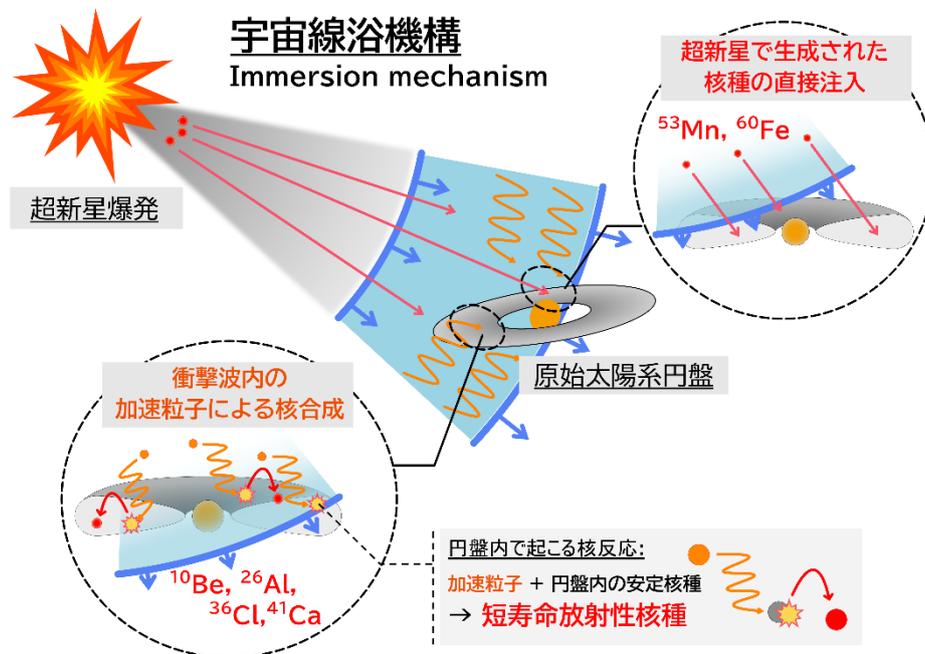


過去の超新星が放った宇宙線が地球誕生のカギだった ——「宇宙線浴」メカニズムで太陽系の放射性元素の起源に迫る——

発表のポイント

- ◆地球型惑星の形成に必要とされる短寿命放射性核種 (^{26}Al など) の起源の謎を解く、新説「宇宙線浴 (Immersion)」メカニズムを提案しました。
- ◆このメカニズムは、太陽系を破壊しない“安全な距離”で起きた超新星によって、隕石に記録されたすべての短寿命放射性核種の量を矛盾なく説明することに、世界で初めて成功しました。
- ◆このプロセスは、太陽のような星が形成される星団環境では珍しくなく、地球のような惑星が従来の理解よりも“ありふれた”存在である可能性を示します。



「宇宙線浴 (Immersion)」メカニズムの概念図

超新星爆発の衝撃波が、原始太陽系円盤全体を包み込み、内部で核反応を引き起こす様子

概要

東京大学宇宙線研究所の澤田涼特任研究員（研究当時：大学院総合文化研究科 学振特別研究員）と、同大学大学院総合文化研究科の黒川宏之准教授、諏訪雄大准教授、瀧哲朗特任研究員、京都大学のLEE Shiu-Hang 准教授（兼：東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構 客員科学研究員）、福井県立大学の谷川衝准教授らによる研究グループは、地球のような岩石惑星の誕生に不可欠な短寿命放射性核種 (^{10}Be 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{53}Mn 、 ^{60}Fe)（注1）が、どのようにして初期の太陽系にもたらされたかという天文学の長年の謎を解決する新しい理論「宇宙線浴 (Immersion)」メカニズムを提案しました。

本研究が提案する新しいメカニズムは、太陽系近傍で起きた超新星爆発（注2）の物質が太陽系円盤に「注入」されるとともに、爆発の衝撃波に閉じ込められた高エネルギー宇宙線に円盤全体が包み込まれて、円盤内で短寿命放射性核種が「合成」されるというものです。

この理論モデルに基づくと、太陽系を破壊しない安全な距離（約1パーセク、約3.3光年）で起きた超新星爆発によって、隕石分析から推定される短寿命放射性核種の存在量を一貫して説明できることが示されました。これは、従来のどのモデルも説明できなかった問題を解き明かす成果であり、太陽系の起源、ひいては地球型惑星の普遍性に迫る重要な知見です。

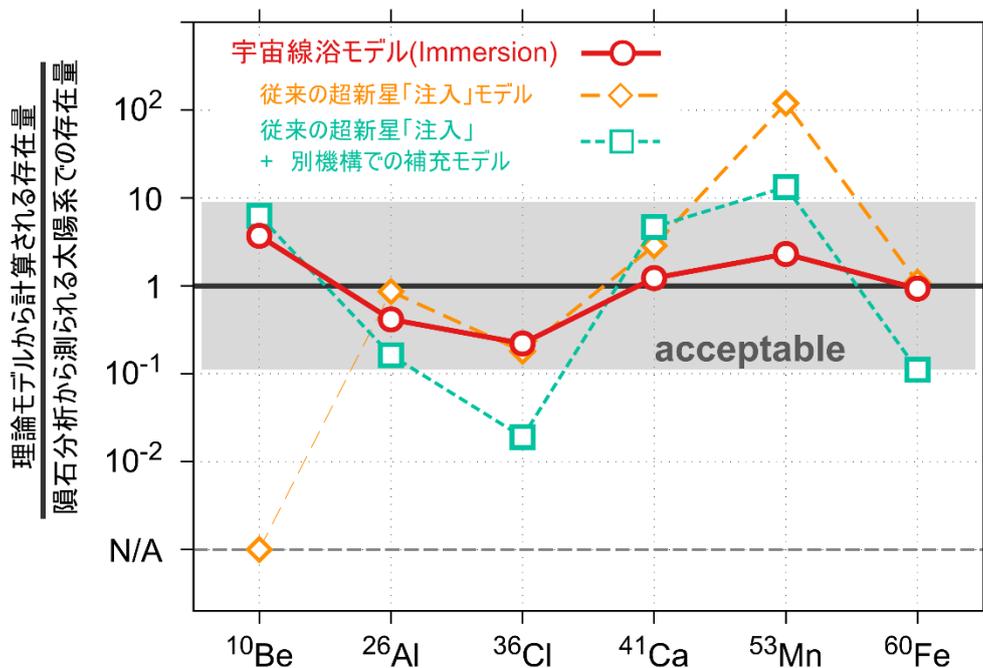


図1：各モデルによる放射性元素の存在量の比較

隕石から推定される初期太陽系の存在量（グラフ中央の「1」のライン）に対し、各モデルの計算値をプロットしたもの。本研究の「宇宙線浴」メカニズムは、すべての元素を許容範囲（灰色の帯）内で説明できている。（論文の図1aを改変）

発表内容

地球のような岩石惑星が形成されるためには、その材料となる微惑星が、短寿命放射性核種の一種であるアルミニウム26 (^{26}Al) の崩壊熱で内部から加熱され、水や他の揮発性物質を失うプロセスが重要であったと考えられています。この短寿命放射性核種は、太陽系惑星がまだガスと塵の円盤（原始惑星系円盤）だった頃、近くで起きた超新星爆発によって運び込まれたとする説（「注入モデル」）が長年有力視されてきました。

しかし、この従来モデルには大きな課題がありました。まず、太陽系の隕石の証拠を説明できるほどの短寿命放射性核種を供給するには、超新星が至近距離で起こる必要がありましたが、その場合、爆発の衝撃で円盤自体が破壊されてしまい、惑星形成どころではなくなるという深刻な矛盾がありました。さらに、このモデルでは、隕石で見つまっている多くの短寿命放射性核種の存在比率を、ひとつのシナリオで矛盾なく説明できませんでした。このように、太陽系の惑星材料の“レンピ”を矛盾なく説明できる統一的なシナリオが存在しないことが、太陽系形成を紐解くうえで大きな課題となっていました。

この度、本研究チームは、超新星爆発は物質を「注入」するだけでなく、その衝撃波の内部に高エネルギーの宇宙線を閉じ込めている点に着目しました。そして、円盤がこの衝撃波に包

み込まれたときに、一時的に「宇宙線の風呂 (Cosmic-Ray Bath)」に浸かることで宇宙線が円盤のガスや塵と核反応を起こし、アルミニウム 26 やベリリウム 10 などが円盤内部で“その場で”合成されるという新しい理論、「宇宙線浴」メカニズムを提案しました。今回、この理論モデルに基づいた計算の結果、太陽系を破壊しない安全な距離（約 1 パーセク、約 3.3 光年）で起こった超新星によって、隕石から推定される ^{10}Be から ^{60}Fe までのすべての主要な短寿命放射性核種の存在量を再現できることが示されました（図 1）。

さらに、星が誕生する環境（星団）においては、太陽のような星が 1 パーセク以内の距離で超新星と遭遇する確率が 10-50% に達することが統計的に明らかにされました。これは、太陽系が経験した「宇宙線浴」は例外的な幸運ではなく、宇宙ではありふれたプロセスであった可能性を示唆します。本研究は、地球の誕生を偶然の奇跡ではなく、星団内で普遍的に生じうる自然な過程として捉え直すものであり、太陽系外における第二の地球探しに新しい理論的基盤を提供します。

発表者・研究者等情報

東京大学

宇宙線研究所

澤田 涼 特任研究員

研究当時 大学院総合文化研究科 学振特別研究員

大学院総合文化研究科

黒川 宏之 准教授

兼：東京大学 大学院理学系研究科 准教授

諏訪 雄大 准教授

兼：京都大学 基礎物理学研究所 基研特任准教授

瀧 哲朗 特任研究員

京都大学

大学院理学研究科

LEE Shiu-Hang 准教授

兼：東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構 客員科学的研究員

福井県立大学

情報センター

谷川 衝 准教授

論文情報

雑誌名：Science Advances

題名：Cosmic-Ray Bath in a Past Supernova Gives Birth to Earth-Like Planets

著者名：Ryo Sawada, Hiroyuki Kurokawa, Yudai Suwa, Tetsuo Taki, Shiu-Hang Lee, Ataru Tanikawa

DOI：10.1126/sciadv.adx7892

URL：<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adx7892>

研究助成

本研究は、科研費「若手研究(課題番号:21K13964)」「特別研究員奨励費(課題番号:22KJ0528)」「学術変革領域研究(A)(課題番号:22H05150)」「学術変革領域研究(A)(課題番号:24H02236)」「学術変革領域研究(A)(課題番号:24H02245)」「基盤研究(B)(課題番号:24K00668)」「若手研究(課題番号:21K13983)」「基盤研究(C)(課題番号:24K07092)」「基盤研究(C)(課題番号:24K07040)」および日本科学協会「笹川研究助成(課題番号:2025-2031)」の支援により実施されました。

用語解説

(注1) 短寿命放射性核種 (^{10}Be 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{53}Mn 、 ^{60}Fe): 半減期が500万年以下の放射性同位体。太陽系形成(約46億年前)の最初期にのみ存在した。現在は消滅しているが、隕石中にその崩壊の痕跡(娘核種)が残されており、太陽系初期の年代測定や物理環境を知る上で極めて重要な「時計」となる。中でもアルミニウム26 (^{26}Al) は短寿命放射性核種の代表格で、半減期は約72万年。その崩壊熱が、初期太陽系の微惑星(惑星の材料)を内部から加熱し水や他の揮発性物質を揮発させたと考えられている。このプロセスが、地球のような岩石惑星の形成に重要な役割を果たしたとみられている。

(注2) 超新星爆発: 質量が太陽の約8倍以上の重い星が、その一生の最後に起こす大規模な爆発現象。爆発によって、星の内部で核融合により合成された重い元素や、爆発時に新たに合成された放射性元素が宇宙空間に放出され、次世代の星や惑星の材料となる。