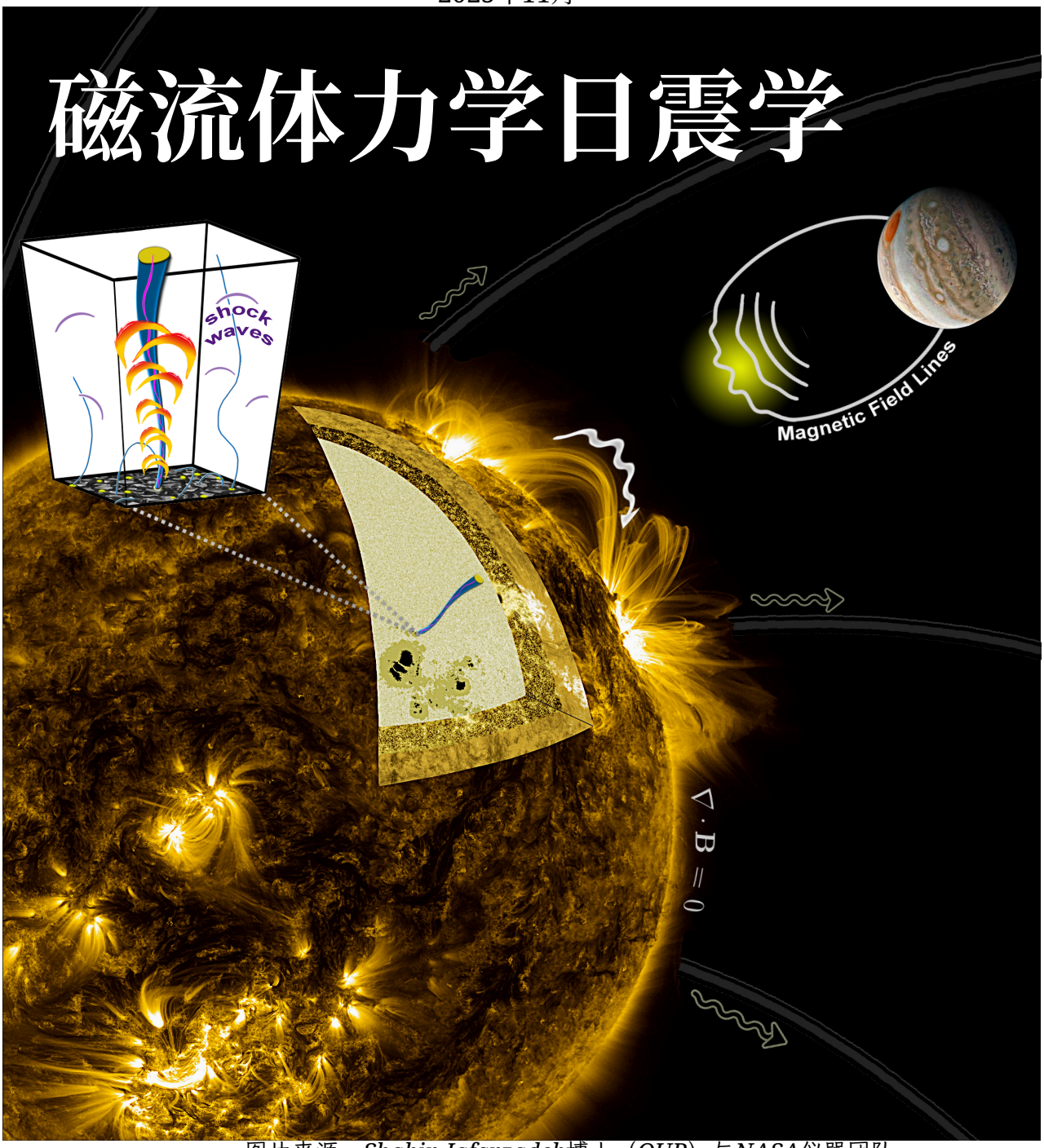
arXiv:2603.05571v1 [astro-ph.IM] 5 Mar 2026

太阳与日球层等离子体的磁流体动力学震学

主题领域：太阳与日球层（*Helio*）

主要作者：V.M. Nakariakov (V.Nakariakov@warwick.ac.uk) D.B. Jess, A.N. Wright, T.K.Yeoman, T. Elsden, J.A. McLaughlin, D.Y. Kolotkov, V.Fedun & R. Erd´elyi

2025年11月



图片来源：*Shahin Jafarzadeh*博士（*QUB*）与*NASA*仪器团队

太阳和日球层等离子体的磁流体力学地震学V.M. Nakariakov, D.B. Jess, A.N. Wright, T.K. Yeoman, T. Elsden, J.A. McLaughlin, D.Y. Kolotkov, V. Fedun, & R. Erd´elyi

科学动机与目标

要解决太阳物理学和日球层物理学中的重大未解问题，例如色球和日冕加热、耀斑和爆发、太阳风加速、空间天气效应以及行星磁层动力学背后的机制，需要可靠地估算等离子体条件和成分。然而，磁场、电流、精细横向结构、输运系数、能量学和连通性等关键变量很难甚至无法直接测量。值得庆幸的是，有一种强大的间接诊断技术，可以通过研究这些等离子体结构所支持的磁流体力学（MHD）波来进行诊断。“MHD”反映了相关波的长波长和长周期，其尺度从数十公里到数十万公里、周期从数秒到数小时，远远超出等离子体的微观尺度[1]。

在整个太阳外层大气中，磁流体力学波表现为紫外、极紫外线、软X射线和可见光辐射中的传播或驻立周期性扰动，以及光谱线变化[2,3]（见图1）。它们会调制射电和微波暴，并在所有具有磁场的行星上通过原位测量。理论将可观测特性与等离子体结构联系起来，从而实现磁流体力学日震学[4]。其他冷的类太阳恒星也存在动态大气，其动态过程可能影响宜居性，甚至支持前生物条件[5], ，这促使人们基于太阳—恒星类比发展可靠的诊断技术。

从光球到日冕，磁流体力学波在多种波导中传播（包括太阳黑子[6,7,8,9], 太阳孔[10,11,12,13,14], 日冕环[15,16,17,18], 喷流[19,20], 针状体[21,22,23,24,25,26], 纤维[27,28,29], 和羽流[30,31,32]），其中包括快、慢磁声波、阿尔fv´én波和熵模[33,34]。此外，色球层波能够追踪气体压力与磁压力占主导地位的不同状态之间的转换。丹尼尔·K·井上太阳望远镜、平方公里阵列、Solar-C 和 EST 等新建及即将投入使用的设施，将提供前所未有的空间、光谱和时间分辨率，因此我们需要更深入地理解太阳等离子体物理学的基础。

磁结构的扭 kink 振荡表现为横向位移或多普勒频移振荡[35,36]。在日冕中，这类振荡有两种状态：大振幅、快速衰减的振荡，以及小振幅的无衰减运动，二者的周期均为 ∼1–30 分钟。其相位结构和周期—长度尺度证实了它们具有驻波性质。衰减和无衰减振荡使我们能够探测磁场、电流、横向结构以及日冕能量供给。在太阳色球更低处，针状体、纤维和暗斑等狭窄磁结构越来越多地呈现出高频、高振幅的横向波活动[26]。这些快速演变的特征只有在分辨率最高的数据集中才能观测到，或可揭示整个太阳外层大气中的质量和能量输运。因此，持续开发能够探测快速动力学过程和微弱光谱偏振信号的先进仪器设备，对于增进我们对太阳低层大气中波能量学和能量耦合的理解至关重要。

传播性慢波表现为近乎单色的强度扰动，从太阳低层大气[37], 向上传播；在日冕中，其周期通常为 ∼3 分钟，速度达数百千米/秒。它们随高度增加而显著衰减，可用于诊断磁场方向和热结构[38,39]。色球层的特征通常通过奔跑日珥波[40,41,42,43] 和暗核闪光[44,45,46], 等现象呈现，从而帮助理解非线性波动力学[47,48]。在日冕中，热（日冕温度为 >6 MK）日冕环[49,50] 内的慢波“晃荡”表明等离子体在足点之间来回弹跳，周期为 >10 分钟且迅速衰减，这有助于研究热传导和日冕加热。准周期快速传播（QFP）波呈现为极紫外波纹，速度达数百千米/秒，周期为 ∼1 分钟[51]。其磁声性质使其易受磁场几何结构和等离子体非均匀性的影响，但利用其进行日震学研究仍处于发展阶段。

磁重联期间的准周期脉动（QPP）表现为辐射的重复调制[52], ，周期从几分之一秒到数十分钟不等。了解准周期脉动的机制有助于深入认识耀斑能量释放，并支持太阳—恒星类比。

低层太阳大气的强分层特性凸显了若干关键的磁流体动力学过程。非线性冲击波的形成是一种潜在的加热机制[20,53]，，而现代理论[54]阐明了离子-中性粒子效应。大尺度波本征模反射，尤其是在太阳黑子本影中，揭示了可能存在的磁流体力学共振腔[55,56]。它们与非线性冲击波的相互作用增加了复杂性，因此需要能够探测小尺度磁场波动的仪器；这是英国具有深厚传统的研究领域（例如 Hinode/EIS、DST/ROSA、Solar Orbiter/SPICE）。

超低频（ULF）波是地球磁层中频率最低的波模，通常使用 MHD[57] 进行研究。这种环境允许对波进行原位 观测，因此与太阳环境形成互补；在太阳环境中，人们可以对整个系统进行远程观测。超低频波在传输能量和动量方面发挥着关键作用，这些能量和动量源自太阳风，并经由磁层传至电离层。磁震学在地球磁层中的发展最为成熟，例如，人们已经能够利用磁

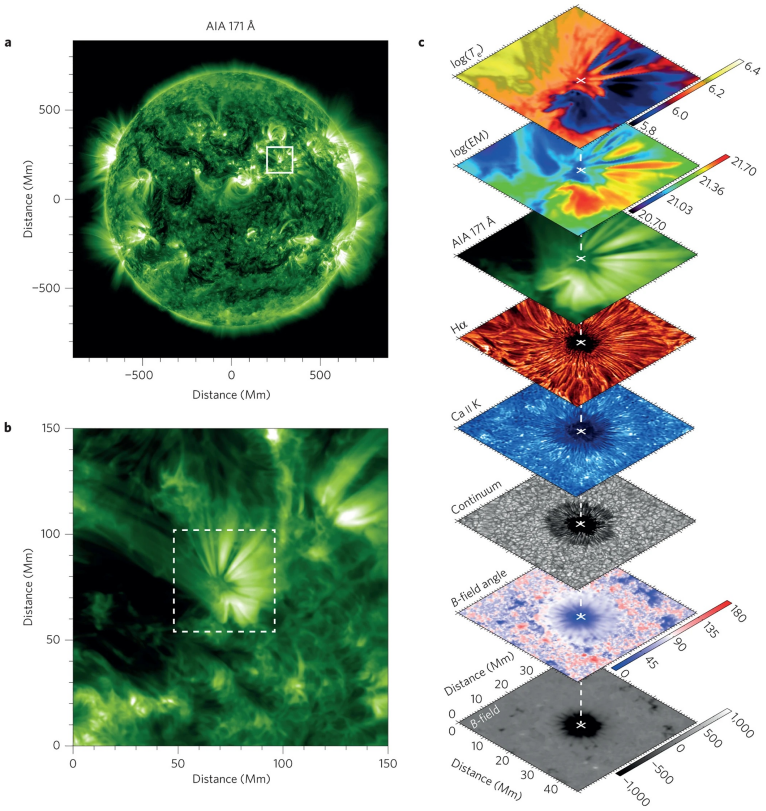


图 1：太阳大气各层之间磁耦合的多波段展示[39]。图 **a** & **b**展示了太阳日冕，其中磁环和扇状结构以多种 MHD 波模振荡。图**c** 揭示了从光球到日冕的大气耦合；这种耦合支持并引导波能量进入日球层及更远处。

磁暴期间的磁场测量显示，磁力线本征频率最多可变化 50%[58]，，由此可诊断磁场和等离子体质量密度的变化。

在其他行星上，通常只能获取单个航天器的数据，且没有可供配合的地基设备；即便如此，磁层地震学仍能为磁层动力学提供深刻见解，例如通过研究行星极光中的周期性特征[59]。对木星和土星极光的此类研究揭示了有关磁层形态和高温等离子体群体动力学的新见解。在水星，针对原位磁场中超低频波的统计研究，已建立起详细模型，描述磁层等离子体的密度和成分，以及高度动态的行星磁场形态[60]。

将磁流体力学日震学全面应用于太阳外层大气和磁层面临若干因素的挑战。在太阳大气中，关键挑战之一是缺乏可靠的等离子体密度和温度诊断，这些量通常由微量组分产生的辐射或光谱偏振反演的结果推断得出。这一问题可通过射电和微波观测加以缓解；然而，此类数据相对较低的空间分辨率可能使辐射难以与特定等离子体结构相关联。若能沿同一等离子体结构同时获得高分辨率成像和光谱信息，特定磁流体力学模态或耦合模态组合的识别将大为改善。若干地震学技术需要来自不同（且理想情况下非共面）视线的立体观测，或至少是准立体观测。高次谐波的探测，包括非线性级联的特征及其性质的地震学利用，受到现有仪器分辨率不足的限制。

从理论上讲，需要理解并尽量减少数值伪影，并实现高性能计算与解析建模更有效的结合。此外，在色球波建模中，显然需要考虑部分电离和非局部热力学平衡的影响；而在日冕中，必须更好地理解无碰撞和非绝热效应对磁流体力学波的影响，并将其纳入建模工作。在磁层环境中，在地球上维持密集的地面磁观测站阵列仍是一项挑战。对新的全数字雷达技术的科学利用尚处于非常早期阶段，但为提高数据采集的时间和空间分辨率带来了巨大前景。仪器设备无法在其他行星表面使用。然而，多航天器时代正在到来，遥感技术的持续改进，例如在红外、紫外和软X射线波段，将为从环绕运行的行星航天器以及诸如詹姆斯·韦布空间望远镜等有利位置对边界和极光进行成像提供未来机遇。

战略背景

利用磁流体力学日震学对太阳等离子体环境进行可靠诊断，总体而言将有助于我们理解太阳外层大气（从光球到日冕）、地球和行星磁层以及太阳风中发生的基本物理过程，进而将这些认识纳入空间天气预报模型。此外，先进的震学将为这些模型提供宝贵的输入参数。振荡参数的变化也可能表明活动区处于亚临界状态，从而成为可能对地球产生影响的耀斑和爆发的前兆[61]。预计这些进展将显著改善空间天气预报，为英国工业带来可观益处，包括电信、航空、电力供应以及其他利益相关方。

新颖的等离子体诊断技术也可转用于实验室等离子体研究，包括对实现未来无化石燃料能源生产至关重要的受控聚变实验。此外，新兴的数据分析工具，例如用于分析非平稳和非线性振荡过程的方法[62,63], ，以及磁流体力学日震学所需的机器学习和人工智能解决方案，在太阳物理学以外的领域也日益受到关注，其潜在应用涵盖工程学、医学、安全、气候研究、地球物理学和计量经济学。

拟议方法

磁流体力学日震学的本质，就是将高精度观测、先进且精细调校的数据分析技术与最先进的理论建模相结合。

观测挑战

要准确表征磁流体力学波活动，必须获取能够同时实现高空间、光谱和时间分辨率的观测数据。这是因为振荡行为表现为数十千米的位移[64], 数十米每秒的多普勒速度[65], 以及数秒左右的周期[26]。这是一项极具挑战性的工作：尽管太阳本身是一个非常明亮的光源，但在衍射极限下进行的观测往往会受到光子匮乏的影响，尤其是在获取窄带光谱图像、并将入射光进一步分解为代表入射偏振态的各个斯托克斯矢量时。因此，要推动磁流体力学波探测、提取和定量分析的边界，学界需要继续开发新一代仪器，使科学家能够进行多波长测量，获取天空平面位移、多普勒运动和光谱偏振特征，并将其用于现代反演程序[66], 同时尽可能以最高时间采样频率获取这些数据。令人欣慰的是，英国近期通过启用世界上首个为光学光谱蓝光波段设计的太阳积分视场单元[67] （IFU），展现了这方面的能力；许多光球和色球谱线都位于该波段。因此，英国已有相关专业能力可供进一步发展，以研制新一代仪器，助力太阳大气磁流体力学日震学取得跨越式进展。

未来要在行星磁层中进一步开展磁层地震学研究，需要继续依靠来自地球和行星探测任务的多仪器原位航天器观测。航天器星座和微卫星提供的多点观测机会尤为重要。新颖的成像技术，例如高能中性原子成像[68] 和多波长极光成像，将提供互补的数据集。在地球，密切协调磁层等离子体的原位观测与大范围全球地面仪器网络（例如 SuperMAG 和 SuperDARN），已被证明是有效的方法；确保这些网络持续运行也至关重要。

英国参与平方千米阵（SKA）项目，为磁流体力学日震学带来了令人期待的机遇。在理想观测条件下，SKA-Mid 的空间分辨率可达不到一角秒，从而能够精确定位耀斑区准周期脉动的精细结构。此外，采用定制观测策略时，其快速成像模式可实现约 $\sim$1 秒的观测节奏，或可用于探测高次谐波、检测更难观测的磁流体力学模态（例如 sausage 模），以及研究非线性级联过程。

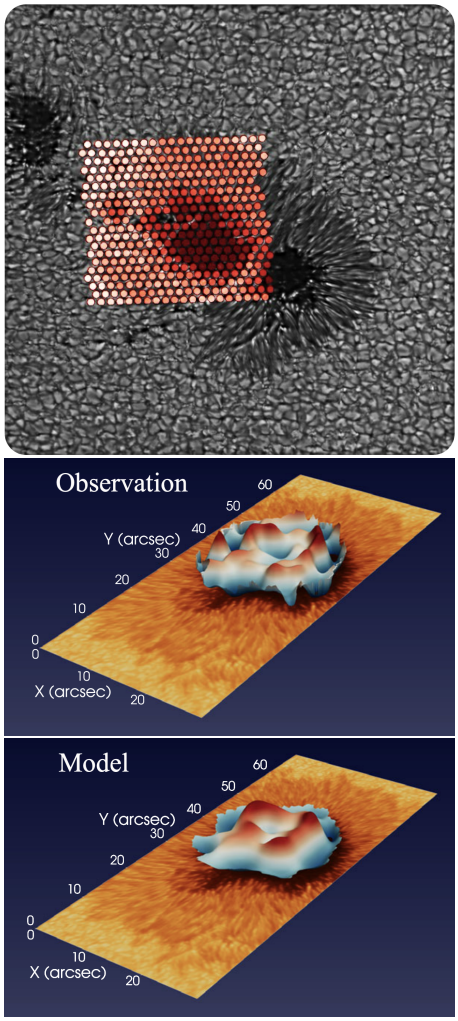


图2：新一代仪器[67]，数值建模[9]，与理论解释[71] 协同工作，以诊断太阳黑子本影中磁流体力学波的模态成分。积分视场单元（IFUs；顶部面板）为同时获取光谱维度和两个空间维度上的信息提供了一种创新方案，从而提供开展深入地震学研究所必需的高分辨率信息。

最先进的理论建模

人们普遍认为，磁流体力学波理论能够准确描述日冕和磁层部分区域中观测到的大多数宏观波现象，并可作为光球/色球中探测到的波以及贯穿整个日球层的大尺度扰动的可靠一阶近似。理论建模的核心是理解磁流体力学波如何在非均匀介质中传播并发生耦合。在这一背景下，关键过程之一是快磁流体力学波与 Alfv´én 波的共振耦合[69]。当前一项新兴的理论挑战，是在色球和日冕磁流体力学波建模中自洽地处理力学平衡与热平衡。这些等离子体持续经历加热和冷却，表现为能够改变磁流体力学波动力学特性的活性介质。在较冷区域，还必须考虑部分电离带来的额外影响[70]。

其他亟待解决的问题包括对磁流体力学波如何触发磁重联、调节能量释放，以及影响非热粒子的加速和输运进行建模。要将理论发展应用于地震学诊断，还需要对特定仪器记录的观测特征进行正向建模，同时考虑空间和时间分辨率、灵敏度、响应函数及其他仪器特性。

该领域的进展依赖于全尺度数值模拟与先进解析理论之间的相互作用：前者能够捕捉真实等离子体系统的复杂性，后者则可以分离出基本的物理机制。值得庆幸的是，随着英国境内现已具备满足大规模计算需求的高性能计算系统（例如 DiRAC），研究人员得以对日益复杂的磁流体动力学过程进行建模，从而更好地理解太阳及邻近行星大气中发挥作用的基础等离子体物理学。

高级数据分析技术

在许多情况下，太阳和日球层的磁流体动力学波过程本质上具有间歇性和非平稳性，其参数（如振荡周期和振幅）会在与振荡周期本身相当的时间尺度上发生变化。此外，人们关注的信号通常具有很强的非谐性。因此，基于傅里叶变换的传统波分析技术并不适用。由此，采用现代数据分析方法有望取得重大进展，例如经验模态分解和变分模态分解、希尔伯特变换及其各种改进形式[62,63]。值得注意的是，英国在开发新型波分析工具方面拥有丰富的成果积累，其中许多工具可通过公开访问的代码仓库获取，以惠及更广泛的研究群体（例如：https://WaLSA.tools）。

机器学习与大数据方法

多仪器、多波段观测数据量日益庞大，这促使人们采用机器学习（ML）及其他大数据方法，自动检测振荡过程、对其进行分类，并识别隐藏的相关性与关系[72]。此外，基于 ML 的技术可用于对检测到的事件进行无监督聚类，以及发现现有模型未能描述的现象（即异常检测）。同时，结合不同的数据源（例如多模态 ML）有望显著提升模型性能，从而为研究界提供快速、准确的观测数据分析。重要的是，近期 ML 方法也已应用于高分辨率光谱学，以识别并分离多个混合的光谱成分，从而揭示精度更高的特征（例如多普勒速度、谱线不对称性和宽度等）；这对于未来涉及偏振光谱波动特征的研究至关重要[73]。

机器学习也已应用于近期的原位行星粒子数据处理技术[74]，以及地球磁层等离子体质量密度建模和确定这类模型所需的关键参数化方案[75]。

磁流体力学日震学与其他等离子体诊断技术的结合

迄今为止，对太阳和日球层等离子体进行的地震学诊断一直是独立的方法，其成果尚未与其他诊断技术的结果相结合。值得探索的后续方向包括：利用日冕磁场的地震学估算值来约束光球磁场的非线性无力外推，以及开展射电磁测。

拟议的技术解决方案及所需的开发工作

观测磁流体力学波现象可使用多种不同仪器，包括传统成像仪、法布里-珀罗干涉仪、扫描狭缝光谱仪和射电望远镜。现有这类仪器设备的一项缺点是无法同时测量空间信息和光谱信息。例如，法布里-珀罗干涉仪需要扫描谱线，而基于狭缝的光谱仪则需要进行光栅扫描才能构建二维信息。积分视场单元（IFU）的新颖优势正有望彻底革新磁流体力学日震学领域。通过将空间信息与光谱仪中的各个光谱色散行相结合，IFU能够重建同时获取的三维 $[x, y, \lambda]$场；若再配合偏振光学元件，并以每秒数帧以上的高帧率观测，就能获得突破性的 $[x, y, \lambda, S, t]$ 五维数据立方体，其中 S 是入射偏振光的斯托克斯参数。这些数据将提供关键中性/电离光谱参数的高分辨率图谱，例如多普勒位移和非热展宽，从而以前所未有的细节研究贯穿整个太阳大气的吸收线/辐射线的完整演化过程；尤其是在结合现代光谱偏振反演算法[66] 以提取随光学深度和/或几何高度变化的关键等离子体参数时（见图2）。

近年来，英国[67]，已开发出此类积分视场单元技术，为进一步发展和完善奠定了坚实基础。即将推出的巴西伽利略太阳空间望远镜[76] （GSST）近期已被纳入巴西航天局的资格认证项目组合，并与英国达成正式协议，共同为航天卫星开发积分视场单元技术，因此英国有望在这一恰逢其时的领域取得全球领先地位。未来十年，英国学界需要推进多项具有挑战性但在技术上可实现的积分视场单元设计发展。尤其重要的是，设计并测试一种新型平移架构，以便将光纤元件定位于目标视场内；通常需要将10,000+ 根光纤成束排列成紧密的六边形紧密排列构型，以最大限度提高入射光的填充因子，并实现与同步高光谱分辨率相匹配的最高空间分辨率。此外，实验室测试积分视场单元光学元件在严苛空间环境（即缺少地球大气层保护）中的性能退化情况，也是最终完成空间合格积分视场单元的重要一步。值得一提的是，英国学界依托英国研究与创新机构资助的实验室设施，具备相应的技能与知识，能够整合学术专长、丰富的仪器设计经验以及满足空间认证要求的能力，从而确保英国在未来数十年处于大型空间任务的前沿。

类似的设计以及采用能够提供光谱参数高分辨率图谱的空间仪器，对于推动我们深入认识百万度磁等离子体中的磁流体动力学过程、实现跨越式进展至关重要。这些光谱参数包括多普勒位移、非热展宽以及日冕发射线的强度演变。

英国的领导地位与能力

英国在磁流体动力学和磁层等离子体震学领域拥有深厚的专业知识和世界领先地位。在 Dungey [77,78]，奠定基础的开创性工作的传承之上，英国各地许多研究机构都在积极研究磁流体动力学现象，并开发下一代硬件。例如，华威大学牵头撰写了第一篇关于日冕磁流体动力学地震学的综合教程论文[4]，；贝尔法斯特女王大学最近启用了首个专为光学光谱蓝光波段设计的太阳光谱偏振积分视场单元[67]，并维护着一个专门的波分析工具代码库[63] （https://WaLSA.tools），帮助全球研究人员准确开展震学研究。诺森比亚大学、谢菲尔德大学和华威大学在磁流体动力学波理论方面取得了重大进展。在地球领域，莱斯特大学、帝国理工学院、诺森比亚大学和圣安德鲁斯大学等机构均设有规模可观的观测和理论研究团队；而更广泛的行星领域研究则主要集中在莱斯特大学、帝国理工学院和伦敦大学学院。磁流体动力学是英国当前多项重大投资研究计划的重要组成部分，例如 SuperDARN、EISCAT 3D、BepiColombo 和 JUICE。

合作机会

磁流体力学日震学领域的努力与成就为太阳、日球层、地球物理学和恒星研究中的多项合作机会奠定了坚实基础。这包括参与并领导双边及多边项目。例如，英国积极参与正在开展的重大国际太阳项目，如平方公里阵列、Solar-C 和丹尼尔·K·井上太阳望远镜，并且已与 SuperDARN、SMILE、EISCAT 3D、BepiColombo、JUICE 和詹姆斯·韦布空间望远镜建立合作关系。

此外，英国科研界成员还担任即将建成的地基和空间设施的科学委员会及科学咨询小组成员，例如欧洲太阳望远镜（EST）、印度国家大型太阳望远镜（NLST）和巴西伽利略太阳空间望远镜（GSST）。这种参与至关重要，使英国科研界成员能够参与塑造并完善这些未来任务的目标和观测策略。此外，与此类国际知名研究机构开展密切合作，将为英国参与仪器设计与组装、双边资助项目征集提供更多机会，并为英国各地的初入职研究人员创造全球就业机会。

签署人名单

签署人姓名	所属机构	国家
Viktor Fedun	谢菲尔德大学	UK
Istvan Ballai	谢菲尔德大学	UK
张金阁	巴黎天文台 - PSL	法国
Samuel Skirvin	诺森比亚大学	UK
Mihalis Mathioudakis	贝尔法斯特女王大学	UK
Anshu Kumari	印度物理研究实验室	印度
Divya Paliwal	印度物理研究实验室	印度
David Jess	贝尔法斯特女王大学	UK
Shahin Jafarzadeh	贝尔法斯特女王大学	UK
Glen Chambers	贝尔法斯特女王大学	UK
Samuel Grant	贝尔法斯特女王大学	UK
Luis Eduardo Antunes Vieira	巴西国家空间研究所	巴西
Michele Berretti	特伦托大学 / 罗马大学	意大利
Abhirup Datta	印度理工学院印多尔分校	印度
Shreeyesh Biswal	谢菲尔德大学	UK
Michael Ruderman	谢菲尔德大学	UK
Szabolcs Soos	厄特沃什大学	匈牙利
Sahel Dey	纽卡斯尔大学	澳大利亚
Alexander Nindos	约阿尼纳大学	希腊
Spiros Patsourakos	约阿尼纳大学	希腊
Kris Mrwaski	玛丽亚·居里-斯克沃多夫斯卡大学	波兰
Piyali Chatterjee	印度天体物理研究所	印度
Marianna Korsos	谢菲尔德大学	UK
Maria Madjarska	马克斯·普朗克太阳系研究所	德国
Paul Cally	莫纳什大学	澳大利亚
Dibyendu Nandi	IIESR Kolkotta	印度
Dipankar Banerjee	印度空间科学与技术研究所	印度
Dyrgesh Tripathi	IUCAA Pune	印度
刘佳佳	中国科学技术大学合肥	中国
Daria Shukhoboskaia	比利时皇家天文台	比利时
Tom Van Doorsselaere	鲁汶大学	比利时
Ricardo Gafiera	科英布拉大学	葡萄牙
Marco Stangalini	意大利航天局	意大利
Dario Del Moro	罗马第二大学	意大利
Stefaan Poedts	鲁汶大学	比利时
倪磊	中国科学院云南天文台	中国
Tim Yeoman	莱斯特大学	UK
James McLaughlin	诺森比亚大学	UK
Sergey Belov	华威大学	UK
Dan Ratliff	诺森比亚大学	UK
Sarah Bentley	诺森比亚大学	UK
Tom Elsden	圣安德鲁斯大学	UK
Andrew Wright	圣安德鲁斯大学	UK
Ryan Smith	诺森比亚大学	UK
Gert Botha	诺森比亚大学	UK
Damian Christian	加利福尼亚州立大学北岭分校（CSUN）	USA
Thomas Rees-Crockford	诺森比亚大学	UK
Cristina Cadavid	加利福尼亚州立大学北岭分校（CSUN）	USA

签署人姓名	所属机构	国家
Manuel Collados	IAC	西班牙
Elena Khomenko	IAC	西班牙
Balazs Asztalos	厄特沃什大学	匈牙利
Rebecca Meadowcroft	华威大学	UK
Ben Snow	埃克塞特大学	UK
Fernando Luis Guarnieri	巴西国家空间研究所	巴西
Alisson Dal Lago	巴西国家空间研究所	巴西
Paulo Jauer	巴西国家空间研究所	巴西
Franciele Carlesso	巴西国家空间研究所	巴西
Alex Degeling	山东大学	中国
Gary Verth	谢菲尔德大学	UK
Jasmine Sandhu	莱斯特大学	UK
Yash Saneshwar	诺森比亚大学	UK
Eamon Scullion	诺森比亚大学	UK
Hamish Reid	MSSL - UCL	UK
Keshav Aggarwal	印度理工学院印多尔分校	印度
Ian Mann	阿尔伯塔大学	加拿大

参考文献

[1]M. Chelpanov、S. Anfinogentov、D. Kostarev、O. Mikhailova、A. Rubtsov、V. Fedenev 和 A. Chelpanov。太阳与地球磁层中的磁流体动力学波特征综述与比较。《太阳 - 地球物理学》，8(4):3–27，2022年12月。doi: 10.12737/ stp-84202201。[2] V. M. Nakariakov 和 D. Y. Kolotkov。太阳日冕中的磁流体动力学波。《天文学与天体物理学年度评论》，58:441–481，2020年8月。doi: 10.1146/ annurev-astro-032320-042940。[3] D. B. Jess、S. Jafarzadeh、P. H. Keys、M. Stangalini、G. Verth 和 S. D. T. Grant。太阳低层大气中的波：新一代太阳望远镜的黎明。《太阳物理学综述》，20(1):1，2023年12月。doi: 10.1007/s41116-022-00035-6。[4] V. M. Nakariakov、S. Zhong、D. Y. Kolotkov、R. L. Meadowcroft、Y. Zhong 和 D. Yuan。利用磁流体动力学波诊断太阳日冕等离子体：磁流体动力学日震学。《现代等离子体物理学评论》，8(1):19，2024年4月。doi: 10.1007/s41614-024-00160-9。[5] P. B. Rimmer、J. Xu、S. J. Thompson、E. Gillen、J. D. Sutherland 和 D. Queloz。系外行星上 RNA 前体的起源。《科学进展》，4(8):eaar3302，2018年8月。doi: 10.1126/ sciadv.aar3302。[6] D. B. Jess、T. Van Doorsselaere、G. Verth、V. Fedun、S. Krishna Prasad、R. Erd´elyi、P. H. Keys、S. D. T. Grant、H. Uitenbroek 和 D. J. Christian。利用更高方位波数深入观察太阳黑子振荡。《天体物理学杂志》，842(1):59，2017年6月。doi: 10.3847/1538-4357/aa73d6。[7] S. D. T. Grant、D. B. Jess、T. V. Zaqarashvili、C. Beck、H. Socas-Navarro、M. J. Aschwanden、P. H. Keys、D. J. Christian、S. J. Houston 和 R. L. Hewitt。太阳色球中的 Alf´en 波耗散。《自然·物理》，14(5):480–483，2018年5月。doi: 10.1038/s41567-018-0058-3。[8] J. Chae、K. Cho、V. M. Nakariakov、K.-S. Cho 和 R.-Y. Kwon。太阳黑子区域色球中 Alf´enic 波的光谱探测。《天体物理学杂志快报》，914 (1):L16，2021年6月。doi: 10.3847/2041-8213/ac052b。[9] A. B. Albidah、V. Fedun、A. A. Aldhafeeri、I. Ballai、D. B. Jess、W. Brevis、J. Higham、M. Stan- galini、S. S. A. Silva、C. D. MacBride 和 G. Verth。太阳黑子中磁流体动力学波模的时间与空间演化。《天体物理学杂志》，954(1):30，2023年9月。doi: 10.3847/1538-4357/acd7eb。

[10] R. J. Morton、R. Erd´elyi、D. B. Jess 和 M. Mathioudakis。磁孔中的 sausage 模观测。《天体物理学杂志快报》，729(2):L18，2011年3月。doi: 10.1088/ 2041-8205/729/2/L18。[11] S. D. T. Grant、D. B. Jess、M. G. Moreels、R. J. Morton、D. J. Christian、I. Giagkiozis、G. Verth、V. Fedun、P. H. Keys、T. Van Doorsselaere 和 R. Erd´elyi。在磁孔中包含的向上传播 sausage 模振荡中观测到的波阻尼。《天体物理学杂志》，806(1):132，2015年6月。doi: 10.1088/0004-637X/806/1/132。[12] P. H. Keys、R. J. Morton、D. B. Jess、G. Verth、S. D. T. Grant、M. Mathioudakis、D. H. Mackay、J. G. Doyle、D. J. Christian、F. P. Keenan 和 R. Erd´elyi。太阳磁孔表面模和体模的光球观测。《天体物理学杂志》，857(1):28，2018年4月。doi: 10.3847/1538-4357/aab432。[13] C. A. Gilchrist-Millar、D. B. Jess、S. D. T. Grant、P. H. Keys、C. Beck、S. Jafarzadeh、J. M. Riedl、T. Van Doorsselaere 和 B. Ruiz Cobo。太阳孔大气中的磁声波能量耗散。《伦敦皇家学会哲学汇刊》A辑，379(2190):20200172，2021年2月。doi: 10.1098/rsta.2020.0172。[14] M. Stangalini、R. Erd´elyi、C. Boocock、D. Tsiklauri、C. J. Nelson、D. Del Moro、F. Berrilli 和 M. B. Kors´os。太阳光球磁孔中的扭转振荡。《自然-天文学》，5:691–696，2021年1月。doi: 10.1038/s41550-021-01354-8。[15] V. M. Nakariakov、L. Ofman、E. E. Deluca、B. Roberts 和 J. M. Davila。TRACE 对阻尼日冕环振荡的观测：对日冕加热的启示。《科学》，285:862–864，1999年8月。doi: 10.1126/science.285.5429.862。[16] I. De Moortel、J. Ireland、R. W. Walsh 和 A. W. Hood。利用 TRACE 观测到的日冕环中的纵向强度振荡 I。测量参数概述。《太阳物理学》，209(1): 61–88，2002年9月。doi: 10.1023/A:1020956421063。[17] S. A. Anfinogentov、V. M. Nakariakov 和 G. Nistic`o。无衰减低振幅扭 kink 振荡：太阳日冕中的普遍现象？《天文学与天体物理学》，583:A136，2015年11月。doi: 10.1051/0004-6361/201526195。[18] T. J. Duckenfield、D. B. Jess、R. J. Morton 和 S. Jafarzadeh。利用 CoMP 的光谱成像技术确定日冕驻波 kink 振荡的偏振。《天体物理学杂志》，982(2):202，2025年4月。doi: 10.3847/1538-4357/adb8d6。[19] F. Mackenzie Dover、R. Sharma 和 R. Erd´elyi。应用于太阳低层大气模型的针状体喷流传播磁流体力学模拟。《天体物理学杂志》，913(1): 19，2021年5月。doi: 10.3847/1538-4357/abefd1。[20] S. Dey、P. Chatterjee、O. V. S. N. Murthy、M. B. Kors´os、J. Liu、C. J. Nelson 和 R. Erd´elyi。聚合物喷流揭示太阳针状体森林的起源与本质。《自然·物理》，18(5):595–600，2022年3月。doi: 10.1038/s41567-022-01522-1。[21] D. B. Jess、M. Mathioudakis、R. Erd´elyi、P. J. Crockett、F. P. Keenan 和 D. J. Christian。太阳低层大气中的 Alf´en 波。《科学》，323(5921):1582，2009年3月。doi: 10. 1126/science.1168680。[22] T. V. Zaqarashvili 和 R. Erd´elyi。太阳针状体中的振荡与波。《空间科学评论》，149(1-4):355–388，2009年12月。doi: 10.1007/s11214-009-9549-y。[23] D. B. Jess、D. J. Pascoe、D. J. Christian、M. Mathioudakis、P. H. Keys 和 F. P. Keenan。I型针状体振荡的起源。《天体物理学杂志快报》，744(1):L5，2012年1月。doi: 10.1088/2041-8205/744/1/L5。[24] R. Sharma、G. Verth 和 R. Erd´elyi。针状体中复杂三维运动的演化。《天体物理学杂志》，853(1):61，2018年1月。doi: 10.3847/1538-4357/aaa07f。[25] T. Samanta、H. Tian、V. Yurchyshyn、H. Peter、W. Cao、A. Sterling、R. Erd´elyi、K. Ahn、S. Feng、D. Utz、D. Banerjee 和 Y. Chen。太阳针状体的生成及随后的大气加热。《科学》，366(6467):890–894，2019年11月。doi: 10.1126/science.aaw2796。[26] W. Bate、D. B. Jess、V. M. Nakariakov、S. D. T. Grant、S. Jafarzadeh、M. Stangalini、P. H. Keys、D. J. Christian 和 F. P. Keenan。色球针状体中的高频波。《天体物理学杂志》，930(2):129，2022年5月。doi: 10.3847/1538-4357/ac5c53。[27]R. J. Morton、G. Verth、D. B. Jess、D. Kuridze、M. S. Ruderman、M. Mathioudakis 和 R. Erd´elyi。太阳色球中无处不在的压缩波观测。《自然-通讯》，3:1315，2012年12月。doi: 10.1038/ncomms2324。

[28] K. Mooroogen、R. J. Morton 和 V. Henriques。网络间色球纤维的动力学：基本性质与磁流体力学横摆波。《天文学与天体物理学》，607:A46，2017年11月。doi: 10.1051/0004-6361/201730926。[29] W. Bate、D. B. Jess、S. D. T. Grant、A. Hillier、S. J. Skirvin、T. Van Doorsselaere、S. Jafarzadeh、T. Wiegelmann、T. Duckenfield、C. Beck、T. Moore、M. Stangalini、P. H. Keys 和 D. J. Christian。揭示超日珥纤维参考系下等离子体动力学的真实本质。《天体物理学杂志》，970(1):66，2024年7月。doi: 10.3847/1538-4357/ad4d97。[30] L. Ofman、V. M. Nakariakov 和 C. E. DeForest。日冕羽流中的慢磁声波。《天体物理学杂志》，514(1):441–447，1999年3月。doi: 10.1086/306944。[31] U. Baweja、V. Pant、S. Krishna Prasad、A. K. Shrivastav、T. Van Doorsselaere、N. Narang、C. Ver-beeck、M. S. Khan 和 D. Berghmans。利用太阳轨道器/极紫外成像仪观测到的极区羽流中纵向与横向振荡的共存。《天体物理学杂志快报》，991(2):L45，2025年10月。doi: 10.3847/2041-8213/ae071e。[32] K.-S. Cho、D. Y. Kolotkov、I.-H. Cho 和 V. M. Nakariakov。极区羽流中传播强度扰动的频率依赖演化。《天体物理学杂志》，992(1):33，2025年10月。doi: 10.3847/1538-4357/adfde0。[33] M. Mathioudakis、D. B. Jess 和 R. Erd´elyi。太阳大气中的阿尔芬波：从理论到观测。《空间科学评论》，175(1-4):1–27，2013年6月。doi: 10.1007/ s11214-012-9944-7。[34] D. B. Jess、R. J. Morton、G. Verth、V. Fedun、S. D. T. Grant 和 I. Giagkiozis。太阳色球中磁流体力学波的多波段研究：近期成果综述。《空间科学评论》，190(1-4):103–161，2015年7月。doi: 10.1007/s11214-015-0141-3。[35] V. M. Nakariakov、S. A. Anfinogentov、P. Antolin、R. Jain、D. Y. Kolotkov、E. G. Kupriyanova、D. Li、N. Magyar、G. Nistic`o、D. J. Pascoe、A. K. Srivastava、J. Terradas、S. Vasheghani Farahani、G. Verth、D. Yuan 和 I. V. Zimovets。日冕环的扭 kink 振荡。《空间科学评论》，217(6):73，2021年9月。doi: 10.1007/s11214-021-00847-2。[36] G. Y. Chen、Y. Guo、M. D. Ding 和 R. Erd´elyi。利用空间日震学测量日冕环中的局部物理参数。《天文学与天体物理学》，678:A205，2023年10月。doi: 10.1051/0004-6361/202346393。[37] D. Banerjee、S. Krishna Prasad、V. Pant、J. A. McLaughlin、P. Antolin、N. Magyar、L. Ofman、H. Tian、T. Van Doorsselaere、I. De Moortel 和 T. J. Wang。开放日冕结构中的磁流体动力学波。《空间科学评论》，217(7):76，2021年10月。doi: 10.1007/ s11214-021-00849-0。[38] D. Yuan、R. Sych、V. E. Reznikova 和 V. M. Nakariakov。太阳黑子大气中磁声截止频率的多高度观测。《天文学与天体物理学》，561:A19，2014年1月。doi: 10.1051/0004-6361/201220208。[39] D. B. Jess、V. E. Reznikova、R. S. I. Ryans、D. J. Christian、P. H. Keys、M. Mathioudakis、D. H. Mackay、S. Krishna Prasad、D. Banerjee、S. D. T. Grant、S. Yau 和 C. Diamond。利用无处不在的太阳黑子波，通过震学技术推导太阳日冕磁场。《自然·物理》，12(2):179–185，2016年2月。doi: 10.1038/nphys3544。[40] H. Zirin 和 A. Stein。奔跑日珥波的观测。《天体物理学杂志快报》，178:L85，1972年12月。doi: 10.1086/181089。[41] D. S. Bloomfield、A. Lagg 和 S. K. Solanki。揭示奔跑日珥波的本质。《天体物理学杂志》，671(1):1005–1012，2007年12月。doi: 10.1086/523266。[42] D. B. Jess、V. E. Reznikova、T. Van Doorsselaere、P. H. Keys 和 D. H. Mackay。磁场对太阳色球中奔跑日珥波的影响。《天体物理学杂志》，779(2):168，2013年12月。doi: 10.1088/0004-637X/779/2/168。[43] N. Freij、E. M. Scullion、C. J. Nelson、S. Mumford、S. Wedemeyer 和 R. Erd´elyi。探测从色球向低日冕传输能量的向上传播波。《天体物理学杂志》，791(1):61，2014年8月。doi: 10.1088/0004-637X/791/1/61。[44] J. M. Beckers 和 P. E. Tallant。太阳黑子本影中的色球非均匀结构。《太阳物理学》，7(3):351–365，1969年6月。doi: 10.1007/BF00146140。[45] J. de la Cruz Rodr´ıguez、L. Rouppe van der Voort、H. Socas-Navarro 和 M. van Noort。具有暗核闪光的太阳黑子色球的物理性质。《天文学与天体物理学》，556:A115，2013年8月。doi: 10.1051/0004-6361/201321629。

[46] V. M. J. Henriques、C. J. Nelson、L. H. M. Rouppe van der Voort 和 M. Mathioudakis。太阳黑子本影色球精细结构与暗核闪光的一体化建模：波纹本影。《天文学与天体物理学》，642:A215，2020年10月。doi: 10.1051/0004-6361/202038538。[47] S. J. Houston、D. B. Jess、R. Keppens、M. Stangalini、P. H. Keys、S. D. T. Grant、S. Jafarzadeh、L. M. McFetridge、M. Murabito、I. Ermolli 和 F. Giorgi。太阳黑子大气中的磁流体动力学非线性：色球中间激波的观测。《天体物理学杂志》，892(1):49，2020年3月。doi: 10.3847/1538-4357/ab7a90。[48] B. Snow 和 A. Hillier。双流体慢模激波中的碰撞电离、复合和电离势：解析与数值结果。《天文学与天体物理学》，645:A81，2021年1月。doi: 10.1051/0004-6361/202039667。[49] T. Wang、D. E. Innes 和 J. Qiu。利用 SUMER 和 SXT 观测到的热环振荡确定日冕磁场。《天体物理学杂志》，656(1):598–609，2007年2月。doi: 10.1086/510424。[50] T. Wang、L. Ofman、D. Yuan、F. Reale、D. Y. Kolotkov 和 A. K. Srivastava。日冕环中的慢模磁声波。《空间科学评论》，217(2):34，2021年3月。doi: 10.1007/s11214-021-00811-0。[51]Y. Shen、X. Zhou、Y. Duan、Z. Tang、C. Zhou 和 S. Tan。日冕准周期快速模传播波列。《太阳物理学》，297(2):20，2022年2月。doi: 10.1007/s11207-022-01953-2。[52] J. A. McLaughlin、V. M. Nakariakov、M. Dominique、P. Jel´ınek 和 S. Takasao。太阳与恒星耀斑中准周期脉动的建模。《空间科学评论》，214(1):45，2018年2月。doi: 10.1007/s11214-018-0478-5。[53] S. J. Houston、D. B. Jess、A. Asensio Ramos、S. D. T. Grant、C. Beck、A. A. Norton 和 S. Krishna Prasad。太阳大气对暗核闪光的磁响应。《天体物理学杂志》，860(1):28，2018年6月。doi: 10.3847/1538-4357/aab366。[54] B. Snow、M. K. Druett 和 A. Hillier。具有碰撞与辐射电离及复合的部分电离双流体激波——多层氢模型。《皇家天文学会月刊》，525(3):4717–4734，2023年11月。doi: 10.1093/mnras/stad2585。[55] G. J. J. Botha、T. D. Arber、V. M. Nakariakov 和 Y. D. Zhugzhda。太阳黑子本影上方的色球共振。《天体物理学杂志》，728(2):84，2011年2月。doi: 10.1088/ 0004-637X/728/2/84。[56] D. B. Jess、B. Snow、S. J. Houston、G. J. J. Botha、B. Fleck、S. Krishna Prasad、A. Asensio Ramos、R. J. Morton、P. H. Keys、S. Jafarzadeh、M. Stangalini、S. D. T. Grant 和 D. J. Christian。利用震学绘制太阳黑子中的色球共振腔。《自然-天文学》，4: 220–227，2020年1月。doi: 10.1038/s41550-019-0945-2。[57] A. N. Wright、M. D. Hartinger、K. Takahashi 和 T. Elsden。地球磁层中的阿尔芬波。载于 Andreas Keiling（编），《横跨日球物理学的阿尔芬波：进展、挑战与机遇》，第285卷，第215–247页，2024年1月。doi: 10.1002/9781394195985.ch10。 ˆ[58] S. J. Wharton、I. J. Rae、J. K. Sandhu、M.-T. Walach、D. M. Wright 和 T. A. K. Yeoman。地磁暴期间本征频率连续谱的变化：对等离子体质量动力学和超低频波耦合的影响。《地球物理学研究杂志：空间物理学》，125 (6):e27648，2020年6月。doi: 10.1029/2019JA027648。[59] J. D. Nichols、T. K. Yeoman、E. J. Bunce、M. N. Chowdhury、S. W. H. Cowley 和 T. R. Robinson。木星主极光椭圆内的周期性辐射。《地球物理研究快报》，44(18):9192–9198，2017年9月。doi: 10.1002/2017GL074824。[60] M. K. James、S. M. Imber、T. K. Yeoman 和 E. J. Bunce。水星磁层中的磁力线共振：结构及其对等离子体分布的影响。《地球物理学研究杂志：空间物理学》，124(1):211–228，2019年1月。doi: 10.1029/2018JA025920。[61] M. B. Kors´os、R. Erd´elyi、X. Huang 和 H. Morgan。耀斑与非耀斑活动区大气中的磁螺度通量振荡。《天体物理学杂志》，933(1):66，2022年7月。doi: 10.3847/1538-4357/ac7469。[62] S. A. Anfinogentov、P. Antolin、A. R. Inglis、D. Kolotkov、E. G. Kupriyanova、J. A. McLaugh-lin、G. Nistic`o、D. J. Pascoe、S. Krishna Prasad 和 D. Yuan。日冕震学中的新型数据分析技术。《空间科学评论》，218(3):9，2022年4月。doi: 10.1007/ s11214-021-00869-w。

[63] S. Jafarzadeh, D. B. Jess, M. Stangalini, S. D. T. Grant, J. E. Higham, M. E. Pessah, P. H. Keys, S. Belov, D. Calchetti, T. J. Duckenfield, V. Fedun, B. Fleck, R. Gafeira, S. M. Jefferies, E. Khomenko, R. J. Morton, A. A. Norton, S. P. Rajaguru, L. A. C. A. Schiavo, R. Sharma, S. S. A. Silva, S. K. Solanki, O. Steiner, G. Verth, G. Vigeesh, 和 N. Yadav。波分析工具。*Nature Reviews Methods Primers*，5:21，2025年4月。doi: 10.1038/s43586-025-00392-0。[64] J. C. Guevara G´omez, S. Jafarzadeh, S. Wedemeyer, S. D. T. Grant, H. Eklund, 和 M. Szyd- larski。毫米波段的太阳。IV. 小尺度亮特征中的磁流体动力学波。《天文学与天体物理学》，671:A69，2023年3月。doi: 10.1051/0004-6361/202244228。[65] J. L¨ohner-B¨ottcher, W. Schmidt, R. Schlichenmaier, H.-P. Doerr, T. Steinmetz, 和 R. Holzwarth。太阳黑子本影中的绝对速度测量。《天文学与天体物理学》，617:A19，2018年9月。doi: 10.1051/0004-6361/201832886。[66] B. Ruiz Cobo, C. Quintero Noda, R. Gafeira, H. Uitenbroek, D. Orozco Su´arez, 和 E. P´aez Ma˜n´a。DeSIRe：基于响应函数的偏离系数辅助的斯托克斯反演。《天文学与天体物理学》，660:A37，2022年4月。doi: 10.1051/0004-6361/202140877。[67] D. B. Jess, S. D. T. Grant, W. Bate, J. Liu, S. Jafarzadeh, P. H. Keys, L. E. A. Vieira, A. Dal Lago, F. L. Guarnieri, D. J. Christian, D. Gilliam, 和 D. Banerjee。光纤分辨光学与近紫外切尔尼-特纳成像光谱偏振仪（FRANCIS）。《太阳物理学》，298 (12):146，2023年12月。doi: 10.1007/s11207-023-02237-z。[68] H.-J. Fahr, H. Fichtner, 和 K. Scherer。高能中性原子作为来自遥远等离子体区域的信使的理论方面，重点讨论日球层。《地球物理学评论》，45 (4):RG4003，2007年11月。doi: 10.1029/2006RG000214。[69] M. Goossens, R. Erd´elyi, 和 M. S. Ruderman。太阳大气中的共振磁流体动力学波。《空间科学评论》，158(2-4):289–338，2011年7月。doi: 10.1007/s11214-010-9702-7。[70] C. D. MacBride, D. B. Jess, E. Khomenko, 和 S. D. T. Grant。太阳低层大气中的双极扩散：太阳黑子的磁流体力学模拟。《天体物理学杂志》，938(2):154，2022年10月。doi: 10.3847/1538-4357/ac94c3。[71] M. Stangalini, G. Verth, V. Fedun, A. A. Aldhafeeri, D. B. Jess, S. Jafarzadeh, P. H. Keys, B. Fleck, J. Terradas, M. Murabito, I. Ermolli, R. Soler, F. Giorgi, 和 C. D. MacBride。太阳黑子中的大尺度相干磁流体动力学振荡。《自然-通讯》，13:479，2022年1月。doi: 10.1038/s41467-022-28136-8。[72] S. A. Belov, Y. Zhong, D. Y. Kolotkov, 和 V. M. Nakariakov。利用卷积神经网络—长短期记忆神经网络检测太阳日冕环中的扭 kink 振荡。《天体物理学杂志增刊》，281(1):12，2025年11月。doi: 10.3847/ 1538-4365/ae0a34。[73] C. D. MacBride, D. B. Jess, S. D. T. Grant, E. Khomenko, P. H. Keys, 和 M. Stangalini。利用机器学习技术，准确约束光谱成像观测中的速度信息。《伦敦皇家学会哲学汇刊》*A*辑，379 (2190):20200171，2021年2月。doi: 10.1098/rsta.2020.0171。[74] M. K. James, S. M. Imber, J. M. Raines, T. K. Yeoman, 和 E. J. Bunce。一种用于分类信使号快速成像等离子体光谱仪质子光谱的机器学习方法。《地球物理学研究杂志：空间物理学》，125(6):e27352，2020年6月。doi: 10.1029/2019JA027352。[75]M. K. James, T. K. Yeoman, P. Jones, J. K. Sandhu, 和 J. Goldstein。用于地球内磁层的可扩展等离子体离子成分与电子密度模型（SPICED）。《地球物理学研究杂志：空间物理学》，126(9):e29565，2021年9月。doi: 10.1029/2021JA029565。[76] L. E. A. Vieira, F. L. Guarnieri, A. Dal Lago, I. de Oliveira, F. Carlesso, F. Tavares, A. Barbosa, M. Rockenbach, J. E. R. Costa, L. A. Da Silva, M. I. Alayo, 和 I. Y. Abˆe。利用伽利略太阳空间望远镜（GSST）研究太阳磁性与日球层演化。载于美国地球物理联合会秋季会议摘要，第2024卷，美国地球物理联合会秋季会议摘要，第SH11F–2855页，2024年12月。[77] J. W. Dungey。导电大气中引力场下磁流体静力学问题的一族解。《皇家天文学会月刊》，113:180，1953年1月。doi: 10.1093/mnras/113.2.180。

[78] J. W. Dungey 和 D. J. Southwood。磁层中的超低频波。《空间科学评论》，10(5):672–688，1970年4月。doi: 10.1007/BF00171551。