

## 次世代放射線検出器開発と宇宙・医療への応用

研究代表者 片岡 淳  
(理工学術院総合研究所 准教授)

### 1. 研究課題

高エネルギー宇宙物理学は未だ黎明期にあり、より高感度の観測を目指した世界的な競争が続いている。とくに宇宙線は人類が到達しえない素粒子現象の宝庫として、その起源の解明が待たれる。現状のX線・ガンマ線観測の感度を向上するには優れた光センサーの開発が鍵となるが、極限環境の宇宙で利用するには綿密な動作実証と技術的裏付けが不可欠となる。本研究では、既存の科学衛星（フェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡・すざく衛星）を用いた最先端の観測により宇宙線加速の現場を探り、一方では次期 Astro-H 衛星や宇宙ステーション搭載を目指した次世代光センサーの開発を行う。さらに、宇宙開発で得られた技術・知見を迅速に産業界に還元することで、さまざまな先端医療や放射線科学への応用と連携をはかる。

### 2. 主な研究成果

#### 2.1 フェルミ衛星・すざく衛星を用いた宇宙観測

2008 年に打ち上げられたフェルミ・宇宙ガンマ線望遠鏡により、2,000 を超えるガンマ線天体が発見され、その数はさらに増加の一途をたどっている。当研究室はフェルミチームの正規メンバーとして衛星データの解析や運用に参加し、とくに巨大ブラックホールである活動銀河核やパルサーの解析では主導的立場にある。2010 年度は我々が発見した「新種の」ガンマ線銀河 NGC1275 (2009 年 6 月に早稲田大学よりプレスリリース)の継続観測を行い、その放射の起源を相対論的ジェット内部と特定した (Kataoka et al. 2010, ApJ)。さらに、これら電波銀河がブレイザーと同様な普遍的ガンマ線源であることを確立するため、26 個の活動銀河核の系統解析を進めている (Kataoka et al. 2011 in prep)。4 月には、サイエンス誌に掲載された“ガンマ線ローブ”発見に関する記者発表を広島大学と共同で行った。二つ目のテーマとして、フェルミ衛星が観測したガンマ線天体の中には十分な明るさと位置精度にもかかわらず、他波長で対応がない「未同定天体」が多数存在することに着目し、研究を進めた。我々はフェルミ未同定天体 11 個を日本の X 線天文衛星「すざく」

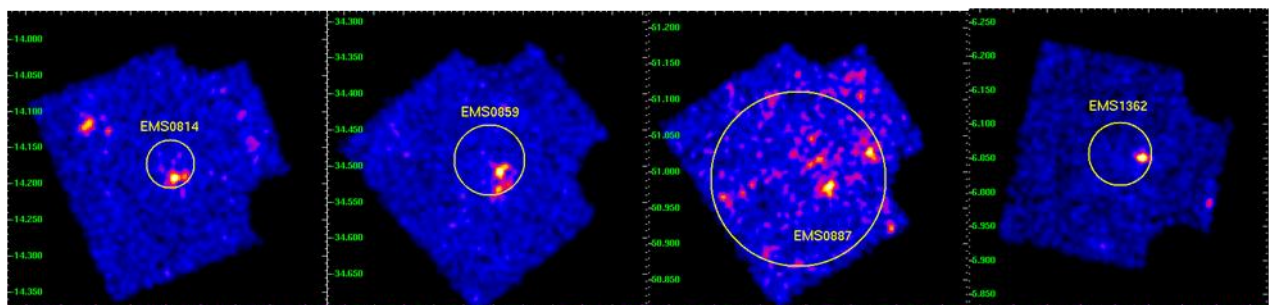


図 1 : 「すざく」衛星でフォローアップ観測した、高銀緯フェルミ未同定天体の例。多くのガンマ線天体の正体が本研究で初めて明らかになった (Maeda & Kataoka et al. 2011, ApJ)

で深く観測することで、約半数に X 線対応天体を初めて発見した (図 1)。たとえば、1FGL J1231 の対応天体は 温度が  $kT \sim 0.3keV$  の熱的スペクトルと高エネルギーで卓越する非熱的成分を持ち、電波のフォローアップ観測もあわせミリ秒パルサーであることが確定した。これらの成果は、既に日本の学会や学術論文でも発表を行った (Maeda et al. 2011, ApJ; Takahashi et al. 2011 in prep)。これらフェルミ衛星、すざく衛星に関する成果は国内外でも注目を集め、2010 年度だけで 4 件の招待セミナー (京大理、東大宇宙線研究所ほか) と 2 件の集中講義 (京都大学理学部、首都大学東京) を行った。

## 2.2 Astro-H 衛星、宇宙ステーション搭載を目指した光センサーの開発

2014 年に打ち上げ予定の Astro-H 衛星には硬 X 線イメージャ(Hard X-ray Imager: HXI)と軟ガンマ線検出器(Soft Gamma-ray Detector: SGD)が搭載される (図 2)。過酷な放射線環境である宇宙環境(Low Earth Orbit)において高感度を実現するにはバックグラウンドを効率よく除去することが鍵であり、HXI, SGD とともにコンパクトで高性能な光半導体増幅検出器 APD(Avalanche Photodiode) を用いた BGO シールドアクティブ・シールドを構成する。本 APD は 2003 年より我々が宇宙利用を目指して浜松ホトニクスと開発してきたもので、小型衛星 Cute-1.7+APD により世界初の宇宙実証を行った特筆すべき検出器である (Kataoka et al. 2010 JGR)。当研究室では Astro-H 衛星搭載の APD 素子全数の開発・受け入れを行い、放射線試験や接着試験、温度特性試験など順調に開発を進めている。また、APD 専用のアナログ処理回路及びデータ処理システムの開発にも着手し、衛星搭載と同じデータ処理フローを用いた性能評価までを行った。成果は日本天文学会、日本物理学会の年会において定期的に発表を行っている。また、同検出器は理工学研究所・鳥居教授が主導する CALET 検出器においても TASC 検出器の読み出しに用いられる予定であり、Astro-H と並行・協力しながら試験が進められている。

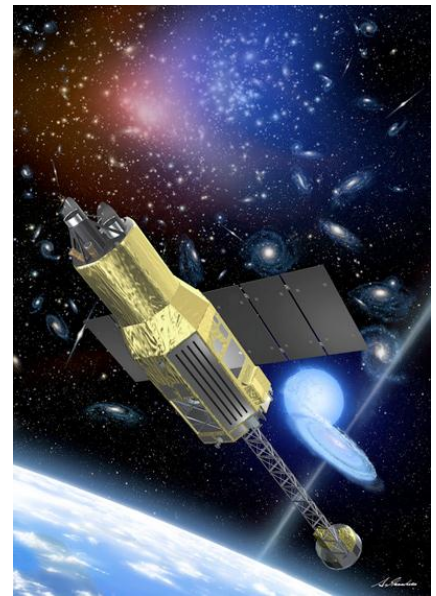


図 2 : 2014 年に打ち上げが予定されている Astro-H 衛星

## 2.3 半導体光増幅素子を用いた次世代 PET 開発

内部増幅機能をもつ半導体光素子はコンパクトかつ高性能、磁場に強いなど様々な特長を兼ね備えている。従って、その用途は宇宙に限られるべきものでなく、積極的に産業界へフィードバックすれば様々な応用が期待できるに違いない。このような観点にたち、本研究室では 2006 年より APD を二次元マトリックス化することでガンマ線イメージャを製作し、先端医療、とくに癌の早期発展につながる PET(Positron Emission Tomography)技術に応用してきた。具体的には、APD と微細加工シンチレータアレーを組み合わせることで、PET で究極とされる 1mm 以下の解像度を実現した (図 3)。シンチレータ自体も純国産 Pr:LuAG 結晶を用いて紫外高感度 APD と組み合わせるなど、新しい挑戦を行っている。本年度はその集大成というべき成果を IEEE, NIM-A 誌に発表し (Kataoka et al. 2010 IEEE; Yoshino et al. 2011 NIM-A)、同時に応用物理学会において口頭発表をおこない講演奨励賞を受賞した(松田、片岡ほか 2010 年度春季年会)。一方で、APD の唯一の欠点はゲインの低さであり、従来用いられてきた光電子増倍管に比べると圧倒的にノイズに弱い。そ

ここで、科学研究費補助金（基盤研究S：代表 片岡）の支援のもと、APDをガイガーモードで使用するMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)を利用した新たな開発を始め、薄型の2次元アレーや大面積化など、様々な応用を始めている(Kato et al. 2011 NIM-A)。2011年度は薄型アレー2枚を用いたピンセット型検出器(図4)の開発を皮切り

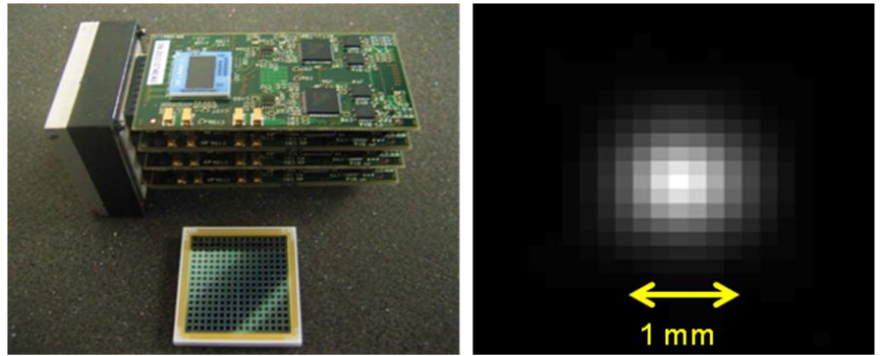


図3：当研究室で開発したAPD-PETユニット。PETでは究極とされる、サブミリ解像度を達成した(Kataoka et al. 2010, IEEE)

に、より高度なPET検出器を構築していく予定である。具体的には、重心演算を用いた信号処理回路の簡略化と解像度向上、ガンマ線吸収深さ(DOI)特定をはじめ、Time-of-Flight (TOF) 情報を利用した新しいアナログ集積回路(LSD)の設計開発を始めている。

## 2.4 その他の開発状況

APDのさらなる展開として、量子情報通信・量子暗号への応用を考えている。これまでAPDをブレイクダウン電圧以上で動作させるゲートモードが主流であったが、InGaAs APDの場合は暗電流が比較的大きく、またゲートモードでは周期信号にしか威力を発揮できない。当研究室ではAPDを敢えてゲイン数百倍程度のリニアモードで利用することで暗電流を劇的に改善し、一方でランダム信号にも対応する新たな光情報通信方法の確立を目指している。APDに特化した高速かつ低ノイズの電荷積分アンプ等、意欲的な開発を行っている。

## 3. 共同研究者

中森 健之（応用物理学科・助教） 錦戸 文彦（放医研・客員准教授）  
渡辺 伸（JAXA 宇宙科学研究所・客員研究員）

## 4. 研究業績

### 4.1 学術論文（主要なもの）

- \*J.Kataoka, H.Matsuda, F.Nishikido, M.Koizumi, H.Ikeda, M.Yoshino, T.Miura, S.Tanaka, Y.Ishikawa, N.Kawabata, K.Shimizu, Y.Matsunaga, S.Kishimoto, H.Kubo, Y.Yanagida, T.Nakamori “Development of an APD-based PET Module and Preliminary Resolution Performance of an Experimental Prototype Gantry”, IEEE-TNS, vol.57, No.5, p.2448-2454, (2010)
- \*J.Kataoka, L.Stawarz, C.C.Cheung, G.Tosti, A.Celotti, Y.Fukazawa, D.Thompson, W.McConville “Gamma-ray Spectral Evolution of NGC1275 observed with FERMI Large area telescope”, The Astrophys. Journal, vol. 715, p.554 -560, (2010)
- \*J.Kataoka, T.Toizumi, T.Nakamori, Y.Yatsu, Y.Tsubuku, Y.Kuramoto, T.Enomoto, R.Usui, N.Kawai, H.Ashida, K.Omagari, K.Fujihashi, S.Inagawa, Y.Miura, Y.Konda, N.Miyashita, S.Matsunaga, Y.Ishikawa, Y.Matsunaga, N.Kawabata “In-rbit performance of avalanche photodiode as radiation detector on board the picosatellite Cute-1.7+APD II” , Journal of

Geophysical Res. vol.57, No.115, A05204, (2010)

- K.Maeda, J.Kataoka, T.Nakamori et al. “Unraveling the Nature of Unidentified High Galactic Latitude Fermi/LAT Gamma-ray Sources with Suzaku”, The Astrophys. Journal, vol. 729, p.103 -116, (2011)
- M.Yoshino, J.Kataoka, T.Nakamori et al. “The development and performance of UV-enhanced APD-arrays for high resolution PET imaging coupled with pixelized Pr:LuAG crystal”, NIM-A, 643, p.57-63 (2011)
- T.Kato, J.Kataoka, T.Nakamori et al. “Development of a large-area monolithic 4×4 MPPC array for a future PET scanner employing pixelized Ce:LYSO and Pr:LuAG crystals”, NIM-A, 638, p.83-91 (2011)
- T.Miura, T.Nakamori, J.Kataoka et al. “Improvement of Energy Thresholds for Scintillation Detectors Using a Monolithic 2 ×2 Multi-Pixel Photon Counter Array with a Coincidence Technique”, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 094203 p.1-6 (2011)

ほか 58 編

#### 4.2 総説・著書

- \*片岡 淳, 「大面積 APD アレーの開発と次世代 PET 技術への展望」、応用物理学会・放射線分科会・学会誌 vol. 35, No. 4, p.277 -287 (2010)
- \*片岡 淳, 深沢 泰司, L.Stawarz, 佐藤 理江, 林田 将明, 「フェルミ衛星による活動銀河ジェット観測の新展開」, 日本天文学会誌 vol.103 p.486 ~ 493, 2010 年 8 月発表
- \*片岡 淳, 「サイエンス誌に載った日本人研究者」 “フェルミ衛星が発見したりサイクルパルサーの集団”, 2010 Issue, p.25

#### 4.3 招待講演

- \*片岡 淳, “二次元放射線検出器の最前線”、応用物理学会 2010 年度春季年会、企画・主催（イントロダクトリートーク担当）
- \*片岡 淳, “APD/MPPC を用いた高解像度ガンマ線イメージセンサー” 「先端的放射線検出器開発とその応用で拓かれる未来」、物理学会 2010 年度春季年会、招待講演
- \*片岡 淳, “モノリシック MPPC アレーの開発と基礎評価”、次世代 PET 研究会、放射線医学総合研究所
- \*片岡 淳, “活動銀河核ジェットのフロンティア：本質的な理解へむけて”、京都大学宇宙物理学教室、招待セミナー（2010, Jul.15）
- \*片岡 淳, “フェルミ・ガンマ線衛星による宇宙科学観測”、早稲田大学理工学研究所主催、宇宙開発に関する連続講演会（2010, Jun.17）
- \*片岡 淳, “Towards Frontiers of AGN Jet Physics”、早稲田大学理論宇宙物理教室、招待セミナー（2010, Nov.19）
- \*片岡 淳, “活動銀河核からの高エネルギー放射：最近の進展”、東京大学 ICRR 宇宙線研究所、招待セミナー（2011, Feb.2）

#### 4.4 受賞・表彰

- Group Achievement Award to Fermi Science Team “For the successful launch and early

operation of the Fermi mission and discover of new high energy gamma ray sources” 米国 NASA (航空宇宙局) 受賞者氏名: \*片岡 淳、2010年9月14日

- 応用物理学会、講演奨励賞、“APD を用いた拡張型・高解像度 PET モジュールの開発とその実証” 応用物理学会 2010 年度秋季年会 受賞者氏名: 松田 英憲、片岡 淳ほか 8 名

#### 4.5 報道発表・プレスリリース

- 2010年4月2日発刊、時事通信 (Web 版)、「巨大粒子雲も宇宙線放出か... 証拠となるガンマ線観測 - 日米欧の衛星で」
- 2010年4月9日発刊、科学新聞 (4面)「巨大ガンマ線天体発見—フェルミ衛星を利用して広島大など続々と研究成果—」, <http://www.hiroshima-u.ac.jp/news/show/id/7508/>

#### 4.6 学会および社会的活動

- 2010-2011年度 (社) 応用物理学会・放射線分科会・幹事
- 2010-2011年度 高エネルギー宇宙物理連絡会・運営委員
- 2010-2011年度 (社) 日本物理学会・宇宙線分科会・領域運営委員

### 5. 研究活動の課題と展望

来年度はフェルミ衛星の運用が3年目に入り、より高度なデータ解析と安定した成果のアウトプットが求められる。当研究室で進めている電波銀河・セイファート天体の解析は、活動銀河核の統一描像を得るために不可欠かつ斬新なアプローチで、さらなる発展が期待される (2011 年度早期に ApJ 論文として出版予定)。すざく衛星では未同定天体のみならず、宇宙線加速源として新たな期待のかかるガンマ線ローブ天体のフォローアップ観測を進める (NGC6251, Galactic Haze など)。次期衛星搭載検出器の開発では、フライトモデル 130 素子の受け入れと詳細な性能評価、振動試験や熱・強度試験などが目白押しで、研究室一丸となって一層の努力していく所存である。最後に、先端医療への応用については既に TOF 対応 LSI の設計が終了し、MOSIS などのシャトルサービスにサブミット段階にある。また、データ取得システムについても設計が完了しており、2011 年度はいよいよ MPPC を用いた PET 装置の開発に着手する。装置概念図を示す (図4)。来年度9月ごろに、初号機完成予定である。

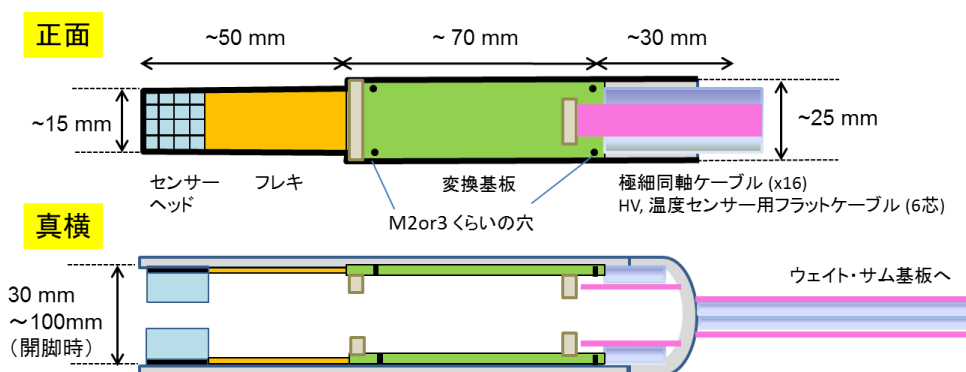


図4：現在開発中の小型ピンセット型 PET 装置。APD にかわり薄板型 MPPC アレーを使用し、術中カメラとしても応用が可能となる。