Draft version March 6, 2023 年使用
AASTeX631 默认样式排版

arXiv:2303.01663v1 [astro-ph.SR] 3 Mar 2023

17.4 至 45.7 个太阳半径范围内单个快速太阳风流中 1/f范围的演变

Nooshin Davis ,[1] B. D. G. Chandran ,[1] D. A. Bowen ,[2] S. T. Badman ,[3] T. Dudok de Wit ,[4,5] C. H. K. Chen ,[6] S. D. Bale ,[7] Zesen Huang ,[7] Nikos Sioulas ,[7] and Marco Velli [7]

[1] *Department of Physics and Astronomy, University of New Hampshire, Durham, New Hampshire 03824, USA*
[2] *Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720-7450, USA*[3] *Center for Astrophysics, Harvard and Smithsonian, Cambridge, MA, USA*[4] *LPC2E, CNRS and University of Orléans, Orléans, France*
[5] *International Space Science Institute, ISSI, Bern, Switzerland*[6] *Department of Physics and Astronomy, Queen Mary University of London, London E1 4NS, UK*[7] *Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California, Los Angeles, CA, USA*

摘要

快速太阳风（$V_{\rm SW} > 500 {\rm km\ s^{-1}}$）中磁场涨落在磁流体力学（MHD）尺度上的功率谱，以折断频率 $f_{\rm b}$为界呈现两种不同的幂律。频率 f 低于 $f_{\rm b}$ 的低频范围，通常被视为为 $f > f_{\rm b}$处的湍流级联提供能量的储备库。在日心距离 r 超过 60 个太阳半径（$R_{\rm s}$）时，功率谱在 $f < f_{\rm b}$处通常呈现 $1/f$ 标度；也就是说，谱指数接近 -1。本研究利用帕克太阳探测器（PSP）第10次近太阳点期间对太阳的观测数据，研究单股快速太阳风流快速径向扫描期间， $r < 60 R_{\rm s}$处 $f < f_{\rm b}$ 的磁场功率谱演化。我们发现，随着 r 从 17.4 个太阳半径增至 45.7 个太阳半径，谱的低频部分的谱指数从约 -0.61 降至 -0.94。我们的结果表明，在快速太阳风中大 r 处常见的 $1/f$ 谱并非在太阳处形成，而是在太阳风从日冕向外膨胀进入行星际介质的过程中动态演化形成。

关键词 *s:* 磁流体力学（1964年）、太阳风（1534）、行星际湍流（830）

1. 引言

日球层中充满了太阳风，这是一种源自太阳、以超声速和超阿尔芬速流动并持续向日球层膨胀的等离子体流。在径向膨胀过程中，太阳风具有强烈的湍流特性（Bruno与Carbone（2013）），其时空变化跨越很宽的尺度范围（例如，参见Goldstein等，1995；Verscharen等，2019）。例如，在航天器参考系中对应于“磁流体力学（MHD）”尺度（即远大于质子回旋半径的尺度）的频率 f 处，根据Taylor（1938年）假设，地球附近快速太阳风中观测到的功率谱密度（PSD）在折断频率 $f_{\rm b} \sim 10^{-3}$ s^{-1} 两侧呈现不同的幂律标度 f^{α_B} （Bruno与Carbone（2013））。在 $f < f_{\rm b}$处， α_B 通常为$\simeq -1$，尤其是在快速太阳风中（Tu与Marsch（1995）；Bruno与Carbone（2013））。在 $f > f_{\rm b}$处， α_B 约为$-5/3$ 至 $-3/2$。这样的谱指数结合观测到的太阳风湍流各向异性（例如，Matthaeus等，1990；Horbury等，2008；Sahraoui等，2010；Wicks等，2011；Chen等，2012），与各向异性磁流体湍流理论相一致，其中包括动态对齐和间歇性可能存在的情形（Goldreich与Sridhar（1995）；Maron与Goldreich（2001）；Boldyrev（2005）；Beresnyak与Lazarian（2008）；Chandran等（2015）；Mallet与Schekochihin（2017）；Schekochihin，2022）。

这一范围 $f < f_{\rm b}$ 有时被称为“含能范围”，相应的长度尺度有时被称为“能量注入尺度”。关于 $1/f$ 标度在 $f < f_{\rm b}$的起源，目前仍存在争议；这种标度常见于快速太阳风中，不仅出现在地球附近，也广泛出现在 $r > 60 R_{\rm s}$（Bruno 等，2019 年）。Roberts (1989年)发现， $f < f_{\rm b}$ 处涨落的振幅在0.3 au至1 au之间的演变方式，与经历WKB传播且未发生湍流衰减的

Alfv´én波相同。随后他提出，如果0.3 au至1 au之间没有发生非线性衰减，那么日冕至0.3 au之间也不应发生衰减，因为越靠近太阳， B 的相对变化越小。如果这一观点正确，他的论证意味着， $1/f$ 部分的谱是在太阳处产生的。Matthaeus & Goldstein（1986年）提出了不同的论据，认为 $1/f$ 标度是在太阳处产生的；他们提出， $1/f$ 标度源自对来自太阳表面不同区域、彼此不相关的涨落样本进行叠加。其他研究则持相反观点，将快速太阳风中的 $1/f$ 标度归因于太阳风内部的湍流动力学。例如，一些研究将 $1/f$ 谱与反射驱动的磁流体力学湍流联系起来（Velli 等人，1989年；Verdini 等人，2012年）；在这种湍流中，非WKB反射是朝太阳方向传播的Alfv´én波的主要来源，这些波与占主导地位、向外传播的Alfv´én波发生非线性相互作用。还有研究提出，Helios航天器在 $f \geq 3 \times 10^{-4}\,\mathrm{s}^{-1}$ 处的快速太阳风中观测到的 $1/f$ 标度（Tu与Marsch（1995）），是在参数衰变不稳定性的非线性演化过程中就地形成的（Chandran 2018）。Matteini等人（2018）提出，Alfv´én快速流中的1/f谱与涨落分布中存在观测截断以及其平均振幅达到饱和有关。

本文利用帕克太阳探测器(PSP)的观测数据，研究 $f < f_{\mathrm{b}}$ 处的磁功率谱密度如何随 r 从 $17R_{\mathrm{s}}$ 增加至 $45R_{\mathrm{s}}$而演化。我们重点关注这样一段数据区间：在此期间，PSP对单个快速太阳风流进行了快速径向扫描，因此，该时段内太阳风性质的径向变化可以合理地映射为太阳风静止参考系中这些性质的时间变化。第2节将更详细地介绍我们所分析的数据，以及在所考察期间PSP与太阳之间的磁连接。在第3节中，我们给出主要结果；第4 节则总结研究发现并给出结论。

2. 数据

本研究分析了PSP第10次近太阳点期间，即2021年11月17日至20日的磁场和速度数据，覆盖的日心径向距离范围为0.08–0.22天文单位（17.4至45.7 R_s）。在PSP第10次近太阳点的整个期间，PSP与一系列三个彼此孤立的中纬度负极性日冕洞相连（Badman等（2023））。在近日点附近沿太阳表面顺行移动时，PSP快速连续穿越了这三个日冕洞。然而，这一运动的大部分发生在2021年11月21日至11月23日的两天内，在此期间PSP的经度移动了近90度。在此之前，也是与本研究最相关的时期，PSP在快速向内移动的同时与太阳近乎共转：从11月17日至11月20日，PSP的日球坐标位置在卡林顿经度上的变化小于10度，且磁力线映射显示，在整个期间源区都位于同一日冕洞的中心附近。从11月17日至11月19日，磁力线脚点略微逆行移动，远离快速太阳风流的中心（峰值），并朝向东侧日缘。在11月19日剩余时间内，PSP经历了共转，随后开始缓慢顺行迁移，并于11月20日中午前后穿过该太阳风流速度最快的部分（Badman等（2023））。我们分析的数据区间基本上提供了对同一快速太阳风流的径向扫描。请注意，该区间不仅排除了日球电流片的穿越，也排除了日冕物质抛射。

在本研究中，我们使用了 FIELDS 仪器套件（Bale 等（2016））中外侧通量门磁力仪（MAG）以 0.21845 s 分辨率获取的磁场数据。速度数据来自太阳探测器分析仪（SPAN）以 3.491 s 分辨率进行的太阳风电子、阿尔法粒子和质子（SWEAP）（Kasper 等（2016））测量（Livi 等（2022））。

图 1 展示了探测器在我们分析时段内的轨迹。如图所示，在这段时间内，帕克太阳探测器大致沿径向从 45.7 移动到 17。4 R_s。图 1 还显示了太阳风的径向速度，记为 V_{sw}，较浅的颜色对应快速太阳风。本文展示的所有径向速度均以太阳静止参考系为基准，而非航天器参考系。图 2 以不同格式重新呈现了 V_{sw} 的数据，并同时显示帕克太阳探测器的日心距离，二者均为时间的函数。如两幅图所示，在此时间段内，太阳风为快速太阳风， V_{sw} 超过 500 km s^{-1} ，且涵盖了绝大部分时段。

3. 结果

通过湍流涨落随航天器参考系频率变化的功率谱密度（PSD）来测量湍流的多尺度性质，是一种常用方法。为研究磁场

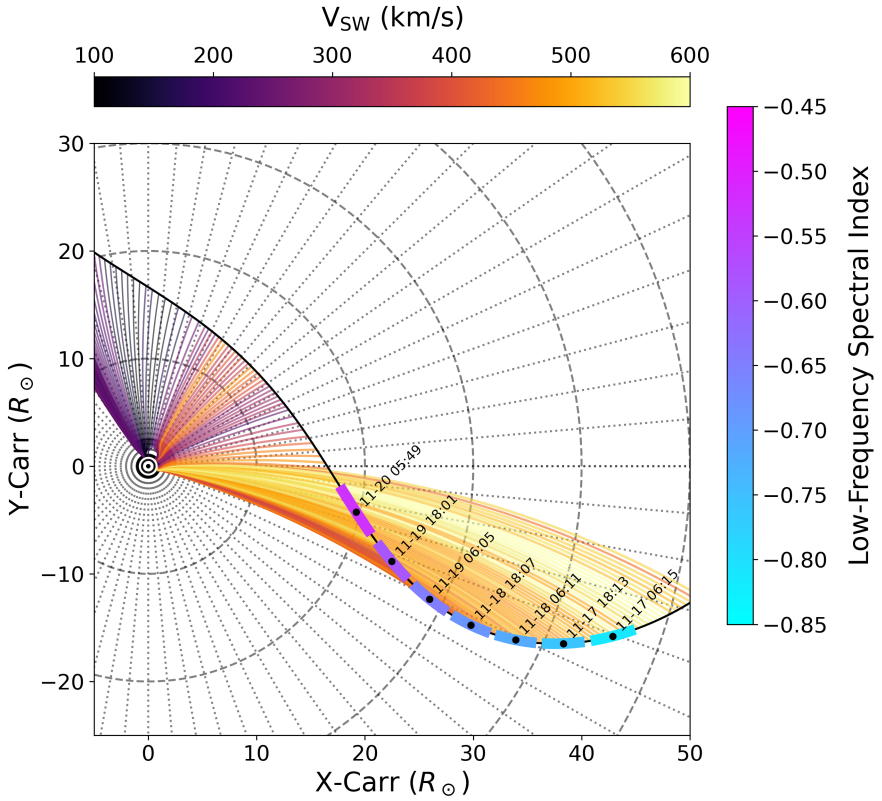

图1. 帕克太阳探测器第10次近太阳点轨道轨迹，从11月17日至11月20日中旬，绘制于卡林顿坐标系（随太阳自转）中。轨迹上的彩色区段按磁谱指数着色。帕克螺旋磁场线根据测得的径向太阳风速度着色，显示本研究所考察的轨迹部分在几乎沿径向相对于太阳运动的同时，始终处于同一高速太阳风流中。

涨落谱以及帕克太阳探测器观测到的太阳风低频谱特性，我们将MAG数据划分为12小时区间。对于每个区间，我们采用傅里叶变换构建磁场涨落的功率谱密度。为提高图像的清晰度，我们在频域内使用宽度为2倍频率因子的滑动窗口对频率谱进行平均。不同12小时区间的功率谱如图3所示，每条频率谱均按日心距离着色。可以看出，随着日心距离增加，功率水平系统性降低；在所考察的距离范围内，总降幅超过一个数量级。这一行为与 $r > 0.3$ 天文单位处的观测结果一致，并且是由太阳风膨胀和湍流级联导致的（Heinemann与Olbert（1980）；Tu与Marsch（1995））。

在所研究的整个距离范围内，功率谱均显示出一个幂律区间；对于高于第1节所述折断频率 $f_{\rm b}$ 的频率，该区间与惯性区间磁流体力学湍流模型相符。对于图3中展示的前几条功率谱，该折断频率为 $\sim 10^{-2}$秒$^{-1}$。在 $f > f_{\rm b}$ 处的谱指数落在磁流体力学湍流理论（例如 Goldreich与Sridhar（1995）；Maron与Goldreich（2001）；Boldyrev（2005）；Beresnyak与Lazarian（2008）；Chandran等（2015）；Mallet与Schekochihin（2017））以及近期帕克太阳探测器观测（Chen等（2020）；Sioulas等（2023））所预测的范围（$-5/3$，$-3/2$）内，但这一频率范围并非本研究的重点。图 3 标出了若干幂律斜率以供比较。

图 4 展示了三个不同日心距离范围内的功率谱。该图还展示了局部谱指数 α_B（f），我们通过在对数(功率谱密度) $-\log(f)$ 空间中，对频率区间（$f/\sqrt{10}$、$\sqrt{10}f$）内的功率谱进行最佳线性拟合来计算该指数——即覆盖频率一个数量级的范围。随着 r从 $\simeq 20R_{\rm s}$增加到

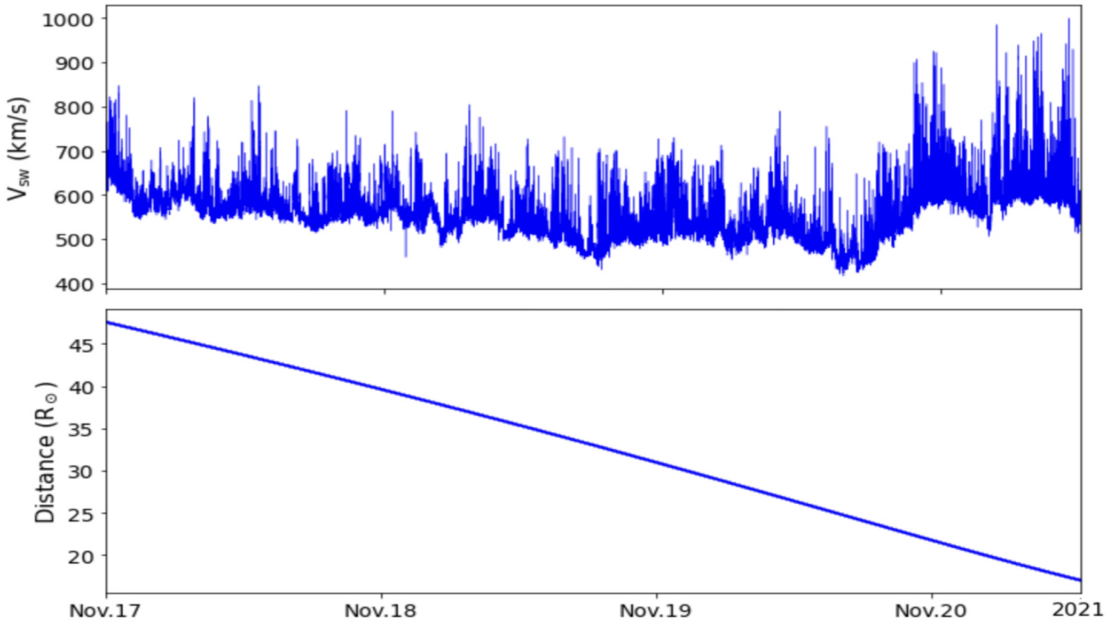

图 2. (上) 径向太阳风速度的变化；(下) 帕克太阳探测器的日心距离。

$\simeq 40R_s$， α_B 在 $f < f_b$ 处的值从 $\simeq -0.5$ 降至 $\simeq -1$；也就是说，低频处的功率谱逐渐向 $1/f$ 谱变陡。图 4 还可以看出，随着 f_b 增加， r 也随之减小，这在更大的 r （Bruno与Carbone（2013）；Chen等（2020））处也会发生。需要注意的是，低频幂律并非完美的幂律，这可能是由于统计数据有限所致，但斜率的差异仍然清晰可见。

图 5 展示了利用全部七个 12小时区间得到的 f_b 的径向演化及其在 $f < f_b$ 处的数值 α_B。对于这幅图，我们采用了一种计算 α_B 的方法，与图 4 中使用的方法不同。具体而言，我们将功率谱拟合为双幂律，并同时调整以下四个参数以优化拟合：折断频率 f_b、 $f = f_b$ 处功率谱的振幅、 $f < f_b$ 处的谱指数，以及 $f > f_b$ 处的谱指数。通过这一过程得到的 $f < f_b$ 处谱指数在图 5 中记为 α_B。如图所示， $f < f_b$ 处的谱指数从 17.4 R_s 处的 -0.61 降至 45.7 R_s 处的 -0.94。在同一日心距离范围内，折断频率从 7.4×10^{-3} Hz 降至 2.7×10^{-3} Hz。我们的结果表明，在这一日心距离范围内，功率谱的含能范围在快速太阳风中动态演化；而快速太阳风在 $r > 0.3$ 天文单位处观测到的 $1/f$ 谱并非产生于太阳。

为探究我们的结果在多大程度上取决于所采用的分析方法，我们使用小波变换重新分析数据。具体而言，我们使用最大重叠离散小波变换（MODWT）（Percival与Mondal（2012）），该方法可直接估算各个倍频程（频率相差 2 倍）的谱指数及其置信区间。随后，我们针对研究中的七个 12小时区间，分别对频率范围（$4 \times 10^{-4}\,\mathrm{s}^{-1}$， $3 \times 10^{3}\,\mathrm{s}^{-1}$）内的小波谱指数取平均，从而确定 $f < f_b$ 处的有效谱指数。如图 4 所示，两种方法计算得到的功率谱（上图）彼此一致。此外，两种方法在高频范围内得出的局部谱指数（下图）也一致，但在 $f < 2 \times 10^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ 处开始逐渐出现差异。图 5 显示，随着 r 从 $17R_s$ 增至 $45R_s$，低频谱指数从 $\simeq -0.5$降至 $\simeq -0.9$，这与根据功率谱密度推断出的谱指数相似。

正如 Kraichnan (1965年) 所指出的，阿尔芬波包往往沿局部背景磁场方向平行或反平行传播。局部背景磁场是对一个体积内的磁场进行局部空间平均所得，该体积远大于阿尔芬波包的体积。对于 $f < f_b$处的涨落，这一局部背景磁场与磁场的一小时平均值相当。根据 Taylor 的（1938年）假设，航天器参考系中的时间变化对应于沿太阳风速度方向的空间变化；太阳风速度 $\boldsymbol{V}$ 是在航天器参考系中测得的。因此，我们绘制的频率谱对应于沿 $\boldsymbol{V}$ 方向的一维波数谱，即对三维波数谱沿与 $\boldsymbol{V}$ 正交的两个波数分量积分。为了阐释

这些频率谱，我们计算 θ_{VB}^{sc} 与 $\boldsymbol{B}$ 航天器参考系速度 $\boldsymbol{V}$之间的夹角。如图 6所示，大部分时间 $160 \lesssim \theta_{VB}^{sc} \lesssim 180$。由于 $\sin(\theta_{VB}^{sc})$ 很小，我们在 $f < f_b$ 处测得的频率谱近似对应于低频涨落的平行波数谱——即对三维波数谱沿与局部平均磁场垂直的两个波数分量积分所得的谱（局部平均磁场的方向，与 $1/f$ 范围内涨落的传播方向相差至多一个整体符号）。因此，在这股快速太阳风流中向 $1/f$ 谱的演变，与参数衰变不稳定性的非线性演化过程中向 $1/k_{\parallel}$ 谱的演变相似；在后者中，慢磁声波受到强烈阻尼，其中 $k_{\parallel}$ 是平行于平均磁场的波数分量（Chandran 2018）。

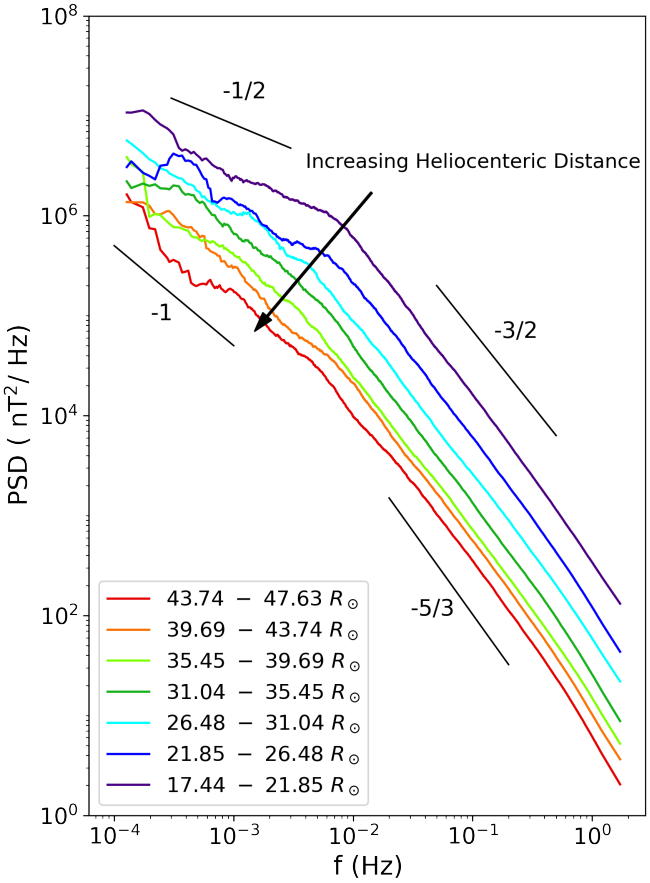

图3。磁场功率谱　　不同日心距离处的功率谱。标出了几条幂律斜率以供比较。

4. 总结与结论

在本文中，我们考察了帕克太阳探测器第10次近太阳点期间的磁场数据，具体时间为2021年11月17日至2021年11月20日。在此期间，帕克太阳探测器在快速太阳风中近似沿径向移动，如图1所示，并与一个中纬度日冕洞保持磁连接（Badman等（2023））。本文所示的磁场功率谱在频率范围（10^{-4} s^{-1},10$_0$ s^{-1}）内均呈现近似的双幂律形式，折断频率为 f_b，且随着 r 增加而逐渐降低。我们的主要发现是，$f < f_b$ 处的谱指数随着 r 从 $17.4R_s$ 增加至 $45.7R_s$，逐渐从 -0.61 降低至 -0.94。尽管我们只分析了单个快速太阳风流，但结果表明，在 $r < 60R_s$、$f < f_b$ 处观测到的快速太阳风 $1/f$ 功率谱并非起源于太阳，而是在太阳风从日冕向外流至 $r \sim 60R_s$的过程中动态演化。还需进一步分析更多太阳风流，以确定我们发现的行为在多大程度上代表了整个快速太阳风。

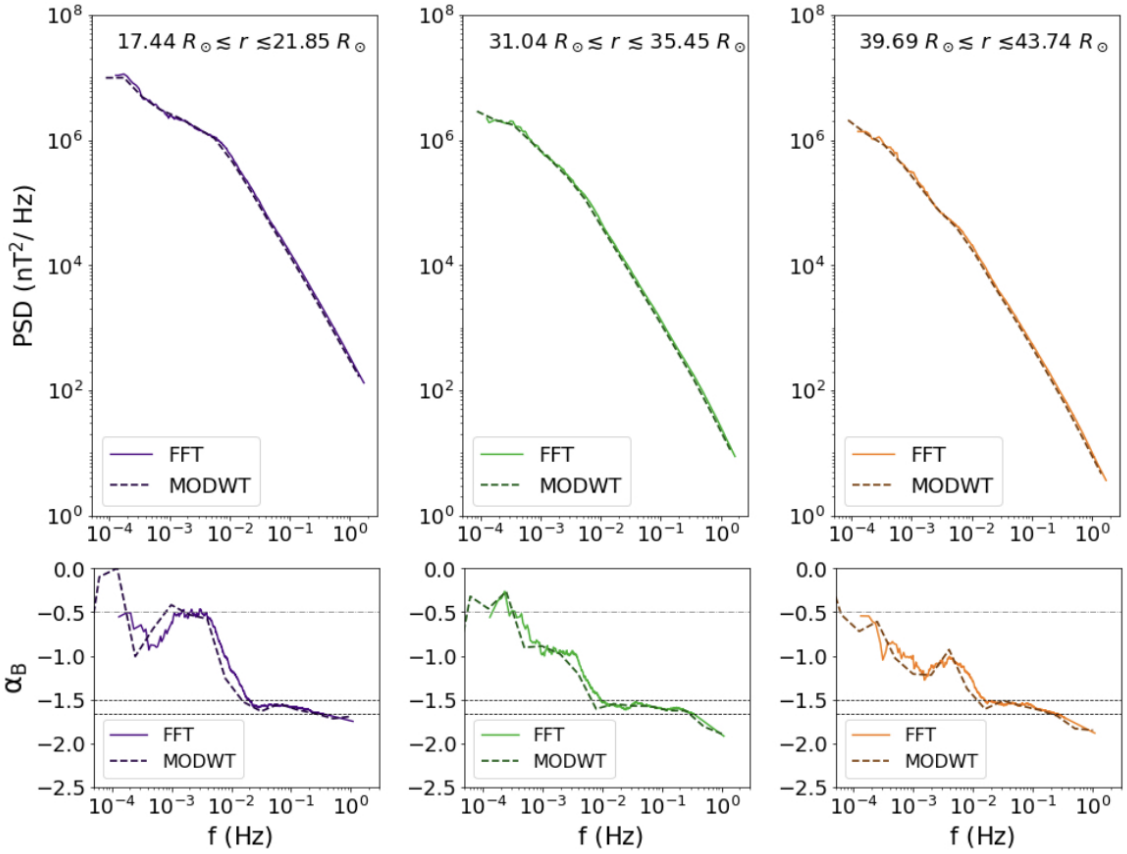

图4. （上）不同日心距离处的磁场功率谱；（下）局部谱指数。水平虚线标出数值 $\alpha_B = -1/2$、$-3/2$ 和 $-5/3$。

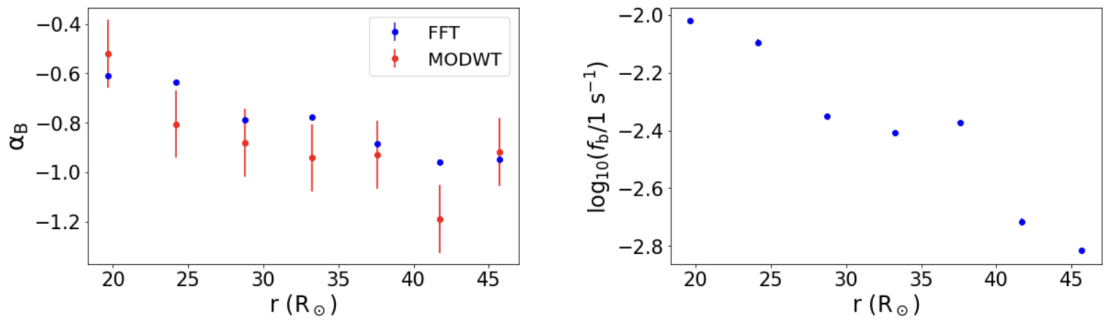

图5. （左）磁场谱指数随日心距离的变化；（右）谱断点随日心距离的变化。蓝色数据点代表快速傅里叶变换方法，橙色三角形代表最大重叠离散小波变换方法。

如果 $f < f_b$ 处的谱指数确实会动态演化，那么确定导致这种演化的物理机制就是一个重要的未解问题。正如引言中所述，先前研究认为，反射驱动的阿尔芬波湍流中的非线性相互作用（例如，Velli 等人，1989年；Verdini 等人，2012年），或参数衰变不稳定性的非线性演化（Chandran 2018），均可产生 $1/f$ 标度。然而，仍需进一步研究，以确定这些机制或其他机制能否解释我们所呈现的帕克太阳探测器测量结果。进一步研究包括深入阐明反射驱动湍流和参数衰变对 $f < f_b$ 处谱的影响，以及开展更多观测研究。除了前文提到的、需要确定 α_B 处的径向演化 $f < f_b$

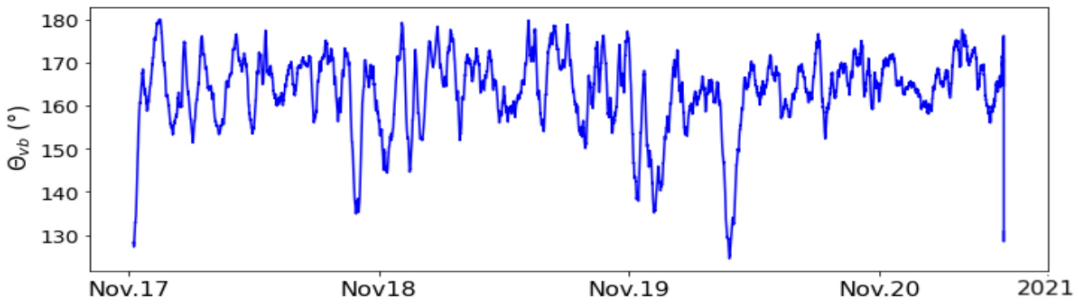

图6. 航天器参考系中平均磁场与平均速度场之间夹角的变化 θ^{sc}_{VB}。

我们发现这种现象也出现在更大的快速太阳风流样本中。要表征除 $\boldsymbol{B}$涨落之外其他类型涨落的径向演化，还需要开展更多研究。尤其重要的是，确定密度、速度和Elsasser变量涨落的径向演化（Elsasser 1950）；这些涨落对应于在等离子体参考系中朝向太阳和背离太阳传播的阿尔芬波涨落。

感谢 Aaron Roberts 提供了有益的讨论。ND 和 BC 部分由美国国家航空航天局拨款 NNN06AA01C（资助帕克太阳探测器 FIELDS 实验）以及美国国家航空航天局拨款 80NSSC19K0829 资助。CHKC 获得了英国研究与创新署未来领袖奖学金 MR/W007657/1 和英国科学技术设施委员会综合资助 ST/T00018X/1 的支持。感谢 FIELDS/SWEAP团队和帕克太阳探测器社区成员提供的有益讨论。帕克太阳探测器数据可从空间物理数据设施获取（https://spdf.gsfc.nasa.gov）。

参考文献

Badman, S. T., Riley, P., Jones, S. I.，等。2023，《地球物理研究杂志：空间物理》Beresnyak, A.，& Lazarian, A. 2008，《天体物理学杂志》，682，1070，doi: 10.1086/589428Boldyrev, S. 2005，《天体物理学杂志快报》，626，L37，doi: 10.1086/431649Bruno, R.，& Carbone, V. 2013，《太阳物理学年度评论》，10，2，doi: 10.12942/lrsp-2013-2Bruno, R., Telloni, D., Sorriso-Valvo, L.，等。2019，°《天文学与天体物理学》，627，doi: 10.1051/0004-6361/201935841Chandran, B. D. G. 2018，《等离子体物理学杂志》，84，905840106，doi: 10.1017/S0022377818000016Chandran, B. D. G.、Schekochihin, A. A. 和 Mallet, A. 2015，《天体物理学杂志》，807，39，doi: 10.1088/0004-637X/807/1/39Chen, C. H. K.、Mallet, A.、Schekochihin, A. A. 等。2012，《天体物理学杂志》，758，120，doi: 10.1088/0004-637X/758/2/120Chen, C. H. K.、Bale, S. D.、Bonnell, J. W. 等。2020，《天体物理学杂志增刊》，246，53，doi: 10.3847/1538-4365/ab60a3Elsasser, W. M. 1950，《物理评论》，79，183，doi: 10.1103/PhysRev.79.183Goldreich, P.，& Sridhar, S. 1995，《天体物理学杂志》，438，763，doi: 10.1086/175121Goldstein, M. L.、Roberts, D. A. 和 Matthaeus, W. H. 1995，《天文学与天体物理学年度评论》，33，283，doi: 10.1146/annurev.aa.33.090195.001435 Heinemann, M., & Olbert, S. 1980年，《地球物理研究杂志》，85，1311，doi: 10.1029/JA085iA03p01311Horbury, T. S., Forman, M., & Oughton, S. 2008年，《物理评论快报》，101，175005，doi: 10.1103/PhysRevLett.101.175005Kasper, J. C., Abiad, R., Austin, G.，等，2016年，空间科学评论，204，131，doi: 10.1007/s11214-015-0206-3Kraichnan, R. H. 1965年，流体物理学，8，1385 Livi, R., Larson, D. E., Kasper, J. C.，等，2022年，《天体物理学杂志》，938，doi: 10.3847/1538-4357/ac93f5Mallet, A., & Schekochihin, A. A. 2017年，皇家天文学会月刊，466，3918，doi: 10.1093/mnras/stw3251Maron, J., & Goldreich, P. 2001年，《天体物理学杂志》，554，1175，doi: 10.1086/321413Matteini, L., Stansby, D., Horbury, T. S., & Chen, C. H. K. 2018年，天体物理学杂志，869，L32，doi: 10.3847/2041-8213/aaf573Matthaeus, W. H., & Goldstein, M. L. 1986年，《物理评论快报》，57，495，doi: 10.1103/PhysRevLett.57.495Matthaeus, W. H., Goldstein, M. L., & Roberts, D. A. 1990年，《地球物理研究杂志》，95，20673 Percival, D. B., & Mondal, D. 2012年，统计学手册：时间序列分析：方法与应用，30，623–657

Roberts, D. A. 1989, 《地球物理研究杂志》, 94, 6899, doi: 10.1029/JA094iA06p06899Sahraoui, F., Goldstein, M. L., Belmont, G., Canu,P., & Rezeau, L. 2010, P hysical Review Letters, 105, 131101, doi: 10.1103/PhysRevLett.105.131101Schekochihin, A. 2022年, 《等离子体物理学杂志》, 88, doi: 10.1017/S0022377822000721Sioulas, N., Velli, M., Huang, Z., 等, 2023, arXiv 电子预印本, arXiv:2301.03896。 https://arxiv.org/abs/2301.03896Taylor, G. I. 1938年, 伦敦皇家学会论文集 A 辑, 164, 476, doi: 10.1098/rspa.1938.0032

Tu, C.、& Marsch, E. 1995, 《空间科学评论》, 73, 1, doi: 10.1007/BF00748891Velli, M.、Grappin, R.、& Mangeney, A. 1989, 《物理评论快报》, 63, 1807, doi: 10.1103/PhysRevLett.63.1807Verdini, A.、Grappin, R.、Pinto, R.、& Velli, M. 2012年, 《天体物理学杂志快报》, 750, L33, doi: 10.1088/2041-8205/750/2/L33Verscharen, D.、Chandran, B. D. G.、Jeong, S.-Y. 等, 2019年, arXiv 电子预印本, arXiv:1906.02832。 https://arxiv.org/abs/1906.02832Wicks, R. T.、Horbury, T. S.、Chen, C. H.K.、& Schekochihin, A. A. 2011, 《物理评论快报》, 106, 045001, doi: 10.1103/PhysRevLett.106.045001