

宇宙再電離期のダストに隠された 普通の銀河



札本佳伸^{1,2}

〈¹国立天文台・アルマプロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈²早稲田大学 理工学術院総合研究所 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1〉

e-mail: y.fudamoto@aoni.waseda.jp

これまで、遠方銀河の観測ではすばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡といった可視光・近赤外線望遠鏡が活躍してきました。これらの観測では、遠方銀河からの静止系紫外光を効率的に検出することができます。しかしその一方で、大量のダストに覆われ紫外光が外に出られないような銀河は検出が難しく取り逃がしてしまうことが知られています。このような大量のダストに隠された銀河は、赤方偏移が6を超えるような宇宙では極端な環境にしか存在せず、極めて稀であると考えられてきました。我々はアルマ望遠鏡による観測によって、赤方偏移7にあるダストに完全に隠された銀河を発見しました。今回見つかった銀河は今まで発見されてきたダストに隠された爆発的星形成銀河などと比べると赤外線でも比較的暗く、星形成率が赤方偏移7周辺にある典型的な星形成銀河と同程度のものであると考えられます。これらダストに隠されているということ以外は「普通」の銀河はこれまで考えられていたよりも多数存在し、そしてこの発見はこれまでの宇宙再電離期における銀河形成への我々の理解は未だ不完全であるということを示唆しています。

1. これまでの遠方銀河観測

1.1 輝く銀河

子供の頃、家からすこしはなれたところにある本屋さんでみつけた科学雑誌に、ハッブル宇宙望遠鏡が撮影したとてつもなく美しい銀河の写真が掲載されているのを目にしました。ひと目でその美しさに魅せられて以来、私が進路を選択する先にそれらの美しく謎めいた銀河の姿が存在していました。そのような銀河の美しさはこれまで多くの人を惹きつけ、たくさんの研究者が銀河の謎を解き明かそうと日夜努力を重ねてきました。

絶えることのない努力と研究の結果、いま私たちは我々の住む天の川銀河をはじめとして、現在の宇宙に存在する成熟した銀河から、過去の宇宙を遠くまで遡り宇宙年齢の95%以上前に存在し

た生まれたての銀河まで、様々な銀河を直接観測することに成功しています。これらの観測から、宇宙が生まれて以来どのようにして銀河が形作られてきたのかの歴史が解き明かされてきました^[1]。

21世紀に入ると、SDSSサーベイをはじめとする大規模銀河探査の時代がやってきました。そこから現代にいたるまで地球から遠くはなれた銀河の研究を最も率いてきたのは、すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡などをはじめとした可視光・近赤外線望遠鏡による観測です。これらの望遠鏡は早くから観測技術が進歩し、現在では極めて感度が高く、そして広い視野で銀河を始め様々な天体を観測することが可能になりました。これらの観測技術のさらなる進歩によって今後、いっそう予想もしなかった宇宙の姿とそこにある美しい銀河の姿、そしてその形成の歴史が明らかになっ

ていくと期待されています。

1.2 「見えない」銀河

しかしながら、可視光・近赤外線望遠鏡だけでは宇宙にある銀河のすべてを見つけることは困難である、ということもやがて研究が進むにつれてわかってきました。その理由は、これらの望遠鏡では「見えない」銀河が存在するということが判明してきたからです。なぜ可視光・近赤外線望遠鏡では見えない銀河があるのでしょうか。それを理解するためには銀河を構成している重要な要素の一つである「ダスト」に注目する必要があります。

すばる望遠鏡をはじめとする可視光・近赤外線望遠鏡では遠方銀河から放たれた紫外光を観測しています*1。銀河から放たれる紫外光を観測することで、遠方にある星形成銀河を効率よく発見し研究することができます。一方で、この紫外光の重要な特徴の一つに、銀河の内部にただようダストによって非常に強く吸収・散乱されるということがあります。これらのダストは星の内部で生み出された炭素やケイ素などからなる微小な物質によってできており、あらゆる銀河に存在しています。この紫外光を吸収・散乱するというダストの性質により、遠方銀河の可視光・近赤外線を使った遠方銀河の観測では、あらゆる銀河は多かれ少なかれダストによる減光の影響を受けています。

そして、銀河の中にはダストを特別大量に持ったものも存在します。特に、星が大量に生まれているような星形成活動が非常に活動的な銀河の内部ではダストを作り出す星も数多く活動し、それらの大量の星から放出されることによって莫大な量のダストが存在します。そして時にはそのダストが銀河全体を覆い隠すほど濃くなってしまいうこともあります。

非常に濃いダストに覆われた銀河からは、その

中でどのような星が輝いていようと、銀河内部で出る光は大部分がダストに吸収され銀河の外に出られなくなってしまいます。我々が遠方銀河を探す際に頼っている銀河の紫外光は特にダストに吸収されやすいことから、そのような濃いダストを持った銀河は可視光・近赤外線では全く見えなくなってしまいます。これが可視光・近赤外線では「見えない」銀河が存在する理由です。

2. ダストに覆われた銀河の発見と研究

2.1 爆発的星形成銀河

1997年、ハワイにあるサブミリ波望遠鏡James Clerk Maxwell Telescopeが850 μm の波長を使った電波での観測から、遠方の宇宙からやってくる非常に明るい信号を検出し、それが遠方銀河に存在する大量のダストからの放射であることがわかりました[2]。電波で見える銀河からの放射は、紫外光を大量に吸収して温められたダストが放つ光であり、そこにダストに隠された銀河の活動が存在することを示しています。この発見は、これまで可視光・近赤外線観測では知ることのできなかった銀河の活動が存在することを新たに示しました。そしてこの発見から現在に至るまでこれら可視光・近赤外線では見えない、ダストで覆われた銀河の研究が精力的に行われてきました。

研究の結果、こういったダストからの放射が非常に明るい銀河は「爆発的星形成銀河」（または「スターバースト銀河」と呼ばれる、恐ろしく活発に星の形成を行っている銀河が主なものであるということがわかってきました。その名前が示す通り、これら爆発的星形成銀河は普通の銀河と比べても何十倍、何百倍もの速度で星が作られており、作られた大量の星が莫大なエネルギーを放射しています。これらの爆発的星形成銀河は極端に

*1 遠方銀河で放たれた紫外光は、宇宙膨張による赤方偏移によって波長が伸び、我には可視光や近赤外線の波長で観測されます。

早いペースで星を生むため、その星の作り出すダストも大量に存在するようになり「見えない」銀河となったと考えられています。

このような爆発的星形成銀河はあまりに極端な存在であるために「宇宙の中の変り者」ともいえる、数の少ない珍しい銀河であると考えられています。どのようにしてこれら爆発的星形成銀河が生まれ、そしてどのような進化を遂げるのかを理解することは銀河形成全体を理解するうえで非常に重要な課題の一つです。

2.2 ダストに隠された「普通」の銀河

一方で、近年、爆発的星形成銀河とは異なり、より一般的な性質を持った普通の銀河にもダストに完全に隠されているものがあることがわかってきました。ここでいう「普通の銀河」とは星形成活動や星質量が、数多く存在する他の平均的な銀河と大差ない銀河を指します。これらのダストに隠された普通の銀河は、先ほどの爆発的星形成銀河と比べてもある程度「普通」な銀河であるが故に、赤方偏移4程度の宇宙においてもかなりの量が存在することがわかり始めてきました [3]。

しかしながら、これらのダストに隠された普通の銀河がどれくらいの量、どれほど初期の宇宙から存在し、またそれが銀河の進化全体の中でどのような役割を担っていたのかはいまだに全くよくわかりません。ダストに隠されているが故に可視光・近赤外線では見えず、そして電波でもさほど明るくない銀河を発見し研究するには、アルマ望遠鏡による超高感度の電波観測が必要不可欠です。しかし、これまでどこにあるのかもわかっていなかったような、暗くダストに隠された超遠方にある銀河の発見はアルマ望遠鏡をもってしても極めて困難でした。

3. アルマ望遠鏡による観測と発見

今回、我々は現在知られている中で最も遠方に

存在するダストに隠された銀河を全く思いもよらなかつたところから発見しました。

アルマ望遠鏡は、2020年より大規模探査プロジェクトの一つとして遠方銀河の候補となる40個の天体の探査を行っていました。国際研究プロジェクト Reionization Era Bright Emission Line Survey (略称REBELS) と呼ばれる探査では、赤方偏移が6.5 (約130億年程度過去の宇宙) を超えるような遠方銀河に対してダスト連続光と、電離炭素や電離酸素からの輝線*2を探して探査を行っています。この探査プロジェクトによって、一度に多数の遠方銀河の赤方偏移を正確に決め、銀河内部のガスの構造を研究し、そしてそれらの銀河におけるダストに隠された星形成活動の探査をも一挙に行うことができる、非常に意欲的な観測プロジェクトです。これほど多数の遠方の銀河を一度にアルマ望遠鏡で観測することは初めてのことです。

アルマ望遠鏡は世界的な新型コロナウイルスのパンデミックという困難に直面し、観測が約一年程度中断せざるを得なくなりました。それに伴い、REBELSの観測も中断し、データを心待ちにして準備を進めていた研究チームも非常に困難な時を過ごしました。現在、様々な方の努力により観測を再開したアルマ望遠鏡によって、REBELSプロジェクトは2022年中に観測をすべて終える予定です。現在は全観測のうち約85%程度まで完了しています。

4. ダストに隠された遠方銀河を発見

4.1 偶然の発見

今回、我々はREBELSによって観測したアルマ望遠鏡のデータの中でも特に、REBELS-12とREBELS-29と名付けた2つの銀河の観測データに注目して研究を進めました。

元々これら2つの銀河は、地上の望遠鏡やハッ

*2 [CII]158 μm と [OIII]88 μm 輝線

ブル宇宙望遠鏡，スピッツァー宇宙望遠鏡といった可視光・近赤外線望遠鏡をもちいた観測データの解析によって存在が知られ，赤方偏移7程度の極めて遠方にある銀河であることが予想されました．そして今回，REBELSの観測の結果，電離炭素からの輝線を検出から，これら2つの銀河は実際に赤方偏移7程度にある銀河であることが確定しました．これらの観測結果は，予想されていた非常に高い赤方偏移を確定させ，詳細な観測を行うという予測通りの結果が得られました．そしてさらに，これらのアルマによる観測データの中には全く予想もしていなかったものも隠されていました．

驚いたことに，我々はREBELS-12とそしてREBELS-29の場所から10秒角程度外れた場所からも非常に強い輝線とダスト連続光を検出しました(図1)．そして，これらの新たに見つけた輝線がそれぞれ元のターゲットとした銀河，REBELS-12・REBELS-29，と同じ周波数にて検出されていることが判明しました(図2)．これはREBELS-12-2とREBELS-29-2も同様に同じ赤方偏移を持つ銀河であることを示しており，それぞれ赤方偏移が6.68と7.35にある銀河であるとわかりました．以降，今回新たに検出した輝線を出す銀河をREBELS-12-2, REBELS-29-2と名付けます．

さらに驚いたことに，すでに得られていた高感

度の近赤外線の画像を調べてみたところ，これらREBELS-12-2とREBELS-29-2の輝線やダスト連続光の位置には近赤外線では何も見えていないということがわかりました(図1)．これは，REBELS-12-2とREBELS-29-2は，紫外光が銀河から外に出ることができずに吸収されている，ダストに隠された銀河であることを示しています．

特にそのうちの一つ，REBELS-12-2は，ダストに隠された銀河としては現在知られている中でも最遠方のものであることがわかりました．

4.2 赤方偏移7程度の見えない普通の銀河

今回我々は，新たに見つかった「見えない」銀河の性質をさらに詳しく調べました．これには，アルマ望遠鏡によって得られたダスト連続光や電離炭素からの輝線を用いることで進められます．ダスト連続光と電離炭素からの光は銀河内部の星形成活動と密接に関わりがあることが知られており，星形成活動が活発であればそれに比例して明るくなることわかっているからです[4]．

今回見つかったREBELS-12-2・REBELS-29-2の2つの銀河はダスト連続光や電離炭素でもそれほど明るくなく，この赤方偏移に存在することがわかっている多数の銀河と同じ程度の星形成活動を行っている，「普通」の銀河であることがわかりました．つまり，第2章で紹介した2種類のダストに隠された銀河のうち，今回見つかったもの

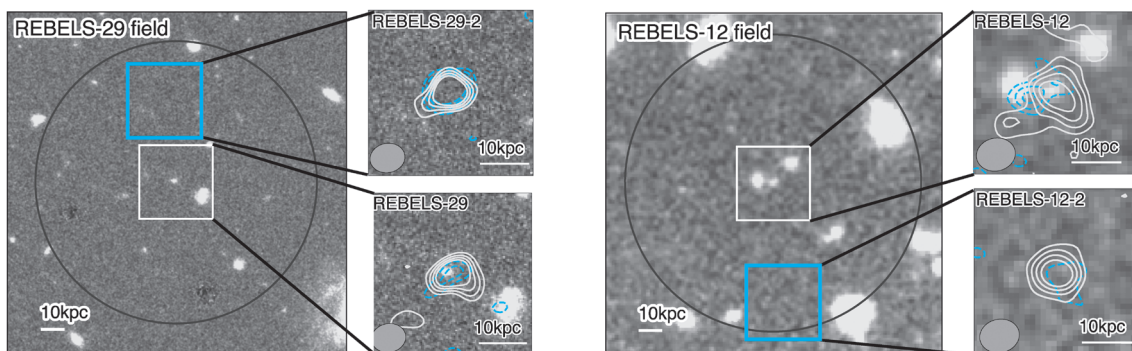


図1 左図：REBELS-29の天域．右図：REBELS-12の天域．それぞれの天域の背景には可視光・近赤外線画像を使用しています．そららの画像では何も見えていない場所から，アルマ望遠鏡によって強い電離炭素からの輝線（白色コントア）とダスト連続光（破線コントア）を検出しました．

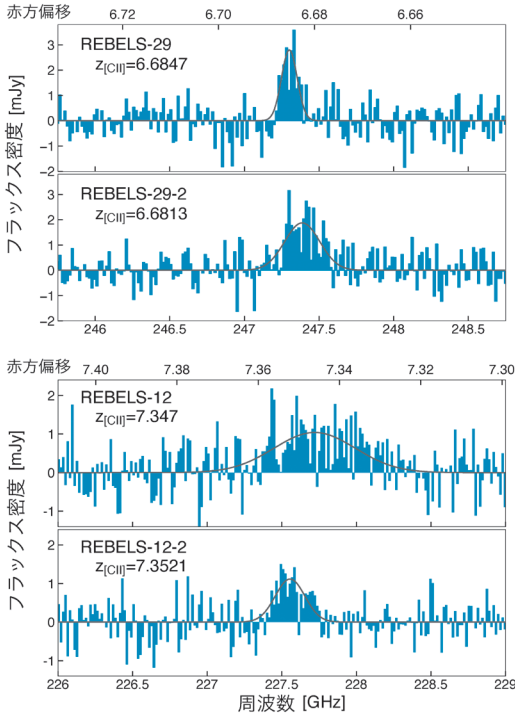


図2 REBELS-29・REBELS-29-2 (上段) と REBELS-12・REBELS-12-2 (下段) から検出した電離炭素 [CII] 輝線. それぞれのペアがほぼ同じ周波数から輝線を出しており, それぞれが同じ赤方偏移にあることがわかる.

は爆発的な星形成活動は行っていない, 「普通」の銀河がダストで隠されているものであるということがわかりました. これは, 赤方偏移7程度の宇宙で, ダストに隠されて見えない普通の銀河が存在するということを示した初めての発見となりました.

ダストに隠された普通の銀河が赤方偏移7程度にも存在する, という今回の発見に我々は驚愕しました. ただ特殊な珍しい銀河がダストに隠れて見逃されていたというわけではなく, 数多く存在するような普通の銀河がダストに隠れてこれまで見つけられずにいた, ということがわかったからです. こういった銀河は普通なありきたりな性質を持っているため, かなり数多く存在することが予想されます.

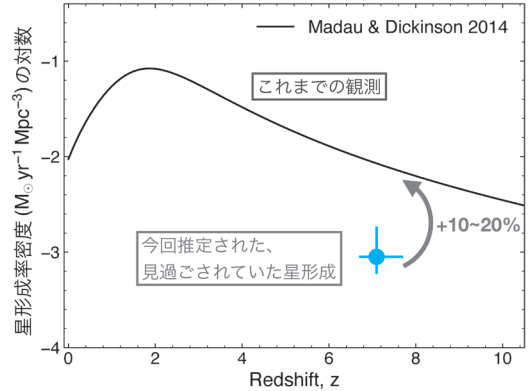


図3 今回新たに得た, 初期宇宙 (赤方偏移7程度) においてダストに隠された銀河がどの程度の星形成率密度を持つのかの推定を不訂正と共に推定した (青点). いまだ不定性は大きいものの, これまで我々は初期宇宙において10~20%程度の銀河を見逃していたことを示しています.

4.3 見逃されていた星形成活動

これらダストに隠されているために見つけられていない銀河は初期宇宙にどの程度存在し, そして我々はどれほどの量の星形成銀河をダストに隠されて見逃してきたのかを見積もりました. 今回, 我々は過去の研究から推定されている高赤方偏移宇宙での銀河密度の分布 [5] をもとに, 高赤方偏移宇宙におけるダストに隠された銀河密度の推定を行いました. その結果, これらの銀河は約2.8平方分に1個程度の密度と推定されました. これは銀河の個数密度として, 約5~10個に1個程度の割合でこれまで銀河がみえていなかったということとなり, 現在知られている宇宙の星形成密度としては10-20%程度を新たに加算する必要があります, ということがわかりました (図3).

しかしながら, 今回我々が発見した銀河は元々知られていた紫外光で明るい銀河のすぐ近くに存在しているため, 特に銀河の密度が高い環境にあると考えられます. このような密度の高い環境がどれほど存在するのか, また銀河の密度が高くない環境下にも同じようにダストに隠された銀河が

存在するの、などは今回の発見からはわかりません。そのためダストに隠された銀河が高赤方偏移の宇宙でどれだけ存在するのかを推定することは大きな不定性が伴い、正確な研究を行うにはさらなる観測が必要となります。

5. 今回の発見が意味するもの

5.1 宇宙再電離期の銀河活動への理解

現在、赤方偏移が6から7の宇宙で、この宇宙全体でおきた最後の相転移「宇宙再電離」が完了したのと考えられています。この期間までに、銀河のなかで生まれた初代星から放たれた紫外光によって銀河間空間に存在する水素原子が電離されました。初めて宇宙で星が輝き始めた時代にあたることから「宇宙の夜明け」とも呼ばれています。この宇宙再電離を理解するために最も重要で基礎的な知識は、その宇宙再電離のエネルギー源である、銀河の星形成活動への理解です。

しかしながら、今回の発見から、我々はこれまでのおおよそ初期宇宙において5~10個に1個の銀河を見逃してきたことがわかりました。これは、これまで我々が可視・近赤外線観測によって培ってきた初期宇宙の銀河像が不完全であることを示しています。宇宙再電離期において銀河がどのような成長を行っていたのか、そして宇宙再電離がどのように起きたのかを理解するためには、初期宇宙における銀河のさらなる観測が必要であると、今回の発見が示唆しています。

5.2 今後の観測

今回の観測により、ダストによって隠された普通の銀河を赤方偏移7程度の宇宙に発見することができました。今後さらに広い天域を、可視光・近赤外線以外の波長でより感度良く観測していくことが必要になります。その観測のためには、ジェイムズウェッブ宇宙望遠鏡による超高感度の中間赤外線観測、そして引き続きアルマ望遠鏡による探査が活躍すると大きく期待されます。特に、今回みられたように小さな領域に複数の銀河

が存在するような、銀河密度の高い領域についての探査は初期宇宙においてまだ進んでおらず、今後の観測によって急速に進展するのではないかと考えられます。

6. あとがき

これまで幸運にも REBELS を始め数々のアルマ望遠鏡を用いた遠方銀河の大規模探査プロジェクト参加させていただくことができました。様々な研究に関わらせていただくことや、また共同研究者の方の手助けを得て様々な経験をさせていただくことが出来ました。その中で、今回の研究をはじめとして最も印象的で重要なことは、「観測の中には常に予想外の発見が潜んでいる」ということを実際の発見と共に学べたことです。

数々の観測データを扱ううえで、観測プロポーザルを作成し研究計画を経て、計算を行い様々な考察を加えて論文として出版する。この作業を行ううえで、しばしば先行研究や他の研究者が行っている研究やその結果が重要な指針となるかと思えます。しかしながら、我々が相手にしているのは宇宙であり、常に宇宙は我々の想像や先入観をはるかに超えた、思いもかけないものをいまだ隠している、ということを忘れてはいけないと学びました。

今後も、過去の研究や先入観に囚われず、常に新しいものを見つけ出す発想と柔軟性を持って研究に臨んでいこうと、改めて身を引き締めました。

謝辞

本稿の内容は、筆者らが発表した論文 [6] 及び筆者の博士論文に基づいています。この原稿を作るにあたって、長年にわたり研究を支えて指導してくださった、共同研究者であり、研究・人生の師匠でもある Pascal Oesch 氏に感謝します。また、コロナ禍の中にあっても、闊達な議論と自由な研究活動が行える環境を与えていただき、また現在研究を共にさせていただいている井上昭雄

氏, 菅原悠馬氏に感謝します. そして, いつも変わらず支えていただいている両親と家族に最大の感謝を送りたいと思います. 最後に, 2021-2022年度の天文月報編集委員の方々にご大変お世話になりました. ここでお礼を申し上げます.

参考文献

- [1] Madau, P., & Dickinson, M., 2014, *ARA&A*, 52, 415
- [2] Smail, I., et al., 1997, *ApJ*, 490, L5
- [3] Wang, T., et al., 2019, *Nature*, 572, 211
- [4] De Looze, I., et al., 2014, *A&A* 568, A62
- [5] Barone-Nugent, R. L., et al., 2014, *ApJ*, 793, 17
- [6] Fudamoto, Y., et al., 2021, *Nature*, 597, 489

The Rise of Normal, Dust-Obscured Galaxies during Cosmic Reionization

Yoshinobu FUDAMOTO^{1,2}

¹*National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

²*Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan*

Abstract: We report the serendipitous discovery of two dust-obscured, star forming galaxies in the heart of the cosmic reionization epoch (at $z=6.6813 \pm 0.0005$ and $z=7.3521 \pm 0.0005$). These newly identified galaxies are completely absent in existing rest-frame UV data, and were only discovered through their far-infrared [CII] lines and dust continuum emission as companions to other UV-luminous galaxies at the same redshift. Their spectral energy distributions are scaled-down versions of dust obscured extreme starbursts with $\geq 10\times$ smaller star-formation rates and stellar masses. The existence of these heavily dust-obscured, but otherwise “normal” galaxies suggests that our current census of star-formation in the reionization epoch may be highly incomplete, requiring a significant revision of our understanding of primordial galaxy build-up.