

Interactions between galaxies and
plasmas in clusters of galaxies

銀河団における
銀河とプラズマの相互作用

牧島一夫 (Kazuo Makishima)

東大 Kavli IPMU 連携研究員

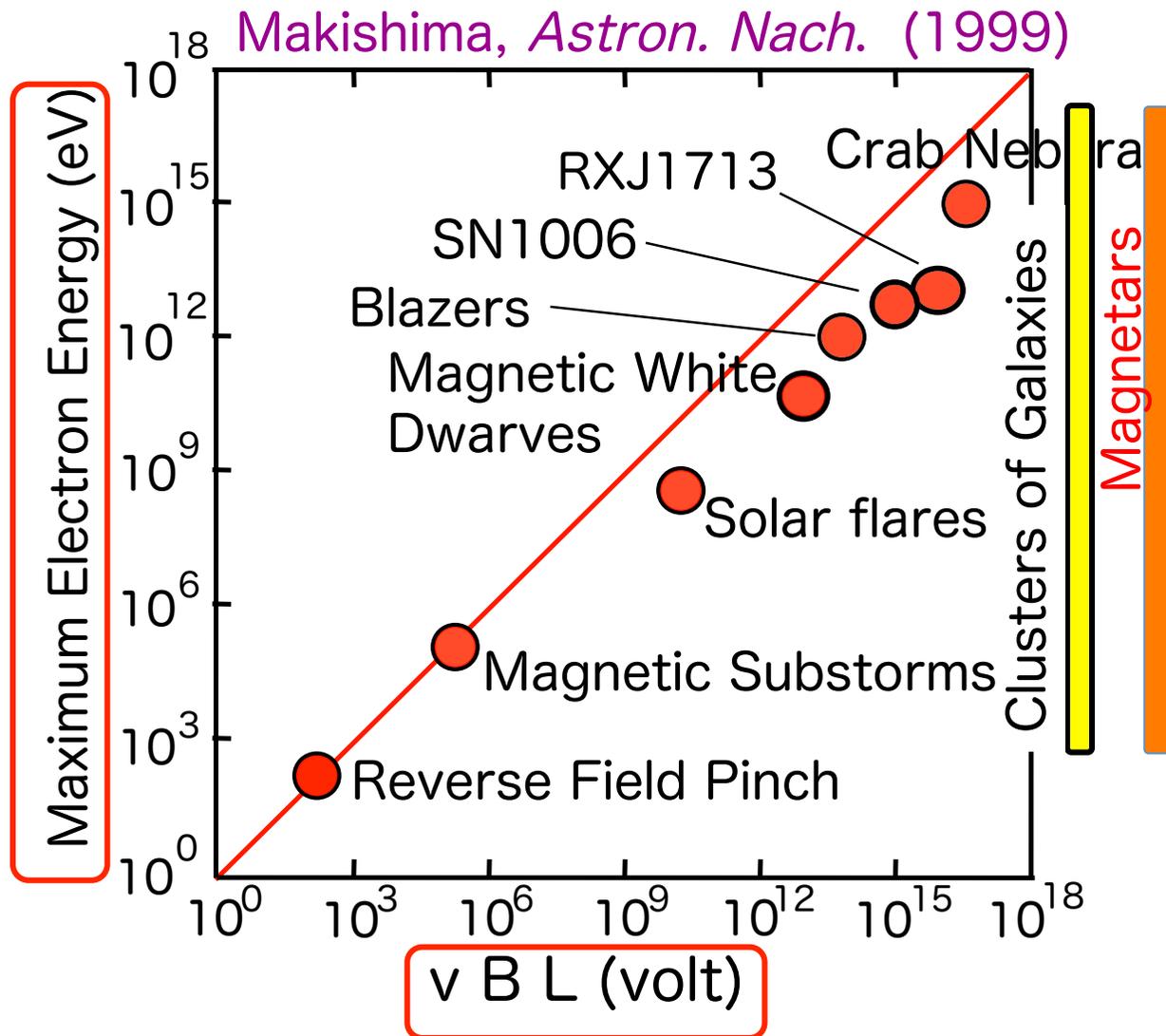
東大 理学系 名誉教授

理化学研究所OB

構造形成が完了後の宇宙における、
最大規模 energy flow の発見のお話

1. 宇宙・加速・プラズマ

~Scaling for Cosmic Acceleration Sites~



v = velocity
 B = mag. field
 L = linear size
of each system

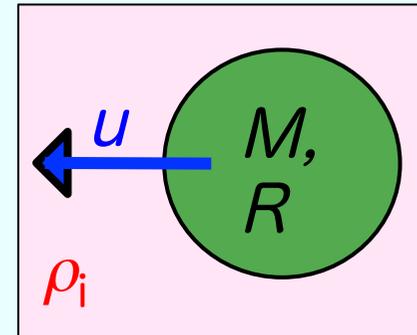
非統計的な電磁場加速が効くかも。
 雷雲中で ~ 20 MeVまで電子が静電加速。制動放射ガンマ線、陽電子、核ガンマ線を生成 (GROWTH project, Enoto+17, *Nature* など)。

2. Clusters of Galaxies 銀河団

- ◇ 銀河団energeticsに関する2つの大きな謎：
 - 銀河団の高温プラズマ (Intra Cluster Medium = ICM) は放射冷却するのに、予言されたCooling flowは存在しなかった (Makishima+01)。冷却を止める加熱機構は？
 - 多くの銀河団で、粒子加速が起きている。加速機構は？
- ◇ Conventionalな候補は、(i) 銀河団merger、(ii) 中心AGNの活動、(iii) メンバー銀河内での高エネ現象 (SNなど)。
- ◇ But: メンバー銀河たちは、その数倍もの質量をもつICMの中を、遷音速で運動し続けている。プラズマ物理的には、銀河 (conductor) とICMが相互作用しないはずがない。

3. Galaxy vs. ICM Interaction

密度 ρ_i のガス中を、半径 R 質量 M の物体が速度 u で運動。ガスの抵抗で物体が運動エネルギーを失う時間スケールは、 $M_i = (4\pi R^3/3)\rho_i$ 、ガス粒子の散乱確率を $0 \leq \eta \leq 1$ とすると、



$$\tau \sim (M/M_i)(R/u)/4\eta$$

$$\sim (0.3 t_H/\eta) (n/3e-4)^{-1} (u/1e8)^{-1} (M/1e10) (R/10\text{kpc})^{-2}$$

(Sarazin 88より改変)。

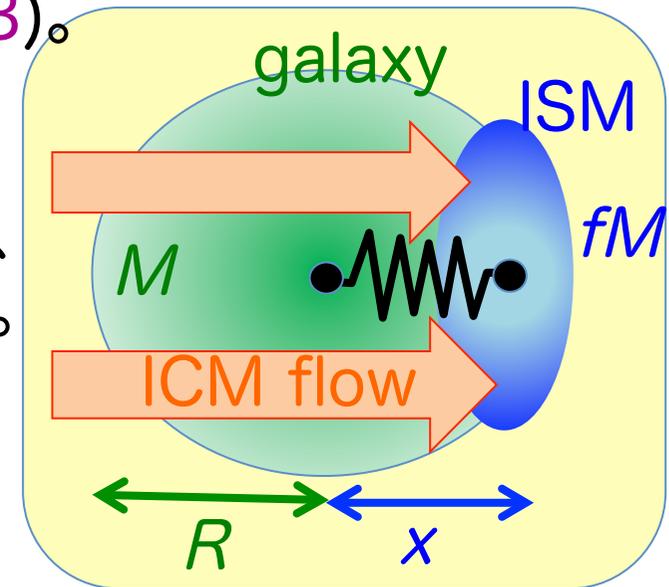
- ◇ $\eta \ll 1$ でない限り、Hubble timeの間に銀河は力学的エネルギーの大部分をICMに受け渡し、ポテンシャル底へ落下。
- ◇ 得られる力学的光度 $L \sim 1 \times 10^{44} \eta (M_{\text{tot}}/1e14) \text{ erg/s}$ は、cool coreからのX線放射 ($10^{43} \sim 44$) を賄うのに十分。
- ◇ 多くの方は $\eta \ll 0.1$ と思っているが、たぶんそうではない。少なくとも次の2つのモードで、相互作用が起きる。

(1) Dynamical friction

重い天体による、ガス粒子の重力的散乱。大質量な銀河ほど η が大で、 t_H の間に、そこそこ効く (Gu+13)。

(2) 銀河ガス成分 (ISM) を介した相互作用
ICMの動圧によりISMが下流に x だけ変位、それが重力により、星+DMを下流に引く。
ISM質量を $f \cdot M$ ($0 < f \ll 1$) とすれば、

$$x/R \sim (M_i u^2) (GM^2/R)^{-1} / f = O(1)$$



◇ if 動圧が過大 or f が過小 $\rightarrow x \gg R$, ISMは剥ぎ取られて、相互作用は止まる。多数のstrippingの観測例あり。

◇ それまでは f によらず銀河はICMとフル ($\eta \sim 1$) に相互作用!

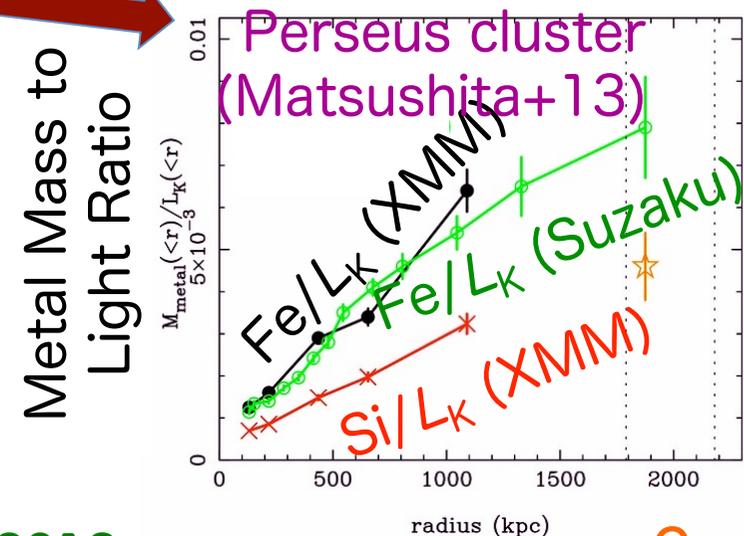
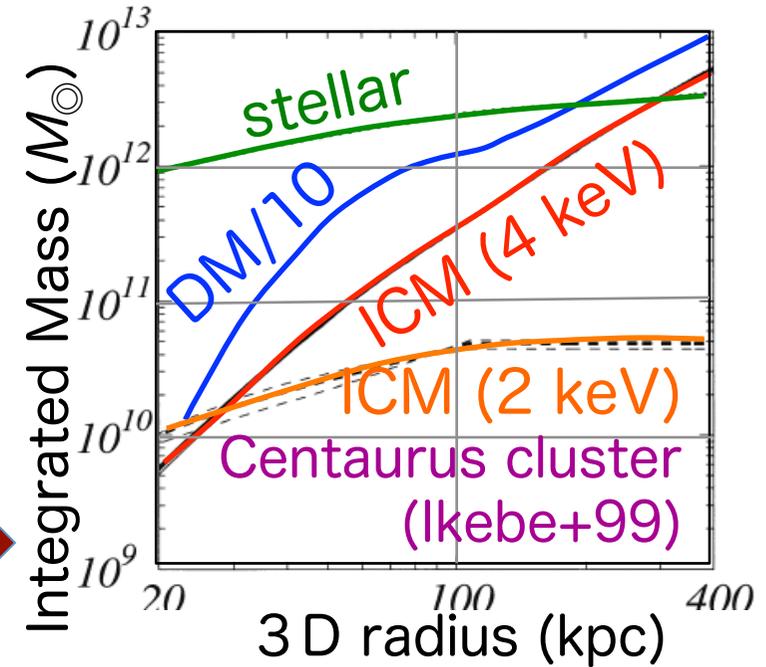
(3) Plasma physical interactions between ICM and stars
(? to be studied)

5. Indirect Observational Evidence

近傍銀河団 ($z \sim 0$) では：

- ◇ 銀河団には、未知の普遍的なICM加熱機構が存在 (Makishima+00)。
- ◇ 空間分布は 銀河 < DM < ICM で、冷却えるはずの ICM が最も広がり、銀河は最も中心に集中。
- ◇ ICM 中の metal も、現在の銀河より広がって分布し (Kawaharada+09, Matsushita+13), metallicity は周辺まで一様 (Werner+13)。過去には周辺まで銀河が居た証拠。

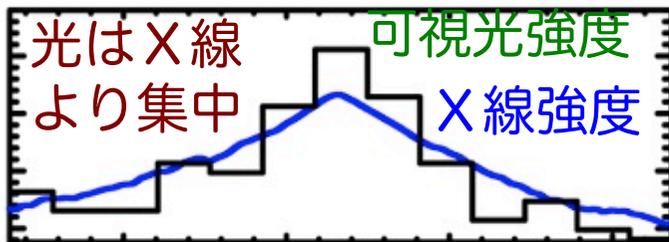
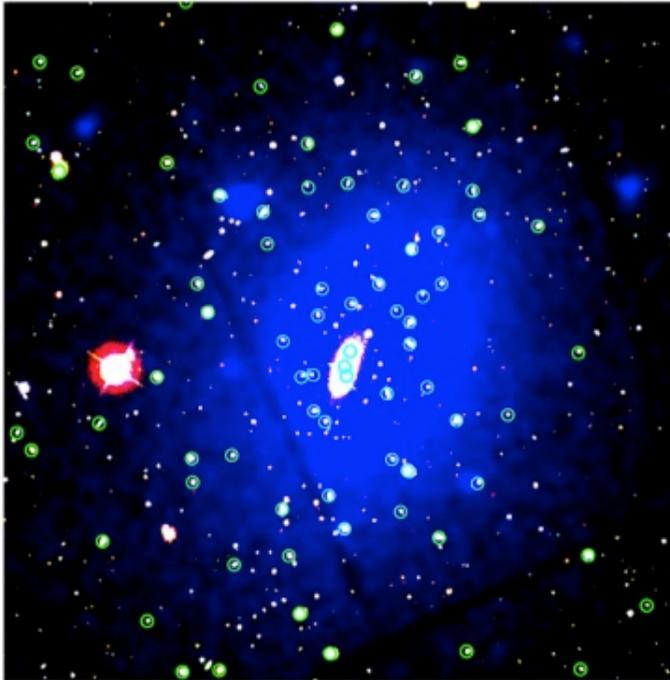
では遠方銀河団 ではどうか？



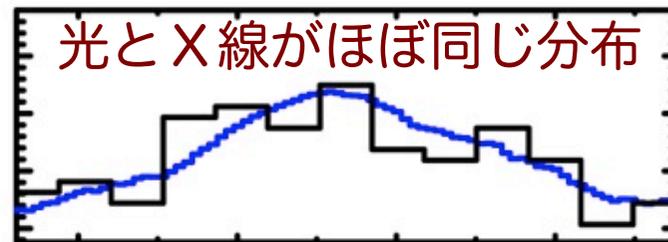
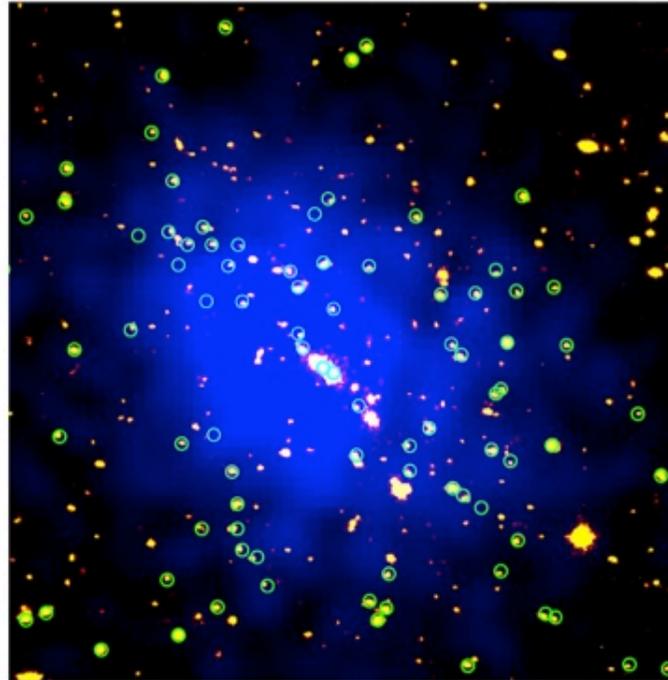
6. Direct Observational Evidence

$z \sim 1$ から $z \sim 0$ にかけて、銀河団の「X線と可視光での広がり
の比」の進化を観測的に探求した決定打 (Gu+13, Gu+16)。

$z \approx 0.1$ の銀河団



$z \approx 0.5$ の銀河団



可視光画像にX線の強度を青で重ねた。認定されたメンバー銀河は丸印。

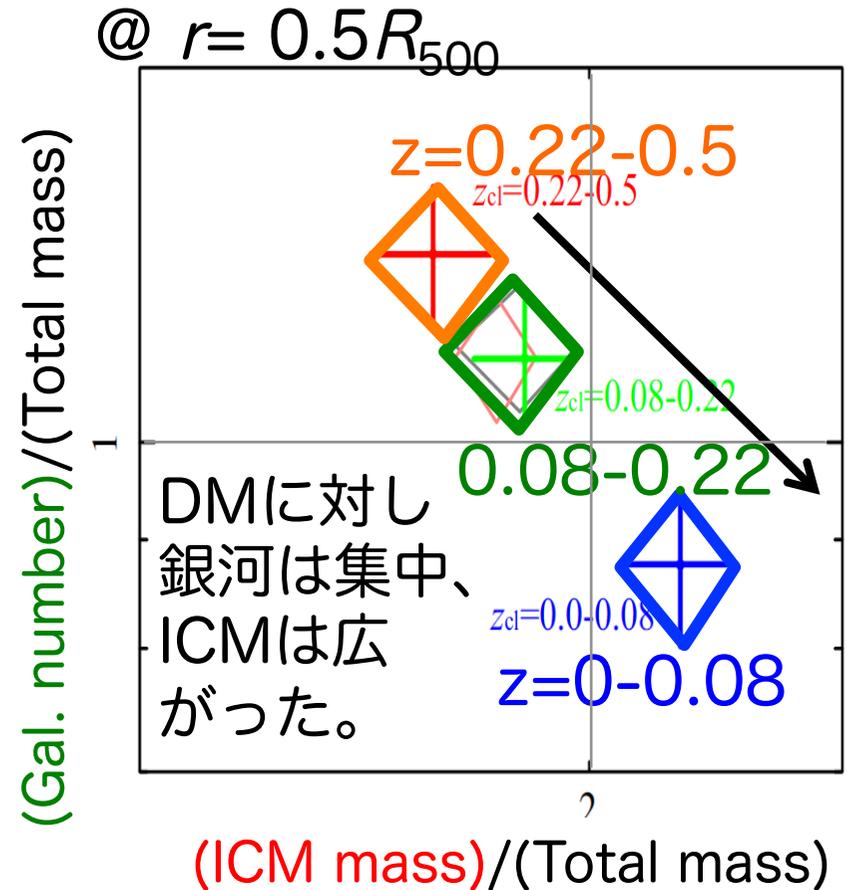
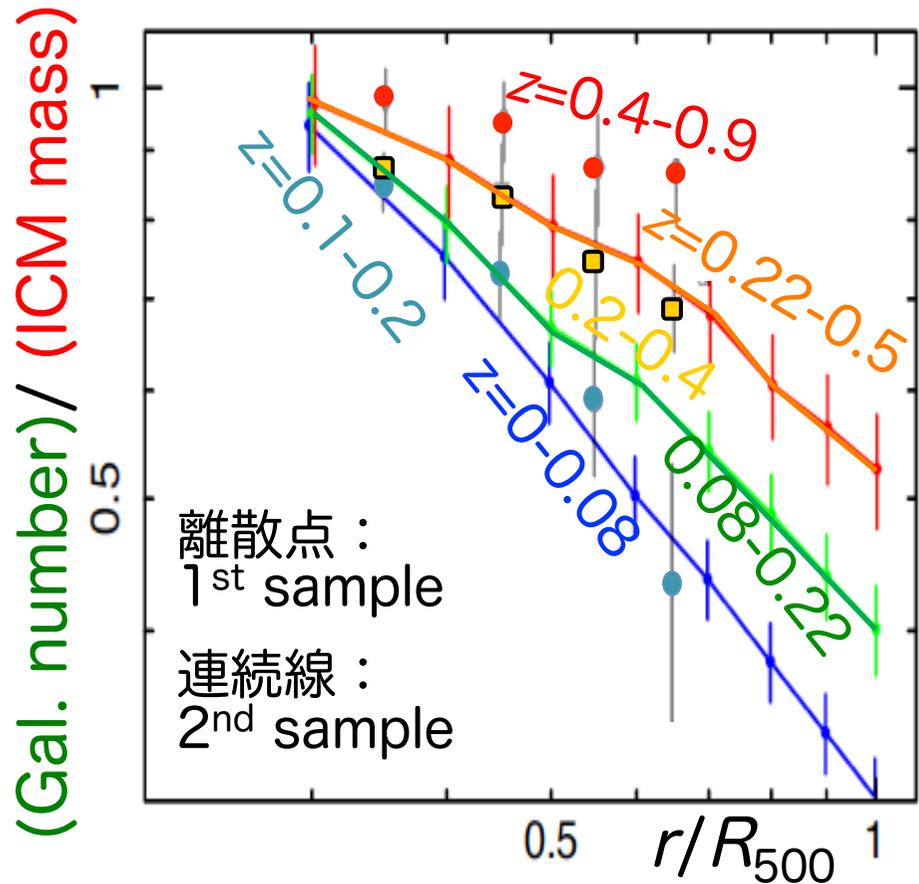
可視光のfore- & backgroundは慎重に推定。

昔は銀河たちが周辺まで分布していた!

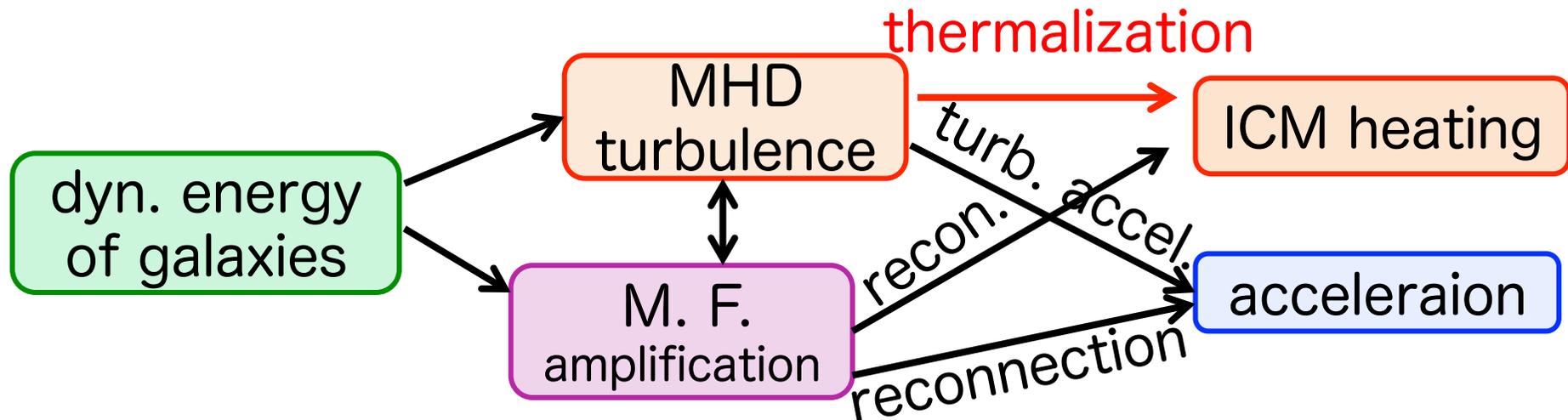
色々な z の銀河団で、**銀河個数**と**ICM mass** (共に2次元積分)の比を、半径の関数として算出。**予想した進化の検出に成功!**

1st sample : $z = 0.1 \sim 0.9$, 34 銀河団 (Gu+13)

2nd sample : $z = 0 \sim 0.5$, 340 銀河団 (Gu+16)



7. Dissipation of galaxy's energy



銀河はICM中にMHD乱流を生成 (Makishima+01)。その視線方向rms速度 σ は、銀河の視線速度分散 $v \sim 1000 \text{ km/s}$ に対し

$$M_{\text{ICM}} \sigma^2 \sim \alpha M_{\text{gal}} v^2 : \alpha \text{ は乱流が担うエネルギーの割合}$$

$$\rightarrow \sigma \sim v \times \sqrt{\alpha (M_{\text{gal}}/M_{\text{ICM}})} \sim \sqrt{\alpha} \times 500 \text{ km/s.}$$

Gu+2016からの数値的評価もほぼ同じ値。ゆえに $\alpha \sim 0.1$ (効率 η も含め) なら、「ひとみ」によるPerseus銀河団での測定値 $\sigma = 160 \text{ km/s}$ (Takahashi+Hitomi collab. 2016)が説明可。

8. Discussion & Conclusion

- ◇ 銀河からICMへのエネルギー輸送は、構造形成が(ほぼ)完了した後の宇宙での、最大規模の energy flow。
- ◇ これは研究の一大空白地帯だった。天体物理学における、プラズマ物理学的な視点の不足がその主因か。
- ◇ Makishima *et al. PASJ* (2001) での着想以来、20年近くかけて(9本のD論)、その実証に成功した。
 - 「あすか」「すざく」などによるX線観測
 - 銀河落下の検証 (Gu *et al. ApJ* 2013 & *ApJ* 2016)
 - 「ひとみ」衛星による Perseus銀河団の乱流測定
- ◇ 今後さまざまな展開が期待される。e.g.,
 - XRISM衛星：銀河によるICMの引きずり効果の実測
 - 乱流とreconnectionによる in-situ 粒子加速
 - 銀河-ICM相互作用--> 銀河の「環境効果」の主因