24P-4F-04

捕捉電子不安定性に及ぼす通過電子の非断熱応答効果
Non-adiabatic Response of Passing Electron on Trapped Particle Instability

矢木雅敏[1]、ワンウェイ[1]、瀬戸春樹[1]、今寺賢志[2]
YAGI Masatoshi[1], WANG Wei[1], SETO Haruki[1], IMADERA Kenji[2]
[1]量研六ヶ所、[2]京都大学
[1]QST Rokkasho, [2]Kyoto Univ.

ジャイロ運動論モデルを用いた捕捉電子不安定性において通過電子の非断熱効果の重要性が指摘されている[1,2]。その不安定化機構を明らかにするため、捕捉電子不安定性に対する通過電子の非断熱応答効果を考察したのでその結果を報告する。ここでは無衝突極限を考える。無衝突捕捉電子不安定性の分散式は

$$\Gamma_0 \frac{\omega_{*e}}{\omega} - \tau(1-\Gamma_0) = 1 + i\delta_T^{(i)} + i\delta_p^{(i)}$$

ここで$\delta_T^{(i)}$は捕捉電子の共鳴効果[3]を示し、$\delta_p^{(i)}$は通過粒子の共鳴効果[4]を示す。$\omega_r \gg \gamma$のリミットにおいて摂動論により分散式を評価する。捕捉電子不安定性に対して、$\Gamma_0 \approx 1$と近似すると、0 次のオーダーから周波数$\omega_r \approx \omega_{*e}$が、1 次のオーダーから成長率が得られる。

$$\gamma \approx -\omega_{*e}\delta_T^{(i)}$$

ここで、

$$-\delta_T^{(i)} = 2\sqrt{\pi}\sqrt{2\varepsilon}\frac{\eta_e}{\varepsilon_n}\left(\frac{1}{\varepsilon_n} - \frac{3}{2}\right)$$

$\varepsilon_n < 2/3$に対し、不安定性が存在する。次にユニバーサルドリフト波に対しては、$\Gamma_0 \approx 1-b$と近似すると、周波数$\omega_r \approx \omega_{*e}(1-(1+\tau)b)$及び成長率が得られる。ここで$\tau = T_e/T_i$であり、それ以外のパラメータに関しては文献[4]で与えられる。

$$\frac{\gamma}{\omega_{*e}} \approx (1+\tau)b\sqrt{\pi}\frac{k_\parallel}{|k_\parallel|}\zeta_e e^{-\zeta_e^2}$$

ユニバーサルドリフト波に対して、$\omega_{*T} = 0$を仮定したが一般化は容易である。

$$\frac{\omega_{*e}}{\omega_r} = \frac{1+\tau(1-\Gamma_0)}{(1-\eta_i b)\Gamma_0 + \eta_i b\Gamma_1}$$

$$\frac{\gamma}{\omega_{*e}} = -\frac{\omega_r}{\omega_{*e}}\delta_T^{(i)} + \sqrt{\pi}\zeta_e e^{-\zeta_e^2}\left(1 - \frac{\omega_r}{\omega_{*e}} - \frac{\eta_e}{2} - \eta_e\zeta_e^2\right)$$

成長率に対する表式の右辺の第２項は通過粒子による寄与を示しており電子温度勾配はユニバーサルドリフト波の安定化に寄与する。

$\zeta_e \to 0$のリミットにおいてΓ_0, Γ_1をテーラ展開すると

$$1 - \frac{\omega_r}{\omega_{*e}} - \frac{\eta_e}{2} = -\frac{\eta_e}{2} + (\tau+1+\eta_i)b + \cdots$$

$\tau = 1, \eta_i = \eta_e 2$の時、上記の項が正となるためには$b > 1/4$を満たす必要がある。すなわち、$k_\theta\rho_i > 1/2$。通過粒子の非断熱応答の効果は短波長領域において支配的となることがわかる。$k_\theta\rho_i = 0.6, \tau = 1, \eta_i = 2$の時、ユニバーサルドリフト波が不安定化するためには$1.54108 > \eta_e$を満たす必要がある。これより、電子温度勾配が安定化に寄与することがわかった。次にITGモードとユニバーサルドリフト波の結合を考える。ITG/TEMに関しては文献[3]で議論されている。

$$(1+b_s+i\delta)\Omega^2 + (-1+2\varepsilon_n+b_sK)\Omega + G = 0$$

ここで$b_s = \tau b, G = 2\varepsilon_n K, K = \frac{1+\eta_i}{\tau}, \Omega = \omega_r/\omega_{*e}$である。ITGモードが安定な場合、$(-1+2\varepsilon_n+b_sK)^2 \gg 4G(1+b_s)$が成り立つ。このリミットにおいて周波数は

$$\Omega = \frac{1-2\varepsilon_n-b_sK}{1+b_s} - \frac{G}{1-2\varepsilon_n-b_sK}$$

である。また、成長率は

$$\gamma \propto -\delta \propto 1 - \Omega - \eta_e/2$$

で与えられる。$K = 1, \varepsilon_n = 0.04, b_s = 0.16$の場合、$0.95318 > \eta_e$であれば、ユニバーサルドリフト波は不安定であることが判明した。ユニバーサルドリフト波は磁気シャーにより安定化されることが知られているので[4]、磁気シャーの効果を調べる必要がある。詳細は本会議にて報告する予定である。

[1] J. Dominski et al., Phys. Plasmas 24, 022308(2017).
[2] W. Wang et al., APTWG Meeting, Kyushu Univ., 6 July, 2021.
[3] F. Romaneli et al., Phys. Fluids B 2 754(1990).
[4] K. Miyamoto, Plasma Physics for Nuclear Fusion, MIT Press 1989.