

磁場閉じ込め実験装置ヘリオトロンJで観測された統計加速の特徴 Characteristics of stochastic acceleration in magnetically confined experimental device Heliotron J

小林進二¹, 永岡賢一², 長崎百伸¹, 稲垣滋¹, 伊藤龍志³, 大垣英明¹, 紀井俊輝¹, 全炳俊¹, 藤田智大³,
山戸瞭雅⁴, 岡田浩之¹, 伊藤龍志³, 大島慎介¹, 門信一郎¹, 南貴司¹, 木島滋¹, 水内亨¹

KOBAYASHI Shinji¹, NAGAOKA Kenichi², NAGASAKI Kazunobu¹, INAGAKI Shigeru¹, et al.,

¹京大エネ理工研, ²核融合研, ³京大エネ科, ⁴京大工学部

¹IAE Kyoto Univ., ²NIFS, ³GSES Kyoto Univ. ⁴Faculty Eng. Kyoto Univ.

超新星や地磁気圏、レーザー加速では、衝撃波による非熱的粒子が観測されており、統計加速現象と呼ばれている。磁場強度 0.6~1.4T のヘリオトロン J 真空磁場中に O-mode の 2.45GHz マイクロ波を入射すると、2MeV を超える高速電子が観測された¹。このとき真空容器内にマイクロ波の共鳴層はなく、マイクロ波強度は規格化ベクトルポテンシャル a_0 に換算して 0.04 以下であった。従って、トーラス方向に周回する電子がマイクロ波アンテナ前面を多数回通過することでマイクロ波電界と相互作用（加速・減速）し、最終的に相対論的電子が生成される、統計加速のモデルが考えられる。本研究ではこのモデルの検証を目的として、シンチレータによる計測、および放射線シミュレーション(PHITS v3.26²)による X 線スペクトル解析と、電子加速シミュレーションの両面より研究を行った。

本研究では真空容器外に設置したシンチレータを用いて X 線スペクトル計測を行った。従って高速電子の制動放射により発生する X 線は真空容器による遮蔽の効果を受け、シンチレータにより観測される。PHITS シミュレーションを用いて、遮蔽の効果を考慮して真空容器内で発生する X 線スペクトルを評価した(図 1 参照)³。マイクロ波入射ポート付近を磁力線垂直方向に観測する視線(Perp)では、実効温度として 0.2MeV を持つ指数関数スペクトルが得られた。一方で接線方向の視線(Para)では、0.3-1MeV のエネルギー範囲でべき指数-2.3 のべき乗型スペクトルが得られた。

この結果を解釈するため、ヘリオトロン J 真空磁場中の電子の軌道追跡計算に、マイクロ波電界による加速の効果を追加したコードを整備し、電子加速シミュレーションを行った。なお電子の損失は真空容器壁との衝突およびシンクロトロン放射を考慮した。与えたマイクロ波電界強度分布は有限要素法解析を基に、アンテナ近傍から対向壁の間に定在波が立っていると仮定した。図 2 に初期エネルギーを 50keV とした場合の電子のエネルギー分布の時間発展を示す。1MeV を超える電

子の生成には 1ms 以上の時間が必要であり、トーラス周回周期(~100ns)と比べると、多数回の加速・減速が行われる必要があり、これは統計加速の特徴である slow heating を示す。加えて 1~2ms のタイミングでは実測とよく似たべき乗型スペクトルが得られることがわかった。

1. S. Kobayashi, et al., Plasma Phys. Control. Fusion **62** 065009 (2020).
2. T. Sato, et al., J. Nucl. Sci. Tech. 55(5-6), 684-690 (2018).
3. 伊藤龍志, 小林進二, 他, プラ核学会第39回年会 (2022) 24Cp07.

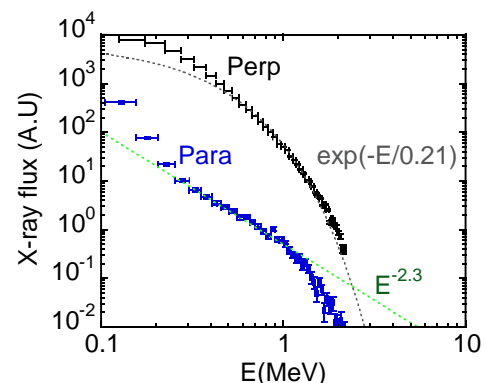


図 1. 非共鳴マイクロ波入射時に観測された X 線エネルギースペクトル。

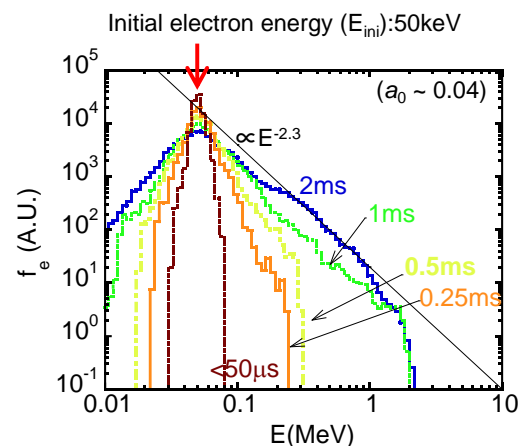


図 2. 電子加速シミュレーションによる電子エネルギースペクトル。