

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

(先進理工学研究科・理工学術院総合研究所 教授)

1. 研究課題

近年、光電子増倍管(PMT)に代わる高性能半導体光素子の登場により、放射線計測も新たな局面を迎えている。たとえば APD (Avalanche Photo Diode), MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)といった内部増幅素子は小型・軽量・省電力、また耐磁場性能に優れ、宇宙・素粒子・原子核・医療・環境計測など多方面で注目を集めている。これに伴い、放射線を可視化するシンチレータも優れた素材が続々と開発され、CdTe, CZT に迫る高エネルギー分解能をシンチレータ (たとえば LaBr, SrI2) でも簡単に実現することが可能になりつつある。本研究では近年開発が目覚ましいこれら計測技術を統合し、理工医の枠組みを超えた次世代放射線計測の開拓を目指す。具体的には [1] X線・ガンマ線天文衛星を用いた高エネルギー宇宙物理実験への展開 (学術研究) [2] 最先端の放射線センサーの開発と産業・医療・工学分野への展開 (応用研究) の二つを掲げている。以下では 2014 年度における主たる研究進捗について概説する。

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 (以下、フェルミ衛星) は 2008 年に打ち上げられ、6 年を経た現在も順調な観測を続けている。本年度は電波銀河 NGC1275 や 3C120 多波長観測(図 1 左: Aleksic et al. 2014, A&A; Tanaka et al. 2015, ApJ) の X線・ガンマ線解析を担当するほか、活動銀河核の 3rd カタログ (Ackermann et al. 2015, submitted) への貢献、フェルミ・バブルの X 線詳細観測

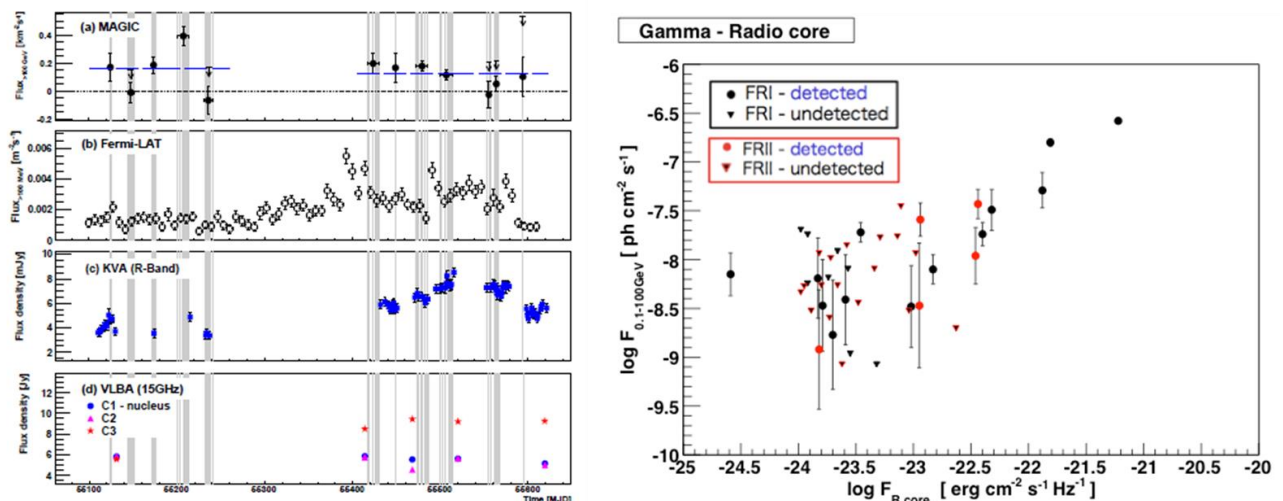


図 1: (左)電波銀河 NGC1275 の多波長時間変動 (Aleksic et al. 2014)。当研究室で 2 段目パネルの Fermi-LAT のデータ解析をすべて担当した。(右) 5 年間のフェルミ衛星観測データを用いた電波銀河 44 天体の系統解析。ガンマ線と電波コア光度の相関をはじめて示した (向江卒論 2015)。

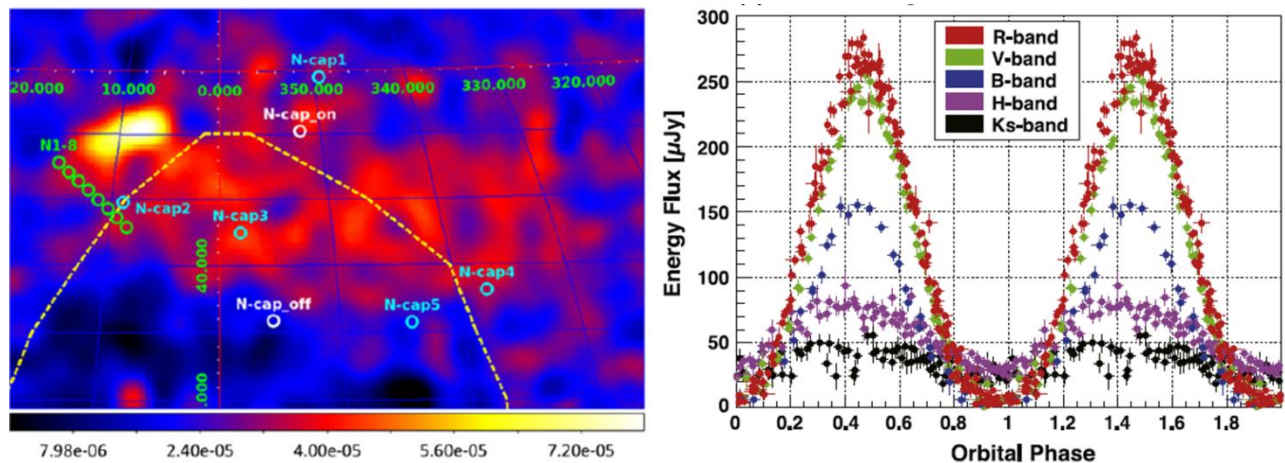


図 2: (左) MAXI-SSC で捕らえたフェルミ・バブルの X 線 N-cap 構造と「すざく」による追観測
(右) 2FGL J2339.6-0532 の赤外～光学ライトカーブ。周期 4.63 hr でフォールドしてある。

(Ackermann 2014, ApJ), さらには内部レフェリーとして多くのフェルミ論文を出版まで導いた。一方で、過去 5 年分のデータを積算し、電波で明るい活動銀河核 44 天体(FR I 21 天体/FR II 23 天体)を候補としたガンマ線の系統的探査を行い、そのうち 18 天体から有意なガンマ線検出に成功した(向江卒論 2015: 図 1 右)。これら 18 天体に対し電波からガンマ線にわたる多波長スペクトル解析を行い、ブレーザーの放射モデルを用いた磁場・相対論的ビーミング因子、領域サイズなどの物理量の導出を試みた。ガンマ線と電波コアフラックスの関係から、FR II 電波銀河がビーミングの影響で相対的に検出されにくいことを初めて示した。

X 線のデータ解析については、2013 年に引き続き“フェルミ・バブル”(天文学会誌解説: 2012 年 9 月号; 片岡 淳ほか)の「すざく」衛星・スウィフト衛星系統解析を行い、2 報目の論文にまとめた(Tahara et al. 2015, ApJ)。図 2 (左) に示す通り、本論文では特に MAXI が初めて観測したバブル北端のキャップ構造(North Cap)、及び南東低銀緯にある「爪」構造(South Claw)に着目し、その放射起源に迫った。North Cap の詳細観測ではこれまで知られていた $kT = 0.3$ keV の熱的プラズマに加え、 0.7 keV の高温成分の存在示唆が得られた。銀河中心から噴出するガスが、周辺物質と衝突することでさらに加熱された成分であると考えられ、今後の検証を待ちたい。一方、東工大の共著者と 2012 年にプレス・リリースをした「毒蜘蛛パルサー」2FGL J2339.6-0532 の詳細なスペクトル・時間変動解析を行い、赤外からガンマ線にわたる広い領域の放射機構に新たな制限を与えることに成功した(Yatsu et al. 2015, ApJ; 図 2 (右))。

2.2 Astro-H 衛星搭載硬 X 線撮像検出器(HXI)のエネルギー較正

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)が搭載され、 $5 \sim 80$ keV の領域で撮像観測を行うことで従来より 100 倍感度のよい観測を実現する。HXI の検出器は 4 層のシリコンストリップ検出器と 1 層の CdTe 検出器からなるが、各層の両面には 128 本のストリップ電極が形成され、4 つの ASIC (アナログ集積回路) で読み出しを行う。HXI の地上キャリブレーションには複数の線源を用いた実測データが用いられるが、地上で完全に宇宙環境を再現することは難しく、また、軌道上では非常に微弱な($3 \sim 4$ Bq)種類の ^{241}Am 較正線源しか用いることができない。そのため、本年度は ASIC に付随したテストパルス機能を用いて軌道上でより迅速かつ正確なエネルギー較正を行う方法を新たに検討した(三村卒論 2015)。具体的にはテ

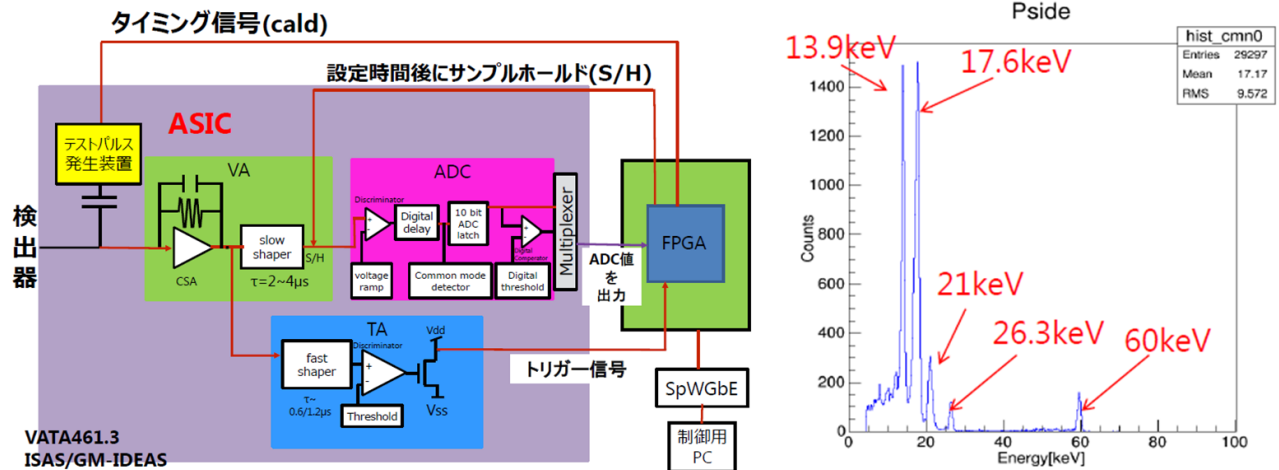


図 3: (左) Astro-H 衛星 HXI 検出器のテストパルス読み出しスキーム (右) 本手法でエネルギー較正を施した後の、 ^{241}Am スペクトル(P-side の DSSD)。全エネルギー帯で精度 2%以下を達成
ストパルスから出力する電荷量を順次大きくし、回路干渉や ASIC の線形性、walk 等まで考慮した ADC の補正関数を精確に求め、線源で取得したデータと比較した。結果、テストパルスを用いても HXI のエネルギー領域で 2% の精度でエネルギー較正が可能であることを示した。今後は同手法を全チャンネルに拡張し、また検出器が温度変化した場合の影響などについても詳細に調べる。

2.3 次世代 PET 技術開発 (MPPC-PET)

科学研究費補助金・基盤研究(S)の支援のもと、コンパクトかつ 10^6 ものゲインを持つ光素子 MPPC を用いて、次世代 PET 装置の開発を進めた。本年度は開発の最終年度にあたり、(1) 新規 DOI 技術を用いた 8ch 小動物用 PET ガントリの製作・評価 (2) MRI/PET 併用による同ガントリの性能評価 (3) TOF-PET 実現に向けた MPPC 時間応答の限界性能評価を行なった。(1) においては当研究室で開発した「3次元構造シンチレータ」(特願 2011-284980) を PET 検出器に応用し、視野中心から視野端のすべてにわたって解像度 1.5mm(FWHM)の歪みのない高品質画像を得ることに成功した(図 4: 左・中)。同成果をまとめた藤田修論は 2014 年度の物理応物専攻・優秀修士論文賞(宮部賞)を受賞している。(2)については MPPC の磁場耐性を生かした ABS 樹脂製の PET ガントリを新たに構築して 4.7T の強力磁場を持つ MRI 中に配置し、FE(Fast Spin Echo), GE

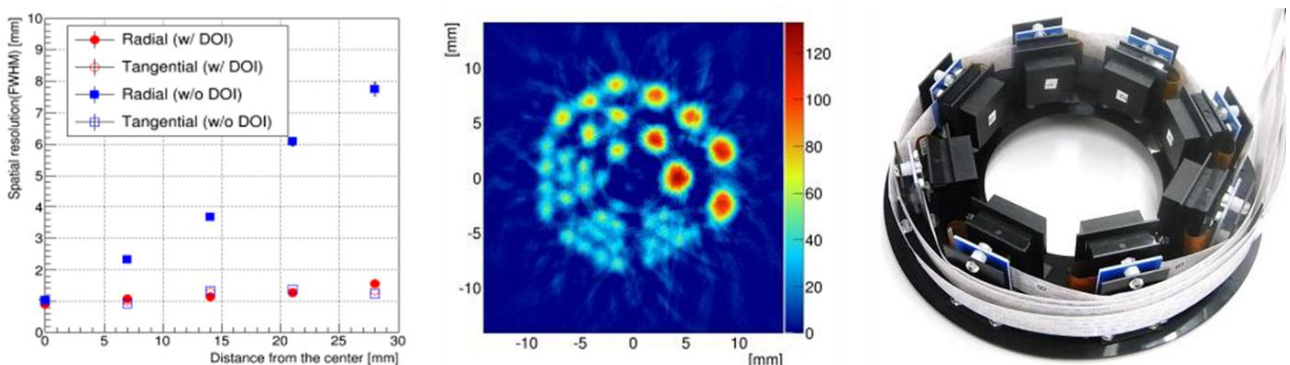


図 4: (左) 開発した DOI-PET 検出器 (赤丸) による解像度の改善。従来型の Non-DOI 検出器は青丸。(中)同検出器を用いた場合のファントム画像シミュレーション (右) 新規に開発した MRI-PET 検出器 (小動物用サイズ)

(Gradient Echo)の撮影中においても PET/MRI 双方の画像にまったく影響が無いことを確認した (図 4 右; 呉井修論 2015)。(3)の TOF 測定においては 2 段階トリガを用いた時間分解能の改善、また、デジタルオシロスコープによる波形取り込み処理により、20℃の環境で 213ps (FWHM)の時間分解能を達成した。この値は、現状 TOF-PET で得られる値としてはトップレベルといえる (Tsujikawa et al. 2014; IEEE-conf series)。

2.4 高精細カラー放射線イメージセンサーの開発

2013 年度に引き続き、Ce:GAGG と大面積 MPPC アレイを用いた高精細放射線イメージセンサーの開発を進めた。本年度は (1) シンチレータ及び MPPC の大面積化 (20x20mm 以上) (2) 多色エネルギー情報を用いた物質同定 (3) 3 色による被写体のカラー撮影など、大きな進展が得られた。成果は大島卒論および投稿論文 (Oshima et al. 2015, in prep) にまとめられている。図 5(左)は 122keV ガンマ線における微細スリット透過画像である。0.3mm のスリットまで明確に分離していることがわかる。図 5(中)はシンチレータで得られるエネルギースペクトルで、エネルギー分解能は 122keV で 12% (FWHM), 60keV で 18%(FWHM)であった。最後に 図 5 (右) にライター先端部の 3 色(31 keV, 60keV, 88keV)にカラー合成画像を示す。

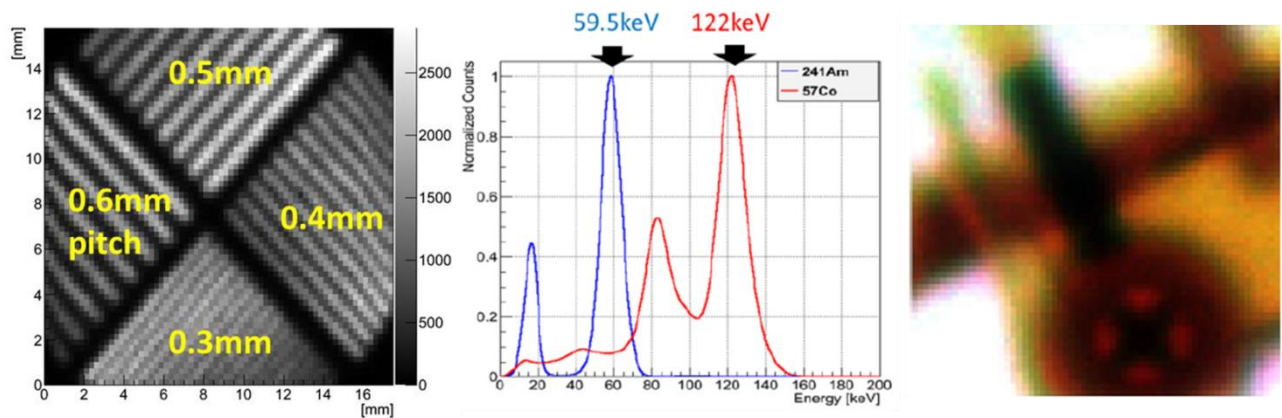


図 5: (左) 122keV 照射による微細スリットの透過画像 (中) 同センサーを用いた 60keV, 122keV のガンマ線スペクトル (右)ライター先端部の 3 色同時撮影画像 (31, 60, 88keV を照射)

2.5 携帯型ガンマ線カメラの開発と医療応用

2013 年 9 月に発表した初版ガンマ線カメラをもとに、浜松ホトニクス社と共同でさらに高解像度・高感度の改良版ガンマ線カメラの開発に成功した (Kataoka et al. 2015; Kishimoto et al. 2014; 西山卒論 2015)。同成果については 2014 年 7 月 24 日に早稲田大学・浜松ホトニクス・科学技術振興機構 (JST) で同時プレスリリースを行なった。従来型カメラの解像度が約 15° (FWHM)であったのに対し改良型は約 8° (FWHM)、感度に関しては 70%の向上に成功している。鍵となる技術は DOI-PET 装置 (2.3 章) でも記載した「3 次元式」シンチレータアレイと、これを用いたコンプトンカメラ技術 (特願 2012-157920・2013-212844) である。これにより、四方を囲まれた数 μ Sv/h 程度のバックグラウンドをもつ森林環境下でも、10 μ Sv/h のホットスポットを 3 分程度で迅速に可視化することが可能になった。図 6(左)は従来型カメラと新カメラの外観比較である。重量は 2.5kg と わずかに重くなったが、性能の改善は劇的である。図 6(中)は福島・浪江の里山における試験撮影で、林道にそって放射性セシウムが沈着している様子が僅か 3 分の撮影時間でわかった。図 6(右)は同カメラを樹冠に向けて撮影したもので、木々の情報からも薄っすらとガンマ線が到来し

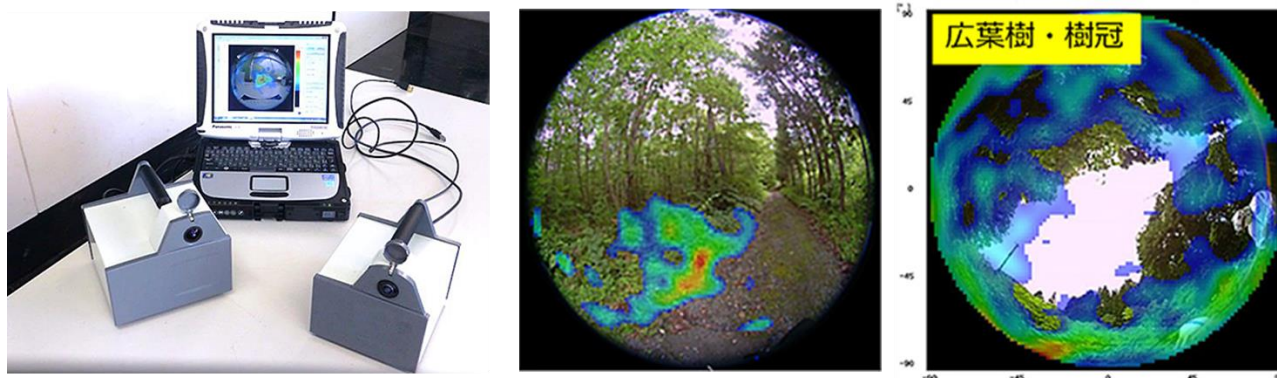


図 6: (左) 従来型カメラ・新規カメラの概観 (中) 福島浪江の里山における撮影例。撮影時間は 3 分。

(同) 同・浪江における広葉樹樹幹の撮影例。撮影時間は 3 分

てることが見て取れる。福島県下において、樹幹のような微弱なガンマ線の撮影に成功した例は過去に無く、今後ヘリ等による森林情報からの撮影にもチャレンジする予定である。また、福島県下における測定スペクトル・イメージから、ガンマ線のスペクトルの散乱成分・直接成分を比較すること、ならびに散乱ガンマ線のイメージの広がりや、土壌深さ方向における放射線セシウムの沈着情報を探る上で有効なプローブとなることを考案して特許を出願(特願 2015-12203: 岩本卒論)、同概念に基づいた新規 3 次元計測カメラの設計を始めている。

最後に、同カメラを医療分野、とくに粒子線治療のオンラインモニタとして使用する検討と予備実験を始めている(多屋卒論 2015)。陽子線や炭素線を用いた粒子線治療は QOL (Quality of Life: 生活の質) を重視した理想的な治療として注目されるが、正確な照射を行わないと正常細胞を壊死させ、ガン細胞を残存する危険性を孕んでいる。現在、ビームの照射位置はオンラインで確認することができず、隣室の PET 装置などへ運んでオフラインによる事後確認が行われるが、これは二度手間であると同時に、再現性や精確性の面で課題も多い。本研究では即発ガンマ線を用いたリアルタイム撮像や、コンプトンカメラを用いた 3 次元分子イメージングへの応用を検討している。図 7 (左) は国立がんセンター東病院の陽子線治療室で取得したガンマ線スペクトルと 511keV ガンマ線画像(右)で、ビーム照射口に集中した画像が確認できる。現状では解像度が十分でないが、511keV に限らず即発ガンマ線を精度よくモニタすることで次世代医療への新たな突破口となる可能性が高い。

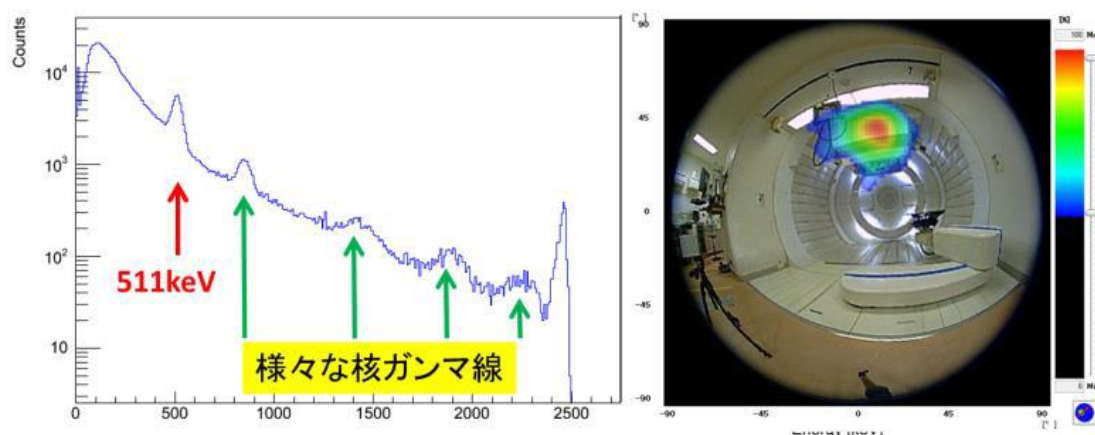


図 7: 国立がんセンター東病院の陽子線治療室で取得したガンマ線スペクトル (左) と 511keV ガンマ線画像 (右)。ビーム照射口に集中した画像が確認できる。いずれも治療 10 分後に入室してデータを取得。

3. 共同研究者

佐藤 悟朗 (早稲田大学理工学研究所・研究員講師)

4. 研究業績

4.1 学術論文 (主要な査読付き論文のみ)

- J.Kataoka, A.Kishimoto, T.Fujita, et al., “Recent progress of MPPC-based scintillation detectors in high precision X-ray and gamma-ray imaging”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 出版中, 7 pages, (2015)
- Y.Yatsu, J.Kataoka, Y.Takahashi, et al, for the OISTER team, “Multi-wavelength observations of the black widow pulsar 2FGL J2339.6-0532 with OISTER and Suzaku” , Astrophysical Journal, vol.802, p.84, 11 pages, (2015)
- M.Tahara, J.Kataoka, Y.Takeuchi, et al., “Suzaku X-ray Observations of the Fermi Bubbles: Northernmost Cap and Southeast Claw Discovered with MAXI-SSC” , Astrophysical Journal, vol.802, p.91, 13 pages, (2015)
- T.Ambe, H.Ikeda, J.Kataoka, et al., “Development and evaluation of an ultra-fast ASIC for future PET scanners using TOF-capable MPPC array detectors”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, vol.771, pp.66-73, (2015)
- T.Nishiyama, J.Kataoka, A.Kishimoto, et al., “A novel Compton camera design featuring a rear-panel shield for substantial noise reduction in gamma-ray images”, Journal of Instrumentation, vol.9., C12031 (12 pages), (2014)
- Y.Kurei, J.Kataoka, T.Kato, et al., “Development of a MPPC-based prototype gantry for future MRI-PET scanners”, Journal of Instrumentation, vol.9., C12032 (12 pages), (2014)
- T.Fujita, J.Kataoka, A.Kishimoto, et al., “Development of prototype PET scanner using dual-sided readout DOI-PET modules”, Journal of Instrumentation, vol.9., C12015 (12 pages), (2014)
- A.Kishimoto, J.Kataoka, T.Nishiyama, et al., “Performance and field tests of a handheld Compton camera using 3-D position-sensitive scintillators coupled to multi-pixel photon counter arrays”, Journal of Instrumentation. vol.9, P11025(15 pages), (2014)
- Y.Kurei, J.Kataoka, T.Kato, et al., “Qualification test of a MPPC-based PET module for future MRI-PET scanners” , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, vol.765, pp.275-279, (2014)
- T.Fujita, J.Kataoka, T.Nishiyama, et al., “Two-dimensional diced scintillator array for innovative, fine-resolution gamma camera” , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, vol.765, pp.262-268, (2014)
- T.Tsujikawa, H.Funamoto, J.Kataoka, et al., “Performance of the latest MPPCs with reduced dark counts and improved photon detection efficiency”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, vol.765, pp.247-251, (2014)
- K.Takeuchi, J.Kataoka, T.Nishiyama, et al., “stereo Compton cameras for the 3-D localization of radioisotopes”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, vol.765, pp.187-191, (2014)
- The Fermi-LAT collaboration, M.Ackermann, J.Kataoka (72 番目/135 人) et al, “The Spectrum and Morphology of the Fermi Bubbles”, Astrophysical Journal. vol. 793, 64 (34

pages) , (2014)

ほか共著論文 9 編

4.2 招待講演・口頭講演（国際学会）・セミナー

- J.Kataoka, “Recent Progress of MPPC-based scintillation detectors in high precision X-ray and gamma-ray imaging” (次世代半導体光素子 MPPC を用いた高精度 X 線・ガンマ線イメージング) , Symposium on Radiation Measurements and Applications (SORMA XV 2014), ミシガン大学、2014 年 6 月 10 日～13 日
【参考 URL】 <http://rma-symposium.engin.umich.edu/>
- J.Kataoka, *INVEITED REVIEW*: “Observational aspects of AGN jets at high energy”, 高エネルギー X 線・ガンマ線でみた活動銀河ジェットの観測的特徴) , IAU Symposium 313 (国際天文学連合シンポジウム), ガラパゴス諸島、エクアドル, 2014 年 9 月 8 日～11 日
【参考 URL】 <http://iau313ecuador.epn.edu.ec/invited.html>

4.3 特許の申請

- 特願 2015-12203 「放射性物質の三次元分布を計測する方法及びその装置」 片岡 淳, 岸本 彩, 岩本 康弘 (早稲田大学)

4.4 報道発表・プレスリリース

- 2014 年 7 月 23 日
ガンマ線撮像用コンプトンカメラの高性能化に成功
～除染のさらなる効率化、環境調査、医療・理学応用へ期待～
JST ページ : <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20140723-2/index.html>
【静岡第一テレビ、日経産業新聞、日刊工業新聞、ハフィントンポスで紹介・掲載】
- Asia Research News 2015 - Environment
“Gamma ray camera may help with Fukushima decontamination”

4.5 受賞

- 2014 年度第 1 回 早稲田大学リサーチアワード (国際研究発信力) ,
片岡 淳 (理工学術院)
<http://www.waseda.jp/top/news/16449>
- 2014 年度 物理応物・修士論文賞 (宮部賞) : 藤田 卓也 (片岡研究室)
「3 次元シンチレータと MPPC を用いた高解像度 DOI-PET 装置の開発」
- 2014 年度 早稲田物理会賞 (並木賞) : 大島 翼 (片岡研究室)

5. 研究活動の課題と展望

2015 年度は Astro-H 衛星が打ち上げられ、ファーストライトの貴重なデータが期待できる。Science Working Group (Galactic Center group) のサブ・リーダーとしてチーム全体を良く統括し、Astro-H のサイエンスを最大限に引き出すべく努力したい。医療放射線検出器の開発においては、2015 年度は科研費・基盤研究(S) ないしは(A) の初年度にあたり、「実用化へ向けた高解像度

3D カラー放射線イメージング技術の開拓」をテーマに研究に尽力したい。レントゲン撮影や X 線 CT, PET 検査や手荷物検査に至るまで、一般に放射線イメージングは 2 次元静止画像を基本とし、かつエネルギー情報を持たない。もし放射線の多色（カラー）イメージを高解像度・3 次元（3D）でリアルタイムに取得できれば、被写体の立体構造や材質、現象のダイナミクスに至るまで、得られる情報量は飛躍的に向上する。本研究ではこれまで独自に開発したガンマ線可視化技術を応用・発展し、世界に先駆けた 3 つの革新技术を創生する。すなわち A) 超解像度 X 線・ガンマ線イメージング技術 B) 医療用リアルタイム 3D コンプトンカメラの開発 C) 広視野 3D エリアモニタの開発と環境計測への応用を目指す。システム全体を国産ベースで開発し、放射線・医療分野の活性化と産業界への迅速なフィードバックを目標としている。