

r プロセスとウラン・トリウム宇宙年代学

和 南 城 伸 也

〈上智大学理工学部物理学科 〒 102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1〉

e-mail: wanajo@sophia.ac.jp

銀河ハローの超金属欠乏星に存在する長寿命放射性元素ウランとトリウムは、我々の銀河系の誕生以来 100 億年以上にわたって時を刻み続ける「宇宙時計」である。数年前の r プロセス過剰な超金属欠乏星の発見によるトリウム年代学、そして新世紀の始まりとともに発表されたウランの発見によるウラン・トリウム年代学は、銀河年齢の、そして宇宙年齢の下限値を与えるユニークな手法として一躍注目を集めるようになった。本稿では、ウラン、トリウムによる宇宙年代学の観測的および理論的な信頼性、そして将来の展望について述べる。

1. r プロセスとは？

ビッグバンで作られた元素は水素、ヘリウムと微量の軽元素のみであり、炭素以上の元素は全て星の中で作られたということはよく知られている。恒星の内部では温度が上昇するにつれ次々に重い元素が合成され、太陽の約 10 倍以上の質量の星では進化の最終段階で鉄の中心核が形成されるにいたる。では、この話の主役であるウランやトリウムなどの鉄よりはるかに重い元素はどこで作られたのであろうか。そのヒントは、図 1 の太陽系の元素組成比¹⁾ に示されている。鉄より重い元素の中に、3 つのピーク群があるのが見てとれる。さらに、それぞれのピークは中性子のマジックナンバー 50, 82, 126 付近に位置している。したがって、鉄より重い元素は中性子捕獲反応によって合成されたことが推測される。つまり、マジックナンバー付近では中性子捕獲に対して原子核が比較的安定であるためにピークが作られたと考えられる。

さらに、それぞれのピーク群は対をなし、1 つは中性子のマジックナンバーの位置に、もう 1 つはそれより少し手前にあるのが分かる。前者は、中性子密度が低く、ゆっくりと中性子を捕獲しながら安定核に沿って元素合成が起こったことを示して

いる (図 5 参照)。これは、遅い中性子捕獲反応 (s プロセス) とよばれる。それに対し、後者は中性子密度が高く、急激に中性子を捕獲しながら中性子過剰な不安定領域を通して元素合成が起こったことを示している (図 5 参照)。これは、速い中性子捕獲反応 (r プロセス) とよばれる。

s プロセスは、低質量星のヘリウム殻燃焼²⁾ および大質量星のヘリウム核燃焼³⁾ 等で起こっていることが分かっている。これに対し、r プロセスがどこで起こっているかはいまだに明らかにされていない。中性子過剰な環境としてまず思いつく天体は中性子星であろう。現在有力と考えられているシナリオは、超新星爆発直後の原始中性子星付近⁴⁾、あるいは中性子星どうし (または中性子星とブラックホール) の合体⁵⁾ により r プロセスが起こるというものである。図 2 は、超新星爆発直後に形成される原始中性子星からニュートリノ加熱によって放出される物質流中での r プロセスの計算結果の 1 例である⁶⁾。いずれのシナリオでも、ある物理条件下では r プロセスが起こり、太陽系の r プロセス元素組成比をよく再現することが示されている。しかし、そのような物理条件が現実実現可能であるか、また、銀河の化学進化モデルを用いたときに太陽系の r プロセス元素パターンやその

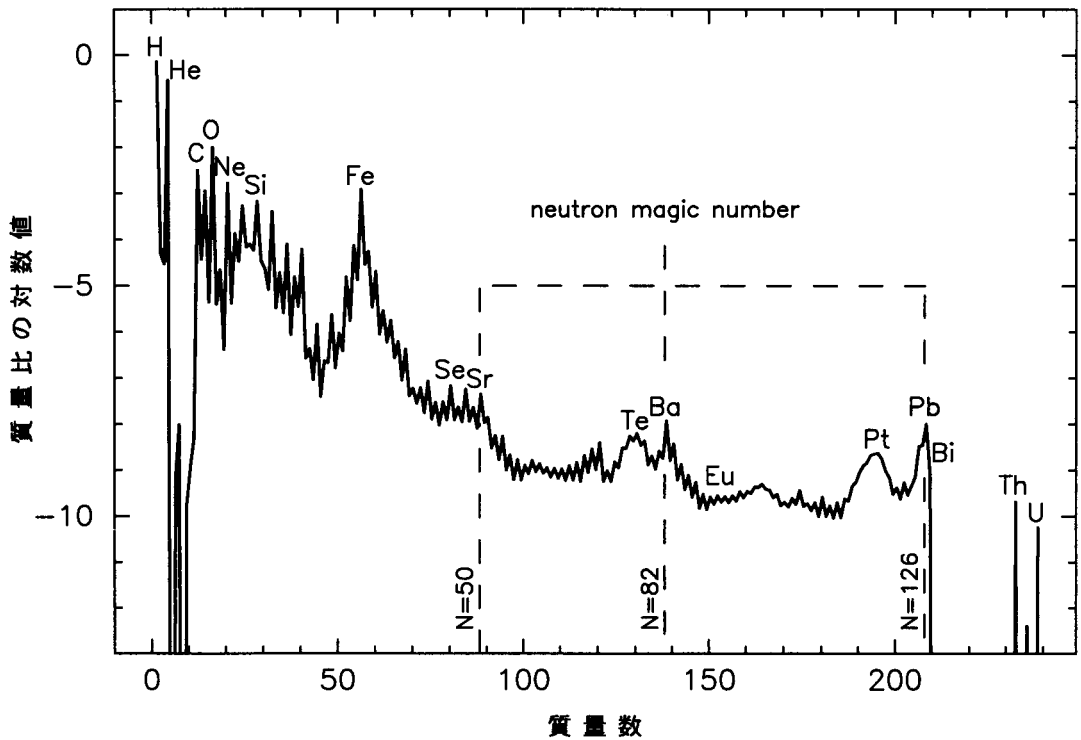


図1 太陽系の元素組成比¹⁾。鉄より重い元素組成比は、中性子のマジックナンバー 50, 82, 126 とその少し手前にピークをもつ。

絶対量を再現するかなどについて多くの疑問点が残されており、決定的であるとはいえないのが現状である。

その起源についてはまだ問題点が多いものの、rプロセスは多くの魅力的な元素を我々に与えてくれた。我々の生活を豊かにしてくれる金、銀、プラチナなどの貴金属のほとんど、そして今や日常生活のエネルギー源として必要不可欠なウランなどアクチノイド元素の全てはrプロセスによって作られた。アクチノイド元素には長寿命の放射性元素が多く、特にウラン238(半減期44.7億年)やトリウム232(半減期140.5億年)は宇宙年齢に近い寿命を持つので、「宇宙時計」として用いることができる。かつては、銀河の化学進化モデルと太陽系のウランやトリウムなどの相対組成比から

我々の銀河系の年齢が推定されていた⁷⁾。しかし、この方法では銀河の化学進化モデルなどによる不定性が大きいことから、誤差が非常に大きい(時には宇宙年齢と同じくらい)のが難点であった。

近年の大型望遠鏡を用いた銀河ハローの超金属欠乏星(鉄の質量比が太陽系の約1000分の1以下)の観測により、星の大気中のrプロセス元素パターンが詳しく調べられるようになってきた。超金属欠乏星は我々の銀河が誕生して間もない頃に生まれた星であり、銀河の化学進化による影響をほとんど受けていないと考えられる。したがって、これらの星の年齢を求めるのに銀河の化学進化モデルを用いる必要はない。ウランやトリウムの初期値と観測値を比較すれば直接的に年齢を求めることができるので、その誤差は著しく軽減される

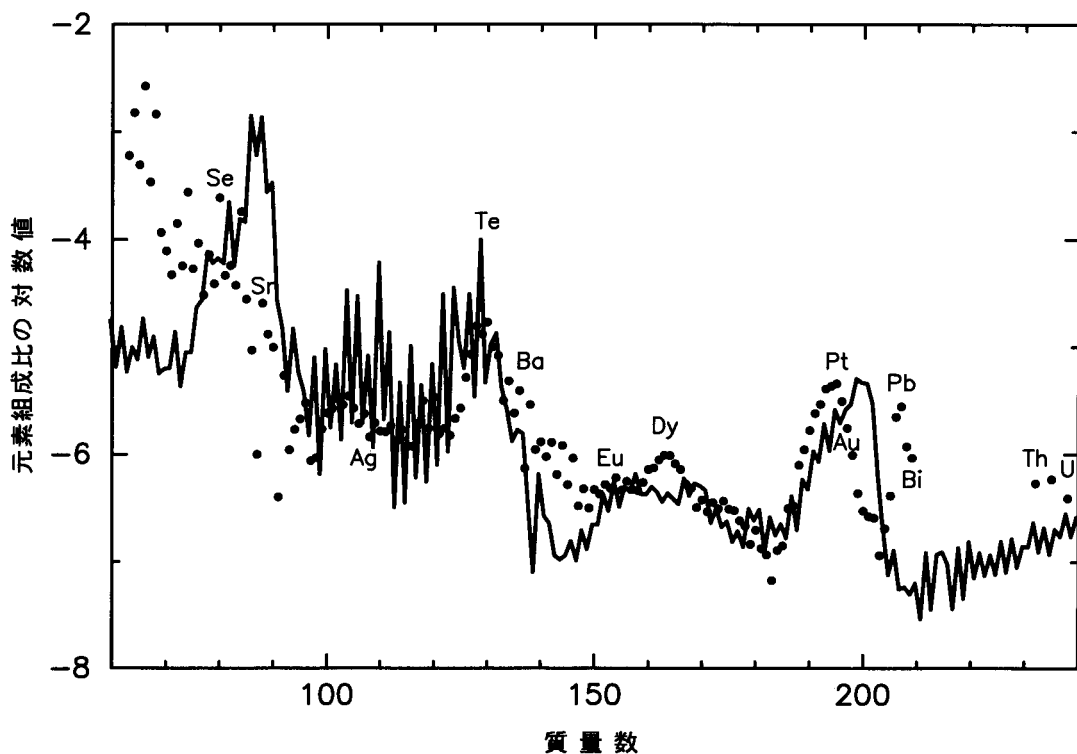


図2 超新星爆発直後の原始中性子星からの「ニュートリノ風」シナリオによるrプロセス元素合成の計算例⁶⁾。実線は、原始中性子星の質量を太陽質量の2倍、半径を10 kmとしたときの結果、点は太陽系のrプロセス元素パターンを表す。

ことが期待される。金属欠乏星の年齢は銀河年齢の、すなわち宇宙年齢の下限値を与え、また、球状星団や宇宙論パラメーターによるほかの宇宙年齢の決定法とは全く独立の手法によっているので、今後ますますその重要性が高まることが期待される。

2. rプロセス星の発見

アメリカの4m望遠鏡 (CTIO) による銀河ハローの超金属欠乏星 CS22892-052 の観測結果⁸⁾ は、多くの天文学者に衝撃をもたらした。この星の鉄の量は太陽系の僅か 1/1250 であるにもかかわらず、安定な r 過程元素の量は太陽系の 1/25、つまり、鉄に対する r プロセス元素の比は太陽系の実に 50 倍にもおよぶ (このような星を r プロセス星とよぶ)。しかも、その重元素パターンは太陽系の

r プロセス元素パターンに見事に一致していたのである。その後、10m の口径をもつケック望遠鏡 (HIRES) などを用いた詳しい解析⁹⁾ により、原子番号が約 50 以下では一致しないことが明らかになったが、原子番号が 56 のバリウム (Ba) から 82 の鉛 (Pb) まではよく一致している (図3)。原子番号が 90 のトリウム (Th) と 92 のウラン (U) は太陽系より低い値を示しているが、これらは放射性元素であり、太陽系より長い年月を経ているからと考えられる。これより、次の3つのことが推測される。

1つは、銀河系が誕生して間もない頃は s プロセスの影響はほとんどなく、太陽系では主に s プロセスに起源をもつバリウムや鉛なども全て r プロセスで作られたということである。これは、多く

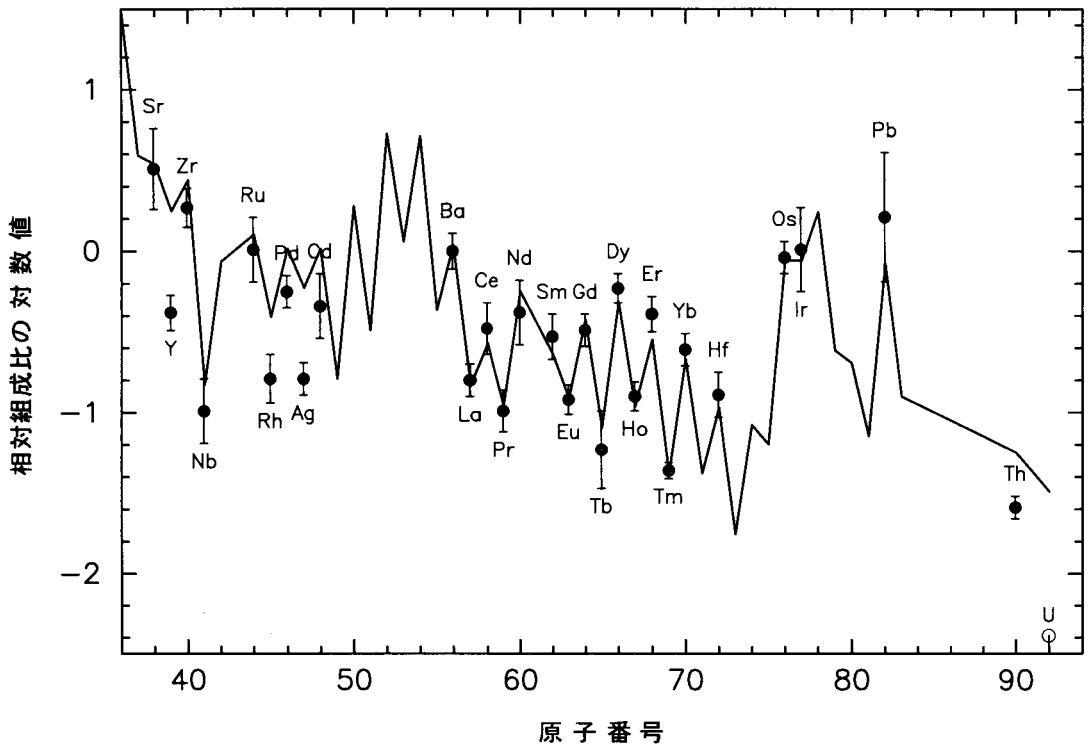


図3 超金属欠乏星 CS 22892-052 の重元素パターン (青円)⁹⁾。ウラン (U) については上限値を示す。実線は太陽系 r プロセス元素パターン。原子番号 56 以上 82 以下では太陽系 r プロセスと合致している。

の金属欠乏星の Ba/Eu の値が太陽系の r プロセス元素の値と合致することからも示唆されている¹⁰⁾。ユーロピウム (Eu) は太陽系ではほぼ完全に r プロセスに起源をもち、金属欠乏星の観測値が比較的豊富なため、よく用いられる。最近では、観測的に不定性の大きいバリウムの代わりにランタン (La) を用いることにより、鉄の量が太陽系の約 1/100 以下の金属欠乏星では s プロセスの寄与が無視できることが確認されている¹¹⁾。

2つめは、その高い r プロセス元素の含有量から、おそらく 1つの超新星爆発が引き金となってこの星が誕生したと考えられる。超新星爆発に起因する星形成を仮定した銀河ハローの化学進化モデルにより、この高い r プロセス元素量を含む金属欠乏星の Eu/Fe の値の大きな分散 (約 300 倍) が説

明されたことから、r プロセス元素の起源は超新星であることが強く示唆されるようになった¹²⁾。中性子星の合体が起源であるとする、このような観測の傾向を再現することは極めて困難である。また、この化学進化モデルより、r プロセスを起こす超新星の質量の範囲は限定される (例えば、8 ~ 10 太陽質量または 30 太陽質量以上) ことが示されている。

3つめは、その元素パターンが太陽系の r プロセス元素パターンと一致していることから、r プロセス元素の起源はおそらく (少なくとも原子番号 56 以上で) 単独の起源を持ち、その元素パターンは常にはほぼ等しい (ユニバーサル) と考えられる。ただし、原子番号 50 以下の r プロセス元素の起源を同時に説明するためには、少なくとも 2つ以上

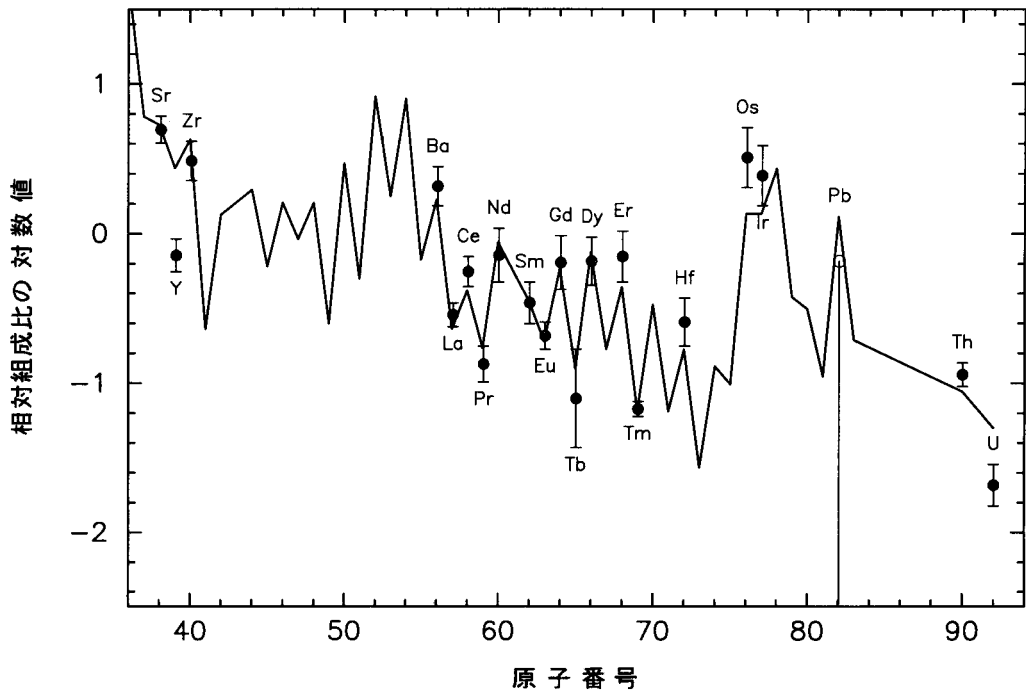


図4 超金属欠乏星 CS31082-001 の重元素パターン (青円)¹⁶⁾。鉛 (Pb) については上限値を示す。実線は太陽系 r プロセス元素パターン。原子番号 56 以上 72 以下では太陽系 r プロセスとほぼ一致しているが、r プロセスの第3ピーク付近 (Os, Ir) では明らかに異なる。

の起源が必要であることが指摘されている¹³⁾。

以上の仮定の基に次のことが結論される。この星が誕生したときにはトリウムはある初期値を持っていたが、長い年月を経てその大半が崩壊したために、太陽系よりも低い値になったのである。これはもちろん、この星は太陽より年老いていることを示している。トリウムの量の時間変化は

$$\text{Th}(t) = \text{Th}(0) \exp(-t/\tau_{\text{Th}})$$

で与えられるから、²³²Th の半減期 (140.5 億年 = $\tau_{\text{Th}} \ln 2$) を用いると、CS22892-052 の年齢は以下のように求められる。

$$467[\log(\text{Th}/r)_{\text{初期値}} - \log(\text{Th}/r)_{\text{観測値}}] \text{ 億年} \quad (1)$$

ここで、 r は安定な r プロセス元素であり、ユーロピウムがよく用いられる。式 (1) に $\log(\text{Th}/\text{Eu})_{\text{観測値}} = -0.66 \pm 0.1$ ⁹⁾、 $\log(\text{Th}/\text{Eu})_{\text{初期値}} = -0.30$ ¹⁴⁾ を用いると、年齢は 170 ± 47 億年となる。この誤差 ± 47 億年は観測誤差 ± 0.1 dex より生じたものである。その後もトリウムの探索は続けられ、他の5つの金属欠乏星の Th-Eu の観測値より、それらの年齢の平均値 110 ± 42 億年が得られている¹⁴⁾。これらの値は宇宙年齢の下限を与えるが、他の手法による宇宙年齢の値と誤差の範囲で一致している。しかし、その誤差は小さいとはいえない。

3. ウランの発見

今年 (2001 年) 2 月にネイチャーに発表された、8 m 望遠鏡 VLT (UVES) による超金属欠乏星

CS31082-001の観測結果¹⁵⁾により、宇宙年代学の新しい時代が始まった。この星はCS22892-052と同じくらい強いrプロセス元素の過剰が認められ、2番目のrプロセス星となった。だが、それ以上に衝撃的であったのは、これまで見つかっていなかったウラン(UII線, 3859.57Å)が初めて検出されたことである。これは、CS31082-001がrプロセス星であったこともさることながら、CS22892-052のような炭素星ではなかったことによりCNの分子線(3859.67Å)の強いブレンドを免れたという幸運もある。ウラン(ほとんど²³⁸U)は半減期がトリウムより短いため、原理的にはより精密な宇宙時計になり得る。また、トリウムについても、CS22892-052ではCHの分子線のブレンドなどのために3本の吸収線のみが測定可能だったのに対し、この星では10本の吸収線を測定することができたためにより高い精度が得られた。

だが、この星は新たに重大な問題を提起した。図4から明らかなように、CS31082-001の元素パターンは原子番号56から72まではほぼ太陽系のrプロセス元素パターンと一致しているが、それより重い元素については一致が見られない¹⁶⁾。rプロセスの第3ピーク付近のオスmium(Os)とイリジウム(Ir)は太陽系のrプロセスパターンに比べて過剰であるが、鉛は検出されていない。さらに、トリウムが太陽系より高い値を示している。この星が太陽より若いとは考えられないので、少なくともウラン、トリウムや第3ピーク付近の元素は太陽系に比べて高い初期値をもっていたと考えられる。つまり、CS22892-052やほかの超金属欠乏星でこれまで仮定されてきたrプロセス元素パターンのユニバーサリティーが、少なくともこの星には当てはまらないのである。したがって、これまでTh-Euの観測値を用いて得られた金属欠乏星の年齢、すなわち宇宙年齢の下限値には注意を要する。今後、より多くのrプロセス星の探索により、この星が例外なのか、あるいは星ごとに違った元素パターンを示すのか確認する必要があるであろう。

さて、ウランの発見により、星の年齢を求めるのに式(1)に加えて新たに2つのオプション

$$148[\log(U/r)_{\text{初期値}} - \log(U/r)_{\text{観測値}}] \text{ 億年} \quad (2)$$

$$218[\log(U/Th)_{\text{初期値}} - \log(U/Th)_{\text{観測値}}] \text{ 億年} \quad (3)$$

が得られる。それぞれの係数は、²³²Th(140.5億年)および²³⁸U(44.7億年)の半減期より計算された。観測誤差はそれぞれの式の係数により増幅されるので、Th-rを用いたときよりも、U-r、またはU-Thを用いた方が誤差ははるかに小さくなることが分かる。式(2)と(3)を比べると、U-rを用いたほうがU-Thを用いたときよりも係数が小さい。しかし、ウランとトリウムは化学的な性質の類似性により系統誤差は比をとるとキャンセルされる傾向にある。また、後で述べるように、ウランとトリウムは原子番号が隣り合っているため、理論的に得られる初期値の信頼性が極めて高い。したがって、現実にはU-Thを用いたものが最も精度の高い時計となる。

式(3)に $\log(U/Th)_{\text{観測値}} = -0.74 \pm 0.15^{15)}$ 、 $\log(U/Th)_{\text{初期値}} = -0.255^{14)}$ を用いて得られたCS31082-001の年齢、すなわち宇宙年齢の下限は 106 ± 33 億年である。ただし、ここで用いられた初期値は太陽系のrプロセス元素パターンを基に計算されたものである。この星では原子番号が72より大きい元素のパターンが太陽系のrプロセス元素パターンと一致していないことから、新たにこの星の元素パターンを基に初期値を計算しなおす必要がある。そのようにして新たに得られた $\log(U/Th)_{\text{初期値}} = -0.16^{17)}$ を用いると年齢は 126 ± 33 億年となり、やはり他の手法により得られた宇宙年齢の値とよく一致している。この誤差 ± 33 億年は観測誤差 ± 0.15 dexを反映している。前述のCS22892-052のTh-Euによる方法より観測誤差が大きいにも関わらず、年齢の誤差はU-Thを用いたほうがずっと小さい。これは、式(1)と(3)を比べ

れば分かるように、U-Th 時計の方が Th-Eu 時計よりはるかに精度が高いからである。したがって、U-Th 時計は、今後の大型望遠鏡による超金属欠乏星の高精度の観測によって、年齢の誤差を著しく減少させる可能性を秘めている。おそらく、近い将来に± 10 億年程度にまで抑えることが可能であろう。

4. 「初期値」の決定

これまで、理論的に得られるウランやトリウム「初期値」の誤差については触れなかった。実は、ウラン、トリウムによる宇宙年代学ではこれが最も深刻な問題かもしれない。r プロセス元素の起源がいまだに明らかにされていないのに、どうしてウラン、トリウムの初期値が計算できるのだろうか。現在のところ、クラシカル r プロセス⁷⁾ という手法を用いて太陽系の r プロセス元素パターンにフィッティングすることによって得られている。

クラシカル r プロセスでは、ある原子番号における中性子捕獲反応とその逆反応（光分解）との間の熱平衡状態を仮定している。このとき、温度と中性子密度を与えれば、ある原子番号における同位体比は化学平衡の式を解くことにより計算できる。必要な原子核データは、原子核の質量と分配関数のみである。また、原子番号の時間発展は、反応時間を与えれば微分方程式を解くことにより計算できる。このとき必要なデータはベータ崩壊率のみである。したがって、温度、中性子密度、反応時間の 1 セットで 1 つの r プロセスパターンが決まることになる。この 3 つのパラメーターのセットをいくつか用意して、それらに重みをつけて足し合わせることにより、放射性元素トリウム、ウランおよびプルトニウムを除く太陽系の r プロセス元素パターンを再現するようにフィッティングする。このとき得られるウラン、トリウムの値が初期値として採用される。しかし、これらの値は太陽系の安定な r プロセス元素のパターンから外挿により計算されるため、いくつかの不定性が考えられる。

1 つは、原子核データ、特に原子核の質量の不定性である。クラシカル r プロセスでは質量のほかに分配関数、ベータ崩壊率のデータも必要であるが、それらも原子核の質量データを用いて計算される。また、ウランやトリウムなどのアクチノイド元素の存在量を計算するには、自発核分裂、中性子誘発核分裂、ベータ遅延核分裂、そしてアルファ崩壊のデータも必要であり、これらもまた原子核の質量に強く依存する。r プロセスに関わる中性子過剰核の実験データは現在のところほとんどなく、理論的なモデルに頼らざるを得ない。中性子過剰核のモデルはこれまで安定核付近の理論や実験データを基に考案されてきたが、最近の不安定核ビームを用いた加速器実験により、その物理的性質は安定核のそれとは極めて異なることが明らかになってきた¹⁸⁾。そのような効果の一部を現象論的に考慮した原子核の質量モデルも考案されている¹⁹⁾。現在、原子核の質量モデルは現象論的なものから微視的に計算されたものまで、多くのものが存在する。それらを全て考慮すると、星の年齢の誤差は宇宙年齢程度にもおよんでしまう²⁰⁾。しかし、クラシカル r プロセスによって安定な r プロセス元素パターンがよく再現される質量モデルはそれほど多くはない。特に、鉛 (Pb) とビスマス (Bi) はウランやトリウムと同様にアルファ崩壊連鎖によって作られるために、それらの合成量の間には密接な関係がある。したがって、これらのパターンを同時に再現するものが「よい質量モデル」であり、そのとき得られるウランやトリウムの値は極めて信頼性が高いといえるであろう¹⁴⁾。残念ながら、太陽系 r プロセスの鉛の値には 2 倍以上の不定性がある²¹⁾。太陽系の r プロセス元素パターンは、全体から s プロセス元素パターンを差し引くことにより求められる。s プロセス元素パターンの決定には、安定核付近の中性子捕獲反応の実験データを用いることができるために不定性は比較的小さい。しかし、鉛は s プロセスと r プロセスの両方によって作られ、また反応経路の最終地点付近にあり外挿に

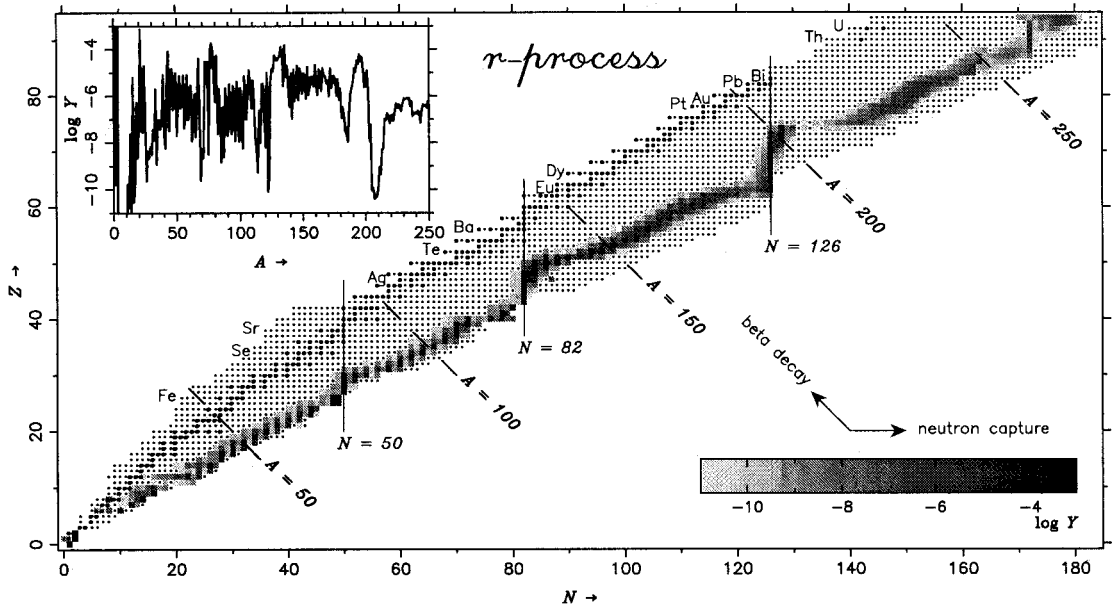


図5 ダイナミック r プロセスによる元素合成の計算例⁶⁾。横軸は中性子数、縦軸は原子番号。点は原子核反応ネットワークに組み込まれている核種で、中性子、陽子からプルトニウムまでの3000個以上におよぶ。青点は、安定核および長寿命放射性元素を表す。グレイスケールは、中性子捕獲反応が凍結したときの核種の存在量を表す。左上には、その対数値を質量数の関数として表してある。中性子のマジックナンバー付近にピークを作っているのがわかる。これらはこの後ベータ崩壊によって安定核へ向かうため、ピーク位置はマジックナンバーより少し手前にシフトする。

より計算されるため、不定性が大きくなる。

また、注意しなければいけないのは、太陽系の r プロセス元素パターンにフィッティングして得られたトリウム、ウランの初期値が信頼できるのは、r プロセスのパターン（少なくとも原子番号 56 以上）がユニバーサルであると仮定した場合である。したがって、特に r プロセス星 CS31082-001 のように明らかに太陽系の r プロセス元素パターンと異なる場合は、その星の元素パターンに直接フィッティングして初期値を決定する必要がある。残念ながらこの星から鉛は検出されていないが、もう1つの r プロセス星 CS22892-052 には見つっている⁹⁾。その誤差は $\pm 0.4 \text{ dex}$ とかなり大きいですが、今後の観測で $\pm 0.2 \text{ dex}$ 以下に抑えられれば太陽系の鉛の誤差を下回ることになる。今後の観測に

よって CS31082-001 の鉛の値が精度よく決まれば、U-Th による星の年齢の「初期値」による誤差はかなり小さくなるだろう。原子核データへの制限についても、鉛を含む r プロセス元素パターンが精度よく観測されれば、太陽系 r プロセスではなく、r プロセス星の観測データを用いるべきであろう。

クラシカル r プロセスによる手法そのものにも問題がある可能性がある。r プロセスの起源がまだに明らかにされていない以上、クラシカル r プロセスは太陽系や超金属欠乏星の r プロセス元素パターンにフィッティングするには最も簡単な方法である。しかし、現実の r プロセスではクラシカル r プロセスとは異なり、温度や中性子密度は連続的に変化する。その結果、中性子捕獲反応が凍結する際に中性子捕獲反応とその逆反応との間の熱平

衡状態が破れる。また、その後のベータ遅延中性子放出などのプロセスが重要となる。これらの効果やより現実的な物理条件を考慮すれば、 r プロセス元素パターンはクラシカル r プロセスの場合と少々異なったものにあるであろう。最近、クラシカル r プロセスのような仮定をせずに、超新星などのモデル計算により得られた温度や密度などの時間変化を用いて、約 3000 個もの核種の間の原子核反応やベータ崩壊、ベータ遅延中性子放出などを考慮した元素合成の計算（ダイナミック r プロセス）が行われるようになってきた（図 5）⁶⁾。ダイナミック r プロセスによる計算では、クラシカル r プロセスほど原子核の質量モデルの性質を強く反映しないことなどが指摘されている²²⁾。したがって、「よい質量モデル」であるかどうかを見極め、精度の高い「初期値」を得るためには、クラシカル r プロセスだけではなくダイナミック r プロセスによる検証が必要であろう。

以上に述べたウランやトリウムの「初期値」の不定性、さらに r プロセス元素パターンがユニバーサルであるとは必ずしもいえないことなどを考慮すると、1つの金属欠乏星から得られた Th-Eu の値を基に決定された宇宙年齢の下限値を信用するのは、非常に危険であるといえる。ただし、今後の観測により多数の金属欠乏星の Th-Eu が得られれば、統計的な有意性により信頼性が著しく高まることが期待される。U-Th については、隣り合う元素であることから上記のような不定性による誤差は小さく、いくつかの「よい質量モデル」を用いると ± 0.1 dex 程度である²⁰⁾。したがって、「初期値」による誤差は式 (3) より 20 億年程度であり、かなり信頼性が高いといえる。この値は、将来 CS31082-001 から鉛が検出されれば著しく小さくなるだろう。

5. これからの宇宙年代学

21 世紀の始まりとともに発表された超金属欠乏星 CS31082-001 のウラン発見のニュースによって、

宇宙年代学の新しい時代が始まったといえるだろう。これまでの誤差の大きかった Th-Eu 時計に代わって、我々は精度の高い U-Th 時計を手に入れた。まさに、手巻きからクォーツの時代への進化である。この新しい時代に要求されることは、以下の点に集約されるであろう。

まず最初に必要なのは、CS31082-001 の追観測である。これまでに発見された r プロセス星は 2 つのみであり、今後も発見される頻度は必ずしも高くはないであろう。しかし、前述のように U-Th 時計による年齢決定の信頼性は非常に高いので、追観測によってその観測誤差をさらに小さくする必要がある。特に、鉛の観測値は U-Th の初期値を決定する際に強い制限を与える。さらなる r プロセス星の探索、そしてウランの発見が必要なのはいうまでもない。また、 r プロセス星でなくても金属欠乏星の中にはトリウムが検出される例は少なくない。単独では信頼性の低い Th-Eu 時計も、今後は統計的な有意性により信頼性が向上していくであろう。

また、超新星爆発モデルなどを用いたダイナミック r プロセスの数値計算と r プロセス星の元素パターンを比較することにより、原子核モデルへのより強い制限を与えると同時に、U-Th の初期値の信頼性を高める必要がある。今後、理化学研究所 (RI ビームファクトリー) を始めとする不安定核ビームによる加速器実験により、中性子過剰核のデータが飛躍的に蓄積され、同時に理論モデルの信頼性も著しく向上すると期待される。また、金属欠乏星の様々な r プロセス元素組成のデータを用いた銀河ハローの化学進化モデルにより、 r プロセス元素の起源となった超新星の質量分布などに強い制限が与えられれば、より現実的な超新星 r プロセスの数値計算が可能となるであろう。

超金属欠乏星の年齢はあくまでも銀河年齢の、すなわち宇宙年齢の下限を与えるものである。宇宙時計によって得られた年齢は常にほかの手法により得られた宇宙年齢の値との比較によってのみ意味をもつ。しかし、精度の高い U-Th 時計により

得られた年齢がほかの方法により得られた宇宙年齢の値に極めて近いことから²³⁾、ビッグバンから我々の銀河系の超金属欠乏星誕生までの時間は、宇宙年齢に比べて十分短かったと推測される。今後のすばる望遠鏡 (HDS) をはじめとする 8 m 級大型望遠鏡の活躍および r プロセスの理論モデルの進展により、r プロセス元素による宇宙年代学は急速に進化していくであろう。特に、U-Th による「宇宙時計」は、数ある宇宙年齢決定法の中でも時計としての精度は最も高いものになる可能性を秘めているといえよう。

参考文献

- 1) Anders E., Grevesse N., 1989, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 197
- 2) Busso M., Gallino R., Wasserburg G. J., 1999, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 37, 239
- 3) Prantzos N., Hashimoto M., Nomoto K., 1990, *Astron. Astrophys.*, 234, 211
- 4) Otsuki K., Tagoshi H., Kajino T., Wanajo S., 2000, *Astrophys. J.*, 533, 424
- 5) Freiburghaus C., Rosswog S., Thielemann F. -K., 1999, *Astrophys. J.*, 525, L121
- 6) Wanajo S., Kajino T., Mathews G. J., Otsuki K., 2001, *Astrophys. J.*, 554, 578
- 7) Cowan J., Thielemann F. -K., Truran J. W., 1991, *Phys. Rep.*, 208, 267
- 8) Sneden C., McWilliam A., Preston G. W., Cowan J. J., Burris D. L., Armosky B. J., 1996, *Astrophys. J.*, 467, 819
- 9) Sneden C., Cowan J. J., Ivans I. I., Fuller G. M., Burles S., Beers T. C., Lawler J. E., 2000, *Astrophys. J.*, 533, L139
- 10) McWilliam A., 1998, *AJ*, 115, 1640
- 11) Johnson J. A., Bolte M., 2001, *Astrophys. J.*, in press (astro-ph/0103299)
- 12) Ishimaru Y., Wanajo S., 1999, *Astrophys. J.*, 511, L33
- 13) Ishimaru Y., Wanajo S., 2000, in *First Stars*, A. Weiss, T. Abel, & V. Hill eds. Springer-Verlag, Berlin, p. 189
- 14) Cowan J. J., Pfeiffer B., Kratz K. -L., Thielemann F. -K., Sneden C., Burles S., Tytler D., Beers T. C., 1999, *Astrophys. J.*, 521, 194
- 15) Cayrel R. et al., 2001, *Nature*, 409, 691
- 16) Hill V., Plez B., Cayrel R., Beers T. C., 2001, *Astrophysical Ages and Time Scales*, T. von Hippel, N. Manset, & C. Simpson eds. ASP, in press (astro-ph/0104172)
- 17) Toenjes R., Schatz H., Kratz K. -L., Pfeiffer B., Beers T. C., Cowan J. J., Hill V., 2001, *Astrophysical Ages and Time Scales*, T. von Hippel, N. Manset, & C. Simpson eds. ASP, in press
- 18) Ozawa A., Kobayashi T., Suzuki T., Yoshida K., Tanihata I., 2000, *Phys. Rev. Lett.*, 84, 5493
- 19) Pearson J. M., Nayak R. C., Goriely S., 1996, *Phys. Lett. B*, 387, 455
- 20) Goriely S., Clerbaux B., 1999, *Astron. Astrophys.*, 346, 798
- 21) Arlandini C., Käppeler F., Wisshak K., Gallino R., Busso M., Straniero, O., 1999, *Astrophys. J.*, 525, 886
- 22) Freiburghaus C., Rembges J. -F., Rauscher T., Kolbe E., Thielemann F. -K., Kratz K. -L., Pfeiffer B., Cowan J. J., 1999, *Astrophys. J.*, 516, 381
- 23) Ferreras I., Melchiorri A., Silk J., 2001, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, submitted (astro-ph/0105384)

The R-process and Uranium-Thorium Cosmochronology

Shinya WANAJO

*Department of Physics, Sophia University,
7-1 Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8554*

Abstract: The long-lived radioactive nuclei, uranium and thorium in the atmosphere of ultra-metal-poor stars in the Galactic Halo, are the "cosmochronometers" working over the Galactic history during more than 10 billion years. The dating with the use of thorium since finding an r-process enriched star several years ago and the uranium-thorium chronology since the discovery of uranium in another r-process star in the beginning of the new century provide us a unique method for determining the age of the universe. I will review the reliability of the dating technique with uranium and thorium, and speculate some progress in the near future.