

PRESS RELEASE (2022/08/24)

宇宙最初の星は「ひとりっ子」で誕生する

高精度磁気流体シミュレーションが切り開いたファーストスター形成の新展開

ポイント

- ① 宇宙最初の星・ファーストスター(※1)形成における新たな磁場増幅メカニズムを発見
- ② 増幅後の強磁場によって、小質量のファーストスター(※2)が形成できず、大質量の巨大なファーストスターのみが誕生する
- ③ ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(※3)による初期宇宙観測による検証に期待

概要

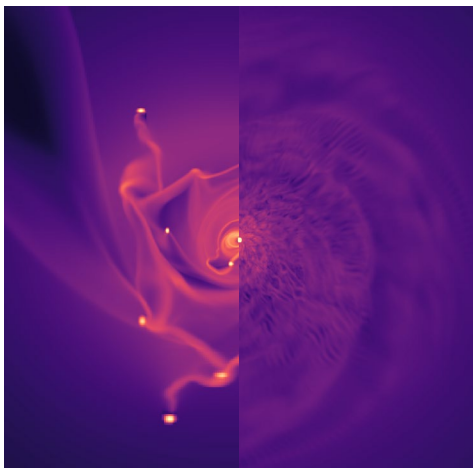
ビッグバンから数億年後の宇宙に誕生する宇宙最初の星・ファーストスター形成時に、従来の数値シミュレーションでは数個から数百個の小質量のファーストスターが同時に誕生することが報告されていました。このシナリオから予言される小質量のファーストスターは現在の宇宙で見つけることができるはずなのですが、その痕跡は未だ観測されておらず、理論的な説明が求められていました。

本研究では、ファーストスター形成過程における磁場の新たな増幅機構を発見し、急増幅された強い磁場の効果によって小質量ファーストスターの形成が抑制されることを明らかにしました。

東京大学大学院理学系研究科の平野信吾特任研究員、九州大学大学院理学研究院の町田正博准教授らの研究グループは、ファーストスターの表層までを取り扱う高精度な磁気流体シミュレーションを行うことで、ファーストスター形成過程における磁気流体効果(※4)を検証しました。ファーストスターが誕生する初期宇宙の磁場強度は現在の宇宙と比べて10桁以上低く、極めて微弱なのですが、星や星周ガスの回転運動によって15桁以上指数関数的に増幅することが初めて分かりました。増幅後の強磁場が星周ガスの回転運動を弱めるため、円盤分裂が抑制され小質量ファーストスターは誕生せず、大質量の巨大なファーストスターは「ひとりっ子」で誕生します(下図)。

今回の発見はファーストスター形成における磁気流体効果の重要性を明確にし、形成シナリオの再構築を促すものです。ファーストスターはジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の科学目標の一つである宇宙最初の銀河・ファーストギャラクシーの構成要素であるため、今後の宇宙望遠鏡の観測への理論モデルとして役立つことが期待されます。また、大質量ファーストスターは大質量ブラックホールへと進化するため宇宙最初のブラックホール(ファーストブラックホール)形成を解き明かすヒントとなります。

本研究成果は米国の雑誌「The Astrophysical Journal Letters」に2022年8月12日(金)に掲載されました。



左図：ファーストスター形成への磁気流体効果の影響
説明：図の左右は、数値シミュレーションで磁気流体効果を見無視した/考慮した計算の違い。磁気流体効果を計算した右側の結果では、星周ガスの分裂が抑制されて、ただ一つのファーストスターが誕生する。

【研究の背景と経緯】

ビッグバンから数億年後は、宇宙最初の星・ファーストスターや宇宙最初の銀河・ファーストギャラクシーが誕生する「宇宙の夜明け」にあたります。この時代は宇宙観測における最後のフロンティアであり、2021年12月に打ち上げられたジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の主な観測目標としても研究者の注目を集めています。

ファーストスターは初期宇宙で誕生する第一世代の星々であり、ファーストギャラクシーを構成して次の世代の星々の材料となるため、宇宙の初期進化を左右する重要な天体です。ファーストスターがどのような天体だったのかを明らかにするために、数値シミュレーションを用いてファーストスターが誕生する様子を再現する理論的研究が行われてきました。近年、ファーストスター形成における磁場の影響に注目が集まっていますが、これまでのシミュレーションでは星の周りの磁場を無視する単純化が行われており、厳密性に欠けていました。

【研究の内容と成果】

本研究では、ファーストスターの表層から星が生まれるガス雲までを空間分解する高精度な磁気流体シミュレーションを行い、ファーストスター形成における新たな磁場増幅機構を発見しました。今回見つけた増幅機構では、まず誕生間もないファーストスターの回転によって、ファーストスターに突き刺さる磁力線が巻き上げられることで磁場が強まります。その後、星周囲のガスの回転によって増幅した磁場が外側へと伝搬することで、強磁場領域が徐々に拡大します（図1）。ファーストスターが誕生する初期宇宙の磁場強度は現在の宇宙と比べて10桁以上低く、極めて微弱なのですが、星や星周ガスの回転運動によって指数関数的に15桁ほど増幅することが初めて分かりました。

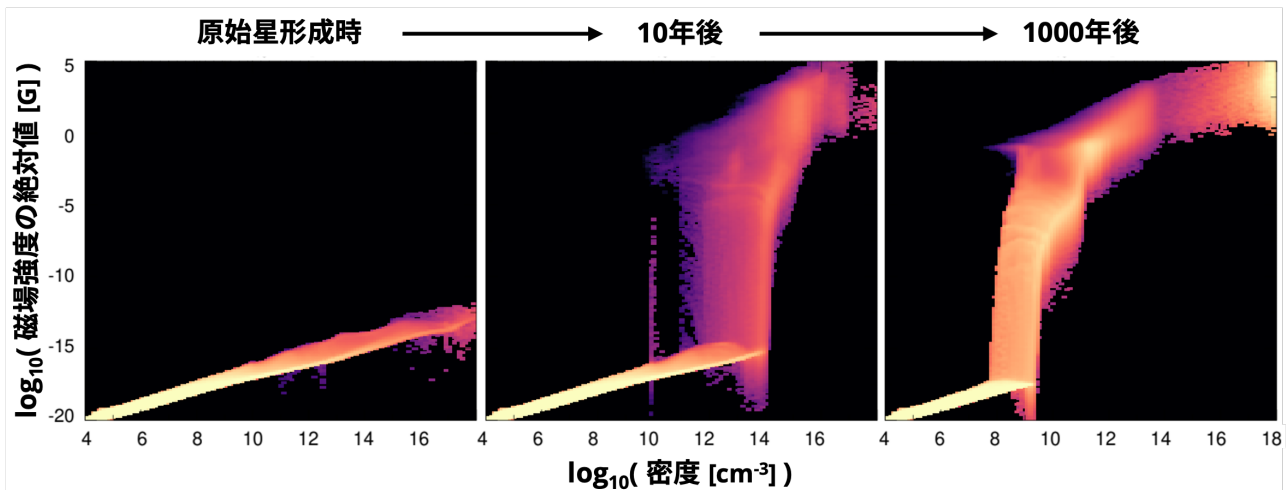


図1：指数関数的な磁場増幅

説明：原始星形成時（左）・10年後（中央）・1000年後（右）の磁場強度分布。まず高密度領域で場強度が15桁にもわたり指数関数的に増幅し、時間が経過すると共に強磁場は低密度領域（星形成領域の外側）へと広がっていく。

この新たな増幅メカニズムによって現れた強磁場は、磁気ブレーキ効果によってファーストスターを取り囲む星周ガスの回転を弱めます。これまでの数値シミュレーションでは星周ガスの回転が早く、星周円盤が分裂して複数の小質量ファーストスターが誕生すると考えられていました（図2左）。しかし本研究より、高精度磁気流体シミュレーションを行うことで現れた磁場増幅メカニズムを考慮すると、円盤分裂が抑制され小質量ファーストスターは誕生せず、大質量の巨大なファーストスターが誕生することが分かりました（図2右）。このような大質量ファーストスターは大質量（ファースト）ブラックホールになると考えられます。

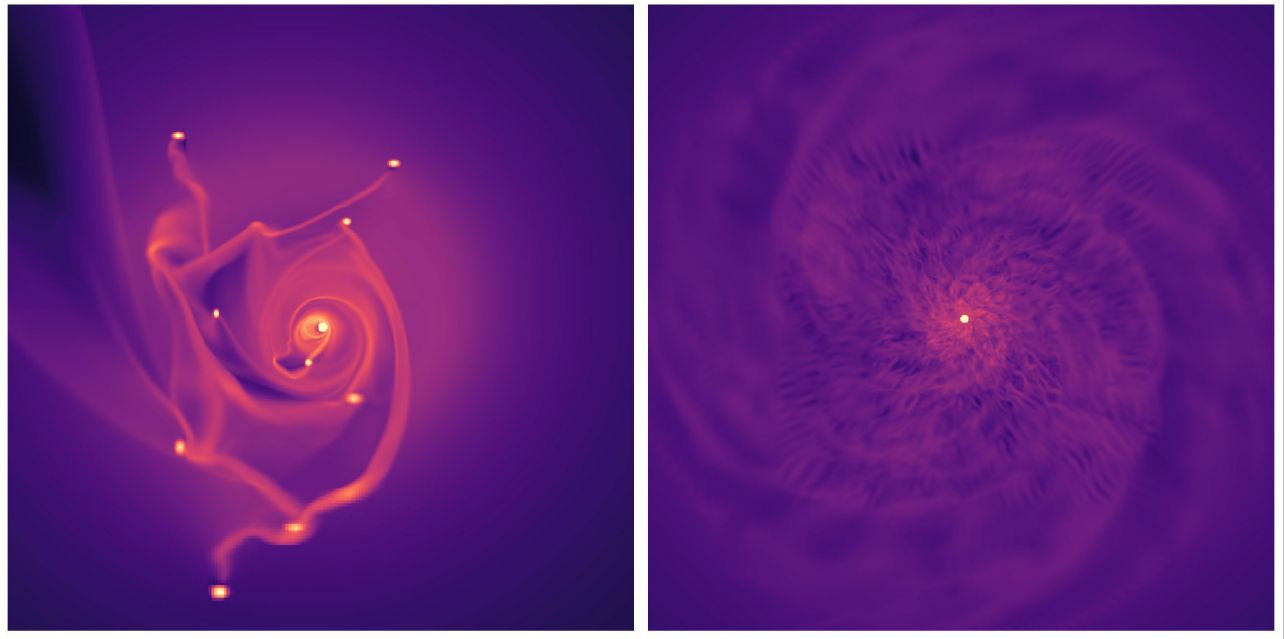


図2：流体・磁気流体シミュレーションの比較

説明：流体シミュレーション（左）と磁気流体シミュレーション（右）の計算終了時（原始星形成後 1000 年）の赤道面の密度分布。

実は、従来の数値シミュレーションにより示されていた小質量のファーストスターは宇宙年齢（138 億年）以上の寿命を持つため、我々が暮らす銀河系に存在するはずなのですが、観測では見つからないという問題がありました。本研究により小質量のファーストスターは誕生しないことが示されたことで、この観測的問題も解決することができました。

【今後の展開】

今回の発見はファーストスター形成における磁気流体効果の重要性を明確にし、形成シナリオの再構築を促すものです。私達は今回発見した磁場増幅メカニズムが、初期宇宙における他の天体・大質量ブラックホールにおいても起きることを確認しています。今後は星形成仮定の物理条件を変え、今回発見した影響がどこまで普遍的なものかを検証します。

【参考映像】

URL:<https://onedrive.live.com/?authkey=%21ADCulpitu9qy1aE&cid=40B5CBF635309091&id=40B5CBF635309091%21401790&parId=40B5CBF635309091%21401765&o=OneUp>

動画：ファーストスター原始星形成から 1000 年間の時間進化

説明：パネル左から（1）流体シミュレーションの密度分布、（2）磁気流体シミュレーションの密度分布、（3）磁場強度分布、（4）磁場の優勢度（=ガス圧/磁気圧）の分布。

【用語解説】

(※1) ファーストスター

宇宙の進化の中で生まれた第一世代の星々。ビッグバン元素合成によって作られた元素しか含まないガスが重力収縮して形成された、炭素より重い元素を全く含まない星である。その質量は太陽質量よりもはるかに大きかったと予想されているため、超新星爆発などを通して、その後の銀河形成期の物質進化に大きな影響を与えたと考えられる。

(※2) 小質量のファーストスター

星の特徴や進化を決定づけるのはその質量である。質量が太陽の 0.8 倍以下のファーストスターは寿命が宇宙年齢(138 億年)程度になるため、現在まで生き残っているはずである。しかし長年の探索にもかかわらず、銀河系内ではファーストスターはまだ見つかっていない。

(※3) ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡

アメリカ航空宇宙局(NASA)が運用する赤外線観測用宇宙望遠鏡。ハッブル宇宙望遠鏡の後継機にあたる。2021 年 12 月 25 日に打ち上げられ、2022 年 7 月 11 日に最初の観測画像が公開された。主な科学目標の一つが、ビッグバンから数億年後に誕生するファーストスターからの光を観測することである。

(※4) 磁気流体効果

電磁場と相互作用する電離したガス成分を含む流体（プラズマ）は、磁力線とともに動く（磁場の凍結）。原始星を取り巻くガスは円盤状に回転しているが、磁場は円盤に刺さったゴムひものように働き、回転によって捩じられると元に戻ろうとして回転運動にブレーキをかける（磁気ブレーキ）。

【謝辞】

本研究は、JSPS 科研費（JP17K05387, JP17KK0096, JP18H05222, JP21H00046, JP21H01123, JP21K03617, JP21K13960）、2019 年度国立天文台大学支援経費、2020 年度九州大学 QR プログラム（整理番号：2217）の助成を受けたものです。本研究は、海洋研究開発機構が提供するスーパーコンピュータ・地球シミュレータ（採択番号：1-22001）、HPCI システム利用研究課題（課題番号：hp210004, hp220003）を通じて、東北大学が提供するスーパーコンピュータ・AOBA、大阪大学が提供するスーパーコンピュータ・SQUID の計算資源の提供を受け、実施しました。

【論文情報】

掲載誌：The Astrophysical Journal Letters

タイトル：Exponentially amplified magnetic field eliminates disk fragmentation around the Population III protostar

著者名：Shingo Hirano, Masahiro N. Machida

D O I : 10.3847/2041-8213/ac85e0

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学理学研究院 准教授 町田 正博（マチダ マサヒロ）

TEL：092-802-4198 FAX：092-802-4208

Mail：machida.masahiro.018@m.kyushu-u.ac.jp

東京大学・大学院理学系研究科・天文学専攻 特任研究員 平野信吾

TEL：070-3162-6035

<報道に関すること>

九州大学広報室

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp