

課題名(タイトル):

再電離期におけるミニハローの光蒸発: 金属量依存性

利用者氏名:

○仲谷峻平

理研における所属研究室名:

開拓研究本部 坂井星・惑星形成研究室

## 1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

宇宙誕生後、最初に形成する初代星やクエーサーといった紫外光源は周囲にある中性水素ガスを電離、加熱しはじめる。電離領域は銀河間を伝搬し、やがて近傍の矮小銀河ミニハローにまで到達する。ハローにあるガスは加熱されることで散逸する。これが光蒸発である。このように初期宇宙の光源は宇宙論的な密度非一様構造(ミニハロー)のダイナミクスや運命を左右する。また逆に、ミニハローの有無により、宇宙再電離に必要な総光子数が変わる。これらの効果によりいわゆる再電離期の宇宙の進化が決まる。したがって、これらの詳細を明らかにすることは、宇宙の物質が誕生からいかに進化したかを明らかにするために必要である。

先行研究では、大質量星などの電離光源がハローに与える影響が調べられているが、その金属量依存性は未だ明らかになっていない。金属量はガスの熱化学に強く影響するため、それによりハローの光蒸発量が変化すると期待される。また、金属はガスの主要な冷却源であるため、ハローないで起こる星形成にも強く影響する。本研究では、金属量に依存する詳細な化学反応を取り入れた多次元輻射流体シミュレーションを遂行することで、宇宙再電離期におけるミニハロー光蒸発の金属量依存性を系統的に明らかにする。本研究結果は、より現実的な銀河形成モデルの構築や初期宇宙の21cm線観測の指針提供に応用できるため、派生研究を多く生むと期待される。本研究はこれらの文脈で意義深い。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

**利用内容** 当計算機は本研究に必要な多数コアを使用した大並列計算のために使用する。ただし、本年度は当計算機の利用が少なかった。(6参照)

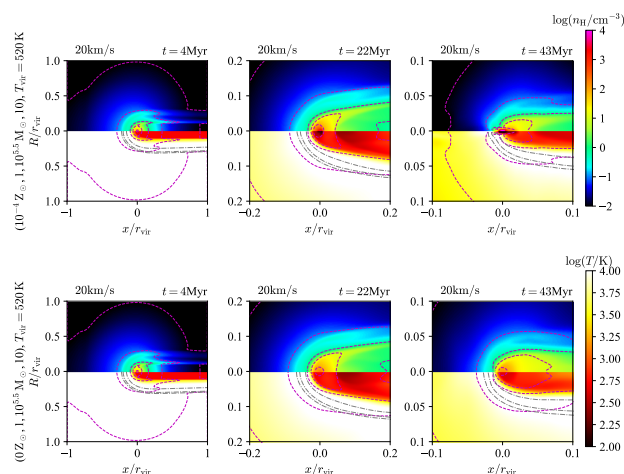
**計算方法** 本研究では多次元磁気流体コード PLUTO に輻射輸送と化学反応を実装したコードを用いる(Nakatani et al. 2018a,b; Nakatani & Yoshida 2019)。初期条件として、静的なミニハローを置き、計算開始とともに電離輻射場に晒す。その後の進化を輻射輸送、非平衡化学反応、流体

力学を自己無撞着に同時に解くことで追う。この手法は未だ前例がないため、本研究の新しいところのひとつである。上の物理化学課程を同時に解くことで、初めて系の進化を自己無撞着に解くことができる。

シミュレーションは、ミニハローの進化を特徴付けるパラメーター(金属量、輻射場強度、ハロー質量、赤方偏移)の組み合わせを変えて計495例行う。

## 3. 結果

以下の図は、495例のうち、2例をピックアップしてそのスナップショットを示したものである。各パネルの縦軸横軸は物理的距離で、1がおおよそ1kpc( $\sim 10^{18}$  cm)に対応する。各パネルの上側はガス密度構造、下側は温度構造、矢印は速度場を示し、その大きさは矢印の長さでスケールしている。上列は比較的高い金属量を持つハローの時間進化を表しており、左パネルから右パネルにかけて時間発展を表している。下パネルは同様に金属を持たないハローの時間発展である。(明確にするために、時間が進むにつれてハロー中心部をズームアップするようにプロットしている。) 輻射場は各パネルの左側境界から入射している。



図で見られるように高金属量ハローは中心部に凝縮した構造を持つ。一方で、低金属量ハローでは平均的な密度が小さい。高金属量ハローは金属によるガス冷却が強いため、ガスを低温にし、結果として外部の高温ガスにより圧縮され、またハロー自身の重力により収縮する。一方で、低金属量ハローは金属冷却が効かず、内部圧力がハロー自身の重力と釣り合ったまま進化するため、相対的に幾何学的に

大きな構造を保ったまま進化する。

幾何構造が大きいことにより、外部輻射場に対する断面積も大きくなり、結果的に光蒸発率も低金属量ハローで大きくなる。そのため、金属量が低いほどハローが短時間で散逸されることが明らかになった。また、高金属量ハローの凝縮中心は星形成に適した環境(高密度・低温)になっていることも明らかとなり、金属を持つハロー中心では星形成が起きうることを初めて明らかにした。

#### 4. 今後の計画・展望

本研究では、現在知られているダークマターとバリオンの比を用いた計算を行ったが、この比が初期宇宙のハローでは低くなることも指摘されている。今後、この比もパラメーターとして取り扱った発展研究を行う。また、金属を持つハローが再電離期に紫外光子どの程度吸収するのか、その定量的見積りも今後の課題である。本研究では、金属を持つハローでは星形成が起こりうることを指摘したので、この結果を適用すればミニハローは必ずしも光子を吸収する役割のみを持つのではないことも考えられる。このような考察を含めた2次的研究を次年度に行う予定である。これらの研究の結果も、宇宙再電離期の進化全体を解明する上で必要不可欠である。

#### 5. 利用がなかった場合の理由

本年度は、コロナ禍により、当初の研究計画を変更し、研究遂行した。そのため、本年度は当プロジェクトの他に同時に取り組んでいる別プロジェクトに取り組むのが大部分であった。そのため、計算機利用が無かった(若しくは少なかった)。次年度、コロナ禍もある程度収束し、共同研究推進を行える環境が整えば、予定通り広いパラメーター範囲を考慮する次ステップの研究を行う。その際、当計算機が資源のひとつとして必要となる。