

白鳥座 X-3のミリ波バースト Millimeter Outburst of Cygnus X-3

堤 貴 弘

〈国立天文台野辺山宇宙電波観測所 〒384-13 長野県南佐久郡南牧村野辺山〉
e-mail: tsutsumi@nro.nao.ac.jp

1972年に巨大なバースト (outburst) を起こして以来、白鳥座 X-3 は銀河系内の特異な電波源として、様々な研究が行われてきた。しかし、このフレア現象がどのようにして起こるのかまだ良く分かっていない。最近、我々は、野辺山ミリ波干渉計を用い、これまでの観測例の少ないミリ波バーストを観測することに成功した。ここでは、その結果について紹介する。

1. はじめに

白鳥座 X-3 (以下 Cyg X-3 とする) は、電波での活動性の高い X 線連星の 1 つである。X 線連星は中性子星もしくはブラックホールと「普通の星」の伴星から成り、伴星からコンパクト天体へ質量降着が起こっている系である。現在、100 数十を越える X 線連星が知られているが、電波放射が検出されているものはその 20% ほどに過ぎない。しかし、このクラスに分類される天体には、Cyg X-3 のほか、電波ジェットを持つ SS 433 や、見かけのジェットの運動が光速を越える現象 (超光速運動) がみられマイクロ・クエーサーとも呼ばれている GRS 1915 + 105 や GRO 1655 - 40 などがある。さながら活動銀河中心核 (AGN) のミニチュア版といえるこれらの系内天体は、AGN で起こっている高エネルギー現象を理解する上での「ロゼッタストーン」となるのではないかと注目されてきた。

白鳥座の X 線源というと、読者はまず、ブラックホール候補天体である Cyg X-1 を思い浮かべるかもしれないが、Cyg X-3 もその非常に高い活動性により、様々な波長で変光の様子が調べられてきた「有名天体」の 1 つである。特に、1972 年に電波天文学史上でも希にみる巨大な電波バーストがこの天体から観測されて以来、センチ波を中心に、定

常的なモニターが現在でも行われている。バーストのような急激かつ高輝度の現象は、高エネルギーに加速された荷電粒子に起因する非熱的放射 (シンクロトロン放射) によるものだと一般に考えられている。しかしながら、この天体の実体についても、バーストの仕組みについても、まだ良く分かっていないことも多い。特にセンチ波に比べミリ波帯での変動については、観測例はこれまで非常にすくなかった。しかし、ミリ波帯の非熱的放射は、より高エネルギーの電子に起因することを考えると、バーストの起源や、赤外線や X 線との関係をさぐる上で、大切な情報となる。最近、広帯域化された野辺山ミリ波干渉計を用いて、我々は今年 5 月、Cyg X-3 の短い時間スケールのミリ波バーストを観測した。

2. 1972 年の電波バーストの発見

1972 年 9 月 2 日晚、トロント大の Phil Gregory らは、白鳥座にある比較的弱い電波が検出されていた X 線源にカナダの Algonquin 電波天文台の 46 m 望遠鏡を向けていた。周波数 10.5 GHz で観測していた彼らは、この日、この天体が以前にない異常な明るさであることにすぐ気づいた。なんと数日前のフラックス密度の約 1000 倍も明るかったのだ。彼等はすぐにアメリカ国立電波天文台 (NRAO) に

連絡し、NRAOでも2.7 GHzと8 GHzでフレアアップが確認された。このニュースを受けて世界各地の望遠鏡がCyg X-3に向けられ、翌朝までには408 MHzから90 GHzまでのバーストのフラックスの減少の様子が得られた。この結果は、当時、電波天文コミュニティーを大いに沸かせ、Gregoryらによるバースト発見の論文¹⁾を筆頭に翌月のNature, Nature Physical Science等に21編の論文が掲載されるという、まさに論文のバースト(?)をも引き起こした。10.5 GHzで記録されたこのバーストのピーク値は、20 Jy ($1 \text{ Jy} = 10^{26} \text{ W/m}^2\text{Hz}$)を越えた。こうしたバーストは、輝度温度の高い現象であること、スペクトル変動の急激な変化や偏波も観測されたことから、シンクロトロン放射と解釈するのが自然である。そこで当初、プラズマの雲が膨張していくに従い、べき乗的にフラックスが減っていくvan der Laanモデルでわりとよくこの1972年のバーストは説明できることが指摘されていた。

3. いろいろな波長でみた Cyg X-3

ここでは、これまでこの天体について様々な波長の観測からどのようなことが分かっているか、かいつまんで述べよう。

Cyg X-3の光学観測では、対応天体は見つからない。しかし、波長21 cmで、Cyg X-3を背景にして銀河系内の中性水素(HI)ガスによる吸収線が受かり、それぞれの速度の異なる吸収線を同方向のHI輝線のプロファイルと比較することにより、この天体までの距離は、8.5~10 kpc程度と推測されている。X線での活動性も当然高く、エディントン限界に近い $10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ という明るさで輝いている。また、超高エネルギーガンマ線(10^{14} 電子ボルト以上のエネルギーを持つ)が観測されたという報告もある²⁾。近赤外とX線で4.8時間の周期的な変光がみられることなどから、これがこの連星系の軌道周期だと考えられている。以前は伴星は低質量の星であると思われてきた。しかし、最

近になって、近赤外線の分光観測でウルフ・レイエ星の特徴であるヘリウム輝線が見つかっており³⁾、現在では伴星は大質量星と考えられている。

電波領域では、1972年のバーストにはおよばないが、その後も、毎年1,2度は、数Jyを越えるようなバーストが起き、1 Jy以下の小さなバーストはもっと頻繁に起こっている。現在、アメリカ、グリーンバンクにあるGreen Bank Interferometer (GBI)が2.3と8 GHzで、イギリスのRyle Telescope (RT)が15 GHzで、定常的にモニター観測を行っている。また一方で、超長基線干渉法(VLBI)を用いた観測も幾つか行われており、光速の30%ほどのジェットが存在が確認されている⁴⁾。最近の例では、アメリカのVLBIアレイ、VLBAによるスナップショット観測で、まだ完全に分解はしていないものの、フレアアップしている時の天体のイメージが1日のうちに刻一刻と変化している様子が捕えられている。このことから、ジェット成分が超光速運動をしていると解釈されている⁵⁾。

4. ミリ波でみた Cyg X-3

4.1 干渉計によるミリ波バーストの観測

観測は、1997年5月17日から20日(JST)にかけて、野辺山ミリ波干渉計(以降、ミリ波干渉計とする)の新システムにより100 GHz帯で行った。我々はこれ以前にも、Cyg X-3の観測をミリ波干渉計を用いて行ったことがあるが、100 mJyほどで検出されるかそれ以下で上限値が与えられる程度の明るさで、これまでフレア活動を捕えることはできなかった。フラックスをモニターするには、より感度が良く安定したシステムが要求される。野辺山ミリ波干渉計では、超広帯域分光相関器を初めとする観測システムの大きなアップグレードがあり、各サイドバンドでバンド幅1 GHzという今までの3倍近い観測帯域を得ることが可能になった。このため連続波の感度が向上し、

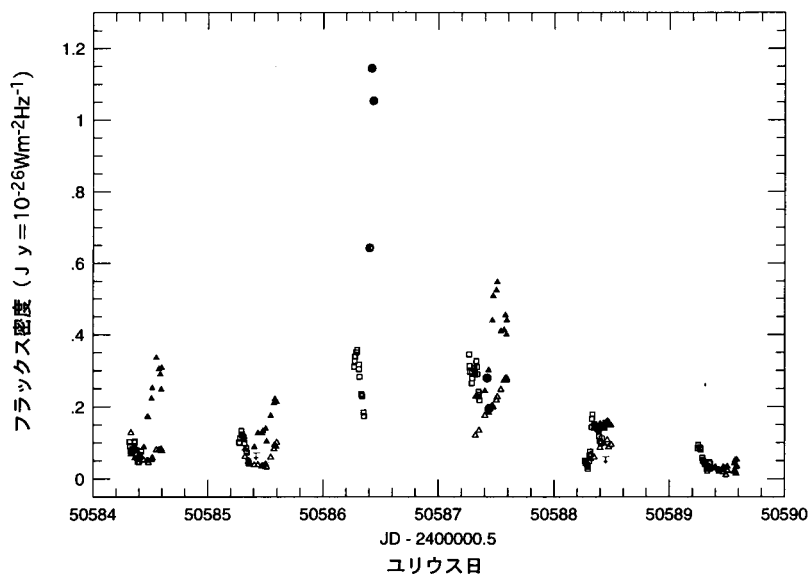


図1 1997年5月のミリ波バースト。●—162 GHz 帯のフラックス密度，MJD = 50585.4 と 50588.4 付近の↓は 102 GHz での上限値。□は Ryle Telescope 15 GHz，▲は GBI 8.3 GHz，△は GBI 2.3 GHz のデータ。ミリ波バーストは，MJD = 50586.4 付近（5月18日 6:00 JST）にピークが見られた。

こうしたモニター観測でもより力を発揮するようになった。またダブルサイドバンド (DSB) の両バンドのデータを得ることが可能になったため，今回の観測でも 90 GHz と 102 GHz のデータが同時に得られた。そうした折り，ミリ波のバーストに偶然にも遭遇したのである。

その観測結果が図1に示してある。各データ点は，約15分のデータからイメージを描き，そこから求めたピークフラックス密度の値である。我々の 102 GHz 帯のデータとともに GBI, RT のセンチ波のデータをプロットしてある。5月17日 (MJD = 50585) にはミリ波エミッションは検出されず 100 mJy 程度の上限值が推定されているが，18日になって急激にフラックスが増えたことが分かる。それもほんの30分足らずで 0.7 Jy レベルから 1.2 Jy へと2倍近く増光している。19日には，200 mJy 程度までフラックスが落ちて，さらにその翌日には，上限値を推定できるのみで，センチ波のバーストで通常

みられるような指数関数的な減光の様子がうかがえる。ミリ波での活動がない時の平均的フラックスは 100 mJy 程度なので，1日以内に10倍以上増光したことになる。求めたフラックスの絶対精度は，およそ20%であるが，相対的な精度は5～10%ほどと推定される。

スケジュール通りなら5月18日も同じ時間帯でグリーンバンクが観測していたはずなのだが，残念なことに，この時に限ってハードのトラブルで観測できなかったそうである。したがってミリ波バーストの時のセンチ波の情報は，前後のデータから推測するしかないが，バースト直前（1時間ほど前）の15 GHz データをみてもセンチ波でのバーストの形跡はなく，むしろフラックスが下がっているようである。

過去のミリ波バーストの記録を振り返ってみよう。実は，センチ波ではこれまでかなり密な観測がなされその解析結果がいろいろ報告されているが，

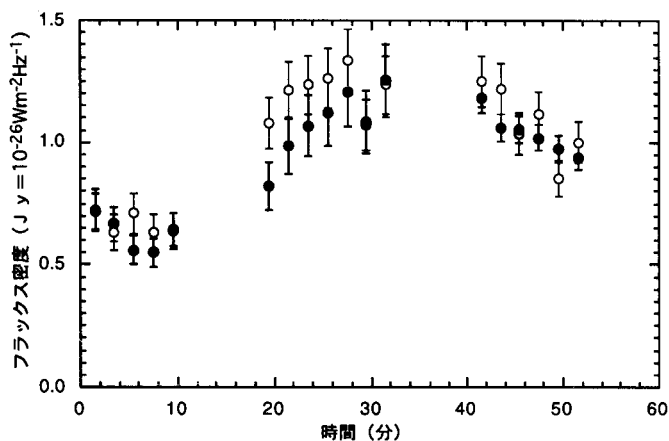


図2 白鳥座 X-3 の5月18日ミリ波バーストの時間変化. ●—90 GHz, ○—102 GHz の2分ごとに積分したデータ. 観測スタート時を0分とした. 各シーケンスの平均的な値が図1のバースト時の3点に対応する.

ミリ波帯に関しては、1972年の大バーストの時の観測と、Baarsらによる1985年 IRAM 30 m鏡による観測⁹⁾の報告の2編の論文しか発表されていない。1972年のミリ波のデータはセンチ波での大バーストのデータと時間的に合致している。一方、1985年のミリ波バーストは、1.3 mmと3.3 mmで観測され、ピーク時には3 mmで3 Jyにまでフレアアップしたが、このピークに対応するセンチ波ピークはなかったという結果であった。この点は今回の我々の結果と似ている。しかし、Baarsらは、センチ波の活動が活発になりバーストが起こっている時期に観測したが、我々の観測では、センチ波では2カ月近く静かな時期が続いていた。また今回のバーストは1時間足らずの非常に短いタイムスケールという点でもBaarsらの観測したミリ波バーストと多少異なるようである。これだけのデータではまだ、断定できないが、ミリ波のバーストには、センチ波と同期して起こるものとバースト時間の短いセンチ波でみえないものとの2つのタイプがあるのかもしれない。

4.2 ミリ波スペクトル

ところで、干渉計での像合成観測を行う場合、観測天体は観測中、時間変化しないというのが大

前提にある。したがって短い時間変動をしている天体を像合成の手法をもちいてそのままマップイメージを描こうとすると質を低下させる。そこで、そうしたことを考慮し、より細かく時間軸方向にデータを区切って(2分毎)各時点でのイメージを描いて求めたフラックス変化を表したものが図2である。この図では、フラックスが最も強かった18日の時間変動の様子を両サイドバンド(102 GHzと90 GHz)での各々のフラックスで表示した。細かなガタガタは主に大気のゆらぎによるものと思われるが、大局的な変光曲線はよく分かる。

この図で90 GHzと102 GHzデータを比較してみると、非常に面白いことが分かる。2つめのシーケンスのバーストの立ち上がり部分で90 GHzのフラックスが低めになっている。この2つめのシーケンスの前半と後半でそれぞれ平均的な90/102 GHzのフラックス比からスペクトル指数(傾き)を求めてみる。フラックス密度は周波数のべき乗(フラックス密度 \propto 周波数 $^{\alpha}$)に比例すると仮定する。すると後半はほぼ1になるのに対し前半は α は+1.7と急な正の傾きになっていることが分かった。

このように活動性の高いCyg X-3であるが、活動がほとんど見られない期間もある。このような

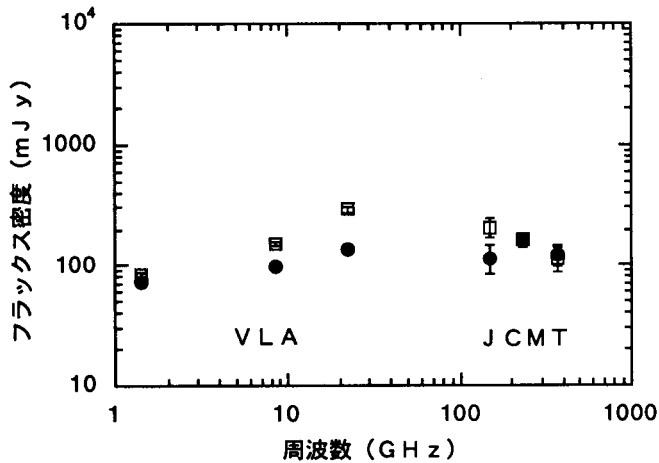


図3 非活動期の白鳥座 X-3 のセンチ波からサブミリ波までのスペクトル。VLA と JCMT の同時観測によって得られた、2 エポック (2 日間) のデータ。

(Tsumi et al 1996 より)

期間、センチ波帯では、100 mJy 程度である。より高い周波数ではどうであろう。とくに活動期でもないのに、光学的に薄いシンクロトン放射を見ているのだとすると、そのエネルギースペクトルはより高い周波数では、フラックスが落ちていくはずである。我々はこうした非活動期のセンチ波、サブミリ波の同時観測を VLA と JCMT をもちいて過去におこなったことがある⁷⁾。その結果、意外にもスペクトルは非常にフラットであるということが分かった (図3)。従って非活動期でもミリ波帯のエミッションは、センチ波から推測されるフラックスより大きいという傾向がみられる。

5. バーストのメカニズム

センチ波のバーストについては、様々なモデルが、考えられてきた。第ゼロ次近似的には、van der Laan モデルで説明できることは先に述べた。しかし、より詳細に見ていくと、多周波のバーストのピーク値を同時にフィットすることができないなど、いくつか問題点があった。その後、シンクロトン放射の減衰、断熱的膨張、free-free プロセスによる吸収や、逆コンプトン散乱による損失等を考慮した様々なモデルが提唱された。

例えば、Marti ら⁸⁾は、電離した熱的なガス (プラズマ) の混ざった高エネルギーに加速された荷電粒子がジェットに放出されるモデルで 72 年の巨大バーストの 408 MHz から 90 GHz のデータの変光曲線を再現させた。

今回観測されたミリ波バーストのスペクトルはバーストの立ち上がりの時に +1.7 程度の急な正の傾きがあるので、センチ波帯はすべて光学的に厚い状況を考えなければならない。センチ波バーストの立ち上がりの時でも、こうした急な傾きのスペクトルは見られるが、その折れ曲がり、10 GHz あたりにあり、それ以上高い周波数では、光学的に薄くなると思われていた。今回のミリ波バーストはセンチ波で年に 1, 2 度見られる数 Jy 以上のフレアに比べれば小さいが、エネルギーに換算すれば、センチ波の 1972 年のバーストに匹敵する。もし指数関数的な減光を仮定すると時定数は 1 時間ほどになり、センチ波の大きなバーストよりもずっと短い。またバーストの時間から求められる電波放射領域の大きさの上限値は、数 AU であり、非常に小さい領域からのエミッションであることがわかる。ウルフ・ライエ星である伴星からは非常に密度の高い星風が吹いているのであれば、この星風による

free-free 吸収により低周波数の光学的厚み上げるのに寄与しているのかもしれない。Fender ら⁹⁾は非活動期のミリ波サブミリ波のスペクトルの解釈に、ミリ波では光学的に薄くセンチ波では厚い星風への断続的な荷電粒子の放出というモデルを用いた。また、X線の活動期と電波のバーストの相関があるのは、質量降着率の増加によるもので、その降着率の増加は、星風の密度の変化と関係していることも指摘されている¹⁰⁾。その他のバーストの起源としては、ジェットの中のショックによるものも考えられる。しかし、センチ波バーストを説明するモデルで今回のミリ波バーストを説明するの難しい。いずれにせよ、センチ波ではみえないジェットの根元付近での現象がミリ波ではみえてきているのではないだろうか。

6. まとめ

野辺山ミリ波干渉計の新バックエンド、超広帯域相関器が97年シーズンより稼働を始めたにことより高感度でしかも、両サイドバンドのデータを利用した2周波同時観測が可能になった。今回、この新システムでCygn-3のミリ波バーストを検出し、バーストの立ち上がり期のスペクトルが非常に急な正の傾きのスペクトルになるということが新たに分かった。こうしたミリ波バーストがセンチ波バーストとどう関係しているかを調べるためには、今後さらに多周波での同時観測を続けていくことが必要だろう。

本研究では、イギリス、MRAOのGuy Pooley氏に未発表の15 GHzのデータを提供していただいた。Green Bank InterferometerはNASAによって支援されNRAOによって運営されており、今回使ったデータは、GBI WWWサイトに公開されているものを利用した。

参考文献

- 1) Gregory P.C., et al., 1972, *Nature* 239, 440
- 2) 例えば, Lloyd-Evans J., et al., 1983, *Nature* 305, 784
- 3) van Kerkwijk M.H., et al., 1992, *Nature* 355, 703
- 4) 例えば, Spencer R.E., Swinney R.W., Johnston K.J., Hjellming R.M., 1986, *ApJ* 309, 694
- 5) Newell S.J., Spencer R.E., Garrett M.A., 1997, *Vistas in Astronomy* 41, 57
- 6) Baars J.W.M., Altenhoff W. J., Hein H., Steppe H., 1986, *Nature* 324, 39
- 7) Tsutsumi T, Peracaula M., Taylor A.R., 1996, in *Radio Emission from the Stars and the Sun*, ASP 93, 258
- 8) Marti J., Paredes J.M., Estalella R., 1992, *A&A*, 258, 309
- 9) Fender R.P., et al., 1995, *MNRAS*, 274, 633
- 10) Kitamoto S., et al., 1994, *A&A*, 281, L85

Millimeter Outburst of Cygnus X-3

Takahiro TSUTSUMI

Nobeyama Radio Observatory, NAOJ

Abstract: Cygnus X-3, a well-known exotic galactic radio source, has been studied at many decades of electromagnetic spectrum since the discovery of a giant radio outburst in 1972. Yet the nature of the object and a mechanism of these flares are not well understood. Here we present recent detection of a burst at millimeter wavelengths using Nobeyama Millimeter Array. Analysis of behavior of bursts at millimeter wavelengths which has not been explored in detailed in the past, may give important clues for understanding of the phenomena.