

輝線で観る銀河進化最盛期の銀河周辺物質

日下部 晴香

〈東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系

〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

e-mail: haruka.kusakabe.takeishi@gmail.com



銀河周辺物質は、銀河形成と進化を支えるガスの貯蔵庫として重要な役割を担っており、特に銀河進化最盛期における「冷たい相」のガスはその進化過程を理解するうえでの鍵となります。本稿では、そのトレーサーである水素および重元素の輝線の空間的な広がりであるハローに関する近年の研究を紹介します。可視面分光装置 Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE, ミューズ) による深いデータから、星形成銀河が一般に Ly α ハローを有することが示され、輝線ハローと吸収線系という独立したトレーサー間の対応関係も明らかになりました。さらに、冷たい銀河周辺物質中の重元素分布を探る新たな観測的プローブとして、SiII*ハローが提案されています。本稿では、これらの成果を概観し、今後の観測的展望について述べます。

1. はじめに

1.1 銀河進化と物質循環

宇宙の約140億年にわたる歴史の中で、数多くの銀河が形成し、進化してきました。銀河がどのように星を形成し、進化してきたのかという問いは、現在の天体物理学における重要な未解決問題の一つです。その理解の鍵を握るのが、宇宙の「物質循環」です。

宇宙では、初期密度揺らぎに従い重力によって物質が集まることで、暗黒物質ハローが形成されます。暗黒物質ハローの内部では、ガスが放射冷却により冷えて星形成が起こり、銀河が形成されます。形成した星の内部では核融合反応を通じて元素合成が起こり、炭素、酸素、さらには鉄に至るまでの重元素が生成されます。こうして作られた重元素を含むガスの一部は、重い星の最期に起こる超新星爆発などによって銀河の外へと吹き出します。この現象はアウトフローと呼ばれ、銀河周辺や宇宙空間を重元素で汚染する役割を果たし

ます。一方で、吹き飛ばされたガスの一部や、宇宙空間に存在する始源的なガスは、インフローとして再び銀河へと流れ込み、新たな星や惑星の材料となります。銀河の星形成がより進むと、銀河本体や銀河の外での重元素汚染がより進みます。

アウトフローは星形成の材料となるガスを加熱・放出するため、定性的には星形成を抑制すると考えられています。これに対してインフローは、宇宙の大規模構造に沿って銀河へガスを供給するため、星形成を促進するとされています。このように、銀河はアウトフローとインフローからなる物質循環を通じて、その進化が制御されています(図1参照) [1, 2]。

1.2 銀河周辺物質

このインフローとアウトフローによる物質循環の現場であり、星形成の材料となるガスの貯蔵庫の役割を果たすのが、銀河周辺物質 (circumgalactic medium, CGM) です。図1に示す通り、銀河周辺物質とは、銀河本体に属する星間物質よりも外側に分布し、銀河の暗黒物質ハローよりは内側に

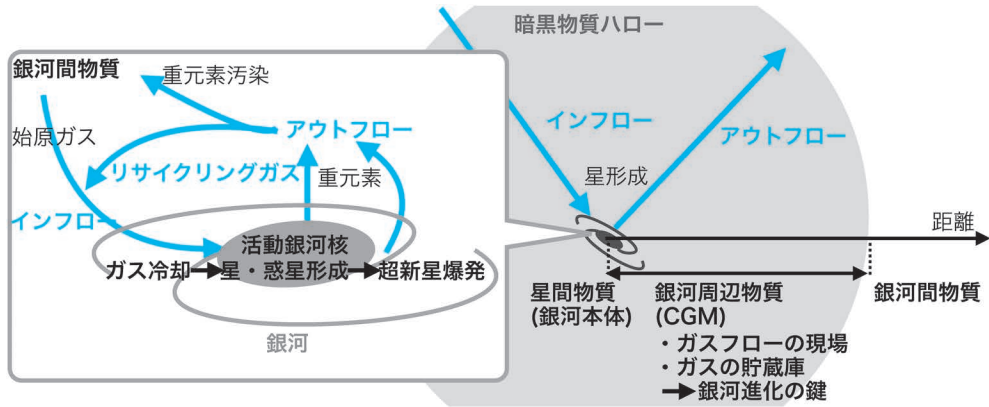


図1 銀河スケールの物質循環と銀河周辺物質の概念図. 青色の矢印はガスフローを表しています. 銀河周辺物質はインフローとアウトフローの起こる現場であり, 銀河のガスの貯蔵庫として重要な役割を果たします. 銀河周辺物質は, 銀河本体である星間物質よりも外側に分布し, 銀河の暗黒物質ハローよりは内側に存在する物質を指すことが一般的です.

存在する物質を指すことが一般的です [1]. 暗黒物質ハローの外は銀河間空間と呼ばれ, そこに存在する物質は銀河間物質と呼ばれています.

水素や重元素は星間物質のスケールから銀河間物質のスケールまで連続的に分布しているため, 銀河周辺物質の境界が, 物質の性質や銀河の性質によって明確に定まるわけではありません. しかし, 銀河本体や暗黒物質ハローのサイズを基準として銀河周辺物質のおおよそのスケールを推定することができます. その大きさは, 銀河中心から見て半径数 kpc から数百 kpc 程度であり, 赤方偏移 (z) や銀河の質量に依存します.

銀河周辺物質では, 密度, 温度, 電離度, 運動, 金属量の異なるガス相が, 幅広い空間スケールにわたって同時に存在し, 相互に影響しあっています. 典型的な温度 (T) と密度 (n) は, それぞれ 10^4 K から 10^7 K, 10^{-7} cm^{-3} から 10^{-2} cm^{-3} と, 非常に広い範囲に及びます [3]. さらに, 銀河周辺物質自体のスケールは大きいにもかかわらず (~ 100 kpc 程度), 冷却, 加熱, 乱流混合など小さなスケール (< 1 pc 以下を含む) の物理機構が働く非常に複雑な系であることから, 銀河周辺物質は「マルチスケール」かつ「マルチフェー

ズ」の構造だと言われています.

宇宙の歴史の中でも, 特に宇宙年齢がおよそ 20-40 億年で, 銀河の星形成活動が最も活発であった時代は, 銀河進化最盛期 ($z=2-3$) と呼ばれています. この時代には, 活発な星形成に伴う激しいガスの流出と, 星形成を維持するための継続的なガス流入が生じていたと予想されます. そのため, 銀河周辺物質における水素や金属の分布を理解することは, 銀河進化を解明するうえで極めて重要です. 本稿では, 銀河周辺物質のマルチフェーズ構造の中でも, 特に星形成と関係の深い冷たいガス相 ($T \sim 10^4 - 10^5$ K) に着目します.

1.3 銀河周辺物質の観測方法

次に, 銀河周辺物質を観測する二つの主要な手法を紹介します. 一つ目はクエーサー吸収線系を用いる方法で, 歴史的に最も広く用いられてきました [4]. 図2上部に示すように, クエーサーのような明るい天体を背景天体として用い, 観測者と背景天体の間に存在するガス雲によって生じる「影」, すなわち背景天体スペクトル上の吸収線を通してそのガスの性質を調べます.

水素の吸収線については, 中性ガスによる Ly α (1216 Å) の吸収線系をダンプト・ライマン α ・

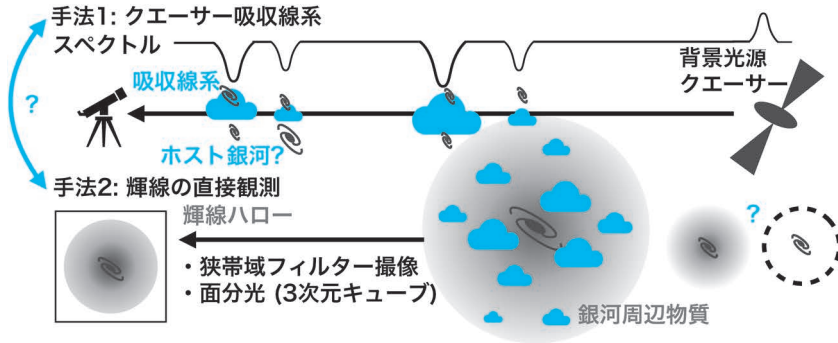


図2 銀河周辺物質の二つの観測手法。手法1では、クエーサーを背景光源として用い、視線にある様々な赤方偏移の銀河周辺物質のガス雲を影、すなわちクエーサースペクトル上の吸収線として観測します。吸収線がどのホスト銀河に付随するどのスケールのガスなのか対応関係がわからないという課題があります。手法2では、銀河周辺物質からの輝線を直接観測します。銀河が一般にLy α ハローを持つのかどうかも未解明なために、Ly α ハローで観測するガスと吸収線系として観測されるガスの対応関係が不明でした。

システム (Damped Ly α systems, DLAs), 部分的に電離したガスによるものを sub-DLA, 電離ガスによるものをライマン・リミット系 (Lyman-limit systems, LLSs) と呼びます*¹。銀河進化最盛期を含む $2 < z < 5$ では、これらの吸収線系を背景スペクトル上の影として可視光で観測することができます。

この手法の強みは、主に二点あります。一つ目は、柱密度の低いガスに対して高い感度をもち、様々なイオンの吸収線を用いることで、幅広い電離状態や柱密度のガスを調べられる点です。二つ目は、吸収線の形状や波長のずれから、ガスの柱密度や運動の情報を得られる点です。一方、上記の DLAs や LLSs といった吸収線系は、銀河周辺物質に限らず、星間物質から銀河間物質に至るまでを連続的にトレースしています。さらに、背景光源がある視線上の情報しか得られず、直接ホスト銀河を確認することもできません。そのため、

吸収線として観測されているガスが、どの銀河に付随するどのスケールの物質なのかを同定することが難しいという課題があります*²。

二つ目の手法は、銀河周辺物質を輝線で直接観測し、その空間的な広がりとしてのハローを調べる方法です (図2参照)。しかし、ガスが大変希薄なため、輝線が暗すぎ、観測は容易ではありません*³。そのため、狙った輝線を観測できる狭帯域フィルターによる撮像データと、多数の銀河カタログを用い、各銀河の位置で画像を切り出して足し合わせることで、実効的な積分時間を長くするスタッキング解析が広く用いられてきました。スタッキング解析では、個々の銀河の個性を直接調べることはできませんが、銀河周辺物質の典型的な性質を明らかにすることができます。近年、高感度な面分光装置が開発されたことで、輝線ハローを個別に検出できるようになり、個々の銀河

*¹ DLAsの中性水素柱密度は $\log(N_{\text{HI}}/\text{cm}^{-2}) \geq 20.3$, sub-DLAsは $19.0 \leq \log(N_{\text{HI}}/\text{cm}^{-2}) < 20.3$, LLSsは $17.2 \leq \log(N_{\text{HI}}/\text{cm}^{-2}) < 19.0$ と定義されます。

*² ここで紹介した背景光源を用いる手法以外にも、吸収線を用いた手法として、銀河本体の連続光とその自己吸収を観測する「ダウン・ザ・パレル法」と呼ばれる方法があります。この手法では、観測対象のホスト銀河は自明である一方、視線方向の奥行き情報が得られないため、どの空間スケールのガスを見ているのかを特定することはできません。

*³ $z \approx 2-4$ の普通の銀河の銀河周辺物質の輝線ハローの典型的な表面輝度は、 $10^{-18}-10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ arcsec}^{-2}$ 程度、もしくはそれよりも低い場合、検出することが困難でした。

周辺における二次元の空間分布と運動の情報を同時に取得できるようになりました。これらは吸収線観測と相補的な手法であり、過去10年ほどの間に、この分野は飛躍的な発展を遂げています。今回の主題は2番目の輝線を用いた手法についての研究なので、次の節でもう少し詳しく議論します。

1.4 銀河進化最盛期の冷たい銀河周辺物質観測の現状と課題：水素

現在、冷たい銀河周辺物質のトレーサーとして最も広く用いられているのは、水素のLy α 輝線の空間的な広がりであるLy α ハローです（図2参照）。Ly α 輝線はあとの3.3節でみるように、さまざまなメカニズムにより空間的に広がった構造として観測されます。観測的には、星形成領域の若い大質量星のトレーサーである紫外線連続光で見るより、水素ガストレーサーのLy α 輝線が広がって見えることとなります。Ly α は紫外線域の輝線であり、低赤方偏移の天体では、大気により吸収されて地上望遠鏡では観測できません。しかし、 $z \approx 2-7$ の天体では可視光域に赤方偏移するため、地上望遠鏡を用いて観測可能になります。また、宇宙に出れば、 $z \approx 0$ と $z > 7$ の銀河でも観測することができます。

銀河進化最盛期のLy α ハローを可視光の狭帯域フィルター画像のスタッキングで調べる際には、同じフィルターでサンプルの選択も効率よく行えることから、静止系紫外線で明るいLy α 輝線を用いて選択されるLy α 輝線銀河という特殊な銀河（Lyman α emitter, LAE）が用いられてきました。または、狭い赤方偏移帯の銀河の個数密度が高いことから、原始銀河団という特殊な環境下の銀河が対象とされてきました。これらの研究から、Ly α 輝線銀河や原始銀河団領域の銀河は、典型的にはLy α ハローを持つことが示されてきました [5, 6].

また、Ly α 輝線銀河におけるLy α ハローの典型的な大きさは、 $2 < z < 6$ で赤方偏移によらず大きく変化しないことも明らかになりました [7]. このように、スタッキングの手法によりこの分野の研究の大きな進展はあったものの、個々の銀河ごとの個別のハローを観測できず、サンプルが特殊な銀河に偏りがちだという問題がありました。

この状況を大きく前進させたのが、欧州南天天文台の超大型望遠鏡に搭載された可視光の面分光装置 Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE, ミューズ) です*4. MUSEにより、多数の銀河についてLy α ハローを個別に検出することが可能になりました。実際、 $z \approx 3-7$ のLy α 輝線銀河の多くで、紫外線連続光よりもはるかに広がったLy α ハローが確認されており、その広がりは典型的に紫外線連続光の約10倍に達することが示されています [8].

しかし、これらの先行研究で主に用いられてきたLy α 輝線銀河は、星形成銀河全体の一部の種族に過ぎず（約30%）[9], また原始銀河団の銀河も一般的な環境とは異なる条件下にあります。そのため、星形成銀河が普遍的にLy α ハローを持つのかどうかは、依然として明らかになっていません。このような輝線観測におけるサンプルバイアスのため、Ly α ハローに対応するガス雲が、クエーサー吸収線系ではどのように観測されるのかという点も十分には理解されていません（図2参照）。輝線観測と吸収線観測の相補的な特性を最大限に活かすためには、両者を結びつける観測的な橋渡しが必要です。さらに、Ly α ハローの観測結果から、銀河周辺物質の柱密度やガスフローといった物理量を定量的に導くためには、Ly α ハローがどのような物理過程によって光っているのかを理解する必要があります。これは長年にわたる大きな課題でした [7, 8, 10].

*4 面分光では、視野全面に渡り各位置で分光スペクトルが得られ、3次元の情報を取得できます。MUSEの視野は1'×1'で、他の可視面分光装置の10-100倍の視野サイズに相当します。

1.5 銀河進化最盛期の冷たい銀河周辺物質観測の現状と課題：重元素

1.1節で銀河周辺物質は物質循環の舞台と書きましたが（図1），その主役が重元素ガスです。銀河周辺物質の重元素ガスは，水素に比べてさらに密度が低いいため，輝線による検出は一層困難になります。冷たいガス相における重元素のトレーサーとして最もよく用いられてきたのが，MgII $\lambda\lambda 2796, 2803$ の共鳴線ダブルット（輝線が 2796 \AA と 2803 \AA にあるということ）のハローです [11]。近年では検出例が急増し，約50天体を対象とした三次元マッピングの結果がちょうど報告されたところです [12]。

しかし，銀河進化最盛期に相当する $2 \lesssim z \lesssim 4$ では，赤方偏移のためにMgII輝線は感度の高い可視光観測が可能な波長域から外れてしまいます。その結果，この重要な時代において，冷たい銀河周辺物質の重元素を直接トレースする輝線がないという問題がありました（図3参照）。この時代は銀河進化の観点からも極めて重要であり，水素のLy α 輝線を可視光で観測できるにもかかわらず，重元素輝線ハローの探査が行われてこなかったことは大きな制約となっていました。

この問題に対する解決策として，非常に暗いものの，静止系紫外線のSiII*輝線が利用可能であるという理論的予測がなされました [13]。ケイ素の一階および二階電離エネルギーはそれぞれ8.1 eVと16.4 eVであるため，Si⁺は低電離状態のガスをトレースし，MgII輝線と同様に冷たいガス相を観測することができます。SiII*輝線はSi⁺の微細構造遷移に由来する蛍光放射です。主な放

射起源は連続光ポンピング（continuum pumping）であると考えられています。中性ガス中のSi⁺が紫外線連続光を吸収した後，その一部が微細構造準位へ遷移してSiII*輝線を放射します。この吸収線が共鳴遷移で，周囲のガスによる吸収と再放射を繰り返して空間的に広がるため（共鳴散乱），SiII*輝線は共鳴線と同程度に空間的に広がるのが期待されます。この輝線は，これまで銀河本体スケールでは検出されてきましたが，Ly α と比べて10-50倍程度暗いため，銀河周辺物質スケールでのSiII*ハローの検出は報告されていませんでした。そこで，これら冷たい銀河周辺物質観測における課題に取り組むため，筆者たちは次章で紹介する，世界で最も深い可視面分光データを用いました [14, 15]。

2. MUSEを用いた最も深い面分光観測とサンプル構築

2.1 本研究のストラテジー

前述の「星形成銀河が一般的にLy α ハローを持つのか」という問いに答えるには，まず観測的バイアスのないサンプルを構築する必要があります。本研究では，原始銀河団を含まない一般領域に限定し，Ly α 輝線などの輝線検出による選択は行わず，連続光の明るさに基づいてサンプルを選択しました。表面輝度の低いLy α ハローの有無を統計的に検証するためには，Ly α 輝線の観測波長，すなわち分光赤方偏移の情報も不可欠です。

このような連続光選択の無バイアスな分光サンプルを構築するには，観測波長が4700-9350 \AA のMUSEでLy α をカバーできる赤方偏移範囲 ($z \approx 2.9-6.6$) に加え，それ以外の赤方偏移でも分光的に赤方偏移を同定または制限できる必要があります。狙っている赤方偏移以外の天体も全て赤方偏移がわからないと，分光的に無バイアスとは言えないからです。しかしMUSEでは， $z \approx 1.5-2.8$ は，明るい静止系可視輝線（H α $\lambda 6563$ から [OII] $\lambda\lambda 3726, 3729$ ）やLy α 輝線が観測可能な波長から



図3 赤方偏移ごとの冷たい銀河周辺物質における重元素のトレーサーとなる輝線

外れてしまうので輝線による分光同定ができません。なので、代替策としてこの赤方偏移範囲では、吸収線や連続光スペクトル形状に基づく分光同定を行います（ただし、十分に明るい連続光天体に限定されます）。さらに、サンプル銀河の Ly α ハローの有無を調べる際に、赤方偏移（すなわち波長）ごとのデータの深さの違いによる影響を避けるため、夜光輝線の影響で感度が低下する長波長側、すなわち Ly α に対して $z > 4.4$ に相当する領域はサンプルから除外しました。以上を踏まえ、本研究では $z \approx 2.9-4.4$ に位置する銀河と、それ以外の赤方偏移でも光学的に赤方偏移を制限できる等級カットを施したサンプルを構築しました。

2.2 MUSEの深データ

本研究では、深いハッブル宇宙望遠鏡の測光データと、世界で最も深い MUSE データを有するミュージック・エクストリームリー・ディープ・フィールド（MUSE eXtremely Deep Field, MXDF）のデータを用いました [16]。MXDFでは、中心から半径31秒以内の領域で100-140時間という、驚異の総露出時間が投入されており、 5σ の表面輝度限界は $\approx 1 \times 10^{-19} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ arcsec}^{-2}$ (7000 Å, 100時間積分) に達します。また、補償光学の効果により、点拡がり関数の半値全幅は0.4-0.5秒です。

2.3 チームでのカタログ作りとサンプル構築

筆者はMXDFサーベイチームの一員としてMUSEカタログの構築に携わると同時に、本研究用のサンプル構築を行いました。カタログは、(1) ハッブル宇宙望遠鏡の連続光選択カタログ [17] に基づいてMUSE三次元データキューブからスペクトルを抽出し、分光赤方偏移を同定する方法と、(2) データキューブ内で輝線により天体を直接検出する方法の二つを組み合わせで作成されました。12名のチームメンバーが数ヶ月にわたり、各天体について3名以上でMUSEスペクトル、三次元フラックス分布、測光画像および測光赤方偏移を精査し、赤方偏移を推定しまし

た。議論を重ねた結果、MXDF領域では691天体（他のデータのあった周辺領域を含めると2221天体）の赤方偏移と信頼度を決定し、カタログを完成させました [16]。MUSEカタログ構築の詳細については、天文月報2020年5月号の稲見さんによる解説をご参照ください [18]。

このカタログ構築過程において、100-140時間露光の中心領域では、ハッブル宇宙望遠鏡のF775Wフィルターで27.5等級より明るい142天体のうち、約94%に相当する133天体の赤方偏移を分光学的に決定できました。そのうち19天体が、本研究の対象とする $z \approx 2.9-4.4$ の赤方偏移を持っていました。赤方偏移が決まらなかった9天体のうち7天体については、抽出したMUSEスペクトルの短波長端における連続光の検出と測光赤方偏移から、 $z < 2.9$ であることが推測され、残る2天体については、 $z = 2.94$ の弱い Ly α 輝線銀河、あるいは $z = 4.17$ の弱い吸収線を持つ Ly α ブレーク銀河である可能性が残りました。無バイアスな分光サンプルを構築する観点からこの2つはサンプルに含めました。その結果、合計21天体のサンプルを構築することができました。こうして、公開カタログに含まれない天体についてもチーム内で慎重に検証を行うことで、極力バイアスを排除した独自のサンプルを構築しました。次章では、このサンプルを用いた Ly α ハロー探査の結果を紹介します。

3. 無バイアスな Ly α ハロー探査

3.1 Ly α ハローの存在の普遍性

第2章で選択したサンプル銀河が Ly α ハローを持つのかどうかを調べるために、筆者たちは Ly α 輝線の空間分布が紫外線連続光（大質量星）の空間分布と比べて、統計的に有意に広がっているかどうかを検証しました [14]。まず、輝線成分のみの二次元画像を作成するため、MUSEの三次元データキューブから連続光成分を差し引き、各銀河を中心とした $15'' \times 15''$ のミニキューブを切

り出しました。そのミニキューブ内で、Ly α 輝線の観測波長付近 $\pm 25 \text{ \AA}$ の範囲において、Ly α のフラックスが最大となる波長範囲と半径を決定し、輝線フラックスのみを含む二次元画像を作成しました。比較対象となる紫外線連続光の画像は、ハッブル宇宙望遠鏡の画像から周辺天体をマスクし、さらにMUSEの点拡がり関数を畳み込むこと（星像の大きさに合うようにぼかすこと）で作成しました。

Ly α と紫外線連続光の空間的な広がりを比較する際には、銀河本体からの明るい光が、ハローからの淡い放射を隠してしまいます。そこで本研究では、紫外線連続光の表面輝度がピーク値の2割となる半径以内を銀河本体と定義し、ハローの評価にはその外側の領域のみを用いました。具体的には、「銀河本体の外側において、Ly α の表面輝度分布は紫外線連続光と同じ動径分布を持つ」という帰無仮説を設定し、有意水準0.05で検定しました。外側領域におけるLy α の表面輝度分布に紫外線連続光の分布をスケールしてフィットした際の補正カイ二乗値をp値に変換し、この帰無仮説を棄却できた場合に、統計的に有意なLy α ハローを持つと定義しました。p値が小さいほど、帰無仮説が正しいと仮定した場合に、観測された分布が偶然得られる確率が低いことを意味しま

す。この検定では、評価に用いる領域がリング状（ドーナツ状）となるため、筆者たちはこの手法を「ドーナツテスト」と呼んでいます（図4左）。

ドーナツテストの結果、 $p < 0.05$ を満たす天体は21天体中17天体でした。これらをLy α ハロー天体と呼びます。図4に示すように、ハロー天体の中には、銀河本体スケールで強いLy α 輝線を示すものから、Ly α 吸収線を示すものまで、多様な性質を持つ銀河が含まれています。ハローが非検出となった4天体についても、検出限界より暗いLy α ハローを持っている可能性は否定できません。本研究では、円対称を仮定したさまざまな大きさのハローについて、MXDFデータにドーナツテストを適用した場合の検出率（コンプリートネス）の推定も行っています。しかし、実際のハローのサイズ分布が未知であるため、本稿ではコンプリートネス補正は行わず、観測された割合をそのまま用いました。その結果、全21天体に対するLy α ハロー天体の割合は $80.1^{+10.1}_{-11.2}\%$ と高く、さらに赤方偏移によらず紫外線絶対等級が -20 から -18.7 のサブサンプルでは、この割合は $91.7^{+5.1}_{-13.2}\%$ に達しました。これらの結果から、ほとんどの星形成銀河はLy α ハローを持つと結論づけられます。興味深いことに、この約8割という割合は、Ly α 輝線銀河において報告されている

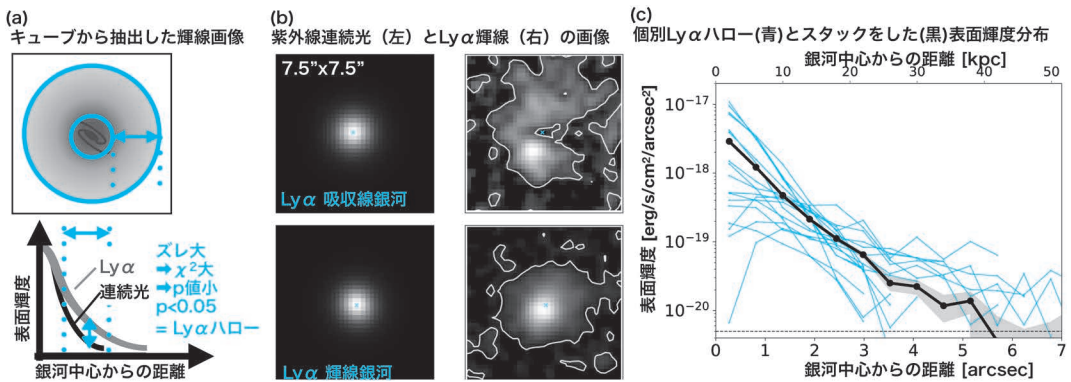


図4 (a) Ly α ハローのドーナツテストの概念図。(b) 多様なLy α ハローの紫外線連続光画像(左)とLy α 画像(右)の例。(c) 個別の銀河のLy α ハローの表面輝度の動径方向分布(青)とスタックをした表面輝度分布(黒)とその1 σ エラー(灰色)。

Ly α ハロー検出率と同程度です [8].

銀河周辺におけるLy α ハローの存在がこれほど普遍的であることは、銀河の周囲に大量の水素ガスが一般的に存在していることを強く示唆しています。これまで近傍銀河の観測や数値シミュレーションから、銀河周辺物質がガスの貯蔵庫として機能することは予言されてきましたが、銀河進化最盛期において、個々の銀河の周辺でその普遍性が直接確認されたのは、本研究が初めてです。

3.2 輝線と吸収線で観測するガスの比較

次に、1.3節で紹介したクエーサー吸収線系(DLA, sub-DLA, LLS)として観測される中性水素ガスと、Ly α ハローとして輝線で観測されるガスとの対応関係を調べるために、発現率 (incidence rate) を求めます。吸収線系の発現率 dn/dz は、クエーサーなどの背景天体の視線上で、単位赤方偏移あたりに検出される吸収線系の数を表す量です。これは、ランダムに選んだ背景天体の視線を辿ったときに、ガス雲に遭遇する頻度を表しています。

一方、Ly α ハロー (Ly α halo, LAH) の発現率は、単位赤方偏移あたりに視野内をLy α ハローが覆う割合を表します。これは三次元的に考えると吸収線系の視線上の発現率と同等の意味になります。サンプルの銀河と同じ明るさの範囲の銀河の dn/dz (LAH) は、典型的なLy α ハローの面積、Ly α ハローを持つ銀河の割合、サンプルの明るさの範囲の銀河の数密度 (絶対紫外等級の上限以下の銀河の数密度)、サーベイ体積、サーベイ面積、赤方偏移ビン幅から求められます。先行研究では、Ly α 輝線銀河という限られた銀河種族のLy α ハローに対して、吸収線系との対応関係が議論されてきましたが [19], 本研究ではこの議論を一般的な星形成銀河へと拡張することが可能になります。 dn/dz (LAH) を求めるためには、まず典型的なLy α ハローの面積を推定する必要があります。図4に示すように、サンプル銀河の平均的な表面輝度の動径分布を求めると、1 σ 限界以上で

検出される典型的なハローの大きさは半径 \sim 40 kpcと得られました。「サンプルの明るさの範囲の銀河の数密度」は、銀河の紫外線の等級ごとの数密度 (紫外線光度関数 [20]) と観測等級の範囲 ($M_{1500} \leq -18$) から求めます。すると、 dn/dz (LAH) = $0.76_{-0.09}^{+0.09}$ が得られます。このような高いLy α ハローの発現率は、 $z=3-4$ において本研究と同様の明るさの銀河からのLy α 放射が、天空上の約80%を覆っていることを意味します。

次に、同程度の赤方偏移における吸収線系の発現率と dn/dz (LAH) を比較します。ここでは単純化し、より中性水素の柱密度の高いガスの吸収線系が輝線として観測されやすいと考えます。先行研究によると、DLA (中性ガス) およびsub-DLA (部分的に中性なガス) の発現率はそれぞれ dn/dz (DLA) = 0.33, dn/dz (sub-DLA) = 1.1 と報告されています [21]. 輝線で見つかった発現率 dn/dz (LAH) = $0.76_{-0.09}^{+0.09}$ は、 dn/dz (DLA) より大きいので、DLAとして吸収線で観測される中性水素のガス雲の全ては、Ly α 輝線でも観測されていると解釈できます。 dn/dz (LAH) の残りの発現率 (0.43) とsub-DLAの発現率 (1.1) の比較から、sub-DLAとして観測される部分的に中性なガス雲の一部がLy α 輝線でも観測されていると解釈できます。

結果をまとめると、これらの観測結果はLy α ハローの吸収線におけるカウンターパートが、DLAすべてとsub-DLAの一部であることを示唆しています。この手法は、輝線については紫外線光度の明るい順に、吸収線については柱密度の高い順に並べ、それらを1対1で対応づけることでカウンターパートを同定していると解釈できます。したがって、これはあくまで第0近似的な議論であり、結果の過度な解釈には注意が必要です。本研究では、輝線の発現率を求める際にLy α 選択 (Ly α 輝線銀河) ではなく紫外線連続光選択の銀河 (星形成銀河) を用いることで、マッチングに伴うバイアスを低減しました。これにより、

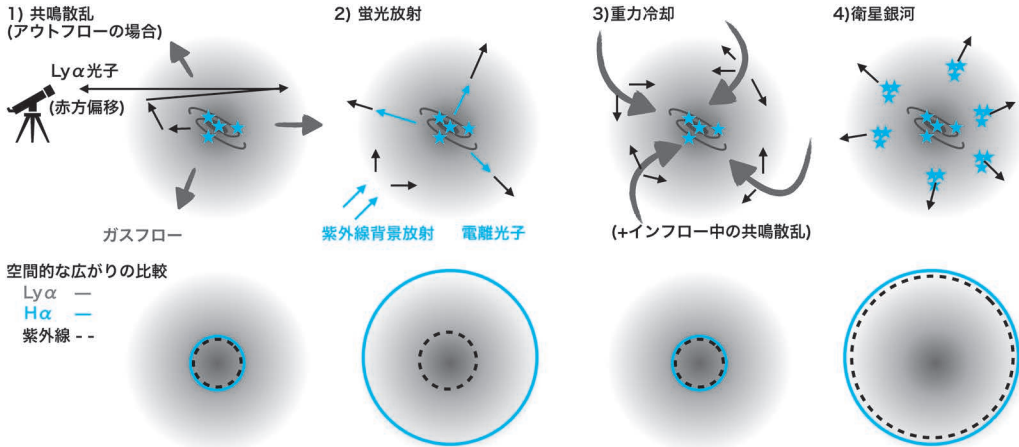


図5 (上段) 星形成銀河のLy α ハローに対して最もよく検討される4つの物理起源の概念図。その他には、近傍の他の暗黒物質ハローに由来する「隣の銀河 (neighbor)」や、「銀河合体 (merger)」がある。(下段) それぞれの物理起源をLy α , H α , 紫外線連続光で観測した時の予想。

吸収線観測と輝線観測を統一的に議論するための橋渡しが実現しました。

3.3 Ly α の物理起源

Ly α ハロー観測から銀河周辺物質の物理量を理解するには、Ly α ハローの起源を理解する必要があります。これは長年にわたり銀河研究における大きな課題でした。星形成銀河のLy α ハローの起源としては、大きく分けて以下の四つが提唱されています (図5参照, [7, 8, 10])。

- 1) 共鳴散乱 (resonant scattering)
- 2) 蛍光放射 (fluorescence)
- 3) 重力冷却 (gravitational cooling)
- 4) 衛星銀河 (satellite star formation)

1つ目の「共鳴散乱」は、Ly α 光子が中性水素により多重散乱 (吸収と再放射の繰り返し) されることで、空間的に広がるというシナリオです。星形成銀河を対象した論文では、このシナリオの際にLy α 光子が銀河本体の星形成領域での光電離と再結合により生成される場合を想定していることが多いです。図5の1) では、銀河周辺物質全体でアウトフローが起こっている場合を示しました。共鳴散乱では、吸収が起こりやすいのはアウトフローするガスの系で見た静止系波長なので、

(観測者から見て) 銀河よりも手前側にある銀河周辺部質の水素原子は、銀河自体からのLy α よりも相対的に青方偏位したLy α 光子をより吸収する事になります。結果、相対的に銀河より赤方偏位した光子 (観測者から見て銀河より後ろ側のガスで最後の共鳴散乱を受けた光子などを含む) が選択的に観測されます。また、ハローガス内の水素原子により吸収されたLy α 光子は、即座に再放射され、また近傍の原子に吸収される、という過程を繰り返します。その際、再放射される光子の波長は、(観測者から見て) 原子の運動方向と速度に依存して変化します。これを繰り返した結果、観測される輝線幅は元の波長から大きく広がっていくこととなります。以上の効果により、アウトフローが卓越したハローでの共鳴散乱であれば、Ly α 輝線のピーク波長が赤方偏位し、かつ銀河自身の光子よりも輝線幅が広がって赤い側に尾を引いたような非対称分布の輝線として観測されます。逆に中心波長が青側に偏位して、青い側に尾を引いたような輝線分布であれば、インフローが卓越した状態だと推測する事ができます。Ly α 光子全体が共鳴散乱を受ける回数が多いほど、波長シフトの効果でLy α 輝線の輝線幅がより太くな

り、輝線のピーク波長のシフトがより大きくなります。

2つ目の「蛍光放射」では、宇宙空間からの紫外線背景放射 (UV background) に銀河周辺物質が照らされ、光電離と再結合によって Ly α 光子が生成されます。しかし、この起源は、近くに活動銀河核がある場合や、銀河周辺物質のガス密度が高い特異な環境 (原始銀河団領域) では寄与が大きくなるものの、普通の環境では非常に暗いと考えられています。普通の環境の場合の電離光子源としては他にも銀河本体の星形成領域から脱出した電離光子もあり、この場合も銀河周辺物質中での光電離と再結合によって Ly α 光子が生成されます。

3つ目の「重力冷却」では、銀河周辺物質スケールでの始原ガスのインフローにおける衝突励起と脱励起による放射冷却により Ly α 光子が放射されます。このシナリオはインフローやコールドストリームと呼ばれることもあります。ややこしいのですが、インフローガスの重力冷却が起こっている時には、中性水素による共鳴散乱も起こっていると考えの方が自然です。1) では、Ly α 光子源が銀河本体であることを想定していることが多い一方、重力冷却シナリオの Ly α 光子源は銀河周辺物質です。銀河本体で Ly α 光子が生成される場合と比べると、重力冷却のように銀河の外で Ly α 光子が生成される時の方が、Ly α 光子が脱出しやすい (観測されやすい) と予測されています。

4つ目の「衛星銀河」では、中心銀河の暗黒物質ハロー内に存在する衛星銀河の星形成領域における光電離と再結合によって Ly α 光子が生成され、それが中心銀河にとっては銀河周辺物質スケールの Ly α 放射として観測されます。この場

合、衛星銀河のあるところで Ly α ハローの分布がクランプ状になるか、異方性を示すことが予想されています。

さらに、近傍の他の暗黒物質ハローに由来する「隣の銀河 (neighbor)」や、「銀河合体 (merger)」の影響も議論されています。上記のように、起源候補の名称と分類は、歴史的な背景もあり、輻射輸送メカニズム、放射が生じる場所 (放射源) や現象に基づいて非常に混乱を招きやすい状況にあります。さらに、用語の使い方には研究者間でばらつきもあります。筆者自身は強い意見はありませんが、本稿では筆者から見て星形成銀河の文脈で一般的に用いられていると考えられる上記の定義に基づいて議論をします^{*5}。

筆者らは以前、銀河進化最盛期である $z \approx 2$ の一般領域に存在する Ly α 輝線銀河の Ly α ハローについて、1) 共鳴散乱が支配的である可能性を提案しました [22]。近年では、同様の結論を支持する研究が増加しており、さらに銀河本体からの距離に応じた物理起源の違いについても議論されるようになってきました。以下では、近年の特筆すべき成果のうち、MXDF 等のサーベイを行ったミュズコラボレーション (MUSE collaboration) で筆者も携わった研究成果を中心にいくつか紹介します。

$z \approx 3-6$ の明るい Ly α 輝線銀河と深い MUSE データを用い、銀河スケールと銀河周辺物質スケール ($\lesssim 20$ kpc, ハロー) における Ly α 輝線プロファイルを比較した研究では、ハローの方が Ly α 輝線幅が広く、Ly α 輝線ピークが銀河本体よりも赤方偏移していることが報告されています [23]。これは図5の1) のように、アウトフローが卓越する銀河周辺物質において共鳴散乱が効いているというシナリオを示唆しています (本節2段落目参照)。

*5 Ly α 光子源ごとに (銀河周辺物質 in-situ か銀河本体か)、ガスの運動と輻射輸送メカニズムで分けた名称が普及するべきであると多くの研究者が考えているはずですが、おそらく、特に観測の論文では、慣習に従って先行研究と同じ用語を使うことが少なくありません (自戒の念も込めて)。今後、ハロー起源の研究の進展に伴い、理解と共に用語がより一層整理されることに期待します。

上記の銀河中心から $\lesssim 20$ kpc は暗黒物質ハローのビリアル半径程度のスケールに相当します。さらに外側の領域 (outer CGM) まで Ly α 輝線プロファイルを調べるためには、信号雑音比を向上させる必要があります。そこで、 $z \sim 3-4$ の MUSE による Ly α 輝線銀河サンプルに対して、銀河中心からの距離ごとに抽出した Ly α スペクトルのスタッキング解析が行われました [24]。その結果、半径 20 kpc 以内では、系の速度に対して赤方偏移した Ly α 輝線が確認され、上記と同様に、アウトフローが卓越する銀河周辺物質において共鳴散乱が支配的であることを示唆する結果が得られました。一方で、半径が大きくなるにつれて Ly α 輝線ピークは青方へとシフトし、30 kpc より外側では青方偏移が観測されました。これは、5の3)の重力冷却による銀河周辺物質スケールでの Ly α 光子の生成とインフローが卓越する銀河周辺物質中での共鳴散乱と矛盾しない結果です (本節2, 4段落目参照)。さらに、これらの銀河の Ly α 表面輝度の動径分布を調べると、半径 20 kpc 付近を境に、プロファイルが冪乗則分布からよりフラットな分布へと変化していくことも明らかになりました [25]。これは、Ly α ハローの物理起源がスケールに依存して変化することを示唆しています (Kozlova et al., submitted も参照)。

以上の結果は、Ly α 輝線銀河の Ly α ハローにおいて、銀河周辺物質の内側ではアウトフロー中の共鳴散乱 (1) が、外側では重力冷却とインフロー中の共鳴散乱 (3) が支配的な物理起源であることを示唆しています*6。Ly α ハローの起源は、銀河周辺物質内でのスケール依存性や環境依存性 [26] に加えて、異なる物理起源の寄与割合や銀河ごとの個性など、依然として未解明な点が多く残されています。また、これまでは物理起源の研究において Ly α 輝線銀河が主に用いられてきま

したが、星形成銀河一般が Ly α ハローを持つことが明らかになったので、今後は Ly α 輝線銀河に限定せずに起源を調べることも重要です。

4. SiII* ハローの探査

4.1 サンプルセレクション

1.5節で述べたように、 $z \sim 2-4$ において重元素の輝線ハローのトレーサーがないという問題がありました。この課題を解決するために、筆者らは $z \sim 2-4$ における SiII* $\lambda 1265, 1309, 1533$ の非常に暗い輝線ハローの検出を目指しました [15]。本研究では、MXDF および同一サーベイに含まれる他の深領域 (30時間積分) のデータとカタログ (合計 1321 天体掲載) を用いました。3章で紹介した Ly α ハローの研究とは異なり、本研究では新たなハロートレーサーそのものの検出が主目的であるため、赤方偏移同定の信頼性が高いサンプルを構築することを最優先としました。1321 天体のうち、MUSE で SiII* 輝線の少なくとも 1 本を観測可能であり、かつ CIII] $\lambda \lambda 1907, 1909$ ダブルレットにより銀河自身の赤方偏移を高精度で決定できている $z = 2.1-3.9$ の孤立銀河に限定し、最終的に 39 天体をサンプルとして採用しました。

4.2 探査方法と結果

SiII* 輝線の画像を作成するために、まず連続光を差し引いた MUSE キューブから、各ターゲット銀河の周囲 $5'' \times 5''$ 、銀河自身の赤方偏移から予想される SiII* 輝線の観測波長周辺 $\pm 200 \text{ km s}^{-1}$ の範囲を抽出しました。各銀河について、紫外線連続光画像と SiII* 輝線画像から表面輝度の動径分布を求め、両者の分布の形状が 97.5% の信頼水準で有意に異なる場合に、SiII* ハローを持つと解釈しました。

その結果、図6に示すように、39 天体中 5 天体において SiII* $\lambda 1533$ のハローを検出することがで

*6 銀河周辺物質の内側、外側で典型的にはガスの運動がアウトフロー、インフローになっていることは確かそうですが、Ly α の光子源については蛍光放射 (2) も含め今後の更なる検討が必要です。

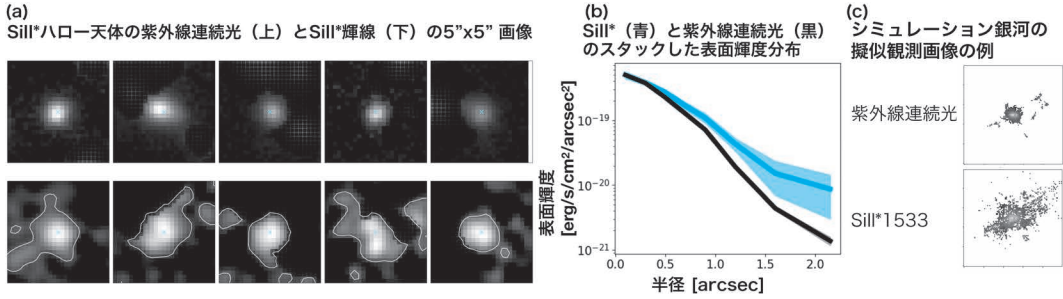


図6 (a) 個別検出したSiir*輝線と紫外線連続光の画像で周辺天体をマスクしたもの。(b) スタックした表面輝度の動径分布: Siir*輝線が青, 紫外線連続光が黒。(c) シミュレーション銀河の擬似観測画像の例 (ばかす前)。

きました。画像上でも、淡いSiir*輝線が連続光よりもわずかに広がっている様子が確認できます。これら5天体は、サンプルの中でも紫外線光度が明るい銀河に偏っている傾向が見られました。Siir*の放射起源が連続光ポンピングである場合、紫外線連続光が(見かけ上)明るい時に(観測的に)強い輝線放射が期待できるため、この結果は理論的な予想と定性的に整合しています。一方で、Siir*λ1265, 1309については、個別天体でのハロー検出には至りませんでした。これは筆者らのシミュレーションに基づく予想とは異なる結果であり、詳細な議論は割愛しますが、その理由は現時点では未解明です。今後の検証には、より深い観測データと大きなサンプルが必要になります。

以上の結果を踏まえ、紫外線の見かけ等級が明るい14天体 ($m_{UV} < 26$) に限定して画像のスタッキング解析も行いました。その結果、Siir*λ1533のハローを検出することができました。さらに、MUSEで3本すべてのSiir*輝線をカバーできている天体について、それらを合わせてスタッキングした場合にも、Siir*ハローが検出されました。図6に示す表面輝度の動径分布の通り、Siir*輝線は連続光よりもわずかではありますが、統計的に有意に広がっています。個別探査およびスタッキング解析のいずれにおいても、Lyαハローと比較すると、Siir*は非常にコンパクトなハローのみが検出されました。これは、水素と比べて重元素

が銀河本体付近により集中して存在している可能性を示唆しています。銀河周辺の重元素は、銀河内の星形成で合成され銀河の外までアウトフローにより吹き飛ばされたものであるため、水素との分布の差はアウトフローの影響を評価するのに有用です。ただし、フラックスの合計が同じであれば、より広がった分布を持つハローほど検出が困難になるため、現時点では観測バイアスの影響も排除できません。

4.3 Siir*の放射起源の解明とシミュレーションとの比較

Siir*の放射起源を理解することは、Siir*ハローの観測から銀河周辺物質の物理量を解釈する上で不可欠です。筆者らは、放射起源が理論的に予想されている連続光ポンピングであるかどうかを検証するために、光子数保存が成り立つかどうかを調べました。1.5節で述べた通り、連続光ポンピングの場合、Siir*輝線の光子は対応するSiir吸収線に由来します。したがって、Siir*λ1533輝線の強さがSiirλ1527吸収線の強さと釣り合えば、光子数保存が成立していると言えます。先行研究では、近傍銀河の分光観測から、銀河本体スケールでは蛍光放射輝線が弱く、光子数保存が成り立たないことが報告されています。一方で、理論モデルでは銀河周辺物質スケールの輝線放射まで含めることで、全体として光子数保存が成り立つことが予言されていました [13]。さらに、他の放射起源である電離領域からの衝突励起や再結合に

よる放射では、観測されている強度を過小評価することが、理論およびモデル計算から示されています [27]. 本研究では初めて SiIV^* ハローを検出したことにより、銀河周辺物質スケールまで考慮した観測的検証を初めて行うことが可能となりました.

光子数保存のテストには、輝線や吸収線のフラックスを連続光のフラックス密度で割った等価幅 ($\text{EW}_{\text{abs}}, \text{EW}_{\text{em}}$) を用いました. 銀河本体スケールでは、 $\text{SiIV}\lambda 1527$ 吸収線の等価幅が $\text{EW}_{\text{abs}}(\text{SiIV}\lambda 1527) = 1.6 \pm 0.2 \text{ \AA}$ であるのに対し、 $\text{SiIV}^*\lambda 1533$ 輝線の等価幅は $\text{EW}_{\text{em}}(\text{SiIV}^*\lambda 1533) = 1.1 \pm 0.1 \text{ \AA}$ となり、近傍銀河の観測結果と同様に釣り合いは成り立ちませんでした. 一方、銀河周辺物質スケールにおける $\text{SiIV}^*\lambda 1533$ 輝線の等価幅は $\text{EW}_{\text{em}}(\text{SiIV}^*\lambda 1533) = 1.8 \pm 0.4 \text{ \AA}$ となり、吸収線の等価幅と誤差の範囲で一致しました. この観測結果は、銀河周辺物質スケールでは光子数保存が成立していることを示唆しています. これは SiIV^* ハローの放射起源が連続光ポンピングであるというシナリオと整合的です.

次に、本研究の観測結果を、連続光ポンピングを実装した銀河進化のズームインシミュレーション [28] と比較しました. 図6は、シミュレーション銀河における SiIV^* 輝線および紫外線連続光の空間分布の一例を示しています. 公平な比較のために、シミュレーション銀河の物理スケールを観測銀河に合わせてスケーリングし、さらに MUSE による擬似観測効果を再現するため点拡がり関数の畳み込みを行いました. 観測とシミュレーションの表面輝度の動径分布を比較した結果、両者に矛盾は見られませんでした. この一致は、 SiIV^* ハローの放射起源が連続光ポンピングであることを支持しています.

今後は、深いデータを用いた SiIV^* ハロー探査によってサンプル数を増やすことに加え、スタッキング解析と組み合わせることで、高い信号雑音比を持つ SiIV^* データから形態や輝線プロファイ

ルに基づく運動などの性質を調べることが重要です. $z \gtrsim 3$ における SiIV^* ハロー天体が増加すれば、 $\text{Ly}\alpha$ ハローとの直接比較も可能となり、水素と重元素の分布の違いを調べることができます. これは、インフローとアウトフロー、ならびに銀河周辺物質におけるガスのミキシング過程に制限を与え、銀河周辺物質と銀河本体の進化の理解を深める上で重要な手がかりになると考えられます.

5. 今後の展望

本稿では、銀河進化最盛期における銀河周辺物質の冷たい相のトレーサーとして重要な $\text{Ly}\alpha$ ハローおよび SiIV^* ハローに関する近年の研究を紹介しました. MUSE の深いデータを使うことで、 $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河に限らず、星形成銀河が一般に $\text{Ly}\alpha$ ハローを有することが明らかになり、ガスの貯蔵庫である銀河周辺物質のスケールに、潤沢な中性水素ガスが存在することが示唆されています. また、 $\text{Ly}\alpha$ ハローは、吸収線系で観測した場合には DLA や sub-DLA に対応すると示されました.

今後、 $\text{Ly}\alpha$ ハローの観測量から銀河周辺物質の物理量を推定するためには、その物理起源に対する理解をさらに深める必要があります. 起源の切り分けには、 $\text{Ly}\alpha$, $\text{H}\alpha$, 紫外線観測を組み合わせ、それぞれの放射の空間的な広がり进行比较する手法が有効です [29]. 例えば、 $\text{Ly}\alpha$ のみにハローが見られ、 $\text{H}\alpha$ と紫外線放射がコンパクトな場合には、図5の1) 共鳴散乱あるいは図5の3) 重力冷却放射が主要な起源であることが示唆されます. 一方、 $\text{Ly}\alpha$ と $\text{H}\alpha$ のみにハローが存在する場合には図5の2) 蛍光放射が、さらに3つすべてにハローが確認される場合には図5の4) 衛星銀河に起因する放射が支配的であると考えられます. 紫外線で明るい $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河に限れば、スタッキング解析により紫外線ハローの検出が報告されています [26]. しかし、 $\text{Ly}\alpha$ ハローと一緒に $\text{H}\alpha$ ハローが検出されたことや、 $\text{H}\alpha$ ハローを持たないとい

う強い制限を与えられるほどの深いH α 観測は未だ実現していません。すばる望遠鏡の次世代装置ULTIMATE-Subaru (Ultra-wide Laser Tomographic Imager and MOS with AO for Transcendent Exploration) のWFI (wide field imager) は、独自の補償光学技術により、世界最大視野で高解像度の近赤外線狭帯域フィルター観測を可能とします。HSC (Hyper Suprime-Cam) による $z \sim 2$ のLy α 狭帯域フィルター観測と組み合わせる形で、ULTIMATE-SubaruにH α 用の狭帯域フィルターを整備すれば、スタッキング解析を通じてH α とLy α 輝線の空間的な広がりを直接比較することが可能となります。ULTIMATEの稼働により、本分野の研究は大きく前進すると期待されます。

一方、SiII* ハローの検出により、 $2 \lesssim z < 4$ において冷たい銀河周辺物質の重元素の適切な輝線トレーサーが見つかっていないという課題は解消されました。今後は、SiII* ハローのサンプル数を増やすことで、その運動学的性質や空間分布に関する理解を深めることが重要です。将来的には、Ly α とSiII* の観測を組み合わせることにより、銀河周辺物質における水素および重元素の分布を比較し、インフロー、アウトフロー、さらにはガスのミキシング過程に対する理解が進むと期待されます。これらの研究は、銀河周辺物質スケールにおける星形成の促進および抑制の物理過程を解明するうえで、重要な手がかりを与えるでしょう。

謝辞

本稿の内容は筆者の投稿論文 [14, 15] に基づいています。この場を借りて共著者の方々に深く感謝いたします。特に、ジュネーブ大学の所属グループPIのAnne Verhamme博士、リヨン天文台留学時の受入教員のJeremy Blaizot博士、MUSE PIのRoland Bacon博士には、多くの貴重な機会とご助言を頂きました。妊娠出産育児に際しては、Verhamme博士の暖かな励ましとご支援があったからこそ研究の道を諦めずに続けることができました。

した。Verhamme博士のグループのThibault Garel博士、Floriane Leclercq博士、Josephine Kerutt博士、Valentin Mauerhofer博士、Moupiya Maji博士、Charlotte Simmonds博士、Eloïse Vitte博士には日常生活から研究議論まで大変お世話になりました。ジュネーブ大学での日々は本当に楽しく充実していました。リヨン天文台訪問や留学時から稲見華恵博士と橋本拓也博士にも大変お世話になりました。また、執筆をお声掛けくださり、原稿を何度も丁寧にご確認くださり、非常に有益なコメントをくださった田中壱編集委員に御礼申し上げます。原稿に有用なコメントをくださった柏野大地博士、菊田智史博士に感謝します。なお、本研究はSwiss Government Excellence Scholarships, Swiss National Fund, 及び日本学術振興会海外特別研究員制度の支援を受けて行われました。

参考文献

- [1] Tumlinson, J., et al., 2017, ARA&A, 55, 389
- [2] Péroux, C., & Howk, J. C., 2020, ARA&A, 58, 363
- [3] Fumagalli, M., 2024, arXiv e-prints, arXiv:2409.00174
- [4] 三澤 透, 家 正則, 2000, 天文月報, 93, 712
- [5] Steidel, C. C., et al., 2011, ApJ, 736, 160
- [6] Momose, R., et al., 2016, MNRAS, 457, 2318
- [7] Momose, R., et al., 2014, MNRAS, 442, 110
- [8] Leclercq, F., et al., 2017, A&A, 608, A8
- [9] Kusakabe, H., et al., 2020, A&A, 638, A12
- [10] Ouchi, M., et al., 2020, ARA&A, 58, 617
- [11] Burchett, J. N., et al., 2021, ApJ, 909, 151
- [12] Pessa, I., et al., 2026, A&A, 708, 214
- [13] Gazagnes, S., et al., 2023, ApJ, 952, 164
- [14] Kusakabe, H., et al., 2022, A&A, 660, A44
- [15] Kusakabe, H., et al., 2024, A&A, 691, A255
- [16] Bacon, R., et al., 2023, A&A, 670, A4
- [17] Rafelski, M., et al., 2015, AJ, 150, 31
- [18] 稲見華恵, 2020, 天文月報, 113, 251
- [19] Wisotzki, L., et al., 2018, Nature, 562, 229
- [20] Bouwens, R. J., et al., 2015, ApJ, 803, 34
- [21] Zafar, T., et al., 2013, A&A, 556, A141
- [22] Kusakabe, H., et al., 2019, PASJ, 71, 55
- [23] Leclercq, F., et al., 2020, A&A, 635, A82
- [24] Guo, Y., et al., 2024a, A&A, 691, A66
- [25] Guo, Y., et al., 2024b, A&A, 688, A37
- [26] Kikuta, S., et al., 2023, ApJ, 947, 75
- [27] Shapley, A. E., et al., 2003, ApJ, 588, 65
- [28] Mauerhofer, V., et al., 2021, A&A, 646, A80
- [29] Mas-Ribas, L., et al., 2017, ApJ, 841, 19

Emission-Line Views of the Circumgalactic Medium at Cosmic Noon

Haruka KUSAKABE

Department of General Systems Studies, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan

Abstract: The circumgalactic medium (CGM) plays a fundamental role as a reservoir of gas that fuels galaxy formation and evolution, and its cold phase during the peak epoch of galaxy evolution is particularly crucial for understanding these processes. This article reviews recent observational studies of spatially extended emission of hydrogen and metals (halos), which serve as probes of the circumgalactic medium. Deep optical integral-field spectroscopic data obtained with MUSE have demonstrated that star-forming galaxies generally host Ly α halos, and have revealed the correspondence between emission-line halos and absorption-line systems. Furthermore, Si, II* halos have been proposed as a new probe of metals in the CGM. These results are summarized, and prospects for future observations are discussed.