

課題名(タイトル):

## 銀河磁場モデルに基づく最高エネルギー宇宙線起源天体の特定

利用者氏名:

○樋口 諒

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  
宇宙から到来する素粒子を宇宙線と呼ぶ。中でも 10 の 19 乗・20 乗電子ボルトを超えるエネルギーを持つ宇宙線が観測されており、これを最高エネルギー宇宙線(UHECR)と呼ぶ。UHECR 起源の観測的証拠は見つかっていない。北半球の Telescope Array 実験(TA 実験)・南半球の Auger 実験の両者の観測結果から、UHECR の到来方向分布の異方性が報告されている。これら異方性は UHECR 起源天体の分布と相関すると考えられてきた。観測で得られた異方性の統計解析から起源天体の種族を同定する事が UHECR の起源の解明において重要となる。一方で宇宙線は起源から地球へ到達するまでの間に磁場の偏向を受ける。宇宙線の偏向の報告と角度は磁場構造と宇宙線の核種に依存する。さらに宇宙線は伝搬中に光子との相互作用でエネルギー損失や二次粒子の生成を経験するため、これらの評価も重要である。そのため、宇宙線の起源の特定には磁場構造と質量組成(宇宙線のエネルギー毎の核種の存在比)をモデルとして仮定し解析を行う必要がある。上記の観点から、以下の課題に取り組んだ。

(1) TA/Auger 実験における SBG 相関解析と銀河磁場モデル解析

(2) 大規模構造シミュレーションに基づく、超重元素 10 の 20 乗電子ボルト宇宙線の予測

2. 具体的な利用内容、計算方法

(1) 現在利用できる TA 実験・Auger 実験の観測データに対し、近傍のスターバースト銀河との相関解析(Abreu et al. 2022)を適用する。等方分布でシミュレーションを行い、TA/Auger 実験の観測視野で観測できる UHECR の到来方向分布を予測する。得られた統計量の分布から、観測データの相関の有意性を求める。従来の相関解析に銀河磁場モデルを組み込み、磁場構造を考慮した相関解析を行う。

(2) 陽子・鉄・ウランの 3 つの核種を仮定し、宇宙線伝搬計算ソフトウェア CRPropa 3.2 を用いて UHECR の伝搬計算を行う。銀河系外磁場強度・起源天体密度を仮定

し 10 の 20 乗電子ボルトの UHECR の到来方向分布を予測する。特にウランの場合は長い伝搬距離となるため、遠方の起源天体分布を反映するために大規模構造シミュレーション Millenium Run を用いる。予測される到来方向分布の小角度異方性から、10 の 20 乗電子ボルトで等方分布を再現し得る核種・磁場強度・起源天体密度を制限する。

3. 結果

(1) TA/Auger 実験の観測データにおいて、それぞれ 1.8 $\sigma$ /3.8 $\sigma$  の有意度で SBG との相関を確認した。銀河磁場構造を考慮した相関解析の結果、質量組成に依存し統計量の変動する事を確認した。

(2) 単一陽子組成はほぼ全てのパラメータ範囲で棄却された。銀河系外磁場の強度が強い場合においてのみ単一鉄組成は等方分布を再現した。単一ウラン分布は磁場強度が強い・または起源天体密度が高い場合双方において等方分布を再現した。

4. まとめ

(1) 起源候補天体と UHECR 到来方向分布との相関解析において、磁場構造に伴う偏向を考慮した解析が重要となる。

(2) 単一陽子組成では 10 の 20 乗電子ボルトの UHECR の到来方向分布の再現は難しい。鉄・ウランの場合は系外磁場強度の強さ・起源天体密度に応じて分布を再現し得るが、シミュレーションをより現実の構造に近づけること・観測からの原子核種の制限手法を検討する事が重要となる。

5. 今後の計画・展望

(1) 銀河磁場を考慮した相関解析手法について、質量組成に依存した不定性の評価を行う。

(2) シミュレーションの構造(銀河磁場・系外磁場構造・天の川銀河周辺の銀河分布の反映)を現実的なものに更新し検証を続ける。大角度異方性・中角度異方性との整合性から、より詳細の核種・磁場強度・起源天体密度への制限を試みる。

2024 年度 利用研究成果リスト

**【口頭発表】**

- Ryo Higuchi, “Constraints on super-heavy UHECR source model with a large-scale structure simulatio”, Nucleosynthesis and Evolution of Neutron Stars, Kyoto University, 2025 年 1 月
- 樋口 諒、「テレスコープアレイ実験による最高エネルギー宇宙線観測と銀河磁場の影響の評価」、日本天文学会 2024 年秋季年会、関西学院大学、2024 年 9 月

**【ポスター発表】**

- Ryo Higuchi et al., “Insights on super-heavy UHECRs scenario with large-scale structure simulation”, UHECR2024, Malargue, Argentina (2024)
- Ryo Higuchi et al., “Correlation studies on UHECR arrival direction and source candidates, with a convolution of magnetic field and mass composition”, UHECR2024, Malargue, Argentina (2024)
- 樋口諒ほか、「大規模構造シミュレーションに基づく重元素最高エネルギー宇宙線起源の検討」、日本天文学会 2025 年春季年会、茨城大学、2025 年(予定)