

赤方偏移の壁突破！

$z=7$ 最遠銀河で暴く宇宙再電離時代



太田 一陽

〈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: ota@optik.mtk.nao.ac.jp

われわれは、すばる望遠鏡と独自のフィルターを用い、127.1 億光年彼方に、観測史上最も遠い天体、赤方偏移 $z=6.96$ のライマン α 輝線銀河を発見した。宇宙誕生わずか 7.5 億年後にはすでに銀河ができていたことになる。 $z < 5.7$ (宇宙年齢 > 9.7 億年) では、この銀河の観測個数密度はほとんど変化しない。しかし最近、 $z=5.7$ から 6.6 (8.1 億年) にさかのぼると、0.4-0.6 倍に減るのが初めて観測された。われわれは今回、 $z=6.6$ から 7 (7.5 億年) でさらに 0.18-0.32 倍にも減るのを確認した。これは $z=5.7-7$ が、まだ暗い初期銀河が形成している時期か、宇宙再電離期に存在した中性水素が銀河光を吸収している時代、または両方である可能性を示す。これまで探査されていない宇宙史の重大な転期に、初めて観測が踏み込み始めた大きな一歩である。

1. 序章：ついに発見、 $z=7$ 銀河！ 見えてきた、宇宙史の暗黒時代！

2006 年 9 月 14 日、衝撃的ニュースが世を走った！最も遠い銀河 IOK-1 の発見だ¹⁾ (図 1)。すばる望遠鏡が見つけたこの天体は、英国 BBC、米国 CNN、ABC ニュースなど、国内外有数のメディアで話題をさらった。ビッグバンからわずか 7.5 億年後 (赤方偏移 $z=7$)^{*1} にはもう天体があったのだ。現宇宙年齢のたった 6% の時代である。「だから何?」「これまでの一番遠い銀河って、 $z=6.6$ だったよねえ。たった 0.4 (6 千万光年の差) じゃん。」そう思った方は多に違いない。し

かし、ちょっと待った。単に遠い銀河を見つけただけではない。宇宙論的に重要な発見があったのだ。6 千万光年さかのぼると、銀河数が 6 分の 1 に減っていたのである (図 1)。宇宙は銀河が空間的に非均一で泡状に分布した大規模構造でできている。「見た場所、たまたま銀河少なかったんじゃないの?」これも違う。この観測で探査した空間内だと、 $z=6.6-7$ 時代で銀河密度のばらつきは、たった $\pm 25\%$ だ (解析的な宇宙大規模構造形成のモデル²⁾ を用いて計算)。6 個あれば最高でも 1.5 個しか減らない。残り 3.5 個の減少はどう説明するのか。三つの可能性がある。(1) 単にサンプル数が少なく、統計誤差が大きい^{*2, 3)}。(2) $z=7$

*1 本稿では、現宇宙年齢を 134.6 億年とする宇宙論モデル ($\Omega_M=0.3, \Omega_\Lambda=0.7, H_0=70 \text{ km/s/Mpc}$) を採用する。モデルが違えば、同じ赤方偏移 z に対する宇宙年齢も異なるが、その差 (例、 $z=6.6$ と 7.0 で 6 千万年の差) は、どのモデルでもほぼ同じだ。

*2 天文ではサンプル数が少ないまれな現象がままある。ガンマ線バースト、超新星爆発など。その場合、観測された個数の不定性が大きく、統計解析には細心の注意が必要だ。この取り扱いには、文献 3 がよく引用されており、本稿の研究でもフル活用している。

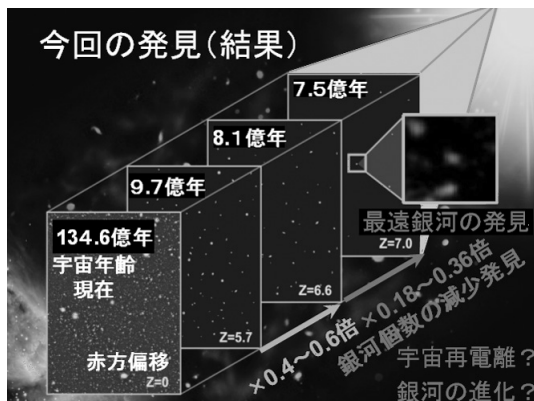


図1 本研究の結果を図示したもの。

時代には観測しやすい明るい銀河がまだ少ない⁴⁾。つまり、非常に暗い初代銀河が形成され始めた時期に近い。(3) 宇宙再電離^{*3}の真っ最中に時代をさかのぼって突入。銀河の光が中性水素に吸収・散乱されて減衰、暗くなって、観測しやすい銀河の個数が少ない⁵⁾。(1)-(3)のいくつかが同時に起こっている可能性もある。

今回、 $z=7$ 銀河を分光で同定、 $z=6.6$ 時代からの銀河個数密度の減少を発見し、(1)-(3)の可能性を吟味したのが、本研究である。その成果は、2006年9月14日のNature誌に掲載された¹⁾。同誌にはもう一つ面白い論文が掲載された⁴⁾。米国カリフォルニア大学のリチャード・ボーエンスとガス・イリングワースの名コンビである。彼らは、ハッブル宇宙望遠鏡の観測から見つけた $z\sim 6, 7-8$ の銀河(測光で選んだ候補天体サンプル、分光同定はされていない)の解析から、やはり $z\sim 6$ から7-8で個数の減少($\times 0.1$ 倍)を確認し、原因は(2)と結論している。興味深いのは、すばる(地上)とハッブル(天空)という、全く独立相違な手段で、解析法も異なるのに、個数の減少とい

う同じ結果を得たことだ⁶⁾。 $z>6.6$ の時代は、宇宙再電離か初代銀河形成(or両方)が起こった宇宙史の極めて重要な時代であり、今まで観測がなく「宇宙史の暗黒時代」と呼ばれてきた。本研究は、観測では初めてその領域に一步踏み込んだことになる。そこに本成果の究極の意義がある。単なる記録更新だけではないのである。本稿では、元最遠 $z=6.6$ 銀河の発見⁷⁾から4年間、世界の研究者が血眼でもっと遠いのを探しているなか、なぜわれわれだけ成功したのか、その秘訣を感動の裏話とともに、本月報読者だけに大公開いたしましう。

2. 背景・研究目的: 宇宙再電離時期を探せ

前述の再電離時期がわかれば、宇宙の進化をよりよく理解し、初期天体形成・銀河進化の過程を解明する手がかりが得られる。そのため、この時期を突き止める研究は理論・観測双方向から活発に行われてきた。特に観測では、四つの独立した方法で目覚ましい成果が出ている(図2)。まず、NASAのWMAP衛星は、ビッグバンの名残である宇宙マイクロ波背景放射の揺らぎを観測し、再電離時期が $6 < z < 14$ (宇宙年齢 $t=2.9-9.1$ 億年)頃であると見積もった⁸⁾。また、専用望遠鏡で全天の4分の1を掃くスローン・デジタル・スカイ・サーベイでは、赤方偏移 $z\sim 6$ ($t=9.1$ 億年)のクエーサーが初めて十数個発見された。クエーサーのスペクトルでは、手前の銀河間空間に少しでも中性水素が存在すれば、電離に寄与するライマン α (Ly α)輝線より短波長側の光が顕著に吸収される。赤方偏移が $z\sim 6$ を超えた領域での吸収の様子から、この時代の宇宙に残っているまだ電

*3 宇宙はビッグバンで誕生した直後、電離状態(陽子、電子ばらばら)だった。その後冷えて中性水素原子が形成され、中性化した。しばらく天体(光)がない「暗黒時代」が続いたが、最初の天体ができたとき、高温度星の紫外線により宇宙空間の中性水素が「再び」電離し始めた。この時代を再電離期と呼ぶ。次々と星、銀河、クエーサーが形成され、それらの光で電離が促進され、 $z\sim 6$ の時代には、宇宙をほぼ100%電離(中性水素率 $\sim 0\%$)し終わったと考えられている。

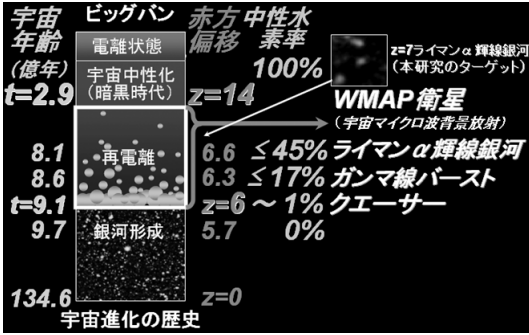


図2 宇宙再電離の先行研究と本研究.

離されてない中性水素の割合は約1%と算出、再電離は $z \sim 6$ に完了したと結論した⁹⁾。三つ目は、すばる望遠鏡が観測した $z=6.3$ ($t=8.6$ 億年)の最遠ガンマ線バーストである。スペクトル光の吸収のされ方から、この時代の中性水素率は $\leq 17\sim 60\%$ と見積もられた¹⁰⁾。

四つ目の鍵となったのは、活発な星形成を伴い宇宙の再電離に寄与したと考えられている、ライマン α 輝線銀河 (Lyman Alpha Emitter; LAE) の観測である。再電離が完了したとされる時期 $z=6$ よりも前にさかのぼると ($z > 6$ になると)、銀河間物質における中性水素の割合が増加し $\text{Ly}\alpha$ 光子を吸収・散乱させるため、LAEの観測される個数密度は減少すると予測される。現在までに $z=3$ から 6.6 ($t=21.1$ から 8.1 億年)までさかのぼってLAEが観測されているが、個数密度の減少が確認されずクエーサーの結果と矛盾することが指摘された¹¹⁾。ところが、最近の別の研究では、 $z=5.7$ から 6.6 ($t=9.7$ から 8.1 億年)にさかのぼると、個数密度が $0.4\sim 0.6$ 倍に減ることが確認され、 $z=6.6$ 時代の中性水素率は $\leq 45\%$ と見積もられた⁵⁾。これは、クエーサーやガンマ線バースト観測の結果を裏づける。もし後者の結果の方が正しいなら、 $z > 6.6$ でもさらにLAE個数密度が減少すると思われる。しかし、 $z=6.6$ より遠い宇宙では、分光で本物と同定された銀河やその他の電離天体はまだない。そこでわれわれは、より遠

い銀河である $z=7$ ($t=7.5$ 億年)時代のLAEを直接観測で検出し、その個数密度が $z < 6.6$ 時代からどう変化するかを調査した。

3. 研究法：秘密兵器、開発成功！ 世界で一つだけのフィルター

3.1 ライバルたちの戦略

2002年に $z=6.6$ 銀河が見つかって以来、人類は、それはもうあの手この手を使って、 $z > 6.6$ 銀河を捕獲しようとした。(A) 重力レンズの利用¹²⁾、(B) ドロップアウト法⁴⁾、(C) 超高感度近赤外線カメラ¹³⁾など。候補天体もいくつか見つっているが、まだ分光で本物と同定されたものはない。これらの方法には一長一短がある。まず(A)は、手前の銀河団が作る重力レンズで増光した背後の遠方銀河を探す。相当暗い天体でも検出できるが、観測が銀河団の重力レンズ効果が利く狭い領域のみに限られ、広い空間にわたって均質に候補天体をサンプルできない。また、モデルを用いてレンズ効果を補正するため、不定性も大きい。次に(B)では、可視から近赤外の広帯域(透過光の波長範囲が広い)フィルターを複数組み合わせ、遠方銀河のスペクトル連続光に特徴的な傾きを多波長でとらえ、狙う赤方偏移範囲にある銀河を見つける。しかし、色が似ている銀河系内の低温度星や低赤方偏移銀河も同時に拾ってしまう。また、検出する銀河の赤方偏移範囲が広く($\Delta z \sim 1$)、特定赤方偏移の銀河だけピンポイントで選ぶことができない。さらに、目的銀河であった場合でも輝線を伴わない(本当はあるがダストなどで遮られている説あり)ものも多く、非常に暗くて $8\sim 10$ m望遠鏡の集光力でも分光できない場合が多い。最後に(C)は、現技術では、この波長域で広視野の検出器が実現していない。 $z > 7$ 天体は非常にレアで暗い可能性が高い。深さは稼げても、広視野を掃かねば、発見できるチャンスは極めて低い。

3.2 われらの戦法—世界一広視野カメラ+独自開発フィルター

$z > 6.6$ の最遠銀河を見つけるだけでも、宇宙の歴史の中でいつ頃にはすでに天体が形成されていたかを知ることができ、その科学的価値は高い。さらに、新規開拓した昔の宇宙 ($z > 6.6$) が、よく探査された後の時代 ($z < 6.6$) と比べどう違うのかまでわかれば、銀河誕生・進化の理論的描像と宇宙再電離時期をより明らかにすることもできる。それには、同一の広い (= 銀河がなす大規模構造をもカバーできる広さの) 宇宙空間を、首尾一貫した観測法で時代をさかのぼって探査し、低～高赤方偏移銀河を均質にサンプルして不定性が少ない比較をする必要がある。ライバル達の戦略では、狭い探査視野や不定性の大きい観測法のため均質なサンプルが得られない。

そこでわれわれは、観測領域をすばるディープフィールド (Subaru Deep Field; SDF, 図3左上) に、ターゲットを $z = 7$ ライマン α 輝線銀河 (LAE) に定め、その Ly α 輝線だけを選択的に探せる狭帯域 (透過光の波長範囲が狭い) フィルターを開発した。このフィルターで SDF を深く撮像して候補天体を探し、分光で本物か確認する「狭帯域サーベイ」という観測法で攻めることに

した。SDF は、8 m 級望遠鏡では世界最大視野 ($34' \times 27'$) を誇る、すばる主焦点カメラ Suprime-Cam (図3中上) の一視野分に相当し、同カメラと多波長の広帯域 (B, V, R, i', z' バンド)、狭帯域 (NB816, NB921 バンド) フィルター (図3右上) で深撮像されてきた領域だ¹⁴⁾。この視野なら、大規模構造による銀河密度の不定性を最小限に減らすことができる。さらに、上記二つの NB フィルターで $z = 5.7, 6.6$ LAE の系統的な狭帯域サーベイ^{5), 15)}が行われ (図3下)、他に類を見ない高均質な LAE サンプルがすでにある。ならば、 $z = 7$ LAE も同じ領域・観測法でサンプルし、比較すれば、誰も文句をつけられない (図3下)。

Ly α 輝線は、静止系 ($z = 0$) では紫外線域の 1,216 Å に現れる。 $z = 7$ LAE の輝線は、 $1,216 \times (1 + z)$ Å に赤方偏移して可視光域の終端近く 9,730 Å に現れる。われわれは、この周辺の狭い波長範囲 (9,655–9,855 Å: $z = 6.9-7.1$ LAE に対応) の光だけを透す狭帯域フィルター NB973 を Suprime-Cam 用に開発した (特別推進研究、代表は家 正則教授) (図3右上)。この NB973 は、これまで一貫してすばるのフィルターを手がけてきた朝日分光社が作製した。可視光域の終端で作製が困難な NB973 は、同社のノウハウ (= 日本の科学技術

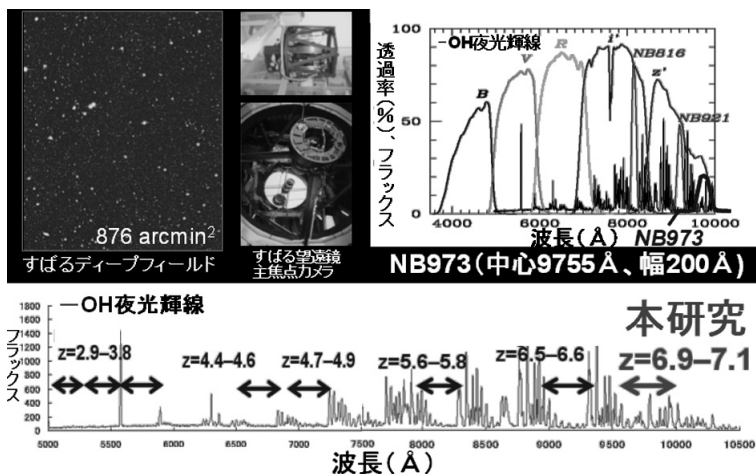


図3 本研究の観測領域・装置、フィルター (上)。狭帯域サーベイの先行研究 (下)。

力)なくしては開発しえなかった。海外のメーカーに打診したところ、非現実的な開発時間と費用を突きつけられたのだ。

大気中には OH 分子があり、強い輝線を出す。狭帯域サーベイは、この輝線がない狭い波長帯「OH の窓」を対象にフィルターを作って行われてきた(図 3 右上, 下)。なので、OH 窓の波長帯に対応した赤方偏移の LAE が観測対象となる。本研究の $z=6.9-7.1$ LAE 対応の窓が CCD の感光域では最高赤方偏移の窓となる。これより長波長は近赤外域になり、OH 輝線が密なうえ、検出器視野が狭く探査空間が小さいため、狭帯域サーベイは成功していない。われわれのサーベイは、従来のものと異なる点が二つある。まず、透過波長内には、かなり強い OH 輝線がある。それらのわずかな隙間に $z=7$ Ly α 輝線が入らなければ、OH 輝線の光に埋もれて検出は難しい。さらに、Suprime-Cam の感度の限界に近い(図 3 右上)。仮に OH 隙間に入ったとしても、 $z=7$ LAE のような遠く暗い天体が検出できるかは、やってみないとわからない。本研究は、現代科学の最先端技術を限界近くまで使い切っても、リスクの高い大挑戦であった。

4. Subaru Deep Field 撮像観測 —宇宙の遠くまで写し出す

4.1 2003 年 5, 6 月: $z=7$ LAE の先駆的サーベイ

実は、NB973 フィルターが完成する前年の 2003 年に、すばる望遠鏡の微光天体分光撮像装置(Faint Object Camera And Spectrograph; FOCAS: 視野は Suprime-Cam のわずか 32 分の 1、探査体積は 62 分の 1) 用に、NB980 フィルター(中心 9,800 Å, 幅 100 Å, $z=7-7.1$ LAE 対応, 朝日分光社製)を開発し、試験観測を行っていた。FOCAS は、光が入射角 7.5° で並行してフィルターに入る構造だ。フィルター内での光の屈折が単純で、光が収束して入る Suprime-Cam 用の多層膜コーティングフィルターの設計は困難を極めたので、

まずは FOCAS 用に試作して試験評価することにした。2003 年 5 月 7, 8 日、FOCAS + NB980 で SDF の北東部(ここでは、3.1 節 (B) のドロップアウト法で $z>5.7$ 銀河の色をもった天体が FOCAS 視野に入る数が最大だった)、銀河団 MS 1,520.1 + 3,002 の中心部(重力レンズで増光を期待)を各 4, 2.7 時間撮像(かなり浅い)した。実はこの時期、超新星が出現していた。すばるには、Target of Opportunity (ToO: 突発天体) 観測プログラムがある。ToO が出れば、他の通常観測プログラムに割り込んで観測できる。探査領域を二つに分けたこと、ToO が入ったことで、各領域の撮像限界等級が浅くなった(5 σ で NB980 \leq 23.2 等(SDF), 23.0 等(銀河団領域))。非常に明るい $z=7$ 銀河の存在を期待して、相当控えめな条件でも候補天体を選んだ。同年 6 月 22, 23 日に分光したが、何一つ検出できずに終わった。また、OH 夜光に起因する強いフリンジ(干渉縞)が撮像画像に出たが、除去できず、これが候補天体選別の邪魔となった。まさに完敗であった。だが、この試験観測のおかげで、フリンジ除去の手法を確立するための予備検討ができ、製作可能な Suprime-Cam 用のフィルターの仕様値を決めることができた。

4.2 2004 年 8 月: NB973 試験撮像—フィルター のときは上々

収束光用でしかも視野中心と視野端とは入射角度が異なる Suprime-Cam 用の狭帯域フィルターの設計は困難を極めた。設計上は良い性能をもつものができても、実際の製作時には多層膜の膜厚にわずかな誤差が生じる。何十層もの膜を重ねて実現する多層膜フィルターなので、誤差の積み重なりは最終性能を大きく左右する。製作時の実際的な膜厚誤差を考慮に入れて、誤差が生じてもフィルターとしての最終性能が確保できる安全な膜設計の最適化にほぼ 1 年を要した。朝日分光社技術陣のねばりでも Suprime-Cam 用に NB973 フィルターが完成したのは 2004 年の春であった。

フィルターの性能確認のため、8月のSuprime-Camの共同利用観測時に、日没後の1時間を特別に割いてもらい、透過率測定、3時間のSDF試験撮像を行った。その結果、設計どおりのできであり、解析でフリッジも除去できた。積分時間が短く、8月はSDFの昇天角度が低いため、天体フラックスの大气透過率が悪く、さすがに候補天体は検出できなかったが、本番に備えた解析手順を確立した。

4.3 2005年3月16-18日：NB973本番撮像

一晴れ男は得をする

観測天文学(地上のみ)では、雨男は苦勞する。観測時間がもらえても、曇ればまた1年待たねばならない。幸か不幸か、筆者は晴れ男だけが取柄である。しかし今までの人生、この観測ほどその恩恵を受けたことはない。観測日の前日まで曇りと強風が続き、ドームさえ開けられなかった。それが、われわれの観測夜にはピタリ！と止み、快晴。シーイングも平均0.7台と悪くない。2晩続いた。しかし、3晩目は残念ながら一晩中曇り、観測不可。翌日ハワイを後にした。聞けば、その後も数日曇りが続き観測は全滅だったそうだ。われわれは、運良くピンポイントで丸2晩の当たりクジを引き、計15時間積分(露出)でSDFを撮像、限界等級NB973 ≤ 24.9等(2"アパーチャー測光のAB等級5σ)を達成した。試験観測時のデータから予測したとおりの値だ。目標としていた限界等級より明るく(浅く)なったが、まだ望みのある値だ。むしろ、この位明るい候補天体がなければ分光同定は難しい。神様ありがとう。

5. z=7候補の選抜：競争率2万倍の狭き門

ハワイから帰国したわれわれには、土産話を語る猶予も許されなかった。10日後の4月までに納得できる候補天体を見つけ出し、すばる望遠鏡のTime Allocation Committee (TAC) に示せなければ、5月に割り当て予定の分光観測時間を取り消

すと通告されていたのだ。試験観測で確立した解析法と寝食忘れる情熱で速攻の測光、何とか候補天体を選出し、無事に乗り切った。候補は、Lyα輝線がNB973フィルターに入りその等級が直ぐ隣のz'バンド(図3)等級より有意に明るくなったと思われる天体を選び出した。さらに、高赤方偏移では、Lyα輝線の短波長側は銀河間物質によってほとんど吸収されるため、B, V, R, i'バンド(図3)で写っていないという条件も課した。しかし、注意が必要だ。NB973はz'バンドの長波長側と重なる特殊な波長帯で作られている。また、NB973は従来の狭帯域フィルターよりも波長幅が約2倍大きい。モデル銀河のスペクトルを用いて厳密なシミュレーションを行ったところ、z < 7銀河でもスペクトル連続光の傾きが大きく明るい天体の場合、z'バンドよりNB973で等級が明るくなるのがわかった。実際、そのような条件に当てはまるz=6.4-7.0 LAE候補が一つ検出された。しかしこの天体は、z=6.6 LAE対応のNB921フィルター(図3右上)でも写っており、別プロジェクトの分光観測でz=6.6 LAEと同定⁵⁾されたものと一致することが判明した。これでz=7の可能性は消えた。ほかに、NB973フィルターでしか写ってない天体が二つあった。この場合、NB973にLyα輝線が入った可能性が非常に高い。z=7 LAEの有力候補として、家、太田、柏川(本研究の中心メンバー)の頭文字を取り、IOK-1, IOK-2と命名した(図4)。NB973 ≤ 24.9に写った41,533天体からの大選抜であった。

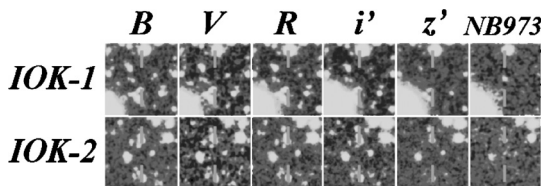


図4 z=7 LAE候補の多波長画像。z=7 Lyα輝線に相当するNB973だけで明るい。

6. 分光同定：2005年5月, 6月, 2006年4月：超新星は味方だった

「2度あることは、3度ある！」は本当によく当たる。また超新星が出た！しかも、100年に1度あるかないかのシロモノだ（実は2度目は2004年、別研究の観測でガンマ線バーストが出た。快晴でシーイング良好の空と時間をToOに譲った）。筆者は、どうも晴天だけでなく突発天体も呼び込む強運をもっているらしい。専門を変えたほうが良いのかもしれない。しかし、今回は観測を交代した途端シーイングが悪化した。超新星の観測には問題ないが、 $z=7$ 銀河候補の分光には厳しく、ToOとの時間交換は吉と出た。失った時間をすぐ後の6月に補填してもらえ、それが功を奏したのだ。5月の観測では、スペクトル中に $z=7$ Ly α 輝線が確認できず、観測チーム内にあきらめ

めと疲弊が蔓延していた。取得スペクトル間でシーイング、フラックス透過率、OH夜光強度に大きなばらつきがあり、輝線の判別が非常に難しかったのだ。従来の狭帯域サーベイでは対象波長域内に邪魔なOH夜光輝線がなく、多少暗くてもLy α 輝線があれば、ハッキリと確認できる。しかし、NB973波長帯はOH夜光があり、Ly α 輝線と一部でも重なれば、デリケートな解析でOH光だけを綺麗に除かないとわからない。シーイング、透過率が悪ければ、Ly α 輝線はOH光に圧倒される。これを救ったのが、6月の観測。文句なしの快晴で、シーイングも透過率も良好。非常に良いスペクトルが取れた。入念な解析の結果、IOK-1スペクトル中に $z=6.96$ のLy α 輝線を確認できた(図5)。世界記録が出た瞬間、筆者は天にも昇る喜びと安堵感を覚えた。これで何とか学位論文が書けると。しかし、共同研究者は意外にも冷静

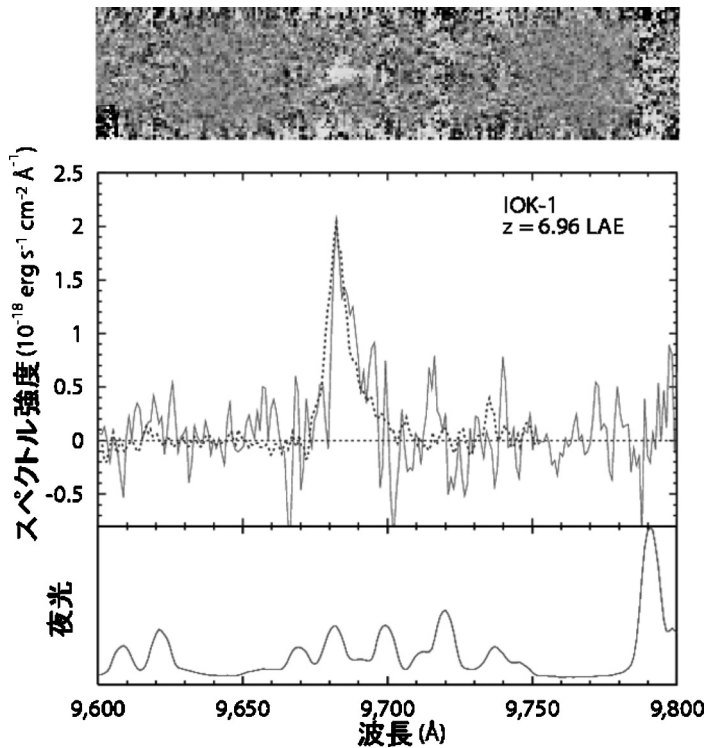


図5 夜光を引いた後の $z=6.96$ LAE (IOK-1) スペクトル (上パネル実線). 12個の $z=6.6$ LAE 合成スペクトルを規格化して重ねる(破線)と非対称な輪郭が非常によく似ている。

だった。「これ、本物なの？」高赤方偏移 Ly α 輝線の形は、前述した様に短波長側が吸収されるので非対称になる。この輝線は明らかに非対称だ。ほかの輝線である可能性もチェックしたが、すべて当てはまらない。2006年4月24日に、再度 IOK-1 を分光。やはり、しかるべきところに輝線があり、本物であることが確実となった。新たなデータを加え、スペクトルの質が格段に向上、Nature 誌投稿に踏み切った。

ところで、IOK-2 は？ IOK-1 よりも暗く、分光した時間も短く、まだ本物かどうか判別できていない。ここで、注意しなければならないことがある。NB973 の観測は他のフィルターでの観測の1-2年後に実施したということである。筆者は突発天体を呼ぶ達人である。IOK-2 は NB973 撮像時だけ突発的に明るくなった活動銀河核などの天体であっても何らおかしくない。その可能性も調べた。NB973 撮像データは1回の観測分しかない。代わりに、複数の期間にわたって SDF を撮像した *i'* バンドの画像で、変光天体数を調べた。その結果、今回の NB973 撮像で検出限界より明るくなりうる変光天体数は、最大で3個だった。3度あることは4度あったのかもしれない。だが、IOK-2 は IOK-1 より拡がりをもつ天体に見えるので、超新星や活動銀河中心核の増光現象の可能性は低いように思われる。今後の追観測に乞うご期待。

7. 最終章：結論と今後

今回見つけた $z \sim 7$ LAE は1個 (IOK-2 も含むと2個) だ。3.2 節では、同一の広い宇宙空間 (SDF) を、首尾一貫した観測法 (NB816, NB921, NB973 狭帯域サーベイ) で、各時代の銀河 ($z = 5.7, 6.6, 7.0$ LAE; 宇宙年齢 9.7 億, 8.1 億, 7.5 億歳) を均質にサンプルし、比較すれば、銀河誕生・進化の理論的描像と宇宙再電離時期をより明らかにすることができる」と述べた。これは本研究では、2 節の研究目的だった、「再電離完了時期が

本当に $z \sim 6$ (9.1 億歳宇宙) だったか裏づける」ことに相当する。各狭帯域サーベイで NB973 撮像が最も浅い。それに深さをそろえ、LAE 個数密度を比較した (図 6)。 $z = 6.6$ に比べ、 $z = 7$ で個数密度が 0.18 倍に減っている (IOK-2 も本物とすれば、0.32 倍)。2 節では、 $z = 5.7$ から $z = 6.6$ で 0.4-0.6 倍に減っている結果⁵⁾と減らない結果¹¹⁾があると述べた。実は、減少を認めたのは、SDF データだけで比較した研究である。減少しない方は、サンプル数が少ないうえ、いろいろな異なる観測研究からデータをかき集めてきて作ったサンプルで比較している。宇宙大規模構造、サンプル選択方法に起因する不定性が大きく、信頼度の高い比較とは言えない。 $z < 5.7$ で LAE 個数密度はほとんど変化せず、 $z = 5.7$ から 6.6 の間 (つまり $z \sim 6$) で減少が起こり、その傾向が $z = 6.6$ から 7.0 でさらに強まっている。これは、 $z \sim 6$ より昔にさかのぼるに従って、まだ電離されていない中性水素が多くなり、Ly α 輝線光が吸収・散乱されて減衰し、地球で観測される LAE 数が減っていることを示唆する。これが本当なら、 $z \sim 6$ に再電離が

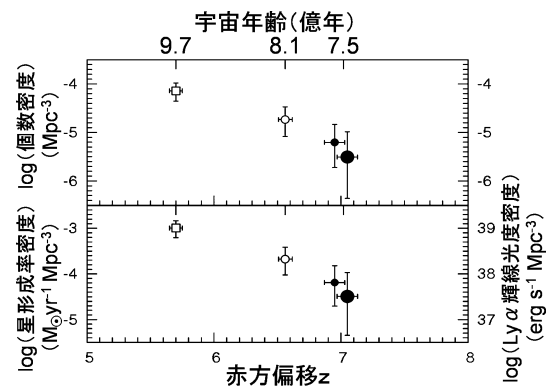


図 6 LAE の個数密度 (上), 星形成率密度 (下左軸), Ly α 輝線光度密度 (下右軸) の時代変化。各データは、 $z = 5.7$ (\square)¹⁵⁾, $z = 6.6$ (\circ)⁵⁾, $z = 7.0$ (本研究: 小さい●LAE2 個, 大きい●1 個の場合) の LAE。縦エラー棒は、宇宙大規模構造による銀河密度ばらつきと少数統計による誤差。横エラー棒は探査赤方偏移範囲を示す。

終わった可能性が高い。ただし、1節で述べたように、LAE自身が進化して、観測個数に影響した可能性は否定できない。LAE自身の $z=5.7-7$ での進化状況はまだはっきりとわかっていない。今後の研究では、銀河進化を詳しく調べ、考慮したうえで、再電離の可能性が残るかを検証することが、初期宇宙をひも解くうえでの重要課題となるだろう。また、今回のNB973撮像は若干浅い、もっと深くしても、個数密度の減少傾向があるか調べるのも重要だ。IOK-2の分光同定、SDFの追加撮像、他領域での $z=7$ LAE探査がこれらの課題を解決してくれる。本稿の読者に、すばる望遠鏡TACの方がいらっしゃれば、観測時間をお願いいたします。

謝 辞

NB973を作製していただいた朝日分光社、7回にわたる大観測を支援して下さった、すばる望遠鏡スタッフの方々、素晴らしい撮像データを取得・公開されたSDFチーム、そして共同研究者の方々に感謝いたします。皆様のご支援なしには本研究の成功はありませんでした。また筆者自身は、日本学術振興会からサポートしていただきました。この場を借りてお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Iye M., Ota K., Kashikawa N., et al., 2006, Nature 443, 186
- 2) Sheth R. K., Tormen G., 1999, MNRAS 308, 119
- 3) Gehrels N., 1986, ApJ 303, 336
- 4) Bouwens R. J., Illingworth G. D., 2006, Nature 443, 189

- 5) Kashikawa N., et al., 2006, ApJ 648, 7; 柏川伸成, 2006, 天文月報 99, 562
- 6) McMahon R., 2006, Nat 443, 151
- 7) Hu E. M., et al., 2002, ApJ 568, L75
- 8) Page L., et al., 2006, astro-ph/0603450
- 9) Fan X., et al., 2002, AJ 123, 1247
- 10) Totani T., et al., 2006, PASJ 58, 485
- 11) Malhotra S., Rhoads J. E., 2004, ApJ 617, L5
- 12) Kneib J.-P., et al., 2004, ApJ 607, 697
- 13) Horton A., et al., 2004, SPIE 5492, 1022
- 14) Kashikawa N., et al., 2004, PASJ 56, 1011
- 15) Shimasaku K., et al., 2006, PASJ 58, 313

Discovery of a $z=7$ Galaxy to Uncover the Epoch of Reionization

Kazuaki Ota

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

Abstract: We discovered the most distant Lyman Alpha Emitter (LAE) at $z=6.96$, showing that galaxy formation was in progress just 750 Myr after the Big Bang. At $z < 5.7$, the number density of observed LAEs does not vary much. However, a recent observation reported it decreased by a factor of 0.4–0.6 from $z=5.7$ to 6.6. We also found the density became even 0.18–0.36 times smaller from $z=6.6$ to 7. This suggests either the first faint galaxies were forming, or neutral hydrogen during the reionization was absorbing light from galaxies, or suggests both events were occurring simultaneously.