

## 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

近年の CCD や CMOS デバイスの技術革新により、デジタルカメラやスキャナーなど様々な光センサーが生活の一部として定着している。物理計測も例外でなく、高感度光センサーの開発は、常に時代が求める最先端のニーズである。本研究は宇宙・放射線・素粒子・医療など様々な局面を担う次世代光センサーの開発と、これを用いた理工医学実験を系統的に推進する。具体的には(1) 既存の X 線・ガンマ線天文衛星を用いた高エネルギー宇宙物理現象の解明 (2) 次期 Astro-H 衛星や宇宙ステーション搭載を目指した放射線検出器の開発 (3) 最先端の光センサーを用いた産業・医療・工学分野への新展開、の 3 つのテーマを掲げている。以下では 2012 年度における研究進捗について、各項にわけて詳説したい。

### 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

フェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡が発見した未同定ガンマ線天体の多くが、ようやくベールを脱ぎつつある。当研究室はフェルミ衛星打ち上げ当初よりその究明にあたっており、昨年度は伴星をとかず「毒蜘蛛」ガンマ線パルサー 2FGL J2339.-0531 の存在を発見し、ApJ 誌(The Astrophysical Journal 誌)に報告、また早稲田大学よりプレスリリースを行った (2011 年 3 月 21 日、早稲田大学ホームページ [http://www.waseda.jp/jp/news11/120322\\_blackwidowpulsar.html](http://www.waseda.jp/jp/news11/120322_blackwidowpulsar.html))。本年度はこれに引き続き、二例目となる radio-quiet なミリ秒パルサー 1FGL J1311.7-3429 を新たに報告し、CGRO 衛星以来 20 年謎であった、本天体の正体を明らかにした (Kataoka et al. 2012, ApJ, 757, 176 : 図 1)。とくにこの天体は X 線で激しく時間変動をしていることが特徴で、今後のさらなる観測により 2FGL2339.7-0531 の放射機構との差異、中性子星の進化の過程に新たなメスを入れることが期待される。本年度はさらに、フェルミ衛星が発見した銀河中心の巨大な泡構造“フェルミバ

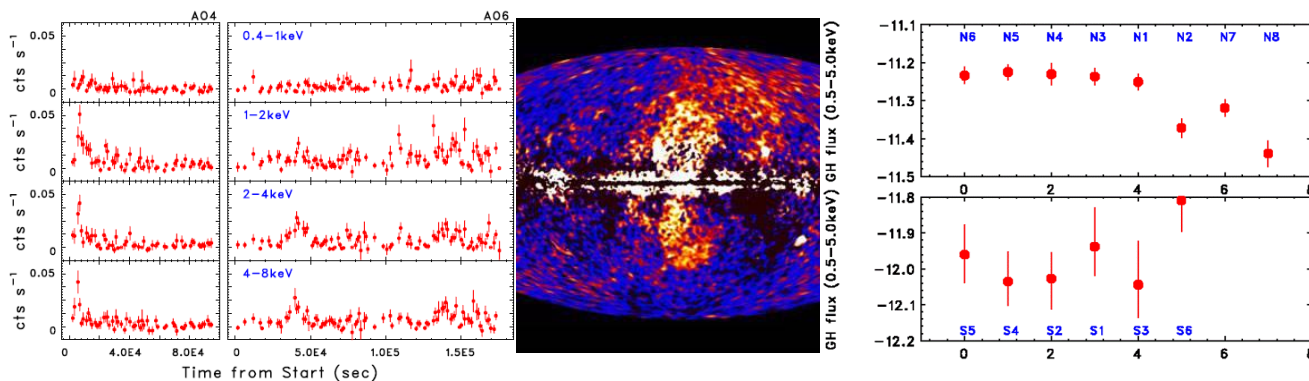


図 1: (左) 1FGL J1311.7-3429 の X 線光度曲線[Kataoka et al. 2012, ApJ] (中)フェルミ衛星の発見した「フェルミバブル」(右) すざく衛星による、バブル境界での強度変化

ブル” (天文学会誌解説記事：2012年9月号；片岡淳ほか)を日本の「すざく」衛星で系統的かつ長時間 (280ksec 観測) し、現在詳細な解析を進めている。招待講演としては、6月に韓国で開かれた 3rd Fermi Asian Network、10月に米国モンレーで行われた 4th Fermi symposium において、フェルミ衛星・すざく衛星による最新の観測成果について発表した (いずれも招待講演：片岡)

## 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開発

2015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)、軟ガンマ線検出器(Soft Gamma-ray Detector: SGD)が搭載される。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) を用いて BGO シールド検出器の信号を読み出す。本年度は [1] APD アセンブリの接着問題の解決と最適化 [2] フライトモデル APD-BGO シンチレータの組み合わせ決定 [3]アナログ処理部フライトモデルの開発を行った (図 2)。とくに、[1] では EM 品の製作・試験過程において、APD センサーのブレイクダウン電圧が 50V 程度低下する異常が発覚し、原因究明に努めた。結果、APD と BGO の接着に用いる接着剤の硬化収縮でワイヤにテンションがかかり、トラブルを引き起こすことを突き止めた。APD アセンブリの構造に改修を加え、また接着剤を選択することで異常は解消した。振動試験・熱サイクル試験などで最終検証を行っている。[2] 機上で用いる APD のゲインと BGO 光量の組み合わせから、個性を一様化する最適な組み合わせを求め、フライト品の製作に反映する。[3] については前年度までに検討してきたアナログ部パラメータの最終案を用いて試験基板製作を行い、現在最終的な調整を行っている (Saito et al. 2013)。同 APD 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。

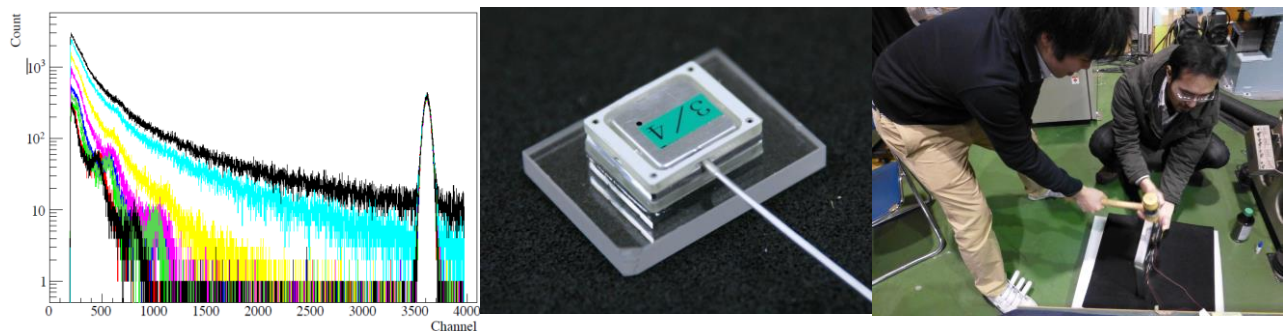


図 2: (左)EM 試験で発覚した APD のノイズ異常 (中) 新規 APD アセンブリ。BGO との接着方法、接着剤を変更 (右)新規 APD アセンブリを用いた高周波衝撃試験の様子 (@ISAS/JAXA)

## 2.3 次世代 PET 技術開発 (MPPC-PET)

Astro-H, CALET で用いる APD 素子は極めてコンパクトかつ高い量子効率を実現するが、一方ではゲインが低く、ノイズの影響を受けやすい。近年、APD をガイガーモードで動作させる MPPC 光素子が注目を集めており、当研究室では次世代医療用検出器およびコンプトンカメラなどの環境計測 (次章) への応用を進めている (Kato et al. 2013; Kishimoto et al. 2013)。特に本年度は [1] MPPC を用いた 8ch PET ガントリの構築と、臨床試験 [2]TOF-PET 用 LSI の開発 [3]MRI-PET 併用時のノイズ性能評価を行った。[1] について、LYSO の微細シンチ(0.5mm 角)と大面積 MPPC アレーを一体化した小型 PET ユニットの製作、大阪大学医学部においてファントム実験、マウスを用いた臨床実験を行った。いずれにおいても 0.9mm (FWHM：図 3)の優れた解像度が得られた

が、感度に関してはユニット数を増やすなどして向上をはかりたい。[2] については超高速 LSI を試作し、実機により 200 psec 程度(ただし LSI 単体)の時間分解能が達成されることを示した。今後は MPPC アレー+LYSO シンチレータを用いた 511keV ガンマ線の対向測定により、検出器システム全体の時間分解能向上を目指す。[3] は小動物用の MRI(磁場 4.7T) の RF コイル外側に MPPC-PET ユニットの対向して配置し、MRI-PET 間の相互の影響を定量的に調べた。結果、5% 程度 MRI 画像の S/N が悪化するものの、PET, MRI の同時併用に何ら支障が生ずることもないことが実証された。簡単な試験ではあるが、今後の MRI-PET 開発にむけ大きな一歩となった。

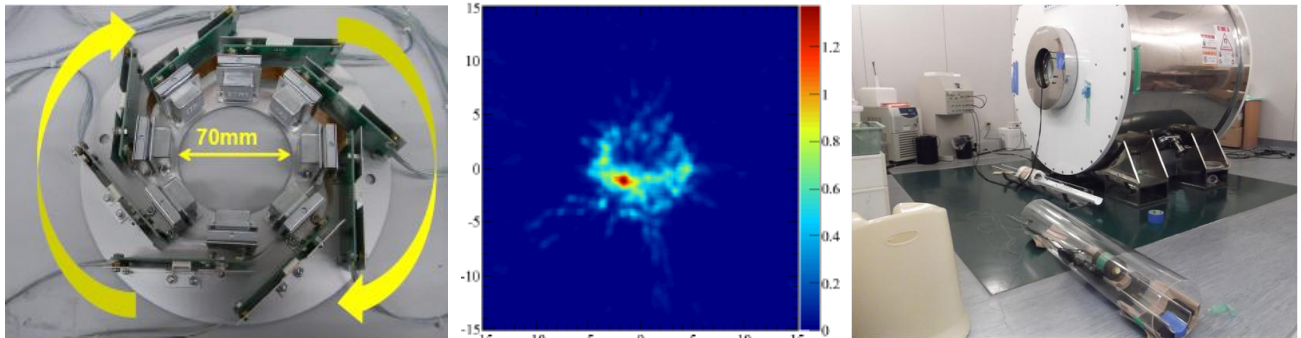


図 3: (左)今年度製作した、8ch MPPC-PET ガントリー (中) 臨床実験により得られたマウス頭部の PET 画像(@阪大医学部) (右) 4.7T 小動物用 MRI と PET 併用実験 (協力 : BioView 株式会社)

## 2.4 革新的ガンマカメラの開発

福島第一原発事故で飛散した放射性核種(おもに  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ )はいまだ大きな社会問題とであり、特に線量が高いホットスポットの迅速な発見と除染作業の効率化は急務の課題といえる。通常用いられるサーベイメータは簡便な装置であるが、線量の源を知るために現場をくまなく走査する必要があり、観測中での被曝や作業の非効率性が指摘される。これに対し、ガンマカメラは遠方からガンマ線の画像を取得する新しい技術であるが、既存の製品は感度が低く一枚の画像取得に数十分もの時間がかかること、また、視野外からのガンマ線の混入を防ぐために 10 キロ以上にも及ぶ重厚なシールドが必要など、多くの問題を抱えている。本年度より、当研究室は浜松ホトニクス社と共同で、携帯可能かつ高感度な「革新的ガンマカメラ」の開発を進めている (JST 先端計測プロジェクト : 浜松ホトニクス+早稲田大学 : 図 4)。本開発のガンマカメラは 15cm 角程度の小型かつ 1-2 kg と非常に軽量であるが、感度は従来のガンマカメラより 50 倍程度高く、ほぼリアルタイムでガンマ線画像を取得することが可能である。解像度も  $10^\circ$  (FWHM) 程度と十分良好な値が見込まれる。本年度は、この技術の鍵であるガンマ線反応位置の 3 次元画像化技術の開発実証を行い、プロトタイプ

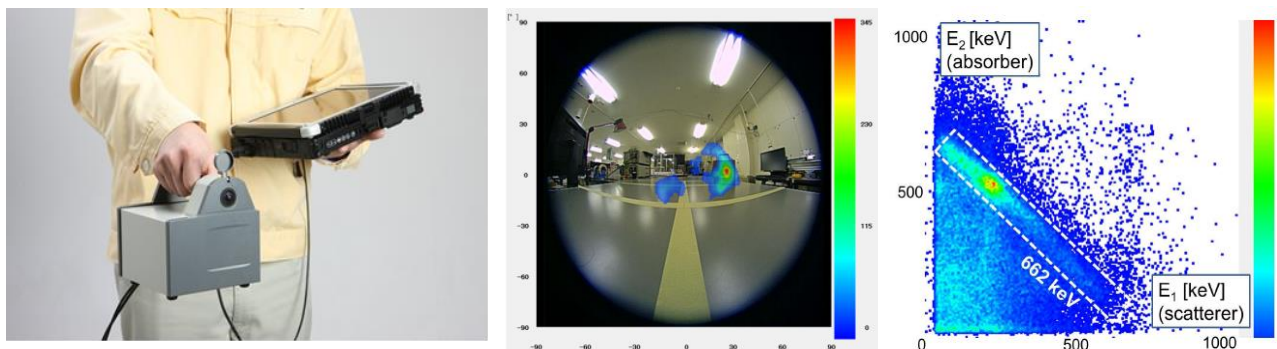


図 4: (左)本研究で浜松ホトニクス社と開発中の携帯型ガンマカメラ (中)ガンマ線源( $5\mu\text{Sv/h}$  相当)の 30 秒集積画像 (右) 画像再構成に用いたスペクトルデータ (コンプトン方式)

ブ機を製作して福島現地での初期実験を行った。リアルタイムで画像を表示するために高速統計画像再構成法 Fast ML-EM (Maximum Likelihood-Expectation Maximization) を新たに開発し、プロトタイプ機に実装することに成功した。来年度はカメラの完成度をさらに高め、早急に除染作業などに適用可能な製品化を目指したい。

### 3. 共同研究者

中森 健之 (応用物理学科・助教)      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)

- A.Kishimoto, J.Kataoka et al., “Development of a dual-sided readout DOI-PET module using large-area monolithic MPPC-arrays”, IEEE-TNS, in press
- H.Matsuda, J.Kataoka, H.Ikeda et al., “Development of ultra-fast ASIC for future PET scanners using TOF-capable MPPC detectors”, NIM-A, 699, 211 (2013)
- T.Kato, J.Kataoka, T.Nakamori et al. “A novel gamma-ray detector with submillimeter resolutions using a monolithic MPPC array with pixelized Ce:LYSO and Ce:GAGG crystals”, NIM-A, 699, 235 (2013)
- 片岡 淳, 戸谷 友則, 井岡 邦仁 「フェルミ・バブルから探る銀河系中心の過去の活動性」 日本天文学会誌 vol.105 p.542-553, 2012年9月発表
- J.Kataoka, T.Saito, M.Yoshino et al. “Expected radiation damage of the reverse-type APDs for the Astro-H mission”, Journal of Instrumentation, 10.1088/1748-0221/7/06/P06001(14pages), (2012)
- J.Kataoka, Y.Yatsu, N.Kawai et al. “Toward Identifying the Unassociated Gamma-ray Source 1FGL J1311.7-3429 with X-ray and Optical Observations”, The Astrophysical Journal, 757, 176 (2012)
- Y.Takeuchi, J.Kataoka, L.Stawarz et al. “Suzaku X-ray Imaging of the Extended Lobes in the Giant Radio Galaxy NGC6251 Associated with the Fermi-LAT Source 2FGL J1629.4+8236”, The Astrophysical Journal, 749, 66 (2012)

ほか共著論文 20 編

#### 4.2 招待講演・口頭講演 (国際学会)

- J.Kataoka et al, “Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays”, VCI2013, 2/13, Wien (2013)
- J.Kataoka et al, “Expected radiation damage of reverse-type APDs for the Astro-H mission”, IEEE-MIC/NSS, 10/30, California (2012)
- J.Kataoka, “Non-Blazar AGN and AGN Unification in the Fermi Era”, 4<sup>th</sup> Fermi Symposium, Monterey, Oct 31, (2012)

- 片岡 淳, “大面積 MPPC-array を用いた 放射線検出器の新展開”、(2012)、第 4 回光センサーワークショップ, 12/26, 大阪大学 (2012)
- 片岡 淳, “大面積 MPPC-array を用いた 放射線検出器の新展開”、応用物理学会・放射線分科会・定期講演会, 11/17, 東京大学 (2012)
- J.Kataoka, “Fermi LAT observations of AGN & unID sources: Update”, FAN3 workshop, June 20-24, Korea (2012)
- 片岡 淳, “「3 次元」高解像度・高時間分解能 次世代 PET モジュールの開発状況”、放射線プロセスシンポジウム, 6/28, 東京大学 (2012)

#### 4.3 特許の申請

- 特願 2012-157920 「コンプトンカメラ」片岡 淳、岸本 彩、加藤 卓也 (早稲田大学) 大須賀 慎二、中村 重幸、平柳 通人 (浜松ホトニクス)
- 特願 2011-289480 「放射線検出器」片岡 淳、岸本 彩 (早稲田大学) 鎌田 圭 (古河機械金属) : 日・米・欧 国際特許として申請 (PCT/JP2012/008129) 特願 2011-289480 「放射線検出器」

#### 5. 研究活動の課題と展望

宇宙物理実験については、Astro-H 衛星の打ち上げに向けハードウェア開発に従事すると同時に、Science Working Group (Galactic Center group) のサブ・リーダーとして全体を良く統括し、Astro-H のサイエンスを最大限に引き出すべく努力したい。データ解析については、「すぎく」AO8 においてフェルミ・バブルの追観測が採択され (PI: M.Tahara)、前年度までのデータを完成させる意味においても重要な観測となると期待される。医療系検出器の開発においては、本年度までにおいて TOF, DOI, MRI を視野に入れた基盤技術が完成し、いよいよ平成 25 年度から PET 装置としての性能評価試験を始める。まずは 8ch 程度のガントりに非磁化対策を施し、MRI との併用実験に臨みたい、その後、DOI を組み込んだ 2-4 ch のガント리를組み、画像視野端での歪み改善を目指す。最後に、ガンマカメラに関しては福島への早急な対応を意識して、急ピッチな開発を進める。とくに、本年度は 3 次元シンチレータ方式のコンプトンカメラの開発を行い、本年度開発したプロトタイプ機よりも解像度がさらに向上することを実機で確認したい。