

自然科学研究機構

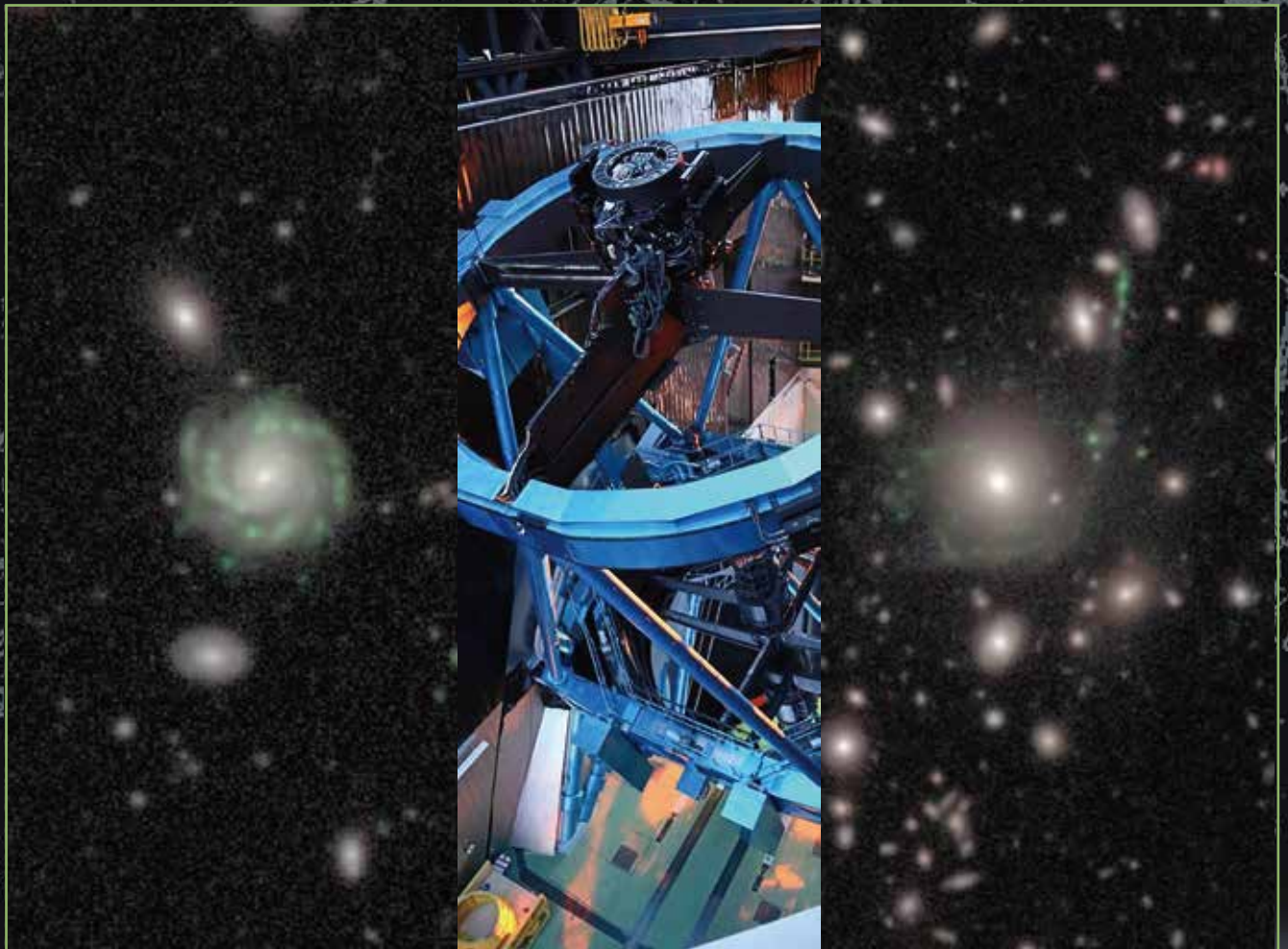
 国立天文台
NAOJ

国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2019年3月1日 No.308

特集 HSCが拓く宇宙 後編



- 高赤方偏移銀河の観測 / AGN (活動銀河核) の観測 / 重力レンズ銀河の観測 / hscMapの開発・運用と市民天文学への活用・展開 / HSCの成果画像で市民天文学を創り出す!
- 天文台メモワール 御子柴 廣 / 松田 浩 / 大塚朝喜
- 「IDL講習会 (FITSデータ解析編)」報告
- 「伝える人のための天文学WS」報告
- 平成32年 (2020) 暦要項を発表しました!

NAOJ NEWS 国立天文台ニュース

C O N T E N T S

- 表紙
- 国立天文台カレンダー

03

特集

HSCが拓く宇宙 後編

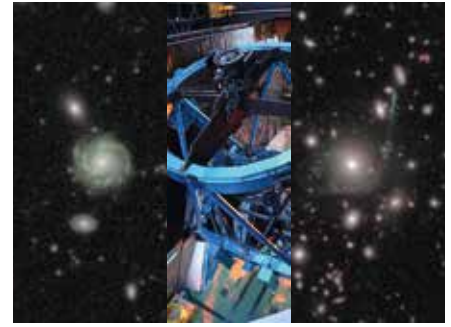
II HSCの科学的成果—太陽系から宇宙論の観測まで—

- 4 高赤方偏移銀河の観測
 - HSC-SSP探査データにもとづく遠方銀河研究の初期成果
——小野宜昭（東京大学 宇宙線研究所）
- 5 AGN（活動銀河核）の観測
 - HSC-SSP探査データにもとづくAGN（活動銀河核）の主な研究成果
——白崎裕治（国立天文台 天文データセンター）
 - HSCで探るクエーサー周囲環境——内山久和（総合研究大学院大学）
 - すばる/HSCで巨大ブラックホールを探る
/ Exploring Massive Black Holes with Subaru/HSC——He Wanqiu（東北大学）
 - 遠方クエーサーの探索——松岡良樹（愛媛大学）
- 6 重力レンズ銀河の観測
 - 重力レンズ効果とHSC / Gravitational Lensing and HSC
——Rachel Mandelbaum（Carnegie Mellon University）
 - 重力レンズ宇宙論の初期成果——大栗真宗（東京大学）

III HSCと市民天文学—hscMapの開発・公開と市民天文学への活用・展開—

- hscMapの開発・運用と市民天文学への活用・展開
——小池美知太郎（国立天文台ハワイ観測所）
- HSCの成果画像で市民天文学を創り出す！
——臼田・佐藤功美子（国立天文台 天文情報センター）

- HSCを越えて——宮崎 聡（国立天文台 先端技術センター）



表紙画像

すばるの主焦点に装着された装着されたHSCと、HSCが撮像した星形成銀河。

背景星図（千葉市立郷土博物館）
渦巻銀河M81画像（すばる望遠鏡）



梅の銀河宇宙（三鷹キャンパス）。

25

天文台メモワール

- 45m電波望遠鏡と共に 御子柴 廣（野辺山宇宙電波観測所）
- 退職のご挨拶 松田 浩（天文情報センター）
- パソコンと私 大塚朝喜（野辺山宇宙電波観測所）

28

おしらせ

- 「IDL講習会（FITSデータ解析編）」報告 亀谷和久（天文データセンター）
- 「伝える人のための天文学WS」報告 波田野聡美（天文情報センター）
- 「一般社団法人 日本カレンダー暦文化振興協会 2018年の活動」報告
片山真人（天文情報センター）
- 平成32年（2020）暦要項を発表しました！ 片山真人（天文情報センター）

31

編集後記／次号予告

32

連載「国立天文台・望遠鏡のある風景」12

アルマ望遠鏡モリタアレイと逆さオリオン

撮影：平松正顕（アルマプロジェクト）

国立天文台カレンダー

2019年2月

- 2日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 8日（金）4D2Uシアター公開&観望会（三鷹）
- 9日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 12日（火）科学戦略委員会
- 16日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 21日（木）幹事会議
- 23日（土）観望会（三鷹）
- 27日（水）プロジェクト会議

2019年3月

- 2日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 8日（金）4D2Uシアター公開&観望会（三鷹）
- 9日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 11日（月）運営会議
- 12日（火）幹事会議
- 16日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 20日（水）幹事会議
- 23日（土）観望会（三鷹）
- 28日（木）プロジェクト会議

2019年4月

- 5日（金）幹事会議
- 6日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 12日（金）4D2Uシアター公開&観望会（三鷹）
- 13日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 19日（金）幹事会議
- 20日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 24日（水）プロジェクト会議
- 27日（土）観望会（三鷹）

特 集

HSCが 拓く 宇宙

後編

2020年代の広視野サーベイ観測をリードする
「すばる望遠鏡 超広視野主焦点カメラHSC」のすべて

協力
ハワイ観測所・HSCチーム

2月号に続いて「HSCが拓く宇宙」後編をお届けします。後編では「Ⅱ HSCの科学的成果—太陽系から宇宙論の観測まで」の「4. 高赤方偏移銀河の観測」「5. AGN（活動銀河核）の観測」「6. 重力レンズ銀河の観測」を解説します（全体の見取り図は前編のp04-05参照）。さらに「Ⅲ HSCと市民天文学—hscMapの開発・公開と市民天文学への活用・展開」として、読者のみなさん自身がHSCの観測成果を気軽に楽しんだり、もっと踏み込んで研究活動に参加することのできるツールや仕組みをご紹介します。

4 高赤方偏移銀河の観測

銀河の色情報や狭帯域フィルターを使った観測により、高赤方偏移銀河を選別することが可能になります。HSCによって探査面積が飛躍的に増えたことで、レアな天体の統計研究までもができるようになってきました。

HSC-SSP 探査データにもとづく遠方銀河研究の初期成果

小野宜昭

(東京大学 宇宙線研究所)



●これまでの遠方銀河探査

遠方宇宙にある銀河を探査してその性質を調べることは、銀河の形成や進化を理解する上で重要です。これまでハッブル宇宙望遠鏡による深宇宙探査で赤方偏移 $z \sim 4$ を越える宇宙にある数多くの暗い遠方銀河が発見されてきました (Stark 2016, ARAA, 54, 761)。最近では、Hubble Frontier Fields プロジェクトにより銀河団の重力レンズ効果を利用してさらに暗い遠方銀河が系統的に探査されました (Ishigaki et al. 2018, ApJ, 854, 73)。一方で、明るい遠方銀河の探査は、これまでにすばる望遠鏡の Suprime-Cam やカナダ・フランス・ハワイ望遠鏡 (CFHT) の MegaCam といった広視野の可視光撮像装置が成果をあげてきました (van der Burg et al. 2010, A&A, 523, A74)。しかし、過去の研究では探査面積が 4 deg^2 程度と限られていたため、個数密度の低い明るい銀河と活動銀河核 (AGN) の間の関係や、銀河団の祖先になったと考えられる遠方銀河の高密度領域についての理解は不十分なままでした。

■HSC-SSP データからの遠方銀河選択

そうした研究を可能にしたのが、レアな遠方天体を探査するのに必要な広さと深さを兼ね備える HSC-SSP データです。私たちは、SSP チーム内でデータがリリースされた2014年秋から遠方銀河探査に取り組んできました★01。当初は、それまでのすばるやハッブルなどでの経験をもとに取り組みれば大きな問題なく結果にたどり着けるだろうと楽観視していたのですが、実際はさまざまな困難に直面することになりました。

最初に発覚したのは測光値に関する問題でした。画像では何も写っていないように見えるのに、チーム内で配布された測光カタログではなぜか明るい等級が得られているニセ天体

★01 銀河の選択方法は、よく知られた二つの手法に基づいています。ひとつは複数の広帯域フィルターによる天体のカラーから銀河のライマンブレイクを目印にして選択する方法で、そのようにして選択された銀河はライマンブレイク銀河 (LBG) と呼ばれます。もうひとつは広帯域フィルターと狭帯域フィルターを組み合わせることで銀河のライマンアルファ輝線を目印にして選択する方法で、この方法で選ばれた銀河はライマンアルファ輝線銀河 (LAE) と呼ばれます。

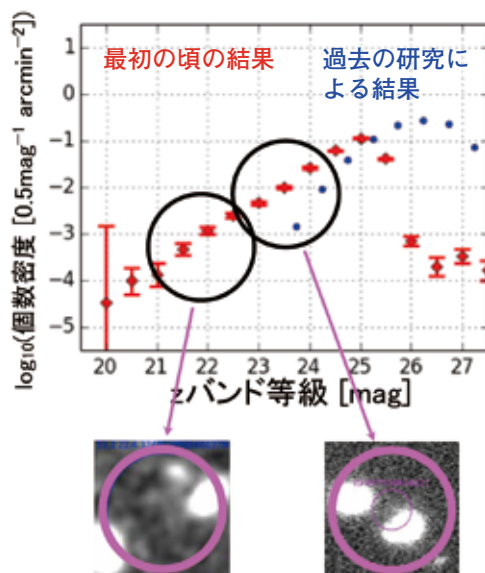


図01 上図は最初頃に選択した LBG サンプルの等級ごとの個数面密度 (赤ダイヤ)。過去の研究結果 (青丸) に対してかなり大きいのですが、下図に示しているように画像をチェックしてみると何も写っていないものがほとんどでした。2015年夏の HSC-SSP 共同研究会議での発表資料を修正して転載。

が多数存在していました。厄介なことに、長い波長の画像でのみこの問題が生じているものがあり、それらは LBG として選択されてしまっていました。そのため、LBG の個数面密度を見てみると、過去の結果と比べて有意に大きく、特に明るい側で10倍以上食い違ってしまっていました (図01)。そこで、それらのニセ天体を効率よく除く方法を模索しました。SSP チームの配布するカタログには、測光の際の問題の有無などを表すフラグも出力されています。Kavli IPMU の安田直樹さんや国立天文台の古澤久徳さんなど HSC データに詳しい方々から意見を聞く中で、そうしたフラグをうまく組み合わせることで、ニセ天体のある程度除くことができることがわかりました。また、プリンストン大学の Jim Bosch さんや Paul Price さんたちにニセ天体のカタログを提供して、そもそもそのような天体が生じないよう HSC パイプラインの改善に役立てていただきました。

測光値の問題と並行して取り組んだのが、移動天体や変光天体の問題です。長波長のフィルターでの観測の際にたまたま視野に入ってしまった移動天体や、そのとき偶然明るかった変光天体は、遠方銀河候補として選択されてしまいます。それらのコンタミネーション（混入）を本物の遠方銀河と見分けるためには、スタックする前の単一の露出で取られた画像をチェックする必要があります。そこで私たちは、単一露出の画像で測光して、明らかに光度が時間変化しているものを自動的に除くようにしました。そして、残された候補天体一つずつ目視で確認していき、除ききれいでなかった移動天体や変光天体、また装置起源と考えられる人工物などといったその他のコンタミネーションを除いていきました。広い調査面積ゆえにその作業量は膨大でして、例えばLAEでは約10万個もの候補天体を目視でチェックしなければならなかったため約2か月もの時間がかかりました。

また、選択完全性（selection completeness）の見積りにも悩まされました。選択完全性は、遠方銀河の探査体積を計算する際に必要になります。暗いLBG/LAEほどノイズに埋もれて選択が難しくなりますので、選択完全性は暗いほど低くなります。また、天体のカラーが赤方偏移到依存しますので、選択完全性は赤方偏移到依存します。そこで、さまざまな明るさや赤方偏移を持つ銀河の画像を実際のHSC画像に埋め込んで選択完全性を調べる必要があります。ただ、独自に疑似HSC画像を作成してパイプラインを走らせることは容易ではありませんでした。2015年秋頃に、当時Kavli IPMUにいたSong HuangさんたちがSynPipeというソフトウェアを開発していることを知りました★02。これは、任意の明るさおよび形態を持つ天体を実際のHSC画像に埋め込んだ後、HSCパイプラインを用いて解析してくれるという、まさに私たちが必要としていたソフトウェアでした。当時はマニュアルがあまり整備されていかなかったり、HSCパイプラインがアップデートされる度に新たなエラーが生じたりと、いろいろとつまづいたのですが、Huangさんや安田さん、同じくKavli IPMUの村田龍馬さんたちに助けていただいてなんとか使用できるようになり、半年くらいかけてようやく選択完全性を得ることができました。

こうしてサイエンスに使えるLBG/LAEカタログが構築され、光度関数などの結果に大きな問題がなさそうなことが確認できたのは2016年夏頃のことでした。SSPデータを扱い始めたのが2014年秋頃でしたので、それから約2年もの歳月が過ぎていました。やがて、PASJ HSC-SSP特集号に掲載される論文の締め切りがSSPチーム内でアナウンスされ、それを目指して論文執筆が始まりました。

●研究プロジェクト名

PASJ特集号に向けた論文ドラフトが形になりつつあった2017年始め、それらの筆頭著者の間で一連のLBG/LAE研究に対してプロジェクト名を付けてはどうかという議論が起きました。論文執筆で慌ただしい中でしたが、プロジェクト名を検討するためのミーティングが開かれることになり、それに先立って各参加者が候補を考えてwikiページ上に挙げることになりました。そこで筆者がLBGプロジェクト用に提案したのがGOLDRUSHでした★03。重要な結果やお

もしろい天体がたくさん見つかるという、一連の研究に対して漠然と抱いていた期待と重なったのを覚えています。その後、3回に渡るミーティングで議論を重ね、50個以上挙げた候補から最終的にGOLDRUSHが選ばれることになりました。各単語の頭文字だけを使う方が美しいという意見が出たので、みんなでアイデアを出して修正しました。さらにペンシルベニア州立大学のAlex Hagenさんによるネイティブチェックを受けて、最終的にGreat Optically Luminous Dropout Research Using Subaru HSCの略称と決まりました。そして、それに対をなすような形でLAEプロジェクトの方はSILVERRUSH（Systematic Identification of LAEs for Visible Exploration and Reionization Research Using Subaru HSC）に決まり、さらにロゴマークまで作成されました（図02）。



図02 プロジェクトのロゴマーク。一部のメンバーで議論した内容をもとに、その日のうちに澁谷さんが作成。

ちなみに、他にも秀逸な候補が多くありまして、個人的に印象深かったのは北見工業大学の澁谷隆俊さんが提案したSHENGLONG（Subaru/HSC Explorations for Narrowband-selected Gaseous Ly α -emitting Objects and Neutral Gas）でした。ただ、議論に参加した若いメンバーの多くがそもそも元ネタ★04を知らないということが判明し、ジェネレーションギャップを感じることになりました。また、宇宙線研究所の樋口諒さんが提案したSHUDEN（終電、Subaru/HSC Ultra Deep Exploration with NB filters）も良かったのですが、ワーク・ライフ・バランスがしばしば重要視される昨今、深夜まで作業していることを連想させる単語はふさわしくないと考えられたため選ばれませんでした。あと、筆者は他にSHAR AZNABLE（Subaru Hsc large ARea And deep search for high-Z uNusuAlly Bright Lyman brEak galaxies）を提案したのですが、使っていない単語があったり、多くが頭文字でなかったりといろいろ苦しく、さらに致命的だったのがSHARではなく正しくはCHARであったことから残念ながらボツとなりました。これらの使用は他の機会に検討したいと思っています。

前置きが長くなってしまったのですが、GOLDRUSHおよびSILVERRUSH（これらをまとめる場合は*RUSHと記します）プロジェクトによる初期成果を以下に紹介します★05。

●GOLDRUSHプロジェクトの主な結果

私たちは、当時HSC-SSPチーム内で公開されていた中で最新のS16Aデータをもとにz~4-7 LBG候補を選択し、明るさごとの個数密度（光度関数）を求めました（Ono et al. 2018, PASJ, 70, S10）。私たちの遠方銀河サンプルの規模は50万天体に及んでいまして、これは過去の研究と比べて10倍以上に相当します（図03）。100 deg²を超える広い視野に

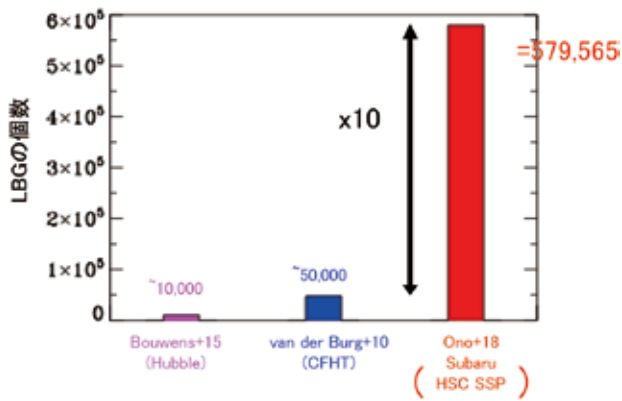


図03 LBGの光度関数研究で使われたサンプルの個数比較。赤の棒グラフがわれわれのサンプルで、マゼンタと青で示している過去のものに比べて10倍以上に及びます。2018年3月に開催されたLy α 研究会 Sakura CLAW (http://cos.icrr.u-tokyo.ac.jp/lya_conference/index.html) での発表資料より転載。

渡って構築されたこの大規模なサンプルのおかげで、レアなため過去の研究では探査できていなかった明るい遠方銀河の個数密度を初めて求めることができました。その結果、遠方銀河の光度関数は、低赤方偏移の観測結果をよく説明するシェヒター関数と比べて、明るい側で有意に超過していることがわかりました (図04)。これは、遠方銀河ではたいていAGNなどによる星形成抑制効果がこれまで考えられていたよりも弱いことを示唆しています。

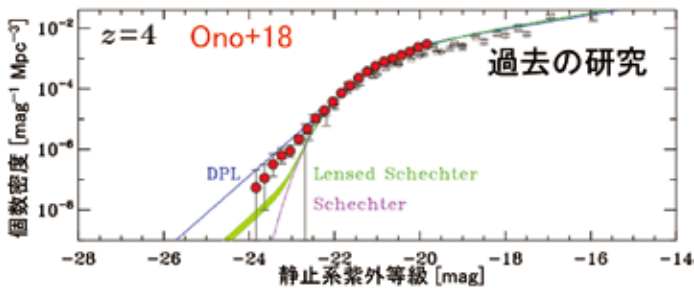


図04 LBGの紫外光度関数 (Ono et al. 2018)。赤丸はHSC-SSP探査にもとづくわれわれの結果を表しています。黒のデータ点は過去の研究結果です。緑の領域は、重力レンズ効果を考慮したベストフィットなシェヒター関数を表します。マゼンタの実線は、重力レンズ効果を考慮していないシェヒター関数です。青の実線はベストフィットな二つのべき乗則です。われわれの結果は、明るい等級範囲でシェヒター関数からの有意な超過を示しています。

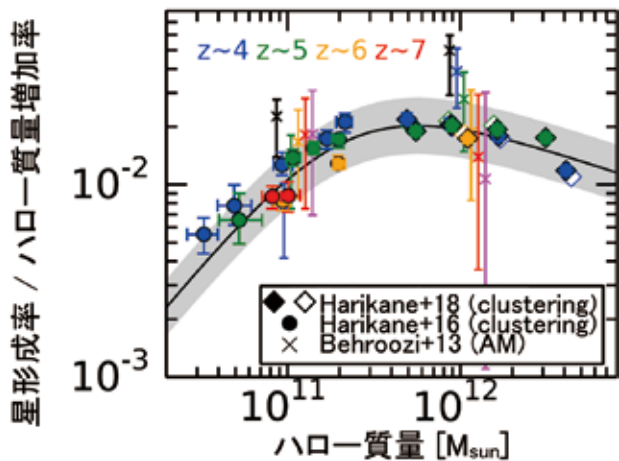


図05 ハロー質量に対する星形成率とハロー質量増加率の比 (Harikane et al. 2018)。ダイヤ印はHSC-SSP探査にもとづくわれわれの結果で、他のデータ点は過去の結果を表しています。黒の実線は観測結果に対するベストフィットな曲線に対応していて、灰色の領域はデータ点の分散を表しています。

また、宇宙線研究所の播金優一さんたちは、LBGの天球面分布から求めた角度相関関数をもとにそれらのダークマターハロー質量 (ハロー質量) を見積もり、ハロー質量と星形成率の間に高赤方偏移で普遍的な関係があることを発見しました (図05, Harikane et al. 2018, PASJ, 70, S11)。大変興味深いことに、この関係と宇宙の構造形成理論を組み合わせると、銀河進化を理解する上で基本的な観測量である宇宙の星形成率密度の過去から現在に至る進化を自然に説明できることがわかりました。

さらに、宇宙線研究所の利川潤さんたちは、LBGの天球面分布をもとに、それらの個数面密度が局所的に高くなっている高密度領域を200箇所以上発見しました (図06, Toshikawa et al. 2018, PASJ, 70, S12)。一度にこれほどの数の高密度領域が発見された結果は今回が初めてです。宇宙の構造形成理論との比較によると、そのような領域の75%以上が現在までに全質量が太陽質量の 10^{14} 倍を越える銀河団になると考えられ、銀河団の形成や進化を明らかにする上で重要な研究対象になると期待されています。現在は利川さんを中心にそれらの赤方偏移を決定するための分光観測や、それらに属する銀河の性質を調べるための多波長観測が進められています。

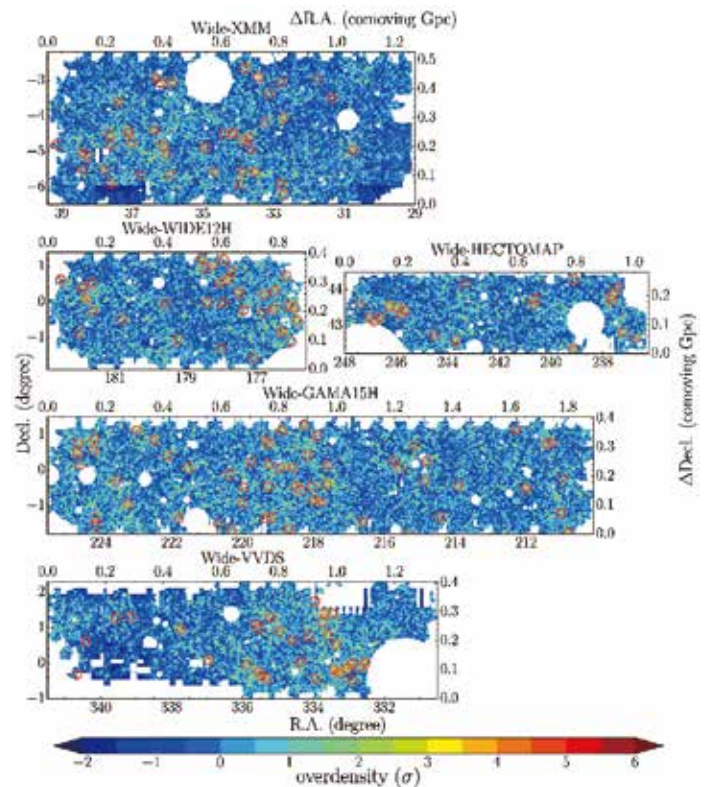


図06 HSC SSP探査にもとづくz~4 LBGの密度超過コントア (Toshikawa et al. 2018)。赤丸で囲まれた領域が高密度領域です。コントアでは赤い色ほど密度超過が大きいかを示していて、白い領域は探査領域の外もしくはマスクされた領域に対応します。

● SILVERRUSHプロジェクトの主な結果

LAE探査については、HSC SSPで取得された狭帯域フィルターの1Gpc²に及ぶ広大なデータをもとに、澁谷さんたちがこれまで最大規模のz=5.7 & 6.6 LAEサンプルを構築しました (Shibuya et al. 2018, PASJ, 70, S14)。特に、Ly α 輝線で空間的に広がっているきわめて珍しいLAE (Ly α プロップと呼ばれます) を多数発見し、宇宙再電離期におけるそれ

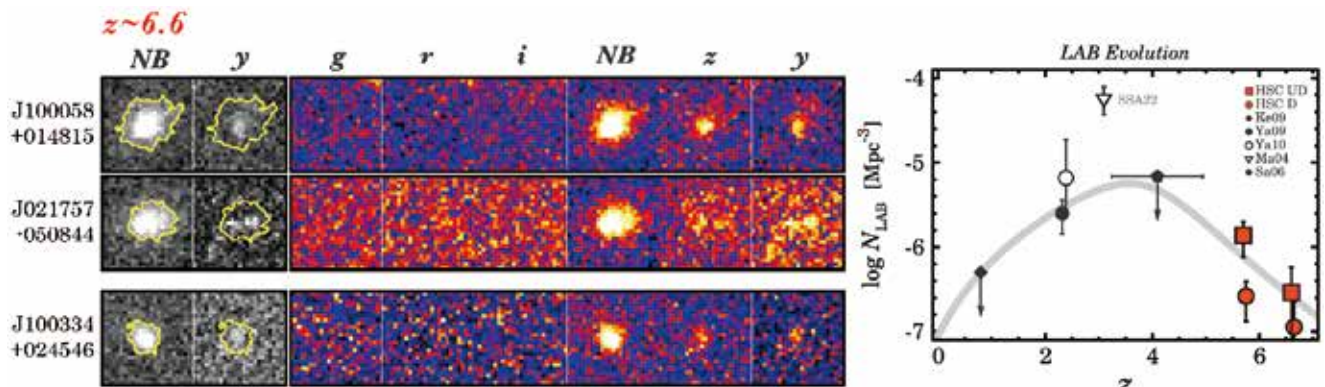


図07 左図はHSC-SSP探査で見つかったLy α ブロップの例です (Shibuya et al. 2018a)。各画像のサイズは4"x4"です。黄色のコントアは表面輝度の2 σ ノイズレベルに対応しています。右図はLy α ブロップの個数密度進化です。赤のデータ点がHSC-SSPにもとづくわれわれの結果で、それ以外のデータ点は過去の結果を表しています。灰色の領域はその進化によく合う関数形のフィッティング結果を示しています。

らの個数密度を初めて導出しました (図07)。その結果、Ly α ブロップの個数密度の進化は、星形成史の関数形と類似していることがわかりました。このことは、Ly α ブロップの起源が銀河の星形成活動と関係していることを示唆しており、その形成過程を理解する上で重要な観測結果となる可能性があります。

また、宇宙線研究所の今野彰さんや大内正己さんたちは、これまでになく高い統計精度でLAEのLy α 光度関数および角度相関関数を求め、それらのz=5.7からz=6.6にかけての進化を明らかにしました (Konno et al. 2018, PASJ, 70, S16; Ouchi et al. 2018, PASJ, 70, S13)。Ly α 輝線は銀河間物質 (IGM) 中の中性水素ガスによる吸収の影響を受けるため、LAEのLy α 光度関数および角度相関関数の進化をもとに、当時のIGM中性度を見積もることができます。観測結果と理論モデルとの比較から、z=6.6でのIGM中性度は15%程度と見積もられました。この結果は、Planck衛星により最近得られた光学的厚みの観測結果と矛盾しないことがわかりました。

さらに、澁谷さんたちは明るいLAEをすばる望遠鏡FOCASやMOIRCS、ケック望遠鏡MOSFIREなどで分光観測しました (Shibuya et al. 2018, PASJ, 70, S15)。過去の低赤方偏移での研究では、Ly α 光度が 2.5×10^{43} erg/sより明るいLAEはすべてAGNを伴っているという結果が報告されていました。しかし、今回z=5.7 & 6.6の明るいLAEでは、AGNでよく見られる電離されたヘリウムや炭素などからの静止系紫外輝線は検出されませんでした。このことは、明るい遠方LAEで見られる強いLy α 放射が、AGN起源でないことを示しています。

● LBG/LAE カタログの応用と更新

二つの*RUSHプロジェクトにより構築されたLBG/LAEカタログは、ありがたいことに多くの方々にご利用され、幅広い分野での成果につながりつつあります。たとえば、愛媛大学の山下拓時さんを中心に進められているのが、超大型干渉電波望遠鏡群 (VLA) によるFIRSTサーベイの20 cmデータとHSCデータを組み合わせて遠方電波銀河およびその周辺環境を調べようとするプロジェクトで、そこで私たちのLBGカタログが活用されています。また、熊本大学の高橋慶太郎さんたちは電波干渉計MWAによる21 cmデータとLAEの相互相関をもとに再電離過程に制限を与えようとするプロジェクトを進めており、そこで私たちのLAEカタログが使われています。

現在、私たちは新たにHSC-SSPチーム内で公開されたS18AカタログをもとにLBG/LAEカタログの構築を進めています。LBGカタログは前回S16Aのものとは比べますと探査面積が3倍以上になっています。LAEカタログは、新たに取得された狭帯域フィルターNB387のデータをもとにしたz=2.2 LAEが追加されます。また、以前のカタログ構築で膨大な作業量を要した候補天体の目視チェックについては、筑波大学の天笠俊之さんや大倉真一希さん、宇宙線研究所の伊藤凌平さんたちが中心となってディープリングを含む機械学習技術を適用することを試みていて、これにより人による作業量が大幅に軽減されると期待されています。S18AカタログはHSC-SSPデータの次の全世界リリースで公開されるものですので、それに合わせて私たちのLBG/LAEカタログも公開できたらと考えています。すでにご存知だった方々も、この記事で知った方々も、もし興味がありましたらぜひお気軽に問い合わせをしていただけたら幸いです。

○謝辞

この記事で紹介させていただいた一連の研究成果はHSC-SSPに携わっている多くの方々の尽力なしには得られませんでした。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。また、一連の研究と一緒に取り組んでいる遠方銀河ワーキンググループおよび*RUSHプロジェクトのメンバーの方々には心から感謝しております。そして、この記事のドラフトに目を通してコメントを送っていただいた天笠俊之さん、伊藤凌平さん、大内正己さん、大倉真一希さん、今野彰さん、澁谷隆俊さん、高橋慶太郎さん、利川潤さん、播金優一さん、樋口諒さん、山下拓時さんに感謝いたします。

- ★02 当初はfake object pipelineという名前でしたが、ソフトウェアの名前にfakeと付けると信頼性を疑われるのではといった意見が出て改名されたという噂を聞きました。
- ★03 提案時はGreat Optical search for DRopout galaxies Using Subaru HSCの略でした。最初に末尾のushを思いついたので、辞書でushで後方一致検索をかけてヒットした中であっただのがこの単語でした。
- ★04 1980年代から連載・放映されている某マンガ・アニメシリーズ。
- ★05 紙面の都合でここで紹介しきれなかった成果も含め、より詳細な解説は天文月報2019年3月号に掲載される予定の大内正己さんの記事にまとめられています。

5 AGN

(活動銀河核)

の観測

その中心部に活発に活動するブラックホールを持つ活動銀河やクエーサーもHSCによって統計的な研究ができるようになってきました。活動銀河核 (Active Galactic Nuclei : AGN) に関連した主な研究成果を紹介します。

HSC-SSP 探査データにもとづく AGN (活動銀河核) の主な研究成果

白崎裕治

(国立天文台 天文データセンター)



●HSC以前の研究成果

AGNは銀河中心に存在する超大質量ブラックホール(SMBH)に物質が降着する際に生じる放射により電波からガンマ線にわたる幅広い波長域で観測されます。その放射光度は宿主銀河の光度を凌駕し、口径数メートルクラスの望遠鏡でも高赤方偏移までの観測が可能であり、最遠方宇宙のプロープとして活用されてきました。一方、その数密度は銀河のおよそ1/100程度であるため、多数のAGNを検出するためには広い範囲に渡ってサーベイ観測を行う必要があります。

可視光観測によるAGN探査がThe Sloan Digital Sky Survey (SDSS) や2dF QSO Redshift Survey (2QZ) によって行われ、赤方偏移毎のAGN光度関数やAGN自己相関関数等が求められました。AGNの光度関数はSMBHの質量分布やSMBHへの質量降着率分布と関係し、その進化の測定はSMBHの成長過程を理解する上で欠かすことができません。また、SMBHはそれを内包する銀河と共に成長することがわかっていますから、銀河の進化モデルに対する観測的制限の一つともなります。AGNの自己相関関数はその空間分布を表す指標の一つであり、どれだけ強く局在化しているかを示す観測量です。この自己相関関数も銀河の進化モデルに対する観測的制限となります。

SDSS等により求められているAGN光度関数は折れ曲がりをもつ二つのべき関数により表されることが分かっており、赤方偏移~6まで測定されています[1, 2]。自己相関関数の結果からは、AGNの分布は一般的な銀河の分布とほぼ一致しており、取り分け高密度な領域に分布しているわけではないことが分かっています[3, 4]。

●HSCによるAGN光度関数

そうした成果が得られている一方で、SDSSの感度では赤方偏移3以上では光度関数の暗い側のサンプルが不足しており、明るい側での光度関数しか測定されていないという問題点が残っていました。光度関数の測定結果からはAGNの個数密度は赤方偏移2-3をピークにそれより遠方、すなわち過去の宇宙へ遡るほど減少していることを示しており、そ

の時期にSMBHの成長が急激に進んだことを示唆します。HSC-SSPサーベイは、そうしたSMBHが急成長する時代におけるAGNの光度関数を、その折れ曲がりの位置よりも暗い側にまでわたって精密に測定することを可能にします。

東北大学の秋山正幸さん達の研究グループは、HSCとSDSSのデータを用いて赤方偏移~4のAGNに対して光度関数の測定を行いました[5]。求められた光度関数はSDSSのみを利用した場合よりも4等級暗い範囲まで達し、折れ曲がりの位置とその前後の光度関数を正確に求めることができています。その結果、光度関数の折れ曲がり光度は赤方偏移2から4までほぼ一定であり、かつその形状を保ったまま数密度のみ減少する、いわゆる純密度進化モデルに従う結果を得ました。

さらに遠方の赤方偏移~6の光度関数については愛媛大学の松岡良樹さん達の研究グループが測定を行っており、その詳細についてはこの後の松岡さんの記事 (p14) をご参照ください。

●HSCによるAGN周辺銀河分布

AGNの自己相関関数については、それをHSCデータのみから精度良く求めることは、サンプル数が不足していることにより困難です。その代わりに、AGNとその周辺銀河との相関、すなわちAGN周辺の銀河分布を測定することにより、SMBHと銀河の進化における広域的相互作用の重要性について検証することが可能です。HSCの銀河サンプルを利用することで、より遠方の宇宙においてそうした研究が可能となります。

筆者等の研究グループは、SDSSにより検出されている赤方偏移0.6~3.0のAGNのうち、そのSMBH質量が比較的大きなサンプル ($>10^8 M_{\odot}$) を選び出し、それらAGNとHSCで検出された銀河との相互相関関数 ξ_{AG} を測定しました[6]。その結果から、AGN周辺における銀河の密度超過度を相互相関距離 r_{AG}^{*1} を用い様々なAGN-銀河サンプルに対して調査しました。求められた r_{AG} は銀河の明るさに強く依存し、銀河の特徴的明るさ M_{λ}^{*2} を越えると急激に値が増加し、最大で

*1 ξ_{AG} と r_{AG} の関係は $\xi_{AG} = (\frac{r}{r_{AG}})^{-\gamma}$ 。rはAGNからの距離。γは1.8とした。

*2 静止系での波長λにおける光度関数が急激に減少を始める絶対等級。

*3 comoving distanceの単位をcMpc, proper distanceの単位をpMpcとする。

*4 現在の所属はMax Planck Institute for Astronomy

40 h⁻¹cMpc³まで達する結果が得られました (図01)。また、このr_{AG}の急激な増加はAGN周辺銀河の特徴的明るさM_{λ,*}が同じ赤方偏移の平均的銀河のそれに比べて明るい方にシフトしていることによるものであることも分かりました (図02)。一方M_{λ,*}より暗い銀河とのr_{AG}はほぼ一定で~5.5 h⁻¹cMpcとなり、平均的な銀河数密度に相当する環境であると言えます。

明るい銀河との相関で得られたこれだけ大きなr_{AG}値は既存の観測結果と大きく矛盾するおそれがあります。というのも、この赤方偏移におけるAGNと銀河の自己相関関数ξ_{AA}、ξ_{GG}はすでに測定されており、AGNの自己相関距離はr_{AA}~6-8 h⁻¹cMpc [3, 4]、明るい銀河の自己相関距離はr_{GG}~10 h⁻¹cMpc [7, 8]と得られています。AGNと銀河が直接的な相関を持たないであろうダークマターハロースケールを越える距離(>1 cMpc)においては、ξ_{AG}²=ξ_{AA}ξ_{GG}が近似的に成り立ち、r_{AG}はr_{AA}またはr_{GG}を越えない値となりますが、得られた値はそれらを大幅に上回る値となっています。

この矛盾を解決するには、この解析に用いたAGNと明るい銀河の間には強い相関がある、すなわち何らかの共通の現象によって同時に発生したものと考える必要があると考えています。共通の現象としては、直接AGNが数cMpcも離れた銀河に直接作用して星形成を促すということは考えにくいので、銀河団や銀河グループ同士の衝突がひとつの可能性として考えられます。これにより爆発的星形成が複数の銀河で同時に発生し、一方はAGNが活動的な段階、もう一方は星形成が活発な段階で観測されたとすると定性的には説明がつけられます。

さらに遠方の赤方偏移~4のAGNについての銀河との相互相関関数の測定が東北大学のHe, Wanqiuさん等の研究グループにより、また同様の赤方偏移におけるAGNと原始銀河団候補との相互相関解析が総研大の内山久和さんの研究グループによって行われています。それらの結果の詳細についてはこの後のHeさん、内山さんの記事(p11~13)をご参照ください。

これまでのSDSSならびに今回のHSCによるAGN周辺の銀河分布の測定によると、AGNは特別銀河密度の高い領域に存在するわけではないことが分かっていますが、総研大の尾上匡房さん¹⁴等の研究グループは、AGNのペアに着目し、その周辺の銀河密度の測定を行いました[9]。SDSSで検出されたAGNのうち、射影距離で2 pMpc以内の距離にペアをもつAGNを選択し、その周辺のHSCにより検出された銀河の平均数密度からの超過度を求めました。その結果、赤方偏移3.4の範囲で見つかった二つのペアはいずれも平均密度より5σ高い高密度領域に存在することがわかりました。また、赤方偏移~1において見つかったペアについてもおよそ20%のペアについて平均数密度より4σ以上の高密度領域に存在することがわかりました。

● HSCによるAGN多波長観測

HSCによる可視光観測データを他の波長域における観測データと組み合わせることにより、HSCデータのみではできない研究も進められています。京都大学所属の鳥羽儀樹さん達の研究グループは、赤外観測衛星WISEによるデータとHSCのデータを組み合わせることにより、ダストに覆われ

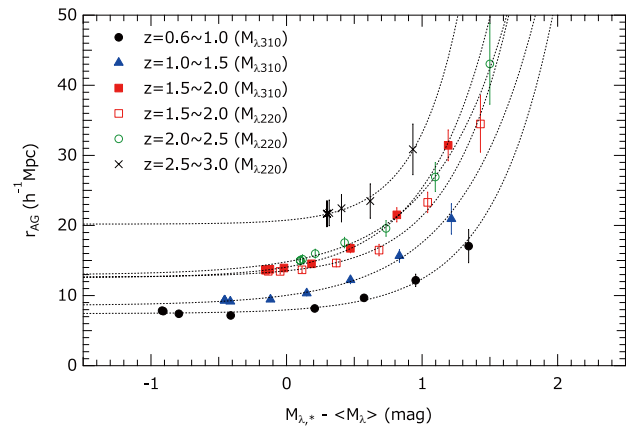


図01 AGNと銀河の相互相関距離と銀河サンプルの明るさ等級との関係。銀河サンプルは与えられた等級より明るい銀河から構成され、各赤方偏移グループ毎に明るさのしきい値を変えたサンプルに対して相関距離を求めた。横軸は銀河の特徴的明るさM_{λ,*}と銀河サンプルの明るさ等級の平均値の差。各マーカーは図中の凡例に示した赤方偏移における結果。M_{λ,310}、M_{λ,220}はそれぞれ静止系310 nm、220 nmの波長域における明るさ等級によりデータ選択をした結果を意味する。

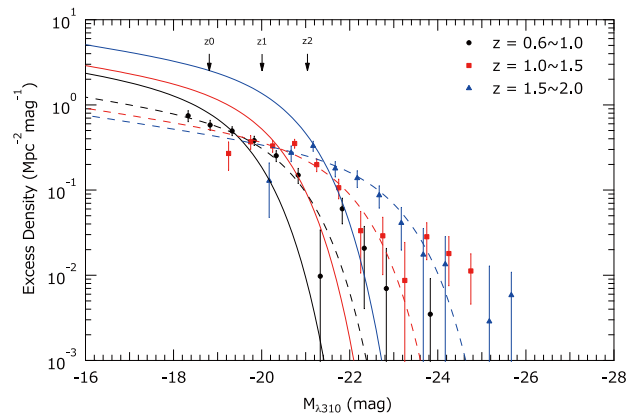


図02 AGN近傍(射影距離0.2-2 cMpc)における銀河の明るさ分布。それぞれのマーカーは図中の凡例で示した赤方偏移における結果。実線は対応する赤方偏移における銀河の光度関数を縦軸関数を縦軸とした関数。そのスケールファクターはそのサンプルに対する相互相関関数から期待される値。破線はM_{λ,*}とφ_{λ,*}をフリーパラメータとしてSchechter関数でデータ点にフィットした結果。いずれの赤方偏移においてもAGN近傍銀河のM_{λ,*}はその平均的値よりも明るいほうにシフトしている。

可視では暗く、赤外では明るい天体Dust-Obscured Galaxies (DOGs)を多数検出し、その自己相関関数を求めています[10]。プリンストン大学のGouldingさん達の研究グループは、HSCとWISEによるデータを利用して、AGNのホスト銀河は衝突合体の兆候がある割合がAGNを持たない銀河に比べて高いことを示しました[11]。愛媛大学の寺島雄一さん達の研究グループは、HSCデータにX線衛星XMM-Newtonによるデータと赤外観測衛星Spitzerによるデータを加え、可視で暗くX線で明るいダストに覆われたAGNのサンプルを多数検出し、その性質を調べました[12]。国立天文台の泉拓磨さん達の研究グループは赤方偏移>6の比較的低光度のAGNについてALMAによってホスト銀河の観測を行い、それはほぼ星形成主系列上あるいはそれより若干星形成率が低下した状態にあることがわかりました[13]。また、SMBHとホスト銀河の質量比は近傍宇宙における測定量とほぼ一致することも示しました。

以上紹介した研究成果以外にもフォローアップスペクトル観測の結果を利用した研究や多波長データを利用した研究等が続々と産み出されつつあります。

HSCで探るクェーサー周囲環境

内山久和

(総合研究大学院大学)



宇宙を見渡すと、銀河が密集した高密度領域が観測されており、特に将来的に銀河団になると予想される領域は「原始銀河団」と呼ばれています。原始銀河団では銀河同士の合体が起こり、その銀河中心にある超巨大ブラックホールにガスが降り積もり、その際ガスの莫大な重力エネルギーの解放により、「クェーサー」と呼ばれる非常に明るい天体が発現すると考えられています。従ってクェーサーは原始銀河団に存在するということが期待されますが、その一方で、クェーサーは莫大なエネルギーを辺りに撒き散らしており、周辺の銀河形成を阻害することが数値シミュレーションで予想されています。つまり、クェーサーは自身の明るさによってその周辺を逆に低密度領域にしていくわけです。

したがって、クェーサーがいったいどんな密度環境に存在するのかを観測的に捉えることは、宇宙の進化や今後辿るその運命を正確に予想することに対して必要不可欠です。過去の研究によれば、いくつかのクェーサーは原始銀河団に存在していることが報告されていますが、その一方で、クェーサーが存在しない原始銀河団も見つかっています。しかしながら、クェーサーならびに原始銀河団は時代を遡れば遡るほどに非常に稀であるために、クェーサーとその周囲環境について統計的な議論に至っておらず、全く分かっていないのが現状です。そこで、我々の研究チームはHSCの広視野撮像観測装置の能力を利用することで、クェーサーの謎に挑みました。

まず、大事になってくるのが原始銀河団のサンプル数を拡大することです。上述したように原始銀河団は極めて稀であり、 $z\sim 3$ より昔の時代ともなると10個程度しか見つかりません。そこでHSCによる大規模探査HSC-SSPのデータを利用することで、そのサンプル数拡大を試みました。HSCは今現在稼働している撮像装置の中で最も広い視野を持ち、かつ、極めて遠い天体からの光を捉えることができるという点において他の追随を許さない、この研究には最適な装置です。

ただ、HSC-SSPは進行中の観測ですので、天体カタログが更新されるたびに問題点が少なからず出て来ます。更新ごとに天体カタログの妥当性を検証し、原始銀河団カタログを作成するという作業が肉体的にも精神的にもとても大変でした。観測が全て完了するまで論文として発表できないのではないだろうかと不安で涙を流しそうになったことが多々ありました。そのような悲境を乗り越え、我々は世界で初めて $z\sim 4$ の宇宙において原始銀河団を179個見つけることができました。これは当時知られていた原始銀河団サンプル数の10倍以上に匹敵します(図01)。

さてようやく、我々はクェーサーがどのような環境に存在するかという前人未踏の謎に挑戦することができるわけです。我々の研究チームは構築された179個の原始銀河団と同じ時

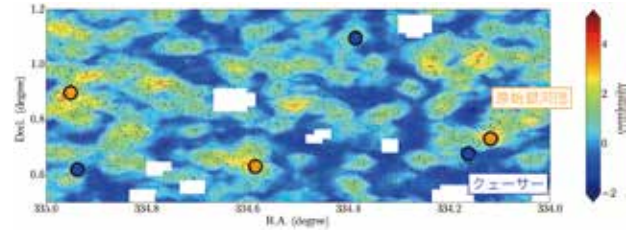


図01 z=4の時代での銀河の分布。色等高線は銀河数密度を表し、赤い程、高密度な領域を示しています。黒点は銀河の位置を表します。オレンジ丸は将来的に銀河団に成長すると予想される原始銀河団であり、青丸はクェーサーを表しています。

代に存在するクェーサーを、スローン・デジタル・スカイサーベイによって見つかったクェーサーのカタログから抽出することにより、統計的にクェーサーが存在する環境を特徴付けることを試みました。その結果、驚くべきことにクェーサーは銀河とほとんど同じ環境に存在していること、ならびに今回のクェーサーサンプルのうち原始銀河団に存在するものは全体のたった1.3%のみであるという結果を得ました(図02)。この結果がパソコンの画面に映し出された時、「これはおかしい、また何か間違ったかな?」と何度もコードを見直したことを覚えています。というのも、大多数のクェーサーが銀河合体によって生じるという従来の有力仮説を覆すものだったからです。

ところが、コードの間違いはなく、さまざまな検証を行なった結果、どうやらこれは間違いのないぞという確証を得るに至りました。つまり、大部分の銀河のそれぞれが進化の過程でクェーサーという段階を辿るのではないかという仮説を統計的に初めて提唱することに至ったわけです。

HSCという広大な目を通して我々は天文学の大きな謎を一つ紐解いて見いだすことができました。それはHSC-SSPメンバーの協力はもちろんのこと、望遠鏡に携わる全ての方々の着実な一歩の積み重ねによって得られたものです。そんな努力の結晶に射す光を覗き込み、胸を高鳴らせ、今もなお

着実な一歩を進めています。

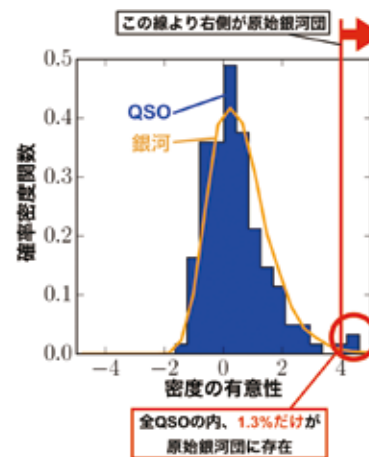


図02 クェーサーの存在する場所での密度の分布(青のヒストグラム)。一方で銀河が存在する場所の密度の分布はオレンジ線で示されています。両者の分布は有意に異なりません。全クェーサーの内、1.3%だけが原始銀河団に存在しています。

Exploring Massive Black Holes with Subaru/HSC

すばる/HSCで巨大ブラックホールを探る

He Wanqiu

(東北大学)



As you may know, there is a black hole of 4 million solar masses at the center of our Milky Way. Actually, in our local universe, it is ubiquitous to find those massive black holes at the center of massive galaxies. As the normal black hole born from “dead” massive star only has several tens solar mass, how can those huge “monsters” be formed in our universe?

Obviously, the black hole can become more massive if gas falls onto it, and we call this process as “accretion”. The mass falling onto the black hole will then release their large gravitational energy as the electromagnetic emission, and the central region during this phase is called an active galactic nuclei. The active galactic nuclei can be very luminous, enabling us to probe them in very distant/early universe.

The studies on the number density evolution of active galactic nuclei show a quite surprising result—active galactic nuclei are more abundant in the early universe (e.g., Ueda et al. 2014), which suggests the mass assembly of massive black holes mainly occurs in the early universe! Then the question becomes what is the mechanism to trigger the frequent gas inflow onto the black hole in the early universe?

Major merger can be the scenario to trigger the gas accretion onto the black holes. This scenario assumes close galaxies will interact with each other due to the gravitational force, and finally merge into one massive galaxy. The strong interaction between the galaxies with similar mass can disrupt the original morphology of the galaxies, and transfer the gas toward the center (e.g., Kauffmann & Haehnelt 2000, Hopkins et al. 2007, 2009).

If the major merger plays an important role in the black hole growth at the early epoch, quasars are expected to reside in the most dense regions with high merger rate, since they are the most luminous population among the active galactic nuclei, i.e., under the rapid gas accretion. The environment of quasars in the early universe thus becomes a powerful method to verify the merger's role in the black hole growth. However, there is a large diversity among previous studies on the environment of quasars in the early universe. Some found an exact over-dense environment around quasars (e.g., Orsi et al, 2016), while others found quasars reside in an average- or even under-dense regions (e.g., Uchiyama et al. 2017). Here, the problem is that the quasar sample in different works can be quite different in size and luminosity range. Most of their quasar samples are highly biased to the most luminous ones, which cannot fully represent the typical black hole population in the early universe. To settle the discussion, a large quasar sample covering a wide luminosity range is necessary. Thanks to the wide and deep imaging from the Subaru Hyper Suprime-Cam strategic survey program (HSC-SSP), we can search for a large quasar sample in the early universe with a wide luminosity range for the first time!

もうご存知と思いますが、天の川銀河の中心には 4×10^6 太陽質量のブラックホールが存在しています。最近では、質量の大きな銀河の中心に超大質量ブラックホールが見つかることがしばしばです。しかし恒星の進化の末期に生まれた普通のブラックホールの質量は太陽質量の数十倍でしかありません。いったい銀河中心の「モンスター」ブラックホールはどのように形成されるのでしょうか。

当然ですが、ガスがブラックホールに落ちることにより質量が増えます。これは「降着」(accretion)と呼ばれています。ブラックホールに落ちる物質は大きな重力ポテンシャルのエネルギーを電磁波エネルギーに変えて放出します。この現象が活動銀河中心核 (active galactic nuclei : AGN) として観測されます。とても明るいAGNもあるので、遠い宇宙 (遠い昔) も観測できます。

AGNの数密度の進化を調べる研究 (例 : Ueda et al. 2014) で、昔の宇宙にはAGNがもっと数多く存在したという意外な結果が明らかになりました。これは、超大質量ブラックホールの質量増加が基本的に昔の宇宙で起こっていたことを示します。とすると、かつての宇宙で、ガスがどのようなきっかけでブラックホールに大量に降着していたのかが問題となります。

そのきっかけは、メジャー・マージャー (major merger = 大規模合体) なのかもしれません。このシナリオでは、2つの近接する銀河が引力でお互いを引っ張り合って、最終的に1つの大きな銀河に合体します。元の2個の銀河が大体同じ大きさなら、強い引力が銀河の形を曲げて、中心へガスを移動させるのです (例 : Kauffmann & Haehnelt 2000, Hopkins et al. 2007, 2009)。

メジャー・マージャーが、本当に昔の宇宙でブラックホールの成長に大切な役割を果たしたとすれば、銀河合体が多い高密度環境にクェーサーも数多く見つかるはずですが、クェーサーが急速なガス降着を伴っているAGNの中で、最も明るい天体だからです。そこで、昔のクェーサーの周辺の環境が分かれば、ブラックホールの成長に銀河合体がどのくらい関与したのかがわかります。しかし、今まで論文では、結果に違いがありました。ある論文 (例 : Orsi et al, 2016) では、クェーサーの周りに高い銀河数密度が観測され、別の論文 (例 : Uchiyama et al. 2017) では、平均程度かあるいは低い密度が示されました。ただ、論文によって、クェーサーのサンプル数や明るさの範囲が異なります。多くのサンプルは明るいクェーサーに偏るので、昔の典型的なブラックホールの実態を知るには、数が多くて、明るさの範囲が広いサンプルが必要となります。それがHSC-SSPによって初めて可能となりました。

In this study, based on the g-band dropout color and stellar morphology, we selected ~ 1000 $20 < i < 23.5$ quasar candidates at $z=4$ from the Wide layer of the HSC-SSP, which are ~ 2 mag fainter than the previous studies. The quasar luminosity function estimated by the sample further suggests our quasar candidates can be the typical quasar population at the epoch, since they are around the knee of the luminosity function, and the faint end of the luminosity function tends to be flat. Moreover, thanks to the wide coverage of the Wide layer, we are also able to locate a large enough spectroscopic-confirmed luminous quasar sample at the same epoch from the Sloan Digital Sky Survey DR12 on the survey area, and to verify their environment. We show a sub-region of the Wide layer in Figure 01. The red stars are our quasar candidates, the black ones are the luminous quasars, and the color contours are the density map constructed from the star forming galaxies at the same epoch.

As shown in Figure 02, we found the low-luminosity quasars do not prefer residing in the dense regions as their surrounding over-density significance is just slightly higher than zero, i.e., they have similar environment to the star forming galaxies at the epoch. Thus, the merger scenario may not play an important role in the early growth of typical black holes. As previous studies found a strong quasar-quasar clustering for the luminous quasars at the epoch (e.g. Shen et al. 2009), our result shows a hint on a luminosity dependence of the quasar clustering in the early universe- the evolution track between the most massive and smaller black holes may be different in the early time and converge later! We will carry out the spectroscopic follow-up observation to verify it.

Another interesting result is we found the luminous quasars at the epoch are also not tightly associated with the most dense regions, especially at their close vicinity (~ 1 Mpc). This result is contradictory to the strong auto-correlation of the luminous quasars found in Shen et al. (2009), and we found the deficit of galaxies around the close vicinity of luminous quasars can be the reason. At the final stage of merger, the feedback from the central massive black hole is thought to be quite efficient to prevent the falling gas and quench the star formation of the host galaxy (e.g., Ota et al. 2018). On the other hands, other works recently detected obscured companions around the luminous quasars at $z\sim 4.8$ (e.g., Trakhtenbrot et al. 2018), which can also be the reason of no tight correlation to the over-dense regions of luminous quasars found in our work. Further sub-mm observation is necessary to clarify the origin of the deficit.

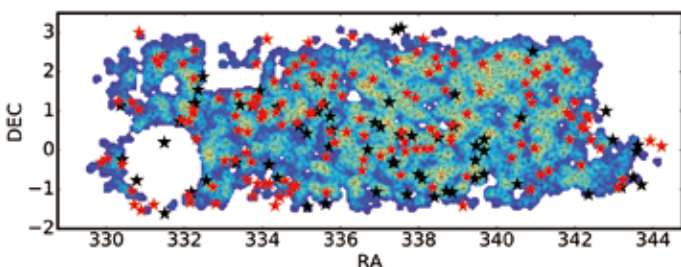


Figure 01: "A sub-region of the distribution of our HSC-selected low-luminosity quasars (red stars) and SDSS-selected luminous ones (black stars) at $z=4$ "

図01: $z\sim 4$ のある領域でHSCが見つけた暗いクエーサー(赤い星)とSDSSが見つけた明るいクエーサー。

今回の研究では、HSC-SSPワイドのレイヤーから、gバンド・ドロップアウトのカラーとその形態をもとにして、 $z=4$ で $20 < i < 23.5$ のクエーサー候補を1000個ほど見つけることができました。以前の研究と比べて、2等級程度より暗い天体を含むサンプルです。また、クエーサーの光度関数の形から、このサンプルはこの時代のクエーサーを代表するサンプルと考えてよいことも分かります。そして、ワイド・レイヤーは Sloan Digital Sky Survey DR12から分光で確認された明るいクエーサーを十分に含むほど探査面積が広いので、付近の環境の確認ができます。図01にワイド・レイヤーの一部を示します。赤い星印が今回の研究のクエーサー候補で、黒い星印が明るいクエーサーです。背景は同じ時代の星形成銀河の密度を示しています(青からオレンジに向かって密度は高まります)。

図02を見ると、暗いクエーサーは高い密度の領域に分布しているとはいえないようです(青色の密度数値0が、その時代の星形成銀河の平均密度です)。とすると、銀河合体が昔のブラックホールの成長にあまり貢献していないのかもしれませんが。以前の研究(例: Shen et al. 2009)では、この時代には明るいクエーサーは群れを成していることが見つかり、今回の研究結果は、クエーサーの明るさによって、生成環境が異なることを示唆しています。昔は、小さなブラックホールと大きなブラックホールの進化はそれぞれ違って、その後収束したのかもしれませんが。今後の分光観測による確認が必要です。

もうひとつの興味深い結果は、明るいクエーサーの存在と最も高い密度環境との関連が、特に1Mpc程度の近接した領域において、さほど強くないことです。この理由として明るいクエーサーの近くに銀河が不足していることが挙げられます。銀河合体の最終段階で中心の超大質量ブラックホールのフィードバックによって、ガスの落ち込み運動がストップし、銀河の星形成活動を停止させてしまうと考えられるのです(例: Ota et al. 2018)。一方で、最近の論文で、 $z > 4.8$ のクエーサーの周りに隠れている天体の発見も伝えられました(例: Trakhtenbrot et al. 2018)。これも、本研究で見つけた星形成銀河の密度の高さとクエーサーの間に強い関係がないという結果を説明できます。銀河の不足の原因を明らかにするために、今後はサブミリ波の観測が必要です。

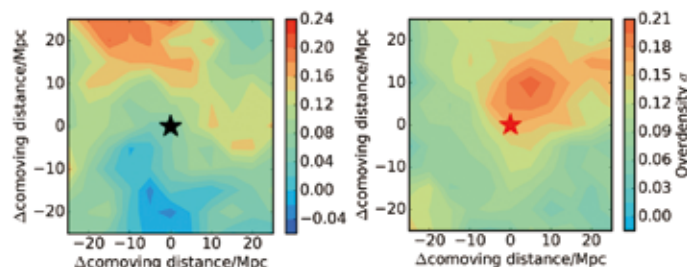


Figure 02: "The stacked average environment around the high- (left panel) and low-luminosity (right panel) quasars at $z=4$. The color suggests the over-density significance."

図02: 明るいクエーサー(左)と暗いクエーサー(右)のサンプルから計算された平均環境。青色の密度数値0が、その時代の星形成銀河の平均密度です。

遠方クエーサーの探索

松岡良樹

(愛媛大学)



HSC & AGNというキーワードで記事を書いて下さいとの依頼は引き受けたものの、よく考えたら天文月報に似たような記事を書いたばかりでした。どうか詳しくは月報2018年11月号をご覧ください。ここではその記事に書かなかったような雑感を、いくつか書いてみたいと思います。

さて、私はHSCのSSPデータを使って、遠方クエーサーを探索しています。もともとこの話が舞い込んできたのは2010年頃、愛媛大学の長尾 透さんからの誘いでした。長尾さんたちは2000年代前半から、Suprime-Camによる広域サーベイをやるというSWANS (Subaru Wide-field AGN Survey) 計画を構想しており、何度かインテンシブ・プログラムにも応募していました。この活動が、後に起こってくるHSCの開発とそれによる広域サーベイ計画へと合流していきます。したがってSSPが始まるかなり前から、日本のAGNコミュニティでは広域サーベイを前提としたグループの拡大が行われており、その中で私にも声がかかったのだと思います。HSC-SSPのAGNグループは今でもよく連携が取れていると言われますが、その背景にはこのような歴史があるわけです。私はその前にオーストラリアで同様のクエーサー探索に携わり、見事に敗北した後だったので最初はちょっと気乗りしなかったのですが、なんだかんだで参加することになりました。

SSPのデータは、ソフトウェアチームの方々の計り知れぬ努力によって、一通り解析が終わってから研究者に届けられます。したがって私たちがデータを手にするときには、遠方クエーサーは検出天体カタログにリストされ、画像にも綺麗に写っています。しかしデータには他にも膨大な数の天体が含まれるので、欲しい天体のみをいかに効率的かつ完全に抜き出せるかが勝負になります。詳細は述べませんが、私たちはベイズ統計に基づく確率的選択法というものをを用いて、遠方クエーサー候補を拾い上げています。この手法は非常に強力で、抜き出された候補天体の約70%が、その後の分光観測によって本当に遠方クエーサーであると判明しています (図01)。なぜこんなに高い成功率になるのか、競合チームをはじめ色々な人から訊かれますが、実は私たち自身にもその理由はわかっていません。私はずさんな観測者なのであまり緻密な理論を構築することを好みませんが、それにしても質の良い観測データに正しい理論的手法を適用すれば、これくらいの成功率にはなるということなのかもしれません。一方でこれだけ誤同定が少ないと、逆に探索の完全性が心配になるのですが、無視できない数の遠方クエーサーを選び落しているという兆候は今のところどこにも見られていません。

細かい選択手法は別にしても、このSSPが遠方クエーサー探索の分野で大きな成功を収めた要因の1つとして、yバンドの存在が欠かせません。歴史的に遠方 (赤方偏移 $z \sim 6$) クエーサーは、可視光 i, zの2色でドロップアウト天体とし

て選択し、近赤外線Jバンドで測光してから、3色で最もクエーサーらしいものを分光する、という手順で発見されてきました。問題は中間ステップに当たるJバンド測光で、そのために半年に一度プロポーザルを書き、観測をする必要があります。当然曇る時もありますし、Jを撮ってみたらどれもクエーサーらしくなく、i, zのドロップアウト選択を見直さなければならない場合もあり、そうなるプロポーザルからやり直します。スピード感を持って試行錯誤することが難しいわけです。一方でHSC SSPの場合は最初から i, z, yの3色があるので、十分に試行錯誤を繰り返して候補天体を確定し、いきなり分光観測に臨むことが可能でした。これは非常に大きかったと思います。また赤方偏移 $z > 6.5$ のクエーサーになると、zバンドではドロップアウトして見えないのでyバンドのみが頼りです。すでにSSPのデータから、 $z \sim 7.1$ のクエーサーが発見されています。

SSPサーベイはまだ道半ば、私たちの遠方クエーサー探索もまだまだ続いていきます。クエーサーの最遠記録は2017年に $z = 7.54$ となり、HSCで見えるぎりぎりのところまで後退してしまいましたが、この記録更新も含めた多くの成果をこれからも生み出していきたいと考えています (図02)。



図01 HSC-SSPデータに写った遠方クエーサーの例。

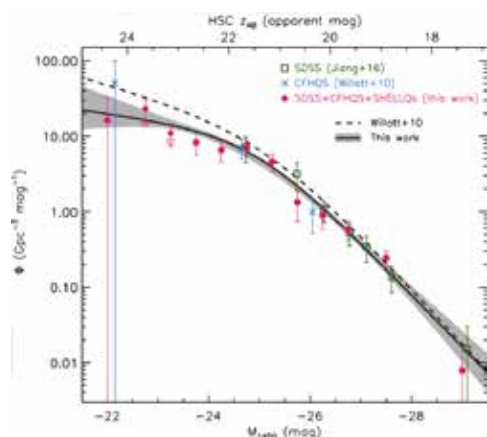


図02 HSCデータから導出された赤方偏移 $z=6$ のクエーサー光度関数 (赤い丸印)。先行するSDSS (緑の四角)、CFHT探索 (青いバツ印) よりも低光度まで精度よく決まっている。

6 重力レンズ銀河の観測

強い重力レンズ現象はかなり珍しいものですが、広い視野をサーベイするHSCはその発見に一役買っています。また、弱い重力レンズ現象を使った宇宙論研究はHSC-SSPの主な科学目標として設定された重要分野です。

Gravitational Lensing and HSC 重力レンズ効果とHSC

Rachel Mandelbaum
(Carnegie Mellon University)



Einstein's theory of General Relativity tells us that the paths taken by light rays traveling through the Universe can be affected by the presence of massive objects, which distort space-time itself. Gravitational lensing is the deflection of light from distant quasars or galaxies due to the mass in more nearby objects such as galaxies or galaxy clusters (gravitationally bound systems of many galaxies). One especially important feature of gravitational lensing is that it is caused by all matter: not just normal matter but also dark matter, which we cannot directly see with our telescopes. This fact makes gravitational lensing one of the best ways to understand the way dark matter is distributed throughout our Universe, including for example how much dark matter surrounds typical galaxies in so-called "dark matter halos." Gravitational lensing effects can be seen in images from our telescopes in a few different ways.

The most dramatic manifestation of gravitational lensing is known as strong gravitational lensing (or "strong lensing"), wherein a more distant object actually appears in multiple locations on the sky, or as a highly distorted shape such as a ring. Strong lensing occurs on the very rare occasions when the mass in the more nearby object is very high and the more distant galaxy is almost directly behind the more nearby one. See [Figure 01](#) for an example of strong lensing in an image from HSC. The appearance of the multiple images in a strongly lensed system tells us about the amount and spatial distribution of mass in the system that is causing the lensing, including the dark matter. For cases where the lensed object is a quasar, which has brightness that varies with time, measurements of the time delays between the different images can be used to measure the differences in distances traveled by light rays that take different paths through space-time, which can tell us not only about the matter in the lens but also about how the Universe has expanded as a function of time.

In contrast, weak gravitational lensing ("weak lensing") occurs even when the more distant galaxy is not directly behind the more nearby one. As a result, only one image of the lensed galaxy appears, but its brightness, position, shape, and size are all slightly changed by the lensing effect. Weak lensing cannot be visually identified since we do not know the original brightness, position, shape or size of the galaxy; however, by measuring coherent patterns in the shapes of large numbers of galaxies (millions!), we can measure the weak lensing effect. This is illustrated

アインシュタインの一般相対性理論によると、重い天体が時空自体をゆがめて、宇宙空間を伝わる光の通り道に影響を及ぼします。重力レンズ効果と言うのは、手前の銀河または銀河団（たくさんの銀河が集まった領域）の重力が、背景にあるクェーサーや銀河からの光を曲げてしまう現象です。大切なポイントは普通の物質に限らず、望遠鏡で直接観測できないダークマターも含む全ての物質が重力レンズを生み出す点です。そのため、直接観測できないダークマターが宇宙の中でどのように分布しているか（例えば、銀河の周辺に広がるダークマターハローにどのように分布しているか）を探る上で、重力レンズは最良の方法の一つと言えます。以下で重力レンズ効果がどのように望遠鏡で撮られた画像（イメージ）に現れてくるかを見ていきましょう。



Figure 01: HSC image of a location with a highly significant dark matter halo detected through the weak gravitational lensing technique. This halo is so massive that some of the background (blue) galaxies are stretched tangentially around the center of the halo. This is called strong lensing. (Credit: NAOJ)

図01 弱い重力レンズ効果によって発見された確度の高いダークマターハローを含むHSCのイメージ。中心の銀河のハローの周りに背景の銀河の光（水色のイメージ）が表れています。中心銀河がとても重いので、背景の銀河は中心銀河をかこむ円の接線方向に伸びて観測されます。これが強いレンズ効果と呼ばれる現象です。（クレジット：NAOJ）

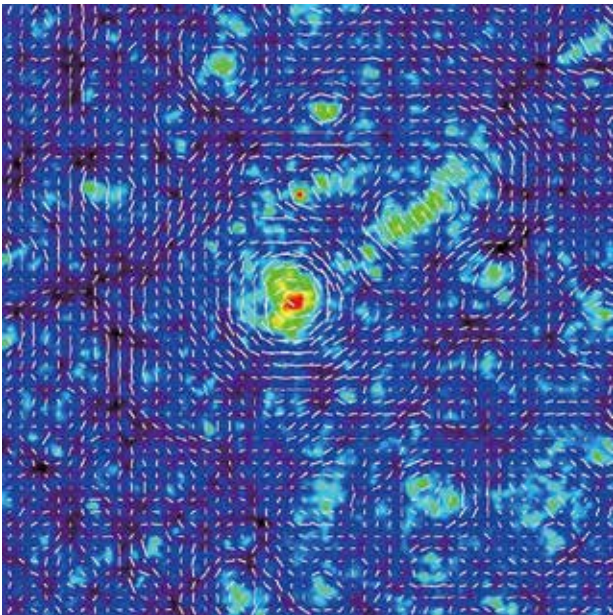


Figure 02: The color scale shows the matter density in a simulated universe, and the lines show the orientation a background galaxy would have if it was gravitationally lensed by the matter field. The fact that the lines show patterns associated with the density field in the Universe is what enables us to measure weak gravitational lensing. (Credit: Takashi Hamana)

図02：色はシミュレーションによる物質密度を表し、線はレンズ効果の影響を受けた場合の背景銀河のイメージに表れるゆがみの方向を示します。線のパターンと密度との関係がわかります。これによって、弱いレンズ効果の観測でダークマターの調査が可能となります。(クレジット：浜名 崇)

in Figure 02. Measuring weak gravitational lensing tells us how matter (including dark matter) is distributed throughout our Universe, including its clumpiness due to its gravitational attraction, which causes small clumps to grow into bigger ones over time. This tendency of matter to clump together over time is counter-acted by the expansion of the Universe, which draws distant objects farther apart. As a result, weak lensing is an excellent way to measure how the Universe's expansion has changed with time, including the effects of dark energy (which causes the Universe's expansion to accelerate over time). Studying weak lensing therefore teaches us a great deal about dark matter and dark energy, which together dominate over the effects of normal matter.

One of the challenges in measuring weak lensing is the need to average over the shapes of a very large sample of galaxies. For this reason, the HSC survey with the Subaru Telescope is particularly powerful for weak lensing measurements. The Subaru Telescope provides very deep images of the distant Universe with very sharp image quality compared to most telescopes on the ground, which means that even in a small area of sky it is possible to precisely measure the shapes of many galaxies. The HSC instrument can see a large patch of sky all at the same time, so it can efficiently cover a large area of the sky in a reasonable amount of time. Between the deep images, excellent image quality, and large area coverage, HSC is currently the best ground-based instrument for weak lensing measurements.

The light that we see with our telescopes has to pass through the Earth's atmosphere, the optical system of the telescope, and is finally measured on CCDs in HSC. All of these steps can introduce apparent distortions in galaxy shapes that are comparable to or even larger than the weak lensing effect that we wish to measure. Hence, another difficulty in weak

最も目立つ重力レンズが「強い重力レンズ効果」です。この効果によって、背景の天体のイメージがいくつかに分かれて別の領域に表れたり、その形がリング状になったり、さまざまにゆがんだ形になって観測されたりします。強い重力レンズは、手前の天体が特に重く、背景の天体がちょうどその真後ろに位置する条件が必要なので、数は多くはありません。図01は、強いレンズ効果を表すHSC画像の1つです。強いレンズ効果で見える複数のイメージの形から、手前の天体の物質の量とその分布の情報を知ることができます。背景の天体が時間変化を伴うクェーサーなら、複数のイメージの時差を測れば、それぞれの光路の長さの違いも分かります。このデータから、物質分布のみならず、膨張宇宙の歴史も調べることができます。

一方、「弱い重力レンズ効果」は、背景の銀河が手前の銀河のちょうど後ろからずれていても観測できる現象です。しかし、個々の銀河に現れる弱い重力レンズによる形状の変化は微小であるため、元の銀河の明るさや場所、形、大きさなどをあらかじめ知らなければ、弱い重力レンズ効果が表れているかどうかを知ることができません。とはいえ、数多くの(数百万レベルの)銀河の形を測って、そのパターンを統計的に調査すれば、弱いレンズ効果を発見できます。図02をご覧ください。弱いレンズ効果から、物質(ダークマターも含む)の分布のようすがわかります。特に面白いのは引力で集まる物質の塊です。時間が進むと物質が集積することによって、小さい塊が段々と大きな塊へと成長していきます。一方、宇宙の膨張は物質間の距離を拡大して、物質が引力により集積することを邪魔します。そこで、弱い

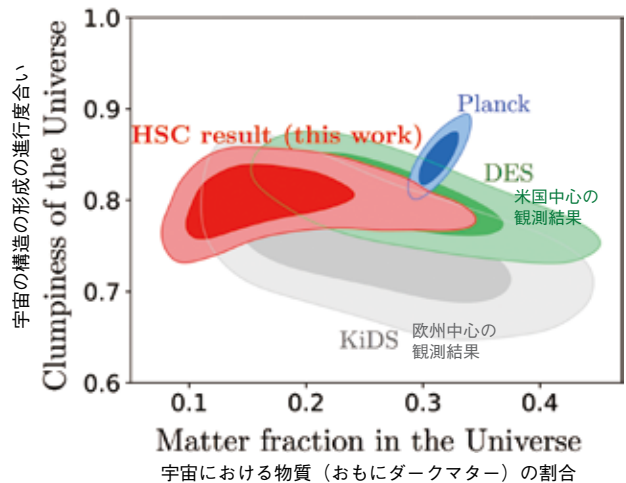


Figure 03: The cosmological constraints on the fractional contribution of matter to the energy budget of the Universe (rest of it corresponds to dark energy), and the clumpiness of the matter distribution today, as inferred from the analysis of the 3D dark matter map. The results of the clumpiness of the matter distribution from HSC observations of the distant Universe using weak gravitational lensing are consistent with results from other similar observations (DES and KiDS) of the nearby Universe. The results from the cosmic microwave background observations reflecting the Universe's infancy obtained by the Planck satellite are shown in blue. (Credit: HSC Project)

図03：物質が宇宙全体のエネルギーに占める割合(横軸)とその分布(構造形成の進行の度合い)について、ダークマターの三次元地図から推定した制約条件を示しました。HSCの遠い宇宙の弱いレンズ効果の観測から導き出した条件は、近傍宇宙の観測(DESやKiDS)と合っています。宇宙の最初期のようなすを表すPlanck衛星のCMB(宇宙マイクロ波背景放射)観測は、青で描かれています。(クレジット：HSCプロジェクト)

lensing measurements is removing the effects of the atmosphere, telescope, and instrument on the observed galaxy shapes, so as to accurately measure shape distortions due to lensing. An important part of any weak lensing measurement is testing the shape measurements to ensure they are free of biases. We have a few ways of doing this, some using real data and others using simulations. For example, by making fake images of the sky with a weak lensing signal in them, and analyzing the fake images with the same image processing software as is used in the real data, we can test whether our analysis algorithms can recover the true input weak lensing signal. This gives greater confidence that the measured weak lensing signal in the real data is free of bias.

After carefully testing our catalogs of galaxy shapes, we can finally measure weak lensing and use it to study the clumpiness of dark matter. Figure 03 shows an example of the latest results from the HSC survey. Compared to other weak lensing surveys, HSC gives results that are consistent within the errorbars. All of these surveys seem to suggest that the clumpiness of dark matter is slightly lower than we would expect based on measurements of the early Universe. This tantalizing hint of disagreement with early Universe measurements deserves further study, and should be the topic of further investigations by the HSC survey in the coming years. If the results persist with further analysis using larger areas of the sky and increasingly sophisticated data analysis methods, it could be a hint of exciting new physics beyond our standard cosmological model that may be discovered with HSC.

レンズ効果が宇宙膨張の歴史（例えば、宇宙膨張を加速するダークエネルギーの影響など）を調べるための有効な手がかりになります。弱い重力レンズを調べることによって、ダークマターとダークエネルギーをより深く知ることができるようになります。

弱いレンズ効果の研究の課題の1つが、たくさんの銀河から平均の形を導き出す作業ですが、ここで、すばる望遠鏡のHSCサーベイ観測がとても重要になります。まず、他の地上望遠鏡と比べて、すばる望遠鏡の遠方宇宙のイメージはとて深くシャープなので、狭い天域を観測しただけでも、多くの銀河の形を正確に測れます。加えて、HSCは一度に広い天域を撮ることができるので、効率的なサーベイができます。すばる望遠鏡の素晴らしい像質と集光力にHSCの広い視野が加わるにより、HSCは地球上の望遠鏡の中で、弱いレンズ効果の研究にとって最良の観測装置といえるでしょう。

HSCのCCDで観測される光は、まずは地球の大気と望遠鏡の光学系を通らなければなりません。このとき、その影響で観測される銀河の形がゆがみます。このゆがみは観測したい弱いレンズ効果の影響と同程度かやや大きいものです。そこで、弱いレンズ効果によりゆがめられた銀河の形状を正確に計測するためには、大気、望遠鏡の光学系、装置の光学系等の影響を取り除かなければなりません。この補正を施した後、それぞれの銀河の形にバイアスが残っているかどうかを確認します。この確認作業では、本物のデータとシミュレーションデータを使います。一例として、弱いレンズ効果の信号を人為的に入れたシミュレーション画像を用意して、本物のデータ解析ソフトで解析し、入力通りに信号が検出できるかをテストします。そこで入力した弱いレンズ効果の信号が検出できれば、本番で実際に観測する信号にもバイアスはなく、本物の弱いレンズ効果の検出に自信を持つことができます。

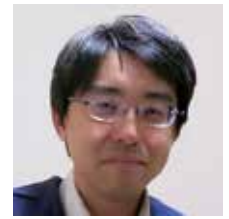
銀河の形のカタログを注意深くテストしたのち、ようやく弱いレンズ効果を測って、ダークマターがどのように分布しているのかを調べます。図03にHSC観測の最新結果を示します。HSCのデータが、誤差内で他の弱いレンズ効果の観測結果と合致しています。Planck衛星による宇宙初期の観測から計算されたダークマターの分布の密集度と比べて、全ての地上サーベイ観測では少し低い数値が示唆されています。今後のHSC観測とより精緻なデータ解析で、このずれが確かめられれば、現在の標準的な宇宙論を超える物理学の発見につながるかもしれません。



重力レンズ宇宙論の初期成果

大栗真宗

(東京大学)



重力レンズの最大の利点はなんといっても目に見えないダークマター分布を直接得ることができる点です。ダークマター分布は薄いところと濃いところがあっていわばムラムラしていますが、濃いところは重力が強いためにさらに密集していくといった具合にそのムラムラの度合いは時間とともに大きくなっていきます。一方で宇宙膨張によってそのムラムラの成長は抑えられるので、その成長度合いを調べることで宇宙の加速膨張の様子を詳しく調べられるというわけです。重力レンズを使ってこのムラムラの成長度合いを調べるのがHSCサーベイのゴールの一つです。

ということで、HSC初年度データを使った重力レンズ解析の結果を簡単に紹介します。HSCは撮像観測なのでそこに写っている銀河までの距離は直接はわかりませんが、測光的赤方偏移と呼ばれる手法で銀河の色を元におおざっぱに距離を見積もります。ある銀河に対する重力レンズ効果は、その手前のすべてのダークマター分布が寄与するのでこのままでは三次元分布は復元できません。しかし、違う距離にある銀河の重力レンズ効果をそれぞれ測定してそれらを組み合わせれば、奥行きまで含めたダークマターの三次元分布が復元できるのです！これはトモグラフィと呼ばれる手法で、あたかもCTスキャンのようにダークマター分布を推定できてまいります (図01)。

このダークマター分布を目で見ているだけではよくわからないので、実際はムラムラの度合いを特徴づけるパワースペクトルという量を測定して宇宙膨張を調べます。この宇宙論解析は東京大の日影千秋氏主導のもとすすめられました。基本的にはHSCデータで測定したパワースペクトルをさまざまな宇宙論モデルで計算される理論パワースペクトルと比較して最も観測データを説明する宇宙論モデルを探せばいいわけですが、測定や解析にはさまざまな系統誤差があるのでそれらを十分小さくおさえる必要があり、そこが一番の難関です (p14のMandelbaum氏の記事を参照)。

またこういった微妙な違いを見分ける解析では人為的バイアスも見逃ごせません。解析者が結果を見ながら解析すると、得てして自分の期待する結果を得たところで思考停止する (期待する結果を得なかったら必死にバグを探したり考慮されていない効果を考える) のものですので、最終結果も解析者の心理的効果に影響を受けたものになってしまう可能性があります。この影響を排除するため、真のカタログと偽カタログを準備して解析者はどれが真のカタログかわからないまま解析を行う、また解析の際も最終結果の宇宙論パラメータ制限の中心値を隠すといった形のブラインド解析が行われました。私たちもこういった解析手法は初めてだったので、手探り状態で解析を行いました。

以上のようにブラインドされた状態で解析の妥当性やさま

ざまな系統誤差のチェックを行い、すべてクリアした上で「アンブラインド」され最終結果がチーム内で明らかにされます。ここまでの道のりは決して平坦ではなく、解析チームの中でも慎重な人は解析方法にさまざまな注文をつけ、あれをチェックしろ、これもチェックしろと指摘します。その要求の厳しさにさすがの温厚な日影氏もキレそうになっていましたが、それをなんとかかなだめ励ましてアンブラインド、そして論文投稿までたどりつくことができました。

そうして得られたHSC初年度データの結果は、ダークマターのムラムラ度合いは宇宙背景放射観測から期待されるものと無矛盾だがそれよりもちょっと少なめにも見える、というものです (図02)。これは単なる統計的なゆらぎによる偶然なのでしょうか、それとも宇宙背景放射が発せられた宇宙年齢40万年から現在の138億年までの間に何か不思議なことが起こっているからなののでしょうか？ その答えはHSCサーベイのさらに広い領域の重力レンズ解析によって明らかになると思われます。

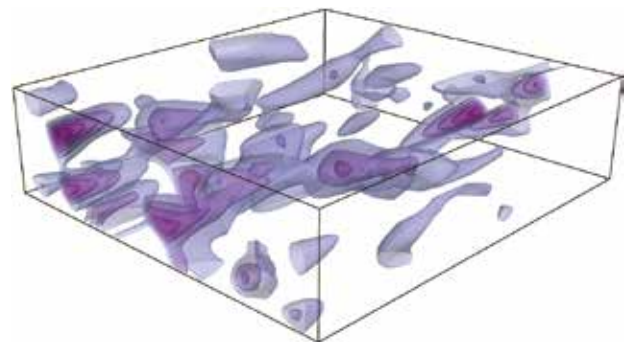


図01 HSC初年度データから得られた三次元ダークマター地図 (Oguri, Miyazaki, et al. 2018)。

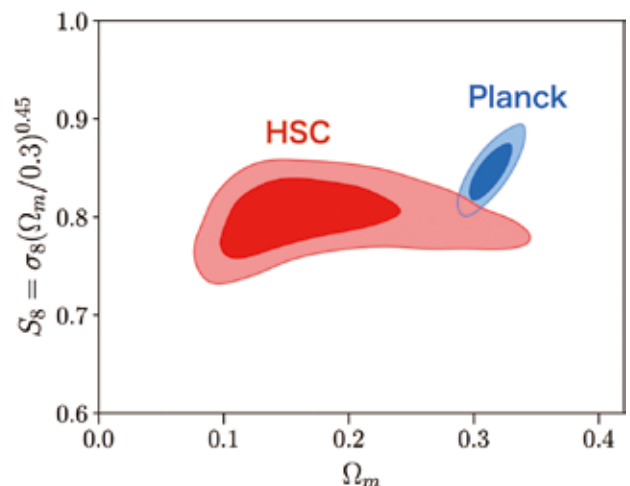


図02 HSC初年度データのパワースペクトル解析にもとづく宇宙論パラメータへの制限 (Hikage, Oguri, et al. 2019)。横軸がダークマターの総量、縦軸がダークマター分布のムラムラの度合いを表しています。

Ⅲ HSCと市民天文学

hscMapの開発・公開と 市民天文学への活用・展開

ここまで、HSCの登場によって天文学の地平が大きく切り拓かれつつあるようすを見てきました。そして、宇宙の姿を一気に写し取ってしまうその優れた能力は、サイエンスの研究のみならず、アウトリーチの世界でも広く活用されはじめています。それを可能とした「hscMap」の紹介と使い方について解説します。

hscMapでHSCのデータを眺めてみよう

小池 美知太郎

(国立天文台ハワイ観測所)



● HSCを自在に楽しむためのhscMap

HSCが1回シャッターを切ると1.7平方度の領域をカバーする112個の画像ファイルが出力されます。112個の画像は焦点面の112個のCCDに対応していて、これらの画像を焦点面のCCDの配置に並べ直すと図01のようになり縦横30000ピクセルを超える大きさになります。これは例えば私が使っているMacBook（2017年モデル）の200画面ほどに相当する大きさで、この大きさの画像を通常のアプリで開こうとすると開くだけで数十秒かかり、正常に表示されなかったりします。HSCのデータは一露出分を眺めるだけでも大変なのです。

HSC-SSPの観測された領域は日々広がっており、S18Aでは1100平方度以上の広さのデータが得られています。この広大な領域をカバーするデータをストレスなく自在に眺めて回りたいというのが人情というものです。hscMapはその欲求を叶えるために開発されました。

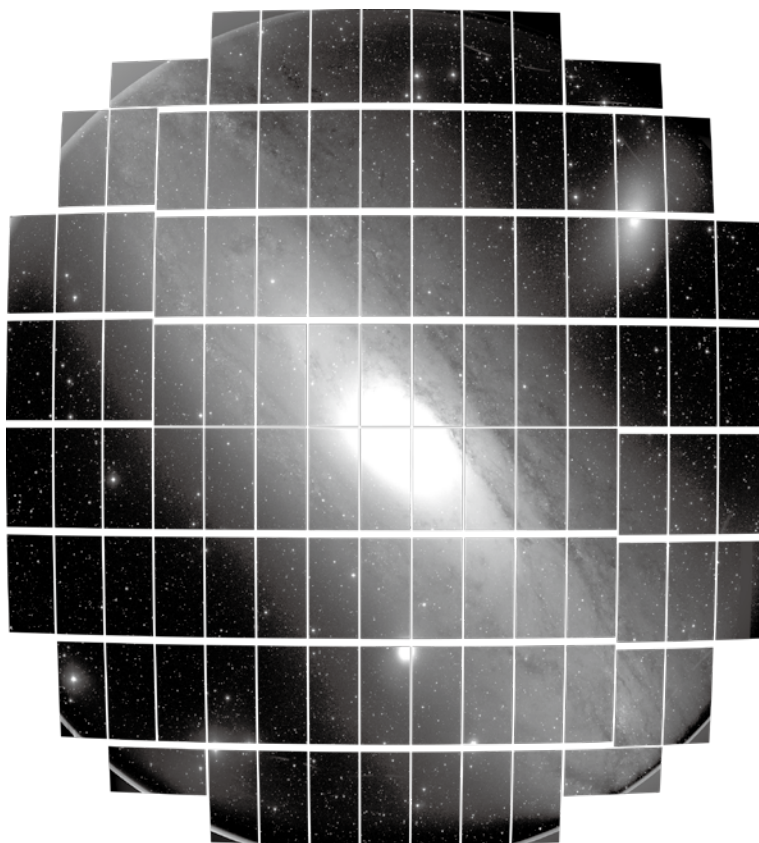


図01 112枚の画像を焦点面のCCDの配置に並べたもの。サイズは縦横30000ピクセルを超え、CCD1つに対応する部分は4000ピクセル×2000ピクセルほどの大きさです。

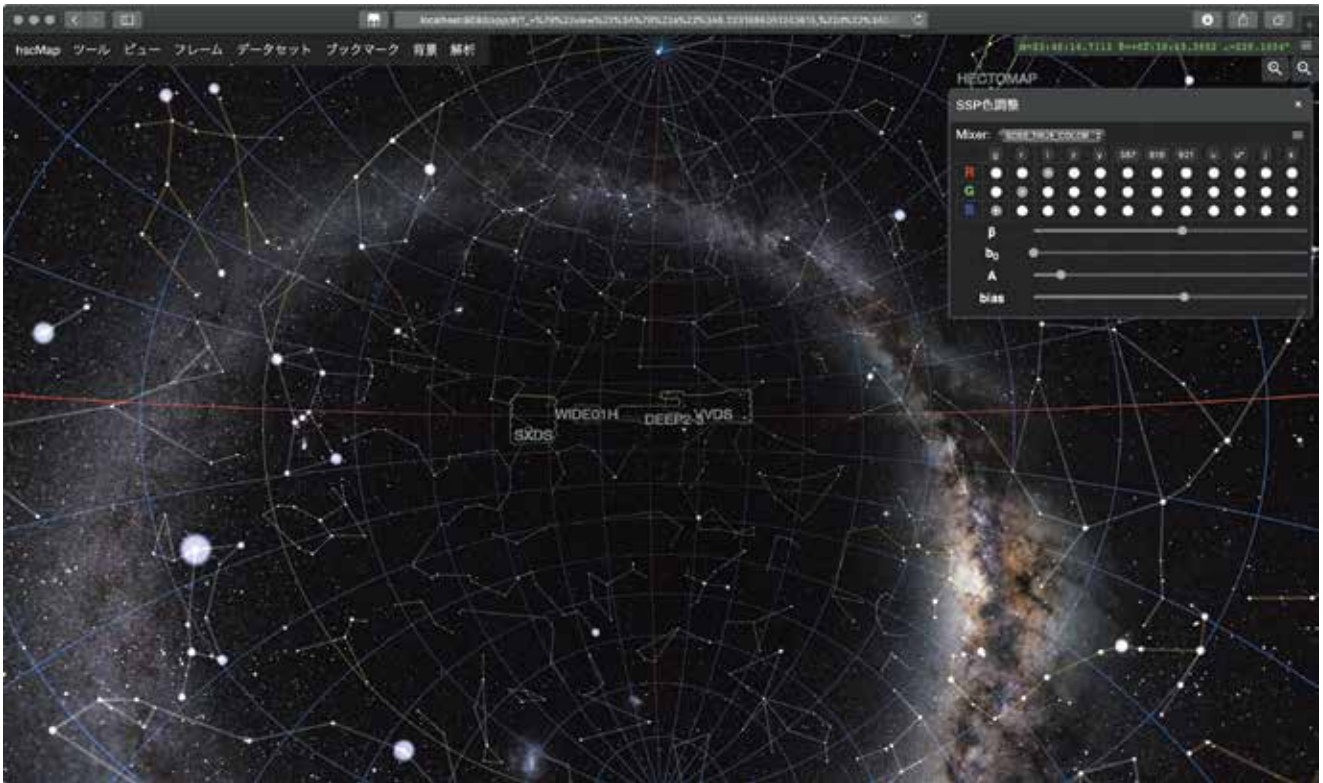


図02 hscMapを開いた直後。天の川、星座線、HSC-SSPの領域の枠、「VVDS」「GAMA09H」などの領域名が見えます。

● hscMap を触ってみよう！

hscMapは次のアドレスからアクセスできます。

<http://hscmap.mtk.nao.ac.jp/>

ページを開くと図02のような画面が現れます。視野内には星座線や天の川などが見られますが、所々に「VVDS」や「GAMA09H」などの領域名を囲む緑色の枠が見えると思います。この枠がHSC-SSPで観測された領域です。

○ PCでの操作

緑色の枠内にマウスカーソルを持ってきてマウスホイールを上向きに転がしてください。すると視野が徐々にズームアップしていき次第にHSCで得られた画像が見えてきます。さらにズームアップを続けていくと元データのピクセル一つ一つがわかるまで拡大できます。また、視野内でマウスをドラッグすることで視野を平行移動させることができます。

○ タブレット端末での操作

緑色の枠内に2本の指を置き、その2本の指を画面に接したまま広げてください(ピンチアウト)。すると視野が拡大されます。また画面を素早く2回タップすることでも拡大できます。これを緑色の枠内で繰り返すと視野が徐々にズームアップされていき、HSCで得られた画像が見えてきます。また画面を一本指でなぞることで視野を平行移動させることができます。ズームアウトするには2本の指を画面に接したまま狭めるか、2本指で画面を素早くタップしてください。



図03 M31を拡大していく様子。縦方向の画角が一番上の図で約30度、一番下の図は約40秒です。マウスホイールの操作またはピンチアウトでシームレスに拡大していけます。

●色調整で見えてくる

一般的にカラーの画像を得るには3種類のフィルターでそれぞれ得られた単色画像をコンピューターで合成する必要があります。HSC-SSPではほとんどの領域で5種類のフィルターでデータを得ているためカラーにバリエーションがあり、hscMapではそのバリエーションを選択することができます。デフォルトではHSC-I、HSC-R、HSC-Gのフィルターで撮られた画像データをそれぞれ赤、緑、青に割り当てていますが、これは「SSP色調整」ウィンドウのラジオボタンから変更す

ることができます（もし「SSP色調整」ウィンドウが表示されていなければ「解析」メニュー内「SSP色調整」をクリックするとウィンドウが表示されます）。また「SSP色調整」ウィンドウ下部のスライダーを操作すると表示する値のレンジを調整することができ、例えば図04のように初期の階調では見えない淡い構造も強調して表示するように調整できます。このように表示の調整によって見えてくるものが変わってくるのもhscMapの面白いところかな、と個人的には思っています。



図04 階調調整前後。「SSP Color」ウィンドウ下部のスライダーを調整し淡いシラスを強調して表示したところです。

○オリオン大星雲（M42）の色調整をしてみよう

M31やM42などいくつかの領域は特別に細かく色調整ができるようになっています。M42を例に紹介します。画面上部のメニューから「解析」→「星雲・近くの銀河など」→「M42」を選んでください。すると「M42」ウィンドウが現れるので、今度はその右上の「三」のマークのメニューから

「表示」を選んでください。図05のようにオリオン大星雲が画面中央にやってきます。先ほど現れたM42ウィンドウにあるツマミは画像の表示を調整するパラメーターで、これらを調整すると例えば図06のように同じ領域でもかなり違った画像を得ることができます。みなさんも、ぜひ興味のある領域でツマミを調整して遊んでみてください。



図05 オリオン大星雲。星雲の詳細な構造が確認できます。

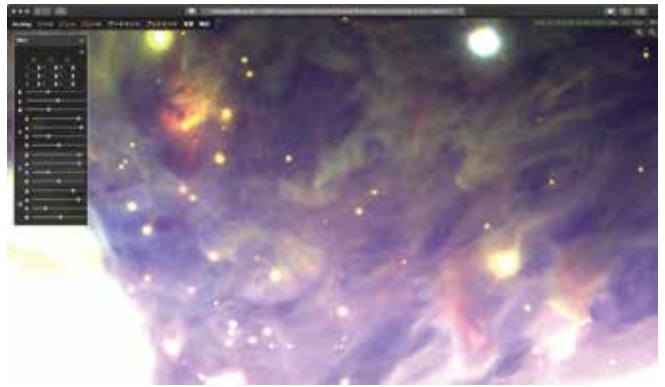


図06 星雲の一部を拡大したもの。左右の画像は同じ領域を切り取ったもので、右は表示のパラメーターを調整し星雲の構造をより見やすくしたものです。

● hscMap で宇宙散歩

hscMap で何気なくデータを眺めていると、彗星が偶然写りこんでいたり (図07)、変わった形の銀河 (図08) があつたりするのを偶然見つけることがあり、とても楽しいです (このような興味深い天体のいくつかはメニューの「ブックマーク」→「オススメ天体」の中にまとめられています)。2015

年9月には「すばるの学校 (★01)」の授業中に講師と学生が hscMap を眺めていて偶然見つけたレンズ天体 (図09) がきっかけとなって、本格的な研究の成果につながった例もありました (★02)。hscMap を眺めているとまた新しい発見があるかも知れません。あなたも是非 hscMap を覗いてみてください。

★01 すばる望遠鏡を運用する国立天文台ハワイ観測所は大学生向けに「すばるの学校」を毎年開催しています。

★02 観測成果「夜空に浮かぶ太古の目—すばる望遠鏡」
https://www.naoj.org/Pressrelease/2016/07/25/j_index.html

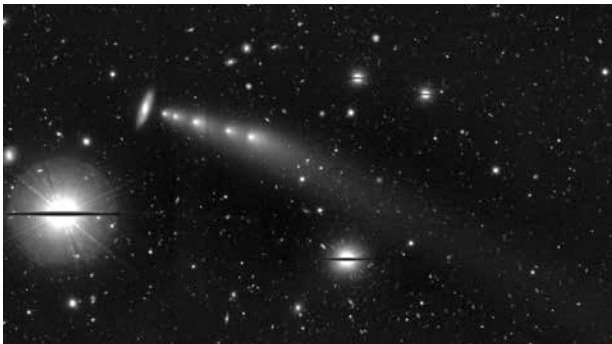
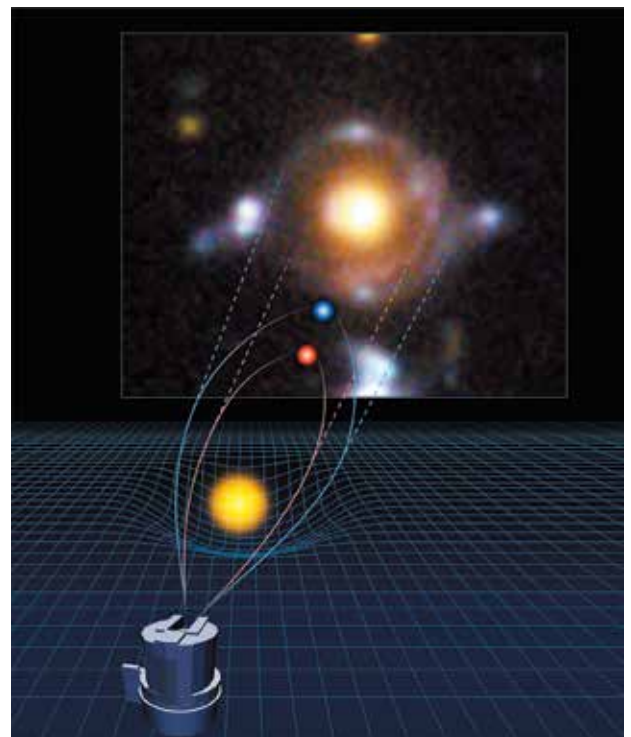


図07 117P/Hein-Roman-Alu 1 彗星 (千葉工業大学の吉田二美さんによる同定)。いくつかのショットで写っていたものがスタックされて何重かに写っています。[座標: 赤経19.889° 赤緯0.124°]



図08 UGC 9327 & FIRST J143043.0+001510。クラゲのような形に見える銀河。2017年の国立天文台特別公開日 (三鷹・星と宇宙の日)「第3回HSC銀河さがしゲーム」に登場しました。[座標: 赤経217.682° 赤緯0.252°]

図09 ホルスの目。2つの遠方銀河が手前にある別の銀河によって同時に重力レンズ効果を受けている極めて珍しい天体 (下の概念図参照)。古代エジプトの神聖なる神の目にちなんで「ホルスの目」と名付けられました。[座標: 赤経216.204160° 赤緯-0.889361°]



HSCの成果画像で 市民天文学を 創り出す！

「hscMap」で利用できる最新の観測データは膨大で、研究者がすべてをチェックするのは困難です。そこで、天文学に関心のある一般の市民が「hscMap」を通して研究活動を行う「市民天文学」が盛んになってきています。

研究者と一緒に、あなたも銀河の謎に挑戦！

臼田-佐藤 功美子

(天文情報センター)

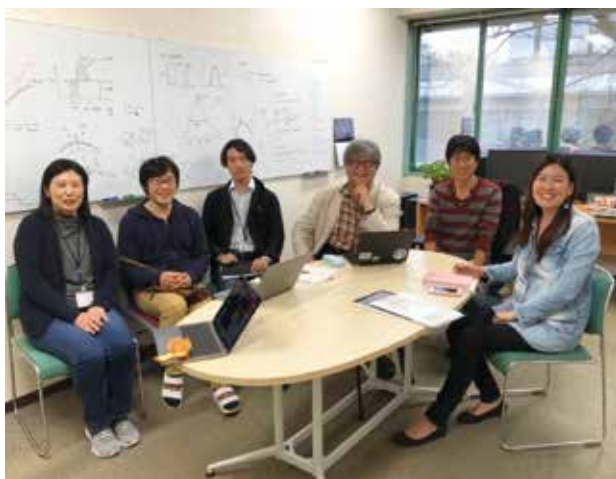
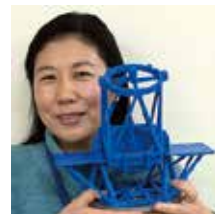


図01 市民天文学プログラムメンバー。左から、臼田-佐藤功美子、小池美知太郎、内藤誠一郎、山岡均、田中賢幸、柴田純子（敬称略）。臼田-佐藤、内藤、山岡が全体のプログラム作成、小池がhscMap機能を活かした銀河分類サイトの作成、田中が科学監修を担当。2018年11月より、ウェブデザイン担当として、柴田がメンバーに加入。

宇宙には様々な形をした銀河であふれています。例えば渦巻きのある銀河もあれば、ない銀河もあります。この銀河の「多様性」がどのようにできたのかは、実はよくわかっていません。銀河は他の銀河と衝突合体を繰り返しながら成長してきたと考えられており、銀河の衝突が鍵を握っている可能性があります。あなたも、簡単な質問に答えることで、HSCがとらえた様々な銀河の形を分類し、研究者と一緒に銀河の謎に挑戦してみませんか。

●市民が研究に参加するシチズンサイエンス

シチズンサイエンス (citizen science) という言葉をご存知でしょうか。オックスフォード英語大辞典によると、「一般市民が、しばしば科学者や科学研究機関と共同で科学的研究を行うこと」とあります。1990年代頃から使われ始めたこの言葉の起源やコンセプトは様々ですが、天文学は小惑星や彗星の発見、変光星の観測などにおいて、アマチュア天文家

の貢献が大きく、昔からシチズンサイエンスが活発だった分野と言えるでしょう。2000年代になると、インターネットを使って既存の大規模観測データにアクセスし、画像などを見ながらデータ分類する形式のシチズンサイエンスが盛んになりました。今では英語圏を中心に、天文学に限らず様々な分野において、この形式のシチズンサイエンスが活発に行われています。

国立天文台では2017年度より、大規模データを使ったシチズンサイエンスの検討を本格的に開始しました。2015年の国際外部評価にて、「天文情報センターでは、シチズンサイエンスのような双方向のやりとりを一般市民と行うべき」という勧告を受けたことがきっかけです。すばる望遠鏡のHSCを使った大規模戦略枠観測プログラム (HSC-SSP) コアメンバーの一人である田中賢幸さんに相談し、田中さんの研究テーマでもある、衝突銀河の形の分類に市民が参加するプログラムの開発を始めました。また、国立天文台におけるシチズンサイエンスの和名を「市民天文学」に決めました★01。

●日本科学未来館でのデータ収集

こうして、すばる望遠鏡を運用するハワイ観測所と、広報普及を業務とする天文情報センターの共同で市民天文学プログラムが本格的に始動しました。そして、小池美知太郎さん (ハワイ観測所) が開発した、自由に宇宙を探索できるhscMapの魅力を活かした、独自の市民天文学サイトを作成することにしました (p18-21参照)。非専門家の方々が練習問題を解くことで、自信を持ちながら銀河の分類を行えるトレーニングメニューを充実させたいと考えたことも、独自のサイトを作成する理由のひとつです。メニューについては、日本科学未来館 (以下、未来館) の科学コミュニケーターの方々より助言をいただきながら、来館者からデータを収集し、作っていました★02。

第一段階として、衝突している銀河か否かを見分けてもらうメニューを作成しました。2018年8月初旬に未来館で行ったイベントでは、まず天文台職員が銀河の形を説明し、参

加者が銀河画像を印刷したカードを分類するトレーニングを行った上で、HSC画像上の銀河の分類をしてもらいました。2日間で合計239名からデータを集めることができました。その結果、年齢による正答率の差がないこと、淡い腕構造を持つ銀河を渦巻銀河だと判別できる人の割合が低いことなどの発見がありました。中には、構造がはっきり見えているもののみが銀河で、ぼんやりしたものは銀河ではない、と知っている人がいる、という驚きもありました。

第二段階として、未来館展示室にある操作端末「オピニオンバンク」にて、来館者が自分で解説を読みながら質問に答える方式でデータを収集しました。最終的には解説者を介さず、参加者が各自ウェブ上でトレーニングを行い、銀河判別の知識をつけていただく必要があるからです。今回は、衝突銀河に見られる構造についても分類していただきました。2018年12月上旬からの1か月間で、990名分のデータを収集できました。①銀河の形を知る、②衝突銀河か否かを見分ける、③衝突銀河に見られる構造を分類する、の3段階にわけ、全10問用意しましたが、参加者の約4割が最後まで答えて下さいました。さらに、正答率が低かった問題を改善した修正版について、2019年2月の約3週間データ収集を行い、正答率が上がったことを確認しました。

●銀河成長の歴史を紐解く旅にでかけよう

未来館で得られたデータをもとに、現在市民天文学ウェブサイトを作成中です。完成を今年夏頃に予定しています。銀河の形の判別は専門家の間でも意見が分かれることがあり、できるだけ多くの方の目で判別していただく必要があります。HSCのデータは他の望遠鏡による過去の画像に比べて観測領域が圧倒的に広だけでなく、データ品質が高く、銀河の淡い構造まで見えています。そのため過去の画像ではできない詳細な解析ができると期待しています。あなたも衝突銀河の形を分類し、銀河の謎を紐解く旅と一緒にでかけませんか。

★01 シチズンサイエンスの直訳は「市民科学」ですが、既に別の意味で使っている団体があります。その団体を尊重し、言葉の意味の混乱を避けるため、市民天文学とよぶことにしました。

★02 日本科学未来館市民参加型実験「オープンラボ」事業では、志野渚さん、鈴木毅さん、片平圭貴さんはじめ、多くの科学コミュニケーター、スタッフの方々にご協力いただきました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

3Dプリンターですばる望遠鏡の模型を作ろう

<http://prc.nao.ac.jp/3d/index.html>

●白田-佐藤を中心に、視覚の有無に関わらず、触って理解できる望遠鏡等の模型を開発しています。第一弾として、すばる望遠鏡を製作しました。開発時には、視覚特別支援学校の先生等のご助言をいただきました。どなたでも市販の3Dプリンターで造形できます。詳細については、公式サイトをご覧ください。

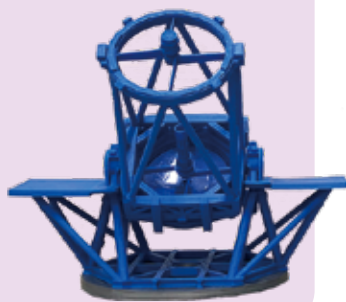


図02 未来館でのイベントの様子。銀河カードを分類するトレーニング（画像上）の後、HSC画像上の銀河を分類（画像中）。上級者編では、田中賢幸さん自ら衝突銀河について解説（画像下）。

ステップ3 問題

この銀河は衝突銀河です。何が見えますか？
※淡い構造にも着目して下さい。（1/4問中）

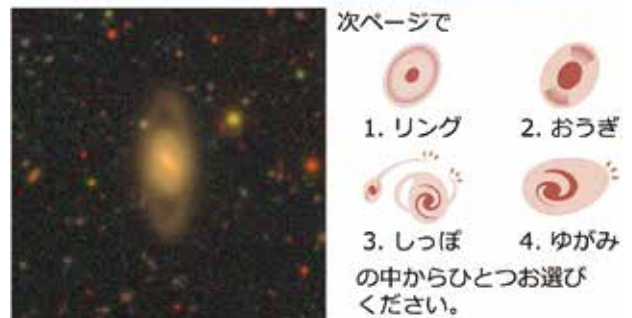


図03 未来館展示室の操作端末「オピニオンバンク」に表示した問題のひとつ。来館者は日本語・英語のいずれかを選んで参加。衝突銀河に見る構造「リング」「おうぎ」「しっぽ」「ゆがみ」は、それぞれ専門用語「リング」「シェル」「潮汐ストリーム」「形のゆがんだハロー」の愛称。ちなみのこの問題の正解は「1. リング」。

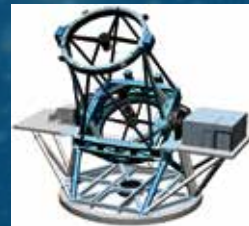
HSCを越えて

宮崎 聡

(国立天文台 先端技術センター)

私たちの世代は、先輩方から「すばる望遠鏡」という偉大な資産を受けつぎました。私たちは、その性能をより一層引き出すために、HSCを開発しました。本特集で紹介されているとおり、現在多くの人々の努力により、大規模探査観測（HSC-SSP）が遂行され、そのデータが解析・公開されています。この世界的にもユニークなデータに基づき、天文学の幅広い分野で成果が出始めました。一般共同利用観測等においても、HSCは活用され、現在のところすばる望遠鏡のおよそ半分の観測時間は、HSCに割り当てられています。

先代のカメラ、Suprime-Camは3割程度の高い稼働率を約16年間維持したまま現役を退きましたが、HSCも今後10年以上にわたり同様に活躍し続けるのでしょうか？ おそらくそうはならないでしょう。米国のLSSTが2022年ころから観測を開始するからです。LSSTはHSCより広視野でかつ専用望遠鏡のため、探査観測のスピードが非常に速いのが特徴です。例えばHSC-SSPでは1000平方度をWide Surveyと位置づけて、6年程度かかる見通しで観測を行って来ていますが、LSST★ではSSP/Wideの深さのデータが、2年弱で、約20,000平方度集まってしまう。HSC-SSPデータが「旬」の期間は、それほど長くないことがわかります（LSSTでHSCほど高解像度の画像が撮れるかどうかはまだわかりませんが）。



すばる

私たちの次の世代の若い人たちは、「HSCで、もうお腹がいっぱい」とか、「どうせLSSTに全部塗り替えられてしまう」などと言わず、ぜひHSCを使って得た経験をもとに、LSSTがもたらす大規模データの時代を、それぞれの分野のリーダーとして走り抜けて下さい。そのためには、LSSTデータを待ちわびている人々に声をかけて、仲間を増やし、今から共同研究を始めましょう。今が旬のHSCデータを最大限活用して下さい。私たちも、このようなことが可能になるように、できるだけお手伝いをしていきたいと考えています。

同時に、私たちは、LSSTができないことが何かを考え、独自の研究手法を確立することも忘れてはいけません。現在Kavli IPMUのリーダーシップの下に開発が進む、Prime Focus Spectrograph (PFS)は大変重要でユニークな装置で、完成後行われる予定のSSP観測は、新しいチャンスを私たちにもたらしてくれるでしょう。



LSST

一方、PFS-SSP終了後も、LSSTの探査観測は続いている予定です。私たちは、それをぼんやりと見物していればよいのでしょうか？ 北天はLSSTは観測できませんから、HSCで観測するとしても、それに加えて、何かもっとLSSTとは根本的に違ったことを、やりたくありませんか？ 私たちが今興味を持っているのは、CCDセンサーの高速CMOSセンサーへの置き換えです。これにより、現在約15秒読み出しにかかっているセンサーがわずか0.1秒で読み出せるようになります。CCDと異なり電荷の転送が不要なため、何千個というADCが素子上に内蔵されているからです。こうして、極めて速い時間変動をする天体の検出が可能となります。このCMOSセンサーのプロトタイプ開発には、すでに着手していて、近い将来ご紹介する機会もあるでしょう。

すばる望遠鏡が魅力を持ち続け、多くの成果が上げられるよう、私たちは今後もいろいろな工夫をしたいと思っていますので、若い観測者の皆様も、たくましい想像力をもって、観測天文学の限界に挑戦して下さい。

★Large Synoptic Survey Telescope

天文台メモワール

私が初めて三鷹キャンパスを訪れたのは、1973年頃だったと思います。当時私は、調布市にある電気通信大学で働いていました。先輩職員に誘われて観望会に参加したのですが、この時に説明してくださったのが天文台の鳥居泰男さんでした。この頃私は、電通大の坂田朗さんと隕石の分析を試み、その時教えてもらった「宇宙化学」「星間分子」といった言葉にワクワクドキドキしました。坂田さんは、観測を開始したばかりの6m電波望遠鏡を見学する機会もつくってくださいました。

それから十年程後のこと。三十代になっていた私は、野辺山宇宙電波観測所から「職員になりませんか」というお誘いを受けました。それは、信州生まれの私にとってとても嬉しい話でした。しかし私は、前年の見学で新たな仕事が転職に近いものであることを知っていました。また、当時の電通大では技術職員の他大学への転勤は極めて稀なことでした。にもかかわらず、坂田さんや中川直哉さんの後押しと、天文台の森本雅樹さんらのご尽力によって、1986年から野辺山観測所で職員として働かせていただけることになりました。

着任した当時の野辺山は、共同利用を開始した45m電波望遠鏡に加えて、ミリ波干渉計の試験観測も行われており、まさに活気溢れる観測所でした。私はVLBIグループに加えていただきました。平林久さん、森本さん、井上允さん、宮地竹史さんが当時のメンバーでした。臼田64m鏡でのスペースVLBI実験、45m鏡での国際ミリ波VLBI観測などワクワクする場面が続きました。しばらくすると平林さんは宇宙科学研究所へ転出なさいましたが、その後任として通信総合研究所(鹿島)から川口則幸さんがいらっしゃいました。川口さんとは、鹿島34m鏡と45m鏡を結合した鹿島-野辺山干渉計、ネットワークの構築を目指す出張観

測、さらにVLBI懇談会の事務局など様々な仕事を一緒にさせていただきました。

しかし、M-5ロケットによるVSOP衛星の打ち上げが近づくと、VLBIのメンバーは次々と三鷹勤務になってしまいました。私は、転出したメンバーとの繋がりを保ちつつ、45m鏡の保守に軸足を移すことにしました。45m鏡は、性能向上を目指して改良を重ねて来ましたが、同時に予期せぬトラブルも発生しました。主鏡パネルの浸水による劣化、AZレール基礎部の沈下、ボルトの劣化による主鏡の歪み、日除けパネルの浸水による劣化などです。45m鏡の責任者である浮田信治さんと共に日夜原因を探り、ひとつひとつ対策を講じました。その結果、45m鏡は毎年共同利用観測に供され、私は充実した四十代を過ごすことができました。

五十代になると、45m鏡の保守に加えてマネージメント的な仕事が増えました。その傍ら私は、職員の森明さんと国立天文台最古の電波望遠鏡の復元にも取り組みました。また、サイエンス・パートナーシップ・プロジェクトの主講師として、ハケ岳の西側にある出身高校で年に数回の授業を4年間にわたってさせていただきました。また、五十代最後の2年間は三鷹に勤務することになり、先端技術センターの皆様にお世話になりました。

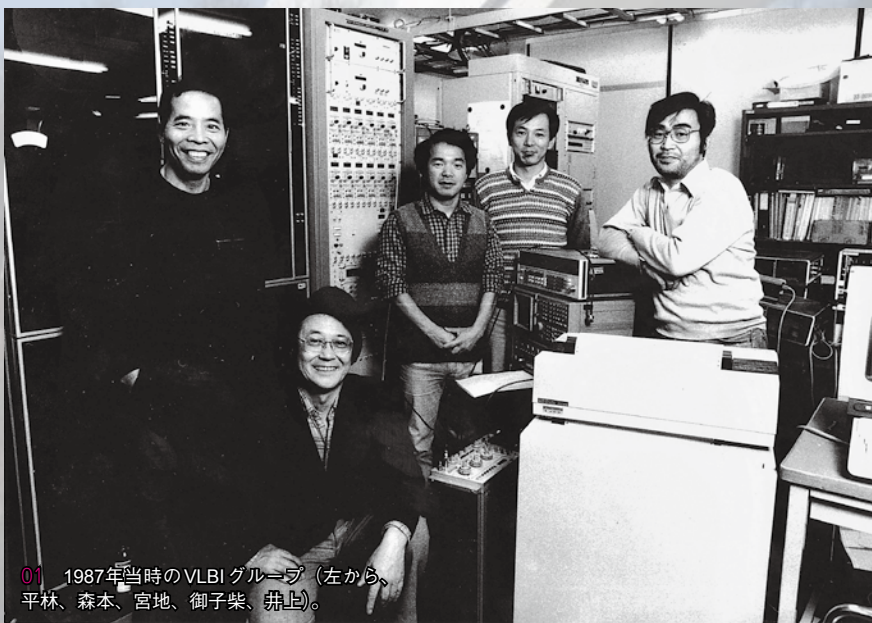
六十代は野辺山観測所に戻り、AZレールの再設定、架台の補修塗装など再び45m鏡の保守に取り組みました。また、野辺山観測所の安全管理者として、事故防止に務める日々を過ごしました。

末筆になってしまいました。不器用で頑固な私を今日まで励まし、導いてくださった国立天文台の皆様、改めて感謝申し上げます。そして、三十年にわたり励まし合ってきた45m電波望遠鏡にも心を込めて「長い間ありがとう」と言いたい。

45m電波望遠鏡と共に

御子柴 廣

(野辺山宇宙電波観測所)



01 1987年当時のVLBIグループ(左から、平林、森本、宮地、御子柴、井上)。



02 2006年から2009年まで岡谷工業高校で行ったSPP授業。

天文台メモワール

退職のご挨拶

松田 浩
(天文情報センター)



お世話になっております。天文情報センターの松田浩です。1980年3月公務員初級技術で東京大学東京天文台に入台してからこの3月で39年になり、メモワールを書く時期になってしまいました。

私の最初の配属先は天文時部の保時室でした。そこでは写真天頂筒(PZT)観測やセシウム原子時計、自動時計比較測定装置の維持管理、関連する電気回路の製作、その後GPSを加えた時計比較データの整約、発送に携わりました。天文時部は東京天文台の中でも大所帯で、今は難しいことですが、月々積み立てて部内旅行に行ったりしました(画像01)。今は暦計算室に所属していますが、当時天文時部と居室が近かったこともあり、暦計算室の溝原さん、中井さんと測光部の田中さんに北アルプス白馬岳などへ連れて行ってもらったのは良い思い出です(画像02)。



01 1991年 宇宙計量部門の部内旅行で北海道へ。



02 1981年 北アルプス縦走中の五竜山荘にて。

1988年国立天文台に改組され、所属は位置天文・天体力学研究系宇宙計量部門となりました。1992年福島登志夫さん(現天文情報センター長)が天文保時室長になり、水沢と三鷹の保時室が連携を始めた頃、私もマネージメントに関わるようになりました。その他に野辺山45mや臼田64m電波望遠鏡のパルサー試験観測(NRO速報No89、No.99)、

重力波の立ち上げ(画像03)や、子午線部の光電子午環の観測当番、セシウム原子時計を使ったNTPサーバーの開発などに参加しました(画像04)。1996年末に保時室の業務は水沢に集約され、その後は光赤外干涉計推進室(MIRA)で制御系の製作と、プロジェクトの事務的な取りまとめをしました。



03 1986年 パルサー観測用の測定機器。

2005年に天文情報センター暦計算室に移り、現室長の片山さんと共に暦要項、暦象年表、理科年表暦部の編制や、ホームページの制作などの業務を引き継ぎました。前任者の伊藤さんが続けてこられた貴重書展示も、図書係と合同で続け私が関わって10年になります(画像05)。その他に2005~2012年まで質問電話や手紙への対応、観望会の質問コーナー、また天文時部の時計、観測機器などを引き継いだことから、旧アーカイブ室の立ち上げにも関わり、ミュージアム推進室の手伝いをしていました。2010年からは総務室長としてセンター内の事務的取りまとめなどもしています。



05 2014年 春季天文学会で貴重書展示について紹介。左から私、伊藤節子さん、当時の図書係長の堀さんと前図書係長の山崎さん。

39年間で健康面の大きな変化は太った以外に網膜剥離があります。2003~2007年左眼を4回、2008年に右2回の手術を経て後遺症は残りつつも、なんとか視力は維持しています。

今の私があるのはこれまで出会った皆さんのお陰です。きちんとお礼をしないで失礼してしまった方々、ご迷惑をかけた方にもこの場を借りて申し上げます。ありがとうございました。そしてもう少しの間、よろしく願います。

天文台メモワール

自分が還暦を迎えるとは。未だにピンと来ませんが、確実に年月は流れたようです。皆様のおかげを持ちまして、天文台で32年、前職の財務局時代を含めると42年間、事務職員として大過なく過ごすことができました。この場をお借りして、御礼申し上げます。大変お世話になりました。

さて、私が野辺山宇宙電波観測所事務室に異動してきたのは、1987年でした。当時は、まだ、東京天文台の野辺山宇宙電波観測所でした。その頃は、事務作業はほとんどが手書きの時代でした。唯一、旅費計算書だけがパソコンで処理されていました。そんな状況ですから、事務室にはパソコンが1台、ワープロ専用機が1台あっただけだったと記憶しています。もちろんそのパソコンもネットワークなんてものには繋がっていませんでした。通信方法は、電話かFAXか郵便です。

パソコンに興味があった私は、旅費用のパソコンをお借りして、当時100人近くいた観測所員の食堂の食事代請求事務を手作業から自動化することにしました。数か月かけて作った請求ツールにより、手作業だと半日かかっていた作業がなんと10分程度で処理できるようになったのを覚えています。そのツールはOSは変わったものの30年後の現在も現役に動いています。これに気を良くした私は、新しいパソコンを上司にねだり、購入してもらいました。当時流行していたNECのPC9801です。OSは、MS-DOS2.0だったと記憶しています。PC98を使い、今度は共同利用宿舎の予約と収入の事務処理をするツールを開発しました。それまでは宿泊予約は受付順にノートに書いておいて、1週間ごとにホワイトボードに転記するという方法だったので、間違いも結構発生していましたし、宿泊料などの収入は帳簿と現金が合わないなんてこともよくありましたが、パソコンで処理できるようになり、かなり改善したと思います。このツールも現在も稼働しています。

そうこうしているうちに、予算執行において手作業で計算していたため、事務室と研究室でその残高が合わないということが問題になっており、所長より予算執行事務を電子化せよとの命令がやってきました。それまでは事務室内のローカルでの処理で十分だったのですが、研究室と情報を共有するために、ネットワークで繋ぐ必要が発生したのです。今のwindowsのように簡単には行きませんでした。OSはまだMS-DOS3.3くらいだったと思います。PC98にはもちろんLANの口なんてものはありませんでした。技術職員の方に手伝ってもらい、通信用のインターフェースのためのボードを別途購入して、な

んとか観測所内限定のネットワークで研究室と繋ぐことができました。そして野辺山独自の予算執行事務処理システムを開発しました。その名称は、私の趣味がスキーだったこともあり、菅平高原スキー場に裏太郎という好きなゲレンデがあったので、当時一世を風靡していたワープロの-太郎をもじって、「NRO会計システム裏太郎」という名にしました。おー、なかなか良い名前だと自画自賛していたら、裏帳簿みたいだなというご批判をいただいたのを覚えています。こちらも1990年から法人化するまでの2003年までの14年間にわたり活躍してくれました。今でもそのデータをアーカイブ化して検索できるようにしてあります。

そして2004年に法人化され、財務会計システムが導入され、やっと台内の会計処理がネットワーク化されました。法人化後は、財務会計システムのデータ検索や予算執行状況などをさらに見やすくするための財会支援ツールや購入依頼を効率化するNO遅延システム、また勤務時間管理システムなども作成しました。

このようにパソコン好きであることを生かせる環境であったことに感謝したいと思います。そして少しは事務の効率化のお役にたてたかなと自己満足しております。

また、32年間も野辺山においていただき、おかげさまで趣味のスキーに没頭できたことも深く感謝しております。今後は再雇用職員としてあと5年ほどお世話になる予定ですので、今後ともよろしくお願いたします。



思い出の写真ですが、パソコンをやっている写真などありませんし、あってもつまらないので、趣味のスキーの写真も2点ほど…。1つは乗鞍岳のコロナ観測所東側の富士見沢での山スキー仲間との写真、もう1点は乗鞍岳の位ヶ原での滑走中の1コマです。ご笑覧ください。

パソコンと私

大塚朝喜

(野辺山宇宙電波観測所)



IDL 講習会 (FITS データ解析編) 報告

亀谷和久 (天文データセンター)

天文データセンターでは、「IDL 講習会 (FITS データ解析編)」を2018年11月1日 (木) から2日 (金) の2日間に国立天文台三鷹キャンパス南棟の共同利用室において開催しました。IDL (Interactive Data Language) は、天文学のみならず地球科学、医学、工学など科学技術の広い分野において、大規模なデータの解析や可視化を早く効率的に実行するためによく利用されているプログラミング言語です。特長としては、画像等のデータを配列として扱い、様々な処理を簡単に直感的に記述できることが挙げられます。また、天文学に特化した豊富なライブラリ群が存在し、グラフィック機能も充実しています。これらを活かして、天文観測データの一次処理から論文用の図の作成まで多くの場面で利用されていますので、一度は利用したことがある、あるいは使ってみたいという研究者や学生の方も多いのではないのでしょうか。

天文データセンターが運営する共同利用のデータ解析環境「多波長データ解析システム」にはIDLがインストールされており、国内外のユーザーにご利用いただいています★01。さらに年に1回以上の頻度でIDLによる天文データ解析に関する講習会を開催しています。今回の「FITS データ解析編」の講師は台湾の中央研究院天文及天文物理研究所 (ASIAA) の大山陽一 Senior Research Scientist に務めていただきました。大山氏はこれまで、すばる望遠鏡 FOCAS 向けデータ解析ソフト開発や、あかり衛星 (JAXA 宇宙科学研究所) の IRC 撮像分光装置解析パイプライン開発などに従事され、IDL によるデータ解析プログラム開発の非常に豊富な経験をお持ちのため、毎年講師をお願いしています。

2018年7月に開催した「初級編」(2018年11月号30ページ参照) ではIDLの基礎を取り上げたのに対して、今回はより実践的な天文データ解析を扱うという位置付けとなります。講師による充実したテキスト★02を用いる講義と、すばる望遠鏡などで取得された本物の観測データを用いる実習で構成される内容で実施されました。受講者は6名の方が参加されました。学部生や修士課程の学生が多く、「自分の研究で観測データを処理するの

にIDLを使いたい」「シミュレーションデータの処理に使いたい」など、これからご自身の研究にIDLを積極的に使いたいという意欲に満ちた顔ぶれとなりました。

講習会1日目の午前中と午後前半までは、テキストに沿って講義 (座学) が行われました。ここでは、IDLの基礎、利点・欠点等の特徴、簡単な文法、プログラミングとデバッグ、エラーの読み方と対処方法など、IDLを用いてデータ解析を始めるために必要な知識を習得します。要点を押さえた分かりやすい講義で、受講者自身の手でプログラミングを始められるように工夫されています。次に、1日目午後の後半と2日目の全ての時間 (講習会全体の75%程度) は演習に充てられました。演習では、すばる望遠鏡のMOIRCSや台湾中央大学Lulin望遠鏡によって取得された本物の観測データを用いて、基礎的な画像処理を実習します。プログラムを自ら考え試行錯誤を繰り返しながら作成し、分からないところは積極的に質問して講師からすぐにアドバイスを受けることで、はじめはIDLに不慣れだった受講者も効率よく実力をつけていくことができていたようです。また、過去に本講習会の受講経験がある方には、講師から別のデータと課題が与えられ、内容が重複しないように工夫されていました。最終的には、受講者の皆さんが所定の課題をクリアできていたようです。さらに、中には自ら発展的な課題に挑戦する受講生もいたようです。



01 講義中の様子 (大山講師)。

講習会終了後にアンケートを実施したところ、受講者の多くから満足度の高い評価をいただき、世話人としては大変嬉しく思っています。受講後の感想としては、「光赤外のバックグラウンドがなくても課題の説明がわかりやすく、取り組むうちに自信ができました。納得するまで自分で考えられる (答えをすぐに教



02 受講者の質問には丁寧なマンツーマン指導で応えます。



03 「初級編」講習会の巻内講師も加わり議論に花が咲く場面も。

えてもらえない) のも良かったです」、「立派な資料もいただけて、嬉しかったです」、「初めてIDLに触れたにも関わらず、非常にわかりやすく楽しく解析できました」、「自分の大学の研究室で復習したいです」などをいただきました。掲載できなかったご意見も含めて、今後の天文データセンター主催の講習会の参考とさせていただきます。

最後となりましたが、講師をご快諾くださった大山先生、受講者の皆様、その他講習会にご協力いただきました全ての方々にご場をお借りして感謝申し上げます。

★01 IDLのライセンスは有料ですが、天文データセンターではIDL環境を含むデータ解析用計算機システム (多波長データ解析システム) を提供しています。天文学やその関連分野における大学院生以上の研究者であれば基本的に利用できますので、是非ご利用ください。

https://www.adc.nao.ac.jp/JJ/kaiseki_top.htm

★02 今回の講習会のテキストは、以下のウェブサイトに掲載しております。

https://www.adc.nao.ac.jp/JJ/cc/public/koshu_shiryo.html

また、過去に天文データセンターが主催した各種講習会の資料も掲載していますので、ご興味のある方は是非ご参照ください。

「伝える人のための天文学WS」報告

波田野聡美 (天文情報センター)

天文学の楽しさ・面白さ・大切さを、なるべく多くの人に届けるためには、どうすればいいのでしょうか？ 国立天文台天文情報センターでは、天文学者を日本各地の小中学校に派遣する「ふれあい天文学」や、夏休みの子どもたちにホンモノの天文学者のレクチャーと仕事を体験してもらう「夏休みジュニア天文教室」などのイベント、また団体見学の対応や4D2U ドームシアターの公開、50センチ公開望遠鏡での定例観望会など、日々、多くの大人や子どもたちに、天文学を届ける取り組みをしてきました。しかし、直接私たちがアクセスできる人数はどうしても限られてしまいます。そこで、天文学の楽しさを「伝える人」の存在が重要になってくるのです。

近年では、サイエンスコミュニケーションへの興味・関心が高まっており、教員、博物館／科学館などの職員、科学メディア関係者など、「伝える」ことを職業としている人だけでなく、個人で観望会やサイエンスカフェなどを主催する方が増えてきました。まさに、天文学の楽しさを「伝える人」の範囲が広がっていると言えるでしょう。国立天文台の発信した情報が、こうした多くの「伝える人」を介して広まっていけば、より多くの人に情報が届くと考えられます。今回のワークショップは、そのような狙いを持って開催されました。

2018年12月2日～3日、大セミナー室を会場に、まずは、5人の講師から（講師リスト参照）、テーマに基づいた情報提供がありました。テーマは、今まさにホットな話題である「惑星系形成」です。“現在どんなことがわかっていて、どんなことがわかっていないのか”まさに惑星系形成研究の最前線を垣間見ることができました（画像01）。

ただし、今回のワークショップは、参加者が、天文学の最前線に触れることだ



01 熱心に聞き入る参加者たち。

けが目的ではありません。参加者と講師との双方向の対話が、このワークショップのもっとも重要な目的でした。そこで、多くの時間を割いたのは、講師も加わって行うグループワークです。スケジュールの都合で、すべての講師に参加していただくことはできませんでしたが、講師以外の台内研究者にも協力してもらい、ほとんどのグループにひとりずつ天文学者が加わる形で進めることができました。グループワークのテーマは、「惑星系形成をテーマにどのようなアプローチを考えるか」で、1日目は学校教育、2日目は社会教育での取り組みを考える予定としました。ただ、教員の方の参加が少なかつたため、1日目は、もう少し条件を広くとらえて、小中高校生を相手にどんなことができるかという議論を行いました（画像02）。2日目は、社会教育での取り組みについて、例えば若い女性に訴求するには、など、主な対象を各チームそれぞれ考え、議論を進めていきました。2回目で慣れてきたということもあり、各チームのアイデアには、とてもユニークで実践的なものが見られました（画像03）。

終了後に行ったアンケートでは、「とても刺激になった」「有意義だった」という意見が多かった反面、「伝える」という視点に十分に立っていなかったという指摘や、グループワークのテーマ・対象に具体性を求める声もありました。いくつかの反省点はありますが、指導者を育てる取り組みは、効果的な天文普及の手段であり、今後も続けていければと願っています。



04 集合写真。皆さんの笑顔に、会場の熱量が感じられます。



02 グループワーク（1日目）の発表。グラントのトラックでたくさん子どもたちを走り回らせ、じゃんけんゲームを使って微惑星の合体成長を体感させようというアイデア。



03 グループワーク（2日目）の発表。若い女性を対象としたアプローチを考えたチーム。他の班では、カラフルな綿あめで微惑星形成を理解させる、あるいはお化け屋敷など、さまざまなアイデアが各班から飛び出しました。

●12月2日（日）9:00-17:00

- ・イントロダクション：平松正顕（国立天文台）「惑星系誕生研究の基礎」
- ・話題提供①：深川美里（国立天文台）「すばる・アルマ・TMTによる惑星系形成観測」
- ・話題提供②：武藤恭之（工学院大学）「新しい観測から惑星系形成を想像する理論研究」
- ・参加者事例紹介
- ・グループワーク①（主に学校での授業向けの内容）

●12月3日（月）9:00-17:00

- ・話題提供③：相川祐理（東京大学）「惑星系形成における化学」
- ・話題提供④：堀安範（アストロバイオロジーセンター）「太陽系外惑星系と惑星系形成」
- ・参加者事例紹介
- ・グループワーク②（主に科学館・博物館、天文イベント向け等の内容）

「一般社団法人 日本カレンダー暦文化振興協会 2018年の活動」報告

片山真人 (天文情報センター)

暦文協★01の活動も早8年目となりました。

●第8回総会 & 講演会

8月30日には、東京大学弥生講堂一条ホールにて総会 & 講演会を開催、約100名の参加をいただきました。

まずは京都産業大学の所 功 名誉教授から「新しい元号への展望—改元の在り方の見直しは可能か—」と題し、元号使用の始まりや改元理由・手続きなどといった歴史を概観したうえで、元号の出版・文字の選定・新元号の公布と施行のタイミングなどについて、来るべき改元に向けた展望をいただきました。



京都産業大学の所 功 名誉教授による講演。

続いて、トークセッション「来年に迫る改元や新元号について」では、毎日新聞社で「平成」発表に携わった小松浩主筆も交え、発表当時の裏話や、元号と西暦の記載順序・法的根拠・使い分け、さまざまな文化のよいところをうまく併せて使いこなす日本人の特質など、さまざまなトークが進みました。



トークセッションの様子。



毎日新聞社の小松浩主筆。

総会では、故古在由秀最高学術顧問★02のご冥福を祈り黙祷をささげた後、事業報告や会計報告などが承認されました。

●新暦奉告参拝

12月3日カレンダーの日★03には、恒例の新暦奉告参拝を明治神宮にて実施、約95名の参加をいただきました。



参拝の様子。

参拝は神楽殿前からの参進に始まり、本殿★04にて参拝・玉串拝礼、その後神楽殿にて祈願の祈祷、巫女舞の奉納という形で執り行われました。

参拝の後には参集殿にて、学校法人 谷岡学園（大



谷岡学園の谷岡理事長・学長による講演。



集合写真。

★01 暦文協

一般社団法人 日本カレンダー暦文化振興協会の略称 (国天ニュース2011年10月号参照) <http://www.rekibunkyo.or.jp/>



一般社団法人
日本カレンダー暦文化振興協会
Japan Association for Calendar and Culture Promotion

★02 国立天文台

初代台長の古在先生は2018年2月5日にご逝去されました (国天ニュース2018年4月号を参照)。古在先生には暦文協の最高学術顧問として温かいご指導をいただいております。ここにあらためて感謝申し上げるとともに、心よりご冥福をお祈り申し上げます。



★03 国天ニュース2018年3月号などを参照。

★04 明治神宮は鎮座百年祭に向けた改修工事の真最中で、今回は仮殿での参拝となりました。

阪商業大学)の谷岡一郎 理事長・学長から「世界を変えた暦の歴史」と題して、暦がいかに社会と知を構築し変化・発展させてきたか、数千年前から存在するゲーム盤の穴や升目の数と月の満ち欠けや二十四節気との関係「原初、ゲームは暦表示盤だった…」などといった講演をいただきました。

暦文協では今後もさまざまな形で、活動を続けていく予定です。

平成32年（2020）暦要項を発表しました！

片山真人（天文情報センター）

平成31年2月1日、官報にて平成32年（2020）暦要項を発表しました。

<https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/yoko/>

●平成32年は平成という時代の終りと東京オリンピックが来いまって、祝日の大変動があります。

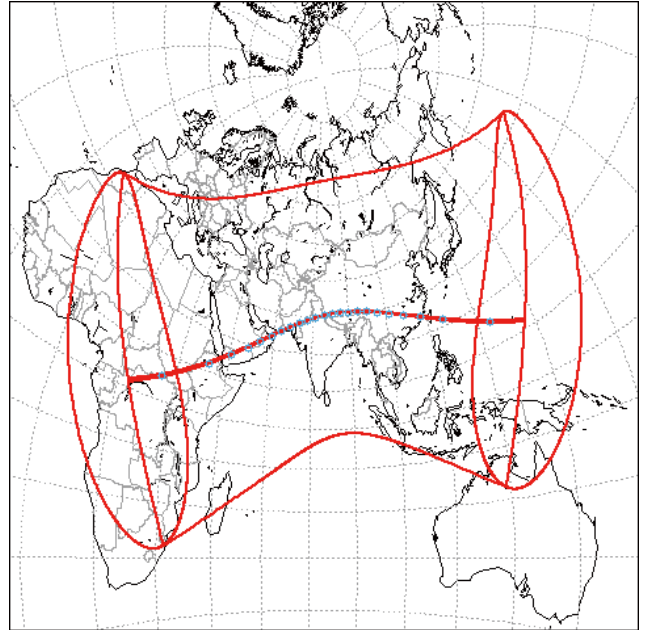
- ・春分の日、秋分の日は、それぞれ3月20日、9月22日になります。
- ・天皇の即位に伴い、平成32年から「天皇誕生日」は2月23日となります。なお、この日は日曜日にあたるため、翌2月24日は休日となります。
- ・平成32年から「体育の日」が「スポーツの日」となり、「スポーツを楽しみ、他者を尊重する精神を培うとともに、健康で活力ある社会の実現を願う」日とされました。また、平成32年に限り、「海の日」は東京オリンピック開会式前日の7月23日、「スポーツの日」は開会式当日の7月24日、「山の日」は閉会式翌日の8月10日となります。
- ・5月3日「憲法記念日」は日曜日になりますが、翌日の5月4日「みどりの日」も翌々日の5月5日「こどもの日」も「国民の祝日」であるため、更に翌日の5月6日（水曜日）が休日となります。

●日食が2回あります。

- ・6月21日には金環日食があり、日本では全国で部分食を見ることができます。
- ・12月14日から15日にかけては皆既日食がありますが、日本では見ることはできません。

※各地の詳しい予報については暦要項のほか、暦計算室ホームページでもお調べいただけます。

これにて平成最後の暦要項発表は完了しましたが、来る4月1日には新元号の発表が予定されており、平成32年は新元号の2年ということになります。元号・祝日・休日・夏時刻といったニュースに一喜一憂する日々もそろそろ出口が見えてきた……か？



6月21日 金環日食。

編集後記

星座柄の折り紙セットを息子にあげたら、気に入ったようです。ただ、むやみやたらに折り上がってくる、鶴や紙飛行機どもをどうしたものか…。(G)
 いつ以来か思い出せないくらい久しぶりのスキーへ。やり始めるとすっかり楽しくなっていました。職場からスキー場へすぐ行ける特権を再認識。(は)
 先月の出張の後、2週間のつかの間の帰国。また来週頭から出張で次の帰国は4月上旬。海外にいればスギ花粉の影響が少ないのはいいけれど、三鷹の桜はみられるかな～。(I)
 1990年代初頭から2000年代にかけてのアルマ望遠鏡建設記録が取められたビデオテープをデジタル化。手で中身が確認できないEDベータ、Hi-8テープに何が入っているか、楽しみです。(h)
 アジア冬の学校で講師をしました。私の班はタイ、ベトナム、韓国、中国(?)の修士の院生さん。やる気ある若者との議論は楽しかったなあ。(e)
 久しぶりにコマ回しをしたりあやとりをしたりして娘と遊ぶ。コマは一発で回すことができ、父親の威厳を示すことができたと思ったら、娘はうまくできず負けず嫌いの性分もありすねてしまった。失敗の積み重ねが大事なんだよ。(K)
 オリオンが傾いて、もうすぐ桜の季節。ああ、桜が今年も見られそう。(W)

●2019年2月号p30の写真(林さんの講演)でお名前に誤りがありました。正しくは「林左絵子氏」です。訂正しお詫びいたします(係)。

国立天文台ニュース
NAOJ NEWS

No.308 2019.3

ISSN 0915-8863

© 2019 NAOJ

(本誌記事の無断転載・放送を禁じます)

国立天文台ニュース編集委員会

●編集委員：渡部潤一(委員長・副会長)／石井未来(TMT推進室)／秦和弘(水沢VLBI観測所)／勝川行雄(SOLAR-C準備室)／平松正顕(チリ観測所)／小久保英一郎(理論研究部/天文シミュレーションプロジェクト)／伊藤哲也(先端技術センター)
 ●編集：天文情報センター出版室(高田裕行/ランドック・ラムゼイ) ●デザイン：久保麻紀(天文情報センター)

★国立天文台ニュースに関するお問い合わせは、上記の電話あるいはFAXでお願いいたします。
 なお、国立天文台ニュースは、<https://www.nao.ac.jp/naoj-news/>でもご覧いただけます。

発行日／2019年3月1日

発行／大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
国立天文台ニュース編集委員会

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

TEL 0422-34-3958 (出版室)

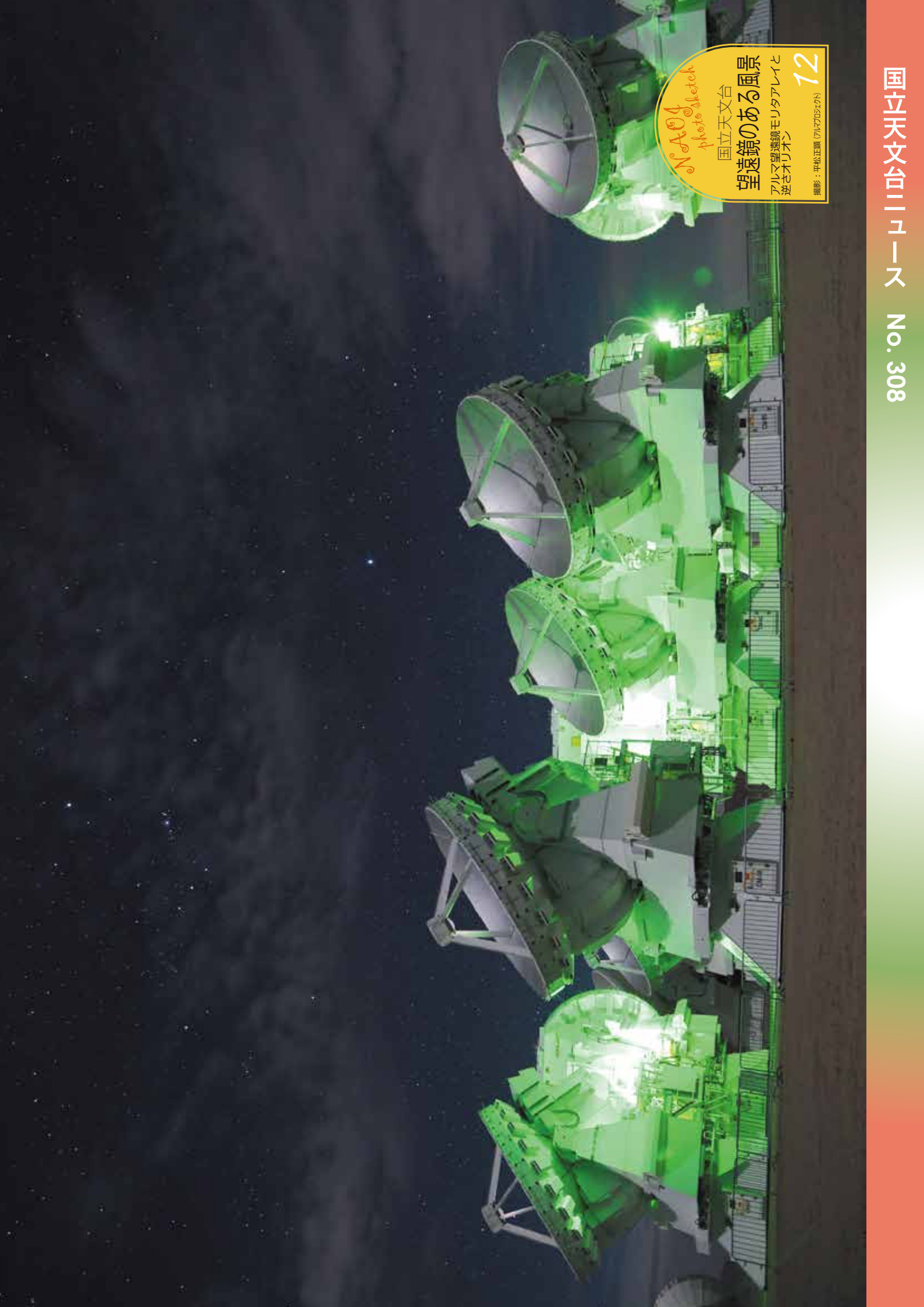
FAX 0422-34-3952 (出版室)

国立天文台代表 TEL 0422-34-3600

質問電話 TEL 0422-34-3688

4月号の研究トピックスは、小型望遠鏡で長時間にわたって数多くの恒星のモニター観測を行い、その掩蔽現象から太陽系の最果てにある極小サイズの天体を捉えた研究成果を紹介いたします。お楽しみに！

天のこぼれ



NAOJ
photo sketch
国立天文台
望遠鏡のある風景
アルマ望遠鏡モリタアレイと
逆さオリオン
12
撮影：平松正顕 (ワルマ705767)