

天体形成研究会 2018

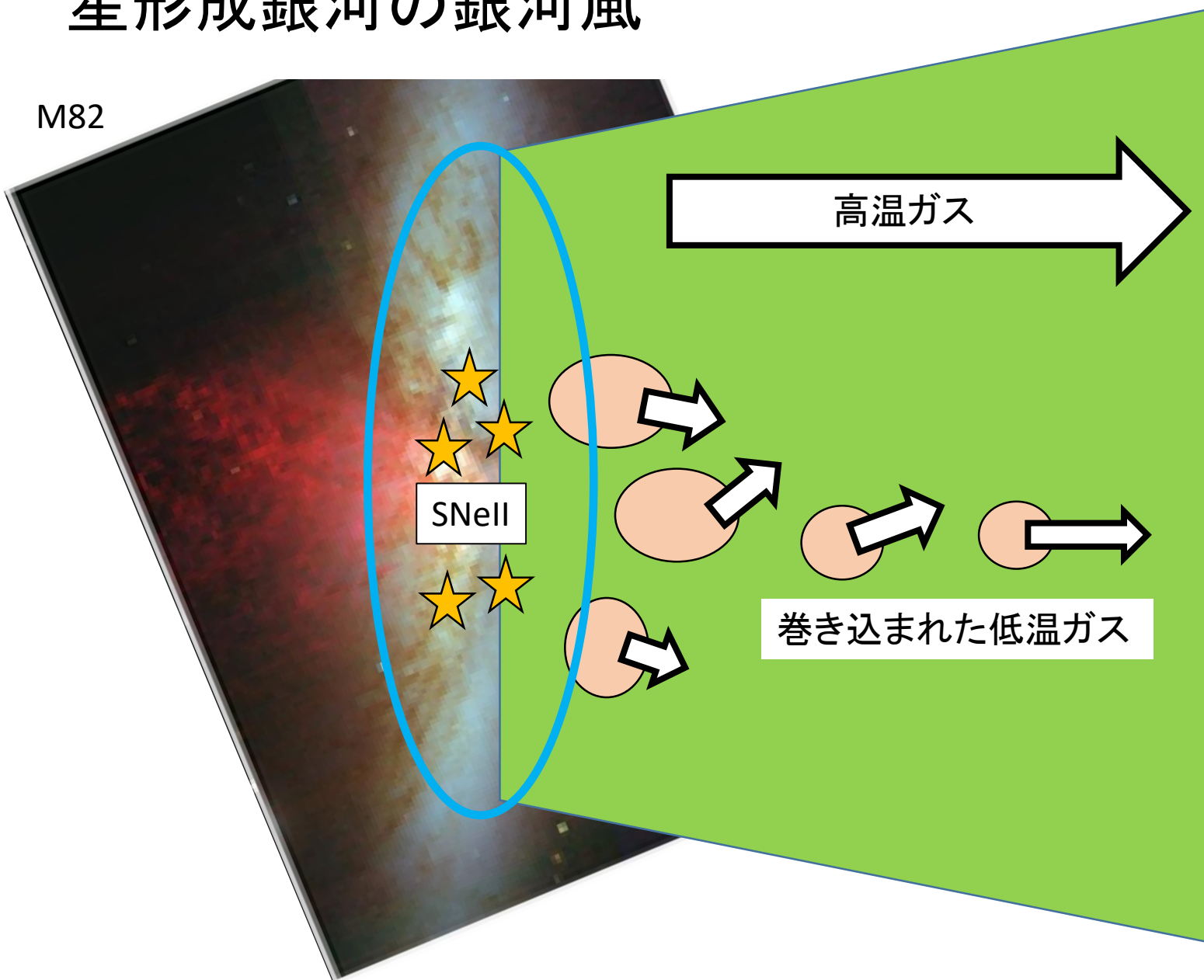
11月02日9:10-9:40

遷音速銀河風モデルによる 星形成銀河からのガス流出量の評価

五十嵐朱夏、森正夫(筑波大)、新田伸也(筑波技大)

星形成銀河の銀河風

M82



高い星形成率

→ 星間ガスにエネルギー注入

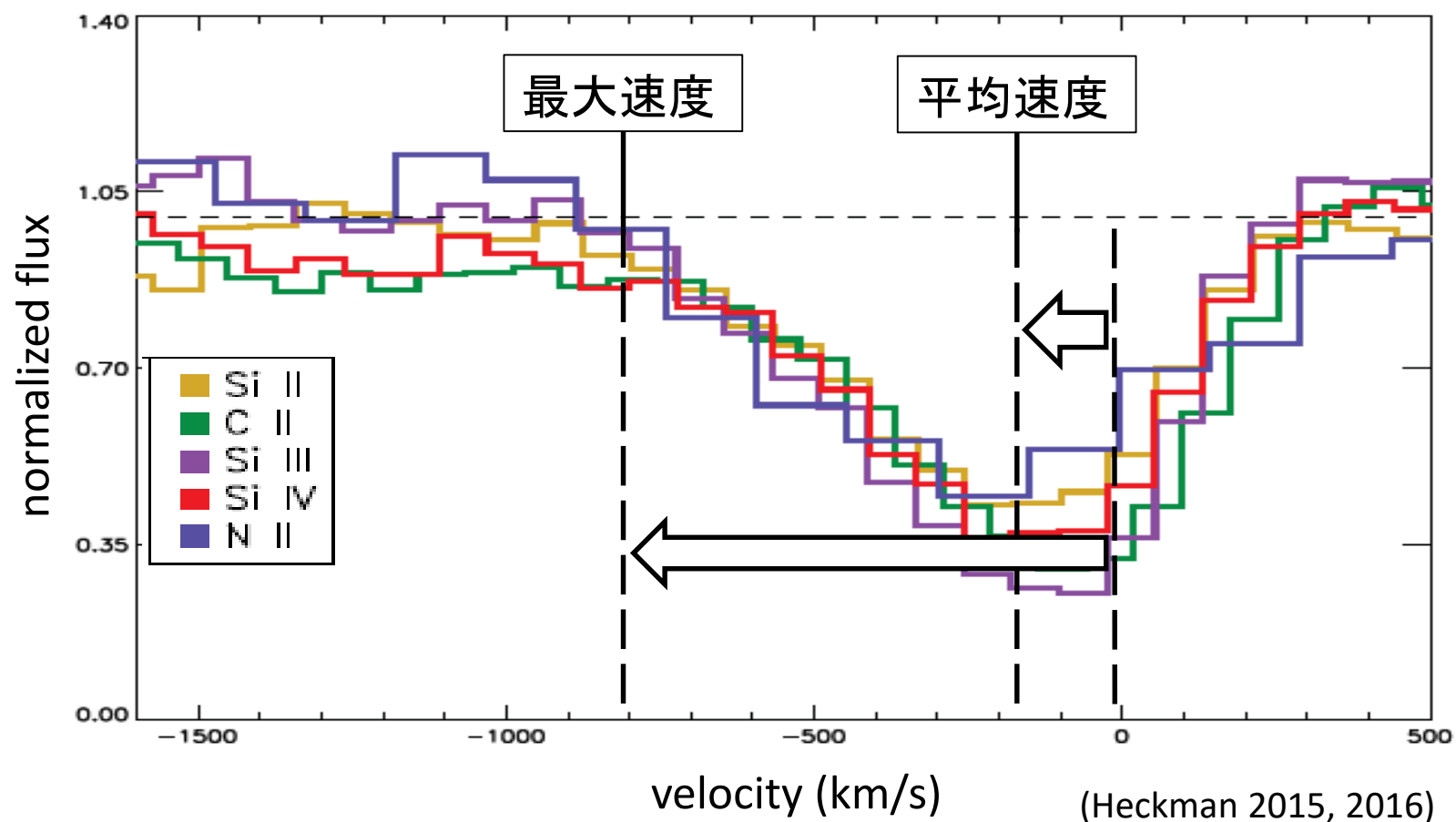
→ 銀河風で星間ガスが流出



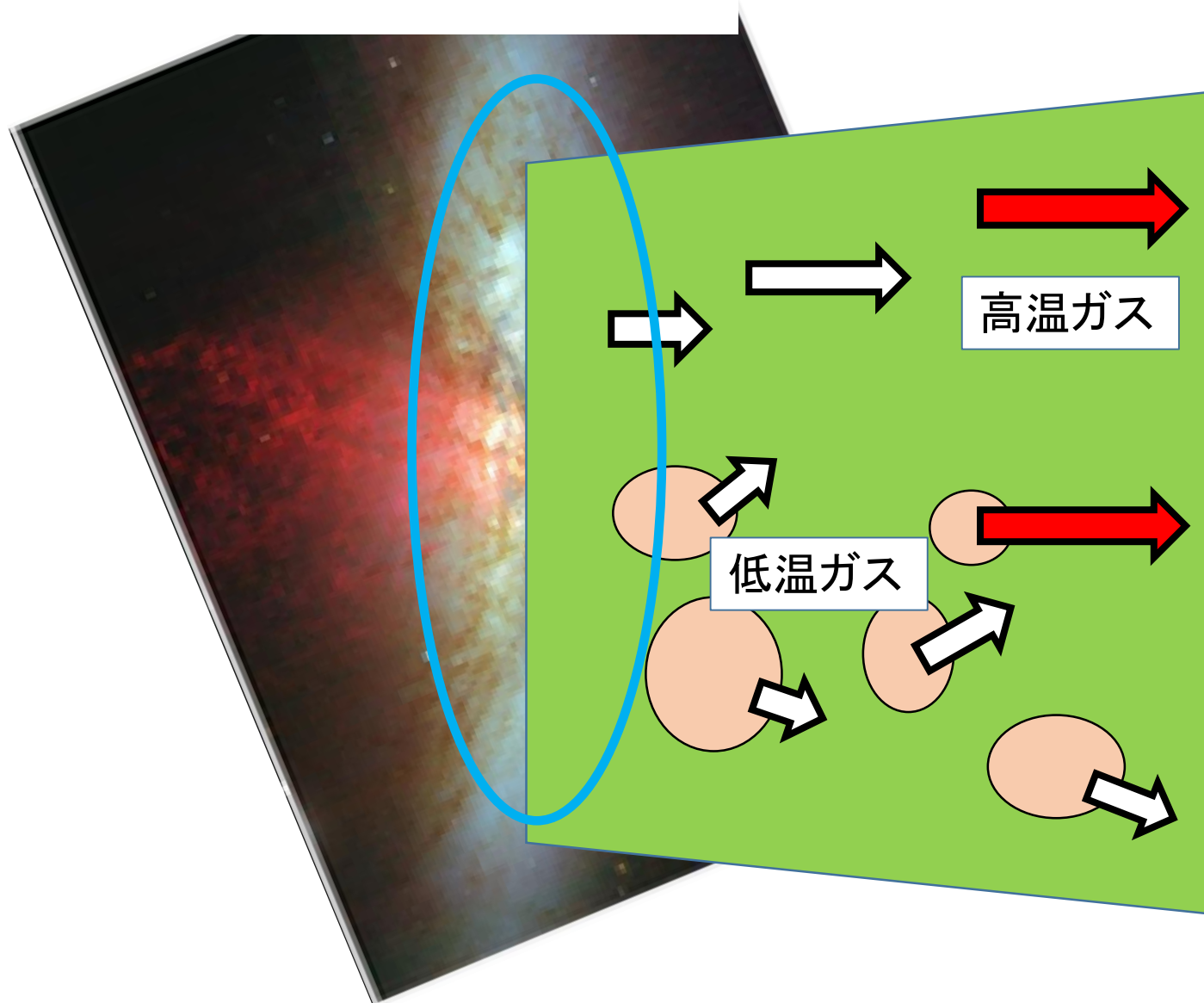
1. 星形成の抑制
2. 銀河間空間の重元素汚染

星形成銀河の銀河風速度

金属吸収線から評価される銀河風速度

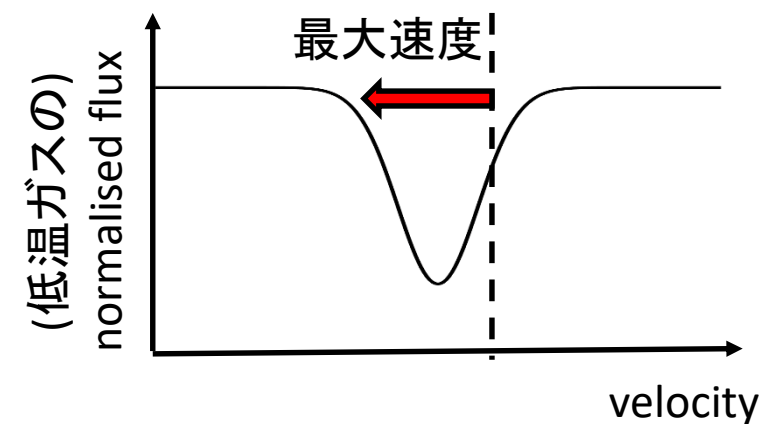


星形成銀河の銀河風速度



高温ガスの流れによって低温ガスが加速

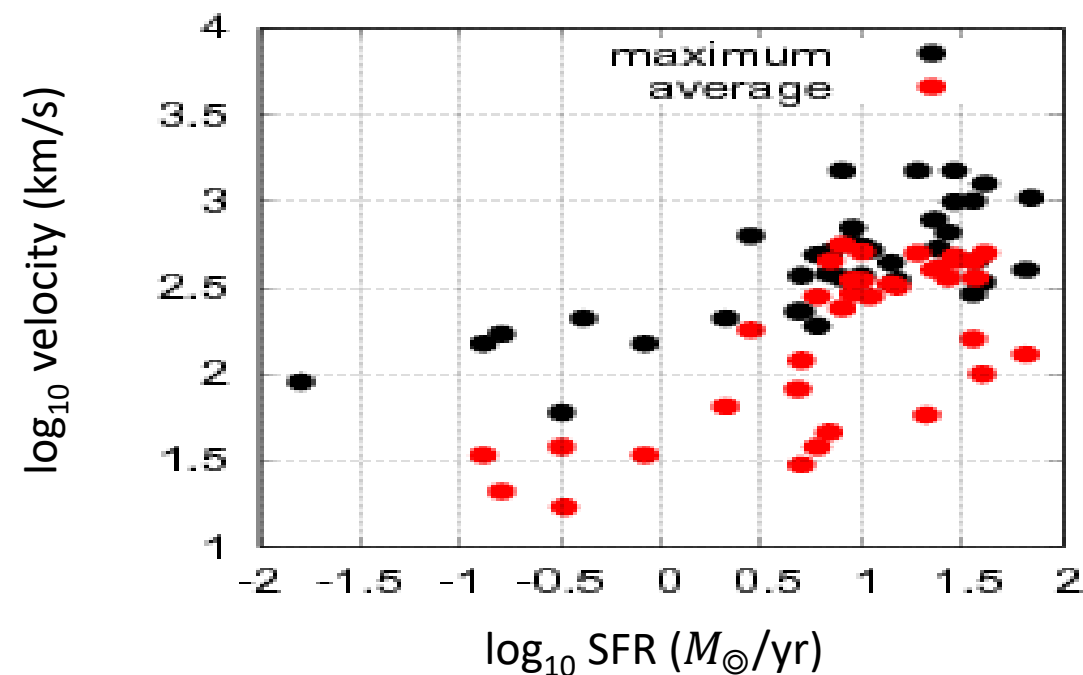
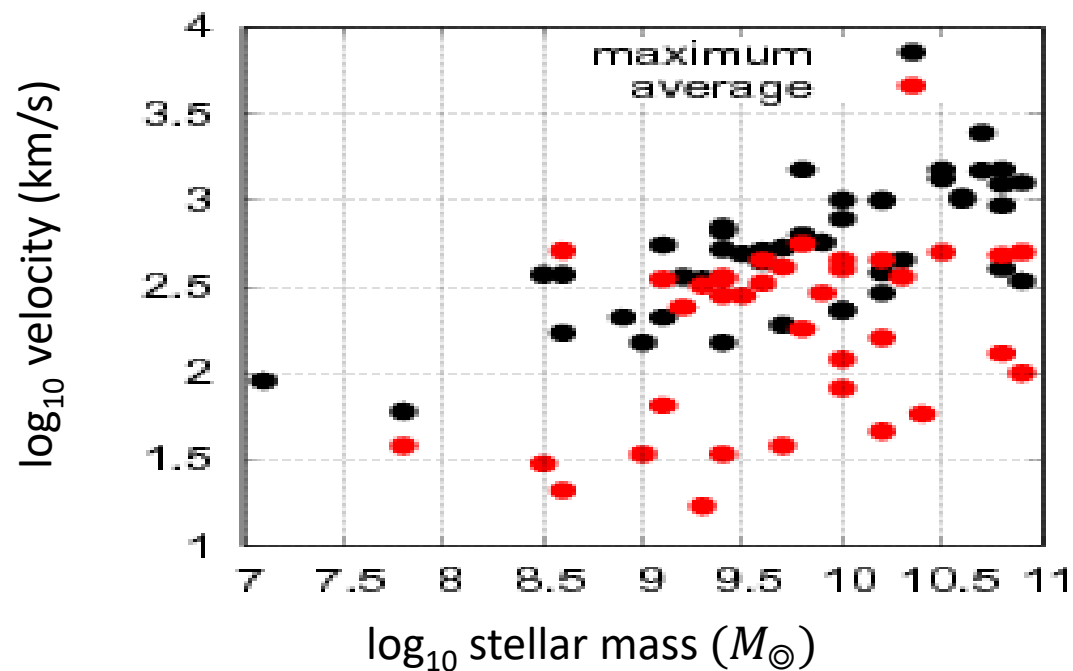
低温ガスの最大速度
と
高温ガスの最大速度(の下限)



近傍星形成銀河の銀河風

速度・星質量・SFR の相関

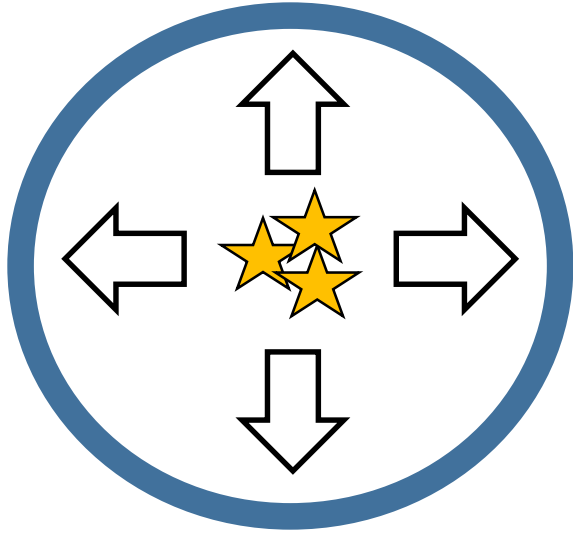
(Heckman 2015, 2016)



影響の大きさは流出ガスの { 速度
質量流束 } に依存

質量流束は？

Shell outflow model



\dot{M} : 質量流束
 N_H : ガス柱密度
 $\langle m \rangle$: 平均質量
 v_{out} : 平均速度
 r_{out} : シェルの半径

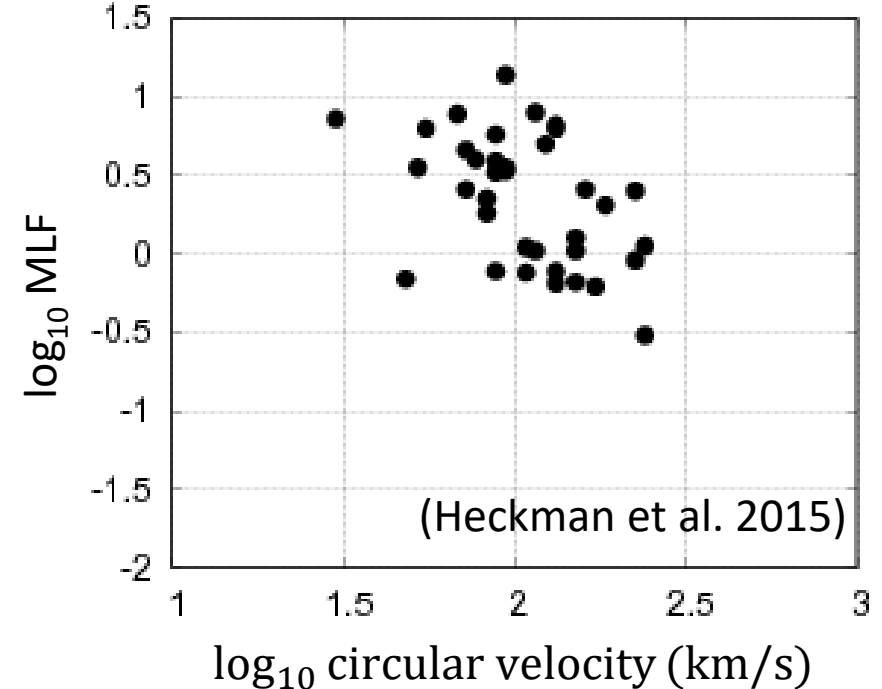
$$\dot{M} \sim 4\pi N_H \langle m \rangle v_{out} r_{out}$$

N_H は金属柱密度から予想

r_{out} は $2 \times$ effective radius (UV) と仮定

$$\text{mass loading factor (MLF)} = \dot{M} / \text{SFR}$$

MLF はISMの流出効率を示す



ハロー質量への依存性は見えない

N_H と r_{out} には不定性がある



高精度の outflow model を構築

Transonic analysis

例: 太陽風モデル (Parker 1958)

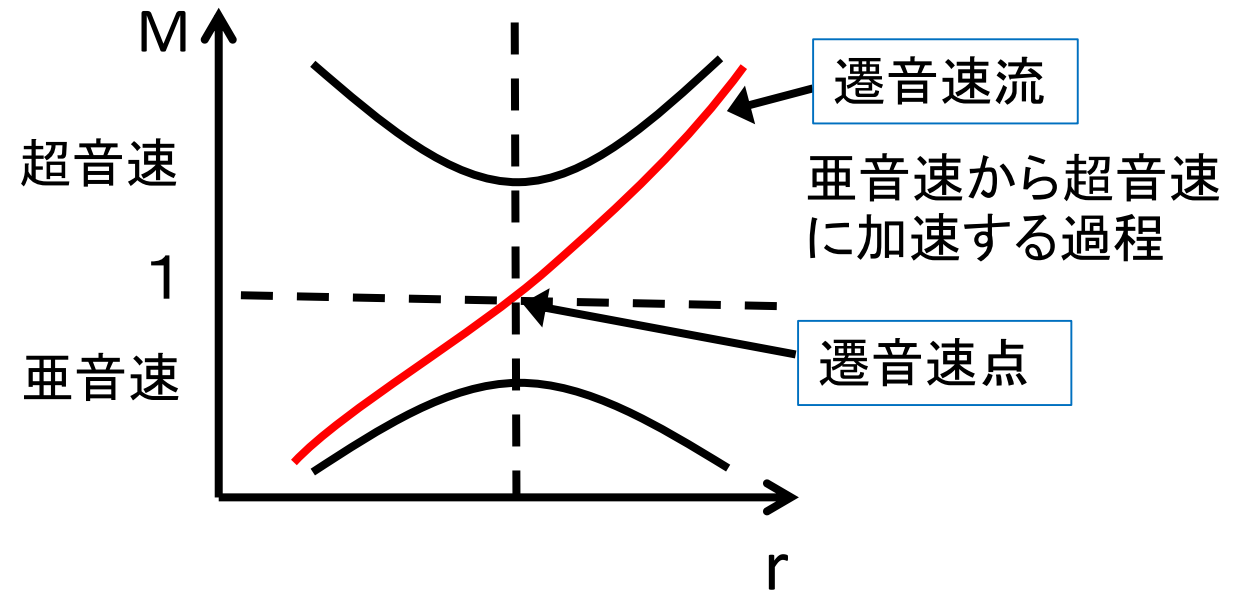
1. 連続の式 $4\pi\rho v r^2 = \text{const.}$

2. 運動方程式 $v \frac{dv}{dr} = -\frac{c_s^2}{\rho} \frac{d\rho}{dr} - \frac{d\Phi}{dr}$



$$\frac{M^2 - 1}{M^2} \frac{dM^2}{dr} = \frac{4}{r} - \frac{2}{c_s^2} \frac{d\Phi}{dr} \quad \left(\Phi(x) \propto -\frac{1}{r} \right)$$

M: マッハ数(= 速度 / 音速)



遷音速流はエントロピー最大の解
→ 遷音速銀河風を仮定する

Transonic outflow model



球対称定常モデル

$\dot{\rho}_m$: (ガス)質量注入
 \dot{q} : エネルギー注入

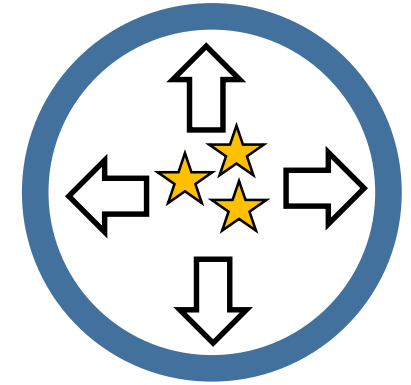
1. 連続の式 $\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (\rho v r^2) = \dot{\rho}_m$
2. 運動方程式 $\rho v \frac{dv}{dr} = -\frac{dP}{dr} + \rho g - \dot{\rho}_m v$
3. エネルギー式 $\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left\{ v r^2 \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{\Gamma}{\Gamma - 1} P \right) \right\} = \rho v g + \dot{q}$

$$\Rightarrow \frac{M^2 - 1}{M^2 \{ (\Gamma - 1) M^2 + 2 \}} \frac{dM^2}{dr} = \frac{2}{r} - \frac{\Gamma + 1}{2(\Gamma - 1)} \frac{\dot{m}}{\dot{e} - \dot{m}\Phi} \frac{d\Phi}{dr} - \frac{\Gamma M^2 + 1}{2} \frac{\dot{e} - 2\dot{m}\Phi}{\dot{e} - \dot{m}\Phi} \frac{1}{\dot{m}} \frac{d\dot{m}}{dr}$$

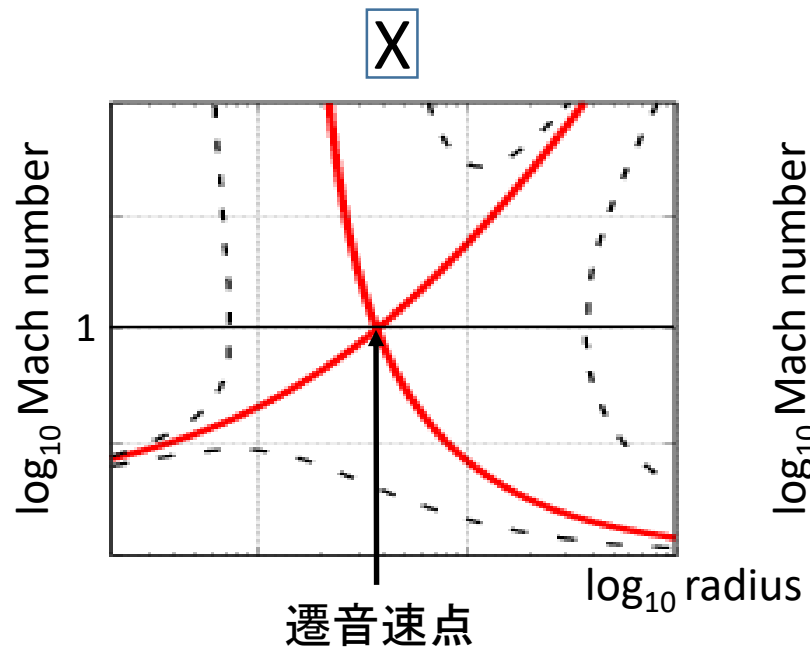
SNeII からのエネルギー注入を仮定

重力場に ダークマターハローと星を仮定

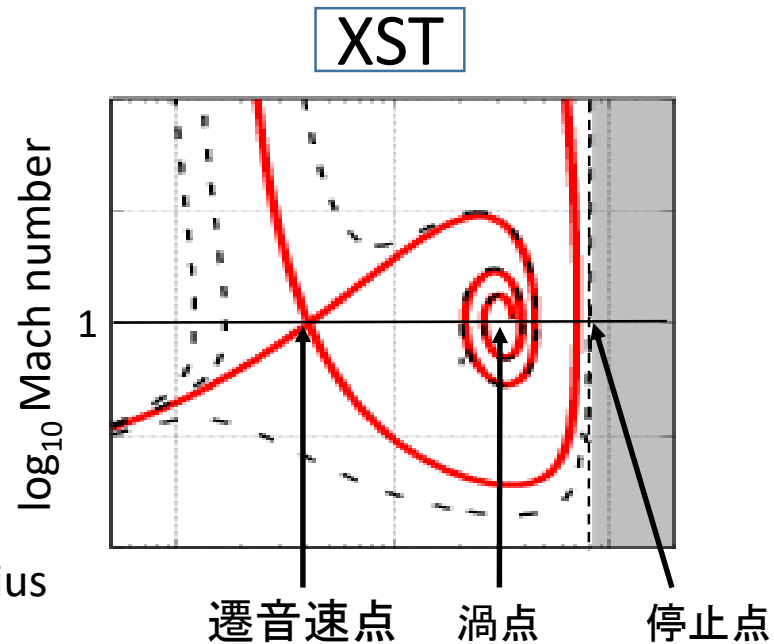
Shell outflow model



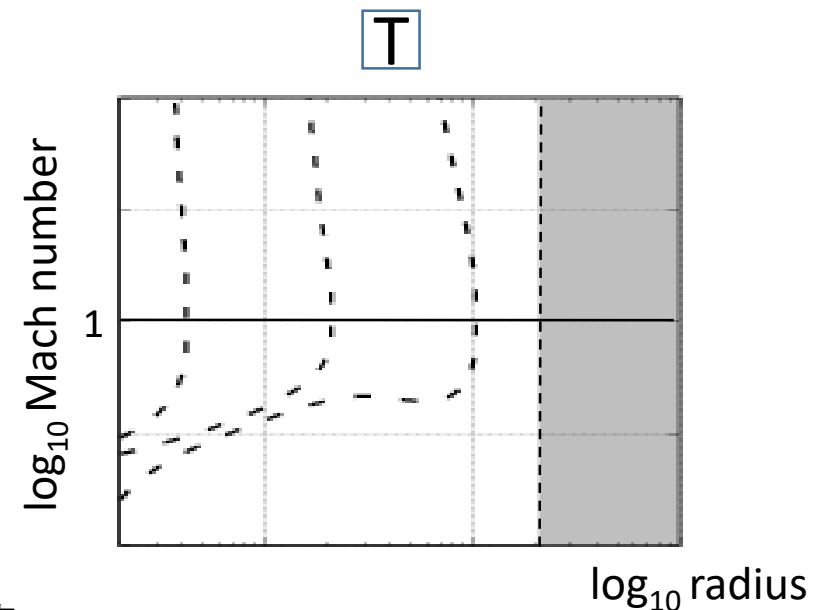
Result: 遷音速解の topology と物理量の関係



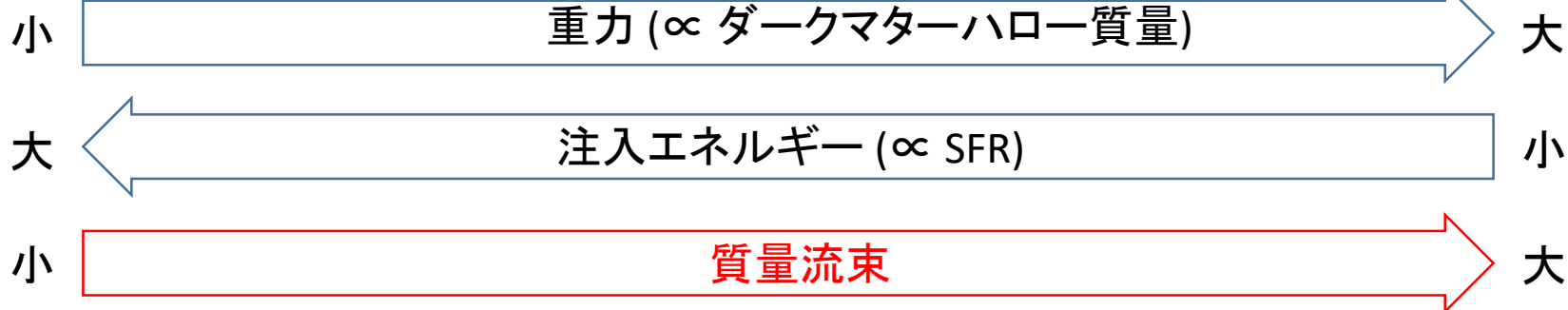
遷音速流は無限遠に到達



遷音速流は途中で止まる



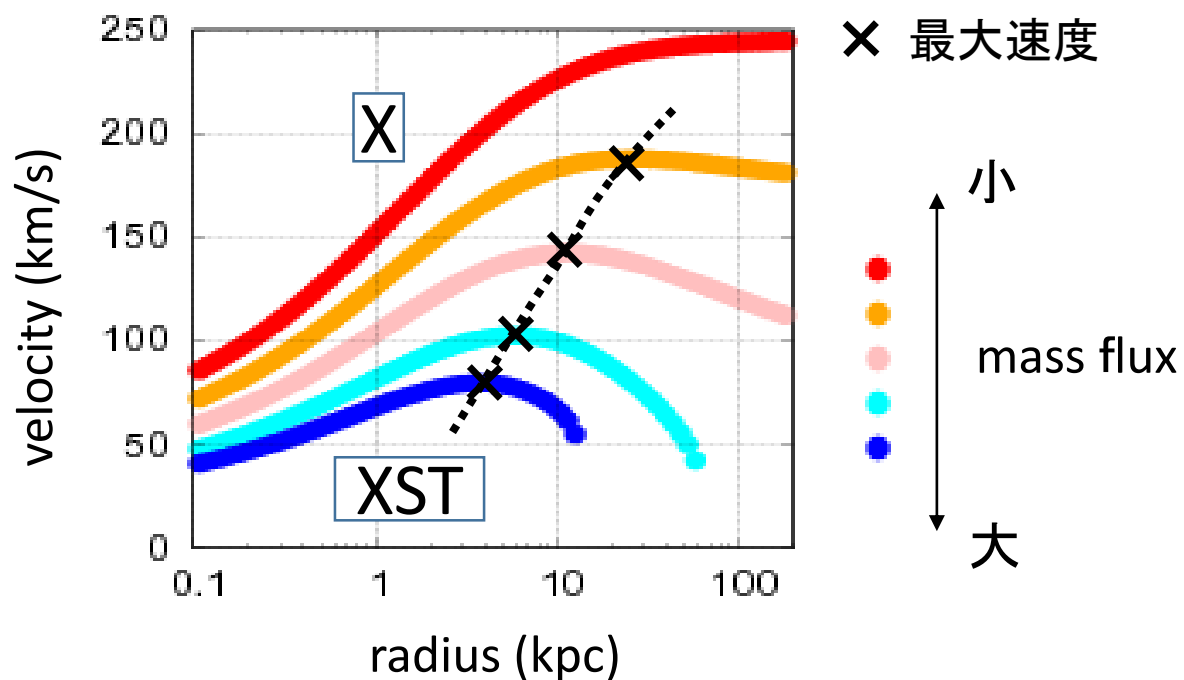
解なし



Result: 速度分布と mass loading factor (MLF)

$$\text{MLF} = \dot{M} / \text{SFR}$$

例: stellar mass = $10^{8.6} M_{\odot}$
(dark halo mass = $10^{10.96} M_{\odot}$)
SFR = $10 M_{\odot}/\text{yr}$



質量流束は最大速度と対応



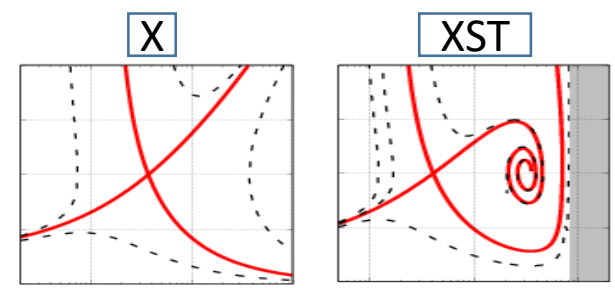
最大速度は MLF と対応

ダークマターハロー質量分布は赤方偏移と星質量から予想
(Behroozi et al. 2010, 2013; Bullock et al. 2001; Munoz-Cuartas et al. 2011).

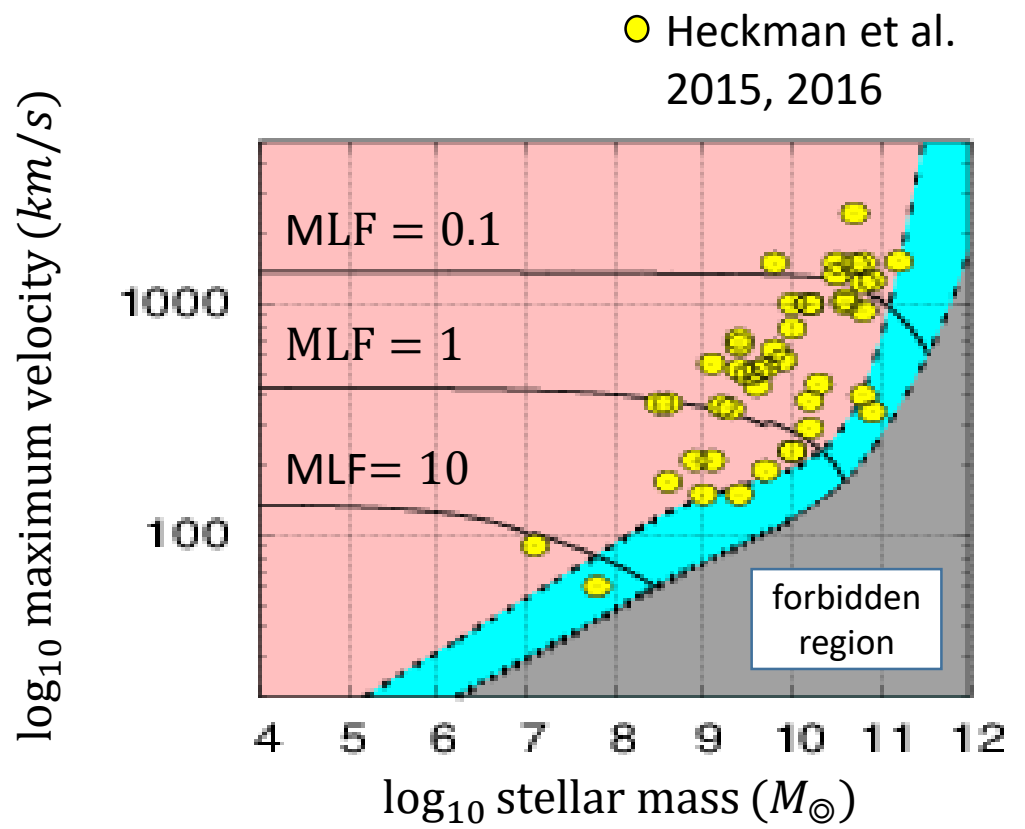
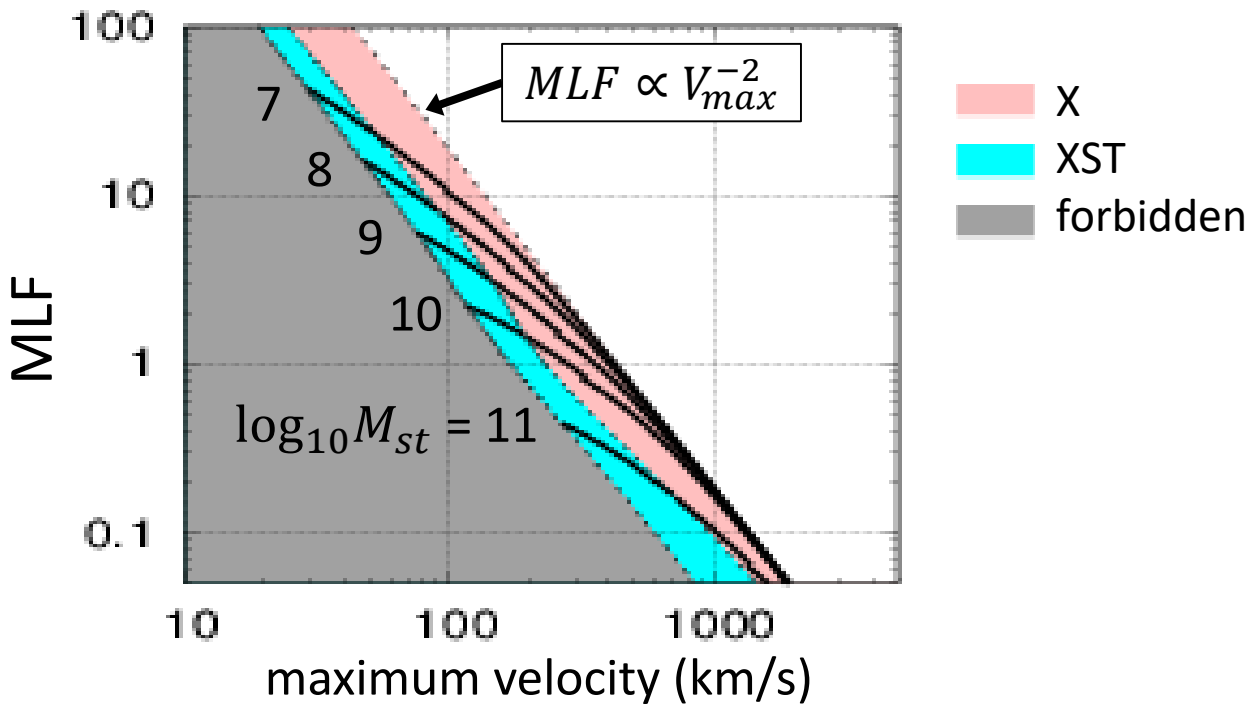
星質量分布は赤方偏移と星質量から予想 (Shibuya et al. 2015).

Result: 速度分布と mass loading factor (MLF)

$MLF = \dot{M} / SFR$



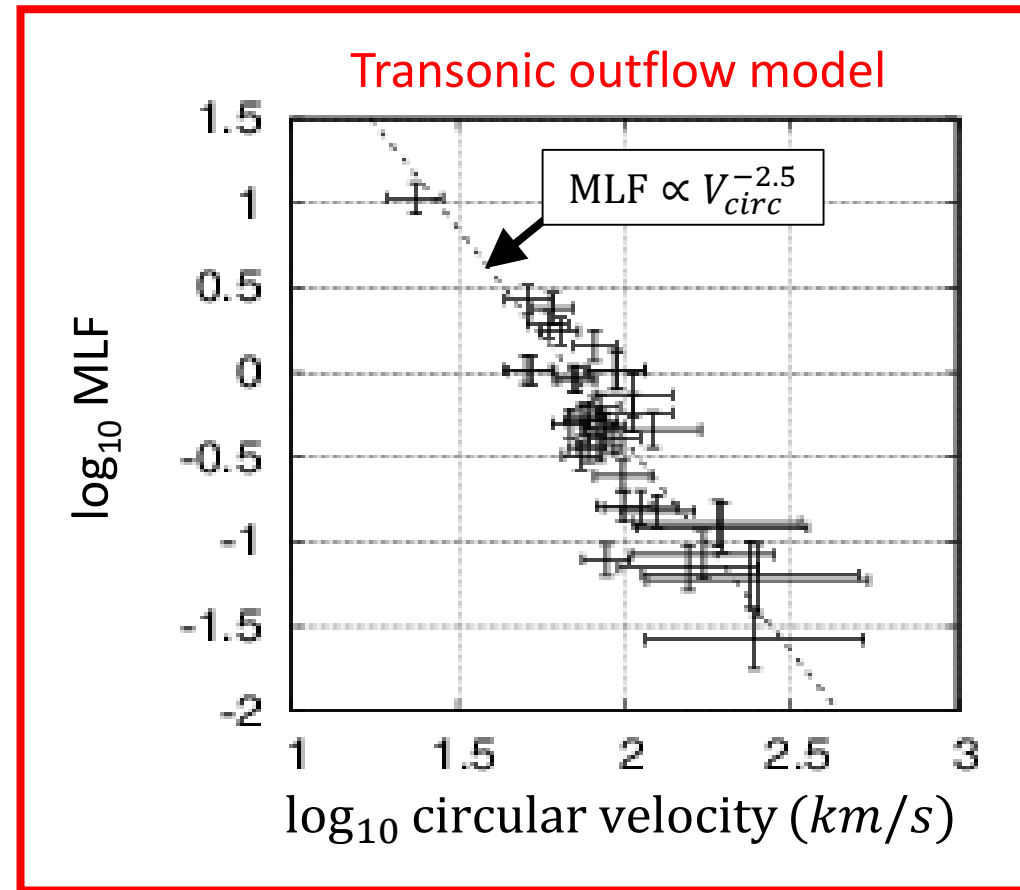
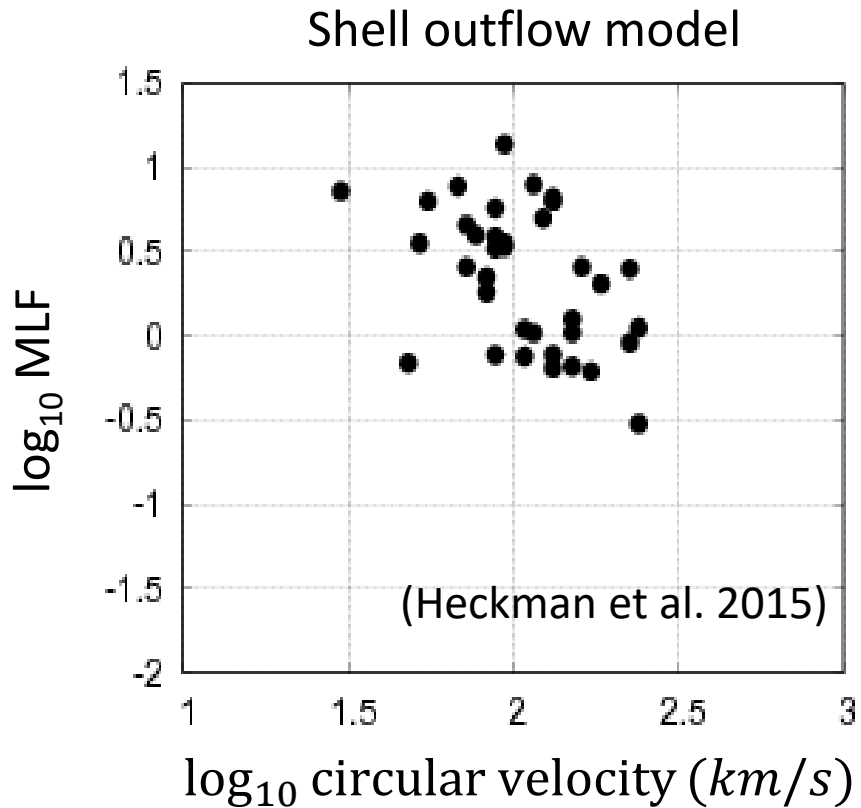
(星質量ごとに) 最大速度と MLF の関係进行评估



⇒ 遷音速銀河風モデルと観測された最大速度から MLF を評価

Result: Shell outflow model との比較

$$\text{MLF} = \dot{M} / \text{SFR}$$

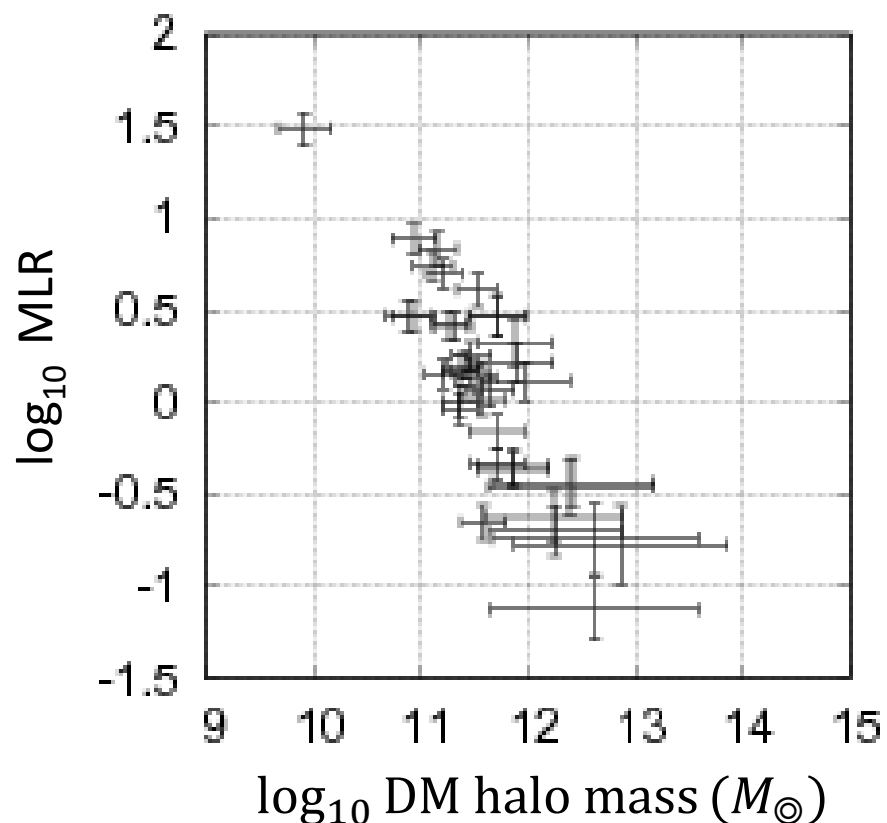


mass loading factor (MLF) を観測された最大速度から評価
→ **MLF はダークマターハロー質量に強く依存 ($\text{MLF} \propto V_{\text{circ}}^{-2.5}$)**

Result: ダークマターハロー質量への依存性

mass loading rate (MLR): SNeII からの ejected mass と massflux の比
星間ガスの流出効率を示す

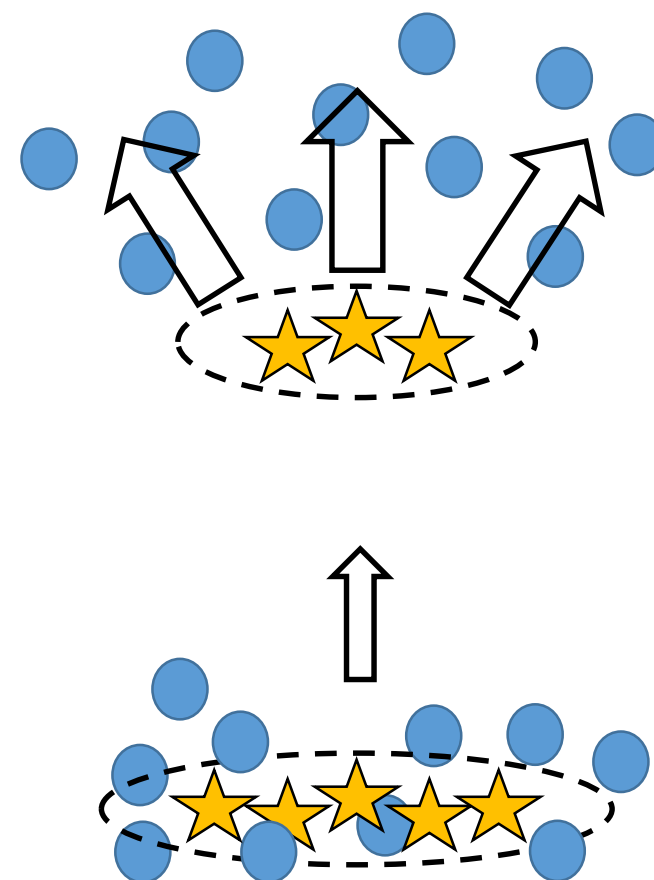
$$\text{MLR} \equiv \dot{M} / \dot{M}_{\text{SNeII}} (\propto \text{MLF}) \quad (\dot{M}_{\text{SNeII}} \propto \text{SFR})$$



$M_{\text{DMH}} \ll 10^{11.5} M_{\odot}$: $\text{MLR} \gg 1$
星間ガスの流出効率が高い
(星形成が抑制されやすい)

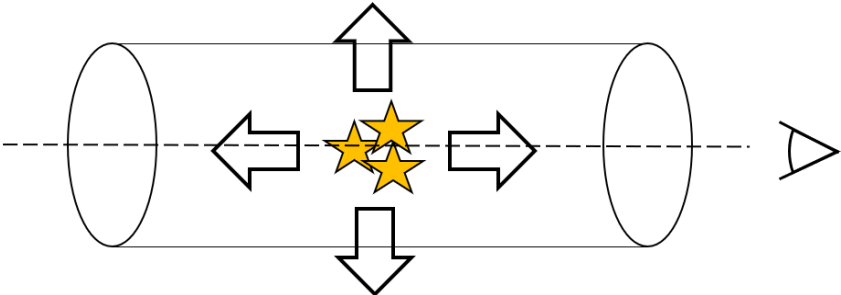
$M_{\text{DMH}} \sim 10^{11.5} M_{\odot}$: $\text{MLR} \sim 1$
SNeII からの ejected mass が
そのまま出てくる

$M_{\text{DMH}} \gg 10^{11.5} M_{\odot}$: $\text{MLR} \ll 1$
ガス流出の効率が低い

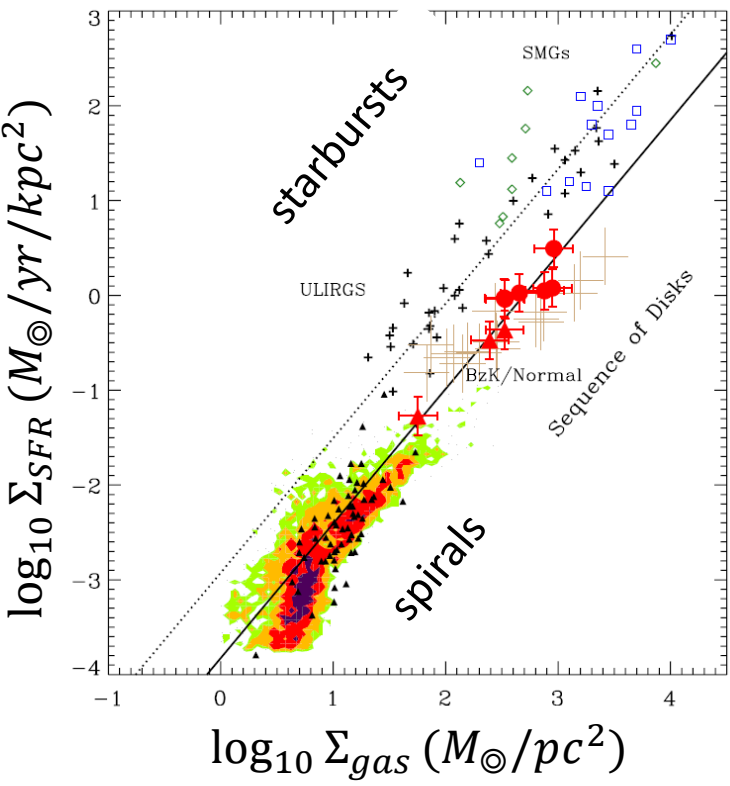
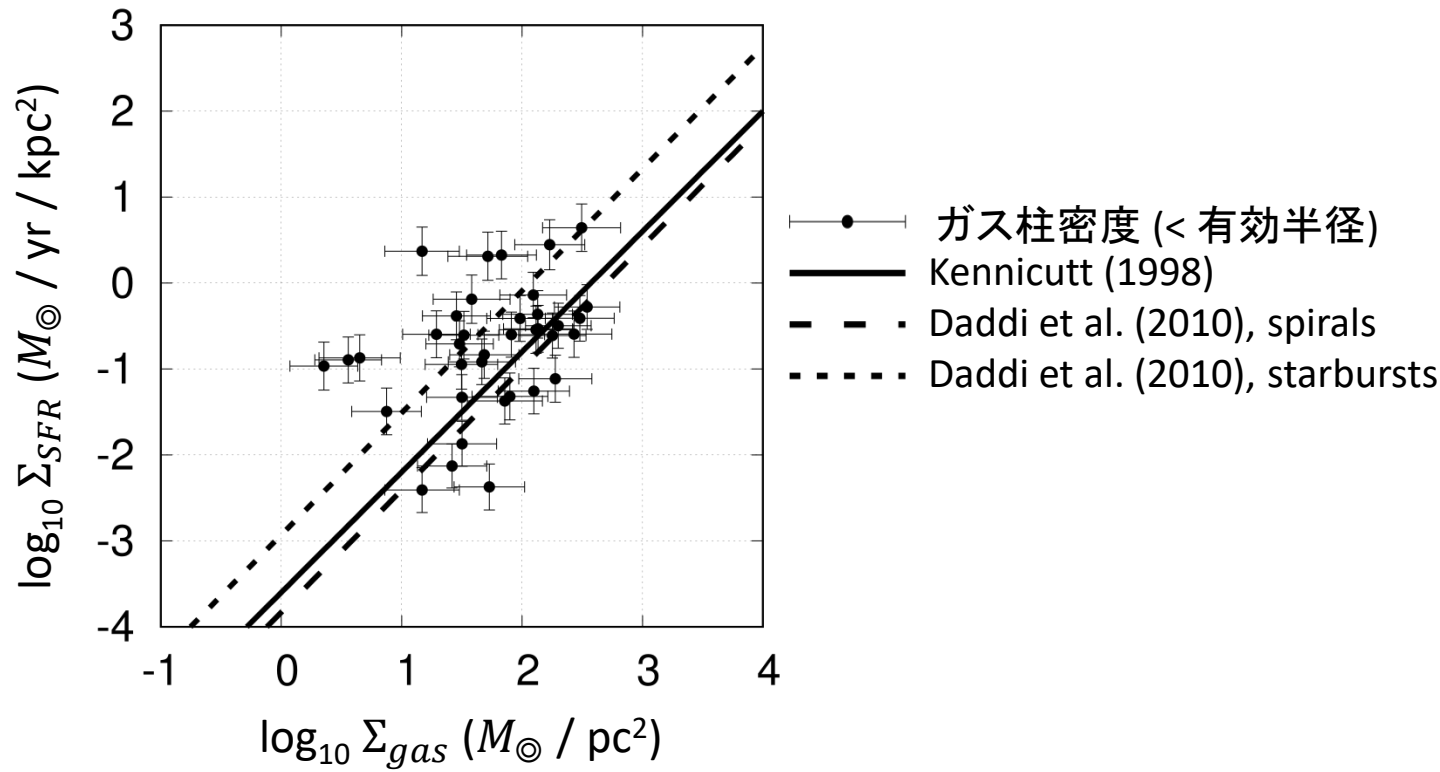


discussion: ガス柱密度

質量流束からガス柱密度が予想できる
Kennicutt-Schmidt law と比較



Kennicutt-Schmidt law for
spirals and starbursts
(Daddi et al. 2010)



遷音速モデルで予想されたガス柱密度は (starburst galaxies の) Kennicutt-Schmidt law と矛盾しない

Conclusion

- 遷音速銀河風モデルでは、mass loading factor (MLF)はダークマターハロー質量に強く依存することが予想される。
- MLF を (ハロー質量と) 観測された最大速度から評価した。
- ダークマターハロー質量が $\sim 10^{11.5} M_{\odot}$ より小さい銀河では、mass loading rate が1より大きい。これは、小質量銀河で星間ガスの流出効率が低いことを示す。より重い銀河では、流出効果が低くなる。
- モデルから予想される column density は、Kennicutt-Schmidt law と矛盾しない。

Transonic outflow model

adiabatic spherically-symmetric steady model

1. equation of continuity $\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (\rho v r^2) = \dot{\rho}_m$

2. equation of motion $\rho v \frac{dv}{dr} = -\frac{dP}{dr} + \rho g - \rho \dot{m} v$

3. energy equation $\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left\{ v r^2 \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{\Gamma}{\Gamma-1} P \right) \right\} = \rho v g + \dot{q}$

r : radius
 v : velocity
 ρ : density
 c_s : sound speed
 P : pressure
 g : gravity
 M : Mach number
 Γ : specific heat ratio
 $\dot{\rho}_m$: mass injection
 \dot{q} : energy injection

$\Rightarrow \frac{M^2 - 1}{M^2 \{(\Gamma - 1)M^2 + 2\}} \frac{dM^2}{dr} = \frac{2}{r} - \frac{\Gamma + 1}{2(\Gamma - 1)} \frac{\dot{m}}{\dot{e} - \dot{m}\Phi} \frac{d\Phi}{dr} - \frac{\Gamma M^2 + 1}{2} \frac{\dot{e} - 2\dot{m}\Phi}{\dot{e} - \dot{m}\Phi} \frac{1}{\dot{m}} \frac{d\dot{m}}{dr}$

mass flux $\dot{m} \equiv 4\pi\rho v r^2$

energy flux $\dot{e} \equiv \left\{ \frac{1}{2} v^2 + \frac{1}{\Gamma-1} c_s^2 + \Phi \right\} \dot{m}$

assuming mass and energy injected by SNeII

assuming the gravity of dark matter (DM) halo and stellar mass

mass and energy injections

$$\dot{\rho}_m = \lambda_{MLF} (SFR/M_{st}) \rho_{st}$$

$$\dot{q} = e_{SN} (SFR/M_{st}) \rho_{st}$$

e_{SN} : injected energy per stellar mass
 (= $0.1 \times 1.86 \times 10^{-2} \times 10^{51}$ erg)

λ_{MLF} : mass loading factor (=massflux/SFR)

stellar mass distribution (Hernquist 1990)

$$\rho_{st}(r) = \frac{M_{st}}{2\pi} \frac{r_H}{r} \frac{1}{(r + r_H)^3} \quad \left(r_H = \frac{r_{1/2}}{1 + \sqrt{2}} \right)$$

M_{st} : total stellar mass
 r_H : scale radius
 $r_{1/2}$: half light radius

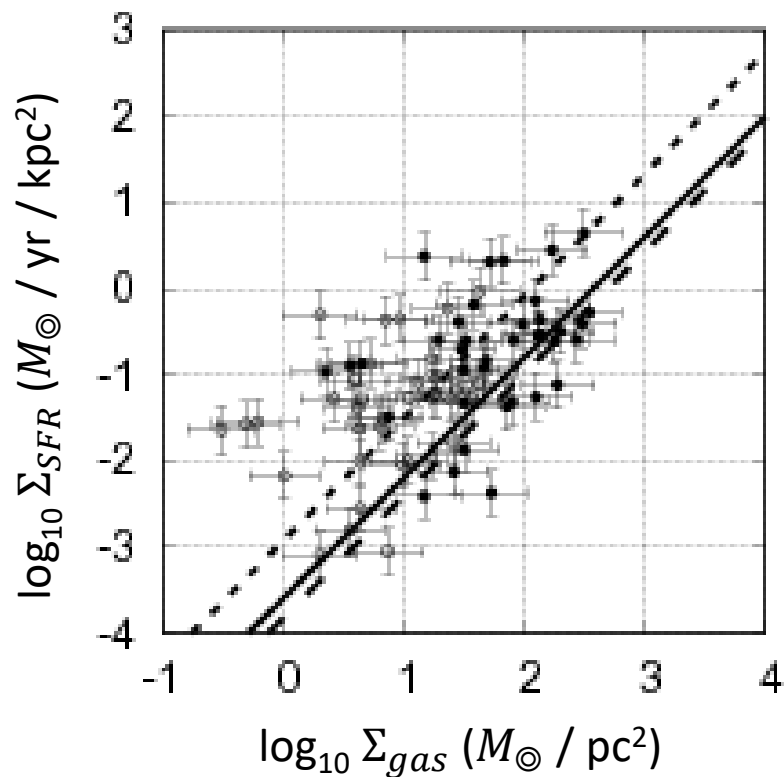
DM halo mass distribution indicated by CDM scenario (Navarro et al. 1996)

$$\rho_{DMH}(r) = \frac{\rho_{dmh} r_{dmh}^3}{r(r + r_{dmh})^2}$$

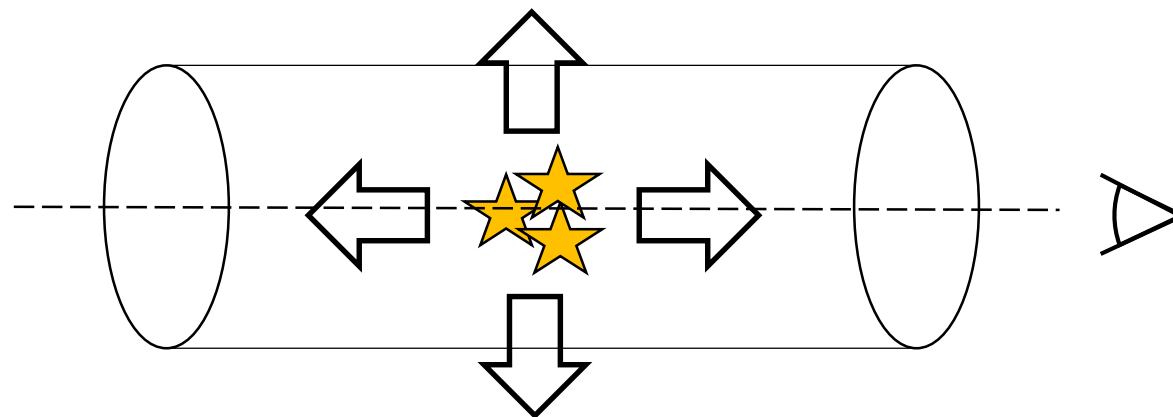
r_{dmh} : DM halo scale radius
 ρ_{dmh} : DM halo scale density

discussion: ガス柱密度

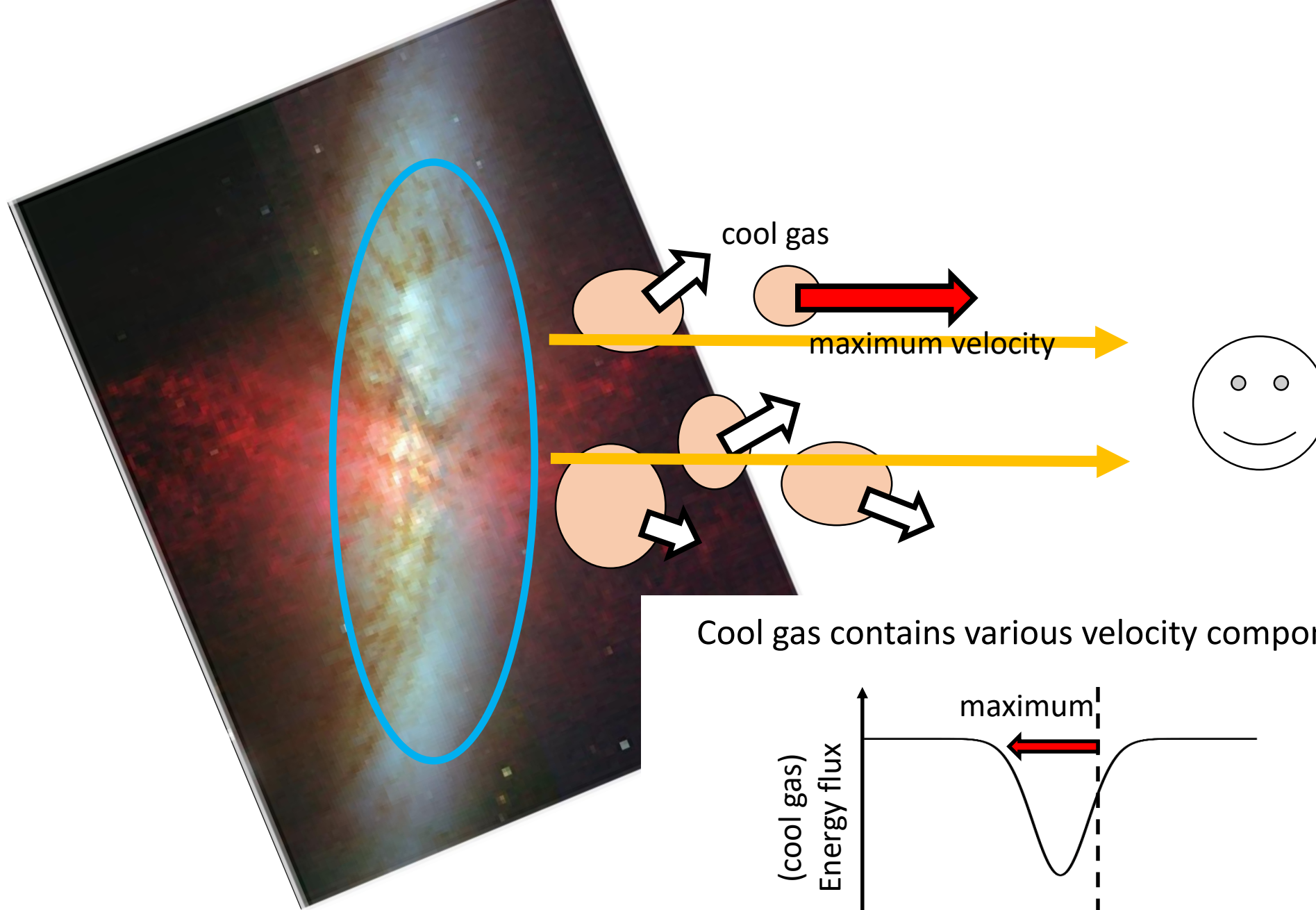
質量流束からガス柱密度が予想できる
Kennicutt-Schmidt law と比較



- ガス柱密度 (< 有効半径)
- ガス柱密度 (< 2.68 x 有効半径)
- Kennicutt (1998)
- - - Daddi et al. (2010), spirals
- ... Daddi et al. (2010), starbursts



遷音速モデルで予想されたガス柱密度は (starburst galaxies の) Kennicutt-Schmidt law と矛盾しない



Cool gas contains various velocity components.

