

The EIGER project

柏野大地

〈名古屋大学高等研究院 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町〉

e-mail: kashino.daichi@b.mbox.nagoya-u.ac.jp



我々が推し進める“EIGER”プロジェクトを、PIであるSimon Lilly (ETH Zürich, スイス) に代わって紹介する。これは再電離期の銀河間ガスと銀河、さらに超大質量ブラックホールの形成と進化の解明を目指すGTOプログラム (ID 1243^{*1}) である。我々は6個の明るい遠方クェーサー ($z > 6$) 領域で、近赤外線カメラ (NIRCam) を用いた深い撮像とスリットレス分光観測を行う。これらの領域ではクェーサースペクトルに刻まれた吸収線から視線上のガスの性質がわかっており、この視線に沿って分光銀河探査を行うことで、銀河の分布や性質と銀河間ガスの物理状態の関係を直接的に調べることができる。

1. プロジェクトの背景

EIGERの目標は宇宙再電離期の銀河と銀河間ガス、そして超大質量ブラックホールの調査である。EIGERとは、Emission-line galaxies and Intergalactic Gas in the Epoch of Reionizationの略称であり、スイスの名峰Eigerからその名を拝借した。図1にプロジェクトのロゴマークを示す。

まずは宇宙再電離について簡単に説明しよう。図2に大まかな流れを示す。宇宙最初期の星や銀河は宇宙誕生後1億から数億年の間に形成されたと考えられている。それまで宇宙を満たしていた中性水素を主成分とするガスは、このような初期天体の放射によって徐々に電離される。宇宙年齢10億年ごろ (赤方偏移およそ6) までにはほぼすべてのガスが電離され、現在に至ると考えられている。これを宇宙再電離 (cosmic reionization)、また初代天体による再電離の開始から完了までの時代を再電離期 (Epoch of Reionization) という。

我々が特に着目する赤方偏移は $z \sim 5-7$, 再電離期の最終ステージである。すでに大部分の銀河間

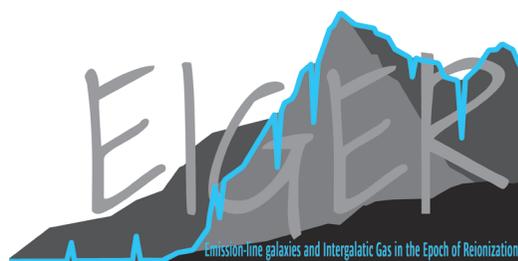


図1 スイスの名峰EigerをモチーフにしたEIGERプロジェクトのロゴマーク。

ガスが電離されているこの時代では、遠方クェーサーのスペクトルに見られるライマンアルファ ($\text{Ly}\alpha$) 線の吸収線を用いて、残存する中性水素量を調べることができる (より高赤方偏移では中性水素が増加し、 $\text{Ly}\alpha$ 吸収が飽和してしまう)。

ここで用いられるのがクェーサースペクトルの「ライマンアルファの森」と呼ばれる波長領域である。これは、視線上の各赤方偏移における中性水素量に応じて、多数の吸収線が異なる波長に刻まれることによって生じる森のような特徴的なスペクトル構造である。高赤方偏移ほど宇宙の中性水素割合が高いためより多くの吸収を受ける。赤

^{*1} <https://www.stsci.edu/jwst/science-execution/program-information.html?id=1243>

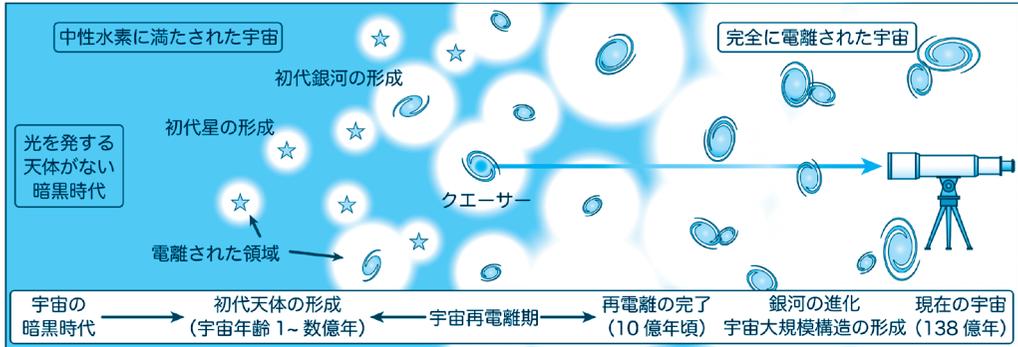


図2 宇宙再電離の流れ。宇宙誕生後しばらくは天体がない「暗黒時代」があり、この頃の宇宙は中性水素によって満たされていた。宇宙年齢1億から数億年ごろに初代星・初代銀河が形成され、これら初代天体から放射される光によってガスの電離が始まる。次第に電離領域が重なってゆき、宇宙年齢10億年ごろにはほぼすべてのガスが電離される。望遠鏡に向かう矢印は、遠方クエーサーから放射された光が電離状態の異なる領域、銀河や銀河周辺ガスを通過しながら我々のもとに届く様子を示している。

方偏移6付近ではLy α 光子がごっそりと吸収され、ガン・ピーターソンの谷と呼ばれる特徴が生じる。多数のクエーサースペクトルを用いてLy α 吸収量を測定することで、 $z < 6$ では平均的な中性水素割合が赤方偏移の関数として高い精度で制限されている。同時に、再電離末期において中性水素密度が大きな空間的非一様性を持つことが示されており、この起源を探ることは再電離過程の理解のために重要であると考えられている。

また、遠方クエーサーの連続光スペクトルには金属元素の吸収線も多数見られる。これは視線上の様々な赤方偏移に金属を含むガス雲が存在することを示しており、銀河から銀河間空間への重元素の供給や、銀河が作る局所的な放射場の性質を反映していると考えられる。

このように遠方クエーサースペクトルはその視線上の銀河間ガスや銀河周辺ガスの性質について様々な情報をもたらしてくれる。EIGERプロジェクトでは、6個の遠方クエーサー領域を観測し、クエーサースペクトルから得られる視線上のガスの物理状態と銀河の分布や性質との関係について様々な観点で調査を行う。

以下では、まず観測の概要を述べ、次に科学目標について詳しく紹介する（この順番の方が科学

目標がどのように達成されるのかイメージしやすいだろう）。

2. 観測の概要

我々の観測にはNear-InfraRed Camera (NIR-Cam)を用いる。NIRCamは2つの $\approx 2 \times 2$ arcmin²領域に分かれた視野をもち、短波長側(0.7-2.4 μ m)と長波長側(2.4-5.0 μ m)で同時観測できる赤外線カメラである。我々は長波長側に備えられたグリズム(透過型の回折格子)を用いて、スリットレス分光観測を行う。

スリットレス分光とは、ある視野に含まれる全ての点を(天体と背景の分け隔てなく)同時に分光し、すべて点から生じるスペクトルを一つの「分散画像」として得る観測手法である。光の分散方向に並行な点から生じるスペクトルは分散画像上で重なるため、スペクトルの分離が難しく、また背景ノイズが(観測したい天体だけにスリットを当てる分光に比べて)大きくなるという弱点がある。一方で、観測装置を簡素化できるため、先にはハッブル宇宙望遠鏡で採用され大きな成果を挙げた。また、スリットレス分光では撮像観測による事前のターゲット選択が必要ないという大きな利点がある。

我々が狙う高赤方偏移の銀河は若く星形成が活発であり、連続光よりも輝線が卓越していると予想される。このような銀河は連続光で暗く、輝線透過幅の不定性が大きいいため、撮像観測によるターゲット選択は効率が悪く、選択バイアスの評価も難しい。視野内に存在する一定の輝線フラックス以上の銀河を一網打尽にできるスリットレス分光は我々の科学目標によく合致した観測方法である。

我々はF356Wバンド(3.1–4.0 μm)でスリットレス分光と撮像観測を行う。狙うのは2階電離した酸素の輝線 [OIII] λ 5007 Å と H β 輝線である。[OIII]輝線が検出可能な赤方偏移範囲は $z=5.3\text{--}6.9$ となる。また、短波長側ではF115W(1.15 μm)とF200W(2.0 μm)の2バンドで深い撮像観測をスリットレス分光と同時に進行。赤方偏移 $z\sim 6$ の銀河に対して、F115WとF200Wは静止波長系紫外線領域、また長波長側のF356Wは可視光領域を測光するため、星形成率の指標となる紫外線光度、ダストの指標となる紫外線スペクトルの傾き、銀河年齢の指標となる4000 Å ブレイク、星質量の指標となる可視光光度といった銀河の性質を決める上で基本となる観測量を得ることができる。観測領域は高赤方偏移キューサーを中心とする約 $3\times 6\text{ arcmin}^2$ の領域である。赤方偏移6における共動距離にすると $7.4\times 14\text{ cMpc}^2$ となる。4個のポインティングからなるモザイク観測によりこれを達成する。合計6個のキューサー領域を観測するため、探査領域の合計は約 100 arcmin^2 に達する。

スリットレス分光観測で目指す輝線感度は $\sim 3\times 10^{-18}\text{ erg s}^{-2}\text{ cm}^{-2}$ (SN比=5)である。典型的な[OIII] λ 5007Å輝線の静止系等価幅(EW_0)は、数100から1,000Åに達すると見積もられている。 $EW_0\sim 600\text{ Å}$ を仮定すると、この輝線感度に対応するF356Wでの測光フラックスは27.5 mag程度となる。F356Wバンドの撮像感度はこれをSN比=10以上で検出できる(この感度はわずか10分の積分時間で達成できる)。紫外線光度関数

から予想される検出天体数は1領域あたり約60個、6領域合計で300個以上の統計的なサンプルが得られると期待される。短波長側の撮像観測ではF115Wで28.3 mag, F200Wで28.9 mag(SN比=5)を実現する。輝線が検出される銀河の静止系紫外線領域を特徴づけるのに十分な感度である。さらに、キューサーのごく近傍の領域($\approx 40\times 40\text{ arcsec}^2$)では周辺部の4倍の積分時間を得ることで、より高い感度を達成する。

また、スリットレス分光は視野内のすべての天体を同時に分光するため、低赤方偏移の銀河のスペクトルも得られる。特に、 $3.7<z<5.1$ の範囲でH α 輝線銀河が多数検出される。6領域から得られるH α 輝線銀河サンプルの大きさは1,000個以上になると期待される。

我々は以下に述べる科学目標を達成するために、明るさ、高赤方偏移の吸収線系の存在、ガン・ピーターソンの谷が示す光学的厚み τ_{eff} の特性などの観点からターゲットとして以下の6個のキューサーを選んだ。JWST/NIRSpec GTOでも観測される(2017年時点で)最高赤方偏移のキューサーJ1120+0641($z=7.08$)、非常に深いガン・ピーターソンの谷を持つJ0148+0600($z=6.0$)、極めて光度が大きいJ0100+2802($z=6.35$)、中性酸素の吸収線を多数含むJ1148+5251($z=6.42$)、J1030+0524($z=6.31$)、PSO J159-02($z=6.35$)である。

3. 科学目標

3.1 再電離期末期における中性水素密度の空間的非一様性の起源

先にも述べたように、キューサースペクトルに見られるガン・ピーターソンの谷や、宇宙マイクロ波背景放射のトムソン散乱の光学的深さなどの観測的証拠から、宇宙再電離は $z\sim 6$ までにはほぼ完了したことが示唆されている。ここで注目するのは再電離末期あるいは完了直後の残存中性水素の空間分布である。

再電離完了から十分に時間が経過した $z \leq 5$ では、 $\text{Ly}\alpha$ 線に対する光学的厚み τ_{eff} の空間的な揺らぎ(非一様性)が、一様な電離放射場を仮定した場合に銀河間ガスの宇宙論的密度分布から期待されるものと一致する。電離放射場が一様とは、電離光子の平均自由行程が大規模構造の局所的な構造のスケールに対して十分に大きい(≥ 100 cMpc)ことを意味する。電離光子の放射から十分に時間が経ち、また平均的な中性水素密度が十分に小さくなった状況では自然と期待される状況である。

しかし、 $z > 5.5$ では状況が変わってくる。キューサースペクトルの解析から得られた τ_{eff} の分布が、一様放射場では説明できないほど大きな散らばりを示すようになる。特に、一様放射場から予測されるよりも遥かに「不透明」、つまり残存中性水素が多い領域が頻繁に見つかるのである。象徴的なのは、キューサー J0148+0600のスペクトルに見られる、赤方偏移範囲 $5.5 < z < 5.8$ (共動距離で160 cMpcに渡る)で $\tau_{\text{eff}} > 7$ を示す巨大なガン・ピーターソンの谷である。再電離がほぼ完了している時代であるにもかかわらず、極めて不透明な領域が残っていることは驚きであり、またそのような領域が、宇宙論的なスケールにおよぶコヒーレントな空間的な広がりを見せていることも非常に興味深い。光学的厚み τ_{eff} の大きな散らばりは電離放射場がもはや一様ではないことを示しており、不均一に進んだであろう再電離過程を反映していると考えられる。このように、再電離末期の空間的非一様性の起源を理解することは、(21 cm 線観測が実現されるまでは)直接観測することができない再電離の主要なフェーズ($z \geq 6-7$)を理解する鍵となる。

我々はキューサー視線上の銀河分布を測定し、銀河をトレーサーとして推定される銀河間ガス密度分布とキューサー吸収線解析から得られる中性水素密度との関係を調べる。これまでに、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いた明るいライマンアルファ輝線銀河 (LAE) やライマ

ンブレイク銀河 (LBG) の探査により、J0148+0600の巨大なガン・ピーターソンの谷の周りでは銀河密度が平均よりも低いことが示唆されている [1, 2]。低密度領域において中性水素密度が高いということは、銀河から放射された電離光子が、低密度領域まで十分に届いていないという状況を暗示している。しかし、他のキューサー領域ではこれを追認する確たる証拠は得られていない (Ishimoto, R. et al., submitted)。地上からの観測ではいくつかの困難がある。まず、中性水素密度が高い領域では $\text{Ly}\alpha$ がより強く吸収を受けるため、観測されるLAE面密度が真の密度場を反映していない可能性がある。また、ライマンブレイク法では明るい銀河しか検出できないこと、ダスト減光の影響が大きいこと(これはLAEにも当てはまる)、測光赤方偏移の不定性が大きいことなどが挙げられる。我々はJWSTで初めて可能になる強い可視光輝線の分光観測を行うことで、これらの問題を本質的に解決し、銀河密度と銀河間中性水素密度の関係を高い精度で測定することを目指す。

また個々の銀河の存在は、局所的なスケールで周辺の銀河間ガスの電離状態に影響を与えている可能性がある。スパイク状の $\text{Ly}\alpha$ 透過信号と、個別の銀河の位置や性質を比較することで個々の銀河が周囲のガスを電離する様子を解明したい。

3.2 金属吸収線のホスト銀河の同定

背景キューサーまでの視線上に金属元素を含むガス雲があると、スペクトルに金属イオン(中性原子を含む)による吸収線が生じる。通常、複数の吸収線が生じるため観測された波長から吸収体の赤方偏移を一意に決めることができる(同じガス雲から生じる複数の吸収線を「吸収線系」と呼ぶ)。これらの吸収体は銀河やその周辺のガスであると考えられ、吸収線の強さや強度比から金属量や元素組成、イオン化状態を調べることができる。 $\text{Ly}\alpha$ 吸収が飽和する $z > 6$ では、金属吸収線は希薄なバリオン物質を調査できる(21 cm 線観測以外では)唯一のプロブとなる。

これまでのキューサー吸収線系の観測により、金属イオンの平均的な存在量は赤方偏移とともに緩やかに減少することが知られている。これは、銀河から銀河間空間への金属供給による金属量進化を反映している。この緩やかな傾向は再電離期が近づくで一変する。CIVといった高電離状態のイオンの存在量が急激に減少するのに対し、低電離イオンはそれまでの傾向を維持、あるいはむしろ増加するのである（特に中性酸素の増加が指摘されている）。これは、金属元素の量的な進化というよりもむしろ吸収体のイオン化状態の変化を反映していると考えられる。このような吸収体の物理状態の変化は、再電離過程に関連して引き起こされる銀河周辺ガスの変化、若い銀河内で起こる放射や金属元素の供給といった物理過程を理解するうえで非常に重要である。

吸収体と銀河の活動を結びつけて考察するには、その吸収体が付随しているであろう「ホスト銀河」を同定する必要がある。これにより、銀河周辺ガスの空間構造やダイナミクス、金属汚染の進行、放射が周囲に与える影響といった物理モデルを制限できるのである。

ホスト銀河探しは深い撮像と分光追観測による方法や、発展が著しい広視野面分光を用いたブラインド探査によって活発に行われている。赤方偏移 $z \leq 3$ では、特にMgIIのような低電離イオンによる強い吸収線系のホスト銀河が固有距離で100 kpcの範囲に高い確率で見つかっている。一方で、 $z > 5$ ではホスト銀河候補が数個程度報告されているにすぎない。

EIGERプロジェクトではターゲットキューサーのスペクトル中に見つかっている多数の吸収線系のホスト銀河の同定を目指す。背景キューサー近傍の $40 \times 40 \text{ arcsec}^2$ の中心領域では、ポイントングを重ねることでモザイク領域の4倍の積分時間が得られる。これにより、高いコンプリーtenessでキューサー視線近傍に存在するホスト銀河を探査する。一方で、キューサー視線の近

傍に銀河が検出されたのに吸収線系は見当たらないといった場合もあるだろう。このような場合も、やはり銀河周辺ガスの金属汚染や構造のモデルに制約を与えることができる。

3.3 最古の明るいキューサーのホスト銀河、ブラックホール質量と周辺環境

ターゲットキューサーはいずれも非常に明るく、中心ブラックホール質量は $\sim 10^9 M_{\odot}$ 程度と見積もられている。このような非常に極端な天体の性質や周囲の環境を明らかにすることで、超大質量ブラックホールの形成、ホスト銀河の進化との関連、再電離や周囲の環境への影響を包括的に理解することを目指す。

大気ゆらぎの影響がない高分解能撮像観測によってキューサーのホスト銀河を分離して測光を行うことが可能である（実際の解析では慎重な点像分布関数の差し引きが必要である）。またグリズム観測により $H\beta$ と $[\text{OIII}]\lambda 5007 \text{ \AA}$ 輝線の検出が可能である（J1120+0641では $H\beta$ のみ検出される）。スペクトル上でも、ホスト銀河からの輝線はキューサー降着円盤からの広がった輝線に重なる形で検出されるため、分離が可能であると期待される。これによりホスト銀河の質量、星形成率、大きさ、形態などの特徴を明らかにする。

また、降着円盤由来の $H\beta$ の輝線幅を測定することで、中心ブラックホールの質量を高い精度で確実に見積もることができる。また、高SN比の $H\beta + [\text{OIII}]$ 輝線を用いることで系の赤方偏移を正確に決定することができる。系の赤方偏移の厳密な決定は、例えば $\text{Ly}\alpha$ 輝線の吸収プロファイルを用いたニアゾーンと呼ばれる近傍電離領域の解析やガスアウトフローの解析において不可欠である。

さらに、キューサーの周辺の銀河を探査することで、高光度キューサーがどのような環境に存在しているのかを明らかにする。近接した銀河の視線速度構造からハロー質量の制限もできるだろう。撮像と分光データからは質量・星形成率といった基本的な性質を測定できる。例えば、このような

銀河ではキューサーからの強烈な放射によりガスが温められ星形成が抑制されるネガティブフィードバックが予想される。そのような機構が実際に働いているのか、といった問いに答えたい。

3.4 $z\sim 4-5$ におけるH α 輝線銀河の探査

上に述べた主要なテーマではH β + [OIII] 輝線で検出される再電離期 ($z\sim 5-7$) の銀河サンプルを用いる。しかし上述の通り今回の観測では、事前選択なしに視野内のすべての銀河のスペクトルを得ることができる。特に、 $3.7 < z < 5.1$ の赤方偏移範囲で6領域全体で1,000個以上のH α 輝線銀河のサンプルが得られる。高解像度の撮像画像と合わせ、質量、星形成率、年齢、ダスト分布の決定や形態分類を行う。活動銀河核 (AGN) や高赤方偏移プロトクラスターの同定を行うことで、これらの形成や進化、特性を理解することができると期待される。また、H α 輝線銀河サンプルを用いて、3.2節で述べた金属吸収線系宿主銀河の探査ももちろん可能である。

4. まとめ—ポストドク生活を振り返って

2016年10月、私はポストドクとしてスイス連邦工科大学チューリッヒ校に着任した。受け入れ教員である、Simon Lilly教授は長年にわたるJWST計画への貢献により110時間のGuaranteed Timeが付与されており、私は着任と同時に、その保証時間を用いた本プロジェクトの立案を開始した。立案と言っても大まかな方針は既に彼の中にあり、主な仕事は観測の最適化や実現可能性の精査であった。この時点でのJWST打ち上げは2018年10月に予定されており、その後も打ち上げの延期が繰り返されたのは、周知のことである。結局スイスでのポストドク期間中にデータ取得は疎か、打ち上げすら迎えることができなかった。

しかし、打ち上げを待つ間に様々な研究をすることができた。中でも本プロジェクトと共通するテーマである銀河間ガスの光学的厚みと銀河分布

の相関に関する研究では、初めてPIとしてすばる望遠鏡HSCの観測時間を獲得することができ、研究者として大きなステップを踏むことができたと感じている。

4年間のチューリッヒ生活を終えて、2020年10月に現職として帰国した。これまで延期を繰り返してきた打ち上げも、2021年12月に無事に成功し、科学観測の開始が目前に迫っている。我々も形が整ってきた解析パイプラインやシミュレータの習熟や解析コードの開発に取り組み、現在まで頻繁なミーティングを行っている。7人の小さなチームではあるが、Lilly教授には押しの強いメンバーに負けずプロジェクトをリードすることを期待されている。信頼と期待に答えられるよう最大限の努力をし、プロジェクトを成功に導きたい。大きなプレッシャーを感じると同時にデータの到着が待ち遠しい。

参考文献

- [1] Becker, G. D., et al., 2018, ApJ, 863, 92
- [2] Kashino, D., et al., 2020, ApJ, 888, 6

The EIGER project (GTO 1243)

Daichi KASHINO

Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8602, Japan

Abstract: Our *EIGER* project aims to understand the process of cosmic reionization, evolution of young galaxies, and the formation of supermassive black holes in the Epoch of Reionization. We use NIRCcam to carry out slitless spectroscopy of $z\sim 6$ star-forming galaxies in six fields of $z>6$ bright quasars, and correlate the distribution and properties of these galaxies with the conditions of the inter/circum galactic media along the lines of sight, which are provided from the spectra of the background quasars.