

●●●●あの論争は…いま？ (8) ●●●●

宇宙ジェットの加速機構

Acceleration Mechanisms of Astrophysical Jets

工藤 哲 洋, 浅野 勝 晃

〈国立天文台理論研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kudoh@th.nao.ac.jp, asano@th.nao.ac.jp

論争の種: 宇宙ジェットの加速機構

論争の期間: 1970年代から現代まで

主な対立点: 宇宙ジェットは磁場による力で加速されているのか, 輻射によって加速されているのか?

現在有望な説: 原始星ジェットは磁場による力で加速. 活動銀河核などの相対論的なジェットは論争中.

はじめに

宇宙ジェットとは, 生まれたばかりの星 (原始星) や, 活動的な銀河の中心核 (活動銀河核), 近接連星系などで見られる細く絞られたガスの流れのことをいう¹⁾. また, 最近ではガンマ線バーストのような天体もジェットを放出しているのではないかとされている. しかし, それぞれのジェットがどのような機構で生成されているのか, 共通の機構なのか, あるいはおのおの別な機構なのかはまだよくわかっていない^{2), 3)}. ここでは, そのジェットの生成機構に関する論争について, 磁場加速を研究している研究者 (工藤) と, 輻射加速を研究している研究者 (浅野) とが, 異趣同舟で解説することを試みた.

宇宙ジェットのモデル

宇宙ジェットの生成モデルはたくさんあるが, 加速機構に着目して大別すると以下の三つに分類される.

(1) 磁場による力で加速するモデル

原始星や活動銀河核などでは, ジェットの根元に, 中心天体があり, その周りをガスが円盤状に回転しながら落下する, 降着円盤が形成されていると考えられている. 磁場による力で加速するモデルでは, 例えば, その円盤を貫くような大局的な磁場を仮定する. そして, その磁場と回転によって生じる磁気遠心力や, 回転によってねじられた磁場が作る磁気圧によってジェットを加速するというモデルである^{4), 5)} (図1).

このモデルにおける重要な要素は磁場と回転である. したがって, 磁場をもって回転している物体が, 降着円盤でなく, パルサーでも⁶⁾あるいはブラックホールでも⁷⁾同じようなことが起こりうる. また, 大局的な磁場でなく円盤内にある局所的な磁場の場合でも, 円盤の中で磁場がねじられることで磁気圧が発生しジェットを加速することが可能である^{8), 9)}.

円盤から磁場の力で噴出するジェットのモデルにおいては, ジェットの最終速度は円盤を貫く磁

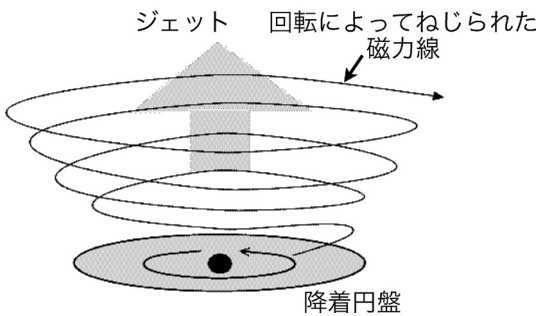
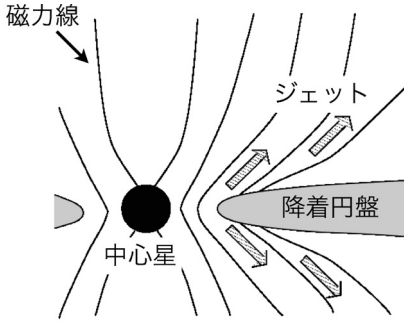


図1 降着円盤から噴出する磁気流体ジェットの概念図。上図は子午面内での断面を書いたもの。下図は回転によってねじられた磁力線を模式的に表している。

場の強さに大きくは依存せず、おおよそジェットが噴出しているところでの円盤の回転速度（ケプラー速度）程度になることがわかっている¹⁰⁾。

磁場による力で加速するモデルの利点は、ジェットの加速とコリメーション（流れを細く絞ること）とを同時に説明できる点である。回転によってねじられた磁場の自己ピンチ力が、ジェットを細くコリメーションする力として自然に発生する¹¹⁾。

(2) ガス圧で加速するモデル

太陽には太陽風というガスの流れが知られているが、これは古典的にはガス圧によって加速するモデルで説明されている。これと同じように、

ジェットを加速する力としてガス圧で加速するというモデルも考えられる。

ガス圧で加速する場合、ジェットの最終速度は加速している領域の音速程度になる。例えば、太陽風の場合は平均的には太陽コロナ下部のガス圧で加速されているが、そこでの温度は数百万度で、太陽風の最終速度は数百 km/s である。高速のジェットを形成するためには高温の加速領域が必要になる。

降着円盤の内縁付近（中心星に近いところ）は重力エネルギーの解放のため高温になることが予想されるので、そこからガス圧によって高速のジェットが噴出することは考えられる。また、降着円盤にもコロナがあれば、太陽風と同じように降着円盤風のような形で吹き出しているかもしれない。

ガス圧で加速する場合、ジェットのコリメーションについては別に考えなければならない。例えば、降着円盤の内縁が高温のためトラス状に膨らみ、流れを降着円盤に垂直方向に絞り込むなどが考えられている。

(3) 輻射で加速するモデル

降着円盤内のガスが中心星に落下する過程で重力エネルギーが解放され、一部は光（輻射）のエネルギーになる。光はガス中の電子により散乱されるが、その際電子に力を及ぼす。この力によってジェットを加速するモデルが考えられる。

ガスが輻射によって加速される場合、ジェットの光学的厚さによって事情が大きく異なる^{*1}。光学的に薄い場合、すべての光子がガスの加速に寄与することはできないが、莫大な数の光子の一部はガスと散乱し、光の運動量の一部をガスの加速に費やすことができるであろう。図2のように、円盤から放たれた光はガスを徐々に加速する。ガスの速度 v が光速 c に近づいてくると、ローレン

*1 光学的厚さとは光と物質の相互作用の程度を測る目安である。ガス密度が薄かったり、系のサイズが小さかったりして、ほとんどの光はガスに散乱されずに、系から真っ直ぐ飛んで逃げてしまう場合、この系は光学的に薄いと言われ、逆に光が系から脱出する前に吸収されてしまったり、多数の散乱を受ける場合、光学的に厚いと言う。

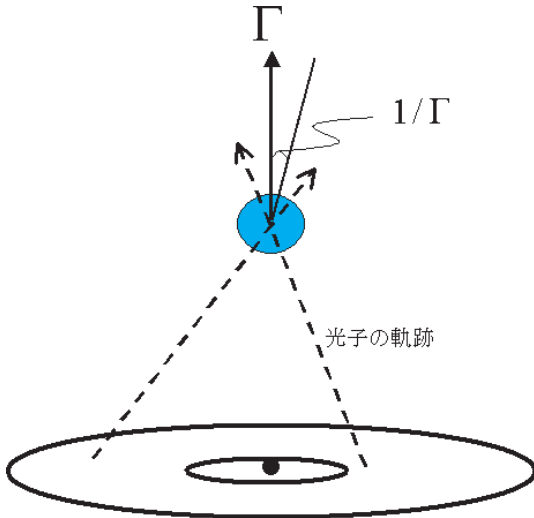


図2 円盤から飛んでくる光子が、ジェット（ローレンツ因子 Γ ）を減速させる。

ツ因子 $\Gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ は1よりも十分大きくなる。このとき、特殊相対論の効果により、角度 $1/\Gamma$ rad (Γ が大きいときの近似) よりも外側からガスに入射してくる光子は、ガスとともに運動する系から見ると、前方から飛んでくるように見える。このような光子はむしろガスを減速させてしまう。つまり、急激な加速により Γ を大きくしようとしても、角度 $1/\Gamma$ がとてつもなく小さくなり、ほとんどの光子はその外側から入り、ガスを減速させる結果となる。このジレンマにより、放射による加速で達成されるジェットの速度には上限があり、通常の陽子・電子からなるプラズマの場合、 $0.4c$ ($\Gamma=1.1$)、電子・陽電子からなる軽いプラズマでも $0.94c$ ($\Gamma=3$) 程度と見積もられている¹²⁾。

一方、光学的に厚い場合には光はガスと一体となって運動する。光学的に厚いモデルは最初、ガンマ線バースト（後述）の大きな Γ (100 から 1,000) を説明するために導入され、火の玉モデルと呼ばれている^{13), 14)}。ここでの火の玉とは、ガスと光が一体となった高温 (100 億 K 程度) の流体と考えることができ、そこには光子同士の衝突で

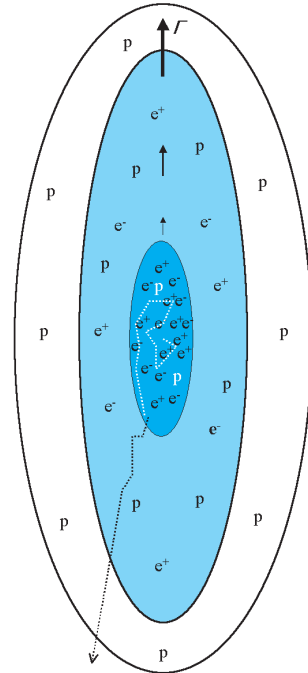


図3 火の玉モデルの概略図。色の濃さは光子の密度の濃さに対応している。火の玉が膨張するにつれ、電子・陽電子対の密度が下がり、最後は陽子とそれに付随する電子ばかりが残る。点線の矢印は、とある光子の軌跡。内側では多くの散乱（および吸収）を受け、最後には系から逃げていく。

生まれた大量の電子・陽電子対が存在する。ガンマ線バーストの場合、ジェットの根元では、光と電子・陽電子対が完全熱平衡状態に達し、そのエネルギー密度のほとんどを占める。バリオン（陽子）も存在しているが、そのエネルギー密度は放射に比べて無視できると想定されている。ガス圧で加速されるのと同様に、放射による圧力で流体は加速・膨張していく。流体が膨張していくにつれ、放射や電子・陽電子対の温度は下がっていく、そのエネルギー密度はバリオンに対して相対的に減っていく。最終的には、当初放射や電子・陽電子対がもっていたエネルギーのほとんどが、バリオンの運動エネルギーへと転換される。初期の放射のエネルギー密度がバリオンのエネルギー

密度の Γ 倍であれば、最終的なローレンツ因子も Γ となる(図3)。上記の初期条件が満たされている限り、十分な加速が達成されることは疑いない^{15), 16)}。しかし、理想的な高温の火の玉を作るメカニズムはいまだわかっていない。

ジェットのコリメーションについては、ガス圧の場合と同様、加速メカニズムとは別に考えなければならない。円盤からの輻射によってコリメーションするというモデルもあるが¹⁷⁾、一般的にはガス圧加速と同様に、降着円盤がドーナツ状に膨らんでいるなどの、幾何学的効果が考えられている。

実際の宇宙ジェットとの対応

次に上で考えられているジェットのモデルが、実際の宇宙ジェットとどのように対応しているか、どのように論争が起きているかを見てみたい。

(1) 原始星ジェット

結論からいうと、原始星のジェットの場合は、ほとんどの研究者が「磁場による力で加速するモデル」を信じていて、その点については全く論争になっていない。

原始星ジェットの場合、星の周囲に円盤をもっている天体がジェットを噴出しているという明白な相関があるので、ジェットの質量の起源は降着円盤にあると考えられている。その場合、まず、ガス圧で加速するのは難しいと考えられる。それは、降着円盤の温度が数千度(その音速は数 km/s)であるのに対して、ジェットの速度が数百 km/s もあるからである。また、輻射圧で加速するモデルもうまくいかないだろうと考えられている。それは、観測されている円盤や星などの輻射から輻射の運動量を見積もると、それらはジェットの運動量よりも小さいと見積もられるからである。そこで、残されたモデルとして、磁場による力で加速するモデルが支持されている。実際、分子雲スケールでは大局的な磁場が観測されていて、星が形成するときにはその磁場を引きずって収縮して

くると思われている。よって、星の周囲の円盤が大局的な磁場をもっていることは十分考えられ、磁場の力でジェットを加速していることはありそうである。また、モデルから予想されるジェットの最終速度や質量放出率なども観測と矛盾していない¹⁸⁾。

原始星ジェットの場合、オプティカルジェット、高速中性風、双極分子流など、ジェットに種類があることが知られている¹⁹⁾。それぞれがどのような関係でどのように加速されているかはまだよくわかっていないので、そのことに関する論争の余地はある。また、磁場の起源が円盤が星間空間から引きずってきた磁場にあるのか²⁰⁾、あるいは星にあるのか²¹⁾、についても異なるモデルが提唱されている。しかし、いずれにせよ、磁場と回転によって生じる力で加速するというモデルが主役であることは変わらない。

(2) 活動銀河核ジェットおよび連星系ジェット

活動銀河核の中心には、太陽質量の1億倍以上にもなる、巨大ブラックホールがあると考えられており、その周りには降着円盤が重力エネルギーを解放して明るく輝いている。よりコンパクトな系である連星系の場合、片方の星が太陽質量程度の中性子星かブラックホールで、そこにもう片方の星からガスが流れ込み、降着円盤を形成していると考えられている。この二つのジェットと原始星ジェットとの違いは、ジェットの速度が光速に近い点にある。連星系ジェットの場合は、 Γ で3程度、活動銀河核ジェットでは10以上になっていると考えられる。いずれのジェットも、その中心天体と降着円盤のシステムから放出されているという点では多くの人に意見の一致が得られている。しかしジェットを加速するモデルとしては、主に、「磁場による力で加速するモデル」と「輻射で加速するモデル」を考えている研究者の間で論争が展開されている。

磁場による力で加速するモデルを主張するグループは、基本的に原始星ジェットからの類推を

元になっている。その背景には、たとえ見かけのスケールが違っていても似たような現象には共通の物理機構が働いているだろうという考えがある。例えば、原始星ジェットも活動銀河核ジェットも連星系ジェットも、中心天体の周りに降着円盤があるというシステムは共通である。さらに、原始星ジェットの速度（数百 km/s）も活動銀河核ジェットや連星系ジェットの速度（ほぼ光速）も、どちらも物理的には中心天体の脱出速度程度であるという点では共通である。よって、活動銀河核ジェットや連星系ジェットにも、原始星ジェットと同じような物理機構が働いているかもしれないと考えるのは自然であろう。原始星ジェットは磁場による加速モデルで成功しているのだから、活動銀河核ジェットや連星系ジェットも磁場による加速モデルで説明できると考える（工藤）。そして、実際にそのような数値シミュレーションを行っている²²⁾。

磁場による加速に否定的なグループは、そもそも数値シミュレーションで、 $\Gamma=10$ 程度の加速に成功した例がないことを挙げる。円盤を貫く大域的な磁場を仮定するシミュレーションでは、多くの場合、アルヴェン速度（磁力線の歪みが伝わる速度、磁場の強さに比例する）程度のガスの流出が見られる。アルヴェン速度を光速に近づけるためには、ガスのエネルギー密度を上回る、極端に大きな磁場を仮定しなくてはならず、そのような強い磁場が円盤を貫いて大域的に存在しているとは考え難い（浅野）。磁場は存在していても、それは大域的なものではなく、円盤内で乱流的に存在しているようなものであろう。一方、活動銀河核ジェットにおける磁場のエネルギーを見積もった研究から、磁場のエネルギーはジェットの運動エネルギーに対して 10 分の 1 から 100 分の 1 程度でしかないという結果が出ている²³⁾。この結果も磁場の重要性に疑問を投げかけている。

活動銀河核の場合には、原始星とは異なり、十分な輻射が期待できるので、それでジェットを加速

できる可能性がある。歴史的には光学的に薄いモデルが考えられていたが、前節で述べたようにジェットの速度を十分に上げることができない。そこで最近ではガンマ線バーストの応用で、光学的に厚い火の玉モデルが考えられている。ただし、活動銀河核は、ガンマ線バーストよりも 8 桁大きいサイズで、エネルギー放出率は 5 桁小さい。このような低密度の輻射では、陽子・電子からなる通常のプラズマを加速することはできないであろう。しかし、高温の降着円盤内で生まれた、軽い電子・陽電子対からなるプラズマであれば、観測されているような速度にまで加速することは可能である^{24), 25)}。この場合の火の玉は、ガンマ線バーストのときとは異なり、光子の密度が低く、電子・陽電子対と光子は完全な熱平衡にはない。しかし、光子と電子・陽電子対は散乱を通じて、一流体として振舞う。このような加速を実現するためには、火の玉の初期温度は十分高くなくはいけない。なぜなら、初期温度が低いと、電子・陽電子対消滅の効率が上がってしまい、加速が終了する前に、電子・陽電子が消えてなくなってしまうからである。初期の火の玉の温度を高く保つことができるかどうかは、全く自明ではない。温度を評価するためには、火の玉の運動と微視的な物理過程を考慮した議論が求められるが、最近そのような試みがなされ始めている²⁶⁾。

(3) ガンマ線バースト

ガンマ線バーストとは数十秒間、非常に明るいガンマ線を放つ現象で、ときにはその残光が数時間から数カ月にもわたって、X線や可視光、電波で観測される。この現象は恒星質量程度の天体がブラックホールに崩壊する際に起きると考えられており、巨大な超新星爆発や中性子星連星合体などに基づくモデルが提唱されている。ガンマ線のスペクトルと明るさを説明するためには、 $\Gamma > 100$ のジェットを放出していると考えられている。前節で火の玉モデルはガンマ線バーストのジェットを説明するために導入されたと述べたが、実際に

この機構で加速されているという証拠は何もない。観測を説明するためには、 $\Gamma > 100$ のガスの流れを実現できればよいので、モデルに特に制限がなく、強い磁場による加速モデルも十分考えられる。しかし、ガンマ線バーストは明らかにエディントン光度（重力で引き寄せられるガスを輻射で吹き飛ばし、ガスの降り積もりを阻止することのできる最低の明るさ）を大きく上回る明るさなので、そのジェット加速に、輻射が大きい役割を果たしていると考えても、そう悪くはないであろう。

火の玉の生成メカニズムは、降着円盤から放たれるニュートリノの電子・陽電子への対消滅²⁷⁾⁻²⁹⁾や、磁気リコネクション^{30), 31)}などが考えられているが、決定的なモデルはない。Aloy や MacFadyen ら^{32), 33)}を筆頭とするさまざまなグループによって、火の玉が星を構成するガスを押しのけて、ジェット状に外層を突き破る数値シミュレーションが行われている。これらのシミュレーションでは、星の回転軸に沿った狭い領域に、人工的にエネルギーを注入することにより、火の玉の外層への伝播に成功している。しかし、このような狭い領域だけにエネルギーを注入するメカニズムはわかっていない。エネルギー注入法を球対称に近づけると、エネルギーは満遍なく、星を構成するガスに受け渡され、光速よりも非常に遅い流れしか実現できないであろう。ガンマ線バーストにおいては、コリメーション機構を解明することが、そのままジェットの加速を説明することにつながるのかもしれない。

おわりに

まとめると、宇宙ジェットのうち、原始星ジェットは磁場の力で加速するモデルではほぼ意見の一致が得られている。一方、活動銀河核ジェットや近接連星系ジェットは磁場で加速されているのか輻射で加速されているのか論争が継続中である。また、ガンマ線バーストは火の玉による

ジェットモデルが有力視されているが、火の玉の起源は謎である。

ただし、いずれにせよ、このような論争は最終的には観測で決着がつけべき問題である。ここで注意しなくてはならない点は、実は、原始星ジェットの場合でも、磁場による加速モデルを直接確認している観測はまだないという点である。（消去法や状況証拠で磁場加速モデルが生き残っているにすぎない。）しかし、原始星ジェットは、他のジェットに比べると観測が進んでいて、最近ではジェットの回転を検出することによって、より積極的に磁場加速モデルを検証しようとする試みが行われている³⁴⁾。もし、原始星ジェットで直接的に磁場加速の証拠が確認できれば、活動銀河核ジェットなど他のモデルへ与える影響も大きいだろう。

活動銀河核における火の玉モデルは、ジェットの放出と同時に、電子質量と同程度のエネルギーのガンマ線放射を予言する。これは観測が難しいエネルギー領域ではあるが、将来のガンマ線観測により、モデルの判定が可能となるであろう。また、ジェットの成分が通常のプラズマか、電子・陽電子プラズマかを観測的に決めることは非常に重要である。磁場で加速する場合でも、慣性の小さな電子・陽電子プラズマの方が加速しやすく大きな Γ を得やすい。偏光観測などからジェット成分の決定が試みられている（例えば Wardle ら³⁵⁾）が、決定打と言えるものはまだない。今後は、モデルに制限を与えるため、理論モデルからもどのような観測を行うべきかを示唆していくことが必要だろう。

参考文献

- 1) 福江 純, 1993, 宇宙ジェット (学習研究社)
- 2) 福江 純, 1999, 活動する宇宙, 柴田一成, ほか共編 (裳華房), p. 207
- 3) 工藤哲洋, 柴田一成, 1999, 活動する宇宙, 柴田一成, ほか共編 (裳華房), p. 241
- 4) Blandford R. D., Payne D. G., 1982, MNRAS 199, 883

- 5) Uchida Y., Shibata K., 1985, PASJ 37, 515
- 6) Takahashi M., Shibata S., 1998, PASJ 50, 271
- 7) Takahashi M., Nitta S., Tatematsu Y., Tomimatsu A., 1990, ApJ 363, 206
- 8) Kudoh T., Matsumoto R., Shibata K., 2002, PASJ 54, 267
- 9) Kato Y., Mineshige, S., Shibata K., 2004, ApJ 605, 307
- 10) Kudoh T., Matsumoto R., Shibata K., 1998, ApJ 508, 186
- 11) Heyvaerts J., Norman C., 1989, ApJ 347, 1055
- 12) Sikora M., Wilson D. B., 1981, MNRAS 197, 529
- 13) Paczynski B., 1986, ApJ 308, L43
- 14) Rees M. J., Meszaros P., 1992, MNRAS 258, 41
- 15) Piran T., Shemi A., Narayan R., 1993, MNRAS 263, 861
- 16) Asano K., Iwamoto S., 2002, ApJ 581, 381
- 17) Fukue J., Tojyo M., Hirai Y., 2001, PASJ 53, 555
- 18) Kudoh T., Shibata K., 1997, ApJ 474, 362
- 19) Bachiller R., 1996, ARA&A 34, 111
- 20) Konigl A., Pudritz R. E., 2000, Protostars and Planets IV, p. 759
- 21) Shu F. H., Najita J. R., Shang H., Li Z.-Y., 2000, Protostars and Planets IV, p. 789
- 22) Koide S., Meier D. L., Shibata K., Kudoh T., 2000, ApJ 536, 668
- 23) Kino M., Takahara F., 2004, MNRAS 349, 336
- 24) Iwamoto S., Takahara F., 2002, ApJ 565, 163
- 25) Iwamoto S., Takahara F., 2004, ApJ 601, 78
- 26) Asano K., Takahara F., 2006, ApJ 掲載予定
- 27) Woosley S. E., 1993, ApJ 405, 273
- 28) MacFadyen A. I., Woosley S. E., 1999, ApJ 524, 262
- 29) Asano K., Fukuyama T., 2001, ApJ 546, 1019
- 30) Thompson C., 1994, MNRAS 270, 480
- 31) Katz J. I., 1997, ApJ 490, 633
- 32) Aloy M. A., Muller E., Ibanez J. M., Marti J. M., MacFadyen A., 2000, ApJ 531, L119
- 33) MacFadyen A. I., Woosley S. E., Heger A., 2001, ApJ 550, 410
- 34) Pesenti N., et al., 2004, A&A 416, L9
- 35) Wardle J. F. C., Homan D. C., Ojha R., Roberts D. H., 1998, Nature 395, 457