

私のガンマ線バースト研究この10年

戸谷友則

〈京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉



このたび、研究奨励賞という名誉ある賞をいただけることになった。私がガンマ線バースト (GRB) の研究を始めて、今回の受賞の直接のきっかけとなった最高赤方偏移ガンマ線バースト GRB 050904 に至るまでの約10年という期間は、ちょうど世界のGRB研究にとっても怒涛の革命の時代にほぼ重なる。ここでは、私自身のGRB研究の裏話や隠れたエピソード、あるいは今感じる教訓などを、GRB研究の世界の流れとともに紹介させていただきたい。

1. はじめに

今回の受賞に伴い、天文月報への記事も依頼されたのであるが、はたと困ってしまった。今回の受賞の直接の契機となった、最高赤方偏移ガンマ線バースト GRB 050904 の発見とそれを用いた宇宙初期の再電離史に関する研究は、本年1月号の月報に河合誠之、青木賢太郎の両氏との共著でエウレカ記事を執筆してしまっている¹⁾。今回の受賞理由としてもう一つ取り上げていただいた、GRBを用いた宇宙の星形成史の研究もまた、平成11年にエウレカとして寄稿させていただいた²⁾。これらの内容と重複させずにどう記事を書いたら良いか。思案の末、ここではあまり専門的なことに踏み込まず、気軽な読み物的に、私がGRB研究に入っていったいきさつや、当時の研究にまつわるエピソードや裏話、あるいは教訓などを書いてみることにしたい。

私自身にとってのたいへんな幸運は、私が研究を始めた10年ほど前から現在に至るまでの期間が、ほとんどそのまま、GRB研究の偉大な革命の時代に重なったことである。今やこの分野はGRB研究者だけの狭いものから、宇宙論や銀河形成などの幅広い分野にまたがる重要な分野へと変貌を遂げた。そんな革命の興奮や臨場感なども

この稿でお伝えできればと思う。

2. 研究の世界へ

私が本格的に研究を始めたのは1994年頃、大学院修士課程1年の年末だったと記憶している。当時の指導教官の佐藤勝彦先生から一つの研究テーマを示唆された。それは、超新星起源の宇宙ニュートリノ背景放射の強度を理論計算しようというものであった。重力崩壊型の超新星からは膨大な数のニュートリノが放射されることはよく知られているが、現在に至るまで観測例と言えはかの有名な超新星 SN 1987Aのみである。しかし超新星は宇宙の歴史のなか、至る所で起きてきたはずなので、現在の宇宙空間はそうしたニュートリノの名残が背景放射として存在するはずである。折しも、ちょうどその頃にスーパー神岡実験が稼働を開始することになっており、大幅な感度向上により検出が可能になるかもしれない。そんな期待の下に、その当時の知見を最大限に用いて精密なフラックスを予想しようというものだった。

理論計算の鍵となるのは、超新星そのものよりもむしろ、超新星の発生頻度とその宇宙論的進化史であった。これは結局、宇宙の中で大局的な星形成率がどう進化してきたか、という「宇宙の星形成史」の概念となる。この概念は、1996年に

Lilly や Madau といった研究者らが最新観測に基づいて実際にデータを出し始めてから一躍脚光を浴びることになるのだが、私がこの研究を始めた段階ではまだ登場していない。われわれは吉井讓氏の協力を得て、銀河進化モデルに基づいた理論的な宇宙の星形成史を構築し、それに基づいて背景ニュートリノフラックスを計算した。論文が ApJ に出版されたのが 1996 年 3 月である³⁾。スーパー神岡実験での予想検出率は、年間約 1 個というものであった。この実験が始まってから 10 年あまりたつので、われわれの予想が正しければすでに神岡のデータの中にはるか昔の超新星から放出されたニュートリノによるイベントが潜んでいるはずである。ただし、この数では他のノイズに埋もれてしまい、残念ながら検出はできない。それでも神岡グループの努力により、現在の上限值はわれわれの予想の数倍というところまで迫ってきていることは特筆すべきである。

今振り返ってみると、最初にこのテーマに取り組んだのは全くもって大正解というか、幸運であった。この研究は決して膨大な計算や作業を要するような仕事ではなかったが、超新星、ニュートリノ、星形成、銀河形成進化、背景放射と宇宙論など、実にさまざまな要素が含まれており、幅広く勉強し視野を広げることができた。その後、私は多くの分野に首を突っ込むことになり、時には、どうしてそんなにいろんな分野で研究してるんですか、と聞かれることもある。しかし私から見ると、その後の仕事はほとんどすべて、この最初の仕事と何らかの接点をもっていて、その意味では自然に分野を広げてきただけという感覚もっている。

3. ガンマ線バーストの世界へ

私が GRB に関する最初の仕事を始めたのは 1996 年の年末から翌年初頭にかけてだったと記

憶している。この当時、GRB 革命が始まる直前であり、まだ世界は GRB で盛り上がっているということではなかった。また、上述の私の最初の仕事も GRB に直接関係しているわけではない。しかしながら、佐藤先生からは「そろそろ一人で論文を書いていいですよ」と言われ、何か自分のオリジナルなテーマを見つけて仕事をしてやろうと考えていた。そんなとき、GRB に興味をもったのは、何といても「謎の天体」であったからである。発見以来数十年もたつのに、銀河系内か宇宙論的遠方か、という恐ろしく原始的なレベルで距離すらわからない天体は当時すでに GRB だけであった⁴⁾。何だか、これから無限の可能性を秘めているような魅力を感じたのである。(ただ、そのすぐあとにあれだけの大革命が起きるとは予想していなかったが。)

しかし、いきなり他分野に参入するには何かとっかかりが必要である。ここで、上述の超新星背景ニュートリノの研究で用いた、「宇宙の星形成史」という概念が再び登場する。GRB をちょっと勉強すると最初にでてくるものに、GRB の空間分布がある。完全に等方的であるにもかかわらず、フラックスの強度分布を見ると、GRB が通常のユークリッド空間に一樣に分布している場合に比べて、暗い GRB が相対的に少ないのである。これは暗い、すなわち遠方の GRB が一樣分布に比べて少ないことを示していて、GRB が宇宙論的な距離にあるとすると膨張宇宙の効果で自然に説明できる。そのような背景で、フラックス分布の解析ではすでに多くの論文が書かれていた。

そのような解析では、GRB の発生頻度の宇宙論的進化史というものが重要になる。だが、それまでの研究のほとんどは、発生頻度は時間一定と仮定するか、せいぜい、赤方偏移 $(1+z)$ の巾(ベキ)で進化するという現象論的なパラメータ化しか行われていなかった。GRB は超新星か、ある

⁴⁾ そして現在は皆無である。GRB はもちろん今でも面白い分野だが、わずか 10 年の差で最近研究の世界に入ってきた若い人にとっては、そういうレベルでの「謎の天体」がもはや存在しないことが気の毒に感じる。

いは連星中性子星の合体か、いずれにせよ寿命の短い大質量星の終焉に関連した現象と思われるから、GRBの発生頻度史は宇宙の星形成史を色濃く反映しているはずである。宇宙の星形成史という概念に馴染んだ私にとって、その発想に至るのに長い時間はかからなかった。

そこで、現実的な星形成史を考慮してGRBのフラックス分布を解析した論文を完成させ、ApJ Lettersに送った⁴⁾。1997年5月15日である。星形成率は過去のほうが高いので、それを打ち消して暗いGRBを少なくするにはより強い宇宙論的効果が必要となり、GRBの典型的な距離スケールはこれまで考えられていたものより遠くなる、というのが主な結論である。

4. 革命勃発

この時点よりほんの少し前から、GRBの革命が始まっていた。この年の2月末（奇しくもSN 1987Aからほぼ10年である）に発生したGRB 970228から初めてX線と可視の残光が発見された。当時の報告の中には、何と可視残光の位置が固有運動で動いているというものであった。これが事実なら宇宙論的遠方ではあり得ない。私の仕事はもちろん宇宙論的距離を仮定していたので、せっかくの執筆中の論文がパーになりかねない。やきもきさせられたが、幸い、この報告はすぐに間違いとされた。だが、このGRBでは距離の問題は決着しなかった。つづいて5月8日に発生したGRBの可視残光から、 $z=0.835$ と赤方偏移した吸収線が発見され、ついに宇宙論的距離が確定した。その報告がされたIAUサーキュラー(IAUC)の日付は5月11日になっている。私の論文の投稿と4日しか離れていなかった。ちなみに私は当時も今もIAUCを読む習慣はなく、この事実は知らないままに投稿してしまっている。

このように宇宙論的起源が確定した当時はちよ

うど、銀河の業界では上述の「宇宙の星形成史」という概念が瞬く間に一大ブームを巻き起こしているときであった。そのような状況では、「GRBを用いて初期宇宙を探る」という概念が新たに注目を浴びるのは当然のことであった。幸いなことに、GRBの論文に宇宙の星形成史の概念を導入したのは私の論文が最初であったため、その後この文脈において多く引用されることになった。

この経緯を振り返ると、つくづく、研究というものは何が評価されるかわからないという気がする。私自身、この仕事がここまで評価されるとは思っていなかった。特に、私の研究の流れからすれば、宇宙の星形成史を導入することはたいしたものではなく、むしろ当然の発想であった。私がこの仕事をしたうえで最大のハードルは何だったかということ、結局のところ、GRBに関心をもったということになるだろう。その後はごく自然な流れで論文が完成し、特に困難はなかった。そういう意味では、視野を広くもち、ある研究で得られた概念や手法などを他の分野に応用することで意外と簡単にブレイクスルーが生まれるという教訓になっているように思われる。

5. 余談：“The Totani Plot”

ここで余談として、今回の受賞理由には含まれない隠れた「成果」を紹介させていただきたい。1998年11月のローマでのGRB国際会議でのことである。私はGRBの中で陽子が超高エネルギーまで加速され、その陽子のシンクロトロンでTeV領域のガンマ線が放射される可能性について発表した。ただ、この効果が重要になるためにはGRBの全エネルギーが 10^{55} erg程度に大きくなければならない*²。しかし、当時としてはこのエネルギースケールは大きすぎると受け取られた。そこで私は、講演の最後に図1のようなスライドを見せた。1970年頃のGRB発見以来、各時

*² ただしこれは放射が等方的と仮定した場合で、ジェット状の爆発を考慮すればエネルギースケールを下げるができる。

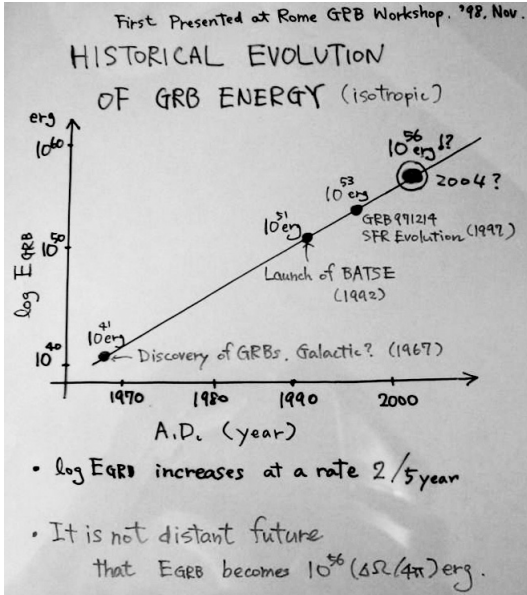


図1 横軸を年代として、縦軸にはその時代に標準的とされていた E_{iso} 、すなわち放射が等方的としたときの GRB の全ガンマ線放射エネルギーをプロットした。1998年11月のローマでの国際会議で使用したスライド。

代で標準とされた GRB のエネルギースケールをプロットしたものである。発見当初は銀河系内の中性子星起源という見方が主流でエネルギースケールも小さかったが、1990年代に入り、コンプトン衛星の結果により宇宙論的起源の可能性が出て、エネルギースケールは一気に 10^{51} erg まで上がった。その後、1997年の革命以後、実際に赤方偏移が測られ始めると、当時の最高記録で 3×10^{53} erg というものまで現れた。これを、横軸年代にとると不思議なことに綺麗な直線に乗る。なので、私の言う 10^{55} erg になるのも時間の問題ですよ、と話したのである。場内は爆笑の渦になった。

この話には後日談があり、この講演直後の1999年1月には、 3×10^{54} erg という莫大なエネルギーを放射した GRB 990123 が見つかった。はからずも、見事に予言的中となったのである。もう一つ後日談がある。2004年頃のある日、私は京大に

移っていて、柴田一成氏と話をしていた。

柴田「戸谷君、Woosley って男を知ってるかね？」

戸谷「ええ、もちろん。有名ですからね*3」

柴田「この前ヨーロッパの研究会で彼と話していたんだが、彼が“Totani Plot” とかいうものについて話していたよ。」

私の名前がついている図があるのかと仰天して詳しく聞いてみると、何とこの図のことであった。業界の大御所に私の名前をつけてもらっていたへん光荣ではあるが、願わくばもっと真面目な結果にも名前をつけてもらえるよう頑張りたい。

6. すばる GRB チーム誕生

1999年元旦より、私は助手として国立天文台理論部に移った。ちょうどこの頃が、すばる望遠鏡が本格的に稼働を始めたころだったというのも、私のもちえた幸運の一つかもしれない。GRBの業界も革命が続いており、世界的に一躍脚光を浴びる分野となっていた。そんななか、すばるを使って GRB 観測をやろうという誘いを水本好彦氏らから受けた。私としては願ってもない話で即答で参加の意思を表明した。ただ、この頃はまだ共同利用観測に TOO (Target of Opportunity, 突発天体観測) のモードがなく、すばる望遠鏡の運営に TOO を取り入れてもらうように働きかけるところから始めなくてはいけなかった。GRB 観測の科学的重要性などをアピールした観測提案書を作成し、観測所へ提出したりした。そうしたかきがあって、やがてすばるでも TOO 観測が認められるようになり、河合誠之氏をリーダーとする「すばる GRB チーム」が結成され、私は理論担当として参加させていただいた。

すばる GRB チームは、だいたい半期に数夜のペースで時間を確保し、興味深いバーストを中心に可視・赤外残光の観測を続けた。しかし、すぐにやすやすと成果が出たわけではない。すでにこ

*3 Stanford Woosley. 星の進化, 超新星, GRB の理論研究の世界的大家である。

の時期、諸外国の大望遠鏡もこぞって GRB 観測のレースに参画しており、チームの規模や観測時間、他波長との連携などから考えて、われわれが互角に戦うのは容易ではなかった。例えば VLT などは 4 台もあるわけで、GRB が発生したら、その時一番ふさわしい検出器がついている望遠鏡を向けることができる。一方すばるはせっかく GRB が発生しても、その時についている観測装置でしか観測できず、それが理想の装置であることはむしろまれである。観測をしてもわれわれ単独のデータでは論文にならないという状況もしばしばあった。良い成果を出すには幸運がめぐってくるのを待つという我慢の状態が続いた。

7. GRB 050904 の発見と「GRB 宇宙論」の誕生

2005 年 9 月 4 日、その幸運は突然やってきた。GRB 050904 は発生直後から、その残光のカラーをもとに、赤方偏移が非常に大きいのではないかと騒がれたが、分光結果がなかなか出てこない。河合氏の決断で、発生からすでに三日が経過していたが FOCAS による分光を敢行、 $z=6.3$ という、GRB の赤方偏移としては現在でも抜群に最高記録となる結果が得られた。結局、この希有なチャンスに分光を行った望遠鏡はすばるだけであった。なぜそんなことになったかなどの詳しい経緯は上述の月報記事¹⁾に詳しいので割愛する。一言で言えば幸運であったとしか言いようがないが、一方で、すばる GRB チームとして地味ながらも継続的に観測を行ってきたこと、そして千載一遇のチャンスを逃さなかったという点も見逃すべきではないと思われる。まさにパストールの有名な言葉、*Chance favors the prepared mind* (幸運は準備を怠らない者に訪れる) である。

7 日の観測直後から、すばる GRB チームは天地をひっくりかえしたような大騒ぎとなった。スペクトルを眺めつつ、理論担当として私に何ができるか考えてみた。最高赤方偏移記録の更新とい

うことだけですでに十分な成果であるが、そうした高赤方偏移 GRB が待ち望まれていたのは「GRB を使って初期宇宙を探れる」と期待されていたからだ。すでに、このデータから何か言えることはないだろうか？ すぐに思いつくのは「宇宙の再電離」に関する示唆である。ビッグバンで熱いプラズマ状態として誕生した宇宙では、温度低下により誕生後約 40 万年で陽子と電子が結合して中性水素となった。しかし現在、宇宙の主構成要素である水素はほとんどが再び電離していることがわかっている。赤方偏移 6 かそれ以上、時代にして宇宙誕生後 10 億年以内に、初代天体形成に伴う紫外線で電離されたと考えられているが、詳しくはわかっておらず、宇宙論の重要問題の一つである。GRB 以前は、キューサーを使って $z>6$ の宇宙の電離度を推測していた。だが、GRB の場合はいくつか重要な利点があり、キューサーに代わる初期宇宙探査の手段として期待されていた。

その程度の知識は宇宙論や銀河形成を専門の一つとする理論屋として私ももっていた。しかし、キューサーによる電離度推定などの研究の詳細を把握しているわけではなかった。さて、どうするか。そのあたりに詳しい国内外の専門家に応援を頼むか、という考えも頭をよぎったが、この驚くべきスペクトルを見ている理論屋が世界で私一人しかいないという希有な機会をむざむざ捨てることもなからうと、行けるところまで行ってみることにした。応援を頼むのはいつでもできる。翌日から、再電離研究の論文を読みあさる日々が続く。この GRB 発生後数カ月は、ほとんど土日を返上していたと記憶している。

キューサーに比べて GRB のスペクトルがもつ最大の利点は、中性水素によるライマン α 吸収の減衰翼がはっきり見えるということである。これは GRB の元のスペクトルが単純な巾型のため、強いライマン α 輝線をもつキューサーでははっきりと見ることができない。この減衰翼を詳

細に調べることで、中性水素の存在量を精度良く求めることができる。今回の場合、再電離を調べるうえで対象となる「銀河間空間の中性水素」なのか、あるいは「GRBの母銀河内の中性水素」なのかを判別するのに手間取ったが、最終的に、 $z=6$ すなわち宇宙誕生後9億年で宇宙はすでに電離されていたことが明らかになった。これはクエーサーでは得られなかった成果で、GRBによる初期宇宙探求が初めて現実のものとなったという意味でも画期的なものとなった。特に、このGRBによる制限は系統誤差が非常に小さいという点に特徴があり、定量的な精密宇宙論がGRBによって展開される可能性を実証したとも言える。

最高赤方偏移を報告する第一論文を河合氏がレターにまとめてNatureに送った⁵⁾のに続いて、この再電離の成果を詳細な第二論文としてPASJに投稿したのが11月4日(金)の午後1時頃である。そして驚くべきことに、なんと11月6日(日)の午前8時前にレフェリーレポートが私の元に返ってきた⁴⁾。私はこれまでに第一著者として30本以上の論文を書いてきたが、さすがにこれは抜群の最速記録である。レフェリーはこの分野の権威であるハーバード大のAvi Loebであった。再電離の専門家とは言えない私の書いた論文がどう評価されるかという不安もあったが、幸い、たいへんに誉めていただき、わずかな改訂で受理されることになった。その後、Natureの河合論文の出版のタイミングとの兼ね合いもあり、最終的に、PASJに出した再電離論文は翌2006年6月に無事出版され⁶⁾、一つの区切りをつけることができた。

8. まとめに代えて

このように振り返ると、私が今日まで歩んでこれたのは、GRBの革命期に巡り合わせた幸運や、良き指導者や共同研究者との出会いなど、いくつかのたいへんな幸運に恵まれたためであると実感

せざるをえない。GRB研究におけるこの10年の激動の時代のなかで、宇宙の星形成史と再電離探査という二つの「GRBを用いて初期から現在までの宇宙進化を探る」という概念の誕生と確立に貢献できたことは、私にとってたいへん楽しく貴重な体験であった。改めて、これまでにお世話になった多くの方々や共同研究者の皆さんにお礼を申し上げたい。次の10年でGRB研究はさらにもっと進むのか、楽しみである。また、積極的に他分野に挑戦することが成功につながるという教訓を踏まえ、新しいことにチャレンジする姿勢も失わぬように、今後も精進を続けていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 河合誠之, 青木賢太郎, 戸谷友則, 2006, 天文月報 100, 17
- 2) 戸谷友則, 1999, 天文月報 92, 223
- 3) Totani T., Sato K., Yoshii Y., 1996, ApJ 460, 303
- 4) Totani T., 1997, ApJ 486, L71
- 5) Kawai N., et al., 2006, Nature 440, 184
- 6) Totani T., et al., 2006, PASJ 58, 485

Ten Years of My Research on Gamma-Ray Bursts

Tomonori TOTANI

Department of Astronomy, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: It is my great pressure to receive the ASJ Young Astronomer Award of the Astronomical Society of Japan. It is about 10 years from the time when I started research in astrophysics to the discovery of the highest redshift GRB 050904, which is the primary reason for the award. This era also roughly corresponds to the revolution of the GRB research in the world. Here, I describe the history and episodes of my study as well as the evolution of the GRB study in the world.

⁴⁾ 担当編集委員の藤田 裕氏によれば、彼がレフェリーに論文を送ってからレポートが戻ってくるまで24時間経っていませんでした。