

# 0<z<2の銀河におけるガス量の進化

諸隈 佳菜 (NAOJ)

関連論文:

KMM & Baba, submitted

KMM+2015, PASJ, accepted (arXiv:1501.02915)

KMM+ in prep.

## 内容

1. INTRODUCTION (光度関数の再現)
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

## Takeaway messages

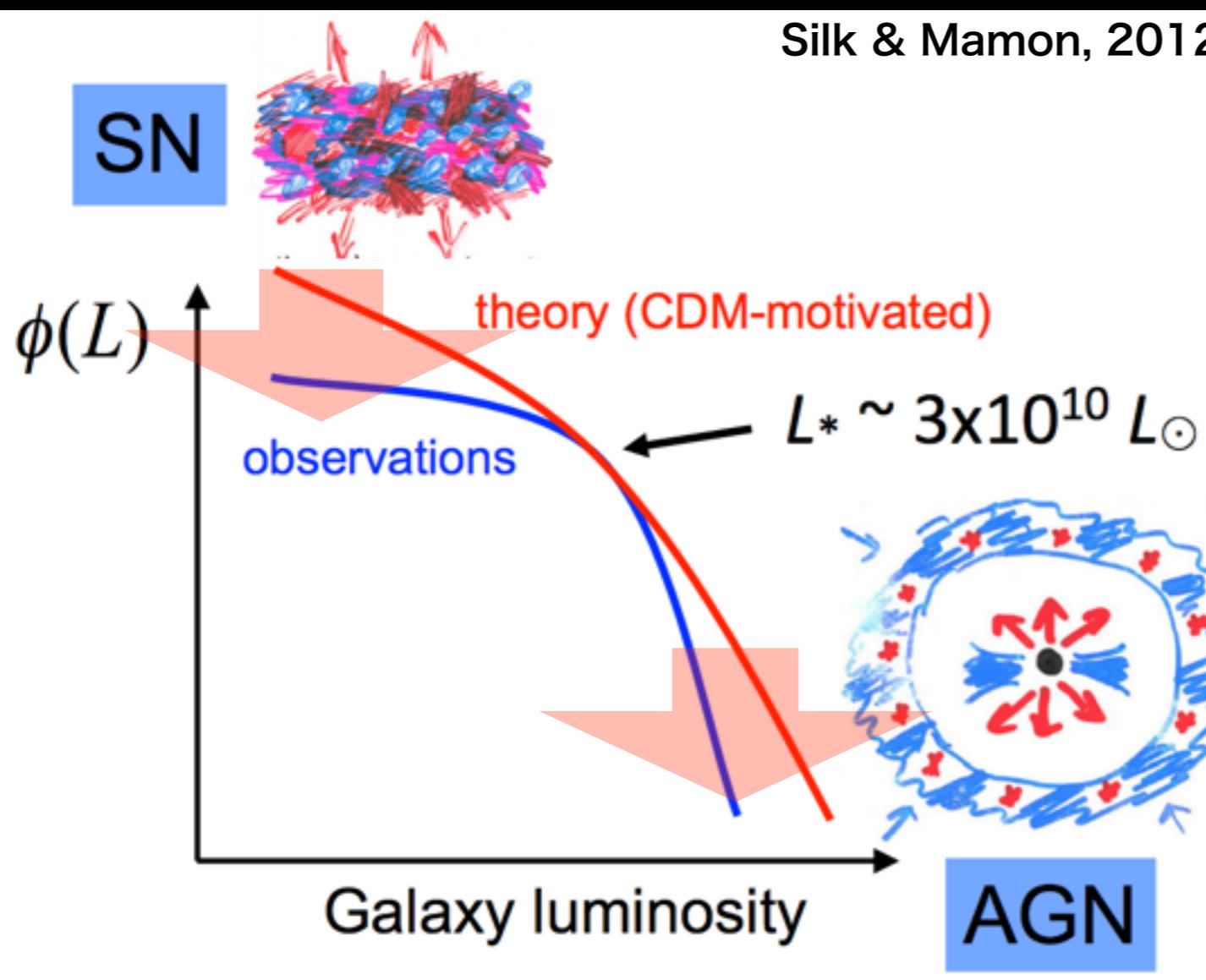
1) 銀河における低温ガス量はフィードバックモデルの強い制限となること。

銀河形成モデルは銀河における低温ガス質量を過小評価  
ガスを残しつつ星形成を止めるプロセスが大事？

2) ALPACA=ALMA Large Program of gAs  
survey toward Chukan-redshift gAlaxies

# 1. INTRODUCTION

問題点: 銀河の光度(質量)関数…銀河形成理論モデルでは大・低質量銀河を作りすぎてしまう。”銀河数密度問題”



解決策:

ガスを冷えにくくしたり、  
なくして星形成抑制。

低質量側: SN feedback

(e.g., Larson+1974; Dekel & Silk 1986)

大質量側: AGN feedback

(e.g., Croton+2006; Sijacki+2007;  
Okamoto+2008)

星形成に直接関わる低温ガスの性質も再現している?

## 2. DATA

# 観測データ

CO Data

Name	Redshift	$M_*$ ( $10^{10} M_\odot$ )	SFR ( $M_\odot/\text{yr}$ )	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 H<sub>2</sub>)-> H<sub>2</sub>

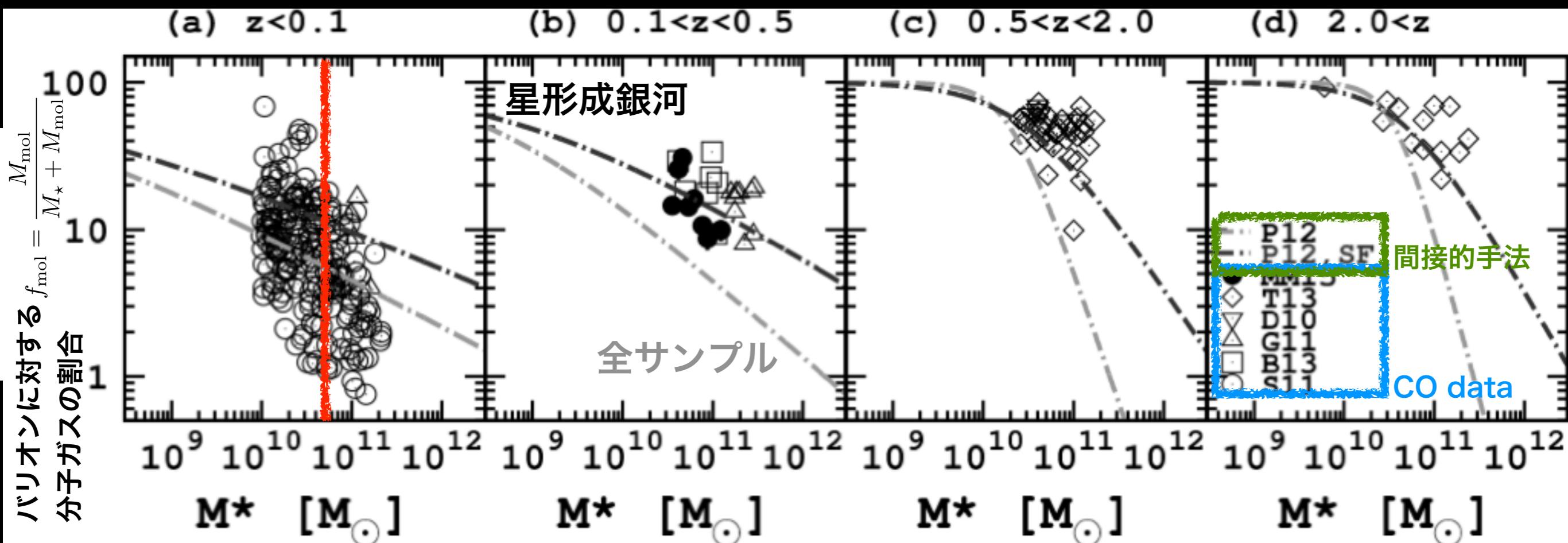
# 理論研究データ

Name	H <sub>2</sub> 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

# 観測データと土の比較

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



$M^* (z=0)$ [Msun]	$f$ [%]	$f$ [%]	$f$ [%]	$f$ [%]	$f$ [%]	$f$ [%]
10	96	6.8	14	80	10	8
10	14	4.2	8	37	7.0	6
10	4.9	3.6	1	26	6.1	4

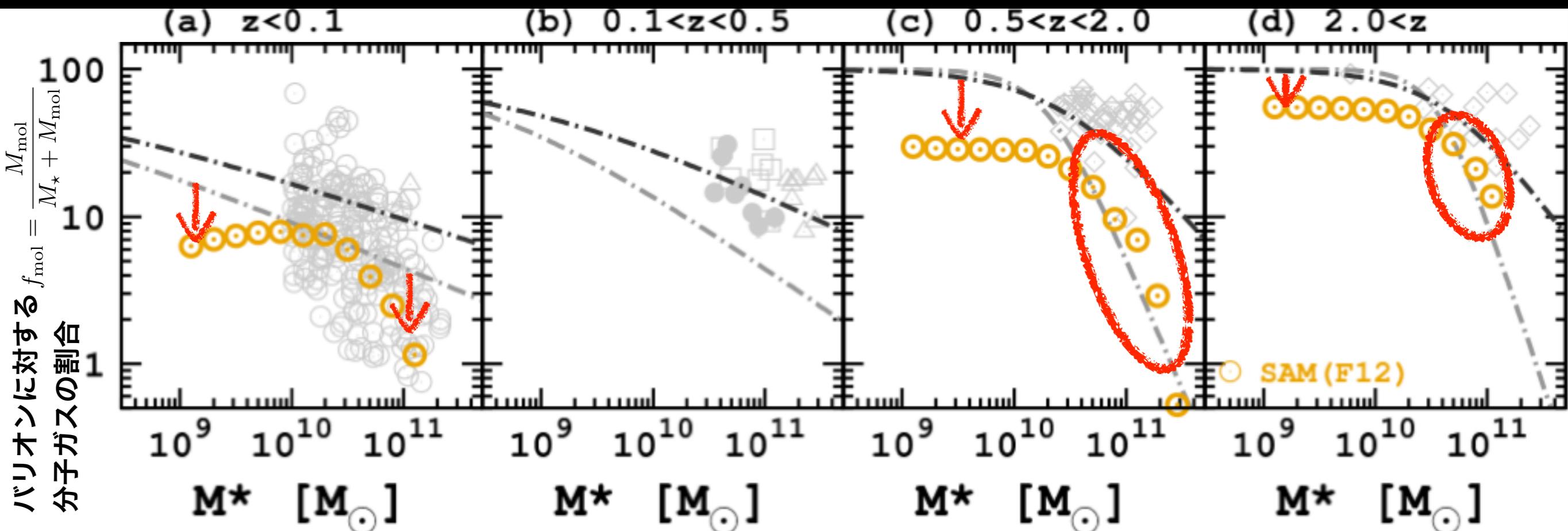
$M^*$ 進化モデル: Conroy & Wechsler 2009

Leitner 2012

KMM & Baba, submitted

# 観測と理論研究の比較 (準解析的銀河形成モデル)

F12: Fu+2012



- どの時代も小質量銀河ほどガスが多い、という傾向の再現。
- $z \sim 0$ :  $\sim 2 \times 10^{10} M_{\odot}$  ではP12(全体)と合うが、大・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。

## 観測データ間の比較

- 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] 大質量銀河は $z \sim 1$ の時点で大半のガスを消費、低質量銀河は $z < 1$ でガスから星に変換。

## 観測と理論の比較

- 1) 観測の1)と2)の定性的な傾向を再現。
- 2) 予想される $f_{mol}$ は全体的に観測よりも低い。
  - 特に $z \sim 0$ では低質量側( $< 10^{10} M_{\odot}$ )と大質量側( $> 10^{11} M_{\odot}$ )で過小評価。

## 4. DISCUSSIONS

# 観測と理論研究の不一致の理由: 観測的研究

## 1) 明るい天体にバイアス (Popping+2014)

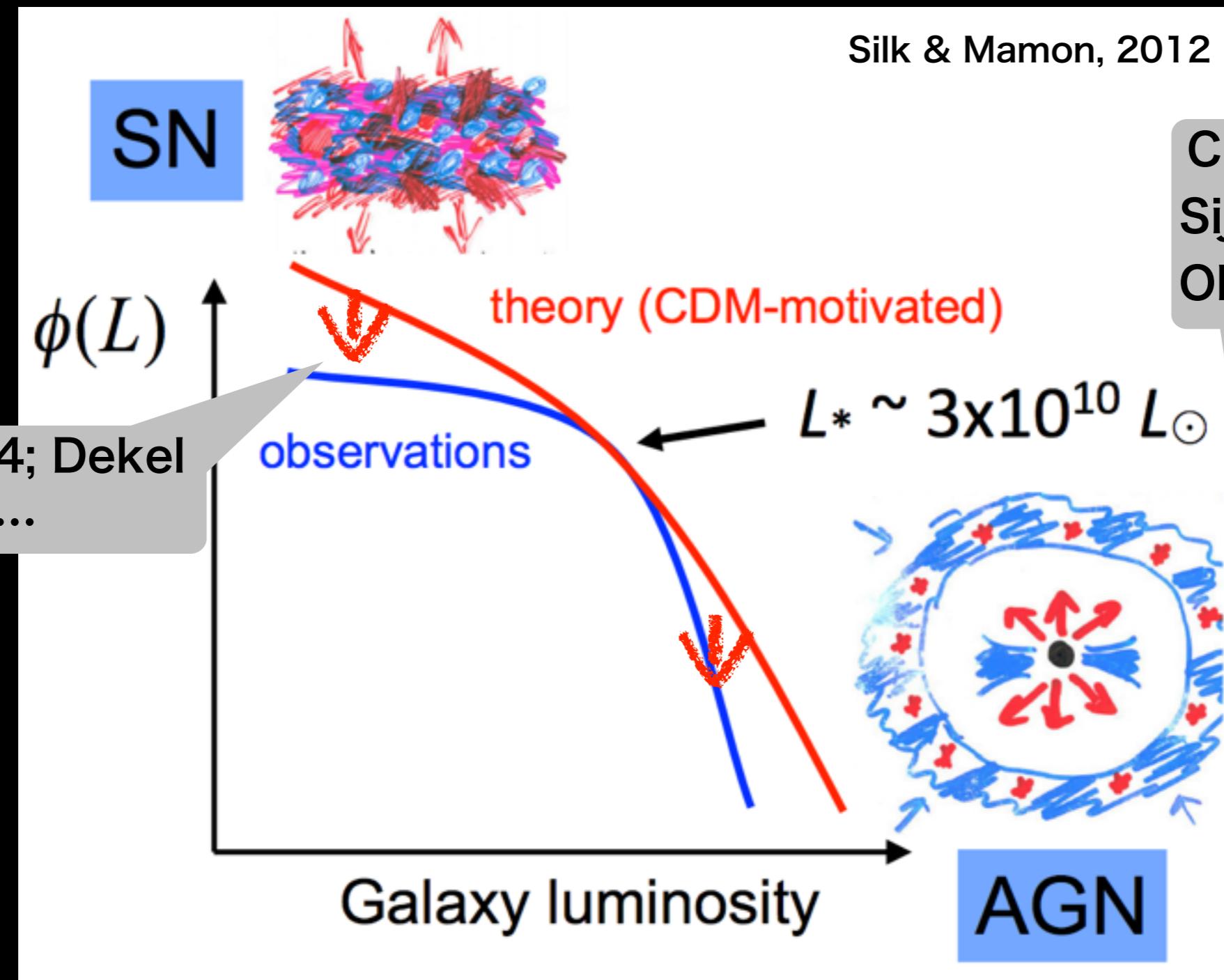
準解析的モデルに観測と同じ条件を課して比較すると、両者は近づく。

## 2) $\alpha_{\text{CO}}$ の不定性 (Narayanan+2011)

金属量・COの積分強度に依存性を持たせると fmolの見積もりは宇宙論的数値シミュレーションからの予想に近づく。

これだけでは説明できなさそう。。。

# 観測と理論研究の不一致の理由: 理論的研究 (Feedbacks)

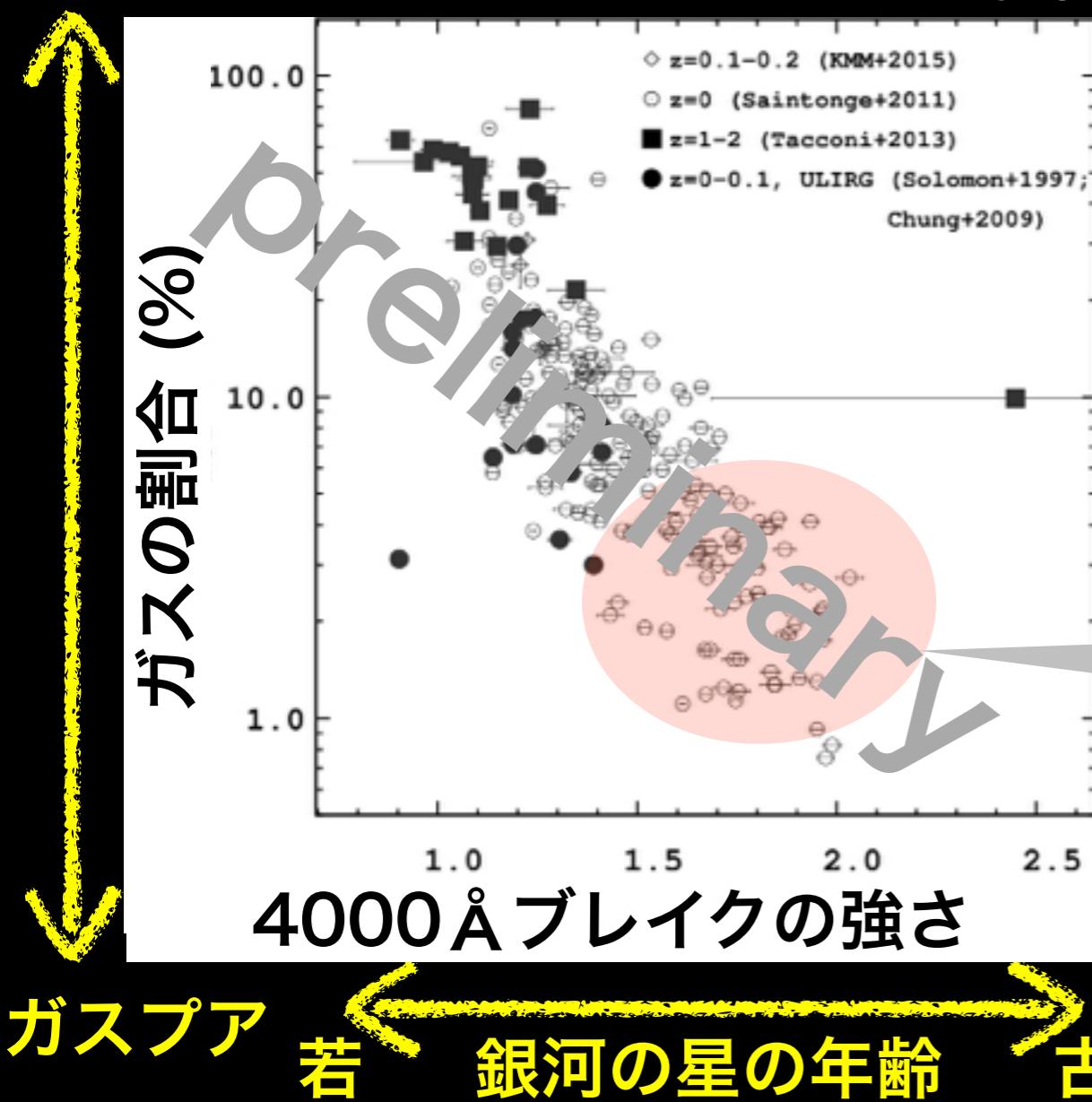


ガスを吹き飛ばす or 加熱し、更なる星形成を抑制。  
→ cold gas成分が減りすぎた？

# 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



D<sub>n</sub>4000-f<sub>mol</sub>関係の発見

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)

# ガスを残しつつ星形成を止めるメカニズム

## Morphological (Dynamical) Quenching

Martig+2009

星の中心集中度が高くなると、シアが効いて重力的に安定化。

Toomre Q (Toomre 1964, 軸対称不安定性)

$$Q = \frac{\kappa\sigma}{\epsilon G \Sigma} \quad \kappa: \text{周転円周期}, \sigma: \text{速度分散}, \Sigma: \text{面密度},$$

$\epsilon: \pi$  for gas, 3.36 for stellar

Martig+2013

$$\kappa(r) = \left\{ 2 \frac{V_{\text{rot}}}{r} \left( \frac{V_{\text{rot}}}{r} + \frac{dV_{\text{rot}}}{dr} \right) \right\}^{1/2} \sim \frac{V_{\text{rot}}}{r}$$

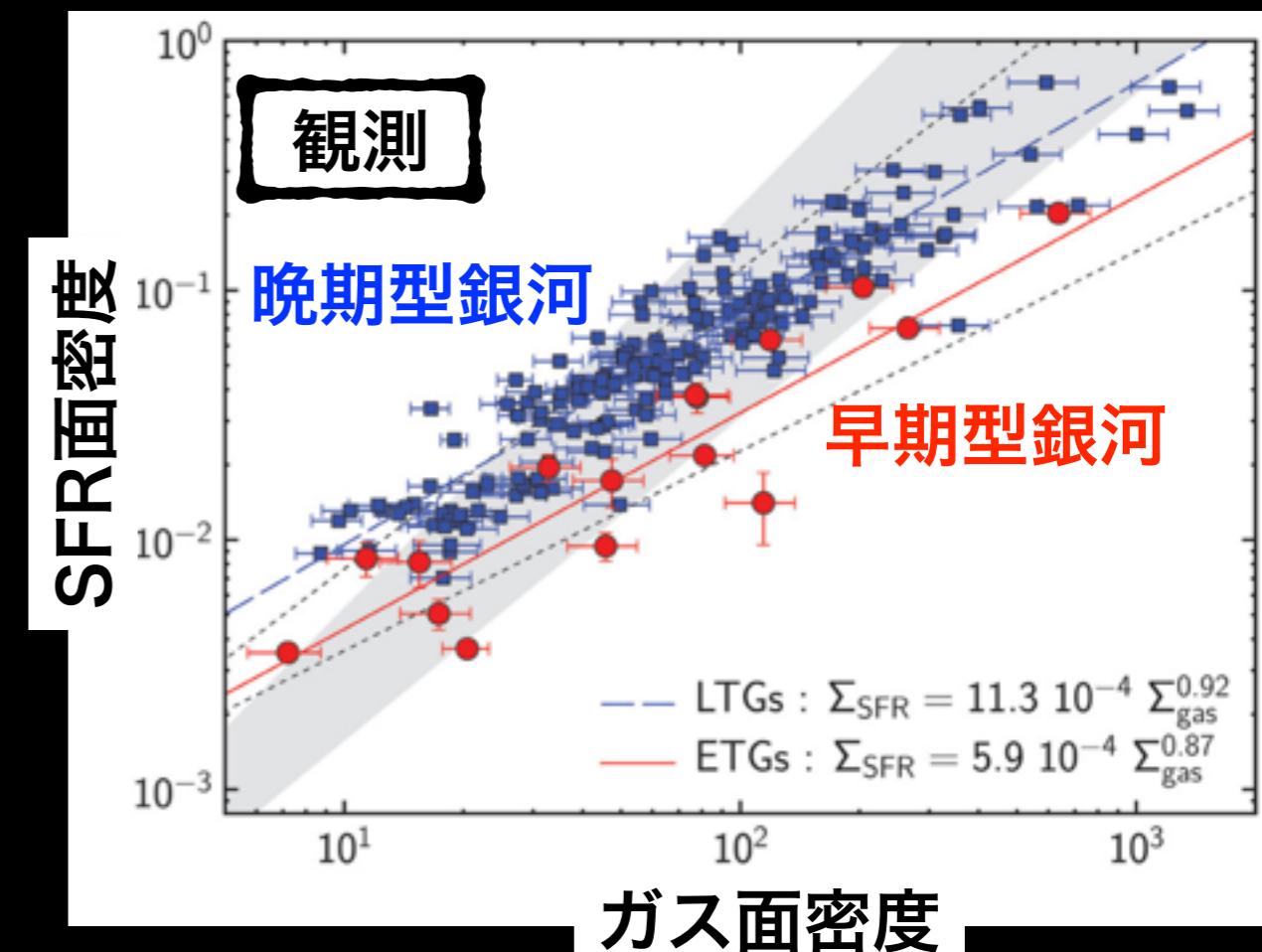
星の中心集中度大



$\kappa$  大



Q 大 (安定)



## 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 $f_{\text{mol}}$ 進化は再現しているか？？

観測される $f_{\text{mol}}$ 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

- 大質量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( $>10^{11} M_{\text{sun}}$ )銀河、小さい( $<10^{10} M_{\text{sun}}$ )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。

- ガスを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？？

# ALPACA (ALMA Large Program of gAs survey toward Chukan-redshift gAlaxies)

**目的：銀河形成モデルの制限となる銀河における低温ガスの統計的性質を観測的に明らかにすること。**

メンバー：竹内氏(名古屋大学)、  
田村氏(東京大学)、馬場氏(東京工業大学)、  
N. Scoville氏(Caltech)、、募集中！

観測周波数：ダスト熱放射 / CO輝線

装置：ALMA / NRO45 / GBT / VLA

観測領域：VIPERS / COSMOS



Fin