

太陽大気加熱機構の輻射磁気流体シミュレーション

代表者氏名: 飯島 陽久 (名古屋大学 宇宙地球環境研究所)

共同研究者氏名: 今田 晋亮 (名古屋大学 宇宙地球環境研究所)

研究課題の概要

本研究課題では、太陽風の加速機構や太陽彩層・コロナの加熱機構の理論的解明を大目標として、3次元輻射磁気流体計算を利用した太陽大気なシミュレーションを実施している。本研究のアプローチの特徴として、太陽大気のエネルギー源である対流層から大気中の磁気流体波動の伝播・散逸までを1つの計算領域で包含していることが挙げられる。この特徴のために、モデルには磁場構造以外のフリーパラメータは存在せず、セルフコンシステントなシミュレーションが可能になる。特に本年度は以下の3つの成果を得ることが出来た。

1. 非平衡電離効果による太陽大気の観測バイアスの定量化
2. 太陽大気モデルと極端紫外線分光観測の比較
3. 磁気流体方程式のエネルギー整合型解法の開発

研究成果1. 非平衡電離効果による太陽大気の観測バイアスの定量化

太陽大気の観測研究では、多くの場合電離平衡を仮定しつつ、極端紫外線・X線観測から密度や温度などのプラズマに関する情報を推定する。しかし、電離平衡という仮定は密度が低い太陽コロナ中では必ずしも成り立たず、その潜在的な影響はこれまで度々議論されてきた。一方で、非平衡電離効果による観測バイアスの定量的な評価に関しては、現実的な太陽大気の非定常モデルが必要であったことや、太陽大気の空間構造において3次元性が本質的であることなどから、これまで実現していなかった。

本研究では、3次元非定常太陽大気モデルに鉄イオンに代表される各イオン種の非平衡電離過程を取り入れることで、太陽大気における観測量がどれくらい電離平衡の場合と異なるかを評価した。その結果、輝線強度・輝線幅・輝線速度のそれぞれで、およそ30%程度の局所バイアスが発生することがわかった。この値はそれなりに非平衡電離過程が重要であることを示す一方で、これまでの1次元計算など単純化した設定で得られた結果に比べて小さいバイアスを示している。これは、3次元計算が非常に乱流的で、視線方向の重ね合わせによって非平衡の寄与が平均化された結果、これまでより小さいバイアスが得られたと解釈している。この結果は現在投稿論文を準備中である。

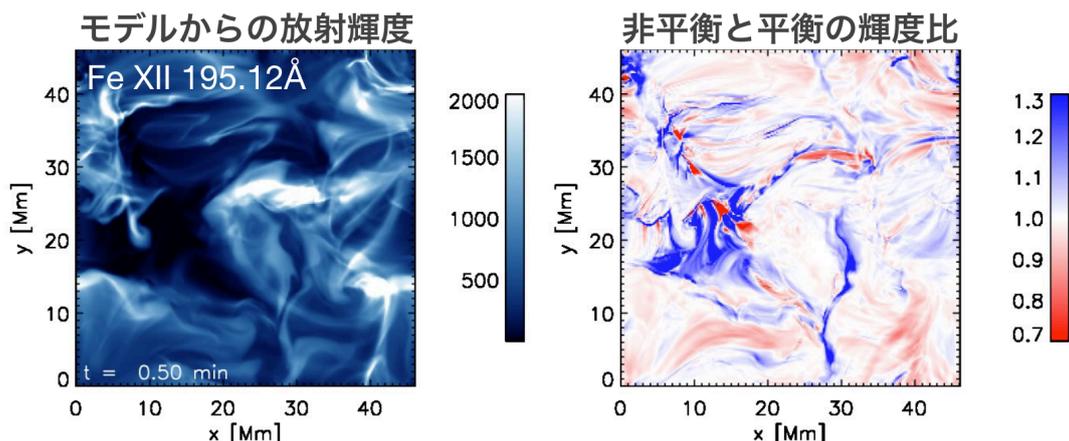


図1. 11階電離した鉄イオンからの輝線強度(左)および電離平衡解との輝度強度比(右)。

研究成果2. 太陽大気モデルと極端紫外線分光観測の比較

太陽大気の動的3次元モデルは近年盛んに開発されているもので、その観測的な妥当性の検証も未だ十分ではない。これまでの最先端と言われるモデルはノルウェーの研究グループによるものであるが、観測される太陽大気と比べて穏やかでダイナミクスが少ないという問題点が知られていた。本研究では、高次精度差分法と数値粘性の軽減、特性速度抑制法による計算効率の向上などを取り入れた独自の太陽大気モデルを開発した。そこで、本研究のモデルを太陽観測衛星「ひので」による極端紫外線観測と比較したところ、ノルウェーのグループと異なり観測とよく整合的であることが分かった。ただし、まだ単独輝線での比較であるため、より詳細な比較を実施中である。

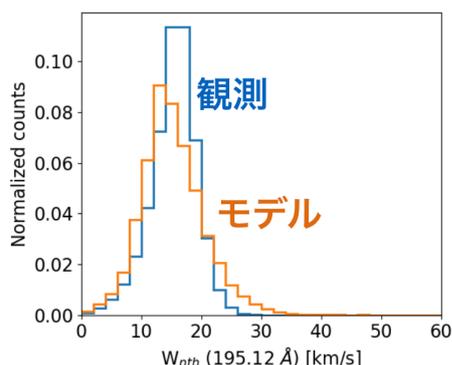


図2. 11階電離した鉄イオンからの輝線幅に関する観測(青)とモデル(オレンジ)の頻度分布の比較。

研究成果3. 磁気流体方程式のエネルギー整合型解法の開発

太陽大気の動的モデルでは現実的な大気成層を取り入れているために、マッハ数にして $10^{-3} - 10^1$ 、プラズマベータ(磁気エネルギーと内部エネルギーの比)にして $10^6 - 10^{-5}$ と、非常に物理パラメータの範囲が広い。特に高マッハ数・低プラズマベータのような状況では、圧力の正值性を保つのが難しく、計算が非常に破綻しやすい。一方で、圧力を正に補正し続けるなどのアドホックな取り扱いをしてしまうと、大気中の加熱率を誤って見積もることにつながる。本研究では、差分法が離散的に満たすライプニッツ則に注目し、これを最大限に活かすことで、運動方程式や誘導方程式を解きながら運動エネルギー方程式や磁気エネルギー方程式をそれぞれ離散的に満たすことが可能な離散化を発見した。これにより、人工的に圧力の正值性を強制せずとも、内部・運動・磁気エネルギー方程式が離散的に満たされることで、プラズマベータ 10^{-8} かつマッハ数 10^2 のような極端な状況であっても安定に計算が出来る数値スキームを開発した。この結果は現在論文を投稿準備中である。

関連する発表・論文

1. C. Quintero Noda, H. Iijima, et al., 2019, MNRAS, 486, 3, 4203 (投稿論文; 共著)
 2. H. Iijima, "Effect of non-equilibrium ionization on the solar EUV/X-ray spectral diagnosis", Hinode-13/IPELS 2019 (国際学会; 招待講演)
 3. H. Iijima, "Radiation magnetohydrodynamic modeling of solar coronal dynamics", Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会; 口頭)
- その他、国内学会における発表5件。