

ディスク銀河の力学応答とTully-Fisher関係

小山 博子(早稲田大)

長島 雅裕(長崎大) 吉井 讓(東京大)

セミアナでのTully-Fisher関係

超新星フィードバックにともなう力学応答 (セミアナ用の部品)

力学応答がTully-Fisher関係に及ぼす影響 (プレセミアナ)

まとめ

§ 渦巻き銀河とTully-Fisher関係

Tully & Fisher 1977

◆ Tully-Fisher関係 (TFR)

回転する銀河の
絶対光度と回転速度に成り立つ
経験則

$$L \propto v_{rot}^4$$

距離の測定にも使われる

TFRの起源？

どんなしくみで成立するのか → 銀河形成、進化シナリオにおいて検証

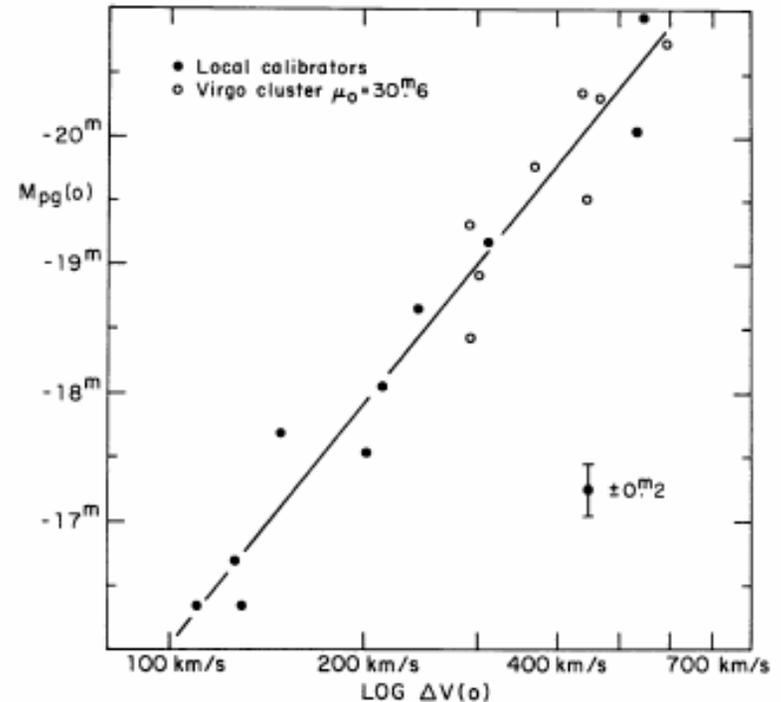
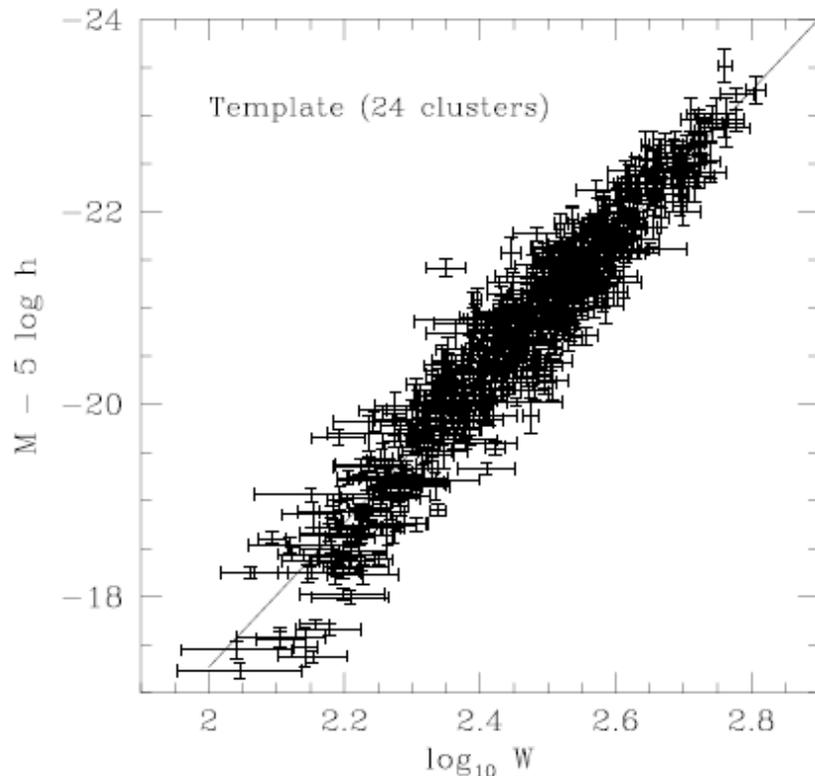


Fig. 5 (a) Absolute magnitude – global profile width relation produced by overlaying Figure 3 on Figure 1, adjusting Figure 3 vertically to arrive at a best visual fit with a distance modulus of $\mu_0 = 30^m6 \pm 0^m2$

Giovanelli et al.1997



Pierce&Tully 1992

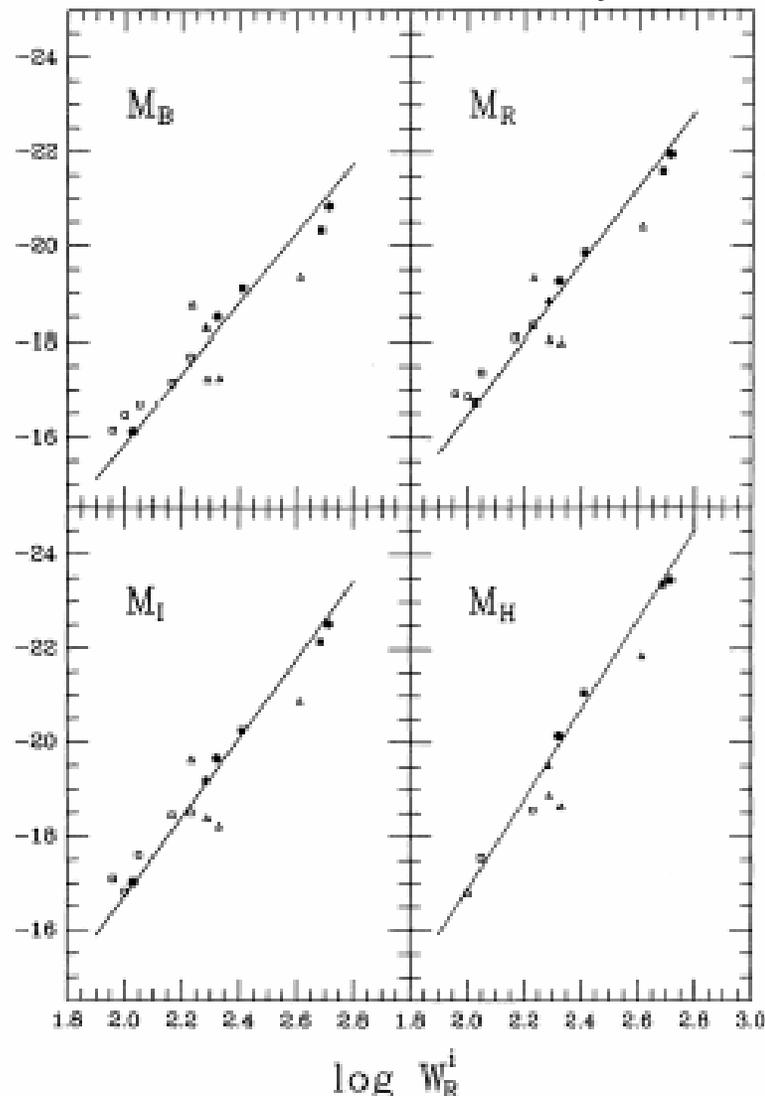
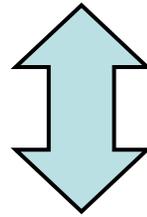


FIG. 1.—The TF relations for the members of the Local (points), Sculptor (triangles), and M81 (squares) groups. The filled symbols represent galaxies with individual distance determinations using Cepheids, RR Lyraes, and/or planetary nebulae. Open symbols represent systems assigned a mean group distance. Note the significant line-of-sight depth for the Sculptor Group. The solid line in each panel is the result of a least-squares fit to similar data for galaxies in the Ursa Major Cluster (Pierce & Tully 1988, 1991) minimizing the residuals in line width. The zero point was established from the six systems with individual distance determinations (i.e., the solid points).

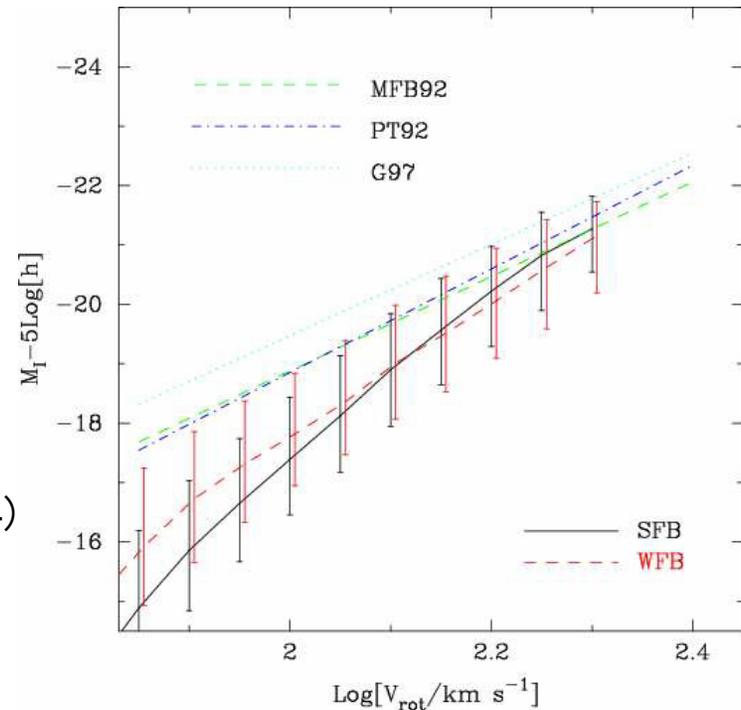
準解析的モデルでのTully-Fisher関係

準解析的モデル → 光度関数の再現のためには、SNフィードバックが必要不可欠



TF関係の傾きはフィードバックの強さで決まる

V_{hot} を導入 ⇒ シングルパワーでなくなる 暗い銀河では傾きがきつくなる



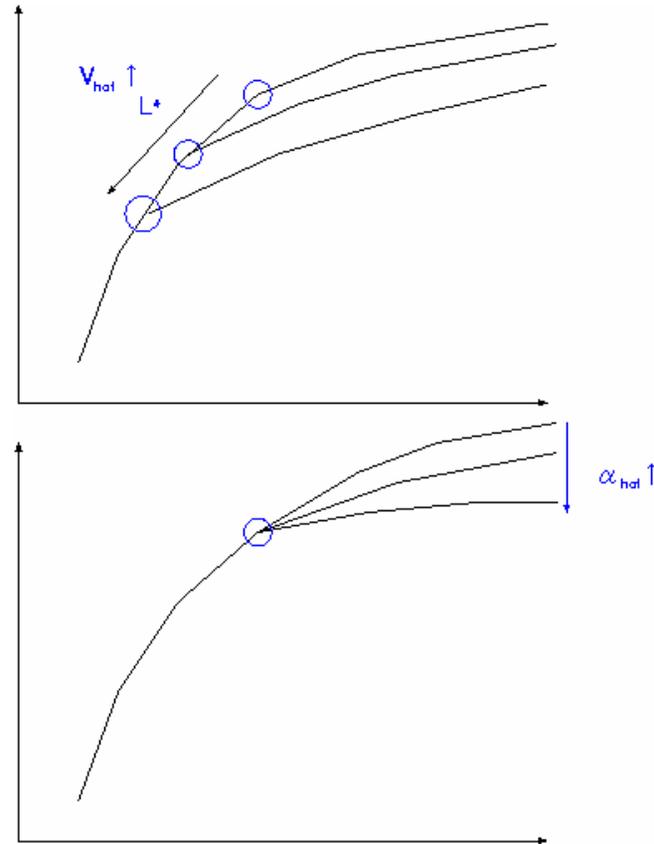
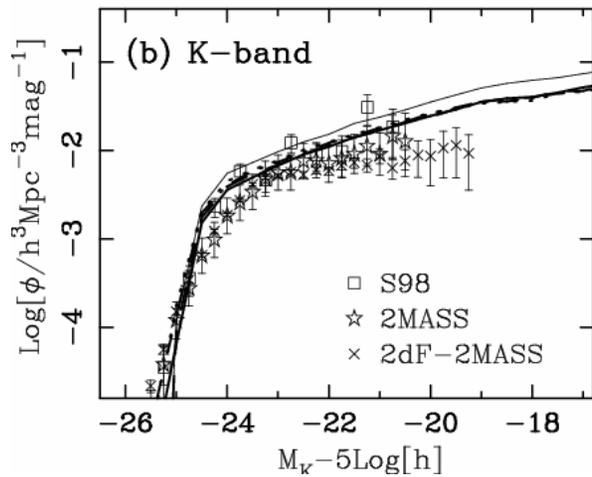
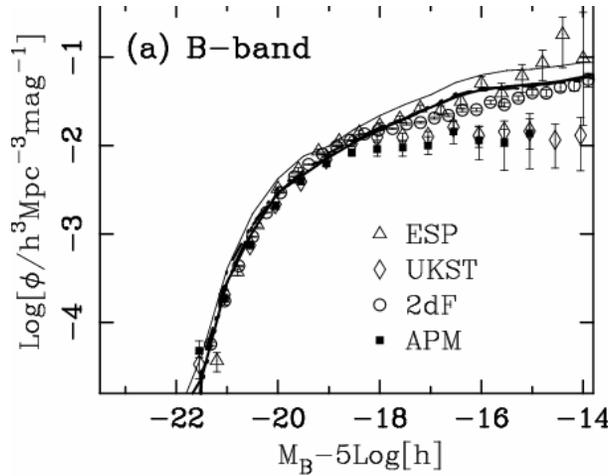
Nagashima&Yoshii(2004)

問題: SNフィードバックを考えると

Tully-Fisher関係の傾きが、暗い銀河について、観測データと合わなくなる

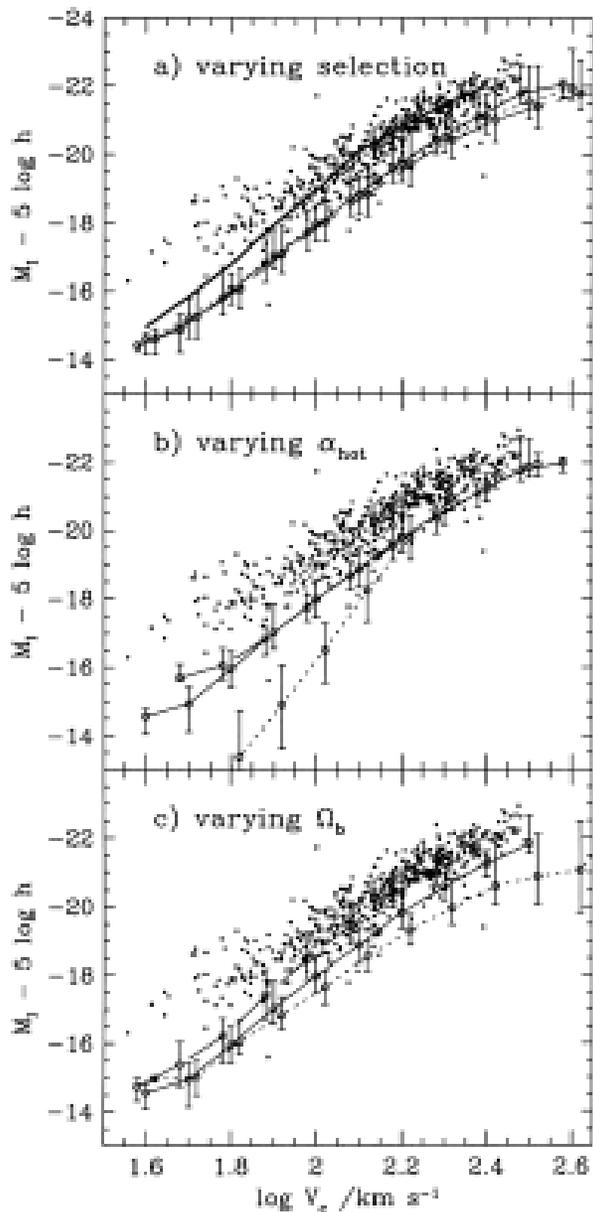
光度関数

SNフィードバックのみでほぼ決まる



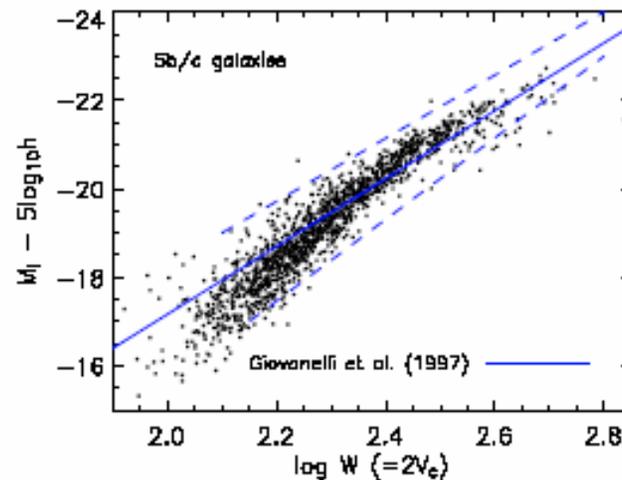
$$\dot{M}_{\text{reheat}} = \beta \dot{M}_* \quad \beta = \left(\frac{V_c}{V_{\text{hot}}} \right)^{-\alpha_{\text{hot}}} \quad 5$$

暗い銀河のTF関係を再現できない問題は、ほかのセミアナモデルでも共通



Cole et al.(2000)

Croton et al.(2006)



最近のモデルになるほど、ずれがはっきり

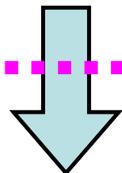
Tully-Fisher関係と合わない問題の原因を考察

フィードバック・・・超新星爆発によって、銀河ガスが
あたためられて、銀河外へ掃きだされる

従来の準解析的モデル
では、ここまで考慮



銀河の質量が減る



力学的応答として、ディスク銀河のサイズと回転速度は変化する

フィードバックは、重力ポテンシャルが浅いほどよく効く

小さい銀河

超新星フィードバックに伴う力学応答を
ディスク銀河の進化に考慮することで、
TFRの問題(暗い銀河で観測値からずれる)は解決すると期待できる

→ 力学応答まで考慮すれば、暗い銀河まで観測データをよく再現できた

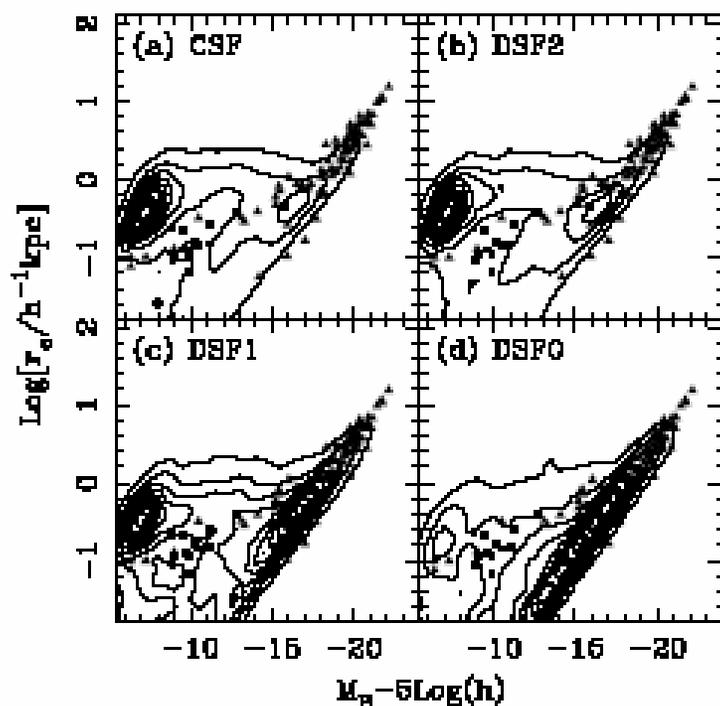


FIG. 6.— Distribution of effective radius for elliptical galaxies in the models of (a) CSF, (b) DSF2, (c) DSF1, and (d) DSF0, where the effects of dynamical response to starburst-induced gas removal are taken into account. Based on the calculated number of such galaxies per magnitude per logarithm of kpc, the levels of contours shown in order from outer to inner are 0.02, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, and 0.9 times the largest number of galaxies in grids, respectively. Symbols indicate the observational data given by Bender, Burstein & Faber (1992) (triangles) and Mateo (1998) (squares).

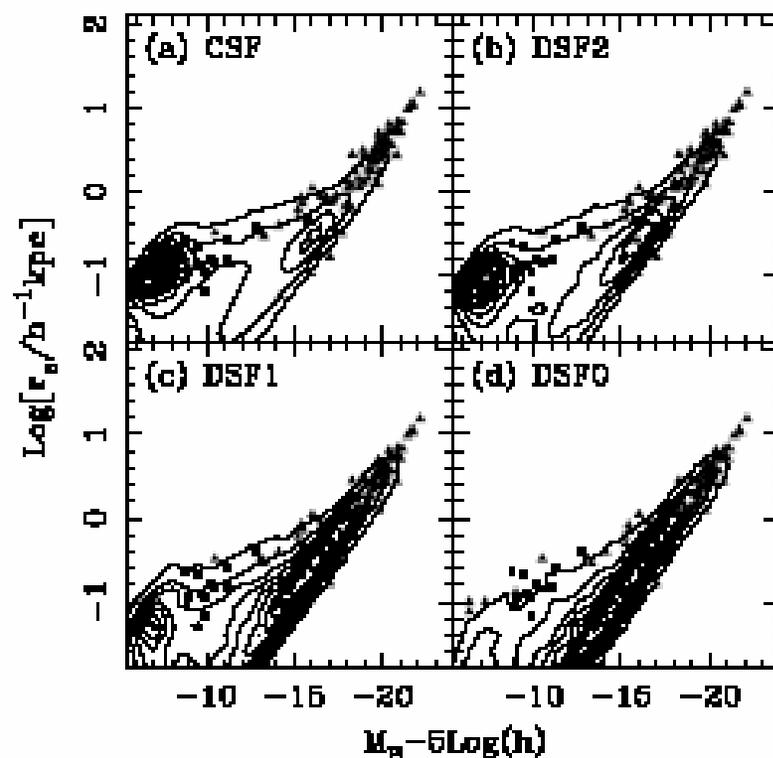


FIG. 7.— Distribution of effective radius for elliptical galaxies. Same as Figure 6, but for the SF models without the effects of dynamical response to starburst-induced gas removal.

→ ディスク銀河でのTully-Fisher関係でも、同様にうまくいきそう

- 超新星フィードバックにともなう力学応答を
解析的に解けるモデルを使って調べる

(セミアナのための部品づくり)

- この結果を、簡単な宇宙モデル(プレセミアナ)に適用して
観測されるTully-Fisher関係と比較

力学応答を考慮することによる効果をみる

§ 超新星フィードバックにともなう力学応答

状況設定

球対称のダークハロー内に
軸対称の薄いディスクを置いた
2成分モデルを考える

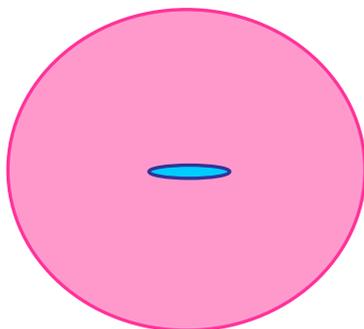
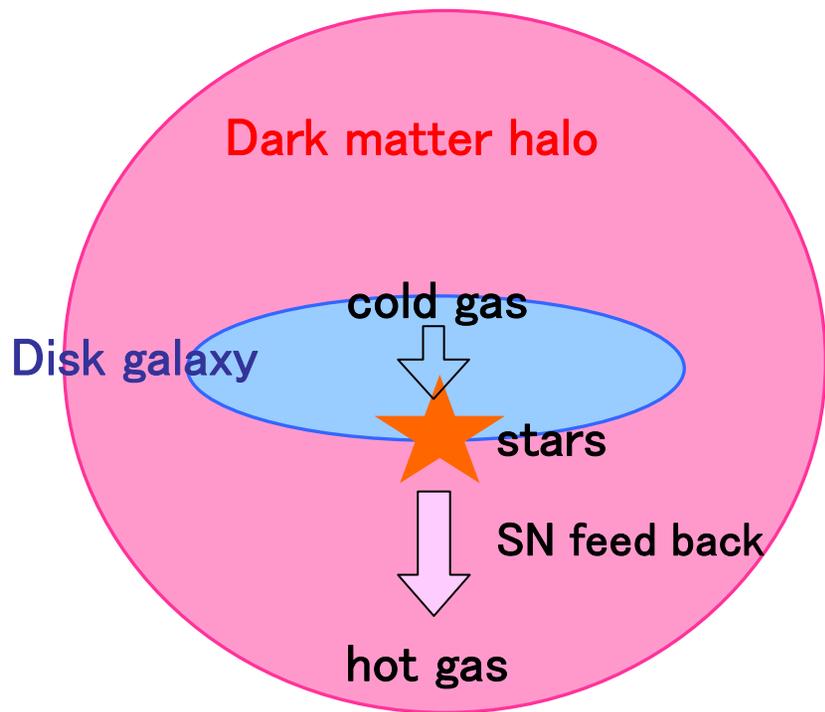
超新星フィードバック



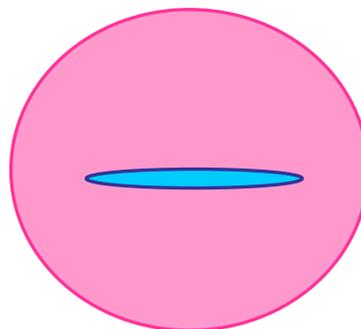
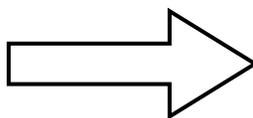
銀河の質量が減る



力学応答として { 銀河のサイズ → 増える
回転速度 → 減る



massloss 前



massloss 後

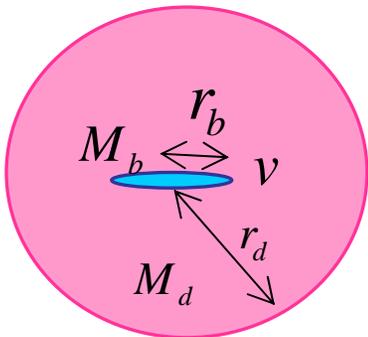
方法

ダークハロー中の銀河の質量の変化量と $\left\{ \begin{array}{l} \text{銀河のサイズの変化量} \\ \text{銀河の回転速度の変化量} \end{array} \right.$ の関係を、解析的に解く

仮定したこと

①密度分布 $\left\{ \begin{array}{l} \text{バリオン Kuzmin-disk 表面密度 } \Sigma(r) = \frac{r_b M_b}{2\pi(r^2 + r_b^2)^{3/2}} \\ \text{(厚みのないディスク 指数分布に近い)} \\ \text{ダークハロー NFW 密度 } \rho(r) = \rho_d c^3 \left[\frac{cr}{r_d} \left(1 + \frac{cr}{r_d} \right)^2 \right]^{-1} \end{array} \right.$

c: concentrate parameter

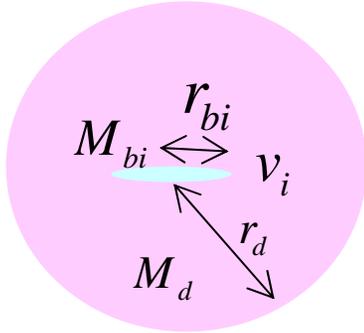


- ②フィードバックは断熱的
- ③massloss の前後で、系はビリアル緩和
- ④ダークハローは、バリオンの変化に影響を受けない

2成分(バリオン、ダークハロー)から成る銀河モデル

初期状態

{ バリオン (薄いディスク): 質量 M_b 半径 r_b 回転速度 v
 { ダークハロー: 質量 M_d 半径 r_d



バリオンのエネルギー
 ビリアル関係

$$\begin{cases} E_i = T_i + W_i = \frac{M_{bi} v_i^2}{2} - a \frac{M_{bi}^2}{r_{bi}} - b \frac{M_{bi} M_d}{r_d} f(r_{bi}, r_d) \\ 2T_i + W_i = 0 \end{cases}$$

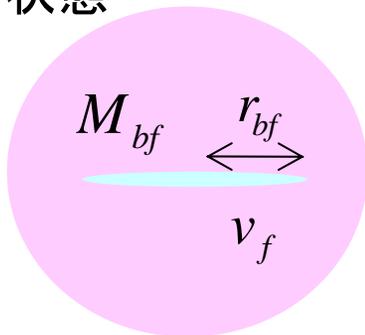
相互作用ポテンシャル

銀河の質量が減る

$$M_{bi} \rightarrow M_{bf}$$

近似: ダークハローは、バリオンの変化に影響を受けない

終状態



mass loss 直後

$$E_f = \frac{M_{bf} v_i^2}{2} - a \frac{M_{bf}^2}{r_{bi}} - b \frac{M_{bf} M_d}{r_d} f(r_{bi}, r_d)$$

↓
ビリアル緩和後

$$\begin{cases} E_f = \frac{M_{bf} v_f^2}{2} - a \frac{M_{bf}^2}{r_{bf}} - b \frac{M_{bf} M_d}{r_d} f(r_{bf}, r_d) \\ 2T_f + W_f = 0 \end{cases} \quad \left. \vphantom{\begin{cases} E_f = \frac{M_{bf} v_f^2}{2} - a \frac{M_{bf}^2}{r_{bf}} - b \frac{M_{bf} M_d}{r_d} f(r_{bf}, r_d) \\ 2T_f + W_f = 0 \end{cases}} \right\} \text{解く}$$

解析解

$$y_{i,f} \equiv \frac{M_{bi,f}}{M_d} \quad z_{i,f} \equiv \frac{r_{bi,f}}{r_d}$$

Adiabatic massloss

サイズ変化
$$\frac{y_f}{y_i} = \frac{1}{y_i} \left\{ [y_i - q(z_i)] \frac{z_i}{z_f} + q(z_f) \right\}$$

ここで
$$q(z) \equiv \frac{b}{az} \int_0^z t^2 \frac{df(t)}{dt} dt$$

回転速度の変化
$$\frac{v_f}{v_i} = \left[\frac{y_f / z_f + bf(z_f) / a}{y_i / z_i + bf(z_i) / a} \right]^{1/2}$$

Instantaneous massloss

$$\frac{y_f}{y_i} = \frac{1 + \frac{bz_i}{ay_i} [f(z_f) - f(z_i)]}{2 - z_i / z_f}$$

c.f. ダークマターなしの場合

Adiabatic massloss

サイズ変化
$$\frac{r_{bf}}{r_{bi}} = \frac{M_{bi}}{M_{bf}}$$

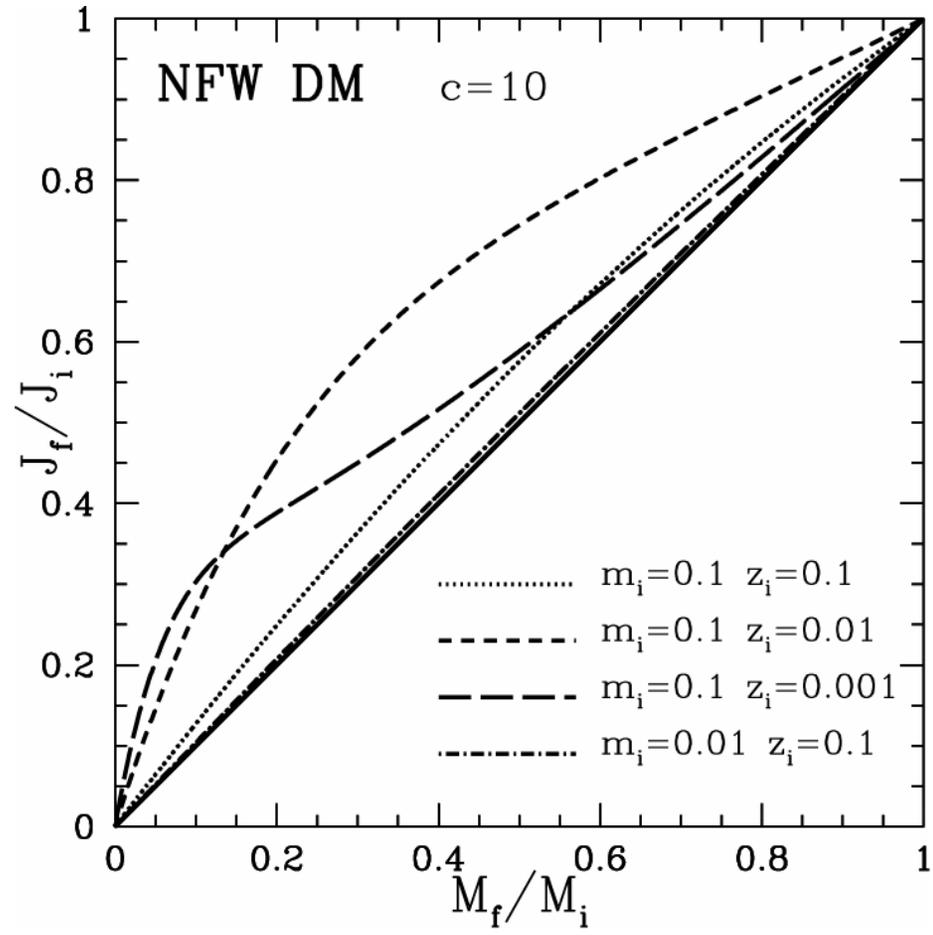
回転速度の変化
$$\frac{v_f}{v_i} = \frac{M_{bf}}{M_{bi}}$$

Instantaneous massloss

$$\frac{r_{bf}}{r_{bi}} = \frac{M_{bf} / M_{bi}}{2M_{bf} / M_{bi} - 1}$$

$$\frac{v_f}{v_i} = \sqrt{2 \frac{M_{bf}}{M_{bi}} - 1}$$

バリオンがKuzmin diskのまま → masslossに対する角運動量の減り方が決まる



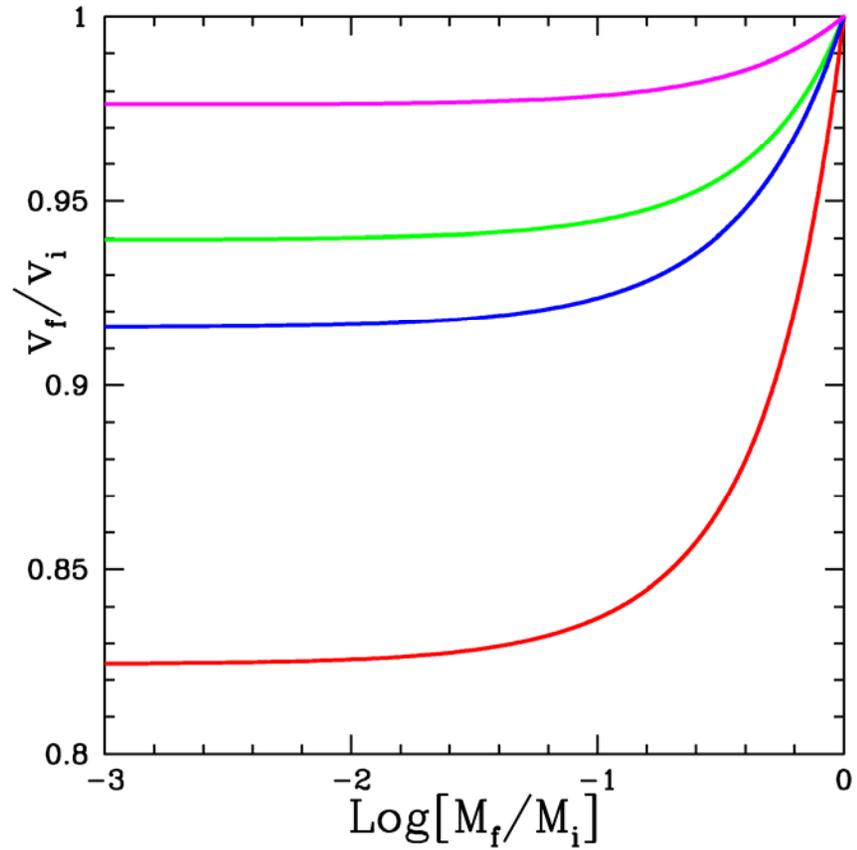
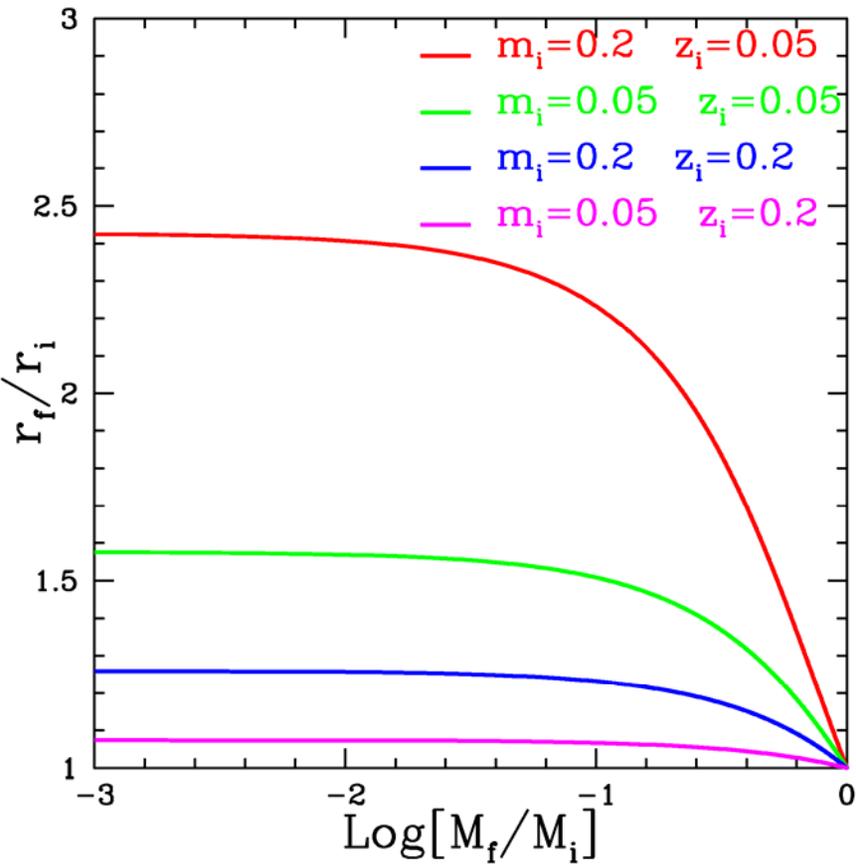
銀河の質量変化と、銀河サイズ、回転速度の変化量との関係

バリオンとDMの質量比の初期値 $m_i \equiv \frac{M_{bi}}{M_d} = 0.2, 0.05$

サイズ比の初期値 $z_i \equiv \frac{r_{bi}}{r_d} = 0.2, 0.05$

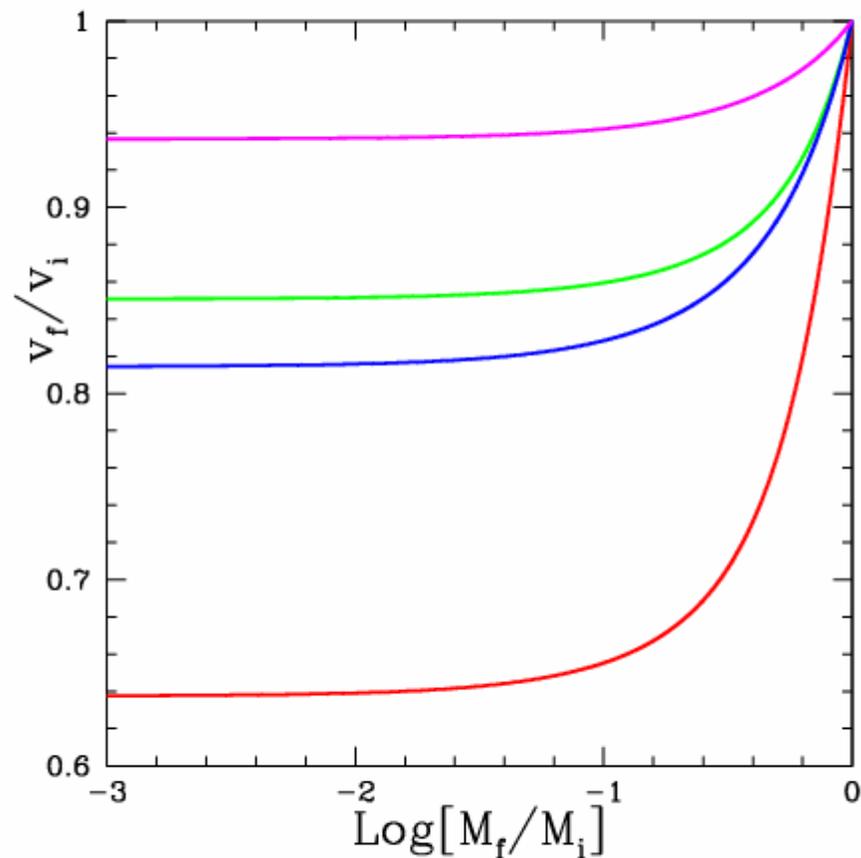
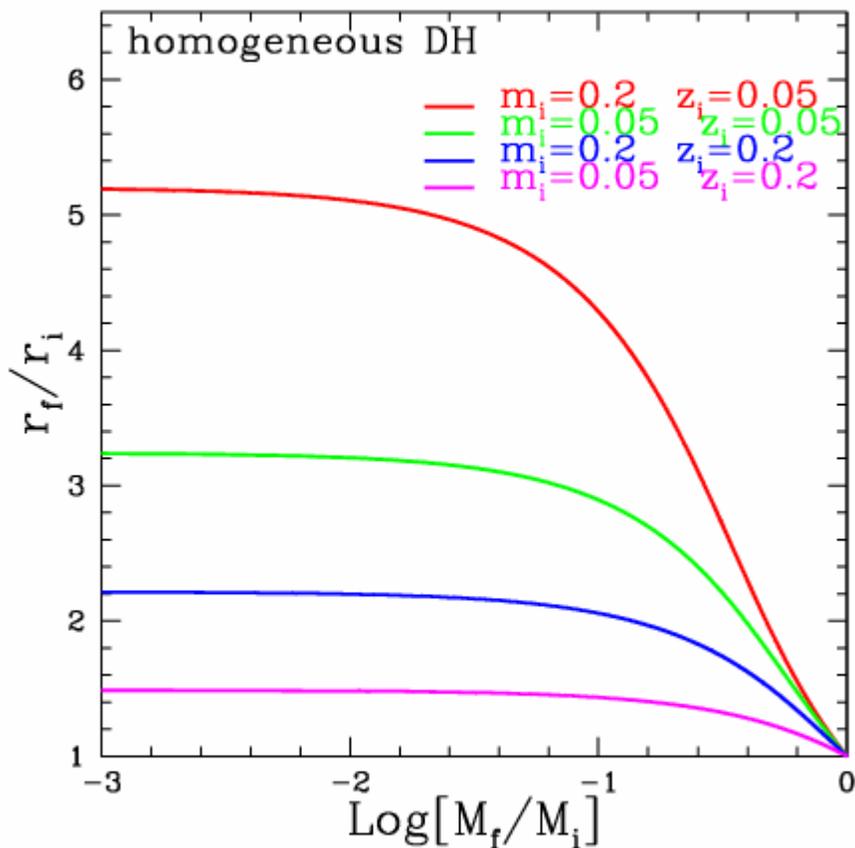
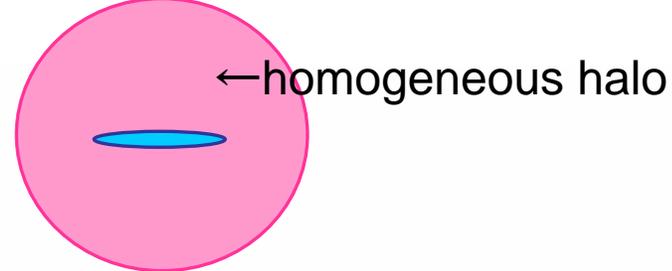
銀河の質量変化 vs サイズの変化

銀河の質量変化 vs 回転速度の変化

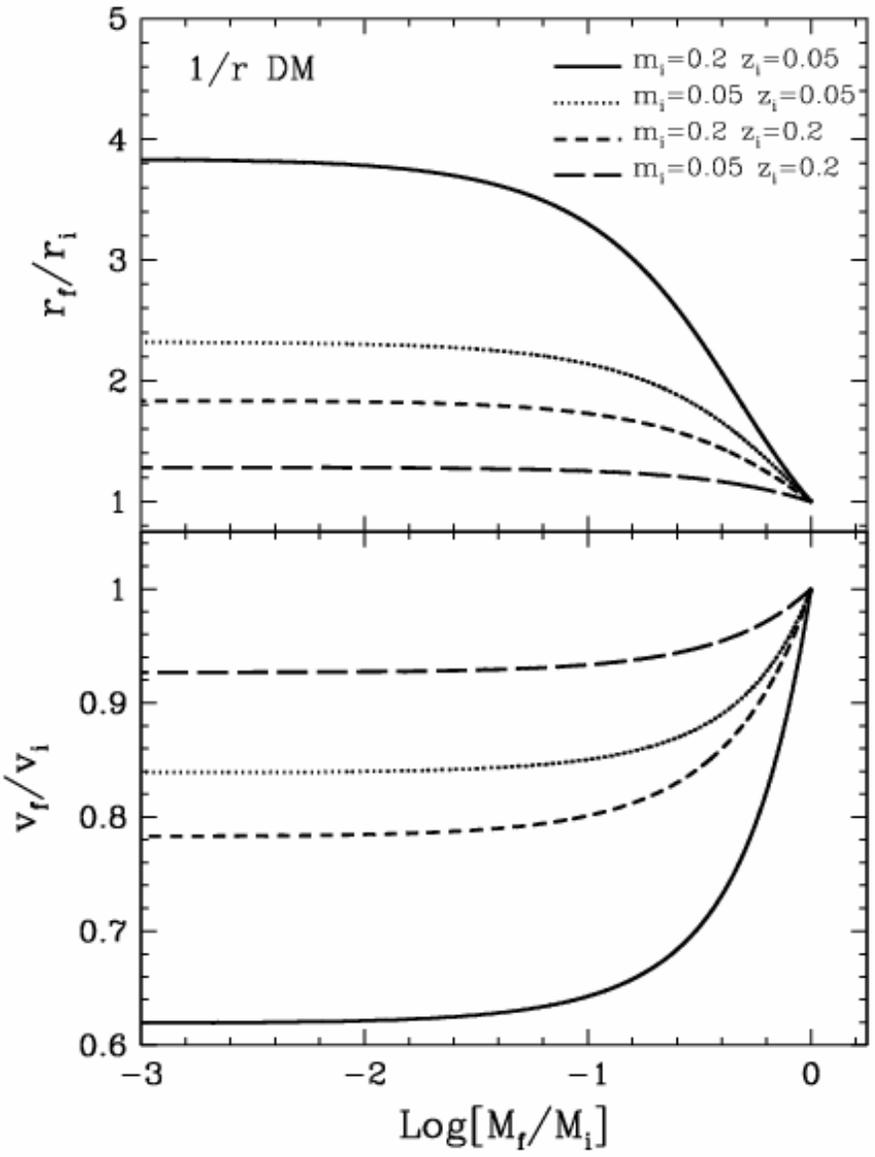
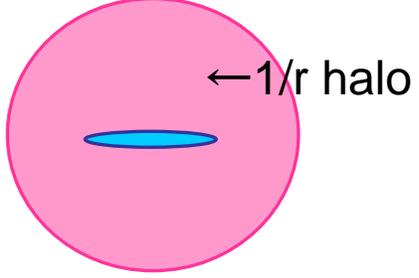


DMに対する、バリオンの質量比が大きく
サイズ比が小さいほど、力学応答は大きい

Dependence on dark matter distribution



NFWの場合と比べて、DMに対するバリオンの密度比が大きいのでそのぶん力学応答も大きくなる



c.f. 楕円銀河の場合
→ 球対称で近似

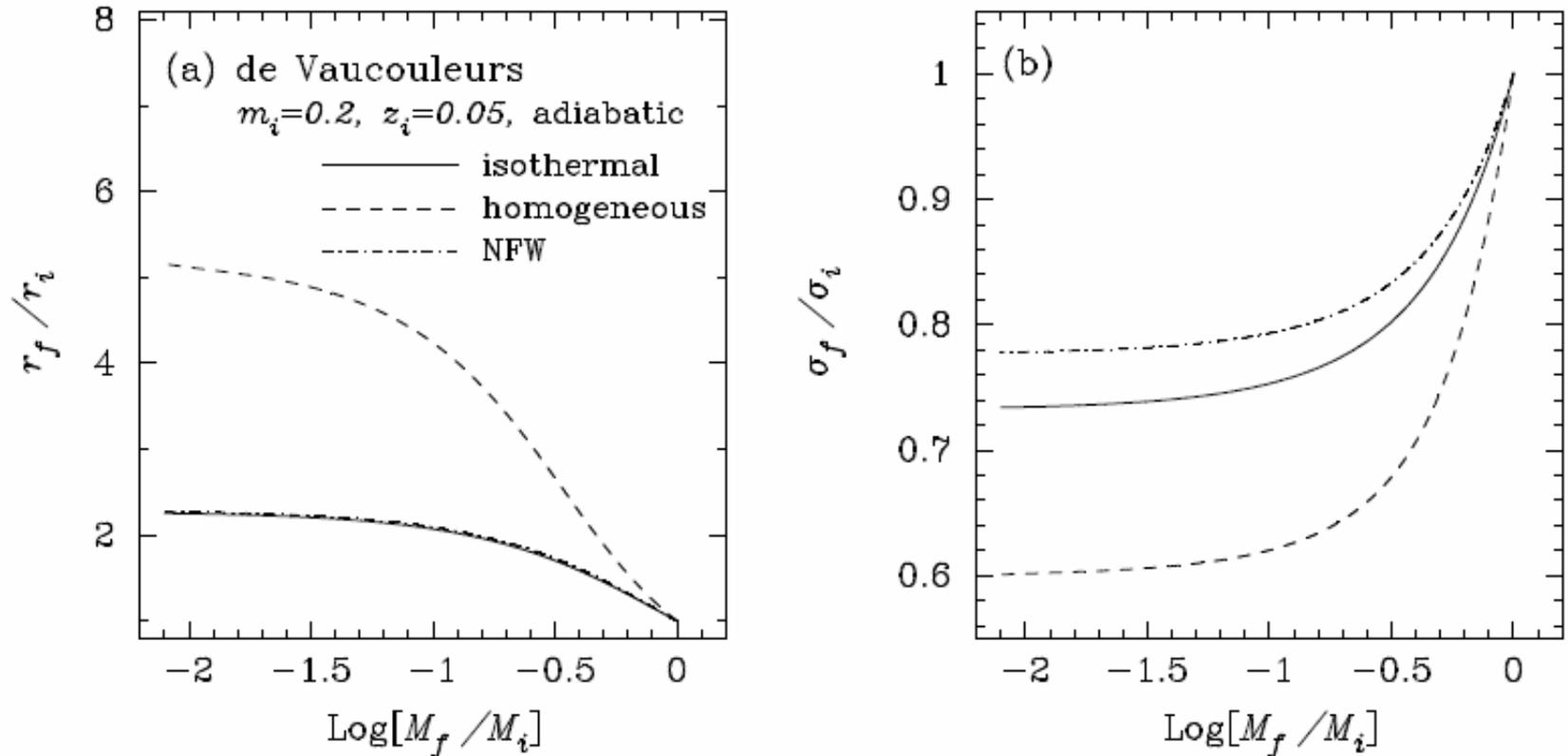
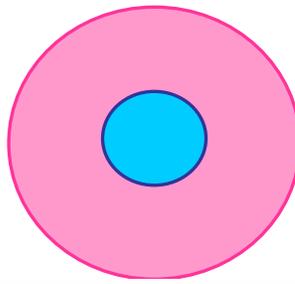


Figure 2. Dynamical response of the deprojected de Vaucouleurs component within a dark halo with three different profiles. The solid, dashed and dot-dashed lines denote the isothermal, homogeneous and NFW profiles, respectively. Shown are the responses on size (left panel) and velocity dispersion (right panel) only for adiabatic gas removal for the initial condition of $m_i = 0.2$ and $z_i = 0.05$.

ディスクでも球対称でも、結果は(数値的にも)あまり変わらない

力学応答のまとめ

▶ ダークハロー内にあるディスク銀河の力学応答

超新星フィードバックにより、銀河外へ掃きだされたガスの質量と、
銀河サイズおよび回転速度の変化量との関係を導出した

バリオンの密度が濃いほど、力学応答が大きくなる

力学応答の大きさは、ハローと銀河の密度比に依存

問題 改善できたらすべきこと

モデルの改良

今回は、解析モデルのため、バリオンはKuzmin disk

本来は指数分布

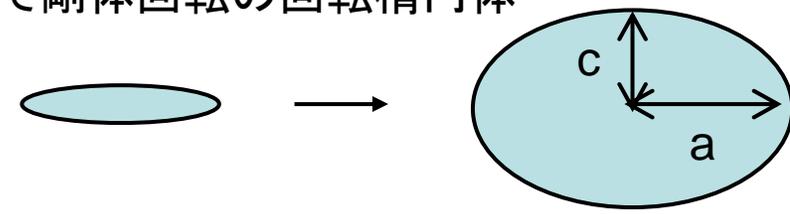
フィードバックによって、ディスク→厚みを得る？
(ダークハロー無しのモデルでは、断熱変化では厚みは増えない
ので、大丈夫そうではあるけど)

解析的には無理 → 数値的に調べる必要がある

MacLaurin spheroid

一様密度で剛体回転の回転楕円体

$$E = -\frac{3}{10} \frac{GM^2}{a} \frac{\sin^{-1} e}{e}$$



$$\frac{25}{6} \left(\frac{J}{M}\right)^2 \frac{1}{GMa} = g(e)$$

$$= [(3 - 2e^2) \sin^{-1} e - 3e(1 - e^2)^{1/2}] / e^3$$

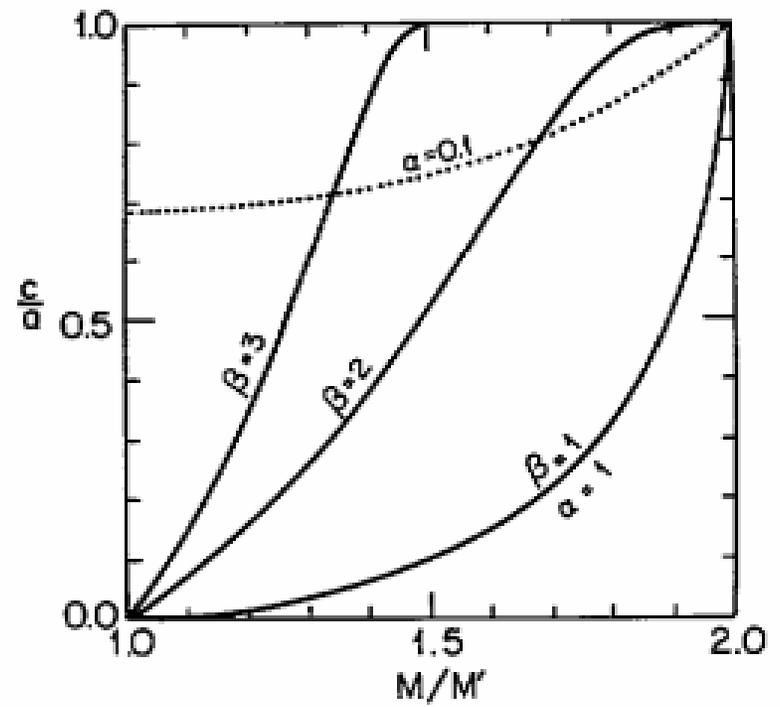
彼らの結果

adiabatic → eは変化しない

instantaneous → eが増える →

$$\Delta J = \beta \frac{J}{M} \Delta M$$

$$J'/M' = (J/M) \frac{1 - \beta \Delta M/M}{1 - \Delta M/M} = \alpha J/M$$

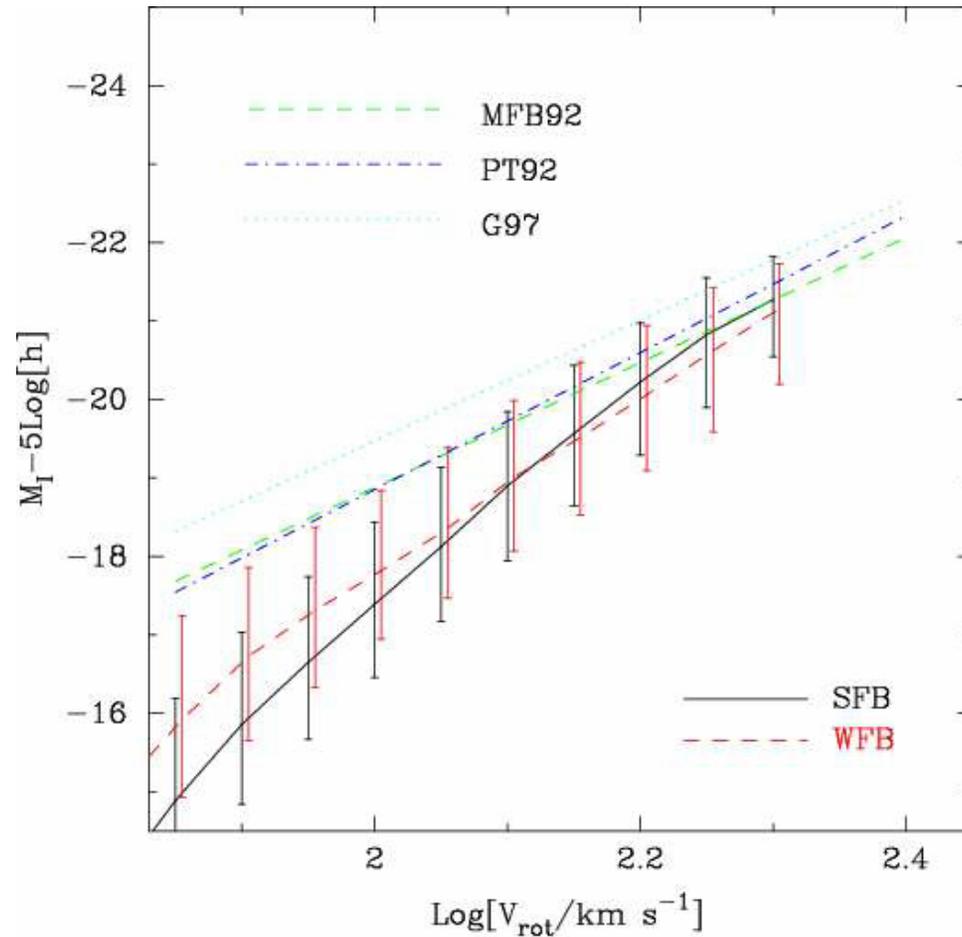


→ ダークハロー入りではどうなるか？

FIG. 1.—The ratio of the minor to major axis of a rotating galaxy following rapid mass and angular momentum loss. The galaxy, initially flat, is modeled as a Maclaurin spheroid. The quantities α and β parametrize the assumed relative efficiency of angular momentum loss to mass loss, which is high for values of β (α) well above (below) unity (see text).

§ 力学応答がTully-Fisher関係に及ぼす影響

さっき得た力学応答の結果を簡単な宇宙モデル(プレセミアナ)に適用して (mass loss後の)銀河の質量と回転速度の関係をプロットし、Tully-Fisher関係と比べる



方法:

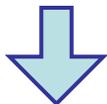
①さっきの力学応答の結果

変化量どうしの関係

$$\frac{M_f}{M_i} \xleftrightarrow{\text{relation}} \frac{v_f}{v_i}, \frac{r_f}{r_i}$$

②CDMシナリオ

初期ゆらぎ $P(k) \propto k^n$



銀河の初期値 (massloss 前)

$$r_i \propto v^{-1} M_i^{(5+n)/6}$$
$$v_i \propto v^3 M_i^{(1-n)/12}$$

$$v \equiv \frac{\delta}{\langle \delta^2 \rangle^{1/2}}$$

v : height of the density contrast

③銀河の進化はmonolithic (mergerなし 渦巻き銀河では良い近似)

はじめ、バリオンはぜんぶガス $M_i = M_g$

星形成 & フィードバック
↓
ガスを使い果たす

$$M_{rem} = \left(\frac{v_{circ}}{v_{hot}} \right)^{-\alpha} \Delta M_*$$

銀河の最終質量

$$M_f = M_i \left[1 + \left(\frac{v_{rot}}{v_{hot}} \right)^{-\alpha} \right]^{-1}$$

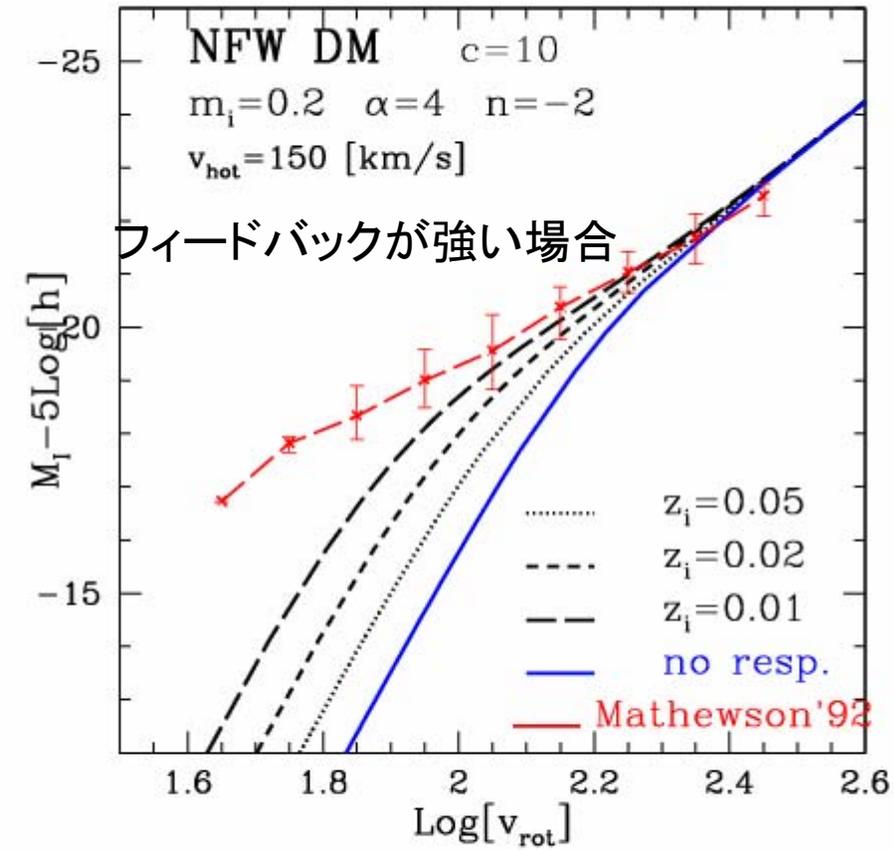
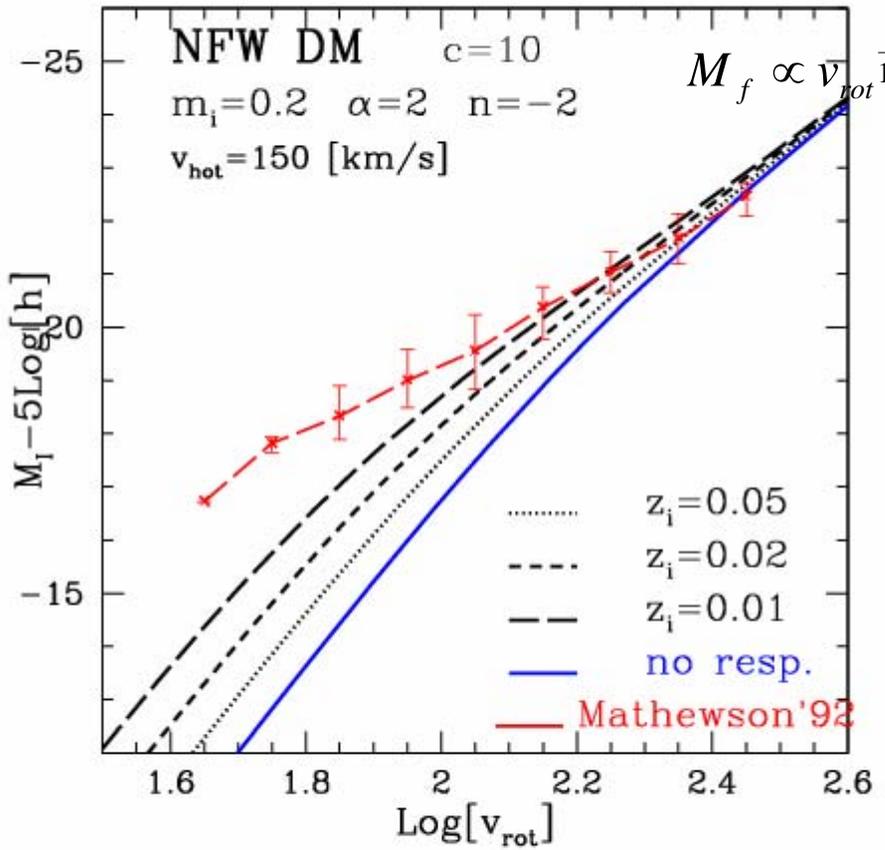
①、②、③から

M_f と v_f の関係

結果

Tully-Fisher関係

mass-to-light-ratioは一定



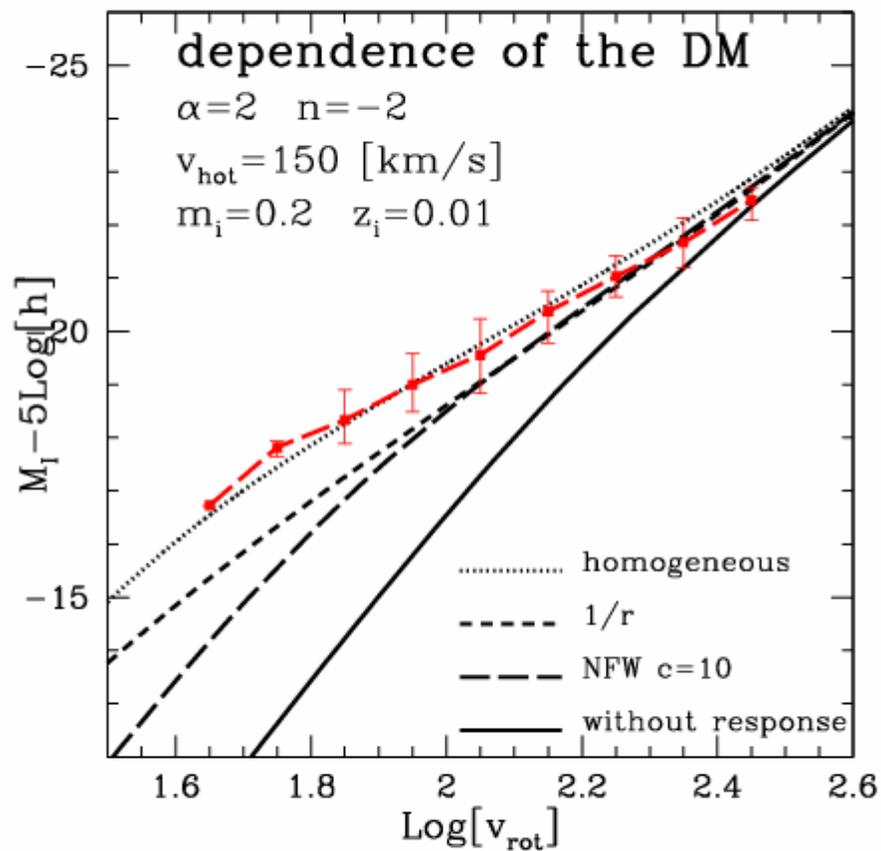
バリオンとDMの質量比の初期値 $m_i \equiv \frac{M_{bi}}{M_d} = 0.2$

サイズ比の初期値 $z_i \equiv \frac{r_{bi}}{r_d} = 0.05, 0.02, 0.01$

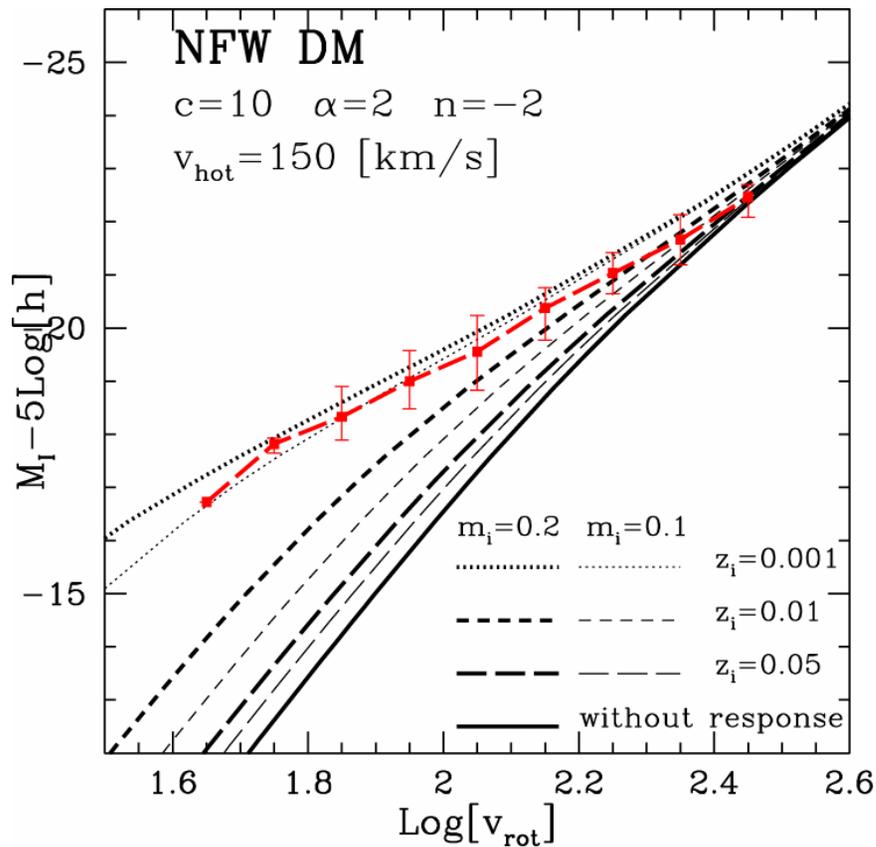
力学応答を考慮することによって、TFRのべき則に、多少改善される

傾きは、バリオンとDMの比、フィードバックの強さに依存する
 バリオンの密度が濃い → 傾きがより緩やかになる

ダークハローモデルの違い



観測データにフィットさせるためには



ここで ν 、 n の値は一定

$z_i=0.001$ くらいでない
 と観測データと合わない
 (とくに暗い銀河で)

力学応答だけでは再現無理?

階層的構造形成シナリオでは
 ν 、 n の値は、mass に依存すると
 考えるのが自然

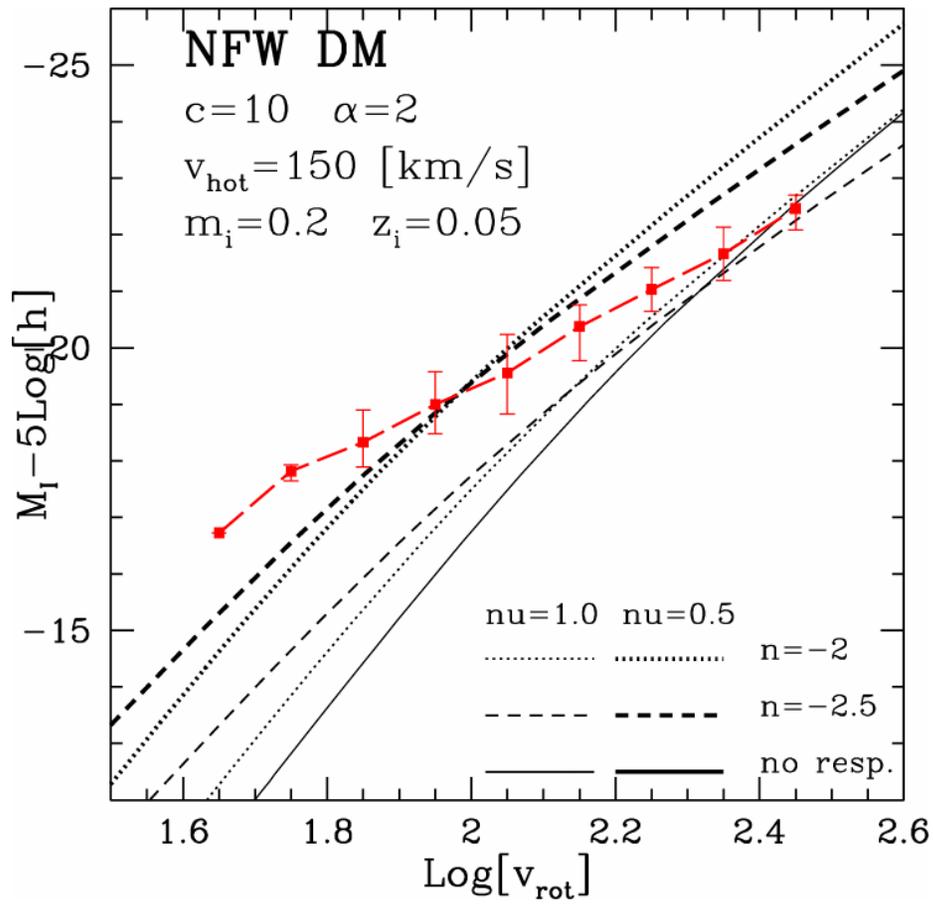
バリオンとDMの質量比
 の初期値

$$m_i \equiv \frac{M_{bi}}{M_d}$$

サイズ比
 の初期値

$$z_i \equiv \frac{r_{bi}}{r_d}$$

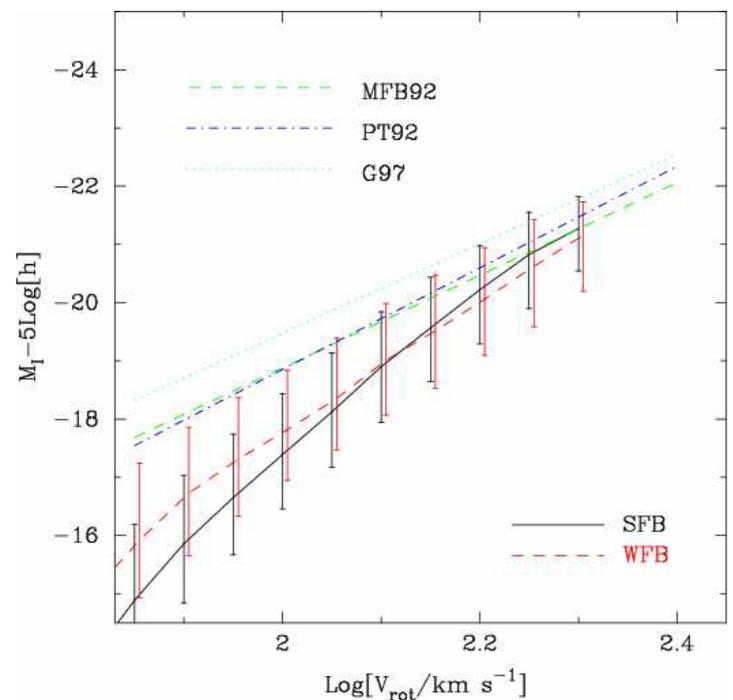
もう少しリアルな(セミアナに近い)モデルに改良する
 → ν 、 n を動かす



$$\nu \equiv \frac{\delta}{\langle \delta^2 \rangle^{1/2}}$$

low-mass galaxies になるにしたがって
 ν 、 n が小さくなるので、より観測値の
 TFRに合う傾向にある

mass-to-light ratioを変えると(小さい銀河が明るい)
 もっと改善される



銀河の質量 vs ディスクサイズ

Nagashima&Yoshii2004

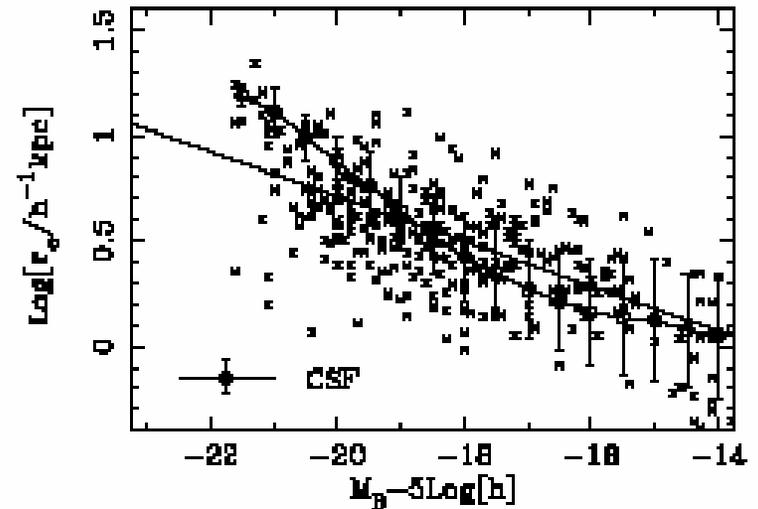
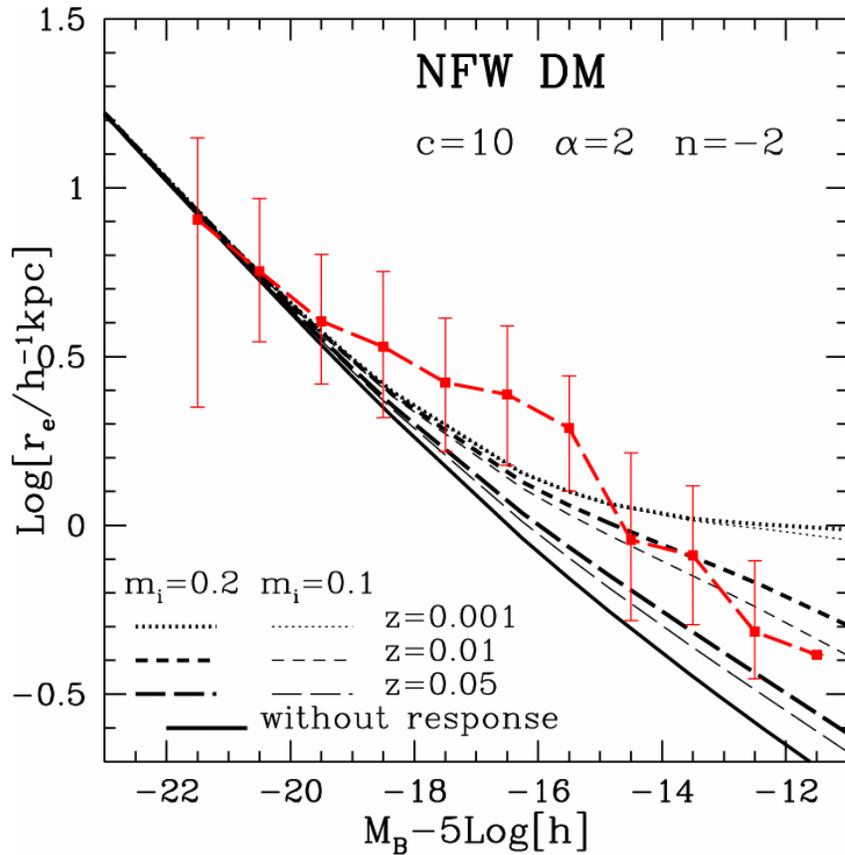


FIG. 5.— Disk size of spiral galaxies. The thick solid line connecting open circles shows the theoretical result for effective radii of spiral galaxies in the CSF model. Errorbars on this line is the 1σ scatter in predicted sizes. Other SF models, not shown, give almost the same results with less than 0.1 dex difference. The thin line indicates the mean relation given by Totani & Yoshii (2000) for spiral galaxies, based on the observational data (crosses) taken from Impey et al. (1996).

§ まとめ

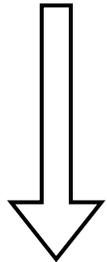
➤ ダークハロー内にあるディスク銀河の力学応答

超新星フィードバックにより、銀河外へ掃きだされたガスの質量と、銀河サイズおよび回転速度の変化量との関係を導出した。

バリオンの密度が濃いほど、力学応答が大きくなる

➤ 力学応答がTully-Fisher関係に及ぼす効果

力学応答の結果と、プレセミアナモデルを使って
タリーフィッシャー関係をプロット



傾きは、バリオンとDMの質量比、サイズ比、フィードバックの強さに依存
バリオンの密度が濃いほど、傾きの変動は大きい

力学応答を考慮することによって、Tully-Fisher関係に、より近づくよう改善される

問題 改善できたらすべきこと

力学応答について

モデルの改良

セミアナに実装して、TF関係が再現されるか調べる