

大気圧非平衡プラズマの連続スペクトル発光分光計測による電子エネルギー分布関数の測定

Thijs van der Gaag¹, ○ 赤塚 洋¹

¹ 東工大

<http://www.zc.iir.titech.ac.jp/~hakatsuk>

[はじめに] 大気圧非平衡プラズマの電子エネルギー分布関数 (EEDF $F(\epsilon)$, ϵ は電子エネルギー) 測定法の確立を目指している。その最近の成果を報告する。

[実験] 針対針電極を用いた 2 重石英管放電装置により大気圧非平衡 Ar プラズマを生成し、絶対較正済測定系で発光分光計測を実施した [1]。その結果、図 1 のような連続スペクトルが得られ、これを解析し、電子エネルギー確率関数 EEPF $f(\epsilon) \equiv F(\epsilon)/\sqrt{\epsilon}$ を導出する [2]。

[理論的解析] 大気圧非平衡プラズマによって放たれる可視波長域の連続スペクトルは、ほぼ電子-原子制動放射によるもので、その分光放射率 $\epsilon_{ea}(h\nu)$ は以下のようになることが既に示されている [1,2]。

$$\epsilon_{ea}(h\nu) = \int_{h\nu}^{\infty} R(h\nu, \epsilon) f(\epsilon) d\epsilon, \quad (1)$$

h は Planck 定数、 ν は光子振動数、 $R(h\nu, \epsilon)$ はカーネル関数で

$$R(h\nu, \epsilon) = \frac{N_a \alpha}{3\pi^2 h} \left(\frac{2}{m_e c^2} \right)^{3/2} (h\nu)^2 \left(\epsilon - \frac{h\nu}{2} \right) \sqrt{\epsilon - h\nu} Q_{ea}^m(\epsilon) \quad (2)$$

で与えられる。 N_a は標的原子密度、 α は微細構造定数、 m_e は電子質量、 c は光速、 $Q_{ea}^m(\epsilon)$ は標的原子の運動量移行断面積である。式 (1) は第 1 種 Volterra 積分方程式であるが、計測可能な範囲、即ち式 (1) 左辺の分光放射率 $\epsilon_{ea}(h\nu)$ の引数の範囲は $h\nu_{\min} \leq h\nu \leq h\nu_{\max}$ に限られるため、方程式も不完全 Volterra 積分方程式となり、一般的 Volterra ソルバーは使用できない。そこで遺伝的アルゴリズムをベースに、機械学習の 1 手法として Visible Bremsstrahlung Inversion (VBI) 法を考案した。これは目的関数である Fitness パラメータを最小化する様、EEPF $f(\epsilon)$ を電子エネルギー空間中に離散化して求める手法である [2,3]。

[結果及び考察] 以上の結果として、大気圧非平衡 Ar プラズマの EEPF 測定結果を、電極間印加電圧をパラメータとして、図 2 に示す。結果として、 $\epsilon = 2.8$ eV 付近に折れ曲がりを持つ 2 温度 Maxwell 分布に近い形が得られた。

なお、式 (1) からわかる様に、この方法では電子エネルギーに関し低エネルギー側 $\epsilon < h\nu_{\min}$ の範囲については何らの情報も得られない。また高エネルギー側 $\epsilon > h\nu_{\max}$ では、電子情報は得られるものの被積分関数の値 $R(h\nu, \epsilon) f(\epsilon)$ が相対的に小さく、 $h\nu_{\min} \leq \epsilon \leq h\nu_{\max}$ の範囲に比べると、その精度が乏しくなることが判明し、図 2 程度の離散化が妥当であることも見出された [3]。

[1] H. Onishi, F. Yamazaki, Y. Hakozaki, M. Takemura, A. Nezu, and H. Akatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. **60**, 026002 (2021).

[2] T. van der Gaag, H. Onishi, and H. Akatsuka, Phys. Plasmas, **28**, 033511 (2021).

[3] T. van der Gaag, A. Nezu, and H. Akatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. **61**, 076004 (2022).

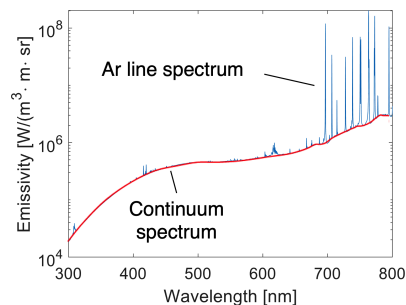


図 1 連続スペクトル計測結果. 赤線は線スペクトルを消去したもの [3]. ©(2022) IOP

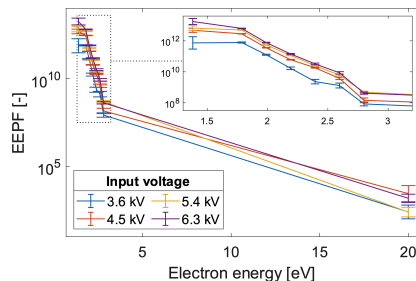


図 2 電子エネルギー確率関数 $f(\epsilon)$ の計測結果. [3]. ©(2022) IOP