

小特集

高強度レーザーを用いた実験室宇宙物理

8. 相対論的プラズマ

高 原 文 郎

(大阪大学大学院理学研究科)

Relativistic Plasmas in Astrophysics

TAKAHARA Fumio

Graduate School of Science, Osaka University, Toyonaka 560-0043, Japan

(Received 27 August 1998)

Abstract

An introductory review is made on relativistic plasmas in astrophysics. Recent progress in the understanding of active galactic nuclei, compact stars in the Galaxy, pulsar winds and cosmic gamma-ray bursts is highlighted. In these high energy phenomena, microscopic plasma and radiation processes are coupled with macroscopic relativistic hydrodynamics.

Keywords:

active galactic nucleus, relativistic jet, gamma-ray burst, pulsar

8.1 はじめに

X線星, パルサー, 活動銀河中心核, ガンマ線バースト, 超高エネルギー宇宙線など, 宇宙における高エネルギー現象は多くの人々の興味を引きつけてきた. これらの天体現象は多様であるとともに, そこに共通の物理過程が働いていることも以前から認識されていたところである. 本稿では, 最近の理論観測両面での進展をふまえながら, これらの天体についての入門的解説を行う.

8.2 X線星

X線星は, 中性子星やブラックホールというコンパクト星が普通の星と連星系をなしており, さまざまの原因で相手の星から放出されたガスがコンパクト星に降りつき, コンパクト星の表面近くで重力エネルギーを解放して, 高温のプラズマをつくりX線で輝いている天体である. ガスはコンパクト星の重力を受けて落下するのだが, 同時に星の表面からの強い輻射で外向きの力を受ける. 両者とも r^{-2} に比例する力となるので, ガスが落下

author's e-mail: takahara@vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp

するためにはX線星の光度はコンパクト星の質量 M に比例するエディントン光度

$$L_E \equiv 4\pi c G M m_p / \sigma_T = 1.3 \times 10^{38} \frac{M}{M_\odot} [\text{erg s}^{-1}] \quad (1)$$

以上の光度をとることができない ($M_\odot$ は太陽質量). 観測される光度はほとんどの場合この制限に近いところにあるが, 光度がエディントン光度に近い場合にはガスと輻射との相互作用がきわめて重要になっている. このようなガスの降り積もりをアクリションと呼ぶが, アクリションをめぐるのはアクリションディスクの角運動量輸送の機構, コンパクト星の磁場との相互作用, 高温プラズマ中の輻射過程, 等々数多くの仕事があり, とてもここでは紹介しきれないが, 多くの古くて新しい興味深いテーマが未解決である. X線星の天文学については参考文献 [1] がある. ブラックホール X線源については参考文献 [2] がある.

特に興味深いことは, 一部のX線星からは高速のジェットが吹き出していることである. 古くから有名なも

のが SS433 と呼ばれる天体で、光速の26%の速さで2本の歳差運動するジェットを放出している。速度が水素の輝線などで測られていることからわかるように、このジェットは熱的な状態にある普通的气体からなっている。ジェットの運動学的光度は $10^{40} \text{ erg s}^{-1}$ を超えると推定されており、中性子星のエディントン光度をはるかに超えている。SS433の中心天体が中性子星なのかブラックホールなのかはいまだに最終的な決着はついていないようであるが、アクリションで解放されたエネルギーの大部分が輻射ではなく運動エネルギー、しかも方向性をもった形で放出されているのである。

長年の間、銀河系内には SS433 以外の相対論的ジェットは発見されてこなかったが、1994年に今度は電波放射の観測から GRS1915+105 と GRO J1655-40 という2つの天体が相対論的ジェットを持っていることが発見された[3,4]。Fig. 1 に示すように、VLBI による観測で双方向に電波強度の強い点がほとんど光速で移動していくことが観測されたのである。この現象は以前から銀河系外の電波銀河で見ついていた超光速膨張と同一の現象と考えられる。二つの天体とも中心天体はブラックホールと考えられているので、ブラックホールへのアクリションが相対論的ジェットをつくるということが銀河系内天体でもおこっていることが実証されたのである。この場合には電波は相対論的エネルギーの電子（および陽電子）が磁場中で放出するシンクロトロン放射であり、非熱的粒子の加速がおこっていることがわかる。熱的粒子の存在については観測的には不明である。この二つの天体は銀河系内にあることから系外天体に比べより詳しい観測が可能であり、ジェット形成機構への手掛かりが得られるものと期待されている。

8.3 パルサー

パルサーは、中性子星の回転エネルギーを源にして、強い磁場のもとで非常に強いコヒーレントな電波放射を行っている天体である。電波放射の輝度温度は 10^{28} K を超えており、その輻射領域はあまりにも極端な物理状態にあるため、実際の物理過程については不明の点が多かった。観測される周期と周期変化を、真空中におかれた磁気双極子の放射公式を使って解析すると、失われた回転エネルギーの大部分は見えない形で周囲に放出されていることになる。例外的に明るいカニ星雲では、パルサー周囲にシンクロトロン放射で光る星雲が観測されそのX線光度、および星雲の膨張運動のエネルギーがこれに相当することがわかっていた。最近の進展としては、

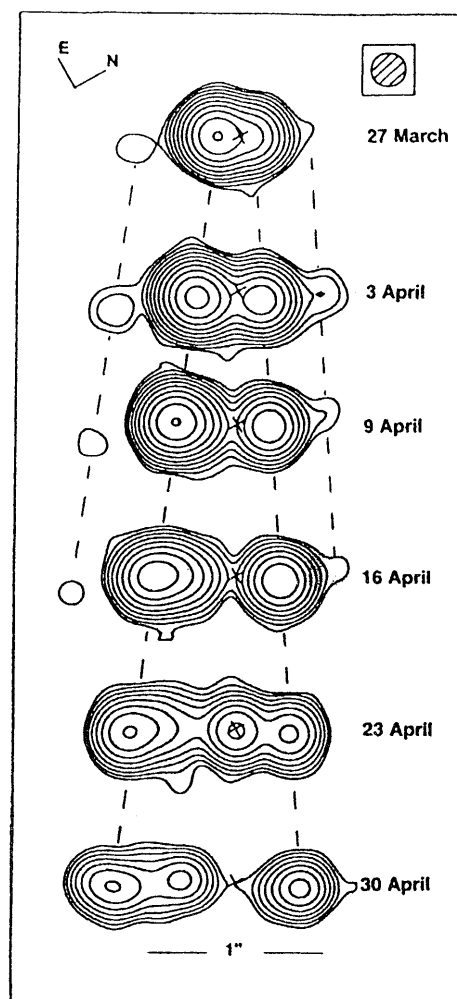


Fig. 1 Time evolution of a pair of radio blobs observed for GRS1915+105 in 1994 March to April [3].

カニ星雲以外にもかなりの数のパルサーの周囲にシンクロトロン星雲が発見されるとともに、TeVガンマ線で光っているものもいくつか見つかった[5]。これらのことからパルサーはローレンツ因子が 10^7 にもなる超相対論的な電子陽電子風を吹き出し、これが周囲の熱的物質と衝突することによって衝撃波をつくり、そこで加速された電子陽電子がシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱で光っているものと解釈されている。HST（ハッブル宇宙望遠鏡）によるカニ星雲の観測はパルサー風と周囲との相互作用の様子を詳しく描き出している[6]。Fig. 2 にその一例を示しておく。

真空中におかれた磁気双極子がどうしてこのような相対論的パルサー風をつくることができるのだろうか？パルサーの近傍は強磁場であり、回転により単極誘導で

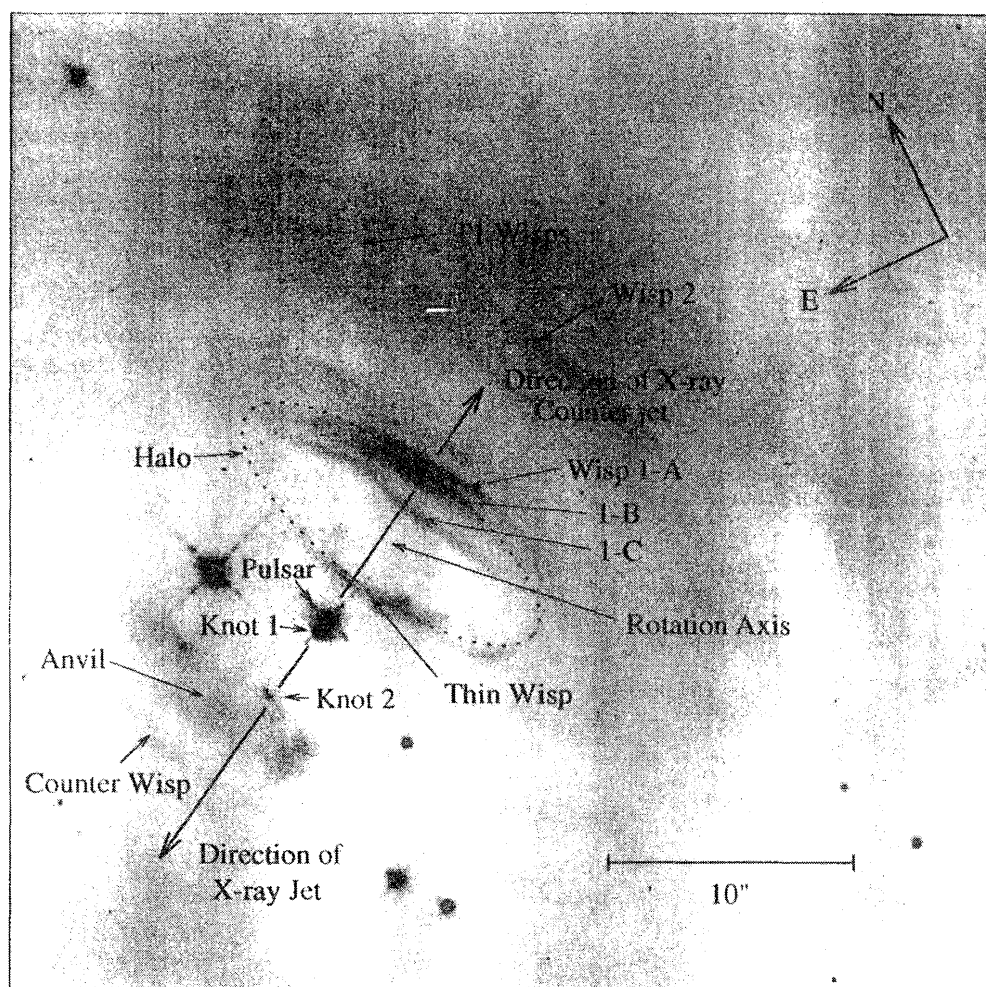


Fig. 2 The structure of the inner part of the Crab Nebula taken with HST [6].

電場が発生するが、自発的に荷電粒子が中性子星から引き出されて、電場はシールドされてしまう。しかし、荷電粒子の流れが存在すると、磁気圏内でも完全に電場が消されことなく一部では沿磁力線電場があって粒子加速が起こり、曲率放射によってガンマ線を放射する。ガンマ線は強い磁場と相互作用して電子陽電子対をつくる。一個の電子から千個程度の電子陽電子対ができるカスケードが起こっていれば、いろいろな観測をうまく説明できそうである[7,8]。磁気圏からでた電子陽電子対の流れは $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 力によって加速され大きなローレンツ因子を得る。実際、ガンマ線のパルス成分もいくつかのパルサーから観測されており、磁極付近の物理過程の詳しい検討も可能になってきている。

8.4 活動銀河中心核

活動銀河中心核 (Active Galactic Nuclei 略称 AGN) は、系外銀河の中心核が非常に明るく輝いているものであり、太陽の一兆倍を超える大きな光度、太陽系の大きさ程度の小さな放射領域、数日以下の速い時間変動、電波からガンマ線までの広い波長域にわたる放射スペクトル等々によって特徴づけられる。そのエネルギー源は $10^8 M_{\odot}$ 程度の質量の大質量ブラックホールへのガスの降積にともなう重力エネルギーの解放であるとされており、この意味でX線星と同様の物理現象がおこっているといえる。AGNの理論のよいレビューとして[9]がある。

最近の観測的進展の中で特に目を引くものは、Blazarと呼ばれるAGNからの強いガンマ線放射の発見であろう。Blazarは短時間の激しい時間変動や非熱的な放射

スペクトルなどで特徴づけられるが、その極端な性質は中心のブラックホールから放出されたローレンツ因子が10程度の相対論的ジェットを真つ正面から観測しているため、相対論的ビーミングの効果を強く受けている天体であると解釈されている。ガンマ線放射の検出はジェットからの逆コンプトン散乱をとらえたもので、電波や可視光でのシンクロトン放射の観測と併せて、ジェットの物理状態をより正確に求められるようになってきた。その結果、ジェットの運動学的光度が輻射にかかわっている電子陽電子対だけでエディントン光度に近くなっていること、磁場のエネルギー密度は比較的強く電子陽電子対のエネルギー密度の30分の1程度であること、ジェットはシュワルツシルト半径の100倍から1,000倍の距離ですでに相対論的な速度まで加速されていること、個々の電子陽電子対の加速機構はおそらく衝撃波加速と考えられるが、TeV ガンマ線が検出されているものもあるので非常に効率よくTeV以上まで加速されていることなどが明らかになってきた[10]。

ジェットのバルクな加速機構としてはこれまで磁場によるのではないかと考えていた人が多いが、上の観測は磁場による加速に不利であることは否めない。銀河系内ジェットの観測とも合わせ、より現実的なモデルの構築が課題となっている。

8.5 ガンマ線バースト

ここ一年の間にガンマ線バーストについては大きな進展があった。ガンマ線バーストは、文字通り数秒間続いて強いガンマ線が検出される現象で、これまで光学対応天体が見つからないため、どんな距離にあるどんな天体が起こすものなのかまったく不明であった謎の天体現象である。イタリアーオランダの天文衛星 BeppoSAX は明るいガンマ線バーストの位置を発生後数時間のうちに決定することに成功し、可視光での追尾観測によりガンマ線バースト源の光学対応天体の観測がはじめて成功したのである。その結果ガンマ線バーストの終了後もアフタグローと呼ばれる可視光やX線での残光が発見された。最初の例 GBR970228 では可視光やX線ではガンマ線バーストのアフタグローは数ヶ月間続き、次第に暗くなっていった。点状のアフタグローの近くには非常に暗い拡がった天体もあり、遠方の銀河ではないかと思われる[11]。GBR970508 は可視光のアフタグローの分光観測によって赤方偏移 $z = 0.835$ の MgII 吸収線が同定された。これはアフタグロー天体が少なくともそれよりも遠方にあることを示しており、ガンマ線バーストが

宇宙論的距離で起こったものであることを決定づけた[12]。さらにこのバーストでは電波のアフタグローも発見されている。GBR971214 では光学対応天体を囲む暗い拡がった天体の赤方偏移が $z = 3.42$ と測定された。もし、ガンマ線バーストが等方に放射しているとするとそのエネルギーは 3×10^{53} erg という莫大なものになる[13]。Fig. 3に可視光におけるアフタグローの光度曲線を示しておく[14]。

ガンマ線バーストのモデルとしてはファイアボールモデルが通説となっている[15]。最初のエネルギー源には不確定なものがあるが、何らかの原因で 10^{6-8} cm 程度の領域に 10^{51-52} erg のエネルギーが解放されたと仮定する。これを Fire Ball と呼んでもよいであろう。サイズやエネルギーは超新星爆発と同程度であるが、Fire Ball はバリオンの割合が著しく小さく、その静止エネルギーは全エネルギーの100分の1から1,000分の1だとするのである。Fire Ball の初期状態は輻射（相対論的な電子陽電子対を含む）のかたまりである。Fire Ball は膨張につれ冷え、電子陽電子対も消滅するがしばらくの間は光学的に厚いので、結局エネルギーはバリオンの運動エネルギーに転化しローレンツ因子が100~1,000の相対論的に膨張するシェルが形成される。このシェルが外部の物質と相互作用したり、内部衝撃波を起こしたりして粒子加速が起こった結果、シンクロトン放射やコンプトン散乱によってガンマ線バーストとそのアフタグローが起こると考えるのである。輻射はシェルが 10^{16} cm 程度まで膨張してから発生するので数秒という短いタイムスケールがでないように思われるかも知れないが相対論的な運動学の結果、観測されるタイムスケールは数秒になるのである

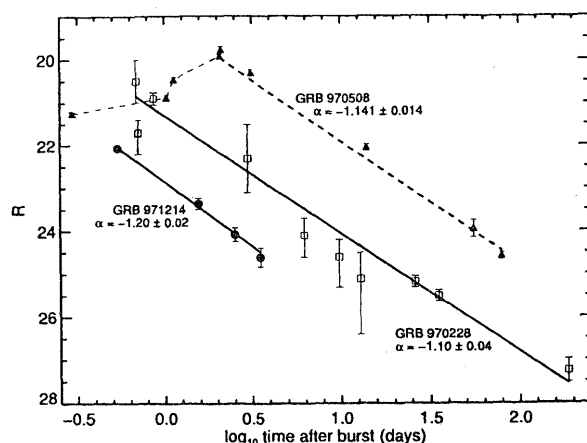


Fig. 3 R-band light curves of afterglow of three gamma-ray bursts [14].

る。もし、Fire Ball 生成時にバリオン一個あたりのエネルギーが静止エネルギー以下だとすると、その後の膨張は非相対論的になり、定性的性質は超新星爆発とかわらない。逆に、バリオン一個あたりのエネルギーがあまりに大きすぎると、msec 程度の長さのガンマ線のパルスになり、観測には合わない。バリオン一個あたりのエネルギーが静止エネルギーの100倍から1,000倍のときに、このモデルはうまく観測事実と適合するのである。

アフタグローの発見後多く研究者が Fire Ball モデルに基づいた解析を行い、基本的にはこれが正しいモデルであろうと考えられている。しかし、二つの基本的問題が残っている。一つはその発生機構である。バリオンをほとんど含まない Fire Ball をつくるのが本当にできるかどうかは難問であり、二つの中性子星が合体するときにでたニュートリノと反ニュートリノが星の外部で衝突して電子陽電子対に転化するモデル、超新星爆発に失敗してできたブラックホールへ残りの物質が落ちるエネルギーを利用するモデルなどが提案されているがどれも十分な程度には成功していない。もう一つの問題はなぜ輻射がガンマ線に集中するかという問題である。輻射スペクトルは粒子加速過程と磁場の強さで決まるが、似たような過程の働く Blazar でも天体ごとに輻射強度のピークは異なっている。ガンマ線バーストをガンマ線バースト (X線や可視光でなく) としているのはどのような機構なのかははっきりとは理解されていない。

8.6 終わりに

以上、宇宙における高エネルギー現象をかいつまんで見てきた。共通の問題が浮き上がってくるのに気がつくであろう。一つは、エネルギー源が何であれ、相対論的なエネルギーを持つビームをどうやってつくるのかという問題である。ガンマ線バーストのモデルのように Fire Ball は Blazar や銀河系内ジェット源でもできているのだろうか？ Fire ball の作り方とジェットのバルク加速の仕方には共通性があるようにも思われる。二つ目は粒子加速機構である。ガンマ線バーストでも Blazar でも、またパルサー風でもバルクな運動エネルギーの散逸は非熱的粒子の加速を通しておこっており、単純な熱化ではない。宇宙物理の世界では通常、非熱的粒子の加速機構としてフェルミ (Fermi) 加速 (特に衝撃波におけるフェルミ加速) を念頭に置き解析して、大雑把な観測の説明に成功している。

衝撃波によるフェルミ加速では、衝撃波面上流と下

流とが収束する流れを構成しているため、磁場の乱れで散乱され上流と下流とを往復できる非熱的粒子は統計的に加速されることになる。この機構は詳細な点では未解決の問題もあるが、指数が衝撃波の圧縮比のみで決まるべきスペクトルを形成する点で魅力的なものであり、大方の支持を受けている。[16,17]

実験室プラズマ物理の世界ではフェルミ加速はあまりにも時間がかかりすぎるので、関心が薄いようである。そこで考えられている加速機構はジャイロ時間のスケールのものである。ところで、宇宙物理の世界でもたとえばパルサー風や超新星残骸で加速される粒子の最大エネルギー付近では実は相対論的效果でジャイロ周期が長くなるため、ジャイロ周期程度の間の加速を必要としている。この辺のところが宇宙物理と実験室との接点として重要になるのではなかろうか。

参考文献

- [1] W.H.G. Lewin, J. van Paradijs and E.P.J. van den Heuvel, *X-Ray Binaries* (Cambridge Univ. Press 1997).
- [2] E.P.T. Liang, *Physics Reports* **302**, 67 (1998).
- [3] I.F. Mirabel and L.F. Rodrigues, *Nature* **371**, 46 (1994).
- [4] S.J. Tingay *et al.*, *Nature* **374**, 141 (1995).
- [5] *Neutron Stars and Pulsars*, eds. N. Shibasaki, N. Kawai, S. Shibata and T. Kifune (Universal Academy Press, 1998).
- [6] J.J. Hester *et al.*, *Astrophys. J.* **448**, 240 (1995).
- [7] J.K. Daugherty and A.K. Harding, *Astrophys. J.* **458**, 278 (1996).
- [8] J. Miyazaki and F. Takahara, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **290**, 49 (1997).
- [9] R.D. Blandford, *Saas-Fee Advanced Course 20 Active Galactic Nuclei* (Springer, 1990).
- [10] 高原文郎：日本物理学会誌 **53**, 405 (1998).
- [11] K.C. Sahu *et al.*, *Nature* **387**, 476 (1997).
- [12] M.R. Metzger *et al.*, *Nature* **387**, 878 (1997).
- [13] S.R. Kulkarni *et al.*, *Nature* **393**, 35 (1998).
- [14] A. Diercks *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **503**, L105 (1998).
- [15] P. Meszaros and M. Rees, *Astrophys. J.* **405**, 278 (1993).
- [16] R. Blandford and D. Eichler, *Physics Reports* **154**, 1 (1987).
- [17] 政井邦昭：プラズマ・核融合学会誌 **73**, 195 (1998).