

# すばる望遠鏡で探るビッグバン元素合成時のヘリウム量



松本 明訓

〈東京大学宇宙線研究所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: matsumoto-akinori489@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

原始ヘリウム質量比  $Y_p$  は、ビッグバン元素合成の主要な予言であり、標準宇宙論を拡張したモデルや中性子寿命の測定問題などに対して感度をもつ。近年、銀河の輝線分光に基づく  $Y_p$  測定では、電子密度に敏感な近赤外 HeI $\lambda$ 10830 輝線の導入により、He/H 推定の不定性の低減が進んでいる。本稿では、 $Y_p$  推定における極金属欠乏銀河 (EMPG) と HeI $\lambda$ 10830 輝線の役割を概説したうえで、著者がすばる望遠鏡 MOIRCS を用いて実施した EMPG の近赤外分光観測を紹介する。本観測の一部は、学生PIに対するすばる望遠鏡からのご支援により、ハワイ現地での観測を行うことができた。望遠鏡の運用停止による延期を経て実現した現地観測の体験も観測遠征記と題し紹介する。

## 1. ビッグバン元素合成

ビッグバン直後の非常に高温の宇宙では、陽子と中性子がバラバラになって激しく宇宙空間を飛び回っていた。宇宙が膨張していくにつれて温度は下がって行くため、やがて陽子と中性子は結合し、宇宙で初めて元素が誕生する。さらに宇宙の膨張が進んでいくと、粒子の密度と温度が下がり元素合成はそれ以上進まなくなる。ビッグバンからおよそ1-10分ほどの間に起こったとされるこの現象はビッグバン元素合成 [1, 2] と呼ばれ、更なる元素の合成はずっと後の時代、宇宙に星が誕生するのを待ってからとなる。ビッグバン元素合成において合成される元素の種類と量は、宇宙論により高い精度で予言することができる。そのため観測結果とこの予言を比較することで、現在の標準的な宇宙論モデルが、本当に我々の宇宙を記述するかテストすることが可能となる。これまでの観測結果は理論の予言と概ね一致しており、ビッグバン元素合成はビッグバン宇宙論モデルを

支持する強力な証拠の一つとなっている。以下では、主にビッグバン元素合成の主要な産物となるヘリウムに焦点を当てていく。

### 1.1 ビッグバン合成の生成物

ビッグバン開始以前の十分高温な宇宙では、元素合成の原料となる陽子と中性子は、ニュートリノや電子、陽電子と相互作用しながら平衡状態を保っている。平衡状態とはいえ、宇宙膨張に伴い温度は刻々と変化していくため、中性子と陽子の存在量比も時間とともに変化していく。中性子の質量が陽子の質量より大きいことから、温度の低下に伴って中性子は陽子に対して指数関数的に量を減らしていくことになる。そのためこの後起こるビッグバン元素合成の材料としては、陽子よりも中性子の量がボトルネックとなってくる。この指数的な減少はビッグバン元素合成開始の少し前に、温度低下により平衡状態が保てなくなるまで継続する。その後も中性子はその寿命により僅かに数を減らしていくが、やがてビッグバン元素合成が始まり、原子核に取り込まれていく。

重水素より重い元素が陽子と中性子のみから合成されるには、3体以上の粒子の衝突が必要となる。宇宙空間では粒子の密度が低くこうした反応は殆ど進まない。したがってビッグバン元素合成は、陽子と中性子が一つずつ結合した重水素の合成から始まる。重水素をもとにトリチウム、ヘリウム3 ( $^3\text{He}$ )、ヘリウム4 ( $^4\text{He}$ ) が合成される。さらにこれらをもとにリチウム ( $^7\text{Li}$ ) やベリリウム ( $^9\text{Be}$ ) も僅かに合成されるが、これらの反応はクーロン障壁が大きくあまり進行しない。また、質量数5と8の安定な原子核が存在しないため、さらに重い元素はほぼ合成されない。そのためビッグバン元素合成で作られる元素は実質的に軽元素に限られる。結局、原料となった中性子は最終的にそのほとんどが最も安定な $^4\text{He}$ 原子核に取り込まれることになる。

つまり、最終的に合成される $^4\text{He}$ の総量は、ビッグバン元素合成開始前に存在した中性子の総量に強く依存する。 $^4\text{He}$ の量は慣例的にバリオンの総量に対する質量比 $Y_p$ で表現され、中性子が全て $^4\text{He}$ に取り込まれると近似すると、その値はおよそ25%と概算される。一方で観測から、我々の太陽系におけるヘリウムの質量比も25%ほどであることが知られている。これほどの量のヘリウムを恒星内元素合成のみで合成するのは困難であり、この事実はビッグバン宇宙論を支持する大きな根拠の一つとなっている。

ただし当然、ビッグバン元素合成開始前の中性子の量が変化すれば、正確な $Y_p$ の値も変化することになる。先ほど述べたように、中性子は陽子との平衡状態が継続する間に指数的に数を減じていく。仮に当時の宇宙の膨張速度が標準宇宙論で考えられているよりも大きかったとすると、中性子と陽子の相互作用が阻害され、平衡状態がより早く終了する。そのため生き残る中性子の量が増え、 $Y_p$ の値は大きくなる。フリードマン方程式から宇宙のエネルギー密度が高ければ膨張速度は大きくなる。当時は放射優勢期なので、これは未

知の相対論的粒子など、例えばステライルニュートリノなどの存在が候補となってくる [3]。このような宇宙膨張の変化をもたらすエネルギーの存在は、しばしばニュートリノの有効種族数 $N_{\text{eff}}$ を用いて表現される。 $N_{\text{eff}}$ は大雑把には光子のエネルギー密度に対する、光子以外の相対論的粒子のエネルギー密度の比のようなパラメータとなっている。標準宇宙論では $N_{\text{eff}}=3.046$ となるが、ステライルニュートリノなどが存在すればその分のエネルギーの寄与により、 $N_{\text{eff}}$ の値は標準宇宙論の値よりも大きくなる。

宇宙膨張の変化以外に、レプトン非対称性の有無などによっても $Y_p$ の値は変化する可能性がある。ここでレプトン非対称性とは宇宙における電子ニュートリノと反電子ニュートリノの個数密度が異なることを指す。仮に電子ニュートリノが反電子ニュートリノよりも多く存在する場合、ビッグバン元素合成開始前に起こっていた陽子、中性子、ニュートリノなどの粒子の化学平衡状態は、標準宇宙論の予言よりも中性子が少なくなる方向に偏る。これにより、 $Y_p$ の値は小さくなる。

そのため観測的に $Y_p$ の値を求めることで、こうした拡張的なモデルの可能性を探ることが出来る。他にも、中性子寿命の値は陽子-中性子の平衡が切れた後の中性子の減少量を決めるため、 $Y_p$ に影響を与える。しかし現在、実験室における中性子寿命の測定値は、その測定手法によって9秒ほど異なってしまふことが知られている [4]。 $Y_p$ の観測はこうした問題に対しても示唆を与えられると期待される。

## 1.2 観測からの制限

現状、金属欠乏銀河を用いた手法が最も統計誤差の小さい $Y_p$ の推定値を与えている [5]。銀河の中では、恒星内元素合成によって $^4\text{He}$ も酸素も時間と共に増加していくため、銀河の水素に対する $^4\text{He}$ と酸素の個数密度比 ( $\text{He}/\text{H}$ ,  $\text{O}/\text{H}$ ) を測定すると、正の相関が見られる。一方でビッグバン元素合成では酸素のような重い元素は合成されな

い。そのため銀河の  $\text{He}/\text{H}-\text{O}/\text{H}$  関係を  $\text{O}/\text{H}=0$  の点まで外挿することで、ビッグバン元素合成時のガスの  $\text{He}/\text{H}$  を推定することができる。

この手法では、精度良く  $\text{He}/\text{H}$  の測定が行われている銀河の大きなサンプルが必要となる。銀河内のある元素の量は、その元素からの輝線のフラックスから推定される。今回の場合、主に銀河内の星からの連続光により電離されたガスから放射された輝線を観測することになる。ただし輝線の強さは電離ガスの各元素の量だけでなく、電子温度や電子密度などの物理量にも依存して放射され、ダストなどによる減光も受ける。加えて実際には、輝線と星からの連続光の重ね合わせを観測することになるが、星の連続光は星自身の大気に含まれるヘリウムと水素により、輝線と同じ波長で吸収を受けている。従って、輝線フラックスから  $\text{He}/\text{H}$  を推定するには、これらの影響も同時に考慮して、self-consistent に銀河のガスの物理状態を決定してやる必要がある。これまで、観測された水素とヘリウムの輝線フラックスに対し、Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 法で同時にパラメータをフィットする形で  $\text{He}/\text{H}$  の推定が行われてきた。

この際、可視光域の水素とヘリウム輝線のみを用いると、 $\text{He}/\text{H}$  がよく制限できないことが知られている。これは主に、輝線フラックスに対し電子温度と電子密度の値が縮退してしまうことに起因する。この縮退を解くために、近年の研究では可視光域の輝線に加え、電子密度に敏感な近赤外の  $\text{HeI}\lambda 10830$  輝線を用いるようになってきた [6, 7]。この輝線はヘリウムの Triplet の  $2P$  から  $2S$  の準位の遷移で放射される輝線である。Triplet の  $2S$  から基底準位である Singlet の  $1S$  への遷移は禁制遷移となるため、Triplet の  $2S$  軌道には電子が留まり易い。これらの電子は、エネルギー差の少ない  $2P$  軌道には自由電子の衝突励起でも容易に励起される。このため  $\text{HeI}\lambda 10830$  は、再結合線が主となる可視の輝線と異なり、電子密度に特に敏感な輝

線となっている [8]。

個々の銀河の  $\text{He}/\text{H}$  の決定精度を向上させることに加え、銀河のサンプルサイズも重要である。特に、ビッグバン元素合成時のガス組成に近いと考えられる、なるべく  $\text{O}/\text{H}$  が低い銀河が鍵となる。ここでは、 $\text{O}/\text{H}$  量が太陽の 10% 以下しかない銀河を、特に極金属欠乏銀河 (Extremely Metal-Poor Galaxy; EMPG) と呼ぶ。 $Y_p$  推定において特に重要な EMPG ではあるが、その希少さから、これまであまり用いることができなかった。特に  $\text{HeI}\lambda 10830$  輝線も含めて  $\text{He}/\text{H}$  が求められた EMPG は数個程度しか存在しなかった。

ただし近年、銀河形成の文脈から EMPG が注目され、EMPG の探査なども行われるようになった [9–14]。その結果、これまでに可視分光データを備えた数十個もの EMPG が報告されるに至っている。そこで、これを  $Y_p$  推定に活かすべく、これらの EMPG に対する近赤外分光観測がすばる望遠鏡を用いた EMPRESS 3D (PI: 大内正己) というプロジェクトの中で行われた [15]。私もプロジェクトに加わり、新たに5個の EMPG について、 $\text{HeI}\lambda 10830$  輝線と既存の可視光輝線を合わせて  $\text{He}/\text{H}$  が求められた。過去の研究の銀河サンプルと合わせることで EMPG の数を3個から8個に増やし、外挿が必要な  $\text{O}/\text{H}=0$  付近のギャップを埋めて新たに  $Y_p$  が求められた。その結果得られた  $Y_p$  は、過去の研究で得られた値よりも  $1\sigma$  ほど小さくなることが分かった。さらにこの値を宇宙膨張の速度によって説明しようとすると、対応する  $N_{\text{eff}}$  の値は標準宇宙論の予言する値よりも  $2\sigma$  ほど低くなる。このような低い  $N_{\text{eff}}$  を実現するモデルも存在するが、観測の統計誤差がまだ大きく標準宇宙論とのずれをさらに高い精度で検証することが重要である。

## 2. 新たな観測

EMPRESS 3D の観測では、天候不良などの影響もあり、当初の見積もりの半分以下の数の

EMPGしか観測をすることができなかった。そこで私は、EMPRESS 3Dの近赤外分光観測を引き継ぎさらにEMPGの数を増やすべく、すばる望遠鏡による観測提案を行った。EMPRESS 3Dの観測時には運用を休止していた多天体近赤外撮像分光装置(MOIRCS)を用い、4晩で約20天体のHeI $\lambda$ 10830輝線を取得することを見込んだ提案は無事採択され、2023年10月から翌年1月にかけて、希望通り4晩の観測時間をいただいた。ただし、この年の9月、すばる望遠鏡の主鏡等が破損してしまうハプニングが起こった。その結果、望遠鏡の運用は当面の間休止となり、我々の観測も中止となってしまった。ところが幸運なことに、翌年、キャンセルされた観測のうち学生PIのプログラムについては改めて観測時間をいただき、結局1年遅れで観測が行えることになった。

観測時間は当初の希望通り合計で4晩、2024年10月から翌年1月にいただいた。10月に行われた最初の観測は、天候に恵まれ、2晩の間にEMPGを含む低金属量銀河16天体のHeI $\lambda$ 10830輝線を取得することができた。続く11月の観測では、現地ハワイの気温が基準以下まで低下し途中で観測中止になってしまったものの、1天体の観測を行えた。残すは1月12日の13日の合計1晩の観測となる。

現在すばる望遠鏡は基本的にリモートで観測が行われており、我々の11月までの観測も三鷹のリモート観測室からの観測であった。ただし学生PIのプロジェクトについては、その課題の期間中に一度だけ現地観測の受け入れと旅費のサポートをすばる望遠鏡から受けることができる。そこで、これを利用して、最後の観測は現地に直接赴いての観測を行うことにした。以下ではその時の様子を観測遠征記と題して紹介させていただく。

### 3. 観測遠征記

観測前日の1月11日にハワイ島へ到着した。現地で、指導教員の大内正己さんおよび研究室の



図1 ハレポハクにある宿泊施設。撮影時は雲の上となっていた。

後輩で共同研究者の柳澤広登さんと合流し、大内さんの運転ですばる望遠鏡のあるマウナケアへ向かった。道中では、大内さんに教えていただき、ロコモコ丼発祥の店と言われるCafe100で昼食を取ることができた。また、地元で有名なチョコレートクッキーの工場にも案内していただき、短い時間ではあったが、ハワイ島の雰囲気を感じながら移動することができた。

その後、マウナケア標高2,800 mのハレポハクの宿舎(図1)に到着し、標高に体を慣らすため、その日はそのまま一泊した。翌日から観測が始まり、ハレポハクから山頂のすばる望遠鏡までは、観測準備の段階からお世話になっているSupport Astronomerの田中壺さんに運転していただいた。田中さんのご厚意により、通常より少し早い時間帯に山頂へ上がることができ、観測開始前にすばる望遠鏡の内部を案内していただく貴重な機会を得た(図2)。

実際に目の前で見たすばる望遠鏡は、これまで写真や数値を通して理解していたものとは比べものにならないほどの迫力があり、強い印象を受けた。望遠鏡には今回の観測で使用する分光装置MOIRCSが取り付けられており、実物の望遠鏡と装置を前に、田中さんと大内さんから詳しい解説をしていただいた。これまでのリモート観測で

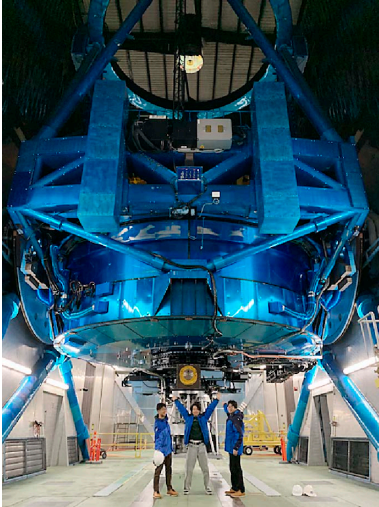


図2 見学時に撮影したすばる望遠鏡.

は、自身の観測であってもどうしても現実感が薄く感じられ、気がつくデータが手元にある、という感覚もした。しかし、現地で実際の望遠鏡や観測装置を目にし、説明を受けたことで、観測がどのように行われているのかを具体的にイメージできるようになった。

すばる望遠鏡の見学を終えた後、いよいよ観測が始まった。観測は別室に移動して行われるため、山頂での観測であっても、結局実際に観測中に眺めるのはリモート観測の際とほぼ同じモニター画面である。ただし、リモート観測の場合には、現地にいる Support Astronomer の方とのやり取りのため、モニターの一つにはすばる望遠鏡の観測室の様子も映し出されている。これまで画面越しに見ていた観測室に、今回は自分自身が実際に立っているという状況に不思議な満足感を感じた。

初日の観測は非常に順調で、天候にも恵まれた。基本的に快晴が続き、前半夜だけで6天体を観測することができた(図3)。観測の終盤には空の一部に雲がかかり、ちょうど観測対象となっていた天体が見えなくなる場面もあったものの、過去のEMPRESS 3Dの観測では半夜で多くても



図3 初日の観測終了直後のすばる望遠鏡の上空。終盤は画像右に映る雲によって、邪魔をされてしまった。

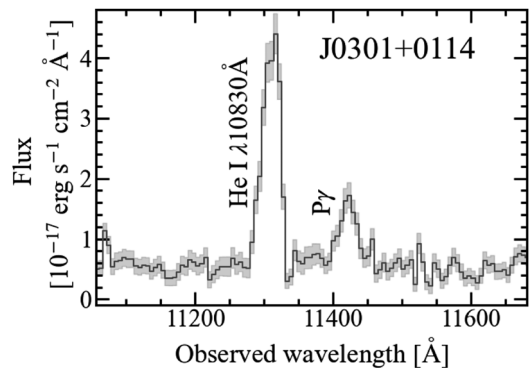


図4 現地観測初日に得られた天体のスペクトルの例[16].

3-4天体程度しか観測できなかったことを考えると、初日の成果は満足だった。観測は前半夜のみであったため、作業が終了したのは深夜1時ごろである。日没前に建物へ入っていたが、観測終了後に外へ出て見ると空には美しい夜空が広がっていた(図4)。ただし、事前に抱いていた「無数の星が肉眼で見える」というイメージとはやや異なっていた。田中さんの話によれば、山頂は空気が非常に澄んでいる一方で、酸素濃度が低いため視力がやや低下するというトレードオフがあるとのことである。

2日目は、観測開始前に山頂周辺を車で案内していただき、Keck望遠鏡をはじめとする他の観測施設を間近で見学することができた。また、初日は十分に見るができなかったマウナケア山頂からの眺望も楽しむことができ、氷河や火口によって形成されたという独特の地形は非常に印象的であった。

一方で、2日目の観測は前日とは対照的に天候に恵まれず、終始曇り空が続いたため、残念ながら1天体も観測することができなかった。このような状況は過去のリモート観測でも何度も経験してきたが、改めて天候に大きく左右される観測の難しさを実感した。しかし、その分時間に余裕ができたことで、柳澤さん、大内さん、田中さんと今後の新しい観測計画についてじっくり議論することができ、有意義な時間でもあった。

観測翌日には、すばる望遠鏡のヒロ山麓施設においてセミナー発表の機会をいただいた。飛行機の時間の都合もあり、やや慌ただしい発表となってしまったが、参加してくださった方々、ならびに発表の機会をアレンジしてくださったハワイ観測所の小野寺さんには、この場を借りて感謝申し上げます。

結果として、2日間の観測で得られたデータは6天体分となり、全体としてはまずまずの成果を得ることができた。なお、今回の観測で得られた天体は、柳澤さんが中心となって解析し、新たに $Y_p$ の測定に用いられた。結果は論文にまとめられ、*Astrophysical Journal*に投稿されている [16]。

今回現地で実際に望遠鏡や観測装置を目にし、運用の様子を間近で体験したことで、これまでデータや画面越しでは把握しきれていなかった望遠鏡の仕組みを、より具体的に理解できるようになった。また、観測が多くの人々の支えによって成り立っていることを実感し、現地観測ならではの学びを得る貴重な機会となった。

加えて、現地での観測はやはりリモート観測に比べて大きな楽しさがあり、強く印象に残る体験

であった。実際に、私自身だけでなく周囲の友人にとっても、このような現地観測の機会があったことは、本分野に興味を持つきっかけの一つとなっていた。今後も学生が現地ですばる望遠鏡の観測を体験できる機会が継続して提供されることを願っている。

## 謝辞

本稿の科学的な内容は、筆者らが発表した投稿論文 [15, 16] に基づいている。論文執筆にあたり、指導教員の大内正己さん、柳澤広登さん、播金優一さん、川崎雅裕さん、村井開さんをはじめとし、共同研究者の方々に多大な協力をいただきました。特に、今回の観測で得られたデータは柳澤広登さんに中心となって解析を行っていただきました。またこの研究は望遠鏡運用にご尽力されている方々、観測のサポートをしていただく Support Astronomerの方々など多くの方々のお陰で成り立っています。この場を借りて御礼申し上げます。最後に今回の現地観測について、移動や案内をしてくださった大内正己さんに改めてお礼申し上げますとともに、観測全体を通して手厚いサポートをしてくださった田中壺さんに心より感謝いたします。また、現地観測の受け入れや旅費のサポートを行ってくださったすばる望遠鏡関係者の皆様にも、深く多大なる感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] Iocco, F., et al., 2009, *Phy. Rep.*, 472, 176
- [2] Steigman, G., 2007, *Ann. Rev. Nucl. Particle Sci.*, 57, 463
- [3] Hamann, J., et al., 2011, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, 217, 72
- [4] Wietfeldt, F. E., & Greene, G. L., 2011, *Rev. Modern Phys.*, 83, 1173
- [5] Workman, R. L., et al., 2022, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2022, 083C01
- [6] Aver, E., et al., 2015, *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 2015, 011
- [7] Hsyu, T., et al., 2020, *ApJ*, 896, 77

- [8] Osterbrock, D. E., 1989, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*
- [9] Kojima, T., et al., 2020, *ApJ*, 898, 142
- [10] Kojima, T., et al., 2021, *ApJ*, 913, 22
- [11] Isobe, Y., et al., 2021, *ApJ*, 918, 54
- [12] Xu, Y., et al., 2022, *ApJ*, 929, 134
- [13] Umeda, H., et al., 2022, *ApJ*, 930, 37
- [14] Nakajima, K., et al., 2022, *ApJS*, 262, 3
- [15] Matsumoto, A., et al., 2022, *ApJ*, 941, 167
- [16] Yanagisawa, H., et al., 2025, arXiv e-prints, arXiv:2506.24050

## Exploring The Primordial Helium Abundance at Big Bang Nucleosynthesis with the Subaru Telescope

<sup>1</sup>Akinori MATSUMOTO

<sup>1</sup>*Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan*

Abstract: The primordial helium mass fraction,  $Y_p$ , is one of the key predictions of Big Bang nucleosynthesis and is sensitive to extensions of the standard cosmological model as well as to uncertainties in measurements of the neutron lifetime. In recent years, measurements of  $Y_p$  based on nebular emission-line spectroscopy of galaxies have significantly improved through the incorporation of the near-infrared He I  $\lambda$  10830 emission line, which is highly sensitive to the electron density and helps to reduce uncertainties in He/H abundance determinations. In this article, we first review the roles of extremely metal-poor galaxies (EMPGs) and the He I  $\lambda$  10830 emission line in estimating  $Y_p$ . We then present near-infrared spectroscopic observations of EMPGs carried out by the author using the MOIRCS instrument on the Subaru Telescope. Part of these observations was conducted on-site in Hawaii with support from the Subaru Telescope for a student principal investigator. We also describe the experience of this on-site observing run, which was realized after delays caused by the temporary suspension of telescope operations, in the form of an observing expedition report.