

# 銀河の星間物質の進化を探る

中 島 王 彦

〈国立天文台 科学研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kimihiko.nakajima@nao.ac.jp



銀河進化を理解するうえで、遠方銀河の星間物質の物理状態を理解することは重要です。大型望遠鏡に高性能な可視・近赤外線の分光装置が登場し、大規模探査が行われることで、遠方銀河の分光学的研究が現在本格的に行われています。本稿では、銀河の星間物質の電離状態の進化にいち早く着目することで、一つの潮流を作り出した私たちのこれまでの研究について紹介します。

## 1. はじめに

「遠くの宇宙を観測するほど、より過去にさかのぼって宇宙の姿を直接調べることができる」という事実は若かりし頃の私にとって非常に魅力的で、私がこの分野に興味を持った最初のきっかけであったことが思い起こされます。遠方であっても比較的明るく観測することができる銀河を対象とし、観測的に遠方銀河を研究することがこの宇宙の天体形成の歴史を明らかにするうえで重要な役割を果たしてきたと言えます。

宇宙初期から現在にかけて宇宙全体の星形成活動がどのような変遷をたどってきたのか、その星形成の歴史に関しては多波長の観測的研究によって私たちの理解はここ20年ほどで大きく進展してきました [1]。しかしながらその一方で、星形成の過程に重要な役割を担っている銀河の星間物質に関して、その物理状態がどう進化してきたのかについての研究は、星形成史の研究ほど進んでいません。その大きな理由として観測の難しさが挙げられます。星間物質の物理状態を調べるためには、星間物質由来の輝線や吸収線を調べる必要があります。とりわけ近傍銀河でよく調べられ理解されてきたのが、星形成銀河の電離水素ガス領域 (HII 領域) から放射される可視輝線スペクト

ルです。赤方偏移  $z=1$  を超えるような遠方の銀河では、 $H\alpha$  や  $[OIII]$  といった重要な輝線が近赤外線波長域へ赤方偏移してしまいます。遠方の暗い銀河に対して輝線を複数観測して詳しく性質を調べるためには、近赤外線の強力な分光装置が必要不可欠なのです。

私が大学院に進学して遠方銀河の研究を始めた2010年頃は、8-10 m級の大型望遠鏡に高感度・多天体の近赤外線分光装置が登場し、遠方銀河の星間物質の観測的研究が本格的に行われ始めていた頃でした。その頃集中的に行われ始めていた研究が、星間物質中に含まれる重元素量の赤方偏移進化です。酸素や窒素等の電離輝線と水素の再結合線を組み合わせることで、星間物質中に含まれる重元素量を推定する手法が確立され [2]、それらの遠方銀河への適用が行われてきました。その結果、同じ質量の銀河で比較したとき、遠方銀河ほど低い重元素量を持つ傾向が赤方偏移  $z=2-3$  に至るまで知られるようになりました (例えば [3, 4])。

## 2. 遠方の若い銀河の性質を知りたい

このような遠方銀河の星間物質\*1の物理状態に観測的に手が届く時代に研究を始めた私がまず興味を持っていたのが、形成後間もない小質量銀

河の性質でした。構造形成理論の観点から、遠方の小質量銀河は現在の宇宙に見られる“より大質量銀河の部品”となる天体に相当するため、銀河の成長過程を理解するうえで重要な研究対象と考えたのです。すばる望遠鏡では、Suprime-Camの狭帯域バンドの撮像観測によって水素のライマンアルファ輝線を強く放射している銀河＝ライマンアルファ輝線銀河（LAEs）の探査が行われ、日本がその研究をリードしていました [5]。LAEsは、他の連続光の探査で見つかる銀河よりも一般的に小質量で若い星種族で成り立っていること、また遠方の宇宙に行けば行くほど銀河全体に占めるLAEsの割合が高くなっている傾向から、まさに成長の初期段階に相当する重要な天体であることが示唆されています [6]。私たちは、すばるで探査できる最も近くの赤方偏移 $z=2.2$ のLAEsサンプルを構築し、詳しく調べることによってLAEsがどういった性質を持つのか、研究することにしました。

見つかってきたLAEsは概ね太陽質量の10億倍かそれ以下の星質量を持ち、これまで遠方で分光学的に調べられてきた銀河よりも1桁以上小質量の銀河であることが判明しました [7]。そこで私たちは、 $z=2.2$  LAEsを対象に近赤外線分光観測を行うことで、遠方の小質量銀河の重元素量を初めて決定する観測提案を行うことにしました。すばる望遠鏡の時間交換枠を使ってKeck望遠鏡へ出した観測提案は採択され、私にとっては初めてのPrincipal Investigator (PI; 研究代表者) 観測時間を獲得できたわけです。

## 2.1 最初の試練

順調に研究を進め観測を待ちわびていた矢先、最初の試練が訪れます。アメリカの競合グループから非常に近い研究の結果が先にarXivにて報告

されてしまったのです [8]。内容は、赤方偏移 $z=2$ で見つかった明るいLAEs 2天体の近赤外線分光観測結果となり、どちらのLAEsも質量の割に低い重元素量を持つことが報告されていました。うち1天体は太陽質量の10億倍以下の小質量であることから、まさに私たちが初めて行おうと計画していた観測プログラムが既に行われ論文にまで至っていたのです。遠方銀河研究の競争の熾烈さをまじまじと体験することとなったわけです。

先を越されてしまったショックはしばらく続いたものの\*<sup>2</sup>、自身の観測まで時間があつたことから、程なくして「観測提案書に沿いながら、どうすればよりよい観測を行うことができるか」と考えられるまで回復していました。当時、赤方偏移 $z=2$ の銀河の重元素量の多くは窒素の電離輝線[NII] $\lambda 6584$ \*<sup>3</sup>と水素のバルマー輝線H $\alpha$ との輝線比=[NII]/H $\alpha$  (N2インデックス) から求められていました。どちらもKバンドの観測だけで得られるため効率がよいからです。今回の競合論文もこの指標のみを使っていました。一方で、この指標だけでは不十分な点も考えられます。星間物質中の重元素量としては、一般的に酸素の量= $12+\log(O/H)$  が用いられます。N2インデックスは、原理的には低階電離の窒素の量を反映するので、そこから低階電離・高階電離の酸素のトータルの量を推定するためには、窒素と酸素の金属元素比や電離状態などの仮定が暗に必要となってきます。これらの仮定は近傍銀河の観測から経験的に決められた場合が多く、遠方銀河では必ずしも成り立たない可能性があります。

そこで私は、低階電離・高階電離の酸素の量をより正確に測るために、[OII] $\lambda 3727$ , [OIII] $\lambda 5007$ の観測も行う観測戦略を取ることにしました。

\*<sup>1</sup> 本稿では、以降星間物質としてHII領域を対象として話を進めます。

\*<sup>2</sup> しばらく毎朝のarXivチェックに恐怖を感じていたのは想像に難くないと思います。

\*<sup>3</sup> 波長6584 Åの輝線を指します。以降、輝線の種類・波長をこのように記載します。

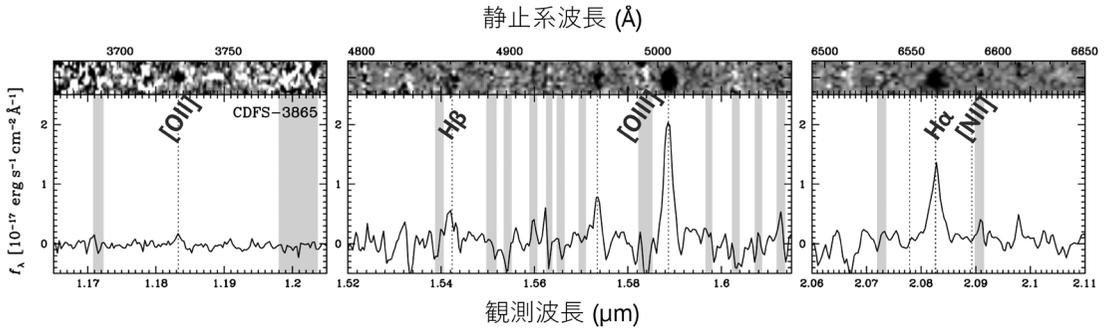


図1 Keck/NIRSPECで [OII] 輝線まで観測された  $z=2.2$  LAE のスペクトル (上側の白黒画像が空間方向の情報を保った2次元スペクトル, 下側の図が空間方向に足し上げた1次元スペクトル). [OIII]/[OII]  $\sim 20$  という, 非常に高い星間物質の電離状態がこの天体によって強く認識されました.

それぞれJバンド, Hバンドの観測が追加が必要となります。当時, 特にJバンドの観測はあまり行われておらず, [OII] まで含めた遠方銀河の分光学的研究はほとんどされていませんでした。観測できる天体数は限られてしまうものの, 新しい観測事実を知りたいという思いが勝ったわけです。

この出来事は当時の私としては非常に大きな試練ではありましたが, 結果的により真剣に観測に向き合い戦略を検討するきっかけを与えてくれたのだと今ではよい経験をしたと考えています。

## 2.2 高い電離状態の発見

Keck望遠鏡のNIRSPECによる近赤外線分光観測は, 初めてのPI観測ということで緊張をしつつもしっかりと練った戦略のおかげで滞りなく進めることができました。結果的に, 2つのLAEsから [OII], [OIII], H $\alpha$ , H $\beta$ の重要な輝線をすべて観測することができました。解析を進めてみると, LAEsの [OII] 輝線がとても弱いことに気がついたのです (図1)。[OIII] 輝線は非常に強いことから, [OIII]/[OII] 輝線比がとても高いと言い換えることができます。この [OIII]/[OII] 比は, 同じ金属元素の電離階数の異なる輝線比であることから, 星間物質の電離状態のよい指標となります。定量的には, 電離パラメータと呼ばれる, HII領域における電離光子の水素原子に対

する個数比を指す量で電離状態は評価されます。LAEsの電離状態は, 当時知られている近傍・遠方銀河の中で最も高い部類であることが明らかとなったのです [9]。

## 3. 銀河の電離状態の系統的研究へ

自身のLAEsの分光観測から, 銀河の星間物質の電離状態が遠方から近傍にかけてどう進化してきたのかを知りたくなった私たちは, その系統的研究を行ってみることにしました [10, 11]。近傍銀河としてはSloan Digital Sky Survey (SDSS)の14万天体を,  $z=2-3$ の遠方銀河としては自身の観測に加え重力レンズ天体などできる限り文献からデータを集め編集することで約40天体をもとに研究を行いました。その結果が図2aにまとめられています。この図は, 縦軸に [OIII]/[OII] 比, 横軸に ([OIII]+[OII])/H $\beta$  比 (R23インデックス) をとった輝線診断図です。縦軸は電離状態に, 横軸は重元素量に特に敏感となっています。ここでは特に縦軸の進化に着目してみると, 近傍から  $z=2-3$ の遠方にかけて, 銀河の平均的な [OIII]/[OII] 比が10-100倍も高くなる傾向が見て取れます。この結果によって, 遠方銀河ほど平均的に高い電離状態の星間物質を持つことが初めて具体的に明らかになりました\*5。そして遠方銀河の中でも, LAEsのような小質量銀河が特

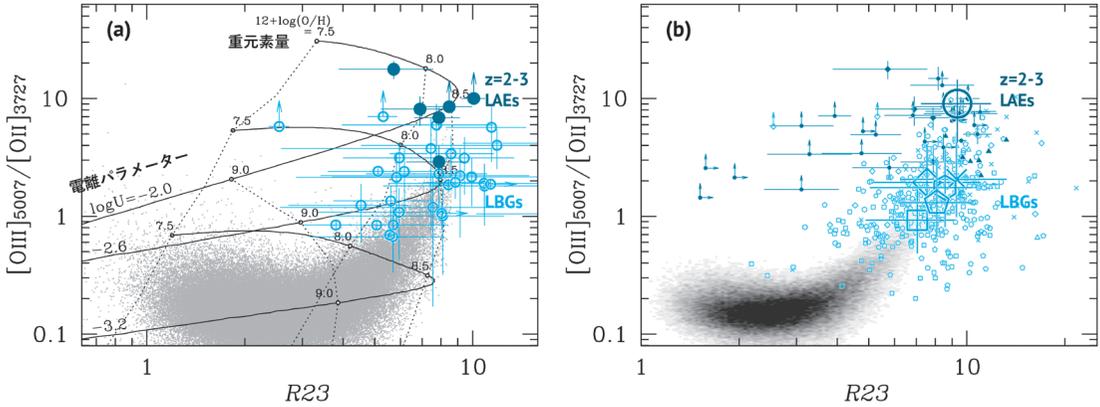


図2 [OIII]/[OII]比 vs. ([OIII] + [OII])/H $\beta$ 比 (R23 インデックス) の輝線診断図。(a) 2014年時の結果 [10]. 近傍のSDSS銀河 (灰色点) に比べ,  $z=2-3$ の銀河 (青色) の高い [OIII]/[OII] 比が示されました. 遠方銀河の中でも, 連続光の探査で見つかる銀河 (LBGs; 穴あき丸, 薄い青色)<sup>\*4</sup>よりも図1のようなLAEs (塗りつぶされた丸, 濃い青色) がより高い電離状態を持つことが明らかとなりました. 黒曲線は光電離モデルによる結果となります. (b) 2020年時の結果 [15]. 色は (a) と同じで, データの参照先ごとに異なるシンボルが使われています. 小さな点が個別天体の, そして大きな点が平均の輝線比です. (a) で示唆された傾向がLAEs, LBGsともにより大きなサンプルで確認されています.

に高い電離状態を持つことも明瞭となりました<sup>\*6</sup>. この系統的研究によって, 電離状態まで含めて遠方銀河を特徴づけることの重要性が広く認識されたと考えています.

### 3.1 高い電離状態と電離光子脱出に関係性?

図2の輝線診断図で銀河を比較するにあたり, 私はSDSS以外にも様々な近傍の銀河をプロットしてその電離状態について調べていました. その実験の中で, とりわけ私の興味をかきたてたのが電離光子放射が見られる銀河 (LyC銀河) でした (図3a). 当時LyC銀河として確認されている銀河が2天体だけ存在していたのですが, その2天体とも近傍ながら遠方銀河並みに高い電離状態を持つことがわかったのです. サンプルは小さいも

のの, 高い電離状態と電離光子脱出に関係性があるかもしれないと考えるきっかけを与えてくれました.

そういう観点から電離光子脱出について勉強をしてみると, 実はこの関係性は理にかなっているかもしれないと考えるようになりました. 図3bを参照してください. HII領域には大きく分けて2種類あり, 電離平衡が成り立ちストロムグレン (Strömngren) 半径まで広がる “Ionization-bound” の状態と, ガスに対して過剰に電離光子が生成されることによって星間ガスの大部分が電離されている “Density-bound” の状態が考えられます. [OII] と [OIII] の放射領域の違いに着目をする, 高階電離輝線ほどHII領域の内側から

<sup>\*4</sup> LBGsとして描かれている天体の中には, 小質量でLy $\alpha$ 輝線を強く出す天体も含まれている可能性があります.

<sup>\*5</sup> この頃, BPTダイアグラムと呼ばれる [OIII]/H $\beta$ 対 [NII]/H $\alpha$ の輝線診断図を用いることで, 遠方から近傍の銀河にかけて星間物質の性質の違いが見られていました. しかしながら, BPTダイアグラム上では星間物質の様々な性質 (N/O金属元素比, 密度, 電離状態, さらに活動銀河核AGNの存在など) が縮退するため, 星間物質の性質がどのように進化しているのか結論は得られていませんでした [12]. ガス密度の進化を議論する研究も同時期に登場しています [13].

<sup>\*6</sup> これらの傾向は, 図2bにあるように最新のより大きなサンプルでその正しさが確かめられています [14, 15].

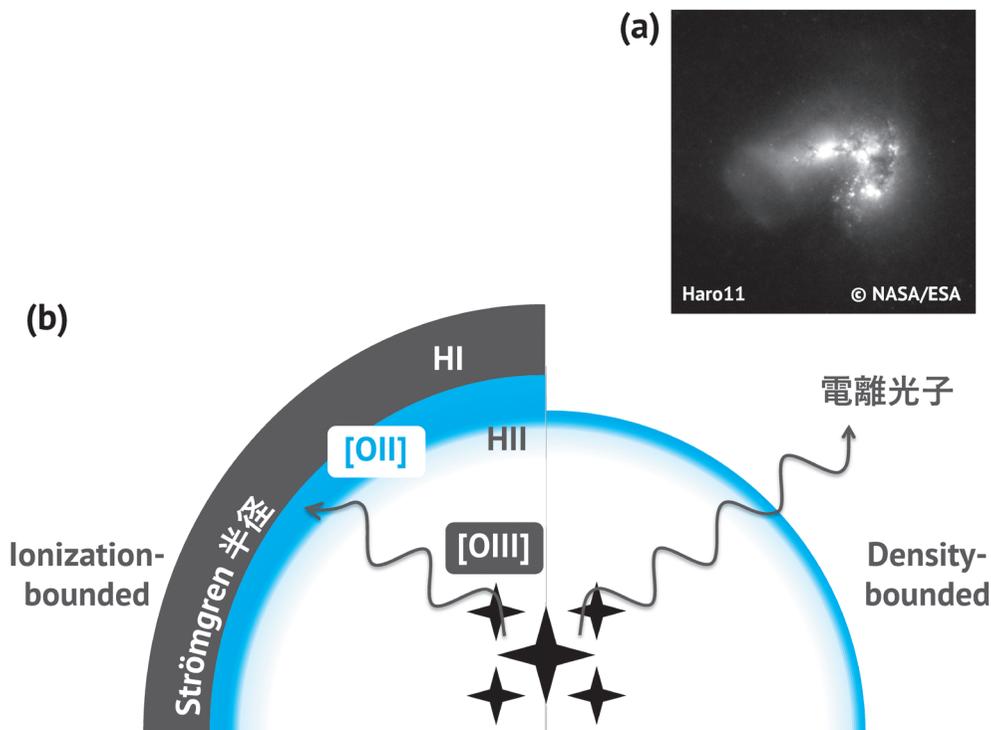


図3 (a) 近傍で知られているLyC銀河の1つ, Haro 11 [16] の写真. (b) 2種類のHII領域の模式図. Density-bounded HII領域(右側)を持つ銀河では, 高い電離状態と高い電離光子脱出率が整合的に説明できます(本文参照).

主に放射されるため, 電離状態が高くHII領域がDensity-bounded状態になることで, 外側の[OII]放射領域が小さくなり, 高い[OIII]/[OII]比が予想されます. 一方で電離光子の消費と脱出という観点に着目をする, Ionization-bounded HII領域からはその定義上(名前の示すとおり)星から生まれた電離光子はガスの電離に使われて(バウンドされて)しまうため, 中性水素(HI)ガス領域を超えて外に出ることはできません. 一方で, Density-bounded HII領域からは一部の電離光子が領域外へ脱出することができます. 結果として, 高い電離状態と電離光子脱出との間に関係性があることが説明できそうだと考えたのです.

私の最初の観測研究で示唆されたように, 遠方銀河の中でもLAEsのような小質量銀河が特に高

い[OIII]/[OII]比を持つことが明らかとなりました. 私は, その星形成領域の一部がDensity-boundedになっている仮説を世界に先駆けて提唱しました. Density-boundedの星形成領域を持つ銀河では, 上の説明のように大質量星から生成される電離光子の一部が銀河外へ脱出できるようになります. このようなメカニズムで遠方銀河の電離光子が銀河間空間へ放射され, 中性状態にあった初期の宇宙を電離させたという宇宙再電離の標準的な描像を説明できることを初めて提案するに至ったわけです.

## 4. 銀河からの電離光子脱出のメカニズム解明に向けて

### 4.1 電離光子脱出研究は難しい

電離状態の高さと電離光子脱出の関係性に関し

て興味深い仮説を提案することができた私は、ぜひ自身の手で観測的にこの仮説を検証したいと考えるようになりました。それによって銀河からの電離光子脱出の有無やメカニズムの解明に繋がります。初期宇宙において宇宙再電離がどのようにして引き起こされたのか迫ることができるようになると考えたからです。

電離光子脱出研究について勉強してみると、赤方偏移 $z=3$ においてLyC銀河が稀ながら複数報告されていることがわかりました（例えば [17]）。これらの [OII], [OIII] 輝線が近赤外線波長域のHバンド、Kバンドで観測できることに気がついた私たちは、LyC銀河の電離状態が高いかどうかを直接探る観測提案を行うことにしました。Keck望遠鏡で稼働を始めたばかりのMOSFIREであれば感度的に検証可能ということで、すばるとの時間交換枠で観測提案を行い、観測時間を獲得できました。

観測を心待ちにしていた中、また一難がやってきてしまいました。それは、遠方のLyC銀河サンプルの信頼度の問題です。当時、こうした遠方のLyC銀河サンプルの多くが地上の観測に基づいて構築されていました。そうした銀河をハッブル宇宙望遠鏡の撮像観測や地上から広い波長域で分光観測することによって、複数のLyC銀河に対して、その電離光子放射だと考えられていた光は実は同じ視線方向上のより近傍の銀河によるコンタミネーションであることが報告されたのです [18]。観測方向に銀河が重なる確率は非常に低いのですが、そもそもLyC銀河自体が稀な天体で

あることから、特に地上からの観測だけではこうしたコンタミネーションを十分除ききれないので、先行研究から持ってきたLyC銀河サンプル自体の不定性であることから、この問題を観測までに解決することはできませんでした\*7。

#### 4.2 ハッブル宇宙望遠鏡を用いた研究へ

そんな苦い経験をしていた頃、私は日本学術振興会の海外特別研究員としてドイツの欧州南天文台（ESO）へ移りました。そこで一緒に研究を始めたのがRichard Ellisさんでした。彼は遠方銀河や宇宙再電離、観測的宇宙論の研究の第一人者です。私は彼がカリフォルニア工科大学にいた頃に顔見知りとなり\*8、ついに本格的に一緒に研究を行うことができるとわくわくしていました。研究計画について様々議論する中で、彼が特に興味を持ったのが私の遠方銀河の電離状態・電離光子放射の研究でした。コンタミネーションの不定性が厄介である旨説明したところ、Richard Ellisさんは一言、「地上からの観測で不十分であるなら、ハッブル宇宙望遠鏡で観測すればよいではないか」と私に当然のごとく言い、当時の私をハッとさせてくれたのをよく覚えています。ハッブル宇宙望遠鏡を使い倒してきたRichard Ellisさんだからこそその考えだったと思います。当時の私にはすばるやKeck望遠鏡は常に頭にあるものの、ハッブル宇宙望遠鏡を自分自身の研究のために観測提案して使うという考えが頭になかったのです。

幸い $z=3$  LAEsのよい分光サンプルがMOSFIRE観測によって構築できており、非常に高い電離状態が確認されていました [14]。私はこれ

\*7 不定性はありつつも、LyC候補天体を中心に観測を行いました。MOSFIREは多数のスリットを通して分光を行うことのできる多天体分光器であることから、周りで見つかった暗い $z=3$  LAEsも同時に観測し、良質なLAEsの分光サンプルを構築することができました [14]。この分光サンプルが、後のハッブルの観測提案で活かされることとなります。

\*8 思い返すと、私が大学院生時代に国立天文台主催の「組織的な若手研究者等海外派遣プログラム」の一員に選んでいただけ、カリフォルニア工科大学で2ヵ月間研究生活を送れたことがRichard Ellisさんとよい関係性を持つことができたきっかけであったと思います。渡航するにあたり、当時国立天文台におられました児玉さんには大変お世話になりました。

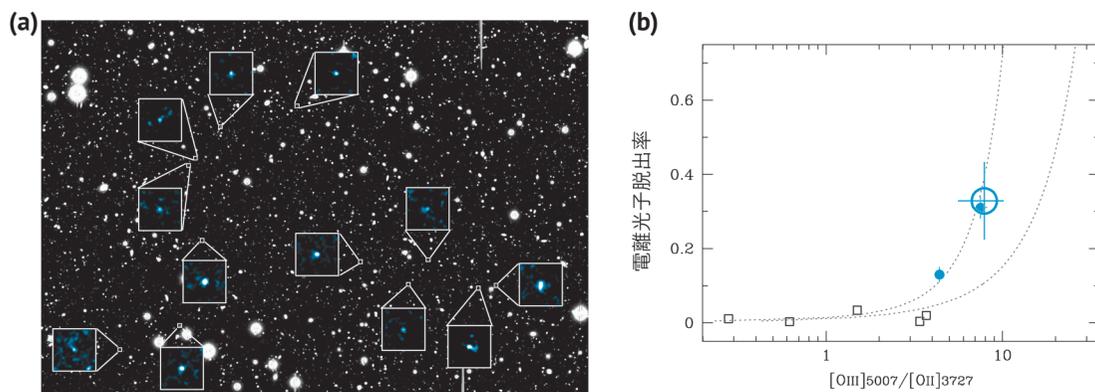


図4 (a) ハッブル宇宙望遠鏡で検出されたLAEsからの電離光子放射(拡大図). (b)  $[OIII]/[OII]$  比に対する電離光子の脱出率. 青色シンボルが(a)で観測されたLAEsの結果となります(個別で $[OII]$ まで検出された2天体が小さい丸, $[OII]$ 非検出天体も含めて得られた平均点が大きい穴あき丸). 近傍で見つかり始めたLyC銀河[20](四角)と, その関係性をより高電離状態へ外挿した関数[21]( $1\sigma$ 範囲が点線で囲まれた領域)の上にLAEsが位置することがわかります. 強く電離光子を放射するためには, 高い電離状態が必要であることが確かめられました\*9.

らのLAEsをハッブル宇宙望遠鏡の紫外カメラで深く観測することで, 電離光子放射の有無を検証する観測プログラムを立ち上げたのです. 私とRichard Ellisさんが中心となり, アメリカや日本からもこの分野の専門家(国立天文台の岩田さん, 早稲田大学の井上さん, など)に集結してもらい, 国際協力で観測提案を行うに至ったのです. ここまで私がESOに移ってからわずか2カ月のことです. 結果, 64オービッツ(約50時間)のハッブルの観測時間を獲得することに成功したのです.

ハッブルの高い空間分解能かつ深い紫外の撮像観測の結果, 近傍のコンタミネーションの可能性を減らしながら, LAEsの多くから強い電離光子放射を検出することに成功しました[19](図4a). これらの銀河に対してKeck/MOSFIREの深い分光観測結果を組み合わせたと, 電離光子放射を見せる銀河はいずれも高い電離状態を持つことが確かめられたのです[15](図4b).

このように, 自身の仮説の提唱から5年近くをかけて実証にまで至ることができ, 非常に充実した研究を行うことができました. 私が最初にこの研究を始めた頃, 確かなLyC銀河は近傍で2天体しか知られていませんでした. それが私の率いた研究以降, 仮説に従って非常に高い電離状態を持つ銀河の電離光子脱出の検証が世界中で行われ, LyC銀河は近傍だけでも20天体近く現在までに見つかってきています[20]. 銀河が宇宙再電離へどのような役割を果たしたのかを解き明かすうえで鍵となる結果・描像を一連の研究で提案し, 本分野に貢献することができたと考えています.

## 5. 遠方銀河に隠された非熱的放射の存在の指摘

私はドイツ・ESOの2年間も含め, 博士取得後に合計5年間ヨーロッパの複数の大学・天文台を渡り歩いて研究を行ってきました. その1つの理由は, 遠方銀河の分光学的研究・探査において進

\*9 実は, その逆は必ずしも成り立っていないことも本研究成果として得られています. 詳しくは論文[15]を参照していただきたいのですが, 一つの可能性として電離光子放射の非等方向性が考えられています.

んでいた欧米の環境に身を置くことで、自身を成長させ、あわよくば日本のコミュニティへ何か少しでも還元できればと思っていたからです。そしてもう1つの理由が、新しい出会いによって新しい研究が生まれるということを感じてきたからです。その中でも、特に記憶に残っている研究について最後に触れたいと思います。

### 5.1 VIMOS Ultra Deep Survey

私がスイスのジュネーブ大学で最初のポストドクをしていた頃、ヨーロッパの分光観測探査VIMOS Ultra Deep Survey (VUDS) [22] によって紫外の輝線を強く出す銀河が遠方(赤方偏移 $z=2-3$ )で見つかった、という話を私は同僚づてに聞き、非常に興味を持ちました。紫外の輝線には、ライマンアルファ輝線を除くとCIII] $\lambda 1909$ やCIV] $\lambda 1549$ , HeII] $\lambda 1640$ , Nv] $\lambda 1240$ など、高い電離エネルギーの必要な輝線が多く存在します。これら高階電離輝線の存在は、私のこれまでの研究で見つけた銀河の電離状態の進化を裏付けるとともに、更に予期せぬほど高い電離状態を持つ銀河が遠方にはいるかもしれないと示唆していたのです。話を詳しく聞くと、高階電離輝線の物理的解釈はできておらず持て余している様子でした。それはもったいないと感じた私は、自身の光電離モデルの専門性を売り込むことでVUDSに参加し、紫外高階電離輝線の起源を探る研究を率いることにしたのです。

### 5.2 試行錯誤

当時、紫外輝線を用いた輝線診断法は十分確立されていませんでした。そこで、光電離モデルを使うことで星間物質の性質(重元素量、電離パラメーター、密度)および電離スペクトル(星種族やAGN)に応じて各紫外輝線がどのように振る舞うのかを理論的に予想し、観測される紫外輝線のみで銀河の性質やAGN診断が可能かどうか、一つ一つ検証していく必要がありました。可視のスペクトルから性質がわかっている天体を対象に紫外輝線モデルを検証し、銀河とAGNを見分け

る手法や銀河の星間物質の物理状態を推定する方法を確立していきました。

紫外輝線モデルの理解が進んだところで、VUDSの高階電離輝線天体の説明に取り組み始めました。ここで、高階電離輝線天体はCIII]輝線の等価幅が特に大きく、 $20 \text{ \AA}$ 以上の天体と決めました。このような天体は非常に稀ながらもVUDSの銀河サンプルの1%ほどの割合で見つかったことから、その性質に特に興味を持っていたのです。図5に、私たちが提案する輝線診断図上でVUDSで見つかった高階電離輝線天体(平均点)と紫外輝線モデルの結果を載せます。驚くべきことに、CIII]輝線が非常に強い高階電離輝線天体は、どんなに若く低重元素量の星を考慮してもその等価幅を説明できないことがわかったのです(図5左)。一方で、電離源としてAGNを考慮すると輝線比が説明できません(図5右)。高階電離輝線天体は私が当初予想したほど簡単に説明がつく天体ではなかったのです。

光電離モデルを駆使して様々な試行錯誤を繰り返した結果、最終的には銀河に少しの割合でAGNが含まれるようなハイブリッドモデルが紫外輝線の輝線比や等価幅を全て整合的に説明するために必要であることが導かれたのです。モデルの便宜上AGNを仮定しましたが、この結果は何か非熱的な放射源が通常の星種族に加えて存在することを示唆しています。低重元素量のAGNや大質量のX線連星系などが考えられます。このように、遠方の非常に高階電離した状態の銀河には隠された非熱的放射が存在する可能性を指摘することで本研究をまとめあげることができたのです[23]。

この研究が重要であったと最近特に感じるのは、近年の遠方銀河の分光観測によって、赤方偏移 $z=6$ を超える銀河から非常に強い高階電離輝線が次々と見つかりだしたからです(例えば[24])。その最たる例が、2021年現在最遠方銀河として報告されたGN-z11(赤方偏移 $z=11$ )で

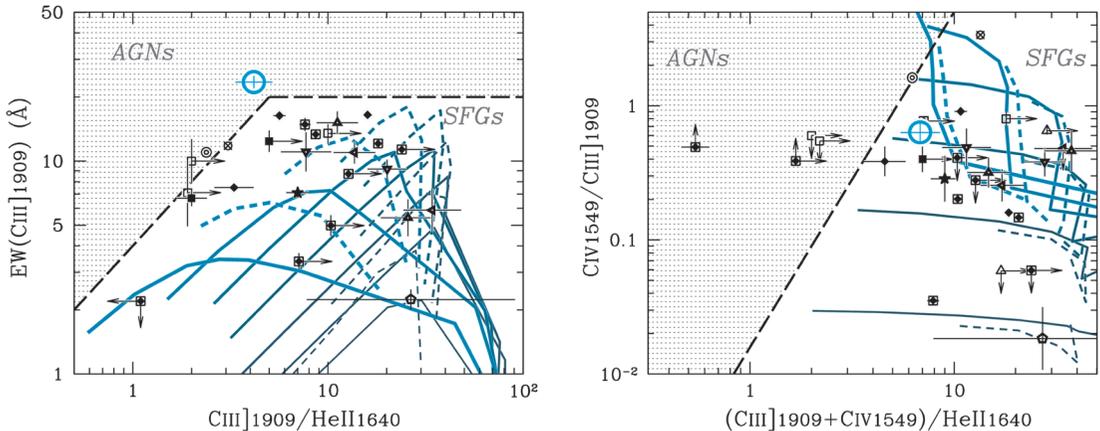


図5 紫外輝線 (CIII], CIV, HeII) のみを用いた新たな輝線診断図. 光電離モデルに基づく、白抜き領域が銀河、影のついた領域がAGNモデルでそれぞれよく説明できます. 銀河の光電離モデルが色付きの曲線で表されています (青く太い線ほど高い電離パラメーター; 横軸の値が高くなるほど高い重元素量; 連星進化を考慮に入れたモデルが破線). 可視のスペクトルから銀河だと判明している天体 (小さい黒シンボル) は、これらの銀河モデル予想と整合性があります. VUDSで同定された高階電離輝線天体のスタックされた平均点が青の大きな丸で示されています. 2つの輝線診断図で異なる電離源が示唆され、単純な銀河やAGNのモデルでは高階電離輝線天体の輝線比と等価幅 (EW) を整合的に説明できないことがわかりました. 結果的に、この両者のハイブリッドモデル (星+隠された非熱的放射源) が最適解として得られ、議論に活用されています.

す [25]. この天体はCIII] 輝線によって同定されたのですが、その等価幅が40 Åと見積もられており、通常の星形成だけでは説明が付きません. 論文の筆者たちは私たちの理論モデルを参照しながら、初期の銀河において隠された非熱的放射の存在を議論しています. もしこうした非熱的放射源が初期宇宙の銀河の多くに存在するとすると、こうした天体も初期宇宙に起きた宇宙再電離に重要な役割を果たしていた可能性が出てきます. 遠方銀河の星種族や星間物質の性質、さらには宇宙再電離への寄与を議論するうえで、隠された非熱的放射まで含めて分光データを丁寧に解析することの重要性が本研究によって広く認知されたと考えています.

## 6. さいごに

私はこれまで、赤方偏移 $z=2-3$ の興味深い遠方銀河を対象に深い分光観測を行い、結果を理論モデルを用いて解釈することで、遠方銀河の描像・進化に迫ってきました. これらの研究を初期

宇宙で直接行うことができる時代がいよいよやってきます. ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡により、銀河の詳細な分光学的研究が宇宙再電離期以遠へと拡張されるはずですが、また、近赤外線波長域で広視野・高感度化するすばる望遠鏡やローマン宇宙望遠鏡は、遠方銀河の大きなサンプルをもたらしてくれます. そして、30 m級望遠鏡によって初期宇宙で生まれたばかりの銀河がどのような性質を持っているのか直接観測的に明らかにすることが可能となります. これまでの研究生活で培われた知識や経験を活かして、こうした次世代の観測装置を目一杯活用することで、これからの日本の遠方銀河の観測研究を大いに盛り上げていきたい、そう思う次第です.

## 謝辞

このたび2020年度日本天文学会研究奨励賞をいただきました、大変光栄に存じます. 受賞対象となった一連の研究は、私自身を研究者として大きく育ててくれました. これまで研究を支えてく

くださった多くの方々に、この場を借りて深く感謝を申し上げます。特に、大学院生時代に力強く指導してくださった嶋作一大さん、大内正己さん、岡村定矩さん、そしてヨーロッパでのポストドク時代に研究の厳しさも楽しさも教えてくれた Richard Ellis さん、Daniel Schaerer さん、Olivier Le Fèvre さんは特筆させてください。Olivier Le Fèvre さんには、VUDS の PI として新参者の私を快く受入れて研究を率いさせてくれて、本当に感謝しています。その後体調を崩されて永眠されたと聞いたときは、とても驚き気を落しました。ヨーロッパの分光観測探査の雄と最後に一緒に研究をして多くを学ぶことができましたので、その経験を糧にこれからますます研究に励みたいと思います。最後に、私の研究や海外生活に理解を示し、支えてくれている家族に心からの感謝を送らせてください。

### 参考文献

- [1] Madau, P. & Dickinson, K. 2014, ARA&A, 52, 415  
 [2] Nagao, T., et al. 2006, A&A, 459, 85  
 [3] Maiolino, R., et al. 2008, A&A, 488, 463  
 [4] Maiolino, R. & Mannucci, F. 2019, A&A Rv, 27, 3  
 [5] 柏川伸成, 2018, 天文月報, 111, 11  
 [6] Ouchi, M., et al. 2020, ARA&A, 58, 617  
 [7] Nakajima, K., et al. 2012, ApJ, 745, 12  
 [8] Finkelstein, S., et al. 2011, ApJ, 729, 140  
 [9] Nakajima, K., et al. 2013, ApJ, 769, 3  
 [10] Nakajima, K. & Ouchi M. 2014, MNRAS, 442, 900  
 [11] 中島王彦, 2015, 天文月報, 108, 51  
 [12] Kewley, L. J., et al. 2013, ApJ, 774, 100  
 [13] Shirazi, M., et al. 2014, ApJ, 787, 120  
 [14] Nakajima, K., et al. 2016, ApJL, 831, L9  
 [15] Nakajima, K., et al. 2020, ApJ, 889, 161  
 [16] Bergvall, N., et al. 2006, A&A, 448, 513  
 [17] Nestor, D. B., et al. 2013, ApJ, 765, 47  
 [18] Siana, B., et al. 2015, ApJ, 804, 17  
 [19] Fletcher, T., et al. 2019, ApJ, 878, 87  
 [20] Izotov, Y. 2016, Nature, 529, 178  
 [21] Faisst, A. 2016, ApJ, 829, 99  
 [22] Le Fèvre, O., et al. 2015, A&A, 576, A79  
 [23] Nakajima, K., et al. 2018, A&A, 612, A94  
 [24] Stark, D. P., et al. 2015, MNRAS, 454, 1393  
 [25] Jiang, L., et al. 2021, Nature Astronomy, 5, 256

### Exploring the Evolution of Inter-Stellar Medium in Galaxies

Kimihiko NAKAJIMA

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

Abstract: This article reviews our pioneering work on the evolution of ionization state of inter-stellar medium in galaxies to discuss the implications for early galaxy evolution and cosmic reionization.