

京都大学	博士（理学）	氏名	澤野 達哉
論文題目	“Simulation Study on an Electron-Tracking Compton Camera for Deep Gamma-ray Burst Search”		
（論文内容の要旨） 遠方宇宙を探索する光源や重力波天体の電磁波対応天体として、ガンマ線バーストを最高感度で観測・撮像する手法を実験とシミュレーション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。 1. Introduction: MeV ガンマ線天体観測の意義と観測の問題について導入を行った。 2. MeV gamma-ray astronomy: MeV ガンマ線天文学に固有の天体現象として、超新星や銀河面からの核ガンマ線、ガンマ線バースト、宇宙背景放射について、歴史的観測や最新の観測をレビューした。特に、重力波に同期した短時間ガンマ線バーストの観測期待数は、従来の観測データから見積もると年間 0.02 例程度と稀事象である。 3. Sub-MeV/MeV gamma-ray observation: MeV ガンマ線が放射される物理過程をまとめ、物質との相互作用から基本的な MeV ガンマ線検出方法であるコリメータ法、コーデッドマスク法、コンプトンカメラ法による観測手法と問題点についてまとめた。 4. Challenges to sub-MeV/MeV region: 初めて MeV ガンマ線で全天探査した CGRO 衛星の COMPTEL 検出器は、MeV ガンマ線帯域特有の膨大な雑音事象や観測方法の問題を提起した一方で、現在も最も MeV 帯域で高感度の結果を得ている。COMPTEL 以降のコンプトンカメラは想定した性能を出し切れなかったものが多いが、この問題の根本的な改善には集光性能である Point Spread Function (PSF) を光学原理から適切に定義して感度を計算することが肝要である。到来方向を表す 2 角を 1 光子毎に測定できる電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) は PSF を改善するための唯一の方法である。 5. SMILE-II Mission: 将来的に ETCC を衛星搭載し COMPTEL の 100 倍の感度で全天観測するための技術実証気球実験 SMILE-II は、気球高度での ETCC の撮像性能を実証することが目的である。この目的を満たすための観測装置の条件を吟味し、要求を満たすフライトモデルを製作した。地上での校正実験で得られた有効面積や角度分解可能についてまとめ、要求をほぼ満足する性能を引き出すことに成功した。 6. Detector Simulation: ETCC の要である電子飛跡の測定データを再現するモンテカルロシミュレータを開発した。これを用いて SMILE-II フライトモデルの性能の定量的評価を試みた結果、検出効率の実験値を十分な精度で再現した。検出効率が解析による事象弁別効率よりも、装置の物理過程により強く制限されることを明らかにし、今後の高感度化へ向けた検出器の改良点を提言した。 7. Future observations: 前章により、実験をよく再現するシミュレータが構築できたため、将来観測の予測が可能である。SMILE-II 実験で期待される観測結果を数値計算し、明るい天体を 5σ 以上で確実に撮像するために PSF を 10 度まで改良することが有効であることを示した。さらに、衛星搭載 ETCC では、赤方偏移が 10 を超えるような最遠方の GRB も年間 1.2-2 例の観測・撮像が期待できること、さらに従来よりも 1 桁よい感度により数年の衛星ミッション期間内に 1 例の重力波に同期した短時間ガンマ線バーストの初期放射を観測できる可能性を示した。 8. Conclusion: ETCC は MeV 帯域特有の膨大な雑音事象を除去する手法をもち、かつ光学原理に基づいた PSF の定義をもって従来の 1 桁良い GRB 観測・撮像を実現する唯一の手法である。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

MeVガンマ線天文学は1991年打ち上げのCGRO衛星搭載のCOMPTEL検出器が全天探査を初めて実現して以降、現在も次期観測計画がない高エネルギー天文学最後のフロンティアである。特に、この帯域で最もエネルギー放射効率が高いガンマ線バースト(GRB)は、超新星よりも2桁以上も明るいため初期宇宙の電離状態や金属量をプローブする光源として期待されている。さらに継続時間が短いGRBが中性子星連星もしくはブラックホール中性子星連星の合体・衝突により生じる相対論的ジェットを正面から見ているとする理論モデルは、重力波と電磁波の同時観測により決定的な検証が可能であり、2015年から夜明けを迎えた重力波天文学の発展と短時間GRBのガンマ線観測による天体の同定は今後の極めて重要な課題である。一方、申請者が共著として発表した論文では、従来の感度で実現できる重力波源としての短時間GRBの発生頻度は稀であり、MeVガンマ線帯域においてBATSEと同等以上の高感度を持ちながらSwift/BATと同等程度の視野と位置決定精度をもつ観測環境の確立がGRBのサイエンス創出に急務である。

申請者の属するSMILEグループは世界をリードするMeVガンマ線観測手法である電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)により古典的コンプトンカメラ(CC)で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し真のイメージング法によりCOMPTELの100倍の感度での全天探査実現を目指すものである。LXeGRITやCOSIなど、過去CCで実施された気球実験では予想したS/N比を実現できなかったが、申請者はこの点に着目しMeV帯域において初めて集光性能を光学原理に基づき定義することで、従来の観測計画では誤った集光性能に基づいて感度を議論していたことを指摘、集光性能の改善にはETCCによる反跳電子の運動量ベクトルの測定が本質的であることを定量的に示した。

さらに申請者はETCC衛星搭載への前段階としての撮像実証実験SMILE-II計画において、検出器の概念設計、詳細設計を主体的に行い、さらに開発した検出器の雑音事象弁別性能をシミュレーションにより定量的に評価した。特に、申請者が独自に開発した電子飛跡データを再現する検出器シミュレータにより、初めて検出器の有効面積を30%以内で定量的にモデル化することに成功し、有効面積の改善に本質的な要素を指摘した。さらに、集光性能を改善するために電子飛跡データの解析方法を改善・検証していくモデルのひな型として将来の発展が期待される。

申請者は自身が構築した検出器シミュレータを衛星搭載モデルに適用し、将来のGRB観測の可能性を検証した。特に赤方偏移が10を超え、宇宙初代星探査に不可欠な最遠方GRBが5年間で5例以上の観測可能性を示し、他の観測計画にない画期的な感度をもつこと、さらに従来のBATSE検出器より1桁良い感度を実現することで近傍の短時間GRBも10倍の検出数が見込まれ、衛星の観測期間内に重力波に同期した短時間GRBを1例観測できる可能性を示した。

このようにこの論文はMeVガンマ線天体観測手法をハード・ソフトの両面で大きく発展させ、さらにMeVガンマ線の集光性能を光学原理から定義する新たな概念を導入することで従来実現できなかった広視野と高感度を両立できることを原理的に示し、最新の理論と照らし合わせて画期的なGRB観測が実現できることを明らかにした。

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1月13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