博士（理　学）　合　川　正　幸

学位論文題名

An Insight into Nuclear Reaction Rates from the Abundance Anomalies in Globular Cluster Red Giants

（赤色巨星中の異常組成観測からの核反応の類推）

学位論文内容の要旨

我々はこれまで、さまざまな天体観測を通じて、宇宙の進化や星の構造などを理解してきた。観測されている天体現象では、多種多様な原子核反応がエネルギー発生の重要な要因になっており、核反応についての知識がそれらの天体現象の理解にとって必要不可欠である。現在観測されている元素組成は、ビッグバン以降の天体現象、核反応を通して、質量数の小さい原子核から大きな原子核へと変化した結果であり、核反応が重要な役割を果たしている一つの例となっている。観測されている元素組成についての理論的な説明は、これまでに起こったであろう天体現象や、実験で測定されてきた核反応の知識や理解にもとづいた計算によってはじめて可能になる。逆に、観測された結果と理論計算とを比較することによって、数 keV といった低エネルギーでの核反応について、新たな知識を得ることが可能になる。

これまでに行われてきた観測の一つに、球状星団中の赤色巨星の元素組成がある。それぞれの星の組成を見ると、C、N、O、Na、Mg、Al などが、通常の星とは異なる場合があることが観測されている。当初、この異常組成の原因としては、星が形成された時点から組成が異常な値をもっていた可能性が考えられた。しかし、異常組成がある星でも、CNO や、Al、Mg それぞれの組成は通常と異なっているものの、それらを合計したものは他の星とほぼ同じ値をとっていることが分かってきた。このことにより、初期の組成から異常な値をもっていたとは考えにくく、星の進化の段階において、内部の水素燃焼殻で CNO-cycle、MgAl-cycle 等の核反応が起こり、Deep Mixing とよばれる現象によって表面まで運ばれた結果であると現在では考えられている。Deep Mixing とは、星の水素燃焼殻の組成が表面まで運ばれるという現象で、そのメカニズムについては未だに詳しくわかっていない。

最近の球状星団 M13 の赤色巨星の観測から、Al が増加している星では、^{25}Mgや^{26}Mgではなく、^{24}Mgが減少していることがわかってきた。しかし、これまでの星の理論では、たとえ水素燃焼殻であっても^{24}Mgが減少することはありえないと考えられている。また、重要なことは、^{24}Mg(p,γ)^{25}Al反応は MgAl 領域で関与する様々な核反応の中では最も良く分かっている反応であり、その不確定さも小さいことである。つまり、^{24}Mgの減少は、これまでの理論とは異なり、赤色巨星の内部で^{24}Mgが反応を起こすほど高温状態であることを示している。このように、星の構造と核反応は、互いの理解に強く影響を与えてあっている。

我々はこれまでに、星の内部で高温状態をつくるモデルとしてフラッシュモデルを用い、^{24}Mgを減少させることができないかどうかを調べてきた。フラッシュとは、星の構造を、ヘリウムが大部分をしめる中心核と、水素がほとんどをしめる球殻として考え、ヘリウム中心核に球殻の水素が混ざると仮定した時、陽子捕獲反応が急激に進み、熱的暴走が起こることにより、一時的に温度が上がる現象である。フラッシュが起こっている時間や最高温度は、水素の混ざる深さ、Fe 等の重い原子核の量によって、解析的に求められる。このモデルは^{24}Mgの問題を解決すると同時に、Deep Mixing の候補として提案された。フラッシュモデルの適用により、$T_9 = 0.04$ ($T_9 = 10^9$K) ぐらいだった星の内部温度が、ある条件の下で一時的に $T_9 \sim 0.1$ K くらいに上昇する。この温度の上昇にともなって^{24}Mg(p,γ)^{25}Alの反応率も大きくなり、計算の結果、^{24}Mgが減少することが

示された。

さらに、Caughlan & Fowler (1988)(CF88) と El Eid & Champagne (1995)(EC95) がまとめた核反応率を用いて行った原子核ネットワークの計算では、あるフラッシュモデルのパラメータの範囲において、Na と Al の相関関係、Mg と Al の反相関関係を非常によく再現することが確かめられた。

フラッシュモデルは現在、球状星団の異常組成問題の解決と Deep Mixing の候補として、ただ一つ存在するモデルである。そこで本研究では、その他の反応率についての考察を行う。反応率が未確定な理由の一つは、共鳴状態の崩壊幅を実験的に決めることの難しさにある。本研究では、共鳴状態の反応率への寄与を考える際に必要な $\omega\gamma$ の値に注目する。ここで、ω はスピンに関連した因子で、γ は崩壊幅に関連した因子である。陽子入射反応の場合、γ は共鳴状態から陽子が放出される崩壊幅 $\Gamma_{\rm p}$ に大きく依存する。しかし、現在問題にしている数 keV のエネルギー領域では、$\Gamma_{\rm p}$ は非常に小さい場合が多く、実験から直接情報を得ることは難しい。多くの場合、大きな誤差、あるいは上限のみを与えるという大きな不定性が伴うこととなり、その結果として、核反応率にも大きな不定性を残すことになっている。

最近 Angulo et al. (1999)(AN99) によって、新たな実験データにもとづいた様々な核反応率の見直しが行われた。しかし、多くの核反応率には大きな不定性が残ったままになっており、AN99 の推奨値を用いて上記と同じ計算を行うと、観測を説明することが難しくなる。そこで、観測値を再現するために、不定性の範囲内で新たな反応率を採用することが必要であると考えられる。

AN99 の推奨値を用いたフラッシュモデルの計算では、^{23}Na の陽子入射反応の反応率が大きいことから、^{23}Na は過剰に減少することがわかっている。フラッシュモデルで到達する温度は、$T_9 \sim 0.1$ くらいまでであり、^{23}Na の陽子入射反応では、共鳴状態のエネルギー $E_{\rm r}$ が 36.2、138、166.7 keV という 3 つの状態からの影響が大きい。そこで、これらの共鳴状態による反応率への寄与を小さく抑えるため、誤差の範囲内で $\omega\gamma$ を小さくした。

Mg 同位体では、^{24}Mg(p,γ)^{25}Al 反応を基準とするため、AN99 の推奨値をそのまま採用する。観測から得られている Al の大きな存在比を説明するためには、^{25}Mg と ^{26}Mg の陽子捕獲反応はある程度大きい方が望ましい。そこで、^{25}Mg の場合では $E_{\rm r} = 58.0$、 92.6 keV、^{26}Mg の場合では 52.1、 90.0、 148.7 keV の共鳴状態について、$\omega\gamma$ を大きく取った。

Al に関しては、安定核である ^{27}Al の増加が得られるようにすべきだと考えられる。そこで、^{26}Al(p,γ)^{27}Si 反応をより大きくなるような実験値を採用した。この後 ^{27}Al をつくり出すための ^{27}Si の β-decay は、半減期が 4.16 秒と十分短い。その間に ^{27}Al が反応を起こさない様にすることが重要なので、^{27}Al(p,γ)^{28}Si 反応、^{27}Al(p,α)^{24}Mg 反応の反応率を共に小さく取った。

この様に、本研究で新たに採用した反応率を用いたフラッシュモデルの計算を行うことによって、AN99 の推奨値では見られなかった観測との傾向の一致が見られ、反応率として上記のような修正が必要であることが示された。しかし、^{25}Mg と ^{26}Mg の陽子捕獲反応が小さいために Al の増加が抑えられる点については、観測値を再現するにはわずかに不十分で、$\omega\gamma$ の見直しだけではなく、その他の仮定についてもさらに考察を行う必要があることが示された。

学位論文審査の要旨

主　査　　教　授　　加　藤　幾　芳
副　査　　教　授　　藤　本　正　行
副　査　　助教授　　大　西　　明
副　査　　教　授　　岡　部　　明
（情報メディア教育研究総合センター）

学位論文題名

An Insight into Nuclear Reaction Rates from the Abundance Anomalies in Globular Cluster Red Giants

（赤色巨星中の異常組成観測からの核反応の類推）

近年、宇宙観測研究の進展に伴い、宇宙の進化や星の構造に関する多くの情報が蓄積されてきた。その中で、星の元素存在比についても、さまざまなタイプの星で広い範囲の元素のデータが高い精度で観測され、従来の標準理論では理解できない現象が存在している可能性が示唆されてきた。現在観測される元素組成は、ビッグバン以後の天体現象、核反応を通して、質量数の小さな原子核から大きな原子核へと変化した結果であり、核反応が重要な役割を果たしてきた。

本論文は、天体現象について観測されるデータから、地上での原子核実験では十分な情報が得られない原子核反応について新たな知識を得ることを目的として、球状星団中の赤色巨星の元素組成の研究を行ったものである。

最近観測された球状星団中の赤色巨星の元素組成において、C, N, O, Na, Mg, Al などの組成比が、通常の星とは異なることが発見された。この異常な組成比は、当初、星の形成時に生じたものではないかと考えられたが、それぞれの元素の組成比について異常を示しているものの、それらの合計は他の星と比べて同様な値を示すことから、星の生成時からの異常ではなく、星の進化の過程で、星内部で生じた元素が星の表面に運ばれて観測にかかったと理解されるようになった。すなわち、星内部の水素燃焼殻で CNO－サイクル、MaAl－サイクル等の核反応が進み、そこで生成されたものが Deep Mixing と呼ばれる星の内部と表面付近の物質混合過程で星の表面に運ばれて観測されたと考えられている。

しかし、最近、球状星団 M13 の赤色巨星で、大きな Al の組成と同時に ^{24}Mg の組成が減少していることが観測された。この ^{24}Mg の組成の減少は、^{24}Mg(p,

$\gamma)^{25}$Al 反応によるものと考えられ、この反応が進行するためにどんな条件が必要か、問題になった。その問題は、^{24}Mg(p, γ)^{25}Al の反応断面積がよくわかっており、この反応が星の中で進むためには高い温度が必要になるからである。すなわち、標準的燃焼殻ではこの星の中の異常な高温状態が説明できず、どのような機構で高温状態がつくられるか、新たな説明が求められることとなった。

著者らは、この問題について、独自のモデルであるフラッシュモデルを提案し、問題が解決できることを示した。このフラッシュモデルは、星の構造をヘリウムが大部分を占める中心核と水素の外殻からなると考え、ヘリウム中心核に外殻の水素が混ざるとすると、混ざったところで陽子捕獲反応が急激に進み、熱的暴走が生じて一時的に高温な状態をつくるとするものである。高温状態の温度、持続時間は水素の混じる深さ、Fe など重元素の量によって決められる。このフラッシュモデルは^{24}Mg－Al の異状組成を解決するだけでなく、Deep Mixing を説明する有力候補とも考えられている。元素生成に必要な原子核反応の断面積を整理・コンパイルした Caughlan-Fowler(CF88)のデータ、および El Eid-Champagne(EC95)のデータを用いて原子核反応ネットワーク計算を行った結果、フラッシュモデルの適当なパラメータ範囲で、観測される Na と Al の相関関係、Mg と Al の反相関関係が非常によく説明できることを示した。

そこで、著者は、フラッシュモデルを用いて、Angulo 等による最近実験観測データに基づいて作成された核反応率の新しいコンパイレーション(AN99)の評価を行った。その結果、原子核反応ネットワークに用いられる原子核反応率を AN99 で推奨されたものを採用すると観測される Mg－Al 組成比を説明できないことが示された。逆に、Mg－Al 組成比から、それを説明する原子核反応率を求めてみた。その結果は、現在地上で観測されている断面積とその誤差の範囲内で Mg－Al 組成比を説明することができることが示された。しかし、実験誤差の範囲は大きく、観測値としての重みは大きくない。むしろ、本論文で、フラッシュモデルに基づいて、観測された星の元素組成比から核反応率を地上の原子核実験より高い精度で決められることが示された。

これを要するに、著者は、不定性が大きい核反応率を球状星団の赤色巨星で観測される元素組成比から決めることができることをはじめて示したものであり、原子核物理学と宇宙物理学にまたがる新しい分野、宇宙核物理学に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。