

近傍で発生したガンマ線バースト GRB 030329

植 村 誠, VSNET Collaboration チーム

〈京都大学宇宙物理学教室 〒606-8502 京都市左京区北白川〉

e-mail: uemura@kusastro.kyoto-u.ac.jp

ガンマ線バーストとは宇宙最大規模の爆発現象で、発見から 30 年たった現在でもまだ多くの謎が未解決のままです。2003 年 3 月 29 日、非常に明るいガンマ線バーストが発生し研究者の大きな注目を集めました。残光の追観測が世界中で行われ、ガンマ線バーストが超新星爆発と関連する現象であることが確認されるなど、このバーストは研究史上に確実に名が残るであろうイベントになりました。また、バーストが発生したのは日本時間の夕方、日本での観測条件が最良と言えるものでした。そのため日本では、アマチュアの方々を含め、10 カ所以上で残光観測が行われ、この残光の詳細な振舞いを明らかにすることに成功しています。本稿では筆者らが観測した早期の光度曲線について紹介します。

1. 謎の爆発現象「ガンマ線バースト」

「ガンマ線」とは X 線よりも波長の短い電磁波のことです。ガンマ線域で 0.01 秒から数百秒の短い間だけ非常に明るく輝く現象が最初に報告されたのは 1973 年のことで、それはアメリカの核実験監視衛星による偶発の発見でした。この現象はガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; GRB) と呼ばれ、その後の研究で 1 日に 1 回程度の頻度で検出される、広い宇宙の中では決して珍しくない、ありふれた現象であることがわかっています。しかし、発見から約 20 年の間はこの現象が太陽系内で起こっているのか、銀河系の中の現象なのか、それともはるか遠方での現象なのか、それすらも結論できない状況でした。

1990 年代に入り、状況は劇的に変わります。1992 年、この時代に活躍したコンプトン衛星の観測によってガンマ線バーストが全天に均一に分布して発生していることが発表されました¹⁾。銀河系内の現象ならば、天の川に集中した分布が期待されるので、この結果はガンマ線バーストが銀河

系外の現象であることを示唆しました。そして 1997 年、ついにガンマ線以外の波長域 (X 線、可視光、電波など) でもガンマ線バーストに付随した新天体 (「残光」と呼ばれる) の発見がやはり報告されました²⁾。可視域のスペクトルからは大きな赤方偏移が検出され、ここに至って、ガンマ線バーストは百億光年彼方の宇宙論的な距離で起こっていることが確定したのです。さらに 1999 年には可視域で 8.9 等という非常に明るい残光が観測され、これ以降、ガンマ線バーストの観測は衛星や大望遠鏡だけでなく、小型の望遠鏡やさらには双眼鏡でも手の届きうる天体になりました。

遠方での現象であるにもかかわらず地球から明るく見えることは、爆発のエネルギーが非常に大きいことを意味します。普通に等方的な爆発を考えると、ガンマ線バーストの爆発エネルギーは超新星のそれより 2 桁も大きくなります。一体何が起こってそのような巨大なエネルギーが解放されるのか？ ガンマ線バーストとその残光現象の正体は何なのか？ 宇宙最大の爆発現象となったガンマ線バーストはさまざまな分野の研究者を巻き

込んで現代天文学の大きな課題の一つになっていきました。

ガンマ線バーストを説明する現在最も有力なモデルは「火の玉モデル」と呼ばれるものです。このモデルでは、最初にガンマ線光子とその相互作用から生じる電子・陽電子を含むエネルギーの塊＝火の玉が生まれると考えます。この火の玉はすぐに膨張を開始し、やがて光子が電子・陽電子に邪魔されることなく自由に伝播できるようになり、火の玉のエネルギーはバリオンの運動エネルギーに転換され、相対論的な速度でバリオンのシェル（殻）が膨張します。われわれがガンマ線バーストとして観測しているものは、この段階で複数のシェル同士が衝突して発生する光だと考えられ、一方で残光はシェルと星間物質との衝撃波面で発生する光だとされています。さらに、残光のスペクトルや光度曲線の研究から、シェルの膨張は等方的ではなく、狭い角度内に絞られた「ジェット」状であると考えられています。ガンマ線バーストがジェットだとすれば、実際の爆発エネルギーは等方爆発の場合より小さくなり、超新星のエネルギーに近くなります。

このモデルは最初に「火の玉」が生まれれば、その予測される時間進化によって観測をよく説明しますが、一方で火の玉を生み出した原因はわかっていませんでした。超新星の原因である大質量星の崩壊や、ほかには連星中性子星の合体が提案されていましたが、確定的な観測的証拠は得られていませんでした。また、実際にどのような加速機構が働いて相対論的な速度までジェットを加速できるのか、という基本的な課題もまだ解決していません。

2. 謎の解明を妨げるもの、それは現象の短さと突発性

発見から30年が経過しても、ガンマ線バーストにはまだ多くの謎が残されています。一体何が研究のスムーズな進展を妨げてきたのでしょうか？

最も大きな原因は、この現象が予測できない突発現象で、しかも爆発の持続期間が極めて短いことにあります。上にも述べたように、ガンマ線バーストそのものの持続時間はまさに「一瞬」(0.01～100秒)です。現在の観測設備では、その一瞬を観測衛星が捕らえ、情報を地上に送り、最後に地上の観測者による残光観測の開始に至ります。さらに、残光現象もバースト同様、持続時間が短く(1～2日しか観測できないものも多い)、1カ所の望遠鏡による観測では現象の全体像を把握することは不可能です。したがって、ガンマ線バーストの研究には観測衛星による迅速な情報伝達と、複数の観測所による多経度での観測、すなわち大規模な国際共同観測が必要不可欠なのです。地上観測者の情報交換と即時観測のためのネットワークシステム(GCN: <http://gcn.gsfc.nasa.gov/> や VSNET: <http://vsnet.kusastro.kyoto-u.ac.jp/vsnet/index-j.html>)が確立していく一方で、これまでの観測衛星の性能ではバーストから少なくとも数時間経過しないと地上へ情報が伝わってきませんでした。実際、地上での観測が開始される頃にはすでに残光が暗くなっていることが多く、早期の詳細な観測ができないまま、ガンマ線バーストの正体を議論するしかありませんでした。

このような状況の中、次章で詳しく紹介するように、これまでで最もわれわれから近いところでガンマ線バーストが発生し、世界中の多くの観測者によって残光の詳細なデータが得られたのです。

ちなみに、筆者らの研究グループは突発現象や変光星の緊急速報や観測結果などを web, ftp, e-mail で即時に伝達する変光星ネットワーク「VSNET」(Variable Star Network)を運営しています。VSNETは世界50カ国以上、1,300名を超えるメンバーが参加しているネットワークで、NASAが運営しているガンマ線バーストネットワーク(GCN)の日本の情報拠点としても活動し

ています。国内でガンマ線バーストの観測に興味を持たれた方は VSNET のホームページをご覧ください。

3. 2003年3月29日：歴史的な「近傍」で「明るい」ガンマ線バースト

日本・アメリカ・ヨーロッパなどの研究機関による国際協同グループで製作された「HETE-2」は世界で最初のガンマ線バースト専用観測衛星です。2000年10月に打ち上げられた HETE-2 は地上からの調整作業を経て、最近ではバースト検出から数十秒で地上に情報を伝達するという高い性能を発揮しています。そして2003年3月29日、日本時間20時37分14秒にそのガンマ線バーストは「HETE-2」によって検出されました³⁾。ガンマ線バーストは便宜上、その発生した日の名前が付けられ、このバーストは「GRB 030329」と呼ばれます。

京都大学チームは新星、矮新星、ブラックホール連星系など、突発的に明るさが変動する天体を毎晩大学屋上の25cm望遠鏡と30cm望遠鏡を用いて観測しています(図1参照)。3月29日土曜日の京都は当時久しぶりによく晴れた夜を迎え、京大屋上では夕方からスーパーアウトバースト中の矮新星「かに座AK」を観測していました。21時50分、著者の携帯電話に届いたメールにはガンマ線バーストが発生した位置が記されていました。ガンマ線バーストの早期の観測は1分1秒を争います。それまでの「かに座AK」の観測を即座に打ち切り、メールに記された座標に急いで望遠鏡を向けました。望遠鏡が止まり、新しい星の配列がパソコンのディスプレイ上に見えてくると、わかりやすい星の配列のおかげで、すぐに星図との照合ができました。しかし、同時に、カタログには存在しない、非常に明るい新しい天体が目に飛びこんできました。とにかく観測を開始したのが21時53分。

それまでも京大チームは過去にいくつかのガ



図1 京都大学宇宙物理学教室屋上での観測の様子。手前に見えるのが25-cm望遠鏡で奥に見えるのが30-cm望遠鏡。鏡筒にかぶっているのは段ボールの筒で、吸水性が良いことから結露対策に、また雑誌をぺたぺた張りつけてバランスウェートの役割も果たす優れたもの。望遠鏡・CCDカメラはセットアップ後は研究室から制御する。冬場などは、気がついたら望遠鏡と制御用ノートパソコンが雪に埋もれている、などということもあるとかないとか。

ンマ線バースト残光の検出に成功してきました。2001年2月22日の残光検出は国内では初めての観測成功例でした(日本の望遠鏡としてはすでにハワイ・すばる望遠鏡の観測がありました)⁴⁾。2002年3月31日のバーストに関して言えば、世界で最も早期の残光観測に成功しています⁵⁾。また、2002年10月4日のバーストでは、バースト1時間後付近の早期残光の挙動を、30年のガンマ線バースト研究史上初めて、明らかにしました^{6),7)}。一方で、口径30cmの小型望遠鏡では検出限界に近いものも多く、観測後に画像処理をして解析しないと残光が見えてこないのがそれまで普通でした。観測中に解析前の生CCD画像を見て、「あ、これが残光だ」とすぐ判別できたことはなかったのです。

その日の晩、観測を開始してからも「ピカッ!!」

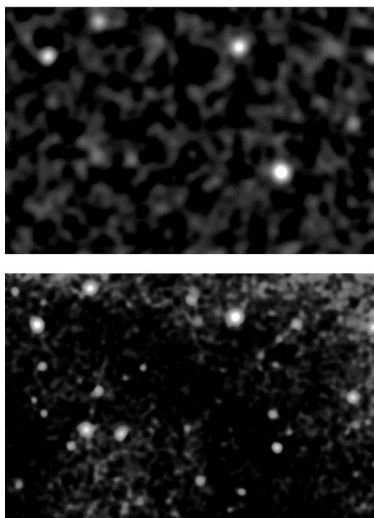


図 2 GRB 030329 の CCD 画像。上の図はバーストから 76 分後のもので観測地は京大屋上、下の図は 28.65 時間後のもので観測地は京大飛騨天文台。画像の視野は約 10 分×6 分。上下の図で限界等級が違うので、上の図には明るい星しか見えませんが、その効果を見ても、急速に減光している天体があるのがおわかりでしょうか？ その天体がガンマ線バーストの残光です。

と輝いている天体（図 2 参照）を見て、興奮しながらもわが目を疑う、といった状況でした。簡易解析してみると 12 等台で、数字を見て改めて驚きました。それまでは 18 等より暗いか、非常に早期の観測に成功した GRB 021004 の場合でも、京都では 16 等台でしか観測できていなかったのです。この明るい天体が小惑星でないことを確認し、同時に次々に保存されていく画像を測光していくと、簡易解析でも減光していく様子がわかり、GCN への報告を書き始めました。と、そうこうしているうちに国内外の観測者から非常に明るい新天体が現れている、という「第 1 報」が報告され、われわれもそれが急速に減光しているガンマ線バースト残光であることを報告しました^{8)~10)}。ちなみに、第 1 報を流したオーストラリアの Peterson と Price のレポートには残光候補天体の位置情報は記載されていましたが、その明るさに関

する情報はありませんでした。研究会の場で Price 本人にそのときの様子を聞いてみると、やはりそうとう慌てていたようで、とにかく暫定の座標だけでも一刻も早く流せ、ということで興奮状態だったようです。

翌日、NASA がこのガンマ線バーストに関するプレス・リリース (<http://www.gsfc.nasa.gov/news-release/releases/2003/h03-126.htm>) を行うなど、この 3 月 29 日のガンマ線バーストは一昼夜で世界中の研究者に知れ渡ることになりました。その後の残光スペクトルの観測によって、このガンマ線バーストは地球から 20 億光年という、これまで観測されたガンマ線バーストの中では最もわれわれに近い場所で発生したことがわかりました。バースト直後のスペクトルはこれまでもよく見られた特徴を示していましたが、バーストから 1 週間ほどたつと極超新星の特徴が現れ始め、ついにガンマ線バーストと極超新星は関連のある現象であることが観測的に明らかになったのです¹¹⁾。

4. われわれが捕えた、激しく変動する残光

GRB 030329 の発生が伝えられたときに夜 8 時だった日本は、早期の観測を行うのに絶好の位置にありました。バーストが出現した方向は北天、しし座の方向で、この位置も日本での観測に有利でした。これまで観測されてきた比較的暗いガンマ線バースト残光では、データ間隔がまばらで、連続した時間変化の様子は明らかではありませんでした。しかし、われわれはバースト 76 分後から観測を開始し、南アフリカの観測者と国際共同観測を行うことによって、連続 11 時間の減光していく様子を詳細に記録することに成功しました¹²⁾。

観測結果は図 3 に示してあります。このような天体の明るさの変動を示した図を一般に「光度曲線」と言います。ガンマ線バースト残光の場合、

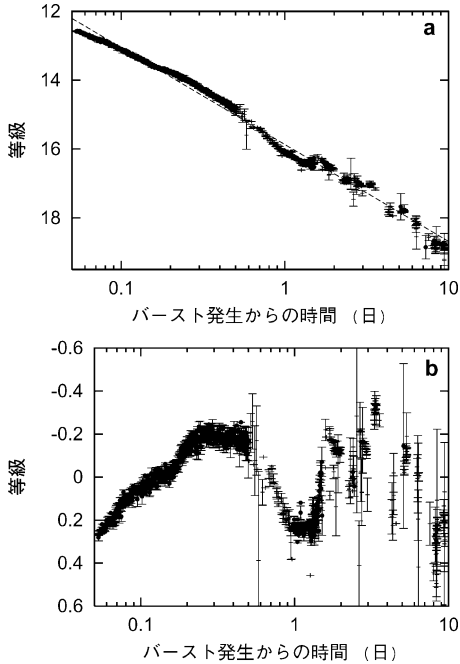


図 3 a: GRB 030329 の可視残光の光度曲線. 横軸はバーストからの時間で単位は日. 縦軸は残光の等級. 黒丸, 十字印はそれぞれわれわれの観測と GCN に報告された観測を表している. 点線からの変動成分を示したのが下の図 3b.

縦軸を等級(エネルギーの対数), 横軸をバーストからの時間(対数スケール)で光度曲線を描くと, おおむね直線で減光していくことは以前からわかっていました. これは, 上述のように, 相対論的な速度で噴出したジェットが星間ガスと衝突しながらその膨脹速度を徐々に落としていく描像で自然に理解されます. GRB 030329 もおおむね直線を描いて減光するのが図 3a からわかりますが, 一方で, われわれの連続観測によってその直線成分からは外れた変動成分が存在することが明らかになりました. 図 3b はこの変動成分を見やすくするため, 直線成分を差し引いた光度曲線です. バースト発生直後から, 変動現象が繰り返しているのがわかります.

早期の残光に変動を起こす原因はいくつか考えられています(図 4 参照). まず, 残光の理論モデ

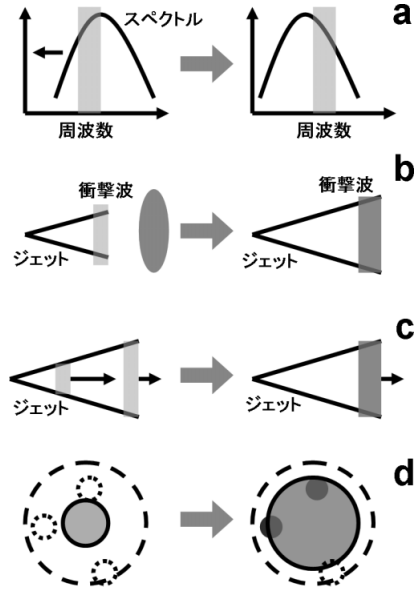


図 4 残光変動成分について提案されているモデルの一例. a: 衝撃波面からのシンクロトン放射の時間発展. 極大が観測帯域を通過する前後で変動成分として捕らえられる. b: 周辺密度の非均一性. c: Refreshed shock モデル. 後発のシェルが追いついて, エネルギーを追加する. d: Patchy shell モデル. 図はジェットを正面から見た図. 早期には相対論的ビーミングの効果が強いためジェットの一部分しか見えないが, 時間とともにジェット輝度分布の非均一性が見える.

ルが予言する光度の極大が早期に観測される可能性があります(図 4a)¹³⁾. 残光は衝撃波面で加速された電子からのシンクロトン放射だと考えられていますが, このシンクロトン放射のスペクトルのピーク波長は時間とともに長波長側へと移動します. 観測波長域をこのピークが通過すると残光は増光から減光へ転じ, 残光光度の極大が観測されることになり, 実際に電波観測ではこの極大が観測されています. 可視域の場合, バースト約 1 時間後に残光光度が極大を迎える可能性があるため, もしその付近から観測が開始された場合は, 残光光度曲線は単調な時間のベキでは表せず, 単調減光成分からの変動として観測されることとなります. この場合, 極大の前後で残光の色

が大きく変化するはずなので、今後の多色観測が重要になります。また、このシナリオの場合、変動成分は早期残光にしか現れないので、バースト後数日にわたって観測されるような変動成分のすべてを説明することはできません。

繰り返し現れる変動成分を説明するには、これまでの単純な「火の玉とジェット」モデルだけでは不十分です。ジェットの衝撃波面からのシンクロトロン放射を時間変化させるために、放射源の密度変化かもしくは（大きな密度変化を伴わない）エネルギー変化が考えられています（図4b～d）¹⁴⁾。ガンマ線バースト発生源の周囲の密度分布が一様でないことは以前から示唆されてきました。密度の高い領域を衝撃波が通過すると、一時的に減光速度が小さくなり、それが変動成分として観測される可能性があります（図4b）。このシナリオでは、例えば可視光では変動するがX線では変動しない、というような、ある波長を境に変動成分の挙動が異なることが理論的に予測されています。多波長観測によって、密度の非一様性による変動かどうかの判断ができるでしょう。放射面の見かけのエネルギーを変化させるシナリオは現在2通り考えられています。一つ目は後から追いついたシェルが前方のシェルに衝突してエネルギーを追加するモデル（refreshed shock model; 図4c）で、バースト後数日間にわたってほとんど振幅一定の変動を繰り返したGRB 030329には、このモデルが現在最有力です。光度曲線上の変動成分の傾きが一定になる、言い換えれば光度曲線が階段状になるのが、このモデルの特徴です。二つ目はジェットの内部で輝度分布が一様でないために光度曲線に変動が生じるモデル（patchy shell model; 図4d）で、残光に色の変化がないこと、変動の振幅が時間とともに減少すること、偏光の変

化が期待されること、が特徴です。

いずれにせよ、残光光度曲線の変動成分の研究は始まったばかりです。上述したように、提案されているモデルは、1. 連続観測による変動光度曲線の形状、2. 多色観測による色の変化、3. 多波長観測による変動成分の挙動の違い、によって検証が可能です。上記のものとは全く異なる変動成分のモデルもあるかもしれませんし、今後の研究が期待されます*。

5. 最後 に

GRB 030329 は長年の謎であった「火の玉の起源」や「超新星との関連」について大きな進展をもたらしました。それと同時に詳細な観測ができたことによって、光度曲線の変動成分などの新たな課題も生まれました。2004年にはガンマ線検出器とともに紫外可視望遠鏡も搭載した観測衛星「Swift」が打ち上げられる予定で、飛躍的に増加するであろう早期残光のデータが謎に対する新たな手がかりを与えるでしょう。

通常、百億光年彼方の天体は大望遠鏡でしか見ることができません。しかし、可視残光は8等台で観測された例もあり、ガンマ線バーストはそのような深宇宙を身近に感じることができる唯一の、非常に魅力的な天体現象です。アマチュア観測者の方々の中にも興味をもたれる方が増えており、実際GRB 030329では多くの方が残光の観測に成功されました。日本の天文愛好家の方々が残光の観測に成功したのは、今回が初めてです。筆者らの論文の共著者となった、ダイニクアストロパーク天究館（滋賀）の高橋 進さんと杉江 淳さん、大学院生で変光星の観測を趣味とされている前原裕之さんをはじめ、何人もの観測者が残光を捕らえました。また、フィンランドでは、望

* 本稿投稿後、他のグループによる観測結果がいくつか発表されていますので、簡単に紹介しておきます。東工大のグループ（佐藤ら¹⁵⁾）は、われわれと同様、早期残光に変動成分を検出しています。これらの変動はミシガン大・スミスらの論文内でも支持されています¹⁶⁾。一方で、理研の鳥居らと東大木曾観測所の浦田らのように、一部の変動成分については否定的な報告もあります^{17), 18)}。詳しくはそれぞれの論文をご覧ください。

遠鏡を眼で覗いて、残光を見ることに成功しています。これはおそらく世界初でしょう。最後になりましたが、このような熱心な変光星・突発現象観測者の方々の活動が2度と繰り返すことのない貴重な瞬間を記録し、天文学の発展に大きな寄与をもたらしていることを強調し、本稿を閉じたいと思います。

謝 辞

筆者は本件の共同研究者、特に本稿をまとめるにあたり貴重なコメントをいただいた加藤太一・山岡 均、両先生に深く感謝いたします。また、2003 GRB Conference でこの天体に関するお話や議論をしていただいた皆様にも、この場を借りてお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Meegan C. A., et al., 1992, Nature 355, 143
- 2) van Paradijs J., et al., 1997, Nature 386, 686
- 3) Vanderspek R., et al., 2003, GCN 1997
- 4) Uemura M., et al., 2001, GCN 984
- 5) Kato T., et al., 2002, GCN 1363
- 6) Uemura M., et al., 2002, GCN 1566
- 7) Uemura M., et al., 2003, PASJ 55, L31
- 8) Peterson B. A. & Price P. A., 2003, GCN 1985
- 9) Torii K., et al., 2003, GCN 1986
- 10) Uemura M., 2003, GCN 1989
- 11) Hjorth J., et al., 2003, Nature 423, 847
- 12) Uemura M., et al., 2003, Nature 423, 843

- 13) Kobayashi S., Zhang B., 2003, ApJ 582, L75
- 14) Nakar E., Piran T., Granot J., 2003, New Astronomy 8, 495
- 15) Sato R., et al., 2003, ApJ 599, L9
- 16) Smith D. A., et al., 2003, ApJ 596, L151
- 17) Torii K., et al., 2003, ApJ 597, L101
- 18) Urata Y., et al., 2004, ApJ in press. (astro-ph/0312145)

Extremely Bright Gamma-ray Burst, GRB 030329

Makoto UEMURA, and VSNET Collaboration Team, Department of Astronomy, Kyoto University

Abstract: Gamma-ray bursts are one of the most energetic events in the universe. Even after 30 years from the first report, we have a number of unsolved issues on the nature of GRBs. On 2003 Mar. 29, an extremely bright GRB was detected, which has been received much attention from GRB researchers. Observations of its afterglow were performed all over the world. They provided some important clues for the nature of GRBs, in particular, the observational evidence of the relationship between GRBs and supernovae. In Japan, the observational condition for this GRB was so good that many observers, including amateur astronomers, succeeded in detecting the afterglow. Here we report on the light curve of the optical afterglow of this GRB.