

# 多波長観測によるガンマ線バースト残光の研究

上原 岳 士・かなた望遠鏡チーム

〈広島大学大学院理学研究科 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

e-mail: uehara@hep01.hepl.hiroshima-u.ac.jp



宇宙で最も激しい爆発現象であるガンマ線バーストは人類が発見したなかで最も遠い天体の一つである。ガンマ線バーストの残光は電波からガンマ線まで観測され、指数関数的に急激減光する。2004年以降にスウィフト衛星によって観測された早期残光 X 線には、これまでのモデルでは説明できないような振舞いがたくさん発見された。また、X 線と可視帯域では異なる振舞いも報告され始めた。これにより、早期から多波長で観測する重要性が増してきた。そこでわれわれは、即時観測が可能な可視赤外線望遠鏡「かなた」、X 線衛星「すざく」、そしてガンマ線衛星「フェルミ」を用いて多波長で即時観測・解析を行う体制を整えた。この観測体制を用いて十数例のガンマ線バースト残光の観測に成功した。これらの観測結果では残光は一つの放射成分では説明ができないことを示した。

## 1. ガンマ線バーストとの出会い

私は「一番」というフレーズが大好きである。研究対象を選ぶ際に、最も大きな宇宙か、最も古い人類の歴史・考古学か悩んだものである。物理と数学が肌に合い宇宙を選んだ。広島大学の当時の牟田泰三学長と面談する機会があり、そこで私はガンマ線バーストと初めて出会った。ガンマ線バーストは最も大きなエネルギーを放出し、最も遠い天体の一つであると教えていただいた。さらに、この天体を利用すれば物理法則の検証、宇宙全体の研究もできる。これでは研究するしかないと考えた。しかし、1日で消えてしまい、その放射は電波からガンマ線帯域までにも及ぶ。即時に多波長で同時観測しなければ重要な情報を見落としてしまう。天文学では波長ごとに歴史、文化、物理があり、これらをすべて理解し習得するには時間がかかる。しかし、それにこそ独自性があると確信し、「多波長同時観測によるガンマ線バーストの研究」を行ってきた。

## 2. ガンマ線バーストとは

ガンマ線バーストは宇宙最大のエネルギー放出を誇る謎の爆発現象として知られ、その正体や機構を解明することは現代宇宙物理学の最も大きなテーマの一つに挙げられている。ガンマ線バーストのプロンプト放射では数秒間に太陽が1年間に放出する約50兆倍のエネルギーをガンマ線で放射する。ガンマ線バーストを利用した物理法則の検証が期待されており、実際にわれわれを含むフェルミガンマ線望遠鏡チームは量子重力理論に対して厳しい制限を与えた<sup>1)</sup>。プロンプト放射後の残光は電波からガンマ線まで観測され、指数関数的に減光する。ガンマ線バーストの標準モデルとして現在支持されている火の玉モデルによると、ガンマ線バーストはある小さい領域から相対論的速度の球殻をジェット状にいくつも放出するとされている(図1上を参照)。ジェット内部(球殻同士)や外部(球殻と星間物質)での二体衝突の結果、電子は衝撃波加速されシンクロトロン放射するとされている(以下、内部衝撃波、外部衝

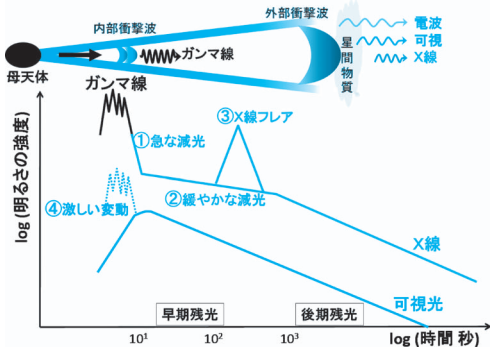


図1 上：ガンマ線バーストの火の玉モデル。下：ガンマ線バーストの光度曲線の観測事実の模式図。

撃波モデルという)<sup>2),3)</sup>。このモデルは図1下の光度曲線の後半のような単純なべきで減光する振舞いは説明できていた。しかし、ガンマ線バースト専用衛星「スウィフト」の早期からの観測により、図1下のような①急な減光、②緩やかな減光、③X線でのみのフレア、④可視域での激しい変動の観測事実は説明できていない。その理由は、ガンマ線バースト残光が時間のべき乗で減光するため、早期に観測しなければならないこと（不足1）と多波長を同時に観測する困難さ（不足2）にある。ガンマ線バーストの位置は衛星を用いてX線ガンマ線帯域で決定し、その情報をもとにほかの帯域で観測する。そのため時間が経過し、ガンマ線バースト残光は暗くなり検出が困難になる。これらの「不足」を打破し、ガンマ線バーストと残光の謎を解明するためには、早期から赤外線-GeVガンマ線まで網羅した観測の必要がある（GeVは $10^9$ 電子ボルトである）。そこで、われわれは不足している1分以内からの可視域の多色・偏光観測を「かなた」望遠鏡で観測し、またMeV-GeV領域をガンマ線衛星フェルミチームの一員としてそのデータを最大限利用することにした（MeVは $10^6$ 電子ボルトである）。

### 3. 「かなた」望遠鏡を用いた多波長即時自動観測システム

1 mクラスの本格的望遠鏡として世界最速クラスの駆動速度を誇る広島大学東広島天文台1.5 mかなた望遠鏡を用いた即時自動観測体制の構築を行い、「不足1」を打破する。「衛星がガンマ線バーストを発見し、その位置情報をインターネットを介して取得、その方向に望遠鏡を向け観測すること」をすべて自動で行う。また、近赤外線2バンドと可視1バンドの同時測光可能なTRISPECを組み合わせることで1 mクラスの望遠鏡で世界で初めてガンマ線バースト発生後1分から三色同時観測できる体制を実現し運用をしてきた。

赤外線からGeVガンマ線にまで至る多波長解析体制で「不足2」を打破する。われわれが構築した多波長解析体制では、「かなた」望遠鏡、ガンマ線バースト専用衛星スウィフト、X線天文衛星「すざく」搭載ガンマ線バーストモニター(WAM)、そしてガンマ線衛星フェルミを用いた。スウィフト衛星は、現在のガンマ線バーストの位置決定数が世界最多でガンマ線バーストの研究をするには必須の衛星である。また、フェルミとWAMでは、当番制で常にガンマ線バーストを監視している。これにより、赤外線からガンマ線までの多波長同時解析の準備を整えた<sup>4)</sup>。

### 4. 観測結果と残光の放射機構

この章では、残光の減光が緩やかな期間②とX線フレア③の放射機構について述べる。

#### 4.1 X線で緩やかな減光期間の可視観測

観測の最初のチャンスは2006年11月21日に訪れた。スウィフト衛星BAT検出器がGRB 061121を検出したのである。このガンマ線バーストはX線の光度曲線で「緩やかな減光②」の振舞いを見せた(図2)。「かなた」望遠鏡ではX線の「緩やかな減光」の後半から可視光と近赤外線の観測に成功した。ガンマ線バーストが起こったと

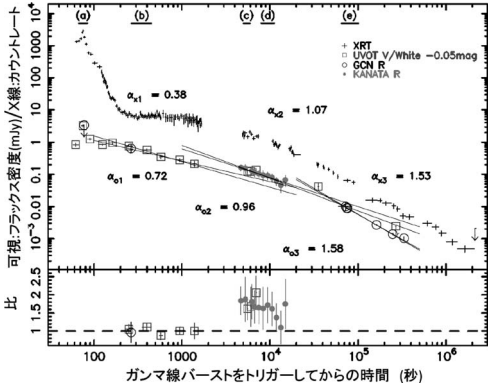


図2 GRB 061121 残光の可視とX線の光度曲線。縦軸の上のパネルは可視帯域ではフラックス密度で、X線はカウントレートで対数表示である。実線は、可視の観測データをべき関数でフィットした95%信頼領域である。(a), (b), (c), (d)そして(e)はそれぞれ多波長スペクトルを作成した期間である(図3)。下のパネルはUVOTのVバンドのフィット結果と「かなた」望遠鏡のRバンドのデータとの比である。RとVのカラーの差とフィット結果の95%の信頼領域分は誤差棒に含めてある。

きの東広島天文台ではガンマ線バーストの位置は運悪く地平線以下で、始めの観測はできなかった。同日16時37分36秒UT(ガンマ線バースト検出後 $\sim 4.6 \times 10^3$ 秒)に高度が10度以上になり始めたので観測を開始した。実は、システム構築のため毎日天文台には上がっていたが、このとき私はアルバイトのために天文台におらず、翌日に観測した事実を知り驚きと同時に悔しい思いをした。図2はX線と可視光とを合わせた光度曲線である。X線の光度曲線では、74秒後に放射のピークがありX線の残光はスウィフト時代の一般的なガンマ線バーストのようにバースト検出後の200秒までは急な減光、200–2,000秒は緩やかな減光、そして5,000–30,000秒は再び減光が急になった。

次に可視光の光度曲線では、プロンプト放射の後、減光の傾きはX線の光度曲線のように緩やかになる。図2中の「始めの緩やかな減光」期間

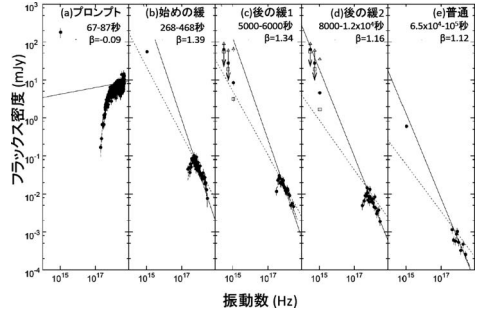


図3 GRB 061121のX線から可視赤外線の多波長スペクトルの時間変化。黒丸はX線データと可視赤外線の観測結果を母銀河のダストによる吸収を最も適したモデルで補正したものである。三角と四角は母銀河のダスト吸収を異なるモデルで補正した結果である。実線はX線データをべき関数と星間吸収モデルでフィットし星間吸収分を取り除いた結果を示している。点線はX線のスペクトルから外部衝撃波モデルで予想される可視スペクトルの下限を示している。

(300–2,000秒)はスウィフト衛星の可視紫外線望遠鏡(UVOT)のVバンドのデータである。「後の緩やかな減光」期間( $4.6 \times 10^3$ – $1.5 \times 10^4$ 秒)は、かなた望遠鏡で観測したものである。 $3 \times 10^4$ 秒後のRバンドのデータはガンマ線バーストの観測者ネットワーク(GCN)で報告されたものである。可視とX線の最後の折れ曲がり明確な時間差はなかった。光度曲線の折れ曲がり以降では可視とX線の減光のべき指数が等しくなっている。これは標準的な外部衝撃波モデルで説明ができる。

図3は光度曲線の典型的な五つの時間帯での同時多波長スペクトルである。丸で表示されている高振動数側がX線で、データ点の少ない低振動数側が可視光である。ガンマ線バーストの母銀河のダストによる低エネルギーX線の吸収は時間変化しないはずである。X線スペクトルのフィットはその吸収分を共通にした上で、各時間のべき関数成分を求めるという手法を用いることにより、べき関数部分の精度良いフィット結果が得られた<sup>5)</sup>。X線のスペクトルはダストによる吸収分を補正し実線で示した。スペクトルのべき指数は

時間変化していることがわかった。

われわれの結果と外部衝撃波モデルの解釈について議論する。このモデルによれば、可視帯域とX線帯域の間にシンクロトン放射の冷却振動数がある場合、X線と可視の減光べき指数の差は0.25となることが予言されている。その差は、「始め」と「後の緩やかな減光」共に外部衝撃波モデルで説明はできない。外部衝撃波中のエネルギー、磁場と電子エネルギーの比、ガンマ線バースト周辺の星間物質の密度をガンマ線バーストからの距離に依存して変化すると考えたモデルがある<sup>6)</sup>。従来は一定と考えられていたこれらのマイクロパラメーターを導入するモデルである。この提案により、X線と可視の減光べき指数の差が0.25にならないガンマ線バースト残光を説明できている。このモデルを当てはめてみたが、GRB 061121の振舞いを説明するためにはそれらマイクロパラメーターが「始め」と「後の緩やかな」期間で不自然に複雑に変化する必要がある。そのほかでは、母天体からの放出質量がバルクローレンツファクターに依存するとしたモデルがある<sup>7)</sup>。このモデルにおいても「始め」と「後の緩やかな減光」期間の可視観測結果を説明するには放出質量が複雑に変化する必要がある。したがって、「始め」と「後の緩やかな減光」期間を一つの成分の振舞いとして説明するのは難しい。

また、「始めの緩やかな減光」期間の光度曲線のフィット結果を「後の緩やかな減光」期間へ延長すると後の減光期間でバンプのようなものが見えた。このバンプはX線では見られない。これらの結果も同様に、「始め」と「後の緩やかな減光」期間の一つの成分では説明ができないことを支持する。例えば2成分ジェットを考え、「後の緩やかな」期間の成分は可視で明るくX線域で暗ければ、このような振舞いは説明できるかもしれない<sup>8)</sup>。

#### 4.2 X線フレア

X線フレアはガンマ線バースト検出後、数十秒から数千秒でX線で増減光をするものである。こ

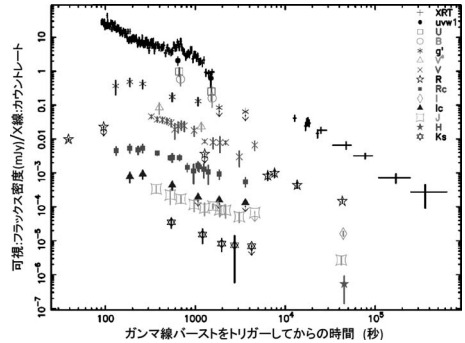


図4 GRB 071121CのX線から近赤外線の光度曲線。縦軸の赤外線可視帯域はフラックス密度で、X線はカウントレートで対数表示してある。赤外線可視帯域のそれぞれの値は見やすくするために赤外線に近いほど定数を掛けてある。

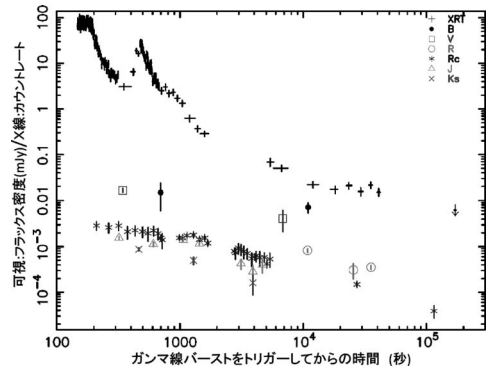


図5 GRB 080506のX線から近赤外線の光度曲線。縦軸の赤外線可視帯域はフラックス密度で、X線はカウントレートで対数表示してある。赤外線可視帯域のそれぞれの値は見やすくするために赤外線に近いほど定数を掛けてある。

れまでの研究では、フレアの振幅やタイミングなどから外部衝撃波では説明できないと言われている<sup>9)</sup>。内部衝撃波は生まれたてのブラックホールの活動により起こっていると考えられている。1,000秒でも存在しているX線フレアがプロンプト放射と同一の内部衝撃波由来とするならば、生まれたてのブラックホールが長寿命であることを示す。フレアの幅と起こった時間に相関があり、プロンプト放射とは異なる性質であることが報告されて



いる<sup>10)</sup>。このようにいまだ起源が明確にはならないが、X線フレアは生まれたてのブラックホールの性質を研究できる非常に重要な現象である。

われわれは運良くX線フレアのあるガンマ線バーストを観測できた。2007年11月12日と2008年5月6日にスウィフト衛星がとらえたGRB 071112CとGRB 080506をかなた望遠鏡とTRISPEC検出器を用いて、赤外2バンドと可視1バンドの観測に成功した。図4, 5が示すように、GRB 071112CとGRB 080506のX線残光にはX線フレアが見られる。他観測所で得られた公開データも用いることで、われわれは近赤外-X線までにおいてX線フレア前後から密な観測データを得ることができた。GRB 071112CとGRB 080506のX線域ではX線フレア時に光度が3倍と15倍増光した。一方、赤外から紫外線では有意な変動はなく、変動振幅の上限は35%と29%である。

図6が示すように、GRB 071112CのX線のスペクトルは通常の減光期、フレア増光期とフレア減光期とを比べるとべき指数が有意に変動している。

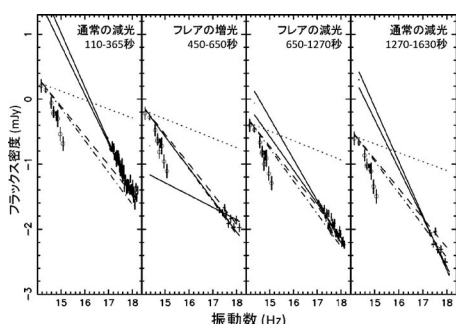


図6 GRB 071112CのX線から近赤外線の高波長スペクトルの時間変化。十字と白丸はX線データを星間吸収を補正した結果と可視赤外線観測の結果である。実線はX線データを星間吸収×べき関数モデルでフィットし星間吸収分を取り除いた95%信頼領域を示している。点線、破線、点破線は三つのガンマ線バーストの母銀河吸収モデルを仮定し補正したデータをべき関数でフィットした結果である。

一方、それに対して近赤外から紫外線域のスペクトルのべき指数は両ガンマ線バーストともに全く変動していない。GRB 080506においても同様であった。これらの観測結果をもとに、われわれは2成分の外部衝撃波でX線フレアを説明できる可能性を見いだした。このモデルについては、私が修士論文提出の直前に、深夜に目が覚めてひらめいてチラシの裏にメモしたことを覚えている。これにより、大幅に修士論文は変更された。X線フレアの光度曲線の振舞いは対数表示していれば激しい変動に見えるが、リニアスケールの表示に戻せばわかるように実際はプロンプト放射と比べ緩やかである。また、外部衝撃波が発生した時間はガンマ線バーストをトリガーした時間であるという確証はない<sup>11)</sup>。したがって、そのトリガーした時間を用いて外部衝撃波で説明できないと主張するのは不十分である。そこで、われわれはもう一度外部衝撃波の可能性を議論した。X線フレアのスペクトルの振舞いは、GRB 071112CとGRB 080506ともに可視では変動がなかった。図7のように遅れて発生した外部衝撃波のスペクトルが可視とX線の間に折れ曲がりがあり、可

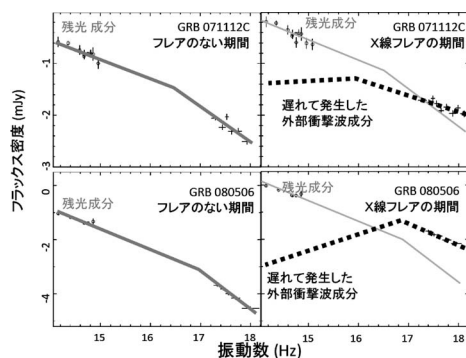


図7 赤外線からX線のスペクトルの時間変動と2成分の外部衝撃波。左の二つのパネルは標準的な減光期間、右の二つはX線フレアの増光期間である。上の二つはGRB 071112C、下の二つはGRB 080506である。実線が外部衝撃波の成分で、点線はX線フレアの振舞いを説明できるような外部衝撃波の成分である。

視赤外線帯域では残光の外部衝撃波よりも暗いと考えれば説明できる。外部衝撃波の二つのスペクトルの折れ曲がりの各振動数の関係が 10 通り考えられる。われわれはその 10 通りのそれぞれの場合で、観測を説明できるか定量的に検証した。その結果、両 X 線フレアともに 2 成分の外部衝撃波モデルで観測を再現できることがわかった<sup>5)</sup>。

残光の減光が緩やかな期間 (図 1 の②) は外部衝撃波の成分では難しいことがわかった。われわれは 2 成分の外部衝撃波であれば説明は可能であることを提案した。先行研究では、X 線フレア (図 1 の③) は外部衝撃波由来と内部衝撃波由来ともに説明が難しいとされていた。しかし、われわれは緩やかな減光期間と同様に 2 成分の外部衝撃波を考え、二つ目の衝撃波が遅れて発生すれば観測結果の説明は可能であることを示した。

### 5. 今後の目標

ガンマ線衛星フェルミは 2008 年からガンマ線バーストを観測し始めている。われわれはフェルミチームの一員であり詳細な解析も行っている。われわれはスウィフト衛星と同期した観測を行っていた GRB 090510 において、紫外線、X 線そしてガンマ線の多波長スペクトルを得た<sup>12)</sup>。また、プロンプト放射で GeV 付近に折れ曲がりが見つかった GRB 090926A において、図 8 が示すような 4,000 秒までガンマ線が放射されていたことを発見した<sup>13)</sup>。このバーストはあるガンマ線バーストの研究会の昼食中に起きて、帰りの新幹線の中で細いネットワークで解析したので覚えている。このようにフェルミ衛星でも残光が 10 例近く観測できており、今後はスウィフト衛星、かなた望遠鏡と合わせて赤外線からガンマ線までの多波長同時観測を目指していく。「かなた」望遠鏡においては、より詳細なデータを得るため、可視赤外線同時カメラ (HONIR) を開発している。

さらにわれわれは、可視残光の初期の偏光観測

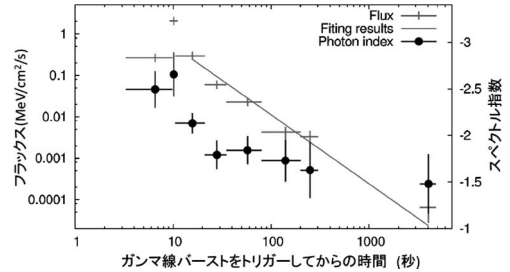


図 8 GRB 090926A のガンマ線の光度曲線とスペクトル指数の時間変動。横軸はフェルミ衛星がバーストをトリガーした時間である。縦軸の左はフラックス (十字)、右はスペクトル指数 (丸) である。

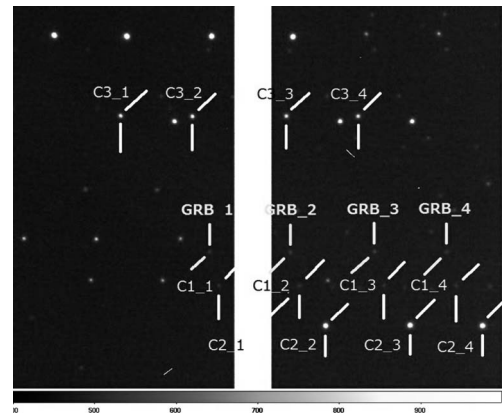


図 9 HOWPol による GRB 091208B の取得画像の例。ウォラストンプリズムにより天体像は偏光の向きによって四つに分けられ、その明るさの比から直線偏光度を導出することができる。この写真では、各々の天体の像が四つ横に並んで写っており、ガンマ線バースト (GRB) と三つの比較星 (C1-C3) の像に、それぞれ、四つの偏光像の番号を振ってある。

にも力を注いでいる。それを目標に開発された一露出型可視偏光観測装置 HOWPol は 2009 年からかなた望遠鏡に取り付けられ、モニターを行っている。1-4 年間モニターを続ければ、十分な精度で偏光を検出できるような明るいガンマ線バーストの観測が行えると期待される。実際、GRB 091208B において辛うじて偏光の検出に成功した<sup>14)</sup> (図 9)。今後は十分に明るい GRB 残光の観測、そして偏光の時間変動の検出を目指してい

る。偏光の度合いから磁場の均一さが、偏光の向きから磁場の向きがそれぞれわかる。この光の特性を活かした可視偏光の観測で、残光として光る領域の磁場構造を知ることが期待される。このことから、シンクロトロン放射を引き起こす磁場がどのようにして生じたものなのか、その起源が明らかになるかもしれない。

どれだけ良い観測機器があっても運良くガンマ線バーストが起こってくれなければ研究すらできない。明るく十分な議論ができるガンマ線バーストはこれまで年に1, 2回程度である。これまでは非常に運が良く今回述べたような十分な議論ができるガンマ線バーストや、スペクトルに超過成分、さらに超過成分に折れ曲がりのある新しいガンマ線バーストの特性を発見できた。今後の観測によって、ガンマ線バーストがまた新たな一面を見せてくれるかもしれない。さらに、ガンマ線バーストによって宇宙全体の解明やあらたな物理法則を発見できるかもしれない。

## 謝 辞

本稿の科学的な内容は、2010年から2011年に筆者らが発表した投稿論文<sup>4), 5), 8), 12)-14)</sup>に基づいているので、詳しくはそれらを参考にさせていただきたい。植村 誠氏、かなた論文を含めこの天文月報の原稿の添削と解析のアドバイスをさせていただき、誠にありがとうございます。理論に関しては青山学院大学の山崎 了氏（本月報の斡旋を含む）と当真賢二氏にお世話になりました。わがままな研究を一貫してさせていただいた深澤泰司氏をはじめ研究室と宇宙科学センターのみなさま、本当にありがとうございました。私はすごい幸者です。

## 参 考 文 献

- 1) 大野雅功, 2010, 天文月報 103, 315
- 2) 小山勝二, 嶺重 慎, 2007, ブラックホールと高エネルギー現象 (シリーズ現代の天文学), 日本評論社, 第五章
- 3) Sari R., Piran T., 1999, ApJ 517, L109
- 4) Uehara T., et al., 2007, AIP 1000, 547550
- 5) Uehara T., et al., 2010, A&A 519, 56
- 6) Panaitescu A., et al., 2006, MNRAS 369, 2059
- 7) Ioka K., et al., 2006, A&A 458, 7
- 8) Uehara T., et al., 2011, A&A 526, 92
- 9) Chincarini G., et al., 2007, ApJ 671, 1903
- 10) Chincarini G., et al., 2010, MNRAS 406, 2113
- 11) Ymazaki R., et al., 2009, ApJ 690, L118
- 12) De Pasquale M., et al., 2010, ApJ 709, L146
- 13) Ackermann M., et al., 2010, ApJ 729, 114
- 14) Kawabata K. S., 2010, AIPC 1279, 355

## Study of Gamma-Ray Burst Afterglows by Multi-wavelength Observation

Takeshi UEHARA and Kanata Team

Department of Physical Science, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan

Abstract: Gamma-ray bursts (GRBs), the most energetic explosion in the universe, are one of the most distant astronomical objects human has ever observed. Afterglows of GRBs are observed in a wide wavelength range from radio to gamma-ray. The flux of the afterglow shows power-law decay. Since 2004, the gamma-ray burst satellite “*Swift*” has observed early afterglows that are not explained by previous model. *Swift* found different behaviors of the afterglow between in X-ray and optical bands also. Rapid and multiwavelength observation became important for study of the afterglow. Therefore, we have developed a prompt multiwavelength observation and analysis system, using the opticalinfrared telescope “*Kanata*,” the X-ray satellite “*Suzaku*”, and the gamma-ray space telescope “*Fermi*”. We succeeded over ten observations of the afterglows using our system. These results show that the afterglows cannot be explained by early models which incorporate only one emission component.