

# 「すぎく」観測成果のハイライト III (Project 7X)

牧島一夫<sup>1,2,3</sup> & 「すぎく」チーム

1:東大 理学系ビッグバン宇宙国際研究センター

2:同上 物理学専攻

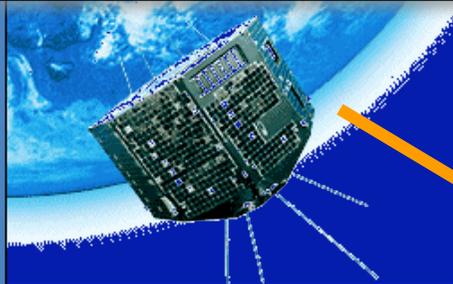
3:理化学研究所宇宙放射線研究室

1. 日本の宇宙 X線衛星
2. 銀河団の七不思議
3. *ASTRO-H*



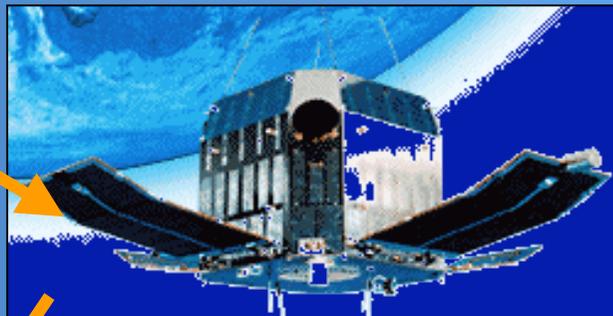
# §1. 日本の宇宙X線衛星

はくちょう (1979)



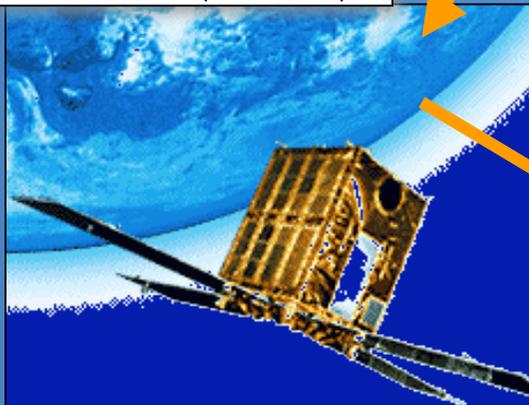
2~10 keV、感度1

てんま (1983)



2~20 keV、感度10

ぎんが (1987)



2~30 keV、感度100

あすか (1993)



0.5~10 keV、感度 $10^4$

「すぎく」 (*Astro-E2*)  
(2005年7月10日)

0.2~12 keV、感度 $10^{4.5}$   
10~600 keV、感度100

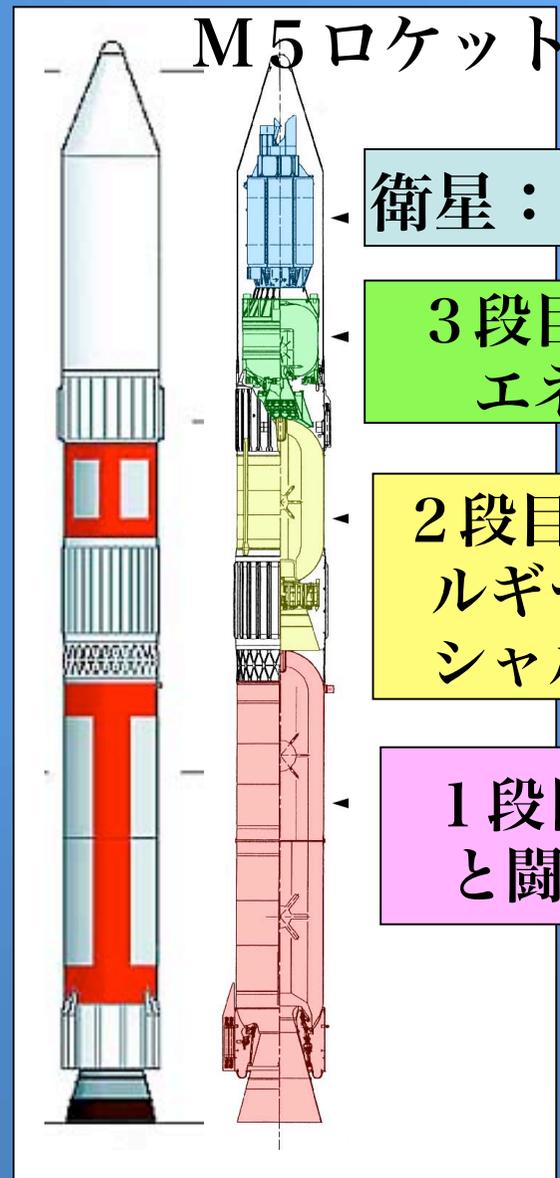


硬X線検出器(HXD)  
釜江研究室などと共同し  
10年かけ開発

# 1a. 「すぎく」誕生：2005年7月10日



鹿児島県 肝属町 内之浦  
JAXA宇宙科学研究本部  
鹿児島宇宙空間観測所



衛星：100億円の積み荷

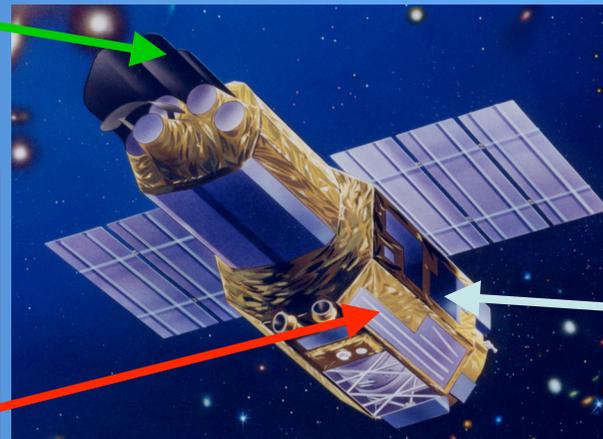
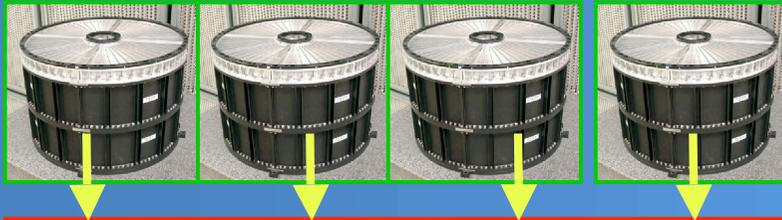
3段目：残るケプラー  
エネルギーを獲得

2段目：ケプラー運動エネ  
ルギーの半分と、ポテン  
シャルエネルギーを獲得

1段目：大気摩擦  
と闘う非保存系

# 1b. 「すざく」 搭載装置

4 台の X 線集光鏡 ; NASA, 名大など



**X-ray Imaging Spectrometer (XIS);** MIT, 阪大, 京大など

- 単一光子計測する CCD デジカメ
- 0.2~12 keV で優れた感度と高いエネルギー分解能

- **Hard X-ray Detector (HXD)**  
東大, ISAS, 広大, 埼玉大, 理研, 金沢大, 青学大など
- 結晶シンチレータと半導体
- 10-600 keV で超低バックグラウンド、撮像能力は無い

## 1c. 我々のモットー

- 世界最高の装置を開発せよ。
- 装置を徹底的に較正し、最大限の性能を引き出せ。
- データ解析は、妥協せず徹底して行なえ。
- 科学的な結果を導くさいは、(1) 自分装置のデータと正面から向き合い、(2) つねに基礎物理学の知識に立ち戻り、(3) 自分の想像力を駆使せよ。(4) 世の中の定説や特定の理論モデルは、まず疑ってかかれ。

## §2. 銀河団の七不思議

暗黒エネルギー  $\Omega_{DE}=0.73$  ; (時間)

暗黒物質  $\Omega_{DM}=0.24$  ; 時間、空間 **10K~10<sup>12</sup>K**

バリオン  $\Omega_B=0.044$

時間、空間、**エネルギー、組成** **元素、化合物**



**約40% 銀河団の高温プラズマ**

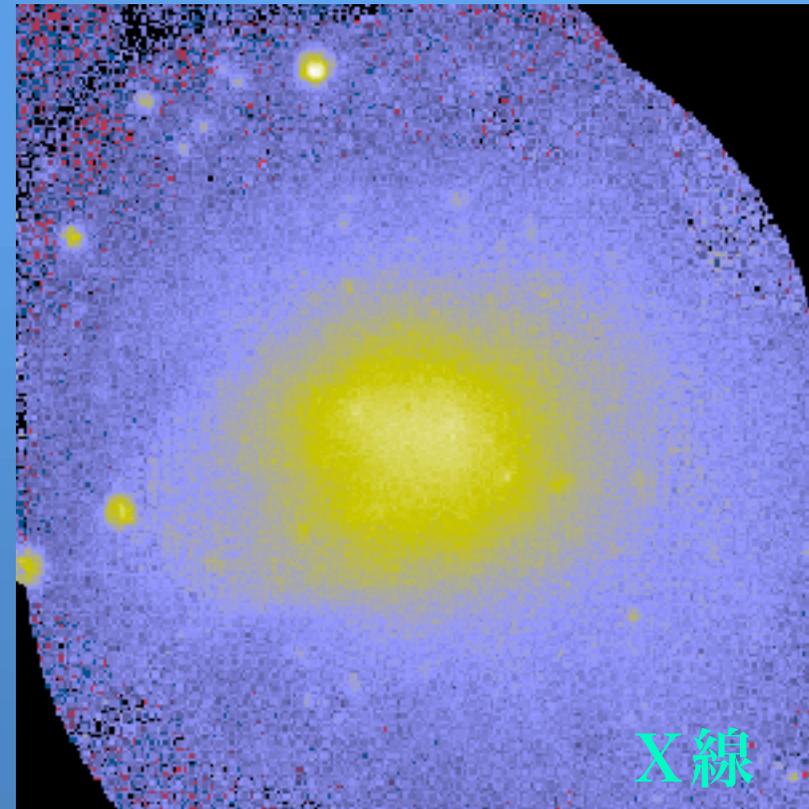
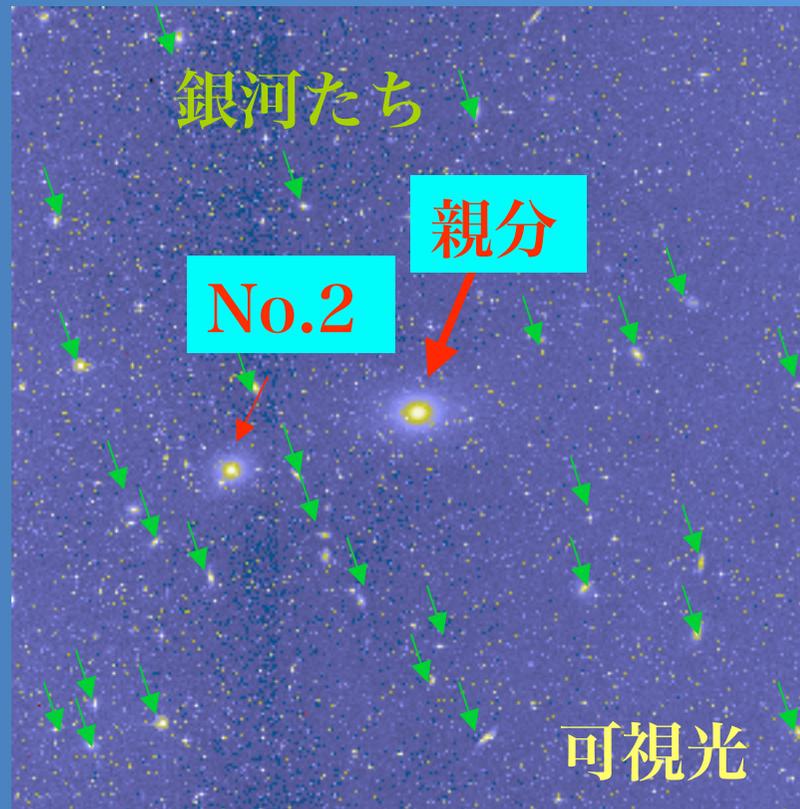
**約10% 星**

**約50% 未発見のWHIM**

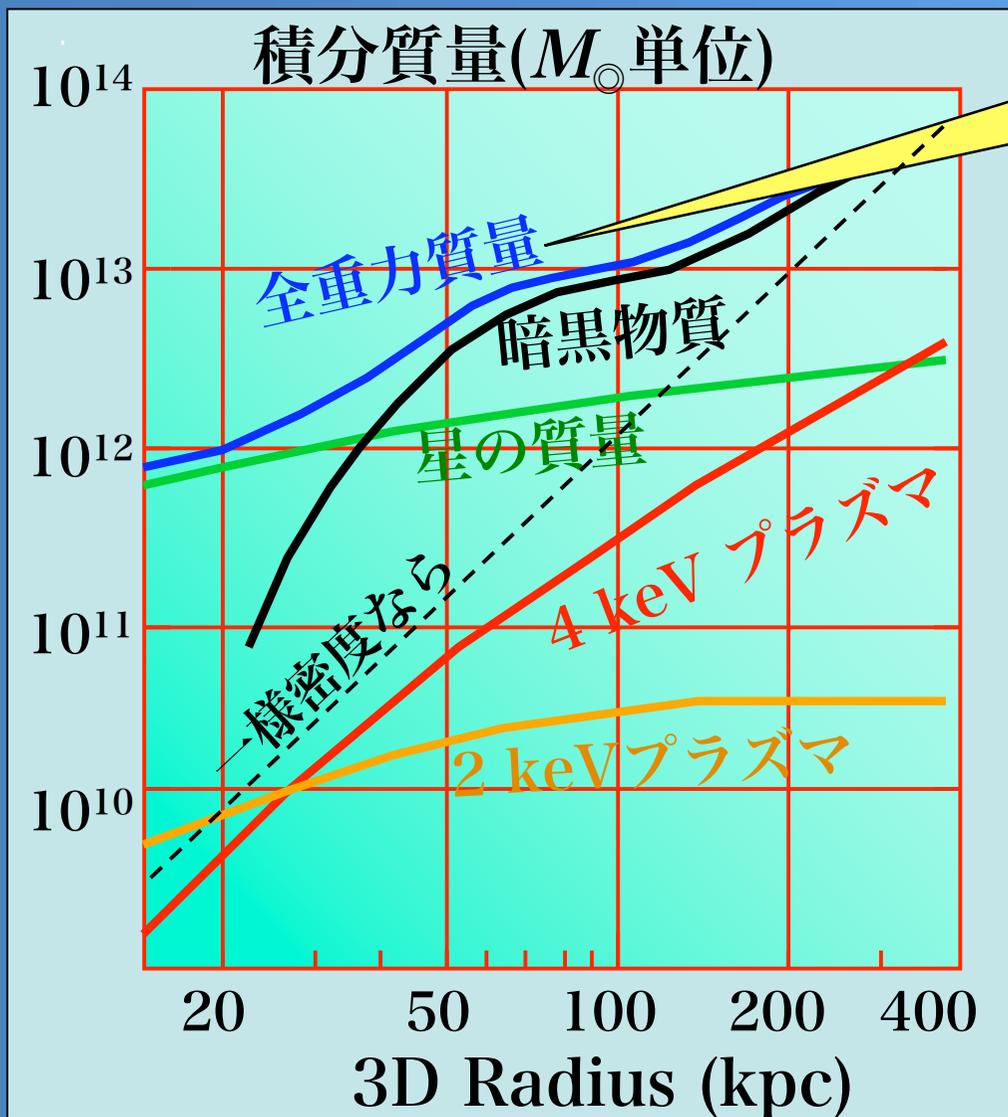
## 2a. 可視光とX線で見た銀河団

親分銀河は重力ポテンシャルの底に静止。他の銀河たちは  
~1000 km/s で駆け巡る。

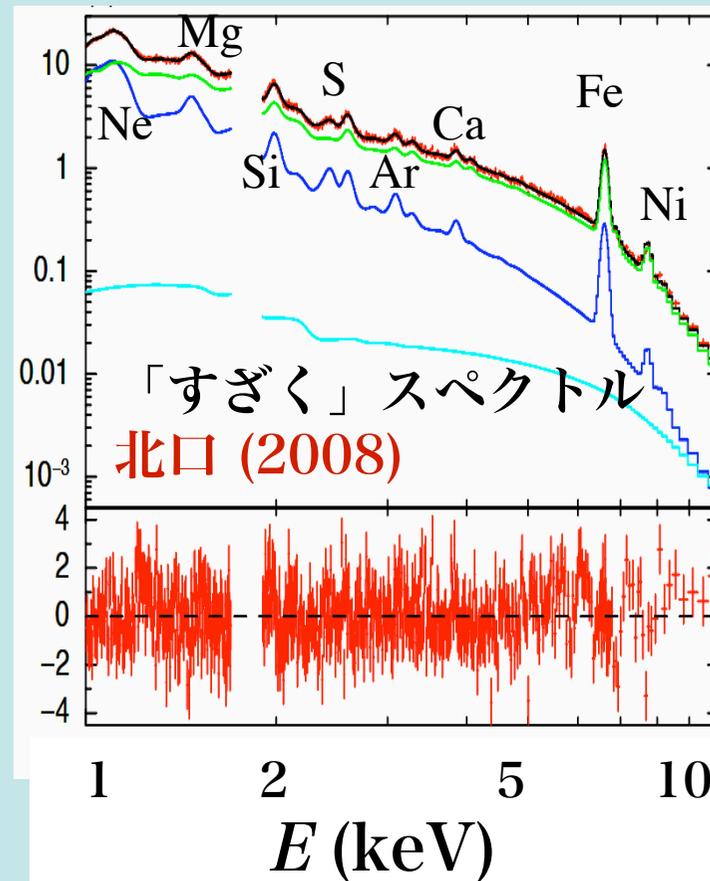
銀河(星)をしのぐ大量の高温(数千万K)プラズマが、重力場に閉じ込められX線を放射。



## 2b. 銀河団の構成要素：ケンタウルス座銀河団の例



プラズマの閉じ込めに必要な重力源。静水圧平衡を仮定。

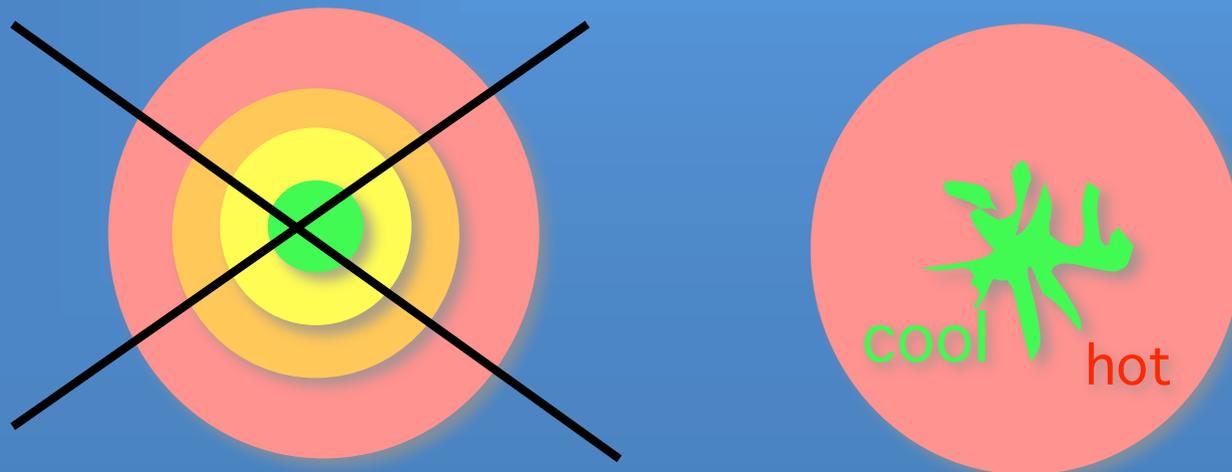


## 2c. 銀河団の七不思議

1. **なぜ銀河に対する「環境効果」が起こるのか？**  
遠方銀河団には多数の青い歪んだ銀河 (Butcher Oemler effect)  
銀河団の中心では渦巻き銀河が少ない
2. **cD銀河はどうやって形成された？**
3. **なぜ cD銀河の付近でプラズマは温度が下がる？**  
これは一世を風靡したcooling flowではない (Makishima+ 01)
4. **Cooling flowを阻止している熱源は何か？**
5. **なぜ銀河団プラズマは数 $\mu$ Gにまで磁化しているか？**  
星間空間の磁場強度に匹敵  
磁気圧=プラズマ圧の数%
6. **ある種の銀河団で起きている粒子加速の機構は何か？**
7. **なぜ銀河はプラズマより中心集中しているのか？**

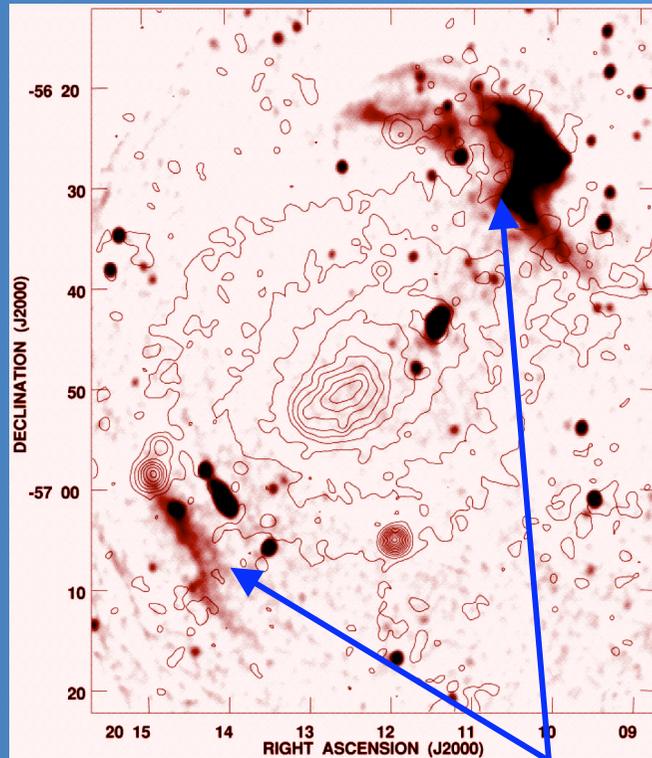
## 2d. 銀河団のCooling Flow伝説

- 銀河団中心部でのプラズマ温度の低下は、放射冷却のためだろう  
∴) cooling time  $\sim 0.1 t_H$
- プラズマは圧力低下、中心に流入、密度上昇、さらに冷える。  
 $t_H$ で $\sim 10^{12} M_\odot$ が中心に集積 (Cooling flow伝説、Fabian+94)。
- 「あすか」 $\Rightarrow$ どの銀河団でも低温プラズマの量は、CF説の予想の  
 $\sim 1/10$ 、CFは存在しない！ (牧島+2001)
- CFを阻止する隠れた宇宙最大の加熱源は？ SN加熱では1桁不足。
- 中心でのプラズマ温度は、外側の $\sim 1/3$ で「下げ止まる」。中心部で、低温と高温のプラズマが共存。



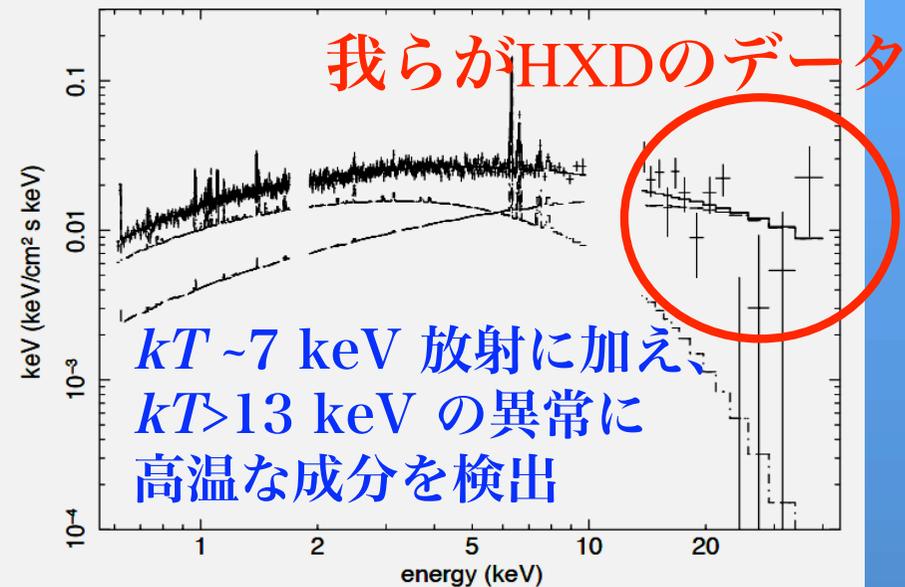
## 2e. 磁場と粒子加速

X線 (等高線) と 843 MHz (グレイスケール) で見た Abell 3667 (Roettinger *et al.* 1999)



電波ローブ  $\propto u_e u_m$

「すぎく」 X線 スペクトル (中澤+08)

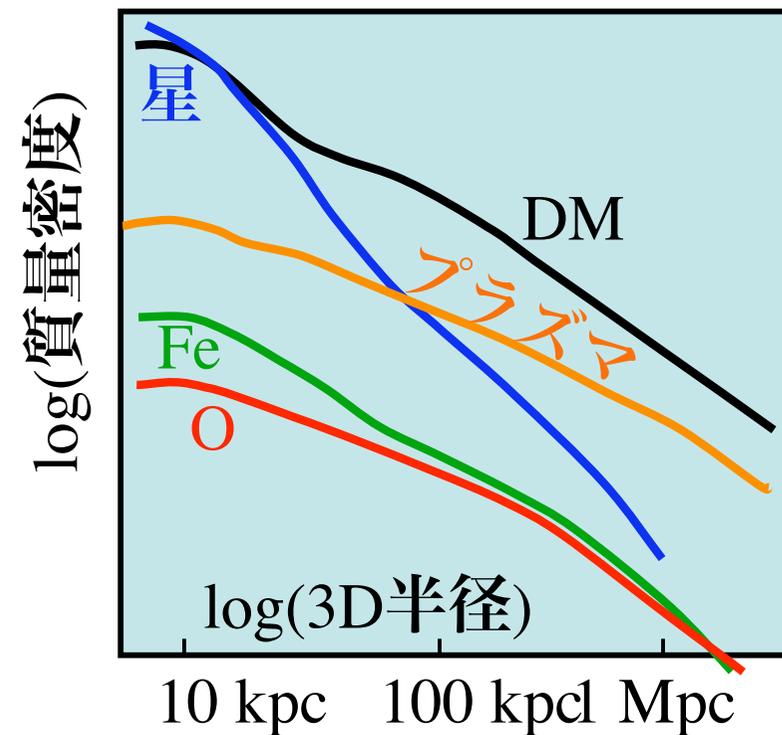


相対論的電子の逆コンプトン硬 X線 ( $\propto u_e u_{\text{CMB}}$ ) には厳しい上限  
→電波と合わせて,  $B > 2 \mu\text{G}$

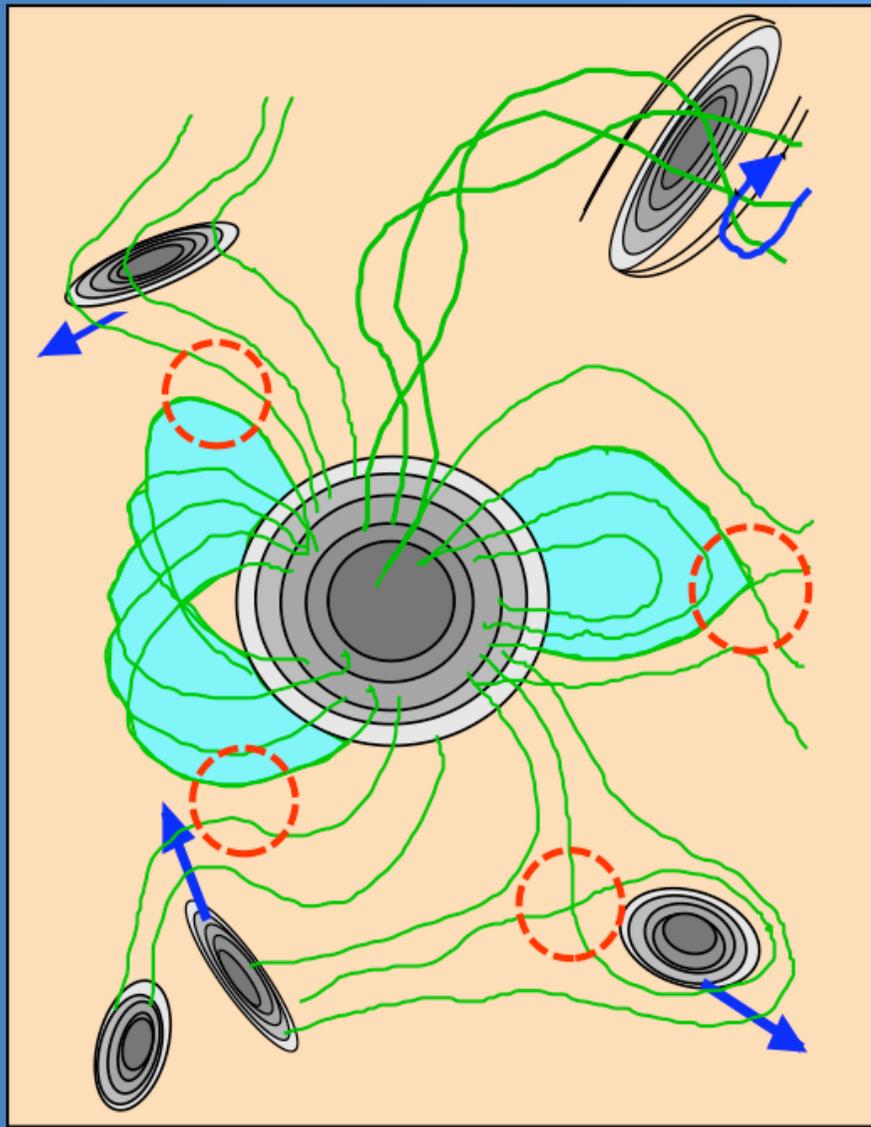
## 2f. 銀河は中心に集中している

- 銀河はプラズマより強く中心に集中。中心ほど銀河形成の効率が高かった??
- $M_{pl} \sim 3M_{\star}$ 、 $Z_{pl} \sim 0.3Z_{\odot}$   
→ プラズマ中の重元素量 ~ 星の中の重元素
- 銀河はプラズマ中の重元素より強く中心集中。
- 重元素がoutflow? 否、CFを阻止する以上のエネルギー注入が必要。
- 銀河が中心に落下?

「すぎく」など  
川原田+ (2008)



## 2g. 七不思議を解決するアイデア



- 高温プラズマ中で、中心銀河のコロナは低温の独立圏を形成→(3)
- 他の銀河は、重元素をまき散らしつつプラズマ中を運動、磁力線を引き延ばす →(5)
- 磁気リコネクションによる加熱がプラズマ冷却を阻止→(4)
- 粒子加速：「すぎく」HXDでは厳しい上限。将来の課題。→(6)
- 銀河はプラズマの抵抗で運動エネルギーを失い、 $t_H$ かけて重元素を捲き散らしつつ中心に落下。→(7)
- 落下した銀河が合体しcDに。→(2)
- プラズマが銀河に及ぼす抵抗が環境効果の源泉。→(1)

## 2h. オーダー算

- 銀河の運動エネルギー

$$E = (1/2) Mv^2 = 1 \times 10^{60} (M/10^{11} M_0)(v/10^8 \text{cm/s})^2 \text{ ergs}$$

- プラズマの動圧によるエネルギー損失

$$-dE/dt = m_p n v^3 \pi R^2 = 5 \times 10^{42} (n/10^{-3}) \text{ erg/s}$$

- エネルギー損失のタイムスケール

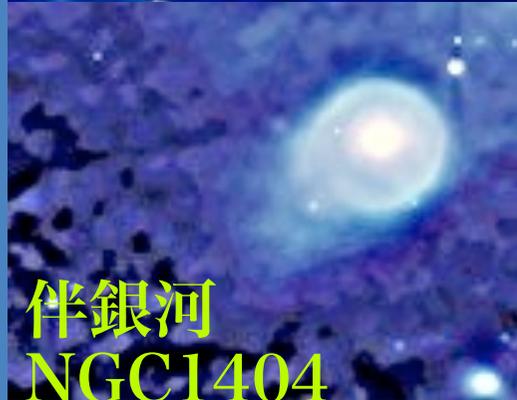
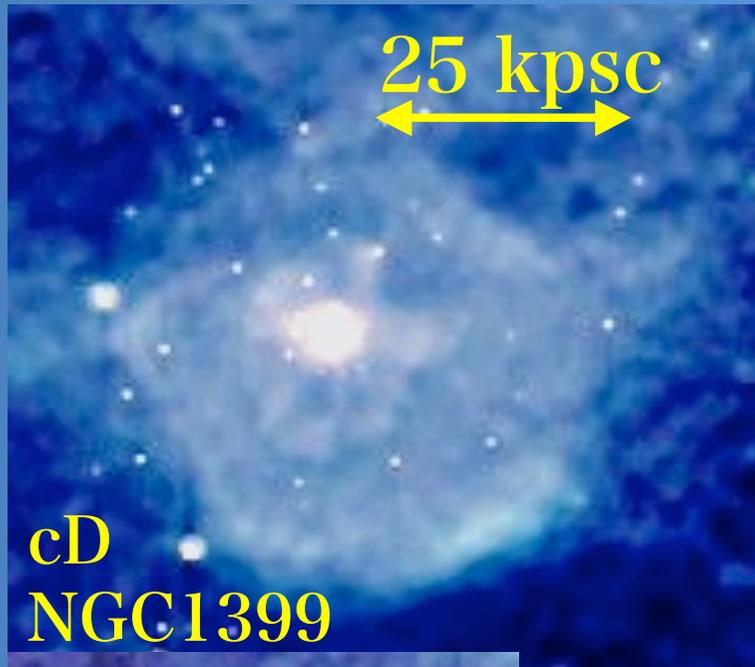
$$\tau = E/|dE/dt| \sim 2 \times 10^{17} \text{ sec} = 0.5 t_H$$

- 銀河がプラズマに与えるエネルギー

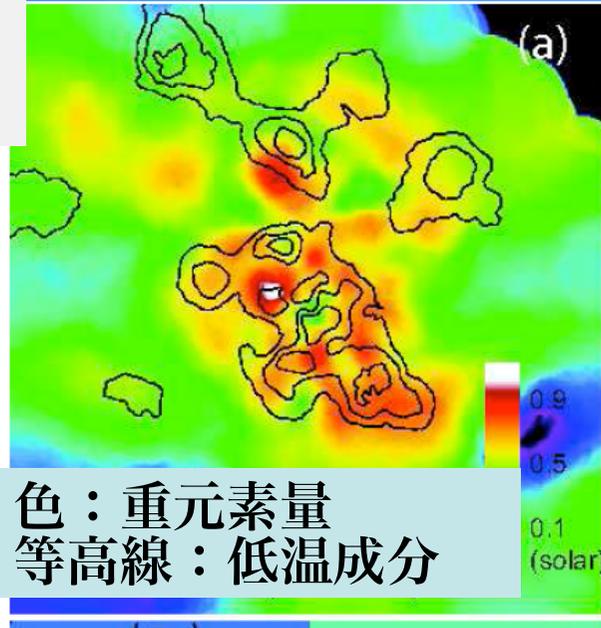
$$L = \eta N_{\text{gal}} \times |-dE/dt| \sim \eta 10^{45} \text{ erg/s}$$

# 2i. いくつかの証拠

ChandraによるFornax銀河団のX線画像 (unsharp masking)

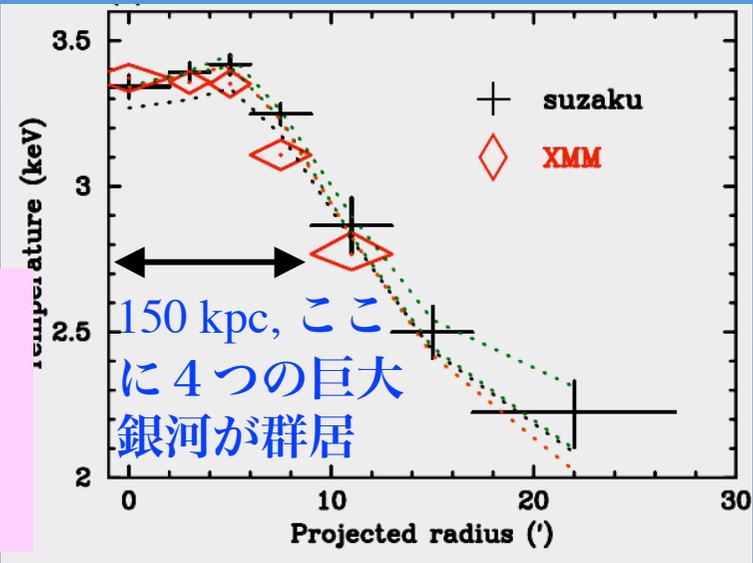


2008/8/31



ChandraによるAbell 1795の中心部 300 kpc のX線画像 (Gu, Maki-shima+08)

cDをもたない銀河団  
Abell 1060の温度は  
中心で上昇! 「すぎ  
く」 Sato+ (2008)

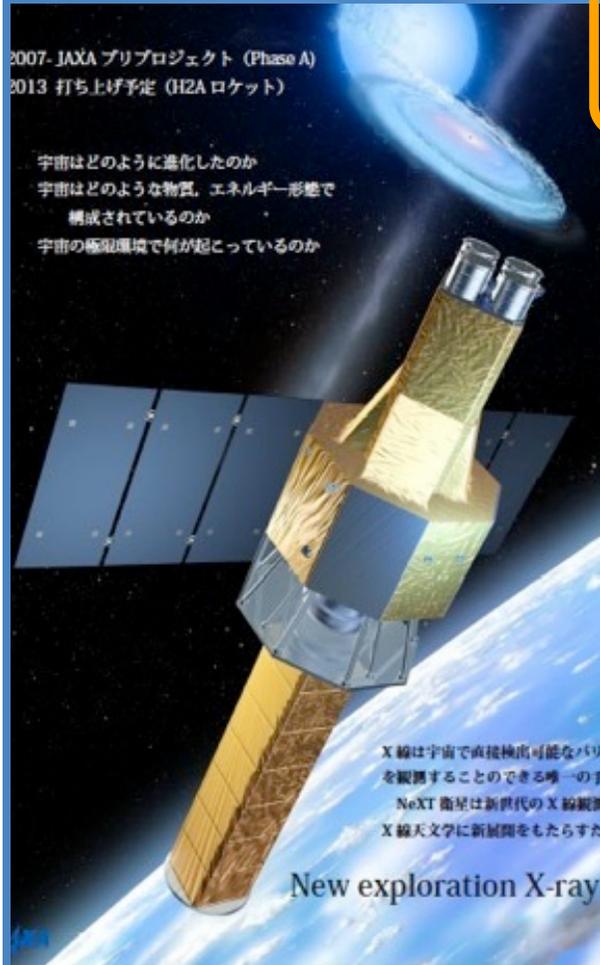


## 2j. 今後の挑戦

- $z=0 \sim 0.7$  の銀河団で、銀河の空間分の進化を探る。  
X線の空間分布でノーマライズ。
- 鉄輝線のドップラー偏移を極低温X線カロリメータで計測することで、銀河の運動に伴ってプラズマが引きずられる様子を解明。 *ASTRO-H (2013)*
- Fe, S, Si, Mg, Neの輝線幅を極低温X線カロリメータで計測、熱的ドップラーと乱流ドップラーを分離し、プラズマ乱流を捉える。 *ASTRO-H*
- 「すぎく」の発見した、合体銀河の超高温成分の空間位置を、硬Xイメージャーで特定する。 *ASTRO-H*
- 「すぎく」HXDより1桁高い硬X線感度を駆使して、非熱的放射の「検出」を目指す。 *ASTRO-H*

Project 7X の第2期計画

## §3. ASTRO-H



NeXT (New Exploration X-ray Telescope)  
→ ASTRO-H, 2013年度にH2Aロケットで↑

- $\delta E/E=0.1\%$ を狙う**極低温X線カロリメータ**  
(JAXA, 首都大, 金沢大, 理研, 埼玉大, NASA  
ほか)。微量元素探査、イオン温度計測、  
天体の動力学、..「すぎく」再挑戦。
- 80 keV まで集光できる**多層膜スーパー  
ミラー**(名大、JAXAほか)
- SiとCdTeを用いた**硬X線イメージャー**  
(JAXA, 東大, 広大, 埼大, Stanford他)  
銀河団での粒子加速、隠れたBH探査など。
- コンプトン散乱を用いた**軟ガンマ線検出器**  
(同上) ; 511 keV 対消滅線 !
- 国産CCDを用いた**軟X線イメージャー**  
(阪大, 京大, 理研, 立教ほか)