

論文の内容の要旨

Search for UHECR sources considering the deflection by the galactic magnetic field
(銀河磁場偏向を考慮した最高エネルギー宇宙線起源の探索)

氏名 樋口 諒

宇宙線は広義には宇宙から飛来する原子核のことを指す。中でも 100EeV 前後の非常に高いエネルギーの宇宙線が地球に飛来することが知られており、これを最高エネルギー宇宙線と呼ぶ。最高エネルギー宇宙線は、宇宙の高エネルギー天体や現象が関わると考えられている。最高エネルギー宇宙線の起源として様々な天体や宇宙の高エネルギー現象が挙げられているが、観測的な証拠は得られていない。最高エネルギー宇宙線の起源の解明は、天体现象のみならず、現在人類が加速できる粒子の最大エネルギーを数桁超えるエネルギーの加速機構・新しい物理の解明に繋がると期待される。

現在最高エネルギー宇宙線の観測をリードしているのは、北半球のテレスコープアレイ (TA) 実験と南半球のオージェ実験である。これまでの TA・オージェ実験で観測された最高エネルギー宇宙線の到来方向分布から、特定の領域から最高エネルギー宇宙線が集中して到来している事がわかる。これを最高エネルギー宇宙線の到来方向の異方性と呼ぶ。こうした最高エネルギー宇宙線の到来方向の異方性は、宇宙線の起源天体の分布と相関していると考えられる。

これまで最高エネルギー宇宙線の到来方向分布と起源候補天体の相関を調べる研究が数多く行われてきた。近年では UHECR の起源天体種族を仮定し、そのモデルに基づくフラックスパターンと観測された UHECR イベントの相関解析から、異方性の非一様成分 f_{ani} (起源天体の異方性への寄与の割合) と平均分離角度スケール θ (起源天体とイベント到来方向の角距離の平均) の 2 つのパラメーターを推定するという手法が取られている。例えばオージェ実験による解析では、近傍のスターバースト銀河 (SBG) 起源を仮定した最尤度推定から $(f_{ani}, \theta) = (9.7\%, 12.9 \text{ deg})$ という結果を出し、近傍の SBG が有力な起源天体である事を示唆した (SBG モデル)。これらの報告により、SBG モデルが興味深い候補になってきた。

しかしこれらの解析はいくつかの問題を抱えている。最も重要な課題は、宇宙線が磁場

によって曲げられるため、到来方向からは直接起源を特定できない事である。特に銀河磁場は銀河系の構造を反映するため、宇宙線は到来方向によって偏向角が大きく異なる。また到来方向だけではなく、偏向角は宇宙線の電荷 Z とエネルギー E (剛度 $R = E/Ze$, e は電子の電気素量)にも依存するため、銀河磁場モデルと宇宙線の核種・エネルギースペクトルを同時に考慮する必要がある。2つ目の問題としてTA 実験とオージェ実験で別々の解析をした場合、南北で磁場を受ける影響が異なるという問題がある。

これまでの研究ではこうした磁場による宇宙線の偏向を全てガウス分布で近似しており、最尤度推定に用いるフラックスパターンの剛度 R 依存性は無視されていた。そのため、銀河磁場の構造に伴う宇宙線の偏向によるバイアス(銀河磁場バイアス)は正しく考慮されていなかった。

本研究ではこれまでの研究における銀河磁場バイアスを定量的に評価するため、SBG モデル・銀河磁場モデル・TA/オージェ実験の観測により得られたエネルギースペクトルと質量組成・そして各実験の観測視野に基づいた最高エネルギー宇宙線の擬似データセットを生成した。この擬似データセットに対してこれまでの研究同様の最尤度推定を適用し、銀河磁場バイアスを評価した。その結果、特に南半球の解析では、正しいパラメータ (f_{ani}, θ)の値に関わらずオージェ実験の解析結果を再現してしまう事がわかった。また、北半球・南半球・全天に視野を分けた解析を行なった結果、推定されるパラメータの分布は一致しない事がわかった。

これにより、仮にSBG モデルが正しい場合でも、銀河磁場バイアスを無視した最尤度推定では正しいパラメータの値を推定できない事が示された。

以上の結果を踏まえて、本研究では銀河磁場バイアスを取り除く新しい最尤度推定の手法を開発した。この新しい手法では、各宇宙線イベントの剛度 R に応じて最尤度推定に用いるフラックスパターンを計算し解析する。擬似データセットの解析結果から、新しい手法では本来のパラメータ (f_{ani}, θ)の値が正しく推定される事を確認した。

本研究で開発した新しい最尤度推定の手法を、現在解析可能な最新のTA/オージェ実験の最高エネルギー宇宙線の観測データに適用した。本研究で用いた観測データからは各イベントの剛度 R を知る事はできないので、オージェ実験の観測結果から決定された質量組成で尤度を重み付けした解析を行なった。イベント数を揃えた擬似データセットと観測データの検定統計量の比較から、あるパラメータの範囲(f_{ani}, θ)ではSBG モデルと一様分布モデルを分離できる事がわかった。そこで現在の観測データからオージェ実験の提唱するSBG モデルを棄却できるパラメータ(f_{ani}, θ)の95%の棄却範囲を世界で初めて求めた。TA 実験・オージェ実験の観測結果から、 $f_{ani} = 20\%$ (100%)で $\theta < 12$ (37) deg・ $\theta < 20$ (45) degの範囲がそれぞれ棄却された。

2020年代・2030年以降に計画されている大規模な宇宙線観測計画では、各イベントの質量 A の値が正しく求められた大統計の観測データが得られる事が期待される。これを踏まえて本研究では、宇宙線の質量決定精度 $\Delta \ln(A)$ を考慮した最尤度推定を擬似データセットに対し適用する事で、将来計画で求められる質量決定精度 $\Delta \ln(A)$ と宇宙線のイベント数を推定した。その結果、パラメータの値が $(f_{ani}, \theta) = (20\%, 30 \text{ deg})$ の場合では、質量の不定性が $\Delta \ln(A) < 30\%$ ・イベント数が約4000イベントの時観測データからSBGモデルを棄却できる事を示した。

以上の結果は起源天体のモデル・銀河磁場モデル・エネルギースペクトルと質量組成・各実験の視野という多くの仮定の下で得られたものであるが、本研究で開発された手法はモデルや観測データを変えた場合でも適用できる汎用性の高いものである。本研究で開発された手法と今後計画されている質量決定精度の高い大規模な宇宙線観測により、最高エネルギー宇宙線の起源天体種族が明かされる事が期待される。