

小特集

宇宙ジェットの物理

Physics of Cosmic Jets

(Received 8 May 2000)

1. はじめに

19世紀までは、人類にとって宇宙・天体は静かで永遠不変のものであった。ところが20世紀に入って、天体物理学が発展すると、宇宙が膨張していることや星のエネルギー源（水素核融合反応）が有限であることなどがわかり、宇宙や天体は、まるで生物のように誕生し、進化し、ついには死を迎えるものである、という新しい宇宙観が生まれた。この進化論的宇宙観は、20世紀後半になると、可視光以外の波長域における天文学の発展によってますます拡大する。すなわち電波天文学、X線天文学、赤外線天文学などの発展によって、クェーサー（活動銀河核）、X線星、パルサーなどの活動天体が発見され、宇宙は爆発・活動している天体に満ち満ちていることが判明したのである。きわめつけは、もちろん、宇宙そのものが大爆発で始まったというビッグバン宇宙の発見だ。ここに至って、19世紀の静的宇宙観は完全に粉碎され、「宇宙・天体は進化し活動し、ときには激しく爆発するものである」というダイナミック宇宙観が成立した[1, 2]。

本小特集が扱う「宇宙ジェット」は、まさに、その「ダイナミック宇宙」の象徴ともいうべき天体現象である。「ジェット」とは、細長く絞られた高速のガス流のことであるが、そのような奇妙で不思議なジェットが、活動銀河中心核、原始星、近接連星系など、宇宙のあらゆるところで近年続々と発見された（Table 1 参照）。これらのジェットは、総称して宇宙ジェット（cosmic jet または astrophysical jet）と呼ばれる（ついでながら、本小特集で取り上げないが、わが太陽の彩層やコロナもジェットだらけであることが最近わかり、総称して「太陽ジェット」と呼ばれている）。

活動銀河核から噴出するジェット（Fig. 1）は、最大のもので数百万光年の長さを持ち、単一の天体としては宇宙最大級の天体である。ジェットの速度は、なんと光速の99%以上にまで達する。ジェットを産み出した活動銀河核は、また、宇宙で最も激しい天体でもある（もっともそのNo.1の地位は、最近、 γ 線バーストによっておびやかされているが）。活動銀河核とそこから噴出するジェ

ットは、宇宙最大の謎であると言っても過言ではないだろう。しかも、このような活動銀河核は、どうやら、生まれたばかりの若い銀河に特有の現象らしいことがわかってきた。その意味で、活動銀河核ジェットは、銀河の形成・進化を解明する上でも重要な現象であるといえる。

さらに興味深いことに、サイズ（数光年以下）や速度（数百 km/s）はずっと小さいものの、活動銀河核ジェットにそっくりのジェットが星形成領域で続々と見つかった（Fig. 2）。これが原始星ジェットである。原始星は文字どおり原始の星、つまり、生まれたばかりの若い星である。原始星ジェットの全エネルギーや質量は、小さいとはいっても、現在の太陽（中年の恒星）が放出しているエネルギー・質量をはるかに凌駕している。さらに近年、原始星で太陽フレアの1万倍以上のエネルギーをもつ1億度の超高温フレアが起こっていることも発見された。どうやら星はとんでもない激しい爆発（フレア）やジェットを伴いながら生まれるらしい。原始星のような若い星が活動的であるのは、活動銀河のような若い銀河が活動的であるのと似ており、大変興味深い。おそらく共通の物理があるに違いない。

一方、活動銀河核ジェットにそっくりのジェットは近接連星系でも見つかった。これらのジェットのサイズは小さい（数百光年以下）が、速度は活動銀河核ジェットと同様に光速の90%以上にまで加速されているものがある。近接連星系とは、2つの星が重力のために近接して引き合いお互いの周りを回っているシステムである。若い天体ではないが、片方の星からもう片方の星へガスが流れ落ちると活動的になる。流れ落ちたガスは角運動量があるために回転円盤を作り、回転しながらゆっくりと中心天体に落ち込んでいく。このような回転ガス円盤は降着円盤（accretion disk）と呼ばれており、非常に活動的であることが知られている。ジェットは降着円盤の内縁付近（中心天体の近く）から噴出していると考えられるが、まだ見た人はいない。ところで、星形成も銀河形成も自己重力によるガス雲の収縮によって起こり、角運動量によって回転円盤の収縮という形をとる。つまり近接連星系の降着円盤とよく似た構造を持っているのだ。こ

SHIBATA Kazunari, Kwasan Observatory, Kyoto University, Kyoto 607-8471, Japan author's e-mail: shibata@kwasan.kyoto-u.ac.jp

Table 1 宇宙ジェットの典型的物理量(c は光速)[1](ジェットの速度は中心天体の脱出速度と同程度であることに注意)

	原始星ジェット	活動銀河ジェット	近接連星系ジェット (X線星)	(激変星)
ジェットの速度	~ 100 km/s	~ c	~ $0.3c - c$	~ 3000 km/s
中心天体の種類	原始星	ブラックホール	中性子星またはブラックホール	白色わい星
中心天体の質量	~ $1 M_{\odot}$	~ $10^8 M_{\odot}$	~ $1 M_{\odot} - 10 M_{\odot}$	~ $1 M_{\odot}$
中心天体の半径	~ $3 R_{\odot}$	~ 1 AU	~ 10 km	~ 10^4 km
脱出速度	~ 100 km/s	~ c	~ $0.3c - c$	~ 3000 km/s

注: 1 AU = 太陽-地球間距離 = 1.5×10^{13} cm, $1 M_{\odot}$ = 太陽質量 = 2×10^{33} g, $1 R_{\odot}$ = 太陽半径 = 7×10^{10} cm.

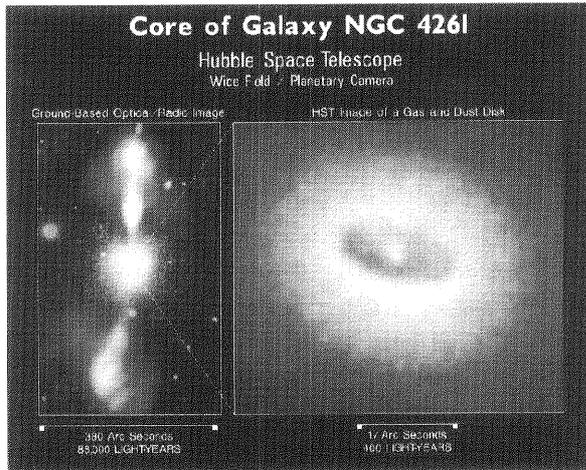


Fig. 1 The left panel shows a jet ejected from radio galaxy NGC 4261 (a kind of active galaxy) observed with radio telescope, overlaid on optical image of NGC 4261. The length of the jet is about 1,000,000 light years. The right panel shows the optical image of the rotating gas torus (accretion disk with a size of 400 light years) in the center of NGC 4261 observed with Hubble telescope.

れがおそらく活動銀河核, 原始星, 近接連星系でよく似たジェットが発生する理由であろう。

さて, 以上の議論からすでに明らかなように, ジェットや降着円盤のエネルギー源は, 重力エネルギーである。ここまでは疑う人はまずいないだろう。問題は解放された重力エネルギーをいかにして, フレアやジェットのエネルギーに変換するか, である。

- ・ジェットを加速する力は, ガス圧なのか, それとも放射圧なのか, あるいは多くの天文学者・宇宙物理学者が毛嫌いする磁場による力なのだろうか?
- ・一方, ジェットを細長く絞り込んでいるメカニズムは, いったい何なのか?
- ・ジェットは中心天体から反対方向の2方向に噴出しているが, このような方向性はどのようにして維持されているのか?
- ・活動銀河核ジェット, 原始星ジェット, 近接連星系ジェットは共通の加速・収束のメカニズムが働いて

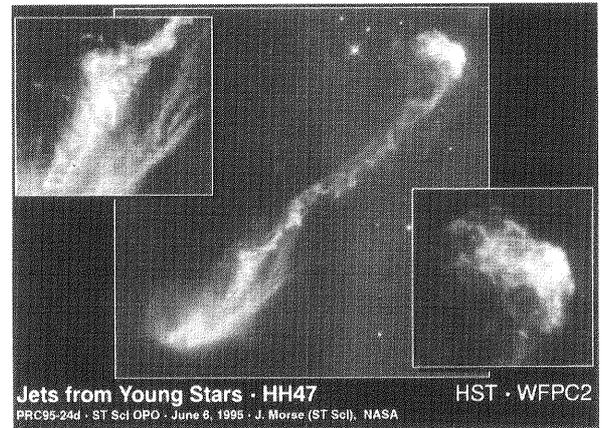


Fig. 2 A jet ejected from protostar observed with Hubble telescope, known as HH 47. The helical structure of the jet is very impressive.

いるのだろうか? それとも, それぞれ別々のメカニズムが働いているのだろうか?

- ・そもそも, ジェットを構成する物質は通常のプラズマなのだろうか? 温度は? 密度は?
- ・さらにまた, ジェットはフレアとどのような関係にあるのだろうか?

本小特集では, 以上のような宇宙ジェットの基本問題について, 宇宙ジェット研究の最前線で活躍している新進気鋭の若手研究者の方々に, 観測, 理論の両面から, わかりやすく解説していただく。この小特集がきっかけになって, プラズマ・核融合学会の中から, 宇宙ジェットの謎にチャレンジしようという方が現れることを, 大いに期待したい。

(京都大学大学院理学研究科附属花山天文台 柴田一成)

参考文献

- [1] 柴田一成, 福江 純, 松元亮治, 嶺重 慎 (共編): 活動する宇宙 (裳華房, 1999).
- [2] T. Tajima, and K. Shibata, *Plasma Astrophysics* (Addison Wesley, 1997).