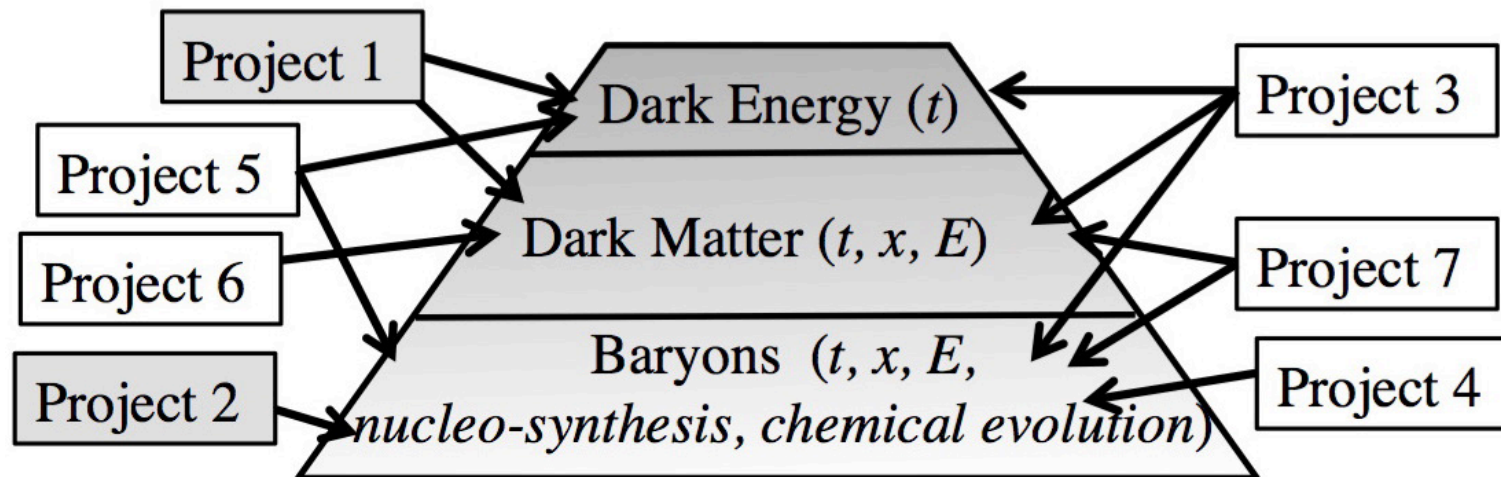


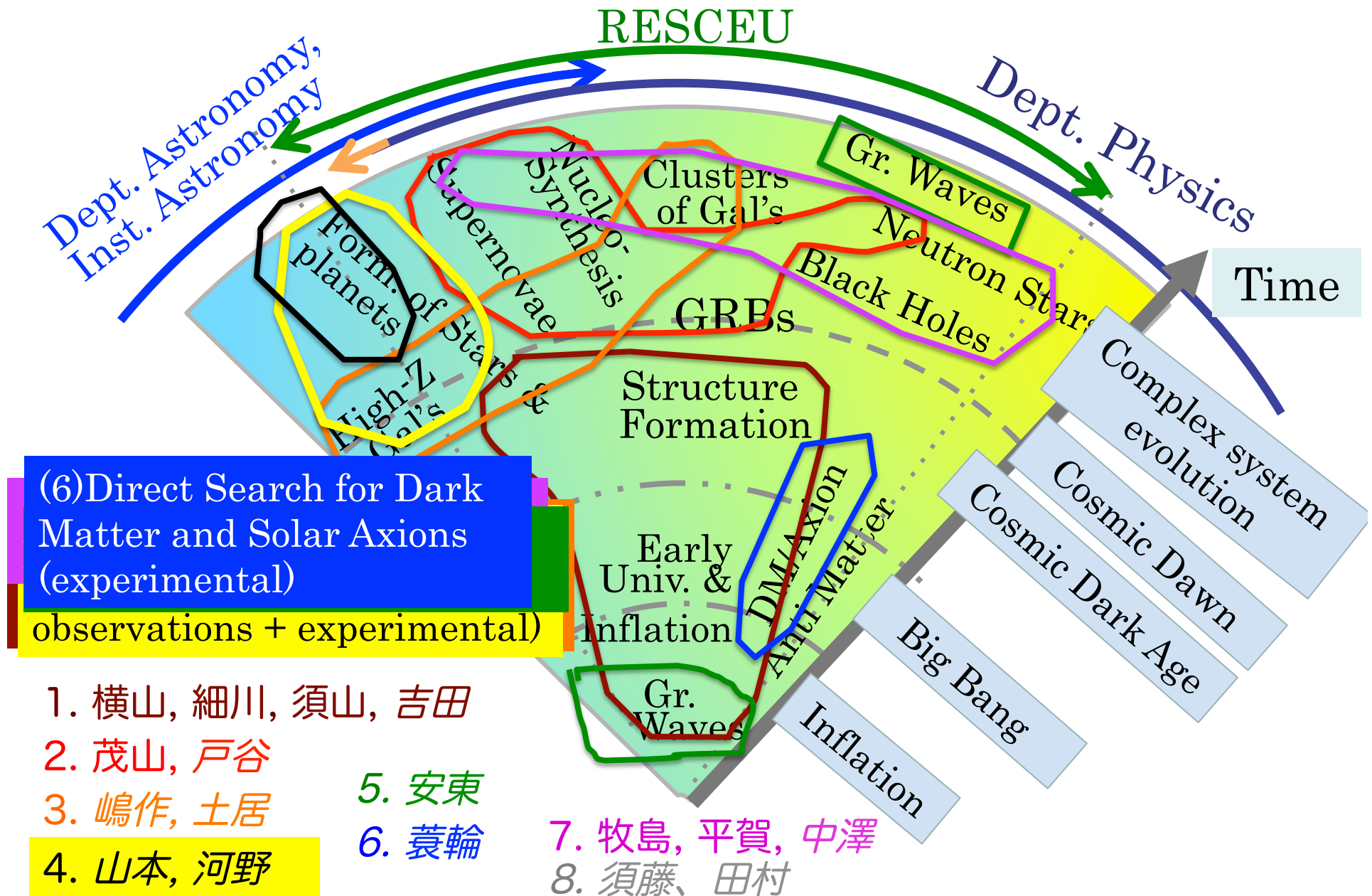
What is *RESCEU* (Research Center for the Early Universe; ビッグバン宇宙国際研究センター) ?

K. Makishima, Director

- ✧ Established in April 1999, and run on university budget.
- ✧ The successor to a more informal organization with the same name, selected in 1995 by the MEXT Center-of-Excellence (COE) program.
- ✧ To understand the universe through three domains, namely, **baryons**, **dark matter**, and dark energy.



The *RESCEU* Projects



銀河団における銀河とプラズマの 宇宙論スケールでの相互作用

牧島一夫^{a,b,c}、Gu Liyi (顧力意)^b

a) 東大/理学系/物理

b) 東大/ビッグバンセンター

c) 理研MAXIチーム



$z=0.1\sim 0.9$ の34個と、 $z=0\sim 0.5$ の250個の銀河団を、可視光とX線とで観測した結果、メンバー銀河が宇宙年齢かけ、銀河団の中心へ落下してきたことを突き止めた。これは運動する銀河たちが高温プラズマと磁気流体的に相互作用する結果と考えられる。それに伴い大量のエネルギーが輸送されていることになる。

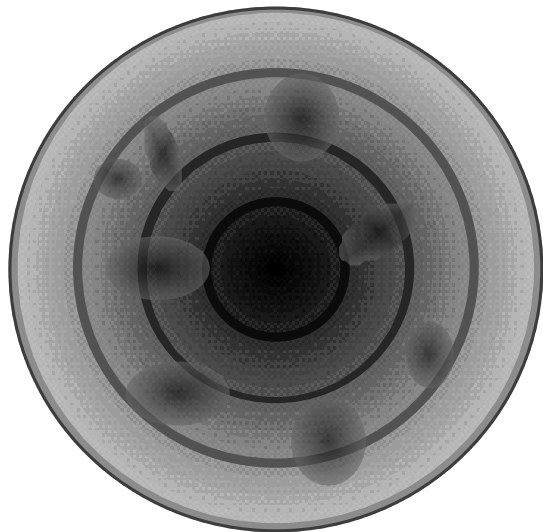
Gu+ *ApJ* 767,
157 (2013)

牧島+, 天文月報
2013/12

1. 銀河団 (CLG) の主要3成分

《暗黒物質》

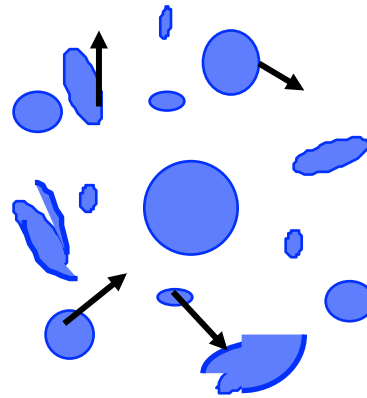
- ◆ 全質量の~85%
- ◆ 銀河に対応したサブ構造あり



2014/3/24

《銀河》

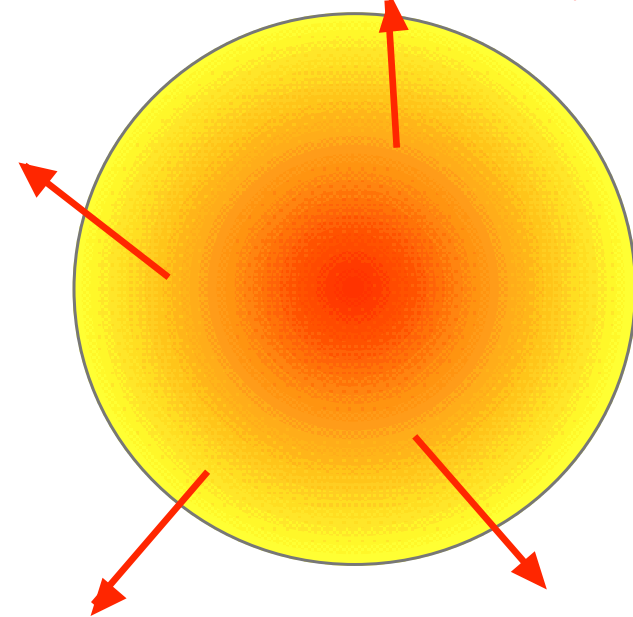
- ◆ 全質量の~3%
- ◆ 遷音速 (数百 km/s) でランダム運動
- ◆ 最も中心に集中



SKA workshop at UT

《ICM, 高温プラズマ》

- ◆ 全質量の~12%
- ◆ $kT_e = 2 \sim 15$ keV
- ◆ X線のみで検出
- ◆ 重力閉込。しかし最も広がっている
- ◆ H + He + 重元素

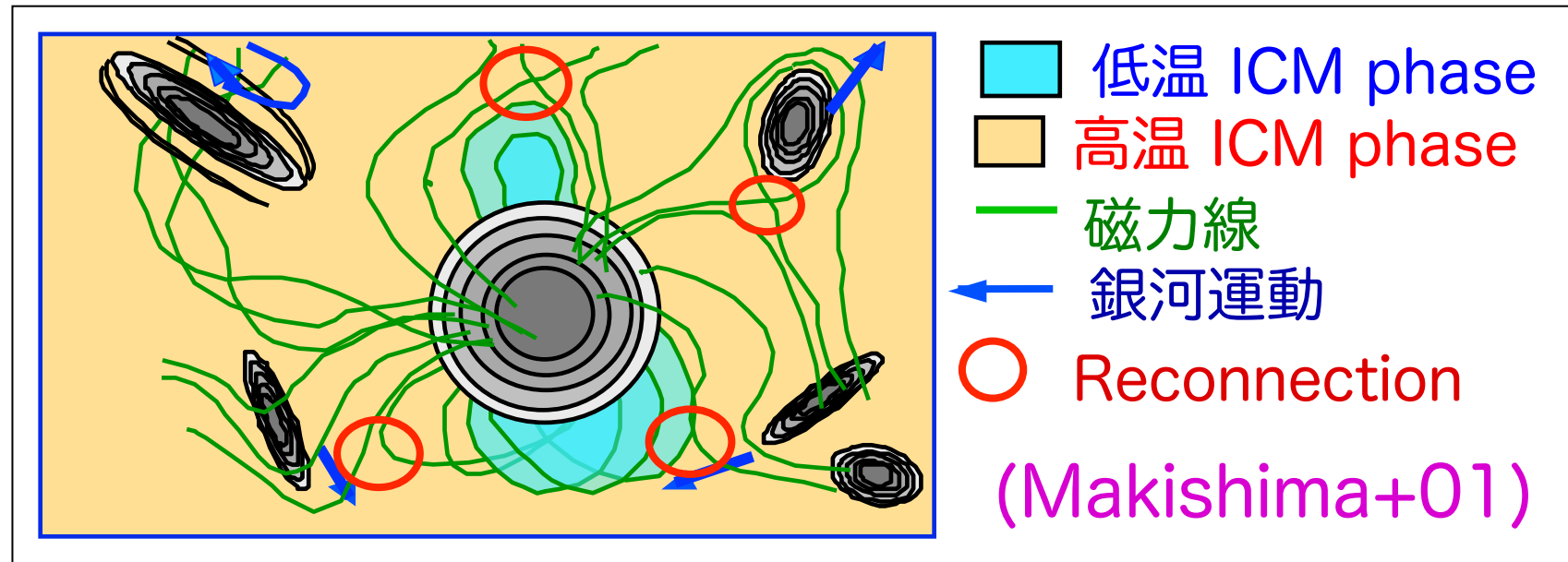


4

2. CLGに関する一連の謎

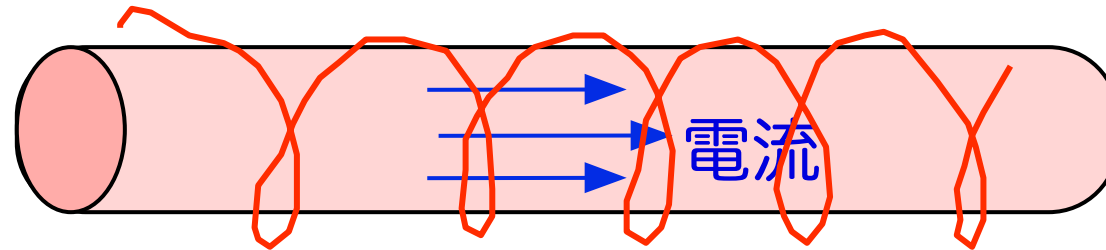
- Q1: 近傍CLGでは、なぜ銀河たちはDMやICMより強く中心に集中するのか？ ~~中心部で銀河形成が盛んだった？~~
- Q2: ICMの周辺まで一様に分布する大量の重元素は、銀河からどう輸送されたのか？ ~~外向きの物質輸送には、巨大なエネルギーが必要。~~
- Q3: 何がCooling Flow (CF) を阻止し、さらにICMをDMより広範囲に分布させているか？
- ICMは宇宙年齢で冷えCFを形成するとされた (Fabian+94).
 - 「あすか」による観測でCFの存在を否定 (Makishima+01).
 - 何がICMを加熱しているか？ 超新星では1桁も不足。
- Q4: ICM中に見られる温度勾配は、どうやって維持される？
CFは存在しないが、銀河団中心部では普遍的に、ICMの温度が周辺の $\sim 1/2$ に低下。単なる放射冷却では、熱的に不安定。

3. 我々の仮説



- cD銀河は大きな磁気圏をもち、低温ICMをその内部に閉じ込める(水色)。これがCFと誤認された。周囲とは磁力線で断熱。
- 開いた磁力線部(橙)は高温ICMで満たされ、熱伝導で等温。
- 他の銀河はビリアル速度で運動。ICMから抵抗を受け、磁気再結合などにより、力学的エネルギーと大量の重元素をICMに渡す。
- 銀河たちが力学的エネルギーのfractionを宇宙年齢かけてICMに渡せば、ICMの放射冷却を阻止するのに十分な熱源となる。

プラズマ中では放っておいても磁場ができる



円筒状プラズマのポロイダル β

$$\beta^{-1} \equiv (\text{磁気energy}) / (\text{熱energy}) = (v/w)^2 \cdot (\omega t)^2$$

(Makishima, *Plasma Phys. Control. Fusion* 39, A15; 1997)

- v : 電子とイオンの軸方向の速度差
- w : 電子の熱速度
- ω : プラズマ周波数 ; e.g. ~ 1 kHz for $n=10^{-3}$ cm $^{-3}$
- t : 円筒のLight crossing時間 ; e.g. 10^3 s (~ 1 au)

たとえば $v/w=10^{-6}$ でも $\beta \sim 1$

→電子とイオンの質量の非対称性により、すべての大規模宇宙プラズマは磁化されている

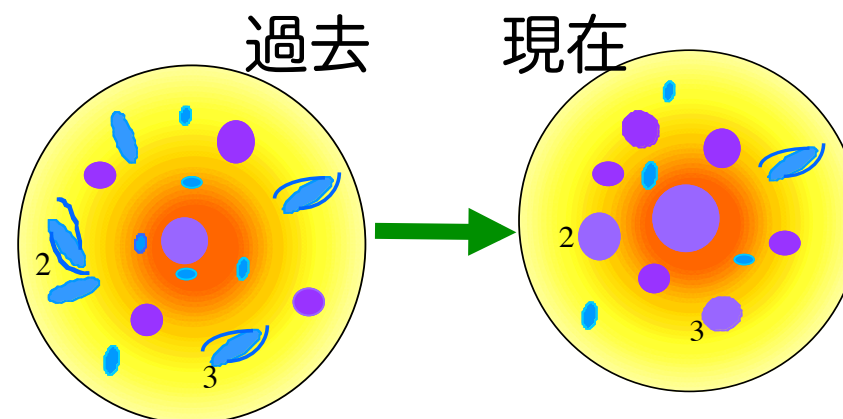
4. 仮説検証への道

(4-1) 予備的な成果

- CLGの中心ではICMが高温/低温の2相からなり(Takahashi +09)、低温相の重元素組成が高いことを発見 (Gu+12)。
- 銀河が、ICM中の重元素より中心集中することを発見 (Kawaharada+09)。銀河が重元素をICMに撒き散らしつつ落下した。

(4-2) 詰めの作業

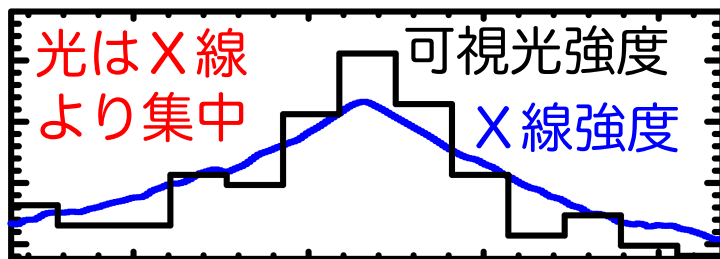
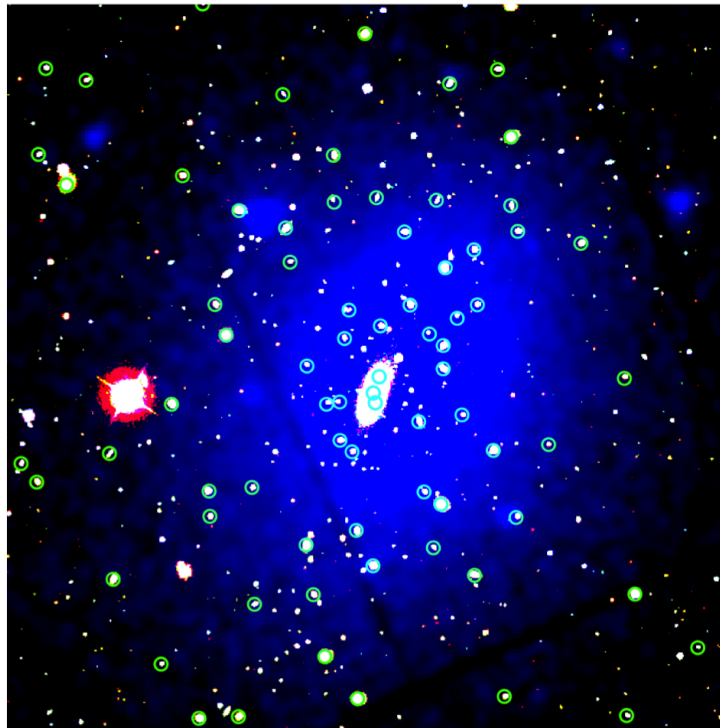
- 遠方CLGに比べ、近傍CLGでは、銀河がより中心に集中することを観測から実証する。
- 可視光データに加え、X線データでICMの分布も測り基準に使う。
- サンプルI: $z=0.11\sim 0.89$ の34個のCLG。UH88望遠鏡で多色測光観測を実施(稲田直久が主導)。X線は公開データを利用。
- サンプルII: 中国研究者の協力でSDSSの2次処理データを入手。 $z=0\sim 0.5$ の250個のCLG。



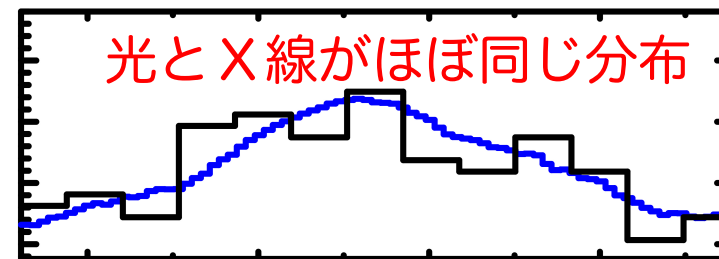
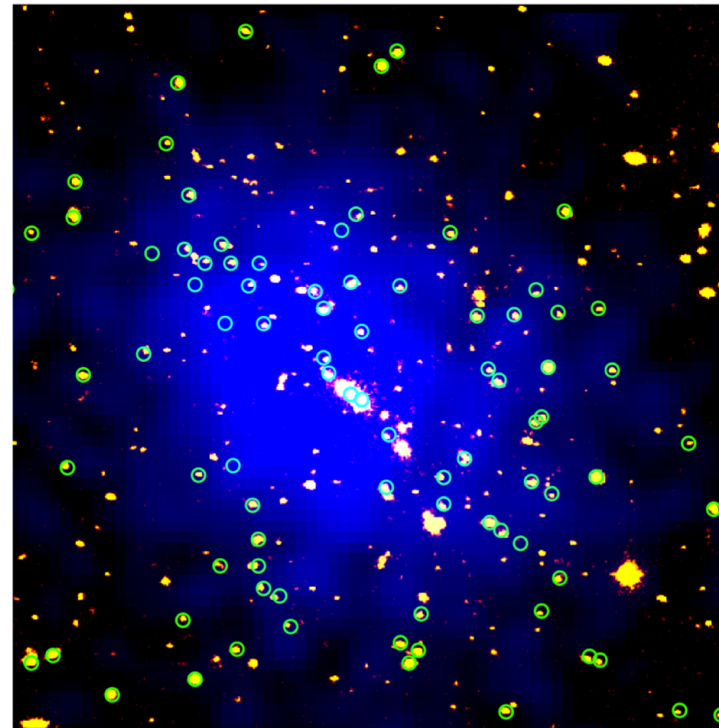
5. 観測結果 (5-1) 観測天体の例

光画像にX線の強度を青で重ね、認定されたメンバー銀河には丸印。

$z \sim 0.1$ の銀河団



$z \sim 0.5$ の銀河団

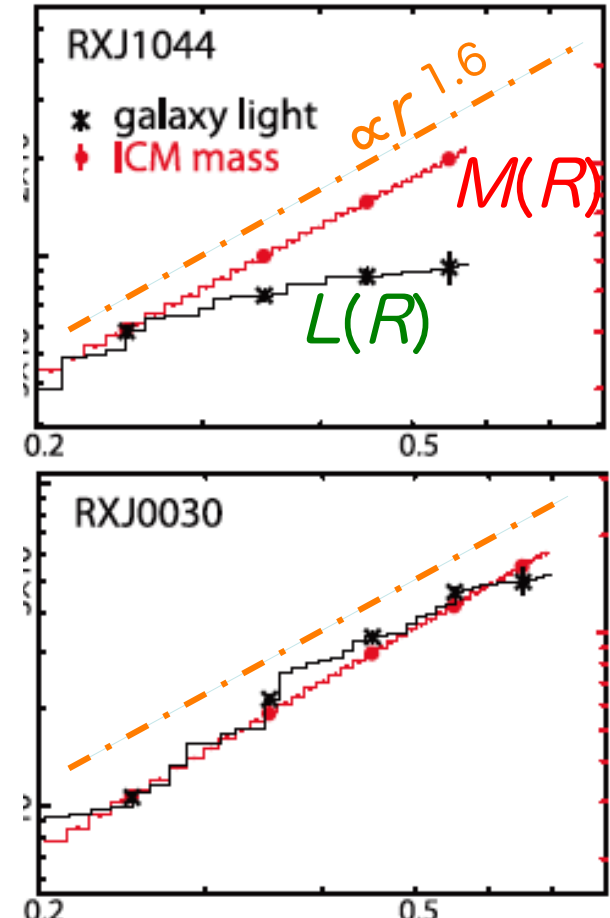
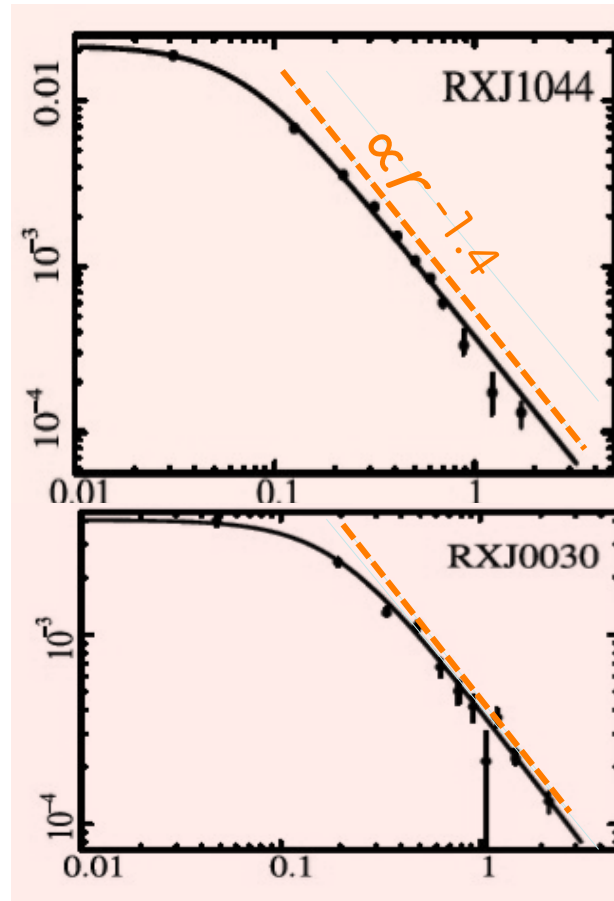
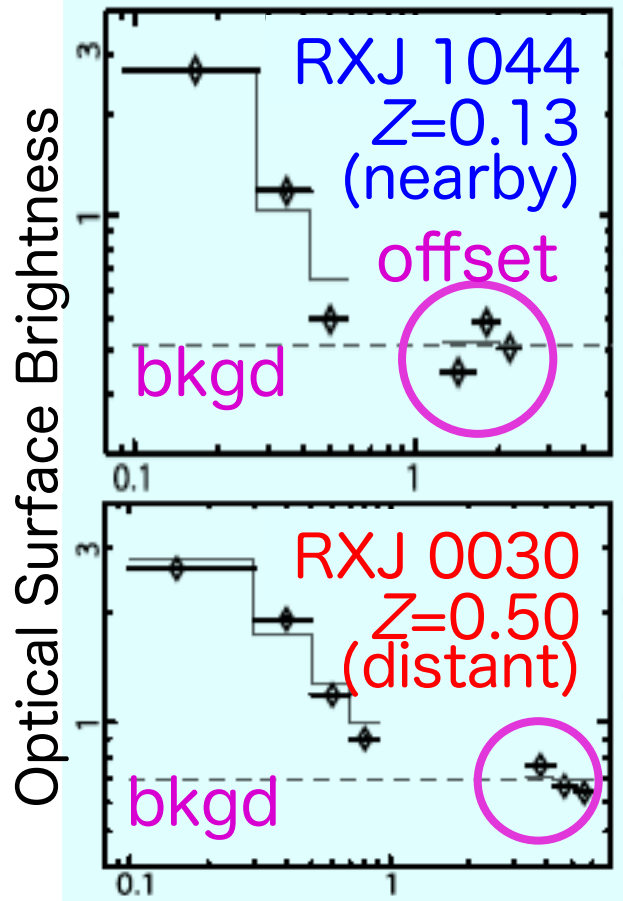


(5-2) 可視光とX線のデータの比較例

★ 可視光 Data
(incl. Background)

◆ ICM 密度分布
from X-ray Data

Integrated
2D 質量分布



2014/3/24

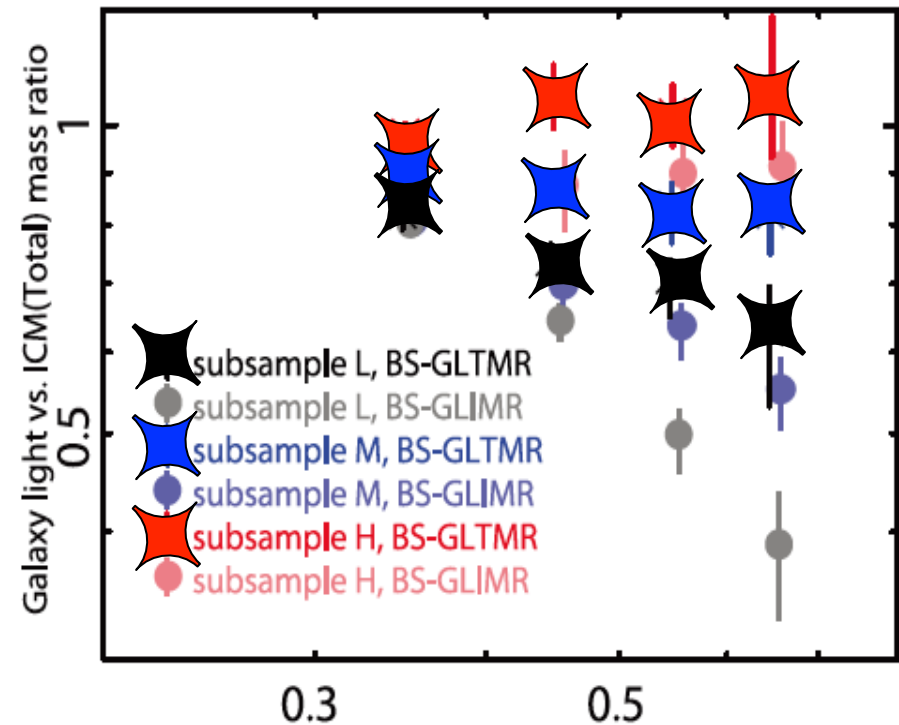
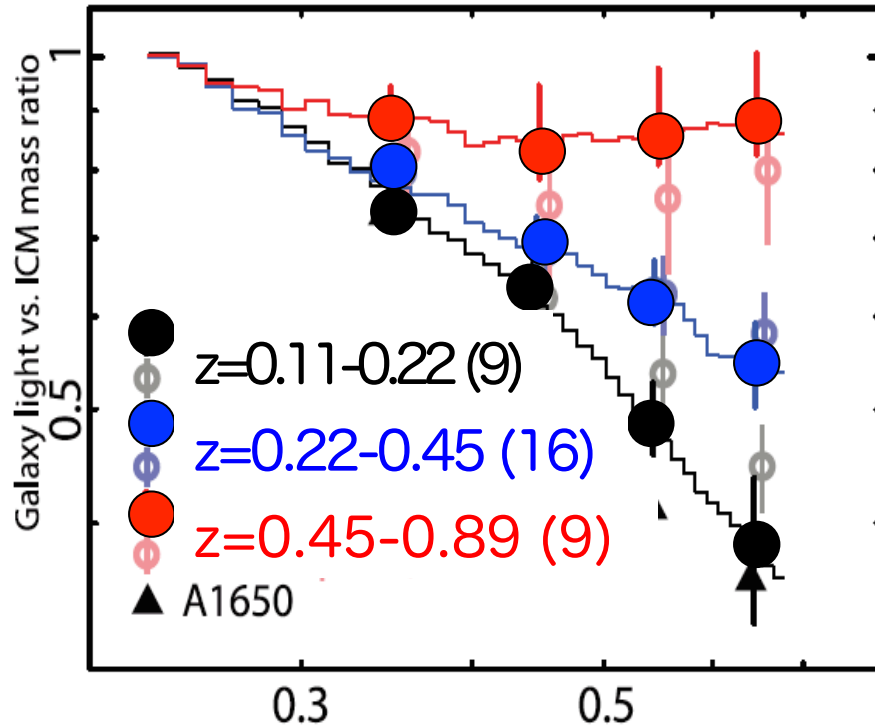
SKA workshop at UT

10

(5-3) 銀河, ICM, 全重力質量の動径分布

(積分銀河光)/(積分ICM質量)
の動径分布

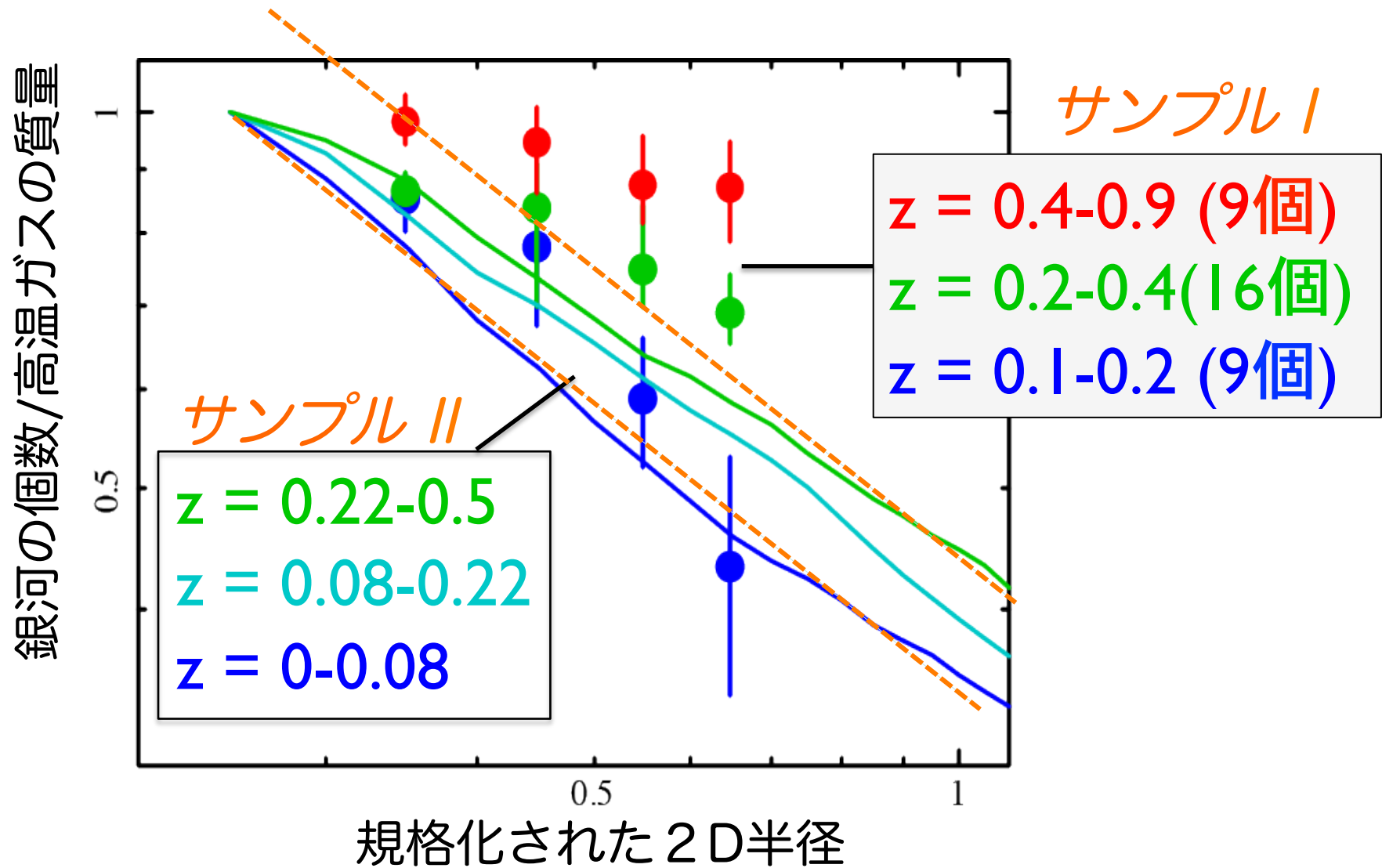
(積分銀河光)/(全重力質量)
の動径分布



R_{500} で規格化した2D半径 r

Gu et al., *Astrophys J.* 767, id.157 (2013)

(5-4) サンプル I, II の比較



6. 考察・議論

(6-1) データ解析結果の信頼性

Gu+13⇒各種の系統誤差や競合疑似効果を評価。どれも効かず。

(6-2) Dynamical friction (DF) の可能性

- 銀河団空間が真空でも、重力によるDFは効く。
- ICM中の重元素が一様に周辺まで分布することは、説明可能。

But

- 観測⇒大質量銀河も矮小銀河も同様に落下。DFのみではダメ。
- CFは抑制できない。ICMがDMより広がることも、説明不可。
- 銀河とICMが強く相互作用していると考えべき。

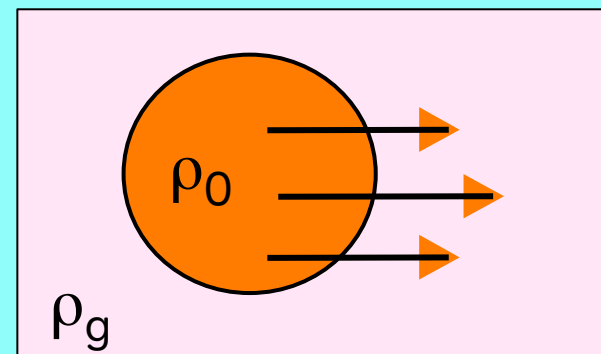
(6-3) そもそもICMが銀河に力を及ぼしうるか？

- 流入する磁化ICMの動圧で、銀河のISMが銀河のポテンシャル中心から少し変位→ISMが星+DMを重力で引張る。
(動圧が大きすぎるとISM strippingが起きる)
- ICM中の磁場が、個々の星の磁気圏と相互作用しうる？超音速の星風があると、起きない？

(6-4) 簡単な計算

半径 R で密度 ρ_0 の天体が、密度 ρ_g の気体中を速度 v で運動するさい、気体の抵抗で物体がエネルギーを失う時間スケールは、

$$\tau \sim \eta^{-1}(\rho_0/\rho_g)(R/v)$$



で与えられる。ここに η は天体と遭遇した1個の気体粒子が実際に散乱される確率。 $\eta=1$ なら気体にとって運動物体は「不透明」、 $\eta=0$ なら「スカスカ」。

銀河団において、個々の銀河を $R \sim 20$ kpc, $v \sim 5e7$ cm/s, $\rho_0 \sim (2e11 M_{\text{sun}})/(4\pi R^3/3) \sim 5e-25$ g/cc とし、ICM は $\rho_g \sim m_p \times 1e-3 \sim 2e-27$ g/cc とすると、

$$\tau \sim \eta^{-1} (250)(4e7 \text{ yr}) = \eta^{-1} \times 10 \text{ Gyr} \sim \text{宇宙年齢 (unless } \eta \ll 1)$$

$$\text{エネルギーの流れ} \sim 4 \times 10^{44} \text{ erg/s} \sim L_x$$

(6-5) 意義と波及効果

- 発想はきわめて単純だが、誰も考えなかった。
- 超新星爆発を凌ぐ、宇宙で最大級のエネルギーの流れを発見。
- 2大バリオン成分(銀河とICM)の間に、強い相互作用がある。
- 銀河の「時間的・空間的な環境効果」の起源は、ICMとの相互作用にあるのでは。銀河の形態/個数の進化を考える上で重要。

(6-6) SKAへの期待

- 銀河とICMの相互作用→プラズマ乱流や磁気リコネクション→強い局所電場→団は宇宙最大の粒子加速器か？
- 静穏銀河団から極めて低輝度なシンクロトロン放射が受かる？

(6-7) 今後の見通し

- 動圧stripping現場の観測 (Gu, Yagi+13, Yagi, Gu+13)。
- CLGの他の謎 (過剰エントロピーetc.) への応用。
- プラズマシミュレーション研究者とのコラボ。
- *ASTRO-H*の精密X線分光でICMの「ひきずり効果」を探查。
- 同衛星の硬X線/軟ガンマ線装置で銀河団の非熱的信号を探查。

1. 論文

牧島+01, *PASJ* 53, 401 [111 citations] : 仮説提示

i高橋+09, *ApJ* 701, 377 : Two-phase nature in Centaurus

川原田+09, *ApJ* 691, 971 : IMLR drop to 中心部

Gu+12, *ApJ* 749, id 186 : Two-phase nature in Abell 1795

Gu+13, *ApJ* 767, id 157 : Discovery of GLIMR evolution

2. 学会記事

牧島+池辺 : 「クーリングフローの終焉」、天文月報2004/1

牧島 : 「宇宙におけるプラズマ現象と長距離相互作用」、物理学会誌2008/8

牧島, Gu, 稲田 : 「誰も気づかなかった銀河とプラズマの相互作用」、天文月報2013/12

3. 学会講演 by 牧島

天文 : 96秋T, 02春T, 03秋T, 04春T, 04秋C, 05春B, 07秋A, 11春T

物理 : 05秋レビューセッション

4. 国際会議招待講演 by 牧島

IPELS (Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space): 2001(Niseko) and 2013 (白馬)