

太陽系を作った超新星爆発はいつ起きたのか？ —宇宙核時計ニオブ92—

早川 岳人 〈日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究センター〉

梶野 敏貴 〈国立天文台理論研究部, 東京大学大学院理学系研究科〉

千葉 敏 〈東京工業大学原子炉工学研究所〉

宇宙核時計とは、放射性同位体の親核と娘核の数の比から、親核が宇宙で生成された年代や、隕石等が形成された年代など、宇宙的な年代を測定する手段である。特に 10^5 年から 10^8 年の半減期を有する放射性同位体（消滅核種）は、その放射性同位体を生成した天体現象（例えば、超新星爆発）から太陽系形成時までの時間（ Δ ）を評価する宇宙核時計として用いることができる。 ^{129}I や ^{107}Pd などは急速な中性子捕獲反応過程（r過程）の宇宙核時計として知られ、r過程からの Δ が評価されている。しかし、現在ではr過程の天体環境について再考が必要となり、r過程の消滅核種は宇宙核時計として機能しなくなってしまったため、新しい種類の宇宙核時計が求められている。そのような候補の一つがニオブ92（ ^{92}Nb ）である。

^{92}Nb は約 3.47×10^7 年の半減期で ^{92}Zr に β 崩壊する放射性同位体である。 ^{92}Nb は現在の太陽系には存在しないが、様々な種類の隕石の研究によって、太陽系形成時に $^{92}\text{Nb}/^{93}\text{Nb} \sim 10^{-5}$ に相当する ^{92}Nb が存在していたことがわかってきた。しかし、 ^{92}Nb を宇宙核時計として用いるには2つの大きな問題があった。まず、太陽系形成時の値として、 $^{92}\text{Nb}/^{93}\text{Nb} \sim 10^{-5}$ 以外にも、 $^{92}\text{Nb}/^{93}\text{Nb} \sim 10^{-3}$ の値が報告されている。実に2桁の開きがある。もう一つのより深刻な問題は、 ^{92}Nb を生成した元素合成過程（つまり、 ^{92}Nb を生成した核反応およびその反応が発生した天体現象）が不明な点であった。これまで、 ^{92}Nb の天体起源として、超新星爆発における光核反応や爆発的な核融合反応（ α -rich freeze-out）などの仮説が

提案されたが、これらの理論計算では $^{92}\text{Nb}/^{93}\text{Nb} \sim 10^{-3} - 10^{-5}$ の値を再現できなかった。このような状況において、著者らは超新星爆発のニュートリノによって外層に存在していた ^{92}Zr から ^{92}Nb が生成されたとの仮説（ニュートリノ過程）を提唱した。

ニュートリノ過程では、原始中性子星から放出されたニュートリノによる核反応によって希少同位体が生成されるというモデルであり、希少な核種の ^{138}La と ^{180}Ta の太陽組成を系統的に説明できる唯一のものである。 ^{92}Nb のニュートリノ過程による生成仮説を検証するため、まず原子核構造を考慮して ^{92}Nb 生成に関係したニュートリノ-原子核反応率を求め、得られた反応断面積を組み込んだ超新星爆発モデルによって ^{92}Nb の生成量を計算した。さらに、太陽系誕生直前に発生した超新星爆発の生成物の原始太陽系に対する混ざり込みをLate Inputモデルを用いて計算した。その結果、 ^{92}Nb を生成した超新星爆発から太陽系形成までの時間が100万年から3,000万年とすると、 $^{92}\text{Nb}/^{93}\text{Nb} = 10^{-5}$ の値が説明できることが判明した。現在、ニュートリノ過程が太陽系生成時の ^{92}Nb の量を定量的に説明できる唯一のモデルである。同時に太陽系誕生直前に膨大なニュートリノを放出する重力崩壊型超新星爆発が発生したことを示唆する。現時点では、評価した年代の幅が大きい。将来隕石研究の進展によって、より精密な太陽系形成時の $^{92}\text{Nb}/^{93}\text{Nb}$ の値が得られたら、より精密に超新星爆発が発生した年代を決めることができる。と期待される。

—Keywords—

宇宙核時計：

10^5 年から 10^{11} 年程度の半減期の放射性同位体の親核と娘核の量から、様々な宇宙的な年代を計測する手段。宇宙化学では、10億年以上の半減期を有する放射性同位体を長寿命放射性同位体と呼び、銀河系初期に形成された金属欠乏星の年代や、太陽系の年齢の評価に使われている。1億年以下の半減期の放射性同位体は短寿命放射性同位体ないし消滅核種と呼ばれ、惑星、地殻、隕石の母天体等が形成された年代や、消滅核種を生成した天体現象から太陽系形成までの時間を評価するために使われている。

r過程：

膨大な数の中性子が存在する環境下で、連続的な中性子捕獲反応と β 崩壊反応によって重元素を生成する元素合成過程。r過程が発生する天体環境として、長らく重力崩壊型超新星爆発が有力であったが、近年の数値計算の発達によって、超新星爆発では十分な量の中性子が存在する環境が発生しないという結果が出つつある。そのため、r過程が発生する天体環境に再考が必要となっている。

ニュートリノ過程：

重力崩壊型超新星爆発において、原始中性子星から放出された膨大な量のニュートリノが外層で既存の原子核と核反応を起こし、新しい核種を生成する過程。 ^7Li , ^{11}B , ^{19}F , ^{138}La , ^{180}Ta 等がニュートリノ過程の寄与が大きい核種として知られている。