Distribution of Europium in The Milky Way Disk; Its Connection to Planetary Habitability and The Source of The R-Process

GAゼミ　2025/05/13　山口未沙

Evan M. Carrasco, Matthew Shetrone, Francis Nimmo, Enrico Ramirez-Ruiz, Joel Primack, Natalie M. Batalha (Nov 16, 2024) http://arxiv.org/abs/2411.10711

【アブスト】
岩石型惑星のマントルに含まれるr過程元素であるトリウム(Th)とウラン(U)同位体が多すぎる場合、放射性崩壊によるエネルギー過剰により、惑星表面の生命生存環境を形成するのに必要と考えられている、惑星のダイナモ作用*1を破綻させてしまう。そのため、主星のタイプ別に惑星のThやUの存在量の固有分散を知ることは、恒星タイプの違いによってホストする惑星の生命生存可能性がどれだけ左右されるかを知るために重要である。彼らは、一般的に観測でThとUの代理元素とされるユウロピウム(Eu)の存在量が主星と惑星とで同じとして、近くのF, G, K型星の光球の分光観測データから、[Eu/H]の標準偏差が僅か0.025 dexであることを明らかにした。また、太陽金属量ほどの恒星のみが惑星のダイナモ作用を持続できるEu存在量をもつことや、観測された[Eu/α]と[α/H]の逆相関から、α元素とr過程元素の生成過程が全く同一ではないことを示した。

【ゴール】
生命生存可能な岩石型惑星をホストできるようなF, G, K型星の金属量に制限をつけること。 r過程元素の起源天体に有意な制限を設けること。

【オリジナリティ】
太陽に近いタイプの恒星がホストする惑星の生命生存可能性を、近傍の観測データを用いて、惑星のダイナモ作用とr過程元素との関係性に基づいて議論していること。

【ロジック】
用いた2つの観測データ: ▲ HARPS GTO planet search program で観測された577個の、6645Å吸収線でEu測定可能なF, G, K型星 (Delgado Mena et al. 2017)
▼ multi-telescope campaign で観測された377個の、4129Å吸収線でEu測定可能なF, G型星 (Battistini & Bensby 2016 & Bensby et al. 2014)

恒星の金属量([α/H]) と有効温度(T_{eff}) は、 観測される[Eu/H] の系統誤差の原因となる。そこでまず、▲と▼のデータの [α/H] – T_{eff} 平面に対する[Eu/H]分布の等高線を回帰的に線形フィットし、 系統誤差を除去。更に、▲と▼が共に観測した68個の恒星データ(■)を利用し、より系統誤差を小さくした。その結果、[Eu/H]の標準偏差を、▲では0.057dexに、▼では0.065dexに減らせた。全データの標準偏差の平均値$\sigma_{\mathrm{Average}}$、▲のポアソンノイズによる標準偏差$\sigma_{\mathrm{PoissonDM}}$、▼のポアソンノイズによる標準偏差$\sigma_{\mathrm{PoissonBB}}$を求め、平均値の式： $\sigma^2_{\mathrm{Average}} = \frac{\sigma^2_{\mathrm{PoissonDM}} + \sigma^2_{\mathrm{PoissonBB}} + 2\sigma^2_{\mathrm{Intrinsic}}}{4}$ を用いることで、固有分散 $\sigma_{\mathrm{intrinsic}} = 0.025\ \mathrm{dex}$ を導出。考慮したα元素: Si, Mg, Ti, Ca。

-図1. [Eu/α]の違いに対するコア対流の感度の時間進化。カラーバーは、ダイナモ作用の強度を表す (エントロピーとの関係は Nimmo et al. 2020 参照) 。赤破線は、地球と同じ組成、金属量、大きさの惑星でのダイナモ作用の破綻が起こる[Eu/α]=0.08 (Nimmo et al. 2020)で、これを超えると1億年以上ダイナモ作用が破綻。黒実線は、マントル温度の等高線。

-図2. [α/H]~0の恒星のみが、赤破線以下の [Eu/α]をもつ。負の勾配 = α元素 (CC-SNeが主な生成源) よりもEuがゆっくり増えている。これは中性子星が連星系を形成してから合体するまでに時間がかかることから説明でき、その遅延時間も中性子星合体のモデル(e.g., Siegel 2019)と一致していることから、Euの主な生成源が中性子星合体であることを示唆。

-図3. 逆相関から、r過程元素の生成源は、CC-SNeともSNe-Iaとも異なるという制約が得られる。
(c): 逆相関 → r過程元素生成の大部分を中性子星合体が占める場合、その遅延時間はSNe-Iaとは異なる。

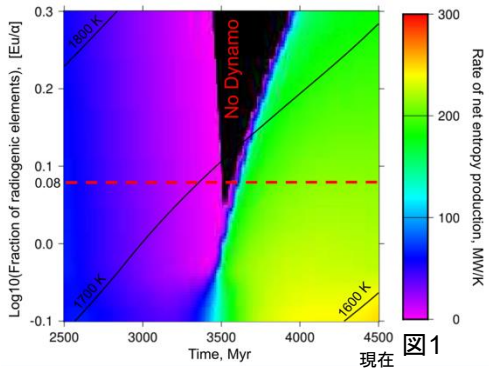


図1

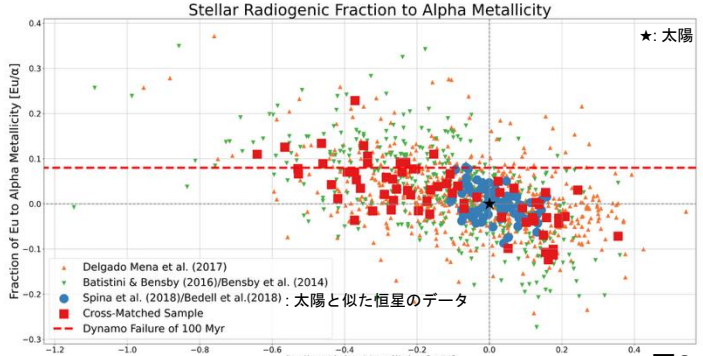


図2

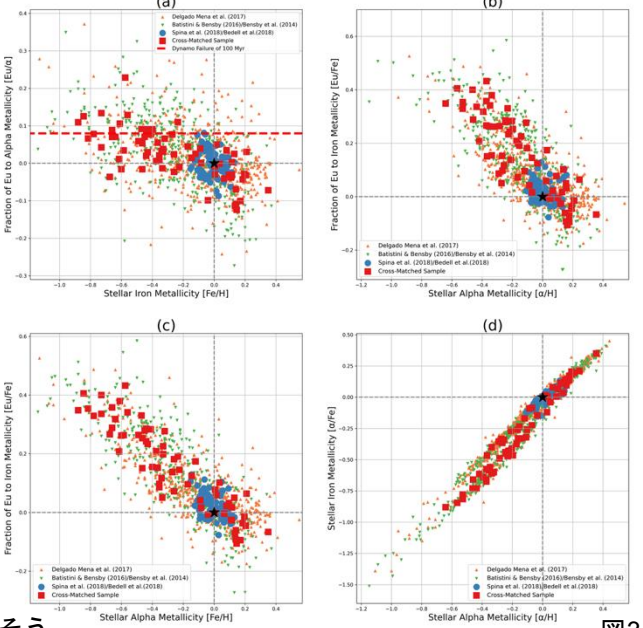


図3

【コメント】[α/H]~0のF, G, K型星がもつ地球型惑星は生命生存可能という証拠の一つとして理論研究に取り入れると面白そう。

*1: 惑星の磁場は、惑星内部にある電気伝導度を持つ流体の運動によって生成され維持されていると考えられている。この流体が磁場中で対流を起こすと電流が生じ、その電流が新たな磁場を生成し、それが元の磁場を強める場合は磁場が維持される。このメカニズムのことを、ダイナモ作用と言う。(https://astro-dic.jp/planetary-magnetic-fields/)