

# ガンマ線偏光で探るガンマ線バーストの放射メカニズム

郡 司 修 一

〈山形大学理学部 〒990-8560 山形県山形市小白川1-4-12〉

e-mail: gunji@sci.kj.yamagata-u.ac.jp



郡司



米徳

米 徳 大 輔 ・ 村 上 敏 夫

〈金沢大学理工学研究域数物科学系 〒920-1192 石川県金沢市角間町〉

e-mail: yonetoku@astro.s.kanazawa-u.ac.jp ・ murakami@astro.s.kanazawa-u.ac.jp

三 原 建 弘

〈理化学研究所MAXIチーム 〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1〉

e-mail: tmihara@riken.jp

ガンマ線バーストは宇宙で最大の星の爆発現象である。発見当初はなかなか理解が進まなかったが、ここ20年の間の観測技術の進歩に従い、特に新しい手法の観測が行われるたびに謎が一つ一つ解明されてきている。しかし、今でもガンマ線バーストのエネルギー放射のメカニズムには多くの謎が残っている。新しい観測手法が新しい発見を生むという歴史に倣い、われわれはほとんど観測が行われていないガンマ線の偏光に着目し、GAPと呼ばれる検出器を使ってガンマ線バーストの偏光観測に乗り出した。GAPは今までに30例程度のガンマ線バーストを検出し、明るくて統計精度の高い3例に関しては偏光を精度良く測定することができた。そしてこの3例の解析によって、ガンマ線バーストの放射メカニズムに大きな制限を付けることができた。ここではGAPによるガンマ線バーストの偏光観測で何がわかったのかを紹介する。

## 1. ガンマ線バーストについて

私（郡司）は高エネルギー宇宙物理学関連の検出器や回路の開発を主に行っている。しかし、普段検出器の論文やICの規格表を読んでいる私にとっても、ガンマ線バーストは非常に興味をひかれる現象だった。発見された経緯からして面白い。大気内核実験禁止協定を監視するために打ち上げられた人工衛星（ベラ衛星）が、全く偶然に発見した。つまり誰一人として、こんな大量のガ

ンマ線が宇宙からやってくるとは思ってもいなかったのだ。今でこそ、およそ1日に1回程度の頻度で起きる現象とわかっているが、いつどの方向でガンマ線バーストが発生するのかは事前にはわからないし、継続時間も数百秒以下と短く、観測が難しい。そのために詳しい研究が難しく、発見当初はなかなか理解が進まなかった。しかし、ここ20年でガンマ線バーストの理解は劇的な進歩を見せた。その立役者は最新鋭の検出器であり、その検出器による新しい観測手法である。以

下にガンマ線バーストの紹介を行うが、より詳しくは天文月報のガンマ線バーストの特集記事<sup>1)</sup>などを参照願いたい。

### 1.1 本格的なサーベイ

1991年にNASAによってCGRO衛星が打ち上げられた。CGRO衛星に搭載されたBATSE検出器<sup>2)</sup>は天空のあらゆる方向を監視した。ガンマ線バーストが起こると、そのエネルギースペクトルやライトカーブ、またその発生方向（精度は±3度程度）を記録した。BATSEは2,704例のガンマ線バーストを検出し、その発生方向を調べ<sup>3)</sup>、全天で高い精度で等方的にガンマ線バーストが起こっていることを突き止めた。したがって、「ガンマ線バーストの発生源は少なくともわれわれの銀河系に存在する天体ではない」ということがBATSEの観測からはっきりした。

さらに、BATSEはガンマ線バーストには少なくとも二つの種族があることを発見した。BATSEが測定した<sup>4)</sup>継続時間の分布を見ると、0.3秒あたりに小さなピークがあり、さらに50秒程度にもう一つのピークが見える。短い継続時間をもつものをショートバースト、長い継続時間をもつものをロングバーストと呼ぶ。

### 1.2 残光の発見

分布から遠方の天体とはわかったものの、ガンマ線バーストまでの距離はわかっていない。この大問題を解決したのは、BeppoSAXと呼ばれる人工衛星である。BeppoSAXには広視野ガンマ線バーストモニター(WFC)と同時に方向決定性能に優れたX線望遠鏡(NFI)も搭載されていた。WFCは1997年2月28日にGRB 970228というガンマ線バーストを捕らえ<sup>5)</sup>、8時間後にX線望遠鏡の観測で、発生方向を0.02度以下の精度で精密に決定した。さらに3日後の観測では何と強度が減衰していることを発見した！<sup>6)</sup>地上の電波天文台や光学天文台に、発生方向を正確に教え、電波や光でも減光している天体が発見された。このようにガンマ線バーストからガンマ線が放出さ

れた後に、X線、可視光、電波などが観測されることがあり、これを残光：アフターグローと呼び、ガンマ線バーストの本体をプロンプト放射と呼ぶ。光学望遠鏡により、残光が観測された位置に銀河が見つかった。その銀河は地球から80億光年離れた銀河であった<sup>7)</sup>。このことからガンマ線バーストは「別の銀河で起こっている」ということがはっきりした。

### 1.3 発生源の天体

バーストの発生天体の謎解きに貢献したのがHETE-II衛星とSWIFT衛星である。HETE-II衛星はガンマ線バーストを発見すると、発生方向をすばやく皆に知らせる。この機能により衛星と地上の望遠鏡が一体となってガンマ線バーストの観測を行う体制が整った。このネットワークが最大限に活用されたのがGRB 030329である。HETE-IIチームはGRB 030329を検出してから73分後に、その発生方向をおよそ0.07度の精度で地上の望遠鏡に教えた。最初、地上の望遠鏡で得られたスペクトルは構造のないべき型だった。しかし3週間後に明るさが弱くなるとともに可視光スペクトルには、明るい超新星(Ic型)のスペクトルとよく似た構造が見えたが、膨張速度は極端に大きかった<sup>8)</sup>。GRB 030329はロングバーストに分類されるバーストだが、大質量の超新星(極超新星)爆発によって引き起こされるというシナリオがこれで確立した。

またSWIFT衛星はBATという広視野のガンマ線バーストモニターでショートバーストに分類できるGRB 050509Bを捕らえた<sup>9)</sup>。地上の光学望遠鏡で観測した結果、この天体が楕円銀河のすぐそばに位置していることがわかった。楕円銀河は星形成がほとんど行われていない古い銀河で、通常このような銀河では超新星爆発は起こらない。このことから、ショートバーストは極超新星爆発起源ではなく、中性子星同士もしくはブラックホールと中性子星の合体によって起こるのではと推測されているが、まだ例が少なく結論に至っていない。

## 1.4 放射メカニズム

発生源の距離や対応天体の解明により1回のバーストで使われるエネルギーがわかってきた。そして、ガンマ線バーストの放射メカニズムの理解も進んだ<sup>10)</sup>。まず中心で重力崩壊を通してエネルギーが開放される。そして火の玉が作られ、その火の玉がジェット状に光速の99.99%以上に加速されながら膨張すると考える。最初は密度が高く、火の玉からは光が出られないが、星の表面を破って外に膨張が進むと密度が下がり、ガンマ線を放射する。膨張運動中の物質には速度の差が存在し、飛行中にお互いが衝突し、衝撃波を発生する。この衝撃波 (internal shock) により加速や磁場の生成が行われてガンマ線を放出すると考える (中心天体から  $10^{13}$  cm 程度離れた位置)。その後、吹き出した物質は周りの星間物質によって減速され、X線や可視の残光を出す。以上が標準的な放射メカニズムで火の玉 (fireball) モデルと呼ばれている。しかし「なぜジェット状に吹き出すのか」、「本当に磁場は生成されているのか」、そして「ガンマ線バーストのプロンプト成分がどのような放射メカニズムなのか」もわかっていない。ちなみに、残光はほぼシンクロトロン放射という説が有力である。

## 2. ガンマ線バーストの偏光観測

決着がつかないプロンプト成分の放射メカニズムをどうすれば解明できるか？ ガンマ線バーストの研究の歴史を振り返ると、「新しい観測手法から重要な発見が生まれる」ということに尽きる。紹介したように、プロンプト放射でガンマ線が放射されるメカニズムはまだよくわかっていないが、標準火の玉モデルではシンクロトロン放射を仮定する。事実、残光はほぼシンクロトロン放射と思われる。次に述べるように、シンクロトロン放射が起きればガンマ線が強く偏光するため、まだほとんど手つかずのガンマ線の偏光観測が必要と判断した。

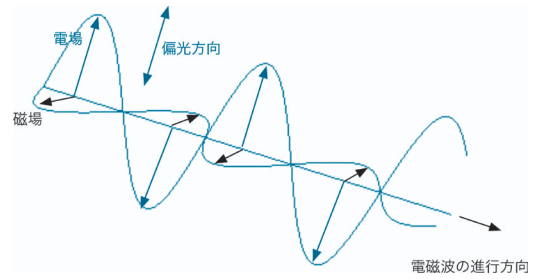


図1 直線偏光の図。進行方向に対して垂直に磁場と電場が一定の方向で振動している。電場の振動方向を偏光方向と呼ぶ。

## 2.1 偏光とは

そもそもガンマ線は高いエネルギーの電磁波である。電場や磁場の振動の仕方には、直線偏光、円偏光、楕円偏光などさまざまあるが今は図1のような直線偏光だけを考える (話を直線偏光に限るのは、シンクロトロン放射では直線偏光が強いためである)。直線偏光では電場の振動方向を電磁波の偏光方向と言う。もし身近に偏光板があれば (釣りレジャー用のサングラスなど)、偏光を実験的に調べることができる。偏光板ごしに、太陽や青空を観測しながら偏光板を360度回転させたとする。偏光板には特定の方向に偏光した光を通しやすという性質があるため、偏光板の回転に従って、透過光が強くなったり弱くなったりする。黒体放射によって太陽から放出された光は無偏光であるため、透過光の強度は一定になるが、一度レイリー散乱を受けた青空からの光では強弱が観測される。もとの光が無偏光でも、散乱されることで偏光するからである。90度に散乱された光が最も偏光度が高いが、散乱角がそれより大きくても小さくてもその偏光度は落ちる。

散乱のプロセス以外に、シンクロトロン放射でも高い偏光度の電磁波を放出する。特に荷電粒子が光速に近いスピードで運動している場合には、電磁波の放出方向は荷電粒子の運動方向とほぼ一致する。電子のエネルギースペクトルがベキであるときは、放射される電磁波は最大70%程度偏光し、偏光方向は磁場に垂直な方向になる。

散乱とシンクロトン放射以外にも偏光した電磁波を発生させるプロセスはあるが、後の議論にはこの二つだけが重要になってくる。ある領域では高く偏光した電磁波が発生しても、さまざまな領域から異なる方向に偏光した電磁波が視野に入ってくると、結局偏光方向がランダムになってしまうため、無偏光となる。偏光は放射領域の分布に大きく依存する。高い偏光を見るには、電磁波の放射領域や磁場が非対称に見えるような方向から観測しないと、一般的に偏光度が小さくなってしまう。

## 2.2 GAP 検出器

さて、今までにガンマ線バーストの偏光観測が行われたことは全くなかったわけではない。今までにガンマ線バーストからのガンマ線の偏光測定は数回報告された。例えば2002年にはRHESSI衛星によって<sup>11)</sup>、また2004年にはINTEGRAL衛星によって<sup>12)</sup>観測が行われている。しかし、残念なことにこれらの検出器は偏光観測を本来の目的として設計された検出器ではなく、そのため精度の良い偏光観測が行えず、確実な結果を出すことができなかった。われわれは過去の観測の欠点を知り、精度の高いガンマ線バースト用のガンマ線偏光検出器を開発し、信頼性の高い偏光観測から放射メカニズムを明らかにしようと考えた。金沢大と山形大と理研が協力して検出器を組み立て、惑星間の宇宙の放射線環境でも回路部品が耐えるように部品を一つ一つテストした。GAP検出器の搭載が予定されていた小型ソーラー電力セール実証機IKAROS<sup>13)</sup>は金星を越えて惑星空間を飛行するため、データを地上に落とすスピードが極端に低下する（最後は8 bit/sとなった。8 bytesでも8 K bit/sでもない）。そのため、機上ですべてのデータ処理を終え、解析が終わった結果だけを地上に送るために、高いCPU負荷を要求される。そして開発にこぎつけた装置が図2に示されているGAP (Gamma-ray burst Polarimeter)である<sup>14)</sup>。



図2 われわれが開発したGAP。写真では中が見えるように横を覆う円柱状のカバーを下げている。

GAPは70-300 keV程度のガンマ線に感度をもった検出器で、構造は比較的シンプルである。中心に12角形のプラスチックシンチレーターが置かれており、そしてその周りを囲むように12個の平べったい直方体のCsIシンチレーターが設置されている。ガンマ線バーストからやってきたガンマ線はまずプラスチックシンチレーターで散乱されて、その散乱されたガンマ線は12個のCsIのいずれかで吸収される。プラスチックシンチレーターによってガンマ線が散乱されたことを知り、12個のCsIによりガンマ線がどちらの方向に散乱されたかを調べる。コンプトン散乱では入射ガンマ線の偏光方向と垂直に散乱されやすいため、散乱された方向を調べることで入射ガンマ線の偏光方向がわかる。検出器全体の重さは4 kg以下で、先に出たINTEGRAL衛星などと比べれば、数百分の1の軽さである。この検出器は図でもわかるように高い軸対称性をもっている。散乱ガンマ線の強度分布から偏光を決めているので、12個の検出器の性能がそろっていることが命である。ガンマ線の偏光検出に特化した検出器であ



ること、KEKの放射光を使ってしっかりとキャリブレーションを行っており、強いバーストが正面付近で起これば（ $\sim \pm 45$ 度以内）、精度良くその偏光を測定することができる。打ち上がったからも検出器の個性を消すために衛星の回転を使い、測定エネルギー領域をそろえるためにキャリブレーション用の放射線同位体をもっている。

2010年5月21日にGAPはIKAROSに搭載され、種子島宇宙センターから打ち上げられた。その1カ月後の6月21日から検出器を立ち上げ、7月7日には最初のガンマ線バーストを検出した。今までにおよそ30例のガンマ線バーストを検出することができ、次に紹介する3例のガンマ線バーストに対しては、偏光度を精度良く観測することができた。

### 2.3 3例の偏光観測結果

まず最初に2010年8月26日に起きたガンマ線バースト GRB 100826Aの偏光観測結果から紹介する<sup>15)</sup>。このバーストはすでに論文で紹介されている。このバーストは非常に強く（BATSEが観測したガンマ線バーストの上位1%に入る）、さらに幸運なことにGAPの正面からわずか20度しかずれていない方向で発生した。図3はGAPが捕らえたGRB 100826Aのライトカーブであ

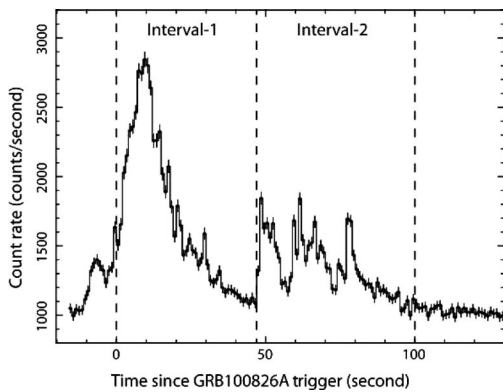


図3 GAPが捕らえたGRB 100826Aのライトカーブ。横軸はGAPがガンマ線バーストと自動判定した時刻からの時間（秒）で、縦軸がカウントレート。

る。この図からバーストのプロンプトは100秒程度続いていることがわかる。そして、最初の50秒間に一つ大きなバーストがあり、それ以後は三つ小さなバーストが続いているのがわかる。まずバーストが続いていた100秒間のデータ全部を使って偏光度を調べてみたが、有為な偏光度は得られなかった。そこで、次に時間帯を0秒から50秒と50秒から100秒までの二つに分けて偏光度と偏光方向を調べた。その結果が図4に示されている。この図で横軸はガンマ線が検出器で散乱された方向に相当しており、縦軸はカウント数である。偏光度が高ければ、それだけ散乱角に対するカウントレートの山と谷がはっきりする。解析の結果、偏光度はInterval-Iで $25 \pm 15\%$ 、Interval-IIで $31 \pm 21\%$ であった。データを二つに分けた結果、両方で30%程度の偏光度が得られたが、誤差が大きいため、確実に偏光しているとは言いがたい。しかし、偏光方向に関しては重大な発

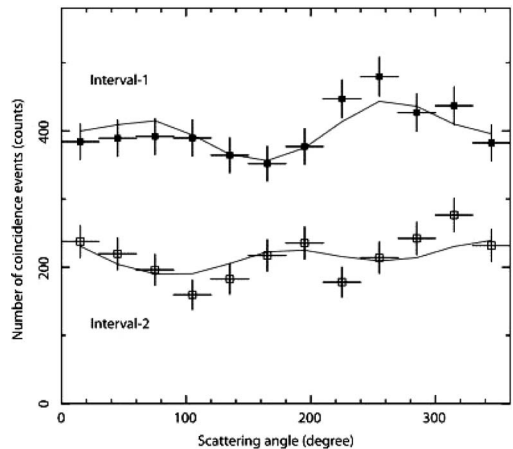


図4 時間帯を二つに分けて解析した図。横軸は入射ガンマ線の散乱角に相当する値で縦軸がバックグラウンドを引いたカウント数。20度傾いた方向でガンマ線バーストが起きているため、データは綺麗なサインカーブにはならない。シミュレーターを使って、データの偏光度や偏光方向を調べることになる。それぞれの偏光度と偏光方向は、Interval-Iが $25 \pm 15\%$ と $159 \pm 18$ 度、Interval-IIが $31 \pm 21\%$ と $75 \pm 20$ 度。

見があった。前に説明したように、ガンマ線の偏光方向に対して散乱方向は垂直になりやすい。つまり、0-50 sのデータ (Interval-I) では、70度と250度付近に盛り上がりが見えるため、ガンマ線の偏光方向は160度付近だったことがわかる。一方、50-100 sのデータ (Interval-II) では、偏光方向は75度近辺になる。つまりバーストの途中で偏光方向が変化していたのだ！ Statistical ErrorとSystematic Errorの両方を考慮しても、このようなことが偶然起きる確率は0.06% (有意度3.5 $\sigma$ )であることがわかり、偏光方向が途中で変化したことは間違いないと結論した。次にGRB 110301AとGRB 110721Aの観測結果を説明する<sup>16)</sup>。これらのガンマ線バーストに特徴的なことは、GRB 110301Aは、GAPの正面から48度程度、GRB 110721Aは30度も外れていたことと、両者の継続時間がそれぞれ7秒程度と11秒程度で、GRB 100826Aに比べて短かった。しかし、どちらも強度の強いロングバーストであるため、偏光の解析に支障はなかった。図5に二つのバーストのライトカーブを示す。上の図がGRB 110301Aで下の図がGRB 110721Aである。図中で点線で示されて

いる時間帯に関して、偏光の解析を行った。その結果が図6に示されている。上図がGRB 110301Aで下図がGRB 110721Aに対応している。この図は図4に対応する。ガンマ線バーストの起こった方向を考慮し、偏光度と偏光角をフリーパラメーターとして最小2乗法によって得られたフィットが実線である。点線はもしガンマ線が無偏光の場合に予想される散乱角度分布である。バーストが真正面で起こっていないため、無偏光でも角度分布に凹凸が見られる。それは斜め入射の効果で検出器が楕円形に見えるため、サインカーブ状の一つ山の散乱強度分布が現れるためである。それに対して偏光している場合には二つの山が現れるのが特徴である。それぞれの平均偏光度は各々70

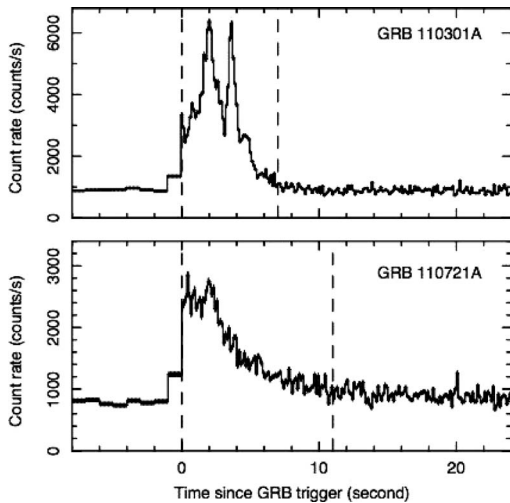


図5 上図がGRB 110301Aのライトカーブで下図がGRB 110721Aのライトカーブ。点線で囲われた時間帯に対して偏光の解析が行われた。

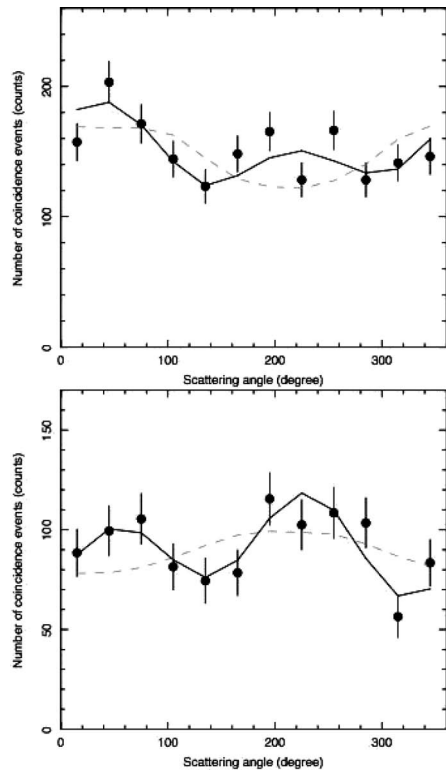


図6 上図がGRB 110301A, 下図がGRB 110721Aの偏光解析の結果。横軸が散乱角で縦軸がバックグラウンドを引いたカウント数。実線がデータ点をベストフィットした線で、点線は無偏光のときに予想される散乱角度分布。

±22% と  $84^{+16}_{-28}\%$  となった。偏光検出の信頼度は、 $3.7\sigma$  と  $3.4\sigma$  であり、間違っただけの偏光していると誤解してしまう確率はそれぞれ0.02%以下と0.1%以下なので、偏光していることは間違いない。時間的に偏光方向が変化している可能性も探ってみたが、時間帯を二つに分けるだけの継続時間がなく、解析するとガンマ線の数が減り、精度の良い解析ができなかった。

## 2.4 物理的な解釈

以上の結果をまとめると「GRB 100826Aは平均偏光度は30%弱であったが偏光方向が変化した、GRB 110301AとGRB 110721Aは平均偏光度が高く、~70%程度であった」となる。このすべての結果を統一的に扱えるモデルを考えてみたい。まず偏光が生じるには、散乱が起こっているかもしくは、磁場が存在してシンクロトロン放射が起きていることが考えられる。しかし、散乱を仮定したいくつかの理論計算でも70%という高い偏光度を出すことは難しい。散乱モデルは<sup>16)</sup>、光学的に薄くなった時点で、高温の火の玉からガンマ線が物質に散乱を受けながら外に出てくるといふモデルである。しかし、散乱を受けて出てくる元々のガンマ線は熱的なガンマ線が無偏光である。無偏光のガンマ線が散乱されると偏光するが、非常に特殊な方向から観測されない限り、高い偏光度を得ることはできない。

一方シンクロトロンモデルでは、70%程度に偏光したガンマ線を出すことが可能である。しかし、磁場の状態がどのような場合でも70%という偏光度を達成できるかという点、そうではない。磁場の向きや構造に支配される。例えばガンマ線が放射される領域で磁場の向きが全くランダムだったと仮定しよう。その場合、さまざまな偏光方向のガンマ線が放出されるため、ガンマ線の偏光度は低くなる。偏光が検出されたことは、ガンマ線が放出された領域では、磁場の向きがそろっていたことになるが、もしそうだとするとGRB 100826Aで偏光方向が変化した事実をどの

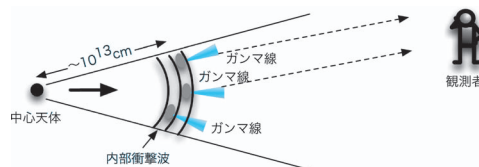


図7 内部衝撃波が時間的にも空間的にもばらばらな場所で数多く起こっており、それぞれからシンクロトロン放射でガンマ線が前方に出てくる。それぞれの場所から出てきたガンマ線は放射領域が違うため、磁場の向きも違い、偏光方向も異なることがありうる。図ではGRB 100826Aの観測者は、二つの領域からのガンマ線を時間をおいて観測している。それに対してGRB 110301AやGRB110721Aの観測者は、一つの領域からのガンマ線のみを観測している。

ように説明するかが問題となる。現在われわれは以下の図7のようなことが起こっていたと考えている。まず中心天体から出てくる超高速の物体は一樣ではなく、内部構造があると考えられる。そして衝撃波が時間的にも空間的にもばらばらに発生し、それぞれの場所でシンクロトロン放射によってガンマ線が放出されると考える。ガンマ線の放出方向は、図に示されているように前方に偏っている（図では青で描かれている）。一つのガンマ線の放射領域ではローカルに磁場がそろっているが、別の放射領域ではまた違った方向に磁場がそろっていると理解する。そう考えれば、偏光方向が変化することを容易に説明できる。GRB 100826Aは偏光度が小さく長く続くバーストで、GRB 110301AとGRB 110721Aは偏光度が高く比較的短いバーストであった。このモデルに従えば、GRB 100826Aの場合は、比較的広いガンマ線放射領域からのガンマ線が観測者に届いたと考えられ、逆にGRB 110301AとGRB 110721Aでは狭い放射領域からのガンマ線が観測者に届いたと考えられる。今までの説明の中で、シンクロトロン放射に寄与する磁場の起源に関しては不問にしてきた。衝撃波ができる際に、加速電子は間違いなく生成されるが、磁場についてはよくわから

ない。そろった磁場ができるという説もあるが、図7のように中心天体から磁力線がジェットの方  
向にらせん状に引き出されているという説もある。必要とされる数千ガウスの磁場が衝撃波起源  
かもとの星起源かはわかっていない。

### 3. 将来の展望

三つのガンマ線バーストの偏光観測から、ガン  
マ線バーストの放射メカニズムに対して、大きな  
情報を得ることができた。もし、3例ではなく多  
数のガンマ線バーストに対して偏光度や偏光角の  
統計的な測定ができたとしたらガンマ線バースト  
の放射メカニズムを確実に特定できる<sup>18)</sup>。GAP  
でそれが実現できればよいが、GAPは現在運用  
を中断している。IKAROSが余りにも遠くに  
いってしまったからである（太陽の反対側）。近い将来、東工大のTSUBAMEと呼ばれるガン  
マ線バースト偏光度検出器を載せた小型衛星も打ち  
上げられる予定であり期待したい<sup>19)</sup>。より多数  
のガンマ線バーストの偏光を検出するには、大型  
の偏光感度の高い検出器を開発し、4,5年の観測  
を行う必要があるだろう。そのため、われわれは  
次世代のガンマ線バースト偏光度検出器の開発を  
現在行っており、小型衛星などに搭載するチャ  
ンスを模索している<sup>20)</sup>。

最近、ガンマ線バーストを標準光源として利用  
した新しい研究分野が開け始めている<sup>21)</sup>。現時  
点では、 $z=8.1$ というまさに宇宙の果てで起こっ  
ているガンマ線バーストも受かっているが、それ  
だけ遠く離れていても観測できるほどにガンマ線  
バーストは明るい。したがってガンマ線バースト  
は宇宙の過去、つまり歴史を調べる非常に有効な  
手段になる。また遠方から地球に届くまでに、ガ  
ンマ線は非常に長い距離を走っており、普通では  
見逃しがちな時空のちょっとした奇妙な性質を、  
人間が観測できる量にまで積算してくれる可能性  
がある。このような考え方を基に、相対性理論で  
登場するローレンツ普遍性がどの程度成り立って

いるのかを調べようという試みも、Fermi衛星で  
すでに行われている<sup>22)</sup>。またGAPの偏光の結果  
を使ってCPT対称性がどの程度厳密に成り立っ  
ているかを研究することもできた<sup>23)</sup>。このよ  
うにガンマ線バーストは、天体物理ばかりでなく、  
宇宙論の研究（ダークマターやダークエネル  
ギー）、相対性理論や素粒子理論などの実験的検  
証にも大いに役立つ可能性がある。今までは実験  
的に検証することなど不可能であると思われてい  
た量子重力理論などの研究が、ガンマ線バースト  
を使ってできるようになれば、非常に面白いと思  
われる。

### 謝 辞

本稿の科学的な内容は主にの参考文献14-16の  
内容を基に書かれている。特に参考文献15と16  
の理論的な解釈に関しては大阪大学の當真賢二氏  
と議論させていただいた。また参考文献23の論  
文に関してはIPMUの向山信治氏が参加されて  
いる。またGAPの開発には金沢大や山形大の多  
くの学生や院生が参加している。ここに謝辞を述  
べる。



## 参考文献

- 1) 河合誠之, 2011, 天文月報 104, 609
- 2) <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/cgro/batse.html>
- 3) <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/batse/BATSE-desc.html>
- 4) <http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/duration/>
- 5) IAU Circ., 6576, 1 (1997).
- 6) <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/grbs/grb970228.html>
- 7) Andrew S., 1999, ApJ 516, 683
- 8) Hjorth J., 2003, Nature 423, 847
- 9) Gehrels N., 2005, Nature 437, 851
- 10) 吉田篤正, 井岡邦仁, 2007, シリーズ現代の天文学 第8巻, 第5章
- 11) Coburn W. & Boggs, S. E., 2003, Nature 423, 415
- 12) Kalemci E., 2007, ApJS 169, 75
- 13) Mori, O., 2010, Proceedings of the 2nd International Symposium on Solar Sailing
- 14) Yonetoku D., 2011, PASJ 63, 3
- 15) Yonetoku D., 2011, ApJ 743, L30
- 16) Yonetoku D., 2012, ApJ758, L1
- 17) Beloborodov A., 2011, ApJ 737 68
- 18) Toma K., 2009 ApJ 698, 1042
- 19) Toizumi T., 2011, PHYSICA E-LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES 43, 685
- 20) Gunji S., 2011, IEEE Trans. Nucl. Sci. 58, 426
- 21) 米徳大輔ほか, 2010年, 天文月報 103, 501
- 22) Abdo A., et al., 2009, Nature 462, 331
- 23) Toma K., 2012, Phys. Rev. Lett. 109, 241104

### Research for Radiation Mechanism of Gamma Ray Bursts through Polarization Observation

Shuichi GUNJI,<sup>1</sup> Daisuke YONETOKU,<sup>2</sup> Toshio MURAKAMI,<sup>2</sup> and Tatehiro MIHARA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Science, Yamagata University, 1-4-12 Koshirakawa, Yamagata 990-8560, Japan

<sup>2</sup> College of Science and Engineering, School of Mathematics and Physics, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

<sup>3</sup> MAXI Team, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: Gamma ray bursts are the most energetic phenomena in the universe. Since the discovery in 1960s, the origin and the radiation mechanism had been unknown for a long time. However, every time new methods for the observation were introduced due to the development of detector technologies, the puzzles have been solved one by one. From the lesson that new observation brings new knowledge, we launched polarization detector called Gamma-ray Polarimeter (GAP). The GAP has detected about thirty gamma-ray bursts and succeeded in determining the polarization for three events among them. As the results, the understanding for the radiation mechanism was much advanced. In this report, we will explain what we learned from our polarization observations.