

# 球対称定常銀河風の解析

## 2015年10月31日

五十嵐 朱夏

# 目次

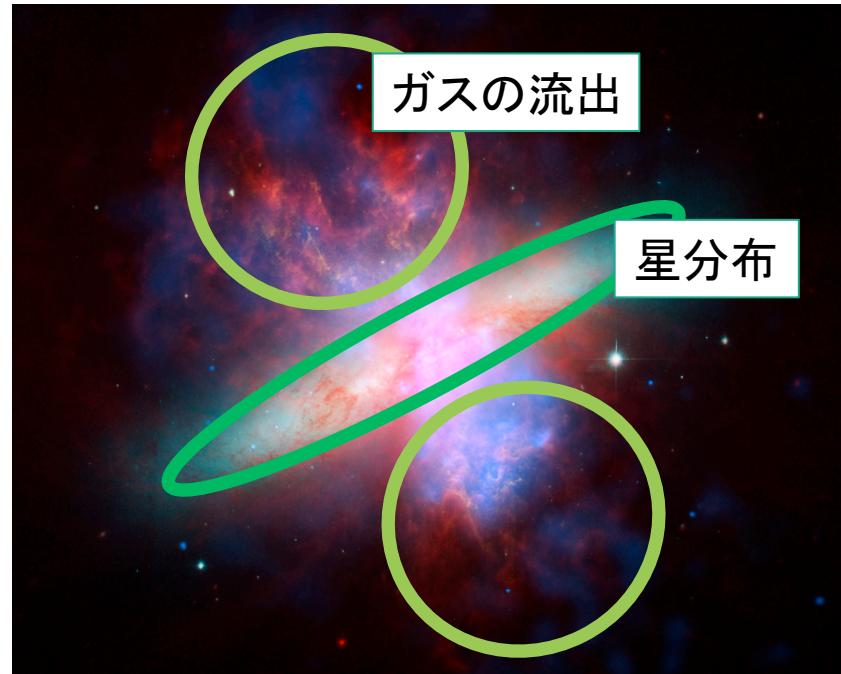
- Introduction
- 先行研究
- Tsuchiya モデル
- 遷音速銀河風モデルとその解
- Sombrero銀河に対する適用
- ポリトロピックモデル
- まとめ
- これから

## Introduction

# 銀河風とは？

- 銀河から星間ガス(高温のガス)が流出する現象
- 1963年、M82(cigar galaxy)の銀河風を発見(Lynds & Sandages 1963)

→ 銀河風研究の始まり



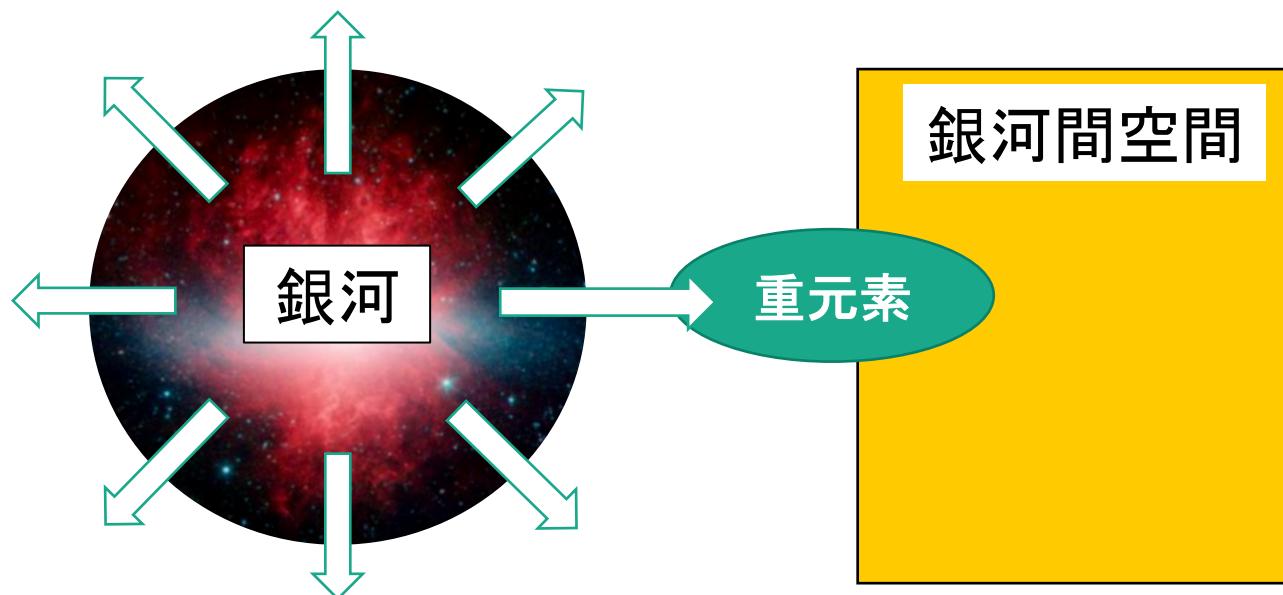
M82 NASA

Green : optical  
Blue : X-ray  
Red : infrared

## Introduction

# 銀河風の役割

- ・銀河自身の進化に影響
- ・銀河間空間の重元素汚染に影響



## Introduction

# 銀河風の観測は難しい

- 詳しい速度分布は(現状では)観測できない  
(Somerville & Primack 1999 など)
- そのため、詳しい加速過程はわかっていない



理論的に予想しよう

## Introduction

# 銀河風の発生過程

- ・(一般的に考えられている)過程

- ① 銀河内で熱エネルギー発生
- ② 星間ガスに熱エネルギーの注入 → 圧力勾配が強くなる
- ③ 銀河重力を振り切って銀河間空間に流出

圧力勾配



エネルギー源は？

エネルギー源は？

→ 主に大質量星(Stellar Winds, SNe II, SFから30-40Myr程度まで)



星形成銀河

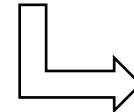
(Larson 1974, Chevalier & Clegg 1985, Recchi et al. 2001, Mori et al. 2003 Kirby et al. 2011, Ruiz et al. 2013など多い)

その他に SNe Ia, AGN, cosmic-ray driven wind なども提案される

しかし、銀河風は複雑

mass loading rate, radiative cooling, shock, radiation force ...

本研究：銀河風が満たすべき物理的性質に注目



遷音速解

# 遷音速解とは？

$$\rho v S = \text{const.}$$

質量保存

運動量保存

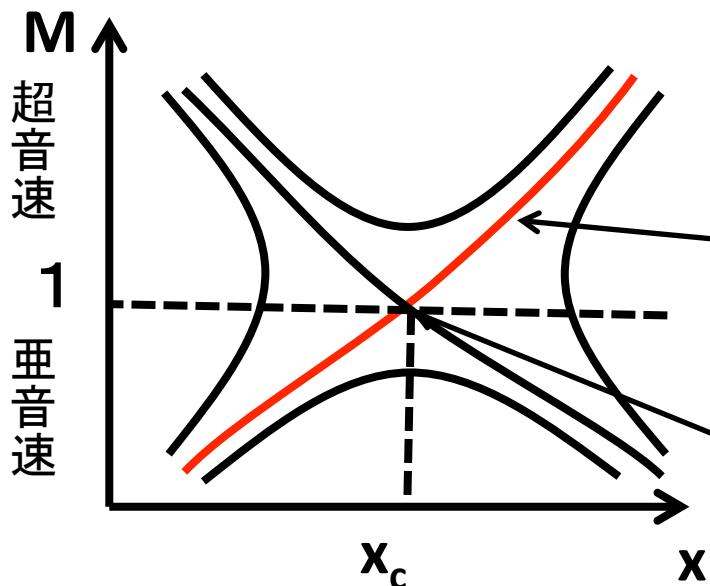
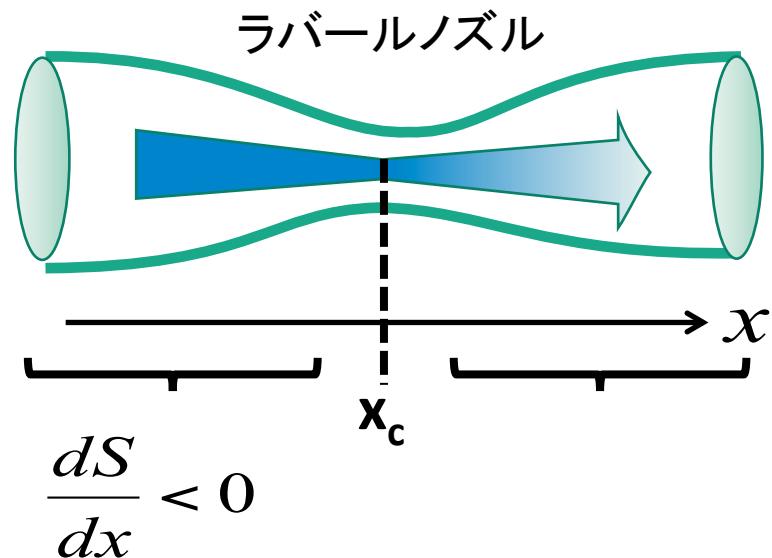
$$v \frac{dv}{dx} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = -\frac{c_s^2}{\rho} \frac{d\rho}{dx}$$



$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dx} = \frac{1}{S} \frac{dS}{dx} = \frac{1}{M^2 - 1}$$

$M$ :マッハ数

$S$ :断面積



$$\frac{dS}{dx} > 0$$

亚音速から超音速に移行する解は1つだけ

遷音速解

遷音速点

$$\frac{dS}{dx} = 0$$

# Parker (1958)

- 宇宙における遷音速流といえば太陽風
- 点源質量の重力場中の球対称定常太陽風モデル

質量保存  $4\pi\rho vr^2 = \text{const.}$

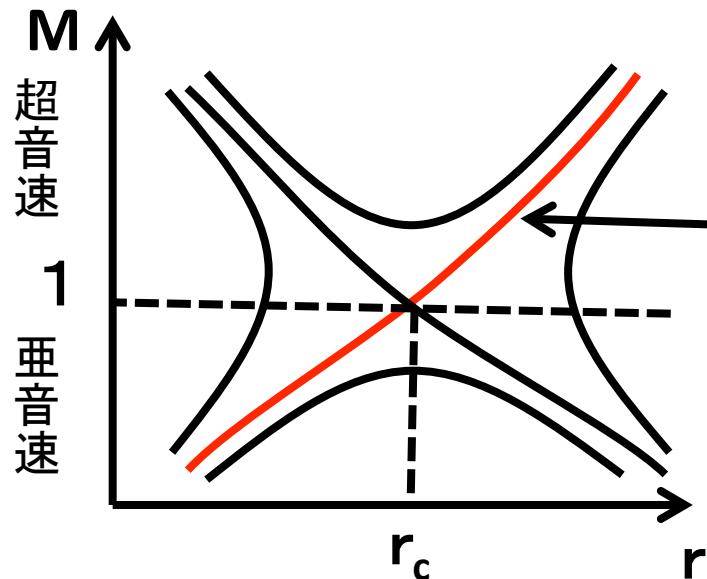
運動量保存  $v \frac{dv}{dr} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} - \frac{GM_{\odot}}{r^2}$

$v$ : 速度,  $\rho$ : 密度,  $r$ : 中心からの距離,  $p$ : 圧力

等温

$$p = c_s^2 \rho$$

$$\frac{1}{2M^2} \frac{dM^2}{dr} = \frac{\frac{2}{r} - \frac{GM_{\odot}}{c_s^2 r^2}}{M^2 - 1}$$



観測される太陽風は超音速である

遷音速流が実現している

実際にポリトロピックでは  
遷音速解でエントロピー最大

# 目次

- Introduction
- 先行研究
- Tsuchiya モデル
- 遷音速銀河風モデルとその解
- Sombrero銀河に対する適用
- ポリトロピックモデル
- まとめ
- これから

# 先行研究 (Johnson & Axford 1971)

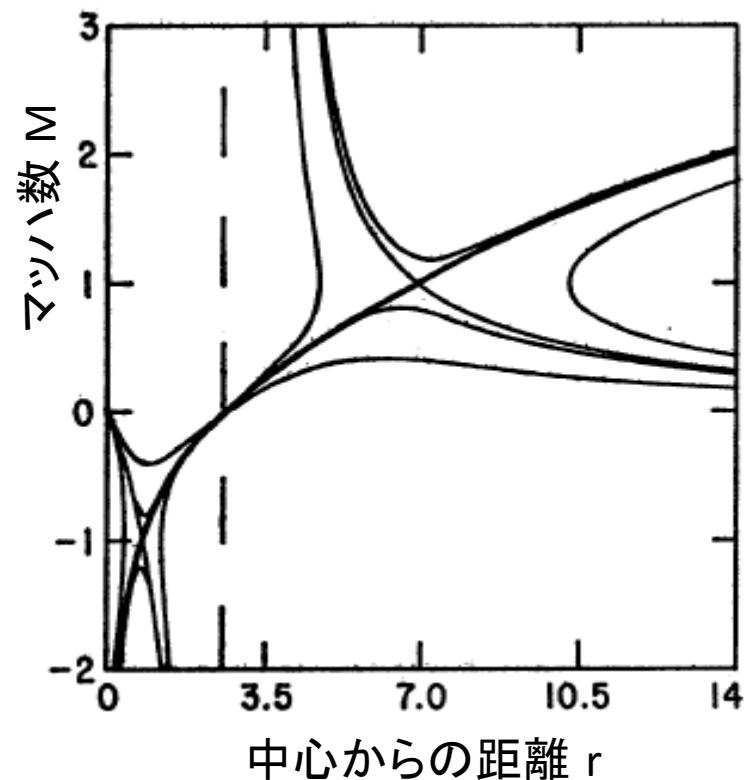
- 星質量分布による重力場中での球対称定常銀河風モデル

星質量  
密度分布  $\rho_{star}(r) \propto \exp\left(-\frac{r}{b}\right)$

遷音速解ができる

しかし ↓

銀河の重力場はダークマター  
ハローが支配的

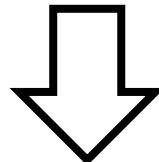


# 先行研究 (wang 1995)

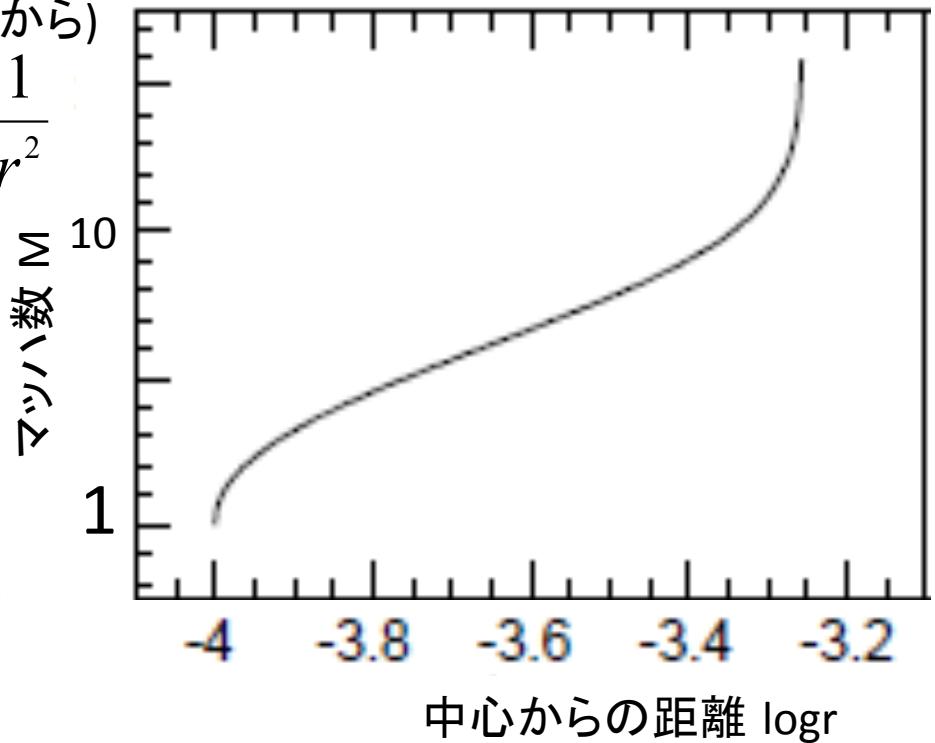
- ・ダークマターハロー質量分布による重力場中の球対称定常銀河風モデル

ダークマターハロー (回転速度一定から)  
質量密度分布  $\rho_{DMH}(r) \propto \frac{1}{r^2}$

遷音速解がない



ダークマターハロー質量密度分布関数に問題？



# ダークマターハロー質量密度分布

- ・ダークマターハロー(DM halo)質量密度分布は  
**double-power law** か？

N体シミュレーションからの予測

NFWモデル(Navarro et al. 1997)

$$\rho_{DMH}(r) = \frac{\rho_d r_d^3}{r(r + r_d)^2} \quad r_d: \text{スケール半径}, \rho_d: \text{スケール密度}$$

中心にcusp構造

double-power-law  
DM halo 質量分布

$$\rho_{DMH} = \frac{\rho_d r_d^3}{r^\alpha (r + r_d)^{3-\alpha}}$$

$\alpha$ : 中心勾配を示す

$\alpha=1$ でNFW

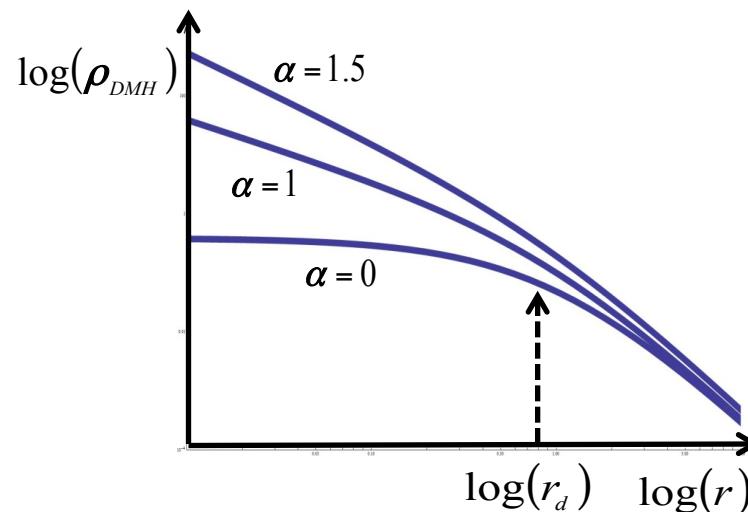
$\alpha=0$ で(近似的に)Burkert

矮小銀河の観測からの予測

Bukertモデル(Buerkert 1995)

$$\rho_{DMH}(r) = \frac{\rho_d r_d^3}{(r + r_d)(r + r_d)^2}$$

中心にcore構造



# 先行研究 (Sharma & Nath 2013)

- DM halo (NFWモデル) 質量密度分布による重力場中の球対称定常銀河風モデル

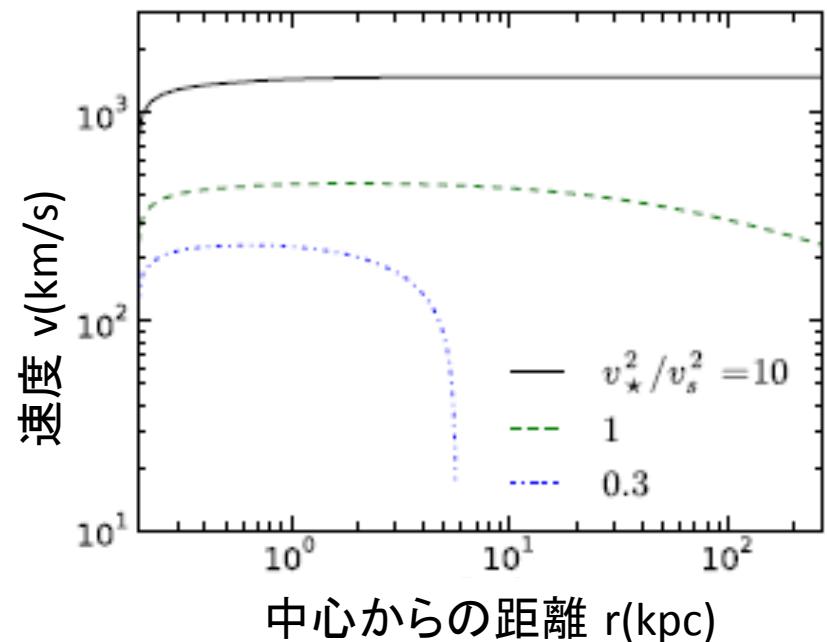
遷音速点を観測値(200pc)に固定



遷音速点は自然に決まるべき



遷音速解析が必要



# 目次

- Introduction
- 先行研究
- Tsuchiya モデル
- 遷音速銀河風モデルとその解
- Sombrero銀河に対する適用
- ポリトロピックモデル
- まとめ
- これから

# 先行研究 (Tsuchiya et al. 2014)

- DM halo 質量密度分布による重力場中の等温球対称定常**遷音速**銀河風モデル

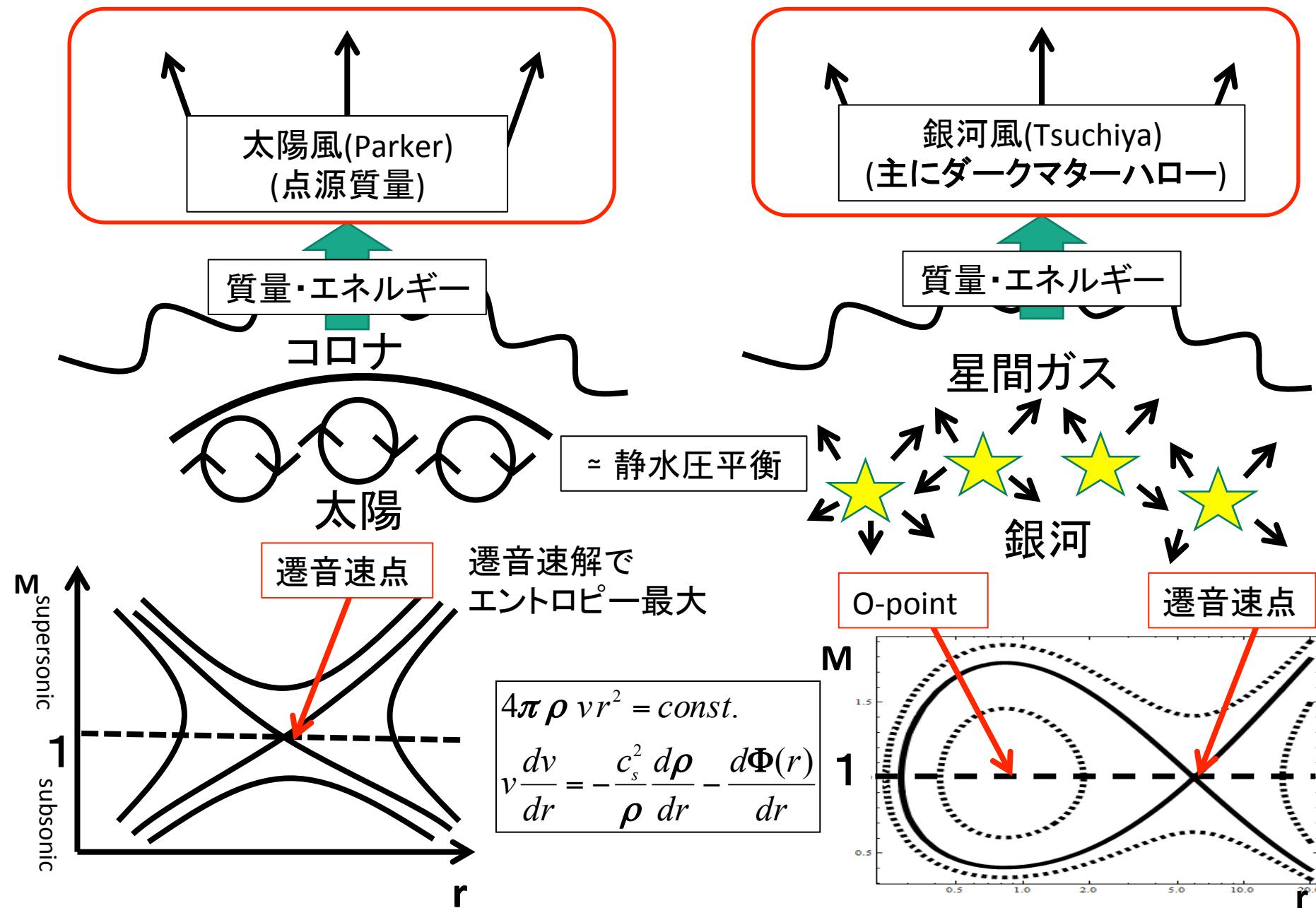
他研究: 高い星形成率  Tsuchiyaモデル: 低い星形成率

星間ガス中の熱エネルギーで駆動(Thermal winds)



質量分布と遷音速解の関係を調べる

# 遷音速銀河風モデル (Tsuchiya et al. 2014)



# DM halo重力場における銀河風

等温球対称定常モデル(Tsuchiya et al. 2014).

$$\text{質量保存} \quad 4\pi \rho v r^2 = \text{const.}$$

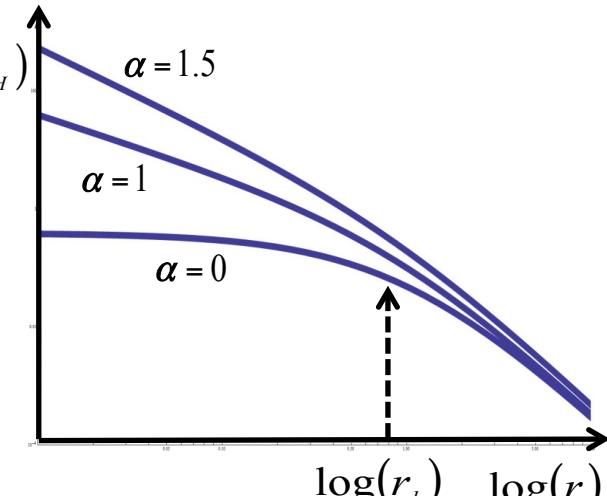
$$\text{運動量保存} \quad v \frac{dv}{dr} = -\frac{c_s^2}{\rho} \frac{d\rho}{dr} - \frac{d\Phi(r)}{dr}$$

DM halo 質量分布

$$\rho_{DMH} = \frac{\rho_d r_d^3}{r^\alpha (r + r_d)^{3-\alpha}}$$



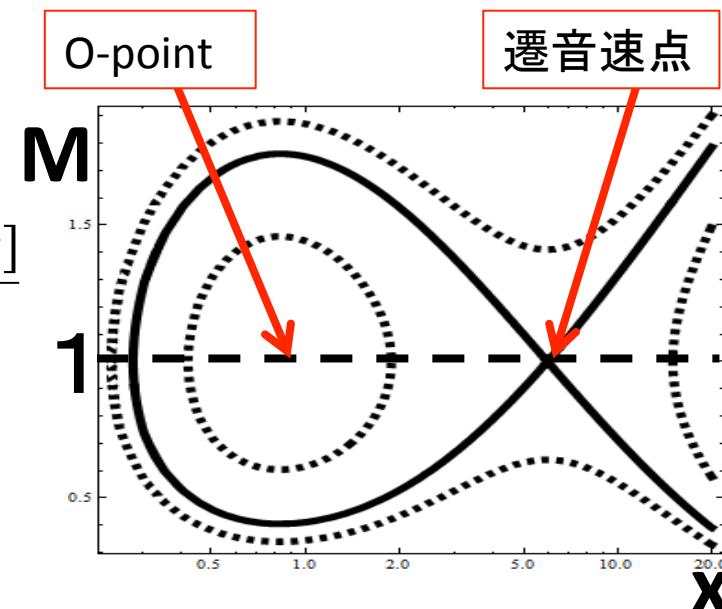
$\alpha$ : 中心勾配を示す  
( $\alpha=1$ でNFWモデル)



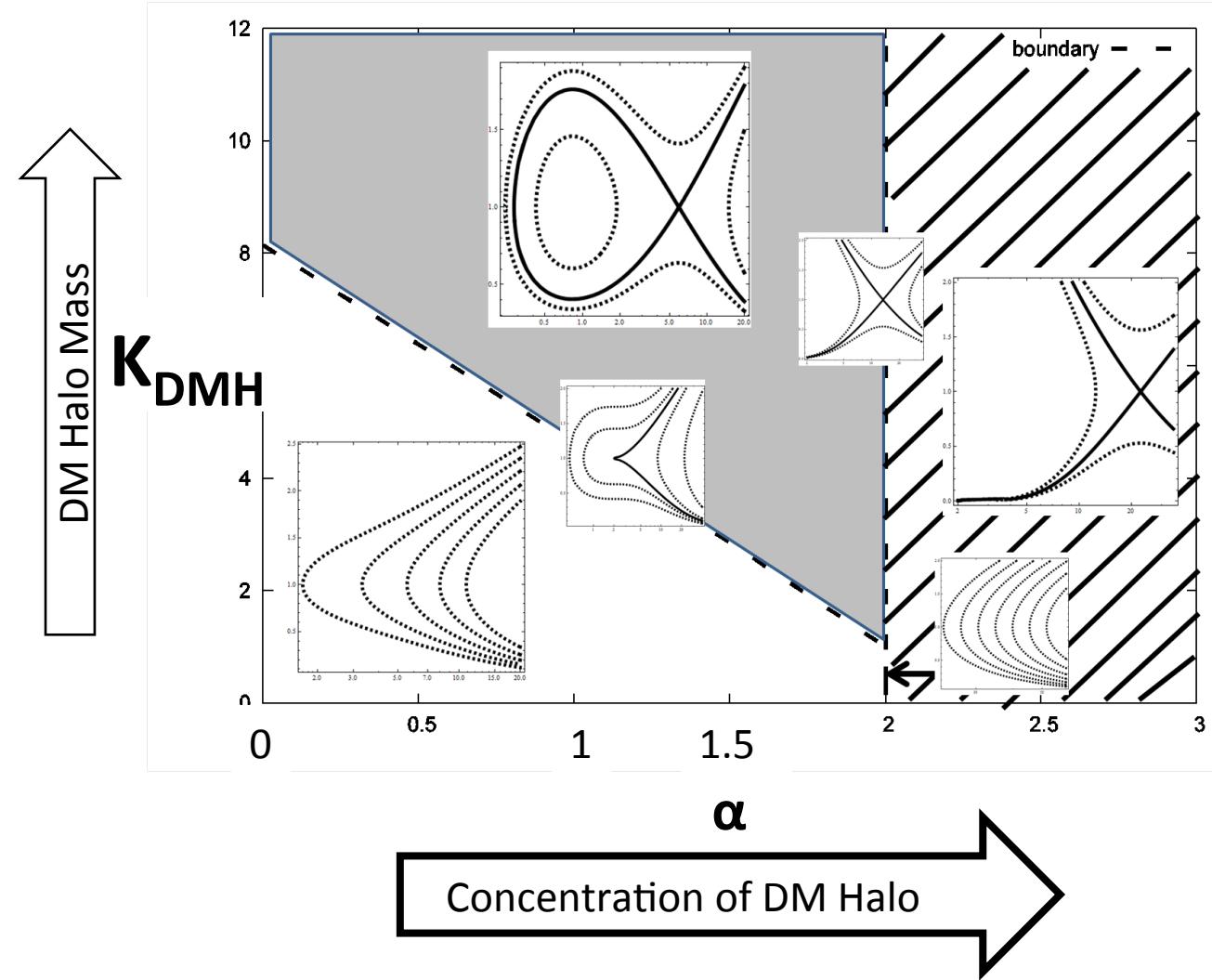
$$\frac{dM^2}{dx} = \frac{\frac{4}{x} N(x; K_{DMH}, \alpha)}{1 - \frac{1}{M^2}}, \quad M: \text{マツハ数}, \quad {}_2F_1[a, b, c; x]: \text{超幾何関数}$$

$$N(x; \alpha, K_{DMH}) = 1 - K_{DMH} x^{2-\alpha} \frac{{}_2F_1[3-\alpha, 3-\alpha, 4-\alpha; x]}{3-\alpha}$$

$$K_{DMH} = \frac{2\pi G \rho_d r_d^2}{c_s^2}$$



# Transonic Solutions with DM Halo (Tsuchiya et al. 2014)



$$K_{DMH} = \frac{2\pi G \rho_d r_d^2}{c_s^2}$$

Large  $\alpha$  represents point-mass-like gravity.

# Tsuchiyaモデルの問題点

銀河中心ブラックホール(SMBH)の存在



(銀河風の始点が中心に近ければ)SMBHの重力が影響



本研究ではSMBHの重力を加える

# 目次

- Introduction
- 先行研究
- Tsuchiyaモデル
- 遷音速銀河風モデルとその解
- Sombrero銀河に対する適用
- ポリトロピックモデル
- まとめ
- これから

# DM HaloとSMBHの重力場における銀河風

質量保存

$$4\pi \rho v r^2 = const.$$

運動量保存

$$v \frac{dv}{dr} = -\frac{c_s^2}{\rho} \frac{d\rho}{dr} - \frac{d\Phi(r)}{dr}$$



$$\frac{dM^2}{dx} = \frac{\frac{4}{x} N(x; \alpha, K_{DMH}, K_{BH})}{1 - \frac{1}{M^2}},$$

$$N(x; \alpha, K_{DMH}, K_{BH}) = 1 - K_{DMH} x^{2-\alpha} \frac{{}_2F_1[3-\alpha, 3-\alpha, 4-\alpha; x]}{3-\alpha} - \frac{K_{BH}}{x}$$

$$K_{DMH} = \frac{2\pi G \rho_d r_d^2}{c_s^2} \approx \frac{\text{DMH重力ポテンシャルエネルギー}}{\text{熱エネルギー}}$$

質量分布

DM Halo

SMBH

DM Halo profile

$$\rho_{DMH} = \frac{\rho_d r_d^3}{r^\alpha (r + r_d)^{3-\alpha}} + M_{BH}$$

$\alpha$ : 中心勾配を示す  
( $\alpha=1$  でNFWモデル)

DM Halo

SMBH

M: マツハ数

${}_2F_1[a, b, c; x]$ : 超幾何関数

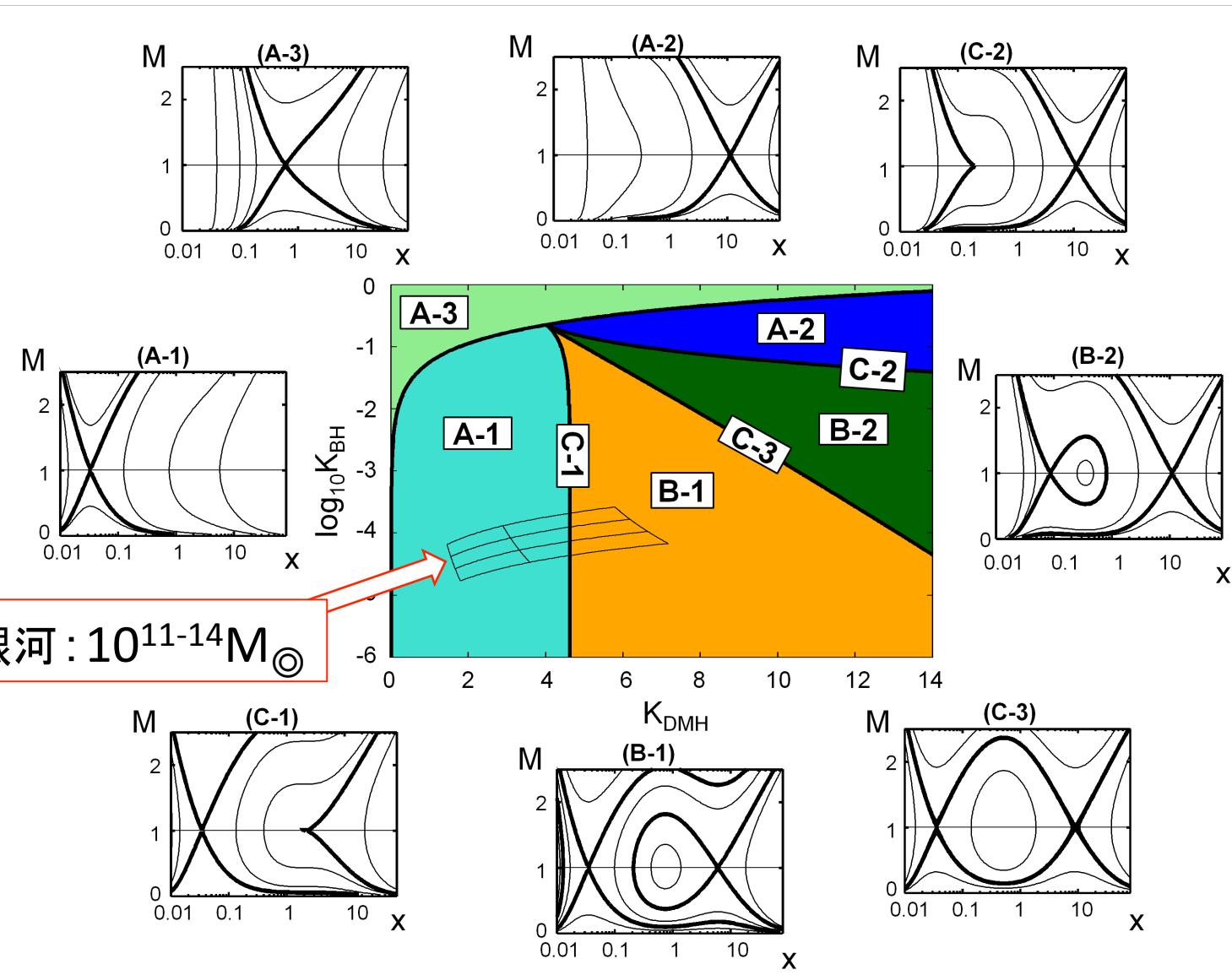
$$K_{BH} = \frac{GM_{BH}}{2r_d c_s^2} \approx \frac{\text{SMBH重力ポテンシャルエネルギー}}{\text{熱エネルギー}}$$

# 解の種類

例:  $\alpha=1$  (NFW model)

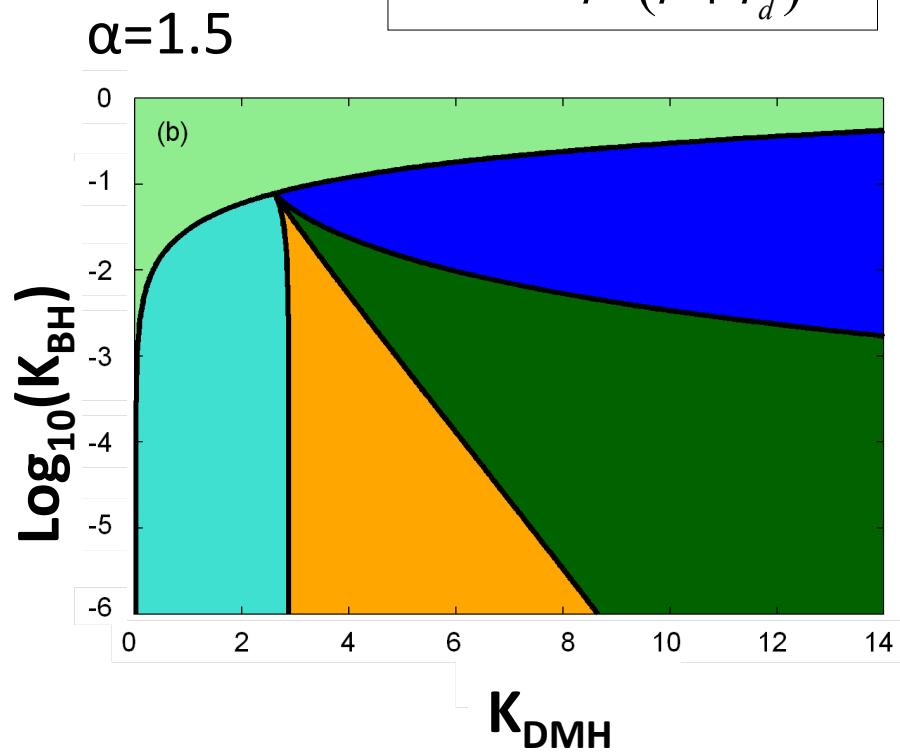
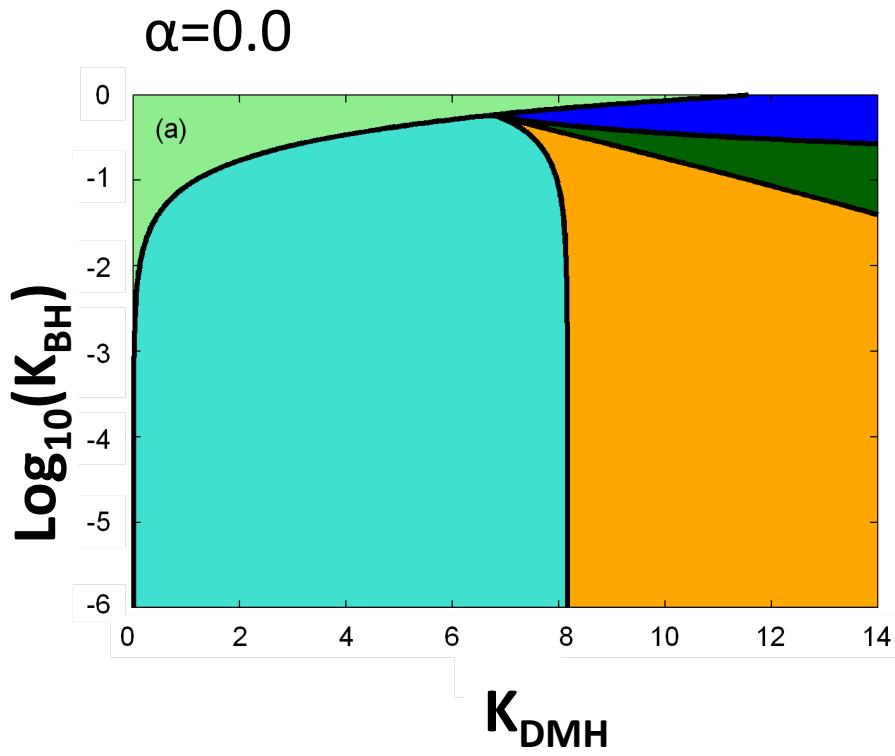
$K_{DMH} \approx \text{DMH重力ポテンシャルエネルギー} / \text{熱エネルギー}$

$K_{BH} \approx \text{SMBH重力ポテンシャルエネルギー} / \text{熱エネルギー}$



実際の銀河:  $10^{11-14} M_\odot$

# ダークマターハロー中心勾配 $\alpha$ と 遷音速解



$\alpha$ によって遷音速解が変化

→ 銀河風速度分布が銀河中心部の質量分布の情報をもつ

# 目次

- Introduction
- 先行研究
- 遷音速銀河風モデルとその解
- Sombrero銀河に対する適用
- ポリトロピックモデル
- まとめ
- これから

# Sombrero銀河の銀河風

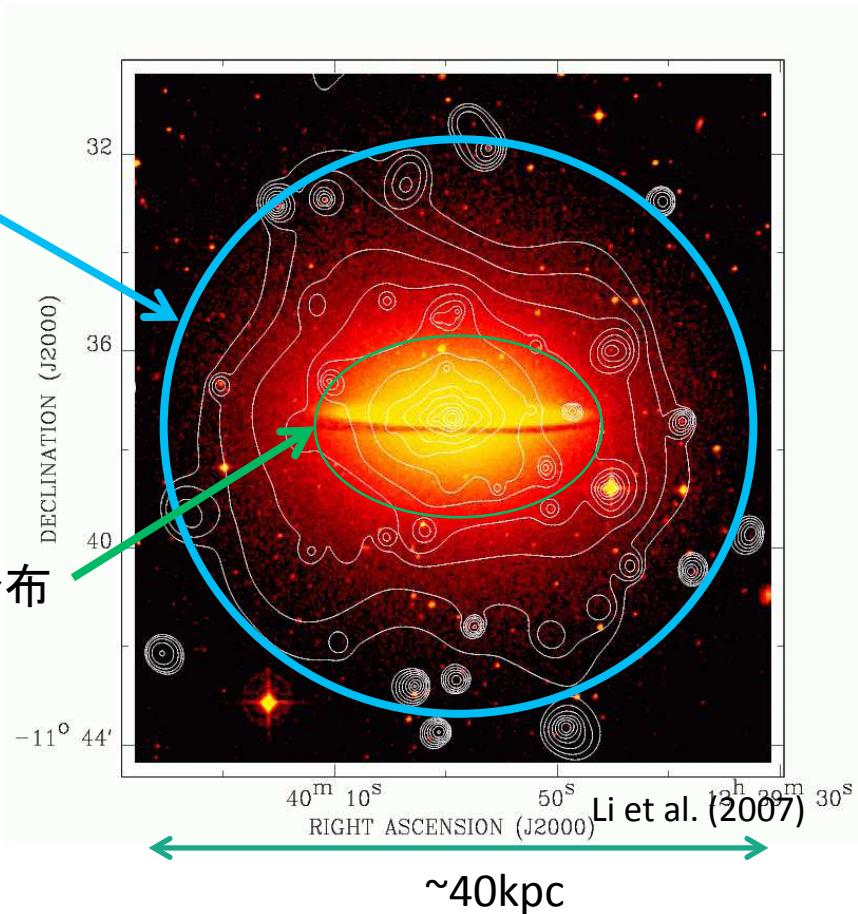
*Chandra X-ray observatory* は  
銀河風の存在を示す広がった  
高温ガスを観測.

(Li et al. 2011)



ガス密度分布は静水圧  
平衡状態に似る  
(Li et al. 2011)

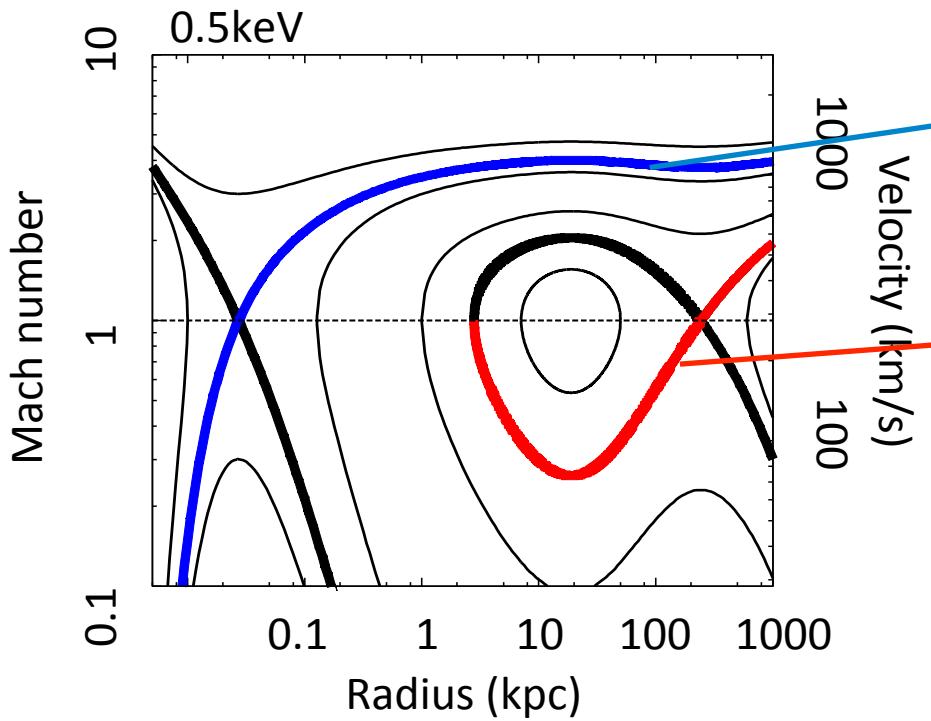
星分布



銀河風は存在するのか？

# Sombrero銀河への適用

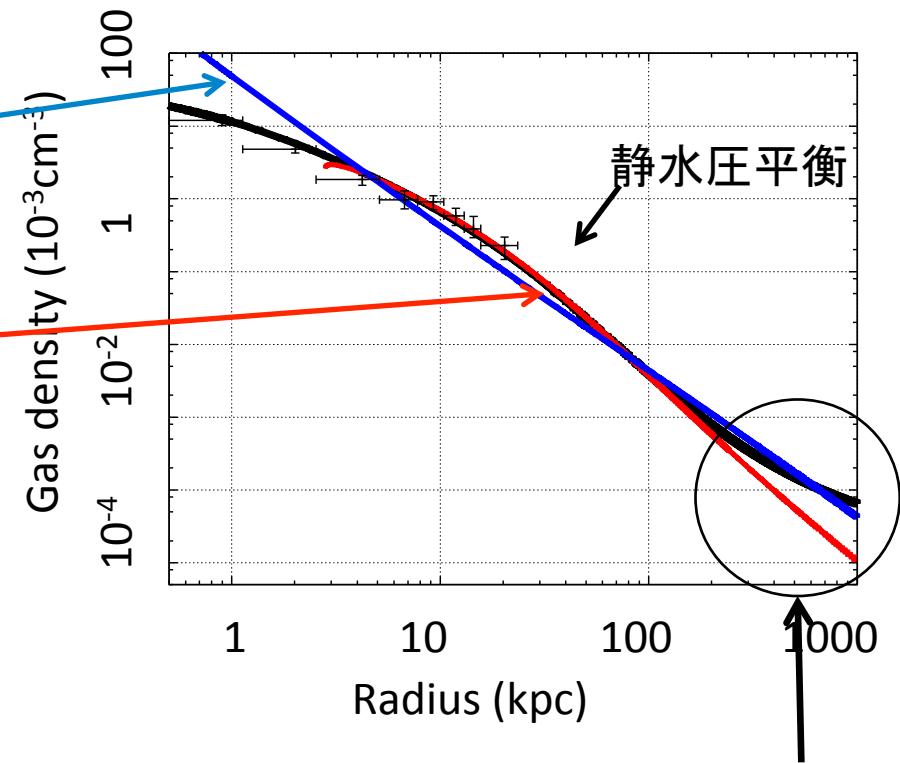
- 観測された質量分布と温度を用いて、ガス密度分布 ( $<25\text{kpc}$ )をフィッティング。(Li et al. 2011, Bridges et al. 2007, Kormendy et al. 1996).



“遷音速解”と“静水圧平衡に近いガス密度”を同時に説明

→ 外側の遷音速点を通る解が観測値を再現

星形成が終わっていても銀河風 (slow-accelerating outflow)は可能?



静水圧平衡とのずれが  
遷音速点付近から見られる

# 銀河風の質量流束

- Sombrero銀河で予想される質量流束は星からの供給量( $0.3\text{-}0.4 M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ )よりも大きい( $1.8 M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ )

→ 等温仮定に問題?  
(エネルギー:無限)

→ ポリトロピックモデルの導入  
(エネルギー:一定)

# 目次

- Introduction
- 先行研究
- 遷音速銀河風モデルとその解
- Sombrero銀河に対する適用
- ポリトロピックモデル
- まとめ
- これから

# ポリトロピックモデルの導入

## ・ポリトロピックモデル

Mass conservation

$$4\pi \rho v r^2 = \text{const.}$$

Momentum conservation

$$v \frac{dv}{dr} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} - \frac{d\Phi(r)}{dr}$$

Energy conservation

$$\frac{v^2}{2} + \frac{c_s^2}{\gamma - 1} + \Phi(r) = E$$

Polytropic relation

$$P \propto \rho^\gamma$$

$r$ : radius

$P$ : pressure

$\rho$ : density

$\gamma$ : polytropic index

$v$ : velocity

$\Phi$ : potential

$c_s$ : sound speed

$E$ : total energy

$M$ : Mach number

$$\frac{M^2 - 1}{M^2 \{( \gamma - 1 ) M^2 + 2 \}} \frac{dM^2}{dr} = \frac{2}{r} - \frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)} \frac{1}{E - \Phi} \frac{d\Phi}{dr}$$

DM Halo

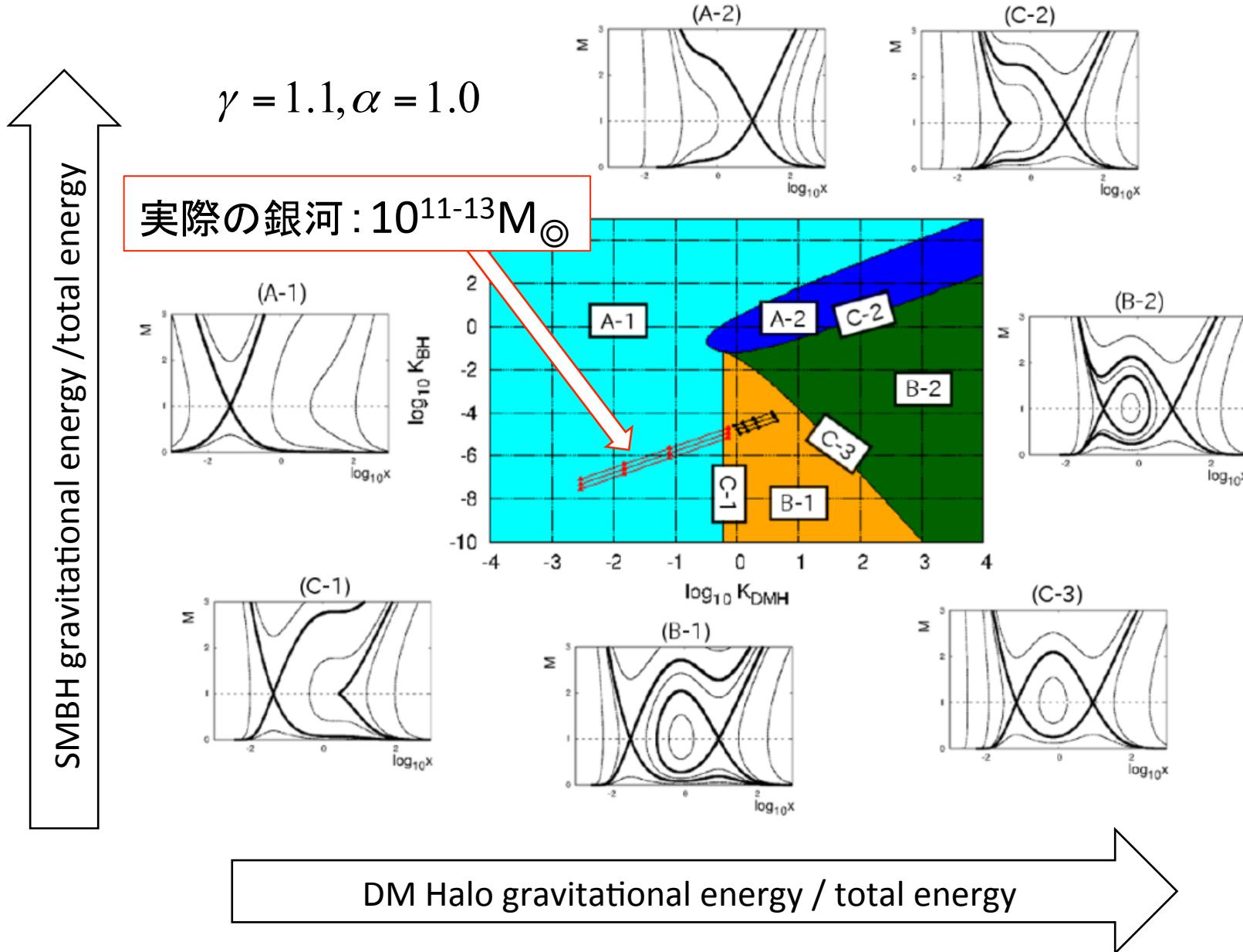
SMBH

$$\frac{1}{2E} \Phi(x) = - K_{DMH} \frac{\log(x+1)}{x} - K_{BH} \frac{1}{x}$$

$$K_{DMH} = \frac{2\pi G \rho_d r_d^2}{E} \approx \frac{DMH \text{ gravitational energy}}{\text{total energy}}$$

$$K_{BH} = \frac{GM_{BH}}{2r_d E} \approx \frac{SMBH \text{ gravitational energy}}{\text{total energy}}$$

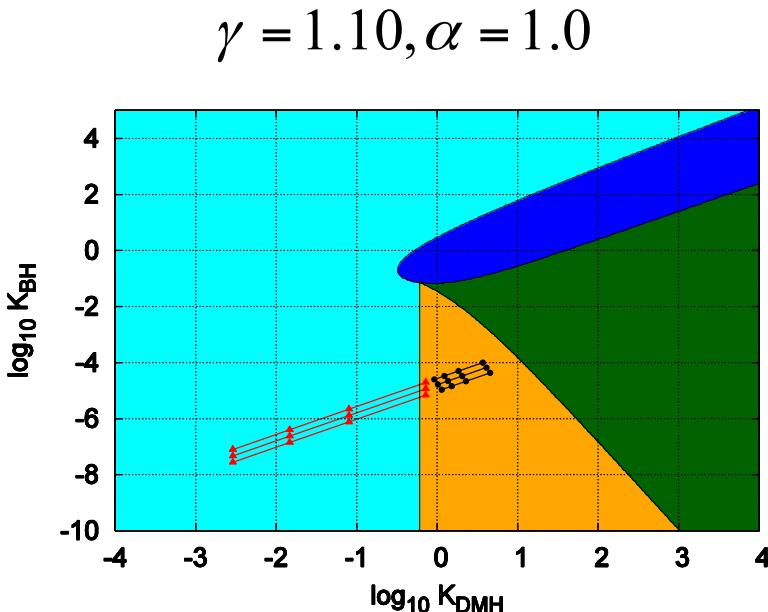
# ポリトロピック解分類 (Igarashi et al. in prep.)



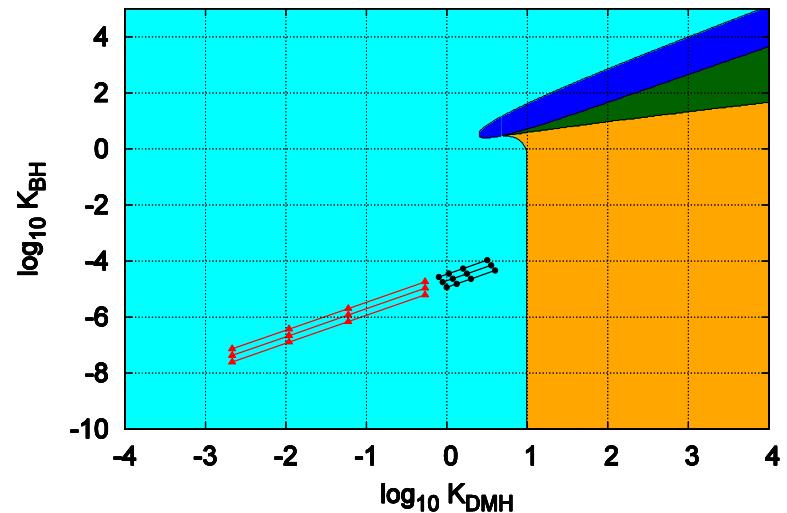
# ポリトロープ指数の影響

$$\rho_{DMH} \propto \frac{1}{r^\alpha (r + r_d)^{3-\alpha}}$$

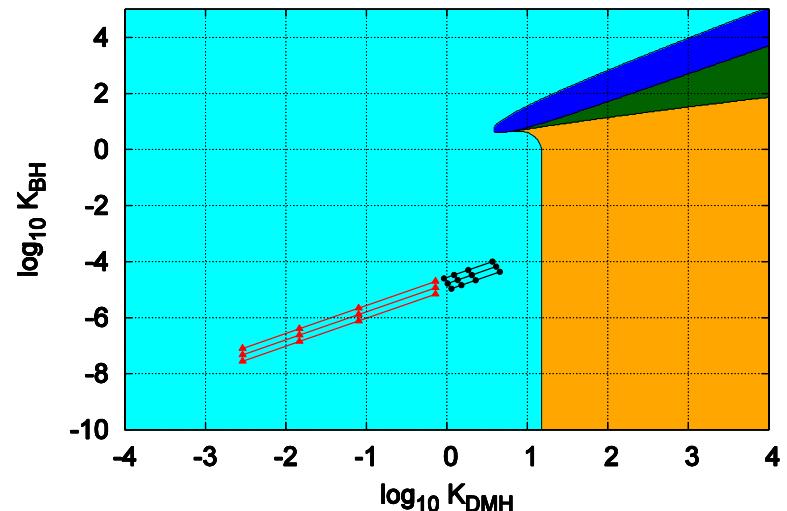
- $\alpha$ (DMHの中心のべき) : 等温モデルと同じ
  - $\gamma$ (ポリトロープ指数) :
    - 大きい high-velocity outflow のみ
    - 小さい slow-accelerating outflow が可能
- 解の変化はポリトロープ指数が重要



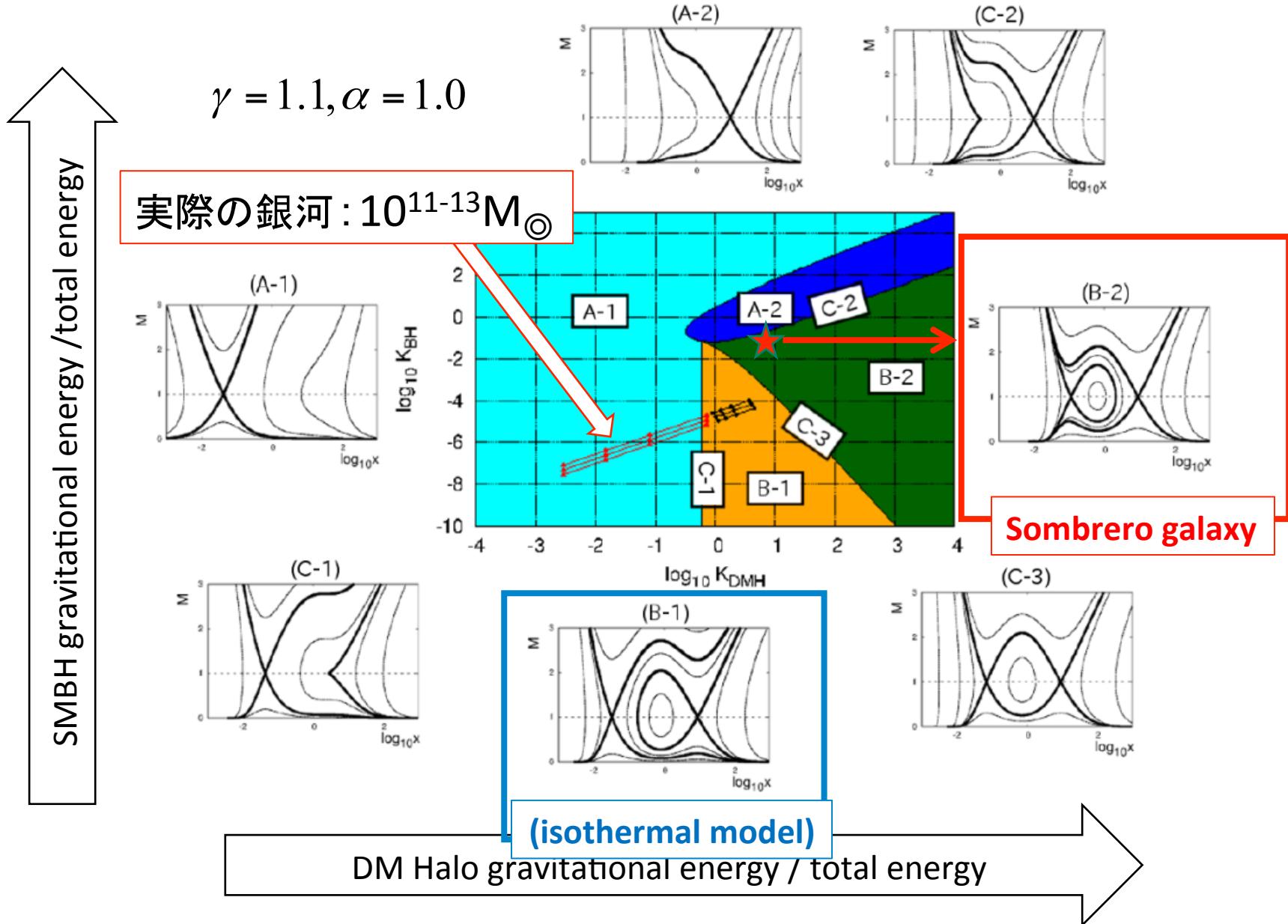
$$\gamma = 1.33, \alpha = 1.5$$



$$\gamma = 1.33, \alpha = 1.0$$



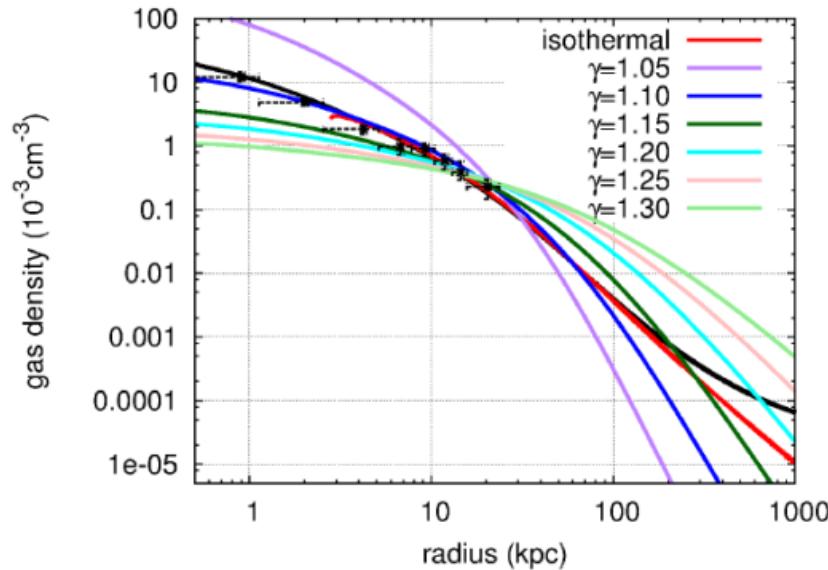
# ポリトロピック解分類 (Igarashi et al. in prep.)



# Sombrero銀河への適用

質量流束を固定し、ガス密度の観測値 (<25kpc) にフィッティング

(Li et al. 2011, Bridges et al. 2007, Kormendy et al. 1996).



質量流束 :  $\dot{M} = 0.45 M_{\text{solar}} / \text{yr}$

(等温モデル :  $\dot{M} = 1.80 M_{\text{solar}} / \text{yr}$ )

( $\gamma \sim 1.10$  で) 遠方の遷音速点を通る解がガス密度分布と質量流束をよく再現

# 目次

- Introduction
- 先行研究
- 遷音速銀河風モデルとその解
- Sombrero銀河に対する適用
- 銀河風の質量流束
- まとめ
- これから

# まとめ

- ・ダークマターハローと銀河中心ブラックホールの重力場における遷音速解はそのトポロジーによって分類できる。
- ・2つの遷音速解が存在し、異なる質量流束をもつ。
- ・Sombrero銀河ではゆっくりと加速される新しい銀河風の存在可能性がある。
- ・ポリトロピックモデルを用いると、質量流束が星からの供給量に近くなる。

# 目次

- Introduction
- 先行研究
- 遷音速銀河風モデルとその解
- 銀河風の質量流束
- Sombrero銀河に対する適用
- まとめ
- 今後の予定

- 星形成銀河への応用

近傍の星形成銀河  
高赤方偏移銀河(Lya emitterなど)



星からの熱エネルギー(現在)  
SNeからの運動エネルギー  
大質量星からの輻射

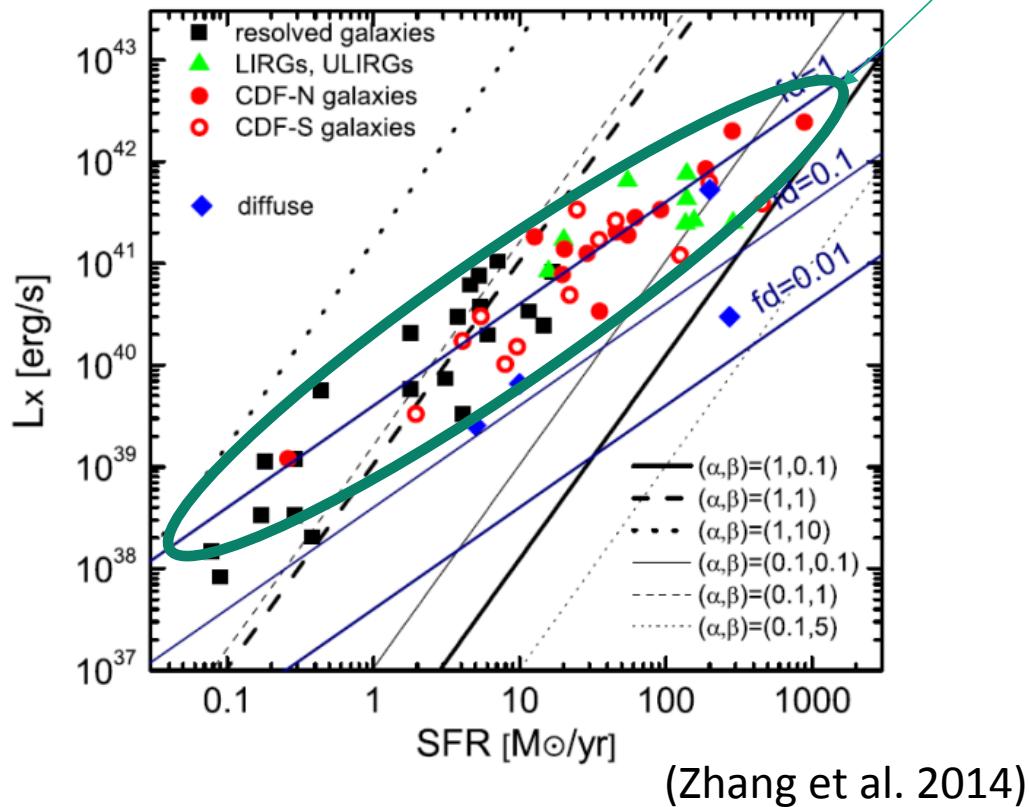


銀河と(遷音速)銀河風駆動エネルギーの関係



物理量の予想(質量流束、速度分布、銀河光度...)

例:  $L_X$  - SFR 関係



# Effective polytropic index

- 銀河風のエネルギーと放射されるエネルギーを比べると $\gamma$ が予想できるのでは

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\text{radiation}} &\sim L_X \\ \dot{E}_{\text{wind}} &\sim \dot{M}_{\text{wind}} \left( \frac{v^2}{2} + \frac{c_s^2}{\gamma - 1} \right) \end{aligned}$$

$\downarrow$

