

宇宙総合学研究ユニット

NEWS 2022年6月号



宇宙倫理学教育プログラム（SEEP）の様子をご紹介します！

2022年4月から開講された京都大学宇宙総合学研究ユニットによる「宇宙倫理学教育プログラム」(SEEP)は、13名の受講生（京大文学部生5名、同大学院生5名、一般受講生3名）を得て、順調に講義およびゼミによる研究活動が進んでおります。講義（宇宙倫理学入門：毎週月曜4限）は主に宇宙総合学研究ユニットの清水雄也特定助教が担当し、宇宙開発に関わる技術的な問題や、それに付随する倫理的な問題点について、学生たちと意見を交えながら授業が行われております（図1参照）。この講義では、宇宙開発に関わる全般的な問題点（宇宙資源の分配、スペースデブリ、テラフォーミングなど）を扱うことで、受講生は宇宙倫理学の基礎的知識の獲得し、自身が関心をもつ分野の位置付けを学ぶことを目標としています。

月曜5限のゼミ活動（宇宙倫理学ゼミ）では、各受講生の関心分野における宇宙倫理問題について研究をおこなっています。毎週、複数の受講生が、調べたこと、考えたことをスライドを使って発表し、それを元に全体でディスカッションを行っています。テーマは「宇宙エレベータ」「宇宙条約と南極条約」「宇宙ニュースとメディアの在り方」など多岐に渡り、毎回じつに活発な意見交換がなされています。



図1（左、右）：「宇宙倫理学入門」講義風景。この講義は京都大学文学部提供の正規の講義として開講され、「宇宙倫理学プログラム」受講生に限らず、京大の他学部・研究科の学生も参加しています。

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	開催方法
7月14日 (木)(予定) 開始時間は決まり 次第 HP に掲載い たします	第5回宇宙学セミナー 講師：三木 健司 氏 (京都大学 総合生存学館 特定助教) 題名：決まり次第 HP に掲載いたします	Zoom によるオンライン開催です。準備 ができ次第、HP に掲載いたします。

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.ussp.kyoto-u.ac.jp/seminar/>) で公開いたします。

放射線計測とその医学・宇宙応用

上ノ町 水紀

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

先月（2022年5月）、宇宙総合学研究ユニットの特定助教に着任しました上ノ町水紀と申します。実は私の専門は宇宙物理学や天文学に関わる研究ではありません。本稿では、自己紹介として、私の専門である放射線計測技術及び核医学イメージング研究とその宇宙への応用について簡単にご紹介させていただきます。

放射線計測技術

放射線とは高いエネルギーを持って飛ぶ電磁波及び粒子線のことを指しますが、一般的には物質を通過する際に原子から電子を弾き飛ばす（電離する）電離放射線のことを指します。X線やガンマ線は電磁波に分類される放射線で、粒子線に分類される放射線としてはアルファ線、ベータ線、電子線、中性子線などがあります。地球には大気圏外から絶えず宇宙線が降り注ぎ、また大地に含まれる放射性物質から放射線が放出されているので、私たちは日常的に放射線を受けています。放射線は目には見えませんが、放射線を可視化したり検出したりすることができます。

ではどのようにして放射線を検出するのでしょうか。放射線を検出するには放射線と物質との相互作用を利用します。具体的には、気体との電離作用を利用したガス検出器、固体との電離作用を利用した半導体検出器、物質との励起作用を利用したシンチレータ検出器が一般的に開発・利用されています。ガス検出器では電離により生成される電子イオン対、半導体検出器では電離により生成される電子-正孔対を電気信号として変換し、放射線の量（エネルギー）を検出します。シンチレータ検出器で

は励起された原子が基底状態に戻る際に放出する光を光センサを介して電気信号に変換します。放射線計測技術は実験核物理や素粒子実験、X線・ガンマ線天文学、原子力分野、医学分野などの幅広い分野で利用されています。検出器や物質の種類により、大きさ、効率、エネルギーや時間分解能、製作コスト等が異なるので、それぞれの目的に応じた検出器が利用されています。

核医学イメージング

では次に、放射線の医学応用の一つである核医学に関する研究について簡単にご紹介します。核医学とは、放射性医薬品を用いて病気の診断や治療を行う医学の分野の一つです。

核医学検査では、透過力の高い X 線やガンマ線を放出する放射性核種を化合物に標識した放射性医薬品を体の中に注入します。そして、体外から X 線やガンマ線を検出して医薬品の体内分布を可視化することで、体の機能や代謝情報が取得でき、病気の診断が行われます（図 1 左図）。例えば、PET(Positron Emission Tomography)検査では、 ^{18}F -FDG(^{18}F -fluodeoxyglucose)という医薬品を使った検査が多く行われています。 ^{18}F -FDG はグルコースとよく似た構造をしており、糖代謝を反映します。悪性度の高いがん細胞ほど多くのブドウ糖を取り込むので、 ^{18}F -FDG はがんにも集積します。核医学イメージングでは、レントゲンや CT のような形態情報ではなく機能や代謝情報を反映するので、レントゲンや CT では発見しにくい小さながんも ^{18}F -FDG の PET 検査では発見しやすく、がんの早期発見に貢献しています。

一方で治療（内用療法とも呼ばれる）では、透過力が低く、エネルギー付与の大きいアルファ線やベータ線を放出する放射性医薬品を体内に投与します。これらの医薬品は特定の病変に集積するように設計されており、アルファ線やベータ線を用いて体内から治療することができます（図 1 右図）。これらの放射線は体外から検出することはできませんが、アルファ線やベータ線のほかに X 線やガンマ線も放出する核種もあり、その場合は体内分布を可視化することが可能です。

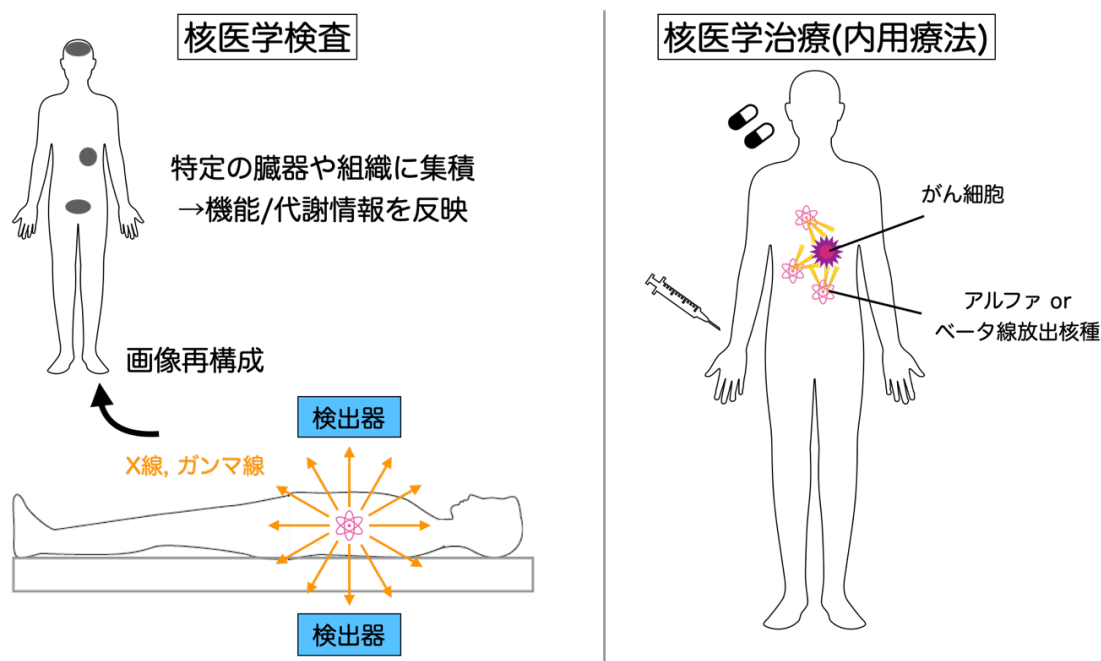


図 1. 核医学検査(左)と核医学治療(右)

X線やガンマ線を検出し、医薬品の体内分布を可視化（イメージング）するには、検出した放射線がどこから来たのか、その場所を推定することが必要です。現在、臨床で用いられている技術としては、PETとSPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)があり、それぞれ放射線の飛来方向の推定手法が異なります。PETは陽電子が近くの電子と対消滅をする際に放出される511 keV（キロ電子ボルト）の2本の消滅ガンマ線を同時計測します（図2左図）。この消滅ガンマ線は対向方向に放出されるので、同時計測により放出位置は計測地点を結んだ直線上に推定できます。つまりPETでは陽電子放出核種のみ可視化されます。一方でSPECTは、鉛やタングステン等の重い金属に穴を開けたコリメータを検出器の前に配置することで物理的に放射線の飛来方向を制限します（図2右図）。SPECTではコリメータを透過しないエネルギー（一般的には400 keV以下）のX線・ガンマ線を放出する核種（単一光子放出核種）が利用できます。しかし、コリメータを用いるため感度と空間分解能はトレードオフの関係にあり、臨床機器ではPETの方がSPECTよりも感度・空間分解能・定量性に優れています。

従来の核医学イメージング手法

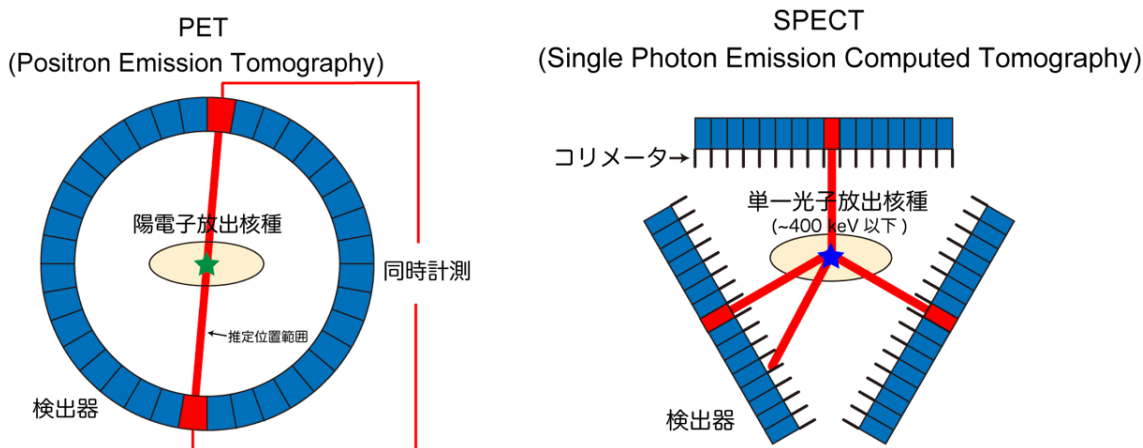


図 2. 核医学イメージングの原理（左）PET、（右）SPECT

このように、臨床で用いられているイメージング技術では、原理の違いにより利用できる放射性核種（放射性医薬品）が異なります。また、そのためにPET/SPECT核種の同時撮像が難しいという課題があります。多核種同時イメージングは、撮像タイミングの違いによる生理機能の違いを排除し、同一座標上に複数の医薬品の可視化画像を取得することができるため、診断精度の向上や検査回数の低減などが期待されます。

このような背景のもと、私たちは新しい多核種同時イメージングシステムや新ガンマ線イメージング手法の開発検証を行っています。まず、一つがPET/SPECT同時撮像手法としてコンプトンPETハイブリッドカメラを提案・開発しました（図3左図）[1]。本手法ではPET核種は従来のPETイメージング、SPECT核種はコンプトンイメージングで可視化し、PET/SPECT核種の同時撮像を実現します。コンプトンイメージングとは放射線と物質の相互作用の一つであるコンプトン散乱原理を利用したイメージング手法です[2]。一般的には散乱体と呼ばれる検出器でコンプトン散乱、吸収体でその散乱光子を同

時計測します。それぞれのエネルギーから散乱角度 θ が算出され、さらに検出位置から放射線の放出位置を角度 θ の円錐面上（コンプトンコーン）に制限することができます。原理的にコンプトン散乱を検出できれば良いので、SPECTのようなコリメータが不要かつ、原理的には数百 keV ~ 数 MeV（メガ電子ボルト）程度のエネルギーのガンマ線の可視化が可能です。コリメータを用いないためコンプトンカメラを対向方向に配置することで PET イメージングも同時施行することができます。コンプトンイメージングでも PET 核種のイメージングは可能ですが、PET イメージングの方が感度・空間分解能・定量性に優れているので PET 画像も出せることは画像を評価する際に大きなメリットがあります。私たちは高分解能 Gd₃(Ga,Al)₅O₁₂(Ce) (GAGG)シンチレータ検出器を用いたシステムを開発し、実際に 18F-FDG(PET 核種)と 111In 抗体 (SPECT 核種) の体内分布を PET およびコンプトンイメージング両原理による同時撮像に世界で初めて成功しました [3]。

また、新ガンマ線イメージング手法として二光子同時計測法によるイメージング手法の検証も行なっています。PET では対向方向に放出される消滅ガンマ線を同時計測して位置推定を行っていました。一方、放射性核種の中には 2 本以上のガンマ線を短い間隔で連続的に放出する核種（カスケード核種）があります。例えば SPECT 核種である 111In は 171 keV と 245 keV のガンマ線を連続放出します。このことを利用すれば、各ガンマ線の飛来方向が推定でき、かつ、放出角度が対向方向以外であれば、同時計数を取ることで各飛来方向の交点に核種の位置を特定できます。この二光子同時計測法をコンプトンイメージング（図 3 真ん中）[4]、および物理的コリメータを用いたイメージング（図 3 右図）[5]に適用させ、実機により位置特定が可能であること、また、非同時計数の場合よりバックグラウンドが大幅に低減できることを実証しました。更に、二光子同時計測イメージングの発展技術として、2 本のカスケードガンマ線の角度相関が局所の電磁場により変化することを利用した位置特定と局所情報の同時取得技術の開発研究も行っています [6]。実際に 111InCl₃ 溶液を用いて、pH や標識前後で角度相関が変化すること、また、コリメータを用いて位置の特定だけでなく、角度相関変化から pH の違い（酸性側 or アルカリ性側）を抽出できることを実証することに成功しました。本技術は従来集積情報しか得られなかった核医学イメージングにおいて、初の全身分子間相互作用イメージングの実現が期待できます。

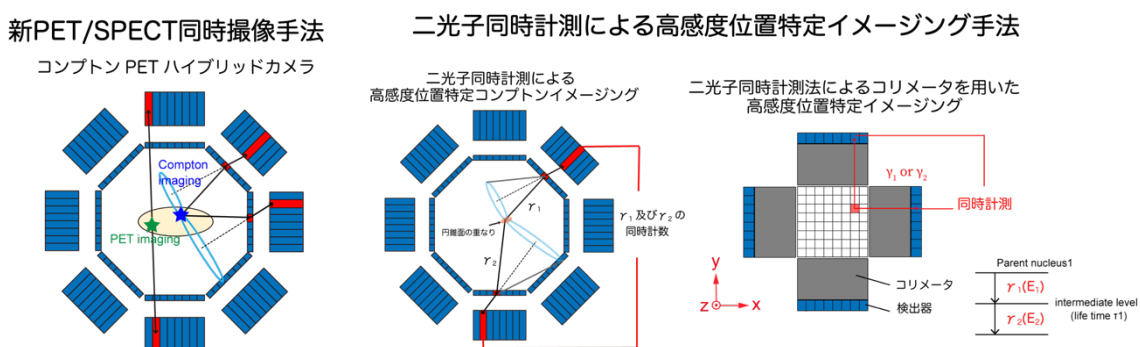


図 3. 筆者のこれまでの研究。(左)PET/SPECT 核種同時撮像を目的としたコンプトン PET ハイブリッドカメラの原理。(真ん中)二光子同時計測法による高感度位置特定コンプトンイメージングの原理。(右) 二光子同時計測法によるコリメータを用いた高感度位置特定イメージングの原理。

今後の研究とまとめ

本稿では私の専門である放射線計測技術と核医学イメージング研究について簡単にご紹介させていただきました。核医学イメージング研究自体は宇宙のことと直接的な関係はありませんが、ガンマ線イメージング技術や放射線計測という基礎技術は宇宙観測にも用いられている共通の技術です。各分野によって重要な性能は異なりますが、基礎技術の分野横断は可能です。私は宇宙ユニットにおいて、宇宙X線観測用に研究開発されている SOI (Silicon on Insulator)技術を用いたピクセルシリコン検出器 (XRPIX)の開発を中心に研究を行っていく予定です。さらに、その基礎技術を核医学イメージングのシステム開発にも応用していきたいです。

参考文献

- [1] K. Shimazoe et al., "Development of simultaneous PET and Compton imaging using GAGG-SiPM based pixel detectors", NIMA, 954, (2020) 161499
- [2] R. W. Todd et al., "A proposed γ camera", Nature, 251, (1974) 132-134
- [3] M. Uenomachi et al., "Simultaneous in vivo imaging with PET and SPECT tracers using a Compton-PET hybrid camera", Sci. Rep., 11, (2021) 17933
- [4] M. Uenomachi et al., "Double photon emission coincidence imaging with GAGG-SiPM Compton camera", NIMA, 954, (2020) 16182
- [5] M. Uenomachi et al., "Simultaneous multi-nuclide imaging via double-photon coincidence method with parallel hole collimators", Sci. Rep., 11, (2021) 13330
- [6] K. Shimazoe et al., "Imaging and sensing of pH and chemical state with nuclear-spin-correlated cascade gamma rays via radioactive tracer", Commun. Phys., 5, (2022) 24

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆様のご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<https://www.ussp.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 507 号室

編集人：高口和也（宇宙ユニット RA）

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: ussp@kwasan.kyoto-u.ac.jp