

# 宇宙の闇を貫く光子カジェット

福江 純

〈大阪教育大学 〒582-8582 大阪府柏原市旭ヶ丘 4-698-1〉

fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

URL: <http://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/~fukue>

ブラックホールから双方向へ、虚空を貫いて延びる宇宙ジェット。その謎の完全なる解明は21世紀に持ち越されてしまいそうだが、本稿では、輻射圧すなわち光の力で宇宙ジェットを駆動するという立場から、とくにファンネルジェットに注目して、この20年間の進展をまとめてみたい。

## 1. 宇宙ジェットの輻射圧加速モデル

宇宙ジェットの起源を説明する現在のパラダイムは、中心にある(はずの)降着円盤を直接利用するものだ(図1)。ここで「降着円盤」というのは、質量をもった中心天体のまわりに、一定の割合の質量降着率でガスが降り注ぐときに形成される、プラズマガスの円盤のことである。降着円盤は現代の宇宙物理学では、活動現象の主演としてきわめて重要な役割を果たしている<sup>1)</sup>。

降着円盤のような円盤形状は本来的に軸対称性をもつので、円盤の表面から放出されたガスが何

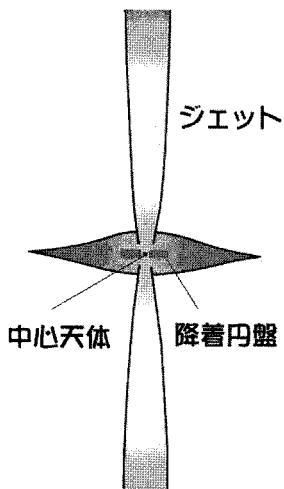


図1 ジェットの模式図

らかの機構によって加速されれば、非等方的な双方向の流れを形成することは難しくない。

ジェットの加速機構は、中心天体の重力エネルギー転換炉の働き方によって、熱的なガスの圧力や輻射圧(放射圧)によるものと、磁場の関与したものに大きく分けられる。岡

本氏の記事に端を発した、冷たい磁場の熱い議論を横目でにらみつつ、ここでは、輻射圧加速モデルに焦点をあてて、その収束と加速の問題を概観しよう。なお、一般的なレビューは2), 3), 4)を、ファンネルジェットについては5)を、特異星SS433については6), 7), 8)を、輻射圧加速については9), 10)も参照されたい。

## 2. 輻射圧加速の基本メカニズム

降着円盤など、中心の天体の放射する強烈な光の圧力によって、ジェットのプラズマガスを駆動するメカニズムを、「輻射圧加速」と呼んでいる。ここでは輻射圧でジェットを加速するメカニズムの基本概念を述べよう<sup>9), 10)</sup>。

### (1) 輻射圧による加速

中心の光源から大量の光が放射されているとき、大部分の光子は外向きの運動量をもっているだろう(図2上)。そしてそれらの光の流れが、周辺プラズマに当たってプラズマを加速する。すなわち中心の光源から放射された光子は、まずプラズマ中の電子に衝突して、外向きに電子を押し、光子はもちろん陽子にも衝突するが、陽子は質量が大きいので光が衝突してもほとんど動かない。しかし電子が(光子によって)押されると、電子と陽子は正負の電荷によって引き合っているため、陽子も電子に引きずられて動く。結果的に、光子のもっていた外向きの運動量がプラズマに受け渡され

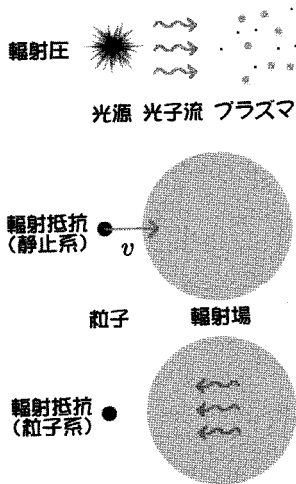


図2 輻射圧と輻射抵抗

て、プラズマは外向きに加速し始める。これが輻射圧加速の素過程である。

輻射圧によって、プラズマだけでなく、数マイクロンサイズのグラファイトなどのダストも容易に加速される（たとえば、彗星のダストテールは太陽光で吹き飛ばされたものだ）。ダストは、光子に比べればはるかに慣性が大きい、輻射圧の影響を受けるかどうかで重要なのは、物体の質量ではなく、（光子を受け止める）物体の断面積  $S$  と、（物体の慣性を担う）質量  $m$  の比、 $S/m$  なのである。ダストや薄っぺらの反射体などは、 $S/m$  が非常に大きい、光圧の影響を強く受ける。

## (2) 輻射場の抵抗

放射の流れが全体として運動量をもっているといまいと関わらず、輻射（多数の光子）の存在自体によって、空間には輻射場のエネルギーが存在するわけで、エネルギーはやはり慣性をもつから、その中を運動する粒子は、速度ベクトルとは反対方向に抵抗を受ける（図2中）。プラズマの場合には、電子と光子の直接の衝突によってこのような「輻射抵抗」が働く。電子と光子の衝突（散

乱）をコンプトン散乱と呼ぶことから、「輻射抵抗」はしばしば「コンプトン抵抗」とも呼ばれる。この輻射抵抗は、プラズマなど抵抗を受ける粒子の大きさや速度が小さいときは、抵抗力の大きさが相対速度に比例する。

輻射場のエネルギーとか慣性がしっくりこないなら、座標系を変えて眺めてみるといいかもしれない。すなわち、（光子）全体としては運動量をもっていない光子に満ちた領域を粒子が運動しているとき（図2中）、座標系を静止系（実験室系）から運動系（粒子系）にガリレイ変換してみる（図2下：ローレンツ変換まで持ち出さなくても、ガリレイ変換で十分）。そうすると、静止した粒子に向かって、（粒子の進行方向）前方から光子が全体として押し寄せてくることになるので、粒子は輻射圧によって後方に押しやられることになる。そして運動系で後方に動くことは、もとの静止系で見れば、（抵抗によって）運動が減速されることに等しい。この座標系の変換という目でみれば、輻射抵抗の原因は、実は、いわゆる「光行差」にほかならないことがわかる。

## (3) 最終速度

このような輻射場において、プラズマの振る舞いを静止系で観測したとき、プラズマは静止系での輻射圧で加速される一方で、静止系での輻射エネルギーのために抵抗を受ける。したがって、中心天体の重力が無視できる場合には、それらの力が釣り合った段階で、プラズマの速度が一定になる（このとき、粒子と共に動く共動系では、輻射場からのネットな力は0になっている）。このときの速度を、「最終速度」とか「終末速度」とかいう。

中心天体の重力を考慮すると、プラズマの加速は抑えられるので、重力が無視できる場合に比べて最終速度は小さくなる。そこできちんと区別するためには、輻射場だけの釣り合いで決まる速度を「平衡速度」、重力など他の力まで考慮して決まる速度を「最終速度」と呼び分けることもある（これは、たんに用語の使い方なんだが、厳密にしな

いとレフリーからクレームが付くこともある（経験者）。

#### （４）輻射圧加速の基本的課題

輻射圧加速のメカニズムは、基本的には、明確でわかりやすいものである。したがって、その長所と問題点もはっきりしている<sup>4)</sup>。

長所としては、まず明るく輝く降着天体との相性が非常にいい。エネルギー的に困らない（重力エネルギーで賄える）のはもちろんだが、標準円盤その他の降着円盤と容易に共存できるのがとても都合がよろしい。

逆に問題点としては、

- ① 輻射は本来的に四方八方へ広がる性質があるので、ジェットとして収束させるためには、何らかの仕掛けが必要であること
- ② 輻射抵抗が存在するので、系内超光速現象などで見積もられている亜光速にまで通常プラズマを加速するのが難しいことなどがある。

コメント1：もっとも、輻射抵抗によってジェットの加速が頭打ちにされるのは、じつは中程度に相対論的なSS433ジェット<sup>6), 7), 8)</sup>に対しては都合がいいので、見方を変えれば長所でもある。

コメント2：また、陽子と電子からなる通常プラズマは陽子の慣性が大きいので、光速の数割ぐらいまでしか加速できない（SS433ジェットが0.26c）。対して、電子と陽電子からなる電子・陽電子対プラズマだと慣性が小さく、光速の9割ぐらいまで加速される可能性がある（系内超光速天体のジェットが0.92c）。しかし、さらに高速のジェット（ローレンツ因子が10ぐらい）が難題である。

コメント3：もう一つ重要なポイントは、輻射抵抗の問題は輻射圧加速だけの問題ではない。対岸の火事ではなく、磁氣的加速メカニズムにとっても、頭に打ち込まれた楔なのである。

### 3. ファンネルジェットの栄光と凋落

もし、中心天体に落下するガスの質量降着率が非常に大きいと、中心近傍で降着円盤のガスの圧

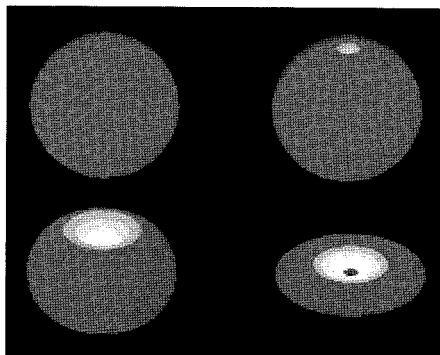


図3 トーラスの外観

力が極度に高くなり、ガス円盤は鉛直方向に膨れて、トーラス形状になる（図3）。このときトーラスの回転軸上には、角運動量の障壁によってガスの入り込めない空洞「ファンネル」が生じる。このファンネルをジェットの収束に用いようという考えは非常に魅力的なものだ<sup>11)</sup>（かつて、このリンデンベルの論文がなかなか手に入らず、京大基研の書庫の奥でやっと見つけた経緯がある）。

ファンネル内のガスが非常に希薄で光学的に薄い場合、降着トーラスの表面から放出されファンネル内に閉じ込められたガスは、トーラス表面（すなわちファンネルの壁）から放射される高エネルギー光子の輻射圧を受ける。対称性からファンネルの軸に垂直方向の輻射圧はバランスするが、ファンネルの形状やファンネル内壁での輻射源の分布のために軸方向には力を受ける。その結果、ガス粒子は軸に沿って加速されて、最終的にファンネルの出口から高エネルギー粒子流として放出される<sup>12)</sup>。ただしこの加速機構には、最初に述べたように、相対論的な加速限界が存在する。

シコーラとウィルスンの計算<sup>12)</sup>では、陽子と電子からなる通常のプラズマの場合、平衡速度は光速の40%程度にしかならない。電子・陽電子対プラズマの場合でも、光速の90%強までしか加速できない。さらに輻射の大部分はガス粒子と相互作用をせずに、直接ファンネルの出口から逃げて

しまうので、全体としてガスに与えられる運動量流束は小さく、加速効率は数%でありよくない。

ファンネル内部が光学的に厚くて、光子がガスに捕捉されれば、粒子的な加速機構における難点の一部は回避できる。この場合ガスと光子は一体となり、比熱比が $4/3$ の相対論的な流体として振舞う。そしてガスは、ファンネルの軸に沿って流体力学的な加速を受け、太陽風や恒星風のように、ファンネルの出口から超音速流として吹き出すだろう<sup>13), 14)</sup>。ファンネルジェットでは、等方的な輻射場のエネルギーが、高い効率でジェット全体の運動エネルギーへ転換される。たとえば、中心の天体のシュバルツシルト半径の26倍より内側の領域で加速が起これば、最終速度は $0.26c$ を超える。

これでメダタシメダタシのはずだったが、時を経ずして、純粹回転しているトーラスは、差動回転に伴うシアーのため、流体力学的に不安定であることがわかった（ドルーリー＝パパロイゾフ＝プリングル不安定<sup>15)</sup>）。ジェットを支える土台であるトーラス自体が数回転のうちに壊れてしまうのである。（ありゃりゃ・・・）

ちなみに、後学のためにも、この場を借りて少し個人的なことを書いておきたい。ファンネルジェットのモデル<sup>13)</sup>を思いついたときのことは、20年近くも前のことだが今でもよく覚えている。D2の最初のころだったが、若干スランプ気味だったので基礎に立ち戻って勉強しようと考え、ほんとにテキストのなかった当時で数少ない参考書だった恒星社厚生閣の現代天文学講座9『銀河と宇宙』の、坂下志郎さんの書いた第6章を読んでいた。太陽風のモデルと当時流行っていたジェットのビームモデルの解説を続けて読んだとき、それらを組み合わせることができないだろうかと思い至ったのだ。よく、「頭の中でカチッと音がする」というが、本当に音がしたものである。日夜考えつづけることが重要なのはもちろんだが、同時に、狭い“守備”範囲に閉じこもらずに周辺の多様な問題にも目を向けることが必要だと思う。

その後、はじめて単著論文を書いて投稿し（でも加藤正二先生に真っ赤に添削されたから、英文は共著みたいなもんだが）、割とスムーズに受理され、年度末ごろには出版もされた。そのおかげで、カルヴァーニとノビリの論文<sup>14)</sup>より出版年で1年早く出せ、宇宙ジェットレビューのバイブルと言われているビーゲルマンらの論文<sup>16)</sup>でも（数少ない日本人著者として）引用された。が、よかったのはここまでで、栄枯盛衰、栄華の後には凋落が続くのが世の定めである。

そうそう、歳の暮れの京大宇宙物理忘年会の席上だったと思うが、当時研修員の伊藤 裕さんに尋ねられたことがある；

“比熱比が $4/3$ ということは、（ジェットは）輻射圧で加速してるんやね？”

“はあ！？”

なんのことはない、ほく自身は輻射圧で加速している（モデルになっている）という自覚が、実はなかったのである。当の本人は、何をやったのか十分に理解していなかったわけだ。今だから書ける話したが、うーん、結構、トホホな人間だった（え、いまも？）

#### 4. 光り輝く降着円盤風

降着円盤にはいろいろな種類があるのだが、とくに基本的なモデルとして、ガスがケプラー回転していて幾何学的に薄く光学的に厚い降着円盤を「標準降着円盤」と呼んでいる<sup>1)</sup>。降着円盤の表面は黒体輻射を放射しており、その温度分布は中心からの半径の関数として解けていて、さらに降着円盤から放射される光度もわかっている。また降着円盤には内縁が存在する（中心天体がブラックホールの場合、内縁の半径はブラックホールの半径の3倍）。このような標準降着円盤から放射される輻射圧でジェットを加速することも可能だ。幾何学的に薄い降着円盤の場合に対しては、イッケ<sup>17), 18)</sup>や田島と福江<sup>19), 20)</sup>らが、かなり詳細に調べている。紙数もないので、詳しくは参考文献<sup>1), 4)</sup>や天文月

報の記事を参照して欲しい。

結論のみ書いておくと、ブラックホールのまわりの標準円盤の温度は中心ほど高く、輻射圧で加速される降着円盤風は中心から吹き出しやすい（ここでは激変星などで成功している線加速は考えていない）。そこで、加速に関しては、輻射圧加速の特性どおり、光速の数割という中程度に相対論的な速度までは問題なく加速できる。

一方、幾何学的に薄い降着円盤風の場合は、収束がやはり難しい。かりにジェットが内縁近傍からだけ吹き出したとしても、そのままと遠方では広がってしまう。ジェットを細く絞るためには、中心付近から吹き出すジェット流を周囲のガス（外部円盤から流れ出す低速で高密度の円盤風とか降着円盤コロナなど）で閉じ込める必要があるだろう（21), 22), 23)。

## 5. ファンネルジェット・リベンジ

先に述べたように、ファンネルジェットの土台であるトーラスモデルは流体力学的に不安定だが、回転運動だけを考慮して降着運動を無視したトーラスモデルは、そもそもがある種の理想化されたモデルである。現実的な状況では、周辺から大量に降り積もるガスは、ブラックホールなどの中心天体へ（トーラス領域を通過し）落下していく。そのような状況では、擾乱も落下するので不安定性は成長するヒマがなく、トーラスとは言わないまでも幾何学的には厚い円盤形状が存続しうると考えられる。

降着流の影響まで考慮した観点から、標準降着円盤モデルを厚くしていったようなモデルとして、いわゆるスリム円盤<sup>24), 25)</sup>（光学的に厚い移流優勢降着流 ADAF / 降着円盤）が提案されているが、ADAF 風についてはまだ十分調べられていない<sup>26)</sup>。

さらに、超臨界降着をさせた状況で、降着トーラス（円盤）+ジェットがどうなるかについて、輻射流体力学を考慮した（2次元の）数値シミュレーションは数例実行されている<sup>27), 28), 29)</sup>。たとえばエグムらの計算<sup>27), 28)</sup>では、幾何学的に厚いトー

ラスが形成されると同時に、ファンネル内で双方向のジェットが形成されることが示されている（ジェットの速度は光速の30%ほど）。また藤田と奥田らのシミュレーション<sup>29)</sup>では、中心部からは高速の流れが、周辺部からは低速で高密度の流れが起こるらしいことが指摘されている。

しかしながら、輻射圧で加速するジェット流の数値シミュレーションは、現状では、定式化やシミュレーションスキームの完全性などなど、まだ議論の余地が多く、納得できる結果は出ていない。輻射流体力学の3次元計算は、やはり難しい。いや実際のところ、振動数空間まで入れると（輻射流体力学の計算は）4次元になるので、おそらく磁気流体力学の計算より難しいだろう。したがって、フルシミュレーションも21世紀の課題になったわけだが、これからの勝負のしどころだろう。

## 6. ミレニアムジェットの時代

従来の描像では、輻射圧加速あるいは磁氣的加速どちらの場合も、ジェットは空間的・時間的に一様だというイメージ（思い込み）が強いようだ。しかし、この条件は自明ではない。実際、最近では、磁氣的フレアのようなアイデアも出つつあるようだ。そこで最後に、ギミックの一つとして、＜空間的な非一様性＞を考慮した「多段階加速機構」に触れておこう<sup>30)</sup>。

まず（従来、暗黙のうちに仮定されてきたパラダイムと異なり）ジェットが非一様な光る雲（層）からできているとしよう。まず降着円盤直上の雲層は、降着円盤自体の輻射圧で加速されるだろう。これが1段目の加速である。つぎにその上の雲層は、降着円盤自体の輻射場ではなく、1段目の雲層の輻射場によって加速されると考える。これが2段目の加速である。こうしてつぎつぎと多段階の加速を考えることができる。このとき重要な点は、1段目の雲層の最終速度は静止系（降着円盤）に対する速度だが、n段目の雲層の最終速度は（動いている）n-1段目に対して決まるので、静止系に対

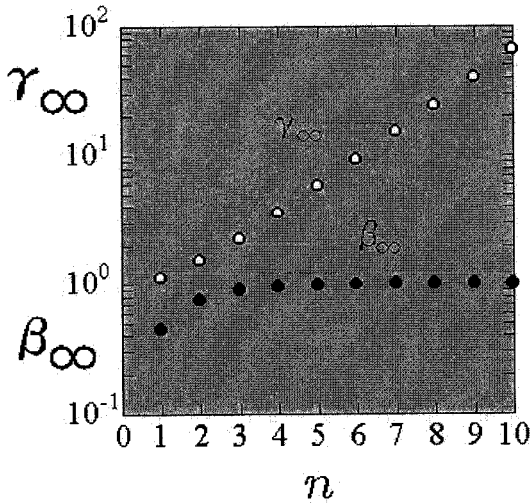


図4 多段式ジェットの加速性能

する最終速度が大きくなるということだ。実際、簡単な解析から、 $n$  段目の雲層の最終速度  $v_\infty$  とローレンツ因子  $\gamma_\infty$  は図4のようになる。この多段式加速のメカニズムを使えば、数段階の雲層で十分に相対論的な速度まで加速することが可能である。

いずれにせよ、輻射圧加速ジェットのモデルで説明できるジェット現象は多いが、一方で、まだ未解決の問題はいろいろと残っている。

### 参考文献

- 1) Kato S., Fukue J., Mineshige S., 1998, Black-Hole Accretion Disks (Kyoto University Press, Kyoto)
- 2) 福江 純, 1990, パリテイ, 5, 14
- 3) 福江 純, 1993, 宇宙ジェット (学習研究社)
- 4) 柴田一成他編, 1999, 活動する宇宙 (裳華房)
- 5) 福江 純, 1984, 天文月報, 77, 74
- 6) 福江 純, 1988, 天文月報, 81, 251
- 7) 福江 純, 石川 薫, 田鍋和仁, 1998, 天文月報, 91, 162

- 8) 福江 純, 尾花好美, 奥上将光, 1998, 天文月報, 91, 210
- 9) 福江 純, 1999, 天文月報, 92, 32
- 10) 福江 純, 1999, 天文月報, 92, 102
- 11) Lynden-Bell D., 1978, PhysScr 17, 185
- 12) Sikora M., Wilson D.B., 1981, MNRAS 197, 529
- 13) Fukue J., 1982, PASJ 34, 163
- 14) Calvani M.C., Nobili L., 1983, in Astrophysical Jets, ed. A. Ferrari and A.G. Pacholczyk (Reidel, Dordrecht) p189
- 15) Papaloizou J.C.B., Pringle J.E., 1984, MNRAS 208, 721
- 16) Begelman M.C., et al., 1984, RevModPhys 56, 255
- 17) Icke V., 1980, AJ 85, 329
- 18) Icke V., 1989, A&Ap 216, 294
- 19) Tajima Y., Fukue J., 1996, PASJ 48, 529
- 20) Tajima Y., Fukue J., 1998, PASJ 50, 483
- 21) Sol H., Pelletier G., Asseo E., 1989, MNRAS 327, 411
- 22) Marcowith A., Henri G., Pelletier G., 1995, MNRAS 277, 681
- 23) Fukue J., 1999, PASJ 51, 425
- 24) Abramowicz M.A., Czerny B., Lasota J.P., Szuszkiewicz E., 1988, ApJ 332, 646
- 25) Beloborodov A.M., 1998, MNRAS 297, 739
- 26) Watarai K., Fukue J., 1999, PASJ 51, 725
- 27) Eggum G.E., Coroniti F.V., Katz J.I., 1985, ApJ 298, L41
- 28) Eggum G.E., Coroniti F.V., Katz J.I., 1988, ApJ 330, 142
- 29) Fujita M., Okuda T., 1998, PASJ 50, 368
- 30) Fukue J., 2000, PASJ 52, in press

### Radiation-Driven Astrophysical Jets

Jun FUKUE

*Astronomical Institute, Osaka Kyoiku University, Kashiwara, Osaka 582-8582*

Abstract: Radiative winds and jets from luminous accretion disks/tori are reviewed. Among various models of astrophysical jets, plasma outflow emanating from accretion disks/tori and accelerated by the radiation pressure is the most promising one. Here explained are the roles of radiation pressure force and radiation drag force. Rise and fall of a torus model are also discussed, following its revenge. Finally, the millennium jet model, where the multi-stage acceleration takes place, is proposed.