

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

本研究は (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・情報分野への展開、の大きく 3 つのテーマから構成される。人間の目で見える可視光を用いた天文学に比べ、X 線やガンマ線を用いた「高エネルギー」宇宙物理実験は未だ学問の黎明期にあり、より高感度の観測を目指した競争が続いている。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必要である。本研究では、既存の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、一方では次期衛星・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、ここで得られた知見を迅速に産業界に還元することで、先端医療との連携をはかる。

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

フェルミ・宇宙ガンマ線望遠鏡が打ち上げられて 3 年が経過し、既に 2,000 を超えるガンマ線天体が新たに発見されている。これらのうち約 7 割が活動銀河ブラックホール、パルサー、超新星残骸など既知の天体と判明したが、残りの 3 割は未だ正体不明の「未同定」ガンマ線源としてその起源解明が待たれる。当研究室では日本の X 線天文衛星「すざく」に観測を提案し、このうち 14 の天体をフォローアップ観測することで、それらの一部が比較的近傍にあるミリ秒パルサーや暗い活動銀河であることを解明し、2 本の学術論文にまとめた (Maeda et al. 2011, ApJ; Takahashi et al. 2012, ApJ)。さらに、米国の Swift 衛星のアーカイブデータを用いて 134 天体に及ぶ高銀緯未同定

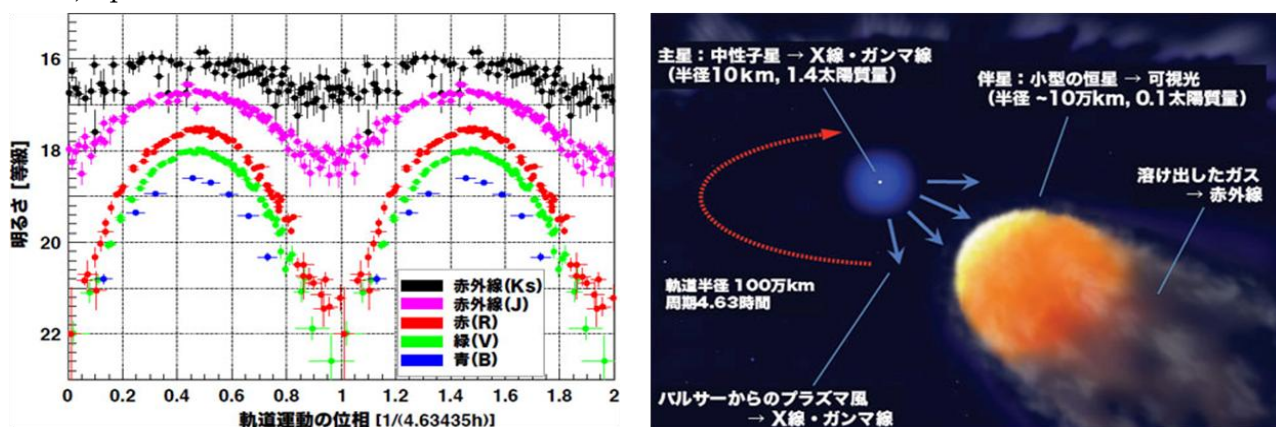


図 1: (左) OISTER で観測した 2FGL J2339.6-0532 の可視～赤外線の高波長光度曲線 (右) 観測から見てきた「毒グモパルサー」2FGL J2339.6-0532 の想像図

天体の系統探査を行い、その正確な位置やX線スペクトルを決定することに成功した。これにより、電波からガンマ線に至る多波長スペクトルの特徴を議論することが可能になり、その起源解明に繋がる新たな判別方法を提案した。結果は前田修士論文(2012)に纏められるほか、現在投稿論文を準備中である。以下では特に興味深い天体、2FGL J2339.6-0532 について紹介する(図1)。この天体はX線で位置誤差内に暗い点源があるにも拘わらず、未だに電波が検出されず、既知のパルサーとは考えにくい。我々は、東工大の共同研究者とともに国内の観測連携ネットワーク OISTER を用いた光・赤外線マルチカラー観測を遂行し、この正体が新種の「毒グモ」パルサーであることを突き止めた(早稲田大学 HP press release 参照)。この結果については2012年春の天文学会(京都大学)で記者会見したほか、3/19付東京新聞・朝日新聞・中日新聞でも図入りで紹介された。その他にも、ガンマ線を放射する電波ローブ NGC6251 を新たに発見し、逸早く論文に纏めるなど(Takeuchi et al. 2012, ApJ)、フェルミ・チーム内でも早稲田大学は非常に高い評価を得ている。招待講演としては、台湾で開かれた2nd Fermi Asian Network、東大・宇宙線研究所で行われた「マルチメッセンジャー宇宙物理学とCTA」などが挙げられる。

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

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)、軟ガンマ線検出器(Soft Gamma-ray Detector:SGD)が搭載される。過酷な宇宙環境(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実現することが鍵である。HXI, SGD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フライト・センサー130個の開発と全数受け入れ試験 [2]APD専用低ノイズ電荷増幅器(CSA-HIC)の開発と受け入れ試験 [3]後段アナログ処理部プロトタイプの開発を一貫して行った(図2)。フライト・センサー受け入れに関しては機上で期待される -15°C を中心にノイズ特性・ゲイン特性を詳細に調べ、全ての素子が搭載可能であることを示すほか(Saito et al. 2012, NIM-A)、 60Co 、プロトン照射実験を行うことで軌道上における放射線耐性を調べ、ミッション経過時のパフォーマンスの劣化について詳細に見積もることに成功した(Kataoka et al. NIM-A)。さらに、CSA-HICについては温度サイクル試験、バーンイン試験、放射線耐性試験を行い、いずれも問題なく全ての素子が合格している。最後に、BGOシールド部を読み出すアナログ処理部に関して、通常天体からのシグナルは勿論、宇宙環境で期待されるバックグラウンド陽子の入射レート、鉄イオンなどを想定した「大パルス応答」を詳細に調べ、回路パラメータの最適化を行った。今後はデジタル部のフィルターと併せ、更なるチューニングを進めるほか、実機センサーと組み合わせた多チャンネル同時読み出し試験など、東大・広島大・宇宙航空研究開発機構(JAXA)などと協力して行い、フライト検出器の組み上げを行う。これら成果は日本天文

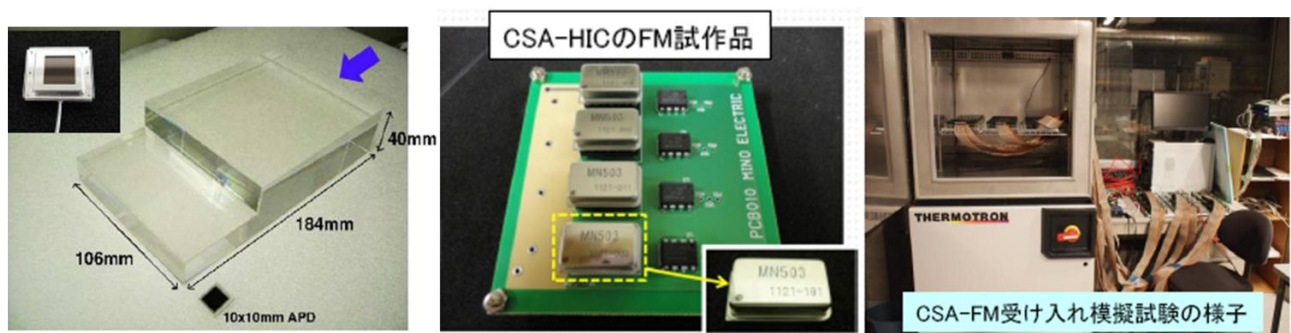


図2: (左)Astro-Hで用いるAPD素子とBGOシンチレータ(中)APD電荷積分アンプのハイブリッドIC(CSA-HIC)(右)CSA-HIC温度サイクル、バーンイン試験の様子(@早稲田・喜久井町キャンパス)

学会、日本物理学会の年会において定期的に発表を行うほか、台湾の国際学会(8th International Hiroshima Symposium)でも発表を行った。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。

2.3 半導体光増幅素子 MPPC の開発と応用

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ため、宇宙に限らず医療・産業用途への展開が期待できる。昨年は APD を 2 次元マトリックス化することで、サブミリ解像度を持つ究極の次世代 APD-PET モジュールを製作することに成功した(Kataoka et al. 2010, IEEE-TNS)。一方で、APD は従来用いられてきた光電子増倍管に比べゲインが小さく、ノイズに弱い欠点をもつ。本年度は、APD をガイガーモードで動作させる新しい光素子 MPPC の開発を重点的に進め、PET を中心に様々な方面への応用を試みた (図 3)。ゲインが 100 倍程度の APD に比べ、MPPC は約 100 万倍と高く、また優れた時間特性を特徴とする。まず、3 面バツタブルのフレックス型 16ch MPPC アレーを新たに開発し (Kato et al. 2011 NIM-A)、新開発の微細シンチレータ Ce:GAGG を組み合わせることで、「超高解像度ガンマカメラ」の開発に成功した (Kato et al. 2012, NIM-A)。MPPC の高いゲインを利用した重心読み出しにより、484 ピクセルからの信号をわずか 4ch で読み出すことが可能である。これを対向型に組み上げることで、手術中でも触診可能な「リアルタイム PET ピンセット」の開発を行った。さらに、ガンマ線の到来時間の僅かな差(Time-Of-Flight: TOF)を利用した次世代 PET 技術開発にも貢献し、MPPC 専用の超高速アナログ LSI を独自開発、実機を用いた性能評価まで行った。その結果、現状の TOF-PET としては最高水準である 500 ps を切る時間分解能を達成することに成功した (Matsuda et al. 2012, NIM-A)。PET へのもう一つのアプリケーションとして、シンチレータ内部でのガンマ線の入射位置(Depth-Of-Interaction: DOI)を 3 次元的に決定する新しい方法を考案し、特許として申請中である(特願 2011-289480 : Kishimoto et al. 2012, IEEE-TNS submitted)。従来、DOI を求めるにはシンチレータの 6 面に光センサーを貼り付けるなど複雑な手法が提案されてきたが、本研究の方法では上下 2 面に MPPC を添付すればよく、原理的に 1mm を切る精度で 3 次元位置決定が可能となる。将来的には PET は勿論、高感度放射線カメラなどへの応用も可能と見込まれる。PET 関連としては、このほか MPPC の温度依存性を自動補償する簡便かつコンパクトな回路を考案し、特許として申請中である (特願 2011-231544)。同技術は(株)古河機械金属と開発したサーベイメータ「ガンマスポッター」に内蔵され、すでに市販化を始めている。



図 3: (左)MPPC アレー+微細シンチで撮像したベアリング画像 (中) 術中に触診可能な小型ピンセット型 PET カメラ。解像度で約 1mm を達成 (右) ガンマ線の 3 次元吸収位置(DOI)測定

2.4 その他の開発状況 (情報通信)

地球からの長距離通信に対する需要は日々高まっており、米国 NASA/JPL や欧州 ESA では火星くらいまでの距離で数十～数百 M bps (bit/s)の通信速度をもつ、深宇宙通信システムの構築が検討されている(図4)。電波を利用した宇宙通信は通信速度が遅いため、近赤外波長帯のレーザー光を用いたシステムが有力視されている。送信された光信号は宇宙空間で減衰され、光子検出器に到達するときには単一光子程度の非常に微弱な光信号となる。従って、深宇宙通信の分野では、微弱な光を検出することができる単一光子検出器の開発が強く望まれている。これまでに様々な単一光子検出器が開発されているが、特に通信波長帯では安価・コンパクト・低消費電力な特徴をもつ InGaAs アバランシェ・フォトダイオード(APD)検出器が注目されている。通常は、InGaAs APD をガイガーモードで駆動させて光子を検出するが、アフターパルス確率・暗計数率が高いなどの問題がある。そこで、我々は深宇宙通信システムへの応用に向けて、サブ・ガイガーモード InGaAs APD 単一光子検出器の開発を行なった。その結果、深宇宙通信で提案されているガイガーモード検出器よりも、高い最大通信速度が期待できることを示した。実際に、組み上げた光子検出器のビットエラーレート(BER)を測定したところ、Symbolあたりの Slot 数を増やすことで BER を低減させることができ、深宇宙通信システムの原理・検証実験に成功した。これらは宮本修論(2012)としてまとめられている。

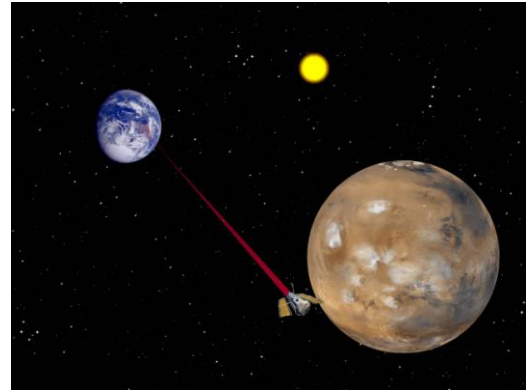


図4: 深宇宙通信システムの概観

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)

- *J.Kataoka, L.Stawarz, Y.Takahashi et al., “Broad-line Radio Galaxies Observed with Fermi-LAT: The Origin of the GeV Gamma-Ray Emission”, The Astrophys. Journal, vol. 740, 29 (16 pages), (2011)
- T.Miura, T.Nakamori, J.Kataoka et al., “Improvement of Energy Thresholds for Scintillation Detectors Using a Monolithic 2x2 Multi-Pixel Photon Counter Array with a Coincidence Technique”, J. Phys. Soc. Jpn, vol.80, No.9, p.094203 (17pages) (2011)
- Y.Takahashi, J.Kataoka, T.Nakamori et al., “Suzaku X-Ray Follow-up Observations of Seven Unassociated Fermi-LAT Gamma-Ray Sources at High Galactic Latitudes”, The Astrophys. Journal, vol. 747, 64 (16 pages), (2012)
- T.Miura, T.Nakamori, J.Kataoka et al., “Development of a scintillation detector using a MPPC as an alternative to an APD”, Journal of Instrumentation, 10.1088/1748-0221/7/02/C020306 (12pages), (2012)
- T.Nakamori, T.Kato, J.Kataoka et al., “Development of a gamma-ray imager using a large-area monolithic 4x4 MPPC array for a future PET scanner”, Journal of Instrumentation, 10.1088/1748-0221/7/01/C01083(15pages), (2012)

- T.Nakamori, T.Enomoto, J.Kataoka et al., “Development of X-ray/gamma-ray imaging spectrometers using reath-through APD arrays”, Journal of Instrumentation, 10.1088/1748-0221/7/03/C03038(12pages), (2012)
- Y.Takeuchi, J.Kataoka, L.Stawarz et al., “Suzaku X-Ray Imaging of the Extended Lobe in the Giant Radio Galaxy NGC 6251 Associated with the Fermi-LAT Source 2FGL J1629.4+8236”, The Astrophys. Journal, vol. 749, 66 (8 pages), (2012)
- A.Kong, J.Kataoka, Y.Takahashi et al., “Discovery of an Unidentified Fermi Object as a Black Widow-like Millisecond Pulsar”, The Astrophys. Journal, vol. 747, L3 (5 pages), (2012)
- *J.Kataoka, T.Saito, M.Yoshino et al. “Expected radiation damage of the reverse-type APDs for the Astro-H mission”, NIM-A, in press (2012)
- A.Matsuda, J.Kataoka, H.Ikeda et al., “Development of ultra-fast ASIC for future PET scanners using TOF-capable MPPC detectors”, NIM-A, in press (2012)
- 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, in press (2012)
- T.Saito, T.Nakamori, J.Kataoka et al., “Development of High Performance Avalanche Photodiodes and Dedicated Analog Systems for HXI/SGD onboard the Astro-H mission”, NIM-A, in press (2012)

ほか 30 編

4.2 招待講演

- *J.Kataoka, “Fermi-LAT observations of Misaligned AGN; Towards AGN Unification”, 2nd Fermi Asian Network Workshop, August 1-5, Hsinchu, Taiwan (2011)
- *片岡 淳, “フェルミ衛星による電波銀河の観測” 「マルチメッセンジャー宇宙物理学と CTA」、宇宙線研究所共同利用研究会、9/29-10/1, 招待講演 (2011)
- *片岡 淳, “Fermi-LAT observations of Misaligned AGN”、「多波長放射で探る活動銀河中心核ジェット」、国立天文台三鷹、9/26-27, 招待講演 (2011)
- *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”、次世代PET研究会、1/27, 招待講演 (2012)

4.3 報道発表・プレスリリース

- 2011年3月19日、東京新聞（朝刊）、「星食べる毒グモ天体」
- 2011年3月19日、中日新聞（朝刊）「早大ら、伴星を共食いする宇宙の毒蜘蛛 “ブラックウィドウパルサー” を観測」
- 2011年3月21日、早稲田大学ホームページプレスリリース「理工・片岡研究室、新種の “毒蜘蛛パルサー” 発見」, http://www.waseda.jp/jp/news11/120322_blackwidowpulsar.html
- 2011年3月23日、JAXA「すざく」ホームページ、「共食いする毒グモ中性子星—新種のパルサー発見に、日本の総力を結集」, <http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/index.html.ja>

4.4 特許の申請

- 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）
- 特願 2011-231544 「携帯型放射線検出器」
鎌田 圭、伊藤 繁記（古河機械金属）片岡 淳（早稲田大学）

4.5 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

近年、フェルミ衛星で巨大なガンマ線の「泡」構造“フェルミ・バブル”が発見され、宇宙線電子の過剰成分、ダークマターとの関連も併せて大いに注目を集めている(Su et al. 2010, ApJ)。来年度は当研究室も総力を結集してその起源解明に挑みたい。具体的には、「すざく」AO-7において既に 20ksec ×14 の長時間フォローアップ観測が認められており(PI: J. Kataoka)、4月中旬から早速観測を始める。また、8月には天文学会誌にレビュー記事を執筆するほか電波や可視の観測と併せ、系統的な理解を試みる。次期 Astro-H 衛星に関しては、いよいよ打ち上げまで2年を切り、フライト検出気全体を組み上げる多忙なフェーズとなる。早稲田大学としては Astro-H 衛星の成功にむけ、これまで同様に BGO シールド部の開発を中心に貢献していきたい。さらに、来年度からは地上チェレンコフ・プロジェクト CTA にも参入を検討・計画しており、高エネルギー宇宙物理の新たな展開をめざしたい。次世代 PET 開発については、MPPC をベースに8ユニットからなるプロトタイプ・ガントリまで製作したい。さらに、MPPC と超微細シンチレータを用いた高解像度・環境ガンマカメラを製作し、福島県をはじめとする放射線汚染地域への迅速な対応・貢献を目指したい。