

ULF 波及其与能量粒子相互作用研究进展

宗秋刚^{①②*}, 王永福^①, 杨彪^①, 周煦之^①, 傅绥燕^①, 濮祖荫^①, 谢伦^①, T. A. Fritz^③

① 北京大学地球与空间科学学院, 空间物理与应用技术研究所, 北京 100871;

② Center for Atmospheric Research, University of Massachusetts, Lowell, MA01854-3629, USA;

③ Center for Space Physics, Boston University, Boston, MA02215, USA

* E-mail: qgzong@pku.edu.cn

收稿日期: 2007-10-22; 接受日期: 2008-07-10

国家自然科学基金资助项目(批准号: 40528005, 40390512)

摘要 地球磁层中的超低频波(ultra low frequency wave, 简称 ULF 波)的全球分布特性以及其与能量粒子之间的相互作用, 如 ULF 波和粒子之间的共振调制、对能量粒子的加速等问题一直是空间物理研究中的热门问题. 深入研究这些问题对于理解太阳风和磁层之间的能量传输, 能量粒子加速等机制问题有着很重要的意义. 本文简要介绍有关 ULF 波的全球分布及其与能量粒子之间共振调制的最新观测研究进展, 并对将来研究工作中的问题和方向做一个简单的总结和展望.

关键词

ULF 波
压缩模
极向模
环向模
磁力线共振(FLR)
能量粒子调制

ULF波在空间物理研究中指频率范围在 1 mHz~1 Hz 之间的等离子体波, 也叫做地磁脉动. 发生在 1857 年的有史以来最大的磁暴事件中, 人们就在地面地磁台站记录到持续数个小时的周期为几分钟的地磁场的准正弦振荡, 就像有一个天上的神仙在拨弄地球“这把磁吉他”上的弦——磁力线一样. 这种振荡后来被称为 ULF 波. ULF 波在地球磁层内部的质量、能量、和动量输运过程中起着很关键的角色.

可能激发 ULF 波的机制包括向日面的太阳风动压脉冲、磁重联、Kelvin-Helmholtz 表面波, 或者夜晚面的亚暴、等离子体不稳定性等, 其中很多机制都将太阳风作为外部的驱动源. 但是, 想要理解 ULF 波的全局特性, 弄清楚能量是如何从太阳风传输到磁层进而通过电离层到达地面这个问题依然是一个很困难的任务. 它需要多颗位于合适位置的卫星之间的联合观测, 同时结合地面观测数据来进行分析处理. Rae 等人^[1]利用 Cluster, Polar, 同步轨道的 GOES-8, -9, -10, -12, LANL-095, -080, -084, -97a 卫星, 以及地面

的 CANOPUS 地磁台站链和 SuperDARN HF 雷达网观测, 研究了 2001 年 9 月 25 日一个大磁暴恢复相期间的持续数个小时的 Pc5 频率范围的 ULF 波事件. 在该事件中, 太阳风速度很高 (~750 km/s), 相当于正常值的 2 倍, 并造成磁层顶的摆动. 此时, Cluster, Polar, GOES 8, 10 在昏侧几乎沿径向由外而内排列, Cluster 观测到了频率为 1.5 mHz (对应周期是 11 min) 的磁层顶边界层穿越振荡, 随着磁层顶的波动向磁层内部传播, Polar 在 $L=6\sim 9$ 处观测到了方位角波数不为零的频率与磁层顶波动相同的阿尔芬驻波(磁力线共振的特征), 而同步轨道的其它卫星均看到了频率相同的磁力线共振现象, 而 HF 雷达网也观测到了由于能量注入而形成的流, 卫星所在位置的磁力线足点附近的地磁台站也观测到了 1.5~1.6 mHz 的磁力线共振信号. 作者推测是 Kelvin-Helmholtz 不稳定性或者昏侧磁层顶的过反射激发了这次 ULF 波事件. 这是一个非常漂亮的观测事例, 揭示了能量是如何由太阳风进入磁层, 进而沉积到高层大气中的.

由于 ULF 波和能量粒子之间存在回旋、弹跳、漂移共振等波粒相互作用(对于能量电子, 由于电子质量小, 回旋频率很高, 因而不会与 ULF 波之间发生回旋共振), ULF 波能够有效地将电子加速到很高的速度. 对于在轨的卫星, 例如同步轨道的通讯卫星, 这些高能电子被称为“杀手电子”, 能够干扰卫星正常工作, 造成技术系统的异常, 甚至产生致命的损害, 使卫星失效. 当大的磁暴发生时, 经常会有上述情况出现. 这些杀手电子对宇航员的身体健康也构成了很严重的威胁. 对于 ULF 波是如何与能量粒子相互作用, 并加速粒子这个问题, 人们提出了很多理论模型, 但由于缺乏对这个问题的深入研究, 目前为止还没有能够将卫星的观测研究与理论模型定量地联系起来. 本文我们将对与这个问题有关的最近进展做一个简要介绍, 并对将来研究工作中的问题和方向做一个简单的总结和展望.

内磁层中存在着很多种频率不同, 性质各异的磁流体力学波, 如 ULF 波, 甚低频波(very low frequency

wave, VLF 波), 电磁离子回旋波(electromagnetic ion cyclotron wave, EMIC 波)等. 在满足其共振条件的情况下, 这些波与内磁层中的能量粒子之间可以产生波粒相互作用, 造成波的衰减/增长以及粒子的加速/减速. 图 1 和 2 显示了地球内磁层中可能的与能量粒子相关的波粒相互作用. 图 1 和 2 中的黑线表示(ULF 波的范围用一个四边形框来表示)内磁层中各种波在各自频率范围内的功率通量密度^[2](对应左侧纵轴), 图 1 和 2 的三个条形面积区域代表不同能量的电子(离子)在内磁层不同漂移壳中的回旋、弹跳和漂移频率(对应右侧纵轴), 从图 1 和 2 中可以看出 ULF 波频率范围与能量电子及离子的弹跳和漂移频率有重合, 因而可以产生 ULF 波与能量电子及离子之间的弹跳和漂移共振.

Zong 等人^[3]研究了 2003 年 10 月 31 日磁暴恢复相期间 Cluster 观测到一次 Pc5 频率范围的 ULF 波事件, 第一次直接观测到了外辐射带中 ULF 波与能量粒子之间的共振. 图 3 简要的给出了该事件的主要特

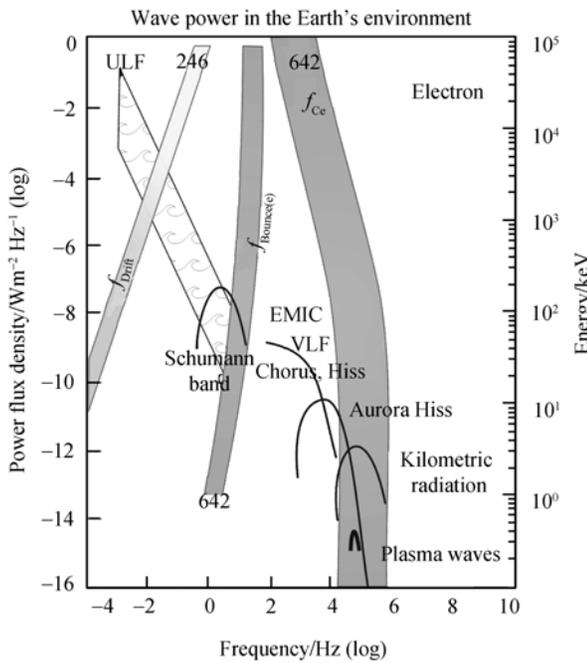


图1 地球内磁层中可能的与能量电子相关的波粒相互作用概览. 图中显示了内磁层中各种波的频率范围的功率通量密度^[2](对应左侧纵轴)和内磁层不同L值壳层的不同能量的能量电子的回旋、弹跳和漂移频率(对应右侧纵轴). ULF 波频率范围与能量电子的弹跳和漂移频率有重合, 从而可以产生 ULF 波与能量电子之间的弹跳和漂移共振

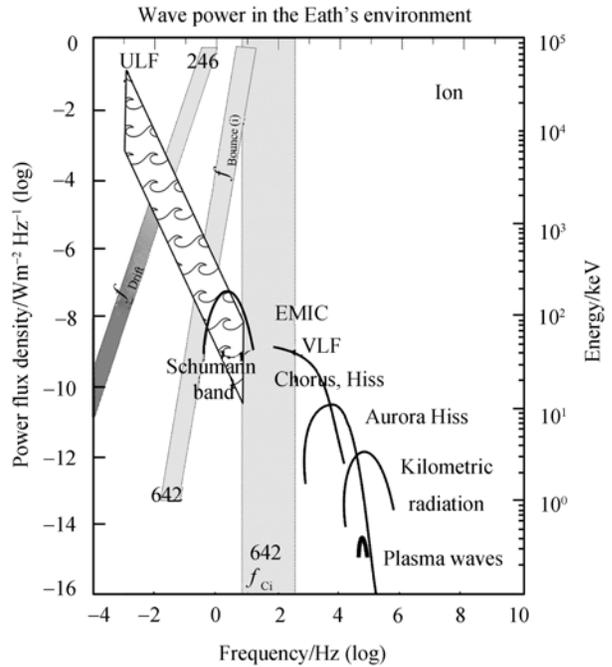


图2 地球内磁层中可能的与能量离子相关的波粒相互作用概览. 坐标含义与图 1 相同. ULF 波频率范围与能量离子的弹跳和漂移频率有重合, 从而可以产生 ULF 波与能量离子之间的弹跳和漂移共振

征. 图 3 中的第 1 栏是能量电子(30~120 keV)通量的调制, 虚线箭头表示通量峰值; 第 2 栏是观测到的磁场在GSE坐标系中的Y分量减去T89 模型^[4]磁场值后的结果. Zong等人对该事件的细致分析表明: Cluster 观测到的磁力线共振现象以ULF波的环向模为主, 其主导频率为 3.9 mHz. 该环向模波对能量电子通量有很好的调制作用, 并与能量为 127 keV附近的能量电子发生了漂移共振.

图 4 是这个事件整体物理图像的示意图. 高速太阳风(~800 km/s)作用在低纬的晨昏两侧磁层顶, 产生了 Kelvin-Helmholtz 表面波, 表面波引发磁力线共振; 当能量电子的漂移周期与磁力线共振的周期之间满足共振条件时, 就会产生能量电子的漂移共振现象. Cluster 从共振区域穿过, 观测到了磁力线共振和能量电子通量的 ULF 波调制. 这个事件的分析研究揭示了 ULF 波在能量电子调制中的关键作用.

ULF波及其与能量粒子的波粒相互作用的研究中, 仍然存在很多问题和不清楚的地方. Schäfer等人^[5]利用 Cluster 四颗卫星的观测, 研究了发生在向日面的

等离子体层区域($L=4.1\sim 4.8$, 靠近等离子体层顶)的 ULF 波极向模振荡, 分析表明观测到的是频率为 16 mHz 的三次谐波, 方位角波数大约是 30, 极向模在径向的空间范围在 $0.67 R_E$ 左右. Adrian 等人^[6]利用 IMAGE EUV 的观测, 在夜晚侧的等离子体层($L=2\sim 3$)区域观测到 He^+ 等离子体分布的径向分叉结构, 这些结构特征在近 3 个小时内保持稳定. 等离子体层的二维数值模拟表明这些结构可能是由 ULF 驻波驱动的对流运动形成的, 相应时间段内的 IMAGE 地磁台网观测也表明有几个频率很窄的地磁振荡存在. 上述研究工作表明 ULF 波在等离子体层的物理过程中可能起很重要的作用, 解决这个问题有待于更深入的观测和数值模拟研究.

ULF 波的全球分布及其不同波模与能量粒子之间的波粒相互作用如弹跳、漂移共振等问题, 也需要更多的联合观测事例或者统计研究工作, 同时结合已有的理论模型和数值模拟来向前推进和发展, 这些问题对于磁层中能量粒子对外界太阳风扰动的相应和具体的加速物理过程研究有非常重要的意义.

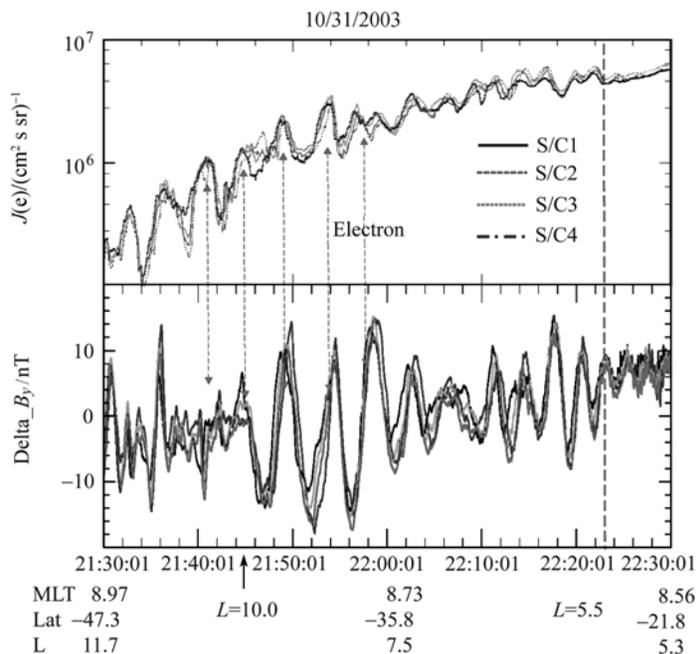


图 3 Cluster 四颗卫星于 2003 年 10 月 31 日在向日面磁层观测到的随 ULF 波变化的能量电子(30~120 keV)通量变化. 第一栏是电子通量的调制, 点线箭头表示通量峰值. 第二栏是观测到的磁场在 GSE 坐标系中的 Y 分量减去 T89 模型磁场值后的结果. 电子通量和 ULF 波环向模的磁场在它们的主要频率 3.9 mHz 附近显著相关, 体现了 ULF 波在能量电子调制中的关键作用

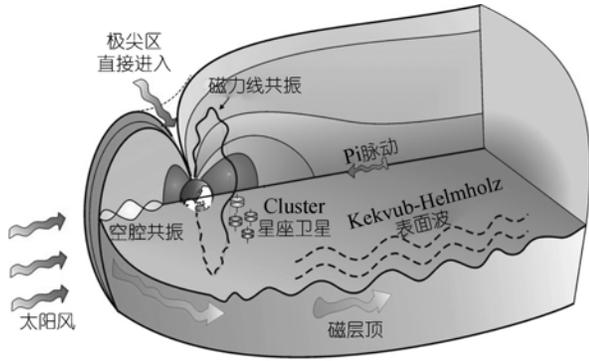


图 4 太阳风激发 ULF 波的示意图. 太阳风作用在低纬的晨昏两侧磁层顶, 产生了 Kelvin-Helmholtz 表面波, 表面波引发磁力线共振. Cluster 星簇从共振区域穿过, 观测到了磁力线共振和能量电子通量调制现象

当行星际激波、太阳风动压脉冲、高速太阳风作用磁层顶时, 激发的 ULF 波在太阳风-磁层-电离层能量传输过程中起着很重要的作用. 强的 ULF 波磁力线共振, 能够在电离层中耗散掉 $4\sim 6\times 10^{11}$ J 的能量, 相当于一次弱的亚暴. 卫星的实地观测最好的情形是多点的联合观测, 想要研究 ULF 波的不同波模在地球磁层中的能量分布, 以及其在电离层中的耗散, 只能通过数值模拟结合卫星观测来加以研究解决. 图 5 是我们利用三维的数值模型模拟得到的 ULF 波环向模相应的方位角方向磁场的功率谱密度随 L 值和波频率的变化, 图 5 中白线是通过飞行时间方法近似计算得到阿尔芬驻波振荡本征频率曲线, 从下往上依次对应 1, 3, 5, 7 等奇数次谐波. 由图 5 中可以得到磁力线共振在不同 L 值位置上的强度及频率等性质, 关于该数值模型模拟的详细讨论参见文献[7]. 上述这些问题都是我们今后可以深入研究的方向.

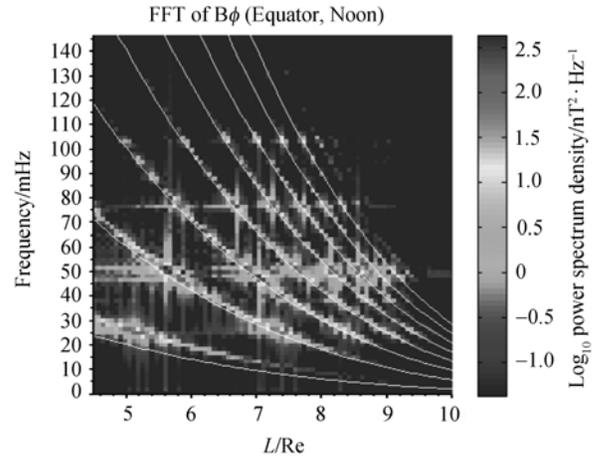


图 5 数值模拟得到的环向模相应的方位角方向磁场的功率谱密度随 L 值和波频率的变化. 图中白线是通过飞行时间方法近似计算得到阿尔芬驻波振荡本征频率曲线, 从下往上依次对应 1, 3, 5, 7 等奇数次谐波

ULF 波全球分布及其与能量粒子之间的波粒相互作用及其在地球磁层能量传输过程中的作用等问题, 会随着多卫星联合地磁台站观测、数值模拟、理论建模等不同类型研究方法的相互结合补充, 逐步得到解决. 美国宇航局(NASA)计划在 2011 年左右发射 2 颗专门研究地球辐射带的 RBSP (radiation belt strom probe—辐射带暴探测器)卫星, 辐射带动力学将会是下一个空间物理研究的前沿和热点之一. 随着这些问题的深入认识和理解, 无论对于研究地球磁层这个复杂系统中的质量、能量、和动量输运过程等基础问题, 还是空间天气预报等应用课题, 都会有很大的帮助. 这些问题也都期待着我们继续探索 and 发现.

参考文献

- 1 Rae I J, Donovan E F, Mann I R, et al. Evolution and characteristics of global Pc5 ULF waves during a high solar wind speed interval. *J Geophys Res*, 2005, 110(A12): 12211—12226[doi]
- 2 Lanzerotti L J, Southwood D J. Hydromagnetic Waves. In: *Solar System Plasma Physics*, vol 3. Amsterdam: North-Holland Publishing Co, 1979. 109—135
- 3 Zong Q G, Zhou X Z, Li X, et al. Ultralow frequency modulation of energetic particles in the dayside magnetosphere. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(12): 12105—12109[doi]
- 4 Tsyganenko N A. On the re-distribution of the magnetic field and plasma in the near nightside magnetosphere during a substorm growth phase. *Planet Space Sci*, 1989, 37(2): 183—192[doi]
- 5 Schäfer S, Glassmeier K H, Eriksson P T I, et al. Spatial and temporal characteristics of poloidal waves in the terrestrial plasmasphere: A CLUSTER case study. *Ann Geophys*, 2007, 25: 1011—1024
- 6 Adrian M L, Gallagher D L, Avanov L A. IMAGE EUV observation of radially bifurcated plasmaspheric features: First observations of a possible standing ULF waveform in the inner magnetosphere. *J Geophys Res*, 2004, 109(A1): 1203—1215[doi]
- 7 Yang B, Fu S Y, Zong Q G, et al. Numerical study of ULF waves in a dipole field excited by sudden impulse. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2008, 51(10): 1665—1676