

# すばる望遠鏡の科学成果の概観

大 栗 真 宗

〈千葉大学先進科学センター 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33〉

e-mail: masamune.oguri@chiba-u.jp



すばる望遠鏡の25周年の機会に、すばる望遠鏡を用いて得られた科学成果を概観します。すばる望遠鏡は多様な装置を備えており宇宙論から太陽系まで天文学の幅広い分野で活躍してきました。25年の歴史を振り返るとともに、最近の成果を中心にいくつかの科学成果を紹介します。

## 1. はじめに

すばる望遠鏡は共同利用施設であり、これまで多様な装置のラインナップにより宇宙論から太陽系に至る天文学の多様な分野で大活躍してきました。その科学成果を一人ないし数人でまとめるというのは土台無理な話なのですが、すばる科学諮問委員長最後の仕事として引き受けることにしました。紙面の限界と筆者の能力の限界により、重要なすべての科学成果を網羅することは到底できませんが、ご容赦いただければと思います。また、日本天文学会の宝である（と勝手に思っている）過去の天文月報の記事を積極的に引用したので、この機会に過去の記事を読んで研究当時の雰囲気を感じていただくのもよいでしょう。

## 2. 25年の成果の概観

科学成果は原著論文で主に発表されますので、まずはAstrophysics Data System (ADS)で査読付き論文を調査しました [1]。Abstract/Keywordsで「Subaru」を指定して論文を検索すると、2000編以上の論文がヒットします。この方法ではすばる望遠鏡のデータを用いたすべての論文を網羅することにはなっていませんが、すばる望遠鏡をメインに使った論文はだいたいカバーできていると期待しています。

図1が引用数でソートした結果ですが、この簡

単な調査からもさまざまなことが読み取れます。例えば、論文数は2007年ごろまで増え続け、その後は年間100編程度で安定して推移してきています。すばるユーザーズミーティングなどで報告される、ハワイ観測所が調査している論文の出版数は年間150編程度で、これよりやや少ないのは上記の通りすべての論文を網羅できていないことに起因すると思われますが、全体的な傾向はより詳しい調査と無矛盾であることがわかります。

論文の引用数は、単純平均すると1編あたり約50回で、天文学の原著論文の平均と比べても平均引用数はかなり多いのではないかと思います。引用数の高い論文を眺めると、Cosmic Evolution Survey (COSMOS), Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program (HSC-SSP), Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS), Subaru Deep Field (SDF)などのいわゆるサーベイ観測データを用いたものが多く、多くの観測時間を投入したサーベイ観測によってインパクトの高い科学成果が得られることが推察されます。

図2には、ADSの分析機能を用いて論文を分類して分析したものを示しています。この分析から、すばる望遠鏡を用いて得られた主要な科学成果として、(1) 遠方銀河、輝線銀河、再電離、(2) 系外惑星、原始惑星系円盤、(3) 遠方クエーサー、HSCサーベイ、(4) 銀河団重力レンズ、などがあるということがわかります。これらの時

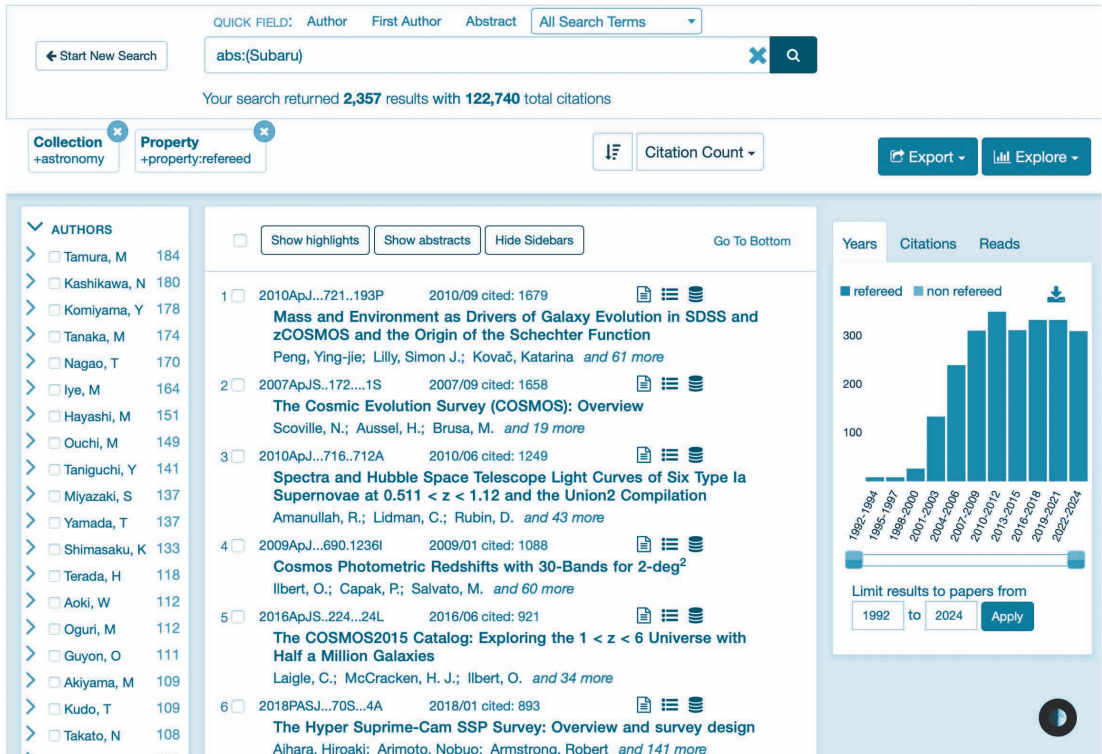


図1 ADSで調査した、すばる望遠鏡を利用したと思われる原著論文のリストを、引用数順にソートしたもの。

間進化を見ると、まず最初に (1) と (2) の成果が卓越し、その後 (4) の成果が目立ち、最後に (3) のHSCサーベイの結果が大きなピークとなって現れています。もちろんこれらに限らず、以下でいくつか紹介するように多様な科学成果がすばる望遠鏡によって得られています。

### 3. 科学成果の例

ここでは、最近の科学成果に重点を置きつつ、25年全体も振り返って、研究分野別に科学成果の例をいくつか紹介します。

#### 3.1 宇宙論

すばる望遠鏡の特長の一つである視野の広さは、広い天域のサーベイ観測が重要となる宇宙論分野で威力を発揮します [2]。初代主焦点カメラ Suprime-Cam の時代には、遠方の Ia 型超新星の探査や、さらに2節でも触れられた、銀河団の弱

重力レンズ解析や COSMOS サーベイ天域の多色撮像サーベイなどで大活躍しました [3-5]。

Suprime-Cam をアップグレードし視野をさらに広げた主焦点カメラ HSC が2014年から本格稼働し、300夜 (30夜追加配分され最終的に330夜) のすばる望遠鏡観測時間を投入された戦略的サーベイ HSC Subaru Strategic Program (以下HSCサーベイ) によって、宇宙論の研究にも大きな進展が得られました。観測は2021年末に完了し、最終的に約1100平方度の天域を、grizyの5バンドで約26等級の深さで撮像観測を行いました。サーベイ初期の興奮については、天文月報の特集記事でその様子を窺い知ることができます [6]。

HSCサーベイから多様な科学成果が得られていますが、宇宙論の研究でも重要な科学成果が得られています。その代表的な成果が重力レンズを用いた密度ゆらぎとその時間進化の測定です。弱

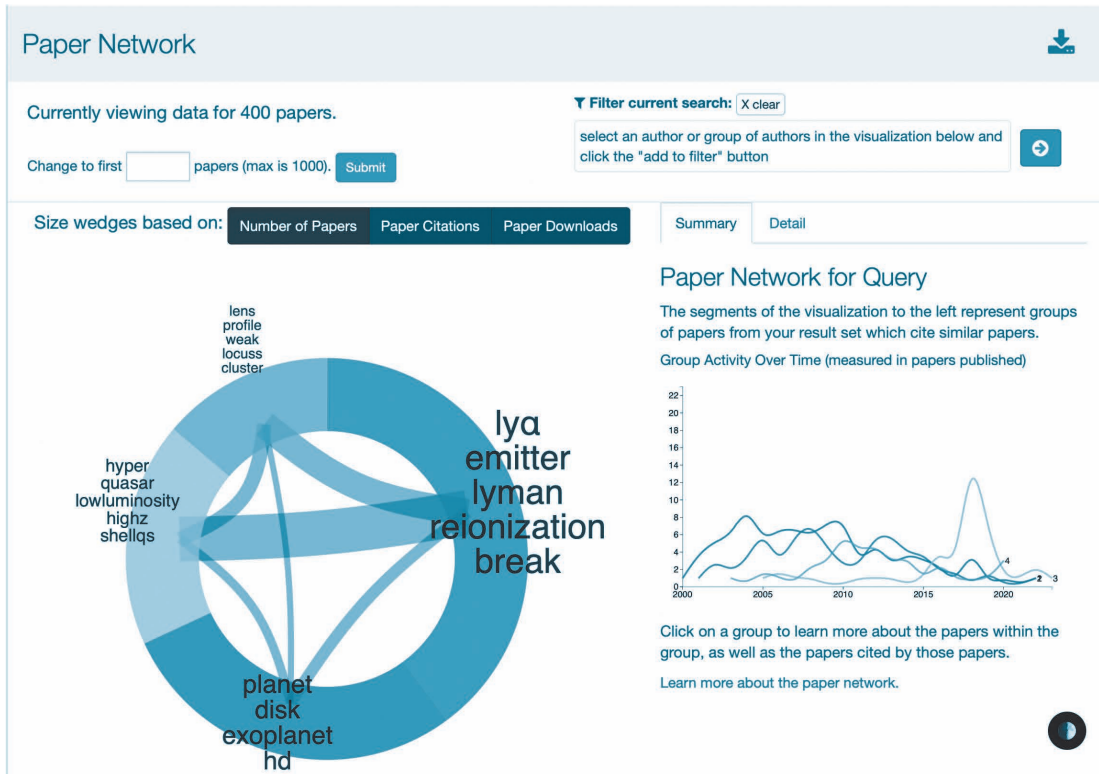


図2 ADSで調査した、すばる望遠鏡を利用したと思われる原著論文を分類して分析した結果。

い重力レンズによる銀河の形状ゆがみの統計解析, 例えば2点相関関数やそのフーリエ変換に対応するパワースペクトルの測定によって, ダークマターが支配的な物質密度ゆらぎを直接測定することができます. この測定を宇宙背景放射から予想される現在の密度ゆらぎの値と比較することで, 宇宙論パラメータを精密に測定し, 標準宇宙モデルの検証を行うことができます. HSCサーベイによる測定によって, 重力レンズで測定される密度ゆらぎが宇宙背景放射からの予想値とのずれが見えてきていますが, この測定のずれは $S_8$ 問題とよばれ, 宇宙論の重要問題の一つとなりつつあります [7, 8]. HSCサーベイの全サーベイデータはつい最近内部で公開されたばかりなので, 宇宙論に限らず各研究分野でのHSCサーベイの最終解析結果が近いうちに報告されるでしょう.

HSCサーベイは撮像サーベイですが, 観測的宇宙論のもう一つの柱は分光サーベイです. すばる望遠鏡が活躍した先駆的な分光サーベイとして, ファイバー多天体分光器FMOSを用いて行われた戦略的サーベイ FastSoundがあります. 赤方偏移ゆがみと呼ばれる銀河相関関数の非等方性を観測することで, 赤方偏移1.4の高赤方偏移での銀河の運動の速度場の測定に初めて成功し, 一般相対論の検証を行いました [9]. 近い将来, 超広視野多天体分光器PFSによってさらに大規模な分光サーベイが行われ, より高赤方偏移で銀河の運動の速度場が精密に測定されると期待されています.

### 3.2 銀河進化, 恒星

すばる望遠鏡はその運用初期から特に遠方銀河の探査で大活躍しました. Suprime-Camの広い視野と狭帯域フィルターを用いることで赤方偏移お

よそ6から7の遠方銀河を数多く発見し、最遠方銀河発見の記録を次々と塗り替えました [10–13]。これらの輝線銀河の数密度の進化から、宇宙が中性だった時代から再電離する過程が見えてきました。また宇宙再電離の様子は、当時最高赤方偏移のガンマ線バースト観測となったGRB 050904の可視分光撮像装置FOCASを用いた分光観測によっても調べられました [14]。再電離の研究はHSCサーベイでも引き続き行われており、巨大サンプルを用いた詳細な統計解析と多波長追観測が進められています [15, 16]。

HSCサーベイは、遠方銀河に加えて遠方クエーサーの研究でも大活躍しました。特に、HSCサーベイデータを用いた遠方クエーサー探査プロジェクトSHELLQsによって赤方偏移6から7の遠方クエーサーの発見数を飛躍的に増大させ、光度関数を暗い光度まで精密に測定することで、クエーサーの再電離の寄与の小ささを定量的に示すなど重要な成果が得られています [17, 18]。HSCサーベイから得られたクエーサーサンプルは、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡でも追観測されており、母銀河の検出によってクエーサー形成の謎に迫りつつあります [19]。

すばる望遠鏡の広い視野は、銀河団領域の観測による銀河の環境効果の研究や、銀河団探査においても有用です。Suprime-Camに加えて、近赤外カメラMOIRCSやHSCを駆使して、銀河団周縁部の銀河の性質や遠方銀河団の発見などの多くの研究成果が得られています [20–22]。

私たちの天の川銀河に近い近傍銀河は、距離が近い分、天球面上で見かけ上大きく観測されますので、視野の広いすばる望遠鏡がその観測に活躍してきました。Suprime-Camの時代から、近傍銀河を観測しその色等級図を調べることで、銀河の中心と周縁部で異なる星形成史を示すなど複雑な銀河形成の描像が得られました [23]。HSCサーベイでは例えば天の川銀河ハローの研究が進められ、非常に暗い衛星銀河の発見や青色水平分

枝星の観測による恒星ハローの「端」の観測などの成果が得られています [24]。

恒星の研究では、高分散分光器HDSを用いた金属量や重元素組成の研究が行われてきました。初代星の元素合成の研究に重要となる低金属星の発見や、新星のリチウム生成の観測などの成果が得られています [25–27]。

宇宙の元素合成の研究で近年脚光を浴びたのが、中性子星連星合体です。中性子星連星合体由来の重力波GW170817の可視光追観測にすばる望遠鏡も参加し、電磁波対応天体の同定及び光度曲線の測定に貢献しました [28, 29]。その視野の広さと集光能力を活かして、すばる望遠鏡は今後も連星合体重力波の電磁波対応天体の探査における活躍が大いに期待されています。

### 3.3 系外惑星、太陽系

上記の高分散分光器HDSは、系外惑星の発見法の一つであるドップラー法の観測でも活躍してきました。例えば2000年代のHDSを用いた系統的なホットジュピター探査により、巨大なコアを持つ系外惑星が発見されました [30]。地球型惑星の探査のためには、より波長の長い近赤外線でのドップラー法の観測が有効であり、そのために開発されたのが赤外線ドップラー装置IRDです。IRDを用いた、M型矮星の周りを系統的に探査する戦略枠サーベイは現在進行中であり、成果が期待されています [31]。

すばる望遠鏡を用いた系外惑星と原始惑星系円盤の研究を牽引してきたのは、戦略枠サーベイSEEDSです。125夜の観測時間を投入した系統的な観測により、原始惑星系円盤の渦巻き構造の発見や、直接撮像による系外惑星の発見などがなされました [32–34]。

SEEDSで用いられた近赤外線高コントラスト撮像カメラHiCHAOは、その後コロナグラフ超補償光学系SCExAOおよび検出器CHARISへと進化し、系外惑星と原始惑星系円盤の研究で活躍しています。特に、最近ガイア衛星の位置天文学

観測データも援用することで、新たな系外惑星をSCEXAOおよびCHARISの直接撮像により発見することに成功しました [35]。位置天文学と直接観測を組み合わせた初の系外惑星の発見例となっています。また、SCEXAOと組み合わせて可視の観測装置VAMPIRESも利用でき、原始惑星系円盤のH $\alpha$ 輝線観測などで成果が得られています [36]。すばる望遠鏡の超補償光学系は今後もさらなるアップグレードが計画されており、将来にわたって活躍が期待できます。

視野の広いHSCは太陽系小天体の観測にも威力を発揮します。トロヤ群小惑星や太陽系外縁天体の観測などで活躍し、また仮想上の天体、第9惑星の探査にも用いられました [37]。また、NASAのニューホライズンズ探査機チームと協力してカイパーベルト天体の探査も行っており、既知のものより遠方のカイパーベルト天体も見つかりつつあります [38]。

#### 4. ま と め

すばる望遠鏡の25年間で多くの科学成果が得られていますが、それではこの先の例えば25年間もすばる望遠鏡は安泰でしょうか？もちろん必ずしもそうではなく、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡やローマン宇宙望遠鏡、30メートル級望遠鏡といった新型望遠鏡が稼働しつつあり、またルービン天文台やユークリッド衛星といった大型サーベイ計画が始動してきている状況において、すばる望遠鏡が世界の第一線で活躍し続けるためには、注意深く戦略を練る必要があるでしょう。

すばる望遠鏡の長期戦略はすばる科学諮問委員会でも議論されており、その一環として、すばる科学諮問委員会、ハワイ観測所、有志の協力のもと、すばる望遠鏡の未来を議論する研究会「すばる3研究会」を2024年8月29、30日に開催しました。またそれに先立ってすばるユーザーに対する無記名のアンケートも実施しました。研究会やアンケートから、すばる望遠鏡への期待はまだまだ

高いと感じましたので、今後もすばる望遠鏡が活躍していけるように議論を重ねていきたいと思っています。研究会の講演ファイルやアンケート結果は研究会のWebページで公開されています [39]。また、このすばる25周年特集号の宮崎氏執筆の記事でもすばる3の議論が紹介されますのでそちらも併せてご覧ください。

最後に、すばる望遠鏡の25年間で得られた「成果」は本稿で紹介したような原著論文に掲載された科学成果だけではないことを強調しておきます。すばる望遠鏡のデータを引っ提げて世界と戦うことで多くの若い研究者が育ち、その研究者が競争率の高いジェームズウェッブ宇宙望遠鏡の観測時間を獲得したり、ユークリッド衛星、ルービン天文台、ローマン宇宙望遠鏡などに参加してその中で存在感を示すなど、世界的に活躍しています。こうした、すばる望遠鏡で育った人材もまたすばる望遠鏡の重要な「成果」といえます。すばる望遠鏡で育った研究者がそれぞれの研究分野を世界的に牽引する活躍をして、その経験をもとにすばる望遠鏡をさらに有効活用し重要な科学成果をあげていくことになれば望外の喜びです。

#### 謝 辞

すばる望遠鏡の建設、運用に関わってきたすべての方々に感謝します。本文中に個人的な体験を書くことはやや憚られたので、ここで筆者とすばる望遠鏡との関わりを書いておくと、筆者はすばる望遠鏡のファーストライトから間もない2000年に大学院に進学したため、いわばすばるネイティブ第1世代（より厳密には、以下に書く事情もあり第1.2世代くらいかもしれません）となります。ただ、筆者の最初のいくつかの研究は理論研究であったためすばる望遠鏡を使う機会はしばらくなく、最初にすばる望遠鏡を使ったのは2003年のことでした [40]。そこでビギナーズラック的に重要な発見ができ、観測研究の楽しさを知った筆者は引き続き重力レンズクエーサー候

補の追観測や銀河団の広視野観測などですばる望遠鏡を幾度となく使わせていただきました [41]。その後、HSC サーベイに深く関わるようになり、すばる望遠鏡との関わりはますます深くなりました。ただ、最近はサーベイデータを解析するかキュー観測でデータを取得するのみで、山頂で観測する機会はめっきりなくなりました。空気が薄い山頂で辛い思いをすることが減ったのはよいことかもしれませんが、一方でやや寂しい気持ちもあります。

そうこうしているうちに、なぜかすばる科学諮問委員会の委員長を務めることになりました。大変な仕事でいろいろと文句も言いましたが、前々委員長の児玉さんが書いているように [42]、私もすばる望遠鏡に少しでも恩返しをという気持ちで委員長の任期を務めました。ただ終わってみると、これでもまだ恩は全然返しきれていないような気もしていますので、今後もさまざまな形で少しずつ恩返しできれば、といったところです。

## 参考文献

- [1] <https://ui.adsabs.harvard.edu> (2024.9.20)
- [2] 宮崎聡, 2017, 天文月報, 110, 48
- [3] 土居守, 安田直樹, 2018, 天文月報, 111, 88
- [4] 岡部信広, 2018, 天文月報, 111, 18
- [5] 谷口義明, 2017, 天文月報, 110, 781
- [6] 小宮山裕, 2019, 天文月報, 112, 79
- [7] 日影千秋, 2019, 天文月報, 112, 720
- [8] 杉山素直, ほか, 2024, 天文月報, 117, 304
- [9] 奥村哲平, ほか, 2017, 天文月報, 110, 131
- [10] 谷口義明, 2004, 天文月報, 97, 621
- [11] 柏川伸成, 2006, 天文月報, 99, 562
- [12] 太田一陽, 2007, 天文月報, 100, 25
- [13] 家正則, 2014, 天文月報, 107, 232
- [14] 河合誠之, ほか, 2007, 天文月報, 100, 17
- [15] 大内正己, 2019, 天文月報, 112, 146
- [16] 播金優一, 2024, 天文月報, 117, 102
- [17] 松岡良樹, 2018, 天文月報, 111, 760
- [18] 長尾透, ほか, 2019, 天文月報, 112, 209
- [19] 尾上匡房, 2022, 天文月報, 115, 168
- [20] 田中賢幸, 2010, 天文月報, 103, 750
- [21] 小山佑世, 2012, 天文月報, 105, 332
- [22] 岡部信広, ほか, 2019, 天文月報, 112, 174
- [23] 小宮山裕, 2018, 天文月報, 111, 93
- [24] 千葉粧司, 2022, 天文月報, 115, 686
- [25] 青木和光, 2006, 天文月報, 99, 197
- [26] 本田敏志, 2006, 天文月報, 99, 358
- [27] 田実晃人, 2015, 天文月報, 108, 591
- [28] 内海洋輔, 2018, 天文月報, 111, 84
- [29] 田中雅臣, 2021, 天文月報, 114, 16
- [30] 佐藤文衛, 2009, 天文月報, 102, 98
- [31] 小谷隆行, 佐藤文衛, 2021, 天文月報, 114, 622
- [32] 田村元秀, 2016, 天文月報, 109, 243
- [33] 武藤恭之, ほか, 2013, 天文月報, 106, 195
- [34] 葛原昌幸, 工藤智幸, 2016, 天文月報, 109, 257
- [35] 葛原昌幸, 2023, 天文月報, 116, 360
- [36] 鶴山太智, 2023, 天文月報, 116, 416
- [37] 吉田二美, 2019, 天文月報, 112, 228
- [38] <https://subarutelescope.org/jp/results/2024/09/04/3439.html> (2024.9.24)
- [39] <https://sites.google.com/faculty.gs.chiba-u.jp/subaru3workshop2024> (2024.9.24)
- [40] 稲田直久, 大栗真宗, 2004, 天文月報, 97, 415
- [41] 大栗真宗, 2011, 天文月報, 104, 30
- [42] 児玉忠恭, 2019, 天文月報, 112, 858

## Overview of Scientific Achievements of the Subaru Telescope

Masamune OGURI

Center for Frontier Science, Chiba University,  
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

Abstract: The overview of scientific achievements of the Subaru Telescope over the past 25 years is presented. The Subaru Telescope has been used in a wide area of research ranging from cosmology to the Solar System. We look back the 25 years' history of the Subaru Telescope and describe some research achievements with an emphasis on recent results.