

ガンマ線バーストの初期残光

小林 史歩

大阪大学理学部宇宙地球

概要

ガンマ線バーストは、宇宙でもっとも明るく、もっとも相対論的な天体である。1997年にガンマ線バーストは、X線、可視光、電波で長く輝く残光(afterglow)を伴っているのが発見され、ガンマ線バーストの理解が、近年、飛躍的に進んだ。現在では、超相対論的速度のフローが、ガンマ線バーストの発生に深く関係していると一般に考えられている。これまで技術的問題により、バーストから数時間以降でしか残光は観測されなかつたが、新しいX線観測衛星HETEや大型のロボット望遠鏡の登場により、初期の残光も観測可能となる。ここでは、逆行衝撃波からの放射について述べる。

1 はじめに

ガンマ線バーストとは、100 keV前後のガンマ線が数ミリ秒から数百秒間バースト的に1日に数回宇宙からやってくる現象である。米国の軍事衛星が冷戦時に偶然発見してから30年間、我々の銀河内の現象なのか、宇宙の果てで起こっている現象なのかと言ったことすら不明であった。しかし1997年イタリア、オランダのX線観測衛星BeppoSAXのブレークスルーにより、ガンマ線バーストは残光を伴っているのが発見され、ガンマ線バーストの理解が飛躍的に進んでいる¹⁾。

現在では、残光のスペクトルやバースト源が属する銀河のスペクトルの観測から、ガンマ線バーストが100億光年程度の宇宙論的な距離で起こっていることがはっきりとした²⁾。観測されているバーストの明るさを、宇宙論的距離にある線源で説明するためには、莫大なエネルギーが必要である。明るいものでは、等方的に放射が出ているとすると、太陽質量程度のエネルギーが数十秒で放出されることになる。このエネルギー放出率は、宇宙の全ての銀河のエネルギー放出率を合わせたものと同じかそれ以上になっている。つまり、ガンマ線バーストは、宇宙でもっとも激しく、明るい現象である。

高エネルギー光子を含む莫大なエネルギーが、バーストのすばやい時間変動から推測される小さな線源領域に放出されると電子陽電子対が多数生成される。線源は光学的に厚くなり、スペクトルは熱的なものとなるはずである。しかし観測されているスペクトルは、高エネルギー側にべき則で延びていて、電子陽電子対生成の閾値となる1MeV以上のエネルギーをもつ光子を多数含む。この矛盾は、コンパクトネス問題と呼ばれ、この問題をいかにして克服するかが、ガンマ線バーストを理解

する上で重要な鍵となった。歴史的には宇宙論的なモデルを排除する意味でコンパクトネス問題は提起されたのだが、線源がローレンツ因子 $\Gamma \sim 100$ 程度の相対論的速度で膨張していれば問題が起こらないことが、80年代に示された¹⁾。

現在、ガンマ線バーストの標準的なモデルとなっている火の玉モデルとは次のようにいくつかのステップからなるシナリオのことである。まずコンパクトなエンジン(エネルギー供給源)から、大量のエネルギーが発生、光子、電子、陽電子からなる火の玉が生まれる。火の玉の膨張につれて内部エネルギーが、火の玉にわずかに含まれるバリオンの運動エネルギーに変換され、相対論的速度で膨張する球殻が形成される。球殻が広がって光学的に薄くなったところで、その運動エネルギーが衝撃波により再度内部エネルギーにもどされる。最後にその内部エネルギーがシンクロトロン放射される。

ここでは、相対論的速度の球殻の起源を、少量のバリオンが混入した火の玉とした。しかし観測にかかるのは、そのような球殻が形成された後の時期だけなので、加速メカニズムとしては、何か他のものでもかまわない。火の玉モデルの本質は、物質が $\Gamma \sim 100$ 程度の相対論的速度で膨張する過程でどのように衝撃波を起こし、エネルギーを放射するかということである。エンジンとしては、中性子星連星の合体、大型の超新星爆発、マグネター(超強磁場をもったパルサー)といった説があるが、どれもまだ決め手に欠ける。しかし最近、ガンマ線バーストが、星形成領域でおこっているという観測や、超新星との関係を示唆する観測がなされ、大質量星との関係が盛んに議論されるようになっている²⁾。

2 火の玉モデルと時間スケール

衝撃波ができる原因としては、多くの球殻がいろいろな速度で広がるために内部で衝突が起こること、球殻が膨張して周りの星間物質に衝突していくことの2種類が考えられる。前者によるものを内部衝撃波、後者によるものを外部衝撃波と呼ぶ。ガンマ線バーストは、内部衝撃波によると考えられているが、内部衝撃波は、球殻の膨張を完全に止めることができない³⁾。球殻は星間物質中をさらに膨張して外部衝撃波により減速を受ける。したがってガンマ線バーストの後に、外部衝撃波が生み出すゆっくりと変化する放射が見られるはずである。これが残光である。

球殻は、相対論的速度で膨張していることから、バースト源で物事が起こっている時間スケールと我々が観測する時間スケールは大きく異なっている。エンジンは、10秒程度の間に多数の球殻を放出する(図を見よ)。球殻は、1時間程度掛けて半径 10^{14} cm 程度まで膨張して内部衝撃により、ガンマ線バーストを生成する。さらに球殻が数日掛けて 10^{16} cm 程度まで膨張した後に残光が発生する。しかし、球殻は、ほぼ光速で膨張しているので、観測者には、バーストと残光の始まりが、ほぼ同時となり得る。また、エンジンが球殻を放出する時間スケールが、バーストの継

続時間を与える。

これまで、X線観測衛星 BeppoSAX の技術的問題により、バーストから数時間以内の初期残光を観測することができなかった。この時期は残光がまだ明るく、物理的にもおもしろい観測が出てくるはずである。現在の残光理論は非常にシンプルで、観測を非常によく説明するが、それはこれまで観測が行われてきた時期の外部衝撃波が少ないパラメータにより決定されることによる。つまりエンジン、火の玉の情報の大部分が、すでに失われている時期しかこれまで観測できなかつたとも言える。新しいX線観測衛星 HETE や、ロボット光学望遠鏡の登場により、観測の空白期は埋められつつある。

3 閃光

衛星でバーストのトリガーがかかると、その天球上の位置が数秒内にネットワークを通じて全世界に発信される。その信号に自動的に反応してバースト方向を向く可視光望遠鏡 ROTSE が、GRB 990123 のバースト中に最大 9 等級という閃光 (optical flash) を発見した。ROTSE により観測された閃光は、 t^{-2} で減衰したのに対して、大型望遠鏡で観測が始まった数時間後以降の残光の減衰は、通常の t^{-1} の振る舞いであった。またこのバーストの電波残光は、バーストから 1 日後に輝き (電波フレア) すぐに暗くなるといった速い変化を見せた。

この閃光、電波フレアは、逆行衝撃波からの放射として説明できる。逆行衝撃波が球殻を横切り終わった時、球殻と順行衝撃波を受けた星間物質の接触面で圧力、速度が等しいことから、内部エネルギーの密度は等しい。しかし球殻の質量密度の方が大きいので、物質中の電子 1 個当たりのエネルギーは、球殻の方少ない。このことから順行衝撃波が X 線で光るのに対して逆行衝撃波は可視光で光る。球殻は膨張するにつれて、速度と温度が下がるので、そこからの放射の振動数、明るさも下がる。電波フレアは、断熱膨張した球殻からの放射として解釈できる⁴⁾。

逆行衝撃波からの放射として GRB990123 の閃光は、よく説明できるが、これまでそのような閃光は、GRB990123 でしか観測されていない。(電波フレアと解釈できる例は多数あるのだが。) なぜ GRB990123 でしか見つかっていないのであろうか? まず GRB990123 は、典型的なバーストよりも 100 倍以上明るいことから、典型的なバーストよりも明るい閃光を放つと考えられる。しかし、ROTSE グループは、位置が精度良く決まった 6 個のイベントについて、閃光が見られなかつたことを報告している。特に、その内の 2 つのイベントについては、閃光の明るさがバーストの明るさに比例しているなら、検出できる感度で観測を行っていた。

検出されない理由としてまず考えられるのは、線源まわりのダストによる減光である。X 線残光が観測され、位置が精度良く決まったバーストの内、可視光残光が観測されているのは、半分程度である。今後の赤外残光観測により何らかの示唆が

得られるかもしれない。また、球殻の流体力学を議論することにより、逆行衝撃波が球殻系でローレンツ因子 $\gamma \sim 2$ 程度で伝播する時が、もっとも閃光が明るくなることが示せる⁵⁾。GRB990123の閃光観測から球殻の物理量を評価すると、ちょうどこの明るい閃光を生み出す場合になっている。GRB990123は、非常に幸運なイベントだった可能性がある。今後、閃光が観測されればエンジンやその周りの環境に対して制限が得られるであろう。

参考文献

- 1) Piran T., 2000, Phys. Rep. 333, 529.
- 2) Djorgovski S. G., et al., 2001, in Proc, IX Marcel Grossmann Meeting, eds. Gurzadyan V., Jantzen R., Ruffini R. (World Scientific, Singapore) in press (astro-ph/0106574).
- 3) Kobayashi S, Sari R., 2001, ApJ 551, 934.
- 4) Kobayashi S, Sari R., 2000, ApJ 542, 819.
- 5) Kobayashi S, 2000, ApJ 545, 807.

