



ガンマ線バーストの対応天体に迫る

門 叶 冬 樹

〈理化学研究所／リニアック研究室，科学技術振興事業団 〒 351-01 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: tokanai@crow.n.riken.go.jp

ガンマ線バーストの発見以来 30 年が経過しますが，未だにそのバーストが何処で起きている現象なのかさえ謎です。この問題に大きな進展が見られなかった理由は，バーストの対応天体が見出されていないことにありました。ところが最近，ガンマ線バースト対応天体の X 線や可視光観測の報告が相次いでおり，バーストの住処がわかりつつあります。ここでは，我々が行なっている「あすか衛星を用いたバースト対応天体探査」，「HETE 計画」，そして「急展開する最近のガンマ線バースト対応天体研究」について述べます。

1. ガンマ線バーストとは

ガンマ線バーストは，多量のガンマ線～X線が突然爆発的に宇宙の彼方から飛来する現象です。ガンマ線バーストの典型的な継続時間は数ミリ秒から数十秒であり，1年間に約1000個のバーストが発生すると考えられています。バースト中の最大エネルギーフラックスは， $10^8 \sim 10^2 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ であり，明るい事で知られるX線星（Crab, SygX-1）の1000倍以上の明るさを持ち，90%以上のエネルギーがガンマ線によって放出されているまさに超高エネルギー現象です。

ガンマ線バースト最初の発見は，1967年にアメリカの核実験監視衛星 Vela¹⁾によって偶然なされました。その後，KONUS 実験，PVO 衛星，GINGA 衛星を代表とする数多くの科学衛星によってガンマ線バーストの観測・研究が行なわれました。1991年に打ち上げられたコンプトン・ガンマ線天文台（CGRO）搭載のBATSE 観測機器は，従来にない高感度を持ち，また，数度の精度ではありますが位置方向決定能力を有しており，現在も1日に約1個の頻度でバーストを検出しています。それらの膨大なデータセットがもたらした最大の成果は次の二点の発見です。まず，バーストの発生方向は等

方的に分布し，われわれの銀河，アンドロメダ星雲（M31）のような近傍銀河，その他いかなる既知の天体とも相関していない²⁾。次に強度分布は空間的には遠くにいくほど少なくなり，太陽系近傍の銀河円盤内（ $\sim 100 \text{ pc}$ ）で一様に発生しているとは考えられない²⁾。このことから，ギガパーセク（Gpc）オーダーの距離スケール，いわゆる「宇宙論的」遠方で発生する，中性子星およびブラックホールの衝突・合体に伴う現象であるとする説が有力となります。他方で，銀河に付随する巨大な銀河ハロー（ $\sim 100 \text{ kpc}$ 程度）で発生するとする説も有力です。いずれの説も現在までに蓄積された膨大な観測結果を完全に説明するものではなく，現状では発生源は謎のまま残されています。

このようにガンマ線バースト発見以来30年間，観測・理論両面において多大な努力が払われたにもかかわらず，ガンマ線バーストは，なにが，どのようなメカニズムで起こしているのか誰もわかりません。その謎に包まれたガンマ線バーストの正体を突き止める方法は，バーストの対応天体を既知の種類の日体と同定する事にあると思われます。その理由から，我々はX線波長領域でのガンマ線バースト対応天体探査をあすか衛星で行なっています。

2. あすか衛星の対応天体探査

ガンマ線バーストは、起こる時刻、位置が予め予測できない事から、広い範囲をカバーできるガンマ線バーストモニターを用いて精度良くその位置を決定し、出来るだけ早く高感度の望遠鏡（多波長）でバースト位置の誤差領域内を探査することが望まれていました。しかしながら、過去のミッションではバーストの位置を十分高い精度で決定するには数週間以上の時間がかかりました。その後には可視光や電波で対応天体探しを行なっても、どの天体がバースト源であるか断定することは極めて困難なのです。一方、X線やガンマ線の追観測となると話は別になります。その誤差領域にX線星やガンマ線を放射している天体が偶然存在する確率はかなり低くなる事から、そのバースト源との関連が考えられるからです。特にガンマ線バーストは、バースト時に強いX線放射をとまなうことから、バーストを起こしていない静穏時もX線を放射していることが期待されます。また、X線ミラーを使えば、ガンマ線より感度が1000倍良く、深く（遠く）まで探査できる事から、まずX線で対応天体を探査することが有効であると我々は考えました。

それでは、探すべきバースト領域はどこにするか？BATSEのガンマバースト源の位置決定精度はせいぜい数度です。この中に含まれるバースト候補天体は、たとえX線星といえどもかなり存在しますから（5度平方角の天空領域をあすか衛星で観測すれば、その中には約70個のX線源が検出される）、もっと精度良く決められたバーストの誤差領域を探査せねばなりません。そこで、IPN（Inter Planetary Network：惑星軌道上で稼働している検出器によるガンマ線バーストの検出の時間差から、位置を決定するシステム）で数十秒角幅の帯に位置がおさえられているバーストがまず選び出されました。次に、これらのバーストの中から、「強いバーストは、静穏時もX線で明るいかも知れない」と考え、BATSEで受かったバーストの中から“超”

明るい2例のバースト選び、比較的広い視野をもつあすか衛星を用いて2例の高強度バーストの対応天体探査を行いました。あすか衛星によって1996年1月に探査したガンマ線バースト源は、1994年2月17日に起きたバースト（以下、GRB 940217）と、1993年1月31日に起きたバースト（以下、GRB 930131）です。

GRB 940217、GRB 930131双方とも、BATSEのほか、CGRO搭載のEGRET、COMPTELでも検出され、これらの観測器による制限を加えると、バースト発生位置は比較的小さい領域に決まりました。

GRB 940217は25-2000 keV領域での輻射終了後も約90分にわたってMeV-GeVの高エネルギーガンマ線が観測されました³⁾。これは、ガンマ線バースト観測史上、最も長く活動し、最高のエネルギー（18 GeV）を放出したイベントです。観測されたエネルギーは、約 6.7×10^4 erg cm⁻²であり、BATSEの3Bカタログ（BATSEが1991年4月19日から1994年9月19日までに観測したバーストのカタログ²⁾）の中で、3番目に明るいバーストでした。一方、GRB 930131は、3Bカタログの中で最高の強度を記録したものです。そのピーク強度は168 photons cm⁻² sec⁻¹に達しました。次に明るいバーストのピーク強度は68 photons cm⁻² sec⁻¹に過ぎず、とりわけGRB 930131が明るかったことを示しています。以上の点から、これら2つのガンマ線バースト源は、あすか衛星でX線対応天体を探査するのに最適なバーストの候補となりました。以下が、両バーストのあすか衛星でのX線対応天体探査を行った結果です。

GRB 940217の誤差領域内に1つのX線源を検出した（図1のソース1）。この線源の2-10keVのエネルギーフラックスは約 4×10^{-13} erg s⁻¹ cm⁻²であった。パロマ天文台で観測した過去の写真乾板を調べたところ、このX線源の半径1分以内の領域に2個の光学天体が見つかった。X線フラックスと光学天体の明るさの関係、及び光学天体の色

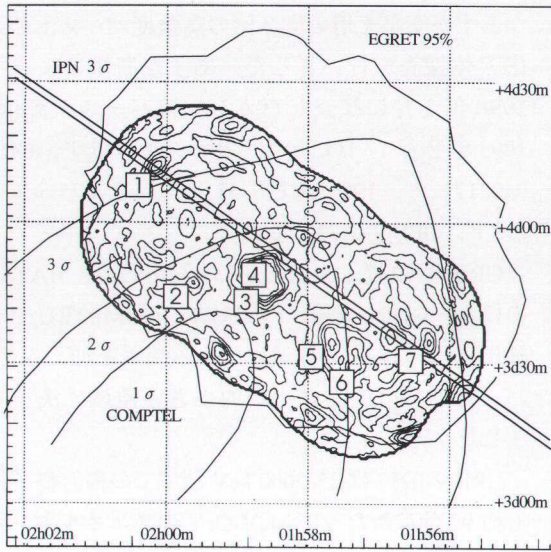


図1 GRB940217の領域のX線探査

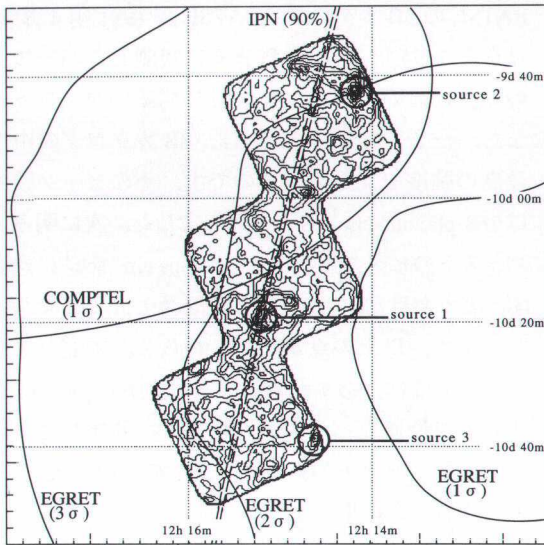


図2 GRB930131の領域のX線探査

(B-R)の議論から、あすかで発見したX線源の対応天体は、通常の星や銀河ではなく活動銀河核である可能性が高く、2個のうち青い方の光学天体がX線源の光学対応天体であると結論される。X線源があすか衛星の探査したGRB 940217の誤差領域内に偶然検出される確率は約0.1と低く、このX線源と光学天体がGRB 940217の対応天体である可能性は高い。この活動銀河核の輻射を約 $1.0 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ と仮定すると、このX線源までの距離は約4.7 Gpc (赤方変移 $z=1$)と推定される。GRB 940217のMeV領域でのエネルギースペクトルから電子・陽電子対生成による吸収を受けていないこと、速い時間変動(約0.1秒)がみられたことから、バースト領域には相対論的なビーミングが要求される。あすか衛星で発見したX線源がガンマ線バースト対応天体だとすると、その推定距離からローレンツファクターは ~ 50 以上であると結論される⁴⁾。

GRB 930131では誤差領域内に1つのX線源が検出された(図2のソース1)。この位置はF型星HR4657とあすか衛星の位置決定精度内で一致し、ROSAT衛星の観測とも一致する。2-10 keVでのエネルギーフラックスは、 $1.3 \times 10^{13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ であった。HR4657までの距離34 pcを考慮すると、バーストがこの天体で発生したとすると、約 $10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ のガンマ線を放射した事になる。F型の星がこのような超高エネルギー現象を起こす事は考えにくく、またこのタイプの星がバーストの発生方向分布にみられるような等方的な分布をしていない事から、HR 4657が誤差領域内に位置することは偶然であると考えられる。このことから、GRB 930131のX線対応天体は $1 \times 10^{13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ よりも暗い天体である結論される⁵⁾。このことから、ガンマ線バーストの対応天体の静時のX線強度はバースト強度と相関するものではないと考えらる。

今回のGRB 930131とGRB 940217についての観測結果、および過去に行われた2例のあすか衛星でのガンマ線バースト対応天体探査の結果(GRB

表 1

ガンマ線バースト	誤差領域から X線源候補検出	X線が検出 される確率	対応天体 候補
GRB 781119	○	3%	活動銀河核
GRB 920501	○	1%	銀河
GRB 930131	×	15%	遠方の銀河?
GRB 940217	○	10%	活動銀河核

Table 1: あすか衛星がおこなったガンマ線バーストの対応天体探査の結果

781119⁶⁾と GRB 920501⁷⁾をまとめると表1になります。

4つのバーストの誤差領域内に、あすか衛星のバースト探査の検出限界以上 ($1.0 \times 10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$) のX線を放出しているX線源が、3つは発見され、1つは発見されなかったことから、バーストの対応天体がX線を $1.0 \times 10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 以上の定常放射を出している確率(α)は、90%以上の信頼度で $0.28 < \alpha < 0.97$ であることがわかりました。ガンマ線バースト源が全くX線で光っていない我々の銀河系のハローにある中性子星であることを完全には除外できません。しかし、あすか衛星のガンマ線バースト対応天体探査の結果は、バースト源が系外の銀河である事を強く示唆しており、発見から30年以上謎に包まれているガンマ線バーストの発生源に新たな光を射しかけました。

3. HETE 衛星計画

ガンマ線バーストの静穏時のX線対応天体探査は、バースト候補天体を絞り込むのに有力な観測手段ではありますが、多数のイベントについて、統計的に行なう必要があり、莫大な観測時間が要求されます。もしガンマ線バーストの現場を精度良くとらえ、静穏時ではなくバースト中にX線を初め

とする別の波長 (TeV ガンマ線, 可視光, 赤外線, 電波など) の観測が行なわれれば、間違いなくガンマ線バーストの謎を解明する鍵となります。

HETE 計画は小型専用衛星を用いて紫外線・X線・ガンマ線でガンマ線バーストの多波長観測を行ない、高精度かつリアルタイム機上処理によりその位置を決定し、地上や他の衛星での速やかな同時/フォローアップ観測を行うシステムを構築するもので、日本の理研をはじめアメリカ、フランスの国際協力で開発されました。我々が開発したX線観測機器 (広視野X線モニター: WXM) は、HETE 計画におけるガンマ線バーストの位置決定作業の中心を担う検出器です。WXMは直交する向きに設置した2組の一次元位置有感型比例計数管と一次元符号化マスクからなり、バーストの位置決定をリアルタイムで行うという主目的の他、サイクロトン吸収共鳴構造をはじめX線領域での系統的な観測を行うことをめざして設計されました。WXMはそれ自体が約18分角の方向決定精度をもち (バーストの強度によっては数分角の精度を持つ)、同時にバーストの位置を紫外線カメラに通報します。もしガンマ線バーストが紫外線カメラの視野内で起こった時には、最高10秒角でその位置を決定することができるというものです。



WXM のガンマ線バーストの位置決定精度は BATSE のそれより約 1 桁以上高精度となり、他の観測装置による精査観測をはるかに容易にします。しかも、バーストが起こると瞬時に情報を地上に放送することが出来るため、リアルタイムで位置情報を通報することができ、バースト中直接的な対応天体探査が可能となります。

HETE 衛星は、ガンマ線バースト天文学の期待を背負って 1996 年 11 月 4 日、アルゼンチンの SAC-B 衛星と共にペガサスロケットで打ち上げられました。しかし、3 段目のロケット切り離し失敗により、HETE 衛星は、ガンマ線バーストを見ることなくその一生を終えました。HETE 衛星の失敗に続き、次世代の IPN を担うべく、火星に向かうはずであった Mars'96 搭載のガンマ線バーストモニターも、衛星打ち上げによる失敗のためにその任務を果たせませんでした。このような不幸が続きガンマ線バースト天文学に暗雲が立ち込めたかに思えました。しかし、このような事態が一変するようない出来事が起こったのです。

4. BeppoSAX の活躍

今年の 3 月 3 日から 5 日にかけて、X 線波長領域における次世代の全天観測とガンマ線バースト観測計画について、「All-Sky X-Ray Observations in the Next Decade」と題する国際会議が理研において開催されました。この会議で、イタリアの BeppoSAX 衛星の運用責任者である Piro 氏から衝撃的な報告がありました。その内容を要約すると次のようになります。

ガンマ線バーストが 1997 年 2 月 28.124 日 (UT) にイタリア・オランダの天文衛星 BeppoSAX 衛星搭載のガンマ線バーストモニター (GRBM) と X 線の広視野カメラ (WFC) によって検出された (GRB 970228)。WFC は、バーストの位置を半径 3 分の精度で決定した⁸⁾。

この情報に基づき、バーストの 8 時間後に、BeppoSAX 衛星搭載の高感度 X 線望遠鏡 LECS

(Low Energy GSPC) と MECS (Medium Energy GSPC) によって誤差領域が探査され未知の X 線源が発見された。この時点の X 線源のフラックスはそれぞれ $2.8 \times 10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (2-10 keV)、 $4.0 \times 10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (0.5-10 keV) であった⁹⁾。

BeppoSAX はさらに 2 日後に同じ X 線源の歳観測を観測したところ、そのエネルギーフラックスは、約 20 分の 1 以下に減光しているのを確認した⁹⁾。

ガンマ線バーストの誤差領域内で受かった X 線源が減光していることが観測されたことは、バースト観測史上初めてのことなのです。この消え行く X 線源の正体は一体何者なのでしょう？ 会議終了後すぐに我々は、あすか衛星による X 線追観測、野辺山宇宙電波観測所と鹿島宇宙通信センターに電波追観測を依頼しました。その他日本以外にも世界中の観測所が多波長観測を行ないました。

あすか衛星は、バースト発生から約 1 週間後に 20 キロ秒におよぶ観測を行ないました。図 3 に GIS で観測された X 線イメージを示します。GIS, SIS とともに BeppoSAX で検出されたバーストの X 線対応天体の位置に弱い X 線源を検出し、2-10 keV の X 線フラックスはそれぞれ、約 $9.0 \times 10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 、約 $7.2 \times 10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ でした¹⁰⁾。さらにバースト発生 11 日後には ROSAT 衛星がこの X 線源を観測し、0.1-2.4 keV で約 $3.8 \times 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ の X 線フラックスを持つ X 線源を検出しました¹¹⁾。これらの X 線領域での減光の様子を図 4 に示します。この対応天体の X 線フラックスは、時間の約 1.3 乗で減光しました。

一方、このガンマ線バーストの誤差領域は、可視光の波長領域でも観測され X 線同様に減光している対応天体が発見されました^{12), 13)}。ガンマ線バーストに付随する X 線-ガンマ線波長領域以外でのトランジェント現象とその対応天体が初めて発見されたこととなります。また、ハッブル宇宙望遠鏡もバーストから約 26 日後と約 39 日後に観測を行ないました¹⁴⁾。Safu 氏らはハッブルのデータから、この可視光対応天体を広かったソース (ハワイの



KECK 望遠鏡等から既に指摘されていた)と点源のソースに分離し、点源はこの2回の観測でも減光を続けているが、広がったソースは光度が変化していないことを示しました。これらの、X線および可視光領域における過渡的なバースト対応天体(現象)の強度の減光は、中性子星同士の合体後にローレンツファクター ~ 100 以上で膨張すると考えられている衝撃火の玉モデルと良く一致しており¹⁵⁾、ガンマ線バーストの銀河系外説を強く支持しています。しかしながら、同じハッブルのデータを解析した Caraveo 氏らは、その光学天体の位置がバーストから約26日後と約39日後で移動したと指摘しています¹⁶⁾。その天体が100 pcの距離にあるとすると260km/秒の速度で移動したことになり、バーストは我々の銀河内で起こったこととなります。同じデータでも未だガンマ線バースト源に制限がつかず議論は沸騰しています。

BeppoSAX 衛星が1997年4月2日に観測したガンマ線バースト(GBR 970402)と1997年5月8日に観測したガンマ線バースト(GBR 970508)にはX線での減光が発見されていますが、1997年の1月11日に観測したガンマ線バースト(GBR 970111)の誤差領域にはX線源は見られませんでした。GBR 970111は、BeppoSAX 衛星が観測した5例のバーストの中で一番

明るかったことからバースト時の強度とX線は相関するものではないと思われます。また、X線の減光が観測されたGBR 970402は、可視光での減光は確認されていません。各ガンマ線バーストが個性を持っていて、統一的な描写で記述するには、か

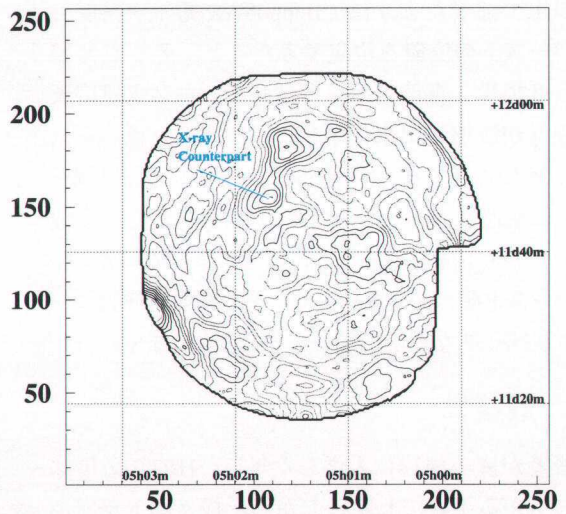


図3 GRB 970228からのX線を検出

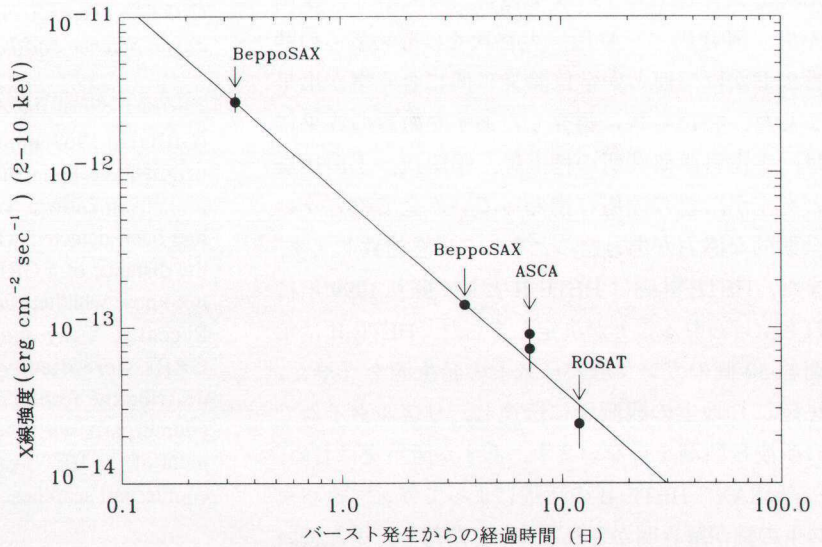


図4 GRB 970228からのX線フラックス

なりの観測例が必要と思われます。

以上で述べたように、BeppoSAX 衛星が精度良くバーストの位置を決定できたこと、そして X 線から可視光、電波に至る多波長でバースト対応天体探しが敏速に出来た事によってガンマ線バーストに対して多くの知見を得ることが出来ました。さらに敏速に（バースト発生から数秒以内）、多波長でバースト源探査を行なうことによって、ガンマ線バースト源ばかりではなく、その放射機構についてより統一的な理解が進むことと思われます。

4. 最後に

著者が博士課程に入学した年に、HETE 衛星は打ち上がる予定でした。しかし、様々なトラブルのために再々延期され、このままでは学位論文のテーマに間に合わない状態になりました。この事に、気遣ってくれた理研の吉田氏があすか衛星を用いた対応天体探しのテーマを授けてくださり、松岡先生、河合氏、三原氏、大谷氏をはじめ多くの助言のおかげで何とか学位論文に間に合う事が出来ました。特に本稿に紹介したあすか衛星の成果には、宇宙科学研究所の村上氏、柴田氏、上田氏などあすか衛星の運用に携わっている全ての方々の全面的な協力があったことをここに感謝致します。また、HETE 計画は HETE II として蘇り 1999 年に打ち上げられることが決定しました。HETE II は年間約 50 個のガンマ線バーストの発生源を「早く、正確に」地上の観測所に伝達し、リアルタイムで多波長観測を行ないます。あすか衛星をはじめ、BeppoSAX, HETE II の活躍によってガンマ線バーストの謎が解き明かされることを期待したいと思います。

参考文献

- 1) Klebesadel R.W., et al. 1973, ApJ 182, L85
- 2) Meegan C., et al., 1996, ApJS 106, 65
- 3) Hurley K., et al., 1994, Nature 372, 652
- 4) Tokanai F., et al., 1997, PASJ 49 No.2, 207
- 5) Shibata R., et al., 1997, ApJ, in press
- 6) Hurley K., et al., 1996, ApJ 469, L105
- 7) Murakami T., et al., 1996, PASJ 48, L9
- 8) Costa E., et al., 1997, IAU Circ, No.6572
- 9) Costa E., et al., 1997, IAU Circ, No.6576
- 10) Yoshida A., et al., 1997, IAU Circ, No. 6593
- 11) Frontera F., et al., 1997, IAU Circ, No. 6637
- 12) Paradijs van.J, et al., 1997, Nature 386, 686
- 13) Galama T., et al., 1997, Nature 387, 479
- 14) Sahu K.C., et al., 1997, Nature 387, 476
- 15) Meszaros P., Rees M. J., 1997, ApJ 476, 232
- 16) Caraveo P.A., et al., 1997, IAU Circ, No. 6629

Toward Finding the Counterparts of Gamma-Ray Bursts

Fuyuki TOKANAI

*The Institute of Physical and Chemical Research
(RIKEN) Linear Accelerator Laboratory
Japan Science and Technology Corporation (JST)*

Abstract: Since the discovery of Gamma-Ray bursts (GRBs) in 1967, numerous efforts to understand their origin have been made. However, the nature still remains unknown. No counterpart in any wavelength had been detected when in quiescent, therefore even the distance of a GRB was not measured, and we did not know whether they are galactic or extra-galactic. Recently, X-ray and optical fading counterparts of GRBs were discovered at last. In this paper, I describe the results of searches for quiescent X-ray counterparts with the ASCA satellite, the development of the HETE satellite, and the recent studies of counterpart searches.