

すばる望遠鏡／MOIRCSを用いた 若い超低質量天体の近赤外多天体分光観測 —すばる望遠鏡現地観測体験記—



金井 昂 大

〈埼玉大学大学院理工学研究科 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255〉

e-mail: s15pp223@gmail.com

私は学生PIとして、MOIRCSを用いた超低質量天体の近赤外多天体同時分光観測をハワイ現地で行った。超低質量天体とは、恒星よりも質量が軽く（0.08太陽質量以下）、水素の核融合反応を起こすことができない天体の総称である。私たちは、その中でも親星を持たず単独で存在する超低質量天体の質量・空間分布を調べ、様々な環境下におけるそれらの特徴の差異を探っている。現地観測では、実際に行かなければ見ることができない光景はもちろん、ドーム内の施設・設備や装置が動いている様子を見学させていただいた。また、観測においては、隣にサポートアストロノマー（SA）さんがいることで齟齬やミスが少なくなり、観測中の状況に応じた臨機応変な対応やスケジューリング調整も三鷹でのリモート観測よりも格段にスムーズに行うことができた。これによって予定していたすべてのデータを無事に取得できた。本稿では、本観測の科学的背景・意義を簡単に述べ、観測に向けた準備から現地での観測の様子を紹介する。

1. 本研究について

1.1 超低質量天体

質量が軽い星たちは天の川銀河にどれだけあるのだろうか、どこで、どのようにして生まれてくるのだろうか。一般に、質量が0.08太陽質量(M_{\odot})以下の天体は、恒星と異なり、水素の核融合反応を安定して起こせない。このような天体は超低質量天体と総称され、質量の重い順に褐色矮星(0.013 M_{\odot} 以上)と惑星(0.013 M_{\odot} 未満)に分類される。本研究ではその中でも、太陽系の惑星や太陽系外惑星と異なり、親星を持たず宇宙空間に単独で存在する惑星質量天体 [1] に着目している。低温で非常に暗い超低質量天体は観測が難しく、その形成過程はいまだに未解明な点が多

い。その起源を明らかにするには、様々な環境下における数多くの超低質量天体から物理的性質や特徴を探ることが重要である。

超低質量天体の効率的な探査には、その明るさの特徴が鍵となる。超低質量天体は形成初期段階(=若い時)には重力収縮によって比較的明るい。進化に伴って次第に冷えて暗くなっていく。また、低温であるために輻射のピークが近赤外線にある。このような特徴から、若い段階の超低質量天体の観測には近赤外線探査観測が非常に有効な手段である。それを裏づけるように、褐色矮星、惑星質量天体の世界最初の発見 [1, 2] は共に近赤外線観測によるものである。

1.2 若い超低質量天体の近赤外線探査観測

超低質量天体の近赤外線探査観測は、(1) 測

光観測で若い超低質量天体の候補となる天体を同定し、(2) 分光観測から確認する、という手順で進めていく。まず、(1) の測光観測では、星形成領域の方向にある天体の明るさと色から若い星の特徴を示す天体を選び、その中でも特に暗いものを若い超低質量天体候補として同定する。一方、分子雲のうしろには、似た色を示す星や銀河が隠れていること、若い天体は年齢によって明るさと温度がどちらも変化するため年齢の仮定が必要になることから、若い超低質量天体と断定するのはやや難しい。そこで、(2) の分光観測を実施して候補天体のスペクトルから温度を決定することで、若い超低質量天体であることを確認する。求められた温度を測光観測で得た明るさと組み合わせることで、年齢と質量を一度に求めることが可能になる。

私たちの研究グループでは、超低質量天体の形成が環境によって異なるのか、もしくは普遍的であるのかを明らかにするべく、これらの手法を駆使して、様々な環境を持つ近傍の星形成領域において、UKIRT（英国赤外線望遠鏡）やすばる望遠鏡などを用いて近赤外線撮像／分光観測を行っている [3-5]。例えば、R CrA 領域と呼ばれる太陽から約 150 pc の距離に位置する星形成領域において、UKIRT による近赤外測光観測を実施し、合計で約 200 天体の超低質量天体候補を同定した [5]。これらの候補天体の分布と、ハーシェル宇宙天文台の遠赤外線観測で得られた分子雲のダスト柱密度を比較すると超低質量天体候補を含む若い星は、ダスト柱密度がやや高い場所に分布する傾向があり、分子雲環境への依存性を示す可能性が示された。

近赤外線分光観測では、観測の効率を最大化するために可能な限り多くの候補天体の近赤外線スペクトルを同時に取得する手法を用いている。すばる望遠鏡に搭載されている多天体近赤外撮像分光装置“MOIRCS”は、近赤外線で最大約 60 天体を同時に分光観測できる。さらに取得できるスペ

クトルの波長域が広く、多様な観測モードを実現できるため、本研究にぴったりの観測装置である。私たちは MOIRCS による超低質量天体候補の近赤外線追分光観測をこれまでに何度も実施してきた [6, 7]。

1.3 本研究の観測領域

今回の観測では、距離約 390 pc にあるオリオン座 B 分子雲の NGC 2068・NGC 2071 領域において、若い超低質量天体がどれくらい存在するかを調査した。これらの領域は約 1 度に広がる 1 つの繋がった分子雲にある活発な星形成領域で、NGC 2068 は M78（ウルトラマンの故郷として有名）とも呼ばれ、大質量星が 2 つ存在することがわかっている [8]。一方で NGC 2071 には大質量星は存在しておらず、同じ分子雲内の近接する領域で異なる環境を持つことから異なる環境における超低質量天体形成の違いを探るうえで最適といえる。私たちはこれまでに UKIRT を用いて、同領域で近赤外線測光観測を実施しており、超低質量天体候補を約 2000 天体発見してきた。発見された候補天体の空間分布から、大質量星が存在する NGC 2068 付近では NGC 2071 と比較して若い褐色矮星が多く存在している可能性が示唆された。これを裏付けるために、発見した候補天体の近赤外線多天体同時分光観測を提案したところ、0.5 夜×2 の観測時間が採択された。

2. すばる望遠鏡での現地観測

2.1 はじめに

ここからは、すばる望遠鏡での現地観測に向けた準備と体験を述べていく。まずはじめに、筆者自身の現地観測に対する思いをここに記しておきたい。最初に『すばる望遠鏡での観測』を志したのは、教員を目指していた高校三年生の時のオープンキャンパスだった。地元である埼玉大学教育学部の研究室を見学した際に、案内をしてくれた大学生がすばる望遠鏡で観測をした、と言っていたことがきっかけだった。その方は学部生向けの

すばる望遠鏡観測実習の体験を語ってくれたのだ。その話を聞いて、教員を目指しつつ天文学の研究をやって、あわよくば、すばる望遠鏡で観測できることに非常に魅力を感じた。進学して研究室に配属されてからも、毎年コンスタントにハワイでのすばる望遠鏡を用いた現地観測を体験する院生がいた。自分の1学年上の先輩までは…。

私は修士2年の時にすばる望遠鏡を用いた観測機会を手にしたが、世はコロナ禍。当然観測は現地ではなく、三鷹でのリモート観測となってしまった。その時には博士課程への進学を決めており、自力で観測採択を勝ち取ることはもちろん、自分の観測をいつか現地で行いたいと願っていた。進学後には合計で2度のPIでの観測機会をいただいたが、いずれも三鷹でのリモート観測であった。コロナ禍が落ち着いてきた2023年、S23B期での観測が採択された際に、ついにハワイでの現地観測が可能であることが知らされた。待ちに待った現地観測！のはずが、主鏡の不具合によって延期^{*1}となり、約1年後の2025年1月に改めて観測が行われることとなった。こうして、様々な方々のご尽力に支えられ、なんと約10年越しのすばる望遠鏡、ハワイ現地観測にこぎつけたのだ。

実はこの観測に先んじて2024年9月から1ヵ月間、光赤外線天文学大学間連携(OISTER)とハワイ観測所の共同プロジェクトとして、短期滞在実習(ハワイインターン)でハワイ観測所に滞在し、MOIRCSおよびULTIMATEに向けた近赤外分光観測の効率・性能評価を行っていた^{*2}。その際に山頂・すばる望遠鏡ドーム見学や現地での観測見学をさせていただいており、現地に行く、という1つの目標は叶っていたが、やはり、自分が提案した観測を自らハワイで実行する！という今回の観測は特別なものであると感じていた。

2.2 観測準備

さて、観測に向けた準備に少し話を移そう。今回実施するMOIRCSの多天体分光観測ではスリットを用いて天体の光を装置に導入する。このスリットを焦点面に多数配置できるスリットマスクは、観測ごとに設計(マスクデザイン)する完全オーダーメイドである。MOIRCSの分光観測視野は約 $4' \times 6'$ で、天体のスペクトルが重ならないようにスリットの位置や幅を微調整する。私たちが行うマスクデザインでは、重要な候補天体を最も多く観測できる視野をその都度検討する。

スリットマスクを焦点面に配置した際は、MOIRCSは目隠しをされている状態になってしまうため、望遠鏡が向いている位置が正しいか確認するためにアライメントホールと呼ばれる位置合わせ用の穴を視野内に数ヵ所配置しておく。す

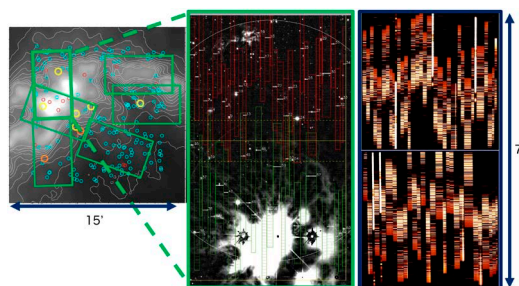


図1 (左) R CrA 領域で同定された候補天体の空間分布 [5] と MOIRCS で追分光観測を行った視野 (四角)。背景の画像はハーシェル宇宙天文台の遠赤外線観測で得られた分子雲のダスト柱密度分布図 [9]。(中央) MOIRCS のマスクデザインの一例。背景は UKIRT/WFCAM で得られた Kバンド ($2\mu\text{m}$) 画像。天体の位置を確認しながら手作業で観測したい天体1つ1つにスリットを配置していく。(右) 実際の分光観測生データ。画像縦方向につながった光が天体のスペクトルであり、規則的に現れているのは地球大気のOH夜光である。この夜光を差し引くために天体をスリット上で一枚ごとにずらして観測するAB観測を行う。

^{*1} S23B期の学生PI観測に対して、この異例の対応をしてくださった観測所と関係者の皆様には大変感謝申し上げます。

^{*2} すばる望遠鏡および埼玉大学webリリース参照。

すべてのホールの中央に星が収まった時に、望遠鏡が正しい位置に向いた、として分光観測を開始する。MOIRCSの分光観測ではマスクデザインがそのまま観測結果に直結するため、非常に入念に準備を重ね、一枚一枚にかなりの時間をかけて行う。一例としてR CrA領域で同定された候補天体の分布の一部と、分光観測で用いたマスクデザインを図1に示す。

完成したマスクデザインを基に、ハワイ観測所にあるレーザーカッターによって厚さ70 μm のアルミ薄板に約60天体分のスリットが切られ、スリットマスクが完成する。近赤外線域でのノイズを減らすため、スリットマスクは観測に先立って山頂に輸送され数日かけて約-180度まで冷却される。今回の観測ではスリットマスクを合計で9枚デザインした。この大変な準備を終え、私たちは1月の寒い日本からハワイへと向かった。

2.3 現地滞在と観測

観測前日にマウナケア中腹の山麓施設であるハレポhak(標高約2800 m)に移動し、高地順応をするために一泊した。ヒロの街では半袖で過ごしていたが、ハレポhakでは寒く、常に上着が必要だった。やはり高地であるため、眠りが浅くなってしまふのに加えて、起きるととても息苦しく感じる。でも朝食のオムレツが抜群に美味しいので、これから初めて行く人はぜひとも朝起きて食べて欲しい(一緒に行ったO氏はたくさんハラペーニョが入った具材全部入りオムレツを注文してまだ辛さが足りない、と仰っていた…)

観測前半夜の割り当てだったため、当日は山頂のほかの望遠鏡とドームの見学のために少し早めに山頂に登った。ハレポhakから山頂への道は最初がとにかく険しい。しかし、OISTERで夏に滞在した際には、歩いて登ろうとする人や自前の自転車で登ろうとしている観光客もいたことが強く印象に残っている。途中、山頂と反対側に目を向けるとマウナロアが裾野まで綺麗に見えたが、すごく遠くに見える山なのか、近くにある山なのか



図2 観測前、すばる望遠鏡ドーム内で、左から共同研究者の高木氏、大朝氏、筆者。カセグレン焦点に搭載されている装置がMOIRCS。すばる望遠鏡の大きさが少しでも伝わるだろうか。

距離と大きさの感覚が全くわからず、マウナケアと同じ4200 mの山にはとても見えなかった。

山頂ではすばる以外のほかの望遠鏡の近くにも行かせていただいた。特に思い入れがあるのは、測光観測で用いたUKIRT。いつか観測したいのはもちろん、せめて中に入りたいと思っていたが、残念ながら次に山頂に行く時にはもう姿はないのかもしれない。素晴らしい望遠鏡/装置であるため、自らの手で実際に観測したい!という思いを持って、行く末を非常に気にしている。

さて、気を取り直して、ついにすばる望遠鏡へ向かう。個人的に一番テンションが上がるのは、JCMTやSMAを過ぎて、すばる望遠鏡のドームがどんどん近づいてくるタイミング。行き慣れている人には見慣れた風景かもしれないが、自分にとっては特別な光景で今でも目に焼き付いている。

観測室に到着後、ドームの中を見学させていただいた(図2)。ちょうど制御室では較正用データを取得中で、MOIRCSのスリットマスクを交

換する際に用いられているロボットアームが動く様子を見学することができた。装置の仕組みや観測時に動作の様子が表示されるステータス画面はもちろん知っていたが、装置が実際に動いている場面は当然現地に行かないと見られないので、貴重な体験をさせていただいたと感じている。

次第に外が暗くなってくると観測の開始。入念に計算したスケジュールを基に、着実にデータを取得していく。三鷹でのリモート観測との一番の違いは、山頂で観測すると圧倒的に効率がよいことである。すぐ隣にSAさんがいる安心感があり、コミュニケーションが捗ることで齟齬やミスをなくすることができる。刻一刻と変わる状況に応じて、臨機応変な対応やその場でのスケジュール調整もできる。少しでも多くのデータを取得できることがその後のデータ解析や議論に大きく関わるので、その場で話し合いながらオペレーションできることは非常に重要であると改めて感じられた。また、安全で確実な観測を運用してくれた望遠鏡のオペレーターさんにも感謝している。

加えて、普段埼玉大学にあるSaCRA望遠鏡やぐんま天文台150cm望遠鏡の観測を運用している立場として、すばる望遠鏡にどんな設備があって、SAさんやオペレーターの方が観測時にはどんなことを気にして、何をみているかという点は非常に勉強になった。すばる望遠鏡の観測室でしか見られないものをたくさん写真に撮らせていただき、SaCRAの観測システムの改善に参考にさせていただいている。

今回はほぼ満月（月齢：15-16）の夜に観測が割り当てられていた。まだ月が昇っていない時間に、写真を撮るために少しだけ外に行かせていただいた。満天の星空の下で早く戻らなきゃという気持ちと、この素晴らしい星空を写真に収めたいという気持ちが合わさって、焦りながらもなんとか星空とドームの写真を撮ることができた（焦ってしまったため出来映えは大満足とはならなかったが…）。今のスマホの待受画面はこの星空の写



図3 観測後、すばる望遠鏡のドーム前で。左から田中氏、高木氏、筆者、大朝氏。満月のためドームや人物がよく写っており、それぞれの個性が出ている一枚。

真とドーム内のすばる望遠鏡の写真である。

幸い気候にも恵まれ、素晴らしい望遠鏡と装置の安全で確実なオペレーションのもと、観測は2夜とも順調に進み、予定通り合計9枚のマスクでデータを取得できた。観測できた天体数はなんと400天体！観測後、特にお世話になったみなさんとドームの外で記念撮影をした（図3）。本当に思い出の写真で、この写真とともに博士論文の学位審査も乗り越え、今後も研究発表時のすばる望遠鏡の紹介時にはしばらくこれを使う予定である。

唯一の気掛かりは、次はいつ現地での観測が叶うかわからないこと。いつの日かまた行けるように、これからも日々頑張りたいと本稿を書いていて改めて心に誓った。

謝辞

本研究及び本稿の執筆を進めるにあたり、共同研究者であり指導教員であった大朝由美子氏に厚く御礼を申し上げます。また、観測準備から当日の観測まですばるでの観測をいつも手厚くサポートしてくださる田中壺氏、共同研究者で観測時にいつも駆けつけてくださる高木悠平氏、ハワイ現地の生活をサポートくださった工藤智幸氏にも厚く御礼申し上げます。また、学生の現地観測を実現してくださった宮崎所長をはじめとするハ

ワイ観測所のみなさま，すばる科学諮問委員会のみなさま，すばる室のみなさまにこの場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Oasa, Y., et al., 1999, ApJ, 526, 336
- [2] Nakajima, T., et al., 1995, Nature, 378, 463
- [3] Oasa, Y., et al., 2006, AJ, 131, 1608
- [4] Oasa, Y., et al., 2008, AJ, 136, 1372
- [5] Kanai, T., & Oasa, Y., 2025, A&A, 698, A96
- [6] Kanai, T., & Oasa, Y., 2023, “NIR Photometric/Spectroscopic Observations of Very Low-Mass Objects in R CrA Region”, the 12th Asian-Pacific Regional IAU Meeting (APRIM 2023)(Koriyama, Japan), Session3, 348
- [7] Oasa, Y., 2025, “IMFs at the low-mass ends: How common are brown dwarfs and planetary-mass objects?”, The 11th East-Asian Meeting on Astronomy (EAMA11) (Niigata, Japan), SE-7C
- [8] Strom, K. M., et al., 1975, ApJ, 196, 489
- [9] Bresnahan, D., et al., 2018, A&A, 615, A125

A NIR Multi-object Spectroscopic Observation of Young Very Low-mass Objects with Subaru/MOIRCS: A Report from Student-PI On-site Observation Program

Takahiro KANAI

Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255 Shimo-okubo Sakura-ku, Saitama, Saitama 338-8570, Japan

Abstract: We have conducted NIR multi-object spectroscopy of very low-mass objects using Subaru/MOIRCS as part of a student PI on-site observation program. Very low-mass objects are objects with masses below the hydrogen-burning limit, and we have been investigating their characteristics across various environments. In the on-site observation, I was able to see things that can only be experienced on the summit, such as the facilities and instruments in operation. During the observations, having a support astronomer by our side helped to prevent mistakes and allowed us to adjust the schedule flexibly, which was much more efficient than remote observation. As a result, we successfully obtained all the data planned for our 0.5 nights \times 2. This article outlines the scientific background of this observation and shares a report on the preparations and the actual on-site observations.