

氏 名 本 田 敏 志

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第589号

学位授与の日付 平成14年3月22日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Spectroscopic Studies of R-Process Elements in
Extremely Metal-Poor Stars with
SUBARU/High-Dispersion-Spectrograph and
Cosmochronometry

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 渡邊 鉄哉
教授 家 正則
助教授 千葉 柁司
助教授 梶野 敏貴
教授 野本 憲一（東京大学）

論文内容の要旨

宇宙や銀河そして我々を構成する様々な元素はいつどこで創られ、どのように進化してきたのか？現代の天文学で元素の起源とその進化の歴史を探ることは重要なテーマである。これまでの研究で水素やヘリウムはビッグバンで、鉄族までの元素については星の内部での核融合反応によって合成されることが明らかになっている。一方、鉄より重い元素は中性子捕獲によって合成されると考えられているが、それを引き起こす起源については未解決の課題が多い。中性子捕獲元素は主に s プロセスと r プロセスという 2 つのプロセスによって合成されると考えられているが、特に r プロセスがこういった天体現象のもとに起こっているかはいまだに明らかにされていない。

このような問題を調べるには、金属欠乏星の化学組成を調べるのが有効な手段である。鉄の組成比が太陽の 1000 分の 1 程度の超金属欠乏星は、単一、もしくは少数の元素合成過程を反映していると考えられるためである。これまでの超金属欠乏星の観測により、中性子捕獲元素が過剰に見られる天体が、少数ながら発見されてきている。それらの星は詳しく観測され、 $56 \leq Z \leq 72$ の元素については、その組成パターンが太陽の r プロセス組成パターンとよく一致することが示された。このことは銀河系が誕生してまもないころは s プロセスの影響はほとんど無く、すべての中性子捕獲元素は r プロセスによって合成され、その合成される組成比は常に一定で、太陽のパターンと同じであると考えられるようになった。

さらにこれらの星では放射性元素である Th ($Z=90$) も検出された。Th は半減期が 14Gyr と宇宙年齢に匹敵するほど長く、すべて r プロセスで合成されるため、安定な r プロセス元素である Eu と Th の組成比から星の年齢を求め、銀河の年齢に下限を与えることができる可能性があり、これまでに複数の天体に対して約 15Gyr という年齢が得られている。ただし、この Th を使って年齢を求めるときに、安定な元素も Th も太陽の初期 r プロセス組成パターンと完全に一致するという仮定を用いている。この仮定はまだ十分確認されておらず、Th まで含めて、r プロセス元素合成による組成パターンの詳細な研究が必要である。

我々は、すばる望遠鏡高分散分光器 (HDS) を用いて、超金属欠乏星 22 天体を、高い波長分解能と高い S/N で観測し、その組成を調べた。その結果、多数の中性子捕獲元素が観測され、その組成比は α 元素や鉄族などの軽い元素と比べて大きな分散が見られることが確認された。これは r プロセスをおこす天体現象は、 α 元素や鉄族元素を合成する過程に比べて限られた場所でおこっており、しかもその結果が銀河初期の星間ガスの中では十分に混合されていないことを示している。

我々のサンプルの中では 11 天体で Eu が検出されたが、観測された Ba と Eu の比はどれも太陽の r プロセス値に近いものであった。このことから、これらの金属欠乏星では、重元素合成過程としては r プロセスが卓越していると考えられる。特に中性子捕獲元素が多数検出できた 7 天体についてその組成パターンを調べると、ほとんどの星で $56 \leq Z < 70$ の元素については太陽の r プロセスパターンとほぼ一致した。特に 5 天体では観測誤差の範囲内で一致し、これは過去に 6 天体に対して示された結果と一致する。しかし、2 天体については太陽系の組成の r プロセス成分からのずれが誤差よりもやや大きい。このことは、

r プロセスによってつくられる組成パターンにもある程度の分散があるか、あるいは超金属欠乏星でもわずかながら s プロセスの寄与があるという可能性を示している。

$38 \leq Z < 56$ の軽い中性子捕獲元素については、太陽の r プロセスパターンとまったく一致しなかった。この結果は過去にもいくつかの星で確認されており、このことは $Z < 56$ の軽い中性子捕獲元素は重い中性子捕獲元素をつくる r プロセスとは別の過程が存在する可能性を示している。

上述の 7 天体では Th も検出することができた。Th は放射性元素であり、時間とともに減少するので仮にこれらの超金属欠乏星の重元素の初期組成が太陽系の r プロセス成分の初期組成と同一であるとすれば、太陽の値よりはるかに減少している (Th/Eu 比が小さい) と期待される。しかしながら、Th と Eu の組成比には分散が見られ、その平均値は予想される太陽系の Th/Eu 比の初期値に比べてさほど小さくない。この値をそのまま用いると非常に短い年齢が得られることになる。これらの超金属欠乏星が太陽と同じ程度の年齢とは考えにくいので、少なくとも一部の金属欠乏星については太陽に比べて高い Th の初期値を持っていたと考えられる。この結果から、金属欠乏星の中性子捕獲元素の組成パターンは、Th のように Z の大きな元素については、必ずしも太陽の r プロセスパターンに一致するとは限らず、星ごとに違ったパターンを持つことが示唆される。金属欠乏星の初期組成比を求めるには太陽で観測される組成比のパターンから単純に推定することはできず、天体ごとに組成パターンを推定する必要がある。

論文の審査結果の要旨

宇宙や銀河そして我々を構成する元素はいつどこで作られ、どのように進化してきたのか。元素の起源とその進化の歴史を探ることは現代天文学の重要なテーマである。これまでの研究で、水素やヘリウムはビッグバンで、鉄族までの元素は星の内部における核融合反応によって合成されることが明らかになってきた。鉄より重い元素は中性子捕獲、すなわち s (slow neutron-capture)-過程と r (rapid neutron-capture)-過程という二つの過程によって合成されると考えられているが、 r -過程を引き起こす起源天体はいまだに観測的にも理論的にも明らかにされていない。 r -過程の起源を調べるには、金属欠乏星の元素組成を調べるのが有効な手段である。

申請者は、すばる望遠鏡高分散分光器 (HDS) を用いて、超金属欠乏星 22 天体を、高い波長分解能と高い S/N で観測し、その組成を調べた。その結果、多数の中性子捕獲元素が観測され、その組成比は α 元素や鉄族などの軽い元素と比べて大きな分散が見られることが確認された。これは r -過程をおこす天体現象は、 α 元素や鉄族元素を合成する過程に比べて限られた場所でおこっており、しかもその結果が銀河初期の星間ガスの中では十分に混合されていないことを示している。

取得されたデータサンプルの中では、11 天体で r -過程元素であるユーロピウム (Eu) が検出されたが、観測されたバリウム (Ba) と Eu の比はどれも太陽の r -過程元素組成比の値に近いものであった。このことから、これらの金属欠乏星では、重元素合成過程としては r -過程が卓越していると考えられる。

特に中性子捕獲元素が多数検出できた 7 天体についてその組成パターンを調べると、 $56 \leq Z < 70$ の元素については、その組成パターンが太陽の r -過程元素組成パターンとほぼ一致する、いわゆる universality と呼ばれる性質がよく成立していた。 $38 \leq Z < 56$ の軽い中性子捕獲元素については、universality が完全に破れていた。この結果は過去にもいくつかの星で確認されており、 $Z < 56$ の軽い中性子捕獲元素の生成には、重い中性子捕獲元素をつくる r -過程とは別の過程が存在する可能性を示している。

上述の 7 天体では Th も検出することができた。Th は放射性元素であり時間とともに減少するので、仮に universality が成り立っているとすれば、太陽の値よりはるかに減少していると期待される。しかしながら、Th と Eu の組成比には分散が見られ、その平均値は予想される太陽系の Th/Eu 比の初期値に比べてさほど小さくない。この値をそのまま用いると非常に短い年齢が得られてしまい、太陽より古いはずの超金属欠乏星の年齢と矛盾する。従って少なくとも一部の金属欠乏星については、太陽に比べて高い Th の初期値を持っていたと考えられる。この結果から、金属欠乏星の中性子捕獲元素の組成パターンは、Th のように Z の大きな元素については、必ずしも太陽の r -過程パターンに一致するとは限らず、星ごとに違ったパターンを持つことがわかった。Th/Eu 組成比を年齢推定に用いることが過去なされてきたが、本論文の結果はこの手法の不確かさをはっきりと示している。

以上、本論文は、すばる望遠鏡高分散分光器 (HDS) を用いて新たに多くの超金属欠乏星を観測し、軽元素量、鉄族元素量、 r -過程元素量を精度よく決定し、これに基づいて、 r -過程元素の組成比が超金属欠乏星でも太陽組成比とほぼ同一であるとする従来の仮説が破れていることを観測的に明確に示した。この結果は、銀河年齢を推定するために Th/Eu

組成比を用いる宇宙年代計の仮定に大きな変更を迫り、Th/Uなどの新たな宇宙年代計を構築する必要性を示す重要な結論である。初期銀河の化学進化の研究にも大きく貢献するのみならず、宇宙論に対して大きく貢献する重要なものとして高く評価できる。