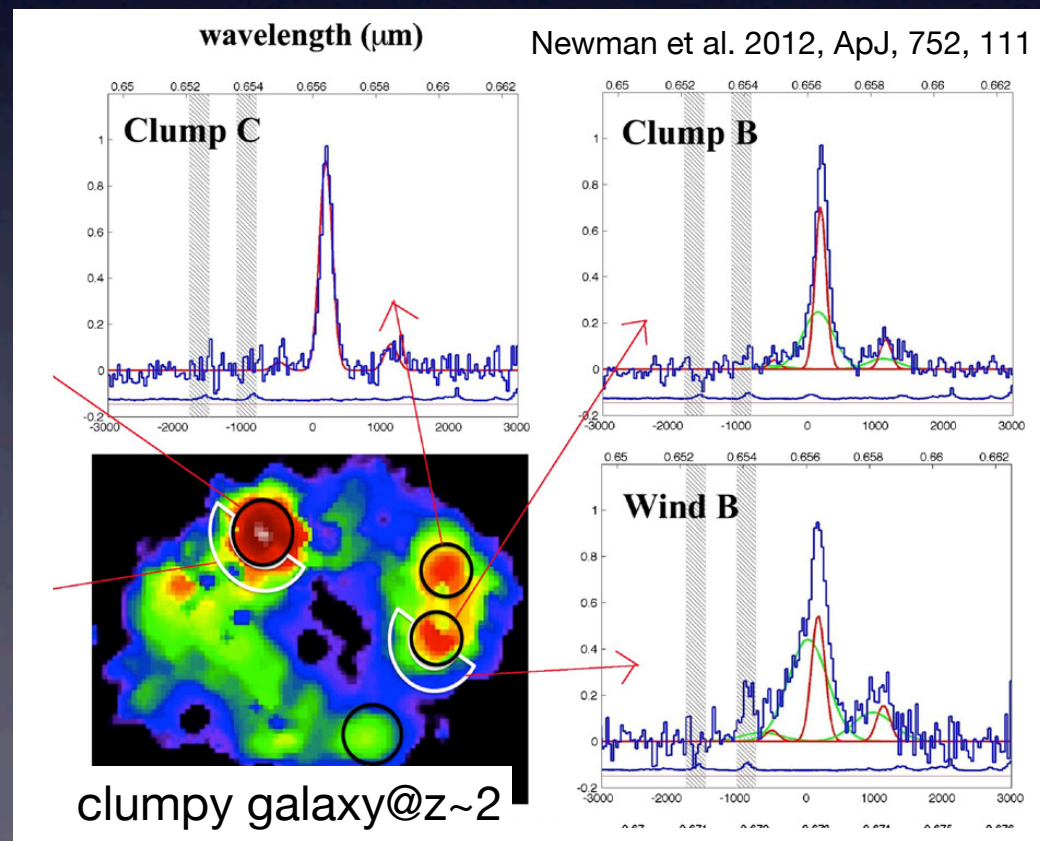
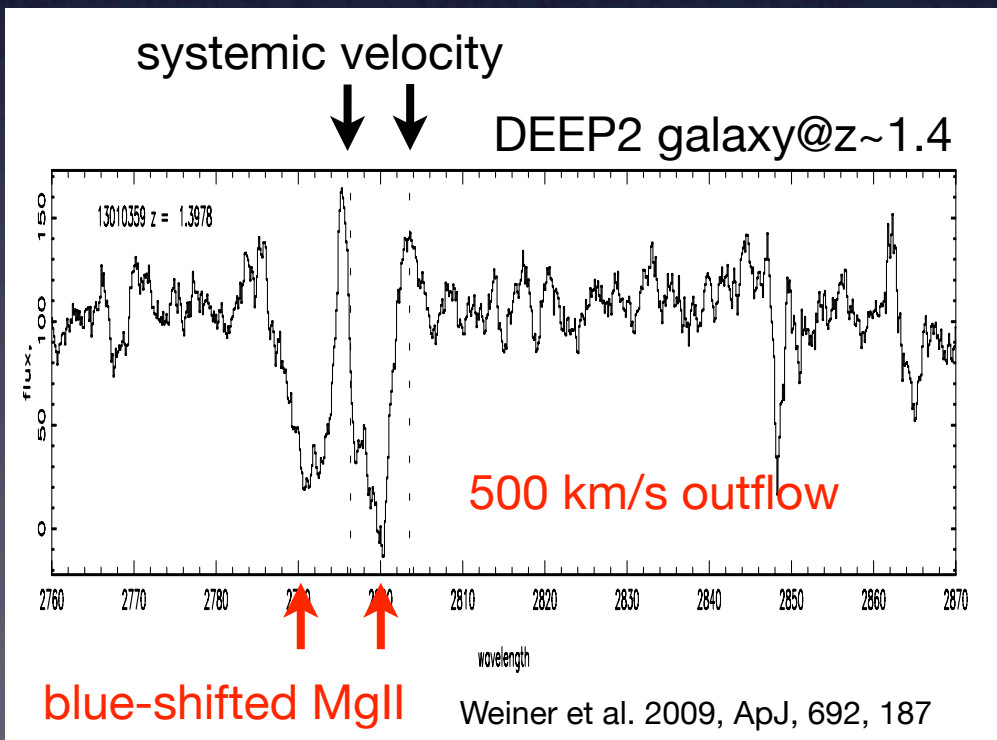


$z=1-2$ におけるガスのinflow/outflow rateへの制限

- 矢部清人(国立天文台)、太田耕司、岩室史英(京都大学)、秋山正幸(東北大学)、田村直之、Yuma Suraphong (東京大学)、ほかFMOS GTOチーム

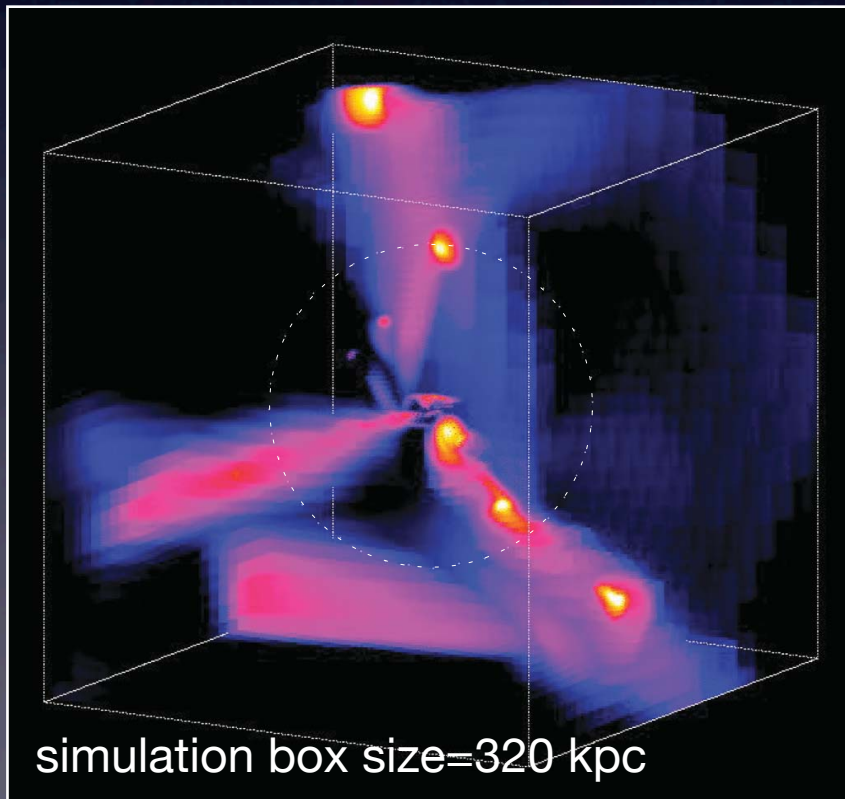
イントロダクション:

- 銀河進化を議論する上でガスの流入(inflow/in-fall)や流出(outflow)を考えることは重要
- closed boxモデルでは説明できない問題 (G-dwarf問題など)
- high-zにおけるoutflowの観測
 - z=1-2では>数100 km/sのoutflowが普遍的に見られる (e.g., Weiner et al. 2009)
 - clump部分でoutflowの兆候有り? (Newman et al. 2012)
 - SFRと同程度かそれ以上のoutflow rate (e.g., Weiner et al. 2009, Steidel et al. 2010)



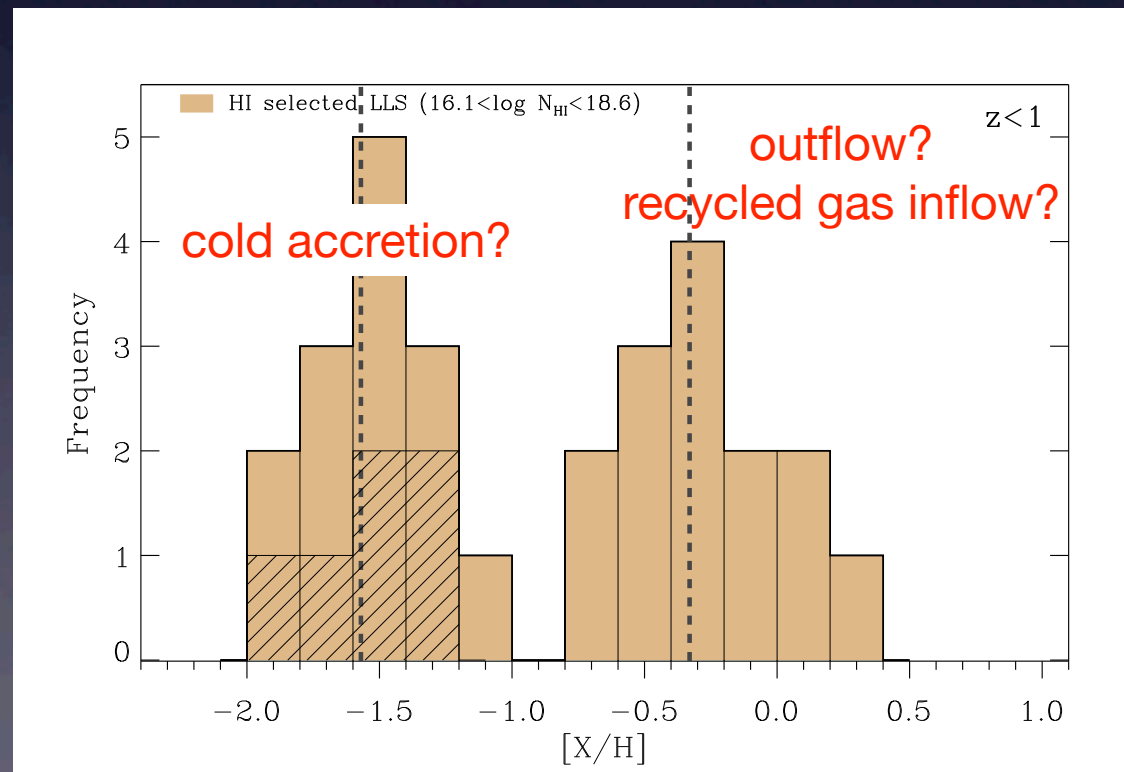
イントロダクション：

- 銀河の成長の主要なプロセスとしてIGMからのガス降着(cold accretion)が注目
- 低金属量のQSO吸収線系はIGMからのcold gasを見ている？ (Lehner et al. 2013)
- より直接的な観測的な例はほとんどない
 - 低密度・低金属量のガスにより吸収線が弱い
 - 速度差が小さいので高分解能な分光観測が必要
- 別のアプローチが必要か



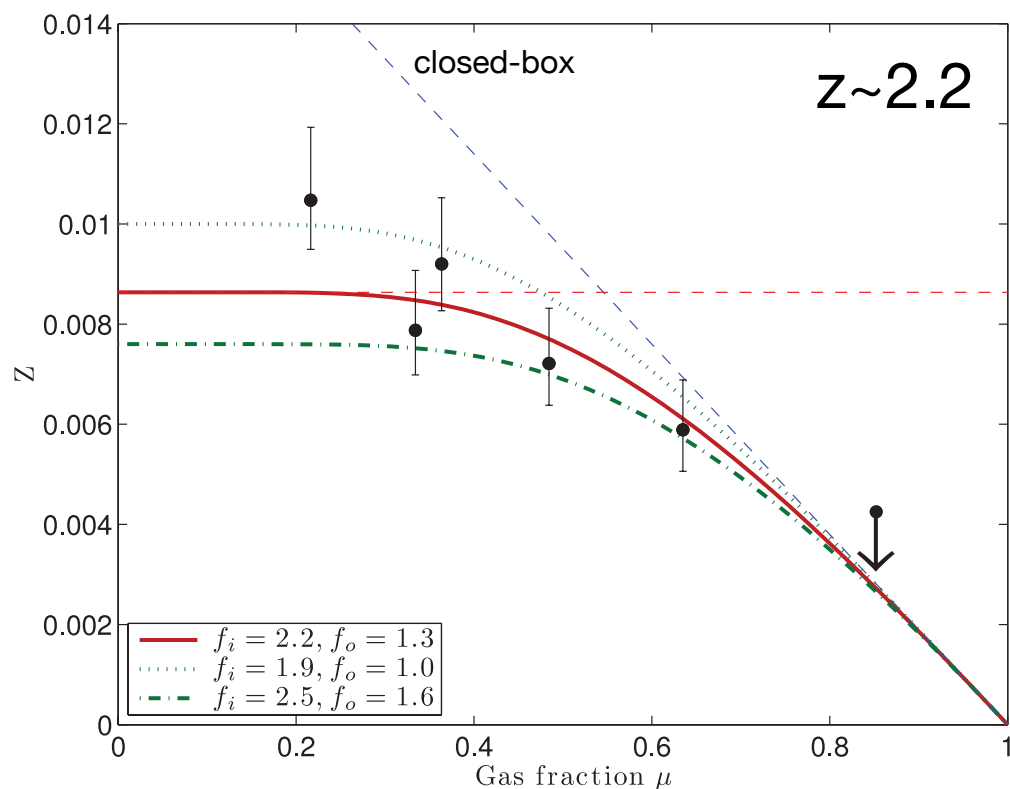
Dekel et al. 2009, Nature, 457, 451

↓ $z < 1$ の LLS の金属量分布 (Lehner et al. 2013, ApJ, 770, 138)

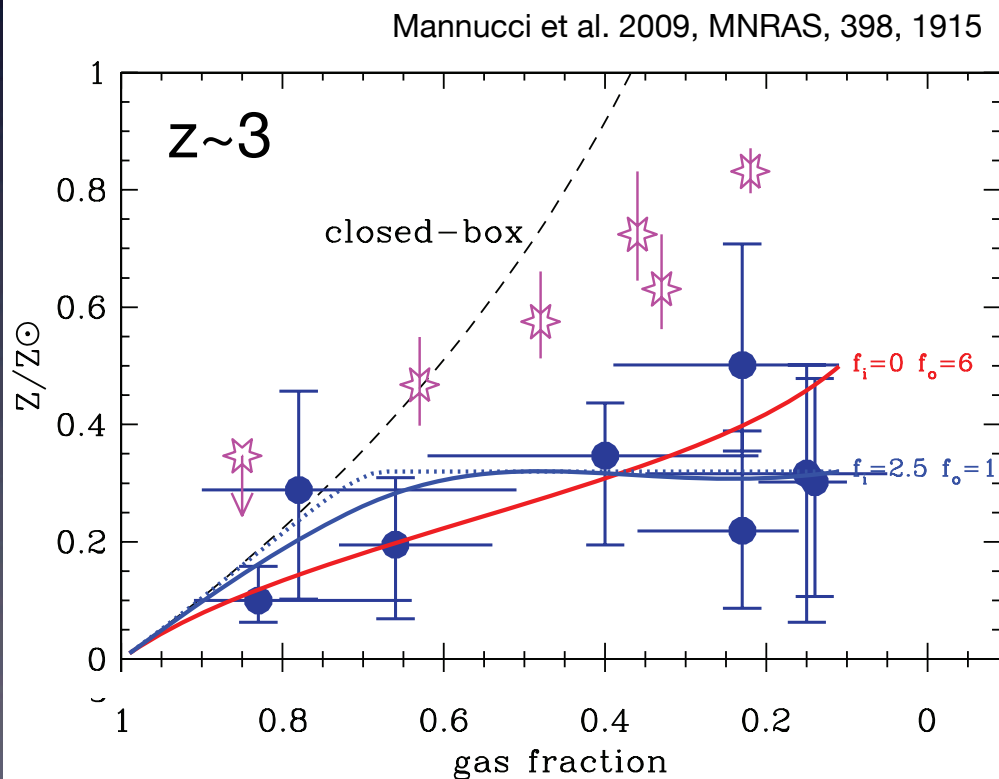


イントロダクション：

- 星質量、ガス質量フラクション、金属量というパラメータを用いて制限を与える試み
- Erb et al. 2006, Erb 2008 ($z \sim 2$), Mannucci et al. 2009 ($z \sim 3$)
 - 解析的化学進化モデルによりフィッティング
 - $z > 2$ ではinflowやoutflowがある程度必要
- ただしサンプル数が少ないという問題点がある
- 我々は $z \sim 1.4$ において大規模なサンプル構築した

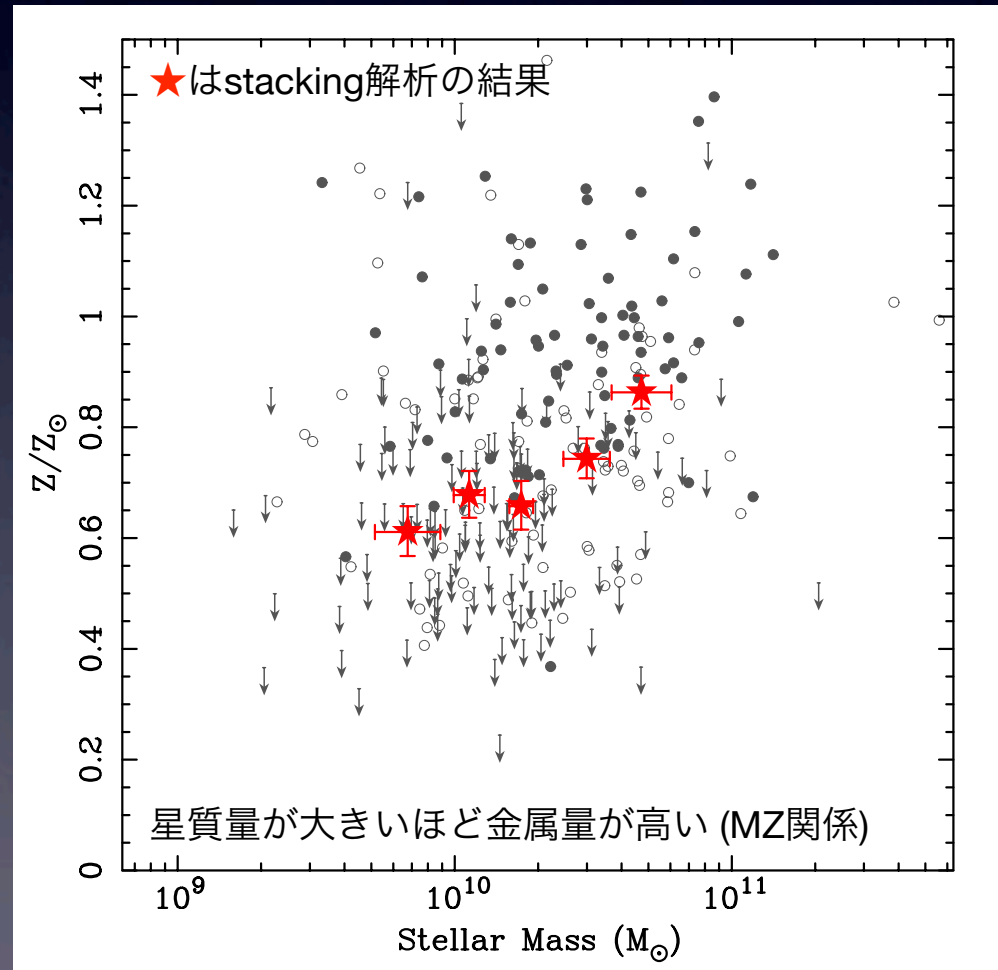
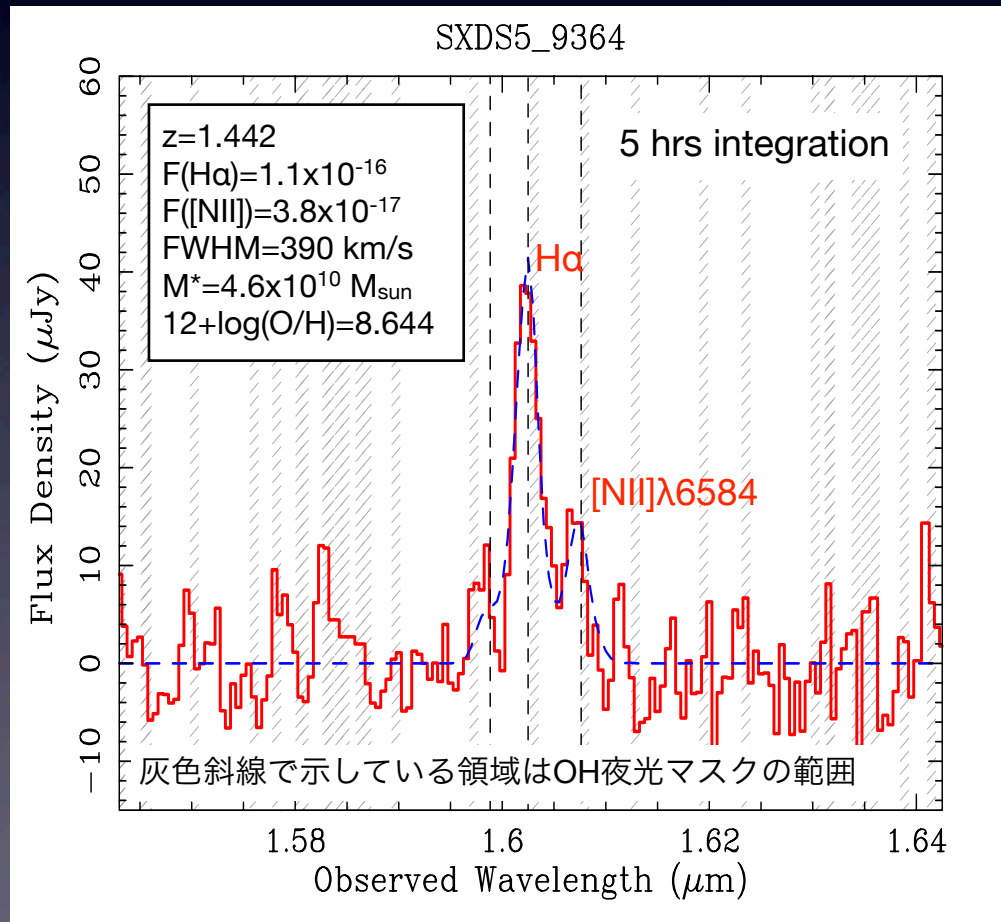


Erb 2008, ApJ, 674, 151



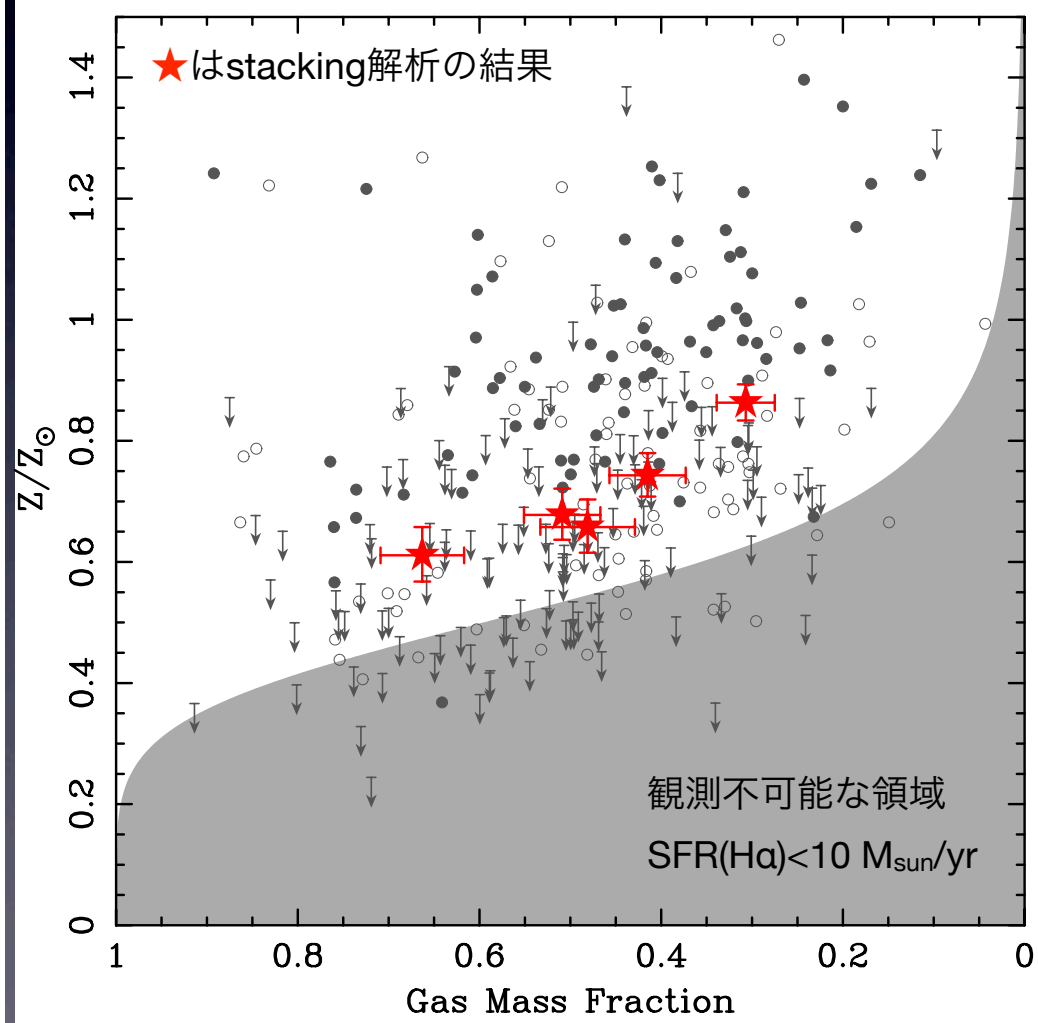
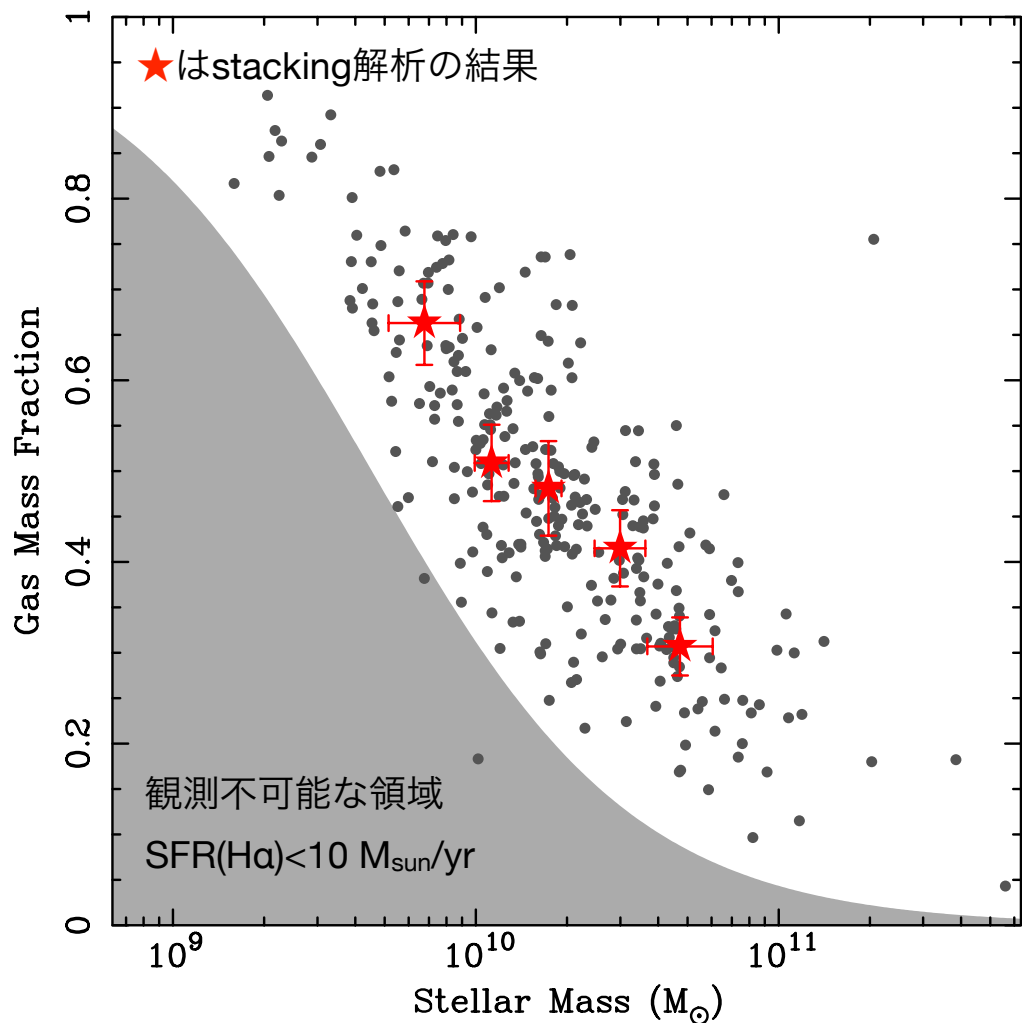
サンプルと観測：

- K-selected phot-zサンプル@SXDS/UDS
- $K < 23.9$ 等、 $1.2 < z_{ph} < 1.6$ 、 $M_* > 10^{9.5} M_{sun}$ 、expected $F(H\alpha) > 5 \times 10^{-17}$ erg/s/cm²
- すばる望遠鏡FMOSによる近赤外分光観測 (Yabe et al. 2012; Yabe et al. submitted)
- $z \sim 1.4$ において約340個のH α 検出 (これは $z > 1$ において最大の近赤外分光サンプル)
- 金属量はN2法(Pettini & Pagel 04)から導出



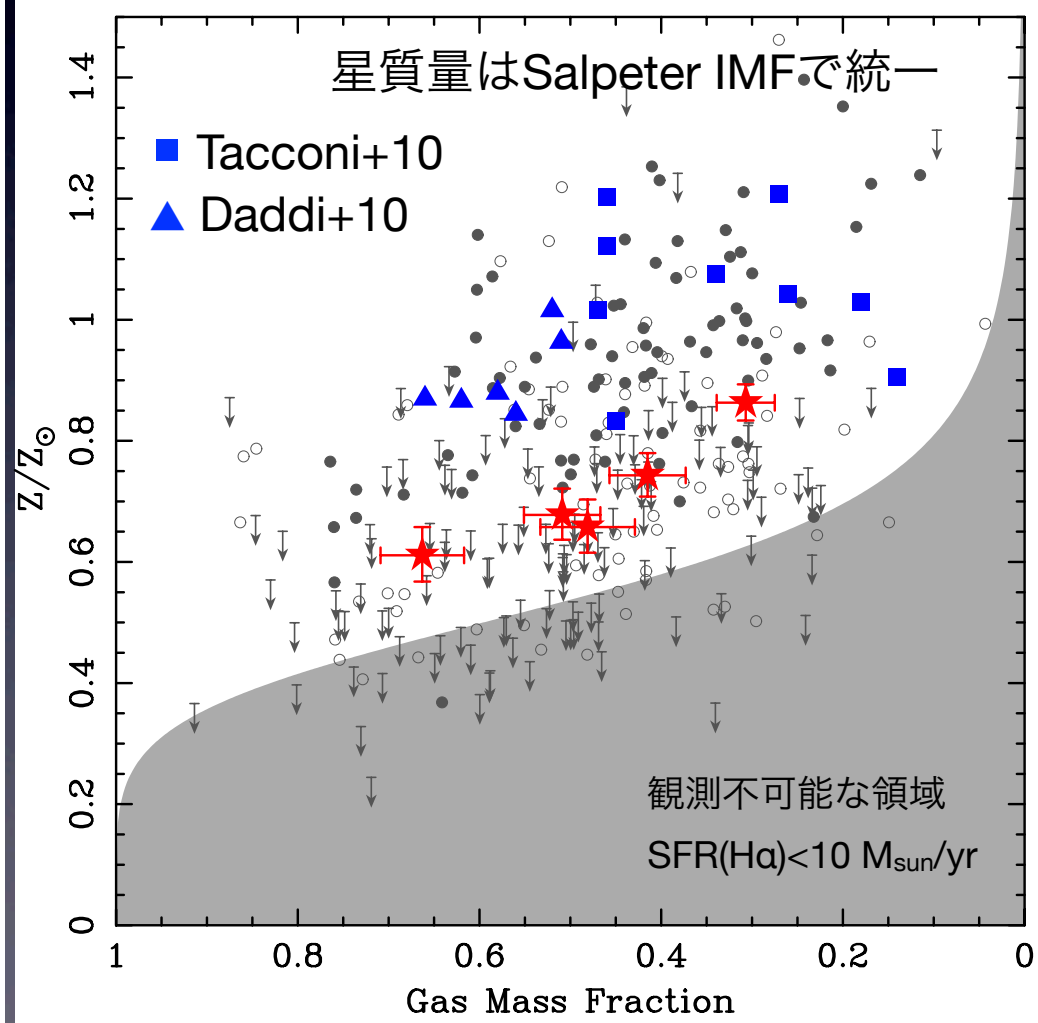
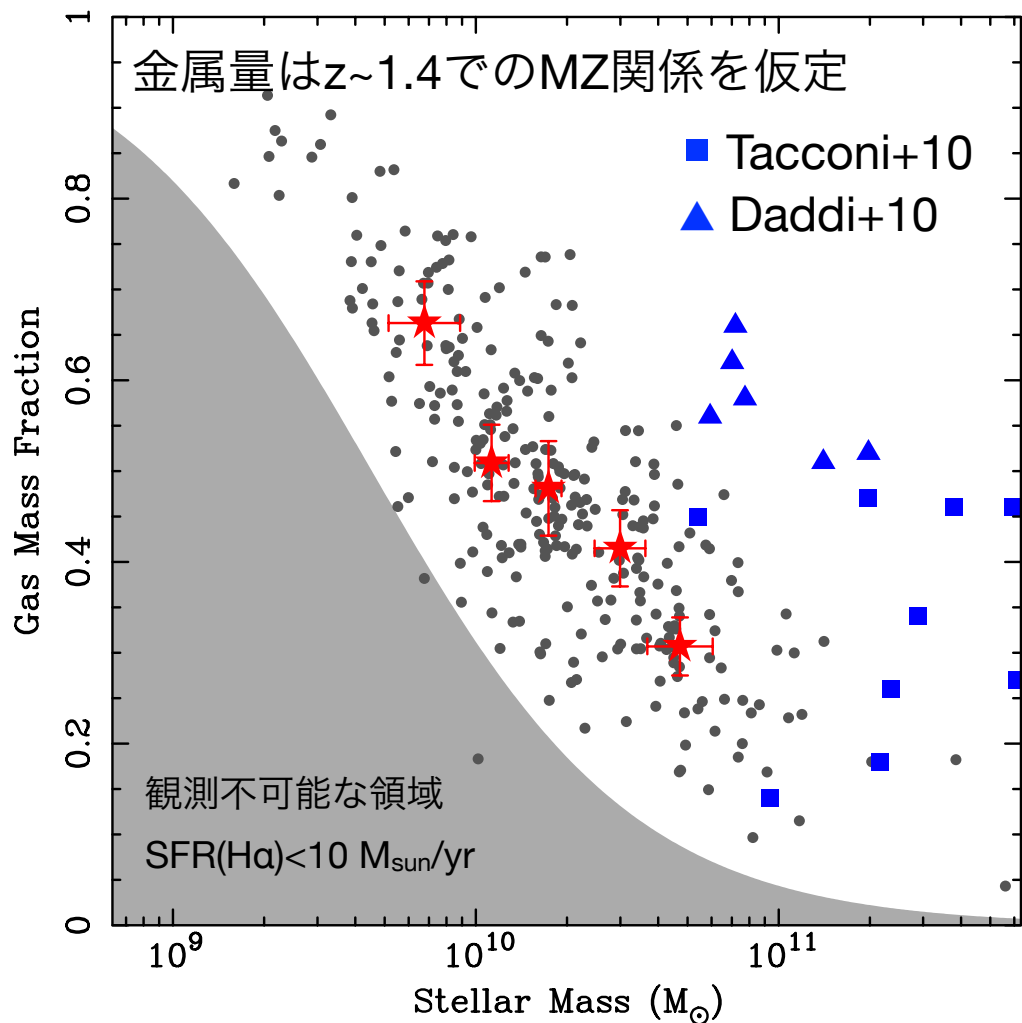
ガス質量フラクション：

- H α 光度密度からガス質量密度を求める (Kennicutt-Schmidt則を仮定)
- サイズはB-band (星形成をある程度トレース)での半光度半径を用いる
- ガス質量フラクションを $\mu = M_{\text{gas}} / (M_{\text{gas}} + M_{\text{star}})$ で定義
- ガス質量フラクションが小さいものは金属量が多い傾向
- 星質量が大きいものはガス質量フラクションが小さい傾向



ガス質量フラクシオン：

- CO観測からより直接的に求めたガス質量フラクシオンとの比較
- Tacconi et al. (2010, Nature, 463, 781)とDaddi et al. (2010, ApJ, 686, 713) を利用
- サンプル方法やredshift範囲などは多少違うことに注意
- 概ね一致しているが、観測点はmassive/gas richな部分にしかないことに注意



化学進化モデルとの比較：

- 解析的な化学進化モデルにより inflow/outflow について調べてみる (c.f., Erb 2008)
- Matteucci 2001 “The chemical evolution of galaxies” (ASSL) を参考にした

Basic equations:

$\psi(t)$ =SFR, R =return fraction

$$\frac{dM_{gas}}{dt} = -(1 - R)\psi(t) + \underbrace{f_i(1 - R)\psi(t)}_{\text{inflow}} - \underbrace{f_o(1 - R)\psi(t)}_{\text{outflow}}$$

$$\frac{d(ZM_{gas})}{dt} = -(1 - R)\psi(t)Z(t) + y_Z(1 - R)\psi(t) + \underbrace{f_i(1 - R)\psi(t)Z_A(t)}_{\text{inflow}} - \underbrace{f_o(1 - R)\psi(t)Z(t)}_{\text{outflow}}$$



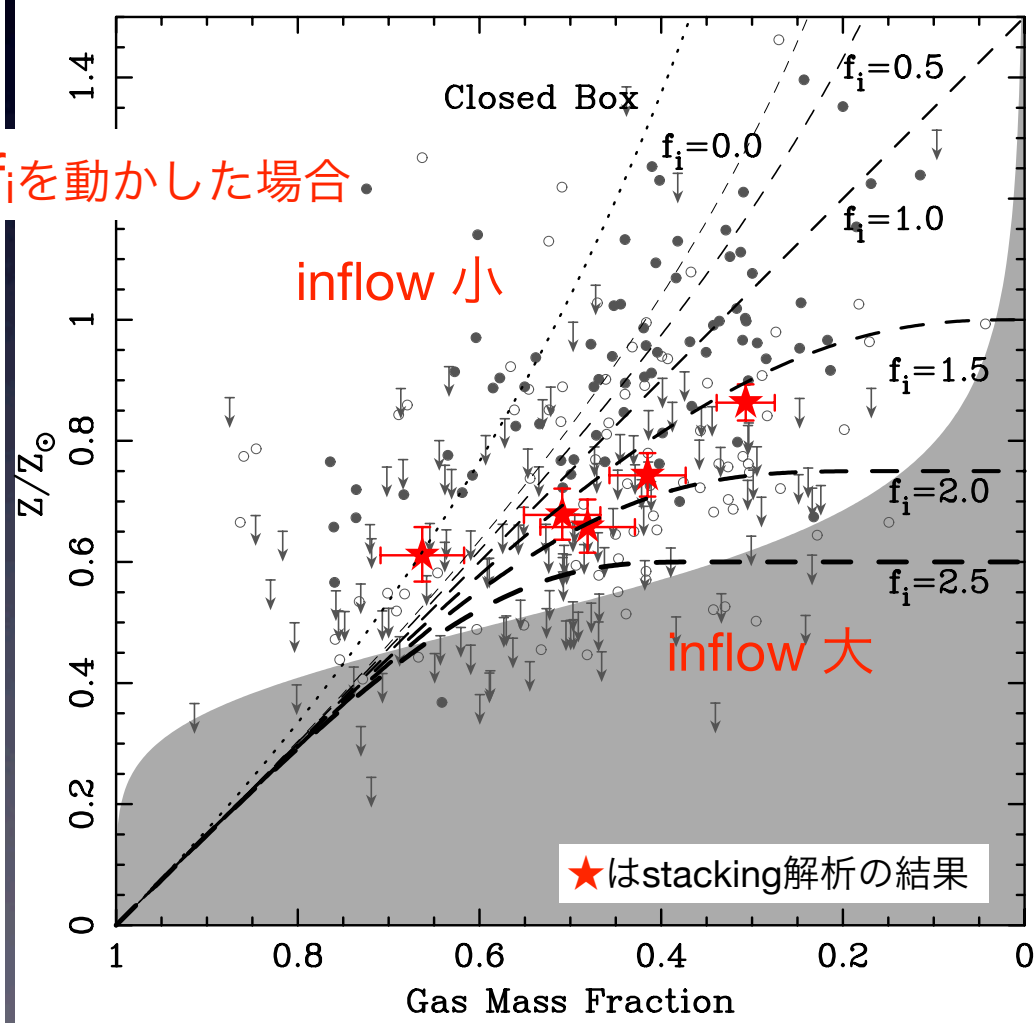
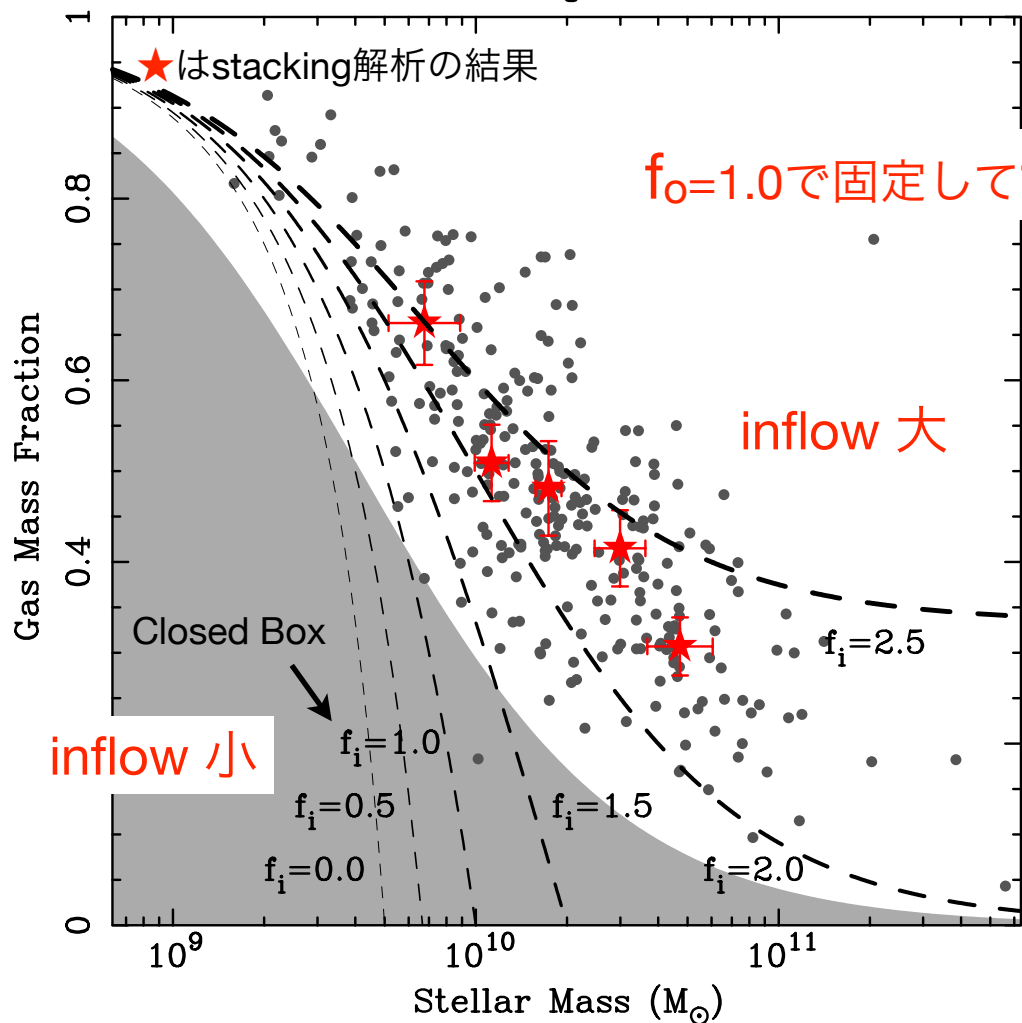
$$Z = \frac{y_Z}{f_i} \left\{ 1 - [(f_i - f_o) - (f_i - f_o - 1)\mu^{-1}]^{\frac{f_i}{f_i - f_o - 1}} \right\},$$

$$\mu = \frac{M_{gas}^0 + (f_i - f_o - 1)M_*}{M_{gas}^0 + (f_i - f_o)M_*},$$

- Z =金属量, μ =ガス質量フラクション, M_* =星質量
- f_i (= f_{in})と f_o (= f_{out})は $\psi(t)$ (=SFR)で規格化された量
- inflowはprimordial gasを仮定 ($Z_A=0$)
- yieldは $y_Z=1.5Z_{sun}$ を仮定

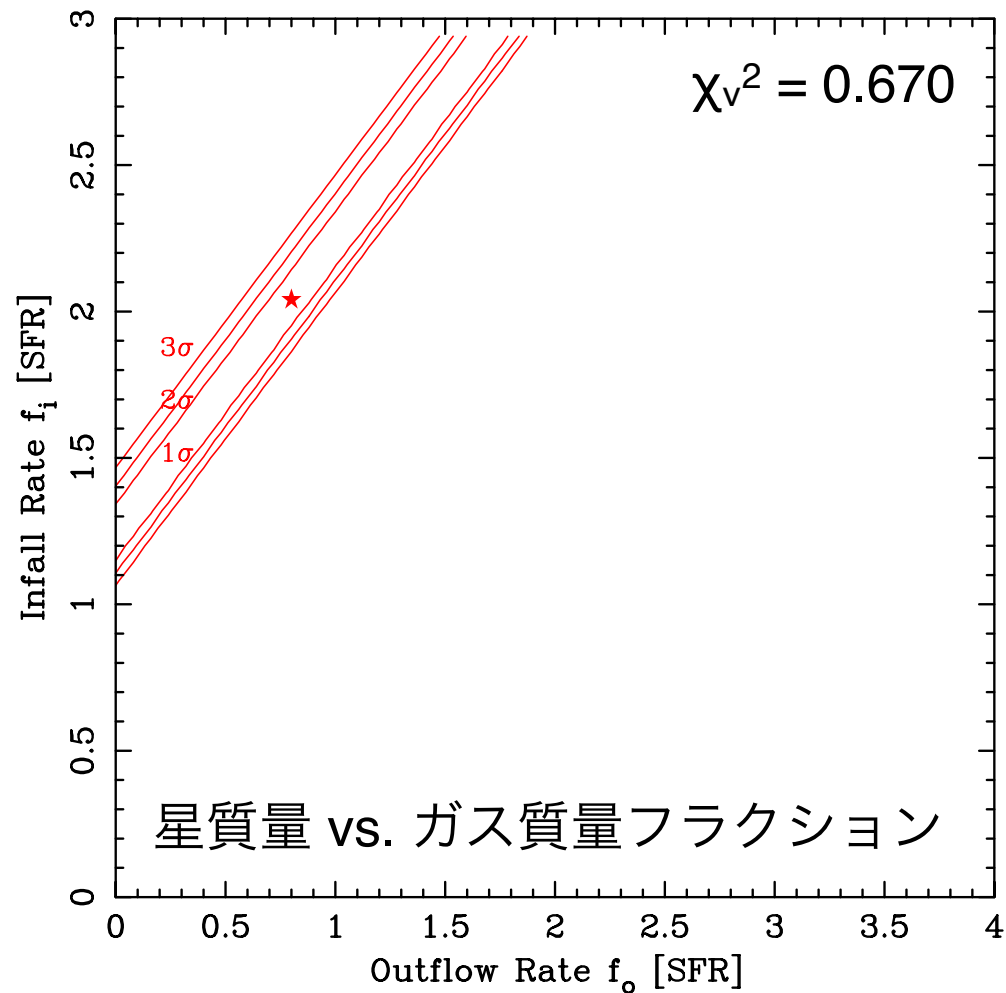
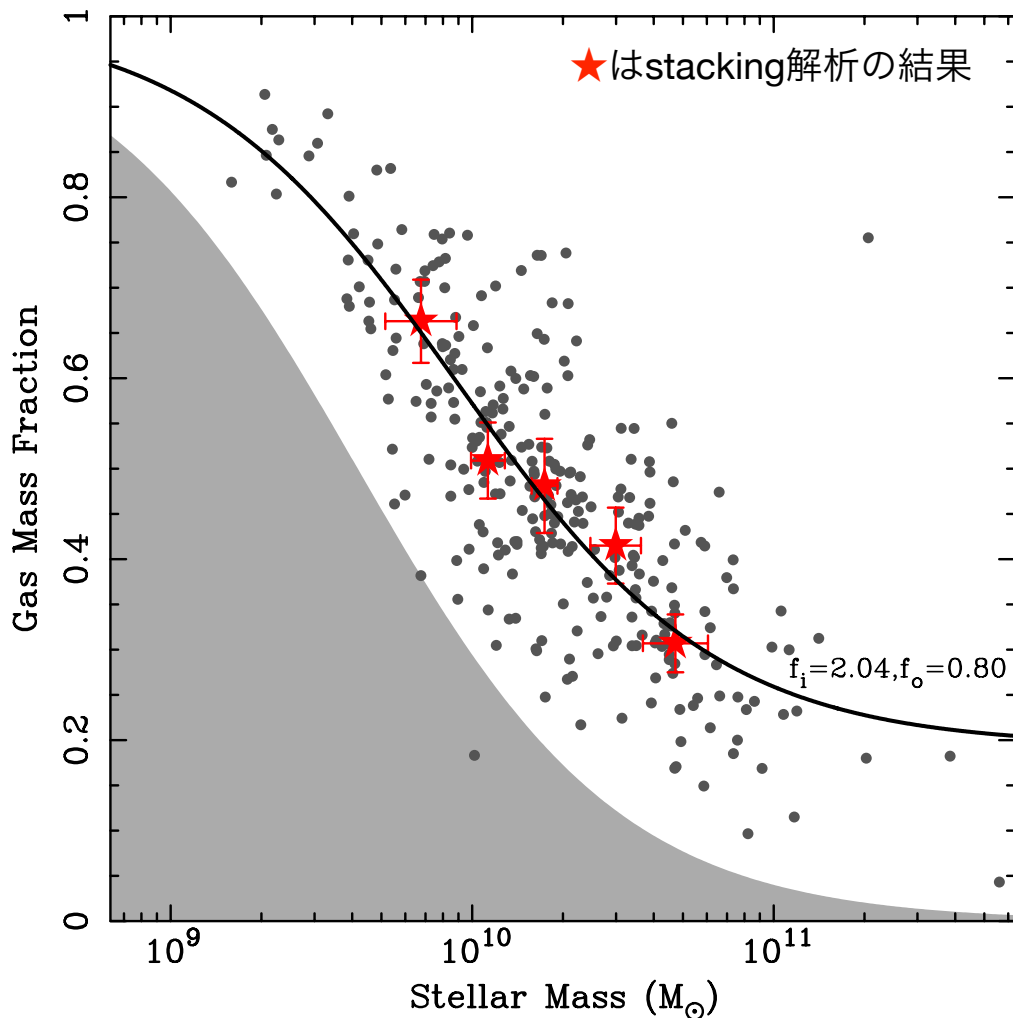
化学進化モデルとの比較：

- この解析モデルを用いてinflow/outflow rateに対する制限を与える
- ガス質量フラクシオンvs.金属量、星質量vs.ガス質量フラクシオン
- 単純なclosed boxモデルではこの両者を説明できない
- f_i , f_o をフリーパラメータとしてフィッティングを行なう



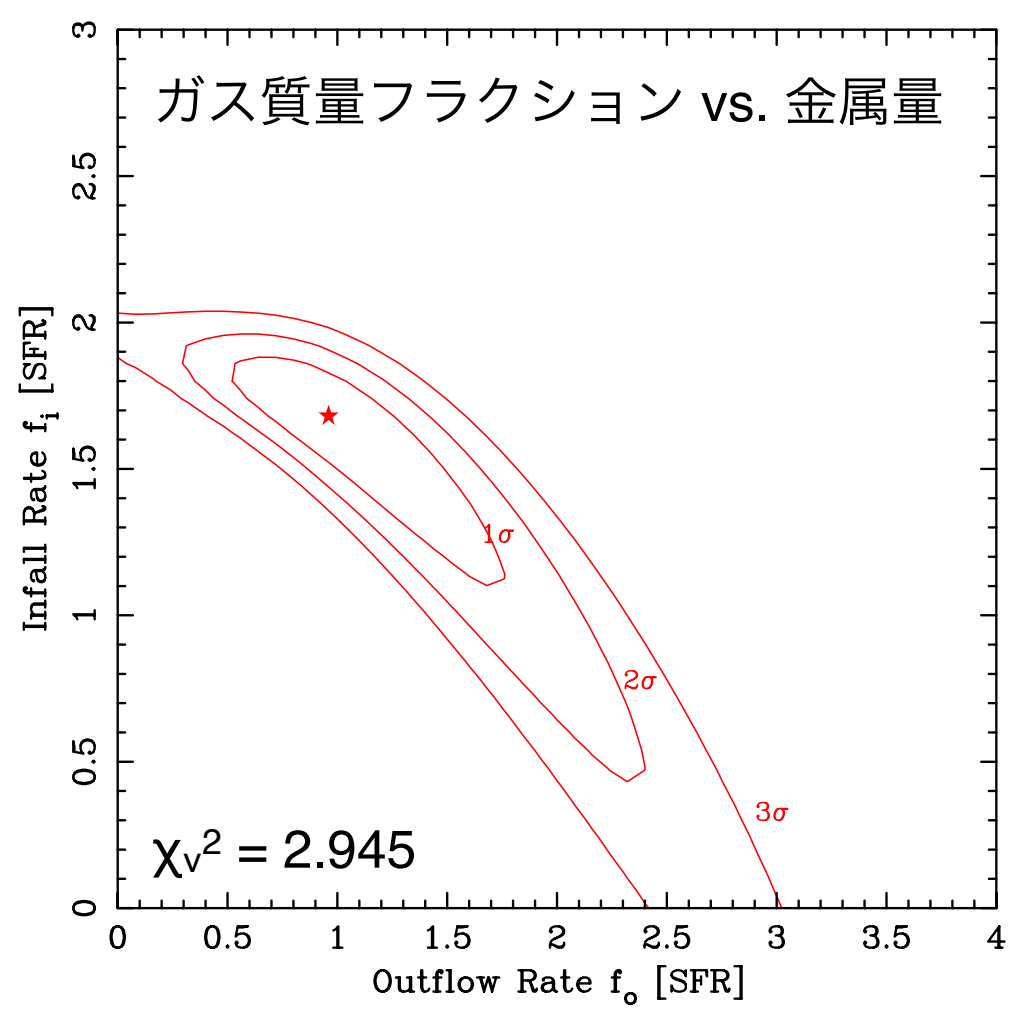
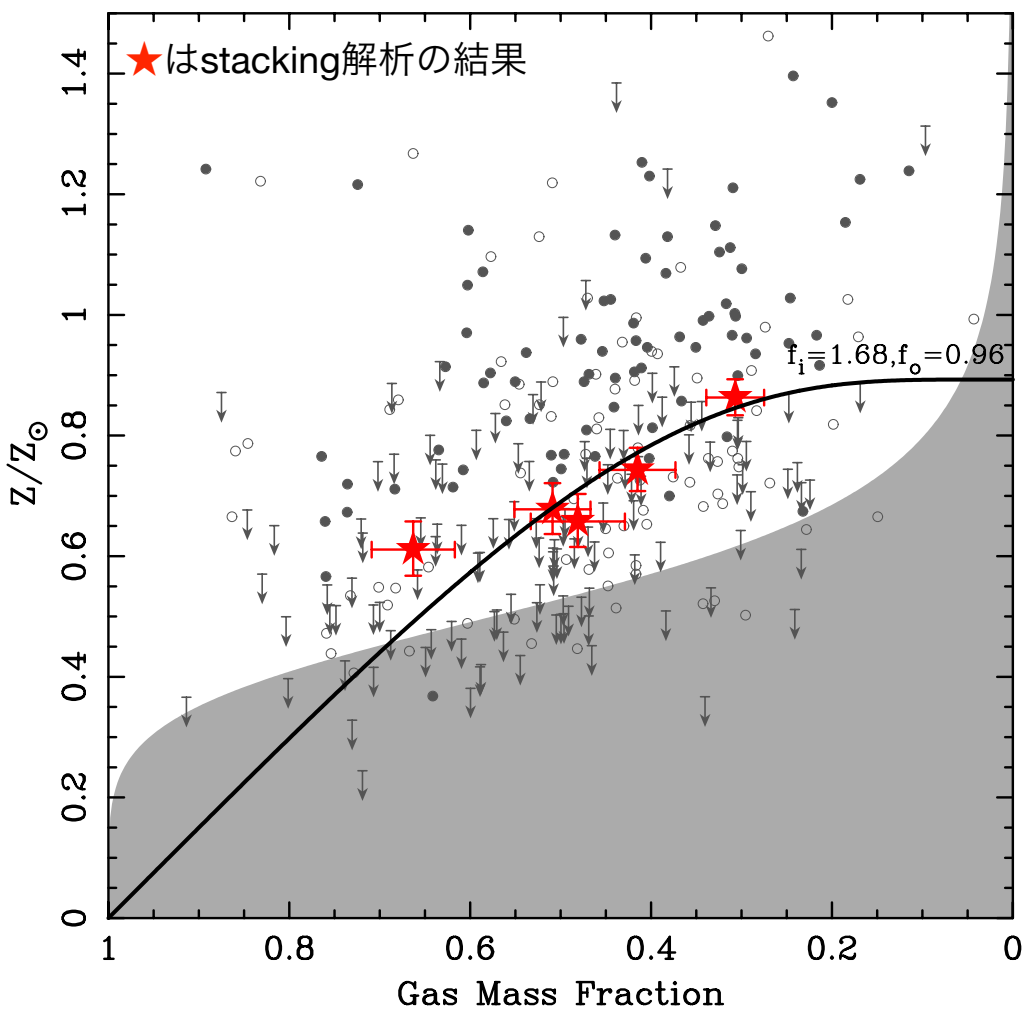
化学進化モデルとの比較：

- この解析モデルを用いてinflow/outflow rateに対する制限を与える
- $f_{in} = 0.0-3.0$, $f_{out} = 0.0-4.0$ の範囲で動かしてフィッティング
- 星質量vs.ガス質量フラクシオン
- $f_{in}=2.04$, $f_{out}=0.80$ のモデルが観測をよく再現する
- f_{in} と f_{out} は縮退が激しいことに注意



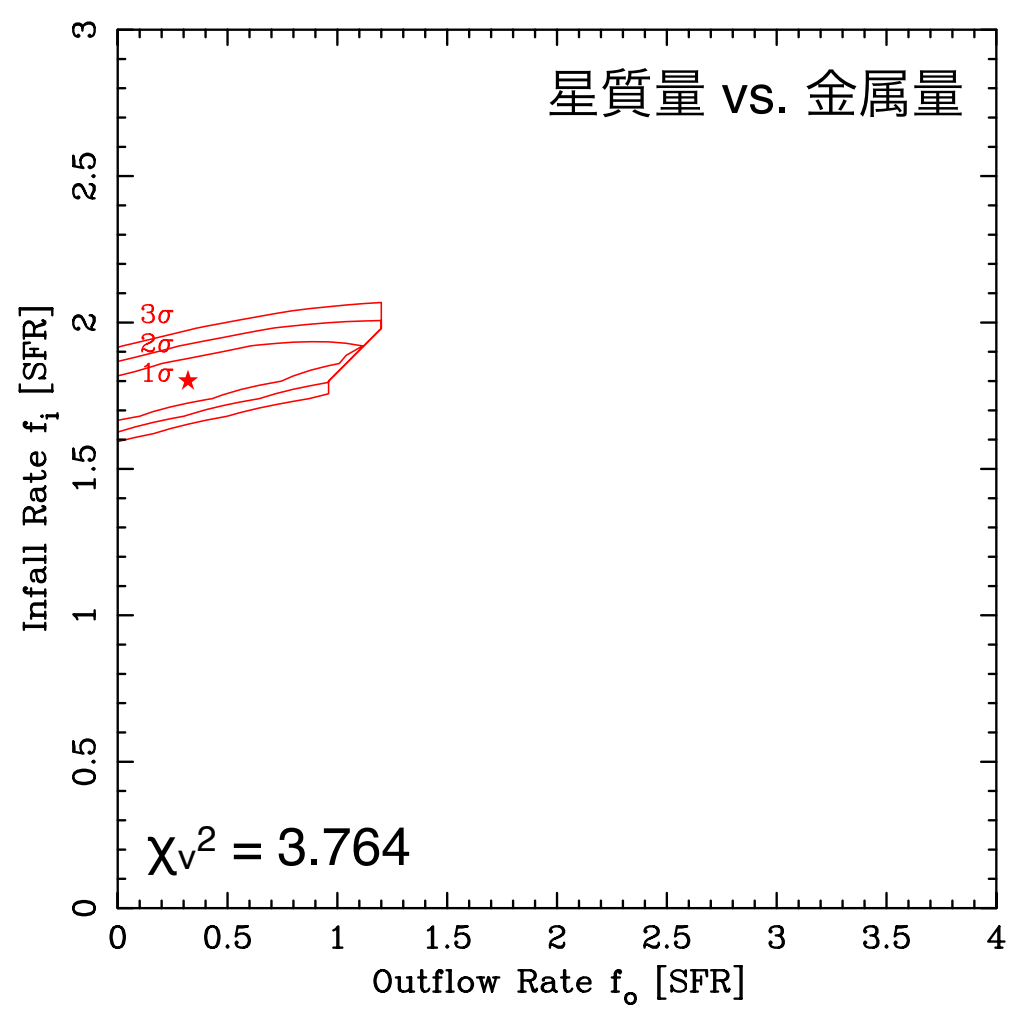
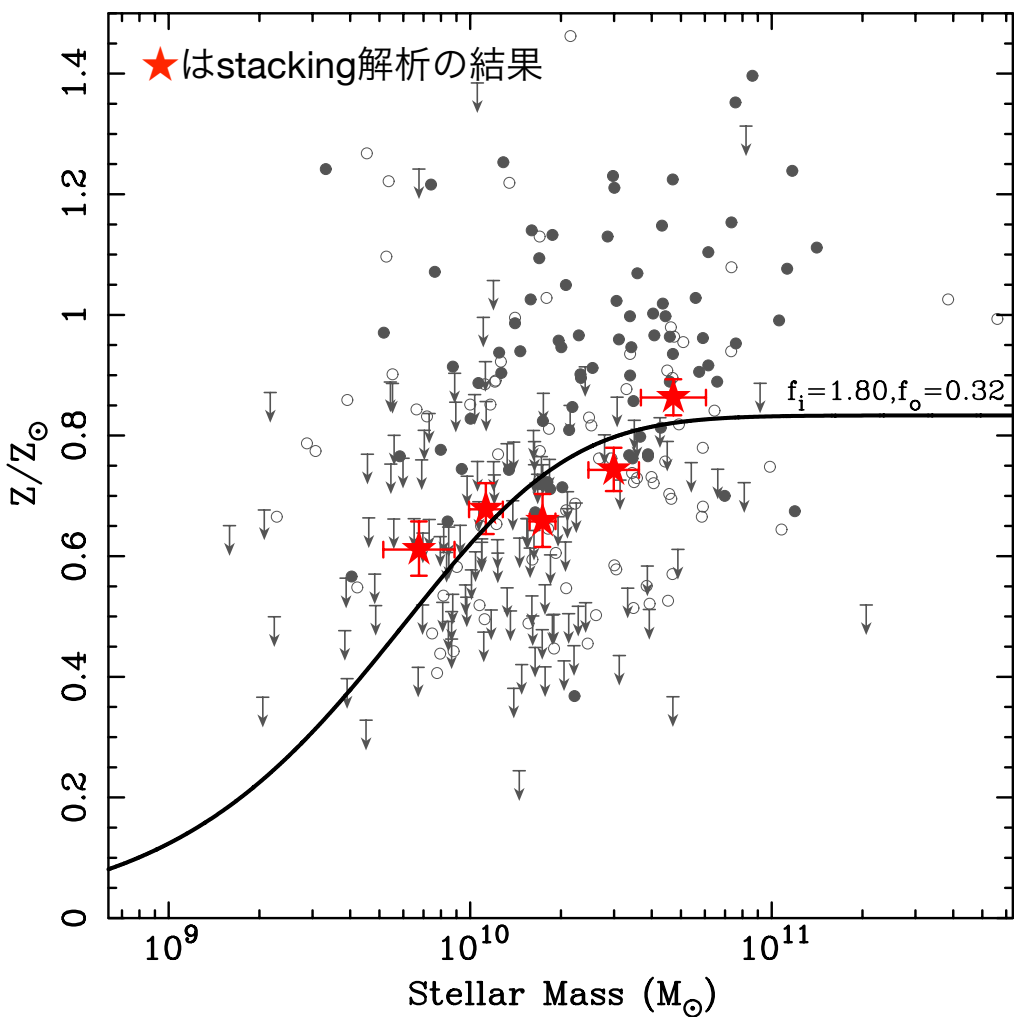
化学進化モデルとの比較：

- この解析モデルを用いてinflow/outflow rateに対する制限を与える
- $f_{in} = 0.0-3.0$, $f_{out} = 0.0-4.0$ の範囲で動かしてフィッティング
- ガス質量フラクシオンvs.金属量について
- $f_{in}=1.68$, $f_{out}=0.96$ のモデルが観測をよく再現する



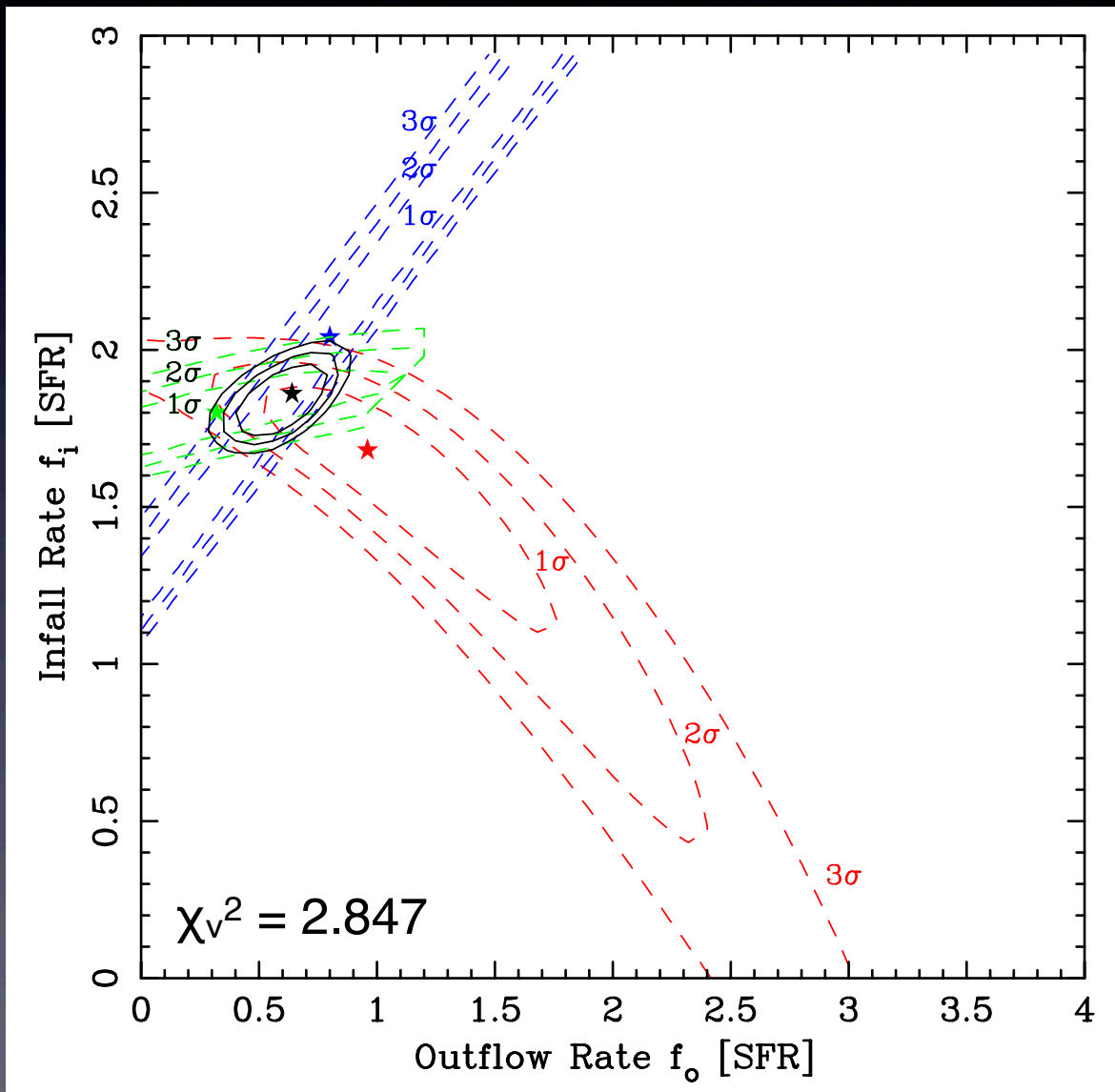
化学進化モデルとの比較：

- この解析モデルを用いてinflow/outflow rateに対する制限を与える
- $f_{in} = 0.0-3.0$, $f_{out} = 0.0-4.0$ の範囲で動かしてフィッティング
- 星質量 vs. 金属量について
- $f_{in}=1.80$, $f_{out}=0.32$ のモデルが観測をよく再現する



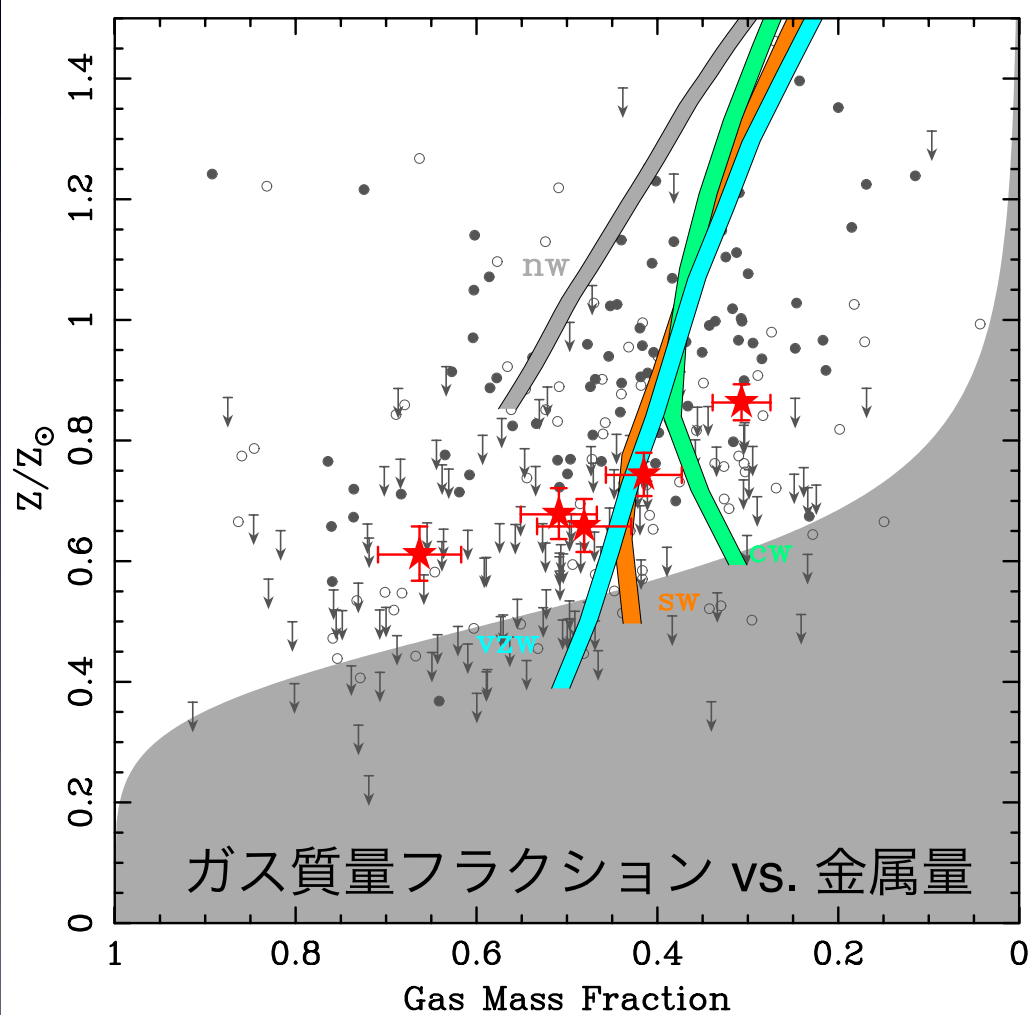
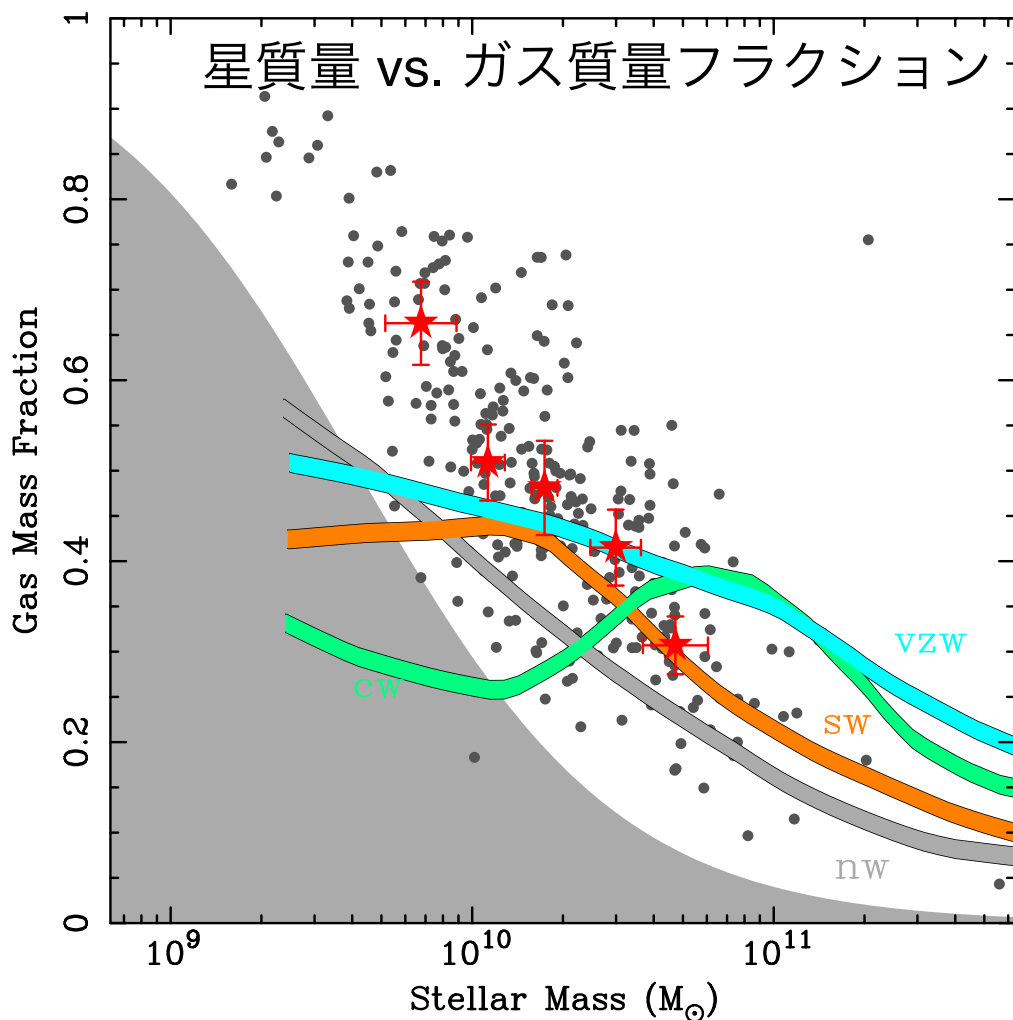
化学進化モデルとの比較：

- 星質量 vs. ガス質量フラクシオン、ガス質量フラクシオン vs. 金属量、星質量 vs. 金属量 に対するフィットを組み合わせる (Joint χ^2 map)
- $f_{in}=1.80$, $f_{out}=0.64$ のモデルが観測をよく再現する



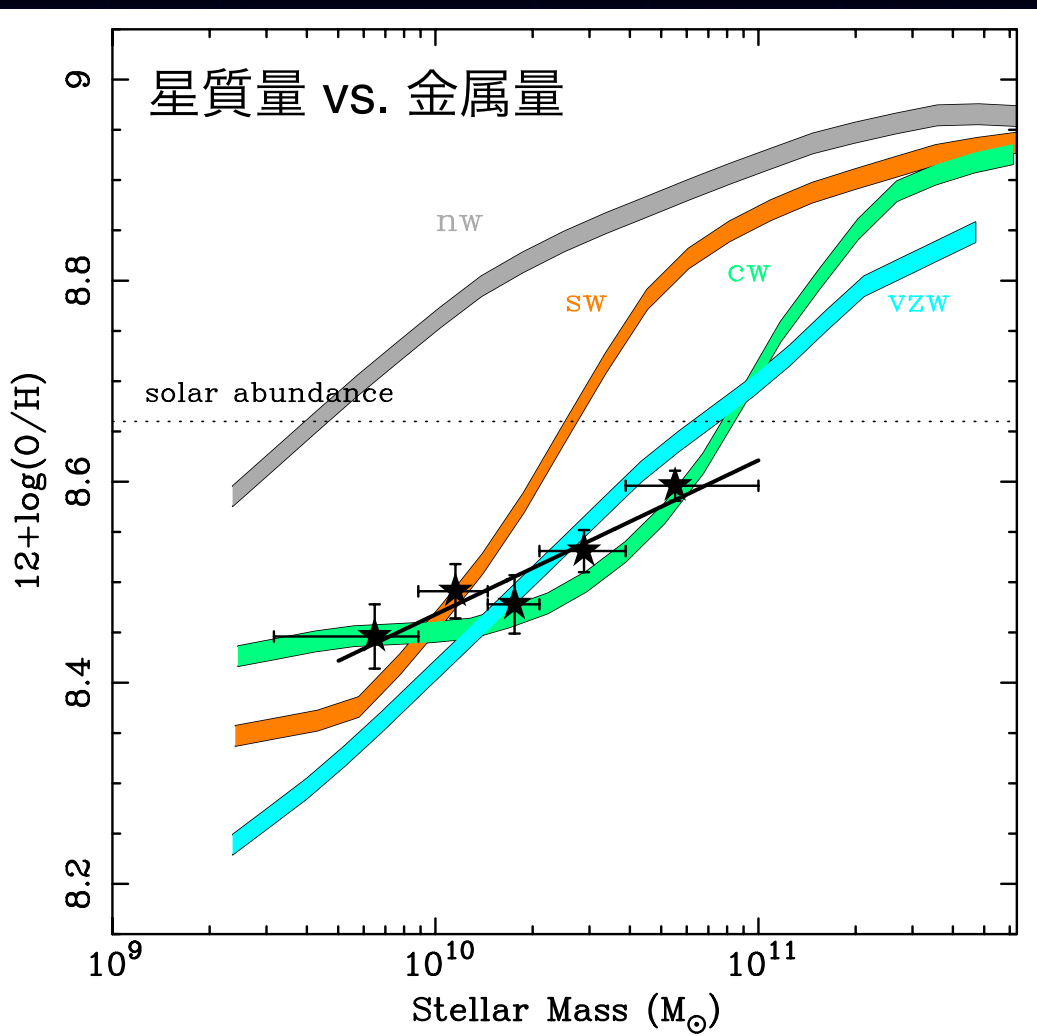
宇宙論的シミュレーションとの比較：

- cosmological simulationとの結果とも(一応)比較してみる
 - Davé et al. 2011 (MNRAS, 416, 1354)の結果を使用
 - N体+SPHシミュレーション
 - 様々なgalactic windモデルを考慮 (no wind, slow wind, const. wind, mom. consv. wind)
- 比較的強いoutflowがある $z=1-2$ のモデルが割と良く観測を再現している



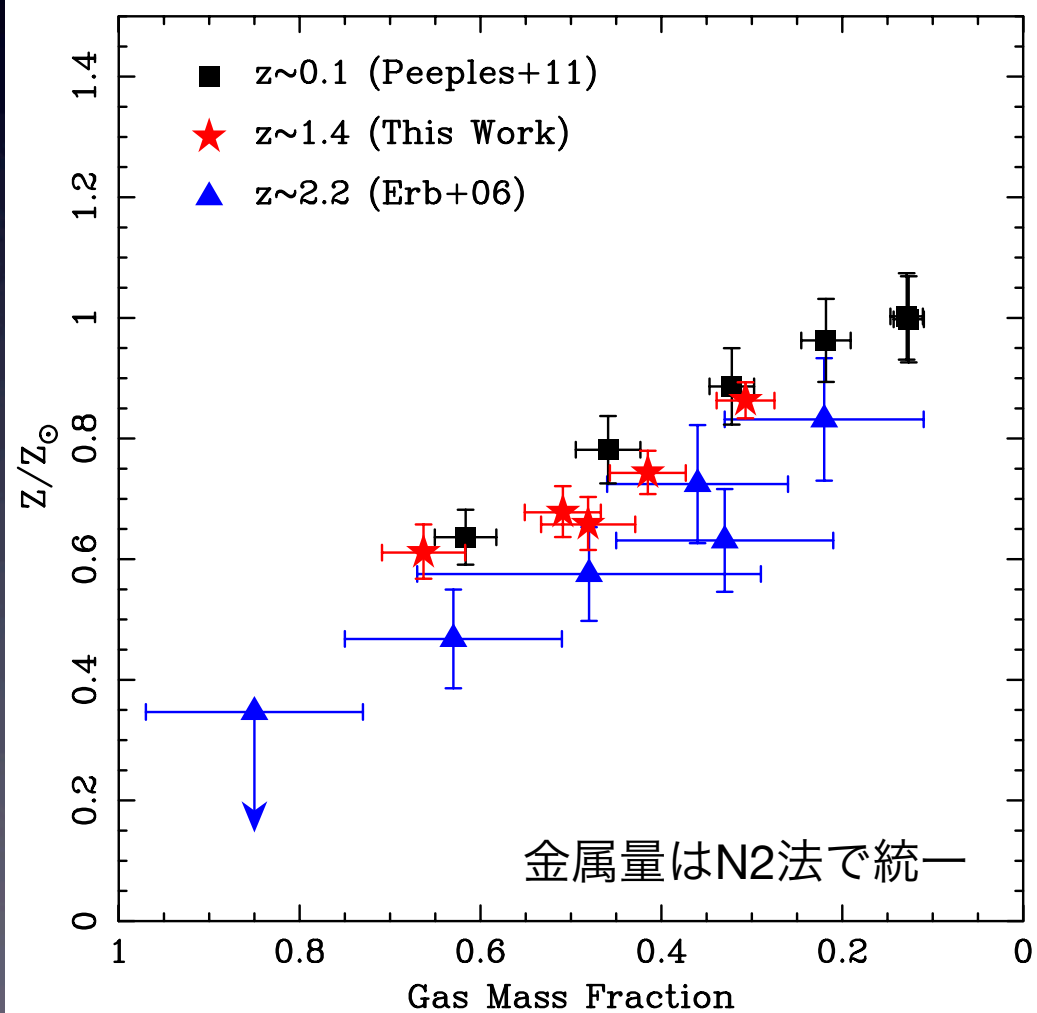
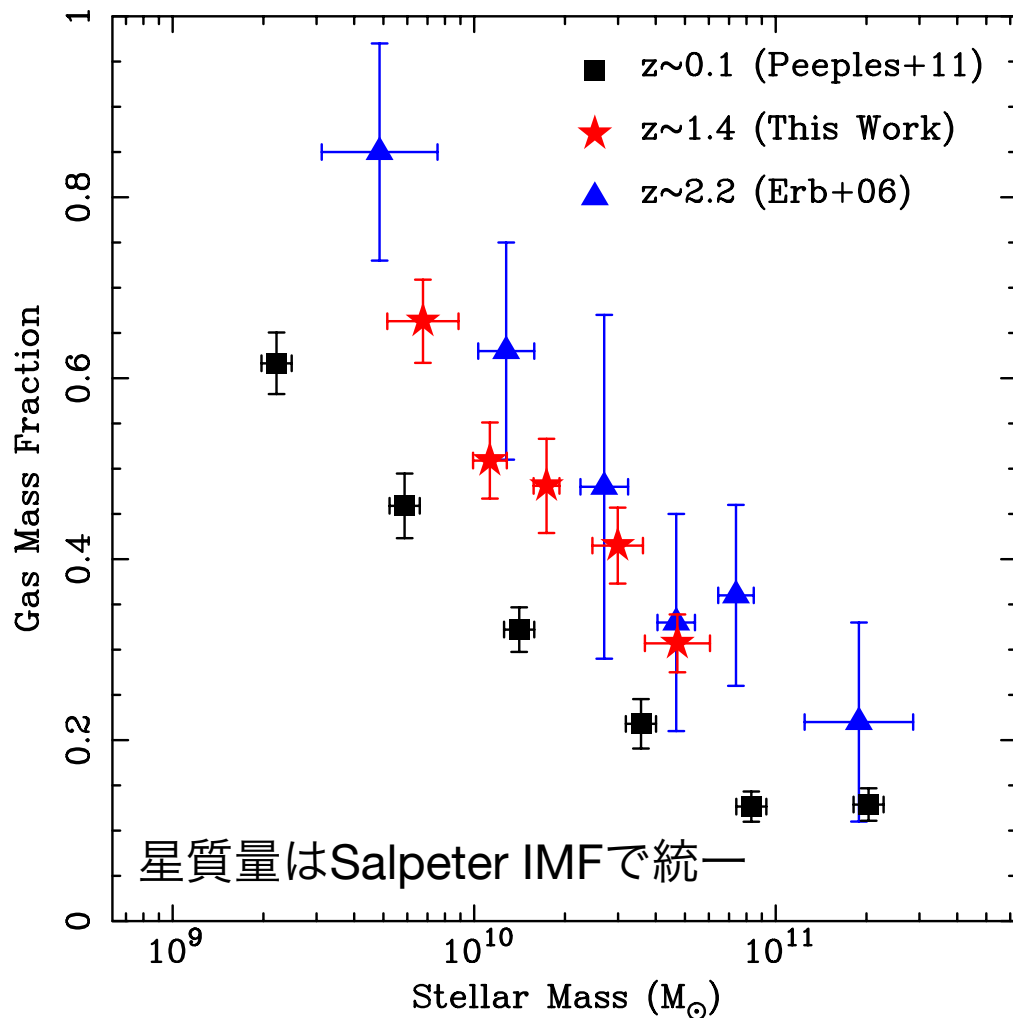
宇宙論的シミュレーションとの比較：

- cosmological simulationとの結果とも(一応)比較してみる
 - Davé et al. 2011 (MNRAS, 416, 1354)の結果を使用
 - N体+SPHシミュレーション
 - 様々なgalactic windモデルを考慮 (no wind, slow wind, const. wind, mom. consv. wind)
- 比較的強いoutflowがある $z=1-2$ のモデルが割と良く観測を再現している



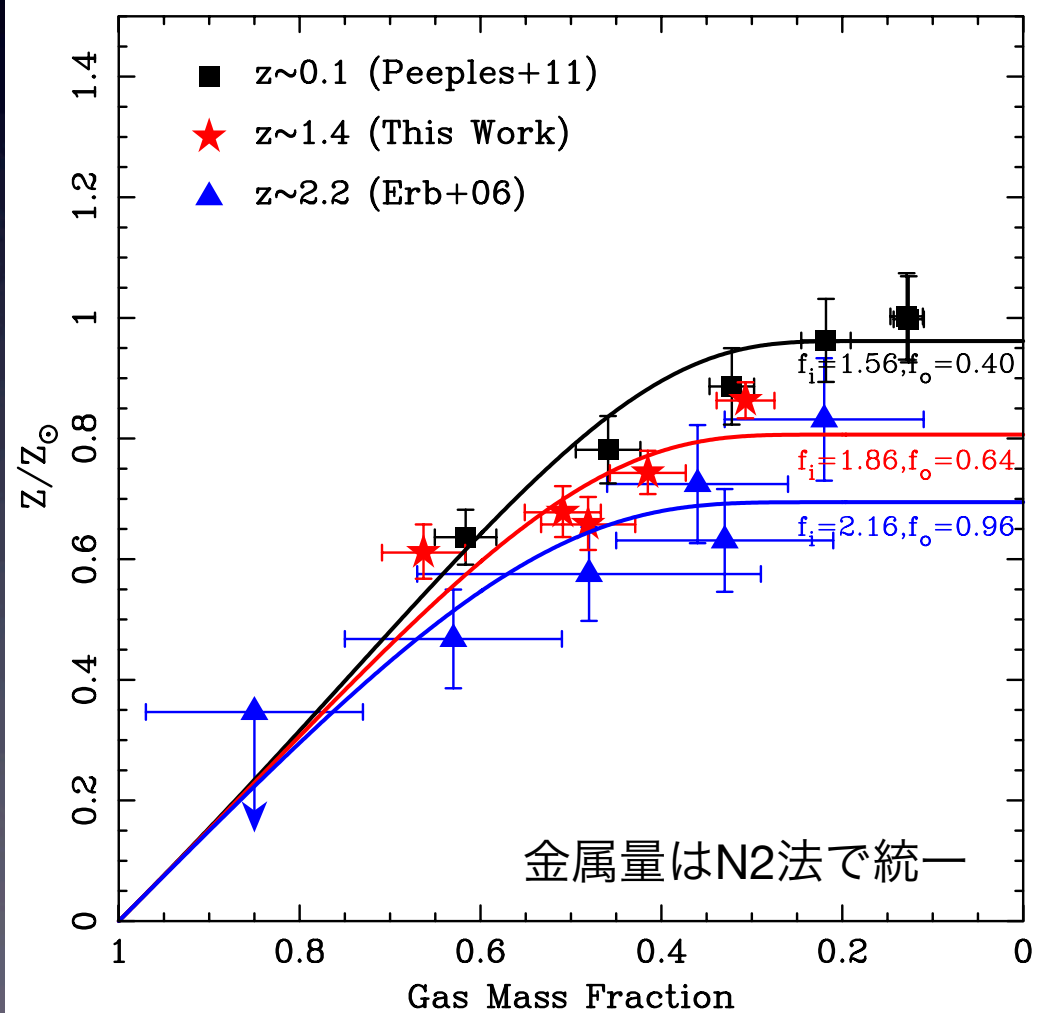
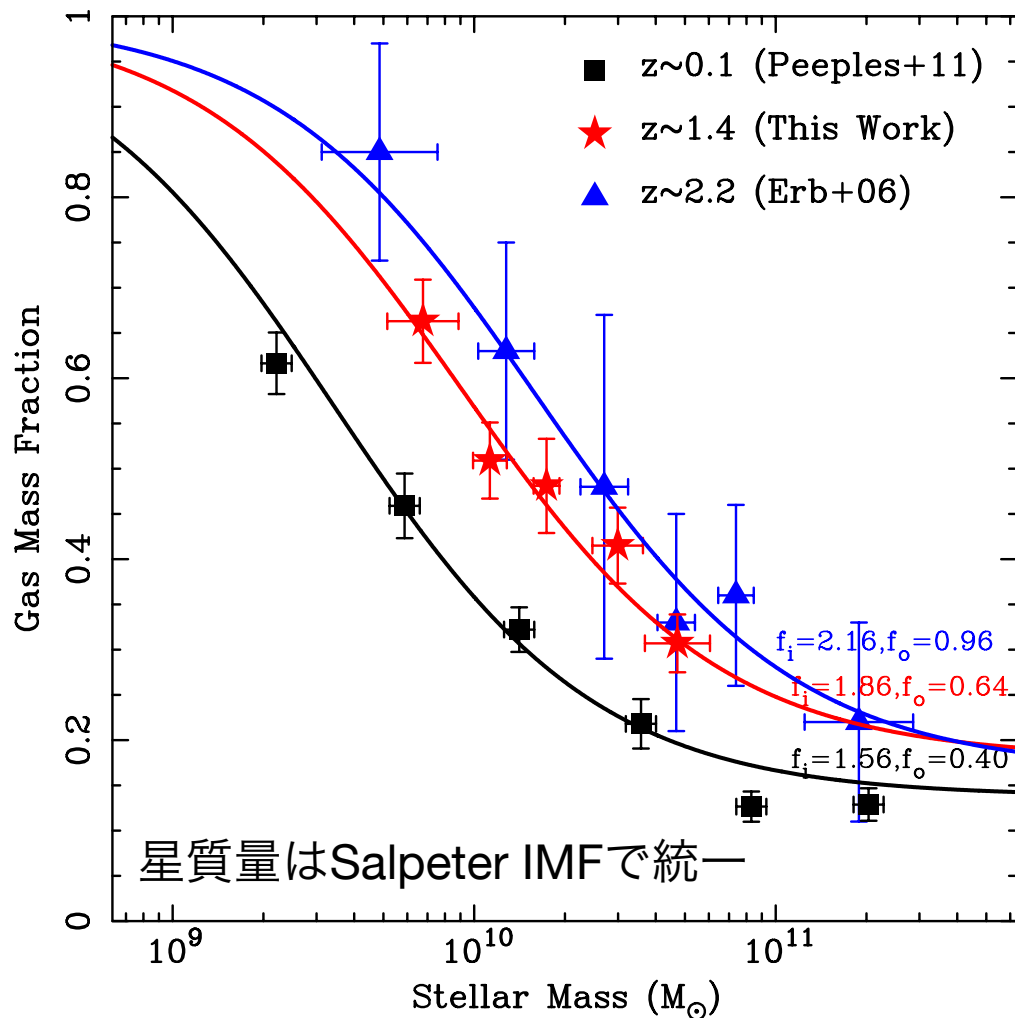
Inflow / Outflow rateのredshift進化 :

- 他のredshiftサンプルとの比較
- $z \sim 0.1$: Peeples et al. 2011 (金属量はTremonti et al. 2004)から (HI+H2ガス質量)
- $z \sim 2.2$: Erb et al. 2006から (ガス質量はK-S則を仮定)
- 同じ星質量で見た場合、 $z \sim 2.2$ から $z \sim 0.1$ にかけてガス質量フラクションは減少
- 同じガス質量フラクションで見た場合、 $z \sim 2.2$ から $z \sim 0.1$ にかけて金属量は増加



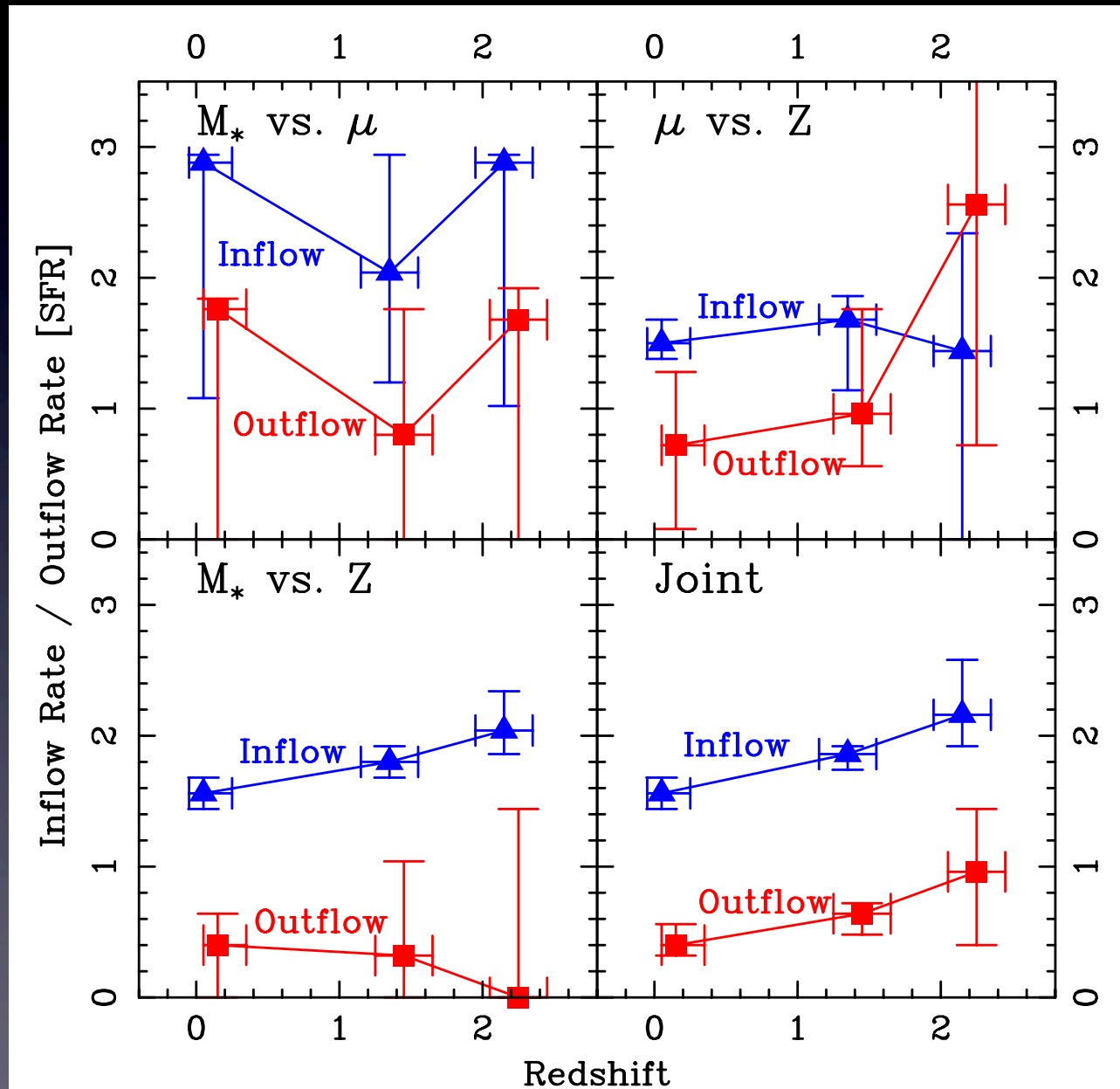
Inflow / Outflow rateのredshift進化 :

- 他のredshiftサンプルとの比較
- $z \sim 0.1$: Peeples et al. 2011 (金属量はTremonti et al. 2004)から (HI+H2ガス質量)
- $z \sim 2.2$: Erb et al. 2006から (ガス質量はK-S則を仮定)
- 同じ星質量で見た場合、 $z \sim 2.2$ から $z \sim 0.1$ にかけてガス質量フラクションは減少
- 同じガス質量フラクションで見た場合、 $z \sim 2.2$ から $z \sim 0.1$ にかけて金属量は増加



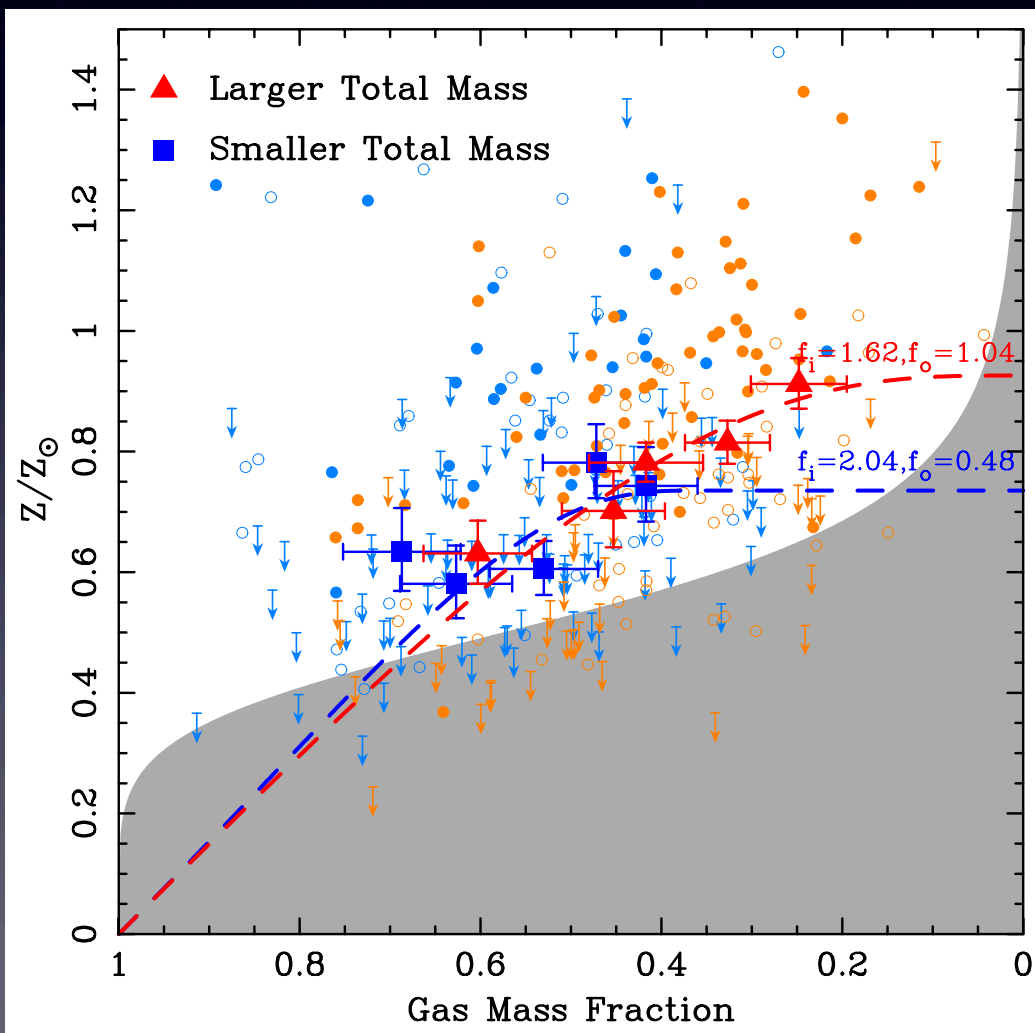
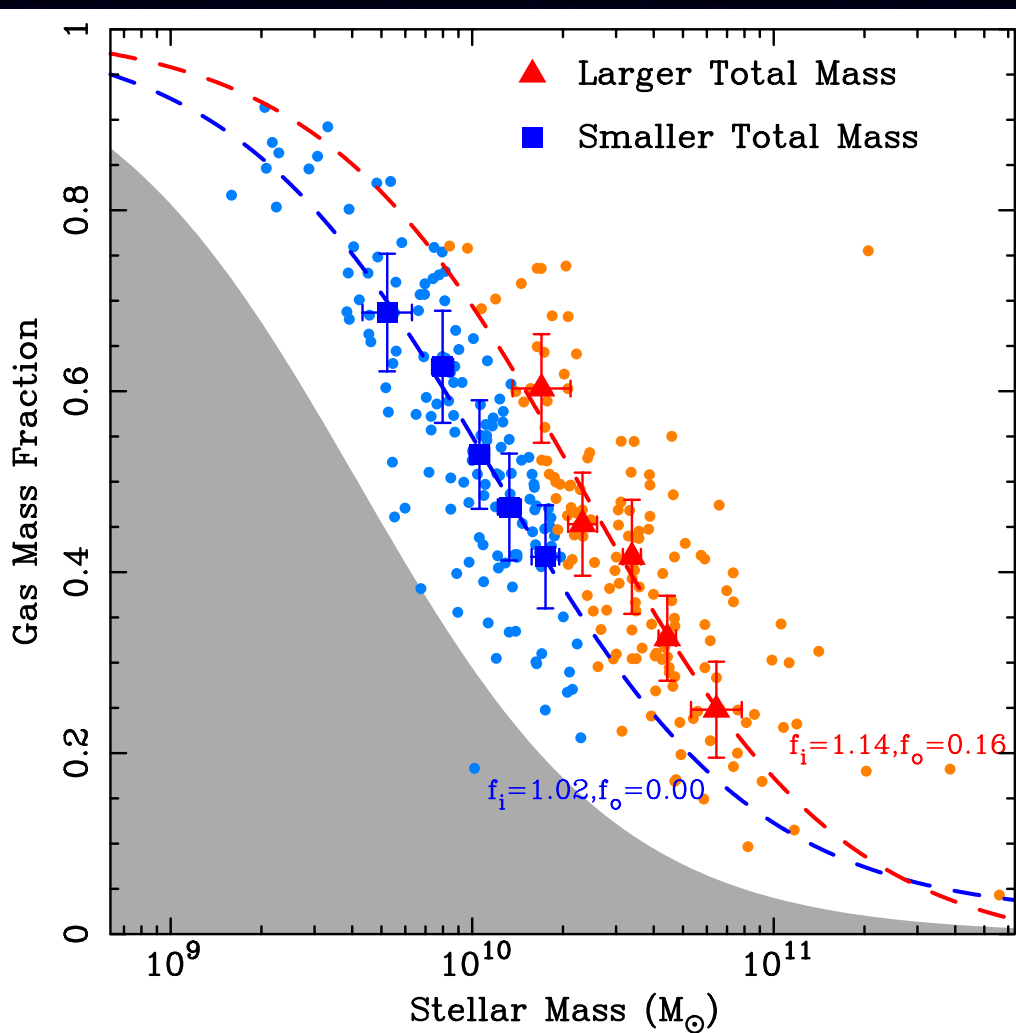
Inflow / Outflow rateのredshift進化 :

- (Joint fitの結果では) inflow / outflow rateは high-zほど高くなる



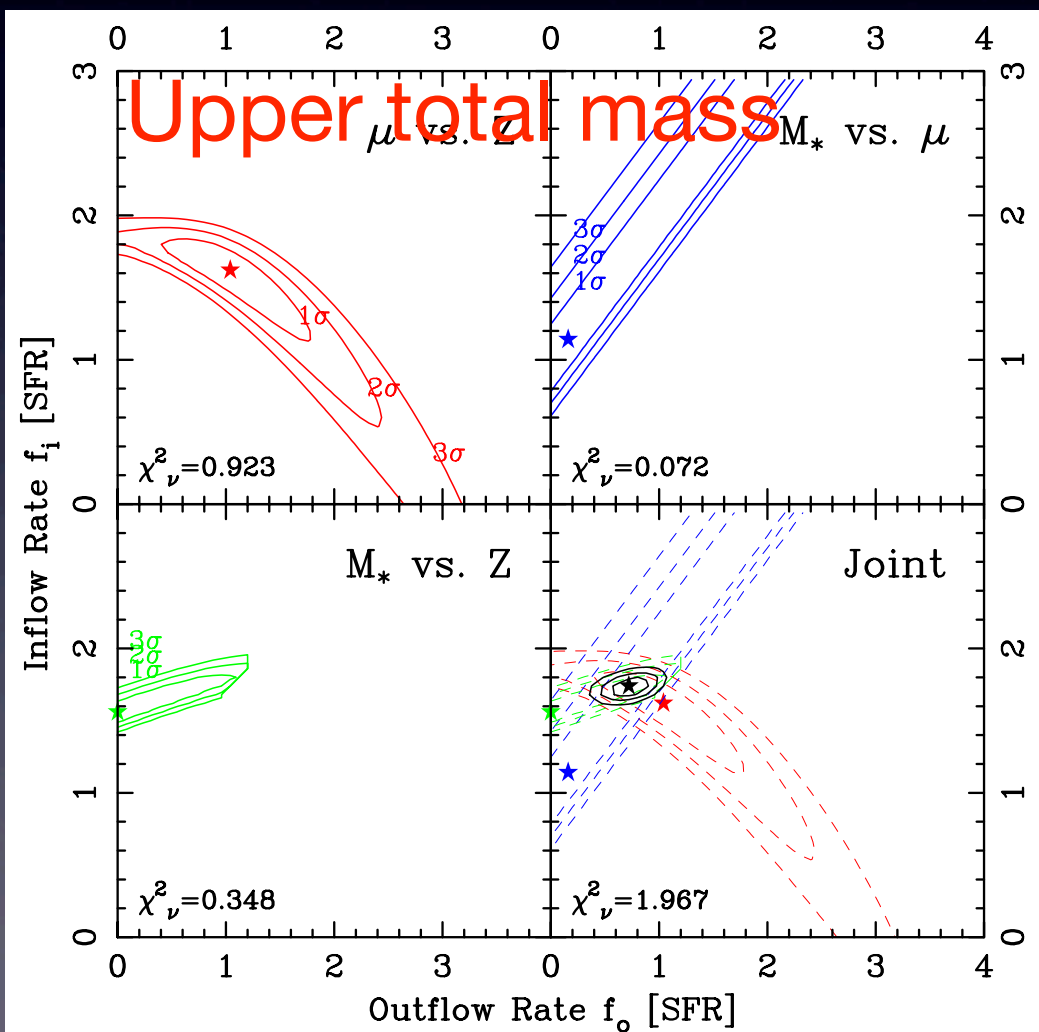
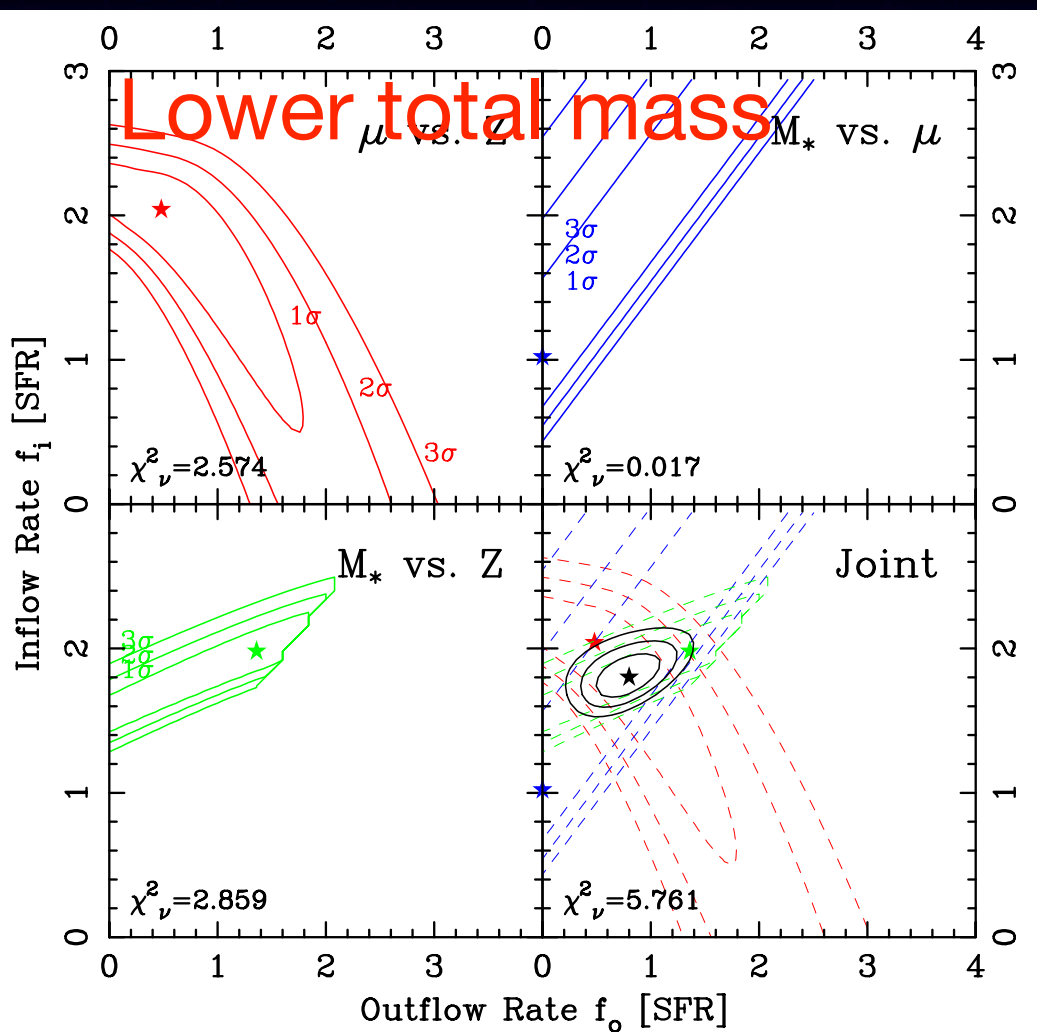
Mass dependent Outflow ?:

- Outflowは銀河の質量(dynamical mass)に比例しても良さそう
- 今回のサンプルでその傾向は見られるのか？
 - total mass (ガス質量+星質量)と星質量は強く相関している
 - total massの大きいものは、 $f_i=1.74\pm0.06$, $f_o=0.72\pm0.16$ (Joint)
 - total massの小さいものは、 $f_i=1.80\pm0.12$, $f_o=0.80\pm0.24$ (Joint)



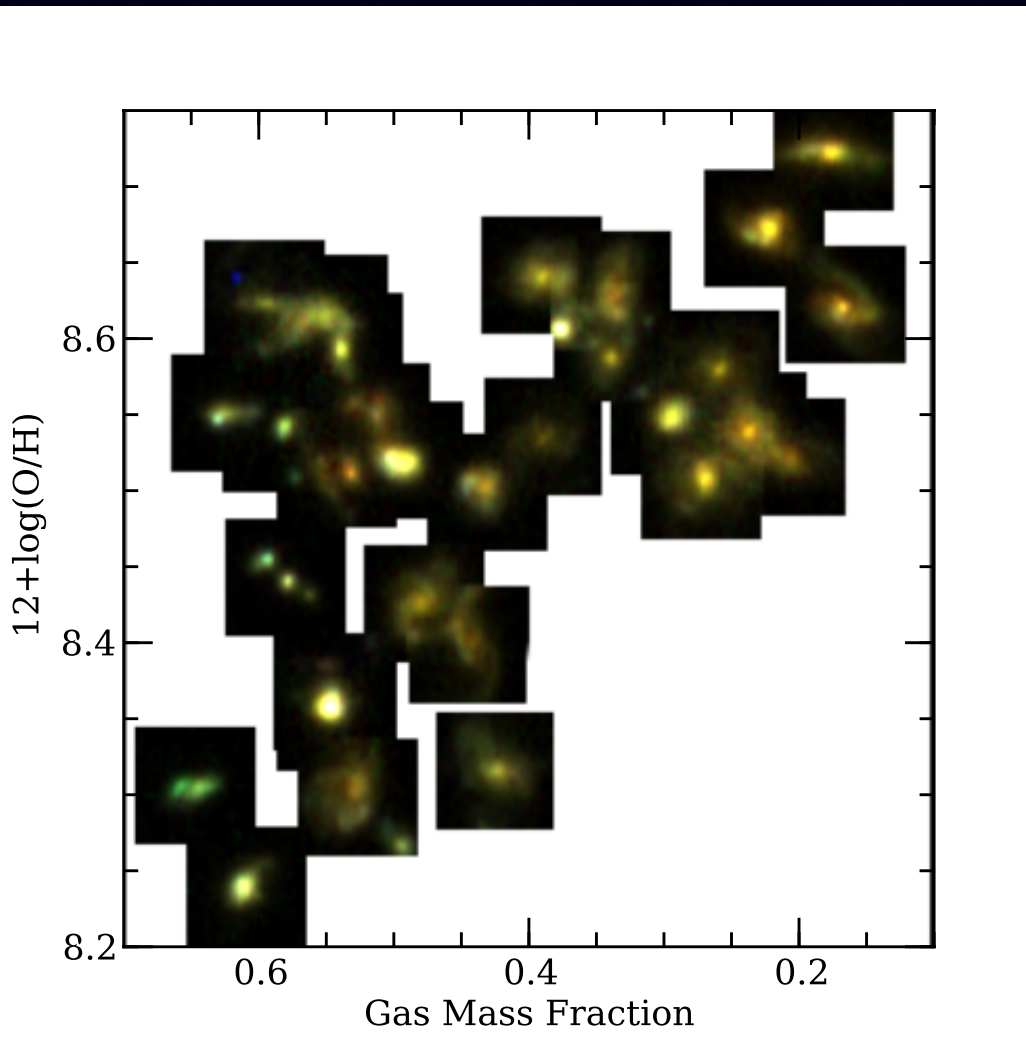
Mass dependent Outflow ?:

- Outflowは銀河の質量(dynamical mass)に比例しても良さそう
- 今回のサンプルでその傾向は見られるのか？
 - total mass (ガス質量+星質量)と星質量は強く相関している
 - total massの大きいものは、 $f_i=1.74\pm 0.06$, $f_o=0.72\pm 0.16$ (Joint)
 - total massの小さいものは、 $f_i=1.80\pm 0.12$, $f_o=0.80\pm 0.24$ (Joint)



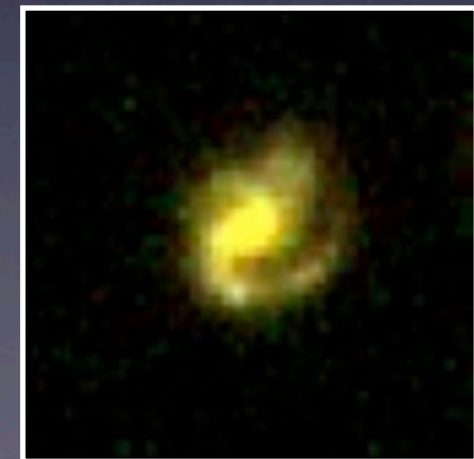
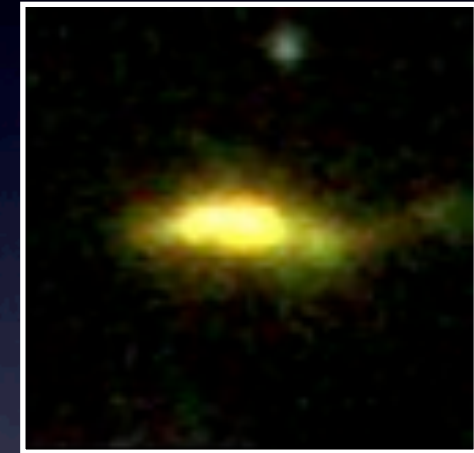
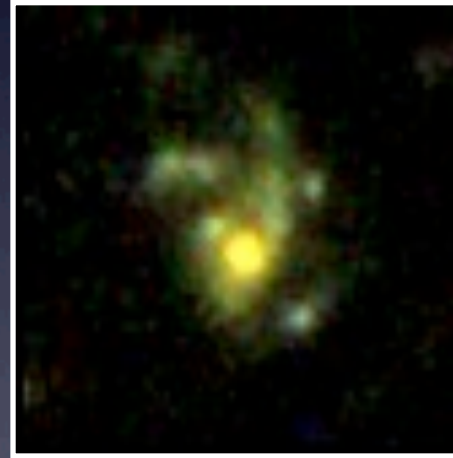
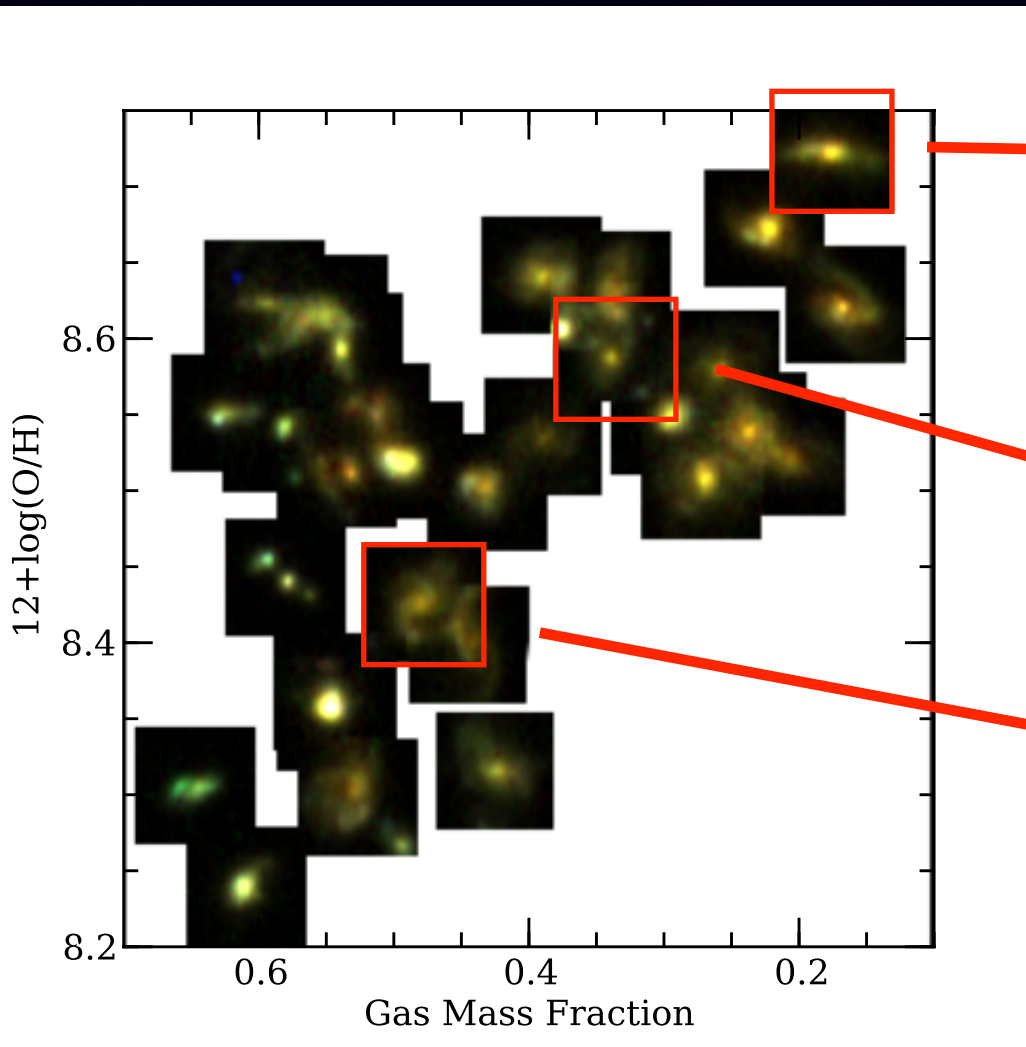
形態との関係：

- 形態(Morphology)とinflow/outflowとの関係
 - 一部のサンプルはCANDELS (HST/WFC3+ACS)領域にある
 - 3色(F808W, F125W, F160W)合成図による形態分類
 - この時代($z \sim 1.4$)において既にdisk/bulge/ellipticalなどの形態が発現している
- inflow/outflowモデルとの比較 (ガス質量フラクション vs. 金属量)



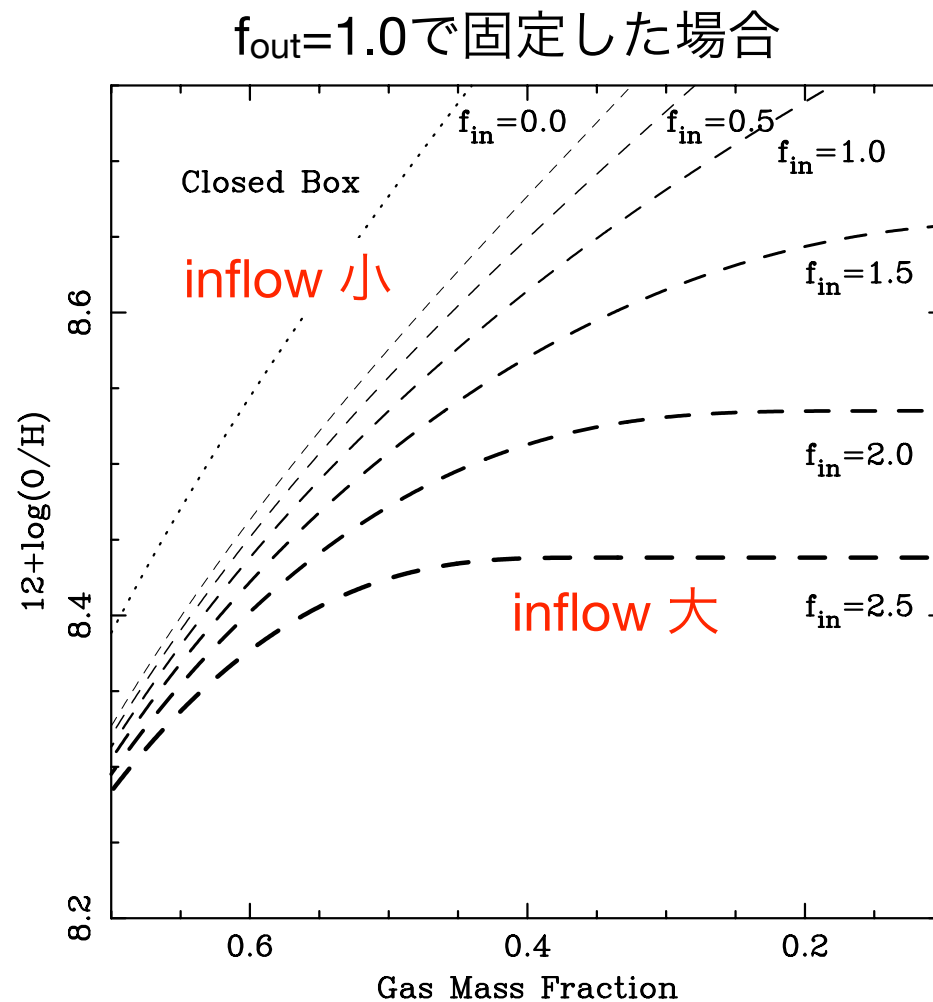
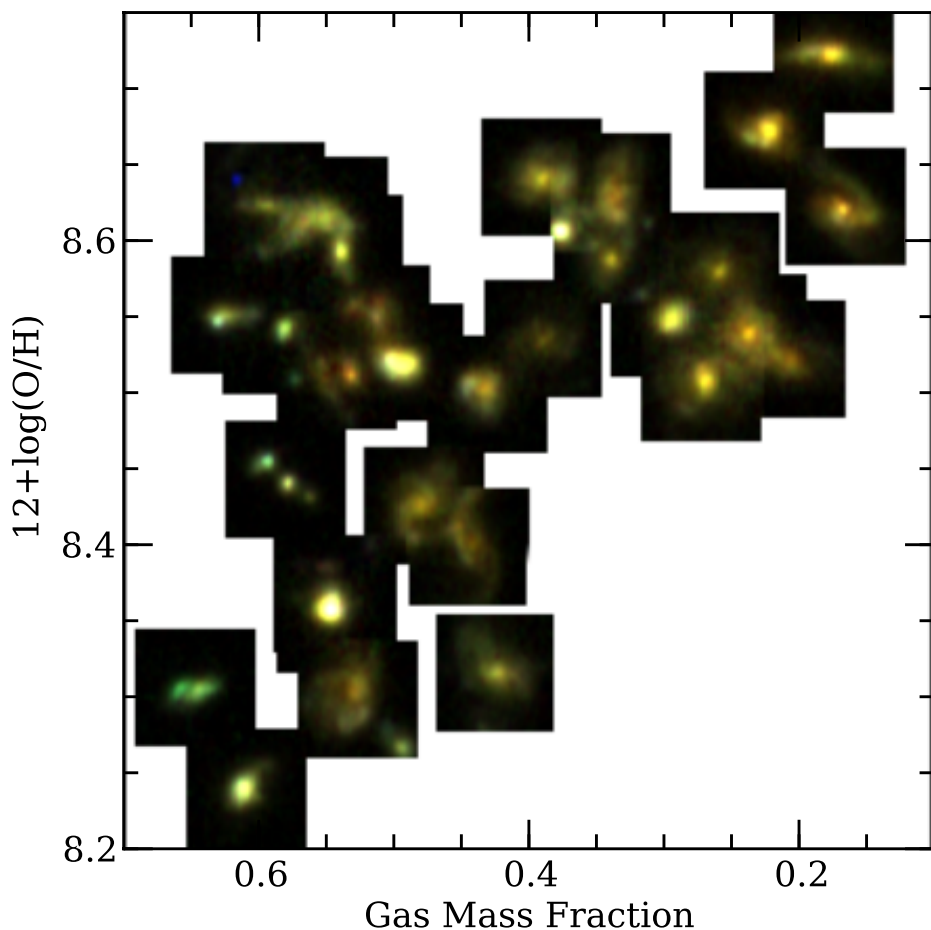
形態との関係：

- 形態(Morphology)とinflow/outflowとの関係
 - 一部のサンプルはCANDELS (HST/WFC3+ACS)領域にある
 - 3色(F808W, F125W, F160W)合成図による形態分類
 - この時代($z \sim 1.4$)において既にdisk/bulge/ellipticalなどの形態が発現している
- inflow/outflowモデルとの比較 (ガス質量フラクシオン vs. 金属量)



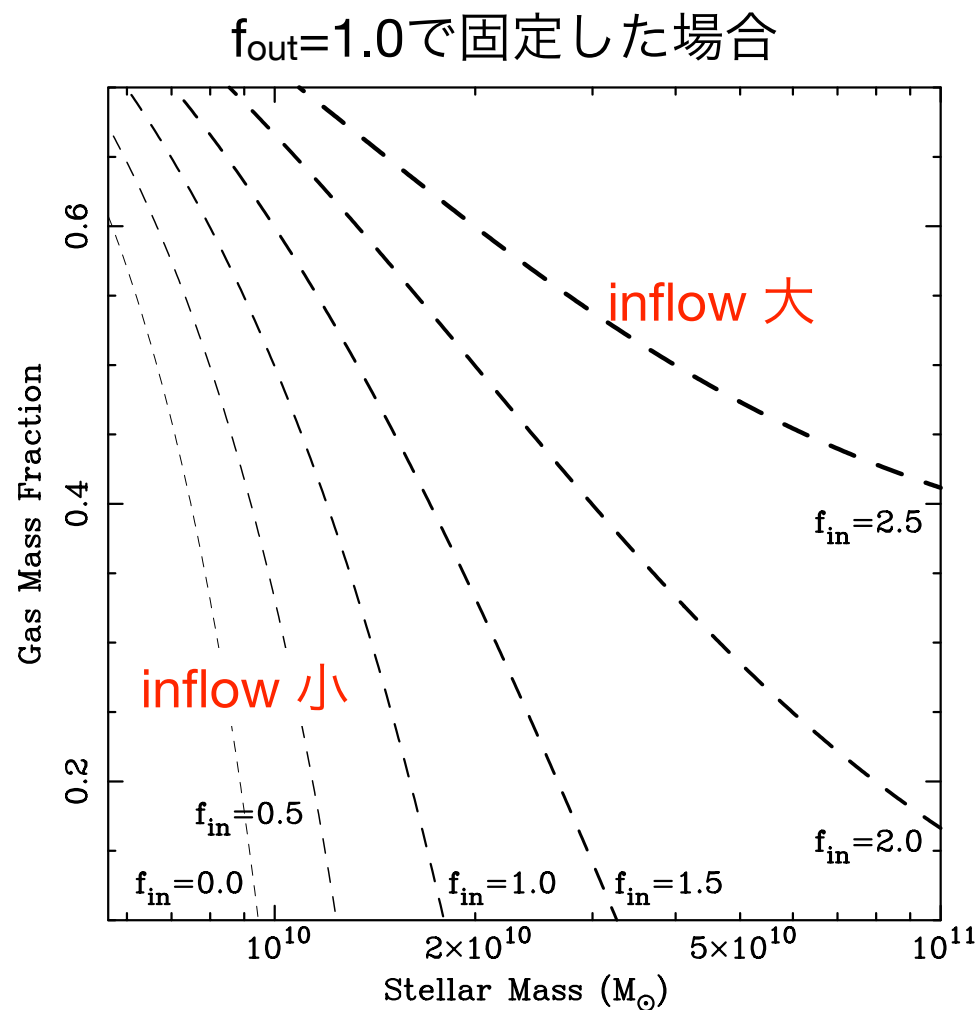
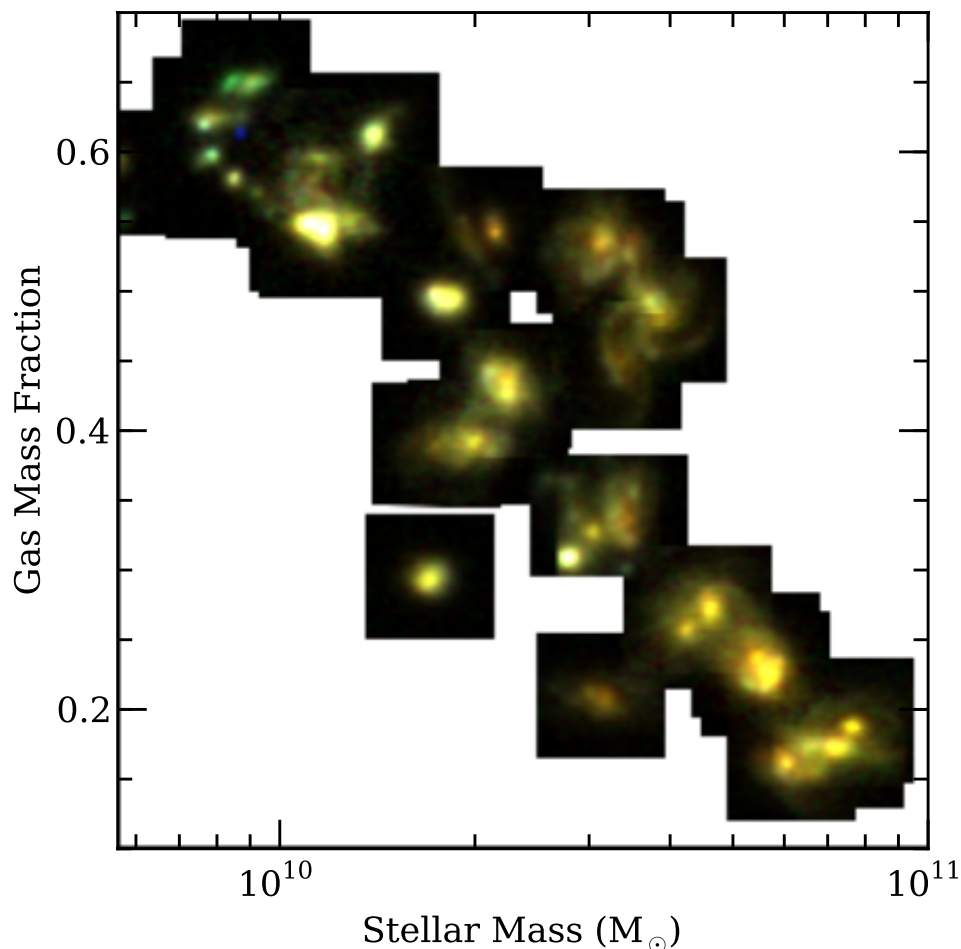
形態との関係：

- 形態(Morphology)とinflow/outflowとの関係
 - 一部のサンプルはCANDELS (HST/WFC3+ACS)領域にある
 - 3色(F808W, F125W, F160W)合成図による形態分類
 - この時代($z \sim 1.4$)において既にdisk/bulge/ellipticalなどの形態が発現している
- inflow/outflowモデルとの比較 (ガス質量フラクション vs. 金属量)



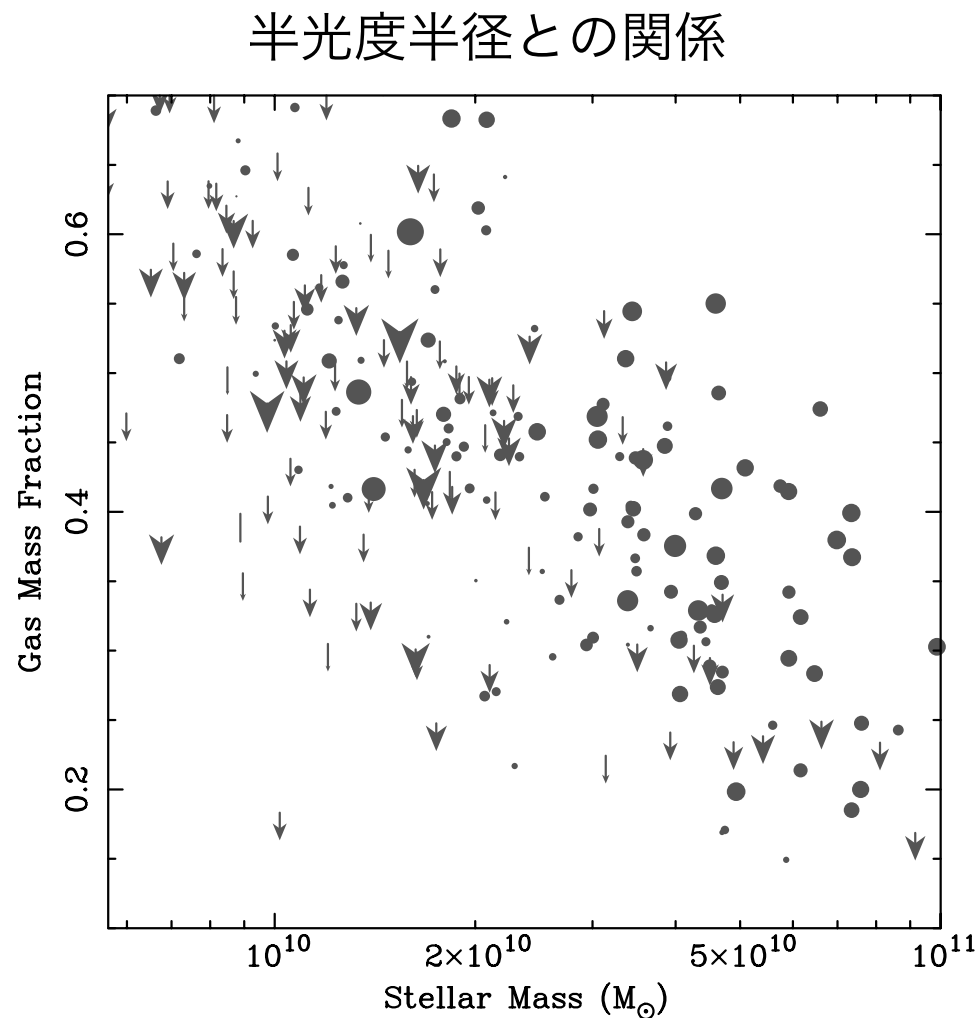
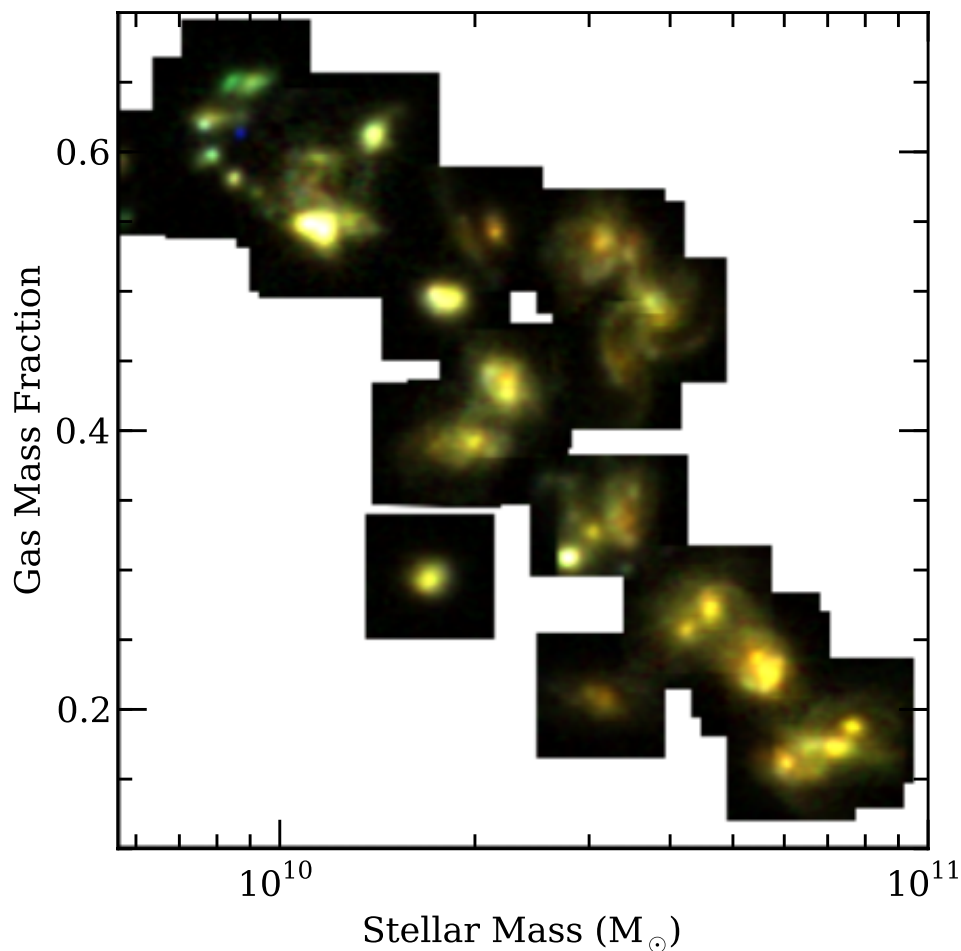
形態との関係：

- 形態(Morphology)とinflow/outflowとの関係
 - 一部のサンプルはCANDELS (HST/WFC3+ACS)領域にある
 - 3色(F808W, F125W, F160W)合成図による形態分類
 - この時代($z \sim 1.4$)において既にdisk/bulge/ellipticalなどの形態が発現している
- inflow/outflowモデルとの比較 (星質量 vs. ガス質量フラクション)



形態との関係：

- 形態(Morphology)とinflow/outflowとの関係
 - 一部のサンプルはCANDELS (HST/WFC3+ACS)領域にある
 - 3色(F808W, F125W, F160W)合成図による形態分類
 - この時代($z \sim 1.4$)において既にdisk/bulge/ellipticalなどの形態が発現している
- inflow/outflowモデルとの比較 (星質量 vs. ガス質量フラクション)



まとめ：

- FMOSによりH α が検出されたサンプル (約340個のこれまでにない大規模サンプル)
- ガス質量をH α 光度からK-S則を仮定して導出
- ガス質量フラクションが小さいものは金属量が大きい傾向
- 星質量が大きいものはガス質量フラクションが小さい傾向
- 解析的な化学進化モデルを用いて、これらの関係のフィッティング
- inflow rateは1.6-2.0 SFR [M_{sun}/yr]
- outflow rateは0.7-1.2 SFR [M_{sun}/yr]
- 同じ星質量で見た場合、 $z\sim 2.2$ から $z\sim 0.1$ にかけてガス質量フラクションは減少
- 同じガス質量フラクションで見た場合、 $z\sim 2.2$ から $z\sim 0.1$ にかけて金属量は増加
- inflow / outflow rateはhigh redshiftほど大きくなる傾向
- inflow / outflow rateの(total) mass依存性はほとんどない
- 形態との関係はサンプル数が小さいのでなんとも言えない
- ガス質量のより直接的な観測も必要 (ALMAに期待?)