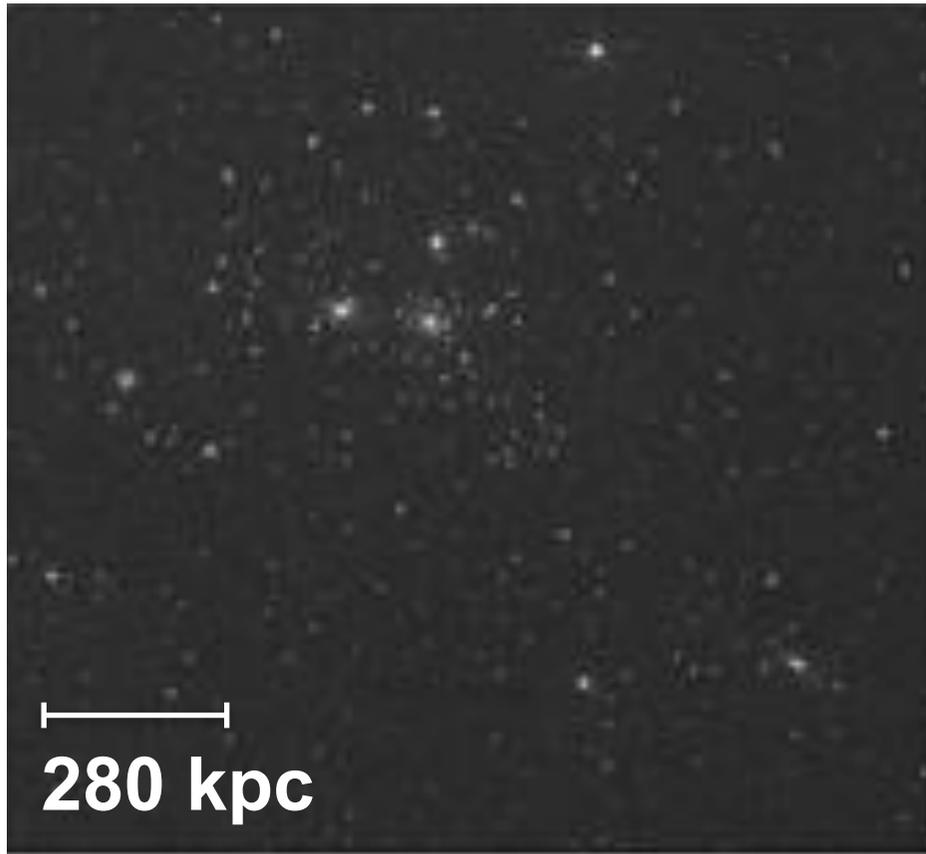


X線天文衛星すざくによる
Abell 478銀河団の外縁部観測から
銀河団の成長過程を探る

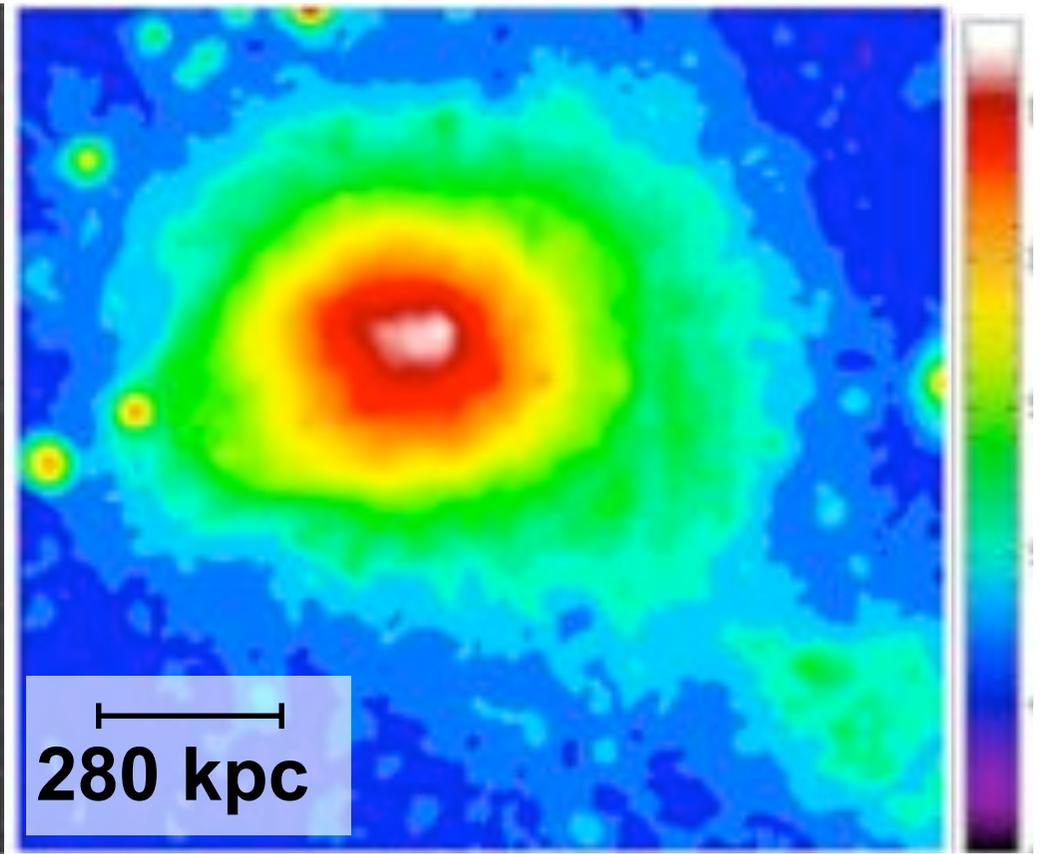
東京理科大学 修士1年
望月ゆきこ

かみのけ座銀河団の場合

可視光画像(銀河)



X線画像(銀河団ガス)



明

出典:理科年表オフィシャルサイト

暗

上の図はかみのけ座銀河団の可視光画像とX線画像である
可視光では無数の銀河が見えるが、X線では銀河団ガスが明るく見える
これは、温度数~数十 keVの銀河団ガスがX線を放射するためである

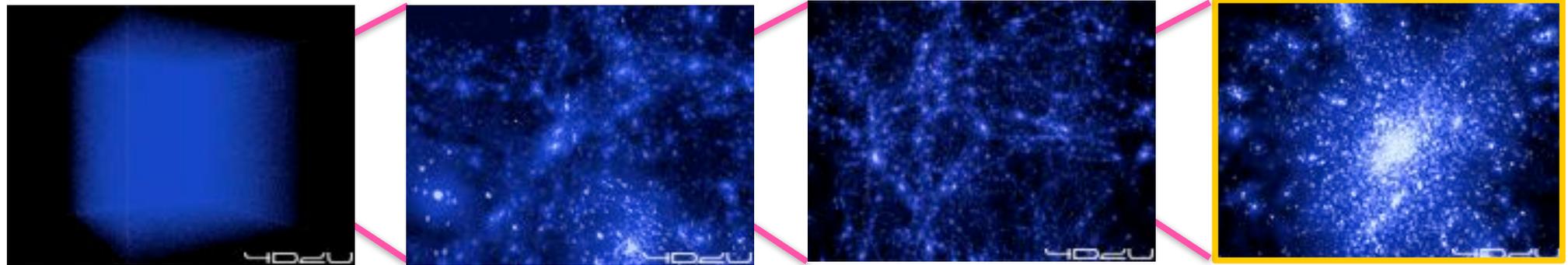
このように、X線で銀河団ガスを観測することができる

銀河団の成長

- ◆ 下の図は、冷たい暗黒物質を仮定した数値計算による、暗黒物質と銀河の分布の変化を表している
- ◆ 冷たい暗黒物質がクモの巣のように分布し、物質が重力により集まり、合体を繰り返すことで銀河団のような大きな構造が形成されていく

青い点：暗黒物質 白い点：銀河

銀河団



宇宙初期

時間

→ 現在

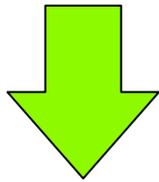
出典:国立天文台4次元デジタル
宇宙プロジェクトホームページ

銀河団の形成時間は宇宙年齢に匹敵しており、
現在も銀河団は成長し続けている

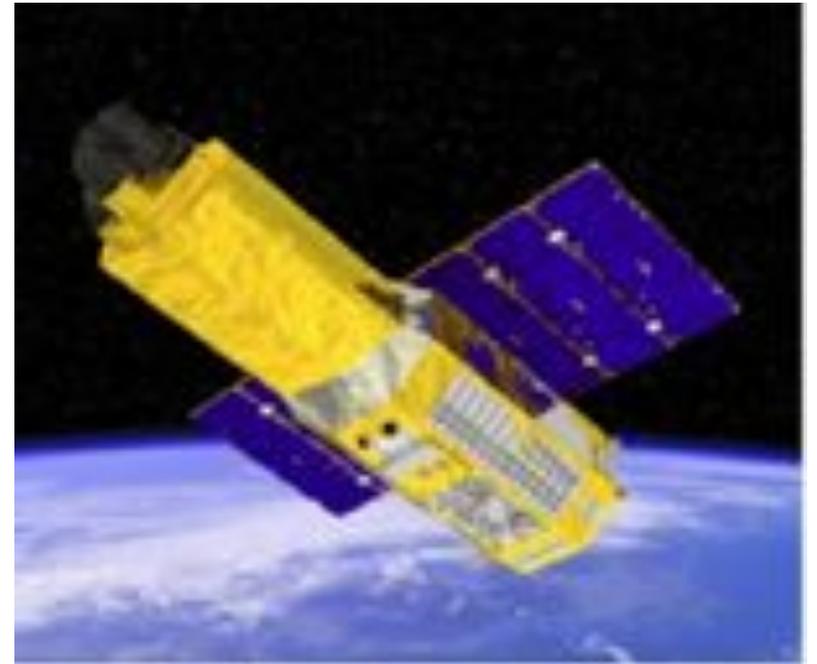
このように、銀河団は現在も物質が降着して成長を続けており、降着の現場である外縁部の観測は銀河団の成長過程を調べる上で重要である

すざく衛星

- ◆ 日本で5番目のX線天文衛星
- ◆ 4つのCCDを搭載
- ◆ 地磁気に守られているため、他の衛星よりも天体以外からのX線放射の影響が低い



銀河団外縁部など、
これまでの衛星より暗い領域の観測が可能である

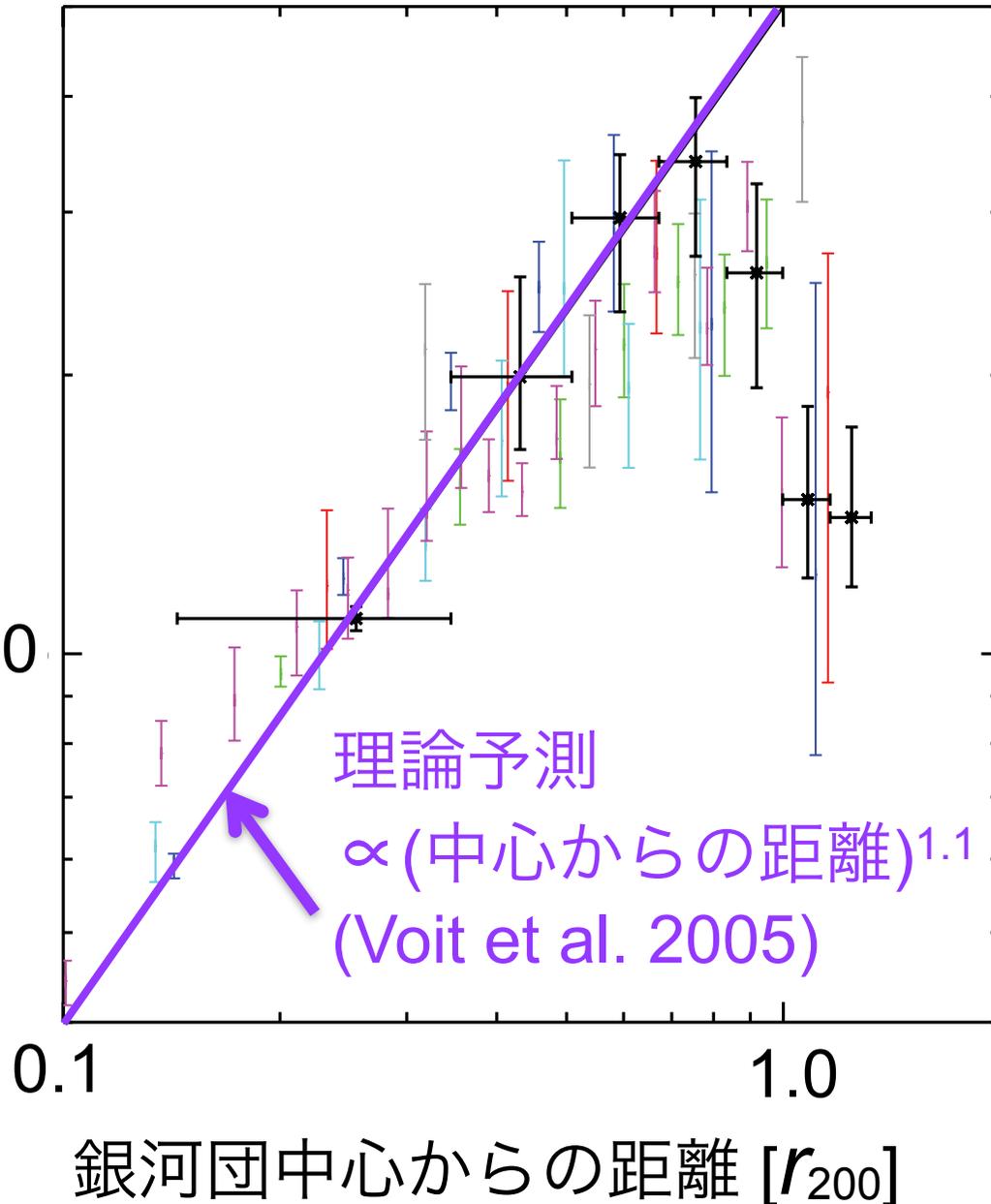


出典:JAXAホームページ

先行研究

いくつかの銀河団において、すざく衛星により銀河団外縁部の熱的力学状態が初めて報告された

平均温度で規格化した
エントロピー [cm^2]



エントロピー分布

PKS 0745-191 (Walker et al. 2012)
Abell 2029 (Walker et al. 2012)
Abell 2142 (Akamatsu et al. 2011)
Abell 1689
(Kawaharada et al. 2010)
Hydra A (Sato et al. 2012)
Abell 1413 (Hoshino et al. 2010)
Perseus (Simionescu et al. 2011)

銀河団外縁部で
理論予測と異なり
エントロピーが減少

※ r_{200} :内側の平均密度が宇宙の臨界密度の200倍となる半径

対象天体と研究目的

対象天体 Abell 478銀河団

赤方偏移 $z=0.0881$

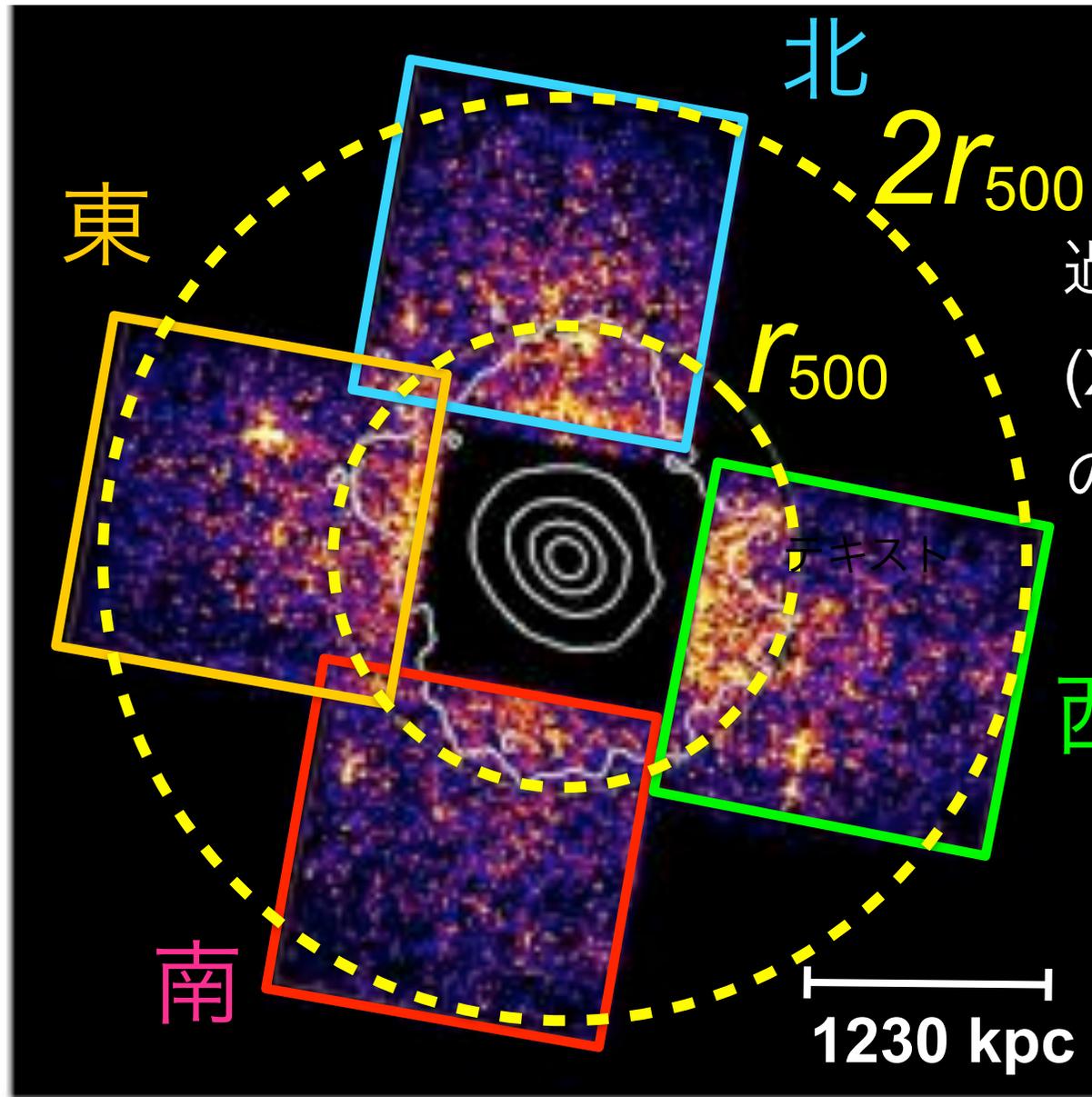
- ◆ これまでにすざく衛星で観測された巨大銀河団よりも距離が近く、銀河団ガスの物理量の統計誤差、系統誤差が小さくなる
- ◆ XMM-Newton衛星で内側の熱的力学状態は既に調べられており (Sanderson et al. 2010)、内側から外側にかけての変化の様子を調べることができる

研究目的

Abell 478銀河団の外縁部をすざく衛星を用いて観測し、外縁部の熱的力学状態をビリアル半径($\sim 2r_{500}$)まで明らかにする

※ r_{500} :内側の平均密度が宇宙の臨界密度の500倍となる半径

すざく衛星によるAbell 478 銀河団の観測



2-5 keV

過去の観測
(XMM-Newton衛星)
の明るさの等高線

テキスト

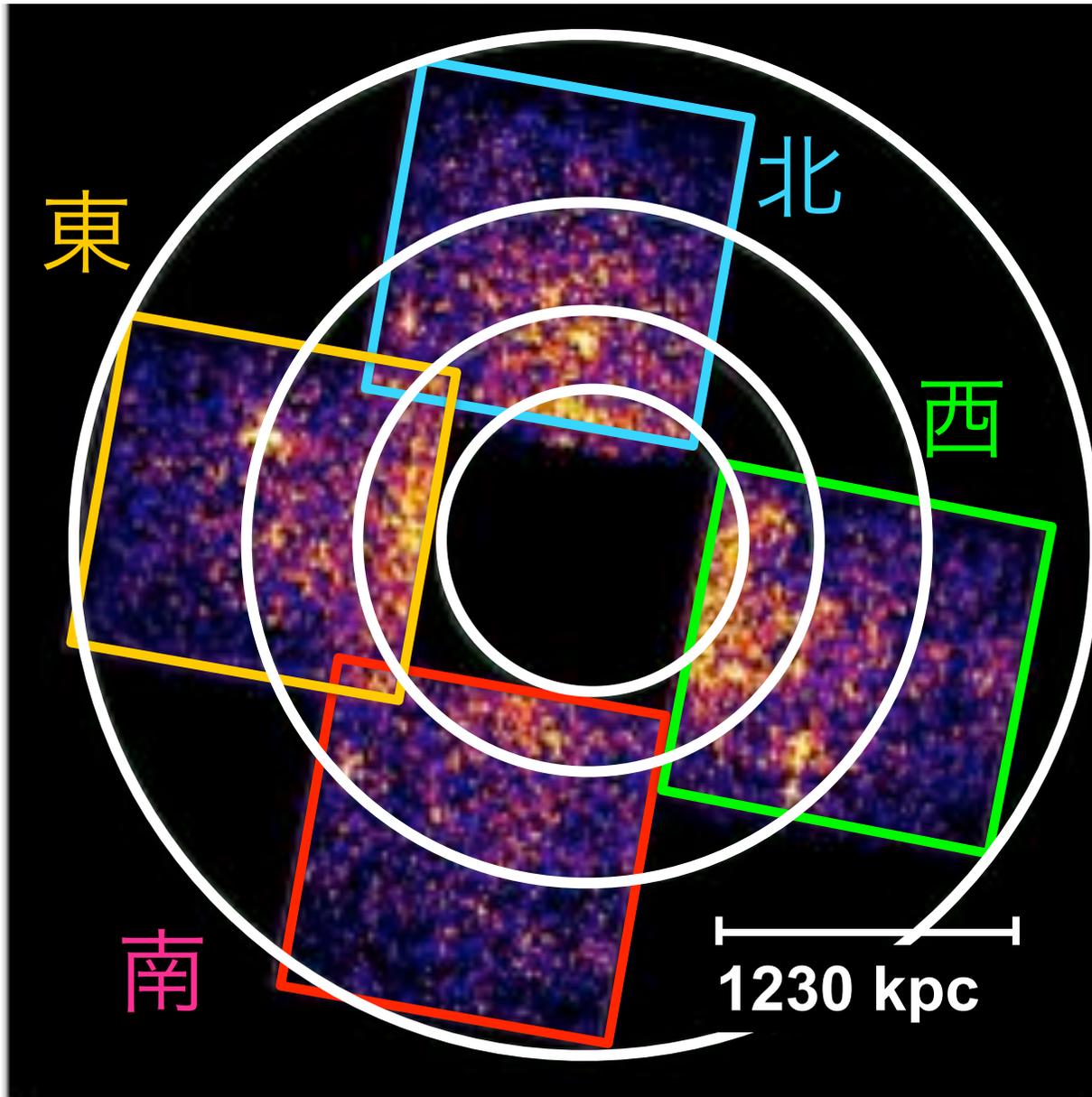
左図は2-5 keVの観測イメージ
である
このように、東西南北4方向に
おいて観測を行った



暗

明

観測データから温度と電子数密度を求める



3つの円環領域に分ける



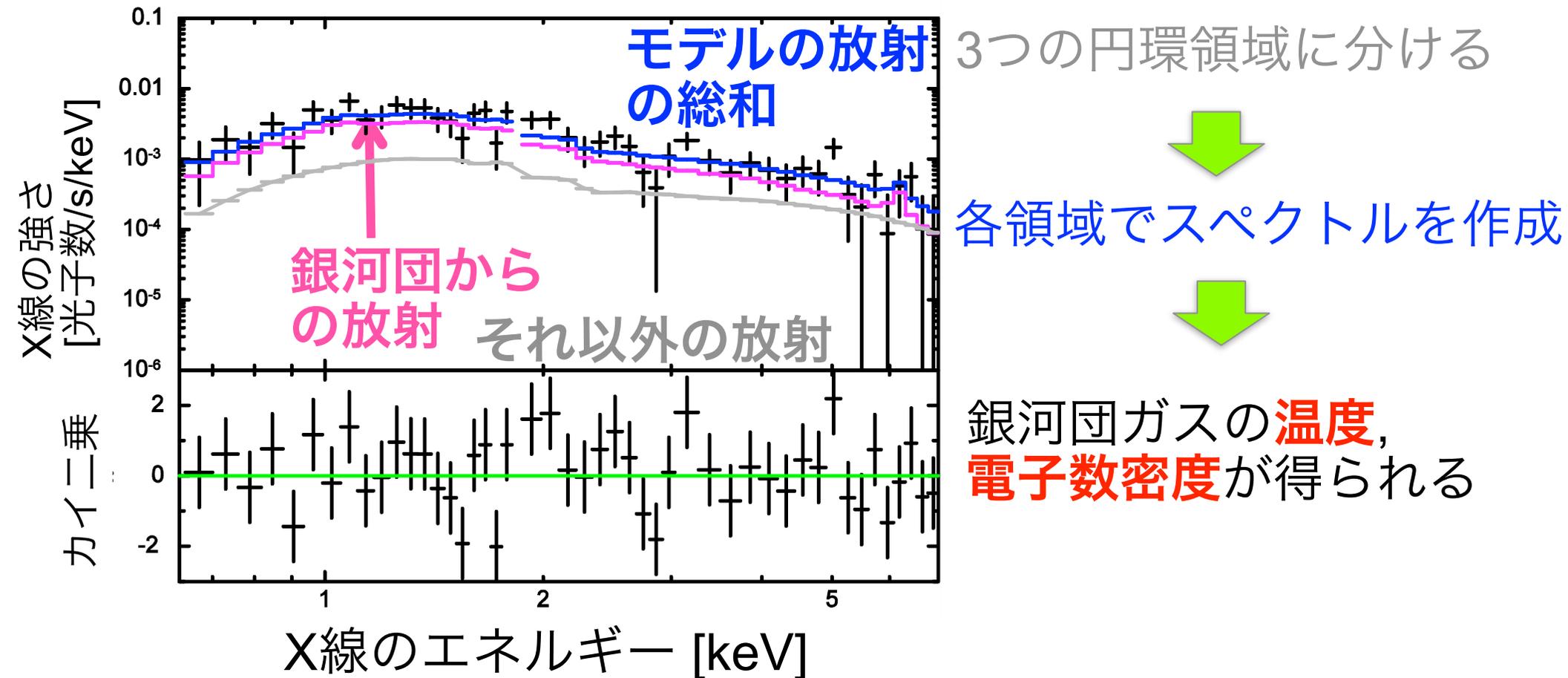
各領域でスペクトルを作成



銀河団ガスの**温度**,
電子数密度が得られる

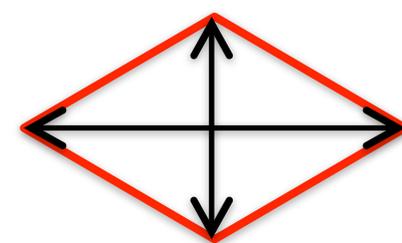
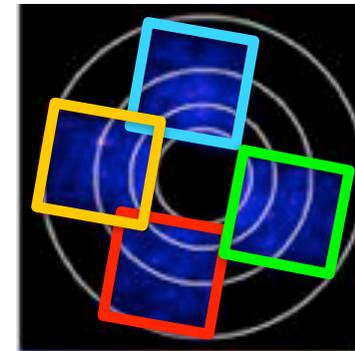
2-5 keV

観測データから温度と電子数密度を求める

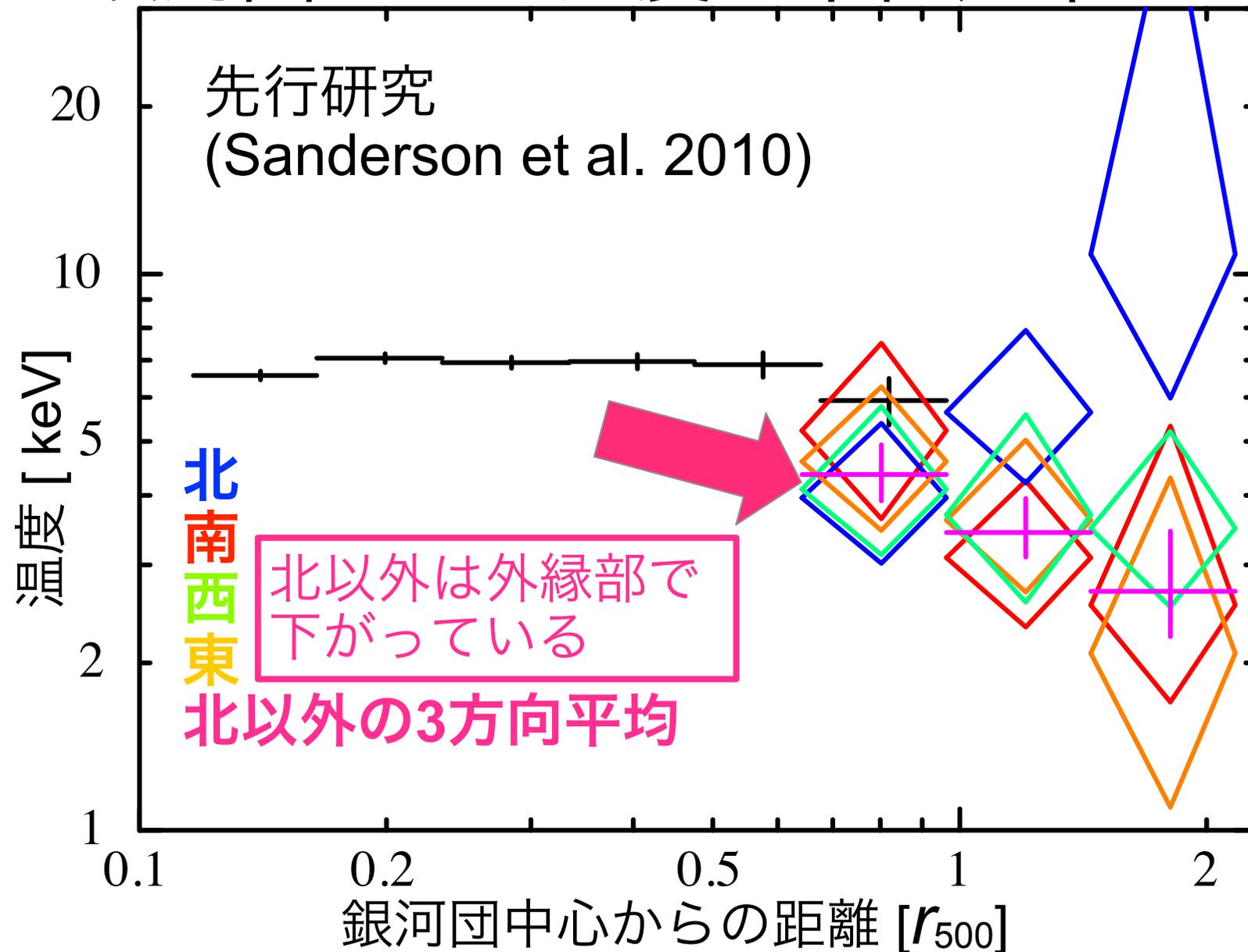


モデルの放射の総和 = **銀河団からの放射** + それ以外の放射
希薄な電離ガスの放射モデル
(熱制動放射 + 特性X線など)

銀河団ガスの温度の半径分布

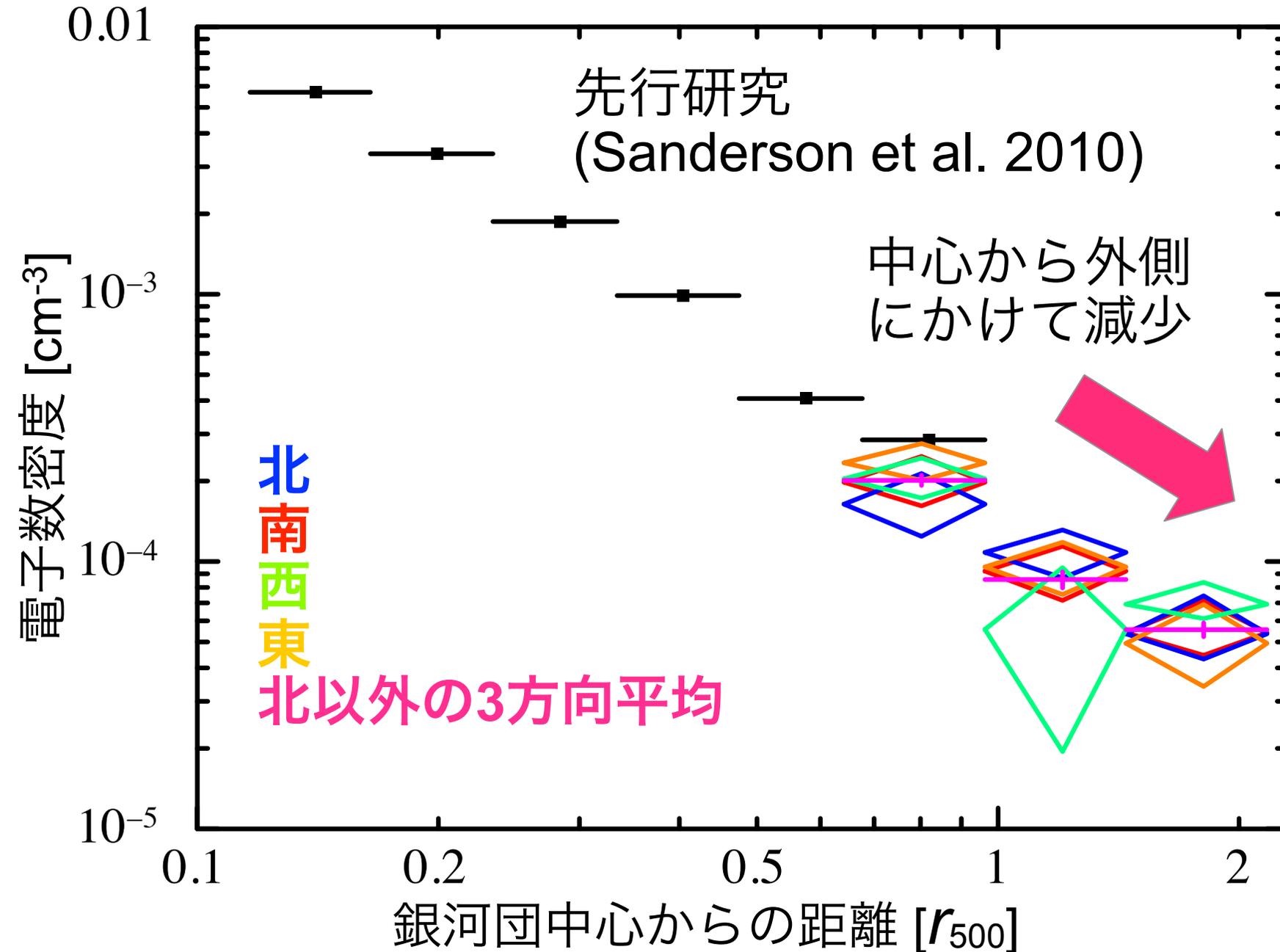
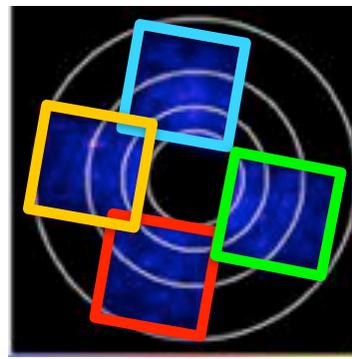


縦：90%
信頼度誤差
横：円環の
半径の幅



北:外縁部で温度上昇
点源などの影響を受けている可能性→今後の課題

銀河団ガスの電子数密度の半径分布



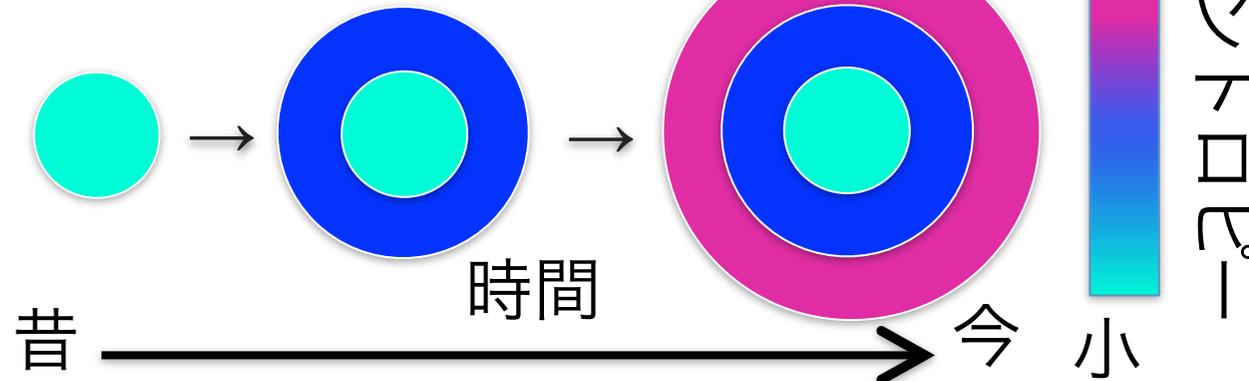
温度と電子数密度からエントロピーを求める

◆ エントロピー = $\frac{\text{温度}}{\text{電子数密度}^{2/3}}$

エントロピーは、衝撃波加熱の指標である
衝撃波加熱では降着する物質の重力エネルギーが
内部エネルギーに変換される

◆ 銀河団のエントロピー

銀河団の成長



最近形成された外側には
より大きな重力がはたらく

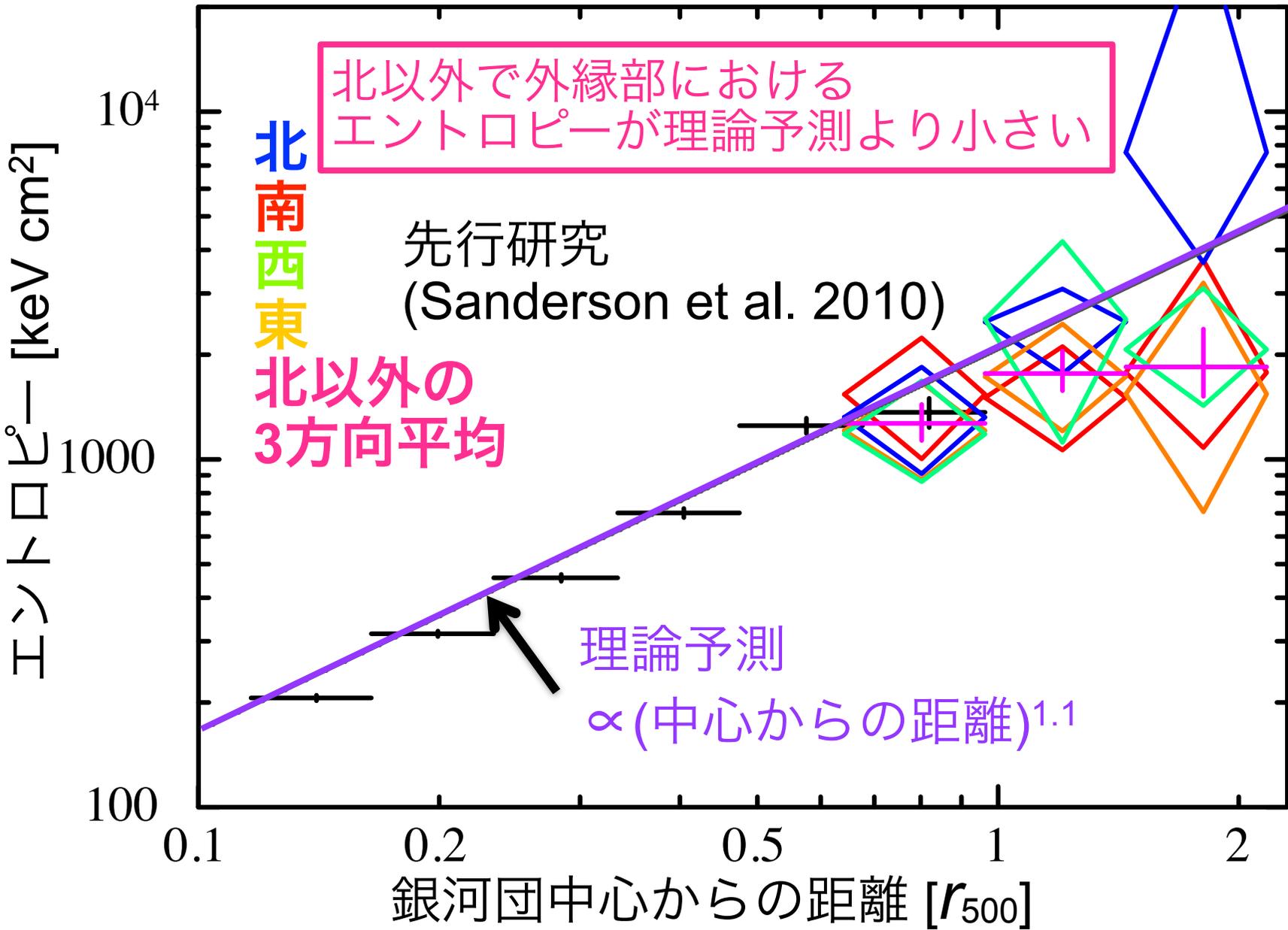
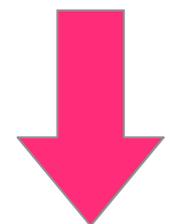
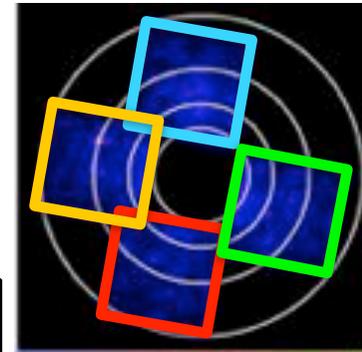


外側ほど大きな
エントロピーをもつ
と考えられる

重力による加熱のみ(重力エネルギーが全て内部エネルギーに変換される)
を考慮した理論予測：

エントロピー \propto (中心からの距離)^{1.1} Voit et al. (2005)

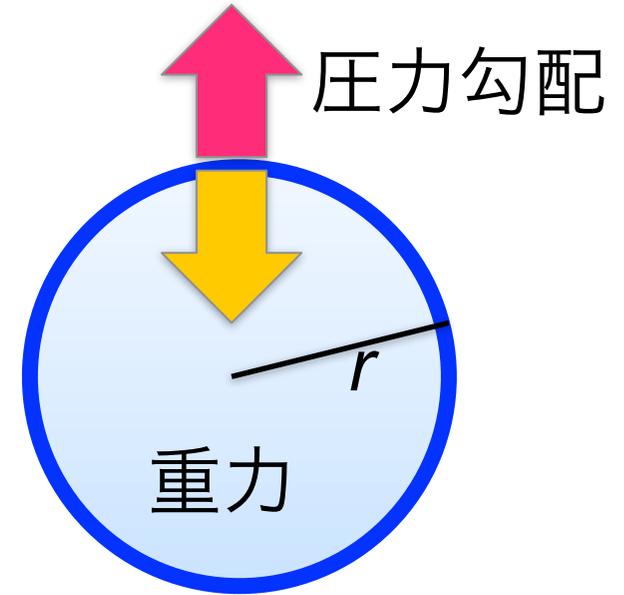
銀河団ガスのエントロピーの半径分布



静水圧平衡を仮定して質量を求める

◆ 静水圧平衡とは

銀河団ガスの圧力勾配と重力が
つりあっている状態



$$\frac{1}{\rho_{gas}} \frac{dP_{gas}}{dr} = - \frac{GM_{total}(<r)}{r^2}$$

半径 r より内側の質量

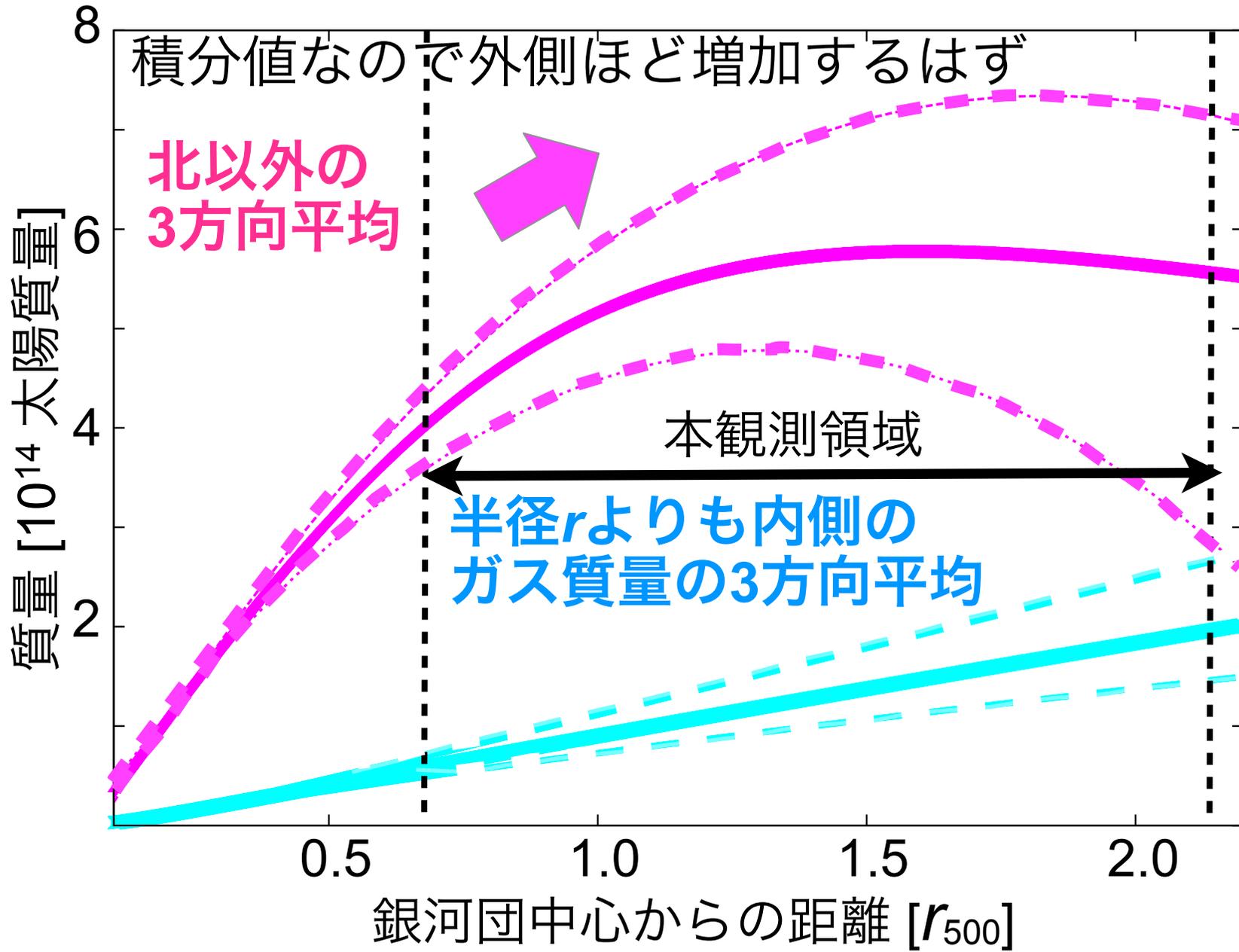
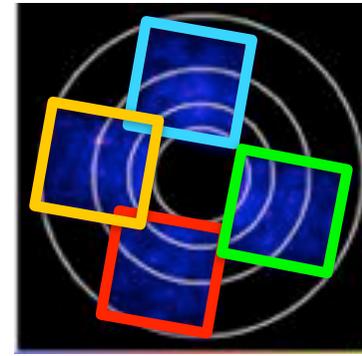
ρ_{gas} 銀河団ガスの密度(電子数密度から求まる)

P_{gas} 銀河団ガスの圧力(温度と電子数密度から求まる)



半径 r よりも内側の質量 $M_{total}(<r)$ が得られる

静水圧平衡を仮定した半径 r よりも内側の質量



外側で減少

※破線は誤差の範囲を表している

静水圧平衡が成り立っていないのではないか

考察 (エントロピーと静水圧平衡)

物理量	エントロピー (衝撃波加熱の指標)	静水圧平衡を仮定した 半径rよりも内側の質量
仮定	重力による加熱のみ 重力エネルギー = 内部エネルギー	静水圧平衡 圧力勾配 = 重力
予測	エントロピー \propto 半径の1.1乗	内側から外側に向けて増加
観測結果	北以外の外縁部で 予測より小さい	北以外の外縁部で 予測に反して減少
解釈	重力エネルギー > 内部エネルギー?	降ってきた物質により 力学エネルギーを得て 銀河団ガスが運動?

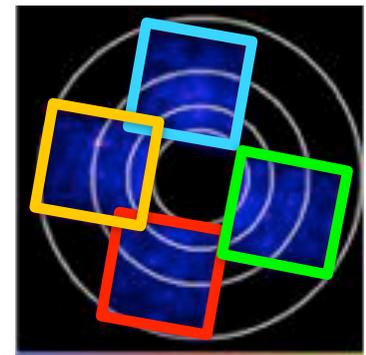
銀河団外縁部：重力エネルギー
→ 内部エネルギー + 運動エネルギーに変換?



まとめ

Abell 478銀河団の外縁部をすざく衛星を用いて観測し、外縁部の熱的力学状態をビリアル半径($\sim 2r_{500}$)まで明らかにする

- ◆ X線スペクトルから温度と電子数密度を求めた
- ◆ 銀河団の外縁部で温度は低下傾向
- ◆ 電子数密度は中心から外側にかけて減少
- ◆ **北以外**の外縁部でエントロピーが理論より小さかった
- ◆ 銀河団外縁部では静水圧平衡が成り立っていないのではないか



銀河団外縁部：**重力エネルギー**
→ **内部エネルギー+運動エネルギーに変換?**

宇宙最大の天体銀河団の成長の現場をみている