

$z > 1$ の星形成銀河における $\text{CO} \rightarrow \text{H}_2$ 変換係数の金属量依存性

京都大学 宇宙物理学教室 修士1回 世古 明史

1 要旨

銀河内の分子ガス質量は銀河進化を探るための非常に良い物理量の一つである。この質量をより正確に決定するためには「 $\text{CO} \rightarrow \text{H}_2$ 変換係数」の性質を調べる事が重要になる。近傍銀河においては変換係数が銀河の金属量に依存することが知られているが、遠方銀河についても同様の依存性があるのかはまだ分かっていない。

本発表では Genzel et al. (2012, ApJ, 746, 69) の紹介を行う。この論文は赤方偏移 $1 < z < 3$ にある 44 個の星形成銀河を用いて変換係数の金属量依存性を調べ、近傍銀河と同様に金属量が小さくなるほど変換係数が大きくなることが分かった。これは同質量の分子ガスをもつ銀河を比較したとき、金属量が小さいほど CO 強度は弱くなることを意味する。遠方銀河は近傍銀河に比べて金属量が小さい傾向にあることが分かっており、この論文の結果を用いると、 $z > 2$ にあり $10^{10} M_{\odot}$ 以下の銀河における CO 輝線の観測は ALMA の感度をもってしても困難であることが示唆される。

2 導入

2.1 分子ガス質量と銀河進化

分子ガスは H_2 を主成分とする銀河の主要な構成要素の一つであり、星は分子ガスが集まった分子雲内でつくられる。すなわち、銀河内に存在する分子ガスの質量は、今後その銀河内でつくられうる星の量の指標と考えられる。また、星の進化を考慮すると H_2 が消費され金属量が増加するので、昔の銀河ほど分子ガスの割合が高いと考えられる。以上の理由から銀河内の分子ガス質量は、銀河進化を追うための非常に良い物理量であることが分かる。

分子ガスの質量は、式 (1) のように銀河からくる CO 分子の光度に係数 α_{CO} をかけることで算出する事ができ、この係数 α_{CO} を「 $\text{CO} \rightarrow \text{H}_2$ 変換係数 (CO-to- H_2 conversion factor)」という。天の川銀河での値は、 $\alpha_{\text{CO}} \sim 4.36 M_{\odot} (\text{K km s}^{-1} \text{ pc}^2)^{-1}$ 程度であるといわれている。

$$M_{\text{mol-gas}} = \alpha_{\text{CO}} \times L_{\text{CO}} \quad (1)$$

正確に分子ガス質量を求めるには、この α_{CO} の性質をきちんと調べる事が不可欠である。

2.2 α_{CO} の性質 (近傍銀河)

α_{CO} の値について、以前は一定であると考えられていた。しかしながら、多数の近傍銀河の観測が進み、 α_{CO} の性質として銀河の金属量への依存性が報告されてきており、金属量が小さい銀河ほど α_{CO} の値が大きいという結果が出ている (図 1)。

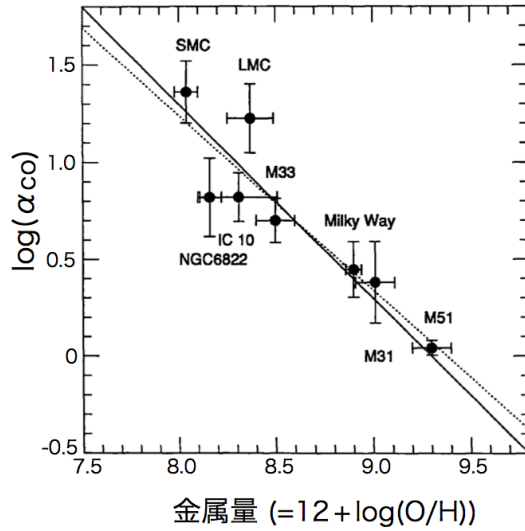


図 1: 近傍銀河の α_{CO} と金属量の関係 (Arimoto et al. 1996 の図を一部改変)。点線は最小二乗法によるフィット、実線は傾き -1 の直線。

3 紹介論文 : Genzel et al. 2012, ApJ, 746, 69

3.1 研究動機 (紹介動機)

銀河進化を探るためには、昔の銀河すなわち遠方の銀河を調べる事が非常に有効である。さらに赤方偏移 $z = 2 - 3$ で最も星形成活動が活発であったという研究がなされていることから、遠方銀河の分子ガスの量を調べる事は非常に重要であると考えられる。その分子ガスの量を正確に算出するために、遠方銀河において α_{CO} の値やその性質を調べる必要があり、近傍銀河で報告されているような金属量依存性が遠方銀河でも見られるのか調べる。

3.2 サンプル

Daddi et al. (2010) と Tacconi et al. (2010) で観測された星形成銀河からの ^{12}CO ($J = 3-2$) の輝線を主に利用した。これらの銀河は星質量が $(3-30) \times 10^{10} M_{\odot}$ で、星形成率は $20-300 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ である。 $1 < z < 1.5$ の範囲にある銀河は 25 個検出され、 $2 < z < 2.4$ の範囲にある銀河は 11 個検出、5 個の銀河は (CO 強度が) 上限値であった。

これら 41 個の銀河に加えて、Baker et al. (2004) などからより遠方かつ低質量の銀河を 3 個選出した。赤方偏移は $2.3 < z < 3.1$ で星質量は $(5-30) \times 10^9 M_{\odot}$ であり、これらの銀河は重力レンズ効果で検出可能であった。(全 44 個の星形成銀河)

3.3 α_{CO} の算出

まずは各星形成銀河について α_{CO} の値を算出する。(1) 式において L_{CO} は観測量であり、何らかの方法で $M_{\text{mol, gas}}$ を算出すればよい。本来は求まっている α_{CO} を用いて $M_{\text{mol, gas}}$ を算出するのだが、今回は α_{CO} を求めるために別の方法で $M_{\text{mol, gas}}$ を見積もる。

この論文では、Kennicutt-Schmidt の関係を用いている。Kennicutt-Schmidt の関係とは (2) 式で示されるような、星形成率 (SFR : star formation rate) の面密度と分子ガス面密度の間のべき乗則である。

$$\log(\Sigma_{\text{SFR}}) = a + n \times \log(\Sigma_{\text{mol, gas}}) \quad (2)$$

SFR は Kennicutt (1998) でも議論されているように紫外線や $H\alpha$ 輝線強度を用いて算出できる。したがって紫外線や $H\alpha$ を用いて SFR を算出し、Kennicutt-Schmidt の関係を用いて分子ガス密度を求める。その後、分子ガス質量に戻し、観測された L_{CO} で割ることで α_{CO} を算出する

3.4 金属量の算出

各銀河の金属量を求める。今回の論文では次の 2 つの方法を用いている。

1. [NII] と $H\alpha$ の輝線強度比

図 2 に示されているように、金属量と [NII] と $H\alpha$ の輝線強度比の間にはよい相関があり、この関係から見積もる金属量の誤差は比較的小さい。今回のサンプルの 44 個の星形成銀河のうち、14 個の銀河についてはこの方法を用いた。

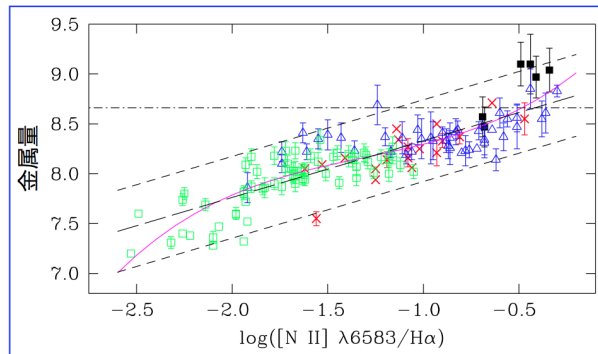


図 2: 銀河の金属量と [NII] と $H\alpha$ の輝線強度比の関係 (Pettini & Pagel, 2004 の図を一部改変)。破線は確度 95%以内を示す線。

2. 星質量と金属量の関係

図 3 に示されているように、銀河の金属量と星質量の間にも関係性がある。図には明示されていないが、この関係は分散が大きく赤方偏移依存性もあるため、1 に比べると精度は落ちる。この関係の重要な点は、遠方銀河ほど金属量は小さくなり、また星質量が小さくなるほど金属量は小さくなっていることである。

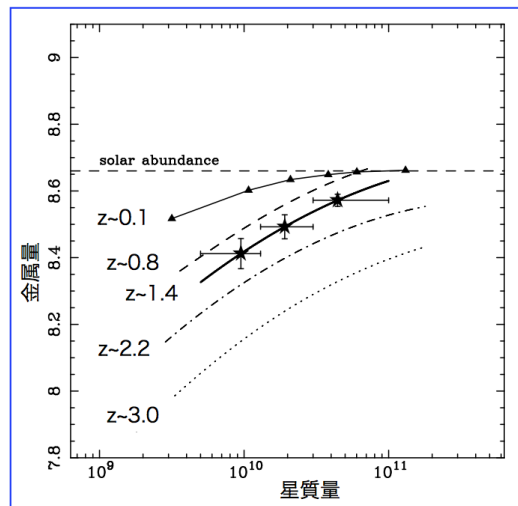


図 3: 銀河の金属量と星質量の関係 (Yabe et al. 2012 の図を一部改変)。各々の曲線が図中に書かれている赤方偏移での関係。

4 結果・議論

44 個の星形成銀河のサンプルについて、各々の α_{CO} と金属量を図 4 にプロットした。金属量が小さくなるほど α_{CO} の値は大きい傾向があり、これは近傍銀河の結果と同じである。ベストフィットの結果は図 4 の赤線で、 $\log(\alpha_{\text{CO}}) = -1.6(\pm 0.6) \times (12 + \log(\text{O}/\text{H})) + 14(\pm 6)$ である。遠方銀河においても α_{CO} の金属量依存性が見られる結果となった。フィットの傾きの赤方偏移依存性は、今回の結果の誤差が大きいことと近傍銀河でもまだ議論の途上であることから明言はできていない状況である。

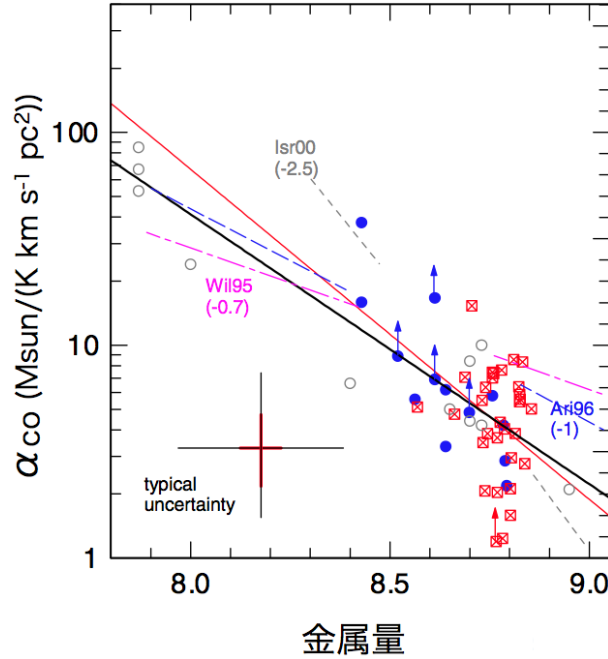


図 4: α_{CO} と金属量の関係。青丸は [NII] と $\text{H}\alpha$ の輝線強度比から金属量を算出した銀河、赤四角は星質量との関係から金属量を算出した銀河を表す。赤い実線はベストフィットの直線を表す。

この結果は、同じ分子ガス質量をもつ銀河を比較したとき、金属量が小さい銀河ほど CO の強度が弱くなるということを意味する。図 3 にあるように遠方かつ低星質量の銀河は金属量が小さいため、これらの銀河からの CO 強度は弱いと考えられる。今回の結果を用いると赤方偏移 $z > 2$ にありかつ星質量が $M_* < 10^{10} M_\odot$ の銀河は高感度の ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) をもってしても CO の検出は困難であることが示唆される。

5 まとめ

赤方偏移 $1 < z < 3$ の 44 個の星形成銀河を用いて α_{CO} の金属量依存性を調べた。銀河の金属量が小さくなるほど α_{CO} の値が大きくなるという近傍銀河と同様の結果が得られた。

この結果は金属量が小さい銀河からの期待される CO 放射強度が弱くなることを意味しており、遠方銀河で星質量が小さい銀河は金属量が小さく、これらの銀河の CO 輝線の検出は ALMA を用いても困難になると考えられる。

6 参考文献

- Arimoto, N., Sofue, Y., & Tsujimoto, T. 1996, PASJ, 48, 275
- Genzel, R., et al. 2012, ApJ, 746, 69
- Pettini, M., & Pagel, B. E. J. 2004, MNRAS, 348, 59
- Yabe., K., et al. 2012, PASJ, 64, 60