

自然科学研究機構

NAOJ

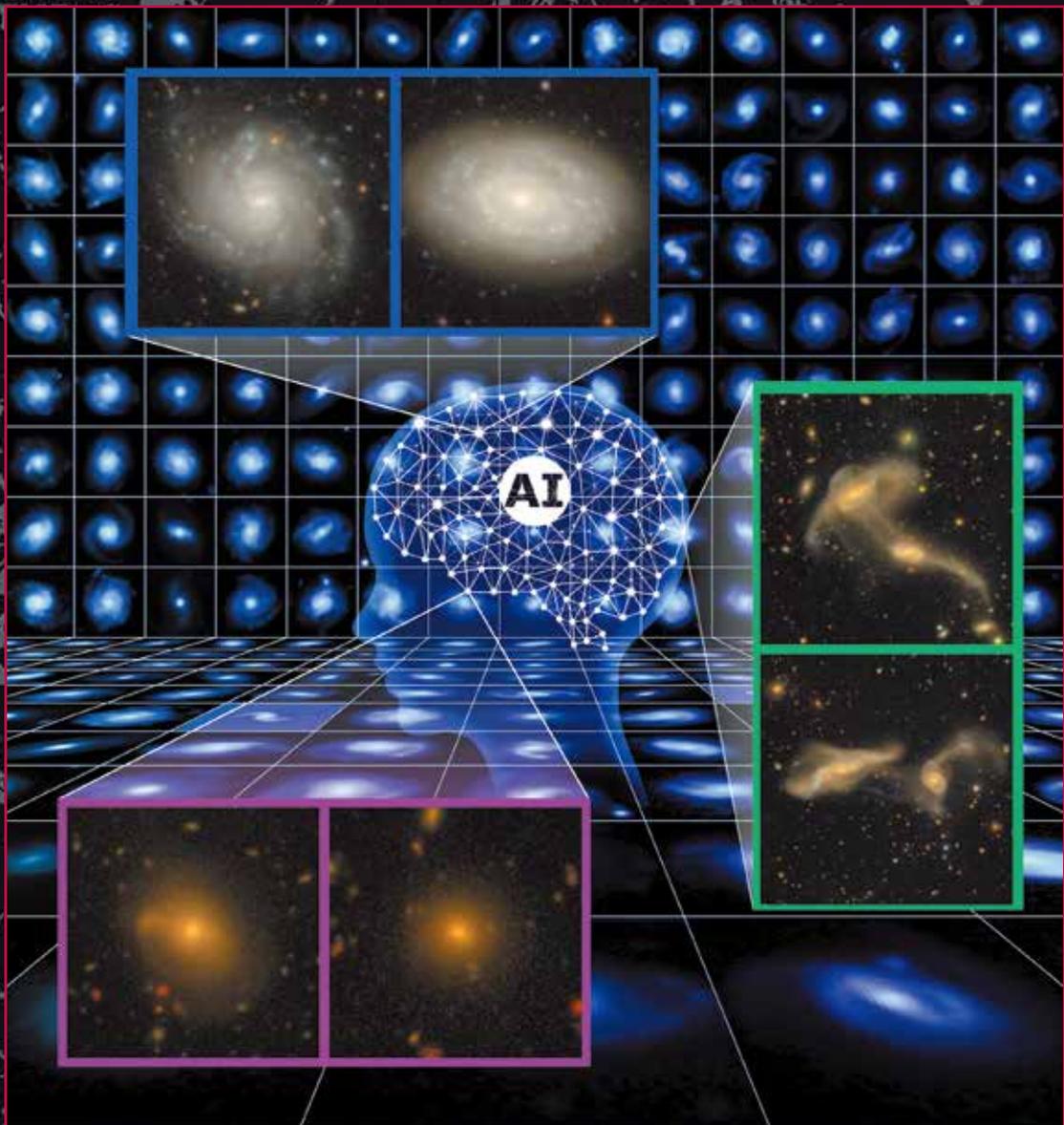
国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2020年12月1日 No.329

研究トピックス

人工知能で銀河の形を調べる



- 一周年を迎えたGALAXY CRUISE、次のステップは機械学習?!
- ミニ特集 国立天文台「検討グループ」概要紹介
「SKA1検討グループ」概要紹介 / 「ngVLA検討グループ」概要紹介
- 「Nobeyama Science Workshop 2020」開催報告
- 「第18回水沢VLBI 観測所ユーザーズミーティング」開催報告
- 「アルマ望遠鏡ツイッターキャンペーン」実施報告

12

2020

- 表紙
- 国立天文台カレンダー

03

研究トピックス

人工知能で銀河の形を調べる

但木謙一 (アルマプロジェクト)

06

おしらせ

- 一周年を迎えた GALAXY CRUISE、次のステップは機械学習?!
臼田・佐藤 功美子 (天文情報センター)
- 「Nobeyama Science Workshop 2020」開催報告
谷口琴美 (学習院大学)
- 「第18回水沢 VLBI 観測所ユーザーズミーティング」開催報告
永山 匠 (水沢 VLBI 観測所)

10

ミニ特集 国立天文台「検討グループ」概要紹介

- 「SKA1検討グループ」概要紹介
赤堀卓也 (水沢 VLBI 観測所 / SKA 機構)
- 「ngVLA検討グループ」概要紹介
伊王野大介 (アルマプロジェクト)
- 「アルマ望遠鏡ツイッターキャンペーン」実施報告
宮田景子 (アルマプロジェクト)

15

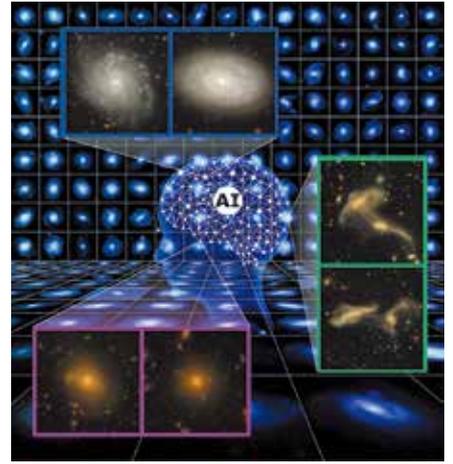
編集後記 / 次号予告

16

連載「すばる望遠鏡 HSC Cosmic Gallery」09

赤方偏移0.7の銀河団

解説：田中賢幸 (ハワイ観測所)



表紙画像

宇宙に存在する様々な形をした銀河が人工知能によって分類されるイメージイラスト (クレジット: 国立天文台 / HSC-SSP)。

背景星図 (千葉県立郷土博物館)

渦巻銀河 M81 画像 (すばる望遠鏡)

新型コロナウイルス感染症に関連した対応について

新型コロナウイルス感染症の感染拡大を防ぐため、国立天文台の施設公開、定例公開、イベント等の一部を中止いたします。再開につきましては、国立天文台のウェブサイトや SNS にてご案内いたします。みなさまのご理解、ご協力をお願いします。

また、国立天文台にご来訪されるみなさまにおかれましては、下記のことをお願いいたします。

- 新型コロナウイルス感染者との濃厚接触が判明している場合や、その恐れがある場合は、ご来訪をお控えください。
- 咳や発熱などの症状がある場合は、ご来訪をお控えください。
- マスクや手洗いなど、各自で十分な防護策をお取りください。

★くわしくは

<https://www.nao.ac.jp/notice/20200226-coronavirus.html>

をご覧ください。

国立天文台カレンダー

★予定は変更される場合があります

2020年11月

- 6日(金) 幹事会議
- 7日(土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 9日(月) 運営会議
- 13日(金) 幹事会議 / 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 21日(土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 25日(水) プロジェクト会議
- 28日(土) 観望会 (三鷹・オンライン)

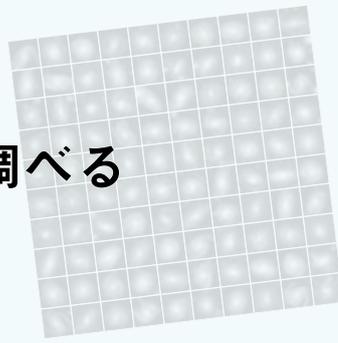
2020年12月

- 8日(火) 幹事会議
- 18日(金) 幹事会議
- 23日(水) プロジェクト会議
- 26日(土) 観望会 (三鷹・オンライン)

2021年1月

- 8日(金) 幹事会議
- 16日(土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 19日(火) 幹事会議
- 23日(土) 観望会 (三鷹)
- 25日(月) 運営会議
- 27日(水) プロジェクト会議

人工知能で銀河の形を調べる



但木謙一
(アルマプロジェクト)

人工知能と天文学ビッグデータ

「AI（人工知能）が将棋でプロ棋士に勝利!」、「AIによる車の自動運転に成功!」。数年前からそんなニュースをちらほら聞くようになり、今では特に珍しいことでもなくなりました。人工知能と聞くと、会話や行動などを自らの意思で行う人間型ロボットのようなものを想像する方もいるかもしれませんが、多くの場合、特定の限られた仕事（画像上のどこに人間がいるか判断することなど）を自動で行うプログラムのことを指します。人工知能を制する者は世界を制すると言わんばかりに、この大きな波は天文学の研究にもやってきています。近年は望遠鏡・観測装置の大型化に伴って、扱うデータ量も膨大になってきており、天文学ビッグデータの解析に人間の処理が追いつかなくなってきました。

私は遠くの宇宙にある銀河の形を調べる研究を行っていますが、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いた戦略枠プログラム (Subaru Strategic Program: SSP★01) の観測データでは、およそ100万個の銀河の形を調べることが可能になります。人間が1つの銀河画像を見て、その形を調べるのに10秒かかったとしたら、100万個の銀河を解析し終えるのに1日8時間作業で約1年かかることになります。人工知能を活用してこのような解析を自動で行えると大変助かるのです。

銀河動物園

研究者はなぜ銀河の形を調べているのでしょうか？ 今から1世紀近く前にアメリカの天文学者エドウィン・ハッブルは、銀河が実に様々な形をしていることを知りました。天の川銀河のような渦巻のある銀河もいれば、ほとんど構造がなくただの楕円形に近い銀河や乱れた変な形の銀河もいて、「まるで銀河の動物園や〜!」という声が聞こえてきそうです (図01)。このような多様な形の銀河はいつ、どのようにしてできたのでしょうか？

銀河研究の面白いところは、遠くの銀河を観測することで、過去の姿を直接見えることです。1億年前の銀河を調べなければ、1億光年彼方にある銀河を観ればよいのです。様々な距離にある銀河を観測することで、銀河が時間と共にどのように進化してきたのか調べることができるため、必然的にたくさんの銀河を観測することになります。2000年代に行われた口径2.5mの望遠鏡を使ったスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) で取得した観測画像では、7億光年くらいまで離れた約30万個の銀河の形を調べることができました。Galaxy Zoo (日本語訳は銀河動物園) という市民天文学プロジェクトでは、SDSSの30万個の銀河画像をインターネット上で公開し、8万人以上の市民ボランティアに銀河の形を判別してもらいました。そして2014年、このGalaxy Zooによって判別した銀河の形を答えとして、自動で分類する競技大会がインターネット上で開催されました。その優勝者は99%というほぼ完璧な精度で銀河の形を分類し、その時に活用されたのが、現在の人工知能を支える基幹技術の1つである「畳み込みニューラルネットワーク」でした。

★ newscope <解説>

★01 Subaru Strategic Program: SSP

現在、日本・台湾・プリンストン大学の研究者達がすばる望遠鏡HSCを300晩使った大規模撮像（写真を撮る）探査を行っています。この探査では観測する広さと感度が異なる3種類の観測を行っているのですが、今回使ったのは最も広い領域を観測する「ワイド」の画像データです。「ワイド」では、1400平方度（満月約6700個分の広さ）に渡って、0.6秒角（視力100に相当）の高解像度画像を取得する予定です。

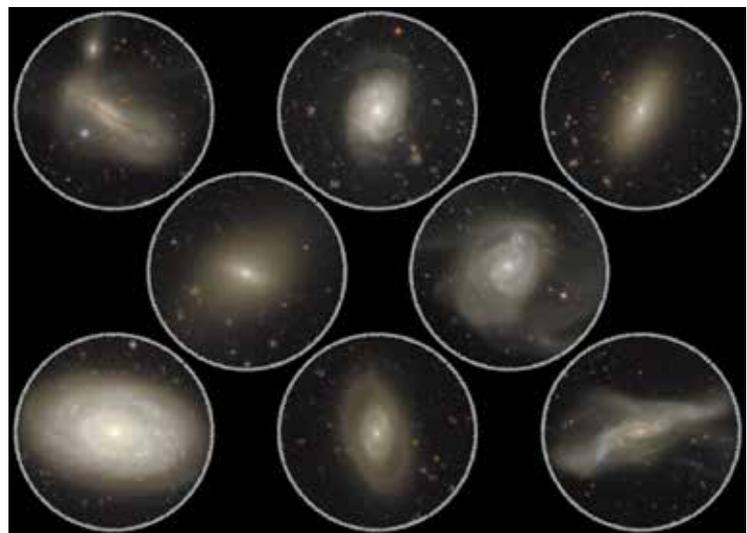


図01 すばる望遠鏡HSCで観測された様々な形をした銀河。(クレジット：国立天文台/HSC-SSP/M. Koike)

畳み込みニューラルネットワーク

猫、犬、馬が写った64ピクセル×64ピクセル（4096画素）の3枚の白黒画像を想像してください。例え3歳の子供であっても、この3枚の画像を見れば、どれが猫の写真かすぐに判別することができます。しかし機械の世界ではそれは簡単な仕事ではありません。画像中に4096個あるそれぞれのピクセルには0（白色）や100（灰色）や255（黒色）などの値が入っており、この4096個の数値データの並びから、猫か犬か馬か機械が自動で判別しなければいけません。同じ猫でも右を向いた画像と左を向いた画像では数値データは大きく変わってしまいます。畳み込みニューラルネットワークでは、4096個の数値データから直接何の画像か判別するのではなく、畳み込みと呼ばれる演算処理を複数回行って、猫の輪郭や耳や目などの特徴を捉え、それらの濃縮された情報を元に猫かどうかの判別を行います（図02）。

S字型の渦巻銀河とZ字型の渦巻銀河、どちらが多い？

SDSSでは7億光年彼方にある銀河の形まで調べることができましたが、解像度が2倍、感度が36倍高いすばる望遠鏡の観測画像（図03）では、70億光年彼方にある銀河でもその形を判別することができます。言い換えれば

03) では、70億光年彼方にある銀河でもその形を判別することができます。言い換えれば

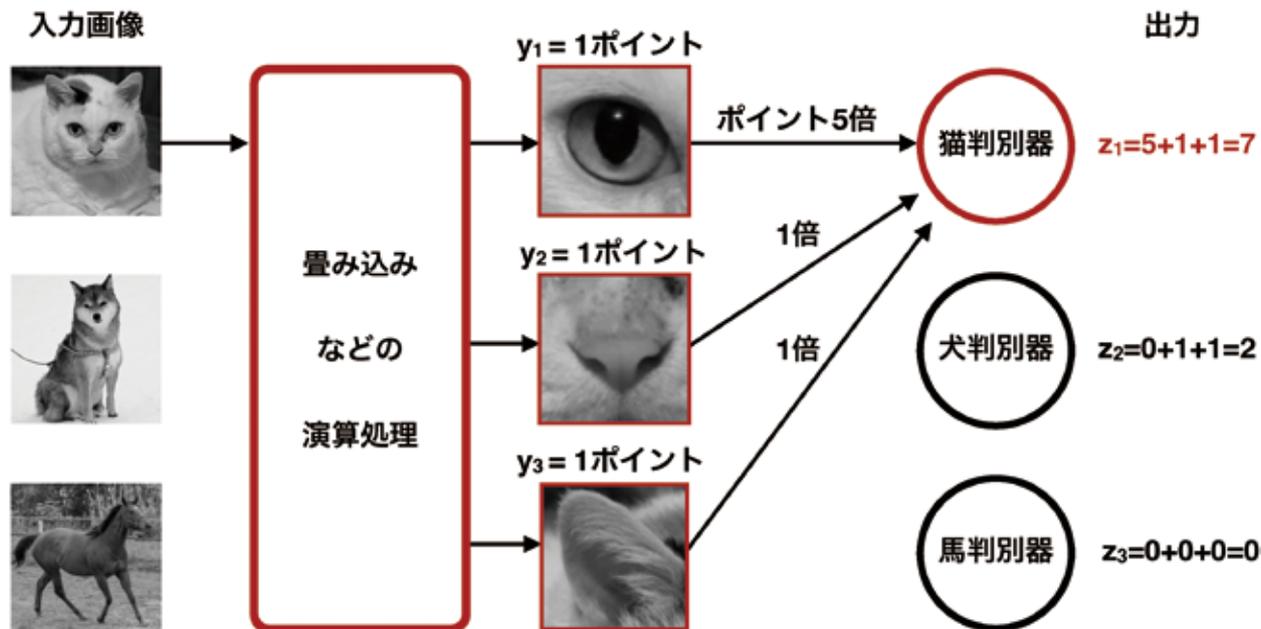
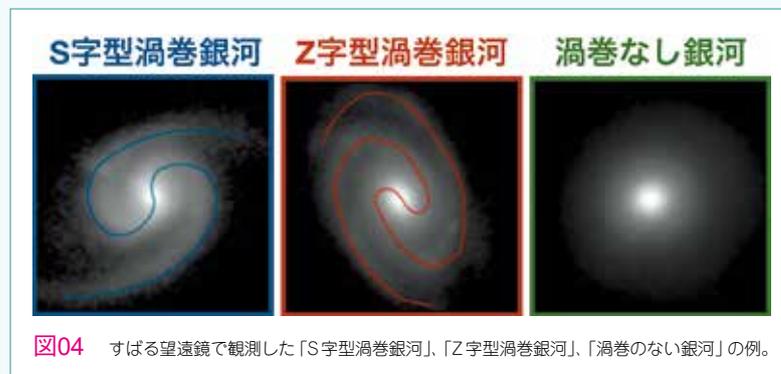


図02 猫・犬・馬の画像を分類する畳み込みニューラルネットワークのイメージ。猫の入力画像に対して、畳み込みなどの演算処理を行った後の3つの出力 $y_1=1$ 、 $y_2=1$ 、 $y_3=1$ から猫かどうか判別することを考えます。その時に3つの出力を同等に扱うのではなく、重要な情報はその分ポイントアップしてあげます。例えば y_1 は明らかに猫の目ですのでポイント5倍、 y_2 や y_3 は猫の鼻や耳に見えますが、犬の鼻や耳とも似ているのでポイント1倍としましょう。そうすると最終的に猫判別器に渡されるポイントは全部で $z_1=5+1+1=7$ となります。一方、犬の判別器では y_1 は犬の目ではないのでポイント0倍、 y_2 や y_3 はポイント1倍として、 $z_2=0+1+1=2$ となり、馬の判別器では y_1 、 y_2 、 y_3 はどれも馬の目・鼻・耳ではないので、全てポイント0倍として $z_3=0+0+0=0$ となります。その結果、猫判別器のポイントが一番高くなり、最終的に「この画像は猫である」と出力されることとなります。高精度で自動判別するために、大量の猫の画像などを教師データとしてネットワークを訓練するのですが、これはポイントアップの倍率（重み）を調整していることに相当します。

138億年の宇宙の歴史の半分まで遡って、銀河の形の進化を追えるということになります。

私たちは畳み込みニューラルネットワークとすばる望遠鏡の世界最大・最高品質の銀河画像データを使って、銀河を「S字型渦巻銀河」、「Z字型渦巻銀河」、「渦巻のない銀河」の3種類に分類しました(図04)。「S」と「Z」は銀河を表側と裏側のどちらから見ているかの違いであり、本質的にはどちらも「渦巻銀河」です。銀河の分布が完全にランダムであれば、「S」と「Z」は同じ数だけ観測されると期待されますが、実際の宇宙はどうなっているのでしょうか。

私たちはまず5万7千個の銀河画像を目で見て分類し、畳み込みニューラルネットワークを訓練するための教師データを作成しました。この段階では「S字型渦巻銀河」の方が多のですが、これは人間の脳が「Z」より「S」の方が認識しやすく偏った結果になっている可能性があります。そこで「S」と「Z」の画像を反転し、それぞれ「Z」と「S」の画像にして教師データに加え、「S」と「Z」の認識精度が等しくなるように訓練を行いました。その結果、約97.5%の精度で銀河の形を正しく分類することに成功しました。この人工知能を使って未分類の56万個の銀河の形を自動分類し、37917個の「S字型渦巻銀河」と38718個の「Z字型渦巻銀河」を見つけました(図05)。これだけ見ると「Z」の方が多いと思うかもしれませんが、約2.5%は間違った分類をしてしまうことを考慮すると、今回の分類では誤差の範囲内で「S」と「Z」の数は等しいという結論になりました。

天文学者×市民×人工知能で挑む銀河進化の謎

今回は銀河の形を3つのクラスに分類しましたが、教師データさえあればもっと様々な形に分類できると期待されます。しかし高い精度で自動分類するためには、1つのクラスあたり少なくとも1000個は必要です。分類する形の銀河が100個に1個しか存在しない希少なものであれば、10万個以上の銀河を目で確認しなければいけません。

そこで研究者だけではなく、多くの市民の方々の協力が必要になってきます。SDSSにはGalaxy Zooという市民天文学プロジェクトがあったように、すばる望遠鏡にはGALAXY CRUISE★02(国立天文台ニュース2020年2月号参照)があります。GALAXY CRUISEでは、すばる望遠鏡の観測画像を使って「リング銀河」や「しっぽ付き銀河」のような銀河同士の衝突・合体の兆候のある銀河の分類を行っています。GALAXY CRUISEで市民の方々に分類してもらった教師データを使って、畳み込みニューラルネットワークを訓練すれば、さらにたくさんの衝突銀河を見つけることができるので、銀河同士の衝突合体が銀河の進化にどのような影響を与えているのか明らかになるかもしれません。天文学者の知恵と経験、市民の天文学への興味、人工知能技術を融合して、宇宙の謎に挑む時代がそこまで来ているのです。

newscope <解説>

★02 GALAXY CRUISE



GALAXY CRUISEのトップページ。
くわしくは下記URLへ。

<https://galaxycruise.mtk.nao.ac.jp/>

●論文掲載情報

Tadaki, K. et al. 2020, "Spin parity of spiral galaxies II: a catalogue of 80 k spiral galaxies using big data from the Subaru Hyper Suprime-Cam survey and deep learning", MNRAS, 496, 4276-4286

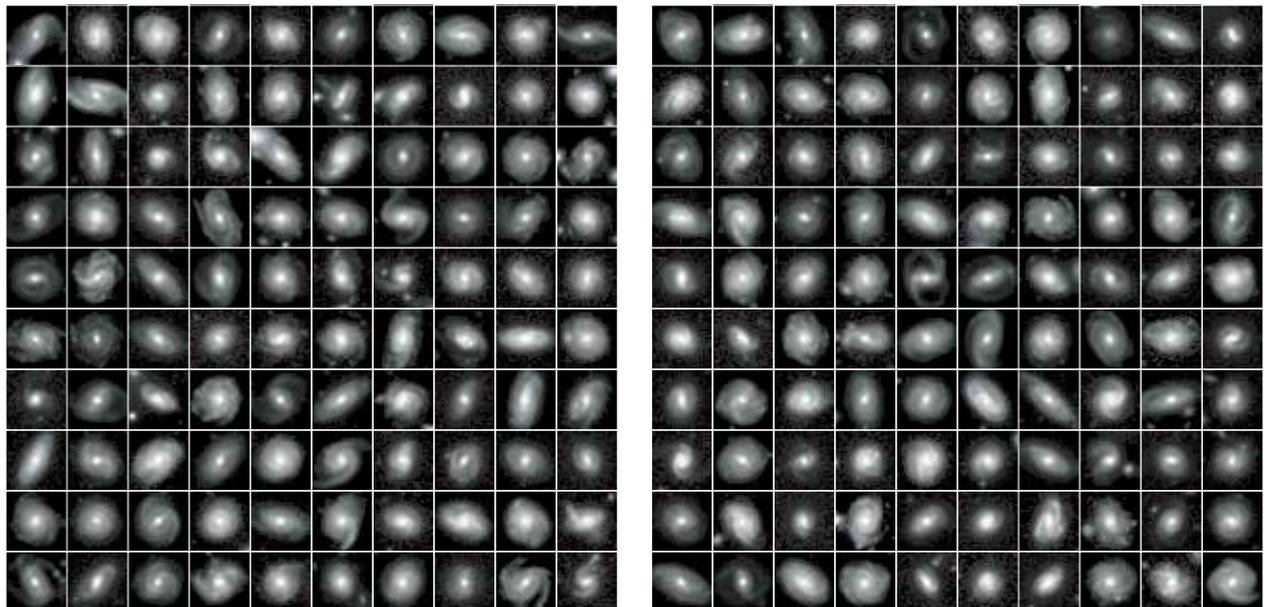


図05 畳み込みニューラルネットワークを用いて自動で分類した「S字型渦巻銀河(左)」と「Z字型渦巻銀河(右)」。

一周年を迎えた GALAXY CRUISE、次のステップは機械学習?!

白田 - 佐藤 功美子 (天文情報センター)

すばる望遠鏡に搭載された超広視野主焦点カメラHSCが捉えた広大な宇宙画像には、たくさんの銀河が写りこんでいます。GALAXY CRUISEは、その銀河を市民が分類し、銀河の形成と成長の謎に挑む、国立天文台初の「市民天文学」プロジェクトです。国立天文台ニュース2020年2月の特集号にある通り、2019年11月1日に日本語サイトが公開され、私たちの「航海」が始まりました。2020年2月19日には、英語サイトも公開されました。日本語サイト公開から丁度一周年を迎えた2020年11月1日の時点で、77の国と地域から5124名が登録され、銀河分類総件数が86万回を超えています。この1年を振り返るとともに、今後の見通しについてご紹介いたします。

●2020年3月

臨時休校時に10代以下の登録者が急増

新型コロナウイルス感染拡大を受けて、日本では3月2日から、全国のほとんどの小中高校、特別支援学校が臨時休校に入りました。3月上旬の約2週間で10歳未満と10代の方々を中心に、国内登録者が700名以上増えました。休校中に楽しめるオンラインコンテンツとして、複数のサイトで紹介されたおかげだと考えられます。国外の登録者も、この期間に300名以上増えました。

●2020年8月

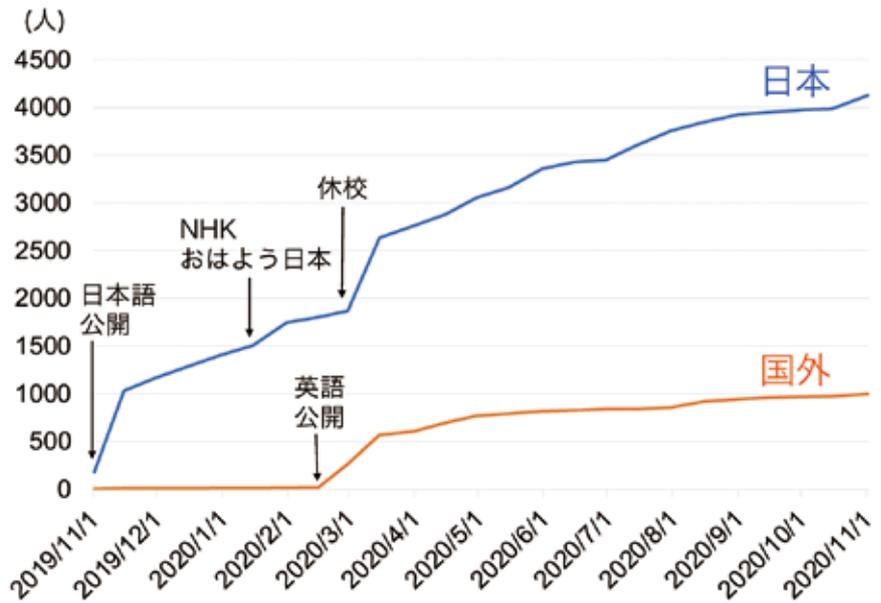
「1カ月で1000個分類しようキャンペーン」大盛況に終わる

8月1日から31日までの1か月間に100個、300個、1000個分類すると、それぞれ銅、銀、金メダルのデジタルアイテムが授与されるキャンペーンを行ったところ、85名の方が金メダルを獲得されました。この1か月間で、銀河分類総件数が30%増えるという快挙を成し遂げました(キャンペーン前が約58万回、後が約76万回)。

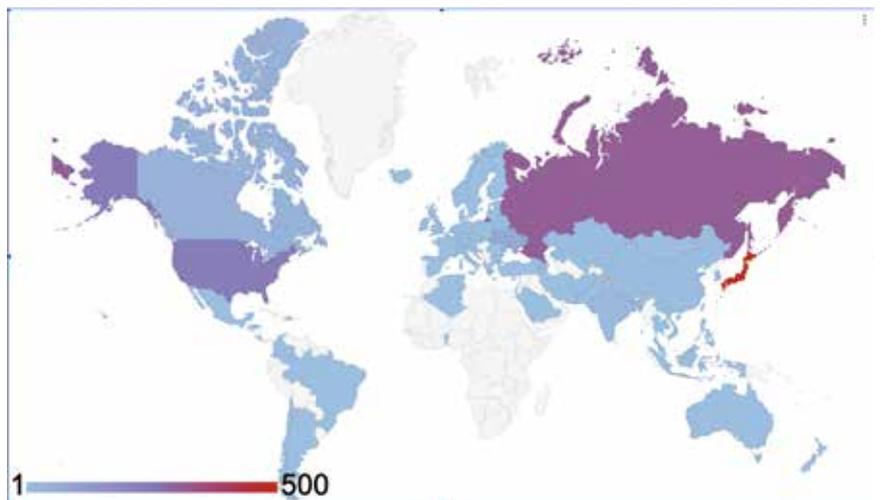
●2020年10月

「三鷹・星と宇宙の日2020」に出演

毎年人気の三鷹キャンパス特別公開



01 2019年11月1日から1年間の、国内と国外の登録者数の推移。日本語サイト公開から2週間以内に、登録者が1000人に達した。次に大きく増えたのは2020年3月2日からの休校時。10月下旬に少し増えているのは、オンライン「三鷹・星と宇宙の日」のおかげ?



02 各国の登録者数。ダントツ1位は日本で、全体の約80%を占める。2位~5位は、ロシア、米国、ウクライナ、カナダ。いずれもオンライン新聞記事が掲載された。ロシアでは、ユーチューバーによる紹介もあった。

「三鷹・星と宇宙の日」が2020年10月24日(土)に開催されました。今年は、新型コロナウイルス感染症拡大防止のためにオンラインでの開催となりました。17時からの「天の川銀河を越えて」で、田中賢幸「船長」(ハワイ観測所准教授 ※裏表紙も参照)が衝突銀河について、白田-佐藤がGALAXY CRUISEについてご紹介しました★01。

ほかにも、オンライン研究会にて他分野の方々との交流が始まったり、「若手クルー」(大学院生など若手研究者)の協力を得てTwitter(日本語 @Galaxy_

Cruise、英語 @Galaxy_Cruis_e)を始めたりと、盛りだくさんの1年となりました。

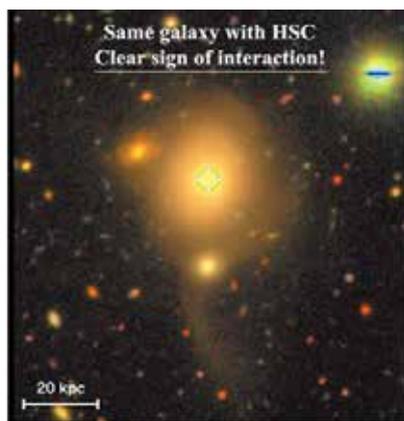
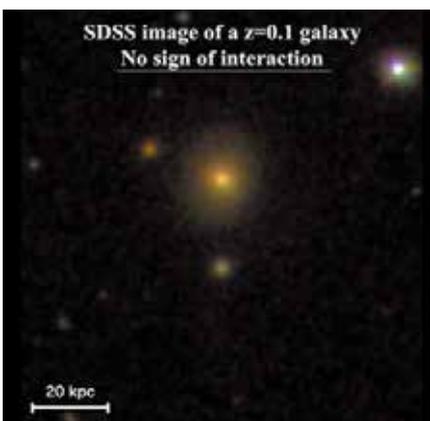
肝心の科学研究成果でも、良い感触を得ています。まず初期成果として、2019年11月1日から2020年1月10日までの、1052人の市民天文学者の分類結果を使って田中船長が統計解析を行いました。過去の観測結果より、明るい銀河ほど楕円銀河の割合が高いことが知られていますが、図05にある通り、市民天文学者の分類結果からも、その傾向がきれいに見えています。



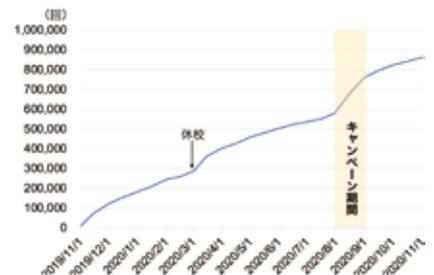
03 キャンペーン期間中の銀河分類画面。右上にインジケーターが出現し、さらに銀河を100個、300個、1000個分類すると、メダルが表示された（画像右上）。

さらに、総合研究大学院大学（総研大）・国立天文台主催のサマースチューデントプログラムにて、東北大学2年生が、市民天文学者の分類結果を「教師データ」とした機械学習の研究体験を行いました。嶋川里澄さん（ハワイ観測所特任助教）と田中賢幸船長が指導されましたが、最終的に91%の精度で衝突銀河を抽出できるAI（人工知能）が完成しました。これまで、いろいろな人から「AIで分類したらどうか」という質問を

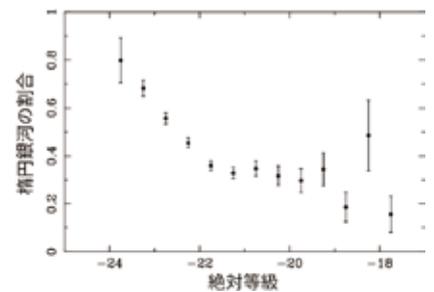
受け、「今はまだその段階にない」と答えていました。というのも、過去に口径2.5mの望遠鏡を使ったスローン・デジタル・スカイ・サーベイ（SDSS）で撮られた画像を使って、衝突銀河の分類がなされていますが、その分類結果をそのまま、すばる望遠鏡HSCの画像で使えないからです。図06にある通り、同じ銀河の画像を見比べると、SDSSで撮られた画像（左）では衝突の痕跡が見られないのに、高品質なHSCの画像（右）



06 SDSSで撮られたある銀河の画像（左）と、すばる望遠鏡HSCで撮られた同じ銀河の画像（右）。左の画像ではみえない「しっぽ」が右の画像では明らかに見えている。
Credit: SDSS（左）、NAOJ/HSC-SSP（右）※田中船長の学生さんがこの画像を作成。



04 2019年11月1日から1年間の、銀河分類総件数の変化。3月の休校時と、8月のキャンペーン時に大きく増加した。



05 市民天文学者の分類結果をもとに、楕円銀河の割合を明るさごとに描いたグラフ。明るい（絶対等級が小さい）銀河ほど楕円銀河が多い（割合が1に近い）という、右下がりの傾向が見えている。

では明らかに衝突の痕跡である「しっぽ」の形状が見えています。ゆくゆくは、GALAXY CRUISEでの市民天文学者による分類結果を教師データとした機械学習を、と考えていた田中船長も、このサマースチューデントの成果を見て、いよいよ次の段階が見えてきた、と喜んでいきます。今後、市民天文学者の皆様の分類結果を直接使った統計的解析と、市民天文学と機械学習を融合させてさらに多くの銀河を分類、という二段階で進めていくつもりです。そのためには、より暗い銀河も分類する必要性を感じており（船長談）、2021年には、暗い銀河を含めた「シーズン2」の開始を計画しています。

ここでご紹介した、この1年のハイライトは、GALAXY CRUISE ホームページに毎月1日に掲載している「NEWS記事」★02としてご覧になれます。今後も、ホームページやTwitterにて、話題提供や進捗状況の報告を行ってまいりますので、よろしくお願いたします。

GALAXY CRUISE をスペイン語で紹介しました！

2020年11月25日午前5時30分（日本時間）より、エクアドルでオンライン開催された「第22回中南米天文学・宇宙工学オリンピック（XII Olimpiada Latinoamericana de Astronomía y Astronáutica OLAA 2020）」にて、スペイン語で講演させていただきました。45分間、スペイン語のみでがつり講演したのは今回が初めてです。結構反響があり、スペイン語での第2回講演が近々ありそう？！

07 オンライン講演の様子。英語スライドを見せながら、スペイン語で講演した。左上はオリンピック世話人、エクアドルのマルセラさん。



「Nobeyama Science Workshop 2020」開催報告

谷口琴美 (学習院大学)

国立天文台野辺山45m望遠鏡は共同利用が開始された1982年以来、日本の電波天文学を牽引する主力装置として活躍してきました。実に40年近くにわたり数多くの重要な発見をもたらしてきた野辺山45m望遠鏡は、今尚、次世代を担う多くの若手研究者たちを中心に積極的に利用され、科学成果を挙げ続けています。

昨年度は、当時観測所の研究員であった竹川さんを中心として、野辺山宇宙電波観測所で「Nobeyama Science Workshop 令和元年」が開催されましたが、観測所の本館の閉鎖に伴い、観測所での開催ができない状況になりました。しかし、野辺山45m望遠鏡を使ってサイエンスの成果を出し続けている若手研究者の方々の発表や議論の場を設けることは重要であると感じていました。そこで今年は、若手研究者を中心に野辺山45m望遠鏡のサイエンスを盛り上げていこうという意気込みで、筆者と竹川さんを中心に本Workshopを計画し始めました。計画を始めた2月初旬では、学習院大学での開催を予定していましたが、残念ながら新型コロナウイルスの影響でzoomによるオンライン開催となりました。

9月15日、16日の2日間で開催しました。招待講演11件に加え、32件の一般

講演の申し込みがありました。また、約130名近くの方々に参加申し込みをいただきました。招待講演の約半数は大学院生や若手研究者の方々をお願いしました。一般講演にも多くの大学院生および若手研究者の方々から申し込みいただき、本Workshopを開催した意義を感じられました。星形成、星間化学、銀河、太陽系、装置開発など、幅広い分野の講演申し込みがあり、野辺山45m望遠鏡が様々な分野の研究で活躍していることが分かります。Zoomでの開催ということで、議論の場所を確保することが難しいという問題がありましたが、Google Documentを利用してTalk Roomを開設することで、質疑応答の時間で収まらない議論を活発に行う工夫を行いました。

さらに今年は、電波天文学の中で重要な分子である一酸化炭素(CO)が星間空間で初検出されてから50年という記念の年でもあります。筆者は昨年夏までバージニア大学(アメリカ)でポスドクをしていましたが、2018年の冬にNRAOでアンモニア初検出50周年を記念した半日のmini workshopがありました。とてもアットホームな雰囲気です。NRAOの方々がGreen Bank 100m望遠鏡を誇りに思い、将来のサイエンスの議

論をしている姿勢にとっても感銘を受けました。日本でもそのような機会があったら良いなと思っているところで、今年がその良い機会になっていることに気がつき、長谷川哲夫 首席教授(国立天文台)に特別講演をお願いしました。野辺山や日本の電波天文学の歴史が感じられるご講演で、望遠鏡の建設・装置開発に携われた方々、日々のメンテナンスを行ってくださっている観測所のスタッフの方々、また今まで多くの研究成果を出してこられた先輩方に、改めて感謝と尊敬の念が湧き、とても身の引き締まる思いです。

世話人は筆者のほか、竹川俊也 助教(神奈川大学)、中村文隆 准教授、立松健一 教授(国立天文台)、土橋一仁 教授(東京学芸大学)、下井倉ともみ 准教授(大妻女子大学)、久野成夫 教授(筑波大学)です。来年度以降も若手研究者の方々を中心に、野辺山のサイエンスを盛り上げていく研究会の開催が受け継がれていくことを切に願っています。

●最後に、本Workshopは一般財団 中社創智社「学術研究や社会貢献を目的とした会議開催費の助成」の支援を受けました。この場をお借りして、本workshopにご支援いただいたことに、心よりお礼申し上げます。



「第18回水沢VLBI観測所ユーザーズミーティング」開催報告

永山 匠 (水沢 VLBI 観測所)

2020年9月24、25日の2日間にかけて、第18回水沢VLBI観測所ユーザーズミーティングが開催されました。今年は新型コロナウイルス感染拡大の懸念により初めてオンラインでの開催となりました。オンラインのメリットは場所に制限されずどこからでも参加できることです。国内はもとより韓国、台湾、オーストラリア、オランダなど世界各地から合計67名が参加しました。講演数も前年比1.5倍の36件に至り、例年以上の参加者と講演数で盛況なミーティングとなりました(画像01)。

1日目は水沢VLBI観測所が現在推進しているVERA、大学VLBI連携観測事業JVN、日韓VLBI観測網KaVA、東アジアVLBI観測網EAVNのステータスとサイエンスの報告がありました。VERAでは今年8月に出版されたPASJ特集号10編の論文をもとに、99天体のVERAカタログ、銀河定数の精密決定、10キロパーセクを超える天体距離測定、変光星の周期光度関係の成果が報告されました。JVN、KaVA、EAVNでは若手研究員や大学院生が主体となり研究を進め、最先端の成果を発表する様子が印象的でした。観測対象も銀河系、ブラックホール、星形成、パルサーなど多岐にわたり、今後のVLBI研究の広がりを期待させるものでした。

2日目はVLBIの将来計画についての発表と議論がありました。午前にはスクエア・キロメートル・アレイSKAと次世代大型ミリ波センチ波干渉計ngVLAの合同セクションで、これらの国際大型プロジェクトが計画される中で、今後の日本のVLBI研究をどのように推進するかを議論しました。午後はより近い将来の第四期中期計画(2022年以降)にフォーカスしました。VLBI懇談会の将来計画ワーキンググループから極限天体、地球物理、星、銀河、装置開発の各分野の検討状況が報告されました。SKAを見据えた低周波(1-10GHz帯)のパルサーと系内ブラックホールの観測、より高分解能を目指した高周波(86GHz帯)の銀河系中心と活動銀河核の観測などが検討中で、これらを実現するためVERAの観測周波数の拡張が提案されました。建

設から20年近くたちますが、アップグレードしつつ、まだまだVERAを使用したいというユーザーの熱意を感じました。将来計画ワーキンググループは本年度中に結果をまとめる方針で、今後の日本のVLBI研究の道筋が示される見込みです。

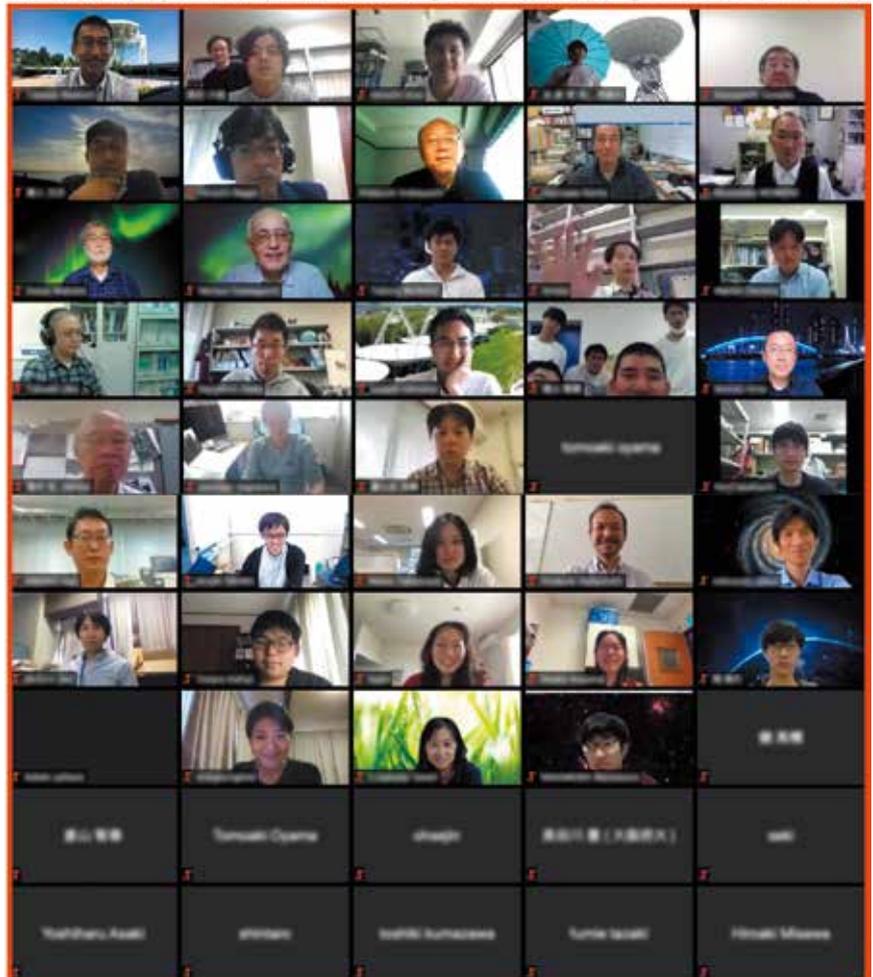
オンライン開催ということで対面でないことにより、議論が不活発となることが心配でした。そこで利用したのがオンライン掲示板でした。タイトなプログラムで漏れた質疑応答を吸収するために準備したもので、参加者が講演に対する質疑とコメントを自由に書き込めるようにしました。これが好評で、最終的に103件の質疑とコメントが寄せられ活発に議論が展開されました。記録に残るという点で議事録の役割も果たしました。掲示板はコロナ終息後に対面で開催する場合でも利用したいという声も頂きましたの

で、来年以降の利用も検討したいと思います。

水沢VLBI観測所と各大学、VLBI懇談会、日本SKA協会などのコミュニティが協力し、今後もVLBI研究を進展できると確信させる2日間となりました。ユーザーズミーティングへご参加いただいた皆様、どうもありがとうございました。



18th Mizusawa VLBI Observatory Users Meeting in 2020 (9/24-25)



01 Zoomによるオンライン開催の様子。

「SKA1検討グループ」概要紹介

赤堀卓也 (水沢 VLBI 観測所 / SKA 機構)

● SKA 計画とは？

2019年3月12日、7つの国の代表者がローマに会し、天文学史に残る式典を執り行ないました。Square Kilometre Array (SKA) ★1 条約の調印式です。この条約には世界最大の電波天文学プロジェクトを実行する、政府間機構たるSKA天文台を発足させることが記されています。プロジェクトは、国連が掲げるSDG ★2 項目に照らして、電波通信技術や省エネルギー技術での社会貢献、発展途上国の開発と教育、そして若者達の国際交流の価値を謳います。そこには単に天文学に留まらない、世界の理想に向かう強い願いが込められています。

遡ること1990年代、すでに世界の電波天文学者は、人類の叡智を集結した世界でただ一つの巨大な電波望遠鏡を希求していました。それは集光総面積が1平方km級、望遠鏡間の距離が数千kmに及ぶ、巨大な電波干渉計です。その10%の規模の設備を建設する第一期 (SKA1★3) 分として、2021年から10年間の建設運用経費が約2300億円と見込まれています。この10%の規模ですら、すでに世界最大級の電波望遠鏡 Jansky Very Large Array (JVLA) の10倍の感度と10倍の分解能をもたらします (図01)。国際条約は、この資金拠出を国家の責任として確かなものにしていきます。

この途方もなく巨大な望遠鏡でなければ

絶対に到達不可能な、そして21世紀の天文学が挑むべき、いくつかの大きな問いがあります。宇宙で最初の星がどのように生まれたのか、アインシュタインの重力理論は正しいのか、宇宙に生命は存在するのか、ダークエネルギーとは何か、そして宇宙の磁場はどこからきたのか……。これらの問いを50 MHzから50 GHz (SKA1は15 GHzまで) の電波を観測して探ります (図02)。

この壮大な夢を実現するために、世界20か国200機関以上の1000名近い科学者と500名以上の技術者が協力し、20年近い歳月を費やして、科学目標の検討と望遠鏡の設計がなされました (図03)。SKA1は350 MHz以下を網羅する13万台の対数周期アンテナをオーストラリアに、350 MHz以上を網羅する197台のパラボラアンテナを南アフリカに設置します (図04)。本部はイギリス・マンチェスター郊外のジョドレルバンク観測所内に置かれます。

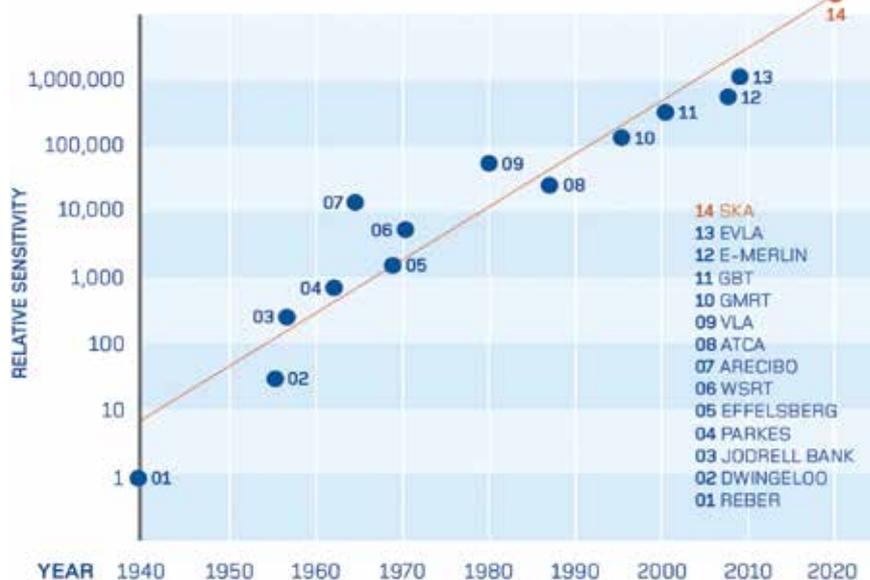
15か国がSKA1に出資を行い、建設費の負担と役割の分担に合意しています。科学者は、国の出資割合に応じた望遠鏡へのアクセスを得ることができます。観測時間の7割を大規模サーベイ観測に、残り3割を公募観測に割り当てる予定です。

● 日本のあゆみ

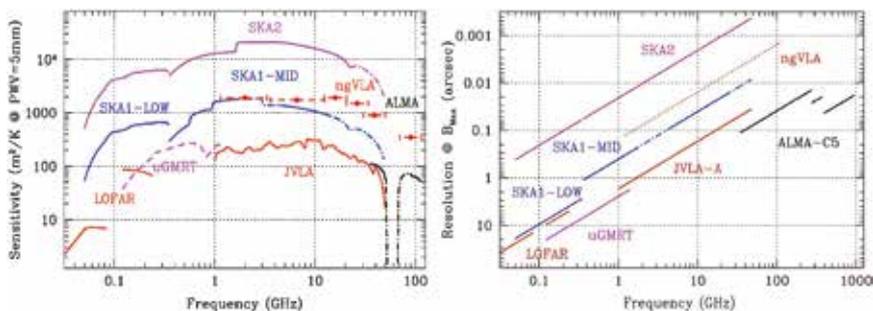
日本では理論研究者のコミュニティと低周波電波観測で実績のあるVLBIのコミュニティとが日本SKA協会★4を2008年に設立し、日本独自のアイデアを創出してきました。日本の電波天文学コミュニティである宇宙電波懇談会からも強く推薦され、日本学術会議マスタープラン2020★5に掲載され、重点大型計画のヒアリング対象にまでなりました。日本はまだSKA計画に未参加ですが、日本のコミュニティの国際的な規模に相応する、費用の2%前後の拠出を目標にして参加を検討しています。SKAのサーベイ型観測ならば、実り多い科学的成果が得られるでしょう。理論家との協力や、多波長との連携でその強みを活かします。

日本は、宇宙初期を含めた星や銀河の形成進化論、重力理論や宇宙論、そして

RADIO TELESCOPE SENSITIVITY



01 感度 (集光力) と年代の比較。現存する世界最大級の望遠鏡は13:EVLA (現在はJVLAと呼称) であり、14:SKA (SKA1に相当) はその1桁上の性能を目指した。



02 周波数 (横軸) に対するSKA計画と既存望遠鏡との感度 (左) および空間分解能 (右) の比較。上に行くほど性能が良い。SKA1は既存望遠鏡より1桁近い向上を狙う。SKA1よりさらに1桁の向上を狙うのが、2030年代の拡張計画SKA2である。

国立天文台には、その将来計画と密接に関連する観測装置の検討を進めるために、「SKA1」「ngVLA」の2つの電波天文系の「検討グループ」が設置されています。それぞれの計画の概要を紹介します。



03 SKAの科学国際会議2019の参加者の集合写真(上)と、12の科学検討部会が作成した立て看板を並べた組画像(下)。国際科学検討部会には日本人研究者も複数参加し、中核メンバーもいる。

プラズマ物理や高エネルギー物理学分野で世界をリードしてきました。装置面でもVERAやALMAなど電波干涉計システムとして最先端の開発をしてきた実績があります。これらの成果をもとに、SKAをリードする国々から参加を要請されています。SKA参加国は、日本がボトムアップの科学事業のために条約を批准することは過去の学術政策を鑑みて難しいことを承知しています。それでも日本が参加を歓迎されているのは、日本への厚い信頼の証と言えるでしょう。信頼を築き上げてきた先人と、各国の関係者への、感謝の念に堪えません。

このように世界から期待され、日本のコミュニティから強く支持され、50年は運用するであろう国際電波望遠鏡計画に日本そして大学共同利用機関たる国立天文台が参加することは必然でしょう。

● SKA1検討グループ

では、日本はどのような体制と規模で参加すべきか、どのサイエンスで世界のトップを狙うのか、そしてどのように国際貢献をしつつ技術の研鑽を図るのか、それをコミュニティと一緒に考え具体化する組織、それが水沢VLBI観測所に設置されたSKA1検討グループです。人材育成や、日本の天文学の裾野を広げること、そしてグローバルVLBIで主導権を獲得することなど、課題は多岐にわたります。この記事を読んでくださる全ての



04 SKA1-LOWの試作アンテナ(左/credit:SKAO)とSKA1-MIDの試作アンテナ(右/筆者撮影)。MIDアンテナは梯子で簡単に副鏡と受信機にアクセスできる保守性の良さがある。

方の計画検討への参加を歓迎します。

SKA1は、SKAの最終形だけでなく、例えば米国のngVLA^{★6}計画や日欧のLST/AtLAST^{★7}計画などの後続する他の大型電波天文学計画にとっても重要な試金石になると考えています。SKA1検討グループは、そのような計画ともできる限り協調していくことが、日本の天文学の発展に資すると考えています。SKA機構と米国電波天文台との連携も始まっています。

2020年9月、SKA1の建設計画と運用計画の最終審査が通過し、SKA機構として支持されました。参加国の条約批准は進み、近々条約が発効してSKA天文台が発足する見込みです。そして直ちに開催されるSKA評議会にて計画が承認されると、いよいよ建設が開始されます。本格的な観測の開始は2028年頃を予定

していますが、建設済みのアンテナを使った早期の部分運用も検討されています。

日本の本格的な参加は建設開始のタイミングには間に合いませんでしたが、後発でも存在感を示すことのできる、そして実は巨大干涉計の実現で最も難しい「性能出し」^{★8}部分を中心に担当することを計画しています。SKA1検討グループのメンバーが団結して、国内大学研究機関研究者そして国際メンバーとも協力をし、必ずやこの計画を成功させる、その強い覚悟を持って臨んでいます。

SETIにも有効なSKA1。202X年、日本の研究者が記者会見を開くかもしれません「ある惑星から微弱ではあるが不思議な電波がやってきている」と。SKAという夢は一歩ずつ現実へと近づいています。

★06 next generation Very Large Arrayの略。
★07 Large Submillimeter Telescope / Atacama Large-Aperture Submm/mm Telescopeの略。

★08 正確には Assembly, Integration, Verification, Commissioning, Science Verification (AIV+CSV)

「ngVLA 検討グループ」概要紹介

伊王野大介 (アルマプロジェクト)

●ngVLA とは

次世代大型電波干渉計(next generation Very Large Array: ngVLA) は、合計267台の高精度アンテナを北米に設置し、最大で約9000kmの口径の望遠鏡を実現する次世代の大型電波望遠鏡計画です。2015年より、アメリカ国立電波天文台(National Radio Astronomy Observatory) 主導のもと、ngVLAが目指す科学目標が本格的に議論され、具体的な装置の仕様が検討されてきました。ミリ波からセンチ波帯(波長3mmから20cm)までの比較的長い波長の電波を高感度・高解像度で捉えることにより、これまで見ることができなかった宇宙の謎に挑みます。特に、

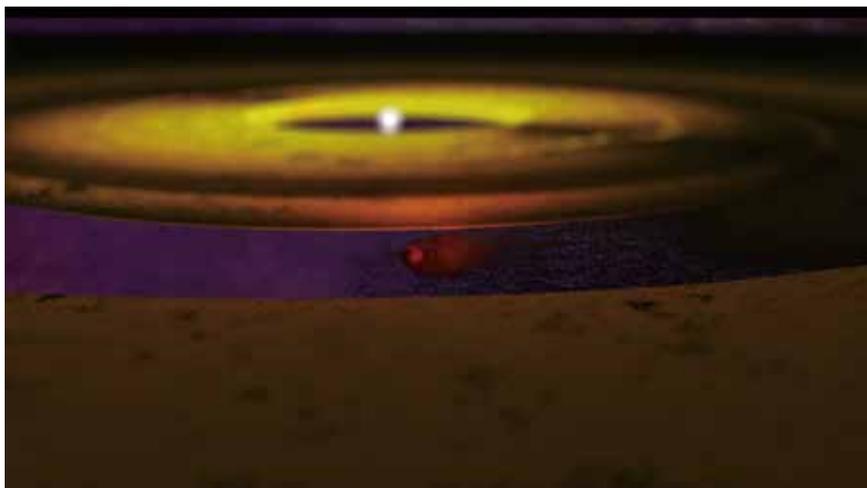
138億年の宇宙の歴史の中で、生命が存在する条件がどのように整えられ進化してきたのか、という人類の究極的な問いに対する知見が得られることが期待されます。2024年頃に建設開始、2030年代中盤には本格運用を予定しています。日本国内の研究者コミュニティからも高い支持を得ており、今後の日本の参画を模索している段階です。

●ngVLAが展開するサイエンス

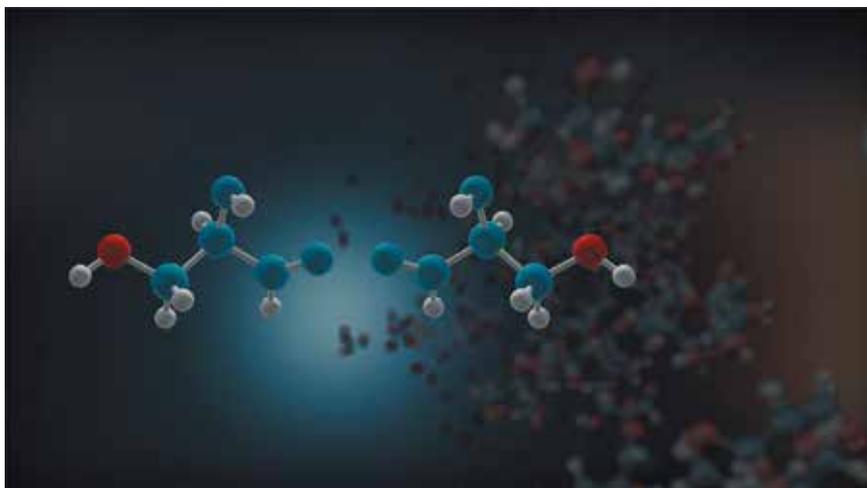
私たちが住む太陽系のような「惑星系」の形成過程の探究

誕生したばかりの「惑星系」はガスや塵でできた円盤を作ることが知られてい

ます。その円盤内を誕生したばかりの若い惑星が通過することにより、円環状の「すき間」ができます。しかし、円盤の中心付近、特に地球のような岩石惑星が生成される場所では、ガスや塵などの物質が密集しており、これまでの望遠鏡では中心付近の「すき間」の観測が困難でした。ngVLAが観測する波長帯では、ガスや塵の密度の高い領域の内部を写し出すことが可能となり、そこで形成された岩石惑星を作る「すき間」の様子を描き出すことができます。「惑星系」形成の初期段階の「すき間」の存在と、その特性を精確に捉えることにより、地球のような岩石惑星の起源、惑星の多様性の理解が大きく前進するでしょう(図01)。



01 惑星系はどのような物質で作られ、どのようなプロセスを経て、私たちの住む太陽系のように生命を育むことができる環境を作り出すのでしょうか。(Credit: NRAO/AUI/NSF)



02 138億年の宇宙の歴史において、どのように地球上に豊かな生命世界が誕生したのか。生命誕生に至る基本的な環境はどの程度普遍的であるのか。私たち人類の究極的な問いです。これらの問いに答えるためには、惑星系の誕生に至る各段階をくまなく探究し、多種多様な「有機物」の起源をたどることが不可欠です。(Credit: NRAO/AUI/NSF)

生命・惑星系・星の誕生の初期条件の探究

ngVLAが観測する波長帯では、星間空間における窒素の重要な存在形態の一つであるアンモニアをはじめ、さまざまな大型有機分子からの電波を検出することができます。特に、窒素は、DNAを構成する塩基やアミノ酸に含まれており、生命に深く関係しています。これらの分子を、ngVLAの高い感度と解像度を使って調べ、生命誕生のための初期化学条件、いかにすれば生命の「種」の探究を行います(図02)。

宇宙誕生後数十億年から現在に至る銀河内での物質循環と進化の探究

宇宙における星の形成は今から約100億年前の宇宙でピークを迎え、現在の宇宙まで進化してきたことが知られています。銀河が激しい星形成活動を開始するためには、その材料である冷たい分子ガスが必要です。ngVLAを使って、星の材料となる低温の分子ガスから放たれる電波を検出し、宇宙誕生後、数十億年から現在に至るまでの星形成の初期条件および物質の大循環の変遷を探究します。

銀河系中心領域のパルサーを使った重力理論の検証

強い磁場を持つ中性子星は、回転する時に周期的な電磁波を放ちます。このような天体をパルサーとよびます。パルサーは極めて正確な信号を放射しますが、

国立天文台には、その将来計画と密接に関連する観測装置の検討を進めるために、「SKA1」「ngVLA」の2つの電波天文系の「検討グループ」が設置されています。それぞれの計画の概要を紹介します。

銀河中心の大質量ブラックホールの重力場によって信号間隔にズレが起こると考えられています。このズレを測定することで、重力理論の検証ができます。パルサーは、天の川銀河の中心付近にたくさん存在することが予想されているにもかかわらず、これまでの望遠鏡では感度不足のため10個程度しか見つかっていません。ngVLAを使って新しいパルサーをたくさん発見することにより、パルサーについての理解が深まるだけでなく、重力理論の検証や星の進化についての知見が得られることが期待されます。

ブラックホールの形成・進化とマルチメッセンジャー天文学

宇宙に存在するブラックホールは、太陽と同程度の質量をもつものから、太陽の10億倍の質量をもつものまで、様々な種類が存在します。宇宙の歴史の中で、ブラックホールがどのように形成・進化してきたかを探るため、ブラックホールに落ち込むガスや放出されるガスの様子、それらが銀河の進化にどのように影響してきたかを探ります。また、ブラックホール・中性子星の合体のような宇宙の激しい現象の正確な位置をngVLAで特定し、他の観測装置で得られたデータと比較することにより、そこで起きている現象を詳しく調べることができます。

● ngVLAの観測装置

ngVLAでは3種類の望遠鏡群(アレイ)が計画されています。中心的な役割を担うのが、口径18mのアンテナ214台で構成される「メインアレイ」です。また、メインアレイのほぼ中心の位置に、口径6mのアンテナ19台と口径18mのアンテナ4台で構成されるアレイを設置する予定です。これを「ショートベースラインアレイ」と呼び、短いアンテナ間隔でアレイを構成することによって、大きく広がった天体の観測に対して威力を発揮します(図03)。これら二つのアレイに加え、超高解像度を実現するためのアレイの設置が計画されています。「ロングベースラインアレイ」と呼ばれ、口径18mのアンテナ30台を、北米大陸だけでなくハワイ州やカリブ海のバージン諸



03 メインアレイとショートベースラインアレイの想像図。口径6mのアンテナと口径18mのアンテナで構成される予定です。(Credit: NRAO/AUI/NSF)



04 米国ニューメキシコ州ソコロにあるVLAサイトを中心に最大1000kmの範囲にメインアレイのアンテナを配置する予定です。ロングベースラインアレイでは、アンテナ30台を北米各地に設置し、8860kmの口径をもつ巨大な電波望遠鏡が実現します。(Credit: NRAO/AUI/NSF)

島にも配置する予定です(図04)。これにより、8860kmの口径をもつ巨大な電波望遠鏡が実現し、0.0001秒角の解像度が実現します。また、ngVLAのアンテナには6つの受信機が搭載され、それぞれ違う波長の電波を観測します。全てのアンテナからやってくる信号を相関器で結合し、解析処理することにより画像が得られます。

● 国内の活動状況

2019年4月、ngVLAへの参画を検討す

るためのグループ(ngVLAスタディグループ)が国立天文台に発足しました。また、2019年9月にはngVLAとして初の国際研究会となる「ngVLA Workshop」を国立天文台で開催しました。2020年には、日本におけるngVLAの科学目標を策定することを目的として5つのサイエンスワーキンググループが国内の研究者を中心に結成され、科学的な検討が進んでいます。また、今後は、SKAやALMA、すばる、TMT等との連携や科学的なシナジーの検討を強化していく予定です。

「アルマ望遠鏡ツイッターキャンペーン」実施報告

宮田景子 (アルマプロジェクト)

2020年4月から6月、新型コロナウイルスによる緊急事態宣言のもと、予定されていた対面イベントは軒並み中止となりました。「3密」や「ソーシャルディスタンス」などの言葉が日々飛びかう中、少しでも人々の気持ちがほっとしたり、前向きになったりするきっかけになればと試みたのが、アルマ望遠鏡ツイッターキャンペーンでした。

◎上を向いて、宇宙を見つめて

宇宙は全ての人に開かれた共通の「自然」といえます。山や海などの自然が近隣にない都会でも、夜空を見上げることができます。そこで、ふだんの夜空を入口として、その先の宇宙に目を向けてもらえるような参加型のオンラインイベントを企画しました。この企画の特徴は、YouTubeトークライブの配信に先駆けて、数週間前からツイッター上で参加型キャンペーンを展開した点です。

◎アルマ望遠鏡といっしょに夏の夜空を旅しよう ～ #アルマの七夕 キャンペーン～

7月1日、アルマの七夕キャンペーン『星に願いを』がスタートしました。アルマ望遠鏡オリジナル短冊(写真02)に願いごとを書いて、ハッシュタグ【#アルマの七夕】をつけてツイッターに投稿してもらいました。参加者から寄せられた短冊は、7月7日のトークライブの冒頭で紹介し、七夕の情報や最新の観測成果の話題をお届けしました。

7月8日、七夕キャンペーン後編の『星空のひみつ』へと続きます。アルマ望遠鏡と満天の星が写った画像にオリジナル星座を描き、『#アルマの七夕』をつけてツイッターに投稿してもらいました(写真03)。7月21日のトークライブでは、ユニークなオリジナル星座の紹介とともに、ふだんの夜空の中に潜む、アルマ望遠鏡がとらえた天体の姿をお届けしました。



写真02 アルマ望遠鏡オリジナル短冊



写真03 オリジナル星座をつくらう

◎アルマ望遠鏡といっしょに秋の俳句を詠もう ～ #アルマのお月見 キャンペーン～

10月1日の「中秋の名月」に合わせてトークライブを設定し、9月上旬からツイッターキャンペーンを開始しました。今回



写真01 #アルマの七夕



写真04 #アルマのお月見

のテーマは「月」。月は、秋の季語のひとつです。秋の季語には、「天の川」、「銀河」、「流れ星」、「ひとつ星」など、天文にまつわるものがいくつかあることがわかり、中秋のオリジナル俳句を募集することにしました。

その結果、全国からオリジナル俳句267作品の応募がありました。「月」ひとつとってみても、日常の傍らにある月、チリの星空に見える月、アルマ望遠鏡が観測する月など、五七五の十七文字の中に情景豊かな世界が広がっていました。10月1日のトークライブでは、オリジナル俳句の一部を紹介するとともに、アルマ望遠鏡で観測した太陽系内の月（衛星）の話題をお届けしました。

◎参加者の声

今回のキャンペーンに参加してくださった方を対象に行ったツイッターアンケートでは、「素人にもわかりやすく説明して下さるので、とても楽しめました!」「アルマから俳句を考えるのは楽しかったです。ツイッターで皆さんの投稿を見られたことも。」「今後も新鮮な切り口で参加しやすく共有しやすい体験をお願いします。」「またこのような企画があると日々の励みになります。」「コロナで疲れている心が洗



写真05 アルマのお月見トークライブ

われた気がしました。」など、さまざまな感想をいただきました。次回以降のリピート参加を希望して下さる方が多く、今後もツイッターキャンペーンを継続していく予定です。

このキャンペーンを実施した7月1日から10月1日にかけて、アルマ望遠鏡ツイッターでは約2500名の方々が新たにフォロワー登録をしてくださいました。今後も、アルマ望遠鏡の魅力をお伝えするとともに、参加して下さる皆さんといっしょに「旬のトピックス」を共有できるような参加型イベントを模索していきたいと考えています。

- アルマの七夕トークライブ
『星空に願いを』 <https://youtu.be/b3kfXX-4kXg>
『星空のみみつ』 https://youtu.be/z-ofbGbo_GA
- アルマのお月見トークライブ <https://youtu.be/MmNh9zffNJM>



編集後記

息子がカミキリムシを捕まえてきたので、図鑑で調べたら「キボシカミキリ」でした。自分は昆虫好きな子どもではなかったですが、息子につきあっていて、子ども時代を再体験しているような気持ちになります。(G)

今年は新型コロナに翻弄された前例のない年でしたが、そんな年末にはやぶさ2の成功は気分躍るニュースでした。来年はまた明るい話題が増えますように。(は)

自転車で出勤中に、歩道に立った車侵入防止の棒に正面衝突。けがは擦り傷だが、自転車はたぶん修理不能。皆さんも自転車安全運転にご注意ください。(I)

アルマ望遠鏡がご縁で、三鷹市がパラリンピックのチリチームのホストタウンに。それを記念したオンライントークイベントが開催されました。なかなか遠い国ですが、「チリは太平洋をはさんでお隣の国」。こうした形で国際親善に貢献できるのはうれしいことです。(h)

今年のふれあい天文学はオンライン授業。担当の中学校は各学年1クラスの小さな学校ということもあってか、Zoomを使った授業に先生も生徒も私以上に慣れているようでした。うちの子供の学校も、これくらいネットを活用してくれるといいのにな。(K)

賢治のゆかりの地をまわりましたが、種山が原だけは雪でだめでした。季節を選ばなくては。。。 (W)

集中講義で、ほぼ1年ぶりに対面講義。もちろん、コロナ対策をして。学生の顔を見ながらの講義はやはり楽しくやりがいを感じました。早く全ての講義が対面になる日が来ますように。(e)

国立天文台ニュース NAOJ NEWS

No.329 2020.12

ISSN 0915-8863

© 2020 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：小久保英一郎（委員長・天文シミュレーションプロジェクト）／渡部潤一（副委員長）／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（アルマプロジェクト）／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／2020年12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

1月号は、新年号恒例の常田佐久台長の巻頭言を掲載。研究トピックスは、「長周期彗星の分布が示すもう一つの黄道面」をお送りします。

12月号



すばる望遠鏡
HSC Cosmic Gallery

09 赤方偏移0.7の銀河団

田中賢幸 (ハワイ観測所)

11月号で述べた銀河の色・形と環境の密接な関係は、まだ起源が完全には理解されていない。この関係が時間とともにどのように変化してきたのかを調べるのが、これを紐解く観測的アプローチの一つであろう。そこで、今月はHSCの捉えた遠方銀河団だ。これは赤方偏移0.7（約65億年前）にある巨大銀河団で、多くの銀河が群れている様子がわかる。この距離ではHSCでも銀河の形を明瞭に見分けることは難しいが、赤っぽい色をした銀河が群れているのが明らかだろう。この時代ですでに銀河団に赤い銀河が多いという住み分けが出来ていたことがわかる。

★HSC：すばる望遠鏡「超広視野主焦点カメラ（Hyper Suprime-Cam/ハイパー・シュプリーム・カム）」

★HSCの観測データを活用した市民天文学プログラム「ギャラクシークルーズ」もお楽しみください。

<https://galaxycruise.mtk.nao.ac.jp/>