

小特集

宇宙ジェットの物理

3. 近接連星系ジェット

小 谷 太 郎

(NASA / Goddard Space Flight Center)

High-Energy Jet from Galactic Binary Systems

KOTANI Taro

NASA/Goddard Space Flight Center, MD20771, USA

(Received 21 February 2000)

Abstract

Galactic jet sources are enigmatic astrophysical objects containing a relativistic high-energy jet. SS433, the classic jet, has a lasting jet precessing with a period of 162.5 days. Transient jets, such as GRS 1915+105 and GRO J1655-40, eject jet blobs of $0.9c$ which show superluminal motion. We have observed Galactic jets with X-ray astronomy satellite ASCA, and revealed these jets' violent nature driven by a super-Eddington accretion.

Keywords:

X-ray binary, jet, SS 433, GRS 1915+105, GROJ 1655-40

3.1 近接連星系ジェットとは

近接連星系ジェットとは連星系から高温プラズマが相対論的速度で噴射される現象、あるいはそのような天体のことで、我々の銀河系内に10個くらいしか見つからない。Fig. 1 に示すような、ブラックホールと普通の(でない場合もある)恒星との連星系で、ジェット連星系、(銀河)系内ジェット天体、jet source, Galactic jet などとも呼ばれる。ジェット連星系に限らず一般にX線新星では、恒星(伴星)からガスがラグランジュ点(用語解説参照)を超えてブラックホール側の重力井戸にあふれている(Roche-lobe overflow)。ガスは角運動量を持っているので、そのままずっとブラックホールに落ちることはできず、まわりをしばらくぐるぐる回る。この渦を降着円盤(accretion disk)という。降着円盤の内縁、ブラックホール近傍でなにが起きているのか実は誰も知らないのだが、なんらかの機構が降着物質の重力エネルギーを運動エネルギーに変換し、物質の一部が外に吐き戻される。このときプラズマの温度はkeV以上、速

度は光速の1/4から0.9倍に達する。射出質量を測定するのは難しいが、SS 433という系では $10^{17} \text{ kg s}^{-1}$ という数値が出ている(Kotani [1])。連星間距離は 10^{10} m くらいで地球・太陽間の1/10程度だが、ジェットの長さは数百光年(10^{18} m)にも達する(ものもある)。

これまでに発見された数少ない近接連星系ジェットをTable 1 に示す。このような表はここ数年、何度かつくる機会があったが、そのたびにメンバが変わる。ここでは「電波観測でジェット物質の運動が確認されている天体」をジェット天体としたが、球対称な運動をジェットと誤認している可能性もあり、ジェット天体の同定は難しい。

近接連星系ジェットは数が少ないうえにどれも個性的で分類しにくいのだが、とりあえずSS 433型とトランジェント(transient)型というカテゴリを作ってみた。あまり一般的に用いられる分類ではない。SS 433は連続的なジェット噴射をする。1998年に発見されたばかりのXTE J1748-288 はSS 433に似た天体かもしれない。トラ

author's e-mail: kotani@milkyway.gsfc.nasa.gov

ンジェント天体の GRS 1915+105 と GRO J1655-40 はときおり発作的にジェット噴射する点と、ジェットが超光速運動を示す点が共通している。ジオメトリが似ているため、よけいに似かよって見えるのかもしれない。CI Cam (「シー・アイ・カム」と読む；麒麟座の122番目の変光星の意) は白色矮星であり、Fig. 1 に示したようなジェット機構ではなく、表層が爆発で吹き飛ばされたのが観測されたという説もある (Parmer *et al.* [8])。Cyg X

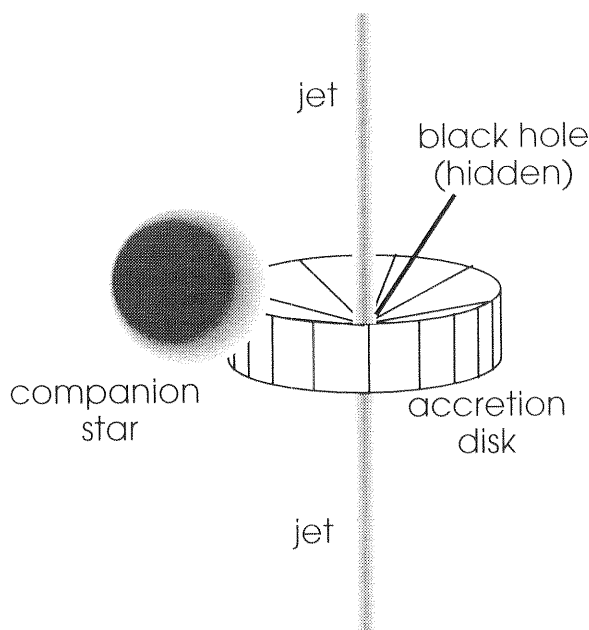


Fig. 1 Schematic view of a galactic jet source.

-3 (「シグナス・エックス・スリー」；白鳥座の3番目のX線天体) の噴射はジェット状でなく球対称だともいわれている。Cir X-1 (「サーチナス・エックス・ワン」；コンパス座の1番目のX線天体) はおそらく中性子星と低質量星との連星系 (low-mass X-ray binary) で、軌道周期毎に近日点で明るく輝くアウトバースト (outburst) を起こす。このアウトバースト時に電波でジェット状の構造が観測されたという報告があるのでリストに入れた (Stewart *et al.* [10])。1E 1740.7-2942 (Mirabel *et al.* [11])、GRS 1758-258 (Rodríguez *et al.* [12])、GT 2318+620 (Taylor *et al.* [13]) はそれぞれジェットのような細長い構造が電波観測で見つがっているが、それが時間変化しているという報告はまだないので、ジェット天体確定とはいえない。GT 2318+620 は銀河系外天体の可能性もある。

SS 433 が1978年に発見されてから長い間、近接連星系ジェットはほんの1、2個の変わり種だった。しかし1994年にGRS 1915+105が発見され、以来このリストは急激に成長しつつある。これは、X線新星 (X-ray transient; X-ray nova) を発生直後に電波観測する重要性が認識されてきたからである。X線新星というのは、普段は暗いが何年かに一度質量降着率が増えて、わっとX線アウトバーストを起こす連星系である。おおよそFig. 1のような構造をしているが、ジェット噴射をするとは限らないし、ブラックホールでなく中性子星のものもある。X線新星は数十個見つがっていて、毎年2、3個新しいものがX線で明るくなって発見されている。このX線新星を

Table 1 Galactic jet sources.

SS433 Type	
SS433	0.26 c, 162.5-days precession. (Margon [2]; Kotani [1])
XTE J1748-288	0.93 c? (Rupen <i>et al.</i> [3]; Kotani <i>et al.</i> [4])
Transient Type	
GRO J1655-40	0.9 c, super-luminal motion (Hjellming & Rupen [5]).
GRS 1915+105	0.9 c, super-luminal motion (Mirabel & Rodríguez [6].
Other	
CI Cam	0.15 c? (Hjellming & Mioduszewski [7]). White dwarf? (Parmer <i>et al.</i> [8]).
Cyg X-3	0.3 c, LMXB. Transient. (Schalinski <i>et al.</i> [9])
Cir X-1	LMXB, periodic outburst. (Stewart <i>et al.</i> [10])
Jet Candidate	
1E 1740.7-2942	Jet-like structure in radio image (Mirabel <i>et al.</i> [11]).
GRS 1758-258	Jet-like structure in radio image (Rodríguez <i>et al.</i> [12]).
GT 2318+620	Jet-like structure in radio image (Taylor <i>et al.</i> [13]). Not a galactic object?

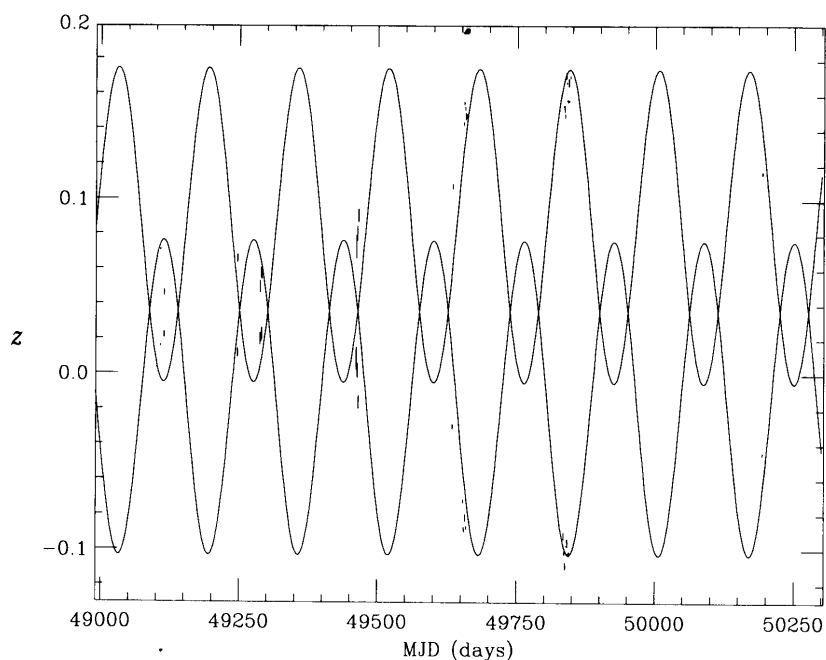


Fig. 2 Precessional variation of Doppler-shift parameters observed with ASCA (Kotani [1]). Doppler-shift parameter z is defined as $1/(1+z) = (\text{observed energy})/(\text{rest-frame energy})$. The prediction of the five-parameter kinematic model (Margon and Anderson [17]) is plotted.

活動開始直後に電波観測すると、かなりの確率でジェット物質の射出がみられるのである。1998年に発見された XTE J1748-288 も CI Cam も、X線アウトバースト発生後数日以内に電波で観測され、ジェットが確認された。ひょっとしたらX線新星の1/5～1/3程度はジェット天体なのかもしれない。

なお以上のような議論は近接連星系ジェットのみについて成り立ち、もう一つの高エネルギージェットのグループ「ジェット銀河」では事情がだいぶ異なる。我々の銀河系の外に目を向ければジェット噴射している銀河は珍しくなく、高エネルギージェット天体といえば普通はジェット銀河をさす。ジェット銀河は近接連星系ジェットにくらべてスケールもエネルギーも桁違いに上だが、超光速運動(super-luminal motion)、細く絞られたジェット流、歳差運動など類似点も多い。これらX線連星系から活動銀河核まで何桁・何階層にもわたるジェット現象には、はたして共通のメカニズムが働いているのだろうか。だとすればゲテモノに属する近接連星系ジェットの研究は、実は普遍的で基本的な現象である宇宙ジェットの一端をおさえる意義がある。また近接連星系ジェットは近くにあつて明るく見え、さらにスケールが小さいぶん近接連星系ジェットの変動のタイムスケールは短く、ジェット現象の理解に適したターゲットといえる。

3.2 SS433型

SS 433 (Stephenson & Sanduleak カタログの433番目の天体) は、もっとも有名な近接連星系ジェットである。観測史上絶えたことのない安定したジェット噴射、162.5日周期で歳差するジェット軸などの特徴を持ち、理論的にも観測的にも精力的に研究が進められてきた。しかし(ほかの近接連星系ジェットと同様)その性質には不明な点が多い。この天体については Margon [2], Clark [14], Vermeulen [15], 福江 [16] などの優れたレビューが存在するので、そちらもどうぞ。

この天体の特筆すべき点は、ジェット軸の歳差である。水を出すホースを振り回すように、ジェットの方向がくるくる変わるのである。ジェット物質は宇宙空間に半頂角 20° の壮大な螺旋構造を描いて飛んでいく。このジェットを分光観測すると、輝線がドップラー偏移して分裂してあらわれ、ジェットの方向が変わるにつれてスペクトラム上を動きまわる。Fig. 2 にX線から求めたドップラー偏移パラメータ z を示す。こちら向きのジェットからの輝線は青方偏移し、あちら向きは赤方偏移する。実線は正弦曲線モデル (Margon and Anderson [17]) によるフィット。両ジェットを足して2で割った値は0にならず、3%ほど赤方偏移しているが、これは相対論的

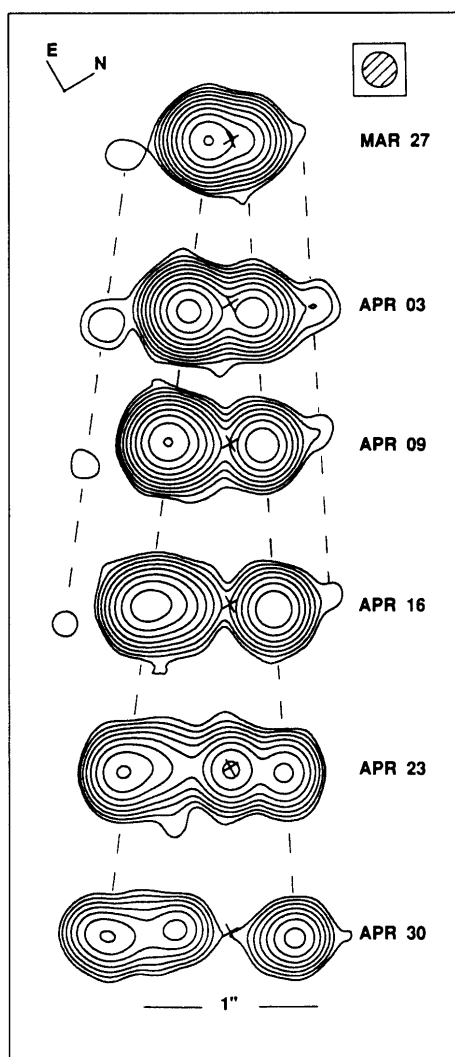


Fig. 3 Pair of jet blobs moving away from GRS 1915+105 (Mirabel and Rodríguez [6]). Radio image taken with the Very Large Array. One arc second (2×10^{15} m) scale is shown at the bottom.

効果による時間の遅れのあらわれである。

我々が行った、X線天文衛星「あすか」によるSS 433の研究について簡単に紹介する。詳細はKotani [1]などをどうぞ。「あすか」は1993年から1998年にかけて31回SS 433を観測し、全歳差位相・軌道位相をサンプルした。X線領域で初めて両ジェットからのドップラー偏移した輝線を検出し、測定した。我々はジェットを多温度プラズマとしてモデル化し、数値計算によってスペクトラムを再現することに成功した。これによりジェットの物理量は温度 20 keV, 初期密度 10^{18} m^{-3} , 射出質量 $10^{-5} M_{\odot} \text{ year}^{-1}$ という莫大なものであることが明らかになった。仮に降着物質の10%がジェットとして吐き戻されているとすると、SS 433の降着量は $10^{-4} M_{\odot} \text{ year}^{-1}$ とい

う、エディントン限界 (Eddington Limit; 用語解説参照) をはるかに超えたものになる。エディントン限界を(時々)超える天体はいくつか見つかっているが、このようにのべつまくなしに超えっぱなしでジェット噴射しっぱなしなのは、この天体だけである。SS 433の物理を説明するためには新しい降着理論が必要だろう。また「あすか」の観測した系の時間変化は、「歳差降着円盤は常にジェット軸に垂直」というモデルで説明できた。これは歳差機構としてslaved disk仮説を支持する。slaved disk仮説とは、まず伴星が歳差運動し、そこから流れ込んだガスが降着円盤の歳差を引き起こし、さらにジェットを歳差させるという説である。SS 433は以前から特異な系と思われていたわけだが、我々の研究によって、その莫大なエネルギー放出など、さらに異常な性質が明らかになった。

3.3 トランジェント型

GRS 1915+105とRO J1655-40の2天体は、ともに発作的に0.9cでジェット噴射すること、ジェットが超光速運動 (super-luminal motion; 用語解説参照) することなど、いくつか共通点がある。超光速運動するジェット物質の電波による観測を Fig. 3に示す。左のジェット物質が超光速運動を示している。

「あすか」によるスペクトラムも似ていて、鉄のK吸収線が見つかった (Ebisawa [18]; Ueda *et al.* [19])。このような吸収線がX線連星系から検出されたのは初めてのことで、ジェット生成機構との関連が疑われる。一方、この2天体のジオメトリ (軌道傾斜 $\sim 20^\circ$) がよく似ていることを考えると、ジェット天体でなくてもX線新星をエッジ・オンで観測するとこのような吸収線が見えるのかもしれない。我々は吸収線の発生源として、トーラス状あるいは円盤状に分布する光電離プラズマを仮定し、光電離の数値計算を行なってこのプラズマのパラメータを決定することに成功した (Kotani *et al.* [20])。GRS 1915+105の場合、プラズマが中心天体から 10^9 m 程度のところに分布しているとする、観測された吸収線を説明することができる。ただし鉄イオンは1,000 keV程度の運動温度をもっていないと、 10^{30} m^{-2} 以上の膨大なプラズマが必要になってしまう。超エディントン降着の起きている系では、(ジェットとは別に) 円盤風として物質の吐き戻しが起きていると考えられている。降着円盤から吹き出す円盤風が吸収線を作っているとする、大きな運動温度などが説明できるので、これら2天体では円盤風が見えているのかもしれない。

Table 2 Specification of jets.

Class	SS433 type	Transient type
Example	SS433	GRS 1915+105, GRO J1655-40
Velocity	0.26 c	0.9 c
Maximum mass outflow	$5 \times 10^{17} \text{ kg s}^{-1}$	$\sim 10^{17} \text{ kg s}^{-1}$
Average mass outflow	$9 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ year}^{-1}$	$\sim 10^{-8} M_{\odot} \text{ year}^{-1}$
Kinetic luminosity	$10^{33} \text{ J s}^{-1}(\text{ave.})$	$10^{34} \text{ J s}^{-1}(\text{max.})$
Lifetime	$10^3 \sim 10^4 \text{ year}$	< hour
Material	Baryon	$e^- e^+?$
Engine	Neutron star? Black hole?	Kerr black hole?
Acceleration mechanism	Radiative?	MHD?

3.4 まとめ

明らかになってきたジェット天体の性質を Table 2 にまとめてみた。あちこちから拾ってきたので互いに矛盾する項目もまじっている。トランジェント型は 0.9 c の亜光速ジェットを発射するので、瞬間的な運動エネルギーは SS 433 型より大きい。しかし SS 433 型は連続運転しているため、平均の射出質量と運動エネルギーは圧倒的に大きい。おそらく我々の銀河系内でもっとも莫大なエネルギー放出をおこなっている。SS 433 の伴星は、このような質量供給をまかなうばかりでなく、slaved disk 仮説の示唆するところによれば歳差を行なう異常な星である。すると、SS 433 の異常な性質は、伴星や軌道といった環境に起因するのかもしれない。一方、トランジェント型の中心天体はカー・ブラックホールという説がある* (Zhang *et al.* [21])。カー・ブラックホールがトランジェント型ジェットの生成に寄与しているならば、トランジェント型をトランジェント型たらしめているのは中心天体といえるだろう。

なんだか宇宙ジェットの統一理論どころか、近接連星系ジェットの生成機構さえばらばらのように思えてきたが、個性的であく強い近接連星系ジェットは研究対象としていっそう魅力的であり、当分目が離せない。

参考文献

- [1] T. Kotani, Doctoral Thesis (University of Tokyo, 1997).
- [2] B. Margon, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **22**, 507 (1984).
- [3] M.P. Rupen, R.M. Hjellming and A.J. Mioduszewski, *IAUC* 6938 (1998).
- [4] T. Kotani, D. Band, A.M. Cherepashchuk, R.M. Hjellming, N. Kawai, M. Matsuoka, M. Namiki, T. Oka, Y. Shirasaki and T. Tsutsumi, *Astron. Nachr.* **320**, 335 (1999).
- [5] R.M. Hjellming and M.P. Rupen, *Nature*. **375**, 464 (1995).
- [6] I.F. Mirabel and L.F. Rodríguez, *Nature*. **371**, 46 (1994).
- [7] R.M. Hjellming and A.J. Mioduszewski, *IAUC* 6872 (1998).
- [8] Parmer *et al.*, 2000, *Astron. Astrophys.*, *in press*, astro-ph/0005565.
- [9] C.J. Schalinski, K.J. Johnston, A. Witzel, R.E. Spencer, R. Fiedler, E. Waltman, G.G. Pooley, R. Hjellming and L.A. Molnar, *Astrophys. J.* **447**, 752 (1995).
- [10] R.T. Stewart, J.L. Caswell, R.F. Haynes and G.J. Nelson, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **261**, 593 (1993).
- [11] I.F. Mirabel, L.F. Rodríguez, B. Cordier, J. Paul and F. Lebrun, *Nature*. **358**, 215 (1992).
- [12] L.F. Rodríguez, I.F. Mirabel and J. Martí, *Astrophys. J.* **401**, L15 (1992).
- [13] A.R. Taylor, P.C. Gregory, N. Duric and T. Tsutsumi, *Nature*. **351**, 547 (1991).
- [14] D.H. Clark, *The Quest for SS433* (Writers House, 1985); D.H. クラーク:SS433 伝説 (恒星社, 1988).
- [15] R.C. Vermeulen, Ph.D. Thesis (University of Leiden, 1989).
- [16] 福江 純: 宇宙ジェット (学習研究社, 1993).
- [17] B. Margon and S.F. Anderson, *Astrophys. J.* **347**, 448

* ブラックホールというのはアインシュタインの重力理論の数学的解で、そのうち角運動量を持つものをカー・ブラックホールとかカー解などと呼ぶ。世の中のブラックホールで角運動量が厳密に 0 のものは珍しいだろうからトランジェント型の中心天体がカー・ブラックホールなのはあたりまえだが、角運動量が大きくてブラックホールの持ちうる上限に近いという意味で「中心天体はカー・ブラックホール」という。

- (1989).
- [18] K. Ebisawa, *X-ray Imaging and Spectroscopy of Cosmic Hot Plasmas*, ed. F. Makino, K. Mitsuda (Universal Academy Press, Tokyo, 1996).
 - [19] Y. Ueda, H. Inoue, Y. Tanaka, K. Ebisawa, F. Nagase, T. Kotani and N. Gehrels, *Astrophys. J.* **492**, **782** (1998).
 - [20] T. Kotani, K. Ebisawa, T. Dotani, H. Inoue, F. Nagase and Y. Ueda, *submitted to Astrophys. J.* (2000).
 - [21] S.N. Zhang, K. Ebisawa, R. Sunyaev, Y. Ueda, B.A. Harmon, S. Sazonov, G.J. Fishman and H. Inoue, *Astrophys. J.* **479**, 381 (1997).