

太陽彩層の輻射磁気流体シミュレーション

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 飯島陽久

課題概要

太陽大気の形成過程は太陽物理学において半世紀以上に渡り続く難問の一つである。太陽の彩層とコロナがどのように加熱されるのか、太陽風がどのように加速されるのかを理解することは、太陽から宇宙空間に放射される紫外線・X線や惑星間空間に広がるプラズマ粒子の超音速流れの物理的起源を知ることでもあり、地球周囲の宇宙環境を理解する上で欠かせない。

太陽大気中において、特に観測データの解釈として問題となる物理過程の1つに非平衡電離効果がある。元素 s 、電離度 i のプラズマの数密度比 $Y_{s,i}$ は電離反応方程式

$$\frac{DY_{s,i}}{Dt} = \sum_j (P_{s,j \rightarrow i} Y_{s,j} - P_{s,i \rightarrow j} Y_{s,i}), \quad \sum_i Y_{s,i} = 1 \quad (1)$$

に従う。ここで、 $P_{s,i \rightarrow j}$ は電離度 i から電離度 j へ変化する電離・再結合反応の頻度、 D/Dt は流体近似されたプラズマにおけるラグランジュ微分である。

通常のプラズマ現象では、電子衝突や輻射反応に伴う電離・再結合過程は十分に早く、電離状態は平衡に達しているため、左辺のラグランジュ微分項は無視出来る。この場合は電離状態はプラズマの温度や密度の関数として一意に決定される。しかし、プラズマ密度が低くマクロスケール現象の時間スケールが短い太陽大気中では電離平衡は成り立たず、ラグランジュ微分が有限の値を持った電離反応方程式を直接解く必要が出てくる。

非平衡電離効果は彩層からコロナ、太陽風までの太陽大気のほぼ全ての層で重要な効果であり、特にリモート観測における特定の電離プラズマからの放射量やその場観測でのプラズマ粒子の速度・密度の測定データをプラズマの温度や質量密度とひも付けて解釈する際に常に問題となってくる。多くの実用的な物理量診断手法では電離平衡を仮定せざるを得ないのだが、非平衡電離を仮定すべき現象で電離平衡を仮定すると出力される温度や質量密度の推定値が多くの系統・分散誤差を含むことになることが知られている。これは太陽大気中でエネルギー的な議論をする際に重大な問題となる。

そこで本課題では、応募者が開発した太陽大気の3次元輻射磁気流体モデルRAMENSに非平衡電離効果を組み込み、特に太陽彩層に注目した現実的な太陽大気のフォワードモデリングを行う。シミュレーション結果をデータベースとして整備・公開することで、従来の物理量診断手法の適用限界と誤差を定量的に評価し、非平衡電離の効果を考慮した次世代診断手法を開発するためのデータ基盤の作成を目指す。

研究内容

本年度は不老Type Iシステムを利用し、非平衡電離コードの開発とRAMENS全体と電離反応モジュール双方のA64FXプロセッサに対する高速化を実施した。

非平衡電離組込前のRAMENSにおいて、主要最内ループが全てSIMD/SWP化するように注意して手動で高速化した結果、主なホットスポットである磁気流体方程式の積分、人工粘性の適用、熱伝導方程式の積分のそれぞれで 3.14×10^7 update/sec/node、 5.48×10^7 update/sec/

node、 2.32×10^7 update/sec/node となり、全体としては 1×10^7 update/sec/node 程度になった(全体のFLOPSピーク性能比は7%程度)。測定は不老Type Iシステムの2ノード、4プロセス/ノード、12スレッド/プロセス、 64^3 グリッド/プロセスで行った。

この結果を受けて、非平衡電離の反応計算部分の計算速度の目標値を 1×10^7 update/sec/node と設定し、最適化を行った。最初の性能は 1.65×10^6 update/sec/node であった。目標値を大幅に下回っていたため単純な最適化では目標達成が難しいと判断し、改めて問題設定・アルゴリズム・実装の見直しを行った。

ホットスポットとなっていたのは式(1)の時間微分と右辺の反応計算である。時間微分の離散化として、時間刻みによらず安定な陰解法は必須である。今回は陰解法として、拡散・減衰的な硬い方程式に対する漸近的性質が良く軽量な後退オイラー法を利用することにした。ラグランジュ微分の速度依存項を演算子分離で除けば、式(1)を離散化した方程式は線形方程式 $Ax = b$ の形で書ける。ここで、 A は反応率や時間刻みを含む係数行列、 x は次の時間ステップの電離状態の数密度比、 b は現在の時間ステップの情報である。

当初の実装では、将来的に励起非平衡過程の考慮や状態方程式との結合も想定していたため、係数行列 A の非ゼロ要素はランダムに配置されるものとして、密行列として実装していた。また、数値誤差の発生防止のため式(1)における拘束条件(式(1)第2式)も明示的に取り入れていたため、係数行列は非正方行列であった。この線形問題を修正グラム・シュミット法を利用した最小二乗法で解いていた。しかし、これは計算量として $\mathcal{O}(N^3)$ の解法(N は元素 s の原子番号)であり、重い元素に対して計算時間が急増していた。

そこで密行列としての扱いを断念し、電離反応も前後の電離レベル間の反応のみを仮定することで、係数行列 A を三重対角行列とした。この場合は $\mathcal{O}(N)$ の解法が存在するため、相当の軽量化になる。この問題設定とアルゴリズムの変更により、性能は 1.27×10^7 update/sec/node まで上昇し、当初の目標値を達成することが出来た。また、懸念していた数値誤差も十分に小さいことが判明した。変更後のアルゴリズムは比較的単純であるため、最適化も比較的容易で、サブルーチンをインライン展開し、主要最内ループ長を長く取りつつSIMD/SWP化することで、最終的に 2.13×10^8 update/sec/node (FLOPSピーク性能比で7.56%)までの高速化を達成した。電離反応によるオーバーヘッドがモデル全体の計算時間に対してほぼ無視できる程度になった。

今後は今年度開発したモジュールを大気モデルRAMENSに組み込み、非平衡電離を考慮した太陽大気の3次元シミュレーションを実施し、観測との詳細な比較を行っていく予定である。

成果発表

- [1] H. Iijima, T. Matsumoto, H. Hotta, and S. Imada, "Solar wind powered by the small-scale dynamo in the Sun", 2023 (査読論文; 投稿済)
- [2] H. Iijima, "Radiative MHD simulation of the solar corona with RAMENS", Advances in Solar MHD Numerical Simulations in the Era of High-Resolution Observations, 2022.8.8, Eastbourne, UK (国際学会; 招待講演)
- [3] 飯島陽久, 「熱対流と磁場が駆動する太陽大気の形成過程」, CfCA User's Meeting, 2023.1.6, Online (国内学会; 招待講演)
- [4] 飯島陽久, 「輻射磁気流体シミュレーション研究の将来」, 太陽研連2022年度将来計画シンポジウム, 2022.8.17, Online (国内学会; 招待講演)