

銀河団サイエンス班の 報告

藤田 裕 (国立天文台理論研究部)

銀河団サイエンス班班員

- 藤田裕: 国立天文台 (班長)
- 大橋隆哉: 都立大 (銀河間物質)
- 岡部信広: 東北大 (磁場)
- 北山哲: 東邦大 (構造形成、SZ)
- 滝沢元和: 山形大 (電波の非熱的現象)
- 田村隆幸: JAXA (X線観測)
- 中澤知洋: JAXA (X線の非熱的現象)
- 坪井昌人: 国立天文台 (SZの観測)
- 服部誠: 東北大 (重力レンズ、SZ)
- 深沢泰司: 広島大 (ガンマ線)
- 松本浩典: 京大 (遠方銀河団)

検討会

- 11月25日に国立天文台で
 - 班員の皆様ありがとうございました
 - 今日の発表は検討会の報告を基にしています

今日の発表

- 主に銀河団の高エネルギー現象について
 - 光赤外は銀河班へ
 - 銀河間物質は宇宙論班へ
- 発表内容
 - 藤田(50分)
 - 一般論
 - 滝沢(20分)
 - シミュレーションと次世代天文学
 - 中澤(20分)
 - 観測技術と他の分野との関連

私の発表内容

- フロンティア

- あまり皆さんが知らない話

- 「銀河」団という名前からどんどん離れていく

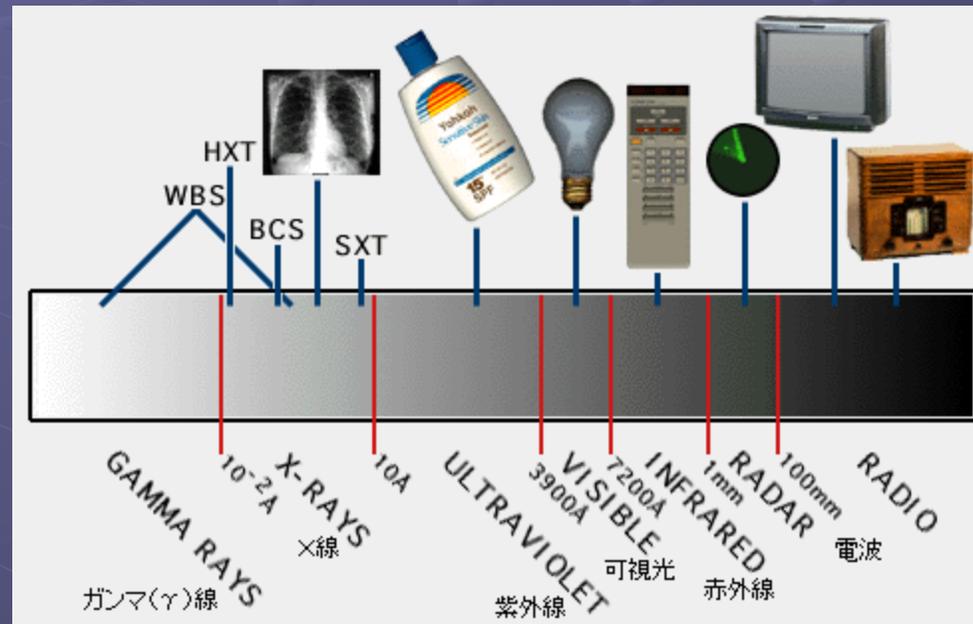


- 現在進められている研究の延長

- 皆さんが比較的知っている話

波長域の開拓

- 天文学は新しい観測波長域を開拓することで進歩してきた



- 銀河団観測で主に使われてきた波長域
 - 光、赤外
 - X線 (~2-10 keV)

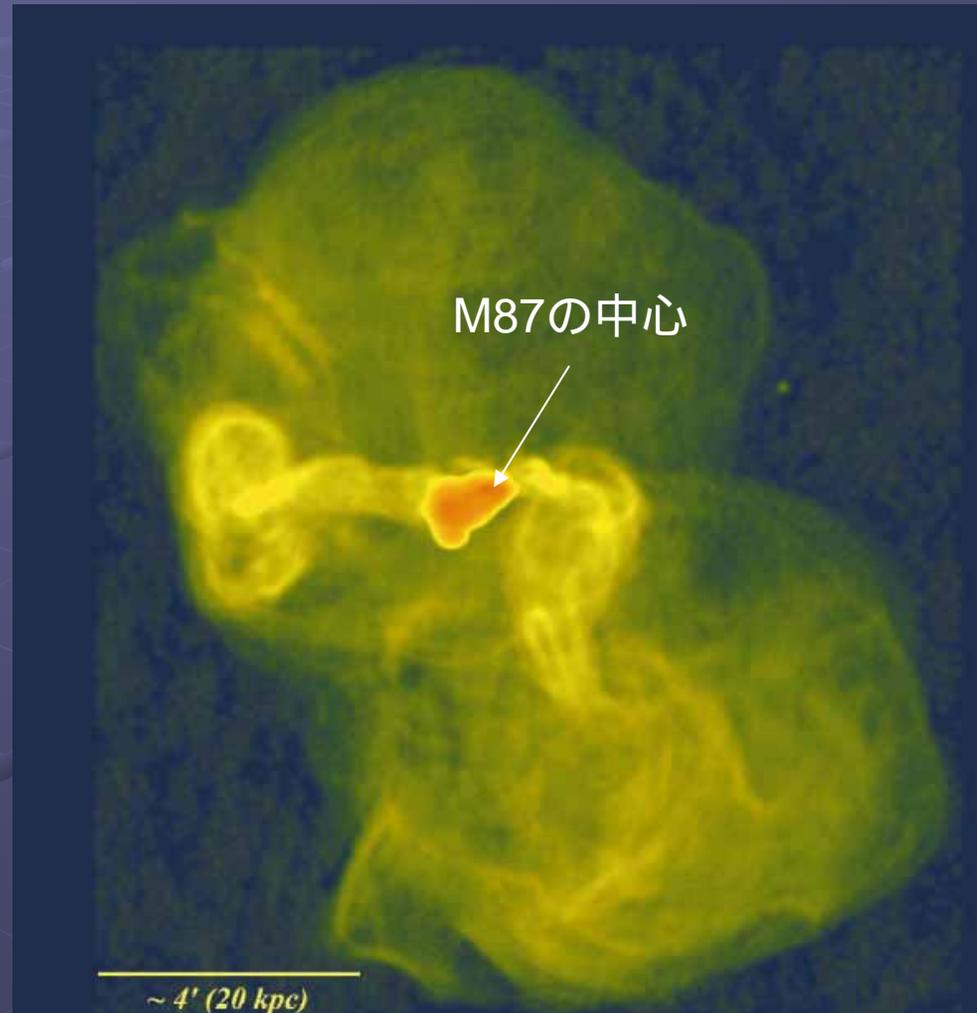
銀河団観測の新しい波長域

● 銀河団分野で新しく観測が始まろうとしている波長域

- 低周波電波(\approx GHz)
 - 硬X線(\blacklozenge 20 keV)
 - ガンマ線
 - 軟X線、紫外線(\approx 0.1 keV)
- } 非熱的現象
(高エネルギー粒子)
- 銀河間物質

低周波電波で見たおとめ座銀河団

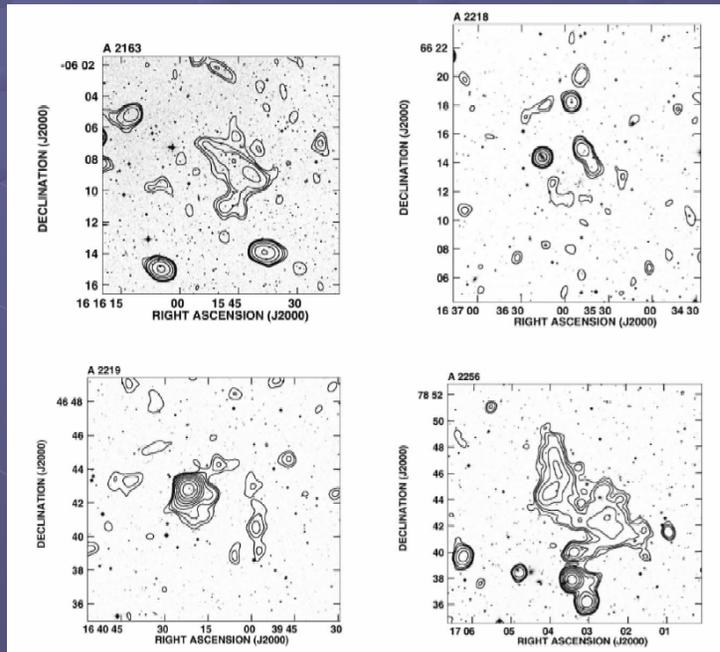
- VLA波長90cm
 - 淡い放射が銀河団の広い領域に広がっている



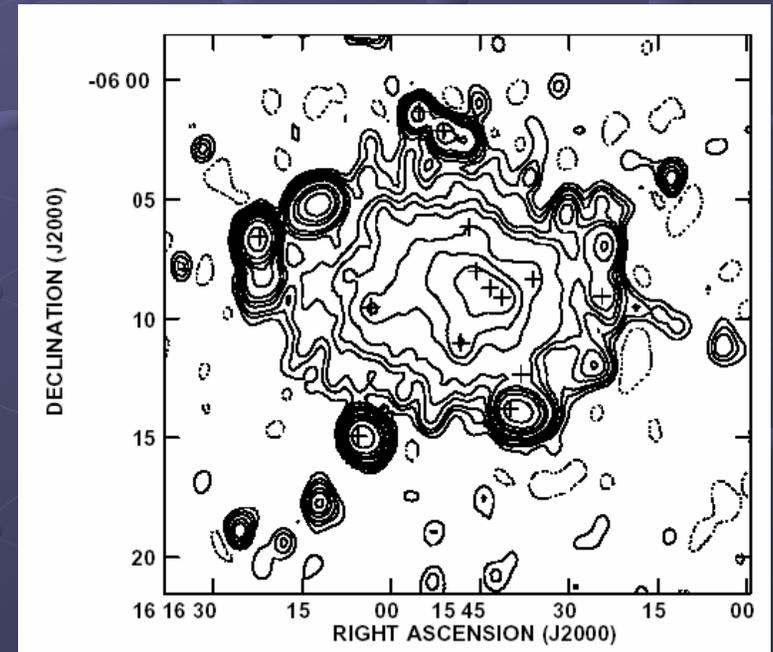
Owen et al. (2000)

銀河団を覆う電波放射

- Mpc スケールの放射 (とても淡い)
 - 電波放射はローレンツ因子 $\gamma \sim 10^4$ の電子からのシンクロトロン放射



Giovannini et al. (1999)



Feretti et al. (2001)

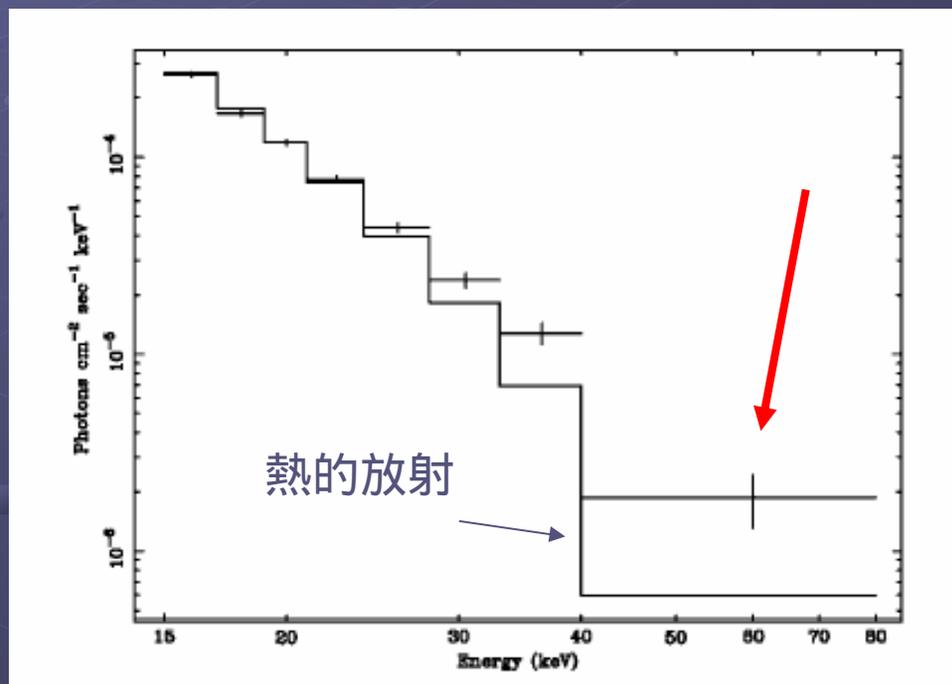
銀河団からの硬X線

- 銀河団ガスの熱的放射(制動放射)では説明できない成分

- ローレンツ因子 $\gamma \sim 10^4$ の電子の CMB光子との逆コンプトン散乱で説明できる

- 空間情報がないので、銀河団のどこから出ているかは分からない

Beppo SAX によるかみのけ座銀河団のスペクトル



Fusco-Fermiano et al. (2004)

大量の高エネルギー電子の存在

Electron Cooling Time

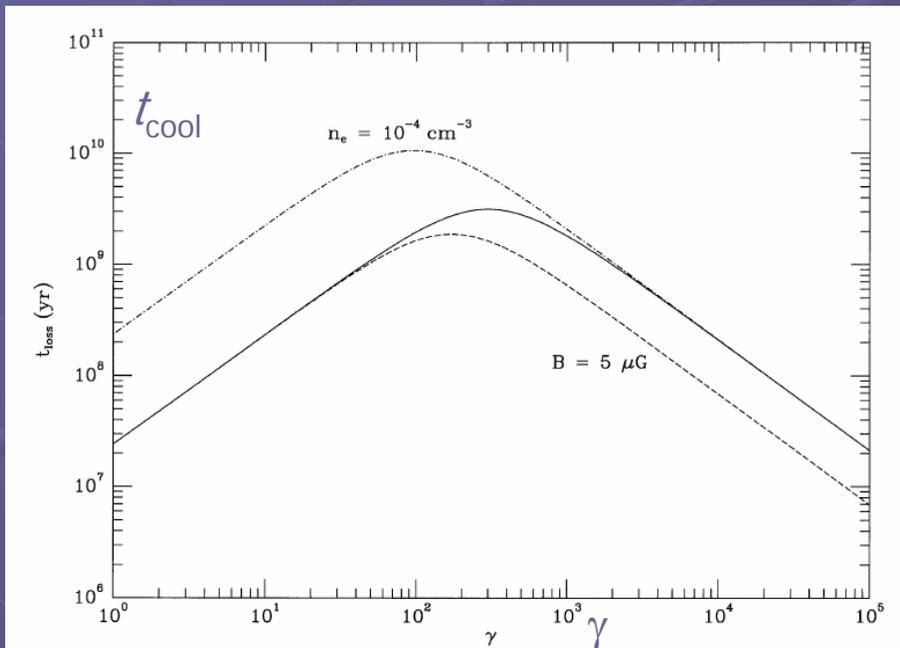


FIG. 2.—Instantaneous loss timescale t_{loss} (eq. [11]) as a function of γ for electrons in a cluster with an electron density of $n_e = 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ and a magnetic field of $B = 1 \mu\text{G}$ (solid curve); a magnetic field of $B = 5 \mu\text{G}$ (dashed curve); and an electron density of $n_e = 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ (dot-dashed curve).

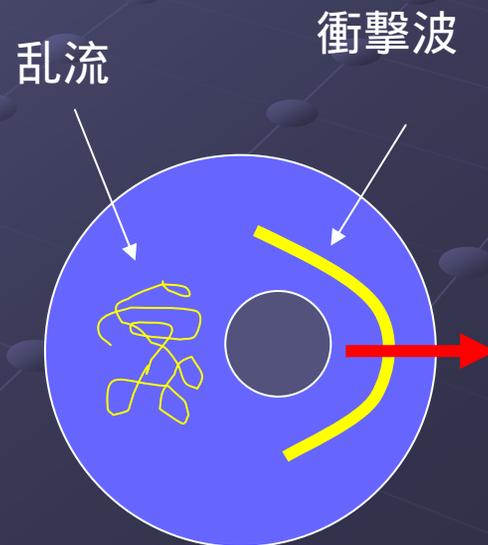
● 電波放射、硬X線放射とも $\gamma \sim 10^4$ の電子が起源

■ これらの電子の寿命はとても短い ($\sim 10^8 \text{ yr}$)

● シンクロトロン放射、CMB光子との逆コンプトン散乱でエネルギーを失う

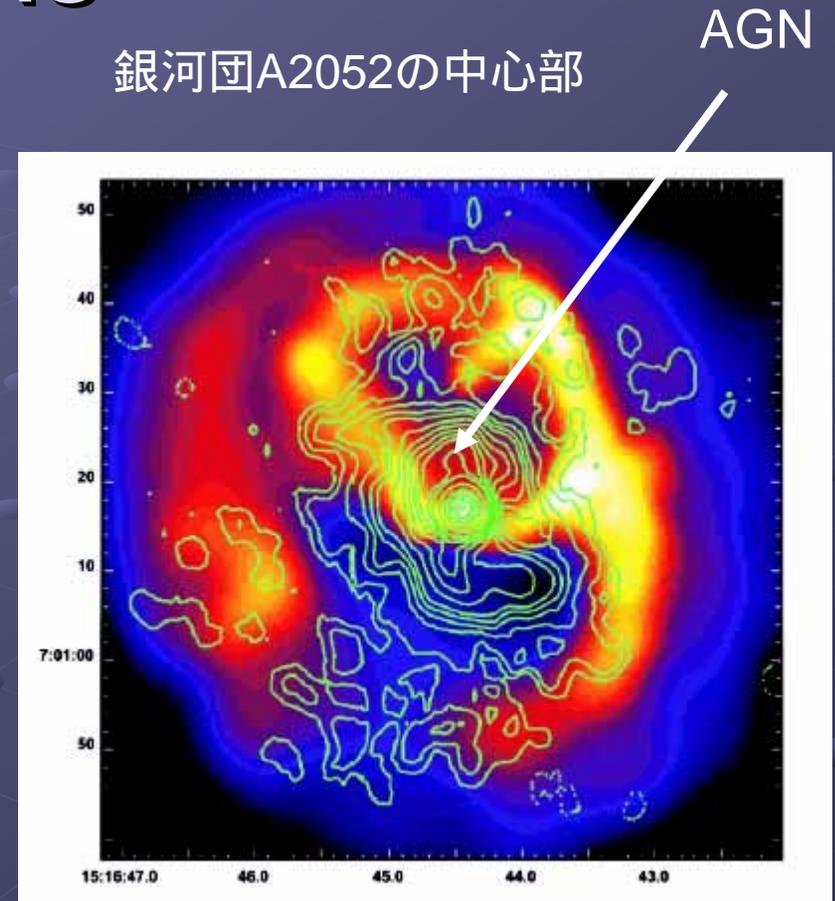
粒子加速

- 銀河団の年齢 ($\sim 10^{10}$ yr) より電子の寿命がはるかに短い ($\sim 10^8$ yr)
 - 粒子加速が今そこで行われている
 - 粒子は磁場によってほとんど動けない
 - **宇宙最大の加速器**
- 粒子の起源
 - 銀河団中のAGNから
 - 銀河団衝突
 - すべての電波放射がAGNに付随しているわけではない
 - 衝撃波加速
 - 乱流加速



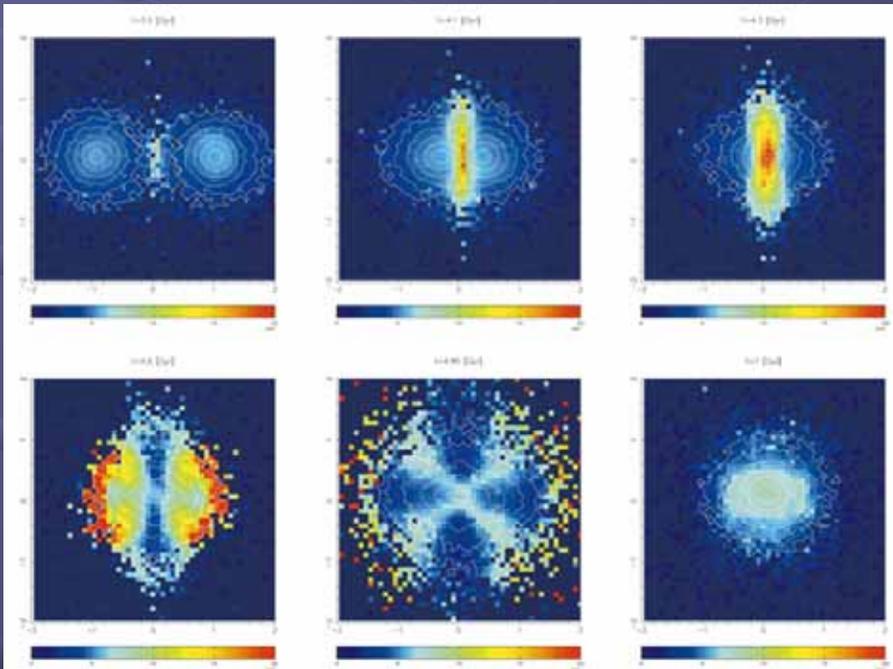
AGNs

- AGN活動は多くの銀河団の中心で見られる
- バブル
 - AGN ジェットの高温 or 相対論的ガスが周囲のX線ガスを押しのけてきた？



銀河団衝突と粒子加速

- 銀河団はしばしば衝突合体をする
 - 衝突時に衝撃波が発生
 - 粒子加速(e.g. Takizawa & Naito 2000)

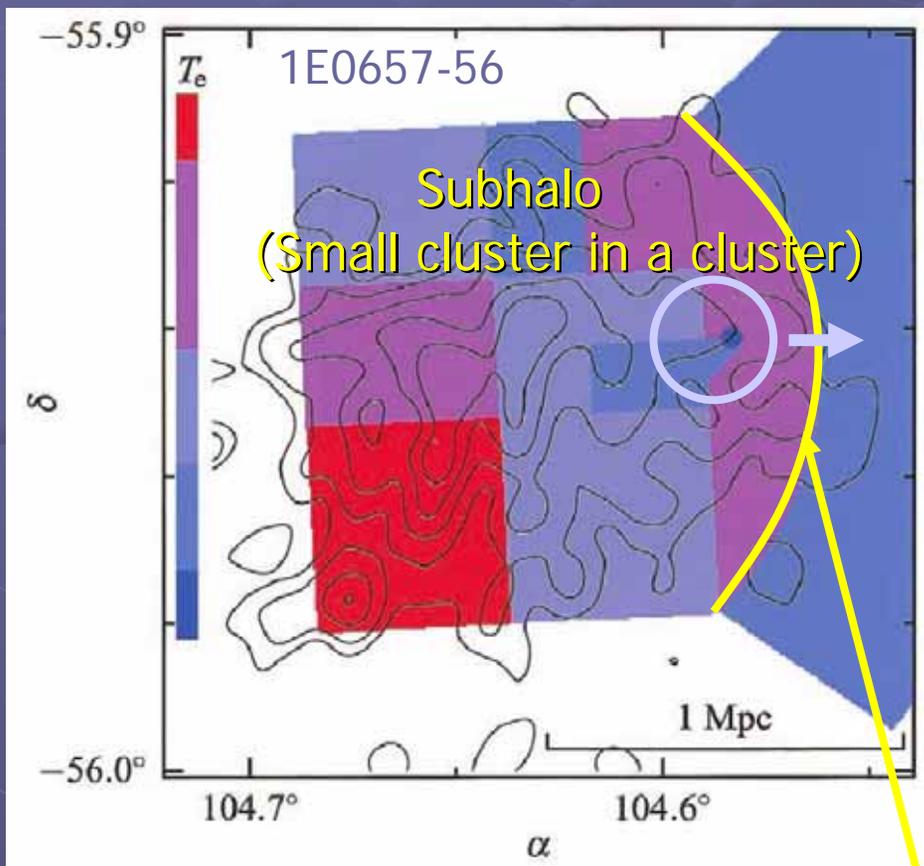


Takizawa (1999)

銀河団衝突時の乱流加速の必要性

Contours: Radio

Colors: X-ray Temperature



Markevitch et al. (2002)

Shock

- 銀河団では衝撃波から大きく離れたところでも電波放射 (高エネルギー電子) がある
 - 電子の寿命は短いので、衝撃波加速だとすると、衝撃波から大きく離れることができない
 - 銀河団衝突で発生した乱流による加速？
- 乱流加速は衝撃波加速に比べて効率が悪い
 - 宇宙ではたいてい衝撃波加速が優勢
- 銀河団は乱流加速の「珍しい」実験場？

銀河団内の高エネルギー粒子、粒子 加速について知りたいこと

● 粒子の起源

- AGN
- 銀河団衝突

● 粒子の加速メカニズム

■ 衝撃波加速

- Fujita & Sarazin (2001), Blasi (2001)

■ 乱流加速

- Ohno, Takizawa, & Shibata (2002), Fujita, Takizawa, & Sarazin (2003)

銀河団内の高エネルギー粒子、粒子 加速とプロジェクト1

- 高感度、低周波での電波観測
 - 高エネルギーの電子ほど高周波数でシンクロトロン放射をするが、寿命が短い
 - steep なスペクトル
 - 低周波ほど昔に加速された電子を検出できる
 - SKAが適している
 - ほとんどの銀河団で電波放射が見つかる？
 - 空間分布
 - 起源
 - AGN、衝撃波、乱流
 - スペクトル
 - 加速された時期

銀河団内の高エネルギー粒子、粒子 加速とプロジェクト2

● 硬X線での観測

- シンクロトロン電波放射の起源である高エネルギーの電子は逆コンプトン散乱も行う

● 電波観測と相補的

- NeXT

- 空間分布(電波と比較)

● 起源(AGN、衝撃波、乱流)

- スペクトル

● 粒子のエネルギースペクトル 加速された時期

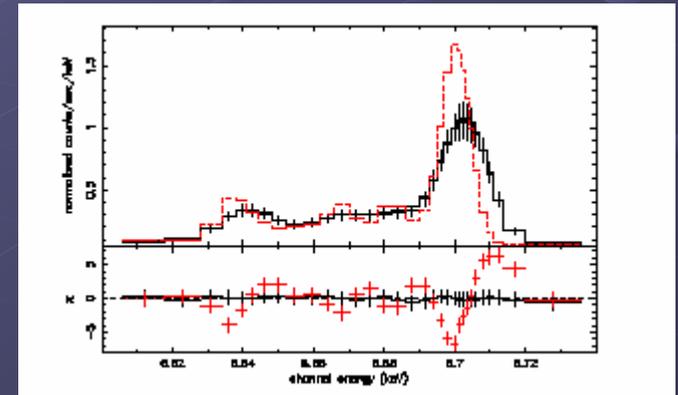
● 電波のスペクトルと組み合わせるとより詳しい情報

銀河団内の高エネルギー粒子、粒子 加速とプロジェクト3

● X線(1-10keV)での詳細なスペクトル観測

- ガスの運動(Doppler shift or Doppler broadening)
- 乱流、衝撃波
- Astro-E2, NeXT

Astro-E2 で見た銀河団



● 空間分布

(Fujita et al. 2005)

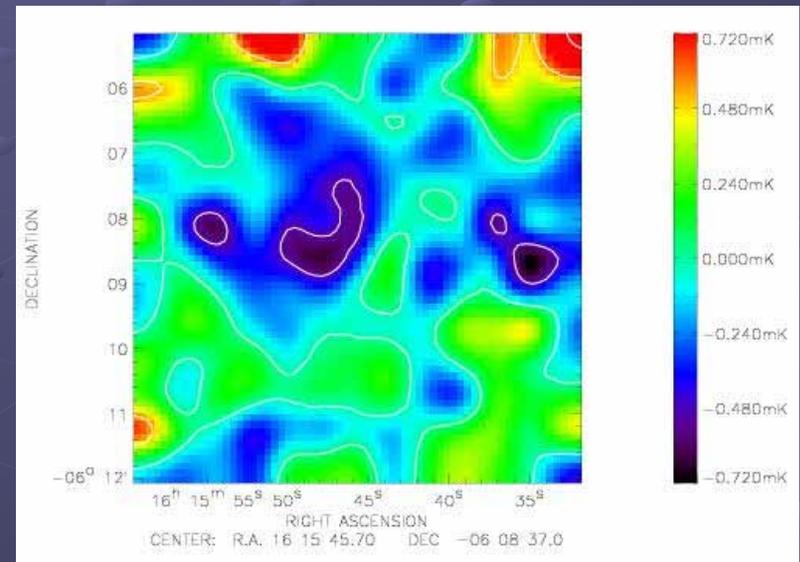
- 加速起源を明らかにするためには銀河団ガスの速度場マップがほしい(分程度の分解能)
 - 乱流が起きているところでシンクロトロン放射、硬X線放射が出ているか？
 - 将来の課題

SZから高エネルギー粒子の性質を明らかにする

● Sunyaev-Zel'dovich effect

■ 銀河団ガスによるCMB光子の逆コンプトン散乱

- 銀河団方向のCMB強度を変える
- 熱的ガスによって引き起こされる
- 相対論的な高エネルギー粒子のガスでは効果が弱い

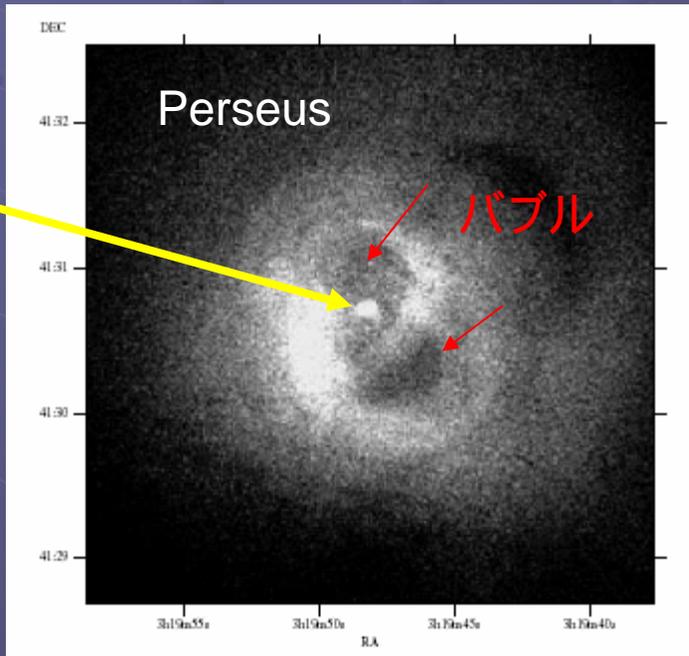


Kuwabara et al. (2004)

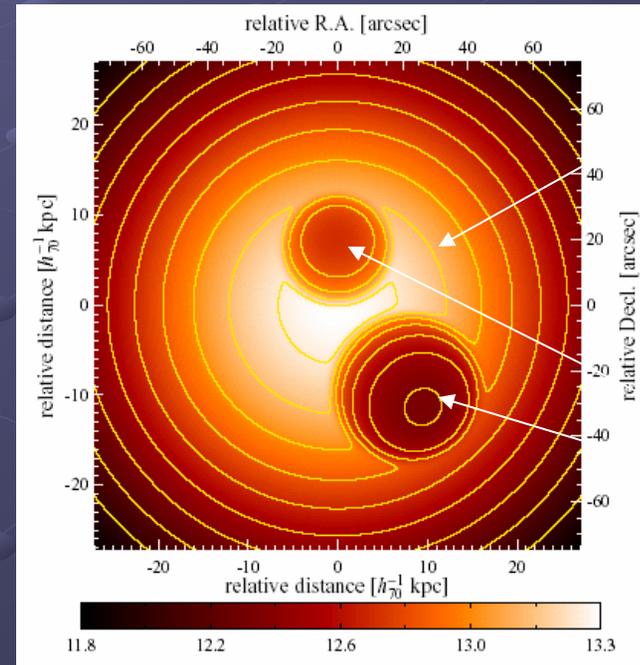
銀河団ガス中のAGNバブルの成分

- 銀河団ガス中にはAGNジェットが作ったバブルが見られることが多い
 - バブルの成分が熱的か、非熱的かでバブルのSZの見え方が異なる (非熱的なときは穴が見える、熱的なときは見えない) ジェットの成分

AGN



X-Ray (Fabian et al. 2002)



ALMA でみたSZ予想図
(Pfrommer et al. 2004)

磁場について

- 銀河団ガス中には $\sim \mu\text{G}$ の磁場が存在している
- 起源は不明
 - ダイナモ (衝撃波付近や乱流で発達)
 - ワイベル不安定性 (衝撃波付近や大きな温度勾配で発達)
 - Okabe & Hattori (2003)
- 硬X線とシンクロトロン放射の強度比(SKA+NeXT)
 - 銀河団ガス中の磁場の強さ
 - 場所による強度比の違いがわかれば
 - 磁場の空間分布
 - 磁場の起源
- 偏光(SKA)
 - 磁場の構造 磁場の起源

ガンマ線

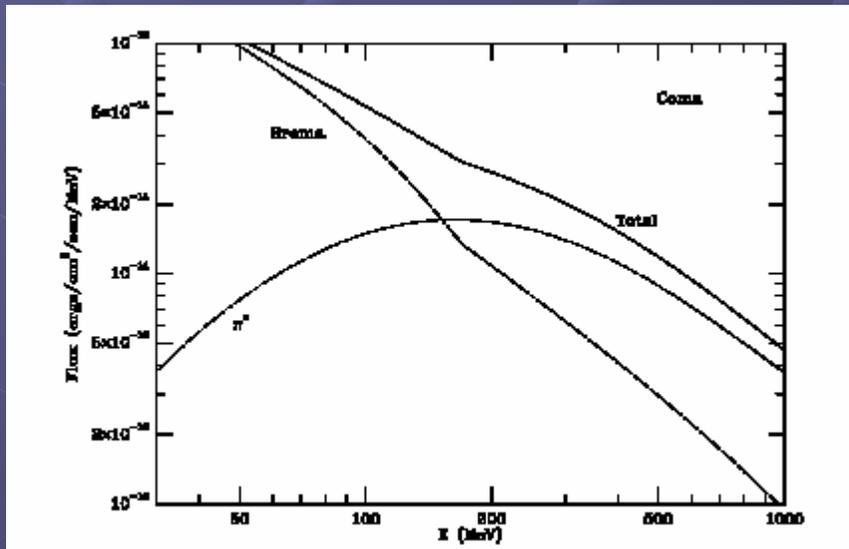
- 銀河団からはガンマ線が出ているかもしれない
 - 加速粒子(Loeb & Waxman 2000, Totani & Kitayama 2000, Blasi et al. 2001)
 - 電子とCMBの逆コンプトン
 - 硬X線と同じ
 - 電子が十分加速されるか？
 - 加速陽子と熱的陽子の衝突でできたパイ中間子
 - ダークマター

高エネルギー陽子

- 高エネルギー**電子**と違い高エネルギー**陽子**の冷却時間は長い
 - 実質冷えない
 - 銀河団内に蓄積する
 - 銀河団衝突で加速される場合、衝突のたびごとに蓄積される
 - 銀河団ガスの圧力の数10%に達するかもしれない
 - 過去の merging history
 - 加速メカニズム、効率
- 電子と違い陽子は直接観測することができない

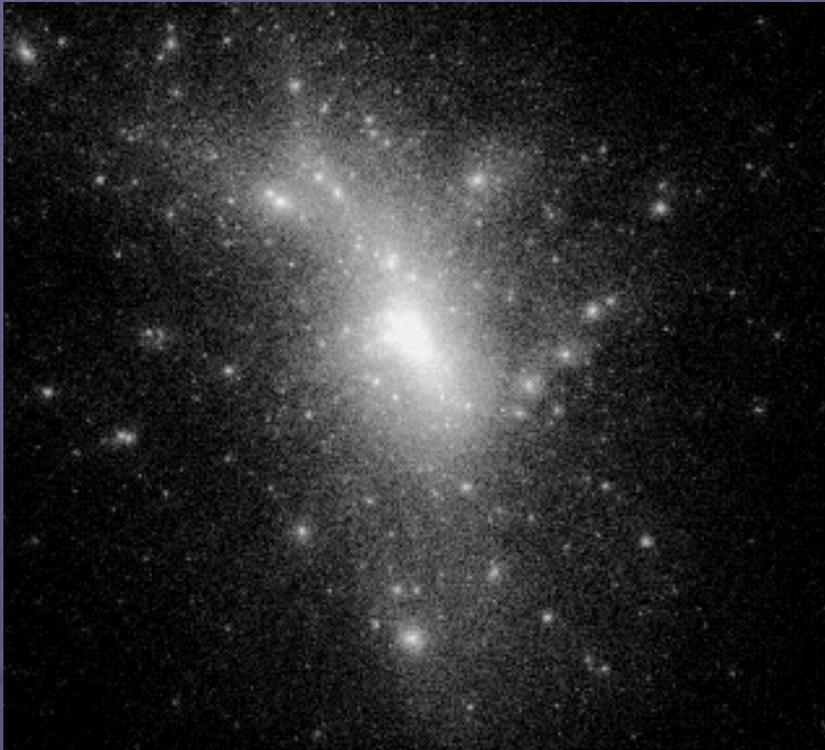
高エネルギー陽子の観測

- 高エネルギー陽子は熱的陽子と相互作用してパイ中間子を生成
 - パイ中間子は崩壊してガンマ線を出す
 - 多くの理論予想では GLAST で観測可能



Coma Cluster
からの予想されるガンマ線
(Sarazin 2001)

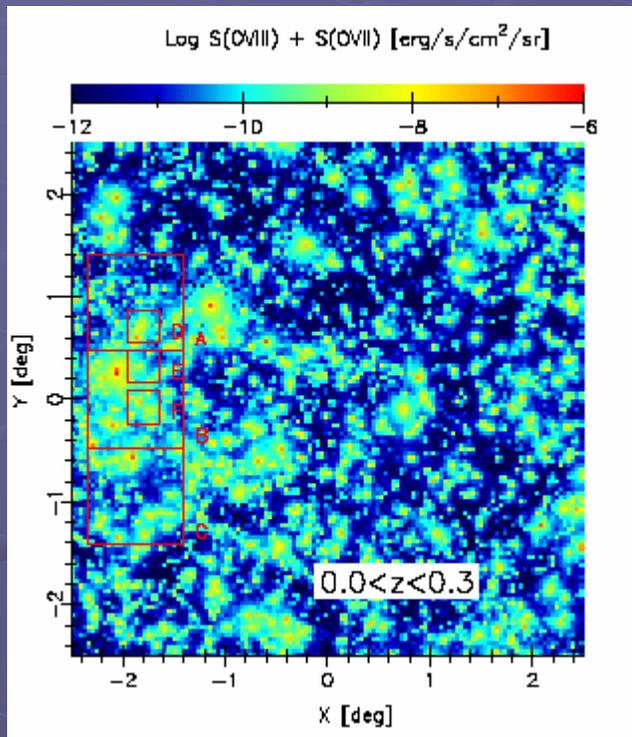
ダークマターとガンマ線



- 銀河団のダークマター分布
 - 中心に向かって密度増大
- もし中心に巨大ブラックホールがあると
 - 強いカスプ
 - ニュートラリーノの対消滅の確率増大 ガンマ線
 - GLASTで見える？
(Totani 2004)

Fukushige & Makino (2001)

銀河間物質と軟X線



Yoshikawa et al. (2003)

- 宇宙のバリオンの大部分は $10^5 < T < 10^7$ K のガス
 - 適切な観測装置がないため
いまのところ観測されていない
 - 酸素からの輝線を使って観測できる
 - DIOSによるサーベイ
 - 吸収も見えるかも
 - Xeus/Con-X
- 詳しくは宇宙論サイエンス班の吉川さんの発表

以前から行われている研究の発展

● 研究テーマ

■ 宇宙論

- 銀河団形成、構造形成
- 遠方銀河団

■ 銀河団ガスの性質

- 化学進化
- Cooling Flow

■ 銀河団の構造

● 手段

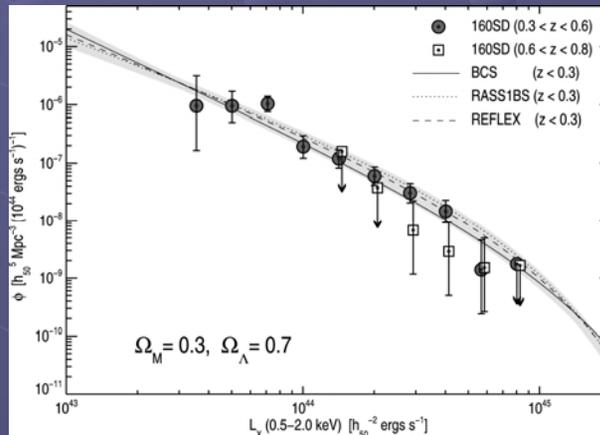
- X線、SZ、重力レンズ

銀河団形成

- 銀河団は現在形成中
 - 周辺部にはガスが降り積もっているはず
 - 衝撃波
 - 電波ではそれらしいものが見えている (Radio relic)
 - X線のこれまでの観測は $\pm 0.5 r_{\text{vir}}$ に限られている
- 構造形成との関連
 - 銀河団の周辺ではフィラメントに伴う銀河間物質が見えるかも 軟X線
- 広い視野だと有利
 - ただしバックグラウンドが低いことが求められる

銀河団と宇宙論

- $z \sim 0$ での cluster abundance
 - $\sigma_8, \Omega_0 \dots$
- High redshift での cluster abundance
 - 宇宙の状態方程式、Non-Gaussianity、銀河団進化



Mullis et al. 2004 ApJ 607 175

- 得られる情報の豊かさから、やはり遠方の銀河団に興味がある

X線で最遠の銀河団

CXO + VLT image ©CXC

RDCS1252-2927

@ $z=1.24$

Rosati et al. 2004

AJ 127 230

20"

- $z \sim 1$ ぐらい
 - 今のところ強い進化は見つかっていない
- 光で見つかった銀河団は $z \sim 4$
 - 光に比べるとX線はまだまだ
 - しかし単なる見かけ上の銀河の集まりを銀河団と見誤る可能性は小さい
 - Collapse していないとX線では光らない

遠方銀河団の観測 (X線)

● サーベイ

- ROSITA, Lobster

● ポインティング (撮像、分光など)

- NeXT, XEUS, Constellation-X

Sunyaev-Zel'dovich (SZ) effect

● 遠方、近傍銀河団のガスの別の観測手段

1. 宇宙論

- 距離の測定 **ハッブル定数 etc.**
- 銀河団の数分布 **密度ゆらぎの進化**

低分解能 ($\sim 1'$)
平均化された情報

2. 銀河群・銀河団物理

- 内部構造、温度分布、速度分布
- ガスの加熱・冷却過程
- 重力ポテンシャル
- 非熱的成分
- ガスの熱伝導

高分解能 ($\sim 1''$)
e.g. ALMA

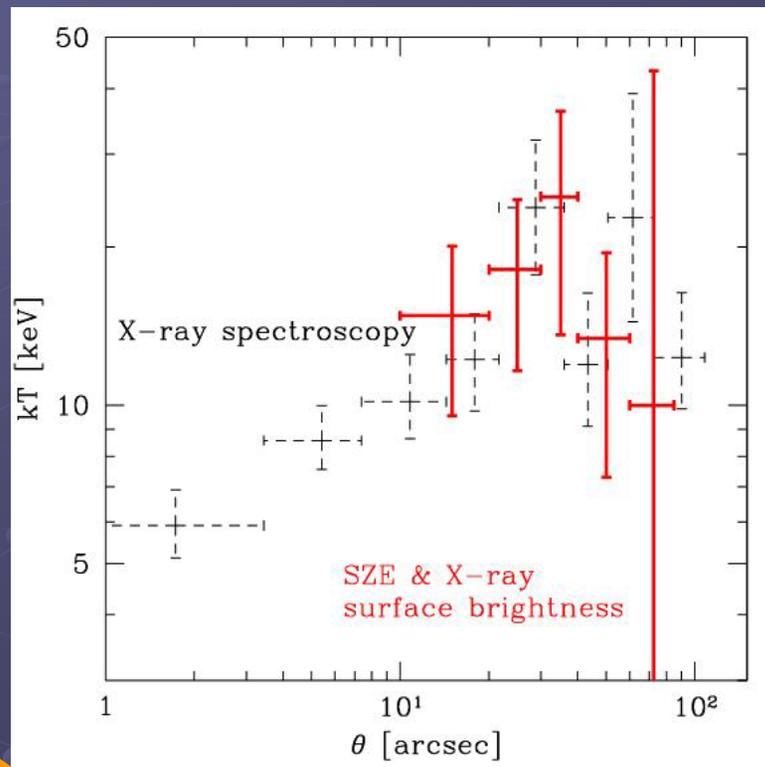
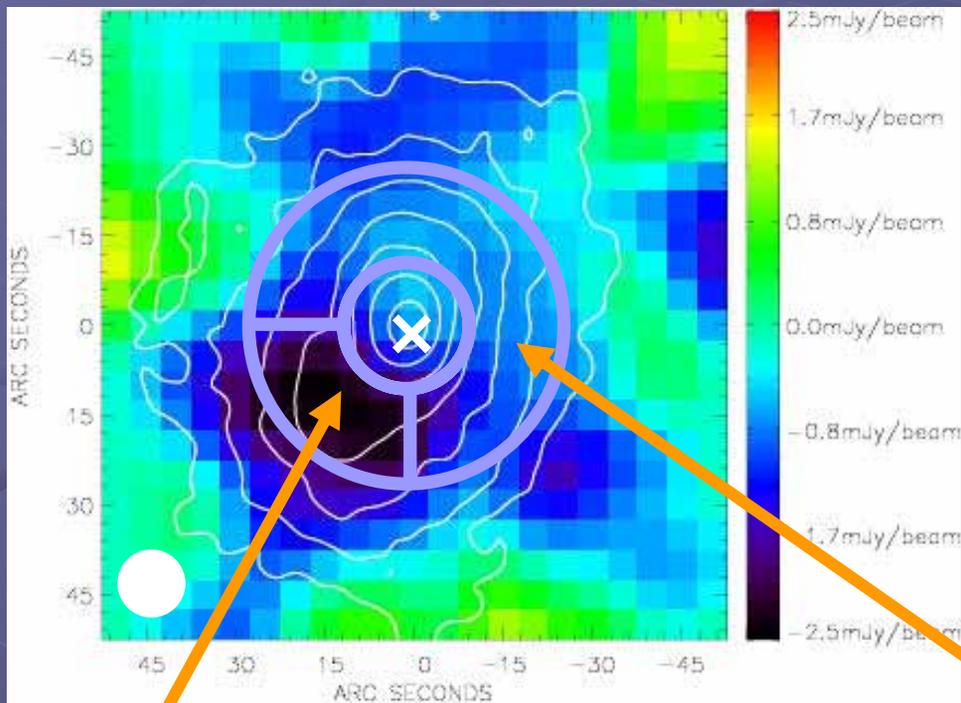
低周波数の検出器は？

(Grad T SZ; Hattori & Okabe 2004)

SZ + X-ray images で何ができるか？

例: RXJ1347.5-1145 @z=0.45 X線光度 & SZ強度最大

現状での最高分解能 (13") SZマップ (Komatsu et al. 2001; Kitayama et al. 2004)



内部構造の物理量

$$n_{\text{ex}} = (1.45 \pm 0.58) \times 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$$

$$L_{\text{ex}} = 250 \pm 190 \text{ kpc (奥行き)}$$

$$kT_{\text{ex}} = 28.5 \pm 7.3 \text{ keV}$$

平均成分の温度プロファイル

$$I_{\text{SZ}} \quad n(r)T(r) \, dl$$

$$I_{\text{X}} \quad n^2(r) T^{1/2}(r) \, dl$$

X線スペクトルによらない

銀河団ガスの性質

● 詳細な重元素ラインの観測(Astro-E2、NeXT)

■ 各元素の存在比 重元素の起源

- SN Ia、SNII、ハイパーノバ？

■ 重元素放出の現場

- スターバースト銀河
- 将来的には空間分解した分光をしてほしい

■ 共鳴散乱

- 銀河団ガスは全体で optically thin だが、ラインは thick
共鳴散乱(ライン強度の銀河団半径依存性が変わる)
- もしガスが乱流運動していると共鳴散乱が起きない
 - ラインプロファイルがドップラー効果で広がる

銀河団



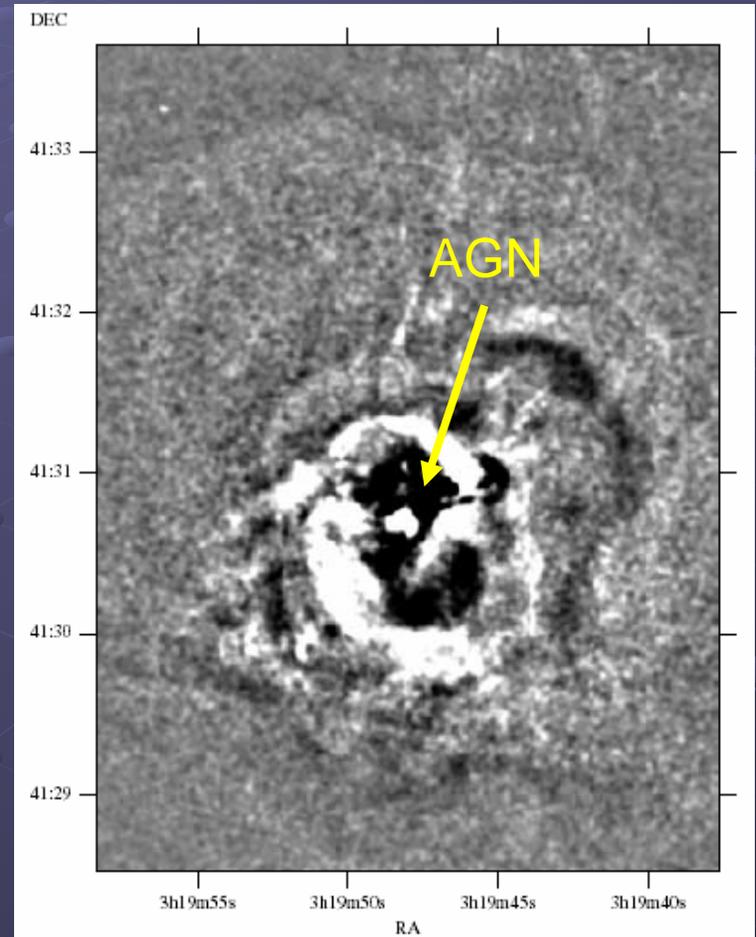
ライン光子

Cooling Flow

X線で見たペルセウス座
銀河団の中心部

● Cooling Flow 問題

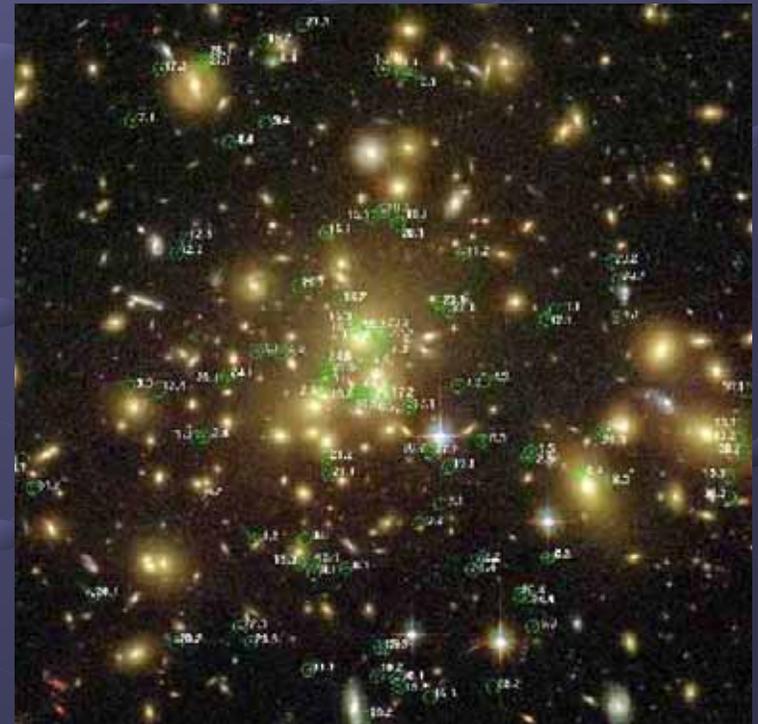
- 銀河団中心部ではガスの冷却時間は短いのに冷えているガスがない
 - 何らかの加熱が行われている
- AGNは最も有力とされている加熱源
 - 難点も多い(例、Tsunami model; Fujita et al. 2004)
- 放射冷却を妨害 銀河の質量の上限(cD銀河)
- X線放射、電波放射、乱流から加熱源、加熱メカニズムが分かるかもしれない



Fabian et al. (2003)

重力レンズと銀河団の構造

- 重力レンズは銀河団の構造を調べるのに最適
 - 仮定によらない
 - 一つ一つの銀河団の重力構造が中心から外周部まで調べられている
 - 広視野望遠鏡
 - 銀河団内の細かい構造 (Subhalo) についても情報が得られている
 - 多数の銀河団について統計的に調べる段階へ



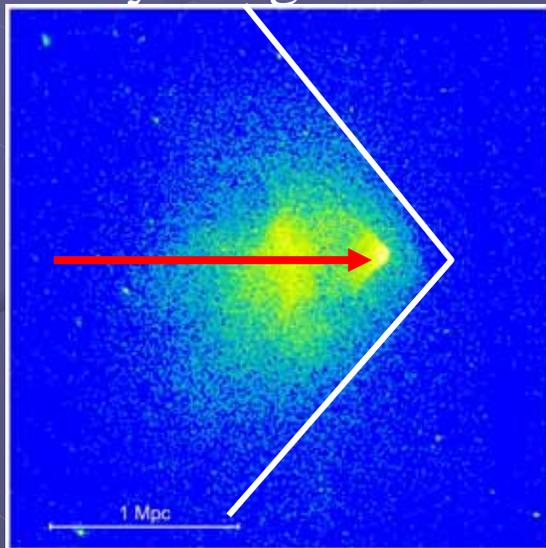
重力レンズとX線で調べる銀河団の ダイナミクス

- ガスの分布と重力分布がずれている
 - ダークマターの衝突断面積に制限 (Markevitch et al. 2004)

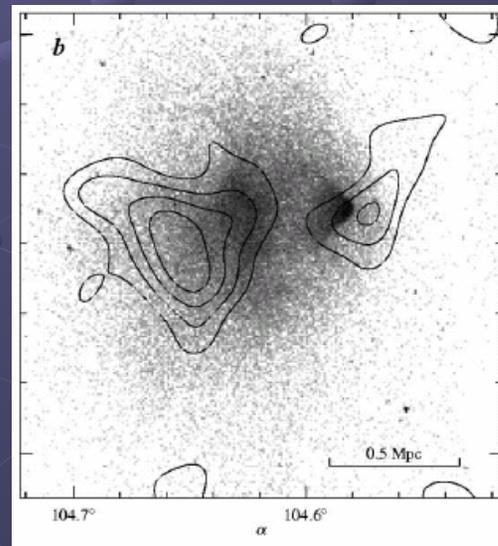
弾丸銀河団: $z=0.296$

WL DM map+X-ray images

X-ray image



1E 0657-558



Clowe et al. (2004)
Markevitch et al. (2004)

まとめ1

● X線非熱的放射

■ サイエンス

- 銀河団ガス中での粒子加速メカニズムを明らかにする
- 銀河団ガス中での磁場の起源を明らかにする

■ 関連するプロジェクト

- Integral, Astro-E2, NeXT (やはり空間分解してほしい)

● X線の熱的放射

■ サイエンス

- 乱流、衝撃波 銀河団ガス中での粒子加速メカニズムを明らかにする
- cooling flow 銀河の上限の質量はどう決まっているか
- 銀河団進化 遠方の銀河団は標準構造形成論に従って進化しているか
- 化学進化 銀河がどう進化してきたか

■ 関係するプロジェクト

- ASTRO-E2, NeXT, ROSITA, Lobster, XEUS, Constellation-X
- ガスの速度場マップがかけるとうれしい

まとめ2

● 電波非熱的放射 (X線非熱的放射と相補的)

■ サイエンス

- 銀河団ガス中での粒子加速メカニズムを明らかにする
- 銀河団ガス中での磁場の起源を明らかにする

■ 関連するプロジェクト

- SKA (低周波高感度を目指すべし)

● 線放射

■ サイエンス

- 高エネルギー陽子 銀河団ガス中での粒子加速メカニズムを明らかにする
- ダークマターの検出

■ 関連するプロジェクト

- CANGAROO-III, GLAST, AGILE, MEGA (まずは検出！)

● 重力レンズ

■ サイエンス

- ダークマター分布-> CDM モデルの検証
- 銀河団のダイナミクス (他波長の観測との組み合わせ)

■ 広視野望遠鏡

まとめ3

● 銀河間物質

■ サイエンス

- missing baryon missing baryon は標準構造形成論が予想するよう
に存在するか。

■ 関係するプロジェクト

- DIOS, MBE, DUO, XEUS, Constellation-X

● Sunyaev-Zel'dovich (SZ) effect

■ サイエンス

- 銀河団の進化 遠方の銀河団は標準構造形成論に従って進化している
か

- 銀河団の構造 銀河団衝突時にガスの物理量がどう変化するか。構造
形成の実態

- ガスの成分分析 銀河団ガス中のバブルの中身は熱的ガスか、非熱的
ガスか。バブルの起源は

- ガスが運ぶ熱の流れ

■ 関係するプロジェクト

- ALMA