

ROIS 戦略的研究プロジェクト 成果報告会

研究課題名：

データサイエンス時代へ向けた新たな宇宙線観測・解析スキームの構築

English Title: Construction of a new framework of cosmic-ray studies for the data-science era

研究カテゴリー

- _未来投資(新分野・新領域開拓)
- _異分野融合(複合分野・多機関との共同研究推進)
- _地球規模課題・社会課題(喫緊の課題への対応)

2025年4月24日

研究代表者

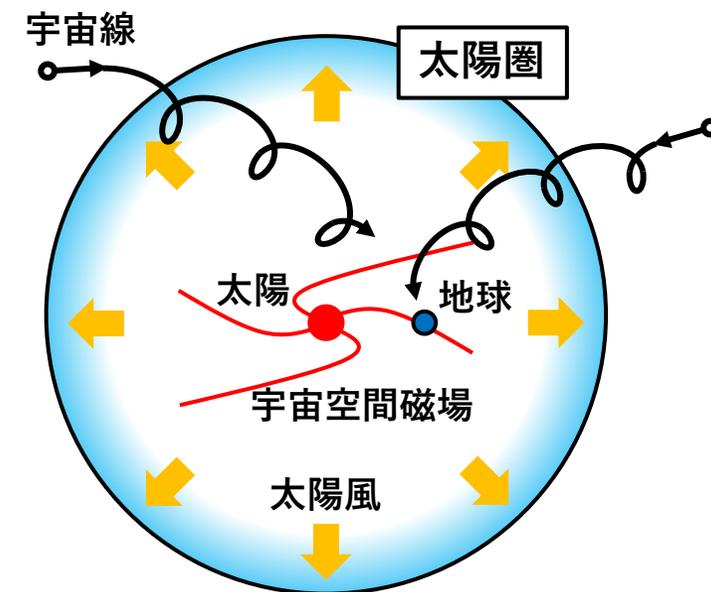
所属 データサイエンス共同利用基盤施設

氏名 小財正義

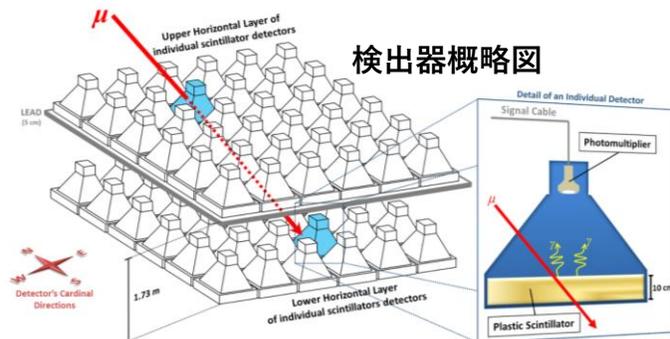
◆ 背景と研究目的

天体衝撃波などで加速された素粒子(宇宙線)は、銀河系空間へ拡散した後、その一部が太陽系空間へ侵入し、地球で観測される。従って宇宙線は宇宙空間のメッセンジャーとしての役割を持っており、その観測・解析から宇宙空間の構造を知ることができる。特に太陽系を含む100天文単位スケールの空間は太陽圏と呼ばれ(右図)、太陽から常時噴出するプラズマ(太陽風)の支配下にあると予想されている。太陽活動は約11年周期で活発/静穏を繰り返し、活発期付近では太陽フレアなどの突発イベントを起こす。宇宙線などの観測から、これら太陽活動により宇宙環境が激しく変動している様子が明らかになりつつある。

宇宙線ミュオン粒子の地上観測は高い統計量や方向分解能を特長とし、上で述べたような宇宙環境研究での高い実績を誇る。本研究ではミュオン粒子の観測システムからデータ解析まで、研究スキームの基盤部分を一体的に再構築し、データサイエンスの積極的活用によるアップグレードを目指す。研究代表者らが参加する国際共同実験GMDN(Global Muon Detector Network)と連携しつつ、①次世代型観測システムの開発、②データ管理・公開の刷新、および③データ駆動型アプローチの導入によるデータ解析研究を行う(下図)。

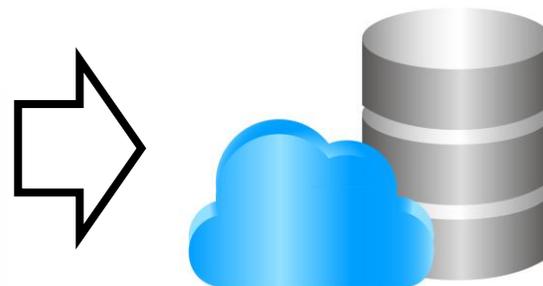


① 観測システム



- ✓ 小型化
- ✓ 多機能・高度化

② データ管理・公開



- ✓ 解析環境との一体的整備
- ✓ オープンサイエンス戦略との連携

③ データ解析



- ✓ データ駆動型研究の導入
- ✓ 科学的成果の創出

◆ 国内外の類似・競合する研究との関係

数分～数時間単位で激しく変動する宇宙環境現象を捉えるには、宇宙線の世界的なネットワーク観測が必要である。ミュオン粒子と並ぶ地上での宇宙線主成分である中性子はその観測・解析手法が比較的容易であり、ネットワーク観測が2000年頃から運用されている。一方、ミュオン粒子の世界的ネットワーク観測はGMDNが唯一のものであり、2000年頃から構築を開始して2016年に完成した。ミュオン粒子観測はデータ補正などで複雑な解析を必要とするものの、高い方向分解能を誇る。それにより宇宙線の異方性(方向分布)を推定することができ、中性子と比べて情報量を格段に拡充することができる。また、この分野における従来のデータ解析研究の殆どは2000年代以前に確立されたアプローチ(関数フィッティングなど)に基づいている。観測装置やデータ管理・公開に関しても、GMDNでは2000年代に開発したシステムを継続利用している。長期連続観測では「枯れた技術」のメリットも大きいですが、最新の情報通信技術の導入や、オープンサイエンス関連基盤との連携へ向けた機運が高まっている。

以上のように、データサイエンスを活用した新たな観測・解析スキームの構築により、宇宙線による宇宙環境研究の分野活性化が期待できる状況である。また、国際宇宙ステーションでの観測などにより、宇宙空間での宇宙線観測も活発化を見せている。地上実験ほどの高統計観測や長期運用は難しいものの、宇宙環境に関する成果が報告されており、宇宙線物理コミュニティの本分野に対する注目度も高まっている。

◆ 本研究の意義

① 次世代型観測システムの開発

宇宙環境の研究では数分単位の時間分解能と同時に、太陽活動周期(10~20年)を超える長期連続観測も必要であり、観測システムのロバスト性やメンテナンス性が求められる。また中性子観測では、本研究に先駆けて新たなデバイスによる観測量の拡充などが示されている(D. Ruffolo et al., 2016, ApJなど)。この10年ほどでFPGAなどプロセッサの集積度は100倍以上となっており、ミュー粒子観測でも新たなデバイスによる装置小型化や高度化が期待される。本研究はその実証を目指す。飛翔体観測など他の宇宙線実験分野、さらにミュオグラフィ(ミュー粒子を用いた構造物透視)など他分野への波及も期待される。

② データ管理・公開方法の刷新

近年、デジタル識別子による適切なデータ引用の担保や、メタデータを含むデータ形式の標準化、統合的なデータ公開サイトなど、分野を問わずオープンサイエンスの基盤が整備されつつある。これらをフル活用した宇宙線観測データの管理・公開スキームを構築することで、本分野のオープンサイエンスに関するモデルケースを示す。

③ データ駆動型研究の導入(データ解析研究)

宇宙環境は太陽面爆発など数分単位の変動から、数十年単位の太陽活動周期まで、多様な自然現象を含む。さらにミュー粒子観測が高精度測定できる宇宙線異方性は、10個以上の多変量パラメータで表される。本研究ではこれら膨大な情報量に着目し、ベイズ推定や機械学習を含むデータ駆動型アプローチを導入する。それにより従来の仮説駆動型研究や単純な線形モデルでは見逃されていた知見を発掘し、本分野でのデータ解析研究の新たな方向性を示す。

<p>1) 研究の概要</p>	<p>宇宙線(天体衝撃波などで加速された高エネルギー粒子)はその伝搬経路の電磁環境を反映し、宇宙空間のメッセンジャーとしての役割を持つ。特に宇宙線ミュオン粒子の地上観測は高い統計量や方向分解能を特長とし、宇宙環境や宇宙線物理研究での大きな役割が期待される。本研究ではミュオン粒子の観測システムからデータ解析まで、従来の研究スキームの基盤部分を一体的に再構築し、データサイエンスの積極的活用によるアップグレードを目指す。特に①次世代型観測システムの開発、②データ管理・公開方法の刷新、および③データ駆動型研究の導入を柱とする。ミュオン粒子の世界的な観測ネットワークGMDN(Global Muon Detector Network)と連携しつつ、観測装置での新たなデバイスの実証や、リモートリポジトリを活用したデータ管理・公開・解析システムの構築、新たな数理手法によるデータ解析研究などを進めた。</p>												
<p>2) 実施計画・実績</p>	<p>2022年度</p> <p>FS (Feasibility Study)</p> <p>★5月 FS採択審査会</p> <p>★2月 FS評価審査会(本研究採択)</p>	<p>2023年度</p> <p>本研究</p> <p>★ 1年目実績評価</p>	<p>2024年度</p> <p>★11月 2年目成果報告会</p> <p>★ 最終成果報告</p>										
<table border="1"> <tr> <td data-bbox="53 749 267 806">費用(千円)</td> <td data-bbox="267 749 389 806">予算</td> <td data-bbox="389 749 1082 806">792千円</td> <td data-bbox="1082 749 1775 806">2,392千円</td> <td data-bbox="1775 749 2519 806">2,093千円</td> </tr> <tr> <td></td> <td data-bbox="267 806 389 863">執行</td> <td data-bbox="389 806 1082 863">792千円</td> <td data-bbox="1082 806 1775 863">2,392千円</td> <td data-bbox="1775 806 2519 863">2,093千円</td> </tr> </table>	費用(千円)	予算	792千円	2,392千円	2,093千円		執行	792千円	2,392千円	2,093千円	<p>実施者(所属機関)</p> <p>代表者:小財正義(DS施設)</p> <p>共同研究者:林優希(信州大)、宗像一起(信州大)、加藤千尋(信州大)、片岡龍峰(極地研)、村瀬清華(極地研)、三宅晶子(岐阜高専)</p>		
費用(千円)	予算	792千円	2,392千円	2,093千円									
	執行	792千円	2,392千円	2,093千円									
<p>3) 研究成果の概要</p>	<p>①観測システムの開発では、装置の小型化や高機能化を可能とする新たな信号処理装置などを開発し、宇宙線の計測試験を行った。さらにシミュレーションなどから北極圏での宇宙線観測の意義を定量的に示し、アイスランドでの新型システムによる観測へ道筋をつけた。②データ管理・公開方法の刷新では、各データ公開基盤の担当者の協力を得て、JAIRO CloudでのGMDNデータ公開や、宇宙科学標準形式へのフォーマット変換とそのアプリケーション開発などを行った。解析パイプラインを整備し、各共同研究者のデータ解析研究で活用している。③データ駆動型研究の導入では、宇宙線強度の方向分布と時間変動を教師なし機械学習で自動分類し、太陽活動との関連性が見えることを示した。情報研の数理研究者との協力により、グラフ理論とベイズ推定を活用した新たな解析手法を開発した。重力波や地震研究で使用されている時間周波数解析の導入も、異分野研究者と共に検討を始めている。</p>												