

第一世代星による元素合成に迫る

青木 和 光

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: aoki.wako@nao.ac.jp

すばる望遠鏡による観測で、これまで知られているなかで最も鉄組成の低い星 HE1327-2326 が発見され、その組成が詳しく調べられた。これは宇宙の第一世代の星による元素合成の理解に大きな意味をもつ観測研究である。その観測と現在考えられている解釈について紹介する。

1. はじめに

5月末としては季節外れに暑かった日曜日のことである。午前中の用事（息子の保育園の行事だったと記憶している）を済ませたのちの、心地よい昼寝は電話で破られた。国立天文台ハワイ観測所（すばる望遠鏡）の田実晃人さん（高分散分光器のサポートアストロノマー）からで、彼は開口一番、「これから青木君の観測をやるよ」。私たちのグループの低金属星に関する観測は翌週に予定されていたのだが、それを急遽やることになったというのである。この日に予定されていた観測で用いるはずの装置に不具合が生じたからだという。

すばるの共同利用観測の日程が変更になることはほとんどない。スケジュールを守れるように、観測所のスタッフは望遠鏡や観測装置の保守に神経をとがらせている。しかし、スペアのない観測装置を用いている以上、故障によりスケジュールを変更せざるをえないことはありうる。たまたまそれにあたってしまったのだ。

何しろ、暑い日曜日の午後である。ぼけた頭を切り替える間もなく、思わず問い返してしまった：「で、晴れてるの?」。返事は「快晴。シーイング 0.38 秒!」。こういうときに限って条件はよくなるものだ。これでようやく目が覚めた。幸い、

翌週に向けて観測プランは詳しく伝えてあったので、とりあえずその線で進めてもらうことにして、急いで天文台の三鷹キャンパスに向かった。三鷹からのリモート観測システムは開発中だが、とりあえず取れたデータをすぐに見ることはできるし、TV 会議システムでハワイの現場と接続することもできる。（本来はきちんとした手続きが必要なのだが。）

三鷹到着後、あたふたと取られたデータを眺め始めた。どんな場合でも、新しいデータを見るのは楽しいひとときだ。どんどんデータは取られ続けているので、最初から順にさっさと見ていこう、と思ったが、二番目に取られた（取ってもらった）星のスペクトルにはすぐに目がとまった。バルマー線を見る限り、ハローのターンオフ星（有効温度で 6,000 度程度の主系列星）なのだが、それ以外の吸収線が全くといってよいほど見えない。「こ、これはもしやえらく低金属なのでは?」本稿で説明する、これまで知られているなかで最も重元素（鉄）組成の低い星・HE1327-2326 の高分散スペクトルが初めて取られた晩のできごとである。

2. 宇宙の第一世代星に迫る

ビッグバン後の宇宙に誕生した最初の星とは、どんな天体だったのか? 「種族 III 星」と名づけ

られているこれらの天体をめぐっては、長年にわたって研究が続けられてきたが、宇宙論、星形成、星の進化と元素合成などの問題が交錯する天文学上の重要テーマの一つである。この問題に対する観測的なアプローチはいくつかあるが、その一つが、われわれの銀河の中に生き残っている年齢の高い星を詳しく調べるという方法である。年齢の高い星は一般的に低金属星であり、より金属量の低い星の探査とその詳細研究が一つの目標となる。

では、低金属星の観測はどのように進展してきたのだろうか²⁾？ 種族 III を意識した低金属星の観測は、1970年代から本格的に進められ、80年代に入ると、鉄組成が太陽の約 2,000 分の一 ($[Fe/H] = -3.3$) の矮星 G64-12 や、さらには同約 1 万分の一 ($[Fe/H] = -4$) の赤色巨星 CD-38°245 が発見された。その後、カルシウムの H・K 線を指標にした低金属星の大規模な探査「HK サーベイ」がミシガン大学などのグループによって進められ、1990年代までには同程度の鉄組成の星が複数発見された。しかし、CD-38°245 の発見から 20 年近くが経過した 21 世紀始めになっても、依然太陽の 1 万分の一という鉄組成の記録は破られなかった。

この結果は偶然ではないと受け止められていた。つまり、鉄組成に代表される金属量には下限があり、それより金属量の低い星間物質から形成されるのは大質量星ばかりで、現在まで生き残ることができるほど長寿命の小質量星はほとんど形成されなかったという解釈が一般的だった。

ところが、2002 年になって、鉄組成が太陽の 20 万分の一 ($[Fe/H] = -5.3$) しかない赤色巨星 HE 0107-5240 の発見が報告される³⁾。この星は、ハンブルク/ESO サーベイと呼ばれる低金属星探査のなかで検出され、鉄組成を含めてその詳しい化学組成が VLT による観測で測定された。(このサーベイも、HK サーベイと同様、カルシウムの H, K 線を指標としている。QSO 探査と兼ねて行われ

た探査で、南天を中心に HK サーベイよりも大規模に深く行われている。) この星の鉄組成は、従来の記録を一気に 1 桁以上塗りかえるものであり、種族 III 星の生き残りではないか？ という解釈も含めて、その後大きな議論を呼んだ。

一方、この時期には、VLT やすばる望遠鏡の高分散分光器が始動し、低金属星の集中的な観測が進められるようになった。VLT では、'First Stars' と銘打った観測プログラムが 30 夜以上を使って行われた。一方、われわれのグループも、すばる望遠鏡高分散分光器 (HDS) の試験観測の数夜を用いて 40 天体程度の低金属星の観測を行った。この結果、鉄組成が太陽の 1,000 分の一前後の多数の星について、精度のよいスペクトルが得られ、銀河初期の元素合成や化学進化に重要な知見がもたらされた。しかし、それより低金属の領域については期待したほどサンプルが増えず、あまり目新しい結果は得られなかった。(HE0107-5240 の発見は、'First Stars' とは別のグループによって得られた成果である。)

これを受けて私たちは、超低金属星の探査を進めてきた研究者や、種族 III 星の研究に関しては伝統のある日本の理論研究者と議論を重ね、金属量の最も少ない領域の星の研究に絞った観測プログラムを組む必要があると考えるに至った。具体的にいうと、鉄組成が太陽の 3 万分の一程度以下 ($[Fe/H] < -3.5$) の候補天体を探し出し、高分散分光を行うという計画である。それまでのすばるや VLT による観測の結果は、これほど金属量の低い星はかなりまれであることを物語っていた。つまり、この金属量領域を探るには、かなり暗い天体まで含めて候補天体を洗い出し、思い切って大望遠鏡の時間を投入する必要があるということだ。

というわけで、すばる望遠鏡の 2003 年度後期から観測を申し込み、以後 2 年間、このテーマで、計 14 夜にわたる観測を進めてきた。観測チームは 6 カ国 15 名からなり、これにあわせて

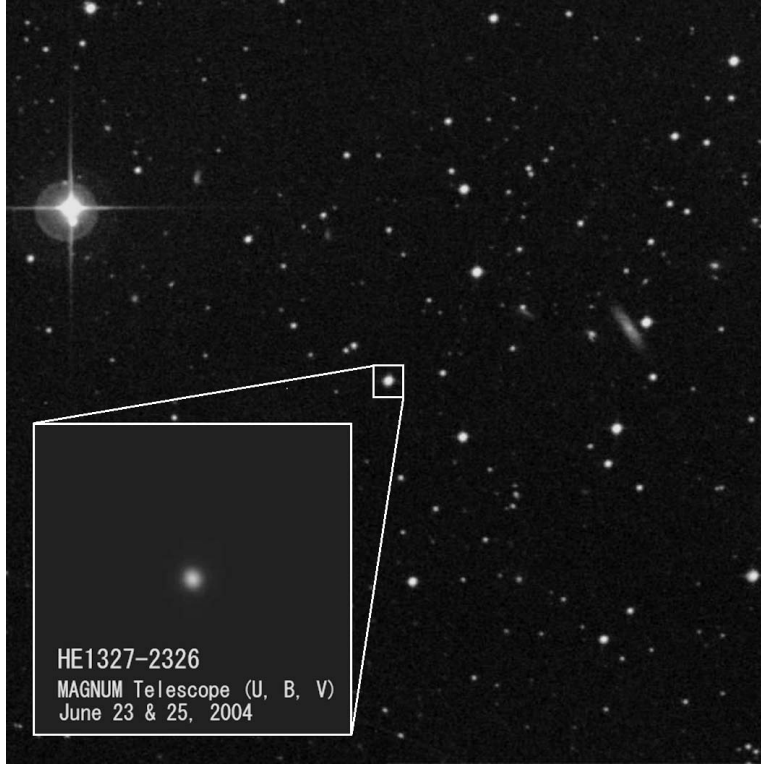


図1 今回の研究で発見された、鉄組成の最も低い星 HE1327-2326 (星の名前は天空上の座標を意味している)。背景は DSS による画像 (AAO/ROE による) で、拡大図はマグナム望遠鏡 (東京大学) による画像。

南天の天体を対象にする観測プログラムも VLT に提案した (こちらは 2005 年から実際に観測を開始した)。これまでに約 20 天体の高精度のスペクトルが得られ、その多くが $[Fe/H] < -3.3$ の星である。その中の一つが、本稿のテーマである HE1327-2326 である (図 1)。

3. 最も鉄組成の低い星・HE1327-2326

この天体も、やはりハブルク/ESO サーベイで見出された低金属星である。ただ、その発見の経過は HE0107-5240 とは異なる。実はこの天体は、サーベイの対象としては少し明るすぎる星で、プレートに記録されたデータが飽和していた (サチっていた) ため、当初そのデータは捨てられていた。しかし、多少サチっても大雑把に金属量

を見積もることは可能であるため、このような星を拾い出す作業のなかで見つけられたのである。この作業を中心的に行ったのが Anna Frebel 氏で、後に HE1327-2326 に関する最初の論文⁴⁾の第一著者には彼女がなった。その後、サーベイのスペクトルよりは分解能の高いスペクトルが ESO 3.6 m 望遠鏡で得られ (図 2)、カルシウムの K 線の弱さから、鉄組成が太陽の 1 万分の一程度と見積もられ、すばるによる超低金属星観測のターゲットに加えられた。この時点では、この天体がずば抜けた低金属星の候補だったわけではない。

すばる望遠鏡による観測は、2004 年 5 月末に行われた (ここで話は冒頭の観測のところに戻る)。得られたデータは驚くべきもので、高分散スペクトルであるにもかかわらず、ほとんど金属による吸収線が見られなかった。水素のバルマー線や星

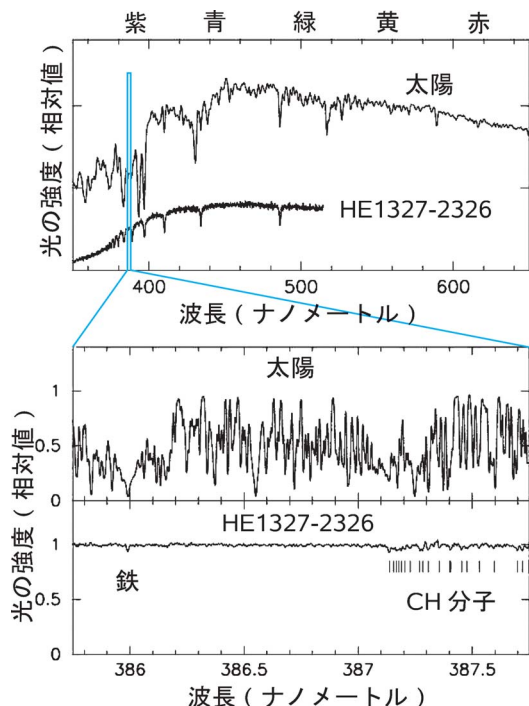


図2 太陽と HE1327-2326 のスペクトルの比較。上の図は可視光領域をカバーした波長分解能の低いスペクトル。太陽に比べて HE1327-2326 のスペクトルはノッペリしているのが印象的である（見えている吸収線は水素のバルマー系列である）。下の図は紫外線領域の高分解能スペクトルを拡大したもので、太陽スペクトルがさまざまな元素による吸収を強く受けているのに対し、HE1327-2326 では鉄と CH 分子によるわずかな吸収しか見られない。

の色指数から大雑把に温度・表面重力を見積もって、化学組成をざっと測ってみると、マグネシウムやカルシウムの組成は太陽の1万分の一程度かそれ以下、そして最初の観測では鉄の吸収線は検出されず、鉄組成は太陽の10万分の一以下と見積もられた。早速、翌日には2時間半の露出をかけ、翌々日には観測波長域を青領域に延ばして3時間かけて観測した。さらに3週間後に割り当てられていた観測では、紫外域を3時間かけて観測した。観測時間が細切れなのは、(星の名前から推測されるように) この天体の赤緯はマイナス 23

度と、ハワイからでは一晩にせいぜい3時間程度しかまともに観測できないためである。

4. HE1327-2326 の化学組成

可視光全域と、地上から観測可能な紫外域 (310 から 680 ナノメートル) をカバーした HDS のスペクトル (図2 参照) を徹底的に調べ、化学組成の測定を行った⁵⁾。星の化学組成は、スペクトルに現れた吸収線 (スペクトルそのもの、もしくは等価幅) と、モデル大気から計算されるスペクトルを比較することによって導かれる。(もちろん観測されるのは星の表面の組成である。) そのためには、モデル大気のパラメーターである有効温度や表面重力を何らかの方法で決めなければならない。星の有効温度の推定にはいくつかの方法を用いたが、その一つが、東京大学のマグナム望遠鏡による測光観測などから得られた色指数を使う方法である (図1 参照)。これらにより、この星の有効温度は、太陽より少し高い 6,180 K と推定された (誤差は 100 K 程度)。

一方、表面重力をきちんと決定するのに十分なデータは、現時点では得られていない。最も有用なデータとなったのはこの星の固有運動である。調べてみると、実はこの星の固有運動はすでに測られていて (SPM3: Yale/San Juan Southern Proper Motion Catalog による)、73 ミリ秒角/年という、かなり大きな値であった。距離があまり大きいとすると、この星が銀河系内に拘束されないほど速く運動していることになってしまう。この星が銀河系内の星と仮定することで、この星までの距離は 1.5 キロパーセク程度以下、絶対光度は 3.2 等以上、そして表面重力は (cgs 単位系で) $\log g > 3.5$ (太陽の約 1/10 以上) という下限が求まった。有効温度を考慮すると、この星の進化段階は準巨星か主系列星となる。この二つの可能性はどちらも排除できないが、組成の決定に非常に大きな影響を与える差ではない。なお、この星は宇宙初期に生まれ、現在まで生き残っていると考えられる

ので、その質量は太陽の0.8倍程度以下と考えるのが自然である。この程度の質量の星でも、金属量が非常に低いと、主系列星から準巨星に進む段階（ターンオフ段階）では優に6,000°Cを超える有効温度をもつようになる。

以上、少し細かい話に入ってしまったが、ここで指摘しておきたいのは、組成解析には、すばるのような大望遠鏡によるスペクトル観測だけでなく、他の望遠鏡の観測の蓄積がものをいうということである。

さて、こうして得られたHE1327-2326の組成の最大の特徴は、鉄組成の少なさと、それに比べて炭素組成が高いことである。鉄組成は、 $[Fe/H] = -5.45$ (NLTE効果を考慮した値)と、従来知られていた主系列星・準巨星よりも1桁以上低く、2001年に発見された赤色巨星HE0107-5240(同様のNLTE効果を含めると $[Fe/H] = -5.2$)の約半分である。これに対して、炭素組成は太陽の約30分の一程度あり、鉄に比べると極端に「過剰」である($[C/Fe] = +4.0$)。この特徴はHE0107-5240とも共通するものである。つまり、「鉄組成の低さ」と「炭素過剰」の2点において、この2天体が他の低金属星とは明確に異なる特徴を持っているといえる。

一方で、そのほかの元素の組成を見てみると、今度はHE1327-2326とHE0107-5240の間の違いが目立ってくる(図3)。まず、炭素と鉄の間に位置する、比較的軽い元素組成がかなり異なり、一般にHE1327-2326のほうが高い組成をもっている。たとえば、マグネシウム/鉄比は、HE1327-2326のほうが1桁ほどHE0107-5240よりも高い。この傾向は、原子番号が奇数番の元素である窒素、ナトリウム、アルミニウムでより顕著である。つまり、今回発見されたHE1327-2326のほうが、軽いほうの元素が過剰で、重い元素(すなわち鉄)がより少ないということになる。

さらに、意外にもHE1327-2326では、重元素ストロンチウムが検出され、その組成は、HE0107-

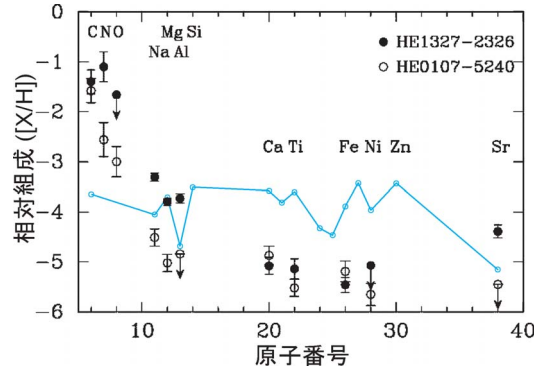


図3 鉄組成が極端に低いHE1327-2326(黒丸)とHE0107-5240(白丸)の組成パターンを、他の超低金属星の組成パターン(実線)と比べたもの。この2天体では、原子番号の増加とともに組成が急激に減少していくのが特徴である。また、窒素とナトリウム・マグネシウムの組成が二つの星で大きく異なる点も目をひく特徴である。

5240に対して求められていた上限値よりもずっと高いこともわかった。ストロンチウムは主として中性子捕獲過程という、鉄までの元素の合成とは全く異なるメカニズムで合成されると考えられている。中性子捕獲過程がどのような環境で起こっているのか、依然として謎が多いが、このような鉄の少ない星でも中性子捕獲元素が検出されたことは、そのプロセスの理解のうえでも重要な意味をもつ。

このような観測結果から、私たちは現在、以下のように結論している：

- (1) 他の低金属星に比べ、今回発見されたHE1327-2326とHE0107-5240は、極端に低い鉄組成と、炭素組成の過剰を示すことから、この二つの天体は似たような起源をもち、それは他の低金属星をつくった過程とはかなり異なるものである。
- (2) この2天体の間に見られる組成の違いは、その形成過程で許されるバリエーションを示している。この2天体の形成をモデル化するには、その点が考慮されなければならない。

これに加えて、今回の観測研究の重要な点と

して、観測対象の進化段階を挙げておきたい。
HE0107-5240 は巨星段階に達していたのに対し、
今回発見された HE1327-2326 はまだ主系列星も
しくは準巨星段階にある。星は赤色巨星に進化する
際に対流層が成長し、内部の元素合成の結果が
表面にくみ上げられるため、表面の化学組成は誕生
時とはいくらか違ったものになる。特に炭素や窒素
といった軽い元素についてはその影響が大きい。
そこで、初期の組成を純粋にとどめている（と期待
される）主系列に近い星の観測の重要性は高いので
ある。

5. 化学組成の解釈

この星の化学組成については、いくつかの解釈が
提案されている。3年前の HE0107-5240 の発見後、
極端に鉄組成の低い星の存在を説明するいくつかの
モデルが提案されてきた。今回の観測により、これら
のモデルにはより厳しい制約が与えられる。われわれ
のグループが、現時点で可能性があると考えているの
は、以下の二つのシナリオである：

(1) 種族 III 星の生き残り？

金属量ゼロで生まれた星でも、星間物質の降着
によりその表面にはいくらかの重元素が含まれる
はずである。その定量的な推定は容易ではないが、
鉄組成が太陽の 10 万分の一以下という星はひょ
っとしたらもともとは金属量ゼロだったのでは
ないか？ との期待をもたせる。問題は、これらの
星が炭素などの組成で大きな過剰を示すことで
ある。炭素組成は太陽の数十分の一に達するの
で、星間物質の降着ではまず説明できない。炭素
は小質量星でも進化が進むと内部で合成され、
表面にくみ上げられる可能性があるが、HE1327-
2326 は進化の進んでいない星なのでそれも考
えられない。残る可能性は連星系を仮定すること
である。すなわち、金属量ゼロで生まれた連星
において、一方の星が進化を遂げて炭素を合成し、
星風によってそれをまき散らす。それを伴星が受け

とって表面が炭素過剰となる（このようなプロセス
は、CH 星と呼ばれる一群の星の起源としてよく
知られている）。鉄などの重元素は小質量星では
合成されないで、星間物質からの降着のみで決まり、
その組成は極めて低い。

このシナリオで HE1327-2326 などの組成パ
ターンを説明する努力もなされている⁶⁾が、HE
1327-2326 も HE0107-5240 も連星系に属すとい
う証拠はまだ見いだされていない。しかし、仮に
これらの星が種族 III 星だとすると、第一世代星
の形成モデルには非常に大きなインパクトを与え
ることになる。

(2) 種族 II 星の極端な場合？

超低金属星は、その金属量の低さから、ほぼ一
つの超新星からの重元素供給で組成パターンが決
まっている、第二世代の星と考えられている。こ
の考え方の枠内で HE1327-2326 などとも理解し
ようというのがこのシナリオである。

しかし、これら 2 天体の顕著な特徴、すなわち
鉄組成の低さと炭素過剰は従来の標準的な超新星
元素合成モデルでは全く説明できない。これを説
明するモデルとして、「暗い超新星」モデルがあ
る⁷⁾。このモデルは、超新星爆発の際に合成され
た元素の混合と、中心で形成されるブラックホ
ールへの物質の落ち込み（フォールバック）をパ
ラメーターとして導入することにより、炭素から鉄
に至る組成パターンに多様性が生じうることを示
した（鉄の合成が少ないことは、後の超新星の光
度が暗いことを意味するので、「暗い超新星」と呼
ばれる）。このようなパラメーターは、非対称な爆
発を考えると物理的に意味のあるものとなってく
る。このモデルは、極端に低い鉄組成と炭素過剰
という組成の特徴をよく説明するばかりでなく、
その中間に位置するマグネシウムなどの元素が星
によって大きく異なる点も容易に説明できる。

この解釈は、これまでの「金属量ゼロの環境で
は大質量星が形成される」という星形成モデルを
逸脱するものではないので、その意味では比較的

受け入れやすいという面がある。鉄組成は低くても、炭素や酸素の存在が星形成の際の分子雲冷却を賄えるからである。

なお、(2)の種族II星シナリオにおいても、その炭素過剰の起源を激しい質量放出を起こす第一世代の大質量星に求めるアイデアもある。金属量の小さな大質量星は星の自転の影響が極めて大きく現れ、超新星爆発に先立ち外層の大半を質量放出によって失い、その中には多量の炭素等の軽元素が含まれるとするモデルがある⁸⁾。これも興味深いシナリオである。

いずれのシナリオ・モデルも、今のところ決定的な根拠（あるいは否定材料）が得られているわけではなく、後述するように今後さらに観測を積む必要がある。

6. リチウム組成の問題

最後に、この天体のリチウム組成の問題について触れておく。まだ進化の進んでいない低金属星で有効温度の高いものには、通常リチウムの吸収線が現れる。低金属になってもその強さはあまり変わらない。これはリチウムがビッグバン時に合成され、低金属星は生まれた当初は普遍的なリチウム組成をもつためである、と解釈されている。HE1327-2326も、その温度・進化段階からみて、当然リチウム吸収線が観測されてしかるべきである……と思ってスペクトルをみていったが、これが見当たらない。誤差解析をしてみると、この星のリチウム組成の上限值は、他の低金属星にみられる値に比べて有意に低いことが判明した。一つの解釈は、何らかの事情でこの星においてはリチウムが破壊されてしまったというものである。事実、リチウムは約200万度という比較的低温で破壊される元素であり、太陽のような星ではすでに表面のリチウムは大半失われてしまっているわけ

だが、低金属の星ではそのようなプロセスは一般には働いていない。この星のリチウム組成（現時点では上限値のみ）は、目下大きな謎である。

7. 今後の観測への期待

今回発見された超低金属星HE1327-2326は、鉄組成が太陽の10万分の一以下の星としては2例目であり、最も低い値をもつものであった。これは、このような重元素の少ない星が少ないながらも、ある程度、銀河系に存在することを明確にした。特に進化の進んでいない段階の星として発見されたことで、炭素の起源やリチウム組成の問題などで全く新しい知見が得られた。この星のさらなる観測は当然必要である。われわれのグループはすでにVLTを用いてより精度の高いスペクトルの取得に成功している（露出時間は20時間に及んだ）。これによりすばるの観測では決められなかった酸素組成が測定され⁹⁾、他の元素についてもより高い精度で組成が決定されることになるだろう。また、視線速度変化の長期モニターも連星かどうかを調べるうえで重要で、これもすばるなどを用いて観測計画がスタートしている。

一方、興味深いことに今のところ鉄組成が太陽の1万分の一から10万分の一の範囲($-5 < [\text{Fe}/\text{H}] < -4$)に星が見つかっていない。HE1327-2326の発見によりこの観測事実がもつ意味はますます大きくなった。低金属星のさらなる観測が求められる。南半球から観測可能な候補天体はまだ多数あり、その観測が期待されるとともに、北天の候補天体も新たなサーベイ(SDSSおよびその拡張プログラムによる)から多数検出される見込みであり、すばる望遠鏡をはじめとする北半球からの観測も今後着実に進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Bromm V., Larson R. B., 2004, ARA&A 42, 79 などに詳しい。日本語では岩波「科学」2003年8月号特集など。
- 2) Beers T. C., Christlieb N., 2005, ARA&A 43, 531
- 3) Christlieb N., Bessell M. S., Beers T. C., et al., 2002, Nature 419, 904
- 4) Frebel A., Aoki W., Christlieb N., et al., 2005, Nature 434, 871 この結果はすばる望遠鏡のページ <http://subarutelescope.org/Pressrelease/2005/04/13/j-index.html> にも紹介されている。
- 5) Aoki W., Frebel A., Christlieb N., et al., 2006, ApJ, 639, 897
- 6) Suda T., Aikawa M., Machida M. N., Fujimoto M. Y., Iben I. J., 2004, ApJ 611, 476
- 7) Umeda H., Nomoto K., 2003, Nature 422, 871
- 8) Meynet G., Ekstrom S., Maeder A., 2006, A&A, 447, 623
- 9) Frebel A., Christlieb N., Norris J. E., Aoki W., Asplund M., 2006, ApJ 638, L17

Nucleosynthetic Signatures of First Generations of Stars

Wako AOKI

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

Abstract: Our observations for metal-deficient stars with the Subaru Telescope discovered HE 1327-2326, the most iron-deficient star known, and revealed its detailed chemical composition. This observation has an impact on studies on nucleosynthesis by first generations of stars. A brief summary of the observation and recent discussions on the origin of this object are reported.