

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:

開拓研究所 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び、中でも最もエネルギーの高い領域(10 の 19 乗～20 乗 eV)のものを最高エネルギー宇宙線(UHECR)と呼ぶ。UHECR の起源天体はまだ特定されていない。北半球の Telescope Array 実験(TA 実験)・南半球の Auger 実験が UHECR の到来方向分布の異方性が報告しており、これらは UHECR 起源天体の分布と相関すると考えられる。異方性から起源天体の種族を同定する事は UHECR 起源の解明において重要である。

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、その偏向角は磁場強度と宇宙線の核種に依存する。その他、伝搬中のエネルギー損失や二次粒子生成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(観測)
- (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(理論)

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。特に、今年度は Auger 実験データと CenA の相関解析報告を踏まえ、TA 実験においても、M82/NGC1068/NGC253 などの相関を検証した。
- (2) 陽子・鉄・ウランの 3 つの核種による単一質量組成を仮定し、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。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。昨年度の成果に加え、銀河磁場モデルを加えた場合の効果を調べた。

3. 結果

- (1) TA 実験において、M82/NGC1068 について、それぞれ 1.6 σ /1.5 σ の有意度(post-trial)での相関を確認した。Auger 実験が CenA 一天体と 3.6 σ の強い相関を示しているのに対し、TA 実験では M82 がエネルギー閾値 54EeV に単一ピーク、NGC1068 は 2 箇所ピークが見られた。これらの傾向の違いの解釈については TA/Auger 間の観測事象数の差異、解析手法の妥当性も含めて現在検証中である。
- (2) 銀河磁場モデル Jansson & Farrar 2012ab (JF12) を適用した結果、特にウランの場合、起源天体密度が低い場合でも 100EeV で等方的な分布を生成した。乱流磁場を加えた場合、鉄・ウランでは起源天体密度・磁場強度の範囲が広がったが、陽子の許されるパラメータ範囲は限定的だった。

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、TA 実験と Auger 実験の結果の違いの検証を進める必要がある。また、今後磁場構造に伴う偏向を考慮した解析が重要となる。
- (2) 銀河磁場を考慮してもなお、単一陽子組成で 10 の 20 乗電子ボルトの UHECR の到来方向分布を再現できるパラメータ範囲は限定される。

5. 今後の計画・展望

今年度は論文の投稿・改訂が主となった。(2)の論文の改訂に際し、実際の Auger 実験の観測視野を再現したシミュレーションを追加し、本研究の観測との比較を検討する。

2025 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

- ・樋口 諒ほか Telescope Array collaboration 「TA 実験 445:TA/Auger 実験の UHECR 到来方向分布と各起源候補天体の寄与」、日本物理学会第 80 回年次大会、広島大学、2025 年 9 月 16 日
- ・樋口 諒、「宇宙磁場と最高エネルギー宇宙線」、前景放射科学による宇宙探究研究会、名古屋大学、2025 年 9 月

【ポスター発表】

- ・樋口 諒、「100 EeV 宇宙線の小角度異方性」、～中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ 2025、理化学研究所、2025 年 5 月