

クエーサー吸収線で探る宇宙の歴史

三 澤 透 , 家 正 則

〈東京大学大学院・理学系研究科・天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉

e-mail : misawatr@cc.nao.ac.jp

非常に遠方に存在するクエーサーは、銀河形成が盛んであった時代の情報を我々にもたすため、初期宇宙を研究するうえで貴重である。その重要性は、クエーサーそのものの研究にとどまらず、クエーサーと私たちの間に存在し、通常は見えない天体（たとえば非常に淡くて暗い銀河など）がクエーサーのスペクトル上に吸収線として現れることによって示される。中でも重元素による吸収線（金属吸収線）は初期宇宙における金属量を測るものさしにもなるため、多くの研究が行われてきた。一般に金属吸収線は、銀河のハローに広がるガス雲によると考えられているが、クエーサー近傍では、それをもたらすガス雲の空間数密度に超過がみられるなどの特異性が知られており、その正体を暴くことは銀河形成を解明するための新しいアプローチになる可能性を秘めている。世界の巨大望遠鏡によるここ数年の観測はクエーサー吸収線系の研究においても飛躍的な進歩をもたらしている。そこでクエーサー吸収線系の分野における観測的研究の歴史、および現時点での課題などを報告する。

1. クエーサー吸収線系とは？

活動銀河核の一種であると考えられているクエーサーは極端に大きな光度（銀河の100倍以上）を持つため、非常に遠方に存在するものまで観測することが可能である。その膨大なエネルギー源は、中心部のブラックホールとそのまわりの降着円盤にあると考えられているが、詳しい構造と放射過程は謎につつまれている。この問題に果敢に挑むべく、これまでに多くの分光観測が行われてきた。

クエーサーのスペクトル上でひととき目立つのは、中性水素ガス（HIガス）によるライマン α 輝線（静止系波長 $\lambda_0 = 1216 \text{ \AA}$ ）であるが、このライマン α 輝線よりも短波長側のスペクトルには多くの吸収線が刻まれている（図1）。これは、私たちとクエーサーとの間に介在するHIガスによる吸収線群であると考えられており、その見た目の印象から「ライマン α の森（ライマン α フォレスト）」と呼ばれている。クエーサーは極めて遠方にあり、なおかつ非常に大きな光度を持っているため、手

前にある暗いガス雲が影絵のようにクエーサーのスペクトル上に吸収線として現れるのである。このようにクエーサーのスペクトル上に現れる吸収線をクエーサー吸収線と呼ぶ。

ところでクエーサー吸収線にはライマン α の森のようなHIガスによる吸収線の他にもヘリウムや重元素によるものも多く観測される。これらのガス雲は付随する銀河やクエーサー本体からの紫外光によって電離状態が異なるため、例えば炭素については中性の炭素（CI）によるものから3回電離した炭素（CIV）による吸収線まで見つかっている。このようにクエーサー吸収線は、ガス雲を構成する元素の種類のみならずその電離状態の異なる多様な吸収線がさまざまな赤方偏移に現れるため、その同定は容易ではない。しかし複数の元素（イオン）による吸収線が非常に近い赤方偏移をもって検出された場合、吸収線種と赤方偏移の同定の信憑性は高いものとなる。この場合、該当するすべての吸収線をまとめてクエーサー吸収線系と呼び、いずれも同じガス雲による吸収線であると考え

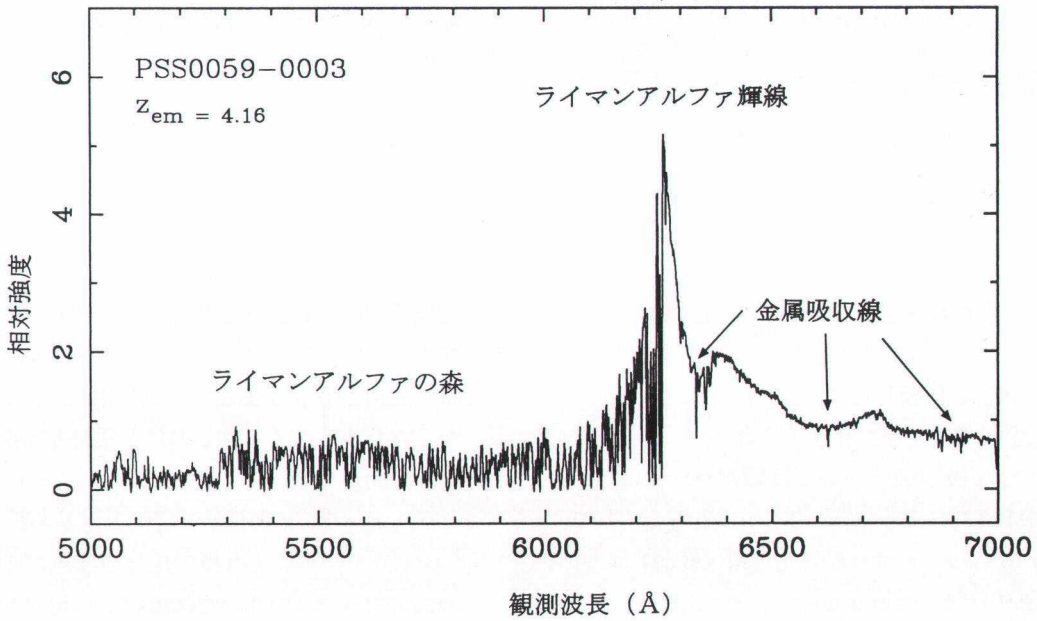


図1 赤方偏移 4.16 に存在するクェーサーのスペクトル

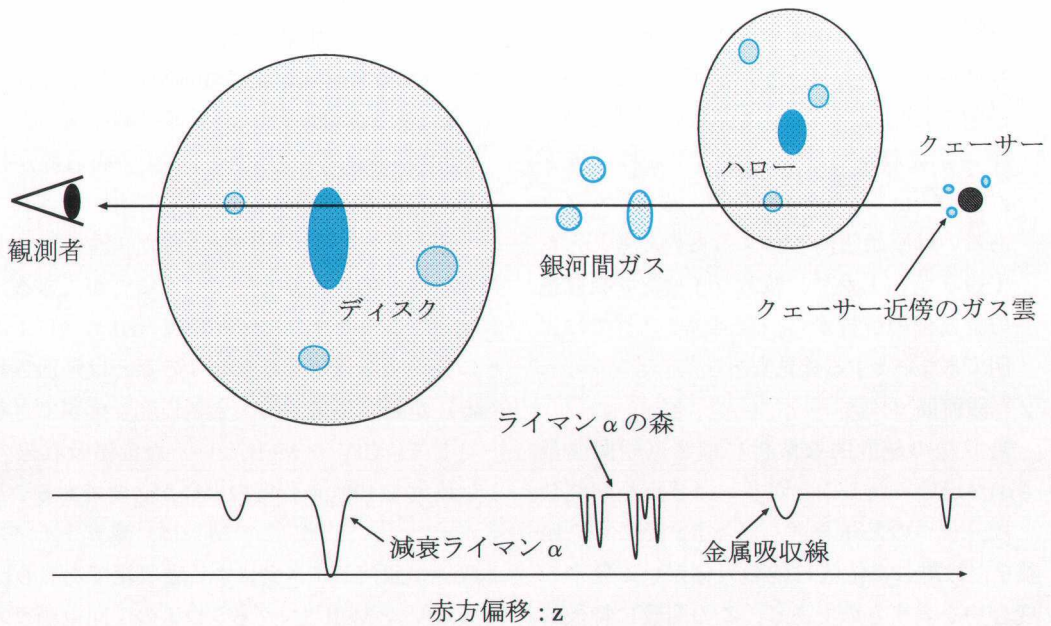


図2 吸収線をもたらすガス雲の候補

特に深宇宙でのキューサー吸収線系の起源や進化の解析は、宇宙論や銀河形成のシナリオ構築に強い制限を与えると期待されている^{1), 2)}。

2. 吸収線をもたらずガス雲の正体は？

宇宙膨張による運動とキューサーに物理的に付随したガス雲固有の運動とを視線速度の情報だけから分離することが難しいなどの課題は残されているものの、吸収線をもたらずガス雲の正体については以下のようなものが考えられている²⁾ (図2)。

(1) 銀河に付随したガス雲

a. 銀河のハローに存在するガス

金属吸収線については銀河ハローに存在するガスによってもたらされると考えられている³⁾。キューサーの分光・撮像観測により、金属吸収線とおなじ赤方偏移に暗い銀河が検出されたものがあり⁴⁾、銀河とキューサーの間の投影距離が数 10 kpc 以内であることなどがこの説を強く支持している (図3)。

b. 銀河ディスク

HI ガスによる吸収線のうち、静止系での等価幅が 10 Å を越え、その中心部で連続光が完全に吸収されてしまうものを減衰ライマン α 吸収線と呼ぶ。対応する柱密度が $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ にも達するため、銀河ディスクあるいは原始銀河雲によるものと考えられている⁵⁾。(しかし、減衰ライマン α 吸収線の金属量の解析から、銀河ディスクでは説明できないとする意見もある⁶⁾。)

(2) 銀河間ガス雲

吸収線の統計的な解析には 2 点相関関数 $\xi(r)$ が用いられることが多い。2 点相関関数とは、一つの天体を選んだとき、そこから距離 r だけ離れた位置に他の天体がいる確率の度合いを表すものであり、この関数に特徴的な距離 r が無ければその天体は宇宙空間にまったくランダムに分布していることを示す。そ

のような解析をした結果、ライマン α の森を構成している吸収線は金属吸収線と異なり、赤方偏移分布から求めた 2 点相関関数にピークが見られないことが分かった。すなわちライマン α の森をもたらず吸収体が宇宙空間に満遍なく分布していることが示唆されていた。このような分布を説明するには (銀河になりそこなった) 銀河間ガスが都合がよいと考えられていた。しかし、最近の観測によって、金属吸収線を付随するライマン α の森が存在すること⁷⁾、ライマン α の森と同じ赤方偏移に暗い銀河が存在する場合があること⁸⁾、が分かったため、ライマン α の森と銀河との関連性も指摘されている。

(3) キューサーに物理的に付随したガス雲

キューサーのごく近傍 (視線速度差が 5000 km/s 以下) では CIV 吸収線の数に超過が見られることが知られている⁹⁾。この現象については様々な説明が提唱されているが、たとえばキューサーに物理的に付随したガス雲であれば非常に大きな視線方向の速度分散を持つことが可能であり、キューサー近傍における CIV 吸収線の超過を説明することができる¹⁰⁾。

銀河の光度関数からあらかじめ銀河の数密度が見積もられているので、すべての吸収線が銀河ハローに存在するガス雲によってもたらされているとすれば、各吸収線の数からガス雲の銀河中心からの典型的な距離を算出することができる。その結果、減衰ライマン α 吸収線 (HI ガスによる非常に強い吸収線; ライマン α の森とは区別されている) が銀河の光学的大小さ程度で再現できるのに対して、CIV や MgII といった金属吸収線の場合は最大で 100kpc 程度の半径が必要であることが分かった^{11), 12), 13)}。この結果は、減衰ライマン α 吸収線が銀河ディスクによる吸収線であるのに対して CIV や MgII (マグネシウムの 1 回電離ガス) といった金属吸収線は銀河ハローに存在するガス雲による吸収線であることを支持する。

3. 主な吸収線の進化の傾向

ここで吸収線の統計的な解析方法とその意義について述べる必要があるだろう。

単純なユークリッド空間と異なり、宇宙は時間の経過とともに膨張しているため、仮に共動空間における吸収線をもたらずガス雲の数密度が不変であっても、単位赤方偏移あたりの空間数密度は高赤方偏移になるほど増えてしまう。私たちとクエーサーの間に介在する吸収線の数、ガス雲の(1) 共動空間における数密度、(2) ガス雲1つあたりの有効吸収断面積、および(3) 観測波長領域がカバーする視線距離の積で与えられる。数密度については宇宙膨張による効果を考慮に入れる必要がある。

ガス雲の空間数密度と吸収断面積が不変であるとすれば、標準フリードマン宇宙を仮定すると、減速パラメータを q_0 として吸収線数の赤方偏移分布を $dN/dz \propto (1+z)/(1+2q_0z)^{1/2} \sim (1+z)^\gamma$ と近似することができる(z :赤方偏移)。ちなみに $q_0 = 0$ を仮定すれば $\gamma = 1$ になるはずであり、 $q_0 = 0.5$ を仮定すれば $\gamma = 0.5$ である。観測結果として γ の値が $0.5 \sim 1$ から大きくはずれる場合は、「ガス雲の共動空間数密度と吸収断面積が不変である」という仮定が誤っていたことになり、実際にはガス雲の数や性質が宇宙年齢とともに進化していることを示す。

それでは、このような吸収線の赤方偏移分布の統計的な解析の結果はどのようなものなのだろうか？ 以下では各吸収線について現在までに得られている結果を紹介する。

(1) 中性水素による吸収線

ライマン α の森については、その統計的解析がもっとも進んでいる。パロマー天文台やケック望遠鏡による高分散分光観測によって、赤方偏移が1.5から4.0の範囲では係数が $\gamma \sim 2$ になることが知られていた。つまり高赤方偏移になるほど吸収線の数密度が増加してい

ることになる。このことはライマン α の森に対応する原始銀河雲が時間とともに次第に衝突合体して整理されて数が減ってゆくという描像と合致するように思われる。一方、90年代に入りハッブル宇宙望遠鏡による紫外域の分光観測が可能になると、赤方偏移が1.5以下のより近傍の宇宙においては、係数が $\gamma \sim 0$ であることが明らかになった¹⁴⁾。つまり、赤方偏移1.5のあたりに吸収線分布の変化が見られ、この時代を境に銀河の合体プロセスが終焉したように見える。しかし、この不連続現象の原因はいまだに解明されておらず、境界領域のサンプル数の不足を補うことが当面の課題となっている。

一方、減衰ライマン α 吸収線の赤方偏移分布についてはどうだろうか。減衰ライマン α 吸収線についても可視・紫外域の分光観測が行われているが係数は $\gamma \sim 1$ であり、面白いことにライマン α の森にみられたような特徴的な赤方偏移分布は見られなかった^{5), 15)}。この減衰ライマン α 吸収線については対応する金属吸収線を調べると、高赤方偏移になるほど吸収線系の金属量が小さくなることが分かっており、原始銀河雲との関連性が脚光を浴びている。

(2) 重元素による吸収線

重元素による吸収線は幅が非常に狭く、その吸収線の形から速度分散を評価すると高々数10 km/s程度しかないことが分かる。また、吸収線の数自体もライマン α の森と比べると圧倒的に少ない。ライマン α の森に埋もれた吸収線は事実上検出が不可能なので、一般にクエーサーによるライマン α 輝線よりも長波長側でのみ金属吸収線を検出することが可能となる(図1)。

このように何かと観測上の制限が多い金属吸収線ではあるが、CIV吸収線とMgII吸収線については比較的多くのサンプルが検出されており、その統計的な解析が試みられている。

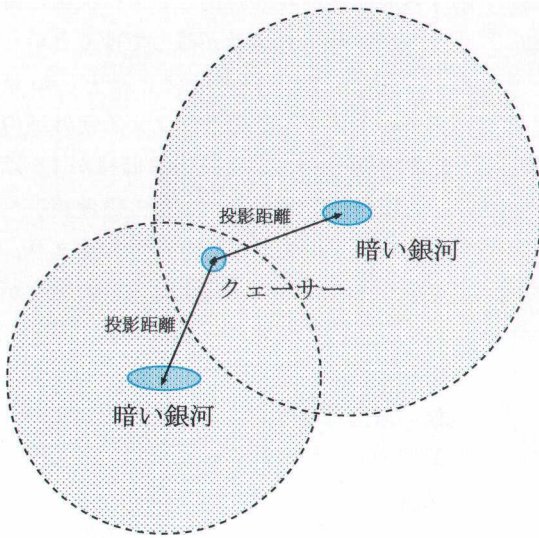


図3 吸収線をもたらすガス雲をハローに持つホスト銀河とクェーサーの投影面での位置関係。投影距離によって、銀河中心からの典型的なガス雲の距離を見積もることができる。

MgII 吸収線は、赤方偏移が2以下の比較的近傍の宇宙で係数が $\gamma \sim 1$ であり、減衰ライマン α 吸収線にみられる進化の傾向とよく似ている¹³⁾。それに対してCIV吸収線は注目すべきことに係数が $\gamma \sim -1.3$ であり、ライマン α の森やMgII吸収線とは全く逆の進化の傾向を示す¹²⁾。この独特な傾向($\gamma < 0$)は、筆者たちの解析により、赤方偏移4のあたりまで続いていることが確認された¹⁶⁾(図4)。

超新星によって供給される重元素の種類は超新星のタイプによって異なる。比較的短いタイムスケール($t < 2 \times 10^7$ yr)で爆発が起こるII型超新星が酸素やシリコンなどを供給するのに対して、Ia型超新星によってもたらされる重元素は鉄などの重い元素であり、爆発までに長いタイムスケールを要する($t > 10^8 \sim 10^9$ yr)。宇宙で最初の天体(種族III天体)ができて間もない宇宙の初期段階における金属汚染は、主に

吸収線数密度の変化

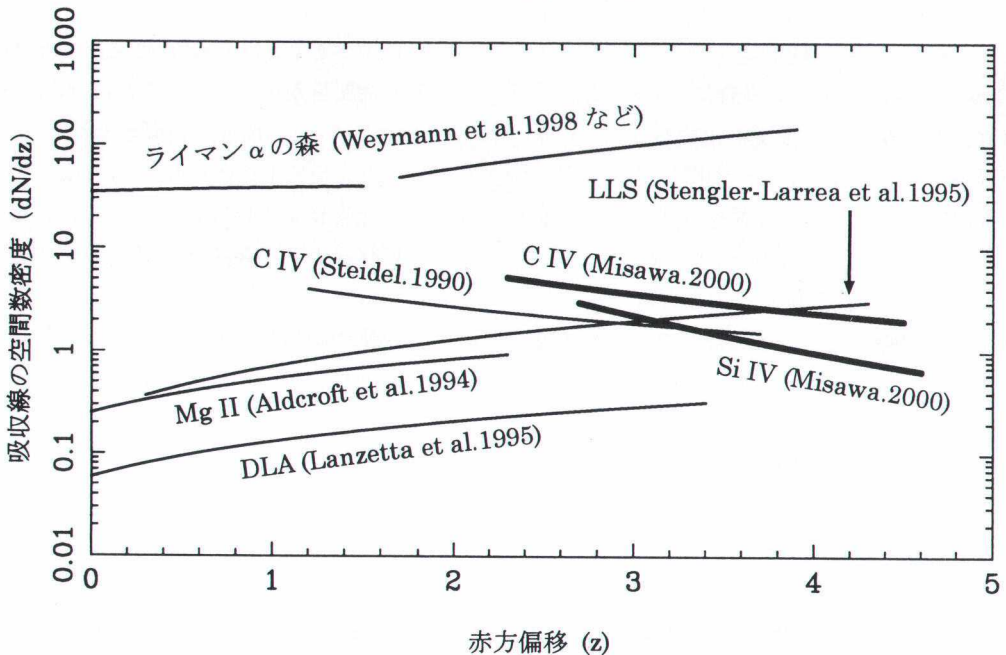


図4 各吸収線の空間数密度の進化

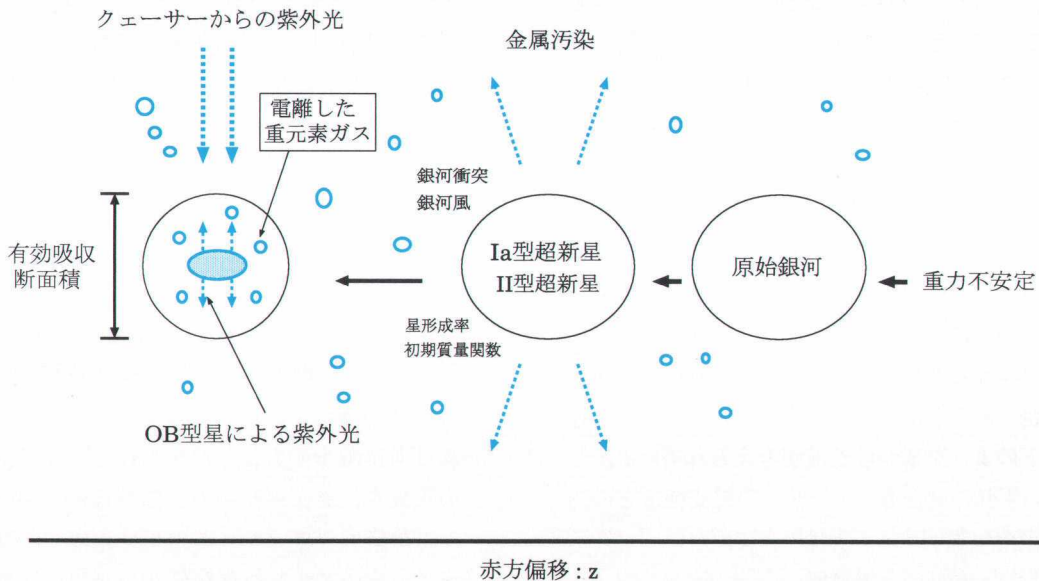


図5. 金属吸収線をもたらす重元素ガスと銀河形成との関係. 複雑に絡み合ったいくつかの要素を分離していくことがこれからの課題である.

II型超新星によるものであったと考えられるが、そのような時期の吸収線系はいまだに見つかっていない。金属吸収線の統計的解析をより遠方にまで拡張することにより、両者の違いが見えてくるものと思われる。

このようにキューサー吸収線系の進化の傾向は、吸収線の種類によってさまざまである(図4)。ただ、ここで注意しなければならないのが、吸収線を検出する際に等価幅の最小許容値となる限界等価幅が吸収線の種類によって異なるということである。従って、図4において有効なのは係数 γ の大小を比較することであり、吸収線数密度そのものを比較することはあまり意味がない。吸収線数密度の赤方偏移分布に変化をもたらす原因としては、ガス雲の(1)数密度、(2)断面積、(3)金属量、(4)電離状態などが赤方偏移とともに変化することが考えられる。これらの要因のどれが本質的でありどのようなメカニズムが重要なのかを分析することが今後の課題となっている。

4. キューサー近傍における銀河形成の可能性

さて、現在までに得られている観測的研究の概要は前章に示した通りであるが、キューサー吸収線系の物理的描像を解明するにはまだまだ情報が不足している。また、キューサー吸収線が検出される領域(赤方偏移2~5)は銀河形成や宇宙の大規模構造の形成が行われる時代とも一致するため、近傍銀河の性質をそのまま適用することができない。このことも、状況をより複雑にしている。

現在受け入れられている描像は、第1世代の天体である原始銀河あるいは矮小銀河が $z = 10 \sim 20$ のころに形成され、そのような原始銀河内での星形成によってもたらされた様々な重元素ガスがハローに拡散されたものが、金属吸収線として観測されるというものである¹⁷⁾。金属吸収線の強さや共動空間数密度は、星形成率や初期質量関数あるいは超新星のタイプや近傍の紫外光による電離の程度に大きく依存する。図5はキューサー吸収線

と銀河形成の関係を示した模式図である。複雑に絡み合ったこれらの要素をひとつひとつ解きほぐしていくことが当面の課題となるだろう。このような課題にメスを入れる方法の一つとして、クエーサー近傍での銀河団の影響について触れておきたい。

金属吸収線はクエーサーの近傍でその数密度に超過が見られる場合があることは先にも触れた通りであるが、この傾向は主に電波クエーサーに特徴的にみられるものである⁹⁾。なぜこのような超過が見られるのかはいまだに解明されていないが、クエーサーの起源と進化をひもとくうえで避けては通れない課題であると言えよう。その原因として、現在では以下のような3つの候補が考えられている。しかし、いずれの場合もクエーサーの電波強度との関連性を完全に説明することはできていない。

(1) クエーサーと銀河団

最近盛んになったクエーサーまわりの深い撮像観測によって、クエーサー近傍におけるいくつかの局所的な銀河団が見つかっており^{18), 19)}、銀河団がクエーサー近傍における吸収線数の超過に影響を及ぼしていることを支持する。しかも、このような銀河群が電波クエーサーに特徴的にみられることも吸収線の場合とみごとに一致している。このような銀河団の存在は、クエーサー近傍での金属吸収線の超過現象を無理なく説明できるため、もっとも有力な候補であると考えられる。だが、銀河団中に電波クエーサーが生じるメカニズムあるいは電波クエーサー近傍に銀河団形成が起こるメカニズムについては、まだ合理的シナリオができていない。

(2) クエーサー周辺に存在するガス雲

炭素の3回電離ガスによる吸収線 (CIV 吸収線; 静止系波長 $\lambda_0 = 1548, 1551 \text{ \AA}$) などのように、2つのラインが対になって観測される吸収線は、その2つのラインの等価幅の比を解析することにより、ガス雲の柱密度を推定することができる。このような解析の結果、光学的に十分厚いにもかかわらず、背後にある

クエーサーのフラックスを完全に吸収しないガス雲の存在が確認された¹⁰⁾。

この吸収線をもたらずガス雲はクエーサーを部分的にしか覆っていないことになるので、クエーサーのごく近傍 (~ pc スケール) に存在していると考えるのが自然である。ただし、このようなガス雲では吸収線系の数密度超過とクエーサー電波強度との関連性を説明することができない等の課題がのこっている。

(3) クエーサー紫外光による電離

クエーサーの近傍では、金属吸収線の空間数密度が増加するのに対して、ライマン α の森は逆に減少することが知られている²⁰⁾。この現象を、クエーサーの近傍ではクエーサーからの紫外フラックスの効果で電離ポテンシャルの高いイオンの存在量が相対的に増加していることにより生じると考えることもできる。つまりクエーサー近傍に存在する銀河の空間数密度に超過がなくても、高電離状態にある重元素吸収線の超過を説明することができるのである。しかし、この場合もクエーサーの電波強度との関連性が説明できない。

クエーサー近傍における金属吸収線探しを目的とした高分散分光観測、およびクエーサー近傍での暗い銀河探しを目的とした深い撮像観測を行い、これらの吸収線と銀河を対応づけることにより、先に挙げた3つの候補をさらに絞り込むことが可能となる。あるいは複数の原因が複合的に働いていることが分かるかもしれない。このような観測は銀河形成、あるいは銀河団形成におけるクエーサーの役割を知るうえでも貴重なテーマであるが、非常に長い観測時間と手間のかかる作業を要求するため、今のところほんの数件しか報告されていない。

今後、すばる望遠鏡の高分散分光器 (HDS) を用いてクエーサーの高分散分光観測を行い、更に微光天体分光撮像装置 (FOCAS) によってクエーサーまわりの深い撮像観測を行うことにより、吸収線超過の原因を突き詰めていきたい。

5. これからの展望

これまで分光観測に頼ってきたクエーサー吸収線系の研究であるが、最近の地上望遠鏡の大型化やハッブル宇宙望遠鏡に代表される観測衛星の活躍により、各種吸収線をもたらすガス雲を持つホスト銀河の直接撮像が可能になってきた。このような手法を用いた観測は、赤方偏移が1未満の比較的近傍の宇宙におけるライマン α の森⁸⁾やMgII吸収線⁴⁾について盛んに行われており、ガス雲の起源の解明に一役買っている。驚くべきことに、今までは銀河間ガスによる吸収であると考えられていたライマン α の森についても対応する輝線放射を伴う銀河が見つかる場合があることが分かった。つまりライマン α の森を構成するすべての吸収線がおのおの対応する暗い銀河を持つとすれば、宇宙には私たちの知らない莫大な数の銀河が存在することになるわけである。しかし、このような撮像による観測はまだ始まったばかりであり、結論を出すには時期尚早である。

将来的な展望としては、このような観測を高赤方偏移領域にまで拡張すること、そしてより多くの金属吸収線について行うことが考えられる。前者は銀河ハローの時間変化についての情報を、後者は銀河ハローの電離状態と銀河中心からの距離との関係をもたらしてくれる。いずれもすばる望遠鏡をはじめとする8~10m級望遠鏡によって切り拓かれるべきテーマである。この「クエーサー吸収線系」の解明は、銀河形成や原始銀河の研究における先導役となるだろう。

謝辞

この原稿を書くにあたり、たくさんの有益なコメントを下さいました傳田紀代美さん、大越克也さん、田中壺さん、川端弘治さんに、そして貴重なデータを提供して下さったDavid Tytlerさんに感謝いたします。

参考文献

- 1) 郷田直輝, 2000, 天文月報 93(No.2),60
- 2) 傳田紀代美, 1996, 天文月報 89(No.12),534
- 3) Sargent W.L.W., et al.,1988,ApJS 68,539
- 4) Bergeron J., Boisse P.,1991,A&A 243,344
- 5) Wolfe A.M., et al.,1986,ApJS 61,249
- 6) Lu L., et al.,1996,ApJS 107,475
- 7) Cowie L.L., et al,1995,AJ 109,1522
- 8) Lanzetta K.M., et al., invited review for IAU Colloq. 171, The Low Surface Brightness Universe
- 9) Foltz C.B., et al.,1986,ApJ 307,504
- 10) Dobrzycki A., et al.,1999,A&A 349,L29
- 11) Lanzetta K.M., et al.,1995,ApJ 440,435
- 12) Steidel C.C.,1990,ApJS 72,1
- 13) Aldcroft T.L., et al.,1994,ApJS 93,1
- 14) Weymann R.J., et al.,1998,ApJ 506,1
- 15) Kinney A.L., et al.,1991,ApJS 75,645
- 16) 三澤 透, 2000, 修士論文
- 17) 村上 泉, 1999, マゼラン星雲研究会集録
- 18) Yee H.K.C., Green R.F.,1987,ApJ 319,29
- 19) Hall P.B., Green R.F.,1998,ApJ 507,558
- 20) Bajtlik S., et al.,1988,ApJ 327,570

The Early Universe Probed by QSO Absorption Lines

Toru MISAWA, Masanori IYE

Department of Astronomy, School of Science, University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: High- z QSOs are valuable probes of the early Universe and provide us information on the era of galaxy formation. QSOs can also be used as background sources against intervening objects such as proto-galactic clouds and faint foreground galaxies. These intervening objects produce absorption lines in the spectra of background QSOs. Gas clouds producing metal absorption lines are thought to exist in the halos of intervening galaxies and are used to evaluate the metal abundances of galaxies at high redshifts. In the course of studying the evolution of metal absorption lines, it was found that the number of absorbers per unit redshift interval increases in the vicinity of QSOs, especially of radio-loud QSOs. The reason of such an excess of metal absorption lines remains still unclear. In this letter, we review the observed properties and enigmas of quasar absorption lines.