
研究发现极光边界波动是等离子体层顶表面波的光学表象

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/9507.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！

太阳风和行星际磁场在驱动地球磁层能量耗散中扮演着决定性角色。当行星际磁场具有南向分量时，太阳风物质和能量就会进入地球磁层，在其中对流，并最终释放到电离层和高层大气中，产生绚丽多彩的极光现象。在磁层中传播的大部分电磁能量由超低频波（Ultra-low Frequency, ULF, 0.1 mHz ~ 10 Hz）携带，并能耦合不同的等离子体区域。ULF波在产生准周期性地磁脉动和加速辐射带高能离子方面具有重要作用。目前广泛认可的ULF产生方式有两种：一种是外部太阳风扰动和磁层顶表面波，另一种是内部驱动，如夜侧磁层中的等离子体不稳定性。许多极光现象都与磁层中的ULF波动相关，如亚暴膨胀相起始、极光弧、极光强度波动等。由磁层顶表面波激发的ULF波是向内传播的（指向地球），在磁暴期间能穿透到内磁层，但相反的过程能否发生目前仍未知。

地球内磁层的主要部分是等离子体层，它是由绕地球共转的致密冷等离子体组成。等离子体层粒子密度随高度增加以对数趋势下降，在3-6 R_E （1 R_E =6378 km，为地球半径）处出现一个密度锐减的外边界叫等离子体层顶（Plasmapause）。等离子体层顶将温度和密度特征显著不同的两种等离子体区分开来，内侧是低能高密度冷等离子体，外侧是高能低密度的热等离子体。等离子体层顶外的高能粒子（电子和离子）可以沿磁力线沉降到极区电离层，在地球两极产生绚丽的极光。由于地球特殊的偶极磁场，两极的极光形态呈现椭圆环带结构，通常也称为极光卵。在平静条件下，极光卵的赤道边界通常是平滑的，对应于平滑的等离子体层顶和等离子体片内边界。在磁暴主相期间，随着磁层对流电场增强并穿透到内磁层，等离子体层外侧的共转流被剥蚀，形成陡峭的等离子体层顶。基于传统的磁流体动力学理论，Chen Hasegawa在1974年就预言当外部压力脉冲作用在等离子体层顶表面时，会激发等离子体层顶的本征膜，产生表面波。但是，一直以来并没有直接的观测证据，等离子体层顶表面波（Plasmapause Surface Wave, PSW）对磁层动力学的影响也一直不清楚。

另一方面，虽然通常情况下极光卵的赤道边界是平滑的，在磁暴期间也经常会在磁地方时下午到夜间时段观测到极光卵赤道边界的大幅波动现象。虽然有很多等离子体不稳定性机制用来解释这些波动，但由于缺乏极光粒子沉降源区的共轭观测，目前对其成因一直没有定论。极光边界和等离子体层顶在空间上处于相邻的磁通量管，两者的波动可能存在物理联系。

中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理重点实验室副研究员何飞、尧中华、研究员魏勇，国家卫星气象中心研究员张效信，北京大学教授濮祖荫、宗秋刚，山东大学教授史全岐等结合我国完全自主知识产权的风云三号卫星广角极光成像仪极光图像、国际卫星遥感和就位探测数据、以及地磁台站数据（涉及9颗不同轨道卫星和2个地磁台站系统），首次发现了PSW证据，证

明了极光边界波动（命名为“锯齿极光（Sawtooth Aurora）”）是PSW的光学表象，并且首次发现PSW激发了向外传播的ULF波（如图1所示）。此项工作还发现PSW驱动的锯齿极光在磁暴期间的发生频率高于90%，表明这一物理过程是磁暴期间的常态，并且对磁层空间能量输运具有关键影响。

风云三号卫星广角极光成像仪是目前低轨卫星上视场范围最大、空间分辨率最高的远紫外波段成像仪（Zhang et al., 2019），2017年12月发射成功后，在2018年各种等级磁暴期间都拍摄到了大量清晰的锯齿极光图像（图2）。研究团队进一步分析了2014-2018年期间DMSP卫星极光图像，发现这期间所有Dst小于-40 nT的磁暴主相中，90%以上产生了锯齿极光。这表明磁暴主相期间，昏侧磁层内发生了常态化的、系统性的物理过程。

研究团队进一步利用前期工作中建立的全球等离子体层顶动态模型（He et al., 2017），根据锯齿极光数据库，自动搜索和匹配磁层就位探测卫星数据，在2017年7月16日磁暴主相期间，辐射带探测卫星（VAP-A和VAP-B）穿越等离子体层顶过程中，首次发现了PSW证据（图3），详细计算发现PSW和锯齿极光在空间上共轭，锯齿波长、传播速度、传播方向一致，表明两者是相互关联的物理现象。进一步研究表明，PSW调制了等离子体层顶外的电子静电回旋谐波（ECH波），后者散射粒子沉降到极区，产生锯齿极光。相同时间段内，IMAGE地磁台链的共轭观测表明，地磁场产生了和PSW相同频率的ULF波动，北向和垂直分量ULF波向高纬传播（相当于在磁层中从等离子体层顶向外传播），东西分量ULF则向西传播（图4）。这表明是PSW激发了向外传播的ULF波，并且在传播过程中还产生了磁力线共振。

该项工作的重要意义在于初步厘清了长期以来关于PSW和锯齿极光的疑问和争论，发现了磁层内波动能量激发和传播的新模式，更新了磁层物质和能量输运图像。表面波和ULF波的产生是空间环境中基本的等离子体过程，也广泛存在于其它行星空间环境。在等离子体层顶发现的这些物理过程也可能存在于其他行星磁层中（如木星和土星磁层），这为今后行星空间物理研究工作提供了关键的方向指导。

研究成果发表于国际学术期刊《自然-通讯》（Nature Communications）。该成果受到中科院A类先导专项（鸿鹄专项，XDA17010201）、国家自然科学基金和中科院青年创新促进会等资助。

[论文链接](#)



图1 等离子体层顶表面波和锯齿极光

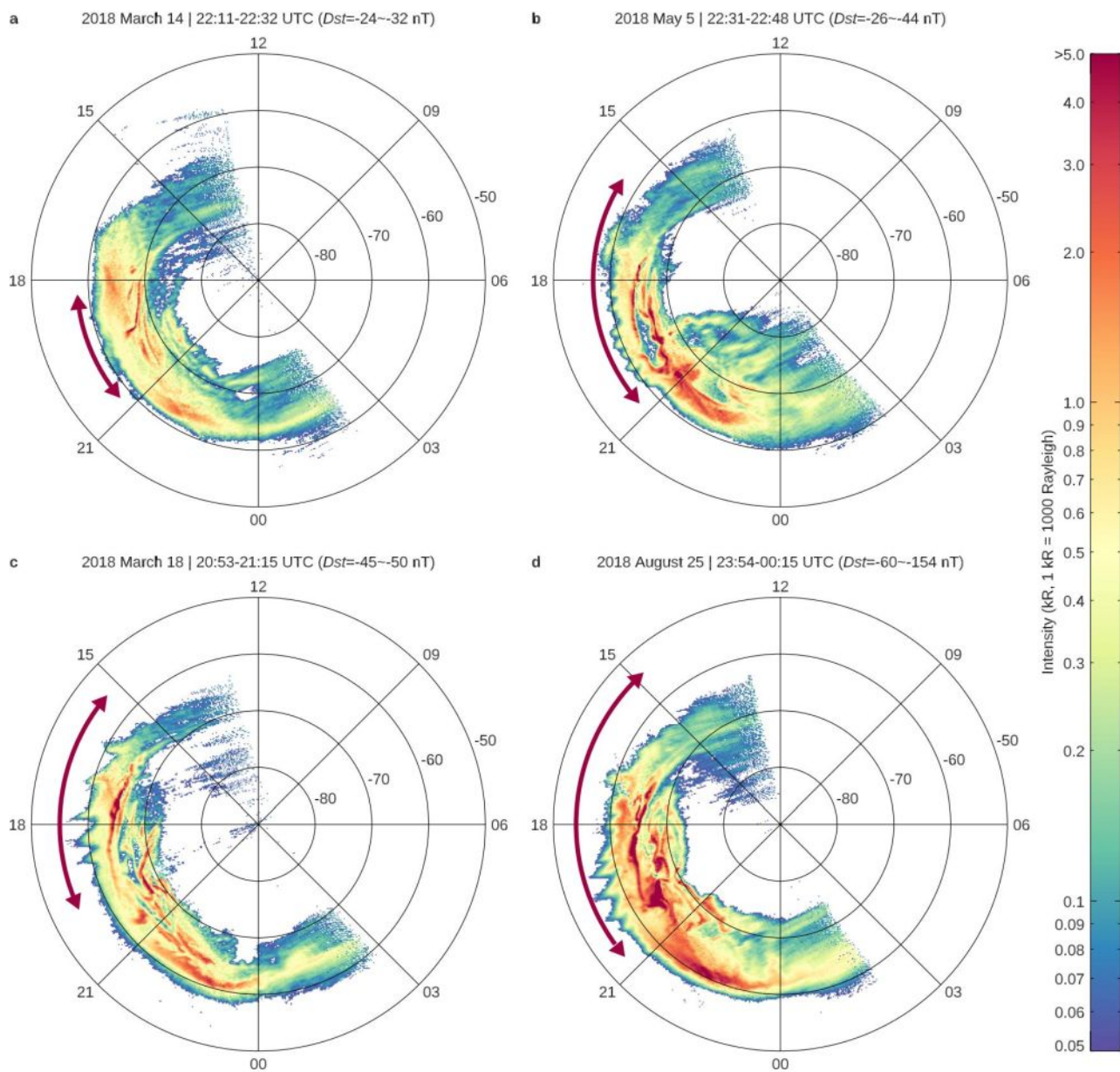


图2 风云三号卫星广角极光成像仪观测到锯齿极光

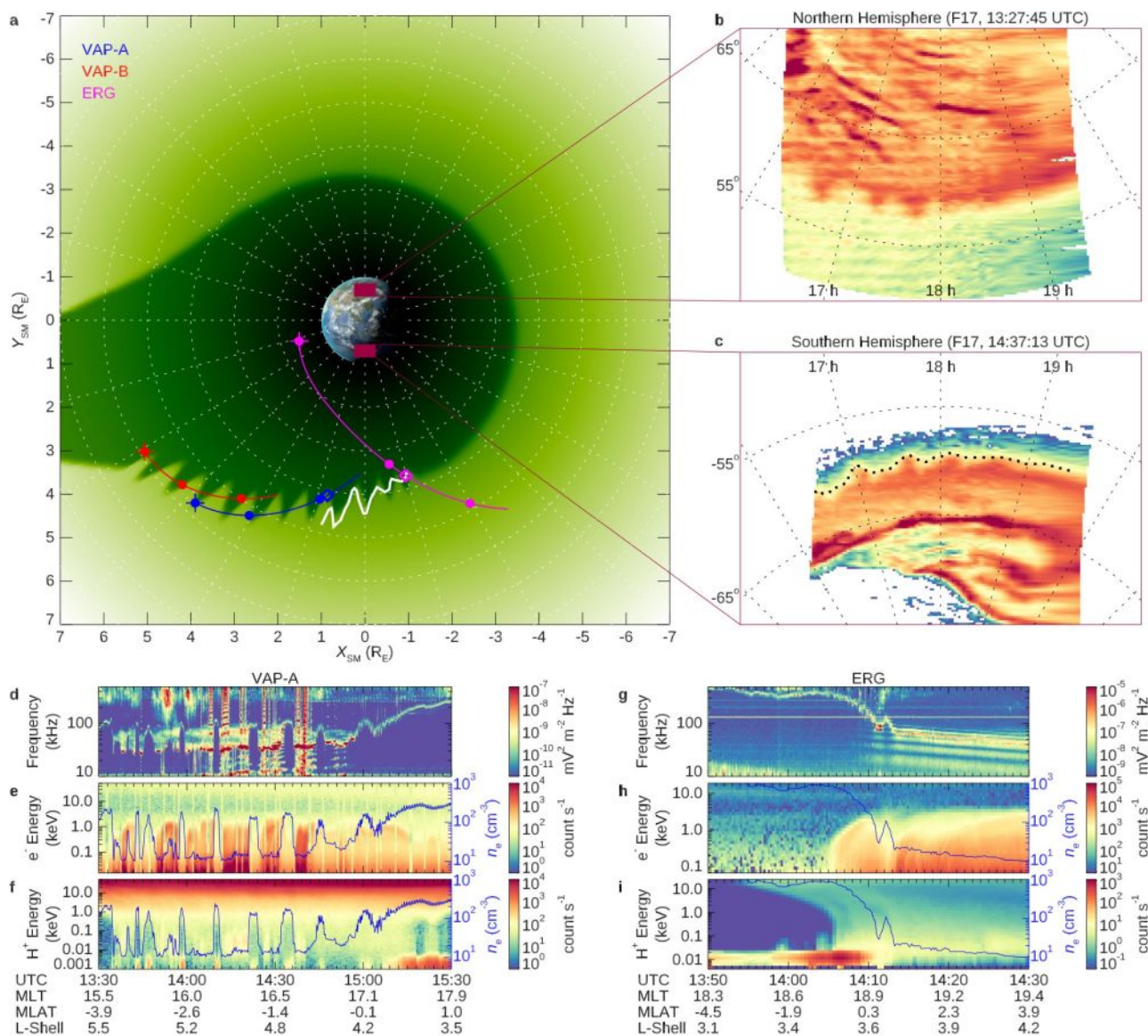


图3 表面波 (a、d-f、g-i) 和关联的锯齿极光 (b-c) 观测证据

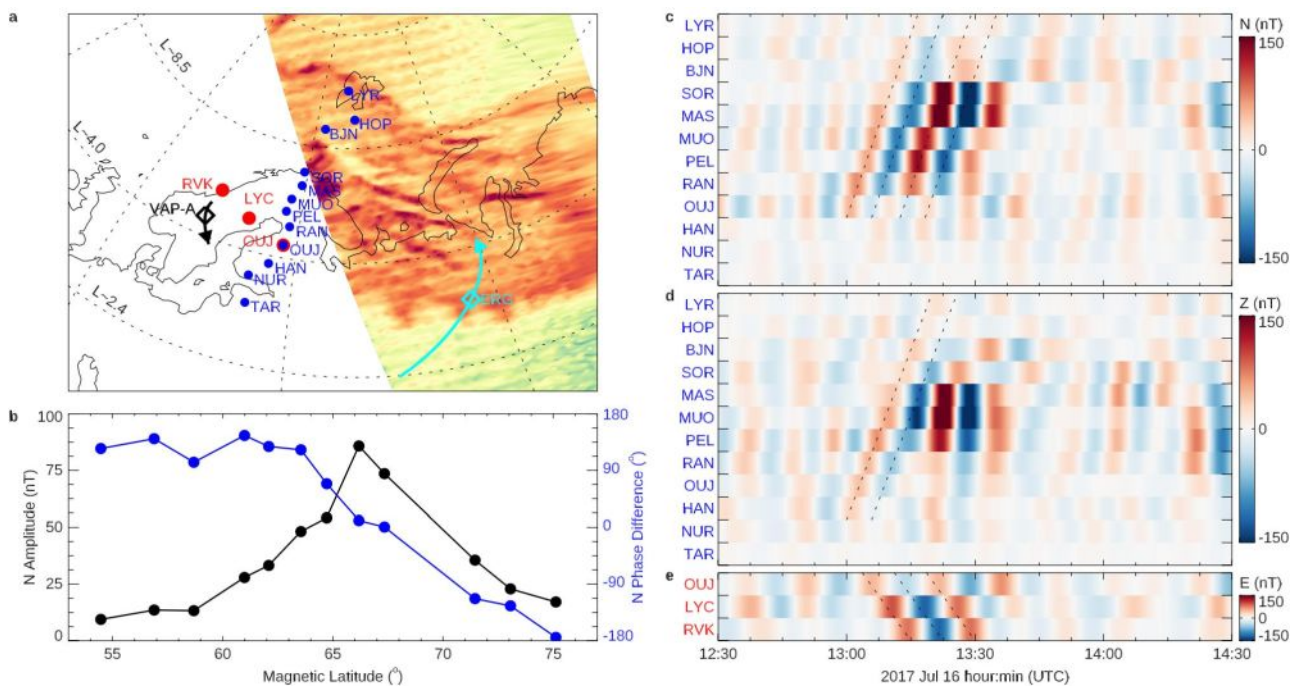


图4 地磁台链观测ULF传播 (a、c-e) 和磁力线共振 (b)

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](http://www.iikx.com)转发