

Cool Gas in High Redshift Galaxies

山口裕貴

平成 25 年 6 月 2 日

4 Observational diagnosis of cool ISM in distant galaxies

4.6 Imaging of the molecular gas in early galaxies

Introduction

- VLA や IRAM PdBI などのおかげで、高赤方偏移銀河の分子ガスの高分解能な imaging は急速に発展した
- CO 放射の imaging は HST の空間分解能 ($\sim 0.15''$) と同程度の空間分解能で明るい天体に対して行われてきた
→ $0.15''$ は $z > 1$ でおよそ 1kpc である
- 以下では今日までの best example をハイライトしていく

4.6.1 A typical CSG

EGS1305123 の imaging

- CSG の研究では Tacconi と Daddi が急激な starburst を起こしていないガスリッチなディスクを見つけた
- 今日までの CSG のもっと良い imaging は Tacconi の CO(3-2) 輝線を用いた EGS1305123 のものである (fig 7)
→ PdBI を用いて空間分解能 $0.6''$ で行われた
- この銀河の H_2 質量は $1.3 \times 10^{11} (\alpha/3.2) M_\odot$ で半径 8kpc の rotating disk 内に分布している. terminal rotation velocity は 200km/s である
- この銀河ははっきりと回転しているにもかかわらず内部に $\geq 20\text{km/s}$ という大きな速度分散を持っている
→ これは disk が乱流的であることを示唆している

EG1305123 の imaging から得られたこと

- この銀河の disk は半径 $\leq 2\text{kpc}$, 質量 $\sim 5 \times 10^9 M_\odot$ の高い輝度温度を持った固まりによって区切られている
- それらのガスの表面密度は $\sim 500 M_\odot \text{pc}^{-2}$ で天の川銀河の GMC よりも数倍程度大きい
→ 内部の速度分散が小さい $\sim 20\text{km/s}$ ため, 一つの巨大な分子雲ではなくたくさんの Galactic GMC の集まりではないかと考えられる
- Daddi は $z \sim 1.5$ のいくつかの CSG について同じような imaging を得た (ただし低分解能で)

CSG imaging 観測の意味

- $z \sim 1-3$ の CSG における CO の imaging 観測は CSG が gas-dominant, で安定した高い星形成を行っている rotation 銀河であるという解釈に大切である
- また, 力学的議論を通して質量換算係数 α に制限を与える

4.6.2 BRI1335-0417

Tidally disturbed gas surrounding a luminous quasar

BRI1335-0417 の imaging

- BRI1335-0417(at $z = 4.4$) は一番最初に可視光で select された高赤方偏移のクエーサーである
→ hyper-luminous FIR ホスト銀河を有し, $\sim 10^9 M_\odot$ の SMBH があり同時に $\sim 1000 M_\odot \text{yr}^{-1}$ で星形成している
- ホスト銀河からは [CII] だけでなく CO の輝線も観測された
→ CO の光度から $M(\text{H}_2) \sim 8 \times 10^{10} (\alpha/0.8) M_\odot$ と推測される
- BRI1335-0417 は広吸収線をもつクエーサーである
→ AGN の outflow
- fig 7 は VLA を用いた BRI1335-0417 の CO imaging である
→ 重力レンズの効果を受けていない高赤方偏移のクエーサーの CO imaging では最も高いクオリティーである
- この系は $\sim 1''$ のスケールでガスが複雑な形態を持っている

- 分子ガスは $\sim 7\text{kpc}$ にわたって分布している複数の構成要素を示している
→ 北の方に伸び、 $\sim 0.7''$ の major な CO clump でピークに達している
はっきりとしたテール、それ以外にも様々な方向からクエーサーにつながる流れ
- 北から南へ速度勾配があるが、general velocity field は chaotic である

imaging の解釈

- Richers はこの複雑なガスの形態を gas-rich (wet) な衝突の late-stage からの tidal remnant であると解釈した
- この衝突は main galaxy にガスを降着させ、hyper-starburst や luminous AGN に燃料を与えた
→ クエーサーホスト銀河に見られる分子の高励起にも矛盾しない
- BRI1202-0725 (at $z \sim 4.7$) の SMG-quasar のペアはまだ銀河同士が融合していない衝突の early-stage を示している

4.6.3 GN20: An SMG with a gas rich disk

GN20

- GN20 銀河は GOODS-North field で最も明るい銀河であり、そのホスト銀河では可視光はほとんど遮られている
- Daddi は PdBI を用いて (近くの CSG に焦点を当てて) CO 放射から赤方偏移が $z = 4.05$ であることを得た
- GN20 の $20''$ ほど西には CO 輝線とダストコンティニウムが検出された 2 つの SMG がある
→ この領域は明らかに銀河が密集している領域であり、 $z_{\text{phot}} \sim 4$ で GN20 から半径 $25''$ の内部に 15 の LBG が見つかった

GN20 の観測

- JVL A を用いた長期間の CO(2-1) 輝線の観測によって CO は直径 $\sim 14\text{kpc}$ に分布していることが分かった
- CO 輝線やダストコンティニウムが放出されている領域は HST の I バンドでは見えなく、見ることで唯一の可視光放射は GN20 の edge である
→ このような強烈な可視光の遮蔽は SMG の特徴である

GN20 のガス雲

- GN20 のディスクの力学は力学的質量 $5.4 \times 2.4 \times 10^{11} M_{\odot}$ の標準的”tilted-ring” gas rotation model に矛盾しない
- 1kpc の分解能による観測により, 30-50 %のガスが質量 $a \text{ few} \times 10^9 (\alpha/0.8) M_{\odot}$, 輝度温度 16K と 31K, 輝線幅 100km/s の固まりの中にあるということが明らかになった
- 力学的解析によってこのガスの固まりが自己重力系であることが分かった
- このガスの固まりの表面密度は $\sim 4000(\alpha/0.8) M_{\odot} \text{pc}^{-2}$ で典型的な GMC よりも一桁程度大きい
- 銀河全体の力学的解析は GN20 の α を決定するのに用いられた

GN20 の disk

- NG20 に disk があるということは高赤方偏移の全ての HyLIRG が衝突している系とは限らないことを示している
- この結論は低赤方偏移のいくつかの SMG にも当てはまる
→ これらの銀河では低励起の CO 観測が GN20 と同様に disk-like なガスリザーバーを示している

cold mode accretion model

- GN20 の clumpy disk は cold mode accretion model(現在では典型的な CSG と比べ遠赤外光度が一桁程度上までしかスケールアップしない) に矛盾しない
- この銀河ではほかの SMG や原始銀河団の小さな銀河の重力相互作用によって星形成が加速されているのかもしれない

SIDEBAR

高赤方偏移銀河の空間分解された分子ガス放射の観測は少数の明るい天体に制限されている。高赤方偏移の分子や冷たい原子ガスの imaging から CSG や SMG の 10kpc-scale の clumpy and turbulent でありながら回転している disk や SM ギャクエーサーホスト銀河の潮汐力によってバラバラになったガスの分布が明らかになった

4.7 Outflows

AGN feedback

- negative feedback(星形成活動や AGN 活動による物質の放出) のない理論モデルは観測に比べ近傍の大質量銀河により多くのガスの存在と星形成銀河の存在を予測する
- AGN の feedback を考慮するとシミュレーションではこれらの問題を和らげられる
→AGN からの風によって ISM のガスは吹き飛ばされ、IGM は large-scale な電波ジェットによって銀河に降着できなくなる
- 近傍銀河でこの feedback の直接的証拠が確認できる
→OH の遠赤外輝線や分子輝線, optical line や原子の微細構造輝線によって outflow が見える
- 赤方偏移 2 やそれ以降の銀河も古い gas-poor な大質量銀河があることから初期宇宙でもこの feedback が重要だったことが分かる

J1148-5251 の outflow

- 最近の観測で初期の銀河で kpc-scale の feedback がある証拠が検出された
- AGN feedback の最も良い例の一つは Maiolino によって観測された $z = 6.4$ のクエーサー J1148-5251 からの [CII] 放射の broad line wind である
→outflow の速度は 1300km/s , outflow rate は $M_{outfl} \sim 3500 M_{\odot}\text{yr}^{-1}$, 運動学的パワーは $P_K = 1.9 \times 10^{45}\text{erg/s}$ である
- このエネルギーはクエーサーのボロメトリックな光度の 0.6 % であり, 理論的に得られる上限値である 5 % を下回っている. しかし, ホスト銀河におけるスターバーストに伴う運動学的パワーの上限値に矛盾しない
- 理論的モデルによると star formation driven wind は $\sim 600\text{km/s}$ に達する
- Maiolino は outflow は AGN-driven であると主張した
- outflow によるガスの消費時間は星形成によるものと同程度であり 10^7yr のオーダーである

その他の系での feedback

- ほかの系は冷たいガスの中で様々な程度の feedback を示している
- BRI1202-0725 は [CII]158 μm スペクトルで broad wing を示しているがその運動エネルギーは J114+5251 よりも少なく、星形成がガスの減少に支配的である
- Weiß は CO と [CI] で 250km/s の outflow を $z = 2.8$ のクエーサーで見つけた
- この銀河の質量 outflow rate の下限値は $180M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ でこの値はホスト銀河の SFR よりも大きい

SIDEBAR

分子の outflow は今日では少数の高赤方偏移系でしか見つかっていない。感度やバンド幅が十分でなかったために過去の観測では受からないものも残っている。outflow に関する運動エネルギーや質量を定量化することは銀河進化のシミュレーションに重要なインプットをもたらすだろう。

5 Dence Gas History of Universe

5.1 Gas dominated disks during the epoch of galaxy assembly

5.1.1 Gas fraction

CSG の観測から得られたこと

- CSG の研究から得られた最も目立った成果は CO 放射の高い検出率だった (50-100 %)
- CSG では輝線強度は hyperstarburst 銀河と同等だが、星形成率は一桁程度小さい (cf 4.5 節)
- さらにこれらの銀河は SMG よりも一桁大きい space density を持っており、銀河形成の時代には宇宙全体の星形成率を支配していた銀河の代表である

CSG のガス質量

- CSG では $\alpha_{\text{CO}} \sim 4$ ではあることが分かっている
→ 推定された H_2 の質量幅は $3 \times 10^{10} - 10^{11} M_{\odot}$ である
- Daddy や Tacconi が指摘しているように、これらの銀河ではガス質量が星質量の同程度か上回っている
- この比は近傍のディスク銀河では異なっており、星質量がガス質量より一桁程度大きくなっている

Fig 10

- Fig 10 では $z \sim 4$ までのガスの割合 ($f_{\text{gas}} = M_{\text{gas}}/M_{\text{stars}}$) を示している
→ $z \sim 4$ ではガス質量がヘリウムによるファクター 1.36 を含めた分子の component に一致する
- 全ての銀河は星質量が $> 10^{10} M_{\odot}$ の star forming disk galaxy である

赤方偏移到伴うガス質量の割合の変化

- fig 10 の分散は大きいですが、大質量銀河のガスの割合は赤方偏移到伴って大きくなっていく傾向にある
→ $z \sim 0$ での平均値は $f_{\text{gas}} \sim 0.1$ だが $z > 1.5$ では $f_{\text{gas}} \sim 1$ である.
データのフィッティングから $f_{\text{gas}} \sim 0.1 \times (1+z)^2$
- 高赤方偏移到の CSG の CO sample は CGS の質量限界の上限に近い傾向がある子のに注意しなければならないが、ほかの側面は典型的な CSG である
- Tacconi による最近の大規模な研究により CSG のガス質量の割合は銀河の質量が小さくなるにつれて大きくなることが分かった

fig 10 の縦座標

- fig 10 の銀河は星質量 $> 10^{10} M_{\odot}$ の大きな disk 銀河であり、 $\alpha \sim 4 M_{\odot}$ の同じ値を用いることができる
- さらに、星質量の推定は full SED-fitting に基づいているがこの結果は観測的に near-IR のデータ (静止系では R バンド) によって主に記述できる
- したがって fig 10 の縦座標は経験的に $\propto L'_{\text{CO}(1-0)}/R_{\text{mag}}^{\text{rest}}$ で近似できる

赤方偏移による α の変化

- Narayanan は赤方偏移に伴ってガス質量の割合が SMG でも CSG でも大きくなることについて考え、いくつかの効果が α の値を変えするという結論に至った
→ α は大きな速度分散や高赤方偏移銀河の高いガス温度などの影響で小さくなる

ガス質量の割合と星形成

- CSG の CO 観測から宇宙の星形成率が最大となった時代というのは、一般的な星形成銀河の中で分子ガスの質量が星質量を上回っていた時代である
- disk 銀河の赤方偏移に伴うこのような根本的なバリオンの変化は早期の銀河の星形成において決定的な結果をもたらすようである

CSG の進化

- もちろん高赤方偏移の CSG は近傍の disk 銀河へと進化していく訳ではないということを忘れては行けないし、銀河衝突によって明らかに形態が変わる
- $z \sim 2$ にある CSG の space density や clustering はそういった CSG が $z \sim 0$ の早期型銀河へ進化していくということに矛盾しない

SIDEBAR

大質量 disk 銀河のガス質量の割合は $z = 0 - z \sim 2$ にかけて一桁上昇している。したがって、宇宙の星形成率が最大になった時代 $z \sim 2$ というのは典型的な星形成 disk 銀河が星ではなく冷たいガスに支配されていた時代に一致している。

5.1.2 Gas accretion

ガスの消費時間

- 銀河での星形成へのガスの再供給は高赤方偏移でも低赤方偏移でも重要な出来事である
- 最も極端な状況は QSO や SMG のガスの消費時間である
→ これらの天体のガスの消費時間は非常に短く、1000 万年ほどしかないものもある

- 一方で CSG のが鵜の消費時間は Hubble time とほぼ変わらない
- この点は Bauermeister が強調していて、彼らは高赤方偏移銀河の短い分子ガス消費時間と宇宙の HI の質量密度があまり進化していないことに基づいてガスが IGM から降着していると結論づけた

Cold mode accretion

- 宇宙時間にわたるガスの再供給の必要性は早期の銀河へのガス供給の考えに変化をもたらした
- cooling of virialized hot halo gas, major gas rich member とは対照的に銀河形成の時代の支配的な星形成モードは cold mode accretion である
- 観測やシミュレーション、解析の収斂として早期の銀河のガスの降着は糸状になった IGM の $T \sim 10^4 \text{K}$ の冷たい流れによって起きていることが分かった
→ この流れは shock-heat を起こさずに、ほぼ自由落下時間と同じ時間で銀河に流れている
- このガスは光学的に厚くて乱流的な rotating disk を作り出すと考えられている
- この disk はわずかばかり Toomre-unstable であり、すぐに効率的に星を形成する kpc-scale のいくつかの固まりに分岐してしまう
- これらの固まりは銀河系の GMC よりも 100 倍ほど大きく 10^7 倍明るい
- 星形成領域は力学的摩擦や粘度によって銀河中心に落ち込んでいき、コンパクトな stellar bulge を形成する
- このプロセスの結果 1Gyr のオーダーで安定的で活動的な星形成が起きる
→ rapid secular galaxy evolution

楕円銀河の星形成

- これらのモデルではガスの供給が減り、ハローの質量が増えて降着ガスに virial shock が作られるにつれ劇的にスローダウンする
- このモデルでは $z < 2$ で引き続き起きるドライな (gas-poor) な衝突では総質量が増加し形態が進化するが、星形成はほとんど行われない item
この描写では楕円銀河のほとんどの星が CMA によって $z \sim 2-3$ で形成されたとされる

CMA と SMG

- Dave は CMA が HyLIRG までスケールアップでき、高赤方偏移の SMG のほとんどは衝突ではなく CMA によってガスを供給されていると主張した
- 流体力学的シミュレーションは高いガス降着率は早い時代の巨大なハローの中で達成され、SFR は minor merger や高密度環境下での重力相互作用によって平均的なガス降着率の 2 倍から 3 倍になる

降着のタイムスケール

- 物理的には、small satellites の 'clumpy' accretion を通した比較的持続的な CAM から珍しい gas-rich な衝突まで降着過程は連続的にある
→ しかし、近年のモデルや観測では降着のタイムスケールが $\geq 10^9 \text{yr}$ であるものが好まれる

CMA の存在

- clumpy で turbulent であるにもかかわらず回転している gas disk は CMA の主張に矛盾せず、gas-rich な衝突とは決定的に異なる
- Robertson と Bullock は秩序だった gas disk の回転は衝突後すぐに再形成されることを示した
- 最近の観測で高赤方偏移銀河に近い低金属量のガスが検出された
→ このガスの性質は CMA と矛盾しない
- 現在までの検出は CMA の存在を証明するには十分ではない

SIDEBAR

$z > 1$ の CMA を通したガスの降着の証拠は CSG の gas-dominant な disk の形態の予想や観測の間の類似性に基づいている。金属量の少ないクエーサーの吸収線はこれらの流れの存在を証明するための最良の方法を提供するかもしれない。