

2019 年度 第 49 回 天文・天体物理 若手夏の学校  
銀河・銀河団分科会 アブストラクト

嶋川 里澄 (国立天文台 ハワイ観測所)

7月30日 14:30–15:30 B会場

## 研究者バトルロイヤル: 傾向から学ぶ最初の5年間の立ち回り方

14:30–15:00 若手のキャリアパス関連

キャリアパスに関する近年の論文や文科省の資料を参照しながら、若手が長く研究業界に残るためにはどうすれば良いのかについて自身の所見を説明し、参加者と議論する。また現在親しい分野で活躍する若手研究者がどうやって成功したのかについても可能な限り情報としてまとめて紹介する。ハラスメント調査の結果についてもここで簡潔に報告する。

15:00–15:10 10分で分かる銀河団における銀河の形成

私がこれまでに行った銀河団研究について10分にまとめて紹介する。

15:10–15:30 天文学と位相データ解析

スローンデジタルスカイサーベイに始まり、近年のすばる望遠鏡 HSC による大規模探索も含めこれからの光赤外研究分野はデータサイエンスが主流になることが大いに期待される。銀河研究においても機械学習・深層学習を用いたデータサイエンスならではのアプローチが少しずつ行われ始めてはいるものの、国内天文業界におけるデータサイエンスへの理解は業界の性質も相まって依然として薄い。本講演の後半ではそうした背景に触れながら機械学習よりも新しく相補的な位相データ解析と呼ばれる、現在急速に発展している近代的手法について簡単に紹介する。

1. R. Shimakawa, et al., 2017, MNRASL, 468, 21
2. R. Shimakawa, et al., 2018, MNRAS, 473, 1977
3. R. Shimakawa, et al., 2018, MNRAS, 481, 5630

西村 優里 (東京大学 天文学教育研究センター)

7月31日 10:00–11:00 B会場

## 分子輝線から銀河を理解するための“分子雲”の星間化学

星間分子雲には水素や一酸化炭素の他にも、わずかながらホルムアルデヒド、メタノール、シアン化水素など、挙げればきりがなほど多種の分子が含まれている。これらの分子の種類と存在量は、分子ガスが収縮して星が形成される過程で(温度や密度、宇宙線や紫外線の輻射、経過時間などに左右されながら)系統的に変化する。星間化学の目標のひとつは、分子組成を手がかりに、分子雲の物理状態や年齢、星形成活動などの情報を引き出すことである。さて、近年の電波望遠鏡の高感度化、さらには分光計の広帯域化のおかげで、いろいろな銀河のあちこちの領域をターゲットに、分子組成を調べる観測が盛んに行われるようになってきた。こうした観測によって、いままで知られていなかったさまざまな環境ごとの分子組成が明らかにされると同時に、(星形成コアよりも、もう数桁大きなサイズスケールでの)分子雲と分子輝線の関係がいまだよく理解できていないことも浮き彫りにされた。本講演では、(1) 各種の銀河の分子組成の特徴とその現時点での解釈を、私がこれまで取り組んできた低重元素量の矮小銀河のいくつかのケーススタディを中心に概観し、その上で(2) 近年ようやく問題意識がもたれるようになってきた、分子雲の空間構造と分子輝線の関係を10 – 1000 pcのスケールで調べることの重要性と、実際の観測研究の進展について話す。この講演を通じて、多数の分子輝線を活用する手法に関心を持ってもらえたり、星形成がコアのみならず分子雲、ひいては銀河全体からも考えるべきマルチスケールの問題であることを改めて認識してもらえれば幸いである。

1. Y. Nishimura, Y. Watanabe, N. Harada, et al. ApJ, 848, 17 (2017)
2. Y. Nishimura, T. Shimonishi, Y. Watanabe, et al. ApJ, 829, 94 (2016)
3. Y. Nishimura, T. Shimonishi, Y. Watanabe, et al. ApJ, 818, 161 (2016)

## 銀河 a1 ダークマターの自己相互作用を考慮した宇宙の構造形成シミュレーション

蛭子 俊大 (千葉大学大学院融合理工学府数学情報科学専攻情報科学コース 石山研究室 M1)

冷たいダークマター (CDM) モデルは宇宙の大規模構造を精度良く再現する。しかし、およそ銀河やそれより小さいスケールでは観測結果と矛盾が生じている。例えば矮小楕円体銀河などでは、観測で見積もられるダークマターハローの密度プロファイルはコア構造を示すが、CDM シミュレーションで得られる密度プロファイルはカスプ構造であり、カスプ-コア問題と呼ばれる。また銀河系周辺で観測された衛星銀河の数は、CDM シミュレーションの予測より 1 桁以上少ないという問題がある。以上のような問題を解決するため Self Interacting Dark Matter (SIDM) モデルが提案されてきた [1]。SIDM モデルは CDM モデルと異なり、ダークマター粒子が互いに衝突し散乱する。高密度領域で衝突は起きやすく、ハローの中心密度は低下しコア構造が形成され、サブハローは潮汐力により壊され易くなると考えられてきた。

本研究では SIDM モデルを用いた低輝度矮小楕円体銀河スケールハローの高分解能シミュレーションを行い、CDM モデルとの違いを定量化する。そして PFS などの次世代分光観測で SIDM モデルに制限が付けられるか検討する。まず SIDM モデルを用いて孤立した銀河ハローのシミュレーションを行った。SIDM の実装は [2] を採用した。[2] では初期状態に Hernquist モデルが用いられたが、本研究では CDM モデルに基づいた宇宙論的  $N$  体シミュレーション [3] より切り取られたハローを用いた。このハローに対して、衝突断面積の異なる複数の SIDM シミュレーションと CDM シミュレーションを行い、それぞれの結果を比較した。その結果、衝突断面積が大きいほど急速に中心密度が低下しコアを形成するが、同時により短時間でコアが崩壊し、最終的に CDM シミュレーションより鋭いカスプになった。ハローの形状はコアの形成と共に球状に近づくが、コアが崩壊すると再び非等方向性が増加した。サブハローの質量関数、空間分布は全ての結果で大差はなかった。

本講演ではこれらの結果に加え、SIDM による宇宙論的  $N$  体シミュレーションを行った結果も報告する予定である。

1. Spergel, D.N., Steinhardt, P.J., 2000, Phys. Rev. Lett., 84, 3760
2. Burkert, A., 2000, ApJ, 534, L143
3. Ishiyama, T., Fukushima, T., Makino, J., 2009, ApJ, 696, 2115

## 銀河 a2 AGN ジェットによる乱流とガス円盤でのフィードバックの解析

和間 雄司 (筑波大学 宇宙理論研究室 M1)

一般に、ガス密度が高いほど星形成は活発であると考えられるが、高密度ガスが存在しながら、星形成の兆候が見られない銀河が観測的に知られている。3C326-N はその一例であり、速度分散が大きいことなどから乱流による影響が考えられている。数値流体計算のシミュレーションにより相対論的ジェットと ISM の相互作用を調べた先行研究では、ジェット等によって円盤内に強い乱流が発生したことが示されており、本研究では、ジェット由来の乱流が円盤内での星形成を制御するかを調べた。先行研究のシミュレーション結果データを利用し、乱流の程度を表すと考えられる物理量として速度分散や渦度を考え、それらと星形成率との間の相関を調べた。ジェットの噴出によって、ジェット領域では星形成率の低下が見られたものの、その外縁領域においては、星形成率が增大している箇所が見られた。また、パラメータの 2 次元分布の解析から、ジェットがある場合は、ジェットがない場合と比べて星形成率が高い領域で速度分散や渦度の値が上昇していることが分かった。この結果は、ジェットによって正のフィードバックが起きている可能性を示唆していると考えられ、より詳細な解析を提案する。

1. Mukherjee et al. Relativistic jet feedback III - feedback on gas disks, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 479(4), p.p.5544-5566 (2018)

## 銀河 a3 重元素組成比の時間進化に関する理論計算 山崎 雄太 (国立天文台 M2)

本研究ではジルコニウム ( $_{40}\text{Zr}$ ) からウラン ( $_{92}\text{U}$ ) に至るまでの r-process 元素全体について、数値計算を通して元素組成比の時間進化を理論的に予測した。

鉄以降の重元素は中性子捕獲過程で生成され、進行速度の遅いものを s-process、早いものを r-process と呼び、宇宙における重元素合成のおおよそ半分ずつを担っている。s-process はその反応の遅さゆえに核物理学により十分な解析がなされている一方で、r-process は非常に高速に進む非平衡の過程であり、未解決の議論を多く残している。従って、r-process 元素の時間進化を解明することが宇宙における物質進化の謎を解くために必須である。

r-process が発生する中性子に非常に富む環境として、中性子星連星合体 (NSM) や超新星爆発が候補天体として議論されてきた。この点で r-process 研究は大きな転換点を迎えている。GW170817・短ガンマ線バースト・キロノヴァの同時観測により、NSM が r-process 対応天体であることと、重力波と短ガンマ線バーストがその発生頻度の指標として利用可能であることが観測的に証明された。詳細な元素合成量は明らかにされていないものの、発生頻度の時間変化に関しては理論計算の観測的

評価が可能になったのである。

そこで本研究では、発生頻度に関して最新の観測結果を取り入れつつ、様々な先行研究モデルで計算された各天体での元素合成量を採用し銀河進化を計算することで、重元素組成比を金属量  $[Fe/H]$  の関数として現在の太陽系組成に至るまでの時間進化を計算した。また、本研究で得られた元素組成比パターンを近年観測された金属欠乏星の元素組成比と比較評価し、誤差の範囲内で無矛盾なモデルパラメータを得ることに成功した。

このような低金属量星の元素組成は近い将来予定されている次世代望遠鏡を用いた可視赤外観測が始まることでより多くの観測データが得られることが予想され、今後の重元素進化の研究に重要な制限を与えることができるものである。

1. Timmes et.al. (1995) ApJ Suppl., 98, 2
2. Shibagaki et.al. (2016) ApJ, 816, 2
3. P. Simonetti et. al. (2019) arXiv:1901.02732

## 銀河 a4 銀河系棒状バルジ終端部付近の金属欠乏 谷口 大輔 (東京大学天文学教室 M2)

近年の近赤外線高分散分光の発展により、激しい減光により可視光では観測が困難な銀河系内縁部の恒星の金属量分布の研究が進展しつつある。とりわけ銀河中心から 4kpc あたりより外側においては、銀河中心から外側に行くほど金属量が低くなる金属量勾配の存在が既によく知られている。一方、若い大質量星団 RSGC1 と RSGC2 と RSGC3 ( $R_g \sim 4$  kpc) の組成解析により、棒状バルジの終端あたりでは、上記の金属量勾配からの予想よりずっと金属量が低い ( $[Fe/H] \sim -0.2$  dex) ことが示唆されている (Davies et al. 2009; Origlia et al. 2013, 2016)。しかしながら、この示唆は少ない数のサンプルに基づいているため、新たな天体の観測により検証することが必要不可欠である。

そこで我々は棒状バルジ終端部にある分子雲複合体 G23.3-0.4 ( $R_g \sim 5$  kpc) 近傍の金属量を決定することを試みた。この領域で Messineo et al. (2014) が同定した 2 つの赤色超巨星候補を、2015 年に近赤外線高分散分光器 WINERED の WIDE mode ( $0.91-1.35 \mu\text{m}$ ,  $R \sim 28,000$ ) で観測した。このスペクトルから、有効温度は星間減光や他の大気パラメータからの影響を受けにくい温度指標であるライン強度比を用いた手法 (Taniguchi et al. 2018) で決定した。更に、マイクロ乱流と金属量は吸収線毎に導出した金属量が吸収線の強さに依存しないという条件を課す手法 (Kondo et al. 2019) で決定した。得られた 2 つの赤色超巨星の金属量はどちらも金属量勾配から予想されるものより低く、棒状バルジ終端部での金属量の欠乏を支持するものであった。更に、2 つの赤色超巨星は異なる金属量を持つことも分かり、この分子雲複合体が二つの異なる金属量を持つガス雲が合体される過程で形成された可能性が示唆された。これらの結果は、銀河間物質/ハロー/銀河系外縁部から棒状バルジ終端部への効率的な低金属量ガスの輸送を化学進

化モデルに取り入れる必要があることを示すものである。

1. B. Davies et al. ApJ 696 2014 (2009)
2. D. Taniguchi et al. MNRAS 473 4993 (2018)
3. S. Kondo et al. ApJ 875 129 (2019)

## 銀河 a5 MaNGA データを使った相互作用銀河の研究 大森 清顕 (名古屋大学 銀河進化学研究室 ( $\Omega$ 研) M1)

銀河は衝突合体を繰り返し成長する。この為、銀河の相互作用は銀河進化を議論する際の重要なプロセスである。相互作用銀河についての研究は多く行われているが、まだ理解出来ない点も多く、銀河内で起きている物理過程についての定量的な結論も自明ではない。我々は相互作用銀河に対する理解を深める為に、相互作用銀河の星形成史に着目した研究を進めている。Mapping Nearby Galaxies at APO (MaNGA) は Sloan Digital Sky Survey (SDSS) の近傍銀河 ( $z < 0.003$ ) を空間分解している。これまでの SDSS サーベイは銀河中心のスペクトルしか得られなかったが、MaNGA は 17 の "integral field units" を使用する事で、銀河面全体に対して領域ごとのスペクトルの取得に成功した。これにより星質量や金属量など銀河の領域ごとの物理量の計測が可能となり、銀河の一生・進化過程についての理解が進む事が期待される。本研究では MaNGA カタログの銀河を Ackermann et al. (2018) の畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を使用して相互作用・非相互作用に分類し、相互作用と分類された銀河に対して複数のデータや手法を用い解析し、星形成史を探っている。まず、我々は MaNGA 銀河スペクトルに対し SED フィッティングコード FIREFLY (Wilkinson et al. 2017) を行った MaNGA FIREFLY Value Added Catalog のデータを使い、各領域の星種族の年齢を求めた。これにより衝突銀河の衝突領域では他の領域と比べ若い星種族が存在する事が明らかになった。続いて我々は各領域のスペクトルに対し PCA (主成分解析) を行った。本研究で行った PCA は Rowlands et al. (2018) で使用され、4000 Å ブレイクとバルマー吸収線を主成分として各領域を「星形成」、「スターバースト」、「ポストスターバースト」、「静穏」、「グリーンバレー」と分類している。PCA の結果、衝突領域は「星形成」または「スターバースト」と分類されているケースが多く、これらは若い星種族が存在する領域と一致した。本発表ではこれまでの発見、そして HI ガスや CO ガスデータの解析など今後の研究展望について議論する。

1. Rowlands et al., 2018, MNRAS, 480(2), 2544-2561
2. Ackermann et al., 2018, MNRAS, 479(1), 415-425
3. Wilkinson et al., 2017, MNRAS, 472(4), 4297-4326

## 銀河 a6 近傍銀河における空間分解した星質量と星形成率の関係

梶川 明祐実 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

銀河ではガスから星が形成されている。星形成の活発さは単位時間当たり形成される星の総質量として定義される星形成率 (Star Formation Rate; SFR) で測られる。銀河全体の星質量と SFR を平面上にプロットすると、両者の間には良い相関が見られ、星形成が現在活発に行われている銀河は Star Formation Main Sequence (SFMS) と呼ばれる帯に沿って分布し、それに対してすでに星形成が終わっている銀河は SFMS よりも下側に分布することが知られている。つまり、銀河は進化に伴い、星質量-SFR 平面上を移動する。しかしながら、この関係は銀河全体を積分した時の星質量と SFR に対して成立するものであり、同じような傾向が銀河を空間分解した時の星質量面密度  $\Sigma_*$  と SFR 面密度  $\Sigma_{\text{SFR}}$  関係についても見られるかは未だ十分に理解されておらず、研究例も少ない。

本研究では、野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡のレガシープロジェクト COMING で観測された 73 個の近傍銀河について空間分解した  $\Sigma_*$ - $\Sigma_{\text{SFR}}$  関係を調べた。その結果、対象天体を棒状構造 (バー) の有無に基づいて分類すると、バーを持つ銀河では銀河全体にわたって  $\Sigma_*$  と  $\Sigma_{\text{SFR}}$  の間に良い相関が見られるが、バーを持たない銀河の中心付近では  $\Sigma_{\text{SFR}}$  が低くなっていることが明らかになった。このことは、形態によって銀河内部での星形成が異なっている可能性を示唆する。

さらに、COMING で得られた  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  データを用いて分子ガス質量面密度  $\Sigma_{\text{gas}}$  を求め、銀河内部における星質量に対する分子ガス質量の割合を調べた。その結果、バーをもつ銀河では中心付近の分子ガスの割合が高く、バーを持たない銀河では低くなることが明らかになった。このことから、COMING で観測されたような分子ガスの豊富な銀河では、バーがある場合はそれによりガスが中心付近に輸送され星形成が続くのに対して、バーが無い場合はガス輸送がないため、ガスが使われて星形成が終わりに近づいていることが示唆される。

1. J. Brinchmann et al. 2004, MNRAS, 351, 1151
2. B. C. Heish et al. 2017, ApJ, 851, L24

## 銀河 a7 近傍の棒渦巻銀河 M83 の分子ガスの密度の研究

八嶋 裕 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

銀河は主に星から構成されており、星は分子ガスが集まり密度が高くなることで形成される。単位時間、単位ガス質量あたりに形成される星の質量 (星形成効率) は銀河によってまた銀河の中でも異なっている。銀河の中で中心に棒状構造を持つ棒渦巻銀河では渦状腕と比べて棒状構造で星形成効率が低いことが報告されている。星形成効率は密度の高いガスの割合と正の相関があることが知られており、棒状構造における低い星形成

効率は棒状構造では分子ガスの運動が激しいためにガスが収縮しにくいことが一因として考えられている。

そこで本研究では、ALMA で観測された近傍の棒渦巻銀河 M83 の渦状腕と棒状構造の  $^{13}\text{CO}(J=1-0)$  (以下、 $^{13}\text{CO}$ ) と  $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$  (以下、 $\text{C}^{18}\text{O}$ ) のデータから、各領域の分子雲について星の直接の元になる密度の高いガスの割合に違いがあるのかを調べた。まず、 $^{13}\text{CO}$  のデータから分子雲を同定し、各分子雲内での  $\text{C}^{18}\text{O}/^{13}\text{CO}$  の輝線強度の比をとった。その結果、渦状腕と棒状構造での各分子雲の比はそれぞれ、 $0.39 \pm 0.04$ ,  $0.40 \pm 0.02$  (± 以下の数字は分散) であり違いが見られなかった。 $^{13}\text{CO}$  は密度が  $\sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$  の分子雲を  $\text{C}^{18}\text{O}$  は密度が  $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$  の分子雲コアをトレースしている。この比は分子雲に対する分子雲コアの割合を示すと考えられるが、それが構造で違いがないことを示す。一方、密度が  $\sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$  程度の分子雲をトレースする  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  (以下、 $^{12}\text{CO}$ ) と  $^{13}\text{CO}$  の比  $^{13}\text{CO}/^{12}\text{CO}$  を各構造で平均をとると、渦状腕の方が棒状構造に比べて約 1.5 倍高かった。これは渦状腕と棒状構造では、分子ガス全体に対して分子雲となっているガスの割合が異なることを示す。以上より、希薄な分子ガスから比較的密度の高い分子雲へ収縮する過程には銀河構造が影響を及ぼすが、分子雲内部においてより高密度になりコアを形成する際には銀河構造が影響を及ぼさないことを示唆している。

1. Momose et al., 2010, ApJ, 721, 383
2. Gao et al., 2004, ApJ, 606, 271
3. Sorai et al., 2012, PASJ, 64, 51

## 銀河 a8 SZ 効果を用いた大規模構造に付随する中高温銀河間物質の探査

山本 涼一 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

現在近傍宇宙で観測されているバリオンは宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測から推定されている量の約半分ほどしかなく、観測されないダークバリオンをめぐる問題は未解決である。ダークバリオンの候補の一つとして構造形成シミュレーションから大規模構造のフィラメントに希薄なガスとして分布していると予想されている中高温銀河間物質 (WHIM) がある。X 線の放射効率は電子数密度の二乗に比例するため、WHIM のような極めて希薄なガスを、X 線によって検出することは難しい。一方 CMB フォトンとガスとの逆コンプトン散乱によって CMB 黒体放射スペクトルが変形する Sunyaev-Zeldovich 効果の変位を示すコンプトンパラメーター  $y$  は、電子数密度と温度に比例するため、希薄なガスの探査に適している。

今回我々は HSC-SSP サーベイで発見された銀河団カタログを利用して  $1-10h_{70}^{-1} \text{ Mpc}$  の距離にある銀河団ペアを作成し、それに対応したコンプトンパラメーター  $y$  マップを *Planck* 全天  $y$  マップから切り出し重ねあわせることで銀河団間に存在すると期待される WHIM の検証を行った。また、フィラメント成分と銀河団ハローの成分を分離するために、経験的に知られて

いる銀河団ハローの分布である  $\beta$  モデルのパラメーターを マルコフ連鎖モンテカルロ法を適用することで推定し、銀河団ハローのモデルマップを作成、その差分マップを作った。ここからフィラメントにある WHIM の制限を与え、考察を行った。

1. Cen R., Ostriker J. P., 2006
2. de Graaff A., Cai Y.-C., Heymans C., Peacock J. A., 2017
3. Oguri M. et al., 2018, PASJ, 70, S20

## 銀河 a9 XMM-Newton 衛星を用いた楕円銀河 NGC 4472 の広がった X 線放射の研究 辻 歩美 (金沢大学 宇宙物理学研究室 M2)

銀河団に属する銀河は銀河団ガス (ICM) など周囲の環境によって様々な相互作用を受ける。特に、銀河が銀河団中を移動する際に星間ガス (ISM) が ICM から受ける動圧によって剥ぎ取られることがある。この動圧剥ぎ取りと呼ばれる現象は、銀河や銀河団の進化を考える上で重要なプロセスの一つである。

NGC 4472 (M49) はおとめ座銀河団の中心からおよそ 1.5 Mpc 南に位置する X 線で非常に明るい巨大楕円銀河で、NGC 4472 を中心とする銀河群が銀河団中心に向かって落下途中であるため、銀河と銀河団の相互作用を調べるのに適した天体である。ROSAT 衛星による観測では、長く尾を引いた Tail 構造が報告され、動圧剥ぎ取りの結果だと考えられている (Irwin & Sarazin 1996)。XMM-Newton 衛星による観測では、銀河中心の北側およそ 20 kpc の位置に NGC 4472 の ISM とおとめ座銀河団の ICM との接触不連続面の存在が示唆されている。また、南西方向に 60 kpc 以上伸びた Tail を発見し、NGC 4472 が銀河団中心の北方向ではなく、北東方向に落下していることを示唆した (Kraft et al. 2011)。

本研究では、XMM-Newton 衛星の 2016 年のデータも用いて、NGC 4472 周辺の X 線放射領域を詳細に調査した。hardness ratio の空間構造を調べたところ、北東-南西方向はスペクトルがソフトで、それを挟むように北と南側はスペクトルがハードであることが新たにわかった。スペクトル解析より、中心領域は温度 (kT)  $\sim 1.0$  keV と  $\sim 1.6$  keV の少なくとも 2 つの成分が存在する。さらに、接触不連続面の形状とスペクトルの hardness に相関が見られた。これらの結果より、NGC 4472 周辺の高温ガスは以下の特徴を持つ。1. 北東-南西方向に伸びた温度 1.0 keV 程度の低温ガスと、球形に近い温度 1.6 keV 程度の高温ガスが存在する。2. Tail の温度も 1.0 keV 程度である。3. 二つの成分で接触不連続面の位置が異なる。その形状から、前者が銀河、後者が銀河群に付随するガスと考えられる。本講演では、これらの構造が形成されたシナリオについても議論する。

1. J. A. Irwin & C. L. Sarazin 1996, ApJ, 471, 683
2. R. P. Kraft et al. 2011, ApJ, 727,41

## 銀河 a10 X 線天文衛星 XMM-Newton を用いた初期衝突銀河団 CIZA1359 の構造解析 山口 友洋 (名古屋大学 X 線グループ (Ux 研) M1)

銀河団は宇宙最大の重力束縛系であり、衝突・合体を繰り返して成長する。宇宙の力学進化を研究する上で、その過程である銀河団衝突の物理過程を明らかにすることは重要である。銀河団衝突のタイムスケールは宇宙年齢の約 0.1 倍と非常に長いので、衝突の初期、中期、後期にある銀河団を別々に観測し、各段階における支配的な物理を理解していくことが重要である。

我々は、衝突初期にエネルギーが熱的・非熱的にどのように解放されるかを明らかにするため、CIZA J1358.9-4750 という衝突銀河団をターゲットにした。先行研究 (Kato et al.2015) のすぎく衛星による観測から、2 つの銀河団は質量比がほぼ 1 で、2 つの銀河団の間の明るい領域 (ブリッジ領域) に衝撃波が見え、 $z = 0.07$  と近傍にある稀な天体であることが知られている。しかし衝撃波の分布に偏りがあつたりと複雑な構造で衝突していると考えられており、詳細な衝突のシナリオは明らかになっていない。衝突によって解放されるエネルギーの理解のためには、まず衝突のシナリオを明らかにする必要がある。本研究ではそれをより明確にするため、すぎくよりも優れた空間分解能、有効面積を持つ XMM-Newton 衛星の観測データを用いた。ブリッジ領域を 40 分割して分光解析を行い銀河団ガスの温度、密度、圧力、エントロピーの分布を求めた。その結果、本衛星の 15 秒角という優れた空間分解能を活かして、新たにブリッジ領域の北西の領域で  $8.0_{-1.1}^{+1.4}$  keV から  $4.8_{-0.52}^{+0.53}$  keV への大きな温度変化のある構造を発見した。これより、先行研究のすぎくが見つけた衝撃波が post-shock 領域の南端で、我々が見つけた構造がその北端である可能性や、北側の銀河団が今回の衝突以前に銀河団衝突を経験していた可能性など、新たな衝突のシナリオが考えられる。それを明らかにするため、さらに詳細な分光解析を行った。

1. Kato et al.2015

## 銀河 a11 X 線観測による遠方銀河団の高温ガスの重元素比の進化 米山 理可子 (東京理科大学 理学研究科 物理学専攻 松下研究室 M1)

銀河団は数百~数千の銀河の集団であり、暗黒物質の重力に束縛された宇宙で最大の天体である。銀河団には銀河よりも大量の高温な銀河団ガスが存在し、X 線を放射している。また、銀河団ガスには大量の鉄などの元素が存在している。これらの元素は超新星爆発によって合成されるため、銀河団での鉄の合成史を調べることは、宇宙の星形成史や化学進化を知るために重要である。銀河団中心部では鉄と水素の個数比 (鉄の組成比) が遠方 ( $z \sim 0.5$ ) ほど小さくなる、つまり現在まで鉄が合成されていると報告されている (e.g., Ettori et al. 2015)。しかし、

合成史を調べる上で不可欠な情報である鉄の質量分布とその進化は調べられていない。

本研究では XMM 衛星で観測された天体のうち、力学的に緩和した赤方偏移が  $0.06 < z < 0.5$  の銀河団について解析を行った。各銀河団について中心から  $r_{500}$  (内側の平均密度が宇宙の臨界密度の 500 倍となる半径) 付近まで最小幅  $0.02 - 0.1 r_{500}$  の複数の円環領域に分けてスペクトル解析を行い、鉄の組成比の分布とガス質量分布を調べ、鉄の質量分布を推定した。その結果、中心領域  $0 - 0.15 r_{500}$  の鉄の質量は  $r_{500}$  までの鉄の質量の数 % に過ぎず、 $0 - 0.15 r_{500}$  での研究は銀河団全体の進化の研究には適さないことがわかった。また銀河団中心部より外側での鉄の組成比と質量の分布は、誤差は大きいものの赤方偏移による進化は見られなかった。

1. Ettori, S., Baldi, A., Balestra, I., et al. 2015, A&A, 578, A46

## 銀河 a12 すばる超広視野観測で解き明かす大規模構造形成と銀河進化

山本 直明 (東北大学 天文学専攻 M2)

近傍宇宙の観測によると銀河の特性 (色、年齢、形態など) は、銀河がどのような周辺環境にいるかによって大きく異なっている。これらの銀河の環境依存性の起源や進化を過去に遡って調べていくことは、銀河の形成進化の歴史を辿る上で非常に重要なテーマである。これまで環境効果が最も顕著に現れる銀河団を探る様々な試みがなされてきた。しかし遠方銀河団のサンプル数も少なく統計的に調べられてきた例は少ないという問題や、形成から十分に時間の経った銀河団が見つかるバイアスがあるという問題があった。そこで私たちは従来よりも視野が広く深い観測データのある、すばる広視野撮像装置 HSC に着目した。この装置は一つの視野で宇宙の大規模構造や数多くの銀河団を効率よく捉えることができる、銀河団探査に適したユニークな装置である。私たちは HSC の 4 年に渡るレガシーデータ (HSC-SSP) を使って前人未達の銀河団サーベイを行った。私たちは 2 種類の銀河を手掛かりに銀河団サーベイを行った。一つ目は Red sequence survey である。これは従来行われてきた探査方法に近い方法であり、赤く古い銀河の高密度領域を見つけることができる [1]。二つ目は Blue cloud survey であり、青く若い輝線銀河 ([OII], [OIII]) の高密度領域を見つけることができる [2]。サーベイの結果、合計 285 個の様々な進化段階の銀河団候補を見つけることに成功した。さらに Blue cloud survey で見つかった銀河団候補の中で、輝線銀河が多く群れている領域を Blue dominated cluster と命名し、赤い銀河と青い銀河どちらも群れている領域を Dual cluster と命名した。銀河の色等級図や光度関数によると、Blue dominated cluster では明るい側のみ赤い銀河が分布しているが、Dual cluster では赤い銀河が暗い側にまで分布していることが確認できた。私たちの結果は、明るく重い銀河が先に進化し、暗く軽い銀河は

ど遅れて進化する「ダウンサイジング」のシナリオと一致する [3]。最後にこのプロジェクト (HSC2) とすばる次世代多天体分光装置の PFS との関わりについても触れる。

1. Gladders M. D., Yee H. K. C., 2000, AJ, 120, 2148
2. Hayashi, M., Tanaka, M., Shimakawa, R., et al. 2018, PASJ, 70, S17
3. Tanaka M., Kodama T., Arimoto N., et al. 2005, MNRAS, 362, 268

## 銀河 a13 $z \sim 1$ 銀河団の最新観測で探る 銀河降着過程と星形成活動の関係

朝野 哲郎 (東京大学天文学教室 M1)

銀河の性質は、その周囲の環境に強く依存しており、銀河団は環境効果が最も顕著に現れる領域である。銀河団での環境効果がどのようにして生まれたかを理解するには、遠方宇宙の観測によって銀河団の進化を直接追うことが必要になる。近年の研究 (MAHALO-Subaru など) からは、銀河降着に伴い銀河団の中心部から外側へと星形成/quenching が進行すること (inside-out シナリオ) が明らかになってきている。

我々は今回、 $z \sim 1$  の銀河団 (C11604-D) に対して狭帯域撮像を行い、H $\alpha$  エミッター (HAE) が銀河団外縁部を取り囲むように多く存在しているという結果を得た。さらに HSC-SSP サーベイのデータと既存の先行研究 (分光サーベイや HST、Spitzer での撮像など) の観測結果を組み合わせることで HAE の多くが銀河団コアへの降着段階にあるグループを形成しており、このグループには高光度赤外線銀河 (LIRG) などスターバースト級の星形成銀河も多く存在していることがわかった。この結果が銀河団での inside-out 的星形成を示唆しており、現在の宇宙で見られる環境効果の起源に繋がるものである。また、今回の狭帯域撮像観測は、すばる望遠鏡で SWIMS を用いて行った。SWIMS は東京大学アタカマ天文台 (TAO) に搭載予定の近赤外分光撮像装置であり、現在は試験観測のためすばる望遠鏡に設置されている。今回の我々の観測も狭帯域フィルターを用いた深い撮像で十分な感度が達成されるかどうかを確認するためのものであったが、上記のような科学的価値ある結果が得られたため本講演で紹介する。

1. Koyama, Y., Kodama, T., Shimasaku, K., et al. 2010, MNRAS, 403, 1611
2. Kocevski, D. D., Lemaux, B. C., Lubin, L. M., et al. 2011, ApJ, 736, 38
3. Lemaux, B. C., Gal, R. R., Lubin, L. M., et al. 2012, ApJ, 745, 106

## 銀河 a14 $z \sim 2$ における原始銀河団コアの探査とメンバー銀河の性質

安藤 誠 (東京大学天文学教室 M2)

銀河の星形成活動や形態の進化は、周囲の銀河数密度をはじめとした「環境」に依存することが知られており (e.g. Dressler+1980),  $z < 1$  では銀河団において特に顕著である。このような環境依存性がいつ・どのように生じたのかを明らかにするため、 $z \geq 2$  に存在する銀河団の祖先、原始銀河団の探査が盛んに行われている。多くの先行研究 (e.g. Chiang+14) では、10 Mpc 程度の広い領域にわたる銀河の数密度超過に基づいて原始銀河団が同定されている。しかしこのやり方では、環境依存性が最も強いと思われる原始銀河団の中心部＝「コア」を見つけ出すことが難しい。そこで原始銀河団のコアに属する銀河の進化を調べるため、コア領域をピンポイントで見つける探査法の開発を行った。本研究では、銀河団をホストしているダークマターハロー (DMH: ダークマターのビリアル系) の質量進化に着目し、 $z=0$  までに銀河団程度の質量に成長できるような十分重い ( $\gtrsim 2 \times 10^{13} M_{\odot}$ ) DMH を原始銀河団のコアと定義する、

こうした非常に重い DMH は、大きな星質量を持つ銀河をホストしていることが予想される。そこで本研究では、COSMOS 領域の銀河カタログ (Laigle+16) を用いて、 $1.5 < z < 3.0$  において非常に重い銀河 ( $\log(M_{*}/M_{\odot}) > 11$ ) が存在する場所を探し出し、原始銀河団コアとみなした。これらのコアに対して clustering 解析を行い DMH 質量を推定した結果、十分な質量を持つことが確かめられた。またコアに所属する銀河のうち、星形成を止めた銀河の割合を調べたところ、フィールド領域と比べて数倍程度高いことがわかった。さらに、所属銀河とフィールド銀河の質量関数を比較したところ、コアのほうが重い銀河の比率が相対的に高い傾向が見られた。本講演ではこれらの結果に加え、コアと QSO などの天体との空間分布の比較結果についても議論する。

1. Dressler et al. (1980), ApJ, 236, 351
2. Chiang et al. (2014), ApJ, 782, L3
3. Laigle et al. (2016), ApJ, 224, 24L

## 銀河 a15 $z = 2.4$ 53W002 原始銀河団における大質量銀河の星形成の調査

米倉 直紀 (愛媛大学 M1)

銀河の性質と銀河周囲の環境には相関があることが知られている。その 1 つに銀河の形態密度関係がある。これは銀河団のような銀河が密集した領域では大質量な早期型銀河の存在割合が銀河の個数密度の低い領域と比べて高い (Dressler et al. 1980) という関係である。これまでの研究から早期型銀河は古い星からできており、 $z > 2$  で形成されたと考えられている。したがって大質量な早期型銀河の形成・進化を解明には、 $z > 2$  の

銀河の密集した領域である原始銀河団を観測することが重要になる。本研究では高密度環境における銀河の形成・進化の解明を目的とし、Subaru/S-Cam ( $B, V, i'$  バンド) と MOIRCS ( $J, H, K_s$  バンド) を用いて  $z = 2.4$  53W002 原始銀河団を観測した。53W002 原始銀河団は電波銀河 53W002 周りの Ly $\alpha$  輝線銀河 (Lyman  $\alpha$  Emitters: LAEs) の大規模構造として発見された領域である (Mawatari et al. 2012)。原始銀河団に属する大質量銀河を、Balmer Break を利用した近赤外  $JHK_s$  カラー (Kajisawa et al. 2006) で選出した。さらに可視光と近赤外のカラーと種族合成モデルのカラートラックを比較して、選出した銀河の星形成を調べた。その結果、 $(J - K_s)_{AB} > 2$  と近赤外のカラーが非常に赤い銀河はダストに覆われた星形成銀河のモデルと一致することがわかった。一方で、近赤外のカラーが  $(J - K_s)_{AB} \sim 1.5$  であった銀河が星形成を終えた銀河のモデルと一致した。分類した銀河と LAEs の空間分布を比較すると、ダストに覆われた星形成銀河は LAEs の構造に沿って分布していることがわかった。反対に星形成を終えた銀河は LAEs の構造からは外れて分布していることがわかった。このことから大質量銀河の形成・進化の段階には原始銀河団内でも場所ごとに違いがあることが示唆される。

1. Dressler et al. 1980, ApJ, 236, 351
2. Mawatari et al. 2012, ApJ, 133, 759
3. Kajisawa et al. 2006, MNRAS, 371, 577

## 銀河 a16 $z \sim 1.4$ の星形成銀河における分子ガス clump の発見

牛尾 海登 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

円盤銀河はどのような過程を経て形成されたのだろうか? 理論的には、ダークマターハローからのガス降着によってできた gas-rich な円盤の重力不安定性により clump が形成され、やがて clump は力学摩擦などによって銀河中心へ落ちていきバルジが形成されるという説がある。宇宙全体で星形成が最も盛んに行われていた  $z \sim 1 - 3$  に存在する銀河に対する rest UV での観測により、この時期の星形成銀河のおよそ半数では、若く重い星 (星形成の活発な領域) がいくつかの kpc スケールの clump になって分布していることが明らかとなっている。また、銀河中心に近い clump ほど古く、stellar mass が大きいということが知られており、上記の理論を支持していると考えられている。

重力不安定性のシナリオが正しいのであれば、先に分子ガスが clump 状になり、その中で星が形成され、rest UV で観測されている clump になると考えられる。このシナリオを検証するためにも  $z \sim 1 - 3$  の星形成銀河に対して分子ガスの性質を銀河内部の構造まで分解して観測する必要があるが、そのような研究は非常に数が少ない。そこで、我々は  $z = 1.4$  の大質量星形成銀河 ( $M_{star} \sim 2 \times 10^{11} M_{\odot}$ , SFR  $\sim 300 M_{\odot}/yr$ )

に対して、ALMA で CO(2-1) と CO(5-4) の観測を行った (分解能はそれぞれ  $\sim 5.1$  kpc,  $\sim 6.0$  kpc)。その結果、銀河には  $\sim 1.5 \times 10^{11} M_{\odot}$  の分子ガスが含まれており、円盤は gas-rich ( $f_{gas} \sim 0.5$ ) であることがわかった。また、ガスの回転速度 ( $r \sim 5$  kpc で  $v_{rot} \sim 250$  km/s) や速度分散 ( $\sigma \sim 50$  km/s) から円盤における Toomre の  $Q$  値は  $Q \sim 0.1$  であった。そして、major axis に沿った CO(2-1) の PV 図上で kpc スケールの分子ガス clump が 6 つ確認された。分子ガス clump の物理量は、 $M_{mol} \sim 10^{10} M_{\odot}$ ,  $\sigma \sim 25$  km/s であった。

円盤が gas-rich であり、重力不安定 ( $Q < 1$ ) であることから、これらの分子ガス clump はガス円盤の重力不安定性によって形成されたと考えられる。

1. Noguchi 1999, ApJ, 514, 77
2. Guo et al. 2012, ApJ, 757, 120
3. Seko et al. 2016, ApJ, 819, 82

## 銀河 a17ALMA を用いた $z \sim 3.2$ のサブミリ波銀河 AzTEC8 の構造解析

小山 紗桜 (新潟大学 宇宙物理学研究室 M1)

遠方宇宙には爆発的に星形成を行なっている銀河 (サブミリ波銀河: SMG) が存在する。その中でも特に活発に星形成を行うものは  $1000 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$  を超える星形成率を示し、近傍宇宙の星形成銀河の性質とは大きく異なる。SMG の性質について理解を深めることは、衝突合体や宇宙の大規模構造に沿った質量降着など、銀河がどのようにして質量を獲得し成長していくのか、銀河の形成・進化を理解する上で重要である。そのためには、銀河内における星形成のプロセスや空間分布の詳細を調べることが必要である。現在、これらの課題については、ALMA を用いて SMG を非常に高い空間分解能で観測し細部を研究することにより、大きく進展しつつある。

本研究では、COSMOS 領域に存在する SMG AzTEC8 ( $z \sim 3.2$ ) について、ALMA を用いて  $\sim 0.05$  arcsec という高解像度でダストの観測を行い、AzTEC8 の空間構造についての解析を行った。その結果、銀河内には複数のクランプが存在し、星形成の領域は 900 pc 程度の非常にコンパクトな領域に集中していることがわかった。また、各クランプでは Maximum Starburst ( $\sim 1000 M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}$ ) に近いスピードで星形成が行われており、銀河全体の星形成率は  $2267 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$  を示すという驚くべき結果が明らかになった。本発表では、これらの一連の結果について報告する。

1. Iono et al. 2016, ApJL, 829, L10
2. Iono et al. 2019, in prep.
3. Younger et al. 2010, MNRAS, 407, 1268

## 銀河 a18 Stripe 82X の多波長観測データを用いた電波銀河の研究

瀬戸口 健太 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

銀河の中心には超巨大ブラックホール (SuperMassive Black Hole; SMBH) が存在する。SMBH へ莫大な質量が降着する銀河では中心核が非常に明るく輝き、活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) として観測される。AGN のうち、特に強力なジェットを放出する種族を「電波銀河」とよぶ。電波銀河は、ジェットによる周辺環境へのフィードバックを理解する上で鍵となる天体である。また、近傍の電波銀河では星形成率が小さく、このことから銀河進化の最終段階とされている。しかし、ジェットが AGN から放射される条件や、母銀河との関連は未だ解明されていない。加えて、 $z \sim 1$  程度の遠方では観測的な制限により詳細な研究は行われていないので、母銀河と AGN の進化段階が近傍と同様であるかは不明である。

電波銀河は個数密度が少ないため、これらの統計的性質を解明するには、広い領域を探索した観測データが必要になる。そこで我々は、多波長観測で広範囲を探索した天体カタログ Stripe 82X (LaMassa et al. 2016) に着目した。このカタログには約 8000 個の天体があり、うち約 100 個の天体が電波干渉計 FIRST で検出されている電波銀河である。このうち、赤方偏移が既に算出されている天体サンプル 63 個を対象天体とした。まず、SDSS、WISE、VISTA の可視光/赤外線スペクトル解析から母銀河の星形成率と星質量を求めた (Boquien et al. 2019)。次に、X 線天文衛星 XMM-Newton のスペクトル解析から AGN の X 線光度 (質量降着率) を推定した。さらに、SDSS のスペクトル情報を用いて SMBH 質量を推定した。本研究では、これら電波銀河の星質量と SMBH 質量の相関、星形成率と質量降着率の相関、AGN のエディントン比分布、およびその宇宙論的進化について議論する。

1. LaMassa, S. M., Urry, C. M., Cappelluti, N., et al. 2016, ApJ, 817, 172
2. Boquien, M., Burgarella, D., Roehlly, Y., et al. 2019, AaP, 622, A103

## 銀河 a19 銀河の相互作用、及び衝突・合体が活動銀河核の活動性に及ぼす影響について

小林 宇海 (国立天文台 M1)

冷たいダークマターモデルに基づく、銀河同士の衝突・合体、相互作用は宇宙において頻繁に起こっている。これらのプロセスは銀河の進化において非常に重要な役割を果たしている、この時銀河に起こっている現象を理解することは、銀河の形成と進化を知る上で大きな手がかりとなる。近年では銀河と活動銀河核がともに進化してきた描像が提案されており、銀河の衝突合体と活動銀河核の関係を観測的に検証することは極め

て重要である。

衝突合体の過程でガスが中心核に流れ込み、活動銀河核が誘発されることがナインに期待されるが、現在までの先行研究では、その明確な観測的証拠は掴めていない。しかしながら、今までの研究は浅い SDSS のデータや、狭い領域のハッブル宇宙望遠鏡のデータに基づいたもので、銀河の衝突合体というイベントを確実に捉えるには適していなかった。そこで、我々は Hyper Suprime-Cam の戦略枠プログラムによる広くて深いデータを用いて、銀河同士の衝突・合体、相互作用が活動銀河核の活動性に及ぼす影響を調べた。

本研究では、SDSS の DR14 から取ってきた赤方偏移 0.2 未満の数千個の銀河について HSC の画像を目で見て、衝突・合体銀河かどうかを判別した。そして、そういった銀河の色、等級、環境分布を評価し、さらに活動銀河核を持つ割合を BPT diagram を使って調べていた。また、統計を上げる為、上を教師サンプルとして Convolutional Neural Network (CNN) という方法を採用して、CNN で得られたサンプルについても上と同様の評価を行う予定である。そして、活動銀河核の割合を銀河同士の距離の関数、つまり、相互作用の時系列としてどのように変化するのかについても調べる。

本公演では、衝突・合体銀河の特徴と活動銀河核について得られた結果を、自分の目で見たサンプルと CNN で得られたサンプルのそれぞれについて、議論し考察を行う。

1. Kauffmann, G., et al., 2003, MNRAS, 341, 33 · Baldry I. K., Balogh M. L., Bower R. G., Glazebrook K., Nichol R. C.
2. Ellison, S. L., Patton, D. R., Mendel, J. T., Scudder, J. M., 2011, MNRAS, 418, 2043

## 銀河 a20 AGN の活動性が狭輝線領域の電離ガスに与える影響

城 知磨 (愛媛大学 M1)

活動銀河核 (AGN) のトーラス構造形成モデルのひとつとして、“輻射駆動噴水モデル” (Wada+12, Wada+18) が考えられている。輻射駆動噴水モデルでは、トーラス構造形成過程においてアウトフローが自然に形成されるため、狭輝線領域に高密度ガス雲を供給していることが期待される。本研究では、2 型 AGN (Seyfert, LINER) の狭輝線領域の電離ガスを Sloan Digital Sky Survey (SDSS) 大規模可視分光データを用いて系統的に調査した。SDSS サンプル約 125000 天体の電子密度を測定し、可視光輝線比診断図 ( $[\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$  vs.  $[\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ ) 上での分布を調べると、狭輝線領域は通常の星形成銀河の HII 領域より高密度であることが分かった。さらに、AGN の活動性が高いほど電子密度は高い傾向があることも分かった。また、 $[\text{OIII}]\lambda 5007$  の速度分散も AGN の活動性と正の相関がみられた。これらは、中心核付近から狭輝線領域まで吹き出された高密度ガス雲が AGN power-law 放射によって電離され

ているという輻射駆動噴水モデルの描像と合致する結果である。LINER や composite (可視光輝線比診断図において星形成銀河と AGN の中間の性質を示す天体) においても可視光輝線比診断図上で高密度な領域が見られた。これらの領域に対しては、衝撃波の効果についても調査した。本発表では以上の結果を報告し、AGN の活動性と狭輝線領域の関係について議論する。

1. Wada 2012, ApJ, 758, 66
2. Wada et al. 2018, ApJ, 867, 49
3. Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, PASP, 93, 5

## 銀河 a21[O IV] 25.89 $\mu\text{m}$ と nuclear 12 $\mu\text{m}$ の光度比を用いた “塵に埋もれた” 活動銀河核の診断法 山田 智史 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 D1)

超/高光度赤外線銀河 (Ultra/luminous Infrared Galaxies; U/LIRGs) は、赤外線で非常に明るく ( $L_{\text{IR}} > 10^{12}/10^{11} L_{\odot}$ )、星形成が活発な進化段階の銀河として着目されてきた。近傍 U/LIRGs の多くはガスが豊富な銀河同士の合体によって生じており、ガスやダストの効率的な角運動量損失により、活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) を誘発する天体も多い。特に合体の最終段階では、急激な質量降着に加え、質量供給源の役割を担う AGN トーラスが全体を覆うほどに “塵に埋もれた” 構造になると予測されている。しかし、ダスト減光により可視光での観測は困難であり、これらを実証するのは難しい。そこで、透過力の高い硬 X 線 ( $> 10$  keV) や中間赤外線 (5–30  $\mu\text{m}$ ) での観測が不可欠である。

本研究では、[O IV] 25.89  $\mu\text{m}$  と nuclear (subarcsecond-scale) 12  $\mu\text{m}$  の光度比を用いた、埋もれた AGN の新しい判定法を導入した。これらは AGN の狭輝線領域とトーラスから放射されており、それぞれダスト減光を受けにくい。まず、X 線天文衛星「すざく」によって追観測されている *Swift*/BAT カタログ天体のうち、トーラス吸収を受けた近傍の 2 型 AGN (水素柱密度が  $\log N_{\text{H}}/\text{cm}^2 = 22\text{--}24$ ) の 16 天体 (e.g., Kawamuro et al. 2016) を用いることで、狭輝線領域からの X 線散乱成分が小さい ( $< 0.5\%$ ) 埋もれた AGN では一般の 2 型 AGN よりも [O IV]/12  $\mu\text{m}$  の光度比が小さいことが分かった。これは、この比が埋もれた AGN を特定する良い指標であることを支持している。さらに、我々はこの判定法を、AGN を持つ近傍の様々な合体段階にある U/LIRGs の 23 天体に適用した。その結果、合体の最終段階では AGN は埋もれている一方、初期段階や合体でない U/LIRGs では埋もれていないことが分かった。これは、銀河同士の相互作用が進むにつれて U/LIRGs が持つ埋もれた AGN の割合が大きくなることを示している (Yamada et al. 2019)。

1. Kawamuro, T., Ueda, Y., Tazaki, F., Ricci, C., &

## 銀河 a22 X 線観測で探るセイファート 1 型銀河のトーラス構造

小川 翔司 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M2)

銀河中心には超巨大ブラックホール (Supermassive Black Hole; SMBH) が普遍的に存在し、SMBH と母銀河は互いに影響を与え合いながら「共進化」してきたと考えられている (e.g., Kormendy & Ho 2013)。共進化を解明する上で重要となるのが、活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) である。AGN とは、SMBH に落ち込む物質の重力エネルギーが解放され、銀河中心が明るく輝く現象である。AGN は、中心の SMBH、降着円盤、それらを取り囲むトーラスから構成される。このトーラスは SMBH への質量供給源と考えられ、共進化の鍵となる構造である。しかしながら、トーラスの空間分解は困難であり、その基本的な性質 (幾何構造やガス・ダスト比など) は未だによく理解されていない。近年、多波長観測結果から、クランプ状にガス・ダストが分布する「クランピートーラス」が示唆されている。実際、赤外線スペクトルに適用可能なモデルが作成された (Nenkova et al. 2008)。赤外線はダストのみの分布を反映する一方、X 線はガス・ダストを含む全物質の分布を調べることが可能である。私達の研究室では、赤外線スペクトルモデルと同様の構造を仮定した X 線スペクトルモデル (XCLUMPY: Tanimoto et al. 2019) を作成しており、赤外線と X 線の結果を比較することにより、ガス・ダスト比を調べることができる。

私達は、赤外線からトーラス構造が調べられている近傍のセイファート 1 型銀河 5 天体 (Ichikawa et al. 2015; Garcia-Bernete et al. 2019) に着目した。これらの天体の広帯域 X 線スペクトルに、XCLUMPY モデルを適用することでトーラスの赤道面における水素柱密度を推定した。その結果、赤外線との比較から、これら AGN のトーラスでは銀河系星間物質よりもガスに対するダストの比が大きいことが示唆された。本講演では、解析の詳細について述べるとともに、AGN トーラスの構造について議論する。

1. Tanimoto, A., Ueda, Y., Odaka, H., et al. 2019, arXiv:1904.08945, ApJ, in press
2. Ichikawa, K., Packham, C., Ramos Almeida, C., et al. 2015, ApJ, 803, 57
3. Garcia-Bernete, I., Ramos Almeida, C., Alonso-Herrero, A., et al. 2019, MNRAS, 486, 4917

## 銀河 a23 SDSS と WISE を用いた、可視光線で極めて青い Dust-Obscured Galaxies の探査 登口 暁 (愛媛大学 D2)

本講演では中間赤外線の明るさが可視光線の明るさの 1000 倍以上である Dust-obscured galaxies (DOGs; Dey et al. 2008) の中に見られた、可視光線で極めて青い DOGs (Blue-excess DOGs: BluDOGs) について報告する。母銀河と超巨大ブラックホールの共進化を理解する上で、ガスを豊富に含んだ銀河同士の合体シナリオが近年注目されている (Hopkins et al. 2008)。このシナリオの中で DOGs はクエーサーへ進化する前の塵に覆われた段階の天体だと考えられているが、観測的には明らかにされていない。Noboriguchi et al. (2019) では、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) と Wide Infrared Survey Explorer (WISE) を用いて発見した 571 天体の DOGs から、BluDOGs を 8 天体選出した。この天体は塵に覆われた活動銀河核でありながら可視光線では青いという興味深い性質を示し、中心の AGN 光が漏れ出しているかもしれないと示唆された。しかし、その統計的性質は見つかった BluDOGs の天体数が少ないことから議論できていない。また、この天体は HSC で観測されるような可視光線で暗い光度レンジだけで見られる天体なのか、より明るいレンジでも見られる天体なのかは明らかではない。そこで本研究は、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) の可視光線超広域サーベイデータと WISE の全天サーベイデータを用いて、比較的可視光線で明るい BluDOGs の探査を行った。結果として、SDSS-WISE DOGs の中でも BluDOGs は存在し、可視光線の暗い光度レンジでしか見られない現象ではないことがわかった。BluDOGs の統計的性質について本講演で議論する。

1. Dey et al. 2008, ApJ, 677, 943
2. Hopkins et al. 2008, ApJS, 175, 356
3. Noboriguchi et al. 2019, ArXiv e-prints, arXiv:1803.09951

## 銀河 a24 銀河衝突はクエーサー活動に影響を及ぼすのか? ~撮像・分光データによる検証~ 中野 すずか (国立天文台 M1)

クエーサーは太陽の 100 万倍以上の質量を持つ超巨大ブラックホール (SMBH) にガスが降着し、重力エネルギーを解放して中心核が非常に明るく輝いている天体である。その発現メカニズムは未解明であるが、複数の銀河の衝突合体により発現するという有力候補がある (e.g., Hopkins et al. 2007)。このため、クエーサーを宿主母銀河の形態とクエーサー活動の関係を調べることは、銀河の衝突合体によるクエーサー活動への影響を探る上で重要となってくる。しかし母銀河からの放射はクエーサー放射に比べて弱く、後者に埋もれているため、そのままでは母銀河の形態を調べるのが難

この問題を解決するため、本研究では、赤方偏移  $z < 1$  の Sloan Digital Sky Survey (SDSS) クエーサー 748 天体に対し、高い感度と角度分解能を持つ、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) の  $i$  バンドの撮像データを用いて、個々のクエーサー母銀河の衝突合体の兆候の有無を調べた。母銀河の形態を調べるためには、クエーサーの中心核からの光を取り除く必要がある。そこでクエーサー成分を点源 (PSF) モデル、母銀河成分をセルシックモデルで表し、それらを組み合わせたモデルでクエーサーと母銀河の分離を行い母銀河のみの画像を作成した。クエーサー成分を分離した画像から母銀河の衝突合体の兆候の有無を調べ、結果として、748 天体のうち、150 天体を衝突合体、272 天体を非衝突合体と分類した (残りは現段階で判断が難しいもの)。

また、衝突合体の有無により SDSS のスペクトル上に違いが現れるのかについて調査した。その結果、衝突合体しているクエーサーは、非衝突合体に比べて (1) よりダストに覆われている (減光し赤い) (2) 中心の BH 質量が小さく、活動性が高い (エディントン比が大きい) といった特徴を示した。本講演では、これまでに得られた結果や議論について報告する。

1. Hopkins et al. 2007, ApJ, 654, 731
2. Shen et al. 2011, ApJS, 194, 45

### 銀河 a25 binary QSOs as tracer of mergers Tang Shenli (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M1)

Since early 1970s, people have realized that merge and interaction of galaxies happens commonly (Toomre et al. 1972), and it plays an important role in the growth of central SMBH and evolution of the galaxy. Some simulations relate such a kind of merge event to the AGN activities (T. Tox et al. 2006, P. Capelo et al. 2018), they argued that galaxy mergers may trigger on the central SMBH and make it accrete actively, thus make quasars. Binary quasars are thought to be one scene in the whole merging scenario when two galaxies passed by each other first time and all triggered on. Later on, P. Green published their first sample of a couple of spatially resolved binary quasar (P. Green et al. 2010) both in optical and X-ray wavelength and talked about the environment around it (P. Green et al. 2011). We followed their research and locked on 150 binary candidates from SDSS and HSC catalog. This January, we carried out spectroscopic observation with Keck/Iris of 18 candidates, among which we confirmed 4 possible binary quasar samples. In this school I will show the spectrum of our samples and talk about their physics properties.

1. Green, P. J et al. 2010, ApJ, 710, 1578
2. Green, P. J et al. 2011, arXiv:1109.1278v1

3. P. Capelo et al. 2018, arXiv:1611.09244v2

### 銀河 a26 超大規模「面分光サーベイ」による AGN サンプル構築と AGN duty cycle の制限 鹿熊 亮太 (東京大学 宇宙線研究所 M2)

SDSS のような分光観測には事前のターゲットセレクションが必要であり、観測されるのは明るい天体のみに限られてきた [1]。しかし、SMBH 進化を考える上でこのような観測のバイアスは大きな問題となっている。例えば、[2] では、小さなサンプルから AGN の Duty cycle (SMBH が生涯のうち AGN として輝いている期間の割合) に光度依存性がある可能性を提示した。すなわち、暗い AGN と明るい AGN とでは SMBH への質量降着・成長の描像が異なるというのだ。未だ謎が多く残る SMBH 進化に関する詳細な描像を得るには、明るい天体のみでなく、暗いものまで含めた大規模な AGN サンプルが必要となる。そこで期待されているのがファイバーなどの装置を使い、観測領域すべてを分光してしまう【面分光サーベイ】だ。この 4 月、史上初の大規模面分光サーベイである Hobby-Eberly Telescope Dark Energy Experiment (HETDEX) [3] が初期データを公開した。輝線情報のみから天体を検出できるため、連続光が暗い AGN を含めた巨大サンプルが構築できる。しかし、大規模な面分光サーベイデータは世界で初めて登場したものであり、天体検出・分類のアルゴリズムはまだ確立されていない。我々は (i) 速度幅が大きい輝線を持つ (ii) 高階電離の輝線を持つ (iii) X 線で検出される (iv) 点源である という AGN の特徴を組み合わせ、独自の AGN 選択アルゴリズムを構築した。初期成果として一部の領域のみのデータからすでに 100 を超える AGN 候補天体の検出に成功している。これらにはすでに他の観測で同定されていた AGN も確かに含まれていた。今回は、大規模面分光サーベイデータからの AGN サンプル構築、そのサンプルを用いた Duty cycle 制限に関しての初期成果を中心に議論する。

1. Laurent P. et al., 2017, JCAP, 7, 017
2. Adelberger, K. L., & Steidel, C. C. 2005, apj, 630, 50
3. Hill, G. J., Gebhardt, K., Komatsu, E., et al. 2008, Panoramic Views of Galaxy Formation and Evolution, 399, 115

### 銀河 a27 HSC-SSP & CHORUS を用いた $z = 4.9$ における Type-II AGNs 探査 岩下 昂平 (愛媛大学 M2)

IceCube 実験により、TeV-PeV 程度と非常に高いエネルギーを持つニュートリノ事象が検出されているが、その起源は未だに謎に包まれている。起源天体の候補に星形成銀河やスターバースト銀河がある。超新星残骸で加速された宇宙線が銀河内で星間物質と衝突し  $\pi$  中間子を生成、それが崩壊しニュートリノになるというシナリオである。このシナリオで観測データが

説明できるか、盛んに研究がされているが、意見は一致していない。これは過去の研究が、比較的単純な見積もりしか行っていないなかったり、不定性の大きな仮定に基づいているためである。そこで本研究では、銀河形成の準解析的モデルに銀河からの高エネルギー放射（ガンマ線/ニュートリノ）の生成過程を組み込むことにより、信頼性が高いニュートリノフラックスの計算を行った。準解析的モデルは階層的構造形成の理論に基づく宇宙論的な銀河の形成進化のモデルであり、これを利用することで、ガス冷却や星形成、銀河合体とそれによるスターバーストなどを統合的に取り扱いながら計算を行うことができる。利用したモデルは高赤方偏移まで含め観測量をよく再現し、研究では様々な赤方偏移からの個々の星形成銀河/スターバースト銀河からのニュートリノ放射への寄与を、現実的な銀河進化モデルのもと計算することを可能にする。また、本研究ではガンマ線で観測されている銀河のデータを用いることでモデルの校正を行った。よくわかっている個々の銀河の性質を用いた点も本研究の特徴で、これにより信頼できる結論を出すことができると考えている。講演では、まず銀河からの高エネルギー放射について説明する。続いて銀河形成の準解析的モデルを紹介する。本研究で用いたモデルは「三鷹モデル」と呼ばれ、銀河形成進化に関わる様々な研究で利用されている。その後、本研究の結果とその示唆について発表する。

- 1 Aartsen, M. G., et al. (IceCube Collaboration), 2015, ApJ, 809, 98
- 2 Nagashima, M., Yoshii, Y., 2004, ApJ, 610, 23

## 銀河 a28 星形成銀河のアウトフロー速度の赤方偏移進化

菅原 悠馬 (東京大学 宇宙線研究所 D3)

活発な星形成銀河では、超新星爆発のエネルギーや運動量により星間ガスが加速され、銀河スケールのアウトフロー（銀河風）が生じる。アウトフローは銀河内部の星間ガス質量を減少させ、フィードバック機構として星形成を抑制することで銀河進化を制御すると考えられている。これまで、銀河の星間吸収線の青方偏移から銀河のアウトフロー速度が各赤方偏移で求められてきた。しかし、研究間で解析手法やサンプルの種族が統一されておらず、研究を比較して赤方偏移進化を議論することが難しかった。本講演では、 $z \sim 0, 1, 2, 5-6$  における星形成銀河のアウトフロー速度を測定・比較した結果を報告する。サンプルはアーカイブデータから、各赤方偏移における最大級の分光カタログを使って構築した。 $z \sim 0$  では SDSS DR7,  $z \sim 1$  では DEEP2 DR4,  $z \sim 2$  では Erb, et al. (2006) ApJ, 647, 128, そして  $z \sim 5-6$  では Capak, et al. (2015), Nature, 522, 455 を使った。個別の銀河スペクトルは信号雑音比 (S/N) が小さく、吸収線を検出するのは難しい。これらの銀河は赤方偏移 ( $z_{\text{sys}}$ ) が輝線から精密に求まっているので、 $z_{\text{sys}}$  を基に  $z \sim 0, 1, 2, 5-6$  でスペクトルを合成した。合成スペクトル中

の吸収線に Gaussian-like なプロファイルをフィッティングして、アウトフロー速度を測定した。各赤方偏移のアウトフロー速度を比較したところ、同じの星質量・星形成率範囲の銀河のアウトフロー速度は、 $z \sim 0$  から  $z \sim 2$  にかけて 0.2 dex ほど単調に増加した一方、 $z \sim 5-6$  では  $z \sim 2$  と同程度の値 ( $700-800 \text{ km s}^{-1}$ ) を示した。さらに、アウトフロー速度は、星・ハロー質量比を使って星質量から換算したハローの回転速度と強い相関を示した。本研究の観測結果は FIRE シミュレーション (Muratov, et al. 2015, MNRAS, 454, 2691) の予測とも良く一致した。本研究で使用した星質量 ( $M_* \sim 10.1 M_{\odot}$ ) の銀河では、ハローの回転速度は  $\propto (1+z)^{0.5}$  で進化する。アウトフロー速度がハローの回転速度により決まるならば、アウトフロー速度の赤方偏移進化は自然に説明されることを示した。詳細は以下の論文を参照していただきたい。

1. Sugahara, et al. (2019), arXiv:1904.03106
2. Sugahara, et al. (2017), ApJ, 850, 51

## 銀河 a29 HSC-SSP で探る $z \sim 4-5$ の AGN 光度関数 Shimodate Karin (東京大学 宇宙線研究所 M2)

赤方偏移  $z \sim 1100$  で中性化した銀河間の水素原子は  $z \sim 6-10$  で再び電離した。これを宇宙再電離と呼ぶ。宇宙再電離は宇宙史最後のビッグイベントであるが、その原因や電離過程には謎が多い。宇宙再電離の原因は宇宙初期の天体からの紫外放射と考えられる。しかし紫外放射源となった天体の正体はわかっていない。最有力候補は星形成銀河 (SFG) と活動銀河核 (AGN) である。最近まで、主な紫外放射源は AGN ではなく、SFG であると考えられてきた。それは、宇宙初期における AGN は電離光子源として非常に数が少ないと予想されていたからである (e.g., [1])。しかし最近の観測結果から、宇宙初期の AGN はこれまでの予想よりも多く存在することが示唆された ([2]G15)。そのため AGN が宇宙再電離の主な原因である可能性が見直されている。本研究の目的は宇宙再電離の原因天体を特定し、これまで多くなされていた議論に決着をつけることである。

AGN の宇宙再電離への寄与を議論するためには AGN の光度関数及びその進化を調査することが必要である。従来の研究のほとんどは形態や色等から AGN 候補天体を選択し、光度関数を描いていた。しかしこの手法では他天体の混入率や AGN 選択の完全性の検証は難しい。AGN の光度関数は double power-law (DPL)、SFG の光度関数はシェヒター関数または DPL でよく表されることが知られている。そこで今回の研究では  $z \sim 4, 5$  それぞれにおいて検出された全天体の光度関数にシェヒター関数と DPL を合成してフィッティングした。今回得られた  $z \sim 4$  での光度関数が予想する暗い (紫外等級  $> -22$  等級) AGN の数密度は、これまでの研究の中で最高密度を予想する G15 と同程度であった。しかし、 $z \sim 5$  においては G15 よりも暗い AGN が少ないという結果になった。これは、G15 で示されたよりも AGN の個数密度が  $z > 4$  で急激に減少

することを示す。宇宙再電離期である  $6 < z < 12$  でもこの紫外放射が急激に小さくなる傾向が続くとすると、AGN はほとんど宇宙再電離に寄与していなかったと結論づけることができる。

1. Masters, D., et al. 2012, ApJ, 755, 16
2. Giallongo, E., et al. 2015, A&A, 578A, 83
3. Ono, Y., et al. 2018, PASJ, 70, S10

## 銀河 a30 宇宙再電離期における暗いクエーサー周囲の近接電離領域 石本 梨花子 (東京大学天文学教室 M1)

宇宙再電離は銀河間空間の電離状態が大きく変わる初期宇宙の一大イベントであるが、いつ、何が、どのように引き起こしたのかは完全に理解されていない。観測的に宇宙再電離を定量化する手法の一つにクエーサーのスペクトルの near-zone size (以下  $R_p$ ) を測る方法がある。これはクエーサー近傍の電離バブルの半径に対応し、クエーサー周囲の中性度、クエーサーの光度と年齢に依存するとされてきたが、中性度にはよらないという指摘もある (Eilers et al. 2017)。この  $R_p$  は、今まで比較的光度の高いクエーサーについてしか測定されていない。よって、その時代の宇宙全体の平均的な中性度を反映した結果かどうかは定かではない。

そこで、われわれは、すばる望遠鏡で新たに見つけた、これまでよりも暗いクエーサーのスペクトルを用いて  $R_p$  の測定を行った。用いたクエーサーは [CII] による正確な赤方偏移が分かっており、 $R_p$  の測定をより正確に行うことができる。IGM 吸収を受ける前のクエーサースペクトルの推測には PCA (主要因解析) を用いた。さらに、先行研究で用いられた明るいクエーサーの赤方偏移をより正確なものに更新し、暗いクエーサーを加えることで、光度のダイナミックレンジを従来に比べて 6 倍程度広げることができた。

これにより、まず  $R_p$  の光度依存性を調べ、理論と合致するという結論を得た。この光度を補正し赤方偏移に対する依存性を見たところ、この進化は緩やかであり、これについても先行研究と合致する。明るいクエーサーと暗いクエーサーでは、光度補正した  $R_p$  に有意な違いは見られなかったが、中には極端に小さい  $R_p$  を持つクエーサーも存在した。このようなクエーサーは、他に比べて年齢が若い可能性が示唆される。

1. Eilers et al., 2017, ApJ, 840, 24
2. Matsuoka et al., 2016, ApJ, 828, 26
3. Suzuki et al., 2005, ApJ, 618, 592

## 銀河 a31 重力レンズ効果と可視/近赤外深撮像観測で探る $z \sim 6 - 9$ の低質量銀河と球状星団候補 菊地原 正太郎 (東京大学 宇宙線研究所 D1)

初期宇宙 (赤方偏移  $z > 6$ ) で形成された低質量銀河 (星質量  $M_* < 10^7 M_\odot$ ) は、現在までの百数十億年をかけて銀河系のよ

うな質量の銀河に成長した [1]。初期宇宙では低質量銀河が支配的であったことを併せて考えると、 $z > 6$  における低質量銀河の量や進化を調べることは初期の星形成史を明らかにする上で重要である。しかし  $z > 6$  の低質量銀河は暗いため観測が難しく、星質量の進化はよく制限されていなかった。

そこで本研究では、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) による銀河団領域の深撮像プログラム (HFF) のデータを解析した。遠方銀河からの像は前景銀河団の重力レンズ効果により増光されて見えるため、HST による深撮像と増光を組み合わせることで、極めて暗い (つまり質量の小さな) 銀河の検出が期待される。

HST で静止系紫外等級 ( $M_{UV}$ ) を測定し、 $z \sim 6 - 7, 8, 9$  の銀河を計 357 個検出した。HST, Keck, VLT, *Spitzer* のデータを重力レンズ効果の増光率で補正し、銀河の静止系紫外-可視における真のスペクトルを得た。このスペクトルをもっとも良く再現するようなモデルスペクトルを、モデルのパラメータを変化させながら探し、銀河の星質量  $M_*$  を求めた。

上記の解析で得た  $M_* - M_{UV}$  関係を光度関数 [2] に適用することで、星質量関数を求めた。この結果、星質量関数に対してこれまでの研究でもっとも低質量の  $M_* \sim 10^6 M_\odot$  にまで制限をかけることに成功した。さらに星質量関数を積分して、星質量密度を導出した。星質量密度の進化は星形成密度の積分により予測される進化と概ね一致しており、 $z > 8$  におけるダークマターハロー内の星形成効率が初期宇宙ほど大きい可能性が示された [3]。

また銀河の  $M_*$  と有効半径  $R_e$  の分布を求め、銀河系内の球状星団の分布と比較した。その結果、銀河系内の球状星団と同程度の  $M_*$  と  $R_e$  をもつ銀河が複数個見つかった ( $M_* \leq 10^7 M_\odot$  かつ  $R_e \leq 40$  pc)。球状星団は一般に非常に年老いていることを併せて考えると、これらの銀河は、現在の球状星団の祖先 (初期球状星団候補) の可能性がある。

1. Behroozi et al. 2018, arXiv:1806.07893
2. Ishigaki et al. 2018, ApJ, 854, 73
3. Oesch et al. 2014, ApJ, 786, 108

## 銀河 b1 ALMA を用いたサブミリ波銀河のクラスターリング解析 三橋 一輝 (東京大学天文学教室 M1)

近年、SCUBA などのサブミリ波での検出装置を用いて、高赤方偏移で赤外線で非常に明るいためにサブミリ波で検出される銀河 (サブミリ波銀河、SMGs) が発見されている。これらの SMGs は大量のダストを含んでおり、内部の星形成によって大質量星から放出される紫外線を吸収したダストによる赤外の放射が非常に大きい。その赤外放射から見積もられる星形成率は  $\sim 1000 M_\odot/\text{yr}$  にものぼり、非常に高い星形成率を示すが、その高い星形成率の起源はまだよくわかっていない。近年では ALMA を用いた高分解能の観測によってその星形成率の上限にはかなり制限がつけられているが、それでも他の星形成銀河

と比べて非常に高い種族の銀河であると言える。

クラスタリング解析は、ある種類の銀河の含まれるダークマターハロー (DMH) の質量に制限をつけることにより、その種類の銀河と他の銀河がどのように異なっているのかを知り、またその種類の銀河が今日ではどのような銀河に成長するのかを理解するための重要な鍵である。例えば先行研究では SMGs のクラスタリング強度が同じ赤方偏移の星形成銀河 (star-forming galaxy) と比較するとあまり差異が見つからないことから、星形成銀河のうちでダスト量が多いだけの種類であるという説も出てきているが、未だサンプル数の少ないこともあって結論には至っていない。また、その DMH の質量から今日の楕円銀河 (elliptical galaxy) や銀河団の祖先であると言われている。

本研究では COSMOS 領域で検出された  $z \sim 1-4$  の SMGs のデータを用いて、その DMH の質量について同領域での他の様々な種類の銀河との比較により SMGs とはどのような種族の銀河であるのかや、今日までの SMGs の成長について明らかにすることを目標とする。講演ではこれらの解析手法と結果、今後の展望について報告する。

1. Wilkinson et al. 2017, MNRAS, 464
2. Simpson et al. 2015, ApJ, 807, 128

## 銀河 b2 すばる Hyper Suprime-Cam で見つかった青い銀河団の X 線の性質 美里 らな (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙の基本的な構成要素である銀河は、銀河中の星生成活動が活発であれば青色に、そうでなければ赤色に見える。青い銀河の割合 (ブルーフラクシオン) が遠方の銀河団ほど増加する、つまり、現在より過去の方が星生成活動が活発であったことを示す、ブッチャー・エムラー効果という現象が観測されているが、なぜ星生成活動が減衰し、終息したのかは明らかになっていない。また、銀河団を X 線領域で観測すると、銀河団中に広がって分布している高温のガスが観測される。近傍の銀河群では、メンバー銀河に含まれるブルーフラクシオンが大きいほど広がった高温の X 線光度が低い、あるいはほとんど X 線放射を持たないことが知られている (Mulchaey 2000; Ota et al. 2004)。このような反相関が存在する理由は、銀河群のようなより小さな質量を持つ系ではガス加熱におけるメンバー銀河の役割が相対的に大きくなるためではないかと予想されるが、まだ解明されていない。そこで、様々なブルーフラクシオンを持つ銀河団ガスの性質を調べることで、銀河団中の銀河進化の解明につなげることができるため、遠方銀河団の X 線観測は重要である。

銀河団の性質を調べるために、まず、すばる望遠鏡の HSC (Hyper Suprime-Cam) を用いた銀河団調査である、HSC-HSC (Hybrid Search for Clusters with HSC) サーベイのカタログから銀河団を選択する。HSC-HSC サーベイは以下の 2 つ

の銀河団探査を組み合わせている。1. red sequence survey : 広帯域フィルターを用いて、星生成活動が終了した銀河を探査する、2. Blue cloud survey : 狭帯域フィルターを用いて、星生成活動が活発な輝線銀河を探査する。これにより、銀河団中のブルーフラクシオンがわかる。次に、選択した銀河団の XMM-Newton 衛星の観測データを解析する。XMM-Newton 衛星は 3 台の X 線望遠鏡を搭載しており、焦点面にはそれぞれ CCD カメラが置かれている。今回は、HSC-HSC サーベイで発見された赤方偏移 0.84 に位置する青い銀河団に注目し、XMM 衛星を用いたデータ解析結果について報告する。

1. Aihara, H., Arimoto, N., Armstrong, R., et al. 2018a, PASJ, 70, S4
2. Miyazaki, S., Komiyama, Y., Kawanomoto, S., et al. 2018, PASJ, 70, S1

## 銀河 b3 CLUMP-3D: Three-dimensional Shape and Structure of 20 CLASH Galaxy Clusters from Combined Weak and Strong Lensing 奈女良 朱里 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

私達は CLASH (the Cluster Lensing And Supernova survey with Hubble) サーベイで観測された 20 個の銀河団に対して、強弱重力レンズ効果を組み合わせることで銀河団の三軸不等質量モデルに対して制限をした論文 (Chiu et al. ApJ, 860, 126) のレビューを行う。 $\Lambda$ CDM モデルに基づくシミュレーションによると、銀河団ハローは球対称ではなくプロレート型の三軸不等モデルが望ましいと予想されている。本モデルでは、三軸不等の NFW (Navarro-Frenk-White) モデルを採用し、質量とコンセントレーションパラメータと三軸不等比の主に 3 つのパラメータにベイズ推定を用いて制限を与える。一般相対性理論に基づく、銀河団のような重たい天体の周囲では時空が歪むため光の経路が曲がり、背景にある銀河の像が歪む。これを重力レンズ効果と呼ぶ。弱い重力レンズ効果は歪みの効果は小さいが、多数の銀河の形状を測定することによって重力レンズ信号を取り出すことができる。一方、強い重力レンズ効果は銀河団の中心部の質量の大きいところで見られる現象で、背景銀河の像が複数に分かれて観測されることもある。両者のデータを組み合わせることによって、銀河団の中心部から外縁部までの質量分布を復元することができる。本論文の解析によって、平均的コンセントレーションパラメータは球対称モデルの場合と一致していることが分かった。また、三軸不等比はプロレートモデルと一致することが分かった。本レビューでは、三軸不等の質量モデルの解析解の説明を最初に行い、ベイズ推定の説明、及び本論文の結果について紹介する。

1. Chiu et al. ApJ, 860, 126

## 銀河 b4 系外銀河の電波源におけるファラデー回転 測度と赤方偏移依存性の調査

大前 陸人 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M1)

宇宙の大規模構造の形成や銀河形成において、宇宙磁場が重要な役割を果たすことが理論的に指摘されている (Ryu et al. 2003)。そのため、大規模構造の磁場を観測的に測定することによって、宇宙の進化の間での磁場強度の変化を明らかにすることは、重要な課題の一つである。磁場情報は、電波連続波の偏光観測から回転測度 (RM) を導出することで得ることができるが、その情報は視線方向に積分されている。つまり、ターゲットとなる系外銀河の磁場情報には、天の川銀河成分と背景の大規模構造の情報も含まれている。そこで、天の川銀河磁場をモデル化し、観測値から差し引き、系外銀河自身の RM である RRM を赤方偏移  $z$  の関数として導出する試みが多数なされてきた (e.g. Fujimoto et al. 1971)。しかし、RRM 分布の分散や視線上に存在する物質の効果、赤方偏移に伴う RRM の進化に関する議論は現在も収束しておらず、高感度観測により高赤方偏移の統計数を上げる必要性が指摘されている。

本講演でレビューする Hammond ら (2013) では、VLA スカイサーベイにより、1.4GHz で検出された 4003 個の系外の電波源の RRM と赤方偏移のカタログを作成している。これは最大のサンプル数であり、赤方偏移は  $0 < z < 5.3$  までカバーしている。このカタログを用いた統計解析の結果、赤方偏移に伴う RRM の有意な変化は見られなかったが、RRM と偏波率  $p$  の間には強い反相関が確認された。これは前景磁場または電子密度の小規模変動によるビーム偏波解消の結果であると主張している。また、Hammond らは、観測された RRM の分散と RRM と  $p$  の反相関の両方の結果から、天の川銀河以外の前景成分も考慮する必要性を示唆している。

1. Alison, M. Hammond., Timothy, Robishaw. & B. M. Gaensler. 2013, arXiv:1209.1438v3
2. Ryu, D., Kang, H., Hallman, E., & Jones, T. W. 2003, ApJ, 593, 599
3. Akahori, T. & Ryu, D. 2011, ApJ, 738, 134

## 銀河 c1 初代銀河からのダークマターの性質の手がかり

佐藤 裕太 (茨城大学 理工学研究科理学専攻物理系 M1)

2021 年に JWST 打ち上げが予定されており、今後数年のうちに高赤方偏移 ( $z \sim 6$ ) 宇宙に関する膨大なデータが利用可能になると予想されており、これらのデータは初期段階の銀河形成の理解に役立つ。一方でダークマター (DM) 探査は未だ成功しておらず、DM の質量が軽いためと予想されている。DM はその速度により分類され、粒子速度の速い DM を Hot DM(HDM)、遅い DM を Cold DM(CDM)、その中間に位置す

る DM を Warm DM(WDM) と呼ぶ。CDM モデルは、大スケールでは観測とよく一致しているが、銀河以下の小スケールでは、一致しないことが知られている。これを解決し得るのが Warm DM(WDM) である。

本発表では、[1] の論文レビューを行う。本研究では、 $z \sim 10$  から 5 の銀河形成の 38 個の高解像度シミュレーションを使って、赤方偏移の大きい宇宙における 3keV の WDM 候補の影響を調べた。ここでは、星の質量関数とグローバルな星生成率に注目し、中性水素の割合の時間発展と電子散乱の光学的厚さについて考察し、次の結果が WDM と CDM の区別に寄与していることを見いだした。まず、WDM は数  $10^9 M_{\odot}$  未満の質量を持つハローの数を抑制すること、次に一定のハロー質量では、WDM は CDM よりも生成される星が少ないことが分かった。これらの結果により、 $10^7 M_{\odot}$  以下の星質量を持つ銀河では、WDM でより低い星質量関数が生成される。 $z > 7$  の場合、WDM シナリオでは、グローバルな星生成密度は  $1/2$  低くなり、中性水素の脱出率は  $z \sim 6$  で 0.3 高い。しかし、脱出率を 23 % から 34 % に増やすことによって、CDM および観測値と部分的に一致することが分かった。

本研究の結果として、バリオンの物理モデルが与えられれば、高赤方偏移での銀河形成シミュレーションが、暗黒物質候補を区別するための重要な道具になり得ることが示された。

1. Boyan K. Stoychev et al. (2019), arXiv:1905.00432

## 銀河 c2 ダークマター欠乏銀河の形成過 大滝 恒輝 (筑波大学 宇宙理論研究室 M1)

現在の宇宙における銀河形成の標準モデルでは、コールドダークマターによる階層的な構造形成がその主要な枠組みとして受け入れられている。最先端の理論的および観測的知見によれば、ダークマターが銀河質量の 9 割以上を占めていることが知られている。しかし最近、Dragonfly Telephoto Array によって、楕円銀河 NGC1052 に所属する銀河 NGC1052-DF2 のダークマター質量は、理論的に予測される量よりも極端に少ないことが示唆された (van Dokkum et al. 2018)。この銀河は ultra diffuse galaxy(UDG) に分類される。UDG とは、天の川銀河程度の effective radius の大きさに対して、表面輝度が矮小銀河程度の非常に小さい銀河のことであり、現在では 1000 個近い UDG が近傍宇宙で見つかっている (van Dokkum et al. 2015; Koda et al. 2015)。NGC1052-DF2 内にある球状星団の速度分散から計算される力学質量と光度から得られる恒星質量はどちらも  $10^8 M_{\odot}$  のオーダーである。同程度の恒星質量を持つ銀河で予測されるダークマターの質量より二桁小さく、バリオンが支配的でダークマター欠乏銀河であることがわかる。また 2019 年新たに、同様な性質を持つ銀河 NGC1052-DF4 が発見され、このような銀河は特別な銀河ではない可能性が示唆された (van Dokkum et al. 2019)。ダークマターが支配的なこの宇宙において、このようなダークマター欠乏銀河の形成シナ

リオの理論研究は始まったばかりである。我々は、このようなダークマター欠乏銀河がダークマターサブハロー同士の衝突によって形成される可能性を考えており、現在 SPH 法と N 体計算を用いて、ガスの冷却や星形成効率等を考慮した数値シミュレーションを行なっている。本講演では、これらの結果・考察について紹介し、議論する。

1. Koda, J., Yagi, M., Yamanoi, H., & Komiyama, Y. 2015, ApJL, 807, L2
2. van Dokkum, P., Danieli, S., Cohen, Y., et al. 2018, Nature, 555, 629
3. van Dokkum, P. G., Abraham, R., Merritt, A., et al. 2015, ApJL, 798, L45

### 銀河 c3 シミュレーションによるダークマターハローへの質量降着と星形成率の関係の考察 奥 裕理 (大阪大学 宇宙進化グループ M1)

銀河形成を理解することは、天文学における重要な問題の一つである。Lambda コールドダークマターモデルでは、銀河はダークマターハロー内でガスが集まって形成されると考えられており、ダークマターハロー質量 ( $M_{mh}$ ) は銀河形成において最も基本的な物理量である。近年、すばる望遠鏡に搭載された超広視野カメラ Hyper Supreme-Cam により、 $z = 4-6$  の遠方銀河の高解像度データが豊富に得られるようになり、銀河の様々な物理的性質と、ハロー質量  $M_{mh}$  および赤方偏移  $z$  の関係が明らかになってきた。特に、ダークマターハローへの質量降着率 ( $\dot{M}_{mh}$ ) に対する星形成率 (SFR) の比とハロー質量  $M_{mh}$  の関係 ( $SFR/\dot{M}_{mh}-M_{mh}$  関係) は、赤方偏移  $z$  によらず、 $SFR/\dot{M}_{mh}-M_{mh}$  関係は銀河形成における基本的な関係性であると示唆されている (Harikane et al. 2018)。 $SFR/\dot{M}_{mh}$  の値は、 $M_{mh} = 10^{11.35} M_{\odot}$  で最大値をとり、 $M_{mh}$  が小さい銀河では超新星爆発 (SN) フィードバック、 $M_{mh}$  が大きい銀河では活動銀河核 (AGN) によるフィードバックによって SFR が抑えられていると考えられている。本研究では、流体シミュレーションコード Gadget 3-Osaka (Aoyama et al. 2017; Shimizu et al. 2019) を用いて、共動体積  $geq(10Mpc/h)^3$  のシミュレーションボックスで赤方偏移  $z = 2$  までのシミュレーションを実行し、Friend-of-friend アルゴリズムでハローを同定し、スナップショット間の  $\dot{M}_{mh}$  を見積もることで、 $SFR/\dot{M}_{mh}-M_{mh}$  関係が再現できるかを調べる。また、フィードバックが SFR に及ぼす影響についても議論する。

1. Y. Harikane et al., PASJ 70 S11 1–27 (2018)
2. S. Aoyama et al., MNRAS 466, 105–121 (2017)
3. I. Shimizu et al., MNRAS 484, 2632–2655 (2019)

### 銀河 c4 銀河のダークハロー fundamental plane の進化 福島 啓太 (大阪大学宇宙進化グループ M1)

これまで銀河団は、宇宙の中で最大のビリアル平衡にある天体であると考えられてきた。しかし最近の研究はそれが正しくないことを示している (Fujita et al. 2018)。銀河団のダークハローの密度分布は Navarro-French-White profile で表わされる。その特徴的な半径を  $r_s$ 、質量を  $M_s$  とし、さらに銀河団ガスの温度  $T_x$  として、対数空間 ( $\log r_s, \log M_s, \log T_x$ ) 上に多数の銀河団をプロットすると平面 (Fundamental Plane) に沿って分布するが、その向きはビリアル平衡から予想される向きと異なる。これは、銀河団は未だにビリアル平衡に達しておらず、成長途中にあるということを示している。この結果は観測もシミュレーションも同様である。

今回我々はより質量の小さい系である銀河が、果たしてビリアル平衡に達しているかどうか同様の解析を行って調べることにした。そこで Illustris TNG のシミュレーションデータを用い、各赤方偏移で、銀河の ( $\log r_s, \log M_s, \log \sigma^2$ ) 空間上での分布を調べた。Illustris TNG の銀河カタログには温度  $T_x$  の情報はないので、速度分散  $\sigma^2$  で代用した。その結果、銀河も Fundamental Plane を構成するものの、その向きは銀河団と異なることが分かった。さらにその向きは、ほぼビリアル平衡であることを示していた。

本講演では質量や赤方偏移ごとの平面の向きについて詳細に調べた結果を紹介する。また銀河の星形成史との関係も議論したい。

1. Fujita, Y., Umetsu, K., Rasia, E., et al. 2018, apj, 857, 118

### 銀河 c5 CTA で探るダークマター 野村 亮介 (東京大学 宇宙線研究所 M1)

人工衛星の観測により、宇宙の全エネルギーのうち約 27 % をダークマターが占めていることが分かった。ダークマターは質量は持つが電磁波を一切出さず光学的に観測ができないため、未だに正体が不明であり、宇宙物理学における重要な課題である。

ダークマターの有力な候補の 1 つとして WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) が挙げられる。WIMP に期待される質量や対生成断面積、対消滅断面積などのパラメータの範囲は広いので、その探索には加速器実験、直接探索、間接探索などの手法が用いられている。

加速器実験は宇宙初期の状態を再現するために光速近くまで加速させた陽子同士や電子陽電子等を衝突させ、発生した粒子を観測する方法で、数百 GeV までの質量範囲が探索対象となる。微小な対生成断面積まで WIMP を探索できるが、探索できる範囲は加速器のエネルギーによって制限されている。

直接探索はバックグラウンドを減らすため、地下に設置した検出器を用いてダークマターと原子核との散乱により電離した電子やシンチレーション光等を検出する。

間接探索とは WIMP の対消滅や崩壊により生成された粒子を観測する方法である。主に加速器が対象とする質量よりも大きな質量領域 (TeV 領域) が探索対象となる。

我々が現在建設中の次世代ガンマ線天文台 Cherenkov Telescope Array (CTA) は TeV 領域において、現行の大気チェレンコフ望遠鏡 H.E.S.S の約 10 倍程度高い感度を持ち、理論的に予言されるガンマ線の信号を検出するのに十分な感度であると考えられる。仮にそういったガンマ線の信号が検出されなくとも、モデルに厳しい制限がつく。

本講演では、ダークマターについてのレビュー、そして CTA がダークマター探索に対してどのように貢献するかについて述べる。

1. CTA-Japan Consortium Cherenkov Telescope Array 計画書 (2014)

## 銀河 c6 銀河団の衝撃波面で期待される 1 次フェルミ加速

野口 実沙子 (青山学院大学大学院 理工学研究科 M1)

宇宙空間には、宇宙線という高エネルギー粒子が飛び交っている。宇宙線の起源として超新星残骸の無衝突衝撃波が考えられているが、未だ理論的な解明には至っていない。銀河団周辺の降着衝撃波も宇宙線電子の源ではないかと考えられ、衝撃波面でのフェルミ加速によって宇宙マイクロ背景放射 (CMB) を種光子とした逆コンプトン散乱が起き、その放射を観測することができれば、銀河団周辺の降着衝撃波が宇宙線源であるという裏付けをすることができる。本発表では、衝撃波面で期待される 1 次フェルミ加速について述べる。

## 銀河 c7 降着衝撃波による逆コンプトン散乱放射の可視光観測に適した銀河団の決定 大久保 宏樹 (青山学院大学大学院理工学研究科 M1)

宇宙空間には、宇宙線という高エネルギー粒子が飛び交っている。宇宙線の起源として超新星残骸の無衝突衝撃波が考えられているが、未だ理論的な解明には至っていない。銀河団周辺の降着衝撃波も宇宙線電子の源ではないかと考えられ、衝撃波面でのフェルミ加速によって宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を種光子とした逆コンプトン散乱が起き、その放射を観測することができれば、銀河団周辺の降着衝撃波が宇宙線源であるという裏付けをすることができる。これまで硬 X 線とガンマ線で観測しようと研究されてきたが、明確な検出例は未だ出ていない。

そこで、可視光で観測しようと考えたのが先行研究の Yamazaki & Loeb (2015) である。これまで可視光で観測しよう

と考えられなかったのは、可視光では暗すぎて検出されないと考えられていたからである。しかし最近になって、Dragonfly Telephoto Array などの超低面輝度の放射を観測することができる手法が確立し、検出が期待されたことによって、可視光での観測に関する研究に至った。

私の研究では、独自の観測に向けて逆コンプトン散乱放射の表面輝度を求め、観測の可能性のある銀河団を絞り込んだ。

1. Yamazaki R., Loeb A., 2015, MNRAS, 453, 1990Y
2. Fujita Y., Kato T. N., 2005, MNRAS, 364, 247

## 銀河 c8 Gaia データを用いた天の川銀河の構造解析 佐藤 元太 (東北大学 天文学専攻 M1)

Gaia DR2 のデータの正確なデータを用いて、天の川銀河の構造を解析した。実空間、速度空間、位相空間における特徴を明らかにし、銀河の進化について簡単に考察した。

1. Antoja et al. arXiv:1804.10196(2018)
2. Johnson & Soderblom (1987), The Astronomical Journal, 93, 864-867

## 銀河 c9 SDSS と ALFALFA データを用いた近傍銀河のインフロー、アウトフローの解明 Namiki Shigeru (国立天文台 D1)

一般に銀河はその内部で星が形成されることを繰り返して成長するが、この過程には多くのプロセスが関わっている。例えば、銀河の外部から中性水素ガスが流入し (インフロー)、銀河内のガスを材料に恒星が形成され (星形成)、星が一生を終える際の爆発によって星の質量の一部は再び銀河内部のガスとなり、また一部は銀河外に流出する (アウトフロー)。このようにインフロー、アウトフローは銀河進化を学ぶ上で非常に重要であるが、既存の望遠鏡や観測装置でそれらを捉えることは非常に困難である。そこで、本研究では観測可能な銀河のパラメータ (星質量、ガス質量、金属量) と簡単な銀河進化モデルを組み合わせることでインフロー、アウトフローの性質を調べる。発表者は ALFALFA サーベイと SDSS のカタログを組み合わせ、3441 個の近傍の星形成銀河について星質量、ガス質量、金属量など様々な情報を得た。そしてこのデータとモデルを比較した結果、星形成が活発な銀河では不活発な銀河に比べ流入したガスから星が形成される際の効率が低く、星形成活動に伴うアウトフローの効率が低いとわかった。一般に星形成が活発な銀河では中心部での星形成率密度が高くなる傾向にあるが、全体で見れば同じ星形成率でも集中度が高い方が周囲のガスを吹き飛ばしやすくと考えると、その分アウトフローの効率は大きくなる。また、これによってインフローの降着が阻害されるため、インフローに対する星形成の効率が下がるのではないかと考えられる。今回のポスターでは上記の解析や結果の解釈について詳細に議論する。

1. Yabe, K., Ohta, K., Akiyama, M., et al. 2015, ApJ, 798, 45
2. Haynes, M. P., Giovanelli, R., Kent, B. R., et al. 2018, ApJ, 861, 49
3. Prantzos, N. 2008, in EAS Publications Series, Vol. 32, EAS Publications Series, ed. C. Charbonnel & J.-P. Zahn, 311–356

## 銀河 c10 SDSS システムにおける渦巻銀河の内部減光補正と腕形態による星形成の比較 石井 菜摘 (東京学芸大学 銀河天文学研究室 M1)

渦巻銀河は、長い 2 本の腕が明瞭に確認される Grand-design(以下, GD) と、短い多数の腕からなる Flocculent(以下, FL) の 2 種類に大別される。この二つの渦状腕形態について、これを維持するための物理的機構が、GD では密度波 (Lin & Shu 1964), FL では確率的星形成伝播 (Seiden & Gerola 1982) と、異なるモデルが提出されている。このため、GD と FL の星形成の差異についても、様々な議論がなされてきた (例えば、Romanishin 1985, Elmegreen & Elmegreen 1986, Cedres *et al.* 2005, Elmegreen *et al.* 2011)。

本研究では Sloan Digital Sky Survey (以下, SDSS) の均一かつ高精度な銀河サンプルを用いて、その可視光カラーの比較から GD と FL の星形成活動性の違いの有無を統計的に調査した。

銀河の可視光カラーを議論する際には、銀河自身による吸収・赤化 (内部減光, internal extinction) を補正する必要がある。本研究では、まず、SDSS の各バンドおよびカラー  $u-r$ ,  $g-r$ ,  $g-i$ ,  $r-i$  における、内部減光量をハッブル形態毎に導出した。次に、これを用いて、Elmegreen & Elmegreen (1987) によって分類された 56 個の GD と 53 個の FL サンプルに対して、 $u-r$ ,  $g-r$ ,  $g-i$ ,  $r-i$  の内部減光を補正した。そして最後に、ハッブル形態毎の GD, FL の各カラーの度数分布に対して、両者の母集団が同じであるという帰無仮説の下で Kolmogorov-Smirnov test を行った。

本研究の結果、GD と FL の SDSS カラー分布に対して、有意水準 95 % で有意な違いは認められなかった。

1. Romanishin 1985, ApJ, **289**:570
2. Elmegreen & Elmegreen 1986, ApJ, **311**:554
3. Cedres, Capa & Tomita 2005, ApJ, **634**:1043

## 銀河 c11 銀河の定量的分類とその成因 赤堀 美桜 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

銀河の形態はハッブル分類の楕円銀河か渦巻銀河かをはじめとして様々な分類されてきており、銀河の進化を知るうえで重要な情報を持っていると推測される。本研究では銀河の形態分類の中でも特に渦巻銀河の渦状腕の形状に注目し、その形状の違いが銀河の形成・進化とどのように関係するのか解明を目

指す。渦状腕ははっきりとした腕が見えるものもあれば、フロキュレントと呼ばれる対称性が低く小さな断片から成る渦巻構造を持つ羊毛状のものもある。渦状腕の分類は Elmegreen をはじめとする研究者によって度々行われてきてはいるものの、この形状の違いが何に起因するものなのか、詳細はまだ解明されていない点が多い。そこで、多数の銀河について個々の銀河の諸性質や環境などとの比較を行い、腕の形状との関連について調べていきたい。まず、多数の銀河に対して同基準で腕の形状を客観的に分類することに着手した。データは WISE の  $3.4 \mu\text{m}$  バンドの画像を用い、銀河中心からの同心円上での明るさのコントラストに対してフーリエ変換を適用して渦状腕を同定した。試験的に実施した結果は Elmegreen らの分類した銀河において合致した。腕の巻きつきとバルジ部分の大きさによって腕を同定できる半径が異なるため、多数の銀河に対して同定を行うための自動化には今後最適なバンドの検証も含めて調整が必要なのことがわかったが、今回の方法で形状の分類ができそうな手応えを得た。高精度での腕の分類方法を探るとともに、今後はそのほかの表面輝度分布関数、中心集中度、バーの有無など銀河の特徴を複数組み合わせることで、より客観的で、精度の高い形態分類を多数の銀河について行い、分類結果と銀河の性質や環境との関連性について調べていく予定である。

1. D. M. Elmegreen and B. G. Elmegreen ApJ, 314, 3 (1987)
2. D. M. Elmegreen, B. G. Elmegreen et al. ApJ, 737, 32 (2011)

## 銀河 c12 空間分解した銀河におけるスケーリング側の研究 近藤 千紘 (名古屋大学 銀河進化学研究室 ( $\Omega$ 研) M1)

銀河全体で積分した物理量の関係、いわゆるスケーリング側は多様なものが知られており、これを規定する素過程の解明は銀河物理学上の重要課題のひとつである。本研究では近傍銀河における星形成率と星質量の関係、star formation main sequence (SFMS, e.g., Brinchmann et al. 2004) とガス質量、および星質量の関係に注目した。どちらの関係も先行研究においてはそれぞれの銀河を積分したグローバルな関係として求められていたものである。

本研究の目標は、空間分解したスケーリング側においてもグローバルな関係と同じ傾向を示すのかを調べ、また空間分解したスケーリング側から、その素過程を解明することである。空間分解の手法としては、1 ピクセル 1 kpc とした空間分解と、1 kpc 間隔の楕円環に空間分解した。前者の手法はすでに空間分解した SFMS を調べる際に用いられている手法であり、後者の手法は半径依存性を調べるために採用した。

近傍銀河のサンプルは DustPedia と COMING (CO Multi-

line Imaging of Nearby Galaxies) プロジェクトから選択した。条件としては両方のカタログに存在していること、渦巻銀河であること、CAAPR (Clark et al. 2017) パイプラインが正常に動作することを課した。CAAPR パイプラインは DustPedia のために開発されたパイプラインで、楕円環に空間分解する際に使用した。最終的なサンプル数は 35 天体となった。

また 1 kpc スケールのピクセルで空間分解したスケージング側において、物理的に意味のある成分とノイズ成分が混在していることが確認された。そのため、混合ガウシアンモデルにおける EM アルゴリズムという手法を用いてそれぞれの成分に分割した。

結果として kpc スケールに空間分解した銀河における、SFMS とガス質量-星質量関係は共に、銀河全体を積分したグローバルな関係と同じ傾向を示すことが、また銀河の形態によって異なる傾向を示すことが見いだされた。

1. J. Brinchmann, S. Charlot, S. White., et al. 2004, MNRAS, .351.1151B
2. Clark, C.J.R., Verstocken, S., Bianchi, S., et al. 2017, A&A, 609, A37

## 銀河 c13 シミュレーションによる銀河中心近傍にある若い星団の個数予測 中津野 侃貴 (国立天文台 M1)

銀河中心の近傍で、とてもコンパクトかつ若い星団として Arches(Nagata et al. 1995) や Quintuplet(Nagata et al. 1990; Okuda et al. 1990) などが発見されており、また銀河中心から 600 pc の範囲に 58 の星団の候補も見つかっている。銀河系ハロー部分に多く分布する球状星団と形状は似ているが、構成する星の年齢や性質は大きく異なり、若い星で構成されている。これらの銀河中心の星団において、球状星団との関係や銀河の星形成に与える影響、銀河中心からどれだけ離れているのか、まだ発見されていない星団がどれほどあるのか、といったことを知ることは銀河形成を理解するために、とても重要である。しかし、バルジ領域は観測できる波長帯に限られており、現在に至るまで詳細な観測データは集まっていない。Gaia とは異なる観測対象を持つ小型 JASMINE の打ち上げによる、詳細な観測データが期待される。

本講演で紹介する論文では、銀河中心から 200 pc 以内の若い星団の進化とその観測可能性に関するシミュレーションを行っている。銀河中心からいくつかの距離を想定し、若い星で構成された星団が銀河中心を中心に對し円運動している状態を考える。恒星進化による星の消滅やガスの流出、連星系の進化や銀河重力の潮汐力による恒星の流出といった影響を想定し、計算を行っている。初期条件は、高精度で観測されている Arches、Quintuplet の情報と太陽近傍の恒星の質量分布関数などをもとに考えられたモデルを用いている。

シミュレーションの結果では、各星団の銀河中心からの距離

に応じて、総質量や星の数が時間とともに減少していく過程が得られている。これより、銀河中心からの距離に応じた寿命を知ることができる。さらに、background の恒星密度や星団自身の視線方向に積分した密度も同時にシミュレーションし、ここに実際に観測されている 2 つの星団の情報を加えて考察することにより、現在までに観測できていない星団の個数が推定されている。これに関して、詳細なレビューを行う。

1. Portegies Zwart et al., ApJ, 546, L101, (2001)

## 銀河 c14 質量とサイズの関係から探る、初代銀河類似天体としての極金属欠乏銀河 磯部 優樹 (東京大学 宇宙線研究所 M1)

極金属欠乏銀河 (Extremely Metal-Poor Galaxy, EMPG) に含まれる金属量は非常に低い。宇宙初期は元素合成が進んでいなかったことを踏まえると、EMPG は近傍宇宙における初代銀河の類似天体として期待されている。Kojima et al. in prep はすばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ (Hyper-Supreme Cam, HSC) データを基に 23 個の EMPG 候補天体を選び出した。追分光観測の結果、それらの天体は 10% 太陽金属量を示し、本物の EMPG であることが確認されている。我々はそれらの天体の有効半径  $r_e$  と星質量  $M_*$  を求め、両者の関係を調べた。その中には  $r_e \sim 10$  pc,  $M_* = 10^{5-7} M_{\text{sun}}$  のものも見つかっており、Kojima et al. in prep の EMPG は球状星団もしくは Ultra-Compact Dwarf (UCD) 銀河に近い天体であることが示唆された。このことから、Kojima et al. in prep の基準では clump 状の天体を選択的に抽出できており、初代銀河の類似天体としてよりふさわしいものである。

## 銀河 c15 CO 回転振動遷移吸収線を用いた AGN 周辺の分子ガス分布の研究 松本 光生 (国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 M1)

活動銀河核 (AGN) とは、銀河中心の大質量ブラックホールに円盤状に降着する物質が重力エネルギーを光放射することで輝いている天体である。そして、光放射する降着円盤を取り囲むように分子トラスが存在すると考えられている。分子トラスの構造は AGN 活動と共に変化するため、AGN の光放射機構を理解する上で重要である。しかし、分子トラスの内部構造や形成過程は、まだ詳細には理解されていない。そこで、分子トラスの内部構造を観測する手法として、4.6  $\mu\text{m}$  付近の CO の回転振動遷移吸収線 ( $v=0-1$ ,  $\Delta J=\pm 1$ ) が有効である。本発表では、CO 吸収線を用いた AGN 周りのガス構造の先行研究 (Baba et al. 2018, Shirahata et al. 2013) のレビューを行い、流体シミュレーションの理論的な先行研究 (Wada et al. 2016) との整合性について議論する。Baba et al. 2018 では、10 天体の CO 吸収線の形状から、CO を含むガスの平均温度が 360 K、CO の柱密度が  $10^{19} \text{ cm}^{-2}$  と見積もられた。CO

ガスは星形成領域のガス (10 K ~ 100 K) よりも高温であり、AGN からの X 線放射によって分子トーラスの内側のガスが加熱されていると結論づけた。また、Shirahata et al. 2013 では、IRAS 08572+3915 をより波長分解能の高い CO 吸収線の観測を行った。その結果、CO ガスの温度が 270 K で、母銀河に対する相対速度が  $-160 \text{ km s}^{-1}$  の Outflow 成分が確認された。一方で、AGN からの X 線放射、超新星爆発を考慮した流体シミュレーションの研究 (Wada et al. 2016) では、Outflow の速さは  $100 \text{ km s}^{-1} \sim 500 \text{ km s}^{-1}$  で、温度は  $10^3 \sim 10^4 \text{ K}$  であった。観測で見られた Outflow 成分は、理論研究の Outflow と異なる起源を持つと考えられるので、その起源を探っていきたい。

1. Baba et al. 2018, ApJ, 852, 83B
2. Shirahata et al. 2013, PASJ, 65, 5S
3. Wada et al. 2016, ApJ, 828, L19

## 銀河 c16 Application of X-Ray Clumpy Torus Model to Obscured AGNs

谷本 敦 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 D3)

超巨大ブラックホール (SMBH: SuperMassive Black Hole) と銀河の共進化 (e.g. Kormendy & Ho 2013) を理解する上で、活動銀河核 (AGN: Active Galactic Nucleus) のトーラスは重要である。AGN とは、SMBH への質量降着により銀河中心が明るく光り輝く現象である。AGN の構造は、クランプ状のガス・ダストからなるトーラスが、SMBH と降着円盤を取り囲んでいる (e.g. Netzer 2015)。このトーラス (1 pc) は、SMBH ( $10^{-6} \text{ pc}$ ) と母銀河 ( $10^4 \text{ pc}$ ) の間に存在し、母銀河から SMBH への質量降着の役割を担う。すなわち、トーラス構造の解明は、SMBH 成長の理解に必要不可欠である。しかしながら、トーラスの空間的分解は困難であり、その構造は未解明である。

トーラス構造の調査には、X 線スペクトルが最適である。なぜなら、X 線は全物質 (ガス・ダスト) の構造を反映するためである。AGN の X 線スペクトルは、次の 3 成分に分離される。成分 1: 降着円盤からの逆コンプトン散乱成分 (直接成分)・成分 2: トーラスによるコンプトン散乱成分 (反射成分)・成分 3: トーラスによる鉄輝線成分。特に反射成分の形状・鉄輝線の強度は、トーラス構造に強く依存する。すなわち、これらの成分からトーラス構造の調査が可能となる。しかしながら、通常の AGN の場合、直接成分が卓越するため、反射成分の形状調査が困難である。

そこで私は、隠された AGN の広帯域 X 線スペクトルを解析した。隠された AGN とは、コンプトン散乱に対し、光学的に厚いトーラスに囲まれた天体である。この場合、直接成分は強く光電吸収・コンプトン散乱されるため、反射成分が卓越する。すなわち、トーラス構造を調べるのに最適な天体である。今回私は、10 天体の隠された AGN における広帯域 X 線スペ

クトルを解析した。広帯域 X 線スペクトル解析の際には、私が作成したクランピートーラスからの X 線スペクトルモデル (XCLUMPY: Tanimoto et al. 2019) を適用した。本講演では、これらの結果について紹介する。

1. Kormendy & Ho. 2013, ARAA
2. Netzer. 2015, ARAA
3. Tanimoto et al. 2019, ApJ

## 銀河 c17 状態遷移するクエーサー

名越 俊平 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M2)

AGN 研究において広輝線領域への理解は重要だ。なぜなら AGN の基本的物理量であるブラックホール質量は、広輝線領域の速度成分と連続光の明るさから計算されるからだ。しかしながら、広輝線領域の起源や幾何的な構造については謎が多い。その謎を解く鍵となるのが、クエーサーの状態遷移だ。状態遷移とは、広輝線があったものが無くなったり、無かったものが出現する現象のことだ。通常、広輝線のある/なしは統一モデルによって視線角度の違いで説明されるが、この現象は統一モデルの描像に矛盾している。この、状態遷移を起こすクエーサー (Changing-Look Quasar: CLQ) のメカニズムを解明することは、広輝線領域への理解を進めると考えている。そこで本研究では、CLQ 及び CLQ と類似する特徴を持つクエーサーの性質を知ることが目的とする。そのために、以下のことを行った。Sloan Digital Sky Survey でクエーサーと同定された天体のうち、Calalina Real-time Transient Survey の光度曲線がある約 40 万天体を母集団とした。このうち、「2018 年 12 月までに CLQ として報告された 56 天体」、「変光量が g-バンドで 1mag 以上のクエーサー」、「3 年程度の周期で明るさが大きく変動 (V-band で 0.8mag 以上) するクエーサー」の 3 つの標本を取り出した。これらと、1 型クエーサーカタログ (Shen et al. 2011) とクロスマッチを行い、それぞれのクエーサーが統計的に何か優位な特徴を持っているか調査した。その結果、これらの標本は全て (特に CLQ は顕著に) [OIII] 輝線が弱いことを発見した。本講演では、この結果の解釈を議論する。

## 銀河 c18 HETDEX Survey & Ly $\alpha$ Luminosity Function at $z = 1.9 - 3.5$

Zhang Yechi (東京大学 宇宙線研究所 M1)

The luminosity function (LF) is a powerful tool to investigate the statistical distribution of galaxies and their evolution. Konno et al. showed the Ly $\alpha$  LF at  $z = 2.2$  with a bright end hump that is possibly caused by AGNs, while studies at higher redshift showed no such humps. We introduce the Hobby-Eberly Telescope for Dark Energy experiment (HETDEX) project, which is a blind integral field spectroscopic survey covering  $150 \text{ deg}^2$  of sky area and a Ly $\alpha$

redshift range of 1.9-3.5. Around 1 million Ly $\alpha$  emitters are expected to be detected when the survey is completed. With the HETDEX data, we plan to derive the Ly $\alpha$  LF at the bright end using both the non-parametric  $1/V_{max}$  method and the parametric Schechter function fitting. Combining the result with the LF derived from HSC narrowband data at the faint end, we can constrain the shape of the Ly $\alpha$  LF over the luminosity range of  $\sim 0.01 - 100L^*$ , as well as the Ly $\alpha$  luminosity density.

1. Herenz, C., et al. 2019, A&A, 621, A107
2. Hill, G. & HETDEX Consortium. 2016, ASPC, Vol. 507, 393
3. Konno A., et al. 2016, ApJ, 823, 20

## 銀河 c19 HSC-SSP を用いた高赤方偏移 DLA の可視光対応天体の探索 玉田 望 (愛媛大学 M1)

形成初期の銀河は高赤方偏移に多く、星よりもガスが占める割合が大きいことから、暗くて観測することが難しいため理解されていない部分が多い。Damped Lyman- $\alpha$  Absorption system (DLA) はクエーサースペクトル上に現れる吸収線系であり、これはクエーサーより手前にある柱密度の大きな中性水素 ( $N_{\text{HI}} > 2.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$  Wolfe et al. 2005) によって生じている。クエーサーと DLA を生じさせている銀河 (DLA 銀河) を見つけることで形成初期の銀河を調べることができる。しかし、先行研究において見つかった  $z > 2$  の DLA 銀河は 20 個程度に過ぎない。そこで、本研究では Sloan Digital Sky Survey (SDSS) の分光観測で見つかった DLA の近傍において、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam のすばる観測戦略枠 (HSC-SSP: Aihara et al. 2018) で取得された可視光画像の中から DLA 銀河の探索を行った。カラーセレクションを用いて HSC のデータから  $2 < z < 3$  の DLA 銀河の候補を選出し、SDSS の DLA をもつクエーサーとマッチングを行うと、クエーサー周りの銀河の分布が得られる。この中から DLA 銀河の候補を絞り込むため、DLA を持たないクエーサー周りの銀河について同様の条件で銀河を選出し、分布の比較を行った。その結果、DLA をもつクエーサーから 2-3 arcsec にいる銀河に約 27% の超過が見られた。このことから、DLA の視線方向から 2-3 arcsec の範囲にある 45 天体の DLA 銀河候補に対して分光追求観測を行うことで、一定の割合で DLA 銀河を発見できると考えられる。

1. Wolfe et al. 2005, ARA&A, 43, 861
2. Aihara et al. 2018b, PASJ, 70, S8

## 銀河 c20 原始銀河団と環境効果 青山 皓平 (東北大学 天文学専攻 M1)

密度の高い領域では古い楕円銀河が、密度の低い銀河では若い渦巻き銀河が銀河の多くを占めているということがよく知られている。そのような銀河の棲み分けといった環境効果がどういった物理的プロセスによって起きるのかを調べるために、銀河形成のピークの時代 ( $z \sim 2$ ) の原始銀河団はうってつけの研究対象である、というも密度の高い銀河団を観測することでなんらかの環境効果を観測できることが期待されるからである。

私が今行っている研究は、 $z = 2.53$  にある USS-1558 と呼ばれる原始銀河団について ALMA を用いた dust continuum のデータを解析することである。この原始銀河団は、フィールドよりも 100 倍ほど密度が高く非常に銀河が群れている領域である。またこの銀河団は Subaru/MOIRC、SHST(WFC3,ACS)、ALMA などを用いた様々な波長での観測がなされている。

MOIRCS での観測では  $z > 2$  の原始銀河団で初めて詳細な力学的構造が明らかになり、clumpy/filamentary な構造が見られ、銀河が成長途中の段階であることや、星形成活動が  $z$  とともに急激に増加することがわかった。また、赤い H  $\alpha$  emitter が観測され、それらはどの時代においても活動的な領域で見られることから、環境効果を考える上で重要な population だと考えられている。ALMA での CO (3-2) 観測では、密度の高い環境においてガスの accretion が質量の小さい銀河では促進され、質量の大きい銀河では抑えられるといった質量に依存する環境効果が明らかになった。ポスター発表ではこれらの先行研究や、星形成に関する論文をいくつかまとめて発表する。