

閉じ込め磁場配位における非共鳴マイクロ波を用いた統計加速と
実験室シミュレーションへの展開

**Stochastic acceleration using non-resonant microwave heating
in magnetic confinement configuration and its application to experimental simulations**

小林進二¹, 永岡賢一², 長崎百伸¹, 徳原圭一³, 大垣英明¹, 紀井俊輝¹, 全炳俊¹, 岡田浩之¹, 伊藤龍志³,
福嶋亮人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, TOKUHARA Keiichi³, et al.,

¹京大エネ理工研, ²核融合研, ³京大エネ科
¹IAE Kyoto Univ., ²NIFS, ³GSES Kyoto Univ.

外部コイルのみで閉じ込め磁場配位を形成するヘリオトロンJでは、磁力線方向（順電流・逆電流方向）に進む高速電子は、トカマクと異なりプラズマ電流がなくとも閉じ込められる。ヘリオトロンJで磁場強度 0.6~1.4T の真空磁場中に 2.45GHz マイクロ波を入射すると、2MeV を超える高速電子がシンクロトロン放射より観測された¹。閉じ込め磁場中にマイクロ波の共鳴層はないため、加速機構としてマイクロ波電界と電子との相互作用による統計加速が考えられる²。この現象を理解するため、シンチレータを用いた X 線スペクトル計測を試みた。X 線は高速電子が容器壁（ステンレス製）に衝突、もしくはイオンとのクーロン衝突による制動放射により発生していると考えられる。3 台のシンチレータ(LaBr₃:Ce)を用意し、それぞれ順電流(Co)、逆電流(Ctr)、垂直方向(Perp)に進行する電子に向けて設置した。なお、垂直方向の視線は、マイクロ波入射ポート付近を観測する。

図1に垂直視線の X 線スペクトルを示す。マイクロ波パワー($P_{2.45\text{GHz}}$)が 3kW の場合にはシンチレータ信号は磁場によるノイズ信号(0kW)とほぼ同じであり、有意な高速電子生成は認められない。一方で 7kW 以上のパワーでは指数関数的なスペクトルが観測され、最大エネルギーは 2MeV を超えた。また、その傾きはパワーに依存せずほぼ一定となった。従って高速電子生成はマイクロ波パワーに対して閾値があるが、一度生成するとパワーに依存しない非線形性を有する。図2に3つの視線のスペクトル形状を両対数プロットで比較する。順電流・逆電流方向の視線は垂直視線と異なり、べき乗的なスペクトルが観測された。なお、観測される X 線はヘリオトロンJ真空容器による減衰の影響を受けるため、この影響を考慮して真空容器内部の高速電子速度分布を類推する必要がある。

以上、ヘリオトロンJで観測された高速電子生成はパワーに対する非線形性、およびべき乗スペクトルと、統計加速の特徴を有していることがわ

かった。加えて、①磁力線構造の空間スケールが m ~ km オーダーであること、②高い外部制御性（初期電子エネルギー、加速電界強度、磁場強度とその空間構造）を有すること、③時間スケール・空間スケールに依存する計測の自由度が高いこと、という特徴を有しており、統計加速の新しい実験室シミュレーションへの展開が期待される。条件によっては高速電子生成に関連してイオンシンクロトロン周波数の数倍~10 倍の周波数に波動励起が観測されており、トカマクの逃走電子に代表される高速電子緩和過程研究³への応用も期待される。

1. S. Kobayashi, et al., PPCF **62** 065009 (2020).
2. H. Laqua et al., PPCF **56** 075022 (2014).
3. D. Spong, et al., PRL **120**, 155002 (2018).

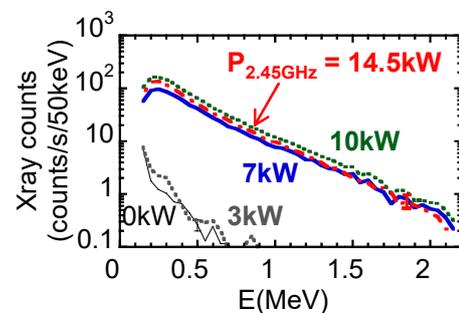


図1. 垂直視線のシンチレータで観測された X 線エネルギースペクトルのマイクロ波パワー依存性。

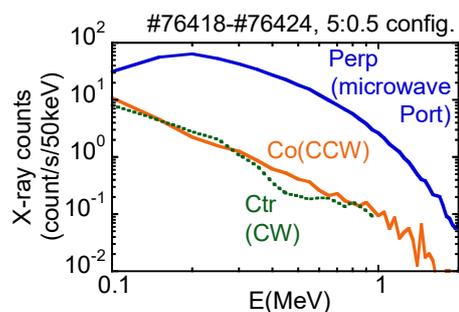


図2. X 線エネルギースペクトルの観測視線方向依存性。