

高精度 3D カラー放射線イメージング

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、元素固有のライン X 線・ガンマ線を抽出し、薬剤の体内伝達から宇宙における元素合成や伝播の理解まで、放射線イメージングの融合と横断的刷新をはかる。個々の元素がもつ X 線吸収特性を用いた多色 CT イメージングにより、現行 CT の約 1/100 の低線量で抗がん剤の伝達および治療の可視化を実現する。さらに原子核から放出されるガンマ線を陽子線や核医学治療のプロブとして利用し、体内核反応や薬剤動態を可視化する。同時に、ライン X 線・ガンマ線を用いた宇宙プラズマの放射機構の解明や小型衛星搭載用ガンマ線カメラの開発、雷のガンマ線観測なども実施し、身近な大気現象と宇宙・人体の高エネルギー現象の統合的な理解をはかる

2. 主な研究成果

2.1 多色 CT イメージング装置の開発

現行 CT では X 線パルスごとの信号が微弱であり、膨大な線量照射と時間積分で画像はコントラスト（白黒）のみとなる。本研究では約 100 万倍の増幅機能を持つ光センサーと高速シンチレータを開発し、パルス毎に「色付け」可能なスペクトラル CT (Spectral Photon Counting CT; 以下 SPCCT) を開発した。2020 年度は、とくに抗がん剤の一種である金ナノ粒子やシスプラチンの低濃度撮影 (~1mg/ml) に成功し、造影剤であるヨードやガドリニウムとの同時撮影に成功した (図 1)。

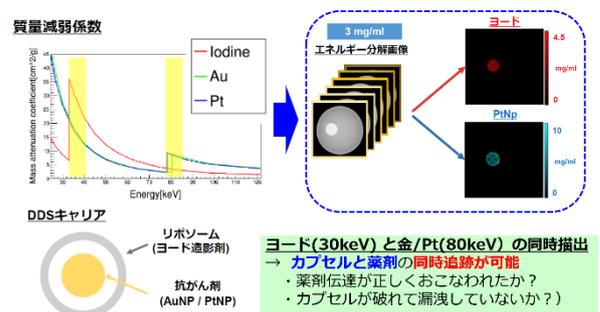


図 1: 多色 CT を用いたプラチナ・ナノ粒子 (PtNP) および造影剤ヨードの同時イメージング

2.2 核医学治療薬の動態イメージング

微弱な放射性元素を用いた核医学治療は 1940 年代から行われ、特に近年ではアルファ線放出核種 ^{223}Ra (塩化ラジウム) や ^{211}At (アスタチン) を用い、特定の疾患のみに集中的ダメージを与える治療が注目されている。本研究では、アルファ線と同時に放出される X 線・ガンマ線をプロブとし、マウス体内の薬剤分布 3D 可視化に成功した (図 2)。なお、本研究

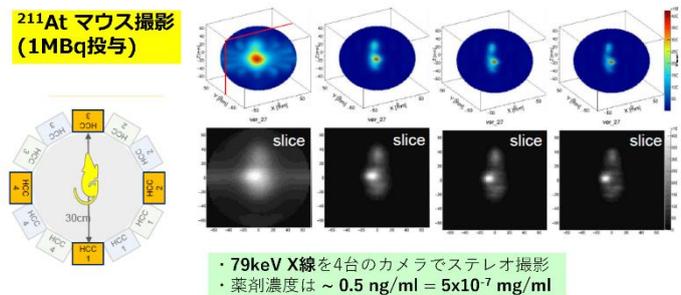


図 2: ハイブリッド・コンプトンカメラを用いたマウス体内の ^{211}At 分布イメージング

で開発した「ハイブリッド・コンプトンカメラ」は数十 keV から数 MeV の広帯域 X 線・ガンマ線を撮像する世界初の装置であり、8 月に本学と大阪大学で共同リリースを行った。

2.3 次世代陽子線治療への挑戦

陽子ホウ素捕獲療法 (pBCT) ではホウ素と陽子線の核反応で生ずるアルファ線で線量集中性を高めることが期待されるが、未だ実験的な検証が乏しい。2020 年度は実測によるアルファ線生成量の測定および、ホウ素薬剤を付与したヒト膵癌細胞株 (Mia PACA-2) への陽子線照射を実施した。今後は様々な照射条件および細胞を用いて実験物理 (核反応)・生化学 (細胞致死率測定) の両面から効果の検証を行う。

2.4 雷ガンマ線の高精度観測

雷にともない数十 MeV までのガンマ線が発生し、大気中の窒素と光核反応を起こす新たな現象が報告されている。雷雲中での電子加速や核反応については解明されておらず、宇宙物理の身近な実験室として注目される。本研究では昨年度より新潟県で冬季観測を開始し、既に 10 例程度の事象を検出した。図 3 に一例を示す。継続時間が 10 ミリ秒と早い稀有な「ショートバースト」で気象学的にも未知かつ大変興味深い現象をとらえた。

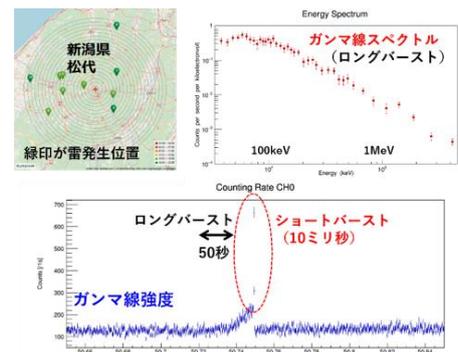


図 3: 雷から発生するガンマ線イベントの例 (松代セミナーハウスで観測)

2.5 X 線で探る、天の川銀河中心の過去の活動性

当研究室では、約 10 年前から銀河系内の大規模 X 線構造の系統解析を進めている。その結果、銀河中心から噴出するガンマ線バブルと X 線で見られる巨大ループ構造が、ともに 1000 万年前に起きた大爆発の痕跡である証拠を突き止めた。本年度はドイツとロシアの X 線天文衛星 eROSITA の詳細観測によりこの提案が裏付けられる論文が Nature 誌に発表された。同論文のレフェリーをした関係で、Nature 誌に解説記事を依頼寄稿したほか、世界的に有名な web サイエンス誌 Quanta Magazine にもインタビュー記事が掲載された (図 4)。

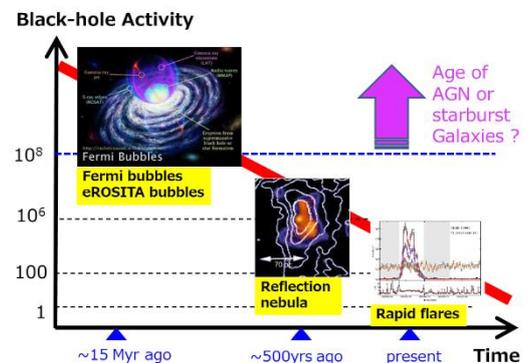


図 4: 天の川銀河中心で起きた爆発と、活動性の歴史

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

4. 研究業績

4.1 学術論論文

[1] Kataoka, J.; Yamamoto, S.; Nakamura, Y.; Ito, S.; Sofue, Y.; Inoue, Y.; Nakamori, T.; Totani, T.; Origin of Galactic Spurs: New Insight from Radio/X-ray All-sky Maps, *Astrophysical Journal*, (2021), vol.908, 14, DOI: 10.3847/1538-4357/abdb31

- [2] Kataoka,J.; Activity Bubbling up. *Nature Astronomy*, (2021), vol.5, p.11, DOI: 10.1038/s41550-020-01269-w
- [3] Omata,A.; Kataoka,J.; Fujieda,K.; Sato,S.; Kuriyama,E.; Kato,H.; Toyoshima,A.; Teramoto,T.; Ooe,K.; Liu,Y.; Matsunaga,K.; Kamiya,T.; Watabe,T.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; Performance demonstration of a hybrid Compton camera with an active pinhole for wide-band X-ray and gamma-ray imaging, *Nature Scientific Reports*, (2020), vol.10, article 14064, DOI: 10.1038/s41598-020-71019-5
- [4] Kiji,H.; Maruhashi,T.; Toyoda,T.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Sato,D.; Yoshiura,K.; Kobayashi,S.; Kawashima,H.; Terazawa, S.; Shiota, S.; Ikeda,H.; 64-channel photon-counting computed tomography using a new MPPC-CT system, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, (2020), vol.984, article 164610, DOI: 10.1016/j.nima.2020.164610
- [5] Kurihara,T.; Tanada,K.; Kataoka,J.; Hosokoshi,H.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Okochi,H.; Gotoh,Y.; Precision spectroscopy of cesium-137 from the ground to 150 m above in Fukushima, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, (2020), vol.978, article 164414, DOI:10.1016/j.nima.2020.164414
- [6] Sato,S.; Kataoka,J.; Kotoku,J.; Taki,M.; Oyama,A.; Tagawa,L.; Fujieda,K.; Nishi,F.; Toyoda,T.; High-statistics image generation from sparse radiation images by four types of machine-learning models, *Journal of Instrumentation*, (2020), vol.15, article P10026, DOI: 10.1088/1748-0221/15/10/P10026
- [7] Sato,S.; Kataoka,J.; Kotoku,J.; Taki,M.; Oyama,A.; Tagawa,L.; Fujieda,K.; Nishi,F.; Toyoda,T.; First application of the super-resolution imaging technique using a Compton camera, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, (2020), vol.969, article 164034, DOI: 10.1016/j.nima.2020.164034
- [8] Fujieda,K.; Kataoka,J.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Sato,S.; Tanaka,R.; Matsunaga,K.; Kamiya,T.; Watabe,T.; Kato,H.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; First demonstration of portable Compton camera to visualize 223-Ra concentration for radionuclide therapy, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, (2020), vol.958, article 162802, DOI: 10.1016/j.nima.2019.162802
- [9] Maruhashi,T.; Kiji,H.; Toyoda,T.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Kobayashi,S.; Kawashima,H.; Terazawa,S.; Shiota, S.; Ikeda,H.; Demonstration of multiple contrast agent imaging for the next generation color X-ray CT, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, (2020), vol.958, article 162801, DOI: 10.1016/j.nima.2019.162801
- [10] Fukuchi,T.; Yamamoto,S.; Kataoka,J.; Kamada,K.; Yoshikawa,A.; Watanabe,Y.; Enomoto,S.; Beta-ray imaging system with γ -ray coincidence for multiple-tracer imaging, *Medical Physics*, (2020), vol.47, p.587, DOI: 10.1002/mp.13947

4.2 受賞・表彰

- [1] 第 81 回応用物理学会秋季年会・放射線分科会優秀講演賞
「陽子線治療オンラインモニタに向けた二次中性子ドシメトリーカメラの開発」
(田中稜・先進理工学研究科・片岡研究室・修士 2 年)
- [2] 第 81 回応用物理学会秋季年会・放射線分科会優秀講演賞

「アクティブピンホールを用いた広帯域ガンマ線カメラの性能実証」
(小俣陽久・先進理工学研究科・片岡研究室・修士1年)

4.3 国際学会発表

- [1] Omata, A. et al. Wide-band imaging using a hybrid X-ray and gamma-ray camera, IEEE MIC/NSS, Oct.13-17, 2020, online [Oral]
- [2] Hosobuchi, M. et al. Experimental verification of alpha particle production between protons and boron for PBCT practical application, IEEE MIC/NSS, Oct.13-17, 2020, online [Oral]
- [3] Toyoda, T. et al. Demonstration of simultaneous imaging of phantoms as anticancer agents using a novel photon counting CT for drug delivery systems, IEEE MIC/NSS, Oct.13-17, 2020, online [Poster]
- [4] Kuriyama, E. et al. Observations of three gamma-ray bursts during thunderstorms with high-time resolution, IEEE MIC/NSS, Oct.13-17, 2020, online [Oral]
- [5] Tanaka, R. et al. Development of a neutron camera to visualize direction and dose of secondary neutrons in real-time for proton therapy, IEEE MIC/NSS, Oct.13-17, 2020, online [Oral]

※ 2020年6月にフランスで開催予定であった New Development in Photon Detection (2020) へも5件の登壇予定があったが、COVID-19の影響で開催延期

4.4 国内学会発表

- [1] 細淵 真那、片岡 淳、西 郁也、田中 稜、上田 真史、平山 亮一、小橋川 共夢
「pBCT 実用化に向けた α 線生成核反応の実験的検証」
第68回応用物理学会春季年会 オンライン開催 2021年3月16日-19日
- [2] 小俣 陽久、片岡 淳、増淵 美穂、加藤 弘樹、豊嶋 厚史、寺本 高啓、大江 一弘、劉 雨薇、松永 恵子、神谷 貴史、渡部 直史、下瀬川 恵久、畑澤 順
「ハイブリッド・コンプトンカメラを用いた核医学治療に向けた3次元イメージングの実証」
第68回応用物理学会春季年会 オンライン開催 2021年3月16日-19日
- [3] 佐藤 大地、有元 誠、吉浦 宏大龍、水野 睦也、川嶋 広貴、小林 聡、片岡 淳、木地 浩章、豊田 貴也、Dima Sonia、池田 博一、寺澤 慎祐、塩田 諭
「次世代フォトンカウンティングCTによる多系統イメージングの性能評価」
第68回応用物理学会春季年会 オンライン開催 2021年3月16日-19日
- [4] Sonia Djara Dima, Hiroaki Kiji, Takaya Toyoda, Jun Kataoka, Makoto Arimoto, Daichi Sato, Kotaro Yoshiura, Hiroki Kawashima, Satoshi Kobayashi, Shinsuke Terazawa, Satoshi Shiota, Hirokazu Ikeda
“ Demonstration of low-concentration nanoparticle imaging for integrated treatment-diagnostic spectral CT”
第68回応用物理学会春季年会 オンライン開催 2021年3月16日-19日
- [5] 田中 稜、片岡 淳、佐藤 将吾、西 郁也
「陽子線治療オンラインモニタに向けた二次中性子ドシメトリーカメラの開発」
第81回応用物理学会秋季年会 オンライン開催 2020年9月8日-11日

[6] 西 郁也、片岡 淳、田中 稜、細淵 真那、細越 裕希、稲庭 拓

「応答行列を用いた陽子核反応の精密測定」

第 81 回応用物理学会秋季年会 オンライン開催 2020 年 9 月 8 日-11 日

[7] 小俣 陽久、片岡 淳、増渕 美穂、加藤 弘樹、豊嶋 厚史、寺本 高啓、大江 一弘、劉 雨薇、松永 恵子、神谷 貴史、渡部 直史、下瀬川 恵久、畑澤 順

「アクティブピンホールを用いた広帯域ガンマ線カメラの性能実証」

第 81 回応用物理学会秋季年会 オンライン開催 2020 年 9 月 8 日-11 日

[8] 栗山映里、片岡淳、藤枝和也、小俣陽久、豊田貴也、榎戸輝揚、和田有希

「新潟県山間部における雷ガンマ線観測システムの開発と初期成果」

2020 年物理学会秋季年会 オンライン開催 2020 年 9 月 14 日-17 日

4.5 プレスリリース

[1] 2020 年 8 月 27 日

「X 線からガンマ線まで 1 台で同時に可視化できる装置を考案: 医療分野の新たな診断や宇宙観測にまで応用可能」

早大・大阪大学

<https://www.waseda.jp/top/news/69935>

4.6 メディア掲載

[1] 2021 年 1 月 6 日

"Galaxy-Size Bubbles Discovered Towering Over the Milky Way"

<https://www.quantamagazine.org/space-telescope-shows-galaxy-size-bubbles-over-the-milky-way-20210106/>

Quanta Magazine

[2] 2020 年 12 月 10 日

“Activity Bubbling Up”

https://www.nature.com/articles/s41550-020-01269-w?fbclid=IwAR3E7WrLIz_SuTuvPJT92QJh5zAUhOi5HlsR5X2_YybrCoCtOlkPsKtzHUY

Nature/ Nature Astronomy

[3] 2020 年 10 月 2 日

「X 線からガンマ線まで同時に可視化」早大・阪大が共同 — 小型のハイブリッド・コンプトンカメラ開発

科学新聞

[4] 2020 年 8 月 27 日

「早大と阪大、数十キロ電子ボルト～数メガ電子ボルトの X 線ガンマ線を同時に可視化できるコンパクトなカメラを開発」

日経新聞・速報

5. 研究活動の課題と展望

2020 年度は 科研費・基盤研究 (A) のほか、JST・ERATO 特定領域調査の新たなサポートを受け、研究が順調に進行した。2021 年度はそれぞれのプロジェクトをさらに高度化し、より臨床に近いシ

ステムの開発と、宇宙・医療横断型の新しい分野開拓を目指す。