

Neutron-Recycling Reactions in Low- and Intermediate-Mass Extremely Metal-Poor AGB Stars -Application to first generation star candidates-

(低中質量超金属欠乏星における中性子循環反応
- 第一世代候補星への応用 -)

学位論文内容の要旨

1 研究背景

我々はすでに宇宙最初の星を見つけているのかも知れない。

恒星はその質量により寿命が大きくことなる。比較的重いものは百万年程度で超新星爆発を起こし、自身を形成していた物質を撒き散らし、周囲を汚染する。それに対して、太陽よりも軽い恒星は百億年以上という宇宙年齢に匹敵するオーダーの寿命を持ち、初期宇宙で形成されたとしても現在まで輝き続けることが可能である。太陽をはじめとした我々の近傍の星々は複数の超新星爆発で汚染されたガスから形成されたと考えられているが、超新星爆発の影響を受けず、汚染されていないガスで生まれた第一世代の星の生き残りがいることは十分に考えられる。

近年の観測により、EMP 星 (Extremely Metal poor stars) と呼ばれる金属量が $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ と非常に少ない星が銀河系内で数多く確認されてきている。これらの星は非常に初期の宇宙で誕生し、銀河系の星形成史を理解するうえで重要な情報を保持していると考えられ、恒星進化、天体形成などの分野から注目を集めている。中でも、HE1327-2326, HE0107-5240, HE0557-4840 の3星は現在知られている中で最も金属量の少ない星 (それぞれ $[\text{Fe}/\text{H}] = -5.4, -5.3, -4.8$) であり、それぞれが太陽ばかりか他の EMP 星とも異なった特徴的な組成パターンを持っていることが知られている。例えば、炭素の比率が著しく高い (それぞれ $[\text{C}/\text{Fe}] = 4.3, 4.0, 1.7$) 点はその最たるものである。

上記3星の組成パターンを理解するため、複数の理論モデルが提唱されており、中にはこれらの星がビッグバンによって構成された組成を、そのまま残す始原ガスから形成された第一世代の星である可能性を指摘するモデルが存在する。このモデルでは上記3星の組成は、現在は観測されていない星で合成された物質が輸送されたと説明される。

本研究では中低質量の EMP 星のような低金属星において、特殊な内部物質の混合に起因する核種合成が進行することに着目し、その内部での核種合成過程を調査した。その結果、この合成過程では $^{13}\text{C}(\alpha, n)$, $^{17}\text{O}(\alpha, n)$ を中性子源とした中性子捕獲反応が進行すること等の特徴を明らかにし、上で述べたモデルに基づいて3星を第一世代星として解釈できることを示した。

2 核種合成過程の解明

解明された核種合成の概要は以下の通りである。

低金属星の特徴として He-flash に誘起された対流層が外側の水素層の底に到達し、対流層に水素

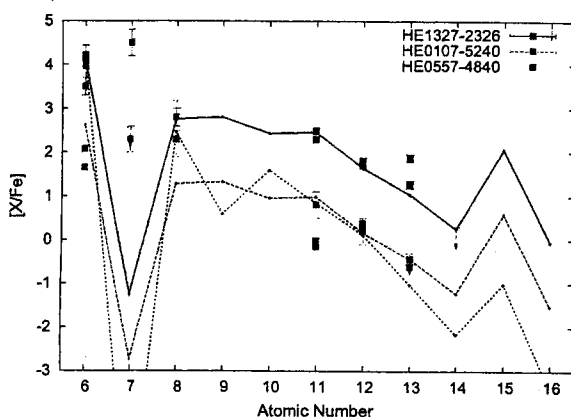
を取り込むことが挙げられる。このときの対流層の組成はヘリウムとヘリウム燃焼の生成物である炭素、酸素でそのほとんどが占めらる。混ざりこんだ水素は ^{12}C に捕獲され、 $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}(e^+ \nu)^{13}\text{C}$ を経て、 ^{13}C が形成され、これが更に $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ で中性子を放出する。この中性子はすぐに ^{12}C に吸収され、ある程度の ^{16}O が形成されるまで $^{12}\text{C}(n, \gamma)^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ のサイクルが回り続け、中性子が数を増した ^{16}O に吸収されることでサイクルから外れる。次に作られた ^{17}O では反応経路が分かれるが、より重い元素を形成する観点からするとこの分化の影響は大きくはない。対流層の温度にもよるが、 ^{17}O に対する α 粒子捕獲と中性子捕獲で大きく二分される。(1) α 粒子捕獲の場合は大部分が $^{17}\text{O}(\alpha, n)^{20}\text{Ne}$ へ流れるが、ここで放出された中性子は再び上述のサイクルに組み込まれ、結局 ^{17}O を再度作ることになる。 $^{17}\text{O}(\alpha, n)^{20}\text{Ne}$ に流れなかった分は $^{17}\text{O}(\alpha, \gamma)^{21}\text{Ne}$ を経て、 ^{21}Ne がある程度できると中性子を捕獲して、 ^{22}Ne を作ることになる。(2) 中性子捕獲の場合は $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ が圧倒的に大きく、そのまま更に $^{14}\text{C}(\alpha, \gamma)^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ を経て、 ^{22}Ne が形成される。 ^{22}Ne でも同様に分化が起き、 α 粒子捕獲で ^{25}Mg , ^{26}Mg を、中性子捕獲で ^{23}Na をそれぞれ形成する。これらの過程で合成された ^{22}Ne , ^{26}Mg はそれぞれより重い核種合成の中性子捕獲反応の種核として機能する。

3 s-process に関して

上記の通り、本核種合成過程では ^{22}Ne , ^{26}Mg が中性子捕獲反応の種核として作用することで、s-process 元素が合成される。s-process には種核として ^{26}Fe が必要と認識されてきたが、それが無い状況、即ち宇宙初期の超新星爆発の影響を受けていないガスで形成された星でも s-process site が存在する点には注意して然るべきである。また、その組成は中性子の供給量、および種核が形成されてからの中性子供給が続いた時間にも依存する。この結果は先に述べた核種合成過程の理解で解釈可能である。

4 観測との比較

得られた結果を用いて現在観測されている最も金属量の少ない3星の組成パターンとの比較を行い、その組成の起源について考察を行った。観測データとの比較に当たって、考慮すべきことはそのデータは星の表面のものであること、現在観測されている星の組成は連星から輸送されたものとするのが合理的であることである。従って、我々の考えているような星の核種合成生成物が内部から表面に、次いでそこから現在観測されている連星相手に輸送が起きたとの仮定に基づいて比較する。反応生成物を内部から表面に輸送するのに機能する2つの汲み上げメカニズムが考えられるが、その際のそれぞれが与える組成への影響を考慮することにより、各メカニズムが機能したか否かを調べることができる。



3星は第一世代の星として解釈することが可能である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 本 正 行
副 査 教 授 河 本 昇
副 査 教 授 小 笹 隆 司
副 査 准教授 羽 部 朝 男

学 位 論 文 題 名

Neutron-Recycling Reactions in Low - and Intermediate-Mass Extremely Metal-Poor AGB Stars -Application to first generation star candidates-

(低中質量超金属欠乏星における中性子循環反応

- 第一世代候補星への応用 -)

我々の宇宙は約 137 億年前のビッグ・バンと共に始まり、ほぼ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、現在の観測される多様な世界が形作られてきた。宇宙の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でも核燃焼で光り輝いていて、誕生当時の宇宙への貴重な情報源となる。これら宇宙初期の恒星は重元素の組成が少なく、とりわけ、宇宙最初に誕生したものはビッグバンで生成されて物質からなり、炭素以上の元素を全く含まない。現在までに鉄の組成が太陽の十万分の 1 程度あるいはそれ以下の恒星が 3 個程度発見されているが、それら全て炭素の組成が極端に大きく、また、O, Na, Mg, Al などの軽元素も多く、そのひとつでは重元素の Sr の過多を示すなど特異な組成分布を示すことが知られている。西村君の研究は、恒星内部での核種合成の理論的な研究を通して、これまでに観測されている銀河系ハローの超金属欠乏星の素性を議論し、宇宙最初の恒星の同定の条件を理論的に解明しようというものである。

これまでの恒星進化の研究で、太陽の金属量の 300 分の 1 以下の恒星では、ヘリウム殻燃焼の暴走の際に、ヘリウム対流層に水素混入が起きることに知られている。西村君は、これに注目、ヘリウム対流層に混入した水素は ^{12}C と結合、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ で中性子を発生、その結果生じる中性子捕獲反応とヘリウム捕獲反応の競合によってもたらされる核種合成過程を、核種合成の反応ネットワークを用いて追跡し、金属欠乏星での核種合成の特性を解明した。その結果、誕生時に全く金属を含まない場合でも、上記の 3 つの恒星から観測されるような組成パターンを再現することが可能であることを示した。これは宇宙最初の恒星の探査と超金属欠乏星による化学進化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。