

博士論文審査報告書

論文題目

高エネルギー宇宙線観測装置（CALET）の
軌道上観測性能に関する研究

Study on the on-orbit performance of a high
energy cosmic ray detector (CALET)

申請者

仁井田	多絵
Tae	NIITA

物理学及応用物理学専攻 実験宇宙物理学研究

2015年6月

宇宙から飛来する放射線(宇宙線)の存在はおよそ 100 年前に発見された。それ以来、地上実験や飛翔体実験を通して様々な観測が行われてきたが、未だにその本質的な部分である加速や伝播の機構さえ完全に解明されたとは言えない状況にある。さらに最近では宇宙の未知の構成要素である暗黒物質が、崩壊または対消滅によって宇宙線スペクトルに影響をもたらす可能性が注目されており、より精密な観測による正体解明が強く求められている。

宇宙線の加速・伝播機構を解明する上で観測の進展が期待されている領域のひとつは、**TeV** 領域の電子成分である。高エネルギーの電子は伝播中のエネルギー損失率が高く寿命が短いことから、近傍加速源の直接的な影響がスペクトルに現れると予想されており、詳細な観測が実現できれば、加速源の直接的同定と加速・伝播パラメータの定量化が可能となる。また、**GeV–TeV** 領域には、近傍パルサー或は暗黒物質由来と考えられる電子・陽電子成分の“過剰”が存在することが、最近の複数の実験から報告されている。より精密な観測によりその起源が特定されれば、天体における新たな粒子加速機構の解明、または暗黒物質の正体解明につながることを期待されている。

本論文は、このように多くの科学成果が期待されている高エネルギー電子の観測、及びガンマ線、陽子・原子核成分の同時観測によって宇宙線の生成及び加速・伝播機構を包括的に解明することを目的として開発された **CALorimetric Electron Telescope (CALET)** 検出器の性能検証を行ったものである。**CALET** は高いエネルギー分解能と粒子識別性能をもつ高機能な複合型カロリメータであり、2015 年に国際宇宙ステーション日本実験棟船外実験プラットフォームに設置される予定である。観測実現に向けて、装置の性能を事前に検証し、宇宙空間でその性能を実現する方法を確立しておく事が不可欠である。本論文では機能試験モデルを用いた気球実験・加速器実験の実施、及びシミュレーション計算を駆使した軌道上装置較正手法の開発により、高精度観測の実現性を総合的に検証している。

本学位論文は 8 つの章と 1 つの付録から構成されている。以下に各章の概要とその評価について述べる。

第 1 章では宇宙線研究の歴史と現状を概説し、現在における **CALET** の観測意義について述べている。陽子・原子核、電子、反粒子、ガンマ線のこれまでの観測結果から、銀河内における宇宙線の加速と伝播を統一的に説明する標準的モデルが構築されつつある。一方、最近の観測からはそのようなモデルだけでは説明できない観測結果も報告され注目を集めている。そのような観測の中で、陽子・ヘリウムエネルギースペクトルの“硬化”、及び電子(+陽電子)スペクトルの過剰、陽電子比の増加は、特にその解釈を巡って数多くの新たな理論的検討が行われている。それらの展開が、宇宙物理・宇宙論と素粒子物理の各分野において果たす役割について述べ、**CALET** 計画がその中で担う役割についてまとめている。

第 2 章は、銀河内宇宙線の加速・伝播の標準モデルについての記述である。

現在では、宇宙線の幂型スペクトルを説明する加速理論としては、超新星残骸の衝撃波による統計的フェルミ加速機構が、そして銀河磁場内の拡散伝播過程では、銀河系からの“漏れ出し”のみを考慮した **Leaky-Box** モデルで近似される理論が、原子核成分について広く受け入れられている。本章ではこの他に、伝播中のエネルギー損失の寄与が大きい高エネルギー電子成分の伝播過程を記述する拡散モデルと、その帰結として期待される **TeV** 領域の特徴的な電子スペクトル形状、低エネルギー宇宙線に対する太陽磁場の影響、及び暗黒物質の理論モデルと宇宙線観測による間接的な暗黒物質検出の可能性について記述している。

第3章では **CALET** 検出器の概要とその性能について述べている。**CALET** は **1mm** 角のシンチレーティングファイバーとタングステンを用いたシャワーイメージ解像型カロリメータ (**IMaging Calorimeter : IMC**) と、無機シンチレータ(タングステン酸鉛)から構成される全吸収型カロリメータ (**Total AbSorption Calorimeter : TASC**) の組み合わせにより、宇宙線の生成するシャワーを初期発達から収束に至るまで三次元的に可視化する能力をもつ。さらに最上部には原子核の電荷識別を行う能力を有する電荷検出器 (**CHarge Detector : CHD**) が配置されている。本章は、装置構造の詳細について記述した上で、モンテカルロシミュレーションによって検証されたエネルギー分解能、角度分解能、粒子識別性能等の基本的な観測性能をまとめている。

第4章では、装置性能実証を目的として行われた気球実験とその観測結果について記述している。この実験は **CALET** の約 **1/3** スケールの気球搭載型プロトタイプ検出器 (**bCALET**) を開発し、**2009** 年に北海道にある **JAXA** 大樹航空宇宙実験所で実施された。その結果、高度 **35 km** における約 **2.5** 時間のフライトにより、**1-30 GeV** の電子および大気ガンマ線が観測されている。気球実験のデータ解析では、**1)** フライト前に取得した大気ミュオン (最小電離損失粒子:**MIP**) による各シンチレータの出力較正、**2)** モンテカルロシミュレーションによるデータ解析手法の最適化、及び **3)** フライトデータのデータ解析、により電子フラックス及び大気ガンマ線フラックスが求められている。これらの結果はシミュレーションによる予測値や過去の実験結果と統計誤差内で一致しており、**CALET** の低エネルギー側の観測性能を実証し、**MIP** を用いた装置較正、及びデータ解析のために開発された手法の妥当性等が、実験的に確認されたと言える。

第5章では、**2012** 年に **CERN-SPS** 加速器で行われた加速器実験とデータ解析結果について記述している。この実験は、搭載装置の熱構造モデルを使用し、電子 **10-290 GeV**、陽子 **30-400 GeV**、ミュオン **150, 180 GeV** に対する検出器応答を測定したもので、検出器の性能評価に使用されるシミュレーションの再現精度を検証する上で重要な意義を担っている。本章ではミュオンを用いた検出器の出力較正手法の詳細がまとめられており、その結果得られるエネルギー分解能、角度分解能、陽子除去性能等の装置基本性能が、

実験結果とシミュレーション計算で十分な精度で一致することが示され、シミュレーションによる装置性能検証の妥当性が確認されている。

第6章は、国際宇宙ステーション軌道上での装置運用を見据え、宇宙線を用いた軌道上における装置較正方法の開発を行っている。CALETの特徴である優れたエネルギー分解能を長期にわたって実現するためには、定期的なエネルギー較正が不可欠であり、このために軌道上では陽子をMIPとしてトリガーする方法が採用されている。しかし、陽子の多くは検出器中で核相互作用によりシャワーを生成するため、装置較正に使用するには、核相互作用せず検出器を通過したイベントを選別する必要がある。本章では、モンテカルロシミュレーションによって軌道上の宇宙線フラックスを再現し、陽子イベント取得レートの確認と、シャワー粒子除去のためのイベント選別アルゴリズムの開発を行うことによって、軌道一周分の観測で得られるデータ量を求めた。その結果、一周分の観測量により十分な精度で装置のエネルギー較正が可能であるという、性能維持のために重要な結果が示されている。

第7章では、上記の結果をもとにCALETの観測性能をまとめ、科学的な成果の展望を述べている。特にTeV領域の電子については、5年間の観測で高精度な電子スペクトル導出と異方性の検出が十分にでき、近傍加速源の同定と加速・伝播のモデル識別が可能であり、GeV-TeV領域におけるスペクトルを他実験に優るエネルギー分解能で測定することにより、過剰成分の起源解明（近傍パルサー、暗黒物質等）が期待できることが示されている。さらに、陽子スペクトルの“硬化”について、硬化の有無の検証について具体的なモデル例によるスペクトルの変化の観測予測をまとめている。

第8章では、本論文のまとめと今後の展望について述べている。

以上をまとめると、本学位論文はこれまで未解明であった高エネルギー宇宙線の加速・伝播、及び暗黒物質の検出にブレークスルーをもたらすことが期待されているCALETに不可欠な、観測性能の検証および装置較正手法の開発について系統的に研究を行った。特に、気球実験による性能実証と、装置較正方法の開発による観測予測という、最重要な研究課題において主要な貢献を果たしており、CALETによる高精度観測の実現性を、装置性能と軌道上観測の両面から示した点において、高い学術的価値を持っており、博士（理学）の学位論文として相応しいものとして認める。

2015年5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

東京大学教授

理学博士(東京大学) 寺澤敏夫

立命館大学教授

理学博士(京都大学) 森正樹