arXiv:2611.28546v1 [physics.plasm-ph] 21 Nov 2026

地球磁鞘中速度空间湍流的统计特征

Tien V ,[1, 2, *] Robert Ergun ,[2, 3] Alexandros Chasapis ,[2] Cr este Pezzi ,[4, †] A drea Larosa ,[4] Sergi Servidio ,[5] Luca S rriso-Valvo ,[4, 6] Le Viet Anh Doan ,[6, 7] Paul Cass k ,[8] Trevor Bowe ,[9] 和 Yi Qi [2]

[1] *Department of Earth Planetary & Space Sciences,University of California, Los Angeles, CA 90095, USA*

[2] *Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado, Boulder, CO 80303, USA*

[3] *Department of Astrophysical & Planetary Sciences,University of Colorado, Boulder, CO 80309, USA*

[4] *Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Scienza e la Tecnologia dei Plasmi (ISTP), I-70126 Bari, Italy*

[5] *Dipartimento di Fisica, Università della Calabria, I-87036 Cosenza, Italy*

[6] *Department of Electromagnetics and Plasma Physics,School of Electrical Engineering and Computer Science, KTH Royal Institute of Technology Stockholm Sweden , , , , , , 91120 Palaiseau, France*

[7] *CPHT CNRS École polytechnique Institut Polytechnique de Paris*

[8] *Department of Physics and Astronomy, Clemson University, Clemson, SC 29634, USA*

[9] *Space Sciences Laboratory, University of California Berkeley, CA 94720-7450, USA*（日期：2026年11月24日）

在无碰撞等离子体中，粒子分布往往远离局部热力学平衡，从而提供大量自由能，导致复杂的速度空间动力学。在湍流等离子体中，有研究提出，自由能可能会在速度空间中发生级联，这类似于流体和电磁场能量的空间级联。然而，目前关于等离子体湍流遍及整个相空间的观测证据仍然有限。利用 *Magnetospheric Multiscale* 任务在地球磁鞘的一次特别观测活动中获取的测量数据，我们首次对广泛等离子体条件下与速度空间湍流相符的特征进行了统计研究。我们在离子速度空间谱中观察到两种主要分布：一种是各向同性的 $-3/2$谱，另一种是受离子 β 和整体流组织的各向异性 -2 谱。此外，空间域和速度域中的谱幂律彼此不相关，而速度空间谱指数与估算的实空间能量传递率相关。这些结果揭示了等离子体条件如何系统地组织离子谱性质，以及这些性质与实空间湍流的关联。这种关联对湍流以及空间和天体物理等离子体中热粒子与非热粒子之间的能量分配具有广泛影响。

引言—湍流是流体和等离子体中一种基本的能量传递机制 [1–4]。通过湍流，注入系统的能量被传输到较小的空间尺度，直至通过碰撞或动理学动力学耗散 [5, 6]。然而，能量传输并不一定只发生在空间中。等离子体动力学由 Vlasov-Boltzmann方程控制

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v}\cdot\boldsymbol{\nabla} f + \frac{q}{m}(\mathbf{E}+\mathbf{v}\times\mathbf{B})\cdot\frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_c \qquad (1)$$

该方程描述了具有质量 m和电荷 q 的粒子在磁场$\mathbf{B}(\mathbf{r}\ t)$和电场 $\mathbf{E}(\mathbf{r}\ t)$中的分布函数 $f(\mathbf{r},\mathbf{v}\ t)$的动理学演化。在空间等离子体和天体物理等离子体中，碰撞项 $(\partial f/\partial t)_c$ 通常较弱，导致 f 中的涨落远离局域热平衡（LTE）[7], , 从而为等离子体提供自由能来源 [8]。随着系统演化，自由能被消耗，用于产生具有独特速度空间特征的动理学现象 [9–12]。因此，无碰撞等离子体在 f中可能具有大量自由能，进而形成高度复杂的速度空间动力学。

基于这一认识，一种新兴理论提出了由于非局域热力学平衡涨落而产生速度空间湍流的可能性，拓展了我们对相空间中能量传输的理解 [13–17]。在速度空间湍流理论中， $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}\ t)$的复杂性通常通过使用厄米特、拉盖尔或汉克尔变换，将其展开为系数 $f(\mathbf{r}, \mathbf{q}\ t)$来研究，具体取决于系统的几何形状。类似于傅里叶变换下与位置$\mathbf{r}$ 共轭的波数$\mathbf{k}$ ， $\mathbf{q}$是与速度$\mathbf{v}$共轭的谱模态。类比经典的柯尔莫哥洛夫现象学 [1]„ 该理论预言自由能在速度模态$\mathbf{q}$中的级联，以及流体能和电磁场能在空间模态$\mathbf{k}$中的级联。在这一现象学中，这种速度空间级联具有如下形式的幂律 $\langle|\hat{}f(\mathbf{r}, \mathbf{q}\ t)|^2\rangle_{\mathbf{r},\ t} \sim q^{\gamma}$，其中$\langle\cdot\rangle_{\mathbf{r},\ t}$ 为空间和时间平均值。

许多数值研究已对速度空间中的湍流进行了探究 [18–23]。然而，由于缺乏对 f 的高分辨率三维测量，这一现象的观测证据一直十分有限，并且仅限于案例研究 [15, 24, 25]。大多数不—

值得一提的是，Servidio 等人 [15], （下文简称 S17）利用磁层多尺度（ MMS ）任务 [26] 的三维离子测量，研究了地球磁层鞘中的速度空间湍流。他们观测到一种$\gamma = -3/2$ 标度关系，与由线性粒子运动引起的主导相混合项和电场项（方程（1）左端的第 2 项和第 3 项）的预测一致

。背景磁场（第 4 项）通过回旋运动为动力学引入三维效应。一种 $\gamma = -2$ 标度关系与强磁化等离子体相关，这一点得到了混合模拟 [21] 的预测，并且最近也在太阳风中 [25]得到了观测。对于静电湍流，也有人提出了其他预测 [14, 17, 27–29]。

S17 的研究成果引发了人们对速度空间湍流观测的广泛兴趣，表明 MMS 磁鞘测量非常适合研究这一现象。然而，许多问题仍未得到探索。等离子体 β，即等离子体压力 P 与磁压力 $B_0^2/2\mu_0$之比（B_0 为背景磁场），决定了动理学效应与磁效应的相对重要性。因此，β 是速度空间湍流的一个主要控制参数。然而，这一现象尚未在广泛的 β条件下得到观测。此外，在强 B_0下，线性运动与回旋运动之间的差异意味着速度空间谱应呈现各向异性，但这一特征同样尚未得到广泛观测。另一个尚待解决的问题是，速度空间中的湍流与实空间湍流有何关联。

在此，我们利用 MMS 测量数据，对涵盖广泛磁鞘条件的离子速度空间谱进行了首次大规模统计分析。我们确定了等离子体条件如何组织离子谱标度与各向异性，并考察了其与实空间湍流之间的统计关系。

数据——人工挑选突发模式下分辨率最高的 MMS 数据，以捕捉感兴趣的事件，例如磁重联、激波和等离子体边界。因此，突发模式数据存在偏差，可能无法反映典型的等离子体条件。为开展对磁鞘等离子体特性无偏的研究，MMS 开展了无偏磁鞘观测计划：穿越弓形激波后、到达磁层顶之前，按固定间隔对磁鞘进行突发模式采样 [30–34]。磁场测量由通量门磁力仪（FGM）提供 [35]。离子速度分布 f（$\mathbf{v}$ t）和矩由快速等离子体探测仪（FPI）提供 [36]。总计从 37 次磁鞘穿越中收集了 653 个时间段，样本量约为此前所考虑样本的 f 600 倍

在 S17 中。我们对 f 测量数据的处理紧密遵循 S17。在补充材料 [37], 中，我们还量化了完整处理流程所引入的系统误差，并确定了本分析中可靠的谱范围。

图 1 展示了无偏观测中的一个典型时间段。在图 1(a) 中，通过在根据其自相关[38–40]确定的相关频率处对$\mathbf{B}(t)$进行低通滤波，得到稳定的背景磁场$\mathbf{B}_0(t)$。相对涨落幅度 $\delta B/B_0$ 较低，

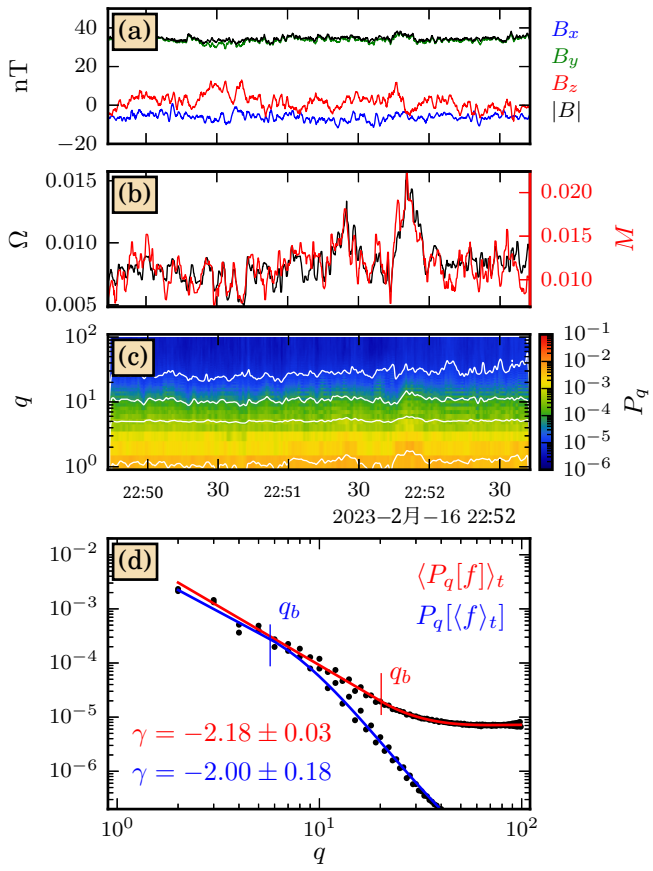

图 1. 无偏磁鞘观测计划中的一个时间区间。(a) GSE坐标系中的磁场。(b) 无量纲熵增率 Ω（黑色）和非麦克斯韦性 M（红色）。(c) 离子 Hermite（速度空间）谱。(d) 时间平均谱（红色）和时间平均速度分布函数的谱（蓝色）。在 (c) 中，白色曲线为 Hermite谱的等值线。在 (d) 中，彩色曲线和标注文字为拟合结果。q_b 是拟合模型中的谱断点。

其中 $\delta B \equiv \langle \|\mathbf{B}(t) - \mathbf{B}_0(t)\|^2 \rangle_t$。为量化离子分布 $f(\mathbf{v}\ t)$偏离局域热平衡的程度，我们采用如下定义的无量纲涡量平方 [6]

$$\Omega(t) \equiv \frac{v_{th,1}(t)v_{th,2}(t)v_{th,\|}(t)}{n_0^2(t)} \int_{\mathbb{R}^3} d^3v |\delta f(\mathbf{v},t)|^2, \quad (2)$$

其中，$\delta f(\mathbf{v}\ t) \equiv f(\mathbf{v}\ t) - f_0(\mathbf{v}\ t)$，而 f_0是根据 f的积分矩构造的三维麦克斯韦分布。场向坐标（FAC）基底为 $(\hat{e}_1,\hat{e}_2,\hat{e}_\|)$，其中$\hat{e}_\| \propto \mathbf{B}_0(t)$, $\hat{e}_2 \propto -\mathbf{u}_i(t) \times \mathbf{B}_0(t)$垂直于$\hat{e}_\|$和离子整体流 $\mathbf{u}_i(t)$, 而 $\hat{}$ n_0 $v_{th\ c}$ = $\sqrt{2k_B T_c\ t\ /m}$ $T_c\ t$ 则补足这一组正交基。 (t) 为密度，, (t) () 为热速度，而 () 为 FAC 中沿分量 c的温度。Ω（t）与基于熵的非麦克斯韦性 [41]有关

$$M(t) \equiv -\frac{1}{1 + \ln[2\pi(v_{th}(t)/\Delta v)^2]} \frac{\delta s(t)}{(3/2)n_0(t)}, \quad (3)$$

其中有限速度网格的尺寸为 Δv [42]。 $\delta s(t) \equiv s(t) - s_0\ t$ $s\ t \equiv -\int_{\mathbb{R}^3} d^3v f \quad f$ （），其中（）ln 为熵密度，而 $s_0(t)$以类似方式定义，使用 f_0。对于较小的 δf，$\delta s\ t$ $- \quad t$ （）$\approx -\int_{\mathbb{R}^3} d^3v|\delta f|^2/2f$，这与 Ω（）类似。因此，$M(t)$ 和 Ω(t) 预计会相关，如图 1(b) 所示。

与 S17 类似，我们使用三维矩形厄米特变换计算 $\hat{}\ f$ (**q** t)，但也探讨各向异性 [37] 的基本作用。我们计算随时间变化的全向厄米特谱 [15,24, 25],，其定义为 $P_q(t) \equiv \sum_{q-1/2<\|\mathbf{q}'\|\leq q+1/2} |\hat{}f(\mathbf{q}',\ t)|^2$，其中 $\mathbf{q} = (n,\ m,\ l)$ 是 FAC 中的三维厄米特模态。根据帕塞瓦尔定理，$P_{q\geq 1}$ 描述了非麦克斯韦性度量 Ω 在 q 中的分布。

在图 1(c) 中，$P_q(t)$ 的涨落与图 1(b) 中 Ω(t) 和 M (t) 的涨落相关。约 22:51:50 时 Ω(t) 和 $M(t)$ 的最大增强，对应于图 1(a) 中 B_z（红色）的旋转。这些观察表明，磁场中的间歇性结构会使离子偏离局域热平衡 [21],，从而增强由 $P_q(t)$ 表征的离子速度空间结构。

图 1(d) 显示了该时间区间的时间平均全向厄米特谱 $\langle P_q[f]\rangle_t$（红色）。在低 q处，$\langle P_q[f]\rangle_t$在 $q_b \approx 20$处的转折点以下呈幂律分布；超过该转折点后，仪器噪声和日益增大的处理误差开始产生影响 [37]。为量化 Hermite指数 γ，我们对 $P_q \sim q^\gamma$（彩色曲线）进行了拟合 [37]。补充误差分析表明，随着 q增大，处理响应会变差，但在 $q \lesssim q_b$范围内仍相当可靠。

由于磁鞘离子通常具有非麦克斯韦分布，平稳的 VDF结构本身也能产生宽广且类似幂律的谱。为确认观测到的谱与非平稳过程有关，图 1(d) 还显示了时间平均 VDF $P_q[\langle f\rangle_t]$（蓝色）的谱，该谱代表此时间区间内的持续性VDF结构。两种谱在低阶处相当，但在 $q \approx 6$之后出现的分歧表明，$\langle P_q[f]\rangle_t$中的大部分高阶功率包含非平稳贡献。

该区间内较低的 β 和拟合的 $\gamma \approx -2$与强磁化区间一致。此外，我们还拟合了平行谱和垂直谱 $P_n \sim n^{\gamma_\perp}$ 以及 $P_l \sim l^{\gamma_\parallel}$，以计算谱各向异性 $\gamma_\perp/\gamma_\parallel$。通过在另外两个维度 [15, 21, 37, 43]中削减 P_q（t），可以计算出P_n 和 P_l。我们在整个观测活动中重复这些计算，以确定其统计

γ 和 $\gamma_\perp/\gamma_\parallel$的性质。

实空间与速度空间湍流之间的关系— 为了表征各时间区间 [37], 内的实空间湍流，我们计算磁场谱 $P_B(k) \sim k^\alpha$，并分别确定惯性区间 ($k\rho_i \ll 1$; $\rho_i = v_{th}/\omega_{ci}$ 为离子回旋半径，$\omega_{ci} = qB_0/m$ 为离子回旋频率) 和（亚离子）动理学尺度区间 ($k\rho_i \gg 1$) 内的傅里叶谱指数 α_i 和 α_k。我们还使用磁流体力学（MHD）湍流的 Politano-Pouquet 定律 ϵ 计算惯性区间内的能量传递率

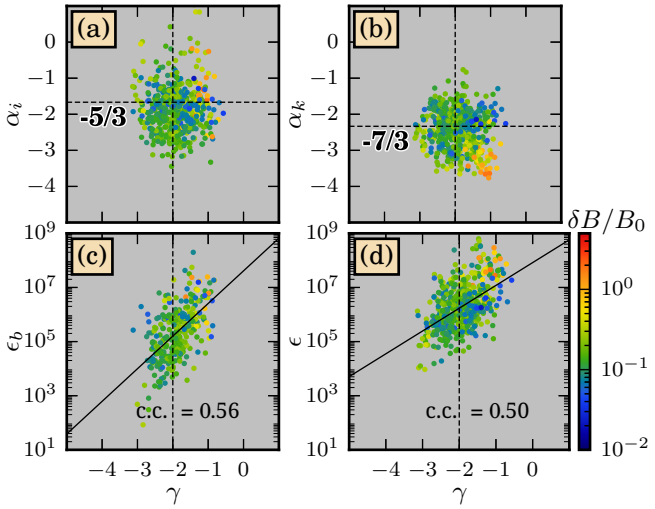

图2。埃尔米特谱指数 γ 以及（a）惯性区间和（b）动力学区间的傅里叶谱指数 α_i和 α_k、（c）磁场中的能量传递率 ϵ_b，以及（d）总能量传递率 ϵ的分布。数据根据相对磁场涨落 $\delta B/B_0$ 进行着色。（a—b）中，水平虚线表示与实空间湍流相关的幂律。（c—d）中，黑色实线表示参数的线性回归线，并标出了相关系数。

使用 Politano-Pouquet 定律研究磁流体力学（磁流体力学）湍流的范围 [44, 45]

$$\langle \delta u_{i,\parallel} \|\delta \mathbf{u}_i\|^2 + \delta u_{i,\parallel} \|\delta \mathbf{b}\|^2 - 2\delta b_\parallel (\delta \mathbf{u}_i \cdot \delta \mathbf{b})\rangle_t = -\frac{4}{3}\epsilon L, \quad (4)$$

其中 $\mathbf{b} \equiv \mathbf{B}/\sqrt{\mu_0 n_0 m}$，$\delta\psi \equiv \psi(t+\tau) - \psi(t)$ 对于 q 量 $\psi(t)$，以及 $L \equiv u_i \tau \sim k^{-1}$。有关这些计算的更多细节，另请参见 Doan 等。[46]。

在图 2 中，我们展示了埃尔米特谱指数 γ和傅里叶空间参数的分布：(a) α_i，(b) α_k，(c) 磁场中的能量传递率 ϵ_b（方程 (4) 左侧的第二项），以及 (d) 总能量传递率 ϵ。在图 2(a-b) 中，指数 γ的平均值约为 -2（垂直虚线），这源于大多数区间中存在较强的 $\mathbf{B}_0$。γ的范围较宽，主要是由于数据集中等离子体条件的物理变化。满足 γ渐近预测的条件很少出现。类似地，指数 α_i和 α_k也呈现出较宽的范围，但其平均值分别与 $-5/3$ Kolmogorov 标度 [1] 和 $-7/3$ Hall 磁流体标度（水平线） [47], 一致。值得注意的是，傅里叶指数与埃尔米特指数之间不存在相关性。这一结果是意料之中的，因为傅里叶变换和厄米变换作用于相空间中彼此独立的部分。

相反，在图2(c-d)中，Hermite指数 γ 与能量传递率之间存在中等程度的相关性。颜色（$\delta B/B_0$）表明，当磁场涨落幅度较高时，γ往往更接近 $-3/2$。这些相关性表明，更强的实空间湍流与更浅的Hermite谱相关，

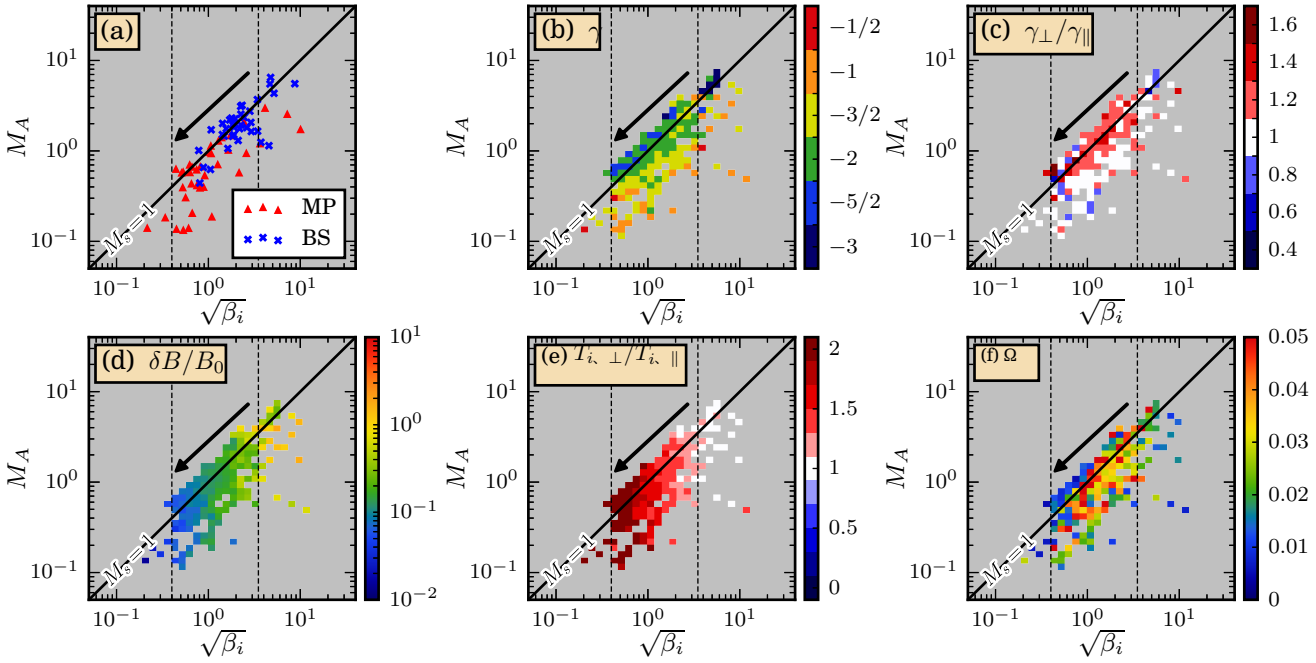

图 3。埃尔米特谱特性随 $\sqrt{\beta_i}$ 和 Alfv´en 马赫数 M_A 的变化。(a) 磁层顶（MP）和弓形激波（BS）区间。箭头表示穿越方向。(b) 全向埃尔米特谱指数 γ。(c) Hermite谱各向异性 $\gamma_\perp/\gamma_\parallel$。(d) 磁场涨落振幅 $\delta B/B_0$。(e) 离子温度各向异性 $T_{i,\perp}/T_{i,\parallel}$。(f) 涡量平方 Ω。黑色实线表示声学马赫数 $M_s = 1$。垂直点线表示统计显著区域。

揭示了实空间能量传输与速度空间湍流之间的统计关联，这与先前的研究 [21, 23, 48]一致。在联合傅里叶-Hermite域中对磁场和离子分布涨落进行更深入的分析，将有助于更好地揭示相空间中的能量传输特征。然而，这项研究超出了本文的范围。

Hermite 谱特性—在无偏观测活动中分析空间演化的一个主要问题是，从弓形激波（BS）到磁层顶（MP）的穿越过程中，上游太阳风和磁鞘中的条件都会发生变化 [33]。然而，每次穿越的第一个和最后一个区间始终分别可明确归类为BS和MP的条件。图3(a)利用局部离子等离子体β β_i 和Alfv´én马赫数 $M_A = u_i/V_A$对端点进行映射，其中 $V_A = B_0/\sqrt{\mu_0 n_0 m}$ 为Alfv´én速度。 $\sqrt{\beta_i}$ 是方程（1）中相位混合与磁场Hermite时间尺度 [15] 之间的相对幅度，与 $\gamma = -3/2$ 和 $\gamma = -2$ 渐近幂律相关。图3中的斜率为表征离子流的声学马赫数 $M_s = M_A/\sqrt{\beta_i} = u_i/v_{th}$。高马赫数磁鞘喷流 [49, 50] 可能由弓前区瞬变 [51–53] 形成，并可产生波、重联、弓形波等，从而导致较高的非麦克斯韦性 [54, 55]。因此，离子流 u_i 也可能是速度空间湍流的另一个控制参数。BS和MP的明显聚类确立了箭头所示的定性统计空间趋势。大多数虚线区域内的穿越都遵循这一演化规律，尽管端点之间存在较大差异。

与图 3(a)采用相同的格式，面板 (b) 和 (c) 分别展示全向埃尔米特谱指数 γ 和埃尔米特各向异性 $\gamma_\perp/\gamma_\parallel$。面板 (d) 显示涨落幅度 $\delta B/B_0$，而面板 (e) 展示离子温度各向异性 $T_{i,\perp}/T_{i,\parallel}$。最后，面板 (f) 给出了涡量平方 Ω。(d) 中的涨落幅度朝向 MP 减小，这是 BS 下游区域的预期行为。在面板 (e) 中，增强的背景地磁场会沿平行于磁场的方向压缩离子，导致分布逐渐变得更加各向异性（另见 [32]）。

至关重要的是，图 3(f) 显示 Ω 的分布并不均匀，且在空间上与图 3(d) 中的涨落幅度不相关。此前的观测和模拟表明，速度空间湍流是一种局部现象 [21, 24]，，这解释了 Ω 的非均匀性。

在图 3(b-c)中，我们观察到埃尔米特谱特性中存在两种主要群体。图 3(b)中由 $\gamma = -2$ 磁场主导的群体（绿色），在图 3(c)中表现出较强的各向异性（红色）。由 $\gamma = -3/2$ 动理学压力主导的群体（黄色）则表现出较弱的各向异性（白色）。这种各向异性与 B_0引入的三维效应有关。各向异性谱倾向于优先沿平行于$\mathbf{B}_0$ [21]的方向延伸。此外，我们观察到，这些群体之间的转变通常与

离子 β_i 和整体流 u_i有关。在 M_A固定时，增大 β_i 标志着从磁性区间向动理学区间的转变。然而，对离子流u_i 的依赖关系则更难以解释。磁性区间倾向于沿着 $M_s = 1$ （黑线）分布，而动理学区间则主要为亚声速（$M_s < 1$）。

讨论—在本信中，我们观测到离子速度空间谱中存在两个主要群体，它们受到离子 β 和整体流的系统性组织。谱特性 [图 3(b-c)] 与速度空间湍流理论 [15]的预测一致。观测到的谱与非稳态过程 [图 1(d)]相关。补充材料中的进一步诊断表明，观测到的谱特性也是高涡量平方离子分布的特征 [37]。这些结果支持这样一种解释：我们的观测与将速度空间湍流作为指导性理论框架相一致。

在理论和模拟中，对整体流的依赖性仍基本未得到探索，并且可能对无碰撞激波动力学产生广泛影响。已知能够产生波、重联、激波前沿和湍流的磁鞘喷流，也已在火星 [56] 和木星 [57]上观测到。从这一角度看，我们的结果为研究行星磁层和行星际激波中的速度空间湍流与粒子加速 [58, 59]提供了观测基础。

Hermite（速度空间）谱特性与 Fourier（实空间）谱特性 [图 2(a-b)], 、全局背景条件 [图 3(d-e)], 以及涡量平方 [图 3(f)]不相关。然而，较平缓的 Hermite 谱与较高的实空间能量传递率相关 [图2(c-d)]。这些结果表明，实空间与速度空间的湍流特征即使彼此不相关，在能量上仍可能存在关联。速度空间特性似乎不会随空间位置变化而在磁鞘中演化。这一观察促使我们在速度空间湍流的背景下，进一步研究局域结构，包括与实空间湍流相关的重联和离子束 [48], 。

在此次观测活动中，其他理论上提出的谱指数[14, 17, 27–29] 并不突出。较弱的 $\gamma = -5/2$ 群体主要出现在 $M_s > 1$ [37], 而未观察到明显的 $\gamma = -1/2$ 群体。这些标度关系是在限制更严格的静电条件下产生的，在通常呈电磁性质的磁鞘湍流中，它们在统计层面可能并不突出。不过，我们的结果并未排除这些状态存在于个别磁鞘时间段内的可能性。

本研究的影响在于，为地球磁鞘在广泛等离子体条件下存在与速度空间湍流一致的统计证据。观测到的Hermite指数和各向异性揭示了非麦克斯韦速度分布函数特征在速度空间中的结构及其与实空间能量传递的关系，突出了等离子体湍流中动力学和非局域热平衡物理的重要性。除与先前的理论研究和数值研究一致外，我们的结果还揭示了其对离子整体流的一种新颖依赖关系，并为未来开展速度空间湍流研究提供了观测基础。这些结果有助于解决不同背景下热粒子与非热粒子之间能量分配这一长期存在的问题，包括日球层和天体物理激波中的粒子加速 [58, 60] 以及下游热化 [61, 62] 。

本研究获得了位于伯尔尼的国际空间科学研究所（ISSI）的支持，资助途径为 ISSI 国际团队项目 # 23-588（揭示非平衡空间等离子体中的能量转换与耗散）。本研究使用了科罗拉多大学博尔德分校的 Alpine 高性能计算资源。Alpine 由科罗拉多大学博尔德分校、科罗拉多大学安舒茨分校、科罗拉多州立大学和美国国家科学基金会（资助编号 2201538）共同资助。

TV、RE、AC 和 YQ 获得美国国家航空航天局 MMS 合同 NNG04EB99C 的支持。TV 还获得美国国家航空航天局 FINESST 基金 80NSSC23K1630 的支持。AC 感谢美国国家航空航天局拨款 80NSSC21K0454、80NSSC22K0688 和 80NSSC24K0172 提供的支持。OP 和 AL 获得意大利大学与研究部资助的 FIS2 初创基金 FIS-2023-00246“湍流近可逆等离子体中的相空间复杂性（PAPAO）”（CUP B53C24009610001）的支持。LSV 获得瑞典国家航天局（SNSA）研究基金 N. 2025-00229 的支持。LSV 和 OP 获得瑞典研究理事会（VR）研究基金 N. 2022-03352 的支持。LSV 和 SS 获得意大利航天局（ASI）项目“膨胀太阳风中大尺度与动理学尺度过程的径向演化（REKIPES）”——C83C25000900005 的支持。PC 获得美国国家航空航天局拨款 80NSSC23K0409 和 80NSSC24K0173，以及美国国家科学基金会拨款 PHY-2607428 的支持。TB 获得美国国家航空航天局 HSR 基金 80NSSC24K0272 的支持。本研究使用了 MMS 二级 FIELDS 数据和快速等离子体探测仪（FPI）数据产品。作者感谢整个 MMS 团队为任务所做的工作，并感谢 Savvas Raptis 和 Domenico Trotta 提供有益的讨论。

本文图表所依据的数据已在 [63], 公开提供，可能适用禁运期。支持本文研究结果的数据可根据合理请求向作者索取。

* tien.vo@epss.ucla.edu † oreste.pezzi@cnr.it

[1] U. Frisch, *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov*（剑桥大学出版社，1995）。[2] D. Biskamp, *Magnetohydrodynamic Turbulence*（剑桥大学出版社，2008）。[3] A. Brandenburg 和 A. Lazarian, 《天体物理流体—

磁湍流，《空间科学评论》**178**，163（2013）。[4] D. Falceta-Gon˙calves、G. Kowal、E. Falgarone 和 A. C.- L. Chian，星际介质中的湍流，《地球物理学中的非线性过程》**21**，587（2014）。[5] D. Verscharen、K. G. Klein 和 B. A. Maruca，太阳风的多尺度性质，《太阳物理学评论》**16**，5（2019）。[6] O. Pezzi、H. Liang、J. L. Juno、P. A. Cassak、C. L. V´asconez、L. Sorriso-Valvo、D. Perrone、S. Servidio、V. Roytershteyn、J. M. TenBarge 和 W. H. Matthaeus，弱碰撞等离子体中的耗散度量，《皇家天文学会月刊》**505**，4857 2021（）。[7] P. A. Cassak、M. H. Barbhuiya、H. Liang 和 M. R. Argall，量化等离子体高阶相空间密度矩中的能量转换，《物理评论快报》**130**，085201（2023）。[8] A. A. Schekochihin、S. C. Cowley、W. Dorland、G. W. Hammett、G. G. Howes、G. G. Plunk、E. Quataert 和 T. Tatsuno，陀螺动理学湍流：通过相空间实现耗散的非线性途径，等离子体物理与受控聚变 **50**，124024（2008）。[9] T. H. Stix，*Waves in Plasmas*（美国物理联合会，1992）。[10] T. A. Bowen、B. D. G. Chandran、J. Squire、S. D. Bale、D. Duan、K. G. Klein、D. Larson、A. Mallet、M. D. Mc- Manus、R. Meyrand、J. L. Verniero 和 L. D. Woodham，太阳风中回旋共振加热的原位特征，《物理评论快报》**129**，165101（2022）。[11] R. Huang、G. G. Howes 和 A. J. McCubbin，渡越时间阻尼的速度空间特征，《等离子体物理学杂志》**90**，535900401（2024）。[12] G. G. Howes，天体物理等离子体湍流及其耗散的基本参数：非相对论极限，《等离子体物理学杂志》**90**，905900504 2024（）。[13] T. Tatsuno、W. Dorland、A. A. Schekochihin、G. G. Plunk、M. Barnes、S. C. Cowley 和 G. G. Howes，陀螺动理学等离子体湍流中熵的非线性相位混合与相空间级联，《物理评论快报》**103**（2009）。[14] A. A. Schekochihin、J. T. Parker、E. G. Highcock、P. J. Dellar、W. Dorland 和 G. W. Hammett，漂移动理学等离子体湍流中的相位混合与非线性平流，《等离子体物理学杂志》**82**，905820212（2016）。[15] S. Servidio、A. Chasapis、W. H. Matthaeus、D. Perrone、F. Valentini、T. N. Parashar、P. Veltri、D. Gershman、C. T. Russell、B. Giles、S. A. Fuselier、T. D. Phan 和 J. Burch，磁层多尺度任务对等离子体速度空间级联的观测：厄米表示与理论，《物理评论快报》**119**，205101（2017）。[16] G. L. Eyink，近无碰撞等离子体湍流中的级联与耗散异常，《物理评论X》**8**，041020（2018）。[17] M. L. Nastac、R. J. Ewart、W. Sengupta、A. A. Schekochihin、M. Barnes 和 W. D. Dorland，近无碰撞等离子体湍流中的相空间熵级联与随机加热的不可逆性，《物理评论E》**109**，065210（2024）。[18] J. T. Parker 和 P. J. Dellar，弱碰撞极限下 Vlasov-Poisson系统的傅里叶-厄米谱表示，《等离子体物理学杂志》**81**，10 1017 0022377814001287 2015。/S（）。[19] D. R. Hatch、F. Jenko、V. Bratanov 和 A. B. Navarro，梯度驱动陀螺动理学湍流中自由能耗散的相空间尺度，《等离子体物理学杂志》**80**，531（2014）。[20] S. S. Cerri、M. W. Kunz 和 F. Califano，三维混合 Vlasov–Maxwell 湍流中的双重相空间级联，《天体物理学杂志快报》**856**，L13（2018）。[21] O. Pezzi、S. Servidio、D. Perrone、F. Valentini、L. Sorriso-Valvo、A. Greco、W. H. Matthaeus 和 P. Veltri，磁化等离子体中的速度空间级联：数值模拟，《等离子体物理学》**25**，060704（2018）。[22] O. Pezzi、D. Perrone、S. Servidio、F. Valentini、L. Sorriso-Valvo 和 P. Veltri，湍流太阳风中的质子–质子碰撞：混合 Boltzmann–Maxwell 模拟，《天体物理学杂志》**887**，208（2019）。[23] G. Celebre、S. Servidio 和 F. Valentini，非磁化等离子体的相空间动力学：无碰撞与碰撞状态，《等离子体物理学》**30**，092304（2023）。[24] Z. Wu、J. He、D. Duan、X. Zhu、C. Hou、D. Verscharen、G. Nicolaou、C. J. Owen、A. Fedorov 和 P. Louarn，太阳风磁重联喷流区中的离子增能与热化，《天体物理学杂志》**951**，98（2023）。[25] A. Larosa、O. Pezzi、T. Bowen、L. Sorriso-Valvo、N. Sioulas、F. Pucci、D. Trotta、J. L. Verniero、R. Livi、S. B. Das、A. Chasapis、D. Perrone、F. Valentini 和 S. Servidio，近太阳太阳风中的速度空间湍流级联：帕克太阳探测器任务的初步发现，《天体物理学杂志快报》**995**，L69（2025）。[26] J. L. Burch、T. E. Moore、R. B. Torbert 和 B. L. Giles，磁层多尺度任务概述与科学目标，《空间科学评论》**199**，5（2016）。[27] T. Adkins、R. Meyrand 和 J. Squire，无碰撞低 β 等离子体中的湍流加热：不平衡、Landau 阻尼与电子–离子能量分配，《天体物理学杂志》**990**，138（2025）。[28] R. J. Ewart、M. L. Nastac、P. J. Bilbao、T. Silva、L. O. Silva 和 A. A. Schekochihin，无碰撞等离子体向普适非麦克斯韦平衡态的弛豫，《美国国家科学院院刊》**122**，e2417813122（2025）。[29] G. Celebre、M. Imbrogno、S. Servidio 和 F. Valentini，波–空穴相互作用驱动的等离子体湍流（2026），arXiv:2606.22098 [physics.plasm-ph]。[30] I. Svenningsson、E. Yordanova、Yu. V. Khotyaintsev、M. Andr´e、G. Cozzani 和 K. Steinvall，准平行与准垂直磁鞘中的哨声波，《地球物理研究杂志：空间物理学》**129**，e2024JA032661（2024）。[31] I. Svenningsson、E. Yordanova、Y. V. Khotyaintsev、M. Andr´e 和 G. Cozzani，利用来自 MMS 的局地测量对磁鞘进行分类，《地球物理研究杂志：空间物理学》**130**，e2024JA033272（2025）。[32] L. Richard、S. Servidio、I. Svenningsson、A. V. Artemyev、K. G. Klein、E. Yordanova、A. Chasapis、O. Pezzi 和 Y. V. Khotyaintsev，地球磁鞘中离子速度分布的非麦克斯韦性，《物理评论 E》**112**，L053201（2025）。[33] F. Pecora、R. Chhiber、S. Roy、A. Chasapis、T. Vo、L. Sorriso-Valvo、V. Montagud-Camps、J. Wang 和 W. H. Matthaeus

’ 磁鞘的一般性质：

MMS无偏观测活动，《地球物理研究杂志：空间物理》**131**, e2025JA034919 (2026). [34] Y. Qi, R. E. Ergun, T. Vo, A. Chasapis, S. J. Schwartz, and V. Wilder, 地球磁鞘中平行电场的演化，《地球物理研究快报》**53**, e2026GL123482 (2026). [35] C. T. Russell, B. J. Anderson, W. Baumjohann, K. R. Bromund, D. Dearborn, D. Fischer, G. Le, H. K. Leinwe- ber, D. Leneman, W. Magnes, J. D. Means, M. B. Mold- win, R. Nakamura, D. Pierce, F. Plaschke, K. M. Rowe, J. A. Slavin, R. J. Strangeway, R. Torbert, C. Hagen, I. Jernej, A. Valavanoglou, and I. Richter, 磁层多尺度任务磁强计，《空间科学评论》**199**, 189 (2016). [36] C. Pollock, T. Moore, A. Jacques, J. Burch, U. Gliese, Y. Saito, T. Omoto, L. Avanov, A. Barrie, V. Cof- fey, 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. Chor- nay, K. Christian, G. Clark, G. Collinson, T. Cor- ris, A. De Los Santos, R. Devlin, T. Diaz, T. Dicker- son, 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. MacDon- ald, A. Mariano, T. Mukai, K. Narayanan, Q. Nguyan, M. Onizuka, W. Paterson, S. Persyn, B. Piepgrass, F. Ch- eney, A. Rager, T. Raghuram, A. Ramil, L. Reichen- thal, 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. Wei- dner, D. White, G. Winkert, P.-S. Yeh, and M. Zeuch, 磁层多尺度任务快速等离子体探测仪，《空间科学评论》**199**, 331 (2016).[37] (2026)，详见补充材料 [url] ，了解计算所得 Hermite 谱的误差分析、拟合模型，以及对谱各向异性、非平稳性和所报告统计结果稳健性的分析，其中包括参考文献 [14 15, 34, 36, 44 46, 68, - - - - -。72 73, 75 76, 78, 81 82] [38] C. W. Smith, B. J. Vasquez, J. T. Coburn, M. A. For- man, and J. E. Stawarz, **1858** au 处湍流级联的相关尺度，2018年，《天体物理学杂志》（）。[39] J. E. Stawarz, J. P. Eastwood, T. D. Phan, I. L. Gin- gell, M. A. Shay, J. L. Burch, R. E. Ergun, B. L. Giles, D. J. Gershman, O. L. Contel, P.-A. Lindqvist, C. T. Russell, R. J. Strangeway, R. B. Torbert, M. R. Argall, D. Fischer, W. Magnes, and L. Franci, 地球磁鞘中与仅电子磁重联相关的湍流性质，《天体物理学杂志快报》**877**, L37 (2019). [40] T. Vo, R. Ergun, A. Chasapis, Y. Qi, N. Pathak, H. George, G. Consolini, S. Benella, D. Belardinelli, and T. Bowen, 与磁尾重联相关的强电场湍流的动理学尺度区间，《物理评论快报》**136**, 105201 (2026). [41] R. L. Kaufmann and W. R. Paterson, 等离子体片中的玻尔兹曼H函数与熵，《期刊 《地球物理研究杂志：空间物理学》**114**, 10 1029 2008 014030 2009。/ JA ( )。[42] H. Liang、M. H. Barbhuiya、P. A. Cassak、O. Pezzi、S. Servidio、F. Valentini 和 G. P. Zank, 分布函数非麦克斯韦性度量的基于动理学熵的方法：理论与模拟，《等离子体物理学杂志》**86**, 825860502 (2020)。[43] J. T. Parker、E. G. Highcock、A. A. Schekochihin 和 P. J. Dellar, 漂移动理学等离子体湍流中相位混合的抑制，《等离子体物理学》**23**, 070703 (2016)。[44] H. Politano 和 A. Pouquet，磁流体力学的 Von K´arm´an–Howarth 方程及其对三阶纵向结构函数和相关函数的影响，《物理评论 E》**57**, R21 (1998)。[45] R. Marino 和 L. Sorriso-Valvo，空间等离子体湍流能量传递的标度律，《物理学报告》**1006**, 1 (2023)。[46] V. Doan、L. Sorriso-Valvo、P. Raynal、V. Montagud-Camps、A. Settino、A. Tamburrini、I. Svenningsson、A. Chasapis、T. Vo、E. Yordanova、L. Richard、F. Pecora、Z. V¨or¨os、S. Servidio 和 O. Pezzi，近地空间湍流结构与耗散代理量之间的统计关联：MMS 2023–2024 无偏磁鞘观测计划，准备中 (2026)。[47] O. Alexandrova、V. Carbone、P. Veltri 和 L. Sorriso-Valvo，太阳风湍流的小尺度能量级联，《天体物理学杂志》**674**, 1153 (2008)。[48] L. Sorriso-Valvo、F. Catapano、A. Retin`o、O. Le Contel、D. Perrone、O. W. Roberts、J. T. Coburn、V. Panebianco、F. Valentini、S. Perri、A. Greco、F. Malara、V. Carbone、P. Veltri、O. Pezzi、F. Fraternale、F. Di Mare、R. Marino、B. Giles、T. E. Moore、C. T. Russell、R. B. Torbert、J. L. Burch 和 Y. V. Khotyaintsev，磁层 Kelvin–Helmholtz 不稳定性中的湍流驱动离子束，《物理评论快报》**122**, 035102 (2019)。[49] F. Plaschke、H. Hietala、M. Archer、X. Blanco-Cano、P. Kajdiˇc、T. Karlsson、S. H. Lee、N. Omidi、M. Palm-roth、V. Roytershteyn、D. Schmid、V. Sergeev 和 D. Sibeck，无碰撞激波下游的喷流，《空间科学评论》**214**, 81 (2018)。[50] E. Kr¨amer、F. Koller、J. Suni、A. T. LaMoury、A. P¨oppelwerth、G. Glebe、T. Mohammed-Amin、S. Rap-tis、L. Vuorinen、S. Weiss、N. Xirogiannopoulou、M. Archer、X. Blanco-Cano、H. Gunell、H. Hietala、T. Karlsson、F. Plaschke、L. Preisser、O. Roberts、C. Simon Wedlund、M. Temmer 和 Z. V¨or¨os，无碰撞激波下游的喷流：近期发现与挑战，《空间科学评论》**221**, 4 (2024)。[51] S. Raptis、T. Karlsson、A. Vaivads、C. Pollock、F. Plaschke、A. Johlander、H. Trollvik 和 P.-A. Lindqvist，作为激波重构直接结果的下游高速等离子体喷流生成，《自然·通讯》**13**, 598 (2022)。[52] S. Raptis、M. Lindberg、T. Z. Liu、D. L. Turner、A. Lalti、Y. Zhou、P. Kajdiˇc、A. Kouloumvakos、D. G. Sibeck、L. Vuorinen、A. Michael、M. Shumko、A. Osmane、E. Kr¨amer、L. Turc、T. Karlsson、C. Katsavrias、L. B. Wilson、H. Madanian、X. Blanco-Cano、I. J. Cohen 和 C. P. Escoubet，多任务观测揭示与激波产生的瞬变相关的相对论电子和高速喷流，《天体物理学杂志快报》**981**, L10 (2025)。[53] S. Raptis、D. Trotta、D. L. Turner、X. Blanco-Cano、

H. Hietala、T. Karlsson、I. C. Jebaraj、I. Y. Vasko、A. Os-mane、K. Takahashi、D. Lario、L. B. Wilson、G. G. Howes 和 R. F. Wimmer-Schweingruber，无碰撞激波前震区中的压缩结构，《天体物理学杂志快报》**1000**, L55 (2026)。[54] T. Z. Liu、H. Hietala、V. Angelopoulos、Y. Omelchenko、R. Vainio 和 F. Plaschke，磁鞘喷流驱动弓形波的统计研究，《地球物理研究杂志：空间物理学》**125**, e2019JA027710 (2020)。[55] O. W. Roberts、Z. V¨or¨os、A. Settino、F. Koller、S. Raptis、M. Temmer、C. S. Wedlund、X. Li 和 R. Nakamura，磁鞘喷流中的能量转换与交换，《地球物理研究杂志：空间物理学》**130**, e2025JA034414 (2025)。[56] H. Gunell、M. Hamrin、S. Nesbit- ¨Ostman、E. Kr¨amer 和 H. Nilsson，火星上的磁鞘喷流，《科学进展》**9**, eadg5703 (2023)。[57] Y. Zhou、S. Raptis、S. Wang、C. Shen、N. Ren 和 L. Ma，木星及太阳系各处的磁鞘喷流，《自然·通讯》**15**, 4 (2024)。[58] D. Trotta、F. Valentini、D. Burgess 和 S. Servidio，激波与等离子体湍流相互作用中的相空间输运，《美国国家科学院院刊》**118**, e2026764118 (2021)。[59] D. Trotta、F. Pecora、A. Settino、D. Perrone、H. Hietala、T. Horbury、W. Matthaeus、D. Burgess、S. Servidio 和 F. Valentini，湍流结构穿越地球弓形激波的传输，《天体物理学杂志》**933**, 167 (2022)。[60] J. Juno、C. R. Brown、G. G. Howes、C. C. Haggerty、J. M. TenBarge、L. B. Wilson III、D. Caprioli 和 K. G. Klein，斜激波中离子的相空间能量化，《天体物理学杂志》**944**, 15 (2023)。[61] P. Ghavamian、S. J. Schwartz、J. Mitchell、A. Masters 和 J. M. Laming，无碰撞激波中的电子—离子温度平衡：超新星遗迹与太阳风的关联，《空间科学评论》**178**, 633 (2013)。[62] J. C. Raymond、P. Ghavamian、A. Bohdan、D. Ryu、J. Niemiec、L. Sironi、A. Tran、E. Amato、M. Hoshino、M. Pohl、T. Amano 和 F. Fiuza，天体物理激波中的电子—离子温度比，《天体物理学杂志》**949**, 50 (2023)。[63] T. Vo，《地球磁鞘中速度空间湍流统计特征》图表背后的数据，10.5281/zenodo.23821840 (2026)。[64] O. Alexandrova、J. Saur、C. Lacombe、A. Mangeney、J. Mitchell、S. J. Schwartz 和 P. Robert，从磁流体力学到电子尺度的太阳风湍流谱普适性，《物理评论快报》**103**, 165003 (2009)。[65] R. Bandyopadhyay、L. Sorriso-Valvo、A. Chasapis、P. Hellinger、W. H. Matthaeus、A. Verdini、S. Landi、L. Franci、L. Matteini、B. L. Giles、D. J. Gershman、T. E. Moore、C. J. Pollock、C. T. Russell、R. J. Strangeway、R. B. Torbert 和 J. L. Burch，*In Situ* 空间等离子体中霍尔磁流体级联的观测，《物理评论快报》**124**, 225101 (2020)。[66] X. Blanco-Cano、L. Preisser、P. Kajdi˘c 和 D. Rojas-Castillo，磁鞘微结构：向南行星际磁场期间的镜像模波与喷流，《地球物理研究杂志：空间物理学》**125**, e2020JA027940 (2020)。[67] R. Bruno 和 V. Carbone，太阳风作为湍流实验室，《太阳物理学评论》**10**，2（2013）。[68] M. O. Chandler、S. J. Schwartz、L. A. Avanov、V. N. Coffey、B. L. Giles、T. E. Moore、C. J. Pollock、J. L. Burch、C. T. Russell 和 R. B. Torbert，《黎明侧磁层中的镜像模结构观测》，《地球物理研究杂志：空间物理学》**126**，e2020JA028649（2021）。[69] A. V. Eyelade、C. M. Espinoza、M. Stepanova、E. E. Antonova、I. L. Ovchinnikov 和 I. P. Kirpichev，《磁流体动力学湍流对地球等离子体片中离子卡帕分布的影响及其与等离子体 β 参数的关系》，《天文学与空间科学前沿》**8**，10 3389 2021 647121 2021 . /fspas. . ( )。[70] S. Galtier，《空间等离子体及更广领域中的湍流》，《物理学A：数学与理论》**51**，293001 2018( )。[71] I. P. Kirpichev、E. E. Antonova、M. Stepanova、A. V. Eyelade、C. M. Espinoza、I. L. Ovchinnikov、V. G. Vorobjev 和 O. I. Yagodkina，《安静地磁条件下地心距离小于 20 RE 处地球磁层中的离子卡帕分布参数》，《地球物理研究杂志：空间物理学》**126**，e2021JA029409（2021）。[72] T. Z. Liu、V. Angelopoulos、H. Zhang、A. Vu 和 J. Raeder，《磁鞘离子场向不对称性及其对离子泄漏至前震区的影响》，《地球物理研究杂志：空间物理学》**129**，e2023JA032339（2024）。[73] G. Livadiotis，《卡帕分布的起源与性质专题导言：空间等离子体中卡帕分布的统计背景与性质》，《地球物理研究杂志：空间物理学》**120**，1607（2015）。[74] M. L. Nastac、R. J. Ewart、J. Juno、M. Barnes 和 A. A. Schekochihin，《Vlasov-Poisson湍流的普适涨落谱》（ 2025 2503 17278 ），[ ] arXiv: . physics.plasm-ph .[75] M. Newville、R. Otten、A. Nelson、T. Stensitzki、A. Ingargi-ola、D. Allan、A. Fox、F. Carter 和 M. Rawlik，LM-FIT：Python 的非线性最小二乘最小化与曲线拟合，Zenodo（2025）。[76] S. Perri、D. Perrone、O. Roberts、A. Settino、E. Yor-danova、L. Sorriso-Valvo、P. Veltri 和 F. Valentini，《地球磁鞘中静电涨落的性质》，《天体物理学杂志》**919**，75（2021）。[77] F. Sahraoui、L. Hadid 和 S. Huang，《近地空间等离子体中的磁流体动力学湍流与动理学尺度湍流：（简短的）带有偏见的综述》，《现代等离子体物理评论》**4**，4（2020）。[78] M. Shoji、Y. Omura 和 L.-C. Lee，《地球磁鞘中的多维非线性镜像模结构》，《地球物理研究杂志：空间物理学》**117**，10.1029/2011JA017420（2012）。[79] L. Sorriso-Valvo、F. Carbone、S. Perri、A. Greco、R. Marino 和 R. Bruno，《内日球层中湍流能量传递率的统计性质》，《太阳物理学》**293**，10（2018）。[80] C. Y. Tu 和 E. Marsch，《太阳风中的磁流体动力学结构、波与湍流：观测与理论》，《空间科学评论》**73**，1（1995）。[81] L. B. Wilson III、L.-J. Chen、S. Wang、S. J. Schwartz、D. L. Turner、M. L. Stevens、J. C. Kasper、A. Osmane、D. Caprioli

K. A. Goodrich, 《行星际激波中的电子能量分配》。I. 方法与数据产品, 《天体物理学杂志增刊》**243**, 8（2019）。
[82] Y. Wu、C. Shi、X. Liu、L. Dai、J. Zhao 和 X. Tao, 磁鞘中镜像模介导的EMIC波生成, 《地球物理研究快报》**53**, e2025GL120624（2026）。