

# 陽のあたる吸収線系

傳田紀代美

〈東京大学理学部天文学教育研究センター 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

キューサーの吸収線系の研究が始まって既に30年近くが経っているが、ここ数年の研究の展開は目覚ましい。ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) 及びケック (KECK) 望遠鏡の観測によって、吸収線系の新しい描像が生まれつつある。最近の研究の展開の報告と、7月にケンブリッジで開かれた国際会議「HSTと高赤方偏移宇宙」について簡単な報告をする。

## 1. 古き良き時代?

キューサーのスペクトル中には、CIVやMgIIなどの重元素イオンの吸収線や無数の細かいライマン $\alpha$ 吸収線 (ライマン $\alpha$ の森)、飽和したライマン $\alpha$ 吸収線などが観測される。これら吸収線系は、宇宙論的距離にあるために光や電波などで直接観測するのが難しい銀河や銀河間ガスの物理状態を探るための、ほとんど唯一の手段である。つまり、「影」を詳しく調べることで「本体」を探るのである。吸収線系を用いれば、高赤方偏移から低赤方偏移にわたる長いタイムスケールを同一の手段で探ることができ、銀河の形成・進化の研究に重要な情報を得ることができる。さらに、吸収線系は探るべき天域と赤方偏移の情報を与えるので、高赤方偏移にある銀河を見つけるための目印としても利用できる。(注: キューサーのスペクトル中に現れる吸収線にはキューサーそのものに付随したガスの吸収もあるが、本稿では我々とキューサーの間に存在する銀河あるいは銀河間ガスによる吸収のみを取り上げる。)

これらのキューサーの吸収線系を中性水素の柱密度の小さい順に並べると、弱いライマン $\alpha$ 系 ( $<10^{17}\text{cm}^{-2}$ )、ライマンリミット系 (LLS;  $>10^{17}\text{cm}^{-2}$ ) と飽和ライマン $\alpha$ 系 (DLA;  $>10^{20}\text{cm}^{-2}$ ) と分類することができる。ただし、弱いライマン $\alpha$ 系は、ライマン $\alpha$ の森 ( $10^{12} \sim 10^{15}\text{cm}^{-2}$ ) と CIV系

( $>10^{15}\text{cm}^{-2}$ ) を含む。重元素イオンの吸収を示す系には対応する銀河が発見されており<sup>1)</sup>、銀河 (に付随するガス) にその起源がある。ライマン $\alpha$ の森は、その分布が大規模構造を示す銀河の分布と大きく異なり<sup>2)</sup>、かつ近傍銀河の100倍程度の観測頻度を示すので、銀河になり損なった原始組成 (水素とヘリウムのみから成るガス) を持つ銀河間雲である (と考えられていた)。もちろん解明されるべきいくつかの問題は残されていたが、大筋では次に述べるような「標準モデル」が80年代後半には確立したかのようであり、“嵐の前の静けさ”という雰囲気があった。

ここで1993年以前の標準モデルをまとめておくと、次のようになる。(1) ライマン $\alpha$ の森は原始組成のガスから成る銀河間雲に起源があり、暗黒物質の重力、または密度が薄く高温の銀河間ガスの圧力によって維持されている。その空間分布は銀河のような大規模構造を示さず、一様な分布をしている。(2) CIV系やLLSは遠方の銀河のハローに、またDLAはディスクにその起源がある。(3) 吸収線系はキューサータイプのスペクトル ( $\nu^{-\alpha}$ ;  $\alpha \sim 1$ ) を持つ背景紫外線輻射と光電離平衡状態にある。(4) 背景紫外線輻射場の起源は、主にキューサーからの紫外線にあり、少なくとも赤方偏移  $z=2 \sim 3$  では銀河の寄与は小さい。

## 2. HST ショック

### 2.1. 複雑な電離状態を示す LLS

Vogel と Reimers が<sup>3), 4)</sup>, 紫外線域から可視光 (1150 ~ 3200 Å) の波長域を低・中分散分光する FOS を用いて, 様々な電離段階にある C, N, O のイオン及び HeI の吸収を同時に示す LLS ( $z=1.8 \sim 2.4$ ) を観測した. このように多種のイオンが同時に同定されたのは初めてであり, 光電離モデルを用いて背景紫外線輻射場のスペクトルに厳しい制限をつけることができるという意味でも興味深い結果であった.

ごく簡単に光電離モデルのキーポイントを説明すると, あるイオン  $X_i$  (元素 X の  $i-1$  回電離イオン) と別の元素のイオン  $Y_j$  の吸収線の柱密度の比は, それぞれの元素の密度比 ( $n(X)/n(Y)$ ) とそれぞれのイオンの電離ポテンシャルに対応する周波数での背景紫外線輻射の強度比 ( $I(X_i)/I(Y_j)$ ) を用いて表すことができる. 粗い近似として

$$N(X_i)/N(Y_j) \propto I(X_i)/I(Y_j) \times n(Y)/n(X)$$

となる. ある元素の異なる電離段階にあるイオンがいく種類か同時に発見されれば, この関係を用いて背景紫外線輻射場のスペクトルに厳しい制限をつけられる. 異なる元素の場合は太陽近傍で求められた元素の相対組成比を適用して, スペクトルへの制限を求めている. またこの解析では, 各種のイオンの吸収線が同じ物理状態を持つ領域から生じていることを, 大前提として仮定している.

観測された電離状態

は, 「標準モデル」のスペクトルを持つ背景紫外線輻射では再現不可能であった. なぜなら, OVI などの高電離イオンの観測データを再現するためには, 高エネルギー光子が比較的多数存在するスペクトル ( $a=0.1 \sim 1.5$ ) が要求されるが<sup>3)</sup>, その場合 He のほとんどは電離されてしまい HeI を吸収線として観測することはできなくなるからである. 逆に, HeI の存在を再現しようとすれば, 高電離イオンの説明ができなくなる<sup>4)</sup>. いずれにしても「標準スペクトルモデル」は困難に直面し, これまではあまり取り上げられていなかった熱い衝突電離ガスの寄与を考慮したモデルも提唱された<sup>5)</sup>. つまり, HeI などの低電離イオンの吸収線は光電離ガスから生じ, OVI などの高電離イオンの吸収線は高温衝突電離ガスから生じるという, 住み分けによって共存を説明する流儀である.

しかし, 背景紫外線輻射のスペクトルがこれまで仮定したように単純なべき乗ではないという可能性もある. 筆者らは折れ曲がったスペクトルを仮定し, 観測データを再現する光電離モデルを構築した<sup>6)</sup>. 得られた最適スペクトルの形は図 1 に示した

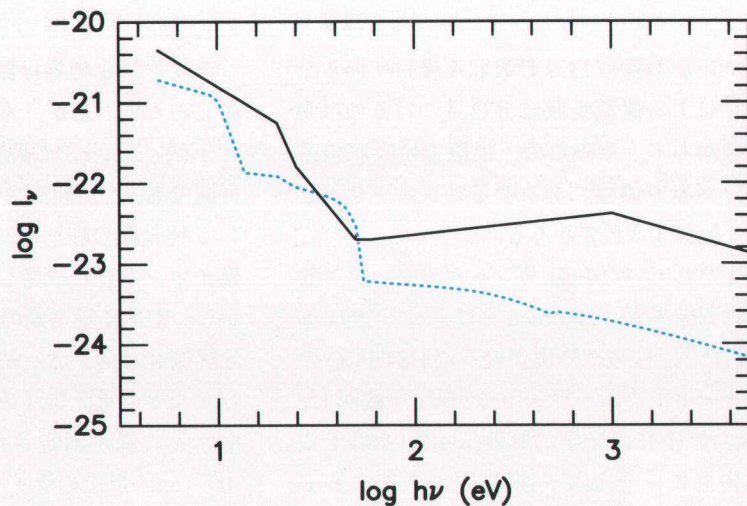


図 1 : LLS の電離状態を説明する背景紫外線輻射場の折れ曲がりスペクトル (黒線) とキューサーからの紫外線を足上げたスペクトル (青線). Denda & Ikeuchi (1995) より改<sup>6)</sup>.

通りである。Heの電離があまり進まず、かつOVIなどの高電離イオンを存在させるためには、HeIIの電離ポテンシャル(54.4 eV)付近を頂点とするL字型のスペクトルを考えれば良いことが分かった。また、得られた折れ曲がりスペクトルのL字型と、キューサーの紫外線を足し上げ、吸収線系による吸収を考慮して得られる輻射場のスペクトルには類似性がある。実際に"足し上げ"スペクトルでもLLSの電離状態は再現可能であり、キューサーを背景紫外線輻射場の主な源と考えて良いことは確認できた。

## 2.2. HeII ガン・ピーターソン効果

銀河間にHIが一様に分布していれば、キューサーのライマン $\alpha$ 輝線の短波長側に連続吸収が見られるはずである。しかし、そのような連続吸収成分の存在ははっきりしていない。そのためGunn & Peterson (1965)<sup>7)</sup>以来、銀河間ガスはある時期に再電離されて、現在も高電離状態にあると考えられている。銀河間ガスの電離状態に制限を求め、かつビッグバン時の元素合成で生成されたHeを見つけるために、HeIIガン・ピーターソン効果探しが試みられていた。HeIIのライマン $\alpha$ 線は504 Åに現れるので、HSTを用いたとしても $z>3$ のキューサーを観測しなければならない。そのようなキューサーのスペクトルはライマン $\alpha$ の森やLLSの吸収を受けているために、HeIIによる連続吸収成分を見つけるのはかなりの困難がある。そのため、視線上に吸収線系が少なく、高赤方偏移にある明るいキューサーを紫外線域で観測する必要がある。

長らく待たれていたHeIIガン・ピーターソン効果の初の観測結果が、Jakobsenらによって1994年に報告された<sup>8)</sup>。彼らは修理が終ったHST/FOCのプリズムモードでキューサー0302-003を観測し、 $z=3.0\sim 3.3$ でHeIIの光学的厚み( $\tau$ )は1.7以上であると報告した。そして、銀河間ガスによる $\tau$ (HeII)と $\tau$ (HI)の比から同赤方偏移での背景紫外線のスペクトルに制限を求めた。彼らは、13.6 eV(HIの電離ポテンシャル)と54.4 eV(HeIIの電離

ポテンシャル)の間でベキ乗のスペクトル( $\nu^{-a}$ )を仮定して、 $a>3$ という急激な傾きを求めた。ただし、この観測はカメラの分光モードで行なわれたので波長分解能は約20 Åと低く、銀河間ガス中のHeによる一様吸収成分ではなく、HeIIのライマン $\alpha$ の森を見ている可能性も大きい。しかし、一つ観測例が出るとはずみがつくのか、現在までにもう二例ほど報告されている。TytlerらはHST/FOSの観測で $\tau$ (HeII)= $1.0 \pm 0.2$  ( $z=3.1$ )<sup>9)</sup>という結果を、またスペースシャトルに載せられたホブキンス紫外線望遠鏡(HUT)の観測でDavidsenらは $\tau$ (HeII)= $1.00 \pm 0.07$  ( $z=2.4$ )<sup>10)</sup>という結果を得ている(図2)。HeIIのライマン $\alpha$ の森からの寄与については議論の余地があるが、銀河間に一様分布しているHeによる吸収が無視できないことはほぼ確実であろう。

HeIIガン・ピーターソン効果の発見も「標準スペクトルモデル」に変更を要請するものであった。ただし、吸収線系によってスペクトルが変形を受けることを考慮すれば、キューサーを背景紫外線輻射場の主な源として考えて不都合はない<sup>11)</sup>。

## 3. KECK インパクト

### 3.1. 重元素を持つライマン $\alpha$ の森

ライマン $\alpha$ の森は原始組成を持つガスであると考えられていたが、本当に重元素を持たないのかどうか、これまでの観測装置では判定がほとんど不可能であった。観測スペクトルを一つ一つのライマン $\alpha$ 吸収線の静止系に直して重ね合わせて、重元素イオンの吸収線探しを行なう程度であった。しかし、KECK望遠鏡の高分散分光器HIRES(波長分解能 $R \equiv \lambda / \Delta\lambda = 36,000$ )によってCIVを始め、SiIVなどの重元素イオンの吸収線を付随するライマン $\alpha$ の森が同定された<sup>12), 13)</sup>。HIの柱密度が $10^{14.5} \text{ cm}^{-2}$ 以上のライマン $\alpha$ の森の約75%がCIVの吸収線を伴い、太陽の約1/100の金属量を持つことが分かった。また、対応するCIV吸収線が速度構造をしめすことから、ライマン $\alpha$ の森に内部

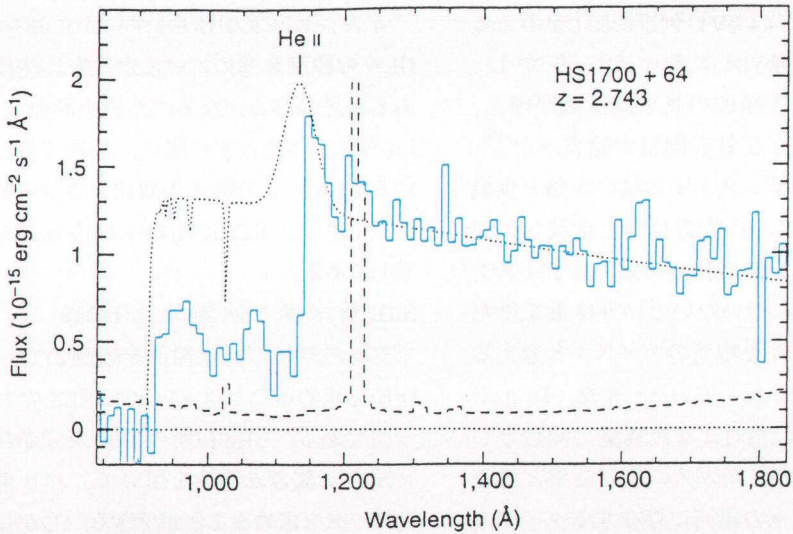


図2：HUTによるHeII ガン・ピーターソン効果の観測。観測されたスペクトル（青線）と吸収がない場合のモデルスペクトル（黒線）。波線は10 Åピンでの統計誤差を表す。Davidsen et al.(1996)<sup>10)</sup>より転載。

構造があることが示唆された（図3）。

また、ライマンαの森と銀河の分布は関係があることが分かってきていたので<sup>14)</sup>、ライマンαの森の描像は急変してしまった。宇宙の大規模構造形成シナリオ（主にCDMモデル）の枠組の中でライマンαの森を考える<sup>15)</sup>のが最近の主流モデルである。「標準モデル」では宇宙空間の至るところにプカプカ浮かんでいる雲というイメージであったが、新しいモデルでは暗黒物質の重力井戸の浅いところに溜ったガスをライマンαの森と考えるのである。ただし、そのようなモデルがバラエティに富んだ物理状態（密度や温度）を予言するのに対し、観測された電離状態のばらつきは少ない、すなわち同じような物理状態にあるという問題もある<sup>13)</sup>。また、原始組成を持つライマンαの森の存在が否定された訳ではない。

### 3.2. DLAの化学進化

4 mクラスの望遠鏡で、DLAでの金属量測定とガスとダストの比の測定がZnIIおよびCrIIを用い

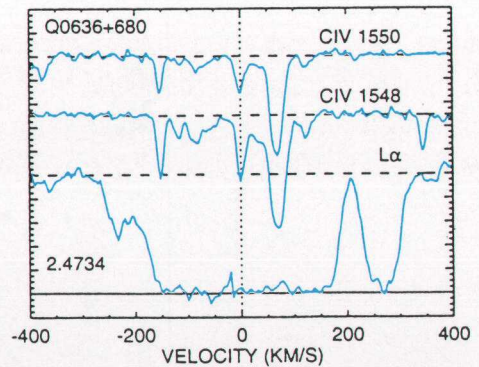


図3：ライマンαの森に付随するCIV吸収線のプロファイル例。キューサー0636+680への視線上にあるz=2.4734のライマンα吸収線（下）とCIV吸収線（上の二つ）。Cowie et al.(1995)<sup>12)</sup>より転載。

て行なわれており、銀河の化学進化の研究が始まっていた。ただし、我々の銀河の星間ガスとの具体的な比較を行なって、銀河の化学進化を考える段階にはまだ遠い段階にあった。しかし、KECK/HIRES によって精度の良い観測例が増え、しかも多種の元素の存在量の測定が始まった<sup>16)</sup>。Luらは我々の銀河のディスク中の星の年齢と金属量([Fe/H])の関係と DLA の赤方偏移と金属量の関係を比較し、DLA は過去の我々の銀河のディスクよりも化学進化が進んでいないという結果を得た(図4)。そして、DLA を銀河のディスクと考える「標準モデル」に疑問を呈している。また、DLA で得られた各種の元素の相対比を金属量の関数として示し、我々の銀河の星間ガスの観測結果と比較して、DLA 中には我々の銀河に存在するタイプのダストは少ないとの議論も行なっている。このように我々の銀河と宇宙論的距離にある銀河の比較が直接詳しく行なえるようになったことは、銀河の化

学進化を解明するための大きな推進する力となるであろう。

また、KECK/HIRES がいかに速いスピードで DLA の観測を進めているかにも、注目する必要があると思われる。なるべく過小評価したとしても、Luらは二年たらずの間に、現在までに見つかっている DLA の3分の1の観測および解析を終えている。しかも、KECK/HIRES は当分向かうところ敵なしである。

### 3.3. 重水素と水素の比(D/H)

キューサーの吸収線系を観測して、宇宙初期の D/H を求めることは KECK/HIRES の大きな目的の一つである。宇宙初期の D/H が分かればビッグバン期の元素合成理論を用いて、バリオンの密度パラメータを求めることができる。しかし、重水素は星形成過程を通じて壊されてしまうので、星形成の影響が低い金属量の少ない吸収線系を観測する必要がでてくるのである。ただし、これまでに得ら

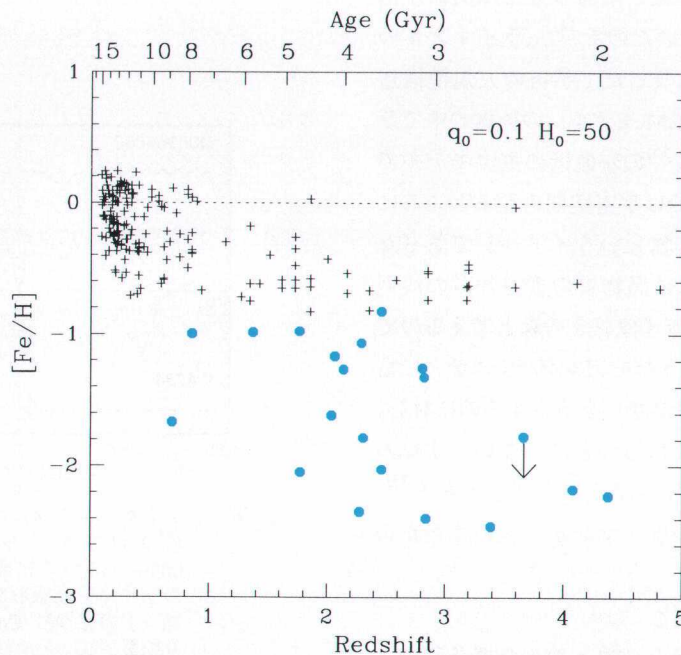


図4：DLAの化学進化(青丸)と我々の銀河ディスクの星が示す化学進化(十字)の比較。Lu et al.(1996)<sup>16)</sup>より転載。

れた結果は一桁程度のばらつきがあり<sup>17), 18)</sup>, 今後の観測結果が待たれる。

#### 4. 陽のあたる吸収線系

このようにHSTとKECK望遠鏡によって、キューサーの吸収線系の描像が書き換えられつつある。KECK/HIRESが吸収線系の研究の全てをリードしているかのようである。KECK望遠鏡のインパクトのせいか、国内の雰囲気も変わってきた。日本にはキューサーの吸収線系を観測できる望遠鏡がないためか、この研究分野は非常にマイナーであった。それが、去年辺りから「吸収線系の研究をしたい」という修士課程の学生をしばしば聞くようになった。また、吸収線系の物理はさまざまな分野との関連があり、KECK/HIRESの観測結果が理論との直接的な比較を可能としたことから、他の分野から研究者の参入も始まっている。

筆者が池内了教授の指導の下でキューサーの吸収線系の研究を始めてから"それなりの年月"が経っているが、キューサーの吸収線系の研究が国内においてもこれほど注目されたのは初めてではないかと思う。しかし、我々の前途は光に満ち満ちているのであろうか。

##### 4.1. 第37回 Herstmonceux Conference

7月1日から5日にかけてケンブリッジで「HSTと高赤方偏移宇宙」というタイトルの国際会議が開かれた。参加者は約200名で、50の口頭発表と100のポスター発表が行なわれた。日本国内からは筆者を含め、国立天文台の家正則教授、柏川伸成助手、東大の佐藤勝彦教授、東北大の谷口義明助教授、京大基研の富田憲二教授の6名が参加した。ごく簡単にはあるが、口頭発表の内容について報告する。

口頭発表の前半はハッブル・ディープ・フィールドサーベイに基づいた、銀河の形成・進化に関する話題が中心であった。二色図上や色-等級関係図上で理論から求められた進化経路と観測の比較を行ない、銀河の進化を探るといった手法がほとんどで

あった。受動的な進化モデル<sup>19)</sup>で良いという声が多かった。ミディアム・ディープ・サーベイの結果も<sup>20)</sup>報告された。また、銀河の形態分類にHSTの撮像能力がいかに力を発揮するかが示された。

今後のHSTの計画についての発表も行われた。STSIのBladesから、1997年2月に予定されているHSTのサービス・ミッション計画についての報告があった。このミッションでHSTの分光器(FOC, GHRS)は取り外され、新たにNICMOS(Near Infrared and Multi-Object Spectrometer)とSTIS(Space Telescope Imaging Spectrograph)が搭載される。HSTは近赤外線域での分解能が高い撮像と、高い波長分解能( $R=30,000$ )で紫外線域( $\lambda=1150\sim 1700\text{ \AA} / 1650\sim 3100\text{ \AA}$ )のエシエル・モードの分光が可能になる。また、STISではフィルターなしで $2000\sim 10,000\text{ \AA}$ を一度にカバーする観測も可能である。1997年7月から始まるサイクル7の予定や将来のサービス・ミッション計画についても発表された。1999年搭載予定のアドバンスト・カメラの性能やフィルターについては、Lick天文台のIllingworthから報告があった。さらに次世代の宇宙望遠鏡計画については、ESOのFosburyから2003年に建造開始の予定の近赤外線宇宙望遠鏡の話があった<sup>21)</sup>。その他、重力レンズやHSTによるキューサーの撮像に関する発表もあったが省略させていただく。

では、本稿のテーマであるキューサーの吸収線系についての発表はどうであったか。理論的な話では、SPHコードでガスの分布を、CLOUDYという光電離状態を解くコードを使って電離状態を求める。そして、ライマン $\alpha$ の森の観測データと比較するという発表が、Max Plank研のHaehneltによって行なわれた。観測に関する話はほとんどがKECK/HIRESの観測結果であった。HSTの結果としては、BergeronがDLAに対応する銀河探しの発表をした。Bergeronらは、赤方偏移 $0.4 < z < 1.0$ の範囲で7のDLA銀河候補あるいは21cm吸収体と $z=1.78$ に21cm-DLA銀河を発見した。そのいずれ

もがコンパクトなサイズを持ち、様々な明るさと形態を持っている。それ以外には、HSTを用いた低赤方偏移でのライマン $\alpha$ の森の発表が一つあるだけであった。

#### 4.2. 持つ者と持たざる者

いずれにしても現状では、キューサーの吸収線系を研究する者はKECK/HIRESの後をついて行くしかないような印象がある。まず、KECK/HIRES、そしてHSTがあって、理論的な解釈が後からついていく。しかもKECK望遠鏡はどんどん先へと進んでいってしまう。このような状況の下では、“持つ者”と“持たざる者”の貧富の格差がすみやかに増大するのは明らかと思われる。この場合の貧富は、質が良くインパクトを持った観測結果にどれだけ速く、多くアクセスできるかで判断される。日本国内ではキューサーの吸収線系の研究が急に“はやりもの”となって盛り上がりを見せているが、実はとても厳しい時代に入っているのではないかと切実に感じた。4 mクラスの望遠鏡を持ち、既に実績を上げているヨーロッパの研究者たちでさえ、自分たちが基本的に“持たざる者”であることに危機感を抱いているようであった。

“影”を用いて本体の銀河を研究するキューサーの吸収線系の研究に、かつてないほどの陽があたっている。でも、実際に何に陽があたっているのかを良く考えなければならぬのかもしれない。今回の国際会議に参加して、KECK望遠鏡あるいはHSTのユーザーやユーザーと共同研究をしている研究者ではない“持たざる者”としての現状を冷静に見極め、今後の戦略を考えなければいけないと感じさせられた。

ケンブリッジで開かれた国際会議に参加するにあたり、天文学振興財団から旅費の一部を援助していただき、感謝している。

#### 参考文献

- 1) 例えば Bergeron J., et al., 1992, A&A 257, 417
- 2) Sargent W.L.W., et al., 1980, ApJS 42, 41
- 3) Vogel S., Reimers D., 1993, A&A 274, L5
- 4) Reimers D., Vogel S., 1993, A&A 276, L13
- 5) Giroux M.L., et al., 1994, ApJ 435, L97
- 6) Denda K., Ikeuchi S., 1995, PASJ 47, 877
- 7) Gunn J.E., Peterson B.A., 1965, ApJ 142, 1633
- 8) Jakobsen P. et al., 1994, Nature 370, 35
- 9) Tytler D., et al., 1995, in QSO Absorption Lines, eds Bergeron G., et al. (Springer, Heidelberg) p.289
- 10) Davidsen A.F., et al., 1996, Nature 380, 47
- 11) Okoshi K., Ikeuchi S., 1996, PASJ 48, 441
- 12) Cowie L.L., et al., 1995, AJ 109, 1522
- 13) Songaila A., Cowie L.L., 1996, AJ, 112, 335
- 14) 例えば Morris S.L., et al., 1993, ApJ 419, 524
- 15) 例えば Cen R., et al., 1994, ApJ 437, L9
- 16) Lu L., et al., 1996, ApJS, in press
- 17) Songaila A., et al., 1994, Nature 368, 599
- 18) Tytler D., et al., 1996, Nature 381, 207
- 19) 太田耕司, 1996, 天文月報, 89(No. 7), 277
- 20) <http://mds.pha.jhu.edu/>
- 21) <http://ecf.hq.eso.org/>

#### QSO Absorption Systems speak on Galaxies at Cosmological Distance

Kiyomi DENDA

*Institute of Astronomy, University of Tokyo*

Abstract: Recently HST and KECK 10-m telescope have developed the research on quasar absorption systems. Their observational results require new pictures of the absorption systems. I review the recent status of this field and present a brief report on the 37th Herstmonceux Conference "HST and The High Redshift Universe".