

銀河系ハローの超金属欠乏炭素過剰星の起源と 初期宇宙の連星系の周期分布特性

藤本正行 (北海学園大学、北海道大学)、山田志真子 (北海道大学)、須田拓馬、小宮悠 (東京大学)

1. 序：銀河考古学

我々の宇宙の構造形成は、ビッグバン後の暗黒時代に形成された mini halos の中で、誕生した星の曙光とともに始まった。銀河はこれらの mini halos の衝突・合体によって形作られてきたが、それは、取り込んだガスを集めて星を形成する過程でもあった。大・中質量星は、超新星爆発、質量放出を通して、核種合成物を放出し、重元素の増加、物質の多様化に寄与してきた。一方、低質量星は、その長寿命のため、数的夥多で銀河の構造を担うとともに、表面組成等に誕生当時の宇宙の状態、その後の進化過程の形跡をとどめる。銀河考古学 (Galactic Archeology) は、宇宙初期に生れた低質量の金属欠乏星の表面組成、空間分布等の理解を通して、銀河の形成史、初期進化を探ろうという試みである。

銀河系ハローの金属欠乏星の探査は、金属量が太陽と 10 分の 1 以下の Pop II 星 ($[Fe/H] \approx -1 \sim -2$) の発見 (Chamblain & Allier 1951)、さらには、宇宙の背景放射の発見で Big Bang による原始核種合成では金属元素が形成されないことの判明を承けて始まる。70 年代の探査を総括して、Bond (1980) は、 $[Fe/H] < -3$ の星はないと宣言したが、その後、 $[Fe/H] = -3.5$ と -4.5 に G64-12 (Carney & Peterson 1981) と CD-38°245 (Bessel & Norris 1984) が high velocity stars および red sub-luminous stars の研究の中で偶然で発見される。1985 年から大規模な探査が始まり、90 年代になる、HK survey (Beers et al. 1992) によって $[Fe/H] = -3 \sim -4$ の多数の超金属欠乏星が、2000 年代になると HES survey (Clistlieb et al. 2001) によって、 $[Fe/H] = -5.3$ と -5.6 の 2 つの極金属欠乏星が発見された。2010 年以降も SDSS (SEGUE)、LAMOST (LEGUE) や Southern Sky Survey (with SkyMapper Telescope) が続けられた。Southern Sky Survey で $[Fe/H] < -7$ ($[Ca/H] = -7.2$) の恒星が発見されたが、これが、現在知られてるもっとも金属量の小さい恒星である。宇宙の初代星は全く金属を含まないが、もし質量 $0.8 M_{\odot}$ 以下の低質量星も形成されたら現在も生き残っているはずである。この宇宙の初代星の生き残りである 種族 III (Pop III) 星の存否については未だ決着はついていない。

近年、HK と HE survey で発見された銀河系ハローの超金属欠乏星 (EMP 星) については、すばる等の大型望遠鏡を用いた高分散分光観測によって、その表面組成等が詳細に研究されてきた。その数は現在までに $[Fe/H] < -2.5$ の超金属欠乏星は 680 余りに達している。これらの超金属欠乏星について、これまで出版された観測データは全て SAGA database (Suda et al. 2008, 2011, Yamada et al. 2013) に収録し、一般に提供されている。以下では、SAGA database を利用して、これまでの観測から得られた、銀河系形成過程についての知見を見ていく。

2. 銀河系ハローの超金属欠乏星の観測特性

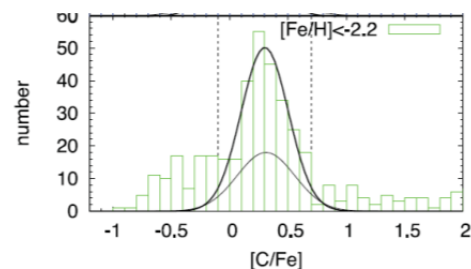
これまでの観測から、銀河系ハローの超金属欠乏星の特性として、次の 3 点が指摘されている。

(1) EMP 星の希少性

HK survey や HES survey の発見された超金属欠乏星の数から、公表されている観測領域の被覆率、観測の深さ、あるいは、恒星の進化段階の違いなどを考慮して評価してみると、銀河ハローの EMP ($[Fe/K] < -2.5$) 星の数は、高々 $\sim 10^6$ 個程度にしかならない (Komiya et al. 2007, 2009)。これは金属量を $[Fe/K] = -2.5$ まで増加させるのに必要な鉄の生成量 すなわち超新星爆発 (SNe) の数が、現在までの銀河系全体の 1/300 であることから考えると、宇宙初期は大質量星に比して低質量星の生成率の割合が非常に小さかったことになる。

(2) 炭素過剰金属欠乏星

超金属欠乏星には、元素組成の異常を示すものが多く、その程度も大きい。右図に炭素と鉄の割合の分布を示したが、 $[C/Fe] > 0.7$ 以上の炭素過剰 (CEMP) 星が多く、その割合は 20~30% に達する (Lee et al. 2013 参照)。これは太陽組成ではせいぜい a few % に留まると対照をなす。炭素の不足 ($[C/Fe] < -0.1$) の星も多く見られるが、炭素は CN サイクルで窒素に変換されるので、観測されてい

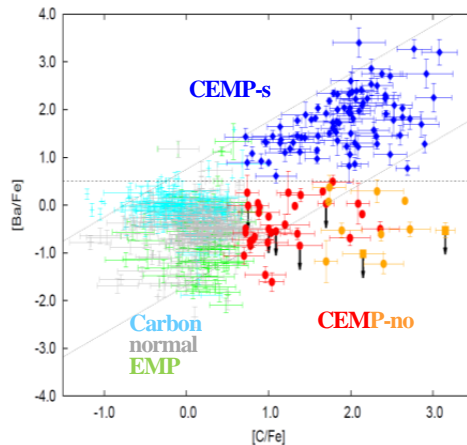


Yamada et al. (2013)

る赤色巨星分枝 (RGB) 星の内部でも可能である。しかしながら、炭素の生成は漸近巨星分枝 (AGB) 段階以降でしか起こり得ないので、その起源が問題となる。

(3) CEMP 星の 2 つの種族

鉄より重い元素は中性子捕獲反応によって合成されるが、slow-過程と rapid-過程に大別される。s-過程は AGB 星や大質量星のヘリウム燃焼段階、r-過程は超新星爆発や連星中性子星の合体時に起き、Ba と Eu がそれぞれの代表的な元素とされている。右図のように、CEMP 星はこれらの元素の組成と s-過程元素と r-過程元素の組成比の大きな変動を示す。Ba の組成を基に、CEMP 星は、 $[Ba/Fe] \geq 0.5$ の CEMP-s (青印) と $[Ba/Fe] < 0.5$ の CEMP-no (赤、橙印) に種別される (Aoki et al. 2002)。CEMP-s 星は s-過程元素に富んでいるのに対し、CEMP-no 星は、炭素過剰を示さない他の星と同程度の中性子捕獲元素の組成を持つとされ、その起源の違いが議論となっている。

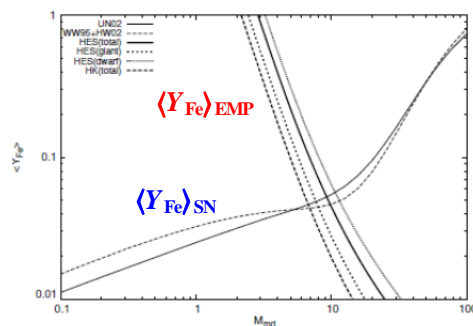


本稿では、上記の観測特性から、CEMP 星とその subclasses の起源及びそれから導かれる宇宙初期の超金属欠乏下での星形成史の性質を調べる。

3. 超金属欠乏星の初期質量関数

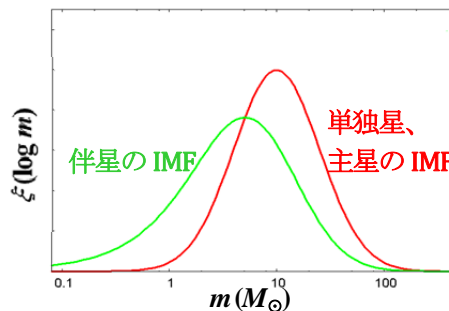
現在まで生き残る低質量星と鉄を生成する大質量星の比は、誕生時の初期質量関数 (IMF) で決まる。観測から推定した銀河系ハローの EMP 星の数を与えると、 $[Fe/H] = -2.5$ までの化学進化から要請される超新星爆発 (SN) あたりの鉄の平均放出量、 $\langle Y_{Fe} \rangle_{EMP}$ が IMF の関数として決まる。一方、超新星爆発のモデルからは、SN あたりの鉄の平均放出量、 $\langle Y_{Fe} \rangle_{SN}$ が求まる。

図に $\langle Y_{Fe} \rangle_{EMP}$ と $\langle Y_{Fe} \rangle_{SN}$ の比較を示した。ここで、IMF としては、中央値、 M_{MD} 、分散、 $\Delta_M (=0.4)$ 、とする log-normal の関数形を採用、また、連星系の割合は 50%、平坦な質量比を仮定した。両者が等しくなることから、宇宙初期の IMF は、 $M_{MD} \cong 10 (5-20) M_{\odot}$ 、ということになる。 $\langle Y_{Fe} \rangle_{EMP}$ は M_{MD} に強く依存するのでこの結果は堅固である。Salpeter IMF とすると、銀河系ハローの EMP 星は 3 桁近く多くなければならない。 (Komiya et al. 2009)



4. CEMP 星形成の連星系シナリオ

求めた IMF を示すと右下図のようになる。単独星及び連星の主星は大質量星が中心で、また、低質量星は殆どが連星の伴星として誕生したことになる。また、低質量星に限ると、その主星は自分より重い低質量星、中質量星の割合が大きい、これらの恒星は、晩期に AGB 星に進化、ヘリウム殻燃焼フラッシュを経験、それによって、ヘリウム燃焼の核生成物である炭素や s-過程元素が汲み出されて、炭素過剰や s-過程元素に富んだ表面組成を持つことになる。



宇宙初期に生れた超金属欠乏星の場合、AGB 星は質量 $0.8 M_{\odot}$ に極近い少数のものを除く大部分は既に寿命を終えている。進化の最後は、外層を wind で放出して、白色矮星になるが、連星系の場合、軌道半径が小さければ、伴星も wind で放出された物質を降着し、表面汚染を受けて炭素過剰、s-過程元素に富んだ表面組成を持つようになる。CEMP 星は、連星系で主星の AGB 星からの wind accretion によって形成されたとする連星系シナリオである (Suda et al. 2004, Komiya et al. 2007)。連星系での wind accretion によるという形成機構は、種族 II の CH 星や種族 I の Ba 星の起源と同じであるが、それらの種族 I や II の星に対して、超金属欠乏星に占める CEMP 星の過多は、連星の割合、また、AGB に進化する主星の割合が大きいことで説明される。

5. 超金属欠乏 AGB 星での s-過程元素合成

CEMP 星の連星系起源は、s-過程元素の増強を示す CEMP-s 星については一般的に受け入れられている。実際、CEMP-s 星については、1 年程度の比較的短い軌道周期が観測されている。

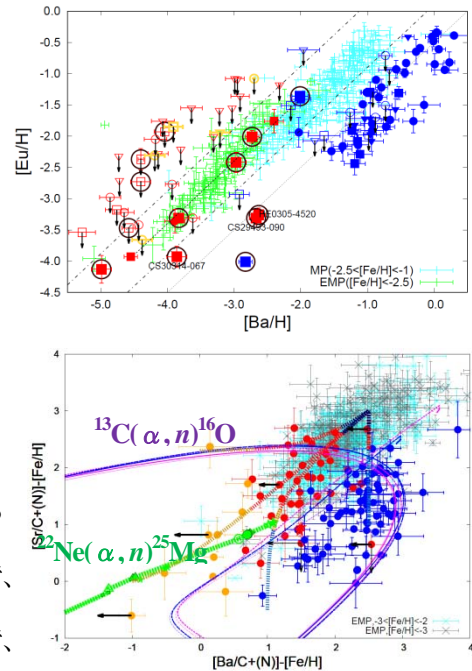
一方、CEMP-no 星については、Ba 組成が通常の EMP 星に近く、また、連星系の軌道運動の兆候が観測されていないとの理由で、連星系起源説に疑問が呈され、むしろ、鉄に対して炭素過剰の物

質を放出するとされる微弱超新星爆発 (Umeda & Nomoto 2002) に起源を求める説が提唱されている (Norris et al. 2011, Bonifacio et al. 2016)。実際、CEMP-no 星では、Eu 組成が測定値を測られているのは3星だけで、その全てが $[Eu/Ba] \approx 0.6$ で r -過程元素からなる通常の EMP 星に近い値を持ち、 s -過程元素の寄与が認められず、 r -過程元素が寄与する CEMP-r 星に分類される。

これまで、CEMP 星は $[C/Fe] > 0.7$ を判定基準としてきたが、AGB 星では、炭素は CN サイクルで容易に窒素に変換されるので、現在観測される窒素はもともと炭素だった可能性が高い。我々は、炭素に窒素を加え、判定基準を $[C+N/Fe] > 0.7$ に変更、該当する恒星は SAGA database で探した。結果、13個の新たな CEMP 星を見出した。右の Ba vs. Eu 図に円枠で示したが、これらの多くは、高分散・高 SN のため、Eu の測定値を持つ CEMP-no 星の数が10星に増えた。そのうち3個に s -過程元素の寄与が認められ、CEMP-s 星と同様に連星起源と考えられる。CEMP-no 星の残り7個は CEMP-r 星であるが、CEMP-s 星の中にも CEMP-r 星が含まれている。割合は57星中2星と割合は小さいが、CEMP-no と CEMP-s も定性的には同様とみなすことが出来る。

CEMP-s と CEMP-no 星の関係を見るために、炭素過剰に対する Ba と Sr の過剰を AGB 星の s -過程元素合成の計算と比較した。低金属量の AGB 星では、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ と $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ の反応を中性子源とする2つの mode があるが、前者は、AGB 進化の初期に起きるヘリウム・フラッシュで発生した対流層への水素の混合に誘起されるもので、質量 $< 3.5 M_{\odot}$ の低質量星で起きる。後者は、後者は水素混合の起きない質量 $> 3.5 M_{\odot}$ の中質量星で起きる。図で、CEMP-no のうち炭素組成が小さい ($[C/H] < -1.0$)

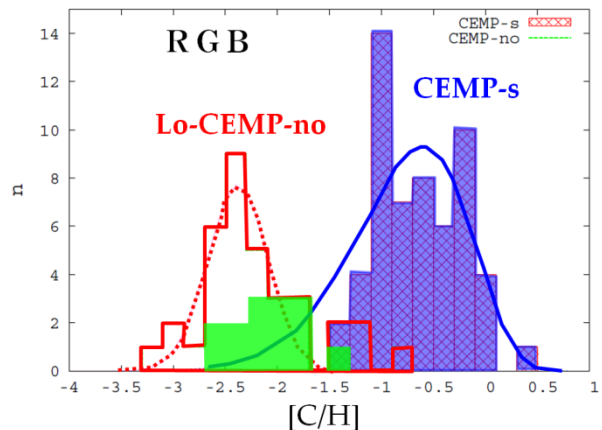
Lo-CEMP-no 星 (赤印) は、CEMP-s 星 (青印) と連続的に分布している。これらは、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応を中性子源とする s -過程合成結果は混合する水素の量に依存するが、軌跡の内部のものは、水素混合が終わった後のフラッシュでの dredge-up による炭素組成の増加による。境界は、誕生時の持っていた Sr の組成を考慮すると、 $[Sr/Ba] = [Sr/Fe]_p - 0.5$ で与えられ、誕生時の組成 $[Sr/Fe]_p$ にもよるが、平均的に $[Sr/Fe]_p \approx 0.5$ であることを考慮すると観測と一致する。また、炭素組成が大きい ($[C/H] > -1.0$) Hi-CEMP-no 星 (橙印) は大部分 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ のみを中性子源とする質量が大きな AGB 星での s -過程元素合成の結果の軌跡 (緑線) に沿って分布する。軌跡に沿っての違いは、フラッシュの到達温度による。



4. 親連星系の初期周期分布

上記で中性子捕獲元素の分布から、CEMP 星は、全て、連星系での AGB 星からの質量降着で解釈できることを示した。Hi-CEMP-no 星は、水素混合を伴わない質量 $> 3.5 M_{\odot}$ の AGB 星を主星とする場合で、降着炭素量の大きさは、主星の質量が大きいことによる。Lo-CEMP-no 星と CEMP-s 星については、ともに、水素混合を伴う質量 $< 3.5 M_{\odot}$ の低質量星を主星に持つ連星系で形成される。この両組については、 $[Ba/Fe]$ の相違、 s -過程元素と r -過程元素の寄与の違いは、炭素組成 $[C/H]$ の量の違いで解釈できる。連星系シナリオの観点からは、降着炭素量の違いは、主星の質量が同じであれば、連星系の軌道半径の違いに還元されることになる。

図に、CEMP 星の炭素組成の分布を示した。分布はふた山になっていて、 $-1 \leq [C/H] \leq 0$ に分布する CEMP-s 星と $[C/H] \leq -1$ に分布する Lo-CEMP-no 星に分かれる (Aoki et al. 2007, Spite et al. 2013)。また、金属量に対する依存性では、CEMP-s 星は、 $[Fe/H] > -3.3$ の金属量が多い範囲にしか存在しないのに対して、Lo-CEMP-no 星は、 $[Fe/H] < -3.3$ の低金属の範囲のみならず、金属量の大きい $[Fe/H] \approx -2$ まで分布する。ただし、下限値は、 $[C/H] > [Fe/H] + 0.7$ で金属量に比例して大きくなる。連星系での降着炭素の量は、(1) 軌道周期は log-normal 分布、(2) wind



は組成 $[C/H] = 0$ 、速度 20 (30) km/s、(3) Bondi 降着率を仮定して求めた。AGB の質量は $2 M_{\odot}$ とした。

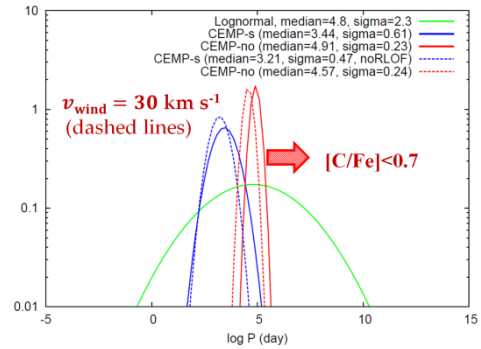
曲線に示した降着炭素量の分布に対する連星系の初期の軌道周期の分布を右図に示した(実線)。CEMP-s 星の場合、ピークは $\log P(\text{days}) = 3.4$ 、分散 $\sigma = 0.61$ これに対し、Lo-CEMP-no は $\log P = 4.9$ と 30 倍ほど長周期ということである。

観測からは、CEMP-s 星については、連星の割合は 100% に近く 軌道周期の平均が $\log P_{\text{mean}} = 2.5$ と推定されている (Starkenbug et al. 2014)。観測しているのは、質量交換後であり、短周期のものは Roche lobe overflow の影響、長周期側は観測限界を考慮すると、結果は矛盾がないであろう。Lo-CEMP-no 星については、連星の確率が低く $17 \pm 5\%$ との推定がある (Hansen et al. 2016) が、長周期であるための観測限界を考慮するとこれも矛盾はないであろう。

我々の結果は、連星系の周期分布は bimodal で、 $[Fe/H] < -3.3$ では長周期のもののみであるが、金属量が増えると、 $[Fe/H] > -3.3$ で短周期の連星系が新たに形成されるようになる。緑の線は、現在の連星系の周期分布を示したものである (Duquennoy & Mayer 1991)。CEMP-s 星の分布は、短周期側が AGB 星に進化できる軌道半径で限られることを考えると、現在の分布の略短周期側半分と重なることになる。一方、Lo-CEMP-no 星は、長周期側が $[C/Fe] > 0.7$ の CEMP 星の条件でかぎられているので、連星としての周期は、現在の分布と同様、更に長波長側に伸びていると考えられる。

現在の理論によれば、連星形成には 2 つの経路、すなわち、1. large-scale fragmentation of turbulent gas cores and filaments, と 2. smaller-scale fragmentation of a massive protostellar disk due to gravitational instability, である。我々の場合、Lo-CEMP-no 星は前者に、CEMP-s 星は後者に当たることになる。

1. と 2. の過程を隔てるのは、星形成過程での the first core の形成であると考えられ、金属量依存性の要因と考えられる。



5. Summary

近年の銀河系ハローの超金属欠乏 (EMP) 星の観測結果を分析、また、金属欠乏漸近巨星分枝 (AGB) 星内部での s -過程元素合成の特性の解明に基づいて、銀河系形成初期段階での星形成史過程とその特性を研究した。

- 1) 宇宙初期星の初期質量関数は大質量星が中心であり、現在の銀河系ハローで観測される低質量の EMP は大質量星を主星とする連星系の伴星として誕生した。
- 2) EMP 星の中で大きな割合を占める炭素過剰超金属欠乏 (CEMP) 星は、連星系での AGB 星からの質量降着によって形成された。
- 3) CEMP 星の表面組成は、誕生時の初期組成と降着で獲得した AGB 星からの物質の組成との混合で表される。

CEMP-s 星: 降着量が多い (連星の周期が短い) + ^{13}C を中性子源とする s -過程元素

Lo-CEMP-no 星: 降着量が少ない + ^{13}C を中性子源とする s -過程元素

Hi-CEMP-no 星: 降着量が多い (主星の質量が大きい) + ^{22}Ne を中性子源とする s -過程元素

- 4) CEMP-s 星と Lo-CEMP 星の炭素組成の分布は、連星系の周期の違いによる。連星周期の分布は、bimodal で、金属量が $[Fe/H] < -3.3$ より小さいときは、比較的長周期な連星のみが形成されたが、金属量が増加すると短周期の連星系の形成が始まる。