

CALET長期観測による地球・太陽圏から銀河系の宇宙線物理学の新概念構築

研究代表者	早稲田大学・理工学術院・名誉教授	
	鳥居 祥二 (とりの しょうじ)	研究者番号：90167536
研究課題情報	課題番号：24H00025	研究期間：2024年度～2028年度
	キーワード：銀河宇宙線、近傍加速源、暗黒物質、宇宙線太陽変調、地球・太陽磁気圏	

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

● 研究の全体像

CALorimetric Electron Telescope (CALET)は、国際宇宙ステーションに設置された宇宙線・ガンマ線の観測装置で、JAXA、NASA、ASIとの協同による日米伊の国際共同研究である。これまで8年以上にわたり優れた観測性能を駆使して、地球・太陽圏から銀河系における未解決問題を解明する端緒となる観測結果を得ている。本研究計画では、新たな銀河宇宙線の高精度観測と地球・太陽圏の連続観測により、宇宙線物理学の新たなスタンダードとなる概念を構築する。銀河宇宙線の観測で取り組む課題として、1) 陽子・原子核観測による、超新星残骸における衝撃波加速仮説の定量的実証、及び加速源・星間空間での伝播過程の定量的解明、2) 電子(+陽電子)観測による、加速・伝播機構のモデル化と陽電子源の解明、及び近傍加速源の同定、を完結する。地球・太陽圏の観測での課題として、3) 太陽磁気圏における銀河宇宙線の太陽変調のモデル化、及び4) 地球磁気圏放射線帯からの相対論的電子降下(REP)現象の成因解明、を行う。

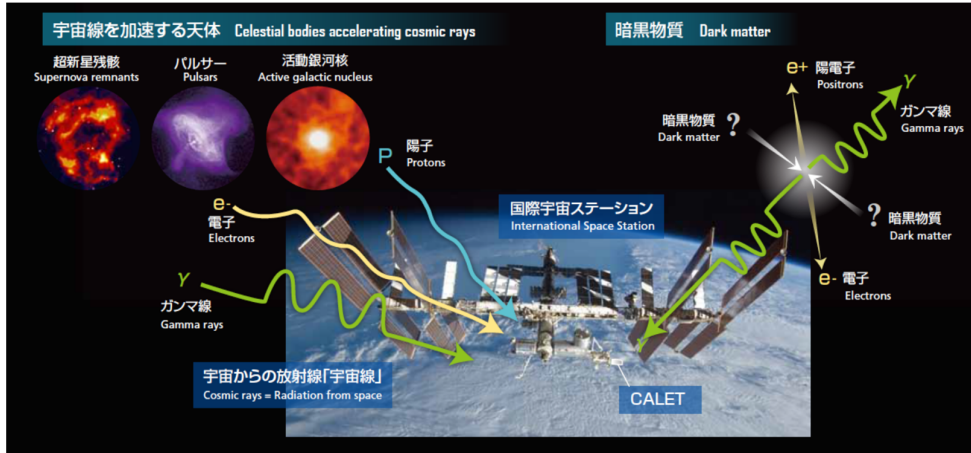


図1: 国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」に搭載されたCALETによる、宇宙から飛来する粒子である宇宙線の観測イメージ図。宇宙線は爆発的な現象を伴う活動的な天体で加速された粒子(電子、陽子・原子核)の他に、暗黒物質の対消滅や崩壊によって生成される粒子の可能性も考えられている。本研究では宇宙線の起源と伝播機構を明らかにする。

● 研究の手法

CALET は世界初の宇宙機に搭載された宇宙線シャワーを可視化するイメージング・カロリメーターで、2015年に打ち上げられ、国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」船外実験プラットフォーム(JEM-EF)に設置されている。図2にその全体概念図を示すが、主検出器であるカロリメータに加えてガンマ線バーストモニタ(CGBM)が搭載されている。地球・太陽圏から銀河系の宇宙線物理学の新概念構築のために、CALETの新たな観測拡大による高精度・長期観測が不可欠である。本研究は、世界的にもこの観測が唯一実現できる計画であり、CALETの優れた観測性能と高度に最適化された軌道上運用でもたらされる、世界最高レベルの観測成果とその総合的な理論的検証により、本研究によって宇宙線物理学の新たなスタンダードとなる基礎的概念を構築する。

● 観測の手法

CALET(カロリメータ)は、電荷測定器(CHD)、イメージング・カロリメータ(IMC)、及び全吸収型カロリメータ(TASC)により構成される。高エネルギー宇宙線やガンマ線が入射するとシャワー粒子が生成され、各検出器のデータを取得し、電子、ガンマ線又は陽子・原子核といった粒子種別や到来方向・エネルギーの情報を得ることができる。エネルギーが1 テラ電子ボルト(TeV)の電子が入射した場合のシミュレーション例を重ね書きした装置概念図を図3(左)に、実際の電子観測例(3.05 TeV)を図3(右)に示す。

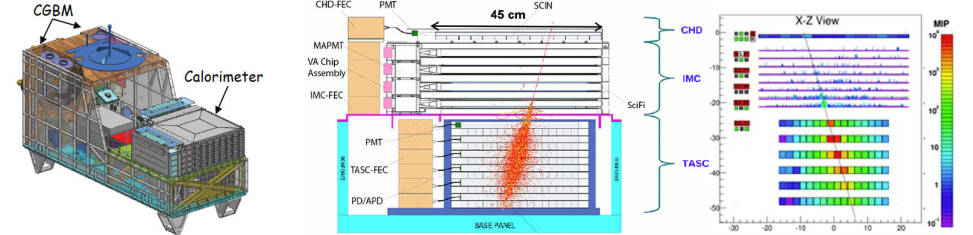


図2: CALET全体のイメージ図。 図3: 1TeVの電子のシミュレーションを重ね書きした装置概念図と(左)と観測例(右)。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

地球・太陽圏から銀河系まで包含した宇宙線の高精度長期観測により、以下に示すこれまでの通説で理解できない未解決問題を解明し、宇宙線物理学の新たな概念を構築する。

● 銀河宇宙線

銀河宇宙線の加速機構の最も有力な仮説として、超新星残骸(SNR)における衝撃波による一次フェルミ加速(以下、衝撃波加速)があるが、その詳細はまだ未解明なままである。このモデルでは、宇宙線各成分のエネルギースペクトルは単一冪の分布を持つ。しかしこれまでの観測結果では、スペクトルには図4に示すような硬化や軟化といった、単一冪では説明できない複雑な構造が存在することが観測されている。これらの成因の解明には、このようなスペクトルの構造が、電荷に依存したものか、質量数に依存したものを確認することが不可欠であり、CALETの新たな観測でこれらの依存性を検証し、軟化、硬化の原因を明らかにする。電子成分の観測では、AMS-02等で観測されている過剰な陽電子源がパルサー(PSR)を起源とするものか、暗黒物質の最有力候補であるWIMPsによるものか、に結論を得ることが全電子(電子+陽電子)観測における喫緊の課題である。さらに、TeV領域の電子スペクトル構造の観測は、地球近傍にある超新星残骸で加速された電子を検出しその天体を同定できるユニークな観測であり、電子加速機構の直接的解明が可能となる。図5にパルサーと近傍加速源を仮定した場合の観測結果と観測予測(赤領域)を示す。

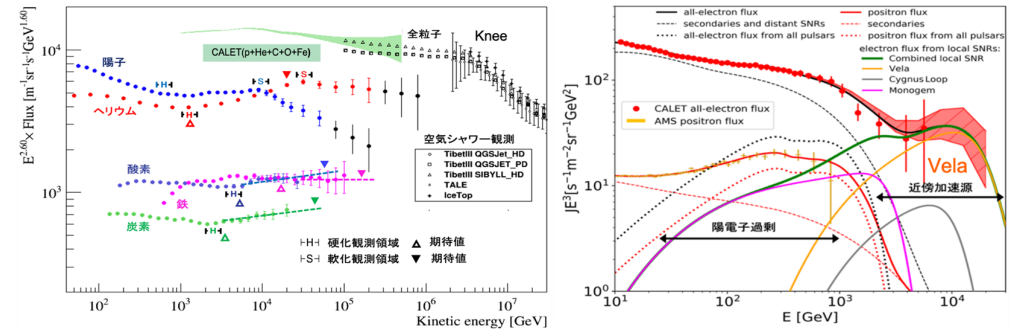


図4: 陽子・原子核成分のスペクトルの観測結果と観測予測(黒点)。図5: 全電子スペクトルの観測結果のパルサー+近傍加速源(Vela)によるモデル化と、TeV領域における観測予測。

● 太陽・地球磁気圏

現在までに、太陽活動の極小期(2019年)を挟んで太陽周期(~11年)の約半周期に亘って、低エネルギー電子、陽子の太陽変調の観測を行い、その電荷(正負)依存性から、太陽変調のドリフトモデルによる理解を世界に先駆けて試みている。本研究では、太陽磁場の極性が正から負に反転する次の半周期の観測を継続することにより、ドリフトモデルの確立を行うとともに、地球磁気圏への太陽活動の影響を明らかにする。