

銀河・銀河団分科会

---

松田 有一 氏 (国立天文台)

7月25日 15:45 - 16:45 B会場

## 「天文学者と海賊」

まずはクイズです。天文学者と海賊の共通点は何でしょうか？答えはどちらも望遠鏡を覗くです。では何のために望遠鏡を覗くのでしょうか？おそらくどちらも宝探しのためと答えると思います。とは言え、現在の望遠鏡（すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡など）には覗くところはないので、望遠鏡は天文学者にとっての海賊船と言えるかもしれません。

私はこれまでいろいろな望遠鏡を使って銀河形成の観測的研究を進めて来ました。小さい頃からなぜか望遠鏡に惹かれて、宇宙の図鑑の望遠鏡ランキングをずっと飽きずに見ていた記憶があります。講演では、これまでの研究で使ってきた望遠鏡の話を紹介して、さらにこれから使えるようになる望遠鏡でどのようなことが見えて来そうかをみんなと一緒に考える機会にできればと思います。

---

田中 賢幸 (国立天文台)

7月26日 17:15 - 18:15 B会場

## 「巨大銀河の形成と進化」

遠方宇宙における巨大銀河の形成と進化に関する理解は近年急速に深まった。同時にいくつかの謎も出てきている。講演では私自身の研究を紹介しつつ、近年の発展をレビューし現状をまとめてみたい。また、若手研究者の今後を見越して、現在進行中/計画中の大規模サーベイ観測についても簡単に触れたいと思う。

## 銀河 a1 棒渦巻銀河の棒部における星形成の抑制メカニズム

前田郁弥 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

渦巻銀河の腕部では、顕著なダストレーンが見られその部分に分子ガスが存在しそこで星形成が起こり、腕に沿って HII 領域が形成されている。しかし、棒渦巻銀河の棒部では顕著なダストレーンが見られ星形成の母胎となる分子ガスが豊富にあると思われるが、重い星の形成は見られない。何が棒部での星形成を抑制しているのか長年の謎となっている。最近の高空間分解能シミュレーションによって、腕部では分子雲同士が衝突し、星形成が誘発され重い星が形成されるが、棒部では分子雲衝突の相対速度が大きく、衝突している期間が短いため、重い星が形成されない可能性が指摘されている。このシナリオを検証するためには、棒部で重い星の形成が見られず腕部では星形成が見られる棒渦巻銀河を対象に、腕部と棒部での分子雲の相対速度を明らかにすることが必要である。

そこで本研究では、このような特徴を顕著に示すプロトタイプ的棒渦巻銀河 NGC1300(距離 20Mpc)、NGC5383(距離 35Mpc) の CO(1-0) 観測を野辺山 45m で行なった。その結果、棒部腕部共に CO 輝線を検出することができた。これまで HII 領域が見られない棒部での CO 検出はなかったが、本観測により棒部にも分子ガスが存在することが明らかになった。ビーム内の CO 輝線の速度幅は、棒部の方が腕部に比べて有意に大きかった。ビーム内での速度場が反映されている可能性もあるが、この結果は棒部での分子ガス雲の相対速度が大きい可能性を示唆していると考えられる。今後は ALMA によって個別の分子ガス雲を分解することによって、相対速度分布を明らかにできればシナリオの当否が検証されると期待される。このような知見は、高赤方偏移における銀河内での星形成を理解する上でも重要な鍵を与えることになるであろう。

- 1 Fujimoto et al. 2014, MNRAS, 439, 936
- 2 Fujimoto et al. 2014, MNRAS, 445, L65

## 銀河 a2 2つの核を持つ超高光度赤外線銀河 Mrk 463の広帯域 X 線スペクトル解析

山田智史 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

銀河中心には超巨大ブラックホール (Supermassive Black Hole; SMBH) が普遍的に存在する。銀河バルジと SMBH の質量には強い相関があり (Magorrian et al. 1998)、これは、銀河とその中心の 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している。この共進化を解明する為に、赤外線で見ると輝く ( $L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$ ) 超高光度赤外線銀河 (Ultraluminous Infrared Galaxy; ULIRG) に着目する。この天体は合体途中の銀河だと考えられ、大量のガスとダストの中に強力なエネルギー源が埋もれている。エネルギー源は主に、濃いガスによる激しい星生成と、SMBH が大量のガスを吸い

込むことで明るく輝く活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) が考えられる。星生成は銀河進化の現場であり、AGN は SMBH の成長の現場である。ゆえに、銀河と SMBH の共進化を解明する為には、ULIRG を理解することが非常に重要である。しかし、ULIRG は厚いガスとダストに覆われており、内部を調べることは容易ではない。そこで、我々は透過力の高い硬 X 線 ( $> 10 \text{ keV}$ ) を用いることにした。

本研究では、3つの X 線衛星 (*NuSTAR*, *XMM-Newton*, *Chandra*) を用いて、近傍 ULIRG であり中心に 2つの AGN を持つ Mrk 463 (Mrk 463e, Mrk 463w) の広帯域 X 線スペクトル (0.6–70 keV) を取得した。SMBH、降着円盤、ダストトラスから成る AGN モデル (Ikeda et al. 2009) を用いた輻射輸送計算結果と観測スペクトルを比較することで、それぞれの AGN について、正確な X 線光度を求めた。さらに、Mrk463e については SMBH の成長度合いの指標 (Vasudevan et al. 2007) である、 $[\text{O IV}](26\mu\text{m})$  に対する X 線光度の比を調べることができた。その結果、Mrk463e が通常の AGN に比べて急激な成長段階にあることが示唆された。今後は、これらの AGN の急成長と激しい星生成の関係を調べていくことで、銀河と SMBH の共進化の解明を目指す。

- 1 Magorrian, J., Tremaine, S., Richstone, D., et al. 1998, AJ, 115, 2285
- 2 Ikeda, S., Awaki, H., & Terashima, Y. 2009, APJ, 692, 608
- 3 Vasudevan, R. V., & Fabian, A. C. 2007, MNRAS, 381, 1235

## 銀河 a3 近傍 LIRG の空間分解された星形成活動 大橋宗史 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M2)

特定の赤方偏移における銀河の大規模サンプルを構築し、統計的な議論を行うことで銀河の普遍的な性質を探ることは極めて重要な研究手法の 1つである。このような研究の中で発見された性質の 1つとして、銀河の質量と星形成率の間の相関である Star Forming Main-Sequence (SFMS) がある。SFMS はこれまでに様々な波長、様々な赤方偏移で調べられてきた。そもそも星形成活動とは様々なスケールの物理の組み合わせである。そこで近年、星形成を担う物理機構の解明に向けた近傍銀河の観測から、1kpc 以下のスケールにおいても空間分解された SFMS が存在していることが明らかになってきた。しかし近傍で最も激しい星形成活動を行っている Luminous Infrared Galaxy (LIRG) では大量のダストが存在するために減光が激しく可視光での観測が困難であり、一方で減光に強い波長帯では空間分解能を稼げないため、空間分解された SFMS についての研究が無かった。そこで我々は水素再結合線の  $\text{Pa}\alpha(\lambda 1.875\mu\text{m})$  を用いることでそれらの課題を克服し、LIRG における空間分解された星形成活動を調べた。

結果、LIRG は global な性質として近傍 SFMS よりも SFR の高い側に offset しているだけでなく、空間分解された SFMS も近傍のものよりも SFR の高い側に offset していることが明らかになった。さらに LIRG のサンプルを interacting/isolated に分類したときに interacting LIRG は isolated LIRG よりも 0.3dex 程度高い specific SFR ( $=\Sigma_{\text{SFR}}/\Sigma_{M_*}$ ) を有していることが明らかになった。本講演ではその原因について、分子ガス面密度について触れながら議論する。

- 1 Cano-Diaz et al., ApJL, 821, 2, L26 (2016)
- 2 Maragkoudakis et al., 466, 1192 (2017)
- 3 Pereira-Santaella et al., 587, A44 (2016)

## 銀河 a4 Plane of Satellites の力学安定性について 宮川銀次郎 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 M1)

The Pan-Andromeda Archaeological Survey によって M31 に付随するいくつかの衛星銀河が特定の平面上に分布する特殊な構造 (Plane of Satellites; PoS) が存在し、それを構成する衛星銀河は PoS 面上を一定方向に軌道運動していることが示唆された (Conn et al., 2013, ApJ, 766, 120; Ibata et al., 2013, Nature, 493, 62). 多数の衛星銀河が母銀河の周りの平面上を軌道運動している場合、衛星銀河同士の合体や変形が起きる可能性がある。したがって、PoS 上での衛星銀河間相互作用や力学的安定性が重要となる。そこで本研究では、PoS を構成する衛星銀河の軌道運動を見積もるとともに、2 つの衛星銀河の近接相互作用に注目し、また PoS 上で衛星銀河同士が合体する距離についての条件を明らかにした。

本研究では PoS 母銀河である M31 に付随する Dark Matter Halo (DMH) には外場として NFW profile (Navarro et al., 1996, ApJ, 462, 563) の密度分布を仮定し、衛星銀河には N 体粒子で構成した 2 つの Plummer モデルを準備した。さらに DMH 内に配置した Plummer 球には DMH から受ける重力と釣り合う回転速度を与え、銀河中心からの距離と衛星銀河間の距離を変えながら粒子分布の時間変化を調べた。また、初期の衛星銀河の位置と銀河の 2 体相互作用に関する条件を解析的に求めたうえで、それを N 体シミュレーションによって確認した。PoS を構成する衛星銀河の回転速度は DMH のスケール長 (34.6kpc) 付近で最も大きく ( $\sim 200\text{km/s}$ )、10Gyr までの回転回数は 200kpc 以内で 1 回以上となった。また、銀河中心からの距離と衛星銀河間の距離に対する Plummer 球の合体条件は衛星銀河間の最小距離が 7.5~12.5kpc 以下であることがわかった。さらに、このような合体条件をもつ衛星銀河同士の遭遇回数が最低 1 回となるには 12.5Gyr 程度必要であり、宇宙年齢のタイムスケールで PoS 上で衛星銀河同士の合体が起きることを示唆した。

- 1 Conn et al., 2013, ApJ, 766, 120
- 2 Ibata et al., 2013, Nature, 493, 62

## 銀河 a5 Lagrange 的手法を用いたシミュレーション における resolution 制限

山本泰義 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

銀河進化の理論研究において、観測では実際に得ることのできない銀河の長時間進化を調べることが可能であるという点で宇宙流体シミュレーションは重要な役割を果たす。Lagrange 的手法を用いたシミュレーションでは、流体は粒子分布によって表現される。各流体粒子は質量、速度、内部エネルギーの他に決まった近傍粒子数  $N_{\text{NEIB}}$  を含む最小距離である kernel size を持っている。また、物理量は kernel function と呼ばれる kernel size に依存する関数によって重み付けされ表現される。この手法を用いる際、対象とする現象を描写するために十分な粒子数を用いなかった場合、物理的に正しい計算結果が得られていない可能性がある。このことを検証するために様々なテスト方法が考案されてきた。その一つとして、重力収縮による構造形成シミュレーションを行う上で必要な resolution を評価する Jeans test (Hubber et al. 2006) が挙げられる。このテスト法には、初期条件における密度揺らぎのスケールと Jeans 波長の比に応じて振動と重力収縮の 2 つのモードの解析解が存在する。複数の resolution におけるシミュレーション結果の振る舞いを解析解と比較することにより、正しい計算を行うために必要な resolution を評価することができる。

本研究では、GIZMO (Hopkins et al. 2015) という一般公開されているコードで Jeans test を行なった。GIZMO には複数の異なる Lagrange 的流体手法が内装されており、それらの流体手法に起因する Jeans test の解析解への収束性を比較した。また、kernel function の表式を変化させた場合に Jeans test の結果にどのような違いが生じるのかを検証した。その結果、以下に示す 3 つが判明した。

1. resolution ( $=$ 流体粒子の平均直径/密度ゆらぎのスケール) は少なくとも 0.25 以下である必要がある。
2. kernel function が高次であるほど解析解によく収束する。
3. Traditional SPH (TSPH), Pressure SPH (PSPH), Meshless Finite Mass (MFM), Meshless Finite Volume (MFV) を用いた結果を比較すると TSPH と PSPH の結果に差は無く、MFM や MFV に比べて解析解によく収束しているように見えるが別の値に収束している可能性がある。MFV より MFM の方が解析解に近い値となる。

- 1 Hubber, D. A., Goodwin, S. P., & Whitworth, A. P. 2006, A&A, 450, 881
- 2 Hopkins P. F., 2015, MNRAS, 450, 53

## 銀河 a6 すざく衛星と Chandra 衛星を用いた M31 中心領域の高温 ISM 中に存在する重元素の空間分布解析

## 田頭政輝 (東京理科大学 松下研究室 M1)

銀河は恒星や星間物質や暗黒物質等が重力によって拘束された天体であり、銀河内は X 線を放射する数百万度の高温ガス (ISM) で満たされている。この ISM 中の重元素由来の特性 X 線放射に着目することで、銀河中に存在する元素量やその分布等を測定することが可能である。宇宙空間の重元素はビッグバン後の星形成過程の中で生成されるものであるため、ISM 中の元素組成を測定することは銀河における星形成史に知見をもたらす。特に O, Mg や Si, Fe のアバンダンスは、それぞれ過去の II 型や Ia 型超新星爆発からの寄与を説明する。

アンドロメダ銀河 (M31) は我々の天の川銀河近くに存在し、また天の川銀河と同じく渦巻銀河であるという特徴を持つ。すなわち天の川銀河の仮想観測サンプルとして M31 は大きなアドバンテージを持つのだが、過去の調査では中心数分領域の ISM からの X 線放射の存在が確認されたものの、元素の空間分布を求めるまでには至らなかった。

本研究では、M31 中心領域を銀河中心から外側へ 4 つの楕円領域に分割することで ISM 中に存在する重元素に焦点を当て、空間分布解析を行った。ISM からの X 線スペクトルを解析するにあたり、低エネルギー側で X 線検出精度の良い「すざく」衛星の観測データを用いて得られたスペクトルに、空間分解能の良い「Chandra」衛星の観測データを用いて測定された X 線連星系等の点源からの影響を加味することで、ISM 本来の X 線スペクトルを精度良く解析した。本講演では M31 中心のそれぞれの領域における重元素のアバンダンスから推定される星形成史について議論する。また M31 中心領域における ISM の放射モデルについて示唆された複数の有意なモデルについて議論する。

## 銀河 a7 赤外線銀河群 Arp 318 の広帯域 X 線スペクトル解析と隠された活動銀河核の発見

小田紗映子 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

銀河バルジと中心にある超巨大ブラックホール (Super Massive Black Hole; SMBH) の質量には強い相関があることが知られており、銀河と SMBH は互いに影響しあって「共進化」してきたことが示唆されてきた。共進化を説明するシナリオとして、ガスの豊富な銀河同士が衝突・合体して楕円銀河まで進化するというメジャーマージャー仮説がある。合体によって銀河中 ( $\sim$  数 kpc) に存在する大量のガスが中心のコンパクトな領域 ( $\sim$  数 pc) まで落ち込み、SMBH への急激な質量降着現象である活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) が引き起こされる。同時に、衝突によるガス密度の増加で爆発的な星形成が進み、SMBH を宿主母銀河もまた急速に成長する。したがって、銀河と SMBH の共進化を考えるうえで、合体前後における銀河の性質を理解することは非常に重要である (Ricci et al. 2017)。合体前後の銀河は大量のガスやダストに覆われ、可視光観測では中心を見通すことは難しい。そこで、透過力の強い硬 X 線 ( $>10$  keV) を用いた観測により、ダストに隠され

た AGN を見つけ出しその性質を明らかにする。

本研究では、主に 4 つの銀河からなる近傍銀河群 Arp 318 を対象として、X 線観測による AGN 探査を行った。Arp 318 はガスやダストが豊富に存在することによって赤外線では明るく輝き、その一部は銀河合体の初期段階にあたると思われる。我々は X 線衛星 *NuSTAR*, *Chandra*, *XMM-Newton* の観測データを用いて広帯域 X 線スペクトル (0.3–49 keV) を取得し、4 つの構成銀河のうち少なくとも 2 つに隠された AGN が存在することを裏付けた。さらに、数値トラスモデル (Ikeda et al. 2009) と比較することによって過去最高精度で AGN 光度とトラスの柱密度を推定し、ダストトラスの厚みが 15 年間で変動しているという興味深い結果を得た。本講演では解析の詳細に言及するとともに、多波長観測間の比較を通して AGN の性質についても議論する予定である。

- 1 Ricci, C., Bauer, F. E., Treister, E., et al. 2017, MNRAS, 468, 1273
- 2 Ikeda, S., Awaki, H., & Terashima, Y. 2009, ApJ, 692, 608

## 銀河 a8 ファラデーモグラフィを用いた銀河磁場解析

江口開哉 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

多くの天体は磁場を伴っている。例えば、渦巻銀河にはその渦の形に沿った大局的な構造を持つ磁場が存在していることが観測から明らかになっている。そして、天体に付随する磁場を解析することにより、その天体の進化の過程や構造を解き明かすことができると言われている。磁場の解析手法として近年ファラデーモグラフィと呼ばれる手法が注目されている。この手法は、観測量である偏波スペクトルから視線方向の磁場および偏波源の分布の情報を持ったファラデースペクトルを構築する手法である。この手法が確立されることによって磁場の三次元構造を手に入れることが可能になる。

ファラデーモグラフィによる磁場解析には大きく分けて 2 つの課題がある。1 つ目は観測された偏波強度からファラデースペクトルをいかに正確に構築するかという課題で、2 つ目は得られたファラデースペクトルからいかにして磁場の情報を抽出するかという課題である。ファラデースペクトルは磁場の情報を持っているが、直接的に実空間における磁場の空間分布の情報を表しているわけではないため 2 つ目の課題が発生する。本研究は 2 つ目の問題に焦点を当てている。

ファラデースペクトルの解釈を行う先行研究として、face-on の現実的な渦巻銀河のモデルから解析的にファラデースペクトルを計算し、その形を特徴付ける統計量である幅、歪度、尖度から磁場の情報を引き出す研究がある。今回は先行研究を拡張した研究を行い、銀河面に垂直な方向だけでなくあらゆる視線方向に関して、また、ファラデースペクトルの位相である偏波角の影響を考慮して解析的にファラデースペクトルの計算を

行い、先行研究との違いを調べた。

- 1 Brentjens, M. A., & de Bruyn, A. G. 2005, A&A, 441,1217
- 2 Akahori, T., Ryu, D., Kim, J., & Gaensler, B. M. 2013, ApJ, 767, 150
- 3 Ideguchi et al. 2017

## 銀河 a9 Blue horizontal-branch stars を用いた銀河系ハロー構造の解明

福島徹也 (東北大学天文学専攻 M1)

円盤銀河は一般的にバルジ・ディスク・ハローにより構成されている。この中でもハローには古い星が多く、それらの星は銀河系形成から間もない力学情報を保存しており、これらの星の空間分布・力学情報を得ることは銀河形成の研究において非常に重要である。現在、ハローの空間分布を明らかにするために RR-Lyrae, blue horizontal-branch (BHB), red-giant-branch (RGB) といった明るい星がトレーサーとして使われるが、本研究では Subaru Strategic Program (SSP) により Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いて得られた遠くの BHB (<300kpc) を用いて研究を進める。この距離は銀河系の降着史に関わる星ハローの端に達している可能性があり、銀河系の形成史を知る上で大きな手がかりになる。

BHB の選択は  $u-g$  vs  $g-r$  の 2 色図を用いてバルマー線の違いにより行うのが一般的であるが、今回用いた HSC のデータには  $u$ -band が無いため、代わりに Vickers et al. 2012 を参考にして  $z$ -band におけるパッシェン系列の違いにより BHB を選択する。しかし、Vickers et al. 2012 では SDSS のデータを用いているため、SDSS と HSC のフィルターの違いを考慮する必要がある。そこで今回用いた HSC のデータと SDSS のクロスマッチして一致した天体を基準として HSC のフィルターシステムを用いた新たな BHB の選択条件を決めた。

ハローの構造はよく軸比を考慮したべき乗でフィットするため、新たな選択方法により選ばれた 2282 個の BHB に対して最尤法を用いてべき乗におけるパラメータを推定した。その結果得られたパラメータを用いて銀河系星ハローの構造・形成過程について議論する。

- 1 Deason, A. J., Belokurov, V., & Evans, N. W. 2011, MNRAS, 416, 2903
- 2 Vickers, J. J., Grebel, E. K., & Huxor, A. P. 2012, AJ, 143, 86
- 3 Xue, X.-X., Rix, H.-W., Yanny, B., et al. 2011, ApJ, 738, 79

## 銀河 a10 主成分分析を用いた矮小銀河サイズのサブハローの性質解析

## 金城和樹 (千葉大学院融合理工学府数学情報科学専攻情報科学コース石山研究室 M1)

現在、我々の銀河系において約 40 個の矮小銀河が観測されているが、これらの形成進化や銀河系形成史との関係は十分に解明されていない。矮小銀河は、サブハローと呼ばれるダークマターの局所密度が高いシステムに所属する。そのため、銀河の形成や進化がそれらをホストするハローの性質に依存するのと同様に、矮小銀河の形成にはサブハローの性質が重要であると考えられる。

そこで、本研究では矮小銀河の形成や進化を理解するために、銀河系サイズハローに存在するサブハローの性質を統計的に調べた。まず、ボックスサイズ  $32\text{Mpc}/h$ 、質量分解能  $3.28 \times 10^5 M_\odot/h$  の高分解能宇宙論的  $N$  体シミュレーションから  $z=0$  において銀河系程度の質量を持つハローの中に存在するサブハローを抽出し、質量、質量の中心集中度、真球度、スピンパラメータ、親ハローの半径内に入った時の赤方偏移、親ハローに対する動径方向速度、接線方向速度、相対距離などの多数の特徴をそれぞれパラメータ化した。そして、これらのパラメータを基に主成分分析法により導出した主成分軸と各パラメータ間の相関を調べた。

その結果、寄与率の大きい 2 つの主要な主成分軸が存在した。第一主成分軸は全体の約 3 割程度の情報を保有し、質量の中心集中度、真球度、スピンパラメータなどのハローの内部構造を記述するパラメータと比較的相関が強い。一方、約 2 割程度の情報を保有する第二主成分軸は親ハローの半径内に入った時の赤方偏移、親ハローに対する接線方向速度、相対距離などのサブハローの進化を記述するパラメータと比較的強い相関を示す。この第二主成分軸は親ハローのみの主成分分析を行った Jeon-Daniel et al. (2011) では見られなかった特徴を持つ軸で、サブハローに特有の性質をよく表現している。本講演では解析の詳細やサブハローの性質の傾向を報告するとともに、矮小銀河や銀河系の銀河形成との関連について議論する。

- 1 Ramin A. Skibba et al. MNRAS, 416, 2388 (2011)
- 2 Akila Jeon-Daniel et al. MNRAS, 415, L69 (2011)
- 3 Miguel Rocha et al. MNRAS, 425, 231 (2012)

## 銀河 a11 DIOS 衛星によるミッシングバリオン検出可能性の検討

泊口万里子 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙の組成のうちバリオン (通常物質) が約 4% を占めるが、近傍宇宙ではその半分程度がまだ見つからない。これはミッシングバリオン問題と呼ばれ、その解決は宇宙の構造形成の歴史や化学進化の理解に繋がるため重要である。 $\Lambda$ -CDM モデルに基づいた宇宙論的シミュレーションによって、ミッシングバリオンの多くが温度  $10^5 - 10^7$  K の銀河間中高温物質 (Warm-Hot Intergalactic Medium; WHIM) として大規模構造のフィラメントに沿って存在することが予言

されている。また、WHIM は高階電離した酸素を多く含むと考えられ、実際に紫外線や軟 X 線領域で酸素の吸収線や輝線の観測が試みられている。しかし、WHIM は淡く広がったプラズマであるため、現行の X 線衛星による確実な検出は難しい。

本研究は、将来のミッシングバリオン探査に向けて、高分解能軟 X 線スペクトルの解析手法を開発し、WHIM の検出可能性を検討することを目的とする。DIOS 衛星は広い視野と有効面積を持つ X 線望遠鏡と、優れたエネルギー分解能 ( $\Delta E \sim 3 \text{ eV}$ ) を持つ TES 型マイクロカロリメータを搭載する計画である。詳細な化学進化モデルを考慮した宇宙論的流体計算 (Osato, K.) に基づいて、DIOS の輝線観測シミュレーションを実行し、エネルギースペクトルのモデルフィットから赤方偏移や温度、重元素量、水素密度を求めた。観測視野内に複数の WHIM 成分が視線方向に重なる可能性があるため、この解析においては、特に強い輝線である OVII、OVIII 輝線を手がかりとし、多成分モデルを用いた。その結果、ある  $36 \times 36 \text{ arcmin}^2$  領域の  $25 \text{ ksec}$  の観測から、水素の overdensity  $\Delta = 100$  の WHIM を  $5\sigma$  の有意性で検出できることが分かった。今後は、バックグラウンドの影響も考慮したより現実的な観測シミュレーションを行い、広域のデータを系統的に解析することで、WHIM の検出可能性や温度、密度などの定量評価を進める。

1 Cen, R., and Ostriker, J., APJ 514:1-6 (1999)

## 銀河 a12 IRSF 望遠鏡を用いた SgrA \* のガス雲降着現象の観測 高橋美月 (東北大学天文学専攻 M1)

我々の住む銀河系の中心には、いて座 A\*(Sagittarius A\*; Sgr A \*) と呼ばれる超大質量ブラックホールが存在している。ブラックホールそのものを観測することはできないが、ブラックホールの重力を受けて周囲を運動している天体や、ブラックホール近傍の降着現象による放射などからその存在を証明することができる。Sgr A\*にも周囲を運動する天体があり、そのうち「G2」と呼ばれるガス雲が、2013 年に Sgr A\*に最接近すると予測されていた [1]。このガス降着により Sgr A\*が大きく増光する可能性があり、これはダスト吸収を受けにくい近赤外線観測で検出可能である。

我々は、南アフリカ天文台サザーランド観測所にある InfraRed Survey Facility (IRSF) において、2013 年 2 月~2015 年 4 月の期間で断続的に Sgr A\*の近赤外線撮像観測を行った。Sgr A\*の明るさの時間変動を調査したところ、G2 による明確な増光は発見されなかった。本当に増光していない可能性もあれば、増光していても観測に用いた IRSF1.4 m 望遠鏡がそれを検出できていない可能性もある。

本研究では、IRSF 望遠鏡における Sgr A\*の検出限界を得ることを目的とする。また、観測画像の Sgr A\*に対して検出限界の超過の有無を検証する。各画像データに対し典型的な Point Spread Function (PSF) を作成し、様々な等級を仮定して Sgr

A\*の位置に人工的な点源 (artificial star) を埋め込むことで、Sgr A\*の明るさを変化させた。そのシミュレーション画像から基準の画像を差し引き、点源が 3 以上の等級で残っている場合を検出可能な等級とした。シーイングを 0.1 ピクセルごとに区切り、シーイングごとに検出限界を得た。その結果、Sgr A\*の明るさが検出限界を超えているものはないという結果を得た。

1 Takayuki R.Saitoh et al. arXiv:1212.0349 (2013)

## 銀河 a13 COSMOS 領域における low-redshift 強輝線天体サーベイ 平野洸 (東北大学天文学専攻 M1)

銀河が形成されてから今に至るまで、どのような進化過程を辿ったか解明することは現代天文学の課題の一つとなっている。銀河進化初期を知るためのアプローチとして私は矮小銀河の観測に注目した。矮小銀河の進化タイムスケールは長く、銀河形成初期時代に近い姿をしていると考えられているためである。そのため矮小銀河の観測・研究を行うことで銀河進化初期を知る手がかりが得ることができると考えられる。現在、近傍宇宙において矮小銀河が多数見ついている。しかしこのような銀河は非常に暗いため観測が難しく、特に遠方宇宙においてはまだまだあまり見つっていない。そこで本研究では星形成矮小銀河の特徴の一つである強輝線に注目し、矮小銀河の選出を行った。

本研究では COSMOS プロジェクトの一環として、すばる望遠鏡 Suprime-Cam の中帯域フィルターを用いて COSMOS 領域中の強輝線天体サーベイを行なった。このサーベイの結果、3097 個の強輝線天体を選出することができた。これらの天体について多波長測光データを用いて spectral energy distribution (SED) fitting 解析を行い、強輝線の同定と強輝線天体の物理量の算出を行なった。これらの天体の主な物理量は  $0.01 \leq z_{\text{phot}} \leq 1.22$ 、 $EW_0$  の中央値は 181AA、星質量の中央値は  $1.5 \times 10^8 M_{\odot}$ 、星形成率の中央値は  $0.8 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  と算出された。このうちの 87 天体は分光観測がされており、スペクトルデータの  $z_{\text{spec}}$  から、今回の SED フィッティングから得られた  $z_{\text{phot}}$  は精度よく算出されていたことがわかった。また今回得られたサンプルは、低質量かつ高い星形成率を示すような Blue Compact Dwarf (BCD) や高い  $EW_0$  を示す extreme Emission Line Galaxy (EELG) が多数含まれていることがわかった。

1 Taniguchi, Y., Scoville, N., Murayama, T., et al. 2007, ApJS, 172, 9

2 Ilbert O. et al., 2009, ApJ, 690, 1236

3 Lilly S. J. et al., 2007, ApJS, 172, 70

## 銀河 a14 $z_{\text{phot}} \leq 1.0$ における銀河の軸比分布とその進化

銀河の軸比を統計的に見ることで、銀河の三次元での形の分布を推定することが出来る。銀河の見かけの形を楕円としたとき、楕円の長軸を A、短軸を B とする。銀河の軸比とは長軸と短軸の比  $B/A$  のことである。先行研究により、円盤銀河をランダムな方向から見た時の軸比分布は平坦な形をとり、楕円体状の銀河をランダムな方向から見たときは  $B/A \sim 0.8$  をピークとする山型をとることが分かっている (Padilla & Strauss, 2008)。この原理を利用すれば、様々な銀河の軸比分布を調べモデルの分布と比較することで、その銀河集団の三次元での形状を推定することが出来る。Takeuchi et al. (2015) では、この方法を用いて  $0.5 \leq z_{phot} \leq 2.5$  の銀河の軸比分布を測定し、丸い円盤銀河が  $z_{phot} \sim 0.85$  付近で出現し始めることを明らかにしている。しかし、 $z_{phot} \leq 1.0$  における銀河の軸比分布の進化については詳しく調べられていない。また、星形成活動や星質量別の軸比分布の進化についても同様である。本研究は、 $z_{phot} \leq 1.0$  における銀河の見かけの軸比分布を星形成活動や星質量別に求めることで、星形成史や星質量集積史と銀河形状の関係性を明らかにすることを目的としたものである。

本研究では、COSMOS 領域の、 $0.2 \leq z_{phot} \leq 1.0$ ,  $M_V \leq -20$ ,  $M_{star} > 10^9 M_\odot$  の銀河をサンプル天体とし、その軸比を HST/ACS データを用いて測定した。また、 $sSFR > -10$  を star-forming 銀河、 $sSFR < -10$  を passive 銀河と定義しそれぞれについて軸比分布の進化を調べた。その結果、星形成別に軸比分布を見てみると passive 銀河は  $B/A \sim 0.8$  をピークとする山型の分布が確認され、star-formation 銀河は平坦な分布が確認された。さらにそれぞれの進化を見てみると、star-forming 銀河の軸比分布はほとんど変化を示さないのに対して、passive 銀河では  $0.6 \leq z_{phot} \leq 1.0$  から  $0.2 \leq z_{phot} \leq 0.6$  になるとよりフラットな銀河の割合が大きく増加することが分かった。さらに passive 銀河を質量別に見てみると、 $M_{star} > 10^{11} M_\odot$  の銀河集団では軸比分布はほとんど変化せず、 $10^{10} M_\odot \leq M_{star} \leq 10^{11} M_\odot$  の範囲で軸比分布が大きく変化していることが分かった。

- 1 Padilla & Strauss, 2008, MNRAS, 388, 1321
- 2 Takeuchi et al. 2015, ApJ, 801, 2
- 3 Binney & Vaucouleurs, 1981, MNRAS, 194, 679

## 銀河 a15 ダスト進化を取り入れた銀河スペクトルエネルギー分布モデルの構築

西田和樹 (名古屋大学、銀河進化学研究室 ( 研 D1))

銀河のエネルギースペクトル分布 (SED) からは、星間塵 (ダスト) 質量や、星形成率などの重要な物理量を引き出すことができる。従来の SED モデル (e.g. Noll et al. 2009) の多くでは、銀河系や近傍銀河で観測されたダストモデルを用いている。しかし、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、赤外線を再放射するだけにとどまらず、ダスト表面で水素分子を形成することで、ガスを冷却し、星形成を促進するなど、銀河の形成や進化に対し大きな影響を与える。そのため、ダストの空間分布、サイズ、組成を考慮しなければ、現実的に即した銀河の SED モデルを構築することはできない。近年、銀河スケールにおけるダスト進化モデルが確立されてきており (e.g. Asano et al. 2013a, 2013b, 2014) ダストの進化を取り入れた SED モデルの構築が急務である。

本研究では、ダスト進化を理論的に解いた Asano モデルを組み入れて、 $0.1 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$  (紫外線から遠赤外線まで) の波長域に対応した銀河進化 SED モデルを構築した。ダストの種類は炭素系ダスト、シリケート、多環芳香族炭化水素を考えている。ダスト温度は非平衡として、モンテカルロシミュレーションにより温度分布を計算した (Draine & Anderson 1985)。また、散乱についてダストの高密度領域を 1 つの巨大なダストと仮定するメガグレイン近似と、一次元円盤銀河の輻射輸送方程式 (Inoue 2005) を解く方法により、空間構造を直接解く場合に比べ計算コストの大幅な削減に成功した。これにより、赤外放射に注目した場合、銀河年齢 1–3 Gyr 程度で放射量のピークを持ち、その後は徐々に放射量が減少していくという特徴を持つことがわかった。本公演では本モデルについて詳しく紹介する。

- 1 Asano, R. S., Takeuchi, T. T., Hirashita, H., and Nozawa, T. MNRAS 440 134 (2014)
- 2 Inoue, A. K. MNRAS 359 171 (2005)
- 3 Draine, B. T. and Anderson, N. 292 494 (1985)

## 銀河 a16 クエーサーのカラーの光度依存性 和田一馬 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

クエーサーは活動銀河核の中でも最も明るく遠方でも観測できる天体である。クエーサーの紫外・可視光放射は、基本的には降着円盤からの放射であるため、標準降着円盤モデル (Shakura & Sunyaev, 1973) で説明できるはずだと考えられているが、母銀河や輝線、もしくはダスト放射の影響により標準降着円盤モデルによる観測 SED (spectral energy distribution, 多波長測光による広帯域エネルギー分布) の再現には未だ至っておらず、モデル予想よりもカラーが赤くなるということが知られている。Xie et al. (2016) では、分光スペクトルの解析により、この赤化の主な原因はダストだと主張している。しかし、ファイバー分光のスペクトルにより求めたカラーは、大気分散の影響のため、信頼性が低いという問題がある。

本研究では、スローン・デジタル・スカイ・サーベイの Stripe82 領域の多数回の測光データを用いて、カラーの明るさに対する依存性を確かめることを目標とする。測光データには、降着円盤、輝線、母銀河の放射などが含まれているが、主に変光するのは降着円盤成分なので、変光成分を抽出すれば良い。そこで、紫外・可視光 5 バンド SED の変光構造関数を取ることで、

変光 SED を得た。ダストの内縁半径はダスト主成分の昇華温度で決まっているため、明るいクエーサーほどダストが破壊され、カラーは青くなると予想できる。この SED に対しパワーローでフィッティングを行い、カラーを求めた。また SMC ダスト (Gordon et al.2003) を用いたモデルフィッティングも行い、減光量を求めた。その結果、明るいクエーサーのカラーは青く、減光量も少ないことが分かり、分光スペクトルのカラーよりも信頼度の高い測光データの変光 SED の解析でも Xie et al.(2016) と同様の結果を得た。

- 1 Shakura & Sunyaev 1973, A&A, 24, 337
- 2 Gordon et al. 2003, Apj, 594, 279
- 3 Xie et al. 2016, Apj, 824, 38

### 銀河 a17 Radio-loud AGN を持つ重力レンズ・サブミリ波銀河 MMJ0107 の CO 輝線エネルギー分布 李建鋒 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

近傍銀河における巨大ブラックホール (SMBH) の質量測定等から、銀河と SMBH は共に進化をしていることが示唆されているが、そのような共進化を引き起こす具体的な物理過程は未だに解明されていない。SMBH への質量降着率は宇宙における星形成活動 (宇宙星形成率密度) と同様に赤方偏移が 2-3 の時代に peak を迎えていることが知られている。従って、この時代における活動銀河核 (AGN) とその母銀河の星形成活動を調べることは、銀河と SMBH の共進化を理解する上で重要である。

最近、Herschel、Planck、SPT 等でミリ波サブミリ波帯広視野 survey が行われ、強い重力レンズにより増光されたサブミリ波銀河が続々と検出されている一方で、このうちに AGN を持つもの、特に radio-loud な AGN を有するものは、まだ殆ど知られていない。我々は、ASTE 望遠鏡での survey 観測で偶然発見された、重力レンズ・サブミリ波銀河 MM J01071-7302 に着目し、ALMA cycle 5 での観測提案を行っている。この天体は  $z = 2.766$ 、即ち宇宙における星形成率密度や質量降着率が peak を迎えている時期の銀河である。energy 分布 (SED) を調べた結果、radio excess を示す AGN が示唆されているため、極めて独特なターゲットである。

我々は、分解能 0.5 秒程度の 4 つの CO 輝線 (J=3-2, 5-4, 8-7, 及び 11-10) の観測によって、CO 輝線の energy 分布 (SLED) を測定することを提案している。これにより、高励起 CO 輝線で追跡される密度の高い星間物質が、AGN からの影響を受けているかどうかを確認すると共に空間的に分解した CO 輝線及びミリ波連続波の分布から、重力レンズの model を得ることができる。CO outflow を探査し、冷たい分子ガスに対する radio-mode feedback の影響を調べることもできる。講演では、重力レンズを受けたサブミリ波銀河や、爆発的星形成と AGN の共進化に関する最近の研究を概観した上で、提案し

ている ALMA を使った研究内容と期待される成果について報告・議論を行う。

- 1 M. J. F. Rosenberg et al. ApJ 801 72 (2015)
- 2 D. R. G. Schleicher et al. A&A 513 A7 (2010)
- 3 T. Takekoshi et al. ApJ 744 L30 (2013)

### 銀河 a18 Calculation of the Lyman-Continuum Photon Production Efficiency $\xi_{ion}$ of $z \sim 3.8-4.7$ Galaxies Based on the IRAC H $\alpha$ Fluxes HilmiMiftahul (東京大学 宇宙線研究所 M1)

Cosmic reionization is the transition from the neutral hydrogen in the IGM to the ionized state that we observed today, caused by the ionizing photons which have a wavelength shorter than 91.2 nm. There are still many uncertainties regarding the cosmic reionization, for example how was the mechanism and which source drives the reionization. One of the candidates of reionization source is star-forming galaxies. In order to verify that such galaxies are responsible for the reionization, we need some information about the ionizing photons emissivity, which can be determined by three parameters: the Lyman-continuum photon production efficiency  $\xi_{ion}$ , escape fraction  $f_{esc}$ , and UV luminosity density  $h_{UV}$ . We can derive the first one by comparing the H $\alpha$  fluxes and the UV-continuum luminosities, in a similar way as (Bouwens et al. 2016).

We used the spec- $z$  dropout galaxies from GOLDRUSH (Great Optically Luminous Dropout Research Using Subaru HSC) catalog (Ono et al. 2017) and select the data with  $z \sim 3.8-4.7$ , where the H $\alpha$  emission line falls into the IRAC channel 1 band (3.6  $\mu\text{m}$ ). We used the SPLASH (Spitzer Large Area Survey with Hyper-Suprime-Cam, PI: P. Capak) data to derive the H $\alpha$  fluxes by comparing the observed magnitudes in the IRAC channel 1 and channel 2 (4.5  $\mu\text{m}$ ), assuming that the continuum fluxes in both bands are same. By adopting the Calzetti dust law (Calzetti et al. 2000) to correct the measured H $\alpha$  fluxes and UV-continuum luminosities, we derived the  $\xi_{ion}$  values and compared it with the Bouwens et al. 2016.

- 1 R. J. Bouwens et al. ApJ 831 176 (2016)
- 2 Y. Ono et al. PASJ (2017) arXiv:1704.06004
- 3 D. Calzetti et al. ApJ 533 682 (2000)

### 銀河 a19 ALMA で探る high- $z$ 超 Eddington 降着クエーサーでの AGN フィードバック

山下祐依 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

近傍宇宙では、SMBH 質量とその母銀河のバルジ質量の間には強い相関 ( $M_{\text{BH}} - \Sigma$  関係) が観測されており、SMBH とその母銀河の共進化を示唆している。しかし、スケールの大きく異なる両者が互いに影響を及ぼし合いながら共に成長する過程は未だ解明されていない。

この問題を解く上で、高赤方偏移クエーサーは大変興味深い。近年の PdBI/NOEMA や ALMA を用いたミリ波/サブミリ波観測は、high- $z$  クエーサーの多くが、SMBH とその母銀河が共に急速に成長している、進化における重要な段階にあることを示唆している。また、high- $z$  クエーサーは近傍のクエーサーに比べて高い質量降着率をもつ傾向にあり (Jiang et al. 2007, De Rosa et al. 2011)、理論的にも、BH の進化において、Eddington 限界を超える激しい質量降着の重要性が示唆されている (Kawaguchi et al. 2004)。

本研究では、ALMA Cycle5 と ACA Cycle4 において、radio loud なクエーサーとしては最も遠方にある天体の一つ、J0131-0321 ( $z=5.18$ ) に対して、Band7 受信機を用いた [CII]158 $\mu\text{m}$  輝線と  $\lambda_{\text{obs}} \sim 1\text{mm}$  の連続光放射の観測を提案した。このクエーサーは、SDSS・WISE および JVLA で検出されており、極めて明るい ( $L_{\text{bol}} = 2.9 \times 10^{14} L_{\odot}$ )。MgII 輝線の分光から推定される SMBH 質量は  $2.7 \times 10^9 M_{\odot}$  に達し、Eddington 限界を超える ( $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} = 3.1$ ) 激しい質量降着が示唆されている (Yi et al. 2014)。ALMA での観測によって、極めて激しい質量降着をみせる SMBH がその母銀河に及ぼす影響を明らかにしたり、また、電波で強い連続光放射を背景光源とした吸収線を探査し、激しい質量降着をみせる SMBH 近傍の ISM の詳細な構造も探ることができると期待される。

本講演では、近年の高赤方偏移クエーサーの研究を議論した上で、今後の研究計画について述べる。

- 1 Jiang, L., et al. 2007, AJ, 134, 1150
- 2 Kawaguchi, T., et al. 2004, A&A, 420, L23
- 3 Yi, W.-M., et al. 2014, ApJ, 795, L29

## 銀河 a20 ずばる HSC による宇宙再電離期の LAE 密度超過領域探査

樋口諒 (東京大学 宇宙線研究所 M2)

宇宙誕生数十万年後の宇宙の晴れ上がり後、赤方偏移  $z \sim 6 - 10$  の間に銀河間の水素が再び電離を起こしたことが知られている。これを宇宙再電離 (以後再電離) という。再電離に関する問題の一つに、再電離の進み方のモデルの判定が挙げられる。

再電離の主要な電離源の候補に星形成銀河と活動銀河核 (AGN) の2つが知られる。どちらの電離源の再電離への寄与が大きいかにより、2つの再電離の進み方のモデルが予想される。星形成銀河は放出するエネルギーが低く、近傍の銀河の

高密度領域の水素のみ電離する。そのため星形成銀河の寄与が大きい場合は銀河の高密度領域で優先的に電離が進行する (Inside-Out モデル)。AGN は放出するエネルギーが高く、遠方の低密度領域まで電離光子を放出できる。よって AGN の寄与が大きい場合は電離水素の再結合率のより低い低密度領域で優先的に電離が進行する (Outside-In モデル)。

再電離モデルの判定に、我々は強い  $\text{Ly}\alpha$  輝線を発する星形成銀河である  $\text{Ly}\alpha$  emitter (LAE) のサンプルを用いた。 $\text{Ly}\alpha$  線が中性水素の散乱を受けやすいので、LAE は周囲の銀河間水素の電離比率を知ることに役立つ。

Inside-Out モデルにおいて、密集した LAE は電離バブルを形成し、 $\text{Ly}\alpha$  輝線の等価幅が増大すると考えられる。よって再電離期の  $\text{Ly}\alpha$  等価幅と LAE 密度超過 (周囲の LAE 密度と平均密度のずれ) の相関は強くなると予想される。我々はすばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ (Hyper-Suprime Cam, HSC) の約 14 (21) 平方度の狭帯域撮像データによる  $z = 5.7$  (6.6) の 594 (164) 個の LAE サンプルから  $\text{Ly}\alpha$  等価幅と LAE 密度超過の相関を調べた。その結果、この相関に有意な赤方偏移進化は見られず、Inside-Out/Outside-In モデルの判定はできなかった。原因に、現在の HSC の  $z \sim 6$  の LAE サンプルは  $\text{Ly}\alpha$  光度で明るいものに偏っており等価幅の不定性が大きいこと、または  $z \sim 6$  で再電離はほぼ完了しており、モデルの判定にはより高赤方偏移の LAE サンプルが必要であることが考えられる。今後 HSC により得られる  $z = 7.3$  の LAE サンプルで、再電離モデルの判定ができる可能性がある。

## 銀河 a21 RELICS 銀河団の質量モデリングと $z \gtrsim 6$ dropouts の星形成活動

菊地原正太郎 (東京大学 宇宙線研究所 M1)

本研究では El Gordo 銀河団領域において  $z \gtrsim 6$  銀河のサンプルを構築し、それらの星形成活動を考察する。

大質量銀河団による重力レンズ効果は、望遠鏡だけでは観測できないような高赤方偏移にある暗い銀河の観測を可能にする。 $z \gtrsim 6$  の遠方銀河を探査することは、まだ解明の進んでいない初期の銀河形成史や宇宙史を解明する上で大きな価値をもつ (Ishigaki et al. 2017)。RELICS プロジェクト (REionization Lensing Cluster Survey; PI: Coe & Bradave) は、重力レンズ効果を強く受けている 41 個の大質量銀河団領域を HST と *Spitzer* で深く撮像し、銀河団の背後にある  $z \sim (6-12)$  の高赤方偏移銀河を探査した。

本研究では HST の可視光・近赤外データを元に、El Gordo の領域に含まれる  $z \gtrsim 6$  dropout 銀河のサンプルを構築した。また重力レンズ効果解析ソフトウェアの glafic (Oguri 2010) を用い、RELICS に属する El Gordo 銀河団の質量分布モデルを決定した。モデルを元に、dropout 銀河の重力レンズ効果を受ける前の明るさが求められた。Dropout 銀河の星形成活動をより正確に見積もるためには、上記の解析に加えてより長波長での解析が必要になる。そこで HST に加えて、dropout 銀河の

ミリ波における対応天体を ALMA データを元に解析した。その結果 dropout 銀河の星形成活動の指標として、星形成率および IRX- $\eta$  関係が求められた。

El Gordo に対して上記のような多波長解析を行い、星形成活動を議論したのは本研究が初めてである。本研究の手法は将来の JWST データへの応用も期待される。発表では、他の RELICS 銀河団に対する質量モデリングおよび dropout 銀河サンプル構築の結果も併せて示す。

- 1 Ishigaki et al. 2017, arXiv:1702.04867
- 2 Ouchi, M. et al. 2010, ApJ, 778, 102
- 3 Zitrin, A. et al. 2013, ApJ, 770, L15

## 銀河 a22 直接温度法で解明する Ly $\alpha$ 輝線銀河の高電離状態

小島崇史 (東京大学 宇宙線研究所 D1)

銀河の星形成活動と銀河進化を理解する上で、星間ガスの金属量と電離パラメータ (単位ガスあたりの電離光子量を表す指標) は鍵となる物理量である。文献 [1] によると、 $z = 2$  の Ly $\alpha$  輝線銀河 (LAE) はライマンブレイク銀河 (LBG) よりも高い電離パラメータを持つ可能性が指摘されている。この結果が正しければ、初期宇宙の主要な銀河種族である LAE が、多くの大質量星を形成し、多量の電離光子を放射していた可能性を示唆する (文献 [2])。しかし、文献 [1] の測定方法には電離パラメータを過大評価する可能性があったため (例: 文献 [3])、文献 [1] は LAE の電離パラメータ増加を結論づけることまではできなかった。決定的な結論を得るためには、信頼性の高い測定手法である直接温度法による調査が必要であった。そこで我々は世界に先駆け、直接温度法による LAE/LBG 電離パラメータの調査を行なった。我々は、合わせて 35 個の典型的な  $z = 2$  の LAE/LBG からなるサンプルを構築した。これらの LAE/LBG に直接温度法を適用した結果、金属量  $12 + \log(O/H) = 8.05-8.14$ 、電離パラメータ  $\log_{10} q_{\text{ion}} = 7.67-8.23$  cm/s の値を得た。LAE と LBG の電離パラメータを比較すると、LAE は LBG よりも  $\sim 3$  倍高い電離パラメータを示した。次に、LAE/LBG を  $z = 0$  銀河と比較したところ、LBG は  $z = 0$  の電離パラメータと金属量の関係に従うが、LAE はこの関係から逸脱していることが明らかになった。このことは、LAE の電離状態が高いことだけでなく、LAE と  $z = 0$  銀河/LBG の電離状態との間に本質的な違いが存在することを示している。大質量星の増加や電離ガス構造の変化と関係があると考えられる。本研究は、信頼性の高い直接温度法を用いることにより、LAE が系統的に高い電離状態にあることを初めて裏付けた。

- 1 Nakajima, K., & Ouchi, M., 2014, MNRAS, 442, 900
- 2 Izotov, Y. I., Schaerer, D., Thuan, T. X., et al. 2016, MNRAS, 461, 3683
- 3 Kewley, L. J., & Ellison, S. L. 2008, ApJ, 681, 1183

## 銀河 a23 AKARI FIS データのスタック解析を用いた AGN 母銀河の星形成率の推定

森脇可奈 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

銀河とその中心にある超大質量ブラックホール (SMBH) との物理量の間には強い相関が見られることが観測的にわかっている。例えば、母銀河の星形成率とクエーサーの数密度の赤方偏移依存性は非常に似ており、これらが互いに相互作用を及ぼしながら進化してきたという共進化シナリオの強い証拠となっている。SMBH と母銀河との相互作用の一つに活動銀河核 (AGN) による母銀河の星形成率の抑制がある。銀河形成シミュレーションでは超新星爆発などによるフィードバックに加えて AGN フィードバックを考えないと、観測される星形成率を再現することができないことが知られている。シミュレーションにおけるフィードバックの寄与の大きさは光度関数等の観測に合うように決められることが多く、AGN の母銀河において直接星形成率を調べることが重要である。星形成は一般に可視光から紫外光の観測を元に見積もられるが、クエーサーを含む AGN の母銀河については、核の非常に大きな光度に紛れて可視光では観測が難しい。そこで母銀河の星形成率の見積もりには、遠赤外線におけるダスト放射が使われることが多い。ダスト放射は星形成率と強い相関があることが知られており、なおかつクエーサーは遠赤外線では比較的暗いためである。本研究では、SDSS によって得られた 10 万個に及ぶクエーサーカタログと赤外線天文衛星 AKARI による全天サーベイデータを用いて、母銀河における星形成率の推定を行った。赤外線では一般に個々の銀河は暗く観測することは難しいため、スタック解析を用いることで統計的にはあるが、クエーサー母銀河からのダスト放射を捉えることに成功した。本講演では得られた星形成率とクエーサー光度、SMBH の質量の関係を赤方偏移ごとに調べることで AGN と母銀河の AGN フィードバックの星形成率への影響に関して議論する。

- 1 Schneider et al. 2010, AJ, 139, 2360
- 2 Okabe et al. 2016, PASJ, 68, 17

## 銀河 a24 SDSS クエーサー吸収線系と広天域すばる銀河カタログを用いた銀河-MgII ガス関係の統計的研究

野沢朋広 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M2)

近年の N 体シミュレーションの発達によりダークマターが支配的な領域に関してはその進化・発展が詳細にわかってきている。しかし、銀河はダークマターのみならず、星や銀河内外のガス、すなわちバリオン成分も進化・発展に大きく寄与する天体であり、その形成史を第一原理的に解くには、膨大な計算コストが必要となる。また、様々な物理が複雑に絡み合っていることから理論的解明も非常に困難である。従って、このバリオン成分の描像を観測的に明らかにすることが銀河形成の理解に

において肝要である。特に銀河を一つの単位としてみたとき、銀河と銀河系外ガスの関係を解明することが議論の焦点となる

ガス雲は可視光を発しない非常に暗い天体である。従って、直接観測が難しい。そのため、ガス雲の背景クエーサーのスペクトルに現れる吸収線系を用いて間接的に観測するのが有力な手法である。本研究はクエーサーの吸収線系のカタログと、吸収線系と同じ赤方偏移にある候補銀河のカタログを用いて、ガス雲と銀河の相関を調べ、前景銀河のハロー領域におけるガス雲の分布や、ガス雲と銀河の物理量の関係を統計的に探るものである。

この研究では、候補銀河のカタログが重要となる。[1][2]では、Sloan Digital Sky Survey(SDSS)のデータを用いて銀河とMgII吸収線系の相関を計算し、冷たいガス( $T \sim 10^4\text{K}$ )の分布や性質を議論している。しかし、SDSSの銀河サンプルは浅いため、 $z \sim 0.5$ のような赤方偏移が小さい領域の議論しかできない。赤方偏移が大きな領域に議論を拡張するためには、広視野に渡る $z > 1$ の銀河を大量に含むサーベイが必要であり、SDSSの銀河サンプルは十分ではない。そこで、本研究ではすばるHyper Suprime-Cam(HSC)による深い銀河の撮像データを用いてガス雲と銀河の相関関係を調べる。そうすることで、SDSSのデータでは成し得なかった赤方偏移が大きい領域での議論が可能となる。本講演では、この結果について発表する。

1 Ting-wen Lan et al., 2014, ApJ, 795, 31

2 Guangtun Zhu et al., MNRAS, 2014, 439, 31393155

## 銀河 a25 suzaku 衛星による近傍銀河団外縁部の元素分布

平井真一 (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る。銀河団は宇宙年齢と比較しても十分長い時間をかけて形成されているため、宇宙の進化を調査する上で非常に有用な天体である。また、宇宙初期には重元素は存在しておらず、銀河内の恒星によって合成され超新星爆発によって銀河団ガス内に供給される。超新星爆発には主に白色矮星による炭素爆燃型の爆発と大質量星による重力崩壊型の爆発の2種類があり、鉄、ケイ素は白色矮星と大質量星の爆発の両方から生成されるのに対して、酸素やマグネシウムのほとんどは大質量星から供給される。このように爆発の種類によって供給する元素の種類が異なるため、銀河団ガス内の重元素についての解析は宇宙の元素合成史及び星形成史の解明にとっても重要である。その際に、重元素と構成銀河の光度の比(重元素質量銀河光度比)は、銀河光度が銀河の生成する重元素量と関係があることから、2種類の超新星爆発の寄与の評価をするときの良い指標となる。

すざく衛星はバックグラウンドが低いいため、銀河団外縁部のような比較的暗い領域の観測に適している。そこで、本研究ではすざく衛星の観測データを用いてケンタウルス座銀河団、ろ

座銀河団を始めとする複数銀河団に対する銀河団外縁部までの鉄やケイ素の空間分布の調査を統計的に行い、静水圧平衡を仮定した銀河団の勢力範囲(以下銀河団半径)の0.5倍程度までの鉄・ケイ素の分布、鉄・ケイ素質量銀河光度比を得ることができた。鉄、ケイ素の水素に対する比は外縁部に向かうにつれて減少し、外縁部でおおよそ一定となった。また、ケイ素と鉄の比は半径に依存せず一定で、それぞれの超新星爆発のみを仮定した比の間の値となったことより、現在の重元素分布は2つの超新星爆発からの寄与によるものであると推定できた。また、初期質量関数と呼ばれる星の質量と個数密度を表す式(初期質量関数:IMF)を用いて、渦巻銀河である天の川銀河と銀河団の主な構成銀河である楕円銀河の星形成の違いを調査し、2つの異なる銀河でも星形成に大きな違いはないという結果を得ることができた。

## 銀河 a26 合体シミュレーションによるダークマターハロー内部構造の進化の研究

佐々木拓洋 (千葉大学融合理工学府数学情報科学専攻情報科学コース 石山研究室 M1)

ダークマターハローの構造は銀河の形成、進化に影響を与える。更にダークマター検出の手がかりである地球近傍を通過するダークマターのフラックスは局所密度に比例するため、ハローの構造の解明は重要な課題である。

これまでハローはその質量スケールに関わらず密度構造が中心部では半径の-1乗、外側では-3乗程度に比例すると考えられていた。しかし、解像度が向上した最近のシミュレーションに基づくと、物理的な最小スケール付近のハローの密度構造は密度カスパが-1.5乗から-1.3乗と大スケールのハローに比べて鋭く、合体を繰り返すことによって-1の冪に近づいていくことが分かってきた。

本研究では、このような進化が起こる物理的なメカニズムを明らかにするために、宇宙論的 $N$ 体シミュレーションで生成されたハローを初期条件として合体の $N$ 体シミュレーションを行い、ハローの構造の進化を追った。合体前のハローの位置関係や初期速度を系統的に変えたシミュレーションを行い、密度構造や速度構造の進化を調べた。その結果、最小スケール付近で中心密度の高い構造を持つハローは、合体によって中心部の密度が合体前のハローの2倍にならず、結果として密度カスパが緩やかになるという結果が得られた。これは大スケールのハローは合体を経験しても構造が保存されるという結果と対照的である。また、合体の軌道パラメータによって中心部の密度は約1.4倍程度異なり、密度カスパの冪にも違いが見られた。本講演では、これらのシミュレーション結果の詳細について報告し、構造進化の物理的メカニズムについて議論する。

1 Tomoaki Ishiyama, 2014, ApJ, 788, 27

2 Go Ogiya, Daisuke Nagai, Tomoaki Ishiyama, MNRAS 461, 3385-3396 (2016)

3 Raul E. Angulo, Oliver Hahn, Aaron Ludlow, Silvia

## 銀河 a27 近傍銀河団 Abell2319 内に存在するサブハローのガス質量比の測定 大谷花絵 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

コールドダークマターモデルによると、銀河団のような巨大な天体は、より小型の天体が衝突合体を繰り返して形成されたと考えられている。その名残として銀河団内にはダークマターのサブハローが複数存在していると予想される。よって、サブハローの質量関数やガス質量比を測定することは、宇宙の構造形成史やダークマター粒子の性質の理解につながるため重要である。サブハローのガス質量比を求めるには、重力レンズと X 線観測を組み合わせることが有効である。弱い重力レンズ効果の解析からは銀河団スケールのハローと銀河団内のサブハローの両方について質量分布を測ることができる (Okabe et al. 2014 など)。一方、X 線観測からは高温ガスからの熱的放射を捉えることで、ダークマターとガスの空間分布の比較やガス質量比の推定が可能である。ただし、現状では上記の方法でサブハローのガス質量比を求めたサンプル数は少なく、より系統的な解析が望まれている。

本研究の目的は、近傍銀河団 A2319 に注目し、銀河団内に存在するサブハローのガス質量比を精度良く求めることである。A2319 は  $z = 0.0557$  に位置する衝突銀河団であり、見かけのサイズが大きいためサブハローの構造を分解しやすいという利点がある。また、既にすばる望遠鏡により弱い重力レンズ効果の観測が行われ、中心領域に見られるコールドフロント (接触不連続面) 付近にサブハローが検出されている。今回は X 線天文衛星 XMM-Newton の観測データを使用し、A2319 内の銀河団スケールおよびサブハロースケールのガスの質量分布の測定を行う。これと、重力レンズ効果によるダークマターの質量分布と比較することでサブハローのガス質量比を見積もる。本講演ではガスの質量分布の解析結果を報告し、得られたサブハローのガス質量比を同規模の銀河群の値などと比較し、A2319 の進化過程について議論を行う。

1 Okabe et al. 2014, ApJ, 784, 90

## 銀河 a28 COSMOS 領域における $z = 0.2 - 1.2$ の銀河の性質とクラスタリングの関係 坂東卓弥 (愛媛大学 D1)

現在の銀河形成モデルでは、宇宙初期のわずかな密度のムラを持って分布していたダークマター (DM) が重力不安定性によって、その粗密の度合いが時間発展することで DM ハローが形成され、そのハロー内部で銀河が形成・進化すると考えられている。これまでの観測的研究から銀河がどのように進化してきたのが調べられており、また DM ハローの進化についても N 体シミュレーションなどの結果から詳しく調べられている。しかし、どのような DM ハローの中でどのように銀河が形成され

るのか、また DM ハローの成長とその内部の銀河の成長がどのように関係しているのかについて、まだ明らかになっていないのが現状である。そこで本研究では、銀河の星質量成長と DM ハローの関係を調べるため、COSMOS 領域の  $z = 0.2 - 1.2$  の銀河を星形成銀河と passive 銀河に分けて、二点角度相関関数 (two-point Angular Correlation Function: ACF) を用いてそれぞれのクラスタリング強度を星質量別に測定した。解析の結果、赤方偏移依存性は見られず、星形成銀河は星質量とともにクラスタリングが強くなるのに対して、passive 銀河は全体的に強いクラスタリングを示しているが、その星質量依存性は弱く、低質量 passive 銀河 ( $\log M_{\text{star}} = 9.0 - 9.5$ ) の方がより強いクラスタリングを示した。大質量 passive 銀河 ( $\log M_{\text{star}} = 11.0 - 11.5$ ) のクラスタリング強度は星形成銀河の星質量とクラスタリング強度の相関の延長線上に位置していた。また、 $\log M_{\text{star}} = 10 - 11$  の post-starburst 銀河は低質量 passive 銀河と同程度の強いクラスタリングを示した。本講演では、他の研究結果と比較しながら、今回得られた結果の解釈について議論する。

1 Mostek et al. 2013, ApJ, 767, 89

2 Bielby et al. 2014, A&A, 568, A24

## 銀河 a29 銀河形成進化と、超高エネルギー宇宙ニュートリノの起源

須藤貴弘 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M2)

IceCube 実験により、TeV-PeV 程度と非常に高いエネルギーを持つニュートリノ事象が検出されているが、その起源は未だに謎に包まれている。起源天体の候補に星形成銀河やスターバースト銀河がある。超新星残骸で加速された宇宙線が銀河内で星間物質と衝突し、中間子を生成、それが崩壊しニュートリノになるというシナリオである。このシナリオで観測データが説明できるか、盛んに研究がされているが、意見は一致していない。これは過去の研究が、比較的単純な見積もりしか行っていなかったり、不定性の大きな仮定に基づいているためである。そこで本研究では、銀河形成の準解析的モデルに銀河からの高エネルギー放射 (ガンマ線/ニュートリノ) の生成過程を組み込むことにより、信頼性が高いニュートリノフラックスの計算を行った。準解析的モデルは階層的構造形成の理論に基づく宇宙論的な銀河の形成進化のモデルであり、これを利用することで、ガス冷却や星形成、銀河合体とそれによるスターバーストなどを整合的に取り扱いながら計算を行うことができる。利用したモデルは高赤方偏移まで含め観測をよく再現し、研究では様々な赤方偏移からの個々の星形成銀河/スターバースト銀河からのニュートリノ放射への寄与を、現実的な銀河進化モデルのもと計算することを可能にする。また、本研究ではガンマ線で観測されている銀河のデータを用いることでモデルの較正を行った。よくわかっている個々の銀河の性質を用いた点も

本研究の特徴で、これにより信頼できる結論を出すことができると考えている。講演では、まず銀河からの高エネルギー放射について説明する。続いて銀河形成の準解析的モデルを紹介する。本研究で用いたモデルは「三鷹モデル」と呼ばれ、銀河形成進化に関わる様々な研究で利用されている。その後、本研究の結果とその示唆について発表する。

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

## 銀河 a30 Multiwavelength study of X-ray Luminous Clusters in the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program

宮岡敬太 (広島大学 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 M2)

本研究の目的は、すばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program(HSC SSP) 領域にある銀河団を、*XMM-Newton* 衛星を用いて、静水圧平衡を仮定した質量を導出し、弱い重力レンズにより求めた質量および光学観測量との比較を行うことである。超広視野主焦点カメラ HSC を用いた大規模サーベイである HSC SSP は、1400 平方度の領域を観測し、 $z \sim 1.1$  までの銀河団を  $10^4$  個も発見する。銀河団は可視光において、銀河の集合体として観測され、背景銀河に対する弱い重力レンズ効果を利用して、銀河団の力学状態を仮定せずに質量を直接測定できる。一方 X 線では広がった高温ガスとして観測され、ガスの静水圧平衡を仮定して質量を測定する。後者の方法は、乱流・バルク運動に起因する非熱的な圧力が存在すると、静水圧平衡の仮定が厳密に成り立っておらず、過小評価する可能性がある。また遠方もしくは暗い銀河団では、上記の方法では質量が測定できないため、観測量と質量の相関関係(スケーリング関係)を介して、間接的に質量を推定するしかない。これらの多波長研究には、質の良い可視光データと深い X 線データの両者が必要不可欠である。そのためサンプルは *ROSAT* 衛星の X 線全天カタログから、低赤方偏移 ( $z < 0.4$ ) かつ重量級 ( $M_{500} > 2 \times 10^{14} M_{\odot}$ ) の銀河団 22 個を選定し、20 ks 以上の観測データを集めた。そのうち現時点で、サーベイが完了した 4 つの銀河団において両者の質量を比較した結果、 $2\sigma$  の範囲で両者は一致した。また全質量とリッチネス(メンバー銀河の個数の指標)においては、べき関数的相関が強く見られた。本口演では 22 個の銀河団のうち、解析の終了した銀河団の結果を述べる。

## 銀河 b1 近傍棒渦巻銀河における分子ガスの性質と星形成の観測的研究

黒田麻友 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙には様々な銀河が存在する。これら銀河の多様性を理解するにはその進化の素過程である星形成を理解することが重

要である。銀河における星形成を特徴付ける量として「単位ガス質量あたりの星形成率」で定義される星形成効率が知られており、多くの研究が行われてきた。近年、棒渦巻銀河において領域ごとに星形成効率が異なることが注目されており、特に棒状構造では、中心領域や渦状腕などのほかの領域に比べて星形成効率が低いといわれている。さらに数値シミュレーションによると棒状構造での分子雲同士の相対速度が大きすぎると、分子雲衝突時に星形成が促進されないということがわかってきた。そこで本研究は、先行研究で示唆された「銀河の棒状構造で、分子雲の相対速度が大きすぎることにより星形成が抑制されるのか」を検証することを研究目的とした。そのために銀河中の分子雲の相対速度の指標として分子ガスの速度分散を導出し、星形成効率との関係を調べた。本研究では近傍棒渦巻銀河である NGC2903、NGC4303、NGC5248 をサンプル天体とし、解析を行った。銀河の領域ごとの性質を調べるために bar、bar-end(near-arm)、arm と領域分けを行い、stacking という手法を用いて領域平均の  $^{12}\text{CO}$  ( $J = 1-0$ ) 積分強度、速度場、速度分散、分子ガス質量、星形成率、星形成効率を求めた。領域ごとの速度分散と星形成効率の関係を調べた結果、分子ガスの速度分散が大きい棒状構造では星形成効率が低く、速度分散が小さい渦状腕では星形成効率が低いという傾向を得た。この結果は「分子雲同士の相対速度が大きすぎると星形成が促進されない」という理論的な予測を支持する。

## 銀河 b2 COSMOS 領域の HST データを用いた $z = 0.7 - 0.9$ の合体銀河探査とその性質に関する研究

樋本一晴 (愛媛大学 M1)

銀河の合体は星形成活動の誘発など物理現象に影響を及ぼすことが知られているため、合体銀河について理解することは銀河進化を理解する上で非常に重要である。合体銀河の分類方法の 1 つとして、撮像データを用いた定量的分類方法がある。先行研究では中心集中度  $C$ ・非対称度  $A$ ・凝集度  $S$  からなる CAS パラメータ (Abraham et al. 1996, Conselice 2003) や、銀河の明るさがどれだけ特定のピクセルに集中しているかを示す Gini 係数と、銀河の輝度全体の 2 次モーメントと明るい方のピクセルから積算して全体の 20% 分の明るさを含む部分の 2 次モーメントの比である M20 などの指標が用いられてきた (Lotz et al. 2004)。しかし、合体銀河の選出方法や、合体ステージの分類方法は確立されていない。本研究では合体銀河分類に特化し、かつ合体ステージも分類できる指標の開発を目指した。

新たに開発した指標は、中心表面輝度比 (Central Surface Brightness ratio : CSB) である。これは、輝度分布重心の表面輝度と、明るい方のピクセルから積算して全体の 20% 分の明るさを含む部分の平均表面輝度との比である。これにより、銀河の明るい部分が一つに集中しているのか、複数に分かれて存在するのかを判別できると期待できる。本研究では、COSMOS 領域で  $z = 0.7 - 0.9$  における  $M_V < -20$  (mag) の銀河 11,150

天体に対して HST/ACS 撮像データを用いて解析を行った。CSB と従来用いられてきた非対称度  $A \cdot M20$  を組み合わせることで銀河形態を分類し、分類された銀河と星形成活動の活発さを表す比星形成率 (specific Star Formation Rate : sSFR) との関係性を調べた。その結果、合体中と思われる形態の銀河は、sSFR が普通の星形成銀河よりも高いことがわかった。さらに、明るい部分が複数存在する合体中と思われる銀河において、明るい部分が互いに近づくにつれて sSFR が上昇し、さらに近づくると普通の星形成銀河の sSFR と同じような値をとることがわかった。

- 1 Abraham et al. 1996 , MNRAS ,279 ,L47
- 2 Conselice 2003 , ApJS , 147 , 1
- 3 Lotz et al. 2004 , AJ , 128 , 163

### 銀河 b3 ダークマターモデルの違いによる宇宙構造形成の変化

市橋洋基 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

Cold Dark Matter (CDM) モデルは観測結果に広いスケールでよく一致する標準的なモデルである。CDM モデルにおいてダークマター (DM) 粒子は生成時に非相対論的な速度を持ち、他粒子と重力相互作用以外行わない。等密度時を過ぎると CDM は重力収縮を行う。その後光子と脱結合したバリオンが DM によって作られた重力ポテンシャル内に落ち込み構造が形成される。

しかしながら、従来の CDM モデルには諸問題が存在する。例えば、銀河スケール以下の構造が多く形成されすぎてしまうサブハロー問題などが挙げられる。これらの問題を解決するために DM モデル固有の性質が考えられるようになった。

本研究では固有の性質の一つとして DM がバリオンと重力相互作用以外に弱く電磁的相互作用を行う DM モデルを仮定した。具体的には衝突によるバリオンと DM 粒子間の相対速度の変化による効果と、2 粒子間相対速度変化分の運動エネルギーからくるバリオン粒子の内部エネルギーの増加を考慮した。衝突によりバリオン粒子の内部エネルギー増加しバリオンの温度が上昇し Jeans 長が増大する。この効果により小さいスケールでの構造が圧力に阻まれて成長できず、抑制されることを予想される。このような予想からサブハロー問題が解決できる可能性が考えられる。

そこで発表者は上述した DM モデルを宇宙論的流体シミュレーションに実装し、DM の性質の違いが構造形成にどのような影響を及ぼすのか調べた。使用した宇宙論的流体シミュレーションコードはラグランジュ法を用いた流体法の一つである GIZMO (Hopkins et al. 2014) である。

本研究ではそれぞれの DM モデルを仮定した際の DM ハローの質量に対する数密度である質量関数から、DM モデルの違いによって宇宙大規模構造形成に関してどのような変化がもたらされるのかについて議論する。

- 1 Julian B. Muoz, Ely D. Kovetz, Yacine Ali-Hamoud Phys. Rev. D 92, 083528 (2015)
- 2 L.Chuzhoy and A. Nusser, Astrophys. J. 645, 950(2006)
- 3 Philip F. Hopkins MNRAS, 450, 53, (2015)

### 銀河 b4 銀河の色で探る銀河団のダイナミクス 浜端亮成 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)

銀河団は宇宙で最大の自己重力系であり、典型的には半径 1Mpc、質量  $10^{14}M_{\odot}$  程度である。この銀河団は宇宙論、あるいは重力理論のプローブとして非常に重要であるが、銀河団の質量の大半はダークマターによって占められており、このため銀河団の測定は困難である。銀河団の観測手法としては、重力レンズ効果を用いたものや X 線によるものが知られているが、近年、銀河団周辺の銀河の運動を測定することによって銀河団の質量を測定しようという試みがなされている。銀河団周辺の銀河は、ハローと呼ばれる重力によって束縛された構造の中心に存在していると考えられており、従って銀河の運動はハローの運動を示している。銀河団は、このハローを複数持っており、銀河の運動を測定することによって、ハローの運動を測程し、その情報から銀河団の質量を測定する [1]。しかし、この試みは、ハローの運動と銀河団の質量の関係が十分には明らかになっていないため成功していない。

このハローの運動と銀河団の質量の関係性に対して、銀河の種類が大きなヒントになることが期待されている。銀河の色や形状などの性質は、銀河団による影響を受けていることが過去の研究によって示唆されている [2]。このことは、銀河の性質が、銀河と銀河団の関係性、ひいては銀河をホストしているハローと銀河団の関係への手がかりとなることを示唆している。

今回、大規模サーベイ観測である SDSS のデータ、及び銀河団カタログ CAMIRA [3] を用いて、銀河の選択方法にどのように銀河団周辺の銀河の速度場が影響を受けるかを統計的に解析し、これらの間に明らかな相関があることを発見した。この結果を紹介した後、N 体シミュレーションの解析と比較し、この結果が示すハローと銀河団の関係性の解釈について議論する。

- 1 Farahi A., et al. 2016, MNRAS, 460 ,3900
- 2 Bayliss B. M., et al. 2017, ApJ, 837, 88
- 3 Oguri M. 2014, MNRAS, 444, 147

### 銀河 b5 特性 X 線の輝線形状の評価方法についての研究

木下佑哉 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

銀河団は数十から数千の銀河が重力的に束縛された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進化する。銀河団は銀河団ガス (ICM) と呼ばれる温度数千万 K の高温プラズマで満たされており、その中に存在する重元素からは元素ごとに決まったエネルギーを持つ特性 X 線が放射される。銀河団ガスの視線方向の運動は、特性 X 線のエネルギー

ギーと幅を測定することで捉えることが可能である。しかし、CCD 検出器を用いた従来の X 線天文衛星による観測では、検出器自身のエネルギー分解能 ( $\sigma \sim 3000$  km/s 相当) によって制限され、有意な測定は困難であった。

2016 年に打ち上げられたひとみ衛星に搭載された精密軟 X 線分光検出器 (SXS) は、X 線マイクロカロリメータを用いた極低温動作の撮像分光装置で、6 keV の輝線に対して半値全幅 5 eV ( $\sigma \sim 100$  km/s 相当) という非常に高いエネルギー分解能を誇る。ひとみ衛星は打ち上げ 1 か月後に観測不能に陥ったが、正常に稼働している期間にペルセウス銀河団の中心部を観測し、銀河団ガスの運動を正確に捉えることに成功した。観測した中心付近の 60 kpc  $\times$  60 kpc の領域では視線方向の速度分散は  $164 \pm 10$  km/s であり、乱流による圧力は熱運動による圧力のためだか 4

ひとみ衛星 SXS で得られた輝線の形状は銀河団ガスの運動 (速度分散) によって決まっているので、その形状を調べることでガスの運動の分布についてさらなる情報が得られる可能性がある。そこで私は、輝線の形状がガウス関数からずれているかどうかを輝線の歪度 (skewness) と尖度 (kurtosis) を使って評価する方法について検討した。

1 Hitomi collaboration, 2016, Nature, 535, 117

## 銀河 b6 赤い渦巻き銀河から探る銀河進化 植村千尋 (宇宙科学研究所 M1)

本発表では、Galaxy Zoo プロジェクトにおいて発見された赤い渦巻き銀河の諸性質について調べた論文についてレビューし、今後行う解析について述べる。一般的に、渦巻き銀河は青く、星形成を活発に行っている。一方、楕円銀河は赤く、星形成は活発ではない。渦巻き銀河は若い銀河、楕円銀河は年老いた銀河と一般的には言われており、渦巻き銀河から楕円銀河に変化すると言われている。しかし、両者の関係や進化経路、形態や性質の変化については未だわかっていないことも多い。これを解明する上で「赤い渦巻き銀河」という両者の中間的な性質を持つ銀河に注目した。

以下赤い渦巻き銀河の諸性質を調べた Masters et al.2010 について述べる。赤い渦巻き銀河は SDSS のデータから選ばれている。これらのサンプルは円盤部分に古い星が多く存在し、楕円銀河と同程度に赤い銀河である。このサンプルに対して、諸性質を調べたところ、以下のことがわかった。

1. 赤い渦巻き銀河と、その存在する環境との間には顕著な相関は見られなかった。

2. 赤い渦巻き銀河は古い星が多いものの、渦巻き構造があることから、最近まで星形成をしていたと考えられる。

3. セイファート銀河・ライナーの割合が通常の渦巻き銀河の 4 倍多かった。

4. 赤い渦巻き銀河のうち、7 割程度が可視光で棒構造が見られた。一般的な青い渦巻き銀河ではこの割合は 3 割程度であ

り、明らかに赤い渦巻き銀河における割合が高いと言える。

これらの結果を踏まえ、本論文では赤い渦巻き銀河は銀河内のガスをすでに使い切った、とても古い銀河ではないかと提案している。

今後は、「あかり」の赤外線データや GALEX の紫外線データを加えて、赤い渦巻き銀河の物理量を求める。星形成率、ダスト減光やダスト量を青い渦巻き銀河や楕円銀河とも比較し、その起源を議論する。

1 K.L.Masters et al. 2010

## 銀河 c1 近赤外分光観測で探る、赤方偏移 1.52 の成熟した銀河団とその周辺環境 竝木茂朗 (国立天文台三鷹 M1)

銀河形成・進化のピークと言われる赤方偏移 1 ~ 3 にある銀河団は近年発見が多数報告されている。しかしその中に存在する個々の銀河の性質についての調査、理解は十分進んでいるとは言えない。例えば、この時代における銀河の金属量-星質量関係の環境依存性についてはいくつか研究があるものの結論がそれぞれ異なっており、確かなことが分かっていない。今回の私の研究では赤方偏移 1.52 の宇宙に発見された銀河団候補領域をすばる望遠鏡/MOIRCS 及び LBT/LUCI で分光観測して得られた近赤外分光データを用いて解析を行う。この領域については今までに Koyama. et al. 2014 においてすばる望遠鏡で広帯域および狭帯域 (H ) フィルターを用いた撮像観測が行われ、以下のようなことが分かっている。

- この銀河団候補領域の中心付近に位置する電波銀河 (4C 65.22) の周辺領域に、一般的な領域に比べて 10 倍以上の明らかな密度超過が測光的に観測されている。
- その密度超過の中心領域は赤い星形成の不活発な銀河で占められている一方、その領域を取り囲むように H 輝線銀河 (星形成銀河) が分布している様子から、この時代としては非常に成熟した銀河団である可能性が高い。

以上のことを踏まえ、今回の解析ではまずこれらの銀河が本当に銀河団のメンバーなのかを分光して得られた赤方偏移を用いて確認する。また、速度分散を調べることで、銀河団全体の質量を求める。その上で、メンバー銀河について輝線比からそれぞれの銀河の金属量を求めて金属量の周辺密度との関係を調べ、同時代の一般的な領域の銀河や、これより近傍の、赤方偏移の小さな似たような銀河団と比較して、高密度領域下で銀河がどのように進化するのかを調べる。今回の夏の学校では、本研究の概要とその進捗状況を発表する。

1 Koyama. et al. 2014, ApJ, 789, 18

2 Hayashi. et al. 2011, MNRAS, 415, 2670-2687

3 Tadaki. et al. 2012, MNRAS, 423, 2617-2626

## 銀河 c2 VLBI 観測による高赤方偏移クェーサーの構造研究

古谷庸介 (山口大学創成科学研究科 電磁宇宙物理学研究室 M2)

高赤方偏移クェーサーはビッグバンから 1 Gyr のうちに形成されており、その性質は低赤方偏移クェーサーとよく似ていることがわかっている (De Rosa et al. 2011)。一方、高赤方偏移において強電波クェーサーやレーザー的天体の検出数が減少することが知られており、活動銀河核 (AGN) への質量降着や中心ブラックホールのスピン状態が初期状態から変化していることを意味している (dotti et al. 2013)。これらの宇宙史におけるクェーサーの進化について考察するためには高赤方偏移クェーサーの詳細な構造を知る必要がある。

クェーサーの構造を空間分解するために超長基線電波干渉計 (VLBI) による高感度な観測を行う必要がある。VLBI 観測は通常の観測より 1000 倍良い空間分解能を持つため、高感度な観測を行うことで VLBI 電波画像 (VLBI 観測で得られた天体の天球面上での輝度分布図) を得ることができ、クェーサーの広がった電波構造を見ることができる。

しかし、現状で VLBI 観測された高赤方偏移クェーサーの数は 60 天体 (e.g. Coppejans et al. 2016) ほどしか無く、高赤方偏移クェーサーの広がった電波構造について十分な議論をすることができない。そこで我々は高赤方偏移クェーサーに対し日本の VLBI 観測網 (JVN) を使った観測を行い、高赤方偏移における VLBI 電波画像の増加を図る。

現在、赤方偏移  $z > 4$  にある 9 天体に対して JVN 観測が行われ、5 天体の VLBI 電波画像を得ることができた。得られた VLBI 電波画像は全てアンテナビームに対して点源であり、高赤方偏移クェーサーの構造に関する議論はできなかった。天体サイズは 43.2 pc 以下と見積もられ、そこから推定される輝度温度は全て  $\sim 10^8$  K であり、コンパクトな構造で非熱的放射をしていることがわかった。

今後はより高い感度・空間分解能を持つ観測網による観測が必要である。そこで期待されるのが東アジアの VLBI 包囲網 (EAVN) による観測である。EAVN は JVN よりも感度が 10 倍良く、空間分解能も 3 倍高いためクェーサーの広がった構造を見ることができると期待される。

- 1 De Rosa et al. ApJ, 739, 56 (2011)
- 2 Dotti et al. ApJ, 762, 68 (2013)
- 3 Coppejans et al. MNRAS, 463, 3260 (2016)

## 銀河 c3 空間分解した銀河のケニカット-シュミット則

依田萌 (名古屋大学、銀河進化学研究室 (研) M1)

銀河進化を考える上で星形成活動を理解することは重要である。単位時間に形成される星の総質量を星形成率といい、

星形成の活発さを表す 1 つの指標として知られている。星形成率と銀河円盤の主要な構成物質であるガスの面密度の間には、べき乗則が成り立ち、Kennicutt-Schmidt 則 (K-S 則, e.g., Kennicutt & Evans 2012) と呼ばれている。K-S 則のべきは星形成メカニズムの指標と考えられている。また、近年の研究によって爆発的な星形成をしている銀河と平均的な円盤銀河では K-S 則に異なるオフセットを持つことが明らかになった。K-S 則は銀河の星形成活動を反映されていると考えられているので、星形成活動を理解するために長年研究されてきた。

K-S 則は異なる銀河の間だけでなく、空間分解した単一の銀河内でも成り立つことが知られている。しかし、K-S 則は観測から明らかになった経験則に過ぎず、それが生じる物理的な起源は未だに明らかになっていない。加えて空間分解した K-S 則については、電波のマッピング観測に時間がかかるためサンプル数が少なく、統計的な議論がされていない。空間分解した K-S 則を物理的に理解するためにはサンプル数を増やした更なる研究が必要である。

本研究の目的は、空間分解した K-S 則を統計的・物理的に理解することである。その第一歩として、銀河の形態や物理量と空間分解した K-S 則の相関を調べた。サンプル天体は Nobeyama CO Atlas (Kuno, N., et al. 2007) から選んだ。Nobeyama CO Atlas では近傍の 40 天体について  $^{12}\text{CO}$  ( $J = 1 - 0$ ) 輝線のマッピング観測を行っており、サンプル天体の多くが他の波長でも観測されているため、多数の天体について K-S 則を調べることができた。また、星形成率を正確に評価するために、多波長にわたるアーカイブデータをフィッティングした SED から星形成率を算出したことも本研究の特徴である。本講演ではその最新の結果について報告する。

- 1 Robert C. Kennicutt, Jr., & Neal J. Evans II., 2012, A&A, 50, 531
- 2 Kuno, N., et al. 2007, PASJ, 117, 166

## 銀河 c4 銀河計数を用いて探る銀河の光度進化 河野海 (名古屋大学、銀河進化学研究室 (研) M1)

銀河が発する電磁波から我々はその銀河の状態を探ることができる。これは、銀河が各波長域において異なる物理過程に基づく放射をしており、それらの放射強度が星形成率などの物理量に換算できるためである。従って、各赤方偏移における銀河光度を調べることで広い時間スケールに対する銀河の活動性を知ることができる。本研究で用いる銀河計数は、シンプルかつ基本的な観測量であるが、銀河進化を定量的に研究するよい指標になる。これまでに遠赤外線と電波における銀河の光度進化を個別に扱った研究はみられるが、それらの進化モデルが異なる波長域に対して適応できるものであるかは検証の余地がある。複数の波長を用いた光度進化のモデルを構築することで、銀河進化に統計的な制限を付けることができると期待される。

本研究では、赤外線の観測により得られた Takeuchi et

al.(2001)による光度進化モデルを用いて他の波長での銀河計数を計算した。遠赤外線 ( $60\mu\text{m}$ ) では、 $z < 1$  の近傍宇宙からの寄与が大きいのにに対し、サブミリ波 ( $850\mu\text{m}$ ) では、負の K 補正により  $z \sim 5$  の光度進化からの影響を十分に受ける。 $1.4\text{GHz}$  の光度関数 (Sadler et al. 2002) にみられるように電波の光度関数には、星形成銀河と活動銀河核の 2 成分がみられる。個別に光度進化を評価したところ、AGN では、 $z < 1$  にかけて  $L_{1.4\text{GHz}}(z) = L_{1.4\text{GHz}}(0)(1+z)^{-3.9}$  である事が分かった。これは、赤方偏移の増加に対して、AGN の光度が減少する負の光度進化をすることを意味している。銀河計数により得られた光度進化を説明する銀河における星形成史、物理過程について議論をする。

- 1 Takeuchi, T.T., et al. PASJ 53, 37 (2001)
- 2 Sadler, E. M., et al. MNRAS, 329, 227 (2002)

## 銀河 c5 CO 吸収の赤外分光で見る IRAS 08572+3915 AGN の構造 大西崇介 (宇宙科学研究所 M1)

Active Galactic Nucleus (AGN) 統一モデルにおいて Molecular Torus による吸収が鍵となっている。しかし、その存在、形状、大きさについて直接的観測がなされてこなかった。そこで、今回は近赤外領域で CO の振動回転遷移 ( $\Delta v = 1, \Delta J = 1$ ) 吸収線の時間変動を調べるという新しい手法によってトーラスの大きさを直接的に求めることを試みた。

本発表では、IRAS 08572+3915 の CO 吸収を 2004 年に観測し、AGN の中心付近の速度構造を示した論文 (Shirahata et al. 2013) のレビューと共に、2010 年の追観測の結果を発表する。

Shirahata et al. (2013) では、波長  $4.9 \sim 5.13 \mu\text{m}$ 、 $J_{16}17$  の CO 吸収の形状から、各励起レベルの柱密度を求め、 $-160\text{kms}^{-1}, +100\text{kms}^{-1}, 0\text{kms}^{-1}$  成分の励起温度をそれぞれ  $\sim 270\text{K}, \sim 700\text{K}, \sim 20\text{K}$  と見積もった。励起温度から求められる CO 分子の柱密度の全励起レベルでの合計と、観測された遷移が起きるための分子密度の制約 (Kramer et al. 2004) から、吸収層の厚さが  $\Delta d < 4 \times 10^{-4}\text{pc}$  であり、Wada & Tomisaka (2005) 等での AGN トーラスの厚さよりもオーダーで 4 つ小さいことを示した。以上から、高速度の成分が AGN 中心の近くで速度ごとにシート状に独立して分布し、それが高密度の温かいガスからの噴出と、そこへの流入を示していると結論付けている。

- 1 M. Shirahata et al., PASJ 65 (2013)
- 2 C. Kramer et al., A&A 424, 887 (2004)
- 3 K. Wada & K. Tomisaka ApJ 619, 93 (2005)

## 銀河 c6 NB973 を用いた $z=7$ の Ly $\alpha$ 輝線銀河の探査と Ly $\alpha$ 光度関数

## 伊藤凌平 (東京大学 宇宙線研究所 M1)

宇宙は  $z \sim 1100$  で陽子と電子が再結合して中性水素で満たされるが、 $z \sim 6-10$  で再び電離することが知られている。この宇宙再電離が、何によって引き起こされたのか、どのように時間変化したのか、そしてどのように伝搬したのかについてはまだ明らかになっていない。Ly $\alpha$  輝線銀河 (LAE) は、Ly $\alpha$  光子が中性水素によって容易に散乱されることから、宇宙再電離期の IGM の中性水素の割合を調べるのに役立つ。過去の研究では、 $z=5.7-7.0$  の Ly $\alpha$  光度関数の明るい側で Schechter 関数に対して超過が見られる (Konno et al. 2017, Zheng et al. 2017)。この超過の原因として LAE の周りに生じた電離バブルにより引き起こされた可能性が挙げられており、明るい側の超過は宇宙再電離を探る上で重要な課題の一つである。本研究では、CHORUS (Cosmic HydrOgen Reionization Unveiled with Subaru; PI Inoue) で得られた NB973 の観測データをもとに COSMOS 領域 ( $2\text{deg}^2$ ,  $5\sigma$  限界等級  $24.5\text{mag}$ ) の LAE を探査し、Ly $\alpha$  光度関数を導出して  $z=7$  における Ly $\alpha$  光度関数の明るい側での超過について議論する。

- 1 A. Konno et al. 2017, arXiv:1705.01222
- 2 Z. Zheng et al. 2017, arXiv:1703.02985
- 3 K. Ota et al. 2017, arXiv:1703.02501

## 銀河 c7 すばる望遠鏡広視野撮像観測に基づく原始銀河団の研究 伊藤慧 (国立天文台三鷹 M1)

銀河団は宇宙において最大の天体であり、特に原始銀河団は宇宙初期の構造形成を理解する上で重要である。ここで原始銀河団は高赤方偏移に存在し  $z \sim 0$  において銀河団になる程度の質量を持つがビリアル平衡に達していないものを指す。近傍銀河団中の銀河は Field 中の銀河に比べ星形成率が低く赤くて古い年齢を持つが、原始銀河団中の銀河  $z \sim 1-4$  においては星形成率が高い銀河が多い。この様に原始銀河団を観測する事で銀河進化の環境依存性を知る事ができる。また電波銀河 (RG) の周りは高密度領域である事例は報告されている。参考文献 [1] では  $z \sim 2.9, z \sim 3.1, z \sim 4.1, z \sim 5.2$  にある RG 周辺には LAEs の高密度領域が存在し、これらは現在の大質量銀河団の祖先であろうと結論づけている。以上のように銀河形成、構造形成の謎を解明しようと試みられているが、原始銀河団は宇宙における個数密度が小さく現時点で十分なサンプル数が得られず、統計的に扱う為にはより多くのサンプル数が必要とされる。本研究においては、すばる望遠鏡主焦点カメラ Hyper-Suprime-Cam の戦略枠の観測データと Canada-France-Hawaii Telescope の U-band データを用いて得た u ドロップアウト銀河サンプルから  $z \sim 3$  の原始銀河団探査を予定している。 $z \sim 3$  は、高密度領域が形成途中のより高赤方偏移の時期に比べ、銀河団の銀河が Field に対し大きく変化する時期だと考えられる。例を挙げると参考文献 [2] にお

いて red-sequence の銀河が  $z \sim 2-3$  で原始銀河団中に存在し始めていると主張されている。つまりこの時期の原始銀河団の銀河を理解する事は、銀河形成プロセスの重要な転換期を説明する事に繋がる。また本研究で用いるデータの観測範囲が  $27 \text{deg}^2$  と広範囲である為、多くのサンプルが得られると予想され、銀河の環境効果をより統計的に理解する事が可能になると考えられる。本発表では原始銀河団研究の過程を紹介し、本研究での研究計画、進捗状況を発表する。

- 1 Venemans et al. 2007; Averbuch & A., 461, 823-845
- 2 Kodama et al. 2007; MNRAS, 377, 177-1725

## 銀河 c8 太陽近傍ダークマター量測定の実況 柏田祐樹 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

我々の天の川銀河をはじめとする銀河は、数千億個の星と水素を主成分とする星間ガス、そしてこれらを広く取り囲むように分布するダークハローから構成されている。ダークハローは銀河の質量の約 90% を占めるが、その構成物質 (以下、ダークマター; DM) の素粒子物理学的な正体は未だに不明である。現在の宇宙構造形成論によると、銀河は小さなダークハローが階層的な合体を繰り返すことにより成長してきたと考えられている。数値シミュレーションから、ダークハローの合体形成史の違いは、最終的なダークハローの形状の違いとして現れることが知られている (Read 2014)。

天の川銀河では、高精度位置天文観測により銀河を構成する星の詳細な位置や運動が得られ、太陽近傍の DM 量を測定できる (Local measures; e.g. Silverwood et al. 2016)。これは DM の地上直接検出実験への有用な情報となる。さらに、銀河系の回転曲線の外挿から得られる独立な DM 量の測定値 (Global measures; e.g. McMillan 2017) と比較することで、天の川銀河のダークハローの形状が、単純に球対称なのか、円盤状に扁平しているのか、もっと複雑に 3 軸非対称なのかを推定することができる。今後は、2013 年に打ち上げられた位置天文衛星 Gaia (欧州宇宙機関 ESA) の観測により、天の川銀河の広範囲かつ精密な DM 量測定が進むと期待される。

このような科学的背景のもと、本講演では太陽近傍 DM 量測定の現状についてレビューを行う。太陽近傍 DM 量測定には主に 2 つの手法がある (Read 2014)。1 つは太陽近傍星の鉛直方向の運動学を用いた Local measures であり、もう 1 つは回転曲線から外挿する Global measures である。また、使用するデータの仮定にも様々な方法が用いられている。これらの解析手法や観測データに着目し、Gaia 時代に期待される展望を議論する。

- 1 J. I. Read, 2014, JPhG, 41, 063101
- 2 H. Silverwood et al. 2016, MNRAS, 459, 4191
- 3 P. J. McMillan, 2017, MNRAS, 466, 174

## 銀河 c9 次世代メニーコアプロセッサに向けたツリー法の高速化 児玉哲史 (千葉大学 融合理工学府 数学情報科学専攻 情報科学コース 石山研究室 M1)

重力多体系とは、質点 (以下、粒子と表現) 同士が相互にニュートンの万有引力を及ぼしあう系である。重力多体系の  $N$  体シミュレーションでは、各粒子の運動方程式を数値的に解くことで、その時間発展を追う。 $N$  体シミュレーションは、球状星団や銀河、銀河団などの天体や、宇宙の大規模構造を理解するのに有用な手段である。

ツリー法 [1] は、計算量が  $\mathcal{O}(N^2)$  の直接計算法よりも劇的に少ない計算量、 $\mathcal{O}(N \log N)$  で重力を近似的に計算するアルゴリズムの 1 つであり、広く用いられている手法である。ツリー法では、近傍の粒子からの重力は直接計算して、遠方の粒子群からの重力は、多重極展開による近似計算で求める。ツリー法はシミュレーションコードの並列化によって高速化される。並列化の方式は大きく、CPU 内部での SIMD 並列化、ノード内の共有メモリ並列化、ノード間の分散メモリ並列化の 3 つに分けられる。本研究の目的は、これらの並列化をすべて取り入れ、高度にチューニングされたツリー法のコードを開発することで、より粒子数が多く、高分解能なシミュレーションを可能にすることである。

これまで報告されている高性能なコードでは、CPU の SIMD 命令を最大限利用し、粒子間の重力計算を大幅に高速化する Phantom-GRAPe [2] (<http://code.google.com/p/phantom-grape/>) という高度にチューニングされたライブラリが用いられることが多かった。我々のコードでは Phantom-GRAPe を拡張し、四重極モーメントを含めた重力相互作用を SIMD 並列化した。単極子モーメントのみを用いる場合に比べ、より近くの粒子群からの重力も高速に近似計算できるようになり、従来の高性能なコードより高い性能を発揮できるようになった。本講演では、我々のコードの詳細について報告すると共に、疑似粒子法や他のコードとの比較を行う。

- 1 J. Barnes and P. Hut, 1986, Nature, vol.324, pp.446-449
- 2 Ataru Tanikawa, Kohji Yoshikawa, Keigo Nitadori, Takashi Okamoto, 2012, New Astronomy, vol.19, pp.74-88

## 銀河 c10 原始銀河団 SSA22 における多波長測光サーベイとそのスペクトル分布 (SED) 鈴木向陽 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

サブミリ波銀河 (SMG) は宇宙論的遠方に多く見つかかり、非常に高い星形成率 ( $100 - 1000 m M_{\odot} / \text{yr}$ ) を示す。この値は近傍の一般的銀河と比べ桁違いに大きく、その星形成の物理について解明することは銀河進化を論じる上で大きな意義がある。

$z = 3.1$  (115 億年前)の銀河高密度領域である SSA22 においてもそれは同様であり、この領域はサブミリ波に加えて X 線から電波に至る豊富な多波長データを有することから、SMG の性質や進化を調べる上で適した領域の一つである。

Tamura et al. (2010) はその中でも極めてミリ波で明るい SSA22-AzTEC 1 に注目し、その調査を行った。Submillimeter Array(SMA) と多波長観測によると、可視-近赤外線では確認できない、電波-中間赤外線における放射の存在が検出されており、その測光的な赤方偏移度が原始銀河団のものと同じであることが示された。他にも、X 線領域で硬いスペクトルが確認でき、これにより SSA22-AzTEC1 が活動銀河核を隠し持つことが考えられ、原始銀河団領域 SSA22 の重力ポテンシャル中における原始クエーサーの存在が確認された初めての例となった。

本講演では、Tamura et al.(2010) のレビューを行い、最新の ALMA データを多波長解析の結果との比較を踏まえて紹介する。

1 Tamura et al. 2010, ApJ, 724, 1270

2 Yun & Carilli 2002, ApJ, 568, 88

## 銀河 c11 多波長データを用いた新たな原始銀河団の探査手法

入倉和志 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M2)

現状の原始銀河団探査は、QSO/電波銀河に着目する方法や、単純に LBGs 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で、銀河進化の環境依存性や銀河団の進化についての手掛かりを得ることが期待できる。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 massive な銀河に注目し、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、その発見した原始銀河団の‘コア’と、従来の原始銀河団探査の比較を行った。見つかった原始銀河団のコアは近傍銀河団の数密度と一致しており、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。

## 銀河 c12 高赤方偏移 HSC 銀河団サンプルを用いた X 線スケールリング則の調査

渡邊翔子 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙の進化を支配する暗黒物質、暗黒エネルギーの解明は現代の宇宙物理学の大きな課題である。X 線観測によって高精度に宇宙論パラメータを推定する代表的な手法として、銀河団の質量関数の赤方偏移に対する進化の測定がある。従って遠方銀河団のサンプルを増やし、質量を正確に測定して信頼性の高い

質量関数を構築することが課題となる。しかし、 $z \sim 1$  の銀河団は見た目のサイズが小さく、内部の質量分布を詳細に測ることは難しいため、温度質量関係などの簡便なスケール則を用いざるを得ない。

そこで本研究は、 $z > 0.8$  の銀河団の X 線観測から、遠方宇宙における銀河団スケール則を確立することを目的とする。可視光観測において高い撮像能力をもつ Subaru 望遠鏡の Hyper Suprime-Cam を用いた広範囲なサーベイ観測により  $z \sim 1$  の銀河団の探査が行われている (Oguri et al. 2017)。今回この HSC サーベイにより検出された、高い可視光 richness をもつ  $z > 0.8$  の銀河団数個を解析対象とした。中でも HSC J0850-0009 銀河団は、HSC サーベイで新たに発見され、2017 年 4 月に X 線天文衛星 XMM-Newton により初めて X 線観測が行われた天体である。XMM 衛星の広い有効面積と高い空間分解能を活かして、スケール半径  $R_{500}$  内の銀河団のガスの温度や光度を測定する。本講演では、その結果を報告し、遠方銀河団の温度光度関係や richness との比較について議論する。

1 Oguri, M., et al. 2017, PASJ, in press (arXiv:1701.00818)

## 銀河 c13 COSMOS 領域における EELG の環境効果及びクラスタリング特性

西塚拓馬 (東北大学天文学専攻 M2)

Low-mass 銀河は宇宙誕生から各時代において最も数多く存在する天体であり、銀河進化を解明する上で重要な手掛かりになると考えられている。そのような天体の中で、Emission line galaxies(EELG) は非常に興味深い天体であり、low-mass で非常に高い sSFG を持つことで知られている。 $z \sim 1$  のような近傍の宇宙における星形成銀河の環境効果なども先行研究で研究されているが、BCD や dwarf galaxies の EELG などの環境効果はどの十分に解明されていない。今回、HST の基幹プログラムである ‘COSMOS20 project’ の観測で得られた 3097 天体の EELG を選別した。この EELG は、Subaru Suprime-Cam の 6 枚の広帯域フィルターと 12 枚の中帯域フィルター (IA band) を用いて非常に大規模なサーベイ領域から選択的に選出されている。その EELG の中で最も多く選出された 2340 [OIII] EELGs に特に着目し、環境効果及び大規模構造を評価する為に表面密度及び Auto correlation function(ACF) の評価を行った。クラスタリングの特徴として、10 arcsec 以下の局所的なスケールで [OIII] EELG の ACF がべき型の近似曲線から乖離が見られる特徴があった。IAband での EELG と Non-emitter とで表面密度の結果に対して顕著な相違は見られなかった。同様に EELG の等価毎に分類し表面密度に対する依存性を調べたが大差は存在しなかった。

1 Kajisawa, M. Shioya, other 2013, 768,51 (2013)

## 銀河 c14 活動銀河核における狭輝線領域の赤方偏移進化

仁田裕介 (愛媛大学 M2)

銀河における星間物質 (ISM) が宇宙の歴史の中でどのようにその性質を変えてきたの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、星形成銀河と活動銀河核 (AGN) 母銀河において赤方偏移とともに ISM の物理状態が変化すると BPT 図とよばれる輝線診断図上で輝線強度比がどう変化するかを求めた理論モデルを示している。星形成銀河に関してはこの理論モデルに一致するような観測的結果が報告されているが、AGN 母銀河に関しては high- $z$  における観測的な調査がほとんど行われていないため、ISM の進化の有無は確かめられていない。Araki et al. (2012) では  $itz \sim 3$  の 1 型クエーサー SDSS J1707+6443 の近赤外線分光観測を行い、得られたスペクトルから狭輝線領域 (NLR) における  $[OII]\lambda 3727/[OIII]\lambda 5007$ 、 $[NeIII]\lambda 3869/[OIII]\lambda 5007$  の輝線強度比の測定を行なっている。その結果、近傍 ( $z \sim 0.7$ ) の 1 型クエーサーと比べて、 $[NeIII]/[OIII]$  が高く、 $[OII]/[OIII]$  は低いことが分かった。この結果は SDSS J1707+6443 において、典型的なガス密度が low- $z$  クエーサーよりも顕著に高いと解釈できる。しかし、high- $z$  クエーサーで NLR の輝線強度比を測定した例はまだ少なく、high- $z$  クエーサーの母銀河のガス密度が low- $z$  に比べて系統的に高いのかどうかは不明である。そこで我々は  $z \sim 3$  に存在する 1 型クエーサー 5 天体の近赤外線分光観測を行い、得られたスペクトルから輝線強度比を測定し、光電離モデル計算の結果との比較を行った。その結果、Araki et al. (2012) と同様に、low- $z$  クエーサーのガス密度よりも high- $z$  クエーサーのガス密度が約 1 桁高いことが分かり、またこの高密度なガスが kpc スケールで広がっていることが分かった。講演では、得られた結果を踏まえて high- $z$  クエーサー母銀河における星形成活動についても議論する。

1 Araki et al. 2012, A&A, 543, A143

2 Kewley et al. 2013, ApJ, 774, 100

## 銀河 c15 Lyman $\alpha$ フィードバックによる direct collapse black hole 形成の促進

阿左美進也 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 M1)

今回の発表では、2017 年の "Enhanced direct collapse due to Lyman  $\alpha$  feedback" Jarrett L. Johnson and Mark Dijkstra の論文をレビューする。初期の宇宙では原始ガス雲が収縮する過程で、内部で元素の核融合を起こさずに、重力により直接ブラックホールに崩壊する可能性が示されている。これを direct collapse black hole (DCBH) と呼ぶ。direct collapse が起こるためには、ガス雲が十分に冷却されずに高温を保つことが条件とされる。原始ガス雲の冷却に重要な役割を果たすものとし

て、 $H_2$  の分子冷却があげられる。原始ガス雲の中で  $H_2$  を生成する媒介物として  $H^-$  が大きな割合を占めている。また、先行研究により、近傍銀河からの背景放射によってガス雲中の  $H_2$  および、 $H^-$  が壊されることが分かっている。この論文では、近傍銀河からの背景放射を受ける状況のなかで、原始ガス雲の収縮過程で発生すると考えられている Lyman  $\alpha$  線がこの  $H^-$  を脱離する効果を入れたときに、ガス雲の温度が密度とともにどのように変化するかを、one-zone モデルを用いて調べている。

結果として、背景放射の光源の温度が比較的高い (今回の研究では  $T_{\text{rad}} = 10^4 \text{ K}$  と  $T_{\text{rad}} = 10^5 \text{ K}$  を比較している) 場合において Lyman  $\alpha$  放射の影響が大きく現れることが示された。Lyman  $\alpha$  のフィードバックを入れた場合では、入れない場合に比べて、水素分子を破壊し高温を保つために必要な背景放射の放射率が  $10^2 \sim 10^3$  程度小さくなる。このことから、宇宙初期での若く熱い星の近傍において、今まで考えられてきたよりも多くの DCBH が形成されている可能性が高くなった。

1 Jarrett L. Johnson and Mark Dijkstra Astronomy & Astrophysics, (2017)

## 銀河 c16 隠された活動銀河核の「すざく」広帯域 X 線スペクトル系統解析

谷本敦 (京都大学宇宙物理学教室 D1)

銀河中心には、約 1 億太陽室質量の超巨大ブラックホール (SuperMassive Black Hole: SMBH) が普遍的に存在し、SMBH 質量と銀河質量には強い相関関係がある。この事実は、母銀河と 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している。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。そこで私達は、ダストやガスにより隠された活動銀河核 (Compton-thick Active Galactic Nucleus: CTAGN) に着目した。この天体は、銀河合体後における SMBH の急激な成長段階であると考えられており、SMBH と母銀河の共進化を調べる上で非常に重要である。その中心核構造を解明する為には、透過力の優れた X 線による観測が必要不可欠である。

近年、Swift/BAT による硬 X 線掃天観測は、吸収に対するバイアスを最小限に抑えた近傍 AGN サンプルを提供している。そこで私達は、Swift/BAT 70-month catalog の追及観測で見えられた CTAGN 候補 (Ricci et al. 2015) に着目した。特に X 線天文衛星「すざく」により観測されている 11 天体について、広帯域 X 線スペクトルの系統的な解析を行った。解析の際には、モンテカルロシミュレーションに基づいた部分球対称トラスモデル (Ikeda et al. 2009) を適用した。本講演では、今回得られた結果と Compton-thin AGN の結果 (Kawamuro et al. 2016a) を比較し、CTAGN とそれ以外の AGN が本質的に異なる種族なのかどうかについて議論する。

- 1 Ikeda et al. 2009, ApJ, 692, 608
- 2 Ricci et al. 2015, ApJ, 815, L13
- 3 Kawamuro et al. 2016, ApJS, 225, 14

## 銀河 c17 近傍銀河の大局的磁場ベクトルの構造 藏原昂平 (鹿児島大学 M2)

渦巻き銀河には腕に沿うような形で渦巻き状の磁場構造が見られることが分かっている (Fletcher et al.2011)。磁場構造には磁場の向きや形状による種類があり、軸対称構造の「Axis-Symmetric Spiral (ASS)」や双対称構造の「Bi-Symmetric Spiral (BSS)」、 「Quadri-Symmetric Spiral (QSS)」及び「Ring」の構造があると考えられているが (Stepanov et al.2008)、多数のサンプルでの統一的な手法による分類はまだ不十分である。また、磁場構造の分類は磁場の起源や進化を理解する上で重要である。

今回、我々は安楽ら (2015) の手法を用いて近傍棒渦巻き銀河に対して偏波解析を行なうことで棒渦巻き銀河の磁場ベクトルマップを作成した。この結果、磁場の方向について  $180^\circ$  の不定性がなくなり、磁場ベクトルを  $0^\circ - 360^\circ$  の範囲で決定することができる。データは VLA のアーカイブデータを用い、3 天体について解析を行なった。その結果、これら 3 銀河の磁場構造は、磁場ベクトルが渦状腕に沿っていることを確認した。また、磁場ベクトルの向きを考えると arm-inter arm の磁場の折り返しが見つかり、QSS 構造を持っていることが分かった。

- 1 Fletcher et al.(2011) MNRAS. 412. 2396
- 2 Stepanov et al.(2008) A&A. 480. 45S
- 3 安楽修士論文 鹿児島大学, 2015

## 銀河 c18 ALMA で探る棒渦巻銀河 M100 における巨大分子雲複合体の多様性 早瀬夏子 (慶應義塾大学 M1)

渦巻銀河 M100 (NGC4321) は SABbc に分類される近傍 ( $D \sim 14.3$  Mpc) の face-on 銀河である。可視光スペクトル線観測から中心に低光度活動銀河核を有する可能性が示唆されており (Ho et al. 1997)、また、中心核から 1 kpc 以内の領域 circumnuclear ring (CNR) では活発な星形成が起きていると考えられている。その近隣性および小さな傾斜角から、M100 は通常銀河内の分子ガスの物理状態や星形成活動の環境依存性を広い空間的ダイナミックレンジで調査する上で適したターゲットであるといえる。

Pan & Kuno (2017) は、M100 における巨大分子雲複合体 (giant molecular cloud association; GMA) の多様な物理状態を調べる目的で、ALMA Science Verification で取得された CO  $J=1-0$  輝線データの解析を行った。用いたデータの合成ビームサイズは  $3.8'' \times 2.5''$  ( $\sim 267 \times 174$  pc<sup>2</sup>) である。雲自動同定アルゴリズム CPROPS (Rosolowsky & Leroy 2006) により計 165 の GMA が検出され、それぞれのサイズ、速度分

散、分子ガス質量、ピリアル質量、星形成率が評価された。その結果、M100 内の GMA は、銀河系内の分子雲一般に見られるサイズ-線幅関係 (Larson 則) には従わないことがわかった。CNR に属する GMA は比較的高い星形成率を示し、重くコンパクトかつ速度幅が広い傾向にあった。また、渦状腕に属する GMA の多くは自己重力的に束縛されていることがわかった。加えて、星形成率面密度と分子ガス質量面密度の間に見られる相関関係 (Kennicutt-Schmidt 則) において、M100 内の GMA は、CNR、渦状腕、棒領域でそれぞれ異なるべき指数を示すことがわかった。これは、各領域における星形成は単一のメカニズムではなく、複合的な要因で誘発されることを示唆している。本講演では以上の結果をまとめた論文 Pan & Kuno (2017) のレビューを行い、M100 における分子ガスの物理状態および大局的な星形成メカニズムについて議論する。

- 1 Pan, H.-A., & Kuno, N. 2017, ApJ, 839, 133
- 2 Ho, L. C., Filippenko, A. V., & Sargent, W. L. W. 1997, ApJS, 112, 315
- 3 Rosolowsky, E., & Leroy, A. 2006, PASP, 118, 590

## 銀河 c19 すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam を用いた $z \sim 1$ における AGN-Red Galaxy のクラスタリング 探査 佐藤真帆 (東北大学天文学専攻 M1)

銀河の形成・進化を理解することが天文学における一つの大きな目標である。銀河の多くがその中心に大質量ブラックホール (super massive black hole; SMBH) を持っており、そのうちの 1 割程に活動銀河核 (active galactic nuclei; AGN) が存在しているとされる。AGN は SMBH へのガスの降着であると考えられており、SMBH 質量と母銀河のバルジ質量の間には強い相関関係があることが観測的に知られている。故に、SMBH は銀河と“共進化”してきたということが示唆された。また、銀河はダークマターハロー (dark matter halo; DMH) 中に存在し、小規模なものから大規模なものへと合体を繰り返し成長してきたとされる。そのため、銀河の進化を知る上でハローの質量分布および銀河の周辺環境の理解が不可欠となる。銀河の DMH 質量は、観測による AGN のクラスタリングと N 体シミュレーションを用いた DMH の理論モデルを比較することによって見積もられる。AGN がどのような環境に住んでいるのかということが、銀河の進化、さらには SMBH の成長と密接に関わっていると考えられるため、AGN のクラスタリング測定が重要な意義を持つとして盛んに研究が行われている。そこで本研究では  $1400\text{deg}^2$  という広視野を持つ HSC-SSP Wide の大規模サンプルを生かすことにより、 $z \sim 1$  における QSO と Red Galaxy のクラスタリング解析を行う。QSO については SDSS DR12 のデータの Wide の領域内のものを用いた。銀河サンプルの選択手法としては、Kodama & Arimoto 1997 の種族合成モデルに基づいた楕円銀河の色進化トラックにより色選

扱を行った。本講演では、詳細な解析方法やその結果について発表する。

1 Kodama, T., Arimoto, N., 1997, A&A, 320, 41

2 Shen, Y., et al., 2013, ApJ, 778, 98

## 銀河 c20 低金属度環境における星の輻射による分子雲からのダスト排出

福島肇 (京都大学 天体核研究室 D2)

初代星は重元素を含まない始原ガスによって形成され、典型的には数十  $M_{\odot}$  以上の大質量星となることが理論的に予測されている。これら初代星は超新星爆発により周りに金属やダストを放出し、その後形成される初代銀河はこの低金属度のガスを取り込んで形成される。この際、ガスに含まれるダスト粒子が冷却材として機能するため、高密度コアの分裂が起こり、小質量星が多く形成されると予想されている (Schneider & Omukai 2010)。

低金属度環境において星形成が始まると、分子雲内部に含まれるダスト粒子は輻射圧を受けることでガスと相対速度を持つようになり (Johnson 2015)、やがて外部へ放出される可能性がある。また、分子雲からダスト粒子が排出されると、その後の星形成において高密度コアは分裂することなく、初代星形成と同様に大質量星が多く形成される環境が実現すると考えられる。

本研究では、分子雲の数密度  $n_{\text{H}}$  と半径  $R_{\text{cl}}$ 、星形成効率  $\epsilon_{\text{cl}}$  に対して、上記のようにダスト粒子を含まない分子雲が形成可能であるかを調べた。今回は、分子雲内部は低金属度であり、星からの直接光に対して光学的に薄いことを仮定した。ダストなし分子雲の形成条件として、ダスト粒子が分子雲から排出されるのに要する時間が、大質量星が寿命となり超新星爆発を起こす、もしくは HII 領域が広がり分子雲全体が電離される時間よりも短くなる必要がある。結果として、金属度が  $Z < 10^{-3} Z_{\odot}$ 、星形成効率が  $\epsilon_{\text{cl}} > 0.03$  を満たす際に、ダストなし分子雲が形成可能であることがわかった。また、ダストなし分子雲中で形成される星の化学組成や典型的な質量についても議論する。

1 Schneider, R., & Omukai, K. 2010, MNRAS, 402, 429

2 Johnson J. L., 2015, MNRAS, 453, 2771

## 銀河 c21 コールドダークマターハロー中の等温銀河風の遷音速解析

永野裕太 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 M1)

本発表では、コールドダークマターハロー中の等温銀河風の遷音速解について研究した T. Tsuchiya, M. Mori, S. Nitta (2013) をレビューする。

銀河風はエネルギーや質量の輸送、銀河内での重元素循環や銀河間領域の重元素汚染等、銀河や銀河間空間の進化に重要な

役割を担っている。ここでは、コールドダークマター (CDM) シナリオに基づいた重力ポテンシャルモデル中の等温球対称の定常銀河風の基本的な性質及び遷音速銀河風における CDM ハローの質量密度分布の影響について考えていく。本研究では、銀河風の遷音速解に 2 つのタイプが存在することを明らかにした：(1) 銀河の中心領域から急激に加速される流れ、(2) 有限の半径を持った銀河中心から離れた領域からゆっくりと加速される流れ。いずれの解に対しても、流れの加速の様子が CDM ハローの密度分布に強く依存していることが明らかとなった。また、(1) の遷音速解が存在するためには、中心付近の密度勾配が Navarro, Frenk & White (1996) や Moore et al. (1999) がシミュレーションから得た CDM ハローの中心密度勾配よりも急である必要性を示した。この結果は、中心領域からの遷音速流を理解するためには、中心の大質量ブラックホールや星の構成要素のようなバリオン系によって生じる密度勾配が必要であることを示唆している。一方、(2) で見られるような銀河中心から離れた領域から始まる流れでは、スターバースト現象のような猛烈なエネルギー注入がなくても、ハロー全体でゆっくりと加速されるような流れの存在を世界で初めて予言した。このような遷音速流は銀河間空間の重元素汚染に恒常的に寄与しているかもしれない。今後は恒星系やブラックホールといった CDM 以外の重力ポテンシャル源や流れに沿った質量やエネルギーの流入を含んだモデルについて考えていく。

1 M. Tsuchia, M. Mori, S. Nita, 2013, MNRAS, 432, 2837

## 銀河 c22 ALMA データを用いたサブミリ波銀河の解析

片野未優 (明星大学 M1)

我々の存在する銀河がどのように誕生し、進化してきたのかわかることは重要なことである。本研究では、サブミリ波望遠鏡 ASTE によってサブミリ波銀河が多数検出された、AKARI Deep Field South (ADFS) と呼ばれる領域を、より高い感度と解像度を持つ ALMA 望遠鏡で観測したデータを用いて解析を行った。この解析の目的は、サブミリ波で明るく輝く遠方銀河の赤方偏移を導出し、水素分子ガス質量を求めることである。今回 57 個のサブミリ波銀河を解析し、そのうち 2 個の銀河から有意なガス輝線候補が検出された。そして、計算の結果、赤方偏移の値を  $z=0.3 \sim 3.5$  と導出した。そのため、今回検出されたサブミリ波銀河は、宇宙の星形成率がピークを迎えた時期 ( $z=2 \sim 3$ ) に存在している銀河の可能性が考えられる。また、求められたガス質量の値から、今回検出されたサブミリ波銀河は、これから天の川銀河クラスに成長する可能性があること示唆され、あと 28 万 ~ 4500 万年でガスが使い果たされると見積もった。

## 銀河 c23 棒渦巻銀河のリング構造の解析

## 望月知里 (日本女子大学 理学研究科 数理・物性構造科学専攻 M1)

棒渦巻銀河の周囲にしばしば形成されるリング状構造について、可視光画像を用いて観測的に解析を行った。現在は宇宙大規模構造などに目を向けている研究者が多く、1980年代に盛んに行われていた銀河構造についての研究はあまり活発でない。そのため、ring 形成のメカニズムについては解析がほとんどなされておらず、未だに理論的な論争にも決着がつかない。本研究で観測的に ring を解析することは、ring のでき方を議論する上での重要な一歩となると思われる。

SDSS の第 12 次公開データ (DR12) から 33 個の銀河の *R*-band で撮影された画像を対象として解析を行った。本研究では解析を行うにあたり、IRAF(天体画像解析用ソフトウェア集合体)、および Fortran 言語で作成したプログラムを使用した。まずは、すべての画像に対して、半径方向の輝度分布 (profile) を調べ、銀河から ring 成分のみを抽出した。次に、具体的な解析として、ring 成分の基本的情報 (最大輝度等級やその半径、その等級と銀河全体の絶対等級の関係)、などを解析的に求めた。

ring の最大輝度は 22 から 23 等に密集しているという結果が得られた。また、解析した銀河の中では、最も early-type であることを表す  $0^-$  は存在せず、 $0^0$  から a タイプに集中するということが分かった。また、ring の幅と半径は比例関係にあり、ring の幅が広いほど、ring の半径も大きい傾向があった。幅と半径の比例関係は、RB タイプと RAB タイプでは傾きが異なり、RAB タイプのほうが緩やかな関係を持っていた。解析の中で profile から ring が二重になっているものが見つかり、内部 ring が大きいだけなのか、外部 ring が二重に形成されることがあるのか別の解析の仕方でも検討する必要がある。

- 1 P. Erwin et al. *Astron. J.* 135 20-54 (2008)
- 2 E. Athanassoula et al. *MNRAS* 400 4 1706-1720 (2009)
- 3 R. D. Grouchy, et al. *Astron. J.* 139 6 (2010)

## 銀河 c24 AGN と銀河の共進化 田中悠太郎 (東北大学天文学専攻 M1)

多くの銀河の中心には超巨大ブラックホールがあることが知られています。質量にして太陽の質量の 100 万倍から 10 億倍の質量をもつ超巨大ブラックホールが一体どのようにしてそこまで巨大に成長したのか、依然謎は多く、活発な議論の対象になっています。かつて活動銀河核や銀河中心のブラックホールは、中心のごく小さな領域の中で起こる局所的な現象として、銀河全体の進化とは切り離されて考えられてきました。しかし近年、大質量ブラックホールの質量は銀河の回転楕円体成分 (スフェロイドやバルジ) の質量と非常に良い比例関係を示すことが明らかにされ、両者のサイズは 10 桁ほど異なっているためなぜこのような関係があるのかが大きな問題としてクローズアップされました。この相関関係はまさにブラックホールと銀河が共に進化してきたこと、お互いにフィードバックを与え

つつ進化してきたことを示唆する証拠であり、それを説明するための銀河と大質量ブラックホールのフィードバックモデルが複数提案されています。そしてそのモデルの一つに中心の活動銀河核やブラックホールが周囲の環境に対して放射圧を与えることにより、そこに含まれるダストやガスを吹き飛ばし、銀河の進化にフィードバックを与えるという radiative feedback model があります。ここではすでに示したようなブラックホールの影響がキロパーセクスケールで起き、星生成を抑制することで再びブラックホールに影響を与え、銀河の進化に大きく関わるフィードバック機構を考察する。

## 銀河 c25 電離光子脱出率と銀河の特徴との関係 角田匠 (名古屋大学 C 研 M2)

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  $z \sim 7$  までにほぼ完了したと考えられている。しかしながら、再電離を引き起こした電離光子源がなんであったかは明らかでない。再電離期に多くの銀河が存在することは既に観測で確認されており、これら高赤方偏移銀河は電離光子源の有力な候補であると期待される。電離光子脱出率 ( $f_{\text{esc}}$ ) は銀河内で生成された電離光子が銀河間空間に供給される割合を表しており、銀河がどの程度再電離に寄与したのかを理解する上で重要な量である。しかし、その平均的な値は理論的にも観測的にもコンセンサスは得られておらず、数値シミュレーション結果は多様な値を示すことが知られている。

本研究では、単純化した銀河モデルについて Ray-Tracing 法による電離構造計算を行うことで銀河の内部構造が  $f_{\text{esc}}$  に与える影響を調査した。その結果、多様性を生み出す一番大きな要因は銀河内の光源の位置であり、これは  $f_{\text{esc}}$  に 2 桁程度のばらつきをもたらすことを示した。また、銀河内部構造が非常に非一様で高密度なガスの塊 (clump) が多数存在する場合、clump の総質量が銀河ガス質量の 10% を超えると  $f_{\text{esc}}$  が高くなる事、clump の質量、大きさなどによって  $f_{\text{esc}}$  が 5 倍程度の変化することも明らかにした。本発表では、これらの結果を踏まえ、 $f_{\text{esc}}$  を決める重要な要素は何か議論する。

- 1 Fernandez E. R., Shull J. M., 2011, *ApJ*, 731, 20
- 2 Yajima H., Choi J.-H., Nagamine K., 2011, *MNRAS*, 412, 411

## 銀河 c26 三次元流体シミュレーションの non-LTE 法による [Cl] の解析

## 村颯太 (鹿児島大学 M1)

分子線、原子線観測は活動銀河核 (AGN) 周辺の構造を解明するのに有効な手段のひとつである。近年、ALMA などによるミリ波、サブミリ波領域での高分解能観測技術の発達により、分子ガスから放射される輝線を用いて AGN 周辺の分子ガスの詳細な構造が明らかになりつつある。原子にはエネルギー準位の微細構造の遷移による中間赤外から遠赤外にかけて微細構造禁制線と呼ばれる禁制線が存在する。これらの輝線は赤外領域にあるため星間ダストによる減光を受けにくく、今日では赤外線観測の重要な分野となっている。

本研究では AGN の 3 次元輻射流体シミュレーションデータ (Wada 2012) を基に、モンテカルロ法と non-LTE 法を用いて輻射輸送方程式を解き [CI] の微細構造禁制線の輝線強度図を再現した。モンテカルロ法とは乱数を用いて擬似光子の伝搬シミュレーションを行う方法であり今回は Wada Tomisaka(2005) の手法を用いた。[CI] には 3 準位の微細構造が存在する。これらの輝線強度比や X-factor の分布の特徴について議論する。

1 Wada K., Schartmann.M., Mejerink R. 2016, arxiv:1511.08815

## 銀河 c27 宇宙再電離期におけるライマン 輝線銀河の遠赤外線 [OIII]88 $\mu$ m 輝線の ALMA 高分解能観測 浦田裕樹 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

宇宙再電離の時代 ( $z \sim 11-6$ ) における若い星形成銀河の星間物質の物理的情報や重元素量を観測的に理解することは、銀河がどのように再電離に寄与したかを知るうえで、きわめて重要である。

Inoue et al.(2016) は、 $z=7.2$  におけるライマン 輝線銀河 SXDF-NB1006-2 に対し、ALMA を用いて遠赤外線 [OIII]88  $\mu$  m 輝線、[CII]158  $\mu$  m 輝線、およびダストからの遠赤外放射の探査を実施した。その結果、[OIII]88  $\mu$  m 輝線の検出に成功した。しかし、その一方で [CII]158  $\mu$  m 輝線とダストからの遠赤外線放射は検出されなかった。そして、この [OIII] 輝線とすばる望遠鏡の観測から得られたライマン 輝線との相対速度  $v_{Ly}$  は比較的小さい ( $\sim 110$ km/s) ことがわかった。このことは、銀河内の HI の柱密度が、 $Ly$  輝線で明るい (紫外線で明るい) 低赤方偏移 ( $z \sim 2-3$ ) 銀河に比べて小さいことを示す。

また、金属量や星形成率 (SFR) 等の物理量を求めるため、静止系紫外線から遠赤外線にわたるスペクトルエネルギー分布モデルを行った。その結果、この銀河は太陽組成のおよそ  $1/10$  程度の金属を保有している若い ( $\sim 10^6$ yr) 星形成銀河 (SFR  $\sim 340 M_{sun}/yr$ ) であることがわかった。また、銀河間空間への電離光子の脱出率が、約 50% と比較的高いことが示唆される。これらの結果から、この銀河の星間物質は、同規模の

星形成率をもつ低赤方偏移の星形成銀河と比較して、ダストや HI ガスが欠乏しており、星間物質が非一様で多孔性のある分布をなしているものと推定される。

本講演では、Inoue et al.(2016), Science, 352, 1559 をレビューし、同天体に対して追加で実施した ALMA の高分解能観測の結果を報告する。

1 Inoue et al.(2016), Science, 352, 1559

## 銀河 c28 VVV アーカイブデータを用いた銀河系中心領域近赤外減光則の導出 長友峻 (京都大学宇宙物理学教室 D3)

星間空間には炭素やケイ素、鉄などから成る固体微粒子が存在する。これらの星間微粒子による減光は、星の明るさからその星までの距離を推測する際に問題となる。減光量を見積もる方法の 1 つは減光の波長依存性、つまり減光則と赤化量を用いる方法である。減光則は「どれだけ赤くなったらどれだけ減光されているか」を表す。一方、赤化量はその星が真の色からどれだけ赤くなったかを表す。減光則は空間的に変化する可能性が示唆されており、さまざまな観測方向について研究が行われている。

近赤外サーベイデータとして、Vista Variables in the V<sub>ia</sub> L<sub>’</sub>actea (VVV) サーベイのアーカイブデータがある。VVV の等級較正には 2MASS が用いられているため、VVV を用いた研究では 2MASS データから求めた減光則である Nishiyama et al. (2009; 以下 N09) を変換したものが使用されている (例 D’ek’any et al. 2015)。しかし、それらの結果の一部は IRSF 望遠鏡で求められた Nishiyama et al. (2006; 以下 N06) の減光則を用いた研究結果と一致しない (Matsunaga et al. 2016)。そこで N06 と全く同じ解析を VVV のアーカイブデータで行い、VVV で使える減光則を導出した。

N06 では銀河系中心部  $3^\circ \times 2^\circ$  の領域を用いて、レッドクランプ (RC) メソッドで減光則を求めていた。N06 と同様の解析を VVV データで行い、RC の平均等級・平均色指数が精度よく求められた小領域から各バンドの減光則を求めたところ、 $A_{K_S}/E(H-K_S) = 1.2$ ,  $A_{K_S}/E(J-K_S) = 0.475$ ,  $A_H/E(J-H) = 1.48$  という結果を得た。N06 の値  $A_{K_S}/E(H-K_S) = 1.44$ ,  $A_{K_S}/E(J-K_S) = 0.494$ ,  $A_H/E(J-H) = 1.42$  と比較すると、 $H, K_S$  や  $J, K_S$  については今回の値の方が小さくなっている。

なぜ N06 より傾きが小さくなったかを考察するために、VVV と IRSF の等級、色を比較したところ、 $J, H, K_S$  バンドの等級には  $\sim 0.2$  等程度の systematic な違いがあることが明らかになった。したがって、この減光則の違いは観測装置由来であると推測される。本講演ではこれらに加え、今回求めた減光則の値が VVV を用いた研究に与えるインパクトについても言及する。

1 Nishiyama, S. et al. 2006, ApJ, 638, 839.

