

赤方偏移 6 を超える宇宙へ

谷 口 義 明

〈東北大学大学院理学研究科天文学専攻 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉〉

e-mail: tani@terra.astr.tohoku.ac.jp

すばる望遠鏡を用いて進められている「すばる・ディープ・フィールド」はまさに可視光帯での深宇宙探査を極めるプロジェクトである。すばる望遠鏡共同利用のインテンシブ・プログラムでこのプロジェクトに参加し、 $z=6$ を超える銀河を 10 個発見した。本稿では、その意義と今後の展開について概観する。

1. はじめに

私たちは幸せである。すばる望遠鏡が使えるからだ。口径 8.2 m、ハワイ島マウナケア山頂にある。ケック。VLT。これらの望遠鏡に負ける理由はない。私たちはフロンティアを走ることができる。私たちは本当に幸せである。

しかし、「逆もまた真なり」である。次のようにも言える。

私たちは不幸せである。すばる望遠鏡が使えるからだ。口径 8.2 m、ハワイ島マウナケア山頂にある。ケック。VLT。これらの望遠鏡に負ける理由はない。私たちはフロンティアを走らなければならない。すばる望遠鏡を使う限り、言い訳無用。決して歩みを止めることはできない。これは結構つらい。私たちは本当に不幸せである。

2. すばるまで

すばる望遠鏡ができる前は、高赤方偏移宇宙の探求を可視光や近赤外線で行うことは、私たち日

本人研究者には無理であった。やはり「竹槍」でフロンティアに切り込むことはできないのである。

いざ、すばる望遠鏡の時代を迎えてみると、確かに私たちは自分の思うとおりの研究が展開できることに大きな喜びを感じる。しかし、厳しい研究の世界にたじろぐこともある。本稿は、禅問答のようなものから始まったが、なるほど、我ながら考えさせられてしまうものである。

口径 4~5 m 級の望遠鏡の時代は 1990 年代前半で終わりを迎えた。ハッブル宇宙望遠鏡、ケック 1 とケック 2 が 96 年までにはデビューした。高赤方偏移宇宙の探求はこれらのスーパー望遠鏡の登場で一気に加速し、ハッブル・ディープ・フィールドの観測で大きな転機を迎えることになった。赤方偏移 5 を超える宇宙に銀河が見つかり始めたからだ^{*1}。クエーサーや電波銀河などに頼る必要がなくなり、普通の銀河の歴史が見えてきた。銀河研究者の一つの夢がかなえられたと言っても良い。21 世紀を待つことはなかった。

^{*1} 赤方偏移 5 を超える銀河の発見は Dey A., et al., 1998, ApJ 498, L93 によってなされ、 $z=5.34$ の銀河であった。日本人による最初の発見はすばる望遠鏡の共同利用 (S01B-051: PI=Y. Taniguchi) 観測から生まれ、 $z=5.69$ の銀河であった (Ajiki M., et al., 2002, ApJ 576, L25)。この発見の経緯については天文月報 96 巻、34 頁に書いた。また、この分野のレビューとして、Taniguchi Y., et al., 2003, JKAS 36, 123; Erratum 36, 283 (astro-ph/0306409) と Spinrad H., 2003, Astrophysics Update (astro-ph/0308411) がある。

3. 高赤方偏移の宇宙へ

高赤方偏移宇宙の探査にはいろいろな方法がある。王道はない。考えつくあらゆる方法を試してみる。そういう研究のスタンスが必要だろう。

奇をてらう必要はないが、生まれたての銀河がどのような状態かを想像してみることは重要である。第一世代の星 (Population III) とまではいかないにしても、生まれたての銀河で生成される星の中に大質量星が多数含まれていることは想像に難くない。もしそうだとすれば、銀河ガスはそれらの大質量星によって電離され、水素原子の再結合線の強度は強いだろう。したがって、ライマン α 線で明るく輝いている可能性は高い。ただ、ライマン α 線は共鳴線なので、周辺にある水素ガスによる吸収を受けやすい。ダストがあれば、紫外線なので、可視光のスペクトル線に比べ、やはり吸収を受けやすい。検出を考える場合は、結構微妙なスペクトル線である。しかし、ライマン α 線で明るく輝く生まれたての銀河を探してみる価値はある。

高赤方偏移宇宙でのライマン α 輝線銀河 (Lyman α emitter: LAE と略す) の研究に燭光が見えたのは 1998 年のことである。ハワイ大学天文学研究所のフー博士 (Esther Hu) とカウイ博士 (Len Cowie) がケック望遠鏡を使って、 $z \approx 3.4$ のライマン α 線銀河を 10 個以上も発見したのである。ケック望遠鏡の大口径が生かされたといっても良い快挙であった。

3 年後 (2001 年) の冬、私はハワイ大学天文学研究所を訪ねていた。フー博士に彼らの最新の成果を見せてもらうことができた。彼女の手には $z = 6.56$ の LAE のスペクトルがあった*²。正直言って驚いた。2001 年の冬、もう $z = 6$ を超える

銀河が見つかったいたのである。すばるで探そうと思っていたものがすでにそこにあった。

4. すばるで

この衝撃を胸に秘め、すばるでどのような探査をすればよいか考えた。LAE 探査では確実に二番煎じになる。すばる望遠鏡をもってして、なおも二番煎じに甘んじるのか。かなり悩んだ。しかし、人には向き不向きもある。スターバースト銀河や活動銀河核の研究で「輝線天文学」になじんでいた私には、LAE 探査は向いていると思った。

その頃、いろいろな方々のご努力ですばる望遠鏡の広視野主焦点カメラ (Suprime-Cam) 用の狭帯域フィルター NB816 と NB921 が完成していた*³。通常の広帯域フィルターに比べて、帯域幅が 12 nm 程度しかなく、輝線銀河を検出するにはもってこいのフィルターである。ライマン α 線がこれらのフィルターの帯域に入ってくると、赤方偏移はそれぞれ $z = 5.7$ と $z = 6.6$ に相当する。Suprime-Cam の視野は $27' \times 34'$ 。フー博士らの使用したケックのカメラ LRIS (視野は $5' \times 7'$) に比べると圧倒的に広い。フー博士らが発見した $z = 6$ を超える銀河の個数は 1 個である。すばるで探査する意義は大きいと思った。

そして、もう一つオリジナリティーを出せるテーマがあった。宇宙再電離である。その頃、筑波大学の梅村雅之氏から宇宙再電離の物理機構の解明の重要性をご教示いただいた。ちょうどその頃、スローン・デジタル・スカイ・サーベイで見つかりつつあった $z = 6$ を超えるキューサーのスペクトルは高赤方偏移宇宙の研究者に衝撃を与えていた。ライマン α 線より短波長側の連続光はほぼ完全に吸収を受けているように見えたからである。宇宙プラズマは $z \sim 1,000$ の頃、再結合して

*² 論文は Hu E. M., et al., 2002, ApJ 568, L75; Erratum 576, L99.

*³ NB816 と NB921 の重心波長はそれぞれ 815 nm と 920 nm である。これらの波長帯は地球大気の OH 輝線の弱い波長帯に相当し、深宇宙探査の「窓」になっている。

中性化した。ところが、少なくとも $z > 5$ の宇宙で、何らかの理由により再電離されたことが観測的にわかっていた*4。いったいつ頃、何によって宇宙空間は再電離されたのか、それが問題であった。最近では $z \sim 17$ の頃に再電離されたのではないかと考えられているが、 $z \sim 6$ の宇宙を「宇宙再電離」という観点から調べることの重要性が大きくクローズアップされていたのである。梅村雅之氏のグループのシミュレーションなどを参考にすると、すばる望遠鏡+Suprime-Cam+NB921の組合せで25時間積分すればライマン α 線で輝く微かな宇宙再電離フィラメントが検出できるかもしれない。これは面白いと思った。

5. すばるディープ・フィールドへ

その頃、国立天文台の柏川伸成氏はすばる望遠鏡のキー・プロジェクトの立案に奔走しておられた。折りしも、2001年の夏ごろから機運が盛り上がってきていた。すばる望遠鏡は世界に誇れる観測性能をもっている。小さなプロジェクトではなく、歴史に残るようなプロジェクトを遂行し、天文学の発展に寄与すべきではないか。このような意見がすばる望遠鏡を建設してきた方々から沸き上がってきたのである。ハワイ観測所の所員には所員時間というすばる望遠鏡の観測時間が与えられる。しかし、一人当たりではほんのわずかである。しかし、所員全員の観測時間を集めれば何十晩もの観測時間になる。これをいくつかのキー・プロジェクトに与えればすごいことができる。

柏川氏が得た一つの答えが「すばる・ディープ・フィールド (The Subaru Deep Field: SDF)」であった。すばる望遠鏡+Suprime-Camを用い、広帯域フィルターを中心にしてディープサーベイを行う。カラー・セレクションでいろいろな赤方

偏移にある銀河の様子を調べ、銀河の進化を系統的に探るプロジェクトである。SDFには狭帯域フィルター (NB711, NB816, NB921) によるLAE探査も入っていた。やはり、 $z=4.9, 5.7, 6.6$ のLAE探査は魅力的だったからである。

私はすばる望遠鏡の建設には携わってきていないのでSDFとは無縁であった。しかし、共同利用観測のサイドからSDFにかかわるようになった。すばる望遠鏡の共同利用は2000年から始まったが、2002年前期(S02A期)から特別な共同利用観測枠が新設された。Intensive Programという枠である。それまで、共同利用観測で申し込める最大観測夜数は3晩であった。この枠があると大規模な観測時間を必要とする観測提案を遂行することはできない。しかし、潜在的には大規模な共同利用観測提案はありうる。このような事情が勘案され、最大夜数として10晩を許すIntensive Programが設定されたのである。私たちは宇宙再電離フィラメントの発見、 $z=5.7, 6.6$ のLAE探査を目的としたIntensive ProgramをS02A期に提案したのである。この提案は幸いにも採択された*5。観測する天域をどうするかが最後の判断として残されていた。狭帯域フィルターのデータを有効に活かすには、広帯域フィルターのデータの取得も重要である。すばるでいくのであればベストな天域があった。それがSDFだった。

こうしてSDFプロジェクトチームとIntensive Program S02A-IP2の共同研究が始まった。観測に先立ち、役割分担の相談があった。 $z=6.6$ LAE探査はIP側で責任をもち、カラー・セレクションによる高赤方偏移銀河の探査はSDF側が責任をもつことなどが決められた。

そして観測が始まった。2002年4月のことである。悪天候との闘いでもあったが、2003年の6

*4 WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) の成果 (Spergel D. N., et al., 2003, ApJS 148, 175). 日本語の優れた解説は小松英一郎氏によるものがある: 天文月報 96 巻, 482 頁。

*5 S02A-IP2: PI=Y. Taniguchi "A Very Deep Search for Lyman α Emitters at $z=5.7$ and 6.6 "

月まで続けられた。Suprime-Cam による撮像観測と FOCAS によるスペクトル観測を中心に行われたが、SDF プロジェクトは高赤方偏移宇宙の探求に大きな貢献をしつつある。

2002 年の観測で我々はすでに $z > 6$ の銀河を 2 個発見することができた。赤方偏移は $z = 6.54$ と 6.58 であり、早くもフー博士の持つ赤方偏移記録を超えた。論文は直ちに IP 側で作成され、Nature 誌を目指した。筆頭著者はすばる望遠鏡建設の牽引をされた小平桂一氏（元 国立天文台長、現 総合研究大学院学長）とした。Nature 誌のレフリーは 2 名。1 名は OK を出してくれたが、もう 1 名のレフリーが No といった。そのため Nature 誌には掲載されなかった。しかし、PASJ 誌に速やかに掲載され、すでに国際的に高い評価を得ている*6。現在、2003 年の成果のとりまとめを済ませ、論文をようやく PASJ 誌に投稿したところである。ここでは、簡単にその成果をまとめてみる*7。

Suprime-Cam の撮像データから $z = 6.6$ にある LAE の候補を選定することができる。LAE はライマン α 線が NB921 フィルターの透過帯域に入ってくるので、NB921 で明るく見える。900 nm 近傍をカバーする広帯域フィルター z' バンドの等級に比べて 1 等級以上明るい天体を LAE 候補とした。もちろんこれらは $z = 6.6$ にあるので、B から R バンドでは全く検出されない。このような天体は 58 個も見つかった。この中から 20 個を選んで FOCAS でスペクトル観測を行った。その結果 14 個から輝線を検出することができた。ライマン α 線はピーク波長 121.6 nm より短波長側では水素ガスによる吸収の影響で、輝線強度が弱くなる。つまり、短波長側で吸収の影響が見られるが、長波長側では影響が見られない。このような特徴を示すものが LAE であると断定できる。14 個の輝線天体のうち、9 個はその特徴をもっていた。9 個の LAE の NB921 画像を図 1 に示す。こ

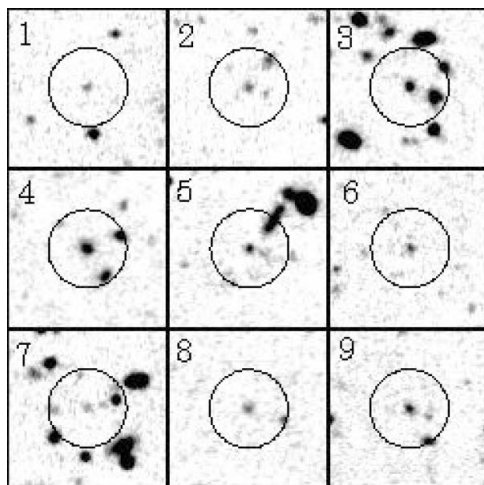


図 1 $z = 6.5 \sim 6.6$ のライマン α 輝線銀河のイメージ。NB921 フィルターで撮影されたもの (Taniguchi et al., 2004)。

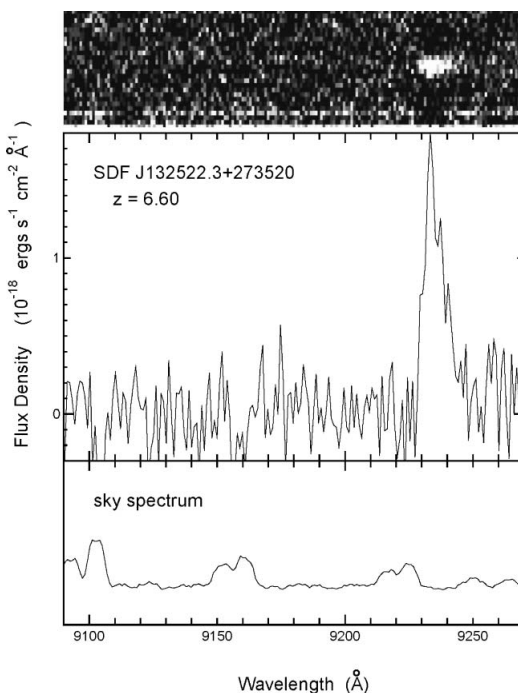


図 2 9 個のライマン α 輝線銀河の中で最も大きな赤方偏移をもつ SDF J132522.3+273520 の可視光スペクトル (Taniguchi et al., 2004)。

*6 Kodaira K., et al., 2003, PASJ 55, L17. 日本語による解説記事は谷口義明, 2003, 岩波書店「科学」73 巻, 871 頁。

*7 最新の論文は Taniguchi Y., et al., 2004, PASJ, submitted (astro-ph/0407542)。

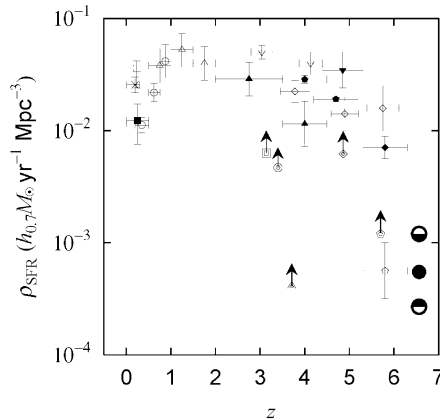


図3 可視光のデータから得られた宇宙における星生成率密度の変化を赤方偏移の関数として表したもの (Taniguchi et al., 2004). SDF のデータポイントは $z=6.6$ にある三つの点。真ん中の黒丸がモDESTな評価で、上下に上限値と下限値の評価を与えてある。しかし、これらの値は、基本的にはすべて下限値になる。それはライマン α 線に対する吸収補正を行っていないことと、ライマン α 線の光度関数を用いた積分も行っていないからである。

これらの赤方偏移は $z=6.50$ から $z=6.60$ であることがわかった*⁸。2002年に発見した $z=6.58$ の LAE のほかに、 $z=6.58$ と 6.60 の LAE を発見できたので、LAE の赤方偏移レコードとしてはトップ3を SDF が検出したことになる*⁹。Suprime-Cam の視野の広さが、LAE の系統的な研究に結びついたといえよう。 $z=6.60$ の LAE のスペクトルを図2に示す。ライマン α 線の短波長側が吸収のために強度が弱くなっているのがわかる。連続光はライマン α 線より長波長側でも見えていな

い。まさに輝線銀河で、このような天体は等級で制限をつけた測光サンプルからは漏れてしまうことが多いだろう。輝線銀河探索の重要性がわかる。

SDF のような系統的な LAE の探索を行うと、高赤方偏移宇宙での銀河における一般的な星生成の様子をうかがい知ることができる。1個を見てすべてを理解するのは難しいが、9個もあると統計的な議論が可能になる*¹⁰。図3に単位体積当たりの星生成率密度(単位は太陽質量/年/Mpc³)を赤方偏移の関数として示した。SDFの結果は $z=6.6$ にある大きな黒丸で示してある。従来の観測結果である $z=0\sim5$ での星生成率密度に比べて2桁程度小さな値が得られる。しかし、ここで注意が必要である。SDFの結果にはライマン α 線に対する吸収の補正がされていない。また、光度関数が不明なために、観測値の積算値を示してあるだけである。

ライマン α 線強度から求めた星生成率は紫外連続光から求めたものを比較してみると、前者は後者の50%から70%程度になる。輝線銀河探索では一般に輝線強度の強いものが選択的に見つかる。そのため、あまり極端な吸収を受けていない LAE が多く見つかるのだろう。この場合、ライマン α 線の光度関数を作ることはある程度意味のあることになる。つまり、吸収率がばらばらな LAE サンプルを使って光度関数を求めてもしょうがないが、吸収率がそろっているサンプルならば意味のある研究になる*¹¹。ただ、現段階で

*⁸ このほかに i' ドロップアウト天体 (z' バンドでは検出されるが i' バンドで検出されない天体) の FOCAS 観測で $z=6.33$ の LAE を偶然発見した (Nagao T., et al., 2004, ApJ 613, L9)。つまり SDF ではすでに10個の $z>6$ の銀河が発見されたことになる。

*⁹ 2004年になって $z=10$ の LAE 候補が Pello R., et al., 2004, AA, 416, L35 によって発見された。しかし、その後のスペクトルの再解析でライマン α 線が本当に見えるか否かが問題になっている (Weatherley S. J., et al., 2004, MNRAS, in press [astro-ph/0407150]; Pello R., et al., 2004, astro-ph/0707194)。

*¹⁰ もちろん十分な個数ではないが、 $z>6$ の銀河探索は口径8m級の望遠鏡をもってしても、大きな困難を伴うことを理解されたい。

*¹¹ LAE の光度関数については Ajiki M., et al., 2003, AJ 126, 2091; Santos M. R., et al., 2004, ApJ 606, 683; Hu E. M., et al., 2004, AJ 127, 563 などで議論されている。

の問題は LAE サンプルの個数が少ないことであり、そのための不定性はぬぐいされない。

今までの研究をまとめると、吸収補正でファクター 2 から 3 の過小評価、光度関数補正はやはり同程度の過小評価となる。これらの効果を補正すると、 $z=6.6$ の星生成率密度はざっと 1 桁くらい高くなるだろう。 $z=5$ での値に比べればまだ低い、 $z>6$ の宇宙でもすでに十分な星生成が進んでいたことがわかる。

現時点では $z=6$ を超える銀河はまだ 20 個程度しか発見されていない。この研究分野では SDF のすばるグループのほかに、アメリカにはケックを利用するグループが複数あり、またヨーロッパは VLT を利用するグループがやはり複数ある。激しい競争関係にはあるが、研究会では友人関係にある。お互いに励まし合いながら、この分野の発展に努力を傾けている最中である。

これらの研究グループの主たる目的は、やはり「銀河形成の現場を見る」ということである。普通の銀河がどのようにして生まれ、育ってきたのか、宇宙における銀河形成史を銀河質量の増加（マス・アセンブリ）と星生成の観点から理解することである。ようやく銀河形成領域にたどり着いたところだろうか。

もう一つの目的は宇宙再電離機構の解明であろう。宇宙を再電離した電離光子の担い手は、はたして銀河なのか活動銀河核なのか、という問題である。私が LAE 探査の主目的に設定したテーマである。最も私の場合はこの電離光子のバジェットを調べるより、宇宙再電離フィラメントの様子を見ることができないか、という荒唐無稽なものであった。

電離光子バジェット問題についてはキットピーク天文台で始められた LALA (Large Area Ly-

man α) サーベイのグループが取り組んできている^{*12}。最近の観測では $z=6$ では宇宙はすでに十分電離されていることがわかっている。LAE の放射する電離光子だけでは、宇宙再電離は不可能である。 $z=4\sim 5$ では LAE の紫外光強度はライマン・ブレイク銀河の半分程度しかない。 $z>6$ ではまだ LAE とライマン・ブレイク銀河の個数密度比や紫外光強度比などがわかっておらず、今後の研究にゆだねられることになる。GOODS^{*13} や ハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドで検出された $z>6$ の銀河候補のフォローアップ分光観測の成果がもうすぐ出てくると思われるので、急速に研究が進むことを期待している。

さらにはキューサー探査、特に暗い活動銀河中心核の新たな探査も待たれるところである。そして、いわずもがなではあるが、可視光では届かない $z>10$ の宇宙の探査の必要性が大きくクローズアップされてきている。

6. すばるを超えて

ただ、可視光帯での探査は終わったのかというと、そうではない。まだまだ研究は不十分である。例えば、SDF の一天域のデータだけからすべてを語ることは当然できない。キューサーは個数密度が少ないので見つからなくもよいが、暗めの活動銀河核がなぜ見えてこないのか不思議である。また、LAE の光度関数を得るにも、まだ探査としての深さが足りない。

確かに私たちは SDF で最善の努力をしている。また、世界中でこの分野の研究が推進されている。それでも、まだ問題が積み残されているのである。これは口径 8 m 望遠鏡の限界を見ているのだと思った方がよい。私たちはフロンティアの光と影を感じ始めている。

^{*12} 例えば Rhoads J. E., Malhotra S., 2001, ApJ 563, L5; Rhoads J. E., et al., 2003 AJ 125, 1006. なお、電離光子バジェットについては Ouchi et al., 2004, ApJ 611, 660 が良い文献である。

^{*13} ハッブル宇宙望遠鏡の Treasury Program の一つで、Great Observatories Origins Deep Survey の略。Giavalisco M., et al., 2004, ApJ 600, L93 を参照。

もちろん、まだ私たちがすばる望遠鏡を使い尽くしたとはいえない。実際、第2世代の観測装置であるFMOSとMOIRCSが準備中である。FMOSは主焦点に装着される近赤外線多天体分光器であり、MOIRCSはカセグレン装置に装着される近赤外線カメラ・分光器である。MOIRCSは口径8 m級の望遠鏡の赤外線カメラとしては最大の視野を誇る(4'×7')。私たちのグループはすでにMOIRCS用に $z=18$ のライマン α 線を検出できる狭帯域フィルターを作った。通称、宇宙再電離フィルターである。MOIRCSが $z=18$ のライマン α 線をとらえる日がくれば、また一つ大きな夢が叶うことになるだろう。

しかし、そろそろ気になることがある。口径8～10 m級の光学赤外線望遠鏡の時代はいつまで続くのだろうか、という疑問である。口径30～100 m級の望遠鏡の建設の足音が聞こえ始めている。米欧が先行しているものの、日本でも地に足の着いた検討が開始されている。これら次世代の望遠鏡にとっても、高赤方偏移宇宙の探査は最重要課題の一つであることは違いない。どのような研究が展開されるかは予断を許さないところであるが、一つ言えることがある。「8～10 m級の望遠鏡を使い尽くしたコミュニティが次のフロンティアを切り開いていくだろう」。何をやればよいか正しく理解しているからである。

今、私たちはすばる望遠鏡を使っている。これを使い切ること。それが私たちの義務である。幸せか、不幸せか？ もちろん答えは決まっている。「幸せ」である。

謝 辞

本稿が成立するのは、まさにすばる望遠鏡のおかげです。すばる望遠鏡の建設やオペレーションに携われてきたすべての方々に深く感謝いたします。また、すばるディープ・フィールドを牽引されてきている柏川伸成氏、そして小平桂一氏、海部宣男氏、安藤裕康氏、唐牛 宏氏、家 正則氏の各先生方からいただいた激励やご助言のおかげで素晴らしい研究成果が出たのではないかと思います。末尾になり恐縮ですが、格別の感謝を述べさせていただきます。銀河形成期の物理に関してはいろいろな方々にご教示いただきましたが、特に梅村雅之氏、太田耕司氏、山田 亨氏には深く感謝させていただきます。最後に私事で恐縮ですが、私のチームメンバーである塩谷泰広、村山卓、長尾 透、安食 優、藤田 忍の各氏に感謝いたします。

Beyond Redshift 6

Yoshiaki TANIGUCHI

*Astronomical Institute, Graduate School of Science,
Tohoku University, Aramaki-aza Aoba, Aoba-ku,
Sendai 980-8578*

Abstract: We present a short story on the Subaru Deep Field that is one of key programs promoted with the Subaru Telescope. In particular, we report on the discovery of 10 Lyman α emitters beyond $z=6$. Its astrophysical impact and future prospect are also discussed.