



# 旅と共に続く遠方銀河の研究

札本佳伸

〈千葉大学先進科学センター 〒263-0022 千葉県千葉市稻毛区弥生町1-33〉  
e-mail: yoshinobu.fudamoto@gmail.com



ビッグバンにより宇宙が誕生した後の約10億年間、銀河がどのようにして誕生し、星を作り、その中で元素合成をしてきたのかを探ることは現代の天文学における最も重要な課題の一つである。特に、近年はALMA望遠鏡やジェームズウェップ宇宙望遠鏡を用いた観測が進むことで、多波長観測により得られる多角的なデータを用いた研究が急速に進展している。それらの研究の発展を紹介とともに、私がこれまでドイツとスイスにて経験してきた日本国外での大学院生活や、そのなかでどのように研究を進めてきたのかを紹介したい。研究の面でも国外での生活の面でも、予想もしなかった変遷が起きる様を共有できれば幸いである。

## スイスで始まった研究生活

2016年10月初頭、修士課程を終えドイツ・ミュンヘンを出発した長距離バスの中で、どのようなことを考えていたかはもうあまり定かには覚えていない。フランス語の勉強でも少しはしていたような気もする。しかし、その後到着したスイス・ジュネーブの、閑静な場所にある長距離バスのターミナルで、博士課程の指導教官 Pascal Oesch 氏（現・ジュネーブ大学教授）に初めて会い、挨拶もそこそこに彼が運転してきたレンタカーに乗り、市内から離れた場所にあるジュネーブ天文台に到着したときのことはまるで昨日の出来事のように覚えている。

私は、京都大学理学部を卒業後、思い立ってドイツ・ミュンヘンにて修士課程を過ごし、その後スイス・ジュネーブにて博士課程を修了した<sup>\*1</sup>。今回は大変貴重な機会をいただいたので、かいつ

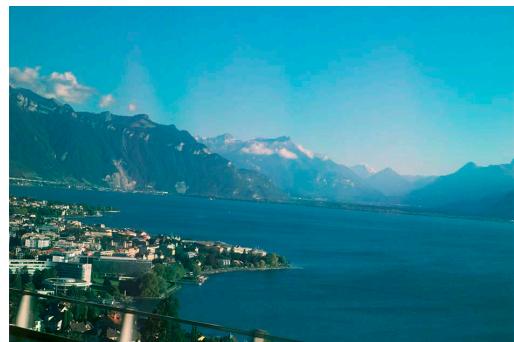


図1 ジュネーブに向かう道中、バスの窓から見えたスイス・ローザンヌ周辺の山々。2016年。

まんだかたちで自分の学生の間の経験を書き留めさせていただこうと思う。前半はあまり楽しい話題もないかもしれないが、少なくとも後半は自分の研究経験とともに盛り上がってくるように努める次第である。もし、本記事がいま進路や成績について何か悩んでいる学生の方などの参考や励みの一助となれば幸甚である。

\*1 欧州における大学院の仕組み上、学士と修士を終えたのち、博士課程からは社会人とほぼ同様の扱いになるため、ポスドク等と同様に公募に採用されることで博士課程に進むことが多い。そのため、修士課程から博士課程への段階で指導教官や専門が変わることは比較的一般的である。また国ごとに課程の長さは異なり、例えばイスラエルでは博士課程は4年間ある。

## 1. 日本国外での学位取得

日本国外にて学位を取得することは、経験する方の性格や人柄などによりそれこそ千差万別である。私にとっては大小さまざまな波にもまれ続けるような日々であった。研究の面でいうと、欧洲では国々の間を常に人々が行き交い、分野を代表する有名な研究者が多数活躍する。その研究室を出てきた新人のポスドクや学生が新たなチャンスを掴もうと常にしのぎを削っている。日常生活に目を向けると、海外旅行や出張での短期滞在では経験できないような出会いや、その土地独特の風景に満ちている。良いことも悪いこともたくさんあり、大きな喜びに繋がる出来事も多くあれば、さざなみのように細かなストレスとして心身を削ってしまうこともある。それらを乗りこなしていくためには、本人の努力や周囲の方々からのサポートなど並々ではないものが必要であり、挫けない気持ちと適度な遊び心が必要である。

学生としての立場では、欧洲においての学生生活は日本とはかなり異なる。学生が研究に本格的に参加していく機会が生まれるのは博士課程に入ってからとなることが多く、修士課程までのカリキュラムはとても緩やかである<sup>\*2</sup>。修士課程1年目は研究に触ることは全くないと言ってよく、現地の学部生よりはすこし発展的な授業や演習を受け試験をパスすることが目標となる。体感的には授業の内容などは日本の学部4年生程度のものを感じられた。修士課程2年目あたりから卒業のための簡単な研究を始めることになる。一方、日本の修士課程では1年目からすでに研究者として最初の段階に挑戦するため、望遠鏡の観測プロポーザルを作成することや、論文の執筆に取り掛かることは珍しくないのだと理解している。私はこのミュンヘンでの学生生活を送って

いる最中、SNSを見ては日本の学生と自分を比べていた。少し前まで同じように肩を並べていたはずの同学年の友人がどんどん研究者になっていく姿が見えた。このとき感じた私の焦りの気持ちは筆舌に尽くしがたいものがあった。

このとき実は、あまりの焦りや慣れない環境への負荷から、精神的に厳しい状態になり、うまく日常生活を送ることができなくなってしまった。自分自身に対して毎日無理な予定をたてて勉強をしたり、独自で研究をしようと努力していたことが空回りして、ノイローゼのようになったようであった。実際、一度日本に戻って半年ほどの静養が必要となってしまった。その間も休めばいいだろうに、何かせねば申し訳ないと実家近くの倉庫にてアルバイトなどをしていた。とんでもないほどの迷走ぶりであった。

この後なんとか再びドイツに戻り、無事に修士課程を修了することができたのは本当にありがたいことだった。両親をはじめ、ドイツにいてサポートしてくださった日本人研究者や現地の教官、そしてその周囲の皆様のおかげであり、本当に頭があがらない。迷走と空転ぶりを發揮し、あらゆる意味で回り道をしていたとはい、このときの経験は今思い返すと何一つ無駄ではなかったと感じる。厳しいときを乗り越えるために、自分との付き合い方を真剣に考えた経験は今に至るまで自分の血肉として生きている。もし何か今の状況に辛いものを感じている学生の方などが本記事を読んでくださっているなら、こんなギリギリのところからでもまだなんとかやっている例があるということを知って、少しは励みにしていただければ幸いである。

<sup>\*2</sup> あくまで5年から10年以上前のことなので現在では状況は大きく違うかもしれない。少なくとも私の経験した範囲内では、ということに留意していただきたい。

## 2. 研究を開始する

研究ができる！ジュネーブに到着して感じたこの思いは、修士課程で弱りきった経験をし、ようやく次の段階へ進んだ私にとって何よりも嬉しいものであった。さらに、欧洲ではすべての博士課程の学生に給料が出るので、自立した生活が可能となる<sup>\*3</sup>。研究ができ、それで生活できることは様々な面でも本当に解放されたような気持ちになつた。

引っ越しなども落ち着いた頃、指導教官とともにこれから進める研究テーマをどうするかという話になった。提示されたテーマは、ALMA望遠鏡を使って遠方銀河のダストの性質を調べる研究、もう一つは当時現役で活躍をしていたSpitzer宇宙望遠鏡のデータを使い、ハッブル宇宙望遠鏡（HST）では検出できないダストに隠された銀河を探査することだった。どちらのテーマを取っても、新たな挑戦が待ち受けていると感じ胸がときめいた。

もともと ALMA 望遠鏡での研究を修士課程で齧っていたこともあり、ALMA 望遠鏡による研究を選択した。今思うと、Spitzer を使った研究もその後のジェームズウェップ宇宙望遠鏡 (JWST) での観測などを見越した非常に優れたテーマであり、改めて素晴らしい研究テーマを提示してくださっていたと感じる。それからは、指導教官は彼のもともとの専門分野でもある HST を使った遠方銀河の静止系紫外光の観測的研究を行い [1]、そして私が ALMA 望遠鏡を使ったダストや微細構造線を用いた星間物質の観測的研究を行う、というチームわけで分担して研究を進めることとなつた<sup>\*4</sup>[2].

### 3. ALMA望遠鏡ラージプログラム とともにやってきた転機

研究を行うなかで全く予想していなかったものを見にし、驚きとともに心踊った経験は多くの研究者が持つのではないだろうか。私にとって、博士課程で始めたALMA望遠鏡を使った観測的研究は驚きの連続であった。毎日新しい風を肌に感じる日々は、特にALMA望遠鏡のラージプログラムに参加したことにより強くなった。このような一国の規模を超えた大きなプロジェクトに多数加わり最先端の研究に携わっていくことは、欧州をはじめ日本国外で研究を行う醍醐味ではないかと思う。

### 3.1 ALPINE

初めに、ALMA Cycle-5の遠方銀河観測ラージプログラム ALPINE[3-5] に参加することができた。ALPINEでは、その頃ちらほらと検出報告が上がり始めていた、赤方偏移4から6程度の銀河から放たれる一階電離した炭素からの輝線とダストからの連続光 [6] についての観測的研究を一挙に推し進め、合計118個の銀河の星間物質の性質を詳細にわたり観測する意欲的なプロジェクトであった。私はもともとはそのラージプログラムの共同研究者ではなく、また私の指導教官も大きくなは関わっていなかった。幸運だったのは、ジュネーブ大学にはもう一つの銀河研究グループを率いる、ALPINEの共同PIのDaniel Schaerer氏（現・ジュネーブ大学教授）がおり、自分たちの隣の部屋でいつも研究をしていたことである。

私は、部屋が隣であるということやたまにミーティングをしていたこともあり、機会を捉えて Daniel Schaeerer 氏に頼み込んでデータを見せて

\*3 逆に言うと、給料の出ない博士課程はなく、財源は限られており博士課程に入るための競争も熾烈である。

\*4 ジュネーブ天文台はノーベル賞を受賞されたMichel Mayor名誉教授らを代表とする系外惑星観測のメッカであり、銀河の研究をしている研究者はかなり少数派である。私が所属したのもPascal Oesch教授、そして現在は研究職を離れられたStéphane De Barros研究員、そして博士研究員の私というとても小さい研究チームだったが、小さなグループだからこそ何を言っても挑戦させてくれる雰囲気があり、とても性に合った。

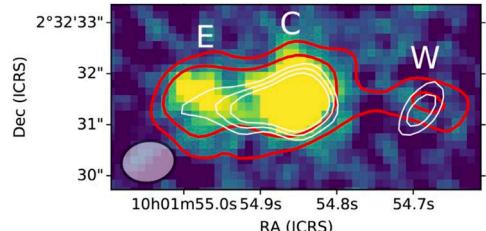


図2 ALMA ラージプログラム ALPINE にて観測された銀河の一つ。中央の C で示されている銀河が本来の観測ターゲットであり、E と W で示されている銀河は観測して初めて C と合体途中の銀河であることが判明した。特に W の銀河は K バンドで検出ができていないダストに隠された銀河である。背景は VISTA 望遠鏡による K バンドの画像、太い実等高線は一階電離した炭素からの輝線、細い実等高線はダストからの連続光を表し、左隅の楕円は ALMA のビームサイズを示す。[7] より引用。

もらうことができた。その際、私がデータをじっくり見ているとき、ダスト連続光のデータがどうもおかしいことに気づいた。本来の ALMA 望遠鏡の観測時間から期待できる感度と比較するとほぼ半分ほどしか感度が得られていなかったのである。ALPINE のデータ処理チームに連絡をして事情を聞くと、基礎的なデータ解析のための人員が全く足りておらず手が回っていないそうであった。ちょうどそこに現れた、比較的暇そうな学生である私はすぐに正式に共同研究チーム、それもデータ解析の中心的な役割を担うことになった。新たな挑戦を始めるためには、いるべき場所にいてあげるべき声をあげる、ということの重要性を強く感じた。

共同研究チームが皆で ALPINE のデータを解析していくなかで、興味深いものがいくつも見つかってきた。その中でも最も興味深い結果として見えてきたのは、本来の ALMA で期待していた成果や観測ターゲットの観測結果ではなく、その周辺に予想外にも映り込んできた現象であった。例えだとある銀河は、初めは 1 つの銀河だと思っていたものが、ALMA で観測してみると実は 3 つの銀河が合体する途中であるという珍しい状態にいることがわかった。さらに、その 3 つの合体途中の銀河のうち 1 つは、地上望遠鏡の可視・近赤外観測では検出できないほどに濃い星間ダストに埋もれていた [7] (図2)。高赤方偏移の銀河を観測していくなかで、ターゲットとして狙った銀河が複数の銀河を巻き込む合体の最中であり、そのうちの 1 つがそもそも地上観測では見えないほどダストに埋もれていた、というような現象は観測前には予想されておらず、観測して初めて判明したサプライズでもあり、それぞれがすぐに論文として出版可能な興味深い発見であった。このときに経験した、「観測して始めてみえる現象を観察し、そこから新たな研究テーマを開拓する」ことはそれ以来の私の研究にとって重要な指針の一つとなっている。

### 3.2 REBELS

ALPINE のデータ解析と研究が早くも一段落したころ、次年度の ALMA ラージプログラムが決まった。これまでもたびたび共同研究をさせていただいている Rychard Bouwens 氏（現・ライデン大学准教授）が獲得した REBELS という名の ALMA 望遠鏡ラージプログラムである [8]。内容は ALPINE と似ているようで大きく異なり、ALPINE よりもさらに遠方、赤方偏移 7 から 8 程度の銀河のダスト連続光と微細構造線の観測を行うものであった。

このとき、私にとって幸運だったことは、すでに ALPINE という似通った ALMA 望遠鏡の大型観測を経験していたため、どのようなテーマで研究をすれば面白い結果を残せるかについて、ある程度目星がついていたことである。それは上記 ALPINE を通して経験してきた「ターゲットにしている銀河以外の場所から見えてくる予想もない現象」である。

實際には、この研究テーマを選んだ理由はほかにある。共同研究を進めるなかで研究者それぞれが担当する研究テーマを決めるのだが、その際

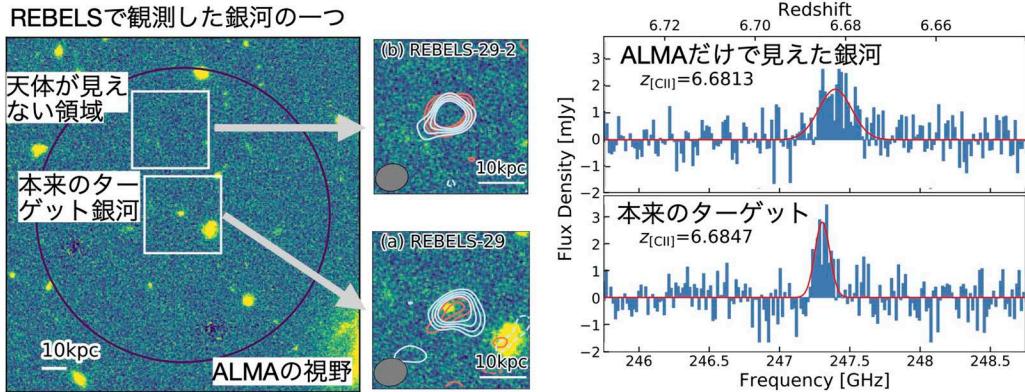


図3 REBELSにて私が発見した新たな銀河の一つ。左図はHSTの赤外観測画像を背景にALMA望遠鏡による観測視野を示し、中央と右の図にて、HSTで明るく見える本来のターゲット（右下図）とHSTでは全く見えない箇所（右上図）からALMA望遠鏡が輝線とダスト連続光を検出した様子を示している。

手堅い主要なテーマはPIとその学生が担当することがほとんどである。研究プロジェクトの立ち上げとその進行に最も貢献した方が、主要な「堅い」研究テーマを進めることは自然な流れだからだ。そのため外部から参加した私としては、共同研究者同士の間でも競争率の高い主要な研究テーマに食い込むことは難しいとすでに諦めていた。しかしながら、もともと狙っているターゲット以外になにか面白いものが見えたならそれを担当するということは、一見すると重要なテーマをそのほかの方に譲った形でいてその実、一番面白いところを取るものであると確信していた。実際に担当が決まったときには、もらった！と思ったものである。

実際に研究を始めてみたところ、自分が期待していたよりもはるかに面白いものが見えてきた。特に目立っていたのが、ALMA 望遠鏡で観測ターゲットとして狙った銀河以外にも、視野内に輝線とダスト連続光を出す銀河が赤方偏移 7 度程に検出されていたことである [9] (図3)。まさに観測して初めて見えてきたターゲットが浮かび上がりってきた形になる。この輝線とダスト連続光を出す銀河はどんな性質を持っているのだろうか、と調べ出したところどうもおかしい、今までそん

な位置に天体がいることはどこにも記録されていなかった。実際に、当時公開されていたHSTやSpitzer、すばるなど様々な観測データを見ても、この位置には天体などいないはずだった。しかし、実際にALMA望遠鏡により検出されているシグナルはあまりに強力で、誤検出ということはあり得ない。

様々なデータと比較し、可能性を検証していく結果、残された結論はこれがHSTを含め当時の可視・近赤外望遠鏡では検出できない、赤方偏移7程度にあるダストに隠された銀河であるということだった。当時、赤方偏移7を超えるような遠方銀河の観測はすばる望遠鏡やHSTをはじめとする可視・近赤外望遠鏡の独壇場であった。初期宇宙においては銀河はまだまだ若く、星間ダストなどを大量に生み出す時間は十分にはないため、遠方銀河はダストをあまり持っておらず可視・近赤外望遠鏡によりすべて検出可能である、ということが主流な前提として研究が行われていた[10]。そこでみると、このALMAでしか見えないダストに隠された遠方銀河の発見は、これまでの遠方銀河についての前提を覆すともいえる発見であった。

実はこの当時、長かった博士課程も残り1年と

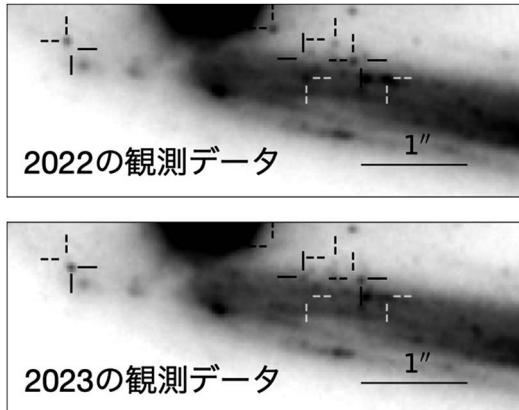


図4 JWSTで観測した赤方偏移0.73の銀河に見える個別星。重力レンズ効果の変動を利用して観測するため、個別星は観測を繰り返したときに現れる変動現象として観測される。2022年の観測と2023年の観測で現れている個別星をそれぞれ破線と実線を用いて位置示している。  
[11] より引用。

なっていて、指導教官から、博士課程の最後のプレゼントとして、アメリカに行って共同研究をすすめたり見識を広めてくるように、という機会をいただき3週間程度の予定でパサデナにあるカリフォルニア工科大学・IPACに出向いていた。忘れもしないあのとき、私はパサデナにあるSAGAモーテルという、いかにもモーテルという雰囲気の宿の一室に宿泊していた。この発見にとても驚き、チームとの相談の後すぐさまそのモーテルの一室でNatureに出すための論文を書きはじめた。その後は、新型コロナウイルスによるパンデミックが始まり、私の博士課程修了はその真っ只中となるなど様々な困難に見舞われたものの、大きな問題もなく修了することができ今に至る<sup>\*5</sup>。

#### 4. 重力マイクロレンズ

次に私の新たな扉を開いてくれた研究は、遠方銀河内部の個別恒星の観測である。約30年前の論文にて予言された現象であるが [12]、2016年になつて初めて観測例が報告された [13] という、天文学観測にとっても史上初めて出くわす観測対象であると言っても過言ではない。文字通り、遠方銀河内部の恒星を一つ一つ個別に検出し、その星種族などといった詳細を正確に調べることができる。

通常、宇宙論的な遠距離にある銀河は、それを構成しているガスや星などを一つの塊として観測することしかできず、どのような大口径の望遠鏡をもってしても、その構成要素を一つ一つ個別に分解して観測することは不可能である。しかし、2つの重力レンズ現象が重なり合った時、通常では不可能な観測が可能になる。1つ目は近傍の銀河団などに付随する巨大質量の暗黒物質による重力レンズ現象である。この暗黒物質の作る時空の歪みによる大規模な重力レンズ効果は、臨界曲線周辺において遠方にある銀河に対して約数百倍の増光効果を与えることができる。2つ目は、銀河団内部に存在する微小構造がピンポイントで作り出す小規模な重力レンズ効果である。この微小構造により、すでに増光を受けている遠方銀河内部の微小構造だけに対して数倍から10倍程度の増光効果が与えられる。この2つの重力レンズ構造による増光効果の掛け合わせにより、遠方銀河内部の極めて微小な点源に近い構造に対して数百倍の増光効果が与えられる。銀河団そのものの固有運動、またその内部の微小構造の固有運動があるため、2つ目のマイクロレンズ構造は常に時間変動する。そのため、遠方銀河内部の個別恒星は時

<sup>\*5</sup> パンデミック当時感じたことの記録としていくつか書き留めておくと、当時ヨーロッパはじめスイスでも大きな行動制限が課された。もともと手洗いはおろかうがいなどといったことをする人は少なかったものの、ようやく周囲の人々がパンデミック以前の日本人と同じ程度には手洗いをするようになったことに喜んでいた。行動制限はあまり長くは続かなかった。2020年の夏、魚釣りが好きな私に博士課程修了のお祝いとして天文台の皆が魚釣りツアーやプレゼントしてくれたので、釣ってきた魚をバーベキューで焼いて皆で楽しんだ。

間変動する構造、つまり突発性天体、として観測されることになる。

すでに自分が研究を始める前に、様々な天体の中の個別恒星の観測は報告されていた。正直なところ、自分が関わるとは思ってもみなかったのである。あるとき、共同で研究プロジェクトを進めていたFengwu Sun氏（現・ハーバード大学研究員）が、赤方偏移0.73にある天体の中で非常に数多くの突発性天体が起きていることを教えてくれた。何十個も遠方銀河の中で点滅している構造があり、そのすべてが重力レンズされた個別恒星であった。実際にJWSTの観測画像をみたとき、あまりにも現実離れした光景に見惚れていたことを覚えている。

通常、突発性天体の探査を除き、銀河の内部構造は時間変化しないことに慣れている。遠方銀河はいつも同じ姿をしていると頭の中で前提として思っている。ただこの時見た銀河は、これまで見られなかったほど多数の個別恒星が現れては消えているため、その中の構造が1年以下という短い時間で大きく変化し、まるでアニメーションを見ているようであった。「これは新しい！」と思わずさま飛びついた。解析を進めれば進めるほどこの観測手法の可能性の大きさに気づくと共に、さらには過去最高数の個別恒星観測を短時間で可能にしているJWSTの観測能力に驚愕した[11]。

この新しい観測分野は、自分自身も今後どのようなことが可能になっているかは予想しきれないほどの可能性があると考えている。共同研究者の作っている論文を読むたびにその適用範囲の広さに驚かされる [14]。ありがたいことに、JWST Cycle-4 にて、私を PI とする観測提案が無事に採択され、微力ながら引き続きこの新しい観測分野へも引き続き貢献できることとなった。

## 5. 今後の研究

ミュンヘンに一人きりでスーツケース一つで渡った頃からは想像もできない環境にいま、身を置いている。論文をいくつも発表できており、まだまだ研究してみたいものや、新しいものは途切れることなく次々と目の前に広がっている。こういう言い方は良くないかもしれないが、自分は周りと比べ特別優秀というわけではなく、ただ、人に比べて直感だけは冴えているように考えている。そもそもの始まりとして海外に渡り住もうとするときに、なぜ一度も行ったことがなく縁もゆかりもないミュンヘンを選んだのかの判断は、その多くの部分を直感に頼って決めており、詳しく説明することは難しい<sup>\*6</sup>。その後、スイスにいるPascal Oesch氏のところに是非行こう!と思った理由もかなりの部分が直感に依っている<sup>\*7</sup>。なんとなく、と言ってしまえば身も蓋もないが、直感に従ってそれが最善であると信じ、最後まで行動した結果には今のところ裏切られたことはなく、日本国外で大学院生を送ったのは人生最良の選択の一つである。

人によって得意なことや不得意なことはさまざまあると思う。人と比べて落ち込んでしまうのは多々あり仕方がない。ミュンヘンで同年代の学生の活躍に焦っていた自分にもし今声をかけるとしたら、焦らず自分を信じて思ったように頑張り、ただたまには力を抜いて遊んだり休むことが大切だ、と当たり前のこと伝えたいだろうか。少なくとももし、いま同じように同世代の他の人の活躍に焦るなどして、無理をしている若い学生がいるなら同じことを言うだろう。

私がこれまで行ってきた研究は、そのときの縁や出会いに支えられてきたものが多い。ALMA

\*6 授業料が無料で、かつ外国人にも入学しやすいシステムとなっていたことや、当時遠方銀河の観測的研究で非常に突出した成果を出していた研究グループがあったことは間違いない理由ではある。

<sup>47</sup> 私が修士課程で集中して勉強していたのはサブミリ波銀河など、Oesch 氏の専門とは分野的には真逆のものが多かった。

のラージプログラムに参加したことをはじめ、JWSTを使って遠方銀河内部の個別星を探査することなども、自分で見つけてきた面もあるものの、共同研究をしている方に引き込まれていった場面が多い。今後も、そのような研究も行うなかで、独自に研究したいことが数多くある。これまでできたような、天文学の新たな扉を開く一助となれば、全く言うことがない。

### 謝 辞

この度は、2024年度日本天文学会研究奨励賞という大変貴重な賞をいただくことができました。大変光栄に思うとともに、今後ますます研究を盛り上げていこうと身が引き締まる思いです。まず初めに京都大学で天文学へと導いてくださった太田耕司教授、そしてミュンヘンで学生をしているときに、無知な学生の私の話を親身に聞いていただき、その後もミュンヘンを出るまで暖かく見守ってくださった小松英一郎教授に心よりお礼を申し上げます。今回の記事は、ミュンヘン周辺とその後の私の生活を、恩人である太田教授、小松教授に報告をさせていただく気持ちで執筆しました。さらに、いまのことあるごとに世話を焼いてくださる指導教官のPascal Oesch氏に心よりお礼を申し上げます。Oesch氏の仔まいからは、研究者としてだけではなく人間としての落ち着いた生き方を学んだように思います。研究員として、ともに天文学に新たな扉を開ける手伝いをさせていただけた井上昭雄教授、大栗真宗教授にも特にお礼を申し上げます。すべての方の名前を挙げることは紙面の都合上不可能ですが、研究と私生活ともにこれまでお世話になってきた、故Adi Paudlach教授、市川幸平准教授、稻見華恵助教、梅畑豪紀助教、江上英一教授、太田一陽准教授、日下部晴香助教、菅原悠馬講師、田村陽一教授、Daniel Schaefer教授、任毅さん、橋本拓也助教、Fengwu Sun フェロー、Miroslava Dessauges-Zavadsky フェロー、Michele Ginolfi助教、

Mengyuan Xiao研究員、Rychard Bouwens准教授、Renske Smitフェロー（五十音順）にこの場をお借りしてお礼を申し上げます。また、故郷を出て以来、様々な場所を旅しながら研究をしてきた私をいつも支えてくださる私の両親、兄弟をはじめ親戚の皆さんに心よりお礼申し上げます。特に、加藤孝明氏には長年の多大なるサポートをいただきました。ここに心より感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] Oesch, P. A., et al., 2018, ApJS, 237, 12
- [2] Fudamoto, Y., et al., 2017, MNRAS, 472, 483
- [3] Le Fèvre, O., et al., 2020, A&A, 643, A1
- [4] Faisst, A. L., et al., 2020, ApJS, 247, 61
- [5] Béthermin, M., et al., 2020, A&A, 643, A2
- [6] Capak, P. L., et al., 2015, Nature, 522, 455
- [7] Jones, G. C., et al., 2020, MNRAS, 491, L18
- [8] Bouwens, R. J., et al., 2022, ApJ, 931, 160
- [9] Fudamoto, Y., et al., 2021, Nature, 597, 489
- [10] Zavala, J. A., et al., 2021, ApJ, 909, 165
- [11] Fudamoto, Y., et al., 2025, Nature Astronomy, 9, 428
- [12] Miralda-Escudé, J., 1991, ApJ, 370, 1
- [13] Kelly, P. L., et al., 2018, Nature Astronomy, 2, 334
- [14] Li, S. K., et al., 2025, arXiv e-prints, arXiv: 2506.17565

### Researches in a Journey

**Yoshinobu FUDAMOTO**

*Center for Frontier Science, Chiba University,  
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan*

**Abstract:** The Universe has been born through the Big Bang  $\sim$ 13.8 billion years ago. Understanding how galaxies were formed, how they created stars, and how elements were synthesized within them during the first billion years after the Big Bang is one of the most crucial questions in modern astronomy. In recent years, observations with facilities such as the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) and the James Webb Space Telescope (JWST) have advanced our ability to explore these early galaxies through multi-wavelength data. In this article, I will introduce some of the recent progress in this rapidly developing field, as well as share my experiences pursuing graduate studies abroad in Germany and Switzerland. Both in science and in life, I have encountered many unexpected life-changing events. I would like to share some of those experiences.