地质地球所研究发现水星空间大尺度磁通量绳与形成机理

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/10495.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

在太阳系内禀偶极磁场行星中，水星的磁场最弱，其磁场强度在赤道表面比地磁场低两个数量级。水星弱磁场受强太阳风驱动形成太阳系中最活跃、尺度最小的行星磁层（图1）。其辐射带、电离层、等离子层及大气层等明显消失，由此导致行星空间环境显著区别于地球。研究水星磁层动力学过程及空间环境特征是认识太阳风向弱磁层空间传输能量和物质一般规律的重要途径，同时对理解地球空间、认知电离层和磁层尺度对空间环境影响等具有重要意义。

类似地球，磁场重联是太阳风驱动水星磁层的重要机制。太阳风磁场通量通过向阳侧磁层顶磁重联被传输进入磁层；磁尾磁重联将磁能进行释放，其中一部分通过对流回到向阳侧磁层顶，形成一种名为“ Dungey Cycle ”的空间等离子体大尺度对流循环，从而导致行星空间与行星际物质和能量的交换运输。在地球空间，该循环的周期为1-3小时，但是在水星空间周期为2-3分钟。当前关于太阳风如何在分钟时间尺度内在水星磁层进行能量快速储存和释放，以及释放的形式和过程是否类似于地球等基本问题仍然不清楚。

磁通量绳或磁岛是磁重联的重要产物，普遍存在于行星磁层空间。“ 信使 ”号卫星的长期探测显示水星磁层充满大量的磁通量绳结构。这些磁结构观测持续时间在1秒、发生周期在10秒左右，空间尺度和离子回旋半径相当。中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理院重点实验室副研究员钟俊及合作者，利用“ 信使 ”号卫星的数据，对水星空间磁重联物理过程进行了系统性观测研究，发现了水星空间超大磁通量绳的存在证据并提出了相应的形成机理。这些大尺度磁通量绳或磁岛空间尺度与水星直径相当，显著区别于之前普遍探测到的离子尺度结构，在磁层能量传输和行星物质损失等过程中可能起着至关重要的作用。

在磁层顶，磁通量绳结构一般称作磁通量传输事件（FTEs），是连接太阳风和磁层的重要通道。地球磁层顶FTEs已被广泛地进行观测研究，多种理论模型被提出用于解释其形成机制。通过行星磁层尺度类比，水星空间大尺度FTEs对应于地球磁层10-15地球半径的空间尺度，现有的FTEs理论模型很难解释其形成。通过对水星磁层顶重联相关的事例进行观测分析，研究人员提出了大尺度FTEs形成机理，即众多离子尺度通量绳的相互作用、多步骤合并（图2a）。该过程区别于被普遍接受的多磁重联线的形成机制，反映了不同行星磁层空间尺度导致磁重联及磁通量绳的形成与演化过程的差异性。

研究人员发现在近磁尾同样可以形成超大磁通量绳或磁岛结构。然而不同太阳风条件下其形成机理也不同。在太阳风平静时期，可以形成南北尺度大于水星直径、观测持续时间甚至超过Dungey循环时间尺度的等离子体团（Plasmoid）结构。等离子体团一般被认为是一种特殊的大尺度磁

岛结构。通过分析推测，这些等离子体团可能是由近磁尾和远磁尾重联产生，近磁尾高密度等离子体及大量重离子的存在对其形成起着重要作用（图2b）。该发现表明，水星磁尾除了以大量的、离子尺度的磁通量管的形式进行能量快速、间歇性的释放外，大尺度等离子体团的形成也是其能量释放的重要形式。在极端太阳活动下，一般认为磁层动力学过程会更加剧烈，如发生强烈的地磁暴和亚暴等活动。然而，研究发现在ICME驱动水星磁层时，磁尾尾瓣区域磁场却反常呈现准稳态特征。此时磁尾动力学过程由多X线重联主导，多磁岛合并形成超大磁通量绳结构，将磁尾能量周期性释放（图2c）。该过程显著区别于当前的主流观点，类似地球亚暴相联系的“装-卸载”过程。

系列研究给出了水星磁层动力学过程的新物理图像，指明了水星磁层动力学过程及其对太阳风响应模式的多样性。由于水星没有电离层和明显的大气层，磁层动力学过程直接影响着太阳风向星体表面传递能量和动量，通过离子溅射、电荷交换等物理化学反应过程，从而改变风化层的物理化学特性、外逸层环境乃至整个行星空间环境的变化。欧空局和日本联合的双星计划BepiColombo已于2018年发射，预计明年开始飞越水星，2025年入轨，将开启水星空间环境的高质量、多仪器、太阳风-磁层-外逸层多区域的联合探测。磁重联及磁通量绳动力学过程，以及如何影响着水星全球性空间环境等一系列科学问题将有待于进一步深入认识。

系列研究成果发表于国际学术期刊*APJL*上。

论文链接：1、2、3

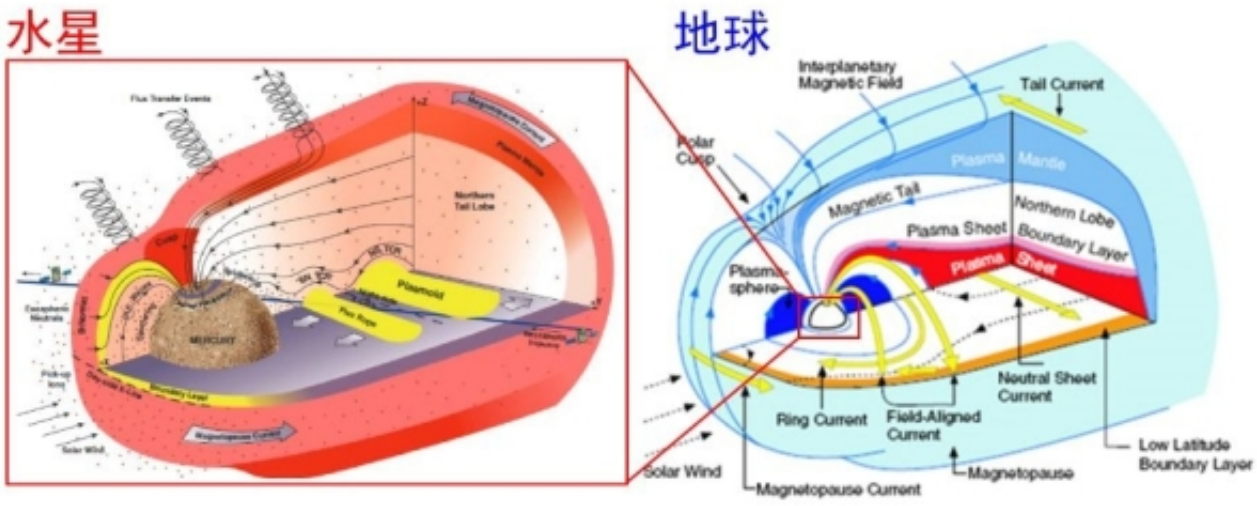


图1 水星与地球空间环境比较

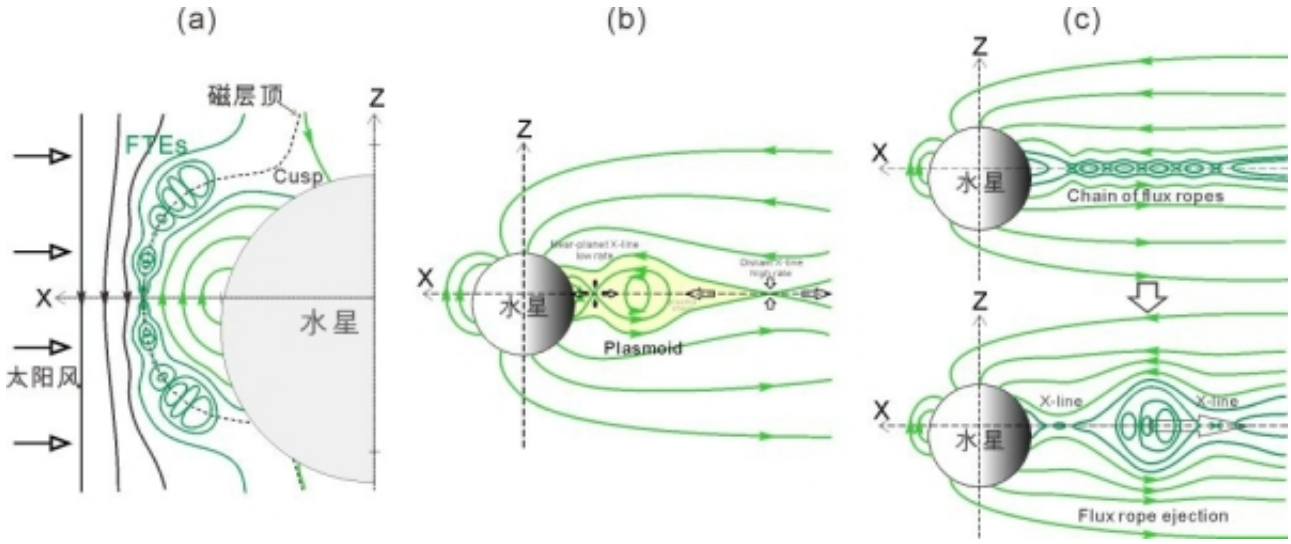


图2 水星空间大尺度磁通量绳结构形成过程。（a）众多离子尺度磁通量绳相互作用、多步骤合并形成FTEs（Zhong et al., 2020a）；（b）近磁尾和远磁尾重联形成磁岛结构（Zhong et al., 2019）；（c）极端太阳风条件下磁尾电流片撕裂模不稳定性形成多重联线及离子尺度磁岛链，通过众多磁岛合并形成大尺度磁通量绳，并进行周期性释放（Zhong et al., 2020b）

研究团队单位：地质与地球物理研究所

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发