



# ガンマ線バースト源は見えただか？

吉田 篤 正

〈理化学研究所 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: ayoshida@postman.riken.go.jp

昨年、ガンマ線バーストのアフターグロー（残光）が発見された。アフターグローの観測から、従来不可能であった精度の高い位置同定と相関天体の探査が可能となり、観測のめざましい発展が進行中である。本稿では、過去1年間に得られた最新の観測結果を紹介し、この奇妙な天体現象について、どこまで分かってきたのかについて報告する。

## 1. ガンマ線バーストの謎

ガンマ線バースト（GRB）の発見は1960年代に遡る。時代は東西冷戦のさなかで、核実験条約に違反する核爆発を監視していた、衛星搭載ガンマ線検出器によって発見された。爾来、数多くの研究がなされてきたが、いっこうにその正体がわからない。2年前にもこの問題について『天文月報』に寄稿させていただいた<sup>1)</sup>ので、ここであらためて、「ガンマ線バーストとはどういう現象か」について言及することは避けることにする。詳しくは上記の記事を参照されたい。最近のものでは、水本好彦氏の解説<sup>2)</sup>が参考になるであろう。

さて、ガンマ線バーストの謎。すこし乱暴だがこれはバーストを起こす天体—バースト源—が何ものかわからない、ということに要約できるだろう。電波パルサーも、（名前の似た）X線バーストも中性子星起源であるということが、その後の研究で分かっている。ほぼ同時期に発見されたこれらの場合と相違して、ガンマ線バーストは発見以来の30年間、正体はおろか、その距離さえも見当がつかないという状況に残された。正体／起源については、暗黒物質、MACHO、超高エネルギー宇宙線などと並んで、未解明の問題である。最近出版された、その名も“Unsolved Problems in Astrophysics”という書籍の一章では、テルアビブ大学のピラン氏

によってガンマ線バーストが紹介されている<sup>3)</sup>（内容はいささか専門的である）。

研究者たちは、勿論、手をこまねいて只待っていた訳ではなく、正体を突き止めるべく、種々の観測が行われてきたのであるが、これといった決定打がなかった。われわれも、ASCA衛星をつかって、比較的良く位置の決定したバースト源の位置を探査し、そのうち幾つかに『怪しげな』X線天体を発見している<sup>4-7)</sup>。しかし、いずれもバースト後かなりの時間を経過した時点での観測であり、バースト自体との関連性がはっきりしない。（ASCAでの対応天体探査については、われわれの研究室で研究をしていた門叶冬樹氏による天文月報の解説記事(8)を参照されたい。）

ガンマ線バーストは何時・何処で起こるか分からない。ガンマ線領域では入射した光子の方向を精度良く決定する事は難しい。かりに入射方向—すなわちバーストの天球上の位置を決定できたとしても、高々数10秒というバースト中、もしくはその直後に追観測するためには、その位置を迅速に他の観測者に知らせる『システム』が必要である。この2点が「足枷」となっている。

Ginga衛星の観測によれば、ガンマ線バーストは～20 keV以下のX線領域での輻射もともなっている<sup>8)</sup>。したがってX線を用いて、しかも機上処理でリアルタイムで『位置決め』を行い、地上に向



けて『放送』すればよからう。このような設計思想に基づいて、われわれは HETE という小型衛星を米・日・仏の共同実験として開発し、1996年11月に打ち上げたが、不幸なことにロケット3段目の切り離しに失敗し、衛星は文字通り『日の目を見ず』に終わった。ところが、イタリヤ-オランダの X 線天文衛星 BeppoSAX によって、HETE 計画の狙いはある程度とげられることになったのである。(その結果、われわれ HETE チームは大魚を釣そこねてしまったのであるが……)

## 2. GRB アフターグロー

BeppoSAX 衛星は WFC という広視野 X 線カメラを2台搭載している。その視野は 20 度×20 度 (FWHM) という大きなもので、2 台のカメラは衛星の主観測装置である X 線望遠鏡/狭視野観測器 (NFI) と直交する反対方向の空を見ている。また GRBM とよばれるガンマ線バーストモニター (硬 X 線観測装置の反同時計測用シールドを兼用している) が搭載されており、バーストを検出することが可能である。1997年2月28日に起きたバーストは、この WFC の視野内で発生した。バーストの位置は地上での解析により 3 分角の精度でもとめられ、8 時間後には衛星を反転し、NFI がその方向に向けられた。そこには未知の減光する X 線天体が発見された。

この発見は突然に、そして衝撃的にアナウンスされた。そのときの衝撃については既にいろいろなところに書かれているので、あえて繰り返すことはしないが (たとえば文献 10) あるいは前述の 8) を参照されたい)、その衝撃の波はガンマ線バーストに関心をもつ研究者たちを一気にのみこんでしまったといってよい。アフターグローの発見以来、世界中の多数の望遠鏡がガンマ線バースト方向に向けられるようになった。ハッブル宇宙望遠鏡 (HST)、ケック望遠鏡、VLA / VLBI といった大型観測施設が動員されている。日本でも ASCA 衛星、東京大学木曾観測所、国立天文台野辺山電波観測所、

通信総合研究所鹿島宇宙センター、オーストラリアにある CANGAROO チェレンコフガンマ線望遠鏡などが観測に参加している。

前述したようにアフターグローを観測するためには、できるだけ迅速にバーストの位置を決定し通報することが必要である。このための『システム』として、現在機能しているものは、BeppoSAX 衛星と BATSE/RXTE/ASCA の連携である。前述したように、BeppoSAX 衛星は WFC によってバースト自体でその位置を決定する。電子メール・電話等で 3~5 分角の位置の通報までには、バースト発生からおよそ数時間~半日を要する。一方、後者はコンプトンガンマ線天文台の BATSE 検出器で決めたバーストの『粗い』位置 (~度の精度) をロッシ XTE 衛星の PCA (大面積比例計数管アレイ) によってスキャン観測し、X 線アフターグローを見つけるといふものである。その結果を受け、ASCA 衛星で最高 0.5 分角の精度で位置を決定する。あるいは、XTE 搭載の ASM (全天 X 線監視装置) の視野内で発生したバーストについて、ASCA 衛星でアフターグローを同定する。バーストから 1.5 日程度で分角以内の位置を GCN (ガンマ線バースト位置情報ネットワーク) に通報する。GCN は NASA のゴダード宇宙飛行センターが運用しているインターネットを用いたネットワークで、ガンマ線バーストに関する観測情報を自動的に配信する。

この『システム』によって、過去ほぼ 1 年の期間に 12 例のアフターグロー天体が探査され、このうち、8 個のバーストで X 線天体が発見された。可視光での対応天体(候補)が発見されたものは、6 個、電波では 2 個のイベントである (表 1 参照)。X 線アフターグローはほぼ検出されると考えてよいだろう (確実な例外は GRB970111)。

## 3. ガンマ線バースト源は見えたのか?

ガンマ線バースト自体は、典型的には高々数十秒間の短期間の現象であるが、アフターグローは全体的にはほぼべき関数的に減光しながら、かな





表 1 GRB アフターグローの星取り表

GRB	バーストの X 線 ピークフラックス		アフターグロー		
	(Crab)	X 線	可視光	電波	ASCA
970111	4	×	×	×	—
970228	2.3	○	○	×	○
970402	0.46	○	×	×	×
970508	1	○	○	○	—
970616	—	●	×	×	●
970815	2	△	×	×	△
970828	>0.8	○	×	×	○
971214	1	○	○	×	—
971227	1.8	●	●	×	—
980109	?	—	—	—	—
980326*	4	—	○	×	—
980329*	6	○	○	○	—

過去 15 ヶ月の間に、12 例のガンマ線バーストについてアフターグロー探査が行われた。このうち 5 例は日本の X 線天文衛星、ASCA 衛星でも観測された。

表中の○は検出、×は非検出、—は非観測、●は 2 個以上の候補天体が検出されたことをあらわす。△でしめした GRB970815 は、ASM/RXTE で決められた誤差領域の～1 分角外側に X 線源が検出された (ASCA の観測)。X 線源の位置は IPN の誤差領域内であり、アフターグローである可能性を完全には否定できない。\* をつけたバーストについては観測が進行中である。? は未報告をあらわす。

り長く輝き続けることが分かってきた。たとえば 97 年 2 月 28 日と 97 年 5 月 8 日のバースト (それぞれ GRB970228, GRB970508 とよぶ) は、バーストから約 100 日におよぶ期間、可視光領域で観測されている<sup>11), 12)</sup> (図 1)。

それではこの天体は何か? 何かははっきりした天体と関係はないのか? 具体的には、ガンマ線バースト源のホストとなる銀河はないのか?

GRB970228 の可視光アフターグローについて、HST はきわめて興味深い発見をした。アフターグロー (点源) の近傍 0.3 秒角離れた位置に、広がった天体を発見したのである<sup>13)</sup>。著者たちは、これはバースト源と相関する銀河ではないかと示唆している。アフターグローに相関して銀河 (と考えられる天体) が、必ず見つかるようになれば、話はすっきりする。ところが現実には、いつもそう簡単に

は事が運ばないようになっているらしい。GRB 970508 についても HST は 97 年 6 月に観測を行ったのだが、アフターグローの近傍には R ~ 24.5 より明るい『広がった』天体像は見出せなかった<sup>14)</sup>。ただ、最新のケックによる観測で、アフターグローの位置に R = 25.29 +/ - 0.16 (98 年 2 月 22 日) の暗い天体が検出されたという報告がある。カリフォルニア工科大のグループは、可視光アフターグローが過去の観測の示す指数 -1.1 のべき関数で減光し続けたとすると、これは期待されるものより約 0.8 等明るく、ホスト銀河が見えているのではないかと示唆している<sup>14)</sup>。

この『広がった天体』が銀河であるとして、その距離はどのくらいか? 残念ながら、GRB970228 については、距離を示唆する観測事実は得られていない。ところが今度は GRB970508 についてのケ

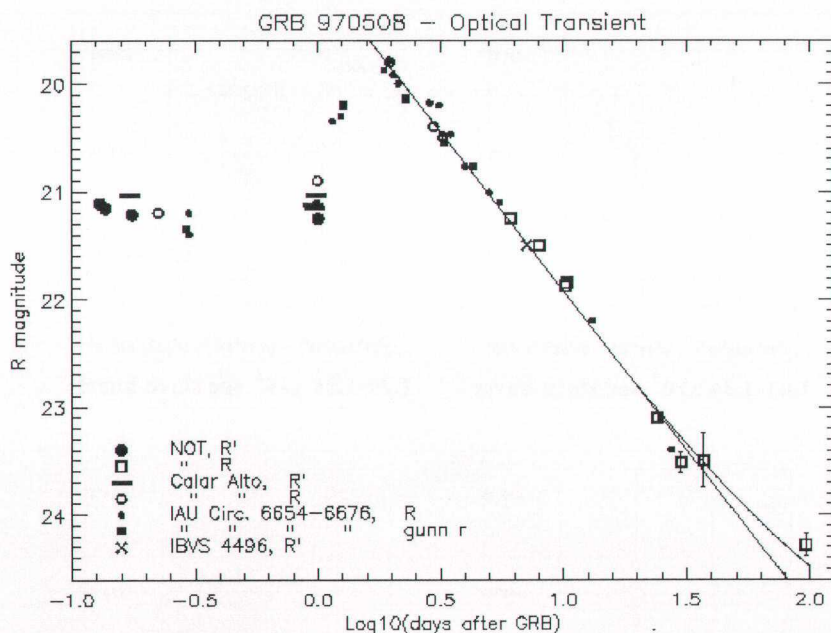


図1 GRB970508 アフターグロウの可視光高度曲線。横軸はバースト発生からの時間(日)の常用対数, 縦軸はRバンド等級である。光度は最初ほぼフラット. ついで約2日後にかけて増光し, 2日後からは, ほぼ経過時間のべき関数  $t^{-1.1}$  (図中の直線) にしたがって減光した. (Pedersen et al. (1998): 文献 12)より)

ックでの分光観測から, 金属によると考えられる吸収線が検出された. 示唆される赤方偏移の大きさは  $z > 0.835$  という大きなものであった<sup>15)</sup>.

ここで電波領域での観測についても触れて置くべきであろう. GRB970508 のバースト5日後の97年3月13日に, 8.46 GHzでのVLBI/VLAによる観測でアフターグロウ天体の位置に電波源が捉えられた<sup>16)</sup>. 電波強度はバースト直後約25日間は激しい変動を見せ, その後  $700 \mu\text{Jy}$  (8.46 GHz) 程度のあまり変動のない強度で1カ月以上輝いた. 観測チームは, この激しい変動は銀河内の星間ガスによる散乱である. その変動が収束したことは, 電波を放射している, いわゆる『火の玉』(後述)が膨張したためであると主張している. 宇宙論的遠方での『火の玉モデル』を間接的に支持する観測結果である. つい最近, 98年3月29日のバースト (GRB980329) で同様の変動する電波源がア

フターグロウの位置に検出されたという報告があった<sup>17)</sup>. VLAによる8.4GHzでの観測で, 強度は4月1日の時点で,  $248 \mu\text{Jy}$ と報告されているが, 現在進行形の観測であり詳細はまだ不明である.

#### 4. 『火の玉』ですべてが説明できるのか?

ガンマ線バーストおよびアフターグロウのモデルとして, 現在最も人気が高い理論は, いわゆる『火の玉モデル』である<sup>18)</sup>.

観測される典型的なガンマ線バーストのエネルギーは  $F \sim 10^6$  エルグ/cm<sup>2</sup>であるから, バースト源が宇宙論的遠方 ( $\sim 3\text{Gpc}$ )にあるとすると, バーストが等方的に放射されているなら, およそ超新星爆発1個分に相当する  $E_1 \sim 10^{51} (D/3\text{Gpc})^2 (F/10^6 \text{ erg/cm}^2)$  エルグのエネルギーがガンマ線で



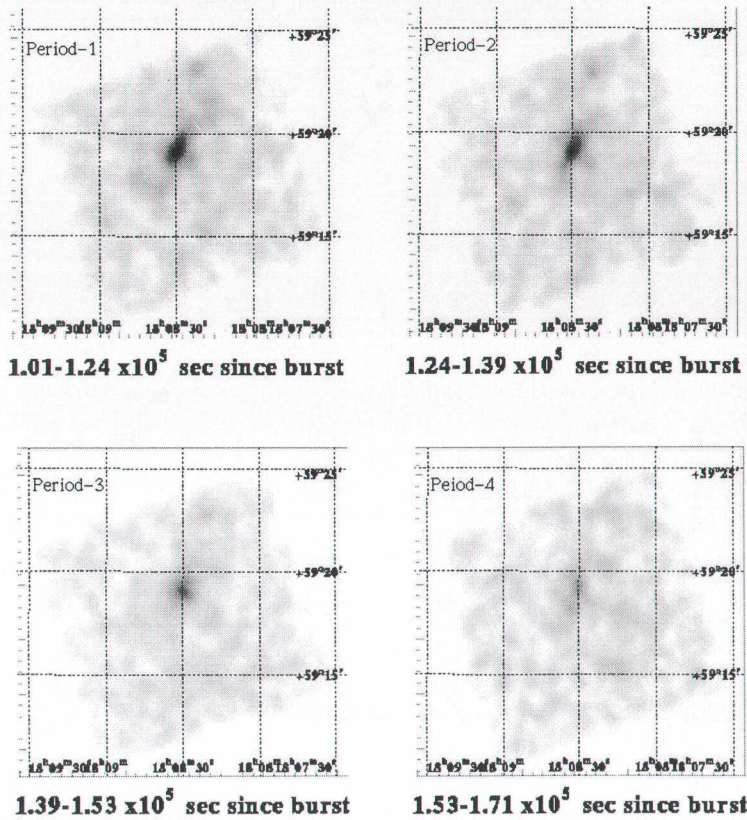


図 2 (a) ASCA 衛星が観測した GRB970828 アフターグロウのイメージ。ASCA の観測時間(約 1 日)の間に減光していく様子がわかる。

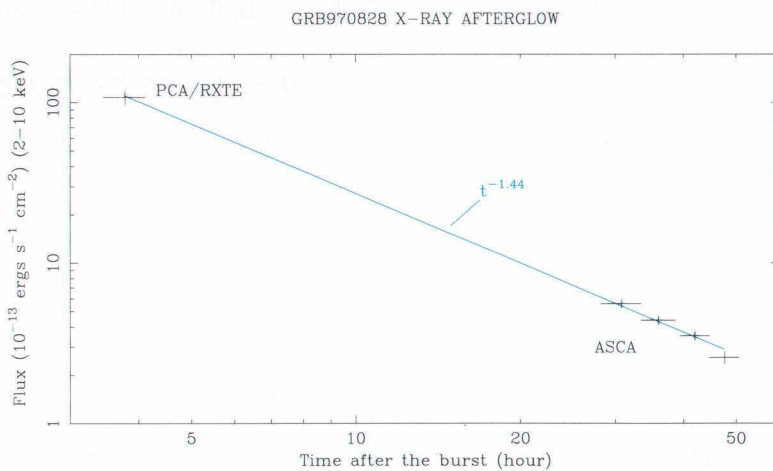


図 2 (b) GRB970828 アフターグロウの X 線での光度曲線。 図 2 (a) で示した 4 つの時間帯の平均 X 線強度とバースト 4 時間後の PCA/RXTE による観測結果をあわせてプロットした。強度がべき関数 ( $t^{-1.44}$ ) で減光したことを示す。

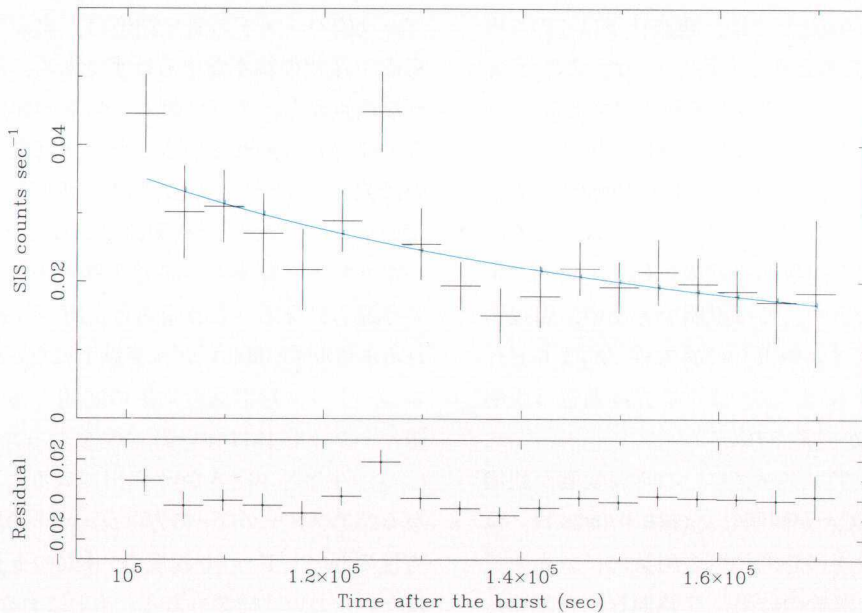


図3 ASCAが見たGRB970828アフターグローの時間変動。実線はべき関数(指数は-1.44に固定)にしたがう減光モデルでの最良あてはめ結果をしめしている。1.25 × 10<sup>5</sup>秒周辺にフレア状の変動がみられる。

解放されたことになる。一方、ガンマ線バーストには短時間(ミリ秒以下)の変動があることから、バーストの放射領域は  $R \lesssim c\Delta t \sim 300 \text{ km}$  ( $\Delta t/1\text{ms}$ )の小さな領域と考えなくてはならない。ところが、ガンマ線バーストはその名のとおり、 $\geq 1\text{MeV}$ のガンマ線を放射する現象である。およそ( $10^{51}$ エルグ/ $1\text{MeV}$ ) $\sim 10^{57}$ 個のガンマ線光子がこのような小さな領域から放射したとすると、光子同士が衝突して電子・陽電子対生成が起こり、肝心のガンマ線が出て来なくなってしまふ。このことは昔から良く指摘されており、バースト源までの距離に制限をあたえるものと以前は考えられていた。この問題は、放射領域が超相対論的速度(すなわちほとんど光速)で膨張している、つまり観測者の方向に向かってきている場合回避できる。膨張運動のローレンツ因子を $\Gamma$ とすると、 $\Gamma > 10^{14/(4+2\alpha)}$ であれば、 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ に対して、上記の放射領域は透明となる。ここでバーストのスペクトルは $E^\alpha$ で表せると

仮定した。観測から $\alpha \sim 2$ 程度であるから、 $\Gamma \geq 100$ となる『相対論的速度で膨張する放射領域』(火の玉)ならばよい。このような『火の玉』が実現するには、最初のエネルギーが、非常にバリオンの少ないところで発生されなければならず、 $E_1 \sim 10^{51}$ エルグに対して、せいぜい太陽質量の $10^6$ 程度のバリオンしか含まれない。これが、いわゆる『火の玉モデル』と呼ばれるものである。

『火の玉』は膨張するにしたがい、周囲の星間物質と衝突して衝撃波を形成するだろう。衝撃波で加速された電子は磁場と相互作用してシンクロトロン放射を生成する。衝撃波面はわれわれ観測者の方向に相対論的速度で接近してくるので、そこで発生した光子は、われわれから見ると青方偏移をうけてガンマ線に見える(バーストの本体)。『火の玉』はなおも膨張し続け、周囲の物質をかき集めてシンクロトロン放射で光り続ける。しかも、かき集めるにしたがって膨張の速度が減速し、 $\Gamma$





は時間のべき関数にしたがって小さくなり、結果的にアフターグローも時間のべき関数的に暗くなっていく<sup>19)</sup>。GRB 970228 では、観測結果はこのモデルの予言するところと良く一致していた。このため、『火の玉モデル』は大きな支持を得たのである。

ただし、この場合も現実はいずれほど単純ではない。図1からもわかるように、GRB 970508 は最初の2日程度は、可視光アフターグローはむしろ増光し、その後べき関数的な減光に転じている。単純な『火の玉モデル』では説明できない。周辺物質の非一様性・『火の玉』の異方性（つまりピーミング）を考慮すれば、このような光度曲線は説明できるという説が提案された<sup>20)</sup>。

X線領域でもアフターグローの時間変動が観測されている。ASCAが観測したGRB 970828は、全体的には指数-1.4の時間のべき関数的に減光しているが、詳細な解析の結果、3時間程度の時間スケールでアフターグローのX線強度変動が変動していることがわかった<sup>21)</sup>。しかもこのバーストの場合、可視光領域ではアフターグローが検出されなかった。『火の玉モデル』にしたがえば、X線も可視光も同じ輻射機構が支配しているはずである。バースト源の周辺に濃い吸収ガスが存在するのかもしれない。可視光天体が見つからないだけにとどまらず、GRB 970111ではバーストそのものはX線領域で明るかったのにも関わらず、X線アフターグローさえ見つけられなかった。

理論的にも、どうやって『火の玉』を作るのかという問題は未解決である。もっとも人気の高い説は、中性子星同士の連星が合体するというものである。これでガンマ線バーストの発生頻度を説明することは十分可能なようだ。ただ、合体によって解放される重力エネルギーを引き抜き、バリオン密度の低いところで『火の玉』を作るということが難しい。有力な仮説は合体時に放射されるニュートリノが対消滅して、電子・陽電子対を生成するというものであるが、果してこのプロセスが十分効率良く働くかどうか、疑問視する研究者も多い。

もし、ガンマ線バーストの素となる『火の玉』の起源が中性子星連星の合体であるとするならば、ガンマ線バーストの発生頻度は、星および銀河の形成・進化の跡をなぞるはずである。最近このような視点から、ガンマ線バーストの強度分布を見直す研究が行われている（たとえば東大の戸谷氏の研究<sup>22)</sup>）。その結果BATSEの観測している最も暗いバーストでは、その距離はこれまで考えられていたものよりも遠く、赤方変移で表して $z > 3$ という遠方になる。こうなると、ガンマ線で放射されるエネルギーは $10^{52}$ エルグ以上になる。前述したニュートリノ対消滅の効率の問題もあり、ガンマ線バースト自体は強い異方性をもった『火の玉』（ジェットと呼ぶべきか）から出ている、と考えたくなる。アフターグローの方はジェットの周辺の、異方性の弱い（ $\Gamma \sim 10$ 程度の）『火の玉』が起源ではないかという提案もある。もしこれが現実なら、『ガンマ線バーストを伴わないアフターグロー』という奇妙なトランジェントがあるのかもしれない。

## 5. おわりに

ガンマ線バーストの発見者であるロス・アラモス研究所のRay Klebesadel博士は、1967年頃からの新奇な現象に気づいていたらしい（公式発表は1973年）。したがって、昨年のGRBアフターグローの検出は、発見からはほぼ30年目での大展開ということになる。上述したようにガンマ線バーストに関しては分からないことがまだまだ多い。高々10例以下のアフターグローが検出されたのみである。観測事例を増やさなくては決定的なことをいうことはできない。前述したHETE計画は、新たに軟X線CCD/符合化マスクカメラを搭載してHETE2計画として蘇り、1999年に打ち上げが予定されている。バースト後10秒程度で位置を通報することが可能で、WFC/BeppoSAX、BATSE-RXTEより格段にレスポンスが向上するだろう。

Rayはユニークな発想をする研究者として知られていた。1988年に筆者がロス・アラモスに滞在し





た時には親切にしてください。独特の語り口に味があった。昨秋、2年ぶりで行われたハンツビル・ガンマ線バーストワークショップで、彼の特別講演が行われた。夫人の経営するキャンディ・ショップの公式QCエンジニアであると言う、以前より少しだけ肥られた姿で登壇し、発見当時の様子を楽しそうに話された。往時と変わらぬ語り口であった。ガンマ線バーストの解明には、Rayのようにユニークな発想がどうやら必要ようだ。

ASCAの観測はTOOとして行なわれたものであり、チーム全員の協力の成果である。また解析については、理研の並木雅章君の努力に負うところが大きい。ここで感謝を表したい。

### 参考文献

- 1) 村上敏夫, 吉田篤正, 1996, 天文月報 89, 104
- 2) 水本好彦, 1997, 科学 67, 894
- 3) Piran T., 1997, in *Unsolved Problems in Astrophysics*, ed. Bahcall J. N. & Ostriker J. P. (Princeton University Press, Princeton) p.343
- 4) Hurley K., et al., 1996, ApJ 469, L105
- 5) Murakami T., et al., 1996, PASJ 48, L9
- 6) Tokanai F., et al., 1997, PASJ 49, 207
- 7) Shibata R., et al., 1997, ApJ 486, 938
- 8) 門叶冬樹, 1997, 天文月報 90, 410
- 9) Yoshida A., et al., PASJ, 1989, PASJ 41, 509
- 10) 吉田篤正, 河合誠之, 1997, 科学 67, 891
- 11) Fruchter A. S., et al., 1998, in the Proceedings of the Fourth Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium, eds. Meegan C. A., Preece R., & Kosshut T. (AIP) (in press) (astro-ph/9801169)
- 12) Pedersen H., et al., 1998, ApJ 496, 311
- 13) Sahu K. C., et al., 1997, Nature 386, 686
- 14) Pian E., et al., 1998, ApJ 492, L103
- 14) Bloom J. S., et al., 1998, GCN Circ. #30
- 15) Metzger M. R., et al., 1997, Nature 387, 878
- 16) Frail D., et al., 1997, Nature 389, 261
- 17) Taylor G. B., et al., GCN Circ. #40
- 18) Rees M. J. & Mészáros P., 1992, MNRAS 258, 41P
- 19) Mészáros P. & Rees M. J., 1997, ApJ 476, 232
- 20) Mészáros P., Rees M. J., & Wijers R. A. M. J., 1997, astro-ph/9709273
- 21) Yoshida A., et al., 1998, in the Proceedings of the Fourth Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium, eds. Meegan C. A., Preece R., & Kosshut T. (AIP) (in press)
- 22) Totani T., 1997, ApJ 486, L71

### Did We See an Origin of Gamma-Ray Bursts?

Atsumasa Yoshida

*The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198*

Abstract: Discovery of long-living afterglows opened up a new stage of the Gamma-Ray Burst research. Remarkable results came out by recent observations; afterglows displaying a decline in flux generally represented by a power-law of time, an extended source which could be a host galaxy, red-shifted spectral lines, and a compact radio source. These may suggest cosmological fireball models. However afterglows show various aspects and only several events are detected to date. More comprehensive observations are clearly necessary to understand this peculiar phe-

本稿脱稿後、大きなニュースが飛び込んできた。Kulkarni et al. (Nature 393, 35)によると、GRB 971214の可視光アフターグローを観測したケック天文台は、分光データの波長5,382.1Åに輝線を発見した。著者たちはこれはバースト源の属する銀河からのLy $\alpha$ 輝線であろうと述べている。もし、この解釈が正しければ、GRB 971214は赤方偏移 $z = 3.418$ というはるか遠方で発生したことになる。ガンマ線領域に放射されたエネルギーは、 $10^{53}$ エルグ（ガンマ線が全立体角 $4\pi$ に等方的に放射されたと仮定）にも達する。

また、WFC / BeppoSAXは、1998年4月以降、4月25日、5月15日、5月19日にもガンマ線バーストを検出した。