arXiv:2304.08254v1 [physics.space-ph] 17 Apr 2023

撞击角控制的行星际激波地效应：以往研究、最新进展与未来工作

Denny M. Oliveira [1, 2, *]

[1]戈达德行星日球物理研究所，马里兰大学巴尔的摩县分校，美国马里兰州巴尔的摩 [2]地球空间物理实验室，美国国家航空航天局戈达德航天中心，美国马里兰州格林贝尔特

通讯作者*：Denny M. Oliveira denny@umbc.edu

摘要

行星际（IP）激波是太阳风中常见的扰动。行星际激波的冲击可能在地球磁层顶、内磁层、电离层、热层以及地面磁场中引发多种空间天气效应。激波入射角，即激波法向量与日地连线之间的夹角，已被证明是控制激波地球效应的一个重要参数。Oliveira 和 Samsonov (2018)撰写的一篇详尽综述总结了截至当时已知的有关冲击波撞击角与地磁活动的所有研究；然而，自 Oliveira 和 Samsonov (2018)以来，该主题已有一些进展。本小型综述的主要目标是据作者所知，总结迄今为止该主题的所有成果。最后，这篇小型综述还提出了一些关于未来开展行星际激波撞击角地球效应研究的建议和构想。

行星际激　　波、激波几何形态、地磁活动、地球空间响应、电离层响应、地面响应　　se

1 引言

行星际（IP）激波是太阳风扰动，会直接触发磁层-电离层-热层（MIT）系统中的地磁活动。IP 激波会迅速在地球同步轨道（Wang 等人，2009）、磁尾（Huttunen 等人，2005）和地面（Smith 等人，1986；Echer 等人，2005；Smith 等人，2020；Hajra 等人，2020）触发磁突然脉冲；增强场向电流（Belakhovsky 等人，2017；Kasran 等人，2019），触发极光亚暴（Kokubun 等人，1977；Zhou 和 Tsurutani，2001；Yue 等人，2010），引发昼侧极光（Zhou 和 Tsurutani，1999；Tsurutani 等人，2001；Zhou 等人，2003），影响辐射带（Schiller 等人，2016；Bhaskar 等人，2021），激发磁层超低频（ULF）波（Kangas 等人，2001；Hartinger 等人，2022）；还会引发地磁感应电流（GICs）（Carter 等人，2015；Belakhovsky 等人，2017；Tsurutani 和 Hajra，2021）、电离层总电子含量变化（Chen 等人，2023），以及热层中性质量密度增加，从而加剧卫星轨道阻力（Shi 等人，2017；Oliveira 等人，2017；Oliveira 和 Zesta，2019）。因此，在 MIT 系统的许多区域都能观测到与空间天气相关的效应。

当驱动气体相对于上游太阳风的速度大于局部磁声波速度时，就会形成行星际快速前向激波（Landau 和 Lifshitz，1960年；Priest，1981年；Kennel等人，

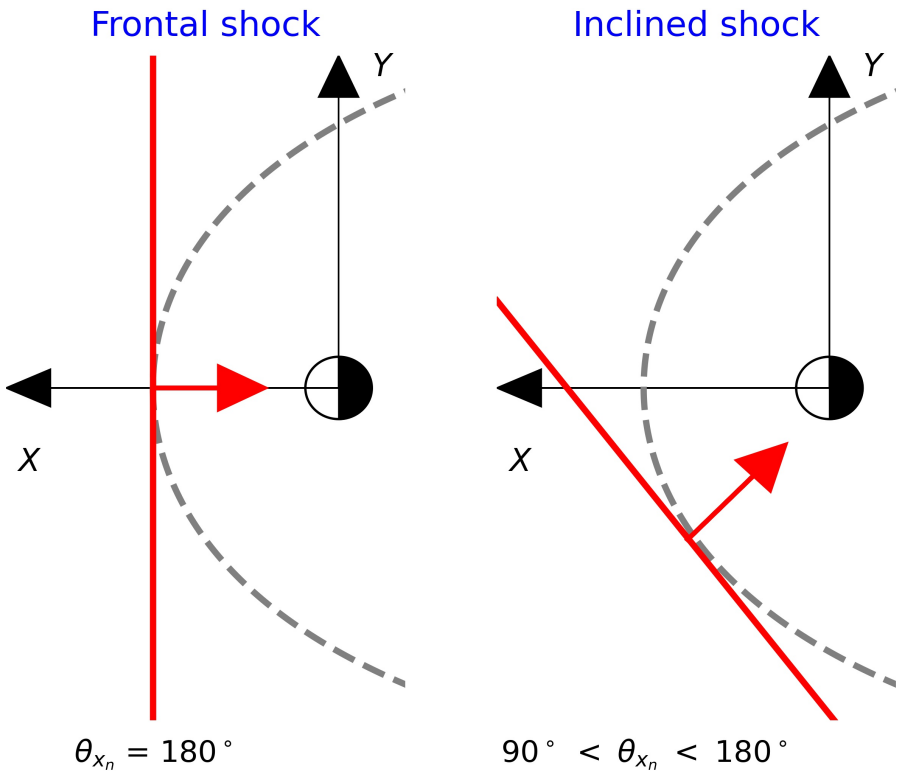

图1。 激波法线方向的两种示意图：左侧为纯正面激波（θ_{x_n}= 180°）；右侧为倾斜激波（$90° < \theta_{x_n} < 180°$）。有关激波角及其计算方法的更多详情，请参见Oliveira 和 Samsonov (2018)。静磁层顶（灰色虚线）由Shue 等人 (1998)经验模型计算得出。

1985年）。最常见且最具地球效应的激波类型称为快速前向激波，它向远离太阳的方向传播（Tsurutani 等人，2011；Oliveira，2017）。在激波的诸多其他性质中，激波入射角 θ_{x_n} 已被证明是控制激波随后触发的地磁活动的一个重要因素（参见 Oliveira 和 Samsonov，2018 的综述）。在这篇小型综述中，迎头激波以 $\theta_{x_n} = 180°$ 表示，而倾斜激波则有 $90° < \theta_{x_n} < 180°$。随着这一角度减小，激波相对于日地连线变得更加倾斜。图1展示了激波法线方向的示意图。通常，由日冕物质抛射（CME）的磁云（MC）部分驱动的激波近乎正面（Klein 和 Burlaga，1982），而由共转相互作用区（CIRs）驱动的激波则更倾斜（相对于地心太阳黄道坐标系x轴），因为快速流压缩慢速流所形成的区域往往沿帕克螺旋分布（Tsurutani 等人，2006）。该角度通过兰金-雨贡纽条件计算，这些条件利用激波前沿两侧的能量守恒和动量守恒（Priest，1981；Berdichevsky 等人，2000）。由于这篇小型综述关注的是不同倾斜程度的行星际激波触发的地磁活动，我们建议有兴趣的读者查阅其他关于激波法线计算方法的参考资料（例如，Tsurutani 和 Lin，1985；Schwartz，1998；Tsurutani 等人，2011；Oliveira，2017）。

自Oliveira 和 Samsonov（2018）综述不同方向的行星际激波触发的地磁活动以来，人们对这一研究课题的认识取得了一些进展。这篇小型综述旨在总结该领域的所有成果，包括新的研究，并指出这一领域仍需开展更多工作。

2 地面磁突然脉冲

关于激波撞击角与随后地磁活动之间关系的首个明确报道，或许来自Takeuchi 等人（2002）。作者清楚地表明，Wind 卫星观测到的一次倾角很大的行星际激波扫过磁层时耗时异常长，同时缓慢地压缩磁层。Geotail 卫星在磁层中观测到总压强（热压强加磁压强）缓慢、逐渐升高，地面磁力仪观测到磁场缓慢、逐渐增强，这些现象都与该行星际激波较大的激波倾角有关。Takeuchi 等人（2002）认为，这些效应是由磁层的非对称压缩造成的，导致磁层-电离层系统中的电流以非对称且缓慢的方式响应。此外，Takeuchi 等人（2002）提出了地球有效磁层距离这一概念，即磁层受压缩期间，激波沿其法线扫过的距离。之后，Guo 等人（2005）通过数值磁流体力学模拟证实了这些结果。他们模拟了两个强度相近、倾角不同的激波，一个为正面激波，另一个为倾斜激波。作者指出，激波压缩后，磁层磁场和电离层跨极冠电势最终达到相近的数值，但倾斜激波造成的效应需要更长时间才会显现。Wang 等人（2005）对法线方向相近的激波进行了数值模拟，并发现地球同步轨道处的磁场响应也呈现类似特征（倾斜激波引发的响应较慢，而正面激波引发的响应较快）。

这些早期观测和数值模拟研究后来得到了 Wang 等（2006）的证实，他们对不同倾斜角激波引起的地面磁力仪响应进行了统计分析。他们的主要结论是，激波越快、越正面，突然脉冲的上升时间就越短。Selvakumaran 等（2017）对同一主题进行了统计分析，并报告了类似的结论。Samsonov 等（2015）在对倾斜激波撞击磁层的数值模拟中指出了晨昏不对称性。作者指出，在黄昏扇区中，一个人工地面磁力仪所在位置的计算磁场出现了过冲；激波首先在该处接触磁层顶。然而，晨侧另一个台站并未明显出现过冲。随后，研究者将模拟和观测中晨侧缺乏过冲的现象解释为：晨侧压缩之前和之后都发生了磁层顶膨胀。通过对位于与人工台站相同扇区的真实地面磁力仪进行磁场观测，也证实了这些结果。Samsonov 等（2015）将这种晨昏不对称性归因于倾斜激波具有很强的太阳风速度 v_y 分量。正如 Samsonov（2011）在理论上指出的那样，很强的太阳风 v_y 分量会大幅增加 y 方向上的太阳风冲压，从而造成 Samsonov 等（2015）在地面磁场观测和模拟中发现的显著晨昏不对称性。对地面极强突然脉冲的历史观测表明，这种响应是由极快且近乎正面的激波撞击地球磁层所致（Araki，2014；Oliveira 和 Ngwira，2017；Love 等，2019b,a；Hayakawa 等，2020b,a，2021a,b）。

地球有效磁层距离这一概念由 Rudd 等人(2019) 进行了研究。他们对 500 多个不同倾角的行星际激波开展了统计研究。作者报告称，较短的突然脉冲上升时间与速度更快、方向更接近正面的激波有关，这证实了上述实验和模拟结果（Wang 等人，2005，2006）。Rudd 等人(2019) 利用各个激波的速度及其后续突然脉冲上升时间发现，与速度较慢、倾角较大的激波相比，速度较快、方向近乎正面的激波在压缩磁层时传播的距离相对较短。这些结果证实了 Takeuchi 等人(2002) 的预测。

3 亚暴发生与强度

Oliveira 和 Raeder (2014) 对三个具有不同倾角和强度的行星际激波撞击地球磁层开展了全球数值模拟。两个激波为倾斜激波（θ_{x_n}= 150°），另一个则是纯正面激波（θ_{x_n}= 180°）。迎头激波和其中一个倾斜激波属于中等强度事件，另一个倾斜激波则是强事件。冲击波法向倾角是相对于 GSE 子午面（xz 平面）而言的。作者发现，迎头激波情形下的整体地磁响应更快、强度也更大。结果表明，只有在正面激波情形下，才在激波撞击数分钟后观察到符合 Akasofu (1964) 亚暴发展框架的明显亚暴活动。作者得出结论，这种响应是由于磁尾迅速而有效地受到压缩，从而释放了先前储存在磁尾中的电磁能；而在倾斜激波情形下，即使是强倾斜激波，也未明显出现这种情况。

随后，Oliveira 和 Raeder (2015) 对 Wind 卫星和 Advanced Composition Explorer卫星在 L1点观测到的 400 多个不同倾角激波的地面磁力仪响应进行了统计研究。作者特别考察了每次事件的 SuperMAG 向西极光电流指数 SML。Oliveira 和 Raeder (2015) 发现，激波速度越快、越接近正面入射，SML 响应就越强烈，这表明激波入射角会控制随后发生的亚暴活动。关于夜侧极光功率强度的类似结果由Oliveira 等人(2016年) 报道。因此，这些实验结果证实了 Oliveira 和 Raeder(2014) 关于行星际激波倾角对后续亚暴活动影响的预测。

需要注意的是，南向 IMF B_z 引起的磁层预调制效应，是亚暴触发的重要因素（Kokubun 等人，1977；Zhou 和 Tsurutani，2001；Yue 等人，2010；Hajra 和 Tsurutani，2018a；Sitnov 等人，2019）。正如 Oliveira 和 Raeder（2014）通过模拟、Oliveira 等人（2021）通过观测所展示的，近乎迎头的激波会增强上游 IMF B_z 分量，使下游 IMF B_z 分量变得更加负向，进而增强亚暴的能量释放，这一点最早由 Tsurutani 等人（1988）揭示。这种突然而剧烈的磁尾能量释放可以解释为何超级亚暴比强烈亚暴强得多且持续时间更长（Tsurutani 和 Hajra，2023）。因此，激波入射角在超级亚暴触发中的潜在作用仍有待研究。

4 超低频波

在数值模拟中，Oliveira 和 Raeder (2014) 还报告了行星际激波入射角对超低频波发生的影响。他们指出，正面激波触发了周期为 ∼5 分钟的明显超低频波扰动，但在两种倾斜激波中均未明显观察到这种响应，即使在强倾斜激波入射的情况下也是如此。Oliveira 和 Raeder (2014) 将这一效应归因于正面激波引发的对称压缩有效激发了磁层-电离层系统中的腔模（Samson 等人，1992；Hughes，1994；Lakhina 和 Tsurutani，2020）。另一方面，倾斜激波由于造成非对称磁层压缩，无法触发这些腔模。 Belakhovsky 等人 (2017) 利用这些模拟结果解释了高度倾斜激波撞击磁层后缺乏超低频波活动的现象。 Takahashi 等人 (2018) 也指出，近乎迎头的激波撞击磁层后会出现强烈的超低频波活动。 Baker(2019) 报告称，与高度倾斜的激波相比，近乎正面的激波会触发波功率谱更强的 Pc5波。

Oliveira 等人（2020）开展了一项比较研究，考察了两种强度相近但倾斜程度截然不同的行星际激波所触发的超低频活动。作者研究了地球空间及地面上的超低频波，发现近乎迎头的激波撞击所引起的波响应更强。这种响应通过波幅和功率谱来表征。此外，Oliveira 等人（2020）提出，正面激波只能在磁层中激发奇模波，而倾斜激波则能在磁层中同时激发奇模波和偶模波。比较两种激波的结果发现，功率谱密度峰值呈周期性出现且“不同相”，这为该观点提供了支持。这些结果证实了Oliveira 和 Raeder(2014) 的预测，但要确认此类波响应的统计特性，仍需针对地球空间及地面上不同方向的行星际激波所引起的超低频波响应开展全面的统计研究。

5 地面DB/DT 变化

地面 dB/dt 变化是导致地磁感应电流的空间天气驱动因素，可能对电力基础设施和输电线路造成危害（Pirjola，2002；Oliveira 和 Ngwira，2017；Ngwira 和 Pulkkinen，2019）。Oliveira 等人（2018）首次阐明了激波撞击角与随后地面 dB/dt 变化之间的联系。作者发现，激波速度越快、入射越正面，激波撞击后 20 分钟内产生的地面 dB/dt 变化就越强烈，尤其是在高纬度地区。关于低纬度响应，Oliveira 等人（2018）报告称，赤道处超过 100 nT/min 阈值的高 dB/dt 变化，与几乎迎头撞击磁层的激波相关，撞击发生在地方时正午前后。正如 Carter 等人（2015）此前提出的，这类 dB/dt 增强是由向阳面电离层赤道电急流增强所致。

Oliveira 等人（2021）通过比较案例研究，探讨了由倾角不同的两次行星际激波触发的两场极强亚暴期间的 dB/dt 响应。Hajra 和 Tsurutani（2018a）将超强亚暴定义为 SML 最低值 $<$ –2500 nT 的事件，将强亚暴定义为 SML 最低值介于 –2500 nT $<$ SML $\leq$ –2000 nT 之间的事件。Oliveira 等人（2021）观察到，近乎正面的激波引发了超强亚暴，而高度倾斜的激波引发了强亚暴；这两场亚暴都发生在南向 IMF B_z 条件持续一段时间之后（Hajra 和 Tsurutani, 2018a）。作者还观察到，近乎正面的激波所对应的 dB/dt 响应更强、出现得更快，而高度倾斜的激波所对应的 dB/dt 响应较弱且出现较晚。此外，在超强亚暴期间，dB/dt 峰值超过 1.5 nT/s 和 5 nT/s 的地理区域范围更大，峰值出现也更早。此类 dB/dt 阈值可能对输电线路和基础设施造成损害（Molinski 等人，2000；Pulkkinen 等人，2013）。Oliveira 等人（2021）指出，这些 dB/dt 峰值在时间上与 THEMIS 卫星计划的亚暴期间事件与宏观相互作用历史（THEMIS）卫星及洛斯阿拉莫斯国家实验室航天器在磁尾磁午夜附近观测到的强烈高能粒子注入相吻合。近乎迎头的激波所触发的高能粒子注入发生得更快、强度也更高；而高度倾斜的激波所触发的高能粒子注入强度较低、发生较慢，并分为两个阶段，呈现双峰特征，这是由非对称磁层压缩造成的。在超强亚暴期间，利用 THEMIS 全天空图像观测到了明显而强烈的极光增亮以及极光椭圆向极扩展；但在强亚暴期间，未能清晰观测到这些现象。

地面B/dt 响应中，由不同倾角激波触发的半球间不对称性已由 Xu 等人 (2020) 报道。行星际激波入射角以太阳磁坐标表示，以突出南北向磁场响应（Laundal 和 Richmond，2017）。Xu 等人(2020) 使用了由南极洲和格陵兰岛地面磁力仪提供的共轭磁场数据

结果发现，通常首先受到激波冲击的半球会最先出现更强烈的 $\mathrm{d}B/\mathrm{d}t$ 响应。

6 弓形激波、场向电流和横尾电流

从理论上研究了倾斜行星际激波撞击地球弓形激波所产生的响应，研究者包括Grib 和 Pushkar (2006)。他们考察了一个激波对黄昏侧弓形激波的撞击，其 θ_{x_n}= 135° 。通过在黄昏扇区沿弓形激波表面的不同位置数值求解 Rankine–Hugoniot方程，Grib 和 Pushkar(2006)发现，激波撞击后，不连续结构沿磁鞘传播，并呈现明显的晨昏不对称性；黄昏侧翼的局部密度几乎比 ∼ 20% 高。在类似分析中，Grib 等人(2016年)发现，在倾斜的太阳风不连续结构撞击弓形激波之前，弓形激波前方就已出现等离子体不规则结构。

在数值模拟中，Oliveira 和 Raeder (2014)发现，与另外两种倾斜激波相比，正面激波引发的场向电流（FAC）响应更快、强度更高。作者指出，正面激波会在磁午夜附近引发强烈的场向电流活动。Oliveira 和 Raeder (2014)将这一场向电流响应与作者在模拟中观察到的亚暴活动联系起来，而倾斜激波则不会产生此类效应。Selvakumaran 等人(2017)在对不同方向激波进行的数值模拟中发现了类似结果。

Shi 等人(2019)利用主动磁层与行星电动力学响应实验项目提供的场向电流数据，研究激波入射角如何影响随后的电流动力学。作者发现，激波入射后场向电流迅速增强；激波越接近正面入射，场向电流的发展速度越快、强度越大。Shi 等人(2019)还发现，与高度倾斜的激波相比，近乎正面入射的激波会引发更强的电流，尤其是在地方正午附近的日侧区域、晨侧I区电流以及昏侧II区电流中。

在Samsonov 等人（2015）的数值模拟中发现，倾斜行星际激波撞击磁层后，横尾电流发生了严重变形。这种效应是由太阳风下游区域中较强的v_y 分量所致，它使东西方向的动压显著增强（Samsonov，2011）。Grygorov 等人（2014）利用多卫星数据观测了行星际激波对磁尾造成的影响（X = ∼ $-240R_E$）。研究人员发现，倾斜激波压缩磁层后（∼ 30°），磁尾发生了严重偏转（θ_{x_n}∼ 150°），原因是东西方向上强烈的太阳风冲压（Samsonov，2011）。

7 结论与未来工作

在这篇小型综述中，结合对 Oliveira 和 Samsonov（2018）所提供综述的部分更新，我总结了许多关于不同撞击角的行星际激波所触发地磁活动的实验和建模研究。据作者所知，这是目前关于该主题最及时的报告。正如预期，本文所述的大多数研究都得出结论：激波速度越快、越趋于正面入射，随后产生的地磁活动就越强。此外，即使在没有激波的太阳风期间，太阳风流动角也会对随后的地球效应发挥重要作用。例如，Rout 等 （2017）发现，当太阳风方位流动角小于 ∼6° （位于 L1点）时，共转相互作用区的周期性赤道电离层响应更强。此外，Cameron 等（2019）发现，当太阳风前沿法线位于赤道面内，并以 45°的角度与帕克螺旋对齐时，地面磁力仪测量所显示的地磁活动更强。尽管这

篇小型综述展示了许多研究工作所取得的若干进展，但我仍然发现了一些值得进一步研究的领域，这些领域涉及激波入射角对随后地球效应的控制。具体包括：

1. 辐射带响应。行星际激波入射角如何控制内磁层中的粒子加速？以及内磁层中的粒子群流动？激波入射角如何控制内磁层中电子密度等的增强和骤降？激波入射角如何控制磁层相对论电子通量的损失（例如Tsurutani 等人，2016年；Hajra 和 Tsurutani，2018b）？

2. *ULF* 波活动。 激波入射角是否会控制不同位置的 ULF 波（Pc4-5， ∼2-22 mHz）振幅/功率谱？对于不同的入射角，Pc4-5 波能量如何随地方时变化并传播至整个磁层？激波入射角是否会控制超低频波的场向模态结构，正如Oliveira 等人 (2020)所提出的？

3. 地面 dB/dt 变化的统计特性。继Oliveira 等人(2021)的比较研究之后，合乎逻辑的下一步是对不同倾角激波引发的亚暴期间地面 $\mathrm{d}B/\mathrm{d}t$ 变化进行统计分析。非对称磁层压缩条件下，地球空间中触发亚暴的条件是什么？$\mathrm{d}B/\mathrm{d}t$变化的纬向范围和强度如何随激波入射角而变化？

4. 热层中性质量密度响应。激波入射角如何影响低地球轨道高磁纬度区域的热层中性质量密度响应？这种密度变化会如何影响后续的卫星轨道阻力？共转相互作用区驱动的激波的撞击角如何影响即时密度响应，以及随后出现的方位向太阳风流和由此产生的卫星轨道阻力效应？

最后，我建议建模人员在数值模拟中考虑行星际激波的倾角。正如 Welling 等人 (2021) 所指出的，在一次速度极快、正面撞击磁层的日冕物质抛射之后，地面 $\mathrm{d}B/\mathrm{d}t$ 变化有所增强，并延伸至非常低的磁纬度。此外，先前的观测也支持这一点：太阳风中观测到的大多数激波都呈中度倾斜，其激波法向相对于日地连线的偏差为 ∼40° （Oh 等人，2007；Kilpua 等人，2015；Oliveira 和 Samsonov，2018； Rudd 等人，2019）。

利益冲突声明

作者声明，本研究是在不存在任何可能被视为潜在利益冲突的商业或财务关系的情况下开展的。

作者贡献

这篇小型 综述文章由作者撰写，未得到其他人的任何直接贡献 rs.

资金支持

本研究得以完成，得益于美国国家航空航天局 HGIO计划通过编号为 80NSSC22K0756 的资助提供的经费支持。

参考文献

Akasofu, S.-I. (1964). 极光亚暴的演变。《行星与空间科学》12, 273–282. doi:10.1016/0032-0633(64)90151-5 Araki, T. (2014). 自1868年以来规模最大的地磁 sudden commencement (SC)。《地球、行星与空间》66. doi:10.1186/s40623-014-0164-0

Baker, A. B. (2019). 行星际冲击波入射角对高纬度地面磁力仪观测到的 *Pc5*波发生率及其特性的影响. 硕士论文，弗吉尼亚理工大学，布莱克斯堡，弗吉尼亚州 Belakhovsky, V. B., Pilipenko, V., Ya. A. Sakharov, Lorentsen, D. L., and Samsonov, S. N. (2017). 2012年1月24日行星际冲击波引发的地磁和电离层响应。《地球、行星与空间》69, 1–25. doi:10.1186/s40623-017-0696-1 Berdichevsky, D. B., Szabo, A., Lepping, R. P., Vi˜nas, A. F., and Mariani, F. (2000). Wind 卫星在其运行的前2.5年期间观测到的行星际快速激波及其相关驱动体，涵盖第23太阳活动极小期。《地球物理研究杂志》105, 27,289– 27,314. doi:10.1029/1999JA000367 Bhaskar, A., Sibeck, D., Kanekal, S. G., Singer, H. J., Reeves, G., Oliveira, D. M., et al. (2021). 地球同步轨道处快速反向激波引发的辐射带响应。《天体物理学杂志》910, 154. doi:10.3847/1538-4357/abd702 Cameron, T. G., Jackel, B. J., and Oliveira, D. M. (2019). 利用互信息研究不同方向的太阳风相位前沿的地球效应。《地球物理研究杂志：空间物理》124, 1582–1592. doi:10.1029/2018JA026080 Carter, B. A., Yizengaw, E., Pradipta, R., Halford, A. J., Norman, R., and Zhang, K. (2015). 行星际冲击波及其在赤道产生的地磁感应电流。《地球物理研究快报》42, 6554–6559. doi:10.1002/2015GL065060 Chen, X., Zong, Q., Hao, Y., Li, Q., Zhang, D., and Zhang, H. (2023). 行星际冲击波激发脉冲的传播：全球导航卫星系统的新观测。《地球物理研究杂志：空间物理》128, e2022JA030975. doi:10.1029/2022JA030975 Echer, E., Gonzalez, W. D., Dal Lago, A., Vieira, L. E. A., Guarnieri, F. L., Gonzalez, A. L. C., et al. (2005). 太阳活动峰年（2000年）和太阳活动极小期（1995—1996年）期间的行星际冲击波与突发脉冲。《空间研究进展》36, 2313–2317. doi:10.1016/j.asr.2005.04.030 Grib, S. A. and Pushkar, E. A. (2006). 太阳MHD间断面与弓形激波非线性相互作用的不对称性。《地磁学与空气动力学》46, 417–423. doi:10.1134/S0016793206040025 Grib, S. A., Pushkar, E. A., and Leora, S. N. (2016). 地球磁层前方太阳风中等离子体非均匀性的若干来源。《地磁学与空气动力学》56, 892–896. doi:10.1134/S0016793216070070˘Grygorov, K., P˘rech, L., Safr´ankov´a, J., N˘eme˘cek, Z., and Goncharov, O. (2014). 行星际冲击波到达后远磁尾的响应。《行星与空间科学》103, 228–237. doi:10.1016/j. pss.2014.07.016 Guo, X.-C., Hu, Y.-Q., and Wang, C. (2005). 不同方向的行星际冲击波撞击地球磁层。《中国物理快报》22, 3221–3224. doi:10.1088/0256-307X/22/12/067 Hajra, R. and Tsurutani, B. T. (2018a). 行星际冲击波引发磁层超级亚暴（SML < -2500 nT）：异常的极光形态与能量流。《天体物理学杂志》858. doi:10.3847/1538-4357/aabaed Hajra, R. and Tsurutani, B. T. (2018b). 磁层“杀手级”相对论电子骤降（RED）及其再充填：一个周期性过程。载于地球空间极端事件：起源、可预测性与后果，N. Buzulukova 编（马萨诸塞州剑桥：Elsevier），373–400. doi:10.1016/B978-0-12-812700-1.00014-5 Hajra, R., Tsurutani, B. T., and Lakhina, G. S. (2020). 2017年9月的复杂空间天气事件。《天体物理学杂志》899. doi:10.3847/1538-4357/aba2c5 Hartinger, M. D., Takahashi, K., Drozdov, A. Y., Shi, X., Usanova, M. E., and Kress, B. (2022). ULF波建模、效应与应用：成果、最新进展与未来展望。*Frontiers*

天文学与空间科学9. doi:10.3389/fspas.2022.867394 Hayakawa, H., Blake, S. P., Bhaskar, A., Hattori, K., Oliveira, D. M., and Ebihara, Y. (2021a). 1941年2月/3月的极端空间天气事件。《天体物理学杂志》908. doi:10.3847/1538-4357/ abb772 Hayakawa, H., Ebihara, Y., Pevtsov, A., Bhaskar, A., Karachik, N., and Oliveira, D. M. (2020a). 1946年3月极端日地风暴的强度与时间序列。《皇家天文学会月刊》497, 5507–5517. doi:10.1093/mnras/staa1508 Hayakawa, H., Oliveira, D. M., Shea, M. A., Smart, D. F., Blake, S. P., Hattori, K., et al. (2021b). 1940年3月21日至27日的极端太阳风暴和地磁暴。《皇家天文学会月刊》doi:10.1093/mnras/stab3615 Hayakawa, H., Ribeiro, P., Vaquero, J. M., Gallego, M. C., Knipp, D. J., Mekhaldi, F., et al. (2020b). 1903年10月/11月的极端空间天气事件：一次来自宁静太阳的爆发。《天体物理学杂志快报》897, L10. doi:10.3847/2041-8213/ab6a18 Hughes, W. J. (1994). 磁层超低频波：兼具历史视角的教程。载于《磁层超低频波的太阳风源，地球物理专著系列》，编者：M. J. Engebretson、K. Takahashi 和 M. Scholer（华盛顿特区：美国地球物理联合会），第81卷，1–11。doi:10.1029/GM081p0001 Huttunen, K. E. J., Slavin, J., Collier, M., Koskinen, H. E. J., Szabo, A., Tanskanen, E., et al. (2005). Cluster卫星观测到由行星际冲击波和压力增大引起的磁尾突然脉冲。《地球物理年鉴》23, 609–624. doi:10.5194/angeo-23-609-2005 Kangas, J., Kultima, J., Guglielmi, A., Potapov, A., and Hayashi, K. (2001). 行星际冲击波对ULF波活动的影响：1999年9月22日风暴突然开始事件的案例研究。《地球、行星与空间》53, 1177–1182. doi:10.1186/BF03352413 Kasran, F. A. M., Jusoh, M. H., Adhikari, B., and Rahim, S. A. E. A. (2019). 行星际磁冲击波到达期间场向电流（FAC）的行为。《物理学杂志：会议系列》1152. doi:10.1088/1742-6596/1152/1/012027 Kennel, C. F., Edmiston, J. P., and Hada, T. (1985). 无碰撞激波研究的四分之一个世纪。载于《日球层中的无碰撞激波：教程综述，地球物理专著系列》，编者：R. G. Stone 和 B. Tsurutani（华盛顿特区：美国地球物理联合会），第34卷，1–36。doi:10.1029/ GM034p0001 Kilpua, E. K. J., Lumme, K., E. Andr´eeov´a, Isavnin, A., and Koskinen, H. E. J. (2015). 地球轨道附近快速行星际激波的性质及其驱动因素（1995–2013）。《地球物理研究杂志：空间物理》120, 4112–4125. doi:10.1002/2015JA021138 Klein, L. W. and Burlaga, L. F. (1982). 1天文单位处的行星际磁云。《地球物理研究杂志》87, 613–624. doi:10.1029/JA087iA02p00613 Kokubun, S., McPherron, R. L., and Russell, C. T. (1977). 太阳风不连续结构触发亚暴。《地球物理研究杂志》82, 74–86. doi:10.1029/JA082i001p00074 Lakhina, G. S. and Tsurutani, B. T. (2020). 电磁脉动与磁暴。载于《固体地球地球物理学百科全书：地球科学百科全书系列》，编者：H. Gupta（多德雷赫特，荷兰：Springer, Cham），1–5。doi:10.1007/978-3-030-10475-7 156-1 Landau, L. D. and Lifshitz, E. M. (1960). 连续介质电动力学（英国牛津：Pergamon Press） Laundal, K. M. and Richmond, A. D. (2017). 磁坐标系。《空间科学评论》206, 1–33. doi:10.1007/s11214-016-0275-y

Love, J. J., Hayakawa, H., and Cliver, E. W. (2019a). 1921年5月纽约铁路超级风暴的强度与影响。《空间天气》17, 1281–1292. doi:10.1029/2019SW002250 Love, J. J., Hayakawa, H., and Cliver, E. W. (2019b). 1909年9月磁超级风暴的强度。《空间天气》17, 37–45. doi:10.1029/2018SW002079 Molinski, T. S., Feero, W. E., and Damsky, B. L. (2000). 保护电网免受太阳风暴影响。《*IEEE Spectrum*》37, 55–60. doi:10.1109/6.880955 Ngwira, C. M. and Pulkkinen, A. (2019). 地磁感应电流简介。载于《从太阳到电网的地磁感应电流》，编者：J. L. Gannon、A. Swidinsky 和 Z. Xu（华盛顿特区：美国地球物理联合会），3–13。doi:10.1002/9781119434412.ch1 Oh, S. Y., Yi, Y., and Kim, Y. H. (2007). 在1天文单位处观测到的行星际前向激波驱动因素的太阳活动周变化。《太阳物理学》245, 391–410. doi:10.1007/s11207-007-9042-2 Oliveira, D. M. (2017). 行星际空间中的磁流体力学激波：理论综述。《巴西物理学杂志》47, 81–95. doi:10.1007/s13538-016-0472-x Oliveira, D. M., Arel, D., Raeder, J., Zesta, E., Ngwira, C. M., Carter, B. A., et al. (2018). 不同撞击角和速度的行星际冲击波所引起的地磁感应电流。《空间天气》16, 636–647. doi:10.1029/2018SW001880 Oliveira, D. M., Hartinger, M. D., Xu, Z., Zesta, E., Pilipenko, V. A., Giles, B. L., et al. (2020). 行星际冲击波撞击角控制磁层超低频波活动：波幅、频率和功率谱。《地球物理研究快报》47, e2020GL090857. doi:10.1029/ 2020GL090857 Oliveira, D. M. and Ngwira, C. M. (2017). 地磁感应电流：原理。《巴西物理学杂志》47, 552–560. doi:10.1007/s13538-017-0523-y Oliveira, D. M. and Raeder, J. (2014). 撞击角对行星际激波地球效应的控制。《地球物理研究杂志：空间物理》119, 8188–8201. doi:10.1002/2014JA020275 Oliveira, D. M. and Raeder, J. (2015). 撞击角对行星际激波地球效应的控制：统计研究。《地球物理研究杂志：空间物理》*style id='21'>120, 4313–4323. doi:10.1002/ 2015JA021147 Oliveira, D. M., Raeder, J., Tsurutani, B. T., and Gjerloev, J. W. (2016).* 行星际激波倾角对夜侧极光功率强度的影响。《巴西物理学杂志》*style id='23'>46, 97–104. doi:10.1007/s13538-015-0389-9 Oliveira, D. M. and Samsonov, A. A. (2018).* 撞击角控制的行星际激波地球效应：综述。《空间研究进展》61, 1–44. doi:10.1016/j.asr.2017.10.006 Oliveira, D. M., Weygand, J. M., Zesta, E., Ngwira, C. M., Hartinger, M. D., Xu, Z., et al. (2021). 撞击角对激波诱发亚暴期间局地强烈 dB/dt 变化的控制。《空间天气》19, e2021SW002933. doi:10.1029/2021SW002933 Oliveira, D. M. and Zesta, E. (2019). 磁暴期间的卫星轨道阻力。《空间天气》17, 1510–1533. doi:10.1029/2019SW002287 Oliveira, D. M., Zesta, E., Schuck, P. W., and Sutton, E. K. (2017). 日冕物质抛射引发地磁暴后热层的全球时间响应。《地球物理研究杂志：空间物理》122, 10,762–10,782. doi:10.1002/2017JA024006 Pirjola, R. (2002). 地面技术系统中地表电场和磁场以及地磁感应电流计算综述。《地球物理学综述》23, 71–90. doi:10.1023/A:1014816009303 Priest, E. F. (1981). 《太阳磁流体力学》（荷兰多德雷赫特：D. Reidel 出版社）

Pulkkinen, A., Rastatter, L., Kuznetsova, M., Singer, H., Balch, C., Weimer, D., 等（2013）。面向模型转入业务运行的地球空间模型地面磁场扰动预测社区联合验证。《空间天气》11, 369–385。doi:10.1002/swe.20056 Rout, D., Chakrabarty, D., Janardhan, P., Sekar, R., Maniya, V., 和 Pandey, K.（2017）。太阳风流动角与共转相互作用区的地球效应：初步结果。《地球物理研究快报》44, 4532–4539。doi:10.1002/2017GL073038 Rudd, J. T., Oliveira, D. M., Bhaskar, A., 和 Halford, A. J.（2019）。行星际冲击波撞击角如何控制地球效应磁层的大小?《空间研究进展》63, 317–326。doi:10.1016/j.asr.2018.09.013 Samson, J. C., Wallis, D. D., Hughes, T. J., Creutzberg, F., Ruohoniemi, J. M., 和 Greenwald, R. A.（1992）。夜侧磁层中的亚暴增强与磁力线共振。《地球物理研究杂志》97, 8495–8518。doi:10.1029/91JA03156 Samsonov, A. A.（2011）。倾斜行星际冲击波穿过磁鞘的传播。《大气与太阳-地球物理学杂志》73, 1–9。doi:10.1016/j.jastp.2009.10.014 Samsonov, A. A., Sergeev, V. A., Kuznetsova, M. M., 和 Sibeck, D. G.（2015）。磁层对倾斜行星际冲击波撞击的非对称压缩与膨胀。《地球物理研究快报》42, 4716–4722。doi:10.1002/2015GL064294 Schiller, Q., Kanekal, S. G., Jian, L. K., Li, X., Jones, A., Baker, D. N., 等（2016）。行星际冲击波引发的超相对论电子快速注入：范艾伦探测器观测的统计研究。《地球物理研究快报》43, 12,317–12,324。doi:10.1002/2016GL071628 Schwartz, S. J.（1998）。冲击波与间断面法线、马赫数及相关参数。载于《多航天器数据分析方法》，G. Paschmann 和 P. W. Daly 编（荷兰诺德韦克：欧洲空间局出版部），ISSI科学报告 SR-001号，249–270 Selvakumaran, R., Veenadhari, B., Ebihara, Y., Kumar, S., 和 Prasad, D. S. V. V. D.（2017）。行星际冲击波方向对 SC/SI上升时间和地球效应的作用。《空间研究进展》59, 1425–1434。doi:10.1016/j.asr.2016.12.010 Shi, Y., Oliveira, D. M., Knipp, D. J., Zesta, E., Matsuo, T., 和 Anderson, B.（2019）。近正面与高度倾斜的行星际冲击波对高纬度场向电流（FAC）的影响。《空间天气》17, 1659–1673。doi:10.1029/2019SW002367 Shi, Y., Zesta, E., Connor, H. K., Su, Y.-J., Sutton, E. K., Huang, C. Y., 等（2017）。高纬度热层中性粒子密度对太阳风动压增强的响应。《地球物理研究杂志：空间物理》122, 11,559–11,578。doi:10.1002/2017JA023889 Shue, J.-H., Song, P., Russell, C. T., Steinberg, J. T., Chao, J. K., Zastenker, G., 等（1998）。极端太阳风条件下的磁层顶位置。《地球物理研究杂志》103, 17,691–17,700。doi:10.1029/98JA01103 Sitnov, M., Birn, J., Ferdousi, B., Gordeev, E., Khotyaintsev, Y., Merkin, V., 等（2019）。磁尾爆发性活动。《空间科学评论》215。doi:10.1007/s11214-019-0599-5 Smith, A. W., Rae, J., Forsyth, C., Oliveira, D. M., Freeman, P. M., 和 Jackson, D.（2020）。利用机器学习对行星际冲击波引发的磁暴突然开始进行概率预报。《空间天气》18, e2020SW002603。doi:10.1029/2020SW002603 Smith, E. J., Slavin, J. A., Zwickl, R. D., 和 Bame, S. J.（1986）。冲击波与磁暴突然开始。载于《太阳风与磁层耦合》，Y. Kamide 和 J. A. Slavin 编（日本东京：Terra Scientific），345 Takahashi, K., Lysak, R., Vellante, M., Kletzing, C. A., Hartinger, M. D., 和 Smith, C. W.（2018）。行星际冲击波激发的空腔模振荡的观测与数值模拟。

《地球物理研究杂志：空间物理》123, 1969–1988。doi:10.1002/2017JA024639 Takeuchi, T., Russell, C. T., 和 Araki, T.（2002）。行星际冲击波方向对地磁 sudden commencement 的影响。《地球物理研究杂志》107, SMP 6–1–SMP 6–10。doi:10.1029/2002JA009597 Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Gonzalez, A. L. C., Guarnieri, F. L., Gopalswamy, N., Grande, M., 等（2006）。共转太阳风流与重复性地磁活动：综述。《地球物理研究杂志》111, 1–25。doi:10.1029/2005JA011273 Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Tang, F., Akasofu, S.-I., 和 Smith, E. J.（1988）。太阳活动峰年（1978—1979年）重大磁暴所涉行星际南向磁场的起源。《地球物理研究杂志》93, 8519–8531。doi:10.1029/JA093iA08p08519 Tsurutani, B. T. 和 Hajra, R.（2021）。芬兰 M¨ants¨al¨a 管道中地磁感应电流（GICs）的行星际与磁层成因：1999年至2019年。《空间天气与空间气候杂志》11, 1–23。doi:10.1051/swsc/2021001 Tsurutani, B. T. 和 Hajra, R.（2023）。冲击波触发的超亚暴（SML ＜ –2500 nT）的能量学。《天体物理学杂志》946。doi:10.3847/1538-4357/acb143 Tsurutani, B. T., Hajra, R., Tanimori, T., Takada, A., Remya, B., Mannucci, A. J., 等（2016）。日球等离子体片（HPS）冲击磁层，通过相干电磁离子回旋波散射导致相对论电子骤降（REDs），并可能影响气候变化机制。《地球物理研究杂志：空间物理》121, 10,130–10,156。doi:10.1002/2016JA022499 Tsurutani, B. T., Lakhina, G. S., Verkhoglyadova, O. P., Gonzalez, W. D., Echer, E., 和 Guarnieri, F. L.（2011）。行星际不连续结构及其地磁效应综述。《大气与太阳-地球物理学杂志》73, 5–19。doi:10.1016/j.jastp.2010.04.001 Tsurutani, B. T. 和 Lin, R. P.（1985）。行星际冲击波在 1 天文单位处对 >47 keV 离子和 >2 keV 电子的加速。《地球物理研究杂志》90, 1–11。doi:10.1029/JA090iA01p00001 Tsurutani, B. T., Zhou, X.-Y., Vasyliunas, V. M., Haerendel, G., Arballo, J. K., 和 Lakhina, G. S.（2001）。行星际冲击波、磁层顶边界层与日侧极光：极小磁层区域的重要性。《地球物理学综述》22, 101–130。doi:10.1023/A:1012952414384 Wang, C., Huang, Z. H., Hu, Y. Q., 和 Guo, X. C.（2005）。行星际冲击波与磁层相互作用的三维全球模拟。载于第四届 *IGPP* 无碰撞冲击波物理年度国际天体物理学会议，G. Li、G. Zank 和 C. T. Russell 编。《AIP会议论文集》（华盛顿特区：美国物理联合会），第781卷，320–324。doi:10. 1063/1.2032716 Wang, C., Li, C. X., Huang, Z. H., 和 Richardson, J. D.（2006）。行星际冲击波强度和方向对磁暴突然开始上升时间的影响。《地球物理研究快报》33, 1–3。doi:10.1029/2006GL025966 Wang, C., Liu, J. B., Li, H., Huang, Z. H., Richardson, J. D., 和 Kan, J. R.（2009）。行星际冲击波引起的地球空间磁场响应。《地球物理研究杂志》114。doi:10.1029/2008JA013794 Welling, D. T., Love, J. J., Joshua Rigler, E., Oliveira, D. M., Komar, C. M., 和 Morley, S. K.（2021）。地球空间对理想行星际日冕物质抛射响应的数值模拟。《空间天气》19, e2020SW002489。doi:10.1029/2020SW002489 Xu, Z., Hartinger, M. D., Oliveira, D. M., Coyle, S., Clauer, C. R., Weimer, D., 等（2020）。行星际冲击波引起的地面磁场响应的南北半球不对称：冲击波撞击角的作用。《空间天气》18, e2019SW002427。doi:10.1029/2019SW002427 Yue, C., Zong, Q. G., Zhang, H., Wang, Y. F., Yuan, C. J., Pu, Z. Y., 等（2010）。行星际冲击波触发的地磁活动。《地球物理研究杂志》115, 1–13。doi:10.1029/

2010JA015356 Zhou, X. 和 Tsurutani, B. T.（2001）。行星际冲击波触发夜侧地磁活动：亚暴、伪弥散和平静事件。《地球物理研究杂志》106，18957–18967。doi:10.1029/2000JA003028 Zhou, X.-Y.、Strangeway, R. J.、Anderson, P. C.、Sibeck, D. G.、Tsurutani, B. T.、Haerendel, G. 等人（2003）。激波极光：FAST 和国防气象卫星计划的观测。《地球物理研究杂志》108。doi:10. 1029/2002JA009701 Zhou, X.-Y. 和 Tsurutani, B. T.（1999）。昼侧极光的快速增强和传播：大尺度行星际压力脉冲（快速激波）。《地球物理研究快报》26，1097–1100。doi:10.1029/1999GL900173