf{V} \times$**磁场强度**）指向该不连续面时，就会产生热流异常。随后，弓形激波反射的离子会沿着不连续面向上游汇聚，使等离子体受热并膨胀。热流异常既可出现在准垂直弓形激波上游，也可出现在前兆区内。

在航天器数据中，热流异常表现为一个热核，其内部磁场强度和等离子体密度大幅降低，等离子体流减速并偏转。核心至少一侧由前沿和后沿界定，界定区域内磁场强度和等离子体密度均增强。研究表明，热流异常会导致磁层顶位移和磁层扰动[49, 57] ，其对地磁场的影响也已由地面观测站探测到 [例如， 50, 21, 15, 25]。

除了热流异常外，太阳风中的旋转间断和切向间断与前兆区内反向流动离子的相互作用，也可能产生其他瞬态现象，例如弓前区泡 [通量束， 33, 37, 36, 38]。 [34] 的混合模拟表明，移动前兆区的边缘可能因等离子体条件不同而与通量束相关，而非前兆区压缩边界。 [26] 对火星的航天器观测展示了一个移动前兆区的实例，其一侧边缘存在通量束。

前弓压缩边界、传播前震波、热流异常和弓前区泡都是地球弓形激波上游常见的瞬态上游中尺度结构[TUMS， 25] 。它们的

典型尺度范围从 ∼2000 km 到超过 10 个地球半径（1 $R_{\mathrm{E}} \sim 6400$km）[60] 。人们认为，它们在促使太阳风的质量、动量和能量传入地球磁层的过程中发挥着重要作用。

本文表明，热流异常可能会取代移动前兆区边缘的场向电流片。当运动电场指向界定这些前兆区的行星际磁场方向不连续面时，就会出现这种情况。我们介绍了两个在其中一侧边缘出现热流异常的移动前兆区。Cluster号航天器星座分别于2005年1月5日（第3.1节）和2005年1月12日（第3.2节）观测到了它们。

我们还表明，有时界定移动前兆区的场向电流片在航天器数据中可能呈现出类似热流异常的特征。然而，更详细的分析显示，其核心区中看似升高的温度以及降低并发生偏转的速度，并非源自太阳风离子束加热。事实上，这些事件内部没有太阳风束加热的证据，而且离子束在其中显著减弱。测得的等离子体矩受到超热离子的显著影响。与相应移动前兆区内部的超热离子相比，前者往往温度更高、分布也更弥散。我们重点介绍了MMS任务于2022年2月6日（第4.1节）和2022年1月30日（第4.2节）观测到的两个类HFA型FCB。

下文将在第 2 节介绍本研究所用的数据集，在第 3 节和第 4 节呈现相关事件，并在第 5 节讨论研究结果。最后，我们将在第 6 节给出结论。

2 仪器和数据集

本研究使用来自两个多航天器任务的观测数据：Cluster卫星 [13]和磁层多尺度任务 [MMS, 9]。这两个任务均由四颗相同的卫星组成，持续测量近地环境中的磁场和等离子体性质。

Cluster号航天器搭载了多套仪器。本文使用磁通门磁强计 [FGM，4] 提供的磁场数据，时间分辨率为 0.2 秒。我们还分析了热离子分析仪（HIA）仪器提供的等离子体数据，其时间分辨率为 ∼4 秒。该仪器属于Cluster离子谱仪 [CIS， 43]套件。

对于MMS任务，我们使用快速等离子体仪器 [42] 提供的等离子体数据，时间分辨率为 4.5 秒；还使用磁通门磁强计 [45] 提供的磁场数据，时间分辨率为 4.5 秒和 1/16 秒。

3 移动 foreshock 边缘的热流异常

3.1 2005年1月5日事件

2005年1月5日，Cluster 1（C1）航天器观测到了第一个事件。图1A展示了一个11分钟的时间区间，在此期间观测到了伴有热流异常（HFA）的移动前兆区（TF）。在 ∼10:42 UT，C1进入了前兆区，该区域以超热离子通量增强为特征（图h中橙色、绿色和黄色表示能量高于 ∼8 keV的离子）。当时没有30秒（∼0.03 Hz）的超低频波（见图a、b以及图i中磁场强度B$_{X,\ GSE}$ 分量的小波谱），这表明观测到的超热离子是场向束流 [，例如 28]，，我们将在下文明确展示这一点

。C1进入该区域时未探测到任何行星际磁场方向不连续，因此该区域可能属于地球的“常规”前兆区。

在 10:45:57 UT，C1 探测到一个行星际磁场方向不连续面，随后出现一个区域，其中充满了压缩性超低频波动和不同类型的离子群。后者包括未被加热的太阳风束离子，它们在面板 h 中呈现为一条连续的窄黄色条带，贯穿整个显示的时间区间；能量高于太阳风束离子的前兆区超热离子，它们存在于整个前兆区区间；以及能量范围宽得多、且延伸至低于太阳风束离子能量的局部加热的太阳风离子。与该不连续面同时，C1 观测到一个前兆区压缩边界，其特征是磁场强度和数密度值先上升，随后相较于周围区域下降。

在 $\sim$10:47 UT，等离子体速度从 $\sim$640 km s^{-1} 降至 145 km s^{-1}，这主要是由 V_X 分量的变化造成的（图1A 中红色阴影区域）。太阳风速度降低的区域伴随着等离子体密度和行星际磁场强度大幅下降，其两侧由磁场强度和数密度升高的两个边缘界定。该处的平行离子温度（面板 d 中的红色曲线）从 1 MK 升高至约 3 MK，而垂直温度没有明显变化。鉴于这些特征以及磁场穿过该区域时旋转了 $\sim$30 °，我们将其称为 HFA0。

在移动 foreshock 的后沿（$\sim$10:50 UT，紫色阴影区域），我们观测到另一个事件，其详情见图1B。该事件呈现出一组热流异常的典型特征：核心区的等离子体密度大幅降低（几乎降至$\sim$0），磁场强度剧烈波动；核心区两侧则是两个边缘，这两种量在边缘处都增强。在该热流异常核心内，平行离子温度（红色曲线）从 $\sim$0.5 MK 升至 $\sim$2.7 MK，而垂直温度（蓝色曲线）跃升至 $\sim$3.8 MK。事件核心区内，太阳风速度从 640 km s^{-1} 降至 215 km s^{-1}，这主要是由 V_x 分量导致的。由于 V 和 N 大幅下降，动压 P_{dyn} 也随之减小。跨越相关的星际磁场方向不连续面时，行星际磁场旋转了 $\sim$37°。离子能谱（图 h）表明，热流异常核心内的温度升高主要是由未受扰动的太阳风离子群体受到强烈加热所致。

在图1C中，我们展示了所有Cluster卫星的磁场剖面。可以看到，C2、C3和C4探测器没有观测到热流异常的特征（增强的边缘、明显的中心凹陷）。进一步检查C3的等离子体数据（未展示）后发现，没有等离子体加热的迹象，这表明这三个探测器可能观测到的是前兆区压缩边界，或者是非常年轻的热流异常。图 2展示了检测到热流异常/通量堆积边界时Cluster探测器的位置，由此可以推断原因。当时，C1航天器的X_{GSE} 坐标是所有航天器中最小的，表明它离弓形激波最近。通过计算四个航天器与模型弓形激波的距离，证实了这一点。该模型由 [54] 描述为离心率为1.15的双曲面，焦点位于(3,0,0) R_E ，半通径为23.75 R_E。后一个数值是根据 [22]中所述，利用环境太阳风动压值对原始 [54] 模型进行缩放后得到的。因此，这个成熟热流异常仅略微延伸至C1的位置，并未延伸到其他探测器所在的位置。

四艘航天器在略有不同的时刻观测到了移动 foreshock 下游边缘的方向不连续面。我们采用与 [47] 所述方法类似的定时法，计算该不连续面所在平面的法向量。图 1D展示了不连续面出现期间所有Cluster卫星的磁场强度$_y$ 变化曲线，

该时间段包含方向不连续面。为计算法向量，我们使用四个探测器数据中共同特征出现的时刻：磁场强度$_y$ 分量开始减小并趋向负值的时刻（箭头所示）。图 1D显示，探测器检测到这一特征的顺序为C3（红色）、C2（蓝色）、C1（黑色）和C4（绿色）。相应时刻分别为10:49:55.461世界时、10:49:54.517世界时、10:49:54.265世界时和10:49:55.902世界时。我们计算得到该不连续面在GSE 坐标系中的法向量为$\hat{n} = (-0.81,\ 0。11,\ 0。57)$。

法向量的方向在图 2 中用棕色箭头标出，而太阳风速度用洋红色箭头表示。

接下来，我们评估不连续面的类型，即切向不连续面还是旋转不连续面。具体而言，我们根据 C1 数据计算以下数值，并采用 [29]中的判据：

$$B_n/B = 0.46, \tag{1}$$
$$\Delta B/B = 0.024, \tag{2}$$

其中， B_n 是行星际磁场在不连续面上的法向分量，而ΔB 是不连续面两侧磁场强度之差。B 是两者中较大的磁场强度。根据 [29]的分类，该不连续面符合旋转不连续面的判据（$\Delta B/B < 0.2$ 和 $B_n/B \geq 0.4$）。

我们还通过计算不连续面两侧的对流电场（$-\mathbf{V} \times \mathbf{B}$）方向，检查是否满足热流异常形成的条件。我们使用以 ∼1分钟为时间间隔取平均的 C1 数据。

在移动 foreshock 内，间断面法向量与对流电场之间的夹角为 106°，而在其外为79°。因此，形成热流异常的第一个条件（至少一侧的对流电场指向间断面）得以满足。

我们进一步分析观测到移动 foreshock 期间的离子通量和速度分布函数（VDFs）。图 3A 展示了磁场强度 (a)、离子能谱 (f)，以及四个不同能量范围内的离子能量通量；这些范围分别对应能量低于太阳风束流能量的离子 (b)、太阳风束能量范围内的离子 (c)，以及超热能量范围内的离子 (d 和 e)。底部面板中的竖线标示了图 3B 所示离子速度分布函数对应的时刻。

图 3A 中最显著的特征是热流异常内部能量低于太阳风束流能量的离子通量出现强峰值。在太阳风束能量范围内，离子通量也出现峰值（面板 c），不过与整个传播型前兆激波区间的其余部分相比，该峰值不那么突出。更高能量范围内的离子（面板 d 和 e）没有表现出任何特殊变化。

图 3B 显示了太阳风整体静止参考系中，移动 foreshock 内部及其附近的离子分布。左侧各面板展示了投影到（V_{per1}，V_{par}）平面上的速度分布函数，其中 V_{par} 是平行于背景行星际磁场的速度分量，而 V_{per1} 方向的计算方式为 $-\mathbf{V} \times \mathbf{B}$，因此平行于对流电场方向。右侧各面板展示了（$V_{per1}$， V_{per2}）平面上的速度分布函数，其中$\mathbf{V_{per2}} = \mathbf{V_{par}} \times \mathbf{V_{per1}}$（电场漂移速度的方向）。所述平面的选取使其包含原点。

图3Bi显示，在TF到达之前，存在两个主要的离子群：其中一个构成太阳风束（靠近两个面板的起源点），另一个具有正向（朝向太阳的）平行速度，从而形成

场向离子束（FAB）。图3Bii显示了HFA发生前的离子分布。太阳风束仍然存在，但在图3Bii左侧面板中，第二个离子群围绕太阳风束形成了一个部分环。右侧面板显示，该分布基本上呈回旋对称 [16]。因此，这一离子群可以描述为处于回旋与弥散之间的阶段。

在热流异常核心（3Biii）中，太阳风束和超热速度分布函数覆盖的速度范围要宽得多，表明这两类粒子都受到强烈加热。最后，图3Biv展示了移动 foreshock 后缘内部的粒子分布。除强烈且各向异性的太阳风粒子群外，速度分布函数还显示存在超热离子，它们形成了中间的回旋相位聚集离子群[16]。此后，离子速度分布函数恢复为原始太阳风束的分布（未显示）。

3.2 2005年1月12日事件

图4A展示了2005年1月12日观测到移动 foreshock 的时间区间。其后沿存在一个热流异常。其核心内的磁场强度降至1.6 nT，等离子体密度几乎降至零。平行温度和垂直温度从 ∼0.8 MK升至 >23 MK，太阳风流速则从660 km s^{-1} 减速至420 km s^{-1}。这主要是由于V_x 分量发生变化，尽管热流异常内部另外两个分量也有显著变化。离子能谱还显示，热流异常核心内发生了离子加热。这一次，Cluster卫星的四个探测器都观测到了热流异常。

图4B展示了四个Cluster探测器在第二个方向不连续面期间测得的磁场强度y 剖面。可以看出，航天器探测到该不连续面的顺序为C3、C4、C2和C1。相对于C1卫星，C2、C3和C4的时间延迟分别为-4.8 s、-4.76 s和-4.65 s。图4C展示了四个Cluster探测器探测到热流异常时的位置。

通过定时法，我们得到不连续面的法向量为$\hat{n} = (-0.51,\ -0.64,\ -0.57)$。

不连续面法向量与移动 foreshock 内外对流电场之间的夹角分别为 44° 和 76°，这意味着满足混杂波前区形成条件。我们再次计算了量$B_n/B = 0.15$ 和 $\Delta B/B = 0.12$。

根据 [29], , 无法明确判定此类间断的真实性质；它可能是旋转间断，也可能是切向间断。

我们在图5A中展示了离子通量。显然，热流异常内部低于太阳风能量的通量（图b）显著增强。太阳风束能量范围内的通量（图c）相比热流异常出现前有所减弱。超热离子在略高于太阳风能量处（图d）出现明显峰值，并在最高能量范围内（图e）出现一个不太显著的峰值。

图5B展示了四个选定时刻的离子分布。面板 i) 显示移动 foreshock 到达前的离子速度分布函数，此时只有太阳风离子存在。之后，在前兆区深处（面板 ii），出现了另一种几乎完全弥散的离子群。在热流异常核心内部（面板 iii），超热离子呈现中间类型的分布；与移动前兆区内部相比，其速度分布函数看起来也更强、更热。在热流异常的后缘内部（面板 iv），离子形成了回旋相位聚集离子群 [16]。

4 类似热流异常的前兆区压缩边界

本节介绍两个事件，它们表现出热流异常的许多观测特征；然而，仔细检查后发现，其核心中并不存在太阳风束加热。

4.1 2022年2月6日事件

我们的第三个案例研究是 MMS 航天器于 2022年2月6日观测到的一次事件。乍看之下，该事件在图6A和B）中的特征与热流异常相似：它出现在移动 foreshock 的下游边缘，并以一个行星际磁场方向不连续为中心。事件核心区的温度显著升高（达到 ∼16.5 MK），流速也明显偏转并减慢，从∼500 km s^{-1} 降至 ∼240 km s^{-1}。结构内部的最低磁场强度仅为∼0.16 nT，密度则降至 ∼0.24 cm^{-3}。

然而，这次事件与之前的事件不同。对图6Bh中离子能谱的详细检查显示，太阳风束完全没有受到加热。相反，其强度大幅减弱，而超热离子在事件核心区占主导地位。

我们在图7A中展示了离子能量通量。可以看到，结构内部低于原始太阳风束能量范围的离子通量与移动 foreshock 中的相似，而在太阳风束的能量范围内，离子通量则大幅减弱。事件内部的超热离子能量通量呈现峰值。

我们在图7B中展示了与该事件相关的离子分布。其对应时刻标示在图7Af中。移动 foreshock 到达之前（面板i），似乎存在两个离子群。仔细检查离子能谱以及热等离子体成分分析仪 [HPCA, 59, not shown] 提供的矩 ∼后发现，这两个离子群都属于原始太阳风束。图7Bi中速度为 ∼零的离子群由质子构成，另一个则由阿尔法粒子（He^{++}）构成。

在事件前缘（面板ii），两个太阳风离子群与一个温度更高、看起来与它们分离的离子群汇合。在事件核心（面板iii），超热离子群温度更高，且几乎完全弥散，而太阳风束强度则大幅减弱。事件过后（面板iv），超热离子群几乎完全弥散，但温度低于事件内部的超热离子群。

4.2 2022年1月30日事件

我们的最后一个案例研究由MMS任务于2022年1月30日观测到（图8A和B）。相应的移动 foreshock于世界时 ∼20:10首次被探测到，并持续至世界时 ∼20:25。其后缘的类HFA事件从世界时 ∼20:23:45持续至世界时20:25:37。事件内部的最低磁场强度几乎为0 nT，而最低密度值为0.35 cm^{-3}。事件内部的温度峰值为10.6 MK，而太阳风速度从前兆区内的433 km s^{-1} 降至事件内部的最低值310 km s^{-1}。

我们再次分析图 9A 中该结构内及其附近的离子通量。可以看到，能量低于太阳风的离子通量（b）与移动 foreshock 内的水平相近。太阳风束范围内的通量（c）在事件内部大幅下降，而超热离子通量（d 和 e）则呈现明显的峰值。

从图9B中还可以看到，该结构核心中的太阳风离子群显著减少（9Biii）。超热离子的速度分布函数从事件发生前（9Bi）和结构前缘（9Bii）处的中等状态，转变为事件核心内（9Biii）高温、弥散的离子群。在之后的时段（9B）iv），原始太阳风束占据主导地位。

5 讨论

5.1 多重TUMS事件

已知前兆区（包括“常规”前兆区和移动前兆区）通常由场向电流片界定。然而，移动前兆区与常规前兆区不同，它形成于磁场磁通管内部，而这些磁通管以准平行方式连接到名义上呈准垂直的激波。因此，在航天器数据中，移动前兆区总是由行星际磁场方向不连续面界定。在条件合适时，热流异常会取代场向电流片出现，这似乎是很自然的。

然而，此类热流异常只会沿着方向不连续面靠近弓形激波的那一段取代场向电流片。这是因为它们会在激波附近开始形成，并且只会逐渐向上游扩展。2005年1月5日的热流异常可能就是这种情况：只有 C1航天器观测到了它，而另外三台距离更远的探测器则探测到了场向电流片。

此外，在该移动前兆区的前缘，Cluster号航天器观测到一个类 HFA 压缩边界，而在其内部则探测到一个热流异常。这意味着，四种不同的TUMS（移动前兆区、类 HFA 压缩边界、热流异常和尾随场向电流片）几乎同时撞击了弓形激波。这种多重TUMS事件的影响将成为未来研究的课题。

这类研究十分重要，因为目前针对多重TUMS事件的研究屈指可数。 [36], [36] 和 [56] 开展了3维和2.5维混合模拟，以说明单个行星际磁场不连续面能够导致场向电流片和热流异常的形成。在 [37] 的模拟中，这两种结构都会影响金星磁鞘，导致电离层向日侧扩展，并使行星离子流出；其中，场向电流片的影响范围更广。在 [56] 的模拟中，单个行星际磁场方向不连续面首先驱动了一个场向电流片，随后与模拟的地球弓形激波相交，又导致多个热流异常形成。这类多重事件对弓形激波及其下游区域的综合影响尚未得到研究，但 [56] 指出，这种影响很可能比各个单独结构的影响更强烈。

5.2 传播前震波边缘处的热流异常类前兆区压缩边界

在我们工作的第二部分，我们描述了两个移动前兆区，它们的一侧边缘呈现类 HFA 压缩边界。在航天器数据中，这些事件表现出与热流异常相似的特征：其核心区内磁场强度和等离子体密度大幅下降，同时太阳风流减速并偏转，温度则大幅升高。然而，经过更细致的检查发现，实际上太阳风离子在这些事件内部并未受热。表观温升主要是因为其中几乎没有太阳风离子，且等离子体矩受到超热离子群的强烈影响。然而，后者比移动前兆区其他部分的超热离子温度更高、分布更弥散，因此导致温度升高。

此外，这两个类 HFA 压缩边界的边缘都相对较弱，磁场强度和数密度仅略有增加，而且其剖面相当“平滑”，也就是说，内部没有大振幅的磁场强度和数密度振荡或波。

目前尚不清楚，类 HFA 压缩边界是否是一种不会因爆炸性膨胀而形成的新现象，因此其核心区没有活跃的离子加热且边缘较弱；还是说，它们代表了 HFA 演化的晚期阶段，此时太阳风束已完全获得能量并转化为超热离子群，膨胀已经减缓，边缘也已减弱。

与前两个案例研究（热流异常）以及后两个事件（类HFA型FCB）相关的行星际磁场方向不连续面之间，一个重要区别在于它们在航天器数据中的持续时间。对于2005年1月5日和2005年1月12日的事件，持续时间分别为38秒和24秒；而对于另外两个事件，持续时间约为3分钟和15秒。

我们根据数据中的持续时间，并通过利用移动前兆区内部和未受扰动的太阳风中的磁场矢量的叉积计算其法向量，确定了后两个行星际磁场方向不连续面的厚度。对于2022年2月6日和2022年1月30日的事件，其厚度分别为1.9 R_E 和1.6 R_E 。这远大于根据两个事件中10 keV–30 keV能量范围估算的超热离子拉莫尔半径，后者介于0.37 R_E 和0.75 R_E之间。因此，可以确定这两个行星际磁场旋转非常厚，使得超热离子在其中始终保持磁化状态。

这可能是 FB 或 HFA 未能在这些 TF 边缘形成的原因之一。 [2] 和 [1] 指出，要形成这些结构，行星际磁场旋转必须发生在小于超热离子回旋半径的空间尺度上。因此，我们转而参考 [34] 的研究，试图为观测到的类 HFA 压缩边界找到一种解释。

[34] 使用 2.5维（空间为二维、电流和电磁场为三维）的全局混合代码研究 FCB 的动力学。作者在稳定和随时间变化的行星际磁场方向条件下进行了多次模拟。在第二次模拟中，[34]模拟了界定移动前兆区的 FCB（见其图6）。形成于 TF 前缘的 FCB 与我们观测到的事件具有相似之处：B 和 N 剖面中的凹陷远深于超低频波的振幅，而且该结构核心的温度高于 TF 其余部分。

为进一步阐述这一点，我们在图10中展示了该次模拟的更多结果。图(a)–(e)依次展示了沿弓形激波附近一条轨迹的温度（以上游值归一化）、离子速度（以阿尔芬速度归一化）、磁场分量、磁场强度以及密度（以各自的上游值归一化）的变化。从太阳风中出发，会遇到旋转间断（紫色阴影区域）；该间断伴随着温度升高、速度小幅下降，以及磁场和密度大幅降低。旋转间断的后部与磁场和密度增强区域重合，这些增强与前兆区压缩边界的形成有关（红色矩形框内）。如 [34], 的图6所示，与前兆区压缩边界相关的密度增强强度会随其与弓形激波距离的增加而减弱（见图10的(i)和(j)面板）。

一般而言，FCB 的形成和性质预计不会与 RD 的性质相关，而是与 [32, 34] 中提到的等离子体条件有关，例如 SW 马赫数和锥角。因此，我们单独考察 RD 的性质。在模拟中初始化 RDs 时，磁场旋转的厚度设为 2 个热质子

惯性长度，且等离子体性质没有任何变化。随着时间推移，RD 的厚度会调整，形成一种自洽结构；这种结构与图10的 (a–e) 面板中所示的结构不同。为说明这一点，图10的 (f–j) 面板展示了远离弓形激波处同一 RD 上的变化，与 (a)–(e) 面板中的情况相同。与弓形激波附近观察到的变化不同，除了 RD 内部有所展宽且 B 略有下降外，没有观察到其他变化。

6 结论

本文考察了TF与太阳风之间边界的结构。鉴于TF两侧均由星际磁场旋转间断界定，这些边界的结构必然包含旋转间断。以往的模拟和观测表明，TF的边缘可能伴有前兆区压缩边界或通量束。本研究表明，TF也可能伴有热流异常，或伴有旋转间断与来自弓形激波的反向流动离子相互作用所形成的非线性结构。以往研究表明，前兆区压缩边界、热流异常和通量束的形成都需要特定的等离子体条件，而这些条件在给定TF的边缘处未必能够满足。因此，TF的边缘可能伴有上述任意一种结构，具体取决于上游条件。我们还证明，旋转间断与反向流动离子的相互作用会显著改变旋转间断的性质，包括大幅降低其密度和磁场强度。这进而影响TF的整体结构。未来的研究将揭示此类结构对弓形激波及其下游区域的影响。

7 致谢

TP.K.的研究由 PAPIIT-DGAPA 通过项目资助 IN100424 提供经费。DRC 的研究获得了 UNAM-PAPIIT 资助 IA105223 和 SECIHTI 资助 CF-2023-I-1264 的支持。N.O. 在 Solana Scientific Inc. 的工作获得了 NASA-LWS 资助 #80NSCC23K1401 的支持。XBC 感谢 DGAPA PAPIIT 资助 IN106724。

参考文献

[1] Xin An、Terry Z. Liu、Jacob Bortnik、Adnane Osmane 和 Vassilis Angelopoulos。前兆区瞬态及相关次级激波的形成。《天体物理学杂志》，901(1):73，2020年9月。doi: 10.3847/1538-4357/ abaf03。[2] M. O. Archer、D. L. Turner、J. P. Eastwood、S. J. Schwartz 和 T. S. Horbury。前兆区气泡的全球影响：磁鞘、磁层顶及地基观测。《行星与空间科学》，106:56–66，2015年2月。doi: 10.1016/j.pss.2014.11.026。[3] H. V. Argo、J. R. Asbridge、S. J. Bame、A. J. Hundhausen 和 I. B. Strong。弓形激波两侧太阳风等离子体变化的观测。《地球物理研究杂志》（*1896–1977*），72(7):1989–1994，1967年。doi: https://doi. org/10.1029/JZ072i007p01989。URL https://agupubs.onlinelibrary.wiley. com/doi/abs/10.1029/JZ072i007p01989。[4] A. Balogh、C. M. Carr、M. H. Acuña、M. W. Dunlop、T. J. Beek、P. Brown、K.-H. Fornacon、E. Georgescu、K.-H. Glassmeier、J. Harris、G. Musmann、T. Oddy 和 K. Schwingenschuh。Cluster磁场探测：在轨性能和初步结果概述。《地球物理年刊》，19(10/12):1207–1217，2001年。doi: 10.5194/angeo-19-1207-2001。URL https://www.ann-geophys. net/19/1207/2001/。[5] L. Billingham、S. J. Schwartz 和 D. G. Sibeck。前兆区空腔的统计特征：Cluster调查结果。《地球物理年报》，26:3653–3667，2008年11月。doi: 10.5194/angeo-26-3653-2008。[6] L. Billingham、S. J. Schwartz 和 M. Wilber。前兆区空腔与内部前兆区边界。《行星与空间科学》，59:456–467，2011年5月。doi: 10.1016/ j.pss.2010.01.012。[7] C. Bonifazi 和 G. Moreno。从地球弓形激波反向流动的反射离子和弥散离子 1. 基本性质。《地球物理研究杂志》，86(A6): 4397–4404，1981年6月。doi: 10.1029/JA086iA06p04397。[8] C. Bonifazi 和 G. Moreno。从地球弓形激波反向流动的反射离子和弥散离子 2. 起源。《地球物理研究杂志》，86(A6):4405–4414，1981年6月。doi: 10.1029/JA086iA06p04405。[9] J. L. Burch、R. B. Torbert、T. D. Phan、L. J. Chen、T. E. Moore、R. E. Ergun、J. P. Eastwood、D. J. Gershman、P. A. Cassak、M. R. Argall、S. Wang、M. Hesse、C. J. Pollock、B. L. Giles、R. Nakamura、B. H. Mauk、S. A. Fuselier、C. T. Russell、R. J. Strangeway、J. F. Drake、M. A. Shay、Yu. V. Khotyaintsev、P. A. Lindqvist、G. Marklund、F. D. Wilder、D. T. Young、K. Torkar、J. Goldstein、J. C. Dorelli、L. A. Avanov、M. Oka、D. N. Baker、A. N. Jaynes、K. A. Goodrich、I. J. Cohen、D. L. Turner、J. F. Fennell、J. B. Blake、J. Clemmons、M. Goldman、D. Newman、S. M. Petrinec、K. J. Trattner、B. Lavraud、P. H. Reiff、W. Baumjohann、W. Magnes、M. Steller、W. Lewis、Y. Saito、V. Coffey 和 M. Chandler。太空中的磁重联电子尺度测量。《科学》，352:aaf2939，2016年6月。doi: 10.1126/science.aaf2939。

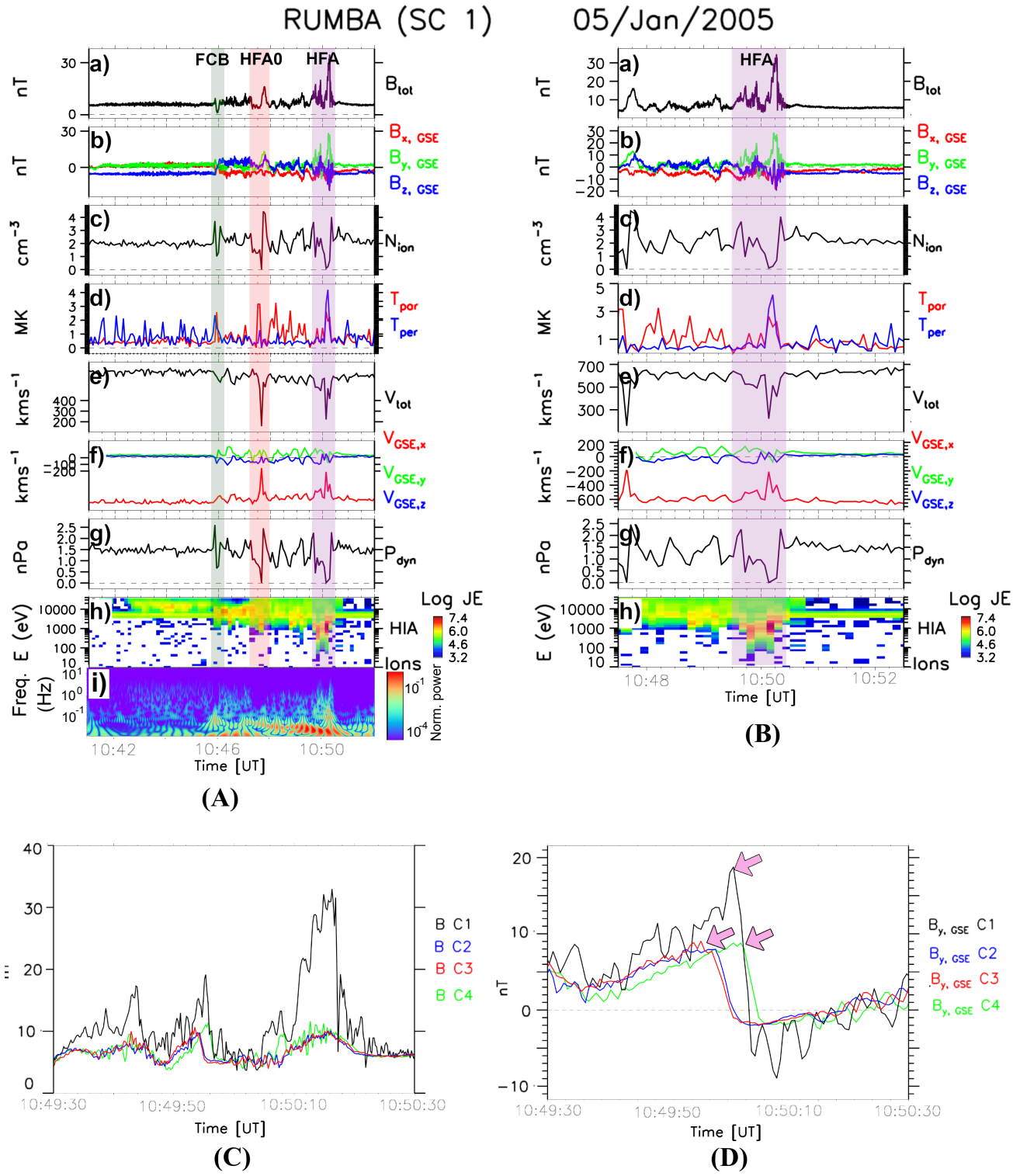

图1：（A）Cluster 1号航天器于2005年1月5日观测到的移动 foreshock。该现象伴随两个太阳风流速显著减慢的事件。第一个是于10:47 UT在移动 foreshock内部深处探测到的SHFA（红色阴影区域）。第二个事件是于 ~10:50 UT在移动 foreshock边缘探测到的HFA（紫色阴影区域）。（B）以HFA为中心的较短时间区间。图（A）和（B）中的各面板从上到下分别显示：行星际磁场强度、GSE坐标系中的行星际磁场分量、等离子体密度、垂直（蓝色）和平行（红色）温度、太阳风整体速度、GSE坐标系中的太阳风速度分量、动压以及离子能谱。此外，面板Ai显示$B_{X,GSE}$ 分量的Morlet小波谱。（C）HFA期间四颗Cluster卫星的磁场剖面。（D）行星际磁场的B_{y} 剖面

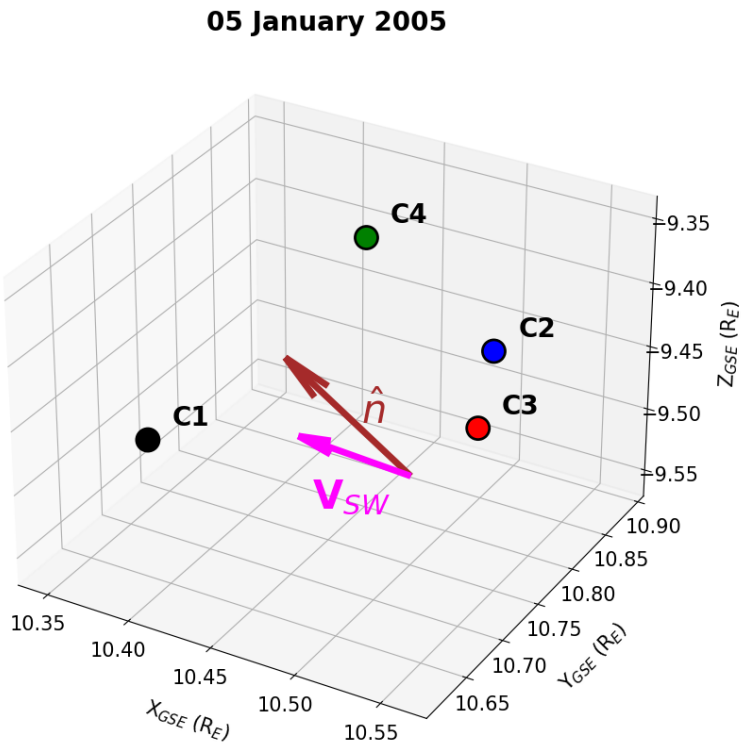

图 2：2005年1月5日探测到行星际磁场方向不连续时 Cluster探测器的位置。棕色箭头表示方向不连续面的法向量，洋红色箭头表示太阳风速度的方向。

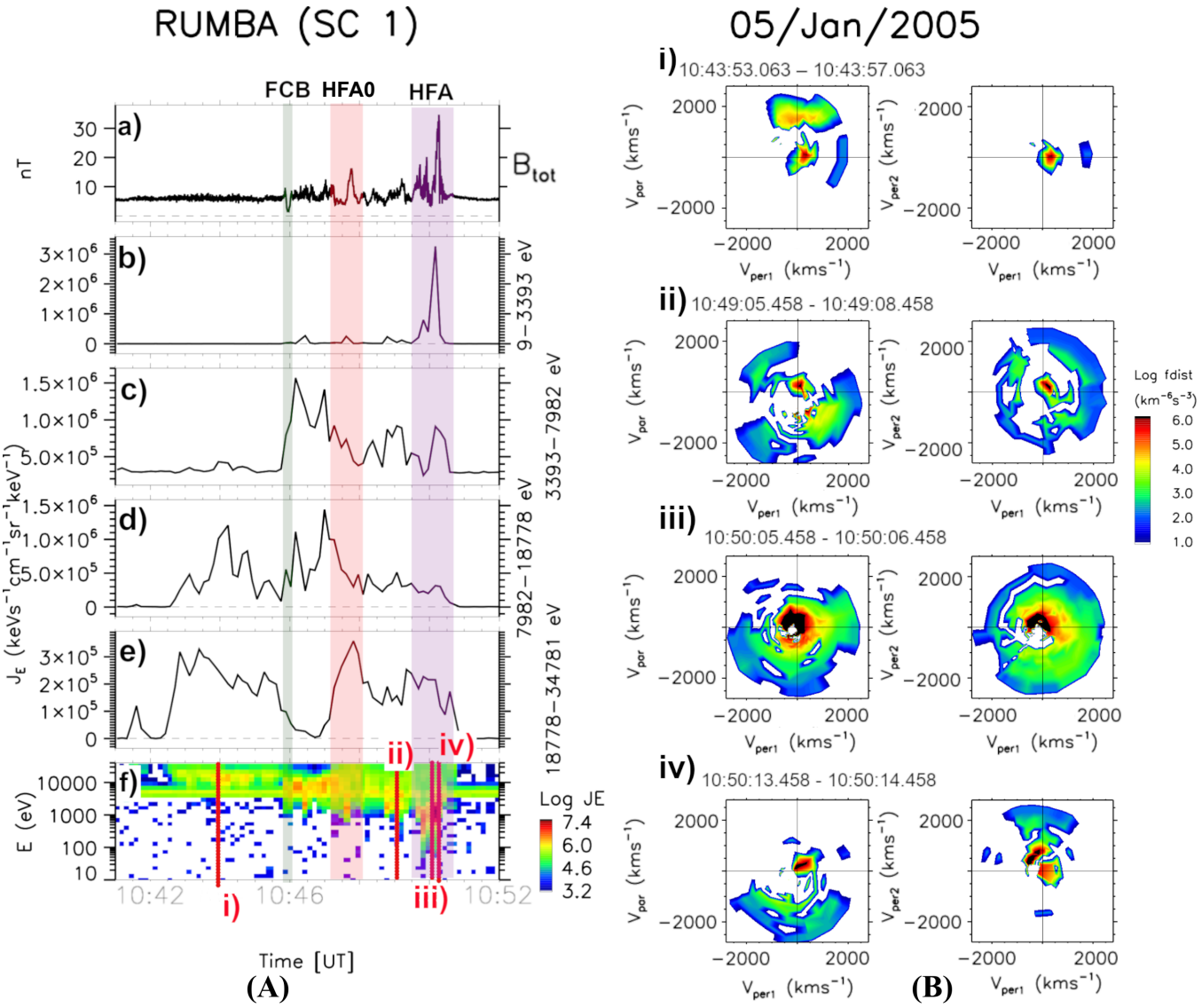

图 3: （A）从上到下依次为：观测到 2005年1月5日移动 foreshock 期间的磁场强度、不同能量范围内的离子通量和离子能谱。（B）选定时刻的离子分布函数（标记于图 3Af 中）。

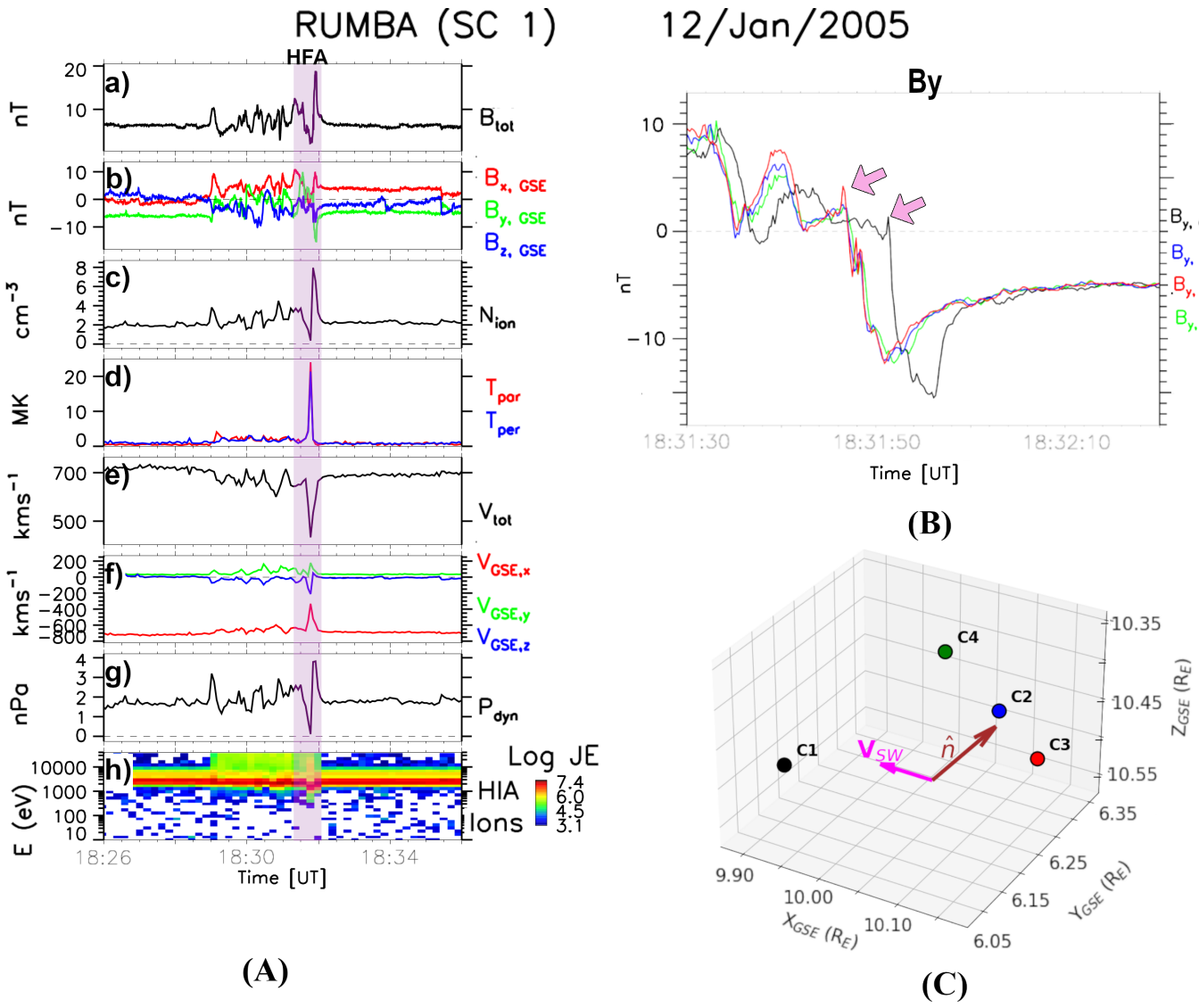

图4：（A）Cluster 1于2005年1月12日观测到的移动 foreshock，其后缘有热流异常。（B）移动 foreshock后缘的磁场强度y 剖面。箭头标示定时分析所用的时刻。（C）探测到行星际磁场方向不连续面期间 Cluster探测器的位置。棕色箭头表示方向不连续面的法向量，洋红色箭头表示太阳风速度的方向。

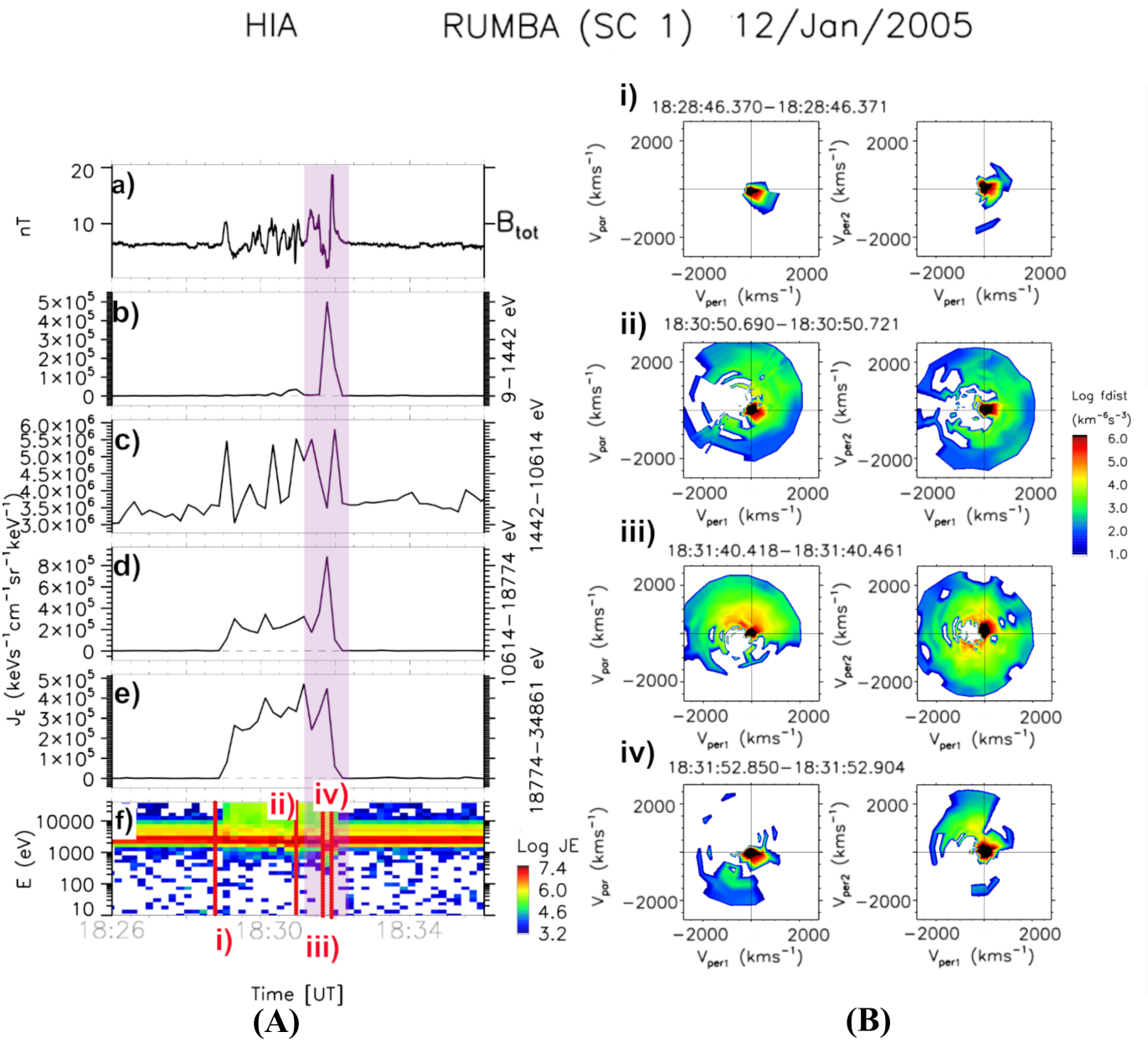

图5：（A）2005年1月12日事件发生前后的离子通量。（B）选定时刻的离子分布函数（标注于图5Af中）。

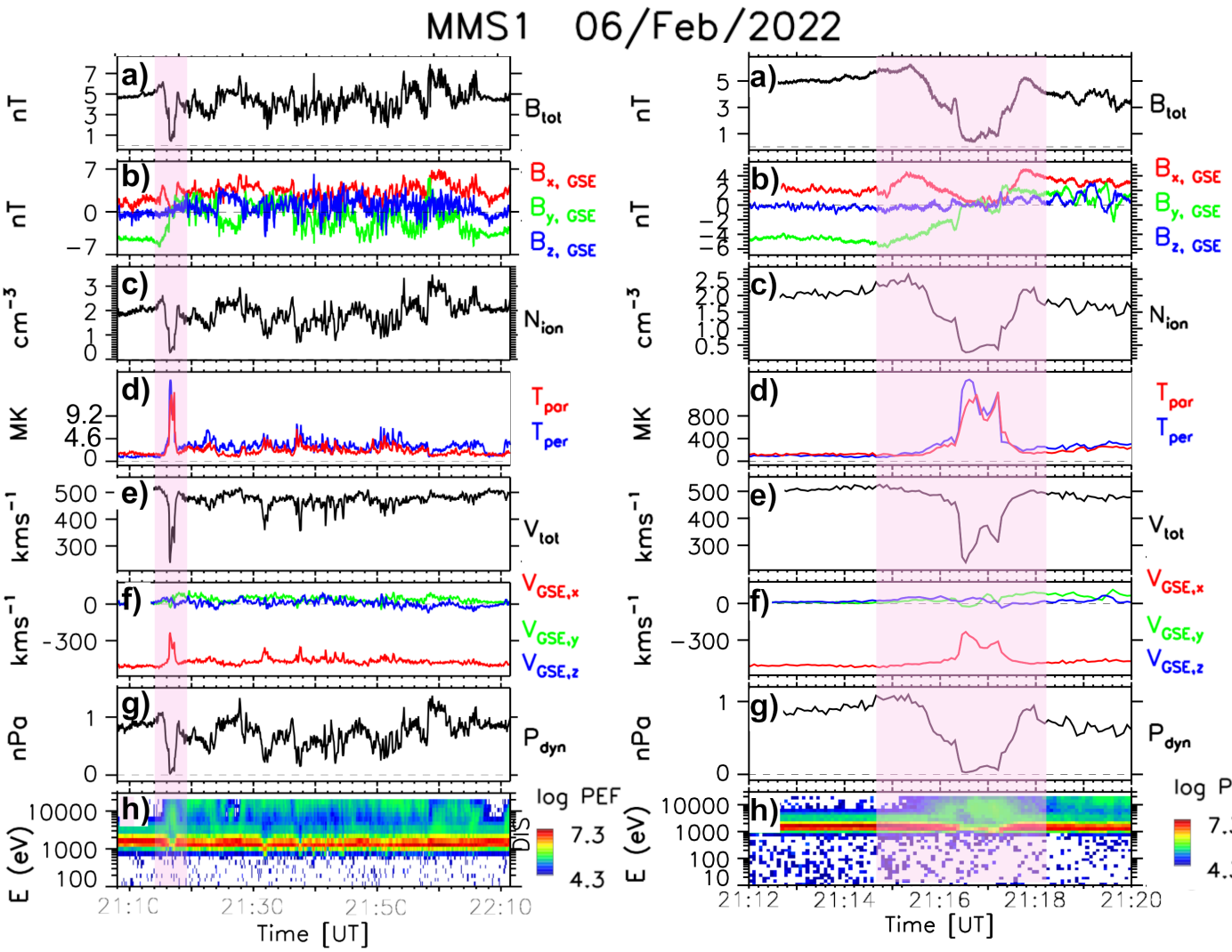

图6 : 202年2月6日观测到的移动 foreshock和类HFA事件 2.

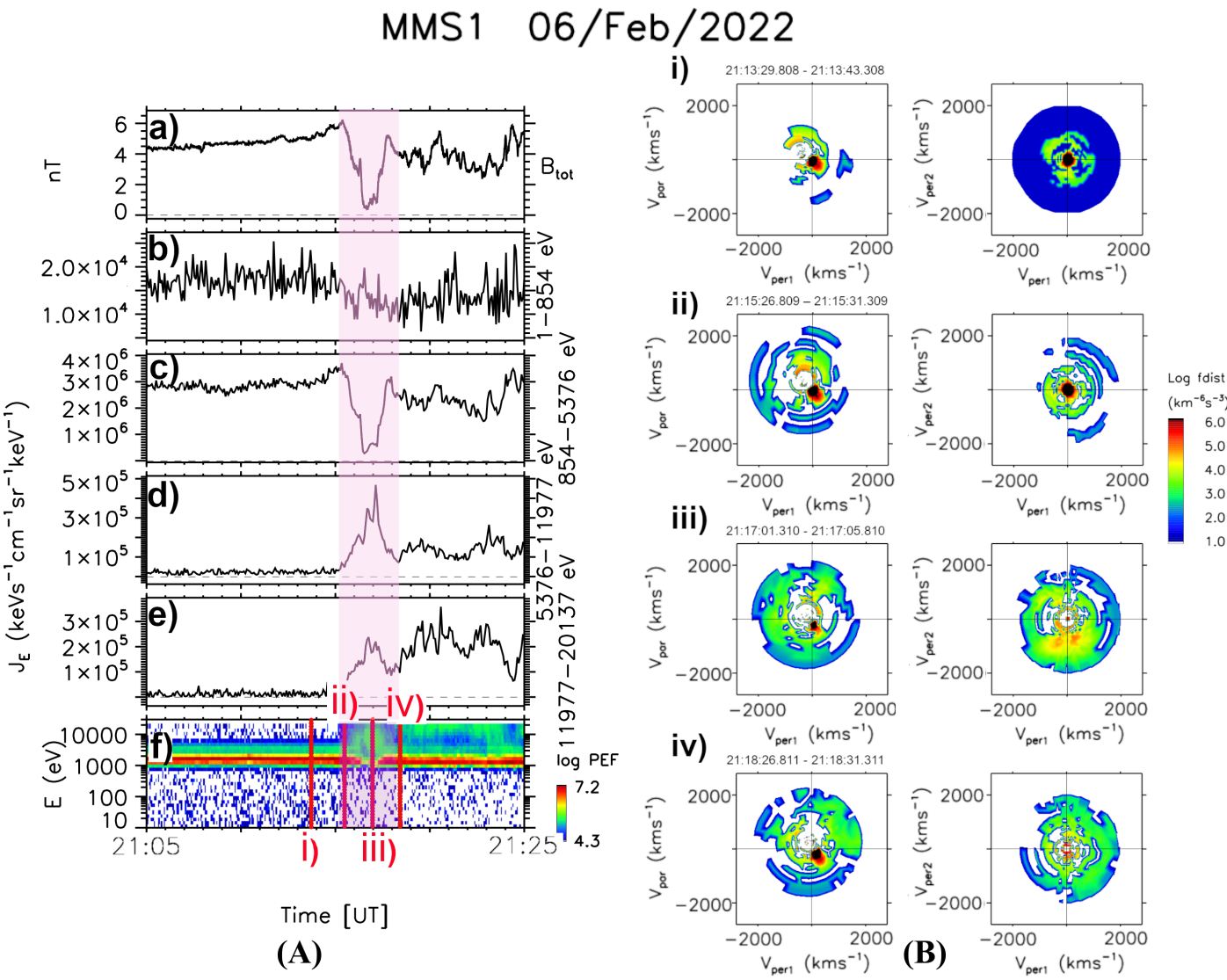

图7：（A）2022年2月6日观测到的事件期间的磁场和离子通量。（B）图7A(f)中标记的选定时刻的分布函数。

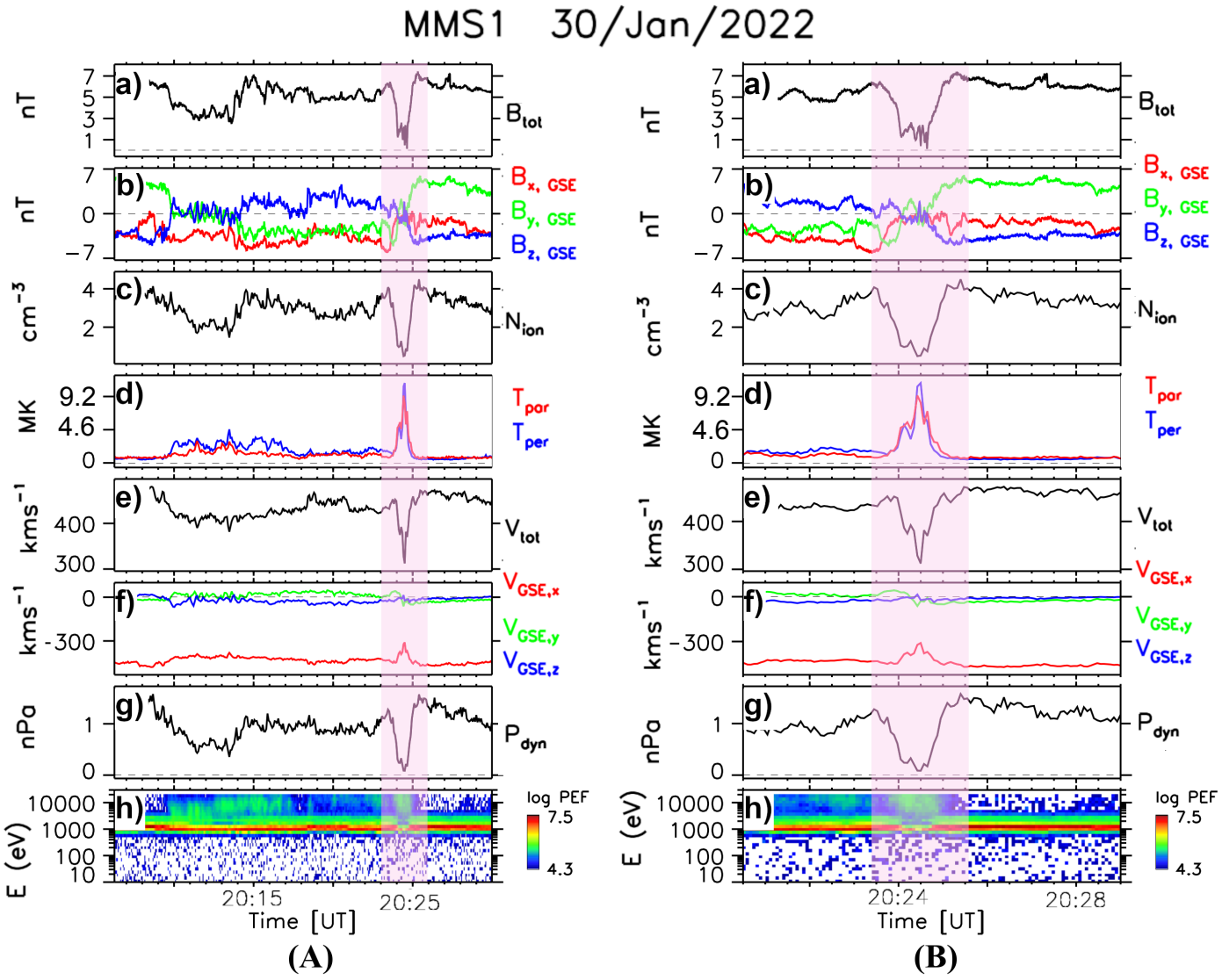

图8 ： 202年1月30日观测到的移动 foreshock 和类HFA事件 2.

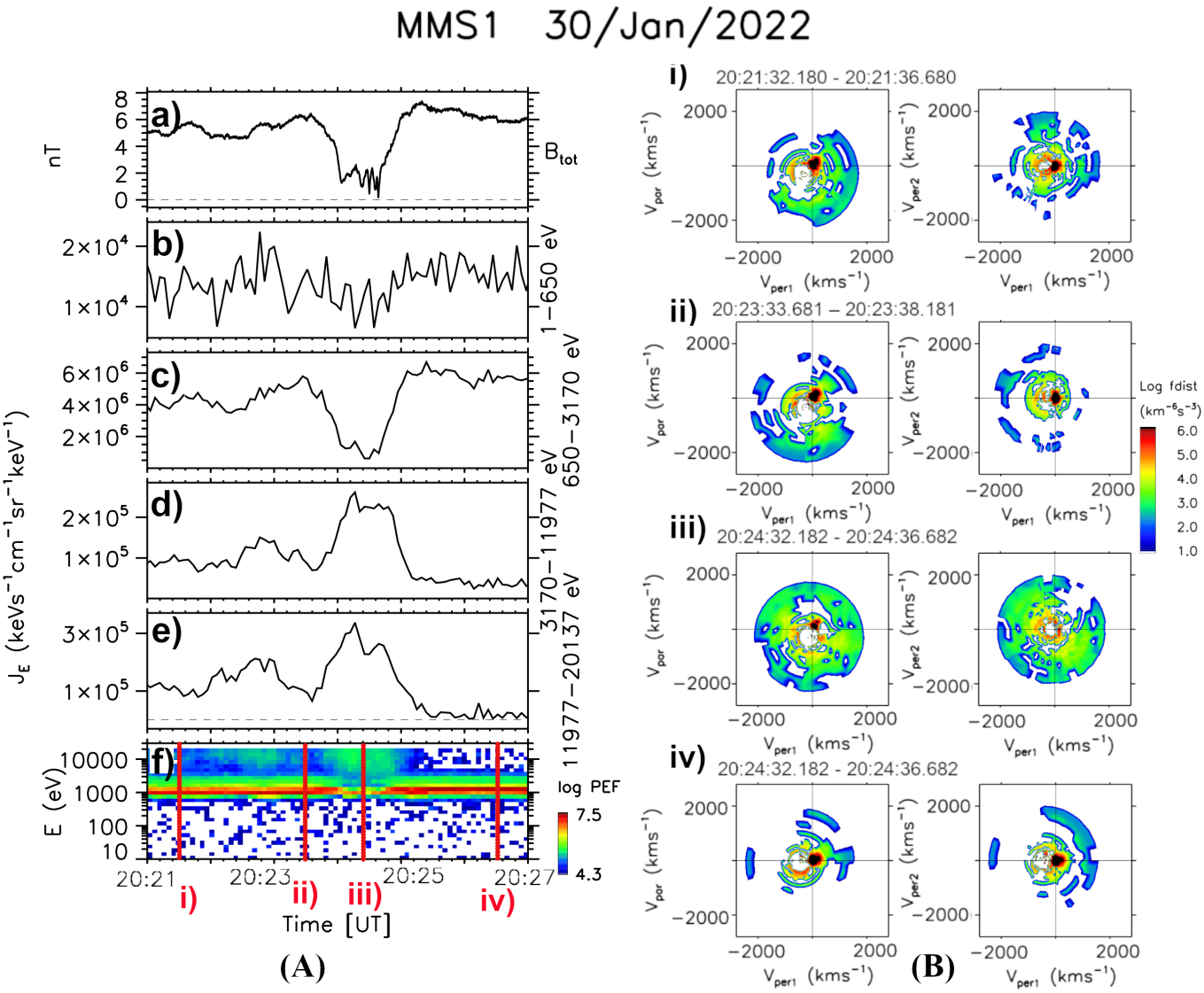

图 9: （A）2022年2月6日观测到的事件期间的磁场和离子通量。（B）9Af) 中标记的选定时刻的分布函数。

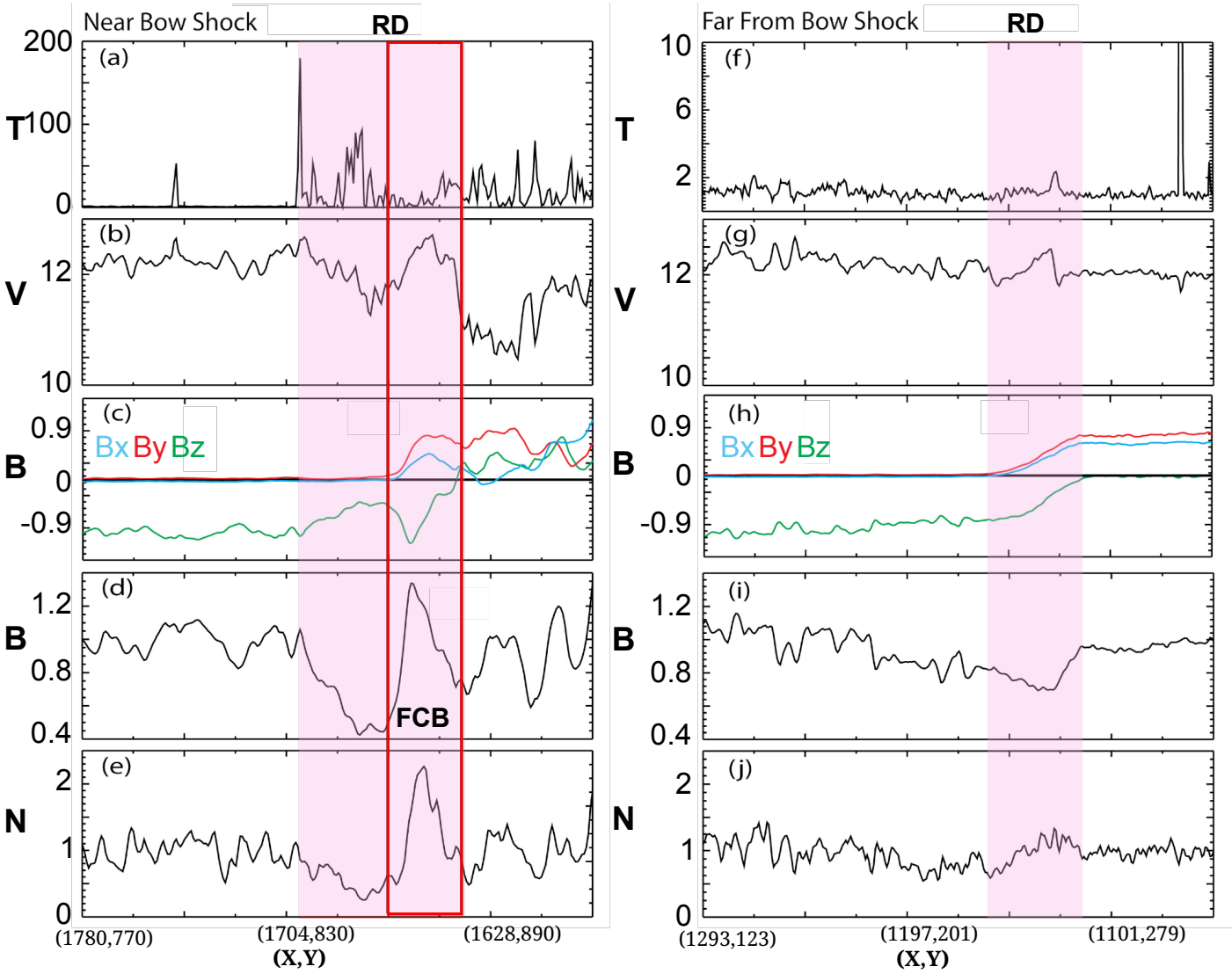

图10：来自 [34] 的模拟结果。各面板从上到下依次显示靠近弓形激波处（左列）和远离模拟弓形激波处（右列）的温度、离子速度、行星际磁场强度及其分量，以及等离子体数密度剖面。

[10]J. P. Eastwood、A. Balogh、E. A. Lucek、C. Mazelle 和 I. Dandouras。Cluster 四航天器任务观测到的准单色超低频前兆区波：1. 统计特性。《地球物理研究杂志：空间物理》，110(A11):n/a–n/a，2005年。ISSN 2156-2202。doi: 10.1029/ 2004JA010617。URL http://dx.doi.org/10.1029/2004JA010617。A11219。[11] J. P. Eastwood、A. Balogh、E. A. Lucek、C. Mazelle 和 I. Dandouras。Cluster 四航天器任务观测到的准单色超低频前兆区波：2. 斜向传播。《地球物理研究杂志：空间物理》，110(A11)，2005年。doi: https://doi.org/10.1029/2004JA010618。URL https: // agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004JA010618。[12] J. P. Eastwood、E. A. Lucek、C. Mazelle、K. Meziane、Y. Narita、J. Pickett 和 R. A. Treumann。前兆区。《空间科学评论》，118(1-4):41–94，2005年6月。doi: 10.1007/s11214-005-3824-3。[13] C. P. Escoubet、M. Fehringer 和 M. Goldstein。引言 Cluster 任务。《地球物理年刊》，19:1197–1200，2001年10月。doi: 10.5194/ angeo-19-1197-2001。[14] D. H. Fairfield。在远上游行星际介质中观测到的弓形激波相关波。《地球物理研究杂志》，74:3541，1969年。doi: 10.1029/JA074i014p03541。[15] M.O. Fillingim、J.P. Eastwood、G.K. Parks、V. Angelopoulos、I.R. Mann、S.B. Mende 和 A.T. Weatherwax。Polar紫外成像仪和 THEMIS磁力计对热流异常电离层响应的观测。《大气与太阳-地球物理学杂志》，73(1):137–145，2011年。ISSN 1364-6826。doi: https: //doi.org/10.1016/j.jastp.2010.03.001。URL https:// www.sciencedirect.com/ science/article/pii/S1364682610000738。[16] S. A. Fuselier。地球弓形激波上游地球前兆区中的离子分布。《空间研究进展》，15(8-9):43–52，1995年1月。doi: 10.1016/0273-1177(94)00083-D。[17] S. A. Fuselier、M. F. Thomsen、J. T. Gosling、S. J. Bame、C. T. Russell 和 M. M. Mellott。地球弓形激波上游热抗磁空腔边缘的快激波。《地球物理研究杂志》，92:3187–3194，1987年。doi: 10.1029/JA092iA04p03187。[18] E. W. Greenstadt、G. Le 和 R. J. Strangeway。前兆区中的超低频波。《空间研究进展》，15:71–84，1995年。doi: 10.1016/0273-1177(94)00087-H。[19] T. Hada、C. F. Kennel 和 T. Terasawa。地球前兆区中压缩波的激发与小激波的形成。《地球物理研究杂志》，92: 4423–4435，1987年5月。doi: 10.1029/JA092iA05p04423。[20] M. D. Hartinger、D. L. Turner、F. Plaschke、V. Angelopoulos 和 H. Singer。瞬态离子前兆区现象在驱动 Pc5超低频波活动中的作用。《地球物理研究杂志（空间物理）》，118:299–312，2013年1月。doi: 10.1029/2012JA018349。[21] K. S. Jacobsen、T. D. Phan、J. P. Eastwood、D. G. Sibeck、J. I. Moen、V. An- gelopoulos、J. P. McFadden、M. J. Engebretson、G. Provan、D. Larson 和

K.-H. Fornaçon。THEMIS 对热流异常导致的极端磁层顶运动的观测。《地球物理研究杂志》，114:A08210，2009年8月。doi: 10.1029/2008JA013873。[22] K. Jelínek、Z. Němeček 和 J. Šafránková。一种基于自动区域识别的磁层顶和弓形激波建模新方法。《地球物理研究杂志（空间物理）》，117(A5):A05208，2012年5月。doi: 10.1029/2011JA017252。[23] P. Kajdič、X. Blanco-Cano、N. Omidi、D. Rojas-Castillo、D. G. Sibeck 和 L. Billingham。传播前震波与瞬态前震现象。《地球物理研究杂志：空间物理》，122(9):9148–9168，2017年。ISSN 2169-9402。doi: 10.1002/2017JA023901。URL http://dx.doi.org/10.1002/ 2017JA023901。2017JA023901。[24]Primož Kajdič、Savvas Raptis、Xóchitl Blanco-Cano 和 Tomas Karlsson。准垂直磁鞘中喷流的成因。《地球物理研究快报》，48(13):e2021GL093173，2021年。doi: https://doi.org/10.1029/2021GL093173。URL https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2021GL093173。e2021GL093173 2021GL093173。[25] Primož Kajdič、Xóchitl Blanco-Cano、Lucile Turc、Martin Archer、Savvas Raptis、Terry Z. Liu、Yann Pfau-Kempf、Adrian T. LaMoury、Yufei Hao、Philippe C. Escoubet、Nojan Omidi、David G. Sibeck、Boyi Wang、Hui Zhang 和 Yu Lin。瞬态上游中尺度结构：太阳宁静期空间天气的驱动因素。《天文学与空间科学前沿》，11:1436916，2024年7月。doi: 10.3389/fspas.2024.1436916。[26] H. Madanian、N. Omidi、D. G. Sibeck、L. Andersson、R. Ramstad、S. Xu、J. R. Gruesbeck、S. J. Schwartz、R. A. Frahm、D. A. Brain、P. Kajdic、F. G. Eparvier、D. L. Mitchell 和 S. M. Curry。火星上游的瞬态前震结构：小型火星弓形激波的影响。《地球物理研究快报》，50(8):e2022GL101734，2023年4月。doi: 10.1029/2022GL101734。[27] K. Meziane 和 C. D'Uston。地球前兆区上游中间离子边界的统计研究。《地球物理年刊》，16(2):125–133，1998年2月。doi: 10.1007/s00585-998-0125-7。[28] Karim Meziane、M. Wilber、C. Mazelle、G. K. Parks 和 A. M. Hamza。弓形激波上游观测到的场向束流综述。载于 Gang Li、Gary P. Zank 和 C. T. Russell（编），无碰撞激波物理：第*4*届年度 *IGPP*国际天体物理学会议，美国物理学会会议系列第781卷，第116–122页。AIP，2005年8月。doi: 10.1063/1.2032683。[29]M. Neugebauer、D. R. Clay、B. E. Goldstein、B. T. Tsurutani 和 R. D. Zwickl。重新审视太阳风中的旋转间断和切向间断。《地球物理研究杂志：空间物理》，89 (A7):5395–5408，1984年。doi: https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1029/ JA089iA07p05395。URL https://agupubs-onlinelibrary-wiley-com.pbidi.unam.mx:2443/doi/abs/10.1029/JA089iA07p05395。[30] N. Omidi 和 D. G. Sibeck。热流异常与孤立激波的形成。《地球物理研究杂志》，112:A01203，2007年1月。doi: 10.1029/2006JA011663。

[31] N. Omidi 和 D. Winske。动理学磁声波陡化形成小激波：关于行星激波和彗星的模拟及其影响。《地球物理研究杂志：空间物理》，95(A3):2281–2300，1990年。doi: https: //doi.org/10.1029/JA095iA03p02281。URL https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JA095iA03p02281.[32] N. Omidi、D. G. Sibeck 和 X. Blanco-Cano。前兆区压缩边界。《地球物理研究杂志》，114:A08205，2009年8月。doi: 10.1029/2008JA013950.[33] N. Omidi、J. P. Eastwood 和 D. G. Sibeck。弓前区泡及其对磁层的整体影响。《地球物理研究杂志》，115:A06204，2010年6月。doi: 10.1029/2009JA014828.[34] N. Omidi、D. Sibeck、X. Blanco-Cano、D. Rojas-Castillo、D. Turner、H. Zhang 和 P. Kajdič。前兆区压缩边界的动力学及其与前兆区空腔的联系。《地球物理研究杂志》，118:823–831，2013年2月。doi: 10.1002/jgra.50146.[35] N. Omidi、H. Zhang、D. Sibeck 和 D. Turner。准平行激波处自发形成的热流异常：2. 混合模拟。《地球物理研究杂志：空间物理》，118(1):173–180，2013年。ISSN 2169-9402。doi: 10.1029/2012JA018099。URL http://dx.doi.org/10.1029/2012JA018099.[36] N. Omidi、G. Collinson 和 D. Sibeck。金星前兆区气泡：混合模拟与金星快车观测。《地球物理研究杂志：空间物理》，125(2):e2019JA027056，2020年。doi: https://doi.org/10.1029/ 2019JA027056。URL https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10. 1029/2019JA027056。e2019JA027056 2019JA027056。[37] N. Omidi、S. H. Lee、D. G. Sibeck、D. L. Turner、T. Z. Liu 和 V. Angelopoulos。弓前区泡的形成与拓扑结构。《地球物理研究杂志：空间物理》，125(9):e2020JA028058，2020年。doi: https://doi.org/ 10.1029/2020JA028058。URL https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/ abs/10.1029/2020JA028058。e2020JA028058 2020JA028058。[38] N. Omidi、S. H. Lee 和 D. G. Sibeck。弓前区泡引起的离子加速。《地球物理研究杂志（空间物理）》，126(5):e28924，2021年5月。doi: 10.1029/2020JA028924.[39] G. Paschmann、N. Sckopke、J.R. Asbridge、S.J. Bame 和 J.T. Gosling。太阳风离子从地球弓形激波反射而获得能量。《地球物理研究杂志：空间物理》，85(A9):4689–4693，1980年。doi: https: //doi.org/10.1029/JA085iA09p04689。URL https://agupubs.onlinelibrary. wiley.com/doi/abs/10.1029/JA085iA09p04689.[40] G. Paschmann、N. Sckopke、I. Papamastorakis、J. R. Asbridge、S. J. Bame 和 J. T. Gosling。地球弓形激波上游反射离子和弥散离子的特性。《地球物理研究杂志》，86(A6):4355–4364，1981年6月。doi: 10.1029/JA086iA06p04355.[41] G. Paschmann、G. Haerendel、N. Sckopke、E. Möbius、H. Lühr 和 C. W. Carlson。地球弓形激波附近具有异常流动方向的三维等离子体结构。《地球物理研究杂志：空间物理》，93(A10):

11279–11294，1988年。doi: https://doi.org/10.1029/JA093iA10p11279。URL https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JA093iA10p11279.[42] C. Pollock、T. Moore、A. Jacques、J. Burch、U. Gliese、Y. Saito、T. Omoto、L. Avanov、A. Barrie、V. Coffey、J. Dorelli、D. Gershman、B. Giles、T. Rosnack、C. Salo、S. Yokota、M. Adrian、C. Aoustin、C. Auletti、S. Aung、V. Bigio、N. Cao、M. Chandler、D. Chornay、K. Christian、G. Clark、G. Collinson、T. Corris、A. De Los Santos、R. Devlin、T. Diaz、T. Dickerson、C. Dickson、A. Diekmann、F. Diggs、C. Duncan、A. Figueroa-Vinas、C. Firman、M. Freeman、N. Galassi、K. Garcia、G. Goodhart、D. Guererro、J. Hageman、J. Hanley、E. Hemminger、M. Holland、M. Hutchins、T. James、W. Jones、S. Kreisler、J. Kujawski、V. Lavu、J. Lobell、E. LeCompte、A. Lukemire、E. MacDonald、A. Mariano、T. Mukai、K. Narayanan、Q. Nguyan、M. Onizuka、W. Paterson、S. Persyn、B. Piepgrass、F. Cheney、A. Rager、T. Raghuram、A. Ramil、L. Reichenthal、H. Rodriguez、J. Rouzaud、A. Rucker、Y. Saito、M. Samara、J. A. Sauvaud、D. Schuster、M. Shappirio、K. Shelton、D. Sher、D. Smith、K. Smith、S. Smith、D. Steinfeld、R. Szymkiewicz、K. Tanimoto、J. Taylor、C. Tucker、K. Tull、A. Uhl、J. Vloet、P. Walpole、S. Weidner、D. White、G. Winkert、P. S. Yeh 和 M. Zeuch。用于磁层多尺度任务的快速等离子体探测。《空间科学评论》，199(1):331–406，2016年。doi: 10.1007/s11214-016-0245-4。URL https://doi.org/10.1007/s11214-016-0245-4.[43] H. Rème、C. Aoustin、J. M. Bosqued、I. Dandouras、B. Lavraud、J. A. Sauvaud、A. Barthe、J. Bouyssou、Th. Camus、O. Coeur-Joly、A. Cros、J. Cuvilo、F. Ducay、Y. Garbarowitz、J. L. Medale、E. Penou、H. Perrier、D. Romefort、J. Rouzaud、C. Vallat、D. Alcaydé、C. Jacquey、C. Mazelle、C. D'Uston、E. Möbius、L. M. Kistler、K. Crocker、M. Granoff、C. Mouikis、M. Popecki、M. Vosbury、B. Klecker、D. Hovestadt、H. Kucharek、E. Kuenneth、G. Paschmann、M. Scholer、N. Sckopke ()、E. Seidenschwang、C. W. Carlson、D. W. Curtis、C. Ingraham、R. P. Lin、J. P. McFadden、G. K. Parks、T. Phan、V. Formisano、E. Amata、M. B. Bavassano-Cattaneo、P. Baldetti、R. Bruno、G. Chionchio、A. di Lellis、M. F. Marcucci、G. Pallocchia、A. Korth、P. W. Daly、B. Graeve、H. Rosenbauer、V. Vasyliunas、M. McCarthy、M. Wilber、L. Eliasson、R. Lundin、S. Olsen、E. G. Shelley、S. Fuselier、A. G. Ghielmetti、W. Lennartsson、C. P. Escoubet、H. Balsiger、R. Friedel、J. B. Cao、R. A. Kovrazhkin、I. Papamastorakis、R. Pellat、J. Scudder 和 B. Sonnerup。利用相同的 Cluster离子能谱仪（CIS）实验，在地球磁层内及附近首次开展多航天器离子测量。《地球物理年鉴》，19:1303–1354，2001年10月。doi: 10.5194/angeo-19-1303-2001.[44] D. Rojas-Castillo、X. Blanco-Cano、P. Kajdič 和 N. Omidi。Cluster观测到的前兆区压缩边界。《地球物理研究杂志：空间物理》，118:698–715，2013年2月。doi: 10.1029/2011JA017385.[45] C. T. Russell、B. J. Anderson、W. Baumjohann、K. R. Bromund、D. Dearborn、D. Fischer、G. Le、H. K. Leinweber、D. Leneman、W. Magnes、J. D. Means、M. B. Moldwin、R. Nakamura、D. Pierce、F. Plaschke、K. M. Rowe、J. A. Slavin、R. J. Strangeway、R. Torbert、C. Hagen、I. Jernej、A. Valavanoglou 和 I. Richter。磁层多尺度磁力计。《空间科学评论》，199(1):189–256，2016年。doi: 10.1007/s11214-014-0057-3。URL https://doi.org/10. 1007/s11214-014-0057-3.[46] Manfred Scholer。上游波、小激波、短时大振幅磁场

结构以及斜准平行无碰撞激波的循环行为。《地球物理研究杂志》，98(A1):47–58，1993年1月。doi: 10.1029/ 92JA01875。[47] S. J. Schwartz。激波与间断面法线、马赫数及相关参数，《style id='6'>ISSI科学报告系列，ESA/ISSI》第1卷。1998年。[48] S. J. Schwartz、G. Paschmann、N. Sckopke、T. M. Bauer、M. Dunlop、A. N. Fazakerley和M. F. Thomsen。地球弓形激波处热流异常的形成条件。《地球物理研究杂志》，105:12639–12650，2000年6月。doi: 10.1029/1999JA000320。[49] Xiao-Chen Shen、Quanqi Shi、Boyi Wang、Hui Zhang、Mary K. Hudson、Yukitoshi Nishimura、Michael D. Hartinger、Anmin Tian、Qiu-Gang Zong、I. J. Rae和Alexander W. Degeling。2008年6月25日一次上游瞬变引发的日侧磁层和电离层响应：1. 卫星与地面磁力计观测到的场线共振。《地球物理研究杂志：空间物理》，123(8):6335–6346，2018年。doi: https://doi.org/10.1029/2018JA025349。URL https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018JA025349。[50] D. G. Sibeck、N. L. Borodkova、S. J. Schwartz、C. J. Owen、R. Kessel、S. Kokubun、R. P. Lepping、R. Lin、K. Liou、H. Lühr、R. W. McEntire、C.-I. Meng、T. Mukai、Z. Nemecek、G. Parks、T. D. Phan、S. A. Romanov、J. Safrankova、J.-A. Sauvaud、H. J. Singer、S. I. Solovyev、A. Szabo、K. Takahashi、D. J. Williams、K. Yumoto和G. N. Zastenker。热流异常引发的磁层响应综合研究。《地球物理研究杂志》，104:4577–4594，1999年3月。doi: 10.1029/1998JA900021。[51] D. G. Sibeck、T.-D. Phan、R. Lin、R. P. Lepping和A. Szabo。Wind卫星对前兆区空腔的观测：案例研究。《地球物理研究杂志》，107:1271，2002年10月。doi: 10.1029/2001JA007539。[52] D. G. Sibeck、N. Omidi、I. Dandouras和E. Lucek。前兆区边缘：模型与数据比较。《地球物理年报》，26:1539–1544，2008年6月。doi: 10.5194/angeo-26-1539-2008。[53] D. G. Sibeck、S. H. Lee、N. Omidi和V. Angelopoulos。前兆区空腔：直接穿过弓形激波的传输。《地球物理研究杂志（空间物理）》，126(5):e29201，2021年5月。doi: 10.1029/2021JA029201。[54] J. A. Slavin和R. E. Holzer。太阳风绕流类地行星，1. 弓形激波位置与形状建模。《地球物理研究杂志》，86 (A13):11401–11418，1981年12月。doi: 10.1029/JA086iA13p11401。[55] A. V. Suvorova、A. V. Dmitriev、V. A. Parkhomov和B. Tsegmed。瞬变前兆区期间产生的平静时段结构化Pc1波。《地球物理研究杂志（空间物理）》，124(11):9075–9093，2019年11月。doi: 10.1029/2019JA026936。[56] Lucile Turc、Martin O. Archer、Hongyang Zhou、Yann Pfau-Kempf、Jonas Suni、Primož Kajdič、Xóchitl Blanco-Cano、Souhail Dahani、Markus Battarbee、Savvas Raptis、Terry Z. Liu、Hui Zhang、C. Philippe Escoubet、Adrian T. LaMoury、Shi Tao、Veera Lipsanen、Yufei Hao和Minna Palmroth。沿同一旋转不连续面形成的前兆区气泡与热流异常之间的相互作用

不连续面。《地球物理研究快报》，52(12):e2025GL116473，2025年。doi: https://doi.org/10.1029/2025GL116473。URL https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2025GL116473。e2025GL116473 2025GL116473。

[57] Boyi Wang, Yukitoshi Nishimura, Hui Zhang, Xiao-Chen Shen, Larry Lyons, Vassilis Angelopoulos, Yusuke Ebihara, Allan Weatherwax, Andrew J. Gerrard 和 Harald U. Frey。 THEMIS卫星与地基成像仪联合观测到的前震驱动场线共振的二维结构。《地球物理研究杂志：空间物理》，124(8):6792–6811，2019。doi: https: // doi.org/10.1029/2019JA026668。URL https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JA026668。

[58] D. Winske 和 M. M. Leroy。电磁离子束不稳定性产生的弥散离子。《地球物理研究杂志：空间物理》，89(A5): 2673–2688，1984。doi: https://doi.org/10.1029/JA089iA05p02673。URL https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JA089iA05p02673。

[59] D. T. Young, J. L. Burch, R. G. Gomez, A. De Los Santos, G. P. Miller, P. Wilson, N. Paschalidis, S. A. Fuselier, K. Pickens, E. Hertzberg, C. J. Pollock, J. Scherrer, P. B. Wood, E. T. Donald, D. Aaron, J. Furman, D. George, R. S. Gurnee, R. S. Hourani, A. Jacques, T. Johnson, T. Orr, K. S. Pan, S. Persyn, S. Pope, J. Roberts, M. R. Stokes, K. J. Trattner 和 J. M. Webster。面向磁层多尺度任务的热等离子体成分分析仪。太空科学评论, 199(1-4)：407–470，2016年3月。doi：10.1007/s11214-014-0119-6。

[60] Hui Zhang 和 Qiugang Zong。《磁层顶和弓形激波处的瞬变现象及其地面特征》，第 2 章，第 11–37 页。美国地球物理联合会（AGU），2020 年。ISBN 9781119509592。doi：https://doi.org/ 10.1002/9781119509592.ch2。URL：https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/ doi/abs/10.1002/9781119509592.ch2。