

学位申請論文公開講演会

日時：2026 年 7 月 30 日(木) 10:00~12:00

申請者：西川 智隆 (TA 研)

場所：物理会議室 (C207)

題目：超新星爆発直後に加速された PeV 宇宙線のガンマ線による観測可能性

主論文の要旨

宇宙線は宇宙空間に広く存在する高エネルギー粒子であり、その一部は地球に到達して観測されている。およそ PeV 領域までの銀河宇宙線は、超新星爆発後に形成される超新星残骸の衝撃波で加速されると考えられている。しかし、宇宙線が超新星進化のどの段階で PeV 領域に達するのか、また、その加速過程をどのように観測的に検証できるのかは、重要な未解決課題である。宇宙線加速の有力な機構は、荷電粒子が衝撃波の上流と下流を散乱されながら繰り返し往復し、その過程でエネルギーを獲得する拡散衝撃波加速である。爆発後 100 年から 1000 年程度が経過した超新星残骸では、観測から推定される宇宙線の最大エネルギーが PeV 領域に達していないことが示唆されている。一方、爆発直後の超新星では、衝撃波が星周物質中を高速で伝播し、磁場増幅や高密度環境の効果によって、より効率的な宇宙線加速が起こる可能性がある。本論文では、この初期段階の超新星衝撃波で加速される宇宙線に着目し、それに伴う高エネルギーガンマ線の検出可能性を定量的に評価した。

対象としたのは、赤色超巨星を前駆星とする II 型超新星であり、爆発前の恒星風によって形成された高密度の星周物質中を衝撃波が伝播する状況である。星周物質の密度は、衝撃波の進化、宇宙線加速およびガンマ線放射量を大きく左右する。本論文では、近年の観測研究から示唆される高い質量放出率として毎年 10^{-3} 太陽質量程度を仮定し、標準的な毎年 10^{-5} 太陽質量程度の場合と比較した。

ガンマ線放射量の評価には、先行研究で得られた宇宙線輸送と磁気流体力学を組み合わせた数値計算の結果を用いた。衝撃波近傍の宇宙線分布と星周物質の密度分布をもとに、宇宙線陽子と星周物質中の陽子との相互作用によって生成されるガンマ線放射を計算し、特に PeV 宇宙線の観測的指標となる 100 TeV 以上のガンマ線に注目した。

さらに、超新星光球から放射される可視光・赤外線光子との電子・陽電子対生成、および宇宙背景放射による減衰を考慮し、爆発後の時間発展に沿って観測されるガンマ線フラックスを評価した。その結果、高密度の赤色超巨星風では、低密度の場合よりガンマ線生成率が大きくなる一方、爆発直後には光球光子による吸収も強く働くことが分かった。したがって、観測されるフラックスは、宇宙線加速、星周物質密度および光子場による吸収の競合によって決まる。これらを総合的に評価した結果、チェレンコフ望遠鏡アレイによる 50 時間観測を仮定すると、II 型超新星からの 100 TeV 以上のガンマ線は最大約 4 Mpc まで検出可能であり、近傍銀河の星形成率から、その検出頻度は全天で約 10 年に 1 回と見積もられた。

以上より、爆発後数十日の近傍 II 型超新星が、PeV 宇宙線加速を観測的に検証する有力な対象となり得ることを、検出可能距離と検出頻度の両面から定量的に示した。本研究は、超新星爆発直後という未開拓の時期における PeV 宇宙線加速を、100 TeV ガンマ線観測によって検証する具体的な可能性を提示するものである。