arXiv:2603.25989v1 [astro-ph.SR] 27 Mar 2026

太阳风中阿尔芬湍流的动力学年龄

Rohit Chhiber[1, 2*], **Yanwen Wang**[3], **Arcadi V. Usmanov**[1,2], 和 **William H. Matthaeus**[1]

[1]特拉华大学物理与天文学系，美国特拉华州纽瓦克，邮编19716 [2]美国国家航空航天局戈达德太空飞行中心日球物理科学部，美国马里兰州格林贝尔特，邮编20771 [3]马里兰大学物理系，美国马里兰州大学公园市，邮编20742

2026年3月30日

摘要

像太阳风这样不断演化的湍流流动，可以用其“湍流年龄”进行有意义的表征——该量估算了等离子体团从太阳传播到空间中某一点的过程中所经历的非线性时间数。帕克太阳探测器（*PSP*）近期对近太阳太阳风的观测表明，速度与磁场涨落之间具有很高的相关性（即交叉螺度，σ_c），而这已知会阻碍磁流体力学（MHD）湍流的发展。本文提出了一种新的太阳风湍流年龄（$A_{\rm t}$）表述方式，明确考虑了内日球层中涨落的阿尔芬性质。随后，利用多种数据源评估 $A_{\rm t}$，包括来自*PSP*、先进成分探测器和旅行者号 任务的观测数据，以及包含湍流输运的全球太阳风模拟。与以往忽略阿尔fvén性的研究所采用的表述相比，当前方法在中高 σ_c 太阳风中得到的 $A_{\rm t}$ 值更小；因此，在黄道面内，快速太阳风和慢速太阳风具有相近的湍流年龄。本文考察了 $A_{\rm t}$ 在 $r \sim 0.2$ 至40天文单位日心距离范围内的径向演化。研究发现，$A_{\rm t}$ 的增长率一直降低到 ~ 5 天文单位，这表明内日球层中湍流原位发展的速度逐渐减缓。超过 ~ 5天文单位后，该增长率开始上升，这可能是由于拾取离子驱动了湍流。本文突出了 σ_c 在调节磁流体力学湍流中的重要作用，研究结果将有助于进一步解读太阳风中各种湍流参数的径向演化观测。

1 引言

自太空时代开启以来，人们便记录到太阳风速度场和磁场中的大振幅涨落（Belcher 和 Davis, 1971）。与之相关的湍流级联被认为是一种重要的日球层现象，能够在加热和加速等离子体（Matthaeus 和 Velli，2011）以及输运太阳高能粒子（SEPs）和宇宙射线（Engelbrecht 等人，2022）方面发挥根本作用。尽管研究日球层湍流所采用的许多理论方法都可追溯到流体力学，但等离子体与电磁场的相互作用会带来显著改变（Zhou 等人，2004）。其中一个关键方面是观测到的湍流具有类阿尔芬波性质，尤其体现在交叉螺度方面（σ_c，即速度涨落与磁场涨落的相关性；Bruno 和 Carbone，2013）。

*rohit.chhiber@nasa.gov,rohitc@udel.edu

这种阿尔芬特征与太阳源区有关：光球层下方的对流运动可引发太阳风磁场“磁足点”的涨落，从而向大气层中发射阿尔芬波（De Pontieu 等人，2007）。对快速太阳风（尤其是在较高日心纬度处）的观测表明，即使在距离太阳数个天文单位处，其中包含的涨落仍具有较大的 σ_c ；而缓慢黄道太阳风通常在1天文单位处具有较低的 σ_c （Bruno 和 Carbone，2013）。帕克太阳探测器（帕克太阳探测器 （帕克太阳探测器）的近期观测表明，即使是慢速太阳风，在靠近太阳处（日心距为 $r \lesssim 0.2$ 天文单位）也具有较大的 σ_c （Chen 等人，2020）。因此，在这一区域——太阳风在此处受到加热和加速，太阳高能粒子也在此处注入日球层（Raouafi 等人，2023）——湍流动力学很可能会受到大 σ_c的显著影响。关于磁流体力学（MHD）湍流的理论研究表明，大 σ_c 会抑制产生湍流级联的非线性相互作用的效能（Kraichnan，1965；Zhou 等人，2004）。事实上，近期研究通过谱斜率和多重分形统计等标准诊断指标发现，与1天文单位处（及更远处）相比，近太阳湍流的发展程度较低（Alberti 等人，2020；Telloni 等人，2021）。

湍流年龄（$A_{\rm t}$）这一概念有助于解读此类演化湍流流动的观测结果。它以流体在两点之间（空间和/或时间上）流动期间经历的非线性时间数目，来表示湍流发展的程度，从而为动力学定义了一个自然且内禀的“时钟”。因此，任意时间间隔都可以用 $A_{\rm t}$表示，并可通过比较特征时间尺度，评估湍流相对于其他相关过程的重要性。[1]

在太阳风的背景下，Matthaeus 等（1998）（下文简称 M1998）引入了湍流年龄这一概念，并提出和评估了多种同时采用建模与观测的方法。他们发现，太阳风从 1 天文单位传播到 40 天文单位期间，经历了约 40 个“涡旋”周转时间，且湍流随年龄增长而逐渐“减缓”。此后，这一概念已被用于多项研究，包括近期一项对帕克太阳探测器数据的分析，该研究考察了观测到的磁场谱指数变化是否由 $A_{\rm t}$ 组织起来（McIntyre 等，2023）。然而，M1998 在其公式中忽略了阿尔fvén性，并将对非零 σ_c 的考量留待未来研究。本文旨在修改 M1998 的公式以纳入交叉螺度效应，对比两种公式，并在扩展后的研究范围内评估太阳风的湍流年龄，该范围涵盖年轻太阳风（$r < 1$天文单位）和极区。本文将采用帕克太阳探测器、先进成分探测器（ACE）和旅行者号任务的观测数据，以及包含湍流输运的全球太阳风模拟数据。

2 太阳风的湍流年龄及其受交叉螺度的调制

M1998 将湍流无量纲年龄定义为

$$A_{\rm t} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt'}{\tau_{\rm nl}(t')}, \tag{1}$$

其中，$t_{1,2}$ 是两个参考时间，而能量衰减方程

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{E}{\tau_{\rm nl}} \tag{2}$$

[1] $A_{\rm t}$ 类似于“碰撞年龄”——即等离子体团到达观测点前经历的库仑碰撞次数（Chhiber 等人，2016）——这种指标常用于根据太阳风偏离热平衡的程度对其进行分类：碰撞年龄较“年轻”的太阳风表现出更强的动理学（非磁流体力学）效应，例如离子温度显著的各向异性，以及等离子体组分的差异加热和加速（Verscharen 等人，2019）。

单位质量的流体尺度能量 E 可用于定义特征非线性湍流时间尺度 $\tau_{\rm nl}$。将太阳风中的时间变量替换为径向距离变量， $dt' = dr/U$，其中 U（r）是太阳风的径向速度，

$$A_{\rm t} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{U(r)\tau_{\rm nl}(r)}. \tag{3}$$

M1998提出采用泰勒–卡门衰减现象学（Batchelor，1953年），其中湍流时间尺度变为“涡周转时间”： $\tau_{\rm nl} = \lambda(t)/u(t)$，其中 λ 是含能尺度（或相关尺度），而$u \sim \sqrt{2E(t)}$是特征湍流速度。对于流体动力学情形，能量衰减模型可写为 $\dot{u^2} = -u^3/\lambda$ （de Kármán和Howarth，1938年）。[2]

对于不可压缩磁流体动力学湍流，输运方程通常用Elsässer变量 $\boldsymbol{z}_\pm = \boldsymbol{u} \pm \boldsymbol{b}$ （Elsässer，1950年）表示，分别对应速度（$\boldsymbol{u}$）和磁场涨落（$\boldsymbol{b}$）；其中后者以阿尔fvén单位表示（ $\boldsymbol{b} \to \boldsymbol{b}/\sqrt{4\pi\rho}$，其中 ρ 是质量密度）。归一化交叉螺度定义为 $\sigma_c \equiv 2\langle \boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{b}\rangle Z^{-2}$，其中 $\langle\cdot\rangle$ 表示对适当区域取平均， $Z^2 = \langle u^2 + b^2\rangle$ 是单位质量总涨落能量的两倍。它也可方便地表示为 $\sigma_c \equiv (Z_+^2 - Z_-^2)/(Z_+^2 + Z_-^2)$，其中各Elsässer能量为 $Z_\pm^2 \equiv \langle z_\pm^2\rangle$。当 $\boldsymbol{z}_\pm$ 中任意一个为零时，非线性相互作用消失，剩余的 $\boldsymbol{z}$对应于单向传播的阿尔fvén波，此时 $\sigma_c = \pm 1$。当 $\boldsymbol{z}_\pm$ 都非零时，它们会发生非线性相互作用，从而产生湍流。对于“平衡”湍流， $Z_+ = Z_- \equiv Z$，相应的零-σ_c 磁流体力学时间尺度为 $\tau_{\rm nl} = \lambda/Z$ （Kraichnan，1965年；Dobrowolny等人，1980年），能量衰减模型为 $\dot{Z^2} = -Z^3/\lambda$ （Hossain等人，1995年）。于是可以直接计算 $A_{\rm t}$

$$A_{\rm t1} \equiv \int_{r1}^{r2} \frac{dr}{U(r)} \frac{Z(r)}{\lambda(r)}. \tag{4}$$

上述表述曾用于 M1998；我们将其记为 $A_{\rm t1}$。

对于非零的 σ_c，能量衰减率可根据磁流体力学方程的分析写为如下形式（Dobrowolny 等，1980；Hossain 等，1995）：

$$\frac{dZ_\pm^2}{dt} = -\frac{Z_\pm^2 Z_\mp}{\lambda}, \tag{5}$$

其中，我们不区分相似长度尺度 $\lambda_\pm$ （参见 Breech 等，2008；Chhiber 等，2021）。利用恒等式 $Z_\pm^2 = (1 \pm \sigma_c) Z^2$，可得（Matthaeus 等，2004）：

$$\frac{dZ^2}{dt} = -f(\sigma_c)\frac{Z^3}{\lambda} = -f(\sigma_c)\frac{Z^2}{\tau_{\rm nl}}, \tag{6}$$

其中

$$f(\sigma_c) = \frac{(1-\sigma_c^2)^{1/2}}{2}\left[(1+\sigma_c)^{1/2} + (1-\sigma_c)^{1/2}\right]. \tag{7}$$

图1展示了 f（σ_c）随交叉螺度变化的情况。

比较式 (6) 与式 (2)，我们可以定义有效湍流时间尺度 $\tau'_{\rm nl} = \tau_{\rm nl}/f(\sigma_c)$。它具有以下优点：当 $\sigma_c \to 0$, $\tau'_{\rm nl} \to \lambda/Z$ 时，描述的是非线性相互作用强度最大的类流体力学情形；随着 $|\sigma_c|$ 增大，$\tau'_{\rm nl}$ 也随之增大，表明湍流减缓（且可能减弱）；当 $\sigma_c \to \pm 1$, $\tau'_{\rm nl} \to \infty$ 时，描述的是纯阿尔fvén波在传播过程中没有湍流衰减。

[2]我们没有列出这些方程中出现的 $\mathcal{O}(1)$ 比例常数（例如，Hossain 等，1995），因为它们与我们的讨论无关。

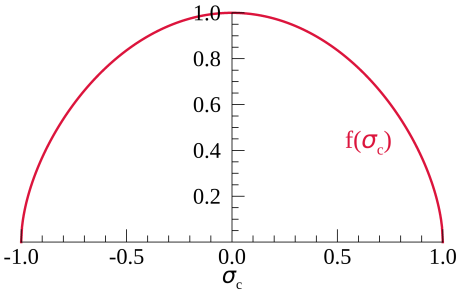


图1：函数 $f(\sigma_c)$ [式（7）]。

这种行为会对湍流年龄产生相应的影响：

$$A_{\mathrm{t}2}=\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{U(r)\tau'_{\mathrm{nl}}(r)}\equiv\int_{r_1}^{r_2}\frac{f[\sigma_c(r)]}{U(r)}\frac{Z(r)}{\lambda(r)}dr, \tag{8}$$

随着 σ_c 增大，湍流老化速度减慢。我们预计，这种阿尔芬调制在近太阳区域和高-σ_c 极区快太阳风中将十分显著。下文将利用观测数据和模拟数据评估并比较这两种表述 $A_{\mathrm{t}1}$ 和 $A_{\mathrm{t}2}$ 。

3 观测结果与数值建模

3.1 基于*ACE* 在1天文单位处的数据评估湍流年龄

我们采用原位 观测数据，来自位于 L_1 的ACE，时间跨度为1998-02-05 00:00:00至2023-12-31 23:59:00（UTC）。磁场数据取自MAG磁强计（Smith 等人，1998），等离子体数据（离子数密度和速度）取自SWEPAM仪器（McComas 等人，1998）。下载的1秒分辨率磁场数据被降采样至1分钟采样间隔；密度和速度数据的采样间隔为64秒，通过线性插值进行升采样，以匹配磁场的采样间隔。缺失数据点以“NaN”表示，并在分析中排除。整个数据集被划分为连续且互不重叠的12小时区间。$NaNs$ 主要影响密度数据；在本研究中，密度数据仅用于计算区间内的平均密度（见下文）。若某区间内密度数据的 NaN 比例超过90%，则予以排除。在其余区间中，速度和磁场数据的 NaN 比例低于10%。选择12小时的区间时长，是为了涵盖多个湍流相关时间（Bruno 和 Carbone，2013；1天文单位处为 $\sim$ 1小时），这是计算湍流统计时的标准做法（Matthaeus 和 Goldstein，1982）。[3]

我们参考 Richardson 和 Cane（2010）编制并于 2025 年更新的目录（Richardson 和 Cane，2024），识别出包含行星际日冕物质抛射的时间段，共 1,270 个。其余时间段（共 10,661 个）被视为代表 1 天文单位处的背景太阳风，这也是本文的研究重点。根据每个时间段内的平均太阳风速度 U ，将时间段划分为慢速（$U<400$ km s^{-1}）、中速（$400\le U<600$ km s^{-1}）和快速（$U\ge600$ km s^{-1}）太阳风：$U\equiv|\boldsymbol{U}|\equiv|\langle\boldsymbol{U}\rangle|$，其中 $\langle\cdot\rangle$ 运算符表示对一个时间段计算的算术平均值~，而 ~ 表示以 1 分钟为采样间隔的量（此处为离子速度 $\boldsymbol{U}$）。据此，慢速、中速和快速太阳风时间段分别有 3666、~6020 和 975 个。磁场 $\boldsymbol{B}$ 被转换为

[3]我们针对 6 小时和 24 小时间隔重复了分析，并排除了密度数据中 $NaNs$ 占比超过 70% 的时间段。在这些情况下，结果均没有显著变化。

	Slow	中等	Fast
U (千米 秒$^{-1}$)	366	474	652
Z^2(千米^2 秒$^{-2}$)	1560	3125	5050
λ(10^6 千米)	1.15	1.04	0.69
σ_c	0.48	0.58	0.70

表 1：ACE 数据集中慢速（$U < 400$ 千米 秒$^{-1}$）、中速（$400 \le U <$600 千米 秒$^{-1}$）和快速（$U \ge 600$ 千米 秒$^{-1}$）太阳风时段的平均值。

~ ~阿尔fvén单位：$\boldsymbol{B}_A = \boldsymbol{B}/\sqrt{4\pi\rho}$ 其中，$\rho = m_p n \equiv m_p\langle\tilde{n}\rangle$ 是该时间段的平均质量密度，根据质子质量 m_p 和数密度 $\tilde{n}$计算得出。下文默认磁场以阿尔fvén单位表示，并省略下标“A”。

磁场和速度涨落、交叉螺度以及湍流相关长度均采用标准方法计算（Pope，2000；Chhiber 等人，2021）。涨落为 $\tilde{\boldsymbol{u}} = \boldsymbol{U} - \tilde{\boldsymbol{U}}$ ~和 $\boldsymbol{b} = \boldsymbol{B} - \boldsymbol{B}$，其中 $\boldsymbol{B} \equiv \langle \boldsymbol{B} \rangle$ 表示一个时段内的平均磁场。基于这些量，我们计算$\tilde{\boldsymbol{z}}_\pm = \tilde{\boldsymbol{u}} \pm \tilde{\boldsymbol{b}}$、$Z^2 = \langle \tilde{u}^2 \rangle + \langle \tilde{b}^2 \rangle$和 $\sigma_c = (Z_+^2 - Z_-^2)$ /（$Z_+^2 + Z_-^2$），其中 $Z_\pm^2 = \langle \tilde{z}_\pm^2 \rangle$。对交叉螺度进行扇区校正，使正的 σ_c 始终表示阿尔芬波向外（远离太阳）传播（Roberts 等人，1987）；也就是说，当某一时段的平均径向磁场极性为正时，该时段的 σ_c 乘以 -1。通过首先计算归一化自相关函数 $\mathcal{R}$（τ）$= \langle \tilde{\boldsymbol{b}}$（$t$）$\cdot \tilde{\boldsymbol{b}}$（$t + \tau$）$\rangle / \langle \tilde{\boldsymbol{b}}^2$（$t$）$\rangle$随时间滞后 τ变化的函数，来估算每个时段的相关尺度，最大滞后时间为 6 小时（Blackman 和 Tukey，1958；Matthaeus 和 Goldstein，1982）。相关时间 τ_c 估算为 $\mathcal{R}$首次低于$1/e$时对应的滞后时间，即 e折叠时间。随后利用 Taylor 的“冻结”假设（Taylor，1938）估算相关长度：$\lambda = U\tau_c$。

上述步骤得到一组在1天文单位处的 U、Z^2、λ，和 σ_c 值。[4] 先前多项研究考察过这些量在近地空间的分布，发现它们通常呈对数正态分布（例如，Bavassano 等，1998年；Ruiz 等，2014年；Wang 等，2024年；Chhiber 等，2025年）；我们得到的分布（未展示）与此一致。慢速、中速和快速太阳风的平均值见表1。

为计算 A_t，我们假设式（4）和式（8）中的被积函数在$r_1 = 0.2$ 天文单位与 $r_2 = 1$天文单位之间保持不变。[5] 尽管这是一个重大简化，但太阳风领域的文献中广泛采用了类似假设，以评估太阳风在1天文单位处的碰撞年龄（Kasper 等人，2008年；Chhiber 等人，2016年）。此外，下面将把这一简化估算与基于帕克太阳探测器和建模得出的更真实估算进行比较，以便说明其中可能存在的不足。我们可以预期，由于 U 和 τ_nl 在靠近太阳处预计较小（Chhiber 等人，2016年；Chen 等人，2020年；Chhiber 等，2021），采用1天文单位近似会增大被积函数中的有效分母，从而减小计算得到的 A_t。相反，由于太阳附近的 $|\sigma_c|$ 较大，f（σ_c）也预计会更小（Chhiber 等，2021），因此对该量采用1天文单位处的取值往往会增大 $A_{\mathrm{t}2}$。

因此，我们对每个区间评估 $A_{\mathrm{t}1} = \Delta r/(U\tau_\mathrm{nl}) = \Delta r\ Z/(U\lambda)$ 和 $A_{\mathrm{t}2} = \Delta r/(U\tau'_\mathrm{nl}) = \Delta r\ f(\sigma_c)\ Z/(U\lambda)$，其中 $\Delta r = 0.8$ 天文单位。图2展示了 U 和 $A_{\mathrm{t}1,2}$的联合概率分布（概率密度函数）。每个速度区间（或“列”）中的概率密度函数均按该区间内的计数总数归一化，颜色对应于垂直色条，表示各速度区间内的概率分布。$A_{\mathrm{t}1}$ 随 U 增加而明显上升。青色符号表示均值和

[4]请注意，我们的平均时间间隔（12 小时）提供了有关湍流含能尺度的信息；在这些尺度上，最大的湍流结构（或“涡旋”）将能量注入惯性区级联（Kiyani 等，2015）。[5]我们选择了 $r_1 = 0.2$ 天文单位，以便与帕克太阳探测器 （第 3.2 节）进行比较。

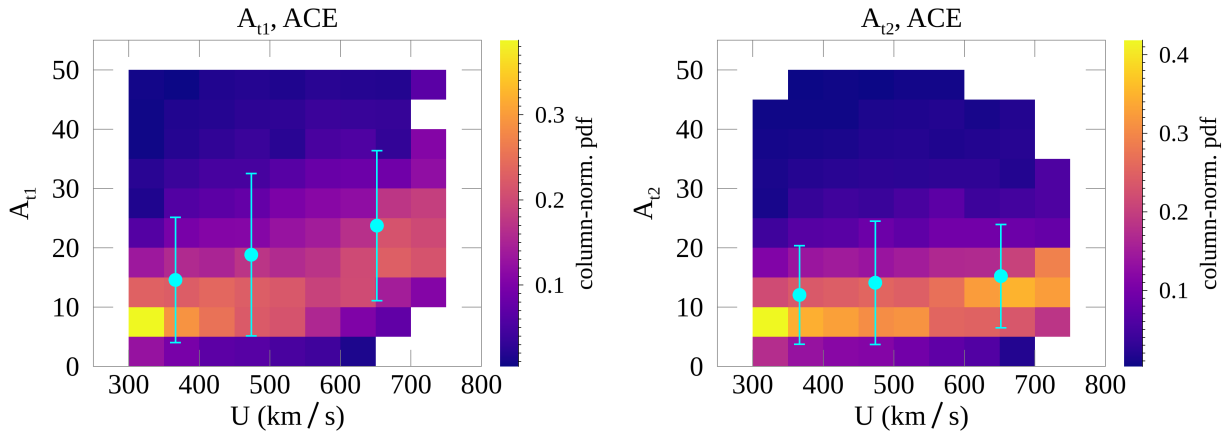


图 2：基于ACE在 1天文单位处 25 年的观测数据计算得到的湍流年龄与太阳风速度的联合概率密度函数。忽略计数少于 5 的区间。每个“列”（即速度区间）的概率密度函数均按该区间的总计数归一化。青色圆圈和竖线分别表示慢速（$U < 400$）、中速（$400 \leq U < 600$）和快速（$U \geq 600$）区间内 A_{t} 的均值和 1σ 。左图和右图分别显示使用 1天文单位处的观测数据（见正文），根据公式 (4) 和 (8) 计算的 A_{t} 。考虑σ_c 后（右图），中速和快速太阳风的 A_{t} 相对下降，这一点显而易见。

标准差（σ），涵盖慢速、中速和快速太阳风： A_{t1} 分别为 ~ 15, 19, 和 24，而三种相应风速下的 A_{t2} 分别为~ 12, 14, 和 15，其中 σ 约为 10。请注意，对于三类太阳风， $f(\sigma_c)$分别为 0.85、0.78 和 0.66。这些数值表明，在考虑阿尔芬型快速太阳风的交叉螺度后，计算得到的湍流年龄显著降低。若不考虑调制因子 $f(\sigma_c)$， A_{t1} 计算将得出有悖直觉的结果：快速太阳风的湍流年龄显著高于慢速太阳风（参见 Bruno 和 Carbone，2013）。

下面，我们根据帕克太阳探测器 的观测数据评估 A_{t} ，从而克服ACE 数据集的“单点”局限。

3.2 根据帕克太阳探测器 在 0.2 至 0.8 天文单位范围内的观测评估湍流年龄

我们分析了帕克太阳探测器第1至25次轨道运行期间的原位 测量数据，涵盖2018年10月31日00:00:00至2025年8月1日00:00:00（UTC）。尽管帕克太阳探测器的近日点可低至 ~ 0.04 天文单位，但低于 ~ 0.2 天文单位时，泰勒假设的有效性就值得怀疑（Chhiber 等，2019；Chen 等，2020），因此我们将研究范围限制在 $r \sim 0.2$ 至0.8天文单位。我们使用 FIELDS/MAG 仪器的磁场测量数据（Bale 等人，2016）和 SWEAP/SPC 仪器的离子矩数据（Kasper 等人，2016；Case 等人，2020）。下载的 MAG 数据时间分辨率为 3.4 毫秒，我们将其时间序列插值，使时间戳与下载的离子数据相匹配。后者的时间分辨率随轨道变化，介于 ~ 0.436 秒至27.5秒之间；在太阳近遇期间（$r \lesssim 0.3$ 天文单位）相对较高。为避免在较大的数据缺口间对磁场进行插值，如果用于插值的最近有效（SPC）时间戳相距超过5秒，我们就将其设为 NaN 。对于 SPC 数据，在数据质量标志（DQF 或通用标志）触发的时间戳处，我们也将数值设为 NaN 。

完整数据集被划分为互不重叠的2小时区间。为避免缺失数据或低质量数据造成污染，我们要求每个2小时区间中至少60%的数据具有有效的非NaN 离子矩（定义为质子密度和整体速度的三个分量同时可用）。经过这些处理后，我们保留了6615个区间。

与长达 25 年的ACE 数据集相比，帕克太阳探测器 数据集包含的可用区间较少，其中快速太阳风所占比例也小得多。因此，我们仅按两个速度等级分类：慢速（$U < 500$ km s^{-1}）和快速（$U \geq 500$ km s^{-1}），分别得到 4146 个和 398 个区间。按照第 3.1 节所述，为每个区间计算平均质子速度和密度、磁场以及湍流量（Z^2，　σ_c，　λ）。计算 λ时略有不同：我们采用 6小时区间，而非 2小时区间，以容纳最长 3 小时的时间滞后，使相关函数能够去相关至 $1/e$，并确保在较大滞后下（例如 Matthaeus 和 Goldstein，1982）有足够的样本用于平均。构成 6小时区间的三个 2 小时区间均赋予相同的 λ 值。

有了这些 U，　Z^2，　λ，以及 σ_c（时间间隔为 2 小时）的数值后，我们以 0.05 天文单位的分箱宽度，按照日心距r 对它们进行分箱。在每个径向分箱内，我们计算各个物理量的均值、 σ和四分位数。通过这一过程，我们可以推断所关注物理量的径向趋势，即将其视为 ~ 7 年的长期平均值。均值（以及 1σ）的径向演化与 Chhiber 等（2021）基于前五次帕克太阳探测器 轨道所得的结果相当相似，因篇幅所限，此处不再展示。这里需要指出的是，在 0.2 至 0.8 天文单位之间的径向平均值呈现出以下总体趋势： U 从 ~ 300 增加至 400 km s^{-1}； Z^2 从 $\sim 10^5$减少至 2×10^4 km^2 s^{-2}； λ 从 $\sim 2 \times 10^5$ 增加至 5×10^5 km； σ_c 从 ~ 0.75 减少至 0。4。

为评估慢速太阳风与快速太阳风的湍流年龄差异，我们分别对这两类区间进行上述径向分箱。[8] 除 U之外，最显著的区别在于 Z^2，其在快速太阳风中大出数倍（Shi 等人，2023；Chhiber 等人，2025）。 λ 和 σ_c 在快速太阳风中分别略小（但呈系统性差异）和略大。这些趋势在定性上与基于1天文单位处ACE 数据得到的结果一致（第3.1节）。接下来，我们计算方程（4）和（8），将 r_1 固定为0.2天文单位，并使 r_2 依次取径向区间中点，逐渐增至0.8天文单位，同时对积分进行数值计算。结果见图3左图。

我们立即注意到，太阳风参数的径向变化对积分的影响：与图2相比，计算得到的 A_t 在0.8天文单位处几乎增大了一倍。我们还注意到，考虑 σ_c 后， A_t 有所减小（图3中标为“阿尔芬减小”），这与ACE 的计算结果类似。最后，我们注意到， A_t 随 r增加的速率似乎呈径向减小趋势，这表明太阳风在内日球层膨胀时，湍流老化的速度有所减缓。第3.4节将更详细地讨论这一点。下面，我们通过全球太阳风模拟，将对 A_t 的评估范围扩展至40天文单位，并延伸至黄道面之外。

[6]详情请参阅SWEAP数据用户指南：https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/psp/sweap/sweap_data_user_guide.pdf。[7]与ACE相比，此处选用较短的区间时长，以适应较小 r 下较短的相关时间（Chen 等人，2020；Chhiber，2022）。[8]由于太阳风会随 r加速，需要注意一个潜在问题：该方法可能会将部分快速太阳风（在较小 r处、尚未加速至超过500 km s^{-1}的太阳风）归类为慢速太阳风。不过，这种影响应该不大，因为预计到 ~ 0.2 天文单位时，大部分加速过程都已完成（例如，Usmanov 等，2025）。

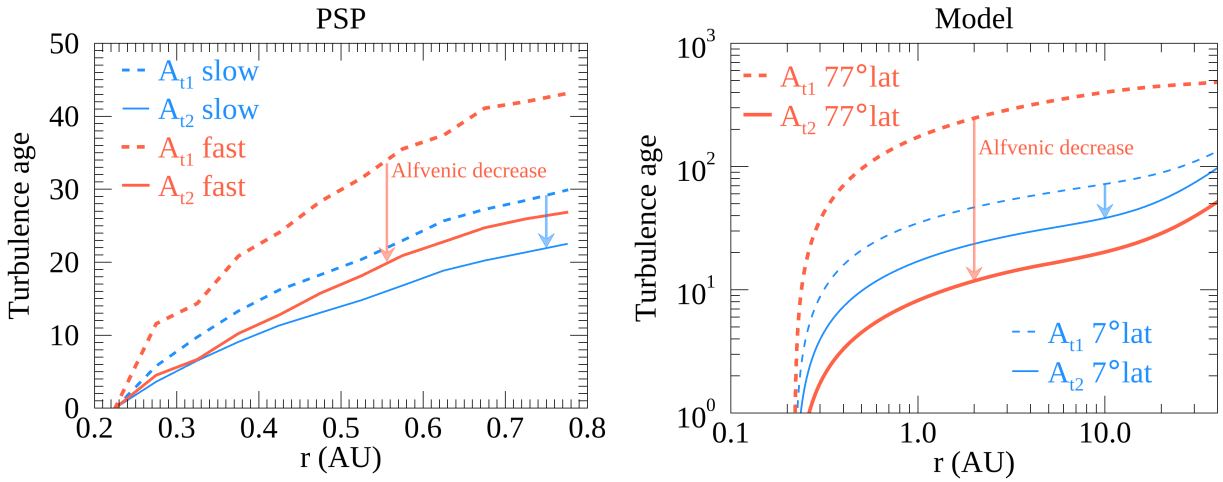


图3：左图：根据文中所述，利用帕克太阳探测器评估的慢速和快速太阳风中 A_t 的径向演化。右图：模拟中低（日心纬度）和高（日心纬度）处 A_t 的径向演化，分别以蓝色和红色表示。两幅图中的 A_{t1} 和 A_{t2} 分别使用方程（4）和（8）评估，后者考虑了 σ_c。

3.3 利用全球太阳风模拟评估0.2至40天文单位范围内的湍流年龄

在这里，我们在全球太阳风的三维磁流体力学模型中评估 A_t （Usmanov 等，2025）。该模型将整体速度、密度、磁场和温度的平均场方程与统计湍流参数的输运方程相耦合，其中包括 Z^2、 λ, 以及σ_c。这种耦合能够有效地模拟湍流对太阳风的加热和加速作用（Matthaeus 和 Velli，2011），这是一种全球日球层建模中广泛采用的方法（Gombosi 等，2018）。关于模型的更多细节，请参阅 Usmanov 等（2025）；这里强调的是，该模型已发展成熟、经过充分测试，并通过与多种日球层观测结果的比较得到验证（例如，Usmanov 等，2018；Bandyopadhyay 等，2020；Chhiber 等，2021；Usmanov 等，2025）。

本研究采用基于无倾斜太阳磁偶极子的模拟运行（Usmanov 等，2025对此进行了详细描述），而非使用特定时期对应的光球磁图（参见 Chhiber 等，2021），以获得典型太阳风状况的一般图景（尤其是在太阳活动较低时期）。该模拟在日经度方向上具有对称性，我们沿着两条参考径向“辐线”评估 A_t：一条位于 $\sim 7^\circ$ 日心纬度，另一条位于 $\sim 77^\circ$ 日心纬度，分别对应近赤道慢速太阳风和极区快太阳风（McComas 等，2000；Usmanov 等，2025）。按照第3.2节所述评估方程（4）和（8），其中 r_1 固定为0.2天文单位， r_2逐渐增大至40天文单位。结果如图3右图所示。

低日心纬度太阳风的湍流年龄（A_{t1} 和 A_{t2}）与左图中的相应帕克太阳探测器 结果非常相似。相比之下，极区快太阳风的 A_{t1} 会迅速增大到极高值，在 1天文单位处超过 100，这归因于其较高的 Z^2 和较小的λ（Usmanov 等，2025）。另一方面，利用方程（8）考虑其较高的 $|\sigma_c|$ 后，计算得到的湍流年龄会大幅降低，约为慢速太阳风相应数值的一半。 A_t 随 r 增加的速率逐渐降低，直至约 5 天文单位；再往外，曲线斜率似乎有所增大（另见下文图4）。下文将回到这一点，并加入与旅行者*1*号 观测结果的比较。

3.4 湍流年龄的径向演化——结合帕克太阳探测器、*ACE*、旅行者*1*号，和全局模拟结果

图4将前面几个小节的结果与 M1998 中的旅行者*1*号 数据结合起来，从而全景式地展现湍流年龄从近太阳空间到外日球层的演变。在上图中，实线表示根据帕克太阳探测器 观测计算出的 $A_{\mathrm{t}2}$，其数值按照第 3.2 节所述按径向区间取平均；此处将慢风和快风时段合并处理。曲线周围的棕褐色阴影区域表示帕克太阳探测器 数据的统计分布范围：在每个径向区间内，分别使用 Z^2分布的上、下四分位数计算 $A_{\mathrm{t}2}$，由此得到阴影区域的上、下界。蓝色符号表示根据 ACE 观测数据计算出的 $A_{\mathrm{t}2}$ 的均值和 1σ分布范围，涵盖所有太阳风速度。绿色阴影区域表示根据我们的全球太阳风模拟（第 3.3 节）在黄道区域计算出的 $A_{\mathrm{t}2}$；阴影区域的上、下界分别对应 7° 和 0°日心纬度。旅行者号 结果（虚线）改编自 M1998；该研究沿旅行者*1*号 轨迹使用方程（4）计算了 A_{t}。因此，他们的积分从 $r_1 = 1$ 天文单位处开始，所得结果不包含从 $r < 1$ 天文单位起累积的湍流年龄。因此，在我们的可视化中，我们将计算得到的 A_{t} 向上平移若干人为设定的数值（在 r上为常数），使旅行者号 结果在 1天文单位处与我们的帕克太阳探测器 和全局模拟结果“对齐”，从而得到图4上图中的两条虚线。[9]

图4底部面板展示了 A_{t} 随 r变化的估算变化率：通过将变量从时间转换为径向距离（$dt = dr/U$），我们将 dA_{t}/dt 计算为 $U\ dA_{\mathrm{t}}/dr$，并对顶部面板中的各条曲线进行数值径向求导。对于旅行者号的结果，假定$U = 400$ 为常数，单位为千米每秒$^{-1}$。

从图4可以看出，A_{t} 在全局模拟中的增长速率低于帕克太阳探测器所呈现的总体趋势；虽然我们并不指望通用的基于偶极子的模拟与观测高度一致，但两种情况间的细微差异至少部分源于模拟中的（扇区校正后）σ_c 相对较大（见 Chhiber 等，2021 的图7），这导致方程（8）中的 f（σ_c）因子产生更强的调制。总体而言，旅行者号的趋势与模型结果一致。底部面板量化了太阳风穿过内日球层向外膨胀时，湍流老化速率的下降；这一现象在帕克太阳探测器和模拟数据中均可见。旅行者号曲线也显示出下降趋势（尽管伴有涨落，而对数 r轴可能放大了这些涨落）。回到顶部面板，显然，旅行者号的结果与模拟在1至4天文单位范围内的下限相当吻合。在约5天文单位处，旅行者号和模拟曲线都趋于平缓，而模拟显示，随着太阳风向外膨胀进入外日球层，dA_{t}/dt 明显增加。M1998 也讨论过这一趋势；它很可能是拾取离子在原位驱动太阳风湍流所致，我们的模拟中也对这一效应进行了建模（见 Usmanov 等，2025）。

4 讨论与结论

本文提出了一种新的太阳风湍流年龄估算方法，该方法考虑了日球层中常规观测到的阿尔fvén性（具体而言，即交叉螺度）水平变化。我们的工作以 Matthaeus 等（1998）为基础，他们将这种定量确定湍流年龄的方法引入空间物理学研究，但将对非零 σ_c 的处理留待未来研究。我们采用两种公式，利用来自

[9]尽管图4中的全局模拟结果考虑了阿尔fvén性，而 M1998 的计算没有考虑，但我们仍选择在此比较这两种情况，因为预计外日球层中的阿尔芬调制较小；也就是说，由于 σ_c 相对较小，在旅行者*1*号 轨迹的大部分范围内都是如此（Fraternale 等人，2022年）。

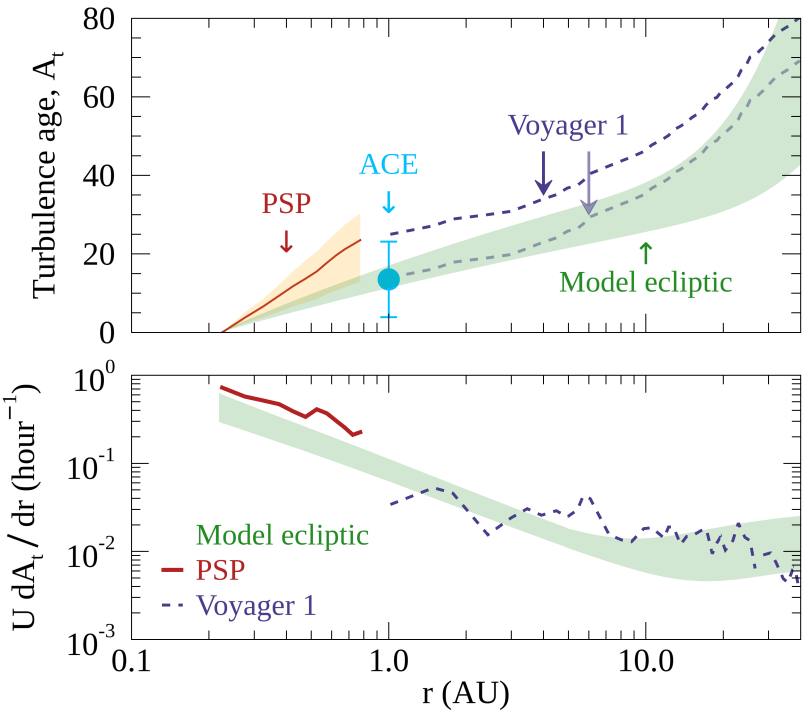


图4： ~ 0.2 至40天文单位之间湍流年龄的径向演化。帕克太阳探测器、ACE以及全局模拟结果均使用公式（8）计算，而旅行者1号的结果改编自 Matthaeus 等人（1998）。上图：深红色实线表示根据帕克太阳探测器 观测数据在径向区间内取平均后计算得到的 A_{t2} 。浅棕色阴影区域（位于0.2至0.8天文单位之间）表示根据帕克太阳探测器计算得到的 A_{t2} 统计分布范围。详情见正文。1天文单位处的蓝色圆点表示根据ACE计算得到的 A_{t2} ，竖直线表示其 1σ 分布范围。0.2至40天文单位之间的浅绿色阴影区域表示根据 Usmanov 等人的（2025年）太阳风模型在黄道区域计算得到的 A_{t2} ，阴影区域的上、下边界分别对应 $7°$ 和 $0°$的日心纬度。虚线表示改编自 Matthaeus 等（1998）图2的A_t ；其结果经过人为向上平移，平移量在 r中保持不变，以便在1天文单位处与帕克太阳探测器 和全局模拟的趋势“对齐”（见正文）。下图： A_t的变化率： $\frac{dA_t}{dt} = U\frac{dA_t}{dr}$（见正文）。

帕克太阳探测器、ACE、旅行者*1*号以及一项全球太阳风模拟，覆盖距太阳0.2至40天文单位的范围，并包含黄道面太阳风和极区太阳风。

我们发现，忽略 σ_c 可能会导致对高速太阳风（尤其是极区太阳风） $A_{\rm t}$ 的估计大得不合理；新的公式得出的数值表明，不同太阳风速度下的湍流发展程度相近，这一结果本身就值得关注。在黄道面（ACE 和帕克太阳探测器），高速太阳风的湍流年龄略长于慢速太阳风；而极区太阳风（根据全球模拟评估）的湍流年龄则短于赤道太阳风。这些发现为“慢速太阳风通常比高速太阳风更具‘湍流性’”这一观点增添了新的细节（例如，Dasso 等人，2005；Wang 等人，2024年）。鉴于观测到速度、质子温度和涨落振幅之间存在正相关关系，这些发现也有助于深入理解湍流在高速太阳风加热和加速过程中的作用（Démoulin，2009；Elliott 等人，2012；Shi 等人，2023；Chhiber 等人，2025年）。

我们还考察了太阳风在内日球层和外日球层中膨胀时，湍流年龄的演化趋势。从 0.2 天文单位到 1天文单位之间，可能经历约 20 个非线性时间，这表明湍流已充分发展，不过靠近太阳时，湍流发展的速率要快得多。在约 5 天文单位处，旅行者号观测结果和全局模拟结果均显示，老化速率有所上升，这可能与拾取离子在原位驱动湍流有关（Fraternale 等人，2022）。我们的分析还表明，1天文单位处的湍流状态同时取决于源区和路径：慢速和快速太阳风（源自不同的太阳风源区；例如，Schwenn，2006）可能具有不同的 $A_{\rm t}$；但若忽略太阳风传播过程中各种参数的变化，则可能低估湍流年龄（参见第 3 节中来自ACE 和帕克太阳探测器的 $A_{\rm t2}$ ）。

这些结果有助于解读其他湍流参数及其复杂的径向演化。例如，雷诺数似乎在 ~ 0.1 到 10 天文单位之间下降（Cuesta 等，2022b；Adhikari 等人，2025年）；而小尺度间歇性在年轻太阳风中（$r < 1$ 天文单位；Alberti 等人，2020年；Telloni 等人，2021）会增强，随后在 ~ 1 到 10 天文单位之间减弱（Cuesta 等，2022b）。距离增加所体现的湍流老化迹象还包括惯性区谱斜率变陡、相关尺度增大（Chen 等，2020年；Cuesta 等，2022a），以及交叉螺度降低（Roberts 等人，1992）。结合上述进展，有望更深入地了解外日球层中湍流的时间尺度和老化过程。这对近期发射的$IMAP$任务可能尤为重要；该任务旨在了解 1天文单位处的条件对外日球层边界及相关高能粒子的影响（McComas 等人，2025年）。

未来的研究或可重新审视那些基于忽略交叉螺度的湍流年龄定义所作出的解释（例如，McIntyre 等，2023）。还可以利用尤利西斯号 和太阳轨道器 在黄道面以外的观测数据评估湍流年龄（McComas 等，2000；Müller 等，2020），并将其与我们在此分析的全局模拟进行比较。利用帕克太阳探测器 观测亚阿尔芬日冕中的湍流年龄也会很有意义（例如，Bandyopadhyay 等，2022），不过，相关解释可能会受到泰勒冻结假设以及帕克太阳探测器近日点处采样方向偏差等问题的影响（Chhiber 等，2019；Cuesta 等，2022a）。

致谢

本研究获得了美国国家航空航天局与星共存（LWS）科学计划（资助编号 80NSSC22K1020）、日球物理学支持研究（HSR）计划（资助编号 80NSSC22K1639）以及通过普林斯顿大学分包合同（SUB0000317）提供的$IMAP$ 任务经费支持。本研究使用了国家能源研究科学计算中心提供的资源。ACE 磁场和等离子体数据分别下载自 https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/ace/mag/level_

2_cdaweb/mfi_h3/ 和 https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/ace/swepam/level2_hdf/ions_64sec。行星际日冕物质抛射列表见 https://doi.org/10.7910/DVN/C2MHTH。*PSP*数据（第 2 级磁场和第 3 级离子矩数据产品）下载自 Heliodata 网站（https://helio.data.nasa.gov/mission/ParkerSolarProbe）。

参考文献

Laxman Adhikari、Ashutosh Giri、Monika Karki、Prashant Baruwal、Prashrit Baruwal、Rubaiya Khondoker Shikha、Bigyan Mainali、Dessalegn Kenno、Ismita Tasnim、Gary P. Zank、Bingbing Wang、Lucien Treville 和 Sagar Ghimire。《太阳风中的雷诺数与黏度》。《天体物理学杂志》，993(1):60，2025年11月。数字对象标识符：10.3847/1538-4357/ae101d。

Tommaso Alberti、Monica Laurenza、Giuseppe Consolini、Anna Milillo、Maria Federica Marcucci、Vincenzo Carbone 和 Stuart D. Bale。关于磁场涨落穿越内日球层时的标度特性。《天体物理学杂志》，902(1):84，2020年10月。数字对象标识符：10.3847/ 1538-4357/abb3d2。网址：https://doi.org/10.3847/1538-4357/abb3d2。

S. D. Bale、K. Goetz、P. R. Harvey、P. Turin、J. W. Bonnell、T. Dudok de Wit、R. E. Ergun、R. J. MacDowall、M. Pulupa、M. Andre、M. Bolton、J.-L. Bougeret、T. A. Bowen、D. Burgess、C. A. Cattell、B. D. G. Chandran、C. C. Chaston、C. H. K. Chen、M. K. Choi、J. E. Connerney、S. Cranmer、M. Diaz-Aguado、W. Donakowski、J. F. Drake、W. M. Farrell、P. Fergeau、J. Fermin、J. Fischer、N. Fox、D. Glaser、M. Goldstein、D. Gordon、E. Hanson、S. E. Harris、L. M. Hayes、J. J. Hinze、J. V. Hollweg、T. S. Horbury、R. A. Howard、V. Hoxie、G. Jannet、M. Karlsson、J. C. Kasper、P. J. Kellogg、M. Kien、J. A. Klimchuk、V. V. Krasnoselskikh、S. Krucker、J. J. Lynch、M. Maksimovic、D. M. Malaspina、S. Marker、P. Martin、J. Martinez-Oliveros、J. McCauley、D. J. McComas、T. McDonald、N. Meyer-Vernet、M. Moncuquet、S. J. Monson、F. S. Mozer、S. D. Murphy、J. Odom、R. Oliverson、J. Olson、E. N. Parker、D. Pankow、T. Phan、E. Quataert、T. Quinn、S. W. Ruplin、C. Salem、D. Seitz、D. A. Sheppard、A. Siy、K. Stevens、D. Summers、A. Szabo、M. Timofeeva、A. Vaivads、M. Velli、A. Yehle、D. Werthimer 和 J. R. Wygant。《太阳探测器 Plus 的 FIELDS 仪器套件：测量日冕等离子体和磁场、等离子体波与湍流，以及太阳瞬变现象的射电特征》。《空间科学评论》，204：49–82，2016年12月。数字对象标识符：10.1007/s11214-016-0244-5。

R. Bandyopadhyay、W. H. Matthaeus、D. J. McComas、R. Chhiber、A. V. Usmanov、J. Huang、R. Livi、D. E. Larson、J. C. Kasper、A. W. Case、M. Stevens、P. Whittlesey、O. M. Romeo、S. D. Bale、J. W. Bonnell、T. Dudok de Wit、K. Goetz、P. R. Harvey、R. J. MacDowall、D. M. Malaspina 和 M. Pulupa。《帕克太阳探测器观测到的亚阿尔芬太阳风：湍流、各向异性、间歇性和反转结构的特征》。《天体物理学杂志》，926(1):L1，2022年2月。数字对象标识符：10.3847/2041-8213/ac4a5c。

Riddhi Bandyopadhyay, M. L. Goldstein, B. A. Maruca, W. H. Matthaeus, T. N. Parashar, D. Ruffolo, R. Chhiber, A. Usmanov, A. Chasapis, R. Qudsi, Stuart D. Bale, J. W. Bonnell, Thierry Dudok de Wit, Keith Goetz, Peter R. Harvey, Robert J. MacDowall, David M. Malaspina, Marc Pulupa, J. C. Kasper, K. E. Korreck, A. W. Case, M. Stevens, P. Whittlesey, D. Larson, R. Livi, K. G. Klein, M. Velli 和 N. Raouafi。《帕克太阳探测器》在太阳附近观测到的太阳风湍流中增强的能量传递率。《天体物理学杂志增刊》，246(2):48，2020年2月。数字对象标识符：10.3847/1538-4365/ab5dae。

G. K. Batchelor。《均匀湍流理论》。剑桥大学出版社，1953年。

B. Bavassano、E. Pietropaolo 和 R. Bruno。太阳风湍流中的交叉螺度与剩余能量：1 至 5 天文单位区域内的径向演化和纬度依赖性。《地球物理研究杂志》，103(A4):6521–6530，1998年4月。数字对象标识符：10.1029/97JA03029。J. W. Belcher 和 L. Davis, Jr.。行星际介质中的大振幅阿尔芬波，2。《地球物理研究杂志》，76:3534，1971年。数字对象标识符：10.1029/JA076i016p03534。R. B. Blackman 和 J. W. Tukey。从通信工程的角度测量功率谱——第一部分。《贝尔系统技术杂志》，37(1):185–282，1958年。数字对象标识符：10.1002/j.1538-7305.1958.tb03874.x。B. Breech、W. H. Matthaeus、J. Minnie、J. W. Bieber、S. Oughton、C. W. Smith 和 P. A. Isen- berg。日球层中的湍流输运。《地球物理研究杂志》（空间物理学），113:A08105，2008年8月。数字对象标识符：10.1029/2007JA012711。R. Bruno 和 V. Carbone。作为湍流实验室的太阳风。《太阳物理学综述》，10:2，2013年12月。数字对象标识符：10.12942/lrsp-2013-2。A. W. Case、Justin C. Kasper、Michael L. Stevens、Kelly E. Korreck、Kristoff Paulson、Peter Daigneau、Dave Caldwell、Mark Freeman、Thayne Henry、Brianna Klingensmith、J. A. Book- binder、Miles Robinson、Peter Berg、Chris Tiu、Jr. Wright、K. H.、Matthew J. Reinhart、David Curtis、Michael Ludlam、Davin Larson、Phyllis Whittlesey、Roberto Livi、Kristopher G. Klein 和 Mihailo M. Martinović。帕克太阳探测器上的太阳探测杯。《天体物理学杂志增刊》，246(2):43，2020年2月。数字对象标识符：10.3847/1538-4365/ab5a7b。C. H. K. Chen、S. D. Bale、J. W. Bonnell、D. Borovikov、T. A. Bowen、D. Burgess、A. W. Case、B. D. G. Chandran、T. Dudok de Wit、K. Goetz、P. R. Harvey、J. C. Kasper、K. G. Klein、K. E. Korreck、D. Larson、R. Livi、R. J. MacDowall、D. M. Malaspina、A. Mallet、M. D. McManus、M. Moncuquet、M. Pulupa、M. L. Stevens 和 P. Whittlesey。内日球层中太阳风湍流的演化与作用。《天体物理学杂志增刊》，246(2):53，2020年2月。数字对象标识符：10.3847/1538-4365/ab60a3。R. Chhiber、A. Usmanov、W. Matthaeus 和 M. Goldstein。基于全球磁流体力学模拟的太阳风碰撞年龄。《天体物理学杂志》，821:34，2016年4月。数字对象标识符：10.3847/0004-637X/821/1/34。Rohit Chhiber。内太阳风中磁场分量的分布——帕克太阳探测器观测。准备中，2022年。Rohit Chhiber、Arcadi V. Usmanov、William H. Matthaeus、Tulasi N. Parashar 和 Melvyn L. Goldstein。帕克太阳探测器的背景预测。II. 湍流特性与泰勒假设。《天体物理学杂志增刊》，242(1):12，2019年5月。数字对象标识符：10.3847/1538-4365/ab16d7。Rohit Chhiber、Arcadi V. Usmanov、William H. Matthaeus 和 Melvyn L. Goldstein。内太阳风中的大尺度结构与湍流输运：帕克太阳探测器前五个轨道观测与全球三维雷诺平均磁流体力学模型的比较。《天体物理学杂志》，923(1):89，2021年12月。数字对象标识符：10.3847/1538-4357/ac1ac7。Rohit Chhiber、Yanwen Wang、Jiaming Wang 和 Sohom Roy。近地太阳风中速度与湍流能量之间稳健的经验关系。*arXiv* 预印本，文章编号 arXiv:2512.00983，2025年11月。数字对象标识符：10.48550/arXiv.2512.00983。

Manuel Enrique Cuesta、Rohit Chhiber、Sohom Roy、Joshua Goodwill、Francesco Pecora、Jake Jarosik、William H. Matthaeus、Tulasi N. Parashar 和 Riddhi Bandyopadhyay。《太阳风湍流中含能涡旋的各向同性化与演化：帕克太阳探测器、赫利俄斯1号、ACE、WIND 和旅行者1号》。《天体物理学杂志》，932(1):L11，2022年6月。数字对象标识符：10.3847/2041-8213/ac73fd。Manuel Enrique Cuesta、Tulasi N. Parashar、Rohit Chhiber 和 William H. Matthaeus。《膨胀太阳风中的间歇性：来自帕克太阳探测器（0.16天文单位）、赫利俄斯1号（0.3–1天文单位）和旅行者1号（1–10天文单位）的观测》。《天体物理学杂志增刊》，259(1):23，2022年3月。数字对象标识符：10.3847/1538-4365/ac45fa。S. Dasso、L. J. Milano、W. H. Matthaeus 和 C. W. Smith。《快速和慢速太阳风涨落的各向异性》。《天体物理学杂志》，635(2):L181–L184，2005年12月。数字对象标识符：10.1086/499559。T. de Kármán 和 L. Howarth。《各向同性湍流的统计理论》。《伦敦皇家学会会刊：*A*辑》，164:192–215，1938年1月。数字对象标识符：10.1098/rspa.1938.0013。B. De Pontieu、S. W. McIntosh、M. Carlsson、V. H. Hansteen、T. D. Tarbell、C. J. Schrijver、A. M. Title、R. A. Shine、S. Tsuneta、Y. Katsukawa、K. Ichimoto、Y. Suematsu、T. Shimizu 和 S. Nagata。《足以驱动太阳风的色球层阿尔fvén波》。《科学》，318 (5856):1574，2007年12月。数字对象标识符：10.1126/science.1151747。P. Démoulin。《为什么太阳风和行星际日冕物质抛射中的温度与速度关系不同？》。《太阳物理学》，257(1):169–184，2009年6月。数字对象标识符：10.1007/s11207-009-9338-5。M. Dobrowolny、A. Mangeney 和 P. Veltri。《行星际空间中充分发展的各向异性磁流体湍流》。《物理评论快报》，45(2):144–147，1980年7月。数字对象标识符：10.1103/PhysRevLett. 45.144。H. A. Elliott、C. J. Henney、D. J. McComas、C. W. Smith 和 B. J. Vasquez。《太阳风温度—速度关系的时间变化与径向变化》。《地球物理研究杂志》（空间物理学），117(A9):A09102，2012年9月。数字对象标识符：10.1029/2011JA017125。W. M. Elsässer。《磁流体方程》。《物理评论》，79:183–183，1950年7月。数字对象标识符：10.1103/PhysRev.79.183。N. Eugene Engelbrecht、F. Effenberger、V. Florinski、M. S. Potgieter、D. Ruffolo、R. Chhiber、A. V. Usmanov、J. S. Rankin 和 P. L. Els。《日球层中的宇宙线输运理论》。《空间科学评论》，218(4):33，2022年6月。数字对象标识符：10.1007/s11214-022-00896-1。Federico Fraternale、Laxman Adhikari、Horst Fichtner、Tae K. Kim、Jens Kleimann、Sean Oughton、Nikolai V. Pogorelov、Vadim Roytershteyn、Charles W. Smith、Arcadi V. Usmanov、Gary P. Zank 和 Lingling Zhao。《外日球层中的湍流》。《空间科学评论》，218(6):50，2022 年 9 月。数字对象标识符：10.1007/s11214-022-00914-2。T. I. Gombosi、B. van der Holst、W. B. Manchester 和 I. V. Sokolov。《稳态太阳日冕和太阳风的扩展磁流体动力学建模》。《太阳物理学综述》，15:4，2018年7月。数字对象标识符：10.1007/s41116-018-0014-4。M. Hossain、P. C. Gray、D. H. Pontius, Jr.、W. H. Matthaeus 和 S. Oughton。《均匀磁流体湍流中含能涡旋衰减的现象学》。《流体物理学》，7: 2886–2904，1995年11月。数字对象标识符：10.1063/1.868665。

J. C. Kasper、A. J. Lazarus 和 S. P. Gary。《热太阳风氦：阿尔芬-回旋波耗散导致局部加热的直接证据》。《物理评论快报》，101(26):261103，2008年12月。数字对象标识符：10.1103/PhysRevLett.101.261103。J. C. Kasper、R. Abiad、G. Austin、M. Balat-Pichelin、S. D. Bale、J. W. Belcher、P. Berg、H. Bergner、M. Berthomier、J. Bookbinder、E. Brodu、D. Caldwell、A. W. Case、B. D. G. Chan- dran、P. Cheimets、J. W. Cirtain、S. R. Cranmer、D. W. Curtis、P. Daigneau、G. Dalton、B. Das- gupta、D. DeTomaso、M. Diaz-Aguado、B. Djordjevic、B. Donaskowski、M. Effinger、V. Florinski、N. Fox、M. Freeman、D. Gallagher、S. P. Gary、T. Gauron、R. Gates、M. Goldstein、L. Golub、D. A. Gordon、R. Gurnee、G. Guth、J. Halekas、K. Hatch、J. Heerikuisen、G. Ho、Q. Hu、G. Johnson、S. P. Jordan、K. E. Korreck、D. Larson、A. J. Lazarus、G. Li、R. Livi、M. Ludlam、M. Maksimovic、J. P. McFadden、W. Marchant、B. A. Maruca、D. J. McComas、L. Messina、T. Mercer、S. Park、A. M. Peddie、N. Pogorelov、M. J. Reinhart、J. D. Richardson、M. Robinson、I. Rosen、R. M. Sk- oug、A. Slagle、J. T. Steinberg、M. L. Stevens、A. Szabo、E. R. Taylor、C. Tiu、P. Turin、M. Velli、G. Webb、P. Whittlesey、K. Wright、S. T. Wu 和 G. Zank。《太阳风电子、阿尔法粒子和质子（SWEAP）探测：太阳探测器 Plus 太阳风与日冕等离子体仪器套件的设计》。《空间科学评论》，204:131–186，2016年12月。数字对象标识符：10.1007/s11214-015-0206-3。K. H. Kiyani、K. T. Osman 和 S. C. Chapman。《太阳风湍流中的耗散与加热：从宏观到微观再回到宏观》。《伦敦皇家学会哲学汇刊》*A*辑，373(2041):20140155–20140155，2015年4月。数字对象标识符：10.1098/rsta.2014.0155。R. H. Kraichnan。《磁流体湍流的惯性区谱》。《流体物理学》，8: 1385–1387，1965年7月。数字对象标识符：10.1063/1.1761412。W. H. Matthaeus 和 M. L. Goldstein。《太阳风磁流体湍流坚固不变量的测量》。《地球物理研究杂志》，87:6011–6028，1982年8月。数字对象标识符：10.1029/JA087iA08p06011。W. H. Matthaeus 和 M. Velli。《谁需要湍流？关于日球层中的湍流效应及其对重联基本过程影响的综述》。《空间科学评论》，160:145–168，2011年10月。数字对象标识符：10.1007/s11214-011-9793-9。W. H. Matthaeus、C. W. Smith 和 S. Oughton。《外日球层太阳风湍流的动力学年龄》。《地球物理研究杂志》，103:6495，1998年4月。数字对象标识符：10.1029/97JA03729。W. H. Matthaeus、J. Minnie、B. Breech、S. Parhi、J. W. Bieber 和 S. Oughton。《太阳风中交叉螺度的输运与阿尔芬性径向演化》。《地球物理研究快报》，31:L12803，2004年6月。数字对象标识符：10.1029/2004GL019645。D. J. McComas、B. L. Barraclough、H. O. Funsten、J. T. Gosling、E. Santiago-Muñoz、R. M. Skoug、B. E. Goldstein、M. Neugebauer、P. Riley 和 A. Balogh。《尤利西斯号首次完整极轨道期间的太阳风观测》。《地球物理研究杂志》，105:10419–10434，2000年5月。数字对象标识符：10.1029/1999JA000383。David J McComas、Eric R Christian、NA Schwadron、Matina Gkioulidou、F Allegrini、DN Baker、M Bzowski、G Clark、CMS Cohen、I Cohen 等。《星际制图与加速探测器：美国国家航空航天局 IMAP 任务》。《空间科学评论》，221(8):100，2025年。DJ McComas、SJ Bame、P Barker、WC Feldman、JL Phillips、P Riley 和 JW Griffee。《先进成分探测器的太阳风电子、质子和阿尔法粒子监测器（SWEPAM）》。《空间科学评论》，86(1):563–612，1998年。

J. R. McIntyre、C. H. K. Chen 和 A. Larosa。内太阳风中磁场谱指数变化的基础特性。《天体物理学杂志》，957(2):111，2023年11月。数字对象标识符：10.3847/1538-4357/acf3dd。

D. Müller、O. C. St. Cyr、I. Zouganelis、H. R. Gilbert、R. Marsden、T. Nieves-Chinchilla、E. An- tonucci、F. Auchère、D. Berghmans、T. S. Horbury、R. A. Howard、S. Krucker、M. Maksimovic、C. J. Owen、P. Rochus、J. Rodriguez-Pacheco、M. Romoli、S. K. Solanki、R. Bruno、M. Carlsson、A. Fludra、L. Harra、D. M. Hassler、S. Livi、P. Louarn、H. Peter、U. Schühle、L. Teriaca、J. C. del Toro Iniesta、R. F. Wimmer-Schweingruber、E. Marsch、M. Velli、A. De Groof、A. Walsh 和 D. Williams。太阳轨道器任务。科学概述。《天文学与天体物理学》，642:A1，2020年10月。数字对象标识符：10.1051/0004-6361/202038467。

S. B. Pope。《湍流》。剑桥大学出版社，2000年8月。

N. E. Raouafi、L. Matteini、J. Squire、S. T. Badman、M. Velli、K. G. Klein、C. H. K. Chen、W. H. Matthaeus、A. Szabo、M. Linton、R. C. Allen、J. R. Szalay、R. Bruno、R. B. Decker、M. Akhavan- Tafti、O. V. Agapitov、S. D. Bale、R. Bandyopadhyay、K. Battams、L. Berčič、S. Bourouaine、T. A. Bowen、C. Cattell、B. D. G. Chandran、R. Chhiber、C. M. S. Cohen、R. D'Amicis、J. Giacalone、P. Hess、R. A. Howard、T. S. Horbury、V. K. Jagarlamudi、C. J. Joyce、J. C. Kasper、J. Kinni- son、R. Laker、P. Liewer、D. M. Malaspina、I. Mann、D. J. McComas、T. Niembro-Hernandez、T. Nieves-Chinchilla、O. Panasenco、P. Pokorný、A. Pusack、M. Pulupa、J. C. Perez、P. Riley、A. P. Rouillard、C. Shi、G. Stenborg、A. Tenerani、J. L. Verniero、N. Viall、A. Vourlidas、B. E. Wood、L. D. Woodham 和 T. Woolley。《帕克太阳探测器：太阳活动周极小期的四年发现》。《空间科学评论》，219(1):8，2023年2月。数字对象标识符：10.1007/s11214-023-00952-4。

I. G. Richardson 和 H. V. Cane。《第23太阳活动周期间（1996—2009年）的近地行星际日冕物质抛射：目录及性质概要》。《太阳物理学》，264(1):189–237，2006年6月。数字对象标识符：10.1007/s11207-010-9568-6。Ian Richardson 和 Hilary Cane。《自1996年1月以来的近地行星际日冕物质抛射》，2024年。URL https://doi.org/10.7910/DVN/C2MHTH。D. A. Roberts、M. L. Goldstein、L. W. Klein 和 W. H. Matthaeus。《太阳风中波动的起源与演化——HELIOS观测及Helios-Voyager比较》。《地球物理研究杂志》，92:12023–12035，1987年11月。数字对象标识符：10.1029/JA092iA11p12023。D. A. Roberts、M. L. Goldstein、W. H. Matthaeus 和 S. Ghosh。《速度剪切产生太阳风湍流》。《地球物理研究杂志》，97:17，1992年11月。数字对象标识符：10.1029/92JA01144。M. E. Ruiz、S. Dasso、W. H. Matthaeus 和 J. M. Weygand。《太阳风中湍流磁积分尺度的表征：从0.3到5天文单位》。《太阳物理学》，289:3917–3933，2014年10月。数字对象标识符：10.1007/s11207-014-0531-9。R. Schwenn。《太阳风源及其在太阳活动周期间的变化》。《空间科学评论》，124 (1-4):51–76，2006年6月。数字对象标识符：10.1007/s11214-006-9099-5。Chen Shi、Marco Velli、Roberto Lionello、Nikos Sioulas、Zesen Huang、Jasper S. Halekas、Anna Tenerani、Victor Réville、Jean-Baptiste Dakeyo、Milan Maksimović 和 Stuart D. Bale。《太阳风中的质子和电子温度及其与太阳风速度的相关性》。《天体物理学杂志》，944(1):82，2023年2月。数字对象标识符：10.3847/1538-4357/acb341。

Charles W Smith、Jacques L'Heureux、Norman F Ness、Mario H Acuna、Leonard F Burlaga 和 John Scheifele。《ACE磁场实验》。《空间科学评论》，86(1):613–632，1998年。

G. I. Taylor。《湍流谱》。《伦敦皇家学会会刊：*A*辑》，164：476–490，1938年2月。数字对象标识符：10.1098/rspa.1938.0032。

Daniele Telloni、Luca Sorriso-Valvo、Lloyd D. Woodham、Olga Panasenco、Marco Velli、Francesco Carbone、Gary P. Zank、Roberto Bruno、Denise Perrone、Masaru Nakanotani、Chen Shi、Raf- faella D' Amicis、Rossana De Marco、Vamsee K. Jagarlamudi、Konrad Steinvall、Raffaele Marino、Laxman Adhikari、Lingling Zhao、Haoming Liang、Anna Tenerani、Ronan Laker、Timothy S. Horbury、Stuart D. Bale、Marc Pulupa、David M. Malaspina、Robert J. MacDowall、Keith Goetz、Thierry Dudok de Wit、Peter R. Harvey、Justin C. Kasper、Kelly E. Korreck、Davin Larson、Anthony W. Case、Michael L. Stevens、Phyllis Whittlesey、Roberto Livi、Christopher J. Owen、Stefano Livi、Philippe Louarn、Ester Antonucci、Marco Romoli、Helen O'Brien、Vincent Evans 和 Virginia Angelini。《帕克太阳探测器与太阳轨道器首次径向对齐期间，太阳风湍流从0.1到1天文单位的演化》。《天体物理学杂志》，912(2)：L21，2021年5月。数字对象标识符：10.3847/2041-8213/abf7d1。

A. V. Usmanov、W. H. Matthaeus、M. L. Goldstein 和 R. Chhiber。《稳态全球日冕与太阳风：包含湍流输运和加热的三维磁流体力学模拟》。《天体物理学杂志》，865:25，2018年9月。数字对象标识符：10.3847/1538-4357/aad687。

Arcadi V. Usmanov、Rohit Chhiber、William H. Matthaeus、Sohom Roy 和 Melvyn L. Goldstein。《太阳日冕、太阳风与全球日球层的统一三维磁流体力学模型：包含湍流输运》。《天体物理学杂志》，993(1):87，2025年11月。数字对象标识符：10.3847/ 1538-4357/ae019c。

Daniel Verscharen、Kristopher G. Klein 和 Bennett A. Maruca。《太阳风的多尺度特性》。《style id='1'>《太阳物理学综述》，16(1):5，2019年12月。数字对象标识符：10.1007/s41116-019-0021-0。

Jiaming Wang、Rohit Chhiber、Sohom Roy、Manuel E. Cuesta、Francesco Pecora、Yan Yang、Xian- grong Fu、Hui Li 和 William H. Matthaeus。《太阳风中 1天文单位处密度涨落的各向异性》。《天体物理学杂志》，967(2):150，2024年6月。数字对象标识符：10.3847/1538-4357/ad3e7a。

Y. Zhou、W. H. Matthaeus 和 P. Dmitruk。专题讨论：天体物理和空间等离子体中的磁流体力学湍流与时间尺度。《现代物理评论》，76:1015–1035，2004年12月。数字对象标识符：10.1103/RevModPhys.76.1015。