

電子ビーム制御研究部門（極端紫外光研究施設）

平 義隆（准教授）（2020 年 4 月 1 日着任）

YANG, Yuxuan（特別共同利用研究員）

ZHOU, Weixin（特別共同利用研究員）

石原 麻由美（事務支援員）

加茂 恭子（事務支援員）

横田 光代（事務支援員）

A-1) 専門領域：ガンマ線計測，陽電子計測，光渦計測

A-2) 研究課題：

- a) 超短パルスガンマ線の発生と利用研究
- b) 軸対称偏光レーザーを用いたガンマ線の発生と計測技術開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 世界の放射光施設でも UVSOR の独自技術である 6.6MeV 超短パルスガンマ線を用いた陽電子消滅分光法によるバルク材料の原子スケール欠陥分析に関する研究である。超短パルスガンマ線は、フェムト秒レーザーと 750MeV 電子ビームの 90 度衝突逆トムソン散乱によって発生し、そのパルス幅はサブピコ秒からピコ秒オーダーである。この超短パルス性とバックグラウンドの低さを活かしたガンマ線の利用研究として、陽電子消滅分光法による材料中の欠陥分析をユーザーに提供している。陽電子は、対生成と呼ばれる現象によって材料内部でガンマ線から発生し、材料中の欠陥に捕獲される。欠陥の大きさによって陽電子の寿命が変化するために、陽電子寿命を測定することで材料中の欠陥を非破壊で分析することができる。さらに、ガンマ線は物質に対する透過率が高いために厚さ数 cm のバルク材料の欠陥分析を行うことが可能である。陽電子寿命測定法のユーザー利用が現在行われており、放射性同位元素から発生する陽電子を直接試料に照射する従来の方法では実施困難な金属材料の応力負荷及び水素脆化時の欠陥形成のその場測定手法の開発を進めている。応力負荷時の測定については論文の執筆を開始している。また、応力負荷後の緩和過程における欠陥挙動に関するユーザー執筆の論文が *J. Phys.: Conf. Ser.* に掲載された。電子線照射による単原子空孔の導入や水素導入の有無によって緩和過程における欠陥形成が大きく異なる事が分かった。さらに、ガンマ線誘起陽電子寿命測定法の最新の状況についてまとめた論文が *J. Phys.: Conf. Ser.* に掲載された。ガンマ線誘起陽電子寿命測定法では、厚さ数 cm のバルク試料の測定が可能であるが、現在の測定手法では試料の平均的な情報のみを測定可能であった。近年、がん検査に使われる Time of flight positron emission tomography (TOF-PET) の時間分解能が向上しており、この検出器を利用することでバルク試料内部の欠陥分布をイメージングできる可能性がある。現在、測定システム設計のため、シミュレーションコードを用いた計算や機器の選定を行っている。来年度に原理実証実験を行う事を目指している。
- b) 本研究課題では、特殊な偏光状態であるラジアル偏光やアジマス偏光の軸対称偏光レーザーを用いた逆トムソン散乱によって発生するガンマ線の偏光分布を明らかにする。直線偏光及び円偏光レーザーを用いると、直線偏光及び円偏光のガンマ線が発生する事は既に実験的に確かめられているが、軸対称偏光レーザーを使用した場合にどのよ

うな偏光状態のガンマ線が発生するのは理論的にも実験的にも確認されていない。新しい偏光特性をもつガンマ線を発生出来れば、新たな利用開拓に繋がる可能性がある。軸対称偏光レーザーは、Altechna 社の S-waveplate を用いて直線偏光のレーザーから変換する。

ガンマ線の空間偏光分布を測定するため、偏光計の設計および構築を行った。ガンマ線が直線偏光の場合、ターゲットで散乱されるコンプトン散乱ガンマ線の断面積が方位角方向に変化するため、ガンマ線の偏光軸に対して 90 度方向に散乱されるガンマ線の割合が高くなる。そのため、ガンマ線検出器を方位角方向に複数配置し、散乱ガンマ線の方位角分布を測定する事でガンマ線の偏光軸を測定できる。さらに、コリメータを 2 次元スキャンして同様の測定を行う事で、ガンマ線の空間偏光分布を測定できる。

直線偏光および円偏光ガンマ線の空間偏光分布を測定し、理論計算との比較を行った。直線偏光ガンマ線は、理論計算が示すようにガンマ線ビーム断面の位置によってガンマ線の偏光軸が変化することを測定することができた。一方で、円偏光ガンマ線は、ビーム断面の位置によって偏光が変化し、直径 10 mm に広がっている外側の領域では直線偏光に変化することを実証できた。次に、軸対称偏光レーザーを用いて発生するガンマ線の空間偏光分布を測定した。この方法で発生するガンマ線は、中心軸付近がランダム偏光であり、外側の領域は方位角偏光になることが分かった。この結果は、直線偏光ガンマ線のインコヒーレントな重ね合わせによって理論的に理解できる結果であった。開発した偏光計を用いて、これまで実験的に不明であったガンマ線の偏光特性を明らかにすることができた。偏光計を用いたガンマ線の偏光測定についてまとめた論文が *Phys. Rev. Research* に掲載された。

ガンマ線天文学の分野において、エネルギー MeV 領域はその測定の難しさから感度の高い測定がこれまで行われてこなかった。現在そのエネルギー領域をターゲットにした検出器開発が世界で進められている。UVSOR のガンマ線は最大エネルギーが 6.6 MeV であり、また、コリメータの位置を変えることで 3 MeV までエネルギーを変えられる。さらに、宇宙ガンマ線の偏光検出もガンマ線発生個所の磁場分布の測定にとって重要である。上述したように偏光特性を詳細に測定した UVSOR ガンマ線が、このようなガンマ線天文学の需要に合うと考え、該当するコミュニティに宣伝することで新規ユーザー 2 組が UVSOR ガンマ線を使い始めた。

ガンマ線のエネルギー測定には、高純度ゲルマニウム検出器を使用している。MeV ガンマ線は物質に対する透過力が高いために、厚さ 10 cm 程度のゲルマニウム検出器の内部構造によって測定されるエネルギースペクトルが変わり得る。そのため、内部構造がスペクトルに与える影響を理解する事がガンマ線源のエネルギー特性評価にとって重要である。ゲルマニウム結晶内部に入り込んでいる冷却用ロッドの構造が異なる 2 つの検出器を用いて同一ガンマ線のエネルギースペクトル測定を行い、内部構造によってスペクトルが変化することを実験的に示し、シミュレーションとの比較を行った。この結果は、ユーザーが論文にまとめ *Radiat. Phys. Chem.* に掲載された。

B-1) 学術論文

M. OMER, T. SHIZUMA, M. KOIZUMI, Y. TAIRA, H. ZEN, H. OHGAKI and R. HAJIMA, “Effect of Coaxial HPGe Detector Structure on γ -Ray Beam Measurements,” *Radiat. Phys. Chem.* **240**, 113467 (2025). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2025.113467

Y. TAIRA, Y. YANG, T. SHIZUMA and M. OMER, “Generation and Measurement of Gamma Rays with Axially Symmetric Polarization States via Compton Scattering,” *Phys. Rev. Res.* **7**, 033130 (2025). DOI: 10.1103/pn68-rjd2

F. HORI, S. ARAKI, Q. XU and Y. TAIRA, “In-Situ Measurement of Stress Relaxation Process in Hydrogenated Bulk Fe by Gamma-Ray Induced Positron Annihilation Spectroscopy,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **3149(1)**, 012018 (2025). DOI: 10.1088/1742-6596/3149/1/012018

Y. TAIRA, Y. OKANO and T. HIRADE, “Gamma-Ray-Induced Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy at UVSOR,” *J. Phys.: Conf. Ser.* **3029(1)**, 012022 (2025). DOI: 10.1088/1742-6596/3029/1/012022

B-4) 招待講演

Y. TAIRA, “Development of gamma-ray-induced positron annihilation spectroscopy at UVSOR synchrotron facility,” 20th International Conference on Positron Annihilation (ICPA20), Takamatsu (Japan), June 2025.

B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

ビーム物理研究会 若手の会 幹事 (2020–).

学会誌編集委員

日本陽電子科学会会報編集委員 (2024–2025).

B-8) 大学等での講義, 客員

理化学研究所, 客員研究員, 2018年9月–.

C) 研究活動の課題と展望

陽電子消滅分光法に関しては, 陽電子寿命測定法と寿命運動量相関測定法に加えて, 同時計数ドップラー拡がり法やスピン偏極陽電子の発生と計測技術開発を行い, 分析技術の拡充を図る。さらに, PET 検出器を用いた欠陥分布のイメージング測定手法の開発にも取り組む。計算上はパルス幅数ピコ秒のガンマ線が発生していると考えられるが, 超短パルスガンマ線のパルス幅計測手法の開発も行う。