

High- z QSOs の性質から探る宇宙再電離

尾上 匡房 (総合研究大学院大学物理科学研究科天文科学専攻)

Abstract

2000 年代の Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [York, D.G. et al. (2000)] に代表される広視野観測により、天文学は宇宙が誕生して約 10 億年後の宇宙再電離期を観測的に探る時代に突入した。クエーサー (Quasar, QSO) はそのスペクトルに、視線の銀河間物質 (IGM) にある中性水素による特徴的な吸収プロファイルが表れるので、その中性度 (x_{HI}) の時代進化を調べる非常に有効な手段として利用されている。 $z > 6$ クエーサーの発見は、この時代での $\sim 10^9 M_{sun}$ の巨大ブラックホールの存在と、IGM の中性度の高さ ($x_{HI} > 10^{-3}$) を示した [Fan (2006)]。また、現在見つかった最遠方の $z \sim 7.1$ クエーサーのスペクトルには中性水素による強い吸収が見られ [Daniel J. Mortlock et al. (2011)]、これらの研究から宇宙再電離期の物質進化に観測的な制限が与えられている [Fan et al. (2006)]。そして high- z クエーサー を用いた宇宙再電離の探求は、来年から始まるすばる望遠鏡の HSC survey 計画によって更に進歩し、より普遍的な知見がもたらされることが期待されている。

1 Introduction

ビッグバン後の宇宙空間には、いくつかの状態変化があったことが現在信じられている。 $z > 1100$ の宇宙は超高温高密度であった為、光子は散乱されてほとんど直進できなかった。その後、膨張によって温度が下がると宇宙は中性水素で満たされた光学的に透明な世界になった。これを宇宙の晴れ上がりと呼び、晴れ上がり前の最後の散乱面は宇宙背景放射として現在観測されている。やがて星や銀河などの天体が誕生するとそれらの放射によって次第に周囲の中性水素は電離されていく。初めは天体の周りに泡状に電離水素領域が分布していたのが次第に結合し、最終的に ($z \sim 6 - 14$) 宇宙は電離水素で満たされた現在の姿になった。これが宇宙再電離と呼ばれる現象である。そして近年の大型望遠鏡の建設と観測技術の進歩により、宇宙再電離がいつ、どのように起こったのかについて観測的に迫ることが可能になった。

ところで、宇宙再電離を観測的に探るために、遠方宇宙を見通すことができるのは非常に明るい天体は、有効な観測対象の 1 つである。クエーサーは活動銀河核の一種であり、中心の大質量ブラックホールからの強い放射により銀河の約 100 倍の明るさで輝く天体である。High- z クエーサーはその明るさ故に遠

方の宇宙の性質、特に IGM の物理状態を調べる上で非常に大事なツールになっており、Sloan Digital Sky Survey [York, D.G. et al. (2000)] をはじめとする広視野観測によって $z \sim 6, 7$ のクエーサー が発見され、宇宙が始まって最初の 10 億年の宇宙再電離期に既に $10^8 - 10^9 M_{sun}$ の大質量ブラックホールが存在していたことが示唆された。またスペクトルの解析から $z > 6$ の宇宙では水素が全て電離していない ($x_{HI} > 10^{-3}$) ことが統計的に調べられ、宇宙再電離がいつ起こったのかについての新たな知見をもたらした。今回の発表では high- z クエーサー の性質 [Fan (2006)]、そこから推定される宇宙再電離の描像 [Fan et al. (2006)]、そして現在見つかった最遠方の $z \sim 7$ のクエーサー の発見 [Daniel J. Mortlock et al. (2011)] について述べ、さらに来年から始まる HSC survey における high- z クエーサー の研究計画についても言及する。

2 Properties of high- z QSOs

SDSS (York et al. 2000) は $0 < z < 6.5$ の多くのクエーサーを発見した。そのなかでも Fan et al. (2000, 2001a,b, 2003, 2004, 2006a) は 6600 deg^2 の SDSS imaging data から 19 個の i-dropout クエー

サー ($5.74 < z < 6.42$) を発見し (図 1)、 $z > 5$ のクエーサーに対して統計的な議論が成された。

図 1 を見ると、クエーサーのスペクトルは銀河間雲の $Ly\alpha$ による強い吸収によって $Ly\alpha$ よりも青い部分のスペクトルがほとんど削られていることがわかる。特に $z > 6$ のスペクトルを見ると、 $Ly\alpha$ のすぐ近くが中性水素によって完全に削られており、これは Gunn-Peterson trough と呼ばれる特徴である。この効果による high- z での IGM の $Ly\alpha$ に対する光学的深さ $\tau_{GP}(z)$ は以下のように表される [Gunn-Peterson(1965) optical depth]。

$$\tau_{GP}(z) = 4.9 \times 10^5 \left(\frac{1+z}{7} \right)^{3/2} x_{HI}$$

ここで $x_{HI} = n_{HI}/n_H$ は中性度と呼ばれ、宇宙空間における電離水素の存在割合を表す。この式を見ると、 $\tau_{GP}(z)$ は $x_{HI} \sim 10^{-4}$ 程度でも十分大きく、実際には水素がほとんど電離していても光学的には十分厚いということがわかる。また、クエーサーの近傍は自身の放射によって周囲よりも光学的に透明になっている。これらの効果により、クエーサーの $Ly\alpha$ 近傍のスペクトルは $Ly\alpha$ の輝線が、輝線のピークから青い側に向けて徐々に 0 に向かって削られていくような形状 (damping wing) になると考えられる [Zoltán Haiman (2002)]。これを表したのが図 2 である。クエーサーを観測すると、これらのスペク

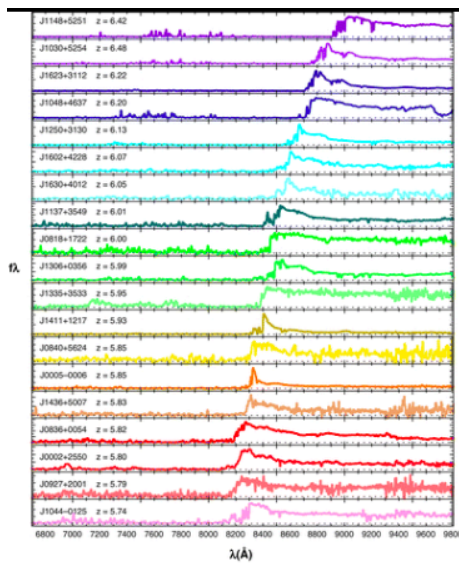


図 1: SDSS nineteen クエーサー (Fan et al. 2006b)

トルの特徴からクエーサーと観測者の間にある IGM の $\tau(z)$ を決定することができるのだ。そして SDSS によって理論的に予言されるこれらの特徴が $z \sim 6$ クエーサーに実際に見つかったことで、 $z > 6$ の宇宙は完全に電離されていない世界であることが確かめられた。

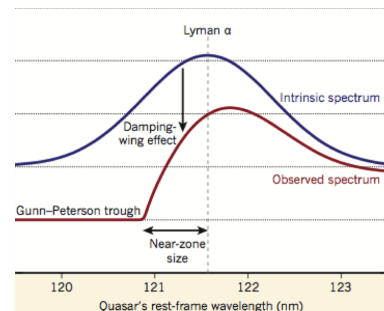


図 2: high- z QSOs に見られる特徴的なスペクトル

ところで、クエーサーのスペクトルについて redshift 進化がほとんど見られないことが様々な観点から議論されている。例えば、Dietrich et al. (2003) によると $[FeII/MgII]$ の値が $z \sim 5$ とそれより lower redshift のクエーサーでほぼ同じで、クエーサーの broad line region の金属量が宇宙が生まれて早い段階から既に現在と同じくらい高いことが示唆された。SDSS の $z \sim 6$ クエーサーの光赤外、X 線の分光観測からも、スペクトルの形状が lower redshift と大きく変わらない結果が得られた。つまり、クエーサーの降着円盤や放射機構は宇宙の進化の中で非常に早くから十分に発達していたことが推定できる。このようなクエーサーの特徴から、low- z クエーサーからわかった性質をそのまま high- z にも適用していいということになるので、この点でも未知の遠い宇宙を探る上でクエーサーの観測は有用だと言える。

以上見てきたように、クエーサーはスペクトルから時代ごと、視線方向ごとに水素がどれだけ電離していたのかを探ることができる重要な観測対象なのである。

3 Cosmic reionization

前章で触れたようにクエーサーのスペクトルを見ると、視線方向に存在する IGM の光学的深さを知る

ことができる。そして、 $z > 6$ クエーサーのスペクトルに Gunn-Peterson trough をはじめとする特徴が表れたことから、この時代は宇宙再電離期の途中であることが分かってきた。この章では、high- z クエーサーの観測を元にした現在の宇宙再電離の描像について述べる。

現在信じられている宇宙再電離の進行過程は大きく3つの段階に分けることができる。まず、完全に中性な宇宙から最初の天体が誕生し、そのUV放射によってゆっくり周囲を電離する。この時は各HII領域はお互いに独立している。次第にそれぞれのHII領域が拡張、結合すると再電離のプロセスは加速し始め光子はより長い距離を進むようになる。この段階を”overlap stage”と呼ぶ。そして最後には全てのHII領域が重なり合い、一部の中性水素が濃い領域が電離がされると宇宙が全て電離され再電離が完了する。現在($z = 0$)の典型的な電離水素の割合は $x_{HI} \sim 10^{-5}$ である。ただし、各過程がどの時代に起こったのかや、再電離が高密度と低密度のどちらの領域から進行していったのかについてなど、解明されていない点は多い。

Fan et al. (2006) は SDSS で見つかった 19 個の $z \sim 6$ クエーサー それぞれに対して、その方向の光学的深さを調べ、 $z > 5.5$ で光学的深さが $\tau \propto (1+z)^{4.3}$ から $\propto (1+z)^{10}$ と大きく変化することを確かめた(図3)。これはこの時代に再電離が完了したことを示唆する。また、 τ の値の分散が $z \sim 5, 6$ を境目に急激に大きくなっていることから、 $z \sim 6$ で中性水素が空間的に clumpy に存在していることを支持する結果を得た。さらに同じデータから平均した IGM の x_{HI} が $z > 6$ で最低でも $10^{-3.5}$ であることが求められた。このように、近年の high- z クエーサーのスペクトル解析から $z \sim 6$ で水素の状態変化があったことがわかってきた。しかし後述するように SDSS サンプルだけによる議論ではバイアスが生じることが避けられないので、今後は HSC をはじめとする新たな survey によって high- z クエーサーのサンプル数を増やし、より普遍的な宇宙再電離の描像を得ることが必要である。

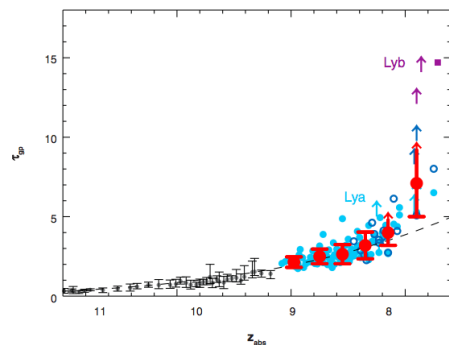


図 3: $\tau(z)$ の redshift 進化 (Fan et al. 2006b)

エラーバー付きのシンボルがその時代の平均の τ_{GP} を示す

4 Most distant QSO ($z \sim 7.1$)

次に、現在見つかった最遠方のクエーサーの発見について述べる。現在確認されている中で最も遠くにあるクエーサーは 2011 年に Daniel J. Mortlock et al. によって発見された ULAS J112001.48+064124.3 である ($z = 7.085$)。ULAS J1120+0641 はハワイのマウナケア山頂にあるイギリスの United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT) の赤外サーベイ (UKIDSS) で最初に検出された。そして、その後 SDSS やその他のフォローアップ観測によって $z > 6.5$ であることが確認された後、Gemini North Telescope で分光観測が行われ、前述した Ly α の青い側が削られたスペクトルと Mg II などの強い輝線のプロファイルから、最終的に赤方変位: $z = 7.085$ の最遠方クエーサーであることが決定された。これは現在から 129 億年前の天体であることを意味する。図 4 は ULAS J1120+0641 のスペクトルである。赤のスペクトルは $2.3 < z < 2.6$ の 169 個の SDSS クエーサーから作り出した合成スペクトルである。両者を比べると連続光の傾きや輝線が非常に良く一致していることが分かる。ただし、CIV の輝線は合成スペクトルよりも青側にシフトしており、これは 1100km/s の outflow が視線方向にあることを示唆している。Ly α の青い側を見てみると、 $5.8 < z < 7.0$ でほぼ完全な GP trough が見えている。これほど削れていると GP trough から x_{HI} を測ることはできないが、この場合、クエーサーの作る HII 領域の半径 (near zone radius) から $z \sim 7$ の IGM の x_{HI} を調べることが可

能である。すると ULAS J1120+0641 の near zone (= 2.1Mpc) は小さすぎるのが分かった。あるモデルに従うと、この near zone 半径で $z \sim 6$ から推定した $x_{HI}(z \sim 7.1)$ が 1 を超えてしまうのだ。また、Damping wing の形状からは $0.1 < x_{HI} < 1$ と制限ができた。ただし、この減衰プロファイルは中性水素の濃いクラウド ($N_{HI} = 4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$) が 2.6Mpc 視線方向手前に存在していても説明できてしまう。そのために、 $z \sim 7$ の ULAS J1120+0641 周りの水素の状態については、より高分解能のスペクトルを得る必要がある。また、 $z \sim 7$ のクエーサー サンプルを増やして視線方向の違いによる議論をすることが今後、 $z \sim 7$ の宇宙を知る上で求められる。

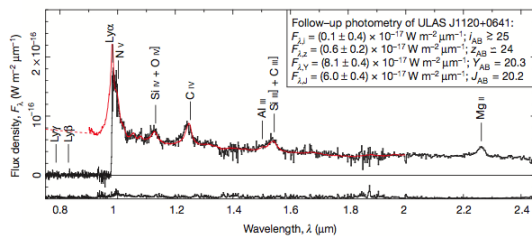


図 4: ULAS J1120+0641 のスペクトル [黒線] (Mortlock, D.J. et al. 2011)

5 HSC survey

ここまで SDSS を初めとする近年の high- z クエーサーの性質とそこからわかる宇宙再電離について述べてきたが、最後に来年からすばる望遠鏡で始まる HSC survey 計画における high- z クエーサーの研究計画について紹介する。これまで何度も述べてきたように、SDSS は high- z クエーサーのサンプル数を数多くもたらし、その性質や IGM の状態の理解に対して革命的な進歩をもたらした。しかし、SDSS のサンプルにバイアスが含まれていることには注意しておかなければならない。まず、SDSS によって見つかったクエーサーは非常に明るい部類のものである。つまり、光度関数でいえば bright-end のみを見たことになり、暗い領域については分かっていないのだ。また、 $i'-z'$ のカラーが赤いクエーサーを選ぶような選択方式であったため、それよりも青いタイプのも

のは見逃している可能性が大きい。また、SDSS から $z > 6.5$ のクエーサーは見つかっていない。以上より、SDSS のバイアスに捕われない、新たな high- z クエーサーのデータセットが必要とされているのである。

すばる望遠鏡では主焦点に現在の Suprime-Cam の約 7 倍の 1.77 deg^2 の視野を持つ新たなカメラ Hyper Suprime-Cam を搭載して大規模サーベイを来年から行う予定である。サーベイは主に 3 種類 (Wide: $1,400 \text{ deg}^2$; Deep: 27 deg^2 ; Ultradeep: 3.5 deg^2) に分かれており、ダークエネルギー、宇宙の加速膨張といった現代宇宙論の大きな謎の解明を目指して現在それぞれに応じたサイエンスが検討されているところである。初期宇宙、特に宇宙再電離期の解明は其中でも重要な課題の一つであり、クエーサーについて言えば WIDE survey で $z > 6$ クエーサーの探査が計画されていて、既知のクエーサーより暗いタイプのもの、さらに比較的カラーが青いものなど、 $z \sim 6, 7$ のクエーサーが数多く ($z \sim 6: \sim 10^2$ 個, $z \sim 7: \sim 10$ 個) 発見されることが期待される。さらにそこから光度関数の暗い部分が精度良く求まり、宇宙再電離においてクエーサー起源の光子がどの程度、再電離に寄与したか (photon budget) や、再電離期の IGM の空間分布 (topology) の議論が初めて可能になり、他にもクエーサーの周りにどれだけ銀河が密集しているか (クエーサーの環境効果) や、クエーサーから求められる中心ブラックホールの質量の測定などのサイエンスが $z > 6$ の宇宙で検討されており、これまで述べてきた high- z クエーサーの性質や宇宙再電離について SDSS 時代よりもより普遍的な知見が得られることが期待されている。

Reference

- Xiahoui Fan 2006. *New Astron. Rev.* 50:665-671
 Daniel J. Mortlock et al. 2011. *Nature* vol.474:616-619
 Xiahoui Fan, C.L. Carilli and B. Keating 2006. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 44:415-62
 York, D.G. et al., 2000. *AJ* 122, 549.
 Dietrich, M. et al., 2003. *ApJ* 722, 732
 Zoltán Haiman, 2002. *arXiv* :astro-ph 0205410v1