

「宇宙線浴」メカニズムで太陽系の短寿命放射性核種の起源に迫る

澤田 涼

Sawada Ryo

1. はじめに

地球はしばしば「水の惑星」と呼ばれる。しかし、太陽系外で存在が予想される「海洋惑星」は質量の数十%を水が占めており、それらと比較すると地球全体の質量に占める水の割合はごく小さい。

海と陸が共存する地球の形成には、初期太陽系に存在した半減期が数百万年以下の短寿命放射性核種が重要な役割を果たしている可能性がある。代表例は ^{26}Al である。 ^{26}Al の崩壊熱は微惑星を内部から加熱し、水を含む揮発性物質を散逸させたと考えられている^{1,2)}。ところが、太陽系が形成された約46億年前に、 ^{26}Al をはじめとする短寿命放射性核種がどのように原始太陽系へ供給されたかは、長く未解決の問題であった。これらの核種はどこから来たのか。

筆者らは、短寿命放射性核種の起源を説明する、新説「宇宙線浴 (Immersion)」メカニズムを提案した³⁾。このメカニズムは、近傍で起きた超新星爆発によって太陽系へ物質を送り込むだけでなく、その衝撃波に閉じ込められた宇宙線によって原始太陽系円盤内でも核種を合成したとする。更にこのメカニズムは、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た。本稿では、この着想に至った背景と、その物理像、モデルから得られた結果を紹介する。

2. 隕石に残された放射性核種の記録

短寿命放射性核種そのものは、現在の太陽系にはほとんど残っていない。初期太陽系に存在した ^{10}Be 、

^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{53}Mn 、 ^{60}Fe 等は、放射性崩壊後に生じる娘核種の過剰として隕石中に記録されている。例えば、 ^{26}Al は ^{26}Mg へ壊変する。 Al を多く含む鉱物ほど ^{26}Mg が過剰なら、その鉱物が固まった時点で ^{26}Al が存在したと分かる。隕石から求める「初期存在量」は、この同位体相関から復元した値である⁴⁾。

重要な試料が、 $\text{Ca} \cdot \text{Al}$ に富む包有物 (CAI) である。CAIは、太陽系で最初期に形成された固体物質である。多くのCAIは、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} \approx 5.2 \times 10^{-5}$ というほぼ共通の初期比を示す。これは、CAI形成時に ^{26}Al が円盤へ広く供給されていたことを示唆する⁴⁾。これらの存在比は、太陽系形成の年代を測る「時計」であると同時に、太陽が誕生した天体環境を探るトレーサでもある。

本研究では、 ^{10}Be 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{53}Mn 、 ^{60}Fe の6核種に注目した。半減期は約10万年から400万年まで異なる。起源も同じではない。例えば、 ^{10}Be は通常の恒星内部ではほとんど合成されない。高エネルギー粒子がO等の原子核を壊す破碎反応が必要である。反対に、 ^{60}Fe は大質量星での元素合成を経て太陽系への供給を必要とする。したがって、初期太陽系の核種組成を説明するには、異なる同位体合成過程を整合的に組み合わせる必要がある。

3. 3つの起源仮説は何を説明できるか

これまで、3つの起源が議論されてきた。第一は、母体分子雲から核種を受け継ぐ「継承」である。第二は、若い太陽の高エネルギー粒子が円盤を照射する「その場生成」である。第三は、近傍超新星の噴

出物を円盤へ取り込む「注入」である。継承には時間尺度の問題がある。半減期が短い核種は、分子雲の進化と星形成の間に減衰する。その場生成は ^{10}Be を説明できるが、 ^{60}Fe を作れない。また、照射領域が円盤内側に偏る。

超新星注入モデルにも2つの難点がある。第一に、注入だけでは核種比が合わない。 ^{26}Al と ^{41}Ca に合わせて注入量を決めると、 ^{53}Mn を隕石からの推定値の約100倍も供給する⁵⁾。

第二は、供給量と円盤の生存を両立しにくいことである。十分な ^{26}Al を直接注入するには、超新星が約0.3 pc (パーセク：約3.26 光年) 以内で起こる必要がある。しかし、この距離では衝撃波が円盤を著しく削る⁶⁾。近づけば核種は足りるが、円盤が壊れる。離れば円盤は残るが、核種が足りない。注入効率の調整だけでは、この矛盾を解消できない。

3つの仮説は、それぞれ一部を解く。特に、その場生成は ^{10}Be を作り、注入は ^{60}Fe を運ぶ。しかし、単独では量・時刻・分布を満たせない。

4. 超新星衝撃波がつくる「宇宙線浴」

筆者らの提案する宇宙線浴モデルは、第四の供給メカニズムではない。近傍超新星爆発によって「注入」と、宇宙線による「その場合成」が同時に達成されることを明らかにした。

超新星衝撃波は、核種を運ぶ物質の流れであると同時に、超新星残骸は銀河宇宙線の主要な加速源の1つでもある。衝撃波では荷電粒子が繰り返し散乱され、陽子を中心とする粒子が高エネルギーまで加速される⁷⁾。特に1 GeV 以下の比較的低エネルギーの粒子は、直ちに銀河空間へ逃げるのではなく、長時間にわたり衝撃波の内側に閉じ込められる⁸⁾。以下では、これらを「閉じ込め宇宙線」と呼ぶ。主成分は陽子と α 粒子である。

超新星衝撃波が原始太陽系へ到達すると、円盤は超新星噴出物だけでなく、衝撃波内に蓄積された大量の加速粒子にも包み込まれる。筆者らは、この一時的な状態を、円盤全体が「宇宙線の風呂」に浸かることになぞらえ、宇宙線浴メカニズムと呼んだ(図1)。超新星で作られた ^{53}Mn や ^{60}Fe 等は従来どおり円盤へ直接注入される。一方、加速された陽子や α 粒子は円盤中の O, Mg, Si 等と反応し、 ^{10}Be , ^{26}Al ,

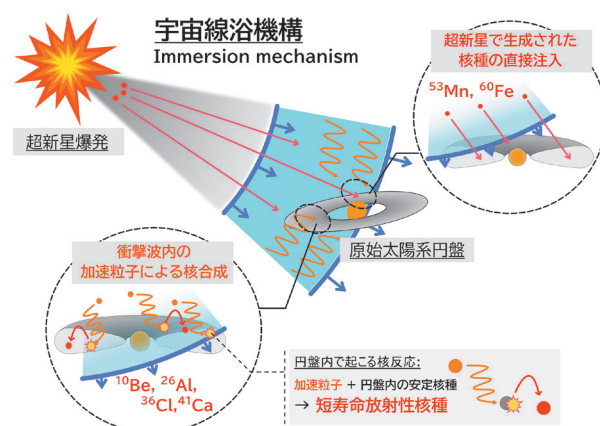


図1 「宇宙線浴」メカニズムの概念図

超新星で生成された核種が原始太陽系円盤へ直接注入される。同時に、衝撃波内の加速粒子が円盤を照射し、短寿命放射性核種を非熱的に合成する。文献3)を基に作成

^{36}Cl , ^{41}Ca 等を円盤内でその場生成する。すなわち、超新星衝撃波が円盤を通過する際には、「外部からの注入」と「円盤内部でのその場核合成」が、同じ超新星事象の中で同時に進行すると自然に考えられる。

5. 円盤内部でのその場核合成

円盤内部でのその場核合成では、円盤は局所的な粒子ビームを受けるのではなく、衝撃波内部の閉じ込め宇宙線へ丸ごと飲み込まれる。

核合成プロセスの具体例を挙げる。例えば ^{26}Al は、高エネルギー陽子が円盤内に含まれる ^{27}Al に衝突し

$$^{27}\text{Al} + p \rightarrow ^{26}\text{Al} + p + n \quad (1)$$

という反応によって生成される。核種ごとに、主要な標的核と反応エネルギーは異なる。

反応断面積は、粒子のエネルギーに強く依存する。多くの反応は、断面積は数十 MeV から数百 MeV で大きくなる。したがって、核種収量は宇宙線の総エネルギーだけでは決まらない。低エネルギー側のスペクトル形状が重要になる。銀河へ逃げにくい閉じ込め宇宙線は、まさにこのエネルギー領域を多く含む。

本研究ではCAI形成前の照射を仮定した。ただし核反応は、円盤ガスだけでなく小さな固体粒子の内部でも起こり得る。1 GeV 以下の陽子の停止距離を考えると、半径3~4 cm 程度までの岩石粒子を貫通できる。CAIの多くはこれより小さい。そのため、

宇宙線浴がCAI形成直前又は形成途中に起きた場合でも、粒子内部まで照射できる可能性がある。

円盤内で合成される短寿命放射性核種の数値は、次式で評価した。

$$N_{\text{SLR}^{\text{syn}}} = \Delta t \sum_{ij} \gamma_i N_j \int_{E_0}^{\infty} \sigma_{ij}(E) dF_{\text{CR}}/dE dE \quad (2)$$

ここで、 N_j は標的核 j の数密度、 γ_i は陽子に対する宇宙線成分 i の個数比、 $\sigma_{ij}(E)$ は反応断面積である。 dF_{CR}/dE は宇宙線のエネルギースペクトルを表す。 E_0 は反応のしきい値、 Δt は衝撃波が円盤を通過する時間である。式(2)は、標的核の数、宇宙線フラックス、反応断面積、照射時間を積み上げた形になっている。

本計算では、超新星の運動エネルギーの10%が宇宙線へ移ると仮定した。粒子の運動量分布には、指数約2.1のべき乗則を用いた。同位体の反応断面積には、核反応計算コードTALYSによる断面積を用いた⁹⁾。衝撃波殻が円盤を通過する時間は、距離1 pcで約43年と見積もられる。これはCAI形成までの時間より十分に短い。そのため、直接注入と非熱的核合成をほぼ同時の事象として扱える。

6. 6核種の起源を1つの超新星で説明する

計算では、超新星までの距離 d と、核種供給からCAI形成までの時間差 t_{delay} を変化させた。最も整合的な条件は、 d が約1 pc、 t_{delay} が約45万年であった。この条件では、6核種すべてにおいて、計算値と隕石からの推定値の差が1桁以内に収まる(図2)。

核種ごとの役割分担も明確である。 ^{10}Be は、ほぼ宇宙線照射だけで作られる。 ^{60}Fe は、ほぼ直接注入だけで供給される。 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca には宇宙線照射による合成が大きく寄与する。 ^{53}Mn には注入成分が大きく寄与する。1つの超新星が、核種によって異なる2つの供給経路を同時に提供する。この点が宇宙線浴モデルの核心である。

供給後の放射性崩壊も重要である。特に ^{41}Ca の半減期は約10万年と短い。核種の供給直後にCAIが形成されると、 ^{41}Ca が多すぎる。一方、核種供給からCAI形成までの時間間隔が長すぎると、 ^{41}Ca は崩壊によって減少し、今度は不足する。隕石学からは、核種供給からCAI形成まで約20~70万年という独

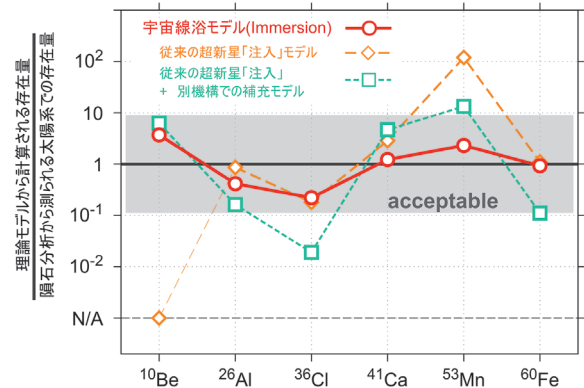


図2 各モデルが予測する短寿命放射性核種の存在量

縦軸はモデルによる予測値を隕石からの推定値で割った比で、1が完全一致を表す。灰色は不確かさを考慮した許容範囲である。宇宙線浴モデル(赤)は、6核種をすべて許容範囲内で説明する。文献3)の図1を改変

立の制約がある。最適値の約45万年は、この範囲内にある。複数核種の半減期の違いが、供給時刻を絞り込んでいる。

約1 pcという距離は、円盤破壊が深刻になる0.3 pcより十分に遠い。それでも宇宙線照射による合成が働くのは、円盤が衝撃波内の加速粒子へ直接さらされるためである。また、衝撃波の圧力は若い太陽の磁気圏を1 au(地球と太陽の平均距離:約 1.5×10^{11} m)未満まで圧縮し得る¹⁰⁾。宇宙線は円盤の広い領域へ到達できる。

更に、星が誕生する環境(星団)においては、太陽のような星が1 pc以内の超新星を経験する確率は、約10~50%に達することが見積もられた。これは、宇宙線浴が極端にまれな事象とは限らないことを示す。ただし、星団の力学、円盤寿命、超新星発生を同時に追った数値計算ではない。現時点では統計的な見積りである。

7. 課題と展望

本研究は、非熱的核合成を解析的に評価した第一段階のモデルである。円盤は一樣に照射されると仮定した。宇宙線輸送、円盤磁場、ガスとダストの密度構造は簡略化している。最小質量太陽系円盤では、およそ10 au以内が1 GeV程度の陽子に対して厚かった(相互作用によってほぼ通過できない)可能性がある。内側と外側で核種の生成量が異なったかもしれない。

今後は、超新星衝撃波と円盤の流体力学的相互作用を計算する必要がある。また、閉じ込め宇宙線のスペクトルと逃走も重要である。更に、宇宙線が円盤内をどう伝播するか、生成核種がガスやダストへどう取り込まれるかを追う必要がある。

核反応断面積にも課題が残る。実験値に限られる反応では、TALYS による理論値を使った。断面積の不確かさは、核種によって 1 桁程度に達し得る。また、超新星衝撃波の低エネルギー宇宙線スペクトルは直接観測しにくい。断面積と宇宙線スペクトルの不確かさは、収量計算の主要な誤差源である。原子核実験と超新星残骸観測の両方から制約を強める必要がある。

これらは、モデルの弱点であると同時に検証手段でもある。宇宙線照射は、核種ごとの空間的不均一や、安定同位体の小さな異常を残す可能性がある。 ^{26}Al をほとんど含まない少数の CAI も知られている。円盤内の遮蔽や粒子輸送を定量化すれば、隕石試料から宇宙線浴モデルを検証できる。

検証には 3 つの方向がある。第一は原子核実験である。 $^{27}\text{Al}(\text{p,pn})^{26}\text{Al}$ 等について、数十 MeV から数百 MeV の断面積を精密に測る必要がある。第二は超新星残骸の観測である。 γ 線観測は高エネルギー粒子をとらえるが、本研究で重要な 100 MeV 前後の粒子は直接見えにくい。そのため分子雲の電離や非熱的放射を組み合わせ、低エネルギー成分を制約する必要がある。第三は隕石分析である。核種間の相関や CAI ごとの不均一性は、照射領域と時刻の情報を残している可能性がある。

本モデルは、太陽系が実際にこの経路だけで形成されたことを証明したものではない。分子雲から受け継いだ背景成分や、若い太陽による追加照射も存在し得る。重要なのは、円盤を破壊しない距離にある 1 つの超新星が、主要 6 核種を同時に説明できる物理的経路を示した点である。今後の計算と試料分析によって、他の起源との寄与を分離する必要がある。

宇宙線浴メカニズムは、超新星を「物質を運ぶ天体」から「物質と粒子線を同時に供給する天体」へ捉え直す。短寿命放射性核種の起源は、超新星元素合成だけの問題ではない。衝撃波加速、宇宙線輸送、非熱的核反応、惑星形成を結ぶ問題である。今後は、理論計算・天体観測・隕石分析を組み合わせ、宇宙線浴メカニズムの妥当性と詳細を更に検証していきたい。

参考文献

- 1) Lichtenberg, T., *et al.*, *Nat. Astron.*, **3**, 307-313 (2019)
- 2) Newcombe, M., *et al.*, *Nature*, **615**, 854-857 (2023)
- 3) Sawada, R., *et al.*, *Sci. Adv.*, **11**, eadx7892 (2025)
- 4) Desch, S.J., *et al.*, *Protostars and Planets VII*, 759-798 (2023)
- 5) Ouellette, N., *et al.*, *ASP Conf. Ser.* **341**, 527-538 (2005)
- 6) Sawada, R., *et al.*, *Astrophys. J.*, **963**, 68 (2024)
- 7) Drury, L.O., *Rep. Prog. Phys.*, **46**, 973-1027 (1983)
- 8) Ohira, Y., *et al.*, *Astron. Astrophys.*, **513**, A17 (2010)
- 9) Koning, A., *et al.*, *Eur. Phys. J. A*, **59**, 131 (2023)
- 10) Miller, J.A. *et al.*, *Astrophys. J.*, **934**, 32 (2022)

(理化学研究所 数理創造研究センター (iTHEMS))