

すばる望遠鏡 学生PI現地観測プログラム特集 (2)

巻頭言	すばる望遠鏡の現地観測が育む光赤外観測天文学の学生達	兒玉忠恭	300
	すばる HDS による明るい金属欠乏星の探索	岡田寛子	302
	すばる望遠鏡 / MOIRCS を用いた若い超低質量天体の 近赤外多天体分光観測—すばる望遠鏡現地観測体験記—	金井昂大	309
	アンドロメダの距離を測る	直川史寛	315
	近赤外線分光観測に基づく遠方クエーサーのアウトフロー探索と MOIRCS データ解析パイプラインの開発	高橋歩美	322
EUREKA	潮汐破壊現象と銀河核環境： AT2023clx 偏光分光観測からの示唆	宇野孔起	328
	銀河形状の大規模整列： 銀河の形は初期宇宙を覚えているか？	栗田智貴	338
雑報	講書始の儀	家正則	347
書評	天文学者が 1 を知ると、宇宙は 10 の謎を投げかけてくる 研究者たちが見ている宇宙の最前線	田中壺	350
年会	日本天文学会 2026 年秋季年会のお知らせ	年会実行委員会	351
	月報だより・寄贈図書リスト		357

【表紙画像説明】

銀河核突発天体 AT2023clx の発見前後画像。発見前画像は Pan-STARRS サーベイから取得。発見後画像（右上）はせいめい望遠鏡 / TriCCS にて取得した。また、画像下部には、Pan-STARRS と TriCCS の g バンド画像とその差分を示した。発見後画像には銀河中心に明るい点（AT2023clx）が確認できる。（せいめい望遠鏡観測画像提供：京都大学岡山天文台 / TriCCS）

【今月の表紙デザイン】

今月は「みずがめ座  $\eta$  流星群」と端午の節句の鯉のぼり（発行月の天体イベントと季節感を）をモチーフにしています。この流星群は、ちょうど GW の頃に極大になるとのこと。観られた方もいるでしょうか？

巻頭言



## すばる望遠鏡の現地観測が育む 光赤外観測天文学の学生達

兒玉忠恭

〈東北大学大学院理学研究科天文学専攻 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉

e-mail: kodama@astr.tohoku.ac.jp

ドームスリットの開いたすばる望遠鏡は静かに呼吸をしている。そして無数の星が散りばめられた暗く静寂な夜空に向かって挑みかかっている(図1)。ブルっと身震いするのは高山のマウナケア山頂の寒さのせいだけではない。眼前に広がる夜空は、その奥に無限に広がる宇宙への入り口に過ぎず、巨大で底のない淵に吸い込まれそうである。そう感じたとき畏怖の念を覚える。そして、地球上のちっぽけな人間たちが精一杯の大望遠鏡を作ってそこに向け、目を凝らし、耳を澄ませて、太古の宇宙からの微弱な声を必死に捉えようと戦っているのだ。観測室のPC上に現れる取れ

たての画像は、我々の頭上に確かに存在する深遠な宇宙の一画を切り取ったものであり、紛れもない現実である。しかも今この瞬間我々だけがそこを覗いているのだ。この圧倒的なリアリティーこそが観測天文学の真骨頂であり、天文学者の原動力である。

光赤外天文学はそのリアリティーを実際に体感できる恩恵に最も与ってきた。未だに観測者自らが実際に望遠鏡のある現地に赴き、己の眼で現実の星空を眺め、そして望遠鏡を通してその奥の奥にある宇宙のかけらのしかも過去の姿を覗き込むことができるからである。我々すばる第一世代は、このリアリティーを何度も体感して育った、いや育ててもらった。私が2000年に初めて見たマウナケアの頂はさながら要塞であり、すばる望遠鏡は戦艦であった。特徴のある円筒形のすばるドームは一際目を引いた。お隣のケック望遠鏡は2つのガスタンク、カルデラを隔てた向かいのCFHTは純白で均整の取れた美しいマッシュルーム、その隣のGeminiは巨大な宇宙船のようであった。沈みつつある夕日を片側いっぱい浴びて赤く染まる望遠鏡達は、これから始まる夜の戦いに備え静かにその時を待ちつつ輝いていた。観測が始まると、時には星がほとんど瞬かない解像度が0.2秒角を切るような高精細な画像が撮れたり、山頂ですぐにデータ解析を行うと遠方輝線銀河が織



図1 夜空に果敢に挑みかかるすばる望遠鏡。四半世紀にわたり多くの学生や研究者に感動を届けてきた。

りなす宇宙大規模構造が画面上に現れたりして、飛び上がるほどの強い感動を味わったこともあった。その一方で、遠路はるばるハワイまでやってきながら、時には厚い雲だけを眺め、時にはドームも開けられず、時には山頂にすら上がれないといった苦難も何度も経験した。装置や望遠鏡トラブルに見舞われたこともよくあった。でもそれはそれでまた観測天文学のリアリティーなのである。

これらのすべての実体験がいかに貴重なものであり財産であったかは、文字で語っても語り尽くせないし、そのような機会を戴いた先人達にも感謝し切れない。少しでも恩返しできるとしたら、次の世代に同様の現地観測を体験させ、感動を届けることである。実際にこれまで院生にはできるだけそのような機会を提供してきた。しかしながら残念なことに、昨今は予算削減や運用の効率化の一環で現地に赴く観測は大きく制限されるようになった。コロナ感染症をきっかけに、観測者は東京の国立天文台三鷹キャンパスのリモート観測室からテレビ会議越しに遠隔参加し、ハワイ現地で望遠鏡のオペレーターと観測サポーターが対応するというリモート観測の形態が一般化した。有り体に言えば、必要に迫られて観測所がこの形式の導入に大変頑張ってしまったために、リモートでの観測遂行が十分可能であることがわかってしまったのである。観測所にとって予算削減や省力化の利点があるだけでなく、忙しい観測者にとっても、現地参加に要する数日間のオーバーヘッドをなくせるし、天候や装置トラブルで観測ができなかった時の損失も最小限に抑えられる。しかしそれらのメリットとの引き換えに、上で述べたようなリアリティー体験の貴重な機会を失ってしまうことになるのである。特にこれから観測天文学を本格的に始めようという大学院生から、現地観測という光赤外天文学一番の醍醐味を味わえる機会を奪ってしまうことは、それに育てられた我々世代からすると極めて残念なことである。院生に

とって現地観測は今後の研究への動機付けにもなる大変有効な機会なのである。それを失うことは、引いては今後の天文学の発展にとっても大きな損失であろう。

このような危機感を共有する現在の宮崎観測所長が、ポストコロナに、学生がPIの共同利用観測に限り山頂での観測を復活させたのは英断であった。日々大学で院生教育に当たる教員を代表して感謝を申し上げたい。ただ旅費が学生一人分しか出ず、引率の教員やポスドクは手弁当で参加しないとならないのは残念であるが、これまで何度も貴重な経験をさせていただいた恩返しと思えば仕方ないであろう。

これまで引率した学生達は例外なく嬉々として山頂の望遠鏡や装置を見学し、美しい夜空を堪能し、入念に準備した観測を実行する。そして自ら取得したデータに大きな愛着を持って帰国し、責任を持って解析を進める。また観測所のオペレーターや観測サポーターらと現地でお会いして話す機会も貴重であり、観測のスムーズな遂行の裏で、いかほどの方がそれぞれの業務に携わり貢献しているかを、学生が肌で感じ取り、関係者の皆さんに感謝の念を抱く。

なお、ほかの望遠鏡はずっと以前から観測者の山頂観測をやめており、すばるだけがまだ現地観測を受け入れている状況である。我々すばるもそう遠くない時代にフルリモート観測に移行することを目指して検討が進んでおり、遅かれ早かれ時代の流れを受け入れざるを得ないであろう。だがそこに至るまでのあと何年かでも、このプログラムをぜひ継続していただき、一人でも多くの学生をハワイ現地に送り、リアリティーを体験させて感動を与え続けてほしい。感動こそが教育の原点であり、研究の原動力であるから。

末筆ながら、日々すばる望遠鏡の運用にあたっておられる皆さんに心より感謝して、巻頭の言葉としたい。

# すばる HDS による 明るい金属欠乏星の探索

岡田 寛子<sup>1,2</sup>

〈<sup>1</sup> 兵庫県立大学大学院 理学研究科 物質科学専攻 / 自然・環境科学研究所 天文科学センター西はりま天文台  
〒679-5313 兵庫県佐用郡佐用町西河内 407-2〉

〈<sup>2</sup> 国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: hiroko.okada@nao.ac.jp



金属欠乏星は、宇宙に金属が少ない時代に形成された低質量星である。その表面組成は、形成時に取り込んだ星間ガスの化学組成を概ね保持していると期待され、宇宙初期の核合成と化学進化を読み解く重要な観測対象である。近年、宇宙初期での低質量星形成を左右する炭素・窒素・酸素 (CNO) の起源に注目が集まっている。一方で、金属欠乏星における CNO 測定については、恒星進化に伴う内部混合が表面組成を変えるため、形成当時の組成を直接測れる天体は限られてきた。そこで本研究では、将来の CNO 測定に適した明るい金属欠乏星サンプルを構築することを目的とし、HDS を用いて準巨星段階の金属欠乏星候補に集中したフォローアップ観測を行った。

## 1. はじめに：元素の起源と金属欠乏星

宇宙に存在する元素の多くは、恒星内部での核融合反応、超新星爆発、さらには中性子星などの高密度天体の合体を通じて合成され、星間空間へ放出されてきた。こうして時間とともに重元素が増えていく過程は、宇宙の化学進化と呼ばれる。

宇宙初期の、まだ重元素が少なかった時代に形成された太陽質量の0.8倍以下の低質量星は、寿命が宇宙年齢よりも長いので、現在まで生き残っていると考えられている。こうした星は、鉄などの重元素が極端に少ない金属欠乏星<sup>\*1</sup>として観測される。金属欠乏星の表面大気の化学組成は、表層混合や外部からの物質降着などによって変化するものの、形成時に取り込んだ星間ガスの化学組成をおおむね保持していると期待される。金

属量が低いという事実は、その星が生まれた星間ガスに重元素がまだあまり蓄積しておらず、初期世代の星の核合成の影響を強く残していたことを示している。したがって、金属欠乏星の元素組成を調べることは、初期世代の大質量星や超新星爆発でどのような核合成が起こり、どの元素がどれだけ作られたのかを読み解くための重要な手がかりとなる。

金属欠乏星の化学組成を観測的に明らかにするため、筆者は共同研究者らとともに木曾シュミット望遠鏡の Tomo-e Gozen Camera に狭帯域フィルタを搭載した観測を行い、高分散分光による詳細な元素組成測定に適した Gaia G 等級で 13 等より明るい ( $G < 13$ ) 金属欠乏星の探索を進めてきた。さらに近年は、Gaia 衛星によって取得された低・中分散スペクトルに基づいて、多数の恒星の金属量が見積もられるようになり、明るい金属欠乏星

\*1 天文学では水素・ヘリウム以外の元素をまとめて金属という。

候補のサンプルは急速に拡大している [1-3]. 筆者は、すばる望遠鏡の高分散分光器HDSを用いて、これらの明るい金属欠乏星候補のフォローアップ観測を行っている. 本稿では、その中でも2025年前期に実施した、準巨星段階にある金属欠乏星に注目した観測について紹介する.

## 2. 今回提案したサイエンスの背景

元素の起源の研究において近年とくに注目されているのが、炭素・窒素・酸素 (CNO) である. これらは水素・ヘリウムに次いで宇宙に豊富な元素であり、金属量が非常に低い環境ではガス冷却を支配して、星形成 (とくに低質量星形成) の成立条件を左右する重要な役割を担う.

宇宙初期におけるCNOの主要な起源は大質量星である<sup>\*2</sup>. 原子番号が偶数の炭素・酸素は主として恒星内部のヘリウム燃焼や炭素燃焼で合成され、その生成量は金属量にあまりよらない. 一方、原子番号が奇数の窒素は金属量に比例して増加する、すなわち二次的供給で生成される元素として振る舞うことが期待されてきた. しかし最近、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の観測によって、高赤方偏移で窒素過剰な星形成銀河が見いだされたこと [4, 5] などを受け、金属量によらない一次的な窒素供給が必要となる可能性が指摘されている. 一次的な窒素の供給源として、高速回転する大質量星からの質量放出や、潮汐破壊現象などが提案されている [6, 7].

さらに金属欠乏星の観測からは、金属量が低いほど炭素過剰星 (CEMP: Carbon-Enhanced Metal-Poor star) の比率が高くなるのが統計的に示されている [8]. このことは、炭素が初期の星形成と銀河化学進化の双方に深く結びついていることを示唆する. したがって、宇宙初期においてCNOがどのように供給されるのかを理解することなしに、宇宙初期の進化を解き明かすことはでき

ない.

しかし、金属欠乏星でCNOを精密に測定することは容易ではない. 低金属量の星では、CNOの多くは分子吸収から推定される. 分子は低温ほど形成されやすいため、分子帯の検出という観点では低温星、すなわち主系列を離れたより進化した星が有利である. 一方で、主系列を離れて進化が進むと、恒星進化に伴う内部構造の変化と混合によって恒星表面のCNO組成が変化しうる. この相反する条件が、金属欠乏星のCNO研究におけるボトルネックの一つとなっている.

さらに窒素と酸素については、NH分子帯やOH分子帯が近紫外～紫外域に位置するため、これらを用いた測定には紫外線分光が必要となり、観測可能な天体や装置に限られる. 近紫外域は大気透過や検出器効率などの制約が強く、ノイズの少ない高品質なデータを現実的な観測時間で得ることが難しい. したがって金属欠乏星のCNO測定を行うには、高品質なスペクトルを取得できる明るい天体を用いる必要がある.

## 3. 提案のポイント

そこで本提案では、先述した二つの条件、すなわち (1) 分子帯が検出しやすい十分低温であること、(2) CNOの初期組成を維持していると期待できること、を同時に満たす対象として、準巨星段階の金属欠乏星に注目した. 準巨星は主系列を離れて対流層が発達し始める遷移期に相当する. この段階は進化が早いので準巨星段階にある金属欠乏星は希少で、既存研究では統計が不足していた. しかし、Tomo-e Gozen Cameraによる探査に加え、Gaiaによって多数の金属欠乏星候補が得られつつある現在、狭いパラメータ領域に集中したフォローアップ観測を行うことで、準巨星段階のサンプルを拡大できると考えた.

本研究では、金属欠乏星を同定するとともに、

<sup>\*2</sup> 一部連星系をなす金属欠乏星で伴星のAGB星からの質量降着でCが増えていることがある.

恒星進化に伴う混合の影響を評価しやすいリチウムを用いて混合の度合いを確認する方針をとった。リチウムは恒星内部で比較的低温でも破壊されやすく、主系列を離れて対流層が深くなり始めると、希釈・混合の進行に応じて表面リチウム存在量が比較的早い段階で減少する。この性質によりリチウムは、表面組成が混合の影響を受け始めたかどうかを判定する指標として有用である。

未進化の金属欠乏星では、リチウム存在量がほぼ一定値 ( $A(\text{Li}) \approx +2.2^{*3}$ ) を示すことが知られており、これは Spite plateau と呼ばれる [9]。一方で、金属量がより低い星では、リチウム存在量の分散や plateau からの逸脱 (meltdown) が報告され [10, 11]、宇宙論的リチウム問題と恒星内部物理の両面から議論が進められてきた (図1)。やがて星が進化し主系列を離れると、表層の対流層が深くなり、表面のリチウム量は減少する。その結果、赤色巨星になり始めた段階の星では、金属量に依存しない  $A(\text{Li}) \approx +1.1$  付近に小さなばらつきをもつ thin Li plateau が現れることが報告されている。したがって、進化に伴うリチウム減少の開始点、およびその金属量依存性は、拡散や追加混合などの恒星内部物理を制約する観測量として重要である。本提案では、リチウムが減少し始める境界を捉え、CNO を初期組成として解釈できるサンプルを構築することを目的とした。

またリチウムは混合診断にとどまらず、リチウム単体の問題としても未解決の論点を含む。たとえば、ビッグバン元素合成 (BBN) で予測される  $A(\text{Li}) = +2.72$  を上回るリチウム過剰天体の起源については、内部生成 (Cameron-Fowler 機構に基づく生成 [12]) と外部供給 (惑星・伴星の取り込みなど [13]) が候補として併存し、頻度・進化段階・付随する元素比や回転などを手がかりに検証が進められている [14]。したがって、準巨星段階におけるリチウムの系統測定は、CNO

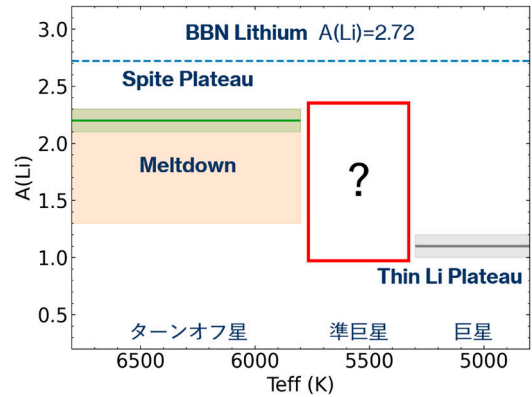


図1 恒星の進化に伴うリチウム存在量の変化。

研究のためのサンプル構築に資するだけでなく、リチウムの起源と輸送過程に対しても制約を与える。

高分散分光によりこれらの議論を成立させるためには、ターゲットが十分に明るいことが重要である。観測効率や得られるスペクトルの品質は天体の明るさに強く依存するため、とくに近紫外域まで見据える場合、明るい候補を系統的に確保できるかどうか観測計画の実現性を左右する。本提案の特徴は、探査で得られた金属欠乏星候補の中から準巨星段階に焦点を当て、明るいサンプルを前提として高分散分光フォローアップを実行する点にある。

以上の目的のため、本観測では、比較的短時間で十分に高品質なスペクトルを取得でき、かつリチウムの吸収線と炭素の分子帯の両方を同時に含む波長域をカバーするように、4030-6730 Å の広い波長範囲をもつ標準的なセットアップ (StdYd) を採用した。

## 4. 観 測

本提案は1.5夜で採択され、2025年2月2日および4月5日の後半夜に割り当てられた。2月はドイツ滞在中であったためリモートで観測に参加

\*3  $A(\text{Li})$  はリチウム存在量を表す対数で表しており、 $A(\text{Li}) = \log[N(\text{Li})/N(\text{H})] + 12$  と定義される。

し、4月は現地で観測を行った。

4月4日、Honoluluで乗り継いでHiloに到着した。荷物を受け取りに向かったところ、スーツケースがターンテーブルに出てこない。初めてのハワイで高揚していた気分は一転し、不安になってすぐにスーツケースに入れていたAirTagの位置情報を確認した。表示は数時間前のHonolulu空港のままで、預け入れ直前の地点から動いていない。空港スタッフに確認すると、次の便で到着するとのことだった。防寒具を含む荷物が当日中に、しかも次の便で受け取れる見込みだとわかり、胸をなで下ろした。人生初めての乗り継ぎ便でバゲージロストを経験するという、なかなか得難い出来事でもあった。

その後、無事に荷物を受け取り、Hale Pohakuへ移動した。標高は約2800 mで、山頂に比べれば低いとはいえ、到着直後は息が上がりやすく、身体が想像以上に高度の影響を受けることを実感した。周囲の雰囲気気に気をよくして周辺を歩き回り、軽い気持ちで坂道を下っていったが、下りは軽く進める一方で帰りの上りは予想以上にきつかった。運動不足による体力低下を都合よく標高のせいにして言い訳しながら、時間をかけてなんとか登り切った。その後は無理をせず、荷解きと最低限の準備を済ませて、ゆっくり過ごしながらいよいよ翌日に備えた。

翌5日の夕方、サポートアストロノマー (SA) の青木賢太郎氏らとともに山頂へ上がった。登っていくにつれ植生が途切れ、やがて視界はゴツゴツした岩肌だけになっていく。これまで見たことのない景色に興奮し、ずっと窓の外を眺めていた。天候は快晴で、Hale Pohakuから見えていた雲も、山頂から見るとずっと低いところにあることがわかった。山頂はHale Pohakuとは比べものにならないほど空気が薄く、到着して観測室に入るところにはすでに頭痛に襲われていた。SpO<sub>2</sub>を測定すると70%を下回っており、オペレーターの方がすぐに酸素供給装置を用意してくださっ

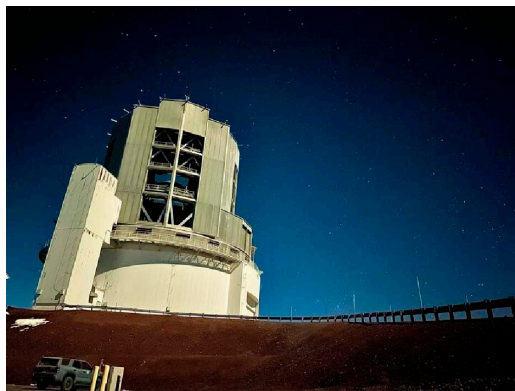


図2 iPhone 12 miniで撮影した夜空とすばる望遠鏡 (4月には上手く撮影できず、2026年1月の訪問時にリベンジしたもの)。

た。しばらく安静にしていると値は回復し、頭痛も徐々に和らいでいった。筆者の観測は後半夜のみであったため、前半夜は観測プランの最終確認をした後、外に出て星空を眺めたり写真を撮ったりして過ごした(図2)。観測日の前日が上弦の月で空が明るく、月明かりだけで道を歩けることに感動した。

後半夜に自分の観測枠へ移行してからが本番である。天候は後半夜も安定していた。観測自体はSAの方が進めてくださるため、筆者は取得したデータのQuick Lookで得られたスペクトルを確認し、低金属量である可能性が高いか、また6708 Åにあるリチウムの吸収線が検出できているかをその場で確認していった。観測した天体の中には、高速自転星のようにスペクトルがならされ低金属量と誤って選んでしまった対象も混じっていたが、吸収線が弱く低金属量が期待できる天体が見つかったり、リチウムの検出を確認できたりするたびに一喜一憂するのはフォローアップ観測の醍醐味であり、非常に楽しい時間であった。観測天体は複数の金属欠乏星候補カタログを組み合わせで選択しているため、確認結果に基づいて観測対象の優先順位を随時更新し、観測天体や観測順を適宜入れ替えながら進めた。大きなトラブルは発生せず、計画した観測を遂行でき、あっと

いう間に朝になった。

三鷹やZoomからリモートで参加している場合はここで観測が終わるが、現地ではまだ終わりではない。キャリブレーションデータを取得した後、観測装置や望遠鏡のシャットダウン作業がある。SAとオペレーターの方が手際よく作業してくださり、観測は無事に終了した。外に出ると朝焼けと雲海が広がり、美しい眺めであった。観測明けの冷たい空気は心地よく、これも現地ならではの満足感である。その後下山し、Hale Pohakuに戻って休息したのち、午後にはHiloへ移動した。

7日の午後には再び山頂へ上がり、望遠鏡見学を行った。SAの新井彰氏がドーム内を案内してくださり、すばる望遠鏡と観測装置を見学し、説明を受けた。ドームに入りすばる望遠鏡と対面した瞬間、憧れの望遠鏡が目前にあることに率直に感動した。巨大であることは頭では分かっていたつもりだったが、実物の迫力は想像以上で、思わず見入ってしまった。

観測で使用したHDSは、金属欠乏星研究を含む幅広い分野の研究に貢献してきた高分散分光器であり、望遠鏡のナスミス台に設置されている。観測で用いたイメージスライサ<sup>\*4</sup> (図3)は、ナスミス焦点にあるHDSスリットユニットの望遠鏡側に搭載される。この取り付け作業を観測前にSAの方が手動で行っていることを、このとき初めて知った。HDSの観測は明夜に割り当てられることが多く、天候によってはイメージスライサを外して観測を行いたい場合もある。しかし、現場で直接付け外しをしているため、急な天候変化に即応するのは難しい。装置運用の実情を把握することは、観測計画の立案や当日の判断を行う上でも重要であると感じた。

また、当時ファーストライト直後であったPFS



図3 本観測で使用したイメージスライサ。

についても（設置室の前まで）見学する機会を得た。今後PFSによって、多数の暗い天体に対しても組成情報が大量に得られていくことが期待される。一方で本研究では、まず明るい天体を高分散分光で詳細に化学組成を調べることで、将来の大規模サンプル（暗い天体を含む）で得られる化学組成情報を活用できるようにしたいと考えている。さらに将来、PFSに高分散分光モードが実装されれば、本研究の延長としても有効に活用できる可能性がある。現時点ですぐに用いる予定はないが、実際に現地に行ったことで、将来の研究に対するモチベーションが上がった。

## 5. 振り返り・今後の展望

本観測（2月・4月に加え、追加で割り当てられた6月の観測）により、合計63天体のデータを取得した。その後の解析を通じて、これらは博士論文の主要な結果の一部となり、研究成果としてまとめることができた。

初期CNO組成が保持されていると期待される有効温度・表面重力の領域を、より正確に同定することができた。さらに次のセメスターでも同様

<sup>\*4</sup> イメージスライサ (image slicer) は、焦点面上の星像を光学的に複数の細い帯状に分割し、それらを分光器の入射スリット上に整列して導入する装置である。これにより、分光分解能を保ったまま入射光量を増やし、観測効率を向上できる。

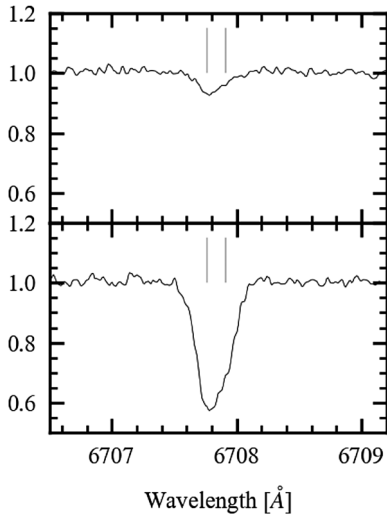


図4 本観測で取得した準巨星段階の金属欠乏星のスペクトルの例。上下どちらの天体も同じ程度の有効温度の金属欠乏星であるが、下のパネルの天体はリチウム過剰天体である。

の提案が採択されたが、天候にも恵まれ無事すべての観測が終了した(執筆時点)。これらの観測により、CNO測定に有用な準巨星段階の金属欠乏星サンプルを大幅に拡大することができた。また、本観測では $G=10.4$ のリチウム過剰天体を1天体発見した(図4)。リチウムに加えてナトリウム組成が過剰である特徴も確認されており、今後の窒素・酸素の組成測定を行うことによってその起源を議論したいと考えている。

今回取得したデータを用いて、リチウムや炭素以外にも、宇宙初期の化学進化を議論するうえで重要な $\alpha$ 元素、鉄族元素、中性子捕獲元素など多様な元素の組成を測定できたことも大きな成果である。起源となる親星や超新星の特徴を解釈するには多数の元素組成情報が不可欠であり、今後の研究の基盤となるデータを取得できた意義は大きい。

これまで筆者はPIとしてなゆた望遠鏡やせいめい望遠鏡を用いた観測を行ってきたが、観測そのものが好きであることもあり、すばる望遠鏡の現地観測の機会を得られたことは嬉しかった。

また、観測が多くの方々サポートの上に成立

していることを、装置運用・観測の実態とともに現場で具体的に見られた点も有意義であった。実際、イメージライサの取り付けを含め、観測前後に必要な作業がSAやオペレーターの方々によって担われていることを改めて認識した。こうした装置運用の前提を理解することは、観測の実現可能性やデータ品質の限界を現実的に見積もる上で重要である。この点はリモート観測だけでは把握しにくく、現地での経験を通じて理解を深められた。

HDSは2000年のファーストライト以来、25年以上を経た現在も第一線の観測装置として安定して運用されている。今回の現地観測を通じて、その背景には夜間運用だけでなく、日中の保守作業を含めて現場で支えてくださっている多くの方々の継続的な努力があることを実感した。高品質なデータ取得が当たり前で成立しているわけではないことを改めて認識するとともに、このような体制の上で観測できたことに深く感謝したい。今後もHDSの強みを活かした観測提案を行っていきたい。

今後の展望としては、まず準巨星段階の金属欠乏星におけるリチウム減少の開始点を有効温度・表面重力の関数として定量化し、その金属量依存性を検証する。これは拡散や追加混合といった内部物理モデルに対する観測的制約となりうる。さらに、本観測で得たスペクトルに基づいてリチウムによる混合評価を行い、初期CNO組成として解釈しやすい金属欠乏星サンプルを構築した上で、紫外線分光観測による窒素・酸素の組成測定を行い、宇宙初期のCNOの起源を明らかにする。加えて、本観測で同定されたりチウム過剰天体について追加観測を行い、起源の検証を進める。

以上のように、本観測では多くの興味深いデータを得ることができた。自ら取得したデータである以上、責任をもって解析と議論を進め、論文としてまとめ上げるまで研究を継続していきたいと考えている。

## 謝 辞

まず、現地観測という貴重な機会を提供してくださった国立天文台ハワイ観測所の皆様に厚く御礼申し上げます。本観測を実施するにあたり、上清初枝氏、末広曜子氏、Noriko Roth氏には渡航・滞在の手続きにおいて多大なるご支援をいただきました。SAの新井彰氏、青木賢太郎氏、ならびにオペレーターの方々には、観測の実務面でのご支援に加え、望遠鏡・装置の運用や観測所の体制について貴重なご教示をいただき、大変お世話になりました。指導教員として現地観測に同行し、移動を含め多方面にわたりご助力いただいた富永望氏にも感謝申し上げます。本観測の計画立案から観測遂行、データ解析に至るまで貴重なご助言を賜りました、富永望氏、松野允郁氏、青木和光氏、本田敏志氏をはじめとする共同研究者の皆様に深く感謝申し上げます。最後に、本稿の執筆の機会を与えてくださり、学位審査が終わるまでご配慮くださった田中壺氏、ならびに本稿を丁寧にご確認いただき、ご助言を賜りました守屋堯氏に心より御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] Andrae, R., et al., 2023, A&A, 674, A27
- [2] Matsuno, T., et al., 2024, A&A, 685, A59
- [3] Yang, L., et al., 2025, ApJS, 279, 7
- [4] Cameron, A. J., et al., 2023, MNRAS, 523, 3516
- [5] Isobe, Y., et al., 2023, ApJ, 959, 100
- [6] Meynet, G., et al., 2006, A&A, 447, 623

- [7] Kochanek, C. S., 2016, MNRAS, 458, 127
- [8] Beers, T. C., & Christlieb, N., 2005, ARA&A, 43, 531
- [9] Spite, F., & Spite, M., 1982, A&A, 115, 357
- [10] Bonifacio, P., et al., 2007, A&A, 462, 851
- [11] Sbordone, L., et al., 2010, A&A, 522, A26
- [12] Cameron, A. G. W., & Fowler, W. A., 1971, ApJ, 164, 111
- [13] Siess, L., & Livio, M., 1999, MNRAS, 308, 1133
- [14] Casey, A. R., et al., 2016, MNRAS, 461, 3336

## Searching for Bright Metal-Poor Stars Using Subaru/HDS

Hiroko OKADA

<sup>1</sup>*Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo, 407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Sayo, Hyogo 679-5313, Japan*

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

Abstract: Metal-poor stars are low mass stars formed in the early Universe. Their surface abundance is expected to preserve the chemical composition of the interstellar gas from which they were formed. Thus, they serve as key observational tracers for understanding nucleosynthesis and chemical evolution in the early Universe. In recent years, growing attention has been paid to the origin of carbon, nitrogen, and oxygen (CNO), which regulate low-mass star formation at extremely low metallicity. However, because internal mixing associated with stellar evolution can modify surface abundances, only a limited number of stars allow a direct measurement of their natal CNO compositions. In this study, we conducted follow-up observations of metal-poor subgiant candidates using HDS to build a sample of bright metal-poor subgiants suitable for future CNO abundance measurements.

# すばる望遠鏡／MOIRCSを用いた 若い超低質量天体の近赤外多天体分光観測 —すばる望遠鏡現地観測体験記—



金井 昂 大

〈埼玉大学大学院理工学研究科 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255〉

e-mail: s15pp223@gmail.com

私は学生PIとして、MOIRCSを用いた超低質量天体の近赤外多天体同時分光観測をハワイ現地で行った。超低質量天体とは、恒星よりも質量が軽く（0.08太陽質量以下）、水素の核融合反応を起こすことができない天体の総称である。私たちは、その中でも親星を持たず単独で存在する超低質量天体の質量・空間分布を調べ、様々な環境下におけるそれらの特徴の差異を探っている。現地観測では、実際に行かなければ見ることができない光景はもちろん、ドーム内の施設・設備や装置が動いている様子を見学させていただいた。また、観測においては、隣にサポートアストロノマー（SA）さんがいることで齟齬やミスが少なくなり、観測中の状況に応じた臨機応変な対応やスケジューリング調整も三鷹でのリモート観測よりも格段にスムーズに行なうことができた。これによって予定していたすべてのデータを無事に取得できた。本稿では、本観測の科学的背景・意義を簡単に述べ、観測に向けた準備から現地での観測の様子を紹介する。

## 1. 本研究について

### 1.1 超低質量天体

質量が軽い星たちは天の川銀河にどれだけあるのだろうか、どこで、どのようにして生まれてくるのだろうか。一般に、質量が0.08太陽質量( $M_{\odot}$ )以下の天体は、恒星と異なり、水素の核融合反応を安定して起こせない。このような天体は超低質量天体と総称され、質量の重い順に褐色矮星(0.013  $M_{\odot}$ 以上)と惑星(0.013  $M_{\odot}$ 未満)に分類される。本研究ではその中でも、太陽系の惑星や太陽系外惑星と異なり、親星を持たず宇宙空間に単独で存在する惑星質量天体 [1] に着目している。低温で非常に暗い超低質量天体は観測が難しく、その形成過程はいまだに未解明な点が多

い。その起源を明らかにするには、様々な環境下における数多くの超低質量天体から物理的性質や特徴を探ることが重要である。

超低質量天体の効率的な探査には、その明るさの特徴が鍵となる。超低質量天体は形成初期段階(=若い時)には重力収縮によって比較的明るい。進化に伴って次第に冷えて暗くなっていく。また、低温であるために輻射のピークが近赤外線にある。このような特徴から、若い段階の超低質量天体の観測には近赤外線探査観測が非常に有効な手段である。それを裏づけるように、褐色矮星、惑星質量天体の世界最初の発見 [1, 2] は共に近赤外線観測によるものである。

### 1.2 若い超低質量天体の近赤外線探査観測

超低質量天体の近赤外線探査観測は、(1) 測

光観測で若い超低質量天体の候補となる天体を同定し、(2) 分光観測から確認する、という手順で進めていく。まず、(1) の測光観測では、星形成領域の方向にある天体の明るさと色から若い星の特徴を示す天体を選び、その中でも特に暗いものを若い超低質量天体候補として同定する。一方、分子雲のうしろには、似た色を示す星や銀河が隠れていること、若い天体は年齢によって明るさと温度がどちらも変化するため年齢の仮定が必要になることから、若い超低質量天体と断定するのはやや難しい。そこで、(2) の分光観測を実施して候補天体のスペクトルから温度を決定することで、若い超低質量天体であることを確認する。求められた温度を測光観測で得た明るさと組み合わせることで、年齢と質量を一度に求めることが可能になる。

私たちの研究グループでは、超低質量天体の形成が環境によって異なるのか、もしくは普遍的であるのかを明らかにするべく、これらの手法を駆使して、様々な環境を持つ近傍の星形成領域において、UKIRT（英国赤外線望遠鏡）やすばる望遠鏡などを用いて近赤外線撮像／分光観測を行っている [3-5]。例えば、R CrA 領域と呼ばれる太陽から約 150 pc の距離に位置する星形成領域において、UKIRT による近赤外測光観測を実施し、合計で約 200 天体の超低質量天体候補を同定した [5]。これらの候補天体の分布と、ハーシェル宇宙天文台の遠赤外線観測で得られた分子雲のダスト柱密度を比較すると超低質量天体候補を含む若い星は、ダスト柱密度がやや高い場所に分布する傾向があり、分子雲環境への依存性を示す可能性が示された。

近赤外線分光観測では、観測の効率を最大化するために可能な限り多くの候補天体の近赤外線スペクトルを同時に取得する手法を用いている。すばる望遠鏡に搭載されている多天体近赤外撮像分光装置“MOIRCS”は、近赤外線で最大約 60 天体を同時に分光観測できる。さらに取得できるスペ

クトルの波長域が広く、多様な観測モードを実現できるため、本研究にぴったりの観測装置である。私たちは MOIRCS による超低質量天体候補の近赤外線追分光観測をこれまでに何度も実施してきた [6, 7]。

### 1.3 本研究の観測領域

今回の観測では、距離約 390 pc にあるオリオン座 B 分子雲の NGC 2068・NGC 2071 領域において、若い超低質量天体がどれくらい存在するかを調査した。これらの領域は約 1 度に広がる 1 つの繋がった分子雲にある活発な星形成領域で、NGC 2068 は M78（ウルトラマンの故郷として有名）とも呼ばれ、大質量星が 2 つ存在することがわかっている [8]。一方で NGC 2071 には大質量星は存在しておらず、同じ分子雲内の近接する領域で異なる環境を持つことから異なる環境における超低質量天体形成の違いを探るうえで最適といえる。私たちはこれまでに UKIRT を用いて、同領域で近赤外線測光観測を実施しており、超低質量天体候補を約 2000 天体発見してきた。発見された候補天体の空間分布から、大質量星が存在する NGC 2068 付近では NGC 2071 と比較して若い褐色矮星が多く存在している可能性が示唆された。これを裏付けるために、発見した候補天体の近赤外線多天体同時分光観測を提案したところ、0.5 夜×2 の観測時間が採択された。

## 2. すばる望遠鏡での現地観測

### 2.1 はじめに

ここからは、すばる望遠鏡での現地観測に向けた準備と体験を述べていく。まずはじめに、筆者自身の現地観測に対する思いをここに記しておきたい。最初に『すばる望遠鏡での観測』を志したのは、教員を目指していた高校三年生の時のオープンキャンパスだった。地元である埼玉大学教育学部の研究室を見学した際に、案内をしてくれた大学生がすばる望遠鏡で観測をした、と言っていたことがきっかけだった。その方は学部生向けの

すばる望遠鏡観測実習の体験を語ってくれたのだ。その話を聞いて、教員を目指しつつ天文学の研究をやって、あわよくば、すばる望遠鏡で観測できることに非常に魅力を感じた。進学して研究室に配属されてからも、毎年コンスタントにハワイでのすばる望遠鏡を用いた現地観測を体験する院生がいた。自分の1学年上の先輩までは…。

私は修士2年の時にすばる望遠鏡を用いた観測機会を手にしたが、世はコロナ禍。当然観測は現地ではなく、三鷹でのリモート観測となってしまった。その時には博士課程への進学を決めており、自力で観測採択を勝ち取ることはもちろん、自分の観測をいつか現地で行いたいと願っていた。進学後には合計で2度のPIでの観測機会をいただいたが、いずれも三鷹でのリモート観測であった。コロナ禍が落ち着いた2023年、S23B期での観測が採択された際に、ついにハワイでの現地観測が可能であることが知らされた。待ちに待った現地観測！のはずが、主鏡の不具合によって延期<sup>\*1</sup>となり、約1年後の2025年1月に改めて観測が行われることとなった。こうして、様々な方々のご尽力に支えられ、なんと約10年越しのすばる望遠鏡、ハワイ現地観測にこぎつけたのだ。

実はこの観測に先んじて2024年9月から1ヵ月間、光赤外線天文学大学間連携(OISTER)とハワイ観測所の共同プロジェクトとして、短期滞在実習(ハワイインターン)でハワイ観測所に滞在し、MOIRCSおよびULTIMATEに向けた近赤外分光観測の効率・性能評価を行っていた<sup>\*2</sup>。その際に山頂・すばる望遠鏡ドーム見学や現地での観測見学をさせていただいており、現地に行く、という1つの目標は叶っていたが、やはり、自分が提案した観測を自らハワイで実行する！という今回の観測は特別なものであると感じていた。

## 2.2 観測準備

さて、観測に向けた準備に少し話を移そう。今回実施するMOIRCSの多天体分光観測ではスリットを用いて天体の光を装置に導入する。このスリットを焦点面に多数配置できるスリットマスクは、観測ごとに設計(マスクデザイン)する完全オーダーメイドである。MOIRCSの分光観測視野は約 $4' \times 6'$ で、天体のスペクトルが重ならないようにスリットの位置や幅を微調整する。私たちが行うマスクデザインでは、重要な候補天体を最も多く観測できる視野をその都度検討する。

スリットマスクを焦点面に配置した際は、MOIRCSは目隠しをされている状態になってしまうため、望遠鏡が向いている位置が正しいか確認するためにアライメントホールと呼ばれる位置合わせ用の穴を視野内に数ヵ所配置しておく。す

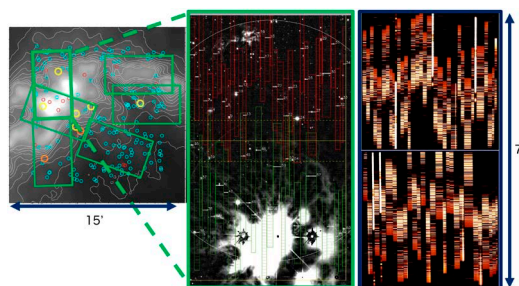


図1 (左) R CrA 領域で同定された候補天体の空間分布 [5] と MOIRCS で追分光観測を行った視野 (四角)。背景の画像はハーシェル宇宙天文台の遠赤外線観測で得られた分子雲のダスト柱密度分布図 [9]。(中央) MOIRCS のマスクデザインの一例。背景は UKIRT/WFCAM で得られた K バンド ( $2 \mu\text{m}$ ) 画像。天体の位置を確認しながら手作業で観測したい天体1つ1つにスリットを配置していく。(右) 実際の分光観測生データ。画像縦方向につながった光が天体のスペクトルであり、規則的に現れているのは地球大気の OH 夜光である。この夜光を差し引くために天体をスリット上で一枚ごとにずらして観測する AB 観測を行う。

<sup>\*1</sup> S23B期の学生PI観測に対して、この異例の対応をしてくださった観測所と関係者の皆様には大変感謝申し上げます。

<sup>\*2</sup> すばる望遠鏡および埼玉大学 web リリース参照。

すべてのホールの中央に星が収まった時に、望遠鏡が正しい位置に向いた、として分光観測を開始する。MOIRCSの分光観測ではマスクデザインがそのまま観測結果に直結するため、非常に入念に準備を重ね、一枚一枚にかなりの時間をかけて行う。一例としてR CrA領域で同定された候補天体の分布の一部と、分光観測で用いたマスクデザインを図1に示す。

完成したマスクデザインを基に、ハワイ観測所にあるレーザーカッターによって厚さ70 $\mu\text{m}$ のアルミ薄板に約60天体分のスリットが切られ、スリットマスクが完成する。近赤外線域でのノイズを減らすため、スリットマスクは観測に先立って山頂に輸送され数日かけて約-180度まで冷却される。今回の観測ではスリットマスクを合計で9枚デザインした。この大変な準備を終え、私たちは1月の寒い日本からハワイへと向かった。

### 2.3 現地滞在と観測

観測前日にマウナケア中腹の山麓施設であるハレポハク(標高約2800 m)に移動し、高地順応をするために一泊した。ヒロの街では半袖で過ごしていたが、ハレポハクでは寒く、常に上着が必要だった。やはり高地であるため、眠りが浅くなってしまふのに加えて、起きるととても息苦しく感じる。でも朝食のオムレツが抜群に美味しいので、これから初めて行く人はぜひとも朝起きて食べて欲しい(一緒に行ったO氏はたくさんハラペーニョが入った具材全部入りオムレツを注文してまだ辛さが足りない、と仰っていた…)

観測前半夜の割り当てだったため、当日は山頂のほかの望遠鏡とドームの見学のために少し早めに山頂に登った。ハレポハクから山頂への道は最初がとにかく険しい。しかし、OISTERで夏に滞在した際には、歩いて登ろうとする人や自前の自転車で登ろうとしている観光客もいたことが強く印象に残っている。途中、山頂と反対側に目を向けるとマウナロアが裾野まで綺麗に見えたが、すごく遠くに見える山なのか、近くにある山なのか



図2 観測前、すばる望遠鏡ドーム内で、左から共同研究者の高木氏、大朝氏、筆者。カセグレン焦点に搭載されている装置がMOIRCS。すばる望遠鏡の大きさが少しでも伝わるだろうか。

距離と大きさの感覚が全くわからず、マウナケアと同じ4200 mの山にはとても見えなかった。

山頂ではすばる以外のほかの望遠鏡の近くにも行かせていただいた。特に思い入れがあるのは、測光観測で用いたUKIRT。いつか観測したいのはもちろん、せめて中に入りたいと思っていたが、残念ながら次に山頂に行く時にはもう姿はないのかもしれない。素晴らしい望遠鏡/装置であるため、自らの手で実際に観測したい!という思いを持って、行く末を非常に気にしている。

さて、気を取り直して、ついにすばる望遠鏡へ向かう。個人的に一番テンションが上がるのは、JCMTやSMAを過ぎて、すばる望遠鏡のドームがどんどん近づいてくるタイミング。行き慣れている人には見慣れた風景かもしれないが、自分にとっては特別な光景で今でも目に焼き付いている。

観測室に到着後、ドームの中を見学させていただいた(図2)。ちょうど制御室では較正用データを取得中で、MOIRCSのスリットマスクを交

換する際に用いられているロボットアームが動く様子を見学することができた。装置の仕組みや観測時に動作の様子が表示されるステータス画面はもちろん知っていたが、装置が実際に動いている場面は当然現地に行かないと見られないので、貴重な体験をさせていただいたと感じている。

次第に外が暗くなってくると観測の開始。入念に計算したスケジュールを基に、着実にデータを取得していく。三鷹でのリモート観測との一番の違いは、山頂で観測すると圧倒的に効率がよいことである。すぐ隣にSAさんがいる安心感があり、コミュニケーションが捗ることで齟齬やミスをなくすることができる。刻一刻と変わる状況に応じて、臨機応変な対応やその場でのスケジュール調整もできる。少しでも多くのデータを取得できることがその後のデータ解析や議論に大きく関わるので、その場で話し合いながらオペレーションできることは非常に重要であると改めて感じられた。また、安全で確実な観測を運用してくれた望遠鏡のオペレーターさんにも感謝している。

加えて、普段埼玉大学にあるSaCRA望遠鏡やぐんま天文台150cm望遠鏡の観測を運用している立場として、すばる望遠鏡にどんな設備があって、SAさんやオペレーターの方が観測時にはどんなことを気にして、何を見ているかという点は非常に勉強になった。すばる望遠鏡の観測室でしか見られないものをたくさん写真に撮らせていただき、SaCRAの観測システムの改善に参考にさせていただいている。

今回はほぼ満月（月齢：15-16）の夜に観測が割り当てられていた。まだ月が昇っていない時間に、写真を撮るために少しだけ外に行かせていただいた。満天の星空の下で早く戻らなきゃという気持ちと、この素晴らしい星空を写真に収めたいという気持ちが合わさって、焦りながらもなんとか星空とドームの写真を撮ることができた（焦ってしまったため出来映えは大満足とはならなかったが…）。今のスマホの待受画面はこの星空の写



図3 観測後、すばる望遠鏡のドーム前で。左から田中氏、高木氏、筆者、大朝氏。満月のためドームや人物がよく写っており、それぞれの個性が出ている一枚。

真とドーム内のすばる望遠鏡の写真である。

幸い気候にも恵まれ、素晴らしい望遠鏡と装置の安全で確実なオペレーションのもと、観測は2夜とも順調に進み、予定通り合計9枚のマスクでデータを取得できた。観測できた天体数はなんと400天体！観測後、特にお世話になったみなさんとドームの外で記念撮影をした（図3）。本当に思い出の写真で、この写真とともに博士論文の学位審査も乗り越え、今後も研究発表時のすばる望遠鏡の紹介時にはしばらくこれを使う予定である。

唯一の気掛かりは、次はいつ現地での観測が叶うかわからないこと。いつの日かまた行けるように、これからも日々頑張りたいと本稿を書いていて改めて心に誓った。

## 謝辞

本研究及び本稿の執筆を進めるにあたり、共同研究者であり指導教員であった大朝由美子氏に厚く御礼を申し上げます。また、観測準備から当日の観測まですばるでの観測をいつも手厚くサポートして下さる田中壱氏、共同研究者で観測時にいつも駆けつけて下さる高木悠平氏、ハワイ現地の生活をサポートして下さった工藤智幸氏にも厚く御礼申し上げます。また、学生の現地観測を実現して下さった宮崎所長をはじめとするハ

ワイ観測所のみなさま、すばる科学諮問委員会のみなさま、すばる室のみなさまにこの場を借りて感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] Oasa, Y., et al., 1999, ApJ, 526, 336
- [2] Nakajima, T., et al., 1995, Nature, 378, 463
- [3] Oasa, Y., et al., 2006, AJ, 131, 1608
- [4] Oasa, Y., et al., 2008, AJ, 136, 1372
- [5] Kanai, T., & Oasa, Y., 2025, A&A, 698, A96
- [6] Kanai, T., & Oasa, Y., 2023, “NIR Photometric/Spectroscopic Observations of Very Low-Mass Objects in R CrA Region”, the 12th Asian-Pacific Regional IAU Meeting (APRIM 2023)(Koriyama, Japan), Session3, 348
- [7] Oasa, Y., 2025, “IMFs at the low-mass ends: How common are brown dwarfs and planetary-mass objects?”, The 11th East-Asian Meeting on Astronomy (EAMA11) (Niigata, Japan), SE-7C
- [8] Strom, K. M., et al., 1975, ApJ, 196, 489
- [9] Bresnahan, D., et al., 2018, A&A, 615, A125

## A NIR Multi-object Spectroscopic Observation of Young Very Low-mass Objects with Subaru/MOIRCS: A Report from Student-PI On-site Observation Program

Takahiro KANAI

*Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255 Shimo-okubo Sakura-ku, Saitama, Saitama 338-8570, Japan*

Abstract: We have conducted NIR multi-object spectroscopy of very low-mass objects using Subaru/MOIRCS as part of a student PI on-site observation program. Very low-mass objects are objects with masses below the hydrogen-burning limit, and we have been investigating their characteristics across various environments. In the on-site observation, I was able to see things that can only be experienced on the summit, such as the facilities and instruments in operation. During the observations, having a support astronomer by our side helped to prevent mistakes and allowed us to adjust the schedule flexibly, which was much more efficient than remote observation. As a result, we successfully obtained all the data planned for our 0.5 nights $\times$ 2. This article outlines the scientific background of this observation and shares a report on the preparations and the actual on-site observations.

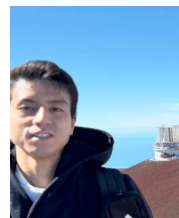
# アンドロメダの距離を測る

## 直川 史寛

〈東京大学理学系研究科物理学専攻, 東京大学理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター  
〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉

〈東北大学理学研究科物理学専攻 素粒子・宇宙理論グループ 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3〉

e-mail: fumihiro.naokawa.e7@tohoku.ac.jp



2024, 25年の2期にわたる計30日間, 学生PI渡航制度にご支援いただき, ハワイ島にてすばる望遠鏡を用いた観測を行いました. 主焦点に構えるHyper Suprime-Cam (HSC)でアンドロメダ銀河の長期モニタリング観測を行い, 史上最高精度での絶対距離測定を目指すものです. HSCは現在, 麓のヒロオフィスからのリモート運用を行っており, 私もマウナケアには登らずリモート観測を行いました. それでは, わざわざ現地に赴く意味はあるのでしょうか? 私の回答としては「大いにあり」です. 以下では, その理由をお話します.

## 1. アンドロメダと宇宙論

### 1.1 天の川は宇宙のすべてか

人里離れた秋頃の夜空にぼやっと浮かぶアンドロメダ銀河. 人類はこの天体を, 古来より眺め続けてきました. 古くは10世紀, ペルシャの天文学者の記録に残り, 1764年にはメシエカタログM31の符号が与えられます [1]\*1.

20世紀の始め頃, M31は歴史に残る論争的的となります. このような星雲が, 天の川銀河に属する天体なのか, それとも全く独立したはるか遠くの天体か. 前者の立場をとるシャプレーと, 後者の立場をとるカーチスとの間で繰り広げられた議論は, 天文学史における「大論争 (The Great Debate)」という名で知られています.

この論争に終止符を打ったのが, エドウィン・ハッブルでした. 1920年代前半, 彼はウィルソン山の60インチ望遠鏡でM31の中にセファイド型変光星を発見します. 変光周期と絶対光度の間

に相関のあるセファイドの性質を利用してM31までの距離を割り出し, この天体が明らかに天の川銀河と独立したはるか遠くの天体であることを見出しました.

この発見は当時ニューヨーク・タイムズ誌に掲載されています [6]. 我々の宇宙観が天の川の外の世界まで広がってから, まだわずか100年ほどしか経っていないことは, その後の宇宙論の発展を鑑みると驚くべきことのように思います.

### 1.2 宇宙の膨張

ハッブルと聞いて多くの方が最初に連想するのは, 宇宙膨張の観測 (あるいはハッブル宇宙望遠鏡) ではないでしょうか. ハッブルは, ほかの銀河についても距離 $d$ を測定し, また後退速度 (銀河が地球から遠ざかる速度) $v$ も求めました. そして, その両者に正の相関があることを発見します. これは宇宙が膨張していることの決定的な証拠となり, 人類の宇宙観が再び大きく変化することになりました. この宇宙膨張の法則は, 同時期

\*1 本節の歴史的な部分に関しては, このほかに [2-5] を参考にしました.

に独立にこの関係を見出したルメートルとともに「ハッブル・ルメートルの法則」と呼ばれ $v = H_0 d$ という式で表されます。比例係数 $H_0$ （ハッブル定数）は、宇宙膨張の度合いを表す最も基本的な宇宙論パラメータの一つです。このハッブル定数は、現在に続く新たな「大論争」を引き起こします。

### 1.2.1 $H_0 \sim 50$ vs $H_0 \sim 100$

ハッブルが測定したハッブル定数は $H_0 \sim 500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ （以下単位は省略）でしたが、彼の測定にはいくつかの大きな系統誤差が含まれており、現在知られている値からは大きくずれていました。その後、距離指標天体の研究と観測が進み、1970年代前半までは $H_0 \sim 100$ と落ち着きます。しかしながら、 $H_0 \sim 50$ とする研究グループも現れ、その後約20年にわたり両者の間で激しい論争が繰り広げられました。

より正確な値の決定について、ハッブルの名を冠したハッブル宇宙望遠鏡（HST）が重要な役割を果たすこととなります。セファイドを用いたHSTによるハッブル定数の測定プロジェクト（HST キーププロジェクト）の最終報告では、上記の論争のちょうど中間あたり $H_0 = 72 \pm 8$ と決定されました [7]。2001年のことでした。

### 1.2.2 $H_0 \sim 67$ vs $H_0 \sim 73$

20世紀の終わり頃から、ハッブル定数を含む宇宙論パラメータの測定に新たに強力な手段が登場します。まずはIa型超新星です。Ia型超新星は、その光度曲線と絶対光度との間に相関があり、より遠方宇宙の距離指標として用いることができます。また、WMAP衛星の登場により宇宙マイクロ波背景放射（CMB）が精密に測定されるようにもなります。WMAPは9年分の測定データを用いてハッブル定数を $H_0 = 70.0 \pm 2.2$  [8] と与え、HSTや超新星による測定と統計誤差の範囲で見事に一致しました。

しかしその後、Planck衛星によるCMBのさらなる精密観測や、超新星観測の進展に伴い測定精度が向上すると、新たな問題が生じるようになりました。両手法（CMBによる手法と天体による手法）で測定されたハッブル定数の値の間に、統計的に有意なずれが生じるようになったのです。この「ハッブル定数問題」は年を追うごとに深刻になります\*<sup>2</sup>。現在では例えば、天体による手法で $H_0 = 73.29 \pm 0.90$  [9]に対し、CMBでは $H_0 = 67.37 \pm 0.54$  [10]とその差の有意性は $5\sigma$ を超え、近年の宇宙論研究における最重要テーマの一つとなっています。そしていま、この問題の解決に向けて、M31の距離測定が再び重要な意味を持つようになっているのです。

## 2. 宇宙の三角基準点

前置きが長くなりました。ここから我々の研究課題の話に移ります。ハッブル定数問題の原因としては、理論・観測の両面から様々な仮説が提案されています。例えば原因が何であろうと、測定手法自体の信頼性向上は、この問題に対するひとつの固いアプローチとなるでしょう。例えばデータ量を増やせば、統計誤差を減じることができそうです。しかし、本研究で注目するのは測定上の「系統誤差」です。

### 2.1 アンカー銀河と宇宙の距離はしご

天体観測を通じたハッブル定数の測定では、セファイドやIa型超新星などの距離指標天体を用います。しかし、これらによって測定できるのは、あくまでも天体同士の「相対的な」距離です。それを絶対的な距離に変換するためには、ゼロ点較正（絶対較正）が必要です。そのために用いられるのが「アンカー銀河」と呼ばれる天体です。アンカー銀河とは、十分な精度で絶対的な（幾何学的な）距離が決定され絶対較正基準に利用可能な銀河のことを指します。この銀河を基準

\*<sup>2</sup> ハッブル定数問題についての最近のレビューとしては例えば [11] があります。日本語で書かれたこちらの文献 [12] もわかりやすいです。この記事を書くうえでも参考にしました。[5]の「ハッブル定数問題の緊張」の項もおすすめです。

点として、まずはセファイドを絶対較正し、さらに遠方の超新星などを順次較正します。この一連の作業は宇宙の距離はしごと呼ばれます。しかし、現在我々が利用できるアンカー銀河は主に、天の川銀河、マゼラン雲、NGC4258 (M106) の三つほどに留まります。それぞれ、年周視差法、食連星法、水メーザー法と呼ばれる異なる手法で絶対距離が高精度で決定されています。アンカー銀河、すなわち較正基準点が少ないことは、ハッブル定数の測定、ひいては一般に宇宙の距離測定における潜在的な系統誤差要因となります。

そこで我々はM31を、新たなアンカー銀河として付け加えることを目標としています。M31 (約0.7 Mpc) はマゼラン雲 (約50 kpc) とNGC4258 (約7.6 Mpc) の間に位置します。ここはアンカー銀河の空白地帯です。これまでもM31の絶対距離測定は行われてきましたが、現状では数個の食連星系を用いた測定にとどまり十分な距離決定精度ではありません [13]。アンカー銀河に必要な精度を達するためにはM31全体からくまなく数百個程度の食連星の光度曲線を精度よく拾い集めることが必要となります。しかしそのような観測は容易ではありません。

## 2.2 すばるHSC

そこで我々はすばる望遠鏡を用いたM31の大規模時系列観測を提案しました。アンドロメダ銀河の個々の星々を分解し、ある程度の暗さの星までを十分な精度で観測するには大口径望遠鏡が必要です。銀河円盤全体を効率よく観測するためには、M31全体を覆う大きな視野が必要です。M31が観測しやすい北半球にて、これらの要求を同時に実現できるユニークな観測装置…それが

すばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC) なわけです。

我々は2024年後期と2025年後期の二度にわたり、併せて17半夜という大きな時間を割り当てていただきました<sup>\*3</sup>。私はその両方で学生PIとしてハワイ現地に渡航し、サポートアストロノマー (SA) や現地職員の皆様に支えられながら観測を行いました。以下では、現地だからこそ得られた経験や学びについてお話しします。

## 3. ハワイでの観測と生活

すばる望遠鏡の観測で現地に赴いた方々は大抵、マウナケア中腹の中間宿泊施設「ハレポハク」に滞在し、観測を行うたびに山頂とを往復するという生活になります。ところがHSC観測の場合は少し違います。HSCはヒロ市内にある国立天文台のオフィスからの運用が行われています。山頂には2名のオペレータのみを残し、SAも含めヒロオフィスあるいはその他の場所からの遠隔操作で観測を行います。そのため、PIとして渡航した場合も、山頂へは行かずに、ヒロ市内に滞在し毎晩NAOJのオフィスから観測を行うこととなります。

### 3.1 ヒロオフィス

ヒロ市中心部から車で10分ほど、ハワイ大学ヒロ校のの近くにNAOJのオフィスがあります。コの字型2階建て、中庭には南国らしい木々が生い茂る美しい建物です。この一帯にはNAOJだけでなく、東アジア天文台、ジェミニ望遠鏡、カルテクなど、マウナケアにドームを構える各国の天文台の拠点が集まっており、一つの天文村のようになっています。イミロアセンターと呼ばれる博物

<sup>\*3</sup> このような観測は2010年代に仏坂健太さん (東大) や増田賢人さん (阪大) らを中心に構想されていましたが実現に至っていませんでした。2020年、学部生であった私は仏坂さんからその話を伺い、いつか自分が挑戦したいと思いました。大学院入学後、なかなか実行に移していなかった折に「学生の間なら現地に行けるらしい」と本渡航制度の話聞き耳に挟みます。「今しかない!」と奮い立ち、仏坂さんや増田さん、そして重力レンズ天体探索でM31の解析経験の豊富な杉山素直さん (IPMU) を始めとする方々とともに、アーカイブデータの再解析などを行ったうえで観測提案を行いました。



図1 後半夜の終わり、ヒロオフィスから臨む朝焼け。

館もあり、ハワイでの天文学・文化や歴史について学べます。一度は訪問することをお勧めします。

### 3.2 ヒロ市内での生活

滞在中は主に、NAOJが現地で借り上げている民家を宿舎とさせていただきます。宿舎には家具や家電製品が一通り揃っており、快適に過ごせました。家主の方がとてもよい方で、滞在中色々気にかけてくださったことも大変助かりました。

宿舎はヒロ中心部から少しはずれに位置し、夜になると満点の星が頭上に広がります。観測のない夜などは宿舎の外で自ら天体観測を楽しみました。1年目は初冬の渡航で、日本よりはるかに高く上がる冬の冬の大三角の南には、カノープスが明るく輝いていました。2年目は夏本番。南側には大迫力の銀中、東側の空にiPhoneを向け少し露光をかけるとM31、M33が写りました。

市内の移動はもっぱら車です。ほぼ毎日Uberでタクシーを呼び、宿泊先とオフィスとの往復を行いました。前半夜の割り当て(1年目)の場合、観測が終わると夜12時。タクシーが拾えるか心配でしたが、毎晩問題なく帰宅できました\*4。むしろ後半夜の場合(2年目)、朝方にドライバーを探すのが難しいことがありました。現地のドライバーはすばる望遠鏡を知っている方も多く、「今夜の宇宙はどうだった？」と聞かれることも。ドライバーと話が盛り上がった結果、宿舎に到着しているのに、なかなか降りれないなんてことも

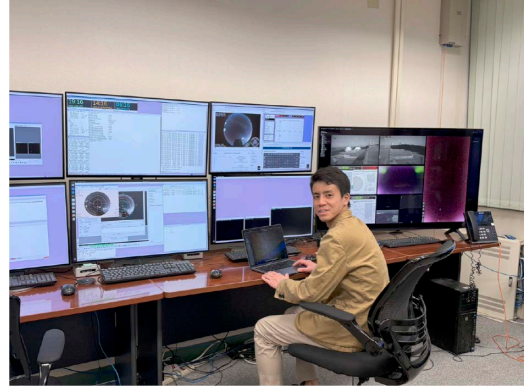


図2 HSCのリモート観測を行う、ヒロオフィス内の制御室にて。

ありました。

オフィスや宿舎の近くに、レストランやスーパーはありません。何日かに一度車でスーパーに行き食材を買い込み、基本的に自炊をしていました。ハワイの食文化は日本に近いものも多く、親しみやすく感じました。特にスーパーで量り売りになっているポケをよく買って食べていました。何度か観測所の方々に現地のレストランに連れて行ってもらい、ラウラウやサイミン、ロコモコ丼など、ハワイ料理も楽しみました。

### 3.3 憧れの「すばる」での観測

突然自分語りになりますが、宇宙少年であった私は、小さい頃から本などですばる望遠鏡を見て育ちました。いつの日か、こんな大きな望遠鏡を使える人間になりたいと思っていました。宇宙物理学者を志し大学院に入学した頃、小平桂一元国立天文台長の著書『宇宙の果てまで』[14]を読み、戦後の日本の天文学及びすばる望遠鏡が出来るまでの壮絶な歴史を学びました。すばるは、僕にとって憧れの望遠鏡です。そんな思いを胸に2024年11月27日前半夜、いよいよ初日の観測のためヒロオフィスのリモート制御室へ向かいます。

制御室では既にSAの藤吉さんが様々な作業を

\*4 1年目には一度だけ、感謝祭の日に昼間のUberのタクシーが全く見つからないということがありました。宿舎の家主の方がご厚意でオフィスまで送って下さり大変助かりました。

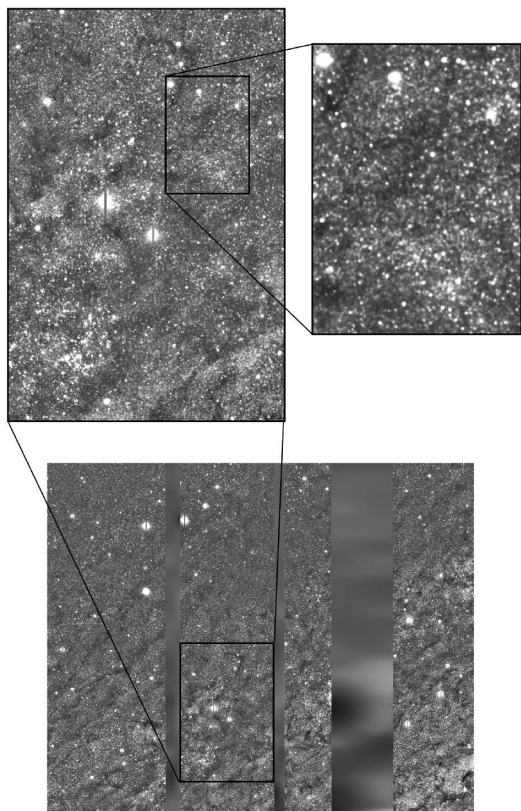


図3 現在解析の途上にある、本課題で観測されたM31の一部分(HSCの視野は広いので、本当にごく一部!). 細部を拡大していくと、一つ一つの星が分解されているのがよくわかる。

始めてくださっていました。日没後に装置の冷却やフラット撮影などを終わると、観音開きのドームシャッターがご開帳、M31に向けてゆっくりと動き始めます。いま、「すばる」が自分の観測のために動いてくれている。一天文少年として育った自分にとって、なんとも表現し難い夢のような心地を感じました。

ちなみに、ハッブルによるM31の距離測定がニューヨークタイムズ誌に掲載されたのは、1924年11月23日。ほぼちょうど百年後に、再びM31に最先端の望遠鏡を向け、その距離測定と

宇宙論の謎に挑戦できることを、とても嬉しく思いました。

焦点合わせを終えると、観測開始です。M31の定点モニタリングである我々の課題は、いざ観測が始まると後は単調にキューを実行するだけです。しかし、飽きることはありません。なぜなら120秒ごとにクイックルックに表示される撮れたてのM31の画像があまりにも美しいからです\*5。画面いっぱいM31の円盤が広がり、拡大してみると、一つ一つの星が分解され「銀河は本当に星の集まりなのだなぁ」と実感できます。

キューを単純に投げ入れるだけとは言っても、大気の状態や焦点位置は刻一刻と変化します。SAの方が常にその状況をチェックし、星像をよりよくするために夜通し焦点の微調整を続けてくださる姿が印象的でした。焦点位置の見極め方をご説明いただきましたが、長年の経験によるところも大きいらしく、自分がすぐに再現できる気はしませんでした。

割り当てられた夜はほぼすべて晴れ、シーイングも良好でした。装置トラブルや湿度により観測できない夜が何度かありましたが、約15半夜分の良質なデータを得られ、マウナケアの透き通る空の威力を肌で感じる事ができました。

### 3.4 「すばる」とご対面

ヒロ市内に滞在し、観測もヒロオフィスからリモートで行うわけですが、ハワイ島まで来て望遠鏡のご本尊を見ずに帰るというわけにはいきません。事前に色々ご相談した結果、ハワイ観測所助教の岡本桜子さんのご好意にあずかり、日中に山頂見学をさせてもらえることに。オフィスから公用車で約30分ほど揺られるとハレポハクにつきます。ここでお茶を飲みながら30分ほど休憩し、高地に体を慣らします。さらに30分ほどマウナケア山を車で登ると、山頂域の望遠鏡群に到

\*5 そう感じるのは私だけではないようです。ある夜、ハワイ観測所を訪問中の研究者らが、私の観測中に制御室を見学に訪れました。スタッフが制御室の説明をしている途中も、クイックルックに表示され続けるM31の画像に参加者は見惚れてしまい…という一幕がありました。

着します。

山頂ではまずドーム内部を順番に見学させてもらいました。当たり前ですが、今までに見たどの光学望遠鏡よりも大きなすばるの筐体に圧倒されました。はるか上を見上げると、毎晩自分が使用しているHSCが装着されています。主焦点にこれほど巨大な装置がぶらさがる異様さを肌で感じることができました。ドーム内には当時開発の最終段階にあったPFSも置かれていました。

一通り見学を終えた後、制御室にて昼食をとりました。食事中酸素ポンペを外していると、少し息苦しくなりました。酸素吸引を再開するとすぐに息苦しさはなくなり、本当に意味があるのだなと感じました。室内には昼食を食べに多くのディクルーの方が集まっていました。我々が夜に望遠鏡を問題なく使えるのは、日中に非常に多くのクルーの方が整備や運用を行っているからだ、恥ずかしながらこの時初めて知りました。

### 3.5 現地での交流

滞在中は観測だけでなくヒロオフィスや周辺の研究機関の研究者らとの交流もできました。まず、広報室の白田・佐藤功美子さんには、買い出しや外食などに送迎いただくなど幾度となくお世話になりました。2年目には広報室主催の七夕ブロックパーティが開催され、私も参加させていただきました。区画一帯での夏祭りのような企画で、各天文台オフィスが所内の見学や展示ブースなどを出展します。生憎の曇り空でしたが、地域の人々とともに天体観望会を行ったり、様々なブースを見学したりし、ジェミニをはじめほかの天文台関係者と交流する貴重な機会となりました。

国立天文台TMT推進室長の白田知史さんにお誘いいただき、1年目にTMTオフィスのクリスマス昼食会に参加しました。TMT建設に向けての尽力や、地元の方々との対話・交流についての話を現地スタッフから伺い、日本にいただけではわからない一端を知ることができました。

補償光学装置を開発している Olivier Guyon さ

んと研究の話で盛り上がり、民生カメラを用いた装置開発を見学させてもらったりしました。2年目には観測終わりの朝方5時台に出勤する彼に出会いました。どうしてこんなに朝早くから出勤するのかと尋ねると「昼間の時間をフル活用して装置をテストするため、今から山に登るんだよ」とおっしゃいました。望遠鏡というものは昼も夜も1秒たりとも無駄にせずを使うものなのだなあと感じました。

観測所の「すばるセミナー」にて発表をする機会もいただきました。1年目は、本観測課題について発表し、その後宮崎所長とも議論させていただきました。HSCを開発してくださったことへの感謝も伝えました。2年目には、博士論文の内容について発表しました。博士論文はCMBや電波銀河など主に電波観測に関連する内容ですが、可視光観測がいかに応用できるか議論を行うことができました。

このほかにも非常に多くの方と交流させていただいたのですが、すべてを書ききれないことが残念でなりません。

### 3.6 渡航の意義

ヒロリモート観測なら三鷹でやるのと変わらないし、わざわざ渡航して意味があるの？と思われるかもしれませんが、2回に渡り渡航させていただいた回答としては「大いにあり」です。

ヒロオフィスや周辺研究所の方々との様々な交流は、ヒロリモート観測ならではの経験だといえます。ふとした出会いや現地のスタッフとの交流は、その場での議論の価値はわずかながな、その後の研究生活にも生きています。このような偶然の出会いはオンライン会議などではなかなかうまれにくく、現地に行ってこそその産物です。普段オンラインでやり取りする人であっても、人となりは対面で直接話して初めてわかる部分も多いものです。一度顔を突き合わせて話しておくことは、コミュニケーションの円滑化に大きく寄与します。

また、普段直接接している研究者以外にも、非

常に多くの方々に支えられ研究を行っていることを強く認識する機会となりました。今回お世話になったヒロオフィスのスタッフや山頂見学時に出会ったデイクルーの方々はその一例です。高度に分業化された現在の天文学において末端のデータだけを触り研究していると、ともすればそのことを忘れがちだと思います。場合によっては全く気づかないまま研究人生を終えてしまうことにもなりかねません。

最後に心に残った言葉を一つ。山頂見学の際、昼食時にお話ししたクルーの方に日頃の整備についてお礼を伝えると「それはいいんだよ。撮ったデータをしっかり論文にしてね。デイクルーの仕事はそのためにあるのだから。」とおっしゃいました。現状思うように解析が進んでおらず申し訳ない気持ちでいっぱいですが、きちんと観測成果を論文にまとめあげたいと思います。

## 謝 辞

本記事の執筆のお声かけをいただきました、田中壺さんに厚くお礼申し上げます。また、田中さんのほかにも観測遂行にあたりサポートいただいた、SAの寺居剛さん、藤吉拓哉さん、新井彰さんにも厚くお礼申し上げます。ノリコRothさん、岡本桜子さん、白田-佐藤功美子さん、白田知史さんをはじめ現地のスタッフの方々には現地での生活や見学などをサポートいただき、大変お世話になりました。また、宿舎の家主の矢野さんの手厚いサポートにも大変助けられました。本渡航プログラムを推進してくださった宮崎聡ハワイ観測所所長にも改めて感謝申し上げます。誌面の都合上、本渡航に際してお世話になった方すべてを挙げる事ができず大変申し訳ございません\*6。最後に紹介したデイクルーの方の言葉を胸に、きち

んとデータを成果につなげ、お世話になった皆様への恩返しとさせていただきますと思います。

## 参考文献

- [1] 早水勉, 2023, Web連動ビジュアル星空大全 (技術評論社)
- [2] 谷口義明, 2018, 銀河I [第2版] (シリーズ現代の天文学)(日本評論社)
- [3] 二間瀬敏史, 2019, 宇宙論II [第2版] (シリーズ現代の天文学)(日本評論社)
- [4] 岡村定矩, 1993, 天文月報, 86, 143
- [5] 天文学辞典 (日本天文学会)
- [6] 1924, FINDS SPIRAL NEBULAE ARE STELLAR SYSTEMS; Dr. Hubbell Confirms View That They Are 'Island Universes' Similar to Our Own, New York Times
- [7] Freedman, W. L., et al., 2001, ApJ, 553, 47
- [8] Bennett, C. L., et al., 2013, ApJ, Suppl, 208, 20
- [9] Murakami, Y. S., et al., 2023, JCAP, 11, 046
- [10] Aghanim, N., et al., 2020, A&A, 641, A6 ([Erratum: A&A, 652, C4 (2021)])
- [11] Verde, L., et al., 2024, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 62, 287
- [12] 大栗真宗, 2023, 日本物理学会誌, 78, 630
- [13] Vilardell, F., et al., 2010, A&A, 509, A70
- [14] 小平桂一, 2006, 宇宙の果てまで—すばる大望遠鏡プロジェクト 20年の軌跡—(早川書房)

## Measuring the Distance to Andromeda

Fumihiko NAOKAWA

*Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

*Department of Physics, Graduate School of Science, Tohoku University, 6-3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan*

Abstract: We were awarded 17 half-nights of Subaru HSC in semesters 24B and 25B for a consecutive monitoring survey of the Andromeda galaxy (M31), aimed at measuring its absolute and addressing the Hubble tension. I stayed in Hilo for a total of 30 days as a student PI, and I report here how fruitful this stay was.

\*6 指導教員である横山順一さんが後日別件出張でハワイを訪れることになりました。その際に「お礼を伝えるべき現地の方のリストを作りなさい」と私に命じられたのですが、いざ作ろうとしてみると、あまりにも多く、フルリストの作成を断念したほどです。

# 近赤外線分光観測に基づく遠方クエーサーの アウトフロー探査とMOIRCSデータ解析 パイプラインの開発



高橋 歩 美<sup>1,2</sup>

〈神奈川大学理学部 〒221-8686 神奈川県横浜市神奈川区六角橋 3-27-1〉

e-mail: <sup>1</sup> ayumi.takahashi969@gmail.com, <sup>2</sup> ayumi@kanagawa-u.ac.jp

2023年8月から2024年の6月にかけてすばる望遠鏡のMOIRCSを用いて、遠方低光度クエーサーの近赤外線分光観測を実施した。本研究課題はクエーサーのCIV輝線の青い側に出現し得る広がった吸収線の有無を捉え、遠方宇宙におけるクエーサーアウトフローの出現頻度を調査することを目的としている。ここでは、ハワイ滞在の思い出や、開発したMOIRCSデータ解析パイプラインの簡単な紹介をしたい。

## 1. 背景

筆者は修士・博士課程で可視光の広帯域フィルターで選択されたクエーサーの分光データを通して、遠方低光度クエーサー群のブラックホール質量推定やそのほかの諸性質の統計調査を行っていた。多くのスペクトルを扱う中で、一部のクエーサーはスペクトルに幅の広い吸収線を持つことを知った。この吸収線とはなんなのか、その出現の物理的背景にはどのような現象があるのか興味を持った。後にこのアウトフローが活動銀河核 (AGN) 活動、ひいては銀河の成長史を紐解くうえで重要な要素であることを知る。先行研究を辿る中で、AGNが活発であると銀河の星形成は阻害されるのか、逆に促進されるのか結局のところどちらなのだろうか、この漠然とした疑問に対して答えを得るべく当該課題を本格的に開始するに至った。ここでは、現地観測の体験記を述べる前にまず、本観測プログラムの科学的位置づけについて紹介する。

銀河の中心には超巨大ブラックホール (SMBHs)

が存在する。SMBHsとその母銀河は空間スケールにしておよそ10億倍異なるにもかかわらず、両者の間には強い質量の相関があることが知られている [1]。この関係は「共進化」としてよく知られており、SMBHsと母銀河が宇宙の長い歴史の中で互いに深く関わり合いながら成長をしてきた可能性を示唆している。AGNおよびクエーサーはSMBHsをエネルギー源として母銀河を凌駕するほど明るく輝き、恒常的に最も宇宙を照らす天体である。SMBHsと母銀河が互いにどう関わり合っているのか、両者を直接結びつけるなんらかの物理プロセスがあるはずだ。そのカギとなるのが、クエーサーに見られるアウトフローである。

母銀河スケールに達するクエーサー駆動の高速度アウトフローガスの存在はいくつかの研究により明らかになっている [2]。また、あらゆる赤方偏移において一定の割合でクエーサーのスペクトル上で特にCIV、NVやSiIVなどの高い電離レベルにおいて広がった吸収線 (broad absorption line: BAL) が見られることがある。このBALこそが、クエーサー駆動アウトフローガスの存在を示す観

測的証拠である。アウトフローガスが星の材料を吹き飛ばし星形成率を抑える可能性や、逆に、星形成を促進する可能性が示唆されている (AGN feedback と呼ばれる)。理論的側面では、AGN feedback は銀河の形成・進化に密接に関わり、pc から Mpc スケールで影響を及ぼすと考えられている [3]。これまで、SDSS や PansTARRS, すばる望遠鏡の HSC-SSP などの地上望遠鏡可視光サーベイにより、赤方偏移が 6 を超えるクエーサーが 300 天体以上発見されている。先行研究では、可視光波長帯で明るいクエーサーの母銀河は近傍宇宙の銀河から推定されるよりも 1 桁ほど小さい力学質量を持つことが示されていた [4]。銀河の成長をコントロールする何かが遠方で強く効いている可能性を示唆する。

INAF (イタリア国立天体物理学研究所) の研究者が率いる研究チームが行った、超大望遠鏡 VLT において X-Shooter を使った観測結果では、30 天体の遠方クエーサーのうち 40-47% もの高い割合で BAL を持つことが明らかにされた [5]。BAL 割合からある仮定を置くと、アウトフローガスの運動エネルギーを推定することができるのだが、彼女たちが求めた BAL 割合を使うと運動エネルギーはエディントン光度の 1-30% ということになり、これは近傍で知られていた一般的な値よりもおよそ 10 倍高い値である。このパワーは理論研究と比較すると、AGN feedback として母銀河へエネルギーを注入するのに十分であると言える [6]。一方で、より一般的な明るさを持つクエーサーではアウトフローガスの出現頻度はどの程度で、母銀河との相互関係はどのようにあるのかなどについての包括的調査は手付かずであった。

## 2. 本研究課題とすばる観測

我々は遠方の低光度クエーサー群の中での BAL 割合を調査するべく、すばる望遠鏡の MOIRCS を用いた近赤外線分光観測を提案した。ターゲットの選択には、すばる望遠鏡の HSC-

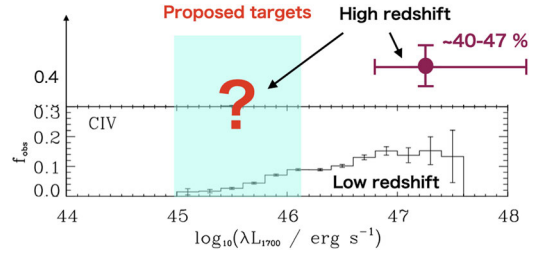


図1 1.2  $\leq z \leq 4.6$  における SDSS クエーサーの光度に対する BAL 割合進化 ([8] の図11 を修正). ハイライト部分が筆者らが提案した光度帯で、エラーバー付きの点が先行研究により測定された遠方クエーサーの BAL 割合 [5].

SSP サーベイに基づく遠方低光度クエーサー探査プロジェクト [7] により発見・分光された赤方偏移が  $z \sim 6.10-6.70$  クエーサー 126 天体を用いた。静止系紫外の絶対等級で  $-24$  等以上で、同赤方偏移帯の他サーベイで発見された天体よりも約 2 等以上暗い天体をターゲットとしている (図1)。BAL クエーサーは典型的には CIV 輝線の青い側に見られる吸収を使って分類されているため、我々の遠方クエーサーターゲットについても CIV 輝線の吸収を検出することを目標にして観測を提案した。本プロジェクトではピュアな BAL 割合を求めべく、ターゲットをランダムに選んだ。本研究課題は 2 セメスターにわたって観測提案を申請し、2023 年から 2024 年にかけて計 7 晩の観測が割り当てられた。ターゲットは非常に暗いのだが、もし吸収線があれば連続光に対して吸収線が  $3\sigma$  で検出できるはずだという算段であった。

### 2.1 S23B の現地観測

自分にとって初めてのすばる現地観測は、同時に、コロナ禍以降初めてとなる現地観測でもあった。2 日間にわたる観測は幸運なことに seeing が 0.4-0.5 秒角とよい観測条件でデータを撮ることができた。最初のターゲットの光が入るまでは気が気ではなかったが (これ以降も 10 ラン程度観測を経験したが、毎度ターゲットのファーストライトを検出するまで非常に緊張した。一生慣れる

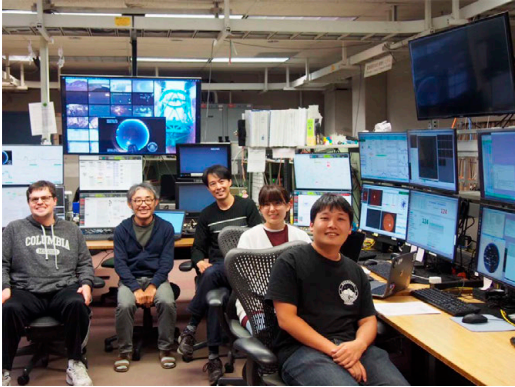


図2 観測の合間に撮影した集合写真。左からオペレータのアンドリュース、SAの青木さん、指導教官の松岡さん、筆者とそして同行してくれた共同研究者の登口さん。



図3 観測のログ係およびそのほかのサポート役として同行してくれた、愛媛大学大学院博士2年(当時修士2年)の齋藤有菜さん。

自信がない)、観測は特に装置トラブルもなく順調に進んだ。

観測中は同行していただいた指導教官の松岡さんや当時ポスドクの登口さん、SAでもあり共同研究者でBALが専門の青木さんと、撮ったスペクトルをみんなで眺めながらこの吸収線・輝線はリアルか、あだこうだ言い合っていた。もしかするとこの時間が観測中一番楽しかった時間かもしれない(図2)。

## 2.2 S24Aの現地観測

この観測でもクリアスカイに恵まれた(聞くと、10日ぶりに山頂が晴れたんだとか)。この時同行してくれた愛媛大学大学院生のパワーかもしれない(図3)。感謝をしている。この頃には、事前に即時解析コードを用意して観測に臨んだ。観測中は撮ったデータをすぐにlocalのパソコンに転送し、シグナルが検出できているかどうかを判断するため最低限の解析を行いながら観測を進めた。S23Bに引き続きこの観測提案はいわゆるクラシカル観測で、事前にどの天体をどれくらい観測するかスケジュールは組んではいたが、実際の観測データで即時解析の結果をみつつ、その時の気象状況、ターゲットの明るさや高度などの様々なパラメータを同時に考慮し、あとどれくら

いの時間観測をするかをその場で考えながら臨んでいた。

余談ながら、自分自身の観測を初めて行ったのは博士課程3年次で遅かったが、指導教官のクエーサー観測には修士の頃からログ係として参加させてもらっていた。その観測もクラシカル観測で、あらかじめ大量のターゲットを用意し、順に観測を進めつつ、クエーサーである確率、明るさ、高度やseeing、残りの観測時間などを考えながらその時に次に優先すべきターゲットを残り1時間、30分程度の積分中に決めていた。その時の自分はログを取りながら密かに次にどのターゲットが観測されるかを当てる遊びを一人で行っていた。途中から次に何を撮ったらいいと思う?と気まぐれに質問されるようになったのでゲームは強制終了となったが、振り返るとこの時間がその数年後の自分の観測で不覚にも活かすように思う。

観測終了後にはSAの方がドーム内ツアーを行ってくれた。自分が使わせてもらっているMOIRCSやそのほかの装置が具体的にどのように望遠鏡にインストールされるかや、MOIRCSのMOS(Multi-Object Spectroscopy)マスクが入っている場所(筆者らはMOSモードで観測に臨んだ)、マスクの出し入れにアームがどこから

でて、どのように動くかなど詳細な説明をしていただいた。観測系を実際にこの目で見てとても嬉しかったし、観測中のover-headがどのような動作によって起こるのか知れたのもよかった。そして、小学生の頃から理科の教科書などで見ていたすばる望遠鏡を目の当たりにした時はやはり感動した。特にドーム内で望遠鏡の組み立てが開始された年月にもこの世に誕生したので、同学年としても対面できたことを嬉しく思った。

### 2.3 観測後のハワイ滞在

S23Bでの観測を終えた後は1週間ほどそのままハワイに滞在させてもらった。S23Bの観測があったのは博士論文の提出締切までちょうど4ヵ月というところであった。観測所のスタッフの方々には、博士論文があるのにここにおいて大丈夫かと心配された。本当にその通りで、今思えば行っている場合ではなかったかもしれない。しかし、滞在中はセミナーの機会をいただいたり、観測所の方々と交流することができ、貴重な時間であったと思う。自分がハワイを訪れている最中、滞在中に次のS24Aの観測提案の締切があった。我々はS23Bのパイロット研究をより発展させるためS24Aでも提案を出すことに決定した。偶然同じタイミングにハワイを訪れていた共同研究者らとともに議論を重ね、提案書をさらにブラッシュアップして提出した。

滞在中、指導教官のお知り合いであった観測所スタッフの方に個人的にお世話になった。その先輩研究者の方と、プロポーザル締切直前の土曜にお互いもしプロポーザルをチーム内回覧に出せたら遊びに行こう、と観光地へ連れ出していただくことになった。せっかくの機会に高揚した私はプロポーザル作成により精を出した。加えて、学生が出した観測プログラムであれば現地観測ができると味を占めた私は、観測提案作成により気合を入れた。無事なんとか提案書をチームに回覧でき、いろいろな場所に連れて行ってもらう、この時にハワイ島について少し知ることができた



図4 Hiloのクラフトビールを作っている工場 (Hilo Brewing Company)。キャッシュオンでその場で飲める。ラガーが特に美味しかった。

(図4)。この約3ヵ月後に私は観測提案の採択通知を受け取ることになる。採択通知を受信後、すばるのwebsiteでaccepted program一覧をぼーっと眺めているとき、ふとこの日のことを思い出した。私はもう一度一覧の上からゆっくり採択プログラムを確認しなおし、遊びに連れ出してくれた先輩研究者の名前を見つけた瞬間、自分自身も嬉しく思ったのを覚えている。

## 3. 解析パイプラインの開発

MOIRCSで取得したデータの解析を始めたのは大学院卒業が約2ヵ月後に迫った時期であった。MOIRCSのデータ解析にはすでに公式的に配布されているソフトがある。しかしこのソフトは普段自分が使用しているパソコン (mac) では動作しない。研究室のサーバでは使えそうであったが、卒業間近に生データ解析のための作業環境を構築するのは現実的ではないと思い、観測データの解析コードを自作することに決めた。これには、自力でのリダクションを通して生データへの理解を深めたいという気持ちもあった。初めから侮っていたわけではないが、生データ解析の経験がなかった自分はこのコード開発に長い時間を要することになった (業務の隙間時間を縫って行っていた背景も大きい)。近赤外線観測ではスカ

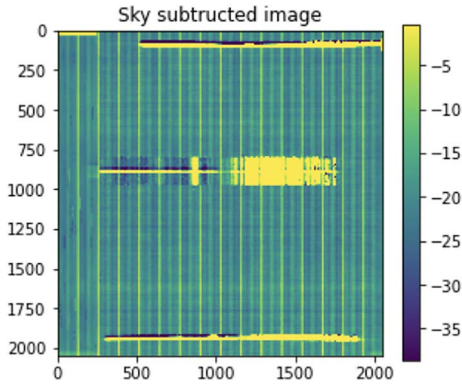


図5 電気ノイズありのフレーム。

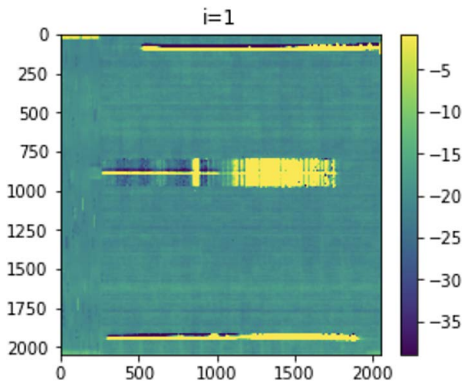


図6 電気ノイズを除去したフレーム。

イ背景光が明るく、特に我々のターゲットは非常に暗いため、解析は本当にノイズとの戦いだだった。開発したパイプラインでは主に、バッドピクセル処理、宇宙線の検出・除去（補間）、スカイ引きなどの共通処理や、スペクトルの1次元化、標準星スペクトルを用いたフラックス較正やOH輝線を用いた波長較正を行う。また、MOIRCSの検出器特有のマルチサンプリングを行った際に生じる電気ノイズ（図5）も差し引く処理を加えた（図6）。他にも、空間方向にシグナルが歪む問題もある。数ピクセル分の歪みが、スペクトルの抽出に大きな影響を与える。本パイプラインではこの空間方向の歪みも補正するコードを組み込

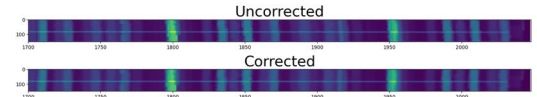


図7 空間歪み補正前後の比較。

んだ（図7）。この作業は各ピクセルがどれくらい歪むかを定量的に調べモデル化するのだが、これがなかなかの鬼門であった。作成したコードはGithubリポジトリ\*1に置いている。ぜひなるべく多くの人に触ってもらいながら、今後も向上させていきたい。

#### 4. 解析結果と今後の展望

S23Bでの2晩とS24Aでの5晩のすばる観測を通して我々はのべ12天体の近赤外線分光データを取得した。1次元化スペクトルから吸収線の有無を調べ、遠方宇宙における低光度クエーサーのアウトフローの割合を求めた。現時点での結論としては、他サーベイで見つかった明るめな種族よりもアウトフロー出現割合は少なく、母銀河スケールへのエネルギー寄与は見込めないことが示唆される結果であった。今後の議論として同光度帯での遠方と近傍でのクエーサー吸収線の割合の比較や、そのほかの物理量と合わせ遠方・近傍で何か違いがあるかななどを深掘りしていきたい。本課題により得られた結果は出版論文として執筆中である。また、これからRubinやRoman, Euclidなどによる撮像大規模サーベイデータが続々と取得されることになる。すばる望遠鏡の多天体分光装置であるPFSなども組み合わせながら遠方クエーサーBALサイエンスをさらに発展させていきたい。

#### 5. 最後に

世界標準は完全リモート観測に向かっている中で、大きなコストやリスクが伴うのにもかかわらず

\*1 [https://github.com/AyumiTK9/drps\\_moircs](https://github.com/AyumiTK9/drps_moircs)

ず、学生PIに限り現地観測を復活させようと、実現に向けて動いてくれた大人たちがいた。筆者はその現地観測が復活した Semester で運よく採択され、ハワイに赴き天候などにも恵まれ実際に現地観測をすることができた。そして、その経験が今の研究活動にも大いに影響している。観測データの理解には想像以上にデータ取得時の映像記憶や実際に観測系をこの目で見た体験がよい影響を与えているように思う。現地観測実現にあたって、ハワイ観測所の宮崎所長をはじめ、SAC および観測所のスタッフの皆さま、観測オペレータ、現地観測を最終的に受け入れてくださった SA の方々、そのほかのご尽力いただいた皆さまに深い感謝を申し上げたい。

## 謝 辞

この原稿を作るにあたっては、天文月報編集委員の方々や事務の方々大変お世話になった。ここでお礼を申しあげる。田中壺さんには MOIRCS 観測のサポートから、本記事執筆のお声をかけていただいた。さらには原稿作成にあたってご助言もくださり感謝を述べたい。修士・博士課程での指導教官であった松岡良樹さんには研究発足時に相談に乗っていただいたり、観測の基礎についてご教授いただいた。共同研究者の登口暁さんからはデータリダクションの心得を学んだ。パイプライン開発中も時折相談相手になってくださり、多岐に渡るサポートをいただいた。また、国立天文台の田中賢幸さんにはリダクションの1次元スペ

クトル抽出やフラックス較正について貴重なご意見をいただいた。信州大学の三澤透さんには観測提案書の構想段階から共に取り組んでいただいている。本研究はまだ始まりに過ぎないが、関わってくださった皆さまにこの場をお借りし多大なる感謝を申し上げたい。

## 参考文献

- [1] Kormendy, J. & Ho, L. C., 2013, *AR A&A*, 51, 511
- [2] Feruglio, C., et al., 2010, *A&A*, 518, L155
- [3] Wagner, A. Y., et al., 2013, *ApJL*, 763, L18
- [4] Decarli, R., et al., 2018, *ApJ*, 854, 97
- [5] Bischetti, M., et al., 2022, *Nature*, 605, 44B
- [6] Hopkins, P. F., & Elvis, M., 2010, *MNRAS*, 401, 7
- [7] Matsuoka, Y., et al., 2018, *ApJ*, 828, 26
- [8] Allen, J. T., et al., 2011, *MNRAS*, 410, 860

## Search for Outflows in Distant Quasars Based on Near-Infrared Spectroscopic Observations and Development of a MOIRCS Data Reduction Pipeline

Ayumi TAKAHASHI

Kanagawa University, Yokohama Campus, 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama, Kanagawa 221-8686 Japan

Abstract: We conducted near-infrared spectroscopic observations of distant low-luminosity quasars using MOIRCS on the Subaru Telescope from August 2023 to June 2024. The aim of this study is to investigate the incidence of quasar outflows in the distant universe by searching for broad absorption lines that may appear on the blue side of the C IV emission line. Here, I would like to share some memories of my stay in Hawaii and briefly introduce the MOIRCS data reduction pipeline I developed.

# 潮汐破壊現象と銀河核環境： AT2023clx 偏光分光観測からの示唆

宇野 孔 起

〈Columbia Astrophysics Laboratory, 538 West 120th Street, New York, NY 10027, USA〉

e-mail: ku2204@columbia.edu



銀河中心に存在する超大質量ブラックホールは、潮汐破壊現象（TDE）に代表される銀河核突発天体と呼ばれる短時間増光現象を引き起こす。本稿ではTDEの基本物理を概観した後、銀河核突発天体 AT2023clx を例として、偏光分光観測による銀河中心環境への示唆を紹介する。我々は AT2023clx に対し、せいめい望遠鏡による初期分光でTDE候補と同定した後、すばる望遠鏡 FOCASの偏光分光観測によりその時間進化を追跡した。その結果、初期のアウトフローに由来する偏光と、銀河中心ダストの散乱による偏光の2成分が検出された。さらに、偏光角の解析から、アウトフローの軸とダスト面が幾何学的に直交している可能性が示された。このことから、既存の銀河中心環境がTDEを引き起こす恒星軌道に影響を与える可能性、あるいはAT2023clxがTDEではなく活動銀河核フレアの一種として解釈される可能性が考えられる。本例を通じて、銀河核突発天体が銀河中心環境を探る有力な手段となりうること、ならびにLSST時代に向けた銀河核突発天体の体系的理解の重要性を紹介する。

## 1. 時間軸天文学の黄金期を見据えて

2000年代後半から本格化した時間軸天文学は、まもなく黄金期を迎えようとしている。機械学習を含む解析・データ処理の進展、広視野サーベイ観測の運用・発見アラート基盤の成熟、そしてCMOSに代表される検出器技術の革新が相まって、この10年で突発天体データの量と質は飛躍的に向上した。そして現在、その流れをさらに加速させる計画として、8.4 m望遠鏡による可視光サーベイRubin Observatory/LSST [1] の本格運用が目前に迫っている（DR1: 2027年末頃予定）。このような「データ飽和時代」では、発見直後の迅速かつ詳細な追観測による天体現象の個別理解と、大規模データ解析に基づく統計的理解の両方がこれまで以上に重要となる。

銀河中心で起こる突発的な増光現象は、時間軸天文学の主要ターゲットの一つである。銀河中心には、太陽の百万–十億倍もの質量をもつ超大質量ブラックホール（SMBH: Supermassive Black Hole）が存在し、銀河の成長や星形成に影響を与えるだけでなく、時として突発的な活動の「エンジン」となる。中でも、恒星がSMBHの潮汐力で破壊される潮汐破壊現象（TDE: Tidal Disruption Event）は、降着円盤やアウトフローの形成、放射過程、さらには銀河中心環境との相互作用までを、数日から数か月という比較的短い時間スケールで追跡できる絶好の対象である。現状ではTDEの発見数は年間数十天体にとどまるが、LSST時代には数千天体規模へと爆発的に増加すると見込まれている。すなわち、TDEをはじめとする銀河核突発天体は、少数例の詳細観測から得られる物

理解を基盤としつつ、統計的な解析へと接続される転換点にあるといえ、時間軸天文学のフロンティアの一つとなっている。本稿では、TDEの物理過程を概観した後、近傍銀河 NGC3799で発生した銀河核突発天体 AT2023clxを取り上げ、その性質と母銀河環境との関連について紹介する。

## 2. 潮汐破壊現象とは

TDEはこれまで天文月報で扱われた例が少ない [2]。そこでまずは、TDEの最小限の物理像といくつかの基本スケールをまとめておく (図1)。

TDEは1980年代後半にX線突発現象として理論的に予言された [3]。恒星 (質量 $M_*$ , 半径 $R_*$ ) がSMBH (質量 $M$ ) に接近すると、恒星の自己重力 ( $f_g \approx GM_*/R_*^2$ ) よりも潮汐力 ( $f_t \approx GM_* R_*/r^2$ ) が勝る距離が現れる\*1。これが潮汐半径 $R_t$ であり、

$$R_t = R_* \left( \frac{M_*}{M} \right)^{\frac{1}{3}} \approx 7 \times 10^{12} \text{ cm} \left( \frac{R_*}{R_\odot} \right) \left( \frac{M_*}{M_\odot} \right)^{-\frac{1}{3}} \left( \frac{M}{10^6 M_\odot} \right)^{\frac{1}{3}}$$

で与えられる ( $R_\odot$ : 太陽半径,  $M_\odot$ : 太陽質量)。この半径付近まで近づくと恒星が引き裂かれる。破壊された星の一部はSMBHへ引き戻され降着 (フォールバックという) し、残りは束縛されずに系外へ放出される。フォールバックする物質は、負の軌道エネルギー ( $\epsilon < 0$ ) を持つということであり、その軌道は楕円軌道となる。

潮汐半径をかすめるような、ほぼ放物軌道をもつ恒星 (近日点 $\approx$ 潮汐半径) の潮汐破壊を考える。放物運動のため、恒星重心の軌道エネルギーは $\epsilon \approx 0$ であるが、破壊される瞬間には恒星内部の位置差 $\sim R_*$ により、重力ポテンシャルが重心とSMBH側で僅かに異なるため、軌道エネルギーは $\epsilon \approx 0$ の周りに幅 $\Delta\epsilon$ をもって広がる。ここで $\Delta\epsilon$ は

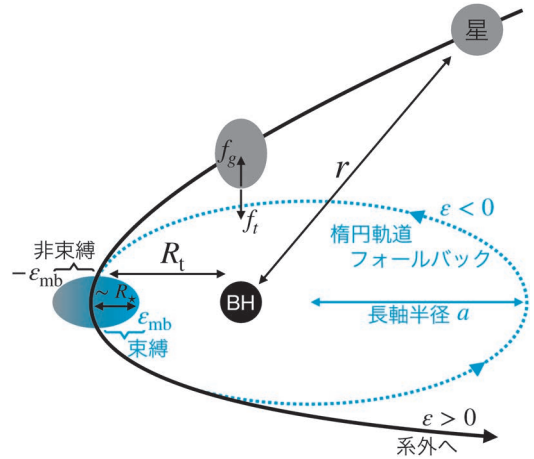


図1 潮汐半径をかすめるような軌道のTDEの設定。軌道エネルギーが $\epsilon_{mb} < \epsilon < -\epsilon_{mb}$ で一様に分布する場合、おおよそ半分の質量が束縛 ( $\epsilon < 0$ ) されフォールバックし、残りは非束縛軌道 ( $\epsilon > 0$ ) で系外へ放出される。

おおよそ、

$$\Delta\epsilon \approx \frac{GM_*}{R_t - R_*} - \frac{GM_*}{R_t} \approx \frac{GM_*}{R_t} \frac{R_*}{R_t}$$

と見積もられる。SMBHに最も束縛 ( $\epsilon$ が最小) された破片の軌道エネルギーは $\epsilon_{mb} = -\Delta\epsilon$ であり、

$$\epsilon_{mb} \approx -\frac{GM_*}{R_t} \frac{R_*}{R_t}$$

となる。そして、軌道エネルギーが決まると、楕円運動自体も決まる。楕円の長軸半径 $a_{mb}$ は軌道エネルギーから

$$a_{mb} = -\frac{GM_*}{2\epsilon_{mb}}$$

と求められる\*2。典型的なフォールバックのタイムスケール $t_{fb}$ は、この最も束縛された物質の軌道周期 $P_{orb}(a_{mb})$ が決める。したがって、

\*1 Gは重力定数。  $f_g < f_t$  となると潮汐力が打ち勝つ。  $f_g, f_t$  ともに単位質量あたりの力。

\*2 これはSMBH周りのケプラー運動から導かれる。大学1回生 (1年生) の力学などでよく扱われる題材である。

$$t_{fb} \approx P_{orb}(a_{mb}) = 2\pi \sqrt{\frac{a_{mb}^3}{GM_*}}$$

$$\approx 42 \text{ days} \left(\frac{R_*}{R_\odot}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{M_*}{M_\odot}\right)^{-1} \left(\frac{M}{10^6 M_\odot}\right)^{\frac{1}{2}}$$

と見積もられる。

フォールバックした物質が瞬時に SMBH へ降着すると仮定すると、SMBH への降着率 ( $\dot{M} = dM/dt$ ) の時間進化は、軌道エネルギー  $\varepsilon$  を介して、

$$\frac{dM}{dt} = \frac{dM}{d\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dt} \sim \frac{M_*}{2|\varepsilon_{mb}|} \frac{(2\pi GM_*)^{\frac{2}{3}}}{3} t^{-\frac{5}{3}}$$

$$= \dot{M}_{peak} \left(\frac{t}{t_{fb}}\right)^{-\frac{5}{3}}$$

と表せ<sup>\*3</sup>、降着率が時間の  $-5/3$  乗で減衰していくことがわかる<sup>\*4</sup>。また  $\dot{M}_{peak}$  は

$$\dot{M}_{peak} = \frac{M_*}{3t_{fb}}$$

$$\approx 3 M_\odot/\text{yr} \left(\frac{M_*}{M_\odot}\right)^{\frac{4}{5}} \left(\frac{M}{10^6 M_\odot}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

である<sup>\*5</sup>。この降着率は、エディントン降着率：

$$\dot{M}_{Edd} \approx 0.02 M_\odot/\text{yr} \left(\frac{\eta}{0.1}\right)^{-1} \left(\frac{M}{10^6 M_\odot}\right)$$

よりも十分大きく ( $\dot{M}_{peak} \gg \dot{M}_{Edd}$ )、TDE のフォールバックは超エディントン降着となると予想される。ここで用いられている  $\eta$  は、放射効率のパラメータである。そして、降着によって解放されるエネルギー率  $L_{acc}$  はおおよそ

$$L_{acc}(t) \approx \eta c^2 \frac{dM}{dt}$$

$$\sim 10^{46} \text{ erg/s} \left(\frac{M_*}{M_\odot}\right)^{\frac{4}{5}} \left(\frac{M}{10^6 M_\odot}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{t}{t_{fb}}\right)^{-\frac{5}{3}}$$

と見積もられる ( $\eta$  は 0.1 程度を仮定、 $c$  は光速)。このことから、観測される光度もおおよそ  $t^{-5/3}$  で減衰していくと予想される。

以上のことから、TDE とは、潮汐半径近傍を恒星が通りかかった際に潮汐力により破壊された後、フォールバックした物質が数十日かけて超エディントン降着することで駆動される、光度がおおよそ時間の  $-5/3$  乗で減衰していく極めて明るい現象であると予想される。また、標準円盤モデルの降着円盤を考えると、典型的な温度は約  $10^6 \text{ K}$  と見積もられ [4]、X 線で明るいことが予想される。

しかし、超エディントン降着による降着円盤だけでは、X 線放射は説明できても近年発見数が急増している可視光・紫外線で明るい TDE は説明できない。可視光・紫外線で放射を説明するため、いくつかのモデルが提案されている。主要なものとしては、超エディントン降着により駆動されるアウトフローが、中心からの X 線を吸収し可視光で再放射するというアウトフローモデル [5, 6] や、破壊された恒星の残骸が SMBH を周回する際に、一般相対論的な効果により軌道が少しずつずれる<sup>\*6</sup> ことで衝突するストリーム衝突 (Stream Collision) モデル [7, 8] などがあるが、まだ決着はしていない。

### 3. AT2023clx: せいめい→すばるへ

#### 3.1 せいめい望遠鏡による同定

2023年2月22日、ASAS-SN という可視光サーベイチームから、突発天体 AT2023clx の発見が報告された (図2)。この天体は、NGC3799 という約 50 Mpc にある渦巻銀河の中心部で発生した銀河核突発天体である。この銀河は低電離中心核

<sup>\*3</sup>  $dM/d\varepsilon \approx M_*/2|\varepsilon_{mb}|$  は、軌道エネルギーが  $\varepsilon_{mb} < \varepsilon < -\varepsilon_{mb}$  で一様に分布し、約半分の物質 ( $M_*/2$ ) が束縛されていると仮定している。 $d\varepsilon/dt$  は、 $t_{fb}$  の式を  $t(\varepsilon)$  として微分した。

<sup>\*4</sup> この計算には太陽程度の主系列星に対する質量半径関係:  $R_* \propto M_*^{1/5}$  を用いた。

<sup>\*5</sup> 恒星が完全に破壊されるような TDE では  $-5/3$  乗だが、部分的に破壊される TDE では  $-9/4$  程度と考えられている。

<sup>\*6</sup> 水星の近日点移動と同じ原理。

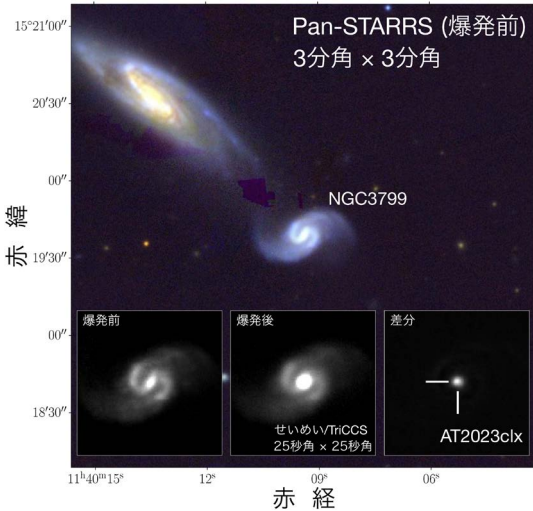


図2 AT2023clxの爆発前 (Pan-STARRS), 爆発後 (せいめい望遠鏡/TriCCS), およびその差分 (爆発後一爆発前) 画像. 爆発後画像では銀河の中心に明るい点=AT2023clxが確認できる.

輝線領域 (LINER: Low Ionization Nuclear Emission Region) と呼ばれる種族の銀河であり、「弱い」活動銀河核 (AGN: Active Galactic Nucleus) の一種であるとも考えられている銀河である. そのためAGN活動と思われたのか, 近傍突発天体であったが, 各国の突発天体フォローアップチームからこの天体の分光同定の報告はされなかった\*7.

発見報告から4日後, 我々 (京都大学) のチームはせいめい望遠鏡によるAT2023clxの分光観測を行った. その結果, 青い連続光と幅の広い水素輝線というTDEに特徴的なスペクトル [9] を得た. 我々は, AT2023clxをTDEと同定し, 世界に先駆けて報告を行った [10]. 光度曲線を見て

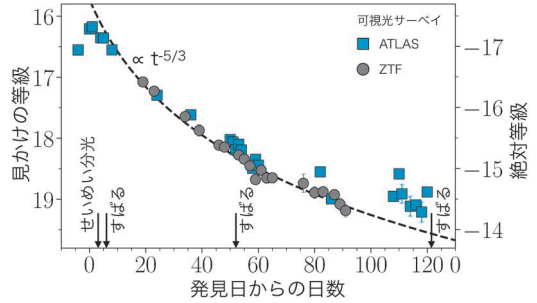


図3 AT2023clxの光度曲線. 光度曲線が時間の $-5/3$ 乗で減衰していく様子が見える. データは可視光サーベイであるATLASとZTFから取得した.

も, この天体はピーク後に明るさが時間の $-5/3$ 乗で減衰しており, TDEに特徴的な光度進化を示していた (図3) [11-13]. しかし, ピークの絶対等級は $-17$ 等程度であり, TDEにしては極めて暗いものであった. 50 Mpcという距離を考えると, AT2023clxは観測史上最も近傍で発生したTDE候補天体であり, 我々は同定直後からせいめい望遠鏡に加え, ハワイにあるすばる望遠鏡, スペイン・ラパルマ島にある北欧光学望遠鏡等を用いた追観測を開始した.

### 3.2 すばる望遠鏡による追観測

我々は, すばる望遠鏡FOCASの偏光分光モードによるTDEのToO (Target of Opportunity) 観測\*8の時間を持っていたため, せいめい望遠鏡の分光同定の直後にすばる望遠鏡へToO観測を申請した. すばる望遠鏡は, 自分が使いたい装置が搭載されているときでないToO観測ができない. スケジュールを確認したところ, FOCAS

\*7 AGNのほかに, 銀河中心で発生するIa型超新星も最大光度やタイムスケールが似ているためTDEと混同されやすい. 特に初期は, 測光データのみを用いてそれらを分類することは難しい. 我々は, せいめい望遠鏡も用いて, TDEなどを狙った銀河中心突発天体の分光同定を継続して行っている (PI: 前田啓一氏) が, 体感8-9割はIa型超新星である. しかし, そのような状況の中でも地道に観測を重ねたからこそ, 今回のような貴重な天体現象を捉えることができた. 本天体の発見は, PIである前田氏の先見性と, 岡山天文台の川端美穂氏・田口健太氏らの継続的かつ着実な観測の積み重ねによるところが大きい.

\*8 あらかじめスケジュールされている観測に割り込んでの観測. 突発天体は発見が予想できないため, 初期観測ではToO観測が必要となる.

の搭載はハワイ時間の2月26日（日本時間では翌27日）までであり，その次に観測可能なのは4月中旬であった．このため，初期のデータを取得するためには，翌日の観測が必須であった．いくらToO観測といえど，翌日の観測への割り込みというのは（主に観測所の）準備が大変である．特に我々は，偏光分光という特殊な観測モードを指定していたため，装置のマスク交換など実際に山頂での作業が必要であった．最終的に承認され，ToO観測が可能となったのだが，対応していただいた観測所の方々，特にサポートしていただいた青木賢太郎さんには本当に感謝している．最終的に3度（2月27日，4月15日，6月22日）のToO観測を行い，偏光分光の時間進化を追うことができた．これまで，8 m級望遠鏡でTDEの偏光分光の時間進化を追った例は少なく [14]，貴重なデータを得た．

## 4. 偏光分光観測

### 4.1 偏光観測とは

結果に入る前に，偏光について述べておく．可視光観測の代表的なモードには「測光」「分光」「偏光」の3種類がある．測光は天体画像からその明るさを測定する手法であり，分光は光を波長ごとに分解してスペクトルを得る方法である．一方，偏光は光の「振動方向」に着目する観測である．

光，すなわち電磁波は，光の進行方向に対して垂直な方向に振動する2つの電場で書き表せる（図4）．偏光観測とは，それらの成分強度の偏りを測定する手法である．実際には，装置の前に偏光板を置き，その向きを変えながら光の強度の変化を測定する．偏光は偏光度と偏光角という2成分で表される．偏光度は偏光の強度そのものを表し，偏光角は天球上での偏光面の角度（電場ベクトルの向き）を表す．

偏光観測の利点は，放射メカニズムと光源の幾何学が直接反映される点にある．例えば，シンクロトロン放射は磁場により電子の運動方向が揃え

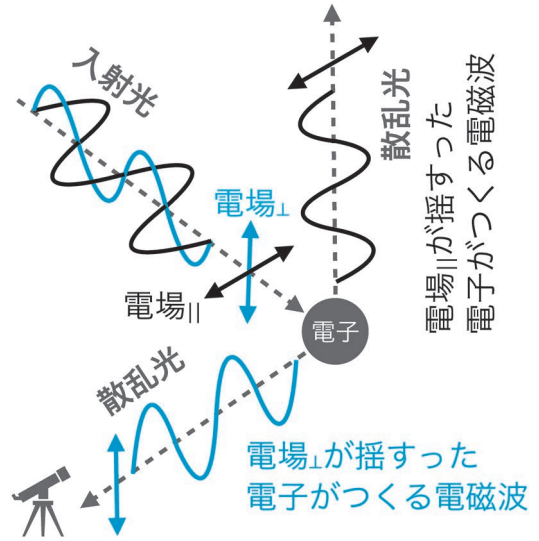


図4 偏光のイメージ図．入射光を2つの直交する電場（電場 $\perp$ ：観測者の視線方向に対して垂直方向に振動する電場，電場 $\parallel$ ：視線方向に対して水平方向に振動する電場）に分ける．この入射光が，ある電子によって入射方向に対して90度方向へ散乱される場合を考えると，観測者は電場 $\perp$ により揺すられた電子が作る電場のみ観測できる．このため散乱光は，入射光と視線方向で張られる面に対して垂直方向の振動をもつ光（偏光）となる．

られるので高い偏光度を示す一方，熱放射は電子の運動がランダムとなりやすく低い偏光度となる [15]．また，球対称の電子散乱が支配的な光源からの偏光は，互いに打ち消し合うことで0%となるが，非対称性が増すにつれて2-3%の偏光度を示す [16]．さらに偏光角からは光源の幾何学に関する情報を抜き出すことができる．例えば，散乱による偏光が支配的な場合，散乱光は入射光と視線方向で張られる面に対して垂直な方向の偏光を獲得する（図4）．このため，偏光角から散乱領域，あるいは対称軸の向きを推定できる．まとめると，偏光度は放射機構と系の非対称性を反映し，偏光角は偏光源の大域構造の向きを反映すると言える．

一方で，偏光観測の欠点は高い信号雑音比（S/N比）が要求される点にある．1%程度の偏光度を測定するためには，偏光板の向きを変えたときの

強度差を高精度で測定しなければならない。この精度での偏光の取得のためには  $S/N \geq 10^{2-3}$  が求められる。したがって、銀河系外の突発天体で偏光分光を実施できるのは、ほぼ 8 m 級望遠鏡に限られ、それであっても 1 天体あたり数時間の観測時間を要する。

4.2 結果

観測された偏光スペクトルを図5に示す\*<sup>9</sup>。すばる望遠鏡 FOCAS による 3 度の偏光分光観測の結果、各 epoch で異なる偏光特性が得られた。1 度目の観測（2月27日、発見から5日後、以後 Epoch1）では、連続光領域で波長依存性のない一定の偏光度  $P \sim 1\%$  と、一定の偏光角  $\theta \sim 125$  度が観測された。2 度目の観測（4月15日、発見から52日後、以後 Epoch2）では、偏光度が短波長側ほど増加し、 $\sim 7000 \text{ \AA}$  付近で  $P \sim 0.3\%$  から  $\sim 4000 \text{ \AA}$  付近で  $P \sim 2\%$  へと増加した一方、偏光角は  $\theta \sim 35$  度でほぼ一定であった。3 度目の観測（6月22日、発見から121日後、以後 Epoch3）では、偏光度は  $P \sim 0.5\%$  まで低下し、偏光角は Epoch2 と同じ  $\theta \sim 35$  度を保った。Epoch3 では突発天体が母銀河に比べて十分暗くなっているため、ここで観測される偏光は主として母銀河および星間物質に由来する定常的な偏光であり、この点を偏光度の零点とみなすことができる\*<sup>10</sup>。

より偏光特性を視覚的に示すべく、 $Q-U$  diagram を図6に示す。偏光は偏光度  $P$  と偏光角  $\theta$  の 2 自由度をもつが、これをストークスパラメータ  $Q$  と  $U$  で表すと、偏光ベクトルの足し引きを扱いやすくなり、また視覚的にも偏光の特徴を捉えやすい。Epoch1 のデータは  $(Q, U) \simeq (-0.2\%, -0.4\%)$  付近に波長依存なく集中している。Epoch2 のデータは Epoch1 の点と原点を結ぶ直線上に沿っ

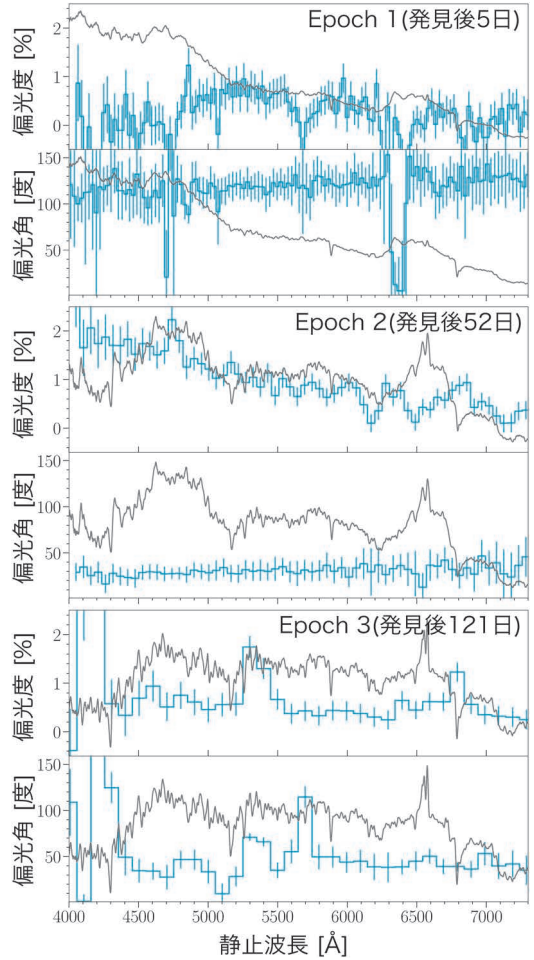


図5 偏光度と偏光角の変化。各パネルでは偏光角と偏光度を青で示し、その観測スペクトルを灰色で示した。時間が経つにつれて、偏光の振る舞いに変化していくことがわかる。

て分布するが、原点に対して反対側へ移動しており（偏光角の $\sim 90$ 度反転に相当）、短波長側ほど大きな偏光度を示している。Epoch3 のデータは波長依存をほとんど示さず、Epoch2 の長波長端と重なる位置にあり、偏光の零点（定常成分）を

\*<sup>9</sup> どうでもよいのだが、突発天体の偏光を扱ったことがある人なら間違いなく驚くデータである。TDE の中では最高の、超新星などを含めてもかなり上位に入るクオリティのデータである。さすがすばる望遠鏡。

\*<sup>10</sup> 偏光の零点を決めなければ突発天体由来の intrinsic な偏光はわからない。観測される偏光には突発天体の偏光に加え、母銀河の偏光と星間物質による偏光が乗るためである。また、偏光パラメータの足し算引き算をする際には、それらがベクトル量であることに注意しなければならない。

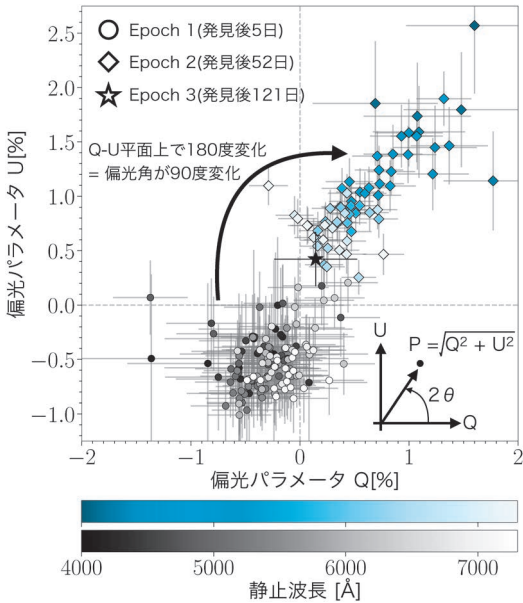


図6 Q-U diagramと呼ばれる、偏光を(偏光度, 偏光角) $= (P, \theta)$ をストークスパラメータ  $(Q, U)$  という別の変数で表し、プロットしたもの。この図で偏光度  $P$  は原点からの距離であり、偏光角の2倍を  $Q$  軸から測った角度としている。この図から偏光角が Epoch1 と Epoch2 の間で90度変化していることがわかる。Epoch3 のデータは偏光パラメータの波長平均値を表示している。

与えると解釈できる。

この偏光の時間進化は以下のことを示している: (i) この系は軸対称な構造を持つ。(ii) 偏光の支配成分が Epoch1 と Epoch2 で異なる。(iii) 偏光角の90度反転は散乱体と光源の幾何学配置で説明できる。

## 5. 偏光シナリオと解釈

### 5.1 AT2023clxの背後にある幾何構造

この奇妙な偏光の時間進化は、二段階の偏光源を考えると自然に説明できる。偏光進化を説明するための模式図を図7に示す。

Epoch1で見られた波長依存の小さい一定の偏光は、突発天体を作る非球対称なアウトフロー中の電子散乱で説明できる。初期は突発天体成分が母銀河に比べて明るく、観測される偏光も突発天

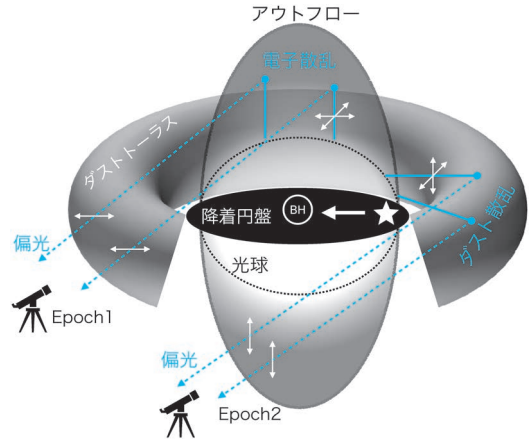


図7 偏光シナリオの模式図。初期 (Epoch1) はアウトフロー中の電子散乱が偏光を支配し、後期 (Epoch2) は銀河中心ダストによる散乱が偏光を支配する。散乱光は入射光と視線方向で張られる面に対して垂直な方向の偏光を獲得するため、アウトフロー軸とダスト面がほぼ直交していれば、偏光角の90度反転を説明できる。

体由来の成分が支配的である。偏光度が1%程度であるので、SMBHへの降着流により駆動される光学的に厚い非球対称なアウトフローが主要な放射源となり、その電子散乱によって偏光が生じたという描像が示唆される。TDEの主要な放射メカニズムの一つであるストリーム衝突モデルでは、強い偏光度(〜10%)が予想されているため [17], 本データとは整合しない。

その後、時間とともにアウトフローが光学的に薄くなり、アウトフロー由来の偏光が弱まる。一方、銀河中心にダストが存在する場合、突発天体の光が周囲ダストを照らし、ダスト散乱(ダストエコー)として遅れて到来する成分が偏光を支配する。重要なのは、(i) ダストエコーはピーク期の青い連続光を主に散乱して届くこと、(ii) ダスト散乱は一般に短波長ほど効率が高いこと、の相乗効果により、ダストエコーが卓越すると短波長側ほど強い偏光(青色超過)が現れる点である。実際、Epoch2で観測された短波長側で増加する偏光度は、このダストエコーの予測と整合的である。

Epoch1の観測フラックスとEpoch2の偏光フラックスの比較(図8)も、このダストエコー解釈を支持する。Epoch2の偏光フラックスは概ね初期(Epoch1)のスペクトル形状をなぞっており、Epoch2で見ている偏光成分が「遅れて届いた初期の光」の散乱によって形成されていることを示している。

さらにこの比較は、ダスト物性にも示唆を与える。一般にダスト散乱は、粒径に依存した散乱効率(不透明度)の波長依存性を反映し、これが青色超過の一因となる。しかしEpoch2の偏光フラックスはEpoch1の連続光形状をよくトレースし、追加の青色超過は見られない。これは、偏光を生む散乱不透明度の波長依存性が弱いことを示唆し、ダストが比較的大きな粒径( $\geq \mu\text{m}$ )を含む可能性を示している。

さらに、このシナリオはEpoch1からEpoch2にかけての偏光角の90度反転も説明しうる。これは、偏光を支配する散乱領域がアウトフローからダストへと切り替わった結果として、放射領域の幾何が「細長い(prolate)」状態から「扁平(oblate)」状態へと移ったことを示唆する。4.1節で述べたように、散乱光は散乱面に水平な方向の偏光を獲得するため、Epoch1で支配的だったアウトフロー軸と、Epoch2で支配的になったダスト面

とが、天球面上で直交する配置にあれば、90度反転は自然に解釈できる。

最終的にEpoch3では、アウトフローおよびダストエコーの双方が十分に減衰し、波長依存をほとんど示さない定常偏光が残る。実際、Q-U diagram(図6)では、Epoch3の点がEpoch2の長波長端と重なっており、観測された偏光が「散乱偏光+定常偏光」の重ね合わせで解釈できることを示唆している。

### 5.2 AT2023clxの起源

AT2023clxで得られた「青色超過」と「90度反転」を同時に示す偏光進化は、既存のTDE偏光サンプルでは報告例がなく、AT2023clxの特異性を示唆する。

ダストの起源については、偏光を担うダスト散乱成分が突発天体発生後~50日という短期間で支配的になっているため、TDE後に新たに形成されたダストで説明することは難しい。したがって、銀河中心に既に存在していたダストが関与した可能性が高い。また、標準的なTDEの描像では、恒星の侵入軌道は概ねランダムであり、その降着によって駆動されるアウトフロー方向もまたランダムとなる。このため、アウトフロー方向が特定のダスト面と系統的に揃う理由は本来ない(偏光角が90度 $\pm$ 5度の範囲に収まる確率は10%未満である)。これは、AT2023clxの背後に恒星軌道をダスト面と整列させる自然な機構が存在する可能性を示唆する。

一つの解釈は、恒星が破壊される前に、SMBH周りを運動するダスト領域を經由してSMBHに接近した、というものである。高密度のダスト領域が恒星を捕獲する、あるいはダスト内部で星形成を駆動すると仮定すれば、恒星がダスト領域に沿った軌道をとることは自然に説明でき、その結果としてTDEによるアウトフローがダスト面と直交して見える。ここで興味深い点として、母銀河がLINERであることが鍵になっている可能性がある。LINERの性質は完全には解明されては

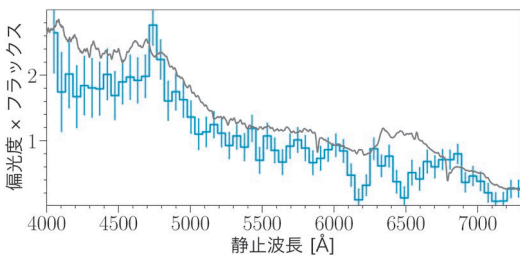


図8 偏光フラックス(青)とスペクトル(灰)の比較。偏光フラックスはEpoch2の観測から $P(\lambda) \times F(\lambda)$ として計算した。灰色は比較のために示したEpoch1のスペクトルである。偏光フラックスが初期スペクトル形状を概ねトレースすることは、Epoch2の偏光が初期光のダストエコーに由来することを示す。

いないが、AGNと非AGNの中間的銀河として位置づけられることが多い。もしLINERが弱いAGNに付随するトーラスや円盤構造（縮小版のAGN構造）を持つならば、恒星は降着円盤に捕獲される、あるいはトーラス領域内で形成され、SMBHへの落下方向が円盤／トーラス面と整列しうる。実際、AGN降着円盤が恒星軌道に影響し、AGNに関連するTDEの発生率を高めうることが理論的に提案されている [18, 19]。AT2023clxは、そのような円盤捕獲型TDEの存在を示しているのかもしれない。

別の可能性として、AT2023clxはTDEというよりも、changing-look AGNやAGN majorフレア [20, 21] に類するAGN的活動であった可能性も残る。さらに近年、弱いAGN銀河においてTDEの特徴とAGNの特徴を併せ持つ新たな銀河核突発天体（ANT: Ambiguous Nuclear Transient） [22, 23] が注目されており、AT2023clxはその理解を促す事例となりうる。この場合、「なぜAGN的活動がTDEのように見えるのか」という疑問が生じるが、アウトバーストの性質は、SMBHへどれだけの質量がどれほどのタイムスケールで降着するかで決まりうることに注意したい。AT2023clxはTDEの中では最も暗いものの一つであり、この明るさを説明するためには、約100日で $0.1 M_{\odot}$ 程度を降着させれば十分である。この降着率はわずかに超エディントンであり、一部のAGN活動では十分説明可能な降着率である。

もっとも、どちらのシナリオにも課題が残る。円盤捕獲型TDEシナリオでは、銀河中心ダストが恒星軌道や星形成に影響を与えうるほど高密度であるかが問題となる。一方、AGN的活動シナリオでは、LINERで突発的な降着率の増加を駆動する機構や、観測的にTDEのように見える放射過程の理解が必要である。

## 6. 将来の展望

### 6.1 銀河中心を照らす「灯台」としてのTDE

これまでAT2023clxの個別観測例について述べてきた。もちろん未解明の点は残るが、銀河核突発天体が母銀河環境、とりわけ弱いAGN構造と結びつく可能性を、偏光というこれまで例がない独立な情報から議論できた点は重要である。実際、可視光サーベイにおいてはAGN活動とTDEを観測的に区別することが難しく、既知のAGN銀河ではTDEを見落とししたり、TDEがAGN変動として扱われたりしやすい。AT2023clxはその境界領域の存在を示唆し、銀河核突発天体を理解する上でAGN-ANT-TDEの連続性を体系的に捉える必要性を浮き彫りにしたといえる。

さらに本成果のユニークな点は、銀河核突発天体を銀河中心環境を照らす「灯台」として用いる可能性を示した点にもある。TDEのように銀河中心を内側から短時間で強く照らす光源が出現すると、周辺の電子やダストが散乱・再放射で応答し、その幾何学情報が偏光や他波長放射として観測される。これにより空間的に分解できないSMBH近傍の環境や、LINERのように定常光度が低く通常は構造探査が難しい中心領域に対しても、時間変動を利用した間接的な調査が可能となる。本例は、銀河中心領域の物理環境を探る新しい手段につながるものでもある。

### 6.2 LSST時代を見据えて

最初に述べた通り、LSSTの本格稼働によってTDEの発見数は桁違いに増え、銀河核突発天体研究は「少数例の現象論」から「統計と物理の接続」へと本格的に移行する。今後の課題は、大量の光度曲線を分類・整理するだけでなく、そこから抽出される多様性を降着状態・放射過程・銀河中心環境と結び付けて理解することである。近傍TDEの多波長・多モード追観測は、個別天体の物理理解に加え、LSST時代の大規模サンプル解析に必要な分類基準（観測量と物理量の対応）を

与える基盤となる。

さらに大口径望遠鏡による LSST サーベイは、より高赤方偏移まで拡張された銀河核突発天体サンプルを提供する。こうした遠方サンプルは、これまで主に AGN 研究で議論されてきた SMBH 成長史や銀河の星形成史の相関についても新たな制約を与え得る。TDE を「個別の突発現象」としてだけでなく、「銀河環境・SMBH 探査の手段」として捉え直すことが、LSST 時代の銀河核突発天体研究の新たな役割となると期待される。

## 謝 辞

本稿で紹介した研究成果は、筆者らの論文 [24]、および筆者の博士論文の一部に基づいています。本研究の遂行にあたり、指導教員であった前田啓一氏をはじめ、長尾崇史氏、Giorgos Leloudas 氏ならびに共同研究者の皆様深く感謝いたします。さらに、せいめい望遠鏡での観測を支援してくださった京都大学岡山天文台の川端美穂氏、田口健太氏、すばる望遠鏡での観測を支援してくださった青木賢太郎氏をはじめとする国立天文台ハワイ観測所の皆様に感謝いたします。また、本記事に対して貴重なコメントをくださった仲里佑利奈氏に感謝いたします。最後に、執筆の機会を与えてくださった編集委員の谷川衝様、校閲・校正を担当してくださった鈴木大介様、越田三緒様をはじめとした天文月報編集委員の皆様心より感謝いたします。なお、本研究は日本学術振興会特別研究員制度の支援を受けて実施されました。

## 参 考 文 献

[1] LSST Science Collaboration, et al., 2009, arXiv e-prints, arXiv:0912.0201  
 [2] 川室太希, 2018, 天文月報, 111, 856  
 [3] Rees, M. J., 1988, Nature, 333, 523  
 [4] Miller, M. C., 2015, ApJ, 805, 83  
 [5] Strubbe, L. E., & Quataert, E., 2009, MNRAS, 400, 2070  
 [6] Metzger, B. D., & Stone, N. C., 2016, MNRAS, 461, 948

[7] Piran, T., et al., 2015, ApJ, 806, 164  
 [8] Lu, W., & Bonnerot, C., 2020, MNRAS, 492, 686  
 [9] Arcavi, I., et al., 2014, ApJ, 793, 38  
 [10] Taguchi, K., et al., 2023, Transient Name Server Classification Report, 2023-438, 1  
 [11] Zhu, J., et al., 2023, ApJ, 952, L35  
 [12] Charalampopoulos, P., et al., 2024, A&A, 689, A350  
 [13] Hoogendam, W. B., et al., 2024, MNRAS, 530, 4501  
 [14] Leloudas, G., et al., 2022, Nat. Astron., 6, 1193  
 [15] Patat, F., 2017, in Alsabti, A. W., & Murdin, P. eds. Handbook of Supernovae (Springer International Publishing), 1017  
 [16] Hoflich, P., 1991, A&A, 246, 481  
 [17] Liodakis, I., et al., 2023, Science, 380, 656  
 [18] Fabj, G., et al., 2020, MNRAS, 499, 2608  
 [19] Wang, Y., et al., 2024, ApJ, 962, L7  
 [20] Graham, M. J., et al., 2017, MNRAS, 470, 4112  
 [21] Graham, M. J., et al., 2020, MNRAS, 491, 4925  
 [22] Hinkle, J. T., et al., 2022, ApJ, 930, 12  
 [23] Hinkle, J. T., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2210.15681  
 [24] Uno, K., et al., 2025, ApJ, 986, L23

## Bridging Nuclear Transients-Insights from The Case of AT2023clx

Kohki Uno

Columbia Astrophysics Laboratory, 538 West 120th Street, New York, NY 10027, USA

Abstract: Supermassive black holes in galaxy cores trigger dynamical outbursts called nuclear transients. The number of such transients has been increasing, leading to discoveries of serendipitous phenomena renewing our understanding. We present spectropolarimetric observations of AT2023clx, among the most nearby nuclear transients classified as a tidal disruption event (TDE). We detected two polarization components; one originated from an aspherical outflow associated with the transient, while the other from a persisting dust torus in an active galactic nucleus (AGN) via light echoes. We found that the outflow was aligned perpendicular to the torus plane. This implies that the pre-existing AGN disk influenced the orbit of the disrupted star, or even AT2023clx might have been triggered by a sudden AGN accretion event rather than a TDE. Irrespective of whether AT2023clx was a TDE or AGN activity, we conclude that pre-existing AGNs play a crucial role in producing some transients with TDE-like features.

# 銀河形状の大規模整列： 銀河の形は初期宇宙を覚えているか？



栗田 智 貴

〈Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Str. 1, 85748 Garching, Germany〉  
e-mail: ktosh@mpa-garching.mpg.de

銀河の形状が、宇宙論界隈で注目を集めている。これまで、宇宙論研究者は「銀河を点として扱う」とよく言われてきた。しかし最近の研究により、銀河の形状は従来捉えられなかった物理現象に敏感であることがわかってきた。本稿では、Intrinsic Alignment (IA) と呼ばれる、銀河の固有形状が宇宙論的スケールで「そろそろ」現象に注目し、銀河形状という向きをもつ観測量が、クラスターリングだけでは捉えにくい初期宇宙の非等方性やパリティ破れの痕跡に感度を持ち得ることを紹介する。IA を用いた新しい初期宇宙探査の可能性と今後の展望を概観する。

## 1. はじめに

銀河は、渦巻銀河や楕円銀河に代表されるように、多彩な形状を示す。ところが宇宙論では、銀河を「青い銀河」「赤い銀河」といった大まかな集団として扱うことはあっても、その形状そのものに着目した研究は長らく限られていた。そのため、宇宙論と銀河形成の研究者が集まる場では、「宇宙論研究者は銀河を点として扱う」という鉄板ジョークがよく聞かれる。

しかし、重力レンズ効果による銀河の形状のゆがみが宇宙論研究に用いられるようになってからは、すばらの主焦点撮像カメラ「Suprime-Cam」や「Hyper Suprime-Cam」のような高性能カメラによって銀河の撮像データの質が大幅に向上し、銀河形状が持つ豊富な情報が注目を集めるようになった。宇宙論研究者が扱う空間分解能が向上し、銀河を「点」ではなく、空間的な広がりと向きを持つ天体として本格的に扱える段階に到達したのである [1-6]。

銀河形状は、弱重力レンズ効果の主要な観測量

として重要であるだけではない。近年では、レンズ効果とは独立に、銀河が形成・進化する過程や、大規模構造中の潮汐場の影響を通じて決まる固有形状そのものが、宇宙論的な情報を担う可能性が注目されている。もしこの固有形状を新たな宇宙論的シグナルとして適切に活用できれば、宇宙論パラメータ推定の精度向上につながるだけでなく、初期宇宙の物理を探る新しい探針にもなり得る [7]。

では、銀河の形状は、どのようにして初期宇宙の情報を今に伝えるのだろうか？この問いを考えるうえで鍵となるのが、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) や宇宙の大規模構造 (Large-Scale Structure; LSS) の起源と考えられている、初期宇宙で生成された微小な確率的ゆらぎ場、すなわち原始曲率ゆらぎ (以下、原始ゆらぎ) である。

これまでのCMBおよびLSSの観測から、原始ゆらぎの統計分布は、観測誤差の範囲でガウス分布と整合的であることが示されている [8-10]。しかし、ガウス性だけからは、たとえばインフ

レーションを担った自由度や相互作用の詳細といった、ゆらぎの生成機構を一意に決定することはできない。そこで重要になるのが、ガウス性からのわずかなずれである原始非ガウス性 (Primordial Non-Gaussianity; PNG) である [11].

ガウス場であれば、その統計情報は2点相関、すなわちフーリエ空間でのパワースペクトルによって尽くされる。一方、原始非ガウス性が存在すれば、3点相関 (バイスペクトル) や4点相関 (トリスペクトル) といった高次相関に、初期宇宙の力学や相互作用の痕跡が刻まれる。パワースペクトルが主に「ゆらぎの大きさの分布」を記述するのに対し、原始非ガウス性は「異なるゆらぎ同士がどのように結びついているか」を捉えるため、類似した予言を与える多くの初期宇宙モデルを識別する強力な手段となる。実際、原始非ガウス性はこれまで主にCMBの高次スペクトル解析によって検証され、波数依存性や形状依存性に対して強い制限が得られてきた。

さらに近年では、銀河の3次元分布を用いた銀河クラスター解析においても、バイスペクトルの測定や、超大スケールに現れる特徴的なシグナルであるスケール依存バイアスを用いて、原始非ガウス性を制限する研究が進展している (詳細は第3章)。Sloan Digital Sky Survey III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) や Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) などの大規模分光サーベイの進展により、その精度は着実に向上している [12].

銀河クラスターが本質的に銀河を「点」とみなし、その空間分布の統計性に着目する観測量であるのに対し、撮像サーベイでは位置情報に加えて、個々の銀河が持つ形状や向きという、局所的により豊かな情報を利用できる。ここに、銀河形状を用いる意義がある。銀河形状は、銀河クラスターリングだけでは捉えにくい初期宇宙の情報に感度を持つ可能性があり、原始非ガウス性の新しい検証手段として期待されている。

本稿では、銀河形状を積極的に宇宙論的シグナルとして捉える筆者らの研究を紹介する。特に、以下の二つの問い

- なぜ、第一原理から予言しにくい複雑な物理過程の産物である銀河が、初期宇宙の原始ゆらぎへの探針となり得るのか?
- なぜ銀河の「形状」に着目するのか? 銀河クラスターリングだけでは捉えにくいどの情報を、形状は新たに与えるのか?

を軸に、銀河形状が初期宇宙物理の検証に果たし得る役割と、筆者らの最近の成果を概観する。

## 2. 宇宙の大規模構造と銀河形状

### 2.1 Intrinsic Alignment (IA)

標準的な宇宙論モデル ( $\Lambda$ CDM モデル) において、構造形成の種となる初期の物質密度ゆらぎはインフレーションによって生成された原始ゆらぎを起源とする。これらのゆらぎは重力不安定性を通じて成長し、小さな構造が合体を繰り返してより大きな構造へと発達するボトムアップ型の階層成長を示す。こうした過程によって形成された高密度領域 (ダークマターハロー、以下ハロー) の中で、星や銀河、銀河団などが形成され、それらが連なることで宇宙の大規模構造が構築される。

個々のハローや銀河は、周囲の重力場 (すなわち周囲の構造、物質分布) の影響を受けながら形成される。例として、大きなフィラメント構造の中で形成されるハローや銀河を考えよう。形成過程における物質の降着は、フィラメントが伸びている方向から起こりやすいため、ハローや銀河形状の主軸の向きは統計的にフィラメントの方向と相関することが期待される。このように、ハローや銀河の形状が、周囲の大規模構造と相関して統計的に「そろろ」現象は、Intrinsic Alignment (以下IA) と呼ばれる [13]. とくに楕円銀河では、銀河本体の形状が周囲の潮汐場を比較的直接反映するため、IAの主要な研究対象となってい

る\*1. 次節では、IAによる相関シグナルを定量的に記述するための理論モデルを紹介する。

### 2.2 IAの物理的描像と線形理論

天体（ハローや銀河）の形状は、適当なスカラー関数（例えば質量や光度分布） $\rho$ の二次モーメントテンソル

$$I_{ij} = \frac{1}{N} \int d^3r \rho(\mathbf{r}) w(r) r_i r_j, \quad (1)$$

を用いてしばしば定義される。ここで $\mathbf{r}$ は天体の中心からの距離、 $w$ は任意の重み関数、 $N$ は適当な規格化定数である。これは、対象天体の形状を三軸不等楕円体として近似することに対応する。シミュレーションや観測から得られた多数の天体に対して $I_{ij}$ を測定し、それらを各天体の位置 $\mathbf{x}$ に対応づけて配置することで、形状の空間分布（以下、形状場） $I_{ij}(\mathbf{x})$ を構築できる。これは、空間の各点に対して $3 \times 3$ の対称行列が対応する場合、すなわち2階の対称テンソル場である。その6つ自由度は、天体のサイズを表すトレース成分1つと、形状を特徴づけるトレースレス成分5つ（歪みの大きさ2つと主軸の向き3つ）に対応する。

統計的一様等方性の仮定より、形状の統計平均（背景量）は球、すなわち $\langle I_{ij} \rangle = \langle \text{Tr}I \rangle \delta_{ij}/3$ であるから、形状場のゆらぎ $S_{ij}$ を

$$\delta_{ij} + S_{ij}(\mathbf{x}) \equiv \frac{I_{ij}(\mathbf{x})}{\langle \text{Tr}I \rangle / 3}, \quad (2)$$

のように定義すれば、 $\langle S_{ij} \rangle = 0$ を満たし、左辺の形から、 $S_{ij}$ は天体形状の単位球からの歪みを表すテンソル型のゆらぎ場となる。

$S_{ij}$ に対する物理モデルを考えよう。場 $S_{ij}(\mathbf{x})$ は多数のフーリエモード $S_{ij}(\mathbf{k})$ の重ね合わせとして表されるが、ここでは波長 $\lambda \gtrsim 100 h^{-1} \text{Mpc}$

（空間周波数 $k = 2\pi/\lambda \lesssim 0.1 h \text{Mpc}^{-1}$ ）の宇宙論的スケールからの寄与に注目する。言い換えると、以後はローパスフィルタを施して粗視化された形状場を仮定する。

このような、銀河やハロー形成のスケールよりはるかに長波長のモードを天体物理過程で生成することは難しいため、その起源はインフレーションで生成された原始ゆらぎであると考えられる。さらにガウス性初期条件の下では、例えば原始重力ポテンシャル $\Phi$ のような単一のスカラー場に比例する。また、天体形成の領域はこのモードに対して十分局所的とみなせるため、等価原理の下では、最低次の重力効果は天体の時空上の軌道に沿ったポテンシャルの二階微分（潮汐力場）である。以上より、宇宙論的スケールのモードからの天体形状への寄与は

$$S_{ij}(\mathbf{x}) \propto \nabla_i \nabla_j \Phi(\mathbf{x}) \propto \nabla^{-2} \nabla_i \nabla_j \delta_m(\mathbf{x}), \quad (3)$$

の形で与えられる。ここで $\delta_m$ は物質密度場であり、最後の関係式にはポアソン方程式を用いた。これはIAの線形理論モデル（Linear Alignment Model）と呼ばれ、宇宙論的スケールにおける天体の形状場と背後のポテンシャル場や物質密度場をつなぐ最も基本的なモデルである [15]。図1に、この線形理論モデルの物理的描像を示す。天体は複雑な天体物理過程を経て形成されるため、個々の形状を見るとバラついているが、多数の天体の形状を平均化してみると背後の潮汐力場（物質分布）と相関する。比例係数は相関の強さを表し、天体サンプルの性質（質量、光度、色など）や形状の測定方法及び精度などに依存する。

ここで、後期宇宙の代表的な観測量である銀河クラスタリングの線形理論を思い出そう。観測された銀河の数密度のゆらぎ場 $\delta_g$ はスカラー型のト

\*1 本稿で扱う銀河は、特に断りのない限り楕円銀河（星形成がほぼ停止した赤い銀河集団）とする。楕円銀河では銀河本体の形状がIAの主な指標となる一方で、渦巻銀河では形状よりもスピン（角運動量）方向との相関が議論されることが多い [14]。



図1 IAの線形理論によって予言される、銀河やハローの形状の空間分布パターン。黒の実線は、宇宙論的スケールの物質密度ゆらぎ(図では水平方向のモード)の振幅を示す。灰色の矢印は、このモードが作る潮汐力場の伸縮方向に対応する。個々の形状(青色の楕円体)が周囲の潮汐力場と相関することで、それらの空間的なパターンが背後の宇宙論的スケールの物質密度分布をトレースする。

レーザーであり、宇宙論的線形スケールにおいて

$$\delta_g(\mathbf{x}) \propto \nabla^2 \Phi(\mathbf{x}) \propto \delta_m(\mathbf{x}), \quad (4)$$

と関係づく<sup>\*2</sup>。したがって、式(3)は式(4)のテンソル版への自然な拡張であり、銀河の形状場は後期宇宙のテンソル型のトレーサーであると理解できる。このようなIAの宇宙論的シグナルとしての有用性は近年注目され始め、理論及び観測の両面で研究が進められている。

### 2.3 IAの統計量と実データからの測定

では、実際の観測データからIAのモデルをどのように検証し、そこから宇宙論的情報を引き出せるのだろうか? ここまでは天体を3次元的な形状(楕円体)として扱ってきたが、実際に観測できる量は、天球面に射影された2次元的な形状(楕円)のみである。射影とは、もともとの3次元的な形状から視線方向に垂直な面の成分を取り出す操作であり、形状の自由度は5自由度から2自由度へと減少する。これらは実空間では2つの楕円率に対応し、一方フーリエ空間ではEモード場とBモード場に対応する。このような形状場から、例えば2点相関関数や、そのフーリエ変換であるパワースペクトルなどの統計量を定義できる。筆者は形状場のパワースペクトルに着目し、

その測定および解析を進めてきた。以下では、その研究の一部を紹介する。

図2は、BOSSで取得された銀河の位置および形状データ(左図)と、それらから構築した密度場と形状場の相互パワースペクトル(右図)を示す[16]。相互パワースペクトルの振幅は、銀河数密度の空間変動と銀河形状(歪みと向き)の空間パターンの整列の度合いに対応する(図1参照)。

前節で述べた標準宇宙論モデル( $\Lambda$ CDM+ガウス性初期条件)におけるIAの線形理論では、式(3)のように形状場は単一のスカラー場由来し、このとき生成されるのは厳密にEモードのみである。したがって、密度場とEモードの相関(濃青の丸点)は非ゼロである一方、Bモードとの相関(淡青の×印)は誤差内でゼロが期待される。Bモード相関は観測、測定や解析の不完全さによる見かけの相関の指標でもあり、これが期待通りゼロと整合していることは、Eモードの測定点が宇宙論由来のシグナルであることを裏づけている。また、黒実線はIAの線形理論の最良フィットモデルであり、スケール依存性はデータとよく一致している。

パワースペクトルの形状は、標準宇宙論モデルにおいて、バリオン音響振動や構造形成の成長率など、豊富な宇宙論的情報を含む。このため、銀河クラスタリングの統計量(銀河密度パワースペクトルなど)と組み合わせ、宇宙論パラメータの制限の改善を目指す研究も行われている[17]。次章では、一方で、ガウス性初期条件の仮定を緩め、形状場のパワースペクトルに刻まれる原始ゆらぎの非ガウス性の寄与を議論し、IAが初期宇宙の物理への探針となる具体例を紹介する。

## 3. 初期宇宙の探針としての銀河形状

### 3.1 原始非ガウス性

標準的な宇宙論モデルでは、宇宙の大規模構造形成の種となった原始ゆらぎはガウス確率場であ

<sup>\*2</sup> 式(3)と(4)の表式では、小スケールからくる確率的な寄与(Stochasticity)は無視している。

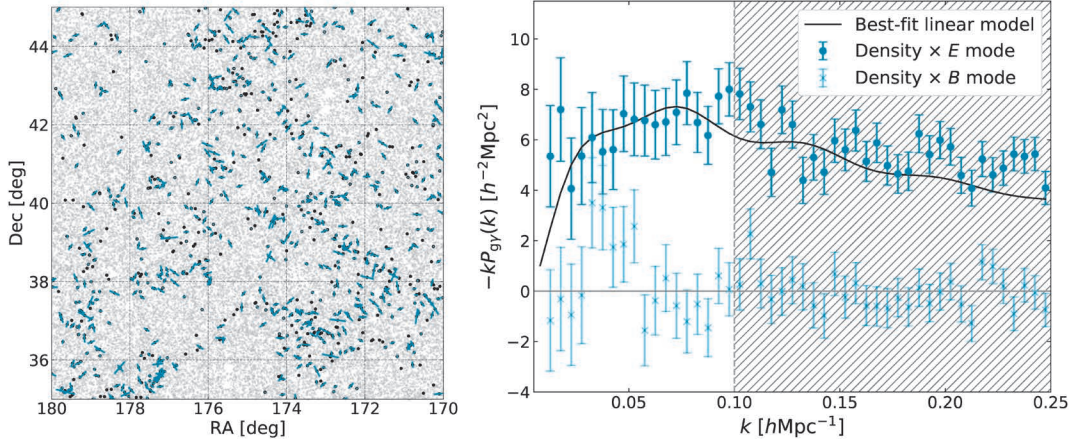


図2 【左図】 BOSSの銀河位置と形状データの一部。黒点は、分光観測によりスペクトルが取得された銀河の天球面上の位置（赤方偏移は $0.47 < z < 0.5$ の薄いスライス）を示す。これらのうち、画像データから楕円率が高精度に測定された銀河については、青色の棒の向きと長さでその形状を表す。背景の灰色点は、サーベイ由来の非物理的なゆらぎを補正するためのランダム粒子である。この領域は、銀河サンプル全体の有効体積のおよそ1/14600に相当する。【右図】 BOSSのNorth Galactic Cap (NGC) 領域における、赤方偏移 $0.2 < z < 0.5$ の銀河サンプルから測定した、銀河数密度場と銀河形状場の相互パワースペクトル。濃青の丸点（淡青の×印）は、それぞれEモード（Bモード）形状場との相互相関を示す。横軸は、空間周波数（ $k \approx 2\pi \times$ 空間スケールの逆数）を表し、表示範囲は宇宙論的スケール（物質密度ゆらぎの線形～準非線形スケール）に対応する。黒実線は標準宇宙論モデル（ $\Lambda$ CDM+ガウス性初期条件）の線形理論による最良フィットモデルを示す。灰色斜線部は線形理論の適用外として、フィットには含めていない。

ると仮定される。ガウス性が成り立つ場合、ゆらぎの統計的性質は2点相関関数（パワースペクトル）で尽き、線形領域では異なるフーリエモード同士は独立である。原始非ガウス性（Primordial Non-Gaussianity; PNG）はこの完全なガウス性からのずれとして定義される。ガウス場では高次の連結相関関数が消えるのに対し、原始非ガウス性があれば最低次から3点相関（バイスペクトル）や4点相関（トリスペクトル）が非ゼロとなる。これは複数モードの結びつき（モードカップリング）の存在を意味する（図3）。

最も標準的な単一場・スローロールインフレーションでは、このずれは一般に非常に小さいと期待され、これまでのCMBや銀河クラスターリングの観測制限とも整合的である。しかし原始非ガウス性は、パワースペクトルだけでは区別しにくい初期宇宙モデルの差異を反映し得るため、その探索は初期宇宙物理の検証において重要である。実

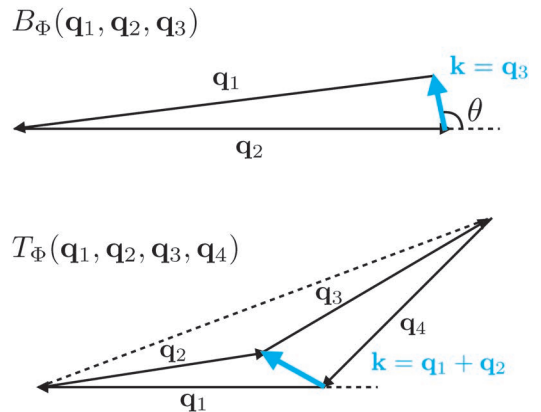


図3 フーリエ空間における原始3点相関（バイスペクトル,  $B_\Phi$ ）と原始4点相関（トリスペクトル,  $T_\Phi$ ）を特徴づける波数ベクトル配置の模式図。  $B_\Phi$  ( $T_\Phi$ ) はそれぞれ、3つ（4つ）の波数ベクトルの成す三角形（四面体）の大きさや形状の関数となる。実際に測定する銀河密度や銀河形状のパワースペクトルへの影響は、一辺（青色）がその他の辺（黒色）に比べて非常に小さく潰れた図形からの寄与が特に支配的となる（詳細は本文）。

際、原始非ガウス性の大きさや形状依存性は、単一場 (single field) か複数場 (multi field) か、あるいは相互作用の形 (音速の小ささ等) を区別する手がかりとなり得る [18]. 特定の形状・極限で現れる非ガウス性の特徴は、インフレーション期に存在した追加粒子の寄与を反映するため、その質量やスピンに関する手がかりを与える [19]. このように原始非ガウス性は、初期宇宙モデルに強い制約を与える有力な観測的指標である。

### 3.2 原始3点相関：非等方局所型

観測と理論の両面で最も標準的に扱われる原始非ガウス性として、局所型 (local type) と呼ばれるものがある [20]. 局所型では、原始重力ポテンシャル $\Phi$ はガウス場 $\phi$ の実空間での局所的な非線形変換として

$$\Phi(\mathbf{x}) = \phi(\mathbf{x}) + f_{\text{NL}}(\phi^2(\mathbf{x}) - \langle \phi^2 \rangle), \quad (5)$$

と表される. このときパイスペクトル $B_\phi$ は図3で示すような一辺が潰れた三角形 (squeezed configuration) で増幅され、その極限 ( $k = q_3 \ll q \simeq q_1 \simeq q_2$ ) では

$$B_\phi(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3) \rightarrow 4f_{\text{NL}}P_\phi(k)P_\phi(q), \quad (6)$$

となる. ここで $P_\phi$ は原始パワースペクトル、 $f_{\text{NL}}$ は局所型非ガウス性の大きさを特徴づけるパラメータである. 標準的な単一場・スローロールインフレーションでは局所型 $f_{\text{NL}}$ は一般に非常に小さいと期待されるため、もし有意に大きな局所型 $f_{\text{NL}}$ が検出されれば、標準単一場モデルを超える物理 (複数場の影響など) を示唆する.

局所型非ガウス性は大規模構造にも特徴的な影響を与えることが知られている [21]. 上述したように、一辺が潰れた三角形のモードカップリングは、長波長モード ( $\mathbf{k}$ ) が短波長モード ( $\mathbf{q}$ ) の局所的な「ゆらぎの強さ」を空間的に変調する. ハロー形成は小スケールゆらぎの強さに敏感であるため、この変調はハロー及び銀河の数密度ゆらぎ $\delta_g$ に長波長ポテンシャル $\Phi$ に比例する寄与を加える. その結果、式 (4) で示した、ガウス初期条件で成り立つ銀河密度 $\delta_g$ と物質密度 $\delta_m$ の単純な比例関係 (線形バイアス) は破れ、 $k^{-2}$ で増大するスケール依存性を持つ追加項が生じる (図4の左

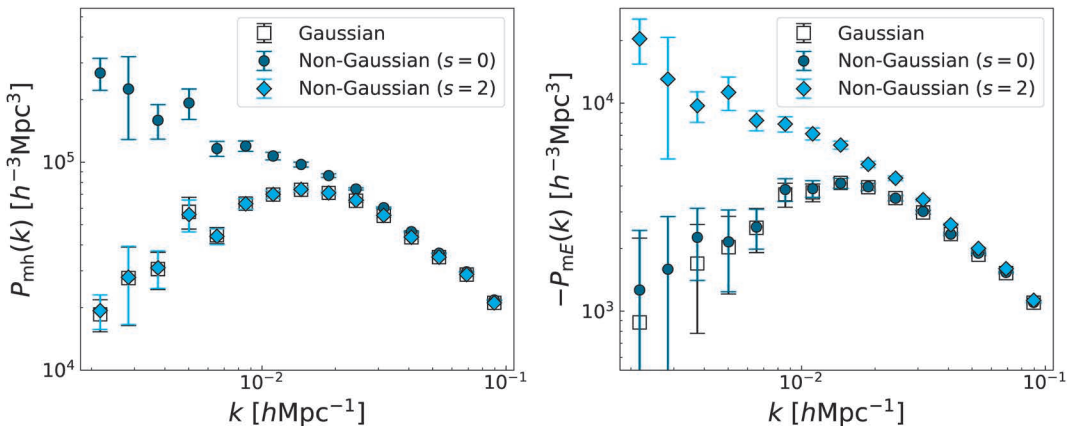


図4 宇宙論的 $N$ 体シミュレーションから測定した、物質密度場とハロー数密度場の相互パワースペクトル (左図) および、物質密度場とハロー形状の $E$ モード場の相互パワースペクトル (右図). 色と記号の種類は、シミュレーションの初期条件の違いを示し、それぞれガウス性初期条件 (Gaussian, 白抜き四角), 局所型原始非ガウス性初期条件 (Non-Gaussian ( $s=0$ ), 暗青の丸), 「非等方的な」局所型原始非ガウス性初期条件 (Non-Gaussian ( $s=2$ ), 明青の菱形) に対応する. ハロー数密度とハロー形状場は、それぞれ異なる原始非ガウス性に応答して、大スケールで増幅することがわかる.

図参照). このことを用いて, 測定された銀河 (ハロー) 密度パワースペクトルの宇宙論的大スケールでの振る舞いから, 局所型  $f_{NL}$  に強い制限をつけることができる [10].

式 (6) で与えた局所型バイスペクトルは角度依存性を持たず, 等方的な非ガウス性に対応する. 一方で, 局所型の一般化として角度依存性を持つ「非等方的な」局所型非ガウス性も考えられる. 例えば, 2次のルジャンドル多項式  $L_2$  を用いると

$$B_\phi(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3) \rightarrow 4f_{NL}^2 L_2(\mu) P_\phi(k) P_\phi(q), \quad (7)$$

と表され, これは四重極依存性を持つ. ここで  $\mu = \cos \theta = \hat{\mathbf{k}} \cdot \hat{\mathbf{q}}$  は長波長モードと短波長モードのなす角の余弦 (図3の上図参照) であり,  $f_{NL}^2$  は非等方的局所型非ガウス性を特徴づけるパラメータである. この種の角度依存バイスペクトルは, 例えばベクトル場の寄与 [22, 23] や高次スピン場の寄与 [19] を含むいくつかのインフレーションシナリオで予言される.

この場合, 長波長モードは短波長ゆらぎの等方的な振幅ではなく, その「四重極的な異方性」の強さを空間的に変調する. その結果, 局所的な天体の形状が長波長モードに応答し, 前述と同様の議論により, 式 (3) で示したガウス初期条件における銀河形状と物質密度の比例関係に対しても, 大スケールで  $k^{-2}$  で増大する効果が追加される [24]. 図4の右図は, 初期条件に非等方的局所型非ガウス性を導入した場合に, 実際にシミュレーションで測定したハロー形状場のパワースペクトルが増幅されることを示す [25].

以上より, 密度場は主として等方的な局所型非ガウス性に, 形状場は非等方的成分に感度を持つため, それぞれ異なる成分に独立に制限を与えられる. 実際に筆者らは, BOSSの銀河サンプルから測定した密度場と形状場の相互パワースペクトル (図2右) を用いて非等方的局所型非ガウス性を後期宇宙の観測量から初めて制限し,  $f_{NL}^2 = -71^{+272}$  を得た [16]. この制限は, 現在の Planck による制限  $\sigma(f_{NL}^2) \simeq$

20 [8] より約一桁弱い, 将来の大規模銀河サーベイで得られるより大きなサンプルにより, 同程度, あるいはそれ以上の制限が期待されている [25].

### 3.3 原始4点相関: パリティ非保存崩壊型

原始ゆらぎの4点相関 (トライスペクトル) は, 3点相関だけでは見えにくい相互作用や, 追加の場が媒介する効果を抽出できる. 特に近年は, 初期宇宙におけるパリティ対称性の破れを検証する統計量として注目されている [26]. スカラー場のゆらぎ (原始ゆらぎや銀河密度ゆらぎ) について, 2点を作る直線や3点を作る三角形は, 鏡に映した配置も回転によって元の配置と重ね合わせられる. 統計的一様等方性を仮定するとそれらは同一視されるため, 2点・3点統計量だけではパリティ奇成分をパリティ偶成分から区別できない. 一方, 4点を作る四面体は一般に鏡像が回転では一致しないため, 4点相関ではパリティ奇成分を分離して解析できる (図5上段参照).

実際, BOSSやDESIの銀河クラスタリングの4点相関関数のパリティ奇成分の解析から, パリティ対称性の破れを示唆する兆候が報告されている [27-29]. しかし, これらの結果は解析の際にどのように銀河を選択するかに敏感であり, 系統誤差や共分散推定の不確かさによる見かけのシグナルである可能性も残る [30] ため, 現時点では結論は定まっておらず, 本テーマは今なお重要な検証課題として位置づけられている.

一方で, 銀河の位置 (スカラー量) だけに限らず形状 (テンソル量, スピン2量) を観測量として組み込むと, より低次の統計でもパリティの破れの検証が可能になる (図5下段参照). 筆者らはこの動機のもと, 銀河形状の2点統計であるパワースペクトルのうち, パリティ奇成分である  $EB$  パワースペクトル着目して, パリティ奇の原始トライスペクトルを探索できる可能性を調べた [31].

この研究では大規模構造の有効場の理論 (Effective Field Theory; EFT) の枠組みを用いて, IAの  $EB$  パワースペクトルが, パリティ奇の原始

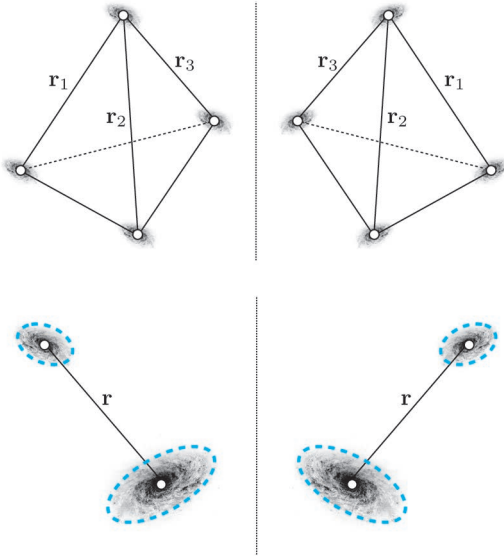


図5 銀河の3次元配置とその鏡像（パリティ変換）の模式図。中央の点線は鏡面を表す。【上段】銀河を点（位置情報のみ）として扱う場合、鏡像と区別するには少なくとも4点からなる同一平面上にない配置（四面体）が必要となる。【下段】各銀河に形状（楕円率，すなわちテンソル情報）を付与すると，2点の位置と形状の情報で鏡像との区別が可能になる。

トリスpekトルの崩壊極限（collapsed limit）と呼ばれる，四面体の対角線の一つが潰れた図形（図3下段参照），に鋭い感度を持つことを示した。とくに  $U(1)$  ゲージ場を含むインフレーションモデル [26] を例に，大スケールで  $P_\phi(k) \sim k^{-3}$  の増幅が現れることを示し，実際に宇宙論的  $N$  体シミュレーションを用いてこの予言を検証した（図6参照）。さらに，DESIおよびVera C. Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time（以下LSST）で得られる将来データを想定した予測から，IAのEBパワースpekトルが，銀河の4点相関やCMBトリスpekトル解析から得られているパリティ対称性を破る原始非ガウス性に関するいくつかの既存制限を改善し得ることを示した。

#### 4. まとめと展望

本稿では，銀河の固有形状が示す宇宙論的ス

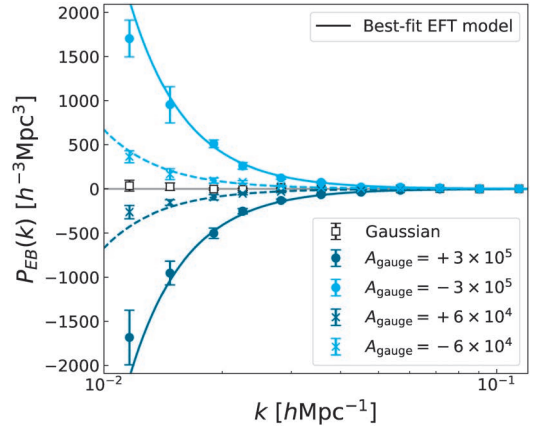


図6 宇宙論的  $N$  体シミュレーションから測定した，ハロー形状場のEBパワースpekトル（パリティ奇パワースpekトル）と，対応するEFT最良フィットモデル（実線）との比較。色と記号の種類は，シミュレーションの初期条件の違いとパリティ奇の原始非ガウス性の振幅（ $A_{\text{gauge}}$ ）の大きさの違いに対応する。ガウス性初期条件は白抜き四角，パリティ奇初期条件については，正（負）の符号が暗青（明青）に対応し，丸点（×印）が振幅の大きさに対応する。

ケールの相関である Intrinsic Alignment (IA) を概観し，IAを初期宇宙物理の探針として用いる可能性に関する筆者らの研究を紹介した。銀河形状は，局所的な歪みの大きさと向きを含む量であり，後期宇宙の観測から構成できるテンソル場として捉えられる。このため，初期宇宙の非等方性に関わる痕跡，例えば非等方非ガウス性やパリティ非保存非ガウス性に対して高い感度を持ち，銀河クラスタリングだけでは調べにくい初期宇宙モデルを検証する有力な手段となり得る。

また，本稿では触れなかったIAの宇宙論的な応用例として，原始重力波（Primordial Gravitational Waves）の痕跡を銀河形状から探索する研究も進められている [32–35]。さらにIAは，初期宇宙物理への探針としてだけでなく，銀河クラスタリングと組み合わせることで，標準宇宙論の宇宙論パラメータ（物質密度  $\Omega_m$  や密度ゆらぎの振幅  $\sigma_8$  など）に対する制限を改善することも示されている [17]。

このようにIAは、後期宇宙における新しい観測量として、今後いっそう重要性を増していく分野である。実際、DESI, Euclid, Subaru HSC/PFS, LSST, 4MOST survey, およびRoman Space Telescopeといった現在進行中・将来の銀河サーベイは、IAの測定を大きく改善し得る高品質なデータを提供する見込みである。これらは利用可能な銀河サンプルの幅を広げ、銀河形状を用いた宇宙論モデルのより高精度な検証を可能にすると期待する。

## 謝辞

本稿の内容は、筆者の博士論文 [36]、マックス・プランク宇宙物理学研究所における筆者の集中講義資料 [37]、ならびに高田昌広氏との共同研究 [16] と Drew Jamieson 氏、小松英一郎氏、Fabian Schmidt 氏との共同研究 [31] に基づいたものです。特に、指導教員である高田昌広氏には修士課程から博士課程修了に至るまで長期にわたりご指導いただき深く感謝いたします。また、本稿の草稿に対して有益なコメントをくださった小松英一郎氏に感謝申し上げます。最後に、本稿の執筆を助めてくださった奥村哲平氏に感謝するとともに、原稿提出が大幅に遅れたにもかかわらず辛抱強くご対応いただいた西澤淳前編集委員、宮武広直編集委員に深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] Miyazaki, S., et al., 2018, PASJ, 70, S1
- [2] 宮崎聡, 2019, 天文月報, 112, 80
- [3] 高田昌広, 2019, 天文月報, 112, 89
- [4] Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70, S4
- [5] 日影千秋, 2019, 天文月報, 112, 720
- [6] 杉山素直他, 2024, 天文月報, 117, 304
- [7] Chisari, N. E., 2025, A&A Rev., 33, 5
- [8] Planck Collaboration, 2020, A&A, 641, A9
- [9] Cabass, G., et al., 2022a, Phys. Rev. Lett., 129, 021301
- [10] Cabass, G., et al., 2022b, Phys. Rev. D, 106, 043506
- [11] Bartolo, N., et al., 2004, Phys. Rep., 402, 103
- [12] Chaussidon, E., et al., 2025, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2025, 029
- [13] Catelan, P., et al., 2001, MNRAS, 320, L7
- [14] Iye, M., et al., 2021, ApJ, 907, 123

- [15] Hirata, C. M., & Seljak, U., 2004, Phys. Rev. D, 70, 063526
- [16] Kurita, T., & Takada, M., 2023, Phys. Rev. D, 108, 083533
- [17] Taruya, A., & Okumura, T., 2020, APJ, 891, L42
- [18] Chen, X., 2010, Adv. Astron., 2010, 638979
- [19] Arkani-Hamed, N., & Maldacena, J., 2015, arXiv e-prints, arXiv:1503.08043
- [20] Komatsu, E., & Spergel, D. N., 2001, Phys. Rev. D, 63, 063002
- [21] Dalal, N., et al., 2008, Phys. Rev. D, 77, 123514
- [22] Bartolo, N., et al., 2013, Phys. Rev. D, 87, 023504
- [23] Shiraishi, M., et al., 2013, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2013, 002
- [24] Schmidt, F., et al., 2015, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2015, 032
- [25] Akitsu, K., et al., 2021, Phys. Rev. D, 103, 083508
- [26] Shiraishi, M., 2016, Phys. Rev. D, 94, 083503
- [27] Philcox, O. H. E., 2022, Phys. Rev. D, 106, 063501
- [28] Hou, J., et al., 2023, MNRAS, 522, 5701
- [29] Slepian, Z., et al., 2025, arXiv e-prints, arXiv:2508.09133
- [30] Krolewski, A., et al., 2024, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2024, 044
- [31] Kurita, T., et al., 2026, Phys. Rev. D, 113, 063557
- [32] Schmidt, F., & Jeong, D., 2012, Phys. Rev. D, 86, 083513
- [33] Schmidt, F., et al., 2014, Phys. Rev. D, 89, 083507
- [34] Akitsu, K., et al., 2023, Phys. Rev. D, 107, 063531
- [35] Okumura, T., & Sasaki, M., 2024, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2024, 060
- [36] 栗田智貴, 2023, 東京大学, 博士論文
- [37] Kurita, T., 2025, MPA Lecture Series

## Probing Early Universe Physics with Galaxy Intrinsic Alignment

Toshiki KURITA

*Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Str. 1, 85748 Garching, Germany*

Abstract: Primordial non-Gaussianity (PNG) of the curvature perturbation encodes key information about the underlying physics of the early Universe and has therefore been studied extensively using precision measurements of the cosmic microwave background and galaxy clustering. In this article, we focus on intrinsic alignment (IA), the phenomenon in which intrinsic galaxy shapes become coherently aligned on cosmological scales, and explain how IA statistics can be sensitive to signatures of anisotropic PNG and parity-violating PNG that are difficult to access with galaxy clustering alone. We conclude by outlining the prospects and outlook for probing early-Universe physics with IA.

# 講書始の儀

家 正 則

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: masanori.iye2@gmail.com

講書始の儀（こうしょはじめのぎ）は明治天皇が年初に漢書と和書についての講義を専門家から聴く儀式として1869年（明治2年）に始まったそうです。1953年（昭和28年）からご進講者は人文科学，社会科学，自然科学からそれぞれ1名という形になり，同年には萩原雄祐東京天文台長が「最近の宇宙進化説」をご進講になりました。辞表を胸に岡山188 cm望遠鏡の建設構想とその意義をお話しになったと聴いております。建設に複数年度を要する188 cm望遠鏡はそれまでの3年上限を更新した5年国庫債務負担行為の最初の適用例として1958年から建設されました。1980年代，90年代には自然科学が2件の年も多かったようですが，近年は元の構成に戻っています。その後，天文学界からは，林忠四郎「太陽系の起源」（1993年），小田稔「科学者に残された宇宙の謎と課題」（1998年），佐藤勝彦「宇宙はどのように始まったのか？—現代物理学が描く創世記—」（2016年）の先生がたがご進講されておられます。この度，令和8年1月9日の講書始の儀でご進講をさせて戴く望外の機会がありましたので，その一部始終をご報告させていただきます。

私の場合，この始まりは2年前のことでした。秋晴れのその日，私は「遅走性徘徊症候群」\*1を発症し，始発電車とバスを乗り継いで中禅寺湖に行き，竜頭の滝を出発点に中禅寺湖畔からいろは坂を駆け下るジョギングをしていました。14時過ぎに東武日光駅に着き，帰りの電車を待ってい

るときに携帯が鳴りました。文部科学省からで、2026年の講書始の儀の進講候補者として宮内庁に推薦したいというお話でした。私ごときにと大変驚きましたが，二度とない話なので謹んでお受けすることにしました。説明では，本番は再来年となるが来年の講書始の儀にも進講者控として参内せよとのこと。進講者が体調不良になった場合の交代要員という位置づけですが，行儀見習いの意味もあったのだと思います。ついては，ご進講内容の梗概案を至急起草するようにとのことでした。

公表までは内々にと釘を刺されたので，だれにも相談できませんでしたが，「観測天文学最前線と日本の活躍」と題して天文学界の様子をお伝えする内容での講話を起草することにしました。内容は，(1) ハッブルが人類の認識を銀河系の外まで広げ，宇宙膨張を発見してから約100年の間に発展した現代宇宙観を振り返り，(2) ハワイのすばる望遠鏡の建設を機に，銀河宇宙や系外惑星の観測的研究で日本が活躍していることをお話しし，(3) 次世代の大型望遠鏡では，生命存在の兆候を示す系外惑星の発見や宇宙の加速膨張の実証観測などが期待されていることを述べることにしました\*2。さらに，講話の最後には，(4) 天文学研究が人類の宇宙観・文明観に与える視点に触れたいと考え，138億年の宇宙史，46億年の地球史，1万年の人類文明史，そしてこの100年の人新世史を振り返り，戦争や環境破壊のリスクを

\*1 一部の高齢男性に散見される症状。雨天の日には発症しないことが知られているビョーキ

\*2 萩原先生と違って退職者なので，辞表の用意は考えませんでした。

乗り越え安定に持続できる成熟した文明を築くことを我々皆が心することが大切だとする認識を、僭越ながら述べることにしました\*3。

ご進講内容はこうして早めに固めました。実際の儀式の進行状況を知らなかったため、YouTubeで近年の実施例をみてみました。ここで驚いたのは、天皇皇后両陛下こそご進講梗概がお手元にあります。ほかの皇族方や陪聴者には配布資料は一切なく、厳かな雰囲気の中、ご進講をひたすら集中して聴くという講書始の儀の形式でした。ご進講後のその場での質疑はありません。また、宮内庁ホームページで近年の講書始の儀の梗概をいくつかよく読むと、どの進講も学ぶことの多い内容であることがわかりました。しかし、資料配布も映像もない状況で、専門用語も出てくるご進講内容を聴くだけでフォローするのは困難と

思える例もあると感じました\*4。

進講者控として陪席した昨年の講書始の儀で最も感銘したのは、天皇皇后両陛下始め皇族の方々がお居まいを直し、ご進講者をじっと見据えてご進講をお聴きになっている姿でした。国民の注目を集める儀式ですので、参加される皇族方にとって心理的なご負担も小さくないのではと拝察致しました。

さて1年経ち、当日は宮内庁官用車のセンチュリーが8時過ぎに拙宅に迎えに来て、モーニングを着用したまま皇居に向かいました。車は北側の乾門から入門し、宮殿南車寄で下車、回廊を歩いて千鳥の間にまずは案内されます。ここで宮内庁長官ほかの挨拶を受け、式部官から式次第の説明の後、会場となる正殿松の間まで移動して所作のリハーサルを行います。その後一旦千鳥の間に戻



写真1 講書始の儀でのご進講（宮内庁報道室提供）

\*3 昨今の戦争を主導する暴君の脅威を大変憂慮しますが、新春の寿ぎの場での述懐は控えることにしました。

\*4 過去には陪聴者がつい居眠りする映像がSNSで拡散したりして、ご進講内容をフォローすることの難しさを物語っています。



写真2 1971年岡山天体物理観測所ご視察の浩宮様。背後左から東京天文台の末元善三郎、石田五郎、1人おいて大沢清輝の各氏（岡山天体物理観測所40周年記念誌より）。

り、定刻になると陪聴者、進講者控、進講者の順で正殿松の間に入場着席して天皇皇后両陛下の入場を待ちます。やがて、北側の扉がノックされ両陛下に続き皇族方が入場され、講書始の儀が始ま

りました。皇居内の各広間には掛け時計など一つもありませんが、分単位でスケジュールされた儀式は段取り通りに進行しました。今年の進講者と題目は(1)佐々木正子嵯峨美術大学名誉教授「江戸時代の日本絵画」、(2)御厨貴東京大学名誉教授「オーラル・ヒストリーとは何か」、(3)私「観測天文学最前線と日本の活躍」でした。なるべく顔を上げてお話しするように心がけました。天皇皇后両陛下はじめ皇族の方々も、時々頷きながら聴いて下さっている様子がよくわかりました。不思議と緊張はありませんでした。ご進講梗概は宮内庁ホームページ (<https://www.kunaicho.go.jp/learn/culture/kosyo/kosho-r08.html>) に掲載され、また講書始の儀の様子はテレビ東京のYouTube (<https://www.youtube.com/watch?v=uRc7CF42PAs>)などで公開されたので、ご進講後、わかりやすく面白かったとの感想を数多く頂きました。

ご進講終了後、別の間で両陛下とお話する機会がありました。ここではご進講内容に関する質疑・会話に加えて、天皇陛下が岡山天体物理観測所をご視察された思い出やご自身の反射望遠鏡で天体撮影をされておられることもお話し戴き、天文談義でも会話が盛り上がりました。

今回のご進講が、天文学の意義と魅力を一般の方にも知って頂く契機となればと願っております。



# 天文学者が1を知ると、宇宙は10の謎を 投げかけてくる

研究者たちが見ている宇宙の最前線

田中雅臣・津村耕司 編，共著者9名

河出書房新社 四六判 260頁 本体1,980円+税

解説書  
お薦め度  
5  
☆☆☆☆☆

研究者であれば、少なからず「発見」の瞬間に立ち会った経験があるはずだ。理論でも観測でも、世界で自分しか知らない事実と直面し、興奮で眠れずあれこれと想像を巡らせ、シナリオを構築し検証していく。この「Eureka!」の瞬間を含むプロセスにこそ、研究の醍醐味がある。

「もし、そんな経験だけを集めた本があれば、最高にエキサイティングな知的探検記になるのではないか」

などと私がぼんやり考えていた折に出版されたのが、本書『天文学者が1を知ると、宇宙は10の謎を投げかけてくる』である。

本書では、現代天文学の中でも最もホットな9つの分野を取り上げ、日本を代表する若手研究者たちが、それぞれの専門領域を解説している。各章では分野の導入に続き、著者自身が「1を知った」瞬間の記憶が、熱く、あるいは淡々と、それぞれの個性を反映した文体で綴られている。9人いれば9通りのスタイルがある。そのバラエティ豊かな語り口の違いを楽しむのが、本書の醍醐味といえるだろう。

限られた紙面で最先端の研究をコンパクトにまとめるのは、至難の業だ。1冊の本を9分野で分け合う構成は、著者一人ひとりのページ数がとても少なくなることを意味する。執筆には相当な苦勞があったはずだ。一文一文の行間には、語りきれなかったドラマが詰まっている。もし難解に感じる部分があれば、ネットやAIを活用してそれを読み解いてみてほしい。少しの探究心を持って

向き合うことで、本書の面白さは何倍にも膨らむはずだ。

研究に終わりはない。1を知れば、その先には無限の広がりがある。将来展望として語られる各著者の見解は、非常に示唆に富んでいる。万物を包含する宇宙を相手にする天文学は、気が遠くなるほど広大だ。本書の多様性そのものが、現代天文学の広がり象徴している。私自身、高速電波バーストや超高エネルギーニュートリノについては、本書を通じて多くの学びを得た。

さて、冒頭に記した「Eureka!の瞬間を集める」という試みは成功しただろうか。

結論から言えば、現代天文学のエキサイトメントを存分に凝縮した、素晴らしい読み物に仕上がっている。ただし、内容は彩り豊かな「幕の内弁当」のように盛りだくさんだ。重厚なコース料理を期待する向きには、一章ずつのボリュームに「もっと読みたかった」というもどかしさを感じる部分があるかもしれない。

しかし、その「もっと先を知りたい」という渴望こそが、天文学者が次なる10の謎を追いかけ際の原動力そのものなのだ。あえて語り尽くさないことで生まれた余白が、読者をさらなる探求へと誘う。お二人の編著者の「はじめに」「おわりに」には、そんな読者の心への細やかな配慮も感じられる。

自信を持ってお勧めしたい一冊だ。

田中 壱 (国立天文台ハワイ観測所)

## 日本天文学会 2026年秋季年会のお知らせ

2026年秋季年会は、2026年9月8日(火) から9月10日(木) までの3日間、岡山理科大学岡山キャンパス（岡山県岡山市）にて開催を予定しております。参加方法の詳細については、tennetや年会ホームページで随時お知らせいたしますので、注視していただくようお願いいたします (<https://www.asj.or.jp/jp/activities/nenkai/>)。

### 開催にあたっての注意事項

- ・遠隔地から参加していただけるように、現地およびオンライン（ベストエフォート）のハイブリッド開催とする予定です。
- ・今回より、参加申込および予稿投稿には、新しい大会プラットフォーム（名称：らくらくカンファレンス）を導入いたします。
- ・現地での受付の際、新しい大会プラットフォームのマイページに表示されるQRコードの提示が必要となります。あらかじめ参加費のお支払いをお済ませください。

### (1) 年会参加費，講演登録費について

- ・料金表

項目	会 員	非会員	備考
参 加 費	正会員学生：2,000円（不課税） 正会員一般：5,000円（不課税） 準 会 員：5,000円（不課税）	5,000円（消費税込み）	参加申込が必要です
講演登録費	2,000円（不課税）	—	1講演につき、一緒に参加費の支払も必要です

大会プラットフォーム上で事前にご精算ください。お支払いいただいた費用は、原則として返金いたしかねます。

### ●領収書・参加証明書について

大会プラットフォームからダウンロードが可能です。会期終了後、1ヶ月以内にダウンロードをお願いします。

### ●講演予稿集について

紙版の発行は2026年春季年会をもって終了いたしました。年会ホームページでご覧ください。

- ・支払期間

### ●講演登録費：2026年5月28日(木) 正午～6月11日(木) 正午

講演者の方は、上記期間に大会プラットフォームから演題登録とお支払いが必要です。お支払いがない場合には取消になりますのでご注意ください。

●参加費：2026年8月3日(月) 正午～9月10日(木) 正午

会期中でもお申し込みは可能ですが、原則として会期前にお申し込みください。申込先URLは、後日年会ホームページでお知らせいたします。

・支払方法

●原則クレジットカード支払です。

※支払期間中に大会プラットフォーム上で必ず手続きを済ませてください。

※クレジットカード決済代行サービス (Stripe) を利用しております。

※取り扱いカードは、VISA, MasterCard, JCB, AMEX, DINERSの5種類です。

※クレジットカード支払が困難な場合は、支払期間内に銀行振込をご利用ください。振込先口座はシステムよりご案内いたします。なお、入金確認には時間を要する場合がございますので、余裕を持ってお申込みください。

(2) 受付期間

通常セッションにおける講演は会員（正会員・準会員）に限られております。非会員の方は、講演申込の前に学会への入会申請をする必要があります。詳しくは年会ホームページをご参照ください。

事 項	受付期間・期限（日本標準時）	関連項目
講演申込	2026年5月28日(木) 正午～2026年6月11日(木) 正午	(3), (4), (5)参照
講演登録費支払	2026年5月28日(木) 正午～2026年6月11日(木) 正午	(1) 参照
参加申込・支払	2026年8月3日(月) 正午～2026年9月10日(木) 正午	(1) 参照
複数講演の順序指定	2026年6月18日(木) 正午まで	(6) 参照
ポストデッドライン・ペーパー	2026年8月20日(木) 正午まで	(7) 参照
最新情報コーナー	2026年8月20日(木) 正午まで	(8) 参照
講演の変更など	わかった時点で直ちにご連絡ください	(9) 参照
特別セッションの企画 招待講演・特別講演の講演者推薦	今回は募集しません	(10) 参照
正会員用展示ブース	2026年6月11日(木) 正午まで	(11) 参照
旅費一部補助	2026年6月11日(木) まで	(12) 参照
各種の会合申込	2026年6月30日(火) 正午まで	(13) 参照
保育室の利用申込	2026年8月7日(金) 正午まで	(14) 参照
懇親会の申込	2026年8月10日(月) まで	(15) 参照

(3) 分野と「企画セッション」

・講演分野は次の16分野です。

M.太陽, N.恒星・恒星進化, P1.星・惑星形成(星形成), P2.星・惑星形成(原始惑星系円盤), P3.星・惑星形成(惑星系), Q.星間現象, R.銀河, S.活動銀河核, T.銀河団, U.宇宙論, V1.観測機器(電波),

V2.観測機器(光赤外・重力波・その他), V3.観測機器(X線・ $\gamma$ 線), W.コンパクト天体, X.銀河形成・進化, Y.天文教育・広報普及・その他

- ・「企画セッション」  
今回は開催しません。

#### (4) 講演の形式

- ・ a 口頭講演(9分間の口頭発表と3分間の質疑応答); b ポスター講演・口頭発表付き(ポスターと3分間の口頭発表); c ポスター講演・口頭発表なし(ポスターのみ) の3種類を予定しています。講演時間は、講演数によって変更することがあります。
- ・ 講演者1人あたり可能な講演数は最大3件です。また、a講演は1人1講演までで、3件目の講演はc講演(ポスターのみ)に限ります。
- ・ 講演は現地で行っていただくことを想定していますが、オンライン講演も受け付ける予定です(ベストエフォート)。開催地および運営の負担を減らすため、子育てや介護など特別の理由がある場合以外は、現地での講演をお願いいたします。
- ・ ポスターは現地会場での掲示に加え、Web上でも公開を予定しています。
- ・ 実施方法の詳細については年会ホームページに掲載いたします。

#### (5) 講演の申込方法(大会プラットフォーム)

- ・ 今回より新しいシステムにて受付を行います。詳細は年会ホームページに掲載いたしますので、ご確認のうえお申込みください。
  - ・ 年会直前に行われる記者会見の参加受付も同時に行います。詳細はtennetや年会ホームページにてご案内いたします。
- ※締め切りは2026年6月11日(木) 正午 を厳守してください。この締め切り日時を過ぎた申請は原則として一切受け付けません。また、締め切り当日のトラブルには対応できない場合もありますので、できるだけ締め切り前日の夕方までに投稿されることをお勧めします。
- ※講演は完成度の高いものに限ります。予稿集は広範な読者が読むことを想定し、(i) 十分な背景説明を行うこと、(ii) 研究内容や結果・考察について具体的記述を含めること、の2点を心がけてください。これらに留意すれば、大抵は400文字以上の予稿になるはずですが、以上のような配慮に欠ける極端に短い予稿など不適切な講演申込は、受理しない場合があります。
- ※提出された予稿は2026年8月下旬頃に公開する予定です。公開後は講演の内容がメディアによって紹介されることもありえます。出版前の論文、特許に関係した論文等の講演をする際などは、十分ご注意ください。
- ※講演者は必ずしも筆頭著者でなくても結構です。講演登録費はこの講演者が支払ってください。
- ※講演予稿の「キーワード」は、Y分野以外は、下記のPASJ Keyword listを使用いただきますようお願いいたします。

[https://academic.oup.com/pasj/pages/Pasj\\_Keywords](https://academic.oup.com/pasj/pages/Pasj_Keywords)

**(6) 複数講演の順序指定**

- ・グループ等で複数の講演を指定した順序で続けたい場合は、申込後、期限内に年会ホームページのWebフォームから申請してください。折り返し、確認メールをお送りいたします。
- ・講演日時に関する要望は一切受け付けられません。
- ・b講演は2時間のセッションの最後にスケジュールする予定です。順序指定にa講演とb講演が含まれる場合は、b講演を最後に並べてください。ご希望に添えない場合もありますのでご承知おきください。

**(7) ポストデッドライン・ペーパー (PDL)**

- ・PDLは、緊急性・トピックス性に富んだ内容について、通常の講演申込の〆切後にも講演を受け付ける制度です。約半年後の次の年会まで待つことができない明確な理由(個人・グループの事情は不可)が必要です。
- ・申請される場合は上記の理由を明記の上、年会実行委員会までお問い合わせください。申請いただいた内容は年会実行委員会では審査し、受理の可否を判断いたします。なお、通常の申込よりも受理の基準がかなり厳しくなります。
- ・PDLの講演形式は、原則、cポスター講演・口頭発表なし(ポスターのみ)になります。ただし、プログラムに余裕がある場合は、bポスター講演・口頭発表付き(ポスターと3分間の口頭発表)も可能です。希望する形式を記入してください。
- ・PDLの受付期間を過ぎた後の申請については、年会実行委員会にご相談ください。
- ・日本天文学会年会における発表は、PDLも含め天文学会員に限られているため、非会員の方は天文学会員になる必要があります。PDLの審査に加え、会員になる手続きにも時間を要しますので、PDL申請を考えている非会員の方は、まず年会実行委員会にお問い合わせください。

**(8) 最新情報コーナー**

- ・最新の情報を掲示するコーナーを設けます。通常の講演に相当する内容で、本年会で公表する緊急性のないものは最新情報として受け付けません。また、最新情報は年会での講演とはなりません。予稿集等にも掲載されません。発表の形式はポスターのみです。
- ・掲示を希望する場合は、掲示内容の概要と掲示者の情報を年会実行委員会に事前に申請してください。
- ・スペースが無くなれば受け付けを終了することがあります。

**(9) 講演のキャンセルや変更**

- ・申し込んだ講演については、年会実行委員会の承認なくキャンセルすることはもちろん、登壇者、講演題名、講演著者、講演内容も変更することはできません。
- ・やむをえず講演をキャンセルしたり、登壇者を変更したりする場合は、共著者の承諾を得た上で、年会実行委員会にて承認の手続きが必要になります。キャンセルや変更を希望する理由を添えて、原則講演者(登壇予定の方)が速やかに年会ホームページのWebフォームから申請してください。ただし、キャンセルは極力避け、可能な限り代理登壇者を立ててください。なお代理登壇者は原則学会員(正会員・準会員)とします。会期中、直前の申し出は承認できない場合があります。

- ・講演申込後に講演をキャンセル等しても、講演登録費および参加費の返金はありません。
- ・講演の申込時に、筆頭著者と講演者を別にすることはできます。筆頭著者は「講演予稿集」の講演者リストの先頭に記され、申込時の講演者（登壇者）は「年会プログラム」で確認することができます。

#### (10) 特別セッション・特別講演・招待講演

- ・多くの会員が関心を持つ話題について、特別セッションを開くことができますが、秋季年会では原則募集しません。これらについては、年会実行委員会にご相談ください。

#### (11) 正会員用展示ブース

- ・正会員用の展示ブースのスペースを設けます。展示を希望される場合は、ブース名・趣旨・世話人（正会員3名以上）を記載して、期日までに年会実行委員会までお申込ください。面積は1区画2×2m～3×3m（開催地の事情により異なる）、展示費は50,000円です。
- ・賛助会員の皆様への展示案内は、別途郵送いたします。

#### (12) 旅費一部補助

- ・日本天文学会では、正会員（学生）に年会出席旅費（交通費）の一部補助を行っております。希望者は、年会のWebページ[https://www.asj.or.jp/jp/activities/expenses/travel\\_grant/](https://www.asj.or.jp/jp/activities/expenses/travel_grant/)をご覧ください。
- ・オンライン講演の場合、補助はありません。

#### (13) 年会時の各種会合

- ・会合などのために講演会場などを使用したい場合には、年会実行委員会が承認の上、部屋を使用できます。年会ホームページのWebフォームからお申込ください。
- ・会合が開けるのは、会期中の昼休み時間に限ります（時間厳守）。並行して午後のセッション準備が行われますのでご注意ください。午後のセッション開始の15分前を目処に会場を明け渡すようご配慮ください。プロジェクターを含む機材やネットワークのサポート（Wi-Fi機器の貸し出し等を含む）は行いません。また、部屋の人数にも制限があることをご了承ください。

#### (14) 年会会期中の保育室

- ・保育室を設置する予定です。詳細は年会のWebページに掲載します。不明な点は年会実行委員（保育室担当）へe-mail ([nenkai-hoiku@asj.or.jp](mailto:nenkai-hoiku@asj.or.jp)) でお問い合わせください。

#### (15) 懇親会

- ・懇親会は、年会2日目にあたる2026年9月9日(水) 夜に、ANAクラウンプラザホテル岡山19階 宙 にて開催予定です。
- ・会費は2026年8月10日(月) までに事前予約された場合は日本天文学会員・非会員共に、一般7,500円、学生5,000円。それ以降に申し込まれた場合は、一般8,000円、学生5,500円の予定です。
- ・会場の都合により、参加人数は240名までとさせていただきます。
- ・詳細は、後日 tennet でお知らせする WEB ページをご確認下さい。

(16) 連絡先

◆年会実行委員会 e-mail : nenkai-committee@asj.or.jp

委員長 和泉 究 (年会実行理事・宇宙航空研究開発機構)

電話: 070-1170-2758

年会係 田口谷怜奈 (日本天文学会)

〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 日本天文学会

電話: 0422-31-5488 FAX: 0422-31-5487 e-mail : nenkai@asj.or.jp

◆開催地組織委員会 e-mail : nenkai202609-loc@ous.ac.jp

ホームページ URL : <https://sites.google.com/ous.ac.jp/nenkai2026fall>

委員長 本田充彦 (年会開催地理事・岡山理科大学)

〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1 岡山理科大学 生物地球学部

電話: 086-256-9462

年会開催期間 (2026年9月8日~10日) の連絡先は、プログラムおよび予稿集に掲載します。

年会ホームページ: <https://www.asj.or.jp/jp/activities/nenkai/>

和泉 究 (年会実行委員長)

## 寄贈図書リスト

- ① 電波天文学入門, 高桑繁久, 菊判, 224ページ, 3,800円+税, 森北出版
- ② 新天文学ライブラリー第3巻 ブラックホール天
- ③ 文学, 嶺重慎, A5判, 304ページ, 3,300円+税, 日本評論社
- ④ 星の文化史 世界13地域における星の知識・伝承・信仰, 後藤明, A5判, 254ページ, 4,500円+税, 丸善出版

## 月報だより

月報だよりの原稿は毎月20日に締切り, 翌月に発行の「天文月報」に掲載いたします。ご投稿いただいた記事は, 翌月初旬に一度校正をお願いいたします。

記事の投稿は, e-mailで [toukou@geppou.asj.or.jp](mailto:toukou@geppou.asj.or.jp)宛にお送りください。折り返し, 受領の連絡をいたします。

## 賞の推薦

## 2026年度の島津賞・島津奨励賞の推薦募集

## 1. 島津賞候補者の推薦(学会推薦)

科学技術, 主として科学計測に係る領域で, 基礎的研究および応用・実用化研究において, 著しい成果をあげた功労者を表彰します。

本年度表彰件数は1件, 賞状, 賞牌, 副賞500万円を贈呈。

## 2. 島津奨励賞候補者の推薦(学会推薦)

科学技術, 主として科学計測に係る領域で, 基礎的研究および応用・実用化研究において独創的成果をあげ, かつその研究の発展が期待される, 当該事業年度の4月1日時点で45歳以下の研究者を表彰します。

本年度の表彰件数は4件以下, 賞状, トロフィ, 副賞100万円を贈呈。

## ■推薦要領・応募方法

学会からの推薦件数に制限はありません。推薦は, 研究者個人を対象とし, 連名や研究グループに対する推薦は受理しません。また, 推薦業績は候補者1人に対し1件に限ります。

各推薦/募集要領及び推薦(申請)書類は, 以下のURLよりダウンロードしてください。

<https://www.shimadzu.co.jp/ssf/>

※各エクセル様式鏡書冒頭の推薦者情報は, 「区分1: 学会」「区分2: 物理関係」「推薦者: 日本天文学会会長」を選択してください。

※候補者(他薦の場合は応募者)は日本天文学会の会員に限らせていただきます。

※学会審査の公平を期すため, 上記締め切り後の書類の提出・追加・差替は受け付けません。

## ■募集締切

いずれの推薦も2026年7月10日(金)までに推薦書ファイル一式をメール添付にて日本天文学会事務局長宛([jimuchou@asj.or.jp](mailto:jimuchou@asj.or.jp))に送付してください。

## ■島津科学技術振興財団 問い合わせ先

〒604-8445 京都市中京区西ノ京徳大寺町1番地  
公益財団法人 島津科学技術振興財団 事務局  
TEL: (075)823-3240 FAX: (075)823-3241  
URL: <https://www.shimadzu.co.jp/ssf>  
E-mail: [admin\[at\]jssf2012.onmicrosoft.com](mailto:admin[at]jssf2012.onmicrosoft.com)

## 第43回(2026年度)井上学術賞受賞候補者の募集

## 〈対象〉

自然科学の基礎的研究で特に顕著な業績を挙げた50歳未満\*の研究者

\*2026年9月20日現在

〈助成金額及び採択数〉

賞状及び金メダル, 副賞200万円。5件以内。

## 〈推薦要項〉

推薦要項および推薦書の書式は下記サイトをご覧ください。

<https://www.inoue-zaidan.or.jp/f-01.html>

## 〈締切〉

学会締切: 2026年8月27日(木)

## 〈提出書類・提出先〉

推薦書(WORDとPDFの両方で)および主要文献(5編以内, PDFで)のファイル一式を添付(またはダウンロード情報を記載)したメールを学会事務局長([jimuchou@asj.or.jp](mailto:jimuchou@asj.or.jp))宛に送付してください。

・推薦書冒頭の日付及び推薦者の欄は推薦決定後事務局にて追記しますので, 空欄のままで結構です。

・学会へのご応募は自薦・他薦を問いませんが, 他薦

の場合は候補者了承のうえご応募ください。

- ・候補者は（他薦の場合は応募者も）日本天文学会会員に限らせていただきます。
- ・学会審査の公平を期すため、上記学会締切後の応募者による書類の提出・追加・差替は受け付けませんので、不備の無いようご留意願います。

〈問い合わせ先〉

賞に関する問い合わせ：

公益財団法人井上科学振興財団

TEL：03-3477-2738

e-mail：inoue-ap[at]inoue-zaidan.or.jp)

学会推薦関係：

学会事務長（jimuchou[at]asj.or.jp）

## 研究助成

### 2026年度島津科学技術振興財団 研究開発助成の募集

「主として科学計測に係る科学技術領域全般」と「新分野」として当財団が定めた領域で、独創的研究を対象として、申請時点で国内の研究機関に所属する、当該事業年度の4月1日時点で45歳以下の研究者に助成します。

○「主として科学計測に係る科学技術領域全般」

助成金総額：20件、1件につき100万円

○「新分野」

助成金総額：3件以下、1件につき100万円

2026年度は、「先進情報技術の研究分野、または先進情報技術やデータサイエンスを用いて科学的課題解決を目指す研究分野」における独創的研究を対象に助成します。

#### ■応募方法

学会推薦は不要です。必要書類一式を当財団ホームページよりダウンロードして提出してください。

島津科学技術振興財団 研究開発助成公募情報：

<https://www.shimadzu.co.jp/ssf/grants/apply.html>

#### ■応募締切

「2026年7月31日(金) 17:00」までに島津科学技術振興財団指定の書類提出サイトへ提出。

#### ■島津科学技術振興財団 問い合わせ先

〒604-8445 京都市中京区西ノ京徳大寺町1番地

公益財団法人 島津科学技術振興財団 事務局

TEL：(075)823-3240 FAX：(075)823-3241

URL：<https://www.shimadzu.co.jp/SSF>

E-mail：[ssf@zaidan.shimadzu.co.jp](mailto:ssf@zaidan.shimadzu.co.jp)

## 会務案内

### 日本天文学会 2026年春季年会報告

2026年春季年会は、3月4日(水) から7日(土)までの4日間、京都産業大学神山キャンパス（京都市、ホスト：京都産業大学・京都大学）にて開催された。遠隔地から参加していただけるように、現地およびオンライン（ベストエフォート）のハイブリッド開催であった。講演は現地で行っていただくことを原則としたが、子育てや介護など特別の理由がある場合はオンライン講演も受け付けた。年会参加者数は、会員1,023名、非会員112名の計1,135名（うち現地参加者は930名）であった。講演件数は、口頭講演（a）が487件、ポスター講演（b, c）が139件の計626件であった。3件の企画セッションと、天文教育フォーラム、特別セッション（天文学白書）、および受賞記念講演も開催された。開催地である京都産業大学・京都大学および参加者の皆様のご理解とご協力により、有効な年会とすることができた。参加者・関係者の皆様にこの場を借りてお礼申し上げたい。座長は次頁の方々に務めていただいた。会場・時間帯別にお名前を示し、感謝の意を表する（敬称略）。

〈記者会見〉

日本天文学会2026年春季年会記者会見は、2026年3月3日(火) 13:00から、オンライン形式にて開催された。冒頭では、太田会長による挨拶に続き、日本天文学会の組織・活動概要の説明、本春季年会の紹介、各賞の概要および受賞対象の紹介などが行われた。その後、太田会長の司会・進行のもと、天文教育普及賞の授賞理由および日本天文遺産の認定についての報告がなされた。当日は、報道機関から7名、その他の関係者1名の参加があった。日本天文遺産の認定を中心に、全国紙・地方紙（オンライン版を含む）やウェブメディアにおける報道、関係機関のホームページでの紹介が幅広く行われたことを確認している。

第8回（2025年度）天文教育普及賞（3件）

「東山正宜（ひがしやままさのぶ）・朝日新聞デジタル企画報道部」

「公益財団法人 倉敷天文台」

「茶木恵子（ちゃきけいこ）」

井上毅（天文教育普及賞選考委員会委員）

	3月4日(水)	3月5日(木)		3月6日(金)		3月7日(土)
	13:00-15:10	09:30-11:40	13:00-15:10	09:30-11:40	13:00-15:10	09:30-11:40
A	Z3. 全天偏光マップ 松村知岳 (東京大学)	U. 宇宙論 石川将吾 (日本大学)	U. 宇宙論 戸田陽 (高知工科大学)	R. 銀河 齊藤俊貴 (静岡大学)	R. 銀河 徳田一起 (香川大学)	
B	V2. 観測機器 米田謙大 (東京農工大学)	V2. 観測機器 秋田谷洋 (千葉工業大学)	V2. 観測機器 美濃和陽典 (国立天文台)	V2. 観測機器 鹿野良平 (国立天文台)	V2. 観測機器 秋山正幸 (東北大学)	
C	T. 銀河団 赤堀卓也 (国立天文台)	Q. 星間現象 柘植紀節 (岐阜大学)	Q. 星間現象 川中宣太 (東京都立大学)	Q. 星間現象 鈴木寛大 (宮崎大学)	Q. 星間現象 霜田治朗 (東京大学)	
D	Z2. ペバトロン 田中孝明 (甲南大学)	Z2. ペバトロン 齋藤隆之 (東京大学)	Z2. ペバトロン 井上剛志 (甲南大学)	Z1. 天文学史 富田晃彦 (和歌山大学)	Z1. 天文学史 玉澤春史 (東京大学/ 京都市立芸術大学)	
E	Y. 教育・広報・他 日下部展彦 (自然科学研究機構)	Y. 教育・広報・他 福田尚也 (岡山理科大学)	N. 恒星・恒星進化 谷口大輔 (東京都立大学)	N. 恒星・恒星進化 藤林翔 (東北大学)	N. 恒星・恒星進化 高田将郎 (東京大学)	N. 恒星・恒星進化 澤田涼 (東京大学)
F	M. 太陽 増田智 (名古屋大学)	M. 太陽 西塚直人 (情報通信研究機構)	M. 太陽 下条圭美 (国立天文台)	V1. 観測機器 新沼浩太郎 (山口大学)	V1. 観測機器 米倉覚則 (茨城大学)	V1. 観測機器 井口聖 (国立天文台)
G	V3. 観測機器 高橋弘充 (広島大学)	V3. 観測機器 野田博文 (東北大学)	V3. 観測機器 信川久実子 (近畿大学)	S. 活動銀河核 萩原喜昭 (東洋大学)	S. 活動銀河核 和田桂一 (鹿児島大学)	S. 活動銀河核 三澤透 (信州大学)
H	X. 銀河形成・進化 磯部優樹 (Cambridge University)	X. 銀河形成・進化 内山久和 (法政大学)	X. 銀河形成・進化 堀内貴史 (東京大学)	X. 銀河形成・進化 仲里佑利奈 (Flatiron Institute)	X. 銀河形成・進化 村田一心 (神奈川工科大学)	X. 銀河形成・進化 道山知成 (周南公立大学)
I	W. コンパクト天体 谷川衝 (福井県立大学)	W. コンパクト天体 志達めぐみ (愛媛大学)	W. コンパクト天体 小林翔悟 (立教大学)	W. コンパクト天体 川島朋尚 (一関工業高等専門 学校)	W. コンパクト天体 木村成生 (東北大学)	
J	P2. 原始惑星系円盤 高棹真介 (武蔵野美術大学)	P2. 原始惑星系円盤/ P1. 星形成 深川美里 (東北大学)	P1. 星形成 小林将人 (核融合科学研究所)	P1. 星形成 細川隆史 (京都大学)	P3. 惑星系 吉川真 (宇宙航空研究開発 機構)	P3. 惑星系 川島由依 (京都大学)

第8回(2025年度)日本天文遺産(2件)  
「星座右と陸奥州気仙郡唐丹村測量之碑(岩手県釜石市)」  
「上松赤外線望遠鏡(兵庫県佐用郡佐用町)」  
松尾厚(日本天文遺産選考委員会委員長)  
(深川美里)

#### 〈企画セッション〉

「天文学史研究の拡大と展望: Cultural Astronomy としての天文と歴史」  
世話人: 玉澤春史(東京大学/京都市立芸術大学),  
松浦清(大阪工業大学), 真貝寿明(大阪工業大学),  
澤田幸輝(沖縄女子短期大学)

2026年3月6日に京都産業大学で開催された日本天文学会2026年春季年会において, 企画セッションZ1

「天文学史研究の拡大と展望: Cultural Astronomy としての天文と歴史」を開催した。本セッションは, 天文学史研究および文化天文学(Cultural Astronomy)の視点から, 天文学と社会・文化との関係を多角的に検討することを目的として企画されたものである。

近年, 国際天文学連合においても文化天文学や天文学史に関する研究が活発化しており, 民族学や考古学の視点から天文を捉えるセッションや天文文化遺産などを扱う国際シンポジウムが継続的に開催されている。国内においても科研費にて天文と歴史・文化を横断するような学際連携研究のプロジェクトが複数実施されるなど近年活発化している。天文学を自然科学としてだけでなく, 人間社会の文化的営みとして捉える研究は, 考古学・文化人類学・歴史学などの学際領域として発展しており, 本セッションもそのような国内外の研究動向を背景として企画された。

本セッションでは、歴史資料に残された天文記録の分析、星名や星座に関する文化的研究、天文現象に対する民俗的解釈、天文学研究の歴史や市民活動との関係など、多様なテーマの研究発表が行われた。

招待講演として、中野真備氏および馬場幸栄氏による講演が行われた。中野氏の講演では、流星や彗星などに関する民俗伝承を対象に、市町村誌から各地に残る言い伝えや占兆の事例を整理し、流星が天候の予兆や吉凶の兆しとして解釈されてきたこと、また願い事を唱えるといった行為や身体動作を伴う対応など、人々が天文現象に意味を見出してきた民俗的価値が紹介された。

一方、馬場氏の講演では、近代日本の天文学研究を支えた水沢緯度観測所を題材として、ガラス乾板写真のデジタル化と史資料調査を通じて、当時の観測活動や研究体制の実態を再構成する研究が紹介された。同観測所では多くの女性所員が計算作業や観測記録の整理、ガラス乾板写真の管理などを担い、国際緯度観測事業などの研究を支えていたことが示され、近代天文学史における女性の役割を再評価する視点が提示された。また、観測資料として残されたガラス乾板が、天文学史研究の重要な史料となる可能性についても示された。

この他にも、星座体系の比較研究、市民科学や教育との関係を扱う発表などが行われ、天文学と社会・文化の関係を多角的に捉える研究が紹介された。各発表に対する質疑応答も活発であり、オンラインも含め聴講者も多く、自然科学分野の研究者がメインである天文学会の会員にも本セッションの内容に対する関心の高さがうかがえた。本企画セッションを通して、天文学史および文化天文学が、自然科学としての天文学と人文学ならびに社会科学を結びつける学際的研究領域として重要な役割を持つことが改めて確認された。活発な質疑応答の議論を踏まえると、天文学史および文化天文学との呼称が、それらの英文表記も含め、この研究領域を差す呼称として最適であるかどうか議論の余地もありそうだが、今後このような研究交流の場を通じて、天文と文化の関係を探る研究がさらに発展していくことが期待される。

「PeV宇宙線加速器ペバトロン探査の現状と今後の展望」

世話人：辻直美（東京大学宇宙線研究所）、田中孝明（甲南大学）、井上剛志（甲南大学）、齋藤隆之（東京大学宇宙線研究所）、佐野栄俊（岐阜大学）

近年の空気シャワー実験の発展により、(サブ) PeVガンマ線天文学が幕を開けた。PeVに迫るガンマ線の観測が可能になったことで、PeVものエネルギーを持つ宇宙線の加速器「ペバトロン」の正体の解明に迫ることができる。銀河宇宙線の起源天体として、以前か

ら挙げられてきた超新星残骸やパルサー星雲に加えて、大質量星団やマイクロクエーサーといった新しい種類のペバトロン候補天体が注目されている。これらの天体はガンマ線コミュニティでは大きな関心を集めている一方で、電波やX線といった他波長での観測が不十分なものも多く、多波長観測の重要性が一層高まっている。また、大質量星団やマイクロクエーサーにおける粒子加速のメカニズムも良く分かっておらず、観測と理論の両面からガンマ線放射や粒子加速の起源に迫ることが重要である。さらに2023年にはIceCube実験によって銀河面ニュートリノ放射が検出され、ペバトロン研究との強いシナジーが期待されている。加えて、これまで北天が中心だったガンマ線観測も、CTAO-North/South, ALPACA, SWGOといった実験の計画・建設が進んでおり、南天も含めた全天でのペバトロン候補天体の探査・観測が始まろうとしている。こういった背景のなか、日本のコミュニティとしてペバトロンの研究に貢献できることがあるのではないかと考え、本セッションを企画することとなった。

本企画セッションは2日間に渡る計6時間のセッションで、基調講演6件、一般講演19件の講演が行われた（うちa講演が15件、b講演が4件）。基調講演としては、IHEPのDmitry Khangulyan氏のLHAASOによる最新のガンマ線観測のレビュー（講演タイトル「Galactic PeVatrons Found in Gamma-Rays with LHAASO」）から始まり、Columbia UniversityのKaya Mori氏によるX線観測の現状「Highlighting recent X-ray observations of Galactic PeVatrons」、岐阜大学の佐野栄俊氏による電波観測の概要（「PeVatron候補天体に付随する星間雲の精査」）の講演があり、電波からガンマ線に渡る多波長観測の最新結果をカバーした。加えて、東京大学宇宙線研究所のMarcel Strzys氏による次世代ガンマ線望遠鏡CTAOの現状と展望（「Identifying Galactic PeVatrons — current status and the role of Imaging Air Cherenkov Telescopes」）、塔隆志氏による南北両半球での空気シャワー実験の将来計画（「Tibet/ALPACA空気シャワー実験による南北両半球でのペバトロン探査」）、東北大学の木村成生氏による理論研究のレビュー（「Theoretical Models for Galactic PeVatrons」）についての講演を設け、今後の展望や理論研究への理解も深めることができた。一般講演でも、電波、X線、ガンマ線、理論、観測装置といった幅広い分野からの報告があり、当初目的としていた通常セッションの垣根を超えた発表や議論を行うことができた。天体別に一般講演を見ると、マイクロクエーサーに関する講演申し込みがもっとも多く、初日に2時間のマイクロクエーサーセッションを設ける

ことができるほどで、皆さんの注目の高さが伺えた。

一般講演の応募数は想定を超え、何件かは通常セッションやb講演に回って頂かなければならなかった。当日も現地に40人ほど、zoomで20-30人ほどの参加者があり、盛況であった。質疑応答や議論の時間では、座長が促すまでもなく自然と参加者から質問が出て、活発な議論が行われた。

ガンマ線や宇宙線の分野はどうしても欧米が主流である一方で、日本でも引けを取らないほどの企画セッションを開催できたことを嬉しく思います。このような貴重な機会をいただき、世話人一同心より感謝申し上げます。

「全天多周波数帯ミリ波・サブミリ波偏光マップ観測がもたらす天文学の新たな知見」

世話人：松村知岳（東大Kavli IPMU）、市来淨與（名古屋大学）、藤本龍一（JAXA）

本企画セッションは、次世代衛星による宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の全天偏光観測がインフレーション仮説の検証を主たる動機として推進されている現状を踏まえつつ、精密な全天多周波数帯偏光マップがより広範な宇宙物理学に対しても重要な科学的価値を有することを再認識することを目的として企画された。実際、欧州宇宙機関Planck衛星の成果が示すように、全天偏光観測は星間ダストや銀河磁場構造の理解をはじめとする多様な研究分野に寄与してきた。本セッションでは、ミリ波・サブミリ波帯における全天偏光観測を基盤として、CMB、星間ダスト、星形成領域に関する研究、および可視偏光サーベイとの連携を含む幅広い話題について議論を行った。とりわけ、Planck衛星による成果を踏まえた全天偏光マップの科学的意義と、LiteBIRDに代表される次世代観測計画の展開が主要な論点となった。本セッションは2時間枠で企画し、キーノート講演1件に加えて6件の一般講演の申し込みがあった。参加者は会場約28名、オンライン約11名であった。

まず、キーノート講演としてFrançois Boulanger氏（École Normale Supérieure）が、Planck衛星が観測した30 GHzから353 GHzの全天偏光マップ、さらには無偏光成分まで含めると545 GHzと857 GHzの全天温度揺らぎマップにより天体物理学への貢献について総括した。特に高精度偏光マップにより星間ダスト成分の理解、そこから銀河磁場構造の理解が進展したこと、さらにはサブミリ波・赤外帯域による中性水素やCO輝線観測を含むダスト分布、また可視光帯域の偏光マップとの相関により多波長解析が可能となり多

様な理解が進んだ。さらには、CMB偏光解析における前景放射の重要性が明確化されたことが示された。

続いて、石野宏和氏（岡山大学）よりLiteBIRD計画の概要と科学目標が報告され、原始重力波起源のBモード偏光検出に向けた観測設計および系統誤差制御の取り組みが紹介された。次に、梨本真志氏（新居浜高専）は、全天ミリ波・サブミリ波偏光マップに基づくダスト物理の新展開について述べ、ダスト粒子の配向や磁場との相互作用に関する新たな制約の可能性を指摘した。さらに、川端弘治氏（広島大学）は可視偏光サーベイSGMAPの進展と国際共同観測との連携について報告し、異なる波長帯の偏光データ統合による銀河磁場およびダスト構造の多階層的理解の重要性を示した。続いて、古屋玲氏（徳島大学）は、450/850  $\mu\text{m}$  帯偏光観測に基づく星形成領域の研究について報告し、ダスト特性および磁場構造の波長依存的解析の有効性を示した。その後、Hanchun Jiang氏（東京大学）は、LiteBIRDの観測精度向上に向けたdelensing手法の最適化について報告し、重力レンズ効果の低減による原始重力波制限の改善可能性を定量的に示した。最後に、直川史寛氏（東京大学）は多波長電波観測に基づく宇宙複屈折の検証について報告し、CMB偏光回転に対する独立かつ相補的な観測的制約の重要性を指摘した。

以上の講演を通じて、全天多周波数帯偏光マップは、宇宙初期物理、銀河磁場、星形成過程、さらにはダスト物性や新物理探索に至るまで、多分野を横断する基盤データとしての役割を担うことが再確認された。特に、異なる波長帯・観測手法の統合的解析の重要性と、LiteBIRDをはじめとする将来計画への期待が共有された。短いセッションではあったが活発な議論が行われ、全天偏光観測の現状と将来展望を整理する上で有意義な機会となった。講演者と参加者の皆様には、世話人一同心より感謝申し上げます。

〈特別セッション〉

「みんなで天文学の未来を語ろう！第4回」

世話人：天文学白書委員会第1期委員

赤堀卓也（国立天文台）、石川遼子（国立天文台）、岡本桜子（国立天文台）、鴈野重之（九州産業大学）、河原 創（JAXA/宇宙科学研究所）、高橋慶太郎（熊本大学・委員長）、田中雅臣（東北大学）、富田賢吾（東北大学）、野田浩司（千葉大学）、野田博文（東北大学）、米徳大輔（金沢大学）

年会最終日の3月7日（土）13:00-15:00に天文学白書に関する特別セッションがハイブリッド形式で開催されました。第4回目となる今回は、近年大きな成果を

あげているJWSTによる遠方銀河研究を取り上げ、2人の講演者にその到達点と今後の方向性について語っていただきました。参加者の人数は現地が約30名、オンラインが約30名と多くの方に参加していただきました。

本セッションではまず天文学白書委員会の趣旨が改めて説明されました。この事業は日本天文学会が波長横断・分野横断で天文学全体について楽しく語り合う場を作って天文学コミュニティを盛り上げていくこと、そしてコミュニティの夢を白書としてまとめることを主な目的としています。詳しくは天文月報2025年2月号の記事をご参照ください。また、ここ数ヶ月で執筆班が確立しつつあり執筆者は60名にも及んでいます。

1つ目の講演は播金優一氏（東京大学）による「遠方銀河研究はどこまで来たのか：JWSTから未来へ」で、JWSTによる最新の遠方銀河研究を踏まえつつ、遠方銀河観測の未来について、期待と夢を語っていただきました。2つ目の講演は長峯健太郎氏（大阪大学）による「JWST以後の遠方銀河研究：理論は次の30年に何を問うべきか」で、JWST以後の時代において銀河形成理論がどのように進化するかを展望していただきました。会場からは盛んに質問が出て大いに盛り上がりました。

パネルディスカッションでは講演者と委員により衛星観測の将来展望について議論されました。会場からも活発に意見が出て、「若手からどんどんアイデアを出してほしい」という声があった一方で、「アイデアを出しても否定されがち」という声もあり、議論が深まりました。

#### 〈天文教育フォーラム〉

会期初日の16時半から18時まで、日本天文教育普及研究会との共催にて天文教育フォーラムが開催された。今回は京都産業大学（天文学会J会場）とオンラインとのハイリッド開催であり、現地とオンラインでそれぞれ約65名、約95名の方にご参加いただいた。

今回のフォーラムのテーマは、「デジタル教材＋生成AI時代の天文教育」であった。GIGAスクール構想のもと、初等・中等教育の現場ではICT端末の1人1台配備が進み、デジタル教科書やオンライン教材、各種学習支援ソフトを活用した授業が急速に広がっている。天文教育においても、シミュレーション、画像・動画データ、オンライン観測など、従来の授業では難しかった学習体験が可能になりつつある。さらに近年は、生成AI技術の急速な進展により、検索や文章生成、要約、画像生成といった機能が日常的に利用できる環境が整いつつある。学習者が疑問を持った際、AIが即座に「答えらしきもの」を提示する状況は、もはや特別なものではなく、デジタルネイティブ世代にとって当たり前の学習環境になりつつある。こ

のような環境は天文教育に新たな可能性をもたらす一方、情報の正確性の判断、思考過程の可視化、探究的学習の設計、教師の役割の変化など、これまでとは異なる課題も投げかけている。生成AIを「答えを与える存在」としてではなく、思考を深めるための補助的なツールとしてどのように活用するかは、教育現場だけでなく研究者にとっても重要な論点である。

今回の天文教育フォーラムでは、デジタル教材や生成AIを活用した天文教育の現状について、学校現場・AI教材開発の立場から話題提供を行うとともに、パネルディスカッションを通して、デジタル教材と生成AIが共存する時代における天文教育のあり方や、今後の展望について議論を行う場として、今回のテーマが設定された。

今回は話題提供として、立教大学の加藤恒彦氏と、松坂市立米ノ庄小学校の前田昌志氏を招待講師としてお招きし、それぞれの教育現場における生成AI利用の現状についてご紹介いただき、さらにパネルディスカッションでは金沢大学付属高等学校の渡會兼也氏を加え高等学校からの視点も交え、会場からも質問を受けつつ活発に議論された。まず、テキスト生成AI（大規模言語モデル：LLM）の近年の進展について紹介された。物理学・化学・生物学の大学院レベルの4択問題をういた指標によると、大学博士課程相当レベルの正答率に達しているという結果もあり、次期学習指導要領の議論において、情報活用能力育成のための教育内容を体系的・抜本的に充実する方向性が指摘されている。一方で、画像生成や動画生成においてはまだ課題が残る状況が紹介された。そのような中、小学校の現場で生成AIによる画像のどこがおかしいかを問うことで授業に応用し、生成AIの使い方と合わせて授業の現場に活用している例が紹介された。ただし、急速に発展する技術とともに、数年のうちに解消されるだろうという議論もなされた。そのため、同じ授業実践がいつまで使えるかは探りの状態であり、学校現場においても日々進化する生成AIに合わせ、技術と時代の変化に対応する教師の学びが重要であることが共有された。

教育関係者や研究者においても、AIを活用している方は多いことと思う。本フォーラムが、今後も進化が続く生成AI時代において、それぞれの現場の中でAIを活用するための一助となれば幸いである。

#### 〈受賞記念講演会〉

年会2日目の3月5日（木）の16:30から開催された会員全体集会で、2025年度の日本天文学会林忠四郎賞、欧文研究報告論文賞、研究奨励賞、天体発見賞、天体発見功労賞、天文功労賞、天文教育普及賞の授賞

式が行なわれた。また、続く18:00からは林忠四郎賞と研究奨励賞の受賞記念講演会が行なわれた。受賞記念講演における講演者（敬称略）と講演タイトルは以下の通りである。

#### 林忠四郎賞受賞記念講演

大向一行（東北大学）「宇宙初期天体形成理論の進展」

#### 研究奨励賞受賞記念講演

尾上匡房（早稲田大学）「すばるとJWSTで追う、超巨大ブラックホールの初期成長と母銀河進化」  
 鄭昇明（MPA）「宇宙初期における低金属度星の初期質量関数の進化に関する理論的研究」  
 行方宏介（京都大学）「多波長観測と太陽・恒星の比較による恒星スーパーフレアとコロナ質量放出の理解」

研究奨励賞の3氏による講演は、いずれも近年の天文学の潮流を生み出してきた力とフレッシュさに溢れたものであり、さらなる若手世代である学生やポスドクに向けた明るいメッセージも込められていた。大向氏による林忠四郎受賞記念講演は、氏の長年にわたる（そしてそれは成功あり失敗ありの山あり谷ありの努力の軌跡でもある）初代星・初代ブラックホール形成の理論的研究の歴史を振り返るものであり、過去から現在に続く様々な人々との交流エピソードとともに、しばしば会場に大笑いを巻き起こしながら進められた。粘り強く、ユニークな研究を続けることの醍醐味を感じられる講演で、参加者一同おおいに刺激を受けた。なお、欧文研究報告賞は、Yajima et al. 2021, PASJ, 73, 257 と Akino et al. 2022, PASJ, 74, 175 の2編に授与された。受賞記念講演は2026年度の秋季年会で開催される予定である。

#### 〈公開講演会〉

日本天文学会第76回公開講演会は、2026年3月8日（日）13:30から16:00まで、京都産業大学むすびわざ館ホールにおいて京都産業大学共催で開催された。「重力と天文学—マルチスケールで暗躍する宇宙の力—」をテーマに、佐藤浩介氏（京都産業大学教授）による「XRISMが切り拓く躍動する宇宙像」、上田佳宏氏（京都大学教授）による「XRISMで解き明かす超大質量ブラックホールの謎」、野村英子氏（国立天文台教授）による「惑星の重力が明らかにする惑星形成の現場」の3講演が行われた。これら3つの空間スケールにわたる講演で、XRISMやALMAなどの最新の観測結果や理論シミュレーションの結果が紹介された。80名の参加者があり、各講演後および最後の全体質疑の時間には、

「XRISMは打ち上げ前に全ての科学観測計画が決まっていたのか」「ベテルギウスは爆発しないということか」「ホットジュピターはどうしてスノーラインのあんなに内側にいるのか」など、多くの質問が寄せられ、一般の方々の天文学に対する深い関心が感じられる講演会となった。司会は岸本真（京都産業大学）が務めた。

（岸本真）

#### 〈懇親会〉

年会3日目の3月6日（金）18:00より、フィエスタ河原町にて懇親会を行った。天文学会の会場から公共交通機関を乗り継いで行かないといけない場所にもかかわらず、224名（うち学生94名）も参加していただいたことに感謝したい。フィエスタ河原町側から人数の変更の受付は前日までと言われており、懇親会当日に数名の方から参加の打診をいただいたものの、断らざるをえなかったのは心苦しかった。

参加受付には、これまでと違いPeatixというシステムを使用した（前々回と前はイベントベイ）。事前にスマホにアプリを入れていただいて決済すれば、受付ではアプリ上のボタンを押すだけで受付が完了するので、受付はスムーズに行えた。バックアップとして参加申込者リストを印刷して、受付で名前を言ってもらおうということでも対応したが、かなりの割合でアプリでの受付をしていただけた。ただ、今回の申込のためだけにPeatixでアカウント登録をするのには抵抗があったという声もいただき、申し訳なかった。次回以降の受付は継続性を考えていただくのがよいかもしれない。

懇親会は野上大作が進行を担当し、太田耕司・天文学会会長の挨拶及び乾杯の音頭により始まった。ただし、年会会場から離れていて到着時間がバラけることが予想されていたため、17:30から飲み物の提供をしており、乾杯の音頭のときには既に2杯目を飲んでの方もそれなりにおられたと思う。物価高騰の折、会費を抑えるために、特に余興や特別な料理や飲料は用意しなかったが、存分に食事と会話を楽しんだという声を多くいただいたのは幸いだった。人数に比してやや会場が狭かったかなという気もしていたが、参加者同士の距離が近めだったのも懇親会としては良かったのかもしれない。最後は米原厚憲・京都産業大学開催地理事と本田充彦・岡山理科大学次回開催地理事の挨拶をもって、20:00に締めとなった。

参加していただいた方々には感謝を申し上げる。今回の懇親会が、世代や分野、立場を超えて親睦を深め、新たな研究の種となる議論が生まれるきっかけとなっていれば幸いである。

末筆ながら、リーズナブルな料金でよい会場（京都

の夜景を楽しめるテラスもあった)と飲食物を提供していただいた(予定になかった量の料理をその場の判断で追加で提供していただいたそうだ)フィエスタ河原町の方々にも感謝を申し上げます。

(野上大作・米原厚憲)

#### 〈保育室〉

京都産業大学 神山ホール3階・第3セミナー室にて、保育室を開設した。本年会では1家族2名が保育室を利用した。保育室の準備にあたり、京都産業大学スタッフの方々に様々なご協力をいただいたことを感謝する。

(年会実行委員長 和泉突)

#### 〈ジュニアセッション〉

第28回ジュニアセッションを、春季年会最終日の3月7日(土)に、現地とオンラインでのハイブリッド形式で開催した。発表数は69件、そのうち現地会場での発表が42件であった。参加者数は、現地会場が発表者生徒142名、指導者38名に加え、保護者や教育関係者などの一般の参加者、運営関係者合わせて270名であった。オンライン参加者は、発表関係者が25接続、その他が55接続であった。これに加えて、年会参加の研究者が数10名参加しており、全体として約390名がセッションに参加したことになる。発表数がここ数年では最大であった一方、期末試験など学校行事が行われている3月第1週の開催だったことで、対面での参加者が大きく減少した。

セッションは太田会長の挨拶に始まり、午前、午後それぞれ約2時間の口頭発表セッションを行った。午前中が山岸光義(東京大学)、鈴木文二(渋谷教育学園幕張中学校高等学校)、午後が 秦和弘(名古屋市立大学)、可長清美(東京都立川高等学校)の各氏にお願いした。例年通り口頭発表の希望が多く、1件あたりの発表時間は3分(現地)ないし4分(オンライン事前収録)だったが、各発表者は研究の要点をうまくまとめて発表し、座長の的確な進行も相まって午前・午後とも大きな遅延なく進められた。昼の時間帯と午後の口頭セッション終了後に、現地会場ではポスターセッションを行い、年会参加の研究者も含めて熱気あふれる活発な議論が行われた。ジュニアセッションでは、口頭発表の有無にかかわらずすべての発表がポスターセッションに参加することが基本で、現地参加できなかった発表はホームページ上にPDFを掲示し、コメントを収集して発表者に送付することとしている。また、今年も、タイの高校生から7件の発表があった。いずれもレベルの高い研究であったが、オンラインによる発表だったため、議論・交流が深められ

なかったことは残念であった。

前述の通り、開催時期が例年より早く学校行事との関係もあり、十分な研究時間がとれないのではないかと憂慮していたが、多くの発表は完成度が高く、あるいは当日の議論でさらに発展の可能性が見えてくるものであった。発表者の生徒の皆さん、また研究指導者の皆さんの努力がうかがえる。これらの意欲の高い生徒さんたちが、研究の楽しさ、厳しさを経験し、将来に活かしていけるよう、天文学会に所属する研究者の議論への参加をお願いしたい。

事後に行った参加者アンケートでは、良い経験になったという感想に加え例年にも増して運営上の改善点・要望を伝える意見があった。これは、参加者がジュニアセッションの意義を評価し、さらに良いものにしていきたいという気持ちの表れと思う。さまざまな制約からすべてに答えることはできないものの、ジュニアセッション実行委員会では、これらの声に耳を傾け、より充実したジュニアセッションの実施に向けて努力していきたい。

最後になったが、ジュニアセッション固有の要望に応えていただいた開催地関係者の皆様、予稿や発表資料の確認、前日の準備から当日の運営を手分けして行った実行委員会・世話人メンバーには改めて感謝したい。本ジュニアセッションは、日本天文学会が主催し、日本天文教育普及研究会が共催、日本学術会議が後援した。参加者およびご協力いただいた関係各位に御礼申し上げます。

(ジュニアセッション実行委員長 山村一誠)

## 入会・移籍・退会のお知らせ

2026年3月2日に開催された公益社団法人日本天文学会理事会において、正式に入会・移籍が承認された方、退会が報告された方の人数をお知らせします。

入会 正会員：22名 準会員：2名  
 2026年度入会 準会員：2名  
 退会 正会員：3名 準会員：14名  
 移籍 2026年度から 準→正：3名 正→準：14名

## 2027年度 日本天文学会「国内研修支援金」の公募

### 〈募集要項〉

応募資格：応募時点で日本天文学会会員であること

(内規第3条)

募集人数：若干名

研修期間：2027年4月から2028年3月までの12カ月のうち希望する期間

- ・受入機関、指導教員〔受入研究者〕と相談の上で決めていただきます
- ・研究終了後、2カ月以内に研究報告書を提出していただきます

支給額：総額25万円以下（2027年4月支給予定）

申し込み：応募申請書に必要な事項を記入し、電子ファイルをEメールで送付してください。郵送の場合は、国立天文台内「日本天文学会事務長」宛てに紙面を送付してください。

送付先：日本天文学会 事務長

住所：〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1

国立天文台内

e-mail: jimucho[at]asj.or.jp

応募締切：2026年8月31日(月) 必着

審査：国内研修支援金選考委員会（内規第5条）で審査し、10月中旬までに通知いたします。

申請用紙：学会ホームページからダウンロードいただくか、日本天文学会事務所（jimucho[at]asj.or.jp）までご請求ください。

<https://www.asj.or.jp/jp/activities/expenses/kensyu/>

（申請書の書き方例もご参照ください）

成果の発表：研修期間終了後2ヶ月以内に「研修成果報告書」を提出していただきます（「天文月報」に掲載されます）。また、天文学会年会において研究報告（発表）を行うことを推奨します。

なお、国内研修支援金に関する内規は天文学会ホームページの「定款・細則・内規」に掲載されています。

<https://www.asj.or.jp/jp/about/articles/#naichi>

問い合わせ先：

国内研修支援金選考委員会（委員長：高妻真次郎）

kokunai-kenshu@asj.or.jp

## 編集委員会より

### 天文月報記事投稿用アップローダー

[https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author\\_submission/](https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author_submission/)

#### ■ログイン

ユーザー名とパスワードが必要です。ホームページにある「お問い合わせフォーム」からお問い合わせください。

#### ■アップロードの仕方

- ・アップロード画面で必要事項を埋めてください。するとアップロードに進むことができます。
- ・できる限りファイルは1つにまとめてください。
- ・ファイルが複数ある場合は「複数のファイルを投稿する」ボタンを押してください。押すたびに欄が増えます。
- ・1回あたり全部で最大50 Mbyteまで、個数は20個まで送信できます。それ以上の巨大なファイルのアップロードは推奨されませんが、やむをえない場合は分割してお送りください。

#### ■注意

投稿者の個人の認証はcookieを利用しています。

したがってcookieを受け取らないブラウザでは使えません。またフォームのチェックや可変個数のアップロードボックスはjavascriptを利用していますのでjavascriptが使えなければこのアップローダーは使えません。その場合はtokuou@geppou.asj.or.jpまでメールでご投稿ください。

#### ■連絡先

アップローダーに関するご質問はtokuou@geppou.asj.or.jpまでお願いします。

（天文月報編集長）

### 天文月報記事ご執筆用テンプレート

SKYLIGHT, EUREKA, 天球儀などのご執筆にあたりましては、日本天文学会HP内「天文月報」のページにあります「投稿用テンプレート」をご活用ください。

[https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author\\_template/](https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author_template/)

TeX・LaTeXで執筆される方はテンプレートをオンライン上またはダウンロードしてご利用ください。

MSWordで執筆される方はwordテンプレートをダウンロードしてご利用ください。

ご執筆の前に必ず「執筆マニュアル」をご一読ください。

[https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author\\_manual/](https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author_manual/)

texをご利用される場合は、あわせてreadmeもお読み下さい。

※ご利用にあたって不具合を発見された方は、お手数

をおかけいたしますが、編集委員会までご連絡をお願い申し上げます。

天文月報 119巻7月号 主な掲載予定記事

EUREKA: 輝線で観る銀河進化最盛期の銀河周辺物質【日下部晴香】電子捕獲型超新星の光度曲線と判別方法【佐藤大仁】多波長観測で探る急成長中の超巨大ブラックホール【小淵紗希子】

〈シリーズ〉海外の研究室から: Carnegie Observatory 坊氏と私のアメリカ研究生生活【百瀬莉恵子】

編集委員: 日下部展彦 (編集長), 岡本文典, 小山翔子, 志達めぐみ, 鈴木大介, 高橋葵, 田中壱, 谷川衝, 鳥海森, 中島亜紗美, 信川久実子, 橋本拓也, 福島肇, 藤澤幸太郎, 宮武広直, 宮本祐介, 守屋堯

令和8年5月20日 発行人 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 公益社団法人 日本天文学会

印刷発行 印刷所 〒162-0801 新宿区山吹町332-6 株式会社 国際文献社

定価733円 (本体667円) 発行所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 公益社団法人 日本天文学会

Tel: 0422-31-1359 (事務所) / 0422-31-5488 (月報) Fax: 0422-31-5487

振込口座: 郵便振替口座00160-1-13595 日本天文学会

三菱UFJ銀行 三鷹支店 (普) 4434400 公益社団法人 日本天文学会

日本天文学会のウェブサイト <https://www.asj.or.jp/> 月報編集 e-mail: [toukou@geppou.asj.or.jp](mailto:toukou@geppou.asj.or.jp)

会費には天文月報購読料が含まれます。

©公益社団法人日本天文学会 2026年 (本誌掲載記事は無断転載を禁じます)