

2020 年度 第 50 回 天文・天体物理 若手夏の学校  
銀河・銀河団分科会 アブストラクト

---

諸隈 佳菜 (東京大学 大学院・理学系研究科・天文学教育研究センター・日本学術振興会特別研究員 (RPD))

8月24日 14:30–15:30 room 2

## 居住環境が銀河の低温星間物質・星形成の性質に与える影響

銀河の星形成活動性は、銀河の質量だけでなく、その居住環境によっても異なることが知られている。質量の大きな銀河は居住環境に関係なく一般的に星形成活動性が低いものが多い。一方で質量の小さな銀河は、銀河が疎な環境下では活発な星形成をしているものが多いが、銀河が密な環境下では星形成活動性が低いものが多くなる。宇宙の超初期を除いて、銀河における星形成の材料は、基本的に水素分子ガスであると考えられており、銀河の星形成活動性を左右するものを明らかにするためには、水素分子ガスの情報が不可欠である。また、銀河が密な環境としては、銀河群・銀河団などが挙げられるが、質量とその内訳（ダークマター・銀河間ガス・星など）や、力学状態にも多様性がある。そのため、銀河群・銀河団の性質と、そこで働く星形成抑制機構の関係を明らかにすることも重要である。そこで、我々は様々な銀河群・銀河団銀河の水素分子ガスや中性水素原子ガス（低温星間物質）の観測データを取得・収集し、所属銀河の低温星間物質と星形成の性質を系統的に調査している。本講演では、銀河における低温星間物質の性質や、銀河群・銀河団環境下で働くと考えられている星形成抑制機構に関する研究などの現状をレビューし、我々が主にアルマ望遠鏡を用いて進めているプロジェクトを紹介する。

---

澁谷 隆俊 (北見工業大学 工学部 助教)

8月25日 15:45–16:45 room 2

## 銀河形態 - 現状の理解と未解決問題 -

銀河の研究が始まって以来、最も古くから調べられてきた性質の一つ、銀河形態。これまでの数々の観測により銀河形態の規則性と多様性が認識されている。SDSS やハッブル宇宙望遠鏡の大規模データからは、赤方偏移  $z$  0-10 の銀河形態進化の大枠が見えてきた。また、面分光装置や ALMA による観測から、銀河形態と他の物理的性質との関係性が明らかにされつつある。観測データのビッグデータ化、機械学習などの情報科学技術の発展、次世代望遠鏡で得られる高解像撮像/分光データにより、銀河形態研究は今後益々進展すると期待される。本講演では、銀河形態に纏わる最近の研究を紹介し、現状の理解について整理する。さらに、銀河形態研究の未解決問題をまとめ、今後の展望について述べる。

## 銀河 1 ダークマター欠乏銀河はどうやってできたのか？

大滝 恒輝 (筑波大学 数理物質科学研究科物理学専攻 M2)

現在の銀河形成の標準モデルでは、コールドダークマターによる階層的な構造形成がその主要な枠組みとして受け入れられている。しかし最近の観測で、楕円銀河 NGC1052 に付随する衛星銀河 NGC1052-DF2 と NGC1052-DF4 のダークマター質量が理論的に予測される量よりも極端に少ないことが示唆された (van Dokkum et al. 2018, van Dokkum et al. 2019)。これらの銀河は、天の川銀河程度の有効半径に対して、表面輝度が矮小銀河程度である特徴を持つ Ultra Diffuse Galaxies (UDGs) に分類されている。さらに、HI 輝線が観測された 6 つの UDGs の回転速度が、他の銀河に比べて約 3 倍遅いことが発見され、ダークマターをほとんど含まないことが確認された (Mancera Pina et al. 2019)。他にも、赤方偏移  $z=0.6-2.6$  の大質量星形成円盤銀河に対してスタックされた回転曲線が半径とともに減少していることが発見された (Genzel et al. 2017)。以上のようなダークマター欠乏銀河の存在は現在の銀河形成論では非常に困難であり、それらの形成シナリオを検討する必要がある。

我々はダークマターサブハロー同士の衝突によってダークマター欠乏銀河が形成される可能性を考え、3次元銀河形成シミュレーションを行った。その結果、衝突速度 100 km/s の場合にダークマターバリオン比が 0.4 となるダークマター欠乏銀河が形成されることを示した。さらに、ダークマターサブハローの衝突速度がダークマター欠乏銀河の形成可能性に与える影響を調べた。低速衝突の場合には通常の銀河が形成され、300 km/s を超える速度の場合にはダークマターバリオン比が 0 の銀河が形成されることがわかった。本発表では、ダークマター欠乏銀河の形成条件について、一次元の流体モデルを用いた解析結果とともに報告する。

## 銀河 2 天の川銀河における Subhalo の衝突過程

数野 優大 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 M1)

現在の銀河形成論では宇宙初期の Cold Dark Matter (CDM) のわずかな密度揺らぎによって銀河や銀河団が作られたとする CDM 理論が隆盛を極めているが、銀河サイズほどの小さなスケールになると理論と観測で一致しない問題が複数現れる。銀河 (Host Halo) に束縛された矮小銀河 (Subhalo) の個数が桁違いに異なる Missing Satellite Problem もこの問題の一つであるが、これを解決する考えとして観測不可能なほど暗い Subhalo が存在すると主張する Dark Satellite 仮説が挙げられる。先行研究では Dark Satellite が Stellar stream と衝突した可能性を示唆する観測結果が発表され、Dark Satellite の存在を衝突現象から示せるのでは

ないかと考えられるようになった。すなわち Dark Satellite 自身は観測が困難であるが、仮に Dark Satellite と観測可能な Bright Satellite が衝突過程を起こすならばその際の Bright Satellite を観測することで Dark Satellite の存在を間接的に示すことができる。しかし Subhalo どうしの衝突頻度や衝突過程については未だ詳しく調べられておらず、衝突が起こり得るのかも定かではない。そこで本研究では、Ishiyama et al. 2015 の宇宙論的 N 体シミュレーションから得られたデータのうち、特に天の川銀河に類似した Host Halo を探し出し、その Host に束縛された Subhalo の位置・速度座標を初期条件にして Subhalo 同士の衝突頻度を求めた。このとき衝突頻度計算では、Subhalo の分布と運動を単純化したモデルで解析的に求める方法と、Subhalo 自体を質点近似し直接計算法を用いた N 体数値計算、Subhalo を多粒子で表現することで有限の大きさを持たせて Tree 法を用いて解いた N 体数値計算の 3 つの方法から独立に算出し、その衝突頻度をそれぞれの近似レベルに応じて求めた。その結果、現在見積もられている宇宙年齢の間に少なくとも数回のオーダーで Subhalo 同士が正面衝突することが解析的にもシミュレーションからも判明した。これより Dark Satellite と Bright Satellite の衝突が現実的に起こり得ることが示され、Dark Satellite を衝突過程から見つけ出すことが可能であることを突き止めた。講演では更に Host 銀河の進化を考慮した場合の Subhalo の衝突回数についても議論する予定である。

## 銀河 3 銀河団 RXJ1347-1145 の数値シミュレーション

石崎 滉也 (筑波大学 数理物質科学研究群物理学学位プログラム M1)

銀河団 RXJ1347-1145 は X 線表面輝度と X 線表面温度の分布のピークが柱密度の分布のピーク位置からずれており、柱密度の分布の長軸短軸比が約 1.5 の細長いサブ構造も確認されている。これが銀河団同士の衝突でどこまで再現できるかを、SPH+N 体コードを用いて数値実験をした。その結果、球対称の銀河団同士の衝突では、X 線表面温度分布は近いものが再現できたが、X 線表面輝度と柱密度の分布のピークの位置のオフセットが 2 倍以上となった。そこで、2 つの銀河団の質量比や中心集中度を変え、空間分解能をあげた計算も行った結果、概ね X 線表面輝度・X 線表面温度分布は再現できた。しかし、柱密度の細長いサブ構造を再現することはできなかった。そこで、銀河団の初期状態を楕円体として数例計算してみたところ、このサブ構造を得られる可能性があることがわかった。このことは、形成段階で既に極端に潰れた楕円体の銀河団が存在していた可能性を示唆している。

## 銀河 4 QU-fitting による複雑なファラデースペクトルの構築

國分 厚志 (熊本大学 自然科学教育部理学専攻 M1)

磁場は惑星や恒星、星間空間、銀河間空間といった宇宙のあらゆる階層に普遍的に存在しており、天体の進化を明らかにする上で重要な手掛かりの一つとなる。磁場の情報を得るため、本研究ではファラデーモグラフィという手法を採用している。この手法は、観測されたシンクロトロン放射の偏波強度スペクトルから視線上の磁場分布を推定するというものである。視線上の磁場分布はファラデースペクトルにその情報が含まれている [1]。偏波スペクトルとファラデースペクトルは互いにフーリエ変換の関係にあり、偏波スペクトルを波長の 2 乗に関してフーリエ変換することで、ファラデースペクトルを得ることができる。しかし、波長の 2 乗空間の全ての点を観測することが不可能であることから、得られるファラデースペクトルは不完全なものとなる。

そこで、より精度良くファラデースペクトルを構築するため QU-fitting という手法を用いる。この手法では、ガウシアンやデルタ関数などのモデルを仮定し、観測量を良く説明するモデルパラメータを MCMC によって推定する。

本研究では、シミュレーションで作成したシンプルな銀河モデルを、銀河磁場のピッチ角と視線の傾きを系統的に変化させた場合の観測を想定し、ファラデースペクトルを解析的に計算する [2]。得られたファラデースペクトルが QU-fitting によってどの程度再現できるかシミュレーションを行う。構築はガウシアンの組み合わせで行い、情報量規準によってモデルを選択することにする。また QU-fitting は複数回行い、構築されるモデルのパラメータ値が局所解にトラップされる頻度も見る。さらに構築されたモデルのガウシアンの偏光角が一定値、線形の時で QU-fitting の結果を比較し、偏光角のファラデースペクトルやその位相への寄与を考察する。

参考文献：

- [1]Brentjens M. A., de Bruyn A. G., 2005,A&A, 441, 1217
- [2]H. Eguchi, M. Suzuki, Y. Miyashita, S. Ideguchi & K. Takahashi, 2020, Astrophys. J., accepted

## 銀河 5 ファラデーモグラフィを用いた銀河磁場探査

二木 惇太郎 (熊本大学 自然科学教育部博士前期課程理学専攻 M1)

宇宙には様々な天体に磁場が存在し、ダイナミクスや高エネルギー現象と深く関わっている。そのため、磁場はその天体の進化の解明に不可欠である。宇宙磁場はシンクロトロン放射のファラデー回転を観測することによって分かる。ファラデー

回転とは偏波が磁場中を通る際に偏波面が回転する現象である。観測された偏波は視線方向に積分された量であるため、その分布情報は分からない。そこで、磁場の視線分布を推定する新しい手法としてファラデーモグラフィが注目されている [1]。ファラデーモグラフィは観測されるシンクロトロン放射の偏波スペクトルからファラデースペクトルと言われる  $\phi$  空間における偏波強度分布を構築する手法である [2]。 $\phi$  はファラデー深度と呼ばれ、熱的電子密度や視線方向に沿った磁場の積分量である。我々は QU-fitting と呼ばれるモデルフィット法によって観測データをよく説明するファラデースペクトルを複数のガウス関数やデルタ関数などのシンプルなモデルを仮定して、パラメータサーチの手法としてマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) を用いる [3]。本研究では ASKAP と呼ばれる望遠鏡で観測された偏波スペクトルを用いる。ASKAP の観測データは 1GHz 帯で系外銀河のサーベイ観測である。我々は QU-fitting を用いてファラデースペクトルを構築し、その中から銀河磁場の情報を探る。

参考文献：

- [1]SKAJP\_Science\_Book\_2020
- [2]Brentjens M. A., de Bruyn A. G., 2005,A&A, 441, 1217
- [3]Miyashita Y., Ideguchi S., Nakagawa S., Akahori T., Takahashi K., 2019, MNRAS, 482, 2739

## 銀河 6 銀河の確率的モデリングと大規模サンプリングで探る元素存在量確率分布の銀河進化

山崎 雄太 (国立天文台・東京大学 理学系研究科天文学専攻 D1)

鉄以降の重元素は中性子捕獲過程により合成され、その半数は r-process と呼ばれる過程で生成される (Burbidge et al. 1957)。r-process は非常に高速で進む非平衡過程であり、核実験的にも理論的にも未解決の議論を多く残している。宇宙における物質進化の理解には r-process 元素の時間進化の解明が不可欠である。

r-process は中性子星連星合体 (NSM) や超新星爆発 (SN)、コラプサーで発生すると考えられている。特に 2017 年の NSM に伴う重力波、短ガンマ線バースト、キロノヴァの同時観測により注目を集めただけでなく、重力波や短ガンマ線バーストが NSM の発生頻度の指標として利用可能であることが観測的に示された (Abbott et al. 2017)。

また、銀河における重元素の観測も近年 SUBARU や LAMOST を中心に行われており、元素進化の観測的データが急速に増えている。

そこで、我々は銀河における元素存在量の分布を理論的に解明し、観測データと比較することを目標とした。我々の先行研究により、銀河内での平均的な r-process 発生頻度は理論的側面からも見積もられており、元素観測データ

に見られる平均的な傾向と無矛盾なモデルが得られている (Yamazaki et al. 2020 submitted).

本研究では、先行研究における  $r$ -process の単位時間あたり頻度を発生確率とみなし、銀河内で  $r$ -process 元素合成が確率的に発生するモデルを構築した。これを用い、異なる歴史を持った小銀河を大量にサンプリングした。各小銀河は実際の銀河を空間的に分割したものの一つと見なすことができる。サンプル内の重元素存在量のばらつきを統計的に評価することで、重元素存在量の確率分布を推定した。また、それらを  $[\text{Fe}/\text{H}]$  の関数として表すことでその時間進化の理論的予測を行った。

本研究は NSM、SN、コラプサーで合成される重元素の分布を同時に計算した初めての研究であり、銀河内の星々に見られる元素量の分散を理論的に議論できる新しい枠組みである。

## 銀河 7 降着した球状星団ストリームを通したダークマターの性質の調査

常盤 晟 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

Malhan et al. による恒星ストリームを用いて銀河サブハローの内部分布を調べる新しい方法を提案する論文のレビューを行う。低質量銀河の中心ダークマター密度分布が、宇宙論的  $N$  体シミュレーションでは小半径で急峻 ("cusp") であるが、観測ではフラット ("core") という core-cusp 問題がある。矮小銀河などの低質量銀河のハロー領域におけるダークマター中心密度分布の急峻さは、ダークマターの性質を知るための有力なプローブである。著者らは降着した球状星団ストリームの現在の形態学的・力学的特性が、その親となる低質量銀河の中心ダークマター密度分布と質量に敏感であることを示した。球状星団の降着と考えられる天の川銀河のストリーム "GD-1" と "Jhelum" とシミュレーションを比較した結果、"cusp" な CDM サブハロー由来の球状星団よりも "core" なサブハロー由来のものがよりよく説明できることを示した。これらの結果は将来のデータによって否定されなければ、ダークマターの "cusp" さは、活動銀河核や超新星爆発などのバリオンフィードバックによって払拭されたか、それらのサブハローは CDM を超えた素粒子物理学モデルを示唆する "core" な密度分布を自然に持つことを意味している。また、降着した球状星団のストリームは高度な構造を持ち、平行構造や "spurs" などの複雑な形態的特徴を示している。このことは、最近観測された幾つかの天の川銀河ストリームの特異性を降着シナリオが自然に説明できることを示唆している。加えて、球状星団の親サブハローの残骸がのちに球状星団ストリームを通過する際に、恒星ストリームにギャップを形成する新しいメカニズムを提案した。これは、球状星団ストリームと親サブハローが小さな相対速度で似たような軌道にあるため、これまで考えられてきた DM サブハローとのランダムな遭遇よりも、より長い時間持続させることができるということである。

## 銀河 9 星団の高速・高精度シミュレーション用アルゴリズム BRIDGE とその応用

平島 敬也 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 M1)

銀河内部に存在する星団に対し、十分にセルフコンシステントな  $N$  体シミュレーションを行うためには、星団部分は高い精度が必要なものに対して、銀河部分は高速に計算できるスキームが必要になる。本講演では、このシミュレーションを行うために、新しいアルゴリズムとして、星団部分と銀河部分をそれぞれ別の方法で計算するハイブリッド法 (BRIDGE) を提案した論文 (Fujii et al. 2007) をレビューする。まず、星団内部の積分では、銀河部分とは独立したタイムステップを決め、直接エルミート法を用いることにより高精度に計算した (ダイレクト法)。次に、銀河部分は二次のリープ・フロッグ法を用いてツリーコードにより高速に計算した (ツリー法)。銀河部分の運動に対応するハミルトニアンはリープ・フロッグ法を用いて積分されるので、シンプレティックである。BRIDGE を用いることで、銀河内部に存在する星団の十分にセルフコンシステントなシミュレーションが可能になり、ダイレクト法を用いて星団の内部進化と軌道進化を計算した結果と良く一致した。また、BRIDGE は星団のシミュレーションだけでなく、頻繁に衝突が起こる領域を内部に含む、大規模な  $N$  体シミュレーションにおいて広く一般に応用が可能であることが示唆されている。本レビューでは、BRIDGE のアルゴリズムの詳細やシミュレーション結果の説明を行い、BRIDGE を応用した展望について述べる。

## 銀河 10 バー共鳴によって作られる Hercules stream の 3 重構造

朝野 哲郎 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 M2)

Gaia 衛星や Hipparcos 衛星による位置天文観測から、太陽近傍の星の速度空間分布には Hercules stream と呼ばれる特徴的な構造が見られることが知られている。Hercules stream は、軸対象銀河モデルでは説明できない構造であるため、バーや渦状腕といった銀河の非軸対象構造と関連付けてその起源が議論されてきた。具体的には、バー由来の 2:1 outer Lindblad resonance (OLR) や Corotation resonance (CR) に束縛された星が Hercules stream を形成していると考えられているが、その詳細は未だ解明されていない。

我々は、世界最大規模の天の川銀河  $N$  体シミュレーション (Fujii et al. 2019) のデータを解析して、バー共鳴と粒子の位相空間分布の関係を調べた。モデル銀河内の様々な場所で粒子の速度空間分布を求めると、銀河中心から 8 kpc、バーの長軸に対する角度  $20^\circ$  の位置で、Hercules stream に類似した速度空間構造が現れることがわかった。粒子

の軌道解析を行うと、Hercules-like stream に属する粒子の多くが 4:1 OLR と 5:1 OLR に属していた。さらに、動径-回転速度空間などでも観測とシミュレーションで星の分布を比較することで、観測でも 4:1/5:1 OLR さらに CR の組み合わせで Hercules stream を説明し得ることが示された (Asano et al. 2020)。この結果は、Hercules stream が 3 重構造をもっているという Gaia DR2 の観測事実とも整合的である。本講演では、銀河構造の時間変動が星の位相空間分布に与える影響等についても議論する。

## 銀河 11 渦状腕構造中の星のエピサイクル位相同期メカニズム

吉田 雄城 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 M2)

銀河の渦状腕構造形成は銀河研究の大きな問題の一つである。近年の研究により、渦状腕は破壊と形成を繰り返す準定常パターンであることが示され、恒星が集団として運動している物質腕であると考えられている。この形成過程として、leading の波が差動回転により trailing の波になり、その間に自己重力によって個数密度が増幅されるというスウィング増幅が考えられている (Julian & Toomre 1966; Toomre 1981)。スウィング増幅のメカニズムとして、銀河円盤中の密度揺らぎを摂動源とする重力散乱により、その周辺で渦状腕構造が形成されることが考えられている。また、スウィング増幅による渦状腕の形成を調べた N 体シミュレーション研究では、渦状腕形成時に恒星の軌道の位相が同期することが確認されている (Michikoshi & Kokubo 2016; 2018)。

我々はこの摂動源による重力散乱に注目し、スウィング増幅の素過程を制限三体問題に還元して考えた。恒星の軌道進化と位相同期を調べるために、周転円近似を用い、摂動源を質点とみなし、恒星の質点による重力散乱過程をシミュレーションした。その結果、摂動源の重力散乱が恒星の周転円運動の位相を同期させることを示した。次に我々は、一様分布の恒星集団を用意し、各恒星の軌道進化を制限三体問題として解き、重力散乱で生じる恒星の個数分布の構造を調べ、スウィング増幅の引き金となる高密度領域を確認した。そして、円盤パラメータや初期の恒星軌道要素に対する高密度領域の構造の依存性を調べた。また、より現実的な系を考えるために、摂動源を長楕円体とみなし、長楕円体の大きさ、軸比、ピッチ角に対する位相同期の依存性を調べた。そしてこれらの結果から恒星軌道の位相が収束する条件と実際の銀河渦状腕構造が、どのように対応するのかを議論する。

## 銀河 12 軌道計算に基づく天の川銀河ハローの構造解析

佐藤 元太 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M2)

天の川銀河は地球や太陽が含まれる、我々に最も近い銀河である。しかし、それでもその空間的構造・動力的構造は完全に理解されているとは言えない。特に、ハローと呼ばれる空間的に広い領域を占める構造に属する天体は、銀河の中心部 (バルジ) や銀河円盤の恒星と比較して暗いものが多い。したがって長らくそれらの天体を正確に観測することは難しかったため、ハローの構造や特徴にはまだ明らかになっていない点が多く残されている。

本研究では、このハロー天体に着目して、観測データを基に軌道を計算することでハローの構造を明らかにした。ハロー天体の観測が難しいことは上述の通りだが、太陽近傍を通過する天体は観測によりその位置や速度を決定することができる。ただし、太陽近傍を通過する天体にはバルジや円盤に所属するものも含まれるため、ハロー恒星を識別するために、金属量をベースにデータを選別した。ハローは銀河の中で最も古くに形成された構造であるため、それに属する恒星は他の恒星と比べて重元素の量が少ない。この特徴を利用して、観測データベースからハロー天体のデータを抽出して、本研究で取り扱った。

恒星の軌道を計算し、それを基に構造を解析する手法は Jesper Sommer-Larsen & Chen Zhen 1990 と同様の手法を採用した。具体的には、まず銀河の重力場を適切な形式で仮定し、その重力場内での観測された各天体の軌道を計算した。次に、それらの軌道ごとに適切な重みを設定し、重み付きで軌道を足し合わせることで、系全体の確率密度分布とした。この確率密度分布が実際のハローの密度分布を再現しているため、ハローの特徴を明らかにすることができるのである。なお、本研究において、天の川銀河の重力場として St\UTF{00E4}cke1 型ポテンシャルと呼ばれるものを採用した。この形式の重力場を用いると、天体の軌道を厳密に数式で表現することができるため、密度分布を正確に計算することができるという利点がある。

## 銀河 13 Gaia DR 2 による観測的 HRD の作成

掛川 魁 (新潟大学 宇宙物理学研究室 M1)

欧州宇宙機関 (ESA) の位置天文衛星 Gaia はおよそ 13 億個の星に対してその位置、運動、光度、表面温度、組成などを測定し、銀河系の非常に精巧な 3 次元地図を作成する。2016 年に最初の Data Release 1 (DR 1) が行われ、2018 年 Data Release 2 (DR 2) の公開によって、およそ 13 億個の光源に対する高精度の位置測定と 3 バンド測光観測が可能となった。前身となる Hipparcos では距離が 100pc 以下の星までの距離しか見えなかったのに対して、Gaia では距離が 10kpc までの観測が可能となっている。次の Data Release 3 によって星の研究が新たな段階に進むと考えられており、具体的にはデータの完全性、精度、正確性の向上だけでなく分光測光や分光などの分野における発展をもたらすことが期待されている。

現在、DR 2 をもとにして様々な分野の研究が行われている

が、ここでは DR 2 で得られたデータを用いて、星の種族に応じた様々な Hertzsprung-Russell diagram(HRD) の微細構造の研究を行った論文のレビューをする。フィールドと星団の両方の星について、観測結果をこれまでの分類や星の進化トラックと比較し、星の年齢、金属量などに対する Gaia HRD の変化を見ていく。Gaia HRD は、銀河系の様々な星の種族や進化段階の精度と填補範囲において前例のないものとなっており、星の年齢や金属量による変化は大規模な星団の主系列や巨星分枝によって明確に描かれる。したがって、Gaia DR 2 は星の進化や種族の研究のための大規模なサンプルに対して正確な位置測定と測光観測を組み合わせたという可能性を示唆し、HRD ベースの研究に新たな領域を開いた。

## 銀河 14 すばる/HSC で探る近傍極金属欠乏銀河の動力学

磯部 優樹 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M2)

我々の研究グループは、HSC-SSP の深撮像データから機械学習を用いて選ばれた 27 個の近傍極金属欠乏銀河 (EMPG; Kojima et al. 2019) 候補天体について調査を進めている。これまでの研究で EMPG は若く ( $< 30$  Myr)、小星質量 ( $10^{(5-6)}$  Msun) であり、高い比星形成率 ( $\sim 100 \text{ Gyr}^{-1}$ ) を示すことが分かっており、これらの性質は遠方初期銀河と類似している。我々はこれまでに 27 天体中 17 個の EMPG 候補天体を分光し、そのうち 14 天体のごく近傍 ( $z = 0.01 - 0.06$ ) の輝線銀河であると認定され、そのうちの 11 天体は EMPG の条件である  $Z \leq 10\% Z_{\text{sun}}$  を満たすことが確かめられた。また、Isobe et al. 2020 では、我々の EMPG の過半数には淡い銀河 (potential associated galaxy, 以下 PAG) が付随していることを報告した。この性質は他の EMPG でも報告されているが、長らく EMPG は PAG 内部にあるとされてきた。

本講演では、分光認定された 11 天体のうち PAG から輝線を検出できた 4 天体について赤方偏移差から相対速度を調べたところ、PAG の回転運動では説明できない程度の比較的大きな速度差 ( $\sim 130 \text{ km s}^{-1}$ ) を示す EMPG が 1 天体見つかった。この結果は EMPG が PAG 内部にあるとする従来の描像には当てはまらず、PAG 外部で形成した EMPG が存在する可能性を示唆するものである。

## 銀河 15 空間分解した近傍渦巻銀河におけるダスト減光量と星形成率、星質量関係

北條 妙 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

星間空間には重元素の固体微粒子であるダストが存在する。

ダストは星の放射を吸収・散乱し、一般に銀河の観測されるスペクトルを赤化し、吸収したエネルギーを遠赤外線として再放射する。これにより本来のスペクトルを得るためにはダストによる減光の補正を行わなければならない。また、減光によって紫外線が過小評価され星形成率の推定を困難にするため、推定には紫外線と赤外線の両方の観測を総合する必要がある。このように銀河における物理量を考える上でダストの減光量を考えることは非常に重要である。本研究ではダストの減光量について調べるために減光量-星形成率、減光量-星質量の関係に注目した。これまでの研究でそれぞれの銀河全体を積分したグローバルな関係が得られているが (Garn & Best 2010)、銀河を空間分解した場合の関係は未だ明らかになっていない。渦巻銀河ではバルジに古い星が多くディスクでは星形成が活発なように、銀河ではその場所ごとに環境が異なっているため、空間分解すると局所的な違いを考慮することができ、積分されていない幅広い値での関係が得られると期待される。そこで、本研究では近傍銀河における 1 kpc スケールでの減光量-星質量関係、減光量-星形成率関係について求めることを目的として、それぞれの関係に対しての空間依存性について調べた。

近傍銀河のサンプルは DustPedia から選択した。使用する UV、IR バンドのデータが揃っていること、渦巻銀河であることを用いるパイプラインである CAAPR (Clark et al. 2017) が動作することを条件とした。ここで、CAAPR は DustPedia のために開発されたパイプラインで、天文データのノイズを除去するために使用した。

結果として、kpc スケールに空間分解した銀河における減光量-星質量関係と減光量-星形成率関係は共に、銀河全体を積分したグローバルな関係と同じ傾向を示すことがわかった。加えてこれらの結果の詳細について議論する。

- 1, Garn, T., & Best, P. N. 2010, MNRAS, 409, 421
- 2, Clark, C. J., Verstocken, S., Bianchi, S., et al. 2018, A&A, 609

## 銀河 16 空間分解した星質量-星形成率関係から見る銀河内部での星形成活動と分子ガスの割合

梶川 明祐実 (北海道大学 宇宙理学専攻 M2)

銀河全体の星質量 ( $M_*$ ) と星形成率 (SFR) の間には正の相関があることが知られており、この相関関係にある銀河は星形成主系列 (SFMS) と呼ばれている。これまでの研究より、星形成が非常に活発な銀河や現在ほとんど星形成を行っていないような銀河は SFMS から外れて分布することがわかっており、 $M_*$ -SFR 平面上で銀河の全体的な星形成の段階を推測することができる。また、分光撮像観測の増加に伴い、銀河内部における星形成の進行過程を明らかにするために、銀河を空間分解して求めた星質量面密度-星形成率面密度 SFR 関係についてもよく調べられている。本研究では、銀河中心から同心円環をとり、その  $M_*$ -SFR 関係を求めることで、銀河の中心からの距離

に応じて星形成がどのような段階にあるのか調査した。我々は COMING で観測された銀河のうち 91 天体について SFMS を決定し、この SFMS からのずれ ( $\Delta MS$ ) によって  $M^*$ -SFR 関係がどのように変化するか調べた。その結果、全サンプル銀河の外縁部における SFR の間には良い相関が見られたが、 $\Delta MS$  が負の銀河、すなわち星形成が終息に向いている銀河では、銀河中心部における SFR の減少が顕著であり、星質量に対する分子ガス質量の割合も SFMS 銀河に比べて 1 割程度減少していることがわかった。このことは、過去の星形成により分子ガスが消費されることで、銀河中心部から星形成が行われなくなっていることを示していると考えられる。

## 銀河 17 スペクトルのモデル計算による Recently Quenched Galaxy の星形成史の推定

安達 孝太 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M1)

銀河の星形成の様子は銀河質量や環境に依存性があることがわかっており、その依存性の起源、特に星形成が止まるメカニズムの解明には注目が集まっている。この目的において星形成を止めたばかりの銀河 Recently Quenched Galaxy (RQG) は優れたサンプルである。本研究では銀河の過去の星形成史からスペクトルを計算するモデルを作成し、RQG の星形成史に何らかの制限をつけることを目標とした。また Balogh et al., 1999 などの先行研究との相違として、化学進化と整合的に計算することを目指した。

作成したスペクトルモデルでは、Bruzual & Charlot 2003 の stellar population synthesis model を用いて計算した同一年齢・金属量の population が持つスペクトルを、想定する星形成史・化学進化史に沿って合成している。ここでの星形成史は星形成タイムスケールと quench パターン (バーストの有無など) をパラメータに持つ。本研究ではこのモデルを用いて Balmer 吸収線と 4000Å break の大きさを計算した。Balmer 吸収線の強度の変化には過去 0.1-1Gyr における星形成活動の様子が反映され、4000Å break は銀河のスペクトル進化の指標となる値である。

計算の結果、星形成タイムスケールと Balmer 吸収線のピーク値に正の相関が見られるなど、星形成を止めたあとのスペクトルにそれ以前の星形成史が影響することが確認できた。今後は星形成領域からの輝線を考慮したモデルへのアップデートや、観測データに対して実際に制限をつけることを目指していきたい。

## 銀河 18 すばる望遠鏡で見つかった青い銀河団の高温ガスの性質

美里 らな (奈良女子大学 人間文化総合科学研究科数物科学専攻 M2)

宇宙の基本的な構成要素である銀河は、銀河中の星生成活動

が活発であれば青色に、そうでなければ赤色に見える。過去の観測から、赤方偏移が高いほど銀河団に含まれる青い銀河の割合 (ブルーフラクション) が増加するブッチャー・エムラー効果 (Butcher & Oemler 1984) が知られている。また、近傍の銀河群ではメンバー銀河に含まれるブルーフラクションが大きいほど、広がって分布している高温ガスの X 線光度が低い、あるいはほとんど X 線放射をもたないことが知られている (Mulchaey 2003; Ota et al. 2004)。このような反相関が存在する理由は、より小さな質量を持つ系ではガス加熱におけるメンバー銀河の役割が相対的に大きくなるためではないかと予想されるが、詳細は分かっていない。また、遠方銀河団については詳しく調査されていないため、遠方にある青い銀河団のブルーフラクションと X 線光度の相関関係を調べることが研究目的である。これは、銀河団中の銀河と高温ガスの共進化の解明につながる。

研究では、すばる望遠鏡の Hyper Suprime-cam (HSC) を用いた銀河団探査である Hybrid Search for Cluster with HSC (HSC-HSC) サーベイのカタログを参照し、 $z=0.84$  にある 43 個の青い銀河団の X 線光度を XMM-Newton 衛星のアーカイブデータを解析し求めた。その結果、13 天体から銀河団放射が確認され、その X 線光度の重み付き平均は、 $L_X (0.5-2 \text{ keV}) = (6.8 \pm 0.7) \times 10^{42} \text{ [erg/s]}$  であった。X 線光度は上限値をとるため、ブルーフラクションと X 線光度に顕著な関係は見られなかった。さらに、可視銀河団カタログ (Oguri et al. 2018) と比較すると、青い銀河団の方が暗い傾向にあることが分かった。また、7 天体には活動銀河核 (AGN) が存在し、SDSS のデータから見積もると、X 線光度における AGN の寄与が支配的であると考えられる。本講演では、青い銀河団の高温ガスの進化段階について議論を行う。

## 銀河 19 すばる超広視野観測で解明する銀河形成最盛期以降の大規模構造形成と銀河進化

山本 直明 (東北大学 理学研究科天文学専攻 D1)

銀河の多様性がどのように生じてきたのか未解明な部分は多い。近傍宇宙の観測によると、銀河の特性 (色、年齢、形態など) は銀河の周辺環境によって大きく異なっている。この銀河進化の環境依存性がいつどのように生じてきたのかについて過去に遡って理解を深めることは、銀河形成・進化の歴史を紐解く上で非常に重要なテーマである。しかしながら遠方宇宙における環境依存性の研究には銀河団のサンプル数が限られており統計的な調査が少ないという問題や、比較的形から十分に時間の経った銀河団にバイアスされているという問題があった。そこで従来よりも視野が広く深い観測データが利用できる、超広視野撮像装置すばる HSC に着目し、そのレガシーデータ (HSC-SSP) を使って大規模な遠方銀河団探査を行った。ここでは星形成を終えた赤い銀河と星形成が活発な

輝線銀河の2つの銀河種族を手掛かりにハイブリッドな銀河団サーベイを行い、様々な進化段階の銀河団候補を見つけることに成功した(HSC2:HSC project 110)。さらに輝線銀河の密度超過領域の中で、輝線銀河が支配的に群れている領域をBlue dominated cluster、赤い銀河と青い銀河の双方が群れている領域をDual clusterと命名し、 $z\sim 0.84$ において銀河団の発達段階によるメンバー銀河の性質の違いを銀河の種族ごとに調べた。さらに本講演では主により広く深くなったHSC-SSP DR2の新しい輝線銀河カタログを使用して、異なる赤方偏移スライスに探査を拡張した結果について報告する。このデータリリースでは狭帯域フィルター NB816でも同様に約16平方度の探査が実現可能であり、メンバー銀河の赤方偏移進化について詳細に調べることができる。最後に近赤外観測と組み合わせた $1.0 < z < 1.7$ のより遠方の銀河団探査や、次世代多天体分光装置PFSとの関連について触れる予定である。

## 銀河 20 宇宙の星形成最盛期 $z=2$ における原始銀河団コアの系統的探査

安藤 誠 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 D1)

銀河の星形成活動や形態の進化は、周囲の銀河数密度をはじめとした「環境」に依存することが知られており(e.g. Dressler+1980),  $z < 1$ では銀河団において特に顕著である。このような環境依存性がいつ・どのように生じたのかを明らかにするため、 $z > 2$ に存在する銀河団の祖先、原始銀河団の探査が盛んに行われている。多くの先行研究(e.g. Chiang+14)では、10 Mpc程度の広い領域にわたる銀河の数密度超過をもとに原始銀河団を同定するが、これでは環境依存性が最も強いと思われる原始銀河団の中心部='コア'を見つけ出すことが難しい。本研究では、宇宙の星形成の最盛期である $z=2$ の原始銀河団のコアに属する銀河の進化を調べるため、コア領域をピンポイントで探す手法の開発を行った。ここでは銀河団をホストしているダークマターハロー(DMH)の質量進化に着目し、 $z=0$ までに銀河団程度の質量に成長するような十分重い( $z=2$ で $> 2 \times 10^{13} M_{\text{sun}}$ ) DMHを原始銀河団コアと定義する。こうした非常に重いDMHは、大きな星質量を持つ銀河をホストしていることが予想される。

本研究ではCOSMOS領域の銀河カタログ(Laigle+16)を用いて、 $1.5 < z < 3.0$ において非常に重い銀河( $\log(M_{\text{star}}/M_{\text{sun}}) > 11$ )が近接して複数存在する場所を目印に、75個の原始銀河団コア候補を探し出した。クラスタリング解析でこれらのDMH質量を推定し、十分な質量( $\sim 2.6 \times 10^{13} M_{\text{sun}}$ )を持つことを確かめた。コアに属する銀河のうち、星形成を止めた銀河の割合を調べると、フィールドと比べて数倍程度高かった。さらに所属銀河とフィールド銀河の星質量関数を比較したところ、コアのほうが重い銀河の比率が相対的に高い傾向が見られた。これらは原始銀河団コアでは銀河の進化が加速していることを意味する。

## 銀河 21 $z=2.39$ 53W002 原始銀河団における大質量銀河候補の探査と性質の調査

米倉 直紀 (愛媛大学 理工学研究科数理物質科学専攻 M2)

銀河団のような銀河の密集した領域には楕円銀河のような大質量銀河の割合が高いことが知られているが、そのような銀河がどのように形成され進化してきたのかは明らかにされていない。この問題を解明するためには、過去の時代へ遡り高密度環境にどのような銀河が存在し、どのように進化していくのかを調べる必要がある。そのため遠方の高密度環境である原始銀河団に属する銀河を探査し、その性質を理解することが重要になる。

本研究では53W002原始銀河団に注目した。53W002原始銀河団は $z=2.39$ にある電波銀河53W002周囲に、Ly  $\alpha$ 輝線銀河(Lyman Alpha Emitters: LAEs)の大規模構造が発見された原始銀河団である(Mawatari et al. 2012)。LAEsは非常に若く軽い星形成銀河であり、原始銀河団に対して特定の種族の銀河しか探査することができていない。そこで53W002原始銀河団に対して、Subaru/S-CamのBVi' 3バンドとSubaru/MOIRCSのJHKs 3バンドの観測データを用いることで、53W002原始銀河団に属する大質量銀河候補の探査と性質の調査を行った。まず、バルマーブレイクを利用したJHKsカラーセレクション(Kajisawa et al. 2006)で大質量銀河候補を選出した。さらにBVi' JHKs 6バンドのデータを用いたSEDフィッティング(Mawatari et al. 2020)を行うことで、53W002原始銀河団に属するメンバー銀河候補の選出と、星形成率、星質量といった銀河の性質の調査を行った。

その結果、すでに星質量が $10^{10} M_{\text{sun}}$ を超えるメンバー銀河候補が見つかった。その中には $10^{11} M_{\text{sun}}$ を超える大質量なメンバー銀河候補も存在した。これらのメンバー銀河候補の大部分はLAEs探査では見つかっていない銀河であり、53W002原始銀河団にはLAEsとは別の種族の銀河が存在することが分かった。さらに、銀河の進化段階の指標になる比星形成率で、星形成をしている銀河と星形成を終えた銀河に分けてLAEsの空間分布と比較した。その結果、星形成を終えた銀河はLAEsの個数密度の低いところに偏っていることが分かった。これは原始銀河団の中でも、場所ごとに銀河の進化段階に違いがある可能性が示唆される。

## 銀河 22 銀河形成最盛期における小質量銀河の星形成活動

大工原 一貴 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M1)

銀河の形成進化を調べる上で、様々な年代や環境における星形成史を調べることは非常に重要である。そこで我々の研究グループでは、すばる望遠鏡に搭載されている近赤外撮像分

光装置 (MOIRCS) と可視光撮像装置 (Suprime-Cam) に多数の狭帯域フィルターを取り付け、星形成銀河から放射される輝線を捉えることで星形成銀河のサンプルを構築してきた (Mahalo-Subaru; Kodama et al., 2013)。現在は、銀河形成の質量依存性を理解するために、さらに深いデータの取得を進め、より低質量・低星形成率の銀河の検出を進めている (Mahalo Deep Survey)。

Hayashi et al. (2016) では、Mahalo Deep Cluster Survey によって取得されたデータから  $z=2.5$  の銀河団における星形成銀河サンプルを構築した。その結果、 $10^{9.3} M_{\odot}$  以上の星形成銀河は星形成主系列上に位置しているのに対し、 $10^{9.3} M_{\odot}$  以下の星形成銀河は、主系列より上側に多く存在していることがわかった。これは低質量銀河の多くがスターバースト状態にあることを示唆している。同様の示唆は、 $3 < z < 4$  の ZFOURGE Survey の報告からも得られている (Tran et al., 2020)。現在私は、Mahalo Deep Survey によって取得された一般フィールド (COSMOS, GOODS-S) のデータ解析を進め、銀河形成最盛期における小質量銀河の星形成活動について調査を行い、これらが環境に依存するものなのかそれとも普遍的な振舞いなのかを調べている。

本講演では、低質量銀河における星形成活動の質量依存性について報告された論文についてレビューし、現在私の進めている研究との関連性について議論する。

## 銀河 23 ALMA で探る原始銀河団の環境効果

青山 皓平 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M2)

周囲の環境の違いが銀河の進化にどう影響するかを調べることは、銀河進化を考える上で非常に重要である。

例えば、近傍宇宙においては、密度の高い領域では古い楕円銀河が、密度の低い領域では若い渦巻銀河が支配的であるということがよく知られている。このような銀河の棲み分けがいつどのようにして生じたのかを明らかにするためには、まさに銀河形成が盛んに行われていた時代 ( $z \sim 2$ ) に遡ってその時代の異なる環境に属する銀河を調べる必要がある。この時代の銀河を調べるためには、可視光近赤外の観測に加えて、ダストに含まれた星形成銀河を捉える sub-mm の観測が不可欠である。

そこで、我々は  $z=2.5$  の原始銀河団 USS1558 の銀河の密度が非常に高い領域に対して、ALMA Band6 による深いダスト連続光の観測を行った。この領域は ALMA band3 で CO(3-2) 輝線を狙った観測が行われているのに加えて、可視から中間近赤外までの多波長の撮像データがある。HAE の分布から求められたその領域の mean separation は 150kpc であり、銀河同士の相互作用といった環境効果が期待される。CASA を用いた解析の結果、先行研究で CO(3-2) が検出されているメンバー銀河に加えて、より低質量のメンバー銀河からのダストの連続光を検出した。本研究で検出した 12 個のメンバー銀河に対して、ガス質量の割合や星形成効率といった物理量が環境にどのよう

に依存しているかについて、フィールド領域から求められたスケールリング則と比較したのでその結果について報告する。

## 銀河 24 HSC 広視野撮像観測による $z \sim 4$ における原始銀河団銀河の光度関数

伊藤 慧 (総研大/国立天文台 物理科学研究科天文学専攻 D2)

銀河の高密度領域では早期から星形成が行われ、他の領域と比べ銀河の進化段階が進んでいる描像が理論予測から考えられている。近傍の銀河団の初期構造であると考えられる原始銀河団の銀河では、星形成率や星質量が卓越する傾向が観測からも  $z \sim 2$  まで既に示されている。一方で  $z > 3$  では原始銀河団のサンプル数が小さく、また SED fitting を行うために必要な多波長データが揃っていない為に十分な議論が行えていなかった。これまでに我々は Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program の可視撮像データを用いて検出したライマンブレイク銀河を元に、 $z \sim 4$  の原始銀河団候補を 179 領域検出した (Toshikawa et al., 2018)。この系統的に選択された大規模なサンプルを用いて、本研究では星形成率の指標ともなる静止系紫外光の光度関数を  $z \sim 4$  の原始銀河団銀河に対して初めて求めた。概形を同赤方偏移のフィールド銀河のものと比較したところ、原始銀河団光度関数は  $MUV < -20.8$  でより平坦な形を持つ傾向が見られた。この結果は  $z \sim 4$  で既に原始銀河団銀河がより高い星形成率を持つことを示す。また、星形成主系列を仮定し原始銀河団銀河の星質量関数を求め、他の赤方偏移の (原始) 銀河団に存在する星形成銀河のものと比較した。光度関数から示唆されるようにフィールド銀河に比べてより重い銀河が存在する傾向はあるものの、 $z \sim 4$  からより低赤方偏移にかけて、(原始) 銀河団では大質量銀河の割合が増加するということが明らかになった。また光度関数をもとに原始銀河団領域における星形成率密度を推定した所、原始銀河団は宇宙全体の星形成率密度の 6-20% を占めていることがわかった。これらの結果は原始銀河団領域では  $z \sim 4$  で既に一般領域に比べてより活発な星形成が行われていることを示唆する。

## 銀河 25 $z = 1.45$ の星形成銀河における分子ガスの内部分布

牛尾 海登 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M2)

赤方偏移 (以下、 $z$ ) が 1-3 の銀河は現在の銀河と比べて平均的におよそ 10 倍も活発に星形成をしている。また、バルジや円盤といった円盤銀河の主要な内部構造が発露したのもこの時代であると考えられており、 $z = 1-3$  は宇宙史において銀河が最も急激に進化した時代であるとされている。この時代の星形成銀河の半数以上は中心部以外の領域に 1 kpc スケールの

巨大な星形成領域 (clump) を持つことが知られている。数値シミュレーションによると、clump はガス円盤の重力不安定性によって生まれ、星形成をしながら銀河中心へと移動し、最終的には合体してバルジを形成すると考えられている。円盤銀河の進化・形成過程をより理解するためには、星の材料である分子ガスの研究も必須である。 $z = 1-3$  の星形成銀河内部における分子ガスの分布や clump での分子ガスの性質を明らかにする必要があるが、ほとんど解明されていない。

そこで、 $z = 1.45$  の星形成銀河 (星質量  $\sim 1.2 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$ , 星形成率  $\sim 130 M_{\text{sun}}/\text{yr}$ ) で、近傍の円盤銀河のような形態を示し、clump を 1 つ持つ銀河を対象として、CO(2-1) および CO(5-4) の 2 つの分子ガス輝線の観測を ALMA によって行なった。円盤モデルフィットの結果、CO(2-1) の分布は回転運動が支配的な円盤でよく再現され、その半光度半径は 2.3 kpc と、星の分布の半光度半径 (3.5 kpc) と比較して、分子ガスの方が銀河中心に集中して分布していることがわかった。また、分子ガスの密度・温度の指標である CO(5-4)/CO(2-1) フラックス比の空間分布を見ると clump の位置でピークを示していた。この結果は clump において分子ガスが高密度 and/or 高温であることを示唆しており、3次元流体シミュレーションから予想されている clump の分子ガスの性質と矛盾しない。本講演では得られた分子ガスの分布を星成分の分布と比較してより詳しく報告する予定である。

## 銀河 26 大型ミリ波望遠鏡 LMT を用いたサブミリ波銀河の高励起一酸化炭素回転遷移輝線のスペクトル解析

萩本 将都 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 (素粒子宇宙物理系) M1)

本講演では口径 50 m の大型ミリ波望遠鏡 LMT に搭載された 2 mm 帯受信機 B4R で観測されたサブミリ波銀河 (SMG) の高励起一酸化炭素分子 (CO) 回転遷移輝線の初期成果について発表する。

SMG はサブミリ波で明るい銀河種族で、赤方偏移  $z \sim 2-4$  に多く存在する爆発的星形成銀河 (星形成率  $\sim 100-1000 M_{\odot}/\text{yr}$ ) である。また、この時代は宇宙全体の星形成率密度が大きく、銀河の急速な星質量の獲得とその中心の超大質量ブラックホール (SMBH) の共進化が起こった時代であると考えられている。しかしこうした爆発的星形成や SMBH の成長はガスやダストに埋もれて進行するため、可視光等での観測が困難である。この問題に対しては CO 輝線エネルギー分布測定による BH で加熱された高温高密度分子ガスの探査が有効である。通常、SMG 内部のガスは局所熱力学平衡 (LTE) にはないが、中心に SMBH がある場合はその放射によって加熱され LTE に近づくことが知られている。

そこで、本研究では銀河内部のガスの物理状態を明らかにするため、2019 年に行われた B4R の性能評価試験の一環として、

Planck 衛星や Herschel 衛星、WISE 衛星によって発見された  $z \sim 2-4$  の 8 つの SMG の CO 輝線観測データの解析を行った。B4R は 125 から 163 GHz をカバーする SIS 受信機である (川邊他 2020 準備中)。今回の観測では積分時間が 5 分で、観測対象は CO J=3-2 から J=6-5 と中性炭素原子輝線 (CI) である。スペクトル解析の結果、それらのうち Planck 衛星で発見された重力レンズ効果を受けた、もしくはその可能性が高い 5 天体で CO 輝線を信号雑音比  $\sim 10$  で検出することに成功した。この結果から LMT の感度の高さが窺える。さらに CO J=4-3 と J=5-4 を観測した天体については、それぞれの輝線強度から少なくとも  $J_{\text{up}}=5$  までは LTE にあることが推測された。その結果、この銀河では SMBH によって加熱された  $\sim 80$  K で高密度な分子ガスの存在が示唆され、SMBH の共進化を研究する上で重要な天体であると言えることが分かった。

## 銀河 27 ALMA で探る近傍活動銀河核 NGC 7469 中心領域の熱源診断

中野 すずか (国立天文台/総合研究大学院大学 物理科学研究科天文科学専攻 M2)

超巨大ブラックホール (supermassive black hole: SMBH) の有力な成長メカニズムとして、ガスが豊富な複数の銀河の衝突合体に起因する SMBH へのガス降着が考えられている。そうした激しい質量降着を伴う SMBH は活動銀河核 (active galactic nucleus: AGN) として存在するが、発見したばかりの AGN は塵の奥深くに埋もれているため、可視光線で発見することは非常に難しく、塵吸収の少ない波長での観測が重要となる。

ここで、観測事実として AGN は爆発的星形成に比べて X 線放射がはるかに強い。そのため、AGN 周囲には X-ray dominated region (XDR) という、系の物理化学的性質が X 線で決まる特異な領域が形成され、星形成領域 (photodissociation region: PDR) とは異なる輝線強度比を示すと期待される。そのような輝線強度比の候補として、我々は [CI]/CO 強度比に注目している。X 線による CO 分子の解離反応により、XDR でのこの強度比は PDR よりも数桁大きいと理論予測されている (Meijerink et al. 2007)。本研究では、この予測が正しいかどうかを検証するために、ALMA を用いて AGN とそれを取り囲む円環状 (半径約 1.5 秒角) の星形成領域を持つ近傍活動銀河 NGC 7469 ( $\sim 70$  Mpc) に対して、複数の CO 輝線と [CI](1-0) 輝線の観測を行なった。特に、光学的に薄い 13CO 輝線に注目すると、確かに AGN 周辺では星形成領域に比べて 10 倍近く高い [CI](1-0)/13CO(2-1) 比が観測されており、理論予測と整合する傾向がみられた。また、この結果を意味する中心領域の物理・化学状態を調べるため、5 輝線 (CO(1-0), CO(2-1), CO(3-2), 13CO(2-1), [CI](1-0)) の輝線強度について RADEX を用い

た non-LTE 解析を行った。本講演では、こうした輝線強度比の空間分布と中心領域の物理・化学状態の解析結果を紹介し、サブミリ波による熱源診断の有用性について議論する。

## 銀河 28 XCLUMPY モデルを用いた Circinus galaxy におけるトラス内縁半径の推定

植松 亮祐 (京都大学 理学研究科宇宙物理学教室 M1)

巨大ブラックホール (Supermassive Black Hole; SMBH) の進化の歴史を解明することは天文学における重要な課題の一つであり、それを解決する鍵が活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) である。なぜならば AGN とは SMBH への大量の質量降着により銀河中心が明るく輝く現象であり、SMBH が成長する過程であると考えられているためである。AGN には、中心の SMBH を囲むようにガスやダストでできたトラスが存在すると考えられている。このトラスは SMBH への質量供給源の役割を担うため、その構造解明は SMBH 進化の理解に不可欠である。近年、高い透過力によりガスやダストを含めたトラス全物質を調査できる X 線観測が着目され、トラスからの X 線スペクトルモデルが多く開発されてきた。トラスからの反射成分には、鉄をはじめとする蛍光輝線が含まれる。ケプラー運動に伴うドップラー効果により蛍光輝線は広がるため、その幅を精密に測定することで、トラスの内縁半径を推定できる。しかし、トラスを構成する物質の運動を考慮したスペクトルモデルは、これまで存在しなかった。そこで我々は、クランプ状構造を反映した現実的な X 線トラスモデル (XCLUMPY; Tanimoto et al. 2019) を基に、モンテカルロ輻射輸送計算コード MONACO (Odaka et al. 2016) を用いて、ドップラー効果による輝線の広がりや考慮したモデルを構成した。さらにモデルの検証も行うため、近傍で鉄蛍光輝線が特に強い 2 型 AGN である Circinus galaxy を対象に、X 線衛星 Chandra の高分散分光データ (HETG) に、NuSTAR、XMM-Newton、Suzaku、Chandra/ACIS のデータも加えて広帯域 X 線スペクトル解析 (3-100 keV) を行った。その結果、広帯域の X 線スペクトルが再現でき、鉄輝線幅からトラス内縁半径は重力半径の  $\sim 10^5$  倍であると初めて特定した。この値は X 線光度 から推定したダスト昇華半径よりもやや小さい。この結果はダストトラスよりも内側の領域に多量のガスが存在することを示唆している。

## 銀河 29 輻射流体計算による活動銀河核周辺ガスの多相構造の解明

牧野 和太 (筑波大学 数理物質科学研究科物理学専攻 M1)

銀河の中心には超巨大ブラックホール

(Supermassive Black Hole; SMBH) が存在し、SMBH と銀河は互いに影響を与えながら共進化してきたと考えられている。銀河の進化を解明する上で SMBH の進化を理解する必要があり、その鍵となる天体が、活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) である。SMBH へ質量降着する銀河では、降着円盤からの放射により、中心核が非常に明るく輝く。このような銀河を活動銀河 (Active Galactic) と呼び、光っている中心核を活動銀河核 (AGN) と呼ぶ。これまでの観測から、AGN の構造は「統一モデル」で説明できると考えられていた。統一モデルとは AGN は SMBH、降着円盤、それを取り囲むダストトラスから成り、ダストトラスにより広輝線と狭輝線を持つ 1 型セイファート銀河と、狭輝線のみを持つ 2 型セイファート銀河の違いが説明できるといふ仮説である。しかし近年の観測で polar region におけるダスト放射が観測されるなど (Tristram et al. 2014; Asmus et al. 2016)、従来のダストトラスモデルでは AGN 周りの構造が説明できなくなっていた。本講演で紹介する論文ではこの観測結果などを説明できる“輻射駆動噴水モデル (Radiation driven fountain)” (Wada+2016) を提案している。このモデルでは、中心核からの輻射や Supernovae によるフィードバックなど力学的計算を行なっていて、観測結果を説明できるだけでなく、従来不明だったダストトラスの生成についても説明することができる。本講演では (Wada+2016) の詳細なレビューを行うとともに、金属量を変えた際にどのような Fountain flow になるか検討していく。

1. Wada 2012, ApJ, 758, 66
2. Wada 2016, ApJ, 828, 19

## 銀河 30 SDSS/MaNGA データを用いた狭輝線領域の起源に関する調査

城 知磨 (愛媛大学 理工学研究科数理物質科学専攻 M2)

AGN の狭輝線領域 (NLR) の起源解明は、銀河中心の SMBH と母銀河をつなぐ物理を理解するうえで重要である。NLR の起源に対して有用な示唆を与えるとして近年注目されているモデルの一つに輻射駆動噴水モデル [1] がある。このモデルは、AGN のトラス構造が SMBH 周りにおけるインフローやアウトフローによって形成されることを示している。この動的な描像において自然に形成されるアウトフローが母銀河スケールまで広がり、AGN からの放射によって電離されることで NLR を形成することが示唆されている [2]。このシナリオでは、アウトフローは AGN の輻射圧によって駆動されると考えられるため、AGN の活動性の違いによって NLR のガス密度や乱流強度が決定される可能性がある。そこで、我々は様々な活動状態にある AGN に対して NLR のガス密度と運動状態の調査を行った。

SDSS の大規模分光サンプルを用いて、NLR のガスの密度

と速度分散を AGN の活動性ごとに 調査した。AGN の活動性は BPT 図 [3] を用いることで評価した。その結果、NLR の電離ガスは、AGN の活動性が高いほど高密度・高速度分散になる傾向があることが分かった。さらに、NLR の空間的に広がった構造を詳細に調査するため、近傍銀河の面分光サーベイである MaNGA の データを用いた。ここでは、同程度の星質量を持つ AGN 母銀河と星形成銀河について各領域ごとで電離ガスの速度分散を比較することで、AGN 活動により SMBH 周辺から噴き上げられたガス雲が NLR の速度構造に影響を及ぼすかどうか調べた。その結果、AGN 母銀河と星形成銀河では星質量に対する電離ガスの速度分散の振る舞いに顕著な違いが見られた。本講演ではこれらの 結果をもとに輻射駆動噴水モデルの描像と比較し、NLR の起源について議論する。

[1] Wada, K. 2012, ApJ, 758, 66

[2] Wada, K., Yonekura, K., & Nagao, T. 2018, ApJ, 867, 49

[3] Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, PASP, 93, 5

## 銀河 31 An introduction of the paper about IR-bright DOGs

Ren Yi (早稲田大学 先進理工学物理学及応用物理学専攻 M1)

The paper I'd like to introduce is "Optical properties of Infrared-bright Dust-obscured Galaxies Viewed with Subaru Hyper Suprime-Cam", published in The Astrophysical Journal on May 13, 2019. In this research, Noburiguchi et al. (2019) selected 571 IR-bright DOGs and studied their statistical properties using the latest data release catalogs of HSC-SSP, VIKING and WISE surveys. They compared their result with previous study of Toba and Nagao (2016). Most of their DOGs are fainter in optical, suggesting their DOG samples are complementary. Then, they compared the (g-z)AB color of their DOG sample with that of ULIRGs, HyLIRGs and quasars. Their sample is much redder. Next, after studying the HSC (g-z)AB color and  $\alpha$  MIR distribution of PL DOGs and bump DOGs, they found PL DOGs are bluer than bump DOGs. Finally, they studied the distribution of the photometric redshifts of PL DOGs and bump DOGs and found no significant difference between them. To probe why some PL DOGs show very blue color (referred to BluDOGs), the authors quantified the blueness of DOGs, selected 8 BluDOGs and studied their morphological shape. As a result, most BluDOGs seem to be consistent with point sources. Then, they derived the mean SED of BluDOGs and compared it with a template spectrum of type 1 quasars. The similarity in the spectral index at the blue part between them suggests the blue excess in BluDOGs is originated from unobscured AGN emission.

## 銀河 32 すばる望遠鏡 HSC で発見された "blue-excess dust-obscured galaxies (BluDOGs)" の可視光線スペクトル

登口 暁 (愛媛大学 先端科学特別コース D3)

近年、クエーサーの発言メカニズムを表している一つのシナリオとして、ガスを豊富に持つ銀河同士の合体進化シナリオがある (Hopkins et al. 2008)。このシナリオでは、銀河同士の合体後、ダストに覆われた星形成段階から、ダストに覆われた活動銀河核 (AGN) の段階を通して、ダストの晴れた AGN (すなわち、クエーサー) へ進化するとされている。Noboriguchi et al. (2019) では、WISE 中間赤外線全天サーベイとすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam サーベイを掛け合わせることで、ダストに覆われた AGN である性質を示しながらも可視光線の短波長側で明るさの超過が見られる Blue-excess dust-obscured galaxies (BluDOGs) を観測領域  $\sim 100$  平方度から 8 天体発見した。この BluDOGs は可視光線と中間赤外線の間で赤い一方で、可視光線だけを見ると青い天体であるという特徴から、ダストに覆われた AGN からクエーサーへ変化している最中にある天体であると示唆された。

本公演では、すばる望遠鏡 FOCAS と ESO/VLT FORS2 を用いて行なった BluDOGs の可視分光観測の結果について報告する。今回の観測では BluDOGs の中で、r-band で明るい順に 4 天体を分光した。結果として、 $\sim 150$  angstrom に達する非常に大きな等価幅を持つ広輝線 (CIV 等) が BluDOGs の "blue-excess" の正体であると判明した。また、CIV の輝線プロファイルから求めたブラックホール質量は  $\sim 10^8-9$  Msun であり、エディントン比を見積もるとスーパーエディントン降着を起こしていた。この結果は、BluDOGs がブラックホールへの激しい質量降着による強い放射圧でガスとダストを吹き飛ばそうとしている段階にいることを示唆している。

## 銀河 33 Convolutional Neural Network in Astrophysics

仲 宇星 (早稲田大学 先進理工学研究科物理応物 M1)

Artificial neural network (ANN) is widely used in image recognition and classification. As one majored in observational astrophysics, one of our main tasks is to process images of astronomical objects. Therefore, it is natural to apply ANN on astronomy. I will present few papers on topic of applications of ANN with different purposes. Barchi et al. (2019) developed a system called CyMorph to compare the overall accuracy (OA) of Traditional Machine Learning (TML) and Deep learning (DL) using datasets from

Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 (SDSS DR7), combined with Galaxy Zoo 1 (GZ1) and GZ2, for the purpose of galaxy classification, finding that Convolutional Neural Network (CNN) is the best choice with an OA higher than 80% in 3 classes (E, S & SB) classification. In order to detect Quasars and to predict the related photometric redshifts in SDSS Stripe 7, Pasquet-Itam & Pasquet (2017) developed a CNN and successfully detected 175 new quasars, and found that their CNN trained with light curves in ugriz bands has a near constant OA whatever how the redshift changes, but is highly wavelength sensitive. And in the field of spectroscopy, Parks et al. (2017) developed a QSO-Ly  $\alpha$  detection pipeline based on CNN. Their system is not limited to detect the Damped Ly  $\alpha$  (DLA) system in the 1-D spectrum, but also capable of detecting Super Lyman Limit System (SLLS) and making implication of the corresponding neutral hydrogen column density. The pipeline has an OA close to 98% and many spectra with signal-to-noise smaller than 2 are safely identified to host DLAs.

## 銀河 34 SXDS 領域における $z \sim 1.4$ の AGN の研究

瀬戸口 健太 (京都大学 理学研究科 M2)

超巨大ブラックホール (SuperMassive Black Hole; SMBH) の質量と母銀河のバルジ質量には強い相関が見られる。しかし、SMBH とその母銀河がどのように影響を及ぼし合いながら進化 (共進化) したのかは謎に包まれている。謎を解く上で重要なのが、 $z$  (赤方偏移) = 1-3 に存在する活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) である。AGN とは、SMBH の強い重力による質量降着によって銀河中心が非常に明るく輝く現象で、SMBH 進化の現場といえる。また、 $z=1-3$  の時代は宇宙史において銀河の星形成と SMBH 成長が最も活発であることが知られている。従って、 $z=1-3$  の AGN に着目し、母銀河と SMBH の性質 (母銀河の星質量・星形成率、SMBH の質量・質量降着率) の関係を解明することが共進化の理解には必須である。

そこで本研究では、Subaru XMM-Newton Deep Survey (SXDS) 領域に着目した。なぜなら、この領域では  $z \sim 1.4$  の AGN 116 天体に対して SMBH の質量と質量降着率が推定されており (Nobuta et al. 2012)、星質量と星形成率の推定に必要な多波長観測データが得られている (Akiyama et al. 2015) からである。我々は、X-CIGALE code (Yang et al. 2020) を利用した可視光から赤外線までのスペクトルエネルギー分布 (Spectral Energy Distribution; SED) のモデルフィットにより、85 天体の星質量と星形成率の導出に成功した。その結果、 $z \sim 1.4$  の AGN では (1) SMBH 質量と星質量の比が近傍宇宙 ( $z < 1$ ) の BH 質量とバルジ質量の比に近い値  $\{10^{(-2.2)}\}$  であった。(2) 星形成率と星質量の分布が main sequence と呼

ばれる関係に沿っており、星形成が維持されることが判明した。(3) 星形成率と全波長光度 (質量降着率に対応) に正の相関が見られた。これらの結果は、円盤部分が優勢な銀河はバルジ部分が優勢な銀河より SMBH 質量が大きいこと、および  $z \sim 1.4$  の時代でも母銀河と SMBH は共進化しているというシナリオを示唆する。

## 銀河 35 AGN の同定を目的とした JVLA による SSA22 原始銀河団の連続波観測データ解析

松田 慧一 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 (素粒子宇宙物理学系) M1)

本講演では、カールジャンスキー超大型電波干渉計 (JVLA) の C-band (波長 6cm) を用いて行われた原始銀河団 SSA22 の連続波観測の解析結果を紹介する。

現在の標準的な宇宙論モデルでは、物質はフィラメント状に分布し、その交点で銀河の密度超過が起きる。そのような領域では、サブミリ波銀河 (SMG) のようなガスやダストが豊富な銀河が選択的に存在すると予想されている (Kauffmann 1999)。SMG においては星形成や SMBH への降着が盛んに生じていることから、銀河の進化が活発な段階にあると考えられている。

SSA22 は  $z = 3.1$  に存在する原始銀河団である (e.g., Steidel et al. 2000)。この領域では、一辺 50 Mpc の三次元フィラメント構造が発見され (Matsuda et al. 2005)、原始銀河団の中では最も高密度な領域であると考えられている (Yamada et al. 2012)。よって、SSA22 は SMG における SMBH の役割を研究するのに適した領域であり、SMG と活動銀河核 (AGN) のトレーサー観測が有効だと考えられる。

Umehata et al. (2015) では、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計の band6 (波長 1.1mm) を用いて SSA22 の観測を行い、複数の SMG を検出した。しかし、Chandra X 線観測衛星による観測で検出された AGN の個数は、検出感度の問題で SMG と比較して少ない。

そこで我々は、JVLA/C-band を用いて、SSA22 原始銀河団の中心  $3' \times 6'$  に対し、超新星残骸や AGN から放射されるシンクロトロン放射の連続波観測を行った。解析の結果、分解能が  $1''$  程度であり、 $rms = 0.5 \mu\text{Jy}/\text{beam}$  といった、他領域の観測と比較して約 4 倍良い感度を持つデータを得た。また、 $5\sigma$  以上の放射を持つ天体を 100 個以上発見し、そのうち 20 個以上の天体が SMG と対応している。

今後、この解析の結果と他波長による同領域のマップを比較することにより天体の同定を行う。また、他波長の観測結果と比較することで SMG における SMBH の役割を解明する。

## 銀河 36 すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam を用いた高赤方偏移電波銀河の調査

山本 優太 (愛媛大学 理工学研究科数理物質科学専攻 M1)

銀河の中には、非常に狭い中心領域で銀河全体よりも強い電磁波を発生している活動銀河核というものがある。活動銀河核の中で、電波を特に強く放出している天体を電波銀河という。活動銀河核の中心に存在する超巨大ブラックホールと母銀河のバルジ質量に正の相関が報告されていることから、銀河と超巨大ブラックホールは共に進化した(共進化)と考えられているが、その中でも電波銀河は共進化の最終段階であると考えられている。このため、遠方の電波銀河を調べることで宇宙初期の共進化シナリオの理解が深まると期待される。しかし、これまでに見つかっている遠方の電波銀河は非常に少なく、そのため遠方宇宙における電波銀河の実態や共進化の理解は不十分である。そこで本研究では、最新のデータカタログを用いて遠方の電波銀河を多数発見することを目的とした。

本研究では、遠方の電波銀河を系統的に探査するために、可視光データとしてすばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam を用いて行われている広域多色撮像サーベイ (HSC-SSP) の最新カタログ (S19A) を使用した。また、電波データとしては、アメリカ国立電波天文台の望遠鏡の一つである VLA (Very Large Array) の広域サーベイ FIRST によって作成された波長 21cm の電波源カタログを使用した。データから遠方の電波銀河を選出するために、本研究ではライマンブレイク法を用いた。今回は特に g-band dropout を示す赤方偏移 4 程度の電波銀河を探査した。その結果、HSC-SSP S19A と FIRST の両方で検出されている高赤方偏移電波銀河候補天体は 265 天体選出された。これは遠方電波銀河候補のサンプルとし過去最大のものである。講演では、サンプルの統計的性質に加え、多波長での性質についても議論する。

## 銀河 37 ALMA を用いた $z \sim 4$ サブミリ波銀河の統計的調査

三橋 一輝 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 M2)

高赤方偏移においてダストに覆われた爆発的星形成銀河はサブミリは銀河と呼ばれ、高赤方偏移での銀河形成を探る上で非常に有効かつ重要である。サブミリ波銀河は静止系遠赤外でのダスト連続光が非常に明るく、 $z \sim 1$  から  $z \sim 10$  までほとんど変わらない見かけの明るさで観測することが可能である。一方で、ダスト吸収により紫外・可視光では観測が難しいため、赤方偏移決定には主に静止系遠赤外の輝線が用いられる。本研究では、分光・撮像が同時に可能な干渉計である ALMA を用いて観測した 200 を超えるサブミリ波銀河に対して遠赤外輝線探査を行い、高赤方偏移でのサブミリ波銀河の爆発的星形成の起源に

迫ることを目指した。結果として、我々は 5 天体から輝線を検出し、それらを  $z=4.6$  の一階電離炭素の再結合線 ([CII]) を発する銀河と結論づけた。輝線幅から見積もったハロー質量を元にしたハローの個数密度と、 $\Lambda$  CDM モデルから推定されるハローの個数密度とを比較した結果、大質量ハロー ( $M_h > 4 \times 10^{12}$ ) に高確率でサブミリ波銀河が存在することが推定された。この事実は、大質量ハローにおいてサブミリ波銀河が長期間にわたり星形成を続けている可能性を示唆している。長期間の星形成を支える冷たいガスの降着を元にモデルした [CII] 光度関数と我々の観測から新たに得られた制限を合わせて考えると、冷たいガス降着でサブミリ波銀河の星形成を説明できることが示唆された。よって我々は  $z > 4$  においてはサブミリ波銀河の爆発的星形成に主に寄与するのは大規模銀河合体ではなく冷たいガスの降着ではないか、と結論づけた。現在  $z \sim 2$  ではサブミリ波銀河の爆発的星形成に主に寄与するのは銀河合体であると考えられているので、我々の結果はサブミリ波銀河の爆発的星形成への寄与に対して赤方偏移依存性が存在する可能性を支持していると言える。発表ではこれらの詳細について述べる。

## 銀河 38 輝線強度マッピングで探る $z \sim 2-7$ 星形成銀河周りの巨大ライマン alpha 構造

菊地原 正太郎 (東京大学 宇宙線研究所 D2)

本講演では、赤方偏移  $z \sim 2-7$  におけるライマン alpha (Ly $\alpha$ ) 輝線天体 (LAE) の周りに非常に淡く広がっている水素ガスの構造、進化、および起源について示す。

LAE の周囲には Ly $\alpha$  ハロー (LAH) と呼ばれる Ly $\alpha$  で輝く水素ガスが広いスケールで付随している。さらに近年、 $z \sim 6$  で水素ガスが LAH よりも外側 (銀河のビリアル半径を超えるようなスケール) まで広がっている可能性も示された (e.g., Kakuma et al. 2019)。しかし、こういった”巨大 Ly $\alpha$  構造”の起源はまだ分かっていない。さらに、近傍から遠方までの構造の進化がまだ議論されていない。

そこで我々は、すばる望遠鏡/Hyper Suprime-Cam (Subaru/HSC) で得られた広域・深撮像データ (視野  $\sim 2 \text{ deg}^2$ , 5 $\sigma$  限界等級  $\sim 26 \text{ mag}$ ) の撮像データに対して機械学習を適用し、 $z=2.2, 3.3, 5.7, 6.6$  に渡る計  $\sim 2,000$  個の LAE を効率的に選択した。これらの LAE の位置と、同じ赤方偏移での Ly $\alpha$  輝線をトレースする HSC 狭帯域画像のピクセル値との相関をとることで、LAE の周りから放たれる Ly $\alpha$  輝線の平均的な表面輝度を求めた。この手法を輝線強度マッピングといい、個々の銀河を観測するだけでは検出できない淡い構造の検出を可能にしてくれる。これらの解析の結果、 $z \sim 2-7$  における Ly $\alpha$  構造は銀河のビリアル半径 ( $\sim 200 \text{ comoving kpc}$ ) を超えるスケールまで広がっていることが分かった。さらに各赤方偏移における Ly $\alpha$  構造の広がりや定量的に表し、その進化をプロットしたところ、いずれの赤方偏移における構造も似たような広がりをもっていることが分かった。最後に、Ly $\alpha$  の輻

射輸送モデルを取り入れた宇宙論的銀河形成シミュレーションと本研究の結果を比べることで、巨大 Ly $\alpha$  構造の形成起源についても議論する。

## 銀河 39 Constraint on H $\alpha$ Luminosity Function at z 7.8 probed by HST and Spitzer

浅田 喜久 (京都大学大学院 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

光度関数 (以下 LF) は、各時代の銀河の統計的性質を知る上で重要である。特に Ly  $\alpha$  や H  $\alpha$  輝線は銀河進化の主要過程である星形成と密接に関係し、その LF を調べることは宇宙論的な銀河進化を知るために重要な課題である。

Ly  $\alpha$  輝線の LF については高赤方偏移では調べられているが、Ly  $\alpha$  輝線は中性水素による吸収の効果が大きい。特に宇宙再電離期 (赤方偏移  $z$  で  $z \geq 7$ ) において Ly  $\alpha$  輝線の LF は急激に変化するが、これは銀河間空間の中性水素ガス密度など周囲の環境の変化が原因とも考えられ、銀河進化を正しく反映していない可能性がある。

また rest UV の光度も星形成の指標で、rest UV の LF から星形成の宇宙論的進化を調べる研究もなされている。しかし rest UV はダスト減光の効果が大きく、宇宙再電離期でもダストが豊富な銀河が近年発見されていることから、rest UV とは独立な検証が必要である。

H  $\alpha$  輝線は中性水素の吸収を受けず、rest UV に比べるとダスト減光の影響も非常に小さい。しかし  $z > 2.5$  の銀河では中間赤外の領域で観測され、地上観測が難しくこの  $z$  で H  $\alpha$  の LF を調べた研究は非常に少ない。

そこで本研究では、Spitzer 宇宙望遠鏡の中間赤外撮像装置 IRAC の Ch3 バンド (中心波長 5.8  $\mu\text{m}$ ) のアーカイブデータを用いて  $z \sim 7.8$  の H  $\alpha$  輝線天体を探索した。さらに重力レンズ効果による増光を利用してより光度が低い銀河まで探索するため、重力レンズ天体領域で Hubble 宇宙望遠鏡と Spitzer/IRAC のアーカイブデータから、Ch3 バンドに H  $\alpha$  輝線が入る  $z$  の銀河を Lyman break 法で選出し、IRAC の ch3 バンドで測光を行った。その結果、 $z \sim 7.8$  における銀河の H  $\alpha$  輝線の LF に制限を与え、同じ  $z$  での銀河の rest UV の LF と矛盾がないことを確認した。講演では結果と今後の展望も含めて紹介する。

## 1 銀河 40 赤方偏移 $z=9.11$ [OIII] 輝線銀河の ALMA 観測データ解析

徳岡 剛史 (早稲田大学 先進理工学研究科物理 M1)

銀河がいつ生まれ、どのように進化してきたかという問題は、現代天文学において重要な問題である。高赤方偏移銀河の観測はこの問題を解明する手がかりとなると考えられている。そし

て、我々のチームは ALMA 望遠鏡のサイクル 3, 4 のデータから、 $z=9.11$  の [OIII] 88  $\mu\text{m}$  輝線を銀河 MACS1149-JD1 から観測した。

さて今回は、新たに ALMA 望遠鏡のサイクル 6 で MACS1149-JD1 に対してより空間分解能を上げる観測を行った。サイクル 6 のビームの面積はサイクル 3, 4 に対して 0.31 倍である。その結果、独立な観測で  $S/N=8.4$  で [OIII] 輝線の再確認ができた。また、この観測の目的は、MACS1149-JD1 のより詳細な構造を得ることである。今回は、サイクル 6 で得られた MACS1149-JD1 の [OIII] 輝線のデータをもとに、サイクル 6 のデータとサイクル 3, 4, 6 を組み合わせたデータに対して解析を行った。その結果得られた積分強度図と輝線光度を報告する。輝線光度はサイクル 3, 4 において  $(7.4 \pm 1.6)(10/\mu) \times 10^{-7} L_{\odot}$  であった。それに対して、サイクル 6、サイクル 3, 4, 6 ではそれぞれ、 $(10.9 \pm 1.9)(10/\mu) \times 10^{-7} L_{\odot}$ 、 $(8.7 \pm 1.5)(10/\mu) \times 10^{-7} L_{\odot}$  であった。輝線の強度分布を比較すると、 $\sim 3.5 \times 1.8 [\text{kpc}^2]$  の同程度の構造が確認できた。