

# Fuzzy Dark Matter ハローの 小スケール物質パワースペクトル

第10回 観測的宇宙論ワークショップ (2021/11/17)

河合宏紀 (東大宇宙理論研究室M2)

[arXiv : 2109.04704](https://arxiv.org/abs/2109.04704), accepted in ApJ

共同研究者 : Masamune Oguri, Alfred Amruth, Tom Broadhurst, and Jeremy Lim

# 内容

## 1. 序論

- Cold dark matter と小スケール問題
- Fuzzy dark matter モデル
- FDMハローの性質
- 強重力レンズ効果から得られる小スケール物質パワースペクトル

## 2. FDMハローの小スケール物質パワースペクトルの理論モデル

## 3. 理論モデルのパラメータ依存性

## 4. FDM質量の制限

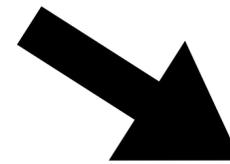
# CDM と小スケール問題

標準宇宙モデル: **Cold Dark Matter (CDM)**

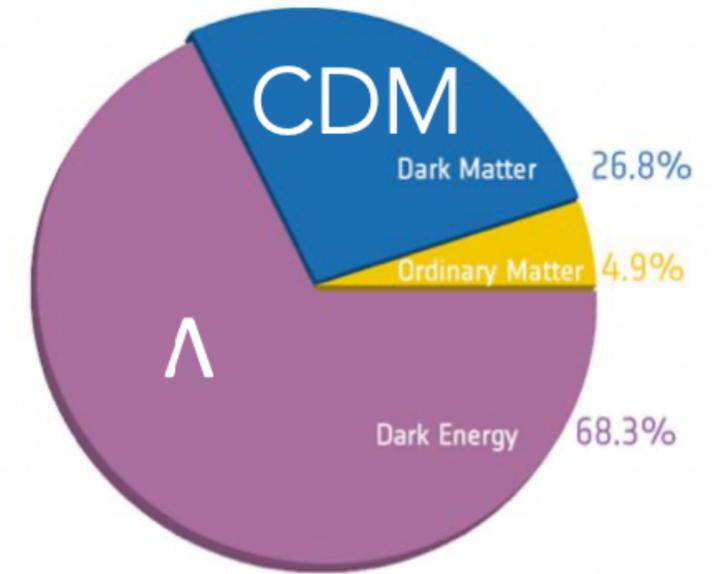
→ 大規模構造の説明に成功

→ しかし、小スケールでは矛盾がある。 (< 1 Mpc)

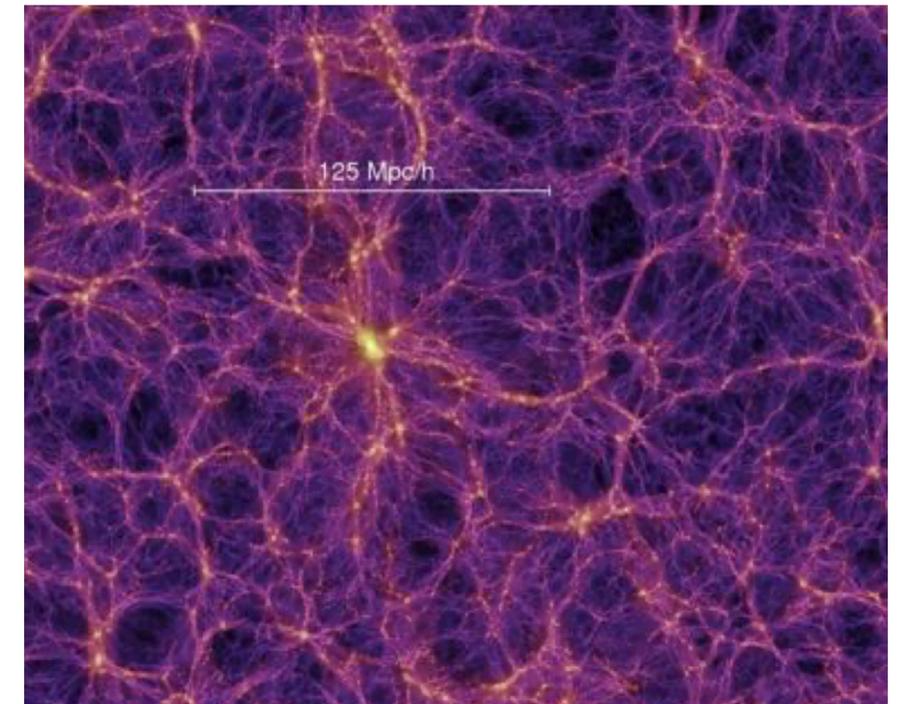
- ・ コア・カスプ問題
- ・ ミッシング・サテライト問題
- ・ 多様性問題
- ・ Too-big-to-fail 問題



他のダークマターモデル？



ESA - Planck Satellite



Springel+ 2006

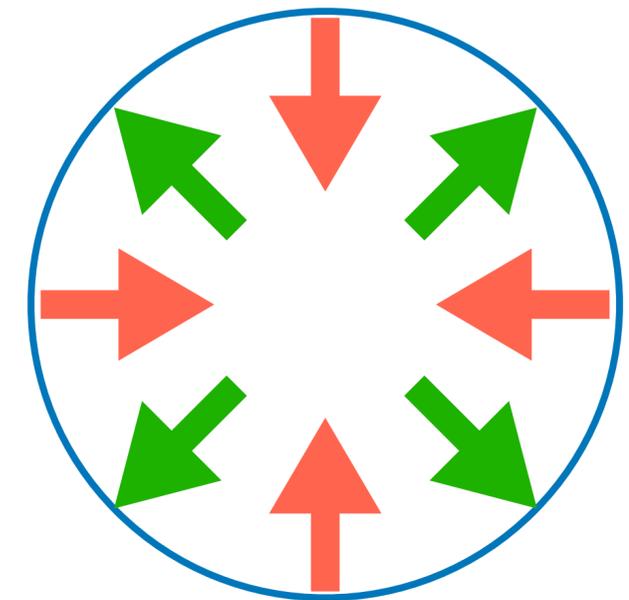
# Fuzzy Dark Matter モデル

Fuzzy Dark Matter (FDM) = 質量が  $m \sim 10^{-22}$  eV 程度の、重力場に結合した自己相互作用しないスカラー粒子

- ドブロイ波長  $\lambda \sim \mathcal{O}(1)$  kpc
- $\mathcal{O}(1)$  kpc 以内の宇宙論的スケールで波動性が見られる。
- ミッシング・サテライト問題の解決

大きいスケールでは、FDMはCDMと同様に振る舞う。

- 大規模構造形成の成功



重力崩壊

||

不確定性関係

# FDMハローの性質

FDMシミュレーションによって、FDMハローの性質が明らかにされた。

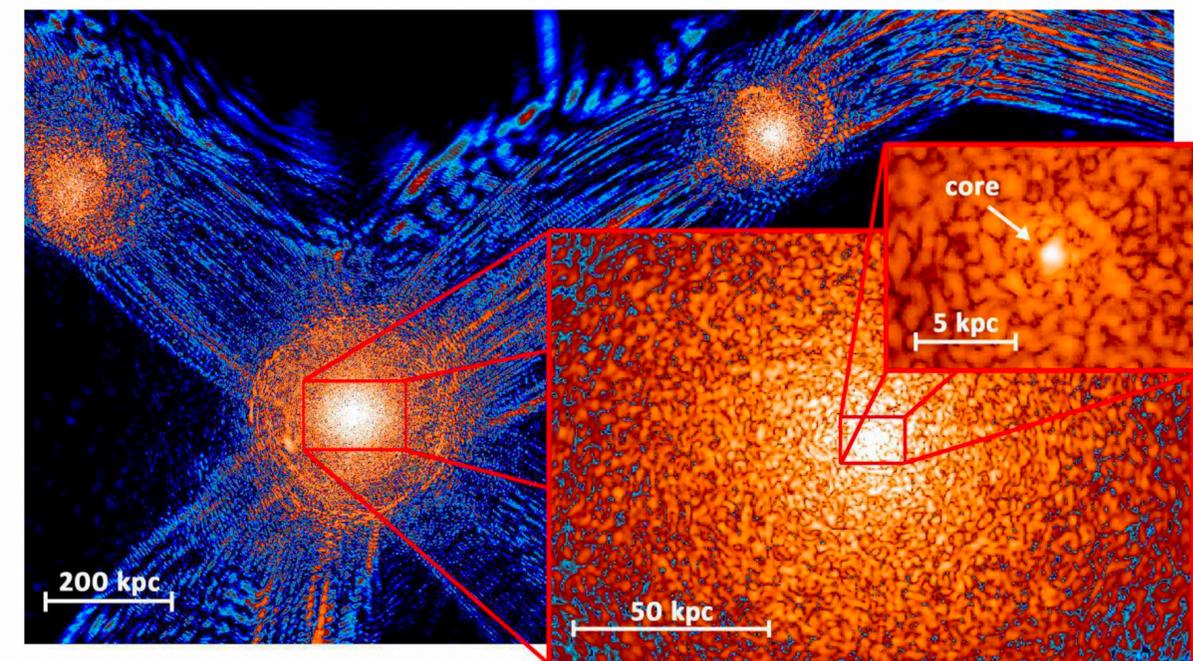
FDMハローの2つの特徴：

粒状構造 と ソリトンコア

→ コア・カスプ問題の解決

粒状構造はFDMの波動性に由来

→ 本当にこの小構造体は存在するのか？



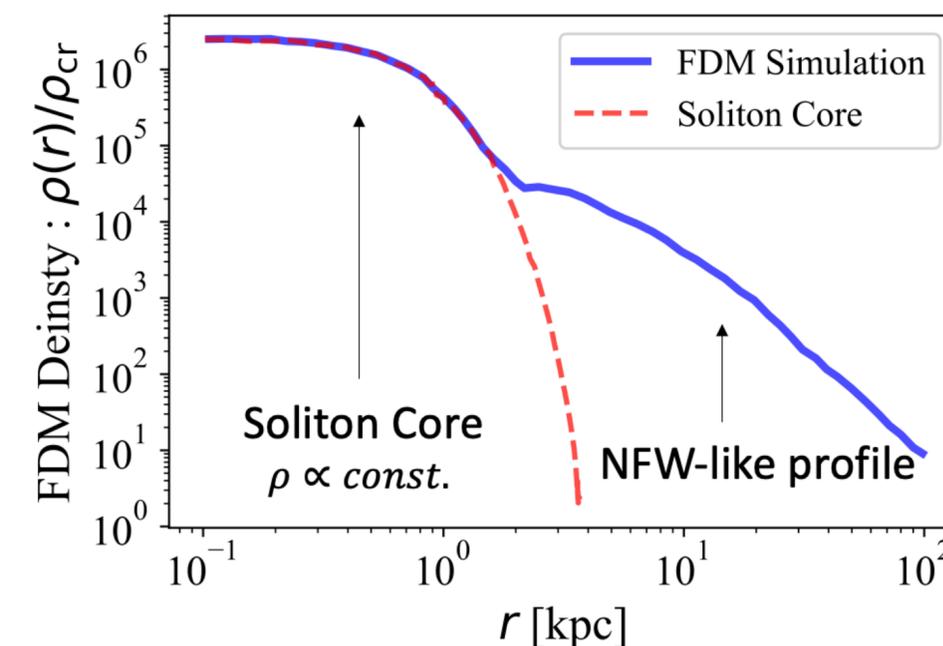
Schive+ 2016

干渉パターン / 粒状構造

ソリトンコア

+

NFW-like  
プロファイル



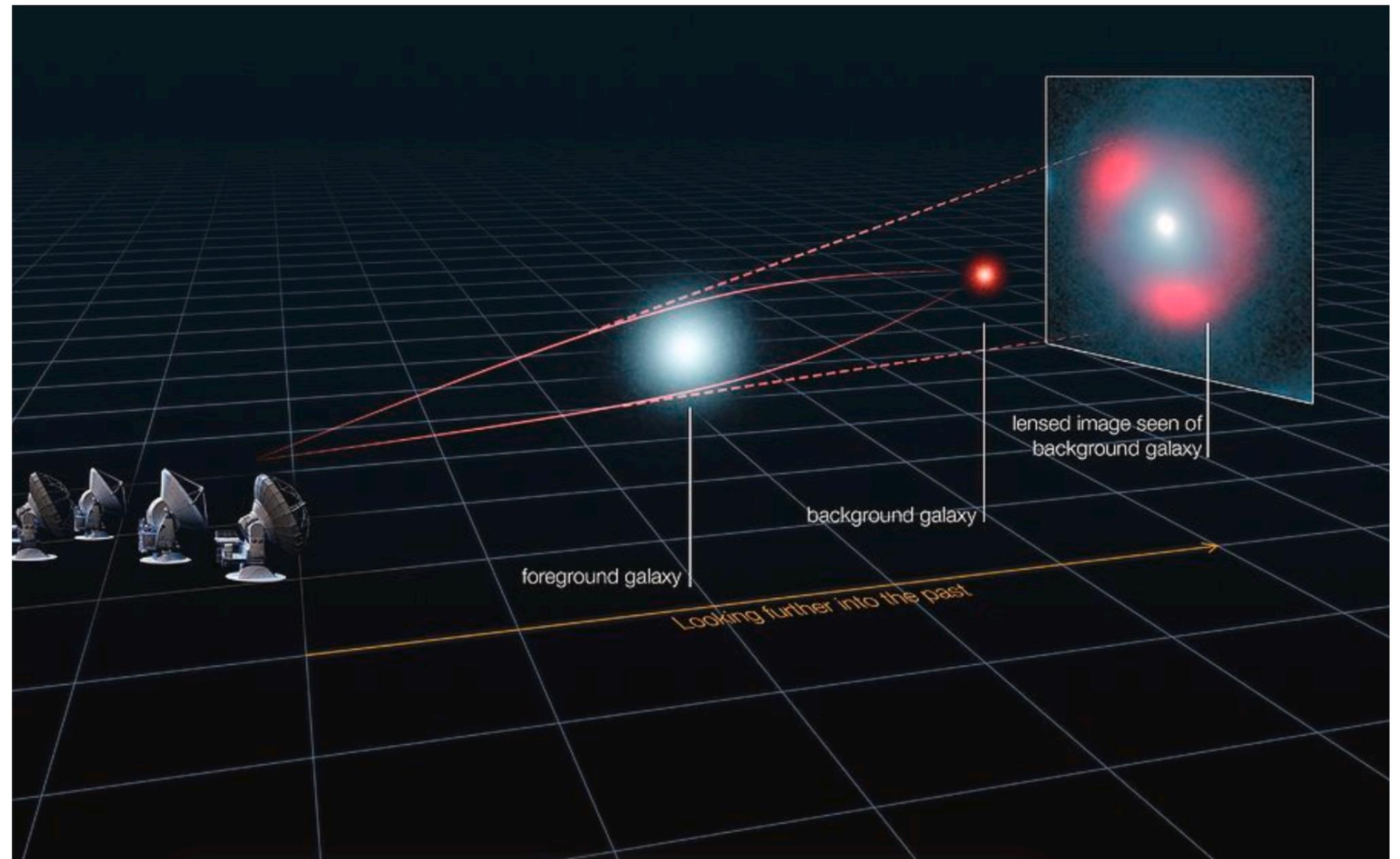
Schive+ 2016

# 強重力レンズ系

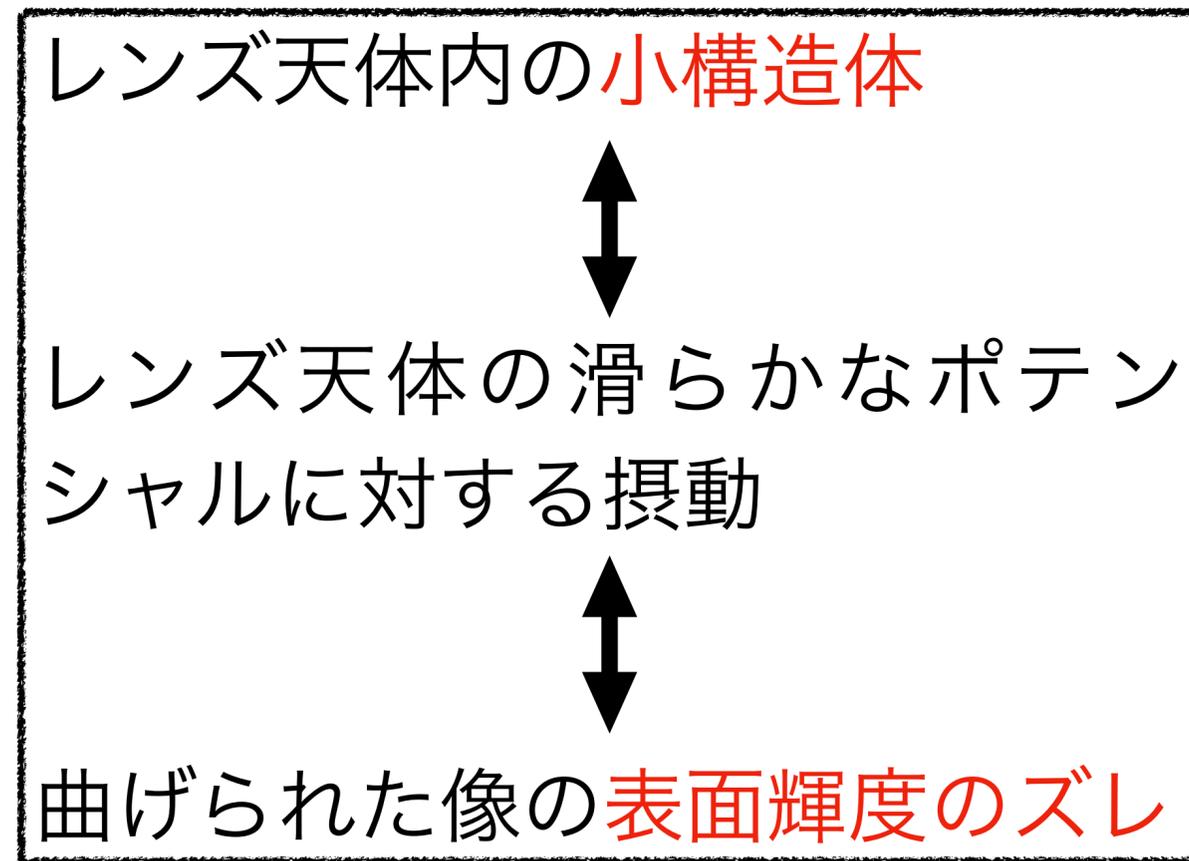
光源天体の曲げられた像



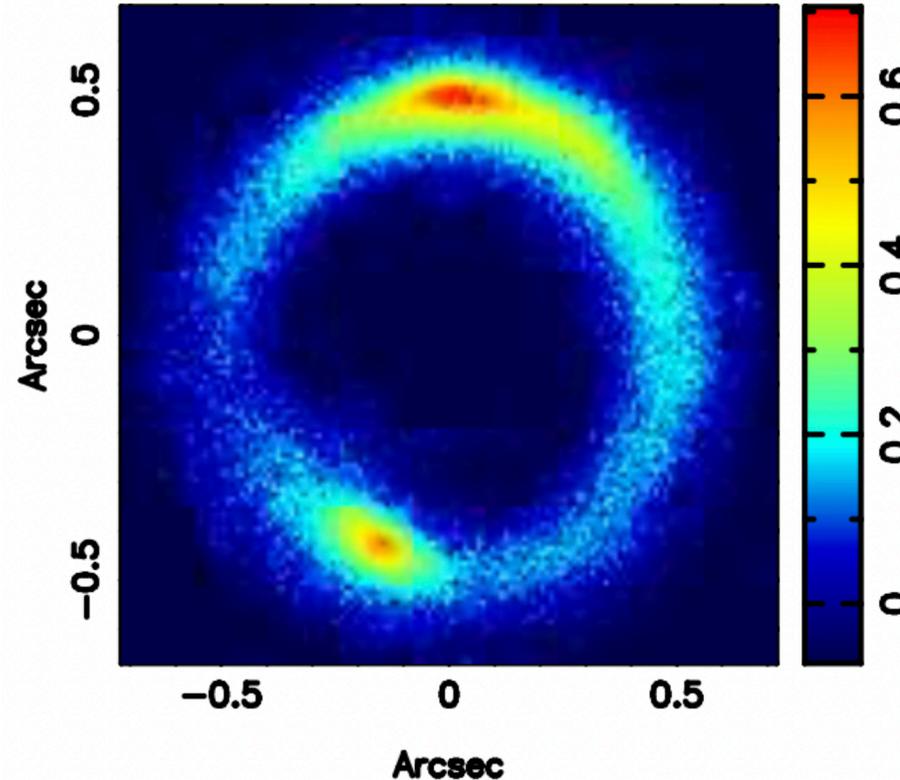
レンズ天体の質量分布等の情報



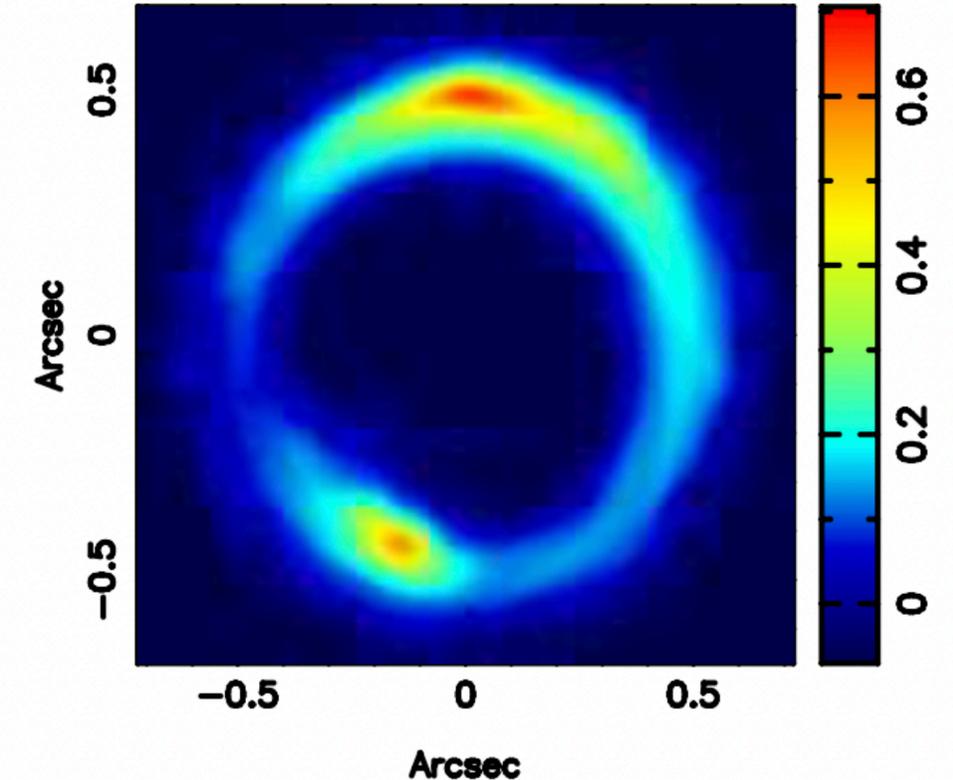
# 強重力レンズ効果から得られる、 小スケール物質パワースペクトル



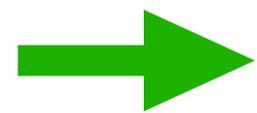
滑らかな密度分布 + 小構造体



滑らかな密度分布のみ



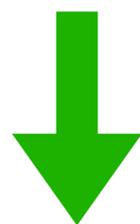
Vegetti+ 2012



Bayer et.al.(2018) は、強重力レンズ系 SDSS J0252+0039 から  
小スケール物質パワースペクトルの上限値を得た。

# 我々の研究のモチベーション

FDMハローに存在する粒状構造を、小スケール物質パワースペクトルで制限できないか？



パワースペクトルの理論モデルを構築し、強重力レンズ系の観測から得られた結果と比較することによって、FDMモデルの妥当性を議論する。

# FDMハローの小スケール物質パワースペクトル

## FDM-only の場合

ハロープロファイル:  $\rho_h(\mathbf{r})$   
(滑らか)

各粒状構造

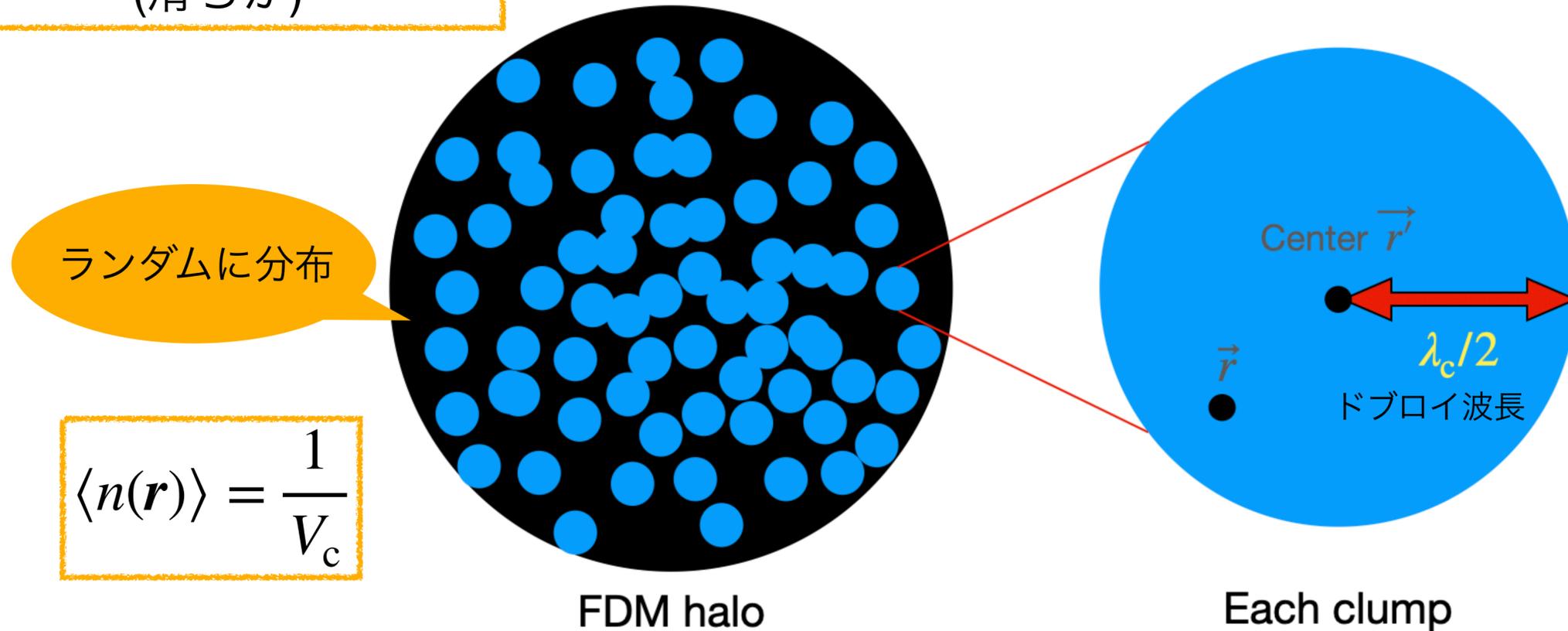
$$\text{質量: } M_c(\mathbf{r}') = \rho_h(\mathbf{r}') V_c$$

$$\text{体積: } V_c = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{\lambda_c}{2} \right)^3$$

各粒状構造内の密度分布

$$\rho_c(\mathbf{r}; \mathbf{r}') = M_c(\mathbf{r}') \frac{u(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{\int u(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d^3 r'}$$

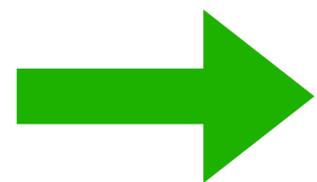
正規化された  
質量プロファイル関数



$$\langle n(\mathbf{r}) \rangle = \frac{1}{V_c}$$

FDM halo

Each clump



$$\text{FDMプロファイル: } \rho_f(\mathbf{r}) = \int_V d^3 r' \rho_c(\mathbf{r}; \mathbf{r}') n(\mathbf{r}')$$

粒状構造の  
重ね合わせ

# 小スケール物質パワースペクトル

射影密度場

$$\Sigma_f(\mathbf{x}) \equiv \int_Z dz \rho_f(\mathbf{r})$$

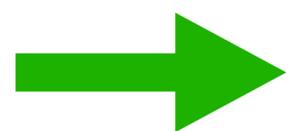
位置  $\mathbf{x}$  近傍の物質密度揺らぎ

$$\delta(\mathbf{x}) \equiv \frac{\Sigma_f(\mathbf{x}) - \Sigma_h(\mathbf{x})}{\Sigma_h(\mathbf{x})}$$

射影密度場  $\Sigma_f(\mathbf{x})$  の  
アンサンブル平均

小スケール物質パワースペクトルは、

$$\langle \tilde{\delta}_k \tilde{\delta}_{k'} \rangle \equiv S_\epsilon \delta_{k+k', \mathbf{0}}^{(2)} P(k)$$



$$P_f(k) = \frac{V_c}{r_h(\mathbf{x})} |\tilde{u}_k|^2$$

球対称な系

ここで、有効半径を定義

$$r_h(\mathbf{x}) \equiv \frac{\Sigma_h^2(\mathbf{x})}{\int_Z dz \rho_h^2(\mathbf{r})} = \frac{\left( \int_Z dz \rho_h(\mathbf{r}) \right)^2}{\int_Z dz \rho_h^2(\mathbf{r})}$$

# FDMハローの小スケール物質パワースペクトル

## バリオンを加えた場合

バリオン分布：滑らかな関数  $\rho_b(r)$

全密度は、

$$\rho(r) = \rho_f(r) + \rho_b(r)$$

射影密度場は、

$$\Sigma(x) = \Sigma_f(x) + \Sigma_b(x)$$

$$\Sigma_b(x) \equiv \int_Z dz \rho_b(r)$$

粒状構造とは  
独立に分布

パワースペクトルは同様の計算により得られる。

$$P(k) = \left( \frac{\Sigma_h(x)}{\Sigma_h(x) + \Sigma_b(x)} \right)^2 P_f(k)$$

FDM-onlyの場合  
より小さくなる

# 具体的な計算例

ハロー分布 = NFWプロファイル

1 パラメータ : ハロー質量  $M_h$

バリオン分布 = Hernquistプロファイル

1 パラメータ : 全恒星質量  $M_s$

ドブロイ波長  $\lambda_c = 2\pi\hbar/mv$  は以下の定数の速度分散から得る

$$v = \sqrt{\frac{3GM_{\text{tot}}}{2R_{\text{vir}}}}$$

1 パラメータ : FDM質量  $m$

質量プロファイル関数 = ガウシアン

$$\tilde{u}_k = \exp\left(-\frac{\lambda_c^2 k^2}{8}\right)$$

位置  $x$  を加えた4パラメータで我々のモデルは構成される。

$$P(k) = \left( \frac{\Sigma_{\text{NFW}}(x)}{\Sigma_{\text{NFW}}(x) + \Sigma_{\text{Hern}}(x)} \right)^2 \frac{4\pi\lambda_c^3}{3r_h(x)} \exp\left(-\frac{\lambda_c^2 k^2}{4}\right)$$

$\left( = \frac{V_c}{r_h(x)} |\tilde{u}_k|^2 \right)$

# FDM質量に対する依存性

減衰スケール：

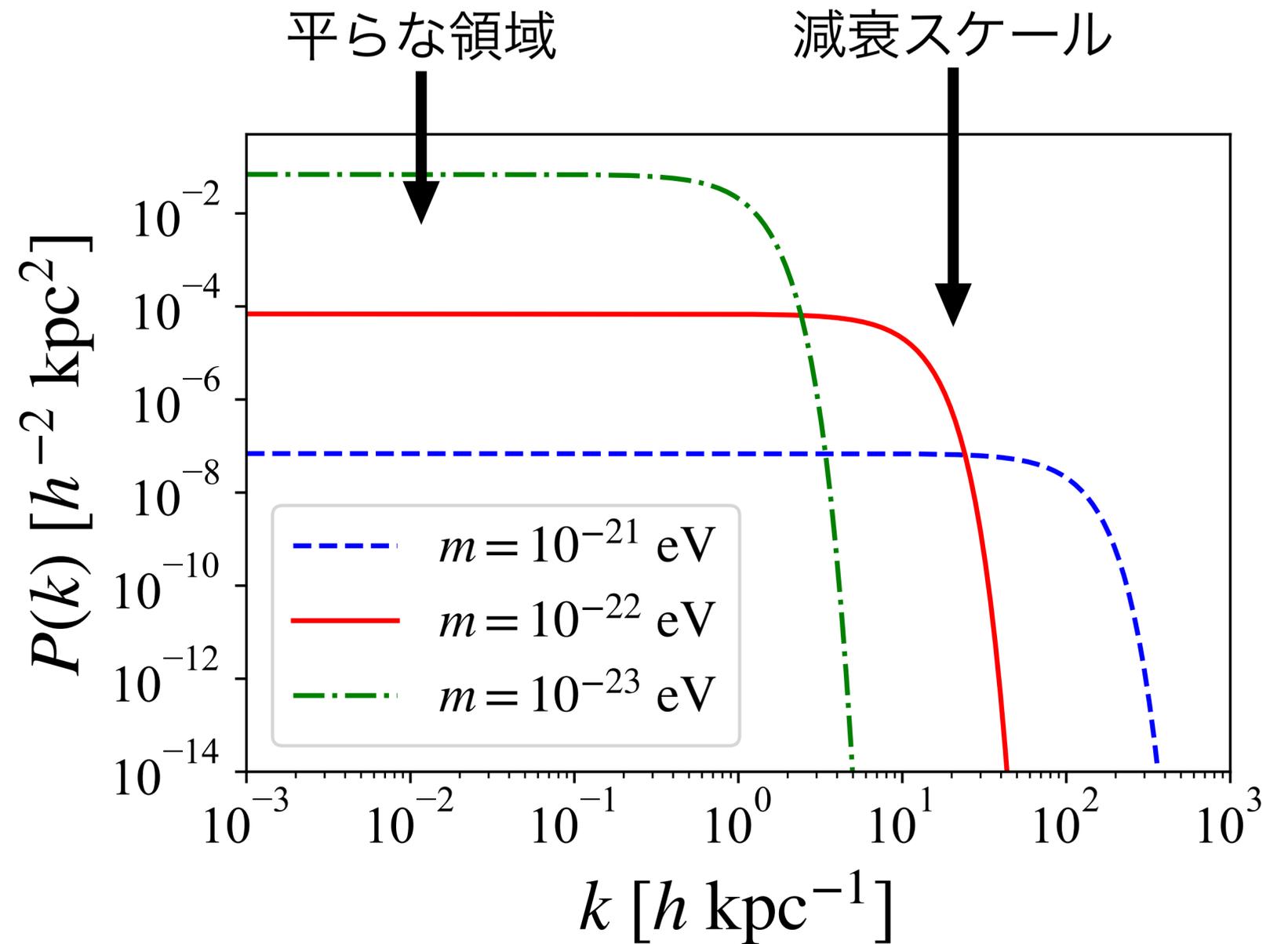
$$k \sim 1/\lambda_c \propto m$$

平らな領域：

$$P(k) \propto \lambda_c^3 \propto m^{-3}$$

大きなFDM質量

- 小さなドブロイ波長
- 視線方向により多くの粒状構造
- 密度揺らぎが平均化される



他のパラメータは、  
 $M_h = 10^{13} h^{-1} M_\odot$ ,  $M_s/M_h = 0.01$ ,  $x = R_{\text{vir}}/10$

# 観測結果との比較

強重力レンズ系SDSS J0252+0039 の観測から、小スケール物質パワースペクトルの上限値を得られている。

無次元収束場パワースペクトル：

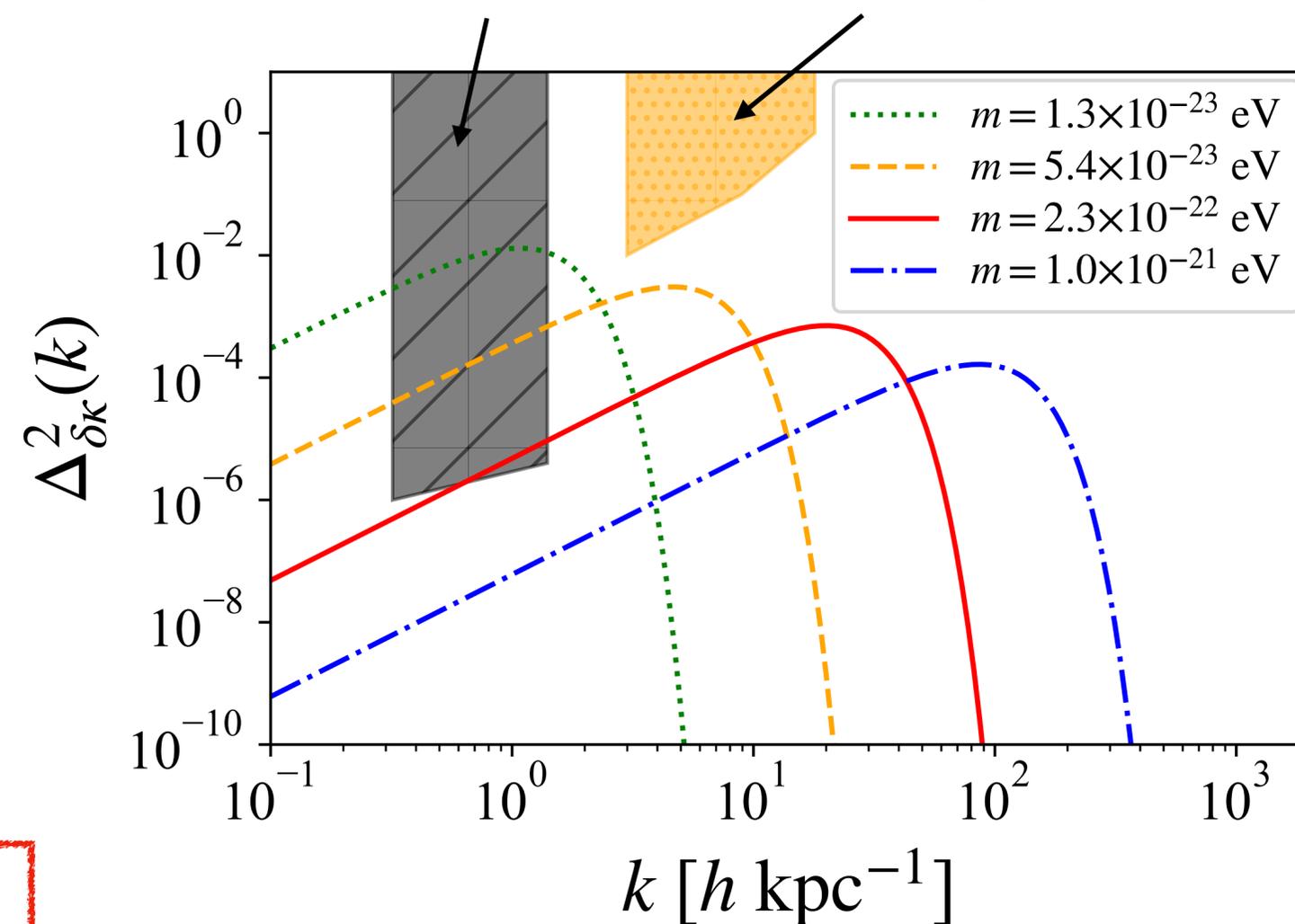
$$\Delta_{\delta\kappa}^2(k) = 2\pi k^2 \left( \frac{\Sigma(x)}{\Sigma_{\text{cr}}} \right)^2 P(k)$$

現在：何の制限も掛けられていない

将来：興味深い範囲の制限が得られる

ALMA望遠鏡による将来の観測から期待される禁止領域  
(Hezaveh, et.al., 2016)

現在の観測結果による禁止領域  
(Bayer et.al., 2018)



SDSS J0252+0039を利用した、異なるFDM質量でのパワースペクトルの比較  
 $M_h = 6.3 \times 10^{12} h^{-1} M_\odot$ ,  $M_s^{\text{Salp}} = 2.0 \times 10^{11} h^{-1} M_\odot$ ,  $x = 3.1 h^{-1} \text{ kpc}$

# まとめ

1. FDMハローの小スケール物質パワースペクトルの理論モデルを構築した。
2. 小スケール物質パワースペクトルに対するFDM質量の依存性が大きいので、FDMモデルを調べるのにこれは有用な手法である。
3. 現在の観測結果からは、FDM質量に何の制限も得られなかったが、将来の観測から興味深い範囲の制限が得られる。