

# クェーサーと銀河の共進化史の探求



内山 久和

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: hisakazu.uchiyama@nao.ac.jp

遠方宇宙に存在する、中心核が非常に明るくてあたかも星に見える天体「クェーサー」。この天体は周辺銀河の形成・進化に影響を与えるほどの莫大なエネルギーを辺りに撒き散らしている。したがって、宇宙の進化や今後辿るその運命を正確に予想するためには、クェーサーの発現する場所、およびその放射の周辺銀河への影響を定量的に理解することが必要不可欠である。しかしながら、クェーサーは非常に稀な天体であるために、統計的な議論には全く至っていないのが現状である。筆者らはすばる望遠鏡搭載のHyper Suprime-Cam (HSC) やSuprime-Cam (S-Cam) と呼ばれる可視光帯の広視野撮像観測装置の能力を最大限に利用することで、この問題に挑んだ。

## 1. はじめに

我々が住むこの宇宙はどのように生まれ進化してきたのか、そして今後どのような運命を辿るかという問題は誰もが一度は考えたことのある、普遍的で霧の深い最大級の謎である。観測と理論双方の研究者らの血が滲む努力により見出された現在の宇宙観は、宇宙はビックバンという大爆発により始まり、その直後のインフレーションによって急激に膨張し、今尚ゆるやかに膨張し続けているというものである\*<sup>1</sup>。かの有名なアインシュタイン方程式によれば、宇宙という巨大な「入れ物」の進化はその中に入っている物質、特に物質の大部分(約85%)を占有する「暗黒物質(ダークマター)」によって制御されている。ダークマターは重力相互作用のみを示す、目には見えない透明な物質である。ダークマターが重力的に集積しているところ(ダークマターハロー)には銀河もまた集積していると期待される。我々は

見ることができる銀河を「灯台」として、見ることができないダークマターの分布を予想することができるであろう。しかしながら、重力以外の相互作用によってダークマターと銀河の分布に食い違いが生じており、それは容易ではない。重力以外の相互作用の中でも近年注目が集まっているのが、クェーサーとその周辺に存在する銀河との相互作用である。

クェーサーは遠方宇宙に存在している、宇宙の中で最も明るい天体の一つであり、中心核が非常に明るいためあたかも星のように見える天体である。その強力な放射光は周辺に存在している銀河の形成ならびに進化に大きな影響を及ぼすと考えられている。したがって、宇宙の構造形成および進化を理解するためには、クェーサーがどういった場所に住んでいて、どの程度の影響を周辺銀河に与えるのかを理解することが必要不可欠である。本稿ではこのトピックに焦点を当て、これに関する筆者らの研究をいくつか紹介したいと思

\*<sup>1</sup> インフレーションの後にビックバンが起こったと言う人もいる。この違いはビックバンの定義の仕方によって生じる。

う。まずはクェーサーが宇宙の中でどういった環境に存在することが期待されるのかについて、その発現機構の観点から述べ (1.1節)、その後クェーサーが銀河に与える影響について述べたい (1.2節)。

### 1.1 クェーサーが住む環境

クェーサーは一般的にガスを多く含んだ銀河同士の合体によって出現すると考えられている [1]。銀河同士の合体が起こると、銀河中心に普遍的にあると考えられている超巨大ブラックホールにガスが降り積もる。その際、ガスの莫大な重力エネルギーを放射として解放し、光り輝く天体となる。これをクェーサーと呼ぶ (その全放射光度はおよそ  $10^{46} \text{ erg s}^{-1}$  にも達する)。したがってクェーサーは銀河の合体が普通の領域よりも多く起こると考えられる、銀河が密集した領域「原始銀河団」に存在することが期待される。ここで、原始銀河団とは近傍宇宙にある銀河団に将来的に成長する、銀河の高密度領域のことである。実際に、遠方宇宙、特に赤方偏移  $z$  が3以上の時代 (約110億年前) では、クェーサーは比較的重いダークマターハローに住んでいることが期待されており [2]、原始銀河団という重い構造中に存在していそうである。

遠方宇宙 ( $z > 3$ ) に存在するクェーサーが実際に原始銀河団に存在するかどうかを定量的に求めるには、クェーサー周辺に存在する銀河の数密度を計測する必要がある。遠方宇宙の銀河としては主に2つあり、(1) ライマンアルファ輝線銀河と (2) ライマンブレイク銀河がある。これらの銀河は本稿の後半で頻繁に言及するのでここで少し詳しく説明したい。星形成が進行中の領域 (星形成領域) において生み出されるライマンアルファ光子はダストによって容易く散乱・吸収される。若くてダストの少ない銀河ならば、それらの光子は銀河の外へ脱出することができるであろう。その光子は地球の観測器に到達するまでに、宇宙膨張の効果を受けることでその波長が長くなる。こ

の引き伸ばされた後のライマンアルファ光子のみを通す狭帯域フィルターで輝線銀河として検出される銀河をライマンアルファ輝線銀河という。一方で遠方銀河からの光は視線方向に沿って存在している物質 (銀河間物質) によって吸収を受ける。結果として引き伸ばされたライマンアルファ線の波長よりも短い波長の光は大きく吸収される。この削り取られた光の特徴を複数のフィルターを使って捉えることで、ある時代 (赤方偏移) の銀河を選択することができる。この銀河のことをライマンブレイク銀河という。多くの観測によって、ライマンアルファ輝線銀河はライマンブレイク銀河よりも若くて軽い銀河であるということが知られている。

遠方宇宙、特に  $z > 3$  のクェーサー周辺環境が実際に高密度領域なのかどうかを調べる観測的研究が今までたくさんなされてきた。たとえば、K. Husband 氏らは  $z \sim 5$  の時代で3つのクェーサーがライマンブレイク銀河の高密度領域に存在していることを見つけた [3]。一方で面白いことに、高密度領域と関連しないクェーサーも多数報告されている。たとえば、E. Bañados 氏らや C. Mazzucchelli 氏らは、 $z \sim 5.7$  の時代ではクェーサー周辺は平均的な銀河数密度とほとんど同じであるということを報告している [4, 5]。このように、クェーサーが本当に高密度領域で発現するかどうかについてはまだ論争中で、共通認識は得られていないというのが現状である。というのも、クェーサーならびに原始銀河団は非常に稀であり、それに加え、今までなされてきた研究は周辺数密度の定義や観測の深さおよび視野が様々であるために、統計的な議論に至っていないからである。

### 1.2 クェーサーの光蒸発効果

クェーサーはその強い紫外放射 ( $> 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ ) によって周辺の銀河形成を阻害し、その周辺を低密度領域にするという「光蒸発効果」を有することがシミュレーションによって予想されている [6]。通常、銀河はダークマターハローに集積

しているガスが重力崩壊することで形成される。しかしながらキューサーがその近傍に存在すると、ダークマターハロー中のガスがキューサーの紫外放射によって温まることで、その重力崩壊が妨げられ、結果として銀河形成が阻害される。この効果はキューサーから半径約100万光年程度の広範囲にまで及び、特に質量の軽い銀河に効果的であるということが期待されている。たとえば、柏川伸成氏らは $z=4.8$ に存在するキューサー周辺のライマンアルファ輝線銀河とライマンブレイク銀河の両方の分布を同時に調査した [7]。その結果、ライマンブレイク銀河はキューサーを含むようにフィラメント構造を作っていたが、ライマンアルファ輝線銀河はキューサーを避けるようにリング状に分布していることがわかった。これはライマンブレイク銀河よりも軽いライマンアルファ輝線銀河のみが光蒸発効果を受けた結果であると考えられる。その一方で、光蒸発効果の証拠が見られなかったという研究結果もある [8]。しかしながら、これらの研究は $z\sim 5-6$ という非常に遠方の宇宙を対象としていて、低光度銀河、つまり光蒸発効果を大きく受けると期待されている低質量銀河を取りこぼしている可能性がある。加えて、サンプル数もまだ少なく、このトピックにおいてもまだまだ統計的な議論に至っていない。

### 1.3 まとめ

まとめると、キューサーと銀河の相互作用を理解するためには (1) キューサーが高密度領域に存在するかどうかを統計的に調査すること、ならびに (2) キューサーの光蒸発効果の有無を統計的に、かつ比較的近傍の宇宙で調査することが必要不可欠である。筆者らはすばる望遠鏡の広視野撮像装置である Hyper Suprime-Cam (HSC) および Suprime-Cam (S-Cam) を最大限に利用し、サンプル数を拡大することでこれらの課題にそれ

ぞれ挑んだ。以下ではそれぞれの研究を順次紹介したいと思う。

## 2. キューサーと原始銀河団との関連

まずはキューサーが果たして原始銀河団のような銀河の高密度領域に存在するのかどうかについての研究から紹介したいと思う [9]。今までの多くの研究において、一番の問題点はキューサーならびに原始銀河団が極めて稀な存在であるということであった。そこで筆者らは、すばる望遠鏡搭載の超広視野撮像観測装置 HSC による大規模探査 (Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program; HSC-SSP) を利用して、原始銀河団とキューサーの大規模サンプルを構築し、それらの分布を比較した。

### 2.1 原始銀河団とキューサーサンプルの構築

HSC は 8-10 m 級の大型望遠鏡の撮像装置の中で最も広い視野を持ち、かつ、極めて遠い天体からの光を捉えることができるという点において他の追従を許さない、この研究には最適な装置である。2014 年初期に始まった HSC-SSP では今尚探査が続けられており、将来的にはおよそ 1,000 平方度の面積の探査が完了する予定である。筆者らは 2017 年 2 月に全世界に向けて公開された初期データ [10, 11] を利用することにより、原始銀河団サンプルとキューサーサンプルを構築した。なお、この初期データを利用してなされた研究は日本天文学会欧文研究報告の特集号にまとめられている\*2。

原始銀河団サンプルの構築は利川潤氏と筆者らによって行われた [12]。まず、HSC-SSP の複数の波長の観測データを組み合わせることにより、 $z\sim 4$  の時代のライマンブレイク銀河を探索領域から選択することができる。ライマンブレイク銀河はいくつかのフィルターの測光値を使って選択されるが、それぞれのフィルターにおいて、観測

\*2 すばるのウェブリリース「<https://subarutelescope.org/jp/news/topics/2018/02/26/2444.html>」を参照されたい。

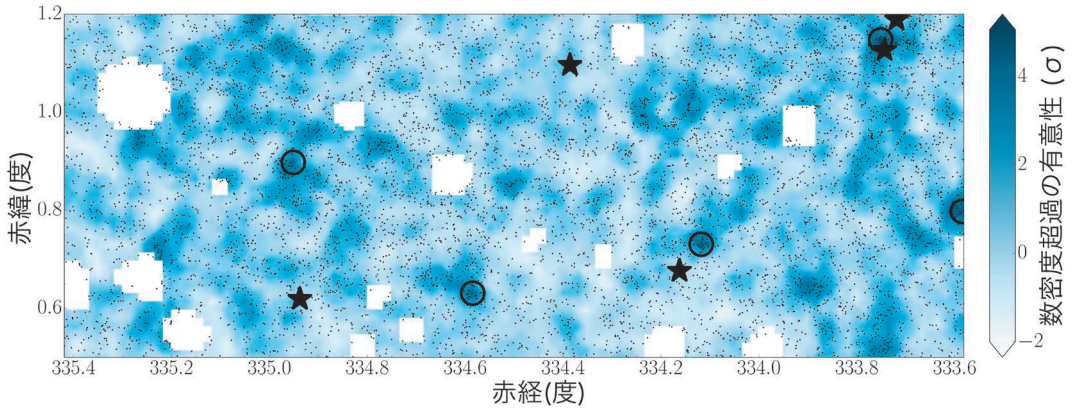


図1 z~4の時代での銀河と原始銀河団領域の分布. 探査領域の一部を切り出して表示したもの. 背景の青色の濃淡は銀河数密度超過の有意性を表し, 黒点は銀河の位置を表す. 特に黒丸は将来的に銀河団に成長すると予想される原始銀河団であり, 黒い星はクェーサーを表している. 白い領域はマスク領域を表している. より広域で詳しい図はすばるのウェブリリース「<https://subarutelescope.org/jp/results/2018/03/04/2616.html>」を参照されたい.

時の天候などの要因により探査領域ごとに画像の質にばらつきがあるために, 領域によってライマンブレイク銀河の数密度にもばらつきが生じる. ここでは一様なライマンブレイク銀河を選択するために, 使用するすべてのフィルターに対し画像の質が一様な領域だけを使った. その有効面積は約121平方度である. 次に抽出したライマンブレイク銀河について, それらの数密度を算出する. 数密度の測定は, ある半径を持った円を探査領域にばらまき, その円内に入るライマンブレイク銀河の個数をカウントすることで行う. ここで重要なのが, ばらまく円の半径の大きさをどのように決めるかである. シミュレーション [13]によれば, z~4の時代では原始銀河団の典型的なサイズは約245万光年であるので, これを円の半径として採用する. 円内に入る銀河の個数の平均値と分散を求めることにより, 数密度超過の有意性が探査領域の各点で見積もられる. このようにして, 探査領域においてライマンブレイク銀河の数密度超過の有意性の濃淡図が完成する (図1). 理論モデルによると, 4σ以上の有意性を持つ領域はz=0の現在まで進化すると, 約80%の高確率で銀河団に成長するということが期待されてい

る [14]. ゆえに, 4σ以上の有意性を持つ領域を原始銀河団と定義する. 結果として, 約121平方度の探査領域中に179個の原始銀河団が見出された. これは知られている原始銀河団サンプル数の10倍以上に匹敵する.

クェーサーサンプルは大規模な探査サーベイであるスローン・デジタル・スカイサーベイ (Sloan Digital Sky Survey; SDSS) で構築されたクェーサーカタログ (DR12Q) から抽出する [15]. このカタログはz=0.041–6.440という幅広い時代の, 10,200平方度という広範囲にわたる297,301個の分光観測で特定されたクェーサーで構成されている. 上で構築された179個の原始銀河団と同じ時代 (z~4), かつ同じ探査領域上 (約121平方度) のクェーサーのみを選択することにより, 結果として151個のクェーサーサンプルを取得した.

## 2.2 クェーサーの周辺環境

これらの179個の原始銀河団と151個のクェーサーサンプルを比較することにより, クェーサーが高密度領域と関連するのかどうかを統計的に議論することができる. 図2はそれぞれのクェーサーから最も近い原始銀河団までの距離 (天球面

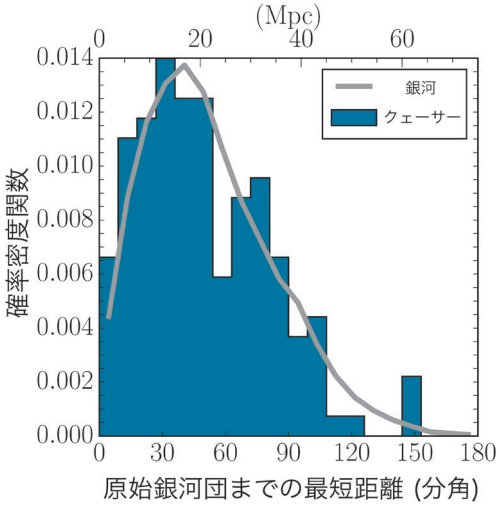


図2 クェーサーから最も近い原始銀河団までの天球面上の距離分布 (青のヒストグラム). ライマンブレイク銀河からの距離分布は灰色線で示されている. 両者の分布は有意に異なるない.

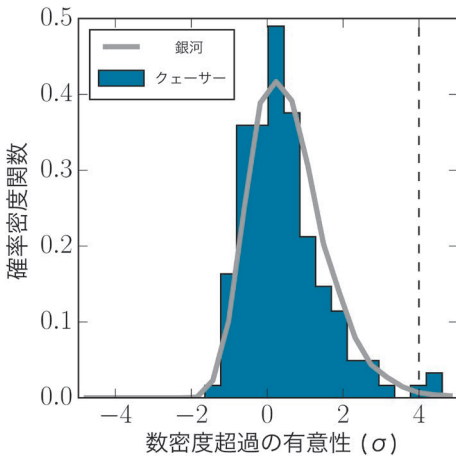


図3 クェーサーの存在する場所の数密度超過の有意性の頻度分布 (青のヒストグラム). ライマンブレイク銀河の場合が灰色線で示されている. 両者の分布は有意に異なるない. 原始銀河団, つまり  $4\sigma$  以上の有意性を持つ領域が点線で表されている. 全クェーサー151個のうち, 2個だけが原始銀河団に存在している.

上での距離)の分布を描いたもの(青のヒストグラム)である. 比較材料として, ライマンブレイク銀河からの最短距離の分布(灰色線)も描かれている. その結果, 驚くべきことにこれら2つの

分布はほとんど同じであることがわかった. 実際, Kolomogorov Smirnov検定(KS検定)と呼ばれる, 2つの分布が有意に異なるかどうかを調べる検定をこれらに対して行くと, これら2つの分布は有意に異なるとは言えないという結果が得られた.

さらに詳しく調べるために, クェーサー周辺の数密度超過の有意性(図1)を計測し, その分布をライマンブレイク銀河周辺の数密度超過の有意性の分布と比較した(図3). ここで, 天球面上には銀河数密度超過の有意性が各点で見積もられているので(2.1節参照), クェーサーあるいはライマンブレイク銀河が存在する位置における数密度超過の有意性の値を参照することで, それらの周辺の数密度超過の有意性を計測することができる. その結果, クェーサー周辺の数密度超過の有意性の分布と銀河周辺のそれとはほとんど同じであることがわかった. 距離の分布と同様に, KS検定を行うと, これら2つの分布は有意に異なるとは言えないという結果が得られた. さらに, クェーサー周辺数密度超過の有意性が  $4\sigma$  以上超えているもの(原始銀河団)であるという場合は全クェーサーサンプル151個中たったの2個(1.3%)のみであることが明らかになった. これはランダムにライマンブレイク銀河を選び出した時に原始銀河団と関連する確率とほとんど同じである.

これらの結果は, クェーサーは銀河とほとんど同じ環境に存在しているということを意味しており, クェーサーはその周辺の環境によらずに出現することを示唆している.

### 2.3 クェーサーの性質と周辺銀河数密度との関係

個々のクェーサーの性質が周辺の銀河数密度に依存するかどうかを見るのは興味深い. 図4はクェーサーの紫外放射の強さ, クェーサーの超大ブラックホールの質量, ならびにクェーサー電離領域の大きさに対して, クェーサー周辺の銀河

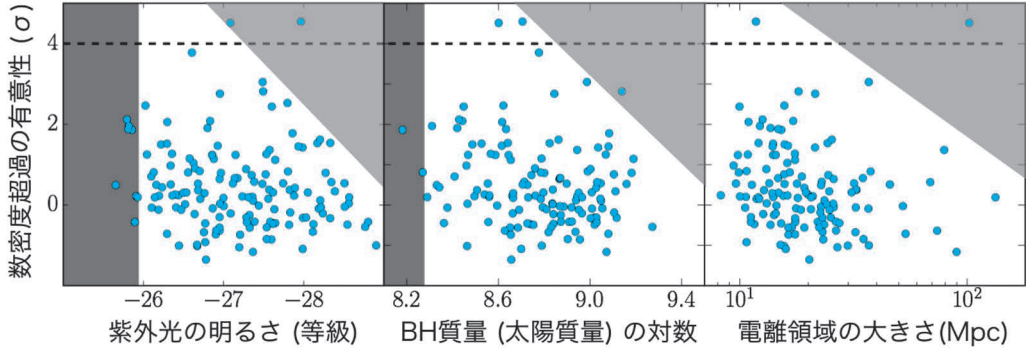


図4 クェーサー周辺の銀河数密度超過の有意性に対する、紫外放射の絶対等級 (左パネル)、中心巨大ブラックホールの質量の対数表示 (中央パネル)、およびクェーサー近傍の電離領域の大きさ (右パネル) の関係. 四角形で表された灰色の領域以外の領域はクェーサーの取りこぼしがない領域を表す. それぞれのパネルの灰色の三角領域にはクェーサーがほとんどいないということがわかる.

数密度超過の有意性がどのように変わるかを示した図である. ここで、クェーサーの超巨大ブラックホールの質量は、ブラックホール近傍のガスがブラックホールに重力的に束縛されていると仮定し、クェーサーのスペクトルから算出している (single-epoch method) [16]. また、クェーサーの電離領域とはクェーサーからの放射によって周辺が電離されている領域のことでその大きさ (Near zone size) はクェーサースペクトルの吸収度合いから見積もることができる [17]. この図4から、紫外放射で最も明るく、ブラックホール質量が最も重く、そして電離領域の範囲が最も大きいクェーサーは、原始銀河団を避ける傾向にあると考えられる. 実際にSpearmanの無相関検定と呼ばれる、2組のデータに相関があるかどうかの検定を行うと、 $2\sigma$ 程度の有意性でこれらに弱い負の相関があることが示された. これらの結果はクェーサーの強い紫外放射によって周辺銀河の形成が阻害された (光蒸発効果) ということを示唆しているとも言える. しかしながら、1.2節で述べたようにライマンブレイク銀河は比較的重い銀河であり、光蒸発効果が顕著に見られないとも考えられる. 次の章では、より軽いライマンアルファ銀河を利用することで、その効果の有無を定量的に調べた結果を紹介する.

### 3. クェーサーによる光蒸発効果

1.2節で紹介したように、クェーサーにはその強い紫外放射によって周辺の銀河形成を阻害する光蒸発効果があると考えられている. 数値シミュレーションによれば、この効果は低質量銀河に強く影響を与えることが予想される [6]. したがって観測的にこの効果の存在を確かめるためにはクェーサー周辺の低質量銀河の分布を調べる必要がある. そこで筆者らはすばる望遠鏡搭載の広視野撮像装置S-Camを使ってクェーサー周辺の低質量銀河であるライマンアルファ輝線銀河の分布を統計的に調べることで、光蒸発効果を定量的に特徴づけることを試みた [18].

#### 3.1 クェーサーとライマンアルファ輝線銀河

光蒸発効果が最も効くと考えられる低質量銀河からの暗い光を取りこぼさないようにするために、比較的近傍 $z \sim 2-3$ の時代のクェーサーとライマンアルファ輝線銀河を選択する. 赤方偏移の値は一般に、赤方偏移した輝線を特定することによって見積もることができるが、クェーサーの赤方偏移を見積もる際には気をつけるべきことがある. というのも、クェーサーからのアウトフローと呼ばれる巨大なガス流によって輝線の赤方偏移がずれることがあるからである. ここではアウト

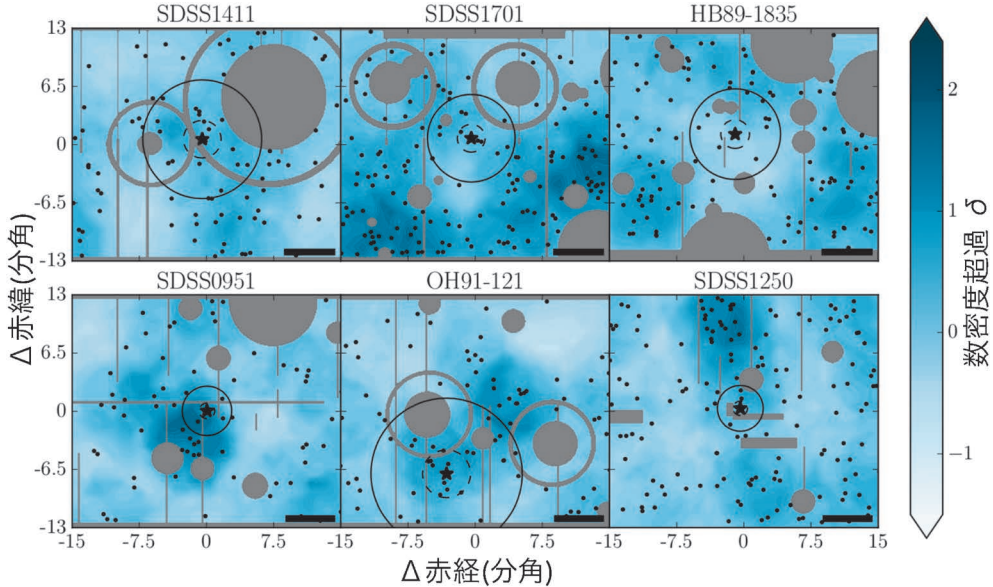


図5 クェーサー周辺の銀河数密度分布の例. 11個のクェーサー領域のうち、6個のみ示されている. それぞれのパネルの中心の黒い星はそれぞれのクェーサーを表している. 黒点はライマンアルファ銀河を表していて、背景の青色の濃淡によってその数密度（正確には平均に対してどのくらい数密度が高いかの量）が表されている. 黒い円内はクェーサーの放射によって、宇宙の平均的な紫外放射の強さよりも紫外放射が強い領域を表しており、黒い点線の円内はさらにそれよりも10倍高くなっている領域を示している. 右下の黒線の長さは共同座標系で8 Mpcの大きさを示している. 灰色の領域はマスク領域を表している.

フローの影響が少ないと考えられている H $\beta$  や [OIII] 輝線から赤方偏移が見積もられているクェーサーのみを選び出した. 加えて、光蒸発効果を系統的に調べるために様々な明るさのクェーサーを抽出した. 結果として、筆者らは紫外放射光度が約  $10^{45.5} - 10^{48.0}$  erg s $^{-1}$  の11個のクェーサー領域を選択した.

これらのクェーサー領域において S-Cam の狭帯域フィルターを利用することでライマンアルファ線銀河を抽出し、その数密度分布を描くと図5のようになる. ここで、クェーサー近傍は宇宙の平均的な背景紫外放射よりも局所的に紫外放射が強くなっていると期待される. クェーサーのスペクトルからどの程度の強さの紫外放射がその近傍に期待されるかを見積もることができる [18]. 図5の黒い円内は宇宙の平均と比較して紫外放射が強い領域を表しており、黒い点線の円内はさら

にそれよりも10倍強くなっている領域を示している. 黒い円内をクェーサーの近傍、そしてその外側をフィールドと定義し、近傍とフィールドとでライマンアルファ輝線銀河の性質の違い、特に質量分布の違いを見ることにより、光蒸発効果の有無を調べる.

### 3.2 光蒸発効果

光蒸発効果が存在するならば、クェーサーの近傍において質量の軽いライマンアルファ輝線銀河は形成を阻害され、フィールドに比べて数が少なくなることが期待される. ライマンアルファ輝線銀河の質量はライマンアルファ輝線の等価幅 (EW) と非常に良い相関があることが知られている [19]. ライマンアルファ輝線銀河の EW が高くなればなるほど、その星質量は小さくなる. 通常、EW を見積もる際は、ライマンアルファ輝線銀河のスペクトルをフラットな連続光と

ライマンアルファ輝線の重ね合わせであると仮定して見積られる。しかしながら、このモデルでは銀河間物質による吸収の効果が考慮されていない。本研究ではより正確にEWを求めるために、その吸収の効果を加えたスペクトルを仮定してEWを見積もった。すべてのライマンアルファ輝線銀河について（静止系で見た時の）EWを求め、近傍とフィールドでEWの分布を比較すると図6のようになる。この図6から、キューサー周辺においてEW>150 Åの軽い銀河が平均的に欠乏していることがわかる。

ライマンアルファ輝線銀河において、このEW>150 Åという等価幅がどのくらいの質量に対応するのかを調べてみる。橋本拓也氏はライマンアルファ輝線銀河のスペクトルを解析することにより、EW~200-400 Åを持つライマンアルファ輝線銀河の星質量が $7.1^{+4.8}_{-2.8} \times 10^7$ 太陽質量であると見積もった [20]。一方で、EW<150 Åを持つ銀河は $5.9^{+19.2}_{-2.2} \times 10^8$ 太陽質量という比較的重い星質量を持つことが知られている [21]。また、これらの星質量はライマンアルファ輝線銀河の星形成率と星質量との関係（main sequence）から

も見積もることができる [22]。この方法でも、橋本拓也氏らの結果と同等の星質量が得られる。最後に、星質量とダークマターハローの質量との間の関係を使うことにより [23]、EW>150 ÅおよびEW<150 Åを持つライマンアルファ輝線銀河のダークマターハロー質量はそれぞれ $3.6^{+12.7}_{-2.3} \times 10^9$ 太陽質量、および $2.9^{+14.0}_{-1.8} \times 10^{10}$ 太陽質量となることがわかった。

北山哲氏らは流体シミュレーションを使うことにより、どのくらいのダークマターハロー質量に対してキューサーの光蒸発効果が効果的であるのかを調べた [24, 25]。そのシミュレーションの結果によると、筆者らが着目しているキューサーの近傍の紫外放射の強さでは、約 $3 \times 10^9$ 太陽質量よりも軽いダークマターハローは光蒸発効果の影響を大きく受け、そのようなダークマターハロー中では銀河形成が阻害される。一方で、約 $10^{10}$ 太陽質量よりも重いダークマターハローになると、ほとんどその効果を受けない。面白いことに、これらの質量はそれぞれ、EW>150 ÅおよびEW<150 Åのダークマターハローの質量に一致する。ゆえに、EW>150 Åのライマンアルファ輝線銀河はキューサーによる光蒸発効果を受けて銀河形成が阻害されたと考えることができる。このようにして、筆者らは観測的に初めてキューサーの光電離効果を示唆することができた。

#### 4. まとめと議論

筆者らはすばる望遠鏡のHSCやS-Camの広視野撮像観測装置を利用することにより、キューサーの環境を統計的に初めて特徴づけることができた。具体的には（1）キューサーは原始銀河団中に好んで住むのではなく、一般銀河とほとんど同じ環境に住んでいること、ならびに（2）キューサーの光蒸発効果によって周辺の軽い銀河の形成が阻害されることを明らかにした。これらのことから、たいていの明るいキューサーは環境に依存せずに出現し、いったん出現すると、その強い紫

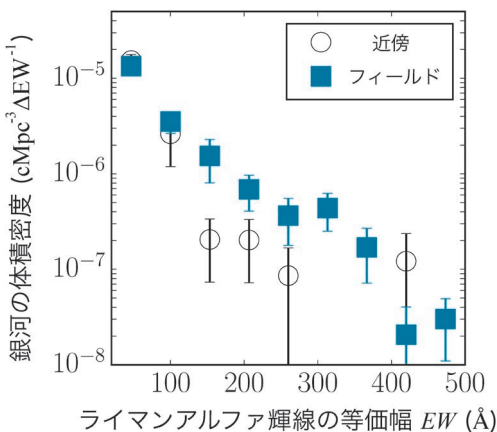


図 6. 銀河のライマンアルファ輝線の等価幅の分布。黒丸点がキューサー近傍、青四角がフィールドでの分布を表している。EW>150 Åを持つ軽い銀河がキューサー近傍で欠落していることがわかる。



外放射によって周辺の軽い銀河の形成を妨げるという驚くべき描像が浮かび上がってきたのである。そうは言っても、まだ解決すべき不透明な部分がいくつか残っている。

まず、原始銀河団とキューサーとの相関についての研究(2章)では、キューサーサンプルは遠方でも捉えやすい明るいキューサーのみを使用しており、暗いキューサーを取りこぼしている可能性がある。さらに、キューサーの発現機構に制限をつけるためには、一つの時代のみならず(今のところ、 $z \sim 4$ のみ調査している)、異なる時代においても周辺の銀河数密度を調査する必要がある。これらのことを解決するためには暗いキューサーと高密度領域との相関分析、ならびに様々な時代でのキューサーと高密度領域との相関分析が必要であろう。前者の暗いキューサーは暗い光でも捉えられるHSCを使うことでそれらのサンプルを構築することが可能である [26]。

光蒸発効果の研究(3章)においては、キューサー周辺における軽いライマンアルファ輝線銀河の欠如から光蒸発効果の存在を示唆した。しかしながら、実はライマンアルファ輝線銀河はライマンブレイク銀河に進化すると考えられており [27]、この欠如が光蒸発効果と無関係な可能性がある。これを解決するためには、キューサー周辺でライマンアルファ輝線銀河とライマンブレイク銀河の分布を比較できるような観測を行えば良いだろう [7]。仮に、ライマンブレイク銀河の数密度がキューサー周辺で超過していた場合、ライマンアルファ輝線銀河がライマンブレイク銀河に進化していると考えられる。その一方で、ライマンブレイク銀河の数密度が平均的あるいは低い場合、キューサーの光蒸発効果によってライマンアルファ輝線銀河が欠乏していると判断できる。また、キューサー中心のブラックホール近傍にはダストがトーラス状に分布しており [28]、中心からの紫外放射が遮られる。ゆえに光蒸発効果は空間的に非等方的になるべきであるが、本研究で

はその非等方性まで確認できなかった。一つの解決策としてはキューサー周辺でのライマンアルファ輝線銀河の3次元空間分布を調べることである。まもなくすばる望遠鏡において科学的観測が始まる、直径1.3度の巨大な視野内の天体を一気に分光できる超広視野分光器PFS(Prime Focus Spectrograph)がその全貌を明らかにするかもしれない。

筆者らはすでにこれらの研究に取り込んでおり、興味深い結果が得られているものもある。これらの結果を皆様に早くお見せできるよう邁進する所存である。

## 謝辞

本稿の科学的な内容は、2018年と2019年に筆者らが発表した投稿論文 [9, 18]に基づいているので、詳しくはそれらをご覧ください。これらの研究に携わっていただいた共同研究者の方々に感謝の意を表します。特に、東京大学の柏川伸成氏、宇宙線研究所の利川潤氏、および国立天文台の田中賢幸氏にはお世話になりました。深く感謝いたします。そして今回本稿の執筆の機会を与えてくださった小宮山裕氏に心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] Hopkins, P. F., et al., 2008, ApJS, 175, 356
- [2] Shen, Y., et al., 2007, AJ, 133, 2222
- [3] Husband, K., et al., 2013, MNRAS, 432, 2869
- [4] Bañados, E., et al., 2013, ApJ, 773, 178
- [5] Mazzucchelli, C., et al., 2017, ApJ, 834, 83
- [6] Benson, A. J., et al., 2002, MNRAS, 333, 156
- [7] Kashikawa, N., et al., 2007, ApJ, 663, 765
- [8] Kikuta, S., et al., 2017, ApJ, 841, 128
- [9] Uchiyama, H., et al., 2018, PASJ, 70, S32
- [10] Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70, S4
- [11] Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70, S8
- [12] Toshikawa, J., et al., 2018, PASJ, 70, S12
- [13] Chiang, Y.-K., et al., 2013, ApJ, 779, 127
- [14] Toshikawa, J., et al., 2016, ApJ, 826, 114
- [15] Pâris, I., et al., 2017, A&A, 597, A79
- [16] Vestergaard, M., 2002, ApJ, 571, 733
- [17] Fan, X., et al., 2006, AJ, 132, 117

[18] Uchiyama, H., et al., 2019, ApJ, 870, 45  
 [19] Nilsson, K. K., et al., 2009, MNRAS, 400, 232  
 [20] Hashimoto, T., et al., 2017, MNRAS, 465, 1543  
 [21] Shimakawa, R., et al., 2017, MNRAS, 468, 1123  
 [22] Vargas, C. J., et al., 2014, ApJ, 783, 26  
 [23] Kusakabe, H., et al., 2018, PASJ, 70, 4  
 [24] Kitayama, T., et al., 2000, MNRAS, 315, L1  
 [25] Kitayama, T., et al., 2001, MNRAS, 326, 1353  
 [26] Akiyama, M., et al., 2018, PASJ, 70, S34  
 [27] Mori, M., & Umemura, M., 2006, New Astron. Rev., 50, 199  
 [28] Antonucci, R., 1993, ARA&A, 31, 473

**The Environment of Quasars in the High Redshift Universe**

**Hisakazu UCHIYAMA**

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

Abstract: High-*z* quasars are generally thought to be formed through major mergers of gas-rich galaxies. Therefore, they should preferentially occur in the peaks of the matter density, i.e., protoclusters that are thought to evolve into the local clusters. However, this topic is still controversial and a consistent picture for the environment of high-*z* quasars has not yet been settled. In addition, the luminous quasars are expected to suppress galaxy formation in their surroundings. We take the advantages of the wide-field imaging capability of Subaru telescope to challenge to characterize the environment of high-*z* quasars.