

プロジェクト名(タイトル): 超高エネルギー宇宙線原子核の伝播シミュレーション

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. 本プロジェクトの研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

研究の背景: 近年テレスコープアレイ実験やピエールオージェ実験による超高エネルギー宇宙線(10^{18} eV 以上のエネルギーを持つ宇宙線)の観測によって、エネルギースペクトル、到来方向や原子核組成などが、これまでより高い精度で測定されている。超高エネルギー宇宙線の起源は未だ明らかではないが、宇宙線源を仮定した上で宇宙線原子核の伝播シミュレーションを行うことで、観測結果を再現できるような宇宙線源について議論されている。特にエネルギーの高い宇宙線原子核は、宇宙マイクロ波背景放射と宇宙線原子核の光崩壊反応によって最も大きくエネルギーを失うため、この反応を正確に計算することが伝播シミュレーションにおいて重要である。しかし、超高エネルギー宇宙線の主成分である、質量数が 60 よりも小さい、比較的軽い原子核では、実験的にも理論的にも光崩壊反応の系統誤差がよく理解できていない。そこで、近年 Photo-Absorption of Nuclei and Decay Observation for Reactions in Astrophysics (PANDORA) プロジェクトがスタートし、利用者の木戸はこのプロジェクトに参加している。PANDORA プロジェクトでは、光崩壊反応を含む光核反応を、3つの加速器の施設と2つの新しい測定手法を用いて正確に測定する計画である。木戸はこのプロジェクトに参加して、光核反応の宇宙線伝播シミュレーションへの影響について調べている。PANDORA プロジェクトでは、全ての原子核の光反応を測定することはできないので、現象論的でない予言能力のある原子核理論モデルの構築が重要である。これまでは、予言能力のある原子核理論モデルによる計算は、宇宙線伝播シミュレーションには使われてこなかった。

目的: 本プロジェクトの目的は、光核反応モデル間の違いが、超高エネルギー宇宙線原子核の観測量に与える影響を明らかにすることである。スーパーコンピュータを使うことで、大量の宇宙線原子核の伝播シミュレーションを短時間で行うことができる。

関係するプロジェクトとの関係: 本研究は、前述の PANDORA プロジェクトと関係している。

2. 具体的な利用内容、計算方法

宇宙線の伝播計算コードである CRPropa を用いて、特に

10^{18} eV 以上のエネルギーを持つ 5 種類の超高エネルギー宇宙線原子核(^1H , ^4He , ^{14}N , ^{28}Si , ^{56}Fe)について、宇宙線源が一様に分布すると仮定した上で、銀河間空間を伝播するシミュレーションを行った。その結果、観測量であるエネルギースペクトルと原子核組成を得た。CRPropa には、広く用いられている原子核反応の計算コードである TALYS の計算結果が組み込まれている。次に、原子核理論が専門の稲倉研究員と共同で、予言能力のある原子核理論モデルの一つである密度汎関数法を使った 29 種類の安定核の原子核反応の計算結果を CRPropa に組み込んで、同じように伝播シミュレーションを行った。

3. 結果

計算の結果、原子核反応がエネルギースペクトルの形状に与える影響が特に大きく、実験の統計誤差よりも大きいことが分かった。更に、個々の原子核の影響について計算し、最もスペクトルに大きな影響を与える原子核について調べた。その結果、 ^{28}Si の原子核反応による違いが最も大きいことが分かった。私は上記の計算結果を論文にまとめて、Astroparticle Physics 誌に投稿し、掲載された。

4. まとめ

私はスーパーコンピュータ HOKUSAI を使って、これまで宇宙線伝播シミュレーションに使われてこなかった、密度汎関数法で計算された光崩壊反応モデルを使って、宇宙線伝播シミュレーションを大規模に行った。このモデルは、PANDORA プロジェクトで測定されていない原子核反応を予測するために非常に重要である。そして、シミュレーションの結果を既存の原子核反応モデルである TALYS によるものと比較した。その結果、原子核反応の違いがエネルギースペクトルの形状に与える影響が特に大きく、 ^{28}Si の原子核反応による違いが最も大きいことが分かった。

5. 今後の計画・展望

今後は、密度汎関数法以外にも、厳密計算や殻模型、反対称分子動力学モデルなどの原子核理論モデルについても調べる計画である。また、今回は超高エネルギー宇宙線の起源が一様に分布すると仮定したが、この仮定では近年観測された異方性を再現できない。この宇宙線の起源の仮定を、宇宙線源の候補天体に変更して、それぞれの天体について光核反応モデルの影響を調べる計画である。

2023年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

1. (論文別刷り) “Evaluations of uncertainties in simulations of propagation of ultrahigh-energy cosmic-ray nuclei derived from microscopic nuclear models”, E. Kido et al., *Astroparticle Physics*, **152**, 102866 (2023).

【口頭発表】

1. (招待講演) E. Kido, “Nuclear reactions related to very high and ultra-high energy cosmic rays”, The 1st IReNA-Ukakuren Joint Workshop “Advancing Professional Development in Nuclear Astrophysics and Beyond”, Mitaka, Sep. 2023.
2. E. Kido, “Updates on evaluations of uncertainties in simulations of UHECRs from microscopic nuclear models,” 3rd PANDORA workshop, Okinawa, Mar. 2023.