

2016 年度 第 46 回
天文・天体物理若手夏の学校

講演予稿集
銀河・銀河団分科会

銀河・銀河団分科会

銀河はどこから来たのか 銀河とは何か 銀河はどこへ行くのか

<p>日時</p>	<p>7月26日 16:30 - 17:30 , 7月27日 10:15 - 11:15 , 13:30 - 14:30 (分科会別ポスター) , 16:00 - 17:00 (招待講師:竹内 努氏) ,17:15 - 18:15 7月28日 9:00 - 10:00, 13:30 - 14:30 (分科会別ポスター) ,16:00 - 17:00 , 17:15 - 18:15 (招待講師:吉田 直紀氏) , 18:30 - 19:30</p>
<p>招待講師</p>	<p>竹内 努氏 (名古屋大学)「極めて個人的な観点からみた銀河の形成と進化」 吉田 直紀氏 (東京大学)「ダークマターと銀河形成」</p>
<p>座長</p>	<p>道山知成 (総合研究大学 D1)、木村勇貴 (東北大学 D1)、安藤亮 (東京大学 M2)、岡村拓 (東京大学 M2)、菊田智史 (総合研究大学 M2)、服部詩穂 (奈良女子大学 M2)、一色翔平 (北海道大学 M1)</p>
<p>概要</p>	<p>宇宙には幾多の銀河が存在する。銀河は永久に現在の姿をとどめているわけではなく、今後その姿や性質が進化すると考えられている。銀河がいつどのようにして生まれたのか、どのようにして現在の姿になったのか、今後どのように姿を変えていくのか。これらの謎に挑むのが本分科会の究極的な目標である。近年の目覚ましい観測装置の発達により、ガンマ線から電波の様々な波長で銀河を観測することができるようになり、様々な銀河進化の様子が観測的に明らかになってきた。また、計算手法や計算機の性能の発達によって、観測するのは難しい小さなスケールの物理や様々な時間スケールでの銀河進化を予測できるようになった。一方で、各分野での専門性が高くなったことから、普段の研究生活では観測波長や理論と観測の垣根を越えて銀河・銀河団全般に関する知識を共有することは困難である。そこで、本分科会ではこのような垣根を越えて、「銀河の形成進化」の謎に取り組む学生同士が交流し意見交換する場を提供する。また、銀河系・近傍銀河・遠方銀河・銀河団・AGN・BH 共進化など、様々な視点での最新の研究成果に触れることで、今後の研究活動の幅を広げる良い機会となることを願う。</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・銀河団分科会で扱う。 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う。 注) 球状星団を1つの系としてみる場合などは銀河・銀河団分科会で扱う。 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・銀河団分科会で扱う。 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・銀河団分科会で扱う。 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。 注) 銀河形成に関連するフィードバック (SN, AGN, 大質量星による輻射等) は銀河・銀河団で扱う。</p>

竹内 努 氏 (名古屋大学)

7月27日 16:00 - 17:00 B会場

「極めて個人的な観点からみた銀河の形成と進化」

私が銀河研究に興味を持ち始めてからはや四半世紀、銀河形成進化についての問題意識、そして宇宙物理学全体の問題意識も大きく変貌した。ここでは、華々しいものそうでもないものも含む、個人的に興味を持ってきた様々な銀河物理学の話題をできれば一貫した形で紹介したい。特にこれから重要性が増していくであろう系外銀河の星間物理を Square Kilometre Array (SKA) との関連から解説する。

1. Takeuchi, T. T., et al. 2016, arXiv/astro-ph/http://arxiv.org/abs/1603.01938v1

吉田 直紀氏 (東京大学)

7月28日 17:15 - 18:15 B会場

「ダークマターと銀河形成」

宇宙の大規模構造や銀河の形成過程において、ダークマターは重要な働きをしたと考えられる。ダークマターが微視的な素粒子で構成される場合、粒子質量や散乱断面積、速度分散は構造形成に大きな影響をおよぼす。逆に、宇宙の観測からダークマターの性質に迫ることも可能である。講演では最近の宇宙観測と大規模コンピュータシミュレーションの結果を交え、ダークマターの性質と銀河形成について議論する。

1. G. Bertone and D. Hooper, A history of dark matter, arxiv:1605.04909

銀河 a1 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 D1)

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] 輝線比が大きいか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。観測で得られたスペクトルと先行研究の結果から、計 41 天体の [Fe II]/[P II] 輝線比とその下限値を得た。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ことを示すが、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。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。また、得られた輝線比と光電離モデルとの比較やアウトフロー現象の候補として近傍 AGN でも観測されている AGN outflow についても議論する。

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

銀河 a2 超高光度赤外線銀河 UGC 5101 の広帯域 X 線スペクトル解析

小田 紗映子 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

超高光度赤外線銀河 (UltraLuminous InfraRed Galaxy; ULIRG) は赤外線では極めて明るく輝く天体である ($L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$)。ULIRG 中には多量のガスやダストが密集しており、加熱されたダストが再放射を行うことによって強力な赤外線光度を実現している。そのエネルギー源としては活発な星生成、あるいは超巨大ブラックホールへの急激な質量降着によって輝く活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) の存在が期待され、ゆえに ULIRG は銀河進化の途中段階であると考えられている。現代天文学における大問題の 1 つである、銀河の星生成活動と超巨大ブラックホールの共進化を理解するためには、ULIRG のエネルギー源やその構造を明らかにすることが非常に重要である。

先行研究においては、活発な星生成が ULIRG の主なエネルギー源で

あると示唆されてきた。しかし、可視光観測ではダスト吸収の影響が大きく、星生成と AGN の寄与を明確に区別することは難しい。そこで、この問題を解決する有用な手段が、透過力の強い硬 X 線による観測である。特に、強い硬 X 線放射は AGN 特有であり、ダストに深く隠された“埋もれた AGN (水素柱密度 $N_{\text{H}} > 10^{24} \text{cm}^{-2}$)” の存在を裏付ける証拠となる。

本研究では、代表的な近傍 ULIRG の 1 つである“UGC 5101”について、*Swift*, *NuSTAR*, *Suzaku*, *XMM-Newton*, *Chandra* といった X 線衛星の観測データをすべて利用し、過去最高精度の広帯域 X 線スペクトル解析 (0.25–100 keV) を行った。その結果、10 keV 以上で卓越する硬 X 線放射を検出し、UGC 5101 の中心に AGN が存在することを発見した。また、複雑なジオメトリを考慮した立体トーラスモデル (Ikeda et al. 2009) を用いることにより、その AGN が埋もれた AGN であり ($N_{\text{H}} \sim 1.7 \times 10^{24} \text{cm}^{-2}$)、ULIRG のエネルギー源の 1 つとして赤外線放射に十分寄与していることを明らかにした (Oda et al. 2016, submitted to PASJ)。本講演では、解析の詳細を述べるとともに、UGC 5101 における埋もれた AGN の性質について議論する。

1. Ikeda et al. 2009, ApJ, 692, 608
2. Oda et al. 2016, submitted to PASJ

銀河 a3 スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) の Stripe 82 領域のクエーサーの変光観測

和田 一馬 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

SDSS の Stripe82 領域ではクエーサーが 2000 年から 8 年間に渡り、複数回観測されている。この観測結果から、クエーサーの変光成分は降着円盤の thin disk model で説明でき、その主な起源は連続光だとされている。さらに最近では、定常スペクトルが赤化されたクエーサーが発見されてきている。このような天体はクエーサーとして活発に活動する直前の状態だと考えられている。しかし、クエーサーの活動の時系列での変化はまだよく分かっていない。割合として少ない特異なクエーサーを見つけることができれば、その変化の途中の段階にあるクエーサーを捉えられる可能性がある。

本研究の目的は中心核付近のみ強く赤化を受けている特異なクエーサーを発見することである。こういった天体は雲が一部分のみかかっている状況にあると考えられる。

本研究ではまず SDSS の個々のクエーサーに対して多数回の測光データを等級の大きいグループと小さいグループに分け、その差分を変光成分とした。そしてその変光成分をクエーサーの典型的なパワーローである $F_{\lambda} \propto \lambda^{-2.33}$ と、小マゼラン雲 (SMC) タイプの減光曲線を用いてフィッティングし、中心核までの減光量を推定した。また、輝線の影響による赤方偏移依存性を補正した定常成分のカラーを算出し、その補正された全体のカラーに対し中心核付近の減光量が異常に大きい 3 天体を特定した。

SDSS の観測期間中においてこの 3 天体の変光量は少なかったため、変光成分のカラーの測定精度が悪い。そこで、西はりま天文台の可視撮像装置 MINT で観測を行った。この結果と SDSS とで差分をとり、変光成分を求めた。

その結果、観測したクエーサーの内の 1 つについて、SDSS 観測期間から現在までの間で中心核付近に 0.09 等の赤化が追加された可能性が

あることが分かった。

1. Kokubo et al. 2014, ApJ, 783, 46
2. MacLeod et al. 2016, MNRAS, 457, 389

銀河 a4 輻射輸送計算によるクランピートーラスモデルの作成

谷本 敦 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

銀河中心には、約 1 億倍太陽質量の超巨大ブラックホール (Super-Massive Black Hole: SMBH) が普遍的に存在し、銀河バルジ質量と SMBH 質量には強い相関関係がある (Magorrian et al. 1998)。この事実は、銀河と SMBH が互いに影響を与えながら、「共進化」してきたことを示唆する。しかし、銀河中心の極めてコンパクトな領域に存在する SMBH が、何故母銀河の質量と強く相関しているのかは謎に包まれている。この課題を解決する鍵が、活動銀河核 (Active Galactic Nucleus: AGN) である。AGN はガスが SMBH へ降着することで、その重力エネルギーを放射エネルギーへ変換し、銀河中心が明るく光り輝く現象である。すなわち、AGN 観測によって、SMBH の成長を調べることが可能となる。

AGN は中心の SMBH と降着円盤、その周囲のガスやダストから成るドーナツ状の物質 (ダストトーラス) から成る。母銀河と SMBH を繋ぐトーラスは、SMBH への質量降着の役割を担っており、銀河と SMBH の共進化を理解する鍵となる構造である。赤外線観測から多数のガスの塊から成るトーラス (クランピートーラス) が示唆され、赤外線スペクトルに適応出来る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で、X 線はダストとガスを含む全物質の分布を反映し、トーラス全体の構造を知ることが可能となる。しかし、X 線スペクトルに適応可能なモデルは、未だに作成されていない。

そこで X 線領域におけるクランピートーラスモデルの作成に取り組んだ。まず、理論予想や他波長観測結果を考慮し、ある確率分布に従ってクランプを配置するコードを作成した。そして、作成したコードを輻射輸送計算コードである MONACO (Monte Carlo Simulation for Astrophysics and Cosmology: Odaka et al. 2011) と組み合わせ、X 線観測データに適応可能なモデルの作成に世界で初めて成功した。本講演では、モデルの詳細や既存モデルとのスペクトルの違いについて議論する。

1. Magorrian, J., Tremaine, S., Richstone, D., et al. 1998, ApJ 115, 2285
2. Nenkova, M., Sirocky, M. M., Ivezić, Ž., & Elitzur, M. 2008, ApJ, 685, 147-159
3. Odaka, H., Aharonian, F., Watanabe, S., et al. 2011, ApJ 740, 103

銀河 a5 ALMA で探る近傍星形成銀河 NGC253 中心部での多様な星形成活動と加熱機構

安藤 亮 (東京大学 天文学教育研究センター M2)

系外銀河中心部での活発な星形成活動は、しばしば多量の星間物質に覆われ、可視光・近赤外線では強い減光により見通せない領域を含んでいる。ミリ波サブミリ波帯の観測は、多様な分子種のスペクトル線やダスト連続波を検出することで、星間物質に埋もれた星形成領域を直接捉え、その性質を探ることのできる強力な手法である。しかし、個々の星形成領域を空間分解し、その活動性や化学組成を調べるには、従来の観測装置では分解能・感度ともに不十分であった。また銀河系内星形成領域との直接的な比較も難しく、これらの集合体として活発な星形成銀河が説明できるのか、あるいは全く異なる種族の星形成を行うのかは未解明である。

本研究では、ALMA のサブミリ波帯高分解能観測により、近傍スターバースト銀河 NGC253 の中心 200 pc の領域について、先行研究より 5 倍以上高い空間分解能 ($0''.3$; 5 pc に相当) でのイメージングを行った。その結果、850 μm 帯の連続波放射でトレースされる、ダストに覆われた 10 pc スケールの星形成領域 8 個が、2 本の平行な列状に分布する姿を初めて分解できた。また、各領域で H_3O^+ や H_2CO など多種の分子輝線を検出したが、その化学的性質はわずか 10 pc 程度隔てた領域ごとでも大きく異なった。特に、HII 領域に起因する水素再結合線 $\text{H}26\alpha$ と、赤外線輻射で振動励起された HNC 分子 ($J = 4 - 3, v_2 = 1f$) は特徴的な分布を示した。また各領域の分子組成は、顕著な HCN の増加や SO の減少など、銀河系内星形成領域には見られない性質を有していた。これらの結果から、NGC253 中心部の星形成領域には、大質量星に加熱される典型的な HII 領域以外に、比較的大質量星を欠いた大規模な中質量星団を熱源とする領域の存在が示唆される。こうした領域は系内星形成領域とは異なる初期条件や進化過程により生じ、その進化段階と加熱機構の差により多様な活動性を示すと考えられる。

1. D. S. Meier et al. ApJ 801 63 (2015)
2. G. J. Bendo et al. MNRAS 450 L80 (2015)
3. J. L. Turner and P. T. P. Ho ApJ 299 L77 (1985)

銀河 a6 銀河団のスロッシングによる衝撃波形成

足立 知大 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ M1)

銀河団の観測では衝撃波が確認されている。これは銀河団の形成、成長の過程で銀河団同士が衝突したためだと考えられる。これまでは独立した銀河団同士が衝突する際に大きなポテンシャルエネルギーが衝突速度に変換されるために超音速で衝突すると考えられてきた。実際、X 線観測で確認されている弾丸銀河団は超音速の衝突の特徴を持っている。一方、超音速で銀河団同士が衝突するとマッハ数が 2 以上の衝撃波しか生じない (Takizawa, 1999)。しかし、実際の観測ではマッハ数が 2 以下の衝撃波も観測されている (Ogrea et al. 2013)。これは大きな銀河団の内部で小さな銀河団が振動している、いわゆるスロッシングが起きているためだと考えられている (Markevitch et al. 2001)。先行研究で行われたスロッシングのシミュレーションでは銀河団同士のスロッシングで cold front と呼ばれる温度の不連続境界面が生じることを確認できた (Ascasibar & Markevitch, 2006) が、衝撃波に着目したものはあまりない。今後、本研究では銀河団内部で小さい銀河団を亜音速で振動させるモデルを考える。衝撃波を高解像度で分解するために AMR (Adaptive Mesh Refinement) シミュレーションを行い、マッハ数が 2 以下の衝撃波が生じるかどうか調べ、本講演ではその進展を報告

する。

1. Markevitch, M., Vikhlinin, A., Mazzotta, P., 2001, ApJ, 562, 153
2. Ascasibar, Y., Markevitch, M., 2006, ApJ, 650, 102

銀河 a7 銀河団内高温ガスの乱流による共鳴散乱への影響の評価

古川 愛生 (東京理科大学 松下研究室 M1)

銀河団は数十から数千個もの銀河が重力的に束縛されている宇宙で最大の天体であり、重力により加熱された高温ガスが X 線を放射している。銀河団中心部では共鳴散乱の光学的厚さが 1 を超えており、共鳴散乱の影響による重元素のアバングスの過小評価の可能性や、共鳴散乱とガスの乱流運動の影響などが議論されてきた (e.g. ASTRO-H WHITE paper)。共鳴散乱の大きさは各重元素からの輝線の観測から直接測定可能であるが、従来の X 線 CCD 検出器ではエネルギー分解能が不十分であり測定が困難であった。「ひとみ」衛星に搭載されたマイクロカロリメーター検出器 SXS は CCD 検出器に比べてエネルギー分解能が飛躍的に向上し、これまで分離できなかった輝線の微細構造から共鳴線を分離することが可能となり、個々の輝線幅から乱流運動をも調べることができる。共鳴散乱シミュレーションはペルセウス座銀河団の Fe-K α 輝線について、 R_{500} まで一様な乱流を仮定した場合の結果が報告されており (Churazov et al. 04, Zhuravleva et al. 14)、乱流が大きくなると共鳴散乱の効果が小さくなること、銀河団中心部ほど共鳴散乱の効果が大きいことなどが議論されてきた。

本研究ではペルセウス座銀河団の He 様 Fe-K α 輝線について、XMM 衛星の観測をもとに球対称な銀河団を仮定し、「GEANT4」及び「ひとみ」SXS の応答関数を用いて、「非一様なガスの乱流運動を仮定した場合」や「中心コアの独立な運動を仮定した場合」の共鳴散乱の影響についてシミュレーションを行った。その結果、銀河団中に一様な乱流を仮定した場合に比べて、中心部の乱流のみを考慮した場合の方が共鳴散乱の影響が小さくなることがわかった。

銀河 a8 Godunov SPH 法への流速制限関数の実装とその性能比較

藤原 隆寛 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法は、粒子を用いて流体を表現するという特徴を持つ流体力学シミュレーション法であり、現在は物理学の研究分野のみならず広く活用されている。本研究では銀河形成・進化シミュレーションのための、新しい SPH 法の実装について提案し、その性能について報告する。銀河形成シミュレーションでは、流体の接触不連続面を正確に捉える必要があるが、SPH 法には接触不連続面で非物理的な圧力ジャンプが生じ、起こるべき流体の不安定性の成長が著しく抑制されるという弱点がある。現在、SPH 法でこの弱点を回避するために様々な方法が考案されているが、その 1 つに Godunov SPH 法 (GSPH, Inutsuka 2002) がある。これは、粒子間の相互作用を評価する際に Riemann 問題の厳密解を用いる手法で、圧力ジャンプを抑えられるほか、通常の SPH 法で必要とされる人工粘性項を導入せずに衝撃波を解くことができるという長所がある。

GSPH 法では、Riemann 問題を解く際に MUSCL 法を用いて補間し

た物理量を使用することで、より高次の空間精度を実現できる。しかし、単純に MUSCL 法を適用しただけでは不連続面で数値的な振動が発生してしまうため、通常は流速制限関数を導入して、補間される物理量に制限を付ける。先行研究として、Murante et al. (2011) によって導入された van Leer 型の流速制限関数等がある。本研究では、van Leer 型に加えて、minmod 型、superbee 型、van Albada 型等の流速制限関数を適用した MUSCL 法により高次精度化した GSPH 法を開発した。本研究では、新しいシミュレーションコードを使って、衝撃波管問題や Kelvin-Helmholtz 不安定性、点源爆発といったテスト問題を行い、その計算性能を比較した結果を報告する。さらに、それらの GSPH 法と通常の SPH 法や Density-Independent SPH 法 (Saitoh & Makino 2013) を比較し、接触不連続面における解の振る舞いを議論する。

1. Inutsuka, S., 2002, J. Comput. Phys., 179, 238
2. Murante, G., Borgani, S., Brunino, R., Cha, S. -H., 2011, MNRAS, 417, 136
3. Saitoh T. R., Makino J., 2013, ApJ, 768, 44

銀河 a9 激動進化期 $z \sim 1.4$ における初期質量関数は top-heavy か?

猪口 睦子 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

星が集団で生まれる時の質量分布関数を初期質量関数 (Initial Mass Function; IMF) という。IMF は観測から星形成率や星質量等を決めたり、モデルからスペクトルや化学進化等を計算したりする際に鍵となる仮定である。すなわち、これを明らかにすることは銀河の形成・進化を考える上で非常に重要である。近傍での研究から、IMF は一般には質量のべき関数で表され、そのべき指数 Γ は我々の銀河の円盤部でおおよそ 1.35 (Salpeter 1955) とされている。そして、多くの人は遠方宇宙の銀河内でも IMF は近傍とほぼ同様だと考えているようだ。しかし、本当にそれが成り立つかはまだわかっていない。特に、 $z \sim 1-3$ は宇宙の星形成密度が大きく銀河が劇的に進化していたとされる時代 (“激動進化期”) で、IMF が銀河進化に与える影響はとて大きい。従って、激しく星形成活動を行う遠方銀河での IMF を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、 $z \sim 1.4$ の星形成銀河の IMF に制限をつけることを試みた。サンプルとしては、すばる多天体ファイバー分光器 (FMOS) で得られた銀河 280 個の近赤外分光データをを用いた。これらは Subaru XMM-Newton Deep Field Survey 領域で K バンドで選択したもののうち、FMOS で有意に H α 輝線が検出された主系列星形成銀河である。このサンプルについて H α 等価幅と銀河の色 ($J-H$; rest $g-r$) の分布を求め、スペクトル合成モデル (PEGASÉ.2) で IMF と星形成史を仮定して作った分布と比較した。

その結果、Salpeter IMF と滑らかな星形成史を仮定したモデルでは分布を再現できなかった。そこで大質量星に偏った (top-heavy) IMF を仮定したところ、分布を再現することに成功した。つまり、激動進化期における銀河の IMF は top-heavy であるという示唆を得られたことになる。しかし一方で、Salpeter IMF であってもスターバーストがある星形成史を考えれば説明できることも同時にわかった。講演では、どのように両者を判別するかについても議論したいと考えている。

銀河 a10 ダスト・ガス二流体で解く大質量星からの輻射フィードバック

一色 翔平 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

本研究では、独自開発したダスト・ガス二流体の球対称一次元輻射流体シミュレーションコードを用い、大質量星からの輻射フィードバック過程を追った。その結果、ダストにかかる輻射圧のため、ダストがガスを置いて行き、大質量星付近ではダストがほとんどない領域が出来る事を示した。以下詳細に述べる。星形成の抑制機構であるフィードバックは、銀河形成において銀河構造をコントロールする重要な物理過程である。最近の数値シミュレーションから、強いフィードバックがなければ、星質量の合計が観測と比較して一桁以上大きくなる事が示されている [1]。このような強いフィードバックの候補としては、超新星爆発、大質量星からの輻射、そして活動銀河核が考えられている。強いフィードバックの起源を解明する事は急務である。このうち、大質量星からの輻射フィードバックについては、[2]の研究から、光電離によるガス圧とダストに働く輻射圧の相乗効果で引き起こされていることがわかった。しかし、[2]の研究など、多くの研究においてダストとガスが完全にカップルすると考え、ダストとガスをあわせて一流体として扱う近似を行っている。故に、本研究ではダストとガスの速度差を [3] で提唱された近似法を用いて導出し、ダスト・ガスの二流体方程式を解いた。このとき、ダスト抗力としては、衝突による抗力とダストチャージによる抗力の影響を考慮している。シミュレーションの初期条件としては、中心に光源を置き、球対称にガスとダストを分布させた。ガスの成分は H, He とした。ダストについては、0.1 μm のグラフィイトを使用した。また、光源のスペクトルとしては PEGASE.2 から得た星団のものを使用した。数値シミュレーションの結果、ダストとガスはデカップルし、二流体で取り扱うべきであることを示した。

1. Kereš D., et al., MNRAS, 396, 2332 (2009)
2. Ishiki S. & Okamoto T., MNRAS, accepted (2016)
3. Laibe G. & Price D., MNRAS, 2136, 46 (2014)

銀河 a11 すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam を用いた Dust-Obscured Galaxies の探査

登口 暁 (愛媛大学 M1)

Dust-Obscured Galaxies (DOGs) は $R - [24] \geq 7.5$ (ABmag) と非常に赤く、深く塵に覆われていると考えられている銀河種族である。この DOGs について Dey et al. (2009) では、Major merger シナリオにおける gas-rich な merger 系の進化の途中段階ではないかとされている。また、DOGs はその Spectral Energy Distributions の形から “Power-Law (PL) DOGs” と “BUMP DOGs” に分類され、特に PL DOGs は赤外線では明るい成長途中のブラックホールを持つ可能性があるとして示唆され重要視されている。

DOGs に関する先行研究の Toba et al. (2015) では、すばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam (HSC, 可視光線) のデータと VIKING (近赤外線) のデータ、および ALLWISE (中間赤外線) のデータを用いて、中間赤外線と比較的明るい DOGs を $\sim 10 \text{ deg}^2$ で 48 天体発見していた。

しかし、先行研究では 3 つの問題点があり、今回我々はその克服を行った。1 つ目の問題点は観測領域が $\sim 10 \text{ deg}^2$ で DOGs が 48 天体

しか見つかっておらず統計的性質を議論することが困難だった点だが、HSC の最新のデータで観測領域を $\sim 55 \text{ deg}^2$ にし、424 天体発見した。2 つ目の問題点は可視光線のデータが 2 バンドのみであり可視光線における性質を議論するには情報が少なすぎた点だが、HSC の 5 バンドの色情報より、比較的赤い天体ばかりだとされてきた DOGs が $(g-z)$ ヒストグラム上の HSC 母集団との比較で DOGs の全てが赤い天体でないことがわかった。3 つ目の問題点は HSC と WISE の空間分解能の差を埋めるために VIKING の K_s バンドデータを prior (先により赤い天体を選出するもの) として入れなければ選別できず、VIKING の観測領域に調査領域が左右されていた点だが、HSC の多色の情報から HSC の全データを 30% 減らすことができ、VIKING のデータを用いずとも HSC のデータで prior を設定できると新たに見出した。

1. Dey et al. ASP,408,411D (2009)
2. Toba et al. PASJ,67,86 (2015)

銀河 a12 SDSS と DEEP2 で探る星形成銀河のアウトフロー

菅原 悠馬 (東京大学宇宙線研究所 M2)

星形成を抑制するようなフィードバック機構は銀河形成史を理解する鍵である。宇宙の大規模構造をうまく説明できる Λ CDM モデルでは、フィードバックを考慮しない場合、過剰に効率良くガスから星が形成され、観測されている数よりも多くの銀河が形成されてしまう (過冷却問題)^[1]。フィードバックの主要因の一つは、星を作るガスが銀河から吹き出るアウトフローである。銀河の形成進化を説明する理論モデルの多くは、銀河の統計的な観測量 (例えば光度関数の進化) を再現するようにアウトフローが組み込まれており、観測からアウトフローの性質を決めているわけではない。観測では、銀河のスペクトル中の金属吸収線から星形成銀河のアウトフローが検出されている。近年、 $z < 1$ の銀河の星形成率や星質量と、アウトフローガスの速度や質量との正の相関関係が観測から明らかになってきた^[2]。しかしこれら過去の研究は近傍の観測から銀河とアウトフローの物理量の関係を調べるものが多く、赤方偏移の違いについては議論していない。そのためアウトフローが赤方偏移進化すると主張する数値シミュレーションも存在する^[3]。一方で、各赤方偏移においてアウトフローが銀河形成に与えた影響は観測的にほとんど確かめられていない。そこで本研究では $z \sim 0$ と $z \sim 1$ の星形成銀河のアウトフローを比較することで、アウトフローの赤方偏移進化を調べた。 $z \sim 0$ のサンプルとして Sloan Digital Sky Survey (SDSS) DR7 を、 $z \sim 1$ のサンプルとして DEEP2 redshift survey を使用した。銀河の物理量ごとに足し合わせたスペクトルの金属吸収線からアウトフロー成分を抜き出し、アウトフローガスの速度と質量を求めた。その結果、 3σ の有意性で $z \sim 1$ では $z \sim 0$ よりも 50 km/s ほどアウトフロー速度が大きかった。この結果からアウトフローが赤方偏移進化する可能性を観測的に初めて示唆した。本講演ではこれまでの理論モデルや他の観測例とも比較しながら、アウトフローの赤方偏移進化について議論する。

1. Somerville, R. S., & Davé, R. 2015, ARA&A, 53, 51
2. Heckman, T. M., et al. 2015, ApJ, 809, 147
3. Muratov, A. L., et al. 2015, MNRAS, 454, 2691

銀河 a13 ALMA を用いた CO 輝線による分子雲質量密度

浜端 亮成 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

分子雲は主に H_2 、CO から出来ており、この分子雲は収縮、降着によって星になり、また星は一生を終えるとその一部は分子雲に還元される。そのため、サーベイ観測によって分子雲質量密度の赤方偏移進化を調べれば、星形成史に示唆が得られる。具体的な手法としては、近傍宇宙での観測によって得られた CO 輝線の光度と分子雲質量の関係 [1] を、サーベイ観測で検出された遠方銀河の CO 輝線光度に適用するというものがある。

参考文献 [2] で、電波望遠鏡 PdBI を用いて天球面の一領域である Hubble deep field north のサーベイ観測が行われ、CO 輝線の検出によって赤方偏移が 0.3, 1.5, 2.7 の分子雲質量密度が見積もられた。しかし、検出感度が十分でなく、擬天体の可能性や他輝線の可能性を棄却できなかった。そのため検出光度を精度よく定めることができず、分子雲質量密度の推定に大きな不定性が残った。

そこで、我々はより精度よく測定できるアタカマ大型ミリ波、サブミリ波干渉計 (ALMA) によるサーベイ観測で赤方偏移 0.7 における CO 輝線を検出し、その光度からこの新しい領域での分子雲質量密度を見積もった。この検出された CO 輝線が他輝線でないことは可視から近赤外の対応天体の存在によってわかる。さらに S/N 比が 6.5σ であり、擬天体でないとみなせる。そのため光度分布を仮定しそれを積分することで、分子雲質量密度に制限を与えることができた。この値を観測的予想や準解析的なシミュレーションの結果 [3] と比較した結果、後者は整合性が悪かった。さらに、今回の値を参考文献 [2] によって与えられた分子雲質量密度と比較することで、少なくとも赤方偏移 0.7 までの領域では、分子雲質量密度は赤方偏移が大きくなるにつれて増加していることがわかる。

本講演ではどのような観測的予想や準解析的な手法が観測された分子雲質量密度に即しているかを考察する。

1. C.L.Carilli and F.Walter ;2013.ARA & A,51:105
2. Walter.F et al. ;2014,ApJ,782,79
3. Lagos et al. ;2011,MNRAS,418,1649

銀河 a14 SXDF-ALMA survey のデータを用いたミリ波輝線銀河探査

山口 裕貴 (東京大学 天文学教育研究センター D1)

本研究では、ALMA データを用いて行った輝線銀河探査の結果を報告する。近年の観測により、宇宙の星形成率密度の変遷が明らかになりつつある。次なるステップとして、その進化の原因を探るためには、ミリ波輝線銀河探査を行い、宇宙の分子ガス質量密度を制限する必要がある。ところが、これまでのミリ波輝線銀河探査の多くは、赤外線などの他波長で選択された銀河を対象にしているという問題があった。本研究では、ALMA による SXDF 領域の掃天観測 (観測波長 1.1 mm, 探査面積 2 arcmin^2 , $1\sigma = 0.048\text{--}0.061 \text{ mJy beam}^{-1}$) のデータを用いて、無バイアスなミリ波分子輝線探査を行った。周波数幅 60 MHz で作成した 3 次元データキューブは、 $1\sigma = 0.45\text{--}0.70 \text{ mJy beam}^{-1}$ を達成している。このデータキューブに対して、CLUMPFIND を用いた天体

抽出を行ったところ、観測周波数 273.29 GHz に輝線天体候補 ($S_{\text{peak}} = 3.8 \pm 0.7 \text{ mJy}$, $S\Delta V = 0.53 \pm 0.08 \text{ Jy km s}^{-1}$, $\text{FWHM} = 100 \text{ km s}^{-1}$) を検出した。輝線天体付近で同定された対応天体候補に対する、可視光-近赤外線 SED フィットによって求められた測光赤方偏移 ($z_{\text{photo}} = 0.97^{+0.13}_{-0.40}$) は、検出された輝線が $z = 0.687$ の CO(4-3) 輝線である可能性が高いことを示している。求められた輝線天体の分子ガス質量比 [$f_{\text{gas}} = M_{\text{gas}}/(M_{\text{*}} + M_{\text{gas}}) = 0.97, 0.69$; それぞれ M82 と銀河系の輝線比、換算係数を仮定した場合] は、同じ時代の星形成銀河の値 ($f_{\text{gas}} \simeq 0.2\text{--}0.4$) よりも高い値になっている。これらの結果は、今回の ALMA を用いた無バイアスミリ波輝線銀河探査によって、従来の探査では見逃されてきた種族の天体が検出されたことを示唆している。本研究で検出された天体は 1 つだが、CO 輝線光度関数に与える制限は準解析的モデルに矛盾しないことが示された。

1. Kohno, K., Yamaguchi, Y., Tamura, Y., et al. 2016, arXiv:1601.00195
2. Williams, J. P., de Geus, E. J., & Blitz, L. 1994, ApJ, 428, 693
3. Obreschkow, et al. 2009, ApJ, 703, 1890

銀河 a15 星形成率密度の宇宙論的進化は分子ガス密度の進化か

前田 郁弥 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

銀河はどのように形成され、進化したのか、その過程を明らかにすることは天文学の大きな目標の一つである。そのなかでも星形成率は銀河の星形成活動を直接的に表す重要な指標である。90 年代後半から、赤方偏移 (z) が 1 - 3 の時代の星形成率密度が現在に比べて約 10 倍大きいことが報告されてきた。これは $z = 1 - 3$ の銀河の星形成活動が現在に比べて非常に活発であったことを示しているが、その原因は現在でもよくわかっていない。考えられる 1 つの原因として、宇宙の分子ガス密度が現在よりも約 10 倍大きかったのではないかとことが挙げられる。この可能性を調べるには遠方銀河における分子ガスのデータが必要となるが、これまで十分なデータがなかった。最近になってようやく IRAM や ALMA といった高感度な望遠鏡によって $z \sim 1.5$ の分子ガスの観測が進み、銀河中の分子ガスの割合 (f_{gas}) と銀河の星質量 (M_{star}) の関係がわかってきた。そこで、本研究では銀河の星質量関数と f_{gas} の M_{star} 依存性を組み合わせることで $z \sim 0$ と $z \sim 1.5$ の分子ガス密度を求め、赤方偏移進化を調べた。その結果、 $z \sim 1.5$ での分子ガス密度は現在に比べて 30 倍以上大きいということがわかった。これは予想した値より大きく、本講演ではこの結果の解釈についてもいくつか紹介する。

1. Akihumi Seko, et al. 2016, ApJ, 819, 82
2. L. J. Tacconi, et al. 2013, ApJ, 768, 74
3. Adam R. Tomczak, et al. ApJ, 783, 85

銀河 a16 銀河団コアの探査

入倉 和志 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

現状の原始銀河団探査は、QSO や電波銀河に着目する方法や、単純

に銀河の密度超過に着目する方法によってなされてきた。しかし、近傍の銀河団の中心部、コアとなっている領域では、銀河進化の環境依存性が顕著に現れており、遠方についてもこの領域にある銀河を見出すことが期待できる。今回の研究では、COSMOS field において、この遠方の原始銀河団におけるコアの領域を見出す方法として、high-SFR 銀河や重い銀河に注目し、その密度超過を、現状の原始銀河団探査で採用されている探査半径よりも 1 桁程度小さい半径で測ることを試みた。また、その密度超過が実際に原始銀河団のコアに対応しているかどうか検証した。また従来の方法が原始銀河団探査を行う上でコンプリートでないことも明らかになった。

1. Chiang, Yi-Kuan, ApJL, 782, L3 (2014)

銀河 a17 Extremely low-mass star-burst galaxies at $z \sim 2.2$

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 D1)

遠方の小質量銀河は、より近傍で見られるより重い銀河の祖先として、銀河形成・進化において重要な役割を果たしている。しかし、これまで、多波長のデータがそろって、宇宙の星形成が最も盛んな cosmic noon の時代でさえ、小質量銀河の星形成活動は、stellar の性質を中心に明るい銀河に特化して個々の描像を得るか、暗い銀河まで含めた平均的な描像を得るにとどまっていた (e.g., Hagen et al. 2014; Nakajima et al. 2012)。そこで本研究では、SXDS 領域の 604 個の LAEs の深くて広いデータをもとに LAEs をサブサンプルにわけ、stellar の性質とダークマターハローの質量を求め、多様な星形成活動について調べた。サブサンプルの 3 分の 2 は、 $z \sim 2.2$ の star formation main sequence の小質量側の外挿 ($\sim 10^9 M_\odot$) にのることがわかった。一方、残りの 3 分の 1 のサブサンプルは、 $\sim 10^7 M_\odot$ という非常に低い星質量を持ち、爆発的に星を形成している。これらの非常に小質量 LAEs の星形成率は、ダークマターハローのバリオン降着率よりも大きい程であり、通常の星形成の効率とは異なる。これらの銀河は、cosmic noon における銀河形成初期のフェーズにある新たな銀河種族の可能性があり、この爆発的な星形成を引き起こすユニークな星形成メカニズムがあると考えられる。

1. Nakajima et al., ApJ, 745, 12 (2012)
2. Hagen et al., ApJ, 786, 59 (2014)

銀河 a18 Hubble Frontier Fields 銀河団の質量分布モデル構築と超新星多重像の出現予言

川俣 良太 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 D2)

Hubble Frontier Fields (HFF; PI: J. Lotz) は、重力レンズ効果の強い 6 つの銀河団を HST で深く撮像し、銀河団背後にある高赤方偏移銀河の探査を目的とした、現在進行中のプロジェクトである。我々の研究 [1] を含めた多くの高赤方偏移銀河に関する研究の進展に貢献してきた。

HFF データの解析では、重力レンズ効果の計算が必要であり、その

ためには銀河団の質量分布モデルを構築しなければならない。我々は、共同研究者の大栗真宗が開発し公開している glafic というレンズ効果を扱うソフトウェアを用い、新たに 3 つの HFF 銀河団の質量分布モデルを構築し、既に構築した 1 つ目の銀河団のそれもアップデートした。本講演では、これら 4 つの質量分布モデルの作成法とその概要を発表する。今回構築した質量分布モデルは、HFF のページで公開されており、Kawamata et al. (2016) で発表済みである。

この 4 つの HFF 銀河団のうちの 1 つである MACSJ 1149 の領域において、レンズ効果を受けた $z = 1.49$ にある渦巻銀河が 3 つの多重像となって現れている。2014 年 11 月、この渦巻銀河の多重像の 1 つに超新星 SN Refsdal が観測された。SN Refsdal は母銀河が多重像となっていることから、他の 2 つの多重像にも時間差を持って超新星が現れることが予測される。時間差と増光率などの予測と実際の観測を比較することにより、この現象は重力レンズモデルの信頼度を検証できる非常に貴重な機会である。我々は、他のグループとのモデルの比較 [2] に参加し、来るべき超新星多重像の出現時期とその増光率の予言を行った。2015 年 12 月、予言されていた超新星多重像が検出された。我々の予言は観測と良い一致を示し、我々のモデルの高い精度を証明するものとなった [3]。本講演では、この予言と観測の概要も発表する予定である。

1. Kawamata, R., Oguri, M., Ishigaki, M., Shimasaku, K., & Ouchi, M. 2015, ApJ, 819, 114
2. Treu, T., Brammer, G., Diego, J. M., et al. 2015, ApJ, 817, 60
3. Kelly, P. L., Rodney, S. A., Treu, T., et al. 2016, ApJL, 819, L8

銀河 a19 重力レンズ効果の像復元アルゴリズムの開発とサブミリ銀河 SDP.81 への適用および星形成活動の解析

石田 剛 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

サブミリ銀河 (SMG) は宇宙論的遠方に多く見つかり、非常に高い星形成率 ($100\text{--}1000 M_\odot/\text{yr}$) を示す。この値は近傍の一般的な銀河と比べ桁で大きく、その星形成の物理を紐解くことは銀河進化を論じる上で大きな意義がある。そのためには分子雲スケールでの観測が必須であるが、ALMA の運用開始に加え重力レンズ効果を組み合わせることで、 $z=3.042$ という遠方にある SDP.81 という SMG において、それが初めて可能となった。本研究では、既存のものよりはるかに高い解像度での像復元を可能とするアルゴリズム (GLEAN: Gravitational Lensing + CLEAN) を開発した。これは電波干渉計の deconvolution で用いられる、CLEAN に着想を得た手法である。我々は GLEAN を用い、SDP.81 の source plane の画像を復元し、その星形成の性質を解析した。その結果、SDP.81 では各々の分子雲がそれぞれ理論的境界、すなわち Eddington limit に近い星形成率を示す、非常に extreme な状況にあることがわかった。今までの観測では、分解能の不足により銀河全体で積分した値でしか星形成の議論ができていなかったが、SDP.81 の超高解像度データに加え、新しい高解像度での像復元アルゴリズム GLEAN を用いることにより、分子雲スケールでの議論が可能となったことは特筆すべきことである。今後、ALMA による重力レンズ銀河の高解像度データに対し、GLEAN を適用することで、直接星形成の現場を見ることができるようになっていくと期待される。

1. ALMA Partnership et al. 2015, ApJL, 808, L4
2. Dye, S. et al. 2015, MNRAS, 452, 2258
3. Tamura, Y. et al. 2015, PASJ, 67, 72

銀河 a20 直接温度法で探る $z \sim 2$ 星形成銀河の星間物質進化

小島 崇史 (東京大学宇宙線研究所 M2)

BPT ダイアグラム ($[O,III]/H\beta$ 対 $[N,II]/H\alpha$ 図) 上の星形成銀河の分布は、 $z = 0$ と $z = 2$ で異なることが知られている (BPT オフセットと呼ばれる)。BPT オフセットは星間物質の性質の進化を示唆しており、 $z = 0 - 2$ でどのような進化があったのかを明らかにすることが喫緊の課題となっている。現在、ガス重元素量 (O/H) に対する窒素・酸素組成比 (N/O) または電離パラメータの増加が最も有力とされているが、決定的な結論には至っていない。決定的な結論を得るためには直接温度法による測定が必要不可欠であるが、直接温度法で使われる $O,III]1665/[O,III]4363$ 輝線は微弱であるため、これまで $z \sim 2$ 銀河への直接温度法の適応は難しいものと考えられてきた。

本研究は、初めて 11 個もの $z \sim 2$ 銀河に対して直接温度法による測定をし、 $z \sim 2$ における N/O の増加と電離パラメータの増加の可能性を議論したものである。我々は $z = 2.2$ の銀河に対して Keck/LRIS による ~ 7 時間の分光観測を行い、1 個の銀河に対して 6.8σ で $O,III]1665$ を検出した。さらに、重力レンズで増光された銀河を中心に徹底的な文献調査を行い、 $O,III]1665$ または $[O,III]4363$ の検出された 10 個の $z \sim 2$ 銀河を選び出した。以上合わせて 11 個の $z \sim 2$ 銀河は、N/O に平均して 0.15 dex 以上の増加がないことを示しており、少なくとも N/O の増加だけでは BPT オフセットを説明できないことが明らかになった。さらに、複数の $z \sim 2$ 銀河が電離パラメータの超過を示しており、この電離パラメータの超過が BPT オフセットを促進していると考えられる。講演では、今回得られた結果の物理的解釈について、詳細な議論を展開する。

1. Steidel, C. C. et al. 2014, ApJ, 795, 165
2. Shapley, A. E. et al. 2015, ApJ, 801, 88
3. Sanders, R. L. et al. 2015, ApJ, 816, 23

銀河 a21 ヒミコ

長谷川 萌 (お茶の水女子大学 宇宙物理研究室 M1)

2008 年に発見された、 $z=6.595$ という遠方にある巨大な天体「ヒミコ」は、 $Ly\alpha$ 輝線を出している雲に覆われている。同時代の天体よりも、ボトムアップ・シナリオで説明しにくい異常な大きさ、 $Ly\alpha$ 輝線による輝き、そして星生成率 $100M_{\odot}yr^{-1}$ を有している。また、詳細は明らかではない 3 つの星の集団が力学平衡にあり、それらが丁度横に整列しているような形をしている。このような複数の星の集団 (clump) を有する典型的な遠方天体として、clumpy 銀河が知られている。

本研究では、これらの多数の clumpy 銀河をヒミコと比較し、星の集団の成因やその後の進化の多様性を追究していく。例えば、ヒミコは力学平衡にあるが、clumpy 銀河はそうではないと知られているので、双

方の力学的な安定性の議論をする。ヒミコの場合、星の集団が直線状に並んだ形状が特徴的である。一方、相当数の clumpy 銀河が 1 次元的な clump の並びを呈していて、chain 銀河と呼ばれている。この直線状に並んだ形状にも注目して、ヒミコと clumpy 銀河を比較していきたい。

1. Ouchi, M., Ono, Y., Egami, E., et al. 2009, ApJ, 696, 1164
2. Ouchi, M., Ellis, R., Ono, Y., et al. 2013, ApJ, 778, 102
3. Matsuda, Y., et al. 2004, AJ, 128, 569

銀河 a22 電離光子脱出率が示す多様性の起源

角田 匠 (名古屋大学 C 研 M1)

現在の標準宇宙論によれば、初期に高温、高密度であった宇宙は宇宙膨張とともに冷え、宇宙年齢約 38 万年に自由電子と陽子が結合することにより宇宙空間は中性化する。その後、宇宙に初代の天体が形成されると、それらが放射する電離光子によって宇宙空間を満たすガスが再び電離される。この期間のことを宇宙再電離期と呼ぶ。観測による制限から宇宙再電離は $z \sim 6$ までに完了していると考えられている。宇宙再電離を引き起こした天体は初代星や銀河などである。再電離のプロセスを理解するためには、それぞれの天体がどのくらい宇宙再電離に寄与したのかを知る必要がある。高赤方偏移の銀河の電離光子脱出率 (f_{esc}) は、銀河からの寄与を決める重要なパラメータである。しかし、観測や銀河シミュレーションから f_{esc} の値には高い多様性が見られる ($0.01 \lesssim f_{esc} < 1$)。本発表では、まず文献 [1] の議論を拡張し、clump と呼ばれる銀河ガスの内部構造がどのように f_{esc} に影響を与えるのかについて議論する。さらに星種族合成モデルにより、銀河のスペクトルを再現し、星種族や星形成率、金属量、年齢などの銀河の様々な性質と f_{esc} の関係を調べることで、 f_{esc} が示す多様性の起源について議論する。

1. Elizabeth R. Fernandez and J. Michael Shull (2011)
2. Yajima et al. MNRAS,412,411(2011)

銀河 a23 宇宙再電離と LAE 探査

樋口 諒 (東京大学宇宙線研究所 東京大学大学院理学系研究會 M1)

宇宙は誕生してから数十万年後の「宇宙の晴れ上がり」により中性となった。その後現在に至るまでにもう一度電離を起こしたことが知られている。これを宇宙再電離という。宇宙再電離の物理的な過程を知ることとは今日の天文学の重要な目標の一つである。そのためには宇宙再電離が起こったと考えられている $z=6$ 以前の時代の高赤方偏移の天体を観測する必要がある。Lyman α emitter (以下 LAE) は高赤方偏移でも明るく探査しやすい。さらに、LAE の $Ly\alpha$ 線は銀河間の中性水素により吸収されるため、宇宙再電離が起こったとされる時代の銀河間物質の水素の電離比率を知る指標になる。Ouchi et al. 2010 ではすばる望遠鏡の主焦点カメラ (SC) の狭帯域撮像によって得られた LAE のデータを用いて $z=5.7, z=6.6$ の光度関数を作成し、 $z=5.7, 6.6$ における光度関数の進化を明らかにした。しかし、これには 2σ 弱の統計誤差が存在する。本研究では新しくすばる望遠鏡の超高視野主焦点カメラ (HSC) で観測された SXDS 天域 (限界等級 24.5-25mag) を探査した。現段階で探査

面積 0.32deg^2 において $z = 5.7$ の LAE を狭帯域撮像により 18 個検出している。探査領域はこれからも増える見込みである。HSC のデータを用いた類似の解析は前例がない。得られた LAE から光度関数を作成し、 $z=5.7$ 6.6 における光度関数の変化から銀河間物質の水素の電離比率に制限をかける予定である。

銀河 b1 High-Velocity Compact Cloud の自動同定アルゴリズムの開発

徳山 碩斗 (慶應義塾大学大学院基礎理工学専攻 M1)

銀河系中心から半径 200 pc 以内の領域 (CMZ; Central Molecular Zone) は、銀河系円盤部に比べ高温・高密度・広速度分散という特異性を持つ。しかしその特異性の原因は未だに解明されていない。CMZ の特異性解明の鍵を握る天体として高速度コンパクト雲 (HVCC; High-Velocity Compact Cloud) の存在がある。HVCC はその名の通り空間的にコンパクトかつ広い速度幅を持つ特異的な分子雲であり、それぞれ度重なる超新星爆発または巨大な重力源に起因する構造と解釈されている。HVCC の同定手法として、Nagai (2008) の開発した方法がある。この方法は計算機による自動同定アルゴリズムと人間による選別プロセスを組み合わせたもので、巨大なデータセットに対しては膨大な労力を要するという問題が残されていた。今回我々はこの問題を解決すべく、HVCC の完全な自動同定アルゴリズムの開発を行った。このアルゴリズムは (1) pressing method、(2) unsharp mask、(3) modified clumpfind の 3 つの手順からなる。まず pressing method により銀河系円盤部にあるガスの影響を軽減させる。次に unsharp mask で空間的にコンパクトかつ速度幅が広い成分を強調する。最後に modified clumpfind を用いて HVCC を同定する。また、Nagai (2008) で用いた $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ データは空間情報が完全ではなかったため、我々は新たに野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて同輝線の Nyquist サンプリングによる OTF マッピング観測を行った。これにより今まで見落とされていた、さらにコンパクトな HVCC を多数発見出来ることが期待される。実際、新データに今回開発した自動同定アルゴリズムを適用することにより 116 個の HVCC 候補天体を同定することに成功した。本講演では、今回開発したアルゴリズムの詳細と HVCC 候補天体の統計解析結果の報告を行う。

銀河 b2 overcooling 問題解決を目的とした superbubble-feedback model の構築

田中 雅大 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

本講演では、Keller et al. (2014) のレビューを行う。彼らは、新しく開発した superbubble-feedback model を銀河スケールのシミュレーションに組み込みフィードバックの効果を調べた。以下に本レビューの詳細を述べる。

観測で得られる銀河の光度関数はネガティブフィードバックなしのシミュレーションで得られる光度関数と大きく異なってしまう。このようなフィードバックの候補としては、超新星爆発 (SNe) や活動銀河核などが考えられている。

Keller et al. (2014) は集団的な SNe によって引き起こされる superbubble-feedback に注目した。宇宙では、複数の SNe が同時期、局所的に起こることが知られている。このような SNe によって hot gas の周りを cold gas が囲んだ superbubble と呼ばれる泡状構造が形成される。この時、hot gas と cold gas の間には、温度勾配によって大きな

熱伝導が起こる。これまでのフィードバックモデルでは、分解能が不足、スーパーバブルの熱伝導による効果が取り入れられていなかった。これにより、過剰にガスを cooling する overcooling の問題が生じてしまう。この問題を、従来のモデルでは、様々な free parameter を使うことで解決してきた。

Keller et al. (2014) では、overcooling の問題を free parameter を入れずに、hot phase や cold phase からなる 2 相を持つ粒子や、2 相間の熱伝導の効果を subgrid で導入することで解決する superbubble-feedback model を構築した。そして、この新たなモデルが分解能に依存しない結果を導くことを確認した。さらに、新しいモデルと従来のモデルを用いて、孤立銀河のシミュレーションを行い比較した。その結果、従来のモデルと比べると新しいモデルは、より効率的に星形成を抑え、強力な outflow を生成した。

1. Keller et al. MNRAS, 442, 3013 (2014)

銀河 b3 活動銀河核における狭輝線領域の赤方偏移進化の観測的研究

仁田 裕介 (愛媛大学 M1)

銀河における星間物質 (ISM) が宇宙 138 億年の歴史の中でどのようにその性質を変えてきたかを明らかにすることは、銀河進化の全貌を理解するために極めて重要である。Kewley et al. (2013) では BPT 図とよばれる輝線診断図上で、星形成銀河と AGN のどちらにおいても赤方偏移とともに ISM の物理状態が変化していく理論モデルを示している。現在、星形成銀河については Steidel et al. (2014) や Hayashi et al. (2015) において Kewley の理論モデルに一致するような観測結果が報告されている。しかし、AGN に関してはほとんど調査がされておらず、Kewley et al. (2013) で予想されたような、AGN 母銀河における ISM の進化の有無は観測的にテストされていない。

Araki et al. (2012) では $z \sim 3$ の 1 型クエーサー SDSS J1707+6443 の近赤外線分光観測を行ない、得られたスペクトルから狭輝線領域 (NLR) における $[\text{NeIII}]\lambda 3869/[\text{OIII}]\lambda 5007$ 、 $[\text{OII}]\lambda 3727/[\text{OIII}]\lambda 5007$ の輝線強度比の測定を行なっている。その結果、近傍 ($0 < z < 1$) の 1 型クエーサーに比べると $[\text{NeIII}]/[\text{OIII}]$ が顕著に高く、 $[\text{OII}]/[\text{OIII}]$ は低くなることがわかった。この観測結果は SDSS J1707+6443 において、ISM の典型的密度が low- z のクエーサーよりも高いと解釈できる。しかし、high- z クエーサーの母銀河の ISM 密度が low- z に比べて系統的に高いかどうかは不明である。よって我々は、SDSS J1707+6443 と同程度の赤方偏移である $z \sim 3$ のクエーサー 5 天体について、すばる望遠鏡の MOIRCS を用いて近赤外線分光観測を行なった。得られたスペクトルより、Araki et al. (2012) と同様に $[\text{NeIII}]/[\text{OIII}]$ 、 $[\text{OII}]/[\text{OIII}]$ の輝線強度比の測定を行い、先行研究との比較を行なったので、その結果について報告する。

1. Araki et al. A&A 543A 143A (2012)
2. Kewley et al. ApJ 774 100K (2013)

銀河 c1 分子輝線観測で探る銀河系中心核への質量供給過程とそのフィードバック

竹川 俊也 (慶應義塾大学 D2)

銀河系中心核 Sgr A*は、約4百万太陽質量の超巨大ブラックホールを内包する低光度活動銀河核であると考えられている。この Sgr A*は、核周円盤 (CND) と呼ばれる高温・高密度な分子ガスリングに取り囲まれており、さらにその CND の外側には二つの巨大分子雲 (M-0.02-0.07, M-0.13-0.08) が隣接している。現在 Sgr A*の活動性は極端に低いが、それを取り囲む CND は将来の燃料貯蔵庫であると同時に、過去の中心核活動を反映している可能性がある。

これまで、我々のグループは、野辺山 45 m 鏡、ASTE 10 m 鏡、JCMT 15 m 鏡等を用いて銀河系中心部の詳細な分子輝線観測を行ってきた。その結果、CND は比較的小さい分子のみで構成されており、大きい分子が過去の中心核活動により壊されている可能性を見出した^[1]。また、CND と巨大分子雲 M-0.13-0.08 とを直接的に繋ぐ構造を発見し、この観測結果は、CND の一部がその手前にある M-0.13-0.08 に突入していると考えられると説明できることが分かった^[2]。このような衝突により、Sgr A*を周回する分子雲が角運動量および運動エネルギーを失い、中心核近傍への質量供給が促進される可能性がある。

CND やその周囲の分子雲の運動状態・物理的性質およびその化学組成を統合的に把握することは、過去から未来にわたる中心核活動を理解する上で極めて重要である。本ポスター講演では、銀河系中心核を取り巻く分子雲の物理・化学状態を、我々の観測成果に基づき整理し、銀河系中心核への質量供給過程およびそのフィードバックについて議論する。

1. Takekawa et al. 2014, ApJS, 214, 2
2. Takekawa et al., submitted to ApJL

銀河 c2 銀河系バルジ領域における銀河系拡散 X 線の放射源と古い星の分布

長友 竣 (京都大学宇宙物理学教室 D2)

銀河系を X 線で観測すると、点源に分解できない広がった X 線放射 (銀河系拡散 X 線; GDXE) があることが知られている。この X 線の放射源として、比較的暗いため分解できない点源であるという説と真に広がった、加熱された星間物質が放射源であるという説が考えられている。点源説の場合、有力な放射源として考えられているのは激変星などの星で、これらは比較的古い星である。対して真に広がった放射源説の場合、星間物質の加熱源として考えられているのは主に超新星爆発であり、寿命が短い重い星の分布が GDXE の分布に大きく影響する。したがって GDXE の放射源を知ることにより、銀河系において星がどこでどのようにできてきたかに制限をつけられることが期待される。

GDXE の放射源を探る有力な方法の一つが、近赤外線で見える「古い星」の分布と GDXE の分布を比較することである。今まで、広い範囲にわたった分布の比較には星分布として近赤外面輝度分布が用いられてきたが、面輝度分布は明るい若い星の影響が避けられず、また減光補正も正確に行えない。Nishiyama et al. (2013) および Yasui et al. (2015) では銀経 $\pm 2^\circ$ 、銀緯 $\pm 1^\circ$ 以内の M 型巨星の星数面密度分布を求め X 線強度分布との比較を行ったが、放射源についてより詳しく知るためには

より広い領域での比較が必要である。

我々は先行研究で用いられた IRSF のデータに加えて Vista Variable in the V'ia L'actea (VVV) のデータを用いて銀経 $\pm 10^\circ$ 、銀緯 $\pm 5^\circ$ 以内の M 型巨星の星数密度分布を取得、X 線強度分布との比較を行った。銀経方向分布の比較では、中心部での X 線強度の超過を再確認した。このとき、分布の規格化を行った銀経 $\sim 8^\circ$ の領域における X 線 (6.7 keV 輝線) 強度と M 型巨星数の比は $(1.09 \pm 0.13) \times 10^{-8}$ [photons/(s cm²)] で、太陽系近傍での値から得られる予想値と矛盾しない。本発表では他に、6.4keV 輝線強度分布との比較、銀緯方向の比較の結果を示す。得られた結果から、バルジ領域における GDXE の X 線源の種類とその分布について議論する。

1. Nishiyama, S. et al. ApJ, 769, L28 (2013).
2. Yasui, K. et al. PASJ, 67, 123Y (2015).
3. Yamauchi, S. et al. PASJ accepted (2016).

銀河 c3 Suprime-Cam を用いた Ursa Minor 矮小楕円体銀河の測光解析

佐々木 花 (東北大学天文学専攻 M1)

Cold Dark Matter (CDM) model に基づく構造形成理論によると、より小さい銀河が集積・合体を繰り返すことで巨大銀河へと階層的に進化すると考えられている。実際、アンドロメダ銀河や天の川銀河等の巨大銀河の周辺では、矮小銀河等の集積・合体の名残が恒星ストリーム等として観測されている。合体の名残としての substructure は巨大銀河だけでなく、矮小銀河そのものにも観測されつつある。Ursa Minor 矮小楕円体銀河 (UMi dSph) はその 1 つで、Pace et al. 2014 において後退速度分布の解析から 2 つの substructure の存在が示唆された。本研究では、この UMi dSph について、すばる望遠鏡主焦点カメラ Suprime-Cam によって得た撮像データの解析・測光を行い、2 つの substructure 候補の領域とそれ以外の領域について比較した。

較正の結果、点光源の限界等級は $V \sim 25.5$ mag まで到達しており、UMi dSph の星の転向点 ($V \sim 23$ mag) も十分にカバーしている。本研究では、UMi dSph を 5 つの領域 (中心部、北西部、南東部、substructure が示唆されている 2 つの領域) に分割して各領域について色等級図を作成し、RGB-bump の解析から金属量の推定、転向点付近の解析から年齢分布の推定を行った。解析の結果、2 つの substructure 候補の領域の平均金属量は他の領域より低い値となることがわかった。また、各領域について求めた金属量に基づき各領域内の星の年齢分布を求めたところ、substructure 候補領域とその他の領域では、星の年齢分布には有意な差は見られなかった。以上の結果は、substructure 候補の領域に存在する星の多くは、金属量の違いから銀河本体とは別の起源である可能性を示唆していると考えられる。本発表では、詳細な解析結果について発表する。

銀河 c4 カスプコア遷移とダークマターハローのユニバーサリティの関係

田沼 萌美 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

本発表では The connection between the cusp-to-core transforma-

tion and observational universalities of DM haloes, Ogiya G., Mori M., Ishiyama T., Burkert A., 2014, MNRASL, 440, L71 をレビューする。最近の観測により、近傍矮小銀河のダークマターハローには2つの一般的な性質があることがわかってきた。矮小銀河の中心から 300 pc 以内のダークマターハローの総質量が一定になること (Strigari の関係)、そしてダークマターハロー中心部の面密度が一定になること (μ_{0D} 関係) である。一方、コールドダークマターモデルに基づく宇宙論的シミュレーションでは、ダークマターハローの中心密度分布がカスプ状になるという予言がされている。ところが、近傍矮小銀河の観測ではダークマターハローの中心密度分布が平坦に近いコア状の分布を持つものが多数発見されている。このようなシミュレーションと観測の結果が矛盾するというコア・カスプ問題が指摘されている。本論文では、初期にカスプ状だったダークマターハローの中心密度分布が、何らかのバリオンの力学過程によってコア状に変わるモデル (カスプ・コア遷移) を考える。その結果、カスプ・コア遷移が μ_{0D} 関係と密接に関連していること、コア状のダークマターハローの中心密度からハローが形成された時期を推定できること、矮小銀河に対する μ_{0D} 関係が Strigari の関係にあたることが示された。

1. Ogiya G., Mori M., Ishiyama T., Burkert A., 2014, MNRASL, 440, L71-L75

銀河 c5 21cm 線スペクトル重ね合わせ解析による近傍銀河星間ガス量に関する研究

上野 紗英子 (鹿児島大学 M1)

我々は HI All-Sky survey (HIPASS) と 2 degree Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) のデータを用いて重ね合わせ解析を行い近傍 (~ 160 Mpc) のうち絶対等級 $M_V = -16.7$ より明るい銀河について HI の質量を見積もった。解析は $0.003 < z < 0.04$ の範囲において z を 0.005 間隔で分割し (最初の区間は $0.003 < z < 0.005$)、赤方偏移ごとに解析を行った。最終的に合計 5855 個の銀河を重ね合わせた。赤方偏移分割後に関しても、全区間で signal to noise ratio (S/N) は 3.6 以上を達成しており、放射が弱い系外銀河の電波を捉えることができた。また、重ね合わせ解析により得られた結果をもとに HI 質量の赤方偏移変化を計算すると、8つの区間での HI 質量の平均は $7.1 \times 10^8 M_\odot$ であり、 $z \sim 0.04$ において 32% 以内で一定であることがわかった。この結果は系外銀河や銀河ハローからガスがディスクに供給されていることを示唆する。G 型矮星問題におけるガス降着モデルも系外からのガスの供給を許す仮定をとっている。以上のことより、いままで化学進化の面から提言されていたガスの流入を、ガスの消費という面からも確認することができた。

銀河 c6 ALMA を用いた衝突後期段階銀河 NGC3256 の分子輝線探査

道山 知成 (国立天文台三鷹 D1)

銀河と銀河は頻りに衝突している。理論シミュレーションによる研究では、銀河衝突によって爆発的星形成や AGN 活動が促進されることが知られている。このような活発な活動は銀河の化学組成を変化させる。本研究では、ALMA を用いて、衝突の後期段階の NGC 3256 に着

目し、化学組成の調査を試みた。本発表では、2016 年 3 月に実行された最新の ALMA 観測結果を紹介する。ショックトレーサー、光乖離トレーサーを含む 10 種類以上の分子輝線 ($c\text{-C}_3\text{H}_2$, H_{13}CN , H_{13}CO , SiO , CCH , HNCO , HCN , HCO^+ , HNC , CH_3OH , CS , HC_3N , CH_3CCH , C^{18}O , C^{13}O) を同定した。これの輝線の情報を元に銀河の化学組成物理状態運動状態、が明らかになる。これらの情報を元に NGC 3256 の形成過程を議論する。

銀河 c7 銀河団 RXC J0751.3+1730 の物理量空間分布、及び周囲の銀河団との相互作用

小林 洋明 (名古屋大学 Ux 研 M2)

銀河団は重力的に束縛された宇宙で最も大きな系であり、宇宙の大規模構造形成史の重要な役割を担っている。また、銀河団の進化過程の一つである衝突・合体では銀河団ガスが互いに相互作用することで、衝撃波加熱により力学的に安定した銀河団の典型的な温度プロファイルに比べ逸脱する点が見られる。また、逸脱した点では圧力や重元素アバダンス等の物理量に関しても変化が見られることが期待される。そこで、我々は銀河団カタログを用いて、銀河団が近接した領域を選び、その領域の X 線天文衛星 XMM-Newton による観測データを解析した。その結果、視野中に RXC J0751.3+1730 や SDSS +117.7+17.7+0.19 を含む計 3 つの銀河群・銀河団からの X 線を検出した。その際、それぞれの銀河団の中心付近では他の銀河団による影響は見られなかった。今回は、検出したソースの内 RXC J0751.3+1730 に着目し、他の銀河団との間の領域での相互作用を調べると共に、銀河団自身の表面輝度や温度等の物理量の空間分布を調べた。その結果、温度は中心から $0.05 \sim 0.1 R_{\text{vir}}$ で 4.6 keV と最も高くなり、 $> 0.5 R_{\text{vir}}$ では 2.9 keV と中心付近に比べ、70% 程度まで低下していることを明らかにした。また、周囲の銀河団との間の領域に関して RXC J0751.3+1730 の中心から近傍の銀河団の方位角方向への表面輝度分布を作成し、RXC J0751.3+1730 の中心を対称点とした反対の方位角方向や垂直方向への表面輝度分布と比較したが有意な差は見られなかった。

銀河 c8 Abell2399 銀河団における AGN フィードバック現象の調査

佐藤 瑛子 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

活動銀河核 (AGN) は、周辺からガスの供給を受けて重力エネルギーを解放し、その一部をジェットとして外界に放出することでまたガスを加熱する。このような AGN フィードバック現象の影響は大きく、銀河団のコア領域のガスさえも加熱するため、銀河間ガスのエントロピー生成の重要な起源の一つと考えられている。実際、AGN 加熱の影響は、銀河団ガスとジェットの相互作用によってできたガスの空洞の存在や中心銀河の K バンド光度と銀河団ガスのエントロピー値の相関などからも指摘されている。一方、最近、X 線輝度の低い銀河団 (以下、これを低輝度銀河団と呼ぶ) において、典型値よりも数倍高いガスエントロピー値を示すことが見つかった。これは、一般に、輝度の高い銀河団ほど高いエントロピー値を示す傾向と異なっており、従来の重力加熱や AGN 加熱のシナリオでは説明が困難である。現状では、サンプル数が不足しているため、低輝度銀河団における高エントロピーの起源は十分理解できていない。そこで今回、銀河団ガスにおける AGN フィードバックの影響を調べる

ため、低輝度銀河団 A2399 ($z=0.057$) の観測を行った。すざく衛星で取得した X 線データを利用して、銀河団ガスの温度や密度、エントロピーを測定し、中心銀河の光度との比較から、AGN 加熱の影響を評価することを目的としている。A2399 は暗い天体であるため、バックグラウンドを詳細にモデル化し、銀河団コア領域の X 線放射のスペクトルの解析を行った。本講演では、得られた解析結果を報告し、低輝度銀河団のガス加熱機構について議論する。

1. Ota et al.(2013), *Astronomy & Astrophysics*, Volume 556, id.A21, 6 pp.

銀河 c9 ハーシェル宇宙望遠鏡で探る $z=2-3$ 原始銀河団の星形成活動

加藤 裕太 (国立天文台三鷹 東京大学 D2)

平均的な銀河の星形成史と合わせて、銀河団環境における銀河の星形成史を理解することは、宇宙の大規模構造の変遷を理解するための重要な課題である。原始銀河団は、銀河の衝突合体を要因として爆発的星形成銀河が多く、群れて見つかる可能性を指摘されているものの、これまでの爆発的星形成銀河の探査は、電波銀河周りの原始銀河団で行われている。そこで我々は電波銀河を持たない 3 つの原始銀河団 (2QZCluster, HS1700, SSA22) をハーシェル宇宙望遠鏡で観測した。その結果、3 つの原始銀河団において、爆発的星形成銀河の高密度領域を発見した。その領域における星形成率密度は、同じ時代の平均的な値と比べて一千倍から一万倍高い値を示した。これらの結果は、観測した電波銀河を持たない原始銀河団においても、爆発的星形成銀河を伴う激しい星形成が行なわれていることを示している。

1. Kato et al., 2016, accepted in *MNRAS*, arXiv:1605.07370
2. Casey, 2016, accepted in *ApJ*, arXiv, 1603.04437
3. Rigby et al., 2014, *MNRAS*, 437, 1882

銀河 c10 QSO environment and feedback to its neighbors

菊田 智史 (国立天文台三鷹 M2)

AGN がその母銀河へ与える影響 (AGN フィードバック) は観測的にも理論的にも多く研究されているが、AGN が周囲の別の銀河に与えるフィードバックは理論的にあるとされているものの観測的研究は十分進んでいない。特に、光度の大きな AGN (=QSO) の周囲では輻射により銀河の形成が妨げられるため、影響のない場所と比べて低質量銀河の数密度が減少することが予測される。一方で、遠方の QSO 周辺は銀河の多い高密度環境であるとも言われている。そこで我々は、すばる望遠鏡の広視野可視光線カメラ Suprime-Cam を用いて $z = 4.87$ 付近の 2 つの QSO の周囲を観測し、これらの予測を検証することを試みた。狭帯域フィルター NB711 および広帯域フィルター (R,i,z) で広視野かつ深い撮像観測を行った結果、2 つの QSO のまわりに 201 個の $z \sim 4.86$ LAE と 165 個の $z \sim 5$ LBG が検出された。我々はそれぞれの銀河種族に対し、QSO から近い銀河と QSO による影響がない遠くの銀河にサンプルを分けて光度関数を描くことで、フィードバック (暗い側に影響) と周辺

環境密度 (明るい側にも影響) の影響の有無を調べたが、いずれの領域でも近くと遠くで有意な差は見られなかった。本講演ではこれらの結果とそれらが銀河形成に与える示唆を示すとともに、Suprime-Cam の後継機である Hyper Suprime-Cam を用いた今後の展望について議論する。

1. Kashikawa et al. 2007, *ApJ*, 663, 765
2. Adams et al. 2015, *MNRAS*, 448, 1335
3. Benson et al. 2002, *MNRAS*, 333,156

銀河 c11 宇宙論的シミュレーションで探る天の川銀河サイズの銀河の形成過程

畑 千香子 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M2)

宇宙論的流体力学シミュレーションを用いて、天の川銀河サイズの銀河の形成・進化の過程について研究を行っている。円盤銀河形成の標準的なシナリオは、バルジが高赤方偏移で形成された後その周囲に円盤が内側から徐々に形成されるという inside-out シナリオである (Mo et al. 1998)。一方観測的には、天の川銀河サイズの銀河の祖先とみられる銀河は $z \sim 2.5$ から $z \sim 1$ までの間、銀河の中心部も外縁部も同じ割合で質量を獲得する、自己相似的な成長をすることが指摘されている (van Dokkum et al. 2013)。この結果は inside-out シナリオに矛盾し、理論的に不自然である。本研究の目的はこの自己相似的な成長を再現する物理過程を明らかにし、観測結果を理論的に説明することである。そのために、ガスの放射冷却や星形成、大質量星からの輻射や超新星爆発によるガス加熱 (フィードバック)、化学進化などの銀河形成に重要なバリオンの物理過程を考慮した高分解能の宇宙論的シミュレーションを行った。また、今回のシミュレーションでは delayed cooling を試した。Delayed cooling とは超新星爆発により加熱されたガスの冷却を一定期間禁止することにより、ホットバブルを作るというものである。その結果、仮定したモデルでは星形成が抑制されすぎてしまうことがわかった。そのため、Type II の超新星爆発で排出されるエネルギーの効率を半分にしたものを試すことにした。本発表ではこれらのシミュレーション結果の詳細を説明し、自己相似的な成長を再現できているかどうかを議論する。

1. Mo, H. J., Mao, S., & White, S. D. M. 1998, *MNRAS*, 295, 319
2. van Dokkum P. G. et al., 2013, *ApJ*, 771, L35

銀河 c12 赤外線銀河のエネルギー源調査

正垣 綾乃 (関西学院大学大学院 松浦研究室 M1)

光度の大部分を赤外線で放射している銀河は、赤外線銀河と呼ばれ、ダストに埋もれたエネルギー源の存在が示唆される。エネルギー源として、銀河同士の合体に起因した、爆発的な星生成活動、もしくは、活動銀河核 (AGN) 活動が候補として挙げられる。これまでの多くの観測結果より、AGN が銀河の星生成活動において重要な役割を担っていると考えられる。したがって、ダストに隠された、エネルギー源が AGN の寄与である赤外線銀河を特定し、その物理的性質を理解することは、銀河進化を理解することにつながる重要なテーマである。本研究では、赤外線天文衛星「あかり」の NEP サーベイ観測で見つかった赤外線銀河から、

AGN 候補天体を選別し、調査を行う。その足掛かりとして、我々は昨年、西はりま天文台 南ゆた望遠鏡/MALLS(Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph) を用いて NEP 天体 J175348.55+663920.9 の可視分光観測を行った。輝線強度比より、電子温度や電子密度の見積もりを行った。加えて、AGN と星形成銀河とを区別する BPT 輝線診断 (Baldwin et al.1981) によって、エネルギー源の推定を試みた。その結果、電子密度がスターバースト銀河の典型的な値より大きいことから、この天体の赤外線光度には、AGN 由来の放射が寄与している可能性が示唆される。 今後は、より大きなサンプル数の赤外線銀河の分光データから、AGN の光度や赤方偏移分布などの統計的な性質を導き出し、AGN が駆動する銀河進化を明らかにすることを旨とする。すでに取得した「あかり」NEP 領域における、Keck 望遠鏡/ DEIMOS(Deep Imaging Multi-Object Spectrograph) の観測データを詳細に解析していく。

銀河 c13 輻射輸送計算を用いた 1 次元円盤銀河の SED モデルの構築

永田 拓磨 (名古屋大学、銀河進化学研究室 (Ω研) M2)

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代表的である。これらの放射の波長ごとのスペクトルエネルギー分布 (SED) と呼ぶ。銀河内にあるダストは OB 型星から放射される紫外線や可視光を吸収し、赤外線再放射する性質だけではなく、ダスト表面で H_2 を形成することで、ガスが冷却され星形成を促進する働きがあり、銀河形成や銀河進化において重要な役割を果たしていると考えられる。このダストの質量や空間分布、種類 (サイズ、組成) が SED を決める重要な物理量となる。しかし、銀河の SED モデルの多くで、ダストの空間分布や種類を近傍銀河や銀河系の観測で得られた経験的なモデルが用いられている。ダストの進化モデルは確立されてきており (e.g. Asano et al. 2013, 2014a, 2014b: 以下 Asano モデル)、ダストの進化に応じた SED モデルを構築する必要がある。

そこで本研究では、ダスト粒子が高密度で存在する領域の一つの巨大なダスト粒子と仮定するメガグレイン近似を用いて、一次元円盤銀河の輻射輸送方程式 (Inoue 2005) を解くことで、 $0.1\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ (紫外線から遠赤外線) まで、星による放射、ダストによる吸収、散乱、再放射を計算し、銀河の SED を導出した。星の放射については PEGASE (Floc & Rocca-Vomerage 1997) を用い、ダストの種類はグラファイト、シリケート、多環芳香族炭化水素 (PAH) を考慮した (Draine & Li 2007)。ダストの温度は非平衡ダストを考え、モンテカルロシミュレーションによって温度分布を導出した (Draine & Anderson 1985)。ダストの質量分布は MRN 分布 (Mathis, Rumpl, & Nordsieck 1977) および Asano モデルを用いて比較した。これにより、ダスト進化に応じた銀河 SED 進化モデルを構築した。本発表では、これらの研究成果を発表する。

銀河 c14 星形成銀河円盤の構造および活動銀河核への質量降着

松木場 亮喜 (東北大学天文学専攻 M1)

観測より銀河バルジの質量とその中心のブラックホールの質量は、比例関係にあることが知られている。これより銀河の成長とその中心ブ

ラックホールの成長は、互いに影響を及ぼし合っていると推察される。星形成銀河円盤では、力学的な時間あたりに星間物質中のガスが数パーセントしか星へと変換されず、星形成の効率が非常に悪いことが観測より示唆されている。星形成は、ガスの自己重力収縮によって起きるが、銀河中の大質量星からの紫外線放射や超新星爆発によるフィードバックが原因で抑制される。銀河円盤が光学的に厚く、ガスとダストがカップリングしているとき、ダストが星からの紫外線放射で輻射圧を受けることによって、ガスは自己重力で収縮することを妨げられる。よって星形成銀河では、星形成の効率が悪いと推測できる。そこで、星形成からのフィードバックによって支えられた自己重力円盤モデルについて考えた。このモデルから得られたエネルギー流速密度や有効温度は、星形成が活発な銀河である ULIRGs の観測量とよく一致する。次に、この円盤のモデルを用いて銀河中心の活動銀河核への定常降着流について考察すると、活動銀河核が十分な明るさを得るためには、臨界値となる降着率があることがわかった。本講演では、このモデルについて研究した Thompson, Quataert, Murray 2005 についてレビューし、星形成銀河円盤と活動銀河核の関係について議論する。

1. Thompson T. A., Quataert E., and Murray N., 2005, ApJ, 630, 167

銀河 c15 低質量超大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 M2)

現在までに、超大質量ブラックホール ($M_{BH} \sim 10^6\text{--}10^9 M_\odot$) と母銀河の様々な物理量 (質量、速度分散、光度など) との間にはタイトな相関が見つけれられてきた (e.g., Marconi & Hunt 2003, Kormendy & Ho 2013)。しかし、ブラックホール質量の低質量側 ($M_{BH} \lesssim 10^6 M_\odot$) において、そのデータ数の少なから、それらの相関に制限をつけるのは未だに困難な状況となっている。また、 $z \sim 7$ において $10^9 M_\odot$ もの質量を持つブラックホールが観測されており、このような天体の存在を説明できる初代ブラックホールの形成・進化過程の理解においても低質量超大質量ブラックホールは重要な鍵となる。 これまでに、SDSS などの大規模サーベイにより、低質量超大質量ブラックホール探査が進められてきたが (e.g., Greene & Ho 2004, 2007)、我々は、時間的にコストのかかる分光観測をせずに、ブラックホールの可視光での短時間変動という指標を用いてブラックホール質量を見積もる、効率的な方法を提案している。我々の観測により、短い時間変動を示す天体が、実際に低質量超大質量ブラックホールであることが確認できた例もある。(Morokuma et al., 2016) これまでに、X 線、可視光領域で、ブラックホール質量と変光の時間変動スケールとの間に相関があることがわかっているが (Kelly et al., 2009, 2013)、可視光領域での低質量側の相関は未だに調べられていない。本研究では、木曾シュミット望遠鏡で得られたデータを用いて、すでに低質量であることが確認されているブラックホールの光度の時間変動について議論する。

1. Greene, J. E & Ho, L. C. 2007, ApJ, 670, 92
2. Kelly, B. C., et al. 2013, ApJ, 779,187
3. Morokuma, T., et al., 2016, PASJ, 68, 40M

銀河 c16 活動銀河中心核における狭輝線領域の物理状態

米倉 健介 (鹿児島大学 M1)

活動銀河中心核 (Active Galactic Nucleus; AGN) は現在、観測可能な分解能よりも小さいためその構造はよく分かっていないが、AGN 周辺の星間ガスには光学的に分解出来る領域が存在する。その一つが狭輝線領域 (Narrow Line Region; NLR) である。しかし、NLR の密度や温度、電離度といった物理状態や輝線強度分布の構造の特徴は分かっていない。本研究では AGN の三次元輻射流体シミュレーションデータ (Wada 2012) を用いて NLR の分布と物理状態を求めた。シミュレーションからブラックホール (BH) 周辺の星間ガス (トーラス) の密度構造と温度、速度構造が分かっている。このデータと降着円盤から観測面まで伝搬する電磁波を求めるために光電離シミュレーションソフトウェア CLOUDY を用いて放射輸送方程式を解いた。これにより電離ガスに対する輝線強度を得た。NLR は電子密度が十分に低いので禁制遷移が衝突によって抑制されず、禁制線を放射することが分かっている。CLOUDY で得られた禁制線を含む特定の輝線の強度比 ($[\text{OI}]/\text{H}\alpha$ - $[\text{OII}]/\text{H}\beta$) を使って分光診断 (BPT) 図 (Kewley et al. 2006) を作成することで NLR がシミュレーション中に再現出来たことを確認した。観測面において NLR であると診断された領域に対して $[\text{OIII}]$ 輝線強度の空間分布図を CLOUDY の計算結果より作成した。この $[\text{OIII}]$ 輝線強度が比較的高い領域に対する密度と温度、電離度を元のシミュレーションデータより得た。これにより NLR の物理状態を特徴付けることが出来た。本講演では NLR の密度、温度、電離度の特徴を述べる。

1. Wada, K. 2012, ApJ, 758, 66
2. Kewley, L. J. et al. 2006, MNRAS, 372, 961

銀河 c17 COSMOS 領域における low redshift $[\text{OII}]$ emitters の統計的性質

西塚 拓馬 (東北大学天文学専攻 M1)

ハッブル宇宙望遠鏡基幹プログラムである COSMOS プロジェクトの一環として 12 枚の中帯域フィルターを用いたすばる望遠鏡 Suprime-Cam の撮像観測に基づき、約 6000 個の強輝線銀河を観測した。その中には活発な銀河形成を終えパッシブのフェーズに移行していると考えられる銀河も発見されている。今回のそのような銀河が発見された COSMOS 領域で約 4700 個の low redshift の $[\text{OIII}]$ やパルマー系列の輝線が強い天体に着目しデータを調べたところ、EW が大きな天体が数千のオーダーで検出できた。その中でも、 $[\text{OIII}]$ 輝線の天体に着目し以下の基準で選別した: (1) SED fitting の reduced χ^2 0.5 (2) SED fitting の際、upper limit を用いない (3) 既存の photo-z カタログの photo-z との差が 0.05 以下。その結果、98 個の $[\text{OII}]$ emitter が得られた。それらの天体に対して光度、EW などの観測量の分布、また SED fitting から得られた SFR の分布などについて考察を行った。

1. Yoshiaki Taniguchi, Masaru Kajisawa, Masakazu A. R. Kobayashi, Tohru Nagao and other 19 author

銀河 c18 Cosmic Galaxy-IGM HI Relation at $z \sim 2-3$ Probed in the COSMOS/UltraVISTA

向江 志朗 (東京大学宇宙線研究所 M2)

宇宙の大規模構造とバリオンガス、特に銀河と銀河間物質の広範囲な分布を描くことは、銀河形成や銀河と銀河間物質 (Intergalactic medium; IGM) の間で行われる物質循環の理解への手がかりとなる。IGM は希薄で直接的な観測で捉えることが難しいため、クエーサーや銀河のような明るい背景光源の分光スペクトルに現れる Ly α forest と呼ばれる中性水素 (HI) ガス吸収線と重元素ガスの吸収線で調べられる。これまで背景クエーサーの視線周囲に限って行われた分光探索により銀河と銀河間空間の中性水素および重元素ガスの関係が調べられ、ガスと銀河までの距離によるガス吸収量の依存性が報告された。ただしクエーサーは個数密度が低いため、これらの研究では 3 次元構造は調べられなかった。一方でクエーサーより個数密度の高い背景銀河を用いた分光探索により銀河と HI の 3 次元構造を明らかにする研究が可能となった。しかし、これらの観測研究は 1 deg² 程度の範囲に留まる。大規模構造における物質循環を調べるためには、これを越えたスケールで銀河-IGM 関係を探る必要がある。

本研究では COSMOS/UltraVISTA 領域 (1.62 deg²) において $z \sim 2-3$ の測光観測された銀河約 13000 天体と SDSS-III の背景クエーサーの分光データを組み合わせた広領域サンプルを構築し、 $z \sim 2-3$ の銀河密度超過量と HI ガス (damped Ly α system を除く) 吸収量の空間相関を調べた。その結果、銀河密度超過量と HI ガス吸収量には有意度 90% で相関があることが分かった。これは HI ガスの超過領域で銀河が形成されていることを示唆する。宇宙論的流体シミュレーションの理論モデルを構築し観測と同様の解析を行ったところ、同程度の相関が再現された。更に、観測結果からは銀河密度超過または HI ガス吸収量が極めて大きい (小さい) 値を示した領域が 4 つ見つかった。観測結果と理論モデルとの比較からこれら 4 つの領域の物理的起源について議論する。

1. Lee et al. 2014, ApJ, 795, L12

銀河 c19 宇宙背景放射の観測で探る銀河形成

佐野 圭 (宇宙科学研究所 東京大学理学系研究科天文学専攻 D3)

銀河形成を探る方法としては、個々の銀河観測によるものが主流であるが、紫外線から赤外線までの波長における宇宙背景放射を観測する方法もある。宇宙背景放射には個々の銀河観測では見落とされてしまう、暗い銀河や遠方の銀河を含むあらゆる光が含まれるため、銀河形成史に加えて素粒子の崩壊に伴う未知の放射などを包括的に明らかにできる可能性がある。宇宙背景放射を測定するためには、その前景放射となる銀河系内の星や、星間ダストによる散乱光、熱放射を正確に除去する必要がある。以前の研究では、特に近赤外線域でそれら前景放射の評価が不十分であったため、我々は近年得られた星のカタログなどを利用して、あらゆる前景放射を考慮し尽くした再解析を行った。その結果、1-2, mmum の波長域では、宇宙背景放射の輝度は系外銀河の積算光の数倍に達することを示した。これは通常の銀河以外の未知の放射源が宇宙に存在することを示唆する。近年の理論計算によると、初代星などの遠方宇宙に存在するとされる天体はその超過成分には寄与しないと予想されるため、

超過成分の起源は近傍宇宙にある可能性が高い。考えられる放射源のひとつとしては銀河同士の衝突、合体時にその周囲にばらまかれた星々である銀河ハロー浮遊星が挙げられるが、それだけで超過成分を説明するのは困難であり、現状では超過成分の起源は謎である。

1. Sano et al. 2015, ApJ, 811, 77
2. Sano et al. 2016, ApJ, 818, 72

.....