

宇宙の進化と星と惑星の誕生

九州大学理学研究科 町田正博



研究目的・背景

宇宙誕生後数億年後に、宇宙最初の星であるファーストスターが誕生した。ファーストスターは大質量かつ短寿命のため超新星爆発を起こしブラックホールを残して消滅する。その後、次世代の星々が誕生し、初期銀河を形成し、現在の天の川銀河のような大きな銀河に成長した。星は現在まで誕生し続けているが、どのように誕生したのかはよく分かっていない。また星の周りでは惑星が誕生するが、どの時代に惑星が誕生したのかは未解明である。

この研究では、宇宙初期から現在までの星と惑星の誕生を解明することを目的とする。図1は銀河系内で星が誕生している現場の観測。中央の青色の構造は分子雲と呼ばれ、その中には上下に示したように星の卵に対応する分子雲コアが存在している。星はこの分子雲コアの中で生まれる。

図2は、若い星が集団で誕生している現場の観測。星からジェットという激しいガスの放出現象(図3)が起り、星形成領域全体にその影響を与えている。また、生まれたばかりの星の周囲には惑星が誕生の母体である星周円盤が存在することが分かっている。

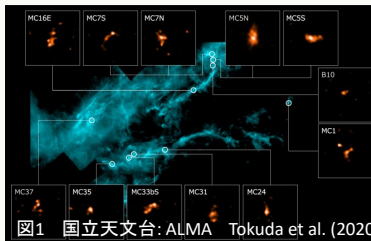


図1 国立天文台: ALMA Tokuda et al. (2020)

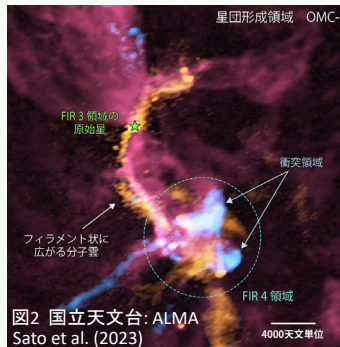


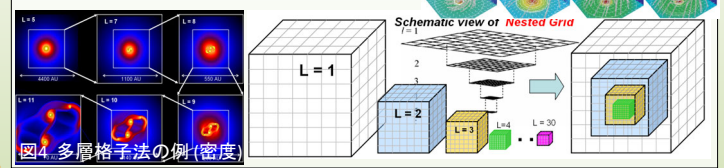
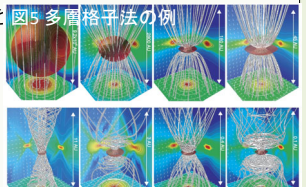
図2 国立天文台: ALMA Sato et al. (2023)



図3 上方から見たジェット Harada et al. (2023)

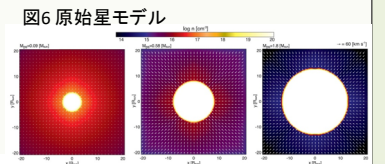
研究方法 | 計算手法

分子雲コアは約1万天文単位の半径を持つ。他方、原始星半径は0.01天文単位程度である。この異なる空間スケールを多層格子法を用いて空間分解して、東北大学サイバーサイエンスセンターのAOBA-A SX-Aurora TSUBASAを用いて磁気流体計算を行った。



基礎方程式+原始星モデル

非理想磁気流体力学の基礎方程式と原始星モデル(図6)を用いて、星が誕生後数千年から数万年の計算を行った。



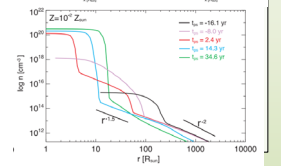
非理想磁気流体方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0,$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P - \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B}) - \rho \nabla \phi,$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \left[\mathbf{v} \times \mathbf{B} - \eta_0 (\nabla \times \mathbf{B}) - \frac{\eta_A}{|\mathbf{B}|^2} (\mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B})) \right],$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho,$$



結果と今後の研究

この研究では、宇宙初期から現在の星形成までのシミュレーションを行った。図7は初期宇宙の研究である。初期宇宙で微小磁場が存在すると右のように単一の超巨大星が誕生することが分かった。磁場を考慮しない場合は、左のように複数の星が誕生する。

図7: 初期宇宙での星形成 (左: 磁場無視、右: 磁場考慮)

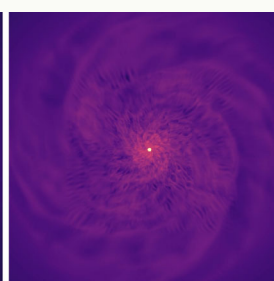


図8は初期宇宙での星団形成である。中心に超巨大ブラックホールの母体となる大質量星が存在する。図9,10は現在の星形成過程。ジェットの駆動(図9)と惑星形成を誘起するダストの円盤への降着(図10)を示している。図11は小マゼラン雲での原始星ジェットの観測。小マゼラン雲は100億年前の宇宙環境に対応するが、この時期に惑星が形成できることが分かった。今後、138億年の宇宙史の中での星と惑星の形成を解明する。

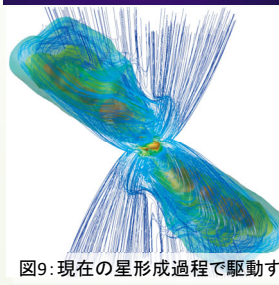
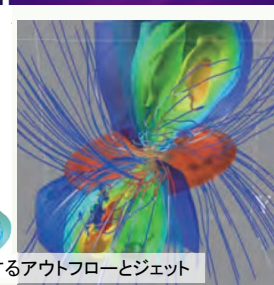


図9: 現在の星形成過程で駆動するアウトフローとジェット



References

Hirano S., & Machida M. N., 2022, ApJ, 935, 1
Koga S., Kawasaki Y., & Machida M. N., 2022, MNRAS, 515, 6073
Machida M. N., Hirano S., & Kitta H., 2020, MNRAS, 491, 2180
Machida M. N., 2021, MNRAS, 499, 4490

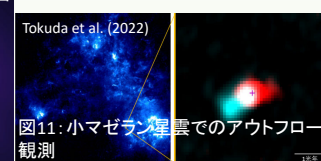
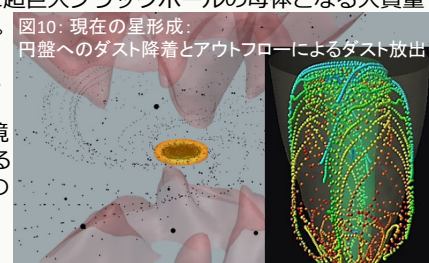


図11: 小マゼラン雲でのアウトフロー観測



スーパーコンピュータSX-Aurora TSUBASA

