大規模銀河形成シミュレーションによる ALMA に向けた観測提案への貢献

早津夏己 (東京大学 宇宙理論研究室)

Abstract

本研究では Okamoto et al. (2014) による大規模銀河形成シミュレーションを用いて, [CII] 輝線銀河の統計 的特徴と検出可能性を議論する.用いるシミュレーションは計算コストの制限により, [CII] 輝線が起源とす るような中性水素ガスを解像していない.そのため星間空間のモデル化には中性水素ガスの熱平衡状態を計 算したワンゾーン計算の結果を応用する.現実的な取り扱いのため,加熱過程に寄与する遠紫外線輻射場は, シミュレーション中のガス粒子と星粒子間におけるダストによる減光の寄与を考慮する.

結果として得られた [CII] 輝線光度は, 近傍宇宙で知られる星形成率との相関を再現した.本理論モデル によって予測される [CII] 輝線光度関数を用いて検出可能性の議論を行い, ALMA Cycle 3 への 3 件の観測 提案に貢献した.例えば,本研究は赤方偏移 z = 6 の [CII] 輝線銀河らしき2 天体の観測提案に用いられた. 過去の観測では,感度不足により輝線の検出を断定できなかったが,もし感度が足りていたら,過去の観測体 積中に最大2 天体の [CII] 輝線銀河が検出可能だったことが本研究から示唆される.一方で,近傍宇宙の観測 で得られる星形率との相関から見積もった光度分布は, [CII] 輝線銀河の検出を示唆せず,本研究の予言能力 を今後の観測で検証できる.

1 Introduction

遠方宇宙の星形成史の観測的な理解は, 歴史的には 静止波長系での紫外線によって成されてきた. 星形 成の直接の指標 は, 寿命の短い大質量星が放射する 電離光子や紫外線である. ただし, 星形成している領 域に星間塵 (ダスト) があれば, 紫外線はダストに吸 収され赤外線で再放射される. そのため, 星形成史の 正しい理解には紫外線の観測だけでなく, 赤外線で観 測する必要がある.

赤外線は、ダスト放射成分の連続光だけでなく、星 の種となる冷たい星間ガス起源の輝線も観測される. 輝線は星形成領域の描像の理解や、精度よい赤方偏移 の決定のために欠かせない.特に [CII] 158 μ m 輝 線は、大質量星からの紫外線に強く輻射された中性水 素ガスを主な起源とし、非常に明るい輝線として知ら れる.

[CII] 輝線は励起温度 92 K, 臨界密度 $300 \times (T/100)^{-0.07}$ cm⁻³ の微細構造線輝線で ある. CI の電離ポテンシャルと CO の解離ポテン シャルはともに 11 eV 程度であるため, [CII] 輝線 は分子雲近くの高密度領域から希薄な電離水素ガス まで広い星形成領域を起源とする.ただし,衝突励 起に伴う輝線放射の冷却関数は n² に比例するので, 高密度中性水素ガスの主な冷却源である.炭素は酸 素に次いで,宇宙で二番目に多い重元素である.ま た,一般に光学的に薄いとされ,減光されにくい.

これらの理由から, [CII] 輝線は特に明るく, 他の輝 線と区別しやすい. そのため分光赤方偏移に向いてい る.また, z = 6-8 での [CII] 輝線の観測波長は大気 の吸収が少ない領域に入り, 感度を稼ぎやすいことも 利点の1つである.実際に, Karim et al. (2013) によ るアタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計 (ALMA) の観測では, 2つの SMG から新たに検出された [CII] 輝線を用いて, 赤方偏移を決定することに成功してい る (Swinbank et al. 2012).

また, [CII] 輝線は赤方偏移を知るためのプローブと して注目されるだけでなく, [NII] 輝線 (205 μm) との 輝線比から high-z の SMG の金属量を見積もる試み や (Nagao et al 2011, 2012), 星形成史のトレーサー として支持する観測結果や (De Looze et al. 2014), 力学的な描像のトレーサーになるという観測的な示 唆もある (Brisbin et al. 2014). サブミリ波銀河の 赤方偏移同定の目的だけでなく,これらの興味深い観 測事実から星形成史の描像を理解するためにも,遠方 [CII] 輝線観測は重要である.

さらに, 遠方宇宙の [CII] 輝線の光度分布 (光度関数) が分かれば, 検出可能性が議論できる. 観測的な [CII] 輝線光度関数の見積もりは Matsuda et al. (2015) らによって成されているが, 将来観測の検出可能性を議論できるほど制限は与えられていない.

統計的な [CII] 輝線銀河の見積りでは, 二相モデル を大規模数値シミュレーションに応用する手法が用 いられている (Wolfe et al. 2003, Wolfe et al. 2003b, Nagamine et al. 2006). 理想的には, 実際の星形成 領域のスケールが分解されている高解像度の大規模 な銀河形成シミュレーションを行うことが望ましい が, 現在の計算性能では不可能である. そのため, 先 行研究や本研究では二相モデルと呼ばれる, 中性水 素ガス雲の熱平衡, 電離平衡状態を解いた one zone 計算 (e.g., Wolfire et al. 1995) の結果をシミュレー ションに応用する.

章立ては以下のようになる.2章では本研究の理 論モデルを概説し、3章では既存の観測との比較や 統計的特徴を主に紹介する.4章では本研究を用い た ALMA Cycle 3 への観測提案の2つの貢献を紹介 する.

宇宙論モデルは Λ CDM model を用いる.宇宙論パ ラメータは $\Omega_{\rm M} = 0.318$, $\Omega_{\Lambda} = 0.682$, h = 0.67, $\sigma_8 = 0.835$ を用いる (Planck Collaboration 2014).

2 Methods

本研究では大規模銀河形成シミュレーションの結 果 (Okamoto et al. 2014)を用いて、シミュレーショ ン中の銀河の [CII] 輝線光度を計算し光度分布を見積 もる.しかし、計算コストの制限により銀河を構成 するガス粒子の質量解像度は 10⁷ 太陽質量程度であ るため、[CII] 輝線が起源とする星形成領域は分解さ れていない.そこで、[CII] 輝線による放射冷却は紫 外線輻射によるダストの光電加熱とほぼ熱平衡の関 係にあることを利用する (e.g., Wolfire et al. 1995). つまり、周囲の星粒子からガス粒子へ放射される遠 紫外線輻射強度を計算し、ガス粒子の紫外線輻射強度(G_0)や重元素量(Z)の性質をもとに[CII]輝線光度を計算し、銀河毎に足し上げる.本研究では $G_0 = 0.16 - 1.6 \times 10^4$, $Z = 10^{-2.5} - 10^{-0.5} Z_{\odot}$ の範囲の二相モデルの結果を用いた (Nagamine et al. 2006). 図 1 は太陽金属量程度で異なる G_0 の場合の密度-圧



図 1: 太陽金属量程度で異なる G_0 の場合の熱平衡 曲線を密度-圧力図上にプロットしたもの (上) と, そ のうち $G_0 = 1.7$ の場合の密度-冷却率・加熱率の図 (下).上: G0が大きいほど輻射場によるダストの光 電加熱 (下の図の P.E)が効き, 高密度側まで高温を 保つ.その場合,より高密度で圧力平行な二相になる ため [CII] 輝線光度があがっていく.下:点線が加熱 率,実線が冷却率. [CII] 輝線放射は広い密度帯で主 要な冷却源となる.

カ図 (上) と, そのうち $G_0 = 1.7$ の場合の密度-冷却 率・加熱率の図 (下) である. 図 1 下のように, 二相 圧力平衡状態となるとき, 平衡曲線は N 字型になる. 熱平衡曲線の圧力の極値の最大値, 最小値を P_{MAX} , P_{min} として, 2 相になるガス圧を $\sqrt{P_{min}P_{MAX}}$ と決 める. すると, G_0 , 金属量 Z ごとの, 圧力平衡な 2 つの中性水素ガス, cold neutral medium (CNM) と warm neutral medium (WNM) の状態を得ることが 出来る.ここで,その中間の密度は,熱的に不安定で あるため中性水素ガス雲は形成されない.

 G_0 の計算にはダスト減光を考慮する. 銀河内の 全ての星粒子のSEDと星粒子とガス粒子の距離 d_{sg} , d_{sg} 間のダストの光学的厚み $\tau(d_{sg})$ をもちいて

$$G_0 = \sum_{\text{star}} \frac{\int_{91.2 \text{ nm}}^{209 \text{ nm}} L(\lambda) e^{-\tau(d_{\text{sg}})} d\lambda}{4\pi d_{\text{sg}}^2}.$$
 (1)

とする.

銀河の [CII] 輝線光度を計算するために, ガス粒子の [CII] 輝線光度の計算は以下のように行う (Nagamine et al. 2006). ガス粒子が二相になるとき, 質量と体積 が保存されると仮定する.

$$\rho V = \rho_{\rm CNM} V_{\rm CNM} + \rho_{\rm WNM} V_{\rm WNM}, \qquad (2)$$

$$V = V_{\rm CNM} + V_{\rm WNM}. \tag{3}$$

体積 V は $V = M/\rho$ から得られるので,式 3 から体 積比 f_V あるいは質量比 f_M を計算することが出来る.

$$f_V = \frac{V_{\rm CNM}}{V} = \frac{\rho - \rho_{\rm WNM}}{\rho_{\rm CNM} - \rho_{\rm WNM}},\qquad(4)$$

$$f_M = \frac{\rho_{\rm CNM} V_{\rm CNM}}{\rho V} = \frac{\rho_{\rm CNM}}{\rho} f_V.$$
 (5)

体積比が正であるためには, ガス粒子がもつ圧力, 密 度が以下の関係式

$$P_{\min} \leq P,$$
 (6)

$$\rho_{\rm CNM} \le \rho \le \rho_{\rm WNM}.$$
(7)

をみたす必要がある.この条件を満たす時,ガスは2相 になるとする.シミュレーションで計算されたガス粒 子は HI 領域を実際には分解していないためガス圧は $P_{\min} \leq P$ を満たせば十分であり, $P_{\min} \leq P \leq P_{MAX}$ を厳密に満たす必要はない.つまり,それぞれの G_0 , Zごとに CNM, WNM の密度,温度,圧力, [CII] 輝 線の放射率を用意し,ガス粒子に対応させればよい.

3 Results

本研究の理論モデルは,近傍の観測で知られる星 形成率と [CII] 輝線光度の相関や光度分布を再現した (図 2). また, [CII] 光度分布も観測的な制限を満た



図 2: 近傍の観測で知られる星形成率と [CII] 輝線光 度の相関 (青・黒), とその付近のシミュレーションの 計算結果 (オレンジ・赤) との比較.本研究の計算結 果は大まかに既存の観測を再現できている.



図 3: 各赤方偏移における, 観測的な [CII] 輝線光度 関数への制限 (丸印) とシミュレーションによる予測 (線) との比較. 理論予測は観測的な制限内に入って いる.

し, 赤方偏移 z = 4.4 から z = 6.5 にかけて明るい銀 河の数密度が増える結果になった (図 3). これは, 遠 方ほど若い星が多く, 星形成領域の紫外線輻射場が高 くなる効果を反映している.以上より, 遠方 [CII] 輝 線銀河は $z \sim 6$ 付近の検出可能性が高く, 星形成史 の理解に貢献できると結論した. 2015年度第45回天文・天体物理若手夏の学校

4 Discussion

本研究は既存の観測の統計的特徴を大まかに再現 する事が分かった.そのため本研究は遠方 [CII] 輝線 観測への予言能力があると見なし,本章では検出可能 性を議論する.

図4は, z = 6の [CII] 輝線銀河らしき2天体の観 測提案に用いられた, 理論予測を示している. 図中の オレンジの点は過去の ALMA での観測条件を表して いる. つまり, 縦軸を観測体積の逆数, 横軸を感度を 光度に換算したものとして図に載せてある. ただし 過去の観測では, 感度不足により輝線の検出を断定 できなかったため, 検出されたシグナルが [CII] 輝線 だった場合の感度を用いてある. もし [CII] 輝線光度 関数の理論予測がこの点と重なれば, シミュレーショ ン内で同じ疑似観測を行った場合に1個の [CII] 輝線 銀河の検出を意味する. 理論線が観測の点を上回れ ば, その観測条件で一個以上の検出を示唆する.

図4中の理論線は二本あり, 濃い緑は本研究の理論 予測で, 黄緑は観測的な星形率との相関から見積もっ た光度関数を示している.本研究の理論予測によれ ば, もし感度が足りていたら, 過去の観測体積中に最 大2天体の [CII] 輝線銀河が検出可能だったことが本 研究から示唆される.一方で, 観測的な星形率との相 関から見積もった光度分布は, [CII] 輝線銀河の検出 を示唆しない.

優先順位が高ければ, 観測は 2015 年 10 月 から 2016 年 9 月に行われる.実際の観測結果と比較し, 結果の (非) 整合性を議論することにより, 遠方星形 成領域の理解が深まることが期待される.

今後の研究では、シミュレーション中の銀河のダス トガス比を二相モデルの結果と対応させるなど、さら に現実的に取り扱うことで予測の精度を高めて行く 予定である.

Acknowledgement

本研究は国立天文台 滞在型研究員制度を利用させ て頂く事で, 観測的天文学者との議論を活発に行えま した. お礼申し上げます. 計算には筑波大学計算科学 研究センターの学際共同利用プロジェクト「大規模 シミュレーションで探る銀河形成ならびに進化」を



図 4: 今後の ALMA 観測結果の予測. オレンジの点 は過去の ALMA での観測条件. 濃い緑は本研究の理 論予測で, 黄緑は観測的な星形率との相関から見積 もった光度分布. 本研究の理論予測のエラーバーは, 観測条件の点より上回っている. 運が良ければ最大 2個の観測を意味している.

利用させて頂き, 得られたものです. 国立天文台の計 算機システム XC30-trial も利用させて頂きました. ありがとうございました.

本研究は修士論文の結果を応用したものになって います.修士論文作成にあたり,指導,議論して下さっ た吉田直紀教授,細川隆史助教授,松田有一助教授, ポスドクの清水一紘氏,千秋元氏に感謝します.

この研究会を運営して下さった,天文天体物理若手 夏の学校の事務局の皆様にもお礼申し上げます.

Reference

- Okamoto, T., Shimizu, I., & Yoshida, N. PASJ, 66, 70 (2014)
- Matsuda, Y., Nagao, T., Iono, D., et al. MN-RAS.451.5660 (2015)
- Nagamine, K., Wolfe, A. M., & Hernquist, L. ApJ, 647, 60 (2006)