

# 宇宙台風, 宇宙ジェット

福江 純\*

## 1. 宇宙ジェット現象

3C 273, M 87 をはじめとする多くの活動銀河から、また SS 433, さそり座 X-1 など銀河系内のいくつかの近接連星系で、さらにオリオン領域のような原始星の誕生現場でも、宇宙のそこかしこ様々なスケールで、その本質的なメカニズムが同じかどうかは別だが、少なくとも見かけ上はよく似た現象が、数多く発見されている。すなわち、天体の中心から正反対の2つの方向へ、細く絞られたガスが噴出している現象——この頃はやりの宇宙ジェットという奴だ。

この小稿では、宇宙ジェット現象に関連して、天体の周りのガストーラスと、それによるジェットの形成について簡単に紹介したい(図1. 宇宙ジェット一般については、サイエンス 1982年7月号のブランドフォード達の記事が詳しい。SS 433 は、月報 1983年7月号高岸氏の記事参照、1984年1月号田原氏の記事も参照)。

## 2. 宇宙台風

ブラックホールや中性子星にむかって、ガス(本稿ではプラズマすなわち電離ガスと同義で用いる)が回転しながら降り注ぐ時、しばしばアクリション・ディスクが形成される(月報 1983年4, 5月号)。中心近傍がいろいろな事情(後述)で熱くなると、ディスクは上下方向に膨れて厚くなる(図1)。この時、中心軸上には、ガスの回転による遠心力のために、ガスが入り込めない細長いろうと状の穴があく。こうなると形状的にはディ

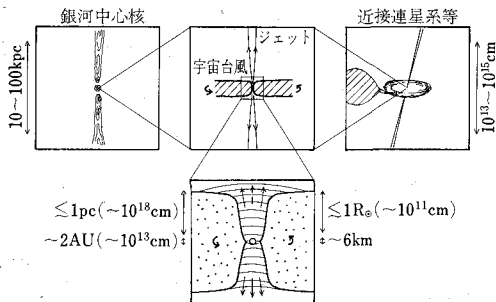


図1 宇宙台風と宇宙ジェットの概念図。中心の天体の質量は、太陽程度(右)から、太陽の1億倍くらい(左)までいろいろある。

スク(円盤)というよりトーラス(円環体)とでも呼ぶべきで、実際そう呼ばれることが多い。

直観的には、天体のまわりの巨大な台風——宇宙台風——を思い浮べてもらえばいいだろう、軸上に形成される穴は宇宙台風の“目”に相当する。地上の台風と異なる点は、宇宙空間には地面がないので、宇宙台風は中心の天体の上下?方向に存在すること。エネルギー源として、地上の台風が水の潜熱(もとは太陽エネルギーのひとつづく)を利用しているのに対し、重力のエネルギーが宇宙台風の原動力であること。我々の常識からすれば真空といってよい程希薄(にもかかわらず、天文学的巨大大さゆえに想像を絶する程のエネルギーを持つ)なことなどだ。また中心付近の回転速度——風速——は、光速に近く、“目”の中では、トーラス内壁から押し出されるガスによって強い上昇流——ジェット——を生じている。

宇宙台風は現在2種類知られているので、以下の節ではそれらを分けて考えよう。

## 3. 光る宇宙台風とジェット

厚いトーラスができる場合の1つとして、降ってくるガスの量(降着率)が多い時がまず挙げられる。中心の天体が太陽質量程度のコンパクト星ならば(図1右)、1年に火星1個分( $\sim 10^{26}g$ )以上、太陽の1億倍の質量をもつブラックホールの場合(図1左)、1年に太陽数個分( $\sim 10^{34}g$ )のガスが降り注ぐと、エネルギーの発生量が十分大きくなり、熱いプラズマのトーラスが形成される(図2左参照)。この時、中心の天体の重力に抗してトーラスを支えるのは、ガスと熱平衡にある光子の圧力(輻射圧)である(ガスの回転による遠心力は、トーラスを上下に支えるには働かないことに注意しておく)。トーラス内部の温度は、10万度から1千万度にぐらいい、光子は電子によって頻りに散乱されるため、光学的には不透明な状態になっている。すなわち、直接見えるのは、太陽と同様に、光り輝くトーラスの表面であり、そのため“円環星”と呼ばれることもある。

3C 273 など特に明るいクェーサー、セイファート銀河の中心や、わし座の SS 433 では、上で述べたような“光る宇宙台風”が渦巻いているのではなからうか。

さて目の中のガスは、トーラス内壁から放射される輻射の圧力によって加速されてジェットとなるが、次の2つの場合が考えられる。

\* 京大理 Jun Fukue: Cosmic Typhoon and Astrophysical Jets from it

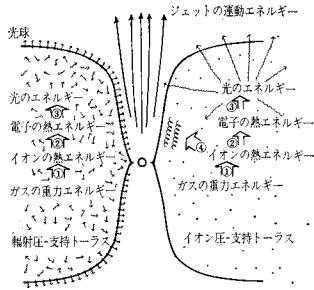


図2 宇宙台風の中でのエネルギーの移動。降着率の大きい場合(左)は光り輝いてみえるが、小さい場合(右)は暗い。図中の番号は本文を参照。尚、ここでは、中心の天体からのエネルギーの供給は考えていない。

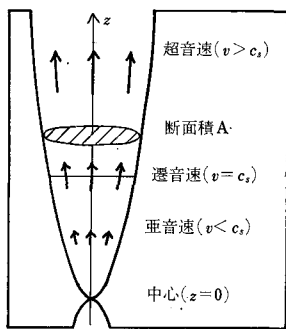


図3 “目”の中の1次元定常流。

まず1つは、トラスと同様に、ジェットも輻射に対して不透明な場合である。この時ガスと輻射は1つの流体として振舞う。簡単のために、ジェットが中心軸(z軸, 図3参照)に沿う1次元定常流と仮定すれば、流れは以下の式で記述される(実際は相対論的に扱う)。

$$\text{連続の式} \quad \rho v A = \text{一定}, \quad (1)$$

$$\text{ベルヌーイの式} \quad \frac{v^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} - \frac{GM}{z} = \text{一定}, \quad (2)$$

$$\text{断熱(仮定)の式} \quad p/\rho^\gamma = \text{一定}. \quad (3)$$

上式で、A(ジェット流の断面積)、v(流速)、ρ(密度)、p(圧力)は、中心からの距離zの関数で、Gは重力定数、Mは中心の天体の質量、γは比熱比(輻射ガスならば4/3)を表わす。また(2)式の左辺の各項はそれぞれ、単位質量当りの運動エネルギー、エンタルピー、重力エネルギーを表わす。トラスの内壁がほぼ放射物面(Aはzに比例して増加)とした時の、流速vと音速 $c_s \equiv \sqrt{\gamma p/\rho}$ を図4に示す。

ジェットは、恒星風のように、中心近くでは亜音速( $v < c_s$ )だが、だんだん加速され、やがて遷音速( $v = c_s$ , 図4では $z=52$ で起こる)、さらに遠方では超音速( $v > c_s$ )となる。このような加速が起こる理由は、流れ

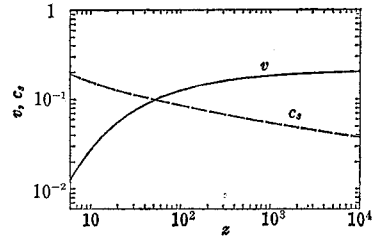


図4 相対論的流体ジェットの解。横軸は中心からの距離z(中心の天体のシュバルツシルト半径が単位)。縦軸は流速vと音速 $c_s$ (光速が単位)。

のガスの圧縮性と、中心の天体の重力の効果による。すなわち、もしガスが縮まなければ( $\rho = \text{一定}$ )、連続の式(1)は、 $vA = \text{一定}$ 、となり、断面積Aが大きくなるに従って流速vは小さくなる筈である。しかし、実際は、中心近くのガスは重力のために強く圧縮されており(ρ大)、遠方で重力が弱まるため膨張するため(ρ小)、結果として、(1)式からわかるように、遠方でvは大きくなることのできる。ところで、ジェットは永久に加速されつづけるかといえば、そうでもない、というのは、流れの持つエネルギーは一定なので、最初に持っていた内部エネルギーと重力エネルギーを、全て流れの運動エネルギーに転換した段階で加速は止まる——ジェットは終末速度に達する。図4の例では、終末速度は光速の10分の1である。

他方、トラスと異なり、ジェットが輻射に対して透明な場合も考えられる。この時、ジェット中のガス粒子は、トラス内壁からの輻射を直接受けて、ほぼ光の放射線方向に加速される(図5)。ライト・セイル(光帆走)によって進む“太陽ヨット”と同じ原理だが、太陽周辺に比べ、光る宇宙台風の目の中の輻射場は桁違いに強烈なので、粒子は容易に光速近くまで加速されよう。

#### 4. 見えない宇宙台風とジェット

前節で、降着率が大きいと、輻射圧で支えられた光り輝く宇宙台風ができ、その目の中では輻射圧で加速されるジェットが生じることを述べた。じゃあ、降着率が小さいと、厚い宇宙台風はできないのだろうか。もう1度トラス内でのエネルギーの移動を考えてみよう(図2右)。

ガスが回転しながら中心の天体に向かって降り積もる間に得た重力エネルギーのうち、一部は回転のエネルギーのなるが、他は乱流等を通して一旦ガスの熱(内部運動)のエネルギーとなる(図2①)。このエネルギーは、質量の重いイオン(陽子)が事実上担う。さらに、イオン-電子間のクローン衝突等で電子の熱エネルギーに移る(図2②)。最後に、エネルギーを得て熱くなった電

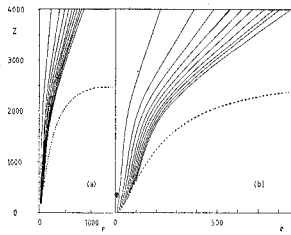


図 5 光学的に透明なジェット中の粒子の軌跡 (シコラとウイilson 1981). 点線はトーラスの表面. (b) は横に引き伸ばしてある.

子は、イオンや磁場によってエネルギー光子を放出したり (熱制動輻射, シンクロトロン輻射), 光子と衝突してエネルギーを失って (逆コンプトン散乱) 冷たくなる (図 2③). このように発熱はイオンが負い, 冷却は電子による点がミソである. すなわち, イオンと電子が熱平衡状態で, イオンから電子へのエネルギーの移動がすぐ起こるならば, 発生したエネルギーはスムーズに光に変わるので, 降着率が小さい時, トーラスは熱くなれない. しかし, イオンから電子へのエネルギーの移動が滞ると (例えば, 密度が小さくなったため, クーロン衝突が有効でなくなり), 電子は冷えてもイオンは冷えることが困難になる, というようなことが起こる. トーラスは熱くなる. この時トーラスを支えるのは, 1 光度にも達するイオンの圧力である. 実際は電子も同時に冷えにくくなり, 電子の温度も 10 億度ぐらいになるだろう.

降着率が小さい時は, 発生するエネルギーの量も少なく (暗い), また密度が小さければ, トーラス深奥で発生した輻射も, 1 度も散乱されずに容易に脱出できる. すなわち, 光学的にはスケスケ——透明な台風——になっており, 光では暗い多くの電波銀河の中心や, さそり座 X-1 に, その存在が予想されている.

たとえばあまり良くないが, 地上の台風でいえば, 前節で述べたのは, 視界のきかない雨台風で, この節のは, 風だけ吹く風台風のようなものだろうか. もっとも, 地上の台風は, 自ら光ったりしないが.

さて, 上述の宇宙台風の場合, 目の中のガスを輻射圧で加速することはできない. もしかすると, 対流や, 磁気流体波, 衝撃波の形でエネルギーが運ばれ (図 2④), 最終的に熱くなったイオンの圧力で加速される太陽風型のジェットが形成されるかもしれない. その場合, ジェットは太陽風同様見えない! また, ジェットが運ぶエネルギーは, トーラス部分で発生するエネルギー自体が少ないので, あまり多くないだろう. 前節の流体的なモデル (図 4) を転用することもできるだろうが ( $\gamma=5/3$  として), 筆者自身は, ジェットがガス圧で加速されるならば, トーラス中の違いを反映して, イオンと電子の

温度が異なった“2温度ジェット”になっている可能性もあると思っている.

## 5. これからの研究対象だ

3 節の輻射圧で支えられた光るトーラスは, アブラモヴィツ, パチンスキーをはじめとするワルシャワのグループが, 1978 年頃から精力的に研究してきた. 4 節のイオン圧支持トーラスは, リース達 (1982) が最近提出した. が共に, 構造の 2 次元性が 1 番障害になっている. 特に, 降り積もってきたガスの持っていた角運動量が, どのように再分配されるかわからないため, トーラスの形状, エネルギーの発生仕方等に, 大きな不定性を残している. 今後の研究が待たれる.

宇宙ジェットの形成機構の方はといえば, 天体のまわりのトーラスによってガスの流れが細く絞られる可能性を 1978 年にリンデンベルグが示唆した後, 具体的な計算は, 光学的に透明で粒子的に加速される場合についてシコラとウイilson (1981) が, 不透明で流体力学的に加速される場合を筆者 (1982) が行なった. ところが, こちらもいろいろと問題がある.

例えば, ジェット流のガスはどこから供給されるのだろうか. 図 6 に中心の天体の違いによる 2 つの可能性を模式的に描いてみた. 図中の矢線はジェットの流線を, 細線は遷音面 (流速と音速が等しい所) を表わす. 中心が質量放出している天体 (中性子星, 原始星) の場合, ジェットのガスは, 中心の天体とトーラス内壁の両方から放出されるだろうが (ケース 1, 図 6 左), 中心がブラックホールならば, ガスはトーラスからしか供給されない (ケース 2, 図 6 右). 特にケース 2 では, ブラックホールに落ちこむ部分があるため, ジェットの途中で流速が 0 となる“よどみ点”を生じるだろう. カルヴァニとノビリ (1983) はケース 2 の場合を考察したが, トーラスからガスがどのように放出されるかという点が, トーラス自体のモデルとカップルしているため, やはり大きな曖昧さが残っている. さらに中心のブラックホールが吹いこむガスの量が任意であることも, 不定性の一

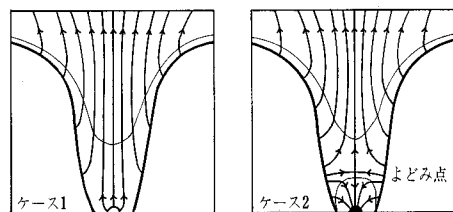


図 6 より現実的な宇宙ジェットの流線図. 中心の天体が質量放出している場合 (ケース 1) と, ブラックホールの場合 (ケース 2) では質的に異なるかもしれない.

困となっている。が、この点は逆手にとれば、フリップ・フロップ（ジェットが片側だけ出ること）に働かせることができるかもしれない。

また、ジェットが“目”から出たあとはどうなるのだろうか。これも大きな問題の1つである。目の出口では流れの断面積が広がるので、急激な加速が起こることも予想される。とにかく宇宙台風にせよ、宇宙ジェットにせよ、それらの研究は始ったばかりなのだ。

最後に一言、本稿で紹介した描像は、1つの見方にすぎないことも今一度強調しておく（筆者自身は、宇宙ジェットの歳差運動や、超光速問題に照らしてみても、有力な見方だと考えているが）。例えば、磁場について全く触れなかったが、重要な役割を果たしていることは十分期待できる。自然は、我々が思っているより多様な答、意外な答を、常に用意しているものではなからうか。

わが国唯一の天体観測雑誌

# 天文ガイド

●4月号 ●3月5日発売 ●定価380円 千70

## 火星の観測ガイド

北尾浩一さんが  
ギリシア神話の世界を紹介

アマ天大会で「下保奨励賞」受賞の藤原邦義さんが  
「流星カメラ」の工作について語る

## 小惑星や惑星による掩蔽 観測ガイド

●アマチュア天文家紹介 ●同好会誌 ●カクタムクラフト ●テレスコープエンジニアリング ●マイコン教室 ●観測ガイドなど満載！

# STAR WATCHING

スター・ウォッチング

天文ガイド2月号臨増 / 定価580円

## 大特集 天体写真術

冷却法公開 / 水素増感法...など天体写真新情報

▶大集合 / 全国自作ドブソニアン ▶冬の装備は完璧に！  
▶天文用フィルム(53本)を考える ▶天文現象ハイライト

★

## マイコンが解く天体の謎

《PCシリーズ版》定価1800円 《FM版》定価1600円

誠文堂新光社 千101 東京都千代田区神田錦町1-5  
 振替東京7 6294 電話03(292)1221

1983年12月の太陽黒点 (g, f) (東京天文台)

1	4,	15	6	4,	19	11	—,	—	16	4,	29	21	1,	39	26	5,	14
2	3,	21	7	3,	33	12	6,	56	17	6,	30	22	1,	17	27	3,	3
3	3,	24	8	4,	32	13	7,	72	18	6,	31	23	2,	14	28	2,	2
4	1,	8	9	8,	69	14	7,	47	19	2,	24	24	2,	7	29	3,	3
5	3,	13	10	7,	70	15	7,	34	20	2,	28	25	2,	11	30	—,	—
															31	—,	—

(相対数月平均値: 47.4)

昭和59年2月20日 発行 人 千181 東京都三鷹市東京天文台内 社団法人 日本天文学会  
 印刷発行 印刷所 千162 東京都新宿区早稲田鶴巻町251 啓文堂 松本印刷  
 定価 450円 発行所 千181 東京都三鷹市東京天文台内 社団法人 日本天文学会  
 電話 三鷹 31局 (0422-31) 1359 振替口座 東京 6-13595