

Physics informed deep learning による 直流電磁界下における電子速度分布関数の計算

Calculation of the electron velocity distribution function in gas under crossed DC electric and magnetic fields by physics informed deep learning

成蹊大 ○川口 悟, 村上 朝之

Seikei Univ. ○S. Kawaguchi, T. Murakami

E-mail: skawaguchi@st.seikei.ac.jp

1. はじめに

電子速度分布関数(EVDF)は放電プラズマ中の電子のふるまいを表す最も基礎的な物理量であり, 電子輸送係数や反応レートの係数は EVDF によって定義される。EVDF は Boltzmann 方程式を解くことによって算出でき, この方程式に対する種々の数値解法が提案されている。ここでは, 直流電磁界下における Boltzmann 方程式の数値解法に注目する。

White *et al.*^[1]は, 球面調和関数を用いて EVDF を級数展開し, CH₄ ガス中の EVDF を計算している。この方法では, EVDF の精度は級数展開において考慮する項数に依存する。Sugawara^[2]は, 級数展開に依らず EVDF を計算する方法を提案し, 直流電界と直流磁界が直交する場合における SF₆ ガス中の EVDF を計算している。しかし, 電界と磁界が任意の角度で交差する場合における EVDF の計算にこの方法を応用することは困難とされる。

我々はこれまで, Physics-informed deep learning^[3]を応用して, 直流電界下における EVDF を正確に求める方法を提案した^[4]。この方法では, EVDF の級数展開が不要であり, メッシュフリーで Boltzmann 方程式を満たす EVDF を求めることができる。本稿では, この方法を直流電磁界下の EVDF 計算に拡張した結果について報告する。任意の角度で交差する直流電界, 直流磁界下における SF₆ ガス中の EVDF を計算するとともに, Monte Carlo 法による計算値と比較することで, 提案方法の妥当性を検証する。

2. 計算方法および計算条件

直流電界 $\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z)$ および直流磁界 $\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)$ 下における流動平衡状態の EVDF $f(\mathbf{v})$ は次の Boltzmann 方程式を満たす。

$$-\frac{e}{m}(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \frac{\partial f(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} + \bar{R}_l f(\mathbf{v}) = J_c f(\mathbf{v}) \quad (1)$$

ここで, e は電気素量, m は電子質量, $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ は電子の速度, \bar{R}_l は実効電離衝突周波数, $J_c f(\mathbf{v})$ は衝突項^[5]をそれぞれ表す。ここでは, $\mathbf{E} = (0, 0, -E)$, $\mathbf{B} = (0, -B \sin \psi, -B \cos \psi)$ とする。気体分子数密度 N を $3.535 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ とし, 換算電界 E/N , 換算磁界 B/N をそれぞれ 1,000 Td および 1,000 Hx とする。ただし, $1 \text{ Td} = 10^{-21} \text{ Vm}^{-2}$, $1 \text{ Hx} = 10^{-27} \text{ Tm}^{-3}$ である。

Wang *et al.*^[6]が提案したニューラルネットワーク(NN)によって $f(\mathbf{v})$ を近似する。この NN の出力値 $f(\mathbf{v})$ が(1)式を満たすように NN の学習を行う。NN の学習方法については, 前報^[4]と同じである。NN の学習前に, (1)式に現れる物理量を無次元化する。SF₆ ガスの電子衝突断面積セットとして, Itoh *et al.*^[7]が提案した断面積セットを使用する。

3. 計算結果および考察

EVDF の計算結果を Monte Carlo 法による計算値と比較するため, (2)式に従って, EVDF $f(v_x, v_y, v_z)$ を $v_x - v_z$ 平面上的 EVDF $f(v_x, v_z)$ に変換した。

$$f(v_x, v_z) = \int_{v_y=-\infty}^{\infty} f(v_x, v_y, v_z) dv_y \quad (2)$$

ただし,

$$\int_{v_x=-\infty}^{\infty} \int_{v_y=-\infty}^{\infty} f(v_x, v_z) dv_x dv_z = 1 \quad (3)$$

Fig.1 は $\psi = 90^\circ$ における SF₆ ガス中の EVDF $f(v_x, v_z)$ を Monte Carlo 法による計算値と併せて示す。 v_{1eV} は 1eV における電子の速さを表す。図中の白の破線は提案方法によって得られた EVDF の等高線を示している。今回得られた EVDF は Monte Carlo 法による計算値と非常に良く一致していることが確認できる。

次に, SF₆ ガス中の電子ドリフト速度 W_x, W_y, W_z を(4)式に従い計算した。ただし, $f(v_x, v_y, v_z)$ は全速度空間で積分して 1 になるように規格化している。

$$W_i = \int_{v_x=-\infty}^{\infty} \int_{v_y=-\infty}^{\infty} \int_{v_z=-\infty}^{\infty} v_i f(v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z \quad (4)$$

($i = x, y, z$)

Fig.2 は, SF₆ ガス中の W_x, W_y, W_z の計算結果を Monte Carlo 法による計算結果と併せて示す。提案方法によって得られた計算値が Monte Carlo 法による計算値と非常に良く一致している。このことより, 提案方法によって得られた EVDF が正確であることが示唆される。

参考文献

- [1] R. D. White *et al.*: J. Phys. D: App. Phys. **32**, 1842 (1999)
- [2] H. Sugawara: Plasma Sci. Technol. **21**, 094001 (2019)
- [3] M. Raissi *et al.*: arXiv.1711.10561 (2017)
- [4] 川口ら: 第 81 回応用物理学学会春季学術講演会 11p-Z05-12 (2020)
- [5] H. Itoh *et al.*: J. Phys. D: Appl. Phys. **21**, 922 (1988)
- [6] S. Wang *et al.*: arXiv.2001.04536 (2020)
- [7] H. Itoh *et al.*: J. Phys. D: Appl. Phys. **26**, 1975 (1993)

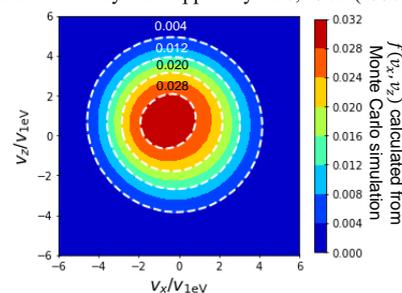


Fig. 1. $f(v_x, v_z)$ in SF₆ gas at $E/N = 1,000 \text{ Td}$, $B/N = 1,000 \text{ Hx}$, and $\psi = 90^\circ$.

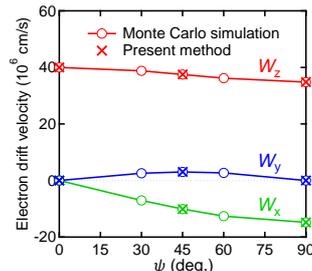


Fig. 2. Electron drift velocity in SF₆ at $E/N = 1,000 \text{ Td}$ and $B/N = 1,000 \text{ Hx}$ as a function of angle ψ .