

---

銀河・銀河団 アブストラクト集  
2022年度 第52回 天文・天体物理若手夏の学校

---

---

播金優一（東京大学 宇宙線研究所 助教）

## JWSTによる遠方銀河研究

銀河の形成・進化を理解することは現代天文学の大きな目標の一つです。これまですばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡、アルマ望遠鏡等の大型望遠鏡を使って数多くの銀河が発見され、様々な研究が展開されてきました。しかし遠方宇宙における銀河の統計的・物理的性質は、まだ一部しか理解されていません。これは遠方銀河は赤方偏移している上に典型的には暗く、赤外域での高感度の観測が必要だからです。

今年の夏に観測を開始した James Webb Space Telescope (JWST) は、NASA/ESA/CSA が開発した口径 6.5m の赤外線宇宙望遠鏡です。6.5m という大口径と宇宙空間という場所を活かして、これまでの望遠鏡よりも 10 倍から 1000 倍高い感度の観測を赤外域で実現します。この圧倒的な感度をもって、JWST は遠方銀河の研究にブレイクスルーを起こすことが期待されています。本講演ではこれまでの遠方銀河研究の成果を振り返りながら、JWST によってどのような研究が可能になるのか、紹介したいと思います。

1. 播金優一, 天文月報, 2022 年 2 月号, 83 ページ
2. Y. Harikane et al., ApJ, 929, 1, 15pp, 2022
3. Y. Harikane et al., ApJS, 259, 20, 37pp, 2022

---

百瀬莉恵子（Carnegie Observatories PD）

## 大規模構造と銀河形成と研究生活

宇宙に存在する様々な階層の構造 (星、銀河、銀河団、大規模構造) は互いに影響を及ぼし合いながら成長する。中でも、ダークマターが織りなす非一様な密度分布であり密度ゆらぎの成長の痕跡を色濃く残す大規模構造は、宇宙論的な観点でも銀河形成の観点からも重要な研究対象である。そのため、大規模構造を観測的に正しく描き出すことは構造形成の理解に不可欠だ。大規模構造の推定には、主に銀河が観測指標として用いられてきた。また近年では、銀河に代わる観測指標として、銀河間空間中の中性水素ガスが注目されている。本講演では、こうした観測指標に依存する“観測的な大規模構造”に関する課題や、指標間の差異、観測と数値シミュレーションを組み合わせた新たな推定手法など、大規模構造を観測的に再現するための様々な研究を紹介する。また銀河形成の観点から、大規模構造の中の環境であるノード、フィラメント、ボイドが銀河形成へ及ぼす影響に関し、観測研究の現状をレビューする。

研究のトピックとは別に、本講演では、海外での研究生活や、結婚・出産といったライフイベント、育児と研究のワークライフバランスについても紹介する。自身の経験や研究者におけるワークライフバランスに関する最新の研究も交えながら参加者とざくばらんに議論したい。

## 「すざく」衛星を用いた Abell 3395/3391 銀河団周辺の銀河間物質の探索 赤塚 勇太 (埼玉大学大学院 理工学研究科 M1)

銀河団は、数十個から数千個の銀河が集まった重力的に束縛された宇宙最大の自己重力系である。銀河団は互いに衝突と合体を繰り返すことで成長してきたと考えられており、銀河団をも繋ぐフィラメント状に分布した宇宙の大規模構造に沿って分布した温度数百万度のガスも巻き込みながら衝突合体している。これら温度数百万度のガスは中高温銀河間物質 (WHIM) と呼ばれている。これまで軟 X 線帯に高い感度を持つ「すざく」衛星の観測により、銀河団周辺の WHIM 候補に強い制限がつけられてきた。

Abell 3395/3391 はビリアル半径が重なっている、衝突の初期段階にある銀河団である。この連結領域の「すざく」衛星を用いた観測から、衝突によるガスの加熱が示唆されている [1]。一方で、点源や銀河による放射の影響も指摘されている [2]。加えて、「すざく」衛星を用いた多くの銀河団外縁部の詳細なスペクトル解析から 1 keV 程度の我々の銀河周辺に広がった成分も示唆されており [3]、銀河団外縁部の解析ではこれらフォア、バックグラウンド成分の不定性を十分に評価する必要がある。本研究では、「すざく」衛星を用いたスペクトル解析から銀河団ガス及びフォア、バックグラウンド成分のモデリングを新たに構築し、フィラメント周辺の低温ガス成分の有意性を検討する。将来的には eROSITA 衛星のスペクトルも組み合わせ、銀河団周辺のフィラメントに付随するガスの温度と密度に制限をつけることを考えている。

1. Sugawara, Y., Takizawa, M., Itahana, M., et al. 2017, PASJ, 69, 93
2. Alvarez, G. E., Randall, S. W., Bourdin, H., Jones, C., Holley-Bockelmann, K. 2018, ApJ, 858, 44
3. Sugiyama et al., submitted

## 超新星フィードバックを考慮した銀河円盤シミュレーション 新井 聡一 (筑波大学 M1)

本講演では、Kim & Ostriker 2017[1] のレビューを行う。銀河円盤内での星形成は、星間物質 (ISM) の物理状態 (温度、密度等) に依存する。一方、ISM の物理状態も星形成のフィードバックの影響を受けるため、星形成と ISM の物理状態は相互に依存している。本論文では星形成と ISM の物理状態の関係について解明するために超新星 (SNe) フィードバックを考慮した 3 次元流体シミュレーションの枠組みを構築した。特に、ISM に大きな影響を与える SNe フィードバックに関しては、その効果を正確に数値計算に取り入れる必要がある。超新星残骸 (SNR) の断熱膨張期にあたるセドフ期を数値計算する際に、解像度が不十分であると”過冷却” が起こり、SNe フィードバックを過小評価してしまう可能性がある。このため、本論文ではセドフ期が解像できるときは、熱エネルギーと運動エネルギーを SNR 内に注入し、解像できないときは運動量のみを SNR 内に注入することで、ISM により現実的な SNe フィードバックの効果を取り入れるモデルを構築した。実際に太陽近傍の物理量を採用し 3 次元流体シミュレーションを行うと、観測で見られる ISM の 3 相構造

を再現することができた。また、大質量星が形成されると、放射や SN により ISM の加熱が起こり、星形成がストップする。その後、ISM が冷えて星が形成されるという循環が 40 Myr 程度の周期で起こっていた。

本論文では、極紫外線 (EUV) 光の放射は考慮されていない。EUV 光の放射は電離加熱を起こすため、放射による ISM の加熱を考える際に重要となってくる。そのため、今後の研究では EUV 光と SNe フィードバックを考慮した放射流体シミュレーションを行い、ISM の物理状態と星形成の関係について調べていきたい。

1. Chang-Goo Kim, Eve C. Ostriker, ApJ, 846, 133, 2017

## **$z \sim 6$ におけるクェーサーのダークマターハロー質量に対する観測的制限 有田 淳也 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 M1)**

銀河とその中心にある超大質量ブラックホールの質量は常に正の相関を持ち、共進化という名で知られているがその成因についてはわかっていない。共進化の理解においてクェーサーから母銀河へのフィードバックは重要であり、ダークマターハロー (DMH) の質量は高赤方偏移で知ることができる母銀河の重要な特性であるとともに、そのモデルの検証に使用できる物理量である。フィードバックモデルに対してより強い制限を与えることができる高赤方偏移クェーサーは重要な観測対象である。DMH の質量を推定するための有用な手法にクラスタリング解析がある。しかし、クェーサーのクラスタリング解析は十分な数密度でクェーサーが検出されている  $z < 4$  に限られており、それ以遠の宇宙では DMH の制限には至っていなかった。すばる望遠鏡の HSC を用いた高赤方偏移クェーサー探索プロジェクト (Subaru High- $z$  Exploration of Low-Luminosity Quasars: SHELLQs) はこの状況を一変させ、 $z \sim 6$  におけるクェーサーの数密度を従来の約 10 倍に増加させたことに注目し、初めてクラスタリング解析を行った。

本研究では SHELLQs で検出されたクェーサーに加え、SDSS・PAN-STARRS で検出された  $z \sim 6$  のクェーサーを用いてクラスタリング解析を行い、2 体相関関数を測定することでクェーサーが非常に質量の大きい DMH に存在するという結果が得られた。本講演では解析と結果の詳細を示し、低赤方偏移の結果と比較するとともにクェーサーのフィードバックモデルなどについて議論を行う。

## **Subaru/HSC SSP 可視光サーベイと VLA/FIRST 電波カタログを用いた 29 天体の radio-loud dust obscured galaxies の発見 福地 輝 (東北大学 M2)**

銀河合体に伴い超巨大ブラックホール (SMBH) が急激に成長する段階はダストに覆われ、可視光で暗く赤外線では明るく光ると考えられる。そのため、HSC  $i$  バンド、WISE W4-band ( $22 \mu\text{m}$ ) での AB 等級の差が  $(i - [22]) > 7$  と定義される dust obscured galaxies (DOGs: e.g., [1], [2]) には、急速に成長する SMBH が存在し、一部の DOGs はエディントン限界に達する可能性があるかと予想される。エディントン限界を超えるような降着率の高い天体では電波ジェットが放出されることが理論的に

示唆されていることから (e.g., [3]), 我々は HSC-WISE DOGs 約 1300 天体と VLA sky survey および VLA/FIRST 電波カタログとのクロスマッチングを行い、電波光度  $L_{1.4\text{GHz}} = 10^{24-26.5} \text{ W Hz}^{-1}$  を持つ電波で明るい DOGs (radio-loud DOGs) を 29 天体発見した。本研究では、これらの DOGs について HSC で得られた測光赤方偏移と CIGALE コードを用いて SED フィッティングを行い、AGN 成分 (AGN 光度:  $L_{\text{AGN}}$ ) と母銀河成分を分離した。これにより、BH 質量と母銀河の星質量の比例関係を用いて、 $L_{\text{AGN}}/M_{\text{star}} \propto L_{\text{AGN}}/M_{\text{BH}}$  からエディントン比を見積もった。その結果、エディントン限界を超えた radio-loud DOGs がサンプルの 30% を占め、その割合は電波で検出されていない DOGs (7%) とくらべて高いことがわかった。したがって、radio-loud DOGs はエディントン限界付近での急激な質量降着やジェット生成機構を理解するための有力天体かもしれない。本発表ではさらに、SDSS で分光観測され、エディントン限界に達していると考えられる radio-loud DOG 1 天体についても紹介する。

1. Toba et al., PASJ, 67, 86T 2015
2. Noboriguchi et al., ApJ, 876, 132N 2019
3. Ohsuga et al., PASJ, 61L, 7O, 2009

## GaiaDR3 の運動データから明らかになったセファイドの渦状腕とその過渡的性質

### 船越 菜月 (東京大学理学系研究科天文学専攻 M1)

ESA の位置天文衛星 Gaia によって天の川銀河内の恒星の 6 次元データ (位置、速度) が得られ、様々な運動学的構造が様々なトレーサーによって発見されている。しかし太陽からの距離が遠いほど視差は小さくなるため、現在の精度では、太陽から 6kpc 以上の距離では正確な恒星分布が得られない。

セファイドという脈動変光星は周期光度関係によって正確な距離を測定できる点で、銀河の構造と進化のよいトレーサーである。また、20~300 Myr と若い恒星種族に属するため、それらの運動学的構造によって短いタイムスケールで起こる銀河系円盤の進化に制限を与えることができる。

我々は、約 1300 個のセファイドと Gaia DR3 のクロスマッチングを行い、太陽から約 10kpc までの 3 次元運動をマッピングした。セファイドの空間分布は OB 型星などと比べると分散が大きい。渦状腕をトレースしているかどうかはこれまで不明だった。今回の研究では、セファイドの 3 次元速度の分布が渦状腕をよくトレースしており、渦状腕ごとに異なる運動パターンを示すことが明らかになった。アウトターームに沿ったセファイドは、外側のものが内側に、内側のものが外側に移動する傾向を示していて、数十 Myr 後には腕が強くなる、つまり成長過程にある。一方ペルセウスアームは崩壊しつつあることが確認された。これらの異なるパターンは渦状腕の過渡的な性質を示すものであり、渦状腕の形成進化を知る手がかりになるだろう。

## 可視光輝線と光電離モデルで探る極金属欠乏銀河の隠れた非熱的放射源の正体 波多野駿 (総合研究大学院大学 博士前期課程一年)

極金属欠乏銀河 (EMPG) には、非常に強い高階電離輝線 ( $\text{HeII}4686$  など) が見つまっているが、星の種族合成モデルではその光度を説明できていない。Umeda et al. (2022; 以下 U22) は光電離モデル CLOUDY と MCMC 法を用いて、EMPG で観測された  $\text{HeII}$  を含む 10 本以上の可視光輝線の光度を再現する電離スペクトルを探った。その結果、EMPG には正体不明の隠れた非熱的放射源が存在することが示された。

この非熱的放射源の正体を探るため、本研究では、電離エネルギーが  $\text{HeII}$  (54.4 eV) より高い  $[\text{NeV}]3426$  輝線 (97.1 eV) を U22 の解析手法に新たに加えることで、非熱的放射のスペクトルの冪と光度を求めた。この解析を  $[\text{NeV}]$  が検出された 5 つの近傍 EMPG に適用したところ、軟 X 線にあたる 54.4 – 97.1 eV のエネルギー帯で、冪と光度の推定値がそれぞれ  $-1.5 < \alpha < 0.5$ 、 $10^{39} < L < 10^{42}$  egr/s の範囲に分布する事が分かった。これらの冪と光度を超大光度 X 線源 (ULX) と活動銀河核 (AGN) のモデルスペクトルと比較したところ、5 つの EMPG のうち 1 天体ずつがそれぞれ ULX と AGN の電離スペクトルと同程度の冪と光度を持つことが分かった。残りの 3 天体のうち 2 天体は AGN と同程度の冪を持つ一方で光度が 1/10 以下だったため、ULX と AGN の中間の性質を持つ中間質量ブラックホール (IMBH) の存在が示唆される。さらに残りの 1 天体は ULX と同程度の冪を持つ一方で光度は 10 倍程度と大きいため、これまで見つかっていないほど多数の ULX を持つ銀河か、IMBH の可能性がある。以上を踏まえ、本講演では  $10^{2-5} M_{\odot}$  の亜-超臨界降着円盤の放射スペクトルモデルを用いて、これらの EMPG の電離源を議論する。

## semi-analytic model "GALFORM" を用いた銀河形成・進化について 五十嵐 諒 (新潟大学 自然科学研究科数理物質科学専攻 M1)

本講演では、膨張宇宙におけるボトムアップ型の階層的な天体形成シナリオによる銀河形成・進化を計算するための semi-analytic model、"GALFORM" について述べた論文 [1] のレビューを行う。

このモデルは Cole らによって開発された初期のスキームを改良・拡張したもので、ダークマターハローの合体進化を追跡するために新たなモンテカルロアルゴリズムを採用している。ダークマターハローの密度プロファイルの現実的な描像を組み込み、ガスや星の化学進化、それに伴うダストの生成、銀河円盤やバルジの大きさの詳細な計算ができる。各物理過程のモデリングは可能な限り、数値シミュレーションの結果に基づいている。この方法を  $\Lambda\text{CDM}$  宇宙論 ( $\Omega_0 = 0.3$ ,  $\Lambda_0 = 0.7$ ) に適用したところ、B バンド、K バンド光度関数、全体的な種族に対しての色分布、楕円銀河と渦巻銀河の比率、銀河円盤のサイズの分布および銀河円盤の冷たいガス量が近傍銀河の観測と一致することがわかった。一方で、集団内における楕円の色等級の関係は明るい等級で観測されたものよりかなり平坦であり、モデルはある等級における銀河の円速度を観測より 30% 程度大きく予測した。

1. Cole et al 2000, MNRAS, 319, 168

## $z = 1.46$ の銀河団銀河の構造とガス動力学

池田 遼太 (総合研究大学院大学/国立天文台 M2)

星形成活動が活発であった  $1 < z < 3$  に存在する遠方銀河が、どのようにして星質量を獲得してきたのかを調べることは、銀河進化において重要な視点である。これには個々の銀河の恒星成分のみならず、星間物質を高分解能で調べることが必要不可欠であり、サンプル数を効率的に獲得できる銀河団銀河は先駆けとして好適な観測対象である。

本研究では、XCS J2215 銀河団 ( $z = 1.46$ ) [1] に属する 17 個の銀河団銀河を対象に、ALMA を用いて  $870\mu\text{m}$  連続光 (ダスト) と CO  $J=2-1$  輝線 (分子ガス) をそれぞれ  $0.2''$  と  $0.4''$  の高分解能で観測し、ビジビリティデータの解析を元に各構成要素のサイズ (有効半径  $R_e$ ) を測定した [2]。9 個の銀河について両サイズが良い精度で測定され、どの銀河についても CO  $J=2-1$  輝線の方が  $870\mu\text{m}$  連続光よりも広がっていることがわかった (平均サイズ比は  $2.8 \pm 1.4$ )。また、各銀河を中心部 ( $0 < r < R_{e,870\mu\text{m}}$ ) と外部 ( $R_{e,870\mu\text{m}} < r < R_{e,\text{CO}}$ ) に分解し、Kennicutt-Schmidt 関係を調べたところ、中心部の方が短いガス消費時間  $\tau_{\text{depl}} (= M_{\text{mol gas}}/\text{SFR})$  を有していることがわかった。これは中心部で特に活発な星形成活動が行われていることを示唆し、近傍宇宙で見られるような楕円銀河のバルジ成分の形成に対応していると解釈できる。

最後に、3次元動力学のモデリングツールである  $^3\text{DBarolo}$  [3] を使って、現在進めている CO  $J=2-1$  輝線のガスの動力学のモデリングの結果について紹介する。

1. Stanford et al. ApJL, 646, L13, 2006
2. Ikeda et al., ApJ, 933, 11, 2022
3. Di Teodoro & Fraternali, MNRAS, 451, 2015

## 銀河相互作用における星形成率の時間変化

井上 真 (京都大学大学院 理学研究科 M1)

銀河相互作用は、銀河の形態や星形成活動に大きな影響を与えるため、銀河の形成・進化に重要な役割を果たすと考えられる。特に星形成率 (SFR) は銀河の活動性を示す重要な物理量であり、銀河相互作用の時間発展に伴って、SFR がどのように変化するかを理解することは、銀河相互作用が銀河進化に与える影響を詳細に理解するために重要である。

この点について、これまで観測とシミュレーションの両面から研究が行われてきた。近傍銀河の観測から、星形成をしている銀河が相互作用を経験すると、平均的な SFR は通常の星形成銀河よりも高くなり [1]、銀河間距離が近づくほど星形成活動が促進されることがわかってきた [2]。特に [1] では、相互作用を接近から衝突までの段階に分けて SFR の空間分布が調べられた。彼らは相互作用の段階の中でも近銀点と最終的に合体した段階で星形成が強く促進されること、また最初は銀河中心部で促進されていた星形成活動が時間と共に外側へ広がっていくという結果を得た。シミュレーション [3] では、[1] と同様の結果が得られたことに加え、衝突の軌道や銀河の質量比、星間ガ

スの量などの初期値によって相互作用中・衝突後の SFR が大きく異なることがわかってきた。特に二つの銀河の回転方向の関係によって SFR のピークに大きな差があり、銀河スピンの互いに逆向きの合体での SFR のピークは、揃った合体と比べ 10 倍以上となることが示唆されている。

本講演では観測とシミュレーションの両面から銀河相互作用に関する複数の論文をレビューし、銀河相互作用における SFR の時間変化について現在分かっていることを概観する。

1. Pan et al., ApJ, 2019, 881, 119
2. Pan et al., ApJ, 2018, 868, 132
3. Di Matteo et al., A&A, 2007, 468, 61

## 次元削減を用いた銀河の物理量の推定

岩崎 大希 (名古屋大学院 M1)

銀河を構成する数百億個から数千億個の恒星と星間物質は銀河の性質を理解する上で重要な役割を果たす。それらの放射の寄与からなる波長の関数としての電磁波の強度分布であるスペクトルエネルギー分布 (SED:Spectral Energy Distribution) は銀河の星形成史、恒星の金属量、星の種類、含まれる恒星の全質量、ガスやダストの状態や量、といった物理量を反映している。銀河の重要な物理量を推定するために SED は必要不可欠である。だが、観測から得られたバンド毎のデータのみで、全波長における SED を推定することは難しい。これを求める際は複数ある SED モデルから与えられたデータに最も適合するモデルを見つけるまで計算を繰り返す SED fitting を行うが、この方法にはあらかじめ様々なパラメーターやモデルを仮定しなければならず、計算コストがかかるという問題点が存在する。等級、形態、大きさ、赤方偏移といった銀河の多くの物理量を単純な線形関係で説明することは現実的でない。本研究ではニューラルネットワークを用いた教師なし学習により高次元データを低次元平面へ圧縮するデータの解析方法を試みた。この手法は広く用いられている主成分分析 (PCA) と違い観測データと潜在変数間の非線形な関係を捉えることができる [1]。この手法による解析は時間を要するが、一度学習することで将来期待される大規模な天体データに対して高速処理が可能となる [2]。観測データを低次元削減に圧縮することで可視化が可能となり、データの解釈を容易にする。今回は教師なし学習を用いて推定した銀河の重要な物理量が SED fitting により推定された値に一致することと PCA による次元削減の結果よりも優れていることを報告する。

[1] Portillo,K.N.S et al AJ 160 45 2020 [2] Hemmati,S et al ApJ881 L14 2019 [3]

1. Portillo,K.N.S et al AJ 160 45 2020
2. Hemmati,S et al ApJ 881 L14 2019
3. Authors3, journal3, vol3, pages3, year3

## ファラデーモグラフィを用いた AGN ジェットの偏波解析

黒木 雅哉 (熊本大学大学院 自然科学教育部 M1)

宇宙の様々な天体に磁場は存在し、天体の運動や高エネルギー現象に大きな関わりを持つ。それゆえ、宇宙磁場の観測は宇宙進化の過程を理解するために重要なものとなる。磁場は主に偏波として観測されるシンクロトン放射と、偏波面を回転させるファラデー回転と呼ばれる現象を用いて、それぞれ視線に垂直な成分、平行な成分の情報を得られる。ただ、従来の方法では磁場成分は積分量として求められており、磁場の 2 次元的な分布のみしか得られなかった。しかし現在では、磁場を 3 次元的に解析するファラデーモグラフィという手法が開発された。具体的には、ファラデー深度と呼ばれる視線方向の磁場と熱的電子密度の視線積分量を変数とするファラデー分散関数 (Faraday Dispersion Function; FDF) を、観測された複素偏波強度を、波長の 2 乗とファラデー深度を共役変数としてフーリエ変換して求めるという手法である。[1]

AGN や原始星などで見られるジェットにはらせん状の磁場が存在するとされていて [2]、これがジェットの構造形成に関わっていると考えられている。トモグラフィによって FDF を得ることで、磁場の強度や奥行きを知ることができ、ジェットの特性などの理解につながることを期待される。本研究ではジェットに沿った一様ならせん状の磁場があるシンプルなモデルを仮定し、AGN ジェットの斜めからの観測を想定した時の FDF を数値シミュレーションした。らせんの進行方向と視線方向が平行な時は、ファラデー深度、偏波角は線形に変化する。しかし、斜めから観測すると磁場の視線方向成分の向きが反転する場合があるため、ファラデー深度が視線に単調に変化しないことがある。つまり、視線の複数の位置で同じファラデー深度をもち、これは FDF に影響を与えるため、FDF は磁場の形状に関する情報を持つことがわかる。

1. Brentjens M. A., de Bruyn A. G., A&A, 441, 1217, 2005
2. Pasetto A., Carrasco-González C., Gómez J. L., Martí J.-M., Perucho M., O'Sullivan S. P., Anderson C., et al., ApJL, 923, L5, 2021

## 銀河の乱流磁場に関するパワースペクトル解析

三城 洋平 (熊本大学 自然科学教育部理学専攻 M1)

普遍的に身の回りに存在している磁場は実は宇宙の進化や銀河構造を知るための重要なファクタである。磁場が宇宙構成の要因となるガスの流れを引き起こし、それが銀河形成に影響し、果ては銀河進化に結びついたりと考えられているからである。

ある天体からのシンクロトン放射のファラデー回転を観測することによって、天体に付随する磁場についての視線合計量を測ることができる。ファラデー回転は放射の偏波角が視線に平行な磁場によって回転する現象である。さらに観測量である偏波強度を逆フーリエ変換し、Rotation Measure (RM) 空間における偏波強度分布 (FDF) を解析する、[1] ファラデーモグラフィと呼ばれる手法を用いて磁場の 3 次元空間分布を調べることができる。RM とは、視線に平行な磁場や熱的電子密度の視線方向積分を与える物理量である。FDF は視線方向の磁場や偏波源の情報を持つ

ている。

FDFには磁場や偏波源、ガスなどの物理的な情報が複雑に入り込み、FDFからそれらの情報を抽出することが難しい。そこでRMの分散やFDFのパワースペクトルなどの統計量を計算し、その結果から何を引き出せるのかが私の研究の主軸である。本研究では、乱流磁場、一様なガス密度、一様な偏波放射を持つシンプルな銀河モデルを仮定し、解析的にFDFを計算する。そこからRMの分散やFDFのパワースペクトル、FDFのモーメントなどの統計量を計算して、物理的な情報がFDFから引き出せないかシミュレーションする。先行研究 [2] では、空間を有限の大きさを持つセルに分ける離散的なモデルを用いて行われたが、今回は連続的なモデルを使って数値シミュレーションを行う。

1. Brentjens & de Bruyn, A&A, 441, 1217-1228, 2005
2. Ideguchi et al, ApJ, 843, 146 (12pp), 2017

## 数値シミュレーションで迫る銀河中心コアの進化とその起源 仲野 友将 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 M1)

天の川銀河の中心において超大質量ブラックホール (SMBH) が観測されたように、多くの銀河の中心には SMBH が存在すると考えられている。しかしながら、このような、SMBH を含む銀河の形成メカニズムはいまだに理解されていない部分が多い。

銀河中心の星が緩和状態にあるとき、星の数密度の分布は中心に向かって増加することが予想されるが、天の川銀河の観測 (Buchholz et al. 2009 など) から、中心における晩期型星の数密度は減少傾向にあり、コアを形成していることが示された。これは、我々の天の川銀河が緩和過程の途中にあることを示唆しており、銀河の形成メカニズムを理解する上で重要な観測結果であるといえる [1]。

本講演では、このような銀河中心コアに焦点を当て、その進化を数値シミュレーションによって追った、Merritt. (2010) のレビューを行う。この論文では、非等方的なコアを初期条件とし、軌道平均した Fokker-Planck 方程式によって 10 Gyr (~宇宙年齢) 以上の長時間スケールで進化を追っている。この計算の結果、はじめ、1.0 pc 程であったコアは、10 Gyr ほど経過したころには 0.5 pc 程度にまで小さくなり (現在の天の川銀河のコア ~ 0.5 pc)、そのさらに 10 Gyr 後には数密度  $\rho \sim r^{-7/4}$  のカスプを形成するであろうことが示されている。

一方で、初期コアの形成についてはいくつかのモデルが考えられており、その一つとして、SMBH を持った銀河同士が衝突し、ブラックホール連星を作ることで銀河中心付近の星を遠方に飛ばすモデルがあげられる。本講演では、近年観測された赤方偏移  $z \approx 2$  での大質量銀河同士の多重合体過程についても議論し [2]、今後の我々の数値シミュレーションによる計画について紹介する予定である。

1. Merritt, D. ApJ, 718, 739, 2010

2. Joseph F.Henaawi et al., Science, 348, 779, 2015

## すばる望遠鏡/HSC 用狭帯域フィルター NB515 で探る M31 恒星ハローの構造とその性質

小上 樹 (総合研究大学院大学 D1)

銀河の恒星ハローには、銀河形成時に潮汐崩壊した矮小銀河や球状星団の残骸である恒星ストリームが存在する。恒星ストリームは、その力学時間の長さから降着時の化学動力学情報を保持し続けており、銀河形成史を解明する手がかりとなる。銀河系近傍に位置する M31 の恒星ハローには、現在までで 10 個以上のストリームが確認されており [1]、銀河形成を理解する格好の観測対象である。しかし、M31 ハローは低銀緯に位置するため、淡く暗い恒星ストリームが前景にある銀河系円盤の主系列星に埋もれてしまい、詳細な構造を明らかにすることは困難であった。これを解消するために、すばる望遠鏡/HSC 用狭帯域フィルター (NB515) での観測が行われた。NB515 を用いることで前景にある銀河系主系列星を恒星物理に則って除去することができ、M31 ハローにある恒星ストリームの真の 3 次元空間分布を捉えることができる。

本講演では、HSC/NB515 を用いた M31 の主要な恒星ストリームの距離推定結果と今後の展望を紹介する。なお主要な結果は以下となる。

- (1) ハロー東側に位置する 2 つのストリームと南東に位置する巨大なストリームは、M31 の手前 ( $\sim 750\text{kpc}$ ,  $\sim 770\text{kpc}$ ) から後方 ( $\sim 800\text{kpc}$ ,  $\sim 850\text{kpc}$ ) にかけて分布するような空間勾配を示していた。
- (2) ハロー西側にあるシェル構造と南側にあるクランプ構造は、M31 よりも後方 ( $\sim 800\text{kpc}$ ) に分布し、ハロー北西にあるストリームと東側にあるシェル構造は、M31 の手前 ( $\sim 750\text{kpc}$ ) に分布していた。
- (3) M31 サブ構造が未検出である領域の距離推定結果は、M31 円盤の距離 ( $\sim 785\text{kpc}$ ) と概ね一致する結果であった。

1. McConnachie, A. W., et al. ApJ, 868, 55, 2018

## 精密 X 線分光を用いた宇宙大規模構造における中高温銀河間物質の探索 大豆生田 創 (立教大学 M1)

この宇宙の物質・エネルギーはダークエネルギー・ダークマターが 96 %、残りの 4 % をバリオンが占めているとされているが、このバリオンの半分は発見されていない。これをダークバリオン問題と呼び、宇宙論における未解決問題の 1 つとされている。現在、ダークバリオンの候補とされているのが温度が  $10^6\text{K}$  程度の中高温銀河間物質、WHIM (Warm-Hot Intergalactic Medium) であり、銀河の集合であるハローの周りや大規模構造のフィラメント上に分布していると考えられている。WHIM は希薄で広域に分布しているため、将来の精密 X 線分光観測により、近傍の熱的放射と宇宙論的な WHIM からの放射を切り分けることで精密観測が可能であると考えられている。我々は、*illustrisTNG* という宇宙論的シミュレーションを用いて、シミュレーション内のハローと

実際に X 線天文衛星「すざく」で観測された銀河団との物理量の比較を行った。また、パーシステントホモロジーを用いた幾何学的な方法で宇宙論的進化の定量化も試みた。

## ダークマターサブハローの衝突頻度の解析

大滝 恒輝 (筑波大学物理学学位プログラム D2/筑波 大学情報理工学位プログラム M2)

銀河形成の標準モデルである Cold Dark Matter に基づいた階層的構造形成論は、宇宙の大規模構造のような大スケールの観測的性質を再現できているが、銀河スケール以下ではいくつかの矛盾が指摘されている。特に missing satellite 問題は、天の川銀河サイズのダークマターハローに付随するサブハローの個数に関する理論的な予測と、天の川銀河内で観測された矮小銀河の個数が大きく異なるという未解決問題として知られている。この問題に対し、ダークマターサブハロー (DMSH) と銀河の衝突過程を観測することで、DMSH の存在を見出す可能性が示唆されている。そのため、DMSH と銀河の衝突頻度を定量的な解析することが重要となる。さらに Otaki & Mori [1] では、DMSH 同士の衝突によって、ダークマター欠乏銀河やダークマターを多く含む矮小銀河が形成される条件を見出し、それらがシミュレーションで形成されることを示した。したがって、DMSH 同士の衝突頻度も missing satellite 問題を考えるためには非常に重要である。

本研究では、天の川銀河サイズのホストハロー内を運動するサブハロー同士の衝突頻度を、解析的手法と数値シミュレーションを用いて調査した。解析モデルでは、NFW プロファイル [2] の密度分布を持つホスト銀河の分布関数から、サブハロー間の相対運動の確率分布と衝突頻度を推定した。その結果、1 Gyr あたり数回程度の衝突現象が発生していることを示した。さらに、Ishiyama et al. [3] の宇宙論的  $N$  体シミュレーションの結果をもとにサブハローの軌道をシミュレーションした。それらの衝突回数を測定することで、DMSH 同士、銀河同士、DMSH・銀河の衝突回数を定量的に解析した。本講演では、解析モデルの詳細とシミュレーション結果との比較について報告する。

1. Otaki, K., Mori, M., JPCS, 2207, 012049, 2022
2. Navarro J. F., et al., ApJ, 462, 563, 1996
3. Ishiyama T., et al., MNRAS, 506, 4210, 2021

## 中間赤方偏移における極端に大きな星形成率を示す銀河種族の探査

佐久間 昂太 (東北大学理学研究科 M2)

星形成率が  $500 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  を超える、極端に大きな星形成率を示す銀河は、サブミリ波などでの探査により高赤方偏移 ( $z > 1$ ) では多数見つかっているが、より小さい赤方偏移ではほとんど見つかっていなかった。このような銀河は可視域で暗く、これまでの広域探査では見逃され、統計的に過小評価されている可能性がある。

本研究では、赤外線天文衛星「あかり」の全天探査で得られた遠赤外線カタログに可視光 SDSS および中間赤外線 WISE のカタログを組み合わせ、15,545 個の遠赤外線天体のカタログを構築し

た。そのうち、約半分の天体については SDSS のスペクトルから分光的赤方偏移の情報が得られたが、残りの天体については測光的赤方偏移の情報のみであった。測光的赤方偏移の情報から大きい星形成率が示唆される 42 個の銀河について、私たちはせいめい望遠鏡 KOOLS-IFU を用いた追観測を行い、分光的赤方偏移を決定した。

遠赤外線銀河について、分光的及び測光的赤方偏移の情報に基づき、CIGALE を用いたスペクトルエネルギー分布フィッティングを行い、それぞれの星形成率の推定を行った。また、同じ共動体積となる赤方偏移のビン ( $0.1 < z < 0.4$ ,  $0.4 \leq z < 0.51$ ,  $0.51 \leq z < 0.62$ ) をとって星形成率の分布を比較したところ、低赤方偏移側において極端に大きな星形成率を示す銀河の数は減少することが分かった。今回見つかった中間赤方偏移に存在する極端に大きな星形成率を示す銀河は、高赤方偏移で多く見られる同様の星形成活動の物理的なメカニズムを紐解く上で鍵となる可能性がある。

## X 線宇宙望遠鏡 eROSITA による X 線前景放射と銀河団ガスの観測への影響 関戸 翔太 (東京理科大学 M1)

銀河団ガスの加熱史を明らかにすることは、銀河団の進化過程・宇宙の構造形成を理解する上で重要である。銀河団外縁部などからの低輝度な放射の解析結果は、解析天体以外からの X 線前景放射の影響を受けやすく、これらを正確に評価する必要がある。一般的に前景放射として、銀河系に広がる高温ガス、太陽風と冷たいガスとの相互作用による太陽風電荷交換反応などが考えられてきた。また、新たにすざく衛星による一部の領域の観測から 0.8 – 1.0 keV 程度の放射 (1 keV 成分と呼ぶ) の存在が報告された [1]。この放射は、これまでに知られている高温ガスより温度が高く、銀河団外縁部や銀河群の温度と近いため、銀河団外縁部の放射と区別することが難しい。また、地球近傍や太陽系からの太陽風由来であるか、銀河系の高温ガス由来のものであると予想されているが、その起源は不明である。

この放射成分の正体を探るために、X 線宇宙望遠鏡 eROSITA の観測データを解析する。eROSITA は 2019 年 7 月に打ち上げられた望遠鏡で、多くの観測衛星は地球近傍を周回する軌道であるのに対して、太陽 – 地球 の第 2 ラグランジュ点周りを周回する軌道である。そのため、地球近傍の太陽風起源の放射の影響を受けない。また観測視野が広く、仮に観測中にバックグラウンドが変化しても、観測対象の天体とそこから十分離れたバックグラウンドが支配的な領域が同時に観測できるため、影響を受けにくい。

本研究では、eROSITA の早期観測データで公開されている銀河団 2 天体と、背景 1 領域について、1 keV 成分が eROSITA においても観測されるかを調べた。また、銀河団ガスの温度分布について、1 keV 成分の存在が与える影響について調べた。本公演では、1 keV 成分をすざく衛星の結果と比較し、その存在と起源について議論する。また、1 keV 成分が銀河団外縁部の測定に与える影響についても議論する。

1. Yoshino et al., PASJ, 61, 805, 2009

## Jeans 解析による Self-Interacting Dark Matter に対する制限

篠原 良太 (早稲田大学 M2)

Dark Matter (DM) の物理的なモデルとしては、無衝突を仮定した Cold Dark Matter (CDM) モデルが  $k \lesssim O(1) \text{ Mpc}^{-1}$  のスケールで観測とよく一致している [1]. しかしながら、矮小銀河のスケール ( $k \gtrsim O(1) \text{ Mpc}^{-1}$ ) では、観測とシミュレーションとの間の不一致が存在することもまた知られている (Small-Scale Problem) [2]. Small-Scale Problem の解決策の 1 つとして、DM 粒子間に重力以外の相互作用を導入した Self-Interacting Dark Matter (SIDM) [3] と呼ばれるものがある.

本講演では、銀河の視線方向の速度分散を用いて SIDM の性質 (特に、DM 粒子同士の散乱断面積  $\sigma/m$ ) を調べた論文 [4] に関して、その手法と結果をレビューする. 視線方向の速度は観測可能なデータである一方、理論的な SIDM の性質を仮定して SIDM ハローを構築すれば、その重力ポテンシャル下で運動する恒星系の視線方向速度分散プロファイルが分かる. これらの観測と理論予言を比較することで、その銀河において好まれる SIDM の性質が分かるのである.

また、本論文 [4] では、Ultra-faint Dwarfs (UFDs) の観測データを用いている. UFD は DM 主体の銀河であり、星形成が活発ではない. そのため、UFD のハローはバリオンの影響を受けづらく、DM の性質を調べるのに都合の良い天体である.

最後に、この研究の発展の方向性として、SIDM の相互作用のモデル自体に対する制限ができることについて、[5] を参考に述べる.

1. Planck Collaboration. *Astron. Astrophys.* 2020, 641, id. A1.
2. Bullock, James S.; Boylan-Kolchin, Michael. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2017, 55(1), p. 343-387.
3. Spergel, David N.; Steinhardt, Paul J. *Phys. Rev. Lett.* 2000, 84(17), p. 3760-3763.
4. Hayashi, Kohei et al. *Phys. Rev. D.* 2021, 103(2), id. 023017.
5. Tulin, Sean; Yu, Hai-Bo. *Phys. Rep.* 2018, 730, p. 1-57.

## HSC-SSP データを用いた天の川銀河トモグラフィ

鈴木 善久 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M2)

現在の標準シナリオでは、天の川銀河 (MW) のような銀河は小銀河が重力相互作用による合体・降着を繰り返すことで形成されてきたと考えられている. この痕跡の位相空間上の緩和時間は 100 億年以上と長いと、銀河全体を覆う希薄な球状の領域であるハローに今なお存在しているのではないかと理論上示唆されてきた.

大規模観測の進展により、このような痕跡を観測的に調査可能な時代が到来している. 特に私たちの属する天の川銀河 (MW) が注目されている. 何故ならば、小さな銀河が母銀河に合体・降着する際に潮汐力で破壊されていく現場を恒星ストリームやサブ構造として直接観測可能だからである. 現状 MW 中心から 20-30kpc 以内のハローの構造およびサブ構造については、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) や Gaia 衛星によって取得されたデータに基づいて化学動力学の観点から理解

が進みつつある一方で [1][2]、MW 外縁部のハロー構造については未解明の部分が多い。

今回私たちは広視野かつ深い測光が特徴的な Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program (HSC-SSP) の全データを用いて、MW 外縁部のハローの構造に関する調査を行った。恒星までの距離推定には恒星までの測光距離を用いた [3]。その結果 70kpc の距離にある天体を誤差約 20%以内で決定可能となった。ここで得られた MW 内の恒星の 3次元の位置情報に基づいて、この全観測領域における MW のトモグラフィー (断面図) を初めて作成した。本講演ではこの結果をもとに、ハローの大局的な構造やサブ構造の 3次元構造について議論する。

1. Jurić et al., ApJ, 673, 864, 2008
2. Helmi et al., Nature, 563, 85, 2018
3. Ivezić et al., ApJ, 684, 287, 2008

### 3次元多層 ISM に対する AGN フィードバック効率の内部マッハ数依存性 田中 怜 (筑波大学 M1)

本研究は、AGN の運動エネルギー及び熱エネルギーの比率と ISM へのフィードバック効率の相関関係を検討するものである。近年の研究で、AGN のフィードバックサイクルが銀河形成に重要な役割を持つことが提言され始めた。現在多くのシミュレーションにより、AGN の様々なパラメータがホスト銀河の星間ガス雲へ与える影響が解明されてきている。特に AGN のパワーとフィードバック効率の間には顕著な相関が存在し、AGN フィードバックサイクルシミュレーションの規模を決定する重要なパラメータの一つと言えるだろう。[1][2] ところで、同じエネルギーであっても運動エネルギーと熱エネルギーでは、ISM に対するフィードバックの物理が異なる。同量のエネルギーを放出しても、その成分によっては違う結果が得られる可能性があるのだが、これについては詳しい研究がされていない。したがって本研究では、AGN 放出する総エネルギーについて運動エネルギーと熱エネルギーの比率を内部マッハ数として定義、パラメータ化し、ホスト銀河へのフィードバック効率に対する寄与を調べる。

本研究は、[2] による三次元 AGN フィードバックサイクル流体シミュレーションから発想を得た。星間ガス雲を持った多層 ISM に AGN-wind を注入し、両者の相互作用におけるマッハ数依存性を確かめる。依存性の有無如何に関わらず、AGN フィードバック効率における内部マッハ数依存性の検証は、今後の AGN フィードバックサイクルシミュレーションの発展に貢献するものであると考える。

1. Wagner & Bicknell, 2011
2. Wagner et al., 2012

## 高い鉄酸素比を持つ極金属欠乏銀河の元素組成比とその起源

渡辺 くりあ (総合研究大学院大学 修士課程 1年)

宇宙の化学進化において、銀河の星や超新星爆発などが重元素をもたらした。そのため、銀河の元素組成比には過去の星形成史の情報が隠されている。特に、金属量が低く、若い極金属欠乏銀河 (EMPG) の元素組成比は銀河形成初期段階の星形成に知見を与える。最近、金属量が  $0.016Z_{\odot}$  と低いにも関わらず、非常に高い鉄酸素組成比  $[\text{Fe}/\text{O}] \sim -0.02$  を持つ EMPG が報告された [1]。このような EMPG の高い  $[\text{Fe}/\text{O}]$  は、星年齢が若く、窒素酸素組成比  $[\text{N}/\text{O}]$  が低いため、Ia 型超新星による鉄生成では説明できない。先行研究では、対不安定型超新星 (PISN) や爆発エネルギーが大きい極超新星爆発 (HN) が豊富な鉄を生成した可能性が指摘されている [2]。PISN が存在する場合は、Fe だけでなく S や Ar が豊富に存在するはずだが、これらの元素組成比は調べられていない。本研究では、O に対する S や Ar の組成比、 $[\text{S}/\text{O}]$  と  $[\text{Ar}/\text{O}]$  について新たに化学進化モデルを作り、観測結果と比較して、PISN の存在を検証した。モデルは、初期質量関数を仮定し、理論的に得られた超新星爆発の Yield を用いた。比較する銀河は、最近観測され、鉄が多い EMPG のうち  $[\text{S}/\text{O}]$  と  $[\text{Ar}/\text{O}]$  が求められた 4 つの EMPG である。4 つのうち 1 つの EMPG (J0811) は特に鉄が多く  $[\text{Fe}/\text{O}] \sim 0.2$  で、他の EMPG は  $[\text{Fe}/\text{O}] \sim -0.4$  だった。モデルと観測結果の  $[\text{Fe}/\text{O}]$  と  $[\text{S}/\text{O}]$ 、 $[\text{Ar}/\text{O}]$  を比較したところ、J0811 を除く 3 つの EMPG は HN で元素組成比を説明できた。一方で、J0811 は PISN と同程度の  $[\text{Fe}/\text{O}]$  を持つが、S と Ar が PISN の予想値より少なく、PISN はもとより典型的な HN や重力崩壊型超新星でも説明できない。本発表では J0811 の特異な元素組成比を示すと共に、その起源について議論する。

1. Kojima et al., *APJ*, 913, 22, 2021
2. Isobe et al., *APJ*, 925, 111, 2022

## 銀河 NGC 1068 における 60 pc 分解能での HCN(1-0)/CO(1-0) 強度比による高密度ガスの研究

渡邊 友海 (福島大学 M2)

銀河の進化を知るには、様々な銀河について活動的銀河中心核 (Active Galactic Nucleus: AGN)、星形成、およびその母体となる分子雲の状態を調べることが重要となる。そこで本研究は、典型的な近傍セイファート銀河の 1 つである NGC 1068 に着目し、分子ガスを調べることにより、この銀河での星形成の状況を明らかにし、銀河の進化の研究に繋げる情報を得ることを目指す。NGC 1068 は、中心部に巨大ブラックホールがあり、それを取り囲むガス (Circumnuclear disk: CND) (半径  $\sim 0.2$  kpc) がある。また、CND を取り巻くリング状の腕 (半径  $\sim 1$  kpc) には、大質量星が多数形成されている爆発的星形成領域 (Starburst ring: SBR) があり、星形成とその母体となる高密度ガスの関係を研究するのに最適である。そこで、高密度ガスをトレースするために、HCN 分子を取り上げた。(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: ALMA) 60 pc の高分解能かつ高感度で得られた HCN( $J=1-0$ )、CO( $J=1-0$ ) のデータを使い、HCN/CO 強度比の分布図を作成した ( $J$

は回転量子数)。

現在までの解析で、以下の結果を得た。(1)CND では HCN と CO の両方で強度が強かったが、SBR では HCN が CO に対して相対的に弱いことがわかった。(2)CND の外側 0.1 kpc の領域で、強度比の値が 1.2 と高い値を示した。これは、渦巻銀河の典型値である 0.1 と比べると異常に高い値である。中心部には outflow(中心部からはガスが吹き出している)があり、それと関連している可能性も示唆される。これに対して、SBR では比は 0.05~0.15 程度であり、典型値に近い。本講演では、CND の外側の異常な HCN/CO 強度比の原因を考察し、SBR 内での比の微妙な変化についても言及する。

## X 線解析で解明するスターバースト銀河 M82 から吹き出す高温電離ガスの銀河間空間への重元素輸送

八木 雄大 (東京大学 JAXA/ISAS D2)

活発な星生成が行われているスターバースト銀河では大質量星の超新星爆発に伴い、星内部で生成された重元素が銀河風により円盤領域から周辺領域へ輸送される。横向きの円盤銀河である M82 は銀河系近くにある典型的なスターバースト銀河で大規模な銀河風をもつ。銀河面と垂直な方向に吹き出す高温電離ガスが X 線により観測されているが、その複雑な系の構造は理解されていない。[1] では、2005 年のすざく衛星による円盤領域を含む北側銀河風の観測データを用いた。複雑な円盤領域の放射を電離平衡プラズマ放射モデルの重ね合わせとしてフィットする手法では、エネルギースペクトルは再現できなかった。銀河風領域の解析では、すざくの低い角分解能の影響による円盤領域からの強い放射の漏れ込みを考慮する必要がある。X 線望遠鏡の応答関数の広がりから漏れ込み評価を行い、銀河風領域の重元素組成比 O/Fe, Ne/Fe, Mg/Fe は位置依存性がないと結論付けた。しかし、再現できていない円盤放射モデルを用いて銀河風領域への漏れ込み量を評価していたため、プラズマ温度と重元素の評価に不定性が残っている。すざくは 2014 年に追加観測を行い、銀河風の北側領域で観測時間を約 2 倍とし新たに南側領域も観測した。私は南北方向の銀河風領域を円盤領域からの距離ごとに分割し、各領域でのエネルギースペクトルを解析することで重元素の輸送について調べた。円盤領域では複雑な放射モデルを仮定せず、最も簡単な単温度の放射モデルを用い各重元素の輝線強度を求めた。また、より正確な放射源を設定し応答関数の広がりをも求め、正確な漏れ込みの評価を行い、銀河風領域からの純粋な放射成分を求めた。そして円盤領域から銀河風領域に重元素を含む冷えたガスが広がっていることを示唆した。本講演ではスターバーストにより起こるアウトフローの観測的知見と XRISM への期待を報告する。

1. Konami, S., et al., PASJ, 63, sp3, S913-S924, 2011

## 量子コンピューターで解く無衝突ボルツマン方程式

山崎 壮一郎 (東京大学 M1)

銀河、銀河団、宇宙の大規模構造などのシミュレーション手法の一つに、無衝突ボルツマン方程式の数値シミュレーションが挙げられる。この手法は、従来から採用されてきた N 体シミュレー

ションにあった人工的な二体緩和や物理量に含まれるショットノイズなどの問題がなく、物質の動きを正確に追うことが可能である。しかし、無衝突ボルツマン方程式の数値シミュレーションは空間3次元+運動量3次元の6次元位相空間での数値シミュレーションをすることになるため、古典コンピューターでは計算資源に限界があり大規模なシミュレーションは行うことが不可能である。この限界を超える手段として量子コンピューターを用いた数値シミュレーションが提案されたが、空間依存のある力を扱うことはできず、実用性が低かった。[1]

そこで、空間依存のある力の分布に対しての無衝突ボルツマン方程式の数値シミュレーションアルゴリズムを新しく考案した。具体的には、reservoir method と呼ばれる古典的な数値シミュレーション法を量子アルゴリズムに落とし込んでいる。力として重力を扱うこともできるようになったため、実用性の高いアルゴリズムになったと言えるだろう。この量子アルゴリズムでは古典的な場合に比べて、指数的に少ない空間計算量と改善された時間計算量でシミュレーションを行うことができる。本講演では、この量子アルゴリズムの概要とテスト計算の結果を議論する。

1. Todorova & Steijl, Journal of Computational Physics, vol409, pages109347, year2020

## アーカイブデータを用いた Changing-Look Quasar (CLQ) の探査、及びフォローアップ観測 及川 雄飛 (京都大学 M1)

背景：quasar の構造を知ることは、超巨大ブラックホールの形成過程の解明に繋がる。特に、広輝線領域はブラックホール質量推定に使用される重要な構造である。広輝線領域の構造を知るために、Changing-Look Quasar (CLQ) と呼ばれる、広輝線領域が数年の短期間で大きく変動する天体に着目した。

目的：CLQ の変化過程を調べることで、広輝線領域の構造や運動情報が得られることが期待できる。しかし、従来見つかっている CLQ のほとんどは偶発的に発見されたものであり、変化過程の観測には間に合っていない。そこで本研究では、現在進行形で Changing-Look を引き起こしている CLQ を探査し、フォローアップ分光することを目指した。

手法：quasar のリストである milliquas に含まれていて、Zwicky Transient Factory DR4 に存在する約 280 万天体の光度曲線を解析した。直近 2~3 年の光度曲線から、増光している 4 つの quasar を候補とし、フォローアップ測光観測で確かめた。増光が確認できた 1 天体に対して分光観測を複数回行う。広輝線領域の楕円形円盤モデル [1] を適用することで Ha, H $\beta$  広輝線領域の内縁半径・外縁半径・離心率・disk の視線角度の変化を測定した。

結果：4 候補天体中、増光中の CLQ を 1 天体発見することに成功した。さらに、フォローアップ分光観測の結果、20 年前の分光結果と比較した際に disk のより内側が明るくなっていることが判明した。

結論：ZTF を用いた CLQ の探査手法が有効であることを実証した。さらに本手法では、増光過程の天体を探査することが可能となるため、増光に伴う広輝線領域の変化過程を観測的に明らかにすることに成功した。

1. Eracleous et al, 1995, Apj, 438, 610

## 乱流銀河円盤の進化

本間 陽大 (新潟大学 宇宙物理学研究室 M1)

私の講演では [1] の文献を主として、乱流銀河円盤の進化についての紹介をします。

様々な時間及び質量の星から出される、円盤銀河における乱流の駆動を、解析的な「浴槽」モデルを用いて解析をしました。ガスと惑星円盤は、トゥームレ不安定な状態にあると考えられています。乱流は、その散逸に加えて、恒星フィードバック、ディスクの不安定性による内向きの輸送、およびストリームを介した塊状の降着の3つのエネルギー源との間のエネルギーの釣り合いによって維持されていると考えられています。エネルギーをつり合わせるために、ディスクは降着した塊の質量分率または乱流粘性トルクパラメータのいずれかを自己調整します。ストリームの運動エネルギーが乱流に変換される効率は、自由パラメータ  $\xi_a$  を用いてあらわします。3つのエネルギー源の寄与が同じ領域内にあり、すべてのディスクにおいて常にこのうち2つまでの要素が主になるを発見しており、 $z=0$  で、 $\leq 10^{12} M_{\odot}$  ( $z \sim 2$  で  $\leq 10^{11.5} M_{\odot}$ ) に進化するハローにおいて、フィードバックは常に銀河の主な推進力になります。この質量を超えると、主な推進力は、それぞれ  $\xi_a$  が非常に低い値なら輸送、非常に高い値なら降着です。 $\xi_a(t)$  が時間的に減少すると仮定すると、現在の質量  $10^{12} M_{\odot}$  のハロー内の銀河は、質量が  $\geq 10^{11.5} M_{\odot}$  となる中間赤方偏移 ( $z \sim 3$ ) で降着優位から輸送優位へ移行します。この研究における予測された星形成速度とガス速度分散との関係は、観測結果と一致していることが分かりました。[1]

1. Omri Ginzburg, Avishai Dekel, Nir Mandelker and Mark R. Krumholz, MNRAS, 513, 6177, 2022

## 広域 X 線観測で探る電波銀河の中心核構造

中谷 友哉 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

銀河とその中心の超大質量ブラックホール (Supermassive black hole; SMBH) の共進化の機構は、現代天文学の重要な未解決問題の一つである。この両者を結びつける鍵となるのが、SMBH への莫大な質量降着の現場である活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) である。特に、質量供給源であるトーラスの構造を母銀河の性質と関連づけて調査することは、SMBH と銀河の成長を理解する上で極めて重要である。その際、高い透過力を持ちガスやダストを含む全物質の構造を調査できる X 線は強力な手段となる。実際、X 線を用いた近傍 AGN のトーラス構造に関する調査は広く行われてきている [1][2][3]。しかし、強力なジェットを放出し、周辺環境へフィードバックを考える上で重要な種族である電波銀河の AGN トーラス構造については、未だ系統的な調査がなされていない。

そこで本研究では、Swift/BAT による硬 X 線サーベイで検出された AGN の中で、X 線に対する電波強度の比が特に大きな天体に着目した。先行研究によって SMBH の質量が求められている 8 天体について、X 線天文衛星 XMM-Newton, Suzaku, Swift, Chandra, NuSTAR による観測データを用いて、広帯域 X 線スペクトル解析 (0.2 – 70 keV) を行った。現実的なトーラス構造を再現したモデル XCLUMPY[3] を用いることにより、全 8 天体についてエディントン比 (SMBH 質量で規格化

した AGN 光度) とトーラスの幾何構造 (SMBH を囲む立体角) を推定した。

その結果、これらの電波銀河は、同じエディントン比をもつ電波で明るくないセイファート銀河 [5] と比べて、ほぼ同様のトーラス構造をもつと考えると矛盾しないことが分かった。この事実は、(1) AGN ジェットの生成される条件はトーラスという pc スケールの周辺環境と関連しないこと、(2)AGN ジェットによるトーラス領域への影響は無視できることを示唆する。

1. Tanimoto, *AstHe*, 114, 514-522, 2021
2. Yamada, *ApJS*, 257, 61-67, 2021
3. Ogawa, *ApJ*, 906, 19, 2021
4. Tanimoto, *ApJ*, 877, 16, 2019
5. Ricci, *Nature*, 549, 488-491 2017

## **JWST 撮像観測シミュレーションから探る近傍 LIRG NGC7469 の銀河核領域における解析手法の検討** **星岡 駿志 (広島大学 M2)**

大質量銀河は進化の過程において、1 度は銀河同士の合体に起因する爆発的な星形成を経験したと考えられている。高光度赤外線銀河 (Luminous Infrared Galaxies, LIRGs) は銀河合体の様々な段階を網羅しており、さらに宇宙初期の星形成を支配していることが示唆されているため [1]、星形成や銀河進化の過程を理解するための理想的なターゲットである。最新の赤外線宇宙望遠鏡、James Webb Space Telescope (JWST) による高感度・高空間分解能の近傍 LIRGs の観測から、星形成や銀河進化過程の理解が大きく進むことが期待される。本研究では JWST で観測される近傍 LIRGs のうちの 1 つである NGC 7469 を対象に観測装置 MIRI の撮像観測シミュレーションを行った。この天体は活動銀河核とその周辺半径約 500pc の距離にある星形成リングから銀河全体の 2/3 の赤外線が放射されている近傍 LIRG であり [2][3]、活動銀河核と星形成の関係を調査することに適している。これを先行研究の地上中間赤外線観測での結果に基づいてシミュレーションで再現し、活動銀河核とその周りの広がった放射を正確に抽出するための解析手法を検討した。本講演では、アパーチャー測光、ガウス関数やモファット関数のフィッティング、天体の構造を階層構造として同定することができる *AstroDendro* によるそれぞれのフラックスの抽出精度を議論する。これを実際の観測に応用することで、精度の高い解析手法で活動銀河核とその周りの広がった放射の正確な物理量を得ることができ、活動銀河核と星形成の関係への理解を進めることができる。

1. Madau&Dickson,2014,ARA&A,415M
2. Diaz-Santos et al.,2007, APJ,661,149
3. Ramos et al.,2011, APJ,731,92

## 高赤方偏移 ( $z > 3$ ) に存在する大質量 Quiescent 銀河の分光学的観測とその祖先 柿元 拓実 (総合研究大学院大学 M1)

近年の深い近赤外線観測によって、高赤方偏移に存在する Quiescent 銀河が測光的に多く発見されてきている。一方で、 $z > 3$  に存在するこのような天体からの光は微かであるため、高赤方偏移においては分光学的に確認された候補の数は少ないままである [1]。これらの銀河は典型的に大質量で、形成初期段階において非常に速い速度で星質量を形成している可能性が高い。しかしながら、測光的な研究では過去の星形成史を明確に推測できないため、どのような天体がより高赤方偏移における祖先となり得るのか明確に出来ていない。

そこで、高赤方偏移に存在する Quiescent 銀河の候補のスペクトルを深く観測する研究が進んできている。例えば Forrest et al. 2020[2] では、 $z = 3.493$  で確認された最も質量の大きい Quiescent 銀河の星形成史をスペクトルから推定し、 $5 < z < 7$  におけるダストの多い星形成銀河が示す星形成率や恒星質量と一致することを確認した。一方で、宇宙論的流体力学シミュレーション (Illustris TNG300[3]) では、このような銀河は再現できず、現在想定されているよりもより速いクエンチング機構が必要なことが確認された。また、Valentino et al. 2020[3] では、 $3.7 < z < 4$  の3つの大質量 Quiescent 銀河について星形成史を推定し、 $z > 4$  に存在するサブミリ銀河の特性との一致だけでなく、星形成の主系列に存在するような普通の星形成銀河も祖先となり得る可能性を導いた。

私は、今後さらに高赤方偏移の  $z > 4$  に存在する Quiescent 銀河のスペクトルから星形成史を求め、どのような天体が祖先となり得るのか検証していきたいと考えている。より高赤方偏移の天体を研究することで、現在想定されている銀河形成モデルをさらに細かく検証できると考えられる。

1. C. Schreiber et al., A&A, 618, A85, 2018
2. Ben Forrest et al., APJL, 890, L1, 2020
3. Annalisa Pillepich et al., MNRAS, 475, 648-675, 2018
4. Francesco Valentino et al., APJ, 889, 93, 2020

## クエーサーのスペクトルと明るさ変動の関係 名越俊平 (京都大学 D3)

明るさの変動はクエーサーの基本的な特徴であるが、そのメカニズムや他の物理量との関係についての理解は乏しい。我々は、ランダムに見える変動の規則性を解明するために、明るさの変動とスペクトルの特徴との関係を調べた。クエーサーの  $\text{FeII}/\text{H}\beta$  フラックス比と  $[\text{OIII}]\lambda 5007$  の等価幅の間には、Eigenvector 1 と呼ばれる負の相関があることが知られている (1)。本研究では、クエーサーの Eigenvector 1 (EV1) 平面上の位置と、約 10 年後の明るさ変化を可視化することで、両者の関係を明らかにした。まず、Sloan Digital Sky Survey のクエーサー 13,438 個を用いて、EV1 平面上の分布と明るさの変化の関係を図示した。この結果から、クエーサーの後の明るさの変化が、EV1 平面上の位置と明確に関係していることが明らかになった。次に、Changing-Look Quasar として報告された天体を、活動状態で分類して EV1 平面上にプロットした。この結果から、EV1 平

面上の位置は、それぞれの天体の活動度合いに対応しており、明るい状態と暗い状態は EV1 平面上で異なる位置に対応することが分かった。最後に、明るさの変化が激しい複数のスペクトルを持つ天体を用いて、EV1 面上の遷移経路を調べた。この結果、明るくなる天体と暗くなる天体は同じような経路をたどり、活発状態と静穏状態に対応する領域を行き来していることが分かった。これらの分析から、クエーサーの活動はランダムではなく、一定の定常状態を保ちながら活発状態と静穏状態を行き来していることを示した。本研究の結果は、Changing-Look クエーサーのような大きな明るさの変化は繰り返される現象であることを示唆している。

1. Boroson, Todd A. and Green, Richard F, Astrophysical Journal Supplement, 80, 109, 1992

## X 線スタッキングを含む多波長解析が明かす $4 < z < 7$ における星形成とブラックホール質量降着率との相関

松井 思引 (東京大学大学院 修士課程 1 年)

現在の宇宙の銀河の中心に存在する大質量ブラックホール (SMBH) の質量  $M_{BH}$  と銀河の質量  $M_{star}$  には正の相関があります。この相関は両者が共進化してきたことを示唆しています。ところが遠方銀河ではクエーサーと呼ばれるごく一部の非常に重い SMBH を除いて SMBH 質量は測れません。そこで  $M_{BH}$  vs  $M_{star}$  の代わりに測定が相対的に容易なブラックホール降着率 (BHAR) vs SFR に注目するが、BHAR は X 線観測で推定できるが一部の成長率の高い SMBH に限られます。共進化の過程を明らかにするには平均的な銀河をも観測する必要があるため、X 線観測で推定できない銀河に関しては、それらの X 線画像を足し合わせることで平均的な X 線光度を求めることができます (X 線スタッキング)。

Carraro et al. 2020[1] と Ito et al. 2022[2] はこの X 線スタッキングを用いて、遠方銀河の BHAR vs SFR の相関について研究した論文です。その結果  $z < 5$  において両者には相関があると確認できましたが、 $3 < z < 5$  の銀河を一括りで調べているため、母集団が多い  $z \sim 3$  に結果に偏りが生じる可能性があります。また BHAR の  $M_{star}$  依存性に注目しているために、 $M_{star}$  の軽い銀河がサンプルから除かれています。

私の研究ではこれらの先行研究よりも深い観測データ ( $4 < z < 7$ ) かつ低質量の銀河をサンプルから取り除かずに BHAR vs SFR の相関を同様に X 線スタッキングを含む多波長解析により調査します。また今回のサンプルにダークマターハローの見積りもあるので、BHAR vs ダークマターハロー成長率の関連性をも調査することができます。そして研究の解析結果と理論シミュレーションとの比較も検討しています。

1. Carraro R. et al., A&A, 642, 17, 2020
2. Ito Kei et al., ApJ, 929, 19, 2022

## ALMA 観測で明らかにする AGN 遮蔽の動的構造

平澤 凌 (東京都立大学 M1)

ALMA 望遠鏡での従来の AGN トーラス研究は高密度分子ガスを観測していたのに対し、近年では多相星間物質の分布とダイナミクスに着目してトーラスの物理的起源に迫る研究も進んでいる。たとえば最近傍 AGN の一つである Circinus 銀河 (4.2 Mpc, type-2 AGN) における CO(3-2) と [CI](1-0) の 10 pc 分解能観測からは、以下のような AGN 遮蔽モデルが示唆された [1]。—(i) Sub-pc region : AGN の放射圧と X 線加熱に起因する低密度高温イオンガスとダストの outflow、(ii) A few-pc : 低密度原子ガスの outflow、その一部がガス円盤に戻る failed wind、そして AGN をトリガーする inflow が組み合わさって作る幾何学的に厚い fountain 構造、(iii) 10pc-100pc : 高密度原子・分子ガスが構成する幾何学的に薄いディスク—特に (ii) の fountain 構造はトーラスの物理的実体だと期待されている。しかしこの見解は Circinus 銀河の結果に依存し、さらには AGN トーラスによる遮蔽はエディントン比 ( $\lambda_{Edd} \equiv L_{AGN}/L_{EDD}$ ) が  $10^{-3} - 10^{-2}$  程度でピークに達し [2]、 $\lambda_{Edd} \gtrsim 0.1$  で小さくなる (Circinus 銀河は 0.2、[3]) ように、AGN の基本的性質にも依存すると考えられている。そこで本研究では、Circinus 銀河よりエディントン比が小さい Type-2 AGN、NGC5643 ( $\log(\lambda_{Edd}) = -1.3$ ) と NGC6300 ( $\log(\lambda_{Edd}) = -1.9$ ) において、[1] の手法を適用しトーラス構造を調査した。用いるデータは ALMA で取得した 10 pc 分解能の CO(3-2) と [CI](1-0) 輝線で、それぞれ分子、原子ガスの分布を反映する。本発表では、これら 2 相のガスの空間分布と運動の様子、AGN アウトフローの有無、tilted-ring 法を用いた dynamical model の詳細を述べ、Circinus 銀河との比較からトーラス構造のエディントン比依存性について議論する。

1. Izumi et al, ApJ, 867, 48, 2018

2. Ricci, Nature, 549, 488, 2017

3. Are'valo, ApJ, 791, 81, 2014

## ALMA による近傍高光度 AGN の高解像度 CO(2-1) サーベイ観測

池田 裕 (東京都立大学 理学研究科物理学専攻 M1)

銀河の中心には超大質量ブラックホール (Super Massive Black Hole: SMBH) が存在し、銀河全体と相互作用しながら共に進化している。SMBH は大量の質量降着 (fueling) が起こることで成長し、その際に放出されたエネルギーが元となり、SMBH の周辺が活動銀河核 (Active Galactic Nuclei: AGN) として輝く。よって、AGN の徹底観測を通じて質量降着の駆動機構・素課程の物理を解明することは、宇宙史における SMBH 成長の包括的な理解において重要である。銀河合体や銀河の非軸対称性によって駆動された銀河スケールから中心に向かうガス流は、その残存角運動量のために AGN 周辺 10~100pc スケールに核周円盤 (Circumnuclear Disk: CND) を形成することが多くの理論研究で予想されている。実際、近年の観測装置の発達により、CND が多くの AGN で実在することが明らかとなった。さらに、X 線観測から推定される質量降着率は CND スケールの分子ガス量とよく相関する一方、銀河スケールでのガスの量とは相関しないことも明らかとなった [1]。

これは、銀河全体ではなく、CNDこそが SMBH への直接的な質量供給源として機能していることを示し、この領域を詳しく研究することの重要性を訴える結果となっている。しかし、CND スケールで観測されている銀河が少なく、統計として不十分なことや、銀河選定時の偏りが問題であった。そこで本研究では、統計的に有意な結論を得るべく、Swift 衛星の X 線サーベイ観測で選定した 32 天体の近傍高光度 AGN、つまり、活発な質量降着の現場として最適なものに対して、ALMA による $\sim 100$ pc 解像度での CO(2-1) サーベイ観測を行った。本発表では、この高光度 AGN サンプルも含めた CND スケールの分子ガス量と SMBH 質量降着率の相関を、観測データの解析から得られた分子ガスの空間分布や速度構造とともに紹介し、質量降着に対して CND の果たす役割を考察し、フィードバック研究も含めた今後の展望について議論する。

1. Izumi et al, ApJ, 827, 81, 2016

## ガリレイ不変性と流体力学シミュレーションの計算解像度の関係 古谷田 和真 (筑波大学 M1)

近年の研究では、超音速のバルク速度を持つ系において、オイラー流体力学シミュレーションがガリレイ不変性を破るということが主張されてきた。一方、Robertson et al. (2010) では、このような主張を批判的に検証し、計算解像度とガリレイ不変性について議論した。具体的には、オイラーメッシュコードである ART(Kravtsov et al. 2002) と ENZO(Bryan & Norman 1997; Bryan 1999; Norman & Bryan 1999; Bryan et al. 2001; O' Shea et al. 2005) を用いて、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性の発達についてのシミュレーションを行った。また、計算結果の視覚的な比較に加え、解の収束、誤差を定量化し議論をした。本発表では、彼らの研究内容について解説する。

まず初めに、ガリレイ不変性を破る数値拡散について理解するため、接触不連続面における 1 次元流体シミュレーションを行った。1 次元流体シミュレーションの結果について、バルク速度依存性、解像度依存性について確認をした。次に、低解像度のケルビン・ヘルムホルツ不安定性では、バルク速度があるとケルビン・ヘルムホルツ不安定性が発生しないという先行研究 (Springel, 2009) を確認し、シミュレーションのバルク速度依存性、その性質や意味を議論した。最後に、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性の新しいシミュレーションを導入し、解像度や超音速バルク速度を変えて、不安定性の発達の違いについて議論した。その結果、2 次元の流体シミュレーションにおいて、十分な解像度があれば、バルク速度に関係なくケルビン・ヘルムホルツ不安定性が適切に発達することを突き止めた。つまり、高解像度のシミュレーションでは、超音速のバルク速度が存在する場合でも、良いパフォーマンスで収束解を得ることができるということが確認できた。