

京都大学	博士 (理学)	氏名	古村 翔太郎
論文題目	“Imaging Polarimeter for a Sub-MeV Gamma-Ray All-sky Survey Using an Electron-tracking Compton Camera”		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>広視野ガンマ線偏光天体観測における重大な誤差要因について考察し、それらを抑制可能な信頼性の高い観測手法をシミュレーションと実験の両面から検証した。この論文は 8 章から構成されている。</p> <p>1. Introduction: X 線ガンマ線偏光天体観測の意義および観測手法の導入を行い、全天探査に有効な観測手法が存在しないことを指摘した。</p> <p>2. Polarization in MeV Gamma-Ray Astronomy: 硬 X 線 MeV ガンマ線帯域における偏光観測の意義と現状を天体現象毎にレビューした。定常天体は Crab Nebula と Cygnus X-1 の 2 例、突発天体は明るいガンマ線バースト (GRB) 数例のみで偏光が検出されているが、いずれも誤差が大きく理論予測との比較議論が十分に行えていない。</p> <p>3. Compton Gamma-ray Polarimetry: コンプトンガンマ線偏光計は、ガンマ線散乱方向 (θ, ϕ) のうち ϕ 角強度分布を測定することで偏光状態を決定する。感度指標 MDP は検出器の性能指標モジュレーションファクター (MF) と信号の統計量により決定される。ただし広視野観測においては、検出器の幾何異方性、off-axis 入射効果、雑音混入により MF および MDP は系統・統計的に劣化する。これらの低減または補正には、θ 角測定および優れた Point Spread Function (PSF) を持つ撮像能力が不可欠である。</p> <p>4. Astronomical Compton Polarimeters: 定常天体観測では X 線集光鏡を用いた狭視野偏光計が用いられ、統計量向上により 10 mCrab 以下の天体に対しても高感度が期待される。GRB 広視野偏光計は大面積化により信号の統計量向上を目指す一方、θ 角測定ができず撮像能力も持たないため、系統・統計的な劣化が生じる。広視野かつ θ 角測定可能な検出器としてコンプトンカメラが存在するが、光子の到来方向を一意決定できないために、PSF が広いことが問題となる。</p> <p>5. Electron-Tracking Compton Camera: 光子到来方向を一意に決定可能な Electron-Tracking Compton Camera (ETCC) は、数度程度の優れた PSF を実現するための唯一の方法である。Tanimori et al. (2015, 2017) に則り、気球観測用 ETCC の検出器構成と性能についてまとめ、撮像に基づく雑音低減の実証実験を報告した。</p> <p>6. Simulation Studies of Polarization Measurement: モンテカルロシミュレーションにより ETCC の MF を調べた。入射エネルギー 150 keV 付近で約 0.68 と優れた MF を持つため、ETCC は GRB の偏光観測に適する。また 60° off-axis で MF は 8% の減少に留まるため、広い視野で MDP の劣化は抑制される。これは θ 角測定により off-axis 入射効果を補正できるためであり、従来の GRB 偏光計での報告 (40% 減少) より極めて小さい。</p> <p>7. Experiment on a Polarized X-ray Beam: SPring-8 の偏光 X 線ビームラインを用いて、多量の雑音を含む現実に則した環境下で実験を行なった。ETCC は 30° off-axis で入射する 154 keV の X 線に対して、約 0.65 と高い MF を示した。これは on-axis で入射する 134 keV の X 線に対して得られた実験値約 0.58 より劣化していない。本実験は世界で初めての off-axis 入射効果補正の実証実験である。</p> <p>8. Discussion and Conclusion: ETCC は統計・系統的誤差を抑制した信頼性の高い広視野偏光観測を実現する為の、唯一の現実的提案である。衛星搭載用 ETCC の開発とそれによる 5 年間の観測が実現すると、10 mCrab 天体に対して MDP は約 7% と将来の X 線狭視野偏光計の感度に到達する。また、GRB 観測については 6×10^{-6} erg/cm² の明るさに対して MDP は約 10% となり将来の GRB 偏光観測ミッションと同等以上の感度および観測数が期待できる。ETCC により、定常突発を問わずガンマ線偏光天文学を一気に開拓することが可能となる。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

今年夏に中性子星連星の合体から重力波が検出、同時に X 線、ガンマ線での天体同定も実施され、中性子星合体が今まで観測されていた Short Gamma-Ray Burst (SGRB) であることが判明するという大発見があった。中性子星合体は理論的に可能だが実際に観測されるにはまだかなりの年月が必要と考えられていたが、このように短時間に実現した。今後はその爆発メカニズム解明が課題となる。解明の鍵となるのが X 線、ガンマ線の偏光観測である。偏光は磁場や放射機構の幾何学的情報という他の観測からは直接得られない重要な情報を与えてくれる。しかしその観測は困難であり、今まで統計精度の悪いデータが数例あるに留まり、高精度の偏光観測が緊急に求められている。

申請者の属する SMILE グループは MeV ガンマ線天体観測を推進するため電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) を開発し気球観測を実施している。ETCC は従来型観測装置である古典的コンプトンカメラ (CC) では測定不可能であった反跳電子の運動量ベクトルを決定することで 1 光子毎に MeV ガンマ線の到来方向を決定する真のイメージング法が可能な観測装置である。このように ETCC は入射ガンマ線のコンプトン散乱の全物理量を測定しているため、最良の偏光測定装置でもある。特にイメージングによる対象天体の画像化、信号の低雑音化が初めて可能なガンマ線偏光装置となる。申請者はこの ETCC を用いて世界で初めてイメージングガンマ線偏光測定装置の能力をシミュレーションおよび Spring 8 の 180keV ガンマ線偏光ビームを用いた実験を行い、定量的に検証した。特に GRB 観測で重要な、広視野観測の“Off-Axis 問題”、つまり対象の GRB は装置の観測中心方向 (ON-Axis) 以外で大半が発生するが、従来装置では測定が容易な観測中心での装置の能力だけが議論されているのが実情あり、中心方向以外 (off-Axis) では大きな系統誤差が予想されながら定量的議論が成さなかった。申請者は ETCC のイメージング能力を利用し、解析の過程で装置の中心方向を対象天体の方向に補正する手法を開発、この効果を完全に取り除くことをシミュレーション、実験両面で実証した。さらに従来手法の系統誤差の見積もりも可能にした。またイメージングによる雑音除去の必要性も実証した。このように従来観測装置ではイメージングが不可能なため曖昧であった系統誤差を明らかにし、イメージング法がガンマ線の高精度な変更観測では不可欠なことを示した。これは今後の偏光観測を一新する重要な発見である。申請者はシミュレーションおよび解析手法を独自に開発、理論的考察も行うことで高い定量性を示し大変説得力のある博士論文となった。また内容はすでに *Astrophysical Journal* 誌に掲載され、世界から注目されている。

以上より本論文は博士 (理学) の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成 29 年 11 月 15 日論文内容および関連した事項についての試問を行った。その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： _____ 年 _____ 月 _____ 日以降