

逃走電子のアバランチ現象に対する不純物種依存性の解析

量研機構・六ヶ所核融合研究所

松山顕之

トカマク装置ではディスラプション時に MeV オーダーの逃走電子が観測されることがあり、逃走電子ビームによる対向機器の装置損傷を回避することは重要な課題である。特に、ITER では 1 次逃走電子と熱電子の近接衝突が雪崩的増倍（アバランチ）を引き起こすことが理論的に予測されており、アバランチの回避と抑制、もしくは発生した逃走電子の影響緩和が ITER に向けた喫緊の研究課題となっている。

本研究では、相対論的 Fokker-Planck 方程式の近似解を基にしたアバランチ成長率の理論計算手法 [1] を用い、アバランチ現象に対する不純物種の影響を調べた [2]。ここでは、不純物の原子分子過程は OpenADAS のデータベース(放射損失パワー、イオン化エネルギー等)を用い、相対論的電子と不完全電離不純物の摩擦は、各不純物原子のイオン化エネルギー、量子力学的補正および自由間衝突におけるプラズマ波動励起の効果などを考慮したクーロン対数の表式を用いる。逃走電子の 2 次電子生成率は

$$\Gamma_{\text{avl}} \equiv \frac{d \log n_{\text{RE}}}{dt} = n_e v_1 \int_{\epsilon_c}^{1/2} \frac{d\sigma_M(\epsilon; \gamma_1)}{d\epsilon} d\epsilon$$

と評価される。ここで ϵ は 1 次電子から 2 次電子に移送されるエネルギーの割合を表しており、 σ_M は電子-電子衝突の散乱断面積である。積分下限は 2 次電子が逃走電子になるために必要なエネルギー移送量を表し、この値は Fokker-Planck 計算で評価できる。すなわち、上式はあるエネルギー γ_1 を持つ逃走電子が熱電子を逃走電子領域に散乱する確率を評価していることとなる。図はアバランチ増幅ゲイン(=最大逃走電子電流と初期電流の比)の不純物密度依存性を (a) 低 Z 元素と (b) 希ガス不純物に対して評価した例である。放射損失とオーミック加熱の間のパワーバランスを考慮に入れると、不純物放射曲線の非線形性に由来し、アバランチが弱い領域から強い領域に遷移する閾値密度が現れ、その値は $\text{Ar} < \text{Ne} < \text{C} < \text{Be}$ の順で高くなることが分かる。このとき、図の解曲線の構造が逃走電子の発生しやすさ、しにくさを表現するとともに、高不純密度領域において増幅ゲインが減少する領域は逃走電子の抑制に必要となる不純物密度の指標を特徴づけるものである。

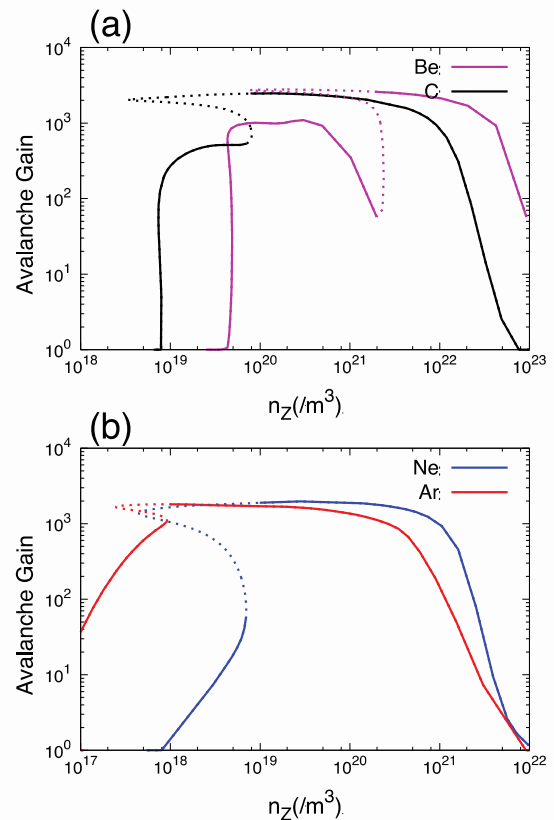


図: アバランチ増幅ゲイン(=最大逃走電子電流/初期電流)の不純物密度依存性の計算例: (a) 低 Z 元素、(b) 希ガス不純物。

[1] P. Aleynikov and B. N. Breizman, Phys. Rev. Lett. 114, 155001 (2015).

[2] A. Matsuyama and M. Yagi, submitted.