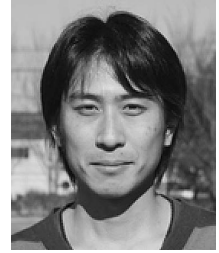


TMTによるサイエンス—系外銀河

田中賢幸

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: masayuki.tanaka@nao.ac.jp



TMTはわれわれがすばるで行ってきた銀河研究を大きく発展させると期待される。しかし、TMTが稼働する2020年代は他の30-40 m級望遠鏡や次世代宇宙望遠鏡も動き出し、厳しい研究競争が待っているだろう。本稿では、日本としてTMTで何をすべきかということに主眼を置いて、近傍銀河から最遠方銀河までの銀河サイエンスを紹介したい。TMTとすばるを両方用いた日本独自の銀河研究を戦略的に展開することの重要性を説きたいと思う。

1. はじめに

TMTの建設が始まった。TMTはすばるを引き継ぎ、さらにそのサイエンスを発展させる望遠鏡として期待されている。そういった役割を担う一方で、すばるとは異なるタイプの望遠鏡であることもまた事実である。ここではTMTによる銀河サイエンスを紹介するが、TMTで何ができるかという全般的な話ではなく、すばるをもつ日本としてTMTで何をすべきかという観点から話したい。これはもしかしたら、本特集の意図に必ずしも添わない書き方なのかもしれないが、科学的競争力のないものを紹介するよりは、TMT時代の世界情勢を踏まえ、より現実的な視点から銀河サイエンスをまとめたほうがいいのではないかと思ったからである。また、銀河形成・進化は非常に幅広い分野で、すべてのトピックを限られたページ数でカバーすることは難しく、多分に主観的なものにならざるをえないことはご容赦いただきたい。

2. TMTサイエンス検討の経緯

さて、まず始めにTMTサイエンス検討の経緯を簡単に紹介したい。実は私はJELTから始まるすべての検討を把握しているわけではなく、近年のものしか紹介できないのが恐縮なのだが、2010年4月に発足したTMTサイエンス検討会において、非常に詳細なサイエンス検討がなされている。私も含めた計18名が銀河セクションを担当し、最遠方銀河からQSO吸収線系、重力レンズに至るまで、実にさまざまな視点からのサイエンス検討が90ページというボリュームでまとめられている。他の分野も含め計400ページという立派なドキュメントが公開されていて^{*1}、ここでは詳細な紹介は避けるが、本稿では触れられないような幅広いサイエンスに興味のある読者はそちらを是非参照されたい。

この後のサイエンス検討はTMTコンソーシアム内での「TMT International Science Development Teams (ISDTs)」で進められている。このISDTsはいくつかのサブグループに分かれていて、銀河サイエンスは主に「Early universe, gal-

^{*1} <http://tmt.mtk.nao.ac.jp/science-j.html>

axy formation and the intergalactic medium」というグループに属する。ISDTsの最近の活動として、2007年に作成された「TMT Detailed Science Case: 2007」というサイエンス検討書を改訂・更新する作業があった。本稿執筆時点では改訂版はまだ公開されていないが、近いうちに公開されるだろう。銀河サイエンスは初期宇宙、赤方偏移2前後の星形成の活発だった時代、そしてそれ以降の銀河が「熟してくる」時代、さらに銀河間物質を扱う四つのセクションに分かれていて、50ページをおそらくは超えるであろうボリュームとなっている。これも、紙面の都合でここで詳細に紹介することは避けるが、それぞれの分野の第一線で活躍する世界の研究者が書いたサイエンス検討である。公開された折にはぜひとも目を通していただきたい。なお、後で触れるサイエンスはこの検討書の内容をある程度反映させたものとなっている。また、TMTサイエンスフォーラムというface-to-faceミーティングも毎年行われていて、そこでも活発な議論がなされている。興味のある方は是非参加してみたらいかがだろうか。

3. ジレンマ

話をサイエンスへと移したい。

TMTができるかどうかという銀河サイエンスができるようになるだろうか。あれもできるし、これもできる、といった明るい未来を想像することもできるのだが、TMTの使命である世界第一級の研究結果を出すことを考えると、TMTを取り巻く環境は実はなかなか厳しい、という現実が見えてくる。2020年代はハッブル宇宙望遠鏡の後継機であるJames Webb Space Telescope (JWST) や、米国のDecadal Surveyでトップ推薦された地上望遠鏡、Large Synoptic Survey Telescope (LSST) がおそらく稼働している。欧州宇宙機関 (European Space Agency) を中心に進められている衛星

計画Euclidや、現在検討されているそのほかの衛星計画もいくつかは現実となっているだろう。超大型地上望遠鏡もTMTだけでなく、南半球にはGiant Magellan Telescope (GMT) とExtremely Large Telescope (ELT) がほぼ同時期に稼働を始める予定である。熾烈なサイエンス競争が容易に想像できるだろう。TMTでどう戦うか？

TMTの最大の特徴の一つは、補償光学 (adaptive optics; AO) を用いた高空間分解能である。空間分解能はJWSTよりも5倍も高く、これは銀河サイエンスにとって非常に強力な武器となる。図1のシミュレーション画像を見ていただくと、その威力がおわかりいただけるだろう。AOがよく効くのは近赤外域で、その波長帯は遠方の銀河を調べる場合とりわけ重要となる。しかしながら、その近赤外域では非常に大きな問題がある。明るい背景光である。地球の上層大気約90 kmから放射されるOH夜光が近赤外域では非常に強く、TMTが集めるほとんどの光は宇宙からの光ではなく実はその夜光である。一方、TMTと同時期に稼働しているJWSTやEuclidといった宇宙望遠鏡では、基本的にOH夜光の影響はなくなり、背景光は非常に暗くなる。その結果、実は宇宙にある数メートルの望遠鏡のほうが、銀河のような広がった天体を考えた場合、30 mのTMTよりも深い撮像観測ができる。例えば、TMT Exposure Time Calculator^{*2}を使って1"×1"に広がった天体を近赤外撮像観測することを考えると、いろいろ仮定や波長にもよるのであるが、同じ明るさの天体に対してTMTよりも6.5 mのJWSTのほうが、おおざっぱに4倍ほど精度の良い測光ができる。

その問題となる夜光を避ける方法の一つは、夜光の比較的穏やかな可視域へくることなのだが、そこでは今度は別の問題が発生する。AOがあまり効かなくなってくるのである。実際、第一期可

*2 <http://tmt.mtk.nao.ac.jp/ETC image.shtml>

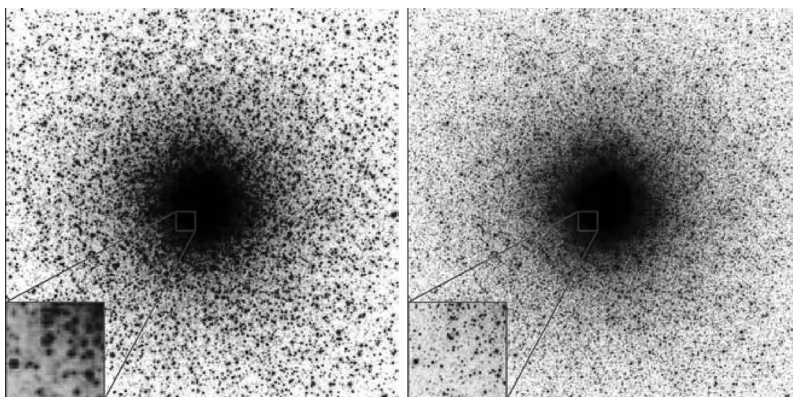


図1 JWST (左) とTMT (右) によるM32のシミュレーション。TMT Detailed Science Case 2007より転載。印刷時の見やすさのため、白黒反転してある。それぞれ図の左下部分にM32中心付近の拡大図がある。

視撮像分光装置であるMOBIE/WFOSはAOなしのnatural seeingで動く装置となっている。可視域において、TMTクラスの望遠鏡でAOを使わずに非常に深くいくと、天体が混み合ってお互いに重なりあってくることがおそらくは起こる。理論的には露出時間の平方根に従って深くなるのが期待されるのだが、この重なり合いの影響でおそらくそうはならず、思ったより深くいけないということが起こるだろう。この可視域、特に6000 Åより短い青い側は、JWSTなどの宇宙望遠鏡で観測できない波長域なので、そこを攻めるのは一つの手ではあるが、TMTの高空間分解能を捨てるのはあまり賢い判断ではないのかもしれない。

夜光を避けるにはまだ方法がある。狭帯域フィルターを用いた観測か、夜光の間をぬえる分光観測を行うことである。狭帯域フィルターは夜光の比較的弱いところに通常は作られるので、背景光は暗くTMTの深さを活かせる。ただし、基本的にある限られた赤方偏移にいる輝線天体のみを見ることになり、可能なサイエンスが大きく限られるという側面もあることに留意したい。一方、分

光観測はある程度の波長分解能があれば、夜光を十分に分離して、夜光と夜光の間の非常に背景光の暗いところで天体光を得ることができる。狭帯域フィルターと違い、波長範囲は広いのでサイエンスの幅もずっと広い。空間分解能を活かすことを考えると、近赤外におけるIFU分光観測、これがユニークな銀河サイエンスをするメインの手法ではないかと思う。もちろん、銀河サイエンスでも分野によってはこれ以外の組み合わせも考えられ、例えば天体が点源に近い場合に限っては、広帯域撮像観測も十分に深くいくことができるだろう^{1),*3}。

主にJWSTを念頭にTMTの特徴が活かせる観測パラメーターを考えましたが、ほかにもTMTと似たような性能をもった地上の超巨大望遠鏡があることを考えると、TMTの独壇場となるような銀河サイエンスは、直球勝負を挑んだ場合は実は意外と少ないのかもしれない。現時点で2020年代にわれわれが立たされる状況を認識しておくことは重要ではないかと思い、あえて正直に書いた。しかし、あまり悲観的になる必要もない。われわれの武器はTMTだけではないのだ。すばるもあ

*3 JWSTとの詳細な感度の比較が「次世代超大型望遠鏡Thirty Meter Telescope (TMT) 計画説明書」(<http://tmt.mtk.nao.ac.jp/info/20120727newbrochure.html>) 図5.2にあるのでそちらを参照されたい。

る。TMTとすばるの2台の望遠鏡で勝負することが、2020年代の熾烈な研究競争を生き残る道ではないかと思う。

4. すばるとの連携

すばるとTMTの活用方法は至って自明で、それぞれの利点をうまく組み合わせることである。銀河サイエンスの観点からすると、すばるの特徴は何と言ってもその広視野であろう。Hyper Suprime-Cam (HSC)²⁾と今後搭載予定のPrime Focus Spectrograph (PFS)³⁾という非常にユニークな装置を用いて、広い視野にわたって撮像・分光両方でサーベイができる8m望遠鏡なのである。この能力はほかの8m級望遠鏡にはない。対照的に、TMTは比較的狭い視野で天体を詳細に調べることに長けている。つまり、すばるを用いて面白そうなターゲットを見つけ、それをTMTで詳細に観測する、というのが日本の攻め方なのだと思う。広視野観測で見つかるユニークなターゲットは、例えば重力レンズ効果を受けた遠方銀河など、広く撮像観測しないと候補が見つからないが、TMTでないとなかなか分光から詳細な物理量が得られない、といった天体が考えられる。また、以下でも述べるが、TMTで分光観測をする際にさまざまな輝線・吸収線が大気に邪魔されず調べられるような、いい赤方偏移にいる天体をあらかじめ選び出しておく、といったこともこれに沿ったやり方であろう。

冒頭でTMTは十分な準備をし、かつ戦略的に使うことが重要であると述べたが、上に述べたようなTMTを取り巻く世界情勢とわれわれのもつすばるという武器を考えてみると、納得していただけのではないだろうか。以下ではこれを念頭に、TMTでの銀河サイエンスに触れたいと思う。なお、紙面の都合でTMTの装置をここでまとめることはしないが、天文月報2014年12月号のTMT特集で観測装置がまとめられている。そちらを参照されたい。

5. TMTによる銀河サイエンス

5.1 銀河考古学

星の集団である銀河を理解するうえで最も重要な情報の一つが、銀河の星形成史である。しかしながら、これを観測的に調べるのは非常に難しい。われわれは銀河をしばしば点として扱う。例えば測光は銀河の場所ごとに行うのではなく、全体で一つの測光点を作るのがほとんどであろう。しかしながら、多くの銀河は現在も星形成活動を行っていて、銀河のスペクトルは最近生まれた若い星で支配されているのだ⁴⁾。銀河を点として扱う場合、古い星の光が若い星によって隠され、過去の星形成史を推測するのは非常に難しくなってしまう。

それを根本的に解決するのが、銀河を星に分解するという手法である。現在の望遠鏡では、局所銀河群やそのごく近くの銀河しか星に分解して観測することが困難だが、TMTの高空間分解能は銀河を星に分解できる距離を、おとめ座銀河団かそれを超えるところまで一気に広げてくれる。今までは、観測できる近傍の巨大銀河は数えるほどしかなかったし、銀河団銀河といった天体は調べられなかった。しかしながら、TMTでは実質的にはほぼすべてのハッブルタイプの銀河を、孤立した銀河から銀河団銀河まですべての環境において星に分離することが可能になる。これは革新的であると言えるのではないだろうか。銀河団銀河には赤い銀河が多いことが知られているが、孤立した銀河と比べて星形成史はどう異なったのだろうか。同じ星質量の銀河同士を比べた場合、孤立した渦巻銀河と楕円銀河はどう星形成史が異なるのだろうか。こういった本質的な問題に回答が得られるのかもしれない。もちろん、おとめ座銀河団の距離では、いくらTMTでも赤色巨星の明るい側から2-3等しか届かないという観測的困難は依然あり、できる限り近い銀河を使うという戦略に変わりはないのだが、TMTで取り組むべきユ

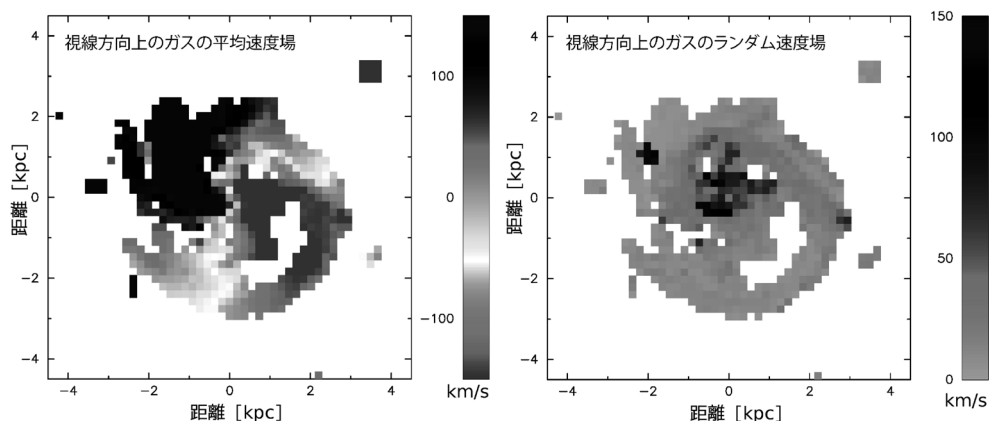


図2 シミュレーションによる遠方銀河のガスの運動。左図は銀河の回転運動を示している、左上が遠ざかる方向、右下が近づく方向で回転している。渦巻銀河の形成初期段階を見ているのかもしれない。右図はガス運動の視線方向の分散を示している、中心付近でガスの流入や吹き出しが活発であることがわかる。ここではガスの運動だけを見ているが、実際に得られるスペクトルからは、星質量や金属量の分布などの情報も得ることができる。TMTサイエンス検討報告書より岡本 崇氏の許可を得て転載。

ニークなサイエンスだろう。

日本としては、現在知られていない孤立した矮小銀河や、天の川銀河に付随する新しい矮小銀河をすばるを用いてあらかじめ見つけておきたい。現在進行中のHSCの戦略枠プログラムがその絶好の機会となるだろう。こういった矮小銀河は巨大銀河の種となる天体で、銀河進化を探るうえでこれらの天体の星形成史を詳細に知ることは重要である。また、これらの天体は宇宙の再電離の影響を強く受ける天体でもあり、星形成史から逆に再電離をひも解くことができるかもしれない⁵⁾。

5.2 銀河の高度成長期

この分野のサイエンスは銀河進化の大枠を理解するというよりは、より詳細な描像を描くことが主なテーマとなる。ここで活躍するのが先に述べたAO+IFU分光であろう。具体的には赤方偏移2前後の銀河を例えばIRISを用いて空間分解し、その星質量、星やガスの運動、星形成率、金属量、ダストなど基本的な量が空間的にどのように広がっているかを見ることである(図2)。これは、現時点で全くやられていないわけではないが、TMTの分解能は別次元である。すでに稼働

を始めたALMAと組み合わせ、高空間分解能で分子ガスと電離ガスの分布や運動を比べることで、この分野の重要な発展がもたらされるかもしれない。

また、星形成銀河のみでなく、星形成をやめた銀河に対しても同様の観測を行い、銀河の中での星の年齢分布と金属量を見ることは興味深い。現在の銀河形成の枠組みとして、遠方でコンパクトな天体ができ、外側は周囲の銀河のmergerにより成長したというものがある^{6),7)}。このシナリオを検証するには星形成をやめた銀河が最適で、時間とともにこういった銀河の外側がどのように形成されてきたのかを観測的に明らかにするのはTMTならではのサイエンスだ。ただし、TMTを用いても感度的に厳しく、いくつかの天体を積分する必要があるだろう。

ここで述べたような観測をするうえで重要なのは、「絶妙な赤方偏移」にいる天体をあらかじめ見つけておくことである。近赤外域では夜光が厳しく、かつ大気中の水蒸気による吸収も強い。こういったものをうまく避けて、見たい輝線・吸収線が確実に見られるような赤方偏移にいる天体を

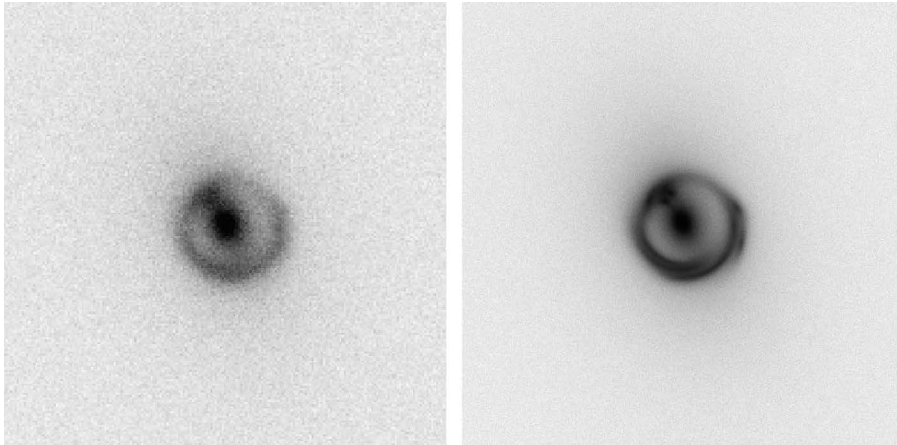


図3 すばる（左）とTMT（右）を想定した、重力レンズを受けた天体のシミュレーション。中心にいる巨大銀河が背景の小天体をリング状に拡大している。TMTサイエンス検討報告書より大栗真宗氏の許可を得て転載。

すばるでそろえておくのだ。また、重力レンズ天体といったまれな天体を見つけておくのも重要である。図3に示したような強くレンズされた天体では、TMTの高空間分解能に加え重力レンズの拡大効果により、TMTの分解能を実質的に超える分解能で銀河の内部構造を探ることができる。現在進められている戦略枠のHSCによる撮像サーベイでこういった天体の候補を探し、その後PFSの分光サーベイで赤方偏移を正確に測定し、TMTでとどめを刺す。これがわれわれの取るべき戦略ではないだろうか。

こういった銀河を空間分解するサイエンスは個人的には非常に面白いと思うが、ここでまた厳しい現実を一つ述べなければならぬ。銀河の物理的性質に迫る多くのサイエンスのベースとなるのはH α 輝線である。この輝線はおよそ赤方偏移2.5より遠方ではKバンドからも外れてしまい、地上からの観測は非常に困難になる。一方、JWSTは赤方偏移約6までの天体のH α を受けることができ、遠方ではJWSTに一步先をいかれてしまうことは避けられないだろう。ほかのTMTパートナー国とJWSTを使えるような共同研究をしたり、またはTMTでも他の輝線で代用するような工夫を考えておく必要がある。厳しい競争ではあ

るが、厳しいからこそ前もって周到的な準備が必要なのである。もしJWSTに国際時間があるのであれば、それを獲得することも当然目指さなければならぬ。

さて、以上のサイエンスとは多少毛色が異なるが、銀河のように光で検出するのではなく、背景天体に対する吸収線で検出する吸収線系の天体も、TMTでは大きな発展が期待される。これは、AOを効かせた近赤外観測ではなく、口径を活かした可視での高分散分光観測となる。従来ではQSOのような非常に明るく、連続光の素直な天体がしばしば用いられてきたが、TMTでは普通の銀河がこういった背景光源になりうる。当然、連続光がより複雑で吸収を受ける前のスペクトルを推測するのが難しいという問題はあるのであるが、宇宙に存在するほとんどの天体は、こういった暗くて光で検出できない小さい天体である上に、現在の階層的銀河形成論ではこれらの小天体が巨大銀河の種となる。TMTの口径を活かし個数密度や空間分布、金属量を測定することは、非常に基礎的で重要な研究である。

5.3 初代銀河と再電離

最後に、初期宇宙での銀河形成について述べたい。実はこの分野はJWSTによって非常に大きな

進展が期待される分野である。JWSTは宇宙における背景光の暗さと大口径を活かし、近赤外域において人類未踏の深さまで達する。これにより赤方偏移10を超える銀河まで捉えることができるだろう。日本がJWSTに加わっていないのは個人的には非常に残念なのだが、JWSTの初期サイエンスでは世界中がわくわくする結果が出るのではないと思われる。

TMTでは上に述べたように、広帯域撮像し遠方のLyman break銀河を見つける、というのはあまり賢い手法ではない。感度ではおそらくかなわないのだ。AOを効かせた狭帯域撮像をし、夜光の合間を縫うのが一つのやり方だろう。この場合はJWSTを超える感度が期待される。輝線としてはLyman α が主なターゲットである。この輝線は中性水素によって簡単に吸収・散乱されるという特徴があり、宇宙の再電離を調べるうえで一つの重要な観測対象なのだ。Lyman α 輝線銀河の個数密度の時間進化や、輝線のプロファイルの変化から宇宙の中性度の変化を探ることができる。また、これは背景光を覚悟しての広帯域撮像かIFU分光になると思うが、TMTの空間分解能を活かして遠方天体の物理的大きさや形態を調べることは、TMTのユニークなサイエンスになるだろう。近年、銀河のサイズ進化は大きなテーマになっていて⁸⁾、より遠方ほど銀河はコンパクトであったようである。その研究を最遠方まで伸ばすのはTMTの使命であろう。

しかしながら、TMTは共用望遠鏡であるし同じことは他の国々も考えている。さらに、JWSTに加わっている国は、JWSTとTMTを組み合わせるということも当然考えるところだろう。この組み合わせが現実解になりにくいわれわれとしては、なかなか厳しい戦いが待っているかもしれない。先にも述べたが、一つは戦いを避けて共同研究という形で相手と一緒に仕事することが考

えられる。先に述べたTMT ISDTsの一つの目的が、共同研究を探ることであるとのことなので、この方向は今から真剣に考えるといいのだろう。

もう一方で、日本独自のサイエンスも考えたい。一般に銀河の詳細な物理的性質を調べるためには分光観測が必要となるが、TMTをもってしても詳細な分光ができるのは、遠方銀河の中でごく明るいものに限られる。そういった明るい銀河は非常に数が少ないので、広い体積を掃く必要がある。ここですばるが活用できるだろう。IRISを用いたAOを効かせたIFU分光で、すばるで見つけた明るい銀河の大きさ、形態、AGNの有無、力学構造などさまざまな情報が得られることになる。すばるではフロンティアと言える赤方偏移までは届かないかもしれないが、日本独自のユニークなサイエンスになるだろう。さらには、狭帯域フィルターを用いて空間的に広がったLyman α blob天体をあらかじめ見つけておいて、TMTでじっくり見ることも日本ならではのいいサイエンスである。IFU分光から得られるガスの運動や、星の分布・運動、さらにはAGNの寄与などこの天体の本質に迫れる観測ができるだろう。また、こういった天体は高密度環境に多いという示唆もあり⁹⁾、遠方宇宙での原始銀河団も同時に探れるかもしれない。

また、重力レンズ効果を使うこともわれわれは真剣に考えるべきである。HSCの戦略枠プログラムで広い面積を深く掃く観測が行われる。これをベースに巨大銀河団周辺のより深い撮像追観測を行い、レンズ効果を受けた遠方銀河を探すことは一つ面白い方向だと思う。良い画質を利用した銀河団の重力レンズ解析は日本のお家芸とも言えるもので、その観点からも日本発のサイエンスとしてふさわしいのではないかな。

最後についてではあるが、現在検討が進められているWISH計画^{*4}は、最遠方銀河に主眼を置

*4 <http://wishmission.org/>

いたJWSTに伍するような衛星サーベイ計画で、TMTで分光可能な赤方偏移10を超える明るい銀河が見つかることが期待される。この計画が進めば、日本はすばるに加えて飛び道具を一つ増やすことになり、遠方銀河に限らずさまざまな分野でサイエンスを飛躍させる強力な手段となるに違いない。

6. ま と め

TMTはすばるを引き継ぎ、大きく発展させる望遠鏡である。ここでは日本としてどういう銀河サイエンスをするべきか、という戦略的な観点から、近傍宇宙から遠方宇宙にわたるTMTサイエンスを紹介した。TMTの高空間分解能を生かし、近傍銀河を星に分解することは個人的には非常に楽しいサイエンスであるし、中間赤方偏移においてAOを効かせたIFU分光で銀河を詳細に調べることが面白い。もちろん、宇宙の再電離や遠方銀河においても大きな発展が期待できるだろう。

しかし、TMT時代の国際情勢は生易しいものではなく、次世代の宇宙望遠鏡やほかの地上超巨大望遠鏡も動き始め、熾烈な研究競争になることが予想される。TMTの独壇場となるような銀河サイエンスは必ずしも多いわけではないが、あまり悲観する必要もない。われわれのもつユニークなサーベイ望遠鏡、すばるを最大限活用し、日本独自のサイエンスを今から戦略的に準備すれば良いのだ。すばるで見つけTMTで詳細に調べる、ということがわれわれのやり方ではないだろうか。

本稿ではこの戦略的な点ばかりくどいほど強調してしまっただけだが、もちろん日本独自路線だけではなく、JWSTへのアクセスを視野に入れ、TMTのパートナー国と国際共同研究を進めることもまた重要である。TMT ISDTsはその一つの機会を提供してくれると期待している。独自路線と共同研究、その両方をしたたかに追い求めることが、われわれのすべきことなのかもしれない。

参考文献

- 1) Wright W. A., et al., 2010, SPIE 7735
- 2) Miyazaki S., et al., 2012, SPIE 8446
- 3) Takada M., et al., 2014, PASJ 66, 1
- 4) Maraston C., et al., 2010, MNRAS 407, 830
- 5) Bentez-Llambay A., et al., arXiv1405.5540
- 6) Naab T., et al., 2009, ApJ 699, L178
- 7) Oser L., et al., 2010, ApJ 725, 2312
- 8) Ono Y., et al., 2013, ApJ 777, 155
- 9) Matsuda Y., et al., 2004, AJ 128, 569

Galaxy Evolution Science with TMT

Masayuki TANAKA

*National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: TMT is going to significantly improve our understanding of extragalactic objects. But, the competition is harsh in the TMT era; there will be a few other 30 m-class telescopes as well as next-generation space-based facilities. In order to carry out unique Japan-led galaxy science with TMT, it is important to use *both* TMT and Subaru. I will briefly review some of the major extragalactic science with TMT from a strategic point of view.