奨学生レポート

多田野奨学生　2024 年度　院第 1 号
松野なな
（総合研究大学院大学先端学術院博士課程 3 年）

「初めての論文執筆を通して学んだこと」

今年の 5 月に、私が第一著者として執筆した論文が日本天文学会の学術誌に掲載されました。論文の内容と、研究や執筆を通して学んだことを報告します。

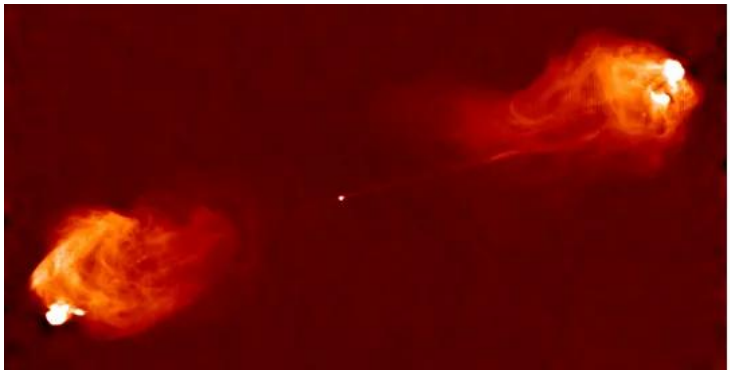


図 1. 銀河中心のブラックホールから出るジェット。なぜ細く保ったまま遠くまで伝搬するのか分かっていない。（画像：NRAO/AUI/NSF）

宇宙には「ジェット」と呼ばれる現象があります。銀河の中心にある巨大なブラックホールの周りから、ガスが光の速さに近い勢いで細い筋のように噴き出し、数十万光年、つまり私たちの銀河系の何倍もの長さにまで伸びていくものです（図 1）。不思議なことに、これほどの距離を進んでも、ジェットはあまり広がらず細いまま保たれています。例えると、ホースから出た水が、太さを変えないまま、10km 先まで伸びているようなものです。何がジェットを細く絞って安定化しているのか。この「収束」の仕組みは、天文学の大きな謎の一つです。

私が注目したのは「熱伝導」です。熱いお茶に金属のスプーンを入れると、持ち手まで熱くなります。これが熱伝導です。この現象は宇宙でも発生しますが、宇宙のガスは電気を帯びた粒子（プラズマ）でできており、少し様子が違います。熱を運ぶ電子は磁場の力によって磁力線に巻き付くように運動し、レールの上を走る電車のように、磁力線に沿ってしか動けません。つまり熱は「磁力線に沿ってだけ」伝わります。この特別な熱の伝わり方がジェットの形や安定性にどう影響するのかは、これまでよく分かっていませんでした。

そこで私たちは、磁場とガスの運動を同時に解く「磁気流体力学シミュレーション」を

開発し、コンピュータの中でジェットを噴き出させました。そして、熱伝導がある場合とない場合を比べて、熱伝導の働きを調べました。

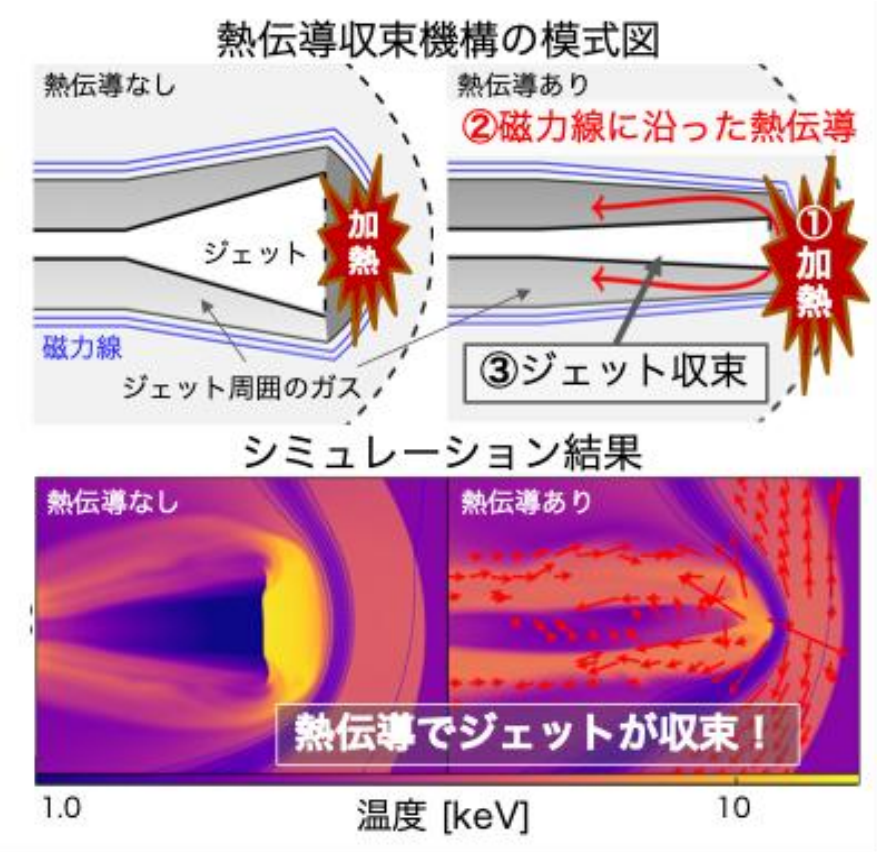


図 2.（上）熱伝導収束機構の模式図。左が熱伝導なし、右が熱伝導ありのモデルを表す。（下）ジェットの先端の温度分布。黄色が高温、青は低温を表す。
（Matsuno et al. 2026 より改変）

その結果、熱伝導は予想していた以上に、ジェットに影響を及ぼすことがわかりました。主な結果は二つです。

一つ目に、熱伝導によってジェットの温度構造が大きく変わるということです。ジェットは進むと周囲のガスにぶつかり、先端部分が非常に高温になります。熱伝導がない場合、この熱は先端にたまったままです。ところが熱伝導があると、ジェットのまわりでは磁力線がジェットに沿うように並んでいるため、熱はその磁力線を伝ってジェットの後ろ側へ「逆流」し、ジェットの先端の温度は低下し、ジェットを包むガスを温めます（図 2）。

二つ目に、熱伝導が効くとジェットが収束することです。温められたガスによってジェットを囲むガスの圧力は約 4 倍に高まり、ジェットを周りから強く押さえつけます。その結果、ジェットの幅は約 4 分の 1 にまで細く絞られます。これは、歯磨き粉のチューブを周りから強く握ると、中身が勢いよく飛び出す現象に似ています。

これらの結果から、私たちは熱伝導がジェットを細く絞る働きをすることを新たに発見

し、この仕組みを「熱伝導収束機構」と名付けました。今後この仕組みの検証を進めていくことで、ジェットの収束という天文学の謎の解明に近づけるかもしれません。

論文執筆を通じて、私が学んだことは主に三つあります。

一つ目は、道具を自分の手で作ることの価値です。今回用いた計算コードは、私が数年かけて一から構築したものです。少しずつコードを書いては何度もテスト計算を重ねてきました。近年は、一般に公開されている電磁流体計算コードがいくつもあり、多くの学生はそれを使っています。そのほうが結果は早く出ますが、自分で書いたからこそ、数値計算の強みや弱みを基礎から学ぶことができ、自信を持って結果を議論できるようになりました。

二つ目は、学び続けることの大切さです。結果をまとめるには、計算して出てきた現象を説明できるような物理を組み立てる必要があります。しかし、結果をいくら眺めても、それが物理的な現象なのか計算の誤差なのかすら、見分けがつかない時期がありました。そのため、基礎的な文献を読み直し、共同研究者と議論を重ねることで、一つひとつ理解を深めていきました。また、天文学の論文は世界中の研究者に読まれるよう英語で書きますが、私は英語で長い文章を書いた経験がほとんどなく、いざ書こうとしても全く筆が進みませんでした。そこで論文執筆の入門書を読み、段落ごとに内容を固めることが大事なのだと学び、文章の構造を意識して書くようにしてからは、少しずつ形になっていきました。物理も英語も、私にはまだ学ぶべきことが山ほどあると気付かされました。学ぶたびに見える景色が変わっていくことが、研究の楽しさだと感じています。

三つ目は、まずやり切ることの重要性です。原稿を書いている間、完璧な論文を目指すあまり、追加の解析が必要ではないか、そもそもこの手法でよいのか、と悩んで手が止まることがありました。そんな時共同研究者の方から、「この論文ひとつで全てを解決しようと思わなくていい」と声をかけていただいたことで、気持ちに整理をつけ、前に進むことができました。1 人で悩み続けるのではなく、まず形にして世の中に出すこと重要性を学びました。

今回の研究は、なぜジェットは収束するのか？という大きな謎に対して、熱伝導による新しい仕組みを提案したに過ぎず、何かが完全に解決したわけではありません。それでも、自分の手で新しいことを見つけ、世に出せたことはとても嬉しく、大きな自信になりました。この経験を元に、これからも研究に取り組んでいきたいと思います。

掲載論文：Matsuno, N., Yokoyama, T. & Machida, M. Anisotropic thermal conduction as a driver of jet collimation and magnetic field amplification on cold fronts. *Publications of the Astronomical Society of Japan* **78**, 1306 (2026).