

すばる HDS で探る r プロセスと宇宙年代学

本田 敏 志

〈国立天文台ハワイ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: honda@optik.mtk.nao.ac.jp

金属欠乏星の組成は元素の起源について多くの情報をもたらす。そのため多くの高分散分光観測が行われているが、トリウムなどの鉄より重い元素の半分を合成する r プロセスについてはいまだに不明なことが多い。われわれは r プロセス解明のために、すばる望遠鏡高分散分光器を用いて超金属欠乏星の観測を行い、その化学組成を調べた。その結果、原子番号 56 番より重い安定元素の組成比は観測されたどの天体でも太陽の r プロセス組成比と同じであることを確認した。これは r プロセスによって合成される組成パターンはいつも同一であるということ (r プロセスのユニバーサリティー) を意味する。しかしながら、より軽い中性子捕獲元素 (ストロンチウムなど) については、金属欠乏星においても複数のプロセスが寄与していることが明らかになった。また、放射性元素トリウムと安定元素ユーロピウムとの組成比にばらつきが見られた。この結果は放射性元素を使った宇宙年代学に大きなインパクトを与えるものである。

1. 元素の起源とその進化

近年の天文学で重要なテーマの一つに、宇宙や銀河そしてわれわれ自身を構成するさまざまな元素はいったいどのようにして作られ、進化し、現在に至るのか? という元素の起源と進化から宇宙史を解明することがある。元素の起源についての研究は、古代ギリシア時代から行われており、その後、中世の時代には錬金術として鉄などの卑金属から金などの貴金属に変換する研究へと変わっていった。結局錬金術はうまくいかなかったが、一方で周期表の発見や核物理学の発展により元素合成の研究は進歩していった。1952年に半減期の短いテクネチウムが恒星で発見された¹⁾ことで、星の内部で重元素合成が続いていることが確認され、1957年にはバービッジらがビッグバンや星の内部やその他、宇宙の元素合成についてまとめた研究²⁾ (B2FH と呼ばれる論文) が発表された。

現在宇宙に存在する最も多い元素の水素、ヘリウムはビッグバンによって合成され、それらを元

に最初の星が誕生する。そして生まれた星の内部では、星の進化とともに核融合反応によって鉄までの元素が合成される。その後、太陽質量の 8 倍以上の星は II 型超新星爆発を起こし、重元素を含むさまざまな元素を宇宙空間にまき散らす。一方、太陽質量の 8 倍以下の星では、超新星爆発を起こすことなく質量放出などを起こすが、連星に属する場合は Ia 型超新星爆発を起こす場合もあり、鉄族を中心に重元素をまき散らす。宇宙空間にまき散らされた元素は次に生まれる星の材料の一部となり、その後誕生する星は以前のものより金属 (ここではヘリウムより重い元素を金属という) を多く含む星となる。宇宙はこの繰り返しのによってさまざまな金属を増やし、宇宙の化学進化は進んでいった。

しかしながら、星の内部での原子核どうしの反応では鉄より重い元素は合成されない。それでは貴金属などの鉄より重い元素はいったいどのようにして合成されたのだろうか? それには鉄などの原子核が中性子と衝突し捕獲する、中性子捕獲

反応という別のプロセスが必要となる。中性子捕獲反応には主に二つのプロセスがあり、ベータ崩壊の速さと比べて中性子を捕獲する速さが遅いものを *s* プロセス、速いものを *r* プロセスと呼ぶ。 *s* プロセスは主に比較的質量の軽い星（太陽質量の 8 倍以下）が進化した AGB 星で起こることが知られているが、 *r* プロセスの起源についてはいまだによくわかっていない。 *r* プロセスは多くの貴金属を生成し、ウラン（U: 原子番号 92 番）やトリウム（Th: 原子番号 90 番）といった放射性元素も生成するが、不安定原子核を経由して起こるため、核物理の研究においてもその理解は重要である。これまでにさまざまな *r* プロセス元素合成の理論モデルが構築され、II 型超新星爆発によって生まれた中性子星周辺³⁾ や中性子星の合体⁴⁾ などによって太陽の *r* プロセス組成比を再現する試みが行われている。しかし、依然として *r* プロセスの起こっているサイトもメカニズムもあまりわかっていない状況である。

2. これまでの *r* プロセス元素の観測

このような研究を進めるうえで有効なのが、金属欠乏星と呼ばれる、金属の組成が太陽と比べて極端に少ない星である。上述したように、宇宙は時間とともに金属汚染が進んできたので、宇宙が誕生し最初に生まれた星が生き残っていたとしたら、その星（種族 III の星と呼ばれる）には金属元素が全く含まれていないことになる。残念ながら完全に金属ゼロの星はまだ見つかっていないが、非常に少ない星は見つかっており、そのような星の組成は銀河形成初期の元素合成を反映していると期待できる。このような理由から、金属欠乏星の探査は行われており、特に 1980 年代からの対物ブリズムを使った HK サーベイ⁵⁾ は後の研究に大きなインパクトを与えた。

HK サーベイによって発見された数多くの超金属欠乏星 ($[Fe/H] < -2.5^*$) のうち、いくつかの

星は高分散分光観測によってその組成が調べられ、各元素についての銀河形成初期における特徴的な振舞いが見られた^{6), 7)}。特に中性子捕獲元素に見られる 2 桁以上の大きな分散は、他の軽い元素には見られない振舞いである。Andrew McWilliam⁸⁾ らによって観測された CS22892-052 は非常に高い中性子捕獲元素組成を示し、鉄に対する中性子捕獲元素の組成比は太陽と比べて 50 倍以上にもなる。その後、Snedden^{8), 9)} らによってこの星の詳細な中性子捕獲元素組成パターンが調べられ、その星の組成比パターンは驚くべきことに太陽の *r* プロセスパターンとぴたりと一致することが明らかとなった（図 1）。ここで太陽の *r* プロセスパターンとは、太陽系の組成から *s* プロセス成分を差し引いたものである。 *s* プロセス成分はモデル計算によるが、これはある程度信頼できるものである。太陽組成の *r* プロセス成分にはさまざまな天体における元素合成の寄与があると考えられるが、これが銀河初期に生まれたと考えられる超金属欠乏星に見られる組成パターンと一致するという事は重要な観測事実である。すなわち、いろいろな組成パターンの足し合わせで太陽の *r* プロセス成分ができていたのではなく、 *r* プロセスで作られるパターンはいつも同一であることが示唆される。これはその後のいくつかの星の観測でより確からしくなり^{10), 11)}、 *r* プロセスのユニバーサリティーと呼ばれるようになった。

Snedden らの観測で、この事実以上に興味深いのは、トリウムの吸収線が初めてはっきり検出されたことである。トリウム 232 は半減期 140 億年の放射性元素であり、100% *r* プロセスによって作られる元素である。そのため、中性子捕獲元素のユニバーサリティーを仮定すると、トリウム以外の比較的安定な元素のパターンからトリウムの初期値を推定することができる。あとは地質学などで用いられている炭素 14 による放射年代測定法と同じ原理で、現在観測される値と比較するこ

* ここで $[X/H]$ は $\log(X/H) - \log(X/H)_\odot$ の意味で、金属量の指標としては鉄が用いられることが多い。

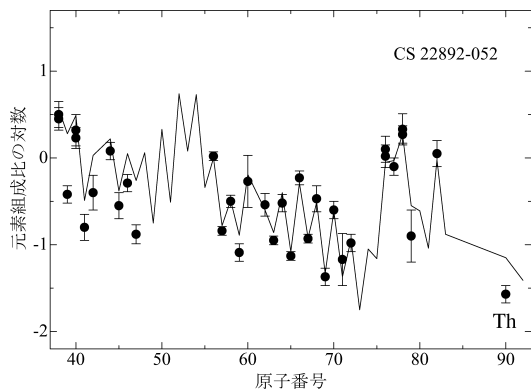


図1 CS22892-052 の中性子捕獲元素組成パターン (点) と太陽系の r プロセスパターン (実線) を比較したもの。

とでこの星が誕生したときから何年経過したか推定することができる¹²⁾。図1で太陽の r プロセスパターンからトリウムだけが一致しないで低い値を示しているのは、太陽よりもこの星が古いためトリウムが減少したものと考えることができる。

Chris Sneden らは安定な元素としてユーロピウム (Eu: 原子番号 63) を使い、この星の年齢は少なくとも 152 億年 (誤差 37 億年) 以上前に誕生したと推定した。この値は大きな誤差を伴うが、現在知られている WMAP で得られた宇宙年齢 137 億歳とも一致する¹³⁾。この方法は星の進化理論や宇宙論パラメーターなどに全く依存しないので、宇宙年齢に対して独立な制限を与えることができると考えられた。

このように、中性子捕獲元素が過剰な星の発見は元素の起源や化学進化の研究に非常に有効であることが示され、次の r プロセス元素過剰星の探査が世界中の望遠鏡を使って精力的に行われた。その結果、いくつかの星でトリウムを含め中性子捕獲元素のパターンが得られたが^{10), 11)}、それでも CS22892-052 ほどの高い値を示す星はなかなか見つけることはできなかった。しかし 2001 年に、すばるとほぼ同時に建設された口径 8 m の ESO/VLT で膨大な時間を投入して探査が行われた結果、Roger Cayrel らのグループは CS31082-001 と

いう r プロセス元素過剰星をついに発見した¹⁴⁾。この星は CS22892-052 と違い、炭素が多くない星であったために、CH, CN などの分子吸収線のブレンドが弱く、おかげで CS22892-052 より多数の中性子捕獲元素の吸収線を検出することができた¹⁵⁾。特に重要なのは、ウランが初めて検出されたことである。ウランは半減期が 45 億年とトリウムより短く、宇宙年齢程度の年代測定に適している。Cayrel らは、トリウムとウランの組成比から 125 億年 (誤差 30 億年) と CS22892-052 よりも小さな誤差で年齢を得た。しかしながら、この星ではトリウム、ウランの値が極めて高く、ユーロピウムなどの安定な中性子捕獲元素の組成との比が太陽系組成から推定される値よりずっと高いという問題が見つかった。すなわち、比較の対象としてユーロピウムを使うという従来の手法では正しい年齢を得られないことになる。このような星は特殊なのだろうか？

3. すばる HDS による金属欠乏星の観測

1999 年にファーストライトを迎えたすばるは、その後続々と観測装置が取り付けられた。2000 年にはナスミス台に高分散分光器 (HDS) が設置され、7 月にファーストライトを迎えた。HDS は可視用エシェル分光器で、高い波長分解能 (最大 15 万) で広い波長域を観測できる特徴をもつ装置である¹⁶⁾。HDS の開発によって、これまで 4 m 級の望遠鏡では詳細な観測が困難であった $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ の星も多くが観測が可能となった。われわれはこれまでに観測された星も含め、 $[\text{Fe}/\text{H}]$ が -2.5 以下の超金属欠乏星で、炭素の少ない巨星を中心に高い波長分解能で観測していった。HDS の試験観測時間の多くを使わせていただいたこともあり、20 個以上の超金属欠乏星について非常に質の高いスペクトルを得ることができた。そのスペクトルを組成解析し、すべての星でマグネシウムなどのアルファ元素から、鉄族元素、バリウム

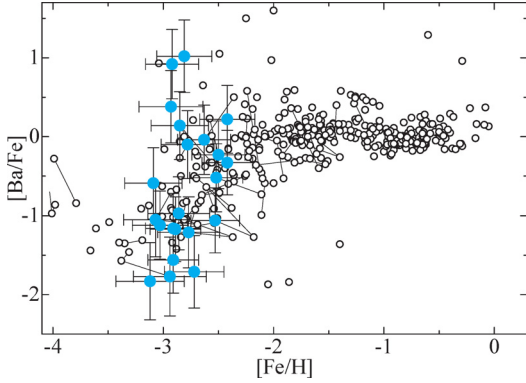


図2 バリウムの鉄に対する組成比と金属量（鉄）との関係。青がわれわれの観測結果。

などの中性子捕獲元素まで組成を得ることができた。これらの解析には、用いる吸収線の振動子強度などの精度が重要であるが、これも近年の実験データなどによって、超微細構造も含め極めて信頼性の高いラインデータが続々と発表されており¹⁷⁾、これらによっても測定誤差は小さくなっている。

われわれが観測した星の金属量 ($[Fe/H]$) は -2.4 から -3.1 の範囲で、アルファ元素や鉄族元素はどの星でも似た値を示した^{18), 19)}。しかしながら、中性子捕獲元素であるバリウム (Ba: 原子番号 56) の組成は3桁以上もの大きなばらつきを示した (図2)。これまでの観測からも中性子捕獲元素に組成のばらつきが見られることは知られていたが、今回の観測でこれまでに検出できなかった低い組成のものを検出したことにより、組成のばらつきは明らかに観測の誤差を超えることがわかった。このばらつきは、銀河形成初期の星間ガスの組成の非一様性を反映しているものと考えることができ、化学進化の数値計算モデルによって再現できることが示されている²⁰⁾。

ここではrプロセスの元素合成に注目するので、これらの星がsプロセスの影響を受けていないかチェックしなければならない。主にrプロセスによって合成されるユーロピウムと主にsプロセスによって合成されるバリウムの比を調べるこ

とによって、それらの星でこれらの元素がどちらのプロセスの影響を強く受けているか判断することができる。その結果、ユーロピウムを検出することができた11の天体で、どれもほぼ太陽のrプロセス成分の値に一致した。このことから、少なくともこれらの星ではsプロセスによる影響はほとんどないと考えることができる。

4. rプロセスのユニバーサリティは成り立つか？

そのうち7つの天体ではトリウムを含む多数の中性子捕獲元素を検出し、詳しい組成パターンを得ることができた。その結果、原子番号56のバリウムから70番のイッテルビウムまでの元素についてはどの星でも太陽のrプロセスパターンによく一致することがわかった (図3)。この結果はCS22892-052やCS31082-001に見られた組成パターンと同じで、このような金属欠乏星では中性子捕獲元素はすべてrプロセスによって作られ、そのときの組成パターンは常にほぼ一定であることが証明された。

しかしながら、軽い中性子捕獲元素 (原子番号が40番付近) では、太陽のrプロセスパターンよりも大きく外れるものが多数見られた。ユニ

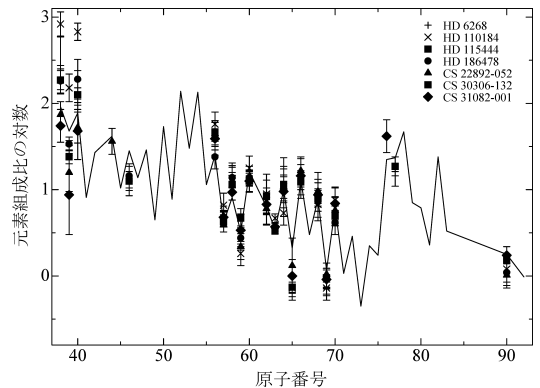


図3 図1と同様に金属欠乏星の組成パターンと太陽系のrプロセスパターンを比較したもの。ただし、金属欠乏星の組成パターンは太陽のパターンと合うようにずらしている。

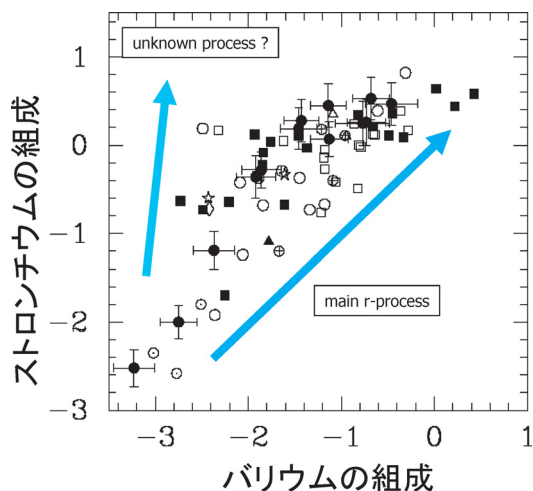


図4 バリウムの組成とストロンチウムの組成を示したもの。

バーサリティーという考え方のきっかけとなった CS22892-052 の測定からも、実は軽い中性子捕獲元素は太陽の r プロセスパターンにあまりよく合わないことが示されていたが、今回の観測では軽い中性子捕獲元素の組成の高い星も低い星も存在し、大きなばらつきがあることが明らかとなった。つまり、原子番号 56 のバリウムより軽い中性子捕獲元素についてはユニバーサリティーは成立せず、従来知られている s プロセスや r プロセスでは説明できないことがわかった。すなわち、軽い中性子捕獲元素を作る何らかのプロセスの存在が示唆されたのである。

そこで、われわれはこの未知のプロセスの性質を調べるために、原子番号 38 番のストロンチウムとバリウムをそれぞれのプロセスによる代表として相関を調べた²¹⁾。図 4 (Sr, Ba) はストロンチウムとバリウムの組成を示したものである。この図を見ると：(1) ストロンチウムが多くてバリウムの少ない星は存在しない、(2) ストロンチウムの分散はバリウムが増えるに従って小さくなっていくという特徴が見て取れる。この傾向は、次のような二つの元素合成プロセスの存在を仮定することでこの傾向の説明が可能である。一つはストロンチウムもバリウムも同じような割合で作るプ

ロセスで、主 r プロセスと呼ばれている従来からよく知られているものである。もう一つはストロンチウムを合成するけれどもバリウムはあまり合成しないプロセスで、最近弱 r プロセスと呼ばれることもあるが、いまだによくわかっていない。われわれの研究から判明したことは、このプロセスはかなりの金属欠乏星に影響しているということである。

この軽い中性子捕獲元素を合成するプロセスをより詳しく調べるには、実は今回注目しているような重い中性子捕獲元素過剰な星は対象として適さない。これらの星では主 r プロセスの影響が卓越してしまうからである。この軽い中性子捕獲元素を合成するプロセスについて調査するには、ストロンチウムが多くバリウムが少ない星の組成パターンを知る必要がある。このような星の詳細な観測例は極めて少ないため、最近われわれはこのストロンチウムがバリウムに比べて多い星の観測に力を入れている。その結果は、ここでは述べないが、観測的に求めた組成パターンは、このプロセスのモデル化に方向性を与えるものである²²⁾。

5. トリウムを使った宇宙年代学

このように、r プロセスで作られる組成パターンのユニバーサリティーは原子番号 56 より軽い元素については成立しないことが明らかとなったが、それでは原子番号 90 番のトリウムはどうだろうか？ 金属欠乏星はいずれにしても年齢の高い (100 億年以上) 星と考えられる。したがって、r プロセスで作られるトリウムと例えばユーロピウムの組成比を一定と仮定すれば、観測される組成比はほぼ一定で、太陽の値よりも低くなると予想される。ところが、得られたトリウム/ユーロピウムの組成比には無視できないほどのばらつきが見られ、一部の星についてはかなり高い値が得られた。特に、今回われわれが初めて観測した CS30306-132 は、CS31082-001 と同じくらい高い中性子捕獲元素組成を示す。上のような単純な仮

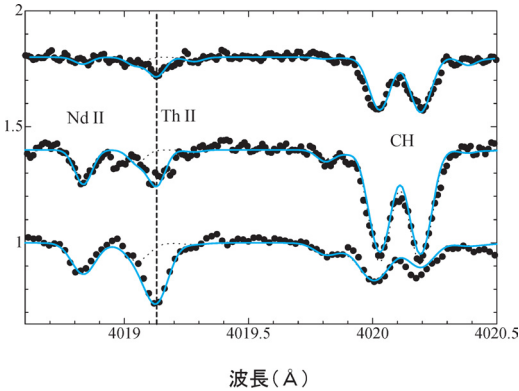


図5 上から順に CS30306-132, CS22892-052, CS31082-001 のトリウム (4,019 Å) 付近のスペクトル (点) とモデルによって計算された合成スペクトル (実線).

定をして、得られたトリウムとユーロピウムの組成比から年齢を求めると、一部の星は超金属欠乏星であるにもかかわらず、太陽よりも若い年齢になってしまう。金属欠乏星の年齢がこれほど若いとは考えにくく、おそらくこれらの星では高いトリウムの初期値をもっていたと考えられる²³⁾。Cayrel らが観測した CS31082-001 は必ずしも特殊ではなく、バリウム、ユーロピウムなどの組成パターンと比べてトリウムが高い値を示す星はほかにも多数存在する可能性が出てきた。

ただし、観測できるトリウムの吸収線は 4,019 Å の 1 本だけで、しかもその吸収線には ¹³CH など多数の吸収線がブレンドしていることから解析には非常に注意を要し、誤差の評価も難しいことから、このばらつきが観測や解析の誤差によるものか、本当に組成に差があるのかは慎重に判断しなければならない。われわれの観測には、これまでに調べられている CS22892-052 と CS31082-001 も含まれているので、CS30306-132 とともにスペクトルを比較してみた。図5はトリウム付近の観測スペクトルとモデルによって計算されたスペクトルである。トリウムの隣には中性子捕獲元素ネオジウム (Nd: 原子番号 60) の吸収線が存在するので、ユニバーサリティーが成立すると仮定する

と、トリウムの吸収線の強度はネオジウムの吸収線におおよそ比例すると考えてもよい。図を見ると、CS22892-052 はトリウムとネオジウムの吸収線も同じ程度の強さであるが、CS31082-001 はトリウムのほうがはるかに強い。CS30306-132 ではネオジウムがほとんど見えないにもかかわらずトリウムの吸収線は見えている。このようなことから、われわれはトリウム組成のばらつきは解析などによるものではなく、実際に星の組成比が違っていると考えている。

このように原子番号 70 番よりも重い元素にもユニバーサリティーを仮定して、ユーロピウムとトリウムのみを用いて年齢を求める手法では必ずしも正しい値を得られるとは限らないことが明らかとなった。r プロセス元素合成の理論計算からも、原子番号 56 から 70 番まではユニバーサルなパターンが作られやすいが、それ以降の元素は r プロセスを起こす環境に強く依存して合成されることが示唆されている²⁴⁾。それでは、これらの問題を解明するためにどのような観測が求められるだろうか？ まず、ウランの観測が重要である。ウランとトリウムはそれぞれの原子番号が近いこともあり、その組成比はユーロピウム/トリウム比よりも合成されるときに環境に依存しないことが期待される。ウランはこれまでに CS31082-001 で検出されたが、それ以降いまだに信頼できる観測結果はない。さらに、ウランやトリウムが崩壊してできる鉛も重要である。CS31082-001 は ESO/VLT によって追観測が行われ鉛が検出されたが、ウランやトリウム組成から期待される値に比べて非常に低いことが示されており²⁵⁾、大きな問題となっている。これら放射壊変に関係する元素を同時に検出することで、初期値の精度は非常に信頼できるものとなり、r プロセス元素合成モデルにも強い制限を加えることができると期待される。

6. 最後 に

以上のように、これまで観測が困難であった超

金属欠乏星の中性子捕獲元素を調べることでその起源を探り、トリウムを観測から宇宙年齢を決定するという目的で研究をスタートしたが、実際には観測によって、ユニバーサリティーの範囲が限定され、軽い中性子捕獲元素を合成する別プロセスの存在が明らかになるなど、むしろ観測によってさらに複雑な状況が明らかになった。このように、すばるHDSなど、近年の大型望遠鏡による観測は従来知られていなかった元素合成プロセスの詳細についても明らかにできる可能性をもっている。今後はより多くの観測とともに、理論研究との連携によって元素合成と銀河の化学進化の理解が進んでいくと期待される。

謝 辞

本稿は筆者の博士学位論文の一部をまとめたものです。共同研究者の国立天文台青木和光氏には多くの有益なコメントをいただきました。指導教官の国立天文台の梶野敏貴氏、安藤裕康氏、野口邦男氏ほか、HDS開発チームの方々、ハワイ観測所のスタッフの方々にはたいへんお世話になりました。この場を借りて感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Merrill S. P. W., 1952, ApJ 116, 21
- 2) Burbidge E. M., Burbidge G. R., Fowler W. A., Hoyle F., 1957, Rev. Mod. Phys. 29, 547 (B2FH)
- 3) Woosley S. E., Wilson J. R., Mathews G. J., Hoffman R. D., Meyer B. S., 1994, ApJ 433, 229
- 4) Freiburghaus C., Rosswog S., Thielemann F.-K., 1999, ApJ 525, L121
- 5) Beers T. C., Preston G. W., Sheckman S. A., 1992, AJ 103, 1987
- 6) McWilliam A., Preston G. W., Sneden C., Searle L., 1995, AJ 109, 2757
- 7) Ryan S. G., Norris J. E., Beers T. C., 1996, ApJ 471, 254
- 8) Sneden C., McWilliam A., Preston G. W., Cowan J. J., Burris D. L., Armosky B. J., 1996, ApJ 467, 819
- 9) Sneden C., et al., 2003, ApJ 591, 936
- 10) Westin J., Sneden C., Gustafsson B., Cowan J. J., 2000, ApJ 530, 783

- 11) Johnson J., Bolte M., 2001, ApJ 554, 888
- 12) Butcher H. R., 1987, Nature 328, 127
- 13) Bennett C. L., et al., 2003, ApJS 148, 97
- 14) Cayrel R., et al., 2001, Nature 409, 691
- 15) Hill V., et al., 2002, A&A 387, 560
- 16) Noguchi K., et al., 2002, PASJ 54, 855
- 17) Lawler J. E., Bonvallet G., Sneden C., 2001, ApJ 556, 452
- 18) Honda S., et al., 2004, ApJS 152, 113
- 19) Honda S., Aoki W., Kajino T., Ando H., Beers T. C., Izumiura H., Sadakane K., Takada-Hidai M., 2004, ApJ 607, 474
- 20) Ishimaru Y., Wanajo S., 1999, ApJ 511, L33
- 21) Aoki W., et al., 2005, ApJ 632, 611
- 22) Honda S., Aoki W., Ishimaru Y., Wanajo S., Ryan S. G., 2006 ApJ, in press
- 23) 和南城伸也, 2001, 天文月報 94, 361
- 24) Otsuki K., Mathews G. J., Kajino T., 2003, New Astron 8, 767
- 25) Plez B., et al., 2004 A&A 428, L9

Investigations of r-Process and Cosmo-chronometry with Subaru/HDS

Satoshi HONDA

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: The abundance analyses of metal-poor stars by high dispersion spectroscopy shed light on the origin of elements. However, the details of the r-process which produces the half of elements heavier than iron are still unknown. We observed very metal-poor stars to investigate the r-process nucleosynthesis with Subaru/HDS. We found that the abundance pattern of stable elements heavier than Ba (atomic number 56) in observed stars are similar to that of the solar system r-process component. This means that the abundance pattern produced by r-process is unique (the universality of the r-process). However, our observation shows more than one processes contribute to the neutron-capture elements lighter than Ba even in metal-poor stars. We also found a dispersion of the abundance ratio of the radio-active element thorium and the stable element europium. This results give a big impact on the cosmo-chronometry using radio active elements.