

37. 電波観測と機械学習による星形成フィラメントの幅の普遍性の解明

九州共立大学経済学部地域創造学科 教授 島尻 芳人

概要

本研究では、星形成過程におけるフィラメント幅の普遍性を解明するため、分子輝線データを用いた水素柱密度分布の予測手法を開発した。従来の観測では、フィラメント幅が 0.1pc に集中する一方で、分子輝線データでは異なる幅が検出されることがあり、その普遍性に疑問が残っていた。本助成により野辺山 45m 電波望遠鏡の観測時間を購入し、新たな観測を実施し、高密度領域の情報を持つ分子輝線(HCO^+ 、 HCN 、 H^{13}CO^+)を追加した機械学習モデルを構築した。その結果、従来モデルでは再現できなかった高密度フィラメント構造をより正確に予測し、フィラメント幅の測定精度を向上させることに成功した。本研究の成果により、分子輝線データから連続波分布を高精度で予測し、フィラメント幅の測定における観測バイアスを補正できる可能性を示すことに成功した。今後は、異なる星形成環境や遠方領域での適用を進め、フィラメント幅の普遍性をさらに検証する。

背景および目的

われわれの生命を構成する炭素、酸素、窒素などの元素は、宇宙にはじめから存在していたものではなく、恒星内部で核融合反応によって生成されたものである。また、太陽系に存在する地球、月、惑星も太陽(恒星)が形成されるとき副産物として生まれる。したがって、星の生まれ方(星形成)の解明は、現代天文学の重要課題だけでなく、われわれが住む物理世界を知ることにつながる。過去のおうし座分子雲などに対する系統的な観測研究から、「分子雲(密度が 10^2cm^{-3} 程度の数 10-100pc 程度(1pc は 3.26 光年に相当)に広がったガスの塊)→高密度($\sim 10^{4-5}\text{cm}^{-3}$)のガスの塊(コア)の自発的重力収縮→中心星への質量降着→誕生初期の星(原始星)から極方向に高速でガスを吹き飛ばす(分子流)」といった星形成シナリオが確立してきた。2010 年頃、ハーシェル赤外線望遠鏡による近傍星形成領域に対する探査観測が行われた。結果、観測した全ての分子雲において細長い構造(フィラメント)が検出され、星を生むもととなるコアのほぼ全てがフィラメントに埋もれていることを明らかになった。この結果は、ほぼ全ての星はフィラメントを介して生まれることを示唆し、これまでの星形成過程の概念を覆すものであった。さらに、それらのフィラメントは 0.1pc という特徴的な幅を持っていることが明らかになった。また、フィラメント幅により、理論研究からフィラメントの形成過程に制限を与えることができる。そのため、フィラメントの観測研究において、フィラメント幅の解明は非常に重要である。しかし、分子輝線による観測から、0.1pc から大きく外れた幅を持つフィラメントが検出されるなど、フィラメント幅の普遍性の有無については、結論が得られておらず、いまだに、議論が活発に行われている。一方、研究代表者の近年の研究(Shimajiri et al. 2023b)から、これらの分子輝線データによるフィラメント幅の測定には、観測バイアスがあることが明らかになった。本研究では、フィラメントの幅の普遍性の解明を大目標に、将来的に分子輝線データからでもフィラメントの幅を正確に測定することを可能にするため、分子輝線データから水素柱密度分布を予測する機械学習モデルを構築することを目的とした。

成果

NGC2024 領域におけるフィラメントに対する水素柱密度, ^{13}CO , C^{18}O , H^{13}CO^+ から作成された動径方向強度プロファイルの比較から、4 者間で分布が異なり、幅の違いが、各分子の捉えることができる密度域に依存していることが明らかになっている(Shimajiri et al. 2023a)。つまり、フィラメント幅の普遍性を明らかにするためには、捉えることができる密度域の制限が少ない連続波(水素柱密度)による観測がフィラメント幅の議論をする上で必須であると言える。さらに、幅の普遍性の解明には、低質量星形成領域だけでなく、大部分が遠方(>1kpc)にある大質量星形成領域にあるフィラメントの幅も明らかにする必要がある。しかし、広がった構造を再現できる高空間分解能(<<数秒角)の連続波の観測装置がないため(観測装置・手法の欠点)、遠方(>>1kpc)の距離にある領域のフィラメント幅を正しく見積もることができない。一方、分子輝線であれば、広がった構造を再現し、高い空間分解能を達成できる観測手法がある。近年、機械学習のテクニックの1つであるランダムフォレストによるモデルを使うことで、分子輝線データ(^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O)から連続波の分布を予測することができるようになった(Shimajiri et al. 2023b)。しかし、このモデルでは、フィラメントのような密度が高い領域の予測精度が悪いというデメリットがあった。

そこで、本研究では、本助成によって野辺山 45m 電波望遠鏡の観測時間を購入し、新たに観測データ (^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O , HCO^+ , HCN , H^{13}CO^+ など)を取得した(図 1)。 ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O に加え、より密度が高い領域の情報を持った HCO^+ , HCN , H^{13}CO^+ のデータをモデルの学習に取り込み、新たなモデルを構築した。従来の予測モデルは、 ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O の分子輝線を学習で利用し、連続波の分布が予測されていた。今回の改良版のモデルは、より密度が高い領域の情報を持った HCO^+ , HCN , H^{13}CO^+ のデータをモデルの学習に取り込んだ。結果、従来の予測モデルは、フィラメントのような 10^4cm^{-3} 以上の密度域の構造は、正しく制限することができていなかったが、今回の予測モデルでは、精度良く構造を再現することができた(図 2)。また、本研究において、重量な測定量であるフィラメントの幅も一致することを確認することができた。

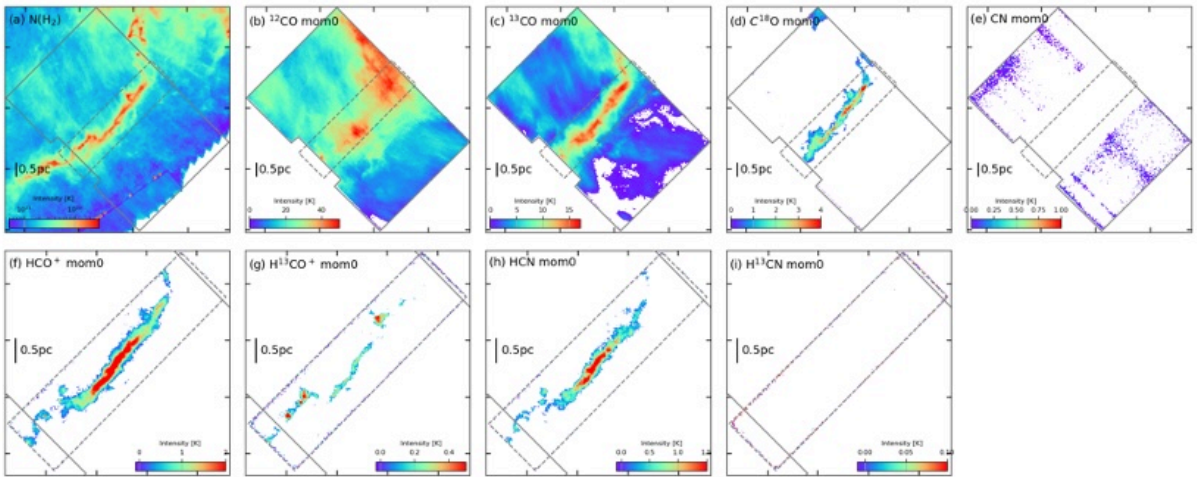


図 1. 本助成によって取得した野辺山 45m 電波望遠鏡により観測したデータから作成したイメージ。

パネル a は $\text{N}(\text{H}_2)$ 、パネル b は ^{12}CO 、パネル c は ^{13}CO 、パネル d は C^{18}O 、パネル e は CN 、パネル f は HCO^+ 、パネル g は H^{13}CO^+ 、パネル h は HCN 、パネル i は H^{13}CN の分布を示す。 $\text{N}(\text{H}_2)$ は、ハーシェル赤外線望遠鏡で取得されたデータから作成したイメージ。 CN と H^{13}CN は未検出である。

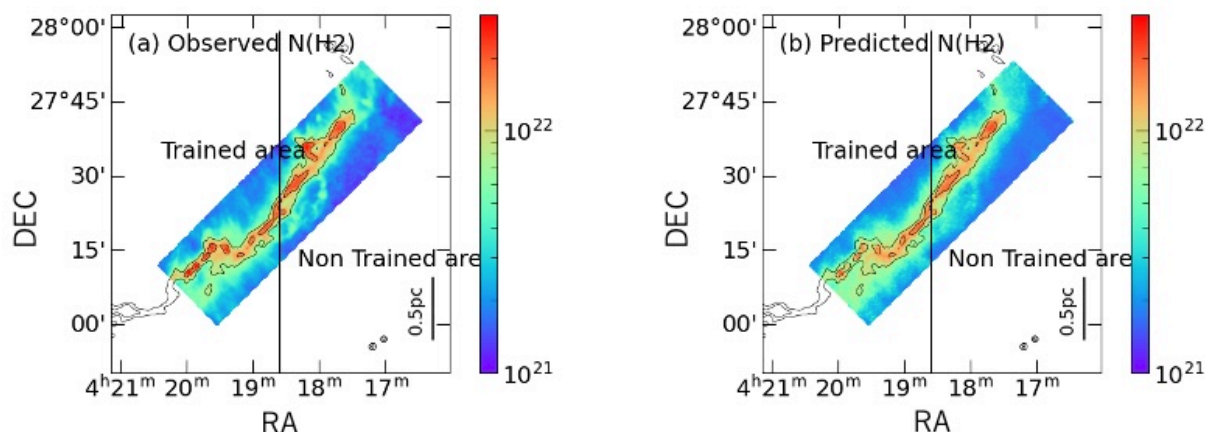


図 2. ハーシェル赤外線望遠鏡で取得されたデータから作成された $N(H_2)$ の分布と本研究で構築した $N(H_2)$ 予測モデルにより分子輝線データから予測された $N(H_2)$ の分布。

パネル a は、ハーシェル赤外線望遠鏡で取得されたデータから作成された $N(H_2)$ の分布を示す。パネル b は、本研究で構築した $N(H_2)$ 予測モデルにより分子輝線データから予測された $N(H_2)$ の分布を示す。左半分を学習領域としてモデルを作成した。

今後の展望および課題

本研究を通して、捉えることができる密度域が異なる複数の分子輝線を機械学習の学習に取り込むことで、低密度から高密度の領域の連続波の分布の再現が可能であることを明らかにした。さらに、その再現性は、フィラメントの幅を測定するうえで十分であることを確認することができた。次のステップの課題は、物理環境の異なるフィラメント領域においても同程度の再現性を保てるかを検証することである。その後、これまで、連続波の観測では、空間分解能が不足または広がった構造が再現できていなかった遠方にあるフィラメントに対して、分子輝線データから連続波の分布を再現し、近傍から遠方にあるフィラメントの幅を測定し、フィラメントの幅の普遍性の検証をする。

(完)

引用文献

- 1) Shimajiri Y., André P., Peretto N., Arzoumanian D., Ntormousi E., Könyves V., 2023a, A&A, 672, A133
- 2) Shimajiri Y., Kawanishi Y., Fujita S. et al. 2023b, MNRAS, 526, 966