

# ダークマターハローの ユニバーサルスケーリング則

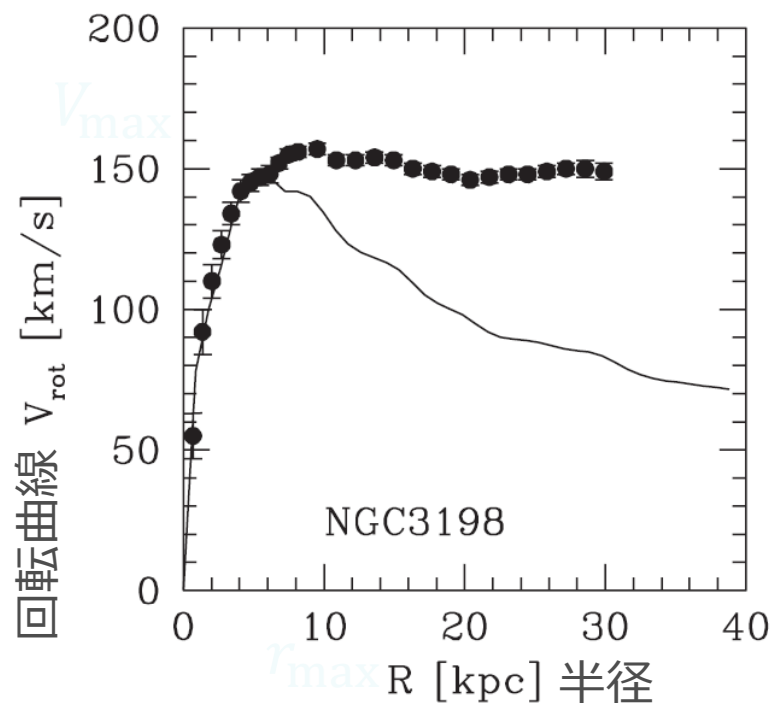
筑波大学 宇宙物理理論研究室

M2 田沼萌美

## 1933年

銀河団の速度分散から質量を見積もったが  
観測されている銀河の量ではこの質量に全然たりない。

- ▶ 見えないけれど何か大きな質量を持ったものがあるはず  
**ダークマター (DM)**



(H. Mo, F. van den Bosch & S. White 2010)

## 1970年代

銀河の回転曲線の観測

中心から離れても  
回転が遅くならない



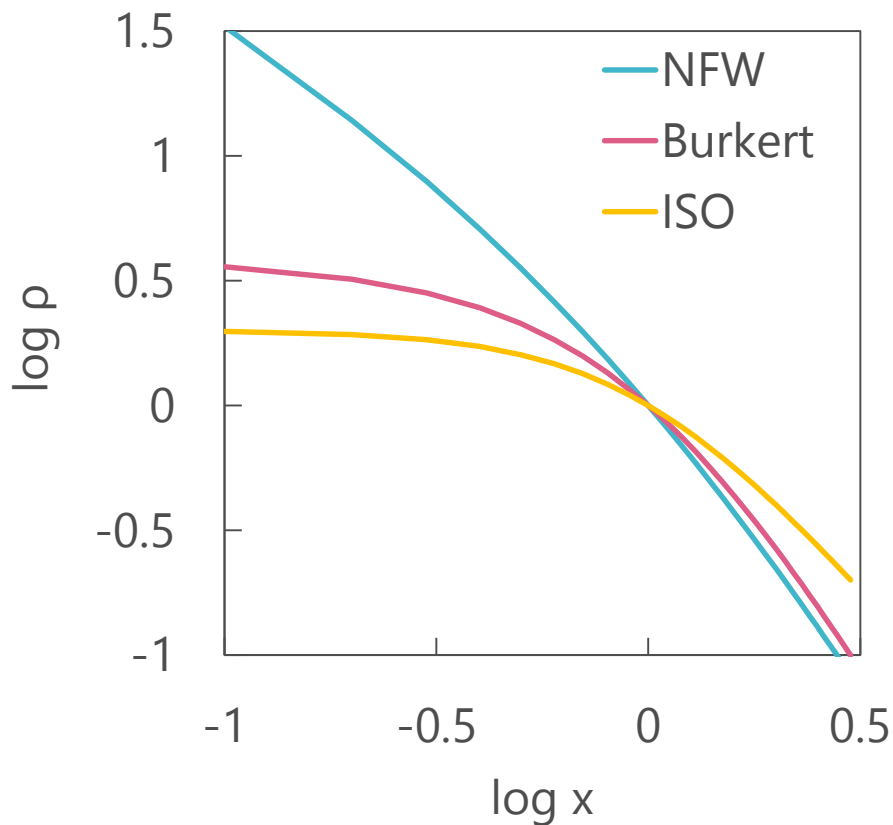
銀河の光っている部分より  
大きく広がった大きな質量を  
持ったものがある  
(DMハロー)

DMの性質が知りたい



銀河、銀河団のDMハローの**密度プロファイル**の研究

# DMハローの密度プロファイル



**NFWプロフィール** (Navarro et al. 1997)

$$\rho(x_N) = \frac{\rho_N}{x_N(x_N + 1)^2} \quad \left( x_N = \frac{r}{r_N} \right)$$

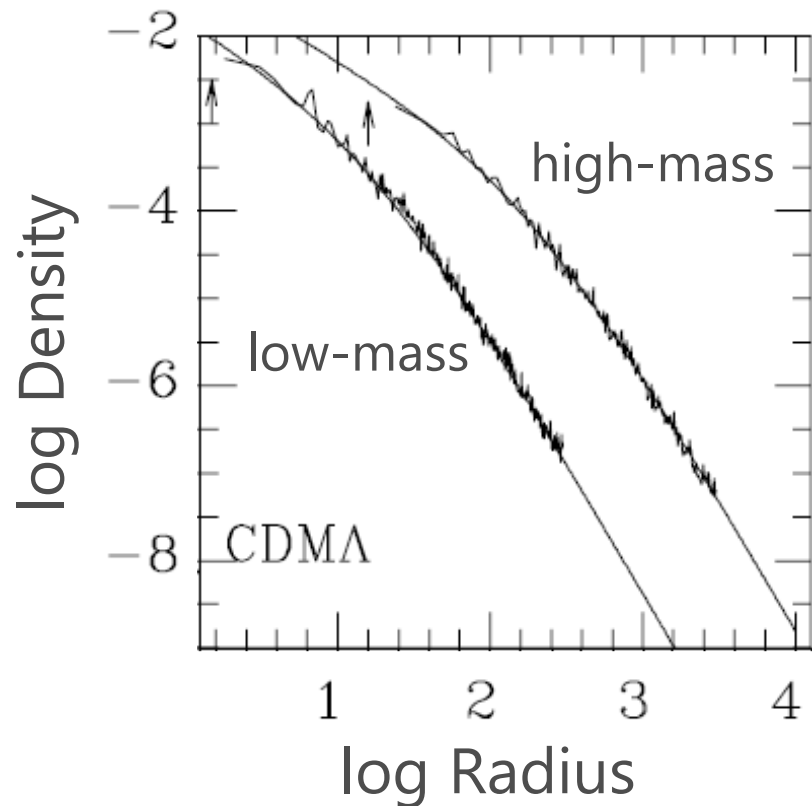
**Burkertプロフィール** (Burkert 1995)

$$\rho(x_B) = \frac{\rho_B}{(x_B + 1)(x_B^2 + 1)} \quad \left( x_B = \frac{r}{r_B} \right)$$

**Pseudo-Isothermal(ISO)プロフィール**

$$\rho(x_I) = \frac{\rho_I}{1 + x_I^2} \quad \left( x_I = \frac{r}{r_I} \right)$$

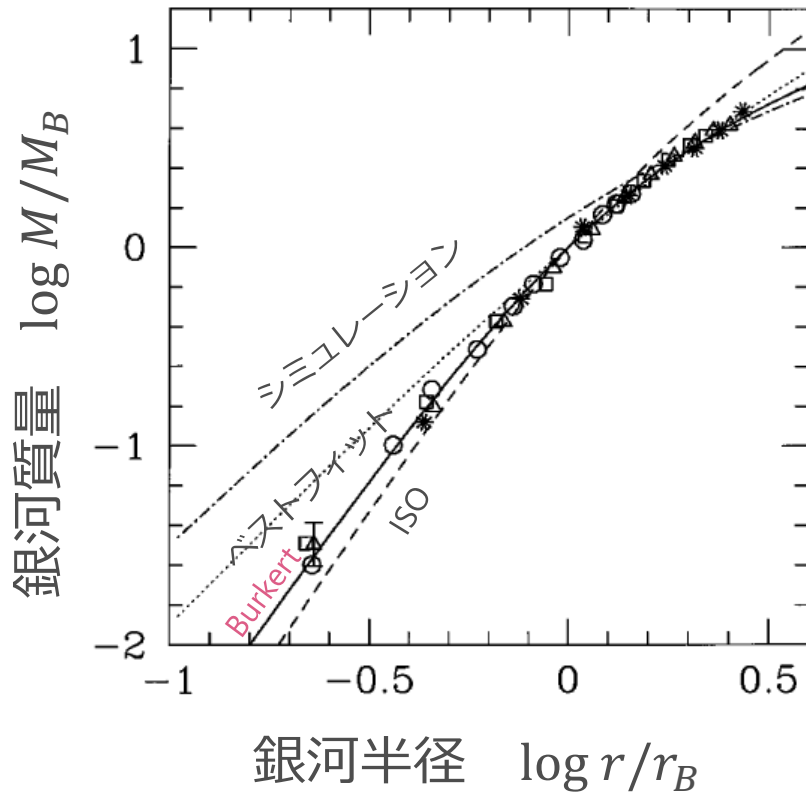
## NFWプロフィール



シミュレーションから  
予言される理論的密度分布

$$\rho(r) = \frac{\rho_N r_N^3}{r(r + r_N)^2}$$

# Burkertプロファイル

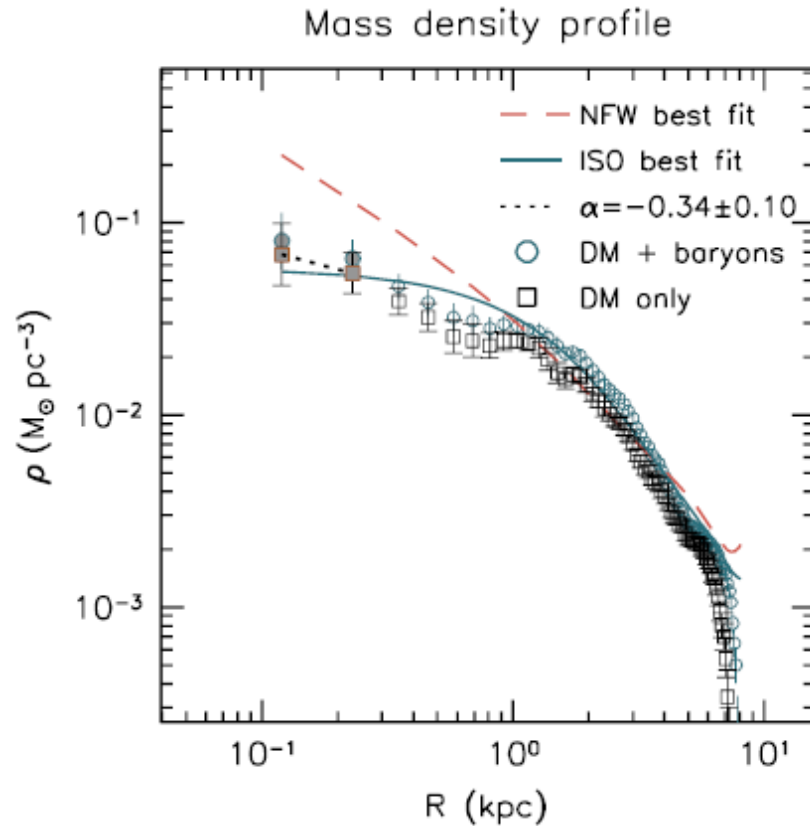


近傍の矮小銀河の  
観測から示唆される密度分布

$$\rho(r) = \frac{\rho_B}{(r + r_B)(r^2 + r_B^2)}$$

矮小銀河の回転速度の観測から  
推測した質量をフィットした。

# ISOプロフィール



銀河の観測をフィットするのに一般的によく使われる。

$$\rho(r) = \frac{\rho_I r_I^2}{r^2 + r_I^2}$$

Local Groupの矮小銀河の  
回転速度から推測した  
密度分布をフィットした。



DMの性質が知りたい



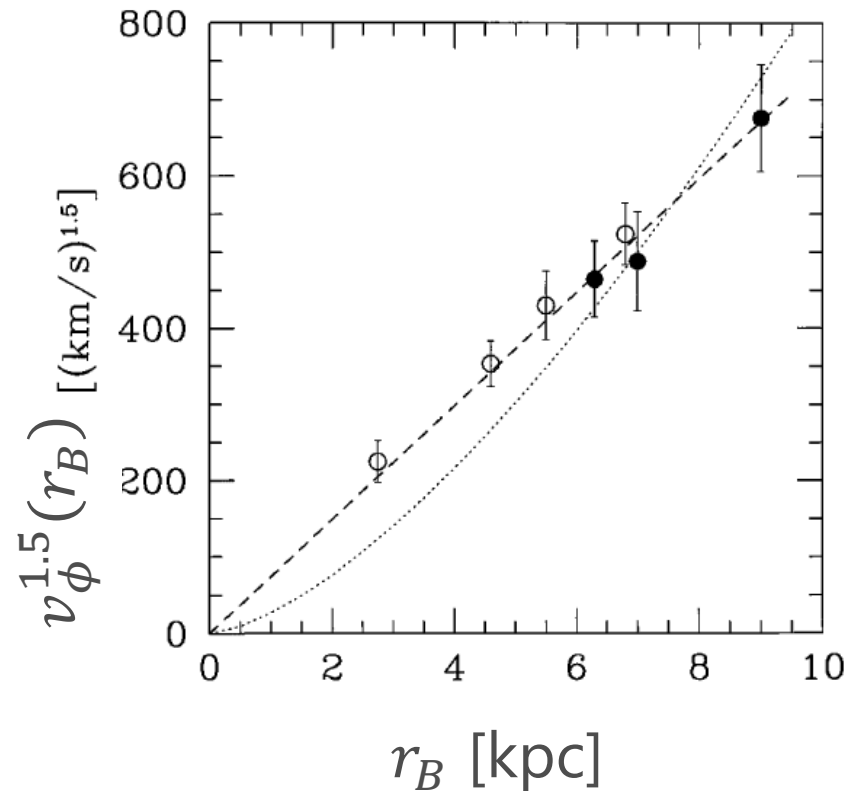
銀河、銀河団のDMハローの**密度プロファイル**の研究



**スケーリング則**

DMハローをフィッティングする  
パラメータ間にある関係性

## スケーリング則の例 | Burkert Relation



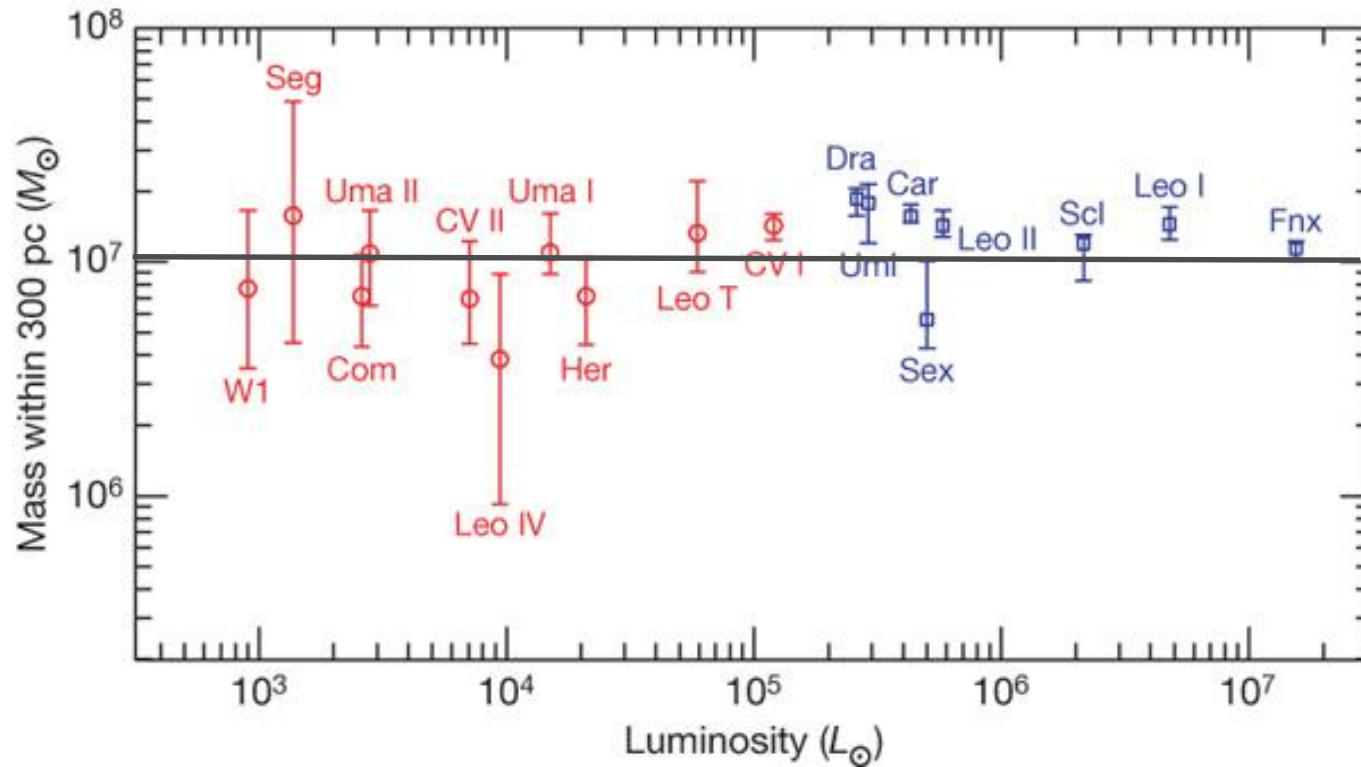
$$v_B = 17.7(r_B \text{ kpc}^{-1})^{\frac{2}{3}} \text{ km/s}$$

**プロフィール : Burkert**

$$\rho(r) = \frac{\rho_B}{(r + r_B)(r^2 + r_B^2)}$$

◀ 近傍矮小銀河の回転速度の観測

## スケーリング則の例 | Strigari Relation



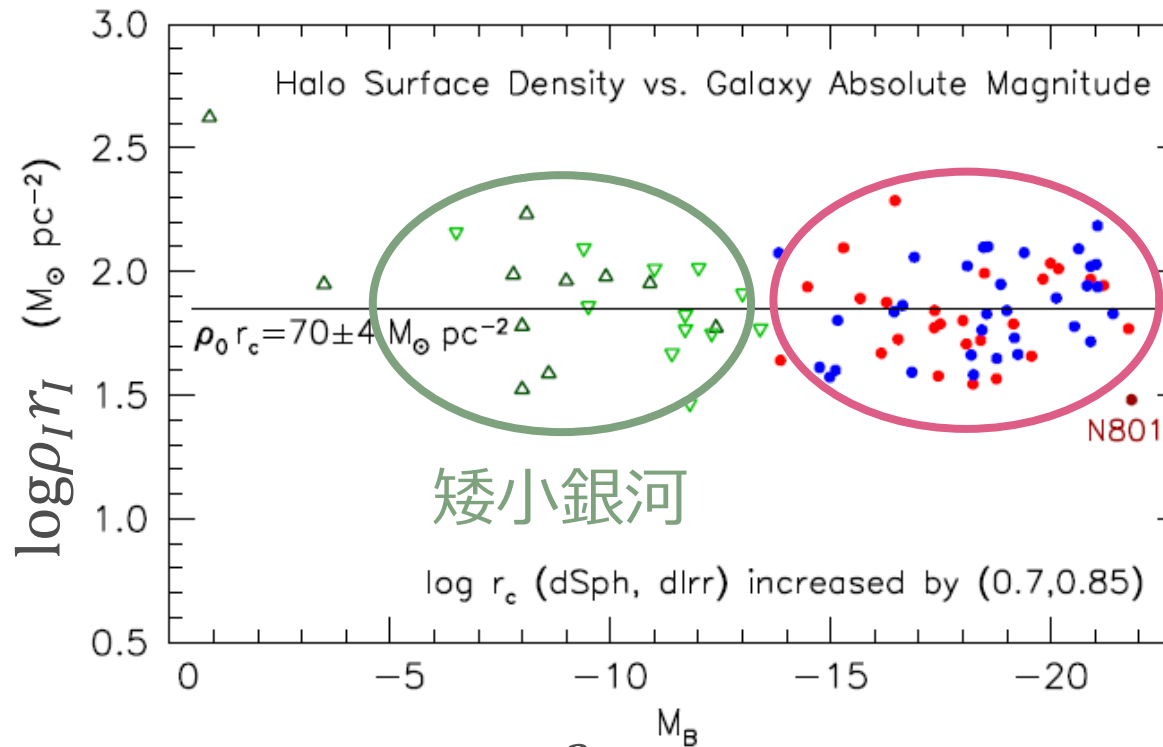
$$M(< 300 \text{ pc}) \sim 10^7 M_{\odot}$$

$M$  : 銀河質量

天の川銀河の矮小銀河の観測

銀河の星の視線方向速度の  
観測から銀河質量を推測

# スケーリング則の例 | Kormendy Freeman Relation



渦巻銀河  
楕円銀河

$$\rho_I r_I = 70 \pm 4 \text{ M}_\odot/\text{pc}^2$$

プロフィール : ISO

$$\rho(r) = \frac{\rho_I r_I^2}{r^2 + r_I^2}$$

late-type galaxy

回転曲線と速度分散のデータから  
フィッティングパラメータを決定

(Kormendy & Freeman 2016)

矮小銀河サイズのスケーリング則は見つかっている。

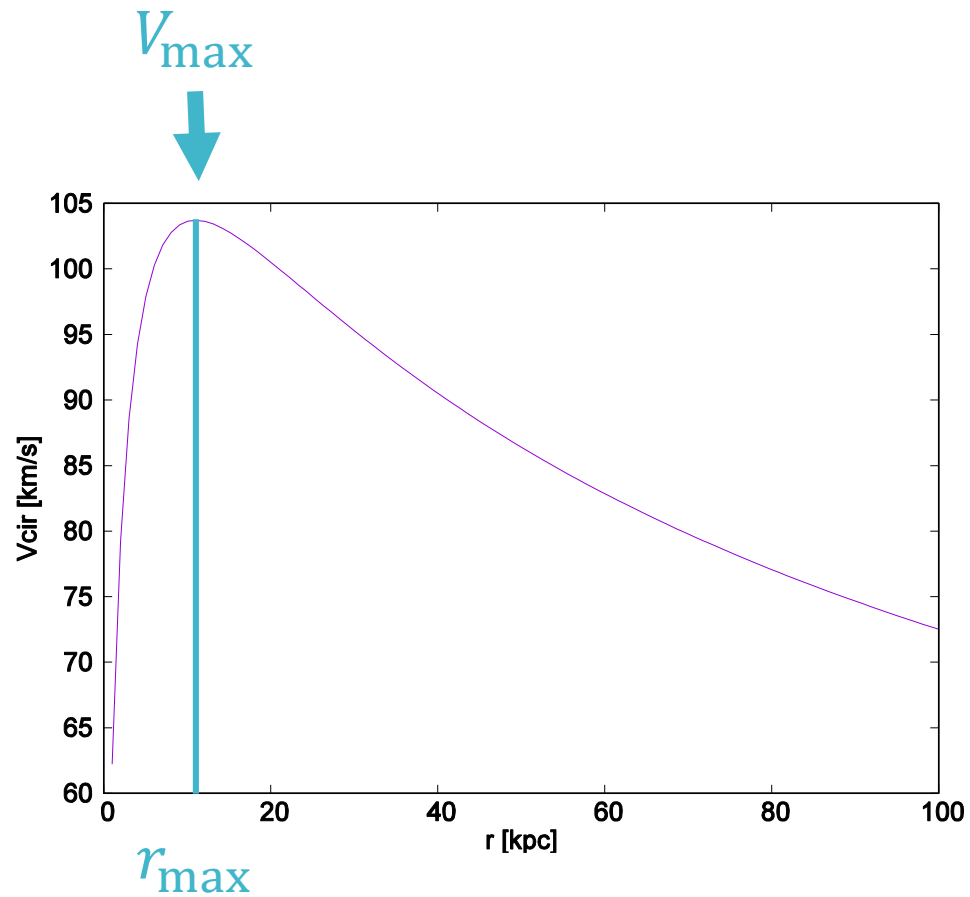
銀河団サイズまで拡張したらどうなるか？



**矮小銀河～銀河団サイズのスケーリング則を探す**

計算方法

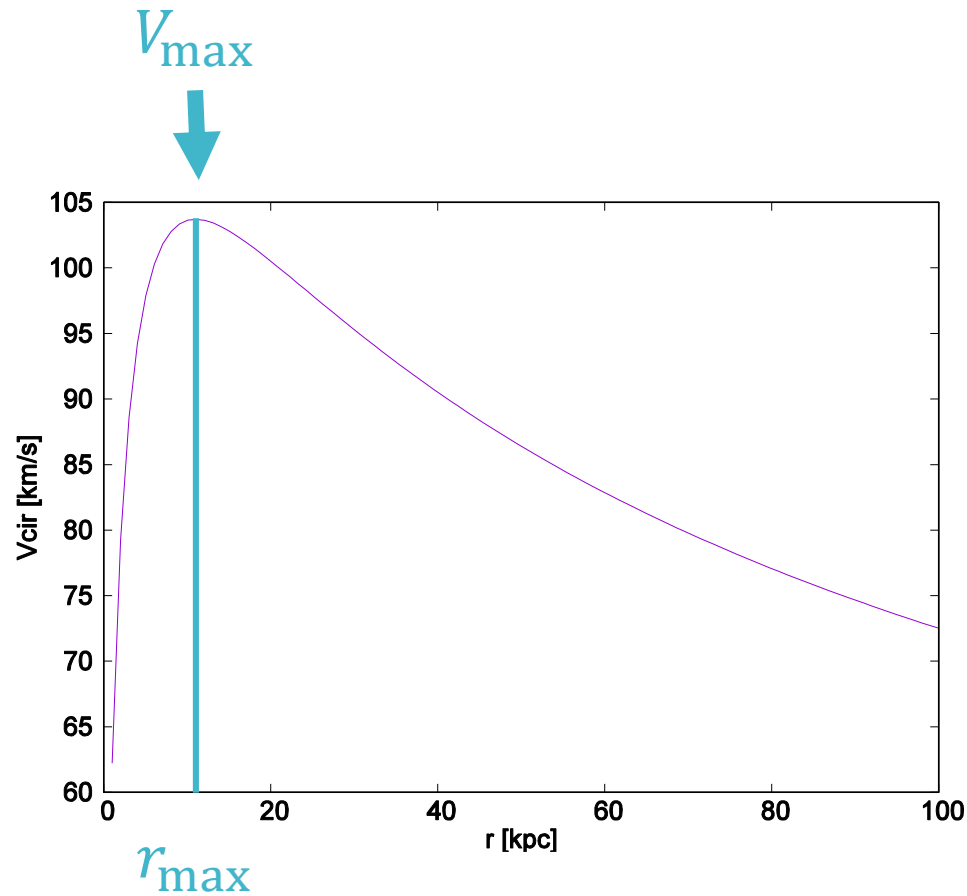
# 物理量の定義



$V_{\text{max}}$  : 銀河の最大回転速度

$r_{\text{max}}$  : 回転速度が最大になる  
銀河半径

# 計算方法



回転速度：  $V_{\text{cir}} = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$

銀河質量：  $M(r) = \int_0^r 4\pi\rho(r')r'^2 dr'$

$G$ ：重力定数

$r$ ：銀河半径

$\frac{dV_{\text{cir}}}{dr} = 0$  になる  $r$  が  $r_{\text{max}}$



銀河質量  $M(r_{\max}) = \int_0^{r_{\max}} 4\pi \rho(r) r^2 dr$

| NFWプロファイル

$$\rho(r) = \frac{\rho_N r_N^3}{r(r + r_N)^2}$$

| Burkertプロファイル

$$\rho(r) = \frac{\rho_B}{(r + r_B)(r^2 + r_B^2)}$$

参考文献	密度プロファイル	銀河の種類	観測	サーベイ
Oh et al. 2015	NFW	矮小銀河	回転曲線	LITTLE THINGS
Gentile et al. 2009	Burkert	矮小銀河、渦巻銀河	回転曲線	THINGS, GHASP
de Blok et al. 2008	NFW	渦巻銀河、円盤銀河 矮小銀河	回転曲線	THINGS
Gastaldello et al. 2007	NFW	銀河群	X線	Chandra, XMM
Umetsu et al. 2016	NFW	銀河団	重力レンズ効果	CLASH
Merten et al. 2015	NFW	銀河団	重力レンズ効果	CLASH



銀河団をX線で撮影した写真

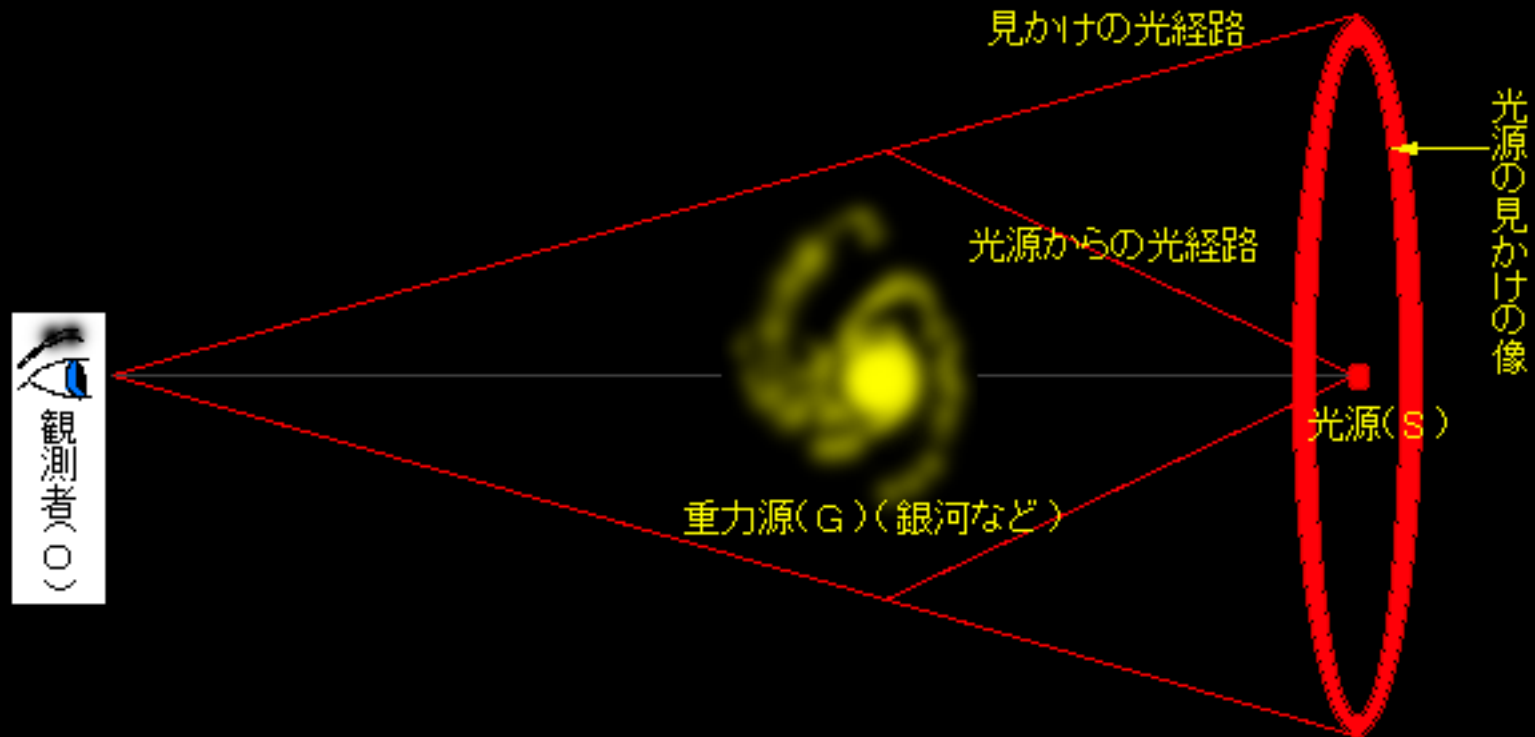
銀河団にはX線でしか観測  
できない高温ガスがある。

高温ガスを銀河団に  
閉じ込めておくために  
大量のDMが必要



高温ガスの観測から  
DMの質量を推測する。

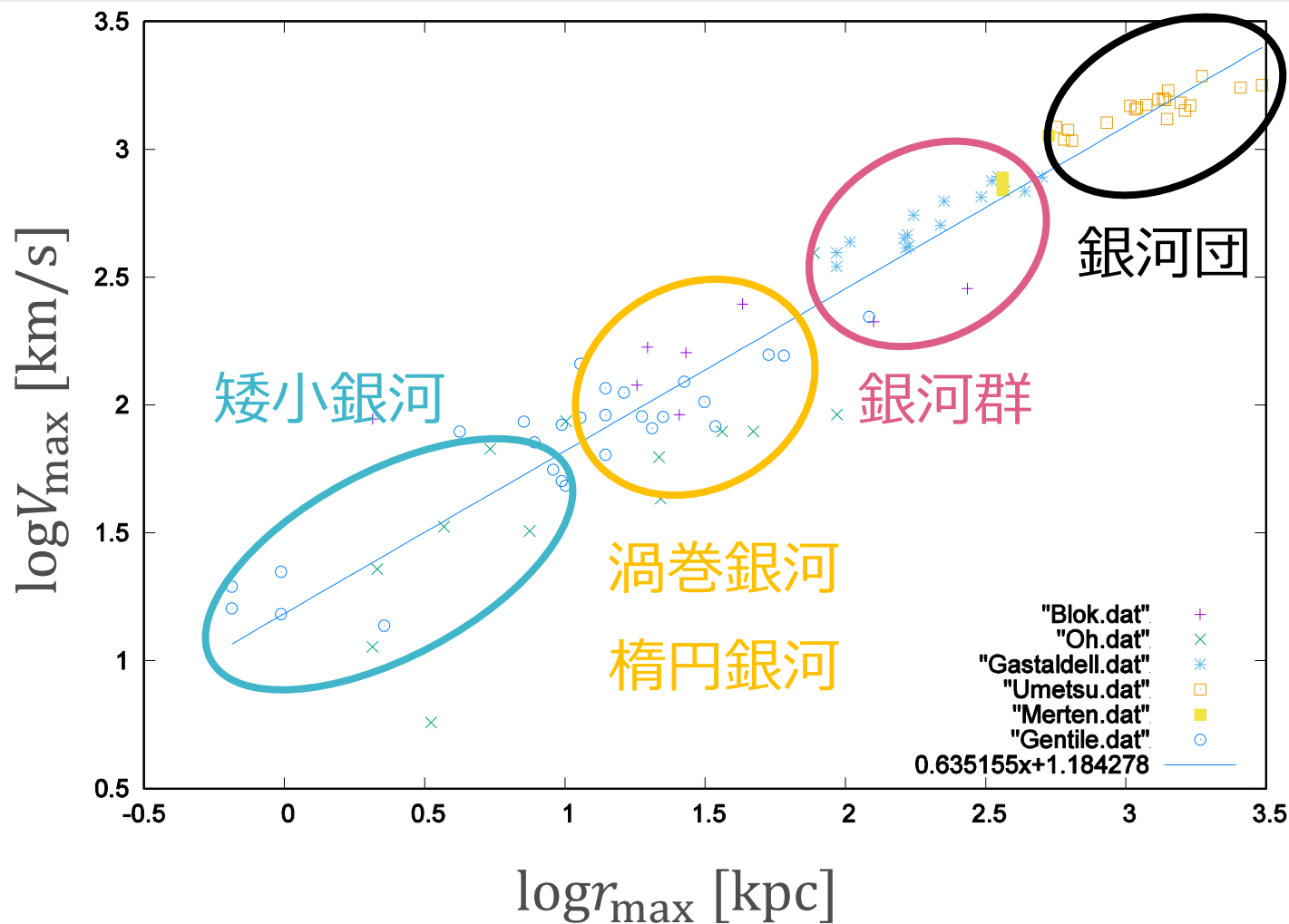
# 重力レンズ効果



光源の曲げられ方から重力源（DM）の密度分布を推測

結果

# 結果

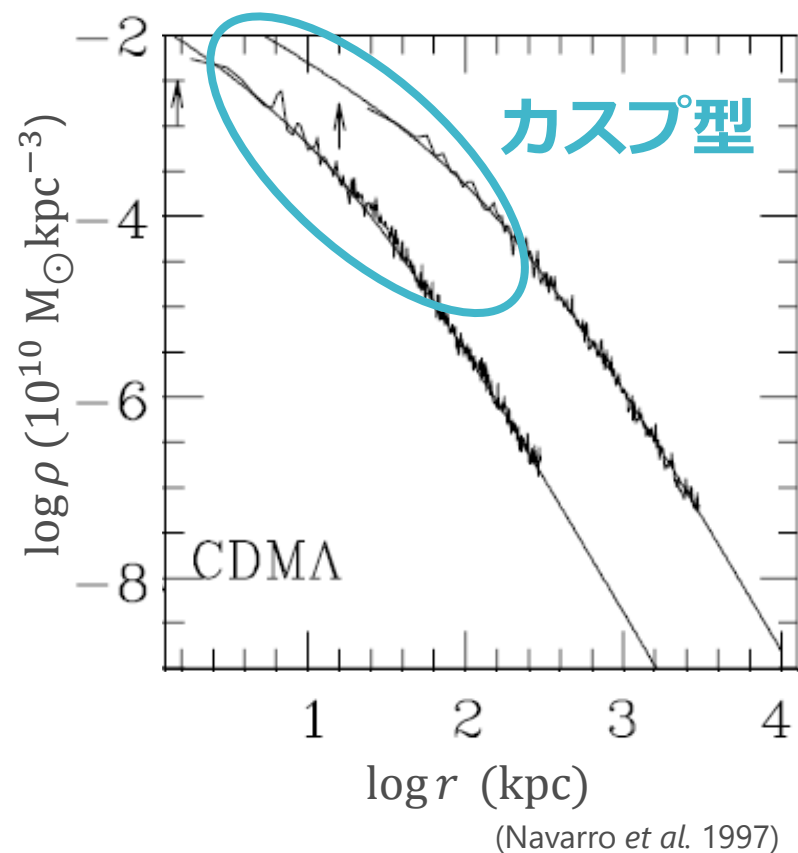


$$V_{\max} = (r_{\max}^{0.635155} \text{ kpc}^{-1}) \times 10^{1.184278} \text{ km/s}$$

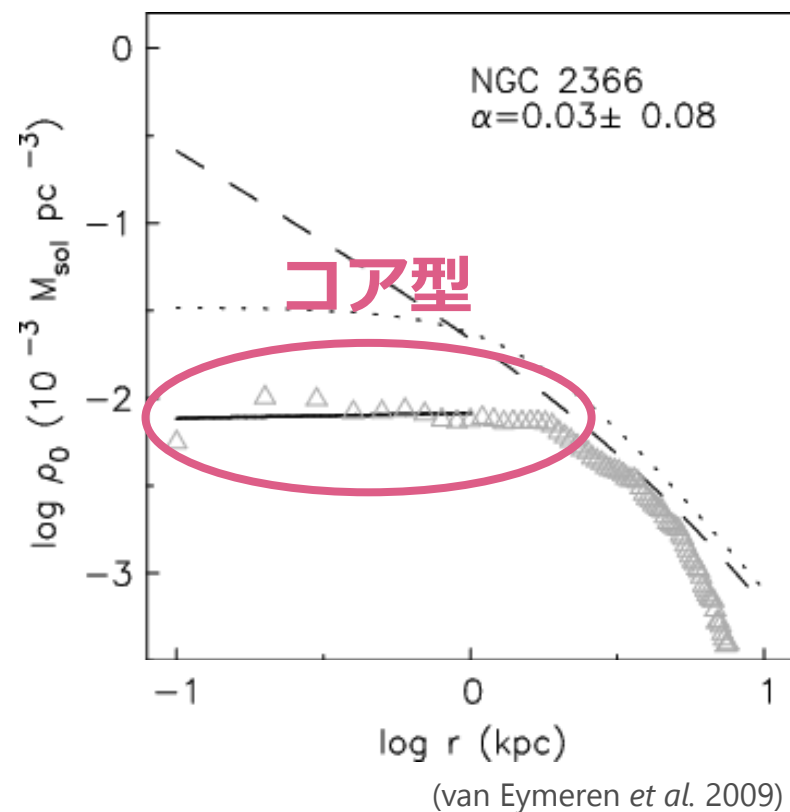
参考文献	密度プロファイル	銀河の種類	観測したもの	サーベイ
Oh et al. 2015	NFW	矮小銀河	回転曲線	LITTLE THINGS
Gentile et al. 2009	Burkert	矮小銀河、渦巻銀河	回転曲線	THINGS, GHASP
de Blok et al. 2008	NFW	渦巻銀河、円盤銀河 矮小銀河	回転曲線	THINGS
Gastaldello et al. 2007	NFW	銀河群	X線	Chandra, XMM
Umetsu et al. 2016	NFW	銀河団	重力レンズ効果	CLASH
Merten et al. 2015	NFW	銀河団	重力レンズ効果	CLASH

# 矮小銀河のDMハローのカスプ・コア問題

理論

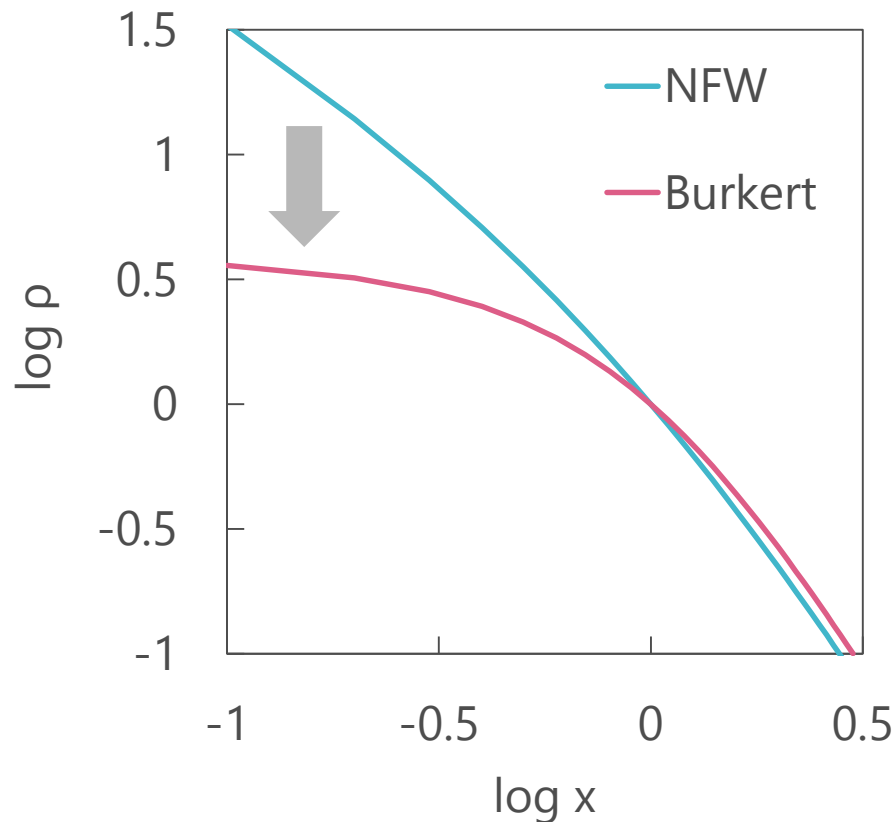


観測



こんな矮小銀河が  
見つかっている





**NFWプロファイル** (Navarro et al. 1997)

$$\rho(x) = \frac{\rho_N}{x(x+1)^2} \quad \left(x = \frac{r}{r_N}\right)$$

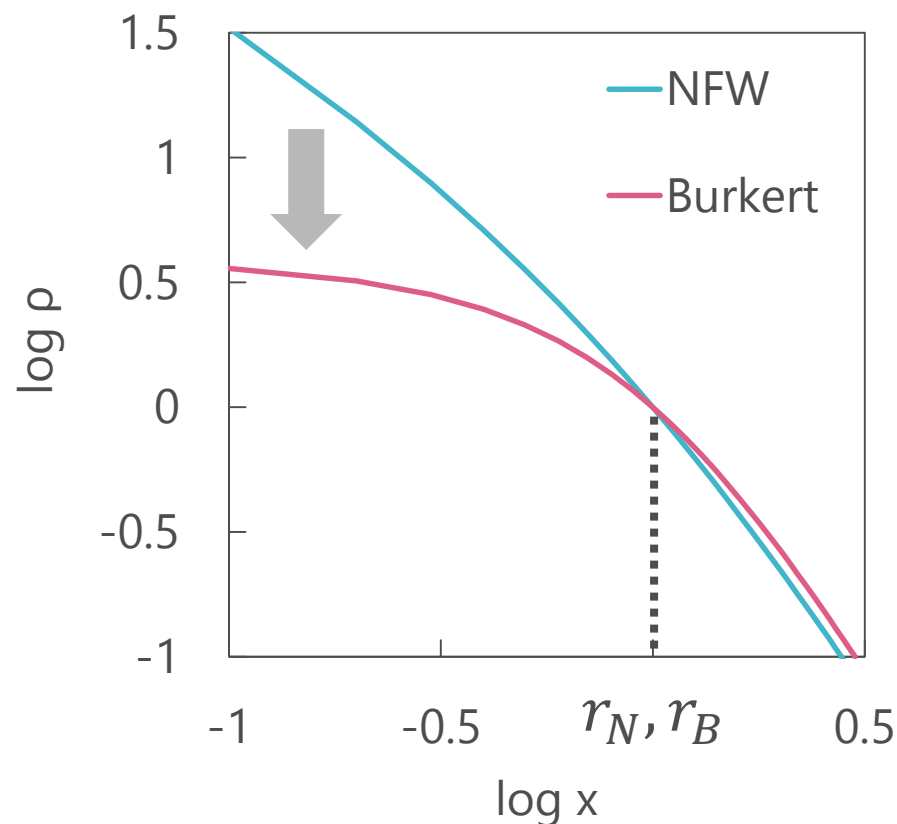
**Burkertプロファイル** (Burkert 1995)

$$\rho(x) = \frac{\rho_B}{(x+1)(x^2+1)} \quad \left(x = \frac{r}{r_B}\right)$$

(Navarro, Frenk & White 1997)

(G. Ogiya et al. 2014)

NFWプロファイルとBurkertプロファイルをつなげるために仮定をする。



## 仮定

1.  $r \gg r_N, r_B$  のとき密度分布のべきが  $r^{-3}$  で保存する。
2. ビリアル質量は変わらない。

1.  $r \gg r_N, r_B$  のとき密度分布のべきが  $r^{-3}$  で保存する。

$$\text{NFW} \quad \rho(r) = \frac{\rho_N r_N^3}{r(r + r_N)^2} \rightarrow \frac{\rho_N r_N^3}{r^3}$$

$$\text{Burkert} \quad \rho(r) = \frac{\rho_B}{(r + r_B)(r^2 + r_B^2)} \rightarrow \frac{\rho_B r_B^3}{r^3}$$

$$\frac{\rho_N r_N^3}{r^3} \approx \frac{\rho_B r_B^3}{r^3} \quad \triangleright \quad \rho_N r_N^3 \approx \rho_B r_B^3$$

## 2. ビリアル質量は変わらない。

$$M(r_{\text{vir}}) = \int_0^{r_{\text{vir}}} 4\pi\rho(r)r^2 dr \quad (r_{\text{vir}} : \text{ビリアル半径}) \quad \text{より}$$

NFW

$$M(r_{\text{vir}}) = 4\pi\rho_N r_N^3 \left[ \ln\left(1 + \frac{r_{\text{vir}}}{r_N}\right) - \frac{r_{\text{vir}}/r_N}{1 + r_{\text{vir}}/r_N} \right]$$

Burkert

$$M(r_{\text{vir}}) = 4\pi\rho_B r_B^3 \left[ -\frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{r_{\text{vir}}}{r_B}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{r_{\text{vir}}}{r_B}\right) + \frac{1}{4} \ln\left\{1 + \left(\frac{r_{\text{vir}}}{r_B}\right)^2\right\} \right]$$

$$\rho_N r_N^3 \approx \rho_B r_B^3$$

$$\ln\left(1 + \frac{r_{\text{vir}}}{r_N}\right) - \frac{r_{\text{vir}}/r_N}{1 + r_{\text{vir}}/r_N} \approx -\frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{r_{\text{vir}}}{r_B}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{r_{\text{vir}}}{r_B}\right) + \frac{1}{4} \ln\left\{1 + \left(\frac{r_{\text{vir}}}{r_B}\right)^2\right\}$$

## 2. ビリアル質量は変わらない。

$$\ln\left(1 + \frac{r_{\text{vir}}}{r_N}\right) - \frac{r_{\text{vir}}/r_N}{1 + r_{\text{vir}}/r_N} \approx -\frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{r_{\text{vir}}}{r_B}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{r_{\text{vir}}}{r_B}\right) + \frac{1}{4} \ln\left\{1 + \left(\frac{r_{\text{vir}}}{r_B}\right)^2\right\}$$


$$r_{\text{vir}} \gg r_N, r_B$$

$$\ln\left(\frac{r_{\text{vir}}}{r_N}\right) - 1 \approx \ln\left(\frac{r_{\text{vir}}}{r_B}\right) - \frac{\pi}{4} \quad \blacktriangleright \quad r_N \approx r_B$$

$$\rho_N r_N^3 \approx \rho_B r_B^3 \quad \blacktriangleright \quad \rho_N \approx \rho_B$$

## 現在の姿（元データ）

Burkertプロファイル

数値データ： $\rho_B, r_B$

$$\rho(r) = \frac{\rho_B}{(r + r_B)(r^2 + r_B^2)}$$



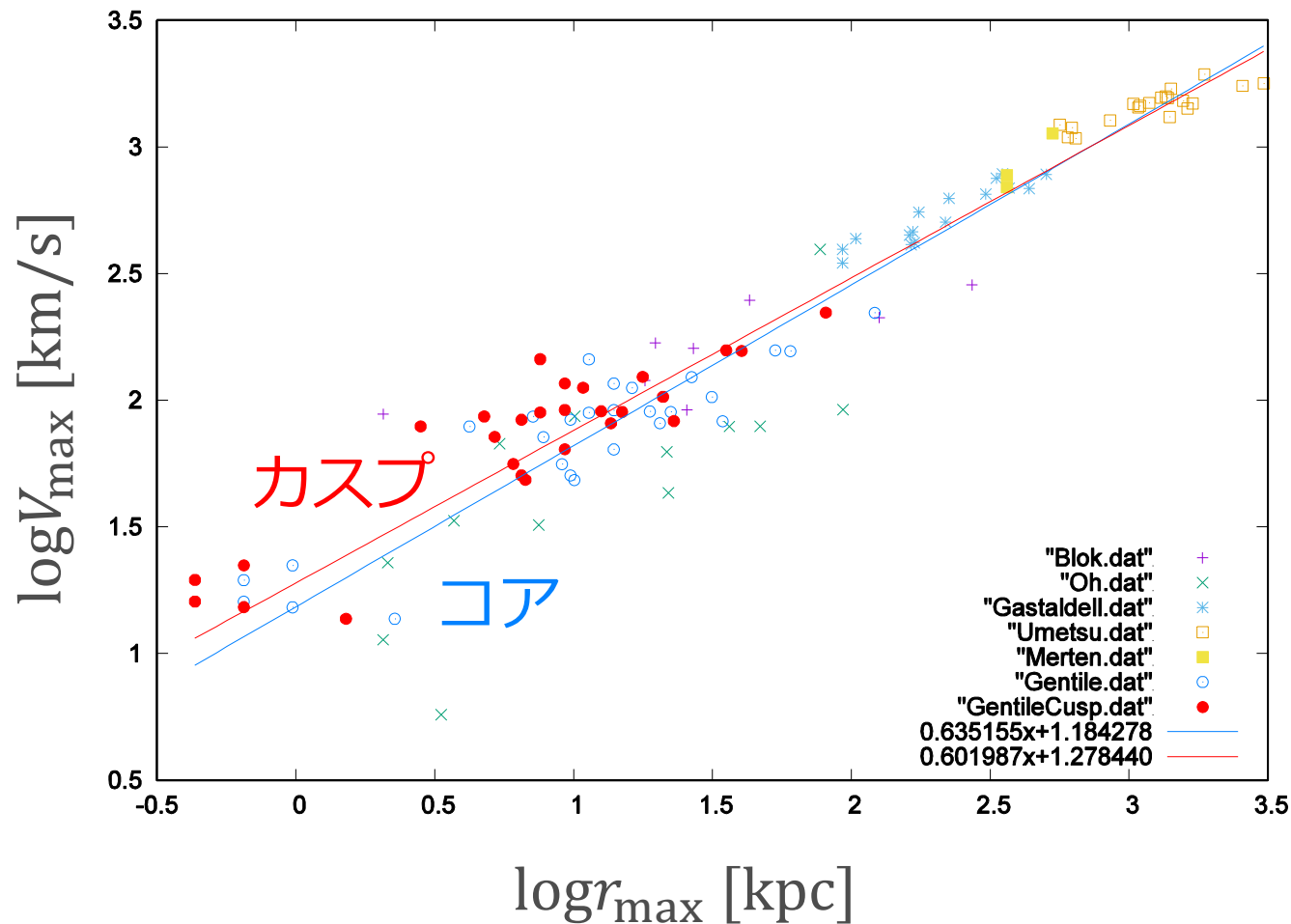
## 過去の姿

NFWプロファイル

数値データ： $\rho_N \approx \rho_B, r_N \approx r_B$

$$\rho(r) = \frac{\rho_N r_N^3}{r(r + r_N)^2}$$

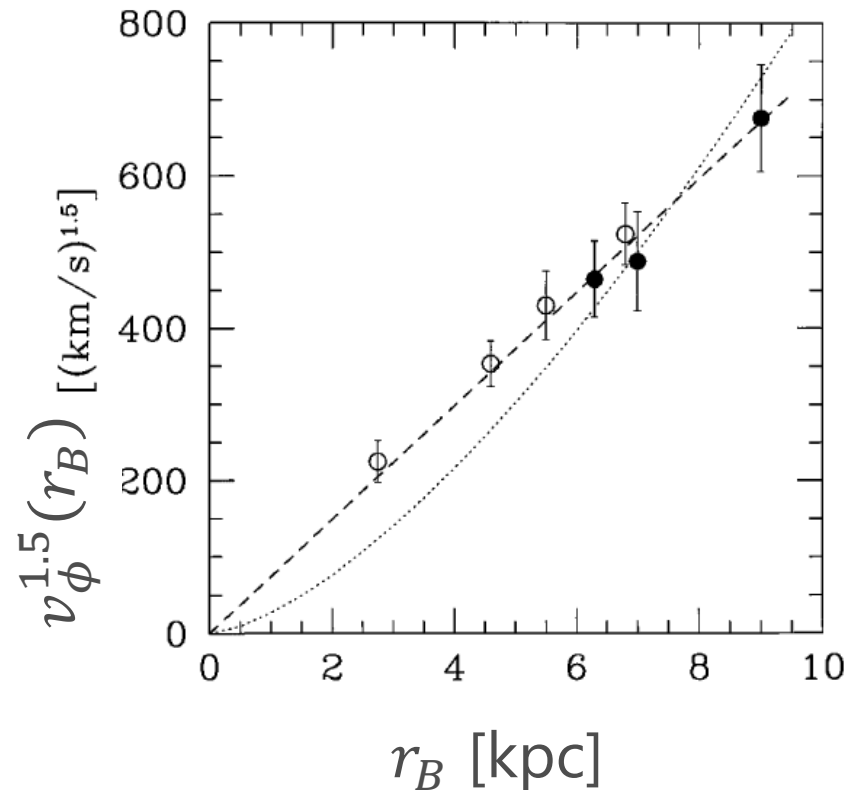
# コア型からカスプ型に変換した



カスプ  $\triangleright V_{\max} = (r_{\max}^{0.601967} \text{ kpc}^{-1}) \times 10^{1.278440} \text{ km/s}$

コア  $\triangleright V_{\max} = (r_{\max}^{0.635155} \text{ kpc}^{-1}) \times 10^{1.184278} \text{ km/s}$

## スケーリング則の例 | Burkert Relation



$$v_B = 17.7(r_B \text{ kpc}^{-1})^{\frac{2}{3}} \text{ km/s}$$

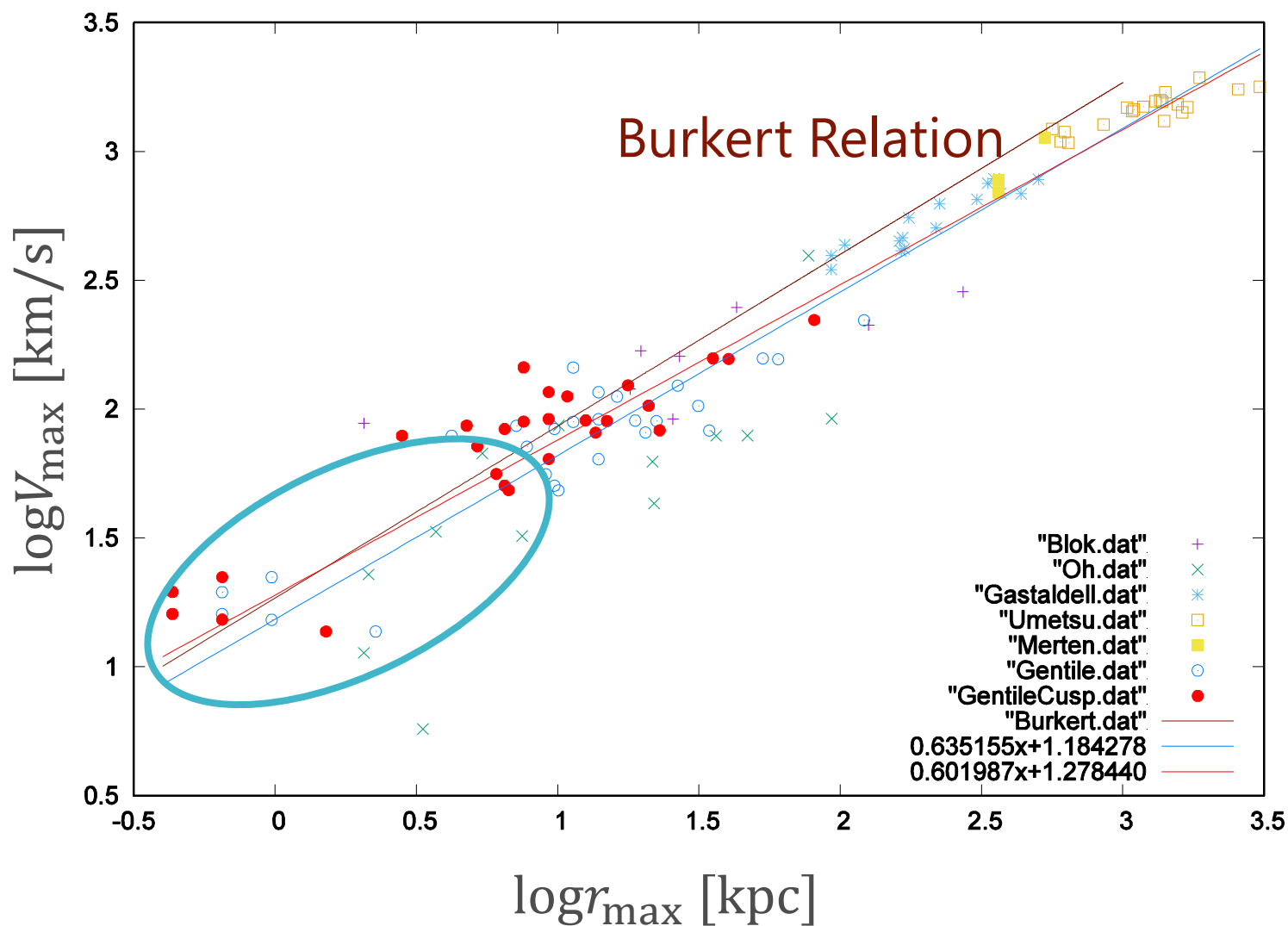
**プロフィール : Burkert**

$$\rho(r) = \frac{\rho_B}{(r + r_B)(r^2 + r_B^2)}$$

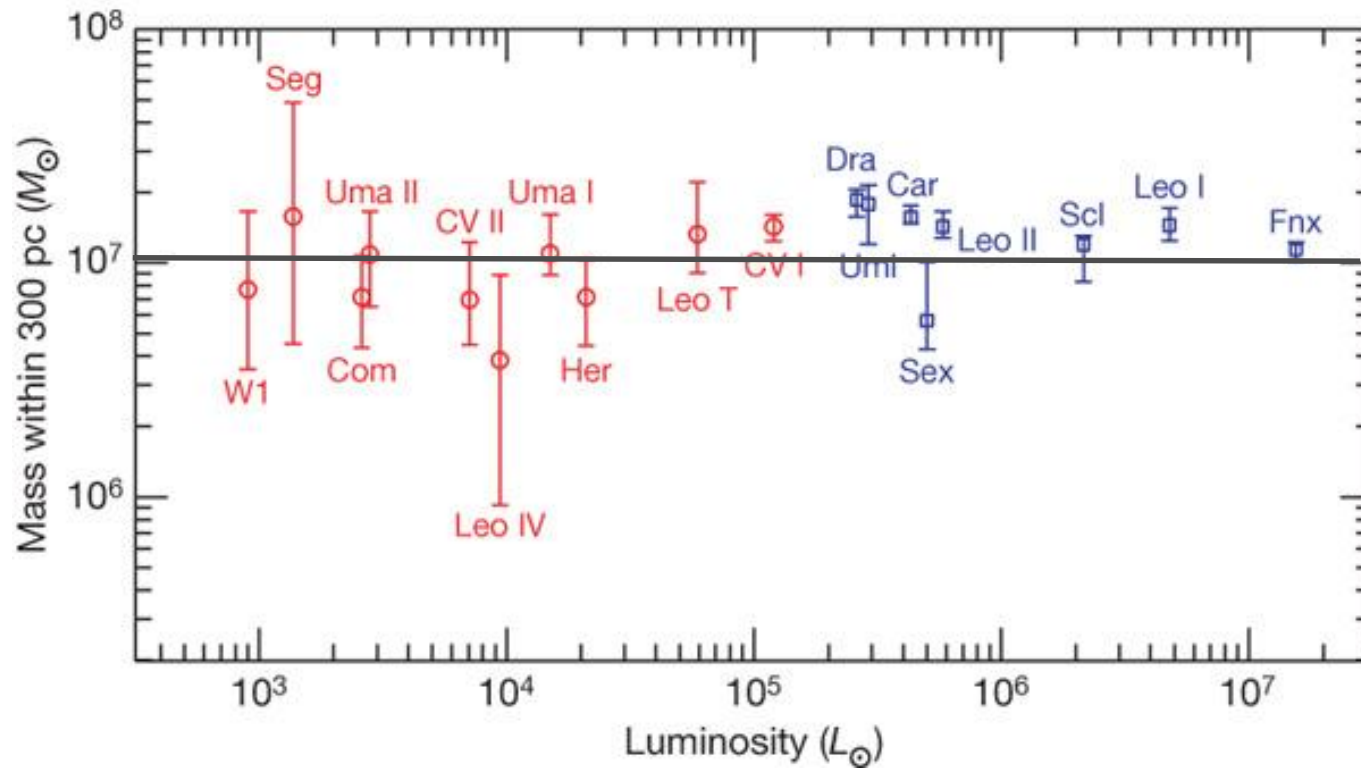
◀ 近傍矮小銀河の回転速度の観測



## Burkert Relationとの比較



## スケーリング則の例 | Strigari Relation



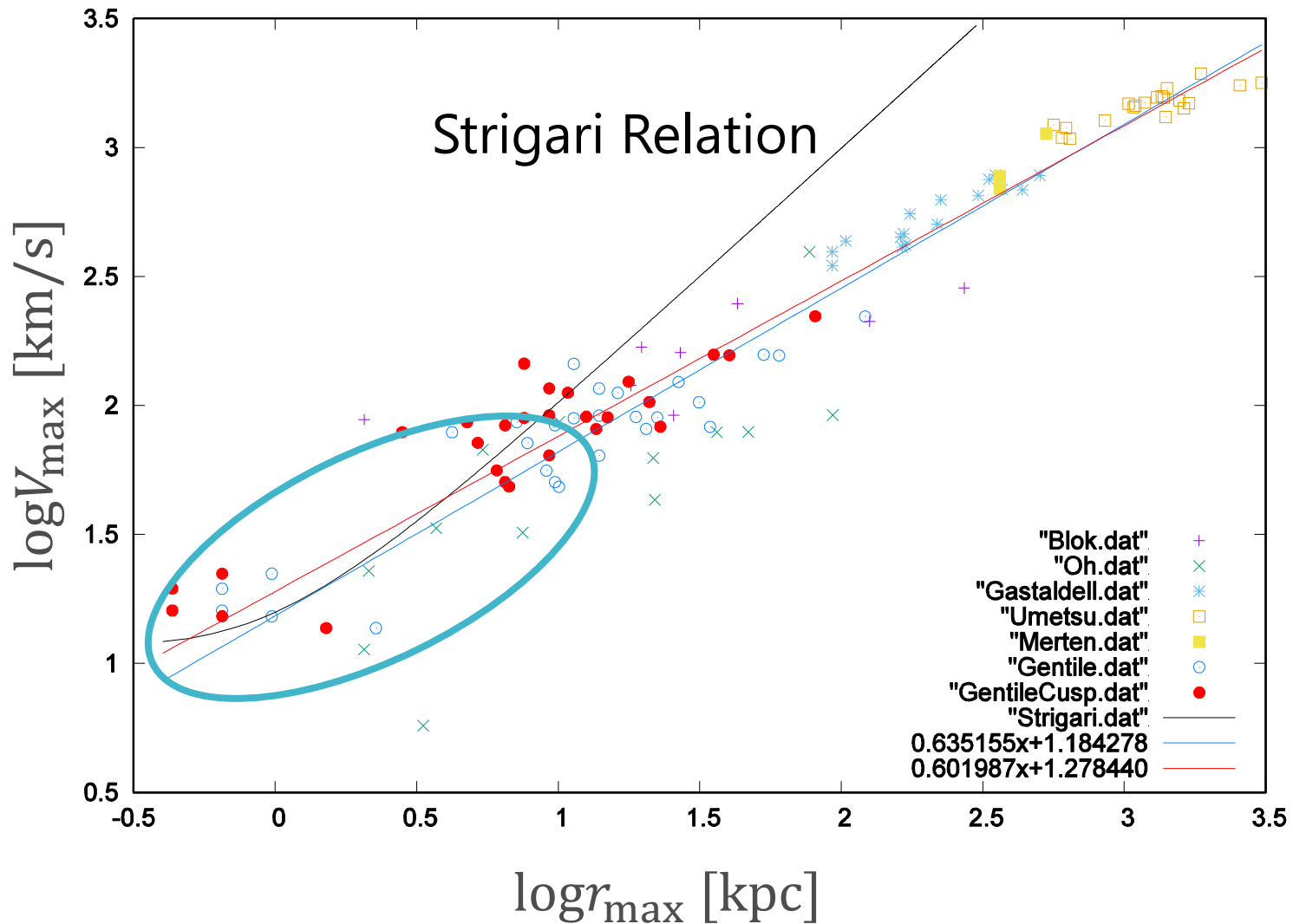
$$M(< 300 \text{ pc}) \sim 10^7 M_{\odot}$$

$M$  : 銀河質量

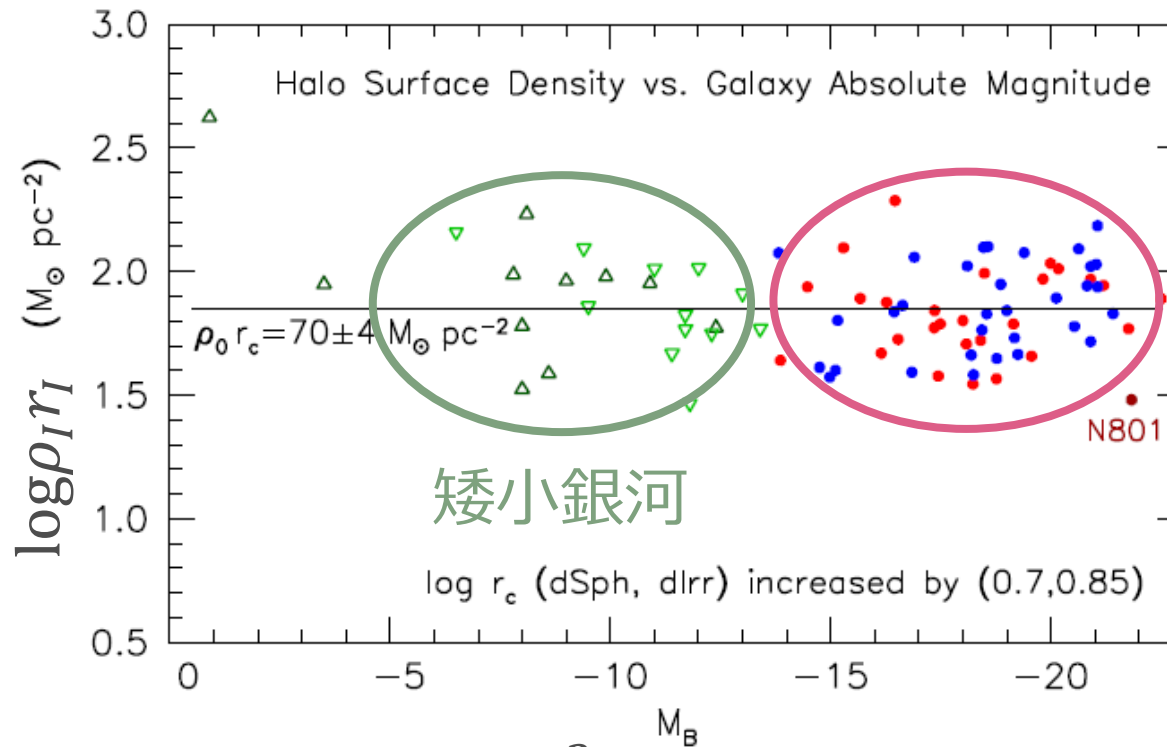
天の川銀河の矮小銀河の観測

銀河の星の視線方向速度の  
観測から銀河質量を推測

## Strigari Relationとの比較



# スケーリング則の例 | Kormendy Freeman Relation



渦巻銀河  
楕円銀河

$$\rho_I r_I = 70 \pm 4 \text{ M}_\odot/\text{pc}^2$$

プロフィール : ISO

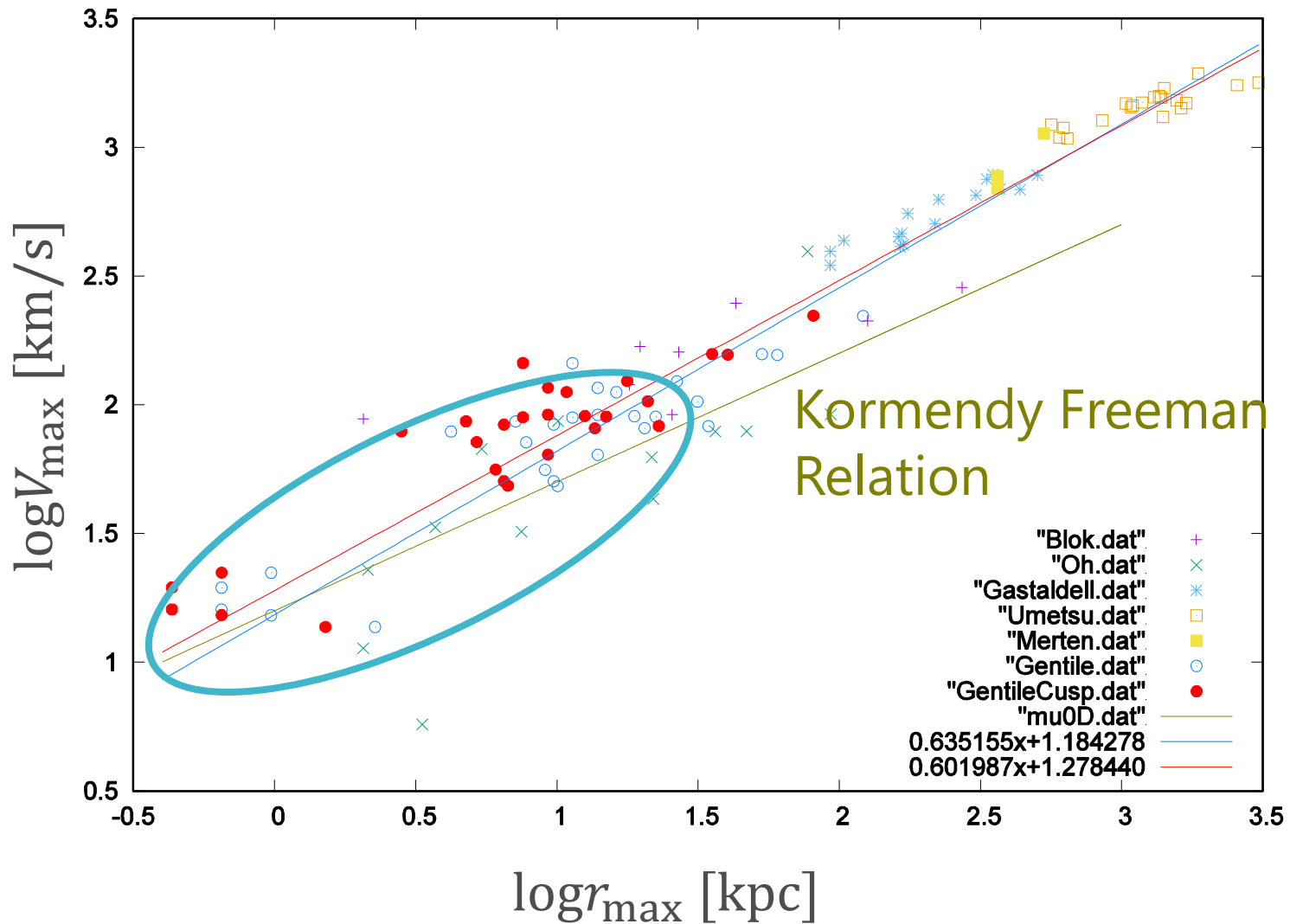
$$\rho(r) = \frac{\rho_I r_I^2}{r^2 + r_I^2}$$

late-type galaxy

回転曲線と速度分散のデータから  
フィッティングパラメータを決定

(Kormendy & Freeman 2016)

# Kormendy Freeman Relationとの比較



まとめ

- $V_{\max}$  と  $r_{\max}$  を用いて、矮小銀河から銀河団サイズまでDMハローのスケーリング則がないか調べた。
- Burkertプロファイルを持っている銀河が過去にカスプ型だった場合のスケーリング関係を調べた。

- 矮小銀河から銀河団サイズまで  
1つのスケーリング則がありそう。
- 矮小銀河の範囲では $r_{\max} - V_{\max}$ 関係が  
他のスケーリング則とも一致する。



- **球状星団**では $r_{\max} - V_{\max}$ 関係がどうなってるか？
- $\Lambda$ CDMモデルに基づくN体シミュレーションでも銀河が $r_{\max} - V_{\max}$ 関係を作るか確かめる。
- $V_{\max} \propto r_{\max}^{0.6}$ となる物理的理由は何か？