

HSC戦略観測を用いた 赤方偏移4の原始銀河団探査

利川潤 (国立天文台)

内山久和、柏川伸成、Roderik Overzier

HSC project 96のメンバーの方々

目次

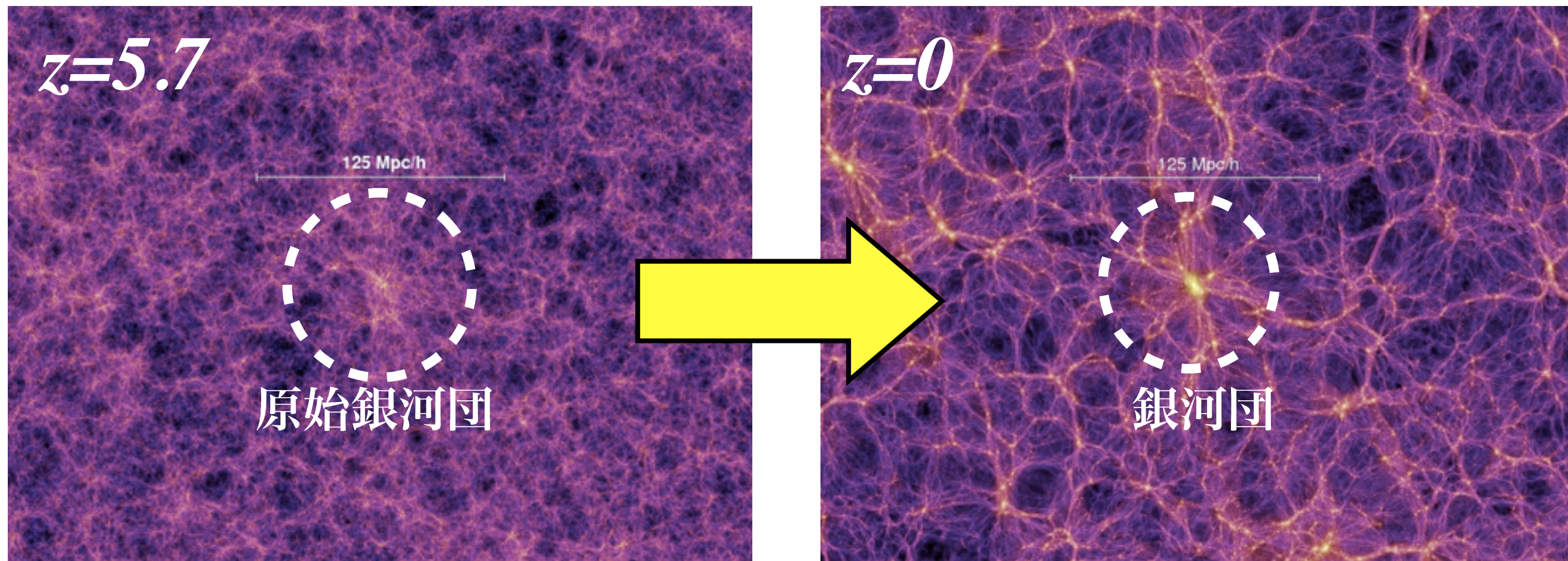
- イントロダクション
- HSC原始銀河団探査
 - 探査手法
 - 赤方偏移 4 の高密度領域の同定
 - 高密度領域のクラスタリング解析
- まとめ・将来計画

原始銀河団の重要性

- ▶ 銀河団形成はいつ始まり、どのように進むのか？
- ▶ 銀河進化への環境効果は？ 大規模構造との関連は？

➡ これらの問題の解決のために銀河団形成の現場

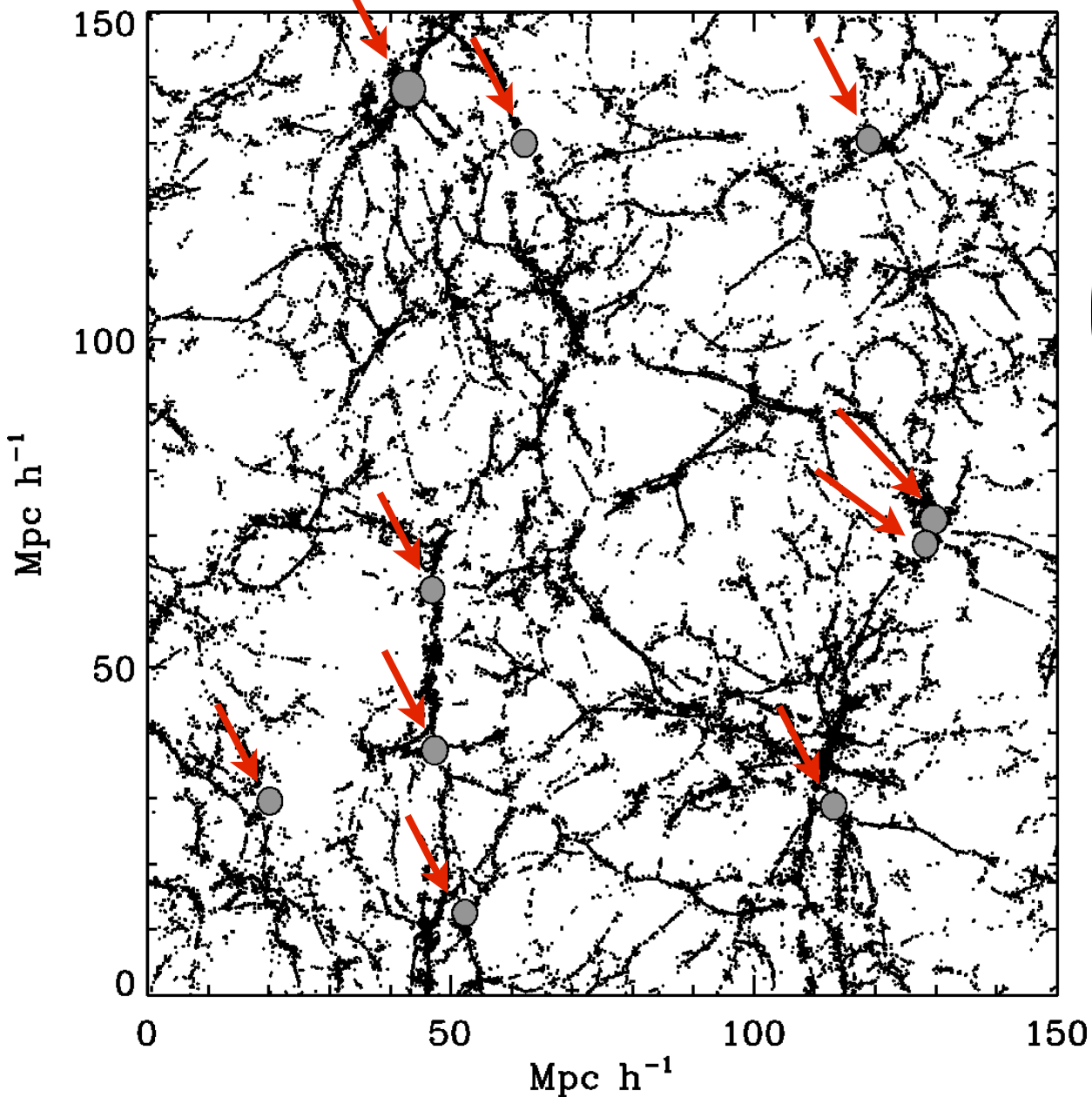
“原始銀河団”を直接調べる必要がある。



銀河団の密度

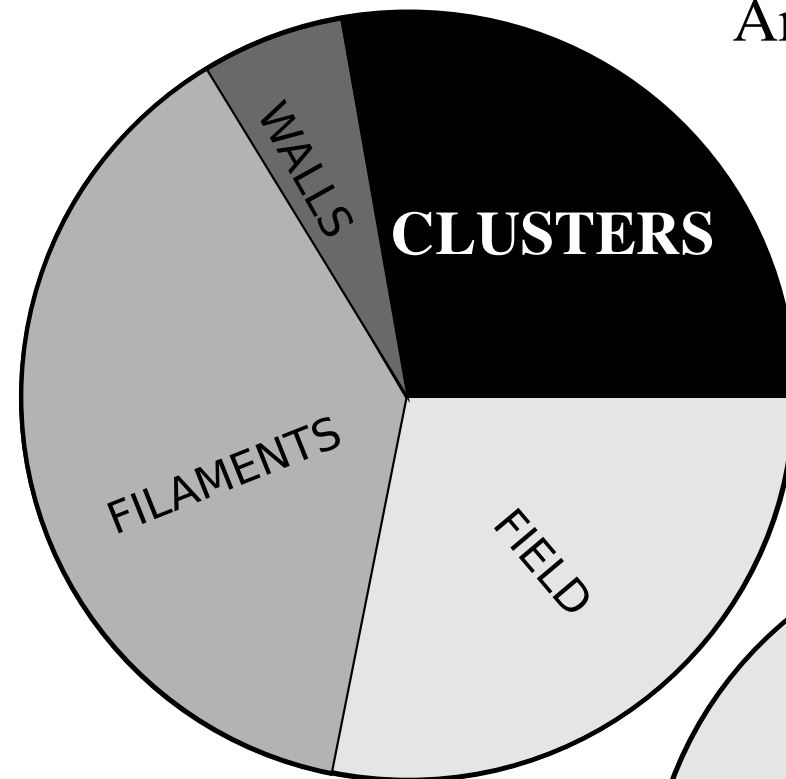
	Clusters	Filaments	Walls	Voids
Volume filling (per cent)	0.4	8.8	4.9	85.9
Mass content (per cent)	28.1	39.2	5.5	27.2

銀河団

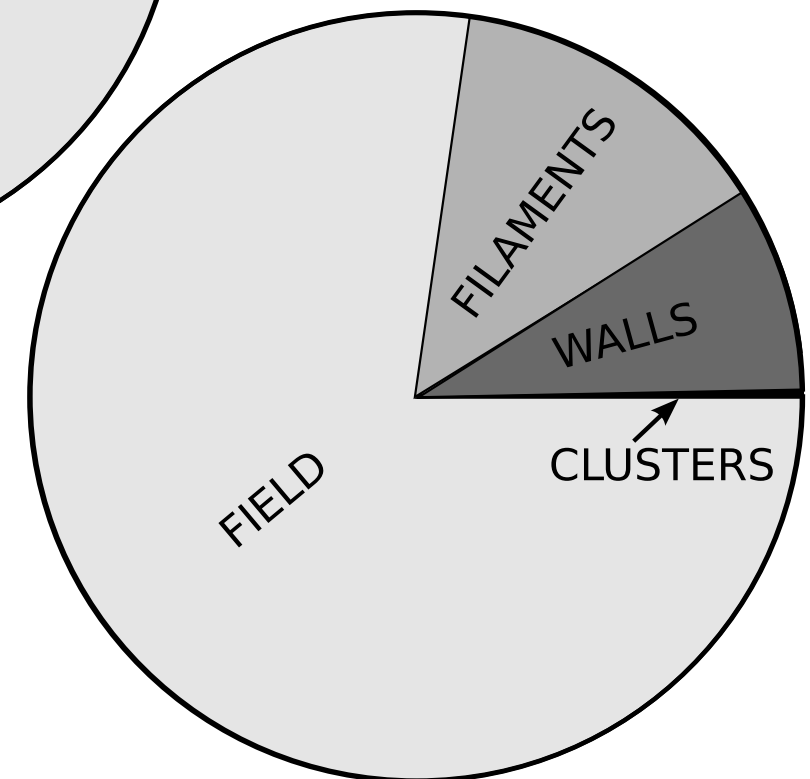


Mass content

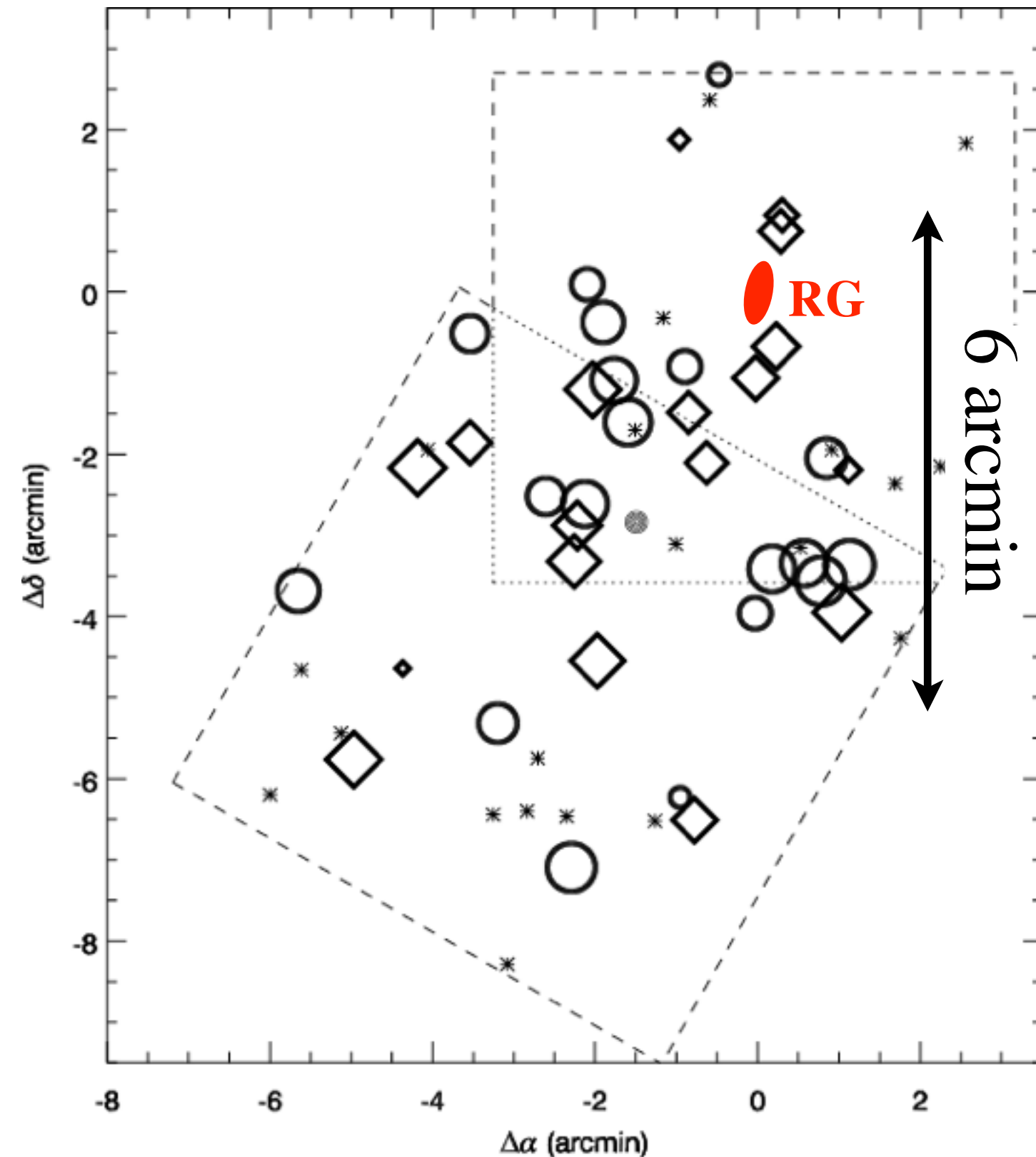
Aragon-Calvo et al. (2010)



Volume content



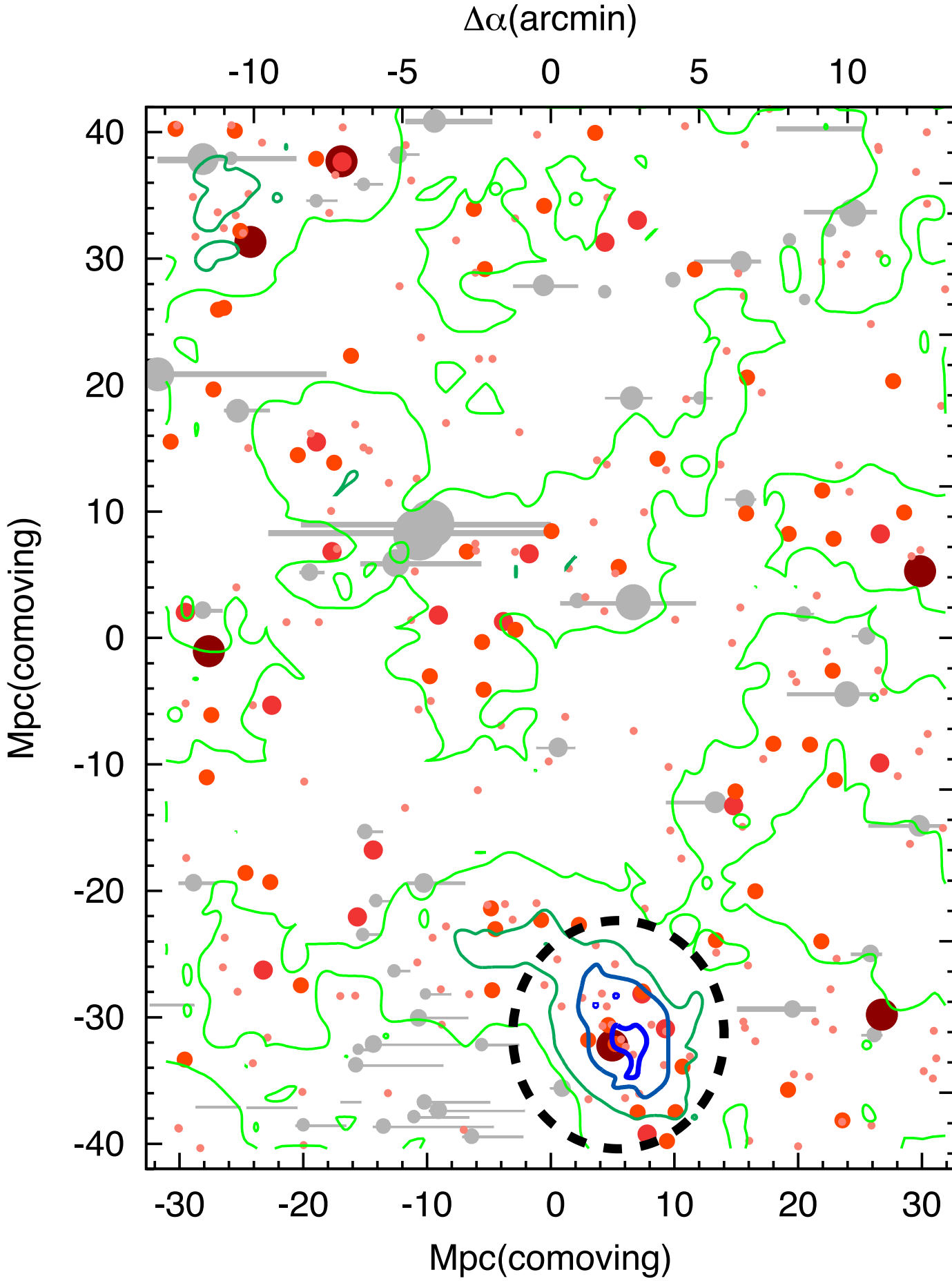
原始銀河団の探査方法



電波銀河(RG)周辺での探査
 $z=4.11$ の原始銀河団
(Venemans et al. 2007)

QSO, サブミリ銀河なども
使われている。

原始銀河団の探査方法

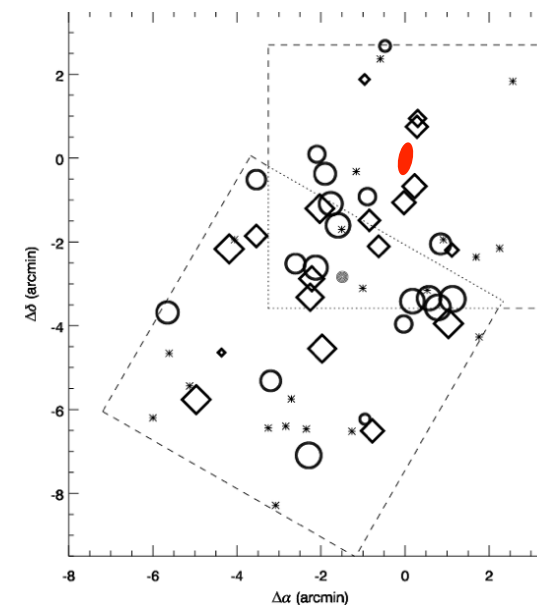


広視野探査

Subaru Deep Fieldでの
 $z=6.01$ の原始銀河団
(Toshikawa et al. 2012)

15
10
5
0
-5
-10
-15

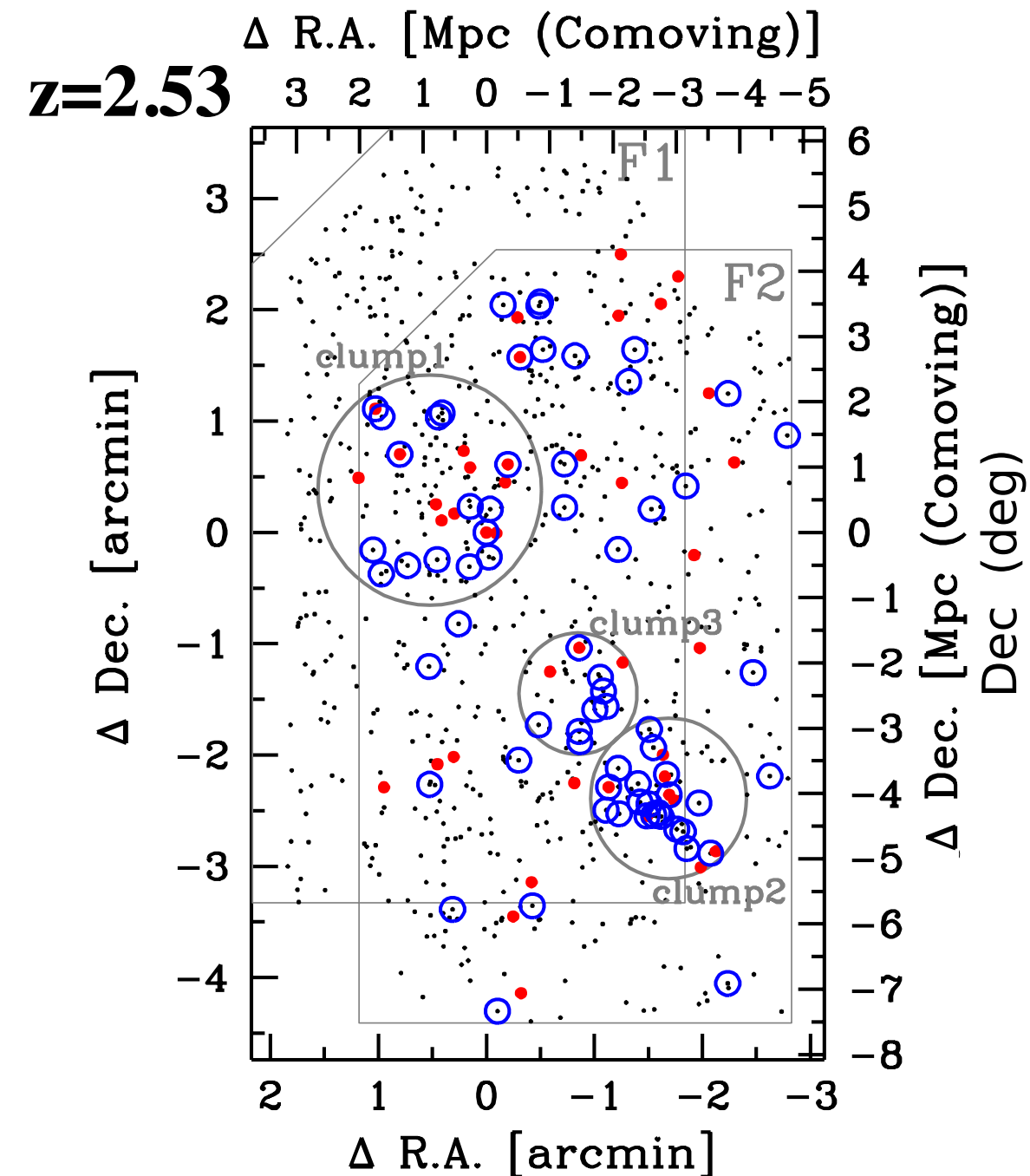
30 arcmin



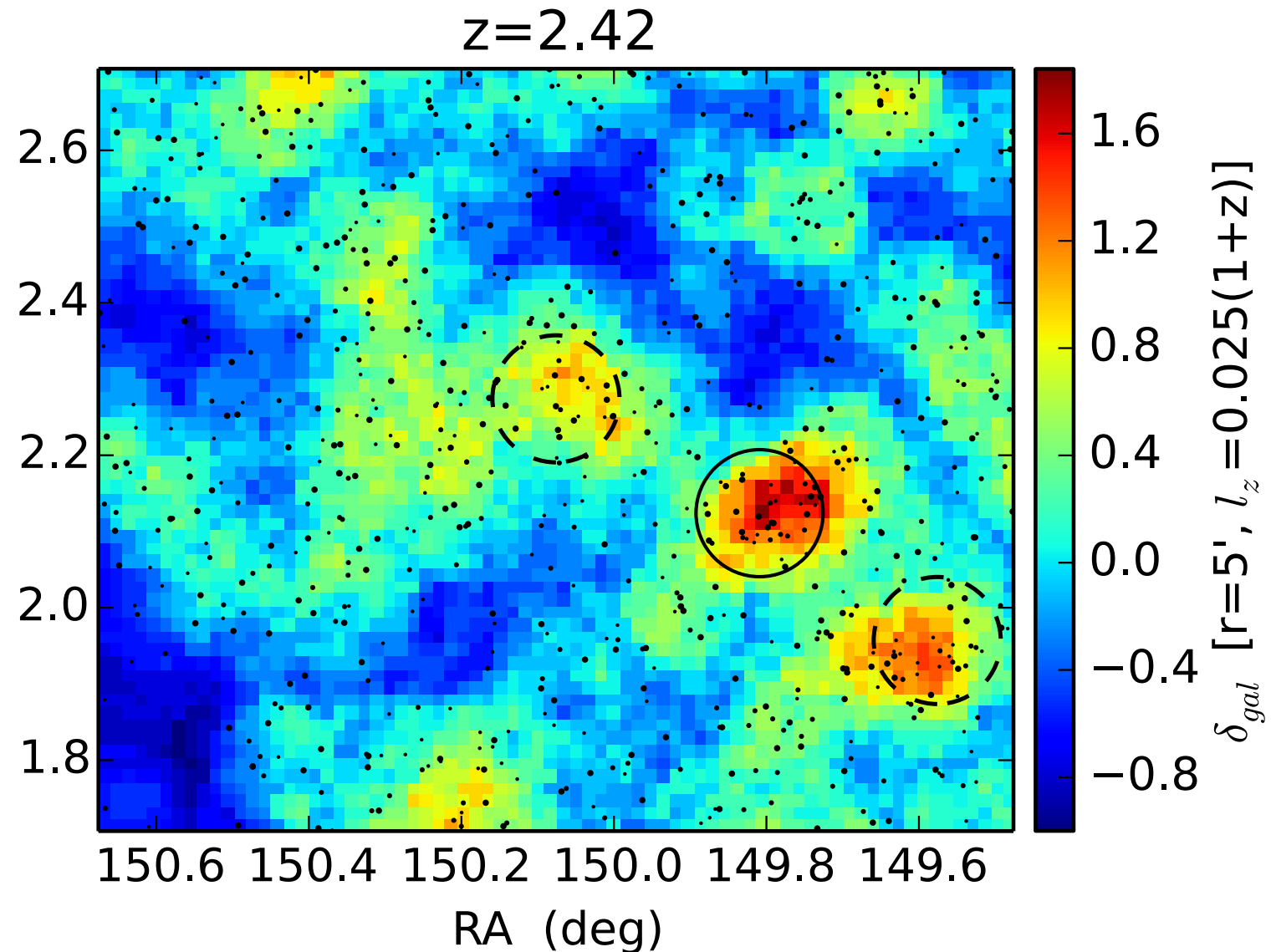
原始銀河団の探査方法

NB撮像やphot-z、または分光サーベイなども使われている。

NB撮像 (Hayashi et al. 2012)



phot-zによる探査 (Chiang et al. 2014)



これまでに発見された原始銀河団

Table 5

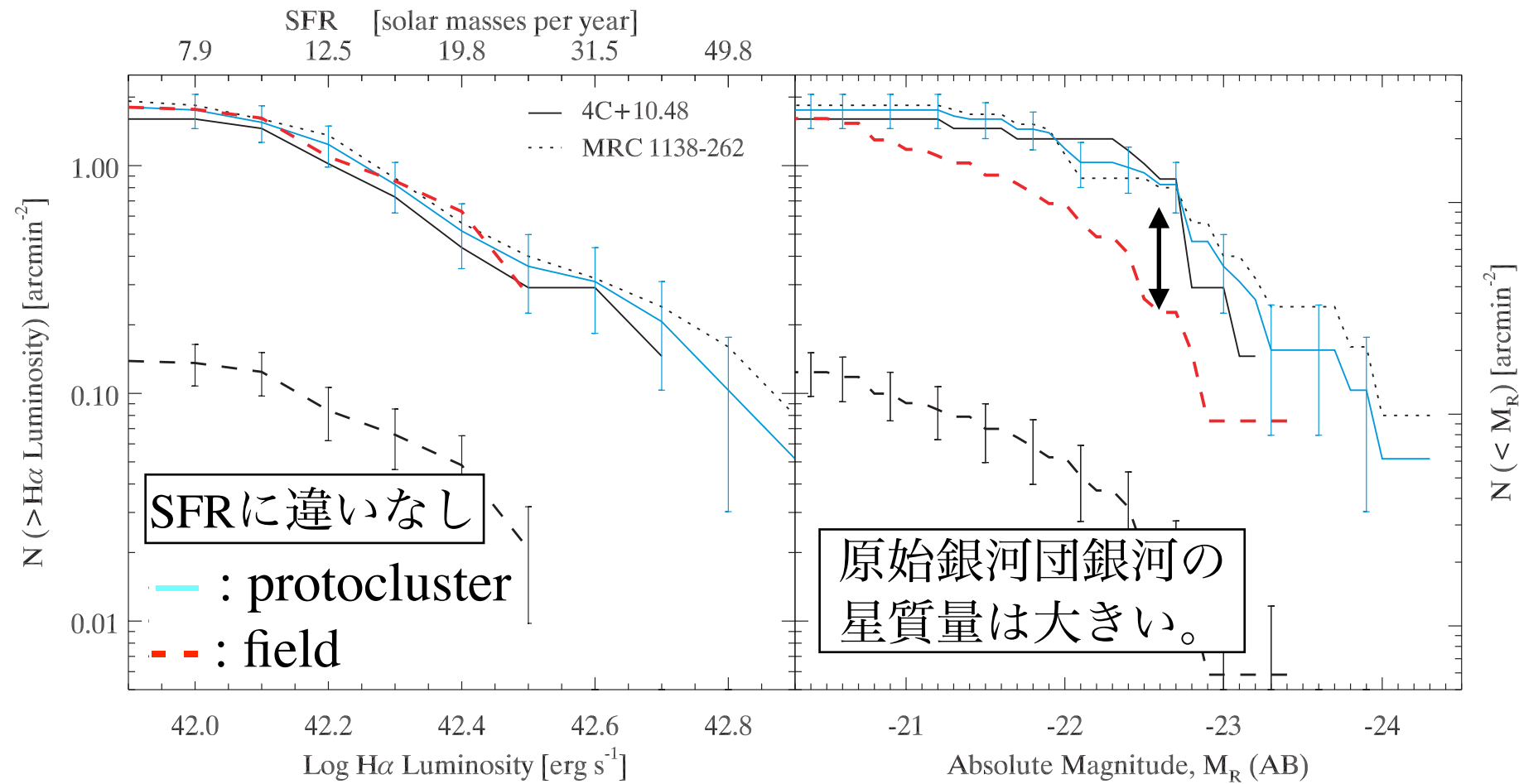
Chiang et al. (2013)

An Overview of Proto-cluster Candidates Selected from the Literature

Object	z	Sample ^a	Window Size ^b (arcmin ²)	Δz^c	δ_{gal}^d	σ_v^e (km s ⁻¹)	M^f (M_{\odot})	References [†]
PKS 1138–262	2.16	Ly α	7 × 7	0.053	3 ± 2	900 ± 240	3–4	1, 2, 3, 4, 5, 6
		H α	7 × 7	0.041	...	...	...	7
HS1700–FLD	2.30	BX	8 × 8	0.030	6.9 ^{+2.1} _{-2.1}	...	14	8
4C 10.48	2.35	H α	2.5 × 2.5	0.046	11 ⁺² ₋₂	...	...	9
J2143–4423	2.38	Ly α	44 × 44	0.044	5.8 ^{+2.5} _{-2.5}	...	...	10
4C 23.56	2.48	H α	7 × 4	0.035	4.3 ^{+5.3} _{-2.6}	...	...	11
USS 1558–003	2.53	H α	7 × 4	0.041	...	...	...	12
LABd05	2.7	Ly α	28 × 11	0.165	~2	...	...	13
HS1549	2.85	LBG	...	0.060	~5	...	...	14
MRC 0052–241	2.86	Ly α	7 × 7	0.054	2.0 ^{+0.5} _{-0.4}	980 ± 120	3–4	6, 15
MRC 0943–242	2.92	Ly α	7 × 7	0.056	2.2 ^{+0.9} _{-0.7}	715 ± 105	4–5	6, 15
SSA22–FLD	3.09	LBG	11.5 × 9	0.034	3.6 ^{+1.4} _{-1.2}	...	10–14	16
		Ly α	9 × 9	0.066	5 ± 2	...	...	17, 18, 19
MRC 0316–257	3.13	Ly α	7 × 7	0.049	2.3 ^{+0.5} _{-0.4}	640 ± 195	3–5	6, 15, 20
TN J2009–3040	3.16	Ly α	7 × 7	0.049	0.7 ^{+0.8} _{-0.6}	515 ± 90	...	6, 15
TN J1338–1942	4.11	Ly α	7 × 7 (×2)	0.049	3.7 ^{+1.0} _{-0.8}	265 ± 65	6–9	6, 15, 21
		LBG	3.4 × 3.4	~0.6	1.5 ^{+0.3} _{-0.3}	...	...	6, 22, 23, 24
6C 0140+326	4.41	Ly α	10 × 10	~0.04	8 ⁺⁵ ₋₅	...	0.8–2.9	25
SDF	4.86	Ly α	10 × 10	0.060	2.0 ^{+1.0} _{-2.0}	...	>3	26
TN J0924–2201	5.19	Ly α	7 × 7	0.073	1.5 ^{+1.6} _{-1.0}	305 ± 110	4–9	6, 15, 27
		LBG	3.4 × 3.4	~0.7	1.0 ± 0.5	...	...	28
COSMOS AzTEC03	5.30	SMG	1 × 1	...	...	...	...	29
SXDF-Object “A” ^g	5.70	Ly α	6 × 6	0.099	3.3 ^{+0.9} _{-0.9}	~180	1–3	30
SDF	6.01	LBG	6 × 6	~0.05	16 ± 7	647 ± 124	2–4	31
CFHQSJ2329–0301	6.43	LBG	34 × 27	~1.0	~6	...	...	32
See also								33, 34, 35, 36, 37

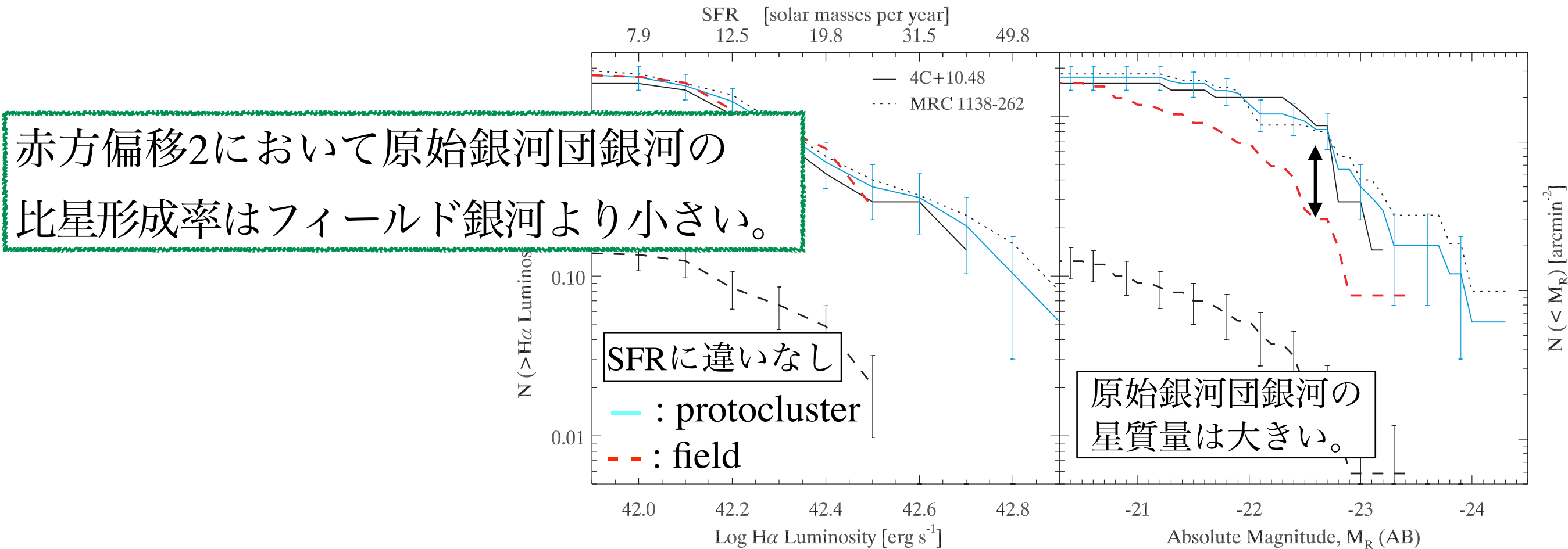
* 現在はもう少し数が増えている

原始銀河団の性質



Hatch et al. (2011)

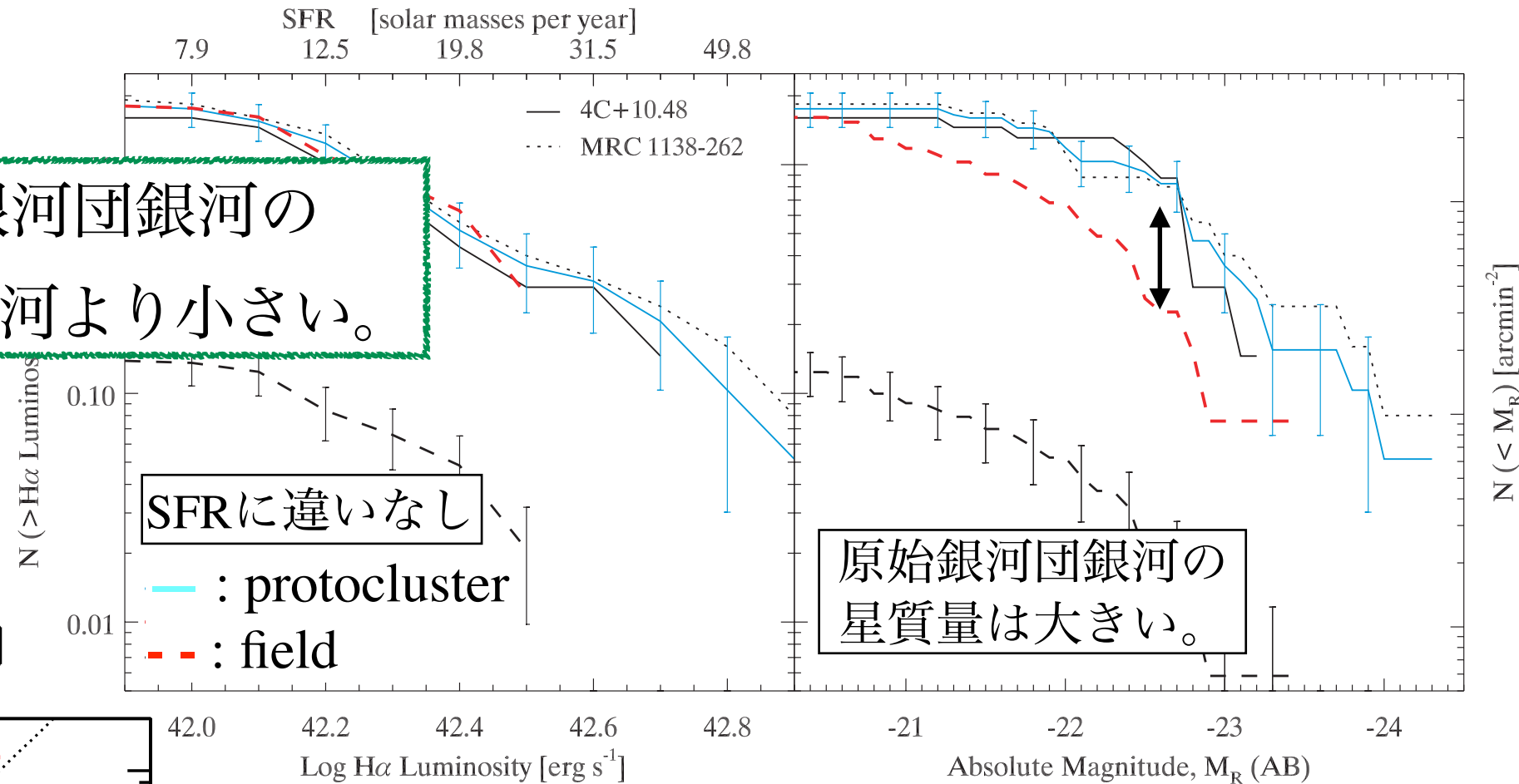
原始銀河団の性質



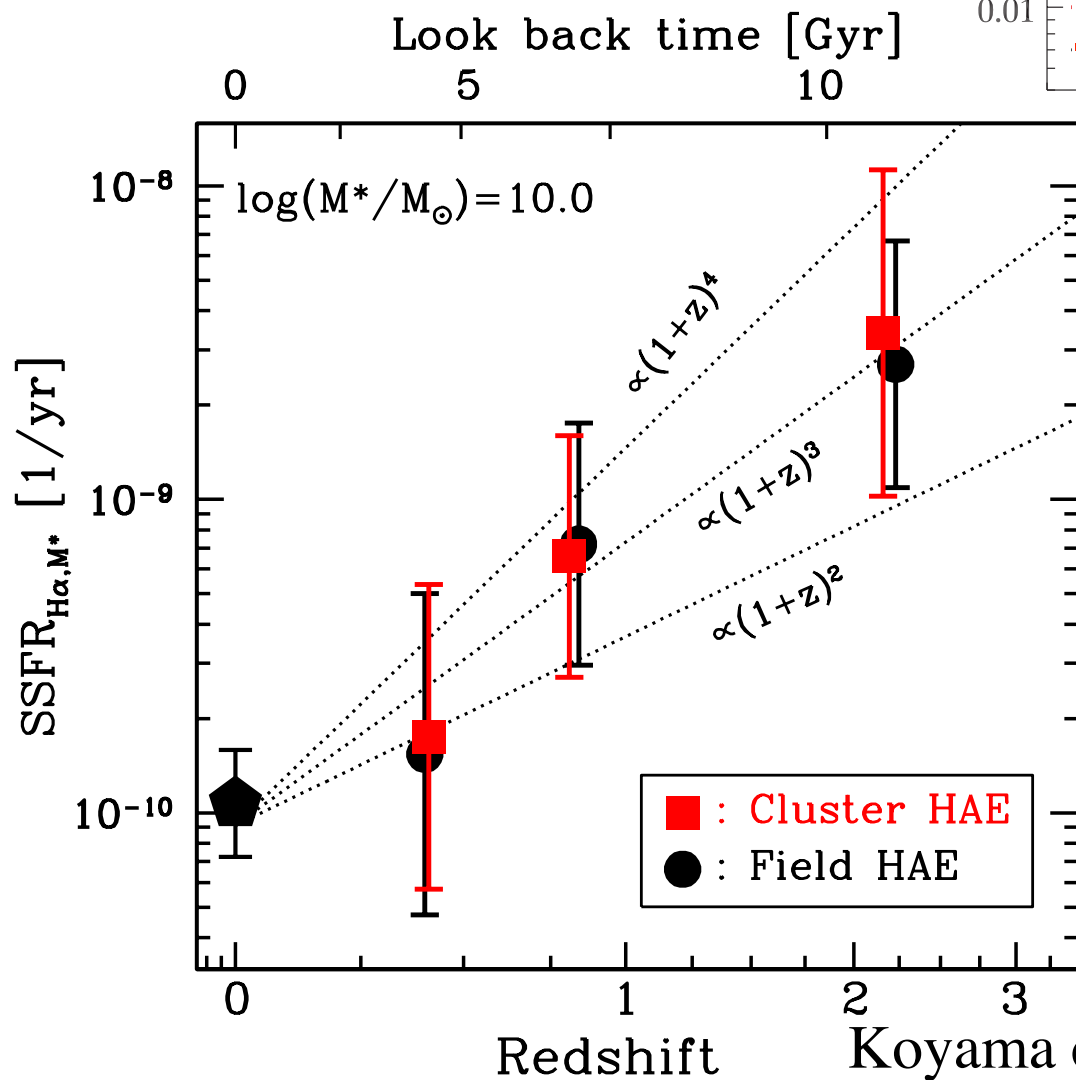
Hatch et al. (2011)

原始銀河団の性質

赤方偏移2において原始銀河団銀河の
比星形成率はフィールド銀河より小さい。



原始銀河団銀河の
星質量は大きい。



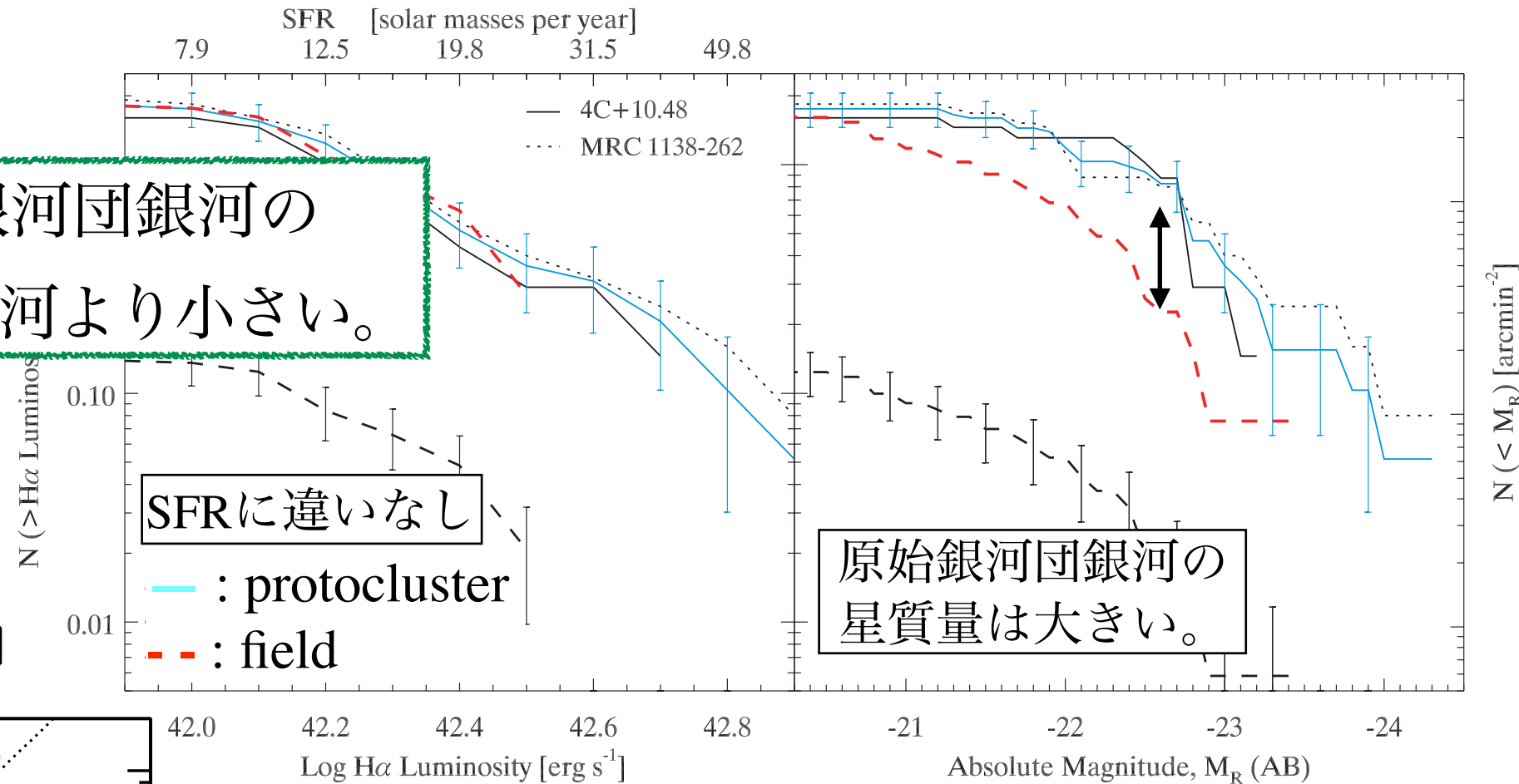
Koyama et al. (2013)

原始銀河団銀河とフィールド銀河で
違いがないという結果も報告されている。

Hatch et al. (2011)

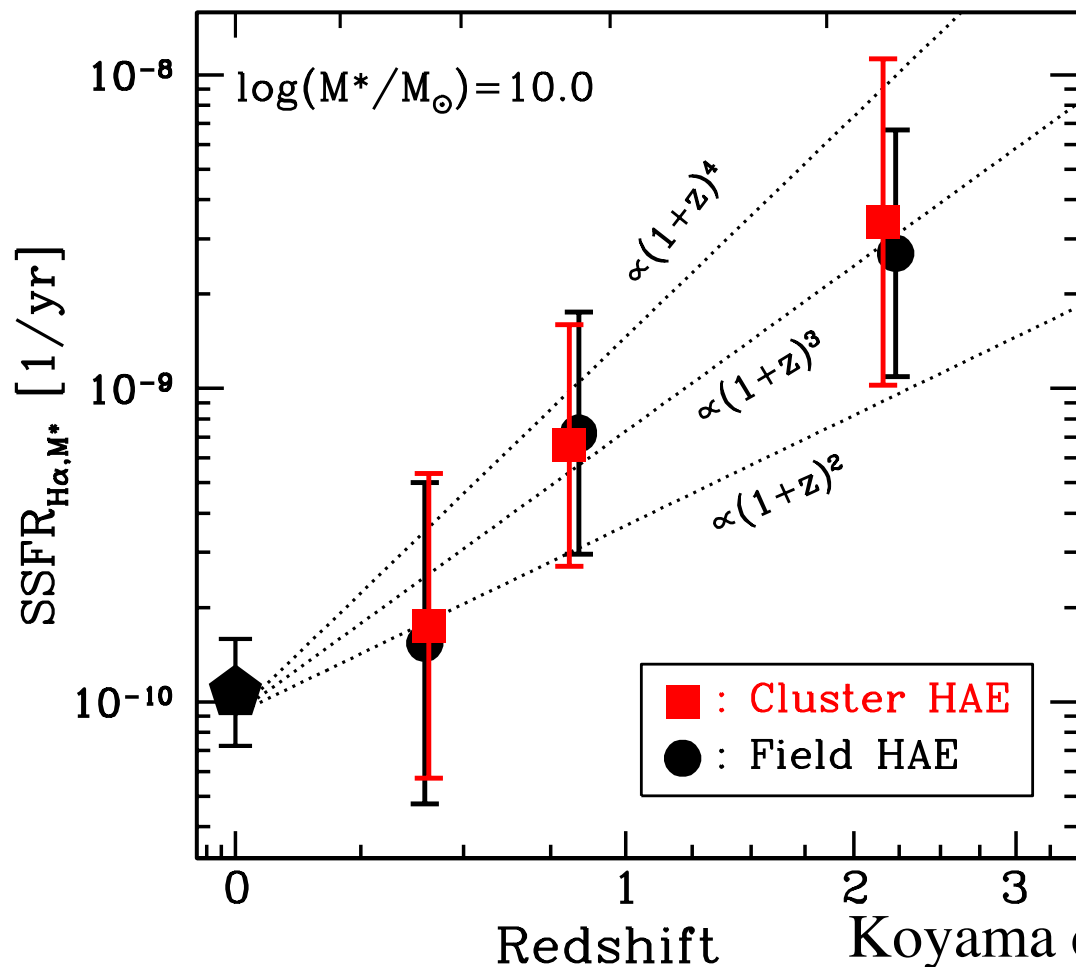
原始銀河団の性質

赤方偏移2において原始銀河団銀河の
比星形成率はフィールド銀河より小さい。



Hatch et al. (2011)

原始銀河団銀河とフィールド銀河で
違いがないという結果も報告されている。



Koyama et al. (2013)

大規模サンプルを用いた
統計的な研究が必要

▶ HSC原始銀河団探査

HSC project 96

First Systematic Studies of Protoclusters at $z \sim 2-6$

- 赤方偏移 4 における大規模サンプルの構築
- 高密度領域のクラスタリング解析
- 将来計画

Science goals

layer	観測領域 (deg ²)	filters	深さ (mag)
Wide	1400 (700 deg ² × 2 fields)	<i>grizy</i>	<i>i</i> ~25.9
Deep	27 (7 deg ² × 4 fields)	<i>grizy</i> + 3NB	<i>i</i> ~26.8
Ultradeep	3.5 (1.8 deg ² × 2 fields)	<i>grizy</i> + 3NB	<i>i</i> ~27.4

1. Ultradeep/Deep layer (~27 deg²)

$z \sim 2-6$ にわたって各赤方偏移で10-20個の発見が期待される

→ 原始銀河団の**赤方偏移進化**

2. Wide layer (~1400 deg²)

$z=4$ において1000個の発見が期待される

→ 原始銀河団の性質の**多様性**

* 原始銀河団の探査手法は、

CFHTLSでの原始銀河団探査(Toshikawa et al. 2016)と

同じものをHSCサーベイにも適用する。

銀河分布の定量化

$\Delta R.A.$ (comoving Mpc)

60 40 20 0 -20 -40 -60

1 degree

$\Delta Decl.$ (arcmin)

20

10

0

-10

-20

60

40

20

0

-20

-40

-60

$\Delta Decl.$ (comoving Mpc)

灰色：
マスク領域

20

10

0

-10

-20

$\Delta R.A.$ (arcmin)

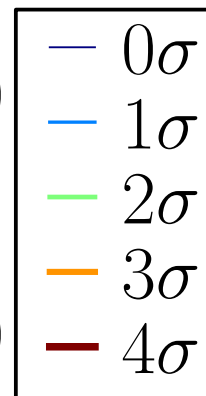
銀河分布の定量化

$\Delta R.A.$ (comoving Mpc)

60 40 20 0 -20 -40 -60

密度超過

(平均)



(高密度)

1 degree

$\Delta Decl.$ (arcmin)

20

10

0

-10

-20

60

40

20

0

-20

-40

-60

$\Delta Decl.$ (comoving Mpc)

20

10

0

-10

-20

$\Delta R.A.$ (arcmin)

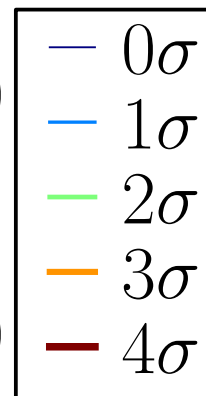
銀河分布の定量化

$\Delta R.A.$ (comoving Mpc)

60 40 20 0 -20 -40 -60

密度超過

(平均)



(高密度)

1 degree

$\Delta Decl.$ (arcmin)

20

10

0

-10

-20

60

40

20

0

-20

-40

-60

$\Delta Decl.$ (comoving Mpc)

20

10

0

-10

-20

$\Delta R.A.$ (arcmin)

灰色：
マスク領域

原始銀河団候補

どれくらいの密度超過の有意性を持つ領域が
原始銀河団候補なのか？

理論モデルを用いて、

密度超過と $z=0$ でのハロー質量の関係を調べる。

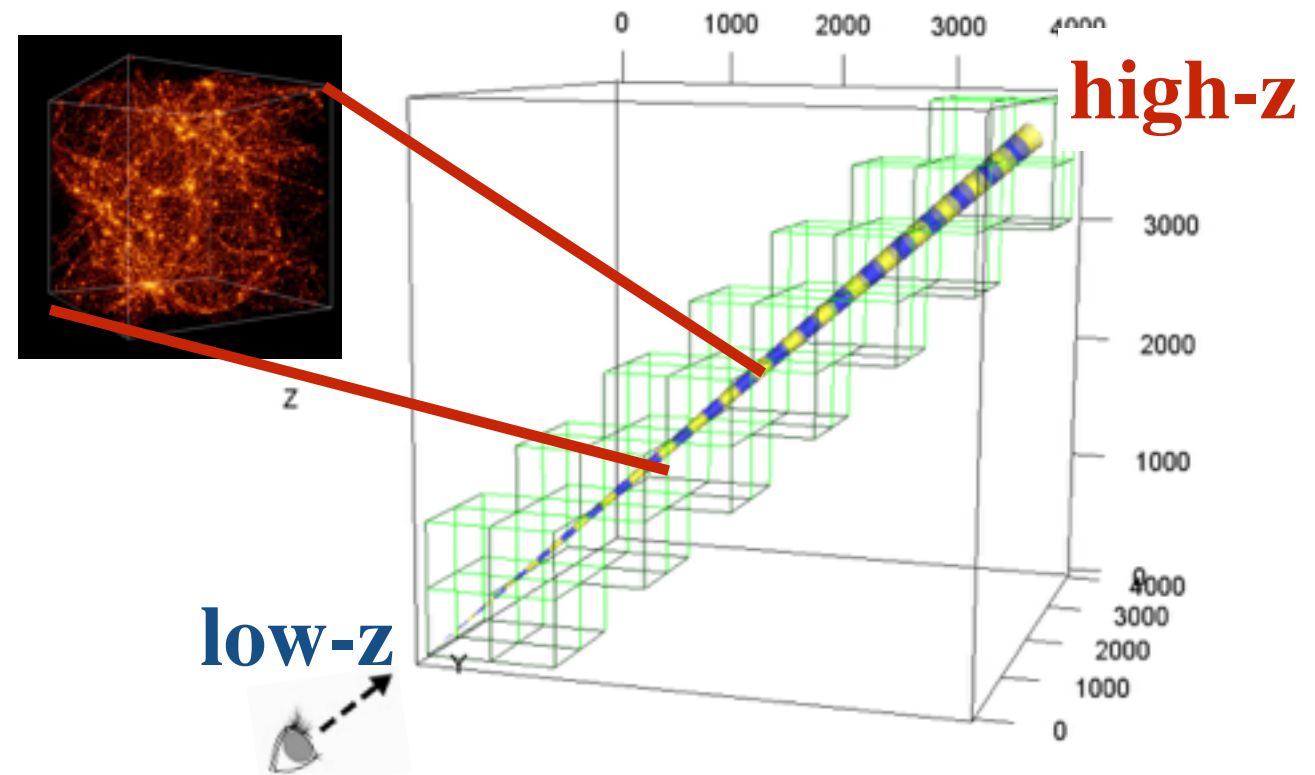
1. N体DMシミュレーション (Millennium simulation; Springel et al. 2005)
2. 準解析的銀河形成モデル (Guo et al. 2011)
3. 銀河間吸収、視線方向にシミュレーションボックスを並べる。

(Henriques et al. 2012; Overzier et al. 2013)

48deg²の擬似銀河カタログ
(2deg²×24通り)

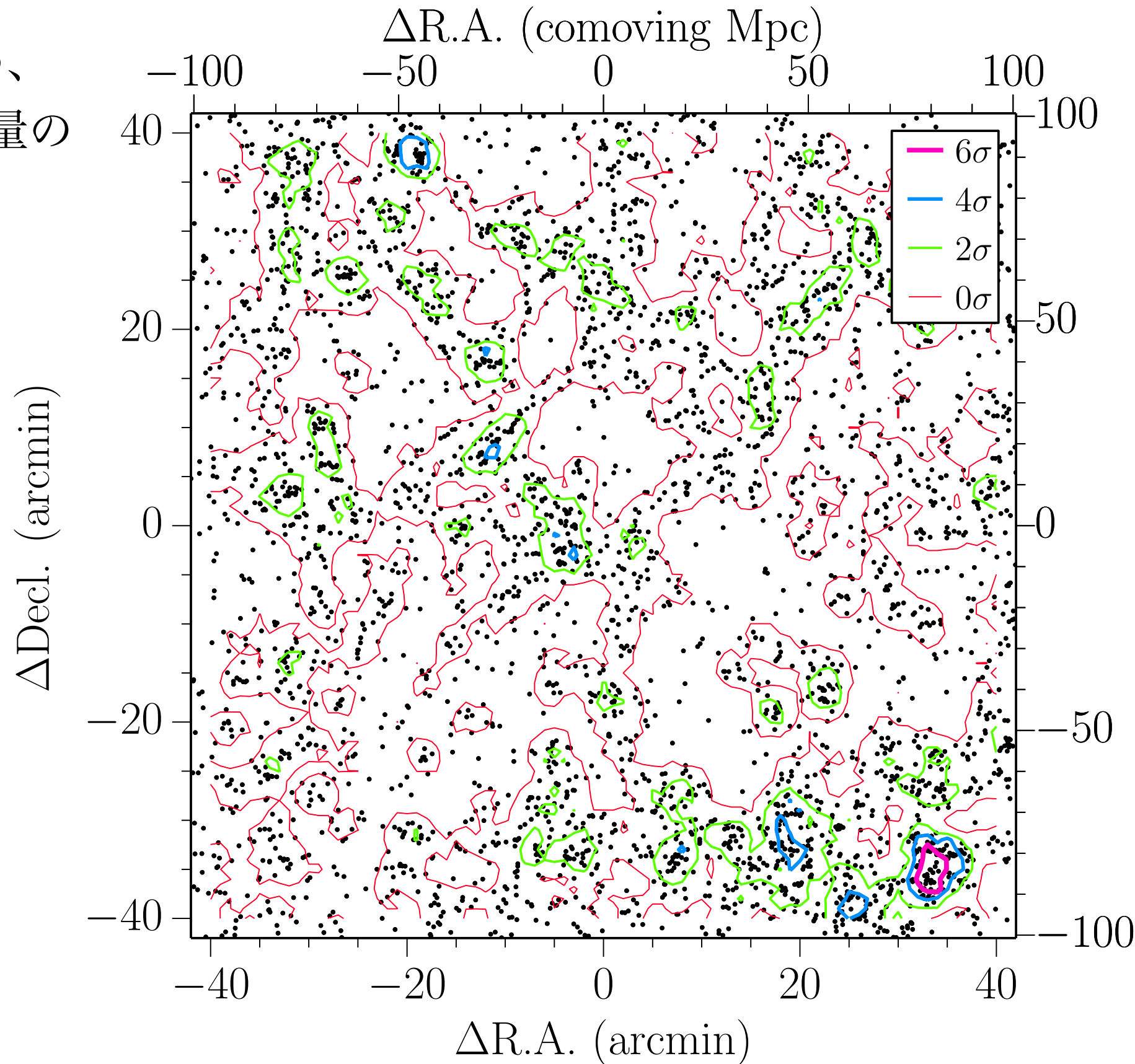


観測に対応する銀河サンプルを
選び出し、その分布を調べる。



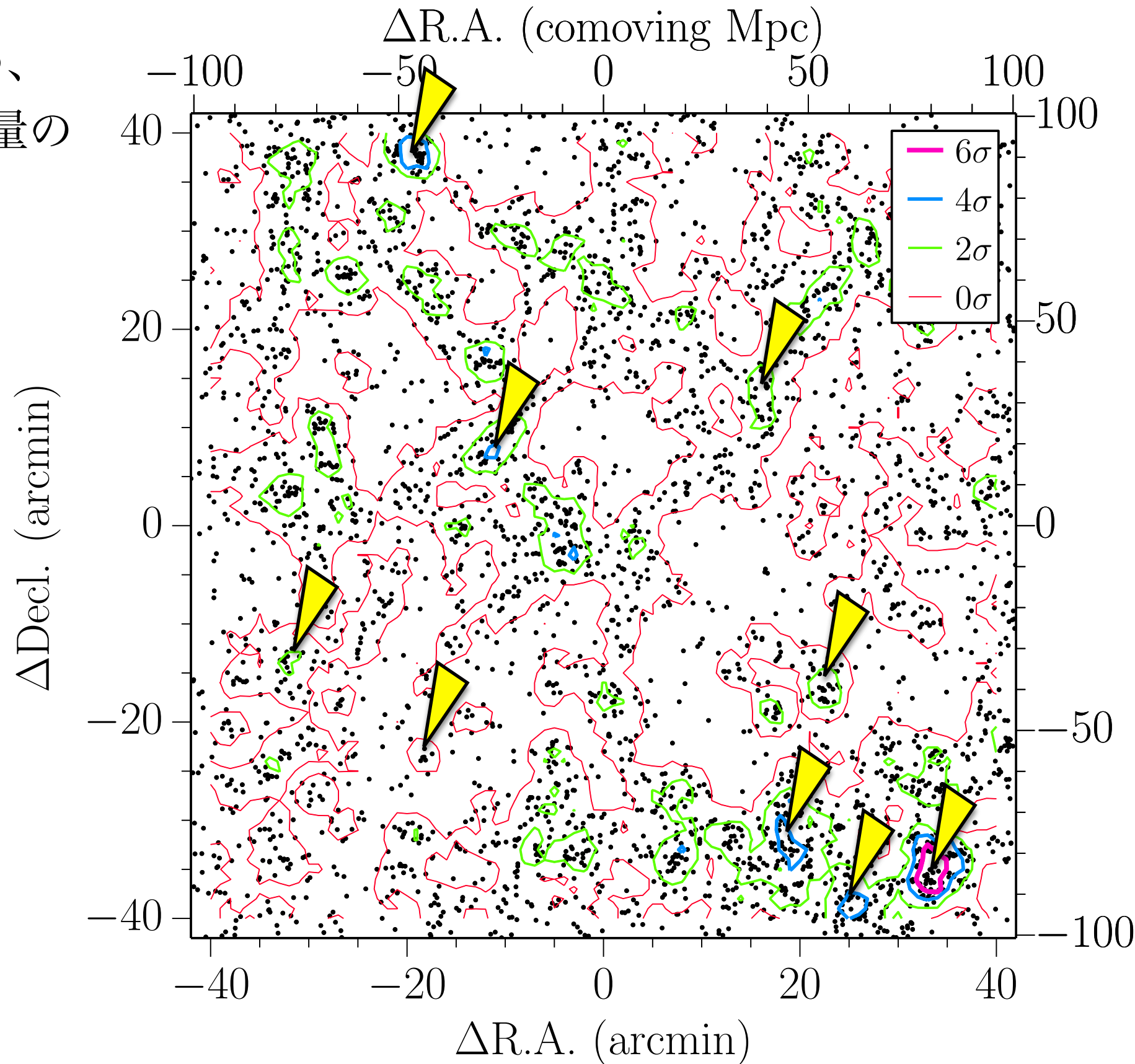
予測される銀河分布 (z~6での例)

観測と同様に数密度を決め、
密度超過と $z=0$ のハロー質量の
関係を調べる。



予測される銀河分布 (z~6での例)

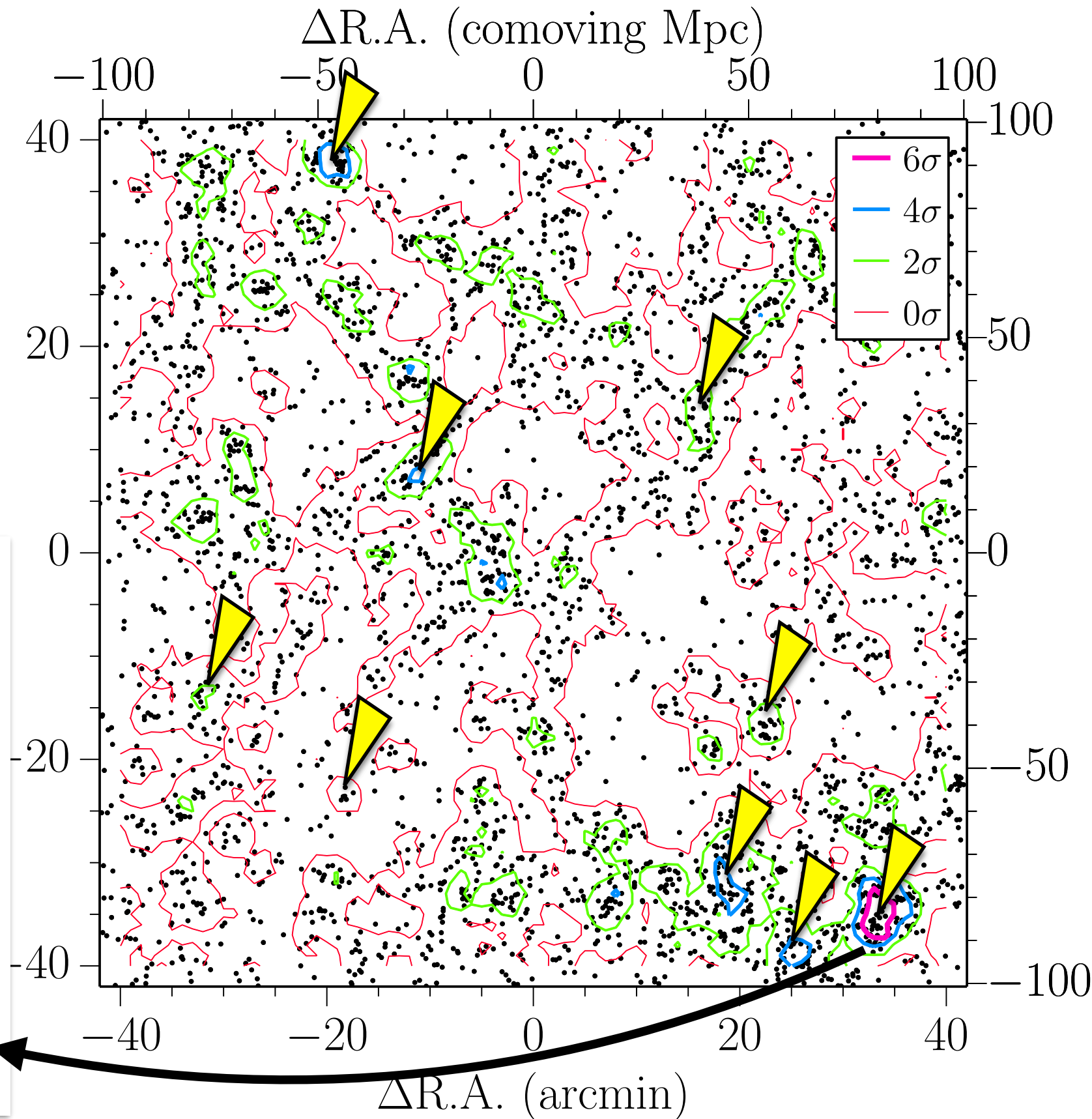
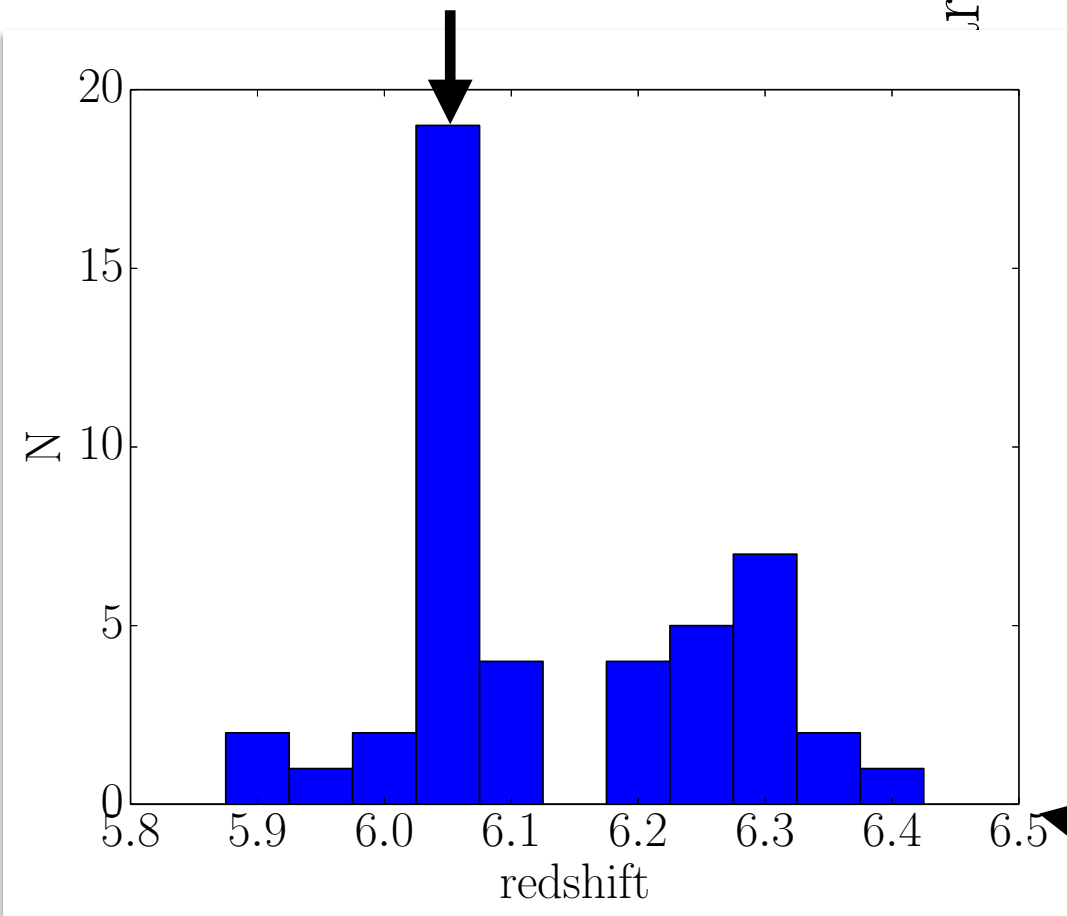
観測と同様に数密度を決め、
密度超過とz=0のハロー質量の
関係を調べる。



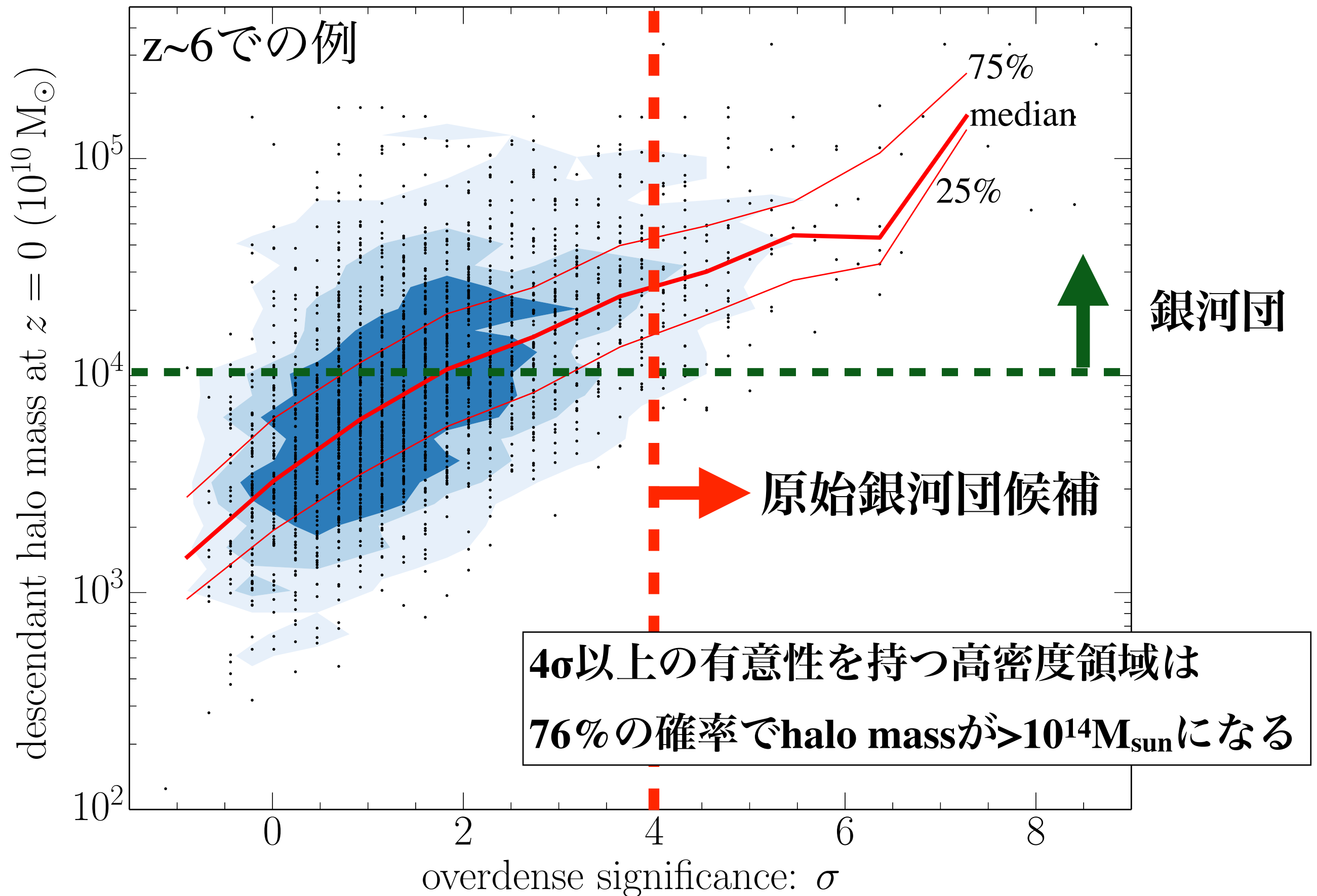
予測される銀河分布 (z~6での例)

観測と同様に数密度を決め、
密度超過とz=0のハロー質量の
関係を調べる。

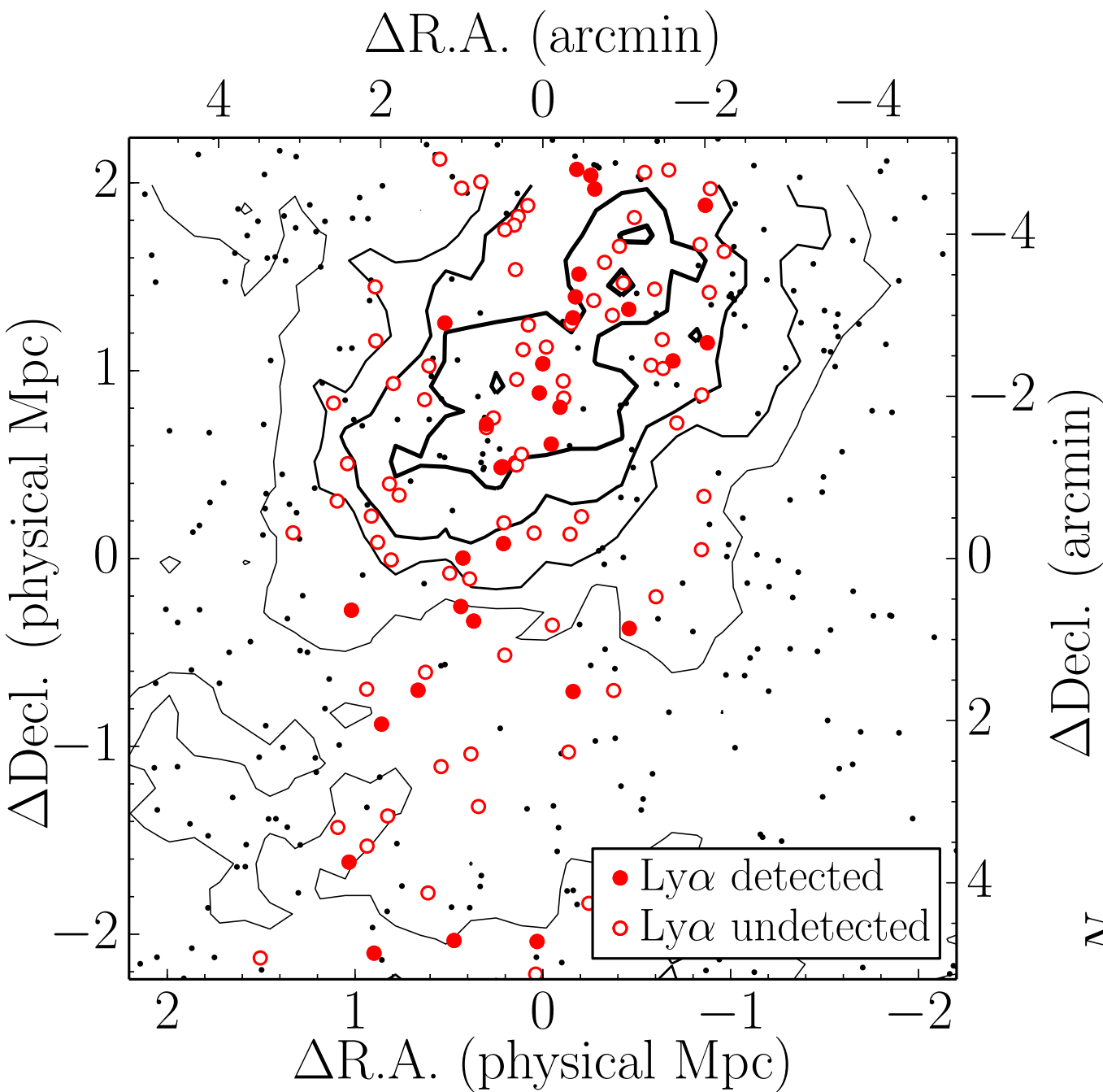
ピークに含まれる銀河の
z=0のハロー質量を調べる



数密度と $z=0$ でのハロー質量の関係



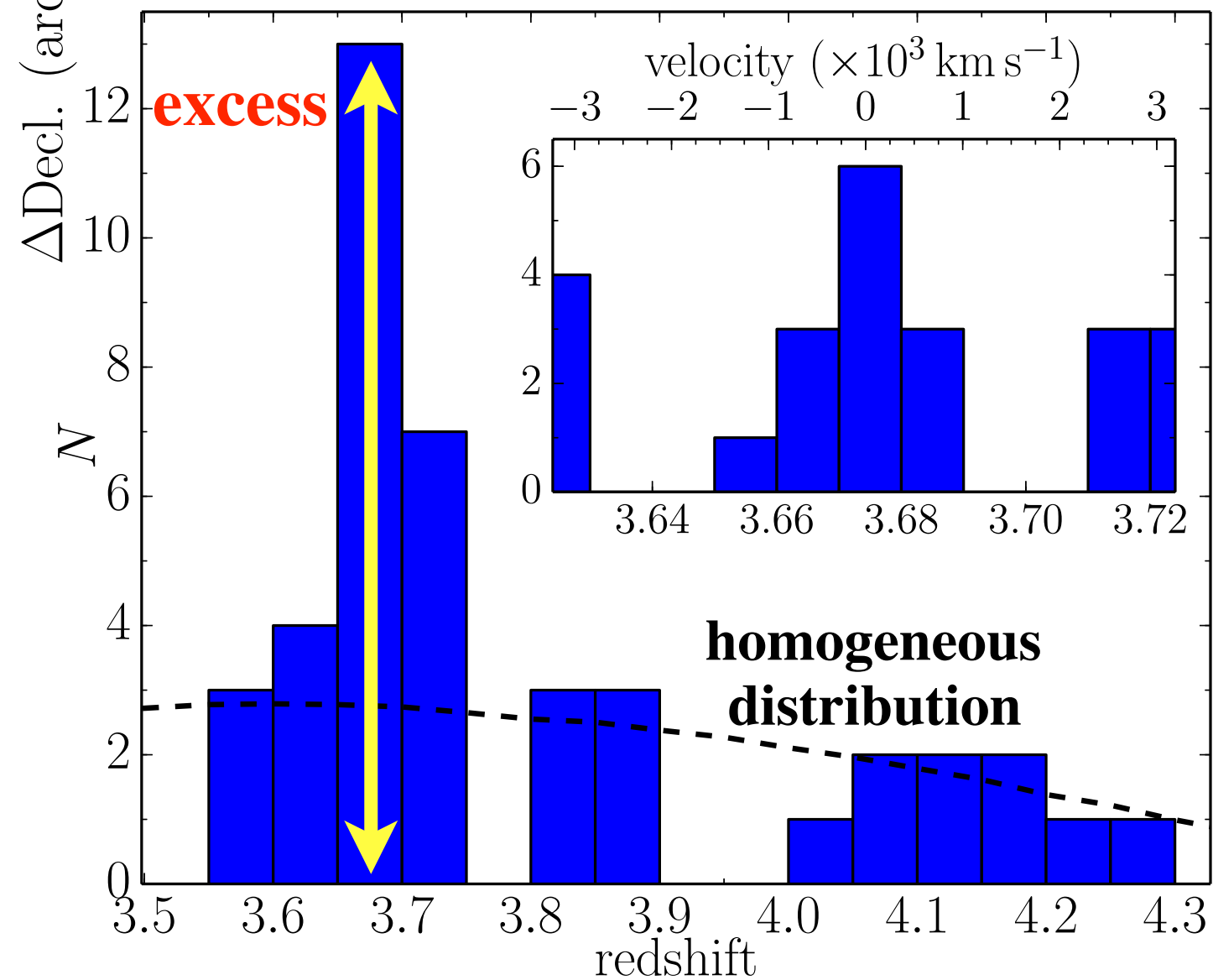
原始銀河団の分光同定



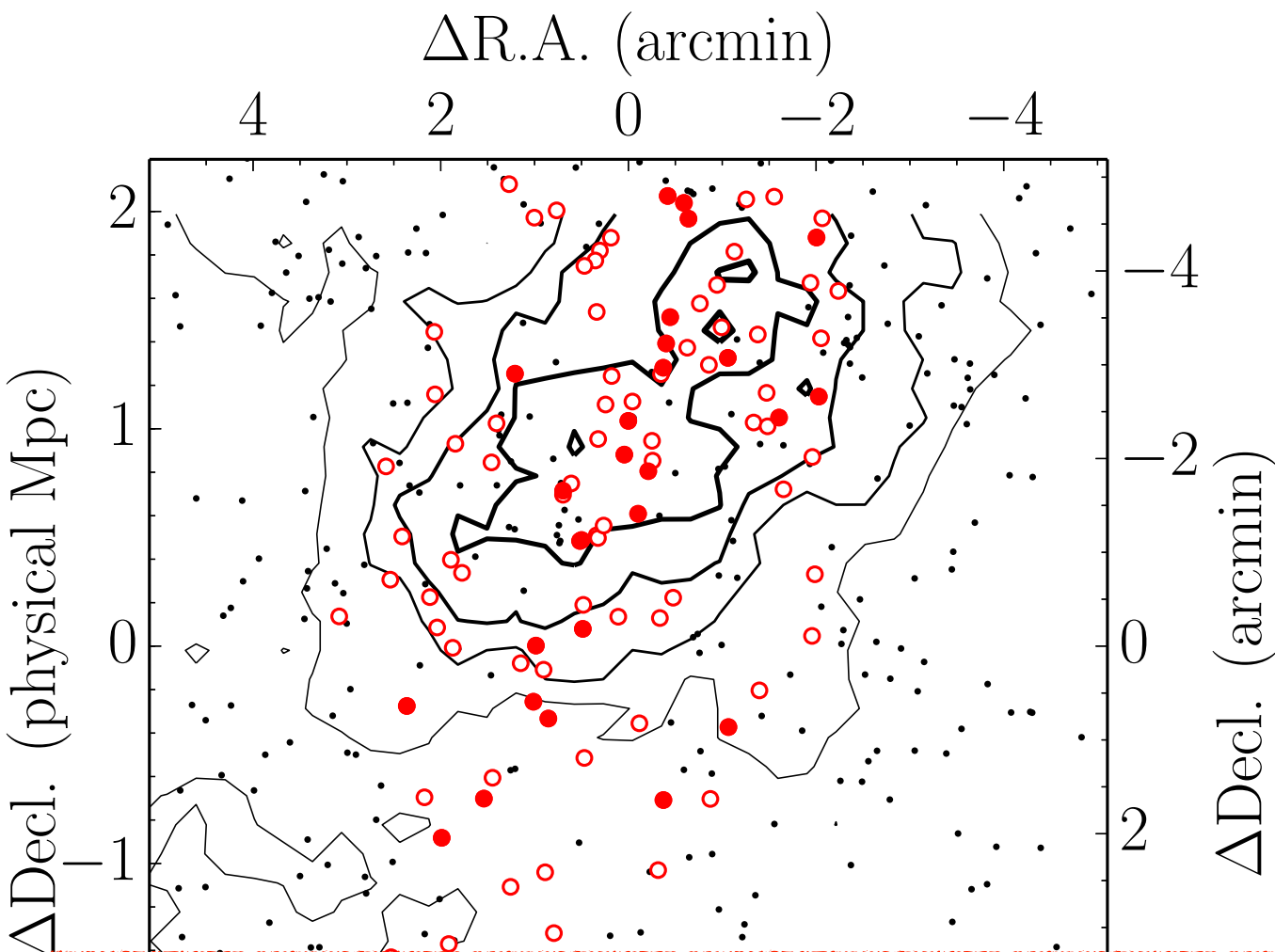
- 空間分布

赤方偏移方向についても
銀河が集中していることを確認

- 赤方偏移分布

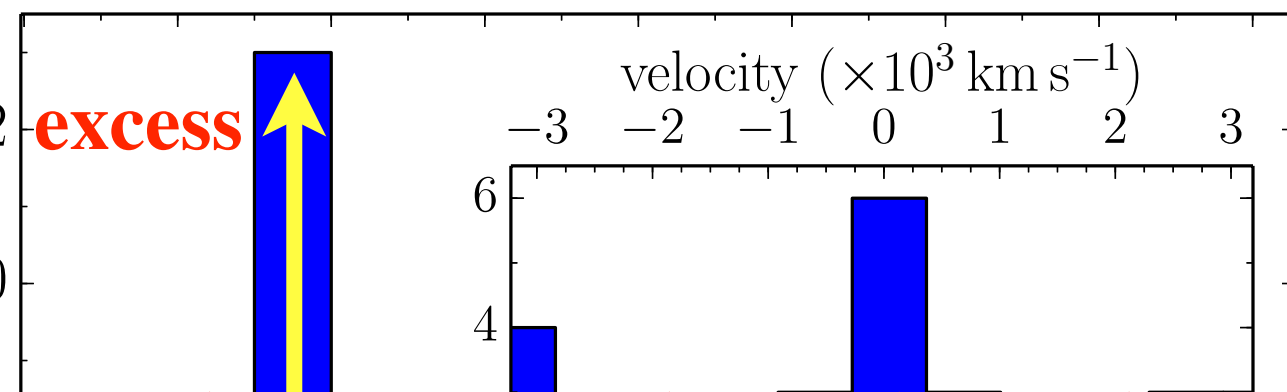


原始銀河団の分光同定



赤方偏移方向についても
銀河が集中していることを確認

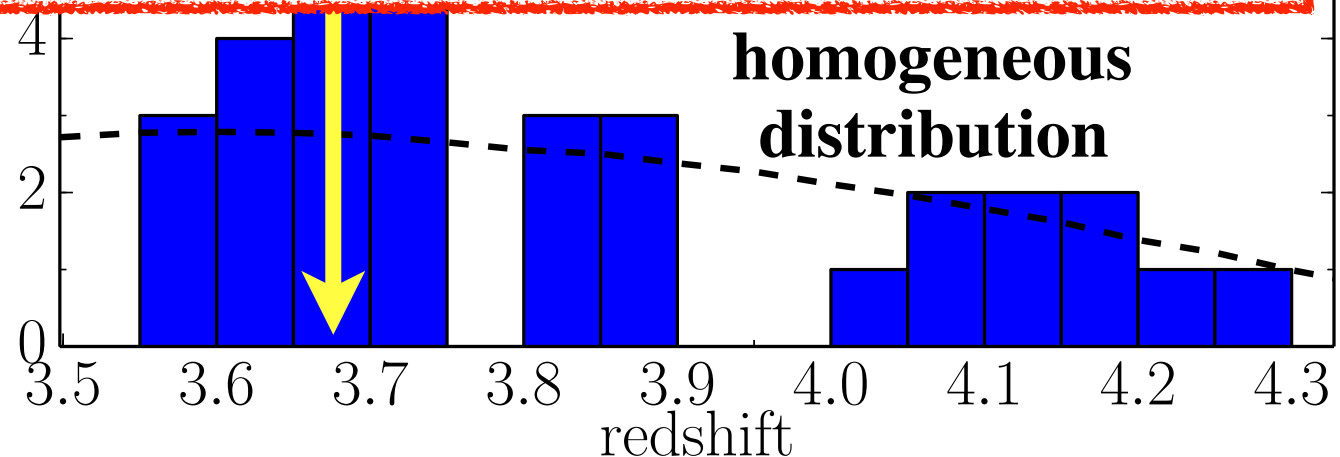
- 赤方偏移分布



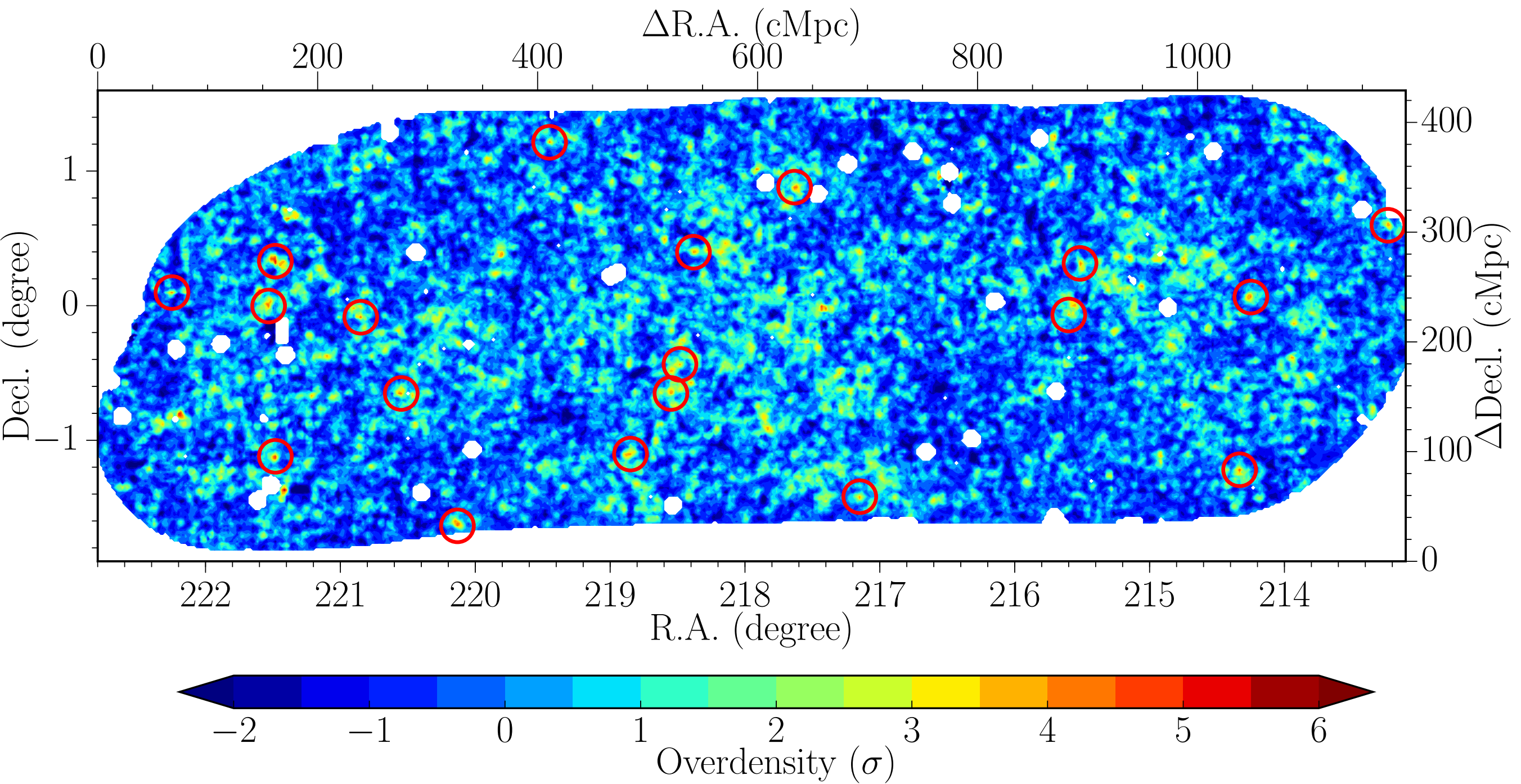
CFHTLSでの先行研究により手法の有効性は確認した。

HSCサーベイにおいて赤方偏移 4 の原始銀河団探査を行う。

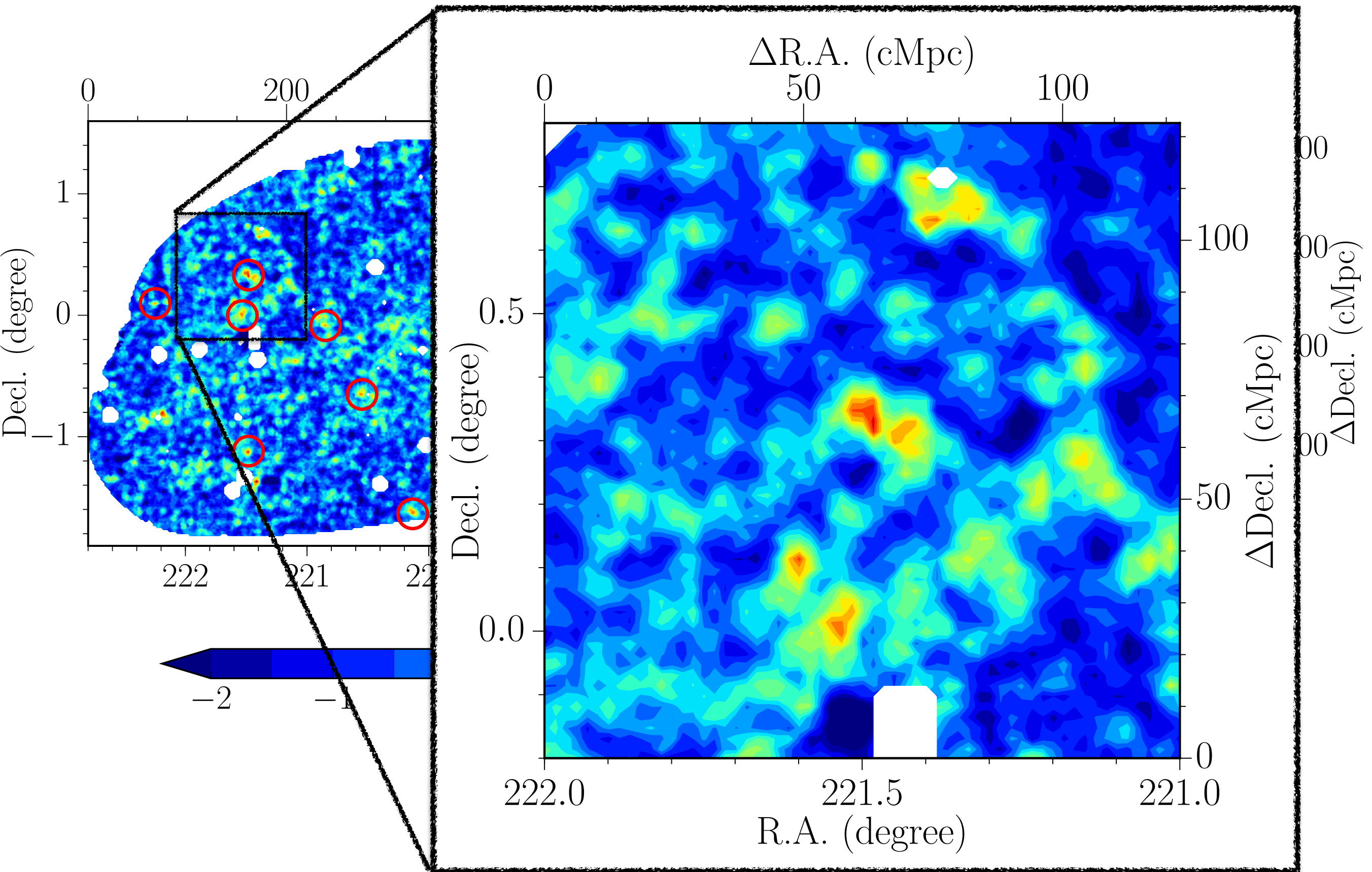
- 空間分布



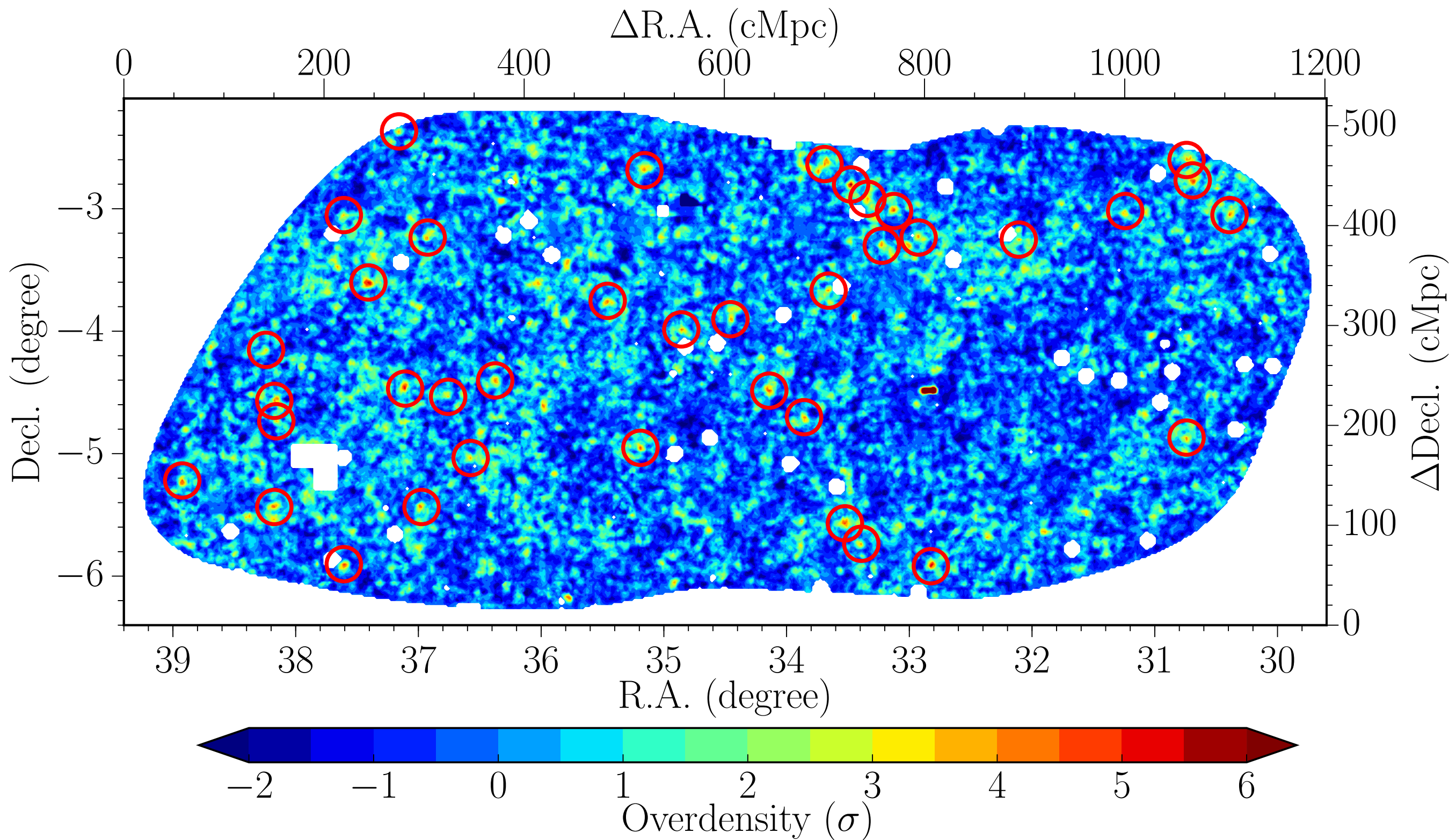
WIDE-GAMA15H領域での高密度領域



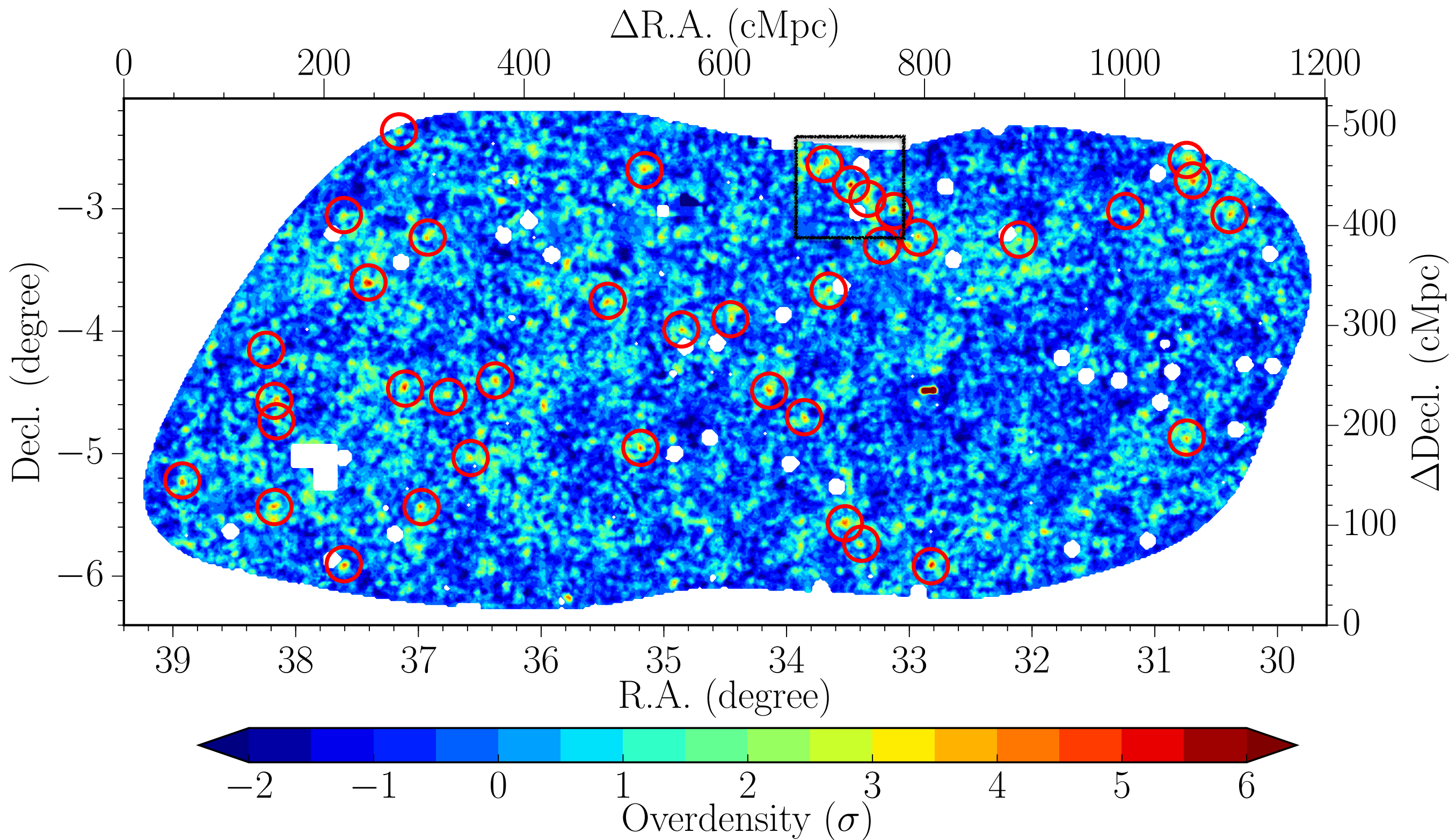
WIDE-GAMA15H領域での高密度領域



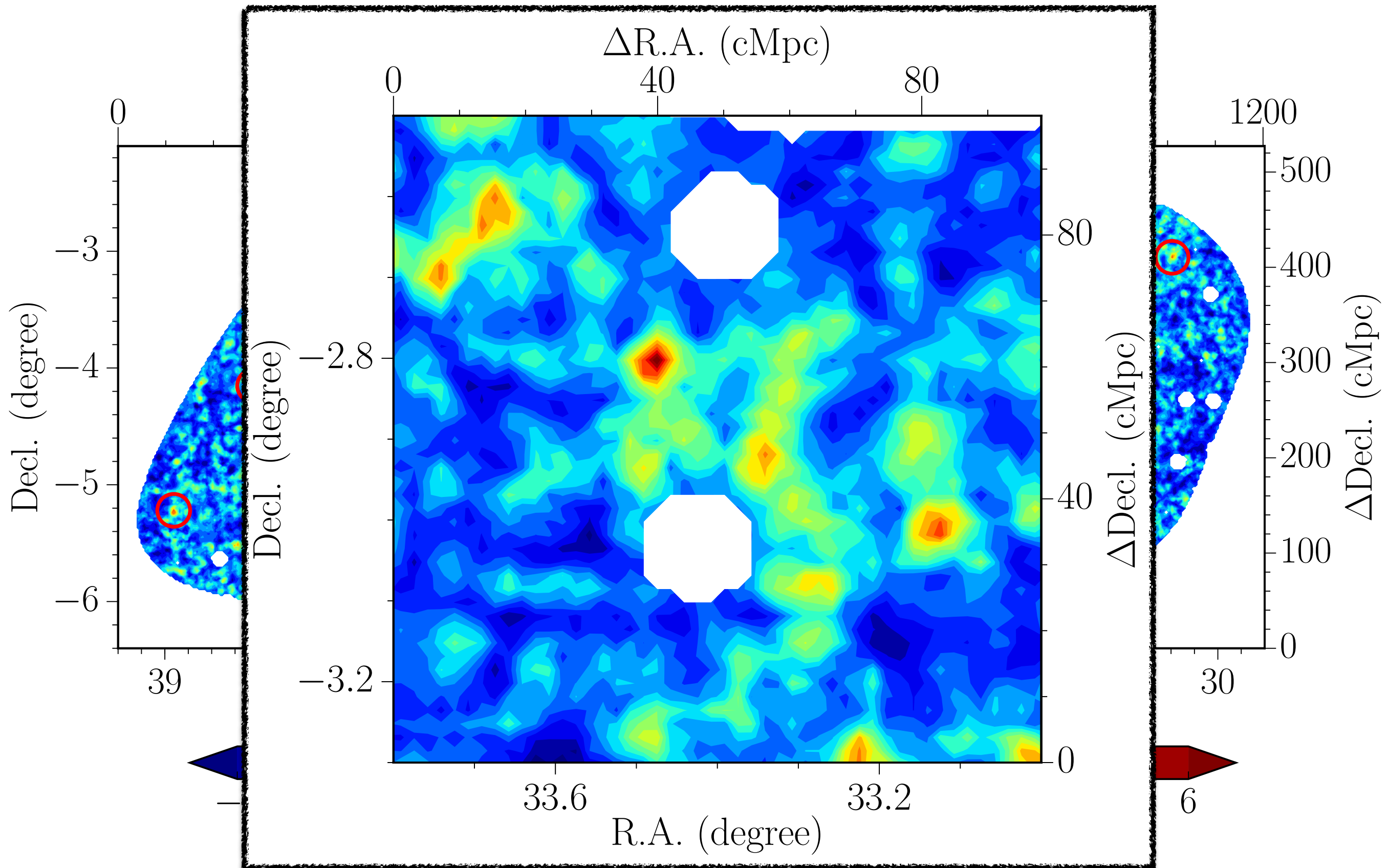
WIDE-XMMでの高密度領域



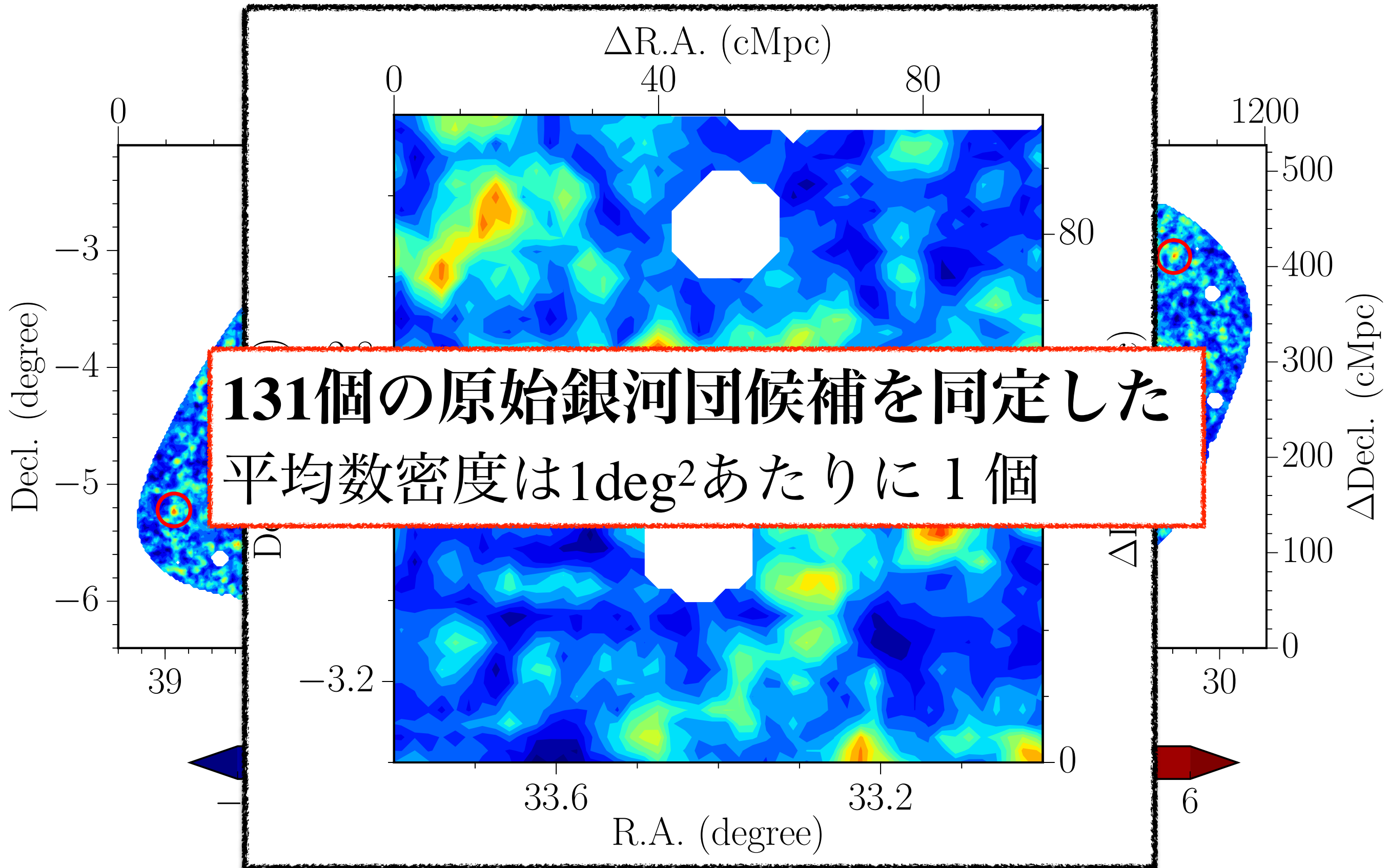
WIDE-XMMでの高密度領域



WIDE-XMMでの高密度領域



WIDE-XMMでの高密度領域



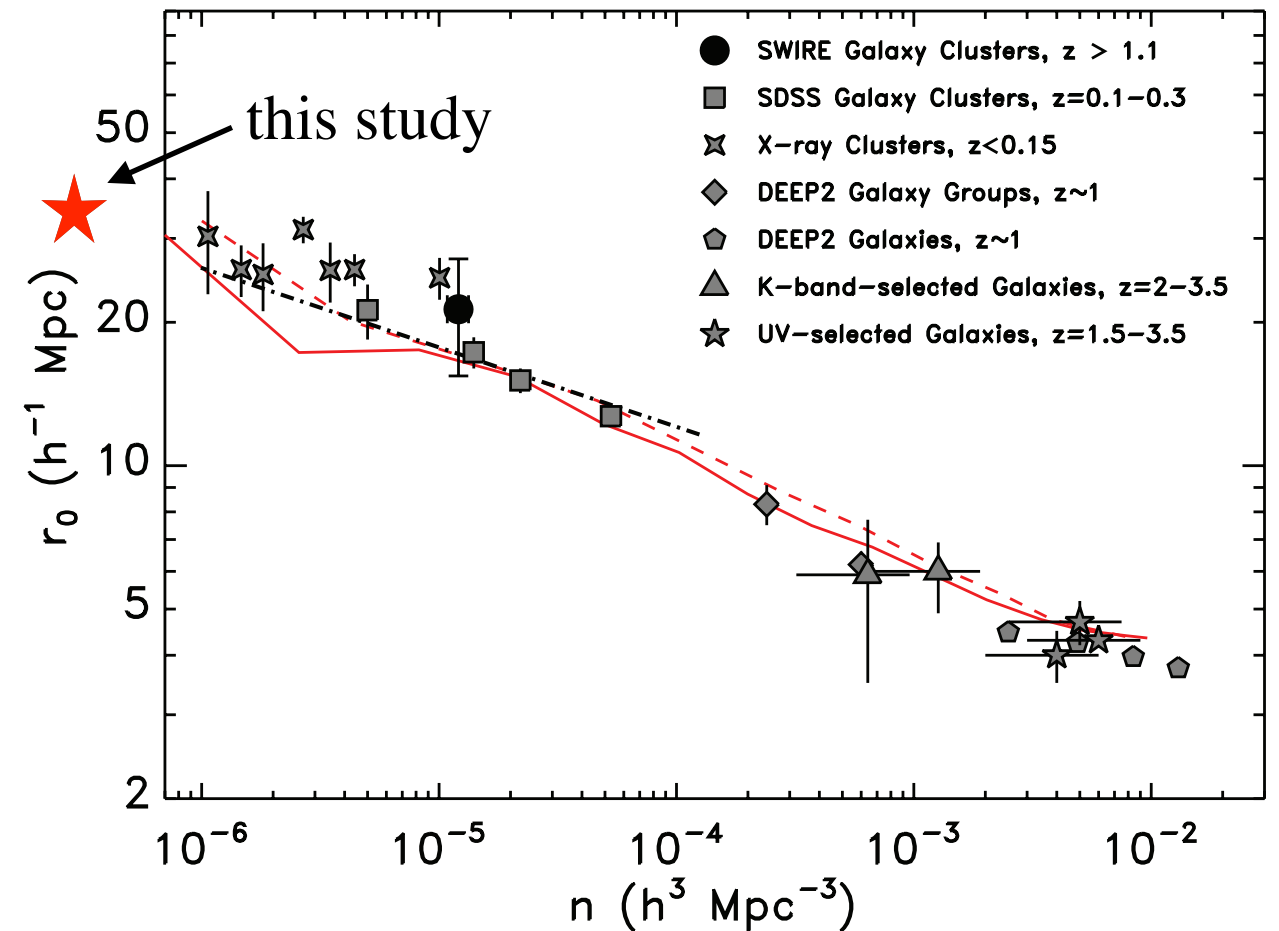
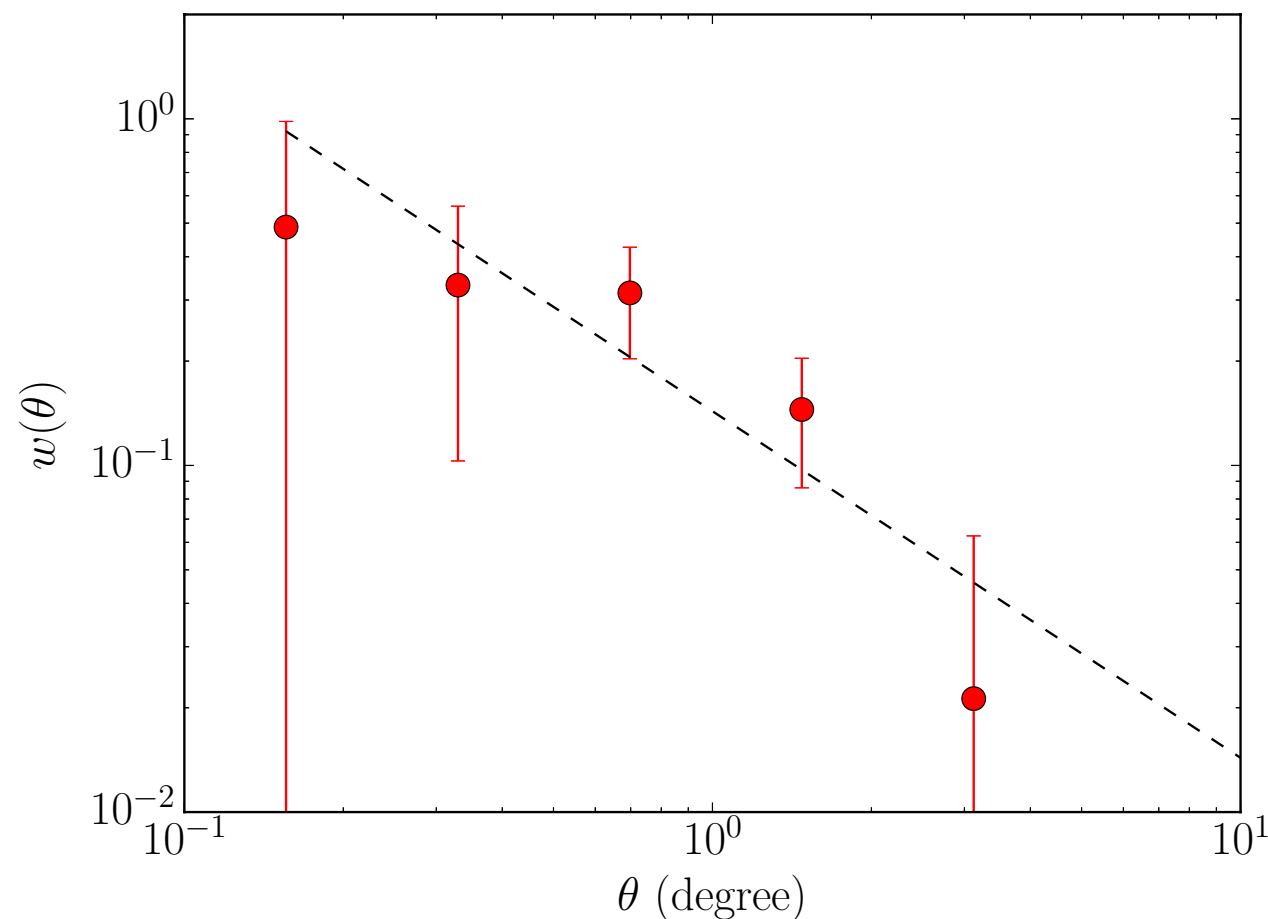
高密度領域の数密度・分布

Preliminary

130deg²に131個の原始銀河団候補 → $n=2.8 \times 10^{-7} \text{ Mpc}^{-3}$

角度相関関数から相関長は $r_0=33.3 \text{ (14.8 - 44.7) Mpc}$

* LBGの赤方偏移分布をそのまま適用した。



Papovich et al. (2008)

まとめ・将来計画

- HSCの広視野サーベイを用いて
無バイアスな原始銀河団探査を行なった。
- **130deg²の領域から131個の原始銀河団候補を同定した。**
- クラスタリングから密度・相関長関係は理論予測と一致
- ハロー質量の推定には詳細な検討が必要

今後は

1. 他の赤方偏移、NBでの探査
2. 高密度領域とQSO/RGなどの特異天体との相関
3. 銀河の性質(SED fittingなど)と環境の関係
4. クラスタリング解析からのハロー質量の測定
5. 高密度領域内での銀河分布
6. 様々な追観測の提案