

Subaru/HSC サーベイ領域にある 重量級銀河団のX線観測による質量推定

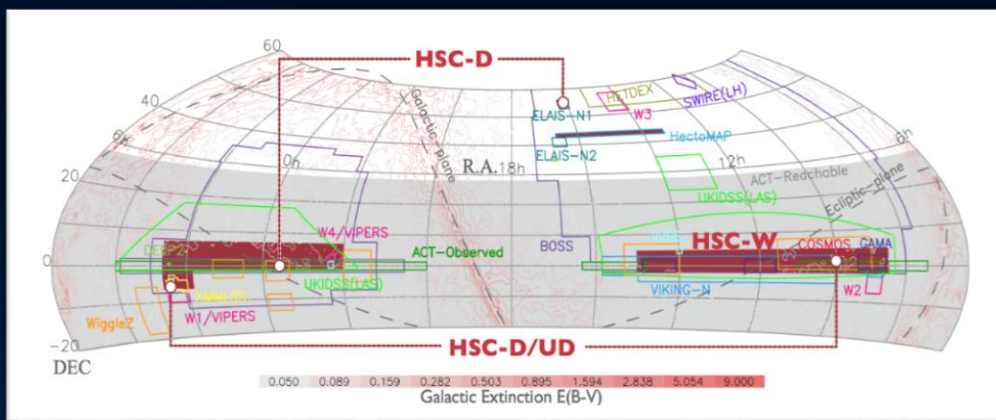
宮岡敬太

北口貴雄 岡部信広 深澤泰司（広大理）

HSC Cluster Members

すばる望遠鏡 HSC SSP の紹介

- すばる戦略枠サーベイ計画 SSP (Subaru Strategic Survey project)



- 2014 年から開始
- 5 バンド
- 300 夜
- 1400 平方度

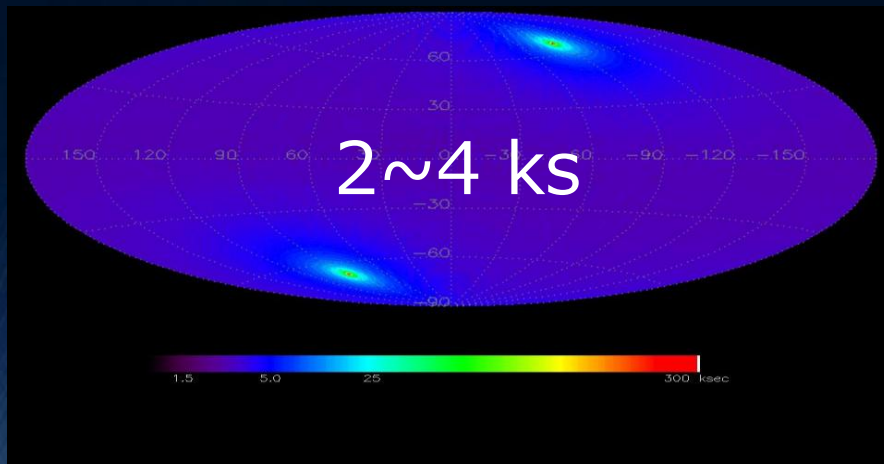
HSC SSP サーベイ領域

- 超広視野 CCDカメラ HSC により質の良いデータが観測
- 数千もの銀河団が観測され、可視光領域における新しい銀河団カタログの到来
- 今後の銀河団研究は HSC SSP を根底とした研究が主流

SRG 衛星 eROSITA の紹介

- 露と独の共同開発の衛星、軟X線CCD検出器 eROSITA

4年間のサーベイ後の Exposure map



- 2017年から開始
- 7年間
- 広視野 1 deg^2
- $\sim 10^5$ 個の銀河団を観測

- 殆どが浅いX線データ（平均 4 ks）しか観測されないため、ガス温度や静水圧平衡質量などの導出には光子統計が不足

目的と背景

- 相補的アプローチ

XMM-Newton 衛星の質の良いデータを用いて、HSC SSP 領域内の重量級銀河団の系統的な研究

X線銀河団カタログ MCXC (R.Piffaretti+10) を使用

- MCXC を用いた研究は eROSITA 打ち上げ前の今しかできない
- 重量級・低赤方偏移の銀河団でサンプル数を制限

「**最終目標**」 X線物理量と弱い重力レンズ質量、光学観測の関係性

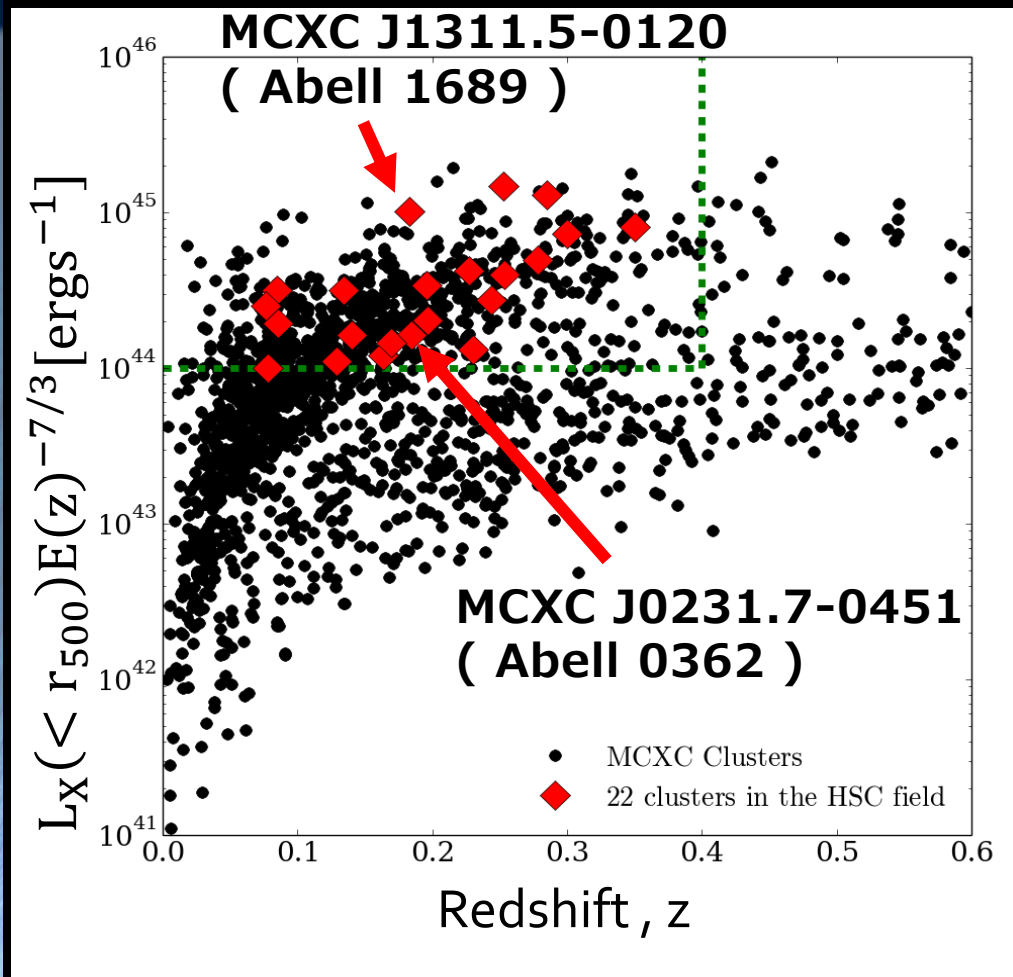
→ 静水圧平衡の妥当性やスケーリング関係の構築、質量関数より
宇宙論パラメータの制限 etc

スケーリング関係の構築は、eROSITA のX線全天サーベイに有益

目的と背景

- HSC SSPによって、大量に観測される銀河団データに対して、統計誤差は極めて小さくなる。そのため、保守的な解析が必要
 - 解析手法の細部に亘る検証を行い、保守的な解析手法を確立
 - 淡く広がったX線放射を使って、温度を正確に求めるためには、バックグラウンドなどの評価は重要
 - スペクトラム解析とイメージ解析両方を工夫
 - 今後の HSC SSP 領域の銀河団の系統的X線解析に適用可

サンプルセレクション



- $z < 0.4$
 $L_X E(z)^{-7/3} > 10^{44} \text{ ergs}^{-1}$
- 22個の銀河団を選定
うち12個はアーカイブデータ
残りは新しく観測したデータ
- Abell 1689 (35 ks)
解析方法の確立のため、
さまざまな検証
Abell 0362 (23 ks)
新しい観測データを解析

解析の流れ

- 目的：静水圧平衡を仮定して、銀河団全質量を導出

$$M(r) = -\frac{k_B T r}{\mu m_p G} \left(\frac{d \ln \rho_{gas}}{d \ln r} + \frac{d \ln T}{d \ln r} \right)$$

$$H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$$

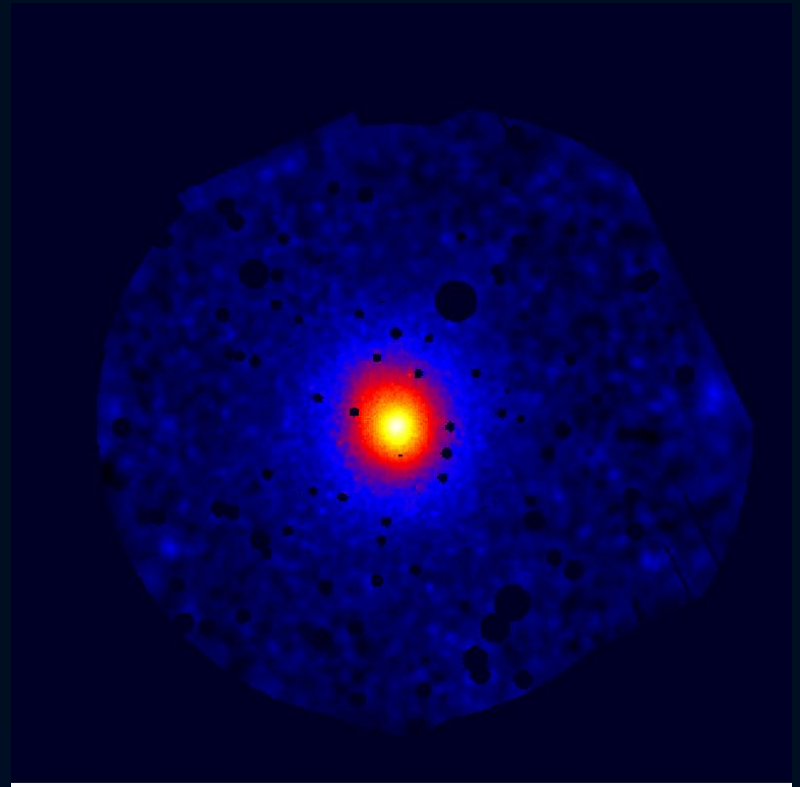
- ガス密度分布
イメージ解析から導出
- 温度分布
スペクトル解析から導出
- 解析ツール

XMM-Newton公式の広がった天体に特化したソフトウェア

Extended Source Analysis Software (ESAS)

Abell 1689 イメージ解析

- Vignetting 補正後のイメージより表面輝度分布を作成
- モデル関数はVikhlinin+06から引用
- 3つの検出器を同時フィット
- 各検出器の有効面積 & PSFの違いを考慮
- 視線方向に積分して、PSFを畳み込む

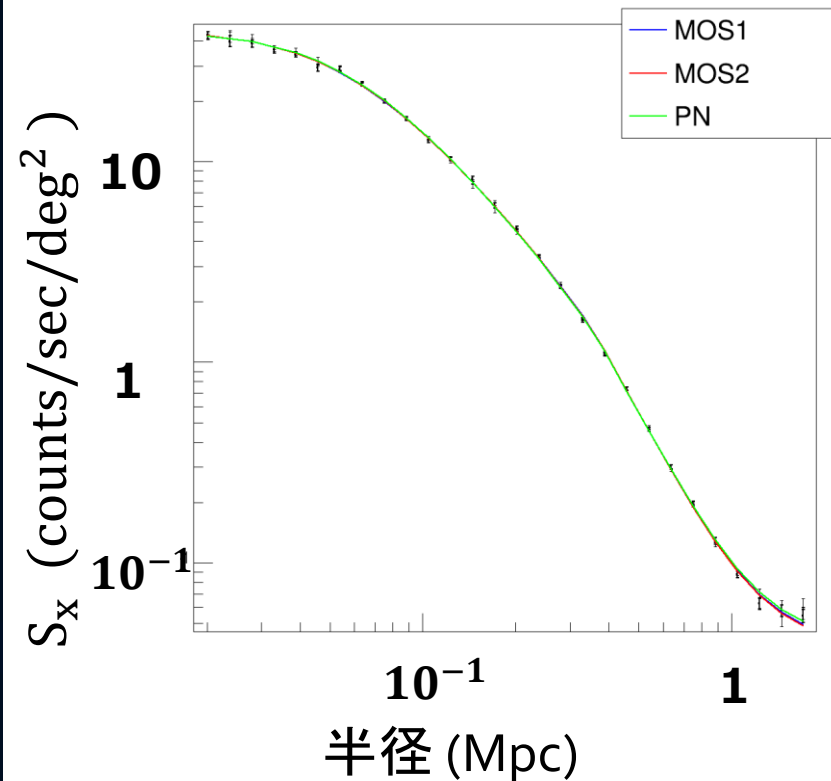


$$n_e n_p = \frac{n_{01}^2 (r/r_c)^{-\alpha}}{(1 + (r/r_c)^2)^{3\beta_1 - \frac{\alpha}{2}}} \frac{1}{(1 + (r/r_c)^\gamma)^{\frac{\epsilon}{\gamma}}} + \frac{n_{02}^2}{(1 + (r/r_{c2})^2)^{3\beta_2}}$$

Abell 1689 イメージ解析

- Vignetting 補正後のイメージより表面輝度分布を作成
- モデル関数はVikhlinin+06から引用
- 3つの検出器を同時フィット
- 各検出器の有効面積 & PSFの違いを考慮
- 視線方向に積分して、PSFを畳み込む

表面輝度分布

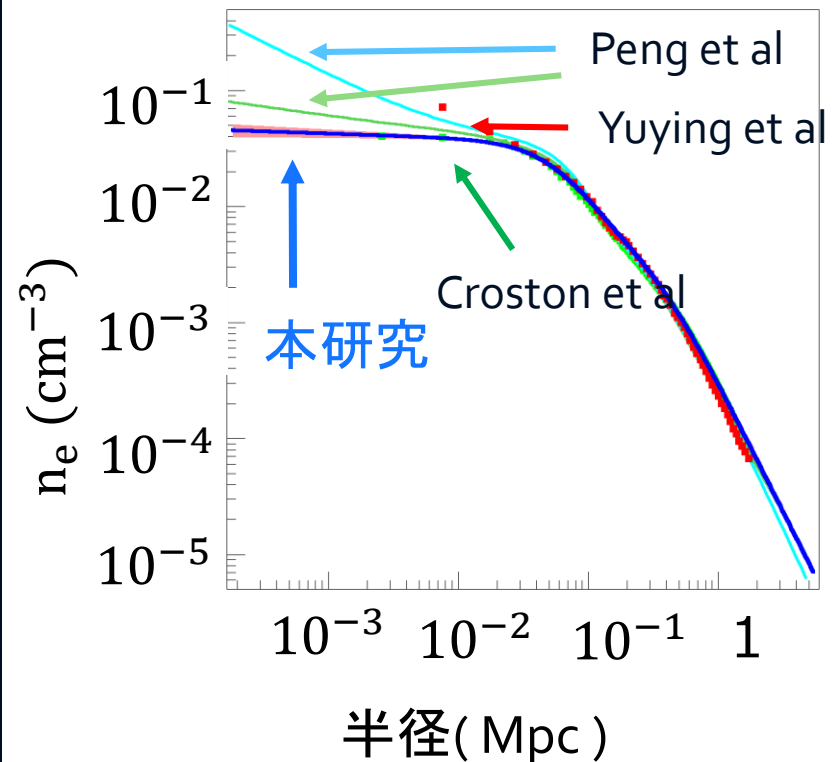


$$n_e n_p = \frac{n_{01}^2 (r/r_c)^{-\alpha}}{(1 + (r/r_c)^2)^{3\beta_1 - \frac{\alpha}{2}}} \frac{1}{(1 + (r/r_c)^\nu)^{\frac{\epsilon}{\nu}}} + \frac{n_{02}^2}{(1 + (r/r_{c2})^2)^{3\beta_2}}$$

Abell 1689 イメージ解析

- Vignetting 補正後のイメージより表面輝度分布を作成
- モデル関数はVikhlinin+06から引用
- 3つの検出器を同時フィット
- 各検出器の有効面積 & PSFの違いを考慮
- 視線方向に積分して、PSFを畳み込む

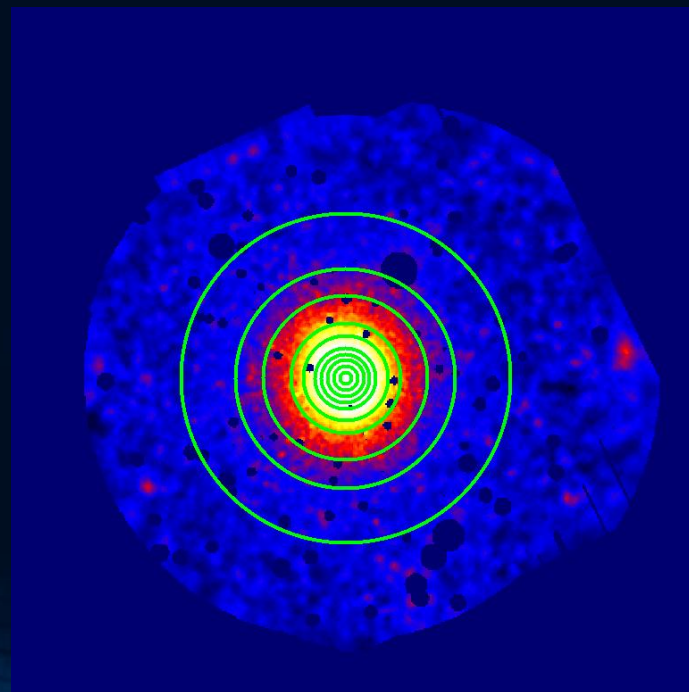
電子密度分布



$$n_e n_p = \frac{n_{01}^2 (r/r_c)^{-\alpha}}{(1 + (r/r_c)^2)^{3\beta_1 - \frac{\alpha}{2}}} \frac{1}{(1 + (r/r_c)r)^{\frac{\epsilon}{\gamma}}} + \frac{n_{02}^2}{(1 + (r/r_{c2})^2)^{3\beta_2}}$$

Abell 1689 スペクトル解析

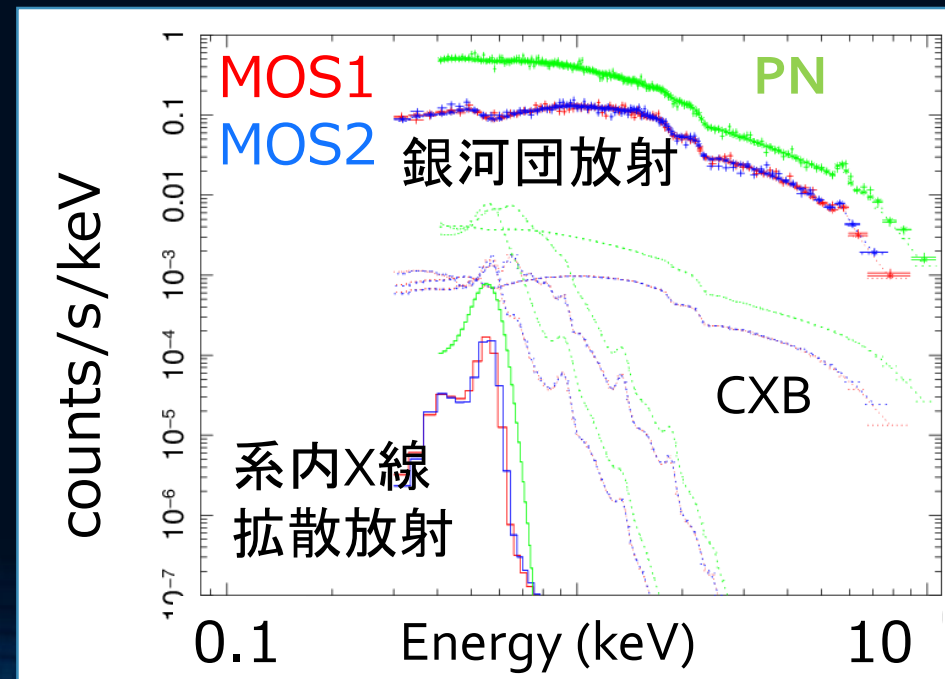
- 検出器バックグラウンドは時間変動するので、同観測データを用いてモデル化
- 各検出器で10個の円環に分割し、30個のスペクトルを同時フィット
- モデル = 銀河団放射 + 背景放射 + 検出器バックグラウンド
 - 銀河団ガス放射 = 光学的に薄いプラズマ放射モデル APEC
 - 背景放射 = 宇宙X線背景放射 + 系内X線拡散放射
- フリーパラメータ 147個
 - 各円環の温度、アバundance
ノーマライゼーション 24個
 - 検出器由来の輝線は 110個
 - 背景放射 7個
 - 検出器由来の連続成分 4個
- XSPEC (12.9系) のAPECモデルの致命的なバグを発見・修正



Abell 1689 スペクトル解析

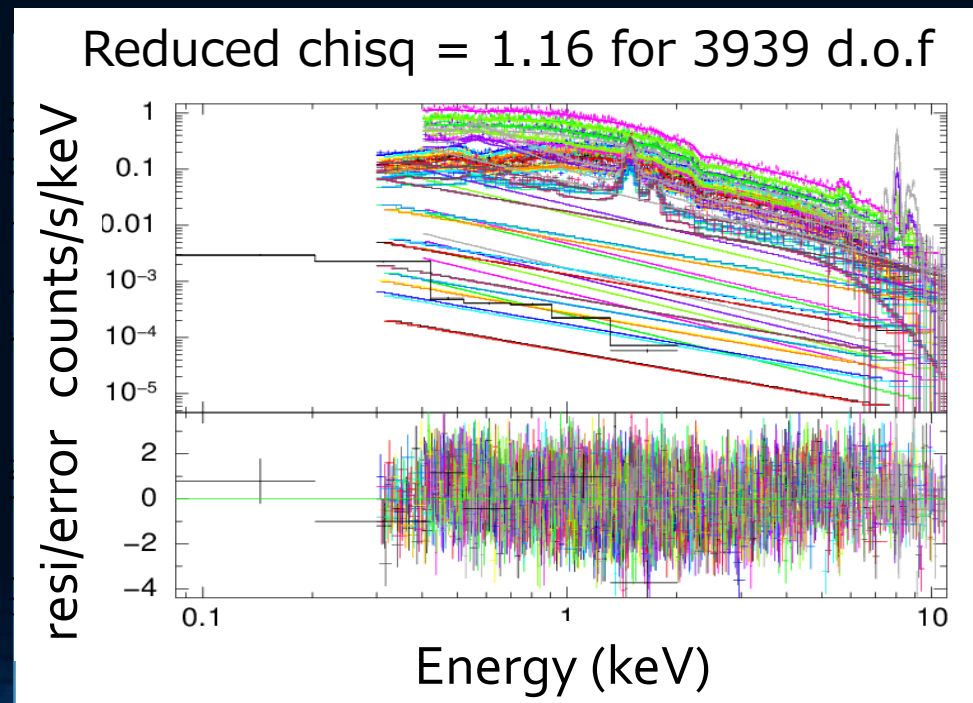
- 検出器バックグラウンドは時間変動するので、同観測データを用いてモデル化
- 各検出器で10個の円環に分割し、30個のスペクトルを同時フィット
- モデル = 銀河団放射 + 背景放射 + 検出器バックグラウンド
 - 銀河団ガス放射 = 光学的に薄いプラズマ放射モデル APEC
 - 背景放射 = 宇宙X線背景放射 + 系内X線拡散放射
- フリーパラメータ 147個
 - 各円環の温度、アバundance
ノーマライゼーション 24個
 - 検出器由来の輝線は 110個
 - 背景放射 7個
 - 検出器由来の連続成分 4個
- XSPEC (12.9系) のAPECモデルの致命的なバグを発見・修正

MCXC_J1311.5-0120 80-100 spectrum



Abell 1689 スペクトル解析

- 検出器バックグラウンドは時間変動するので、同観測データを用いてモデル化
- 各検出器で10個の円環に分割し、30個のスペクトルを同時フィット
- モデル = 銀河団放射 + 背景放射 + 検出器バックグラウンド
 - 銀河団ガス放射 = 光学的に薄いプラズマ放射モデル APEC
 - 背景放射 = 宇宙X線背景放射 + 系内X線拡散放射
- フリーパラメータ 147個
 - 各円環の温度、アバundance
ノーマライゼーション 24個
 - 検出器由来の輝線は 110個
 - 背景放射 7個
 - 検出器由来の連続成分 4個
- XSPEC (12.9系) のAPECモデルの致命的なバグを発見・修正



Abell 1689 温度分布

- スペクトルフィットから得られる各円環の温度を半径ごとにプロット

- XMM-Newton 衛星の3つの先行研究の結果と比較

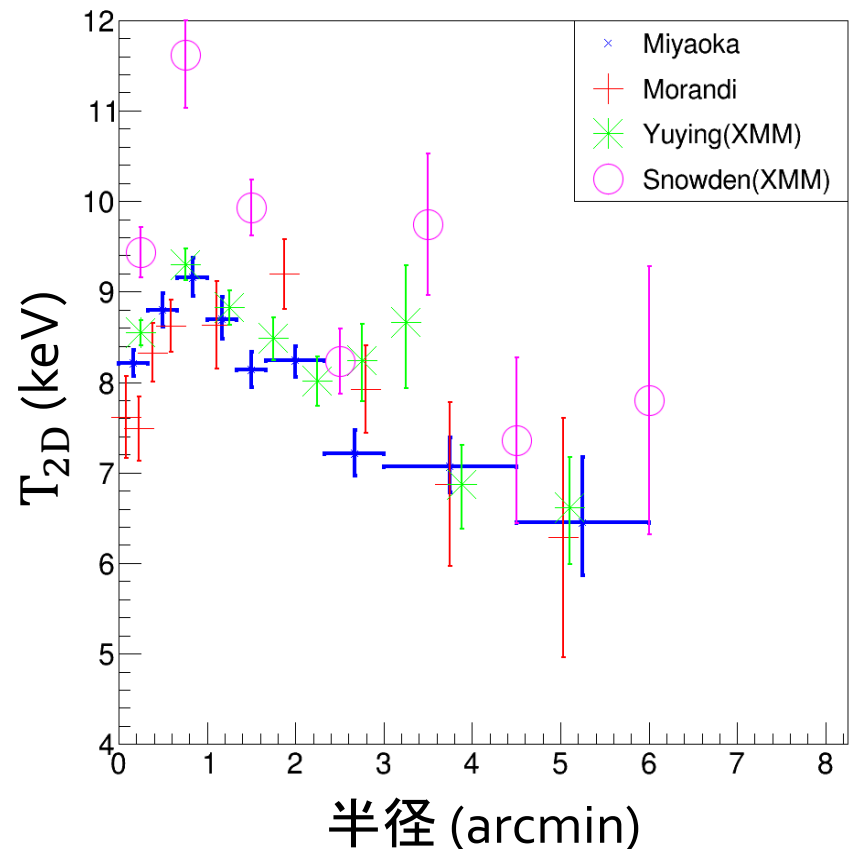
Morandi+11 (XMM)

Yuying+07 (XMM)

Snowden+07(XMM)

- Caldb 内のレスポンスのバージョンの違いにより温度の過大評価をしている Snowden+07 を除けば、先行研究とエラーの範囲内で一致

2次元温度分布



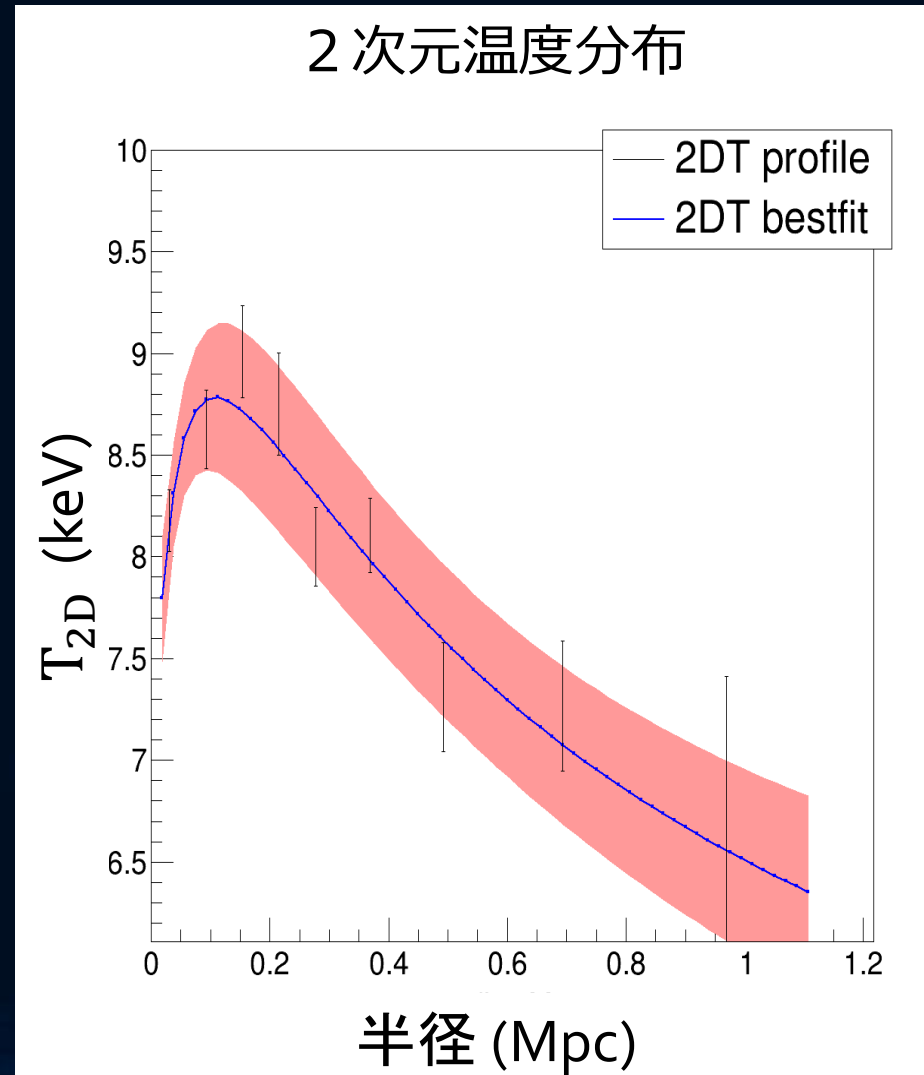
Abell 1689 温度分布

- 温度分布モデルは
Vikhlinin+06 から引用

$$T_{3D}(r) = T_0 t_{cool} \frac{(r/r_t)^{-a}}{[1 + (r/r_t)^b]^{\frac{c}{b}}}$$

$$t_{cool} = \frac{(x + T_{min}/T_0)}{(x + 1)} \quad x = \left(\frac{r}{r_{cool}}\right)^{a_{cool}}$$

$$T_{ew}(r) = \frac{\int n_e n_p T_{3D}^{\frac{3}{2}} dV}{\int n_e n_p T_{3D}^{\frac{1}{2}} dV}$$



Abell 1689 温度分布

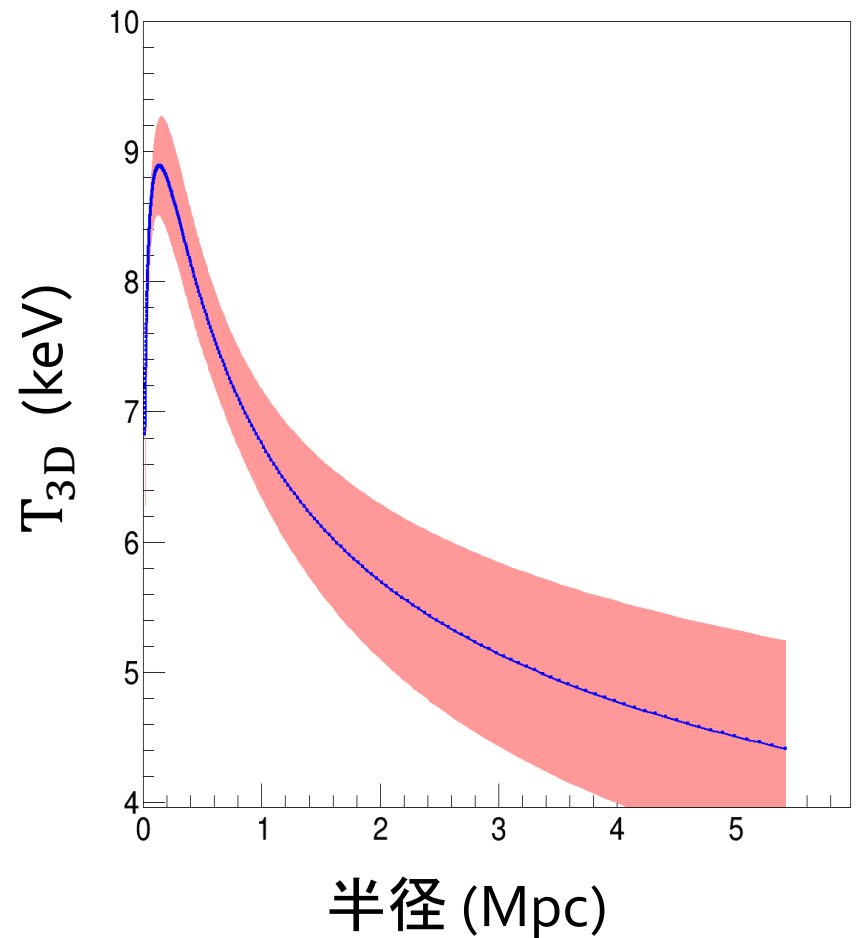
- 温度分布モデルは
Vikhlinin+06 から引用

$$T_{3D}(r) = T_0 t_{cool} \frac{(r/r_t)^{-a}}{[1 + (r/r_t)^b]^{\frac{c}{b}}}$$

$$t_{cool} = \frac{(x + T_{min}/T_0)}{(x + 1)} \quad x = \left(\frac{r}{r_{cool}}\right)^{a_{cool}}$$

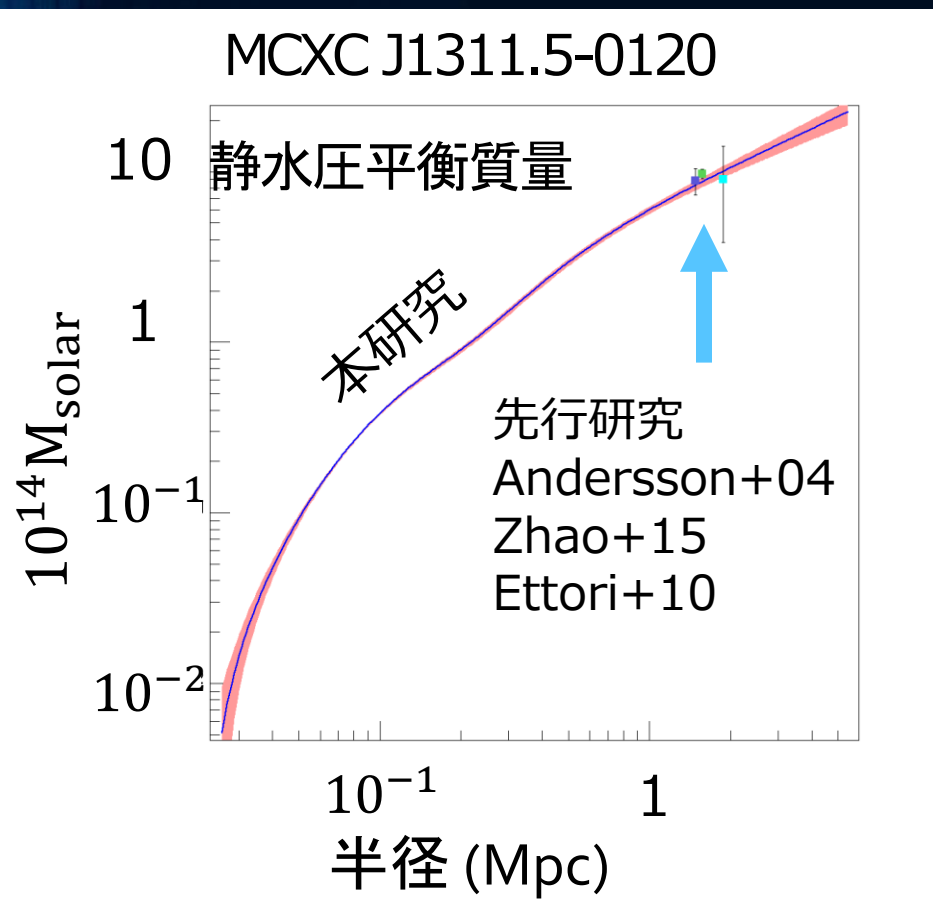
$$T_{ew}(r) = \frac{\int n_e n_p T_{3D}^{\frac{3}{2}} dV}{\int n_e n_p T_{3D}^{\frac{1}{2}} dV}$$

3次元温度分布



Abell 1689 静水圧平衡質量

- ガス密度分布および温度分布から、静水圧平衡を仮定して質量導出

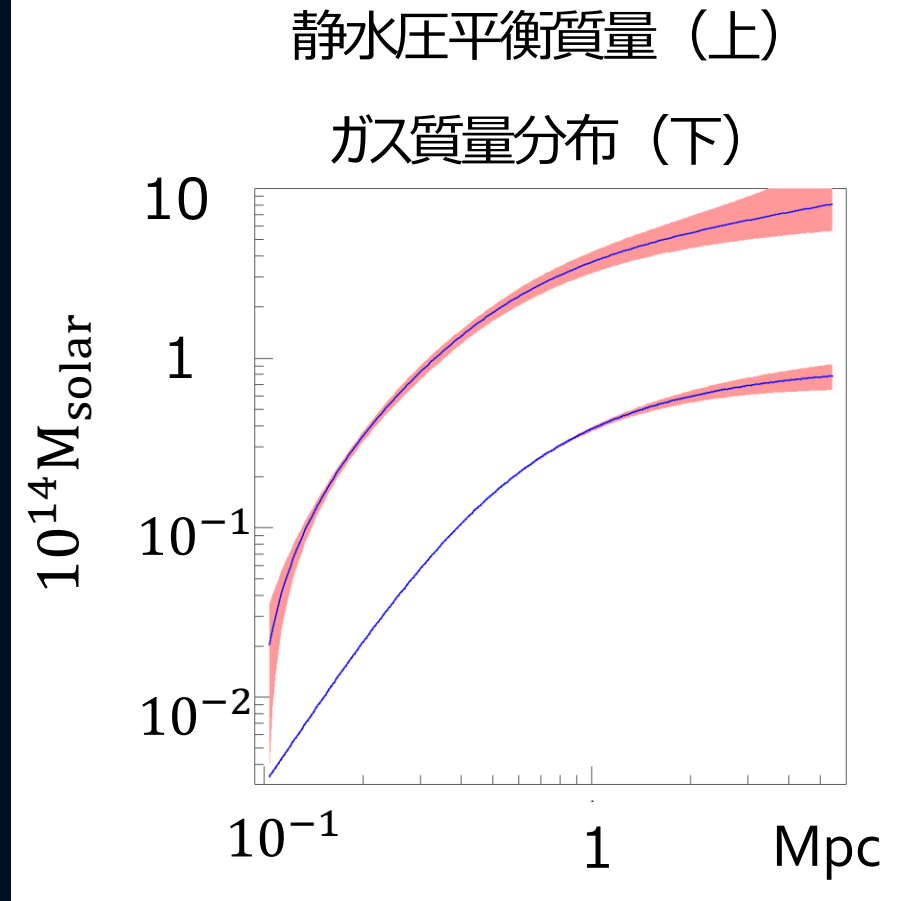
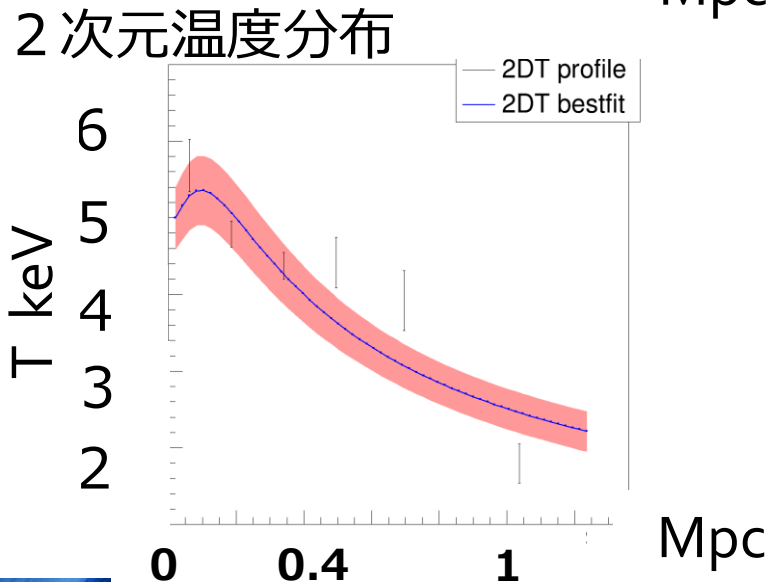
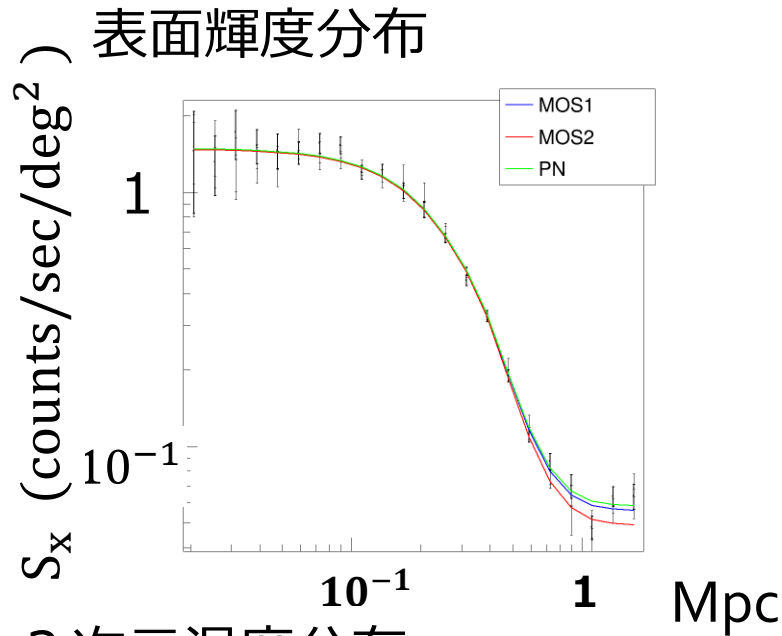


	M_{500}
本研究	7.3 ± 0.6
Andersson+04	9.0 ± 5.1
Zhao+15	8.9 ± 1.6
Ettori+10	7.4 ± 0.4

M_{500} ($10^{14} M_{\text{solar}}$) で先行研究とエラーの範囲内で一致

銀河団 Abell 0362 (新しい観測データ)

Abell 1689 に対して、一桁ほど暗く、観測時間は 2/3 程度



	r Mpc	M _{total}
r_{500}	1.13 ± 0.06	3.7 ± 0.7

まとめ

- サンプルは、HSC SSP サーベイ領域内にある重量級、低赤方偏移の銀河団 2 2 個を MCXC カタログから選定した。
- 今回、Abell 1689 と Abell 0362 の 2 つの銀河団の解析を行い、温度分布、ガス密度分布、静水圧平衡質量分布を導出した。
- Abell 1689 においては先行研究と比較し、解析手法の正当性を検証した。
- また、今後の系統的なX線解析に適用するため、解析方法に様々な工夫を凝らし、保守的な解析方法を確立した。
- 残りのサンプルも今後、解析し、静水圧平衡質量の導出を行い、X線観測量と、弱い重力レンズ質量および光学観測量の関係性を議論する。