0254-6124/2026/46(5)-1147-12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

MA Yuduan, YANG Youjun, AILIMU · Alimu, WANG Wei. Progress in Research on Mirror and Electromagnetic Cyclotron Instabilities of Multi-component Ions (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1147–1158. CSTR:32142.14.cjss.2025–0176. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0176

多组分离子镜像与回旋不稳定性研究进展*

马玉端　杨有军　阿力木·艾力木　王　卫

(北京航空航天大学空间与地球科学学院　北京　100191)

(太阳活动与空间天气全国重点实验室　北京　100190)

(空间环境监测与信息处理 工业和信息化部重点实验室　北京　100191)

摘　要　由离子垂直温度各向异性驱动的镜像 (mirror) 不稳定性和电磁离子回旋 (EMIC) 不稳定性在空间等离子体中普遍存在, 且在亚暴、磁暴的演化过程中具有非常重要的作用. 本文概述了磁流体力学和动理论下两种不稳定性的物理机制, 回顾了单一离子成分 (质子) 条件下两种不稳定性的基础理论研究成果; 进一步梳理了多组分离子中两种不稳定性的研究进展, 重点探讨了地球磁层中重离子 (He^+, O^+) 的引入对两种不稳定性产生的影响; 总结了多组分等离子体中不稳定性阈值与增长率的理论推导及数值模拟成果, 分析了当前研究中存在的挑战, 并对未来理论研究、数值模拟和卫星观测提出展望, 以期全面揭示多离子组分中该两种不稳定性的调控作用及其在全局动理学中的意义.

关键词　多组分离子, 温度各向异性, 镜像不稳定性, 电磁离子回旋不稳定性, 增长率

中图分类号　P354

Progress in Research on Mirror and Electromagnetic Cyclotron Instabilities of Multi-component Ions

MA Yuduan　YANG Youjun　AILIMU·Alimu　WANG Wei

(*School of Space and Earth Sciences, Beihang University, Beijing* 100191)

(*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, Beijing* 100190)

(*Key Laboratory of Space Environment Monitoring and Information Processing, Beijing* 100191)

Abstract　The mirror instability and Electromagnetic Ion Cyclotron (EMIC) instability, driven by ion perpendicular temperature anisotropy, are ubiquitous in space plasmas and play important roles in the evolution of substorms and storms. This paper outlines the physical mechanisms of these two instabilities based on Magnetohydrodynamics (MHD) and kinetic theory, and reviews the fundamental theoretical research results on the two instabilities under the condition of a single ion component (proton). EMIC waves are propagating waves below the proton cyclotron frequency along field-line resonances. In

* 国家自然科学基金项目 (42374202) 和太阳活动与空间天气全国重点实验室专项基金资助项目共同资助

2025-10-18 收到原稿, 2026-01-16 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

an electron- proton plasma, the waves are left-hand circularly polarized, or more generally left-hand elliptically polarized for propagation at an angle to the background field. In a multi-ion plasma, such as the magnetosphere, there are stop bands where no left-hand polarized waves are possible and bands where the waves are right-hand or right-hand elliptically polarized. Mirror modes are magnetic and plasma pressure fluctuations that are driven by proton temperature anisotropy instabilities. The wave magnetic pressure and plasma pressure are 180° out of phase with each other so there is a total pressure balance across the train of structures. Progress on the two types of instabilities in multi-component ions was further reviewed with a focus on exploring the impact of the heavy ions (He^+,O^+) in the terrestrial magnetosphere on these two types of instability. The theoretical derivation and numerical simulation related to instability thresholds and growth rates in multi-ion plasmas were summarized, and challenges in current research were analyzed including but not limited to non-Maxwellian ion distributions and nonlinear evolution of instability. To comprehensively reveal the regulatory effects of multi-ion components on these two types of instability and their significance in global kinetics, future research requires a combination of more systematic theories, advanced numerical simulations, and more satellite observations, which will provide important basis for a deeper understanding of energy transport and wave particle interactions in space plasma.

Key words Multi-component ions, Temperature anisotropy, Mirror instability, Electromagnetic ion cyclotron instability, Growth rate

0 引言

等离子体广泛存在于日地空间, 其中离子垂直温度各向异性 ($T_\perp > T_\parallel$, $T_\perp$, $T_\parallel$分别代表垂直和平行于背景磁场的温度) 引起的两种不同的不稳定性——镜像 (mirror)[1] 和电磁离子回旋[2](EMIC) 不稳定性是空间等离子体物理领域的核心研究课题之一. 这两种不稳定性直接参与磁暴、亚暴等空间天气事件的演化过程, 显著影响空间等离子体的能量输运、波–粒相互作用及粒子沉降等关键物理过程, 对理解空间等离子体动力学特性具有重要意义.

目前, 关于单一离子组分 (质子) 驱动的两种不稳定性, 已经形成了较为成熟的理论体系[3–8]. 相关研究涵盖不稳定性色散关系、产生机制、不稳定性阈值及增长率等物理量的推导与验证. 本文简要回顾了两种不稳定性的研究现状. 产生镜像不稳定性的基石是压力各向异性, 该压力各向异性主要由太阳风猛烈撞击地球磁层后, 等离子体流穿过弓激波的过程产生; 同时太阳风穿过磁鞘时也会导致离子温度升高, 为镜像不稳定性提供自由能. 当等离子体绕磁层顶流动时, 磁鞘本身也会产生压力各向异性[9,10]. 在磁流体理论框架下,镜像不稳定性是低频下, 垂直压力$\delta p_\perp$对磁场强度的压缩变化δB做出的反相响应[1,11]. 在冷电子且离子为双麦克斯韦分布的磁流体近似下, Hasegawa[1] 推导出镜像不稳定性发生所需的各向异性阈值条件: $T_\perp/T_\parallel - 1 > 1/\beta_\perp$(其中 $\beta_\perp = 8\pi n_0 T_\perp/B_0^2$, B_0为磁场, n_0为等离子体密度). 后续研究指出镜像不稳定性本质上是一种共振型不稳定性, 需要在动理论框架下解释. Mckean 等[12] 系统研究了镜像不稳定性的激发、增长与饱和机制, 揭示了共振与非共振离子的关键作用, 并对比了磁流体与动理论的适用性. Southwood 和 Kivelson[13] 综述了磁流体和动理论框架下线性镜像不稳定性的物理机制, 动理论的核心在于区分共振粒子和非共振粒子的响应, 非共振粒子的能量在磁场变化中保持不变, 仅通过磁矩守恒实现垂直和平行能量的交换, 其压力响应与磁场变化反相, 符合流体理论的描述. 共振粒子的平行速度接近零, 无法通过沿磁场的运动抵消磁场变化. 因此, 其能量会随磁场的变化而改变, 导致其压力响应与磁场变化同相. 后续在冷电子的基础上还研究了电子温度各向异性对镜像不稳定性的影响, Ahmadi 等[14] 通过线性理论预测, 电子温度各向异性的存在可以增强质子镜像不稳定性增长率; 同时也有文章讨论了有限拉莫半径效应[15]、超热质子[16] 等各种条件下的镜像不稳定性增长率. Leubner 等[17] 还推导了非麦克斯韦分布函数下超热粒子群不稳定性阈值的表达式.

对于单一离子 (质子) 引起的回旋不稳定性, 已经有非常深入的讨论. 电磁离子回旋波为左偏振、且频率低于离子回旋频率的横波, 由热离子温度各向异性驱动的回旋不稳定性激发. 离子与接近其回旋频率的波发生共振, 会导致离子投掷角散射, 最终沉降至电离层[2]. 磁层中离子温度各向异性和 EMIC 波的产生一般主要有两种机制: 一是在磁暴和亚暴期间, 来自夜侧磁尾等离子体片中的高能离子注入内磁层, 导致离子温度存在较高的各向异性[18], 地面观测到的 Pc1-Pc2 波就来源于 EMIC 不稳定性产生的 EMIC 波[19]; 二是太阳风动压增强会导致日侧磁层压缩, 在日侧外磁层中形成温度各向异性分布, 为 EMIC 波的增长提供自由能[20,21]. 大量文章研究表明, EMIC 波在地球磁层中的各种物理过程中发挥至关重要的作用, 例如在磁层中的冷电子加热[22,23]、冷离子加热[24]、环电流离子损失[25,26] 以及相对论电子散射损失[27,28]. 质子回旋不稳定性及质子温度各向异性与β之间的负相关性在 Gary 等[29,30] 的文章中也有详细的研究: 他们对质子各向异性的 EMIC 不稳定性理论进行了扩展, 使用线性理论、一维混合模拟和数据分析, 发现 EMIC 波在热质子温度各向异性上存在上限, 该上限与热质子的平行等离子体β成反比; 同时还指出低β等离子体优先激发质子回旋不稳定性, 而在高β等离子体中, 镜像不稳定性比回旋不稳定性的增长率更高, 详细内容可参考 Gary 等[29,30] 的文章.

回顾已有研究, 现有的相关论文多聚焦于单一组分的两种不稳定性, 然而实际空间等离子体如地球磁层并非是单一离子组分 (质子), 自从在磁层中发现 He^+, O^+等重离子以来[31,32], 许多研究指出, 重离子的存在会显著改变等离子体的动力学行为, 进而调控两种不稳定性. 以往的相关文章难以全面反映多组分离子环境下两种不稳定性的研究现状和发展趋势. 因此, 本文旨在系统梳理多组分离子镜像和 EMIC 不稳定性的研究成果, 明确重离子的调控作用, 分析当前研究中存在的挑战并展望未来方向, 为该领域的后续研究提供参考.

1 多组分镜像不稳定性

在无碰撞等离子体中, 带电粒子 (离子和电子) 的速度分布往往偏离热平衡的麦克斯韦速度分布, 常见的简单非平衡分布为双麦克斯韦分布. 正如前文所述, 双麦克斯韦分布下离子在平行和垂直于磁场下表现出不同的温度, 可能会引起两种不稳定性 (镜像和回旋不稳定性). 对于镜像不稳定性, 在之前研究的基础上, Pokhotelov 等[7] 根据动理论推导出了任意电子和离子速度分布函数$F_j(W,\mu)$(W为能量, μ为磁矩, j为不同粒子) 的一般色散关系和增长率. 根据其镜像不稳定性增长率γ的推导结果,有

$$\gamma=\frac{k_{\parallel}p_{\mathrm{i}\perp}\mathrm{m_i}}{\pi^2 D}\left[K-\frac{1}{\beta_{\mathrm{i}\perp}}\frac{k_{\parallel}^2}{k_{\perp}^2}(1+\frac{\beta_{\perp}-\beta_{\parallel}}{2})\right], \tag{1}$$

$$K=A-\frac{1}{\beta_{\mathrm{i}\perp}}+\frac{\left(\Sigma_j q_j\left\langle \mu B\partial F_j/\partial W\right\rangle\right)^2}{2p_{\mathrm{i}\perp}\Sigma_{\mathrm{j}}\mathrm{e}_j^2\left\langle \partial F_j/\partial W\right\rangle}, \tag{2}$$

$$D=-\int_0^{\infty}\mathrm{d}W(W-W_0)^2\frac{\partial F_{\mathrm{res}}}{\partial W}. \tag{3}$$

其中, $p_{\mathrm{i}\perp}=\langle\mu BF_{\mathrm{i}}\rangle$, $\beta_{\mathrm{i}\perp}=p_{\mathrm{i}\perp}/(B^2/2\mu_0)$, $\beta=nT/(B^2/2\mu_0)$, $\partial F_{\mathrm{res}}/\partial W=(\partial F_{\mathrm{i}}/\partial W)_{\mu=W/B}$, μ为磁矩, B为磁场强度, n为等离子体的数密度, T为等离子体的平均温度, $k_{\parallel}$和$k_{\perp}$分别为平行、垂直波数, i为离子. 基于动理学理论, 其结果给出了普遍的镜像模增长率, 同时也给定了阈值条件, 便于使用任意分布函数来确定镜像模在多组分等离子体中是否稳定.

同时, Gedalin 和 Balikhin 等[33] 使用长波、低频近似对任意分布的多离子镜像不稳定性做了比较系统的分析, 并推导了多组分等离子体中镜像模的通用色散关系, 通过色散关系得到不稳定性阈值和增长率的一般表达式. 他们假设不同离子成分 s,对应的分布函数为$f_s=f_s(v_{\perp}v_{\parallel})$, 限制条件为$\omega\ll\Omega_s$且$0<\omega/kv_{\mathrm{T}s}<\infty$, (其中$\omega$为波的频率; $\Omega_s=q_sB_0/m_s$c为成分 s的回旋频率; q_s和m_s分别为成分s的电荷和质量; B_0为背景磁场; $v_{Ts}=\sqrt{T_s/m_s}$为热速度, T_s为成分s的平均温度; k为波矢$\boldsymbol{K}=(k_{\perp},0,k_{\parallel})=k(\sin\theta,0,\cos\theta)$对应的波数 ($\theta$为波矢量$\boldsymbol{K}$与磁场矢量$\boldsymbol{B}$的夹角). 本文只给出多粒子等离体中长波、低频镜像模的通用色散关系的最终结果, 详细推导过程不再赘述, 具体形式如下:

$$\begin{aligned}\Psi(Z)=&[2\beta_0^{-1}-Z^2\cos^2\theta\Sigma_sN_sM_s]-\\&\cos^2\theta\Sigma_sN_sR_s(1-r_s)+2\sin^2\theta\Sigma_sN_sR_sr_s-\\&2\sin^2\theta\Sigma_sN_sR_s\alpha_sr_s^2\chi_s^{(2)}]\left(\Sigma_sN_sQ_s^2R_s^{-1}\chi_s^{(0)}\right)+\\&\sin^2\theta(\Sigma_sN_sQ_sr_s\chi_s^{(1)})^2=0.\end{aligned} \tag{4}$$

其中, $\beta_0 = 2v_{T_{\parallel 0}}^2\omega_{p0}^2/\Omega_0^2 c^2, \alpha_s = \langle V_{\perp s}^4\rangle/2\langle V_{\perp s}^2\rangle^2$, $R_s = T_{\parallel s}/T_{\parallel 0}, r_s = T_{\perp s}/T_{\parallel s}$, $Z = \omega/k_\parallel v_{T_{\parallel 0}}$, $N_s = n_s/n_0$, $M_s = m_s/m_0$, $Q_s = q_s/q_0$, $\chi_s^{(n)} = \int_{-\infty}^{\infty} \dfrac{1}{Z_s - v}\dfrac{\partial f_{\parallel,s}}{\partial v}\mathrm{d}v$, $Z_s = Z\sqrt{M_s/R_s}$, $\omega_{p0}^2 = 4\pi n_0 q_0^2/m_0$, $v_{T_{\parallel 0}}, T_{\parallel 0}$, n_0, m_0, q_0分别为参考离子的平行速度、平行温度、密度、质量和电荷量; $n_s, T_{\perp s}, T_{\parallel s}$为不同离子的密度、垂直温度、平行温度. 由式 (4) 可以得出弱镜像不稳定性增长率和不稳定性条件的通用表达式. 同时当用重离子取代部分质子时, 不稳定性的最大增长率会降低; 降低幅度虽然很小, 但是再加上离子回旋不稳定性受到抑制, 可能对镜像不稳定性更有利. 他们认为重离子的抑制作用是由于重离子相对于质子的迁移率较低, 这对镜像不稳定性影响很重要. 同时他们指出, 如果进一步考虑各向异性电子对镜像不稳定性的影响, 就可以预测这些比离子更高迁移率的电子可能会导致镜像不稳定性增强. 在低频、长波限制下, Hellinger[34] 也扩展了线性镜像不稳定性在阈值附近的行为, 同时给出了包括冷热离子的多组分等离子体不稳定性阈值条件. 均匀多组分等离子体中热离子的镜像不稳定性的阈值条件为

$$\Lambda_m \equiv \Sigma_s \beta_{\perp s}\left(\frac{\beta_{\perp s}}{\beta_{\parallel s}} - 1\right) - \frac{\left(\Sigma_s q_s n_s \dfrac{\beta_{\perp s}}{\beta_{\parallel s}}\right)^2}{2\Sigma_s \dfrac{(q_s n_s)^2}{\beta_{\parallel s}}} > 1. \tag{5}$$

其中, s代表不同的离子, $\beta_{\perp s}$和$\beta_{\parallel s}$分别为不同离子平行、垂直等离子体β值.

镜像不稳定性激发波的特征是在等离子体中的实数频率为零, 通常在高β区域普遍存在, 尤其在磁鞘等区域. 在由各向异性电子、质子和少量重离子 $^4He^{2+}$,$^{16}O^{6+}$ 组成的均匀多组分等离子体中, 较重离子的存在会影响镜像不稳定性与回旋不稳定性之间的竞争[35–37]. Remya 等[38] 对双麦克斯韦粒子分布的完整动理学电磁色散关系进行数值求解,首次研究了温度各向异性 (电子和离子)、等离子体β值和重离子浓度对镜像不稳定性和 EMIC 不稳定性竞争的影响. 研究结果表明: 含有少量重离子$^4He^{2+}$,$^{16}O^{6+}$的等离子体中会明显降低 EMIC 不稳定性的增长率, 轻微影响镜像不稳定性的增长; 多组分的重离子在各自回旋频率下与质子回旋不稳定性产生共振, 由此会产生以各自重离子回旋频率为上限的回旋波; 重离子回旋波之间存在停止带, 从而会降低质子回旋不稳定性的线性增长率. 最近, Guo 等[39] 给出了两种不稳定性的最大增长率随α离子的密度、温度变化的结果, 如图 1 所示. 图 1 中, N_α, N_p, T_α, T_p分别代表α离子和质子的密度和温度. 随着 N_α/N_p和 (或)T_α/T_p的增大, EMIC 不稳定性的增长率降低, 而镜像不稳定性几乎保持相同的增长率.

早在 1999 年 Huddleston 等[37] 在对木卫一的观测中, 已经发现了多离子及电子等离子体 (尤其是重离子) 激发的镜像不稳定性. 研究指出, 在多组分等离子体中, 可能存在多种离子回旋模式, 每种模式的增长率取决于特定回旋共振离子组分提供的温度各向异性和自由能. 然而, 镜像不稳定性可能占主导地位, 因为其增长率取决于所有离子的总各向异性压力, 而少量重离子 (SO_2^+) 的改变对其没有显著影响. 同时文章[37] 也探讨了镜像不稳定性在何种情况下占主导地位, 以及镜像模结构的形成对离子回旋不稳定性的抑制机制.

2 多组分离子回旋不稳定性

冷重离子 (例如 He^+和 O^+) 在地球磁层动力学, 尤其是在波–粒能量交换和等离子体不稳定性中, 发挥关键作用. 研究[40] 发现, 在磁暴的不同阶段, 环电流中的主导离子成分不同, 在磁暴恢复相中, 低能部

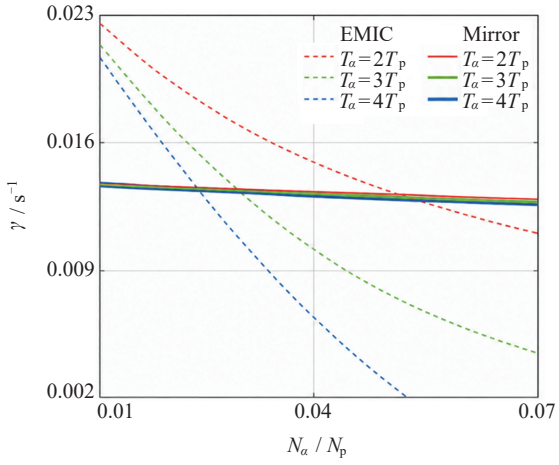


图 1 电磁离子回旋不稳定性 (虚线曲线) 和镜像 (实线曲线) 不稳定性的最大增长率随N_α/N_p的变化[39]

Fig. 1 Maximum growth rates of the electromagnetic ion cyclotron (dashed curves) and mirror (solid curves) instabilities as a function of N_α/N_p[39]

分主要是 O^+和 He^+, 这些冷重离子不仅能改变波的频率, 还影响其增长率. Young 等[41] 在研究波–粒相互作用的物理机制时, 特别关注了氦离子 (He^+), 认为即使低浓度、低温度的重离子也会产生新的共振、截止频率, 改变波的群速度, 进而影响等离子体中离子回旋波的传播和增长率. 此后, Gomberoff 和 Neira[42] 首次计算了 H^+和 He^+组成的等离子体, 以及考虑第三种 (少数) 冷离子组分 (例如 O^+) 时, 多组分等离子体 (H^+, He^+, O^+)EMIC 的空间增长率. 结果表明, 波增大是冷离子组分与高能质子温度各向异性相互作用的结果, 这与 Young 等[41] 在 GEOS-1 和 GEOS-2 卫星上观测到的低于质子回旋频率的超低频波产生的结果一致; 同时, 研究还发现重离子 (例如 O^+) 会抑制 H^+波段的回旋不稳定性. 此外, 少量的 O^+能够强烈影响低于 He^+回旋频率不稳定性的空间增长率.

研究环电流中重离子对离子回旋不稳定性产生的离子回旋波的影响时, Kozyra 等[43] 发现, 当重离子主导环电流时, 氢离子的回旋不稳定性将受到抑制, 与之前的研究结果一致, 然而重离子相应频段的低频波会增长. 同时, 还考虑了冷等离子体和高能等离子体中的多种离子成分,并推导出线性电磁离子回旋空间增长率S, 其表达式为

$$S=\frac{\mu}{V_{\rm g}}=\left\{\Sigma_l\frac{\eta_{l\rm w}\sqrt{\pi}}{M_l^2\alpha_{\parallel,l}}\left[(A_l+1)(1-M_lX)-1\right]\cdot \exp\left[\frac{-\eta_{l\rm w}}{M_l}\frac{(M_lX-1)^2}{\beta_{l\rm w}X^2}\Big/\left[\frac{(1+\delta)}{(1-X)}+\Sigma_j\frac{(\eta_{j\rm w}+\eta_{j\rm c})M_j}{1-M_jX}\right]\right]\right\}\cdot \left\{2X^2\left[\frac{(1+\delta)}{(1-X)}+\Sigma_i\left(\eta_{i\rm w}+\eta_{i\rm c}\right)\frac{M_i}{1-M_iX}\right]\right\}^{-1}. \tag{6}$$

其中, μ为时间增长率, $V_{\rm g}$为群速度, $A_l=(T_{\perp,l}/T_{\parallel,l})-1$, $M_l=m_j/Z_jm_{\rm p}$, $X=\omega_{\rm r}/\Omega_{\rm p}$, $\delta=\omega_{\rm ppc}^2/\omega_{\rm ppw}^2$, $\alpha_{\parallel,l}$为离子的平行热速度, $\omega_{\rm pp}$为等离子体频率, $\omega_{\rm r}$为波频, $\Omega_{\rm p}$为质子回旋频率, 下标l为所有的离子, i和j仅代表质量大于氢离子的其他离子, w代表热离子, c代表冷离子, p代表质子; 等式 (6) 详细推导和其他相关参数的定义可以参考文献 [43]. 研究结果发现, EMIC 波的有效增益取决于在源区内停留的时间, 由热等离子体色散关系得到的空间增长率更适合描述 EMIC 波的增长.

在进一步考察多种重离子及其不同占比对不稳定性增长的影响后, 得出以下结论: 对于每种重离子, 当频率低于其临界不稳定性波模时, 会出现部分波的增长; 当特定高能重离子的频率超过其临界不稳定性波模时, 波的增长会受到部分抑制或完全抑制. 虽然高能成分中的少量重离子无法在其各自的临界不稳定波模下产生显著的波增长, 但是其能改变由高能 H^+产生的波增长; 当高能成分与冷离子密度相当时, 这种效应可能非常显著.

Gary 等[44] 使用混合模拟, 考察三组分磁层等离子体 (电子流体、热 H^+和冷 H^+) 中 H^+ EMIC 不稳定性的饱和振幅. 研究发现, 饱和振幅随$\beta_\parallel$ (磁场方向热压与磁压之比) 增大而增大, 随热、冷 H^+密度之比的增大而减小. Hu 等[45] 指出, 多离子 (例如 H^+, He^+, O^+) 等离子体的存在会引入新的色散面和共振频率 (例如双离子频率), 每种新离子的出现均会引起回旋共振和双离子共振. 其还使用了二维混合模拟 (离子为单粒子, 电子为流体), 进一步研究了偶极磁场中 H-He-O 等离子体中的 EMIC 波. 假设冷离子 (温度约为 eV) 温度各向同性, 密度空间均匀, 由高能环电流质子的温度各向异性驱动磁赤道附近的 EMIC 波, 对应的频率为$\Omega_{\rm O+}<\omega<\Omega_{\rm He+}$. 磁赤道附近增长的波为左旋极化, 具有较小的法向角; 当波向高纬度传播时, 变为线性或右旋极化, 具有较大的法向角, 并且会遇到氧离子回旋频率的二次谐频、He-O 双离子频率, 甚至可能是氧离子回旋频率的一次谐频. 波在高纬度相遇的过程中, 由于波粒二象性, 一些波被吸收, 一些波被 He-O 双离子频率反射, 一些波在相同的色散表面上透射, 一些波可能穿过所谓的停止带; 这些效应随离子成分的变化而变化, 尤其随 O^+浓度的变化而变化.

Omidi 等[46] 模拟了不同 O^+浓度下 EMIC 波的演化: 随着 O^+浓度的增大, EMIC 波的增长被显著抑制, 主要是由 O^+的回旋共振阻尼效应导致. 同样 Denton 等[47] 也探讨了冷 O^+对地球磁层中电磁离子回旋波的产生及其非线性演化的影响, 结果与已有研究结论一致. Ofman 等[48] 在前期研究基础上, 通过混合模拟探究磁层多离子等离子体中 EMIC 波的增长和非线性饱和, 量化了波动的线性增长、非线性饱和水平以及离子温度各向异性的时间演化对多离子等离子体参数 (温度、密度等) 的依赖性.

对于冷重离子已经有大量的观测和模拟研究, Zhu 等[49] 进一步研究了暖 O^+浓度变化对 EMIC 波 (尤其是 O^+波段) 的影响. 当磁暴期间的暖 O^+含量增

加时, O^+波段 EMIC 波的最大增长率增大, 激发区域变宽; 当暖 O^+与暖 H^+密度比增加时, H^+波段 EMIC 波被抑制, 最大增长率降低, 激发区域缩小. 这种影响也出现在 He^+波段, 丰富的 O^+和较大的冷等离子体密度是 O^+波段 EMIC 增长的有利条件. 图 2 给出的是三组离子和三种 EMIC 波段的演变.

多离子等离子体成分产生的电磁离子回旋波特性, 也可以通过多离子振荡的概念解释. Sauer 等[50] 通过求解冷离子色散关系, 将波矢 $\boldsymbol{K}$ 作为随离子含量和波传播角变化的函数: EMIC 振荡的频率接近相应的重离子回旋频率, 其随重离子含量的增加而增大; 当重离子密度降低时, 激发振荡的最优传播角增大, 这与波由右旋偏振向左旋偏振的偏振态转变有关.

考虑到在空间中很少观察到离子的麦克斯韦分布, Bhaisaniyar 等[51] 从 Kappa 分布探讨了多种离子 (具体为 H^+, He^+和 O^+离子) 组成的等离子体中的 EMIC 波的色散关系、共振能量 (垂直和平行) 以及增长率, 并给出相应增长率的表达式, 即

$$\begin{aligned}\frac{\gamma}{\omega_l}=&\left\{\frac{\pi^{3/2}\Omega_{\mathrm{H}+}}{K_{\parallel}V_{T_{\parallel\mathrm{H}+}}}\left[\frac{\Gamma(\kappa_{\mathrm{p}}+1)}{\kappa_{\mathrm{p}}^{3/2}\Gamma(\kappa_{\mathrm{p}}-1/2)}\left(1-\frac{\omega}{\Omega_{\mathrm{H}+}}\right)\cdot\right.\right.\\&\left.\left(\frac{T_{\perp\mathrm{H}+}}{T_{\parallel\mathrm{H}+}}\right)-1\right]\times\left[1+\frac{(\omega-\Omega_{\mathrm{H}+})^2}{K_{\parallel}^2V_{T_{\parallel\mathrm{H}+}}^2}\right]^{-\kappa_{\mathrm{p}}-1}\left.\right\}\Big/\\&\left\{\left(\frac{CK_{\parallel}}{\omega_{\mathrm{pH}+}^2}\right)^2\left(\frac{2\Omega_{\mathrm{H}+}\omega}{\Omega_{\mathrm{H}+}\omega}\right)+\frac{1}{2}\frac{\omega^2}{(\Omega_{\mathrm{H}+}-\omega)^2}\right\}+\\&\left\{\frac{\pi^{3/2}\Omega_{\mathrm{He}+}}{K_{\parallel}V_{T_{\parallel\mathrm{He}+}}}\left[\frac{\Gamma(\kappa_{\mathrm{p}+1})}{\kappa_{\mathrm{p}}^{3/2}\Gamma(\kappa_{\mathrm{p}-1/2})}\left(1-\frac{\omega}{\Omega_{\mathrm{He}+}}\right)\cdot\right.\right.\\&\left.\left(\frac{T_{\perp\mathrm{He}+}}{T_{\parallel\mathrm{He}+}}\right)-1\right]\times\left[1+\frac{(\omega-\Omega_{\mathrm{He}+})^2}{K_{\parallel}^2V_{T_{\parallel\mathrm{He}+}}^2}\right]^{-\kappa_{\mathrm{p}}-1}\left.\right\}\Big/\\&\left\{\left(\frac{cK_{\parallel}}{\omega_{\mathrm{pHe}}^2}\right)^2\left(\frac{2\Omega_{\mathrm{He}+}\omega}{\Omega_{\mathrm{He}+}\omega}\right)+\frac{1}{2}\frac{\omega^2}{(\Omega_{\mathrm{He}+}\omega)^2}\right\}+\\&\left\{\frac{\pi^{3/2}\Omega_{\mathrm{O}+}}{K_{\parallel}V_{T_{\parallel\mathrm{O}+}}}\left[\frac{\Gamma(\kappa_{\mathrm{p}}+1)}{\kappa_{\mathrm{p}}^{3/2}\Gamma(\kappa_{\mathrm{p}}-1/2)}\left(1-\frac{\omega}{\Omega_{\mathrm{O}+}}\right)\cdot\right.\right.\\&\left.\left(\frac{T_{\perp\mathrm{O}+}}{T_{\parallel\mathrm{O}+}}\right)-1\right]\times\left[1+\frac{(\omega-\Omega_{\mathrm{O}+})^2}{K_{\parallel}^2V_T^2T_{\mathrm{O}+}}\right]^{-\kappa_{\mathrm{p}}-1}\left.\right\}\Big/\\&\left\{\left(\frac{\mathrm{c}K_{\parallel}}{\omega_{\mathrm{pO}+}^2}\right)^2\left(\frac{2\Omega_{\mathrm{O}+}-\omega}{\Omega_{\mathrm{O}+}\omega}\right)+\frac{1}{2}\frac{\omega}{(\Omega_{\mathrm{O}+}\omega)^2}\right\}.\end{aligned}\tag{7}$$

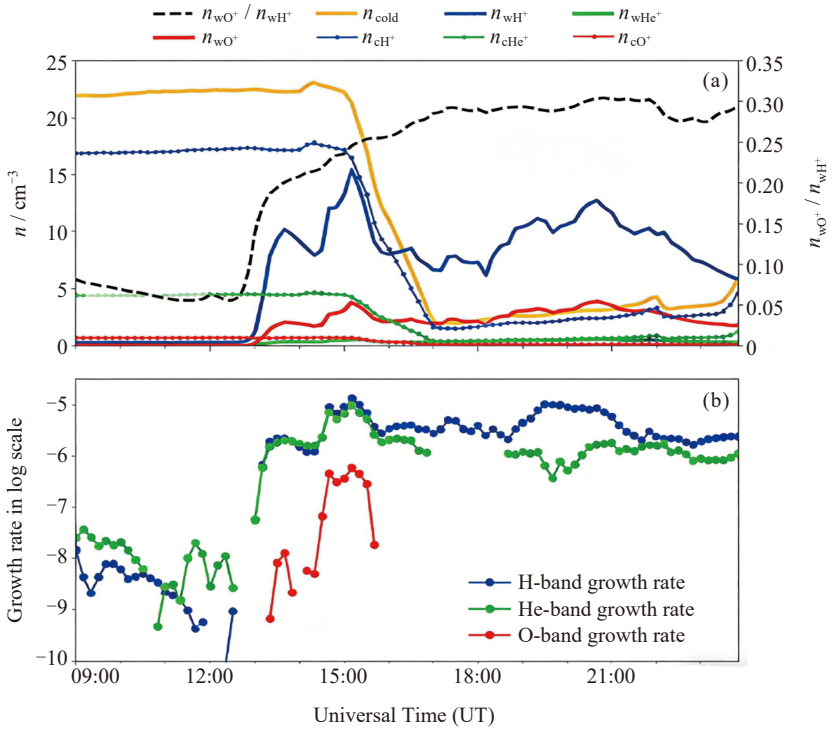


图 2 09:00—24:00 UT 期间三种离子和 EMIC 波段的演化[49]

Fig. 2 Evolution of three ion species and three EMIC bands from 09:00 UT to 24:00 UT[49]

其中, 下标l代表 H^+, He^+和 O^+离子成分, 其他参数和函数的具体定义可参考 Bhaisaniyar 等[51] 的文献. 图 3[51] 给出了增长率在不同κ_p参数下随波矢的变化情况: κ_p指数显著影响增长率, 在任何给定的$K_\parallel$下, κ_p值越高, 增长率越高. 同时, 还指出该研究是基于低β等离子体的假设, 等离子体可能无法准确代表等离子体密度较高的区域, 该研究考虑的是所有离子种类的单一温度各向异性, 而实际上, 不同的离子种类可以表现出不同的温度各向异性, 这也是该研究存在的局限性. 同样在离子非麦克斯韦分布的研究中, Rizwan 等[52] 利用 Cluster 卫星将观测到的实际离子速度分布函数 (VDF) 用 kappa 分布函数拟合, 对 EMIC 波进行全面分析, 并且揭示了超热离子群的存在及其在激发 EMIC 波时的作用, 而这也是麦克斯韦分布无法充分理解的.

EMIC 波 (以及大多数等离子体波) 是通过不稳定性计算分析的, 该计算通过输入一组参数, 从而得出线性增长率. 首先假定平面波具有给定的频率, 其波矢相对于背景磁场存在一定倾角, 在由任意数量的不同离子成分组成的均匀等离子体中传播, 其中的每种离子具有特定的密度、温度和各向异性, 并且具有规定的速度分布如麦克斯韦分布, 但有时也会使用其他分布[53]. 然后通过扫描一系列输入参数, 计算得出对应的增长率, 基于计算结果揭示了一些重要特征: (ω, k) 中波最有可能被激发的区域 (即空间增长率最大的区域), 或者由于衰减或阻尼增强而波会被抑制的区域, 亦或者研究不同离子对波谱特征的影响[54].

3 卫星观测

对于单一组分 (质子) 的两种不稳定性观测已经有了广泛的研究, 这里主要聚焦于多分组离子的不稳定性观测. Huddleston 等[37] 在对木卫一的观测 (主要重离子为 O^+, SO_2^+, S^+等) 中已对两种多组分不稳定性进行了分析, 指出等离子体中离子组分越多, 可能出现的离子回旋波模越多, 但这些波模的增长率低于相同总离子数的单一离子的波模的增长率. 同时镜像不稳定性是所有离子组分综合的各向异性驱动的, 所以多离子等离子体中镜像不稳定性可能更具优势. Noh 等[55] 在研究质子温度各向异性与 EMIC 不稳定性的关系时也评估了热 He^+的存在对质子线性不稳定性的影响, 并且指出热 He^+会抑制质子回旋波, 从而需要更高的温度各向异性质子才能导致不稳定性发生. Simon 等[56] 基于镜像不稳定性判据研究了火星中观测到的镜像模结构, 从速度分布函数 (VDF) 初步分析并揭示了非麦克斯韦分布的离子行为, 其中轻离子 (例如质子) 可利用自由能来驱动不稳定性增长. 同时研究也表明, 在观测区域, 由于等离子体β值较大, 且等离子体中存在的少量重离子可能会促进镜像不稳定性的增长. Liu 等[57] 基于磁层多尺度 (Magnetospheric Multiscale, MMS) 卫星首次报道了同时观测到镜像模结构和 EMIC 波的事件, 对 EMIC 不稳定性进行了分析, 观测参数Σ_h, 理论不稳定性阈值S_h的表达式为

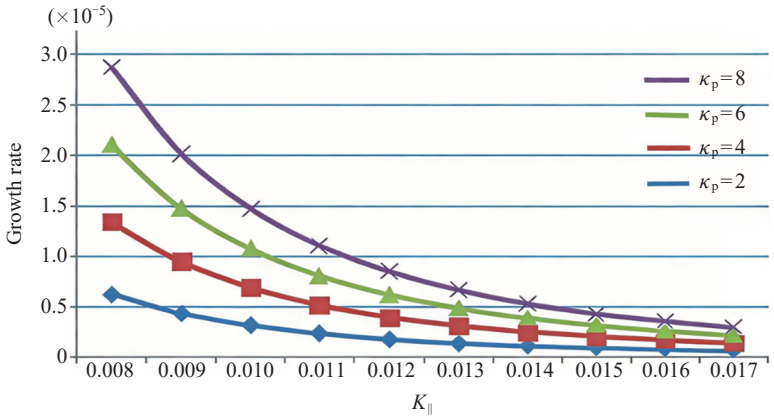


图 3 在$n_{H^+}=0.9$, $n_{He^+}=0.9$, $n_{o^+}=0.9$和$T_\perp/T_\parallel=8$时不同κ_p指数下增长率与波矢$K_\parallel$的变化[51]

Fig. 3 Variation of growth rate versus wave vector $K_\parallel$ for different values of distribution indices κ_p, at particle density $n_{H^+}=0.9$, $n_{He^+}=0.9$, $n_{o^+}=0.9$ and $T_\perp/T_\parallel=8$[51]

$$\Sigma_{\rm h}=\left(\frac{T_{\perp{\rm h}}}{T_{\parallel{\rm h}}}-1\right)\beta_{\parallel{\rm h}}^{a_{\rm h}}, \tag{8}$$

$$S_{\rm h}=\sigma_0+\sigma_1\ln\left(\frac{n_{\rm h}}{n_{\rm e}}\right)+\sigma_2\left[\ln\left(\frac{n_{\rm h}}{n_{\rm e}}\right)\right]^2. \tag{9}$$

其中，$a_{\rm h}=a_0-a_1\ln\left(\frac{n_{\rm h}}{n_{\rm e}}\right)-a_2\left[\ln\left(\frac{n_{\rm h}}{n_{\rm e}}\right)\right]^2$，$a_0=0.409$，$a_1=0.0145$，$a_2=0.00028$；$\sigma_0$，$\sigma_1$，$\sigma_2$分别为0.429, 0.124 和 0.0118；$n_{\rm h}$和$n_{\rm e}$分别为热离子和电子密度，当$\Sigma_{\rm h}$大于$S_{\rm h}$时，会激发 EMIC 不稳定性. 图 4 和图 5 分别为对混合离子利用两种不稳定性判据得到的相关参数，其中镜像不稳定性阈值$R=\beta_{\rm i\perp}(1-T_{\rm i\perp}/T_{\rm i\parallel})+1$，i为离子.

Liu 等[57] 的研究从观测上给出了 EMIC 不稳定性和镜像不稳定性能在磁层中同时增长. Shreedevi 等[58] 在观测磁暴期间 EMIC 波分布与质子沉降产生极光的关联时，计算了 H^+，He^+和 O^+的线性空间增长率，给出了不同离子频段 EMIC 波的最大增长率的全球分布，结果显示 He 波段的增长率和空间分布均弱于 H 波段的增长率，而 O 波段的空间分布和增长率最小. Lee 等[59] 利用 MMS 卫星对不同离子成分的观测详细研究了 EMIC 波，通过计算多卫星波矢数据并应用线性理论，证明了波的观测行为与理论一致. 图 6 为 Lee 等[59] 对离子 EMIC 波的观测结果.

随着搭载高精度和探测多离子组分仪器的卫星不断升空，为研究两种不稳定性的演化过程以及不同离子对不稳定性的影响提供了重要的数据支撑.

4 结语

本文综述了多组分离子镜像和电磁回旋不稳定性的研究进展，主要的研究结论如下.

在空间等离子体环境中，离子的不稳定性普遍存在，离子垂直温度各向异性可驱动镜像不稳定性，进而激发镜像模波. 重粒子的存在可抑制由垂直温度各向异性驱动的另一种不稳定性——EMIC 不稳定性，从而使镜像不稳定性成为主导.

电磁离子回旋不稳定的研究逐步从“单带、冷离子、线性”推向“多带、非冷离子、非线性”. 当下的研究结果揭示了很多物理现象，例如当 O^+含量增强时，H^+波段和 He^+波段 EMIC 波的增长均会受到抑制，

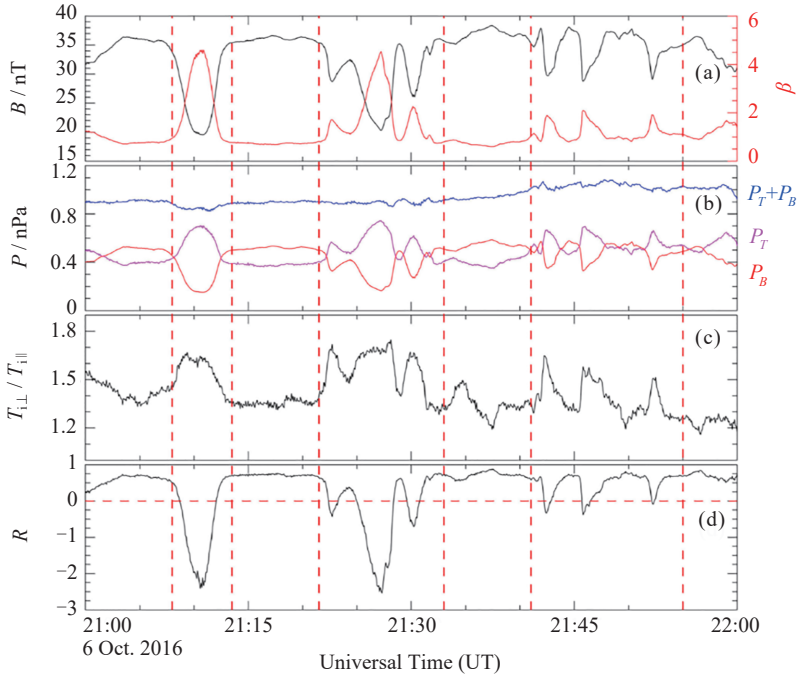


图 4 (a) 磁场强度 (黑线) 和离子β值 (红线); (b) 热压 (品红线), 磁压 (红线) 和总压 (蓝线); (c) 离子温度各向异性; (d) 镜像不稳定性阈值R[57]

Fig. 4 (a) Magnetic field strength (black) and ion plasma β (red), (b) thermal pressure (magenta), magnetic pressure (red), and their summation (blue), (c) temperature anisotropy of ions, (d) threshold of mirror mode instability[57]

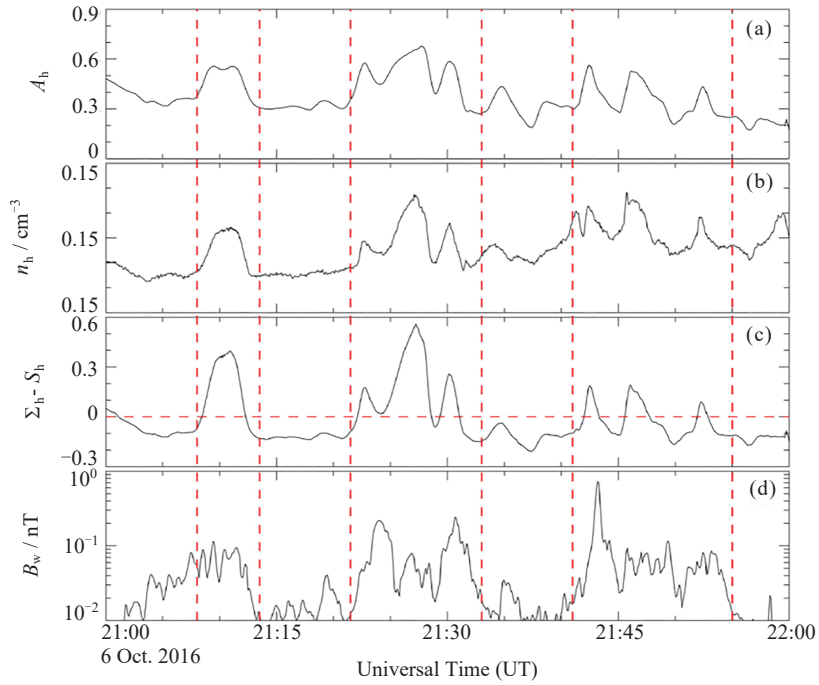


图 5 (a) 热离子温度各向异性, (b) 热离子数密度, (c) EMIC 不稳定性参数, (d) 波幅[57]

Fig. 5 (a) Temperature anisotropy of hot ions, (b) number density of hot ions, (c) EMIC instability parameters, (d) wave amplitude[57]

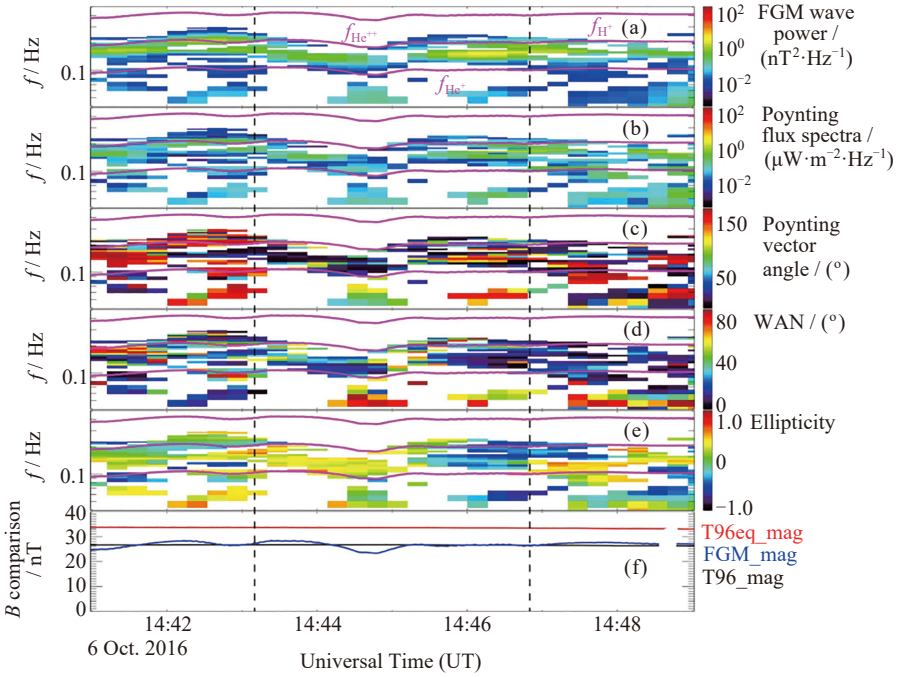


图 6 (a) 波功率谱, (b) 坡印廷通量, (c) 坡印廷角通量, (d) 波法向角, (e) 波的椭圆度, (f) 环境磁场分析[59]

Fig. 6 (a) Wave power spectra, (b) Poynting flux spectra, (c) Poynting flux angle, (d) wave normal angle, (e) wave ellipticity, (f) ambient magnetic field analysis[59]

而 O^+波段 EMIC 波的增长则会增强[60]. 较低频率 O^+波段 EMIC 的增强, 意味着 EMIC 波可在更宽的频率范围内与粒子有效相互作用.

在离子温度各向异性存在的情况下, 电子温度各向异性可显著改变镜像不稳定性和 EMIC 不稳定性.

对于镜像和 EMIC 不稳定性的研究, 已经建立了基本的研究方法, 并取得了重要的研究成果, 但是在更复杂的等离子体环境下对两种不稳定性的研究仍有不足. Jiang 等[61] 从磁鞘区 2015—2019 年的观测数据中发现, 镜像不稳定性发生率大于 20%, 在不同的空间等离子体区域中也可观察到镜像不稳定性, 包括太阳风和内磁层. 但镜像模结构的识别是比较困难的, 卫星观测表明, 镜像模结构本质上是沿着背景磁场方向细长的圆柱形结构, 其不会在等离子体静止框架中传播, 而是与等离子体流一起对流, 被认为是镜像不稳定性演化的非线性阶段. 此外, 从弓激波到磁层顶的路径上, 镜像模结构的时间演化、以及两种不同形式镜像模结构 (峰和谷) 的起源问题, 至今仍然存在争议[62].

EMIC 不稳定性研究表明, 在存在非热离子/电子群分布的空间环境中, 麦克斯韦分布假设的适用性受到极大限制, 同时 EMIC 波的产生机制仍然是磁层研究中长期存在的难题. 无论是线性理论还是数值模拟均预测, EMIC 波由磁赤道处的各向异性质子激发; H^+波段的波一般具有较小的波法向角, 表现为左旋极化; 但 O^+波段大多为线性极化或者弱右旋极化. 目前虽已提出 EMIC 波的激发机制, 但仅依靠局域观测尚不足以揭示这些波的时空演化, 对这些波的完整解释仍需要更加深入的研究[63,64].

综上所述, 以下三点内容可能会为多组分离子镜像和回旋不稳定性未来的研究提供重要参考. 其一, 完善非麦克斯韦分布下多组分离子不稳定性的理论框架, 同时考虑多种重离子 (He^+, O^+等) 的色散关系、不稳定性阈值及增长率的解析表达式, 明确和量化不同离子组分的调控权重. 其二, 发展高分辨率、多尺度的数值模拟方法以及非麦克斯韦色散关系求解工具, 通过引入真实的等离子体边界条件和离子分布函数, 模拟多组分离子不稳定性的演化过程. 其三, 依托多卫星联合观测计划, 开展多组分离子不稳定性的系统性观测, 并结合实际观测的不同离子的速度分布, 从动理论的角度研究离子的行为, 并建立观测数据与理论、模拟结果的对比验证体系, 从而全面揭示不稳定性的物理机制及其演化过程.

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] HASEGAWA A. Drift mirror instability in the magnetosphere[J]. *Physics of Fluids*, 1969, **12**(12): 2642-2650

[2] KENNEL C F, PETSCHEK H E. Limit on stably trapped particle fluxes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1966, **71**(1): 1-28

[3] KENNEL C F, SCARF F L. Thermal anisotropies and electromagnetic instabilities in the solar wind[J]. *Journal of Geophysical Research: : Space Physics*, 1968, **73**(19): 6149-6165

[4] LIU W, JIA H Y, LIU S M. Effects of ion temperature anisotropy on ion-scale waves' generation in the near-sun solar wind: parker solar probe observations[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2025, **983**(2): L35

[5] YOON P H, LAZAR M, SALEM C, *et al.* Boundary of the distribution of solar wind proton beta versus temperature anisotropy[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **969**(2): 77

[6] DIMMOCK A P, YORDANOVA E, GRAHAM D B, *et al.* Mirror mode storms observed by Solar Orbiter[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(11): e2022JA030754

[7] POKHOTELOV O A, TREUMANN R A, SAGDEEV R Z, *et al.* Linear theory of the mirror instability in non-Maxwellian space plasmas[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A10): 1312

[8] GU S J, COWEE M, FU X R, *et al.* The role of cold oxygen ions in the EMIC wave growth[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(6): e2024JA033661

[9] SIMON WEDLUND C, MAZELLE C, MEZIANE K, *et al.* Local generation of mirror modes by pickup protons at Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(1): e2024JA033275

[10] POKHOTELOV O A, SAGDEEV R Z, BALIKHIN M A, *et al.* Nonlinear mirror waves in non-Maxwellian space plasmas[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A4): A04225

[11] HESSE M, BIRN J. MHD modeling of magnetotail instability for anisotropic pressure[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1992, **97**(A7): 10643-10654

[12] MCKEAN M E, GARY S P, WINSKE D. Kinetic physics of the mirror instability[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, **98**(A12): 21313-21321

[13] SOUTHWOOD D J, KIVELSON M G. Mirror instability: 1. Physical mechanism of linear instability[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, **98**(A6): 9181-9187

[14] AHMADI N, GERMASCHEWSKI K, RAEDER J. Effects of electron temperature anisotropy on proton mirror instability evolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(6): 5350-5365

[15] POKHOTELOV O A, SAGDEEV R Z, BALIKHIN M A, *et al*. Mirror instability at finite ion-Larmor radius wavelengths[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A9): A09213

[16] SHAABAN S M, LAZAR M, ASTFALK P, *et al*. Stimulated mirror instability from the interplay of anisotropic protons and electrons, and their suprathermal populations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(3): 1754-1766

[17] LEUBNER M P, SCHUPFER N. Mirror instability thresholds in suprathermal space plasmas[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A12): 27387-27391

[18] JUN C W, MIYOSHI Y, HORI T, *et al*. Arase in situ observations of high-frequency Electromagnetic Ion Cyclotron (EMIC) waves in regions close to the Earth during the May 2024 storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, **52**(7): e2024GL112489

[19] REMYA B, HALFORD A J, NOH S J, *et al*. (Un)explained EMIC waves: understanding quiet time EMIC wave drivers[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(8): e2024JA033125

[20] XUE Z X, YUAN Z G, YU X D, *et al*. Enhanced solar wind dynamic pressure as a driver of low-energy proton temperature anisotropies and high-frequency EMIC waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(9): e2023JA031929

[21] ENGEBRETSON M J, POSCH J L, CAPMAN N S S, *et al*. MMS, Van Allen Probes, GOES 13, and ground-based magnetometer observations of EMIC wave events before, during, and after a modest interplanetary shock[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(10): 8331-8357

[22] THORNE R M, HORNE R B. The contribution of ion-cyclotron waves to electron heating and SAR-arc excitation near the storm-time plasmapause[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, **19**(4): 417-420

[23] YUAN Z G, XIONG Y, HUANG S Y, *et al*. Cold electron heating by EMIC waves in the plasmaspheric plume with observations of the Cluster satellite[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(6): 1830-1837

[24] KIM K H, JUN C W, KWON J W, *et al*. Observation and numerical simulation of cold ions energized by EMIC waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(5): e2023JA032361

[25] JORDANOVA V K, FARRUGIA C J, THORNE R M, *et al*. Modeling ring current proton precipitation by electromagnetic ion cyclotron waves during the May 14-16, 1997, storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A1): 7-22

[26] MA Q, LI W, BORTNIK J, *et al*. Diffusive and nonlinear scattering of ring current protons by electromagnetic ion cyclotron waves in the earth's inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(8): e2025JA034078

[27] GRACH V S, ARTEMYEV A V, DEMEKHOV A G, *et al*. Electron precipitation driven by EMIC waves: Two types of energy dispersion[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(9): e2023GL107604

[28] YAN Y, YUE C, YIN Z F, *et al*. Amplitude-dependent properties and excitation mechanisms of EMIC waves in the Earth's inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(7): e2023JA031451

[29] GARY S P, FUSELIER S A, ANDERSON B J. Ion anisotropy instabilities in the magnetosheath[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, **98**(A2): 1481-1488

[30] GARY S P, LEE M A. The ion cyclotron anisotropy instability and the inverse correlation between proton anisotropy and proton beta[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1994, **99**(A6): 11297-11301

[31] GOMBEROFF L, VEGA P. Effect of He+ temperature and thermal anisotropy on the electromagnetic ion cyclotron instability in the geosynchronous region of GEOS-2[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1987, **92**(A7): 7728-7732

[32] FRASER B J, SAMSON J C, HU Y D, *et al*. Electromagnetic ion cyclotron waves observed near the oxygen cyclotron frequency by ISEE 1 and 2[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1992, **97**(A3): 3063-3074

[33] GEDALIN M, BALIKHIN M, STRANGEWAY R J, *et al*. Long-wavelength mirror modes in multispecies plasmas with arbitrary distributions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A2): 1018

[34] HELLINGER P. Comment on the linear mirror instability near the threshold[J]. *Physics of Plasmas*, 2007, **14**(8): 082105

[35] GARY S P. The mirror and ion cyclotron anisotropy instabilities[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1992, **97**(A6): 8519-8529

[36] CHENG I, ACHILLEOS N, BLANCO-CANO X, *et al*. Waves and instabilities in Saturn's magnetosheath: 2. Dispersion relation analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(10): e2024JA032585

[37] HUDDLESTON D E, STRANGEWAY R J, BLANCO-CANO X, *et al*. Mirror-mode structures at the Galileo-Io flyby: Instability criterion and dispersion analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, **104**(A8): 17479-17489

[38] REMYA B, REDDY R V, TSURUTANI B T, *et al*. Ion temperature anisotropy instabilities in planetary magnetosheaths[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(2): 785-793

[39] GUO X D, WANG T Y, ZHAO J S, *et al*. Excitation of mirror mode waves and whistler waves in space plasmas[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(8): e2025JA034084

[40] NOWROUZI N, KISTLER L M, ZHAO K, *et al*. The variation of ionospheric O^+ and H^+ outflow on storm timescales[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(11): e2023JA031786

[41] YOUNG D T, PERRAUT S, ROUX A, *et al*. Wave-particle interactions near Ω_{He+} observed on GEOS 1 and 2: 1. Propagation of ion cyclotron waves in He^+-rich plasma[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1981, **86**(A8): 6755-6772

[42] GOMBEROFF L, NEIRA R. Convective growth rate of ion cyclotron waves in a H^+- He^+ and H^+- He^+- O^+ plasma[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*,

1983, **88**(A3): 2170-2174

[43] KOZYRA J U, CRAVENS T E, NAGY A F, *et al*. Effects of energetic heavy ions on electromagnetic ion cyclotron wave generation in the plasmapause region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1984, **89**(A4): 2217-2233

[44] GARY S P, THOMSEN M F, YIN L, *et al*. Electromagnetic proton cyclotron instability: interactions with magnetospheric protons[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1995, **100**(A11): 21961-21972

[45] HU Y, DENTON R E, JOHNSON J R. Two-dimensional hybrid code simulation of electromagnetic ion cyclotron waves of multi-ion plasmas in a dipole magnetic field[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A9): A09218

[46] OMIDI N, BORTNIK J, THORNE R, *et al*. Impact of cold O^+ ions on the generation and evolution of EMIC waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(1): 434-445

[47] DENTON R E, JORDANOVA V K, FRASER B J. Effect of spatial density variation and O^+ concentration on the growth and evolution of electromagnetic ion cyclotron waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(10): 8372-8395

[48] OFMAN L, DENTON R E, BORTNIK J, *et al*. Growth and nonlinear saturation of electromagnetic ion cyclotron waves in multi-ion species magnetospheric plasma[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(6): 6469-6484

[49] ZHU M H, YU Y Q, JORDANOVA V K. Simulating the effects of warm O^+ ions on the growth of electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2021, **224**: 105737

[50] SAUER K, DUBININ E. Multi-ion oscillations—Origin of coherent magnetospheric EMIC waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(10): e2022JA030925

[51] BHAISANIYAR, AHIRWARG. The Kappa distribution function's impact on EMIC waves in multi-ions magnetoplasma[J]. *Indian Journal of Physics*, 2025, **99**(13): 5275-5283

[52] RIZWAN S T, QURESHI M N S. Investigation of EMIC instability in the inner magnetosphere using observed ion velocity distributions from cluster observations[J]. *Physics of Plasmas*, 2025, **32**(10): 102103

[53] LOU Y Q, CAO X, WU M Y, *et al*. Scalings for the Alfvén-cyclotron instability in a bi-kappa plasma[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2023, **7**(6): 631-639

[54] BORTNIK J, OMIDI N, CHEN L, *et al*. Saturation characteristics of electromagnetic ion cyclotron waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A9): A09219

[55] NOH S J, LEE D Y, KIM H, *et al*. Upper limit of proton anisotropy and its relation to electromagnetic ion cyclotron waves in the inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(5): e2020JA028614

[56] SIMON WEDLUND C, VOLWERK M, MAZELLE C, *et al*. Making waves: mirror mode structures around mars observed by the maven spacecraft[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(1): e2021JA029811

[57] LIU X M, YU J, CHEN ZZ, *et al*. Simultaneous observations of mirror mode structures and electromagnetic ion cyclotron waves in the Earth's outer magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 2024, **129**(11): e2024JA032951. DOI: 10.1029/2024JA032951

[58] SHREEDEVI P R, YU Y Q, MIYOSHI Y, *et al*. Global distribution of EMIC waves and its association to subauroral proton precipitation during the 27 May 2017 storm: modeling and multipoint observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(6): e2023JA032337

[59] LEE J H, TURNER D L, TOLEDO-REDONDO S, *et al*. MMS measurements and modeling of peculiar electromagnetic ion cyclotron waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(21): 11622-11631

[60] LIU X, CHEN L J, SUN J C, *et al*. A parametric study of oxygen ion cyclotron harmonic wave excitation and polarization by an oxygen ring distribution[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(11): e2022JA030828

[61] JIANG W C, LI H, YANG Z W, *et al*. Spatial dependence of ion-kinetic instabilities in the Earth's magnetosheath: MMS observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(3): e2024JA033463

[62] COOPER M B, GERRARD A J, LANZEROTTI L J, *et al*. Mirror instabilities in the inner magnetosphere and their potential for localized ULF wave generation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(2): e2020JA028773

[63] BILAL M, AMAN-UR-REHMAN, SHAHZAD M A, *et al*. EMIC mode instability stimulated by non-thermal non-extensive particles in non-equilibrium bi-Cairns–Tsallis distributed magnetized plasmas[J]. *The European Physical Journal Plus*, 2024, **139**(11): 1029

[64] CHEN H Y, GAO X L, LU Q M, *et al*. Analyzing EMIC waves in the inner magnetosphere using long-term Van Allen Probes observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(9): 7402-7412

作者简介



马玉端 女, 1977 年 8 月出生于河南省周口市, 北京航空航天大学空间与地球科学学院副教授, 主要研究方向为地球磁尾离子高速流、磁暴和亚暴.

E-mail: ydma@buaa.edu.cn