

高エネルギーで探る宇宙の多様性 I

10/18/2021



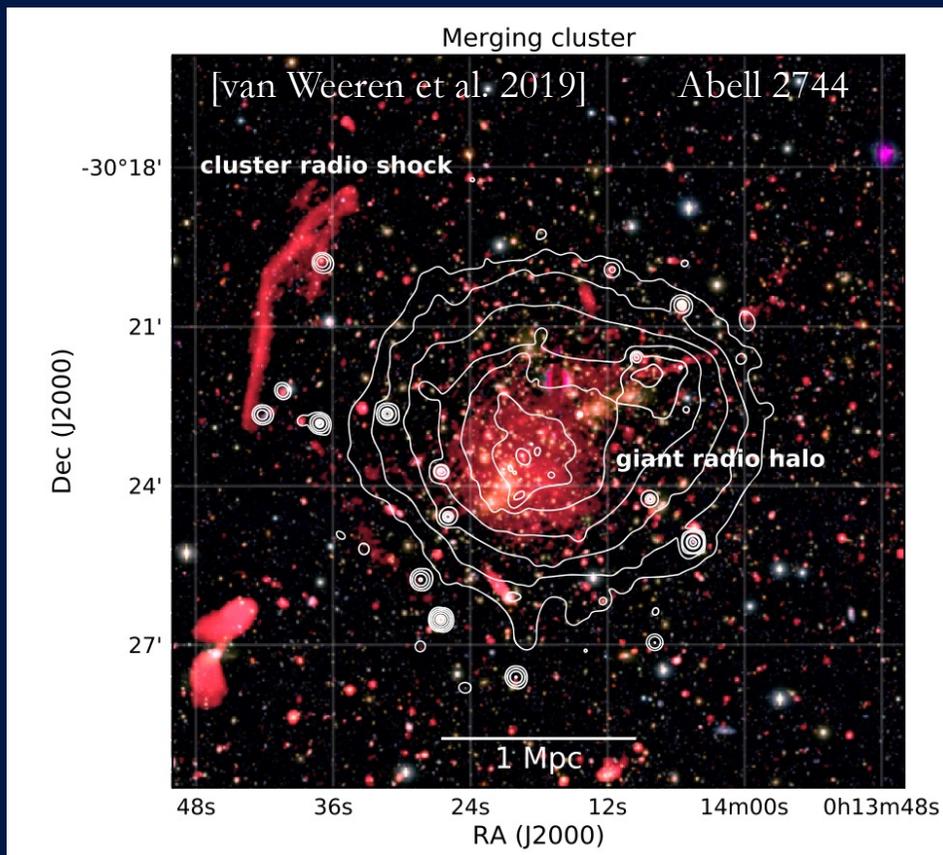
銀河団の形成過程における 電波ハローの駆動条件

東京大学 宇宙線研究所

西脇公祐 ・ 浅野勝晃

nisiwaki@icrr.u-tokyo.ac.jp

巨大電波ハロー (Radio Halo, RH)



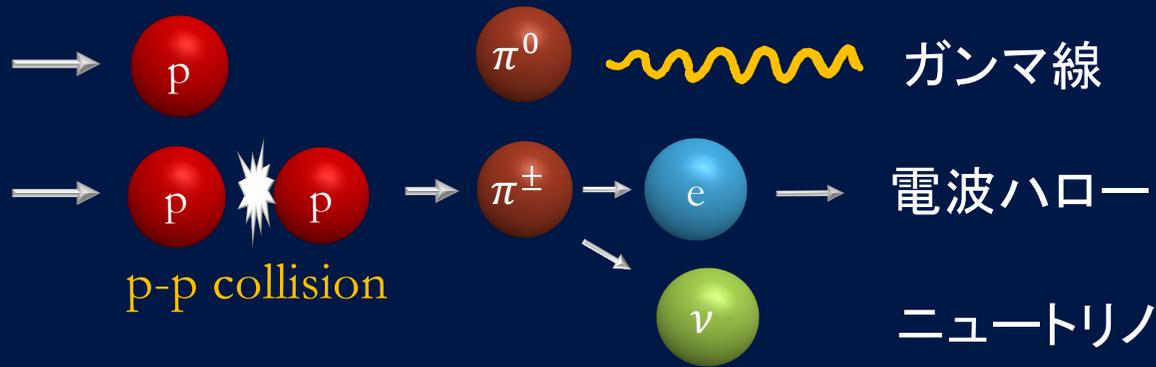
- 相対論的電子のシンクロトロン放射
- Mpc スケールの広がり
- ~ 40%の銀河団だけに見られる
- **衝突系との相関**
- LOFAR, uGMRTにより、観測数増加中
- 将来観測により更なる発展が期待される

乱流再加速モデル

銀河団衝突による乱流 ⇒ 宇宙線加速

Secondary (陽子起源) シナリオ

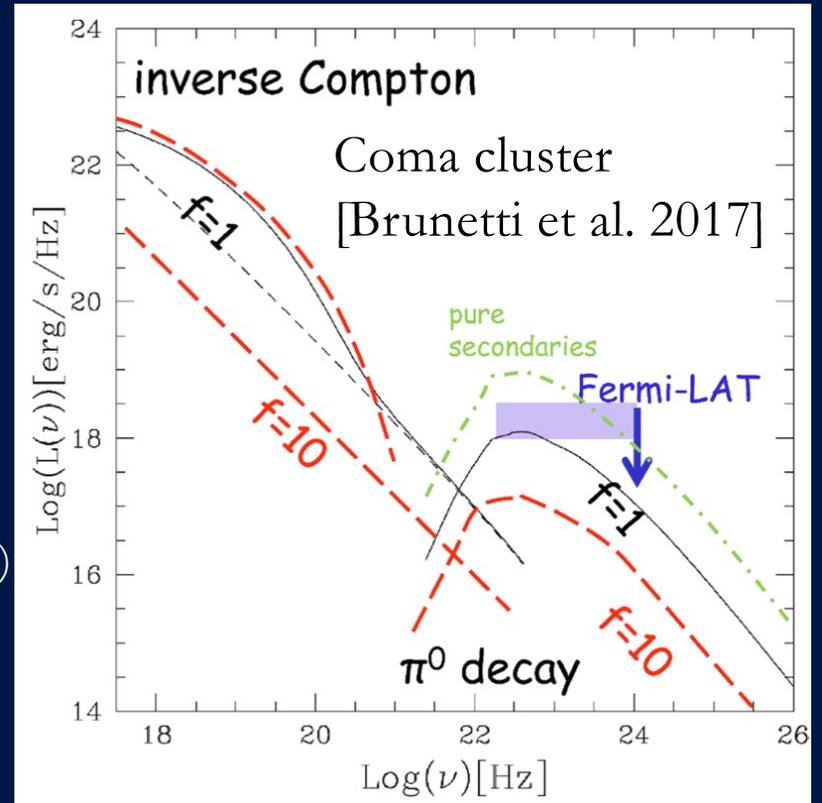
宇宙線注入



電波ハローからガンマ線が観測されていない

(*Possible detection from Coma with Fermi-LAT: e.g., Adam et al. 2021)

再加速によるエネルギー注入
and/or 一次電子が有力!

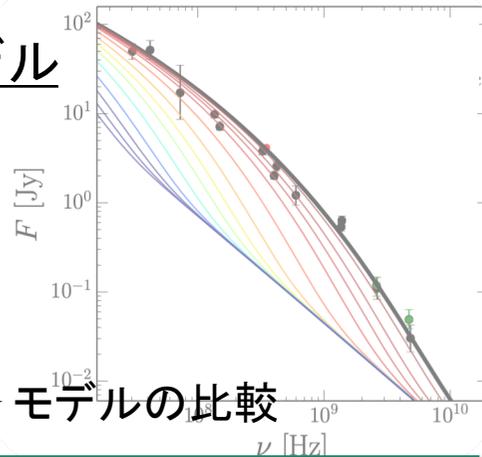


Method: スペクトル計算 + Merger Tree

1. Fokker – Planck equation

乱流再加速モデル

空間方向1次元(球対称)



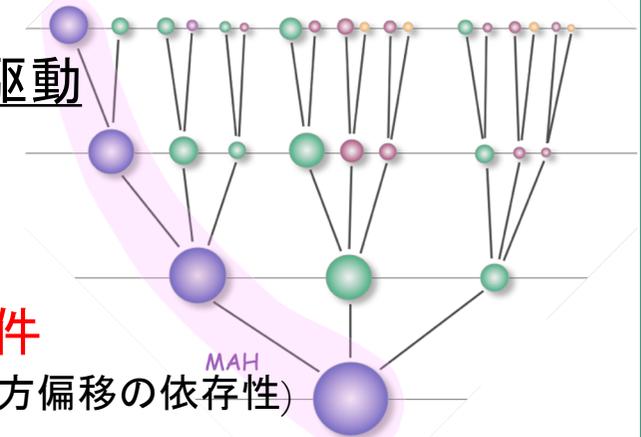
- 放射の寿命
- secondary/primary モデルの比較

観測 (Coma cluster)

- 輝度プロファイル
- スペクトル

2. Merger Tree

衝突による駆動



- RH駆動条件
(質量, 質量比, 赤方偏移の依存性)

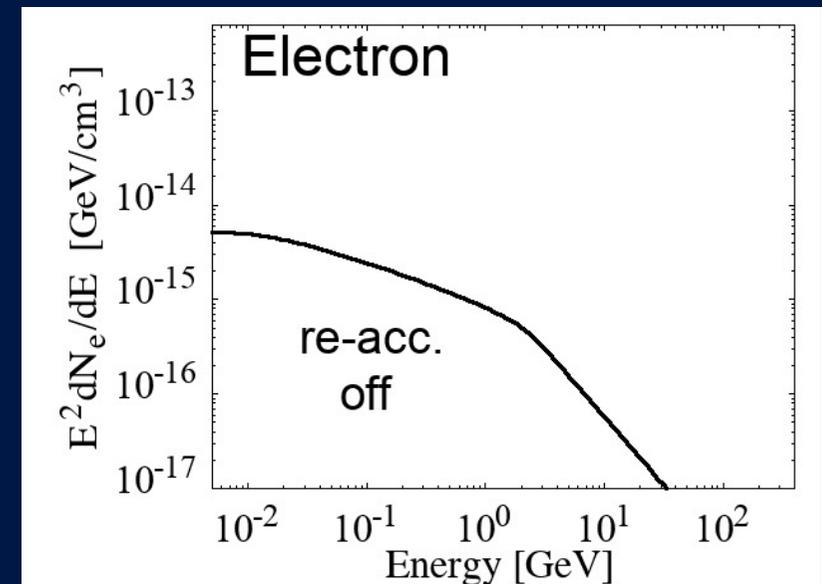
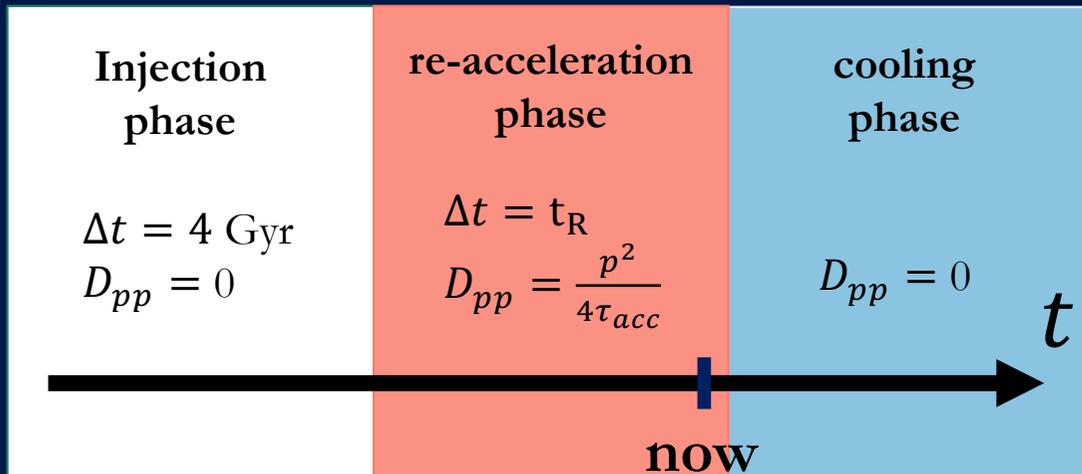
観測 (統計的性質)

- RHの割合
- $P_{1.4} - M_{500}$ (輝度-質量)の相関

1. Fokker – Planck equation

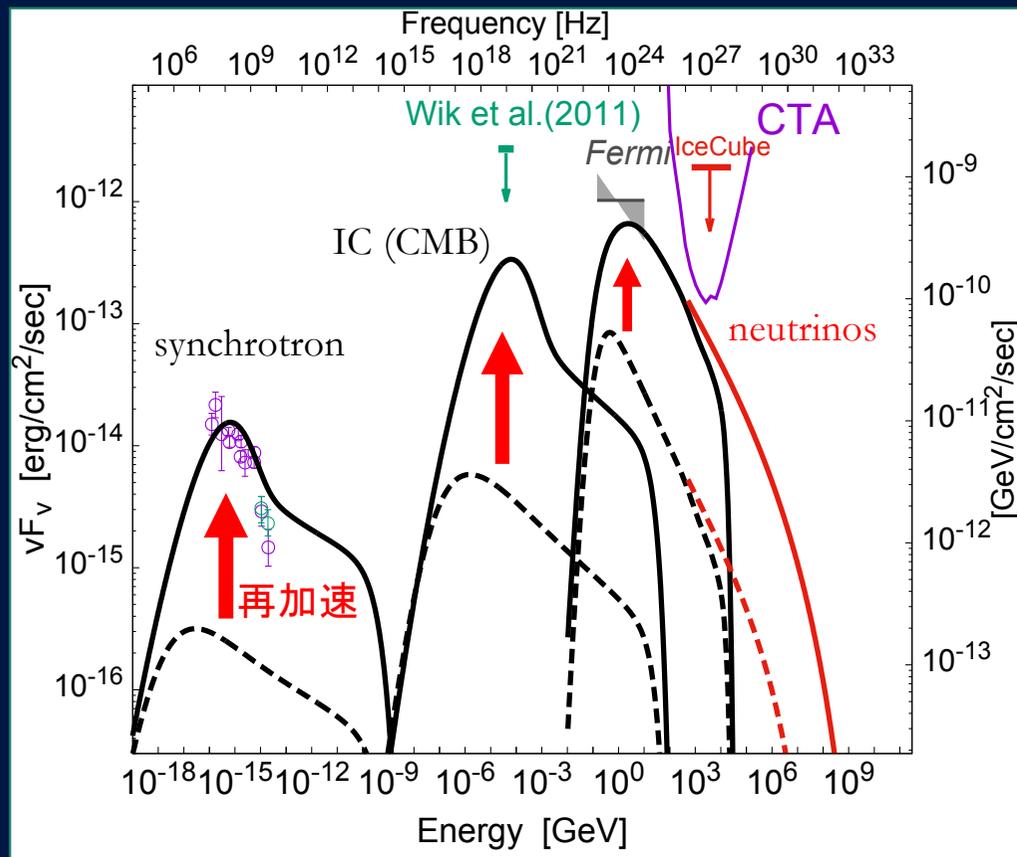
$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial p} \left[N_e \frac{dp}{dt} \right] + \frac{\partial}{\partial p} \left[D_{pp} \frac{\partial N_e}{\partial p} - \frac{2}{p} N_e D_{pp} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[D_{rr} \frac{\partial N_e}{\partial r} - \frac{2}{r} N_e D_{rr} \right] + Q_e^{pri} + Q_e^{sec}$$

冷却
再加速
空間拡散
1次電子
2次電子



[Ref: Nishiwaki et al. (2021), ApJ in press, arxiv : 2105.04551]

Coma clusterの多波長スペクトル



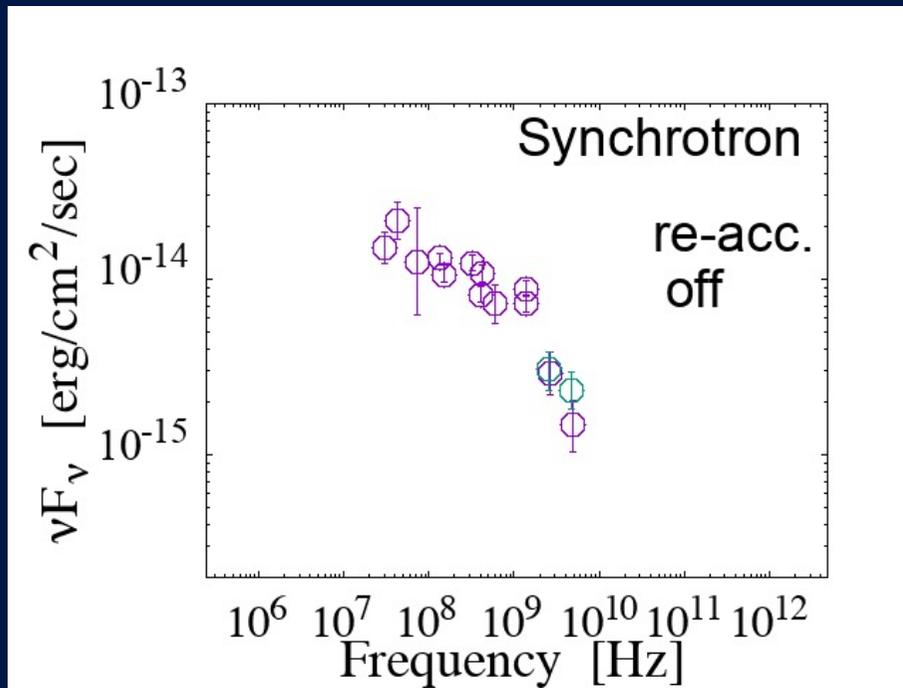
再加速モデルによって

- 電波スペクトル
- ガンマ線upper limit
- 電波輝度分布

をconsistentに再現できる

この放射は
どれくらい持続するのか？

電波ハローの寿命 : *primary scenario*



電子が主に一次宇宙線として注入される場合
(pp collisionを無視できる)

$$t_{RH} \approx 300 \text{ Myr}$$

電子の冷却時間(≈再加速タイムスケール)程度

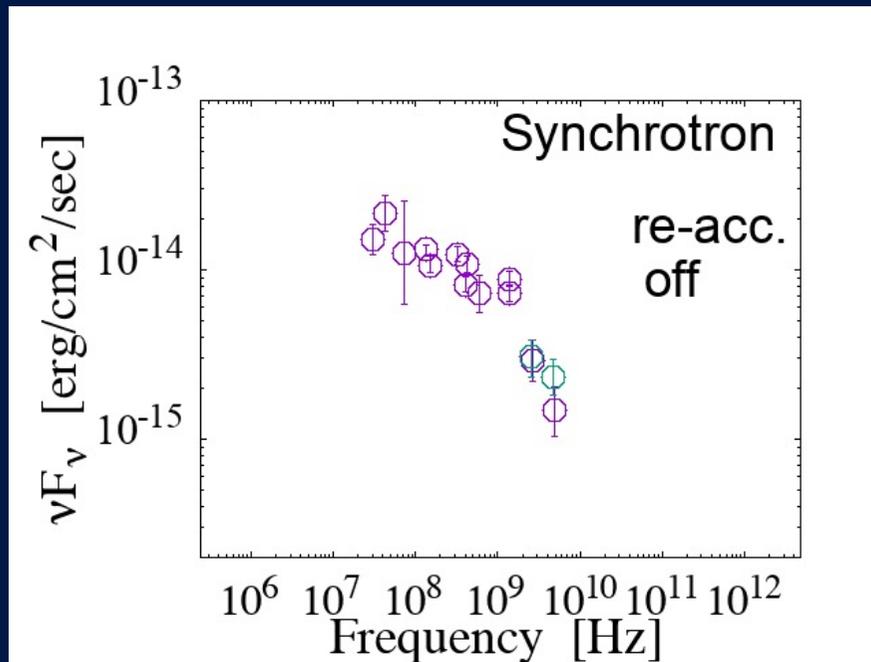
先行研究と同様

[Cassano & Brunetti 2005, Cassano+2016]

電波ハローの寿命 : *secondary* scenario

電波スペクトルの時間発展

電子が主に二次宇宙線として注入される場合



$$t_{RH} \gg 1 \text{ Gyr} \quad (\nu > 1 \text{ GHz})$$

一次陽子のloss timescale (pp衝突)

宇宙線陽子の再加速

⇒ 2次電子注入率の上昇

⇒ 再加速後も高い放射強度が持続
(従来のhadronicモデルへ)

前半まとめ

本研究

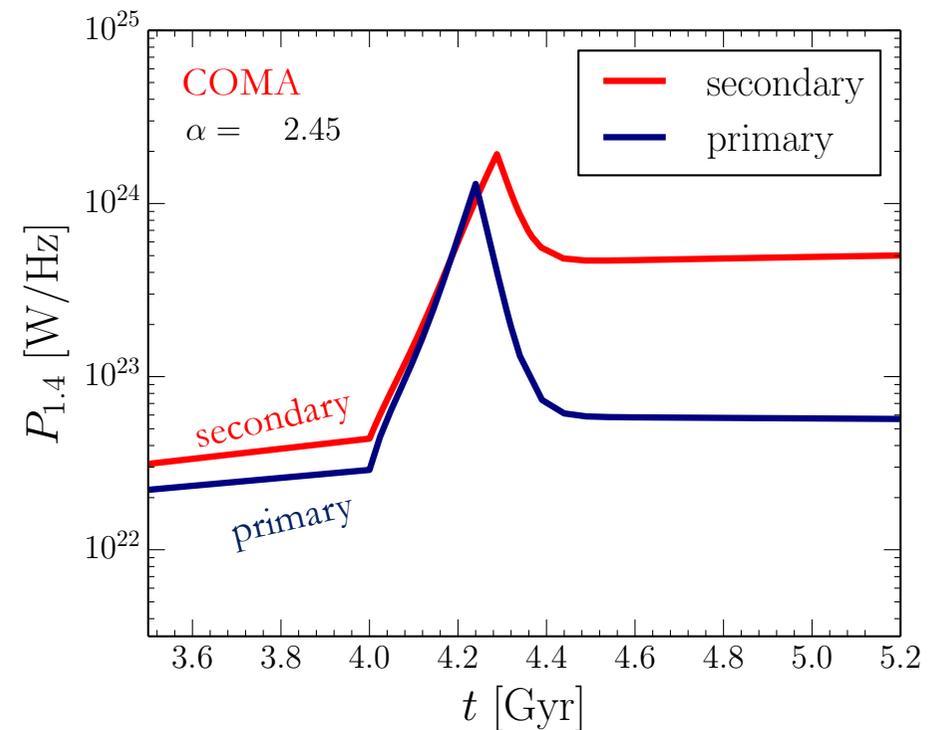
primaryシナリオ $\rightarrow t_{RH} \approx 300 \text{ Myr}$

secondaryシナリオ $\rightarrow t_{RH} \rightarrow \infty$

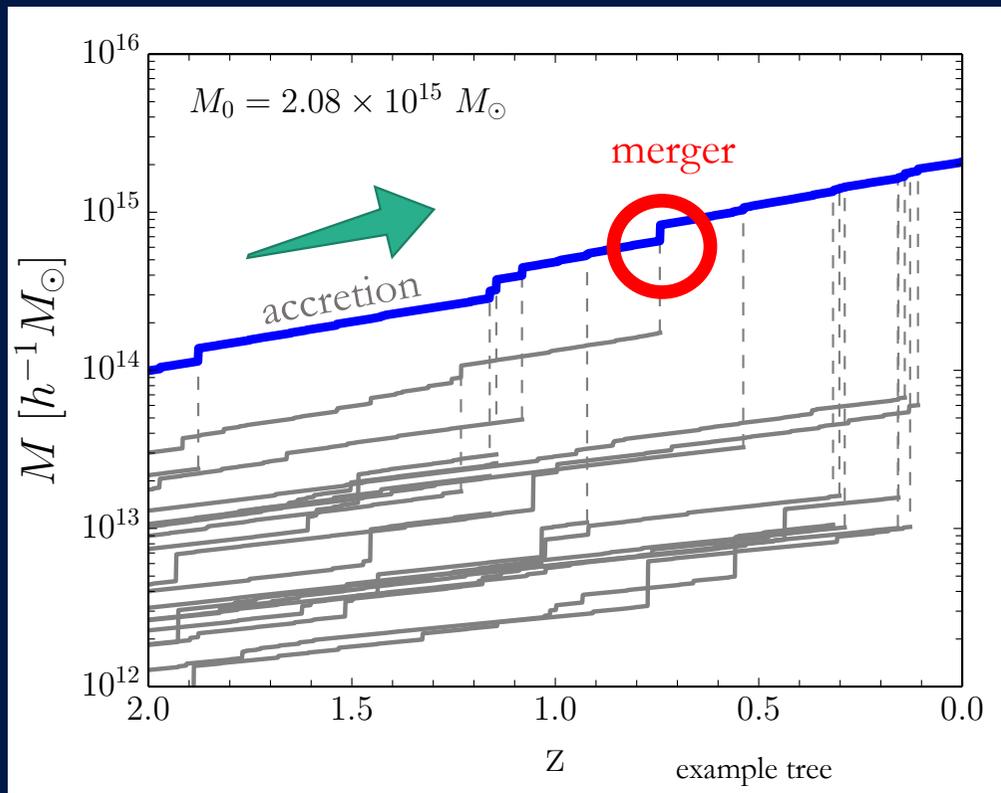
先行研究 [Cassano & Brunetti 2005, Cassano+2016]

RHは電子のcooling time程度で消える
(暗にprimaryシナリオを仮定)

電波輝度の時間進化



2. Monte Carlo Merger Tree



Millennium simulation [Fakhouri et al. (2010)]

- Merger rate per halo

$$\frac{dN_m}{d\xi dz} = A \left(\frac{M}{10^{12} M_\odot} \right)^{0.13} \xi^{-2.0} \exp \left[\left(\frac{\xi}{\xi} \right)^{0.26} \right] (1+z)^{0.1}$$

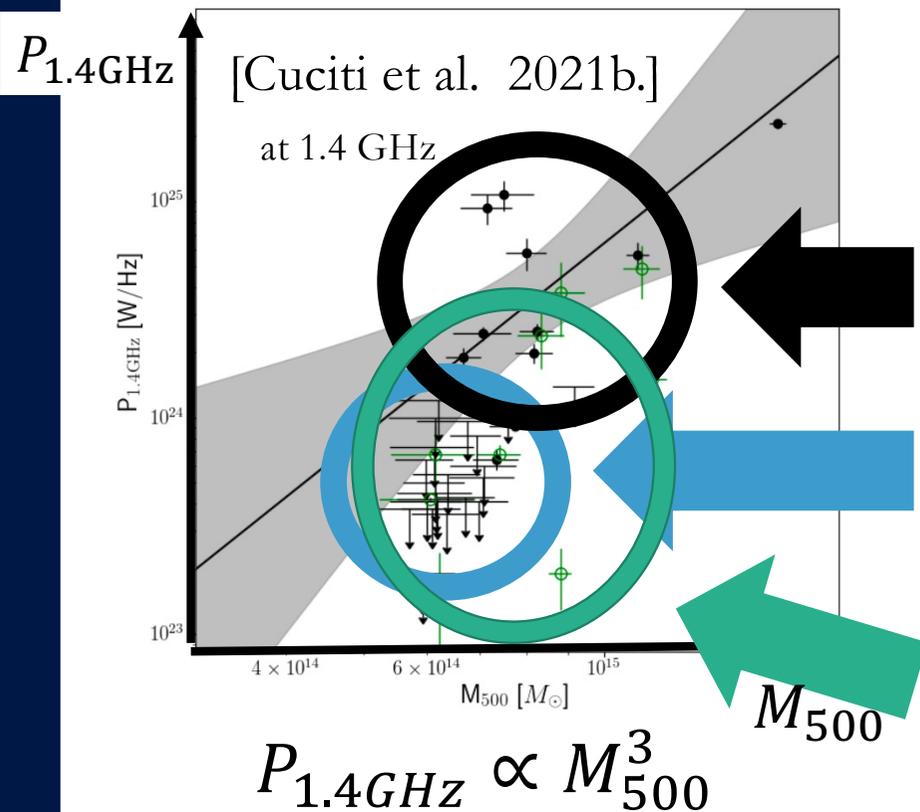
$0 < \xi \leq 1$: 質量比

- Accretion (median mass accretion rate)

$$\langle \dot{M} \rangle = 25.3 M_\odot \text{yr}^{-1} \left(\frac{M}{10^{12} M_\odot} \right)^{1.1} \times (1 + 1.65z) \sqrt{\Omega_m (1+z)^z + \Omega_\Lambda}$$

- 初期条件 : $z = 0$ での Mass function [Tinker et al. 2008]

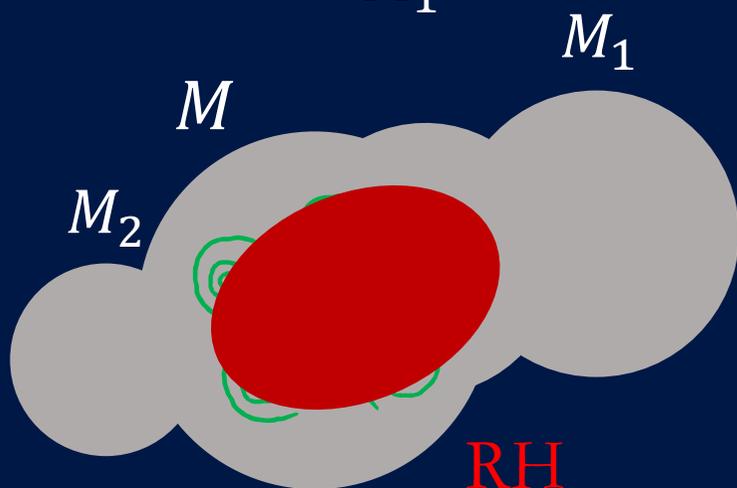
観測 : Luminosity-Mass relation



- 電波ハローの輝度と銀河団質量に相関
- data points...
電波ハローを持つ銀河団 $\approx 40\%$
($P_{1.4\text{GHz}} \approx 10^{24.5}$ [W/Hz])
- upper limits ...
電波ハローを持たない銀河団
($P_{1.4\text{GHz}} < 10^{23.5}$ [W/Hz])
- Ultra-Steep Spectrum RH & “small” halos

電波ハローの駆動条件

$$\xi = \frac{M_2}{M_1}$$



乱流のエネルギー

$$\epsilon_{turb} > \epsilon_0$$

- 衝突の運動エネルギーの一部が乱流として散逸

$$\epsilon_{turb}(M, \xi, z) = \eta_t f_{baryon} \epsilon_{kin}(M, \xi, z)$$

- ϵ_{turb} が閾値を超えると電波ハローが発生

$$\epsilon_{turb}(M, \xi, z) > \kappa \epsilon_{ICM}(M, z)$$

$$\Leftrightarrow \xi > \xi_t(M, z) \text{ (質量比の下限)}$$

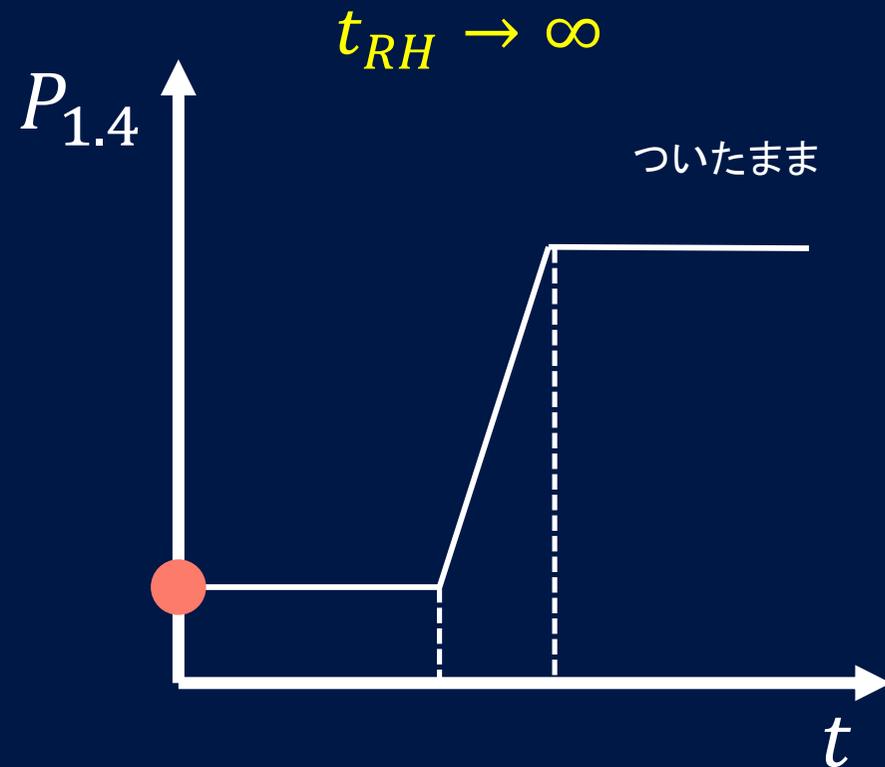
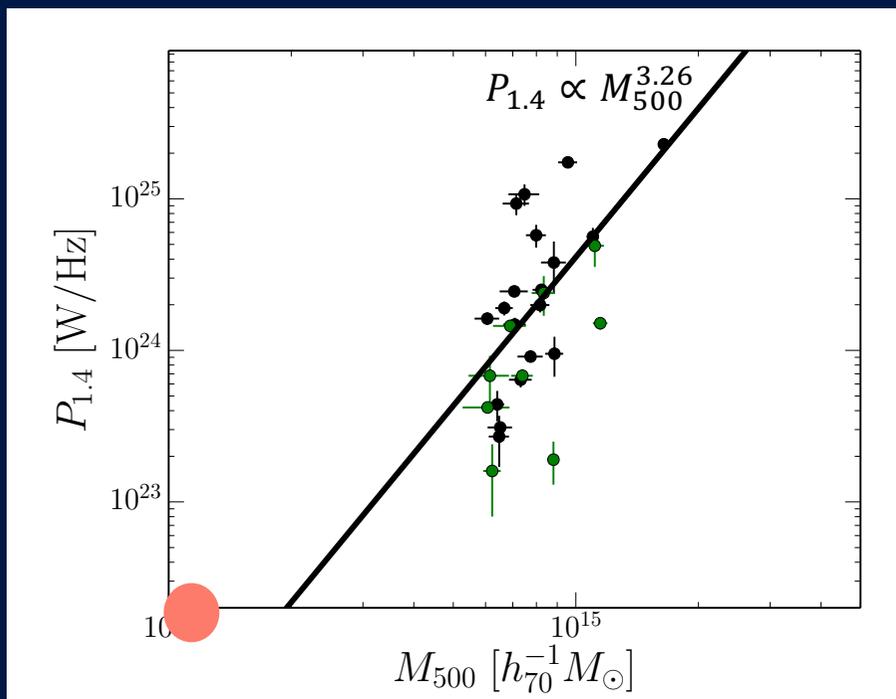
Coma Cluster (スペクトル計算)

$$\Rightarrow \kappa \approx 0.01(\text{secondary}), \kappa \approx 0.001(\text{primary})$$

モデルパラメータ η_t

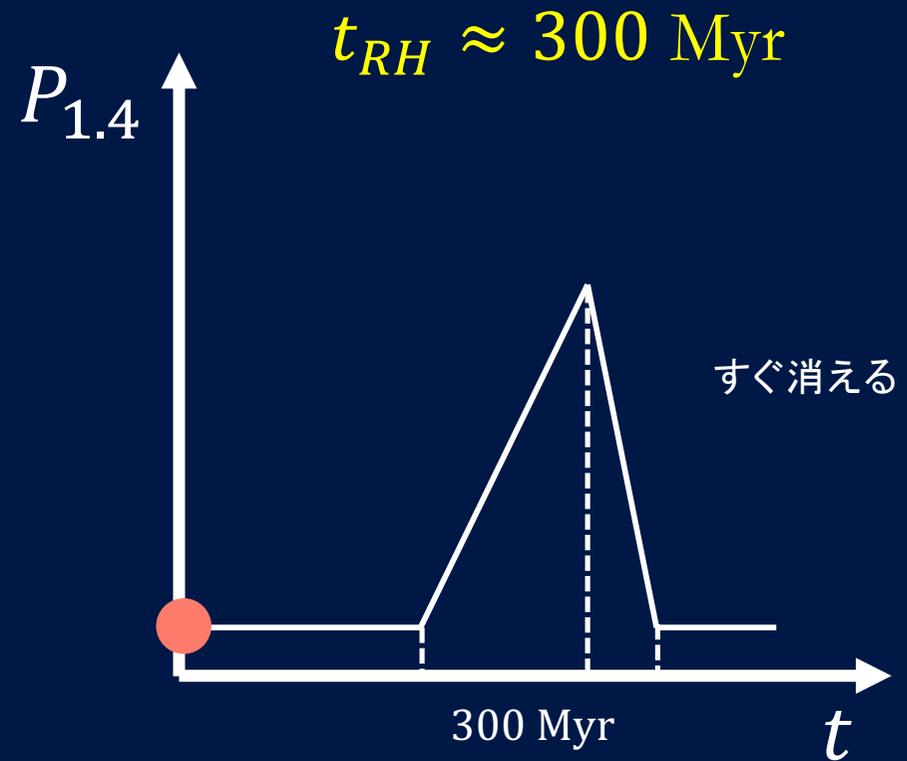
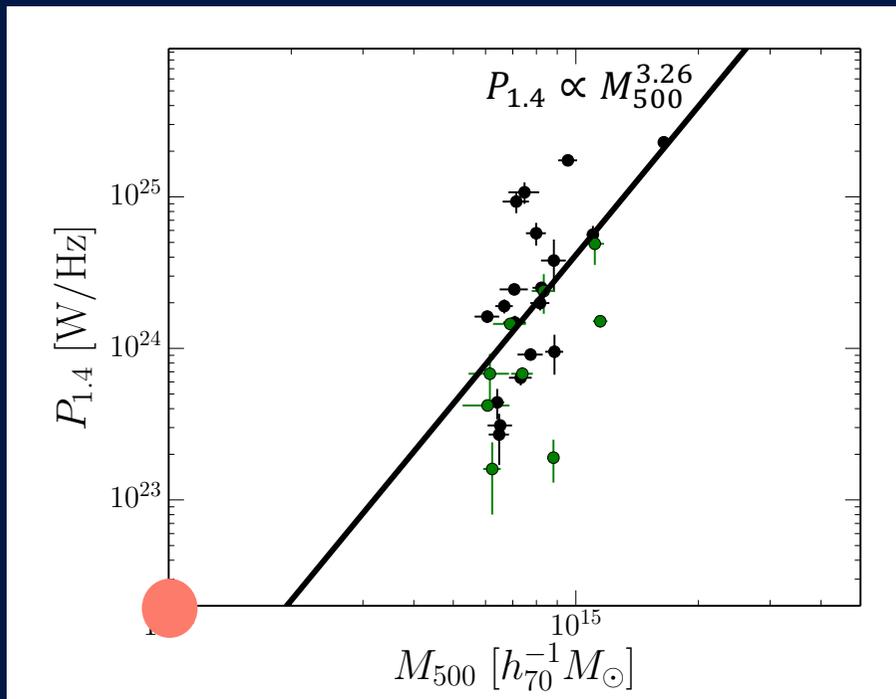
luminosity - Mass relation

secondary

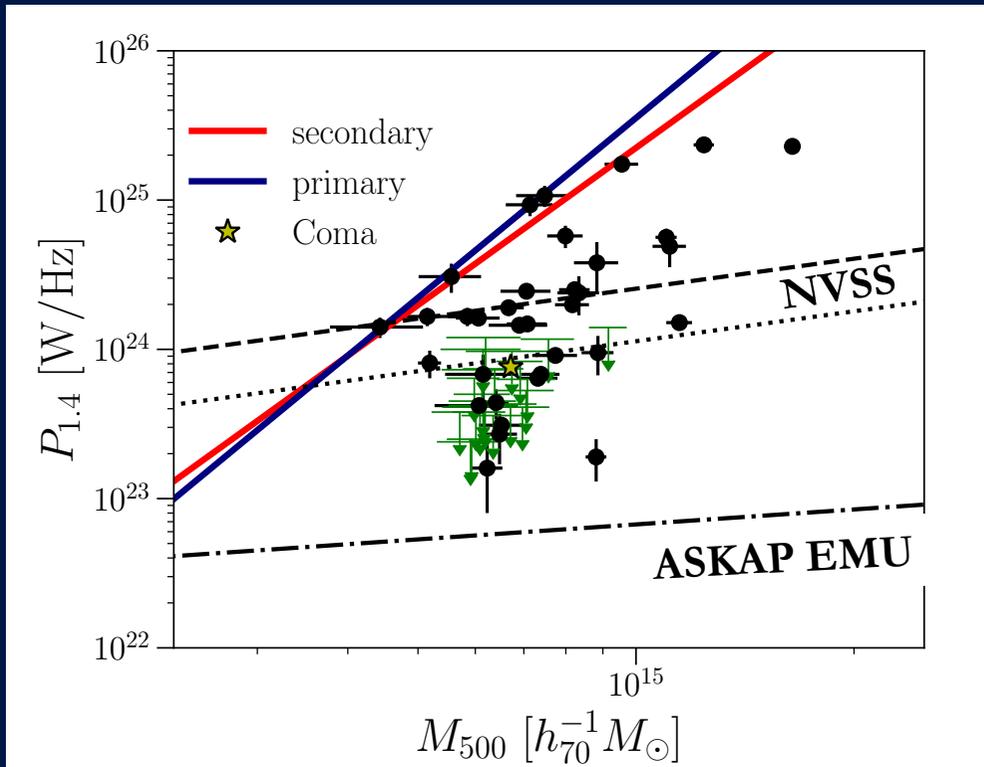


luminosity - Mass relation

primary



Peak Luminosity at the onset



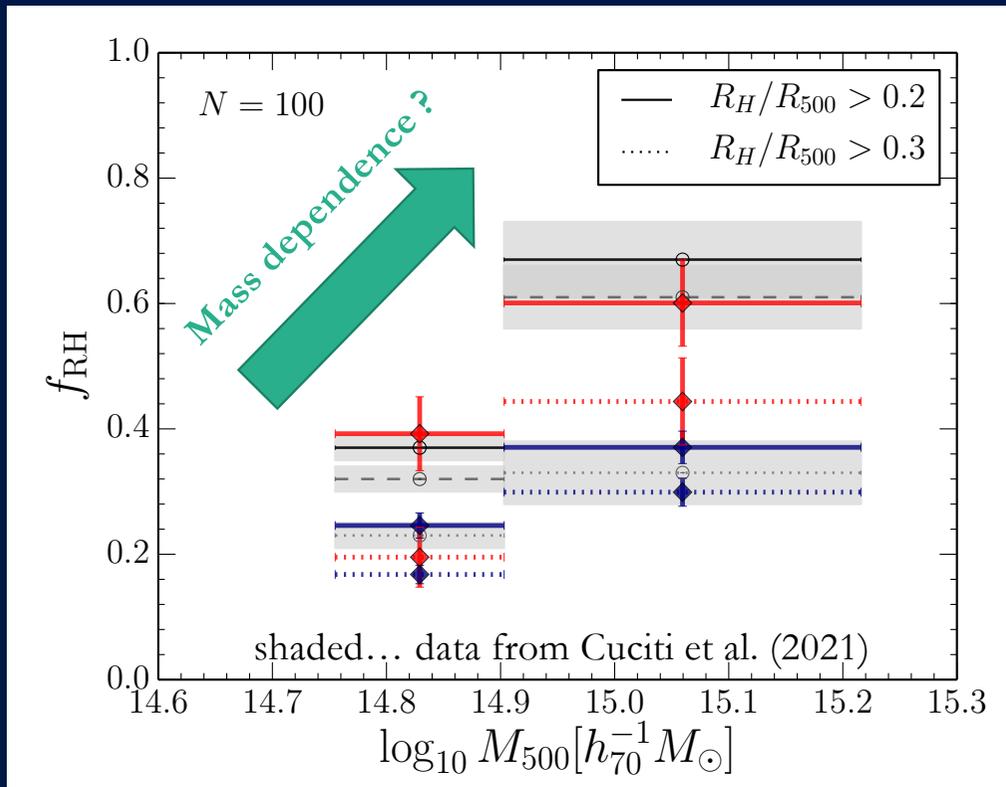
- Onset時の $P_{1.4} - M_{500}$ に power-law を仮定
(質量比の依存性は考慮していない)

$$\left(\frac{P_{1.4\text{GHz}}}{10^{24.5}\text{W/Hz}} \right) = A_{1.4} \left(\frac{M_{500}}{10^{14.9}M_{\odot}} \right)^{\alpha_M}$$

- 電波サーベイの感度 (for $z = 0.2$)
- パラメータ ... $\eta_t, A_{1.4}, \alpha_M$

	$A_{1.4}$	α_M
secondary	$10^{0.49}$	3.5
primary	$10^{0.6}$	4.0

Occurrence : $f_{RH} = \frac{RHs}{clusters}$

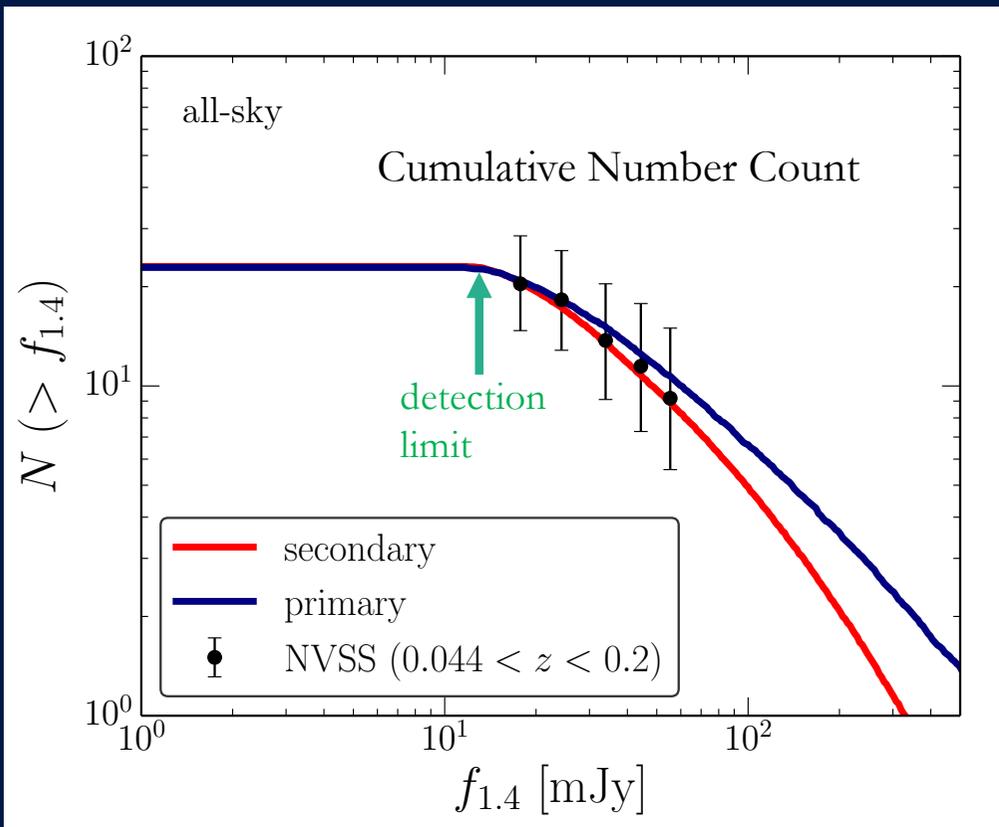


- best-fit parameters

	secondary	primary
t_{RH} [Gyr]	∞	300 Myr
κ	10^{-2}	10^{-3}
η_t	0.065	0.30

- 実は今のモデルでは、Onset条件がMassによらない
- primary ($\alpha_M = 4.0$, blue) ... 質量依存性が弱い
- secondary ($\alpha_M = 3.5$, red) ... onset後に質量が進化するので、勝手に質量依存性ができる

Occurrence : $f_{RH} = \frac{RHs}{\text{clusters}}$

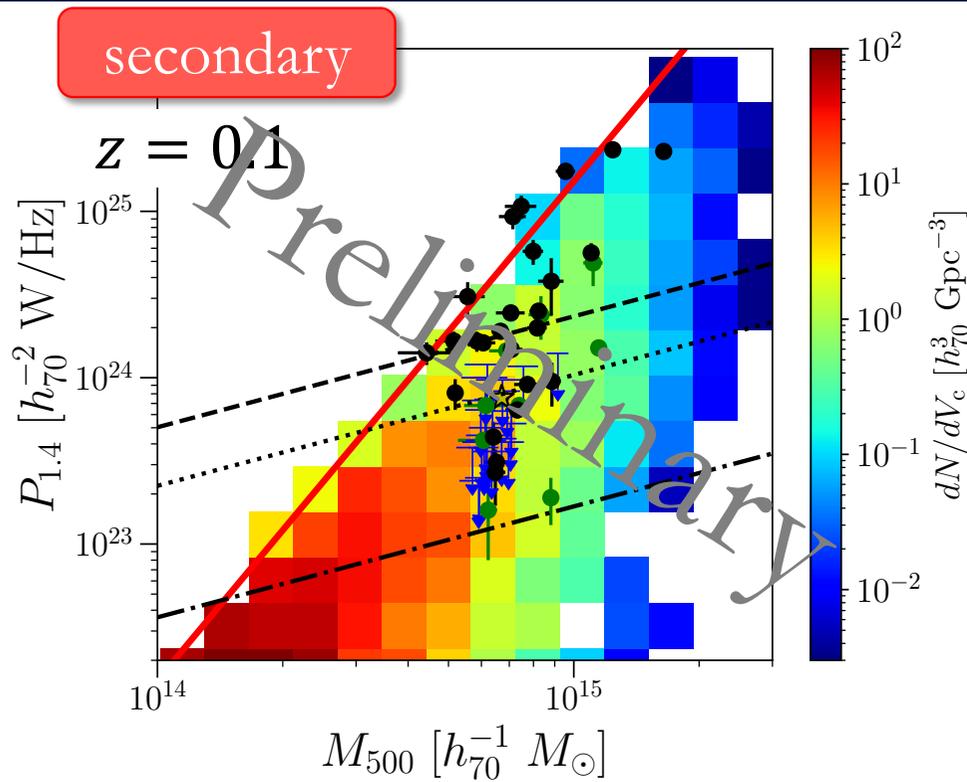


- best-fit parameters

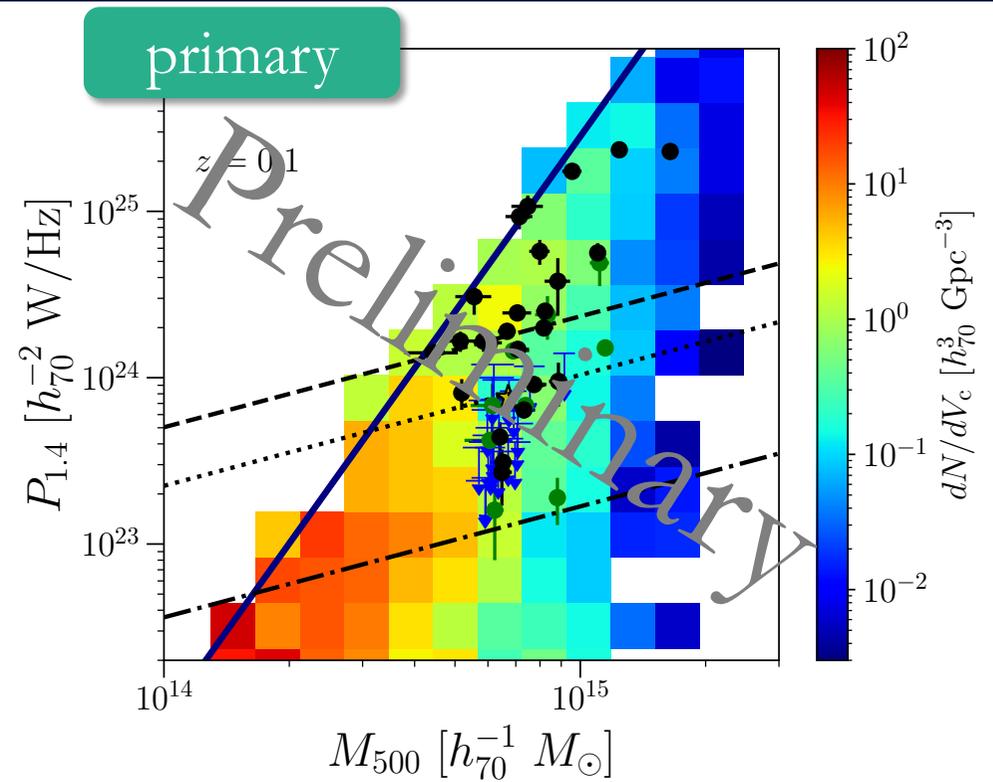
	secondary	primary
t_{RH} [Gyr]	∞	300 Myr
κ	10^{-2}	10^{-3}
η_t	0.065	0.30

- 実は今のモデルでは、Onset条件がMassによらない
- primary ($\alpha_M = 4.0$, blue) ... 質量依存性が弱い
- secondary ($\alpha_M = 3.5$, red) ... onset後に質量が進化するので、勝手に質量依存性ができる

luminosity - Mass relation

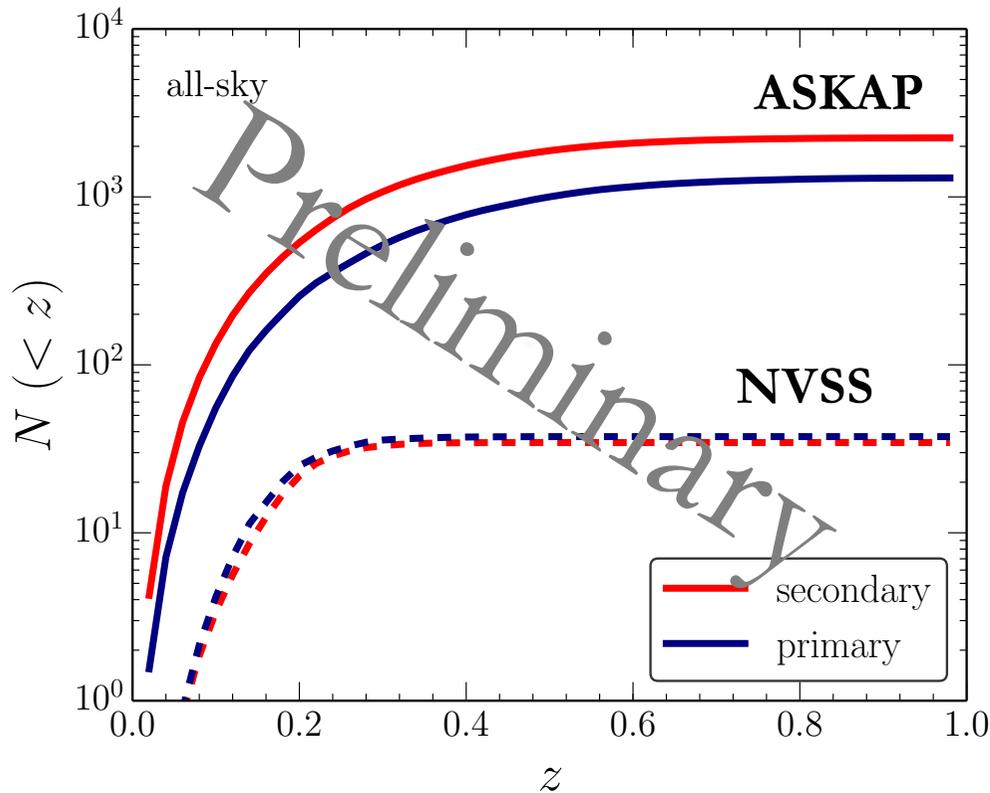


*暗い電波ハローを持つ銀河団が多数



* ~50%の銀河団は電波ハローを持たない(図中に無い)

Number Count in the ASKAP Survey



- Number Count
 ≈ 2000 RHs with the ASKAP sensitivity
 *depends on α_M
- Occurrence (at $z = 0.2$, $M \approx 10^{14} M_\odot$)
 secondary ... $f_{RH} \approx 80\%$
 primary ... $f_{RH} \approx 40\%$

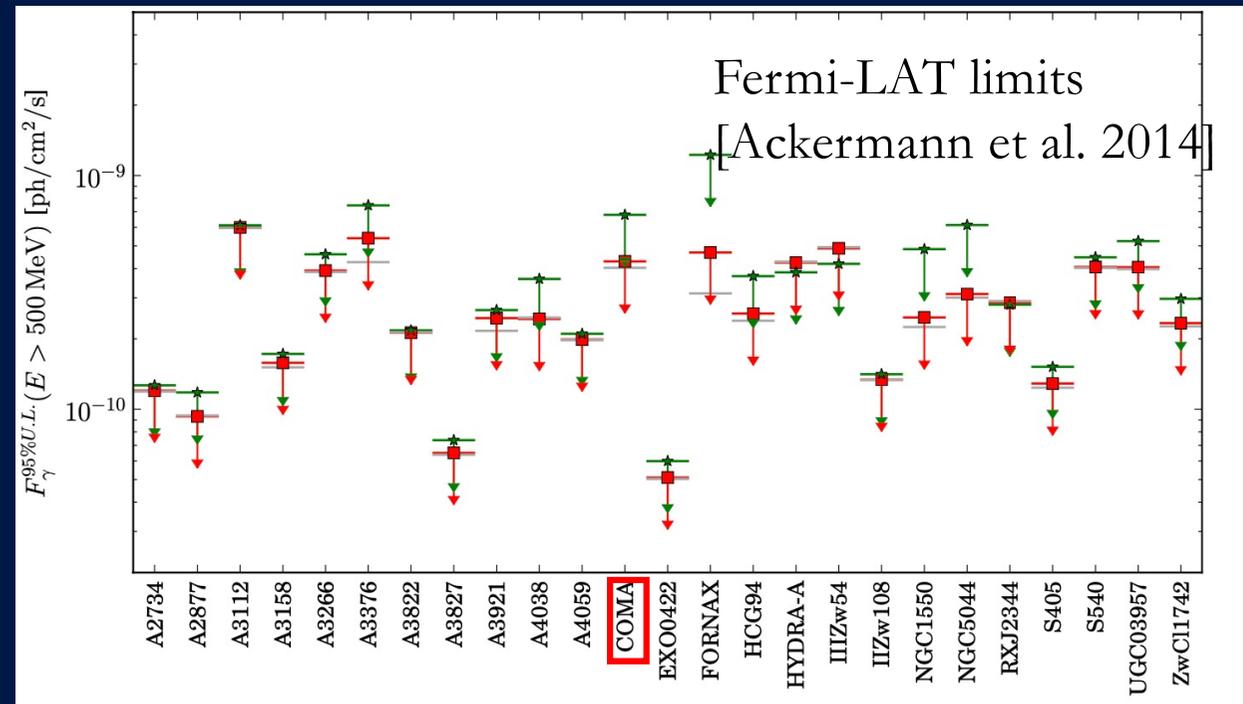
	rms noise per beam	Beam size
NVSS	450 μ Jy/beam	45 arcsec
ASKAP EMU	10 μ Jy/beam	25 arcsec

Summary

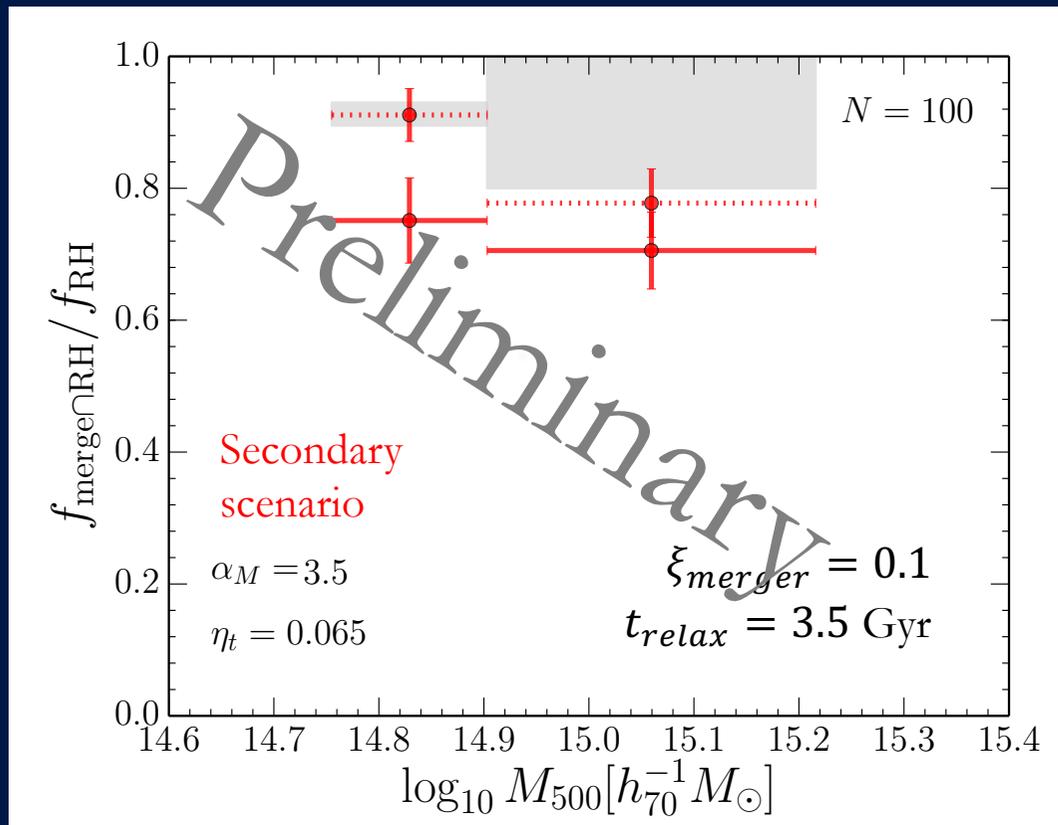
- 電波ハローの寿命 (Fokker-Planck eq.)
 - primary シナリオ : 電子の冷却時間 (≈ 300 Myr)
 - secondary シナリオ : 陽子の loss timescale (> 1 Gyr)
- 電波ハローの駆動 (Merger Tree)
 - 衝突エネルギーの $\sim 10\%$ が宇宙線加速に使われる
 - これまでの観測結果は、secondary シナリオ ($t_{RH} = \infty$) でも説明可
 - secondary ... 質量依存性が強い
 - primary ... 質量依存性が弱い
 - 将来観測で ~ 2000 個の発見が期待される

Caveat : ガンマ線上限との比較が必要

- **secondary scenario**では再加速後のガンマ線が非常に明るい
- Coma cluster ... **再加速途中**であると仮定し、upper limitを回避した
- 他の銀河団からも観測されないこと(右図)を確認する必要がある
- なお、diffuse gamma-ray backgroundへの寄与は十分小さい
[Nishiwaki et al. 2021]



“RHが衝突系に見つかること”と矛盾しないか



- RHのうち、衝突系にあるものの割合

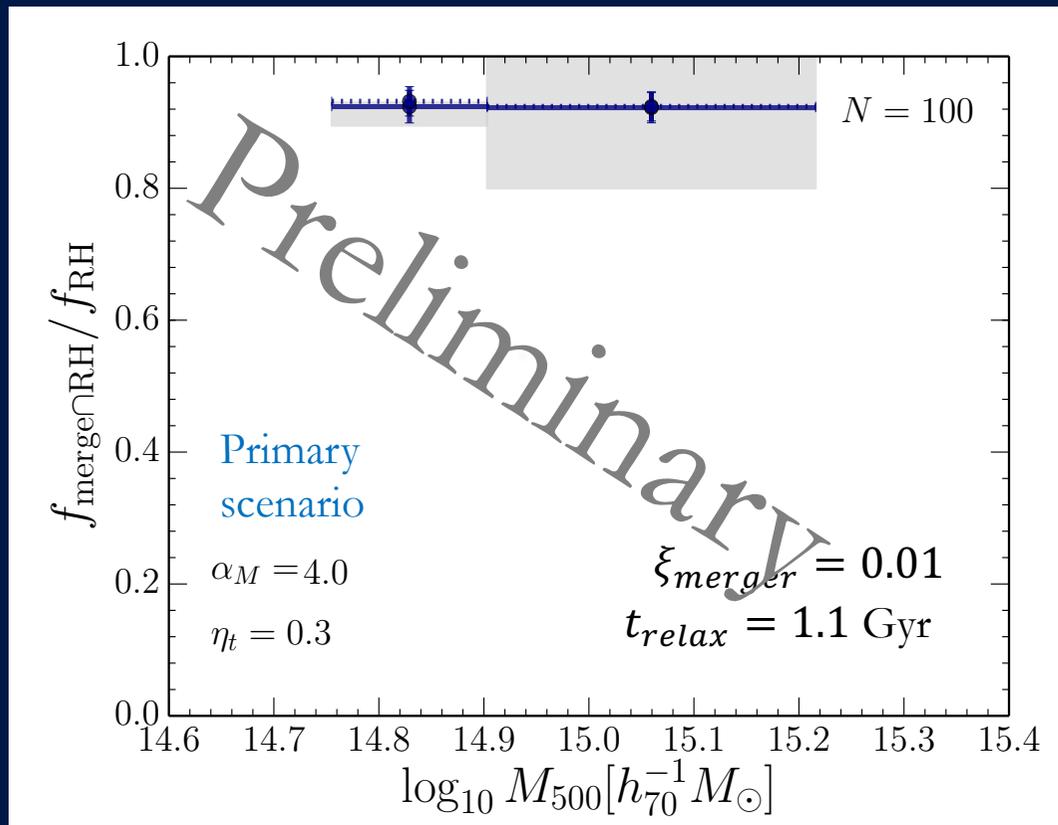
$$\frac{\#(\text{merger} \cap \text{RH})}{\#(\text{RH})}$$

観測では~90%

- 衝突系は全体の~60%
($\xi_{\text{merger}} = 0.1, t_{\text{relax}} = 3.5 \text{ Gyr}$ で説明可)

*“衝突系”の基準にもよる
(X-ray morphology)

“RHが衝突系に見つかること”と矛盾しないか



- RHのうち、衝突系にあるものの割合

$$\frac{\#(merger \cap RH)}{\#(RH)}$$

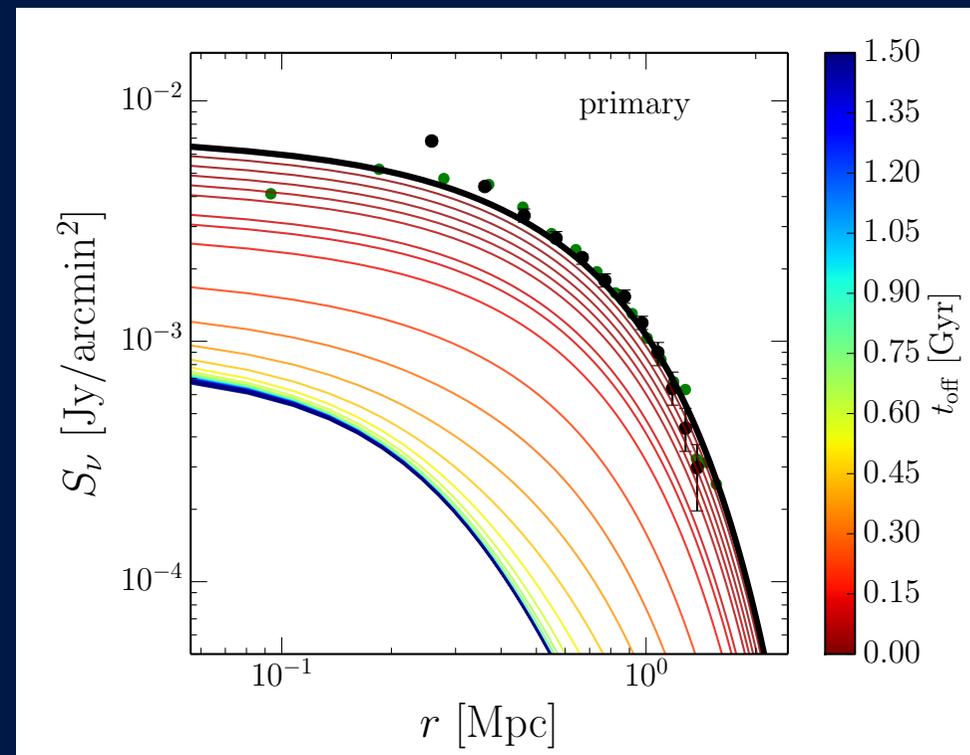
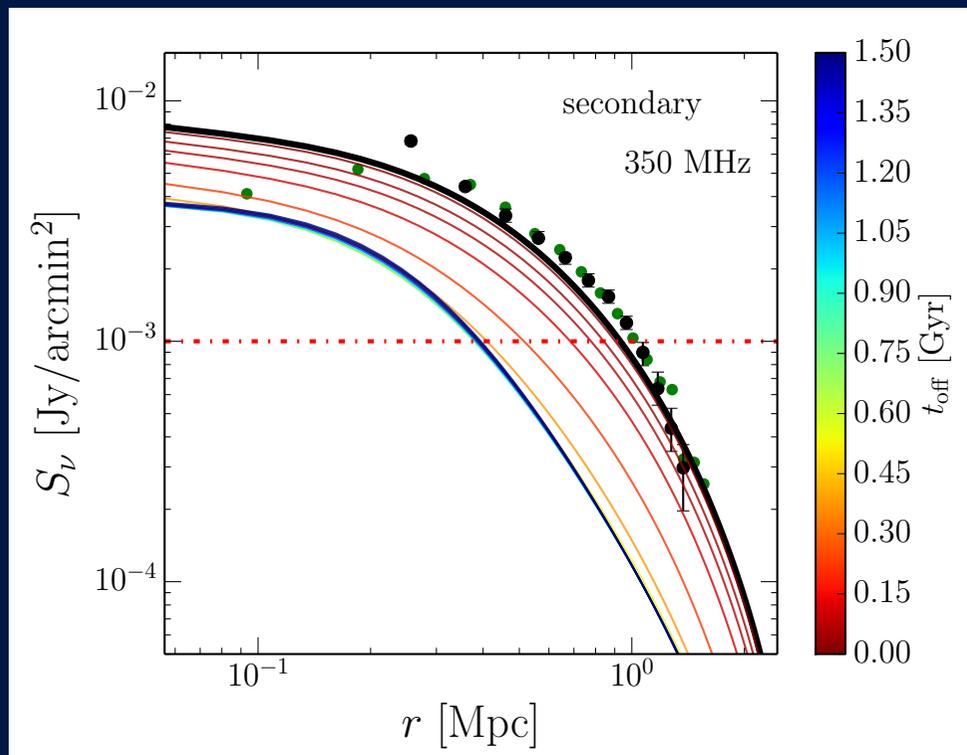
観測では~90%

- 衝突系は全体の~60%

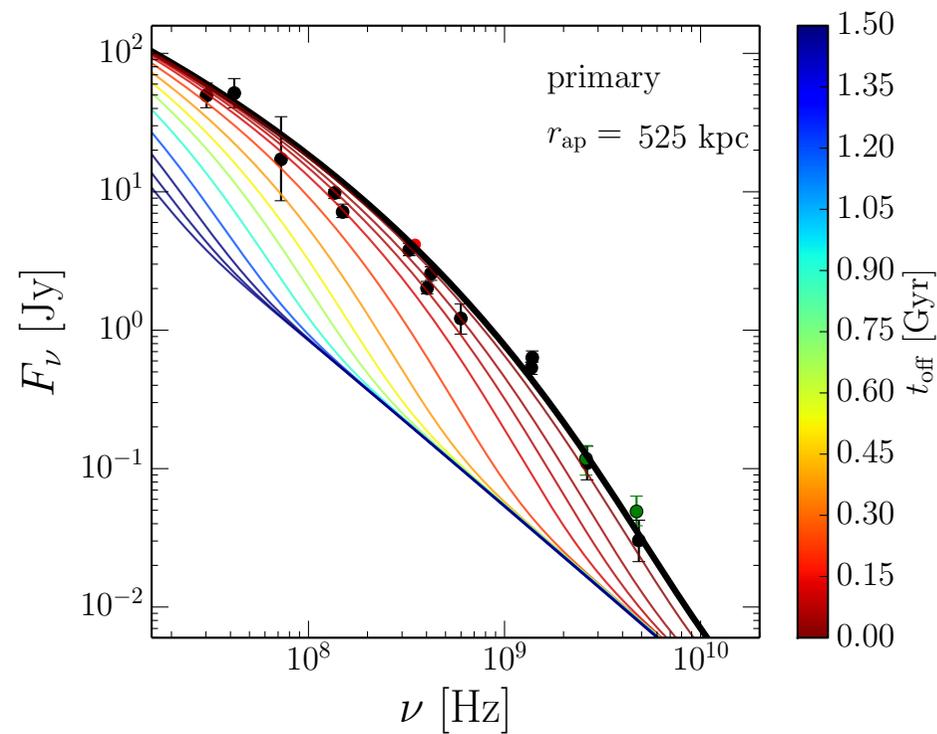
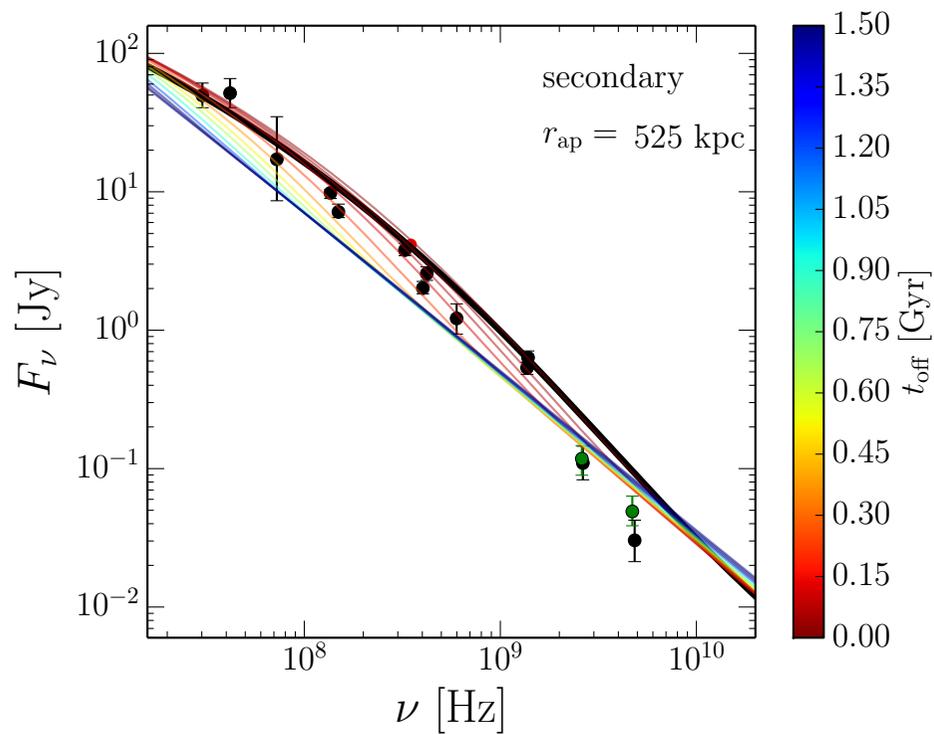
($\xi_{merger} = 0.01, t_{relax} = 1.1 \text{ Gyr}$ で説明可)

	ξ_{merger}	t_{relax}
secondary	0.1	3.5 Gyr
primary	0.01	1.1 Gyr

輝度分布の時間進化 (350 MHz)



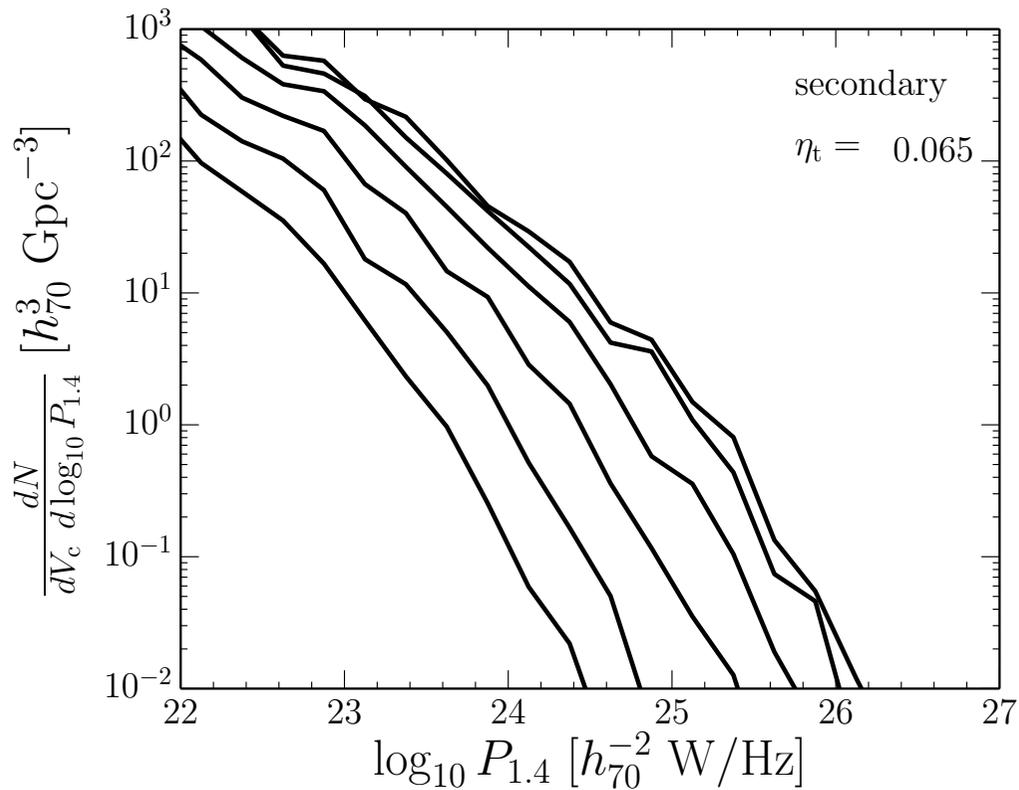
フラックスの時間進化



RHLF

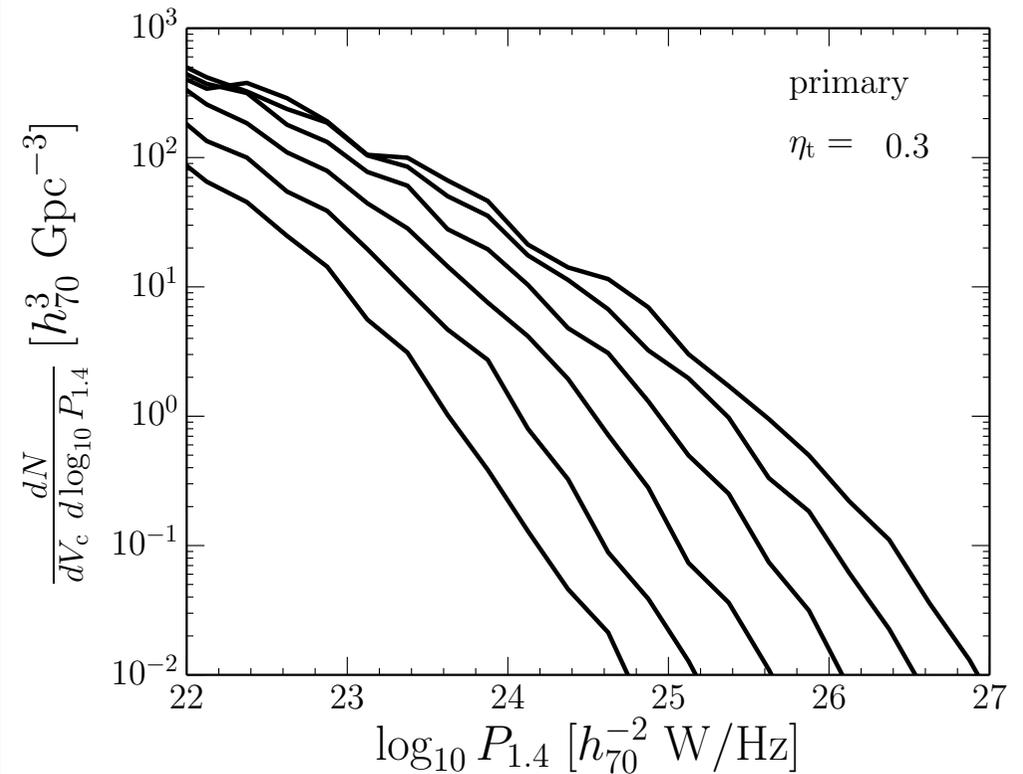
secondary

$$P_{1.4} \propto M_{500}^{3.5} \rightarrow M_{500} \propto P_{1.4}^{0.285}$$



primary

$$P_{1.4} \propto M_{500}^{4.0} \rightarrow M_{500} \propto P_{1.4}^{0.25}$$



Occurrence in ASKAP sensitivity

