

## 祝・日本学士院賞受賞

## 抜きつ、抜かれつ、夜明けのライマンレース

## 家 正 則

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: m.iye@nao.ac.jp



「初期宇宙の研究」に関し、たいへん光栄なことに平成25年度日本学士院賞を2013年6月17日に賜りました。TMT計画推進で慌ただしく、「六日の菖蒲、十日の菊」どころではない大ピンぼけ時期の寄稿となってしまいました。一連の研究の背景と所感を記させていただきます。

## ミッション・インポッシブル

宇宙は約138億年前に高温高密度のビッグバンとともに始まったとされています。ビッグバンからわずか38万年後には、急激な膨張で宇宙の火照りは治まり、陽子と電子が結合した水素原子と正体不明の暗黒物質が主役となりました。いまだ星が生まれていない宇宙は、光のない「暗黒時代」に入ります。その後、暗黒物質の濃い部分に水素原子が集まり、約2億年ごろから原始銀河があちこちで生まれ始めたと考えられています。だが、誰もその現場を見てはいません。100億光年かたの銀河の光は届くのにはざっと100億年かかります。つまり遠くを見るほど昔の姿が見えるはずですが、宇宙の考古学研究のためには、原始銀河の水素原子が放つ特徴的な紫外線（ライマンアルファ線）が手がかりになるはずという歴史的論文が発表されたのは、ほぼ半世紀前になります<sup>1)</sup>。その後、世界中の天文学者が血眼になって、そのような銀河の探査を試みましたが、電波銀河に付随した少数例を除くと、8m級望遠鏡が完成するまで誰も成功しませんでした。遠くの原始銀河は余りに暗すぎたからです。

## 夜明け研究の夜明け

すばる望遠鏡と視野の広い主焦点カメラの完成

でそのチャンスが訪れました。2000年から共同利用を始めたすばる望遠鏡は、最初の2年間については体験者を増やすため観測時間を細分化する方針をとりました。だが観測時間を集約して世界的な成果を上げるため大プロジェクト枠を2002年度から設けることになりました。この枠に銀河研究者グループは、柏川伸成氏をリーダーとする春の「すばる深探査領域」チームと、関口和寛氏を代表とする秋の「すばるXMM深探査領域」チームを結成し、観測計画を提案しました。コミュニティの支持を得て、これら的大プロジェクトは2002年度から観測を開始しました。

原始銀河を探すには銀河系内の星々が邪魔にならない「何も見えない」天域を探査領域として選ぶ必要があります。また、遠い宇宙を地上から見るには、地球大気からの発光がない波長帯を「窓」として選ばねばなりません。撮影された銀河の赤方偏移を推定するため、標準的ないくつかのバンドフィルターに加えて、赤方偏移4.9（124.1億年前）、5.7（126.5億年前）と6.6（128.2億年前）のライマン $\alpha$ 銀河を探す窓となる狭帯域フィルターを用いて系統的な観測を行い、多数のライマン $\alpha$ 輝線銀河候補が見つかることができました。FOCASによる分光観測でそれらの赤方偏移を確認測定した結果、早くも2003年10月の時点

では遠い銀河のベストテンのうち8個がすばるによる発見となったのです。一連の研究のさきがけとなった最初の成果は谷口義明氏がまとめた論文として発表されました<sup>2)</sup>。その後、赤方偏移4.9の時代の探査成果は大内正己氏<sup>3)</sup>が、5.7の時代の探査成果は嶋作一大氏<sup>4)</sup>が、赤方偏移6.6の時代の探査成果は柏川氏<sup>5)</sup>が中心となり発表しました。これら一連の研究の中で、特に柏川論文では赤方偏移6.6の時代と5.7以前の時代とでライマン $\alpha$ 銀河の見え方に変化があることを示し、これが宇宙再電離の終焉期の目撃によるものである可能性を初めて示しました。

筆者はこの間、赤方偏移7.0 (128.8億年前)の宇宙の窓を探すフィルター NB973を科研費で開発し、FOCASでの試験観測からSuprime-Camでの本観測を太田一陽氏、柏川氏らと進めました。学術的価値は高いもののリスク満載の計画を学位研究とする果敢な決心をした太田氏は、不屈の努力でデータ解析を進め、NB973でのみ輝く候補天体をいくつか発見しました。その後FOCASによる分光観測を2年かかりで慎重に行い、赤方偏移6.964のライマン $\alpha$ 銀河であることに確信を得て、Nature論文として2006年9月に発表したのです<sup>6)</sup>。この原始銀河は研究の中心となった3名の頭文字をつけて勝手にIOK-1と名づけました(図1)。この手法でIOK-2やIOK-3が次々に見つかるだろうと期待したからです。しかし、その後4年間2匹目のどじょうはついに現れませんでした。

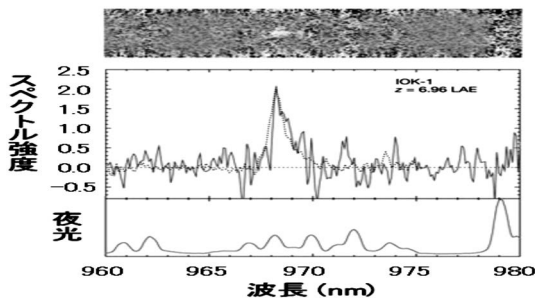


図1 すばる望遠鏡で発見した赤方偏移6.96のライマン $\alpha$ 銀河IOK-1のスペクトル。

## 抜きつ、抜かれつ、のレース

2010年には欧州のある研究者がNature論文で赤方偏移8.55のライマン $\alpha$ 銀河の発見を報じました。だが、その論文を見てすぐに、この結果は危ないと感じました。データが極めて貧弱なものだったからです。案の定、この発見は間違いであることが別の研究者の追試観測で2年後には証明されました。2011年4月には、赤方偏移7.0と7.1の銀河が海外の研究者により発見され、四年半にわたり世界の座を守ったIOK-1は3位に転落しました。その後、2012年1月には小野宜昭氏と大内正己氏が赤方偏移7.213の銀河GN-108036を発見して、すばる望遠鏡が世界一に返り咲きました<sup>7)</sup>。さらに2012年6月には赤方偏移7.3 (129.1億年前)のフィルターNB1006で探査を進めた澁谷隆俊氏が赤方偏移7.215の銀河SXDF-NB1006-2を発見して世界一に輝くことになりました<sup>8)</sup>。GN-108036との赤方偏移の差は0.002、100 m競争ならわずか3 cmの差に相当する身内の激戦(?)です。太田さんも澁谷さんも5年間の努力で、それぞれ世界記録となる銀河を一つずつ発見でき、迫力ある学位研究にまとめることができたのは、実に幸運だったとも言えます。

赤方偏移7.3以上のライマン $\alpha$ 銀河の探査観測はCCDカメラの長波長感度限界を超えるため、赤外線カメラでの探索が必要となります。赤外線カメラはすばるSuprime-Camに匹敵する広視野カメラの製作が困難なため、これまで赤外線探査で発見された高赤方偏移銀河の例はありませんでした。しかし、本稿を書くのをぐずぐずしているうちに、2013年10月にはアメリカのグループが

天体名	赤方偏移	発見者	出版時期
HCM-6A	6.54	Huほか	2002年4月
SDF-ID1004	6.597	谷口ほか	2005年2月
IOK-1	6.964	家ほか	2006年9月
BDF-3299	7.109	Vanzellaほか	2011年4月
GN-108036	7.213	小野ほか	2012年1月
SXDF-NB1006-2	7.215	澁谷ほか	2012年6月
Z8_GND_5296	7.508	Finkelsteinほか	2013年10月

図2 最も遠い銀河の記録の変遷。

赤外線探査による赤方偏移7.508の銀河z9\_GND\_5296の発見を*Nature*で報じ、現在すばるは世界一の座をゆずることになっています<sup>9)</sup>(図2)。ただ、負け惜しみではないのですが、この銀河のライマン $\alpha$ 線の観測データは大気夜光に妨げられ、肝心のところが確認できていない面があり、追試確認が必要と考えています。

### 宇宙の夜明けはいつ起きたか？

抜きつ、抜かれつ、のギネス記録競争は、それ自体スリル満点で面白いのですが、一連の研究にはもっと重要な意義があります。それは、これまでのライマン $\alpha$ 銀河探査の結果が赤方偏移7を境にライマン $\alpha$ 銀河が急激に見えなくなることを示唆していることです(図3)。このことは、128.2億年から128.8億年のわずかな時間の間に宇宙に

何か大きな変化が起こった可能性を暗示しています。ビッグバン後、数億年続いたと考えられる暗黒時代の宇宙空間の中性水素原子は、あちこちで誕生した原始銀河からの紫外線で再び電離したと考えられています。これを宇宙再電離(あるいは「宇宙の夜明け」と呼びますが、いつどのように夜明けが進んだのかはこれまで不明でした。ライマン $\alpha$ 線を散乱する中性水素がなくなるとライマン $\alpha$ 銀河の見通しが良くなるはずですが、われわれの一連の観測結果は宇宙の夜明けがこの時期に起きたことを示唆していると考えています<sup>10)-13)</sup>(図4)。

ライマン $\alpha$ 銀河を軸にした一連の研究では、筆者の果たした役割はごく一部でしたが、今回の受賞に加えて仁科記念賞(2008年度)などをいただきました。共同研究者の皆さんも数々の招待講演に加えて、太田一陽氏はベニスで開催された国

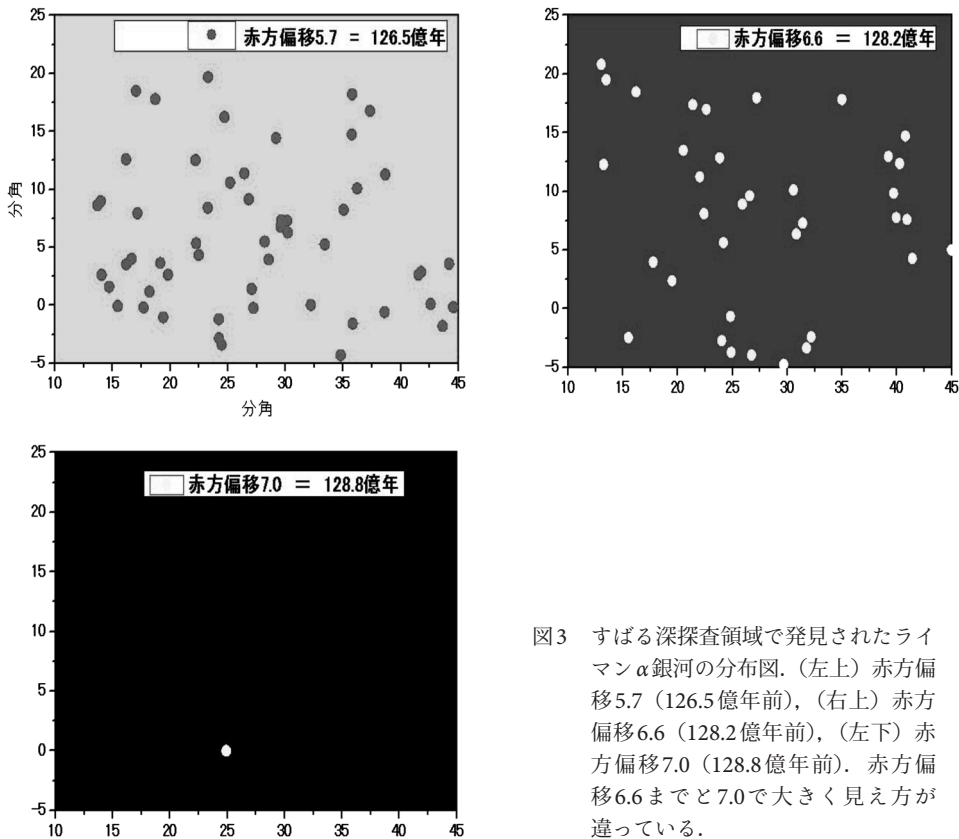


図3 すばるの深探査領域で発見されたライマン $\alpha$ 銀河の分布図。(左上)赤方偏移5.7(126.5億年前)、(右上)赤方偏移6.6(128.2億年前)、(左下)赤方偏移7.0(128.8億年前)。赤方偏移6.6までと7.0で大きく見え方が違っている。

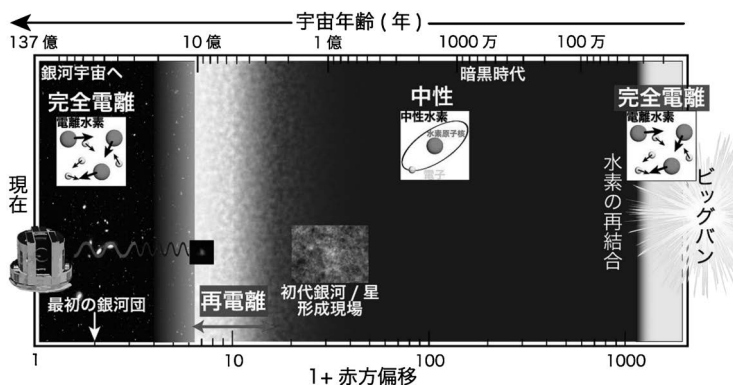


図4 宇宙史の暗黒時代から再電離期への流れ (図: 澁谷隆俊氏).

際会議でベスト発表賞を受賞 (2007年度), 柏川伸成氏は井上學術賞受賞 (2010年度), 澁谷隆俊氏は総合研究大学院大学長賞受賞 (2012年度), 大内正己氏は日本天文学会研究奨励賞受賞 (2008年), Tinsley Scholar 受賞 (2013年) と, それぞれ各界で高く評価されています. この分野の研究の高い評価がTMT計画推進の後押しとなった面もあるものと考え, 関係者には感謝しています.

### すばるから TMT へ

日本の研究者がこの分野で大きな成果を上げることができたのは, ほかの 8 m 級望遠鏡ではできない広視野探査を可能にしたすばる主焦点カメラ Suprime-Cam の存在があったからです. すばる望遠鏡計画を構想した頃, 欧米の天文台では主焦点を諦めて建設経費を節約する代わりに, 8 m 級望遠鏡を複数建設して観測時間を増やす戦略を採りました. 1990年代前半に, すばる, VLT, Gemini 計画の代表者が情報交換の場とした「8 m クラブ」の会合では, すばる望遠鏡構想の, 主鏡裏面に 261 個のポケットを掘るリスク, 「優先度の低い」主焦点の搭載, 副鏡とカセグレン焦点装置の交換を前提とする運用計画について, 「無謀だから考え直しては」との助言をいただいたものです. これらの懸念を払拭して, 世界一の望遠鏡に仕上げることができたのは予算化に努力された方々, なにより技術者と研究者の努力の賜だと思えます.

すばるの主焦点カメラの成功を見た海外の天文台は, 望遠鏡の改造を検討しましたがどこも実現できていません. 宮崎聡氏を中心に, Suprime-Cam のさらに 10 倍の超広視野を誇る Hyper Suprime-Cam が立ち上がり, 赤方偏移 7.3 までの銀河の研究では今後 10 年間はずばる望遠鏡の独断場が間違いなく続くものと思われま.

日本・米国・カナダ・中国・インドの 5 カ国で建設を進めようとしている口径 30 m の次世代超大型望遠鏡 TMT が東京オリンピックの翌年 2021 年にハワイに完成するころには, 打ち上げが遅れている宇宙望遠鏡 JWST も観測が始まっているでしょう. 日本の研究者がすばるを軸に JWST や TMT を駆使して, 宇宙の一番星が輝き始めた時代を実際に観測し, 宇宙史の解明を進めることが期待されます.

### 参考文献

- 1) Partridge R. B. and Peebles P. J. E., 1967, ApJ 147, 868
- 2) Kodaira K., et al., 2003, PASJ 55, 17
- 3) Ouchi M., et al., 2003, ApJ 582, 60
- 4) Shimasaku K., et al., 2006, PASJ 58, 313
- 5) Kashikawa N., et al., 2006, ApJ 648.7
- 6) Iye M., et al., 2006, Nature 443, 186
- 7) Ono Y., et al., 2012, ApJ 744, 83
- 8) Shibuya T., et al., 2012, ApJ 752, 114
- 9) Finkelstein S. L., et al., 2013, Nature 502, 524
- 10) Ota K., et al., 2008, ApJ 677, 12
- 11) Ouchi M., et al., 2010, ApJ 723, 869
- 12) Kashikawa N., 2011, ApJ 734, 119
- 13) Iye M., 2011, PJAB 87, 575