地质地球所等揭示亚极光区极化流震荡演化特征

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/4956.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！

地质地球所等揭示亚极光区极化流震荡演化特征。地球是一个多圈层耦合系统。从空间物质分布角度来说，地表向上依次分布着大气层、电离层(热层)、等离子体层、等离子体片等结构，物质特性从中性大气逐渐过渡到等离子体(图1)。电离层是地球大气被太阳极紫外辐射和宇宙射线电离产生的，等离子体层的粒子来源于电离层，并在地球偶极磁场的作用下形成类似轮胎的三维分布。等离子体层具有明显的外边界，其高度平均约为20000 km，称为等离子体层顶(Plasmapause)。等离子体层顶内是低温、高密度的冷等离子体区域，主要受地球磁场和共转电场控制。等离子体层顶外则是来自太阳风的热等离子体，温度至少比等离子体层高3个数量级。平静期太阳风物质和能量注入较少，冷热等离子体之间处于扩散平衡。随着太阳风活动增强，包括密度、速度和行星际磁场增强，磁层空间被太阳风压缩，一部分闭合磁力线开放，磁层大尺度对流电场增强，削弱地球共转电场控制，导致等离子体层向地球方向收缩。与此同时，等离子体片的热等离子体密度和温度均升高，向地球方向注入，导致近地空间环境扰动。等离子体片的热等离子体沿磁力线注入两极的高层大气，并与大气分子和原子发生碰撞产生极光，在南北两极形成近似以磁轴为中心椭圆形极光带，也叫极光卵(Auroral Oval)。在极光卵赤道边界以南的区域一般称为亚极光区域(Subauroral Region)。亚极光区域在空间上与中纬度电离层密度槽、等离子体层顶、场向电流等存在交叠，使得其中的动力学过程非常复杂。

在地磁活动增强后，比如磁暴主相(Storm Main Phase)或亚暴扩展相(Substorm Expansion Phase)期间，等离子体片离子边界与电子边界分离，前者更靠近地球，从而在两个边界之间产生电势差，该电势差会沿磁力线映射至亚极光区域电离层，同时产生流向电离层的二区场向电流。在低电导率的亚极光区域，该二区场向电流通过极向流动的Pedersen电流与从电离层流出的一区场向电流闭合。沉降粒子与中性大气的碰撞加热、化学反应、垂直传输等过程耗空F区，强电场也同时降低E区密度。这导致电离层Pedersen电导率大大降低，形成强的尖峰状极向电场，并在电场力驱动下产生离子西向漂移，形成亚极光极化流，即SAPS结构。在不同的二区场向电流结构下，SAPS甚至会出现双峰(He et al., 2016)和震荡结构(He et al., 2019)，分别对应双层电流和多层电流(图2)。这使得SAPS的演化特征异常复杂，并在磁暴和亚暴期间表现出不同的演化模式(He et al., 2017)。这使得SAPS成为揭示磁层动力学过程和电离层反馈过程，从而揭示磁层-电离层耦合机制的重要研究对象。

从统计角度来看，从单峰到双峰再到震荡结构，对应着太阳活动或地磁活动增强。特别是通过对近几十年发生的磁暴期间的SAPS结构进行调查发现：图2中剧烈的震荡结构只出现在少数极强磁暴的主相期间，可能代表着内磁层剧烈的相互作用。

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与国家卫星气象中心

、美国高山天文台和北京大学合作利用一次超强磁暴期间的多卫星观测数据，揭示了震荡结构的演化过程，并通过理论分析，阐明了可能的物理机制。

2003年11月18日，太阳爆发产生的日冕物质抛射(CME)在两天后到达地球轨道，产生了极强的磁暴。大量太阳风粒子注入磁层空间，高温的等离子体片甚至推进到了距地表3000多公里的高度。在主相期间，SAPS的全局演化行为与普通磁暴类似[He et al., 2018]。在磁暴达到最强时，发生了行星际磁场Y分量由正变负，即其由指向昏侧转向指向晨侧。与此同时，在同步轨道观测到了明显的等离子体片密度增强，预示着此时有热等离子体流注入。流入电离层的二区场向电流也出现多层结构。此时在磁地方时子夜前，SAPS出现了剧烈的震荡，而且该震荡向西传播至昏侧附近。SAPS震荡的特征如下(图3)：

(1)漂移速度的峰谷差达到1.5 km/s，明显超过直流漂移速度0.5 km/s。

(2)谱分析结果显示速度震荡频率为0.2-0.4 Hz，相应的磁场扰动震荡频率约为0.3 Hz，表明该震荡为超低频波动。

(3)通过对其他大磁暴期间数据的核查，SAPS震荡均发生在磁暴过程中行星际磁场Y分量由正变负后。

基于以上观测事实和理论计算，从两个角度对SAPS震荡的可能机制进行了探讨：从磁层角度看，在等离子体片内边界附近，等离子体片与等离子体层冷热相互作用激发的剪切流气球模不稳定性(SF-BI)可能是SAPS震荡的激发机制。行星际磁场Y分量由正变负使得磁力线与子午面的共面性更好，磁力线几何形状也更有利于激发不稳定性。SF-BI产生的阿尔芬波在西向传播的同时，沿磁力线传播至电离层，导致SAPS漂移速度和磁场的震荡。从电离层角度看，多层场向电流结构导致的电离层反馈不稳定性，也可能在低电导率的亚极光区域激发小尺度结构，导致漂移速度的震荡。

该研究清晰地表明了行星际磁场对磁层动力学及磁层电离层耦合的调控作用，为开展详细的观测研究和第一性原理模拟研究提供了新的思路。

研究成果发表于Geophysical Research Letters。(He F, Zhang X X, Wang W, et al.Evolution of the Subauroral Polarization Stream Oscillations during the Severe Geomagnetic Storm on 20 November 2003[J].Geophysical Research Letters，46(2)：599 – 607.DOI: 10.1029/2018GL081446)。

论文链接

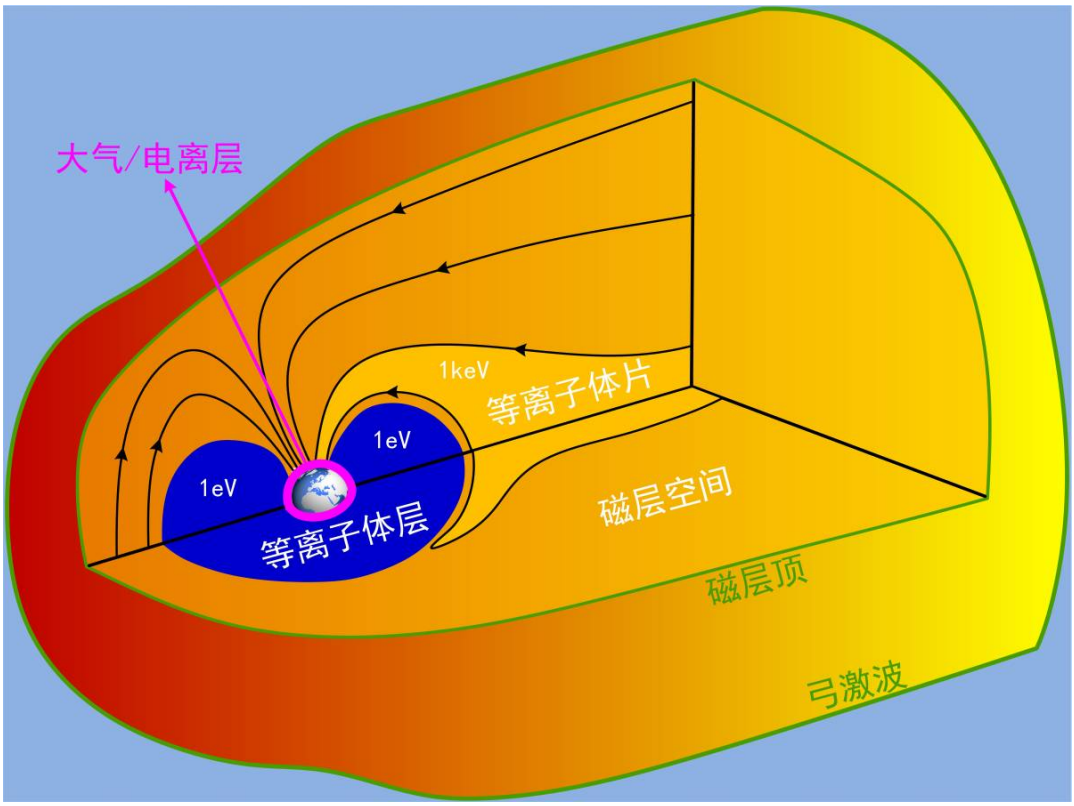


图1地球磁层空间的基本结构示意图，黑色箭头曲线代表地球磁力线

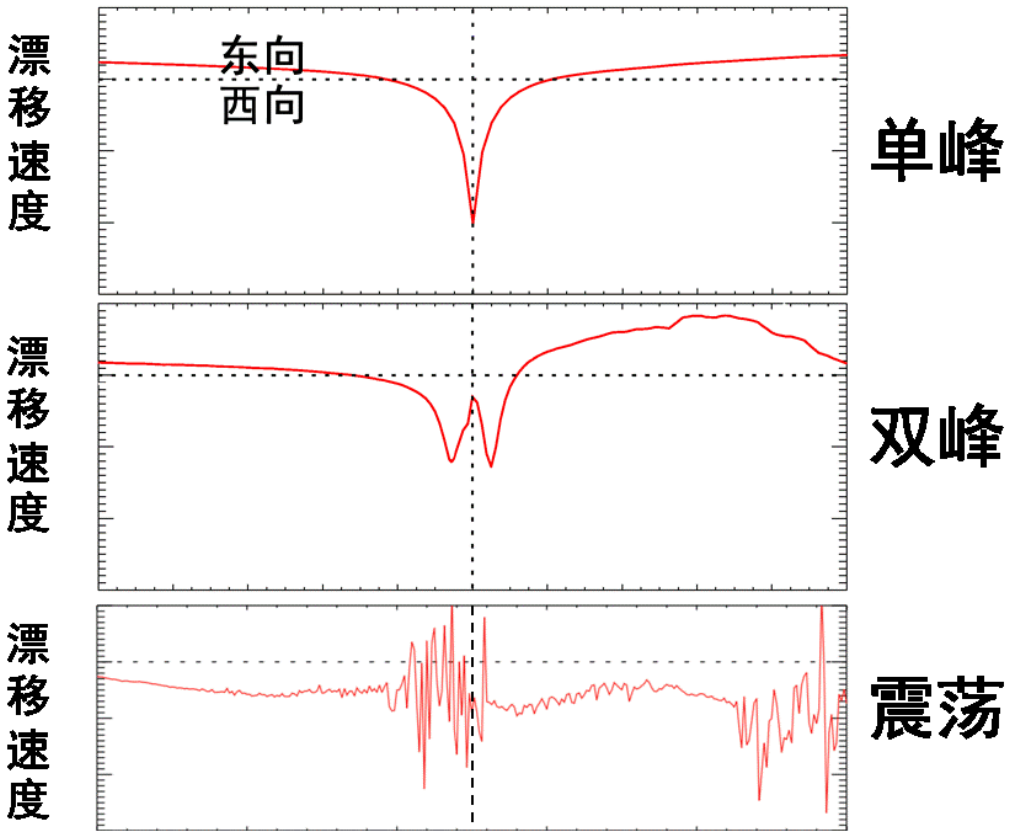


图2不同类型的SAPS结构(从左至右为低纬到高纬)

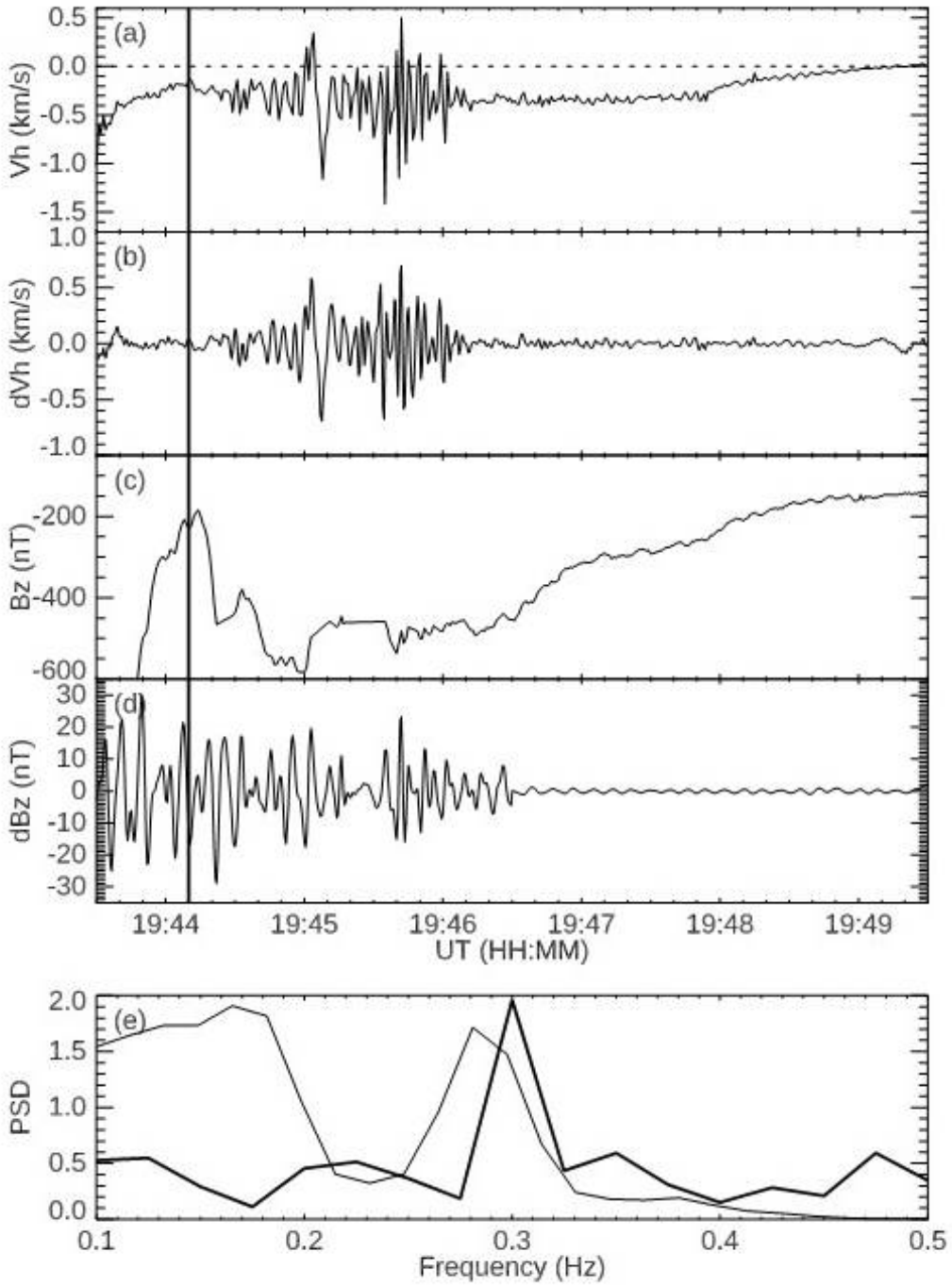


图3 SAPS震荡特征及其谱分析

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