

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	寺内 健太
論文題目	Constraints on Gamma-Ray Burst Jet Angular Structure from GeV-TeV Gamma-Ray Afterglows (GeV-TeV ガンマ線残光によるガンマ線バーストジェットの角度構造の制限)		
(論文内容の要旨)			
ガンマ線バースト (GRB) に伴うジェットを始めとする相対論的ジェットは天体物理学に広く存在するが、ジェットの形成と伝播は依然として広範な意義を持つ未解決問題である。本論文では、GRBの相対論的ジェットにおける形成・伝播の物理を解明するため、多くのGRBで観測される一方物理的メカニズムが未解明なshallow decay段階に着目し、GeV-TeVガンマ線の観測からジェットの初期バルクローレンツ因子と角度プロファイルの研究を行った。 TeVガンマ線帯域におけるGRBの観測は多く行われてきたが、ガンマ線が地球大気中で生成する電磁シャワーからの淡いチェレンコフ光の観測を、明るい月光下で実施するのは難しく、突発天体であるGRBの検出は高々5個程度しかない。この為、次世代チェレンコフ望遠鏡アレイ観測所CTAOの大口径望遠鏡LSTを用いて、強い月光下におけるTeVガンマ線観測の解析手法をかに星雲の観測データに基づき確立した。主要な観測パラメータ分布がシミュレーションと整合することを確認し、事象選別の最適化から月光下における検出感度を得た。暗空観測と比較して、~ 1 TeVの感度は2倍程度の劣化に留まる一方、閾値付近の数百GeVでは約3.5$\sim$7倍の劣化に達する。この評価は、将来のLSTアレイによる突発天体の超高エネルギー追跡観測において極めて重要な基盤的研究である。 GRBジェットの初期バルクローレンツ因子を調査する為、GRB 240529Aのshallow decay段階に着目した。このGRBはFermi LAT望遠鏡で観測、本研究での解析により4.5σの統計的有意度でGeVガンマ線放射を検出し、高エネルギー帯域でもshallow decay段階を持つ世界で初めての観測例となる。LSTによるGRB 240529A残光TeVガンマ線追跡観測は月光下で行われ、本研究で確立した手法で解析した。LSTのデータからは、超高エネルギーガンマ線の放射は検出されず、TeVエネルギー域における上限値を与えた。各モデルとの比較から、エネルギー注入モデルは上限値を著しく超過する一方で、ウィンドモデルは上限値と整合していることが判明し、GRBジェット内にバルクローレンツ因子が低い遅い成分が存在することを示唆する。 GRBジェットは構造化されていると予想されるため、その物理的性質は開口角に対して一様ではない。ジェットの角度プロファイルを調査するため、LST-1を用いてGRB 221009Aの広範な追跡観測を満月直後の月光下にて実施した。バースト発生1.33日後に行われた観測では、統計的有意度4.8σのガンマ線様事象の過剰が認められ、その後数日間バックグラウンドと一致する結果となった。本研究の結果は、進化の全期間を通じてVHEフラックスがジェット内核に支配されるモデルを支持せず、後期VHE放射は主にジェット外層に起因することを示唆する。 2つのGRBの分析結果から、本研究はジェットの低速度 (ローレンツ因子が低い) 成分がジェット外側に位置することを明らかにした。Shallow decay段階が多くのGRBで観測されることを踏まえると、多くのGRBが二成分ジェットを持ち、VHE残光に寄与する成分はより低いローレンツ因子で特徴づけられる可能性がある。ジェット特性を包括的に理解するには、典型的なGRBに対する将来のVHE観測が不可欠である。将来のLSTアレイによる検出可能性を評価した結果、GRB 240529A類似の事象は、比較的低い赤方偏移 ($z \sim 0.5-1$) を仮定すると、2桁低いフラックスであっても検出可能であることが示された。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

近年GeV-TeVの高エネルギーガンマ線でGRBが観測されるようになってきているが、その放射機構や残光の光度曲線は未だ解明されていない。本研究では、Fermi望遠鏡及びCTA0を用いて2つのGRBを観測し、高エネルギーガンマ線の放射機構やジェットの構造に迫った。

X線でのGRB観測ではshallow decayと呼ばれる、減光の時間変化が緩やかになるフェーズが多く観測されており、その物理的メカニズムはよく解っていない。本研究ではFermi望遠鏡によりGRB 240529Aを観測し、世界で初めてshallow decay中のGeVガンマ線放射を検出した。また、同期間にTeVガンマ線観測を次世代チェレンコフ望遠鏡アレイ観測所の大口径望遠鏡(LST)で実施、TeVガンマ線帯域で上限値を得た。これらの超高エネルギーガンマ線(VHE)観測を含む多波長スペクトルと時間発展放射モデルとの比較から、ジェットに遅い衝撃波成分が存在し、GeV-TeVガンマ線を放射している示唆を得た。また、shallow decayフェーズが存在しないGRB 221009AについてもLSTで観測し、バーストから1.3日後、TeVガンマ線放射の検出に成功した。このGRBの光度曲線は、VHE残光放射がジェットの外側からの放射である事を示唆する。これらの観測から、多くのGRBのジェットが普遍的に構造を持っており、外側に存在する低速度成分がVHE放射の起因となっている可能性を得た。

また、本研究のLSTによるTeVガンマ線GRB残光観測では、ガンマ線が地球大気中で生成する電磁シャワーからの淡いチェレンコフ光を月光下において観測する必要があるが、本研究により月光下での観測解析手法が確立された。これは、今後の高エネルギーガンマ線GRB観測には必須の手法であり、来年度大口径望遠鏡が4台揃い、観測が本格化する今、非常に重要な礎になる研究である。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和8年1月9日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降