

論文の内容の要旨

博士論文題目

Nucleosynthesis Signature of the First Stars - Theoretical Prediction of Heavy Elements from the First Generation Massive Stars -

宇宙初期天体によって行われた元素合成の特徴について ～ 第一世代大質量星における重元素生成の理論的予言 ～

氏 名 佐々木 孝浩

本論文は、5章からなり、第1章は導入部で、現在の宇宙元素合成史の成功と問題点について言及した後、本論文の主要テーマである第一世代大質量星が及ぼす重元素合成と金属欠乏星の組成比との関係について、歴史的背景、モデル構築、および本論文の概要と目的が述べられている。

第2章では、第1章の導入部を受け、第一世代星の進化についての具体的なシナリオを提案し、構築したモデル(コラプサーモデル)の詳細を説明する。大質量星(20太陽質量以上)の終焉であるコラプサーモデルと、銀河形成初期の時代に相当する high redshift(高赤方偏移)で観測されているガンマ線バーストについて、それぞれ、研究の歴史を追いながら他の研究者による研究のレビューを加え、本研究の位置付けを行った。さらに、宇宙論の観点から、両者の関連性を明確に記述し、超金属欠乏星(金属量約 -5)に影響を与える現象は、ガンマ線バーストを伴うような大爆発であり、その起源は、宇宙初期に誕生した大質量星にある可能性が強いということを論理的に導いた。

第3章では、2章を受け、コラプサーモデルの中で元素合成が行われる二つの重要なサイト(降着円盤と円盤流)について具体的なモデルを与える。円盤流は、コラプサーにおいて、速い中性子捕獲過程(以下、r-process)が最も起こりやすい場所であり、超金属欠乏星の重元素に与える寄与が大きいと考えられている。また、降着円盤は、円盤流の初期速度と初期元素組成を与えるという点で重要な部分となっている。降着円盤については、定常流近似から、基礎方程式を解析的に解き、円盤の中心からの距離の関数として温度、密度、圧力、回転速度等の物理量を導き、その力学構造を決定した。円盤流については、断熱自由膨張近似を施し、過去に行われたシミュレーション結果を定量的に支持するようなモデルを構築した。

第4章では、宇宙現象モデルに沿って元素合成をシミュレーションする際に必要となる大型計算機用ネットワークコードを開発し整理した。中でも特に、重元素合成にとって重要な反応領域と示唆され、かつ最近実験的に反応

過程データが成熟しつつある He から C までの領域の元素に関わる各核反応について、r-process を経て産出される最終重元素量にどの程度影響を与えるか、感度 (sensitivity) という概念を構築して定量的に明らかにした。これにより、観測精度と比較して、r 過程重元素合成を検証するのに必要な精度を実現するために許容される核反応の実験誤差及び精度についてのデータベースを提供することができた。さらに、r 過程が有効に実現する爆風環境について、物理的パラメータであるエントロピー s/k と爆発タイムスケール τ_{dyn} に要求される関係について考察し、従来との関係式を修正して新たに定式化した。これにより、数多く提案されている爆発モデルについて、定量的な制限をかけることができた。

第 5 章では、第 2 章から第 4 章の内容を総括し、コラプラーから生成される元素を理論計算により見積もった。考察の結果、最近相次いで観測された金属量約 -5 という超金属欠乏星の大気組成の観測データを再現できるパラメータがあることを発見し、モデルの実現可能性について言及するとともに、まだ観測されていない重元素組成について理論的予言を与えた (図 1)。超金属欠乏性は、Ba, Sr の組成に特徴があり、これらの特徴は球状星団の星の組成にも見られ、銀河形成の初期の段階に行われた元素合成の影響を反映しているものと推定されている。コラプサーモデルは、分光学的な観点から、従来から γ 線バーストの説明に用いられてきた。しかし、 γ 線バーストが本当にコラプサーによって引き起こされるものか、決定的な証拠はまだない。本研究は、上記の問題について、元素解析という観点から取り組める可能性を与えた。

第 6 章では、本研究と今後の展望についてまとめを行い、最後に詳細精密な天文観測が宇宙初期元素合成を覗く新しい窓となると期待して、本文を結んでいる。

本研究の特色は、

1. 基礎物理である素粒子物理学、原子核物理学を土台に、元素合成過程を徹底的に追求し、天文学的に可能性のある現象モデルを構築してそれに応用することで、宇宙初期の現象について斬新な提案と問題解決の手法を切り出した点
2. その理論定式化のみならず、問題解決のために必要な数値計算コードの開発を通じて定量的な観測量として理論的予言を提示した点
3. 宇宙論的な現象である γ 線バーストについて、元素解析という新しい視点から実証的に検証できる可能性を示唆した点

にある。

以上のように、本論文は、宇宙初期天体である第一世代大質量星が引き起こす元素合成について、天文学的な検証可能性に関する新しい知見が得られるものである。

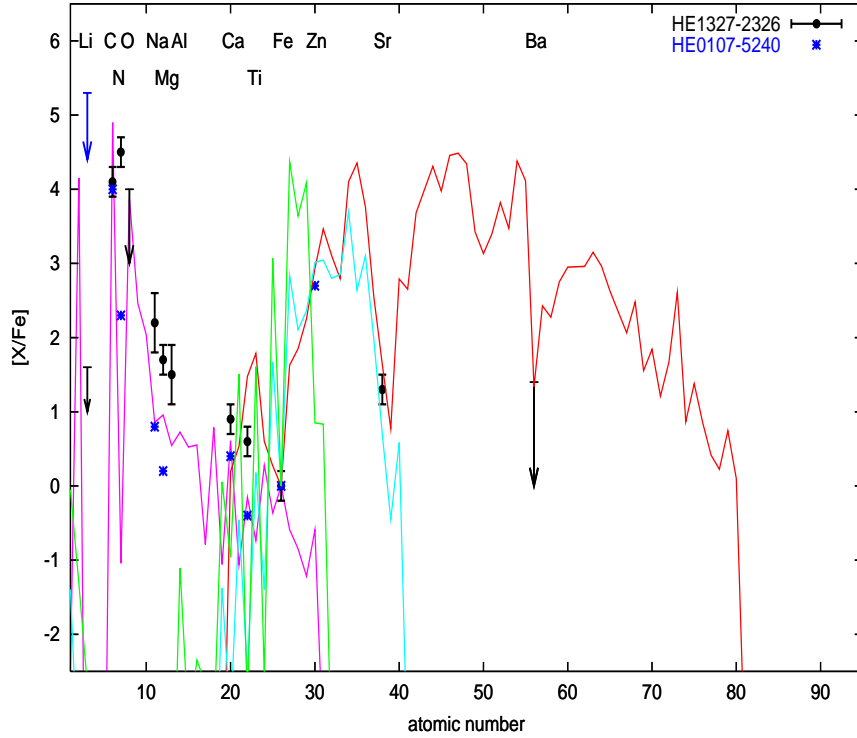


図 1: 本モデルで理論的に生成される元素の組成比。横軸は原子番号、縦軸は Fe を基準とする核原子の産出量。重力崩壊によって形成される降着円盤の降着率をパラメータとして提示している。赤実線が $\dot{M} = 0.01 M_{\odot} s^{-1}$ 、水色が $\dot{M} = 0.1 M_{\odot} s^{-1}$ 、そして緑色が $\dot{M} = 1.0 M_{\odot} s^{-1}$ のケースに相当する。観測データとして超金属欠乏星 (HE3127-2326 and HE 0107-5240) のデータをプロットした。適切なパラメータを選ぶことにより、本モデルで、超金属欠乏星の大気元素組成比を再現できる可能性があることが示唆された。更に、まだ観測データが無い元素について理論的予言値を提供している。