利用木星系统中的在轨X射线仪器探索日球物理学中的基本粒子加速与损失过程

为*2024—2033*年太阳与空间物理（太阳物理学）十年调查撰写的白皮书

作者：W. Dunn*[1,2]，G. Berland*[3]，E. Roussos[4]，G. Clark[5]，P. Kollmann[5]，D. Turner[5]，C. Feldman[6]，T. Stallard[6]，G. Branduardi-Raymont[24,2]，E. E. Woodfield[7]，I. J. Rae[8]，L. C. Ray[9]，J. A. Carter[6]，S. T. Lindsay[6]，Z. Yao[10]，R. Marshall[3]，A. N. Jaynes[11] A.，Y. Ezoe[12]，M. Numazawa[12]，G. B. Hospodarsky[11]，X. Wu[13]，D. M. Weigt[14]，C.M. Jackman[14]，K. Mori[15]，Q. Nénon[16]，R. T Desai[17,18,7]，L. W. Blum[3]，T. A. Nordheim[19]，J.U. Ness[20]，D. Bodewits[21]，T. Kimura[22]，W. Li[23]，H. T. Smith[5]，D. Millas[1,2]，A. D. Wibisono[24,2]，N. Achilleos[1,2]，D. Koutroumpa[25]，S. C. McEntee[14]，H. Collier[26,27]，A. Bhardwaj[28]，A. Martindale[6]，S.J. Wolk[29] S.V. Badman[9]，R. P. Kraft[29]1.伦敦大学学院（UCL），英国 2. UCL/伯贝克行星空间科学中心，英国，3. 科罗拉多大学博尔德分校，4. 马克斯·普朗克太阳系研究所，德国，5. 约翰斯·霍普金斯大学应用物理实验室，美国马里兰州劳雷尔，6. 莱斯特大学，英国，7. 英国南极调查局，英国剑桥 8. 诺森比亚大学，英国，9. 兰卡斯特大学，英国，10. 中国科学院，11. 爱荷华大学，12 东京都立大学，13 日内瓦大学，14. 都柏林高等研究院，爱尔兰，15. 哥伦比亚大学，美国纽约州，16. IRAP-CNRS，法国，17. 伦敦帝国理工学院，英国，18. 华威大学，英国，19. 喷气推进实验室、加州理工学院，美国加利福尼亚州，20. 欧洲空间局（ESA）、ESAC，西班牙 21. 奥本大学，美国阿拉巴马州。22. 东京理科大学，日本。23. 波士顿大学，美国马萨诸塞州。24. 穆拉德空间科学实验室、伦敦大学学院（UCL），英国。25. 大气、环境与空间观测实验室、CNRS，法国。26. 苏黎世联邦理工学院，瑞士。27. 西北瑞士应用科 学，瑞士，28. 物理研究实验室，印度。29 史密松天体物理台、CfA | 哈佛大学与史密松学会，美国马萨诸塞州。*这些作者对本研究的贡献相同。

概要：木星磁层被认为是太阳系中最强大的粒子加速器，可将电子从 eV 加速至 >70 兆电子伏特，并将离子加速至 GeV 能量。电磁过程如何驱动能量和粒子流，产生并移除高能粒子，是日球物理学的核心议题。尤其是，《2013年太阳与空间物理学十年战略》提出要“发现并表征日球层内部以及整个宇宙中发生的基本过程”。木星系统为研究上一项十年调查所强调的所有普适过程提供了理想的天然实验室。

X射线波段已被广泛用于远程研究天体物理系统中的等离子体。仅钱德拉和*XMM*-牛顿*X*射线天文台 迄今就已发表 >14,000 篇经同行评审的论文（获得 >120,000 次引用）。然而，这些研究中有 <1% 所探测的系统可以通过原位测量进行研究。大多数天体物理辐射可归为 5 种 X射线过程：荧光、热辐射/日冕辐射、散射、电荷交换和粒子加速。木星系统或许是唯一兼具丰富的各类 X射线辐射过程、且可供实地探测的系统，因此能够直接将基本等离子体过程与其产生的 X射线特征联系起来。这为研究无法通过原位探测抵达的天体提供了宝贵的地面基准，例如褐矮星、磁星或绘制宇宙图景的星系团。

在此，我们展示了将原位测量与对木星辐射带、伽利略卫星、木卫一环面和大气层的在轨X射线观测相结合，如何解答日球物理学的基本问题，并对日球物理学和天体物理学产生广泛影响，包括：

1. 太阳系中最强辐射带的整体结构及其时间变化具有怎样的特征？哪些过程在控制这种结构和变化？2. 物质流失到大气层、卫星、环物质和中性粒子环面的过程如何达到平衡，并最终限制辐射带的强度？3. X射线特征如何刻画不同种类的天体物理等离子体？4. 木星等快速自转的巨行星是否存在磁层尖点？这种结构的范围和时间变化如何?

从地球轨道观测木星磁层，会受到X射线光子通量和空间分辨率的限制。软X射线（0.2-10 千电子伏特）成像仪器从未飞抵气态巨行星所在的区域。微型化X射线光学系统和抗辐射探测器等新技术的发展，使紧凑、轻巧（~10 千克）、视场宽广的X射线仪器成为木星系统的理想选择，让这一令人振奋的新可能成为现实。目前及即将执行的美国国家航空航天局/欧洲航天局/日本宇宙航空研究开发机构/中国科学院任务中，已有越来越多此类仪器积累了应用经验（*AEPEX*上的*AXIS*；贝皮科伦坡号上的*MIXS*；*SMILE*上的*SXI*；*SVOM*上的*MXT*；爱因斯坦探针上的*WXT*；*Gamow*上的*LEXT*）。我们在此指出，要探究辐射带物理学和相对论性粒子行为等日球物理学基本问题，必须使用此类仪器，从而使日球物理学能够为研究太阳系之外的天体物理系统提供独特且不可替代的垫脚石。

引言： 在提交给十年调查的配套白皮书中（Clark+，2022年；Kollmann+，2022年；Turner+，2022年），我们阐述了探索日球物理学中支配粒子加速与损失的基本电磁过程的必要性，并借助木星辐射带这一天然实验室展开研究；尤其是通过美国国家航空航天局资助的任务概念磁层粒子加速、源区与汇区综合观测（*COMPASS* - Clark+，2022年）。本文特别关注如何利用X射线为单点原位粒子与场测量提供全球背景，从而深入认识支配此类系统的动力学，并解答日球物理学中的基本问题。

迄今为止，所有针对木星系统的（0.2 - 20 千电子伏特）X射线观测均由地球轨道上的天文台获取。自1999年以来，这些观测最常由美国国家航空航天局的钱德拉和*NuSTAR*X射线天文台、欧洲航天局的*XMM*-牛顿X射线天文台以及日本宇宙航空研究开发机构的朱雀卫星开展（综述见 Dunn，2022年）。这些旗舰级X射线天文台为快速旋转磁层的控制过程带来了突破性认识，揭示了：多种重离子极光（例如 Branduardi-Raymont[B-R]+，2008年）；通过极光热点实现的磁层—电离层（M-I）耦合（Gladstone+，2002年，《自然》）；如钟表般规律的电磁脉动（Dunn+，2017年，《自然·天文学》）；木星的磁星式极光（Mori+，2022年，《自然·天文学》）；等离子体损失至卫星、环和环面产生的X射线荧光（Bhardwaj+，2005年；Elsner+ 2002）；辐射带超相对论电子辐射（Ezoe+，2010年）；以及电磁离子回旋（EMIC）波作为离子极光驱动因素可能具有普适性

（Yao+，2021年，《科学进展》）。尽管地球轨道观测设备探测到的木星X射线通量有限、空间分辨率较低，且无法观测木星夜侧，这些突破仍然得以实现。

尽管木星磁层会发出多种波长的辐射（可见光、射电／同步辐射、紫外线、红外线、可见光和X射线），但X射线之所以成为辐射带科学中尤为突出的波段，不仅因为其产生过程涉及高能粒子相互作用，还因为我们能够区分不同区域（卫星、极光、辐射带、木卫一环面、木星大气层）中不同粒子种类的相互作用，并将其对应到不同的能量范围（从千电子伏特到相对论能量）。例如，电子能够产生0.2–20千电子伏特的（非）热韧致辐射连续谱，而不同种类的离子在碰撞时各自会产生特征谱线（例如，O^{6+} 离子的特征是位于~0.56千电子伏特处的三重线——图4b）。相比之下，例如，对木星同步辐射的观测只能测量低空电子带，无法提供多少有关其他粒子种类或区域的信息。X射线光谱既取决于高能粒子（种类和通量）的性质，也取决于散射介质或中性粒子。因此，X射线光谱能够为高能粒子分布（第1节和第3节）、碰撞率以及碰撞物质的性质（第2节）提供独特的见解。

因此，X射线是对木星辐射带的多个组成部分和过程进行全球观测的理想波段。观测档案表明，这不仅是可行的任务，而且通过专门的木星轨道X射线成像仪（第4节），有望显著增进认识并取得开创性发现。

1. 通过时变X射线光谱和成像识别木星辐射带的全球动力学与源过程：辐射带是拥有高强度俘获高能粒子的磁层区域。地球、木星、土星、天王星、海王星和木卫三都拥有辐射带，这表明辐射带可能是具有强大磁层的天体的普遍特性。在太阳系的辐射带中，木星的辐射带最为强烈，其兆电子伏特电子的强度比其他行星高出>2 个数量级（Mauk和Fox，2010年），吉电子伏特离子的强度也更高（Becker+，2021年）。对于木星而言，辐射带始于距离云顶不到0.5 R_J（R_J=木星半径）处，并延伸至木卫二轨道之外（9.4 R_J），其规模和强度远超整个封闭的地球磁层。在如此庞大的系统中，单点原位粒子／场测量对于识别驱动过程至关重要，但要确定哪些过程支配该系统，还需要全球背景。因此，与原位测量同时获取的全球图像必不可少。

木星系统的高能环境使其成为X射线观测的理想目标。2006年至2014年间对木星进行的3次*Suzaku X*射线成像光谱仪（*XIS*）观测均独立发现了来自木星辐射带的弥散1-5千电子伏特X射线辐射（图1；Ezoe+，2010年；Numazawa+，2019年；2021年）。辐射带X射线谱表明，这些辐射追踪的是超相对论性（>10 兆电子伏特）电子分布——电子通过散射可见光太阳光子产生X射线。

结合原位测量，这种全球成像为检验木星辐射带的来源提供了强有力的工具。对于开展接近阶段观测或远木点为30-90 R_J 的任务，这种成像可对辐射带进行近乎连续的覆盖，并将目前尚未明确的辐射带与太阳风压缩、木卫一的火山活动或磁尾重联等测量之间的关系联系起来，从而解答有关木星高能粒子来源及其调控过程的长期悬而未决的问题。将木星辐射带与地球辐射带的全球视图（例如来自范艾伦探测器/SAMPEX）进行比较，将揭示哪些过程具有普适性。

要将这些过程联系起来，需要使用木星轨道X射线仪器，以足够短的时间间隔获取图像和光谱。由于到达地球轨道的X射线通量较低，每次朱雀卫星观测都需要曝光40小时。**在木星轨道上，木星X射线通量~10^7高于到达地球的通量**，因此可以进行短时间尺度（~小时）的曝光，测量等离子体分布随经度、地方时和L壳层的时间变化。

与其他太阳系X射线源的情况一样（Lisse+，2017年；Dunn+，2021年），木星辐射带的亮度高于模型预测（Numazawa+，2021年）。解决这些X射线亮度不一致性，对于解读天体物理学中的X射线特征也至关重要。要解决木星辐射带的这一问题，需要开展适当的原位相对论性粒子分布测量（Kollmann+，2022年），并结合X射线观测，正如 Clark+（2022年）提出的*COMPASS*方案。此类测量将有助于建立所需的逆康普顿模型，适用于从脉冲星（Lyutikov+，2012年）到星系（Strong+，2007年，引用量为1262）的天体。

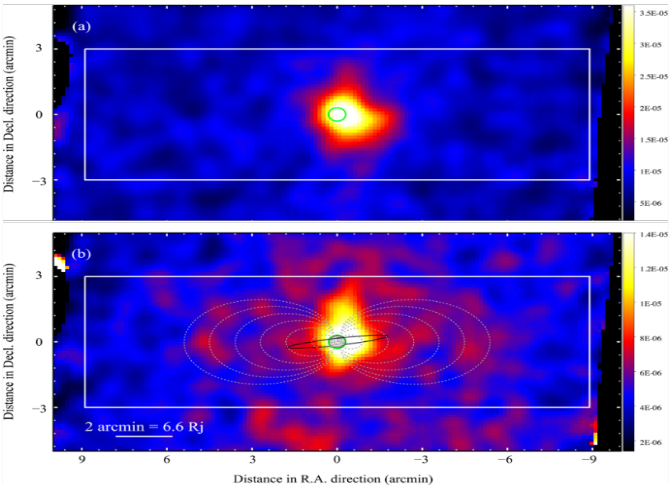


图***1***：朱雀***XIS***拍摄的木星及其辐射带图像（*Numazawa+，2019*年）：能量范围为*0.2–1 keV*（*a*）和*1–5 keV*（*b*），显示了木星辐射带在*1–5 keV*能量范围内的电子辐射。绿色圆圈表示当时木星的位置和大小（*39″*）。灰色虚线表示磁力线，其赤道交点分别位于*3*、*6*、*9*、*12*、*15*和*18* R_J。黑线表示木卫一轨道路径。

2. 通过木星卫星、环面和环的X射线图表征辐射带损失：尽管加速和源过程是辐射带物理学的重点，但损失同样重要，因为如果没有损失，粒子强度将会无限累积。对于木星而言，辐射带深嵌于内磁层（<15 R_J）中，远离磁层顶停滞距离（60-100 R_J）。因此，与地球不同，木星的辐射带粒子无法直接逃逸至太阳风（SW）中。相反，内磁层中的过程控制着辐射带粒子群的状态及其损失。在整个太阳系中，

卫星、中性粒子和环会调节、侵蚀并摧毁辐射带（Kollmann+，2017年；Roussos+，2018年）。木星内磁层中卫星、环和气体环面丰富，它们不仅提供等离子体，还会从系统中移除高能粒子（图2）。各种过程为何总体上促使辐射带累积，目前尚不清楚。X射线辐射是破解这一问题的关键：通过远程监测和诊断高能粒子与中性粒子的碰撞，识别、绘制并表征全球损失过程及其时间变化。

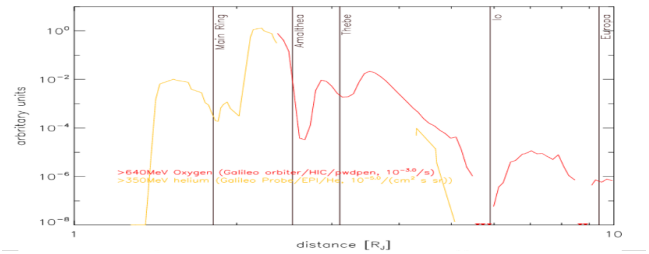


图*2*：卫星和主环对木星辐射带的清除作用*(Kollmann+，2022年)*：木星辐射带中氧和氦的高能粒子强度，显示卫星和环的轨道处高能粒子数量减少。

1999年，首次对木星进行的钱德拉X射线观测发现，木卫一（图3）、木卫二和木卫一环面存在X射线辐射（Elsner+，2002年）。伽利略卫星的X射线辐射由高能粒子撞击卫星表面产生（Nulsen+，2020年）。因此，产生的X射线辐射取决于表面成分，以及离子和电子轰击的贡献（Paranicas+，2002年）。离子碰撞会产生粒子诱发X射线发射（PIXE – Johansson+，1995年），其特征是具有强烈、离散的荧光谱线。相比之下，电子会产生厚靶韧致辐射（TTB），其辐射呈连续谱，也能产生PIXE谱线（主要针对Z > 13元素）（Markowicz & Van Grieken，1984年）。粒子向卫星表面的沉降取决于其俯仰角，因而也取决于等离子体分布、磁场构型和波粒相互作用（Nénon+，2017年；2018年），因此X射线辐射能够反映驱动粒子沉降的磁层因素。

从地球轨道观测伽利略卫星，其可探测到的X射线通量极低，因此无法研究其随时间或半球的变化。地球轨道观测设备的研究能力已达上限，而木星轨道探测仪器可获得的~10^7 X射线通量增幅，将提升对伽利略卫星的探测能力，使研究人员能够同时研究时间变化和高能粒子损失分布图，并对辐射带状况进行原位测量。

与土星不同，土星环发出的X射线荧光已被观测到（Bhardwaj+，2005年）；而辐射带粒子与木星较稀疏的环以及木卫五和木卫十四（图2）碰撞所产生的X射线辐射，因信号限制，尚未从地球轨道进行研究。从地球上也观测到了木卫一环面的X射线辐射，但其成因尚不明确，似乎是电子碰撞与离子-中性粒子碰撞共同作用的结果（Elsner+，2002年），这有助于追踪环面在损失过程中的作用。在地球轨道观测到的信号较弱，使得木卫一环面变化的解释颇具挑战。这一问题同样可通过轨道X射线仪器解决。

在更广泛的天体物理学领域，人们通过研究高能粒子与中性粒子的相互作用，利用X射线研究含尘系统（例如星际／恒星际天体和星云——综述请参见 Heinz 和 Corrales，2016年）。对于这类系统，此处提出的观测将提供关键的地面实测依据，从而有助于解读仅凭远程观测获得的信号。然而，在可预见的未来，没有任何地球轨道X射线仪器能够提供更高的空间分辨率来

开展相关研究。例如，欧洲航天局的 下一代X射线天文台*ATHENA+* （计划于21世纪30年代发射）的空间分辨率比钱德拉低一个数量级。要通过绘制和刻画粒子向各卫星的损失来取得突破，需要一台木星轨道X射线仪器。

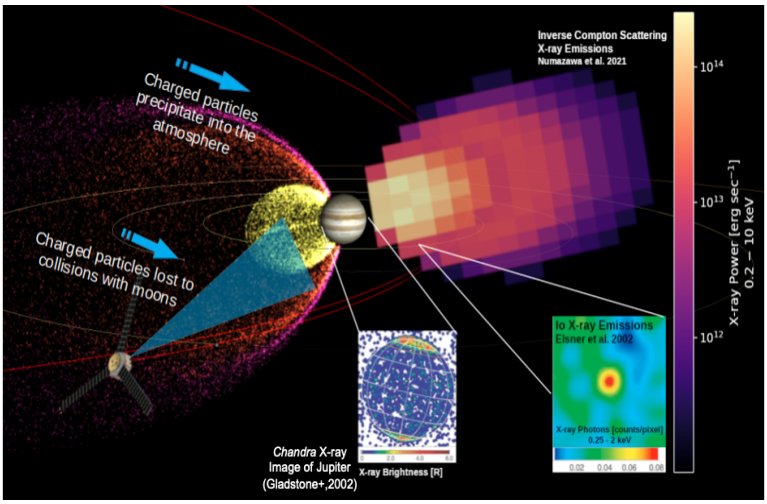


图 ***3.*** *COMPASS X*射线成像仪观测示意图：带电粒子沉降至木星大气层（插图为钱德拉观测木星极光和赤道*X*射线辐射的图像——*Gladstone+，2002*年）；带电粒子损失至卫星（插图为*Elsner+*于*2002*年对木卫一的钱德拉观测图像）；以及木星辐射带产生的逆康普顿*X*射线模型。

3. 大气带损失、磁层—电离层耦合与开放磁层系统的普遍性：沉降至木星大气层的高能粒子会产生多种X射线辐射。不同的沉降粒子会产生不同的X射线谱特征。电子沉降会产生韧致辐射，可用于诊断电子分布（B-R+，2004年；Mori+，2022年，《自然·天文学》）；带电量足够高或能量达到>300 千电子伏特/原子的离子则会产生电荷交换谱线（图4），从而确定沉降离子种类及其能量（B-R+ 2007；Houston+，2020年）。

与地球一样，木星也会通过粒子沉降至大气层而损失辐射带粒子（Kollmann+，2021年）。木星低纬度X射线辐射主要由太阳光子与大气氢发生弹性散射产生（Maurellis+，2000年），但在辐射带损失锥最大的区域，辐射也会增强（Bhardwaj + 2006；McEntee+，审稿中）。从地球轨道观测时，木星只有向阳的半球可见，因此无法从占主导地位的散射太阳光子信号中分辨出这类辐射带粒子沉降产生的X射线能谱。然而，对于木星轨道航天器，夜侧观测不受散射阳光干扰，可监测电子和离子辐射带损失的光谱、空间和时间特征，并与例如EMIC波和哨声波的同步测量进行比较（Nénon+，2017年；2018年），从而关联源与损失过程。

木星拥有太阳系中最强大的极光，主导着其高纬度地区的X射线辐射（图4）。与脉冲星类似，木星极光相对于自转轴倾斜，并固定在旋转参考系中，因此会随着行星自转而转入和转出视野。许多波段都能为研究木星极光提供重要见解，而X射线的独特之处在于，它显示的是沉降粒子发出的辐射，而非大气响应（例如紫外线/红外线极光），并能区分电子极光（韧致辐射）和重离子极光（电荷交换谱线）。

这为磁层—电离层耦合提供了整体性刻画，可追踪向上和向下电流。尤其是，木星的重离子极光是太阳系中独特的实验室，为研究重离子丰度较高的磁层中的磁层—电离层耦合提供了深入见解。观测结果显示存在弧、随时间变化的脉动和边界，但它们变化的时间尺度过短，信号较弱的地球轨道观测（~1次/分钟）无法分辨（Dunn+ 2016）。拟议中的*COMPASS X*射线成像仪（*XRI*）将观测到一个极具变革性的行星信号，计数率达~10,000次/秒，从而揭示目前仅由稀疏点簇构成的形态。

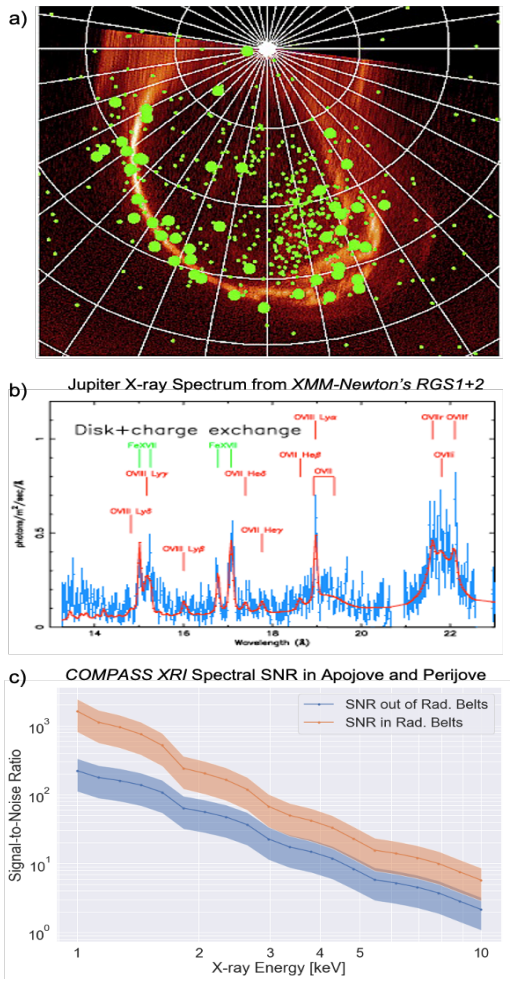


图*4*：*a*）木星北极的投影图，显示了*2003*年*2*月*24*日由哈勃空间望远镜*STIS*远紫外仪器和钱德拉*ACIS*仪器记录的紫外线（橙色）与*X*射线（绿色圆点）极光。每个绿色圆点表示一个*X*射线光子。小绿色圆点表示*<2 keV*光子，主要是来自沉降重离子的电荷交换谱线。大绿色圆点表示来自电子韧致辐射的*>2 keV*光子。韧致辐射与紫外主极光卵位于同一区域，而重离子极光则出现在其极向一侧。纬度和经度间隔均为*10°*的网格固定在木星系统*III*坐标中，*180°*朝下，*270°*朝左（*B-R+*，*2008*年）。*b*）木星的*XMM-*牛顿高分辨率光谱（蓝色十字），合并了*RGS 1+2* 光谱。叠加的红线为最佳拟合模型，其中包括用于代表木星软*X*射线极光的电荷交换模型，以及用于代表木星盘面辐射的散射太阳*X*射线谱线（*B-R+*，*2007*年）。*c*）使用*COMPASS X*射线成像仪（*XRI*）测得的木星*X*射线极光在辐射带内外的信噪比。

在日球物理学中，理解磁层在多大程度上普遍呈磁性开放或闭合状态，以及邓吉循环对不同系统的重要性，至关重要。对于木星这类快速自转系统，开放磁力线对流进入磁尾所需的时间尺度远长于行星自转周期，因此人们一直在讨论这类系统是否能够发生邓吉循环（McComas与Bagenal，2007年；Cowley+，2008年）。随着日球距离增加，系统可能从邓吉循环主导（例如水星）转变为黏滞相互作用主导的太阳风相互作用（例如木星）（Delamere与Bagenal 2010年；Masters，2018年）。

X射线观测或许能独特地揭开木星向太阳风开放程度这一长期谜题。太阳风电荷交换辐射是太阳风离子与中性粒子碰撞并产生电荷交换谱线的过程；通过这种辐射，可以确定太阳风沉降到大气层中的时间段。X射线天文台偶尔确实能探测到来自木星的太阳风电荷交换特征（Dunn+，2020b）。然而，由于空间分辨率低，且地球轨道处的信号微弱，人们一直无法确定其源区和持续时间。木星轨道探测仪器可获得光子丰富的信号，因此能够解决这一问题。欧洲航天局-中国科学院的*SMILE* *SMILE*航天器将利用太阳风电荷交换特征，以这种方式研究地球尖点区（Sibeck+，2018年；B-R+，2018年）。类似地，搜寻来自木星尖点区的太阳风电荷交换辐射，将检验木星尖点区是否存在、其朝向和时间变化，以及快速自转和/或遥远磁层向太阳风开放的程度。

4. X射线仪器的新进展助力日球物理研究取得突破：

微孔光学器件、耐辐射探测器等X射线仪器领域近期的突破性进展，使紧凑、轻便（~10 kg）、低功耗（~W）的X射线仪器成为可能，非常适合用于木星日球物理科学研究。为了观测本文讨论的源，仪器需具备以下性能：能量范围为0.2-8 keV，且在0.56 keV处的分辨率为0.15 keV；视场（FoV）为22+/-5°（可全球观测30-90R_J范围内的辐射带）；角分辨率为1°，以便在近木点[PJ] (4-6 R_J)期间实现木星的L壳层分辨率，并在远木点分辨卫星；或者具备~10’的分辨率，以便从<10 R_J处分辨卫星的表面特征。

目前在轨或计划于未来5年内发射的若干仪器搭载了轻型X射线仪器，符合上述要求，并将实现相关科学目标，包括：*MIXS*搭载于贝皮科伦坡号，用于观测水星的PIXE和厚靶韧致辐射（Bunce+, 2020）；*SXI*搭载于*SMILE*任务，用于研究地球尖点区和磁鞘中的SWCX（B-R+, 2018）；以及中法SVOM任务，用于观测伽马射线暴。日本宇宙航空研究开发机构的木星轨道*JUXTA*X射线仪器概念也为此奠定了重要基础（Ezoe+, 2013）。

对于美国国家航空航天局的日球物理学任务概念 COMPASS，搭载的X射线成像仪（XRI——含屏蔽层质量：15 kg；功耗：15 W）基于 AEPEX/AXIS 的技术积累（Marshall+，2020）。XRI 提供 22° 视场和 1° 分辨率（飞掠期间可达到 50–200 km 的卫星分辨率；PJ 期间可实现木星 L壳层分辨率）。尽管如今已能够制造出可耐受木星粒子本底的耐辐射X射线探测器，但噪声仍是一项挑战。图 4c 显示，尽管存在这一问题，信噪比仍能满足科学目标。为处理 PJ 期间高达 10,000 cts/s 的超强 X 射线信号，该仪器连接了 16 个 X 射线探测器（每个可处理 $6x10^4$ cts/s）。

木星轨道X射线仪器及其科学研究如今已具备很高的可行性和较低的风险，为日球物理学开辟了令人振奋的新范式。一座尚未探索的发现宝库正等待着木星轨道X射线仪器，而该仪器对于解答高能系统中能量和粒子传输的一系列基本问题至关重要。通过此类观测，日球物理学将为研究太阳系之外的天体物理系统提供不可替代的垫脚石。

参考文献

Becker, H. N., Alexander, J. W., Connerney, J. E., Brennan, M. J., Guillaume, A., Adumitroaie, V., ... & Bolton, S. J. (2021年). 木星相对论性电子带内缘高纬度区域的

Branduardi-Raymont, G., Elsner, R. F., Gladstone, G. R., Ramsay, G., Rodriguez, P., Soria, R., & Waite, J. H. (2004). XMM-牛顿首次观测木星。《天文学与天体物理学》.

Branduardi-Raymont, G., C. Wang, C.P. Escoubet, 等 (2018年), SMILE 定义研究报告, 欧洲空间局. ESA/SCI. https://doi.org/10.5270/esa.smile.definition_研究_报告- 2018年-

Bunce, E. J., Martindale, A., Lindsay, S., Muinonen, K., Rothery, D. A., Pearson, J., ... & Yeoman, T. (2020). 贝皮科伦坡号水星成像 X 射线光谱仪：科学目标、仪器性能与运

Clark, G. 等（2022年）。磁层粒子加速、源区与汇区综合观测（COMPASS）：一项前往木星极端磁层的任务概念，旨在解答日球物理学中的基本谜题。为2024—2033年太阳

Cowley, S. W. H., Badman, S. V., Imber, S. M., & Milan, S. E.（2008年）。对 DJ McComas 和 F. Bagenal 所著《木星：与太阳风发生本质不同的磁层相互作用》的评论。

Cravens, T. E., Howell, E., Waite Jr, J. H., & Gladstone, G. R.（1995年）。木星的极光氢沉降。《地球物理研究杂志：空间物理学》，*100*(A9), 17153-17161。

Cravens, T. E. (1997). 百武彗星X射线源：太阳风重离子的电荷转移。《地球物理研究快报》，*24*(1), 105-108.

Cravens, T., Waite, J., Gombosi, T., Lugaz, N., Gladstone, G., Mauk, B., & MacDowall, R. (2003). 木星X射线发射对磁层-电离层耦合的意义。《地球物理研究杂志:

Elsner, R. F., Gladstone, G. R., Waite, J. H., Crary, F. J., Howell, R. R., Johnson, R. E., Ford, P. G., Metzger, A. E., Hurley, K. C., Feigelson, E. D., 等人。（2002年）。发现来

Fraser, G.W., JD Carpenter, DA Rothery, JF Pearson, A Martindale, J Huovelin, J. Treis, M Anand, M Anttila, M Ashcroft 等（2010年）贝皮科伦坡号上的水星成像X射

Gladstone, G., Waite, J., Grodent, D., Lewis, W., Crary, F., Elsner, R. F., Weisskopf, M., Majeed, T., Jahn, J.-M., Bhardwaj, A., 等. (2002年). 木星上的脉动极光

Kollmann, P., Clark, G., Paranicas, C., Mauk, B., Roussos, E., Nénon, Q., ... & Rymer, A. (2021年). 木卫二轨道以内的木星离子辐射带。《地球物理研究杂志：空间物

McComas, D. J., & Bagenal, F.（2007年）。木星：与太阳风发生了本质上不同的磁层相互作用。《地球物理研究快报》，34(20)。

McEntee, S.C., C.M. Jackman, D.M. Weigt, W. R. Dunn, V. Kashyap, R. Kraft, C.K. Louis, G. Branduardi-Raymont, G. R. Gladstone, P. T. Gallagher, （审稿中），比较

Metzger, A. E., Gilman, D. A., Luthey, J. L., Hurley, K. C., Schnopper, H. W., Seward, F. D., & Sullivan, J. D.（1983）。木星X射线的探测。《地球物理研究杂志：空

Mori, K., Hailey, C., Bridges, G. 等木星非热硬X射线的观测及其起源。《自然·天文学》6, 442–448（2022年）。https://doi.org/10.1038/s41550-021-01594-8

Nénon, Q., Sicard, A., & Bourdarie, S.（2017年）。木星木卫二轨道以内电子辐射带的新物理模型。《地球物理研究杂志：空间物理学》，122(5)，5148- 5167。

Nénon, Q., Sicard, A., Kollmann, P., Garrett, H. B., Sauer, S. P. A., & Paranicas, C.（2018年）。木星木卫二轨道以内质子辐射带的物理模型。《地球物理研究杂志：空间

Nulsen, S., Kraft, R., Germain, G., Dunn, W., Tremblay, G., Beegle, L., Branduardi-Raymont, G., Bulbul, E., Elsner, R., & Hodyss, R. (2020). 木星伽利略卫星

Numazawa, M., Y. Ezoe, K. Ishikawa, T. Ohashi, Y. Miyoshi, T. Kimura, Y. Uchiyama, D. Shiota, and G. Branduardi-Raymont (2019) 太阳活动峰年期间朱雀卫

,

Turner, D. 等（2022年），跨尺度物理学与日球层及其以外无碰撞等离子体中的粒子加速：III. 辐射带．2024- 2033年太阳与空间物理学（日球物理学）十年调查白皮书。

，