

ガンマ線バーストと私

河合 誠之

〈東京工業大学大学院基礎物理学専攻 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

e-mail: nkawai@phys.titech.ac.jp



ガンマ線バーストは、発見後当初は銀河系内中性子星上の現象であるという見方が有力であったが、1990年代末に遠方銀河の巨大爆発へと理解が大転回した。この転回を挟む時期に筆者がガンマ線バースト研究に巻き込まれ、「ぎんが」衛星と HETE 衛星の開発、そして「すばる」望遠鏡などを用いたアフターグロー（残光）の観測に関わった経緯を振り返る。さらに現在のガンマ線バースト研究の課題を提示する。

1. はじめに

本稿では、受賞対象になった研究内容の解説というよりも、私がこのテーマに関わる経緯の紆余曲折を紹介したいと思います。私がガンマ線バーストの研究をするようになったこと、そのなかで天文学上の大きな展開に立ち会えたことは、実に幸運だったと思っていますが、そこに至るきっかけのエピソードを振り返り、その機会ごとにお世話になった方々に感謝したいと思います。

まず、具体的な研究経過に入る前に、簡単にガンマ線バーストについて紹介しておきましょう。冷戦下の 1960 年代に宇宙空間での核実験を禁止する条約をソ連が守っているか検証するためにアメリカが打ち上げた核実験査察衛星ヴェラが、短時間の爆発的なガンマ線放射を検出したのが最初の観測で、学術誌には 1973 年に発表されました¹⁾。ガンマ線強度は極めて強く、爆発の瞬間には全天で最も明るいガンマ線源である、かに星雲やはくちょう座 X-1 などの数百倍の強度に達するものもあります。超新星残骸や定常 X 線源などの既知の高エネルギー天体との対応はありません。ガンマ線の到来方向を精度よく決めることはできないので、他の波長で見えている天体（星や

銀河）などと対応づけて距離を推定することもできず、その正体どころか、発生源の距離も真の爆発エネルギーも 30 年間説明されませんでした。X 線バーストやパルサーのように中性子星での現象であるという当初有力だった考え方は、1997 年の X 線と可視光の残光の発見、そして遠方の母銀河の同定によって覆され、現在、その多くは、大質量星の死によって発生する大爆発と考えられています。なぜ、これほどの見当違いに長いこと世界中の研究者がとらわれていたのか、なぜ、GRB の研究はこれほどの紆余曲折を経ることに

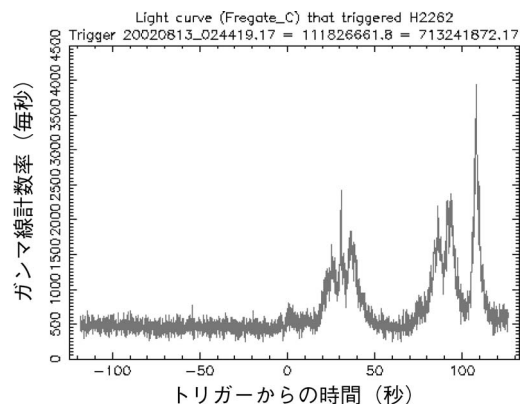


図1 ガンマ線バーストの光度曲線の例。
(HETE-2によって検出された GRB 020813)

なったのかを見ることによって、この研究の面白さの一端なりとも感じ取っていただければと思います。

2. バーストとの初めての出会い

2.1 すれちがい

大学院に入ったときに同じ部屋には、学位をとりたてで大に就職が決まったばかりの田原 譲氏がいらっしゃいました。田原さんの修士論文のテーマは西村 純先生とともに行った気球実験でのガンマ線バースト観測であり、世界的に見ても GRB 観測の先駆けだったわけです。150 時間の長時間気球実験を行い、「すだれコリメーター」を用いて到来方向を 0.3° の精度で決定、さらに GRB の強度と発生頻度の関係（いわゆる $\log N$ - $\log S$ 関係）を測定したという成果は今から見ても優れた研究でした²⁾。ただし、私は、特に強く興味をもったわけでもなく深く知ることにはなりませんでした。

2.2 まがい物：軟ガンマ線リピーター

修士 1 年の夏には、中津川で行われた天文夏の学校に参加しました。ここで、東大天文学科の修士学生グループが加藤万里子さんの指導のもとに「ガンマ線バースト」のレビューをしたことをはっきり覚えています。ここで紹介されたのは、GRB 790305 と名づけられた、大マゼラン雲の方向から来たバーストで、減衰部に 8 秒周期の変動がくっきり見えていて、中性子星の回転を示していることは疑いありませでした。また、 γ 線強度が非常に強いので、LMC の方向に重なっているのは偶然で、おそらく天の川銀河内、太陽系に比較的近いところに発生源があると考えられていたと思います。しかし、数年後、80 年代には、すでにこのバーストは、普通のガンマ線バーストではないことがほぼ明らかになってきました。これ以外のガンマ線バーストは明確な周期変動を示さないこと、また、同じところから繰り返し発生することがないのに対し、GRB 970305 と同じところ

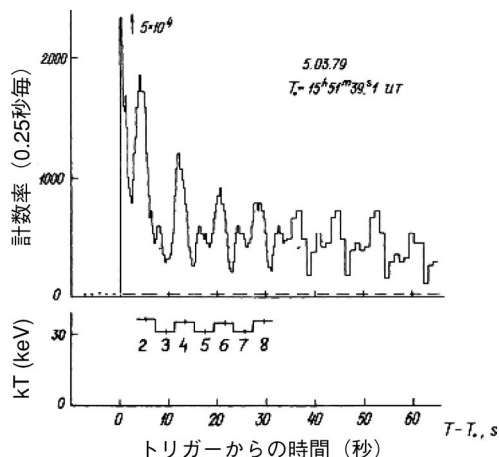


図2 GRB 790305 のガンマ線光度曲線³⁾。

から小さなバーストが繰り返し検出されたのです。同様の天体がほかにも発見され、これらは軟 γ 線リピーター (SGR) と呼ばれることになりました。SGR は、その後、特に磁場の強い中性子星マグネターであるという説が有力となっています。

このように GRB790305 は本来の GRB とは異なる現象ですが、GRB が中性子星の現象である、という先入観を多くの天文学者に刷り込む役割を果たしてしまったと思います。私も 90 年代半ばまでは、そう固く信じていました。

2.3 X 線バーストのハンター

この夏の学校のあとに「はくちょう」衛星追跡の当番として内之浦に行きました。「はくちょう」の最重要ターゲットは X 線バーストでした。この現象はガンマ線バーストとほぼ同時に発見されましたが、低質量の恒星と連星をなす中性子星表面の暴走的核融合による爆発であることが定説となっていました。X 線放射の時間変化も、爆発で熱せられた中性子星表面が 30 秒ぐらいで冷えていく様子をはっきり示しています。ガンマ線バーストも当時は中性子星表面の現象であるという説が有力でしたが、なぜ、ある天体では X 線バーストとなり、ある場合は、ガンマ線バーストとなる

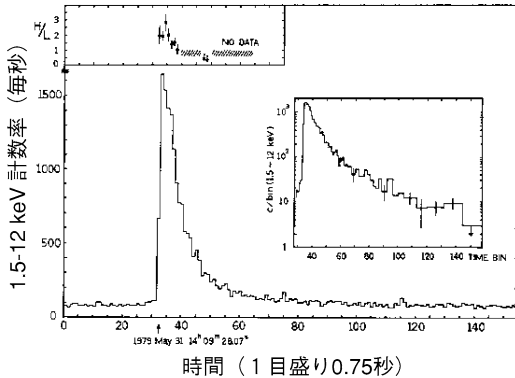


図3 「はくちょう」によって観測されたX線バーストの例⁴⁾。

のか、これはガンマ線バーストの起源が銀河系外ということが確定するまで、繰り返して議論されました。

はくちょう衛星追跡の仕事の一つは、1日に5回、90分間隔で衛星からダウンリンクされるデータを処理してタイプライター文字を使ってアスキーアートのように打ち出されたグラフからX線バーストを見つけることです。ここで、私は世界の誰よりも早く突発現象を見つける「バースト・ハント」の楽しみを刷り込まれたように思います。

2.4 マイナス質量の観測装置

私が修士大学院生だったときの指導教官は、日本のX線天文学の父である小田 稔先生でした。「はくちょう」、「てんま」に続く第3のX線天文衛星ASTRO-Cの構想段階で、小田先生が助手の村上敏夫氏(現 金沢大教授)を連れてアメリカの研究機関を歴訪しました。その訪問地の一つ、ガンマ線バーストを発見した核実験査察衛星ヴェラを作ったロスアラモス国立研究所で、エヴァンス宇宙科学部門長に、すべての天文衛星はガンマ線バースト検出器を載せるべきだと説得されたそうです。小田先生は、質量がマイナスならば載せてもよいと答えたところ、エヴァンスはその条件でOK、ただし、少々誤差は許してほしい、という

ことでASTRO-Cにガンマ線バースト検出器GBDを載せることが決まりました。

ロスアラモスから派遣されたエド・フェニモア博士が1年ほど宇宙研に滞在し、村上氏や西村研の山上氏とGBDの設計作業を行いました。さらに、フェニモア氏のスペクトルフィットのためのプログラムは大橋氏(現 首都大教授)らによって改造されて「てんま」の解析の標準ツールとして使われました。

2.5 ロス・アラモスとサンタ・クルーズ会議

ある日、X線グループのもう一人のリーダーである田中靖郎先生にフェニモア氏の部屋に行くように指示されました。何を話したのか覚えていないのですが、後で田中先生から、面接はOKだったからアメリカへ行ってみたら、と勧められました。夏に学生を雇って研究補助をさせる制度を利用して4カ月ロスアラモスに滞在することになりました。6月に渡米し、スペクトル解析のプログラム開発を行いました。7月には小田先生も組織委員を務める「高エネルギー・トランジェント天体」をテーマとする会議がカリフォルニア大サンタ・クルーズ校で開かれるため、そこでの発表を丁寧指導されました。いまますべてを守っているわけではありませんが、特に以下の2点は印象的でした。

- 1枚のスライドに書くのは3項目まで
- 大学院生病に気をつける

大学院生病とは、自分が行ったことをすべて発表しようとすることです。

サンタ・クルーズ会議については、以前、HETE-2に関する天文月報記事⁵⁾に書きましたので、詳しくはそちらをご覧くださいのですが、この会議の特別なところは、普通の研究発表会にとどまらず、ガンマ線バーストの謎を解くためにどのようなミッションが必要か、という課題に対して具体的な議論を行って実際に衛星ミッションの提案⁶⁾まで行ったことです。結論は何よりも位置情報が重要。X線で位置を決定して、紫

外・可視光で同時に光る天体の位置を高精度で求め、迅速に地上に伝達する、という HETE 衛星が提案されましたが、実現の見込みはすぐにはありませんでした。

3. 「ぎんが」と HETE

3.1 再びロス・アラモス

博士課程 2 年の夏、4 カ月を米国滞在で過ごした後、博士論文では中性子星連星 X 線源の一つであるラピッドバースターを題材に選びました。博士論文審査で主査の佐藤勝彦先生に絞られた後、辛うじて合格し、スキーに出かけて戻ってきたら応募していた学術振興会特別研究員の不採用通知が届いていました。田中先生は結果をすでにご承知だったようで、フェニモア氏に連絡をとってロスアラモスの博士研究員に応募する段取りを整えてありました。その勧めに従い、新たに面接を受けることもなく採用が決まって 1985 年 9 月からロスアラモス研究所の所長採用枠博士研究員となりました。ここで初めてガンマ線バーストの研究に参加することになりました。

ロスアラモスでの仕事は、SPARTAN 実験による銀河中心 X 線観測のデータ解析と、ロスアラモスで製作した ASTRO-C (後の「ぎんが」) 衛星に搭載するガンマ線バースト検出器開発 GBD の開発でした。この検出器は、ロスアラモスが検出器本体、日本 (宇宙研) が電子回路部を担当しました。私がまず行ったのは、GBD を構成する二つの検出器のうちの一つ、シンチレーション検出器の特性検査でした。アメリカ製の光電子増倍管の一様性が極めて悪いために所期のエネルギー分解能が得られないことがわかりました。この問題は、日本側と相談の結果「てんま」衛星のスペア品として宇宙研に残っていた日本製の光電子増倍管を使うこととで解決されました。一方、X 線領域を測る比例計数管も、プロトタイプ検出器の両端の増幅率が極端に違うことがわかりましたので、改善のため試作実験を行いました。実験室で

一緒に仕事をしたのは、GRB 発見者であるレイ・クレバサデル博士とジェリー・コナー博士という年配の研究者でした。ガス増幅率を決める比例計数管内部の電場を一様にするために、いろいろ工夫をこらした設計を完成させ、ニューヨーク州のロングアイランドにある LND という会社で製作させました。日本に納入する期限まで時間がないので、ガス詰めが終わる日に工場に私が出向き、その場で受け入れ試験を行ってロスアラモスに持ち帰るつもりでいたところ、すぐにガス漏れがわかり、作業はやり直しとなりました。結局、新設計の検出器は打ち上げには間に合わずに、プロトタイプに改修を施して衛星に搭載しました。

このようにして作られた「ぎんが GBD」は、2 keV から 400 keV にわたる広いエネルギー範囲を同時に連続的に観測できる初めての装置でした。観測の結果、20 keV 付近と 40 keV 付近に吸収構造が見つかり、中性子星表面の強磁場によるサイクロトロン共鳴吸収であるという解釈に基づいて、ガンマ線バーストの中性子星起源説を支える強力な証拠と考えられるようになります^{7),8)}。しかし、この結果は 90 年代に活躍した米国のコン

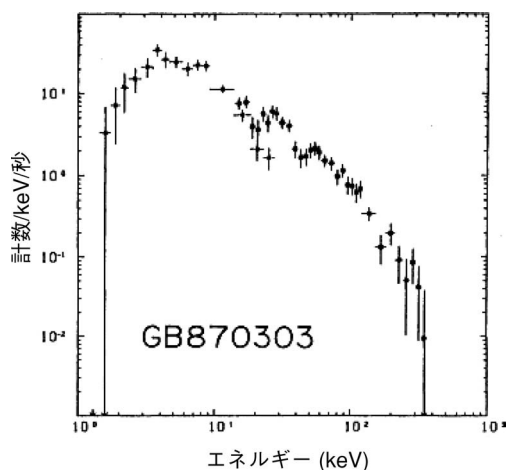


図4 「ぎんが」GBDによって観測されたガンマ線バーストのスペクトル例。20 keVと40 keV付近に吸収が見られる⁷⁾。

プトン天文台衛星 BATSE 検出器では確認されなかったため、HETE 衛星の設計においては、「ぎんが」GBDの結果の確認が（もともとの目的である）位置決定と並んで設計上の大きな要素となりました。

3.2 HETEの始動

ロスアラモスでポストドクをしていた1986年1月には、ヒューストンで開かれた米国天文学会年會に参加しました。この會場で、MITのG. リッカー博士がフェニモアに声をかけてきました。1983年のサンタ・クルーズ會議において理論家主導で立案されたHETEを実現させよう、という提案でした。私は、たまたまその場面に立ち会ったものの、このときは自分がHETE製作に参加するとは全く予想していませんでした。その後、リッカーは精力的に活動し、この種の衛星の募集は全くなかったにもかかわらずNASAにHETEを提案し、認めさせることに成功しました。最初の案では、シャトルのカーゴベイから、バネを使って多数の小型人工衛星を放出するGAS缶を用いるというものでした。NASAは、開発費用を抑えるために国際協力をとりつけること

という条件を与えました。

1987年1月から私が採用された理化学研究所宇宙放射線研究室では、リーダーである松岡主任研究員は、宇宙研のX線衛星プロジェクトの一翼を担うだけでなく、理研の独自のプロジェクトに意欲を燃やしていました。そこに海外パートナーを求めてリッカーがやってきたわけです。折よく、私の指導教官だった小田先生は私が来た3カ月後に理研の理事長に就任していました。HETEのモットー **Cheaper, Faster, Better**（より安く、より速く、より良く）は、小田先生が宇宙研で追求していた日本の衛星の理念にそっくりで、自分はHETEの構想の父であると自負しておられたようです。理研では松岡主任研究員と私のほかに、吉田篤正氏（現 青学大教授）、山内 誠研究員（現 宮崎大教授）が新たに加わり、ガンマ線バーストの位置決めという最も重要な任務を担う広視野X線監視装置(WXM)の開発を開始しました。

その後のHETEの開発から1996年の打上げ失敗、そして2000年の2号機HETE-2の打上げまでのエピソードについては、天文月報に以前に書

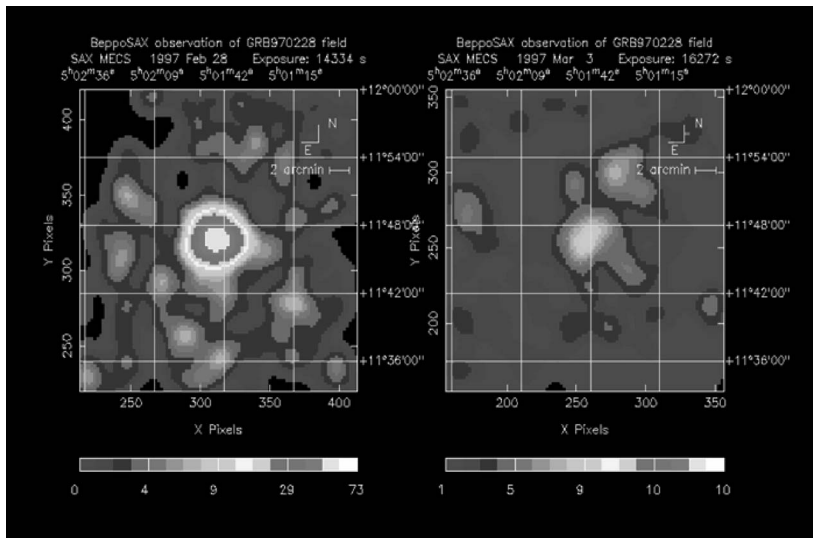


図5 イタリアのX線天文衛星BeppoSAXによって、世界で初めてとらえられたガンマ線バーストのX線残光画像⁹⁾。発生8時間後(左)と3日後、この画像が世界で初めて公開されたのは理研の研究会。

いた記事⁵⁾を、ぜひご参照ください。一緒に HETE を開発した、MIT、ロスアラモス、CESR (仏トゥールーズ)、シカゴ大などのメンバーは私にとって一生の友人となりました。

3.3 友人に残光発見を出し抜かれる

以前の記事にも書きましたが、HETE の目標であった、位置速報に基づく光学対応天体の同定は、皮肉にも HETE 一号機打上げ失敗の直後に、イタリアの X 線天文衛星 BeppoSAX による X 線残光の発見をきっかけに実現してしまいました^{9),10)}。その中心人物の Luigi Piro 博士は、実はわれわれに馴染みの深い人物でした。Piro 氏は 1980 年代末にポスドクとして理研に 1 年間滞在し、当時稼働していた世界唯一の X 線天文衛星「ぎんが」を用いて活動銀河核の研究を松岡先生と行っていました。私自身は AGN を研究テーマとしていなかったので当時は研究上の協力関係はありませんでしたが、年の近い者同士、毎日理研のプールで泳ぐなど親しく付き合っていました。帰国後 10 年近く経った 1997 年 3 月 3-5 日に理研で開催した、全天 X 線観測をテーマとした研究会“第一回 MAXI 国際シンポジウム”に Piro 氏を招待したのは、古い友人であるとともに前年に打ち上げられた BeppoSAX 衛星の中心人物となっていたことから二つの意味で当然のことでした。しかし、ここで記念すべきガンマ線バースト残光の発見が世界で最初に発表されるとは、全く予想していませんでした。その後、L. Piro は AGN よりもガンマ線バーストの観測・研究を牽引する重要な研究者となり、さらに X 線マイクロカロリメーターを用いたガンマ線バーストの X 線観測の実現に熱意をもって取り組んでいます。

3.4 美星で残光観測を始める

この頃、HETE によって通報されるガンマ線バーストの位置を、地上望遠鏡で観測してもらうために、中小望遠鏡利用天文学の研究会などで、しばしば講演をさせていただきました。自分で光学

観測に手を出すようになったきっかけは、京都で行われた天文学会のときに、美星天文台の小暮智一先生と綾仁一哉氏に声をかけられたのがきっかけです。美星天文台の近くの玉島高校の物理の先生で、彗星観測のアマチュアとしても高名な小坂浩三氏が、ガンマ線バーストを美星で観測することを小暮氏に提案したのがもとのようです。それがきっかけとなり、理研の内部の競争的資金(「理事長ファンド」)や科研費をいただいて、GRB を追跡するための自動小型望遠鏡を美星天文台の屋上に作ることになりました。これにあたっては、当時理研にいた鳥居研一氏、小濱光洋氏、浦田裕次氏、根来 均氏にいろいろ分担・協力してもらいました。もちろん美星天文台の綾仁氏、川端哲也氏には大変お世話になりました。これでロボット望遠鏡の運用に関しては、実に多くのことを学び、現在の 50 cm 望遠鏡 MITSuME プロジェクトに発展しました。

3.5 HETE-2 の成果

HETE-2 は高さ約 1 m、質量わずか 120 kg の小型衛星ですが、人員も限られていたため、開発も運用もたいへん苦労しました。2000 年 10 月に HETE-2 は地上運用系も機上ソフトウェアも未完成の状態で打ち上げられました。運用しながらデバッグを行い、初めてのガンマ線バースト位置決定が実現したのは打ち上げの 4 カ月後、初めて HETE-2 の通報から光学残光が発見されたのは打ち上げから 1 年後のことでした^{11),12)}。日本チームでは、白崎裕治氏(現 国立天文台)が WXM の位置決定において素晴らしい活躍をし、運用や検出器の較正には、新たにチームに加わった玉川 徹氏、鳥居研一氏、坂本貴紀氏が大きな貢献をしました。名前をすべて挙げることはできませんが、東工大の鈴木素子氏、佐藤理江氏、有元 誠氏、青学大の中川友進氏など多くの大学院生の貢献も大きなものでした。打上げ後 2 年は思っていたほどの成果が上がらず、苦しい時期を過ごしました。ようやく最初の明確な成果が出たといえるの

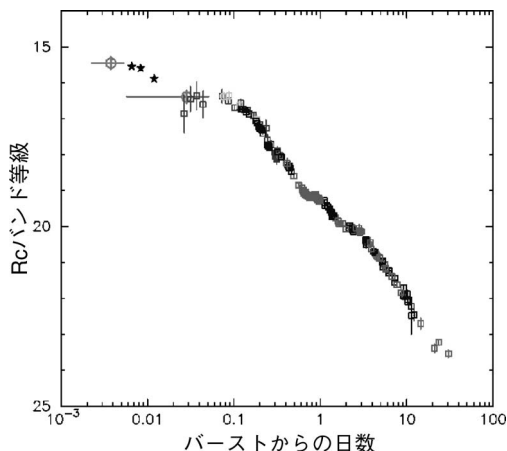


図6 HETE-2の位置速報に基づく観測によって得られたガンマ線バースト GRB 021004の光学残光の発生3分後から30日後までの光度曲線。GCN Circular などから作成。

は、2002年10月に、明るい残光を伴うガンマ線バーストの位置速報に成功した¹³⁾ことでしょう。

BeppoSAXによる位置通報の場合は、広視野X線カメラのデータを地上にダウンリンクして人の手による解析の結果を通報するため、どうしても位置通報に数時間の遅れが生じますが、HETE-2の位置通報は早ければ1分で世界に送信されます。その初めての成功例であるGRB021004に対しては美星天文台での観測¹⁴⁾を含め、世界各地の望遠鏡によってかつてない密度で残光の光度曲線が得られました。その結果、以前のまばらな測定点しかない光度曲線でははっきりわからなかった、波打つような変動がはっきりとらえられました。ガンマ線バーストの残光は、相対論的なジェットが希薄な星間物質に突っ込んで形成される衝撃波からのシンクロトロン放射と考えられていますが、その理論に従うと、星間物質の密度など外部条件でこのような変動を再現することは極めて困難なため、相対論的なジェットを放出する中心エンジンが1日以上活動し続けることが示唆されます。

この後、2006年にバッテリー劣化のために運用を停止するまで、HETE-2は約230個のガンマ線

バーストを検出し、そのうち95個の位置を決定しました。そのうちの34個からは光学残光が観測され、22個に対して赤方偏移が決定されました。特に重要な成果としては三つを挙げましょう。

1. Ic型超新星を伴うガンマ線バースト GRB 030329の発見と位置通報¹⁵⁾⁻¹⁸⁾
2. 短いガンマ線バースト GRB 050709の観測と位置速報^{19), 20)}
3. 放射がX線領域に偏ったガンマ線バースト(X線フラッシュ)の系統的観測と、 γ 線バーストの光度とスペクトルの相関²¹⁾

X線フラッシュに関する成果は、坂本貴紀氏による天文月報記事²²⁾に詳述されているのでご参照ください。

3.6 すばる GRB チーム

理研の宇宙放射線研究室には、ポスドク(基礎科学特別研究員)として、それまで縁遠かった分野の研究者もやってきました。その一人、山田亨氏を通じて光学天文学者とのつながりができました。また、吉田篤正氏、戸谷友則氏、水本好彦氏らが中心になって始まったのが「すばる GRB チーム」です。2000年に共同利用が始まったすばる望遠鏡において、ガンマ線バーストの残光観測という特殊な緊急観測に関する方針は決まっていなかったため、ほぼすべての観測装置の担当者を巻き込み、どの装置が望遠鏡についても、研究観測が実施できるような体制を作って、国立天文台およびハワイ観測所にTOO観測(好機に緊急に行う観測)を要請することとしました。すばるの立ち上げの時期で、いろいろなことが決まっておらず、当初は観測実施に混乱があった場合もありましたが、予定されていた装置をそのまま使用するという条件でTOO観測提案をあらかじめ採択し、条件が満たされた場合に、その日にもともと割り当てられた観測に優先して観測を行う、という仕組みができました。当初の5年間、ハワイ観測所では小杉城治氏が観測を中

心的に実施してくれました。小杉氏が ALMA に移った後は、青木賢太郎氏が中心となっています。

すばるを用いたガンマ線バーストの観測で最大のヒットは 2005 年 9 月 4 日のバーストを 3 日後にすばるで観測したもの^{23), 24)}で、これに関しては、戸谷・青木両氏とともに、天文月報の記事²⁵⁾に詳しく書きましたので、ここでの記述は略しますが、あのとときの興奮は忘れることはできません。告白すれば、純粋な科学的探究心だけでなく、ギャンプルに似た突発天体ハンターの喜びがそこにあるように思います。

その後、ガンマ線バーストの最高赤方偏移の記録は 2009 年に 6.7²⁶⁾、2010 年に 8.2^{27), 28)}と更新されましたが、ライマン吸収端の減衰翼の形状による電離度に対する制限や吸収線分光による、 $z > 6$ での元素組成比の測定など、最高赤方偏移の定量的な研究において、まだ、「すばる」による GRB 050904 の観測をしのぐ結果は得られていません。ぜひ、近赤外線分光によって、赤方偏移 7 を超えるガンマ線バーストの分光観測で、重元素組成や宇宙電離度の有意な計測を実現したいと思っています。以前と違うことは、「すばる」の成果のために GRB の追跡観測の重要性和実現可能性が広く受け入れられたことです。GRB の追跡観測は、今後の宇宙赤外線望遠鏡 WISH, JWST や、地上巨大望遠鏡 TMT などの観測対象として、真剣に対応が検討されています。

すばるによる最近の成果として、橋本哲也氏、太田耕二氏らによって、可視光が暗く赤外線では残光が見えないダーク GRB の母銀河が重元素を多く含む大きな銀河であることを明らかにしたことがあります²⁹⁾。これに関しては橋本氏による月報の記事³⁰⁾をご参照ください。

4. ガンマ線バースト研究の課題

ガンマ線バースト研究の今の課題として大きく分けて三つのテーマがあると考えています。

4.1 ガンマ線バーストの発生機構

特に、光速に近いジェットを発生させる機構として、降着円盤からジェットを作るのか、磁場を介してブラックホールの回転エネルギーを取り出してジェットを加速するのか、あるいは高速回転マグネターなど、各種の理論を観測によって検証する必要があります。γ線・X線のエネルギースペクトル、時間変動、γ線偏光などの観測が必要です。現在は Fermi 衛星による高エネルギーγ線観測データが重要な情報を提供しています³¹⁾。東工大のわれわれのグループではガンマ線偏光を測る超小型衛星 TSUBAME を開発中です³²⁾。地上からの最初期からの光学観測による即時放射と早期残光の観測も、発生源の環境やジェットの性質を調べるために重要なため、国内外の中小望遠鏡を用いた観測体制の整備を行っています。国立天文台岡山天体物理観測所の柳澤顕史氏らによって開発された三色同時撮像カメラを取り付けた 50 cm ガンマ線バースト専用ロボット望遠鏡 (MIT-SuME 岡山および明野)、石垣島天文台むりかぶし望遠鏡、近赤外でも岡山 90 cm 望遠鏡、金沢大グループが運用している宇宙研 1.3m 望遠鏡などが、観測に参加しています。

4.2 ガンマ線バーストで探る宇宙の歴史

ガンマ線バーストは、極めて明るいために、銀河が形成される前の宇宙の最初の星の爆発を観測できる可能性をもっています。宇宙の一番星はいつできたか、宇宙最初の銀河はどんなものだったか、このような課題をガンマ線バーストを使って研究するためには、遠方宇宙から到達できる赤外線での残光観測が非常に重要になります。最も良いのは、GRB 速報に自動的に反応する近赤外線望遠鏡を宇宙に待機させることでしょう。例えば遠方銀河の広視野近赤外サーベイを目的として提案されている WISH 衛星³³⁾にそのような機能をもたせることが考えられます。高赤方偏移のガンマ線バーストであることが撮像観測で確認されれば、TMT などの次世代の巨大地上望遠鏡でフォ

ローアップ分光観測を行うこととなります。また、X線マイクロカロリメーターによって実現するX線残光の高エネルギー分解能分光をさまざまな赤方偏移のGRBに対して行うことによって、宇宙における元素組成の進化の歴史もとらえられるはずですが、このためには、ガンマ線バーストを追って機動的に動けるX線天文衛星が必要となります。GRBには最適化されていませんが、もしもASTRO-HによるGRB残光の観測が実現すれば、その結果が楽しみです³⁴⁾。

4.3 まだ正体不明の短いガンマ線バースト

継続時間が2秒より短いガンマ線バーストは、長いものと異なって、さまざまな銀河で発生し、そのエネルギーも、2,3桁小さいようです。これら短いバーストの発生源としては、中性子星連星が重力波放出によって軌道が小さくなって合体することが最有力候補とされていますが、直接の証拠はまだありません。決定的な検証は合体時に発生する特徴的な重力波をガンマ線バーストと同時に検出することでしょう。幸いなことに、日本でも重力波望遠鏡 LCGT の建設が始まりました。米国の advanced LIGO の開発も進んでおり、数年後に人類が初めて天体重力波を受ける可能性が高まっています。もしも中性子星連星合体以外に近傍銀河で重力波がバースト的に発生する未知の現象があるとすれば、短いガンマ線バーストのように見える可能性が高いともいえます。したがって、重力波とX線・ γ 線および光・赤外観測との連携は極めて重要です。もし重力波と同時にガンマ線バーストを観測することができれば、天体物理学のみならず、相対論など基礎物理学においても非常に重要な観測結果が得られるはずであり、ぜひ、重力波検出に備えた観測体制を整備しなくてはなりません。

む す び

振り返っていみると、私はGRBの研究に、なかば偶然の結果で深く関わってきたように思いま

す。フェニモア氏が日本に来て、また私をロスアラモスに呼んでくれたことは非常に大きなきっかけでしたが、もし、学術振興会特別研究員に採用されていたならば、ガンマ線バーストの研究に入っていかなかった可能性が高そうです。私が、たまたま理研に就職して、松岡主任研究員がHETEという小さな衛星プロジェクトに加わったこと、何人かの人とのつながりで、すばるや小望遠鏡でGRBの光学観測に関わるようになったことも、自分で意識して選んだ方向ではありませんでした。私がガンマ線バーストの研究に携わった20年間に、ガンマ線バーストに関する理解は、銀河系内の 10^{40} erg程度のエネルギー規模の現象から 10^{51} ergという遠方銀河の大爆発へと大転回しました。天文業界における認知度にも大きな進歩がありました。20年ぐらい前に、理研のPDだったS氏に、「河合さんはゲテモノ好きですね」と言われたことがあります（ガンマ線バースト以外には連星ジェット天体、孤立パルサーが筆者のテーマでした）。今、ガンマ線バーストの研究をゲテモノと思う若い人はいないでしょう。また、筆者が中村卓史氏、太田耕二氏らと2007年度から始めた科研費特定領域研究「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」によって、さらにガンマ線バースト研究の基盤が国内で広がったと思います。これほど短期間に根本的に認識が変化する珍しいテーマに、ちょうど博士号を取ってからの研究キャリアの大部分にわたって関わることができたことは、非常に幸運だと感じています。この道をつけてくれた恩師である小田先生・田中先生・松岡先生・フェニモア博士には深く感謝します。また、すべてのお名前を挙げることはできませんが村上敏夫さんをはじめとする宇宙研での先輩方、ロスアラモス、理研、そして東工大でそれぞれ一緒に研究した同僚、学生諸君に感謝いたします。

参考文献

- 1) Klebesadel R. W., Strong I. B., Olson R. A., 1973, *ApJ* 182, L85
- 2) Nishimura J., et al., 1978, *Nature*
- 3) Mazets E. P., et al., 1982 *Ap&SS* 84, 173
- 4) Matsuoka M., et al., 1980, *ApJ* 240, L137
- 5) 河合誠之, 2001, *天文月報* 94, 7, 287
- 6) Woosley S. E., et al., 1984, in *AIP Conf. Proc.* 115, "High Energy Transients in Astrophysics," ed. S. E. Woosley, p. 709
- 7) Murakami et al., 1989, *PASJ* 41, 405
- 8) Fenimore E. E., et al., 1988, *ApJ* 335, L71
- 9) Costa E., et al., 1997, *Nature* 387, 783
- 10) van Paradijs J., et al., 1997, *Nature* 386, 686
- 11) Ricker G., et al., 2002, *ApJ* 571, L127
- 12) Price P., et al., 2002, *ApJ* 571, L121
- 13) Shirasaki Y., et al., 2002, *GCN* 1565
- 14) Kawabata T., et al., 2002, *GCN* 1700
- 15) Vanderspek R., et al., 2003, *GCN* 1997
- 16) Hjorth J., et al., 2003, *Nature* 423, 847
- 17) Stanek K. Z., et al., 2003, *ApJ* 591, L17
- 18) 河合誠之, 2004, *パリティ* 1月号, p. 51
- 19) Butler N., et al., 2005, *GCN* 3570
- 20) Villasenor J. S., et al., 2005, *Nature* 437, 855
- 21) Sakamoto T., et al., 2005, *ApJ* 629, 311
- 22) 坂本貴紀, 2005, *天文月報* 98, 8, 507
- 23) Kawai N., Kosugi G., Aoki K., et al., 2006, *Nature* 440, 184
- 24) Totani T., Kawai N., Kosugi G., et al., 2006, *PASJ* 58, 485
- 25) 河合誠之, 青木賢太郎, 戸谷友則, 2007, *天文月報* 100, 1, 17
- 26) Greiner J., et al., 2009, *ApJ* 693, 1610
- 27) Tanvir N., et al., 2010, *Nature* 461, 1254
- 28) Salvaterra, et al., 2010, *Nature* 461, 1258
- 29) Hashimoto T., et al., 2010, *ApJ*, 719, 378
- 30) 橋本哲也, 太田耕司, 2011, *天文月報* 104(4), 193
- 31) 大野雅功ほか, 2010, *天文月報* 103(5), 315
- 32) Toizumi et al., 2009, *Transactions of Space Technology Japan* 7, 31
- 33) Yamada T., et al., 2010, *Proc. SPIE* 7731, 77311Q
- 34) Kawai N., Yonetoku D., 2010, *AIP Conf. Proc.* 1279, 204.

Gamma-Ray Bursts and I**Nobuyuki KAWAI**

Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan

Abstract: Understanding of gamma-ray bursts was revolutionized in late 1990's from the earlier picture since the discovery as phenomena on neutron stars. I was involved in the gamma-ray burst research during the period spanning this revolution: development of Ginga and HETE satellites, and afterglow observations using Subaru and other telescopes. After describing the history, I present the current issues on gamma-ray burst research.