

# クエーサー吸収線系から探る銀河と宇宙大規模構造の進化

小倉 和幸 (文教大学)、長尾 透 (愛媛大学)、今西 昌俊、柏川 伸成 (国立天文台)、谷口 義明 (放送大学)、鍛冶澤 賢 (愛媛大学)、小林 正和 (呉高専)、鳥羽 儀樹 (ASIAA)、延原 広大 (愛媛大学)

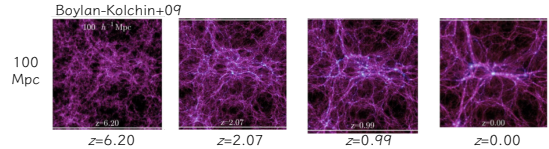
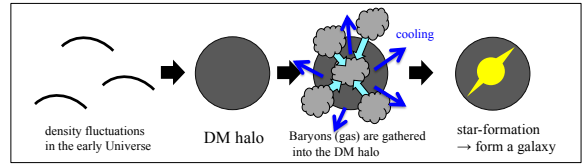
2018.2.24-25 第23回天体スペクトル研究会  
@ノートルダム清心女子大学

1

## 銀河の形成と進化

### ★銀河進化と構造形成のモデル

- 冷たいダークマター (CDM; cold dark matter) 宇宙論が現在の主流  
→ 銀河の進化はCDMが主導



・ CDMモデルの特徴: 銀河のクラスタリング (密集)

2

## 銀河の形成と進化

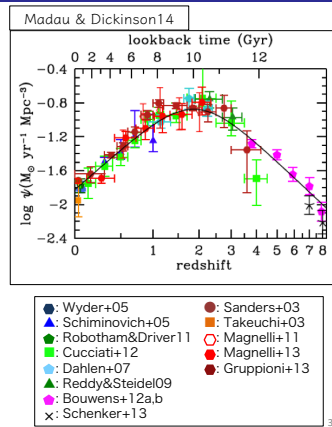
### ★銀河のバリオン進化

note: 銀河 = バリオン + DM  
バリオン = 星 + ガス

- 星成分の進化
- ・ 銀河進化の歴史 → 星形成の歴史
- ・ 星形成銀河の観測により、星形成率密度の進化が明らかに

Madau & Dickinson 14  
・ 星形成率密度  $\psi(z)$  の赤方偏移進化  
-  $z \sim 2$  でピーク

→  $z \sim 2$  は初期宇宙での星形成を  
探るために興味深い赤方偏移



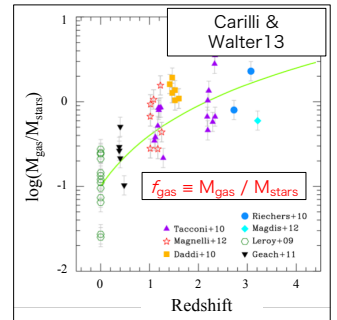
3

## 銀河の形成と進化

### ★銀河のバリオン進化

- ガス成分の進化
- ・ ダークマターや星に比べて理解が進んでいない
- ・ CO輝線の観測で銀河に含まれるガスの割合が調べられつつある
- ・ 高赤方偏移ほどガスの割合が高い

$z > 2$  ではガスの割合が  
50%を超えることも



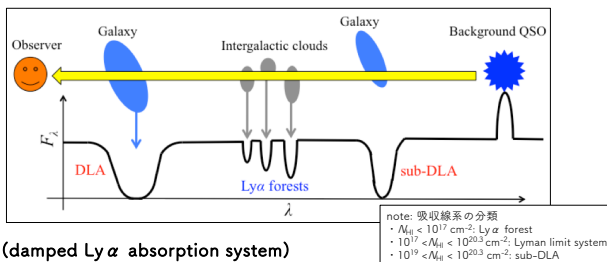
● 疑問: 形成初期の銀河でガスはどのようにして星に転化されてきたのか?  
→  $z \sim 2$  でガスと星との関係を調べることが重要

4

## クエーサー吸収線系とDLA

### ★クエーサー吸収線系

- ・ クエーサーなどを背景光源として吸収線として検出されるガス体
- ・ 吸収線をつくる天体の明るさに関係なく検出可能 → 遠方のガスの調査に有用



### ● DLA (damped Ly $\alpha$ absorption system)

- ・  $N_{\text{HI}} \geq 10^{20.3} \text{ cm}^{-2}$  のクエーサー吸収線系
- 柱密度は近傍の円盤銀河に相当
- ・ 宇宙の中性水素ガスの80%程度をDLAが占める (e.g., Noterdaeme+09)

DLAは将来的に星形成を引き起こす大量のガスの貯蔵庫

5

## DLAと星形成銀河との関係

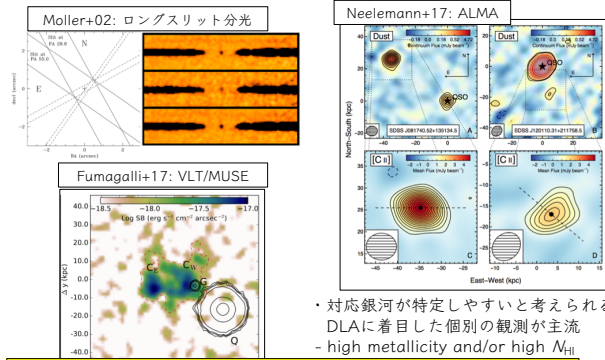
- DLAの起源は議論下
- ・ 銀河の円盤、アウトフロー、tidal tailなど様々なシナリオ
- DLAと銀河との関係の調査は困難
- ・ 対応天体の特定が難しい
- ・ これまでに対応銀河が分光同定された  $z > 2$  のDLAは17個 (2018年1月現在)
- ・ 対応銀河特定率は10%程度 (Krogager+17)
- なぜ対応天体特定率が低いのか?
- ・ 明るい背景クエーサーの存在
- ・ DLA対応銀河は暗すぎる?
- まだ星が少ない?
- ・ 直接的に星形成活動に関わっているDLAは一部だけ?
- 中性ガスが直接星に転化されるわけではない (分子ガスを經由)

6

## DLAと星形成銀河との関係

### ★DLA対応天体の探査

- ・ロングスリット分光、狭帯域フィルター (NB) 撮像、面分光など



- ・対応銀河が特定しやすいと考えられるDLAに着目した個別の観測が主流
- high metallicity and/or high  $N_{\text{H}}$

DLA対応天体の系統的な探査が必要

7

## DLAと星形成銀河との関係

### ★ $z > 2$ で分光同定されているDLA対応銀河

Quasar	$z_{\text{QSO}}$	$z_{\text{DLA}}$	$\log N_{\text{H}}$	$\theta$ (")	b (kpc)	References	Emission lines
Q2233+131	3.298	3.15	20	2.51	18.52	Djorgovski+96	Ly $\alpha$
Q2206-1958	2.559	1.92	20.65	0.99	8.09	Møller+02	Ly $\alpha$
PKS 0458-02	2.286	2.04	21.65	0.31	2.44	Møller+04	Ly $\alpha$
Q2222-0946	2.926	2.354	20.65	0.8	6.67	Fynbo+10	Ly $\alpha$ , [O III], H $\alpha$
J0918+1636	3.086	2.583	20.96	1.98	16.2	Fynbo+11,13	[O II], [O III], H $\beta$ , H $\alpha$
J1135-0010	2.888	2.207	22.1	0.1	0.9	Sommer-Larsen & Fynbo17	Ly $\alpha$ , [O III], H $\alpha$
J0338-0005	3.068	2.22	21.05	0.49	4.12	Noterdaeme+12b	Ly $\alpha$
HE 2243-6031	3.01	2.329	20.62	3.1	26	Krogager+12	Ly $\alpha$
J0918+1636	3.086	2.412	21.26	<0.25	<2.0	Bouche+13	H $\alpha$
J0310+0055	3.782	3.115	20.05	3.8	28	Fynbo+13	[O III]
J2358+0149	3.255	2.979	21.69	1.5	21	Kashikawa+14	Ly $\alpha$
J0817+1351	4.398	4.26	21.3	6.2	42	Srianand+16	Ly $\alpha$
J1201+2117	4.579	3.798	21.35	2.5	18	Neeleman+17	[C II] 158 $\mu\text{m}$
J0255+0048	3.996	3.255	20.85	30.05		Neeleman+17	Ly $\alpha$
J2059-0528	2.539	2.210	21.00	<0.8	<6.3	Fumagalli+17	Ly $\alpha$
J2348-011-1	3.01	2.425	20.53	0.7	5.9	Krogager+17	Ly $\alpha$

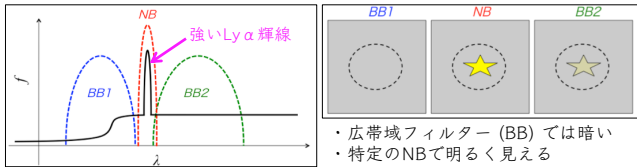
- ・分光同定された $z > 2$ のDLA対応銀河のほとんどはLy $\alpha$ 輝線を示す
- DLAとLy $\alpha$ 輝線銀河 (LAE) との関係を示唆

8

## DLAと星形成銀河との関係

### ★ライマンアルファ輝線銀河 (LAE; Ly $\alpha$ emitter)

- ・強いLy $\alpha$ 輝線で検出される銀河: 一般的には $EW_0 > 20 \text{ \AA}$
- 狭帯域フィルター (NB) を使った探査が有効



- ・広帯域フィルター (BB) では暗い
- ・特定のNBで明るく見える

- LAEは若い銀河 (Cowie&Hu98, Malhotra&Rhooads02, Nilsson+07, Ono+10a,b,12など)
- ・UV連続光が弱く、Ly $\alpha$ 等価幅が大きい
- 典型的な星質量:  $M \sim 10^8 - 10^9 M_{\odot}$
- 典型的な年齢: 5 - 100 Myr

大量のガスを含むDLAと若い銀河であるLAEにはどのような関係があるのか?

9

## DLAとLAEとの関係を調査

### ★DLA集中領域 (DLA concentrated region; Ogura+17)

- ・同じ赤方偏移のDLAが狭い範囲に集中している領域をDLA集中領域と定義し、LAEの性質を調査

- なぜ集中領域に着目するのか
- (1) DM宇宙論によると、銀河が集団で存在する環境が重要
- (2) 効率よくDLAとLAEとの関係を調査可能
- (3) 効率よくDLA対応天体の探査が可能

DLA集中領域の定義  
(50 Mpc)<sup>3</sup>の範囲にDLAが3個以上存在する領域

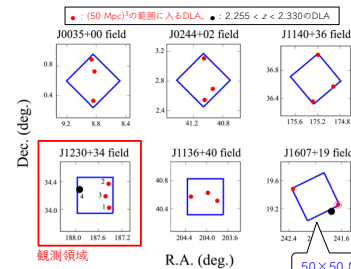
- note: 中領域の定義は原始銀河団の大きさに基づく
- ・原始銀河団に含まれる銀河の赤方偏移分布
  - Chiang+13, Overzier+16:  $\Delta z \sim 0.02-0.06$  (30-80 Mpc に相当)
  - ・原始銀河団の広がり
  - Prescott+08:  $20 \times 50 \text{ Mpc}^2$  ( $z \sim 2.75$ )
  - Lee+14:  $72 \times 72 \times 25 \text{ Mpc}^3$  ( $z \sim 3.8$ )
  - ・理論的研究
  - Muldrew+15:  $z \sim 2$ 原始銀河団の広がり $\sim 50 \text{ Mpc}$

10

## DLA集中領域の探査とLAEの観測

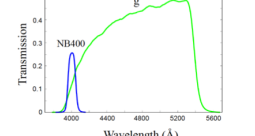
### ★BOSS DLAカタログを用いた調査

- ・BOSS DLAカタログ (Noterdaeme+12)
- 12,801個のDLAを掲載 (SDSS DR9に基づく)
- ・ $2.255 < z < 2.330$ に着目
- BOSS DLAの赤方偏移分布のピークに近く、Suprime-CamのNB400でLy $\alpha$ を観測可能
- 選出されたDLA集中領域 (@ $z \sim 2.3$ )



### ★観測

- ・装置: Suprime-Cam
- NB400, g'-band撮像
- ( $2.255 < z < 2.330$ のLAEがターゲット)
- ・観測日: 2015年4月15、16日 (ハワイ時間)



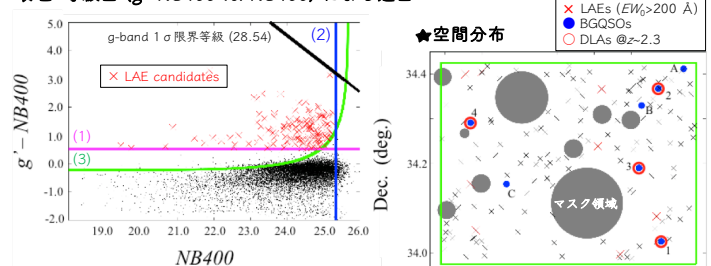
NB400		g'	
exposure	seeing	exposure	seeing
4.6 hrs	0".7-1".0	1.0 hrs	0".5-0".7

- データ整約/解析
- ・SDFRED2, IRAF, SExtractorを使用
  - ・最終画像の総積分時間:  
NB400 → 185分、g' → 54分
  - ・限界等級 (5 $\sigma$ , AB mag):  
NB400 → 25.34, g' → 26.69
  - ・最終画像のPSFサイズ:  $\sim 0".9$
  - ・測光アーチャーサイズ: 2".0

11

## LAEの色選出

### ★色等級図 (g'-NB400 vs. NB400) による選出



- LAE選出基準
- (1)  $g'-NB400 \geq 0.522$ :  $EW_0 \geq 20 \text{ \AA}$
  - (2)  $NB400 \leq 25.34$ : 5 $\sigma$ 限界等級
  - (3)  $g'-NB400 \geq -0.23 + 3\sigma$  color-error (オフセットは $24.0 \leq NB400 \leq 25.0$ の天体のメジアンカラー)

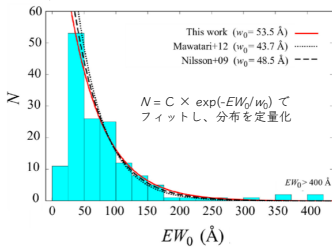
- ・SExtractorにより16912天体を検出
- ・色選出で154個のLAEを選出
- ・画像を確認し、 $z \sim 2.3$ のLAEを149個選出

12

## DLA集中領域におけるLAEの性質

・J1230+34天域のLAEの性質と近い赤方偏移のLAEの性質とを比較

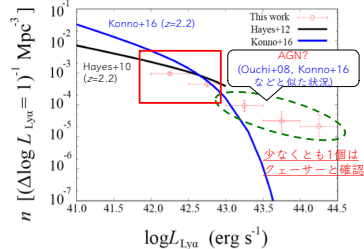
### ★Ly $\alpha$ 静止系等価幅 ( $EW_0$ ) 分布



・Mawatari+12 ( $z=2.4$ , 密度超過領域), Nilsson+09 ( $z=2.3$ , 一般領域) と比較

- This work:  $w_0=53.5 \pm 4.7 \text{ \AA}$
- Mawatari+12:  $w_0=43.7 \pm 0.4 \text{ \AA}$
- Nilsson+09:  $w_0=48.5 \pm 1.7 \text{ \AA}$
- 有意な違いなし

### ★Ly $\alpha$ 光度関数

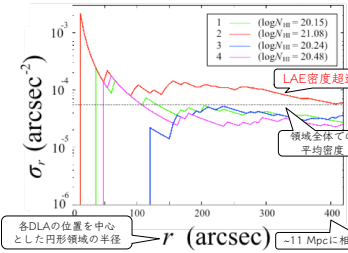


・Konno+16, Hayes+10 ( $z=2.2$ の一般領域) と比較  
→ 有意な違いなし

J1230+34天域全体(-50 Mpcスケール)でのLAEの性質は、近い赤方偏移における他の領域(一般領域や原始銀河団を含む)と違いは見られない

## DLA集中領域におけるLAEの性質

### ★LAE密度分布



・最も  $N_{\text{H I}}$  が大きい ( $\log N_{\text{H I}}=21.08$ ) DLA (#2) 周囲にLAE密度超過の兆候がみられる  
・3個のDLA周囲にはLAEの密度超過はみられない

近年の原始銀河団の探索により、高密度環境においてLy $\alpha$  輝線が抑制される傾向があることが報告されている (Toshikawa+16, Shimakawa+17, Lemaux+17など)  
→ シナリオ(1)のようなガスに富んだ原始銀河団環境の存在を示唆

### ★DLA集中領域を説明するシナリオ

- (1) DLA集中領域はガスに富んだ若い天体が多く存在する領域である  
→ 光度関数や等価幅分布が他の環境のLAEと変わらないのは、共鳴散乱とダスト吸収によりLy $\alpha$  輝線が弱められ、DLA周囲のLAEが見落とされるため  
→ 最も  $N_{\text{H I}}$  の大きいDLAの周囲では、豊富なガスから多くのLAEが生まれ、共鳴散乱とダスト吸収の影響を打ち消して密度超過がみられる  
→ Ly $\alpha$  輝線に類らない観測による検証が必要 (LBG, H $\alpha$  emitter, [O III] emitterなどの)
- (2) DLA集中領域にはガスが多く存在するが、まだ銀河はあまり多く存在しない  
→ H Iガスは直接星に転化されるのではなく、分子ガスを經由して星になるため、多くの銀河ではまだ星が少なくガスが多い状態  
→ H $_2$ 分子ガスの観測により検証可能
- (3) DLA集中領域はガスが多い領域ではなく、若い銀河が特に多い領域ではない  
→ 偶然DLAが密集しているだけ  
→ 検証には背景QSOの面密度が不十分  
→ PSFでの探索、eBOSSなどの大規模分光探索、銀河を背景光源としたDLAの調査などに期待

## まとめと今後の課題

### 本研究の成果

- DLAとLAEとの関係を調査するために $z=2.3$ のDLA集中領域でNB撮像によりLAEを観測し、その性質を調査した
- 50 MpcスケールでのLy $\alpha$  光度関数やLy $\alpha$   $EW_0$ 分布には、近い赤方偏移における先行研究と有意な違いは見られない
- 1個のDLA周囲に10 MpcスケールのLAEの密度超過を発見した  
→ ガスの多い領域に若い銀河が集中している環境の存在が示唆される

### 今後の課題

- DLA集中領域を説明するシナリオを検証するための追観測  
→ より深いLAEの観測  
→ LBG, H $\alpha$  emitter, [O III] emitterなど、共鳴散乱の影響を受けにくい銀河の観測  
→ 分子ガスの分布を観測 (LBG観測データ、LAEの追加観測データは解析中...)

### ● 理論モデルの構築

DLA集中領域は形成初期の銀河の進化を調べるために興味深い研究対象