

星と惑星形成の大規模シミュレーション

九州大学理学研究科 町田正博

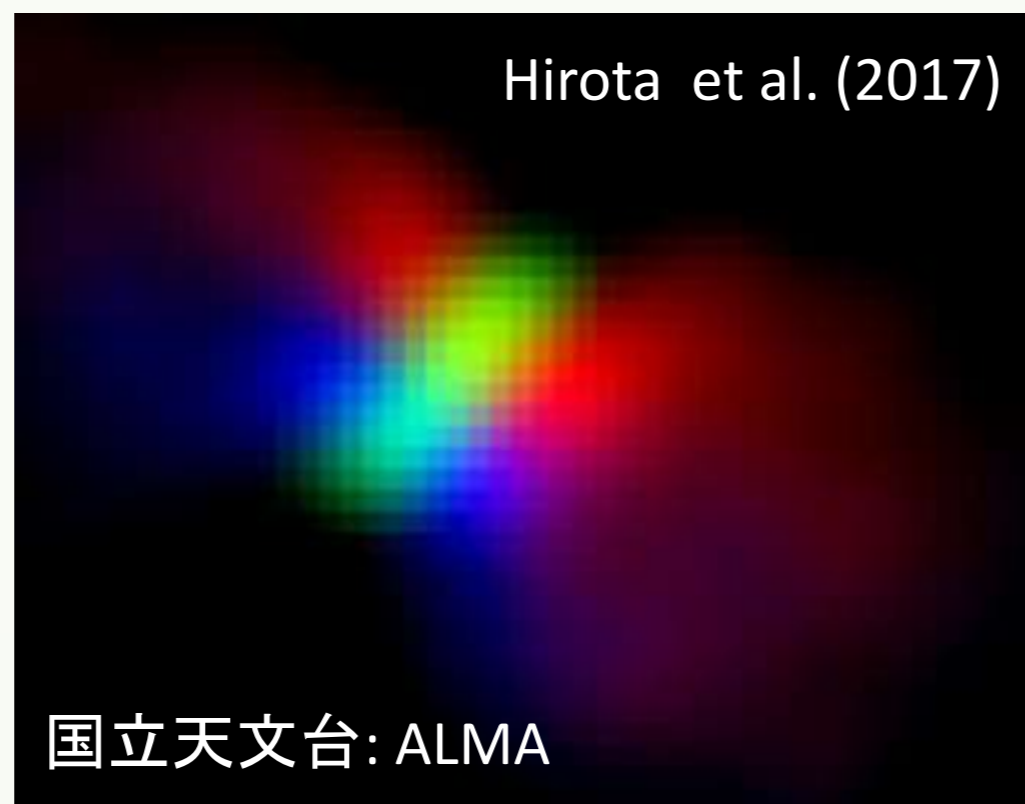
研究目的・背景

星は宇宙の最も基本的な構成要素であり、宇宙の物質進化を司る。また、星の誕生時には、星の周囲で原始惑星系円盤が発達する。この原始惑星系円盤の中で惑星が生まれる。そのため、星の誕生の過程は、惑星の誕生、さらには、生命の誕生と密接に関係している。

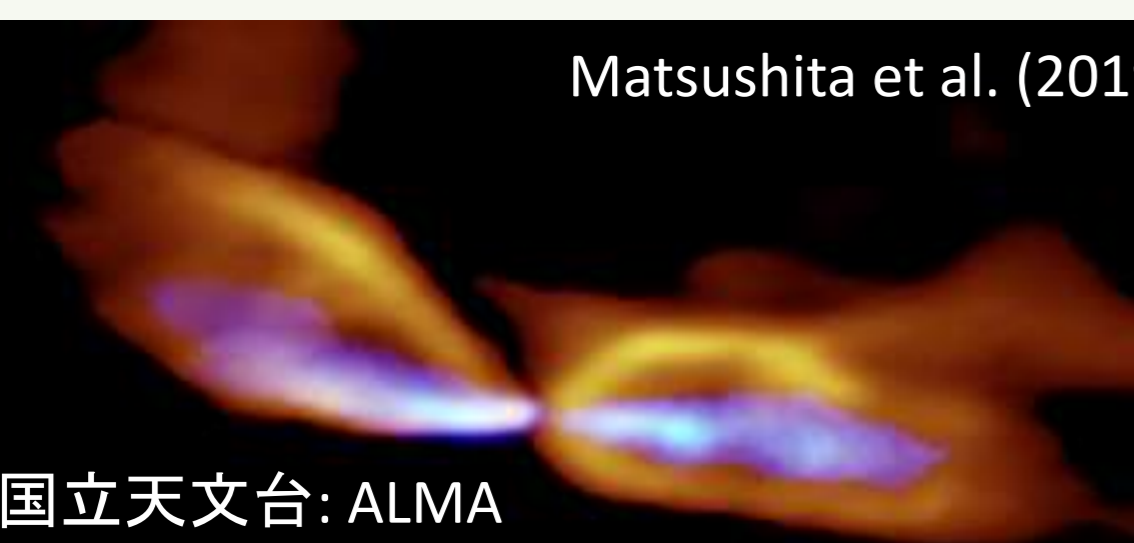
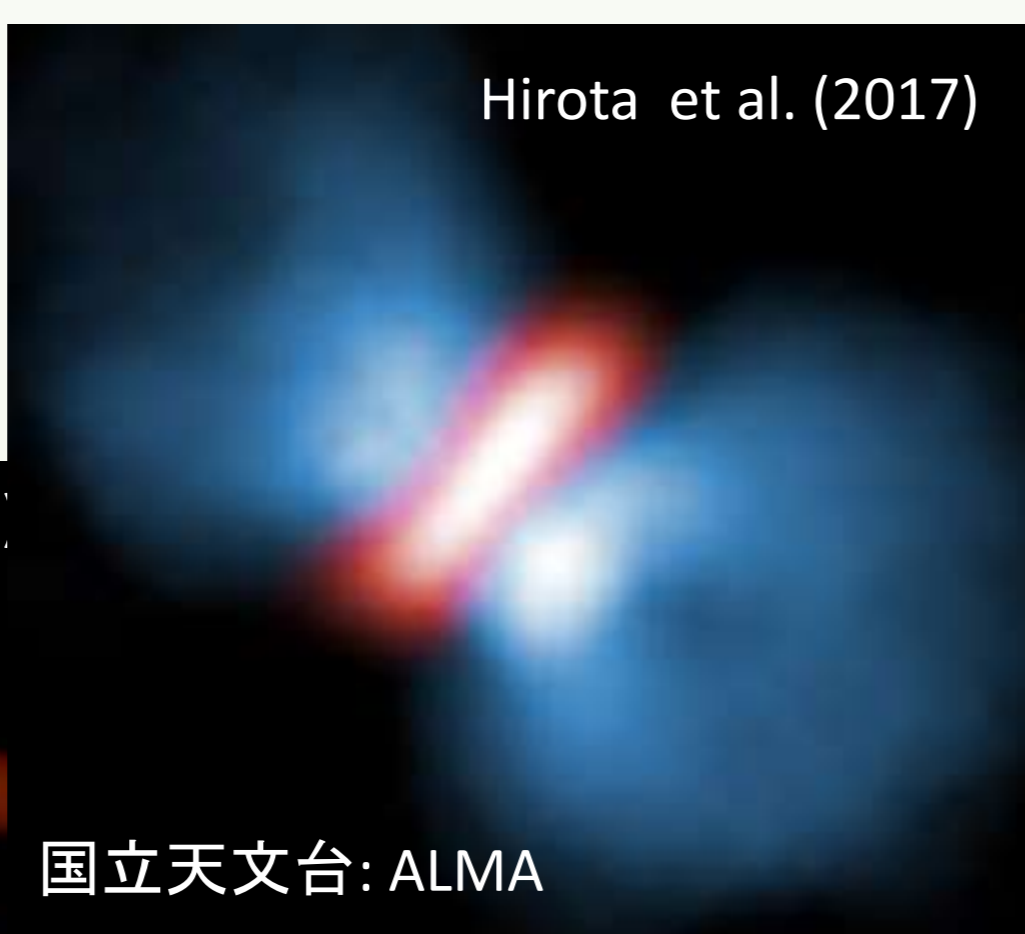
このような星がどのようにして誕生したかを理解することは、宇宙や生命の起源を理解する上で非常に重要である。近年南米チリに設置されているALMA望遠鏡によって、星が誕生する現場が詳細に観測されている。下に示しているのは、我々がALMA望遠鏡を用いて行った観測である。

図の様に星は、その誕生時に産声とも呼ばれる激しいガスの放出現象を示す。これは、原始星ジェットと呼ばれる。星は、生まれた後に、周りのガスが赤ちゃん星に落下することにより成長する。

そのため、この噴水のように星から出現するジェットは、星形成を解明するための鍵であると考えられている。この現象を含め、星が誕生する過程を数値シミュレーションを用いて解明する。

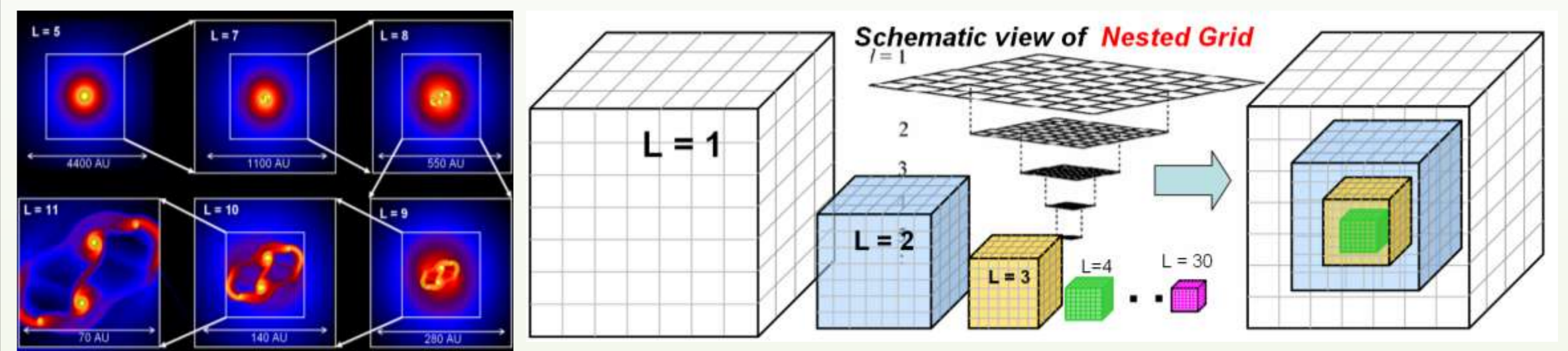


図の中心付近に赤ちゃん星が誕生している。その周囲は原始星ジェットというガスの放出現象。



研究方法 | 計算手法

星の誕生の母体である分子雲は10万天文単位程度の大きさを持つのにに対し、誕生したばかりの星の大きさは、0.01天文単位であり、1000万倍空間スケールが異なる。この異なる空間スケールを下に示したような多層格子法を用いて空間分解し、磁気流体力学の基礎方程式を適切な境界条件のもとで解くことによって、星が誕生する過程を計算する。計算は、東北大学サイバーサイエンスセンターのベクトル型スーパーコンピュータSX-ACEを用いる。



基礎方程式+原始星モデル

下に示すの非理想磁気流体力学の基礎方程式と右に示す原始星モデルを用いて、分子雲コアから星が誕生し、誕生後の進化を2000年間計算する。

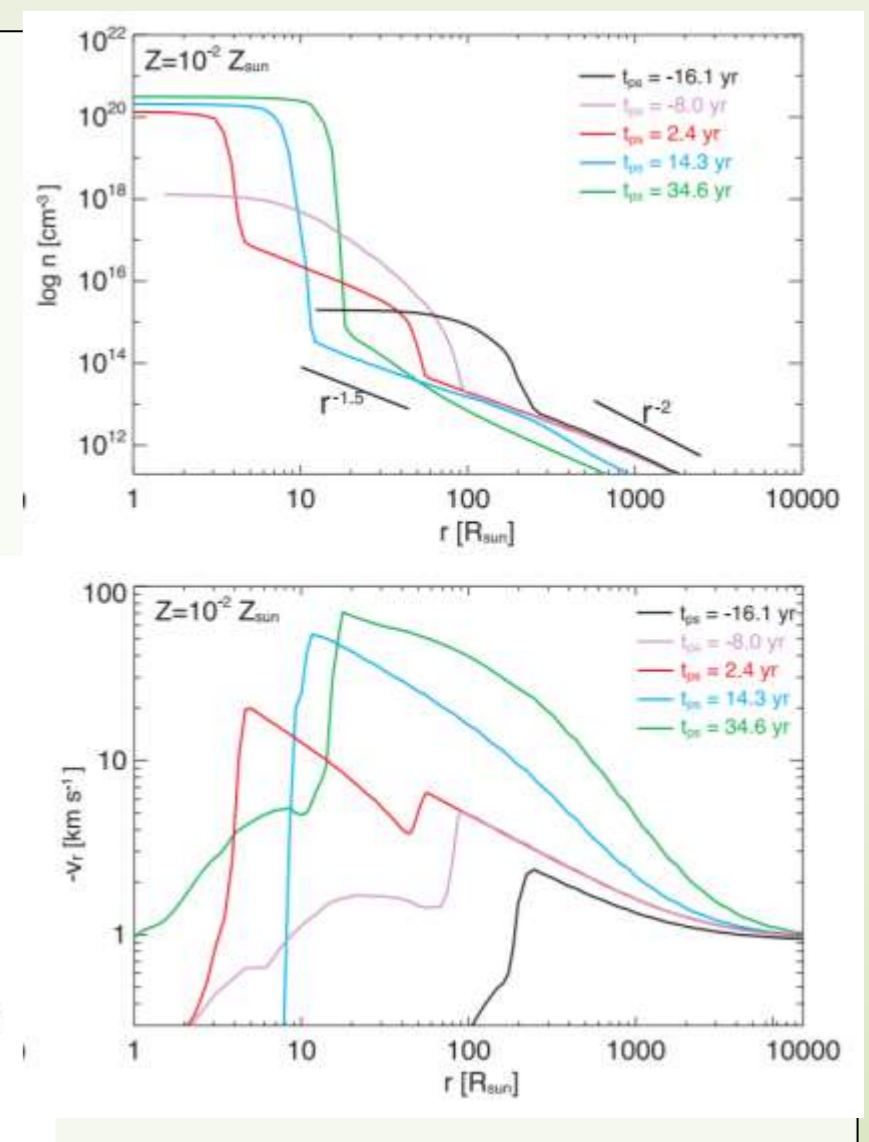
非理想磁気流体方程式

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

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

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

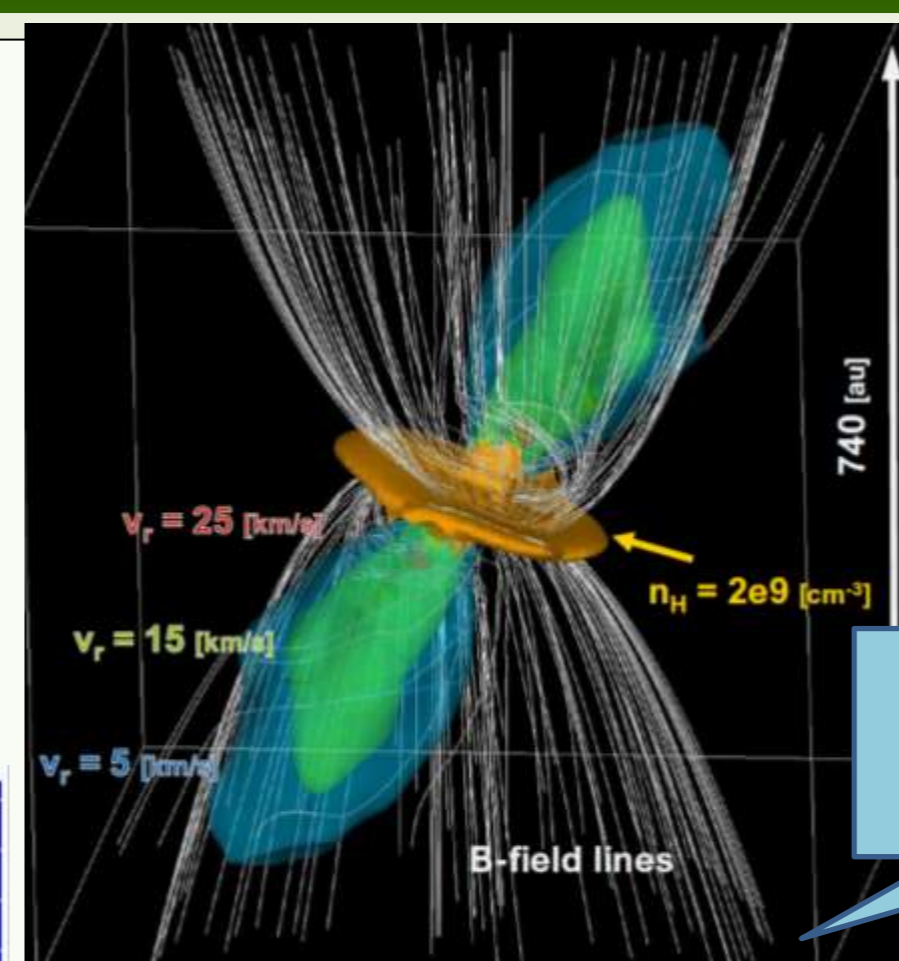
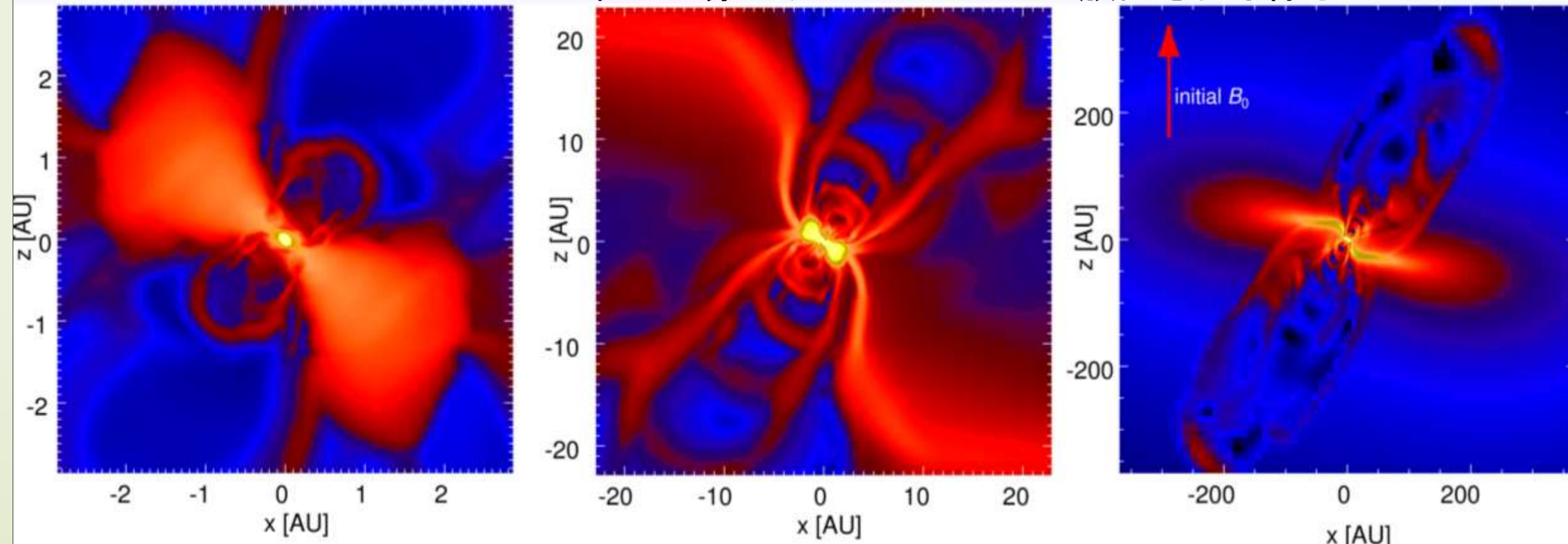
$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho,$$



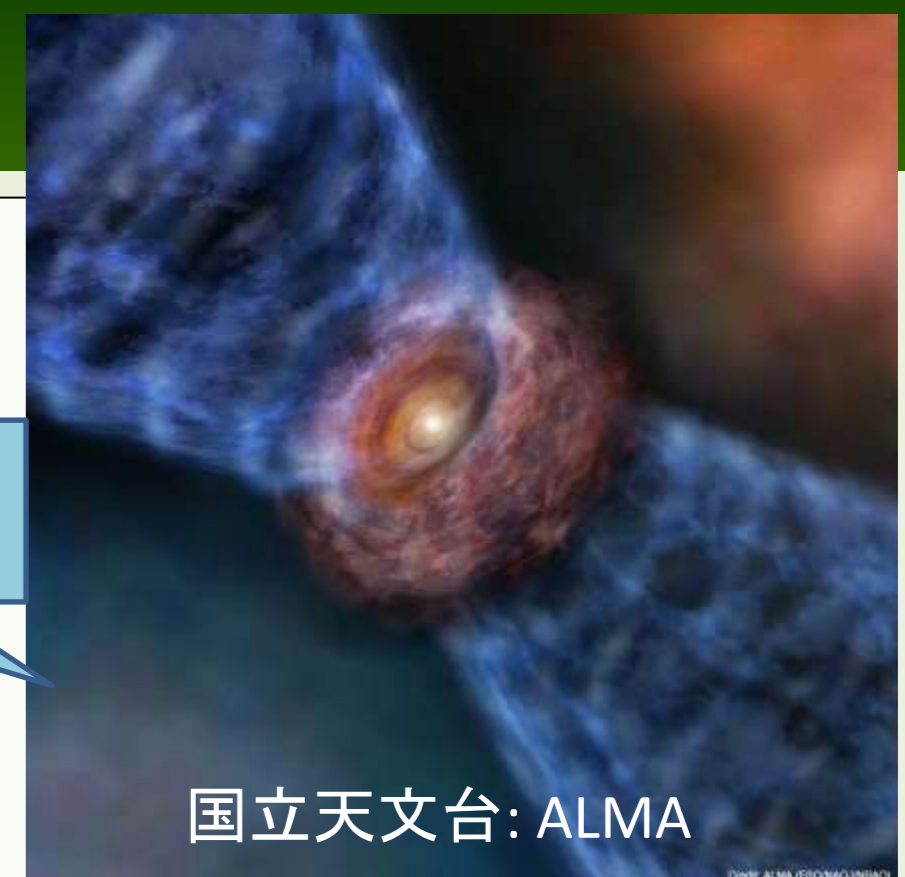
結果と今後の研究

シミュレーションの結果、観測で見られる原始星ジェットを再現することが出来た。原始星が出来ると、周囲に高い角運動量を持ったガスが落下する。このガスが回転円盤を作る。回転円盤は遠心力で支えられておりガスが落下せず原始星は成長することは出来ない。しかし、磁場と回転による磁気遠心力風という効果によってジェットが現れる。ジェットが効率良く円盤ガスの角運動量を持ち去ることによって、円盤のガスが中心の原始星に落下して原始星は成長することが出来る。

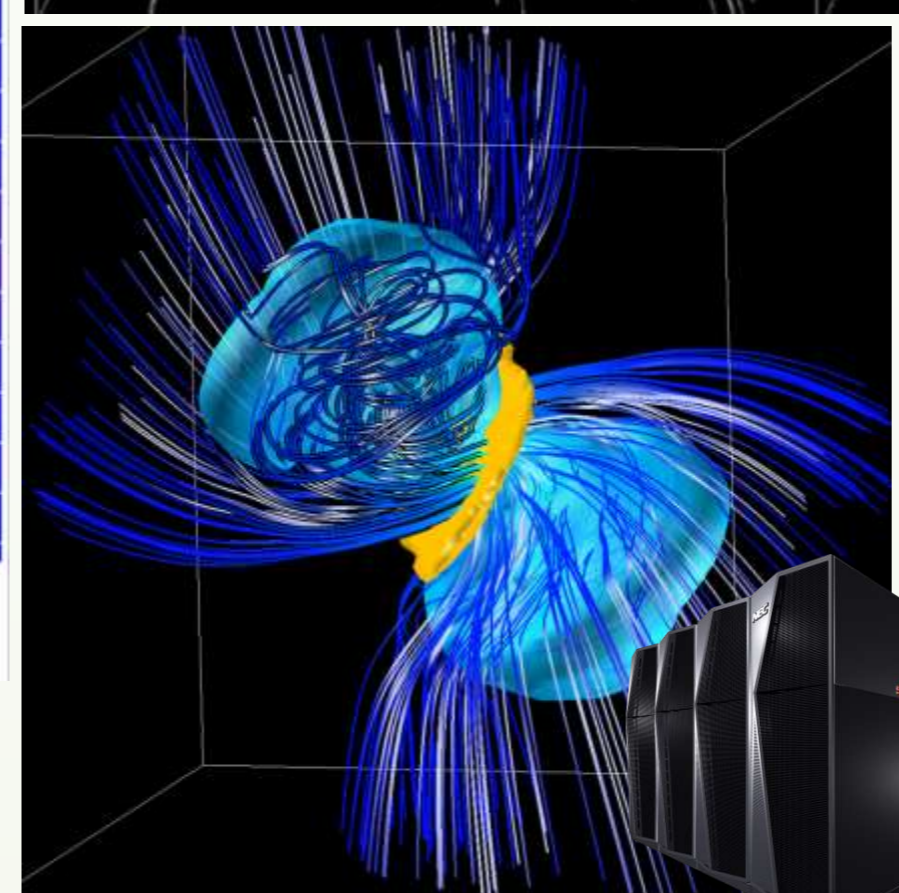
中心の赤ちゃん星からガスが放出される様子



観測の模式図



数値シミュレーション結果



国立天文台: ALMA

ジェットは中心の赤ちゃん星に食料(ガス)を供給する役割を果たしている。今後は、原始星の周りの円盤の中で惑星が誕生する過程をシミュレーションと観測を使って解明する。最終的には地球型の惑星と生命の起源を解明するための大規模シミュレーションを実行する。

Reference
Hirano S., Machida M.N., 2019, MNRAS, 485, 4667
Machida M.N., Basu S., 2019, ApJ, 876, 149
Matsushita Y., Takahashi S., Machida M.N., Tomisaka K., 2019, ApJ, 871, 221
Hirota T., Machida M.N., Matsushita Y., et al., 2017, NatAs, 1, 0146

スーパーコンピュータ SX-ACE