

研究简报

高 β 等离子体的离子-离子束不稳定性

周 玉 美

(中国科学院物理研究所)

吴 京 生

(美国马利兰大学物理科学与技术研究所)

1982年9月27日收到

提 要

在 $\beta_i \ll 1$ 的条件下,人们曾得到电磁效应可以稳定离子-离子束不稳定性的判据

$$V_d/V_A < \sqrt{1 + \beta_e}.$$

本文研究了等离子体的有限 β_e, β_i 效应对离子-离子束不稳定性的影响. 在所研究的参数范围内,随着 β_e 的增加,增长率上升,并且流速比 V_d/V_A 所允许的不稳定区域变宽. 而随着 β_i 的增加,依赖于流速比 V_d/V_A 的不同,增长率的变化也有所不同,但流速比 V_d/V_A 所允许的不稳定区域变窄.

一

离子-离子束不稳定性很早就被人们研究过^[1-3], 人们认为此种不稳定性可以提供解释离子加热所需要的耗散机制^[3]. 开始的研究被限制在静电波, 后来 Auer 等人^[4]和 Papadopoulos 等人^[5]分别讨论了包含磁化电子效应和电磁扰动效应在内的离子-离子束不稳定性问题. 他们发现电磁效应可以稳定此种不稳定性. Papadopoulos 等人^[5]对此种不稳定性提出了一个近似的判据, 认为离子的流速 V_d 不能超过 Alfvén 速度 V_A , 否则此不稳定性将被电磁效应抑制. 以前的作者在得到 $V_d/V_A < \sqrt{1 + \beta_e}$ 的不稳定条件时, 曾作了 $\beta_i \ll 1$ 的假设. 我们对此种不稳定性重新进行了研究. 本文给出了任意 β_e, β_i 时, 离子-离子束不稳定性的不稳定区域以及最大增长率 $r_{\max}$ 随 β_e, β_i 和流速比 V_d/V_A 的变化情况. 这里, $r_{\max}$ 是表示对波矢 k 取了极大, 即 $r_{\max} = r(k_0)$, k_0 是相应于有最大增长率时的 k .

二

由于离子-离子束不稳定性可以加热离子, 因而在无碰撞激波或 θ -pinch 的有关研究里, 经常被人们提到. 而在这些情况下, $\beta_i \ll 1$ 的条件并不是经常满足的. 为了讨论任意 β_i 的情况, 我们给出包含温度效应、电磁效应在内的, 对任意 β_e, β_i 都成立的色散关系

$$1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\omega_{pi}^2}{k^2 V_{ti}^2} z'(\zeta_{i+}) + \frac{\omega_{pi}^2}{k^2 V_{ti}^2} z'(\zeta_{i-}) \right] + \frac{2\omega_{pe}^2}{k^2 V_{te}^2} [1 - e^{-\mu} I_0(\mu)] \\ + \frac{\omega_{pi}^2}{k^2 V_A^2} \frac{e^{-2\mu} (I_0 - I_1)^2}{[1 + \beta_e (I_0 - I_1) e^{-\mu}]} = 0.$$

上式可以从文献[6]所给出的一般色散关系(9)式中令 $k_{\parallel} = 0$, 并略去各种梯度效应而得到。这里 $\mu = k^2 V_{te}^2 / 2\Omega_e^2$, $\zeta_{i\pm} = (\omega \pm k V_d \cos \phi) / k V_{ti}$, z' 是等离子体色散函数的微商。在写出上式时, 我们已将离子处理成非磁化的, 即假设 $\Omega_i^2 \ll \omega^2 \ll \Omega_e^2$, 并且 $k^2 \rho_i^2 \gg 1$ 。 k 和 ω 分别是所讨论的不稳定模的波矢和频率, ρ_i 为离子拉莫尔半径, V_{te} , V_{ti} 分别为电子和离子的热速度。 Ω_i , Ω_e 分别为离子和电子的迴旋频率。 V_d 为离子束的流速。 I_0 , I_1 分别为零阶和一阶变形 Bessel 函数, 其宗量为 μ 。 ϕ 为波矢 k 和流速 V_d 之间的夹角。以下仅讨论 $\phi = 0$ 的情况。我们对(5)式进行了数值计算, 计算结果见图 1—图 4。

图 1 和图 2 分别给出了在不同的 β_e , β_i 下, 不稳定模的最大增长率 $\gamma_{\max} / \omega_{th}$ 随流速比

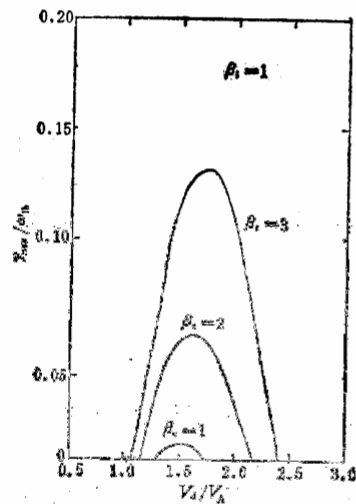


图 1

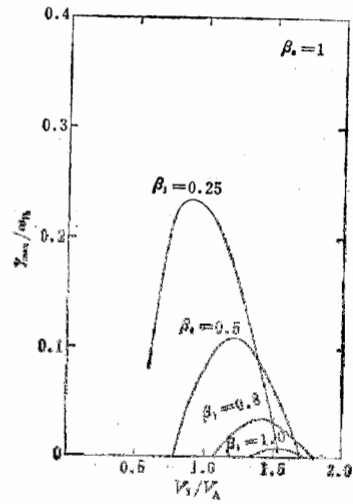


图 2

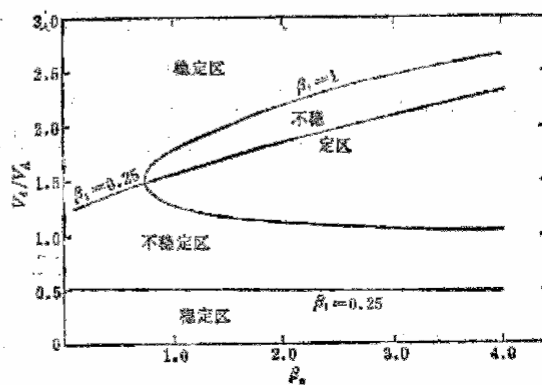
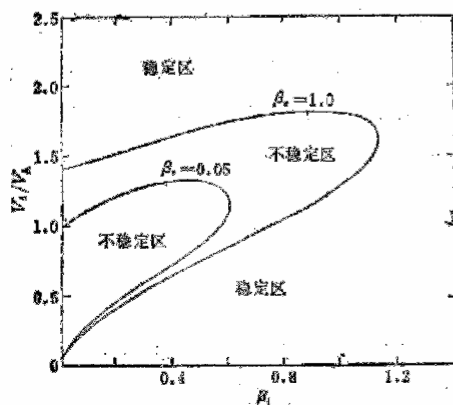


图 4

V_d/V_A 的变化情况。这里, $\omega_{ih} = \omega_{pi}/(1 + \omega_{pe}^2/\Omega_e^2)^{1/2}$ 为低杂频率。

图 3 和图 4 分别给出了在不同的 β_e, β_i 下, 允许不稳定性存在的 V_d/V_A 的区域。

从图 1 可以看到, 当 $\beta_e = \beta_i = 1$ 时, 增长率是很小的。大约位于 $V_d/V_A \simeq 1.5$ 处的峰值增长率也是小于离子回旋频率 Ω_i 的。若固定 $\beta_i = 1$, 增加 β_e , 则随着 β_e 的增加, 不稳定的增长率增加, 并且不稳定的区域 V_d/V_A 也加宽。最大增长率的峰值约落在 $1.5 \leq V_d/V_A < 2.0$ 的区域。

从图 2 可以看到, 若固定 $\beta_e = 1$, 减小 β_i , 则随着 β_i 的减小, 最大增长率 $\gamma_{\max}/\omega_{ih}$ 曲线的峰值将明显增加, 并向较低的 V_d/V_A 处移动。但在流速的不同区域, 最大增长率的变化是不同的。若 V_d/V_A 较小 (例如 $V_d/V_A < 1.4$), 则随着 β_i 的减小, 最大增长率 $\gamma_{\max}$ 增大; 若 V_d/V_A 较大 (例如 $V_d/V_A \geq 1.5$), 则随着 β_i 的减小, $\gamma_{\max}$ 最初增加, 然后变小, 甚至完全稳定下来。所以增长率随 β_i 的变化, 不像随 β_e 变化时那么单一, 而是比较复杂的, 依赖于流速比 V_d/V_A 的不同, 有所不同。这点从图 3 也可以看到, 例如, 取 $\beta_e = 1.0$, $V_d/V_A = 1.5$, 随着 β_i 的增加, 此模可以从稳定变成不稳定, 而最后又变成稳定。

从图 3 可以看到, 对给定的 β_e , 当 β_i 足够高时, 不稳定性可以被抑制。例如, 对 $\beta_e = 1$, 当 β_i 超过 1.1 就没有不稳定性了; 而对 $\beta_e = 0.05$, β_i 超过 0.6 就没有不稳定性了。

从图 4 可以看到, 对给定的 β_i , 不稳定的 V_d/V_A 区域将随 β_e 的增加而增加。对 $\beta_i = 1$ 的情况, 只有 $\beta_e \geq 1$, 不稳定性才会发生。另一方面, 若取 $\beta_i = 0.25$, 则 β_e 很小时也有不稳定性发生。

三

综上所述, 我们可以得到以下结论:

1. 以前人们所得到的电磁效应可以稳定离子-离子束不稳定性的判据

$$V_d/V_A < \sqrt{1 + \beta_e},$$

只适用于 $\beta_i \ll 1$ 的情况。

2. 我们讨论了任意 β_e 和 β_i 的情况。发现在所研究的参数范围内, 随着 β_e 的增加, 增长率上升, 并且流速所允许的不稳定区域变宽。对给定的 β_i , 随着 β_e 的增加, 不稳定性最终将会发生。而随着 β_i 的增加, 依赖于流速比 V_d/V_A 的不同, 增长率的变化也有所不同。在较低的流速区, 它可以一直减小, 但在较高的流速区, 它可以先增加, 然后减小。但对给定的 β_e , 随着 β_i 的增加, 不稳定性最终将被抑制。

参 考 文 献

- [1] T. E. Stringer, *Plasma Physics*, 6(1964), 267.
- [2] D. A. Tidman, *Phys. Fluids*, 10(1967), 547.
- [3] B. Bertotti and D. Biskamp, Proceeding of a Study Group on Collisionfree Shocks in the Laboratory and Space Held at ESRIN, Frascati, Italy, ESRO Spec. Pap. SP-51, 41, (1969).
- [4] P. L. Auer, E. W. Kith, W. F. Cravner, *J. Geophys. Res.*, 76(1971), 2927.
- [5] K. Papadopoulos, R. C. Davidson, J. M. Dawson, I. Haber, D. A. Hammer, N. A. Krall, R. Shanny, *Phys. Fluids*, 14(1971), 849.

[6] J. B. Hsia, S. M. Chiu, M. F. Hsia, R. L. Chou and C. S. Wu, *Phys. Fluids*, **22**(1979), 1737.

ION-ION STREAMING INSTABILITY IN A HIGH BETA PLASMA

ZHOU YU-MEI

(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

C. S. WU

(*Institute for Physical Science and Technology, University of Maryland*)

ABSTRACT

The criterion $V_d/V_A < \sqrt{1 + \beta_e}$ for instability mentioned in the existing theories is based on the assumption $\beta_i \ll 1$. The present study investigates the effects of finite β_e and β_i on the ion-ion streaming instability. It is found that within the domains under investigation in the parameter space the growth rate increases with the increase of β_e . Moreover, the unstable region, as a function of the streaming velocity V_d/V_A , becomes broader. On the other hand, when β_i increases (for a given β_e) the unstable region in the V_d/V_A space becomes narrower.