

# 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 千葉県千葉市稲毛区弥生町 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ブ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するとともに、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

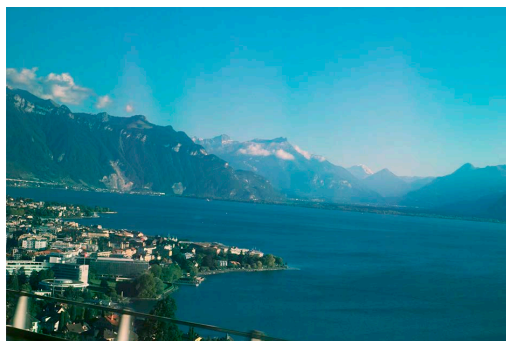


図1 ジュネーブに向かう道中、バスの窓から見たスイス・ローザンヌ周辺の山々。2016年。

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ってほしいと思う。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。

<sup>\*1</sup> 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、ボ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、例えばスイスでは博士課程は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ぞれ千差万別である。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、欧州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トドクや学生が新たなチャンスをつか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。それらを乗り越えていくためには、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、欧州における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年目は研究に触れ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年生程度のもののように感じられた。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、ノイローゼのような状態であった。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。迷走と空転ぶりを発揮し、あらゆる意味で回り道をしていたとはいえ、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。



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。例えばとある銀河は、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たことがわかった。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。

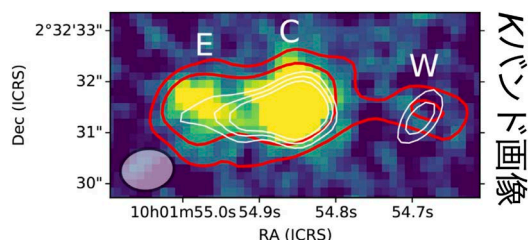


図2 ALMA ラージプログラム ALPINE にて観測された銀河の一つ。中央のCで示されている銀河が本来の観測ターゲットであり、EとWで示されている銀河は観測して初めてCと合体途中の銀河であることが判明した。特にWの銀河はKバンドで検出ができていないダストに隠された銀河である。背景はVISTA望遠鏡によるKバンドの画像、太い実等高線は一階電離した炭素からの輝線、細い実等高線はダストからの連続光を表し、左隅の楕円はALMAのビームサイズを示す。[7] より引用。

### 3.2 REBELS

ALPINEのデータ解析と研究が早くも一段落したところ、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た 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しない現象」である。

実際には、この研究テーマを選んだ理由はほかにもある。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

## REBELSで観測した銀河の一つ

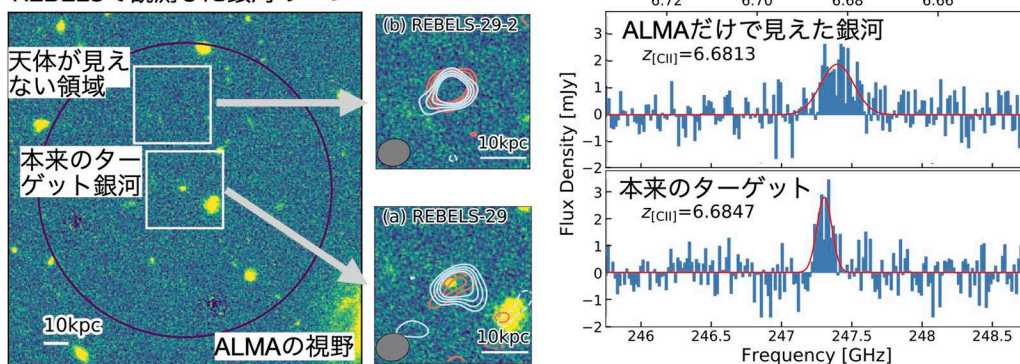


図3 REBELSにて私が発見した新たな銀河の一つ。左図はHSTの近赤外観測画像を背景にALMA望遠鏡による観測視野を示し、中央と右の図にて、HSTで明るく見える本来のターゲット（右下図）とHSTでは全く見えない箇所（右上図）からALMA望遠鏡が輝線とダスト連続光を検出した様子を示している。

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程度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

な位置に天体があ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るとあり得ない。

様々なデータと比較し、可能性を検証していった結果、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

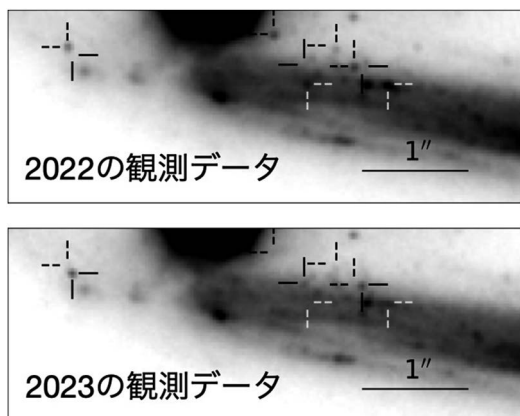


図4 JWSTで観測した赤方偏移0.73の銀河に見える個別星。重力レンズ効果の変動を利用して観測するため、個別星は観測を繰り返したときに現れる変動現象として観測される。2022年の観測と2023年の観測で現れている個別星をそれぞれ破線と実線を用いて位置示している。[11]より引用。

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。忘れないあのとき、私はパサデナにあるSAGAモテルという、いかにもモ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年になっ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て、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を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。



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索することなども、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き気持ちで執筆しました。さらに、いまでも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氏の佇まいからは、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別にお礼を申し上げます。すべての方の名前を挙げき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 Pauldrach教授、市川幸平准教授、稲見華恵助教、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 Schaerer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ま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 ~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.