

鉄より重い原子核として飛来する超高エネルギー宇宙線

—アマテラス粒子の謎—

概要

京都大学基礎物理学研究所の B. Theodore Zhang 特任助教（研究当時、現：中国科学院高能物理研究所准教授）、村瀬孔大特任教授（兼：ペンシルベニア州立大学教授）らの国際研究グループは、観測史上最高級のエネルギーをもつ宇宙線の一部が、鉄より重い「極重」原子核である可能性を理論的に調べました。超高エネルギー宇宙線、特に「アマテラス粒子」のような 100 エクサ電子ボルトを超える宇宙線事象の起源は長年の謎であり、どのような天体で加速されているのかは分かっていません。本研究では、極重宇宙線原子核が宇宙空間を伝わる際のエネルギー損失過程を詳しく計算し、最高エネルギー領域では、陽子や中間質量原子核よりも長く生き残って地球へ届きやすいことを示しました。また、ピエール・オージェ観測所とテレスコープアレイ実験の観測データを用いて、観測される超高エネルギー宇宙線に極重原子核がどの程度寄与し得るかを初めて制限しました。その結果、許される超高エネルギー極重原子核の生成量は、中性子星連星合体や大質量星の重力崩壊と矛盾せず、これらの天体爆発現象がアマテラス粒子のような最高エネルギー宇宙線の有力な起源候補となりうるということが分かりました。将来の超高エネルギー宇宙線観測や極限天体爆発現象の理論研究により、この仮説が検証されることが期待されます。本研究成果は、2026 年 5 月 7 日に米国の国際学術誌「Physical Review Letters」にオンライン掲載されました。

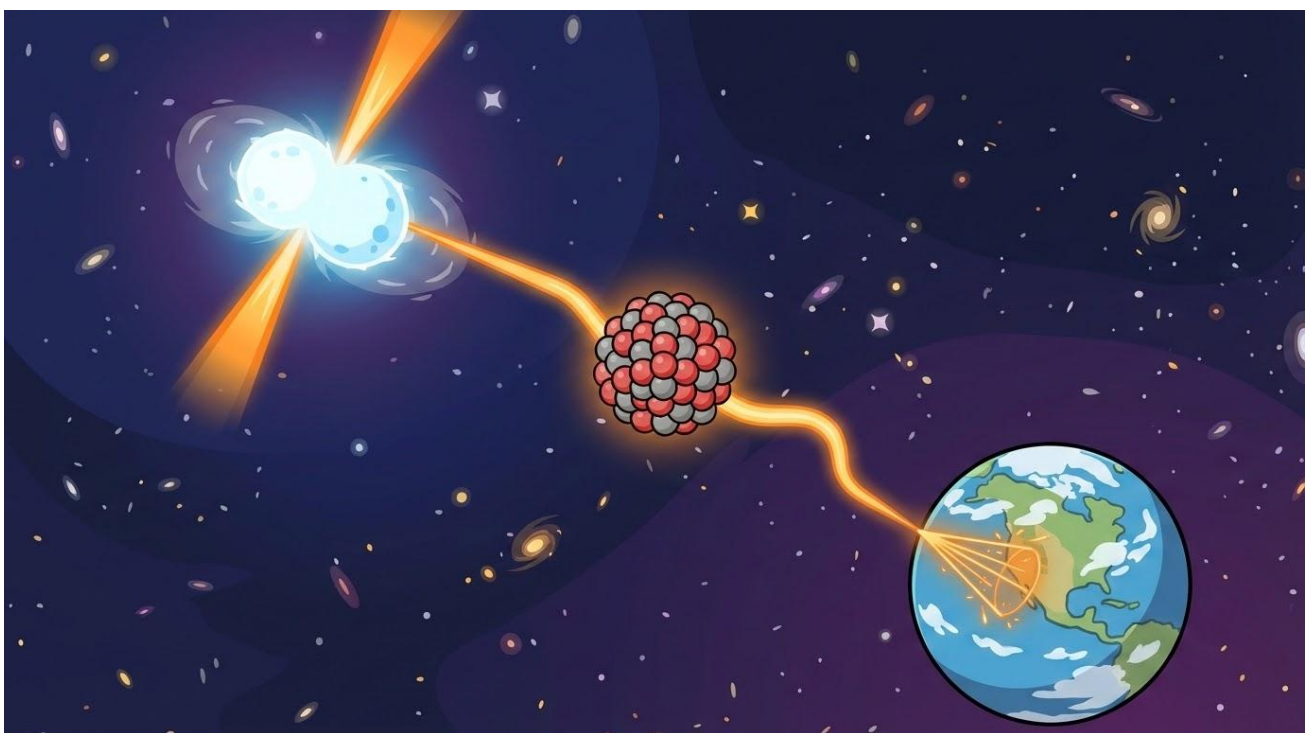


図 1：超高エネルギー極重宇宙線原子核の模式図。中性子星連星合体や大質量星の崩壊で作られた極重原子核が加速され、宇宙背景光と相互作用しながら地球へ届く様子を示す。作成：B. T. Zhang and K. Murase (Google Slides 及びその AI 支援機能を使用)

1. 背景

宇宙線は、宇宙から地球に飛来する高エネルギー粒子で、主に陽子や原子核などの荷電粒子です。その中でも、100 エクサ電子ボルト (EeV) を超える超高エネルギー宇宙線は、地上の加速器によって到達できるエネルギーをはるかに上回ります。このような粒子が宇宙のどこで、どのような仕組みによって加速されているのかは、1960 年代に約 100 エクサ電子ボルトの宇宙線が報告されて以来、60 年以上にわたる大きな謎となっています。

2021 年に、日本とアメリカが主導するテレスコープアレイ実験は、「アマテラス粒子」と呼ばれる極めて高いエネルギーの宇宙線事象を検出しました。アマテラス粒子は、日本神話の太陽神である天照大神にちなんで名付けられたもので、そのエネルギーは約 240 エクサ電子ボルトと報告されています。陽子や通常の軽い原子核、鉄原子核として銀河磁場中での荷電粒子の曲がり方を考慮すると、アマテラス粒子の飛来方向をさかのぼった先は、起源になりそうな明るい天体があまり見当たらない宇宙の空洞領域に行き当たります。このため、アマテラス粒子の正体や起源を理解する上で、これまで十分に検討されてこなかった鉄よりも重い原子核という選択肢が浮かび上がります。

本研究では、そのような鉄より重い宇宙線原子核、すなわち「極重宇宙線原子核」に注目しました。このような重い原子核は、中性子星連星合体や、大質量星の崩壊など、中性子に富んだ環境で合成されると考えられています。もしこれらの原子核が、宇宙の極端な天体現象でさらに高エネルギーまで加速されれば、最高エネルギー宇宙線の一部として地球に届く可能性があります。

2. 研究手法・成果

研究グループは、超高エネルギーの極重宇宙線原子核が宇宙空間を伝わる物理過程を詳しく計算しました。超高エネルギー宇宙線は、宇宙マイクロ波背景放射や銀河系外背景放射光と相互作用しながらエネルギーを失っていきます。特に原子核の場合、光との相互作用によって核子を失う光崩壊反応や、電子・陽電子対生成などが重要になります。

従来の宇宙線伝播計算では、鉄より重い原子核は十分に扱われていませんでした。本研究では、セレン、テルル、プラチナなどを含む多数の極重原子核について、光崩壊反応や不安定核の崩壊などの核反応データを伝播計算に組み込みました。その結果、100 エクサ電子ボルトを超える最高エネルギー領域では、極重原子核が陽子や中間質量原子核よりもエネルギーを失いにくく、比較的長い距離を生き残って地球まで到達し得ることが分かりました。

さらに、ピエール・オージェ観測所とテレスコープアレイ実験によって得られたエネルギースペクトルおよび宇宙線組成の観測データと比較し、極重宇宙線原子核成分がどの程度許されるかを評価しました。その結果、中性子星連星合体や大質量星の重力崩壊に伴う爆発現象によって加速される極重宇宙線原子核の寄与と矛盾しない範囲にあることが示されました。これらの天体現象は宇宙最強の爆発的天体現象であるガンマ線バーストを引き起こしているとも考えられています。

また、アマテラス粒子が極重宇宙線原子核であれば、銀河磁場による曲がり方が大きくなるため、通常の軽い原子核や鉄原子核として推定した場合とは異なる方向に起源天体が存在し得ることも示しました。これは、アマテラス粒子が一見すると起源天体の見当たらない宇宙の空洞領域から来たように見えるという問題を解決できる可能性があります。

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、最高エネルギー宇宙線の一部が鉄より重い極重宇宙線原子核である可能性を示し、その寄与を観測データから初めて制限したものです。これは、宇宙線の起源天体を探る

うえで新しい視点を与えます。

一つの予言は、極重原子核が最高エネルギーで大きく寄与する場合、宇宙線空気シャワーの観測から推定される平均組成が、鉄よりも重い方向へ変化することです。この特徴は、ピエール・オージェ観測所の性能向上計画など、将来の宇宙線観測計画によって検証できる可能性があります。

また、本研究の枠組みは、北半球のテレスコープアレイ実験と南半球のピエール・オージェ観測所のデータから示唆されている最高エネルギー宇宙線スペクトルの違いを理解する手がかりにもなります。近傍で起きた大質量星の重力崩壊や中性子星連星合体のような天体現象によって、極重原子核を含む宇宙線が加速されていれば、観測を上手く説明できる可能性があります。一方で、極重原子核が合成された後、天体内部で壊れずに加速され、宇宙空間へ脱出できるかどうかなど、大質量星の重力崩壊や中性子星連星合体についての理論研究を進めていく必要があります。合わせて、ガンマ線やニュートリノを含むマルチメッセンジャー観測も、最高エネルギー宇宙線の起源天体に迫る重要な手段になると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、京都大学基礎物理学研究所、ペンシルベニア州立大学、バージニア工科大学、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構などの国際共同研究として行われました。

本研究は、米国国立科学財団、米国エネルギー省科学局、日本学術振興会科学研究費助成事業、文部科学省世界トップレベル研究拠点プログラム、柳澤衛氏からの寄附などの支援を受けました。具体的な課題番号は、NSF AST-1908689、AST-1908960、AST-2108466、AST-2108467、AST-2308021、PHY-2209420、DOE DE-SC0020262、JSPS KAKENHI 20H01901、20H05852、22K03630、23H04899 です。研究課題名などの正式表記は、公開前に各機関の記載ルールに合わせてご確認ください。

<用語解説>

注1：超高エネルギー宇宙線

宇宙から地球に飛来する極めて高いエネルギーをもつ粒子です。特に100エクサ電子ボルトを超える宇宙線は、地上の加速器で到達できるエネルギーを大きく上回り、その起源は宇宙物理学の大きな謎です。

注2：エクサ電子ボルト (EeV)

エネルギーの単位です。1エクサ電子ボルトは10の18乗電子ボルトです。100エクサ電子ボルトは10の20乗電子ボルトに相当し、約16ジュールです。アマテラス粒子の報告値である約240エクサ電子ボルトは約38ジュールで、硬式テニスボールが時速130km程度で飛ぶときの運動エネルギーに相当します。ただし、このエネルギーが宇宙線原子核たった1個に集中している点が大きく異なります。

注3：アマテラス粒子

テレスコープアレイ実験が報告した、観測史上最高級のエネルギーをもつ宇宙線事象です。日本神話の太陽神である天照大神にちなんで名付けられました。報告されたエネルギーは約240エクサ電子ボルトですが、測定値にはまだ大きな不確かさが残っています。

注4：極重原子核

本研究では、宇宙線粒子としての、鉄より重い原子核を指します。セレン、テルル、プラチナなどが例です。これらの原子核が超高エネルギーまで加速されると、最高エネルギー宇宙線の一部として地球に届く可能性があります。

注5：中性子星連星合体

非常に高密度な天体である中性子星同士が合体する現象です。鉄より重い元素を合成する場所の一つと考えられており、重力波を出す天体現象としても知られています。継続時間が短いガンマ線バーストを引き起こしていると考えられています。

注6：ガンマ線バースト

宇宙で最も明るい爆発現象の一つで、短時間に強いガンマ線を放出します。継続時間が長いガンマ線バーストは、大質量星の重力崩壊現象に伴って、ブラックホールや強力な磁場を持つ中性子星が形成される際に起こると考えられています。鉄より重い元素の合成や、宇宙線を極めて高いエネルギーまで加速する天体としても注目されています。

注7：光崩壊反応

高エネルギーの原子核が宇宙背景放射などの光子と衝突し、陽子や中性子などを放出して崩壊する反応です。宇宙線原子核が長い距離を伝わる際に、どれだけ壊れずに生き残るかを決める重要な過程です。

注8：電子・陽電子対生成

高エネルギー粒子が光子と相互作用し、電子と陽電子の対を作る過程です。この過程によって宇宙線はエネルギーを失います。イオン化された高エネルギーの極重原子核では電荷が大きいため、このエネルギー損失も重要になります。

注9：宇宙線組成

宇宙線が、陽子、ヘリウム、酸素、鉄、あるいはさらに重い原子核など、どの種類の粒子がどの程度含まれているかを表します。宇宙線が地球大気に衝突して生じる空気シャワーの発達の仕方を観測することで、組成を統計的に推定します。

注10：空気シャワー

高エネルギー宇宙線が地球大気に衝突したとき、多数の二次粒子が連鎖的に作られる現象です。空気シャワーの広がり方や発達の深さを調べることで、もとの宇宙線が軽い粒子だったのか、重い原子核だったのかを推定できます。

注11：ピエール・オージェ観測所とテレスコープアレイ実験

いずれも超高エネルギー宇宙線を観測する大型実験です。ピエール・オージェ観測所は南半球、テレスコープアレイ実験は北半球で観測を行っており、宇宙線のエネルギー、到来方向、組成を調べています。

注12：マルチメッセンジャー観測

宇宙線だけでなく、電磁波、ガンマ線、ニュートリノ、重力波など、複数の情報を組み合わせて宇宙の天体現象を調べる観測手法です。超高エネルギー宇宙線の起源を特定する上で重要です。

<研究者のコメント>

超高エネルギー宇宙線の起源は、宇宙粒子物理学における最大の謎の一つです。本研究は、極重原子核からなる超高エネルギー宇宙線の可能性を理論的に調べたものです。アマテラス粒子の起源を含め、今後の研究の進展に貢献できれば幸いです。

村瀬孔大

<論文タイトルと著者>

タイトル：Ultraheavy Ultrahigh-Energy Cosmic Rays（極重・超高エネルギー宇宙線）

著 者 : B. Theodore Zhang, Kohta Murase, Nick Ekanger, Mukul Bhattacharya, Shunsaku Horiuchi

掲 載 誌 : Physical Review Letters DOI : 10.1103/221m-gvs3