

# すばる望遠鏡での現地観測を通じて学んだこと

鈴木 善久

〈東北大学天文学教室 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉

e-mail: yoshihisa.suzuki@astr.tohoku.ac.jp

私は、国立天文台ハワイ観測所が企画する教育目的による山頂・山麓施設での共同利用観測者受け入れプログラムの一環として、ハワイ時間2024年7月12日から7月16日の5日間にわたり、すばる望遠鏡での現地観測を行いました。近年、世界的にリモート観測が進む中で、実際に観測現場を訪れ、滞在しながら観測に携わったことで、観測が厳しい自然環境のもとで行われていることや多くの人の支えによって成り立っていることを強く実感することができました。本稿を通して、すばる望遠鏡における観測現場の雰囲気をもっと多くの方に伝えることができれば幸いです。

## 1. はじめに

日本時間2023年12月7日10時46分、“We are pleased to inform you that ...”という書き出しのメールが届きました。観測プロポーザルを提出すること自体が初めてだった私は、その英文をしばらく理解できずに画面を見つめていました。それは、私にとって初めてのプロポーザルの採択通知でした。思いがけない知らせに驚きを隠せず、何度もメールを読み返しました。当時は観測の機会を得られたことへの喜びばかりが先に立ち、観測がどれほど多くの人に支えられて実現しているのかを深く考える余裕はありませんでした。

私の初めての観測は、国立天文台のリモート観測室から行いました。日本時間2024年5月13日、朝早くに仙台を出発して意気揚々と天文台のリモート観測室に向かい、画面越しに観測の現場が映し出される瞬間を心待ちにしていました。観測の開始を待っておりますと、当日観測を支援してくださるサポートアストロノマーの方から一通のメールが届きました。山頂は濃霧に覆われ、時折降雨や降雪も見られるため、山頂には上がらずに

マウナケア山麓にある中間施設であるハレポハクで待機を続けますというご連絡でした。観測開始とともに現地から共有されるはずの画面は、真っ暗なまま変化しませんでした。世の中にはビギナーズラックという言葉がありますが、どうやら私には縁がなかったようでした。本観測に同行していただいた千葉柁司先生からは冗談混じりに「日頃の行いだね」と言われながら、少しでも天気が回復しないかと付け焼き刃に黙々と観測室のゴミ拾いをしました。しかし、最後まで天気が好転することはありませんでした。続く5月15日も、サポートアストロノマーの方から、山頂の湿度が高く、すばる望遠鏡の主鏡周辺の露点も高くミラーカバーも開けることができない状況のため、ハレポハクで待機をしていますというご連絡をいただきました。この日も天気が回復することはありませんでした。

こうして私の初めての観測は1枚のデータも得られないまま終わりました。唯一の成果といえますと、リモート観測室がいつもよりきれいになったことでしょうか。そのときはまだ、ハレポハクがどのような場所で、山頂がどれほど厳しい環境である

か知りませんでした。また、観測が実現するまでに、どれほど多くの人の準備が重ねられているのかについても、深く考えてはいなかったのです。

## 2. 観測テーマ

初めての観測は分厚い雲に阻まれていましたが、私たちが解き明かそうとしている宇宙の謎もまた、同じように深く覆い隠されているものでした。それは、暗黒物質とは何かを明らかにすることです。暗黒物質とは、電磁波を放出しないために直接見ることはできませんが、重力を介してその存在が示唆されている仮説上の物質です。古くは1932年にヤン・オールトが、太陽近傍の恒星の運動を解析し、“missing mass”としてその存在について言及していました [1]。

現在の標準的な宇宙論では、冷たい暗黒物質 (Cold Dark Matter; CDM) が宇宙の全エネルギー密度の約3割を占めていると考えられています。ここで冷たいとは、暗黒物質の運動が光速に比べて十分遅く、非相対論的に振る舞うことを意味します。このような性質を持つ暗黒物質を仮定すると、宇宙初期に存在していた、ある場所はほんの少しだけ物質が多く、別の場所は少しだけ少ないといった物質分布のムラを保つことができます。そして時間が経つとともに、物質が多かった場所には重力によってさらに物質が集まるため、このムラは時間が経つとともに成長していきます。その結果、まず小さな構造が形成され、それらが合体しながら銀河や銀河団といったより大きな構造へと成長していくことができます。このようにしてできた構造は、観測される銀河の三次元分布など、銀河よりも大きなスケールの構造を非常によく再現できることが知られています [2]。

では、CDMモデルは銀河よりも小さなスケールでも観測をよく説明することができるのでしょうか。CDMモデルに基づく、私たちの住む天の川銀河の周りには、暗黒物質が支配的な小さな天体が数多く存在することが予想されています。

もしその中にガスが流入し、星形成が起っていると、私たちはそれを小さな銀河として観測できると期待されます。天の川銀河の周囲に発見されている矮小楕円体銀河は、まさにそのような天体に対応すると考えられています。

矮小楕円体銀河は光度が非常に低く、恒星の数も少ない銀河です。しかし、その内部の恒星の運動を解析すると、矮小楕円体銀河は、恒星の明るさから予想される質量に比べて、約100-1000倍大きな質量を持つことが明らかになっています [3]。これは、矮小楕円体銀河が暗黒物質に支配されていることを示しています。そのため、矮小楕円体銀河を通して、銀河よりも小さなスケールにおいてCDMモデルの検証がなされてきました。

その結果、CDMモデルは銀河よりも小さなスケールでは観測を十分に説明できない可能性が指摘されてきました。ここでは、提案されている問題のうち、特に天体の数に注目したミッシングサテライト問題に焦点を当てます。ミッシングサテライト問題とは、天の川銀河サイズの銀河形成シミュレーションが予測する暗黒物質が支配的な天体の数が、実際に天の川銀河周辺で観測されている矮小楕円体銀河の数よりも1桁以上多いという問題のことです [4, 5]。

この数の不一致を説明するために、大きく3つの考え方が提案されています。1つ目は、暗黒物質のモデルを変更することです。例えば温かい暗黒物質 (Warm Dark Matter) モデルでは、小さなスケールの構造形成が抑えられるため、予想される矮小銀河の数は減少します。2つ目は、超新星爆発をはじめとするバリオンのフィードバック効果を考慮することです。超新星爆発などによって、暗黒物質が支配的な系から星形成に必要なガスが吹き飛ばされることで、星形成が抑制され、結果として観測される矮小銀河の数を減らすことができます。3つ目は、まだ発見されていない暗い矮小銀河が存在する可能性です。当時は比較的明るい矮小楕円体銀河しか知られていなかった

め、より暗い天体が今後の観測で発見されれば、この不一致は緩和されます。

このうち、特に3つ目の観測的アプローチによって、この問題は少しずつ緩和されていきました。スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) やダークエナジーサーベイ (DES) といった大規模な測光観測によって、矮小楕円体銀河だけでなく、それよりもさらに暗く、より暗黒物質が支配的な低光度矮小銀河 (Ultra Faint Dwarf; UFD) なども見つかってきたのです。

この問題に対して、日本のすばる望遠鏡はさらに重要な役割を果たしました。2014年3月から2022年1月にかけて約7.5年、計330夜を用いて、Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program (HSC-SSP) と呼ばれる大規模な測光観測が実施されました<sup>\*1</sup>。その結果、天の川銀河の周りに新たに5つのUFDが発見されました<sup>\*2</sup> [6]。これらの発見をHSC-SSPの観測領域の面積や検出限界を考慮して統計的に補正すると、発見された衛星銀河の総数はCDMモデルの予測よりも、やや多い可能性が示唆されました。興味深いことに、本論文の発表と同時期に、近傍渦巻き銀河M83の衛星銀河の数についても、数値シミュレーションの予測と比較した研究により、予測より多い可能性が示唆されました [7]。もはや“missing”ではなく、“too-many” satellite problemです。では、この不一致はどの程度深刻なのでしょうか。

本観測の目的は、このHSC-SSPで発見されたUFD候補の分光フォローアップ観測をすることです。HSC-SSPなどの測光観測では、空間的に星が集まっている領域を効率よく探すことで候補天体を選ばれます。しかし、それらが本当に矮小銀河であるかどうかは確定していません。例えば星が密集して見える天体としては球状星団もあり、

球状星団には暗黒物質がほとんど存在しないことが知られています。そこで、私たちは、すばる望遠鏡の微光天体分光撮像装置 Faint Object Camera And Spectrograph (FOCAS) を用いて、矮小銀河候補内の恒星を分光観測し、その視線速度や金属量を測定することで、暗黒物質が支配的な矮小銀河であるかどうかを決定したいと考えました。

これまでにも、同様の分光観測計画は遂行されてきましたが、悪天候などに見舞われたこともあり、2020年以降なかなか思うように進んでおりませんでした。そこで、2020年以降にHSC-SSP領域内で新たに発見された矮小銀河も含めて、分光フォローアップ観測を再開することにしました。今回は、牛飼い座IVと名づけられた矮小銀河の分光観測に挑みました。

### 3. 現地観測

CDMモデルの検証に向けて、私はハワイ時間2024年7月12日から7月16日にかけて現地観測を行いました。7月12日、ハワイのヒロ空港に到着すると、そのままハワイ観測所の岡本桜子氏の車で、すばる望遠鏡のあるマウナケア山麓の中間施設であるハレポハクに向かいました。車で約1時間、標高2,800 mまで一気に上がります。富士山でいえば七合目から八合目に相当する高さです。地上のハワイらしい暑さとは対照的に、標高が上がるにつれて空気はひんやりとし、景色も次第に荒涼としていきました。

ハレポハクでの手続きを終え、外のデッキを渡って宿泊棟へ向かいました。その途中で地上を見下ろし、初めて自分かなりの高所にいることを実感しました。宿泊する部屋は想像よりも広く、10畳ほどの空間が静まり返っていました。部屋に荷物を置き、夕食を終えて、すぐに床に就

<sup>\*1</sup> Hyper Suprime-Cam や HSC-SSP については天文月報2019年2月号のHSC特集を参照していただきたい。

<sup>\*2</sup> HSC-SSPを用いたそのほかの銀河考古学のサイエンスについては、天文月報2019年4月号のHSC特集(3)のHSCで探る銀河系と近傍銀河(著:千葉柁司氏)を参照していただきたい。

きました。ところが、その夜はなかなか寝つくことができませんでした。観測がいよいよ始まるという高揚感とも、時差ボケとも異なる、低酸素によると思われるぼんやりとした感覚が、夜のあいだ続きました。

訪問2日目、いよいよ山頂での観測が始まります。山頂観測の期間中は、毎日ハレポハクと山頂を往復します。観測は今日から3日間、每晚19時頃から24時頃まで行われます。その日の空は快晴で、風も弱い状況でした。リモート観測で空振りに終わった日々を思い出しながら、ようやく巡ってきた好機に胸が高鳴りました。午後4時頃、専用の四輪駆動車に揺られながら、舗装されていない道を約30分かけて登っていきました。マウナケア山頂の標高は約4,000 mです。高度が上がるにつれて草木は消え、岩肌が広がっていきました。

山頂の観測室に入ると、まず酸素ボンベを着用しました。高山病の危険があるためです。その後、分光観測の準備を本観測のサポートアストロノマーである青木賢太郎氏の横で見守っていると、シーイングは約4秒とのことでした(図1)。シー

イングとは、大気の揺らぎによって星像がどれだけ広がるかを示す指標です。マウナケア山頂の典型的な値である約0.6秒を大きく上回っています。今回用いた分光器のスリット幅は0.4秒でした。シーイングがこれほど大きい場合、星像はスリット幅を大きく超えて広がります。そのため、今回ターゲットとするような暗い矮小銀河内の恒星の分光データを取得することは難しいです。

快晴であっても、必ずしもよいデータが得られるとは限らないということを思い知らされました。青木氏からは「ワースト1位・2位を争うほど悪いシーイングです」と言われました。結局、その夜は有意なデータを取得することはできませんでした。

訪問3日目は、快晴ではあるものの、やや風の強い日でした。この日は、青木氏のご厚意により、すばる望遠鏡の施設内をご案内いただきました。観測室からエレベータで上階へ上がり、外に出て望遠鏡外周のデッキを一周しました。その後、観測室へ戻る途中で、今回観測で使用しているFOCASと、青く輝くすばる望遠鏡本体を間近に見る機会を得ました。その大きさには圧倒されました。また、FOCASと入れ替わりで配備されている多天体近赤外撮像分光装置MOIRCSについても拝見しました。さらに、高分散分光器HDSの設置された部屋や、新たな矮小銀河の発見に大きく貢献してきたHyper Suprime-Cam(HSC)、そしてその前身であるSuprime-Camも拝見しました。いずれも想像を超える規模でした。最後に1階へ降り、主鏡の下に入りました。直径8.2 mの単一鏡の大きさには改めて圧倒されました。

ご案内いただく中で、HSCなどの主焦点に取り付ける装置の運用の難しさや、日々続けられている装置のメンテナンス作業についてもお話を伺いました。望遠鏡が常に最高の性能を維持できるよう、多くの方々が高所で作業にあたっていることを改めて認識しました。この日も観測は思うようには進みませんでした。リモート観測では見

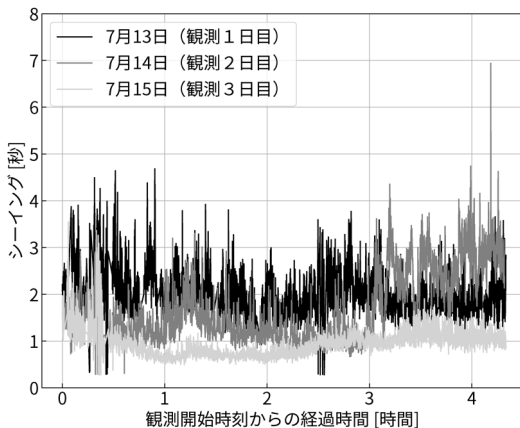


図1 3日間の観測における観測開始時刻からのシーイングの時間変化: 観測1日目と観測2日目はシーイングの平均値が約2秒で、時間変動も大きいことがわかります。一方で観測3日目はシーイングの平均が約1秒で安定していることがわかります。なお3日間とも天気は快晴ではありましたが、

えなかった現場の厳しさを知ることができました。標高4,000 mという過酷な環境での作業や、低酸素下での長時間観測。地上での観測を行うという点では理想的な立地でありながら、その環境には大きな負担が伴っていることを実感しました。観測とは、単にデータを取得する作業ではないことを強く認識しました。

訪問4日目、観測最終日となりました。この日はシーイングが約1秒程度まで改善し、ようやく牛飼い座IVを観測することができました。天候やシーイングは人の力では制御できません。しかし、観測可能な条件が整った瞬間にすぐ観測を開始できるよう、装置を整え、体制を維持し続けてきたからこそ、今回の観測は成立したと言えます。こうして、私の現地観測は、観測の現実を知る機会となりました。

#### 4. おわりに

本観測体験は、観測の背後にある多くの人の支えを実感する貴重な経験となりました。普段のリモート観測ではあまり意識することのない、過酷な環境での作業や日々の保守点検があつてこそ、私たちは遠く離れた場所から観測することができます。近年は様々な事情から、現地で観測に立ち会う機会は決して多くないと思います。しかし、現地で体験した観測環境の厳しさど、観測を支える人々の存在は、今後の研究活動において忘れてはならないものであると考えています。今後はその重みを感じながら、宇宙の謎に迫っていきたくと考えています。

#### 5. 後日談

今回のS24A期の観測に続きS24B期でも観測時間をいただくことができましたが、再び悪天候に見舞われる結果となりました。それゆえ、2024年は総じて掃除のスキルが向上しました。その後、S25A期およびS25B期を経て、ようやく解析に必要なデータが集まってきました。現在は

その結果の報告に向けて、やや散らかった部屋で解析を進めています。

#### 謝辞

本原稿の作成にあたり、担当編集委員の田中孝氏には大変お世話になりました。ここに厚く御礼申し上げます。現地観測に際しては、上清初枝氏、Noriko Roth氏、末広曜子氏に多大なるご支援をいただきました。また、現地観測時にすばる望遠鏡ツアーを企画してくださった本観測のサポートアストロノマー、青木賢太郎氏に心より感謝申し上げます。本観測提案にあたり、共同研究者として貴重なご助言を賜りました千葉柁司氏、石垣美歩氏、本間大輔氏、岡本桜子氏、小宮山裕氏、田中賢幸氏、林航平氏にも深く感謝申し上げます。最後に、日頃より観測を支えてくださっているすべての皆様に、心より御礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] Oort, J. H., 1932, Bull. Astron. Inst. Netherlands, 6, 249
- [2] Tegmark, M., et al., 2004, ApJ, 606, 702
- [3] Gilmore, G., et al., 2007, ApJ, 663, 948
- [4] Klypin, A., et al., 1999, ApJ, 522, 82
- [5] Moore, B., et al., 1999, ApJ, 524, L19
- [6] Homma, D., et al., 2024, PASJ, 76, 733
- [7] Müller, O., et al., 2024, A&A, 684, L6

#### Lessons from On-Site Observation with the Subaru Telescope

Yoshihisa Suzuki

*Astronomical Institute, Tohoku University, 6-3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan*

Abstract: I participated in on-site observations with the Subaru Telescope from July 12 to July 16, 2024. In recent years, remote observation has become more common worldwide. However, by traveling to the observatory and staying there during the observations, I was able to directly experience the harsh natural environment in which astronomical observations are conducted and to recognize how much we rely on the dedicated support of many people.