

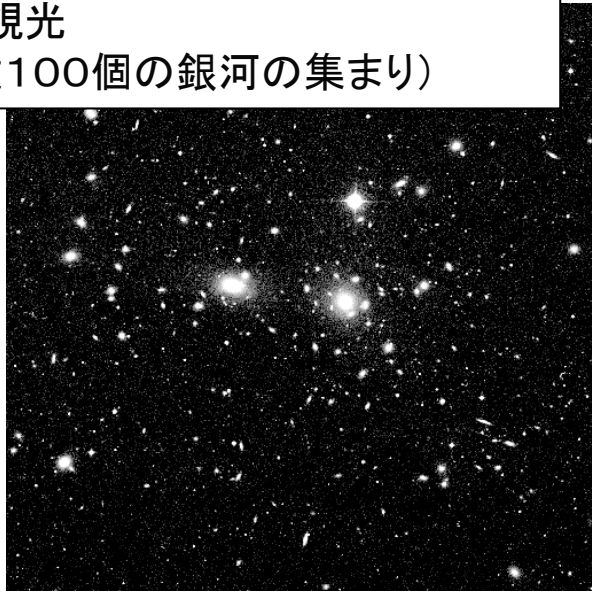
ファラデー回転を用いた 銀河団磁場の推定

Faraday Tomography を用いた銀河団
電波ハロー数値モデルの解析

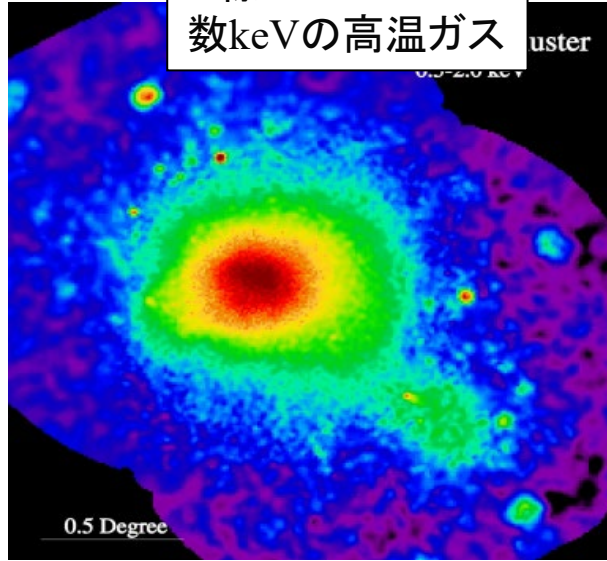
滝沢元和、菅原充祥（山形大学），
出口真輔（国立天文台）、赤堀卓也（国立天文台/SKA 天文台）

Introduction: 銀河団

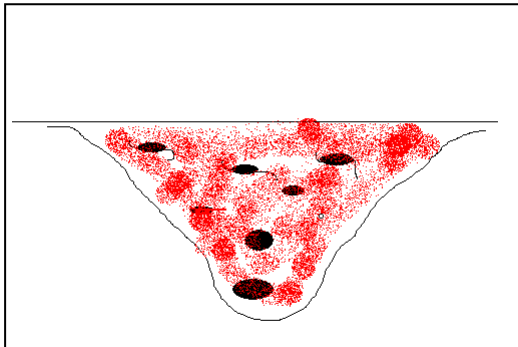
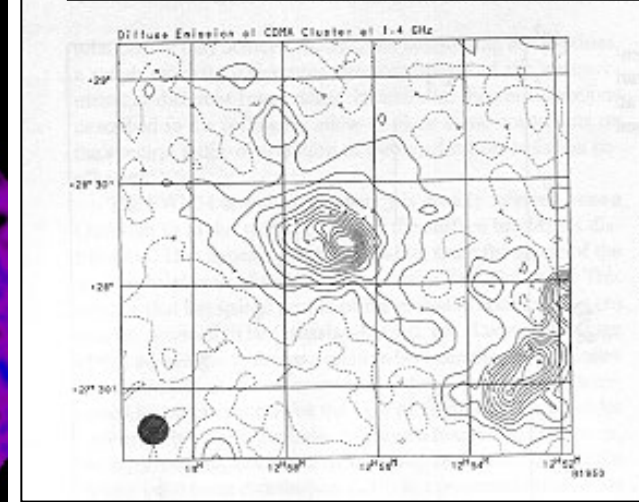
可視光
(数100個の銀河の集まり)



X線
数keVの高温ガス



電波
数GeVの高エネルギー電子+磁場



銀河団: 模式図

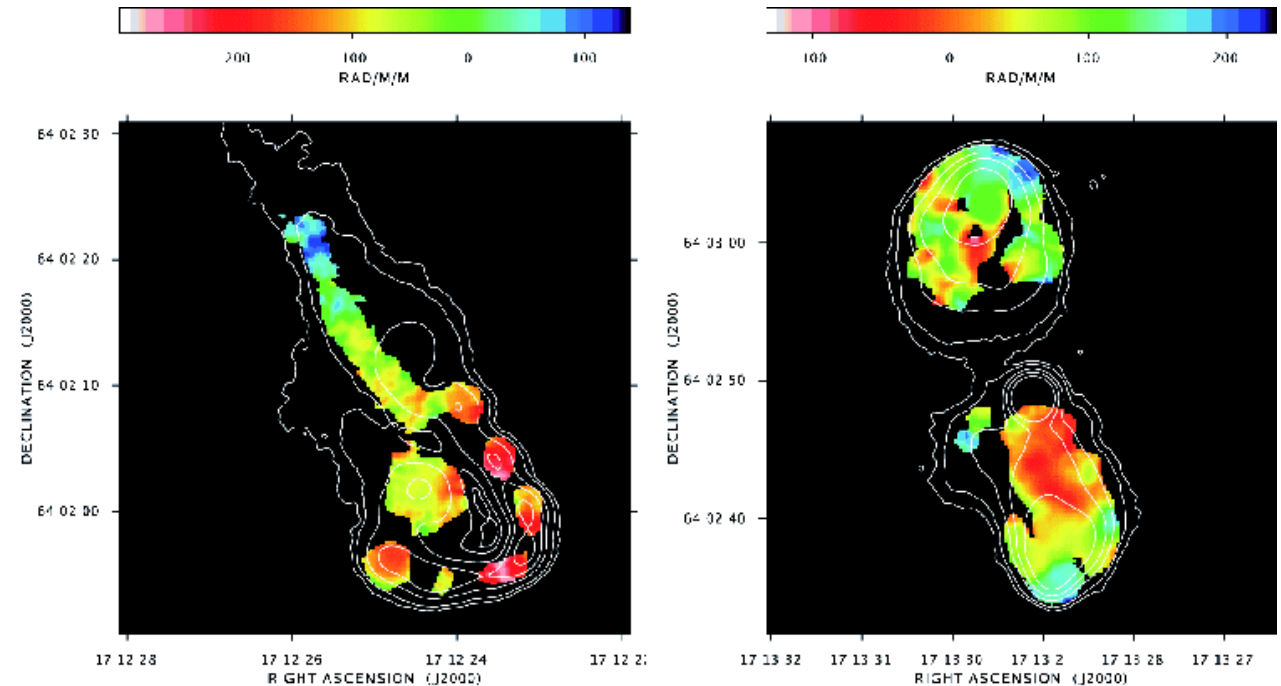
- 暗黒物質の重力ポテンシャル中に束縛された高温ガス ($T \sim 10^7 - 8 \text{ K}$) と銀河のかたまり。
- 宇宙で最大のビリアライズした天体 ($R \sim \text{Mpc}$, $M \sim 10^{14-15}$ 太陽質量)
- 宇宙の構造形成の (観測可能な) 現場
- 周囲のバリオン (ガス、銀河など) や暗黒物質を降着させながら成長中 ---> ガスの加熱、乱流の発生、非熱的粒子の加速、磁場の増幅 etc

Observational Evidence of Intracluster Magnetic Field : Faraday Rotation

- Polarized plains of linear polarized radio wave rotate when propagating through the magnetized plasma.

- $\Delta\theta = \text{RM} \lambda^2$
$$\text{RM} = 0.81 \int_0^d n_e \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} \text{ [rad m}^{-2}\text{]}$$

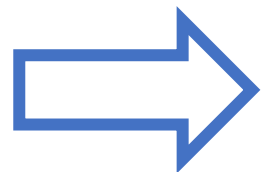
- Polarized radio sources observations in and behind clusters suggest random magnetic field structures.



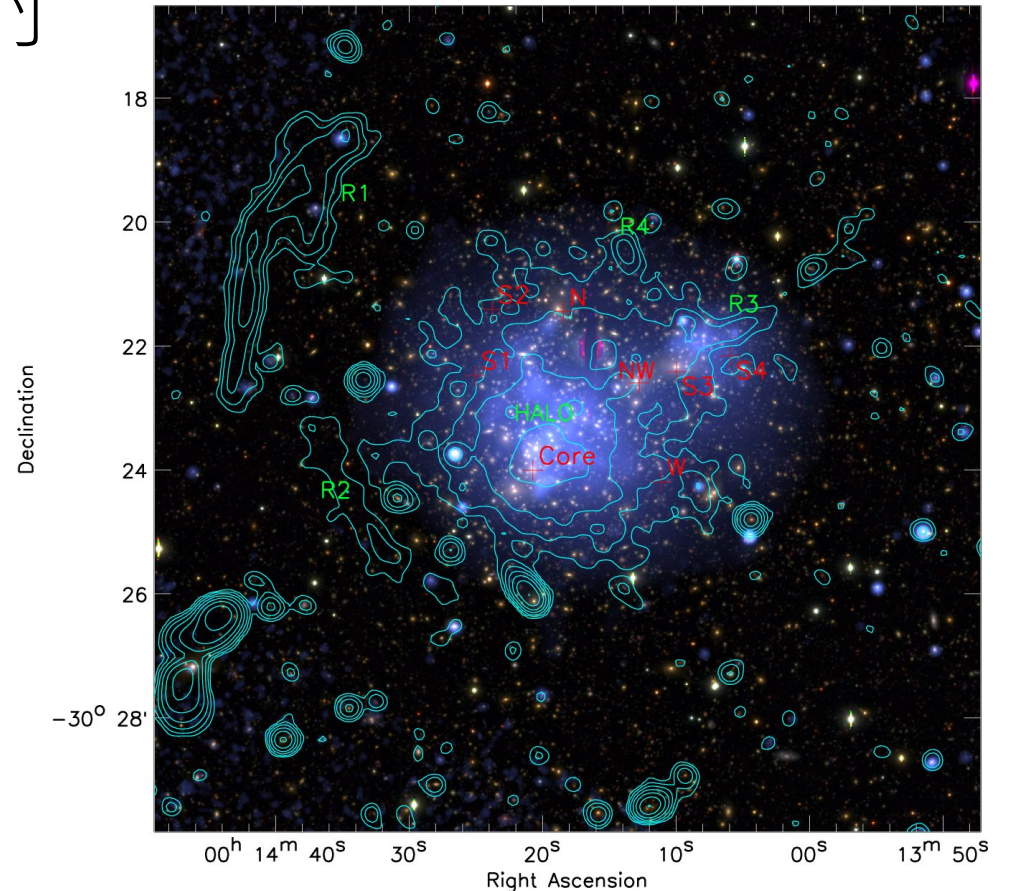
Faraday rotation measure map of
the radio sources in Abell 2255
Color: RM
Contour: radio
Govoni et al. 2006

銀河団の非熱的電波放射

- 銀河団の中には広がった非熱的電波放射を持つものがある (電波ハロー or レリック)
- 磁場や宇宙線電子の直接的証拠
- Rotation Measure (RM) を用いて磁場の推定が行われてきた
- 偏波源かつ Faraday 回転源
- RM では奥行方向に構造をもった偏波源には対応が難しい



Faraday Tomography



Optical(color), X-ray(blue) & radio(contours) overlay of Abell 2744 (Pearce et al., 2017)

Faraday Tomography

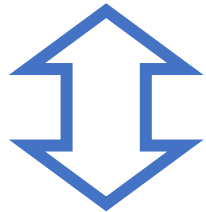
(Burn 1966, Brentjens&Bruyn 2005)

- **Faraday depth** (磁場で測った"距離")

$$\phi(r) = 0.81 \int_{\text{there}}^{\text{here}} n_e \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} \text{ rad m}^{-2}$$

- **複素偏光強度**

$$P(\lambda^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\phi) e^{2i\phi\lambda^2} d\phi$$



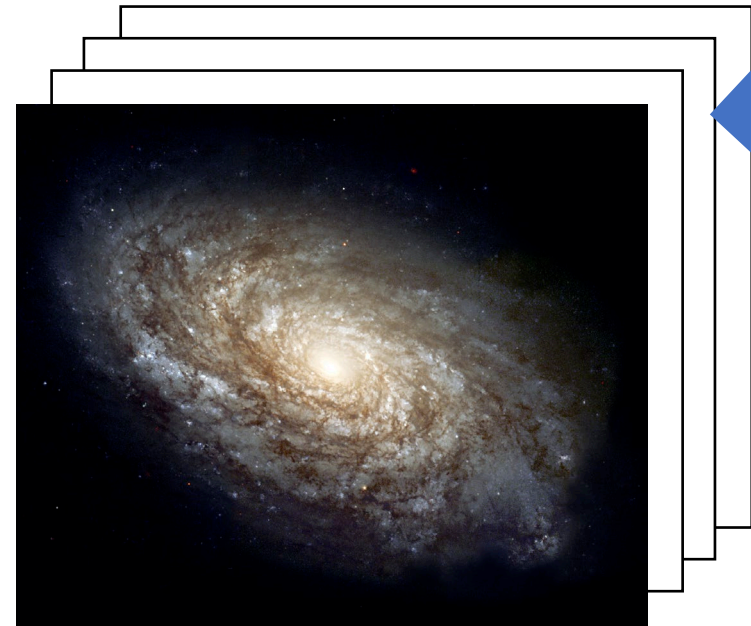
フーリエ変換

- **Faraday Spectrum**

(Faraday depth 上での複素偏光強度分布)

$$F(\phi) = \int P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2$$

奥行方向を ϕ に置き換えることで分解

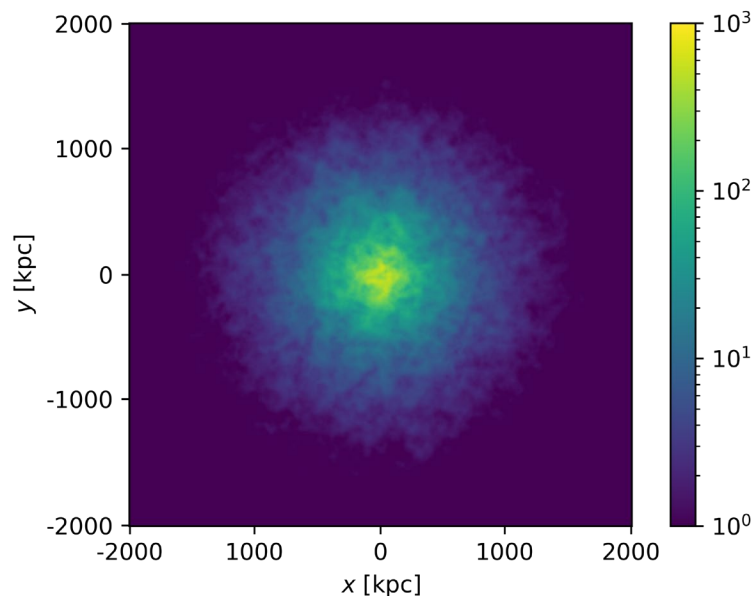


断層写真に!!

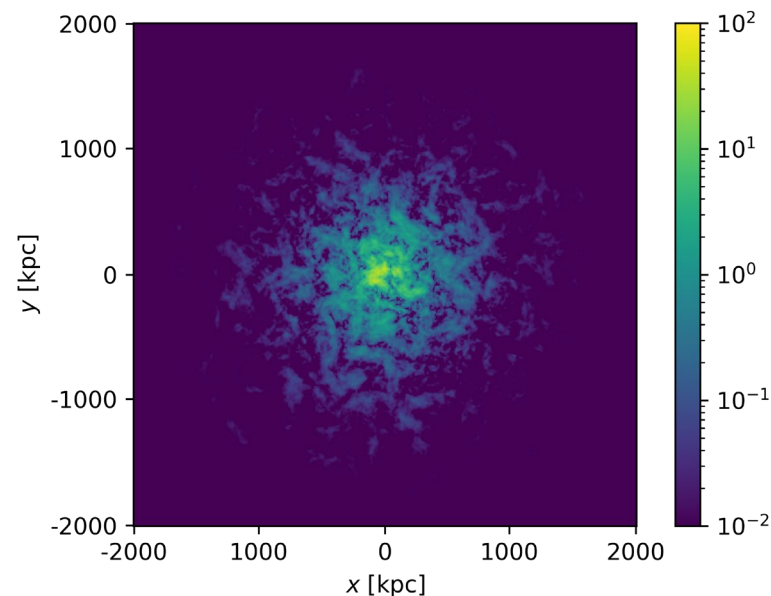
Faraday Tomography における 2 つの課題

1. 有限区間のフーリエ変換による Faraday Spectrum の再構築
2. 実際の距離空間と Faraday depth 上での空間の対応

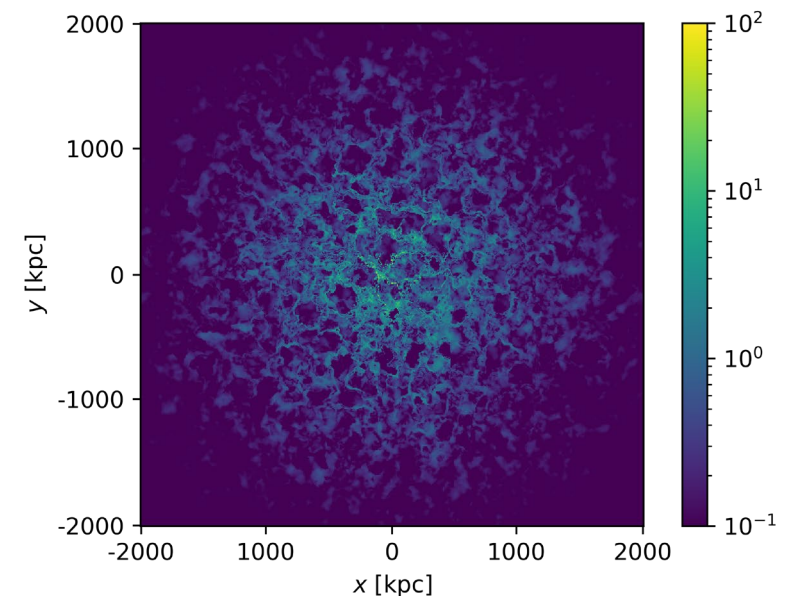
⇒ 2 の問題に関連して、Faraday spectrum (Faraday depth 上での輝度分布) から磁場構造の情報を取り出せないか試みる



銀河団電波ハローの表面輝度



中心部の断層イメージ



Faraday Spectrumでの断層イメージ

計算方法 & 銀河団電波ハローのモデル

- 磁場 べき型のパワースペクトルを持つ乱流磁場

$$|B_k|^2 \propto k^{-n}, k = 1/\Lambda, |B(r)| \propto \left(\frac{n_e(r)}{n_0}\right)^{0.5}$$

- 熱電子密度は β モデルを仮定
宇宙線電子密度は熱電子密度に比例

$$n_e(r) = n_0 \left[1 + \left(\frac{r}{r_c}\right)^2 \right]^{-\frac{3\beta}{2}}, n_{CR} \propto n_e$$
$$n_0 = 0.003 \text{ cm}^{-3}, r_c = 0.2 \text{ Mpc}, \beta = 0.66$$

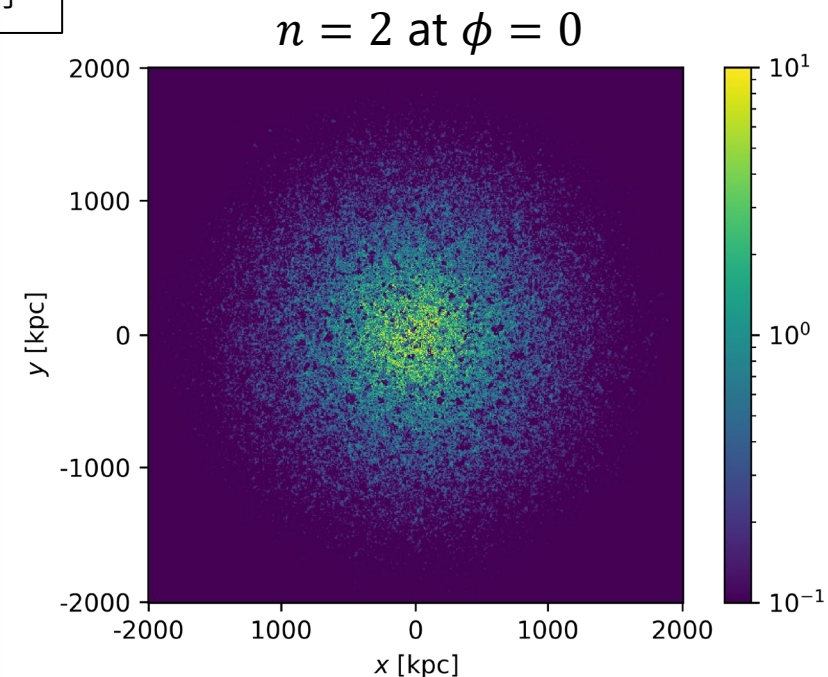
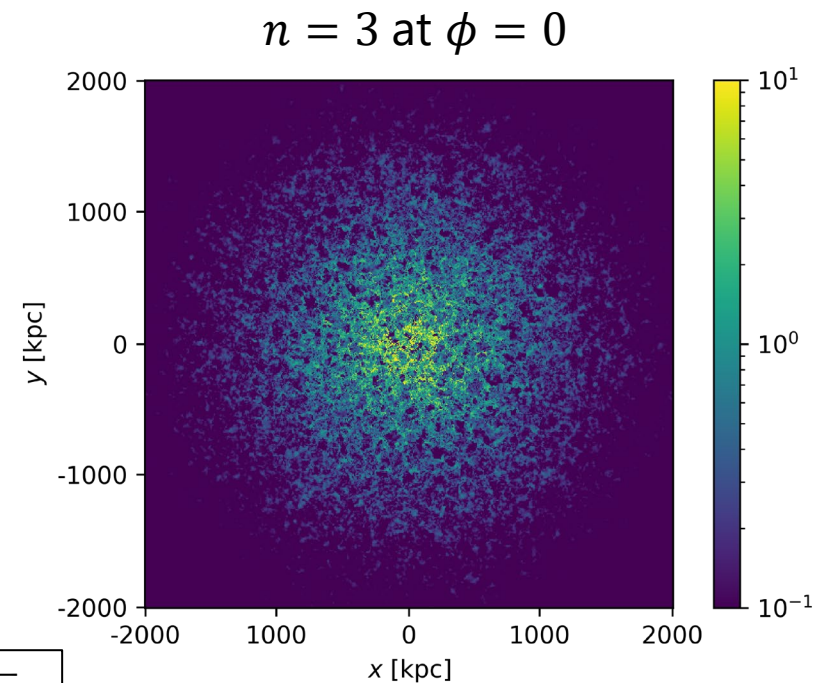
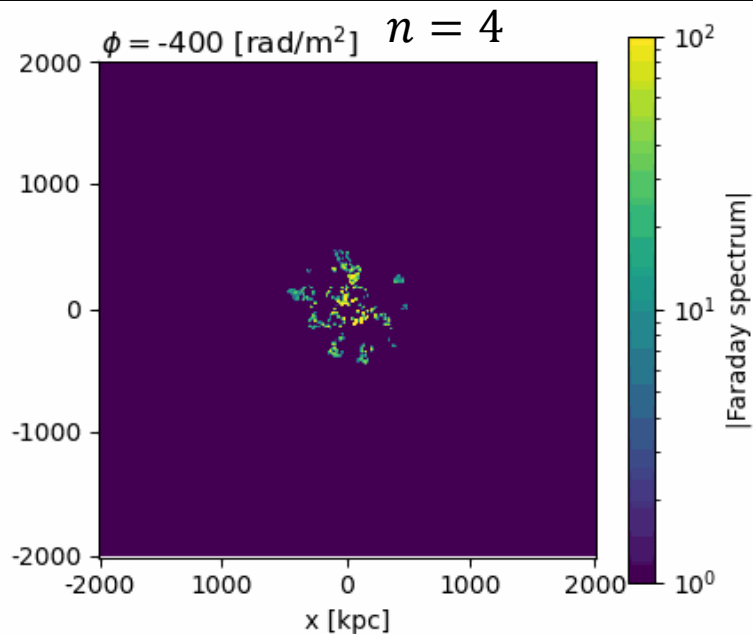
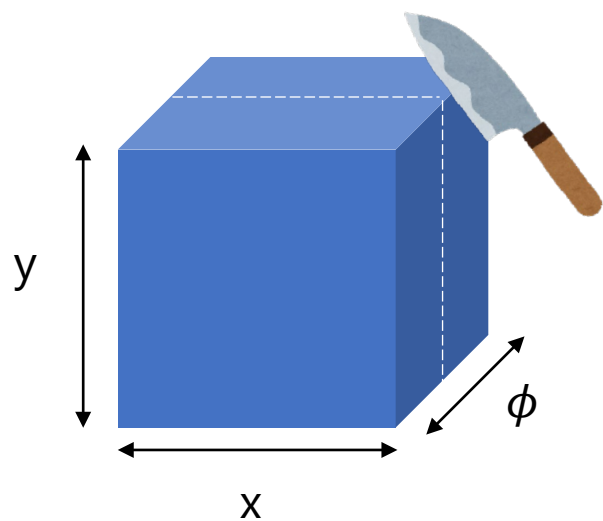
- 格子数 $512 \times 512 \times 512$ 銀河団直径 4Mpc

天球面に平行な断面を見る

- 泡状の構造
 - 宇宙線電子はなめらかな分布
- ⇒ 乱流磁場の構造を反映

$$|B_k|^2 \propto k^{-n}$$

断面におけるgrid当たりの放射輝度分布

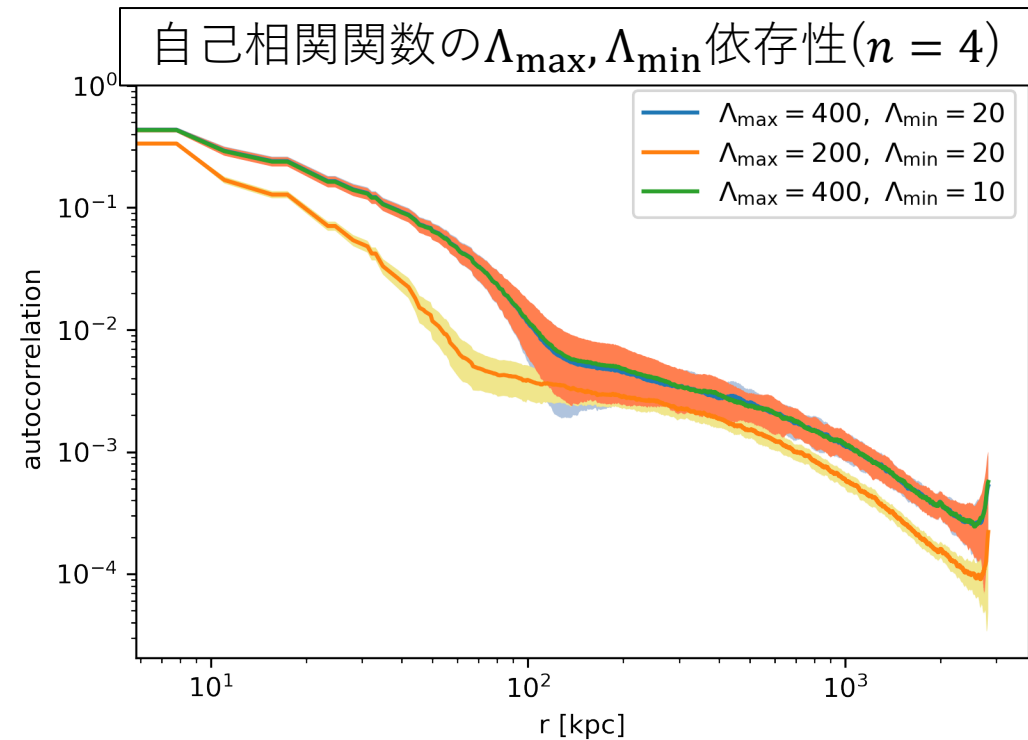
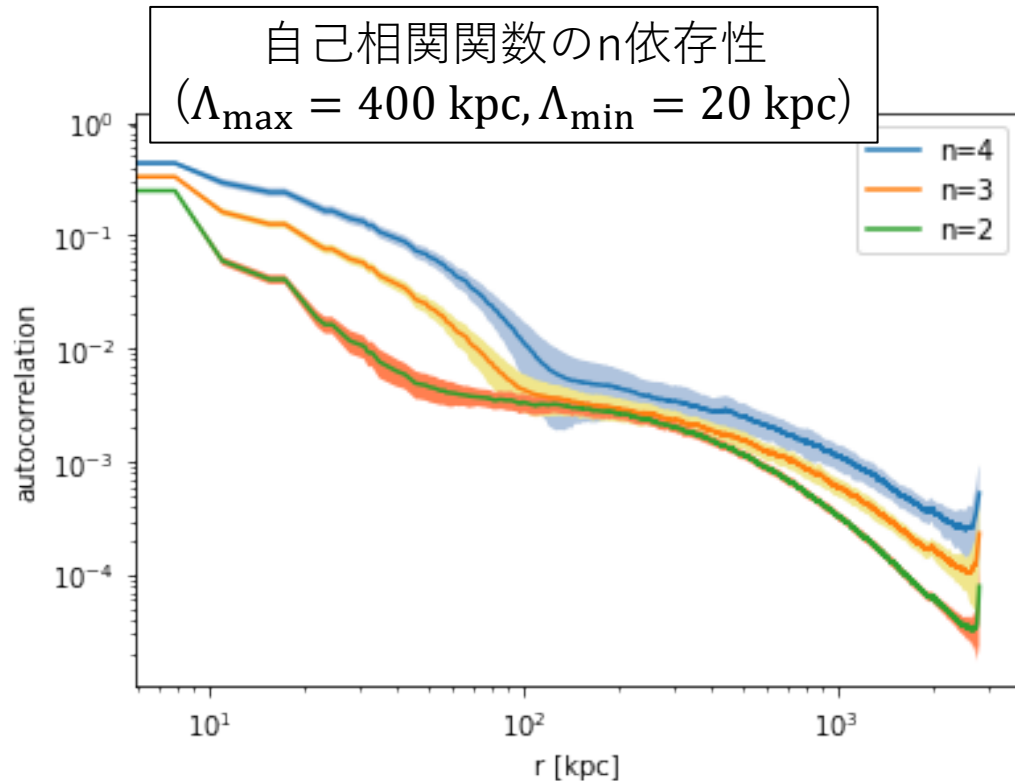


$$A(r) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(r' - r) f(r') dr$$

自己相関関数で構造の変化を見る

$$|B_k|^2 \propto k^{-n}, k = 1/\Lambda$$

- べき n を下げると相関の強度が落ちる
- 最大空間スケール Λ_{\max} を上げると相関のポイントが遠くなる
- 最小空間スケール Λ_{\min} は変化をほとんど及ぼさない



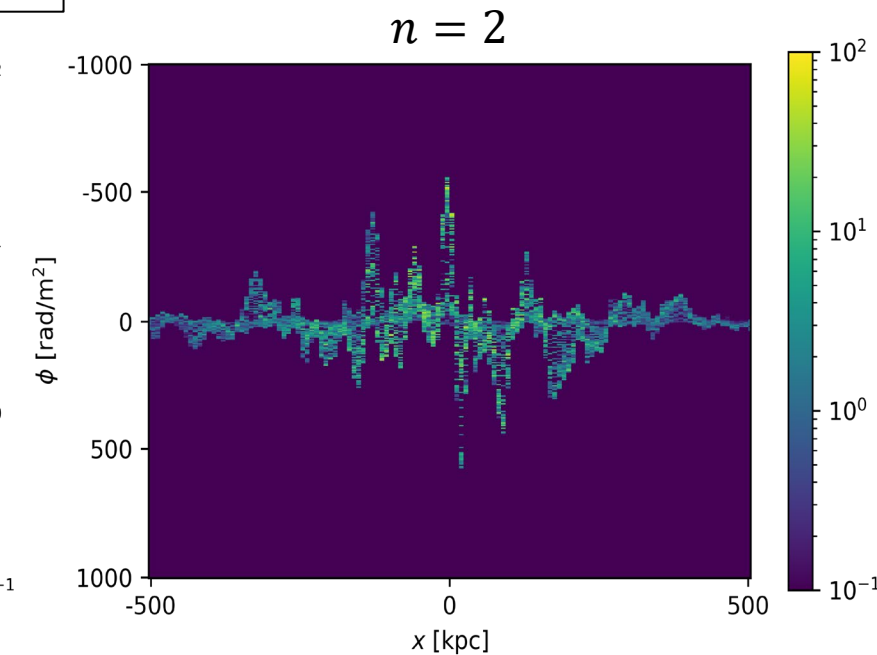
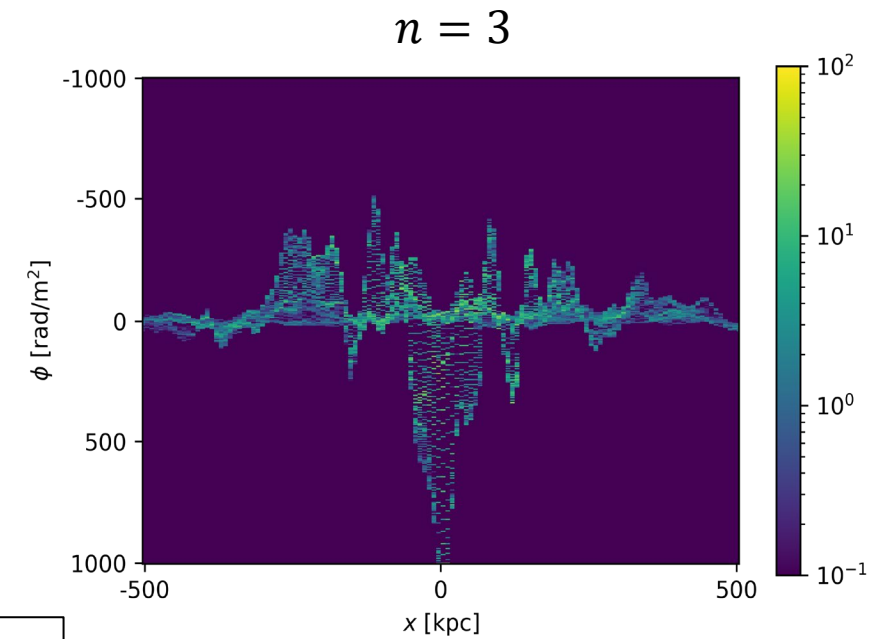
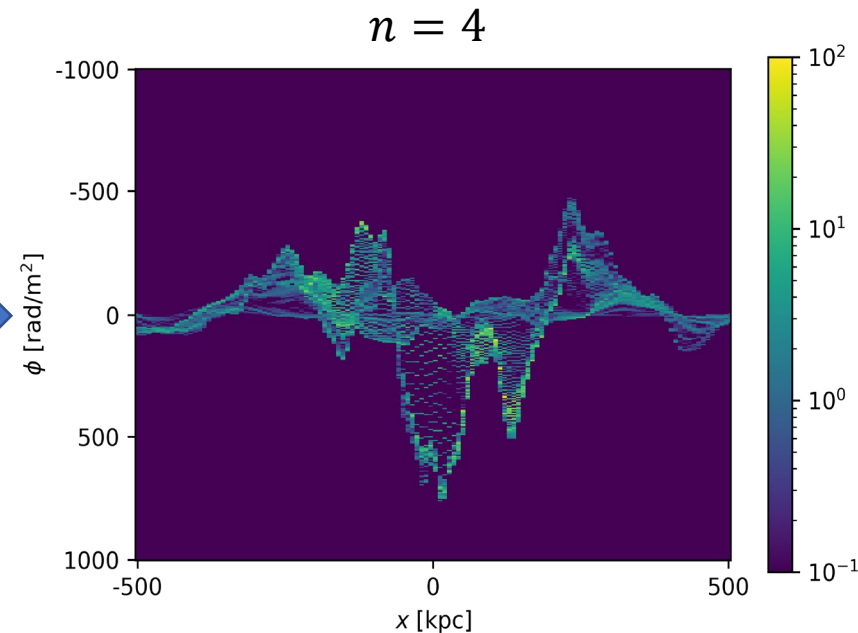
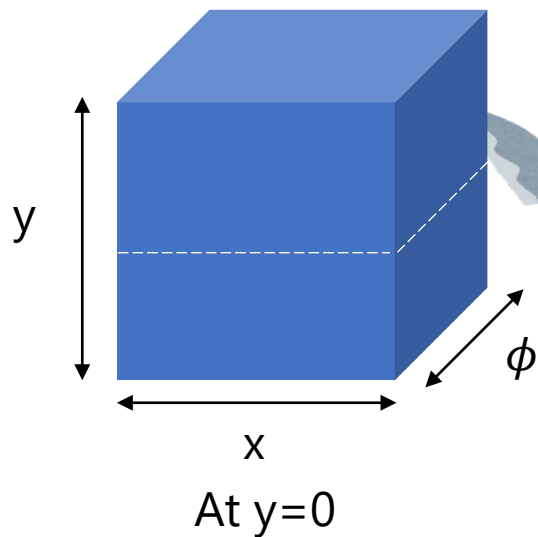
視線に平行な断面を見る

● 波状の構造

● ϕ が反転している $\phi(r) = 0.81 \int_{there}^{here} n_e \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} \text{ rad m}^{-2}$
⇒ 磁場の反転を反映している

$$|B_k|^2 \propto k^{-n}$$

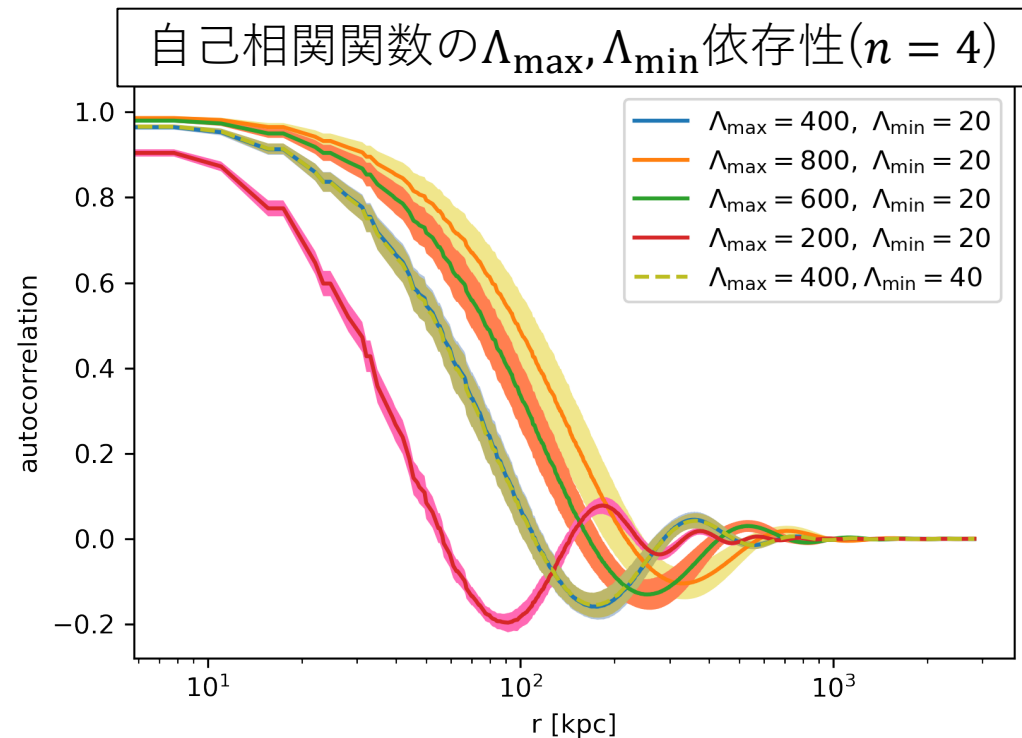
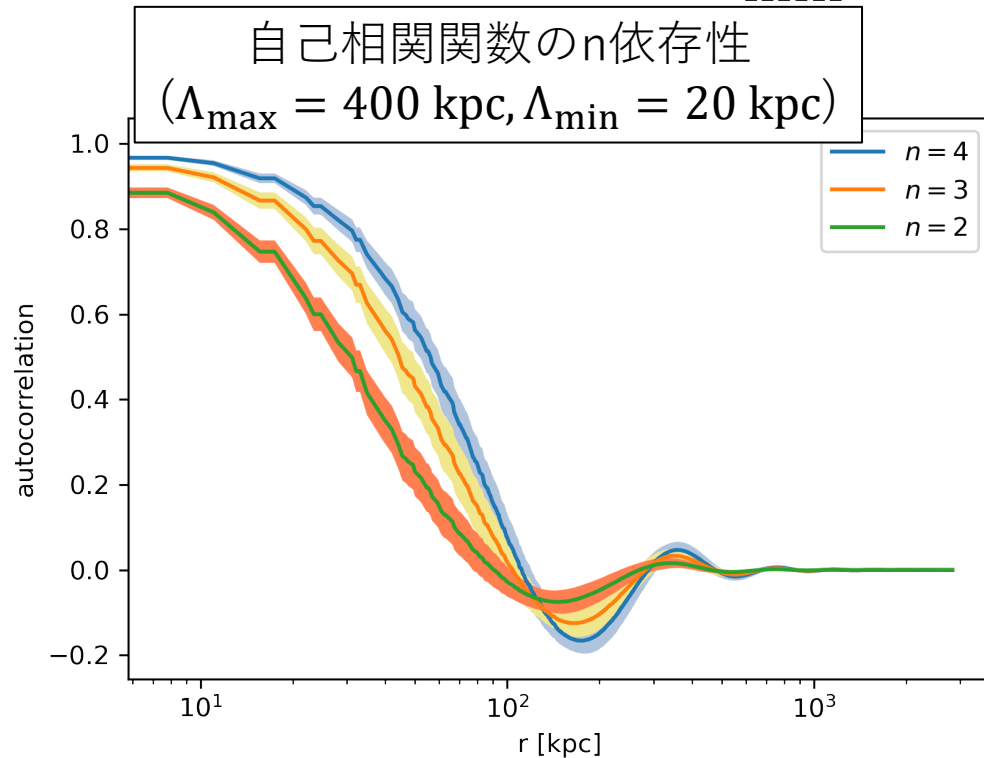
断面におけるgrid当たりの放射輝度分布



$$A(r) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(r' - r)f(r') dr$$

自己相関関数で構造の変化を見る

- ϕ の奥行方向における加重平均値で自己相関関数を計算
- べき n を下げると相関の強度が落ちる $|B_k|^2 \propto k^{-n}, k = 1/\Lambda$
 最大空間スケール Λ_{\max} を上げると相関の負のピークが遠くなる
 最小空間スケール Λ_{\min} は変化をほとんど及ぼさない



まとめ

- 偏波源とファラデー回転源が奥行き方向に重なっているような場合はFaraday Tomography が有効な手法である。
- 銀河団電波ハローをモデル化してFaraday spectrumを計算した。
- 天球面に平行（Faraday depth一定）の断面ではFaraday spectrumに泡状の構造が見え、自己相関関数において、磁場パワースペクトルのべきや揺らぎの最大空間スケールに応じて相関の強度が変化した
- 視線に平行な断面ではFaraday spectrumに波状の構造が見え、自己相関関数において、磁場パワースペクトルのべきで相関の強度が変化した、揺らぎの最大空間スケールに応じて相関の負のピークが遠ざかった