

0 < z < 2 における銀河のガスの割合の進化: 観測とモデルの比較

諸隈 佳菜 (国立天文台 野辺山宇宙電波観測所)

関連論文:

KMM & Baba, in prep

KMM et al., PASJ, accepted (arXiv:1501.02915)

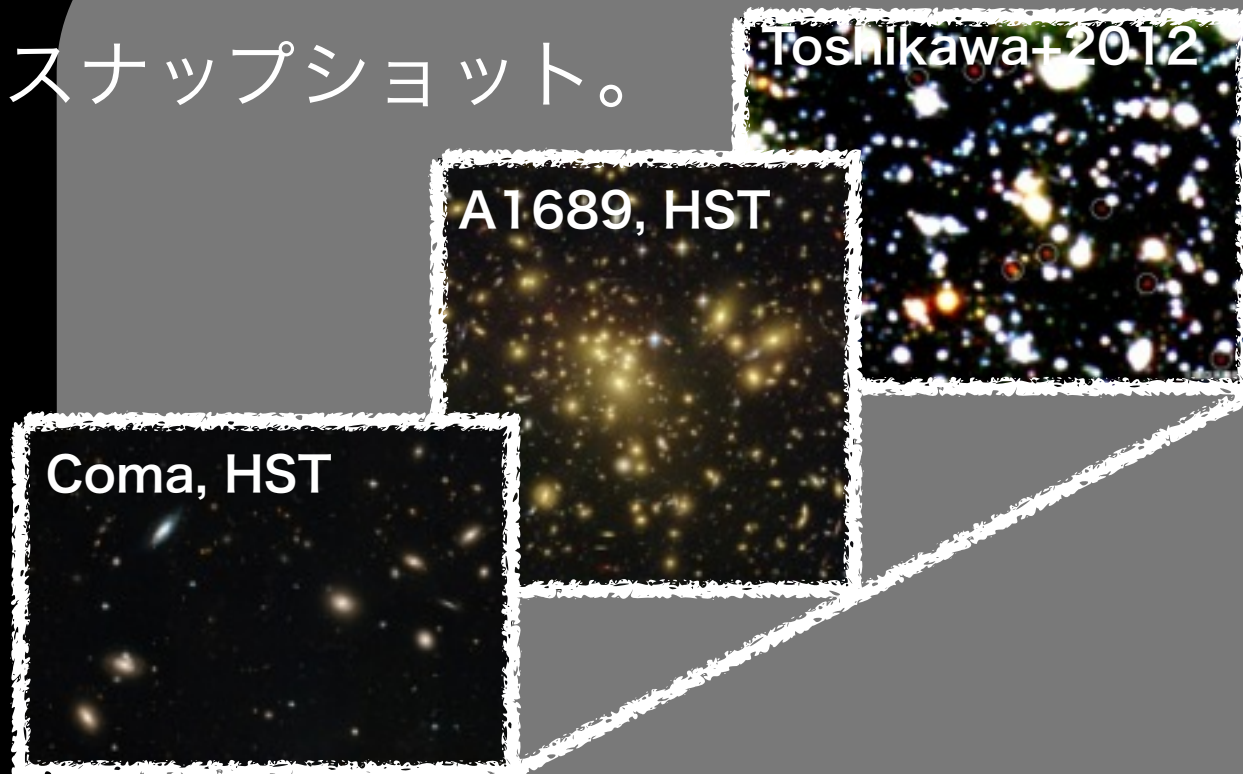
内容

1. INTRODUCTION (銀河進化の痕跡残す fmol)
2. DATA (比較する観測・理論研究)
3. RESULTS (fmol進化の質量依存性の再現)
4. DISCUSSIONS (観測と理論の差の原因)
5. SUMMARY, SKAへの発展

1. INTRODUCTION

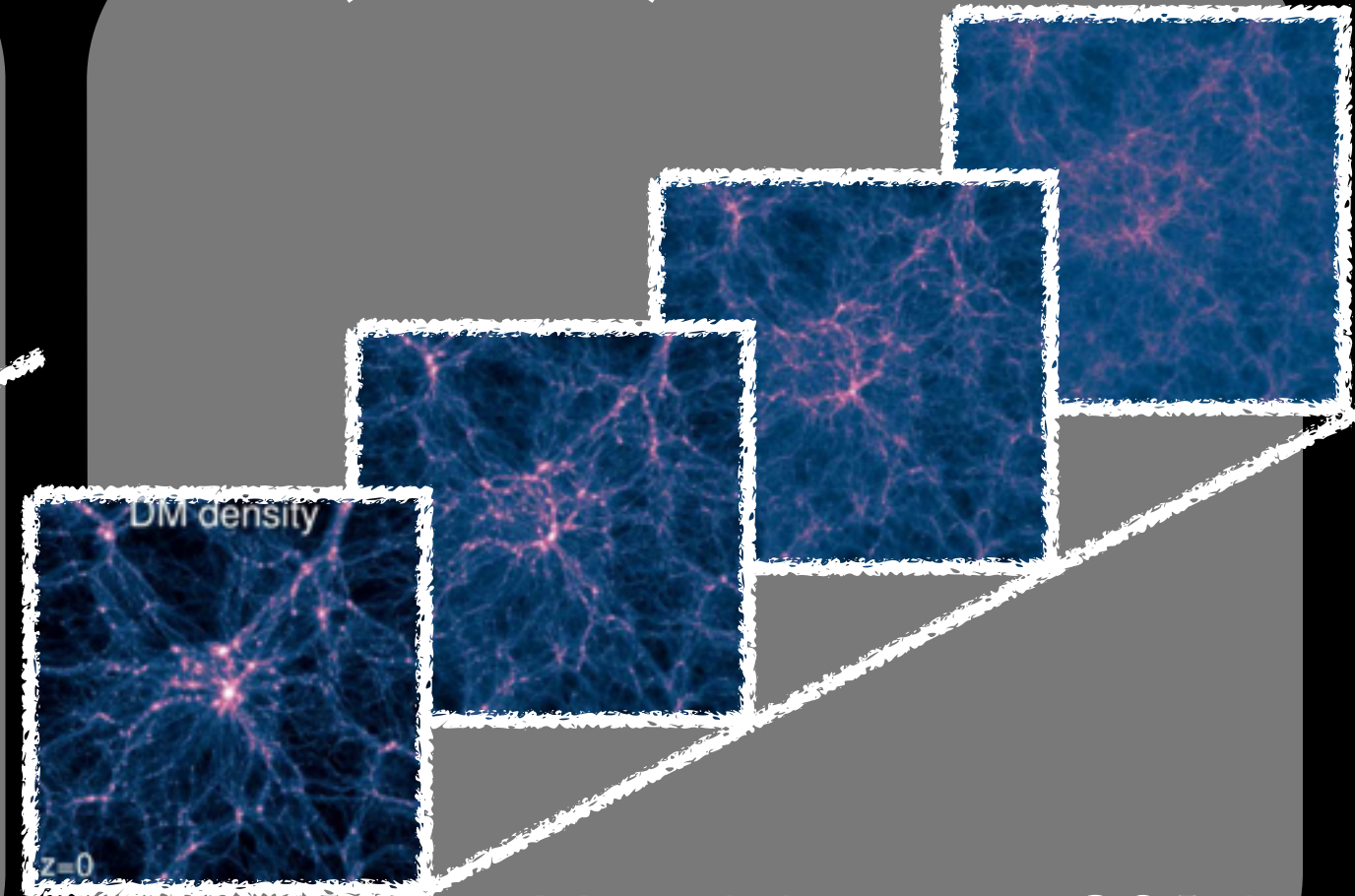
銀河進化の理解… 観測を再現する銀河形成モデルの構築

観測… 観測事実。でも色々な天体のスナップショット。



時間

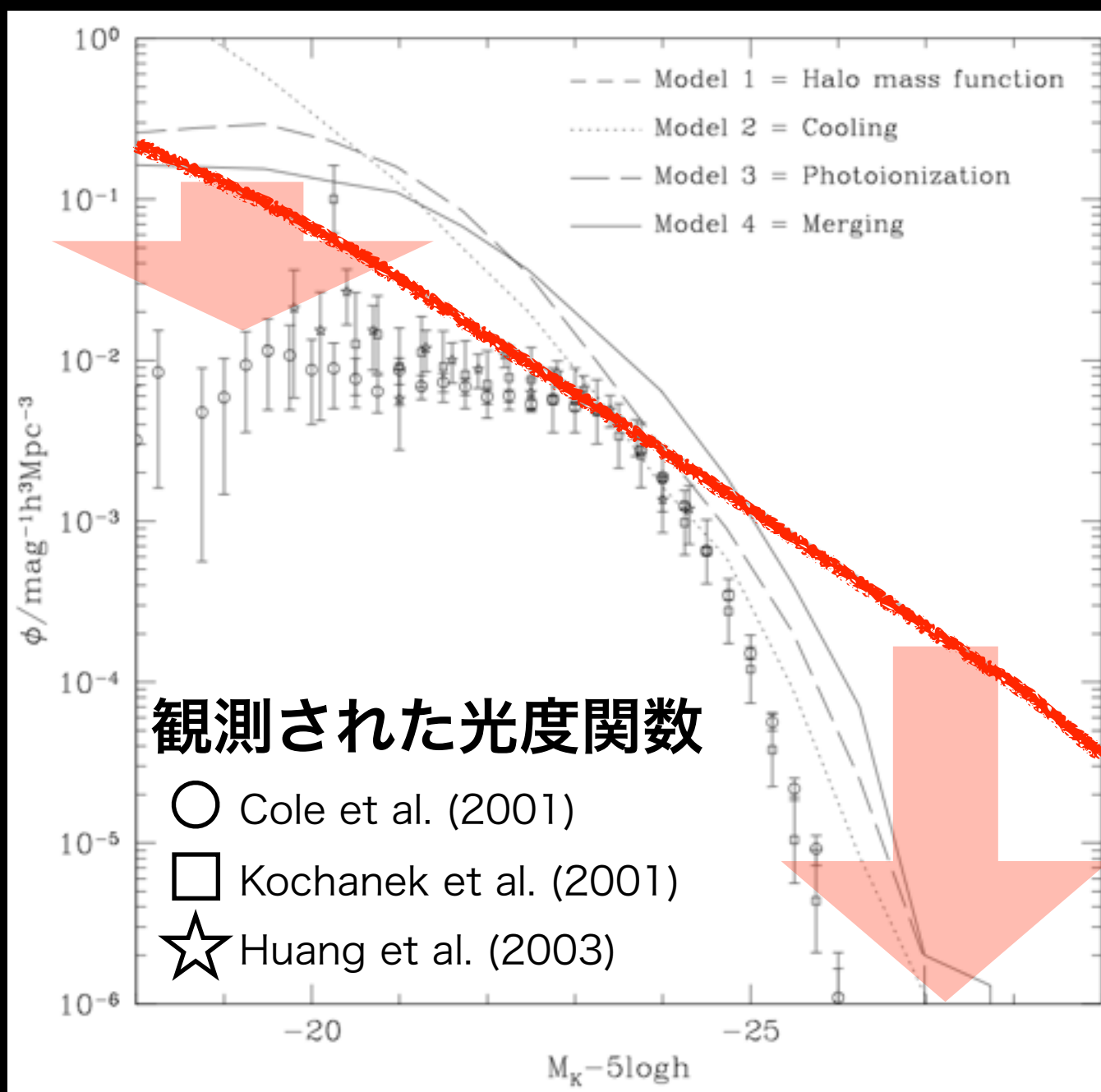
理論(モデル)… 同じ天体の進化。



時間

相補的

問題点: 銀河の光度(質量)関数…銀河形成理論モデルでは massive、低質量銀河を作りすぎてしまう。。



Benson+(2003)

モデル

- Halo mass functionと一定のM/L
- Cooling timescale (White & Rees 1978)
- - Photoionization (Benson+2002)
- Photoionization+Merging

解決策:

ガスを冷えにくくしたり、
なくして星形成抑制。

星形成に直接関わる低温ガスの性質も再現している?

注目するパラメタ: バリオン(星とガス)に対するガスの割合

$$f_{\text{gas}} = \frac{M_{\text{gas}}}{M_{\star} + M_{\text{gas}}} \quad M_{\text{gas}} = M_{\text{HI}} + M_{\text{H}_2}$$

本当はHIのデータも必要!
SKAでのHIサーベイ

星の死

ガス降着

ガス放出

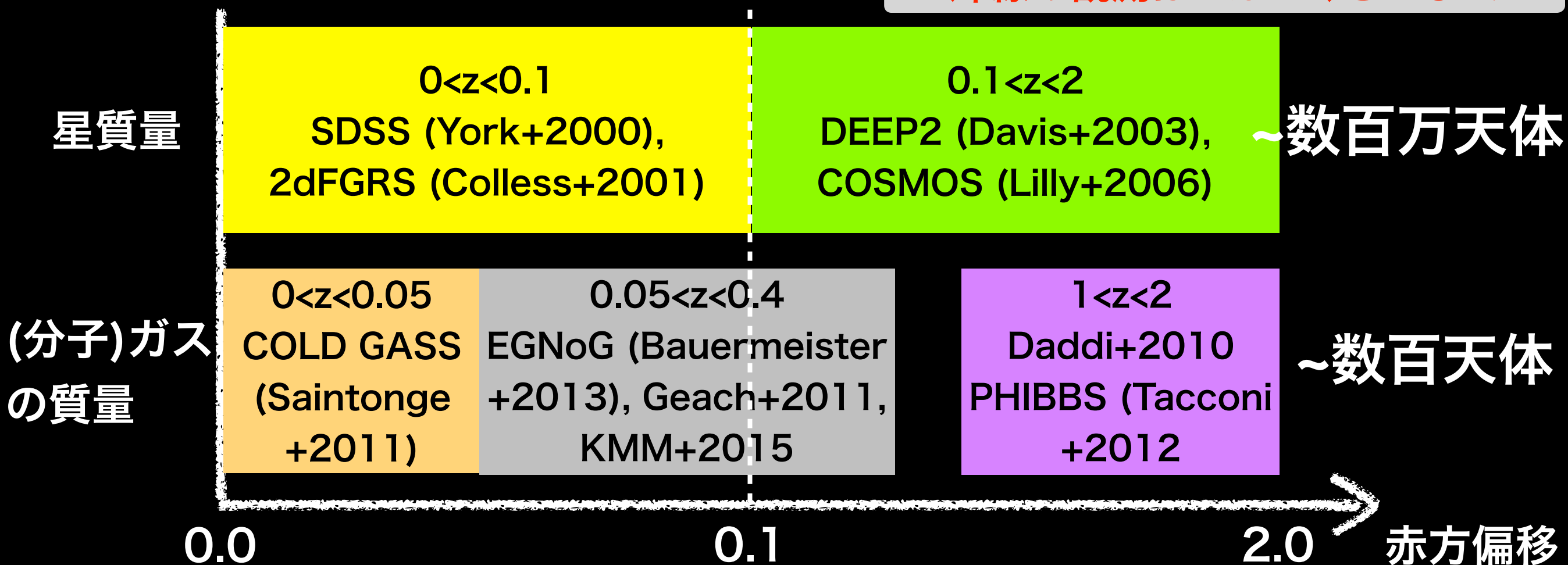
M101/HST Gallery

星形成

$f_{\text{gas}} \leftarrow$ ガス降着・星形成・ガス放出の歴史

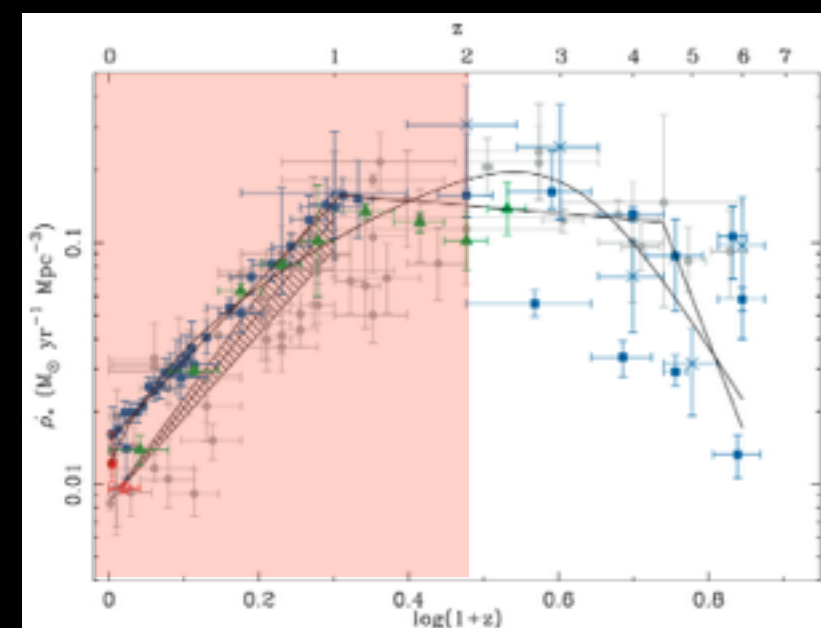
CO観測による銀河の分子ガスサーベイの発展

HI輝線の観測は $z < 0.2$ くらいまで...



$0 < z < 2$ の銀河の星、分子ガスのデータが集まりつつある!

星形成の最盛期 → 現在
における銀河の f_{mol} 進化



銀河形成・進化に関する、統計的理論研究の発展

銀河の統計的性質 (光度関数など)

準解析的モデル (SAM)

e.g., Kauffmann et al. 1999;
Somerville & Primack 1999; Cole
et al. 2000, ...

数値シミュレーション (SIM)

Schaye+2010 (OWLS), Okamoto
+2014, Thompson+2014,
Vogelsberger+2014 (Illustris),
Schaye+2015 (EAGLES),

H₂分子形成モデル

Obreschkow+2009, Lagos+2011,
Fu+2012, Popping+2014

Duffy+2012, Christensen+2012,
Thompson+2014, Tomassetti
+2015

観測との直接比較が可能に！

2. DATA

観測データ

Name	Redshift	M_* ($10^{10} M_\odot$)	SFR (M_\odot/yr)	Symbols in figure 1	Reference
S11	0.025 – 0.05	1.0 – 32	0.07 – 39.74	open circle	Saintonge et al. (2011)
B13	0.05 – 0.3	4.0 – 30	3.4 – 88	open triangle	Bauermeister et al. (2013)
MM15	0.1 – 0.2	4.0 – 20	8.5 – 48	filled circle	Morokuma-Matsui et al. (2015)
G11	0.4	4.1 – 11	28 – 62	open square	Geach et al. (2011)
D10	1.5	3.3 – 11	62 – 400	open inverted-triangle	Daddi et al. (2010)
T13	1.0 – 1.5, 2.0 – 2.3	0.6 – 17	26 – 480	open diamond	Tacconi et al. (2013)
P12	0.5 – 2.0	0.01 – 100	–	dash-dot lines	Popping et al. (2012)

Indirect method: SFR -(KS則)-> Gas -(Pressure-based H₂)-> H₂

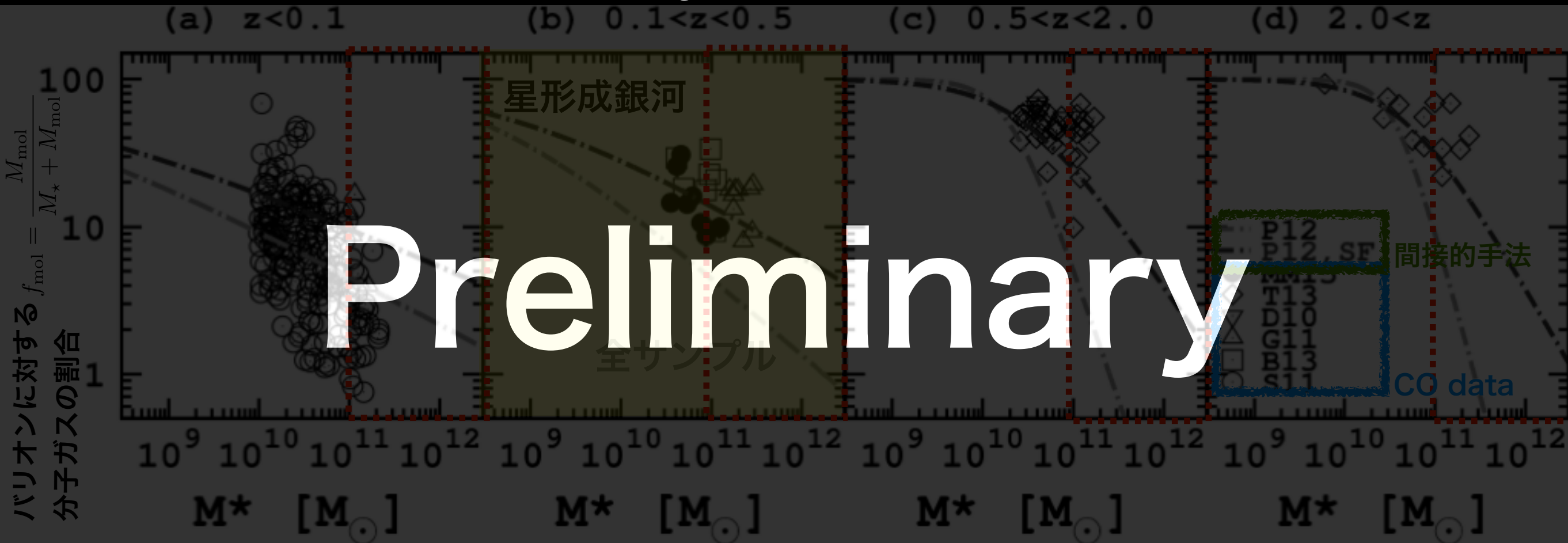
理論研究データ

Name	H ₂ prescription	Star formation	Symbols in figure 2	Reference
F12 (Semi-analytic model)	Column density, metallicity and radiation field (Krumholz et al. 2009)	Bigiel et al. (2008)	orange open circle	Fu et al. (2012)
Du12 (Cosmological simulation)	Pressure (Blitz & Rosolowsky 2004)	Schaye & Dalla Vecchia (2008)	open square	Duffy et al. (2012)

3. RESULTS

観測データ同士の比較

P12: Popping+2012(indirect method), MM15: KMM+2015, T13: Tacconi+2013, D10: Daddi+2010, G11: Geach+2011, B13: Bauermeister, S11: Saintoge+2011

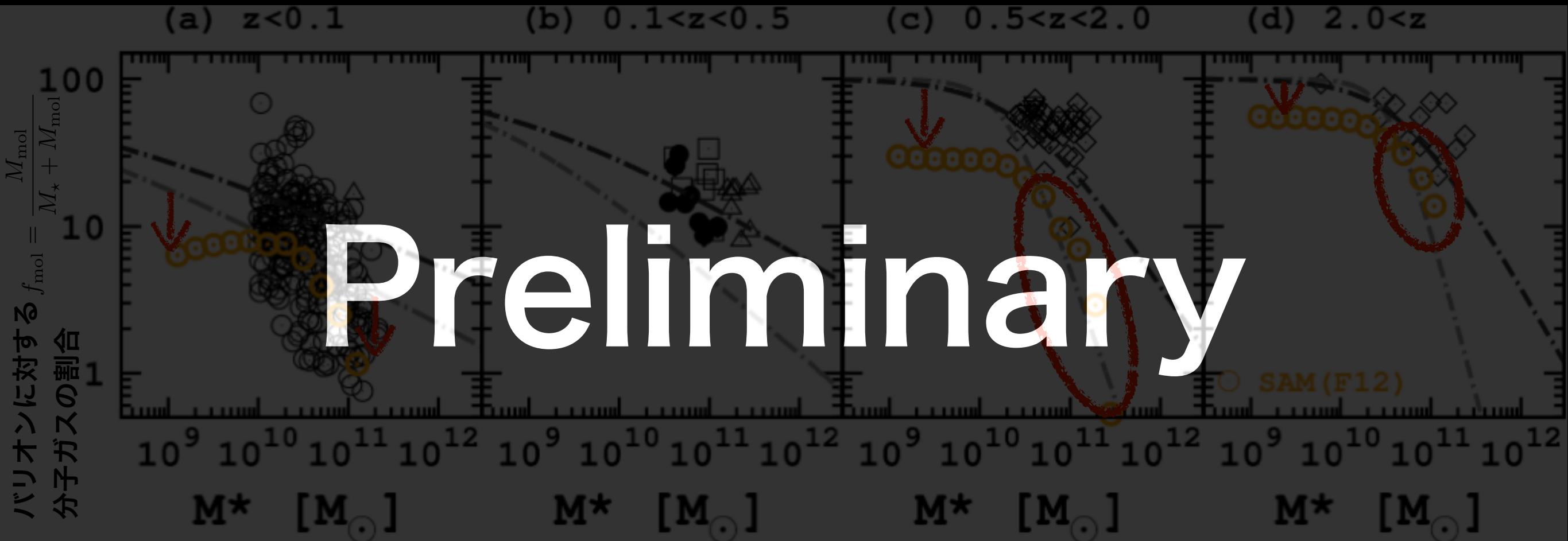


Preliminary

- **0.1 < z < 0.5でもCO観測とP12(星形成)一致。P12式はCO観測をよく再現。**
 - **P12式: massive側(>10¹¹Msun)、lower-zでf_{mol}大。--> 適用限界?**
- **f_{mol}進化の質量依存性: 銀河の星質量進化(Leitner 2012)を考慮に入れると、z=0で10¹⁰、10^{10.5}、10¹¹ Msunに進化する銀河のf_{mol}はz=1から1/8、1/6、1/4に減少。**
 - **しかし、z<1における低質量銀河のCO観測が少ない。**

観測と理論研究の比較 (準解析的銀河形成モデル)

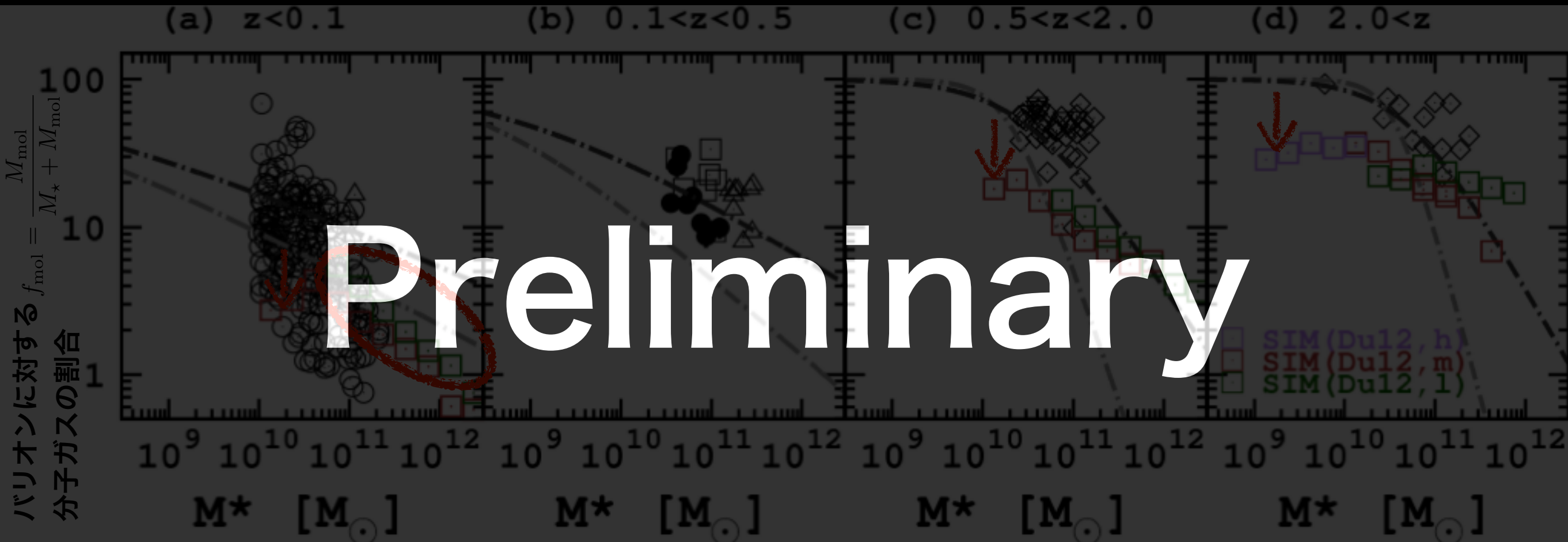
F12: Fu+2012



- $z \sim 0$: $2 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$ あたりではP12(全体)と合うが、massive、低質量側で過小評価。
 - ただしCOの観測とは一致。
- $z \sim 1-2$: massive側はP12(全体)と合うが、低質量側では過小評価。
 - CO観測と比べると過小評価。

観測と理論研究の比較 (宇宙論銀河形成シミュレーション)

Du12: Duffy+2012, AGN feedbackなし



- $z \sim 0$: massive側ではP12(全体)と合うが、低質量側で過小評価。
- $z \sim 1-2$: massive側はP12(星形成銀河)に近づくが、低質量側では過小評価。
- CO観測と比べると過小評価。

結果のまとめ

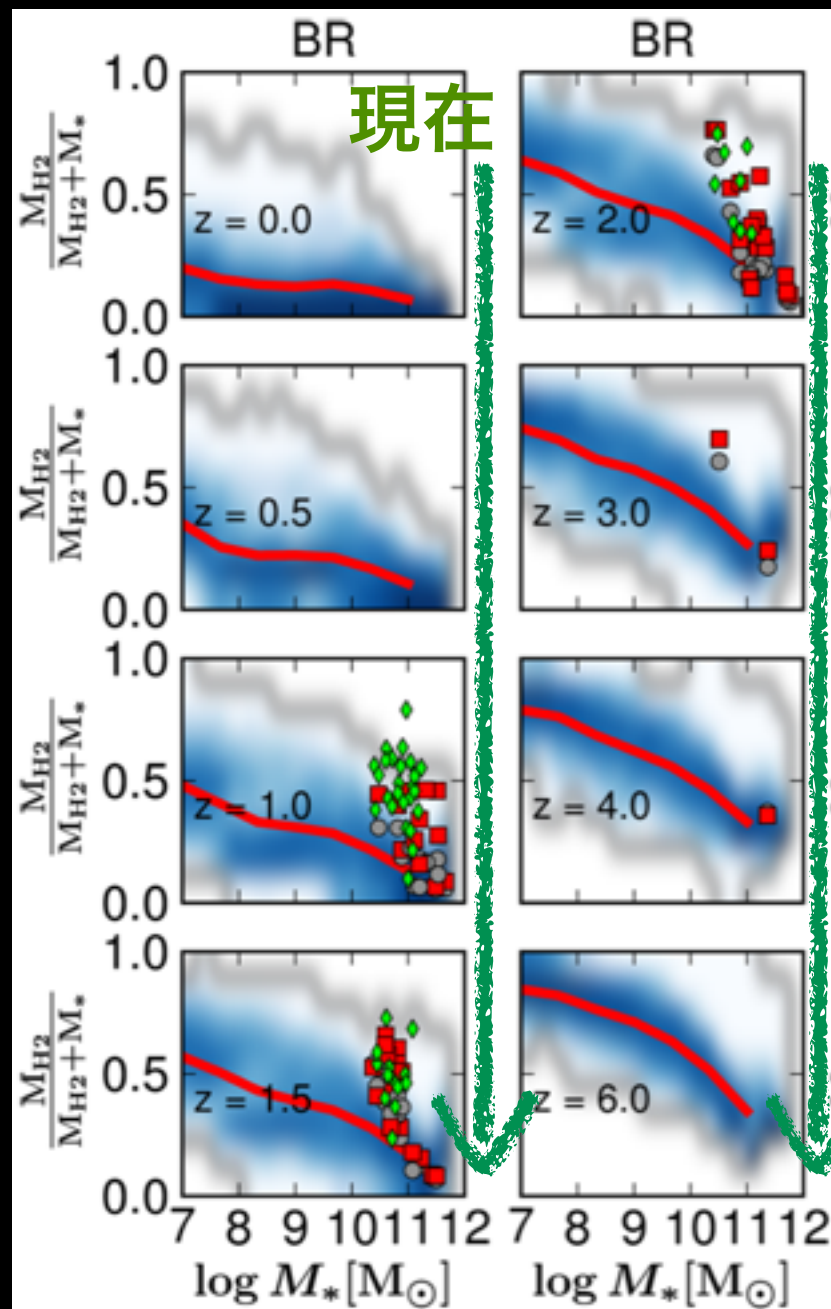
- 1) どの時代もmassive銀河ほど f_{mol} 小。
- 2) f_{mol} 進化の星質量依存性: massiveな銀河は $z \sim 1$ の時点で大半のガスを消費、低質量は $z < 1$ でガスから星に変換。
- 3) Popping+2012のfitting式は $> 10^{11} \text{ Msun}$ では使えない？
- 4) 理論研究は1)と2)の定性的な傾向を再現。
- 5) 理論研究から予想される f_{mol} は全体的に観測よりも低い。
 - 1) $z \sim 0$ では低質量側($< 10^{10} \text{ Msun}$)とmassive側($> 10^{11} \text{ Msun}$)で過小評価。massive側はCO観測とは合う。low- z +massive側ではPopping+2012のfitting式が適用できないだけ？
 - 2) $z \sim 1-2$ のPopping+2012(全体)massive側の特徴は再現。

4. DISCUSSIONS

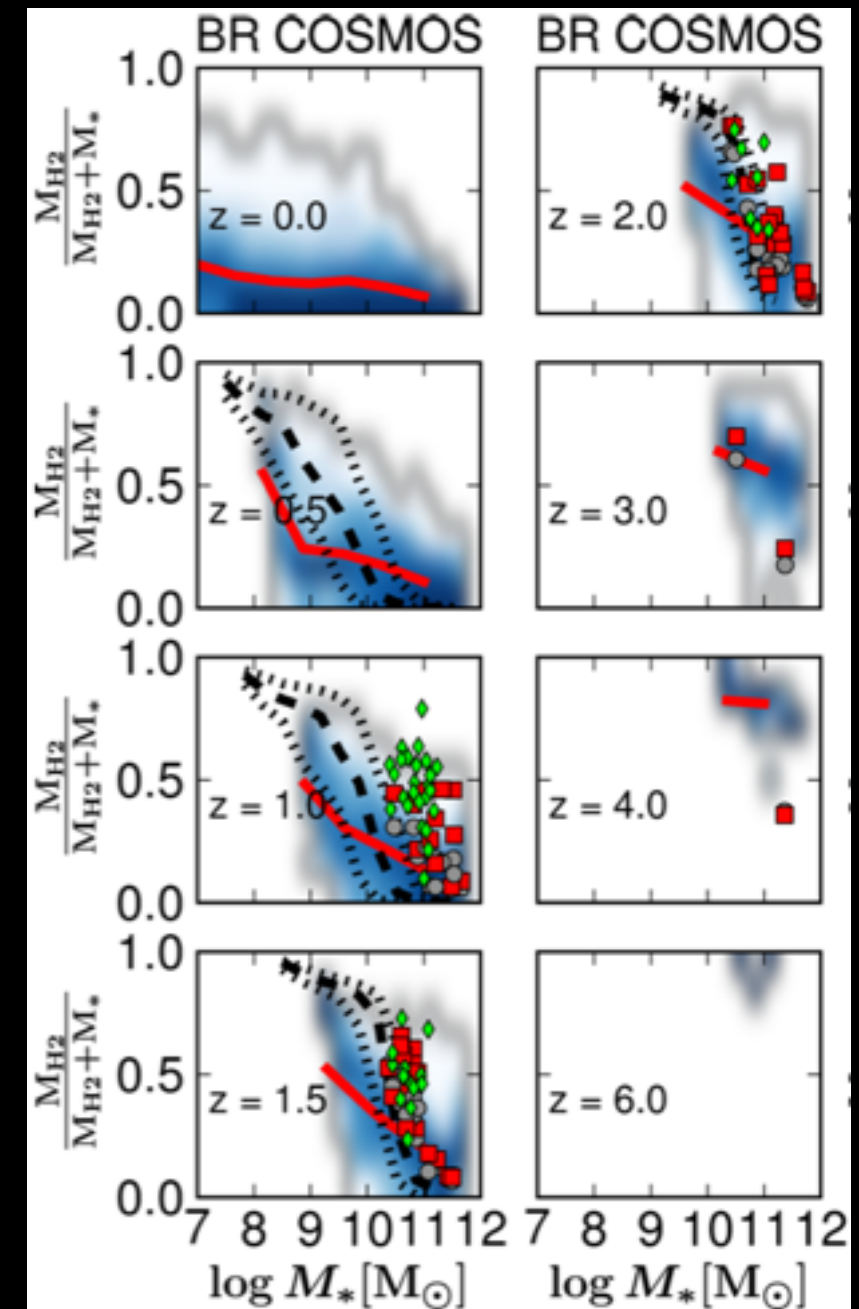
観測と理論研究の不一致の理由: 観測的研究 (1/2)

“明るい天体”へのバイアス。

- サンプル抽出条件や、観測感度を考慮に入れると、観測に近づく (Kauffmann+2012; Popping+2014)。




青・赤: モデル
記号: CO観測
点線: 間接的手法



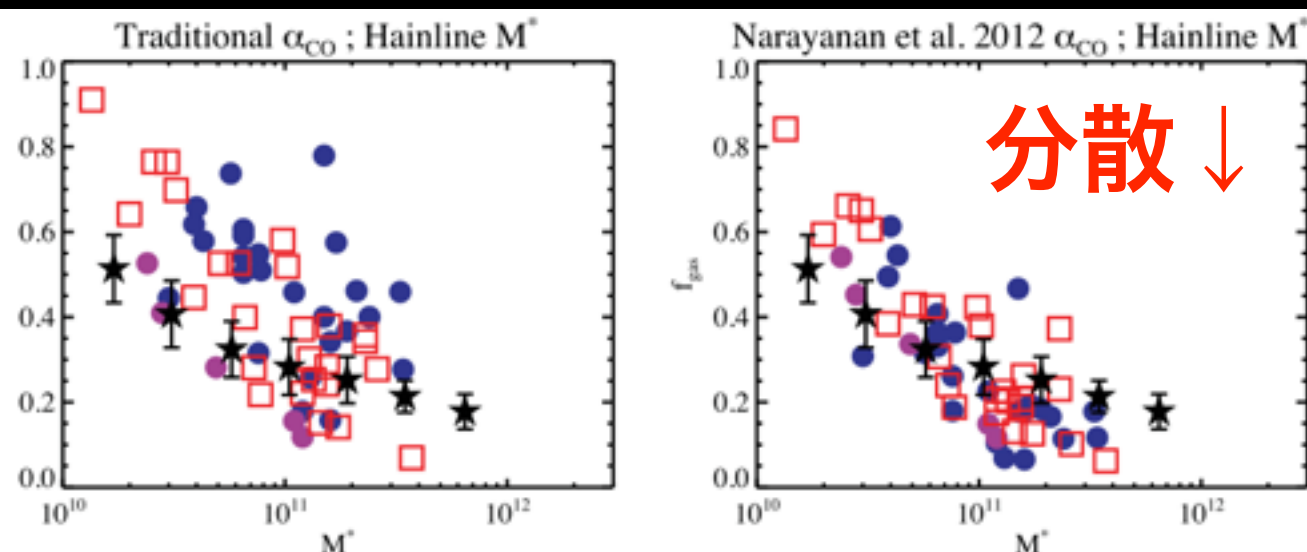
改善?

観測と理論研究の不一致の理由: 観測的研究 (2/2)

- **CO-to-H₂変換係数(α_{CO})の不定性。**
 - fixな α_{CO} を使用すると、 f_{mol} を過大評価する可能性があり、 $\alpha_{CO}(Z, W_{CO})$ (Narayanan+2012a)を使うと宇宙論的シミュレーションから予想される値と合う(Narayanan+2012b)。

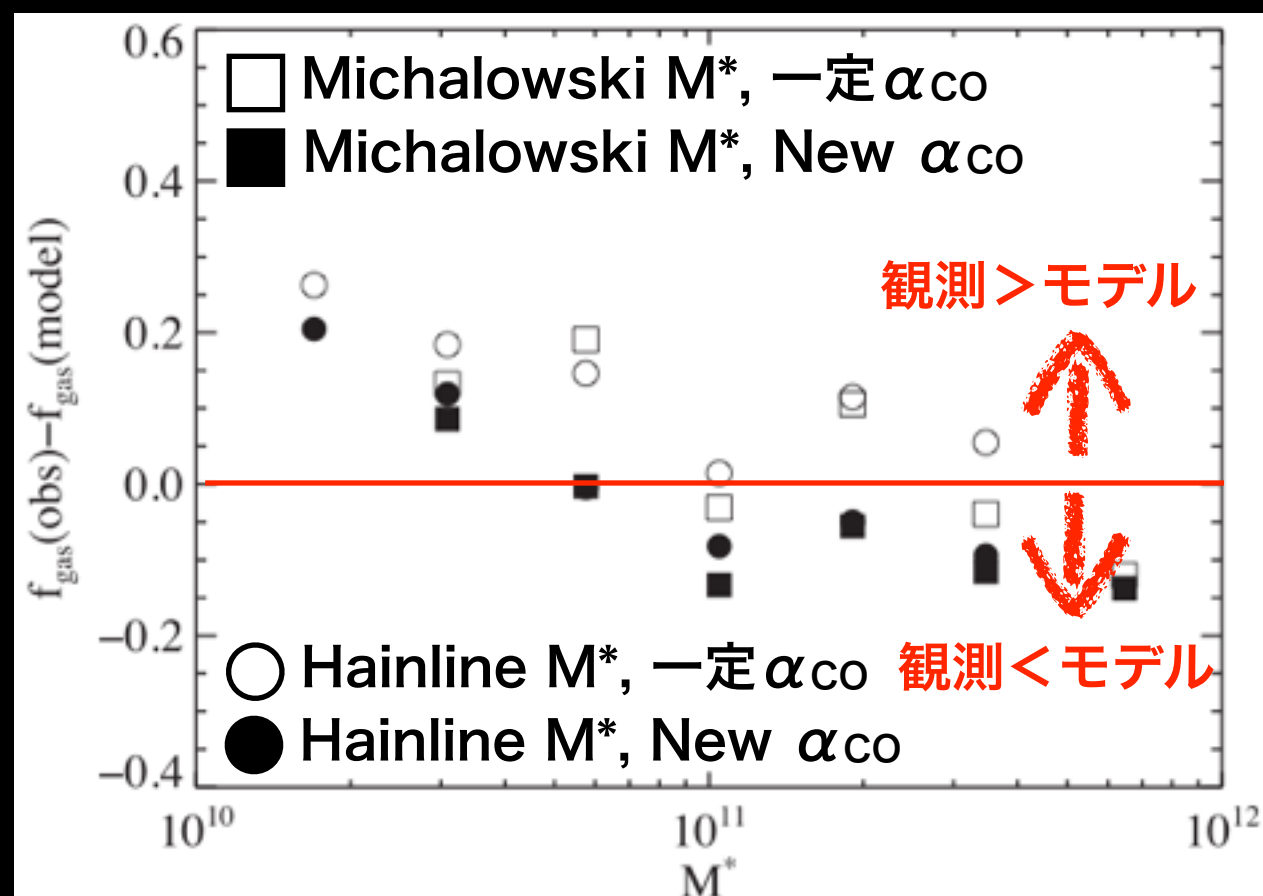
一定 α_{CO}  New α_{CO}

ガスの割合



- high-z disk
- SMG
- 可視で暗い電波銀河
- ★ 数値シミュレーション

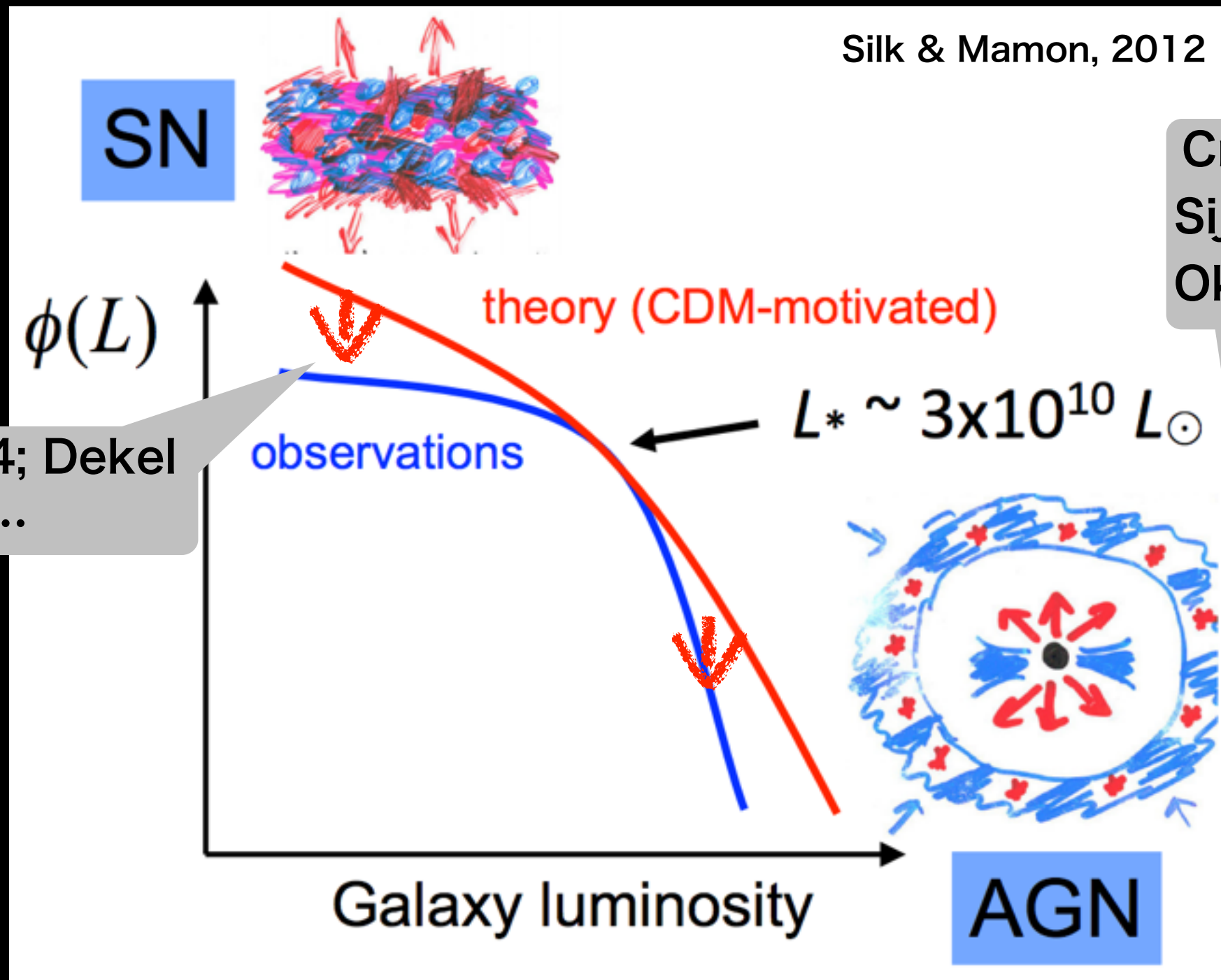
観測とシミュレーションの差



Narayanan+2012b

改善?

観測と理論研究の不一致の理由: 理論的研究 (Feedbacks)

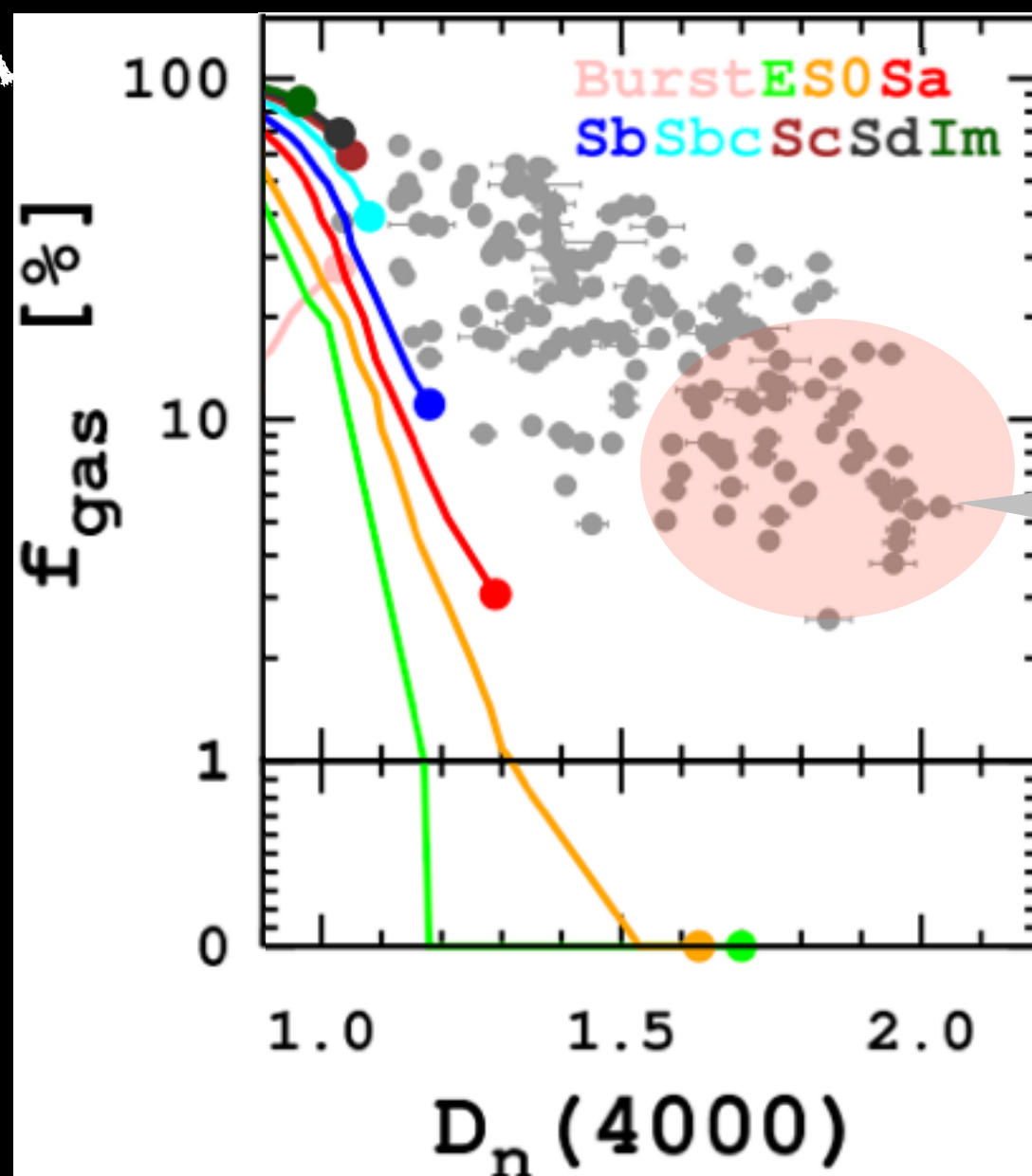


ガスを吹き飛ばす or 加熱し、更なる星形成を抑制。
 → cold gas成分が減りすぎた？

観測と理論研究の不一致の理由: Feedbackの入れ方?

ガスリッチ

KMM+2015



種族合成モデル・PEGASEとの比較。
各銀河タイプの可視スペクトルを再現する
進化シナリオでの計算。

non-zero gas fractionで、古い星から
なる銀河を作るのは困難。。

ガスを残しつつ、星形成を止める
feedbackの必要性を示唆。
e.g.) Morphological quenching
(Martig+2009)

ガスプア

若 銀河の星の年齢 古

5. SUMMARY

Q. 銀河形成進化モデルは銀河の質量関数(星成分)を再現するように銀河内のガス量を調節。観測される f_{mol} 進化(~ガス降着、星形成、ガス流出の歴史)は再現してるか??

観測される f_{mol} 進化の質量依存性を理論予測と比較

A. 観測と理論の不一致

- massiveな銀河ほど初期にガスを減らしているという観測の傾向を再現。
- しかし、全体的に観測よりもガスの割合が低い。
 - 特に質量の大きい($>10^{11}$ Msun)銀河、小さい($<10^{10}$ Msun)銀河におけるガスの割合が低い。

[考察] 観測の不定性だけでは観測と理論の不一致は説明できない。

- ガスのある程度残すことのできるフィードバック過程が必要??
 - 単純にガスを抜き去って星形成を止めるわけではない??

SKAですべき(したい)こと…

feedback以外の銀河進化モデルの不定性の解消

H2形成モデルの検証

低温ガス

HIとH2に分類

星形成

H2形成モデル

H2からのSF

H2形成モデルの違いで異なるHI/H2進化

Metallicity-based

$z > 2$... H2/HI比がほぼ一定。

$z < 2$... H2/HI比が減少。

Pressure-based

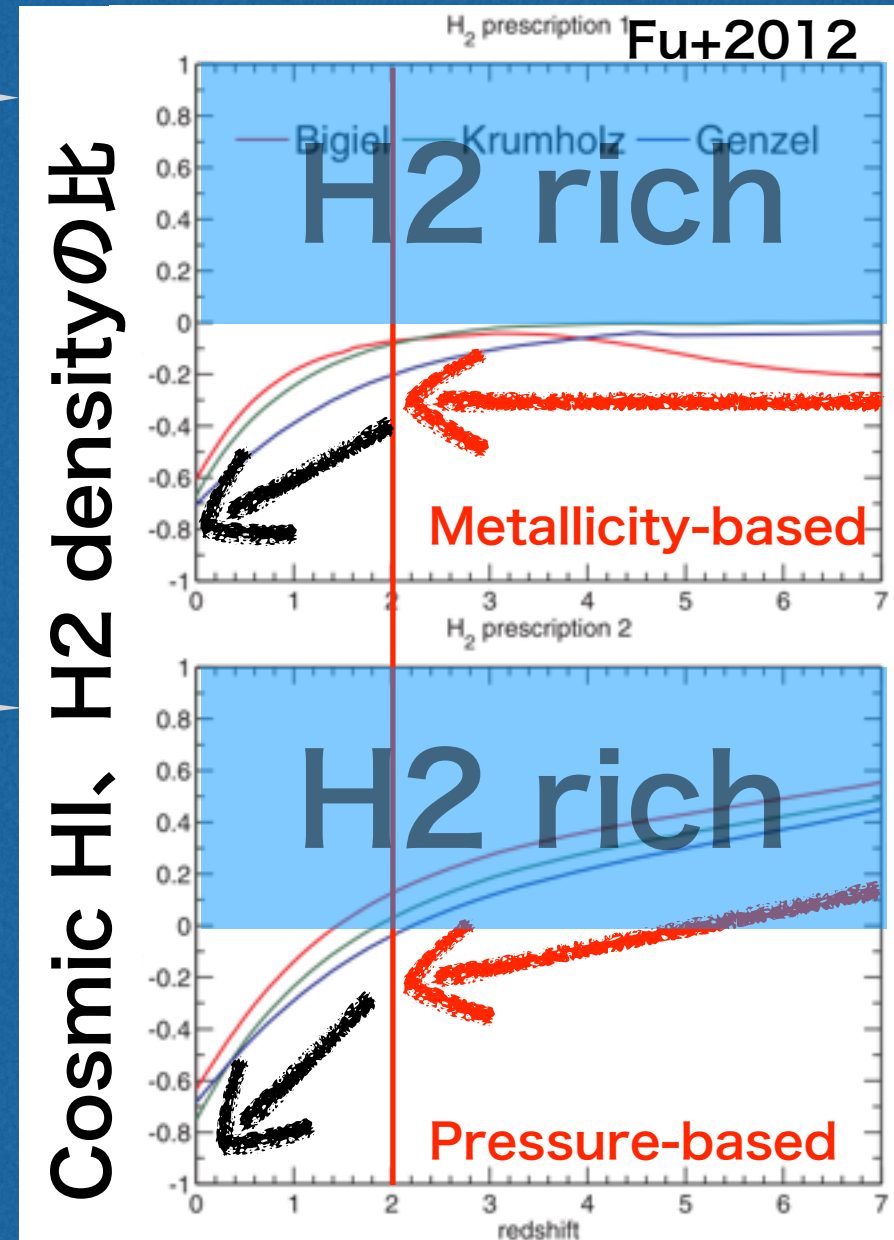
$z > 2$... H2/HI比がゆるやかに減少。

$z < 2$... H2/HI比が減少。

SKAでHI質量分布進化

ALMAでH2質量分布進化

+独自の銀河進化モデルの構築



Fin