

博士論文審査報告書

論文題目

Search for Signals of Decaying Dark Matter
and Spectral Features
in the Flux of Electron and Positron Cosmic-Rays
Measured with CALET on the ISS

申請者

Saptashwa	BHATTACHARYYA
バタチャリヤ	サパタシャワ

物理学及応用物理学専攻 実験宇宙物理学研究

2019年2月

宇宙線が V.Hess によって 1912 年に発見されて 100 年以上が経過しているが、その加速・伝播機構といった基本的な問題についてさえまだ未解明な部分が多い。その主な理由として、宇宙線の研究には粒子の生成・消滅という素粒子物理学または原子核物理学と粒子の加速・伝播という宇宙物理学の両面が不可欠であり、観測される宇宙線の組成やスペクトルは両者が複雑に絡み合った現象であることが挙げられる。このため、広いエネルギー領域で多種類の粒子の識別とエネルギーの決定を行う必要があり、様々な検出器が考案され、地上および気球・人工衛星による観測がこれまでに実施されてきた。その結果、銀河系内に起源をもつ宇宙線は、超新星残骸の衝撃波による一次 Fermi 加速機構で加速され、銀河磁場による拡散過程によって伝播して銀河系外に漏れ出すという、“標準モデル”が提唱されている。しかしながら、2000 年代に入ってから、飛躍的に進展した粒子検出技術により観測装置の大規模化と高精度化が達成され、観測精度が非常に向上した結果、“標準モデル”だけでは理解できない観測結果が幾つか得られている。

その内の最も重要な観測結果として、Payload for Antimatter/Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics (PAMELA) 衛星によって検出された陽電子の電子に対する割合（陽電子比）が 10 GeV 以上のエネルギー領域で増大することが挙げられる。この結果は、国際宇宙ステーションに搭載された Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)-02 によって、さらに高精度かつ高エネルギー領域まで確認された。“標準モデル”では、主に陽子が星間物質と相互作用して生成する中性パイ中間子の崩壊による γ 線の電子・陽電子対生成により、二次的に陽電子が作られる。しかし、このモデルでは陽子の銀河内滞在時間がエネルギーの増大とともに $E^{-\delta}$ に従って減少するので、陽電子比も同じエネルギー依存性を持って減少することが予測される。したがって、観測された陽電子比の増大のためには、10 GeV 以上の陽電子を一次成分として生成する源（ソース）が存在することが不可欠となる。その有力候補として、天体起源としてパルサーと素粒子的起源として暗黒物質候補の Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) の 2 つの解釈が提案されている。いずれの場合も、陽電子は電子と対生成されるので、陽電子と共に電子にもこの未知の一次成分の影響によるフラックスの“過剰”が起こることが予測され、陽電子と電子+陽電子のスペクトル構造の精密な観測によって、パルサーと暗黒物質の識別が可能であることが多くの論文で指摘されている。

以上のことを踏まえて、申請者は本論文において AMS-02 で観測された 10-500 GeV の陽電子比と陽電子スペクトル及び CALorimetric Electron Telescope (CALET) による 10 GeV-3 TeV の電子+陽電子スペクトルを統一的に説明できるパルサーと暗黒物質の仮説について、系統的かつ詳細に解析を行っている。近傍の単一パルサーが陽電子生成源である場合と、 γ 線と反陽子スペクトルからの制限を回避できる、レプトンに三体崩壊する WIMP タ

イプの暗黒物質 (K. Kohri and N. Sahu, PRD 2013)の可能性について議論し、両者の識別可能性を今後の観測からの期待値を含めて結論している。

本論文は Introduction 及び 6 章と 3 つの補遺から構成されており、各章毎の概要と評価は以下の通りである。

第 1 章では高エネルギー宇宙線の加速・伝播機構に関する“標準モデル”と、本研究に関連する宇宙線の観測結果とその観測方法、及び CALET の観測目的と装置性能の特徴について、基礎的な知識をまとめている。

第 2 章では、宇宙物理学最大の謎とされる暗黒物質についてその存在の根拠となっている観測結果を歴史的に概説して、それらを最も自然に説明できる暗黒物質として WIMPs が最も有力な候補であることの根拠が詳細に述べられている。そして、暗黒物質の検出方法としての 3 つの手法、1) 衝突型加速器(CERN-LHC)による生成実験、2) 地下実験による原子核との弾性散乱を測定する直接測定、及び本研究のテーマである 3) 暗黒物質の対消滅又は崩壊で生じる宇宙線成分を検出する間接測定、及びそれらの測定結果がまとめられている。

第 3 章では、間接測定による暗黒物質の検証には不可欠な、銀河内での宇宙線の伝播過程の計算方法について詳述している。特に電子・陽電子では、磁場によるシンクロトン放射と星間光子との逆コンプトン散乱により、エネルギー損失の割合がエネルギーの 2 乗に比例するため、高エネルギーになるほど大きな影響が現れる。エネルギー損失を含む拡散方程式を解く方法では、銀河内での加速源である超新星残骸や磁場の分布を取り入れた正確な計算は難しいので、GALPROP などの数値計算コードを用いた計算が行われている。本論文では、GALPROP をそのまま使った場合に生じる問題を回避するために計算コードに改良を加えて、“標準モデル”が予測する電子・陽電子のフラックスを求め、同じ手法でパルサーと暗黒物質からの寄与を求める計算技法とその結果を詳細に論じている。

第 4 章では、レプトンに三体崩壊 ($DM \rightarrow l^+ l^- \nu$)する暗黒物質モデルと、生成粒子のスペクトルの計算方法について説明し、前章で開発した伝播過程の計算技法により、観測される電子・陽電子や γ 線のスペクトルを正確に予測している。しかしこの方法では、計算に用いるパラメータをすべてスキャンしてカイ二乗 (χ^2) 検定により最適解を求めるには膨大な時間が必要となる。このため、各物理プロセスを反映するパラメータを用いた電子・陽電子スペクトルのフィッティング関数を作成して、数値計算解との一致性を検証した上で、様々なパラメータスペースでの χ^2 検定を行っている。パルサーの場合については、加速時のスペクトルの冪と加速上限エネルギーをパラメータとして、生成された電子・陽電子に対して同様な手法で最適解を求めている。そして、まず AMS-02 の電子・陽電子観測の結果のみを用いて、暗黒物質とパルサーの識別がどの程度まで可能であるかの定量的な比較に成功している。

第5章では、CALETが約1.7年間で観測した10 GeVから3 TeVまでの電子+陽電子のスペクトルを、AMS-02の陽電子スペクトルと統一的に解析することによって、パルサーと暗黒物質の可能性を詳しく検証している。その結果、暗黒物質としては、 $\mu^-\mu^+\nu$ と $e^-e^+\nu$ に崩壊する質量800 GeVの暗黒物質が、 γ 線スペクトルによる制限を満たした上で、電子・陽電子のスペクトルの観測結果を説明可能であることを示している。さらにこの暗黒物質と単一パルサーの識別が、CALETの5年間の観測により20 TeVまで観測が実現すれば、45%の確率（95%CL）で可能であることを予測している。

第6章は本研究の成果をまとめ、今後の展望について議論している。

以上が本論文の各章ごとの概要と評価である。要約すると本研究では宇宙線の加速・伝播に関する“標準モデル”では理解が不可能な陽電子比の増大と電子+陽電子フラックスの過剰を説明する2つの仮説、パルサーと暗黒物質、の識別可能性を最も高精度なAMS-02とCALETの観測結果を使って詳細に研究している。その結果として、近傍パルサーの加速エネルギーに制限を与えるとともに、 $\mu^-\mu^+\nu$ と $e^-e^+\nu$ に三体崩壊する質量800 GeVの暗黒物質は観測結果を説明できると結論している。これまで、同様な研究方法による暗黒物質の間接測定に関する論文は数多く発表されているが、本論文はこれまでの γ 線や反陽子観測や直接測定、LHC実験の結果とも矛盾しないレプトン三体崩壊する暗黒物質について解析し、パルサーとの識別可能性についての定量的な考察も行っている。この結果は、今後の暗黒物質探索に対して重要な示唆を与えるものであり、十分に意義深いものと評価される。よって、本論文は博士（理学）の論文として価値あるものと認める。

2019年1月

審査員

主査 早稲田大学教授 理学博士（京都大学） 鳥居祥二

副査 早稲田大学教授 理学博士（早稲田大学） 長谷部信行

早稲田大学教授 理学博士（京都大学） 前田恵一

立命館大学教授 理学博士（京都大学） 森 正樹