

M1法に基づく非局所電子熱伝導モデルによる
レーザーアブレーション解析

**Laser ablation simulation using a non-local electron heat transport model
based on M1 method**

長友英夫¹, 松川敏徳¹,
NAGATOMO Hideo¹, MATSUKAWA Toshinori¹

¹阪大レーザー研

¹Osaka Univ.

はじめに

レーザーを物質に照射する場合、照射強度が比較的高い領域 ($> 1 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$) においては運動論的な振る舞いが現れるようになってくる。しかしながら、全体を運動論として扱う相対論PICコードでシミュレーションをおこなうのは計算資源の問題や他の物理モデルとの連携させることを考慮すると現実的ではない。

このため、われわれのグループでは、運動論的な効果のモデル化して輻射流体シミュレーションコードにその影響を付加する手法を試みてきた。例えば、古典的なSpitzer-Harmの電子熱伝導係数に対し、温度勾配が急な領域での非物理的な熱流束を抑制する流速制限法 (flux-limited Spitzer-Harm法) が広く用いられているが、この流束制限SH法には経験的なパラメータを導入しないといけないなど様々な制約、限界がある。一方、厳密に高速電子の影響を考慮するにはフォッカー・プランク方程式を直接解いて電子熱流束を求める必要がある[1]。しかしながら、フォッカー・プランク方程式を広域で解くのは計算機資源の制約から非常に困難であることから、 f_1/f_0 が小さいという仮定の下で導出された非局所電子熱伝導モデル：SNB (Schurtz, Nicolai, Busquet)モデル[2]を導入、改良したモデルでシミュレーションを行ってきた。

多群拡散方程式に近似した場合、 $f_1/f_0 \ll 1$ という制約があるため、近相対論レーザープラズマ相互作用における非線形現象、パラメトリック不安定性によって発生するやや強い非等方性を伴う高速な電子ビームの取り扱いのような問題においてはモデルの限界を超えることになる。そこで、適切な f_2 を与えることによって f_1 を比較的高い精度で求める手法を導入する必要がある。

フォッカー・プランク方程式の1次、および2次

のモーメント方程式は、それぞれ、

$$v \vec{\nabla} \cdot \vec{f}_1 - \frac{e \vec{E}}{m_e v^2} \cdot \frac{\partial}{\partial v} (v^2 \vec{f}_1) = \nu_{ee} v \frac{\partial}{\partial v} (f_0 - f_0^m) \quad (1)$$

$$v \vec{\nabla} \cdot \vec{f}_2 - \frac{e \vec{E}}{m_e v^2} \cdot \frac{\partial}{\partial v} (v^2 \vec{f}_2 \cdot \vec{E}) + \frac{e \vec{E}}{m_e v} \frac{\partial}{\partial v} (f_0 \vec{I} - \vec{f}_2) \cdot \vec{E} \\ + \frac{e}{m_e c} \vec{f}_1 \times \vec{B} = \nu_{ee} v \frac{\partial}{\partial v} \vec{f}_1 - \nu_{tot} \vec{f}_1 \quad (2)$$

と表される。これに、M1モデルと言われる entropic closure 条件、

$$\vec{f}_2 = \bar{\chi} (f_0, \vec{f}_1) f_0$$

$$\bar{\chi} = \frac{1}{3} \vec{I} + \frac{\vec{\Omega}_v^2}{2} \left(1 + \vec{\Omega}_v^2 \right) \left(\frac{\vec{f}_1 \otimes \vec{f}_1}{f_1^2} - \frac{1}{3} \vec{I} \right)$$

を課すことによって、方程式が閉じることから解を求められるようになる。ただし、これを初めて導入した手法[3]では、数値的な不安定性を除去することができない。今回、これを改善するためにクランク・ニコルソン法を組み合わせた陰解法に拡張することによって安定に解ける手法を開発したので、その手法と計算例を紹介する。

参考文献

- [1] E.M. Epperlein, *CPC* **52** (1988)
- [2] G.P. Schurtz *et al.*, *Phys. Plasmas* **7**, 4238 (2000)
- [3] D. Del Sorbo *et al.*, *Phys. Plasmas* **22**, 082706 (2015)