

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 22 現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20674002

研究課題名（和文）

人工衛星による偏光観測の実現とガンマ線バーストの放射機構の解明

研究課題名（英文）

Polarization Measurement aboard the Satellite

and Solution of the Emission Mechanism of the Gamma-Ray Bursts

研究代表者

米徳 大輔（YONETOKU DAISUKE）

金沢大学・数物科学系・准教授

研究者番号：40345608

研究成果の概要（和文）：

本研究で開発したガンマ線バースト偏光検出器（通称 GAP）は、2010 年 5 月に打ち上げられた IKAROS 探査機に搭載され、世界初となる本格的なガンマ線偏光観測を行ってきた。観測データからガンマ線が強く偏光している事を検出し、強磁場環境下におけるシンクロトロン放射である可能性が極めて高いことを明らかにした。さらに相対論的速度を持ったジェットには内部構造が存在することを裏付ける証拠も得られ、ガンマ線バーストの放射メカニズムの解明に大きく貢献できた。

研究成果の概要（英文）：

The Gamma-Ray Burst Polarimeter (GAP) was installed aboard the IKAROS solar-sail spacecraft which was launched on May 21st 2010. We realized the first gamma-ray polarimetry in the world. We detected the strong polarization in the prompt emissions of three gamma-ray bursts, and we consider that the emission mechanism is probably synchrotron radiation. Moreover, we detected possible evidence of the existence of inner structures in the relativistic jets. We could contribute to reveal the emission mechanism of gamma-ray bursts.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	29,100,000	8,730,000	37,830,000
2009 年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2010 年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2011 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2012 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
総計	49,900,000	14,970,000	64,870,000

研究分野：数物科学系

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ガンマ線バースト、偏光、宇宙物理、人工衛星、検出器開発、相対論的ジェット、量子重力、CPT 対称性

1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バースト (GRB) とは、100 億光年以前先の初期宇宙から数 10 秒間という短時間にだけ大量のガンマ線が飛来する現象である。ガンマ線の全エネルギーは超新星爆発をはるかに凌ぐような、宇宙最大の爆発現象である。最近、この GRB という現象がとて注目されている。この 10 年間の学術的進歩が著しいだけでなく、GRB は一瞬だけ非常に明るく輝くので、はるか昔の「暗黒時代」に遡るほどの初期宇宙を見渡せる可能性があるからである。

しかし、そのような多大なエネルギーをガンマ線放射として解放する物理過程は、観測的に突き止められていない。理論的には複数の相対論的プラズマ流が衝突することで衝撃波を作り、電子が加速され、数万ガウスに達する強磁場が形成されてシンクロトロン放射を行うと考えられている。これはあくまでも理論モデルであって、強磁場が存在するという観測的証拠は皆無と言っても過言ではない。磁場の強度もエネルギー等分配から予想する程度の議論しかない。本当に数秒程度の短時間で強磁場が生成され、本当にシンクロトロン放射で輝くのならば、ガンマ線光子は強く直線偏光しているはずで、偏光の直接検出が GRB の放射機構に迫る重要な手段と考えられている。

2. 研究の目的

2010 年度に打ち上げられるソーラーセイル探査機に『ガンマ線バースト用偏光検出器』を搭載し、研究期間内に観測を行い、観測成果を公表することで、ガンマ線バーストの放射メカニズムを解明することが本研究計画の目的である。また、世界で初めて人工衛星を用いた本格的なガンマ線偏光観測を実現し、「ガンマ線偏光天文学」という新分野を開拓することも大きな目標である。

3. 研究の方法

2010 年 5 月 18 日に打ち上げられた小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS にガンマ線バースト (GRB) 用のガンマ線偏光観測装置 (GAP) を搭載し、世界初の本格的な GRB 偏光観測を実現した。ガンマ線がコンプトン散乱する際には、偏光方向と垂直に散乱しやすいという性質を利用し、散乱強度分布を測定できる検出器となっている。

本研究の最初の 2 年間 (平成 20 年度から 21 年度の前半にかけて) は GAP の開発に専念し、図 1 左の写真に示すような検出器を完成させた。形状は直径 17cm 高さ 16cm の円筒形で、重量は 3.4kg と非常に小型の観測装置

となっている。図 1 右に示すように、中心には差し渡し 14cm、高さ 6cm の 12 角形のプラスチックシンチレータを配置し、その外周には厚さ 5mm、長さ 6cm の CsI (Tl) シンチレータが取り囲んでいる。各シンチレータの発光は小型の光電子増倍管で検出され、エネルギーや検出時間を測定することができる。ガンマ線がコンプトン散乱するときには、偏光方向と垂直に散乱しやすいという特徴があるため、GAP はプラスチックと CsI の同時イベントを観測して、コンプトン散乱の角度依存性を測定できる仕組みになっている。

検出器内部にはアナログ信号を扱う回路、AD 変換後のデジタル信号を扱う FPGA 部、衛星バスとのコマンドインターフェースや GAP の観測機能をつかさどる CPU 部で構成されている。高圧電源も 2 台内蔵されている。基幹部品である FPGA、CPU (FPGA に焼き込んで構成)、SRAM、LVDS、リレーなどは放射線耐性の高い部品を用いたが、それ以外は民生部品を利用し、独自の放射線試験をおこなって選定した。電源回路の変換効率も含めて、総電力は 5W 以下で動作する。図 2 にブロック図を示す。

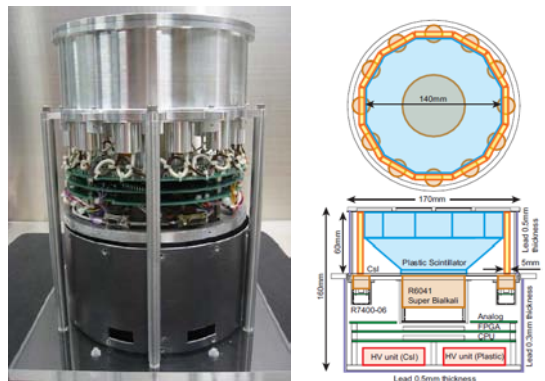


図 1 : (左) GAP フライトモデル、(右) 内部構造を示した図

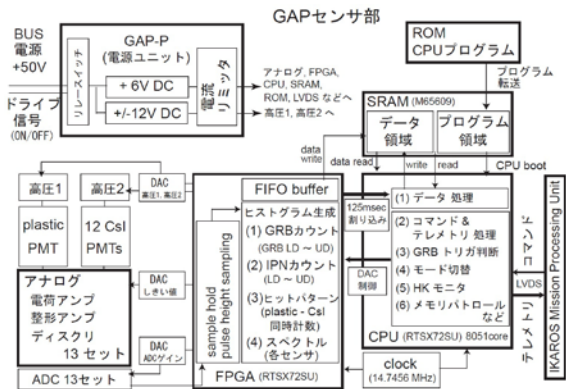


図 2 : GAP 検出器の構成を示したブロック図

4. 研究成果

IKAROS の打ち上げ後、GAP は各種の観測パラメータの設定を経て、2010年7月7日には最初のGRBを検出した。その後も順調に稼働し、これまでに合計30例のGRBを検出している。

GRB 100826A からの偏光検出

特にGRB 100826Aは過去のすべての観測でトップ1%に入るほど明るいGRBであった。このGRB 100826Aから、ガンマ線偏光を検出することに成功した。

図3(左)のようにこのGRBは前半の大きなフレアと、後半の小さなパルス群のような構成となっている。それぞれの時間帯における散乱ガンマ線の角度分布を書いたのが図3(右)である。十字点がデータ点であり、スムーズな曲線は、GRBの発生位置(中心から20度オフセットした位置)に天体を置きGeant4シミュレーションで得られた曲線によりデータ点をフィットさせたもので、約25%の偏光度を示している。また後半部分でも約31%の偏光度が検出され、前後半を同時に解析した結果は $27 \pm 11\%$ (2.9σ の有意度)であった。興味深いことに前半後半では偏光方向が84度異なっていた。このことから、GRBを発する相対論的ジェットには内部構造が存在し、それぞれの地点では独立の偏光情報を持っていると考えられる。

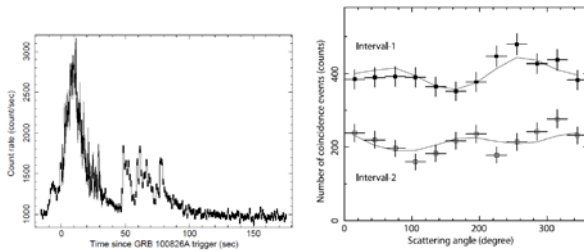


図3：GRB100826Aの光度曲線(左)と散乱強度分布(右)

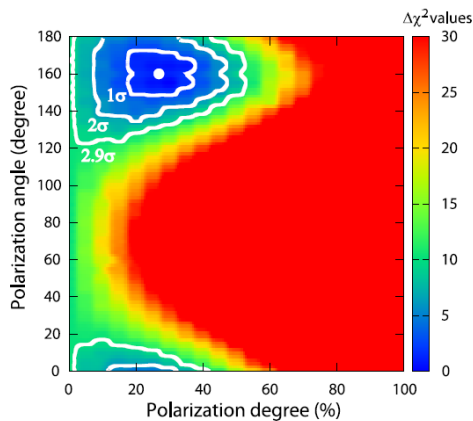


図4：詳細解析の結果、 $27 \pm 11\%$ の偏光を 2.9σ の有意性で検出した。

世界で初めて本格的なガンマ線偏光観測を実施できる観測装置が稼働したことについて、宇宙科学研究所からプレスリリースを出した。さらに、ガンマ線偏光を検出したことを日本天文学会で記者発表を行い、非常に多くの新聞やメディアに取り上げられ、国民に広く研究成果を伝えることができた。

GRB110301A と GRB110721A から高い偏光度を検出

さらに観測と解析を進めた結果、新たに2つのGRB110301AとGRB110721Aからも偏光を検出した。これらの光度曲線はどちらもシングルピークであった(図5)。得られた偏光度はどちらも高く、 $70 \pm 22\%$ (3.7σ の有意度)と $84(+16, -28)\%$ (3.3σ 有意度)であった。途中で偏光方向が回転することはなかった。

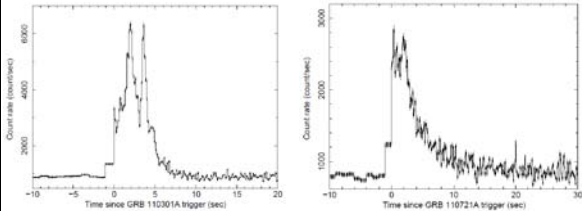


図5：GRB110301AとGRB110721Aの光度曲線

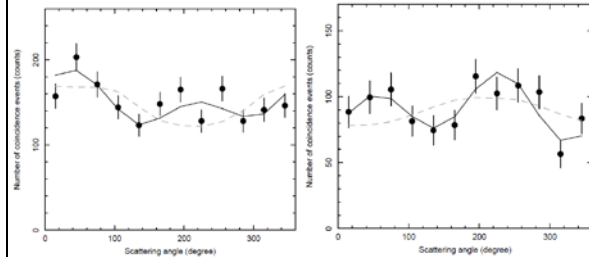


図6：GRB110301AとGRB110721Aの散乱強度

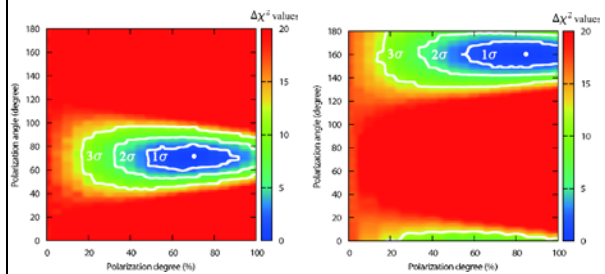


図7：GRB110301AとGRB110721Aの偏光度と偏光角の最適値を示した等高線

その他のGRBでは、偏光解析が行える程度の質の良いデータが5例あり、このうち4例

から偏光度の90%上限値として50-80%を得ている。GRBの偏光を説明できる理論はいくつかあるが、これらの3事象をすべて説明できるような物理状態を理論面からも研究した。その結果、

- (1) 「ガンマ線の偏光が検出された」ことから、ガンマ線放射領域には数万ガウス程度のよく揃った磁場が存在していると考えられる。
- (2) 「偏光方向が短時間で変化した」ことから、ジェット内部にはガンマ線を作り出す領域がいくつか点在していて、それぞれの磁場の向きは異なっていると考えられる。

図8には、以上の状況を踏まえて描いたGRBの想像図を示す。ジェット内部の赤色の線は強い磁場を表現したものである。

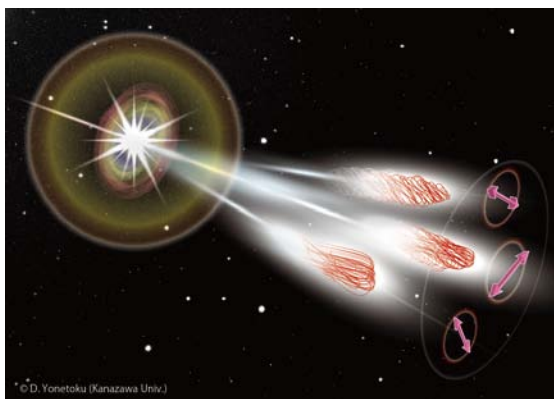


図8：GAPによる偏光観測から考えられるGRBの想像図

最遠方から最小波長で、CPT対称性の破れ

GAPによるガンマ線バーストからの偏光検出は基礎物理学にも一石を投じることとなった。現在の物理学ではCPT対称性が成り立っていると信じられている。電荷(Charge)、左右(Parity)、時間(Time)の入れ替えを同時に行っても物理は同じという原理である。しかし最先端の量子重力理論などは「CPT対称性の破れ」を予言するものも存在している。もし破れていれば、左まわりと右まわりの円偏光のスピードがわずかに異なるため、その重ね合わせである直線偏光は、宇宙空間を長いこと伝播するうちに偏光方向が回転することになる。その回転の度合いは電磁波のエネルギーによって異なる。

GAPにより70-300keVで直線偏光が検出されたことから、70keVと300keVで直線偏光の回転角の違いは1回転も無いということの意味する。70keVと300keVで100億光年

($=10^{26}\text{m}$) 走った時の左円偏光と右円偏光の波の数の差は1以下(約100keVのガンマ線の1波長は $0.1\text{\AA}=10^{-11}\text{m}$)ということであるから、左右の円偏光のスピードの差は光速の 10^{-37} 程度以下ということになる。CPTの破れパラメータ ξ であらわすと $|\xi| < 10^{-15}$ となる。これは従来よりも8桁も厳しい制限値となっており、プランクスケールの10兆分の1程度の極微なスケールまで、CPT対称性が保たれている事を示している。したがって、今後の量子重力理論などの研究の方向性としては、CPT対称性が保たれているもののみが許容されるという、非常に大きな指針を示すことにつながった。

本研究は、GAPの観測成果を利用して、理論研究者である當眞賢二氏(大阪大学SPD)と向山信治氏(Kavli IPMU准教授)が中心となって行われたものである。

以上のように本研究では、

- (1) ガンマ線バースト偏光検出器GAPの開発
- (2) IKAROS探査機に搭載し、宇宙空間でのガンマ線偏光観測の実施
- (3) ガンマ線偏光データの解析による科学成果の創出と論文執筆
- (4) 国際研究集会等での発表
- (5) 日本天文学会や宇宙科学研究所、金沢大学を通じたメディアへの発表

の検出器開発から成果の公表までを行うことができた。さらに、当時は全く想定していなかったCPT対称性に関する観測的検証も実現することができ、基礎物理学(しかも最先端の理論物理学)へも貢献することができた。

今後もX線・ガンマ線偏光観測は重要なテーマとなるだろう。現に、世界的に見てもPoGO Lite, GEMS, POETと呼ばれるX線・ガンマ線偏光観測計画が進んでおり、国内でも小型科学衛星Polarisが計画されている。我々もIKAROS GAPでの成果を発展させるべく、次世代のガンマ線偏光検出器の開発を進めており、2020年頃を目指して計画を進めている大型ソーラーセイルへの搭載を提案している。本計画の中では、GRBの放射メカニズムがシンクロトロン放射である可能性が高いことは示せたが、そこに必要な強磁場の起源については明確な議論ができなかった。この磁場は宇宙ジェットを形成する上でも重要な役割を担っているはずで、次期の偏光観測で解明していきたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計11件)

Strict Limit on CPT Violation from Polarization of Gamma-Ray Burst

Kenji Toma, Shinji Mukohyama, **Daisuke Yonetoku**, Toshio Murakami, Shuichi Gunji,

Tatehiro Mihara, Yoshiyuki Morihara, Tomonori Sakashita, Takuya Takahashi, Yudai Wakashima, Hajime Yonemochi, Noriyuki Toukairin
Physical Review Letters, 109, 241104 (2012) 査読有り

Magnetic Structures in Gamma-Ray Burst Jets Probed by Gamma-Ray Polarization

Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami, Shuichi Gunji, Tatehiro Mihara, Kenji Toma, Yoshiyuki Morihara, Takuya Takahashi, Yudai Wakashima, Hajime Yonemochi, Tomonori Sakashita, Noriyuki Toukairin, Hirofumi Fujimoto, Yoshiki Kodama
The Astrophysical Journal, 758, L1 (2012) 査読有り

Detection of Gamma-Ray Polarization in Prompt Emission of GRB 100826A

Yonetoku, Daisuke; Murakami, Toshio; Gunji, Shuichi; Mihara, Tatehiro; Toma, Kenji; Sakashita, Tomonori; Morihara, Yoshiyuki; Takahashi, Takuya; Toukairin, Noriyuki; Fujimoto, Hirofumi; Kodama, Yoshiki; Kubo, Shin; IKAROS Demonstration Team
Astrophysical Journal, 743, L30 (2011) 査読有り

Gamma-Ray Burst Polarimeter - GAP - aboard the Small Solar Power Sail Demonstrator IKAROS

Yonetoku, Daisuke; Murakami, Toshio; Gunji, Shuichi; Mihara, Tatehiro; Sakashita, Tomonori; Morihara, Yoshiyuki; Kikuchi Yukihiro; Takahashi, Takuya; Fujimoto, Hirofumi; Toukairin, Noriyuki; Kodama, Yoshiki; Kubo, Shin; and IKAROS Demonstration Team
PASJ Vol. 63, No. 3, pp. 625--638 (2011) 査読有り

[学会発表] (計 30 件)

米徳大輔

宇宙最大の爆発「ガンマ線バースト」はシンクロトロン放射起源か?
日本天文学会秋季年会 2012年秋季年会企画セッション「次世代の多波長偏光サイエンス」, 2012/09/19, 大分大学(大分県)

D. Yonetoku (招待講演)

Study of emission mechanism of Gamma-Ray Bursts by the gamma-ray polarization with IKAROS-GAP
39th COSPAR, July 14-22, 2012, India

D. Yonetoku (招待講演)

Study of prompt emission mechanism by the gamma-ray polarization with IKAROS-GAP
Gamma-Ray Bursts in the Era of Rapid Follow-up, 18-22, June, 2012, United Kingdom

D. Yonetoku

Study of emission mechanism of Gamma-Ray Bursts by the gamma-ray polarization with IKAROS-GAP
The Fermi/Swift GRB Conference 2012, 7-11, May, 2012, Munich, Germany

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: **ガンマ線カメラ**

発明者: **米徳大輔**、若島 雄大、米持元 (金沢大学)、根本 瀧男、久保 信、山口 明則、松浦 貢 (クリアパルス株式会社)

権利者: 根本 瀧男 (クリアパルス株式会社)

種類: 特許(国際特許分類) G 0 1 T 1 / 2 4
番号: 特願 2013-077555

出願年月日: 2013 年 4 月 3 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://astro.s.kanazawa-u.ac.jp/~yonetoku/gap/index.htm>

<http://www.kanazawa-u.ac.jp/university/administration/prstrategy/eacanthus/1212/07.html>

<http://astro.s.kanazawa-u.ac.jp/~yonetoku/gap/asj-press/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

米徳 大輔 (YONETOKU DAISUKE)

金沢大学・数物科学系・准教授

研究者番号: 40345608

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし