

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
(先進理工学部 応用物理学科 教授)

1. 研究課題

本研究では次世代光センサーを用いた高精細放射線イメージングをキーワードに、宇宙物理から医療・環境計測に広く応用可能な検出器開発と、これを用いた最先端の学術研究を並行して実施する。レントゲン写真やX線CTに代表されるように、これまで放射線イメージングはエネルギー情報をもたない「モノクロ」かつ「静止画像」が基本であった。本研究では、放射線の高解像度・多色（カラー）イメージを3次元かつリアルタイムで取得することを目指し、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、情報量を大幅に向上する。とくに、これまで独自に開発したガンマ線可視化技術をベースに、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。大きなテーマとしては [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2015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 人工衛星や気球を用いた宇宙観測

フェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡（以下、フェルミ衛星）を用いた国際共同研究は7年目を迎え、米国NuSTAR衛星とのAGN同時観測 (Furniss et al. 2015, ApJ)、フェルミ衛星チームとして5年分の観測データを用いた第三カタログ出版 (Acero et al. 2015, ApJ) など、顕著な成果があった。さらに、スウェーデンと共同プロジェクトとして進めてきた気球実験PoGOLiteの初期観測成果が出版され、カニ星雲の偏光検出に関する論文などを出版した (図1左: Chauvin et al. 2016, MNRAS)。

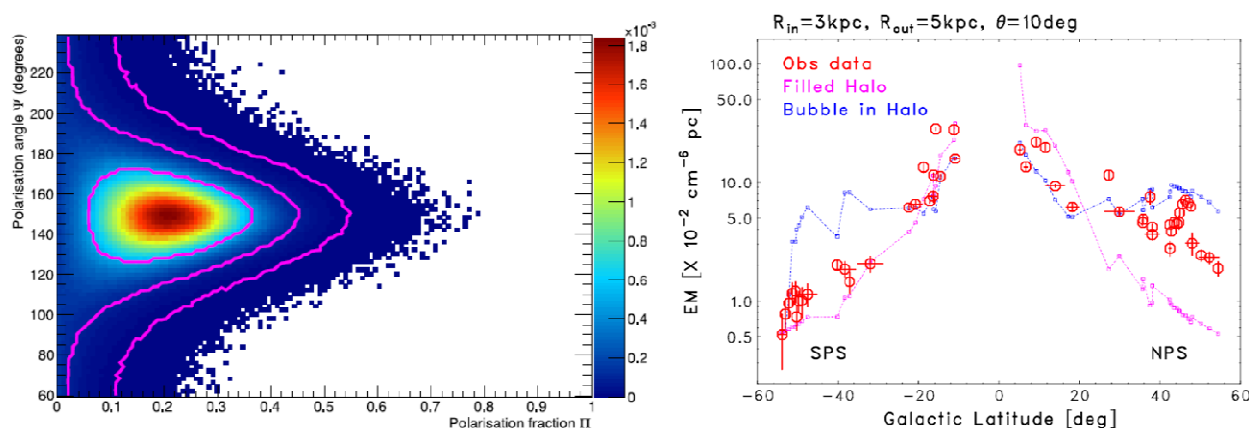


図1: (左) 偏光X線気球実験PoGOLiteによるカニ星雲の観測結果。偏光度と偏光角に強い制限を与えた (Chauvin et al. 2016) (右) 「すざく」およびSwift衛星を用いたフェルミ・バブル周辺プラズマの観測放射率（データ点）と、理論モデル（点線）との比較 (Kataoka et al. 2015)

X線天文衛星の解析では、日本の「すざく」衛星と米国Swift衛星を用いたフェルミ・バブル観測

の集大成といえる解析結果を論文にまとめ、バブル周辺は一様に $kT \sim 0.3 \text{ keV}$ の熱浴に満たされており、これは $kT \sim 0.2 \text{ keV}$ の銀河ハローがバブルの膨張による弱い衝撃波で過熱された結果であることを結論付けた (図 1 右 : Kataoka et al. 2015, ApJ; Kataoka et al. 2013, ApJ も参照)。

2.2 「ひとみ」衛星搭載検出器の立ち上げ及び動作確認

「ひとみ」衛星は 2016 年 2 月 17 日 17 時 45 分に種子島宇宙センターより打ち上げられ (図 2 左)、順調に初期運用フェーズにあった。打ち上げから約ひと月の間は検出器の立ち上げ、重要天体の初期観測を行ってきた。「ひとみ」には、当研究室が主として開発したアバランシェ・フォトダイオード(APD)が全 68 素子使われ、BGO シンチレータと併せ硬 X 線撮像検出器(HXI)及び軟ガンマ線検出器(SGD)のシールド検出器を構成している。打ち上げ後もシールド検出器は全数正常に動作し、バックグラウンドのスペクトル取得等に成功している (図 2 右)。また、当研究室では HXI に搭載されたシリコン DSSD 検出器のエネルギー較正などでも大きな貢献をしてきた。JAXA 公式発表にあるとおり、現在「ひとみ」衛星の運用は非常に困難な状況が続いているが、チームメンバーとして今後も原因追及に努めていきたい。なお、ペルセウス銀河団の初期観測については、既に Nature 誌に投稿されている (Takahashi et al. 2016)。



※HV2系 (1-7ch) は 190 V

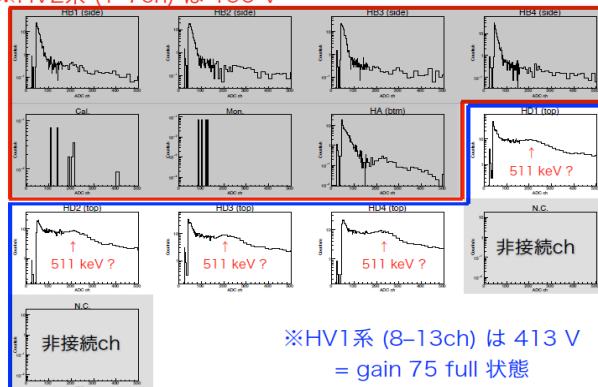


図 2 : (左) 本年 2 月 17 日、種子島宇宙センターより「ひとみ」打ち上げの様子 (右) 約ひと月にわたる、初期運用中に BGO+APD シールド検出器で取得したスペクトルの一例。HXI, SGD には APD68 素子が搭載されているが、全数正常動作を確認している。

2.3 低被ばくかつ多色 X 線 CT の開発

X 線 CT はは現在の医療画像診断においても根幹をなす重要技術であるが、その被ばく量は一回で 10 mSv に及ぶ場合があり、これは日本人一人当たりの年間自然放射線量 2.1 mSv に対して遥かに大きい。そこで CT メーカー各社は画像再構成のアルゴリズムに改良を加え、低被ばく化を目指しているが、線量を一桁下げるといった劇的な改善には至っていない。本研究では、MPPC と高速シンチレータを用いることで線量を従来 CT の約 $1/1000$ まで削減し、かつ同等以上の高精細イメージを取得できる新たな手法を確立した (図 3 左)。さらに、個々の X 線パルスエネルギー毎に計数することで、X 線カラー撮影にも挑戦した。これにより、水とアルコールのように CT 値が近い物質の同定が容易になるほか、金属アーチファクトなどが効率よく取り除かれることを実測から確認した。本年度は原理検証のため、単素子 MPPC とシンチレータで第一世代の CT 実験を行っているが、今後は装置化を目指した 2 次元 MPPC アレイと高速 LSI の開発が鍵となる。エネルギー弁別のほかの手法として、一部 CT メーカーは CdZTe など半導体検出器の導入を検討している。しか

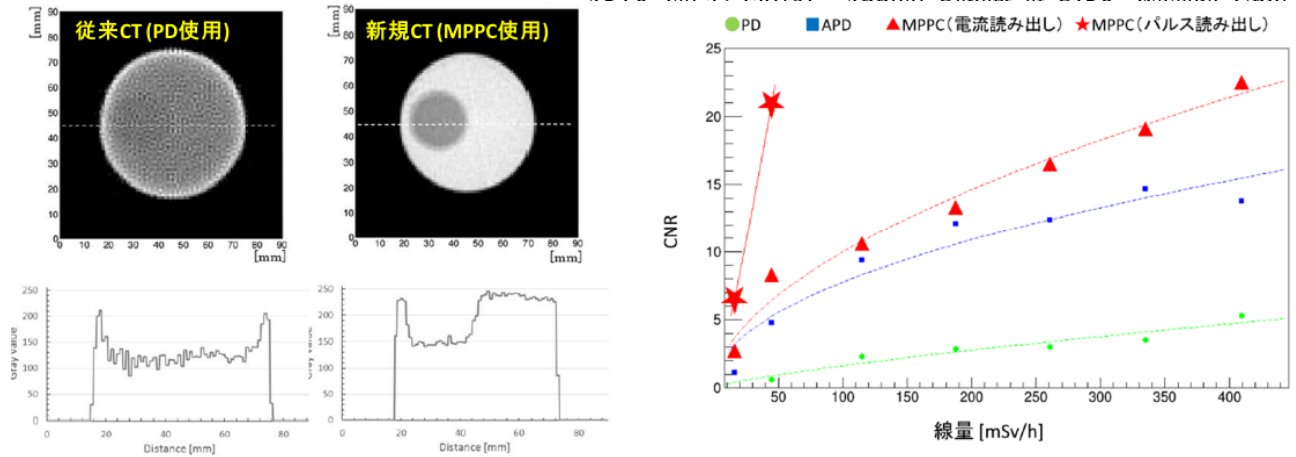


図 3：(左) 低線量下で取得した、従来 CT と新提案の「低被ばく」CT 装置の画像比較。PD の代わりに MPPC を利用してパルス計測することで、非常に低い線量下でも高精細な画像が取得できる。

(右) 線量に対する、画像コントラスト比の変化。MPPC パルスモードでは 1/1000 の低線量を実現するほか、カラー画像を得ることが可能である。

しながら、これら半導体は電子・ホール移動度が遅く必要以上にピクセルサイズを小型化する必要があり、膨大な信号処理が不可欠のため、臨床応用には至っていない。また既存の装置を全て置き換えるなど、ハードウェアとしても大々的な変更が必要となる。当研究室が提案する次世代 CT は、光センサーを従来の PD から MPPC に変えるだけであり、ハードにたいするインパクトが非常に少ない。また、パルス計測に至る前の中間ステップとして、既存 CT と同じ電流モード読み出しをするだけで、大幅な低被ばく化が期待できる。したがって、現行 CT ユーザーにとってもハードルを下げる提案であり、今後大きな注目を集めるものと確信している。

2.4 陽子線オンラインモニタの開発

医療現場においては、ガンの早期発見のため陽電子断層撮影(PET) が普及している。PET ではガン細胞がブドウ糖を過剰に摂取する性質を利用し、目印となるポジトロン核種を合成した放射性

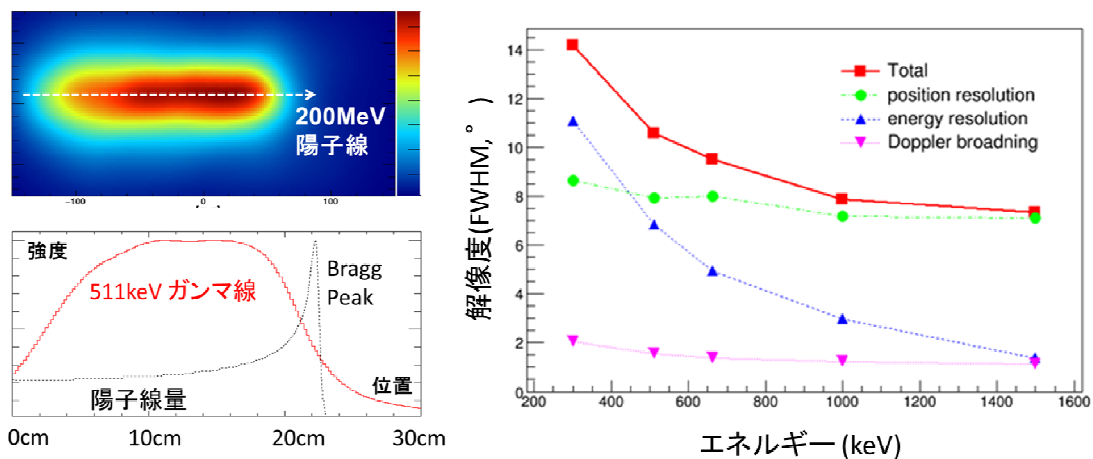


図 4：(左) 200MeV の陽子線を PMMA ファントムに照射後、コンプトンカメラで取得した 511keV のガンマ線分布 (右) 同・カメラで解像度を定める三つの要素。3 次元シンチレータを採用しているが、エネルギー分解能やドップラーブロードニングよりも位置分解能が支配的である。

薬剤(フルオロデキシグルコース: FDG) を患者に投与する。511 キロ電子ボルトの対消滅ガンマ線

を用いることで、数ミリ精度のガン機能画像が得られる。さらに、PET 装置は高精度の照射が不可欠な粒子線治療でも用いられる。粒子線と体内元素が反応して生ずるポジトロン核種を利用して、照射視野を確認するが、装置の構成上、陽子線ビームを当てつつ PET でモニタすることはできない。そこで、当研究室が開発するコンプトンカメラの医療応用として、粒子線治療モニタとしての可能性を調べた。名古屋陽子線治療センターにおいて 200MeV 陽子線治療ビームを PMMA ファントムに照射し、照射中に生ずる 511 キロ電子ボルトガンマ線を約 20cm 離れたコンプトンカメラでモニタした。図 4 左に結果の一例を示す。陽子線の飛程は 25cm であり、ビームに沿ったガンマ線の分布が明確にわかるが、解像度は充分といえない。ブラッグ・ピーク手前でガンマ線が急激に落ち込むのは、ポジトロン核種（たとえば ^{11}C , ^{14}O , ^{15}O ）を生成するためにはエネルギー閾値があり、停止寸前の陽子は核種を生成できないことを意味する。

2.5 高解像度・多色分子イメージング用コンプトンカメラ

2.4 章で見たように、現状のコンプトンカメラの解像度は医療応用に充分とはいえない。これは、おもにガンマ線の反応位置不定性によるものである（図 4 右）。そこで、解像度を大幅に向上すること、また人体等に密着できるような、より小型で軽量の装置開発を目指した。医療用コンプトンカメラとしては、散乱体として $0.5 \times 0.5 \times 3\text{mm}^3/\text{pix}$ の Ce:GAGG のシンチレータアレイ (42×42) を 2 層、吸収体として $2 \times 2 \times 2\text{mm}^3/\text{pix}$ (11×11) 10 層からなる 3 次元シンチレータを採用した。さらに、センサーヘッドと回路基板を分離し、全重量 580g の超軽量コンプトンカメラを構成した。分子イメージングへの応用例として、直径 4.5mm、高さ 10mm のシリンジファントム 3 本を束ね、内部に ^{18}F -FDG (各 0.75MBq) を注入して撮影を試みた（図 5 左）。本実験においては、 30° ピッチで 12 方向から撮影を行い、3 次元的な画像再構成を試みた。図 5 右に示すとおり、各 15mm 離れた三つのシリンジが 3 次元的に識別できている。今後は、より複雑なファントムや、マウスを用いた臨床実験により、3 次元多色イメージングの性能追及を進めて行きたい。

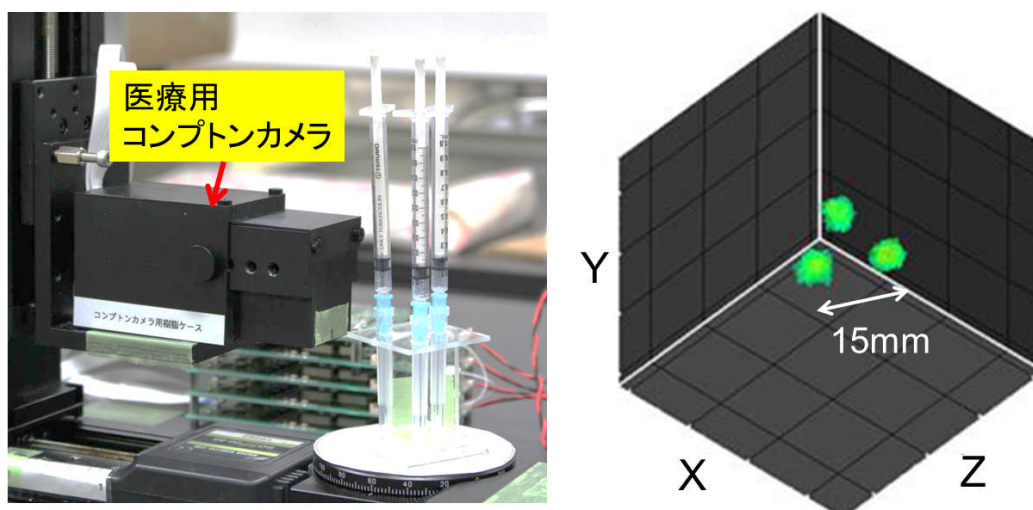


図 5 : (左) 新開発の高解像度コンプトンカメラによる、 ^{18}F -FDG シリンジファントム (3 本 : 各 0.75MBq, 直径 4.5mm ϕ) の撮影の様子。解像度は 662 キロ電子ボルトで 4.5° (FWHM) を達成。
(右) 12 箇所からの撮影により再構成した、同ファントムの 3 次元画像。計測時間は全 15 分。

3. 研究業績

3.1 学術論文（主要な査読付き論文のみ）

- M.Takabe, A.Kishimoto, J.Kataoka, et al., “Performance evaluation of newly developed SrI2(Eu) scintillator”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 出版中, 5 pages (2016)
- T.Taya, J.Kataoka, A.Kishimoto, et al., “First demonstration of real-time gamma imaging by using a handheld Compton camera for particle therapy”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 出版中, 7 pages (2016)
- Y.Iwamoto, J.Kataoka, A.Kishimoto et al., “Novel methods for estimating 3D distributions of radioactive isotopes in materials”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 出版中, 6 pages (2016)
- Y.Sofue and J.Kataoka, “CO-to-H₂ Conversion Factor using X-Ray Shadows by Molecular Clouds”, PASJ Letter, 出版中 (astro-ph/1603.04302), 6pages (2016)
- Y.Sofue, A.Habe, J.Kataoka et al., “Galactic-Center Hyper-Shell Model for the North Polar Spurs”, MNRAS, 出版中 (astro-ph/1603.02786), 13pages (2016)
- M. Chauvin et al., “Observation of polarized hard X-ray emission from the Crab by the PoGOLite Pathfinder”, MNRAS, vol.456, L84-88 (2016)
- A.Kishimoto, J.Kataoka, T.Nishiyama et al., “Demonstration of three-dimensional imaging based on handheld Compton camera”, J. of Inst., vol.10, P11001, 20pages, (2015)
- A. Furnis et al., “First NuSTAR Observations of Mrk 501 within a Radio to TeV Multi-Instrument Campaign”, Astrophysical Journal, vol.812, pp.65-86 (2015)
- T.Oshima, J.Kataoka, A.Kishimoto et al., “Development of a high-precision color gamma-ray image sensor based on TSV-MPPC and diced scintillator arrays”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, vol.803, , pp.8-14 (2015)
- J.Kataoka, M.Tahara, T.Totani et al., “Global Structure of Isothermal Diffuse X-Ray Emission along the Fermi Bubbles”, Astrophysical Journal, vol.807, pp.77-89 (2015)
- Y.Inoue et al., “Metal enrichment in the Fermi bubbles as a probe of their origin”, PASJ, vol.67, pp.568-575 (2016)
- Y.Tanaka et al., “Six Years of Fermi-LAT and Multi-Wavelength Monitoring of the Broad-Line Radio Galaxy 3c 120: Jet Dissipation At Sub-Parsec Scales from the Central Engine”, Astrophysical Journal, vol.799, L18-23 (2015)

ほか共著論文 7 編

3.2 学会発表

- 【国内 oral】 小出絢子, 片岡淳, 岩本康弘ほか, “Evaluation of 1D-profile of wideband prompt gamma-ray emission and optimization toward on-line monitor for the future proton therapy”, 日本医学物理学会, 2016 年春季, パシフィコ横浜
- 【国内 oral】 森田隼人, 大島翼, 片岡淳ほか, “A novel photon counting CT operating at low dose using Multi-pixel photon counter”, 日本医学物理学会, 2016 年春季, パシフィコ横浜
- 【国内 oral】 増田孝充, 片岡淳, 岸本彩ほか, 「高精度陽子線治療に向けた 陽電子放出核種生成断面積の決定」, 応用物理学会, 2016 年春季, 東京工業大学

- 【国内 oral】 岸本彩, 片岡淳, 末岡晃紀ほか, 「分子イメージング応用に向けた 高解像度型コンパクトカメラの開発」, 応用物理学会, 2016 年春季, 東京工業大学
- 【国内 oral】 辻川貴之, 片岡淳, 池田博一, 「MPPC を用いた高精度時間計測法の開発と ToF-PET への応用」, 応用物理学会, 2016 年春季, 東京工業大学
- 【国際 oral】 A.Kishimoto, J.Kataoka. A.Koide et al., “Development of a compact scintillator based high-resolution Compton camera for molecular imaging”, 14th Vienna Conference on Instrumentation, Feb.2016, Wien, Austria
- 【国際 oral】 T.Oshima, J.Kataoka. S.Yamamoto et al., “Development of a high-precision color gamma-ray image sensor based on TSV-MPPC and diced scintillator arrays”, IEEE medical imaging conference, Nov.2015, San Diego, USA
- 【国際 poster】 M.Takabe, J.Kataoka, A.Kishimoto et al., “Performance evaluation of newly developed SrI2(Eu) scintillator”, 10th International Hiroshima Symposium, Sep.2015, Xi'an, China
- 【国際 oral】 T.Taya, J.Kataoka, A.Kishimoto et al., “First demonstration of real-time gamma imaging by using a handheld Compton camera for particle therapy”, 10th International Hiroshima Symposium, Sep.2015, Xi'an, China
- 【国際 oral】 Y.Iwamoto, J.Kataoka, A.Kishimoto et al., “Novel methods for estimating 3D distribution of radioactive isotopes in materials”, 10th International Hiroshima Symposium, Sep.2015, Xi'an, China
- 【国内 oral】 多屋隆紀, 片岡淳, 岸本彩ほか, “Verification of real-time gamma imaging by using a handheld Compton camera for particle therapy”, 日本医学物理学会, 2015 年秋季, 北海道大学
- 【国内 oral】 三村健人, 佐藤悟朗, 片岡淳ほか, 「ASTRO-H 搭載硬 X 線撮像検出器(HXI) エネルギー較正手法と実機検証」 日本物理学会, 2015 年秋季, 大阪市立大学

3.3 広報・アウトリーチ等

- 2016 年 4 月 15 日 早稲田大学ホームページ
「次代の中核研究者、最先端の研究を発表」
<http://www.waseda.jp/top/news/40394>
- 2016 年 2 月 2 日 早稲田大学ホームページ
「X 線天文衛星 ASTRO-H、打上げ迫る 本学の片岡研究室も参加」
<http://www.waseda.jp/top/news/37150>
- Journal - Asia Research News 2015
Environment – “Gamma ray camera may help with Fukushima decontamination”
p.10, researchSEA

4. 研究活動の課題と展望

大変栄誉なことに、本研究室は平成 28 年度から早稲田大学「中核研究者」として採用されている(<http://www.waseda.jp/top/news/40394>)。本学の模範研究者として恥じない成果を挙げ、世界の早稲田を売り出していきたい。衛星データ解析では「すざく」Swift 衛星を用いたフェルミ・バブルの解析の続括とも言える第 3 論文 (Kataoka et al. 2015) および関連論文が 3 本出版され、研究テーマとして一区切りした感がある。今後は銀河中心の高温成分($kT \sim 5keV$)と、これまで解析してき

たフェルミ・バブル($kT \sim 0.3keV$) のミッシング・リンクを解き、我々の銀河系の歴史を紐解くべく「すざく」アーカイブデータを総ざらいする予定である。さらに、米国の硬 X 線衛星 NuSTAR を用いたブレーザー Mrk421, Mrk501 の変動解析や、「あかり」衛星を用いた赤外観測と X 線観測の全天マップ比較など、多波長観測を主軸として今後も意欲的に解析をしていきたい。一方で、本年 2 月に「ひとみ」衛星が打ち上げられ、本学で開発した光センサー APD が全数正しく動作することを確認した。また、初期観測のペルセウス銀河団については、現在第一論文をチームとして Nature 誌に投稿中である。現在、残念ながら衛星は深刻な状況で定常運用がかなわないが、今後は原因の究明調査に協力していきたい。新たな解析テーマとして医学物理に関しては、低被ばくかつ多色 X 線 CT の開発をさらに進め、 4×4 程度の 2 次元 MPPC アレイを用いたより現実的な CT システムを構築していく。平成 28 年度は、さらにコンプトンカメラの小型化、高解像度化を進め、陽子線治療中のリアルタイム・モニタとして十分な解像度を実現するほか、大阪大学医学部と共同で「多色分子イメージング」のプロジェクトを指導する。これまで ^{18}F など FDG に限られてきた分子イメージングを多色かつ 3 次元にすることで、医療分野に大きなインパクトが期待できる。環境計測においては、引き続きドローンを用いた上空からの放射線計測を実施し、平成 28 年度はコンプトンカメラも搭載した広域撮影にトライしたい。そのため、カメラ本体と制御 PC の無線データ通信を確立するほか、データ量を大幅に削減して通信負荷を軽減するなど、さまざまなチャレンジをしていきたい。