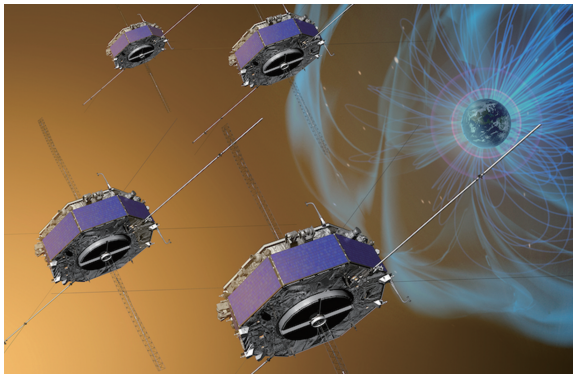


磁波如何在地球磁层中转化为热量

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Charles Day. *Physics*, November 26, 2024)

观测结果证实了一个理论模型，该模型解释了在地球磁层中，大尺度磁波如何通过将能量转移到较小尺度的声波来加热磁层的等离子体。

洋流衍生出巨大的环流，其动能被转移到越来越小的湍流结构中，直到粘滞性抵消了速度梯度，水分子因热随机性而晃动。当太阳风撞击磁层顶(地球磁场的外边界)时，类似的级联过程在太空中上演。这种撞击会发射大尺度的磁波，或阿尔文波，其能量消耗使磁层内的等离子体产生热量。然而，由于等离子体太稀薄，其粘滞度无法使这种级联反应继续进行。自1971年以来，研究人员逐渐加深了对太空等离子体中阿尔文波产生热量的机制的理解。这些研究最终得出了一个特定的假设：阿尔文波加速离子束，产生小尺度的声波，从而产生热量。最近，加州大学洛杉矶分校的Xin An和他的合作者已经找到了该机制的直接证据。更重要的是，该机制可能在太阳风和其他太空等离子体中起作用。



磁层多尺度探测中四艘航天器的艺术图，它们以四面体形式飞行，并收集有关磁力线重新连接和相关过程的微物理学信息

实验室规模的实验难以捕捉旋转等离子体的运动情况，而空间的观察结果更是稀缺。An和他的合作者所分析的观测数据是2015年由四个航天器在磁层多尺度探测(MMS)中获得的。当年发射的MMS旨在研究磁重联，在磁重联过程中，磁力线的拓扑结构发生剧烈变化。重联引起磁场重排的可能性很大，其尺度相当于从太阳光球层中产生的巨环的规模。但是导致重联的事件发生在相邻磁力线交汇的一个小得多的区域，即X线处。MMS的四个航天器以一种特定配置飞行，使所有航天器都见证了大尺度的拓扑变化，而其中一个航天器可能刚好飞过X线——一个以前没有特意发送过航天器的地方。

2015年9月8日，四个航天器沿着MMS的轨道穿过地球黄昏一侧的磁层顶。它们之间的距离足够远，使其可以一起探测到大尺度阿尔文波的通过，而其中每一个都可以单独探测到周围等离子体中离子的运动。An和他的合作者后来意识到，这些观察结果可以用来检验离子束及其产生的声波介导阿尔文波能量转化为热量的理论。

来自 MMS 航天

器上各种仪器的数据显示了驱动能量级联的三个因素的特征：阿尔文波和离子束，两者的长度都约为2000 km，以及声波，长度为50—1500 m。至关重要的是，这些仪器还记录了过程之间的联系。阿尔文波的磁压变化与离子密度、局部电场的涨落同步，而离子束的速度与局部阿尔文波或声波的速度相匹配。

航天器原位测量就像拍摄一个正在进行中的过程的快照。尽管MMS的观察持续了2.4小时，但不足以构成一部完整的电影。为了确认观察到的这种联系是真实的，研究人员使用美国国家大气研究中心的超级计算机Derecho进行了模拟。模拟花费了4000个CPU小时，在400000个时间步长中跟踪了5亿个粒子，与观察结果相匹配。

在法国米蒂比利牛斯天文台研究等离子体的François Rincon说：“这些结果为控制空间和天体物理等离子体的能量学和结构的复杂、多尺度的动力学过程提供了新的、详细的见解。”

此后，An和他的同事在其他MMS数据中发现了能量转移机制的实例。适用该机制的条件在太阳风中可能更为普遍。研究人员计划使用来自帕克太阳探测器和太阳轨道飞行器的数据来扩展他们的研究，从而更好地了解这种能量转移机制在空间等离子体中的普遍程度。