

銀河・銀河団分科会

観測と理論から解き明かす銀河・銀河団の謎

日時	<p>7月27日 16:30 - 17:30, 20:00 - 21:00</p> <p>7月28日 9:00 - 10:00, 14:45 - 15:45, 17:15 - 18:15 (招待講演：小野寺 仁人 氏), 18:30 - 19:30</p> <p>7月29日 9:00 - 10:00 (招待講演：行方 大輔 氏) 13:30 - 15:45</p>
招待講師	<p>小野寺 仁人 氏 (チューリッヒ工科大学)「恒星種族に刻印された化石情報から紐解く楕円銀河の形成史」</p> <p>行方 大輔 氏 (筑波大学)「活動銀河核トラス研究の現状」</p>
座長	<p>山口裕貴 (東京大学 M2) 日下部晴香 (東京大学 M2) 白方光 (北海道大学 M2) 満田和真 (東京大学 D1) 高橋晴香 (東京大学 M2) 仁井田真奈 (愛媛大学 M2) 播金優一 (東京大学 M2)</p>
概要	<p>新たな観測装置、大規模サーベイデータ、高性能な計算機により、銀河・銀河団の研究は目覚ましい進展が見られる。ALMA 望遠鏡によって高感度・高分解能のミリ波・サブミリ波のサイエンスが切り開かれ、すばる望遠鏡/HSC の 運用開始により稀な天体の統計的解析や効率の良いサーベイが可能となった。TMT や ASTRO-H 等の次世代望遠鏡の運用を控え、銀河・銀河団の理解は今後も急激に進むだろう。</p> <p>このように多種多様な観測によって得られるデータとの比較を行うことができる理論的研究基盤も整いつつある。個々の銀河や銀河内の一部の領域については数値流体シミュレーションを用いて観測では分解が難しいコンパクトスケールの物理や、系の時間発展を予測できる。また宇宙論的流体シミュレーションや準解析的モデルの発展により特定の銀河種族に対する統計的研究も行えるようになってきた。</p> <p>銀河・銀河団の理解が日々深まっていくこの恵まれた時代において、銀河・銀河団全般に関して観測と理論の垣根を越えて知識の共有、活発な議論を行うことは、我々若手にとって大変有意義である。そのため、本分科会では、銀河系、近傍銀河、遠方銀河、AGN 及び銀河団全般を扱う。また、招待講演では、国内外で活躍される理論・観測の研究者の方を1名ずつ招待し、最先端の研究を紹介して頂くので、ぜひ聞きにきて頂きたい。本分科会が参加者 同士の交流の場となり、今後の研究活動を広げる契機となることを願う。</p> <p>注) 降着円盤からのアウトフローは銀河・銀河団分科会で扱います。</p> <p>注) AGN ホスト銀河と AGN と銀河の共進化については銀河・銀河団分科会で扱います。</p> <p>注) AGN のブラックホールとしての挙動やジェットに注目する場合はコンパクトオブジェクト分科会で扱います。</p> <p>注) 球状星団を1つの系としてみる場合などは銀河・銀河団分科会で扱います。</p> <p>注) 系外銀河内の星形成あるいは銀河系内の kpc スケールに関連する星形成活動は銀河・銀河団分科会で扱います。</p> <p>注) Gpc 以上の大スケールの構造形成は銀河・銀河団分科会では扱いません。Mpc 以下のスケールの構造形成は、その構造をトレースするものが銀河である場合 (例えば銀河団、銀河クラスタリングなど) は銀河・銀河団分科会で扱います。</p> <p>注) 銀河による宇宙再電離への寄与の議論は銀河・銀河団分科会で扱います。</p>

小野寺 仁人 氏 (チューリッヒ工科大学)

7月28日 17:15 - 18:15 B会場

「恒星種族に刻印された化石情報から紐解く楕円銀河の形成史」

近傍の宇宙では、恒星の多くは楕円銀河のような星形成活動がほとんど見られない早期型銀河に存在することが知られています。これらの銀河では、いつ、どのような時間スケールで星形成が行われてきたのでしょうか。また、星形成を止めるメカニズムや時間スケールは一体どのようなものだったのでしょうか。銀河の星形成史に関する情報は、銀河を構成する恒星種族に化石のように刻まれています。近傍楕円銀河については、過去20-30年にわたり、銀河を構成する恒星種族の年齢や金属量、そして元素組成比が詳しく調べられてきました。一方で、近年の観測からは、星形成が既に止まった銀河は少なくとも赤方偏移3程度では既に存在していることが知られています。楕円銀河進化における大きな問題のひとつとして、たとえば、これらの銀河は、同じような恒星質量を含んでいても、近傍の楕円銀河に比べて3-5倍程度その有効半径が小さいことが知られています。この進化を説明するメカニズムはよくわかっていません。この謎を解く鍵は、恒星種族に刻まれていると考えられていることから、高赤方偏移での恒星種族パラメータを決定し、その進化を調べることが、活発なトピックになっています。これには、静止系可視光にある吸収線を用いることが必要になります。実際、近年の大型望遠鏡での近赤外線分光器の進歩や、観測結果を解釈する恒星種族合成モデル、また解析手法の発展により、赤方偏移2程度、つまり大質量楕円銀河の主要な形成期での化石情報の発掘作業が可能になってきました。本講演では、このような研究の歴史や現状、そして、遠方で観測が重要な鍵となる楕円銀河進化の問題などについて概観し、今後の展望などについて議論したいと思います。

1. Onodera et al. (2015, ApJ, in press; arXiv:1411.5023)
2. Onodera et al. (2012, ApJ, 755, 26)
3. Thomas et al. (2005, ApJ, 621, 673)

行方 大輔 氏 (筑波大学)

7月29日 9:00 - 10:00 B会場

「活動銀河核トラス研究の現状」

活動銀河核 (AGN) は宇宙の中で最も明るい天体 ($L_{\text{bol}} = 10^{42} - 10^{47} [\text{erg s}^{-1}]$) の一つであり、1960年代の発見以降、AGNに関する理論的・観測的研究が非常に多くなされてきた。現在では年間1000本以上の論文が出版される巨大な研究分野となるに至っている (Netzer 2013)。現在広く受け入れられているAGNの統一モデル (Antonucci 1993; Urry & Padovani 1995) は、AGNを巨大ブラックホール+降着円盤+ダストトラスから成る系と仮定することで多くの観測事実を説明することに成功している。しかしながら、AGNの活動性の詳細 (活動性の発現機構・強さ・持続期間等) については、十分な理解が得られているとは言えず、これが例えば銀河形成とAGNの関連性を議論するのを困難にさせている。AGNの活動性の詳細を理解するためには、AGN降着円盤と降着円盤へのガス供給過程の理解が不可欠である。後者に関しては、ダストトラスがガス供給源となっていると推察されるが、AGNが強烈に放射している状態でどのようにガス供給が起こるかは自明ではない。本講演では、ダストトラスの理論的研究と関係する観測についてできるだけ幅広く紹介するとともに、我々が取り組んでいるダストトラス内縁部の研究について紹介したい。

銀河 a1 「すざく」衛星による Abell 2744 銀河団周辺のミッシングバリオン探査

服部 詩穂 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙を構成する成分のうち、その 4% はバリオン (通常物質) であることがわかっているが、近傍宇宙では半分程度しか検出されていない。宇宙の構造形成シミュレーションから、これらの未検出のバリオンはガスの温度が $10^6 - 10^7$ K の中高温銀河間物質 (WHIM) として銀河団同士をつなぐフィラメントに沿って分布していると予測されている。WHIM の検出は観測と理論それぞれからのバリオン量の不一致を埋めてくれるだけでなく、その密度、温度分布がわかれば、宇宙論の理解を観測から進めていくことができる。これらは極紫外線や X 線のエネルギー範囲でイオン化された元素の輝線や吸収線による検出が期待されており、中でも酸素が最も検出可能な元素であると思われる。しかし、この領域のガス密度は非常に小さく、現在の観測機器の感度では検出が難しい。

本研究では宇宙の大規模構造のフィラメントへのつながりが発見されている Abell 2744 銀河団の北東領域周辺に注目し、X 線天文衛星「すざく」による解析を行った。フィラメント領域のスペクトルに対して、WHIM 成分を考慮したモデルフィットを行い赤方偏移した OVIII 輝線のフラックスの 2σ 上限値を求めた。また Gaussian 輝線モデルを加えたときの F 検定や輝線エネルギーの値から 0.5 keV 付近の放射はこの銀河団周辺からのものと考えて矛盾しないことがわかった。本講演ではこの結果と今後の展望について議論する。

1. Cen, R, and Ostriker, J.P. 1999, Ap.J., 514:1-6

銀河 a2 Abell 2255 銀河団の電波レリク領域における衝突現象の研究

水野 真梨子 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

銀河団は宇宙最大の天体であり、衝突合体を繰り返すことでより大きな構造へと成長する。衝突の運動エネルギーは衝撃波を介してガスの加熱や粒子加速に使われる。そのため、X 線や電波の観測から衝突の特性を調べることで、銀河団の形成過程の解明につながる重要な手がかりが得られると期待する。衝撃波をトレースするものとして、X 線を出す銀河団ガスの温度分布や「電波レリク」と呼ばれる円弧状の電波放射がある。X 線観測から衝撃波前後のガス温度を測定し、ランキン - ユゴニオの関係式を適用すると衝突のマッハ数 M_X を見積もることができる。一方、電波レリクが衝撃波加速によって形成されたと考えると、電波スペクトルと統計加速理論から、X 線とは独立にマッハ数 M_R を見積もることができる。以上の二通りの方法から得られるマッハ数を比較することで、衝突過程や電波レリクの起源を考察することが可能である。

本研究では Abell 2255 銀河団 (赤方偏移 0.08) の北東に観られる電波レリクに注目した。この電波レリクは差し渡し約 1.5 Mpc と大きいため、激しい衝突合体の痕跡であると予想される。そこで、すざく衛星で取得した X 線スペクトルを解析し、この領域のガスの温度分布を調べた。その結果、電波レリク領域とその外側の温度はそれぞれ 4.6 ± 0.3 keV, 4.3 ± 0.5 keV と求まり、強い衝撃波で期待されるような不連続的な温度変化は見られなかった。この領域の温度を用いて衝突のマッハ数を求めると $M_X \sim 1.1$ である。このとき、領域の選び方による系統誤差が約 50% ある。これを電波観測による値 $M_R \sim 2.8$ と比較すると、両者は誤差を考慮しても一致しないことがわかった。 $M_X < M_R$ となる原因として、X 線望遠鏡の空間分解能の影響やプロジェクション

効果、あるいは仮定した理論が単純すぎるなどの可能性が考えられる。本講演では、すざく衛星による観測結果を報告し、マッハ数不一致の問題について議論する。

1. H. Akamatsu, H.Kawahara, 2013, PASJ, 65, 16.
2. R. F. Pizzo, A. G. de Bruyn, 2009, A&A, 507, 639.

銀河 a3 銀河団の重力レンズ質量密度プロファイルの普遍性の検出

新倉 広子 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 M2)

銀河団は宇宙最大の自己重力天体である。その質量密度プロファイルは宇宙構造形成の情報を含むと考えられていて、様々な性質が示唆されている。その中でも重要な性質として、質量の大小に関わらず、適切にスケール変換するとパラメータに依存しない、普遍的な関数形 (NFW モデル) でよく表される事が挙げられる^[1]。これは CDM モデルに基づいた N 体シミュレーションで再現されるハローから示唆される性質で、観測データを用いた検証が試みられている^[2]。

観測により銀河団の暗黒物質の空間分布を調べるには、弱い重力レンズ効果のデータが強力である。しかし重力レンズ効果から復元した銀河団の質量プロファイルはノイズが大きい。そのため従来の手法では、複数の銀河団の情報をスタックした平均的な質量分布を調べるに留まり、質量の大小による普遍性を検証することが出来なかった。

そこで本研究では、重力レンズ効果を用いて復元した銀河団の質量プロファイルに対して NFW に基づいたスケール変換を試行する事で、「銀河団の質量プロファイルの普遍性」を調べる新たな手法を考えた。手法の検証にはすばる望遠鏡の Suprime-Cam の重力レンズデータと X 線の質量データを組み合わせて、X 線光度で最も明るい、最大質量級の 50 個の銀河団を調べた。検証の結果、この 50 銀河団については、 $4-6\sigma$ レベルで普遍的な NFW プロファイルが存在することが分かった。つまり、銀河団の質量の大小に関わらず、暗黒物質の分布の特徴が相似であることを観測によって初めて確認できた。

本講演では上述した銀河団の質量プロファイルの普遍性の詳細な検証の結果を報告する。

1. Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1996, ApJ, 462, 563 - 1997, ApJ, 490, 493
2. Okabe, N., Smith, G. P., Umetsu, K., Takada, M., & Futamase, T. 2013, ApJ, 769, L35
3. Niikura, H., Takada, M., Okabe, N., Martino, R., & Takahashi, R., 2015, ArXiv e-prints:1504.01413

銀河 a4 連星中性子星合体による銀河の r プロセス元素分布

平居 悠 (国立天文台三鷹 D1)

鉄より重い核種の多くは r プロセスにより合成される。r プロセス元素の起源天体は未だ明らかになっていない。r プロセス元素の起源天体候補は重力崩壊型超新星爆発と連星中性子星合体である。最近の元素合成計算は、重力崩壊型超新星爆発では、質量数が 110 以上の r プロセス元素を合成するのが難しいことを指摘した^[1]。一方、連星中性子星合体は、元素合成計算から、r プロセスの有力な起源天体候補である

ことが示唆されている。しかし、これまでの銀河の力学進化を考慮に入れない化学進化計算からは、連星中性子星合体の低い頻度（銀河系で 10^{-6} – 10^{-3} yr $^{-1}$ ）と長い合体時間（ ≥ 1 億年）のため、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ にみられる r プロセス元素組成比（例えば $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ ）の分散を説明できないという問題が指摘されている [2]。こうした問題は、階層的構造形成モデルに基づき、銀河系ハローがより小さい矮小銀河の集積によって形成されたとするならば、解決できる可能性がある [3]。そこで本研究では、 N 体/Smoothed Particle Hydrodynamics コード ASURA を用いて、矮小銀河の化学力学進化を計算した。 r プロセス元素の起源天体としては、連星中性子星合体を仮定した。その結果、合体時間が 5 億年より短く、銀河系での頻度が $\sim 10^{-4}$ yr $^{-1}$ の連星中性子星合体で、 $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Fe}/\text{H}]$ の観測値を再現できた。また、矮小銀河の力学的性質、金属量分布、質量-金属量関係の計算値も観測値と矛盾のない結果が得られた。本研究により、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ における $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ の分散を再現するには、星形成領域（ ~ 10 – 100 pc）における金属の混合が重要な役割を果たしていることが示唆された。さらに、連星中性子星合体で $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ の観測値を再現するには、銀河ハロー形成初期（ $\lesssim 1$ 億年）では、個々のサブハローの星形成率が $10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 程度である必要があることも示唆された。本研究は、銀河進化の観点から、連星中性子星合体が r プロセス元素の起源天体であることを強く示唆する。

1. Wanajo, S. Janka, H.-T., & Müller, B. 2011, ApJL, 726, L15
2. Argast, D., Samland, M., Thielemann, F.-K., & Qian, Y.-Z. 2004, A&A, 416, 997
3. Ishimaru, Y, Wanajo, S., & Prantzos, N. 2015, ApJL, 804, L35

銀河 a5 Abell262 銀河団外縁部の鉄分布の解析

菅野 祐 (東京理科大学 松下研究室 M1)

銀河団は重力で束縛された宇宙で最大の天体である。銀河団中のバリオンのほとんどは銀河団ガス (ICM) として存在し、重力によって数千万度まで加熱されているため X 線で観測することができる。X 線で観測すると、高階電離した鉄原子の特性 X 線から鉄のアバundanceを求めることができる。また、鉄質量を銀河の光度と比較することでどのように ICM へ鉄が供給されてきたのかを調べることができる。今回、これまで中心付近しか観測されていなかった Abell 262 銀河団をピリアル半径程度まで観測を行った。銀河団外縁部は ICM の密度は小さいが銀河団全体に占める割合が大きいため、銀河団全体の鉄質量を調べるためには銀河団外縁部まで観測することが重要となるのである。

本研究ではすざく衛星を用いて Abell 262 銀河団をフィラメント方向とボイド方向の 2 方向について観測し、ICM に含まれる鉄の分布を求めた。Abell 262 銀河団は地球近傍の小規模な銀河団であるが、小規模な銀河団は研究例が数例しかないため銀河団ガスの状態が系の大きさによってどう異なるのかを調べるために重要な天体である。解析の結果、鉄質量銀河光度比は $3 \times 10^{-3} M_{\odot}/L_{k\odot}$ 程度、ガス質量銀河光度比は $8 M_{\odot}/L_{k\odot}$ 程度となった。この数値は巨大な銀河団と比べて小さく中規模な銀河団と同程度である。小さな銀河団のガスや鉄が少ないのは、巨大な銀河団に比べて重力が小さいため銀河団形成時に周囲のガスを集められなかったためと考えられる。また、Abell262 は中規模な銀河団の中でもガスや鉄が多く存在する AWM7 と似たガス質量・鉄質量・鉄質量銀河光度比を持つことがわかった。このことから、Abell262 と AWM7 は同じような成長をしてきたと考えられる。

1. Sato et al.2008

銀河 a6 Abell2163 銀河団におけるエントロピー分布の探求

伊東 雅史 (東京理科大学 松下研究室 M1)

冷たい暗黒物質 (CDM) モデルによる階層的構造形成理論では、現在も銀河団の重力場にひかれて質量降着流が大規模構造のフィラメントに沿って起きていると考えられている。X 線観測衛星「すざく」衛星では銀河団の外縁部を観測することが出来、このような銀河団の形成現場を明らかにすることができる。重力による加熱のみを考慮した数値シミュレーションでは、銀河団の加熱指標となるエントロピーは銀河団中心からの距離の 1.1 乗に比例する。しかし、「すざく」の観測結果によるとエントロピー分布は銀河団外縁部で上昇せず一定になると確認された。一方、電波観測による SZ 効果では、視線方向に沿って積分した熱的なガス圧力に比例するため銀河団外縁部のようなガスの比較的低密度な領域の調査に有用である。SZ 効果とは、CMB が銀河団の電子により逆コンプトン散乱し揺らぐ現象である。そのため、Eckert et al. (2013) は電波観測衛星「Planck」による圧力と X 線観測衛星「ROSAT」によるガス密度からエントロピーを求めた。その結果、「すざく」の結果とは異なり銀河団外縁部でも上昇し、衝撃波加熱による予測に従うと主張した。

今回我々は、Abell2163 銀河団 ($kT = 13.40$ keV, $z = 0.203$) について「すざく」衛星を用いて 6 ケ所の領域、計 330 ks 以上の観測を行った。「すざく」はノイズが他の衛星に比べて低いため X 線強度が弱い銀河団外縁部まで銀河団ガスの温度と数密度を求めることができる。X 線放射は視線方向に沿って積分したガス密度の二乗に比例するため、高温ガスの比較的高密度な領域で有用となる。そのため、電波観測の結果と比較することにより「すざく」衛星の妥当性を調べることができる。解析の結果、ガス温度は銀河団外縁部において ~ 3 keV まで低下していた。また電波観測と「すざく」衛星のガス圧力を比較するとおおよそ一致することがわかった。講演では銀河団ガスの温度や密度分布並びにエントロピーについて報告を行う。

1. Eckert, D., Molendi, S., Vazza, F., et al. 2013, A&A, 551, A22
2. Voit, G. M., Kay, S. T., & Bryan, G. L. 2005, MNRAS, 364, 909
3. Planck Collaboration 2011, A&A, 536, A11

銀河 a7 X 線天文衛星 XMM-Newton を用いた近接銀河団 RXC J0751.3+1730, SDSS 117.7+17.7+0.19 の観測

小林 洋明 (名古屋大学 Ux 研 M1)

銀河団は宇宙の階層構造の中で、重力的に緩和した最大のシステムである。そのため、衝突銀河団システムを観測し、その衝突現象を理解することは宇宙の力学進化史の解明にもつながる。また、銀河団中のバリオンの多くは X 線を放出する高温ガスであるため、X 線を用いた観測は銀河団を検出・詳細解析をする上で有用な方法と考えられる。そこで、我々は新たな衝突銀河団システムを探すため、X 線 (ROSAT) により同定された銀河団 2 個、可視光 (SDSS) により同定された銀河団 1 個の計 3 個が近接している領域を選定した。その領域を広視野 ($30' \times 30'$) かつ高角度分解能 ($\sim 15''$) の X 線天文衛星 XMM-Newton を用いて

ポインティング観測を行い、新たな衝突銀河団を見つけようと試みた。

その結果、視野中に 4 ヶ所 X 線で明るい領域を検出し、そのうち 3 ヶ所はカタログから選出した銀河団の存在する領域であり、残りの 1 ヶ所の天体に関してはこれまでのサーベイ観測では X 線源は検出されておらず、本観測にて初めて広がった天体であることが示された。解析の結果、これまで X 線で銀河団と同定されていた天体のうち 1 つが QSO であることを初めて明らかにし、X 線で同定されていたもうひとつの銀河団に関しては初めて温度等の物理量を定量的に求めた。さらに、可視光で銀河団と同定されていた天体が存在する領域に関してはこれまでの X 線観測では広がった天体は検出されておらず、本研究で初めて付随する高温ガスの存在を明らかにし定量的に物理量を求めた。さらに、この銀河団は力学的に不安定な銀河団であることが分かったため本講演では、周辺天体との相互作用を議論していくと共に残りの 3 天体の解析結果も報告する。

銀河 a8 宇宙磁場解析における QU-fitting

中川 晶太 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

宇宙空間には、天体を取り巻く磁場が存在している。天体のスケールが様々であるように、磁場のスケールも様々である。このような磁場は宇宙磁場と呼ばれる。宇宙磁場は様々な天体現象に密接に関わっており、その構造を探ることは非常に重要である。磁場の構造を明らかにする上では、ファラデー回転と呼ばれる現象が鍵になる。直線偏波の光が磁化プラズマ中を伝搬すると、その偏光面が回転する。回転の度合いはその光の波長の 2 乗に比例し、比例定数は電子密度と磁場の積を光の道のりで積分したものの (RM) になる。観測で得られた光の偏光角と波長の関係をプロット、線形近似することで、その傾きとして RM が得られる。ただし、RM で解決できるのは、光源が一つのシンプルな状況のときだけで、一般的な状況で磁場の情報を取り出すのは容易ではない。観測対象が複雑になると、積分量で表される RM では磁場の構造を推定できないからである。そこで考え出されたのが RM-Synthesis である。この手法では、磁場の積分量 (ϕ) とグラフの傾き (RM) を切り離して考える。これにより、 ϕ に対する光のスペクトルが定義できる。これをファラデー分散関数 (FDF) とよび、複素偏光強度の逆フーリエ変換から解析的には求めることができる。しかし、実際の観測帯域に制限があるので、逆フーリエ変換で得られる FDF には不正確さが付きまとう。この問題にアプローチする一つの方法が、本研究で取り組む QU-fitting である。この方法では、まず考えられる FDF のモデルを仮定し、それをフーリエ変換した結果を観測結果と比較する。これを一致するまで繰り返し、そのときの FDF は真の FDF となるはずである。仮定する FDF の ϕ に制限は無く、完全なフーリエ変換が可能だからである。当日の発表では、この手法をより詳しく説明し、QU-fitting をシンプルな銀河モデルに適用した結果を示す。

1. Brentjens, M. A., & de Bruyn, A. G. 2005, A&A, 441, 1217
2. Ideguchi, S., Tashiro, Y., Akahori, T., Takahashi, K., & Ryu, D. 2014 ApJ 792 51

銀河 a9 Exploring the clustering of star-forming galaxies at $z \sim 1.6$ in COSMOS

柏野 大地 (名古屋大学 C 研 D2)

銀河はダークマターが重力的に崩壊してできるハローと呼ばれる構造の

内部で形成されると考えられている。大規模観測が牽引する昨今の銀河形成・進化の研究において、ダークマターと銀河の関係を明らかにすることは重要な課題となっている。銀河の 2 点相関関数は宇宙論モデルから予言されるダークマターの密度分布 (あるいはハローの分布) と銀河の分布を結びつける強力なプローブである。特に銀河とダークハローの関係を調べる手法の一つとして、halo occupation distribution (HOD) モデルにより銀河クラスタリングを解釈するということが広く行われている。近傍宇宙では SDSS などの分光サーベイによる大サンプルデータを用いて精密な研究が行われてきたが、 $z > 1$ の遠方宇宙では、統計誤差、系統誤差ともに大きく、十分な理解ができていない。特に $1 < z < 3$ は宇宙の星形成史のピーク期、すなわち銀河の質量獲得が急激に進んだ時代であり、この時代の銀河とダークマター分布の関係を明らかにすることは重要な課題である。そこで我々は、すばる望遠鏡 FMOS による近赤外分光サーベイにより得られた COSMOS 領域の $1.4 \lesssim z \lesssim 1.7$ における H α 輝線銀河サンプルを用いて、2 点射影相関関数を用いたクラスタリング解析を行った。 $0.1 \lesssim r_p \lesssim 20 h^{-1} \text{Mpc}$ に於いて優位なクラスタリングシグナルを検出し、相関長 $r_0 \sim 3 h^{-1} \text{Mpc}$ が得られた。また、射影相関関数を HOD モデルでフィットし、サンプル銀河に対する典型的なハロー質量、銀河バイアスなどを制限した。本講演では、得られた結果と解析手法について議論する。

銀河 a10 $z=0-3$ の星形成銀河の紫外光脱出率とダストのジオメトリ

日下部 晴香 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M2)

銀河の若い星から出る紫外 (UV) 放射の一部は、ダストに減光され、赤外線 (IR) で再放射され、減光されなかった残りの分が UV のまま抜けてくる。この割合を表す UV の脱出率 f_{UV}^{esc} は、銀河の Spectral Energy Distribution (SED) を決める重要な物理量である。しかし、これまで f_{UV}^{esc} がダストの質量や空間分布によってどのように決まるのか、近傍銀河と遠方銀河を統一的に調べた研究はされてきていない。そのため、銀河進化の理論モデル (シミュレーションや準解析的モデル) では、観測的に裏付けられていない、星とダストが平板状の空間分布をもつという、単純なダスト減光モデルを採用している [1,2]。最新の銀河進化の理論モデルは紫外線光度関数の観測をよく再現できているが、個々のモデル銀河のダスト減光量が正しい保証はないため、減光前のトータルの SFR は数倍見誤っている可能性があった。そこで本研究では、ダスト質量 M_d の求まっている、近傍と遠方の星形成銀河に着目する。近傍銀河は、Herschel Reference Survey から約 110 個、遠方銀河は、重力レンズで増光された銀河を含む、深い IR の観測のある約 30 個 ($z \sim 1-3$) を用いた。その結果、私たちは、銀河の f_{UV}^{esc} と銀河の global な柱密度 ΣM_d に強い相関関係が存在することを初めて見いだした。銀河進化の理論モデル用いられている単純な平板分布の減光モデルは、この観測結果を再現できない。そこで私は、ダストの動径方向の分布が、星と同じ指数関数分布に従うとするモデルを提案し、これが観測と合うことを示した。 $z \sim 0-3$ で普遍的に成り立つ、観測に基づくダストの空間分布の減光モデルを確立出来たのも、これが初めてである。興味深いことに、この減光モデルを銀河進化シミュレーション [1] に組み込むと紫外光度関数が再現できなくなった。この結果はシミュレーションが予想する各銀河の半径、減光前のトータルの SFR、ダスト質量などの基本量から見直す必要性を示唆している。今後、シミュレーションの見直しを行うことで、観測提案や将来観測装置の計画でも用いられる理論モデルが予想する銀河の性質が変わる可能性がある。

1. Shimizu et al. 2014, MNRAS, 440, 731
2. Makiya et al. 2015 in prep (the successor of Nagashima et al. 2005, ApJ, 634, 26)

銀河 a11 ダスト存在下での輻射性フィードバックにおける輻射圧と光電離の役割

一色 翔平 (北海道大学 宇宙物理学研究室 その他)

大質量星からの輻射がアウトフローの加速に与える効果を知る事は、銀河中に存在するガスの量、ひいては銀河の星形成史を理解する上で重要である。

輻射によるアウトフローの駆動過程としては二通り存在する。一つ目は、光電離によって引き起こされる圧力差によるもの、二つ目は輻射圧によるものである。この二つのうち、近年の研究では光電離からくる圧力差の方が輻射圧よりずっと優勢であり、輻射圧による影響はほとんど見えないとされる結果が報告された (Sales et al. 2014)。しかし、この研究では輻射圧を優勢にさせ得るダストの影響が考慮されていない。ダストが存在する場合、光電離を生じさせる紫外線がダストに吸収され、光電離を起こせない赤外線として再放射することによって光電離の影響を減少させる効果がある。加えて、ダストによる散乱過程は輻射のエネルギーを効率良くガスの運動量に変換する。

こうしたことから、本研究ではダストの影響を考慮した一次元数値シミュレーションコードを開発し、ダストが存在する場合輻射圧の優劣は変化するのかどうかを調べた。この数値シミュレーションでは、中心に光源を置き、球対称にガスを分布させた。ガスの成分は H、He、そしてダストとしてグラファイトを使用した。また、光源のスペクトルとしては 10^5K の黒体放射、または PEGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange 1997, 1999) から得た星団のものを使用した。これらの条件を元に、散乱入りの一次元輻射流体シミュレーションを行った。

以上のシミュレーションからダストが含まれる時、光電離からくる圧力のみ影響を考えた場合と光電離からくる圧力と輻射圧の両方の影響を受ける場合で、両者の結果が大きく変わる場合がある、つまり先行研究と異なり輻射圧が重要となることがわかった。

1. Sales, V. et al. 2014, MNRAS, 439, 2990
2. Fioc, M., Rocca-Volmerange, B. 1997, A&A, 326, 950
3. Fioc, M., Rocca-Volmerange, B. 1999, astro-ph/9912179

銀河 a12 平行平板モデルにおける Ly α 光子の一次脱出確率

久喜 奈保子 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

高赤方偏移天体である LAE (Lyman Alpha Emitter) は、原始銀河であるとしてその物理量を見積もる研究がなされてきた。LAE の星形成率を求めるためのパラメータのひとつに Ly α 光子の脱出確率 f^{esc} がある。これを求める計算コードは、解くべき方程式が微積分方程式であるため、輻射輸送計算が非常に複雑であること、要求される計算機リソースが莫大であることから、よりよい計算方法が模索されている。そこで、最終的には LAE での Ly α 光子の脱出確率を求める新しい計算方法の開発を目指したい。その第一段階として本研究では、平行平板モデルにおいて、吸収・散乱を免れて出てくる Ly α 光子の割合 (一次脱出確率) を輻射輸

送方程式を解いて求めた。

Ly α 光子が水素原子に吸収・放射される際、振動数分布は Voigt プロファイルに従う。このプロファイルは、中心振動数付近は水素原子の熱速度による Doppler プロファイル、中心から離れた "wing" 部分は量子力学で決まる Lorentz プロファイルに従っている。

まず、各プロファイルでの平行平板における脱出確率を垂直方向の輻射について求めた。Voigt プロファイルでの脱出確率は、光学的厚み τ が小さい部分では Doppler プロファイルに従い、大きい部分では Lorentz プロファイルの影響を受けることが確認できた。次に、半球を立体角が等しくなるように分割し、全方向の輻射輸送を解いて 3 次元的な脱出確率を求めた。斜め方向の輻射を考えると τ が大きくなる為、どのプロファイルについても垂直方向のときより脱出確率は減った。垂直方向に対する全方向の脱出確率の比率を見ると、Doppler プロファイルでは 1/2 倍、Lorentz プロファイルでは 2/3 倍になり、Sobolev (1957) の解析と一致した。Voigt プロファイルは τ が小さい部分で Doppler に従い、大きい部分では Lorentz に漸近する結果となった。

1. Sobolev V.V., 1957, SvA, 1, 678
2. Tasitsiomi A., 2006, ApJ, 645, 792

銀河 a13 SXDF-UDS-CANDELS-ALMA 1.5 arcmin² survey: The multi-wavelength analysis of the 1.1 mm sub-mJy sources

山口 裕貴 (東京大学 天文学教育研究センター M2)

本研究では、ALMA を使った波長 1.1 mm の無バイアスサーベイ (SXDF-UDS-CANDELS 領域; P.I. Kohno) で検出された sub-mJy 天体 (観測フラックス密度 0.1 - 1 mJy 程度) の多波長解析による結果を報告する。宇宙の星形成の進化において、ダストに隠された星形成活動というのは重要な役割を果たしている。これまでに単一鏡による大規模観測で、ダストに隠された爆発的星形成銀河 (サブミリ波銀河: SMG; 星形成率 $\sim 1000 M_{\odot}/\text{yr}$) が数多く発見され、その性質が調べられてきた。ところが、単一鏡の観測では source confusion による感度低下のため、宇宙の星形成活動の主役を担っているとされる一般的な星形成銀河 (星形成率 \sim 数 10 - 数 100 M_{\odot}/yr) の観測は難しい。したがって、隠された星形成の全貌を明らかにするためには、赤外背景光の 50% 以上を占めるこのクラスの天体 (sub-mJy 天体) を干渉計観測によって分解し、多波長データ解析を通して、その性質を系統的に調査する必要がある。そこで本研究では ALMA 無バイアスサーベイで検出された 5 つの sub-mJy 天体について、可視光・近赤外線のデータで対応天体を同定し、SED fitting によってその性質を調べた。結果、4 天体についてはそれぞれ測光赤方偏移 (2.53, 2.53, 1.33, 1.52)、星質量 ((6.8, 7.9, 3.5, 4.1) $\times 10^{10} M_{\odot}$) として星形成率 (44, 62, 7.9, 30 $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$) が得られた。これらの値は、この 4 天体が main sequence に位置する星形成銀河であることを示している。残る 1 天体は特徴的な性質を示している。測光赤方偏移が $z = 3.1^{+1.8}_{-1.5}$ と推察されるこの天体は、数 100 $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ という高い星形成率を示すにもかかわらず、1.6 μm よりも短い波長帯では検出されていない。これは、すばる望遠鏡や VLT, Hubble 宇宙望遠鏡による既存の可視光・近赤外線探査で見逃されているダストに隠された星形成活動が ALMA によって見えてきた証拠になっている。

1. Tamura et al. 2009, Nature, 459, 61
2. Ono et al. 2014, ApJ, 795, 5

3. Galametz et al. 2013, ApJ, 206, 10

銀河 a14 $z \sim 4$ 星形成銀河のダークハロー質量と銀河サイズの関係

岡村 拓 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

銀河をホストしているダークハローは銀河の進化、形成に大きな影響を与えている。そのためダークハローと銀河の性質の関係性を調べることは銀河の歴史を知る上で重要である。我々はハッブル望遠鏡の ACS、WFC3 で得られたデータを元に作られた 3D-HST カタログの星形成銀河や、SExtractor を使って検出した LBG を利用して赤方偏移 ~ 4 の銀河を選択し、ダークハロー質量と銀河サイズの間の関係を調べた。使用した領域は GOODS South の deep, wide, ERS であり、広さは約 100 平方分である。天体の位置を元にして 2 体角度相関関数を計算し、クラスタリング強度を推定することでダークハロー質量を計算した。得られたダークハロー質量は $1 \times 10^{10} \sim 8 \times 10^{11} M_{\odot}$ 程度であり、銀河サイズとよい相関があることが分かった。従来の研究では UV 絶対光度がダークハロー質量と相関があると考えられており、UV 絶対光度が同じであれば基本的に同じ質量のダークハローに属すると考えられてきたが今回の結果は従来のモデルが単純すぎる可能性を示唆している。またこの結果は従来説明できなかった銀河サイズのばらつき (Huang et al. 2013) 説明をできる可能性を示唆しており、本講演ではこれらについて議論していく予定である。

1. Huang et al. ApJ, 765, 68 (2013)
2. H.J. Mo et al. MNRAS, 295, 319 (1998)
3. Skelton et al. ApJS, 214, 24 (2014)

銀河 a15 ALMA Calibrator Sources を用いた分子吸収線系探査

安藤 亮 (東京大学 天文学教育研究センター M1)

分子吸収線系、すなわち遠方クエーサーを背景光源として、手前に存在する星間物質による分子吸収線を生じている系は、銀河系内から遠方銀河までのあらゆる星間物質の化学的性質や進化を探索する上での強力な観測対象である。しかしその半面、強い背景光源が必要であることから、現在知られている分子吸収線系の数は極めて限られており、とりわけ遠方銀河においてミリ波・サブミリ波帯での分子吸収を生じている例はわずか 5 天体しか知られていない。

本研究では、新たな分子吸収線系を探索する対象として、過去に ALMA で観測されている膨大な数のキャリブレーション天体に着目した。ALMA の高感度・高速度分解能によって、短い積分時間でも何らかの分子吸収線を検出しているケースがあることを期待し、ALMA アーカイブデータに含まれるキャリブレーション天体 36 個のスペクトル解析を行った結果、4 天体において銀河系内の星間物質由来の分子吸収線を検出することに成功し、さらにこのうち 3 天体は過去に研究されていない新たな銀河系内吸収線系である。また、2 天体においては HCO ラジカルの吸収線を検出したが、銀河系内の希薄なガスにおける HCO 吸収線は過去に 2 例しか報告されておらず、本研究はそのサンプル数を倍増させた。さらに、HCO が PDR (光解離領域) のトレーサーであること

から、観測された希薄なガスが PDR 的な環境にあり、何らかの熱源による光解離が生じていることが示唆される。本講演では、検出された新たな分子吸収線系についての報告と、吸収線の解析結果を用いた銀河系内のガスの化学的性質に関する議論を通して、ALMA のキャリブレーション天体を用いた分子吸収線系探査が有効な手法であることを示す。

1. F. Combes Ap&SS 313 321 (2008)
2. H. S. Liszt et al. A&A 564 A64 (2014)
3. M. Gerin et al. A&A 494 977 (2009)

銀河 a16 等面輝度形状で探る早期型銀河の進化

満田 和真 (東京大学 天文学教育研究センター D1)

本研究では早期型銀河の等面輝度形状に着目し、 $z \sim 1$ から 0 における boxy 早期型銀河と diskly 早期型銀河の比率の変化を調べた。早期型銀河は系の角運動量の小さな Slow Rotator と、大きな Fast Rotator に分類できる。前者は大質量で、X 線・電波放射を伴い、boxy な等面輝度形状で、金属量の大きな古い星で構成される。一方、後者は低質量で、X 線・電波放射を伴わず、diskly な等面輝度形状で、金属量の小さな新しい星で構成される。Slow Rotator と Fast Rotator の分類には吸収線の面分光観測で力学構造を直接調べる方法と、撮像観測から表面測光で等面輝度形状を測定して boxy, diskly に分類する方法がある。見かけで暗い遠方銀河の吸収線の面分光観測には将来の 30m 級の望遠鏡が必要だが、撮像観測では現在の望遠鏡で取得可能な質のデータでも表面測光による分類ができるため、本研究では後者の分類法を用いた。それでも視直径が小さく見かけで暗い遠方銀河の等面輝度形状の測定は難しく遠方銀河に最適化された既存の表面測光ソフトウェアもない。そこで我々は遠方銀河に最適化された表面測光ソフトウェアを開発した。我々は Hubble Space Telescope Cluster Supernova Survey と Sloan Digital Sky Survey のデータを用い、 $z \sim 1$ と 0 それぞれについて銀河団に属する早期型銀河のサンプルを作成し、今回開発した表面測光の手法を用いて boxy と diskly に分類した。どちらの赤方偏移でも星質量が大きいほど boxy なものの割合が増加する傾向を確認したが、 $z \sim 1$ では diskly 早期型銀河と boxy 早期型銀河の比率が $z \sim 0$ に比べて高くなる兆候が見られた。

1. J. Kormendy & R. Bender, 1996, ApJ, 464, L119
2. E. Emsellem et al, 2007, MNRAS, 379, 401
3. S. Khochfar et al., 2011, MNRAS, 417, 845,

銀河 a17 Keck/LRIS と Subaru/FMOS で探る Ly α 銀河の星間物質の状態

小島 崇史 (東京大学宇宙線研究所 M1)

銀河の星間ガスに含まれる金属量がどのように遷移してきたのかを知ることが、天体の形成と進化を探索する上で重要である。金属量の統計的な研究 [1][2] によると、(1) $z \lesssim 2.5$ の銀河には金属量と星質量と星形成率の間に強い相関 (Fundamental Metallicity Relation) があること、(2) $z \sim 3$ ではこの関係が成り立たない可能性があることが報告されている。しかし、これらの研究で用いられた金属量の測定方法については不確かな要素が残っており [3]、この相関をより詳しく調べるためには高精度の金属量決定が必要である。

そこで本研究では、Keck/LRIS の 6 時間以上もの露光による観測が

ら得られた OIII] λ 1661, 1666Å 金属線を利用することによって、高精度の金属量決定を実現する。この微弱な OIII] 金属線と Subaru/FMOS で得た [OIII] λ 4960, 5008Å 金属線との強度比を、電離平衡モデルと比較することで金属量を決定する。対象天体は、COSMOS 領域にある $z \sim 2$ の Ly α 銀河 1 天体 (以下 LG1 と呼ぶ) である。将来的には、この手法を Subaru/PFS による $z \sim 1.5$ 大規模観測に適用することによって、Fundamental Metallicity Relation を高精度に検証することが可能となるだろう。本発表では、LG1 の物理的性質と、OIII] λ 1661, 1666Å 金属線を用いた金属量決定法の有用性について議論する。

1. Mannucci, F., Cresci, G., Maiolino, R., Marconi, A., Gnerucci, A., 2010, MNRAS, 408, 2115
2. Lara-López, M. A., et al., 2010, A&A, 521, L53
3. Nakajima K., Ouchi, M., 2014, MNRAS, 442, 900

銀河 a18 大規模銀河形成シミュレーションによる ALMA に向けた観測提案への貢献

早津 夏己 (東京大学 宇宙理論研究室 D1)

遠方宇宙の星形成史の観測的な理解は、歴史的には静止波長系での紫外線によって成されてきた。星形成の直接の指標は、寿命の短い大質量星が放射する電離光子や紫外線である。ただし、星形成している領域に星間塵 (ダスト) があれば、紫外線はダストに吸収され赤外線で再放射される。そのため、星形成史の正しい理解には紫外線の観測だけでなく、赤外線でも観測する必要がある。赤外線は、ダスト放射成分の連続光だけでなく、星の種となる冷たい星間ガス起源の輝線も観測される。輝線は星形成領域の描像の理解や、精度よい赤方偏移の決定のために欠かせない。特に [CII] 158 μm 輝線は、大質量星からの紫外線に強く輻射された中性水素ガスを主な起源とし、非常に明るい輝線として知られる。また、遠方宇宙の [CII] 輝線の光度分布 (光度関数) が分かれば、検出可能性が議論できる。観測的な [CII] 輝線光度関数の見積もりは Matsuda et al. (2015) らによって成されているが、将来観測の検出可能性を議論できるほど制限は与えられていない。

本研究では Okamoto et al. (2014) による大規模銀河形成シミュレーションを用いて、[CII] 輝線銀河の統計的特徴と検出可能性を議論する。計算コストの制限により、シミュレーションでは [CII] 輝線が起源とするような中性水素ガスを解像していない。このような星間空間のモデル化には中性水素ガスの熱平衡状態を計算したワンゾーン計算の結果を応用する (Nagamine et al. 2006)。現実的な取り扱いのため、加熱過程に寄与する遠紫外線放射場は、シミュレーション中のガス粒子と星粒子間におけるダストによる減光の寄与を考慮する。

結果として得られた [CII] 輝線光度は、近傍宇宙で知られる星形成率との相関を再現した。[CII] 輝線光度関数をもちいた検出可能性の議論を行い ALMA Cycle 3 への 3 件の観測提案に貢献した。優先順位が高ければ、観測は 2015 年 10 月から 2016 年 9 月に行われる。実際の観測結果と比較し、結果の (非) 整合性を議論することにより、遠方星形成領域の理解が深まることが期待される。本講演では、2 件の貢献について詳しく解説する。

1. Matsuda, Y., Nagao, T., Iono, D., et al. arXiv:1505.02244 (2015)
2. Okamoto, T., Shimizu, I., & Yoshida, N. PASJ, 66, 70 (2014)
3. Nagamine, K., Wolfe, A. M., & Hernquist, L. ApJ, 647, 60 (2006)

銀河 a19 電波領域を考慮した銀河スペクトルエネルギー分布モデルの構築

永田 拓磨 (名古屋大学、銀河進化学研究室 (研) M1)

銀河はあらゆる波長の放射源である。例えば OB 型星による紫外線の放射、ダストによる赤外線の再放射がある。これらの放射の波長ごとのエネルギー分布をスペクトルエネルギー分布 (SED) と呼ぶ。SED から、単位時間あたりに形成される星質量を示す星形成率 (SFR) や星質量など銀河の物理量が推定できる。このように、銀河の SED モデルを構築することは物理量を求める上で重要である。

銀河の SED モデルを構築するためには、銀河を構成する星やガス、ダストのスペクトルを足し合わせる必要がある。これらのスペクトルは銀河が形成されてから、銀河がたどってきた進化を仮定することで導出できる。つまり、SED モデルを構築するためには、初期質量関数や星の個々のスペクトルだけではなく、銀河進化を考慮する必要がある。特に銀河の SED に関連して重要なのは化学進化である。これは銀河内の星が内部の核融合反応により金属を形成し、超新星爆発や恒星風により金属が放出されることで銀河の化学組成が変化していく現象のことである。

先行研究で、ダストによる星の放射に対する吸収および再放射を考慮することにより、化学進化と整合的な銀河 SED 進化モデルが紫外線から赤外線までの波長で構築されている。一方、電波領域では超新星残骸の相対論的電子によるシンクロトロン放射、HII 領域のプラズマによる熱制動放射、分子雲内の CO や Fe など金属による線スペクトル、中性水素による 21cm 線があり、銀河にとって重要な要素を含むが、紫外線から電波までの波長の銀河 SED 進化モデルはいまだ構築されていない。シンクロトロン放射や熱制動放射によって得られる電波領域での連続スペクトルも SFR と深い関係があり、紫外線や赤外線と組み合わせることにより正確な SFR を調べることができる。本研究では先行研究で得られた紫外線から赤外線までの銀河 SED 進化モデルを用いて、電波領域まで拡張した銀河 SED 進化モデルを構築した。この結果と観測への示唆について述べる。

銀河 a20 AGN feedback to galaxy formation at high redshift

菊田 智史 (国立天文台三鷹 M1)

古い星が楕円状に分布する銀河のスフェロイド成分 (楕円銀河、銀河のバルジ) の中心に超巨大ブラックホールがほぼ普遍的に存在し、両者の質量に相関があるという観測事実は、スフェロイドの星を生成する銀河形成活動と、超巨大ブラックホールへの物質の質量降着によって明るく輝く活動銀河中心核 (AGN) 活動が、互いに関わり合いながら進化してきたこと、および AGN 活動が銀河形成において重要な役割を果たしてきたことを示唆している。AGN がその母銀河へ与える影響 (フィードバック) に関しては、観測的にも、理論的にも多くの研究がされつつあるが、AGN が周囲の別の銀河に与えるフィードバック、特に光度の大きな AGN が周囲の低質量の銀河に与えるフィードバックに関しては、理論的にはあるはずだと定性的には言われているものの、定量的には、観測的にも理論的にもほとんど手付かずの状態のまま残っている。そこで我々は、すばる望遠鏡の広視野の可視光線カメラ Suprime-Cam を用いて、赤方偏移 5 付近の明るい AGN の周囲を、狭帯域フィルターで、広く、かつ、低質量の銀河 (ここでは Ly α 輝線銀河、LAE) も検出できる深さで撮像観測し、低質量銀河へのフィードバック効果を定量的に調べた。AGN の影響の強い近傍領域 (proximity) と、影響の

ない一般領域の低質量銀河を同時に捉えることができる点は、我々の広視野・高感度の Suprime-Cam を用いた手法のユニークな強みである。初期解析の結果、AGN の周囲において実際に暗い LAE の数が一般領域と比べて有意に減っていることが確認できた。本講演では、その初期解析に基づくその他の結果と、銀河形成への示唆について紹介する予定である。

銀河 a21 準解析的モデルを用いた活動銀河核におけるダスト減光効果の研究

白方 光 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M2)

我々は準解析的銀河形成モデルである、*New Numerical Galaxy Catalogue* (ν^2 GC; Makiya et al. in prep, Ishiyama et al. accepted) を用いて超巨大ブラックホール (SMBH) と銀河の共進化について理論的に研究している。準解析的銀河形成モデルでは、ダークマターの空間分布をダークマターのみの N 体シミュレーションで計算し、バリオンが関わる部分については観測や数値シミュレーション・解析解を元にモデル化している。そのため宇宙論的流体シミュレーションによる銀河進化研究よりも格段に広い計算体積を取ることができ、統計的研究に優れている。特に活動銀河核 (AGN) などの空間密度が低い天体の研究には強力な武器となる。

これまで私は、AGN の中で最も明るいクラスであるクェーサーのダスト減光効果を研究してきた (Shirakata et al. 2015)。クェーサーが質量比の大きな銀河合体によってトリガーされるとして、合体後のクェーサー母銀河に存在するダストがクェーサーの減光にどの程度寄与するのかを調べた。その結果、我々の準解析的銀河形成モデルが銀河の観測結果を説明できるのならば、母銀河のダストによってクェーサーは可視光 (B-band) で約 2 等級ほど暗くなるのがわかった。しかし観測はクェーサーにおけるダスト減光の効果は統計的には無視できるほど小さいことを示唆している。

今回はクェーサーだけでなく暗い AGN をトリガーする物理過程も考慮した上で、母銀河のダスト減光が AGN にもたらす影響を調べた。観測と比較する際はダストによる減光は無視できると考えられている硬 X 線と可視光 (B-band) の光度関数を用いた。今回は $z < 2$ の結果を発表する。また、クェーサーについてはダスト減光を弱めるために必要なプロセスも議論する。

1. Ishiyama et al. accepted by PASJ (arXiv: 1412.2860)
2. Shirakata et al. MNRAS, 450, L6 (2015)

銀河 a22 高赤方偏移の低光度クェーサー探索におけるコンプリートネスと光度関数の再評価

仁井田 真奈 (愛媛大学 M2)

巨大ブラックホールの進化を解明するためには、宇宙の様々な時代において広い光度範囲のクェーサーの光度関数 (単位体積・光度あたりの個数密度) を求めることが重要である。クェーサーは AGN の中でも最も明るいクラスの天体であり、先行研究によって幅広い時代の高光度クェーサーの光度関数が求められてきた (Croom et al. 2009)。しかし巨大ブラックホールの成長初期に対応する遠方の低光度クェーサーの光度関数は系統誤差を多く含むなどの理由により、正確な光度関数が得られていない。我々は光度関数を導出する上で重要なコンプリートネス (サンプル選出により選出可能なクェーサーの割合) の導出方法に系統誤

差が生じる原因に注目した。ひとつ目は、低光度のものほど輝線等価幅が大きいというクェーサースペクトルの光度依存性 (Baldwin 1977) を考慮していない点である。ふたつ目は、クェーサーのモデルスペクトルに適用させる銀河間物質の一般的なモデルが吸収を過大評価している点である。

そこで本研究ではこの 2 点を改善し、より正確な遠方の低光度クェーサー光度関数の導出方法の確立を目的とした。我々は SDSS のクェーサーカタログを用いて定量化したスペクトルの光度依存性の情報と、最近の観測結果に基づく銀河間物質の吸収モデル (Inoue et al. 2014) を用いて、COSMOS 領域のデータから $z \sim 4, 5$ におけるコンプリートネスを導出した。その結果、低光度のクェーサーほど二色図上で選出されやすく、コンプリートネスが影響を受けることが分かった。導出したコンプリートネスを使用することで、従来の導出方法によって生じる系統誤差の除去に成功し、その結果各赤方偏移のクェーサー個数密度に約 25% の増減があった。本講演では導出方法の詳細に加え、導出した光度関数に基づくクェーサーの個数密度進化やすばる望遠鏡の超広視野カメラ (Hyper Suprime-Cam) を用いた今後の展望について議論する。

1. Croom et al. 2009, MNRAS, 399, 1755
2. Baldwin 1977, ApJ, 214, 679
3. Inoue et al. 2014, MNRAS, 442, 1805

銀河 a23 近赤外線分光観測に基づくセイファート銀河の狭輝線領域における電離メカニズムへの制限

寺尾 航暉 (愛媛大学 M2)

活動銀河核 (AGN) の狭輝線領域 (NLR) の電離メカニズムは、主に中心核からの電離光子による光電離であると考えられているが、電波ジェットなどに起因する衝撃波による衝突励起が電離に寄与している可能性も指摘されており、議論が続いている。

観測から電離メカニズムを切り分ける方法として、近赤外線の [Fe II] 1.257 μm /[P II] 1.188 μm 輝線強度比による診断が有用であると Oliva et al. 2001 (Hashimoto et al. 2011 も参照のこと) で提案されている。鉄はダストに非常によく吸着するが、リンはダストに吸着せずガス中に存在する。ダストは衝撃波によって簡単に破壊されるため、ガス中の鉄の存在量が増加し、[Fe II] 輝線は強くなる。対するリンの [P II] 輝線の強度は衝撃波の有無に寄らないため、[Fe II]/[P II] 輝線強度比が大きいことは衝撃波の影響が強いことを示唆している。しかし、AGN におけるこの輝線比はこれまであまり調査されておらず、サンプル数が少ないため統計的な議論は進んでいない。

本研究では、近傍セイファート銀河 26 天体の中心核領域を岡山天体物理観測所 188cm 望遠鏡の近赤外分光装置 ISLE を用いて分光観測を行った。その結果、下限値も含めて計 19 天体の輝線比のデータを得た。さらに先行研究から 22 天体の輝線比のデータも収集し、合計 41 天体の輝線比を得た。この結果から、多くの天体では光電離が主な電離メカニズムであるが衝撃波が電離に寄与している天体も見つかり、実際に NLR の電離に衝撃波が寄与している天体が一定の割合で存在することが分かった。NLR における衝撃波の起源は、近年話題になっている AGN feedback に対応する現象が考えられ、母銀河の星間物質への feedback が NLR の衝撃波による電離として見えている可能性がある。この衝撃波の起源について電波ジェットの活動性の強弱と輝線比の関係をみると、これらの間に相関は見られなかった。そのため、NLR における衝撃

波の起源には、電波ジェット以外の放射開口角が大きいアウトフロー現象が関与していることが示唆された。

1. Oliva, E., et al. 2001, A&A, 369, L5
2. Hashimoto, T., et al. 2011, PASJ, 63, L7

銀河 a24 可視光輝線診断による低金属量 AGN 探査

川崎 光太 (愛媛大学 M1)

多くの大質量銀河中心には超巨大ブラックホール (Super Massive Black Hole; SMBH) が存在することが知られている。特に SMBH へのガス降着により明るく輝く天体を活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) という。AGN の狭輝線領域 (Narrow Line Region; NLR) の金属量が低い天体は進化の初期段階にあると考えられ非常に興味深い天体である。しかし、一般的に AGN の NLR の金属量は太陽金属量と同程度かそれよりも高く、金属量が低い AGN は非常に稀な存在である。低金属量の AGN を選択するために BPT 図と呼ばれる輝線診断図 ($[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ vs. $[\text{O III}]/\text{H}\alpha$) を用いる方法がある (e.g., Groves et al. 2006)。BPT 図内では、左上から右下にかけて星形成銀河が、左下から右上にかけて AGN が多く分布し、星形成銀河と AGN を切り分けることができる。理論モデルによると、NLR の金属量が太陽程度かそれ以下である低金属量 AGN は、天体がほとんど存在しない BPT 図の谷にくることが示唆されている。しかし、高い電子密度や電離パラメータをもつ AGN、高い電子密度・電離パラメータ・ハードな極紫外線 (EUV) をもつ星形成銀河も BPT 図の谷にくるため (e.g., Kewley et al. 2013)、BPT 図の谷にくる天体は必ずしも NLR の金属量が低い AGN だけではないという問題がある。

本研究では BPT 図の谷に来る AGN の NLR の金属量や電子密度、電離パラメータについて調べ、本当に NLR の金属量が低い AGN を選択する。SDSS DR7 データベースから、近傍 ($0.02 \leq z \leq 0.36$) にある $\sim 340,000$ 天体を選択し、その中に含まれる $\sim 43,000$ 天体の AGN のうち BPT 図の谷にくる AGN の候補 85 天体を選択した。それらの候補天体のスペクトルに広輝線が He II が見られる天体を AGN であると判断した。このサンプルに対して、電子密度は $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ 輝線比、電離パラメータは $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ 輝線比を用いて調べた。その結果 BPT 図の谷に来る AGN は、ほとんどが低金属量で特徴付けられるものであり、電子密度や電離パラメータの効果で BPT 図の谷に位置する AGN はほとんど存在しないことが分かった。本講演では、解析の詳細および結果の意義について述べる。

1. Groves, B., Heckman, T., & Kauffmann, G. 2006, MNRAS, 371, 1559
2. Kewley L. J., Dopita M. A., Leitherer C., DavéR., Yuan T., Allen M., Groves B., Sutherland R., 2013a, ApJ, 774, 100

銀河 a25 AGN トーラスから放出されるアウトフローの 1 次元モデル

寺本 篤史 (鹿児島大学 M1)

本研究では AGN トーラスからの質量流出 (アウトフロー) の 1 次元モデルを作成し、トーラス外縁部における速度、質量を求めた。このモデル

では、アウトフローはトーラス内縁付近で幾何学的に薄いシェルとして発生し、降着円盤が放射する紫外線の輻射圧によって加速される。シェルはトーラス表面に束縛され、光学的厚み $\tau \approx 1$ を保ち、雪かき式に質量を増しながらトーラス外縁部へ向かって加速すると仮定した。トーラスの形状として、(Wada & Norman 2002) で示された形状を仮定した。結果として、標準的なパラメータの AGN において質量 $5 \times 10^5 M_{\odot}$ 、速度 210 km s^{-1} のシェルが放出されることがわかった。トーラス外縁部におけるシェル速度は脱出速度を超えており、シェルが AGN から脱出してアウトフローになると考えられる。この結果から、トーラス内縁部におけるシェルの発生間隔に適切な仮定を置くことでアウトフローの質量放出率及び、質量放出によってトーラスが消滅する時間を得た。また、シェルが加速しきれずにトーラスに再び落下する可能性についても議論した。さらに、結果のパラメータ依存性についても述べる。

1. K. Wada & C. A. Norman, 2002, ApJ, 566, L21

銀河 a26 SMBH と母銀河の共進化史解明に向けた小質量サンプルの獲得

木村 勇貴 (東北大学天文学専攻 M2)

銀河と超大質量ブラックホール (Super Massive Black Hole ; SMBH) の共進化史を解明するにあたって、過去の情報、つまり高赤方偏移での銀河と SMBH の関係を知る必要がある。そのような観測は近年活発に行われているが (例えば Sun et al. 2015)、それらは X 線で同定された比較的明るいクエーサー・AGN といった大質量サンプルだけを用いて議論される場合がほとんどで、小質量サンプルについては全く扱われることはなかった。しかしながら階層的構造形成を考えたとき、高赤方偏移の情報を知るにあたってそのような小質量サンプルは非常に重要な位置づけにあると考えられる。そこで我々のグループでは AGN の変光の性質を用いて高赤方偏移にある小質量 SMBH サンプル獲得に向けた観測を行った。低光度なもの (つまり小質量天体) ほど変光強度は大きいことが知られており (Vanden Berk et al. 2004)、これにより小質量の AGN 候補の獲得が予想される。これに加えて color-selection によって BzK (Daddi et al. 2004) や DRG (Franx et al. 2003)、LBG (Steidel et al. 1996) といった高赤方偏移サンプルの確保が期待される。この変光の性質と color-selection を組み合わせると、X 線でも検出できないような高赤方偏移・小質量サンプル獲得に向けた調査を UKIDSS/UDS 領域で行った。本講演ではこの調査結果について報告する。また獲得されたサンプルの妥当性を確かめるべく実施した分光観測結果についても述べる。

1. Sun et al. 2015, ApJ, 802, 14S
2. Vanden Berk et al. 2004, ApJ, 601, 692V

銀河 a27 X 線天文衛星「すざく」・Swift による Compton Thick AGN NGC 1106 の広帯域 X 線観測

谷本 敦 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

銀河中心に存在する超巨大ブラックホール (SMBH : Supermassive Black Hole) への質量降着によって、銀河中心が明るく光り輝く現象が活動銀河核 (AGN : Active Galactic Nuclei) である。SMBH 質量と銀河バルジ質量には強い相関関係があることが知られており、SMBH と

銀河が共進化してきた可能性を示唆している。AGN は質量降着によって SMBH がまさに成長している過程であり、AGN は銀河進化の理解において重要である。

AGN では、銀河中心の SMBH をトラスと呼ばれるドーナツ状のガスやダストから成る遮蔽物が取り囲んでいると考えられている。このトラスを通さずに SMBH を見たものが 1 型 AGN、トラスを通して SMBH を見たものが 2 型 AGN と分類される。2 型 AGN の中でも特に X 線の吸収量が大きく、Compton 散乱に対する光学的厚みが 1 を超えるものを CTAGN(Compton Thick AGN) と分類する。この全 AGN 種族からの X 線放射の重ね合わせが宇宙 X 線背景放射 (CXB: Cosmic X-ray Background) として観測されている。この CXB を分解することによって、AGN の種族毎の存在量を決定し、各種族の SMBH 成長への寄与を調べることが可能となる。

しかし、10 keV 以上の CXB の大部分は未分解のまま残されている。このエネルギー領域において CTAGN が重要な寄与をすると考えられている。その寄与を正確に知り、CXB の起源を説明する為には、CTAGN の広帯域 X 線スペクトルの理解が必要不可欠である。しかし、強い X 線吸収の為に詳細に調べられる近傍宇宙の CTAGN の数は限られていた。本研究では、Swift 衛星による透過力の高い硬 X 線サーベイで見つかった新しい CTAGN 候補である「NGC 1106」を X 線天文衛星「すざく」によって追求観測し、その広域 X 線スペクトル (0.5-100 keV) を初めて取得することに成功した。そして、トラスからの吸収・反射を考慮したモデル (Ikeda et al. 2009) により観測されたスペクトルを再現し、トラス構造に制限を付けることに成功した。本発表では、NGC 1106 の観測結果とこれまでの CTAGN に関する研究を比較し、議論を行う。

1. Ueda et al. 2007, ApJ, 664, L79
2. Ikeda et al. 2009, ApJ, 692, 608
3. Eguchi et al. 2011, ApJ, 729, 31

銀河 b1 バルジ形成過程の解明に向けた近傍 LIRG におけるダスト減光の評価

小早川 大 (東京大学 天文学教育研究センター M2)

我々は銀河の形態形成メカニズムに迫るため、形態を良く反映しているバルジに着目し、その形成過程を解明しようとしている。近年では数値シミュレーションなどを用いたバルジ形成の研究が進んできているが (Okamoto et al. 2012)、これらの結果が示唆するモデルを検証する観測的研究はまだ多くはなされていない。そこで、我々は今まさにバルジを形成しつつある銀河として活発な星形成活動を行っている高光度赤外線銀河 (LIRG) に注目し、星形成がバルジにどのように関わっているのかを調べることでバルジ形成のメカニズムを解明することにした。

LIRG は濃いダスト ($A_V \sim 2 - 6$ mag; Alonso-Herrero et al. 2006) に覆われているため、星形成活動の一般的な指標である UV や H α 輝線では減光が大きく、正確な星形成領域の空間分布が得られない。そこで、我々は減光をあまり受けない赤外波長の水素電離輝線のうち最も放射強度が大きい Pa α 輝線を用いることで、ダストを見通して星形成領域を捉えた。しかし、LIRG のダストは濃く、Pa α 輝線であっても 1mag 程度の減光を受けてしまうため、得られる星形成領域の空間分布には無視できない不定性が残ってしまう。我々は、2 つの水素電離輝線の強度比からダスト減光分布を求めることにより、この不定性を排除することにした。

これまでに H α 輝線および Pa α 輝線を用いて 9 天体の LIRG について減光分布を求めたところ、中心部に近いほど減光量大きい傾向があることがわかった。本講演ではこの結果に加えて、他の研究で求められている H α /H β 輝線比から求めた減光量との比較から得られた結果について議論する。

1. Okamoto, T., 2013, MNRAS, 428, 718
2. Alonso-Herrero, A., et al. 2006, ApJ, 650, 835

銀河 b2 矮小銀河の回転速度における理論と観測の不一致

畑 千香子 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙マイクロ波背景放射の揺らぎの詳細な観測により、平坦・低密度で宇宙の物質密度の大部分を cold dark matter が占める Λ CDM が宇宙の標準モデルとして確立された。 Λ CDM モデルに基づく銀河形成シミュレーションでは、矮小銀河のダークハローの中心密度プロファイルが近傍矮小銀河の回転速度の観測から示唆されるような銀河中心部で密度一定の "core" ではなく密度が半径の累乗の "cusp" 構造を持つ (Navarro et al. 1997) という問題 "core-cusp problem" (Moore 1994) があることが 1990 年代半ばから知られている。

本発表ではこの問題に関する Oman et al. (Submitted to MNRAS) の論文のレビューを行う。この論文では EAGLE プロジェクトと LOCAL GROUPS プロジェクトによる Λ CDM 宇宙論的流体シミュレーションから得られた銀河の回転速度を調査し、矮小銀河の観測によって得られた回転曲線との比較を行っている。その結果から "core-cusp problem" を観測から示唆される銀河の中心密度プロファイルが理論から推測されるような半径の累乗ではなく一定であるという "密度傾斜の不一致" の問題ではなく、銀河の内部領域の質量が理論から推測されるものよりも非常に小さいという "内部質量の不足" の問題であるとみなし、次に述べる三つの事柄の内一つ又はそれ以上が正しくなければならぬと示している。(i) dark matter は現在あるモデルで予想されるよりも複雑である。(ii) 矮小銀河の内部領域のバリオンの効果の再現が現在のシミュレーションでは正しくない。(iii) 運動学のデータから推測される "内部質量が不足" している銀河の質量プロファイルを再評価する必要がある。

1. Oman et al. 2015, arXiv:1504.01437v1
2. Navarro, Frenk, & White, 1997, ApJ, 490, 493
3. Moor, B. 1994, Nature, 370, 629

銀河 b3 赤方偏移 $z \sim 0.7 - 0.8$ のバースト的な星形成をする銀河のスペクトル解析

工野 瑞季 (愛媛大学 M1)

個々の銀河の星形成史は、その銀河の進化を理解するための重要な情報である。一般的に、銀河の星形成史は τ モデルで近似される。しかし、階層的な形成モデルにおいて、バースト的な星形成を短い時間スケールで引き起こしながら現在に至った可能性が十分に考えられる。銀河の SED から、観測された時点での星形成については比較的详细に分かるが、それよりずっと昔の詳細を知ることは難しい。しかし、遠方の銀河に遡っていくことで、広い時代に渡って星形成の詳細を調べることが

できる。そこで我々は、COSMOS サーベイの中帯域フィルターのデータを用いて、 $0.2 < z < 1.0$ の銀河の中から急に星形成が止まった銀河 (post-starburst) や、古い星ばかりだったところに急に星形成が起きた銀河 (old+burst) を選び出し、その進化を調べた。その結果、 $z \sim 1$ に近づくにつれ、これらの銀河の割合が高くなることが分かった。本研究では、これらの銀河の星形成の詳細やガスの金属量を調べるために、スペクトル解析を行い、輝線や吸収線の等価幅や異なる輝線のフラックス比を、赤くて古い星からなる銀河 (passive) や、連続的に星形成を行っている銀河 (continuous Star Formation) と比較した。

z COSMOS サーベイ (観測波長: 約 5500 – 9700Å) による分光データを使用し、 $z \sim 0.66 - 0.85$ の passive 銀河 303 個、continuous SF 銀河 692 個、post-starburst 銀河 22 個、old+burst 銀河 90 個のスペクトルを解析に用いた。十分な S/N 比で輝線や吸収線の測定を行うために、各銀河種族でスペクトルの足し合わせを行った。

これらのスペクトルの解析から、old+burst 銀河の [O II] $\lambda 3727$ や [O III] $\lambda 5007$ の輝線の等価幅が continuous SF 銀河よりも大きいこと、また post-starburst 銀河は passive 銀河と比べ、バルマー吸収線が顕著に強いことが分かった。これらの結果は、old+burst 銀河において活発な星形成が起きていること、post-starburst 銀河はスペクトルにおける A 型星の寄与が大きく、星形成が止まってから間もないことを示唆しており、中帯域フィルターを用いることによって、確かにバースト的な星形成を持つ銀河を選び出せていることを確認できた。

銀河 b4 あかりスリットレス分光で見るヒクソンコンパクト銀河群

池内 綾人 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

Hickson Compact Groups(HCG) は local universe において銀河が最も濃い環境にあります。これは 1877 年に HCG の原型となる Stephan's Quintet が発見されて以来、パロマー天文台で行われた掃天観測の撮像乾板に主に基づき 1982 年に Hickson が 451 個の銀河を 100 個のコンパクト銀河群に割り当て、カタログにしたものです。視線方向に沿って見かけ上コンパクト銀河群に混じっている銀河があるものの赤方偏移情報からそれらを除くことが可能であり、HCG の内 43% の銀河は相互作用を受けていると考えられている形状を示しています。私は重力的に相互作用していると考えられている HCG のメンバー銀河の赤外線における特徴を詳しく知りたいという意欲の元、現在あかりの IRC のスリットレス分光画像から銀河の赤外 SED を求めようとしています。あかりは IRTS に続き 2006 年に打ち上げられた口径 68.5cm の日本の赤外線天文衛星で、赤外線による掃天観測を目的として JAXA 宇宙科学研究所が主体となり開発されました。あかりには観測装置として遠赤外線サーベイを担当する FIS と近赤外線での指向観測を主目的とした IRC が搭載されていました。IRC には 1.8-5.3 μm を担当する NIR、5.4-13.1 μm を担当する MIR-S、12.4-26.5 μm を担当する MIR-L の 3 つのチャンネルがあり、それぞれ $10' \times 10'$ 程度の視野を持ちます。しかしながらスリットレス分光において広がった天体のスペクトルを得ることは、分光が画像上で始まる位置が視野の中にあること、分散方向に他の天体のスペクトルが混じることがある等の理由で困難です。本講演ではあかり IRC でのスリットレス分光の課題や解決法、現状での成果について紹介します。

1. Bitsakis, T., et al. 2010, A&A, 517, A75
2. Mendes de Oliveira, C., & Hickson, P. 1994, ApJ, 427, 684
3. Onaka, T., et al. 2007, PASJ, 59, S401

銀河 c1 低質量ブラックホールの短時間変動

谷口 由貴 (東京大学 天文学教育研究センター M1)

超大質量ブラックホール (SMBH) は、 $10^{10} M_{\odot}$ 以上の銀河の中心に普遍的に存在するとされているが、どのような進化をしてきたのかは解明されていない。ブラックホールと銀河は、互いに関係し合いながら成長してきたと考えられるので、SMBH の進化過程は、銀河進化においても重要である。SMBH も最初は $10^{4-5} M_{\odot}$ の seed BH から、合体や降着をくり返して成長をしてきたと考えられている。しかし、現在、高赤方偏にある seed BH は直接観測ができないため、近傍の矮小銀河にある low-mass BH を観測することで、SMBH の起源を明らかにできると考えられている。近年、SDSS によるサーベイで低質量ブラックホール探しが行われたが、可視光による観測では、星形成の活発でない領域ばかりで検出してしまうというバイアスがあった。その欠点を補うため、X 線や電波による観測も盛んになってきたが、検出数はまだ少ない。そこで我々は、低質量ブラックホールの可視領域での短時間変動を利用して検出するという方法を使った。低質量ブラックホールは、その系が小さいことにより、降着円盤が不安定で、可視領域での力学的タイムスケールが数時間程度になることが期待されている。(eg., Peterson et al. 2005) 一方で、大きな SMBH だと、数ヶ月～年タイムスケールで変動することが観測的に示されている。このように短時間変動を利用した、low-mass BH を同定する方法が確立できれば、今後の観測も効率化でき、統計的に意味があるサンプル数が得られると考えている。今回は、我々が行った最近の観測 (Subaru/HSC+FOCAS) の結果と今後の展望について紹介する。

1. Peterson et al., 2005, ApJ., 799, 808
2. Tominaga et al., ATel, 6291, 1

銀河 c2 Subaru/Hyper-Suprime Cam サーベイを用いた高赤方偏移クェーサー探査

尾上 匡房 (国立天文台三鷹 D1)

初期宇宙に存在するクェーサーは超巨大ブラックホールの形成史や宇宙再電離、さらには銀河と AGN の共進化を探る上で非常に重要な役割を果たす。現在までに赤方偏移が 6 を超えるようなクェーサーは SDSS に代表される大型サーベイ観測によって 70 個程度発見されており (e.g., Mortlock et al. 2011, Venemans et al. 2013, Fan et al. 2006)、これらが宇宙年齢 10 億年未満の時代において 10 億太陽質量程度のブラックホールを持つという観測事実は超巨大ブラックホールの形成モデルに大きな制限を与えている。しかし一方で、これらはこの時代で最も活発で明るい AGN と考えられるため、初期宇宙における超巨大ブラックホールの降着活動の一般的な性質を探るためには現在のサンプルよりも暗いクェーサーを含めた大規模サンプルを構築する必要がある。そこで我々は 2014 年春から観測が開始したすばる望遠鏡・Hyper-Suprime Cam (HSC) 戦略サーベイにおいて高赤方偏移クェーサーの発見数を大幅に増大させ、初期宇宙における超大質量ブラックホールの性質や再電離の進行過程の解明を目指している。HSC は直径 1.5 度という超広視野を誇るすばる望遠鏡の最新鋭の可視撮像装置であり、HSC-Wide サーベイは 5 年間に渡って 1,400 deg² もの領域を 5σ 限界等級: $r \sim 26$ mag という深さまで撮像することを可能にする為、現段階において世

界で最も強力な可視光サーベイであると言える。ところでキューサーの検出に通常用いられる二色図による色選択法では褐色矮星に代表される混入天体が障害になるが、我々はこの問題を克服するため可視と近赤外線の色データを用いた SED fitting 法を適用することで従来より効率的なキューサー検出を行う。本講演では HSC サーベイの概要や SED fitting 法の有効性を議論した後、HSC 戦略サーベイ初年度データを用いた高赤方偏移キューサー探査の初期結果を報告する。

1. Venemans et al. (2013). ApJ, 779, 24
2. De Rosa et al. (2014). ApJ, 790, 145
3. Miyazaki et al. (2012). SPIE Conference Series, 8446, 84460ZZ

銀河 c3 「あかり」と Spitzer を用いた分子トラスの物理状態の推定

馬場 俊介 (宇宙科学研究所 D1)

活動銀河核 (AGN) の周囲には、それを囲むようなトラス型の分子雲 (分子トラス) が存在していると考えられている。しかし、数 pc オーダーという物理的小ささのため空間分解した観測を行えず、分子トラスの構造や物理状態は良く分かっていない。

我々は、分子トラスの物理状態を解明するため、一酸化炭素 (CO) の回転振動遷移 ($4.7 \mu\text{m}$) に着目した。分子雲が視線上で中心核の手前にあれば、中心核とその周辺からの熱放射を吸収する。吸収線のため母銀河からの寄与を受けず、背景光源がコンパクトなため手前の領域を実効的に高い空間分解能で観測できる。先行研究として、Shirahata et al. (2013) がダストに埋もれた AGN IRAS 08572+3915 をすばる望遠鏡を用いて観測し、異なる回転励起レベルごとの強度比から CO 分子ガスの物理状態を調べ、中心核周囲におけるガスの分布を議論している。しかし地上観測では、観測可能な明るさの制約と CO 吸収がバンド内に収まる赤方偏移という制約により、大規模なサンプルを望めない。

そこで本研究では CO 吸収を系統的に解析するため、赤外線天文衛星「あかり」と Spitzer の分光観測データを利用した。ただし、これらの観測では波長分解能が足りず異なる回転励起レベルの吸収線を分離できないため、局所熱平衡を仮定したモデルフィッティングにより解析を行った。回転励起ごとのラインが分離できていないものの、数十%の良好な精度で柱密度と温度を求めることに成功した。典型的な値はそれぞれ、CO 分子の柱密度 10^{19} cm^{-2} (水素分子換算 10^{23} cm^{-2})、温度数百 K であった。高温の CO が大きな柱密度で存在することは、星形成領域における光解離領域の重ね合わせでは説明できない。したがって、中心核付近に系統的に分布する分子雲を観測していると考えられる。本発表では、高温かつ大量の分子ガスについて、その加熱機構と分布を議論する。

1. Shirahata, M., Nakagawa, T., Usuda, T., Goto, M., Suto, H., & Geballe, T.R. 2013, PASJ, 65, 5

銀河 c4 [OIII] 輝線銀河で探る最盛期前夜における銀河形成の活動性

鈴木 智子 (国立天文台三鷹 D2)

$z \sim 1-3$ において宇宙の大局的な星形成率密度は非常に高く、この時代は銀河形成最盛期と言われている。本研究では、何故この時代に最盛期

を迎えることになったのかを理解するために、最盛期よりさらに時代を遡った $z > 3$ という時代に注目している。我々は、すばる望遠鏡の MOIRCS と狭帯域フィルターを用いた撮像観測によって、一般フィールドである SXDF において $z=3.2, 3.6$ の [OIII] 輝線銀河のサンプルを構築した。そしてそれらの星質量や星形成率といった大局的な物理量を調べ、同じフィールドで構築された $z=2.2, 2.5$ の H α 輝線銀河サンプルとの比較を行った。その結果、異なる時代のふたつの銀河サンプル間で星質量や星形成率の分布に明らかな違いが見られることが分かった。この質量分布の差は、異なる指標を用いていることによる選択効果、もしくは $z > 3$ から $z \sim 2$ にかけての銀河の進化をみていると解釈できる。本講演では、本研究の一連の結果を紹介するとともに、[OIII] 輝線と H α 輝線という指標の違いがもたらす影響についての検証、そして銀河の進化を見ていたと考えた場合に、 $z > 3$ から最盛期にかけてどのような銀河の成長が見られるのかということに関して議論を行う。

1. Tadaki, K.-i., et al. 2013, ApJ
2. Suzuki, T. L., et al. 2015, ApJ

銀河 c5 すばる/HSC とハッブル望遠鏡で探る $z = 4-7$ の銀河・ダークハロー関係

播金 優一 (東京大学宇宙線研究所 M2)

銀河の形成を理解することは、現代の天文学の大きな目標の一つである。銀河を取り囲むダークハローは、ガス冷却による星形成や超新星爆発・AGN によるフィードバックなどを通して銀河形成と密接に結びついている。この銀河・ダークハロー関係を表す物理量として、銀河の星質量とダークハロー質量の比である stellar-to-halo mass ratio (SHMR) がある。SHMR は近傍宇宙では議論されているが、 $z \sim 2$ を超える遠方宇宙では詳しく調べられていない。そこで本研究では、すばる/Hyper-Suprime-Cam(HSC) による最新の超広領域撮像データとハッブル望遠鏡の深撮像データを組み合わせて、 $z \sim 4-7$ の銀河を約 7000 個選択し、クラスタリング解析でダークハロー質量を求めた。求められたダークハロー質量から見積もった SHMR は近傍の値から進化を示しており、さらに $z \sim 4$ から $z \sim 7$ での進化も示唆していた。本研究ではこれらの銀河・ダークハロー関係から得られる銀河形成への示唆について議論する。

銀河 c6 QSO 吸収線と遠方銀河を用いた原始銀河団領域の構造探査

向江 志朗 (東京大学宇宙線研究所 M1)

キューサー (以下、QSO) のスペクトルにみられる Ly α forest と重元素による吸収線は銀河間物質のプロープとなるため、宇宙の広い範囲にわたる物質分布への重要なアプローチとなる。形成過程にある銀河団である原始銀河団の物質分布は、 $z > 2$ では遠方銀河だけを用いて探査されてきた。しかしながら中性水素ガスの分布は調べられていない。

そこで、我々は SSA22 原始銀河団領域 ($z \sim 3.09$) において背景 QSO のスペクトルにみられる吸収線を用いて原始銀河団に付随するガスの有無に迫った。まず、SDSS-III から得た 4 つの QSO スペクトルに見られる吸収線より中性水素の柱密度と赤方偏移分布を求めた。このデータと Magellan/IMACS で分光同定された銀河約 131 天体の分布と合わせることで SSA22 での中性水素と遠方銀河の 3 次元マップを描いた。その結果、銀河の高密度領域に中性水素による吸収の卓越がみられた。

本講演では銀河と中性水素の空間相関を議論することで銀河-銀河周辺物質 (CGM)-銀河間物質 (IGM) の関係を俯瞰する。

1. Yamada et al. 2012, AJ, 143, 79

銀河 c7 BCG progenitor candidate at $z \sim 8$ in the Abell 2744 field

石垣 真史 (東京大学宇宙線研究所 D1)

宇宙初期における銀河の形成を調べることは、銀河天文学のみならず宇宙論研究においても、構造形成モデルを検証する観点から重要である (Feng et al. 2015)。しかし、 $z \sim 7$ を超える銀河の観測は今のところ非常に小さな領域に限られ (e.g. Bouwens et al. 2015)、特に個数密度が小さな大質量銀河の性質を調べることは非常に困難である。Hubble Frontier Fields プロジェクトによる Abell 2744 銀河団フィールドの探査の結果、 $z \sim 8$ 銀河の個数密度が平均密度の 120 倍を超える領域が発見された。このような高赤方偏移銀河の高密度領域は他には発見されていない。本研究では、Millennium Simulation (Henriques et al. 2014) との比較により、このような高密度領域がどのように進化するかを調べた。シミュレーション内で同じような密度を持つ領域は、 $z \sim 3$ で銀河団中心の明るい銀河 (BCG) に成長し、周囲の銀河を取り込みながら $z = 0$ で $10^{14} M_{\odot}$ 程度のハロー質量を持つ銀河団に進化することがわかった。この結果をふまえ、本講演では高赤方偏移でどのように大質量銀河が形成されたかを議論する。

1. Feng et al. eprint arXiv:1504.06618
2. Bouwens et al. 2015, ApJ, 803, 34
3. Henriques et al. 2014. eprint arXiv:1410.0365

銀河 c8 すばる広領域深探査による銀河団の質量進化

玉澤 裕子 (東京大学宇宙線研究所 D1)

銀河団の形成や一般的な進化は観測的には未解明な面が多い。そこで、銀河団の質量進化を観測的に理解するため、 $z \sim 4.5$ のライマンブレイク銀河で構成される原始銀河団候補を探索した。使用した観測データは、Suprime-Cam で観測された SXDS 天域と、Hyper Suprime-Cam で観測された COSMOS 天域のデータである。探査の結果、SXDS 天域から $z \sim 5$ において密度超過 δ が $\delta = 1.7_{-0.5}^{+0.8}$ で、 $\sim 4\sigma$ の有意性をもつ原始銀河団候補を 1 か所見つけた。COSMOS 天域からは、 $z \sim 5$ において $\delta = 4.3_{-1.6}^{+2.1}$ で、 $\sim 5\sigma$ の有意性をもつ原始銀河団候補を 1 か所見つけた。そこで、これらの原始銀河団候補の中心に存在するであろうダークハロー質量を、Millennium Simulation に基づく準解析的銀河形成モデルと light cone モデルを用いて推定した。その結果、それぞれ $1.9_{-0.7}^{+0.9} \times 10^{12} M_{\odot} h^{-1}$ 、 $2.3_{-1.0}^{+1.8} \times 10^{12} M_{\odot} h^{-1}$ となった。さらに、これらの原始銀河団候補は $z=0$ で、それぞれ $3.2_{-2.3}^{+4.8} \times 10^{14} M_{\odot} h^{-1}$ 、 $3.6_{-2.6}^{+5.1} \times 10^{14} M_{\odot} h^{-1}$ のダークハロー質量を持つ銀河団規模の構造に進化すると推定された。

1. Chiang, Y.-K., et al. 2013. ApJ, 779, 127
2. Guo, Q., et al. 2011. MNRAS, 413, 101
3. Henriques, B. M. B., et al. 2012. MNRAS, 421, 2904

銀河 c9 $z < 1$ の非常に強い [O III] 輝線を持つ銀河の統計的性質

大城 円香 (愛媛大学 M1)

$z < 1$ の非常に強い [O III] 輝線を持つ星形成銀河に着目した、2 つの論文を紹介する。これらの非常に強い輝線銀河 (extreme emission line galaxies, EELG) は星質量が小さい矮小銀河で、活発に星形成を行っていて、ガスの金属量がかかなり低い傾向があることがわかってきている。このような天体を詳しく調べることは、過去 80 億年の間に急速に進んだ低質量銀河の星質量集積の様子を明らかにすることに加えて、銀河の質量集積や化学進化の最初期の段階で働く物理機構を理解する上でも非常に重要である。

今回紹介する論文は、COSMOS 天域における分光サーベイのデータを使ってこれらの EELG を見つけて、その性質を調べた研究で、[1] では VIMOS Ultra Deep Survey を用いて比較的低光度の 31 個の EELG について、また [2] では zCOSMOS bright を用いて比較的明るい 165 個の EELG について調べている。これらの分光データに加えて、COSMOS サーベイの多波長データを組み合わせることで、EELGs の形態、星質量、星形成率、ガス金属量を推定し、それらの間の相関関係について銀河の形成・進化の観点から議論する。

1. Amorin et al. 2014, A&A, 568, L8
2. Amorin et al. 2014, arXiv, 1403.3441, v1

銀河 c10 wakelets の非線形相互作用による銀河の大局的渦状腕形成

熊本 淳 (東京工業大学地球生命研究所 (滞在) 東北大学天文学専攻 (所属) D1)

円盤銀河に存在する渦状腕構造の形成と進化に対して数値シミュレーションによる研究が多くなされている。孤立系円盤銀河での N 体シミュレーションなどにより渦状腕の振る舞いやパターン (渦状腕の本数や巻き込みの強さ) はよく理解されている。しかし、渦状腕の形成メカニズムそのものについては十分な理解がなされていない。近年の研究では局所的密度揺らぎ (wakelets) が接合することで大局的渦状腕を形成するという提案がなされている。しかし、個々の wakelets が接合するメカニズムの詳細な調査はなされていない。

そこで、本研究では wakelets が接合するメカニズムを詳しく調べる。N 体シミュレーションを用いて、安定な銀河円盤に摂動源を加え、人為的に wakelets を発生させ、それらの相互作用について解析を行う。同様の手法で wakelets を扱った研究も存在するが、分布が乱数的で個々の相互作用の解釈が難しい。本研究では、摂動源の数や配置を工夫することで、wakelets の接合メカニズムを明解にする。摂動源の配置が異なるモデルを比較することで、wakelets の非線形相互作用が大局的渦状腕を形成することを発見した。さらに今回発見した形成メカニズムは先行研究が示唆する渦状腕の振る舞いやパターンと矛盾しないことを確認した。

また、近年のシミュレーションによる研究は、比較的本数の多い渦状腕 (multiple-armed spiral) について「大局的渦状腕のパターン速度が各半径で星の回転速度と一致する」ことを示唆する。一方で、「大局的な渦状腕はより局所的なモードの重ね合わせである」という主張も存在する。今回の結果は、より高い視点からこれら 2 つの主張を統合する役割

を果たす。

1. D' Onghia, E., Vogelsberger, M., & Hernquist, L. 2013, ApJ, 766, 34
2. Dobbs, C., & Baba, J. 2014, PASA, 31, 35
3. Sellwood, J. A., & Carlberg, R. G. 2014, ApJ, 785, 137

銀河 c11 UltraVISTA を用いた赤方偏移 $z \sim 2$ における銀河の星質量関数

市川 あき江 (愛媛大学 D2)

銀河進化を理解する上で、銀河がいつどのように星形成を止めたのかわかることは大変重要である。銀河はだまかに、星形成活動が活発な star-forming 銀河と、星形成が終わり古い星で構成される passive 銀河とに分けることができる。特に、星形成の止まった passive 銀河の星質量関数 (各星質量をもつ銀河の個数密度) の進化に注目することで、いつ、どの程度の星質量を持つ、どれ程の数の銀河が星形成活動を止めたのかわかることができる。先行研究から、 $\sim 10^{11} M_{\odot}$ の星質量を持つ passive 銀河は $z \sim 2$ から 1 にかけて個数密度が急激に増加していることが分かっている (e.g. Kajisawa et al. 2011)。しかし、passive 銀河は star-forming 銀河に比べ質量光度比が大きいため、高赤方偏移における低質量の passive 銀河ほど観測が難しく、低質量の passive 銀河の星質量関数の進化は明らかになっていない。そこで本研究では、広視野で深い近赤外領域のデータである UltraVISTA (McCracken et al. 2012) の Data Release 2 データと、すばる望遠鏡 Suprime-Cam による非常に深い z' バンドデータを用いることで、COSMOS 天域における $z = 1.5 - 2.0$ の銀河の星質量関数を低質量側まで求めた。色選択法 ($z' - J$ vs. $J - K_s$) を用いて、 $z = 1.5 - 2.0$ の star-forming 銀河 (11146 天体)、passive 銀河 (840 天体)、星形成が終わったばかりで A 型星からの光が卓越している post-starburst 銀河 (406 天体) をそれぞれ選び出し、各々の星質量関数を求めた。得られた $z \sim 2$ の passive 銀河の星質量関数は、現在のそれとは異なり、低質量側は星質量が軽くなるにつれて銀河の個数密度が減少するが、star-forming 銀河の星質量関数は、現在と同様に低質量ほど個数密度は増加することが分かった。一方、本研究により初めて明らかとなった post-starburst 銀河の星質量関数は、低質量側では銀河の個数密度が星質量に依らずほぼ一定である。従って post-starburst 銀河が時代と共に passive 銀河に加わると考えると、 $z \sim 2$ の時代以降低質量の passive 銀河は急速に増え始めようとしていることが示唆された。

1. Kajisawa et al. 2011, PASJ, 63, 403
2. McCracken et al. 2012, A&A, 544, A156

銀河 c12 銀河中心 BH の物質降着による角運動変化

加藤 広樹 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ D2)

銀河中心のブラックホール (以下 BH) の回転軸を調べると、銀河円盤の回転軸とずれている事が多々ある。BH も円盤も元は一つのガス塊等が収縮してできる為に、回転軸は一致しているのが進化過程としては自然である。ずれているのは、何らかの原因でどちらかの角運動量が変化すると考えられ、その為の方法としてガスの降着による角運動量

の流入により、BH の回転軸が変化される可能性を調べる事とした。回転軸の変化を調べる為、三次元シミュレーションを行い、BH へと降着する物質の角運動量の総量を調べる。この時、中心へと物質が落ちるには、物質が持っている角運動量を減少させる機構が必要であり、その為の機構として棒構造を考える。この棒構造はいわゆる棒銀河中の棒構造 (kpc) よりもずっと小さい (100pc) ものであり、観測によって 1/3 程の棒銀河の中に、大きい棒構造とは別に存在している事が分かっている。棒の存在により、物質は角運動量を抜かれて落下する事が知られており、BH への物質の降着はこれにより問題なく生じる。本研究ではこの降着の機構を調べる事によって、中心へと降着する物質の角運動量へ寄与するものとして、主にどのようなものがあるか、どの程度寄与するのかわかる。

1. I.Shlosman, J.Frank and M.Begelman Nature. 338 45S

銀河 c13 CFHTLenS/VIPERS を用いた $0.5 < z < 1.0$ の銀河の星質量 - DM ハロー質量比

坂東 卓弥 (愛媛大学 M1)

CFHTLS と VIPERS の非常に広視野の多波長データを用いて、 $0.5 < z < 1.0$ の銀河の stellar-to-halo mass ratio (SHMR) を銀河団スケールを含む幅広いダークマターハロー質量に渡って調べた論文 [1] を紹介する。宇宙の構造形成の枠組みの中での銀河の形成・進化を理解するためには、ダークマターハローの中での銀河形成がそのダークハローの性質とどのように関係しているのかわかることが非常に重要である。それを調べるための最も基本的な指標に、ダークマターハロー質量に対する銀河の星質量の比、SHMR がある。今回紹介する論文では、大規模銀河サンプルを用いて銀河のクラスタリング、galaxy-galaxy lensing、星質量関数を求めて、星質量とダークマターハロー質量の関係性を調べた。 $10^{12} \sim 10^{15} M_{\odot}$ のダークマターハロー質量にわたって SHMR を見ると、 $M_{h,peak} = 1.9^{+0.2}_{-0.1} \times 10^{12} M_{\odot}$ でピーク $M_{*}/M_h = 0.025$ を持つことがわかった。central と satellite 銀河に分けてみると、ピーク付近では central 銀河が星質量を支配しているのに対して、銀河団スケールでは satellite 銀河からの寄与が星質量を支配していることが分かった。さらにこの SHMR の結果を semi-analytic simulation と比べると、central 銀河の SHMR を過大評価する一方で、satellite 銀河からの寄与を過小評価することがわかった。ポスターではこれらの結果についての考察も行う。

1. J.Coupon et al. ,Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 449, Issue 2, p.1352-1379(2015)

銀河 c14 初期宇宙における巨大ブラックホール形成

鄭 昇明 (東京大学 宇宙理論研究室 D2)

$z \sim 7$ に存在する超大質量ブラックホール (SMBH) が次々と観測されている。 $z \sim 7$ は宇宙が始まっておよそ 8 億年程度に対応しており、このような短い間に観測された $10^9 M_{\odot}$ の天体を作るプロセスは未だ知られていない。例えば初期宇宙で形成される質量 $100 M_{\odot}$ の BH への降着を考える。このような種ブラックホールへの降着を考えても、観測された SMBH を形成する時間は足りない事が分かっている。これらの困難はより重たい種ブラックホールへの降着を考える事で回避できる。

近年、初期宇宙において非常に特殊な環境下で $\sim 10^5 M_{\odot}$ もの質量を持つ超大質量星 (SMS) が形成される可能性が指摘された。非常に明るい銀河の近傍に存在するガス雲では、冷却剤の水素分子が解離することで冷却が非常に悪くなる事が知られている。このようなガス雲は高い Jeans 質量を持ち、大質量のガスが直接崩壊して1つの星を形成する事ができる。この星は死後、直接 BH に崩壊すると考えられている。この BH への降着を経て SMBH 形成に至るシナリオを「Direct Collapse (DC) シナリオ」と呼ぶ。

現在のところ、理想的な環境下で DC を検証した研究は数多く存在する。一方で、宇宙論的初期条件から始まって DC が起こりうるかを調べた計算はまだ無い。本研究では宇宙論的初期条件から始まって、星・銀河形成を準解析的に再現した結果から DC 候補ガス雲を見つける。このガス雲に対して、流体計算を行い DC が起こりうるかを調べる。現在のところ、20 個程の DC ガス雲に対して流体計算を行ったところ1つのサンプルについて大質量星が形成される事を確認した。この結果をもとに本講演では、今まで考えられてこなかった大質量星が形成される条件、また、現実的な DC ガス雲で形成される大質量星の性質について議論する。

1. Bromm and Loeb (2003)
2. Dijkstra et al (2008)

銀河 c15 Prospects of HSC-HSC (Hybrid Search for Clusters with HSC): a large unbiased distant cluster survey at z 1-1.7

山元 萌黄 (国立天文台三鷹 M2)

銀河団の成長と銀河の形態変化は z 1-2 で最盛期を迎えることがこれまでの観測や理論から考えられている。従って、この時代において銀河団中の銀河の進化を評価することは非常に重要であるが、 z_{cl} では今まで探し出した銀河団はおおよそ 10-20 個に限られる上、さらに、遠方においてはサンプル出来るものは非常に巨大な銀河団に限られ、得られる情報がサンプリングに大きく依存してしまう。そこで、申請者は上記の問題を克服する z 1-2 の新たな原始銀河団探査として、すばる望遠鏡の新たな可視撮像装置 HSC を利用する。HSC はその広視野による高い観測効率を活かし、非常に広範囲かつ深い観測を行っている。この広視野観測と、2つの原始銀河団探査法を組み合わせた、HSC-HSC (Hybrid Search for Clusters with HSC) サーベイを推進する。2つの原始銀河団探査法とは、1. blue sequence サーベイ：星形成銀河の放つ [OII] 輝線を3枚の狭帯域フィルター (Narrow-Band filter; NB) で捉え、 z 1.4-1.7 の星形成銀河を探査する 2. red sequence サーベイ：広帯域フィルター (Broad-Band filter; BB) を用いて、銀河団銀河特有の色等級図における赤色の系列を用いて (Gladders & Yee 2001)、各 z に対応した色選択を行い、 z 1-1.7 の星形成を終了した銀河を中心に探査する であり、銀河の密度超過領域を探り、原始銀河団を発見する。これまでのサンプル数が非常に少ないという問題は、HSC サーベイの従来になく広範囲かつ深いサーベイが解決する。BB によるサーベイ領域は 1400 平方度まで上り、red sequence サーベイのみだけで得られる数を考えても、約 5000 個というこれまでにない巨大な原子銀河団サンプルを構築する事ができる。また、2つの手法で星形成銀河と星形成を終えた銀河両方を指標にし、この時代の代表的な銀河種族を網羅できるということも HSC-HSC の非常に強みと言える部分であり、サンプルの種族の偏りも克服出来る。これまでにない銀河団の系統的な研究である HSC-HSC により、銀河

団中の銀河種族の割合の時間進化、銀河の形態が発現してきた赤方偏移 1-2 の銀河団中の銀河の進化と環境への依存性を、統計的に揺るぎなく検証することを目指す。今回はこのサーベイの展望、そしてサーベイのスタートとし部分的に行った red sequence サーベイの結果について報告する。

銀河 c16 Hyper Suprime-Cam による $z \sim 1$ の電波銀河探査

延原 広大 (愛媛大学 M1)

活動銀河核 (AGN) の一種である電波銀河は強い電波を放射し、その多くが大質量の楕円銀河を母銀河に持ち、銀河団を伴う傾向にある。そのため、電波銀河は巨大ブラックホールと宇宙の大規模構造およびそれらの進化を研究する上で重要な種族であると認識されている。特に、高赤方偏移の電波銀河 (High- z Radio Galaxy; HzRG) が存在する領域は構造形成が早く進んでいる事が期待され、宇宙大規模構造の進化を研究する上で強い関心が持たれている。

しかし HzRG は稀な天体であり、 $z > 1$ で知られている天体数は数百天体と少ないため、新たな広域探査を行なう必要がある。これまでに行なわれた HzRG の広域探査の中でも特に重要なものとして、全天の約 4 分の 1 の領域を可視光 5 バンドで撮像した Sloan Digital Sky Survey (SDSS) と 1.4 GHz での広域電波観測で、電波源を観測した Faint Images of the Radio Sky at Twenty centimeters (FIRST) とを組み合わせた探査がある [1]。この探査では、SDSS の感度不足により、FIRST の電波源のうち約半分についての可視光対応天体が見つからない。つまり、より深い可視光広域撮像観測と FIRST のデータを組み合わせた HzRG 探査が必要である。

そこで我々は、すばる望遠鏡の超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC: SDSS より約 3 等級暗い天体まで検出可能) を用いたすばる戦略枠サーベイにより観測される領域 (1400 平方度) で HzRG 探査を検討している。しかし HzRG が稀な天体であるため、HSC による HzRG 探査は注意深く検討する必要がある。そこで本研究で我々は、Old Passive Evolution Galaxy (OPEG) に着目した。この天体に着目したのは、OPEG が電波銀河の母銀河であると考えられる大質量楕円銀河と似た進化過程を示す銀河だからである。また、OPEG は可視光帯の R, i', z' バンドの色選択だけで選出できることが報告されているためである [2]。以上を踏まえ、まずは HSC で $z \sim 1$ の OPEG の選出を行い、FIRST とのマッチングを行なった。本講演では解析の評価と今後の展望について発表する。

1. Ivezić et al. 2002, AJ, 124, 2364
2. Yamada et al. 2005, ApJ, 634, 861

銀河 c17 分子ガスの観測から探る $z \leq 1$ での星形成率密度減少の起源

青野 佑弥 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

宇宙の星形成史の理解は銀河進化解明にとって重要である。これまでの研究から、宇宙の星形成率密度は $z \sim 7$ から増加し $z \sim 1-3$ で最も高くなり、 $z=0$ になるにつれて減少していることがわかっている (Madau & Dickinson 2014)。しかし $z \leq 1$ で星形成率密度が下がる原因はまだよくわかっていない。これを説明するシナリオの一つに、 $z \sim 0$ の銀河は $z \sim 1$ の銀河と比べて分子ガスの割合 ($= M_{\text{gas}} / (M_{*} + M_{\text{gas}})$) が低いた

め星形成率密度もそれに伴って少なくなっているという考えがある。そこで本発表では $z \sim 1-2.5$ の星形成銀河の分子ガスの割合について調べた Tacconi et al. 2013, ApJ, 768, 74 の紹介を行う。また、今後の研究の展望についても述べる。

Tacconi らは、 $z \sim 1-1.5$, $z \sim 2-2.5$ で $M_* > 2.5 \times 10^{10} M_\odot$, 星形成率 $> 30 M_\odot/\text{yr}$ の一般的な星形成銀河 67 天体に対し CO(3-2) 輝線の観測を行った。サンプルセレクションに伴うバイアスを補正すると、平均的な分子ガスの割合が $z \sim 1.2$ で 33%, $z \sim 2.2$ で 47% となった。これを現在の値 (8%) と比較することで、分子ガスの割合が現在になるにつれて減少する傾向が見えた。今回の観測から分子ガスの消費時間 ($t_{\text{dep}} = M_{\text{gas}}/\text{星形成率}$) は、 $\propto 1/(1+z)$ となることがわかった。分子ガスの割合 $\propto (\text{星形成率}/M_*)/t_{\text{dep}}$ という関係を用いて、各 z での平均的な分子ガスの割合から星形成率/ M_* の赤方偏移進化を求めると、紫外～赤外の SED フィッティングの結果から求めた星形成率/ M_* と一致した。 $z < 1$ で星質量密度はほぼ一定であるため、これらの結果は分子ガスの割合が $z=0$ に向けて小さくなったことにより $z < 1$ において星形成率密度が減少したというシナリオを支持している。

今回の研究では分子ガスの質量の算出に銀河系内の変換係数を使用しているが、変換係数は金属量に依存するため、正しい分子ガス質量の算出には金属量が求まっているサンプルを用いる必要がある。我々のグループでは近赤外線分光観測により金属量が求まった $z \sim 1.4$ にある一般的な星形成銀河の大規模サンプルを構築しており、これらに対し CO 観測を行うことを計画中である。

1. Tacconi et al. 2013, ApJ, 768, 74
2. Madau P. Dickinson M., 2014, ARA&A, 52, 415

銀河 c18 大規模銀河形成シミュレーションで探るガンマ線バースト発生率の見積もり

加藤 貴弘 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

現在、すばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam (HSC) によって 300 晩に渡る大規模サーベイが計画されており、約 2 万個超の Ia 型超新星 (SN) の発見が予測されている。得られた膨大なデータからは、SN だけでなく継続時間の長いガンマ線バースト (LGRB) などの銀河系外の突発天体の理解が大きく進むことが期待されている。特に LGRB は赤方偏移 $z = 9.4$ で検出されるような (Cucchiara et al. 2011) 非常に明るい突発天体であるので、より遠方の宇宙を知る手がかりとなる。LGRB は SN に付随する現象と考えられ、その母天体は大質量星であることが示唆される。一般に大質量星はその寿命が短いことから、銀河においてその寿命以下の期間に形成された星質量、即ち星形成率 (SFR) の指標となる。これらのことから、LGRB の数をサーベイで見積もることにより遠方の星形成活動を探る試みが始まってきている。Roberson & Ellis (2012) では観測的な単位体積あたりの LGRB 発生率-星形成率密度 (SFRD) 関係が $z < 4$ において、 $(1+z)^{0.5}$ に比例していることが示唆される。ここでは、ある閾値以下の金属量を持った銀河で LGRB が起こると仮定し、その関係の赤方偏移進化を説明している。しかし、観測的に見積もられた金属量-銀河星質量の関係を用いているため不定性が大きく、 $z > 4$ では既存の観測で得られた SFRD との不一致が生じてしまう。

本研究では Okamoto et al. (2014) による銀河形成シミュレーションの結果を用い、Roberson & Ellis (2012) による手法を参考に LGRB の発生率を算出し、観測的には外挿でしか見積もられていない $z > 4$ における LGRB 発生率-SFRD の関係を考察する。Okamoto et al. (2014)

は観測的な星形成史を再現することに成功しており、計算された個々の銀河は金属量、星質量、星形成率のデータを持っている。本研究の結果は既存の観測 (Berger et al. 2013) や将来的にすばる HSC によるサーベイ等の結果と比較可能なものになり、LGRB による星形成史の探求の足がかりとなる。

1. Okamoto, T., Shimizu, I., and Yoshida, N., PASJ, 66, 70 (2014)
2. Brant E. Robertson and Richard S. Ellis .Apj.744.95 (2012)
3. E. Berger et al. Apj.779.18 (2013)

銀河 c19 空間分解された近傍銀河における星形成則の研究

照屋 なぎさ (名古屋大学、銀河進化学研究室 (研) M2)

銀河の進化を考える上で、星形成に関わる量を正確に評価することは本質的に重要である。単位時間あたりに作られた星の総質量を星形成率 (SFR) といい、星形成の活発さを表す指標の 1 つである。銀河の星形成率を知るためには、寿命の短い大質量星 (寿命 10^{6-8} yr) がよい手がかりとなる。この大質量星は、紫外線 (UV) 領域にピークを持つ光を放射する。そのため、初期質量関数 (IMF) を仮定することにより、観測された紫外線量からその領域の大質量星の数を推測することができる。一方で、星形成を活発に行っている領域ではダストと呼ばれる $1 \mu\text{m}$ 以下の固体微粒子が形成されており、そのダストが UV を吸収し遠赤外線 (FIR) で再放射する。そのため UV の観測データのみから星形成率を推定すると過小評価になってしまう可能性があり、星形成率は UV と FIR の両方の効果を考えて見積もる必要がある。本研究では、GALEX (UV) と Herschel SPIRE (FIR) の撮像データを使用し、空間分解された銀河について星形成率を見積もった。また SDSS (可視光) と 2MASS (近赤外) の撮像データを用いて、星質量の密度と星形成率の密度の関係を調べ、グローバルな銀河の性質 (形態) との比較を行った。今回の夏の学校では、その最新の結果を報告する。

銀河 c20 COMING(CO Multi-lines Imaging of Nearby Galaxies) の初期成果:NGC2903 の観測

柳谷 和希 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

銀河の多様性やその進化を理解するためには、星の誕生メカニズムや、銀河の分子ガスの量や物理状態の関係などを調べることが重要である。そこで、我々は野辺山 45m 鏡と新マルチビーム受信機 FOREST を用いた、系外銀河の $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線と $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線の同時観測プロジェクト (CO Multi-lines Imaging of Nearby Galaxies:COMING) を推進している。2015 年 4 月から 5 月にかけて、棒渦巻銀河 NGC2903 の CO 輝線観測を行い、 $^{12}\text{CO}(J=1-0) \cdot ^{13}\text{CO}(J=1-0)$ の両方で良質のマップを取得した。NGC2903 は過去に、IRAM30m 鏡による $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 輝線観測が行われている。そこで今回取得した $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線のデータと、 $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 輝線のデータを用い、銀河の各場所で 2 つの輝線の積分強度を比較した。その結果、NGC2903 では中心から円盤のどの場所においても $^{12}\text{CO}(J=2-1)/^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 比がほぼ 1 に近いことがわかった。

1. Leroy et al. 2009AJ, 137, 4670L

銀河 c21 H₂O ice を用いた ULIRG 内部における星形成活動の探索

道井 亮介 (宇宙科学研究所 M1)

一般に、赤外線での光度は星形成率を反映していると考えられている。この赤外線光度が太陽高度の 10^{12} 倍を超える天体は Ultraluminous Infrared Galaxy (ULIRG) と呼ばれ、銀河・星形成史において極めて重要な役割を果たす。

しかしながら ULIRG は大量のダストに覆われているため、内部が見通しにくいという特徴を持つ。それはつまり、ULIRG のどこで、どのように星形成が行われているのかを知ることが困難ということである。ULIRG 内部構造を調べる手段としては、これまではダストに含まれる酸化ケイ素 SiO_x を用いる方法 (Spoon et al. 2006) などが知られている。しかし SiO_x の昇華温度は ~ 1500 K と高温であるため、星形成の母体である低温分子ガス・ダストの分布の研究には不向きである。

そこで ULIRG 中での星形成の母体を直接捉えるための手段として、氷 (H₂O ice) に特徴的な $3.1\mu\text{m}$ 吸収線を用いた観測を提案する。H₂O ice の昇華温度は ~ 150 K であるため、H₂O ice の分布はまさに低温ガス・ダストの分布を良く反映していると考えられる。

さらに、星形成の結果を反映する指標である多環芳香族炭化水素 (PAH) の観測と組み合わせることにより、ULIRG において一連の星形成活動がどこで、どのように行われているのかを知る手がかりが得られると期待される。

この波長 $3.1\mu\text{m}$ を用いた観測は地球大気の影響を受けやすく、また赤外線天文衛星「あかり」に固有な観測波長域にある。その上「あかり」は PAH の観測もカバーしている。すなわち、H₂O ice の系統的の研究のためには「あかり」を通した観測が最適である。本講演では、H₂O ice 観測の意義とともに「あかり」を用いた具体的な解析方法について議論し、今後の ULIRG 内部での星形成活動に関する研究への展望を述べる。

1. Spoon, H. W. W. et al., 2006, ApJ, 638, 759

銀河 c22 IFU 分光による近傍の重力レンズ検出とレンズ銀河の IMF について

加藤 美保子 (東北大学天文学専攻 M2)

重力レンズの系を探すサーベイには様々な種類があり、分光によるもの、像の形状から検出するものなどがある。この 2 種類の長所を組み合わせる手法として Integral Field Unit (IFU) 分光による観測がある。IFU を利用し近傍の重力レンズの系を検出、初期質量関数 (Initial Mass Function, IMF) について議論した Smith et al. 2015 の紹介とともに、重力レンズサーベイと IMF について議論する。

1. Smith R. J. 2015, MNRAS, 449, 3441

銀河 c23 VERA による銀河系外縁部 HII 領域 IRAS21306+5540 の年周視差計測

手塚 大介 (鹿児島大学 M1)

銀河系回転曲線は、銀河系の構造を語る上で重要な物理量である。詳細な回転曲線を得ることができれば、銀河系の質量分布を議論することができ、ダークマター分布についても議論することができる。しかし太陽

円外の領域である銀河系外縁部の回転曲線は、未だ不定性が大きく、如何にして詳細な外縁部回転速度を測定するかが重要な問題となる。そこで我々 Outer Rotation Curve (ORC) プロジェクトでは、国内 VLBI 観測システム VERA を用いた外縁部天体の年周視差計測を進めている (e.g. Sakai et al. 2012)。

ORC 候補天体の 1 つである、HII 領域 IRAS21306+5540 (=Sh2-128) は、 $(l, b) = (97^\circ.53, +3^\circ.18)$ に位置する大質量星形成領域である。その北方の S128N 領域から静止周波数 22.235GHz の水メーザーが検出されており、CO やアンモニア、水メーザーの観測から、2 つの分子雲衝突の可能性も考えられている (e.g. Haschick & Ho 1985)。さらにアウトアーム付近に位置することが明らかになっている (Hachisuka et al. 2015)。

本発表では、2012 年から 2014 年までの 3 年間に渡るモニター観測と、AIPS による 13epoch の解析によって得られた年周視差から、導出された太陽-天体間の距離 D 、3 次元速度 (V_R, V_θ, V_Z) についてまとめ、さらに天体内部構造についても考察する。

1. Hachisuka et al., 2015, ApJ, 800, 2
2. Haschick & Ho, 1985, ApJ, 292, 200
3. Sakai et al., 2012, PASJ, 64, 108

銀河 c24 すばる望遠鏡 HSC で探る天の川銀河周辺の矮小銀河

本間 大輔 (東北大学天文学専攻 M1)

Λ CDM 理論は宇宙の構造形成を上手く説明できるが、銀河系サイズの小規模構造で観測との矛盾が見られる。その一つが、銀河系の衛星銀河の数が理論で予測される数に比べて圧倒的に少ないという Missing Satellite 問題である。そこで、すばる望遠鏡の Hyper Suprime Cam (HSC) の観測データを用いて、天の川銀河周辺の新しい衛星銀河としての矮小銀河の発見を試みる。特に表面輝度が暗いものや 400kpc 付近の遠方のもののように、SDSS では発見されなかったものをターゲットにしている。本発表では、矮小銀河を発見するための簡単なアルゴリズムを紹介する。もし未発見の矮小銀河が多数発見されれば、Missing Satellite 問題の解決や、矮小銀河の分布が銀極方向に集中しているという特徴の真否を確かめることができる。

1. S.M.Walsh Ap.137450W(2014)
2. Girardi A&A.422.205G(2004)
3. Belokurov ApJ.654.897(2007)

銀河 c25 銀河の衝突合体における星形成フィードバックと星間物質

藤田 彩豊 (国立天文台三鷹 M1)

星は星間物質が重力収縮を起こして作られるが、それらが超新星爆発を起こすとき、星間物質の密度や星形成率に変化を与える。これを星形成フィードバックと呼ぶ。本講演では Hopkins et al. (2013) による、銀河の衝突合体において今まで明らかでなかった星形成フィードバックを考慮したモデルの数値流体シミュレーションとその結果のレビューを行う。このモデルは Hopkins らによる過去の論文で提唱されており、 $\sim 1\text{pc}$ スケールの解像度のシミュレーションにおいて、巨大分子雲で

のより小さなスケールの星形成フィードバックを考慮することができる。高い解像度でシミュレーションを行うことにより、個々の巨大分子雲や星団が形成されたり破壊されたりする様子までカバーすることができる。

星間物質の密度と星形成率の関係を表す Kennicutt-Schmidt 則 (KS 則) と呼ばれる法則がある。KS 則は観測により経験的に導かれている法則であるが、これが表れる本質的な要因はまだ明らかになっていない。KS 則を考えるためには高い解像度のシミュレーションや、星間物質の詳細な物理過程が必要となってくる。Hopkins らによるシミュレーションは今までのものよりはるかに解像度が高く、KS 則を議論することも可能となってくる。本講演ではこの研究によって導かれた様々な結果の中でも、特にこれに着目しレビューを行っていく。

1. Hopkins et.al., MNRAS 430, 1901-1927 (2013)

銀河 c26 VLBI を用いた最新の銀河系の構造解析について

倉持 一輝 (国立天文台三鷹 M2)

我々が住む天の川銀河は、宇宙を構成する基本的要素である銀河の基本的性質を理解する上で重要な天体である。特に 2000 年代初頭から、高い空間分解能を持つ VLBI を用いて銀河系内の星形成領域内に存在するメーザー源の三次元位置や運動を測定し、天の川銀河の構造や動力学を調べる研究が国立天文台の VERA プロジェクトをはじめとして精力的に行われている。

本講演では、これまでに測定されたメーザー源の位置や運動を元に銀河系の構造解析をした Reid et al.2009 及び Honma et al.2012、Reid et al.2014 を紹介し、天の川銀河の三次元構造の理解がどこまで進んできたかを概観する。また、永井、坂井、本間らの観測シミュレーションの結果を元に、今後の観測の展望についても紹介する。

現在、講演者は今後銀河系の構造解析上で課題となるメーザー源の位置決定精度の問題に対して、ビーム内位相補償を用いる事で検出出来る位置参照天体を増やす事で克服できるのかを研究している。最後に講演者の研究についても紹介したい。

1. Reid, M. J., et al. 2009b, ApJ, 700, 137
2. Honma, M., Nagayama, T., Ando, K., et al. 2012, PASJ, 64, 136
3. Reid, M. J., Menten, K. M., Brunthaler A., et al. 2014, ApJ, 783, 130

銀河 c27 Extremely gas-rich 矮小銀河における HII 領域の分布

高橋 晴香 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M2)

銀河は金属元素をほとんど含まないガス雲から誕生し、星生成を繰り返しながら金属量を増加させる形で進化してきた。現在観測されている銀河の金属量には、星質量との強い相関が知られているが (mass-metallicity relation ; Tremonti et al. 2004)、銀河の星質量が少なくなると金属量が急激に低下することに大きな特徴がある。これは従来、矮小銀河からのアフフローによる金属汚染ガスの流出が主なメカニズムであると解釈されてきたが、その明確な観測的証拠は未だ存在せ

ず、それ以外の様々な可能性も提案されてきている。

この具体的なメカニズムの解明には、矮小銀河の中でも進化の初期状態にあると考えられる極端に gas-rich なもののが有効な観測対象になると考えられる。そこで我々は、近傍 (距離 <11Mpc) の M_{HI}/L_B 比が大きな矮小銀河に着目し、銀河内のガス、星生成、並びに金属量の分布など、内部構造の詳細な観測から具体的なメカニズムに迫る研究を進めている。その第一段階として、星形成並びに現在の金属量の指標となる「HII 領域」を、銀河の外縁部に至る広域で探査した。観測には「すばる」望遠鏡 FOCAS を用い、 $H\alpha$ 輝線の深撮像データを取得、解析した。今回は、特に近傍にあるため内部構造の詳細を見ることができる gas-rich な矮小銀河 DDO154 についての結果を紹介する。すばる望遠鏡の高感度を活かし、銀河の外縁部にこれまで報告されていない複数の HII 領域を発見した。また、すばるの高分解能によって、HII 領域の今まで知られていなかった詳細な形態も明らかになった。本発表では、HII 領域の広域での空間分布や光度関数を、他波長のデータと比較し議論する。

1. Tremonti et al. 2004 ApJ, 613, 898

銀河 c28 ASTE、野辺山を用いた衝突銀河サーベイ観測

道山 知成 (国立天文台三鷹 M2)

銀河と銀河の衝突は宇宙で頻繁に起こっている。銀河同士が相互作用することで潮汐力が働きガスが銀河の中心に落ちる。さらに中心へガスが流入することで、爆発的星形成や AGN のような非常に活発な状況を引き起こすと考えられている。理論シミュレーションでは、衝突の段階に応じて KS 則 (分子ガスの量と星形成率の関係) 上で進化すると考えられている。これまで、銀河の進化段階によって整理されたサンプルにおける分子ガスのサーベイ観測は行われていなかった。そこで我々は 6 個の衝突銀河ペア (12 個の銀河) の CO(3-2) 輝線を ASTE 望遠鏡を用いて 2014 年 11 月に観測した。また、野辺山 45m 望遠鏡を用いて、9 個の衝突銀河ペア (18 個の銀河) の CO(1-0) 輝線を 2015 年 5 月に観測した。これらの観測結果と、さらに 2015 年 6 月に予定されている ASTE 観測の結果を紹介する。

1. Bournaud et al. 2011, EAS, 51, 107
2. Iono et al. 2009, ApJ, 695, 1537
3. Wilson et al. 2012, MNRAS, 424, 3050

銀河 c29 銀河中心領域における磁気雲のダイナミクス

柿内 健佑 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

天の川銀河中心のガスの運動は非円運動であることが観測的事実として知られている。その非円運動の起源については未だ解明されておらず、銀河バルジ内の恒星による重力ポテンシャルの形状を非軸対称な棒形状であると考えてモデル化するなど、様々な議論がなされている。

一方で、宇宙空間の平均的な磁場の強さが μG 程度であるのに対し、銀河系中心付近の磁場は mG 程度であるという複数の観測的示唆がある。近年、観測された銀河系中心方向のガスのループ (Fukui et al. 2006) が、磁気浮力に起因するパーカー不安定性によって説明が可能であるとされており、このことは銀河系中心における動力学に磁場が少なからず

影響を及ぼしていることを示している。これを踏まえ、銀河中心のガスの非円運動の原因を探る上でも、磁場の影響を考慮した解析が必要であることが示唆される。

本発表の前半で紹介する Suzuki et al. (2015) では、磁場の影響を考慮した銀河系円盤のガス運動について 3 次元理想磁気流体での数値計算を行っている。本論文では、棒形状成分を考慮しない軸対称の重力ポテンシャルを考慮した場合でも、磁気活動によりガスの非円運動が励起されるとの報告がなされた。具体的には、銀緯方向のガス密度を積分して得た銀径速度図 (l-v 図) が、観測で得られたガスの l-v 図中の非円運動の特徴をよく再現している。しかし、本論文では、銀河面上のどの高度での磁気活動がこのような非円運動を励起しているのかが、まだ理解されていない。そこで本研究では、非円運動と磁気活動の高度依存性との関係を詳細に解析し、現在までの成果を観測との比較も含めて報告する。

1. T. K. Suzuki, Y. Fukui, K. Torri, M. Machida, & R. Matsumoto, 2015, Submitted to MNRAS (ArXiv: 150408065)
2. Y. Fukui. et al., 2006, Science, 314, 106
3. M. Morris, & E. Serabyn, 1996, ARA&A, 34, 645

銀河 c30 銀河衝突で探るアンドロメダ銀河のダークマターハローの外縁構造

楠 尚久 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

コールドダークマター (CDM) 宇宙における銀河形成シミュレーションの結果によると、ダークマターハロー (DMH) の外縁部密度は中心からの距離の 3 乗に反比例して減少すると予想されている。しかしながら、観測的な検証作業はその困難さから立ち遅れている。その一方で、アンドロメダ銀河 (M31) には 120kpc 以上に及ぶステラーストリームや、30kpc におよぶ星の作る殻状の構造等が次々と発見され、これらは銀河衝突の証拠とみられている。この銀河衝突の過程を詳細に調べることで、DMH の構造を知る手がかりを得る可能性がある。

Kirihara et al. (2014) では、M31 の DMH の密度分布をパラメータとした N 体シミュレーションを用いて M31 と矮小銀河の衝突の数値実験を行った。そして、その結果を観測で見られるステラーストリームやシェル構造と比較することで CDM モデルの予想を検証した。また、密度分布の変更が本質的に寄与するのか確認するため、DMH の質量を変化させるシミュレーションも行った。その結果、最も観測をよく再現する密度プロファイルは、CDM の予想である -3 乗の冪よりも、より距離の依存性が急な -3.7 乗であることが分かった。また DMH の質量を変化させた銀河衝突のシミュレーションから、観測された構造の再現のためには質量の大小ではなく密度分布が本質的に重要であるという結果が得られた。このことは CDM モデルの根幹を揺るがす問題かもしれない。

本発表では Kirihara et al. (2014) のレビューを行うとともに修士論文の研究計画について報告する。修士論文の研究では、Kirihara et al. (2014) の数値シミュレーションの検証作業に加えて、Miki et al. (2014) で予言された銀河衝突によって発現する漂うブラックホールの存在とその観測可能性について検討する。

1. T. Kirihara, Y. Miki, & M. Mori, 2014, PASJ, 66, L10
2. Y. Miki, et al. 2014, ApJ, 783, 87

銀河 c31 天の川銀河に存在する広大な極構造の形成

善光 哲哉 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

天の川銀河の周りには衛星銀河が存在している。衛星銀河の分布は銀河面にほぼ垂直に突き刺さった円盤状の DoS (Disk of Satellites) と呼ばれる構造を作っていることが知られていた。DoS 形成を説明するシナリオの一つとして潮汐力シナリオが考えられている。潮汐力シナリオとは、質量が大きい銀河がもう一方の銀河を潮汐力で引き伸ばし、ガスや星を剥ぎ取るというものである。先行研究では衛星銀河の観測データから軌道平面を求めて潮汐力シナリオの検証を行ったが、サンプル数が十分ではなかった。

今回紹介する Pawlowski et al. 2012 の論文では、サンプル数を増やすために若いハローに属する球状星団とストリームの観測データを用いてさらに詳しく潮汐力シナリオの検証を行った。潮汐力シナリオが正しければ、若いハローに属する球状星団やストリームも同じ軌道平面に存在すると考えられる。球状星団との分布とストリームの形状から軌道平面を求めた結果、若いハローに属する球状星団もストリームも DoS の軌道平面と極めて近い値をとることが分かった。これから DoS の形成は潮汐力シナリオによって説明できることが分かった。

さらに全く独自の視点から我々は潮汐力シナリオと銀河中心の星形成を結びつけて議論できると考えている。DoS に存在する衛星銀河は銀河円盤に落下し、天の川銀河の構造に影響を与えると考えられている。一方、銀河中心の星形成に必要なガスの流入に天の川銀河の構造が関わっていることが理論的に示唆されている。しかし観測から銀河中心の星形成と銀河の構造の間の関係性を十分に調べられていないので、今後の研究としてガスと同じように銀河中心に入るであろう星の観測を行い、銀河中心の星形成と潮汐力シナリオが関係していることを確かめたい。

1. M. S. Pawlowski, J. Pflamm-Altenburg and P. Kroupa. MNRAS. 423, 1109-1126 (2012)
2. Kroupa P. et al. A&A. 523, A32 (2010)
3. Matsunaga N., et al. Nature. 477, 188-190 (2011)

銀河 c32 ALMA を用いた衝突銀河 NGC1614 の CO 分子ガス観測

安藤 未彩希 (国立天文台三鷹 M1)

銀河はその進化過程において衝突を繰り返しながら成長してきたと考えられており、衝突銀河の研究は銀河の形成を考える上で重要である。衝突の影響によってガスが圧縮されて星形成が活発になるということがシミュレーションから示されており、その様子が多くの観測からも明らかにされている。

本研究で扱う NGC 1614 は、衝突の後期段階にあるスターバースト銀河であり、星形成領域 ($SFR 50M_{\odot}yr^{-1}$) は核を中心としてリング状に分布していることが明らかになっている。また最近では、CO(1-0) による観測からアウトフローの存在も示唆されている。我々は ALMA によって得られた高分解能、高感度の CO 分子ガスデータを用いて、アウトフローも含めた星間物質の詳細な物理状態の検証を行っている。今回の観測によって得られたのは CO(2-1)、CO(1-0)、 $^{13}CO(2-1)$ 、($^{13}CO(1-0)$) の 4 輝線である。今後は既存の他の分子ガスデータや他波長データと比較することで、より詳しい物理状態の考察も行っていく予定である。

1. R. Teyssier et al. ApJ. 720 L149 (2010)
2. C. K. Xu et al. ApJ. 799 11 (2015)
3. S. Garcia-Burillo et al. arXiv:1505.04705 (2015)

2. A.D'Ercole et al. 2008,MNRAS,391,825D
3. C.Conroy et al. 2011,ApJ,726,36C

銀河 c33 3次元分光サーベイ MaNGA で見た近傍銀河のアウトフロー

菅原 悠馬 (東京大学宇宙線研究所 M1)

銀河のアウトフローは、銀河進化において星形成にフィードバックを与える重要な役割を担ったと考えられている。例えば、現在の楕円銀河では星形成が活発ではなく、進化のいずれかの段階で星の起源となるガスを銀河から抜く必要があると考えられる。このシナリオを確かめるためには高赤方偏移においてアウトフローを伴う天体を発見する必要があるが、現在観測されている天体数は十分ではない。これらの天体は次世代望遠鏡により3次元分光観測も含めた詳細な観測がなされると期待される。本研究の狙いは、将来の高赤方偏移におけるアウトフローの研究を見据え、近傍銀河におけるアウトフローの詳細を明らかにすることである。

Sloan Digital Sky Survey IV(SDSS-IV) の一つである Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory(MaNGA) は、6年かけて赤方偏移が0.01から0.15の近傍銀河約10000天体を観測する3次元分光サーベイである。我々はMaNGAで得られたデータを用いて吸収線の速度分布について調べている。空間2次元と波長1次元の、合わせて3次元の分光データを用いることより、単スリット分光データでは議論しづらい非等方な現象であるアウトフローの詳細に迫ることができる。本発表では解析の途中経過を報告するとともに、理論研究とも照らし合わせながら銀河のアウトフローについて議論する。

1. Bundy K et al., 2015, ApJ, 798, 7

銀河 c34 球状星団形成モデルの発展

荒田 翔平 (東北大学天文学専攻 M1)

球状星団は星のダイナミクスとその進化の関係を調べるうえで良い実験室である。近年、高感度の観測により球状星団中の星々について次々と詳細が明らかになってきた。とくに球状星団の年齢や、内部に様々な金属量の星が存在すること、銀河中心からの距離とmetallicityの関係などがよく分かっている。しかし一方で、観測から得られたこれらの条件を十分満たすように球状星団の形成モデルを構築することは、未だ議論の最中にある難しい問題である。Trenti et al. 2015 はハローとハローのmergingの結果、球状星団が形成されるというシナリオを提案した。このシナリオでは、まずmajor mergerによって水素原子冷却の閾値を超えたハロー $M_h \sim 10^8 M_\odot$ の中心で第1世代の星団が生まれる。つづくminor mergerによって持続的に供給されるガスがAGBの化学汚染を薄めることで、金属量の様々な第2世代の星団が生まれると予想される。高解像度の数値シミュレーションから、このシナリオで見積もられた最も古い球状星団の年齢は13Gyrであり、観測より知られている年齢と一致する。また銀河中心の空間分布やDMの剥ぎ取りなど多くの点で観測結果をよく再現する。今回の講演では過去の形成モデルとこの論文を比較検討し、今後の展望を議論する。

1. M.Trenti, P.Padoan & R.Jimenez 2015,arXiv150202670T

銀河 c35 宇宙磁場解析におけるRM-CLEAN法の評価方法とその指標

宮下 恭光 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

宇宙には恒星、銀河、銀河団など様々なスケールで磁場が存在している。その宇宙磁場を解析する方法として、我々はファラデー回転という現象を用いている。これは、偏波が磁気流体中を通過すると偏波面が回転する現象で、その回転角は波長の二乗に比例し、比例係数RMは視線方向の電子密度と磁場の情報を含んだ積分値として表される。しかし、RMを用いた手法では、得られる情報が視線方向の積分量であるので、磁場や偏波強度の分布が分からないという問題がある。そこでこの問題を解決するためにRM-synthesisという新しい手法を用いる。これは視線方向の積分量でしか得られなかった偏波強度や磁場の情報を断層的に解析する手法である。式としては、偏波強度をファラデー分散関数という磁場の情報が入った関数のフーリエ変換の式で表す。しかしRM-synthesisにも観測帯域の制限が原因で、得られるファラデー分散関数が不正確なものとなるという問題がある。その問題を解決するのがRM-CLEANによる修正である。RM-CLEAN法は、RM-synthesisによって得られた不正確なファラデー分散関数をより正確に近いものにするものである。現在、ある観測データPを得たとき、RM-CLEANを行った結果を評価する指標があまり確立されていない。先行研究では、RM-CLEANを行ったときにfalse signalという誤ったシグナルがどういう状況下で発生するか系統的に調べられていた。本研究では、それに加えて二乗検定などで用いられるchi-squareを利用し、RM-CLEANによる結果をどのように評価すればよいか、視線上に存在する複数の銀河のように、sourceが関数二つで表される簡単な状況でシミュレーションを行った。

1. Brentjens,M.A.; de Bruyn,A.G. 2005, A&A 441, 1217-1228
2. Heald, G., Braun, R., & Edmonds, R. 2009, A&A, 503, 409
3. Kumazaki, K., Akahori, T., Ideguchi, S., Kurayama, T., & Takahashi, K. 2014, PASJ, 66, 61

銀河 c36 銀河団のFUNDAMENTAL PLANE

丸橋 美香 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ M1)

過去の研究により、X線で光る多数の銀河団のコア半径、中心のガス密度、温度を三次元対数グラフにプロットすると、それらはFUNDAMENTAL PLANEを形成することが知られている。これは銀河団が二次元パラメータで表現されることを示している。またFUNDAMENTAL PLANE上のデータ点は帯状に分布し、観測から知られているX線光度-温度関係はこの帯の断面を見たものであることも示されている。しかし、近年では、銀河団の構造はコア半径よりもNavarroFrenkWhite(NFW) profileでよく表現されることが知られている。そのため私はFUNDAMENTAL PLANEがNFW profileでも再現できるかどうかという問題に注目することにした。具体的には、最新の観測データを用い、NFW profileに基づいた銀河団の観測データが、やは

り2次元の FUNDAMENTAL PLANE で表現できるかどうか調べた。
また FUNDAMENTAL PLANE のパラメーターから、銀河団の構造と
進化の関係について検討した。

1. Fujita & Takahara 1999a, 1999b

.....