太阳物理学 DOI：10.1007/●●●●●-●●●-
●●●-●●●●-●

从水星到木星的行星际激波统计分析

卡洛斯·佩´雷斯-阿拉尼斯[1] · 米霍Janvier[2] · Teresa Nieves-Chinchilla[3] ·恩内斯托·阿吉拉尔-罗德´里格斯[4] ·帕斯卡尔·德´穆兰[5,6] · Pedro Corona-Romero[7,8,9]

✉ C. P´erez-Alanis
cpereza.art@igeofisica.unam.mx M.
Janvier
m
iho.janvier@universite-paris-saclay.fr
T. Nieves-Chinchilla
teresa.nieves@nasa.gov E.
Aguilar-Rodr´
ıguezernesto@igeofisica.unam.mxP. D´
emoulin pascal.demoulin@obspm.frP.
Corona-Romero
p.coronaromero@igeofisica.unam.mx

[1] 墨西哥国立自治大学地球科学研究生院，墨西哥城，墨西哥。´´´

[2] 巴黎-萨克雷大´学，法国国家科学研究中心，空间天体物理研究所，奥赛，法国。

[3] 日光层物理科学部。美国国家航空航天局戈达德太空飞行中心，美国马里兰州格林贝尔特。

[4] 地球物理研究所，米却肯州分部，墨西哥国立自治大学（UNAM），莫雷利亚，墨西哥。

[5] 空间与天体物理仪器研究实验室、巴黎天文台、PSL大´学、法国国家科学研究中心、索邦大´学、大´学巴黎西岱´、Jules Janssen广场5号，92195默东，法国。

[6] Cogitamus实验室，75005巴黎。

[7] CONACyT 教席，墨西哥国立自治大学米却肯州地球物理研究所，58190 莫雷利亚，米却肯州，墨西哥。

[8] 国家空间天气实验室（LANCE），墨西哥国立自治大学米却肯州地球物理研究所，58190 莫雷利亚，米却肯州，墨西哥。

[9] 墨西哥空间天气服务（SCIESMEX），墨西哥国立自治大学地球物理研究所米却肯分部，58190 莫雷利亚，米却肯州。

arXiv:2304.05733v1 [astro-ph.SR] 12 Apr 2023

© 施普林格 ●●●●

摘要对行星际（IP）日冕物质抛射（ICME）和行星际激波进行原位观测十分重要，因为它们是太阳活动的主要组成部分。不同空间任务在不同时间、不同日心距离处探测到了数百个行星际激波。其中一些激波后方有明确识别出的驱动体，而另一些则没有。本研究对不同日心距离处记录的行星际激波的等离子体和磁参数分布进行统计分析。我们按日心距离对激波进行分类：0.29 至 0.99 天文单位（Helios-1/2）；约 1天文单位（Wind、ACE 和STEREO-A/B）；以及1.35至5.4天文单位（尤利西斯号）。我们还将行星际激波分为两类：探测到行星际日冕物质抛射的激波和未探测到此类抛射的激波。正如预期，在位于1天文单位处的航天器所得结果之间没有显著差异。此外，激波参数的分布以及激波法线均未随日心距离发生显著变化。我们还研究了与流相互作用区相关的激波数量如何随距离增加，以及其相对于行星际日冕物质抛射/激波的比例如何变化。从1 到5 天文单位，共转相互作用区/激波的发生率略微从21% 增至 34%；相比之下，行星际日冕物质抛射/激波的发生率则从 47%降至 17%。我们还发现，帕克螺旋会导致共转相互作用区出现不对称性，而行星际日冕物质抛射则没有这种现象。

关键词：行星际激波 - 日冕物质抛射（CMEs） - 太阳风扰动

1. 引言

自空间时代开始以来，已有多项空间任务开展日球层特性原位测量。尤利西斯号等专注于研究高太阳纬度处太阳风的空间任务，以及位于 1 天文单位处的不同任务（例如 ACE、WIND 或 STEREO 双航天器），为我们提供了更好的原位观测，使我们能够通过行星际（IP）介质加深对太阳现象的理解。此外，帕克太阳探测器（PSP）和太阳轨道器等新的太阳任务目前正在帮助我们更好地理解太阳过程，并增进我们对太阳系不同位置处太阳风的认识。

太阳风的特征是：当我们从太阳向外移动进入行星际介质时，其密度会降低。太阳风并非平稳地向外流动，而是瞬变现象发生的场所，例如激波（Cane，1985；Cane、Sheeley Jr 和 Howard，1987）、日冕物质抛射（日冕物质抛射；Gopalswamy，2006）以及慢速和快速太阳风之间的流相互作用区（Jian 等，2009）。当波在无碰撞等离子体中经历陡化过程时，就会形成激波；此时粒子的平均自由程约为1天文单位（Parks，1991）。当在磁化等离子体中传播的波速超过太阳风的Alfv´én速度时，该波的振幅会迅速增大，非线性效应变得十分重要，因此会形成激波

（Burgess 和 Scholer，2015）。激波两侧超声速流与亚声速流之间的突然转变，其特征是介质中的压力、温度、密度和磁场强度发生突变（Burlaga 和 Chao，1971；Eselevich，1982；Sagdeev 和 Kennel，1991）。在行星际介质中以及靠近太阳的区域，激波主要由行星际日冕物质抛射（行星际日冕物质抛射）引起：当其相对于周围太阳风的传播速度超过快模波速，并在行星际介质中膨胀时，就会产生激波（Gosling 等，1968）。激波后方的太阳风物质称为行星际日冕物质抛射鞘层。在行星际日冕物质抛射鞘层后方，磁场波动强度低于鞘层的区域称为磁性抛射体（Winslow 等，2015）。此外，在其他情况下，高速和低速太阳风流之间的相互作用也会产生激波，并形成共转相互作用区（Gosling 等，1972，1976；Richardson，2018）。

日冕仪和日球层观测表明，行星际激波沿着宽阔且大致呈球形的前沿，在从日冕物质抛射（CME）中喷出的等离子体和磁场前方穿过太阳风传播（Hundhausen，1976）。一般而言，整个行星际日冕物质抛射/激波结构的几何形态可视为一个远离太阳源区、不断膨胀的气泡（Berdichevsky等，2000；Berdichevsky、Lepping 和 Farrugia，2003）。然而，由于传统图像处理技术在识别和追踪这类结构方面存在局限，行星际日冕物质抛射/激波结构真实的三维几何形态或形貌仍未得到充分约束（Howard等，2006；Ontiveros 和 Vourlidas，2009；Thernisien，2011）。一些作者利用数值磁流体力学（MHD）模拟，研究了行星际激波穿过弓形激波和磁鞘时的形貌与传播（Koval等，2005；Samsonov、Nˇemeˇcek 和 ˇSafr´ankov´a，2006）。另一方面，由于原位航天器测量只能提供单个观测点（除了少数航天器沿经度方向排列的罕见事件，例如双子 STEREO 航天器任务早期的观测），行星际日冕物质抛射/激波性质的原位数据被视为局部观测，因此所得结果也受到限制。

近年来，一些研究分析了激波性质随其到激波顶点距离的变化。Hoang 等（1995年）利用尤利西斯号任务的原位观测样本，研究了激波强度与日心距离之间的相关性。Lai 等 （2012年）将这类研究拓展至在 0.28 至 1 天文单位范围内探测到的激波。他们得出结论，激波磁场增强与径向距离之间不存在相关性。最后，Janvier、D´emoulin 和 Dasso（2014年）以及 Janvier 等（2015年）通过对在 1 天文单位处观测到的大量行星际激波进行统计分析，发现激波法向矢量在太阳顶点线周围没有优先方向。

本研究旨在了解内日球层不同位置处行星际激波结构的空间和时间变化。本文结构如下：第2节介绍我们用于构建本研究分析事件集的行星际激波目录。第3节考察1天文单位处激波上游/下游参数的分布，以及位置角 λ（激波法线与径向之间的夹角）之间的相关性，据此我们可以确定位置

对于给定的激波形状，该位置表示航天器穿越激波时相对于激波前沿的位置。第4节将这项研究扩展至不同的日球距离，并进一步探讨激波驱动结构的形状是否可能存在东西向不对称。我们在第5节讨论并总结本研究。

2. 行星际激波的筛选：覆盖 0.3 至 5.4 天文单位日球层距离的目录。

2.1. 本研究纳入的任务

此前已有多位作者利用原位观测研究行星际激波。一些空间任务持续时间较长，因此研究人员得以在涵盖数年至多个太阳活动周的事件目录中报告所有这些行星际激波。基于这些先前研究，我们查阅了多个网站和研究论文，以获取在 1 天文单位处检测到的行星际激波，以及与其相关的行星际日冕物质抛射（如有）；并以 Helios-1/2 和尤利西斯号观测到的行星际激波补充了数据集。

Helios-1/2 两项空间任务分别于1977年（Helios-1）和1976年（Helios-2）发射，覆盖距太阳 0.29 至 0.99 天文单位的日球层距离范围。这些任务的主要目的是开创性地测量从地球附近到太阳近旁的行星际介质。行星际介质的测量由 Helios 磁场和等离子体实验完成，相关内容见 Neubauer 等（1976）和 Rosenbauer 等（1977年）。

对于1天文单位处的数据，我们结合了来自 Wind、ACE 和 STEREO A-B 任务的数据。Wind号航天器于1994年11月1日发射，旨在研究行星际介质及其对地球磁层的影响。在数次穿越磁层的轨道运行后，Wind号航天器被置于拉格朗日 L1 点附近的晕轨道上，目前仍在该处运行，并持续通过其搭载的仪器记录太阳风测量数据（Ogilvie 和 Desch，1997年）。用于探测激波的主要仪器包括磁场探测仪（MFI，Lepping等，1995年）、太阳风实验仪（SWE，Ogilvie 等，1995年）和射电与等离子体波探测仪（WAVES，Bougeret 等，1995年）。

先进成分探测器（ACE）空间任务旨在从日地 L1 拉格朗日点研究空间高能粒子并监测太阳活动天气。自 1997年8月25日发射以来，它持续提供太阳风参数的近实时覆盖，并测量太阳高能粒子强度。冲击判定所需的磁场和等离子体参数由磁场仪（MAG）以及太阳风电子、质子和阿尔法粒子监测仪（SWEPAM，Smith 等，1998年）提供。

太阳地球关系观测台（STEREO）是一项太阳空间任务，由两颗相同的航天器组成，于2006年10月26日发射。此后

进入日球层轨道后，STEREO-B 位于地球后方（距太阳1.05天文单位），而 STEREO-A 位于地球前方（距太阳0.95天文单位）。从太阳上观察，两颗航天器每年以约44至45度的角度彼此分离（Kaiser 等，2008）。数据由 IMPACT（Acu˜ na 等，2008；Luhmann 等，2008）和 PLASTIC（Galvin等，2008）仪器提供。

最后，我们还考虑了尤利西斯号任务的数据（Wenzel等，1992年）。这项任务在太阳系探索历史上独一无二：它于1990年10月发射，旨在探索太阳周围数个天文单位范围内、覆盖完整日心纬度范围的日球层，并于1994年年中飞越太阳南极，于1995年年中飞越北极。航天器上搭载的先进科学仪器提供了一套全面的观测数据，用于研究各个纬度上的太阳风。在主要仪器中，用于获取激波数据的是磁场实验（VHM/FGM，Balogh 等，1992年）和太阳风等离子体实验（SWOOPS，Bame 等，1992年）。

2.2. 行星际激波、行星际日冕物质抛射和共转相互作用区数据库

2.2.1. 行星际激波数据库

虽然已有多篇论文报道了由上述空间任务探测到的行星际激波的不同目录，但同样重要的是，不同目录之间的激波分析应保持一致。一方面，有许多技术旨在确定激波法线、激波速度、上游/下游等离子体的数值以及磁场/速度参数，例如磁场共面法、速度共面法或混合模式方法（Paschmann和 Daly，1998年）。另一方面，行星际激波的探测取决于测量的时间精度，以及对激波上游和下游区间的定义。因此，不同目录之间的数据库必须保持一致，以便为未来的研究提供记录完整的激波数据，并评估多种激波法线确定技术的准确性（Russell 等，1983年）。

在我们的研究中，我们选择了全面的日球层激波数据库（HSD）（www.ipshocks.fi/），该数据库提供由不同任务探测到的激波性质（Kilpua等，2015年）。我们将该数据库与哈佛—史密森天体物理中心的 Wind 激波数据库（CfA 行星际激波数据库）进行了比较，该数据库可在 lweb.cfa.harvard.edu/shocks/ 查阅。后者还提供了由 Wind 和 ACE 航天器在 1天文单位处观测到的行星际激波的详细分析。由于每个数据库都采用不同的方法来识别和表征观测到的激波，我们在附录A中通过比较不同方法得出的激波法线数值之间的相关性，对这两个数据库进行了比较，发现混合模式方法的相关性最佳。我们发现这两个数据库之间吻合良好，这使我们有信心在下文中使用 HSD 中的数据。

在此数据库中，激波通过两种方法识别：(1) 目视检查太阳风等离子体和磁场观测，以及

(2) 使用自动激波检测算法（请参阅网站上的相关文档及其中引用的参考文献）。对于每艘航天器，数据库中提供的参数包括：行星际磁场矢量、太阳风速度和质子/离子的整体速度、太阳风质子/离子数密度、太阳风质子/离子温度或最概然热速度、航天器位置，以及激波类型（快速前向（FF）或快速反向（FR））。上游和下游区间的选取确保均值是在距离激波峰值足够远处取得的，并在固定的分析区间（~ 8 分钟）内确定。此外，数据点数量取决于各航天器等离子体数据的分辨率和激波类型。

我们仅考虑远离太阳传播的快速流激波。这类激波是在太阳风中、直至1天文单位处最常观测到的激波（Pitˇna 等，2021年）。快速反向激波朝向太阳传播，但会被太阳风流带离太阳。此外，我们仅考虑满足以下上游/下游条件的激波：(1) 磁场比 $B_d/B_u \geq 1.2$，(2) 质子密度比值 $N_p^d/N_p^u \geq$1。2，(3) 质子温度比 $T_p^d/T_p^u \geq 1.2$，以及 (4) 磁声马赫数 $M_{\rm A} > 1$。这样我们便能将结果与 Kilpua 等（2015年）的统计研究进行比较。

2.2.2. 行星际日冕物质抛射数据库

在可能的情况下，我们通过交叉比对激波列表与已报告的行星际日冕物质抛射列表，将行星际激波与其驱动源（即行星际日冕物质抛射）关联起来。遗憾的是，Helios 任务探测到的行星际日冕物质抛射数量太少，不足以开展统计研究（30个事件），因此我们在此重点关注在地球轨道附近及尤利西斯号探测到的、由行星际日冕物质抛射驱动的激波。

对于近地分析，Wind数据采用Nieves-Chinchilla等（2018年）的目录，该目录也可在Wind NASA网站上找到[1]。在此目录中，作者报告了行星际日冕物质抛射和磁性抛射体的起止时间。对于ACE数据，我们采用Regnault等提供的1997年至2017年目录（2020年），该目录基于对Richardson和Cane行星际日冕物质抛射列表的修订（Cane和Richardson，2003年；Richardson和Cane，2010年）。最后，Jian等（2006年、2013年）提供了2006年至2014年间由STEREO-A/B观测到的行星际日冕物质抛射列表。对于尤利西斯号观测到的行星际日冕物质抛射，我们采用 Richardson（2014年）提供的列表，该列表涵盖了1996年至2009年间的三段航天器轨道，并包含事件的起止时间、行星际日冕物质抛射期间的太阳风参数、航天器日心距离、日心纬度等信息。

通过检查行星际激波和行星际日冕物质抛射数据库，我们比较激波与行星际日冕物质抛射扰动之间的时间差，将每个行星际日冕物质抛射与HSD列表中距离最近的激波对应起来。我们选取行星际日冕物质抛射前沿与激波之间时间差小于两小时的事件，从而创建了由所有这些航天器观测到的ICME相关行星际激波目录。

[1]wind.nasa.gov/ICMEindex.php

表1. Helios-1/2、Wind、ACE、STEREO-A/B和尤利西斯号航天器在不同日心距离处探测到的冲击数量汇总，以及所用目录的来源。

航天器	时间范围	R [天文单位]	来源	事件数
行星际激波总数				
Helios-1/2	1975—1981年	0.29-0.99	a	103
Wind	1994—2017年	1	a	469
ACE	1998—2013年	1	a	255
STEREO-A/B	2007—2014年	0.95/1.05	a	204
尤利西斯号	1990—2009年	1.3-5.4	a	238
与行星际日冕物质抛射相关的激波数量				
Helios-1/2	1975—1981年	0.29-0.99	e	30
Wind	1994—2017年	1	b	185
ACE	1998—2013年	1	c	125
STEREO-A/B	2007—2014年	1	d	98
尤利西斯号	1990—2009年	1.3—5.4	f	38
具有关联共转相互作用区的冲击数量				
Helios-1/2	1975—1981年	0.29-0.99	e	9
Wind、ACE 和 STEREO卫星	1994—2017年	1	g	90
尤利西斯号	1990—2009年	1.3-5.4	h	80

[a]ipshocks.fi/[b] Nieves-Chinchilla *et al.*(2018年)[c]Regnault *et al.* (2020 年)[d]Jian *et al.* (2006年, 2013)[e] Lai *et al.*(2012)[f]Richardson (2014年)[g]Jian *et al.* (2006年, 2019)[h]Jian *et al.*(2008)

2.2.3. 共转相互作用区数据库

流相互作用区（共转相互作用区）以高速太阳风追赶较慢太阳风为特征。这会导致一个压缩区，总压强（P_t）在其中达到最大值。共转相互作用区中还可能出现其他特征，例如质子数密度和磁场的压缩，以及显著的温度升高。在前方和后方的高速太阳风中，等离子体流偏转也经常可以观测到。这些性质有助于更好地识别共转相互作用区。我们使用了L1附近的几个共转相互作用区目录：对于Wind和ACE，我们采用了Jian 等人（2006年）编制的目录，该目录涵盖1995年至2004年（Wind）以及1998年至2004年（ACE）期间。对于由STEREO-A/B观测到的共转相互作用区，我们使用了Jian 等人（2019年）提供的2007年至2016年期间的目录。对于尤利西斯号任务，我们使用了基于Jian 等人（2008年）开展的研究编制的1992年至2005年共转相互作用区事件列表。对于每个目录，作者报告了开始时间和结束时间

表2。在1990年至2009年期间，尤利西斯号观测到的快速前向激波数量，按不同的径向区间和纬度区间排列。

径向距离 [天文单位]	日心纬度 $[\theta]$		
	$\lvert\theta\rvert < 30^\circ$	$30^\circ < \lvert\theta\rvert < 60^\circ$	$\lvert\theta\rvert > 60^\circ$
$[1, 2.5]$	27	5	11
$[2.5, 4]$	13	22	7
$[4, 5.5]$	133	20	0
总计	173	47	18

共转相互作用区，是否检测到前向／反向激波或与共转相互作用区相关的行星际日冕物质抛射、间断面两侧的总压强，以及太阳风速度、质子温度和磁场强度的最大值。此外，对于每项任务，我们还使用等离子体和磁场的原位观测，根据上述标准识别共转相互作用区，并补充完善所呈现的目录。

本研究中记录的事件数量、激波与行星际日冕物质抛射及共转相互作用区的关联结果，以及时间范围、日心距离和所用资料来源，均列于表1中。

2.3 尤利西斯号观测到的激波纬度

尤利西斯号轨道相对日心赤道的倾角高达约80度，因此能够在不同日心纬度扫描日球层，尤其是几乎飞越太阳两极。为了研究不同日球距离处的激波性质，我们首先分析航天器在不同纬度范围内观测到的行星际激波数量，以避免混淆纬度依赖性与径向依赖性。

为了研究尤利西斯号探测到的行星际激波的性质及其在太阳活动周22（SC22）和太阳活动周23（SC23）期间的变化，图1第二行显示了这些事件的发生情况。我们将这些激波按三个纬度范围划分，并以堆叠直方图呈现。在第一行中，我们将这一变化与整个任务期间的太阳黑子数变化进行比较（数据取自网站 www.swpc.noaa.gov/）。表2列出了1990年至2009年间所有激波在三个不同径向区间和纬度区间内的数量。

事件的发生与太阳活动相关，在太阳活动周22（1990年）和太阳活动周23（2000年）峰值之后，事件数量更多。接下来，尤利西斯号的径向位置和纬度位置随时间变化（图1的后两行）。如果从太阳看去的激波角宽度随距离变化，径向演化可能会影响探测到的事件数量。此外，大多数激波是在低纬度（小于30°）和大于 4 天文单位的距离处探测到的，共观测到 133 个激波。一种可能的解释是，低纬度地区存在快风和慢风（Goldstein 等，1996；Neugebauer 等，1998），形成了更容易产生激波的环境，即使行星际日冕物质抛射的速度只是中等偏快。

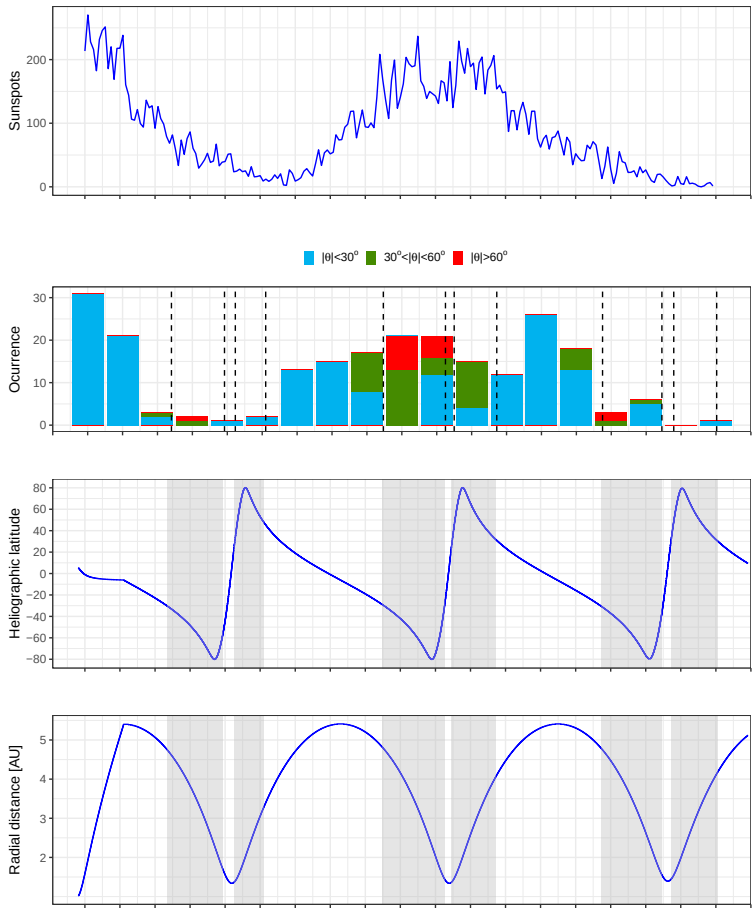

图1。 第一面板：1991年到2009年期间的太阳黑子时间变化（按12天分箱）。第二面板：尤利西斯号探测到的行星际激波分布，以堆叠直方图表示三类观测到的日球纬度 θ激波的发生情况：蓝色表示探测到的激波，其 $|\theta|$ 低于 30°；绿色表示 $|\theta|$ 介于 30° 和 60°之间；红色表示观测到的激波，其 $|\theta|$ 高于 60°。第三面板显示尤利西斯号的日心纬度，阴影区域表示尤利西斯号 $|\theta|$ 超过30°的时间间隔。最后一个面板显示尤利西斯号的径向位置。

即使是速度中等偏快的行星际日冕物质抛射，也能在这样的环境中产生激波。这些结果与 Gonz´alez-Esparza 等 （1996）的研究一致，因为他们发现，1990年至1994年间，高纬度地区（大于 38°）的前向激波数量有所减少。对于CIR前向激波，他们发现这类事件在低纬度地区较强，而在高纬度地区较弱且不太可能发生。还应注意，这些探测结果也受到尤利西斯号在这些纬度区间停留时长的偏差影响，因为尤利西斯号在高纬度地区停留的时间相对较短。更准确地说，尤利西斯号在绝对日心纬度小于 30° 的区域运行了3503天，在 30° 至 60°之间运行了2100天，而在大于 60°的区域仅运行了1208天。此外，

尤利西斯号的纬度与太阳活动的组合调制了每年的冲击数量。在两组太阳活动极小期中，处于高纬度阶段时，尤利西斯号连续数月处于快速的日冕洞太阳风中，因此探测到的激波极少；相比之下，即使在太阳活动极大期的高纬度地区，也探测到了数量显著的事件，因为日冕流和慢太阳风区域覆盖了所有纬度。

事件计数在径向上也存在偏差，因为尤利西斯号在4至5.5天文单位之间运行了总计3673天，而在 [1,2.5]天文单位和 [2.5,4] 天文单位区间内，航天器分别只运行了1414天和1748天。考虑到在低纬度探测到的大多数激波都位于[4,5.5]天文单位区间，我们将在第4节重点研究这一区间，因为其中的案例数量足以用于分析统计分布。此外，其他区间，尤其是更靠近地球的区间，已有1天文单位处的大量统计数据覆盖。

3. 1天文单位处行星际激波的多航天器分析

本节重点介绍位于1天文单位处的航天器——ACE、Wind和STEREO-A/B——所获得的结果。我们将这些结果相互比较，并探究所得差异的重要性。我们还研究激波参数与位置角之间的关系。Janvier、D´emoulin和Dasso（2014）曾对1天文单位处的激波开展过类似研究，但HSD数据源覆盖的年份和航天器范围更广，使我们能够更全面地考察结果。

3.1. 比较1天文单位处的航天器结果

图2展示了位于1天文单位附近的航天器所探测到的所有行星际激波的激波参数分布，分别为ACE（第一行）、Wind（第二行）和STEREO-A/B（第三、第四行）。从左至右，我们报告磁场比、激波处太阳风速度跃变以及质子温度比的分布。每个航天器报告的所有事件均分为24个区间。所有直方图均显示归一化频率（概率），因此可以直接比较不同行和列。我们用一条竖直虚线标出每个直方图的中位数。

我们发现，相同参数的大多数分布呈现出相似的趋势，这可从直方图的形状（图2）以及最可能值和中位数（表3）中看出。不同航天器的速度分布结果略有差异，这可能是由统计波动造成的。不过，不同航天器的最可能值并没有明显差异。

更准确地说，磁场比的分布先急剧上升至峰值，随后向 ~ 4延伸出一条尾部。速度跃变和温度比的分布呈现出类似的趋势，其形状类似于伽马分布。定量结果汇总于表3。不同航天器得到的标准差相近，

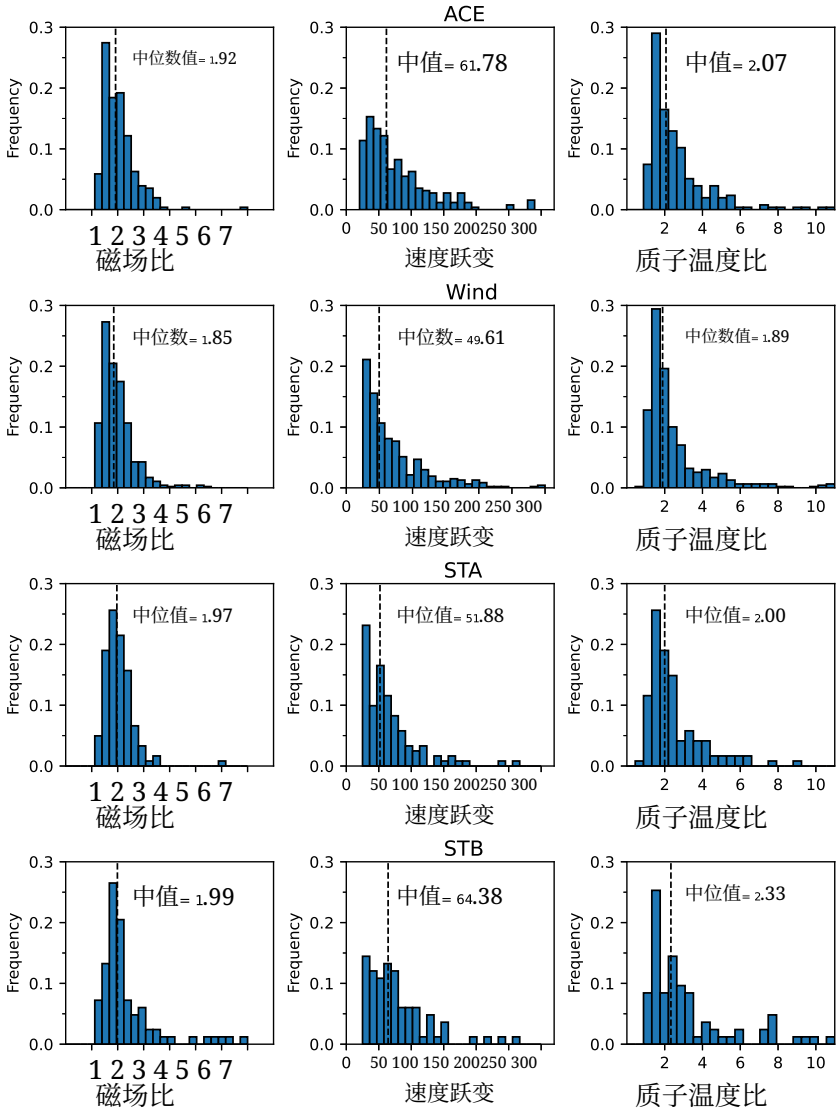

图2. 在1天文单位处探测到的所有行星际激波的等离子体和磁场性质分布。从左至右依次为：磁场比、太阳风速度跃变和质子温度比。第一行对应ACE探测到的激波，第二行对应Wind探测到的激波，第三、四行分别对应STEREO-A和B任务。竖直虚线表示各分布的中位数。

因此，我们仅报告合并所有航天器数据后得到的标准差：$\sigma_{B_{\rm d}/B_{\rm u}} = 0.69$、$\sigma_{N_{\rm p}^{\rm d}/N_{\rm p}^{\rm u}} = 1$、$\sigma_{T^{\rm dp}/T_{\rm p}^{\rm u}} = 2.62$、$\sigma_{M_{\rm A}} = 0.89$、$\sigma_{\Delta V} = 51\,{\rm km\ s^{-1}}$，以及$\sigma_{V_{\rm sh}} = 151\ {\rm km\ s^{-1}}$。这些数值低于表3所示的中位数。

表3。 在1天文单位处探测到的行星际激波比值分布的统计量（见附录A）。参数包括：磁场比 $B_{\rm d}/B_{\rm u}$（下标 d 表示下游，u 表示上游）、质子密度比值 $N_{\rm p}^{\rm d}/N_{\rm p}^{\rm u}$、质子温度比 $T_{\rm dp}$ $/T_{\rm p}^{\rm u}$、磁声马赫数 $M_{\rm A}$、速度跃变 $\Delta V = V_{\rm d} - V_{\rm u}$以及激波速度 $V_{\rm sh}$。 ΔV和 $V_{\rm sh}$的单位为 km s^{-1}。

s/c	数量	最可能值						中位数					
		$B_{\rm d}/B_{\rm u}$	$N_{\rm p}^{\rm d}/N_{\rm p}^{\rm u}$	$T_{\rm p}^{\rm d}/T_{\rm p}^{\rm u}$	$M_{\rm A}$	ΔV	$V_{\rm sh}$	$B_{\rm d}/B_{\rm u}$	$N_{\rm p}^{\rm d}/N_{\rm p}^{\rm u}$	$T_{\rm p}^{\rm d}/T_{\rm p}^{\rm u}$	$M_{\rm A}$	ΔV	$V_{\rm sh}$
ACE	255	1.54	1.76	1.54	1.54	41.5	462	1.9	2.0	2.0	1.7	61.8	509
WIND	469	1.54	1.76	1.54	1.26	30.5	462	1.9	1.9	1.9	1.6	49.6	457
STA	121	1.82	1.76	1.54	1.27	30.5	374	1.9	2.4	2.0	1.4	51.9	408
STB	83	1.82	1.76	1.54	1.26	30.5	418	1.9	2.5	2.3	1.4	64.3	423
所有航天器	928	1.54	1.76	1.54	1.26	30.5	418	1.9	2.0	1.9	1.6	55	457

总之，我们没有发现位于1天文单位处的4艘不同航天器之间存在显著差异，尤其是考虑到探测到激波数量最多的航天器（ACE和Wind）时更是如此。这是预料之中的，因为ACE和Wind在空间和时间上都彼此接近。考虑到STEREO结果受统计涨落的限制，这一结论也适用于更大的经度范围和时间差异。

我们进一步研究了参数随太阳活动周的演变，发现其与太阳活动周之间没有显著变化（未展示）。这与Kilpua等人（2015年）的图3一致，作者展示了1993年至2013年激波参数年度中位数的太阳活动周期变化。他们发现激波参数随太阳活动周没有显著变化，我们的研究证实了这一点。

3.2. 有无探测到行星际日冕物质抛射时行星际激波的性质分布。

在确认不同航天器之间不存在显著偏差后，我们接下来研究在1天文单位处，探测到行星际日冕物质抛射和未探测到行星际日冕物质抛射的激波是否存在差异。

图3展示了所有航天器的激波性质分布，这些性质均已在图2中列出。由于 Wind 和 ACE 围绕 L1 运行，在某些情况下，两艘航天器会观测到同一个激波。因此，对于这些事件，我们的统计中可能会将同一激波计算两次。为解决这一问题，我们比较了 Wind、ACE 和 STEREO-A/B 各事件的起始时间。随后，我们将 2 小时（ $|t_{\rm Wind} - t_{\rm s/c}| < 2$h）设为判定两个事件相同的时间间隔条件（其中下标“s/c”表示 ACE 或某一颗 STEREO卫星）。因此，我们最终仅保留 Wind 观测到的事件，并从列表中剔除 ACE 和 STEREO卫星观测到的相同事件。总计有 235 个事件符合这一条件，并从整体 1天文单位激波列表中剔除。

在图3中，我们在第一行报告所有行星际激波，在第二行报告激波下游区域中明确识别出磁性抛射体的所有行星际激波，在第三行报告检测到共转相互作用区的行星际激波。每一类的总数标注在各行标题中，且

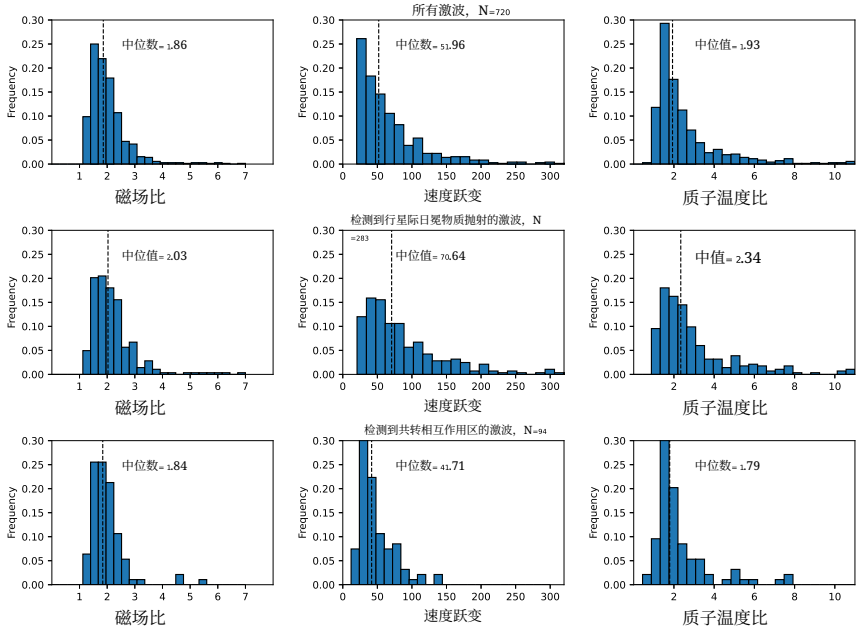

图3. 利用1天文单位处的观测得到的行星际激波各项比值属性的分布。从左至右依次为：磁场比、太阳风速度跃变和质子温度比。第一行显示了在1天文单位处报告的所有激波；对于由多艘航天器观测到的激波，仅保留 Wind 的数据。第二行对应于激波下游区域中明确识别出行星际日冕物质抛射的所有激波，第三行则对应检测到共转相互作用区的激波。虚线表示各分布的中位数。

每个分布的中位数也予以标示。我们还在表4中报告了每个分布的最可能值和中位数，以及 Kilpua等(2015年)中针对伴随后续行星际日冕物质抛射的激波和检测到共转相互作用区的激波所得的中位数。

总体而言，图3中的分布与图2所报告的趋势相同，与 Janvier、D´emoulin 和 Dasso（2014年）在较少激波样本中发现的结果相似。不过，由于本文研究的案例数量更多，在比较第二行和第三行时，我们也发现了一些差异。对于所有参数，检测到行星际日冕物质抛射的激波，其分布范围更大，且朝各参数较高值方向延伸的尾部更长。这可能是因为，与共转相互作用区激波相比，行星际日冕物质抛射/激波包含更多强激波，因此其尾部更长。利用这些航天器进行的观测，尤其是尤利西斯号的观测表明，快速日冕洞太阳风（驱动共转相互作用区）的速度上限约为 800 km s^{-1}，而日冕物质抛射激波的速度可以超过这一上限，偶尔甚至超过 1000 km s^{-1}。这意味着，检测到共转相互作用区的激波，其参数分布宽度较小。

表4显示，我们的数值与Kilpua等人（2015年）针对后续伴有行星际日冕物质抛射的激波所报告的数值相似。磁场、质子

表4。 表3标题中定义的参数分布的最可能值、中位数和标准差，用于比较在1天文单位处探测到的行星际激波中同时探测到行星际日冕物质抛射和共转相互作用区的情况，以及分别与Kilpua *et al.*（2015年）关于探测到行星际日冕物质抛射和共转相互作用区的行星际激波的结果进行比较。

数据集	N	最可能值						中位数						标准差					
		B_d/B_u	ΔV	N_p^d/N_p^u	T_p^d/T_p^u	V_{sh}	M_A	B_d/B_u	ΔV	N_p^d/N_p^u	T_p^d/T_p^u	V_{sh}	M_A	B_d/B_u	ΔV	N_p^d/N_p^u	T_p^d/T_p^u	V_{sh}	M_A
所有激波	720	1.54	30.5	1.76	1.54	418	1.3	1.9	52.0	2.0	1.9	450	1.5	0.7	51	1.1	2.7	146	0.8
行星际日冕物质抛射激波	283	1.57	45.6	2.2	1.37	467	1.2	2	70.6	2.2	2.3	488	1.7	0.8	61	1.2	3.3	178	1.1
Kilpua *et al.* (2015年)中伴有行星际日冕物质抛射	351	-	-	-	-	-	-	2	-	2.2	-	482	2.1	-	-	-	-	-	-
共转相互作用区激波	94	1.5	31.8	1.8	1.3	412	1.2	1.8	41.7	2	1.8	402	1.4	0.6	25.7	1	1.3	78	0.4
Kilpua *et al.* (2015年)中伴有共转相互作用区	131	-	-	-	-	-	-	1.7	-	1.9	-	415	1.8	-	-	-	-	-	-
未检测到行星际日冕物质抛射/共转相互作用区的激波	343	1.54	31.8	1.4	1.37	413	1.3	1.7	43.9	1.8	1.7	441	1.4	0.5	41	1	2.3	118	0.6

密度比值和激波速度相同。然而，与我们得出的1.7相比，Kilpua 等人（2015年）得出的马赫数更高（2.1）。

对于检测到共转相互作用区的激波，各项数值相近，唯独激波速度和马赫数在 Kilpua等人(2015) 的研究中更高。各组数据的标准差没有明显变化（与第3.1节给出的数值相近）。此外，Kilpua等人(2015)发现，由日冕物质抛射驱动的激波平均而言略强、速度略快，其激波参数的分布也比共转相互作用区驱动的激波更宽。我们的样本也得出了相同结果。

各参数分布形状相似，且最大值彼此接近，这表明有无检测到行星际日冕物质抛射时，最典型的激波都相似；因此，这证实了 Janvier、D´emoulin 和 Dasso (2014) 的结论：1天文单位处的激波很可能由行星际日冕物质抛射驱动，而磁性抛射体未必能在原位被探测到。事实上，Richardson (2018) 和 Lai等人(2012) 的研究结果表明，行星际日冕物质抛射驱动的激波往往在远小于1天文单位处形成。此外，与行星际日冕物质抛射相关的激波发生率随日心距离仅略有变化：从0.72天文单位到1天文单位时有所上升，随后在超过1天文单位后略有下降（Jian 等人, 2008）。相比之下，与共转相互作用区相关的激波发生率随日心距离增加而上升。在距太阳0.5天文单位以内，这类激波较少见（发生率较低，约每200天一次），而在0.5–1天文单位范围内更常见（约每100天一次）；到了3–5天文单位，超过90%的相互作用区被发现具有前向激波，75%具有反向激波，远高于在1天文单位处或 Helios 探测器观测到的发生率（Richardson, 2018）。事实上，据报道，共转相互作用区驱动的激波在0.4天文单位处便开始形成（Lai 等人, 2012）；随着其从0.72天文单位演化至5.3天文单位，与共转相互作用区相关的激波比例迅速从3%升至91%（Jian等人, 2008）。

3.3. 激波的几何特性

在 Janvier、D´emoulin 和 Dasso（2014年）以及 Janvier 等（2015年）此前的研究中，研究人员利用来自 L1 处航天器的原位航天器数据，对激波方向进行了统计研究，从而刻画了行星际日冕物质抛射激波前沿的典型形状。为此，作者引入了位置角 λ，其定义为激波法线与

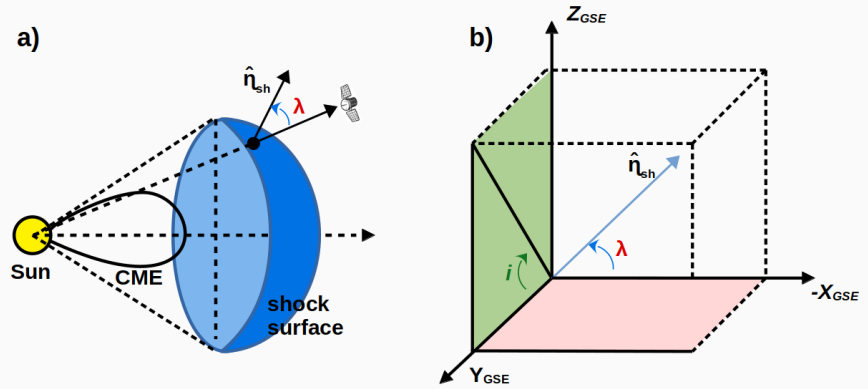

图 4。以 GSE 坐标系中的几何量表示的激波前沿一般形状示意图：**a**）此处将激波面表示为由行星际日冕物质抛射驱动。**b**）位置角 λ 是激波法向矢量 $\hat{\mathbf{n}}_{\rm shock}$ 与径向方向 $-\hat{\mathbf{x}}_{\rm GSE}$之间的夹角；倾角 i 则表示投影矢量 $\hat{\mathbf{n}}_{\rm shock,\ yz}$ 与方向 $\hat{\mathbf{y}}$之间的倾斜程度。

径向 $-\hat{\mathbf{x}}_{\rm shock}$ 之间的夹角。位置角 λ 可以直接根据法向量 $\hat{\mathbf{n}}_{\rm shock}$ 的分量推导得出：

$$\tan\lambda = \sqrt{n_y^2 + n_z^2}\,/\,n_x. \tag{1}$$

对于日冕物质抛射激波，该参数与航天器穿越激波时的相对位置有关。当位置角 $\lambda \sim 0°$时，航天器穿越行星际激波的位置接近其顶点；而 $|\lambda|$ 的值逐渐增大至 $90°$，则意味着航天器穿越激波的位置逐渐远离激波的“鼻部”（见图4a）。

通过比较观测到的激波取向分布与参数 λ的合成分布，可以推断激波前沿的平均形状。随后可利用位置角的分布推断行星际日冕物质抛射前方激波的一般结构（例如参见 Janvier、D´emoulin 和 Dasso，2014年）。此外，还可利用位置角研究激波性质沿激波从鼻部到翼部的分布（例如参见 D´emoulin等，2016年）。

图 5 显示了在 1 天文单位处探测到的激波在各类别中的 λ 角分布。我们发现，与探测到行星际日冕物质抛射的激波和未探测到行星际日冕物质抛射的激波，其分布相似。两种分布的形状和趋势相似，在较低的 $|\lambda|$ 值处均出现陡增，峰值位置也相近。细微差异体现在分布尾部。探测到共转相互作用区的激波分布表明，在较大的$|\lambda|$ 值处，与共转相互作用区相关的激波较少。

第二个参数是黄道面上的倾角 i，用于量化投影向量$\hat{\mathbf{n}}_{\rm shock,yz}$ （与$-\hat{\mathbf{x}}_{\rm GSE}$正交）和$\hat{\mathbf{y}}$ 方向（在GSE坐标系中定义 $i = 0$）之间的倾角；该方向指向太阳东向，其中 i 的范围为 $-180°$ 至 $180°$ （见图4b）。

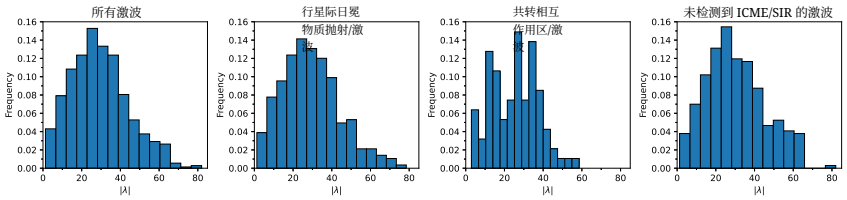

图5。 使用在1天文单位处的观测得到的位置角 λ 的分布。从左到右：所有激波；下一幅图对应于检测到行星际日冕物质抛射的所有激波；第三幅图为检测到共转相互作用区的激波；最后一幅图为未检测到行星际日冕物质抛射/共转相互作用区的激波。

对于地球附近航天器的坐标系， x-轴指向太阳，z 轴指向北方，而y 轴构成正交归一右手基。我们将 i 定义为：

$$i = \mathrm{atan2}(\boldsymbol{n}_z, \boldsymbol{n}_y)\,. \tag{2}$$

在 RTN 坐标系中，R 轴从太阳径向向外，T 轴大致沿行星轨道方向；N 轴指向北方，RN 平面包含太阳自转轴。将太阳东向设为 i 的原点：

$$i = \mathrm{atan2}(\boldsymbol{n}_N, -\boldsymbol{n}_T)\,. \tag{3}$$

图6展示了所有行星际激波（第一行）、检测到行星际日冕物质抛射的激波（第二行）以及检测到共转相互作用区的激波（第三行）在 1天文单位处的 λ 角与激波参数（磁场比、速度跃变和质子温度比）之间的相关性。每个分布均给出了 Pearson 和 Spearman 相关系数（C_p 和 C_s），以及线性拟合函数。红色/蓝色分别表示东向/西向。下文先综合分析红色和蓝色结果，再探究是否存在东西向不对称性。

我们考察了激波参数沿激波结构随位置角 λ 变化的可能趋势。对于整个数据集，相关系数的绝对值表明，除 V_sh 外，激波参数均与位置 λ 角无关。与 Janvier、D´emoulin 和 Dasso（2014年）一样，激波速度 V_sh 与其局部径向速度 V_ρ（远离太阳）相关，其表达式为 $V_\mathrm{sh} = V_\rho \cos(\lambda)$。在最简单的情形下，行星际日冕物质抛射在太阳风中传播并作自相似膨胀，其向外速度预计沿径向。在此背景下，我们预期 V_sh 随 $\cos(\lambda)$ 变化，其中 V_ρ 不依赖于带有激波的 λ。因此， V_sh 的微弱依赖性是一种投影效应。

我们研究了日冕物质抛射激波的形状是否可能存在不对称性，以及这种不对称性是否与其和帕克螺旋的相互作用有关，从而可能形成东西向不对称。东西方向按照太阳惯例定义。为此，我们从整个数据集中选取两个 i 区间：用蓝色表示角度 i 在 GSE坐标系中介于 $[320°, 40°]$ 之间的激波，对应东向（$\pm 40°$）；用红色表示 i 介于

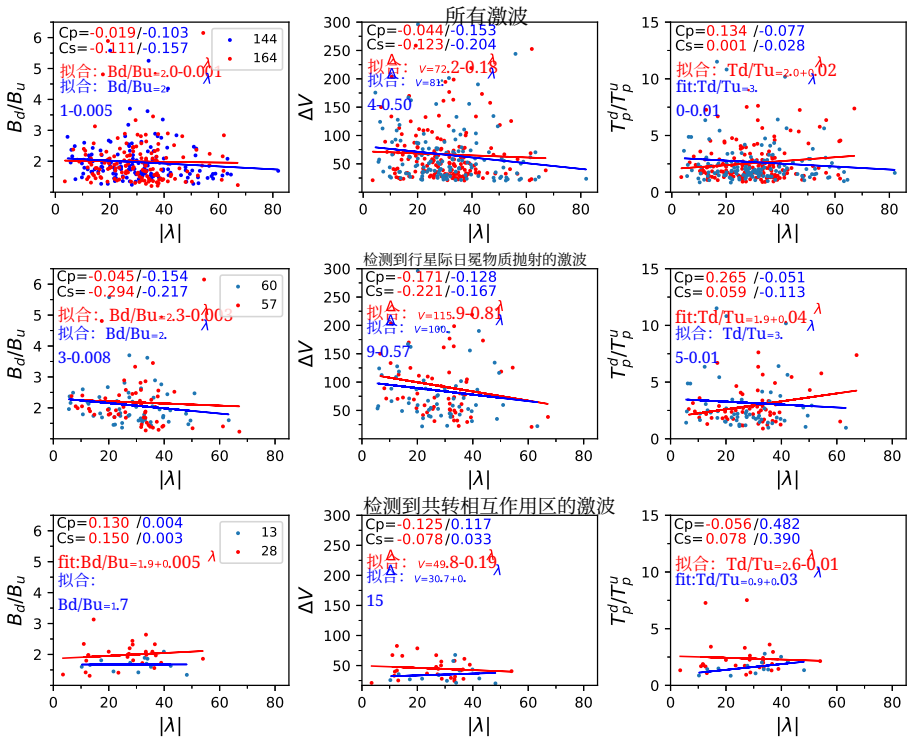

图6。 λ 与1天文单位处不同数据集的激波参数之间的相关性。第一行对应所有行星际激波，第二行对应与行星际日冕物质抛射相关的激波，第三行对应检测到共转相互作用区的激波。蓝色表示其法向主要指向太阳东向的激波（采用GSE坐标系时， i 位于 $[320°, 40°]$ 之间），红色表示指向西向的激波（i 位于 $[140°, 220°]$之间）。给出了皮尔逊相关系数 c_p和斯皮尔曼相关系数 c_s，以及拟合函数。

$[140°, 220°]$ 之间的激波，对应西向。我们未发现显著的东西向不对称（图6仅展示了三个参数，而其他等离子体参数也得到了类似结果，例如表4中列出的参数）。

总之，在未发现激波参数与 λ之间存在相关性后，我们使用更大的行星际激波样本确认了 Janvier、D´emoulin和 Dasso（2014年）此前得到的结果。根据λ 分布推导出的激波形状不依赖于激波的任何参数，即从统计上看，无论其行星际日冕物质抛射驱动源为何，激波都具有相近的形状。

4. 不同日球距离下激波性质的统计分析

在以下部分中，我们利用 Helios-1/2、1 天文单位

处的航天器数据以及尤利西斯号的数据，分析在 0.3 至 5.5 天文单位范围内不同日心距离区间检测到的所有行星际激波的属性分布及其可能的演化。

图 7 展示了 Helios 任务在[0.3,0.8] AU 处报告的激波性质分布、1 AU 处的分布，以及尤利西斯号航天器在三个不同距离区间（ [1,2.5], [2.5,4] 和 [4,5.5] AU）和低纬度 $\pm 30^\circ$ 度处报告的分布。对于 [0.3、0.8] AU、 [1,2.5] 和 [2.5,4] AU 处的情况，由于事件数量较少，直方图呈现不规则形状。

4.1. 激波性质随日心距离的演化

图 7 展示了激波参数随日心距离的分布。为描绘激波性质的均值和中位数随径向的变化，我们采用二次回归拟合这些量（图 8）。我们将伴有行星际日冕物质抛射的激波（实线）与不伴有行星际日冕物质抛射的激波（不包括共转相互作用区激波，虚线）区分开来。对于两个数据集，绿色符号和线条表示均值，红色符号和线条表示中位数。

与二次回归所描绘的整体距离变化相比，图8中的彩色符号显示，均值的偏差比中位数更大。事实上，图3显示，较大数值对应的分布具有较长的尾部。这些尾部中的样本数量较少，因此比起分布的核心部分，更容易受到统计噪声的影响。在1天文单位处得到的这一结果也适用于其他距离（图7）。均值容易受到尾部大值的影响，而中位数对这些异常值更稳健，因此基于中位数的结果更能抵御统计涨落，也更值得信赖。

二次拟合只有三个自由参数，因而在五个距离区间内得到的结果彼此关联。这意味着，与各个区间内单独拟合相比，拟合多项式较少受到统计涨落的影响。特别是，均值和中位数的拟合在所有参数上都很接近（图8）。因此，尽管激波数量有限，尤其是尤利西斯号的数据如此，二次拟合仍有望给出足够稳健的结果。

虽然拟合采用二次函数，但所有参数的结果几乎都随距离呈线性依赖关系。速度跃变 ΔV的曲率最大，但在误差范围内，这种曲率可能并不可靠。磁场比值 $B_{\mathrm{d}}/B_{\mathrm{u}}$随距离的增幅最大。从0.5到5天文单位，这一增幅仍相对有限，约为1.17倍。这意味着， B_{up} 随距离的减小速度快于 B_{down} 。这可能是由于环境太阳风中的磁场随距太阳距离增加而显著减弱，也可能是由于共转相互作用区之间的稀疏区出现得更多，从而使更远距离处的背景磁场减弱。从0.5到5天文单位，速度跃变 ΔV 和激波速度分别以0.45倍和0.89倍的幅度适度减小。其他参数在误差范围内保持不变。我们还研究了检测到共转相互作用区的行星际激波属性分布的径向变化（未显示）。然而，我们发现其随距离没有显著变化，这可能是因为检测到的事件数量较少。

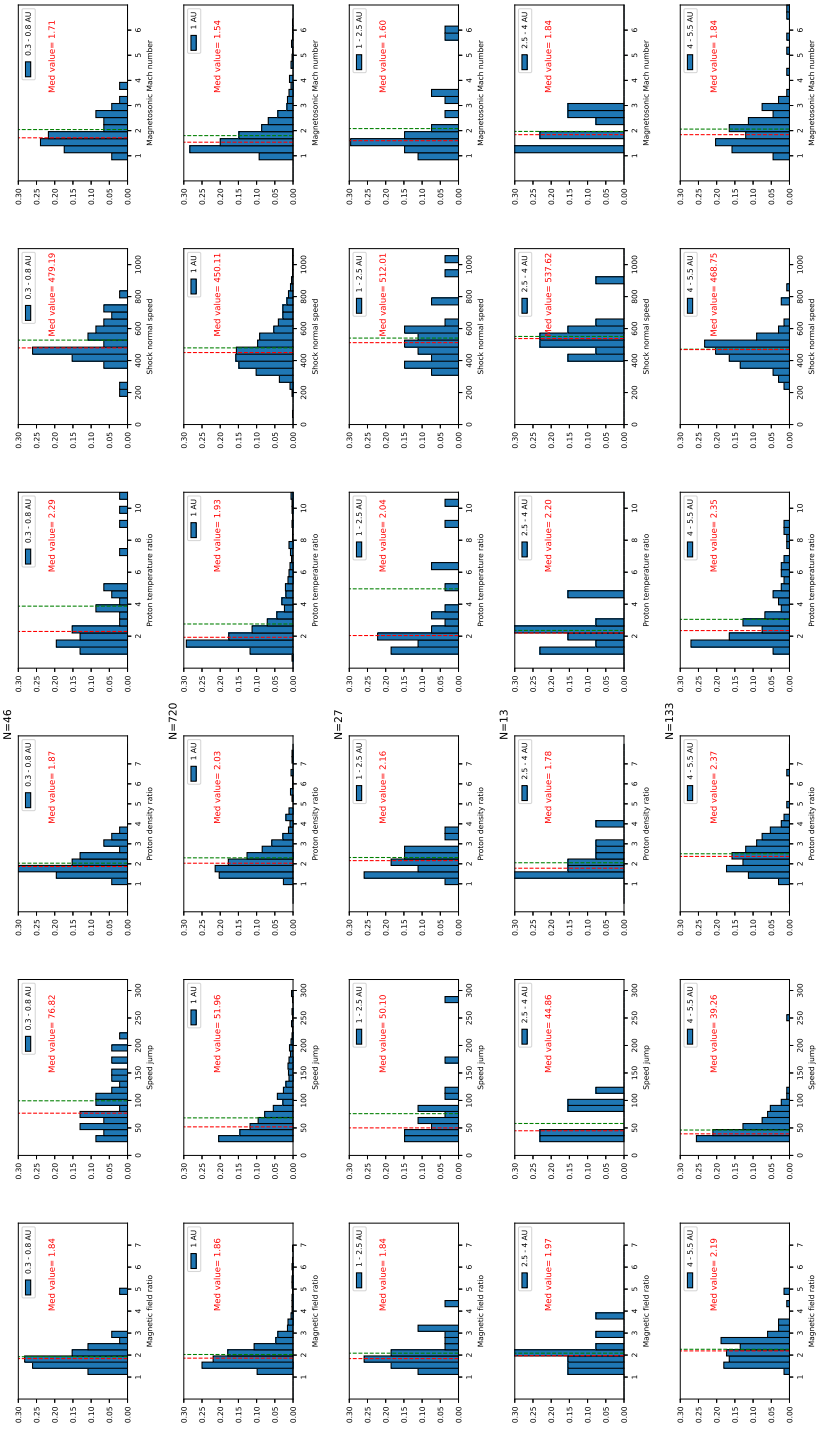

Figure 7.: Distributions for all shocks, at different heliocentric intervals, of the magnetic-field ratio, the speed jump, the proton-density ratio, the proton-temperature ratio, the shock normal speed and the magnetosonic mach number. From top to bottom, the rows are for all the shocks reported at [0.3,0.8] by Helios missions, then by 1 AU missions. And finally, by Ulysses spacecraft at three different distances intervals, [1,2.5], [2.5,4] and [4,5.5] AU, and at low latitudes $\pm 30^\circ$ degrees, as well. Green and red dashed-lines indicate the mean and median value, respectively.

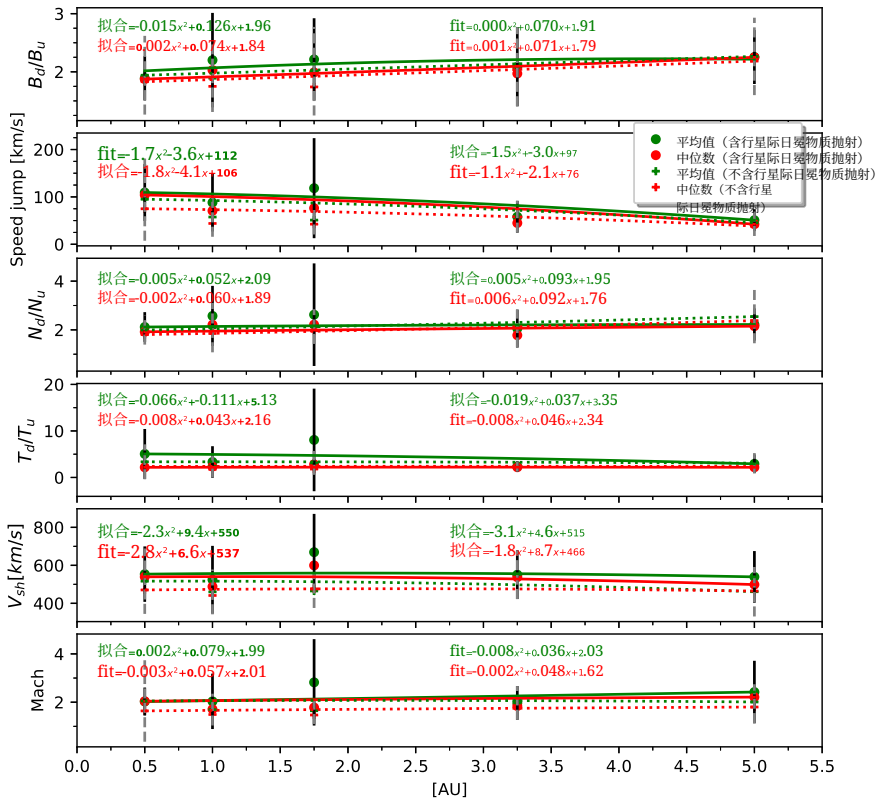

图 8。对于伴随行星际日冕物质抛射的激波（实线）和未伴随行星际日冕物质抛射的激波（不包括共转相互作用区激波；点线），冲击比属性的平均值（绿线）和中位数（红线）在 0.3 至 5.5 天文单位范围内的变化。每个面板均通过二次回归标示平均值和中位数的总体趋势，并以误差棒表示各点的标准差。

总之，激波性质随日心距离的变化较弱。这与 Lai 等人 (2012) 对 0.2 至 1 天文单位范围内行星际激波径向变化的研究结果一致。激波参数的这种微弱变化与某些参数的内在变化形成对比，例如磁场强度、等离子体密度和温度，因为这些参数在 0.5 至 5 天文单位之间会变化 10 到 100 倍。

我们还研究了在0.3至5.5天文单位范围内检测到的位置角 λ 与激波参数之间的相关性（未显示）。与1天文单位的结果（图6）类似，我们发现任意激波参数之间均不存在相关性，除了$V_{\rm sh}$和 λ。激波速度（$V_{\rm sh}$）与 λ 之间的轻微依赖关系表现为两个相关系数 $|C_{\rm p}|$ 和 $|C_{\rm s}|$ 均大于0.3。由于 $|C_{\rm p}|$ 和 $|C_{\rm s}|$ 在2至5天文单位范围内介于0.3和0.5之间，它们随日距略有增加。我们将这种依赖性解释为在1天文单位处（第3节第3.2小节）所作的解释。

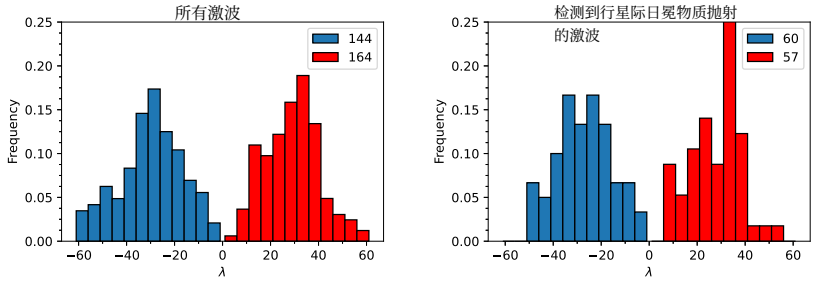

图 9. 位置角的分布 λ，基于 1 天文单位处的观测数据：左图为在 1 天文单位处报告的所有激波，右图为后方检测到行星际日冕物质抛射的所有激波。激波法线朝东、 i 介于 $[320°, 40°]$之间的，设为人工负 λ 值，并以蓝色表示。激波法线朝西、 i 介于 $[140°, 220°]$ 之间的，设为正 λ 值，并以红色表示。

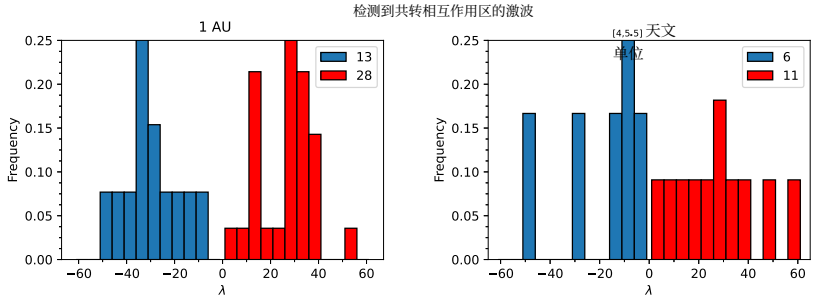

图10. 在1天文单位和 [4,55] 天文单位处检测到共转相互作用区的激波的位置角 λ 分布。蓝色表示角度 i 介于$[320°, 40°]$之间的激波（激波法线指向东向， λ人为设为负值）；红色表示 i介于 $[140°, 220°]$之间的激波（激波法线指向西向， λ为正值）。

4.2. 位置角 λ的分布

考虑到我们研究中在1天文单位处探测到的激波数量（720个事件），我们扩展了 Janvier、D´emoulin 和 Dasso（2014）的激波数据库，以获得更可靠的结果。此外，由于尤利西斯号探测到的大多数激波位于4至5.5天文单位范围内且处于低纬度 $\pm 30°$，本节将重点关注这一区间。为进一步研究行星际日冕物质抛射/激波形状可能存在的不对称性，我们将激波法线的日向东/西方向作为一种人为划分，将数值分为向东和向西两类。图9中， i 角处于 $[320°, 40°]$范围内的激波，其 λ 分布以蓝色表示，对应日向东的方向（$\pm 40°$）；而 i 处于 $[140°, 220°]$ 范围内的激波则以红色表示，对应日向西的方向（$\pm 40°$）。 λ 值分为负值（红色）和正值（蓝色），以研究行星际日冕物质抛射/激波的形状不对称性。

在东西两个方向上，我们发现，在1天文单位处探测到的所有激波具有相似的分布（图9左图），因此没有迹象表明帕克螺旋造成了偏差。对于较小的 $|\lambda|$ 值，探测到的日冕物质抛射激波数量较少（中图），这可以用顶点附近激波面的延伸范围较小来解释（Janvier、D´emoulin 和 Dasso，2014年）。因此，与结构的其他部分相比，航天器在顶点附近穿越激波的可能性较低。其次，对于较大的 $|\lambda|$值，即介于 50° 和 60°之间的值，没有日冕物质抛射尾随的激波比有日冕物质抛射尾随的激波更多（未显示）。事实上，当航天器在远离顶点处穿越这些结构时，后续日冕物质抛射与航天器的交会位置可能过于接近其边界，以至于无法探测到该日冕物质抛射；甚至航天器也可能在日冕物质抛射之外穿越。因此，较大 $|\lambda|$ 值的激波预计更可能与未探测到的行星际日冕物质抛射相关。

在图10中，我们绘制了在1天文单位处以及4至5.5天文单位之间探测到的所有激波的 λ 分布，分为15个区间。由于1天文单位处的案例数量减少到与4至5.5天文单位之间观测到的数量相近，分布变得不那么规则。尽管统计数据有限，但考虑到理想共转几何结构中相互作用区的螺旋几何结构，可以预期，共转相互作用区相关的激波事件中，朝西的激波会多于朝东的；事实上，在这两个距离处，朝西的激波数量都是朝东的两倍。

根据尤利西斯号的数据，大多数激波后方没有探测到行星际日冕物质抛射，而在1天文单位及以内的情况则恰恰相反。事实上，在尤利西斯号的数据中，共转相互作用区是快速流激波的主要驱动体（34%），而行星际日冕物质抛射仅占17%，因此其余49%的激波后方没有探测到相关结构。此外，从1天文单位到5天文单位，伴有共转相互作用区的激波比例略有上升，从21%增至34%；而伴有行星际日冕物质抛射的激波比例则从47%降至17%。一种可能的解释是，尤利西斯号探测到的激波很可能属于共转/扇区相互作用区，因为快风和慢风之间的相互作用需要时间，也就是需要一定距离，才能形成强激波。相比之下，行星际日冕物质抛射通常以较高速度从太阳发射，随后逐渐减速至周围的太阳风速度。因此，预计行星际日冕物质抛射激波在内日球层中更强。由此，1天文单位以内的激波预计主要由行星际日冕物质抛射驱动，而尤利西斯号探测到的激波则很可能主要由共转/扇区相互作用区驱动。

5. 结论

本文的主要目的是对大量激波进行统计研究，以了解激波性质随日球层距离的演变，并研究激波是否会随倾角 i 和位置角 λ 呈现可能的优选取向。

我们的研究基于一系列目录，这些目录报告了在多个日心距离处探测到的行星际日冕物质抛射、行星际激波和共转相互作用区相关参数：使用Helios-1/2在 0.29 至 0.99 天文单位处探测到的；使用 Wind、ACE 和STEREO-A/B在约1 天文单位处探测到的；以及使用尤利西斯号在1.3至 5.4天文单位处探测到的。我们对1 天文单位处的行星际激波开展了多航天器分析，以研究航天器偏差。对于由Wind 在1 天文单位处探测到的那些事件，我们比较了激波法向量；这些事件被报告在两个不同的数据库中：来自日球层

激波数据库和 CfA 行星际激波数据库。通过这项比较，我们发现 HSD 得出的法线分量与 CfA 数据库报告的激波法线方法之间存在很强的相关性（高于 0.8）。这一结果让我们相信，日球层激波数据库提供的结果相当可靠。

正如预期，我们没有发现位于1天文单位处的航天器所观测到的激波性质存在显著差异。我们研究了1天文单位处探测到和未探测到行星际日冕物质抛射的所有激波的分布。与未探测到行星际日冕物质抛射的激波相比，与探测到的行星际日冕物质抛射相关的激波，其磁场强度、密度和温度的下游与上游比值的平均值更高。所得结果表明，速度更快、强度更大的激波与行星际日冕物质抛射相关，这与若干相关研究一致（Janvier 等，2019年及其中的参考文献）。此外，激波分布的相似性进一步印证了 Janvier、D´emoulin 和 Dasso（2014年）的结论：1天文单位处的激波很可能由行星际日冕物质抛射驱动，而磁性抛射体不一定能在原位被探测到（激波在横向上的延伸范围大于磁性抛射体）。接下来，我们考察了激波性质与位置角 λ 之间的关系；对于给定的激波形状，该角度定义了航天器穿越行星际日冕物质抛射/激波结构的位置。与 Janvier、D´emoulin 和 Dasso（2014年）使用更大激波样本所得的结果一致，我们没有发现激波参数与位置角之间存在关联，这表明激波前沿在统计上具有均匀的性质。

接下来，我们利用尤利西斯号按纬度区间分析了激波性质。我们发现，大多数激波是在低纬度、 $\pm 30^\circ$ 以内及4天文单位以外探测到的。我们还利用 Helios-1/2、1天文单位任务和尤利西斯号（纬度低于 30°）航天器，研究了激波性质的分布及其随日心距离可能发生的演化。我们发现，激波处参数比值随日心距离（0.5 - 5天文单位）的变化最多为15%。相比之下，太阳风和行星际日冕物质抛射中的相应等离子体参数通常会变化10倍或100倍，具体取决于参数。我们发现， λ 分布不会随日心距离发生显著变化；将东向和西向的行星际日冕物质抛射/激波区分开后，还发现 $\hat{\mathbf{n}}_{\rm shock}$ 优先分布在太阳顶点线上。相比之下，西向激波法线方向的共转相互作用区/激波数量约为东向的两倍。

我们研究了来自多个空间任务的激波性质分布在空间和时间上的变化。本文建立的统计分析方法可用于理解行星际日冕物质抛射/激波在内日球层中随距离的演化。我们需要一组一致的原位观测，以获得更可靠的结果。就此而言，帕克太阳探测器（Case 等，2020年）和太阳轨道器（M¨uller 等，2020年）等新任务将大有帮助，可用于研究日冕物质抛射和行星际激波在更接近太阳的距离处的演化与传播。

致谢 CarlosP´erez-Alanis 和 ErnestoAguilar-Rodr´ıguez 感谢 DGAPA/PAPIIT 项目 IN103821 提供的支持。我们认可

知识创造与传播的协作性和开放性，并认为这一过程应由学术共同体掌控，正如 Camille Noˆus 在 www.cogitamus.fr/indexen.html 上所阐述的那样。

附录

A. 激波法线的确定有多准确?

在本研究中，我们使用赫尔辛基大学维护的日球层激波数据库（HSD）提供的行星际激波目录，计算位置角 lambda λ，并利用不同的激波法线数据集进行比较，以检验该量是否定义明确。为了构建此数据库，采用了两种识别激波的方法：（1）通过目视检查太阳风等离子体和磁场参数，同时寻找等离子体和磁场参数的突变。这些突变应符合激波特征，才能被视为正向激波（FF）或快速反向激波（FR）；（2）使用一种名为 IPSVM（行星际支持向量机）的自动化激波检测机器学习算法（Isavnin，2017）。

根据 HSD 的文档，激波法向量（$\hat{\mathbf{n}}_{\mathrm{shock}}$）采用混合模式方法（MD3）计算。该方法遵循以下条件：只要速度分量没有缺失，上游和下游磁场的叉积应垂直于激波法线。如果速度分量存在数据缺失，则使用磁场共面性计算法向量，这也是应用最广泛的方法。该方法依据共面性定理，其基本思想是：如果两个向量位于一个平面内，就可以确定该平面所对应的法向量。

对于可压缩激波，激波两侧的磁场与激波法线都位于同一平面内。因此，激波平面内存在多种矢量，包括磁场变化量、上游和下游磁场的叉积（该叉积垂直于共面平面），以及上游或下游磁场与其相对于磁场变化量和整体速度变化量之差的叉积（Paschmann 和 Schwartz，2000年及其中所引文献）。磁共面法通过计算上游和下游磁场的叉积来确定法向量，尽管使用方便，但在 $\theta_{B_n} = 0^\circ$ 或 90°时会失效。无论采用何种方法来确定激波法向矢量及相关参数，其结果都可能存在较大误差，具体取决于为每个激波选取的上游和下游数值。为了准确获得激波参数，必须将激波本身完全排除在上游和下游数据点之外，并且不考虑与激波无关的扰动。然而，上游和下游区间因激波而异，而且在大多数情况下，选择这些区间并没有明确的标准。

随后，我们应用方程1，根据激波法线矢量计算了角度 λ。该数据库的优势在于，对大量

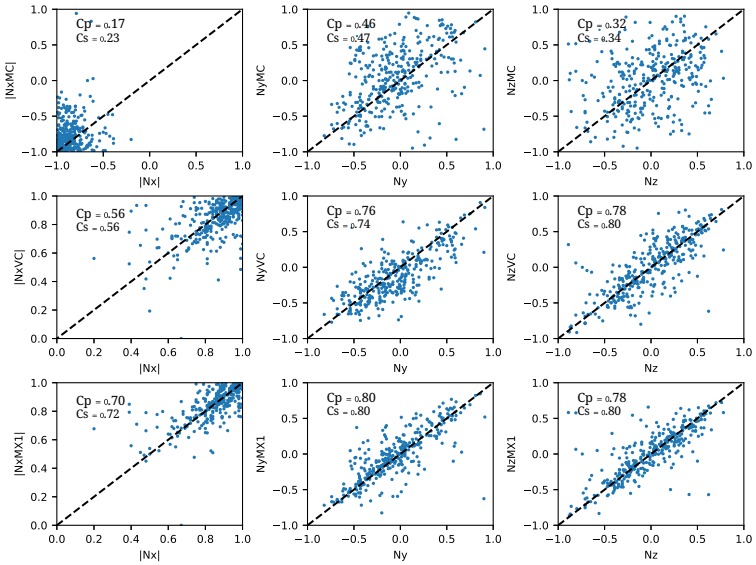

图11。 使用三种方法（CfA激波数据库）、磁共面法、速度共面法和MX1 计算的激波法线各分量与混合模式方法（太阳风层激波数据库）之间的相关性（见第2.2节）。对于每个图表，我们标出了皮尔逊和斯皮尔曼相关系数， C_{p} 和 C_{s}。

航天器数据（见第2节）采用相同的方法，从而确保整个分析过程的一致性。不过，也有其他作者研究了激波参数的检测和表征，包括我们用来获取位置角的法线矢量。因此，接下来我们将比较现有的不同激波法线数据集，以检验这一量是否得到了准确确定。

1天文单位处的激波

对于在1天文单位处探测到的激波，CfA 行星际激波数据库[2] 提供了由 Wind 航天器观测到的行星际激波。因此，我们将在下文探讨该数据库中使用的不同方法，并将位置角的计算结果与日球层激波数据库的结果进行比较。

在 CfA 行星际激波数据库中，事件按年份列出，并对检测到的每个激波进行详细分析。每个激波均采用三种方法推导出的激波法向量进行分析：磁共面法（MC）、速度共面法（VC）和三种混合模式（MX1）。

速度共面法（VC）未用于日球层数据库，但可很好地近似法向量；在高马赫数以及 θ_{B_n} 接近 0° 或 90° 时，该近似有效（Daly 和 Paschmann，2000年）。三种混合模式

[2]lweb.cfa.harvard.edu/shocks/

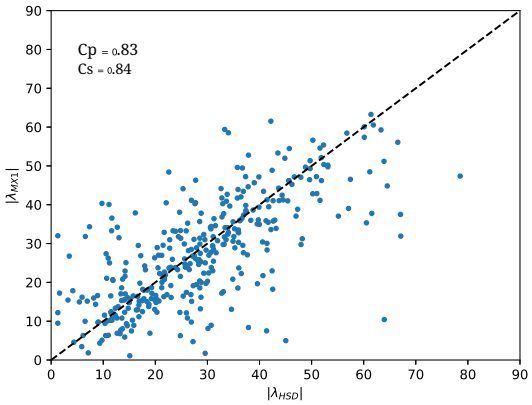

图12。 通过混合模式方法（λ_{HSD}）得出的 λ 与根据MX1（λ_{MX1}）计算的 λ 之间的相关性。左上角添加了皮尔逊和斯皮尔曼相关系数。

方法在下文中称为 MX1，需要等离子体和磁场数据来计算激波法向矢量的各个分量。为此，使用了上游、下游的各个分量以及磁场的大小。

通过比较分析，我们选取了两个目录所报告的检测时间相差不超过 1小时的事件。大多数事件都能在两个目录中找到，因此我们最终得到共 358 个事件，约占日球层激波数据库所报告事件总数的 69%。

图11展示了日球层激波数据库中的法向量各分量（N_x、 N_y、 N_z）与CfA行星际激波数据库中法向分量之间的相关性，分别对应每种方法：磁共面法的（$N_{x\mathrm{MC}}$、$N_{y\mathrm{MC}}$、 $N_{z\mathrm{MC}}$）、速度共面法的（$N_{x\mathrm{VC}}$、 $N_{y\mathrm{VC}}$、 $N_{z\mathrm{VC}}$）以及三种混合模式方法的（$N_{x\mathrm{MX1}}$、 $N_{y\mathrm{MX1}}$、 $N_{z\mathrm{MX1}}$）。

我们使用 x 分量的绝对值来比较正值。这些分量集中在一个较小的区域内（图11，右侧面板）。我们发现，MC 方法与 HSD 结果的相关性最低，如第一行所示；而 MX1 方法在所有分量上的相关性均最高，所有分量的皮尔逊和斯皮尔曼相关系数均约为 0.7∼0.8。

在图12中，我们展示了由混合模式方法的激波法向矢量得出的位置角（λ_{HSD} 在日球层激波数据库中报告）与由 MX1 方法的激波法向矢量得出的位置角（λ_{MX1} 在 CfA 行星际激波数据库中报告）之间的相关性。皮尔逊和斯皮尔曼相关系数（C_{p} 和 C_{s}）均表明这两个 λ 值之间存在很强的相关性，相关系数分别为 0.83 和 0.84。

总之，我们没有发现不同激波法线方法得出的 λ 值之间存在显著差异。最强的相关性是通过以下方式获得的，ZWJ需要保留输入无空格格式？原文“Insummary,we donotfind” 翻译要照结构，句尾 as, literally "最强的相关性是通过……获得的，如，" unclear truncated. Translate "as," as “如，”. “obtained, as.” likely cut from next line perhaps "as" conjunct. Must not invent. final.

这是预期结果，适用于 HSD 和 CfA 行星际激波数据库使用的混合模式方法。由于结果高度相关，相关系数超过 0.8，因此这一比较让我们有信心认为，日球层激波数据库提供的结果相当可靠，同时涵盖了处于不同日心距离的多艘航天器。

参考文献

Acu˜na, M., Curtis, D., Scheifele, J., Russell, C., Schroeder, P., Szabo, A., Luhmann, J.：2008, STEREO/IMPACT 磁场实验。 *Space Sci. Rev.* **136**(1-4)，203。Balogh, A., Beek, T.J., Forsyth, R., Hedgecock, P., Marquedant, R., Smith, E., Southwood, D., Tsurutani, B.：1992，尤利西斯号任务中的磁场探测——仪器与初步科学成果。 *Astron. Astrophys. Suppl.* **92**，221。Bame, S., McComas, D., Barraclough, B., Phillips, J., Sofaly, K., Chavez, J., Goldstein, B., Sakurai, R.：
1992, *Astron. Astrophys. Suppl.* 尤利西 **92** 237
斯号太阳风等离子体实验。，。Berdichevsky, D., Lepping, R., Farrugia, C.：2003，磁通量绳演化的几何考量。 *Phys. Rev. E* **67**(3)，036405。Berdichevsky, D.B., Szabo, A., Lepping, R.P., Vi˜nas, A.F., Mariani, F.：2000，Wind在其最初2.5年间观测到的第23个太阳活动极小期内的行星际快速激波及其相关驱动体。 *J. Geophys. Res.* **105**(A12)，27289。Bougeret, J.-L., Kaiser, M.L., Kellogg, P.J., Manning, R., Goetz, K., Monson, S., Monge, N., Friel, L., Meetre, C., Perche, C., *et al.*：1995, WAVES：Wind号航天器上的射电与等离子体波探测。 *Space Sci. Rev.* **71**(1-4)，231。Burgess, D., Scholer, M.：2015，空间等离子体中的无碰撞激波：结构与加速粒子。Burlaga, L., Chao, J.：
1971, *J. Geophys.* 太阳风 *Res.* **76** 31 7516
中的反向和正向慢激波。( )，。Cane, H.：1985，行星际激波的演化。 *J. Geophys. Res.* **90**(A1)，191。Cane, H., Richardson, I.：2003，1996—2002年近地太阳风中的行星际日冕物质抛射。 *J. Geophys. Res.* **108**(A4)。Cane, H., Sheeley Jr, N., Howard, R.：1987，高能行星际激波、射电辐射与日冕物质抛射。 *J. Geophys. Res.* **92**(A9)，9869。Case, A.W., Kasper, J.C., Stevens, M.L., Korreck, K.E., Paulson, K., Daigneau, P., Caldwell, D., Freeman, M., Henry, T., Klingensmith, B., *et al.*：2020，帕克太阳探测器上的太阳探针杯。 *Astrophys. J., Suppl.* **246**(2)，43。Daly, P.W., Paschmann, G.：
2000, *ISSI Scientific* 多航天 *Report SR-001 (Electronic edition 1.1)*
器数据分析方法。。D´emoulin, P., Janvier, M., Mas´ıas-Meza, J.J., Dasso, S.：2016，1天文单位处行星际日冕物质抛射一般三维形状的定量模型。 *Astron. Astrophys.* **595**，A19。Eselevich, V.：1982，基于实验室实验结果的无碰撞等离子体中的激波结构。 *Space Sci. Rev.* **32**(1-2)，65。Galvin, A.B., Kistler, L.M., Popecki, M.A., Farrugia, C.J., Simunac, K.D., Ellis, L., M¨obius, E., Lee, M.A., Boehm, M., Carroll, J., *et al.*：2008，STEREO天文台上的等离子体与超热离子成分（PLASTIC）探测。 *Space Sci. Rev.* **136**(1)，437。Goldstein, B., Neugebauer, M., Phillips, J., Bame, S., Gosling, J., McComas, D., Wang, Y., Sheeley, N., Seuss, S.：1996，尤利西斯号等离子体参数：纬度、径向和时间变化。Gonz´alez-Esparza, J., Balogh, A., Forsyth, R., Neugebauer, M., Smith, E., Phillips, J.：1996，行星际激波与大尺度结构：尤利西斯号在黄道面内外的观测。 *J. Geophys. Res.* **101**(A8)，17057。Gopalswamy, N.：
2006, *Space Sci. Rev.* 行星际 **124** 1 4 145
日冕物质抛射的性质。(-)，。Gosling, J., Asbridge, J., Bame, S., Hundhausen, A., Strong, I.：1968，行星际激波的卫星观测。 *J. Geophys. Res.* **73**(1)，43。Gosling, J., Hundhausen, A., Pizzo, V., Asbridge, J.：1972，太阳风中的压缩区和稀疏区：Vela 3。 *J. Geophys. Res.* **77**(28)，5442。

Gosling, J., Asbridge, J., Bame, S., Feldman, W.：1976，太阳风速变化：1962—1974年。 *J. Geophys. Res.* **81**(28)，5061。Hoang, S., Lacombe, C., Mangeney, A., Pantellini, F., Balogh, A., Bame, S., Forsyth, R., Phillips, J.：1995，尤利西斯号在黄道面内观测到的行星际激波随日心距离的变化。 *Adv. Space Res.* **15**(8-9)，371。Howard, T., Webb, D., Tappin, S., Mizuno, D., Johnston, J.：2006，利用太阳物质抛射成像仪（SMEI）追踪日冕晕状日冕物质抛射从0至1天文单位的传播并进行空间天气预报。 *J. Geophys. Res.* **111**(A4)。Hundhausen, A.：1976， *Coronal expansion and solar wind.* ADS。Isavnin, A.： 2017 *Ipsvm - machine learning detection of in-* ，。 *terplanetary shock waves* https://www.researchgate.net/project/IPSVM-machine-learning-detection-of-interplanetary-shock-waves。Janvier, M., D´emoulin, P., Dasso, S.：2014，根据原位观测推导的行星际激波平均形状及其与行星际日冕物质抛射的关系。 *Astron. Astrophys.* **565**，A99。Janvier, M., Dasso, S., D´emoulin, P., Mas´ıas-Meza, J., Lugaz, N.：2015，在 1 *J.* 天文 *Geophys. Res.* **120** 5 3328 单位处比较行星际激波与磁云轴构型的通用模型。( )，。Janvier, M., Winslow, R.M., Good, S., Bonhomme, E., D´emoulin, P., Dasso, S., M¨ostl, C., Lugaz, N., Amerstorfer, T., Soubri´e, E., *et al.*：2019，通过叠加历元分析得到的水星、金星和地球处行星际日冕物质抛射的通用磁场强度剖面。 *J. Geophys. Res.* **124**(2)，812。Jian, L., Russell, C., Luhmann, J., Skoug, R.：2006，1995—2004年1天文单位处行星际日冕物质抛射的性质。 *Solar Phys.* **239**(1-2)，393。Jian, L., Russell, C., Luhmann, J., Skoug, R., Steinberg, J.：2008，太阳黄道面附近 5 3 *Solar Phys.* 天文单位处的 **250** 2 375 流相互作用与行星际日冕物质抛射。( )，。Jian, L., Russell, C., Luhmann, J., Galvin, A., MacNeice, P.：2009，多航天器观测：流相互作用及相关结构。 *Solar Phys.* **259**(1)，345。Jian, L., Russell, C., Luhmann, J., Galvin, A., Simunac, K.：2013，STEREO太阳风观测：2007—2011年。载于： *AIP Conference Proceedings* **1539**，191。美国物理联合会。Jian, L., Luhmann, J., Russell, C., Galvin, A.：2019，太阳地球关系观测台（STEREO）对2007—2016年流相互作用区的观测：与日球层电流片、太阳活动周期变化及双点观测的关系。 *Solar Phys.* **294**(3)，1。Kaiser, M.L., Kucera, T., Davila, J., Cyr, O.S., Guhathakurta, M., Christian, E.：2008，STEREO任务简介。 *Space Sci. Rev.* **136**(1-4)，5。Kilpua, E., Lumme, E., Andreeova, K., Isavnin, A., Koskinen, H.：2015，地球轨道附近快速行星际激波的性质与驱动体（ 1995 2013 *J. Geophys. Res.* –）。( )，。 **120** 6 4112 Koval, A., ˇSafr´ankov´a, J., N˘eme˘cek, Z., P˘rech, L., Samsonov, A., Richardson, J.：2005，磁鞘中行星际激波前沿的变形。 *Geophys. Res. Lett.* ( )。Lai, H., **32** 15 Russell, C., Jian, L., Blanco-Cano, X., Anderson, B., Luhmann, J., Wennmacher, A.：2012，内日球层中行星际激波的径向变化：Helios、信使号和STEREO的观测。 *Solar Phys.* **278**(2)，421。Lepping, R., Ac˜una, M., Burlaga, L., Farrell, W., Slavin, J., Schatten, K., Mariani, F., Ness, N., Neubauer, F., Whang, Y., *et al.*： 1995， *Space Sci. Rev.* **71** 1 4 207 Wind磁场探测。(-)，。Luhmann, J., Curtis, D., Schroeder, P., McCauley, J., Lin, R., Larson, D., Bale, S., Sauvaud, J.- A., Aoustin, C., Mewaldt, R., *et al.*：2008， *STEREO IMPACT investigation goals, measure- ments and data products overview* 117 978 0 387 09649 0 ，，施普林格，纽约，NY，。国际标准书号 - - - -。DOI。https://doi.org/10.1007/978-0-387-09649-0 6。M¨uller, D., Cyr, O.S., Zouganelis, I., Gilbert, H.R., Marsden, R., Nieves-Chinchilla, T., Antonucci, E., Auch`ere, F., Berghmans, D., Horbury, T., *et al.*：2020，太阳轨道器任务——科学概述。 *Astron. Astrophys.* **642**，A1。Neubauer, F., Beinroth, H., Barnstorf, H., Dehmel, G., *et al.*：1976，Helios 1号搜索线圈磁力计实验的初步结果。 *J. Geophys. Res.* **42**(1)，599。

Neugebauer, M.,Forsyth, R., Galvin, A., Harvey, K., Hoeksema, J., Lazarus, A., Lepping, R., Linker,J., Mikic, Z., Steinberg, J., *et al.*：1998年，太阳风的空间结构及其与太阳数据和模型的比较。 *J. Geophys. Res.* **103**(A7)，14587。Nieves-Chinchilla, T., Vourlidas, A., Raymond, J., Linton, M., Al-Haddad, N., Savani,N., Szabo, A., Hidalgo,M.：2018年，利用20多年的Wind观测了解行星际日冕物质抛射内部的磁场构型。 *Solar Phys.* **293**(2)，25。Ogilvie, K., Desch,M.：1997, *Adv. Space* Wind号航天器及其早期科学成果。（-），。Ogilvie, K., Chornay,D., Fritzenreiter, R., Hunsaker, F., Keller, J., Lobell, J., Miller, G., Scudder,J., Sittler, E., Torbert, R., *et al.*：1995年，太阳风实验仪——Wind号航天器上的综合等离子体仪器。 *Space Sci. Rev.* **71**(1-4)，55。Ontiveros,V.,Vourlidas, A.：2009年，基于LASCO观测对日冕物质抛射驱动的激波进行定量测量。 *Astrophys. J.* **693**(1)，267。Parks, G.K.：1991年，*Physics of space plasmas. An introduction.* ADS。Paschmann, G., Daly, P.W.：1998年，多航天器数据的分析方法。ISSI科学报告系列 SR-001, 1 1608 280 1998 *ISSI Scientific Reports Series* 欧洲空间局/ISSI，第 卷。国际标准书号 -X，。。Paschmann, G.,Schwartz,S.：2000年，关于多航天器数据分析方法的ISSI专著。载于： *Cluster-II workshop multiscale/multipoint plasma measurements* **449**，99。Pitˇna, A., ˇSafr´ankov´a, J., Nˇemeˇcek,Z., ˇDurovcov´a,T., Kis, A.：2021年，行星际激波上游和下游的湍流。 *Frontiers in Physics* **8**，654。Regnault, F., Janvier,M.,D`emoulin,P., Auch´ere, F.,Strugarek, A., Dasso,S., Noˆus,C.：2020年，ACE数据的20年：叠加历元分析如何揭示行星际日冕物质抛射剖面的普遍特征。 *J. Geophys. Res.*，e2020JA028150。Richardson,I.：2014年，利用多种太阳风特征识别尤利西斯号上的行星际日冕物质抛射。 *Solar Phys.* **289**(10)，3843。Richardson, I.G.：2018年，整个日球层中的太阳风流相互作用区。*Living Rev. Solar Phys.* **15**(1)，1。Richardson, I.G., Cane, H.V.：2010年，太阳活动周23（1996–2009年）期间的近地行星际日冕物质抛射：目录及性质概要。 *Solar Phys.* **264**(1)，189。Rosenbauer, H., Schwenn, R., Marsch, E., Meyer, B., Miggenrieder,H.,Montgomery, M., M¨uhlh¨auser,K.,Pilipp, W., Voges,W.,Zink, S.：1977年，Helios等离子体实验初步成果综述。 *Journal of Geophysics Zeitschrift Geophysik* **42**，561。Russell, C.,Mellott,M.,Smith,E.,King,J.：1983年，行星际激波的多航天器观测：利用四艘航天器确定激波法线。 *J. Geophys. Res.* (A)，。**88** 6 4739 Sagdeev,R.Z.,Kennel, C.F.：1991年，无碰撞激波。 *Sci Am.* **264**(4)，106。Samsonov, A.,Nˇemeˇcek, Z.,ˇSafr´ankov´a,J.：2006年，行星际激波穿过磁鞘传播的数值磁流体力学建模。 *J. Geophys. Res.* **111**(A8)。Smith, C.W., L'Heureux, J., Ness, N.F., Acuna, M.H., Burlaga, L.F., Scheifele, J.：1998年，ACE磁场实验。 *The advanced composition explorer mission*，613。Thernisien,A.：2011年，渐进圆柱壳模型在日冕物质抛射三维重建中的实现。 *Astrophys. J., Suppl.* **194**(2)，33。Wenzel, K.,Marsden,R., Page, D., Smith, E.：1992, *Astron. Astrophys.* 尤利西斯号任务。，。Winslow, R.M., Lugaz, N., Philpott,L.C., Schwadron, N.A., Farrugia, C.J.,Anderson,B.J.,Smith,C.W.：2015年，基于信使号在水星轨道上的观测得到的行星际日冕物质抛射。 *J. Geophys. Res.* **120**(8)，6101。