

NGC 2264で見つかったX線源を伴う原始星



亀崎 達矢

〈鹿児島大学大学院理工学研究科 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-35〉

e-mail: kamezaki@milkyway.sci.kagoshima-u.ac.jp

星形成領域NGC 2264では多くの星々が今まさに誕生しています。この領域はCOやCSの分子輝線を始めとするいろいろな観測が行われてきました。その中でCOのアウトフローに付随する領域NGC 2264Cの存在が明らかになりました。今回、われわれはこのNGC 2264Cに付随する水メーザーをVERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry) を用いて距離を測定することで精密な物理量の議論が可能になりました。その結果、この領域で発見したメーザーの一つはクラス0と呼ばれる進化段階のとても若い星に付随していることがわかりました。またこの星はとても濃い雲に覆われていて、X線を放射しているということもわかりました。このことについて今回、紹介します。

1. 星形成領域NGC 2264C

NGC 2264は、いっかくじゅう座の北に位置し、円錐星雲 (Cone nebula), 雪片星団 (Snowflake Cluster), 狐の毛皮星雲 (Fox Fur Nebula), クリスマスツリー星団 (Christmas Tree Cluster) など魅力的な名前の天体で構成されています。

この領域はNGC 2264Cという領域で、CO分子輝線でアウトフローが観測された領域¹⁾です。この領域では多くの星が生まれています。

2. クラス0天体

星形成の話をするときによく出てくるのが低質量星のクラスという分類です。これは星の周波数(波長)ごとの明るさのグラフ、スペクトル・エネルギー分布 (SED) の形で決められています²⁾。クラスIは分子雲に深く埋もれていて、物質降着が活発でアウトフローも観測されます。クラスIIは星自体の黒体放射に加えて赤外線で見えて明るい天体です。これは星の周りがある円盤のためです。クラスIIIは中心星が放つ黒体放射でほぼ近似することができ、目立った星周構造はありま

せん。クラスI, II, IIIの順に星は進化していると考えられています。

この分類を作った後に近赤外線や中間赤外線を検出することはできないが遠赤外線やサブミリ波などでは検出することができる天体が見つかりました。クラスI天体よりも前の進化段階に位置してより濃い分子雲に覆われていると考えられるため、このような天体をクラス0天体といえます³⁾。

3. VERAでのVLBI観測

NGC 2264Cでは、星形成が活発に行われていて、クラス0だと思われる星形成の初期段階にあたるコアも見つかっています⁴⁾ (図1)。星形成の初期段階では形成されつつある円盤やアウトフローに付随した水メーザー輝線がよく観測されます。これは、水分子が発する極めて強い電波輝線で、その強さは時間によって大きく変動することがあります。NGC 2264Cからも水メーザーが観測されていたのでVERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry) を用いて、2009年9月から2010年12月まで合計13回のVLBI観測を行いま

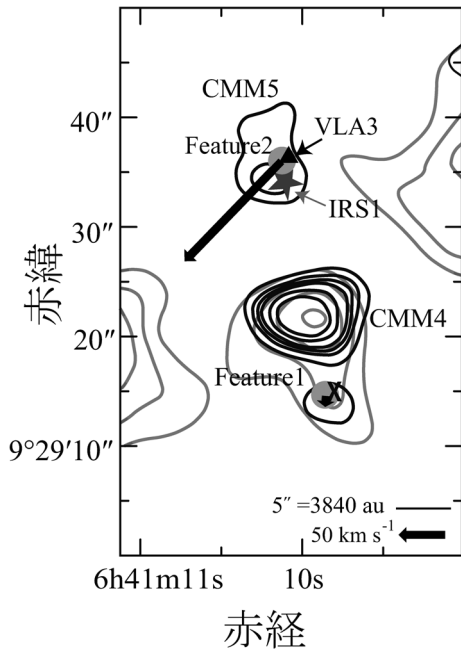


図1 水メーザースポット周辺の関連天体の位置関係。グレーの○は水メーザー源で、矢印はその速度の大きさ、▲はセンチメートル連続波、星印はIRS1、黒の等高線は3.2mmサブミリ波連続波、グレーの等高線はN₂H⁺分子輝線強度の分布を示す⁷⁾。

した⁵⁾。1回あたりの観測時間は約8時間です。VERAには二つの受信機があり、目標天体と参照天体の2天体を同時に観測することができます⁵⁾。私たちは参照天体としてJ 0643+0857を観測しました。この天体は何億光年も先にある天体で、目標天体の天球面上での位置を決めるうえでの基準になります。

4. 年周視差と距離

私たちは13回中9回の観測でメーザーを検出することができました。検出されたメーザーは二つで、それぞれCMM5とCMM4という高密度なダストのコアの近くに位置していました(図1: 天体の位置)。

このうちCMM4の近くに位置していたメーザー(フィーチャー1)を使って、年周視差を計測しま

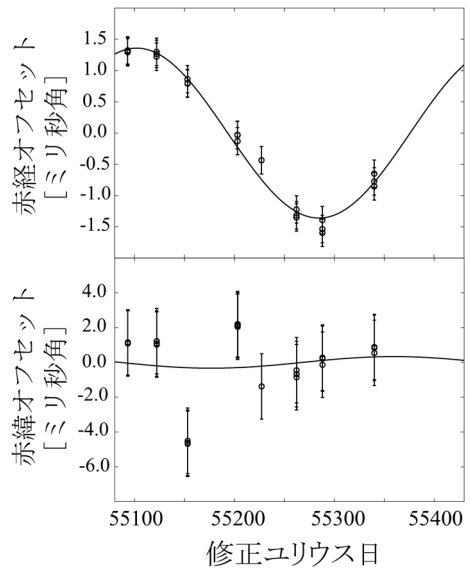


図2 年周視差のフィッティング(フィーチャー1)。エラーバー付きの白丸: 観測されたメーザー 実線: 固有運動, 上) 赤経方向, 下) 赤緯方向。

した。年周視差は地球の公転運動のために生じる視差で、年周視差の逆数が天体までの距離になります。この方法を用いてVERAは多くの天体までを測定しています。NGC 2264の年周視差は1.37 ± 0.10 ミリ秒角で、対応する距離は738⁺⁵⁷₋₅₀ pcになります。今までこの天体は距離760 pc⁸⁾にあると考えられていましたが、私たちの結果は、この値がほぼ正しかったことを意味しています。

5. 水メーザーと励起星

水メーザーを発生させ、動かしている天体のことを励起星といいます。星形成領域での水メーザーの励起星の多くは生まれたばかりもしくは生まれつつある星です。これらの星は先ほど述べたクラス0やクラスIの星に相当します⁹⁾。これらの星はまだ濃い分子雲中に埋まっているので可視光ではほとんど観測できませんが、赤外線やサブミリ波でなら観測することができます。

5.1 赤外線源

そこで私たちは水メーザーの励起星の候補とな

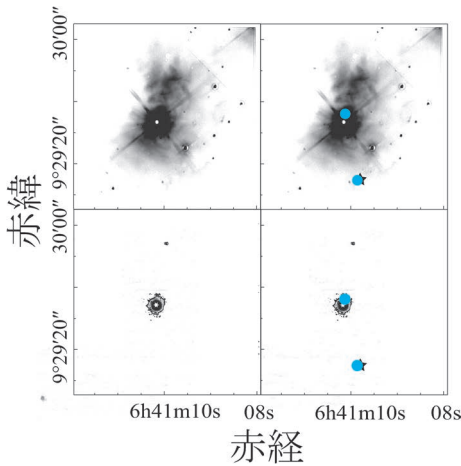


図3 赤外線画像¹⁰⁾。上段が近赤外線 (2.2 μm), 下段が中間赤外線 (11.9 μm) の画像。★がX線源, 青丸がメーザーの位置。

るとなる赤外線源を点源のカatalog (2MASS, IRAS, SPITZER, WISE, AKARI) から探してみました。しかし、二つのメーザーの近くには候補となる赤外線源は見つかりませんでした。なぜ見つからなかったのか。答えは簡単でした。この領域には、赤外線でもとても明るい天体IRS1があり、それぞれのカatalogの元となった画像を見ると、観測装置の影響で星像が周りに大きく広がってしまい、周囲の天体が見づらくなっていたのです。Catalogの数字を見ているだけでは、このようなことはわかりません。とはいえ、画像を見ても明確な赤外線源はなさそうだということもわかりました。

一方で近赤外線、中間赤外線の観測が報告されています⁹⁾。彼らの画像上にメーザーの位置を重ねたものを図3に示します。左は、論文に掲載されている画像、右はそれにメーザーと(後ほど重要になる)X線源の位置を示したものです。上段が近赤外線 (2.2 μm), 下段が中間赤外線 (11.9 μm) の画像です。これからわかるようにメーザーやX線源の位置には赤外線では対応天体がないということがわかります。これは中間赤外線でも観測することができないほど周囲に濃い

分子雲をこの天体がまとっていることを示して、これはクラスIよりも若いクラス0天体であることを支持する証拠になります。

5.2 サブミリ連続波

励起星が分子雲に埋もれているならば、そこに含まれるダスト (星間塵) はミリ波やサブミリ波連続波を放つので、それがダストコアと呼ばれる天体として観測されます。調べてみると、この領域には13個のダストコアが存在します⁶⁾ (図1)。これらにはCMM何番という名前が付けられています。NGC 2264「C」の「mm (ミリメートル)」連続波源という意味です。二つの水メーザーのうち、フィーチャー1はCMM4の南に存在するコア (CMM4Sと命名) の位置と、フィーチャー2はCMM5の位置とよく一致しました。フィーチャー1は約1年間連続して検出することができ、天球面上でほとんど移動しない天体でした。このCMM4Sとは一体どのような天体なのでしょう。

サブミリ波の放射はダストから放射されているので、我々が得た正確な距離を用いると、質量と柱密度を求めることができます (今回はダストの観測では分解できていません)。得られたCMM4Sの質量と水素分子の柱密度はそれぞれ約2.5 M_⊙, >2.6 × 10²³ cm⁻²となりました。

5.3 X線源

宇宙にはX線を発する天体もあります。身近な天体である太陽や大質量星が最後に爆発してできる超新星残骸がX線で観測できることは有名ですが、原始星もX線を放っています。では原始星はどの段階からX線を発するのでしょうか。クラスI天体からのX線はすでに観測されています¹¹⁾。恒星が放つX線は基本的には恒星のフレア現象の際に生じます。クラスI天体でも周りにある星周円盤から中心星に向かって物質が降着するときやフレアのような現象によってX線が発生していると考えられています。一方、クラス0天体では、X線が観測されたという論文はあるものの、それ

が本当にクラス0天体からのものなのかいまだに議論は盛んです¹²⁾。

NGC 2264Cの領域も既にX線で観測されています¹³⁾。見つかったX線源は天球面上でフィーチャー1の近く(離角で約1秒角)に一つありました。そこで、このX線源とCMM4Sが関連のある天体かどうかを調べてみることにしました。宇宙には奥行きがあるので、たまたま天球面上で重なって見えているだけかもしれないからです。

私たちはX線とサブミリ連続波から求めることができる水素分子の柱密度を比較することにしました。X線の連続スペクトルから求められた水素分子の柱密度は $2.5 (1.3-4.6) \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ 。一方、サブミリ連続波から求められた水素分子の柱密度は、前に示したように $>2.6 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ でした。つまり、二つの方法で求めた水素分子の柱密度は一致しています。このことから、X線源は高密度なダストコアCMM4Sの中心星であると考えられます。

以上をまとめると、この天体はダストをまとったメーザーとX線を放射する天体なのです。赤外線のところでも少し触れましたがこの天体がどんな天体なのか見ていきましょう。

5.4 CMM4Sの密度とクラス0天体を示唆する証拠

密度は柱密度を奥行きで割ることで求められます。奥行きは観測できないので広がりから推測しますが、CMM4Sは分解できていないのでその正確な広がりはありません。ただ大きく見ても観測時のビームサイズ(5.3"×3.8")程度でしょう。この値から奥行きを4.5"程度、738 pcの距離では $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}$ です。X線で求めた柱密度を $2.5 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ をこの値で割ると密度は $>10^6 \text{ cm}^{-3}$ となります。これは典型的な高密度分子雲コアの密度が 10^5 cm^{-3} ということ考えると十分に大きな値です。このことからこの天体は周囲の分子雲が散逸し始めている段階のクラスI天体

ではなさそうだということがわかります。

5.5 フィーチャー2の励起星

フィーチャー2はフィーチャー1の北約22秒角の位置にいる水メーザーです。この天体は3回の観測で検出されました。3回なので固有運動を求めることはできませんでしたが、年周視差を求めることはできませんでした。そこで、フィーチャー1と同じ距離にいと仮定するとこのフィーチャー2の運動速度は、周囲の天体に対して、約 150 km s^{-1} になります。この速度は水メーザーが示す値としてはとても大きな速度です。同程度以上の速度をもつ水メーザーは大質量星形成領域W49Nで観測されていて、そこでは星の周囲で発生した水メーザーが 150 km s^{-1} 以上まで加速されているだろうと考えられています。NGC 2264Cの領域で今回見つかったフィーチャー2も、もしかしたらこのようなメーザーかもしれません。

フィーチャー2の励起星についてもフィーチャー1のときと同様の手順で調べてみました。フィーチャー2の近くには赤外線やX線の天体は見つかりませんでした。センチメートル連続波天体VLA3があることがわかりました。センチメートル連続波は、大質量星や晩期型星からの紫外線放射もしくは衝撃波によって電離された物質の存在を示すと考えられます。このVLA3とフィーチャー2の位置関係は、フィーチャー2の運動の方向と一致しているので、この二つは関連していると思われます。しかし、今回の研究では、これらの天体が付随している励起星を特定することはできませんでした。

6. まとめと今後

私たちは星形成領域NGC 2264CをVERAでVLBI観測しました。その結果、二つの水メーザー源を検出することができました。フィーチャー1を使って測定された年周視差は 1.37 ± 0.10 ミリ秒角、距離にして $738^{+57}_{-50} \text{ pc}$ でした。この距離は、以前から使われている測光学的距離と

一致しています。VERAで正確な距離を測定したことによって精密な物理量の議論が可能になりました。

フィーチャー1はクラス0天体であるサブミリ波連続波CMM4Sに付随していて、その中心星はX線を放射していました。クラス0である可能性の高い天体からX線が検出されたこととなります。一方、フィーチャー2は 150 km s^{-1} の特異速度を持ち、センチメートル連続波VLA3に付随していると考えられますが、励起星は特定することができませんでした。

今回、X線がクラス0天体からも放射されるということを示しました。今回の研究はVERAと他の望遠鏡を用いて多波長観測を行うことの重要性を示しています。また今後、観測が進めば、ほかにもこのような例が多く出てくると考えられます。また、多数の若い星が密集している星形成領域では、明るい天体の周囲にある暗い天体まで観測できる高精度な赤外線撮像観測が必要だということが確認されました。今後、大口径赤外線望遠鏡と恒星コロナグラフを活用した星形成領域の詳細観測を行うことでクラス0天体や励起星について正確な考察ができるようになることを期待しています。

参考文献

- 1) Margulis M., Lada C. J., Snell R. L., 1988, ApJ 333, 316
- 2) Lada C. J., 1987, Star Forming Regions 115, 1
- 3) Andre P., Ward-Thompson D., Barsony M., 2000, Protostars and Planets IV, 59
- 4) Maury A. J., André P., Li Z.-Y., 2009, A&A 499, 175
- 5) Kamezaki et al., 2014, ApJS 211, 18
- 6) Kobayashi H., et al., 2003, Astronomical Society of the Pacific Conference Series 306, 367
- 7) Peretto N., Hennebelle P., André P., 2007, A&A 464, 983
- 8) Sung H., Bessell M. S., Lee S.-W., 1997, AJ 114, 2644
- 9) Furuya R. S., Kitamura Y., Wootten H. A., Claussen M. J., Kawabe R., 2001, ApJ 559, L143
- 10) Schreyer K., Stecklum B., Linz H., Henning T., 2003, ApJ 599, 335
- 11) Koyama K., Hamaguchi K., Ueno S., Kobayashi N., Feigelson E. D., 1996, PASJ 48, L87
- 12) Feigelson E., Townsley L., Gudel M., Stassun K., 2007, in Protostars and Planets V, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, K. Keil (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 313
- 13) Flaccomio E., Micela G., Sciortino S., 2006, A&A 455, 903

The X-Ray-Emitting Class 0 Protostar Candidate in NGC 2264 Using VERA

Tatsuya KAMEZAKI

Department of Physics and Astronomy, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 1-21-35 Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan

Abstract: There are many stars being born in the active star-forming region NGC 2264, which has been studied with the molecular lines like CO or CS. We observed the NGC 2264C star forming region with Japanese VLBI telescope VERA to measure the distance. Using the distance, we can discuss the accurate physical parameters. One detected maser feature is associated with Class 0 candidate and X-ray emission detected from the central source of the Class 0 candidate.