

# A Novel Method For Selecting Secondary Starburst Galaxies and Its Application to $z\sim 2$ LAEs

2015/6/5 第二回銀河進化研究会@名古屋

東京大学 M2 日下部晴香

嶋作一大(東京大学), 中島王彦(ジュネーブ天文台),  
橋本拓也(リヨン天文台), 後藤亮介, 久保真理子(東京大学)

# 銀河の星形成史はepisodic

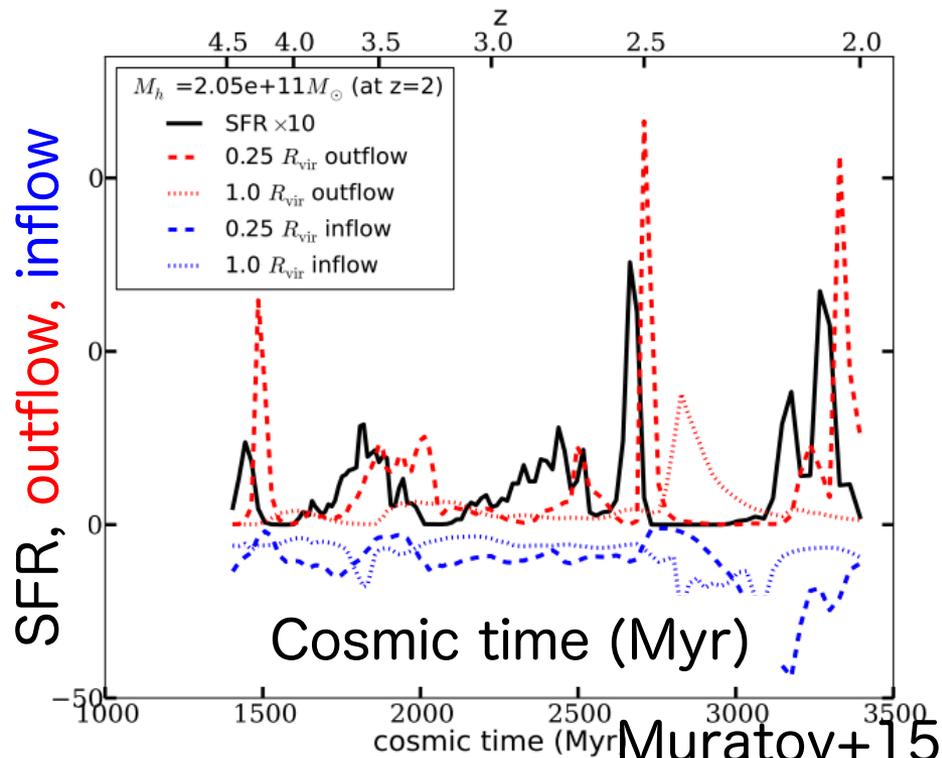
# 星形成史の理論・観測的な研究

## 理論的研究

- 遠方の小質量銀河は、星形成史がepisodic bursty SF + outflow (Muratov+15, Wyithe+14)

## 観測的研究

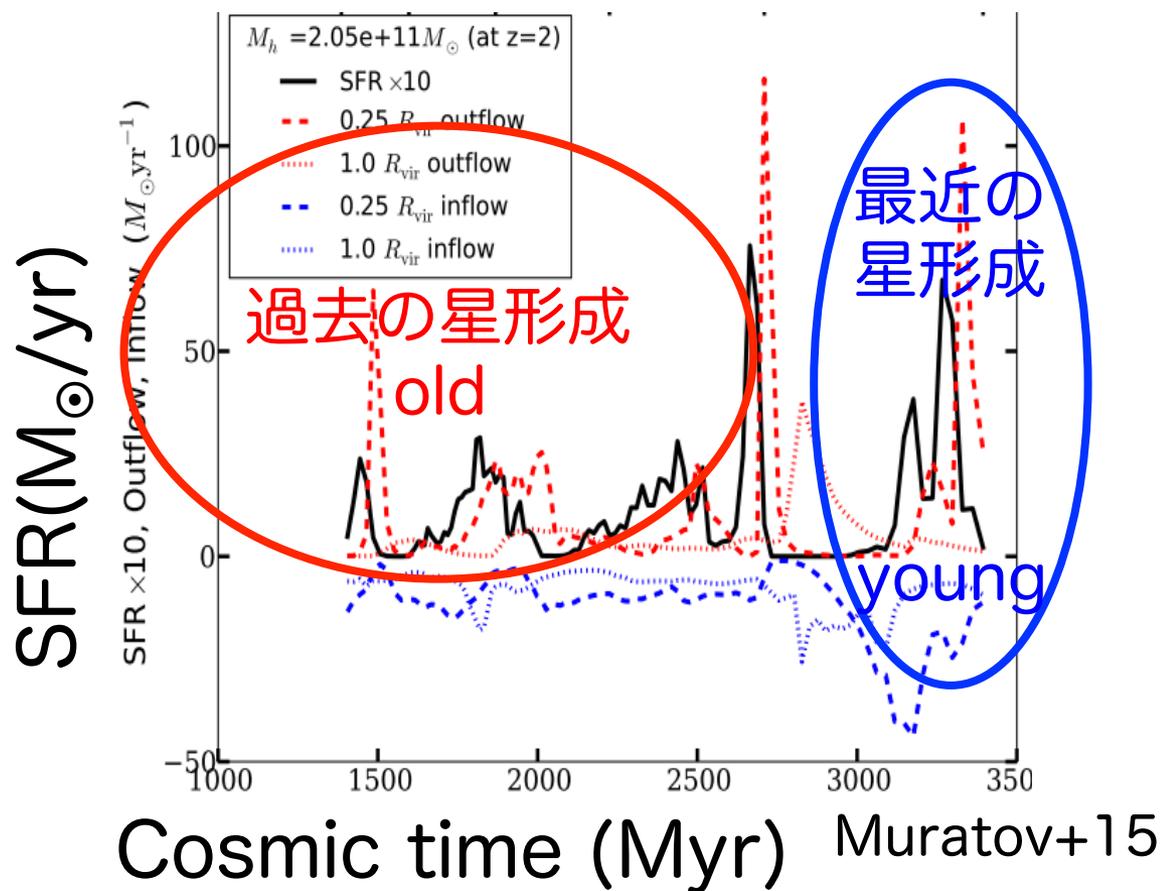
- 一部の統計的な観測から星形成史がepisodic (Stark+09, Lee+09)
- 個別の銀河の解析で、単調な星形成史を仮定した測光SEDフィットの結果が、輝線の分光結果と矛盾 (Stark+14, Rodríguez Espinosa+14, Sobral+15)



# 2成分近似の星形成史

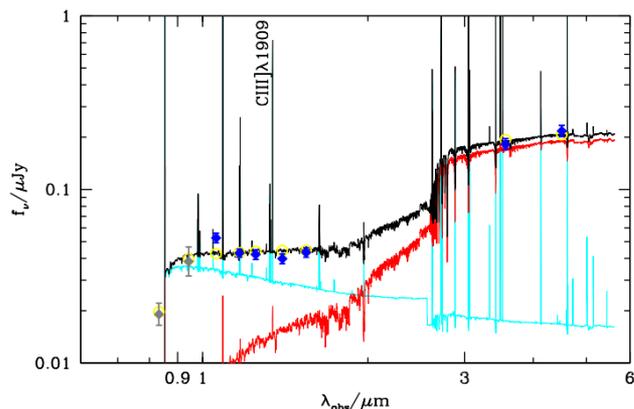
episodicな星形成史の最も単純な近似モデル

old(過去の星形成)+young(最近の星形成)の2成分ok

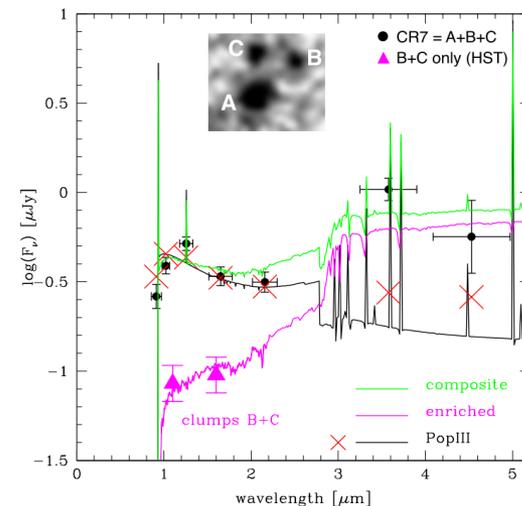
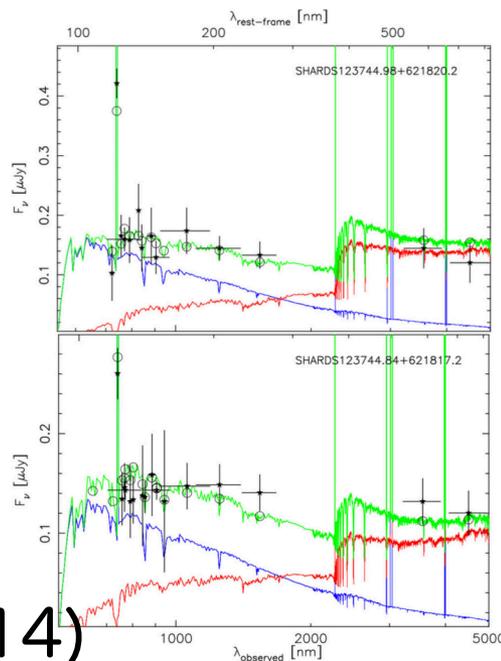


# 2成分近似の星形成史

- 先行研究の2成分の銀河は、**偶然の発見**  
(broad-bandとline emissionを1成分で同時説明~~×~~)  
→ **どのような銀河**が2成分で表されるのか不明
- Broad-bandのみ → 誤った1成分モデルでもfit可能
- 全ての銀河に深い分光観測をするのは非現実



z~6 LAE (Stark+14)  
z~5 LAEs  
(Rodríguez Espinosa+14)

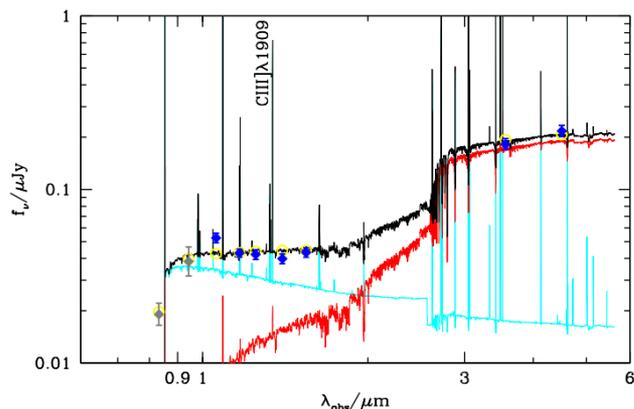


to observed MIR (east frame optical) and the best fit with a normal stellar

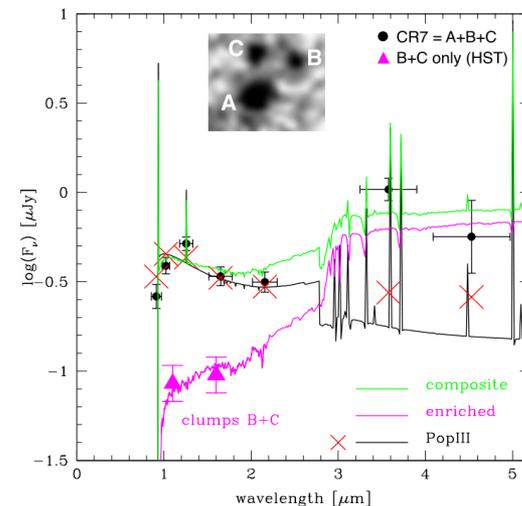
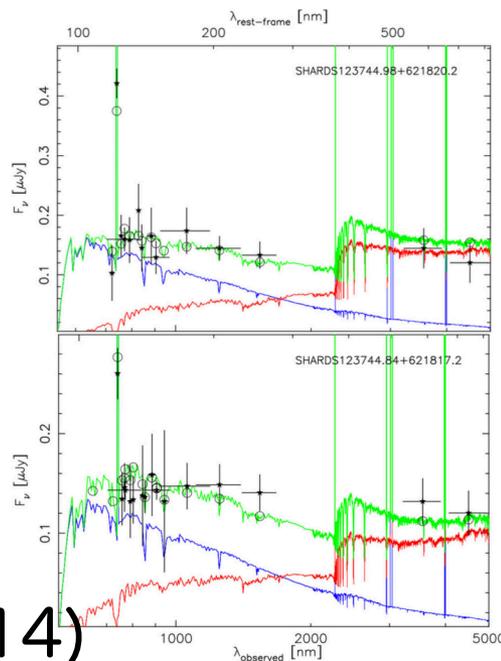
z~7 LAE  
(Sobral+15)

# 2成分近似の星形成史

本研究は、遠方銀河の星形成史を調べる最初のstep、  
 1. 星形成史が2成分の遠方銀河を効率よく選ぶ方法  
 2. 実際の銀河に適用、その性質を考察



z~6 LAE (Stark+14)  
 z~5 LAEs  
 (Rodríguez Espinosa+14)



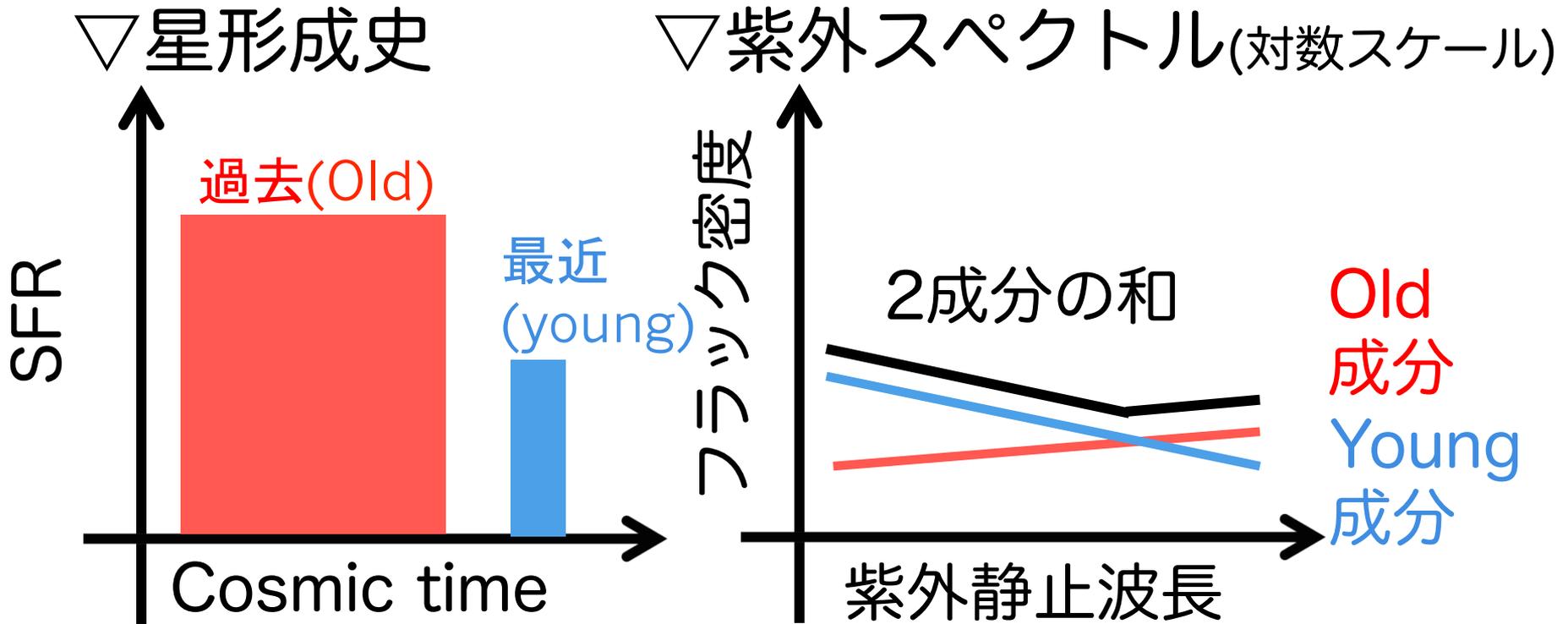
to observed MIR (rest frame optical) and the best fit with a normal stellar

z~7 LAE  
 (Sobral+15)



## 2. 2成分銀河の選択方法

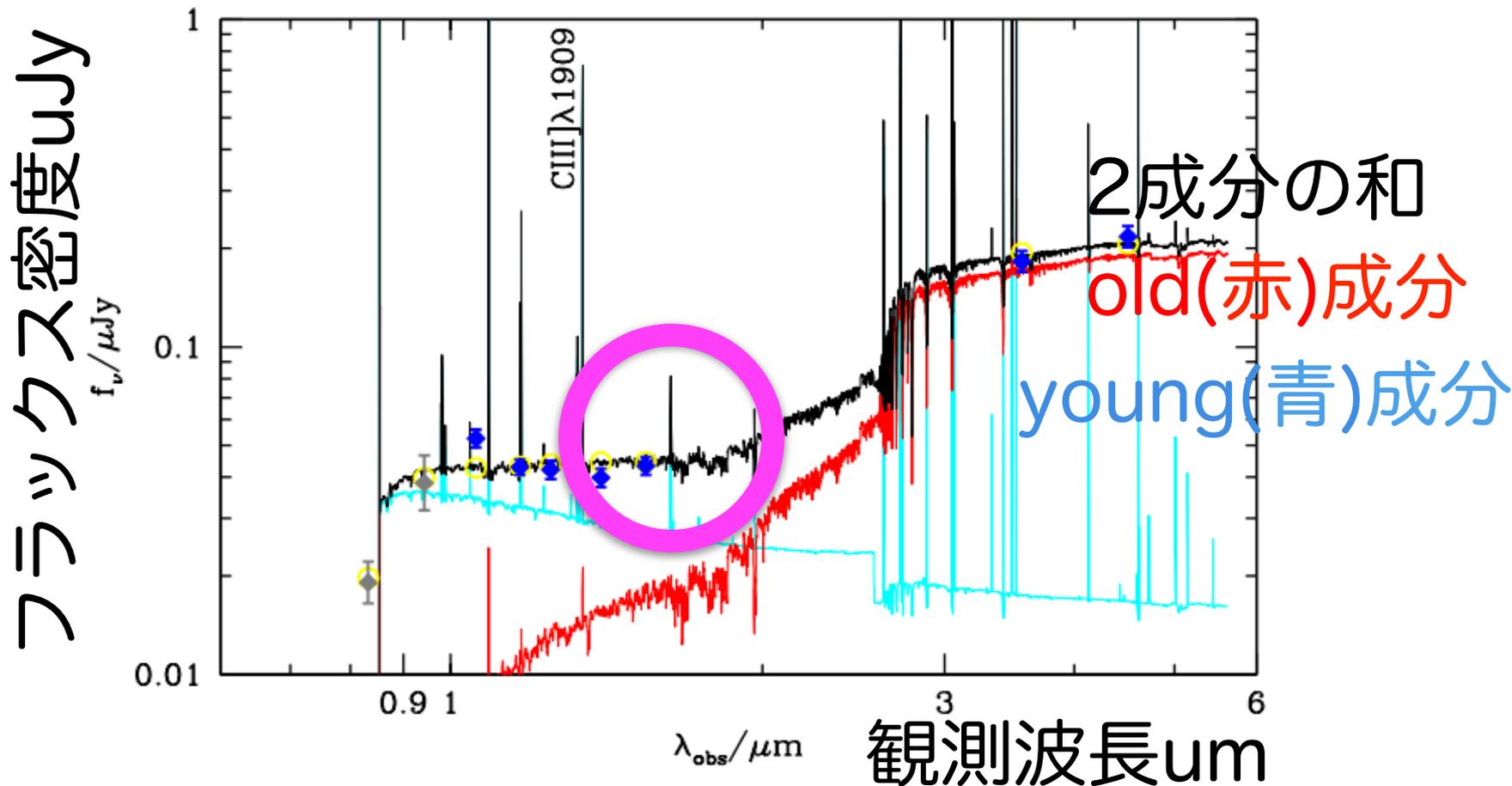
# 2成分の銀河の特徴



- 紫外のスペクトルはpower law
- 紫外のslopeは $f_\nu \propto \lambda^{\beta+2}$ と $\beta$ で表せ、 $\beta$ が大きい=赤い
- $\beta$ の値が、短波長側と長波長側で変わる”double- $\beta$ ”

# 先行研究の“Double- $\beta$ ”の有無①

z~6のLAE (Stark+14)

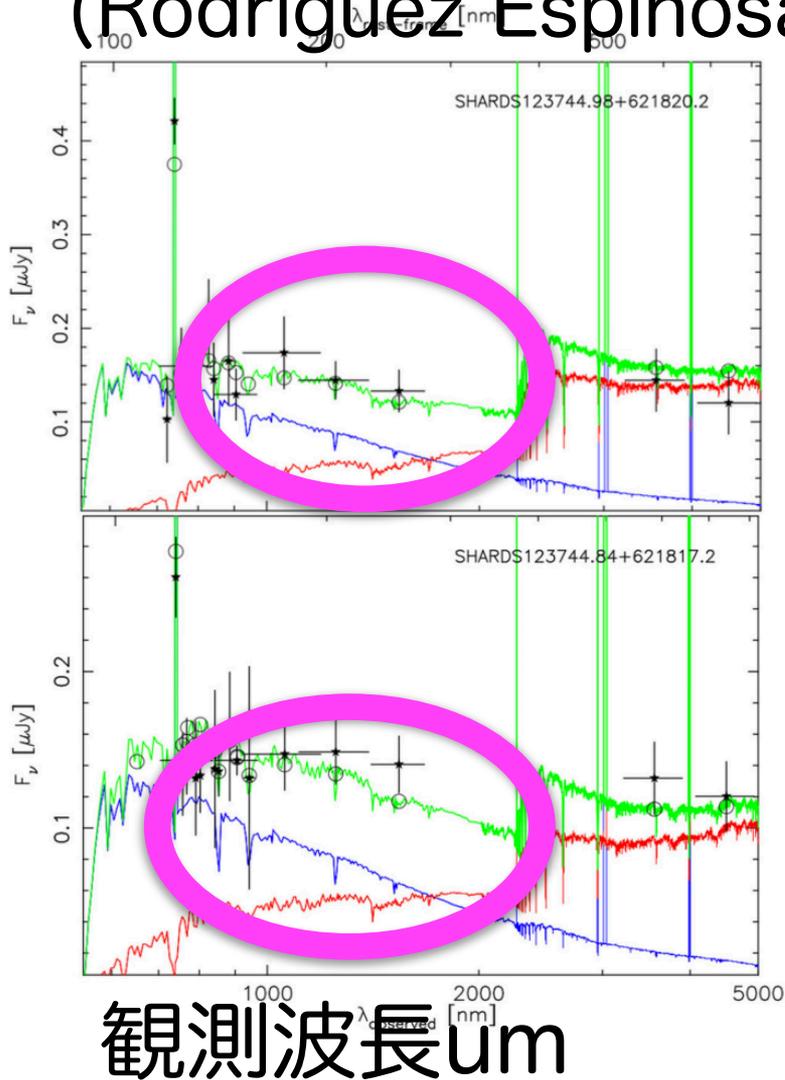


## 2.2成分銀河の選択方法

# 先行研究の“Double- $\beta$ ”の有無②

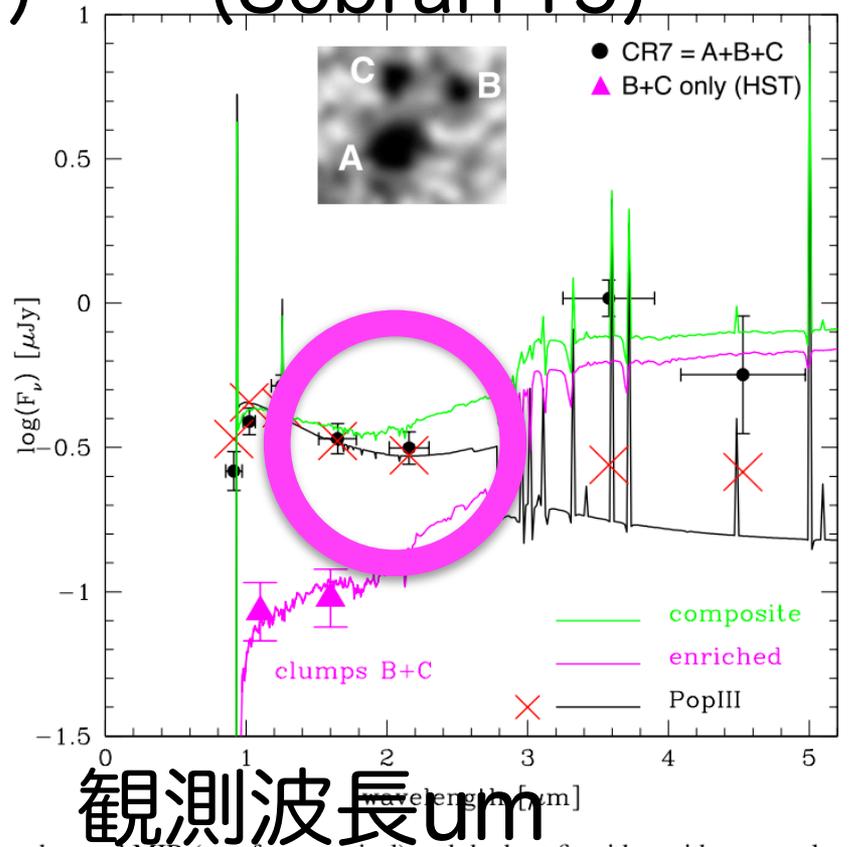
z~5のLAEs

(Rodríguez Espinosa+14)



z~7のLAE

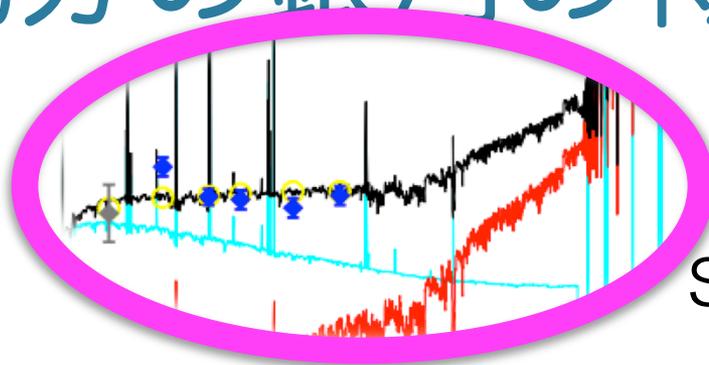
(Sobral+15)



フラックス密度  $\mu\text{Jy}$

to observed MID (rest frame optical) and the best fit with a with a normal stellar

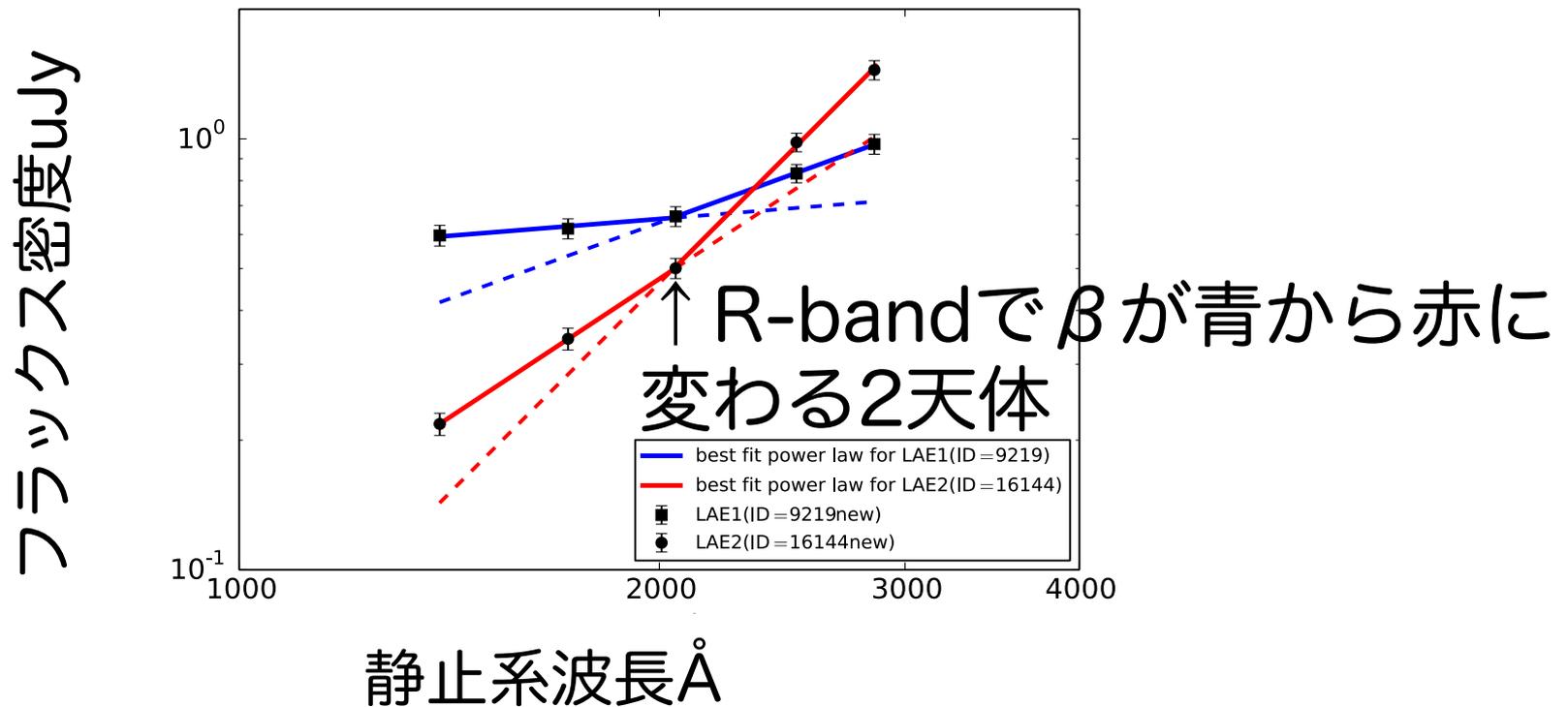
# 2成分の銀河の特徴



Stark+14

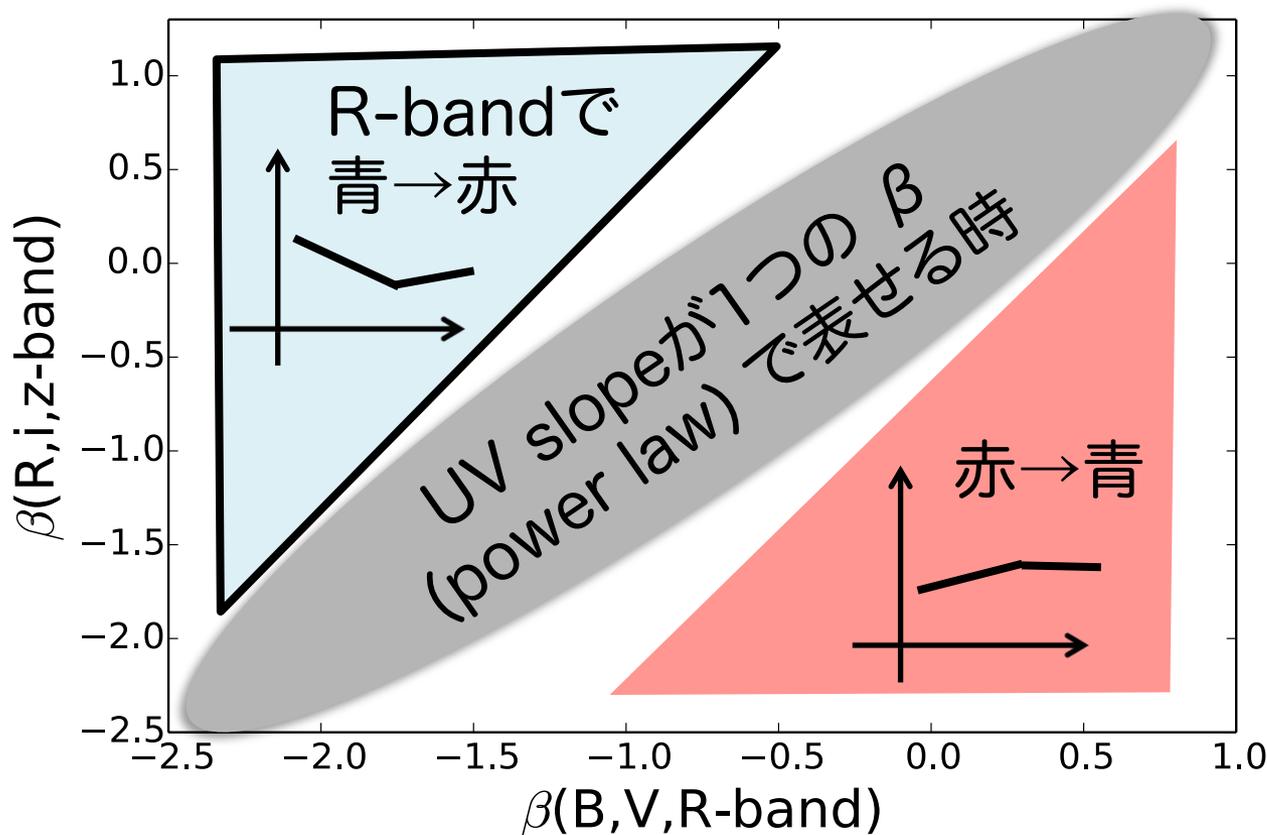
- Young + oldの合成で $\beta$ が途中で変わる”double- $\beta$ ”
    - ✓ 先行研究では触れられていない
    - ✓  $z > 5$ で $\beta$ の変り目に観測が無く”double- $\beta$ ”未確認
    - ✓  $z < 2.5$ なら確認可能
  - 先行研究の2成分銀河はLAEs(典型的に小質量)
    - ✓ 理論的研究と合う
- $z < 2.5$ のLAEsに注目する

# Double- $\beta$ をもつ $z=2.2$ の LAEs



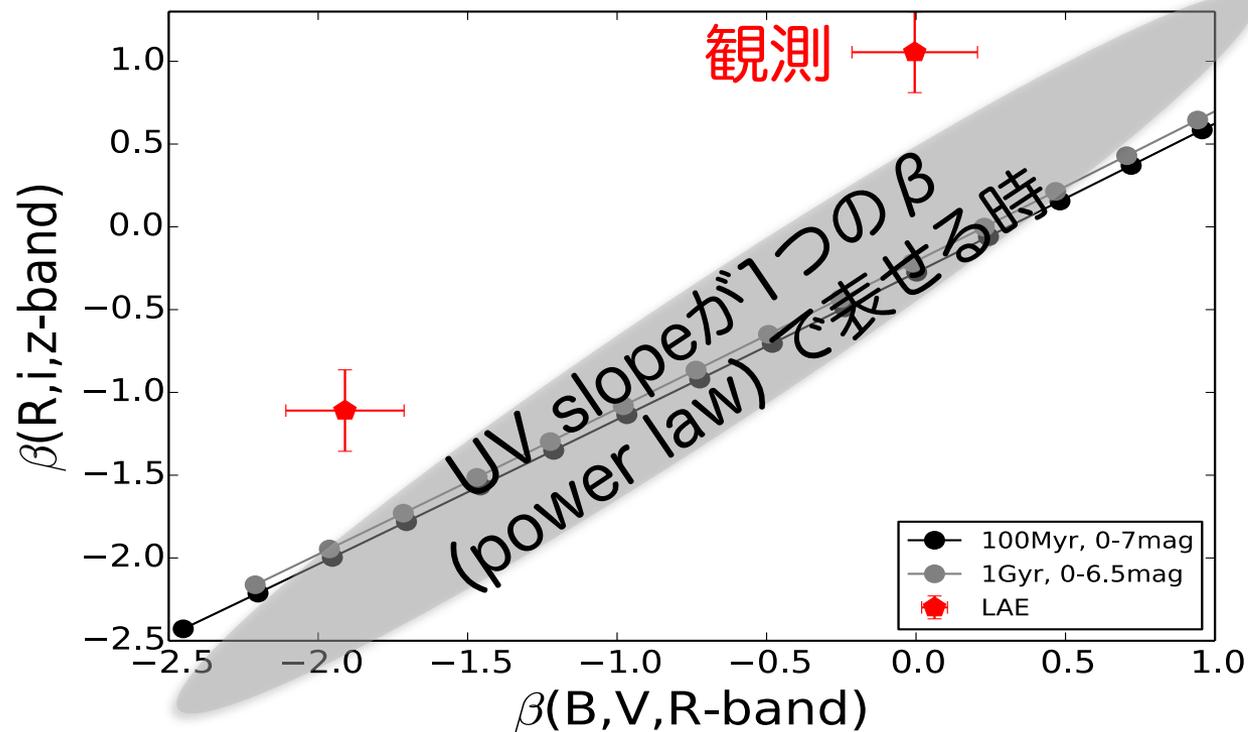
- SXDS領域の  $z \sim 2.2$  の分光同定 LAEs 34個 (Nakajima+15 in prep)
- "double- $\beta$ " は複数存在し、折れ曲がる波長、 $\beta$  の値は多様
- $z \sim 2.2$  では、R-bandで青から赤になる "double- $\beta$ "  
 輝線や減光曲線を変えても、1成分の単調な星形成史 ✗

# Double- $\beta$ をもつ $z=2.2$ の LAEs



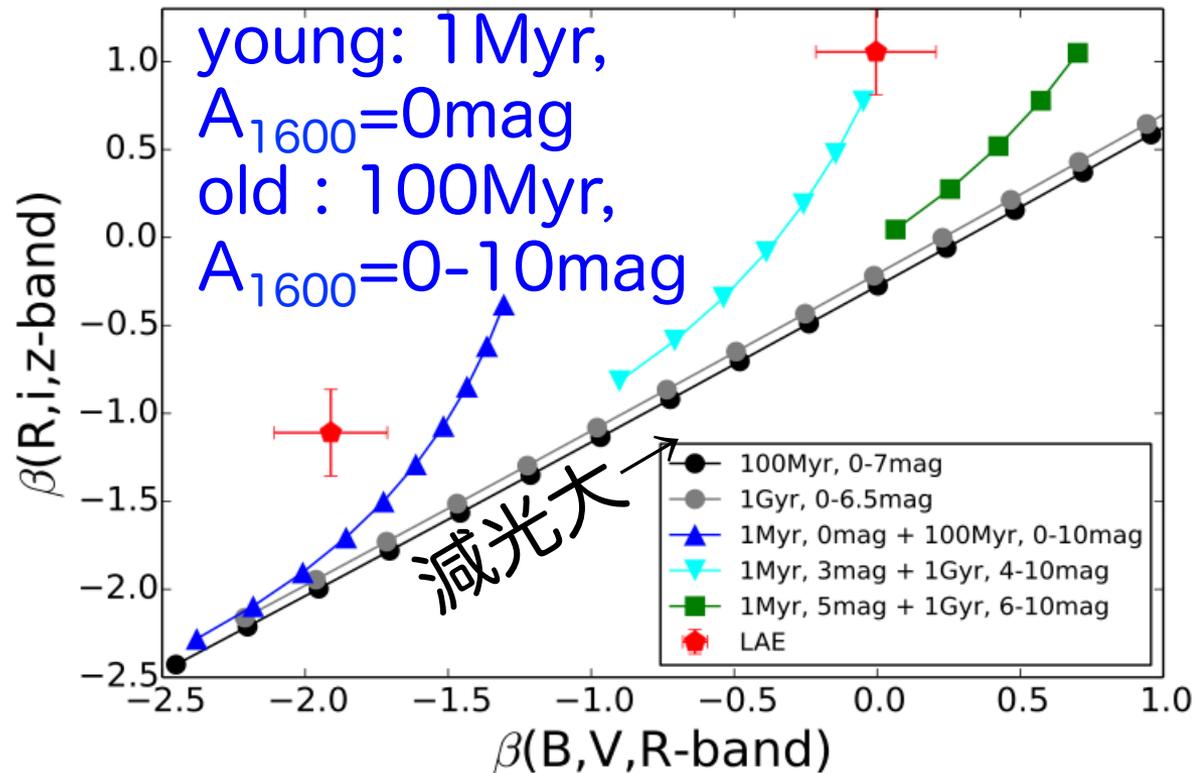
R-bandよりも短波長側の $\beta$  vs. 長波長側の $\beta$ の図

# Double- $\beta$ をもつ $z=2.2$ の LAEs



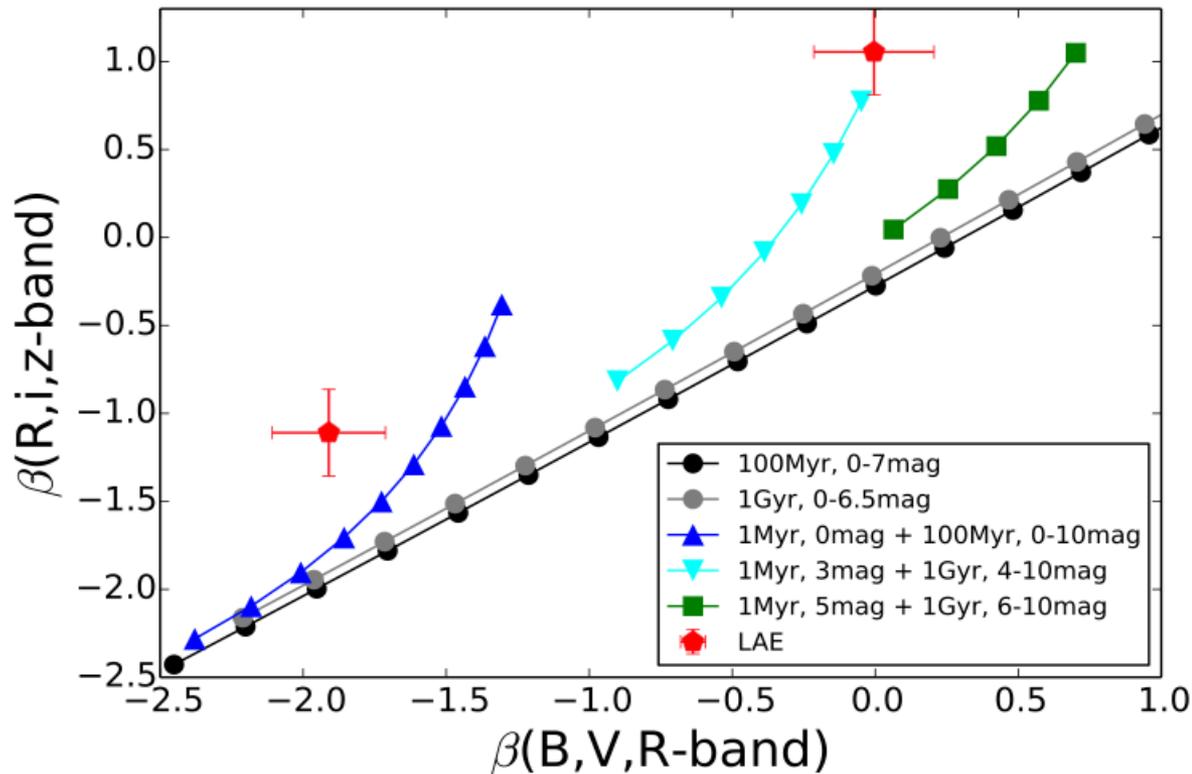
- 大半の単調な星形成史では、 $\beta$  はほぼ一定(黒、灰)
- 一部の星形成史は青から赤になるがR-band以外 (SSP, exp-decayの年齢の大きいもの)

# Double- $\beta$ をもつ $z=2.2$ の LAEs



- Young+oldの2成分なら、観測(左上)を再現可能
- Exp-risingや、exp-decayの星形成史を組み合わせれば、より広い範囲のdouble- $\beta$ を再現可能

# Double- $\beta$ をもつ $z=2.2$ のLAEs

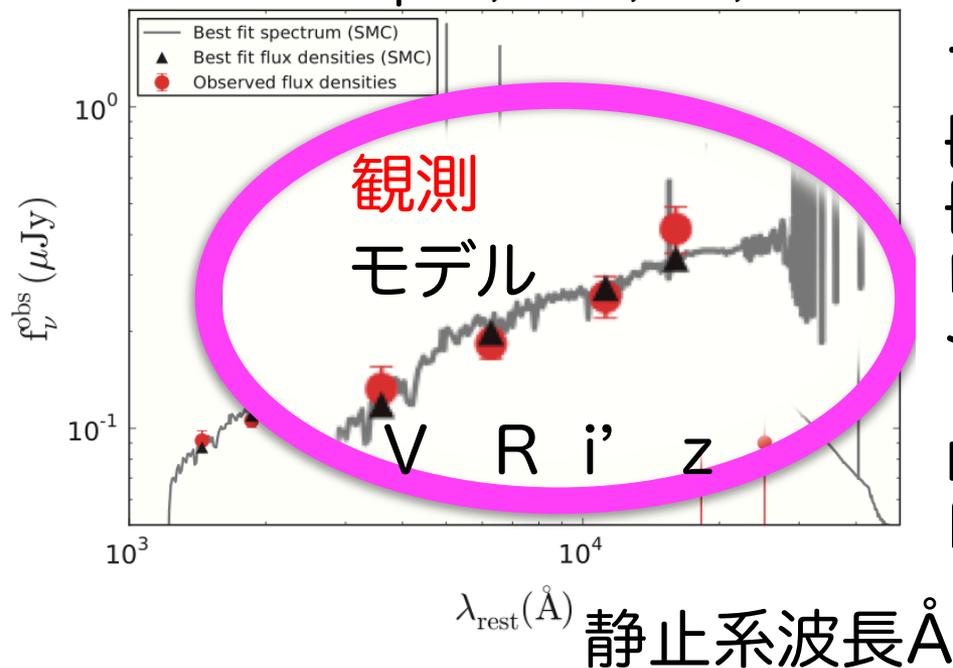


- S15B Subaru/MOIRCSに30天体のLAEsの $H\alpha$ 分光を提案中(PI: Kusakabe)
- 分光+測光(紫外-近赤)データを同時にSEDでfitする

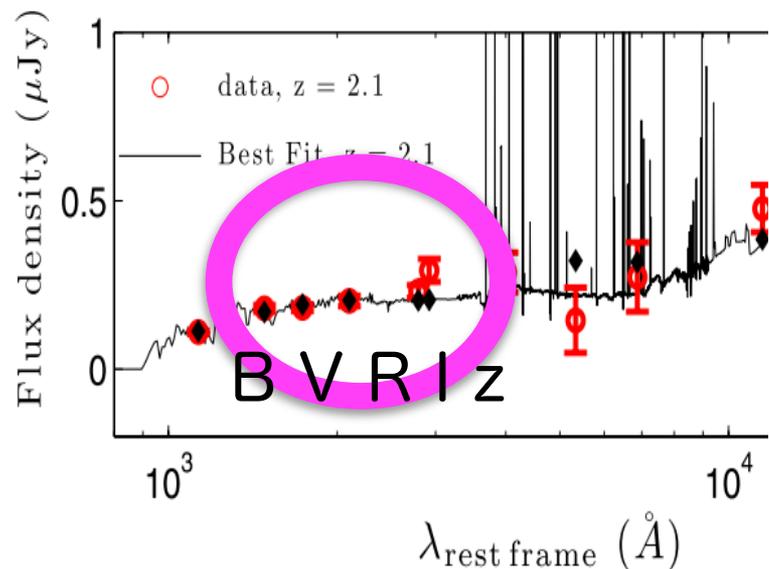
# Stacked LAEs

$z \sim 2.2$ のLAE(Kusakabe+15)  
ApJL, 800, 29, 2015

$z \sim 2.1$ のLAE(Acquaviva+12)



フラックス密度 $\mu\text{Jy}$



- 観測 i-bandを境に“double- $\beta$ ”
- 輝線を考慮しても、z-bandが再現できず
- ✓ 多くのLAEsが2成分の星形成をもつ可能性

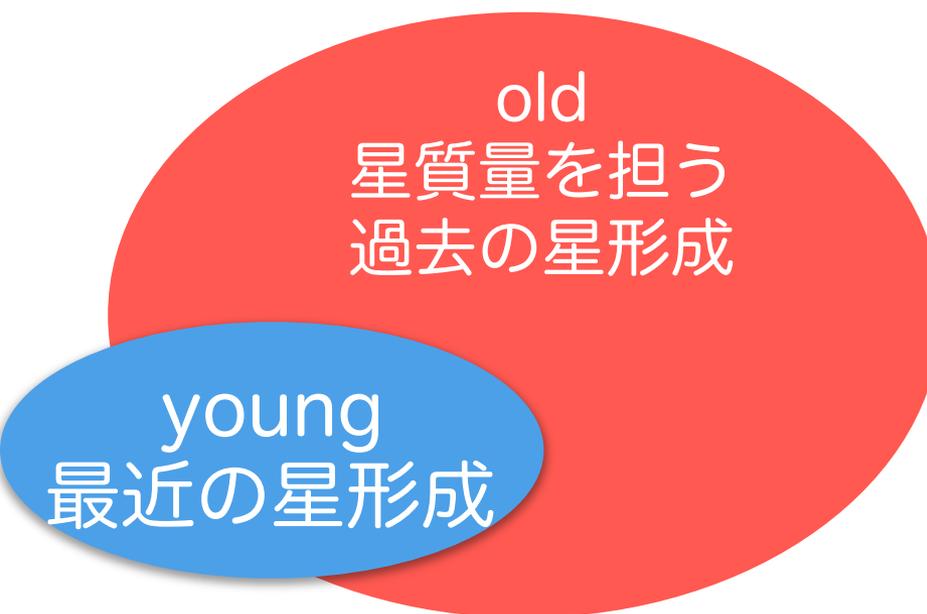


# 3. Discussion

### 3. Discussion

## 2成分のLAEsの性質？

- Double- $\beta$ を示す2成分の星質量の比は？



old  
星質量を担う  
過去の星形成

young  
最近の星形成

- old : young  
=  $\sim 100-1000 : 1$
- 2回目以降のstarburst  
= youngではないLAE
- 理論モデルからの示唆  
外縁での遅れた星形成  
(Shimizu& Umemura10)

- 銀河の星形成史も考慮することで、銀河の性質や進化にさらに迫ることができる
- このdouble- $\beta$ の手法は、episodicな星形成史の銀河を効率よく選択して調べる最初のstep

# 将来観測: Keck/MOSFIRE

Keck/MOSFIREの交換枠が増えるという噂



### 3. Discussion

## MOSFIREを用いた小質量銀河の星形成史の研究

すばるコミュニティでインテンシブプロジェクトを発足する→ $z \sim 2.2$ のLAEsの星形成史を盛り込んで頂きたい

- MOSDEFでは小質量銀河( $< 10^9 M_{\odot}$ )はやられてない
- $z=2.2$ のNB-LAEsは3600天体, 静止系 可視-近赤外
- 星形成史が2成分の銀河の候補は測光データのみから容易に選べる+手法自体も新しい



# MOSFIREを用いた小質量銀河の星形成史の研究

将来装置との親和性の高さ

- PFSと組み合わせる  
→ $z > 5$ のLAEsのように紫外・可視の輝線も使用
- GLAO(ULTIMATE-SUBARU)と組み合わせる  
→Sobral+15のように、銀河のclumpを分解して2成分モデルでSED fit

LAEsの星形成史の研究は良いところづくし



# まとめ

- 星形成史を効率よく調べる新手法の開発が求められる
- Double- $\beta$ に着目すればよい  
特に $z=2.2$ ではR-bandで青から赤に変化するもの
- 星質量を担うold成分と星形成を担うyoung成分  
年老いたLAEs(type-2 LAEs)
- Subaru/MOIRCS S15Bに提案中♪  
近い将来観測時間をもらえますように (u人u)
- Keck/MOSFIREが使えるならLAEの星形成史!

謝辞：ひかりちゃんとはりかねくん、発表練習ありがとう

## 2成分銀河パラメタまとめ

- St+14

10Myr(CSFH,fix)+530Myr,

2.0M<sub>☉</sub>/yr, mass比 y:o=1:3.0×10<sup>9</sup>

1成分old: breakは再現可, EW CIII]過小, UV slope再現不可

young: dusty metal poorでbreak再現可、EW CIII]過小

- R+14

1) 2Myr, 0mag, 6.3×10<sup>7</sup>M<sub>☉</sub>+130Myr, 0mag, 2.0×10<sup>9</sup>M<sub>☉</sub>

SFR~32, 15M<sub>☉</sub>/yr(C仮定でも), SFH=decay

2) 2Myr, 0.1mag, 6.3×10<sup>7</sup>M<sub>☉</sub>+70Myr, 0.1mag, 7.9×10<sup>8</sup>M<sub>☉</sub>

SFR~32, 10M<sub>☉</sub>/yr(C仮定でも), SFH=decay

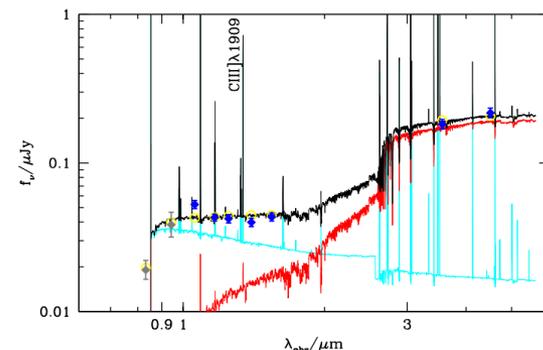
1成分のときは可視のスペクトルと分光結果同時に合わず

- So+15

16Myr, ~10<sup>7</sup>M<sub>☉</sub>+360Myr, 1.6×10<sup>10</sup>M<sub>☉</sub>

# Stark+14

- $z \sim 6$ のLAE: CIII]の $EW_0 = 7.6 \text{ \AA}$   
 $L_{\text{Ly}\alpha} = 6.8 \times 10^{42} \text{ erg/s}$ ,  $EW_0 = 83 \text{ \AA}$   
 Breakが強い(oldのbalmerかyoungのnebula?)
- 1成分
  - old: breakは再現可,  
 EW CIII]過小かUV slope再現不可
  - young: dusty metal poorでbreak再現可  
 EW CIII]過小
- 2成分
  - 10Myr(CSFH,fix)+530Myr(exp-decay),  
 SFR $\sim 2.0 M_{\odot}/\text{yr}$ , mass比 y:o=1:3.0 $\times 10^9$   
 $M_{* \text{tot}} \sim 3 \times 10^9 M_{\odot}$



# Rodríguez Espinosa+14

	R.A.(J2000)	Dec.(J2000)	Redshift	Ly $\alpha$ flux erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$	L <sub>Ly<math>\alpha</math></sub> erg/s	SFR M $_{\odot}$ yr $^{-1}$	$M_{UV}$	EW <sub>rf</sub> Å
Obj1	12:37:45.02	+62:18:20.33	5.0722 $\pm$ 0.0012	1.63 $\pm$ 0.29 $\times 10^{-17}$	4.57 $\pm$ 0.81 $\times 10^{42}$	4.2 $\pm$ 0.7	-22.4 $\pm$ 0.4	41 $\pm$ 5
Obj2	12:37:44.87	+62:18:17.30	5.0754 $\pm$ 0.0012	6.85 $\pm$ 1.74 $\times 10^{-18}$	1.92 $\pm$ 0.49 $\times 10^{42}$	1.8 $\pm$ 0.5	-22.8 $\pm$ 0.6	26 $\pm$ 5

- 1成分  
Ly $\alpha$ とUV, optical  
を全て同時にfitできない

- 2成分

1) 2Myr, 0mag,  $6.3 \times 10^7 M_{\odot}$

+130Myr, 0mag,  $2.0 \times 10^9 M_{\odot}$ ,

SFR $\sim 32$ ,  $15 M_{\odot}/\text{yr}$ (C仮定でも), SFH=decay

2) 2Myr, 0.1mag,  $6.3 \times 10^7 M_{\odot}$ +70Myr, 0.1mag,  
 $7.9 \times 10^8 M_{\odot}$

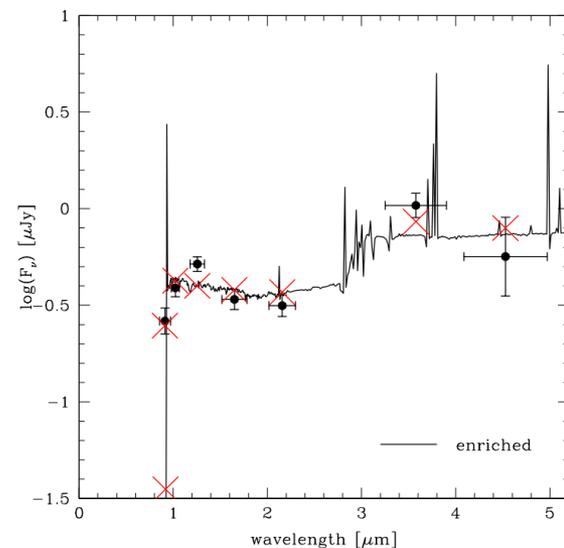
SFR $\sim 32$ ,  $10 M_{\odot}/\text{yr}$ (C仮定でも), SFH=decay

	Obj1		Obj2	
	young	old	young	old
Z(Z $_{\odot}$ )	1.0	1.0	1.0	1.0
$\tau$ (Myr)	1.2 $^{+0.3}_{-0.2}$	4.0 $^{+1.1}_{-0.8}$	11 $^{+50}_{-9}$	5.9 $^{+6.1}_{-1.8}$
Age (Myr)	1.7 $^{+0.3}_{-0.2}$	127 $^{+17}_{-14}$	1.6 $^{+0.7}_{-0.5}$	66 $^{+32}_{-26}$
$A_v$ (mag)	0.0 $^{+0.1}_{-0.0}$	0.0 $^{+0.1}_{-0.0}$	0.1 $^{+0.1}_{-0.1}$	0.1 $^{+0.2}_{-0.1}$
$M$ (log M $_{\odot}$ )	7.8 $^{+0.2}_{-0.2}$	9.3 $^{+0.1}_{-0.1}$	7.8 $^{+0.3}_{-0.3}$	8.9 $^{+0.1}_{-0.2}$

# Sobral+15

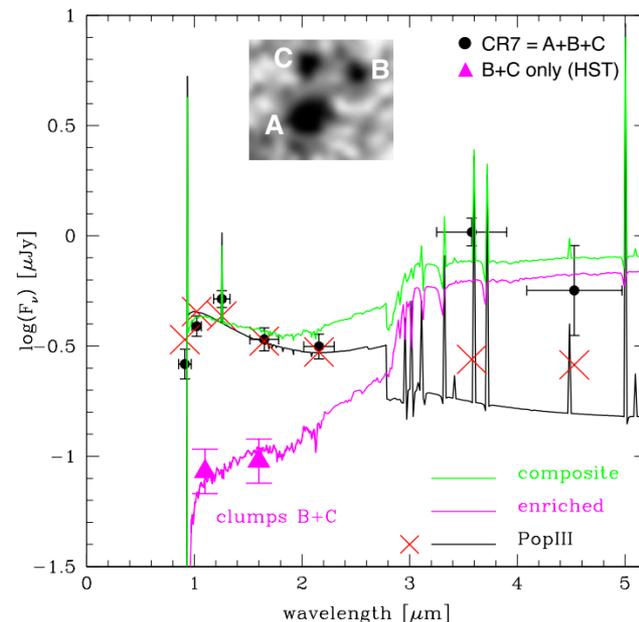
## • 1成分

The typical physical parameters derived from these SED fits which only include “normal” stellar populations indicate a stellar mass  $M_* \sim 2 \times 10^{10} M_\odot$ , SFR  $\sim 25 M_\odot \text{ yr}^{-1}$ , and a fairly old age ( $\sim 700 \text{ Myr}$ ; the Universe is  $\sim 800 \text{ Myr}$  old at

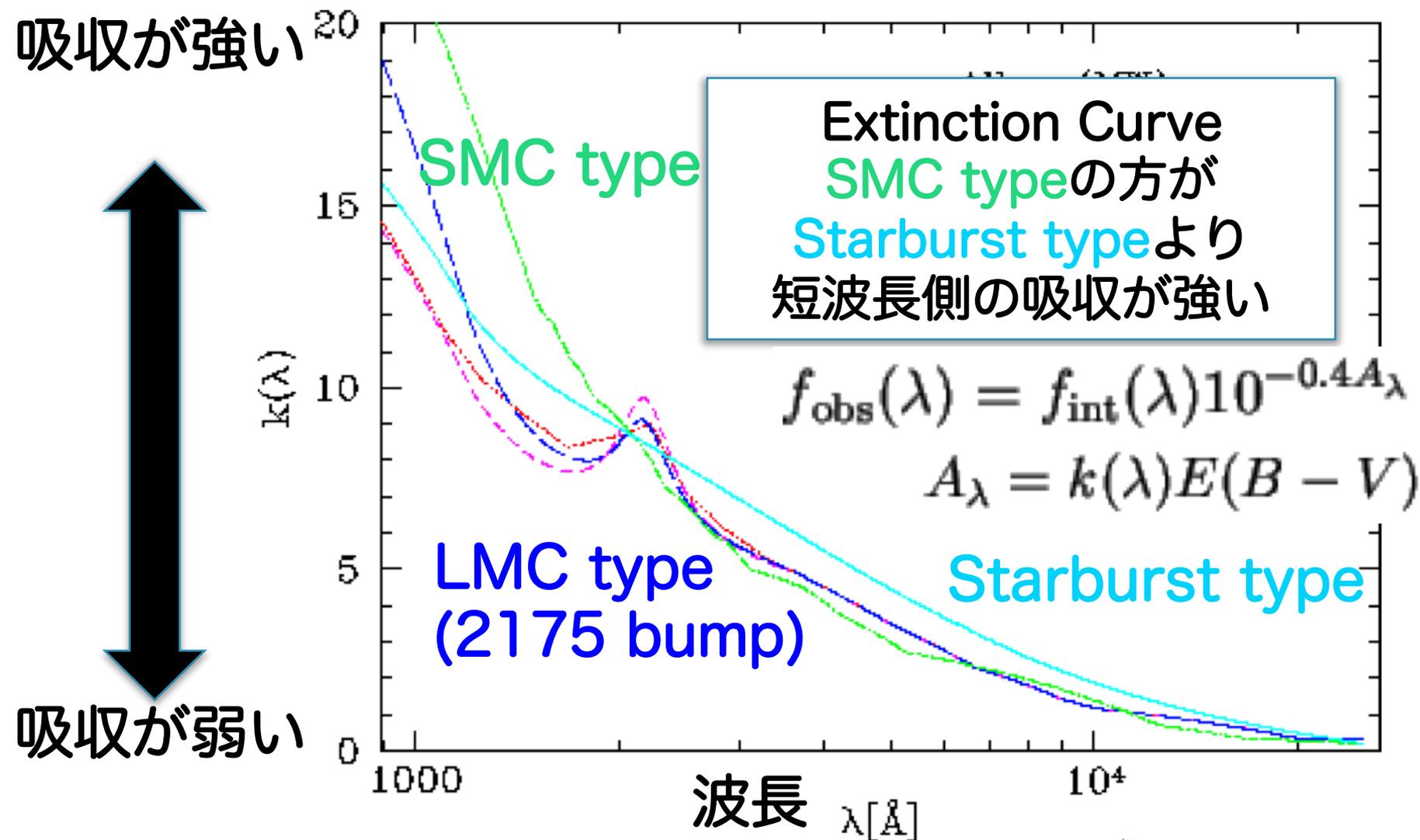


## • 2成分

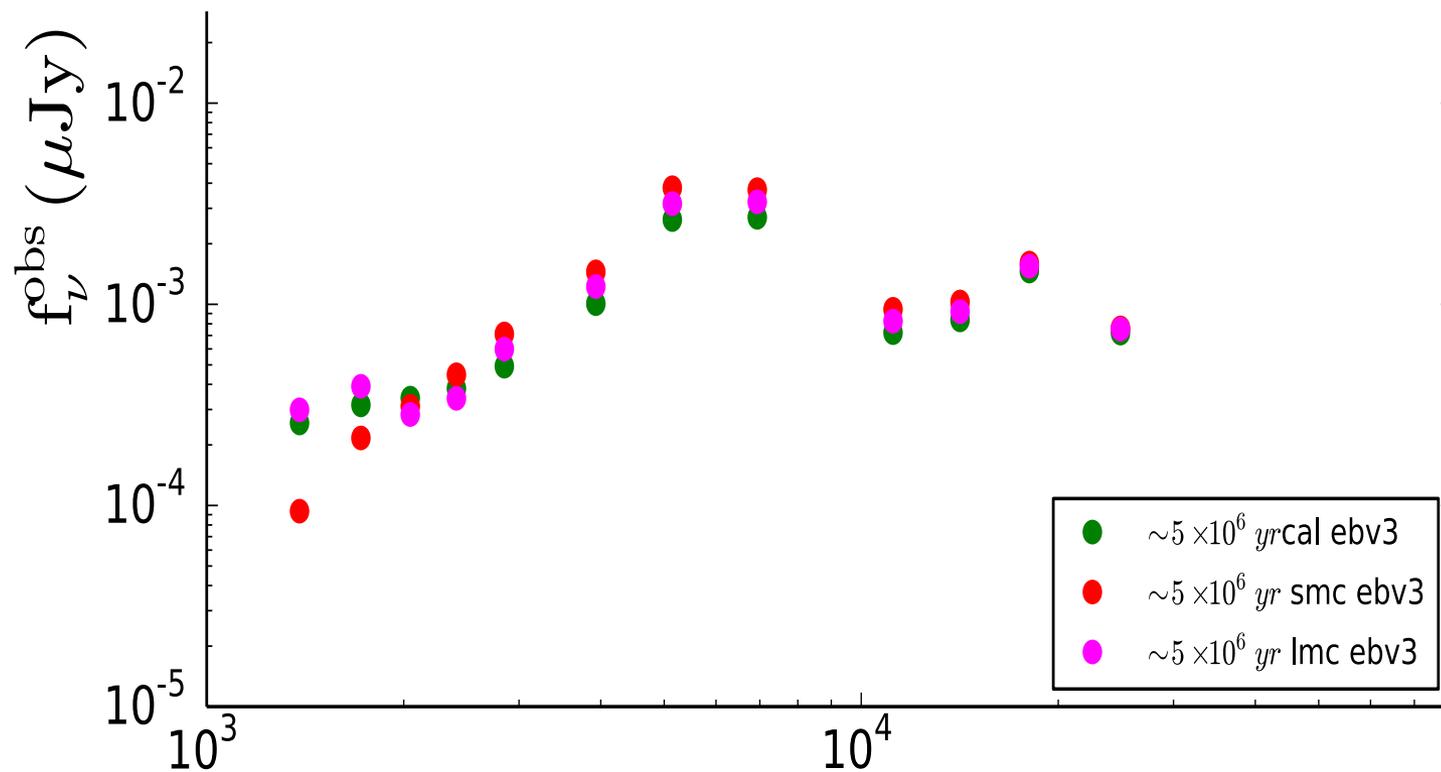
16Myr,  $\sim 10^7 M_\odot$   
 + 360Myr,  $1.6 \times 10^{10} M_\odot$   
 輝線の再現はok



## 減光曲線

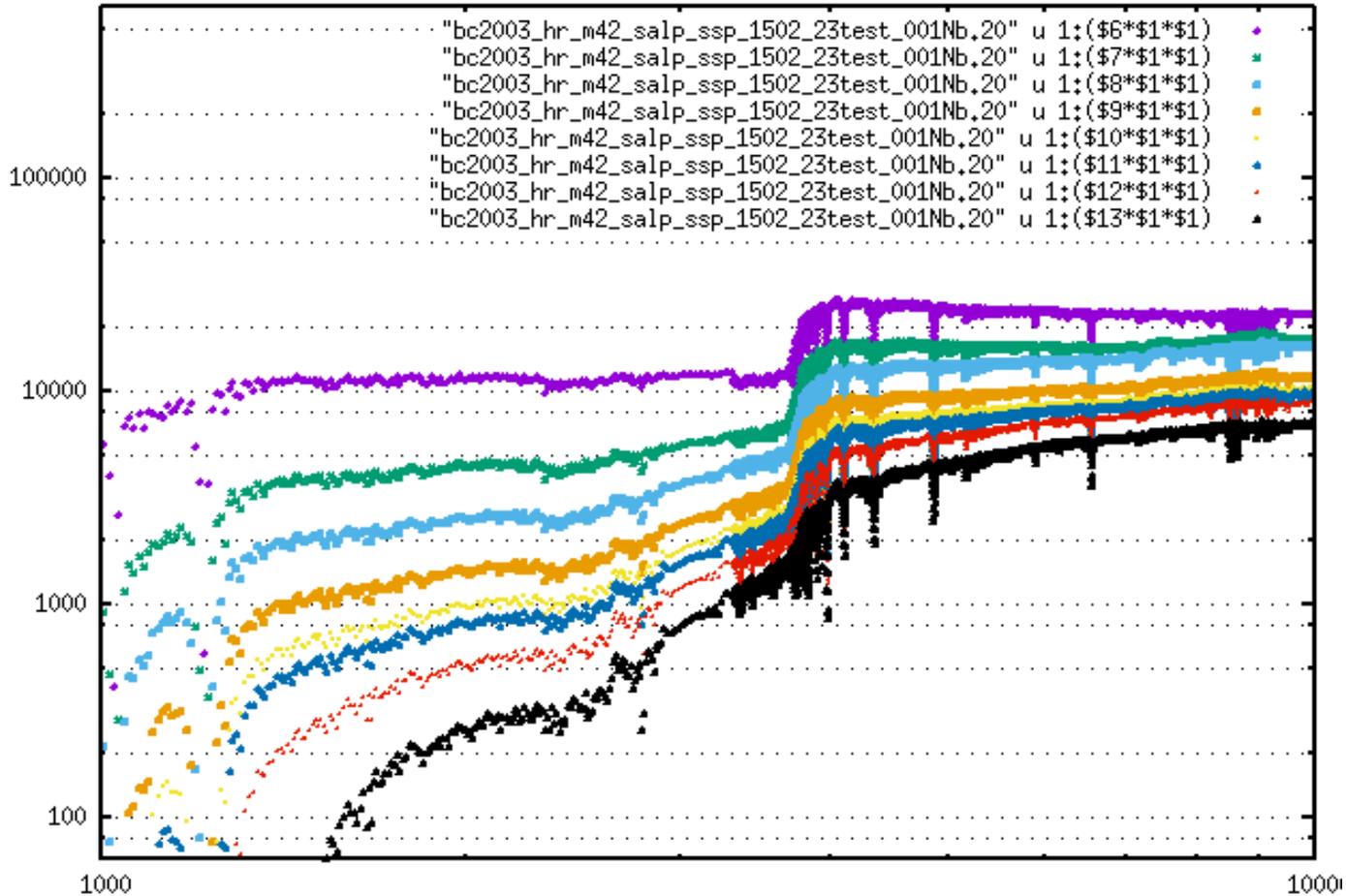


## 減光曲線

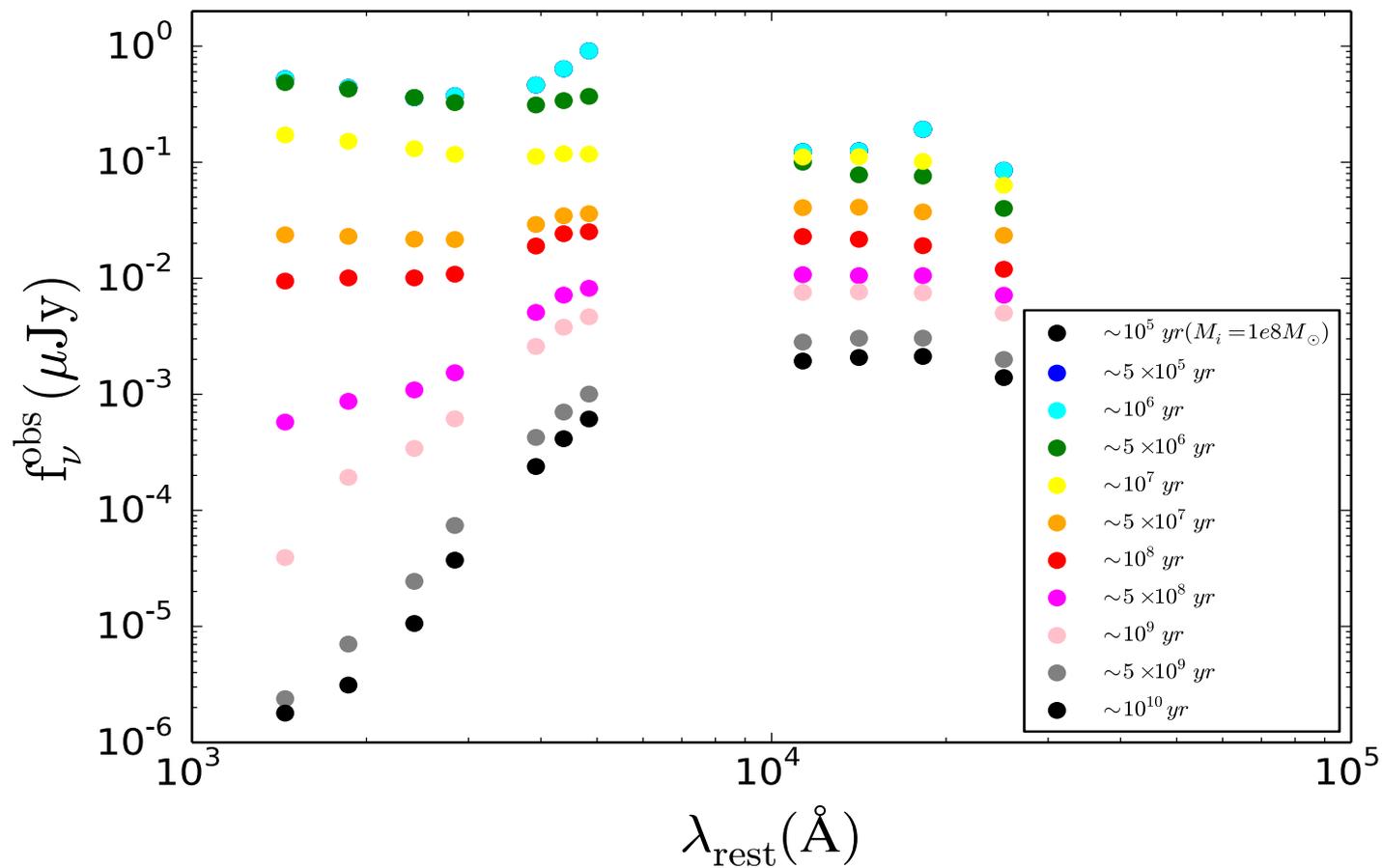


- LMCはRbandが凹むのでdouble- $\beta$ ではない
- SMCは赤から青にかわる
- Calzettiは3magくらいなら $\beta$ 一定

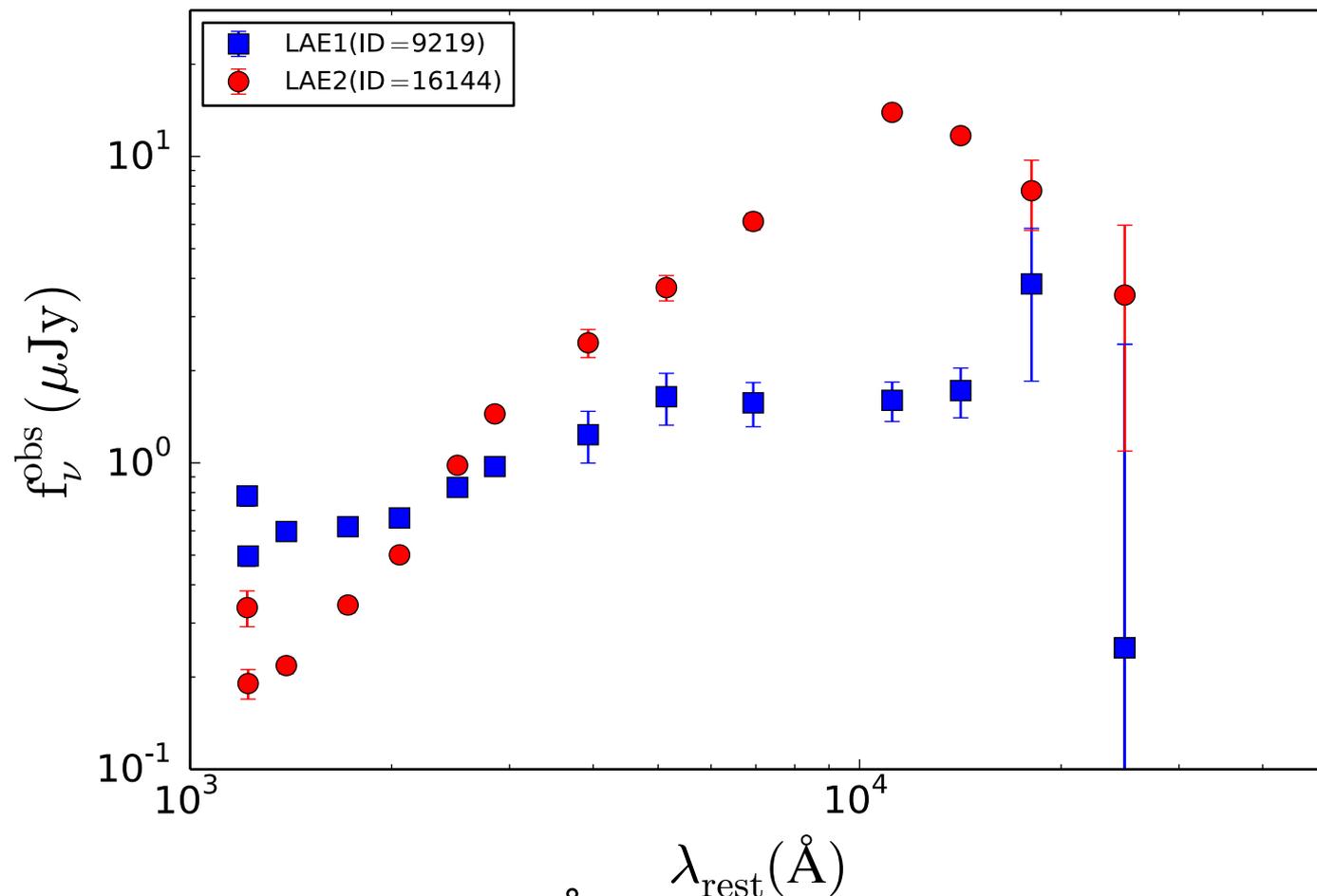
## SSP (100-800Myr)



## SSP

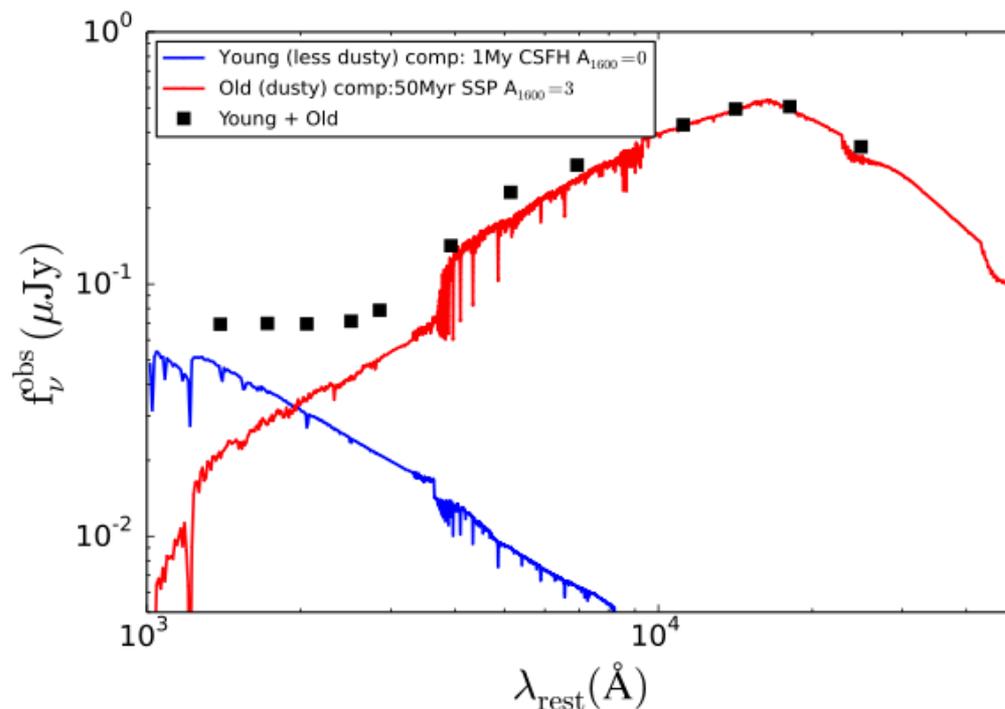


## 全体のスペクトル



9219  $\text{EW0}=30\pm 2\text{\AA}$ ,  $L_{\text{lya}}=3.9\pm 0.3\text{e}+42$  erg/s  
16144  $34\pm 6\text{\AA}$ ,  $L_{\text{lya}}=2.2\pm 0.3\text{e}+42$  erg/s

## 2成分のスペクトル



**Figure 4:** An example of two component model spectra. Young (less dusty) and old (dusty) components (only continuum) are plotted with blue and red lines, respectively. Black squares represent two components spectra (including nebula emission).

ここまで