

## 課題名(タイトル): Simulations of the propagation of ultra-high energy cosmic ray nuclei

利用者氏名: 木戸 英治

理研における所属研究室名: 開拓研究本部 長瀧天体ビッグバン研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係する課題との関係  
 研究の背景、目的: 超高エネルギー宇宙線の起源は、解明されていない。本課題では、超高エネルギー宇宙線の起源解明のために、超高エネルギー宇宙線到来方向のデータ解析手法を新しく構築し、必要な数値シミュレーションを行った。また、データ解析の結果を解釈するための、宇宙線原子核伝播シミュレーションを行った。

関係する課題との関係: 本研究は、テレスコープアレイ(TA)実験とピエール・オージェ(オージェ)実験の宇宙線観測データを使った。そのため、この二つの実験と関係している。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

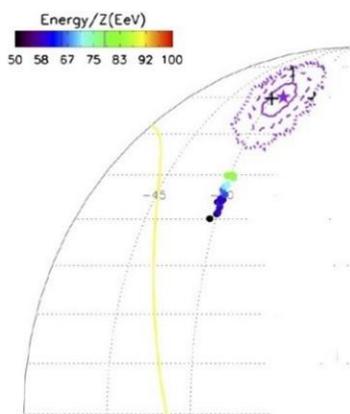


図1: 宇宙線源の方向(図中の十字)を仮定して、シミュレーションした宇宙線の到来方向(色付きの点、色はエネルギーを示す)。データ解析の結果、得られた宇宙線源の方向が紫の星印(紫線は信頼領域) (He et al., 2016)。

図1は、本研究のデータ解析手法をシミュレーションに適応した例である。規則的な宇宙磁場による偏向を考慮しない従来の手法では、宇宙線到来方向分布の中心付近が宇宙線源の方向と間違えてしまう。本研究では、この手法を実際の観測データに適応できるように、新たにアパーチャーなどの検出器の特性を考慮した。データ解析で得られた、図1のような特徴的な構造の統計的有意性を評価するためにHOKUSAIを利用した。統計的有意性の評価のためには、到来方向やエネルギーが等方的な分布を、大量にシミュレーションして、データとの違いを評価する必要がある。また、データ解析から推定した宇宙線到来方向の磁場偏向角と、

既存の銀河磁場モデルから予想される磁場偏向角を比較した。磁場偏向角の予想のために、いくつかの銀河磁場モデルを仮定して、宇宙線原子核の伝播シミュレーションを行った。宇宙線伝播計算コードには CRPropa を使い、HOKUSAI を使って計算した。

## 3. 結果

TA 実験とオージェ実験は、それぞれ 57 EeV ( $1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$ )以上と 40 EeV 以上のエネルギーの宇宙線到来方向で、半径  $25^\circ$  程度の角度スケールのイベント超過が観測されている。このイベント超過はそれぞれホットスポットとウォームスポットと呼ばれている。これらのデータに対して、上記の新しいデータ解析を適応した。その結果、TA 実験のデータから、このホットスポットを作っている宇宙線源の方向が、赤道座標で赤経  $184^\circ .8 \pm 25^\circ .6$ 、赤緯  $69^\circ .1 \pm 8^\circ .5$  であるという結果が得られた(研究成果リスト 口頭発表 1., 2. 参照)。一方で、オージェ実験のウォームスポットの起源になっている宇宙線源の方向は、赤経  $188^\circ .7 \pm 1^\circ .8$ 、赤緯  $-8^\circ .3 \pm 1^\circ .8 - 1^\circ .9$  という結果(図 2 参照)が得られた(研究成果リスト その他 1. 参照)。これらの結果は、ホットスポットやウォームスポットの中心とは  $20^\circ$  以上離れている。また、銀河磁場モデルを使った宇宙線原子核の伝播シミュレーションの結果、TA 実験の磁場偏向は、既存の銀河磁場モデルでは説明できないことが分かった。一方で、オージェ実験の結果は、Jansson et al. 2012 の銀河磁場モデルの  $Z=7$ (窒素原子核)で、ほぼ説明できることが分かった。

## 4. まとめ

私は、新しい解析手法を使って、超高エネルギー宇宙線到来方向の観測データを解析した。HOKUSAI を使って、データ解析に必要なシミュレーションを行った。また、解析結果を解釈するための宇宙線原子核の伝播シミュレーションを行った。その結果、宇宙線源の方向と、銀河磁場による偏向角について、これまでになく新たな知見が得られた。

## 5. 今後の計画・展望

今後は、銀河磁場モデルだけでなく、銀河系外の磁場モデルも使った大規模な宇宙線伝播シミュレーションを行い、実験データを再現できるような磁場モデルについて調べる計画である。また、銀河磁場モデルについても、公開されている全てのモデルを使ってシミュレーションを行い、銀河

磁場モデル間の違いについて評価する。

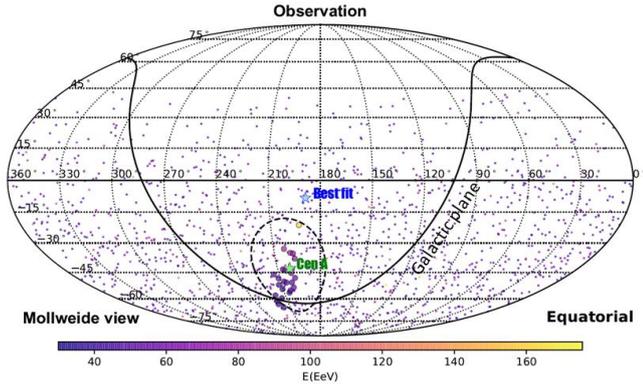


図2:ピエール・オージェ実験で得られた40 EeV以上のデータ(The Pierre Auger Collaboration 2022)を解析して推定した宇宙線源の方向(図中の青い星印)。エネルギー(EeV)はカラーで示し、特に尤度関数が高いデータは太い点で表している。

2024 年度 利用研究成果リスト

**【口頭発表】**

1. 木戸英治, 長瀧重博, 樋口諒, H. He, N. Globus, D. Warren III 他 Telescope Array Collaboration, “TA 実験 419:TA 実験ホットスポットの起源天体探索 II”, 日本物理学会春季大会, オンライン, 2024 年 3 月
2. E. Kido, “Search for magnetic deflection multiplets in the observed data by the Telescope Array surface detectors”, 7<sup>th</sup> International Symposium on Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR) 2024, Malargüe, Argentina, Nov. 2024.

**【ポスター発表】**

1. E. Kido, H.-N. He, “Search for Secondary Cascade Photons from Ultrahigh-Energy Cosmic Ray Source Candidates”, The 2<sup>nd</sup> LHAASO Symposium, Hong Kong, China, Mar. 2025.

**【その他(著書、プレスリリースなど)】**

1. H.-N. He, E. Kido, K.-K. Duan, et al., “Evidence for the Sombrero Galaxy as an Accelerator of the Highest-Energy Cosmic Rays”, arXiv:2412.11966v1 [astro-ph.HE]. (理研のスーパーコンピューターの利用に関する記述は、更新版で追加される。)