

The Systematic Properties of the Warm Phase of Starburst-Driven Galactic Winds

Timothy M. Heckman, Rachel M. Alexandroff, Sanchayeeta Borthakur, Roderik Overzier, and Claus Leitherer
Heckman, T. M. et al. 2015, ApJ, 809, 147

- アウトフロー速度は星形成率面密度とsSFRによく相関する
- 質量放出率はSFRの1-4倍
- アウトフローの強度を判別する閾値 R_{crit} の導入
- 弱いアウトフローはどの理論予測やモデルとも合わない

The Implications of Extreme Outflows from Extreme Starbursts

Timothy M. Heckman and Sanchayeeta Borthakur

Heckman, T. M. and Borthakur, S. 2016, arXiv e-prints, arXiv:1603.03036

- 並外れて大きなアウトフロー速度を持つ銀河もH15の傾向の上に乗る
- 星形成銀河のアウトフローの宇宙論的進化とインフローの見えにくさについて考察

導入

アウトフロー

説明 超新星爆発により駆動され銀河から吹き出るガス

効用 星形成フィードバック、重元素損失、CGM・IGM進化

理論と観測

理論 第一原理からの銀河形成は現実的でない 単純な関係を与える

観測 cool & warm gasはスペクトル中の金属吸収線で調査可能

確定的な経験則を与えるまでには至っていない

この論文は

UV分光観測データを用いて、

広いパラメータ空間(星質量、アウトフロー速度など)において、

低赤方偏移の母銀河とアウトフローの物理量の関係を導く

サンプル (1)

A. Lyman Break Analogs Heckman+11, Alexandroff+15

観測装置: HST/COS、天体数: 21個、赤方偏移: $z < 0.2$

性質: 高赤方偏移 $z \sim 3-4$ の典型的な LBG に類似

B. UV-bright low-z galaxies Grimes+09, Heckman+01

観測装置: FUSE、天体数: 19個、赤方偏移: $z < 0.2$

性質: 低赤方偏移の典型、Aよりも小さい星質量、SFR、金属量

C. Extreme starbursts Diamond-Stanic+12, Sell+14

観測装置: MMT+SDSS、天体数: 9個、赤方偏移: $z \sim 0.4-0.7$

性質: 速いアウトフロー速度、高いSFR、小さいサイズ

解析

水素柱密度

光学的に薄い金属吸収線

COS (stacked): SIII 1012, OI 1039, SIV 1063,
FeII 1145, 1608, AlII 1670

FUSE: SIII 1012, SiII 1021, OI 1039, SIV 1063,
FeII 1097, 1145

中性ガス: OI

電離ガス: SIII, SIV

COS: $N_{\text{HI}} < 10^{19.3}$, $N_{\text{HII}} = 10^{20.7}$

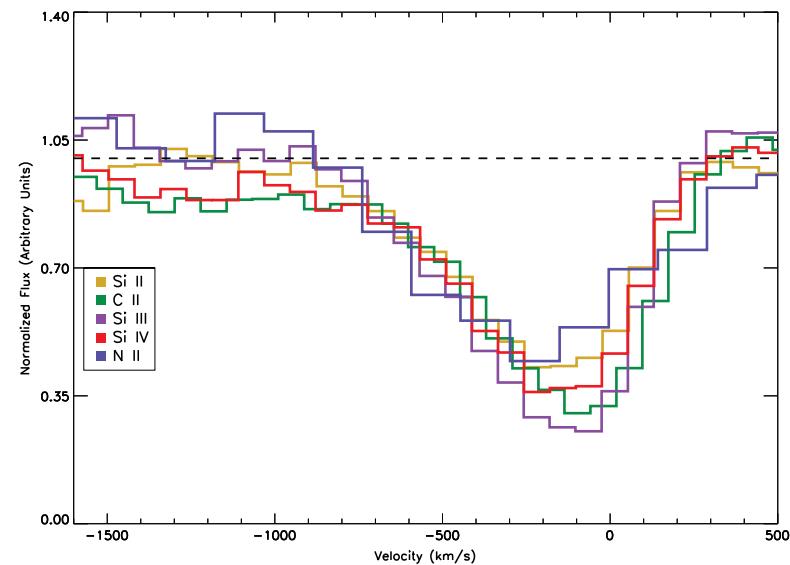
FUSE: $N_{\text{HI}} = 10^{19.6}$, $N_{\text{HII}} = 10^{20.6}$

アウトフロー速度

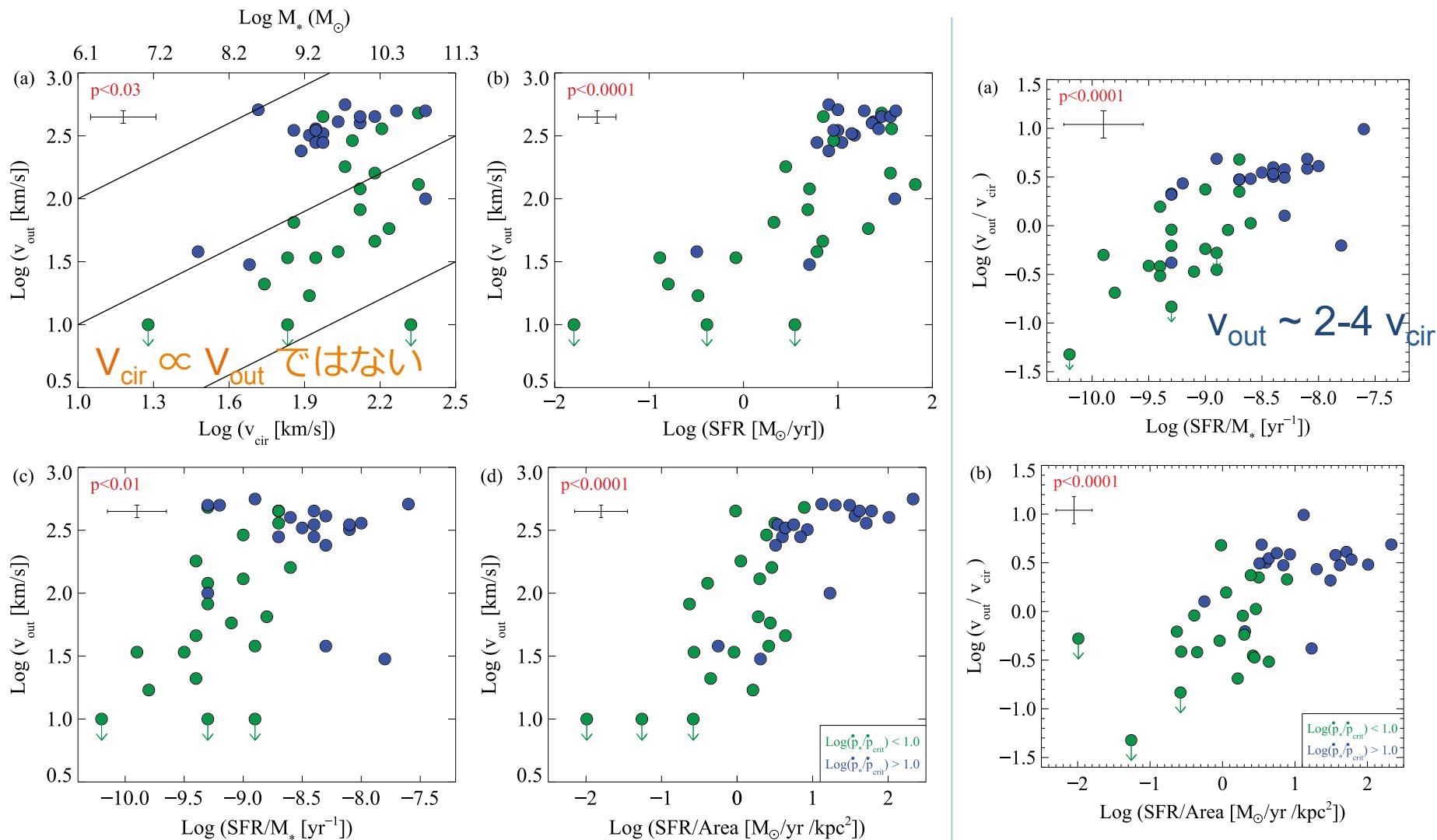
COS: Si III 1206

FUSE: (CIII 977+NII)/2

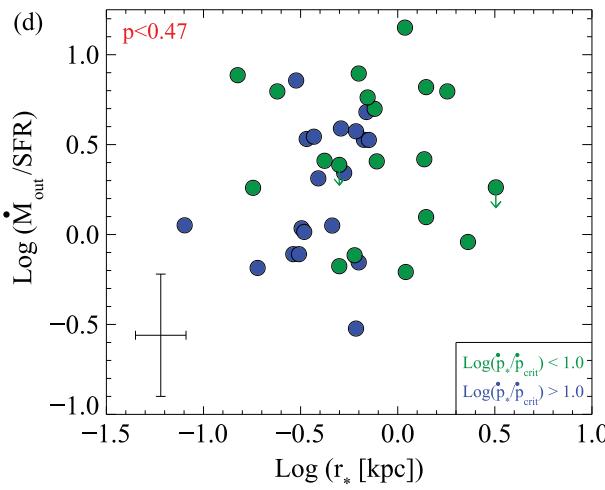
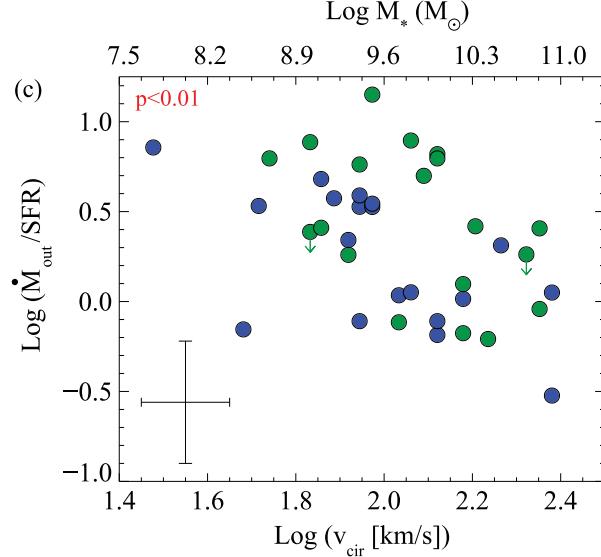
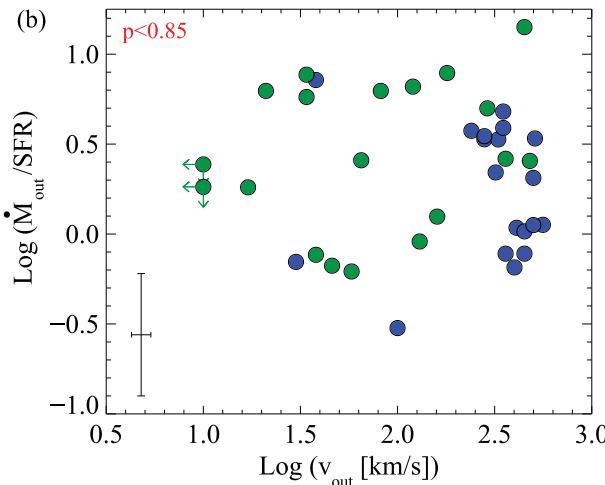
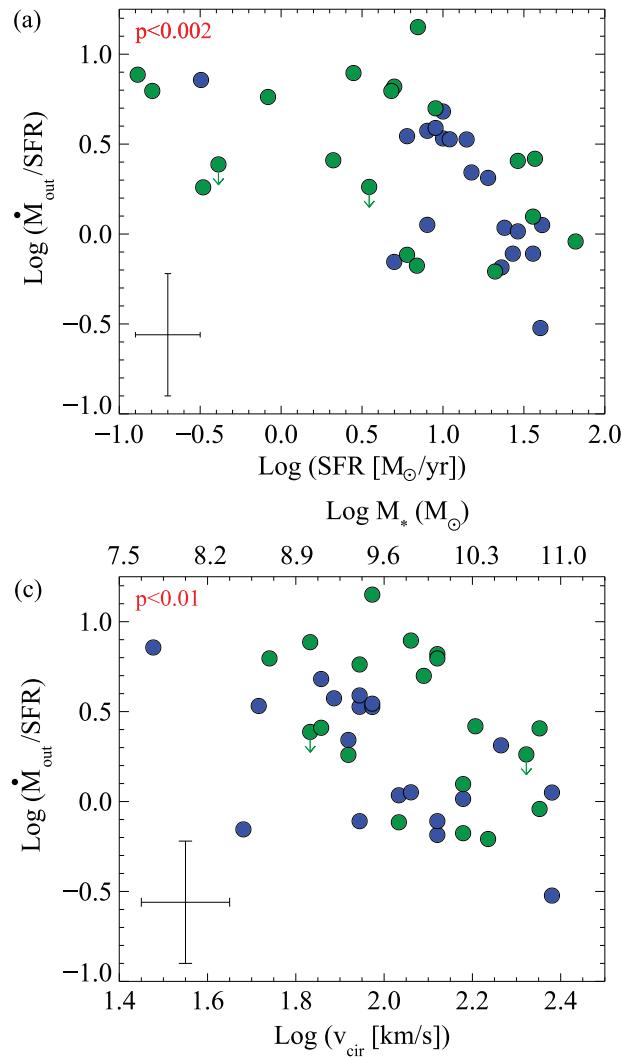
flux-weighted line centroid



結果1 – アウトフロー速度



結果2 – Mass Loading Factor



質量放出率

$$\dot{M} = \Omega N_{\text{out}} \langle m \rangle v_{\text{out}} r_{\text{out}}$$

$$\Omega = 4\pi$$

$$N_{\text{H}} = 10^{21.0} \text{ cm}^{-2}$$

A uniform radius of $2 r_*$

質量放出率はSFRの1-4倍

運動量駆動アウトフロー (1)

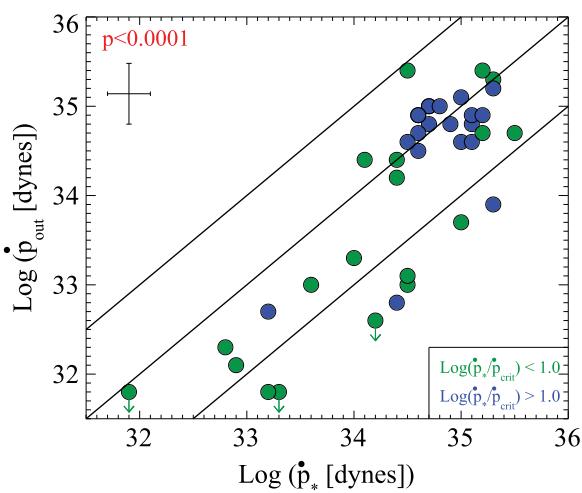
アウトフロー運動量

$$\dot{p}_{\text{out}} = \dot{M} v_{\text{out}}$$

全運動量フラックス

$$\dot{p}_* = 4.8 \times 10^{33} \text{ SFR}$$

(超新星起源の運動量)



Clouds Model

放射

$$F_{\text{out}} = A_c \dot{p}_* / 4\pi r^2.$$

重力

$$F_{\text{in}} = M_c v_{\text{cir}}^2 r^{-1}$$

平衡

$$\dot{p}_{\text{crit},c} = 4\pi r_* N_c \langle m \rangle v_{\text{cir}}^2.$$

cloud質量

$$M_c = A_c N_c \langle m \rangle$$

半径

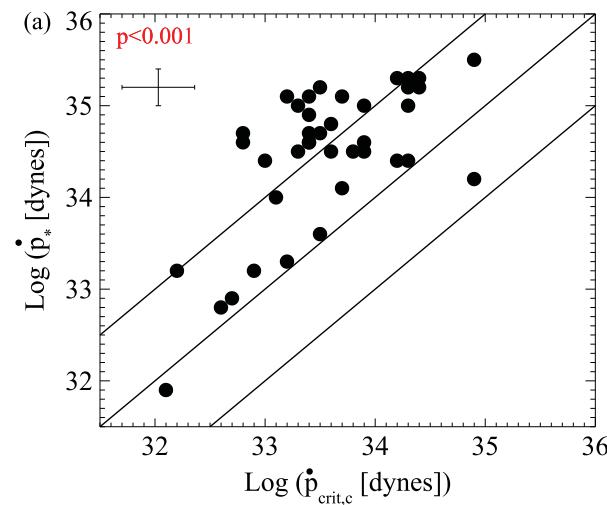
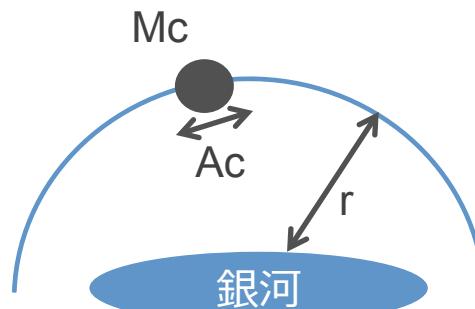
$$r = r_*$$

$\dot{p}_{\text{crit},c}$ is $10^{33.9}$ dynes

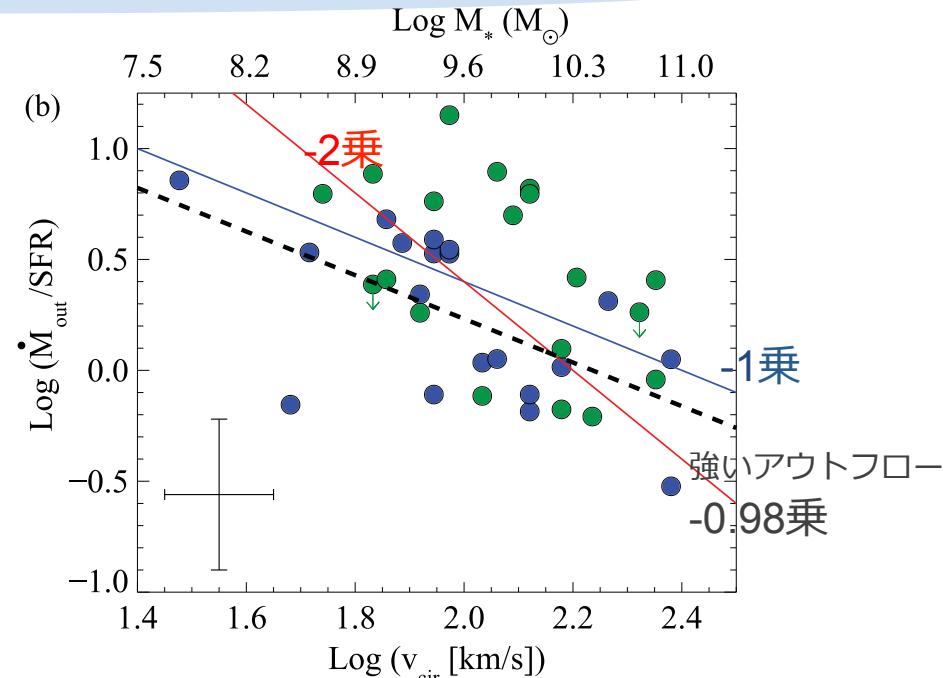
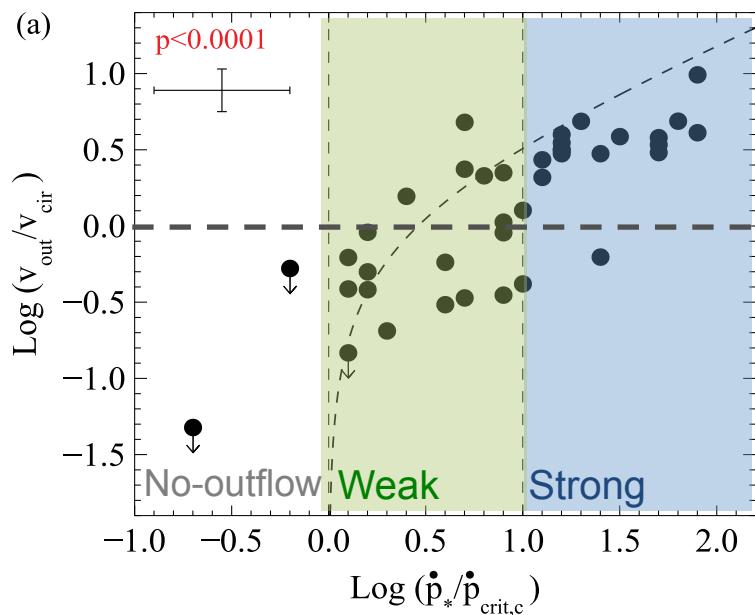
$$N_c = 10^{21} \text{ cm}^{-2}$$

$$r_* = 1 \text{ kpc}$$

$$v_{\text{cir}} = 100 \text{ km s}^{-1}$$



運動量駆動アウトフロー (2)



cloudの最大速度

$$v_{\max,c}/v_{\text{cir}} = \sqrt{2} [(R_{\text{crit},c} - 1) - \ln(R_{\text{crit},c})]^{1/2}.$$

アウトフロー強度の閾値

$$R_{\text{crit}} = \frac{\dot{p}_*}{\dot{p}_{\text{crit}}} : r_* \text{より遠くへ飛べるか?}$$

結論 (弱いアウトフローは...)

1. 脱出速度に達しない
2. $\dot{M}_{\text{out}}/\text{SFR}$ を説明するモデルがない
3. 運ぶ質量は「強い」と同じ

解析 (H16)

アウトフロー最大速度

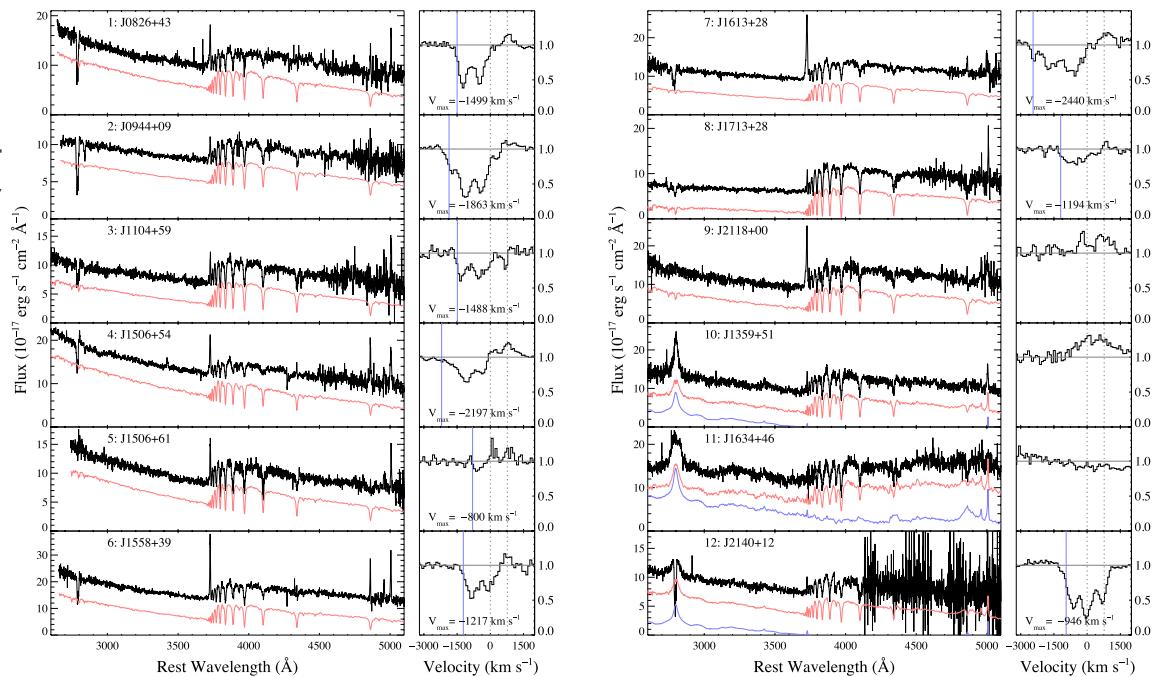
H16: MgII 2796, 2803

H15 (COS): SiII 1190 & CII 1334

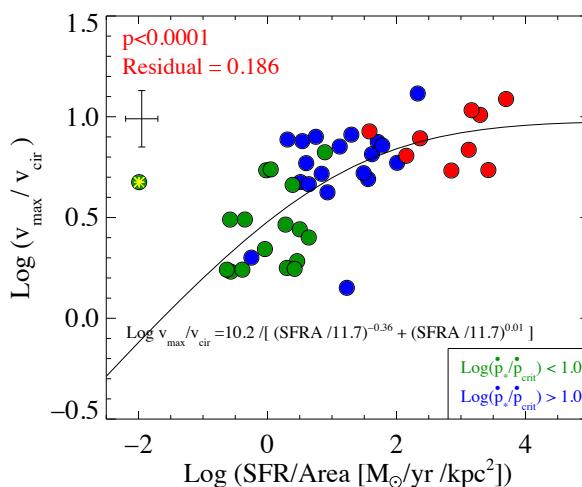
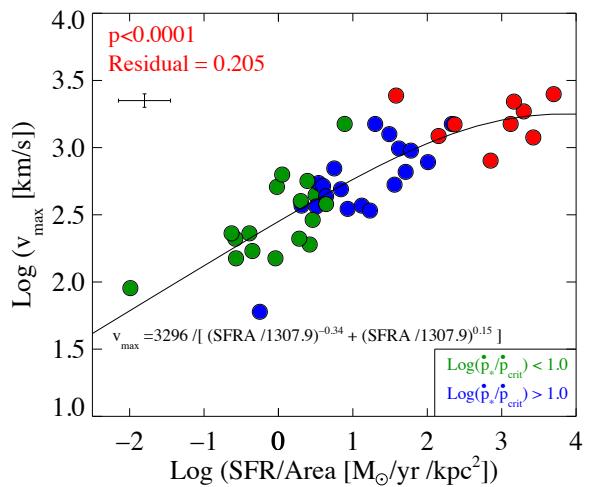
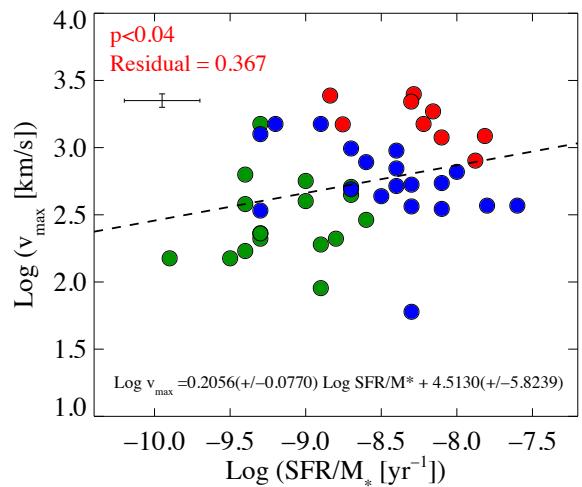
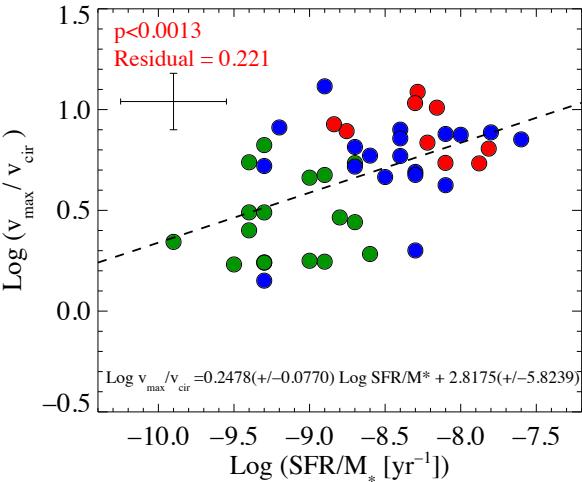
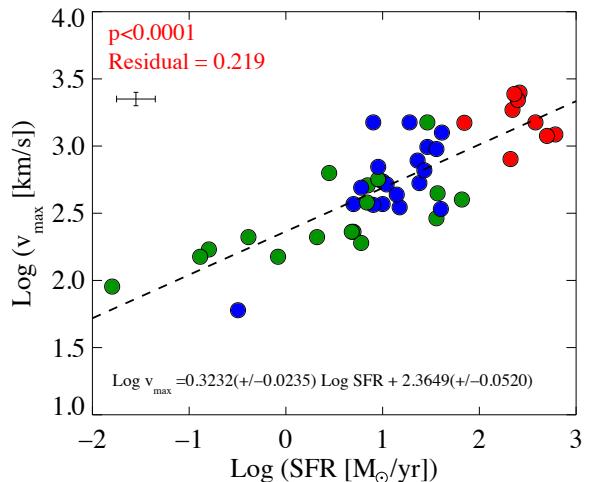
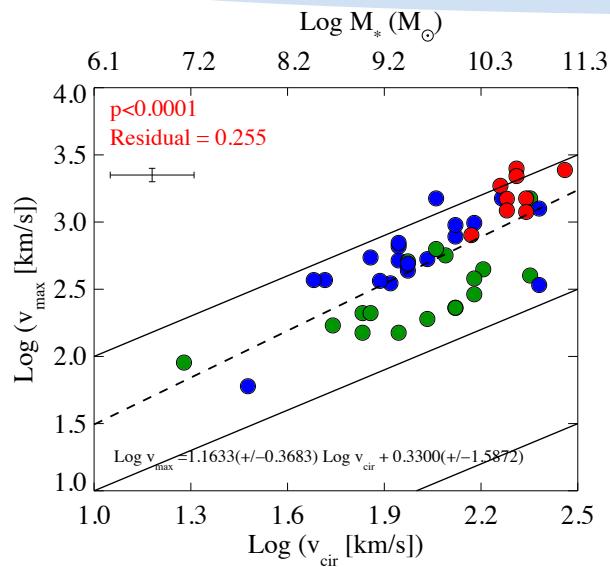
H15 (FUSE): CII 1036

Vmax: 全等価幅の98%に

到達するような速度



結果 (H16)



アウトフローの赤方偏移進化

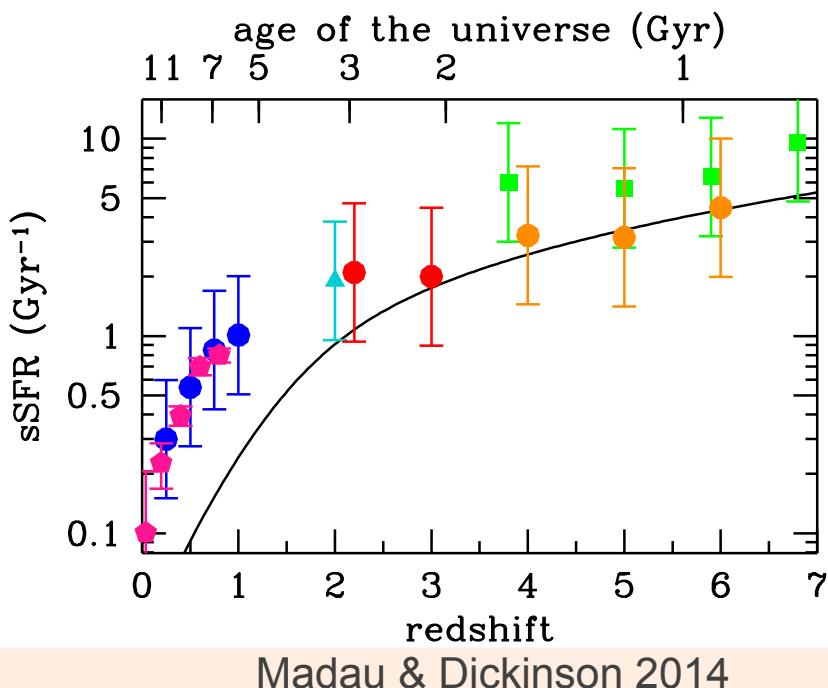
starburst領域の質量

$$v_{\text{cir}}^2 = \frac{G(M_{\text{sb}}/2)}{r_*} \iff M_{\text{sb}} = \frac{2v_{\text{cir}}^2 r_*}{G}$$

low-z: $M_{\text{sb}} < M_*$

$$R_{\text{crit}} = \frac{\dot{p}_*}{\dot{p}_{\text{crit}}} = \frac{k \times SFR}{\Omega r_* N_c \langle m \rangle v_{\text{cir}}^2} \propto \frac{SFR}{M_{\text{sb}}} = sSFR_{\text{sb}}$$

high-z: $M_{\text{sb}} \sim M_*$



主系列星形成銀河で

$$R_{\text{crit}} \sim \begin{cases} 0.3 & (z \sim 0) \\ 3 & (z \sim 1) \\ 5 & (z \sim 2) \\ 13 & (z \sim 4 \text{to} 7) \end{cases}$$

high-z では強いアウトフロー

インフローガス

インフローの柱密度

$$R_{\text{crit}} = \frac{\dot{p}_*}{\dot{p}_{\text{crit}}} = \frac{k \times SFR}{\Omega r_* N_c \langle m \rangle v_{\text{cir}}^2} \propto \frac{SFR}{M_{\text{sb}}} = sSFR_{\text{sb}}$$

low-z: $M_{\text{sb}} < M_*$

柱密度が十分大きくないと落ちてこない

high-z: $M_{\text{sb}} \sim M_*$

$$N_{\text{inflow}} > N_{\text{crit}} \propto sSFR_{\text{sb}}$$

普通のダスト/金属量比(Mattson+14)とダスト減光(Calzetti+00)を仮定

$$A_{\text{farUV}} = 25Z/Z_\odot$$

極端に金属量が小さくない限り、

rest-farUVでインフローを見ることはできない

結論

サンプル: 幅広いパラメータ空間に属する星形成銀河

手法: UVスペクトル中の金属吸収線の青方偏移を見る

結果と議論:

- アウトフロー速度は星形成率面密度とよく相関がある
- アウトフローの強さを判別する R_{crit} の考慮が必要
($R_{\text{crit}} > 10$: 強いアウトフロー、 $1 < R_{\text{crit}} < 10$: 弱いアウトフロー)
- 強いアウトフローは運動量駆動モデルに合う
- 弱いアウトフローはどのモデルにも合わない
- 並外れた強さのアウトフローもH15の関係に乗る
- アウトフローはhigh-zにいくにつれ平均的に強くなる
- インフローは大きな柱密度が必要でfar-UVでは見えない