

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

本研究では高精度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科学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、画像情報量を格段に向上する。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（理学研究） [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2018年度の主要な成果を報告する。本年度が研究重点教員として2期目最後の年であり、2009年から通じての成果については、「理工総研報告特集号」第15号 ASTE Special Issue on the “History of the Priority Researches” を併せて参照されたい。

2. 主な研究成果

2.1 高エネルギー宇宙物理（解析）

本年度はChandra 衛星およびFermi 衛星の観測データを用いた電波銀河 Centaurus A の詳細解析 (Tanada et al. 2018)、フェルミ・バブルに付随する銀河中心巨大ループ構造 Loop I の観測 (Akita et al. 2018)、PoGO+による白鳥座ブラックホール Cygnus X-1 の観測 (Chauvin et al. 2018)、さらには「ひとみ」衛星搭載機器やCALETを用いた宇宙線の観測で多くの論文成果を出版した。たと

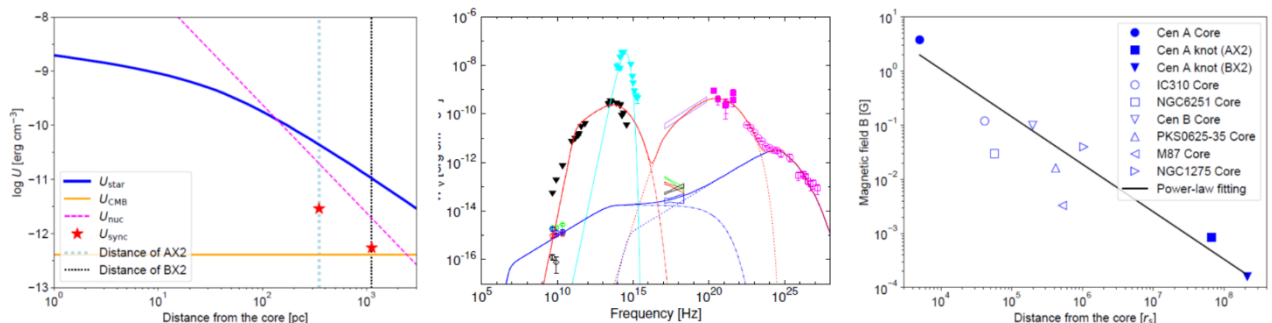


図 1: 電波銀河 Centaurus A における (左)ブラックホールからの距離と逆コンプトン散乱の種光密度の関係 (中) 電波から TeV ガンマ線までの他波長スペクトル (右) 距離をパラメータとした、ジェット内部の磁場の強さの変化の様子 (Tanada et al. 2019, ApJ)

例えば Centaurus A のガンマ線観測では GeV-TeV 領域に顕著なバンプ構造が確認され、その起源は未だ不明である。図 1 に示す通り、論文ではブラックホール近傍からの距離に応じて逆コンプトン散乱で寄与する種光子の密度分布が変化する様子を定量的に調べ、その結果、sub-pc ジェットと kpc-ジェットの重ね合わせとしてバンプが説明できることを解明した。さらに、それぞれのスケール (ブラックホールからの距離 d) でジェット中の磁場の強さ (B) を正確に見積もることに成功し、 $B \propto d^{0.88 \pm 0.14}$ の関係を初めて見出した。これは、電磁流体力学シミュレーションの予言と正確に一致し、観測としては世界初の成果である。Cygnus X-1 の偏光観測は Nature Astronomy に掲載され、ブラックホールに物が吸い込まれる直前での膠着円盤の構造に制限を与えることに成功し、広島大学、東京大学、名古屋大学と共にプレスリリースを行った。

2.2 医療応用 - RI 内用療法での臨床試験

近年、骨転移のある去勢抵抗性前立腺ガンの特効薬としてアルファ線 (α 線) 核種である塩化ラジウム (^{223}Ra) が用いられ、欧米では数百億円の市場規模に拡大しつつある。我が国でも 2016 年に ^{223}Ra 利用が認可されたが、骨転移巣への ^{223}Ra 分布は患者ごとに異なり、また投与量により疼痛の緩和度が異なることも示されている。もし、投与後に ^{223}Ra の体内分布を迅速かつ正確に評価することができれば、患者に合わせた投与量や投与間隔を設定し、テーラーメイド医療に貢献が期待できる。

^{223}Ra はガンマ線放出核種でもあるので、原理的にはその体内分布をガンマカメラで求めることが可能であるが、既存の SPECT (単一光子放射断層撮影) 装置は同一体位で長時間撮影が必要であり、疼痛を有する患者全例に対して行うのは現実的ではない。また、視野は $50 \times 50 \text{ cm}^2$ 程度と限られ、腹部を中心とした狭視野での 2 次元画像となる。本研究ではヒト体内、全身における ^{223}Ra の分布を迅速に可視化すべく、コンプトンカメラを用いた世界初の臨床試験を行った。結果を図 2 に示す。現状ではコンプトンカメラのサイズが SPECT の 1/100 と小さく画質で SPECT に劣るが、わずか 10 分で体の全範囲の薬剤集積を捉えることに成功した。

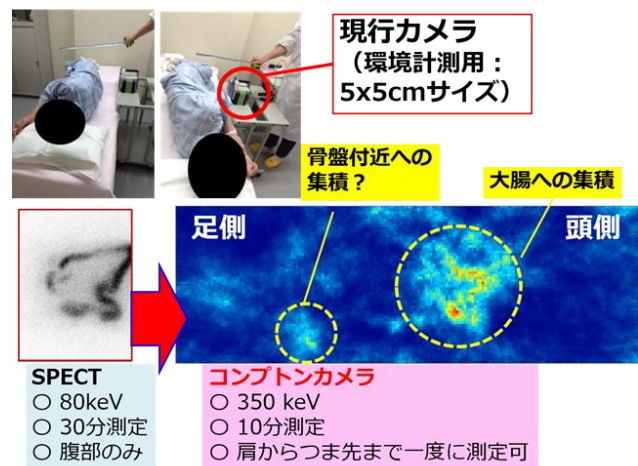


図 2: 現行コンプトンカメラを用いた、阪大病院での臨床実験の結果。わずか 10 分で、ほぼ全身の広視野撮影を実証した (Fujieda et al. 2019, NIM-A)

2.3 医療応用 - 4.4MeV 即発ガンマ線イメージング

昨年に引き続き、陽子線治療中に発生する即発ガンマ線のイメージングに挑戦した。陽子線と体内の原子核で生ずる核ガンマ線の多くは 1-10MeV の領域に集中する。100keV 以下を対象としたレントゲンや CT に比して、これらの核ガンマ線は透過力が強く、その撮影は困難を極める。とくに陽子線の線量分布を反映する ^{12}C からの 4.4MeV ガンマ線は検出器内部で多重散乱やエスケープを起こすため、イメージングが難しい。本年度は、昨年度 PMT ベースで構築した小型ガンマ線カメラを一新し、半導体光センサーMPPC を用いて新たなカメラユニットを製作した。これにより、1-10MeV イメージングのさらなる高感度化・高解像度化を目指した (Mochizuki et al. 2019)。図 3 に開発した新カメラの写真と、得られた即発ガンマ線イメージを示す。解像度は 4.4MeV ガンマ線に対し

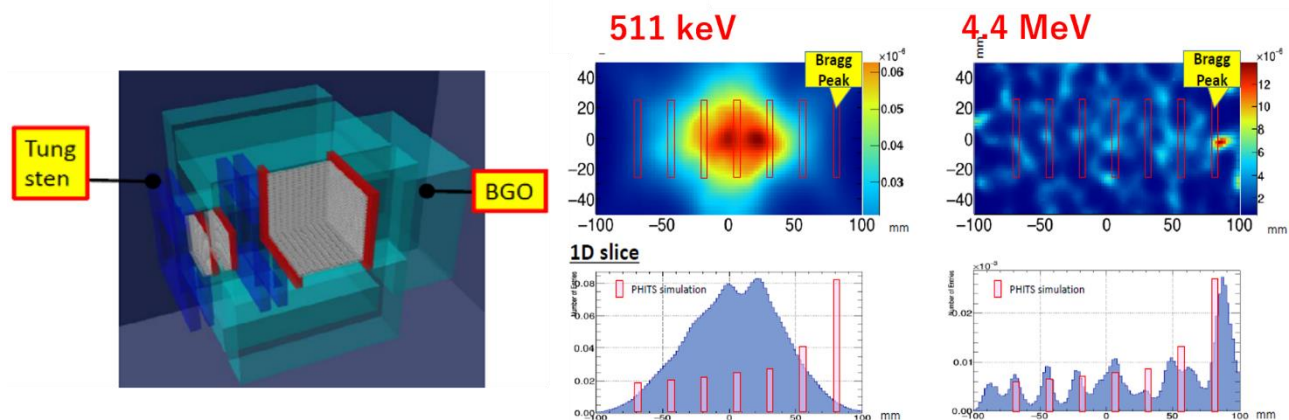


図 3: (左) 新規に開発した高エネルギー用コンプトンカメラの概観 CAD 図面 (中) 同カメラで取得した、511keV ガンマ線画像 (右) 同・4.4MeV ガンマ線画像。4.4MeV ガンマ線の画像は陽子線量分布と正確に一致した (Mochizuki et al. 2019, NIM-A)

約 5° (FWHM) で、旧カメラの約 15° (FWHM) より大幅に改善している。従来 PET でイメージングされていた 511keV は Bragg Peak と全く異なる強度分布を示すが、4.4MeV は場所も強度比も正確に一致することが確かめられた。

2.4 環境応用 - 中性子イメージング

陽子線治療は正常細胞への被ばくを最小限に抑えつつ、主にダメージを与える有効な治療法として注目を集めている。一方で、放射線を絞る過程で用いられる真鍮製コリメータから発生する 2 次的な高速中性子や、体内原始と入射粒子が起こす核反応で生ずるガンマ線の寄与は、現状の治療システムでは正しく評価されていない。本研究では、陽子線照射下で発生する、数 MeV 程度までの高速中性子の線源方向を可視化する手法を開発し、実証した。開発したセンサーは前後 2 層のレイヤーからなり、 n/γ 波形弁別シンチレータ (EJ299-34) と小型 PMT (R9880-210U) を組み合わせた構成とした。中性子が一層目で反跳した陽子のエネルギーと、反跳した中性子のエネルギーを Time-of-Flight で計測することで、到来方向を決定する。装置構成と測定結果を図 4 に示す。真鍮に陽子線 (70MeV) を照射した際に生ずる 2 次中性子を、正しくイメージングできることが確かめられた。

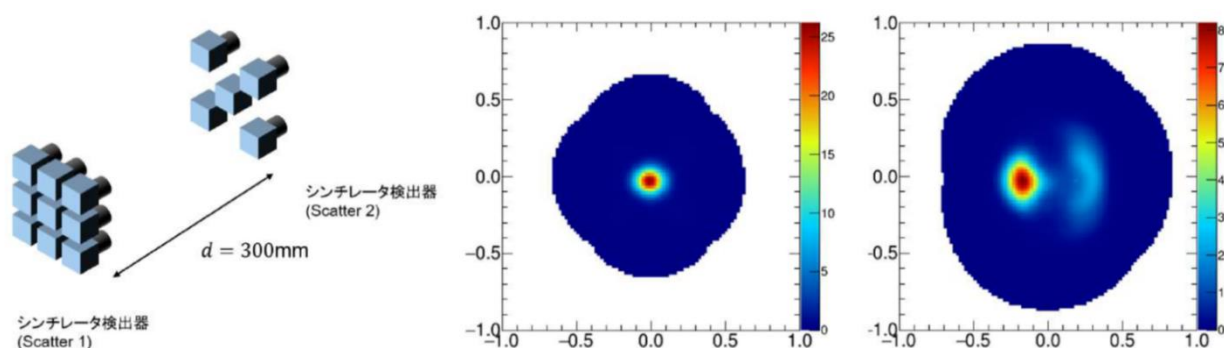


図 4: (左) 開発した中性子カメラの構成 (中) 70MeV 陽子線を真鍮ファントムに照射し、真正面から撮影した場合の画像 (右) 同・ 15° オフセットした位置からの撮影結果 (Tagawa et al. 2019, NIM-A)

3. 共同研究者

有元 誠 (金沢大学・助教) ※ 2019.4 月より客員主任研究員
吉野 将生 (東北大学・助教)

4. 研究業績

4.1 学術論論文

- [1] Tanada,K.; Kataoka,J.; Inoue,Y.; Inverse Compton scattering of starlight in the kiloparsec-scale jet in Centaurus A: The origin of excess TeV γ -ray emission, *Astrophysical Journal*, (2019), submitted
- [2] Fujieda,K.; Kataoka,J.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Sato,S.; Tanaka,R.; Matsunaga,K.; Kamiya,T.; Watabe,T.; Shimosegawa,E.; Prof.; Hatazawa,J. First demonstration of portable Compton camera to visualize ^{223}Ra concentration for radionuclide therapy, *NIM-A*, (2019) submitted
- [3] Maruhashi,T.; Kiji,H.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Terazawa,S.; Shiota,S.; Ikeda,H. Demonstrative imaging of multiple contrast agents for next generation color X-ray CT, *NIM-A*, (2019), submitted
- [4] Mochizuki,S.; Kataoka,J.; Koide,A.; Fujieda,K.; Maruhashi,T.; Kurihara,K.; Sueoka,K.; Tagawa,L.; Yoneyama,M.; Inaniwa,T. High-precision Compton imaging of 4.4 MeV prompt gamma-ray toward an on-line monitor for proton therapy, *NIM-A*, (2019), in press
- [5] Tagawa,L.; Kataoka,J.; Sueoka,K.; Fujieda,K.; Kurihara,T.; Arimoto,M.; Mochizuki,S.; Maruhashi,T.; Toshito,T.; Kimura,M.; Inaniwa,T., Development of novel neutron camera to estimate secondary particle dose for safe proton therapy, *NIM-A*, (2019), in press
- [6] Maruhashi,T.; Morita,H.; Arimoto,M.; Kataoka,J.; Fujieda,K.; Nitta,H.; Ikeda,H.; Kiji,H.; Evaluation of a novel photon-counting CT system using a 16-channel MPPC array for multicolor 3-D imaging, *NIM-A*, (2019) in press
- [7] Yamamoto,S.; Kataoka,J.; Kamada,K.; Yoshikawa,A. An ultrahigh spatial resolution radiation-imaging detector using $0.1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ pixelated GAGG plate combined with 1 mm channel size Si-PM array, *NIM-A*, (2019), vol.919, pp.125-133
- [8] Chauvin,M.; Florén, H.-G.; Jackson,M.; Kamae,T.; Kataoka,J.; Kiss,M.; Mikhalev,V.; Mizuno,T.; Takahashi,H.; Uchida,N.; Pearce,M.; PoGO + polarimetric constraint on the synchrotron jet emission of Cygnus X-1, *MNRAS*, (2019), vol.438, L138-143
- [9] Arimoto,M.; Morita,H.; Fujieda,K.; Maruhashi,T.; Kataoka,J.; Nitta,H.; Ikeda,H. Development of LSI for a new kind of photon-counting computed tomography using multipixel photon counters, *NIM-A*, (2018), vol.912, pp.186-190
- [10] Koide,A.; Kataoka,J.; Taya,T.; Iwamoto,Y.; Sueoka,K.; Mochizuki,S.; Arimoto,M.; Inaniwa,T. Spatially resolved measurement of wideband prompt gamma-ray emission toward on-line monitor for the future proton therapy, *NIM-A*, (2018), vol.912, pp.24-28
- [11] Sueoka,K.; Kataoka,J.; Takabe,M.; Iwamoto,Y.; Arimoto,M.; Yoneyama,M.; Yoda,I.; Torii,T.; Sato,Y.; Kaburagi,M.; Terasaka,Y. Development of a new pinhole camera for

- imaging in high dose-rate Environments, NIM-A, (2018), vol.912, pp.115-118
- [12] Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Taya,T.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Koide,A.; Sueoka,K.; Morita,H.; Maruhashi,T.; Fujieda,K.; Kurihara,T.; Arimoto,M.; Okochi,H.; Katsumi,N.; Kinno,S.; Matsunaga,K.; Ikeda,H.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; Ohsuka,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Yamaguchi,M.; Kurita,K.; Kawachi,N. Ultracompact Compton camera for innovative gamma-ray imaging, NIM-A, (2018), vol.912, pp.1-5
- [13] Koide,A.; Kataoka,J.; Masuda,T.; Mochizuki,S.; Taya,T.; Sueoka,K.; Tagawa,L.; Fujieda, K.; Maruhashi,T.; Kurihara, T.; Inaniwa,T. Precision imaging of 4.4 MeV gamma rays using a 3-D position sensitive Compton camera, Nature Scientific Reports, vol.8, No.8116
- [14] Akita,M.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Sofue,Y.; Totani,T.; Inoue,Y.; Nakashima,S. Diffuse X-ray emission from the northern arc of loop I observed with Suzaku, Astrophysical Journal, (2018), vol. 862, article number 88
- [15] Nakashima,S.; Inoue,Y.; Yamasaki,N.; Sofue,Y.; Kataoka,J.; Sakai,K. Spatial Distribution of the Milky Way Hot Gaseous Halo Constrained by Suzaku X-Ray Observations, Astrophysical Journal, (2018), vol. 862, article number 34
- [16] Tanada,K.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Akita,M.; Chuengu,C.C.; Diegel,S.W.; Fukazawa,Y. The Origins of the Gamma-Ray Flux Variations of NGC 1275 Based on Eight Years of Fermi-LAT Observations, Astrophysical Journal, (2018), vol. 860, article number 74
- [17] Yamamoto,S.; Kataoka,J.; Fukuchi,T.; Kamada,K.; Yoshikawa,A. Development of ultrahigh resolution radiation imaging detector using 1 mm channel size Si-PM array combined with 0.2 mm $\times$ 0.2 mm pixelated GAGG plate, Jinst, (2018), vol.13, P05028
- [18] Odaka, H., Asai,M.; Hagino,K. et al. Modeling of proton-induced radioactivation background in hard X-ray telescopes: Geant4-based simulation and its demonstration by Hitomi's measurement in a low Earth orbit, NIM-A, (2018), vol.891, pp.92-105
- [19] Nakazawa,K.; Sato,G.; Kokubun,M.; Hard x-ray imager onboard Hitomi (ASTRO-H) , JATIS, (2018), vol.4, 21410
- [20] Hagino,K.; Nakazawa,K.; Sato,G.; In-orbit performance and calibration of the Hard X-ray Imager onboard Hitomi (ASTRO-H), JATIS, (2018), vol.4, 21409
- [21] Hitomi collaboration; Design and Performance of Soft Gamma-ray Detector onboard the Hitomi (Astro-H) satellite, JATIS, (2018), vol.4, 21411
- [22] Hitomi collaboration; Hitomi (Astro-H) X-ray astronomy satellite, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments and Systems, (2018), vol.4, 21402
- [23] Hitomi collaboration; Hitomi X-ray observation of the pulsar wind nebula G21.5-0.9, PASJ, (2018), vol.70, article number 027
- [24] CALET collaboration; Characteristics and Performance of the CALorimetric Electron Telescope (CALET) Calorimeter for Gamma-Ray Observations, Astrophysical Journal Supplementary Series, (2018), vol. 238, article number 5
- [25] CALET collaboration; Search for GeV Gamma-Ray Counterparts of Gravitational Wave Events by CALET, Astrophysical Journal, (2018), vol. 863, article number 160
- [26] Chauvin,M.; Florén,H.-G.; Friis,M.; Jackson,M; Kamae,T.; Kataoka,J.; Kawano,T.;

Kiss,M.; Mikhalev,V.; Mizuno,T.; Ohashi,.; Stana,T.; Tajima,H.; Takahashi,H.;, Uchida,N.; Pearce,M. Accretion geometry of the black-hole binary Cygnus X-1 from X-ray polarimetry, Nature Astronomy, (2018), vol.2, issue 8, pp.652-655

[27] CALET collaboration; On-orbit operations and offline data processing of CALET onboard the ISS, Astroparticle Physics, (2018), vol.100, pp.29-37

[28] CALET collaboration; Extended Measurement of the Cosmic-Ray Electron and Positron Spectrum from 11 GeV to 4.8 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station, Physical Review Letters, (2018), vol.120, issue 26, No.261102

4.2 総説・著書

[1] 著書：朝倉書店：「宇宙物理学ハンドブック」 2019 年度出版予定

4.4 章の執筆を担当

[2] Invited Review: Kataoka,J.; Sofue,Y.; Inoue,Y.; Akita,M.; Nakashima,S.; Totani,T. “X-ray and Gamma-Ray Observations of the Fermi Bubbles and NPS/Loop I Structures”, Galaxies, (2018), vol.6, pp.27-46

4.3 招待講演

[1] 片岡 淳

アイソトープ協会・放射線基礎セミナー：2018 年 7 月 6 日@東大工学部

「核医学や高精度陽子線治療にむけたイメージング装置の開発」

4.4 受賞・表彰

[1] 第 8 回測定器開発優秀修士論文賞 (KEK 測定器開発室)

「MPPC を用いた低被曝かつ三次元カラー X 線 CT システムの開発」

(早稲田大学片岡研究室：森田隼人)

<http://rd.kek.jp/ronbun/award2018.html>

4.5 国際学会発表

[1] Fujieda,K. et al. First demonstration of portable Compton camera to visualize ²²³Ra concentration for radionuclide therapy, VCI 2019, Feb 18-22,2019, Wien, Austria [Poster]

[2] Maruhashi,T.et al. Demonstrative imaging of multiple contrast agents for next generation color X-ray CT, VCI 2019, Feb 18-22,2019, Wien, Austria [Oral]

[3] Fujieda,K. et al. First demonstration of portable Compton camera to visualize ²²³Ra concentration for radionuclide therapy, PD18, Nov 27-29,2018, Tokyo, Japan [Oral]

[4] Maruhashi, T. et al. Evaluation of a novel photon-counting CT system using 16-ch MPPC array for multicolor 3D imaging, PD18, Nov 27-29,2018, Tokyo, Japan [Oral]

[5] Kurithara,T. et al. First precision spectroscopy of cesium-137 from the ground to 150m above in Fukushima, PD18, Nov 27-29,2018, Tokyo, Japan [Oral]

[6] Mochizuki,S. et al. High-precision Compton imaging of 4.4MeV prompt gamma-ray toward on-line monitor for proton therapy, IEEE MIC/NSS, Nov.10-17, 2018, Sydney, Australia [Oral]

- [7] Tagawa,L. et al. Development of novel neutron camera to estimate secondary particle dose for safe proton therapy, IEEE MIC/NSS, Nov.10-17, 2018, Sydney, Australia [Poster]
- [8] Kataoka,J. et al. Precision imaging of 4.4MeV gamma rays using 3-D position sensitive Compton camera, SORMA XVII, June.12-15, 2018, Michigan, USA [Oral]
- [9] Maruhashi,T. et al. Evaluation of a novel photon-counting CT system using 16-ch MPPC array for multicolor 3D imaging, 14th PISA meeting, May 27-June 2, Elva, Italy [Oral]
- [10] Tagawa, L. et al. Development of new compact neutron camera for safe proton therapy, 14th PISA meeting, May 27-June 2, Elva, Italy [Poster]
- [11] Mochizuki,S. et al. Development of high-resolution Compton camera for prompt gamma-ray imaging during proton therapy, 14th PISA meeting, May 27-June 2, Elva, Italy [Poster]

4.6 国内学会発表

- [1] 木地 浩章、丸橋 拓也、片岡 淳、有元 誠、寺澤 慎祐、塩田 諭、池田 博一
「次世代カラーX線CTに向けた複数造影剤イメージングの実証」
第66回応用物理学会 東京工業大学 2019年3月9日~12日
- [2] 藤枝 和也、片岡 淳、望月 早駆、田川 怜央、佐藤 将吾、田中 稜、松永 恵子、神谷 貴史、渡部 直史、下瀬川 恵久、畑澤 順、大須賀 慎二
「RI内用療法に向けたコンプトンカメラによる²²³Raイメージングの実証」
第66回応用物理学会 東京工業大学 2019年3月9日~12日
- [3] 田中 稜、片岡 淳、望月 早駆、田川 怜央、藤枝 和也、佐藤 将吾、吉野 将生、鎌田 圭、吉川 彰
「RI内用療法に向けた大面積コンプトンカメラの最適化検証」
第66回応用物理学会 東京工業大学 2019年3月9日~12日
- [4] 吉野 将生、金 敬鎮、鎌田 圭、横田 有為、黒澤 俊介、山路 晃広、大橋 雄二、佐藤 浩樹、藤枝 和也、田中 稜、片岡 淳、吉川 彰
「CeBr₃を用いた高エネルギー分解能1mmピクセルアレイの開発」
第66回応用物理学会 東京工業大学 2019年3月9日~12日
- [5] 栗原 拓也、片岡 淳、棚田 和玖、望月 早駆、田川 怜央、丸橋 拓也、細越 裕希、大河内 博、後藤 友里絵
「福島県浪江におけるガンマ線スペクトルの高度変化測定」
第66回応用物理学会 東京工業大学 2019年3月9日~12日
- [6] 細越 裕希、片岡 淳、望月 早駆、米山 昌樹、棚田 和玖、藤枝 和也、伊藤 颯一郎、木地 浩章、西 郁也、宮本 修治
「MeVガンマ線コンプトンカメラの最適化および性能評価[7]」
第66回応用物理学会 東京工業大学 2019年3月9日~12日
- [7] 米山 昌樹、片岡 淳、望月 早駆、伊藤 颯一郎、木地 浩章、西 郁也、細越 裕希、宮本 修治
「チェレンコフ光検出型MeVガンマ線偏光計の提案と実証」
第66回応用物理学会 東京工業大学 2019年3月9日~12日

4.7 プレスリリース

[1] 2018 年 7 月 26 日

銀河中心「巨大ガンマ線バブル」の謎に迫る；1000 万年前の大爆発を X 線で検証

早大・東大理・理研・金沢大

<https://www.waseda.jp/top/news/60439>

[2] 2018 年 5 月 26 日

世界初！4.4 MeV ガンマ線 の高精度イメージングに成功 ― 先端医療と宇宙をつなぐ、新しい 架け橋へ

早大・量研機構

<https://www.waseda.jp/top/news/59259>

4.8 メディア掲載

[1] 2018 年 8 月 9 日

天の川銀河「巨大ガンマ線バブル」の謎に迫る

Academist journal

<https://academist-cf.com/journal/?p=8135>

[2] 2018 年 7 月 26 日

銀河中心「巨大ガンマ線バブル」の謎を解明－1000 万年前の大爆発を X 線で検証

日本経済新聞

<https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP>

[3] 2018 年 6 月 6 日

ガンマ線検出のカメラ～陽子線治療など応用

日経産業新聞

https://twitter.com/nikkei_bizdaily

[4] 2018 年 6 月 1 日

4.4MeV のガンマ線可視化

科学新聞

<https://sci-news.co.jp/>

5. 研究活動の課題と展望

宇宙から医療まで、対象が広大なため試行錯誤しながらの研究開発で苦労は多かったが、重点教員(2 期 10 年)の成果としては十分な成功を収めたと自負している。今後は研究をさらに加速し、10 キロ電子ボルト(keV)から 10 メガ電子(MeV)ボルトの 3 桁にわたるエネルギー帯で 3D 動的カラー放射線イメージング技術を実現する。とくに、MeV 以上のエネルギーは励起核から生ずる核ガンマ線の主要なチャンネルであるが、宇宙・医療ともに応用研究が全く進んでいない。宇宙科学においては小型衛星を利用した MeV ガンマ線天文学の開拓を目指す。医療においては核ガンマ線が粒子線治療の高度化の鍵を握り、また近年では α 線内用療法やホウ素陽子線捕獲療法などへの展開も期待されている。環境においては雷放電で発生する核ガンマ線のイメージング探査にも新しい切り口が期待できる。今後の研究においては、本研究で実現できなかった「機械学習を用いた医療画像処理」にも着手し、学術研究を新しい潮流へと導きたい。