

星形成領域領域 NGC2264C で見つかった Class0 天体に付随する X 線

亀崎 達矢 (鹿児島大学大学院理工学研究科)

Abstract

NGC2264C は、Mon OB1 巨大分子雲複合体の東に位置する CO のアウトフローが観測された星形成領域である。NGC2264C には合計で 13 個のコンパクトな高密度コア (ミリ波連続波源 CMM1 - 13) が見つまっている。この領域には水メーザーが付随しており、我々は VERA 入来局の単一鏡観測でそのメーザーの増光を確認したため、VERA4 局による VLBI 観測で NGC2264C の年周視差計測を開始した。2009 年 9 月から 2010 年 12 月まで約 1ヶ月おきに計 13 回のモニター観測を行い、得られた年周視差は 1.365 ± 0.098 mas、距離に換算すると 738^{+57}_{-50} pc であった。これまでは測光学的距離に基づいて $\sim 700 - 800$ pc とされており、今回得られた距離はそれと一致する。VLBI によるマッピングの結果、検出された 2 つの水メーザー源はそれぞれミリ波連続波源 CMM4 の南のダストコア (CMM4S) とセンチメートル連続波源 VLA3 に付随することがわかった。センチメートル連続波源 VLA3 に付随するメーザーは 150 km s^{-1} 程度の高速度の特異運動を持つことがわかった。もう一つのメーザーは CMM4S に付随する事がわかった。CMM4S の中心星は中間・近赤外線で見ることができないことから Class 0 天体である。この中心星からの X 線も観測されていることが今回わかった。CMM4S の質量、光度、柱密度はそれぞれ $\sim 1-4 M_{\odot}$, $\sim 4.8 L_{\odot}$, $\sim 5.4 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ であった。この質量と光度から $M - L_{bol}$ 図上にプロットすると CMM4S は低質量の Class0 天体だと考えられる。減光量は $A_V = 160 (81 - 290) \text{ mag}$ とかなり大きかった。

1 Introduction

Class 0 天体を取り巻くエンベロープは電波から可視光に至るまでの多くの波長域で観測することができない。一方で X 線はダストエンベロープの中心星の近くでのフレアや高エネルギー現象によって発せられる。Class I 天体からの X 線放射は多くの文献で報告されていて (Koyama et al. 1994; Kamata et al. 1997)、Class II や Class III と同じメカニズムによって X 線放射が起こっている (Imanishi et al. 2001)。Class 0 天体からの X 線放射も報告されているが本物の Class 0 天体かどうかは係争中である。それらの多くは $M - L_{bol}$ 図上で Class I の領域かまたは境界領域に位置している (Getman et al. 2007)。(Class 0 天体を見分ける 1 つの方法が $M - L_{bol}$ 図である。)

Furuya et al. (2001, 2003) では、水メーザーがどの進化段階で放射されているかを報告している。彼らは、水メーザーを放射する天体の多くは Class 0 もしくは Class I 天体であることを示した。つまり、水メーザーは星形成の初期に放射されることが多いと

いうことである。

NGC2264 は Mon OB1 の東に位置する活発な星形成領域である。多くの波長域で研究が行われており、CO のアウトフローが付随する領域は Margulis et al. (1988) によってラベリングされた。この内、NGC2264C 領域で観測された CO のアウトフローはサブミリ波連続波源がドライビングソースであると考えられている (Maury et al. 2009)。この領域のサブミリ波連続波源 (ダストコア) は、CMM1-13 という名前でラベリングされている (Peretto et al. 2006, 2007)。この領域で赤外線でも最も明るい星は IRS1 と呼ばれ、この天体は可視光では観測できない (Allen 1972)。IRS1 は Class I の大/中質量星であると考えられている。この領域には、水メーザーが観測されていて、CMM4 のあたりに位置していることがわかってきた (Genzel & Downes 1977)。

我々はこの領域にある水メーザーを VERA で単一鏡観測によるモニターを行っていた。この領域に付随する水メーザーの増光を確認したので 2009 年より VLBI 観測を開始した。

2 Observations and Data reduction

我々は VERA を用いて 2009 年 9 月から 2010 年 12 月まで VLBI 観測を実施した。観測は全 13 回行われ、間隔はだいたい 1 ヶ月である。典型的な合成ビームサイズは $1.19 \text{ mas} \times 0.66 \text{ mas}$ である。VERA は 2 ビーム機構を搭載しており、同時に 2 つの天体を観測する。一方はターゲットである NGC2264C の水メーザーを、もう一方は位置基準である連続波源 J0643+0857 を観測した。メーザーの位置を正確に決定するために位置の基準となる天体も同時に観測する。同時に観測を行なっているため大気ゆらぎを相殺することが可能である。観測時に用いた各天体の座標は NGC2264: $(\alpha_{J2000.0}, \delta_{J2000.0}) = (6^{\text{h}}41^{\text{m}}9^{\text{s}}.86, +9^{\text{circ}}29'14''.7)$ 、J0643+0857: $(\alpha_{J2000.0}, \delta_{J2000.0}) = (6^{\text{h}}43^{\text{m}}26^{\text{s}}.445000, +8^{\text{circ}}57'38''.01338)$ である。データは DIR2000 のテープ記録で 256MHz の帯域で行われ、16 個の IF に分割される。1IF は 16MHz であり、メーザーには 1IF、連続波には 15IF が割り当てられる。メーザーは 512 分光点で分割され、周波数分解能は 31.25kHz、速度分解能では 0.42 km s^{-1} である。データリダクションは AIPS を用い、一般的な位相補償解析を行った。

VLBI 観測で 13 観測中、9 観測でメーザースポットを $6.77 \text{ km s}^{-1} - 7.61 \text{ km s}^{-1}$ の視線速度の範囲で検出することができた。検出できたメーザースポットは大きく 2 つのグループ(フィーチャーという)にわかれる。南北に大きく離れていて、その離角は約 $22''$ 出会った。南にあるスポット群をフィーチャー 1、北側のスポット群をフィーチャー 2 と呼ぶ。フィーチャー 2 は 3 回しか検出することができなかったためフィーチャー 1 だけを用いて年周視差のフィッティングを行った。NGC2264C は赤緯が 9 度と低いので赤経方向はフィッティングに使用しなかった。結果として NGC2264 の年周視差は $1.365 \pm 0.098 \text{ mas}$ 、距離にして $738_{-50}^{+58} \text{ pc}$ と求められた。この領域での距離は $\sim 750 \text{ pc}$ のグループ (Sung et al. 1997; Turner 2012) と $\sim 900 \text{ pc}$ のグループ (Baxter et al. 2009) に分かれる。前者は測光学的距離で後者は星のサイズと回転速度から求めたものである。我々の結果は前者を支持する。

求められた距離を用いて(フィーチャー 1 とフィーチャー 2 が同じ距離にいるとすると)、フィーチャー 2 の固有運動を求めると $(\mu_{\alpha} \cos \delta, \mu_{\delta}) = (23.91 \pm 4.29, -29.81 \pm 4.27) \text{ mas yr}^{-1}$ となった。

3 Driving sources of the maser features

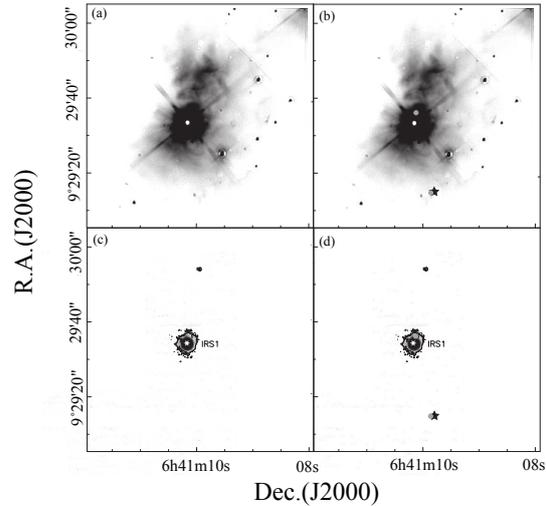


図 1: 近赤外線の画像と水メーザー。a) 近赤外線 K バンドの画像。中心にいる明るい天体が IRS1。b) a) と同じだが、水メーザーの位置を灰色の●で示している。c) 近赤外線 $11.9 \mu\text{m}$ バンドの画像。中心にいる明るい天体が IRS1。d) c) と同じだが、水メーザーの位置を灰色の●で示している。

4 Driving sources of the maser features

水メーザーは Class 0 や Class I 天体に多く付随する (Furuya et al. 2001, 2003) のでドライビングソースが Class I 天体であるならば赤外線でも観測できるはずである。そこで赤外線のデータをみている事にした。いくつかのカatalog (IRAS, 2MASS, AKARI, MSX, WISE) を調べたが、IRS のサチュレーションの影響で確認することはできなかった。Schreyer et

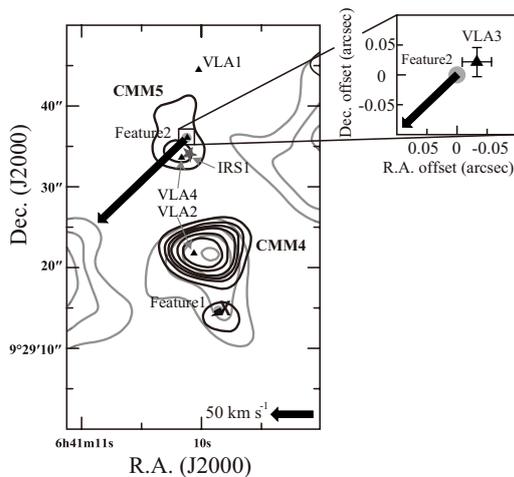


図 2: 水メーザーと関連する天体。▲は VLA センチ波連続波源、灰色の●は水メーザーフィーチャー、黒のや印は固有運動の大きさと向き、黒の等高線は 3.2mm ダスト連続波、グレーの等高線は N_2H^+ 分子輝線の強度を示す。

al. (1997, 2003) には、より高分解能かつ IRS1 が比較的サチっていない赤外線画像を見ることが出来る。この画像を図 1 に示した。見るとわかるように、南側にあるフィーチャー 2 の位置には赤外線天体は存在しないことがわかる。これはフィーチャー 2 のドライビングソースが Class 0 天体であるという 1 つの証拠である。一方でフィーチャー 1 の位置はまだ IRS1 のサチュレーションの影響を受けているので判断することはできない。

センチ波連続波は水メーザーのドライビングソースの近くに多く存在している。3.6 cm 連続波源 NGC2264VLA3 がフィーチャー 2 から北東へ約 80 mas の位置にいた (Reipurth et al. 2004b)。フィーチャー 2 と VLA3 の位置関係はフィーチャー 2 の固有運動の向きに沿っている。これは VLA3 YSO にフィーチャー 2 が付随していることを示唆している。この領域は多くのアウトフローが CO や CS で検出されていて複雑な領域である。なので VLA3 自体が相対的に高速なアウトフローに付随しているかもしれない。

ドライビングソースは高密度なガスに覆われているはずである。フィーチャー 1 の周囲の 3.2 mm dust

連続波と N_2H^+ のマップを Peretto et al. (2007) で見つけた。彼らのマップでちょうどフィーチャー 1 の位置に小さなコアがあることが確認できた (図 2 参照)。このコアは CMM4 の南側に位置していることから「CMM4S」と名付けた。この特徴を考察するために質量、光度、柱密度を求める。

質量は 3 つの方法で求める。: ① ビリアル質量、② X 線の柱密度から求めた質量、③ ダスト連続波の強度から求められた質量。

① ビリアル質量

我々は K.Schreyer から PdBI (Plateau de Bure Interferometer) で観測された CS(2-1) 輝線のデータを頂いた。このデータからビリアル質量、 M_{vir} は $M_{vir} \sim 1.1 M_{\odot}$ であった。

② X 線の柱密度から求めた質量

次の 6 章で説明するように X 線の観測から柱密度は $2.5(1.3 - 4.6) \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ とわかっている所以我々が求めた距離 738 pc とダストの雲のサイズ $4'' \times 3''$ を使って、X 線の柱密度から求めた質量 M_X は $M_X \sim 1.0(0.6 - 1.8) M_{\odot}$ と求められる。

③ ダスト連続波の強度から求められた質量

3.2 mm ダスト連続波の強度は Peretto et al. (2007) から 2.4 mJy - 4.0 mJy であり、ダストの温度 $T_d \sim 16 \text{ K}$ と仮定し、質量不透明度 $\kappa_{3.2\text{mm}} \sim 1.3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ 、平均分子量、 $\mu \sim 2.33$ を使うとダストの柱密度は $N(H_2)_{dust} = (1.0 - 1.7) \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ 、質量 M_{dust} は $M_{dust} \sim (2.3 - 3.9) M_{\odot}$ と求められる。

ここで求めたこれら 3 つの質量は一致しているといえる。そのため、ダストの柱密度を求めるときに使った $T_d \sim 16 \text{ K}$ という仮定は妥当であるといえる。我々の距離 738 pc とこの温度から光度を求めると光度 $L_{CMM4S} \sim 4.8 L_{\odot}$ となる。

5 Driving sources of the maser features

図 3 は $M_{env} - L_{bol}$ 図である (Maury et al. 2009)。この図は Class 0 と I を区別するためにしばしば用いられるものである。今までに見つかっている X 線を放射している Class 0 の候補天体たちはこの図の「border zone」もしくは「Class I」の領域に位置して

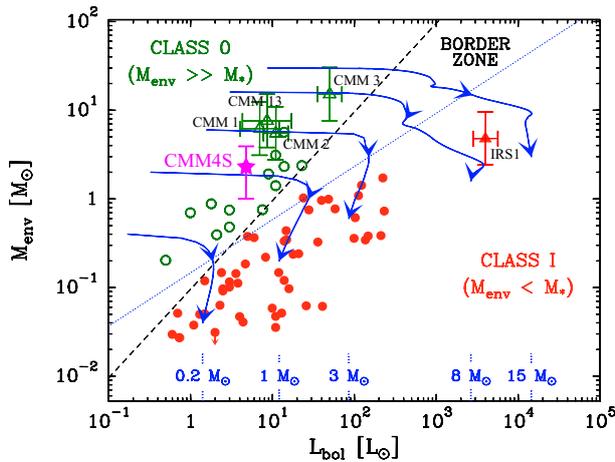


図 3: $M_{\text{env}} - L_{\text{bol}}$ 図。緑の○は今までに見つかっている Class 0 天体、赤の●は今までに見つかっている Class I 天体。青の矢印はモデルで予測されている進化経路。ピンクの星印は CMM4S の位置。

いた。今回の CMM4S はこの図では明らかに Class 0 の領域に位置していて、進化トラックを信じるとだいたい $1 M_{\odot}$ 程度の星になると考えられる。

6 X-ray source and Feature 1

Flaccomio et al. (2006) は NGC2264 領域の $17' \times 17'$ の範囲からの X 線の観測をチャンドラ衛星を使って観測した。彼らのカタログの中にフィーチャー 1 の北西 $0.94''$ の位置に X 線源があることがわかった。彼らはこの X 線源は系内のものであると言っている。検出した X 線源全 420 個の内 10 個が系外からの X 線だと言っているのでもたまたま位置が一致するという事も考えにくい。そのためこの天体は偶然にこの位置にいるのではなく、フィーチャー 1 に付随した X 線源であると考えられる。

フィーチャー 1 のドライビングソースは濃いガス (CMM4S) の中心に埋まっているはずである。この X 線源は CMM4S の中心星から放たれたものである。X 先のデータからエミッションメジャー EM と柱密度 $N(H_2)$ はそれぞれ $9.4 (2.6-24.0) \times 10^{53} \text{ cm}^{-2}$ 、 $2.5 (1.3-24.0) \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ となった。柱密度を減光量に変換すると $A_V = 160 (81-290) \text{ mag}$ に相当する。

Reference

- Allen, D. A. 1972, ApJL, 172, L55
- Baxter, E. J., Covey, K. R., Muench, A. A., et al. 2009, AJ, 138, 963
- Getman, K. V., Feigelson, E. D., Garmire, G., Broos, P., & Wang, J. 2007, ApJ, 654, 316
- Genzel, R., & Downes, D. 1977, A&AS, 30, 145
- Flaccomio, E., Micela, G., & Sciortino, S. 2006, A&A, 455, 903
- Furuya, R. S., Kitamura, Y., Wootten, H. A., Claussen, M. J., & Kawabe, R. 2001, ApJL, 559, L143
- Furuya, R. S., Kitamura, Y., Wootten, A., Claussen, M. J., & Kawabe, R. 2003, ApJS, 144, 71
- Imanishi, K., Koyama, K., & Tsuboi, Y. 2001, ApJ, 557, 747
- Kamata, Y., Koyama, K., Tsuboi, Y., & Yamauchi, S. 1997, PASJ, 49, 461
- Koyama, K., Maeda, Y., Ozaki, M., et al. 1994, PASJ, 46, L125
- Margulis, M., Lada, C. J., & Snell, R. L. 1988, ApJ, 333, 316
- Mauzy, A. J., André, P., & Li, Z.-Y. 2009, A&A, 499, 175
- Peretto, N., André, P., & Belloche, A. 2006, A&A, 445, 979
- Peretto, N., Hennebelle, P., & André, P. 2007, A&A, 464, 983
- Reipurth, B., Rodríguez, L. F., Anglada, G., & Bally, J. 2004, AJ, 127, 1736
- Schreyer, K., Helmich, F. P., van Dishoeck, E. F., & Henning, T. 1997, A&A, 326, 347
- Schreyer, K., Stecklum, B., Linz, H., & Henning, T. 2003, ApJ, 599, 335
- Sung, H., Bessell, M. S., & Lee, S.-W. 1997, AJ, 114, 2644
- Turner, D. G. 2012, Astronomische Nachrichten, 333, 174