

ブラソフ方程式の直接積分による無衝突プラズマシミュレーション

鈴木昭宏 (東京大学)

利用カテゴリ XT4MD ・ SX9MD

本研究課題では、ブラソフ方程式とマクスウェル方程式からなる方程式系の数値積分コードの開発に取り組んでいる。宇宙空間には、粒子間の相互作用が無視できるほど希薄なプラズマ(無衝突プラズマと言われる)が至る所に存在しており、このプラズマのダイナミクスが本質的な役割を果たすような天体現象も多数存在する。ブラソフ-マクスウェル方程式系は、この無衝突プラズマの時間発展を記述する方程式である。位相空間 $(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ における時刻 t での荷電粒子の分布関数を $f(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t)$ としたとき、ブラソフ方程式は

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{c\mathbf{p}}{\sqrt{m^2c^2 + \mathbf{p}^2}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} + q \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{p}}{\sqrt{m^2c^2 + \mathbf{p}^2}} \times \mathbf{B} \right) \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} = 0 \quad (1)$$

と書ける。ここで、 m, q はそれぞれ粒子の質量と電荷で、 c は光速である。また、 $\mathbf{E}, \mathbf{B}$ は電場と磁場を表し、その時間発展はマクスウェル方程式

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{B} - 4\pi \mathbf{j}, \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi \delta, \quad \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

によって記述される。マクスウェル方程式に現れる、電荷密度 δ と電流密度 $\mathbf{j}$ の項は、粒子の分布関数と

$$\delta = q \int f(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{p}, \quad \mathbf{j} = q \int \frac{\mathbf{p}}{\sqrt{m^2c^2 + \mathbf{p}^2}} f(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{p} \quad (3)$$

という関係がある。

本年度は、相対論的なブラソフ方程式を数値的に積分するコードを作成し、テスト計算を行った。その結果、考案したアルゴリズムでプラズマと電磁場との相互作用がうまく解けていることが分かった。以下に結果の一部である、航跡場加速というプラズマ過程を紹介する。図 1 に概念図を示す。このプラズマ過程は、レーザーのような強力な放射を電子-イオンプラズマに入射させたときに、プラズマ中の電子を加速して、非熱的成分を作り出すものであり、以下の順序で起こる。

1. レーザーの輻射圧によって電子が押され、電子の空間分布が変化する
2. イオンは重いいためほとんど動かず、電子が濃い部分とイオンが濃い部分の間に電場が生じる
3. 生じた電場によって電子が加速される

このプラズマ過程を、開発したコードで再現した。静止した電子-イオンプラズマを用意し、計算領域の左側から light pulse(レーザーにあたるもの)を入射させて、プラズマの応答を観察するという手法である。図 2 にその結果を示す。下の 2 つのパネル (E_y, B_z のプロファイル) にあるように、静止したプラズマ中を light pulse が伝搬していく。すると上から 2 つめのパネル (E_x のプロファイル) のように、light pulse の運動方向に電場が発

生する。励起された電場はノコギリ状になっていることが見て取れる。一番上のパネルは横軸が x 、縦軸を x 方向の運動量を $m_e c$ で規格化したものである。電場が発生した領域では、大きな運動量を持った電子が観測されているのが分かる。

このような励起された電場と電子の振る舞いは、他の手法 (例えば粒子法) を用いて計算された結果を再現しており、今回開発したコードがプラズマと電磁場との非線形な振る舞いをうまく取り扱えていることを示している。今後は、この計算結果を天体現象に利用できるように、様々なパラメータでの計算や加速メカニズムの解明などをする予定である。

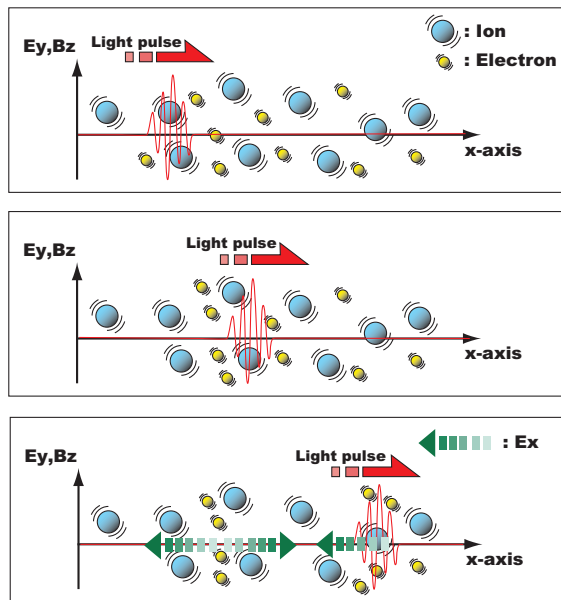


図 1: 航跡場加速の概念図

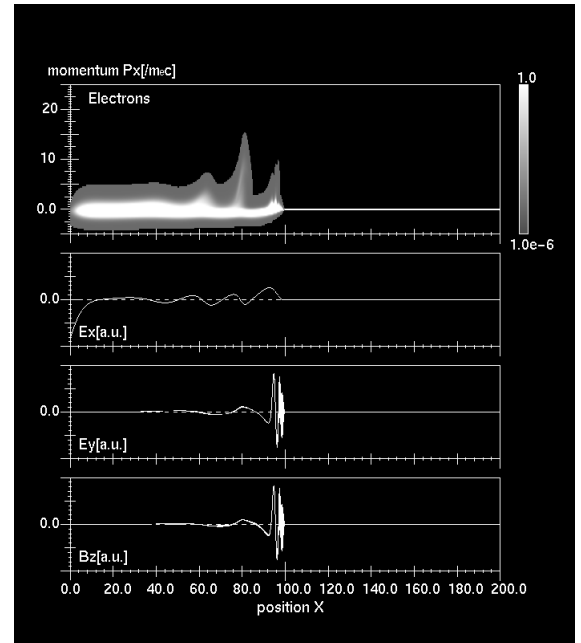


図 2: (上から) 電子の位相空間での分布、 x 方向の電場、 y 方向の電場、 z 方向の磁場。