

重力崩壊直前の恒星内部自転進化モデル

—磁場が握る星の自転の命運—

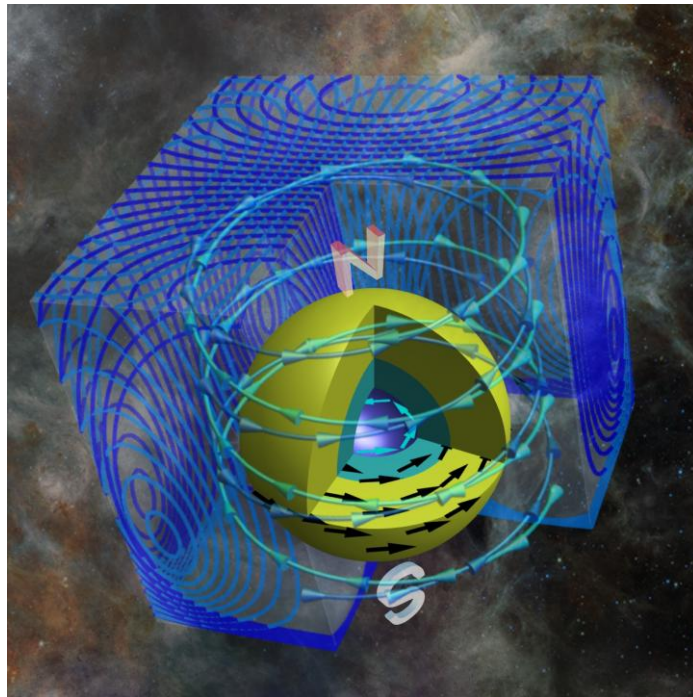
概要

畠田遼太 理学研究科博士課程学生、Lucy O. McNeill 同助教を中心とした国際研究グループは、大質量星内部での自転率進化を支配する新たな物理モデルを構築しました。

恒星は一生を通じて自転率を減少させると考えられていますが、従来の理論では観測されている自転率を正確に再現できないという長年の課題があります。本研究では、重力崩壊直前の大質量星内部の酸素燃焼殻に関する3次元電磁流体計算の解析を行いました。特に、自転率進化をもたらしている磁場による角運動量輸送が、太陽型星で知られる角運動量輸送理論を満たすことを発見しました。この結果を踏まえて、磁場による角運動量輸送の新たなモデルを構築し、自転率の減速のみならず、特定の条件下では加速も起こり得る多様な自転率進化メカニズムを示唆しました。

今回の成果は、恒星進化理論において課題が残っている対流層における角運動量輸送の理解を大きく前進させるものです。また、多様な自転率進化はミリ秒マグネターのようなエキゾチックな天体の形成を紐解くための重要な一歩だと考えられます。

本研究成果は、2026年4月27日16時（米国東部夏時間）にアメリカの国際学術誌「*The Astrophysical Journal*」にオンライン掲載されました。



キャプション: 重力崩壊直前の大質量星内部のイラスト。激しい対流が生じている酸素燃焼殻(緑色)、ヘリウム燃焼殻(黄色)が示されている。箱内に磁場構造が投影されており、矢印で自転速度が示されている。酸素燃焼殻での対流・自転・磁場の相互作用によって自転率が加速あるいは減速する。(Credit: Lucy O. McNeill)

1. 背景

恒星はその誕生から死に至るまで、自転率を初期の 100~1000 倍程度も減少させると考えられています。この減少をもたらす仕組みとして、磁場とプラズマガスの相互作用が挙げられます。例えば太陽も、誕生直後は現在の約 10 倍の自転率を持っていたと考えられますが、数十億年かけて内部の角運動量が表面へと運ばれ、太陽風によって放出されることで現在の自転率まで減速してきました。さらに、今回研究の対象とする大質量星(太陽の 8 倍程度以上の質量)においては、崩壊直前の内部の自転率やその分布が、重力崩壊や超新星爆発の形態、さらにはその後形成される中性子星やブラックホールの回転特性を決定づける重要な要素であると考えられています。

近年、星震学という画期的な手法により、銀河系内にある数千もの恒星の内部自転率を測定できるようになりました。しかし、その結果として既存の磁場による角運動量輸送理論では、観測に対して大幅に大きい自転率を予測してしまう課題が浮き彫りになっています。特に、ブラックホールや中性子星へと進化する大質量星において、この傾向が顕著に見られます。このような観測と既存の磁場による角運動量輸送理論との乖離に関連する課題として、これまで恒星内部の対流と磁場の複雑な相互作用が角運動量輸送理論において考慮されていなかったという問題点があります。

一方で、太陽や太陽と同程度の質量を持つ恒星(太陽型星)については、対流と磁場の相互作用が表面での磁気活動に重要な影響を及ぼすことから、多くの研究グループが内部の相互作用を解明するための 3 次元電磁流体計算を行ってきました。これらの結果から太陽型星では、対流に対する自転の重要度に応じて、磁場の構造や角運動量輸送の形態が変化することが明らかとなり、そのプロセスが定式化されています。

このような背景を踏まえ、本プロジェクトでは、太陽型星で蓄積された知見を、大質量星の研究へと応用し、激しい対流下での磁場による角運動量輸送のモデル化に挑みました。

2. 研究手法・成果

畠田遼太 理学研究科博士課程学生、Lucy O. McNeill 同助教、前田啓一 同教授、横山央明 同教授らからなる国際研究グループは、重力崩壊直前の大質量星内部の酸素燃焼殻付近に関する 3 次元電磁流体計算の結果を用いて、激しい対流・回転・磁場の複雑な相互作用を直接調査しました。調査にあたり、太陽型星対流層において知られる磁場の形状、強度、対流、自転の間の関係性を活用しました。結果として、今回の計算の中でも類似の関係性が成立することを確認しました。

この結果を活かして、酸素燃焼殻付近における磁場による角運動量輸送を、酸素燃焼殻でのエネルギー生成率、自転率の関数としてモデル化しました。さらに、本モデルが今回の 3 次元電磁流体計算内の自転率進化を再現できることを示しました。

本モデルは恒星の一生を計算する 1 次元恒星進化計算への適用を目指すものです。恒星進化計算でこれまで考慮されていなかった課題である、対流層での磁場による効果を初めて取り入れたモデルであることが大きな特色になります。今後本モデルを取り入れた恒星進化計算を行うことで、恒星の一生を通じた自転率進化において対流層における磁場がどのようなインパクトを持つのか検証する重要な足掛かりになります。

また、既存のモデルでは磁場は角運動量の外向きへの輸送を担うとされていましたが、今回の計算内では、時間帯によって、内向き、外向きの双方の輸送が実現していることが観測されました。本モデルは今回明らかとなった双方向への角運動量輸送を考慮した最新のモデルとなります。

3. 波及効果、今後の予定

現在の恒星進化理論においては、恒星内部の磁場が常に自転率の低下をもたらすと予測されています。しかし、今回の成果により、特定の条件下においては、磁場が内部の自転を加速させることが示されました。このことは、大質量星の自転率進化の過程が現在の理論予測に比べて、より多様であることを示唆しています。一部の大質量星においては、自転率の下限が存在する可能性もあります。また、極端な場合には、このプロセスによって恒星内部が加速され、ミリ秒マグネターやガンマ線バーストの親星のようなエキゾチックな天体が形成される可能性があるかと推測します。このような可能性を議論するために、今後本モデルを1次元恒星進化計算に適用して検証を行っていく予定です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)次世代研究者挑戦的研究プログラム(Spring)助成金(JPMJSP2110)、理化学研究所数理創造プログラム(iTHEMS)のスタディグループ(2024~2025年)、京都大学白眉プロジェクト「高解像度観測の時代に向けた超新星前質量損失の理論的更新」、日本学術振興会(JSPS)科学研究費助成事業「国際強度研究加速基金(海外連携研究)(JP24KK0070)」、「学術変革領域研究(A)(JP24H01810)」、「基盤研究(B)(JP24K00682)」、「基盤研究(A)(JP21H04492)」、およびオーストラリア研究会議(ARC)ディスカバリー・プロジェクト(DP240101786)の支援を受けて実施されました。

<研究者のコメント>

「一般的に、恒星の自転率は理論上の予測よりも10倍ほど遅くなっています。そのため、理論研究者は、恒星内部の自転を減速させるための効率的なプロセスを探求しています。しかし、一部の大質量星は、その寿命を終える際、極めて高速で回転する核を持っていないと分かっていません。そうでなければ、ミリ秒マグネターのようなエキゾチックな恒星の存在を説明できないからです。このため、今回恒星内部が加速したという結果を見て非常に驚きました。」(Lucy O. McNeill)

「大質量星の3次元電磁流体計算における、自転率の加減速と、対流に対する自転の影響の間に明確な対応関係が見られたことは驚きでした。この対応関係は、太陽型星対流層における3次元電磁流体計算の結果とよく似ています。対流、回転、磁場の相互作用が、恒星の進化段階に関わらず普遍的な性質である可能性が示唆されたことは興味深いです。」(畠田 遼太)

<論文タイトルと著者>

タイトル: Angular momentum transport in the convection zone of a 3D MHD simulation of a rapidly rotating core-collapse progenitor

著者: Shimada, R., McNeill, L. O., Varma, V., Maeda, K., Yokoyama, T., Mueller, B.

掲載誌: *The Astrophysical Journal* DOI: 10.3847/1538-4357/ae53da