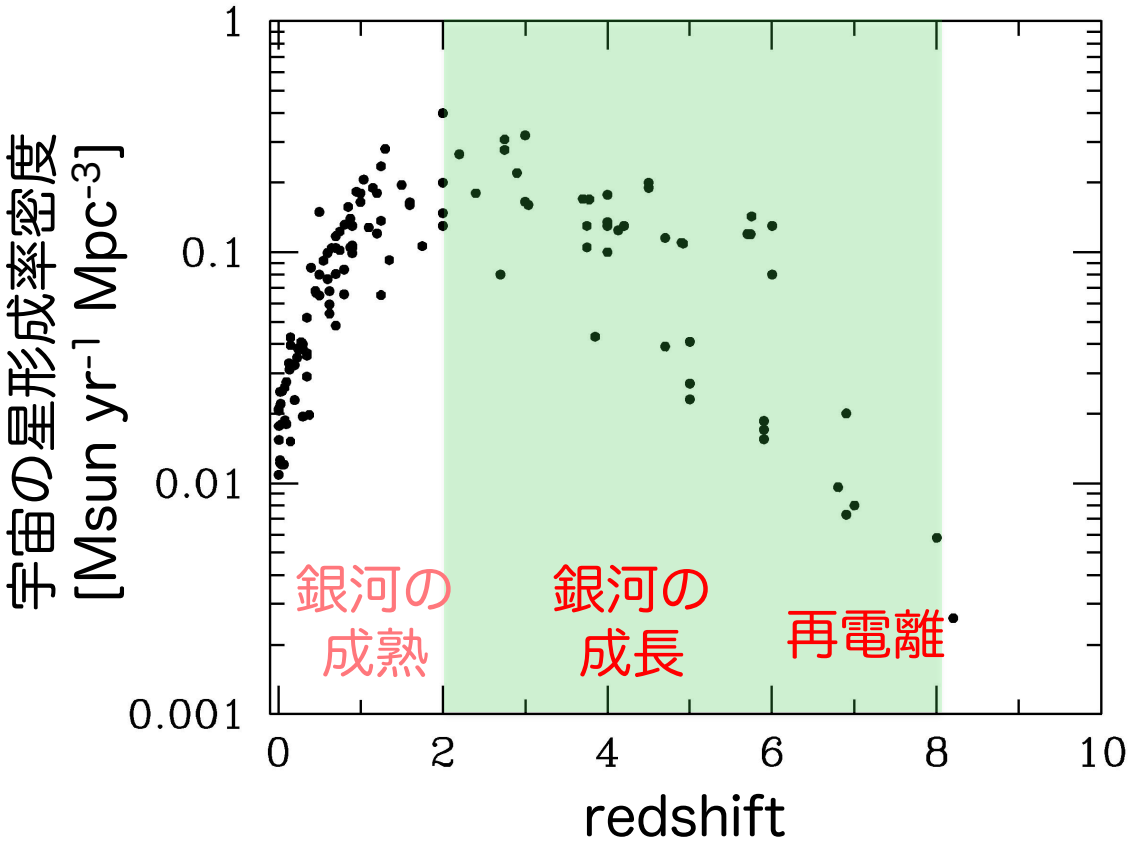
すばるHSCサーベイによるサイエンス

高赤方偏移銀河

東大・天文教室
嶋作一大

共同執筆：大内正己、Seb Foucaud、岩田生、井上昭雄、
松田有一、斎藤智樹、長峯健太郎、ほか

対象は 2<z<8


宇宙の星形成率密度
[Msun yr-1 Mpc-3]
1
0.1
0.01
0.001
0
2
4
6
8
10
redshift
銀河の
成熟
銀河の
成長
再電離

主な科学的目標

□銀河進化

銀河はダークハローの中でどう進化するか？
Lyα blob の銀河進化上の位置づけは？

□宇宙再電離

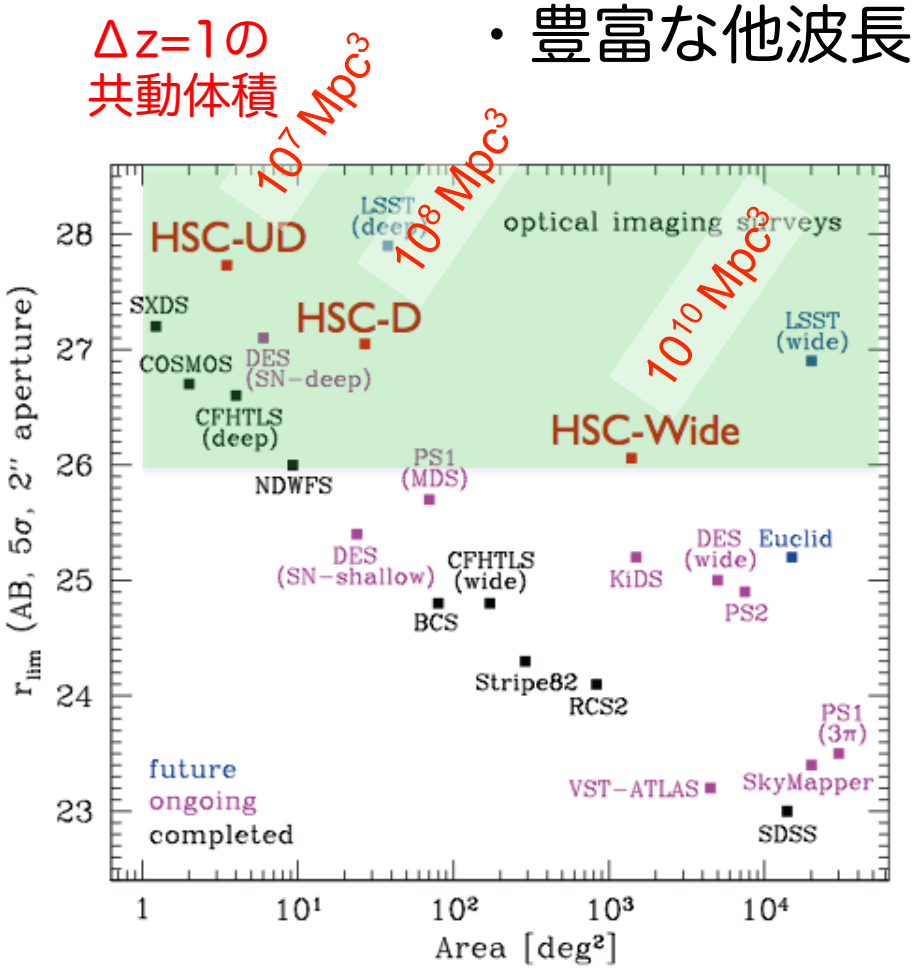
いつ起きたか？どこから起きたか？
銀河は宇宙を再電離できるか？

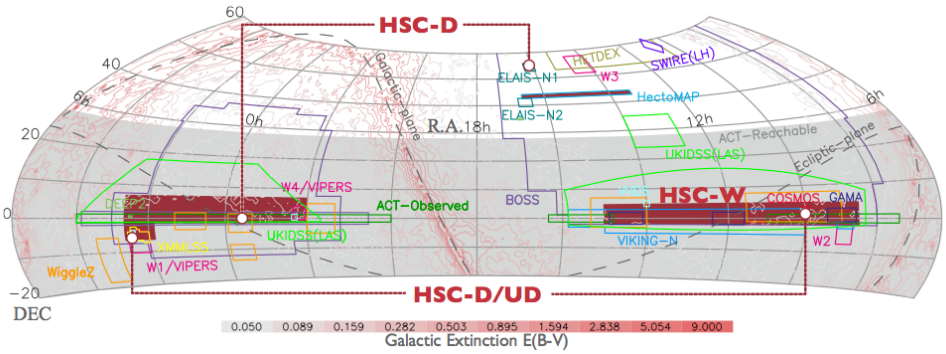
2<z<8 の紫外連続光銀河(LBG)とLyα輝線銀河(LAE)の圧倒的なサンプル

LBG: ダークハロー、電離源
LAE: ダークハロー、Lα blob、再電離、電離源

HSCサーベイ

・十分深く、かつ広い
・狭帯域フィルターを使う唯一のサーベイ
・豊富な他波長データ





フィルターと限界等級

Layer	Filter	Exp. (# of epochs)	Lim. mag. (5σ, $2''$)	Moon phase	Requirement(s)	Main scientific driver(s)
Wide	g, r	10 min (3)	26.5, 26.1	dark	photometry	photo-z, low-z ($z \lesssim 2$) gals, QSO
Wide	i	20 min (6)	25.9	dark	seeing ($\lesssim 0.7''$)	WL, low-z gals, QSO
Wide	z, y	20 min (6)	25.1, 24.4	grey	photometry	photo-z, clusters, $z \sim 1$ gals, $z \sim 6$–7 QSO
Deep	g, r	2 hrs (10)	27.5, 27.1	dark	cadence	SNeIa
Deep	i	3 hrs (10)	26.8	dark	seeing ($\lesssim 0.7''$), cadence	WL calibration, SNeIa
Deep	z, y	3 hrs (10)	26.0, 25.3	grey	cadence	low-z gals, SNeIa, QSO
Deep	$N387$	2 hrs ($\simeq$10)	24.8	dark	photometry	$z \simeq 2.2$ LAEs & LBGs
Deep	$N816$	2 hrs ($\simeq$ 10)	25.3	grey/dark	photometry	$z \simeq 5.7$ LAEs
Deep	$N921$	4 hrs ($\simeq$ 10)	25.1	grey/dark	photometry	$z \simeq 6.6$ LAEs
UD	g, r	10 hrs (20)	28.1, 27.7	dark	cadence	high-z ($z \gtrsim 2$) gals, SNeIa
UD	i	20 hrs (20)	27.4	dark	cadence	high-z gals, SNeIa, QSO
UD	z, y	27 hrs (20)	26.8, 26.3	grey	cadence	high-z gals, SNeIa, QSO
UD	$N387$	20 hrs ($\simeq$ 10)	26.1	dark	photometry	$z \simeq 2.2$ LAEs & LBGs
UD	$N527$	15 hrs ($\simeq$ 10)	26.5	dark	photometry	$z \simeq 3.3$ LAEs & LBGs
UD	$N718$	10 hrs ($\simeq$ 10)	26.0	dark	photometry	$z \simeq 4.9$ LAEs
UD	$N816$	15 hrs ($\simeq$ 10)	26.4	grey/dark	photometry	$z \simeq 5.7$ LAEs
UD	$N921$	20 hrs ($\simeq$ 10)	26.1	grey/dark	photometry	$z \simeq 6.6$ LAEs
UD	$N101$	25 hrs ($\simeq$ 10)	24.8	grey/dark	photometry	$z \simeq 7.3$ LAEs

赤: 狭帯域フィルター

検出される銀河の数

紫外連続光銀河

sample	BX/BM[a]	u-drop[a]	g-drop	r-drop	i-drop	z-drop	y-drop[b]
redshift	2.3 ± 0.5	3.0 ± 0.5	3.8 ± 0.5	5.0 ± 0.5	5.9 ± 0.5	6.8 ± 0.5	7.8 ± 0.3
$N_{\rm UD}$	900k	220k	240k	50k	11k	700	2
$N_{\rm D}$	800k	98k	1.1m	200k	17k	99	0
$N_{\rm W}$	-	-	17m	1.9m	38k	4	-
$M^c_{\rm UD}$	$-18.0/-17.0$	-18.3	-18.2	-19.0	-19.9	-20.6	-21.6
$M^c_{\rm D}$	-19.5	-20.8	-18.8	-19.6	-20.7	-21.6	-24.1
$M^c_{\rm W}$	-	-	-19.8	-20.6	-21.6	-22.5	-

>300万個

Lyα輝線銀河 (括弧内は Lyα blob)

narrowband	NB387	NB527	NB718	NB816[b]	NB921[b]	NB101[b]
redshift	2.18 ± 0.05	3.33 ± 0.06	4.90 ± 0.08	5.71 ± 0.10	6.57 ± 0.11	7.30 ± 0.07
$N_{\rm UD}$	4.0k (120)	6.3k (150)	2.3k (70)	3.9k (60)	1.7k (30)	39 (0)
$N_{\rm D}$	9.0k (730)	-	-	8.6k (90)	3.2k (20)	-
$L({\rm Ly}\alpha)^a_{\rm UD}$	0.9	0.7	2.2	1.5	2.5	6.8
$L({\rm Ly}\alpha)^a_{\rm D}$	2.7	-	-	4.1	5.3	-

>3万個

検出される銀河の数

重いダークハロー
+ NB offbands

紫外連続光銀河

電離源
(光度関数)

	lrop^a	g-drop	r-drop	i-drop		
	$+0.5$	$3.8+0.5$	$5.0+0.5$	$5.9+0.5$		
$N_{\rm UD}$	900k	220k	240k	50k	11k	700	2
$N_{\rm D}$	800k	98k	1.1m	200k	17k	99	0
$N_{\rm W}$	-	-	17m	1.9m	38k	4	-
$M^c_{\rm UD}$	$-18.0/-17.0$	-18.3	-18.2	-19.0	-19.9	-20.6	-21.6
$M^c_{\rm D}$	-19.5	-20.8	-18.8	-19.6	-20.7	-21.6	-24.1
$M^c_{\rm W}$	-	-	-19.8	-20.6	-21.6	-22.5	-

軽いダーク
ハロー

電離源(脱出率)

活弧内は Lyα

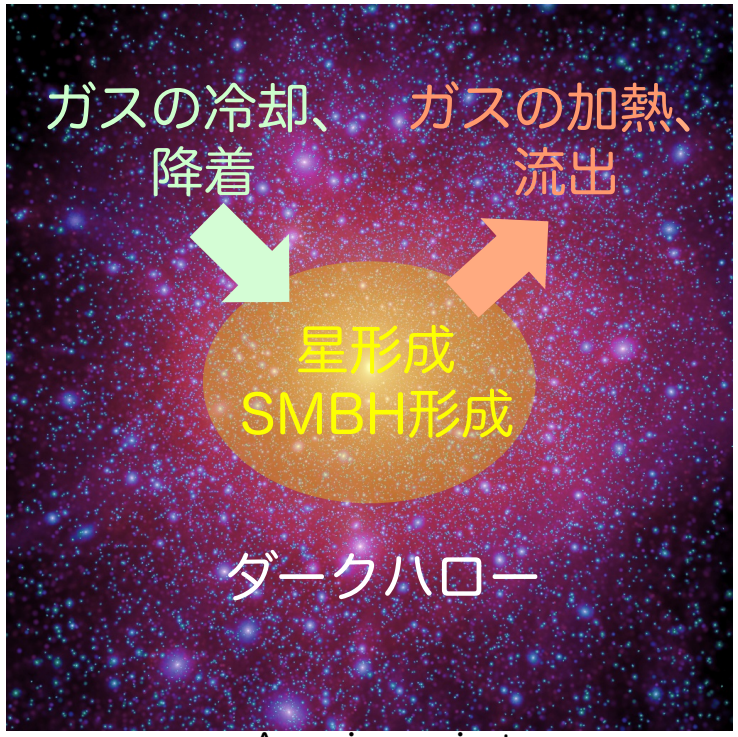
再電離

	NB387	NB527	NB718	NB816^b	NB921^b	NB101^b
	$.18\pm0.05$	3.33 ± 0.06	4.90 ± 0.08	5.71 ± 0.10	6.57 ± 0.11	7.30 ± 0.07
$N_{\rm UD}$	4.0k (120)	6.3k (150)	2.3k (70)	3.9k (60)	1.7k (30)	39 (0)
$N_{\rm D}$	9.0k (730)	-	-	8.6k (90)	3.2k (20)	-
$L({\rm Ly}\alpha)^a_{\rm UD}$	0.9	0.7	2.2	1.5	2.5	6.8
$L({\rm Ly}\alpha)^a_{\rm D}$	2.7	-			5.3	-

Lyα blob

銀河の進化はダークハローの質量にどう依存するか？

銀河の進化はダークハローの
質量で (ほぼ) 決まる



Aquarius project

遠方銀河の観測量

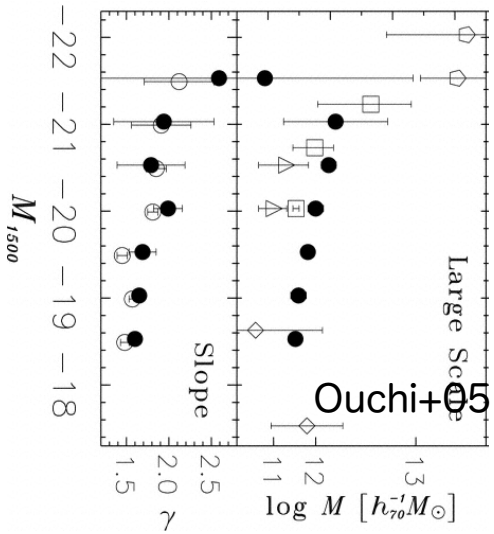
- 星形成率
- 星質量
- 重元素量
- 形態
- SMBH質量
- ガス質量
- …

これらをダークハロー質量の
関数として表したい

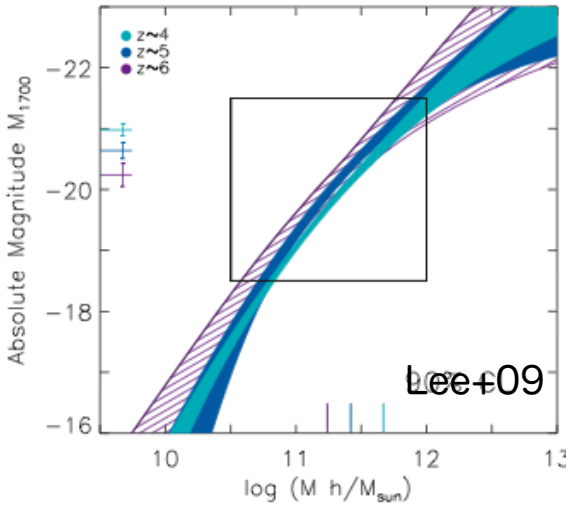
クラスタリングに基づくDH質量の研究

クラスタリングが強い = DHが重い

星形成率 vs DH質量

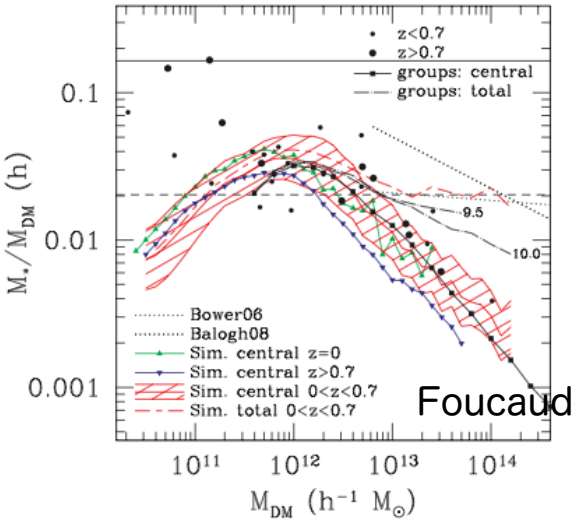


Ouchi+05



Lee+09

星質量 vs DH質量



Foucaud+10

未解明:

- 10^{11} Msun 以下の軽いDH
- 10^{12} Msun 以上の重いDH
- z>5 という早期
- 星形成率以外の物理量
- DH内の銀河の数や分布

HSC: 星形成率と星質量のDH質量依存性

銀河の角度相関関数を測って
Halo Occupation Analysis を行い、

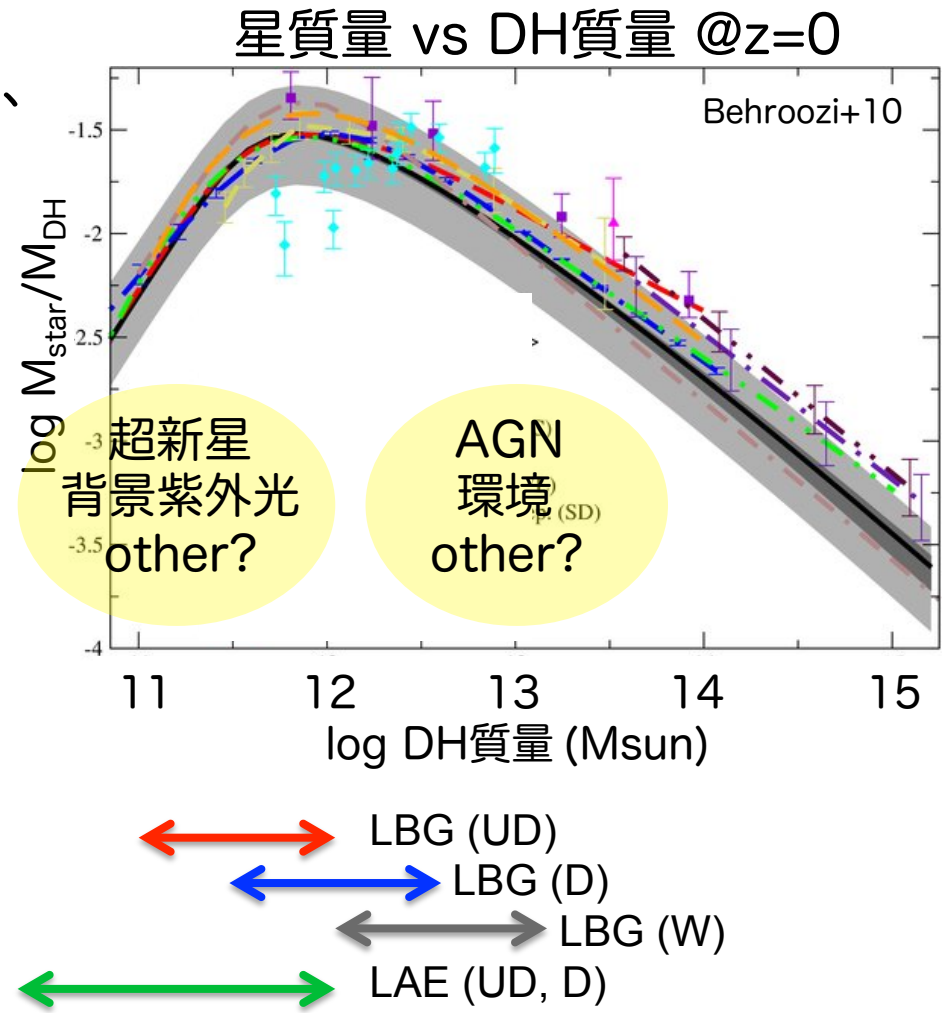
z ~ 2-7
DH質量 ~10^{10} -10^{13} Msun

にわたって

DH質量 vs 星形成率
DH質量 vs 星質量
DH内の銀河の個数と分布

を導出

← 宇宙論的体積
深い限界等級 (=low-mass)
深いNIRデータ (=星質量)
10^4 銀河/subsample



HSC: Lyα blobs の正体の解明

Lyα blobs = 巨大な Lyα 輝線銀河
- 極めて稀な天体 → 非常に重い銀河 or 銀河群？
- 複雑なLyα形態 → ガス降着、流出に関連？
- 正体は未だに不明

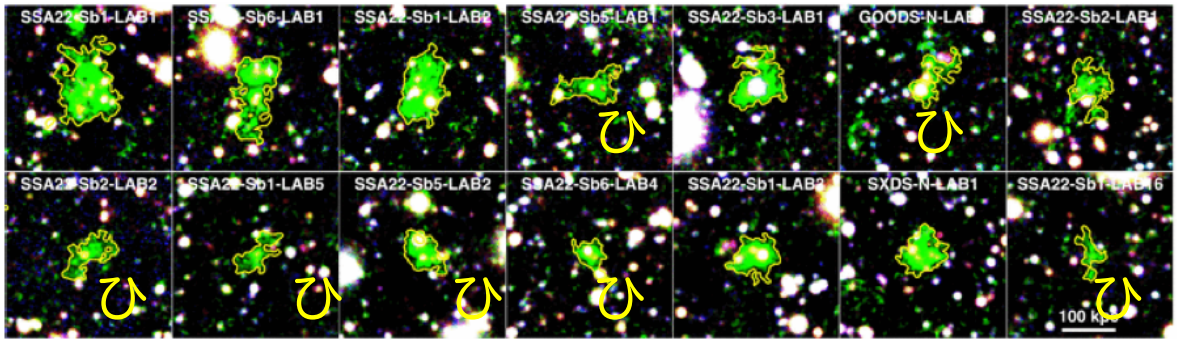


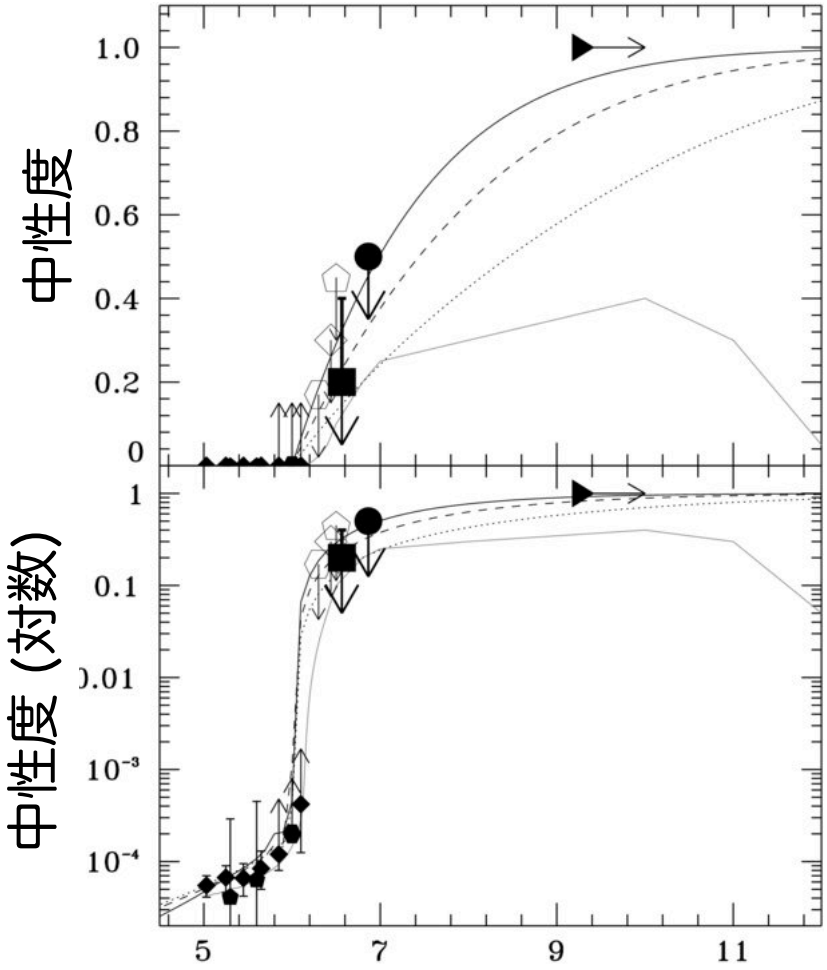
Figure 11: Pseudo-color images (B for blue, NB497 [targeting Lyα] for green, V for red) of 14 LABs at $z = 3.1$ observed by Matsuda et al. (2011). They have suggested that objects with a filamentary morphology have inflowing gas, while those with a round shape have outflows.

Matsuda+11

Deep + UltraDeep から1000個のLABs
- DH質量を初めて推定 (クラスタリング)
- ガスの降着、流出の様子
- 重い銀河の形成過程

宇宙再電離は、いつ、どこで起きたか？

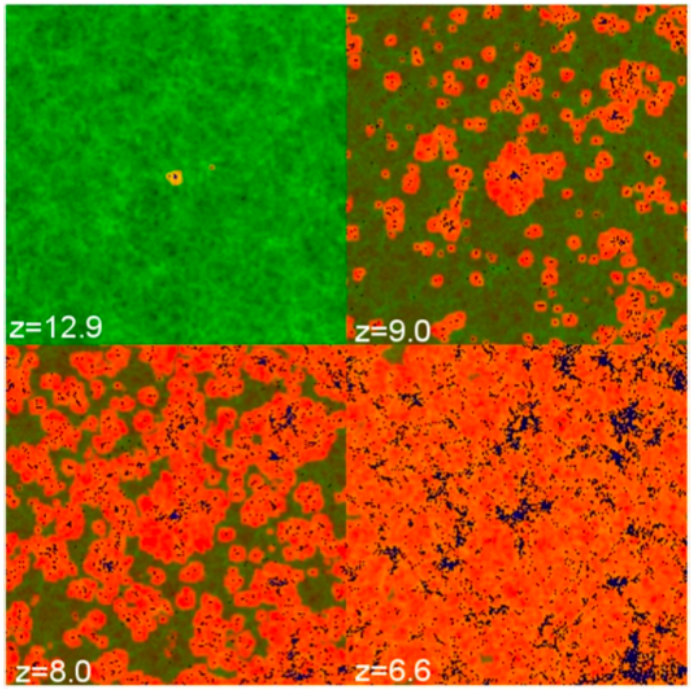
いつ？



Ouchi,KS+10

どこで？

高密度領域から？
低密度領域から？
それ以外？



Iliev+09によるシミュレーション
(1辺100Mpc/h)

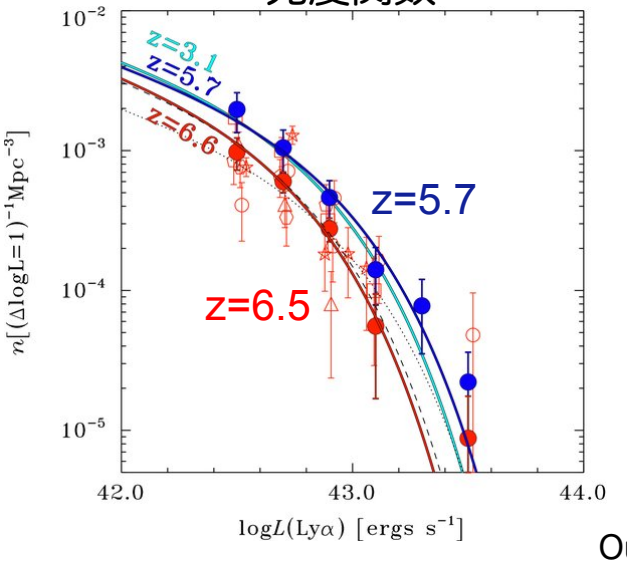
HSC: z>6の電離度と非一様な電離過程を明らかに

LAEs で z=6.5, 7.3 の電離度を推定
　光度関数 ← 低電離度宇宙にあるLAEは暗い
　クラスタリング ← 電離泡の大規模構造
z=6.5の電離泡をトレース

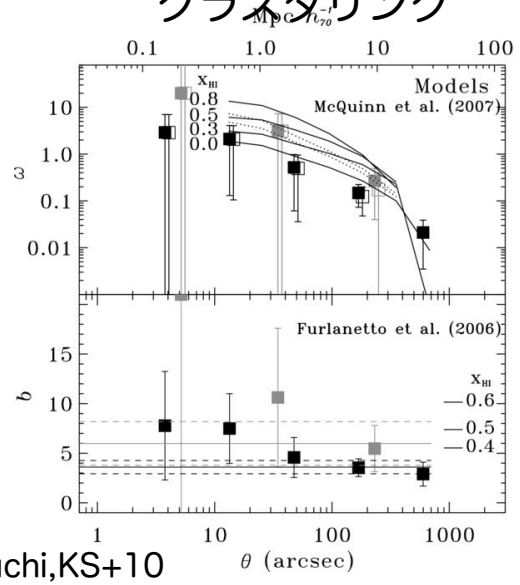
- z=6.5で電離度を初めて「ちゃんと」推定 ← 大サンプル & 複数の手法
- 空間的に非一様な再電離を初めてトレース ← 30平方度
- z=7.3で初めて統計的に意味のある推定 ← NB101
- LOFAR との比較

最先端のS-Cam観測でも
誤差が大きすぎ:
電離度@6.5 = 80±20%

光度関数

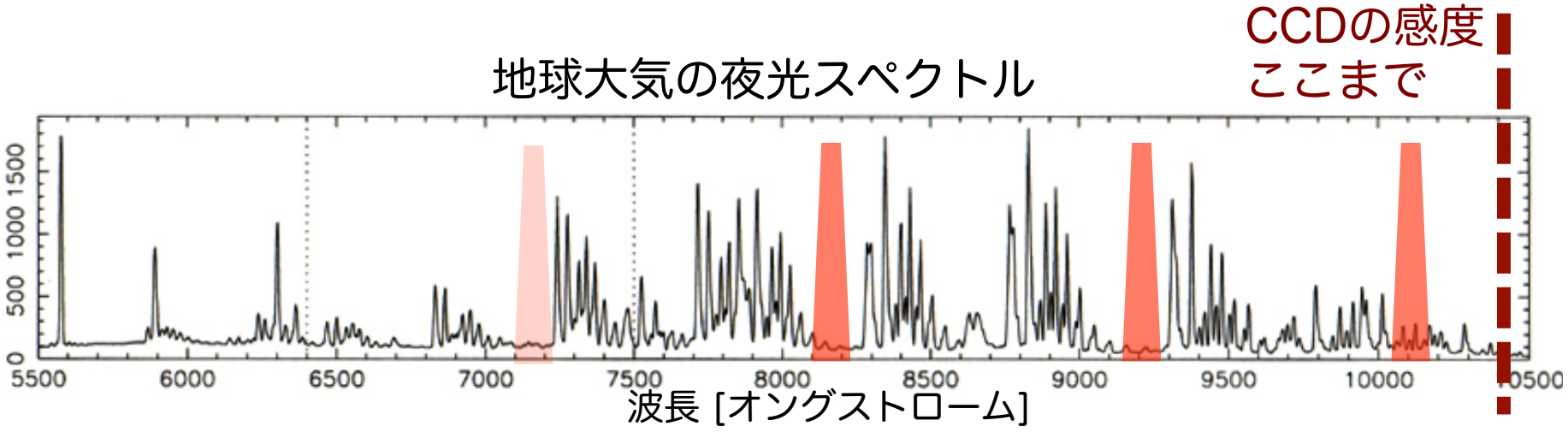


クラスタリング



Ouchi,KS+10

HSCデータは「決定版」



ライマンαの観測波長[A]	8160	9210	10100
赤方偏移	5.7	6.5	7.3

銀河の赤方偏移ランキング

name	z	type	ref
UDFy-38135539	(8.555)	LBG	Lehnert+10
SXDF-NB1006-2	7.215	LAE	Shibuya+12
GN-108036	7.213	LBG	Ono+12
BDF-3299	7.109	LBG	Vanzella+11
A1703_zD6	7.045	LBG	Schenker+12
BDF-521	7.008	LBG	Vanzella+11
G2_1408	6.972	LBG	Fontana+10
IOK-1 (SDF-63544)	6.965	LAE/LBG	Iye+06, Ono+12
J095950.99+021219.1	6.944	LAE	Rhoads+12
HUDF09_1596	6.905	LBG	Schenker+12
SDF-46975	6.844	LBG	Ono+12
NTTDF-6345	6.701	LBG	Pentericci+11
NTTDF-474	6.623	LBG	Pentericci+11
many	< 6.6	LAE	SDF, SXDF, ...

銀河はz~7で宇宙を再電離できるか？

銀河からの電離光子の数 = 発生する電離光子の数 × 脱出率
(暗すぎて直接測れない)　(直接測れない)

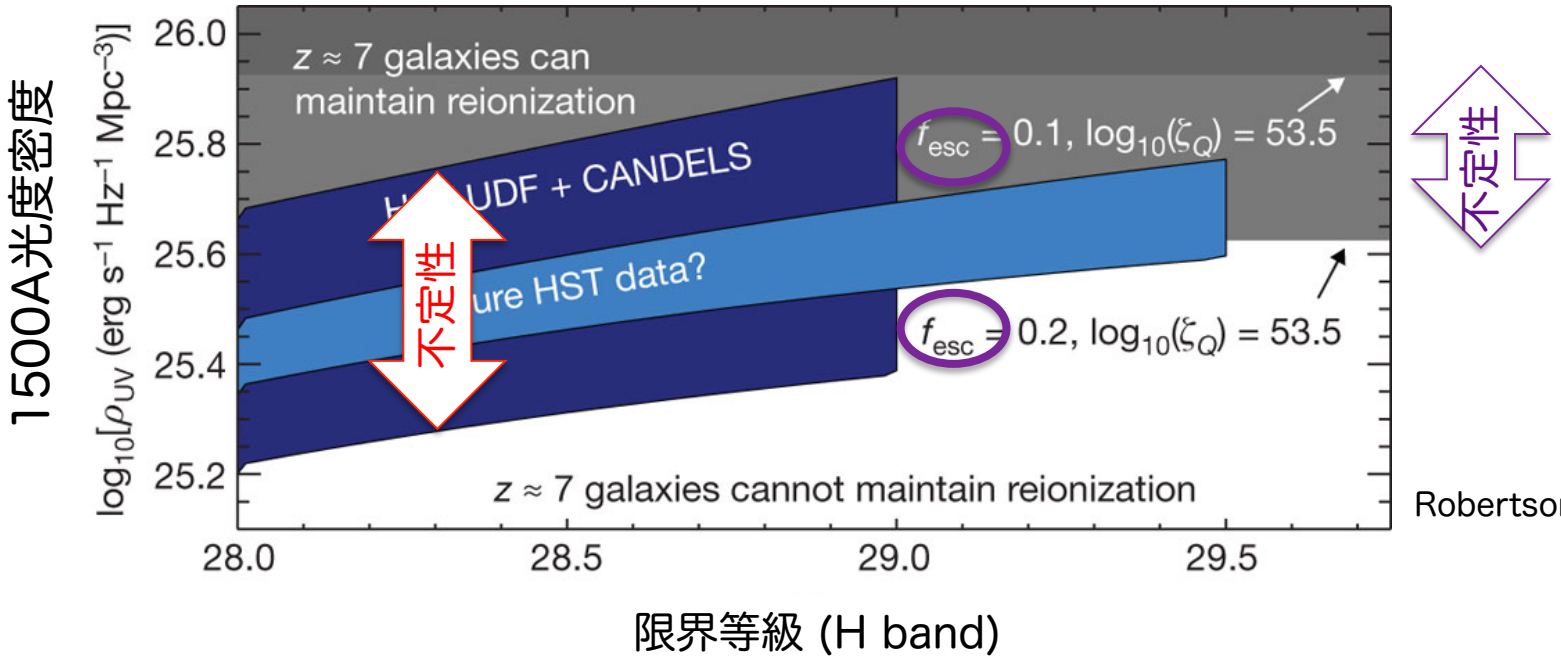
↑

1500A光度密度

↑

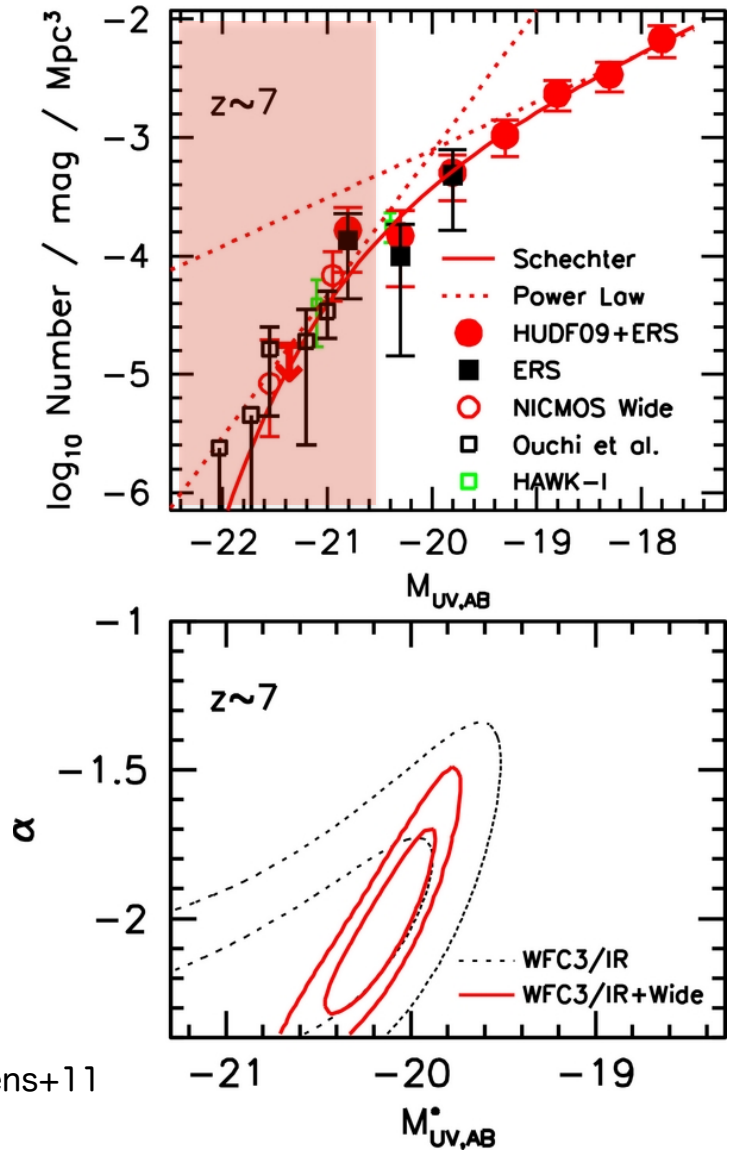
1500A光度関数

議論の現状



Robertson+10

HSC: z~7の光度関数を決定



Bouwens+11

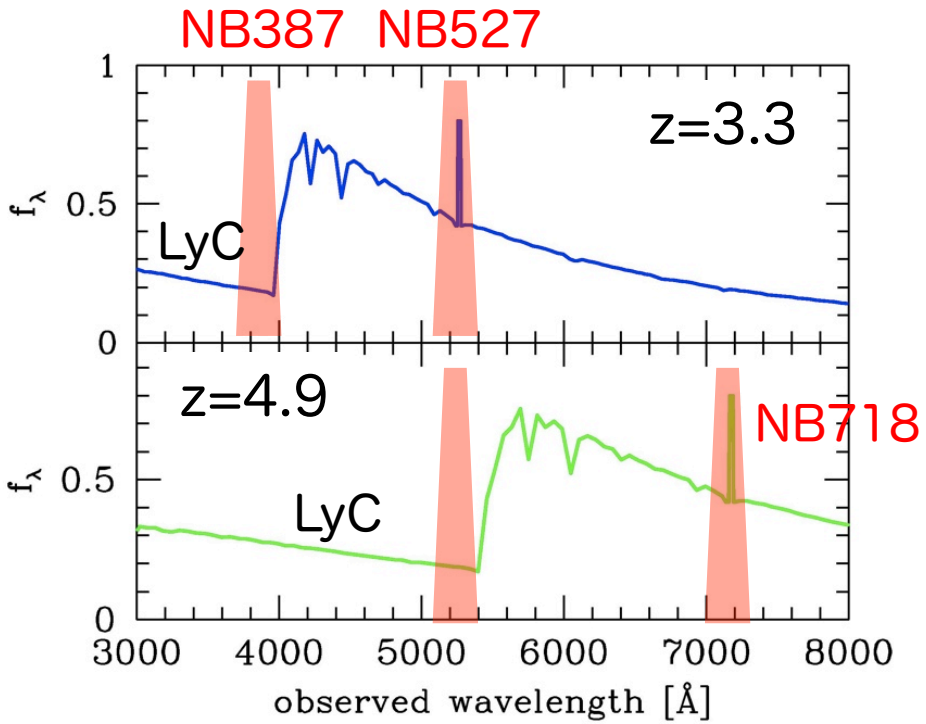
HSC の ~1000個の z~7 銀河で光度関数の bright end を測定し、Schechter パラメータを決定

- LAEs も使って、暗い等級まで制限できる可能性

- HSC で見つかる明るい銀河はPFSの追観測等に最適

HSC: 電離光子脱出率を推定

岩田、井上の先駆的な研究を発展



Ly continuum = 電離光子数

z=3.3での脱出率:
約100銀河の Ly continuum
・脱出率を推定
・脱出率と他の物理量との関係

z=4.9での脱出率:
数個の銀河の Ly continuum
スタッキングで平均値を推定
・z=3.3からの進化

電離光子脱出率を直接測れる
唯一の観測

まとめ

□HSCの高赤方偏移銀河サンプル
- 3 layers, とりわけ Deep, UltraDeep
- 2<z<8、宇宙論的体積
- 紫外連続光銀河300万個、Lyα輝線銀河3万個以上

□日本がS-Camでリードしてきたサイエンスを飛躍的発展
- 銀河進化をダークハローを基礎として理解
- 宇宙再電離過程の整合的な理解
- SSPの他の銀河サイエンスと合わせて、再電離時期から現在までの銀河進化の全貌を理解