

Cool Gas in High Redshift Galaxies

C.L. Carilli, F. Walter

山口裕貴

平成 25 年 4 月 7 日

Abstract

この 10 年、分子や原子の微細構造線を通した遠方銀河の冷たい星間物質の観測はいくつかの極端な天体や珍しい天体の調査から、高赤方偏移へ向けての銀河形成を研究するための主要な道具まで用いられてきた。分子ガスは近傍 ($z \sim 1$) の 200 の銀河や $z \sim 7$ 以上の多くの AGN ホスト銀河、活発に星形成をしているサブミリ銀河 (赤方偏移の中央値は $z \sim 2.5$) そして $z \sim 1.5 - 2.5$ の color-selected した '主系列' にある星形成銀河で観測されている。研究は単純な検出を超えて、kpc-scale の分解能での dynamical imaging や初期銀河の星間物質のなかでの物理的状況を決定する複数のラインや種類の研究へと動いてきている。冷たいガスの観測には宇宙の星密度や星形成史の研究の完成が必要である、というのもそれらは銀河の中の星形成に直接先立つ星間物質のフェーズを明らかにするからである。最近の観測によると $z \sim 0 - 2$ にかけての宇宙の星形成密度の増加オーダーは星形成ディスク銀河でのガスが星になる割合の増加と同程度であるされている。高赤方偏移での H_2 の質量換算係数に対する CO の光度の決定について発達があり、主系列銀河対スターバースト銀河のための数値の高低の間の対立はそれぞれ赤方偏移の増加、金属量や近傍のほかの物理的状況への依存にこだわっているようである。原子の微細構造輝線の研究は [CII] の $158\mu\text{m}$ 輝線が特に明るい数十もの銀河の発見に伴って急速に発展している。[CII] の輝線は初期宇宙での銀河の力学のユニークなトレーサーであり、またほかの原子の微細構造輝線とともに宇宙の再電離が起きている間の最初の銀河の分光赤方偏移を得るための最も直接的な道具になる可能性を持っている。

1 Introduction

1.1 Motivation

最近の数年, cm 波や (sub-)mm 波望遠鏡を用いる事で銀河に含まれる冷たい分子雲の研究は飛躍的に進歩してきた. 冷たいガスの量は銀河進化の直接的なパラメータであり, 銀河内での星形成の燃料となっている. 2005 年におけるこの分野の状態は Solomon と vanden Bout によって述べられている (Omont 2007 も参照). その時点では, 分子ガス放射が見られる星形成が活発な銀河や明るい活動銀河核のホスト銀河は有意なルックバックタイムにおいて少数しか検出されておらず, ガスの励起について何かを知る事は困難だった. また, 原子の微細構造線の検出器もなかった. 近年の研究では, 遠方宇宙で原子の微細構造輝線だけでなく分子輝線で非常に多くの種類の銀河がたくさん検出されている. 詳細な多遷移, 多種類の調査は知られている中で最も明るい高赤方偏移における系の物理状態を決定してきた. その結果は我々の銀河形成や進化に関する理解を証明, 極端に言え教えている. また, 銀河に含まれる冷たい分子ガスの量はルックバックタイムにそって明らかに増加している事を示している.

現在が高赤方偏移銀河の分子輝線観測の分野を見直すいい機会であるというのには2つの理由がある. はじめに観測を通した銀河もつ分子の量の特徴付けだけでなく, 検出する銀河の数が劇的に進展した事. もう一つは ALMA や JVLA といった革命的な望遠鏡がまもなく完成する事である. この二つの望遠鏡は宇宙の分子ガスについて従来のものよりさら詳細にそしてより高い感度で観測できる事を約束している. この分野に関するこのレビューは最先端の知識でこの分野の現状の網羅しており, 次世代の機器へとつながる基本的な疑問を形づくる.

1.2 Galaxy formation and the need for cool gas observation

近年, 銀河進化はたくさんのレビューの主題となり (例えば Shapley 2011, Renzini 2006, Giavaliso 2002, Silk · Mamon 2012) そして, この10年で我々の宇宙構造の形成についての理解のなかで劇的に発達してきた. 宇宙幾何学や宇宙の質量-エネルギー量, そして初期の密度変動のスペクトルなどは10%強しか解明されていない (Spergel et al. 2007, Komatsu et al. 2011). 重力的不安定による構造の形成は巧妙に数値計算されてきたし (例えば Springel et al. 2005, Klypin et al. 2011), 銀河分布の研究を通して観測的に確かめられてきた (例えば Peacock et al. 2001, Reid et al. 2010). そして宇宙の星形成率密度 (宇宙の星形成史, SFHU) や星質量の増加はビックバンから 1Gyr 以内のファーストライトや宇宙の再電離にもどって定量化されている (例え

ば Bpuwens et al/ 2011a, Coe et al. 2013). 銀河進化の研究は銀河の星形成の燃料である冷たいガスの進化に焦点を移してきている. この節では, 銀河のガス進化についての今後のレビューに関係する一般的な結論を簡単にまとめる.

SFHU では 3 つの主要な時代が確認されている, $z \sim 10 - 6$ からの宇宙再電離中の一様な上昇の始まり (たとえば Bouwens et al. 2011, Bouwens et al. 2012, Coe et al. 2013), これは宇宙に散らばっていた中性銀河間物質が最初の銀河からの光によって再電離された時代と一致している (Fan et al. 2006, Finkelstein et al. 2012). 共同宇宙の星形成率密度は $z \sim 1 - 3$ でピークを迎える. この領域は”銀河集合の時代”と呼ばれていてその間に現在の宇宙にある星のほぼ半分が形成された (Shapley 2011, Marchesini et al. 2009, Reddy et al. 1996). 最後に赤方偏移 $z \sim 1$ から現在にかけては, 宇宙の星形成率が減少している.

銀河形成の研究は観測されているこの星形成史を Λ CDM モデル, 階層的暗黒物質モデル, のうえで説明しようとしている. 銀河形成を理解するためには星や星形成が時間に依存する様々な質量のダークハローの中にどのように分布しているかを調査しなければならない. この分野に関する我々の理解の最も重要な特徴は星や銀河形成は非効率であるという事である. すべてのバリオン (つまりすべての種類の原子) のうちたった 5 % が星や赤方偏移ゼロのくらい星屑である (例えば Fukugita · Peebles 2004).

天の川銀河 ($\sim 5 \times 10^{10} M_{\odot}$) よりもバリオン質量がわずかに大きい銀河はバリオンを最も効率よく星に変えている (15-20 %. Moster et al. 2010). 鍵となる観測結果はこの典型的な銀河の質量は $z \sim 3$ から大きく変わっていないということだ (Marchesini et al. 2009, Ilbert et al. 2010). 一方, ダークマターハローとそのバリオン量はこのタイムスパンの間に 2 桁も増加している (Springel et al. 2005). 宇宙時間のすべてにおいて $\sim 10^{12} M_{\odot}$ の合計質量を持ったダークマターハローが最も効率の良い星形成工場である. このようなハローにおいて, 異なる時代の星形成率は Λ CDM モデル (星形成率は赤方偏移に従ってシステムティックに増加している, 銀河の’主系列’のよな通常の様式が確立される, 与えられた銀河の星質量のための星形成に比較的小さな散乱がある) によって予想される宇宙論的な降着率に追随していると観測されている (Noeske et al. 2007). $z \sim 0$ での星形成率密度は星形成率が $\leq 10^{10} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ の銀河に支配されている (遠赤外出の光度が $\leq 10^{11} L_{\odot}$). $z \sim 2$ まででは星形成率が $\sim 100 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ の銀河が支配している (Murphy et al. 2011, Magnell et al. 2011). いったんハローや銀河がこの質量を超えたならば星形成を通したそれ以上の成長は銀河同士の衝突 (Peng et al. 2010) になる. そして銀河同士の合体が銀河進化の新たな方向となる (van der Wel et al. 2009).

星形成の不活発な銀河は $z \leq 3$ で観測される (Franx et al/ 2009). そして

そのような銀河の存在は重いハローのなかにガスが冷やされたり星が作られるのを妨害する複雑な構造があるのではないかという疑問を投げかける。これについてはいくつかのアイデアが考えられている、落下しているガスのショックヒーティング (Keres et al. 2005, Dekel·Brinboim 2006)、活動銀河核からのフィードバック (AGN, Croton et al. 2006, Bell et al. 2012)、偏在的に観測される大質量銀河内の大質量ブラックホールやキューサーのピークの併発、 $z \sim 2$ の星形成銀河によって刺激されている (Hopkins et al. 2006)、バルジ形成の結果としてのガス円盤の安定 (Feruglio et al. 2010)。活動銀河核からの風によるフィードバックは若い星形成銀河が赤く、つまりバルジを持った中間距離の赤方偏移にある銀河、進化することの説明が必要であるらしい。一方で活動銀河核からの激しい電波ジェットが最近の時代の大質量銀河の周りの銀河団間物質を暖めるのに必要らしく、それによって大質量銀河はさらに成長していくらしい (Fabian 2012, McNamra·Nulsen 2007)。

このレビューでは‘スターバースト’や‘主系列’といった言葉が星形成銀河についてどのように使われているのか明らかにする。これらの分類は平行する二つの状況で起こっている。まず最初に高赤方偏移と近傍の赤方偏移両方にある星形成銀河の大部分は‘主系列’にがあると定義できる事が明らかになった。その中では星質量に対する星形成率がとくに厳しい分布 (分散 0.3dex) にある。星形成率は星質量が増加するにつれて穏やかに減少している。さらに主系列銀河ではある星質量について $z = 0$ から $z = 2$ まです星形成率は 20 倍になっている (Sargent et al. 2012, Rodighiero et al. 2011)。しかしながらすべての赤方偏移において星形成率の分布関数には主系列の星形成率より 4-10 倍大きい第 2 要素が必要である。このようなスターバーストの要素はこれらの分布において数の上ではほんの数%にすぎず、宇宙の星形成率密度に 10 %ほどしか寄与していない。

つぎに第 4 節、5 節で述べるように、遠赤外領域での CO の光度比、主系列に比べスターバースト銀河の方が数倍大きい、について二重の系列があるらしい。含まれるガスを消費するタイムスケールは主系列よりもスターバースト系のほうが 1 桁以上短い (第 4 節参照)。スターバーストはガスリッチな衝突を経験しているという考えを指示する証拠はいくつかあるが、まだこの分野には未解決の問題が残されている。星形成銀河のこれら二つの系は上で説明された早期型銀河、典型的に星質量が重く星形成率が 1 桁以上小さい、にくわえられる。

星形成効率が特定の重さをもったハローで最大になり、より重い系で減少する理由を理解するためにはガスの降着や冷却、星形成やフィードバックを理解しなければならない。今日の我々の銀河進化に関する理解のほとんどは上で説明したように星や星形成、電離ガスの研究に基づいている。冷たいガス、つまり銀河での星形成の燃料の観測と我々の知識の間にはまだ大きな隔りがある。要するに、最近の研究は銀河形成の過程を証明してきたが、形成の原

因は分かっていない．もし宇宙年齢のすべてにわたって冷たいガスの存在や異なった銀河やハローでの分布をトレースする事ができたならば，星や銀河の形成効率についての疑問が解き明かされるだろう．数多くの観測的，理論的論文銀河の星形成の燃料である冷たい分子ガスの観測の重大な必要性を指摘している (Dressler et al. 2009, Genzel et al. 2008, Obreschkow-Rewlings 2009a, Baumert et al. 2010).

銀河に含まれる冷たいガスの観測，星間分子の回転遷移を利用する方法や主として[CII]の微細構造線を利用する方法，の現状を説明する．Solomon-vanden Bout (2005) と Omont (2007) の結果をもとにしている．我々のレビューは主として観測的である．遠方の銀河での星間物質研究の道具やコンセプトを述べ (第 2 節)，高赤方偏移における様々なタイプの銀河の観測の結果をまとめる (第 3 節)．そのあと最近の観測の意味を議論し (第 4 節)，一般的にそれらが初期銀河の状態や銀河形成にいて何を物語っているかについて議論する (第 5 章)．最後に JVLA や ALMA といった次世代の設備につながる鍵となる問題を提起する (第 6 節, 第 7 節)．

このレビューでは分子や原子の微細構造輝線のみを考える．分子の回転による吸収線については Combes (2008) や Carilli-Menten (2002) を参照せよ．

SIDEBAR

この 20 年宇宙の星形成史や星質量の増加は宇宙の再電離 ($z \sim 10$) まで銀河の環境や光度の関数として定量化されてきた．大質量銀河がそのほとんどの星を早くに形成したことや星形成のほとんどが $z > 1$ で起こった事は明らかである．宇宙の星形成密度は赤方偏移につれ星形成率が高い銀河に移ってきている．銀河進化の研究の新たなステップは銀河内の冷たいガス量の記述，特に宇宙年齢の関数として星が形成しているまわりでの星間分子を記述することである．