

Tornado Nebula に付随するミリ波分子輝線の観測

酒井 大裕 (東京大学大学院 理学研究科 天文学専攻)

Abstract

Tornado nebula (G357.7-0.1) は太陽系から 12 kpc の距離にある双極的構造をもつ特異な電波天体であり、発見以来その起源は永らく不明であった。最近、X 線天文衛星「すざく」により、電波で見える双極構造の両端に、ほぼ同じスペクトルを呈する 2 つの熱的拡散 X 線源が検出された。加えて野辺山 45 m 望遠鏡による分子スペクトル線観測によって、2 つの拡散 X 線源の外側に隣接する分子雲 (MC1, MC2) が検出されたことから、Tornado の正体は双極構造の中心部分にある中性子星またはブラックホールを含む近接連星系から放出されたジェットに駆動された構造と考えられるようになった。さらに我々は CO スペクトル線データの解析を進め、分子ガスの圧力が熱的拡散 X 線源のそれとほぼ同程度である事を見出した (酒井他、2012 年秋季年会 Q42a)。さらに、VLA のアーカイブデータの検索を行い、Tornado nebula 方向の OH 1720 MHz 輝線データの入念な解析を行った。その結果、その観測の PI らが報告した強力なメーザー・スポットの他に、微弱かつ空間的に拡散した OH 輝線放射を確認した。この放射は 20 cm 電波連続波で見える Tornado nebula の形状に沿って分布しており、強度パターンも強く相関していることから物理的に付随している事は間違いないと考えられる。この拡散 OH 1720 MHz 輝線放射は、 $V_{\text{LSR}} \cong -12 \text{ km s}^{-1}$ と $+4 \text{ km s}^{-1}$ の二つの速度成分から成り、どちらも “head” 部分に分布している。特に “head” 部分だけに限るならば、拡散 OH 放射の速度構造は膨張運動と解釈する事も可能であるが、“tail” 部分も含めた大局的な運動を記述するモデルは今のところ見出されていない。

1 Introduction

Tornado nebula (G357.7-0.1) は、銀河系中心方向にある奇妙な形をした電波天体であり、その名前は特徴的な軸対称な形状から名付けられたものである (Shaver et al. (1985a), Becker & Helfand (1985), Helfand & Becker (1985))。その構造は、主に 2 つの構成要素に分けられる。一つは、北西領域に存在する、電波連続波で明るい部分で、“head” と呼ばれている。もう一つは南東領域にある比較的暗い領域であり、“tail” と呼ばれている。

発見されてから、Tornado nebula の成因に関して様々なシナリオが提案されてきたものの、この天体の起源は依然として未知のままである。過去に考えられてきたシナリオは、大別して 2 つに分けられる。一つは、Tornado の電波連続波で最も明るい領域にその活動中心があるとするもの (Shaver et al. (1985a), Shull et al. (1989))。もう一つは、Tornado の “head” と “tail” の中間付近に活動中心があり、双極的な構造を有する、とするものである (Manchester

(1987), Caswell et al. (1989))。この天体が銀河系内のものであるか否か、という点においても議論がなされてきたが、OH 1720 MHz メーザーの検出により、Tornado は太陽系から約 11.8 kpc の距離にある、銀河系内天体であることがわかっている (Frail et al. (1996))。

最近の Suzaku 衛星の観測により、Tornado nebula の両端に広がった熱的 X 線源が検出された (Sawada et al. (2011))。また、2009 年に我々のグループが行った NRO 45m 望遠鏡を用いた ^{12}CO と ^{13}CO $J=1-0$ 輝線の観測により、2 つの拡散 X 線源に付随する分子雲が検出された。これらの結果により、Tornado nebula は、ブラックホールや中性子星を主星とする近接 X 線連星系からのジェットによって生成されたものである可能性が高くなった。

2 Observations

2.1 NRO 45m observations

我々は、2013 年 3 月 1 日から 10 日まで、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて、Tornado nebula を CO, ^{13}CO , C^{18}O , HCO^+ , N_2H^+ $J=1-0$ 輝線で観測を行った。受信機は BEARS を用い、on-the-fly (OTF) マッピングモードで観測した。望遠鏡のポインティングは VX Sgr の SiO メーザーを 1 時間ごとに観測することで補正し、 $\leq 3''$ の精度を維持した。25 個の自己相関器が広帯域モードでスペクトロメーターとして使われ、帯域幅は 512 MHz (110 GHz で 1400 km s^{-1} の速度幅に対応) と 500 kHz の分解能 (110 GHz で 1.4 km s^{-1} の速度分解能に対応) である。

得られたデータは NRO の解析パッケージ NOS-TAR を用いて解析した。

2.2 VLA archive data analyses

NRAO の VLA のアーカイブから OH (1720 MHz) のデータを取得した。Tornado nebula の観測は 2000 年 6 月 24 日と 18 日に C 配列と D 配列で行われた。合成ビームサイズは、 $40'' \times 23''$ であった。

取得した OH (1720 MHz) データは、NRAO の CASA (Common Astronomy Software Applications) で解析した。得られたデータのグリッド間隔は $15'' \times 15'' \times 1 \text{ km s}^{-1}$ である。

3 Results

図 1(a) は、OH 1720 MHz メーザーが検出された速度帯での ^{13}CO $J=1-0$ の強度分布を表している。図 1(b) は Suzaku 衛星による観測で得られた X 線の強度分布である。どちらの図も、白色の等高線で 20 cm 電波連続波強度分布を重ねている。この図から、OH 1720 MHz メーザーの位置と、2 つの拡散 X 線源の北西成分の位置に対応する ^{13}CO 放射が検出されていることがわかる。その他にも、主に Tornado nebula の南側で ^{13}CO がいくつか検出されているが、南東方向の X 線源に対応する放射は明確には検出されなかった。

図 2 は、VLA のアーカイブデータから得られた OH 1720 MHz データの -15 km s^{-1} から -10 km s^{-1} までと 0 km s^{-1} から $+5 \text{ km s}^{-1}$ までの積分強度図をそれぞれ示している。どちらの速度帯でも空間的に広がった OH 分子の放射が検出されていることがわかる。 $-15 \sim -10 \text{ km s}^{-1}$ では Tornado の “head” から “tail” に向かって広がっているのに対し、 $0 \sim +5 \text{ km s}^{-1}$ では “head” に集中しており、20 cm の電波連続波の強度分布と相関している。構造の違いはあるが、どちらも “head” 領域にあり、“tail” 領域では放射が検出されなかった点では共通している。負の速度の成分は既に別の研究者によって報告されている (Yusef-Zadeh et al. (1999))。しかし、正の速度の成分は我々が初めて確認した構造である。

4 Discussion

4.1 Two velocity components of OH 1720 MHz line

OH 1720 MHz 輝線は、衝撃波と分子雲の相互作用の根拠となる重要な輝線であり、実際、超新星残骸 (SNR) のシェルで検出されることが多い。2 つの速度の OH 1720 MHz 輝線が検出されたことと、そのどちらも “head” にのみ存在することから、“head” 領域で何らかの膨張運動が起きていることが考えられる。しかしながら、現在の段階では実際にどういった運動が “head” 領域で起こっているかを特定するには至っていない。

4.2 The differences between head and tail

観測結果と、アーカイブデータの結果を総合すると、“head” 領域と “tail” 領域で明確な違いがあることがわかる。つまり、熱的 X 線源に関してはどちらの領域にも存在するが、 ^{13}CO $J=1-0$ などの分子雲自体の存在を示す輝線や、衝撃波と星間物質の相互作用を示す OH 1720 MHz 輝線の放射は “head” 領域のみで検出され、“tail” 領域ではどちらも検出されなかった。

この不一致に対する解釈としては、

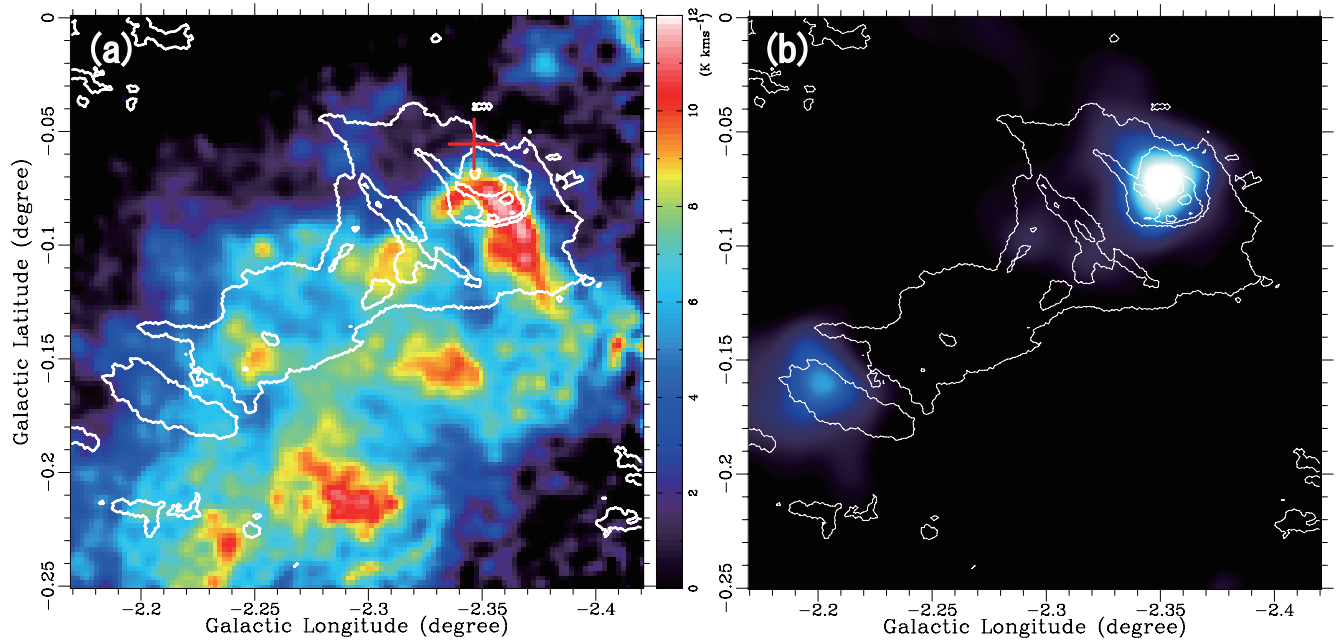


図 1: (a) -15 km s^{-1} から -13 km s^{-1} での $^{13}\text{CO } J=1-0$ の積分強度図。白色の等高線は 20 cm 電波連続波の分布を表している。赤色の十字は OH 1720 MHz メーザーの位置を示している。(b) Suzaku 衛星によって観測された 2–5 keV の X 線強度分布。

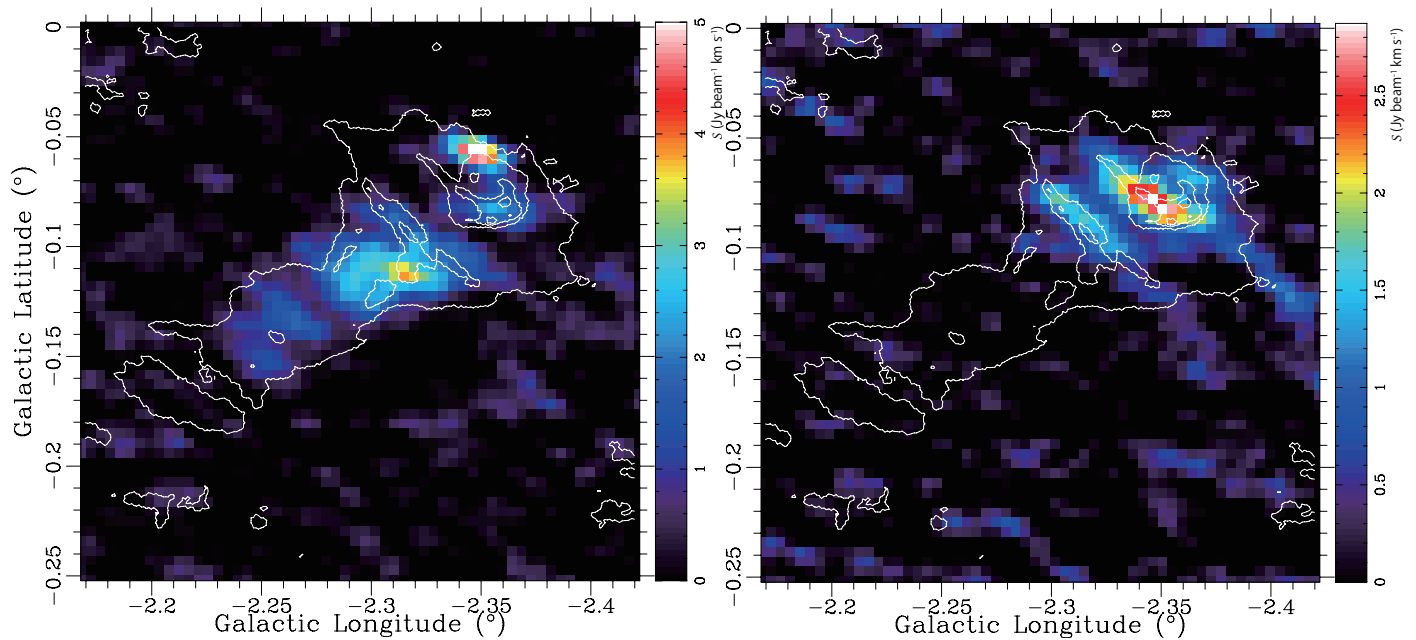


図 2: (左) OH 1720 MHz 輝線 $-15 -10 \text{ km s}^{-1}$ の範囲での積分強度図。(右) OH 1720 MHz 輝線 $0 +5 \text{ km s}^{-1}$ の範囲での積分強度図。等高線は 20 cm 電波連続波の強度分布を示している。

- ショックが起こる前に存在していた星間物質の状態が “head” と “tail” で大きく異なっており、ショック後の状態の違いが生じたというもの
- 現在、有力視されている “head” と “tail” の中間付近に活動中心を持つ双極構造ではなく、“head” と “tail” で別々の現象が起きているとするもの

などが考えられる。現在得られているデータからはシナリオをさらに絞り込むことはできないが、現在有力視されている解釈を積極的に指示するものではないことがわかった。

5 Conclusion

- 現在、Tornado nebula の形成シナリオとして有力であるのは、“head” と “tail” の中間付近に存在する活動中心からのジェットによって形成された、とするものである。この時、ジェットによって掃き集められた星間物質が加熱され、2つのプラズマが生成されたと考えられている。
- 野辺山 45m 望遠鏡によって Tornado nebula 方向の分子輝線の観測を行った結果、“head” 領域では明確な構造が検出されたが、“tail” 領域でははっきりとした構造は認められなかった。
- VLA archive より取得した OH 1720 MHz 輝線データから、空間的に広がった微弱な放射が、 -12 km s^{-1} と $+4 \text{ km s}^{-1}$ の2つの速度領域で検出された。どちらの速度成分も “head” 領域でのみ検出された。
- これらのことから、“head” 領域と “tail” 領域では、検出された放射の種類に明白な違いが見られた。この相違の解釈としては、ショック前の星間物質の性質が異なる可能性や、“head” のみが Tornado に付随している可能性などが考えられる。

Reference

- Angelini, L., & White, N. E. 2003, ApJm 586, L71
Becker, R.H., & Helfand, D.J. 1985, Nature, 313, 115

- Burton, M. G., Lazendic, J. S., Yusef-Zadeh, F., & Wardle, M. 2004, MNRAS, 348, 638
Caswell, J. L., Kesteven, M. J., Bedding, T. R., & Turtle, A. J., 1989, Proc. Astron. Soc. Australia, 8, 184
Frail, D. A., Goss, W. M., Reynoso, E. M., Giacani, E. B., Green, A. J., & Otrupcek, R., 1996, AJ, 111, 1651
Helfand D. J., & Becker, R. H. 1985, Nature, 313, 118
Hewitt, J. W., Yusef-Zadeh, F., & Wardle, M. 2008, ApJ, 683, 189
Manchester, R. N., 1987, A&A, 171, 205
Mills, B. Y., Slee, O. B., & Hill, E. R. 1960, Aust. J. Phys., 13, 676
Sawada, M., Tsuru, T., Koyama, K., & Oka, T., 2011, PASJ, 63, 849
Shaver, P.A., Salter, C. J., Patnaik, A. R., van Gorkom, J. H., & Hunt, G. C., 1985, Nature, 313, 113
Shaver, P. A., Pottasch, S. R., Salter, C. J. Patnaik, A. R., van Gorkom, J. H. & Hunt, G. C., 1985, A&A, 147, L23
Shull, J. M., Fesen, R. A., & Saken, J. M. 1989, ApJ, 346, 860
Turner, B. E. 1982, ApJ, 255, L33
Yamamoto, H., Ito, S., Ishigami, S., Fujishita, M., Kawase, T., Kawamura, A., Mizuno, N., Onishi, T., Mizuno, A., McClure-Griffiths, N. M., & Fukui, Y., 2008, PASJ, 60, 715
Yusef-Zadeh, F., Goss, W. M., Roberts D. A., Robinson, B., & Frail, D. A., 1999, ApJ, 527, 172