

学 位 論 文 題 名

Probing the Early Universe with
Extremely Metal-Poor Stars as Living Fossils in the Galaxy

(銀河系における生きた化石としての超金属欠乏星を用いた
初期宇宙の解明)

学位論文内容の要旨

「我々はどこから来たのか」

この問いの一部は、宇宙の歴史を知ることによって明らかにされつつある。WMAP による宇宙背景放射の観測はビッグバン直後の宇宙の姿を見せてくれた。また現在までの遠方銀河の観測では、赤方偏移 7、宇宙年齢で 7 億年程度までの銀河が発見されている。しかしその間の銀河が形成される以前の宇宙、形成途上の銀河や、銀河形成以前の星を観測することは現状ではほとんど不可能である。また遠方銀河の観測からは恒星スケールの現象の理解は難しい。しかしながらこの時期こそは最初の星形成、および銀河形成などの極めて重要な出来事が起こった時期であり、その理解は宇宙の歴史を知る上で欠かせないものである。

これまでの理論的研究からは、 Λ CDM モデルに基づいて、銀河系の $1/10^6$ 程度、およそ $10^5 M_{\odot}$ の原銀河の中で最初に星形成が起こり、それらの原銀河が合体、成長を繰り返して今日あるような銀河を形作っていったと考えられている。また宇宙初期においては、現在より大質量の星が形成されたことが示唆されている。これらの星々が、宇宙に重元素を作り出し、それ以降の構造形成を促していったと考えられる。しかしながら星形成や銀河形成について未解明の部分も多く、観測による検証が求められている。

本研究では、銀河系ハローに残る超金属欠乏星に着目することで、宇宙初期・銀河形成期の宇宙を探ろうと考えた。超金属欠乏星は、銀河形成のごく初期に作られた星の生き残りであり、揺籃期の銀河に関する情報を残していると考えられる。また近年これらの星の詳細な観測が進展しており、実証的な議論が可能になりつつある。

このような、超金属欠乏星を用いた初期宇宙の研究は、寿命の長い低質量星しか生き残っていないため、元素合成などで重要なより重い星についての理解に難点がある。本研究では、連星に着目することでこの難点を解消した。連星系の場合、先に進化した主星から、伴星への質量輸送が起こるため、低質量の伴星が生き残っていれば大質量の主星に関しても研究が可能になる。これを利用して、金属欠乏星の初期質量関数の推定を行い、さらに銀河形成過程の金属欠乏星に与える影響について考察した。

炭素過剰超金属欠乏星(CEMP star)を用いた初期質量関数の推定

超金属欠乏星の、表面組成の観測から明らかになっている顕著な特徴のひとつとして、炭素過剰な星(CEMP star)が多数(20~25%)含まれているということがあげられる。一方恒星進化の研究から、中質量の星においては炭素の合成と表面への汲み上げが起きることが知られており、CEMP star は中質量星を主星に持つ連星系であったと考えられる。特に、超金属欠乏星では通常と異なる炭素汲み上げ機構が働くことが明らかにされている。

本研究ではまず、恒星進化に関する最新の成果に基づいて、炭素星が連星によって形成されたという説の検証をおこなった。連星モデルの予測する炭素星の周期、組成などの特徴を推定し、その結果を観測と比較することで、CEMP star が連星によって説明できることを示した。また、CEMP star は s-process 元素や窒素の組成により 2 種類に分けられるが、これが主星の質量の違いによって説明できることを示した。

これにより CEMP star が連星起源であることが明らかになったので、CEMP star の統計に基づいて、連星系の主星となっていた星の質量の分布を求め、超金属欠乏星の初期質量関数の推定をおこなった。その結果、超金属欠乏星は現在より大質量の星が多かったとの結論を得た。典型的質量としては $6M_{\odot}$ 以上、 $10M_{\odot}$ 程度であろうと考えられる。

階層的銀河形成と初代星

初期質量関数がより大質量星が多いものであったとすれば、それらの星の放出する重元素によって、化学進化が急速に進むことになる。ある金属量 Z をもつ星の個数を n とし、金属量分布関数 $n(Z)$ をもとめれば、これに初期質量関数による違いが認められるはずである。そこで実際に金属量分布を推定し、観測との比較をおこなった。

実際に観測の統計から得られる金属量分布は、 $[\text{Fe}/\text{H}]=-4$ までは連続的に分布しているのに対して、そこから $-5 < [\text{Fe}/\text{H}] < -4$ の間の星は発見されていない。そして $[\text{Fe}/\text{H}]=-5$ 以下の星が 2 個発見されている。

原銀河は、その形成時は小規模であるため、一個の超新星の爆発によって $Z=10^{-4} \sim 3Z_{\odot}$ 程度まで重元素汚染を受ける。とすれば、その付近より低金属部分の金属量分布関数は、銀河の形成過程の影響を受けているはずであり、第 2 世代以降に生まれた星は $[\text{Fe}/\text{H}]=-4$ 以上にのみ分布すると考えられる。そして、 $[\text{Fe}/\text{H}]=-4$ 以下の星は、超新星の影響を受けていない初代星の生き残りであると考えられる。このような描像は、観測されている金属量分布に対する自然な説明を与えている。初代星と考えられる星が含んでいる微量の金属は、初代星形成後に、周囲の星によって作られた重元素が表面に降着したものと考えられる。

現在、銀河形成過程が超金属欠乏星に与える影響を、より具体的かつ詳細に明らかにしていくため、原銀河の合体成長史を取り入れたモデルによる計算を行っている。

Press-Schechter 理論に基づき、原銀河ダークハローの質量分布関数が解析的に与えられており、これに基づいて原銀河の合体成長過程を確率的に再現する手法が考案されている。この手法を用いて銀河の質量進化の再構成を行った。そして、再構成された原銀河たちの中での重元素量の変化、超金属欠乏星の形成、および星への表面汚染の効果の計算を実行中である。

学位論文審査の要旨

主査	教授	藤本正行
副査	教授	加藤幾芳
副査	教授	河本昇
副査	教授	小笹隆司
副査	助教授	羽部朝男

学位論文題名

Probing the Early Universe with Extremely Metal-Poor Stars as Living Fossils in the Galaxy

(銀河系における生きた化石としての超金属欠乏星を用いた
初期宇宙の解明)

我々の宇宙は約 137 億年前のビッグ・バンと共に始まり、膨張による温度の下降とともに、一様なガスの中から最初に恒星が生まれ、銀河が形成され、それらの天体が織り成す現在の多様な世界が形作られてきたと考えられている。この初期宇宙の構造形成・進化の解明は現代宇宙物理学の中心課題の一つである。この宇宙の極初期に生まれた恒星のうち低質量のものは寿命が宇宙年齢よりも長く現在までも核燃焼で光り輝いて観測可能である。我々の世界を構成する元素も宇宙の歴史のなかで形成されてきたが、ビッグ・バンでは水素とヘリウムおよび極微量のリチウムしか合成されず、それ以外の全ての元素は、恒星内部での核反応で合成され、恒星の終末に星間空間にばら撒かれ、その重元素を含んだガスから次代の恒星が誕生、また、進化の過程で合成した元素を宇宙空間にばら撒きという輪廻のなかで増加してきた。したがって、宇宙初期に形成された古い恒星ほど炭素以上の元素（金属と総称）の含有量の少ないガスから生まれたことになる。近年の大型望遠鏡の出現等観測技術の発展で銀河系ハローに生息する超金属欠乏星の探査が急速に進み、その数も増加し、それらを対象として宇宙初期の構造形成を議論することが可能になってきた。小宮君の仕事は、この「生ける化石」である超金属欠乏星に着目し、その観測特性の分析を通して、初期宇宙の構造形成史を研究したものである。

これらの超金属欠乏星は、宇宙初期の誕生以来、その後 100 億年余の長い生涯の間に蒙った内部の核反応による元素組成の変成、あるいは、連星系での相手の恒星からの質量輸送や星間ガスの降着による汚染等の影響をうける。小宮君は、超金属欠乏星の元素組成の特性とそれらの低質量・金属欠乏星の進化の理論を踏まえて、超金属欠乏星の素性を解き明かすことに成功した。とりわけ、連星系での進化の考察から、現在生き残っている低質量星は連星系の質量の小さい伴星として生まれたものであることを明らかにした。これに基づいて、既にその進化を終えている質量の大きい恒星が伴星に残した痕跡から、宇宙の初期に形成された恒星の質量分布を推定することに成功、宇宙初期には現在と比して、質量の大きい恒星が形成されたことを示した。これは、観測に基づいて宇宙初期の恒星の形成に制約を与えた最初の研究であり、彼の求めた質量関数は今後、銀河系の形成・元素形成の議論を進め上での基礎となるものであり、宇宙初期の構造形成の研究に新たな方向性と発展の展望を与えるものである。よって、本論文は、北海道大学博士（理学）の学位の授与に値するものと認めます。