

すばる HDS による 明るい金属欠乏星の探索



岡田 寛子^{1,2}

〈¹ 兵庫県立大学大学院 理学研究科 物質科学専攻 / 自然・環境科学研究所 天文科学センター西はりま天文台
〒679-5313 兵庫県佐用郡佐用町西河内 407-2〉

〈² 国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: hiroko.okada@nao.ac.jp

金属欠乏星は、宇宙に金属が少ない時代に形成された低質量星である。その表面組成は、形成時に取り込んだ星間ガスの化学組成を概ね保持していると期待され、宇宙初期の核合成と化学進化を読み解く重要な観測対象である。近年、宇宙初期での低質量星形成を左右する炭素・窒素・酸素 (CNO) の起源に注目が集まっている。一方で、金属欠乏星における CNO 測定については、恒星進化に伴う内部混合が表面組成を変えるため、形成当時の組成を直接測れる天体は限られてきた。そこで本研究では、将来の CNO 測定に適した明るい金属欠乏星サンプルを構築することを目的とし、HDS を用いて準巨星段階の金属欠乏星候補に集中したフォローアップ観測を行った。

1. はじめに：元素の起源と金属欠乏星

宇宙に存在する元素の多くは、恒星内部での核融合反応、超新星爆発、さらには中性子星などの高密度天体の合体を通じて合成され、星間空間へ放出されてきた。こうして時間とともに重元素が増えていく過程は、宇宙の化学進化と呼ばれる。

宇宙初期の、まだ重元素が少なかった時代に形成された太陽質量の0.8倍以下の低質量星は、寿命が宇宙年齢よりも長いので、現在まで生き残っていると考えられている。こうした星は、鉄などの重元素が極端に少ない金属欠乏星^{*1}として観測される。金属欠乏星の表面大気の化学組成は、表層混合や外部からの物質降着などによって変化するものの、形成時に取り込んだ星間ガスの化学組成をおおむね保持していると期待される。金

属量が低いという事実は、その星が生まれた星間ガスに重元素がまだあまり蓄積しておらず、初期世代の星の核合成の影響を強く残していたことを示している。したがって、金属欠乏星の元素組成を調べることは、初期世代の大質量星や超新星爆発でどのような核合成が起こり、どの元素がどれだけ作られたのかを読み解くための重要な手がかりとなる。

金属欠乏星の化学組成を観測的に明らかにするため、筆者は共同研究者らとともに木曾シュミット望遠鏡の Tomo-e Gozen Camera に狭帯域フィルタを搭載した観測を行い、高分散分光による詳細な元素組成測定に適した Gaia G 等級で 13 等より明るい ($G < 13$) 金属欠乏星の探索を進めてきた。さらに近年は、Gaia 衛星によって取得された低・中分散スペクトルに基づいて、多数の恒星の金属量が見積もられるようになり、明るい金属欠乏星

^{*1} 天文学では水素・ヘリウム以外の元素をまとめて金属という。

候補のサンプルは急速に拡大している [1-3]. 筆者は、すばる望遠鏡の高分散分光器HDSを用いて、これらの明るい金属欠乏星候補のフォローアップ観測を行っている. 本稿では、その中でも2025年前期に実施した、準巨星段階にある金属欠乏星に注目した観測について紹介する.

2. 今回提案したサイエンスの背景

元素の起源の研究において近年とくに注目されているのが、炭素・窒素・酸素 (CNO) である. これらは水素・ヘリウムに次いで宇宙に豊富な元素であり、金属量が非常に低い環境ではガス冷却を支配して、星形成 (とくに低質量星形成) の成立条件を左右する重要な役割を担う.

宇宙初期におけるCNOの主要な起源は大質量星である^{*2}. 原子番号が偶数の炭素・酸素は主として恒星内部のヘリウム燃焼や炭素燃焼で合成され、その生成量は金属量にあまりよらない. 一方、原子番号が奇数の窒素は金属量に比例して増加する、すなわち二次的供給で生成される元素として振る舞うことが期待されてきた. しかし最近、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の観測によって、高赤方偏移で窒素過剰な星形成銀河が見いだされたこと [4, 5] などを受け、金属量によらない一次的な窒素供給が必要となる可能性が指摘されている. 一次的な窒素の供給源として、高速回転する大質量星からの質量放出や、潮汐破壊現象などが提案されている [6, 7].

さらに金属欠乏星の観測からは、金属量が低いほど炭素過剰星 (CEMP: Carbon-Enhanced Metal-Poor star) の比率が高くなるのが統計的に示されている [8]. このことは、炭素が初期の星形成と銀河化学進化の双方に深く結びついていることを示唆する. したがって、宇宙初期においてCNOがどのように供給されるのかを理解することなしに、宇宙初期の進化を解き明かすことはでき

ない.

しかし、金属欠乏星でCNOを精密に測定することは容易ではない. 低金属量の星では、CNOの多くは分子吸収から推定される. 分子は低温ほど形成されやすいため、分子帯の検出という観点では低温星、すなわち主系列を離れたより進化した星が有利である. 一方で、主系列を離れて進化が進むと、恒星進化に伴う内部構造の変化と混合によって恒星表面のCNO組成が変化しうる. この相反する条件が、金属欠乏星のCNO研究におけるボトルネックの一つとなっている.

さらに窒素と酸素については、NH分子帯やOH分子帯が近紫外～紫外域に位置するため、これらを用いた測定には紫外線分光が必要となり、観測可能な天体や装置が限られる. 近紫外域は大気透過や検出器効率などの制約が強く、ノイズの少ない高品質なデータを現実的な観測時間で得ることが難しい. したがって金属欠乏星のCNO測定を行うには、高品質なスペクトルを取得できる明るい天体を用いる必要がある.

3. 提案のポイント

そこで本提案では、先述した二つの条件、すなわち (1) 分子帯が検出しやすい十分低温であること、(2) CNOの初期組成を維持していると期待できること、を同時に満たす対象として、準巨星段階の金属欠乏星に注目した. 準巨星は主系列を離れて対流層が発達し始める遷移期に相当する. この段階は進化が早いので準巨星段階にある金属欠乏星は希少で、既存研究では統計が不足していた. しかし、Tomo-e Gozen Cameraによる探査に加え、Gaiaによって多数の金属欠乏星候補が得られつつある現在、狭いパラメータ領域に集中したフォローアップ観測を行うことで、準巨星段階のサンプルを拡大できると考えた.

本研究では、金属欠乏星を同定するとともに、

^{*2} 一部連星系をなす金属欠乏星で伴星のAGB星からの質量降着でCが増えていることがある.

恒星進化に伴う混合の影響を評価しやすいリチウムを用いて混合の度合いを確認する方針をとった。リチウムは恒星内部で比較的低温でも破壊されやすく、主系列を離れて対流層が深くなり始めると、希釈・混合の進行に応じて表面リチウム存在量が比較的早い段階で減少する。この性質によりリチウムは、表面組成が混合の影響を受け始めたかどうかを判定する指標として有用である。

未進化の金属欠乏星では、リチウム存在量がほぼ一定値 ($A(\text{Li}) \approx +2.2^{*3}$) を示すことが知られており、これは Spite plateau と呼ばれる [9]。一方で、金属量がより低い星では、リチウム存在量の分散や plateau からの逸脱 (meltdown) が報告され [10, 11]、宇宙論的リチウム問題と恒星内部物理の両面から議論が進められてきた (図1)。やがて星が進化し主系列を離れると、表層の対流層が深くなり、表面のリチウム量は減少する。その結果、赤色巨星になり始めた段階の星では、金属量に依存しない $A(\text{Li}) \approx +1.1$ 付近に小さなばらつきをもつ thin Li plateau が現れることが報告されている。したがって、進化に伴うリチウム減少の開始点、およびその金属量依存性は、拡散や追加混合などの恒星内部物理を制約する観測量として重要である。本提案では、リチウムが減少し始める境界を捉え、CNO を初期組成として解釈できるサンプルを構築することを目的とした。

またリチウムは混合診断にとどまらず、リチウム単体の問題としても未解決の論点を含む。たとえば、ビッグバン元素合成 (BBN) で予測される $A(\text{Li}) = +2.72$ を上回るリチウム過剰天体の起源については、内部生成 (Cameron-Fowler 機構に基づく生成 [12]) と外部供給 (惑星・伴星の取り込みなど [13]) が候補として併存し、頻度・進化段階・付随する元素比や回転などを手がかりに検証が進められている [14]。したがって、準巨星段階におけるリチウムの系統測定は、CNO

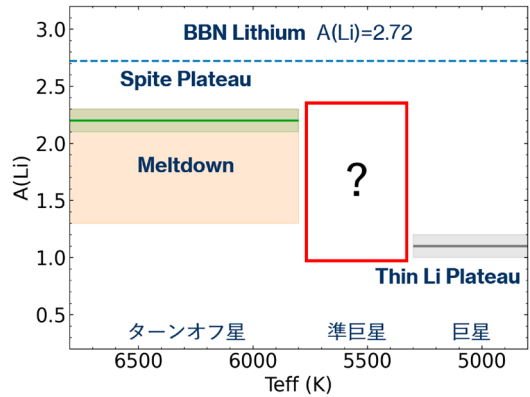


図1 恒星の進化に伴うリチウム存在量の変化。

研究のためのサンプル構築に資するだけでなく、リチウムの起源と輸送過程に対しても制約を与える。

高分散分光によりこれらの議論を成立させるためには、ターゲットが十分に明るいことが重要である。観測効率や得られるスペクトルの品質は天体の明るさに強く依存するため、とくに近紫外域まで見据える場合、明るい候補を系統的に確保できるかどうか観測計画の実現性を左右する。本提案の特徴は、探査で得られた金属欠乏星候補の中から準巨星段階に焦点を当て、明るいサンプルを前提として高分散分光フォローアップを実行する点にある。

以上の目的のため、本観測では、比較的短時間で十分に高品質なスペクトルを取得でき、かつリチウムの吸収線と炭素の分子帯の両方を同時に含む波長域をカバーするように、4030-6730 Å の広い波長範囲をもつ標準的なセットアップ (StdYd) を採用した。

4. 観 測

本提案は1.5夜で採択され、2025年2月2日および4月5日の後半夜に割り当てられた。2月はドイツ滞在中であったためリモートで観測に参加

*3 $A(\text{Li})$ はリチウム存在量を表す対数で表しており、 $A(\text{Li}) = \log[N(\text{Li})/N(\text{H})] + 12$ と定義される。

し、4月は現地で観測を行った。

4月4日、Honoluluで乗り継いでHiloに到着した。荷物を受け取りに向かったところ、スーツケースがターンテーブルに出てこない。初めてのハワイで高揚していた気分は一転し、不安になってすぐにスーツケースに入れていたAirTagの位置情報を確認した。表示は数時間前のHonolulu空港のままで、預け入れ直前の地点から動いていない。空港スタッフに確認すると、次の便で到着するとのことだった。防寒具を含む荷物が当日中に、しかも次の便で受け取れる見込みだとわかり、胸をなで下ろした。人生初めての乗り継ぎ便でバゲージロストを経験するという、なかなか得難い出来事でもあった。

その後、無事に荷物を受け取り、Hale Pohakuへ移動した。標高は約2800 mで、山頂に比べれば低いとはいえ、到着直後は息が上がりやすく、身体が想像以上に高度の影響を受けることを実感した。周囲の雰囲気気に気をよくして周辺を歩き回り、軽い気持ちで坂道を下っていったが、下りは軽く進める一方で帰りの上りは予想以上にきつかった。運動不足による体力低下を都合よく標高のせいにして言い訳しながら、時間をかけてなんとか登り切った。その後は無理をせず、荷解きと最低限の準備を済ませて、ゆっくり過ごしながらいよいよ翌日に備えた。

翌5日の夕方、サポートアストロノマー (SA) の青木賢太郎氏らとともに山頂へ上がった。登っていくにつれ植生が途切れ、やがて視界はゴツゴツした岩肌だけになっていく。これまで見たことのない景色に興奮し、ずっと窓の外を眺めていた。天候は快晴で、Hale Pohakuから見えていた雲も、山頂から見るとずっと低いところにあることがわかった。山頂はHale Pohakuとは比べものにならないほど空気が薄く、到着して観測室に入るところにはすでに頭痛に襲われていた。SpO₂を測定すると70%を下回っており、オペレーターの方がすぐに酸素供給装置を用意してくださっ

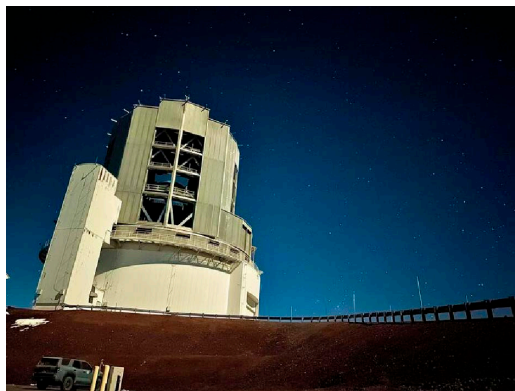


図2 iPhone 12 miniで撮影した夜空とすばる望遠鏡 (4月には上手く撮影できず、2026年1月の訪問時にリベンジしたもの)。

た。しばらく安静にしていると値は回復し、頭痛も徐々に和らいでいった。筆者の観測は後半夜のみであったため、前半夜は観測プランの最終確認をした後、外に出て星空を眺めたり写真を撮ったりして過ごした (図2)。観測日の前日が上弦の月で空が明るく、月明かりだけで道を歩けることに感動した。

後半夜に自分の観測枠へ移行してからが本番である。天候は後半夜も安定していた。観測自体はSAの方が進めてくださるため、筆者は取得したデータのQuick Lookで得られたスペクトルを確認し、低金属量である可能性が高いか、また6708 Åにあるリチウムの吸収線が検出できているかをその場で確認していった。観測した天体の中には、高速自転星のようにスペクトルがならされ低金属量と誤って選んでしまった対象も混じっていたが、吸収線が弱く低金属量が期待できる天体が見つかったり、リチウムの検出を確認できたりするたびに一喜一憂するのはフォローアップ観測の醍醐味であり、非常に楽しい時間であった。観測天体は複数の金属欠乏星候補カタログを組み合わせで選択しているため、確認結果に基づいて観測対象の優先順位を随時更新し、観測天体や観測順を適宜入れ替えながら進めた。大きなトラブルは発生せず、計画した観測を遂行でき、あっと

いう間に朝になった。

三鷹やZoomからリモートで参加している場合はここで観測が終わるが、現地ではまだ終わりではない。キャリブレーションデータを取得した後、観測装置や望遠鏡のシャットダウン作業がある。SAとオペレーターの方が手際よく作業してくださり、観測は無事に終了した。外に出ると朝焼けと雲海が広がり、美しい眺めであった。観測明けの冷たい空気は心地よく、これも現地ならではの満足感である。その後下山し、Hale Pohakuに戻って休息したのち、午後にはHiloへ移動した。

7日の午後再び山頂へ上がり、望遠鏡見学を行った。SAの新井彰氏がドーム内を案内してくださり、すばる望遠鏡と観測装置を見学し、説明を受けた。ドームに入りすばる望遠鏡と対面した瞬間、憧れの望遠鏡が目前にあることに率直に感動した。巨大であることは頭では分かっていたつもりだったが、実物の迫力は想像以上で、思わず見入ってしまった。

観測で使用したHDSは、金属欠乏星研究を含む幅広い分野の研究に貢献してきた高分散分光器であり、望遠鏡のナスミス台に設置されている。観測で用いたイメージスライサ^{*4} (図3) は、ナスミス焦点にあるHDSスリットユニットの望遠鏡側に搭載される。この取り付け作業を観測前にSAの方が手動で行っていることを、このとき初めて知った。HDSの観測は明夜に割り当てられることが多く、天候によってはイメージスライサを外して観測を行いたい場合もある。しかし、現場で直接付け外しをしているため、急な天候変化に即応するのは難しい。装置運用の実情を把握することは、観測計画の立案や当日の判断を行う上でも重要であると感じた。

また、当時ファーストライト直後であったPFS



図3 本観測で使用したイメージスライサ。

についても（設置室の前まで）見学する機会を得た。今後PFSによって、多数の暗い天体に対しても組成情報が大量に得られていくことが期待される。一方で本研究では、まず明るい天体を高分散分光で詳細に化学組成を調べることで、将来の大規模サンプル（暗い天体を含む）で得られる化学組成情報を活用できるようにしたいと考えている。さらに将来、PFSに高分散分光モードが実装されれば、本研究の延長としても有効に活用できる可能性がある。現時点ですぐに用いる予定はないが、実際に現地に行ったことで、将来の研究に対するモチベーションが上がった。

5. 振り返り・今後の展望

本観測（2月・4月に加え、追加で割り当てられた6月の観測）により、合計63天体のデータを取得した。その後の解析を通じて、これらは博士論文の主要な結果の一部となり、研究成果としてまとめることができた。

初期CNO組成が保持されていると期待される有効温度・表面重力の領域を、より正確に同定することができた。さらに次のセメスターでも同様

^{*4} イメージスライサ (image slicer) は、焦点面上の星像を光学的に複数の細い帯状に分割し、それらを分光器の入射スリット上に整列して導入する装置である。これにより、分光分解能を保ったまま入射光量を増やし、観測効率を向上できる。

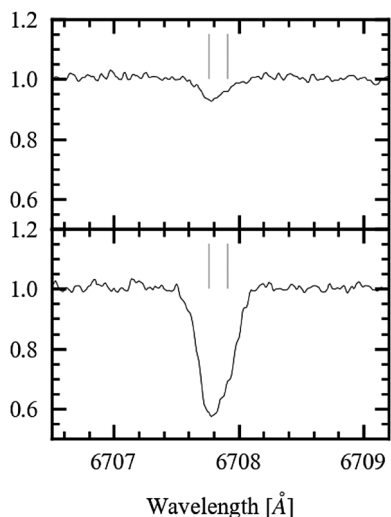


図4 本観測で取得した準巨星段階の金属欠乏星のスペクトルの例。上下どちらの天体も同じ程度の有効温度の金属欠乏星であるが、下のパネルの天体はリチウム過剰天体である。

の提案が採択されたが、天候にも恵まれ無事すべての観測が終了した(執筆時点)。これらの観測により、CNO測定に有用な準巨星段階の金属欠乏星サンプルを大幅に拡大することができた。また、本観測では $G=10.4$ のリチウム過剰天体を1天体発見した(図4)。リチウムに加えてナトリウム組成が過剰である特徴も確認されており、今後の窒素・酸素の組成測定を行うことによってその起源を議論したいと考えている。

今回取得したデータを用いて、リチウムや炭素以外にも、宇宙初期の化学進化を議論するうえで重要な α 元素、鉄族元素、中性子捕獲元素など多様な元素の組成を測定できたことも大きな成果である。起源となる親星や超新星の特徴を解釈するには多数の元素組成情報が不可欠であり、今後の研究の基盤となるデータを取得できた意義は大きい。

これまで筆者はPIとしてなゆた望遠鏡やせいめい望遠鏡を用いた観測を行ってきたが、観測そのものが好きであることもあり、すばる望遠鏡の現地観測の機会を得られたことは嬉しかった。

また、観測が多くの方々サポートの上に成立

していることを、装置運用・観測の実態とともに現場で具体的に見られた点も有意義であった。実際、イメージライサの取り付けを含め、観測前後に必要な作業がSAやオペレーターの方々によって担われていることを改めて認識した。こうした装置運用の前提を理解することは、観測の実現可能性やデータ品質の限界を現実的に見積もる上で重要である。この点はリモート観測だけでは把握しにくく、現地での経験を通じて理解を深められた。

HDSは2000年のファーストライト以来、25年以上を経た現在も第一線の観測装置として安定して運用されている。今回の現地観測を通じて、その背景には夜間運用だけでなく、日中の保守作業を含めて現場で支えてくださっている多くの方々の継続的な努力があることを実感した。高品質なデータ取得が当たり前で成立しているわけではないことを改めて認識するとともに、このような体制の上で観測できたことに深く感謝したい。今後もHDSの強みを活かした観測提案を行っていきたい。

今後の展望としては、まず準巨星段階の金属欠乏星におけるリチウム減少の開始点を有効温度・表面重力の関数として定量化し、その金属量依存性を検証する。これは拡散や追加混合といった内部物理モデルに対する観測的制約となりうる。さらに、本観測で得たスペクトルに基づいてリチウムによる混合評価を行い、初期CNO組成として解釈しやすい金属欠乏星サンプルを構築した上で、紫外線分光観測による窒素・酸素の組成測定を行い、宇宙初期のCNOの起源を明らかにする。加えて、本観測で同定されたりチウム過剰天体について追加観測を行い、起源の検証を進める。

以上のように、本観測では多くの興味深いデータを得ることができた。自ら取得したデータである以上、責任をもって解析と議論を進め、論文としてまとめ上げるまで研究を継続していきたいと考えている。

謝 辞

まず、現地観測という貴重な機会を提供してくださった国立天文台ハワイ観測所の皆様に厚く御礼申し上げます。本観測を実施するにあたり、上清初枝氏、末広曜子氏、Noriko Roth氏には渡航・滞在の手続きにおいて多大なるご支援をいただきました。SAの新井彰氏、青木賢太郎氏、ならびにオペレーターの方々には、観測の実務面でのご支援に加え、望遠鏡・装置の運用や観測所の体制について貴重なご教示をいただき、大変お世話になりました。指導教員として現地観測に同行し、移動を含め多方面にわたりご助力いただいた富永望氏にも感謝申し上げます。本観測の計画立案から観測遂行、データ解析に至るまで貴重なご助言を賜りました。富永望氏、松野允郁氏、青木和光氏、本田敏志氏をはじめとする共同研究者の皆様に深く感謝申し上げます。最後に、本稿の執筆の機会を与えてくださり、学位審査が終わるまでご配慮くださった田中壺氏、ならびに本稿を丁寧にご確認いただき、ご助言を賜りました守屋堯氏に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Andrae, R., et al., 2023, A&A, 674, A27
- [2] Matsuno, T., et al., 2024, A&A, 685, A59
- [3] Yang, L., et al., 2025, ApJS, 279, 7
- [4] Cameron, A. J., et al., 2023, MNRAS, 523, 3516
- [5] Isobe, Y., et al., 2023, ApJ, 959, 100
- [6] Meynet, G., et al., 2006, A&A, 447, 623

- [7] Kochanek, C. S., 2016, MNRAS, 458, 127
- [8] Beers, T. C., & Christlieb, N., 2005, ARA&A, 43, 531
- [9] Spite, F., & Spite, M., 1982, A&A, 115, 357
- [10] Bonifacio, P., et al., 2007, A&A, 462, 851
- [11] Sbordone, L., et al., 2010, A&A, 522, A26
- [12] Cameron, A. G. W., & Fowler, W. A., 1971, ApJ, 164, 111
- [13] Siess, L., & Livio, M., 1999, MNRAS, 308, 1133
- [14] Casey, A. R., et al., 2016, MNRAS, 461, 3336

Searching for Bright Metal-Poor Stars Using Subaru/HDS

Hiroko OKADA

¹*Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo, 407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Sayo, Hyogo 679-5313, Japan*

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

Abstract: Metal-poor stars are low mass stars formed in the early Universe. Their surface abundance is expected to preserve the chemical composition of the interstellar gas from which they were formed. Thus, they serve as key observational tracers for understanding nucleosynthesis and chemical evolution in the early Universe. In recent years, growing attention has been paid to the origin of carbon, nitrogen, and oxygen (CNO), which regulate low-mass star formation at extremely low metallicity. However, because internal mixing associated with stellar evolution can modify surface abundances, only a limited number of stars allow a direct measurement of their natal CNO compositions. In this study, we conducted follow-up observations of metal-poor subgiant candidates using HDS to build a sample of bright metal-poor subgiants suitable for future CNO abundance measurements.