

**ETH** zürich

# 恒星種族に刻印された化石情報 から紐解く 楕円銀河の形成史

小野寺仁人 (スイス連邦チューリッヒ工科大学)



@masato\_onodera

# 略歴

海外での研究生活については、  
明日の全体企画で

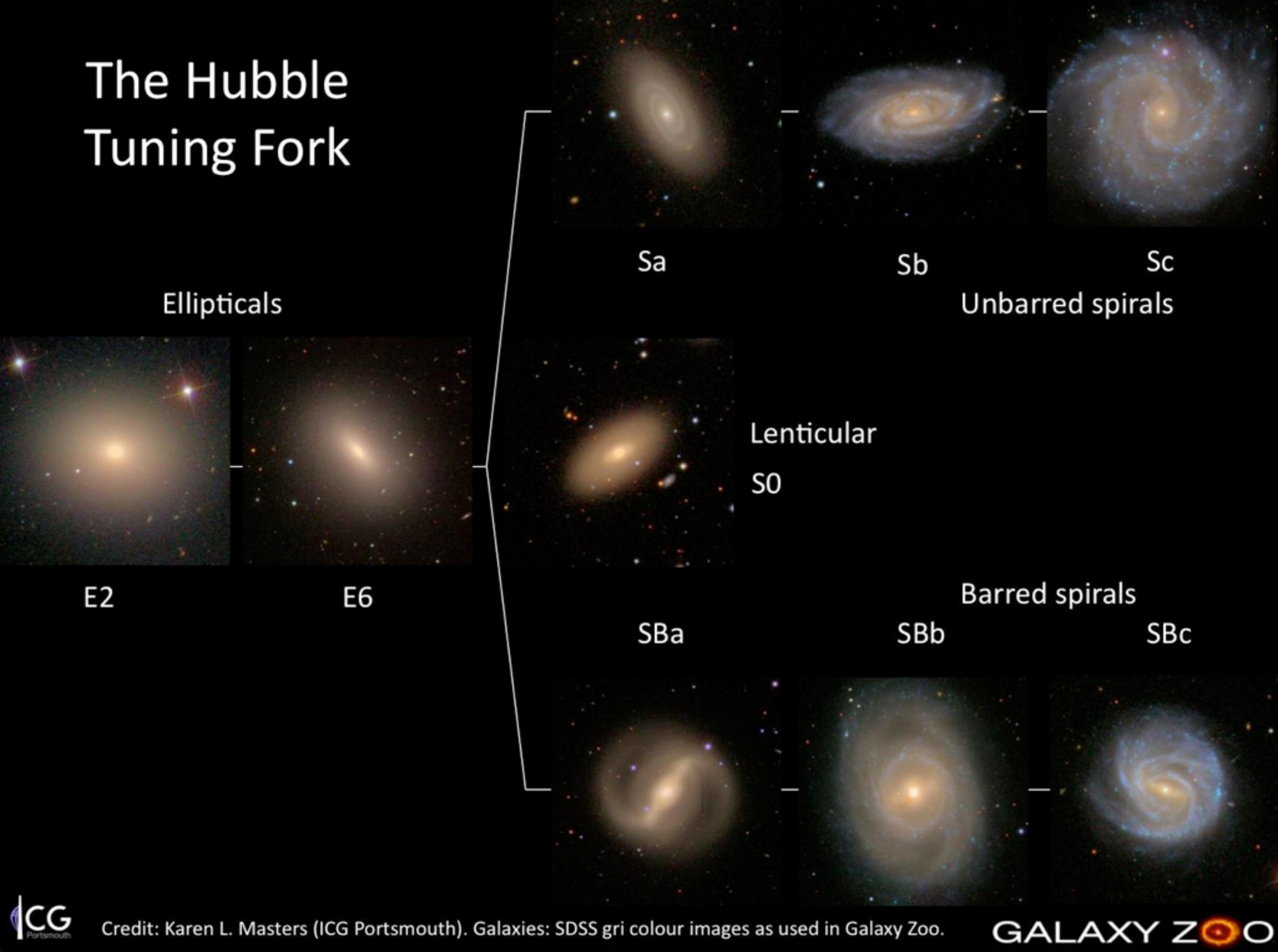
- 2001年3月: 東京大学理学部天文学科卒業
- 2006年3月: 博士(理学) @ 東京大学理学系研究科天文学専攻
- 2006年4-9月: 国立天文台 CfCA 研究支援員
- 2006年10月-2008年9月: 延世大学 BK21 研究員 (韓国)
- 2008年10月-2010年9月: フランス原子力庁 (CEA/Saclay) 研究員
- 2010年10月-現在: チューリッヒ工科大学 (ETH Zürich) 研究員

# アウトライン

1. 銀河のスペクトルと恒星種族
2. 近傍宇宙の楕円銀河の恒星種族
3. 遠方宇宙の楕円銀河の恒星種族
4. 恒星種族が鍵となる銀河進化の問題の例
5. 今後の課題と展望
6. まとめ

# 銀河のスペクトルと恒星種族

# The Hubble Tuning Fork



Ellipticals

Sa

Sb

Sc

Unbarred spirals

Lenticular

S0

E2

E6

SBa

SBb

Barred spirals

SBc

# 恒星種族スペクトルのレシピ

## SSP

*simple stellar population*

単一年齢・単一金属量の星の集まり

星のスペクトルを **isochrone** (等時曲線)

にしたがって、**IMF** (initial mass function; 初期質量関数) で重みをつけて足しあわせ

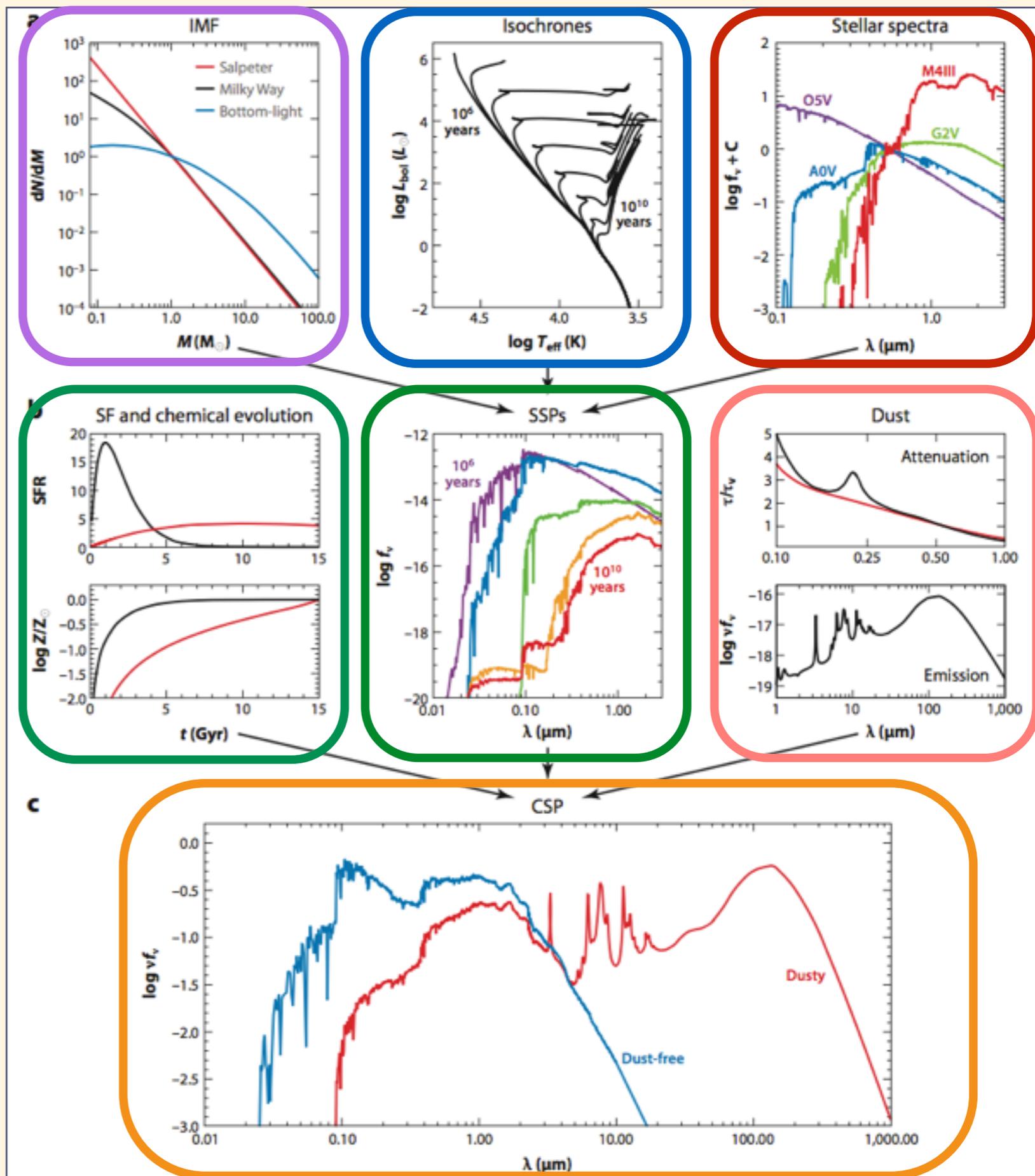
## CSP

*composite stellar population*

SSP を星形成史で重みをつけて足しあわせ (お好みでダスト減光+再放射)

メジャーなモデル

Kodama & Arimoto (1997), Fioc & Rocca-Volmerange (1997), Bruzual & Charlot (2003)  
Maraston (2005), Conroy et al. (2009), Vazdekis et al. (2010)



Conroy (2013)

# 恒星種族を特徴づけるパラメータ

## 年齢

どの年齢の恒星種族が支配的か

## 金属量 (重元素量)

金属元素すべてを足したものの  $[Z/H]$  や  $[M/H]$  と表記

## 元素組成比

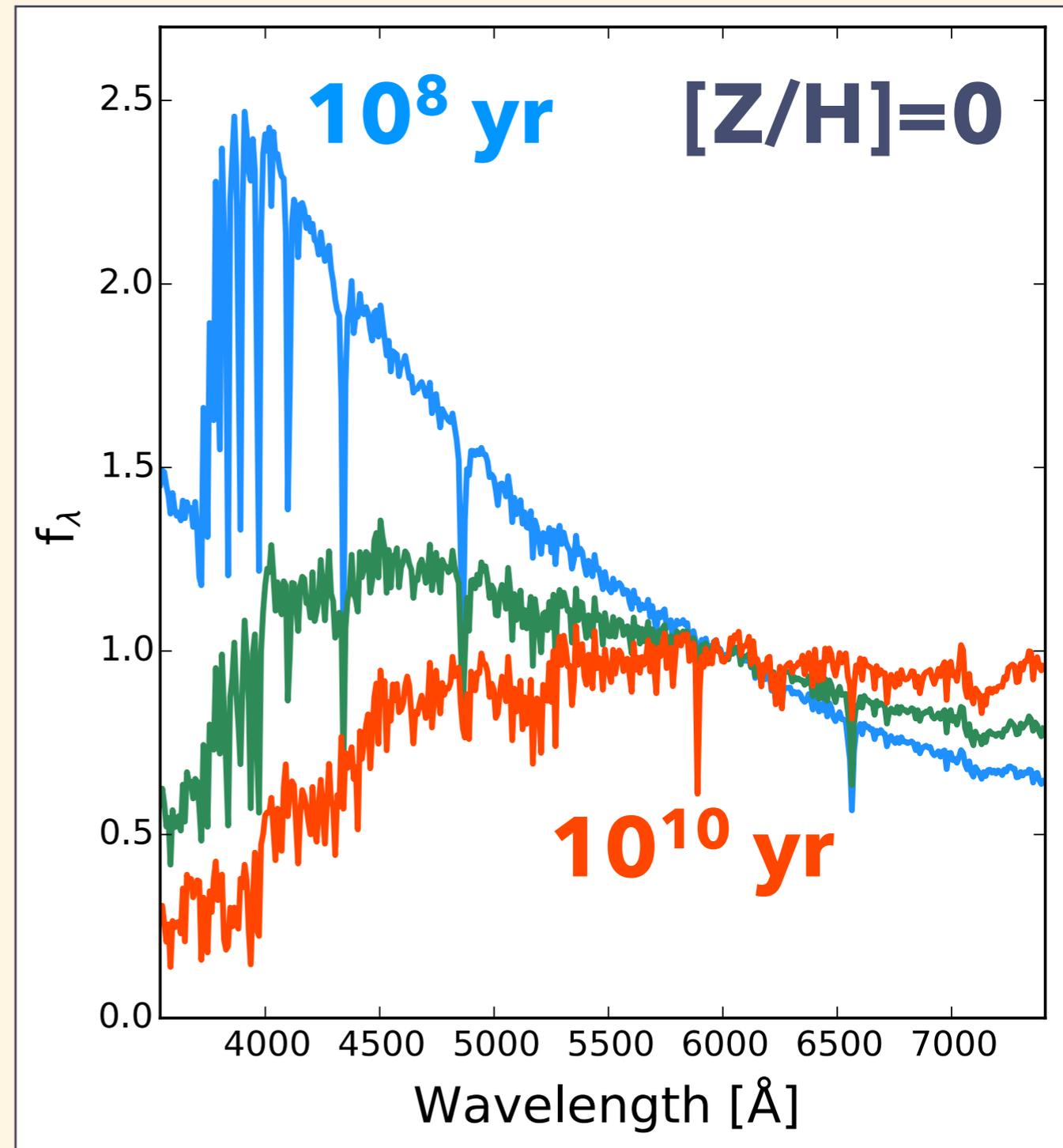
各元素の組成比: (例)  $[Fe/H]$ ,  $[Mg/Fe]$ ,  $[\alpha/Fe]$

$\alpha$ -元素: He整数倍の原子量を持つ元素 で O, Mg, Si, Ca, Ti 等

\* $[X/Y]=\log(X/Y)-\log(X/Y)_{\text{sun}}$

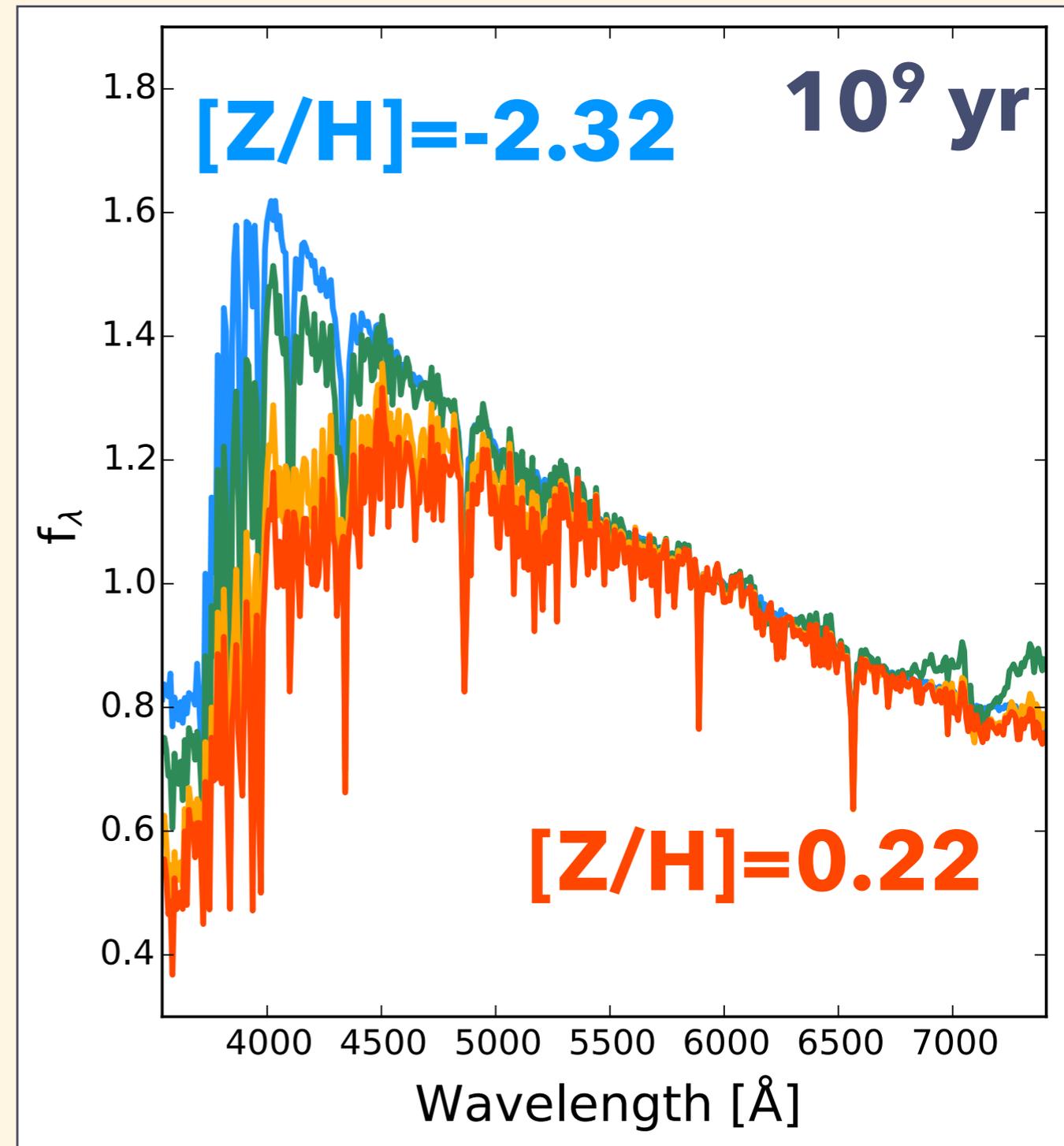
# 加齢に伴う現象

- 全体的に暗くなる  
(M/Lが大きくなる)
- 色が赤くなる
- 4000Åブレイクが強くなる



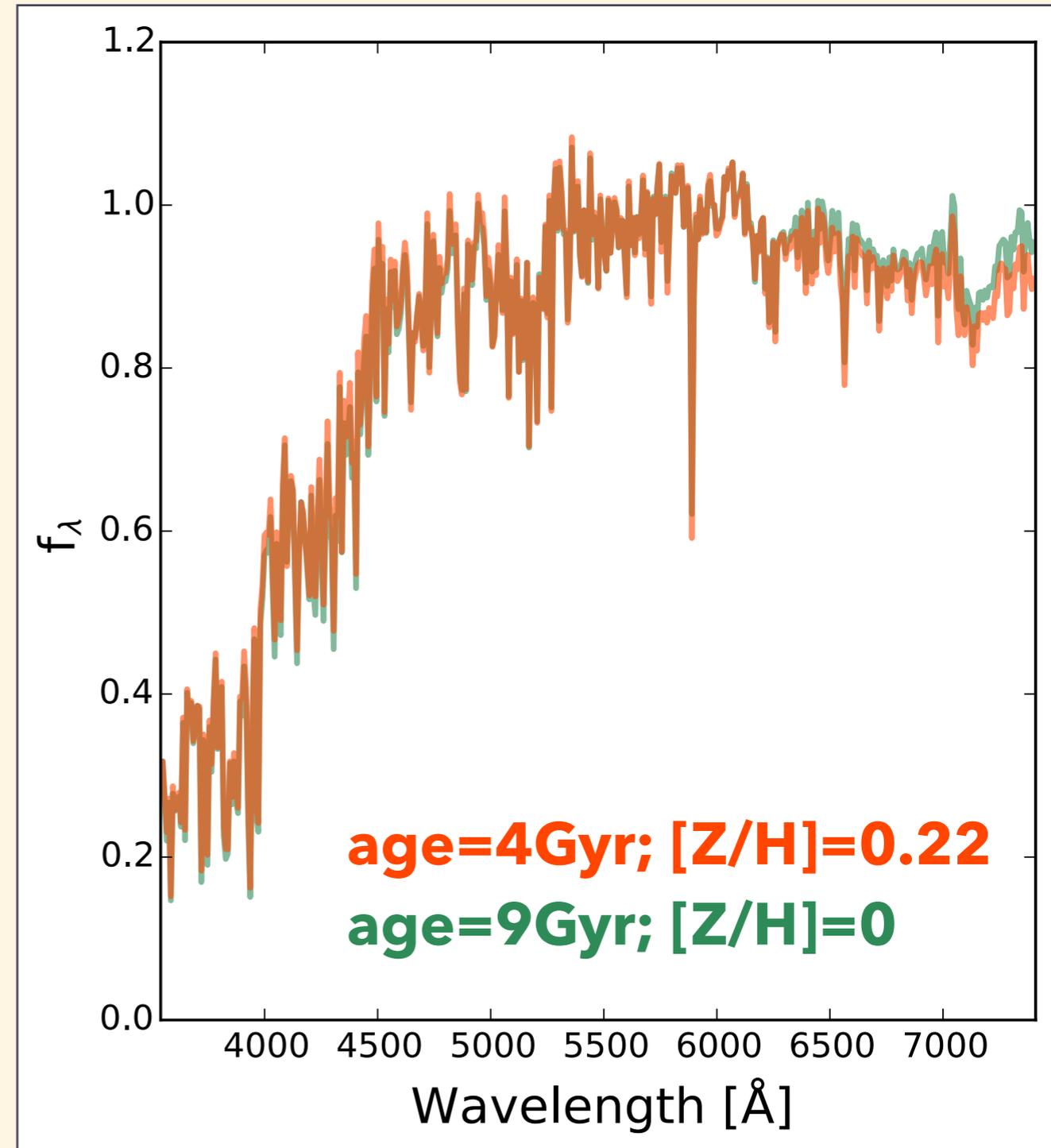
# 金属量増加に伴う現象

- 全体的に暗くなる  
(M/Lが大きくなる)
- 色が赤くなる
- 4000Åブレイクが強くなる



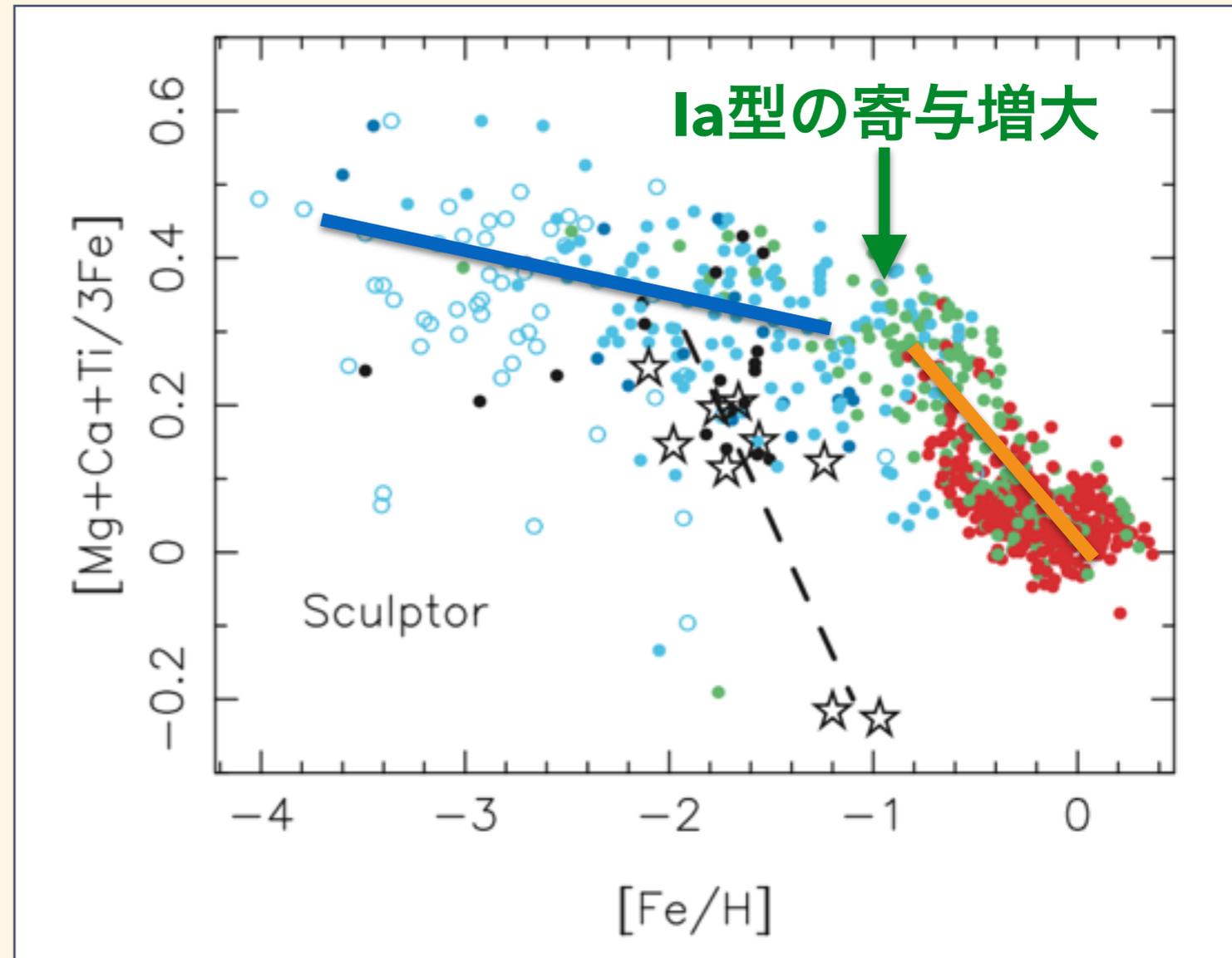
# 年齢と金属量の縮退

- 古くて低金属量の恒星種族と若くて高金属量の恒星種族は区別がむずかしい
- 少なくとも、色での区別は非常に困難
- 年齢を3倍すると金属量を2倍にするのと同じ効果  
(3/2ルール; Worthey 1994)



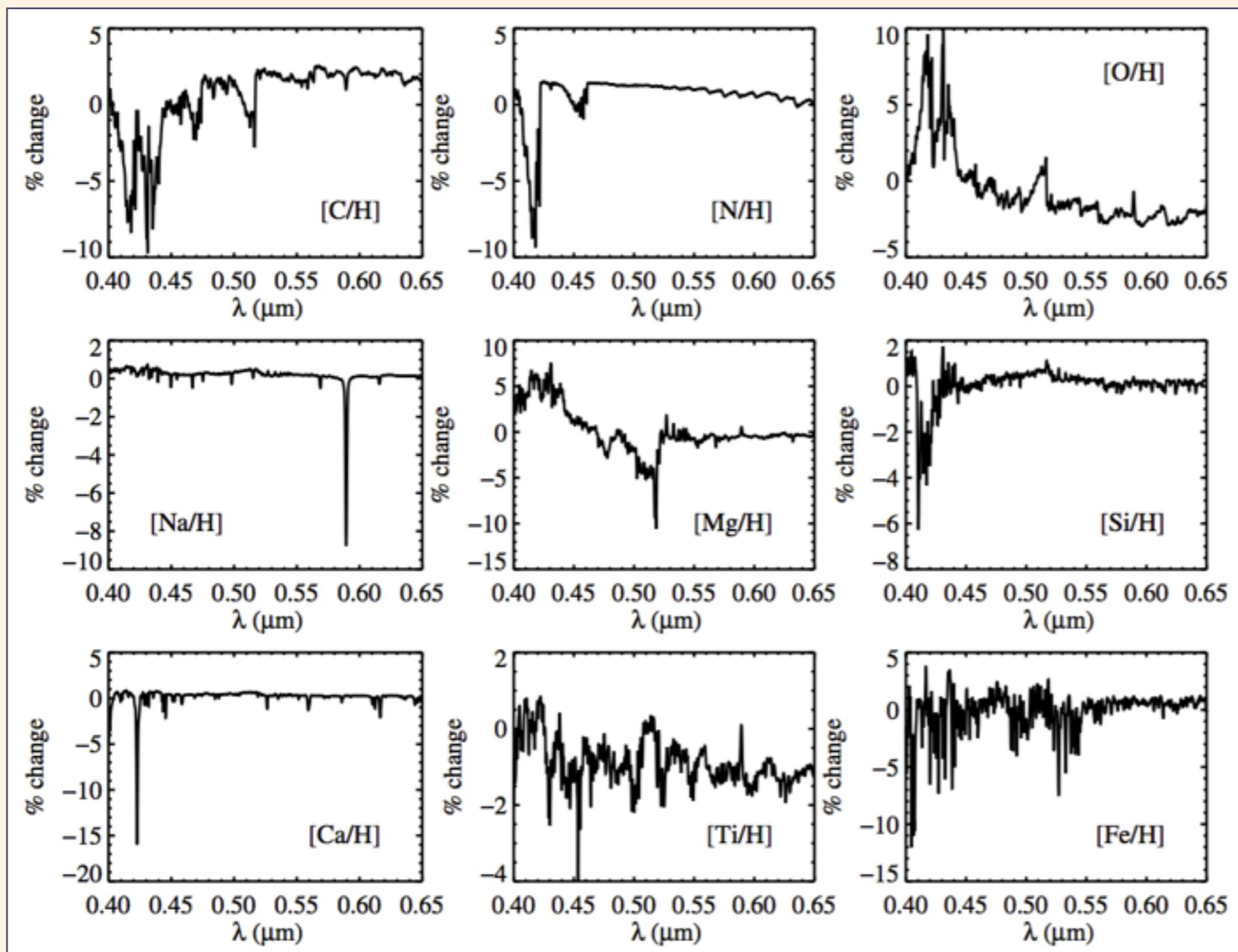
# 元素組成比

- $\alpha$ 元素はII型超新星、FeはIa型超新星から
- II型: 星形成直後から重元素汚染をおこなう
- Ia型: 星形成後しばらくしてから発生 (数百Myr-数Gyr)
- $[\alpha/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$ の折れ曲がりの位置から星形成の時間スケールを推定可能



Venn et al. (2004)

# 元素組成比がスペクトルに与える影響



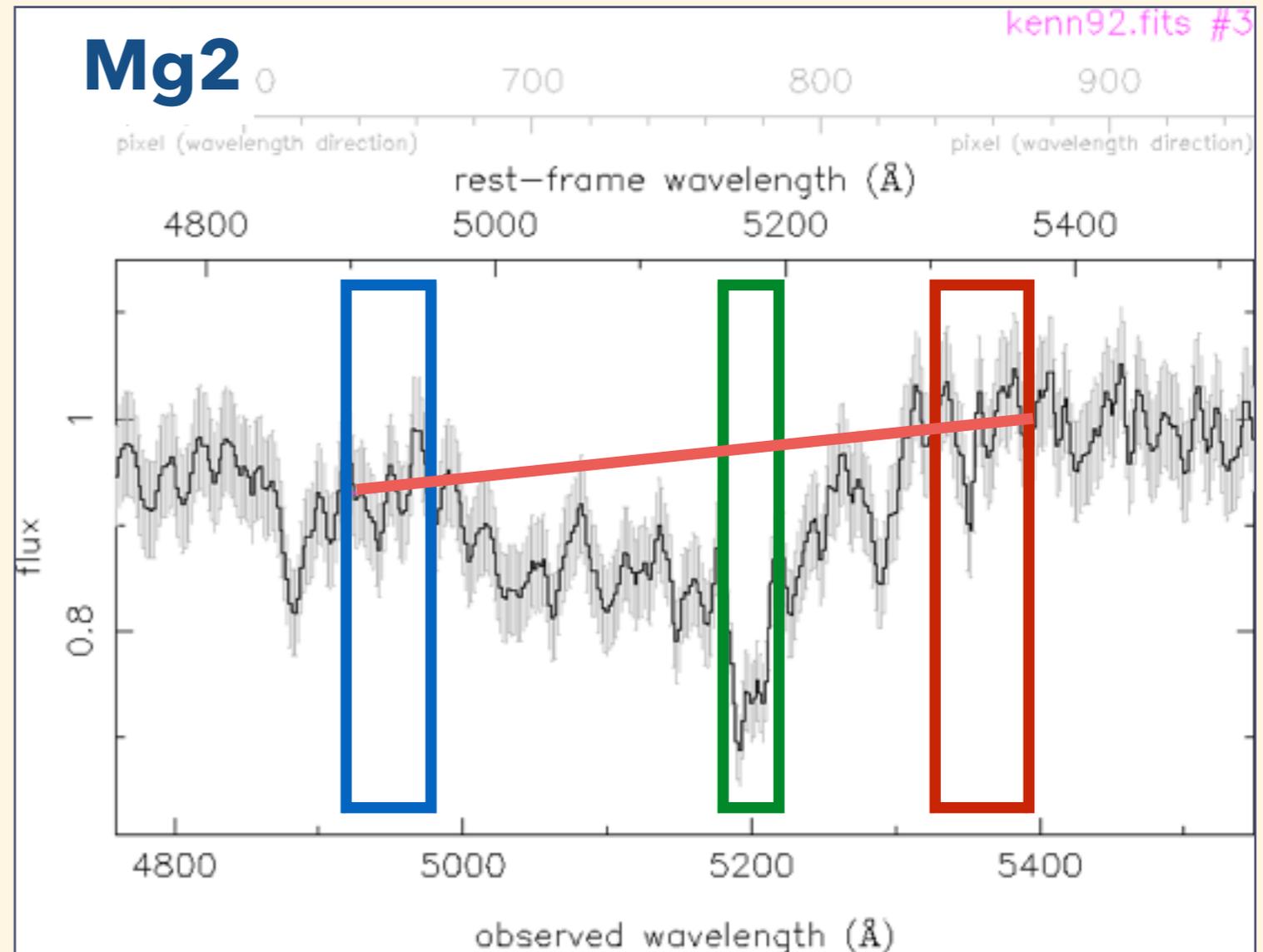
**[X/H]を0.3dex  
増やしたときの  
フラックスの変  
化量**

# 恒星種族パラメータを推定する

- 年齢と金属量の縮退があるので、撮像データからはむずかしい。静止系可視スペクトルを使う
- 年齢: 水素のバルマー吸収線 ( $H\beta$ ,  $H\gamma$ ,  $H\delta$ )
- 金属量: 金属吸収線
- 元素組成: 各元素の吸収線

# スペクトルインデックス

- 20年以上の歴史がある手法 (e.g., Worthey et al. 1994)
- Lick indices が有名
- 吸収線等価幅のセット



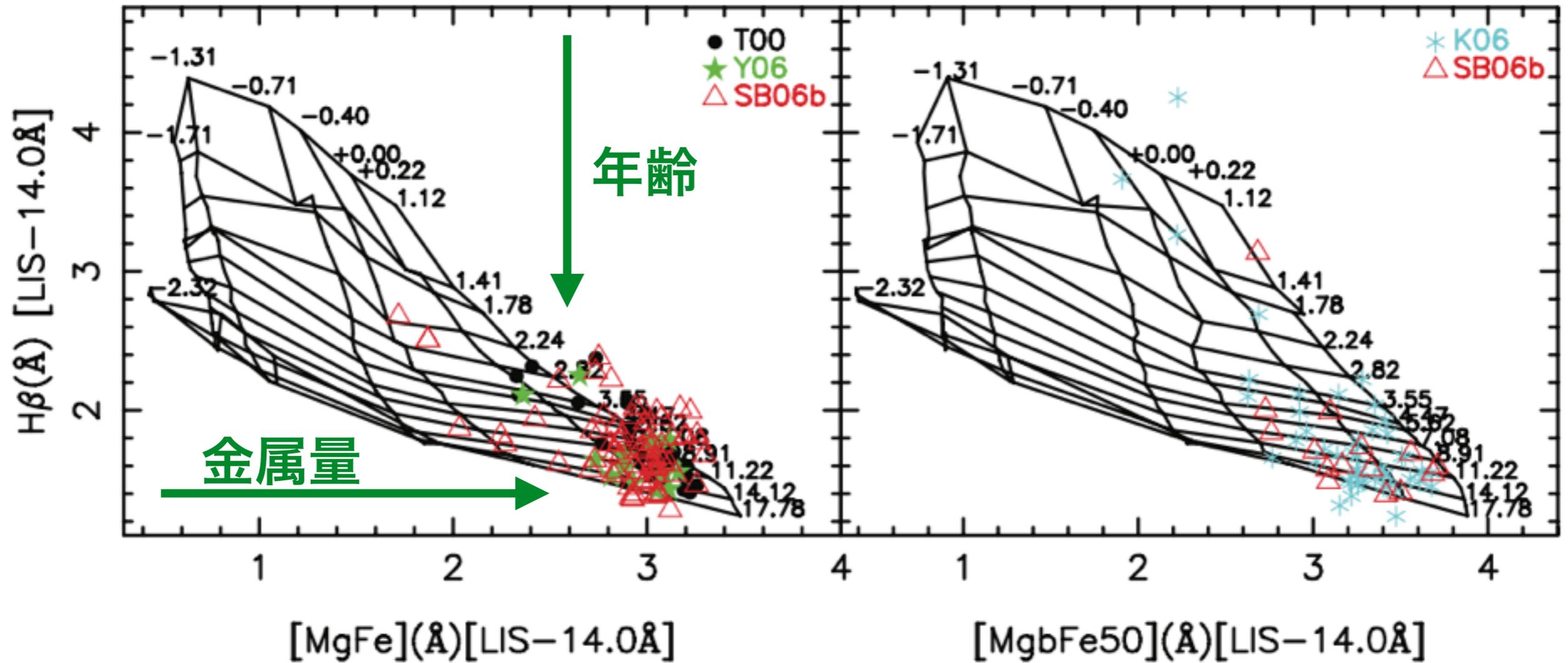
連続光(青)

吸収線

連続光(赤)

**Table 2**  
Absorption Line Indices

No.	Name	Index Bandpass (Å)	Pseudocontinua (Å)	Reference
01	H $\delta_A$	4083.500–4122.250	4041.600–4079.750, 4128.500–4161.000	Lick <sup>a</sup>
02	H $\delta_F$	4091.000–4112.250	4057.250–4088.500, 4114.750–4137.250	Lick



**Notes.**

- <sup>a</sup> Worthey et al. (1994).
- <sup>b</sup> Gonzalez (1993).
- <sup>c</sup> Kuntschner et al. (2006).

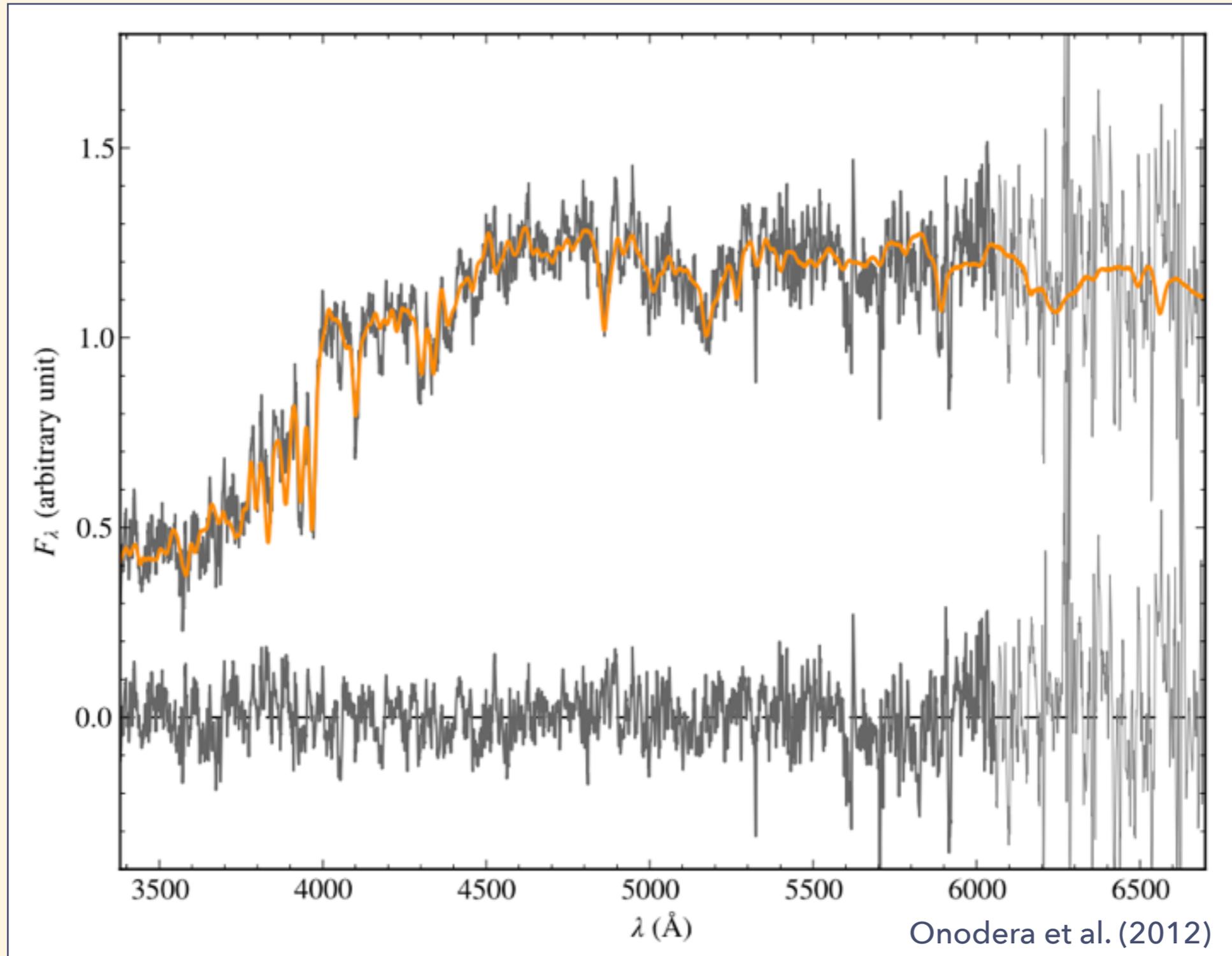
- **メリット**

- **等価幅を使うので多少 S/N が低くても使える**
- **ダスト減光の影響が少ない**
- **$\alpha$ 元素の影響がよく調べられている**

- **デメリット**

- **理論モデルが基本的に SSP なので、星形成が止まっていなると使いにくい (意味をなさない)**
- **スペクトルをかなり低分散にダウングレードしなければならない (代替案はあるが、あまり使われていない; e.g., Vazdekis et al. 2010)**

# Full Spectral Fitting

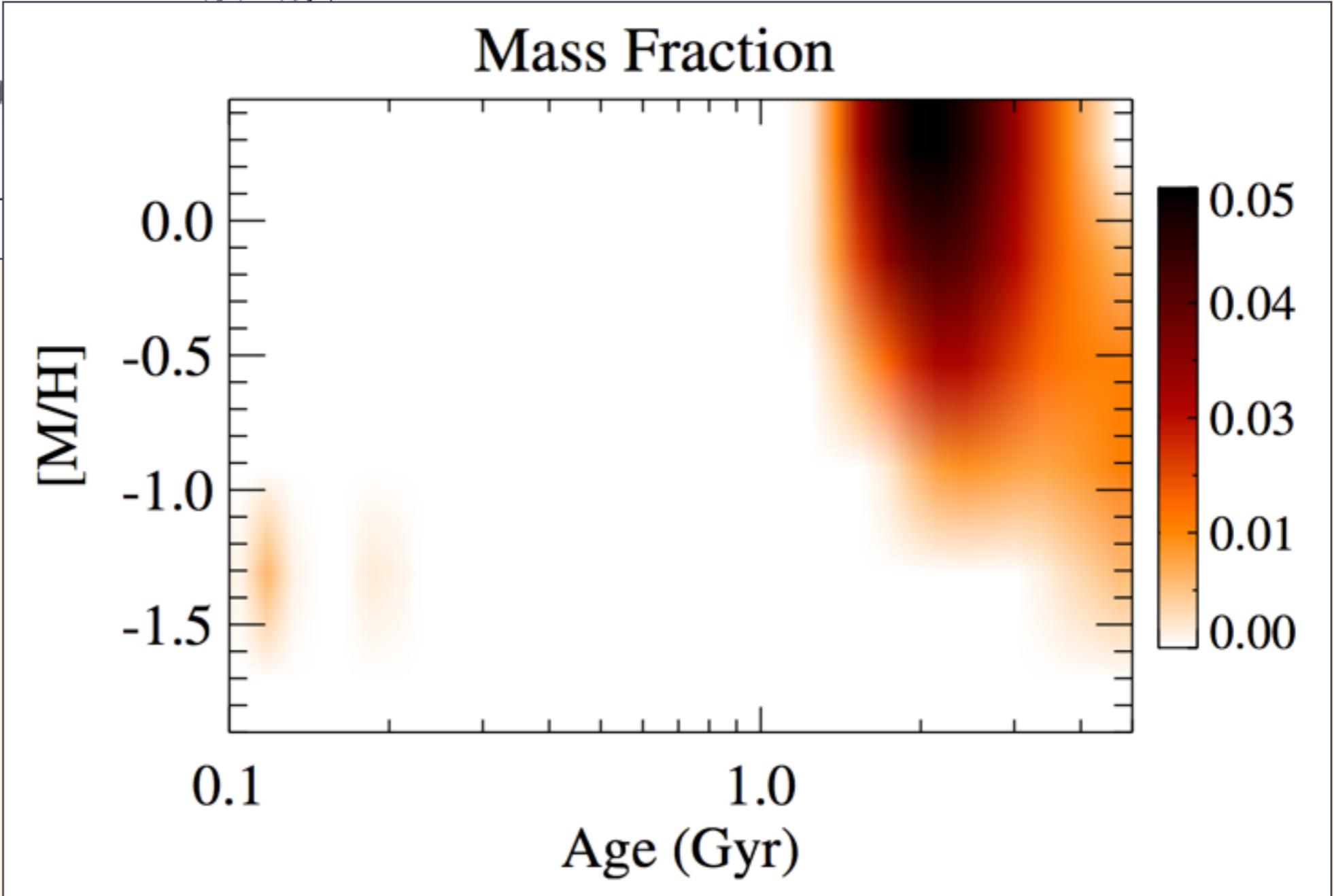
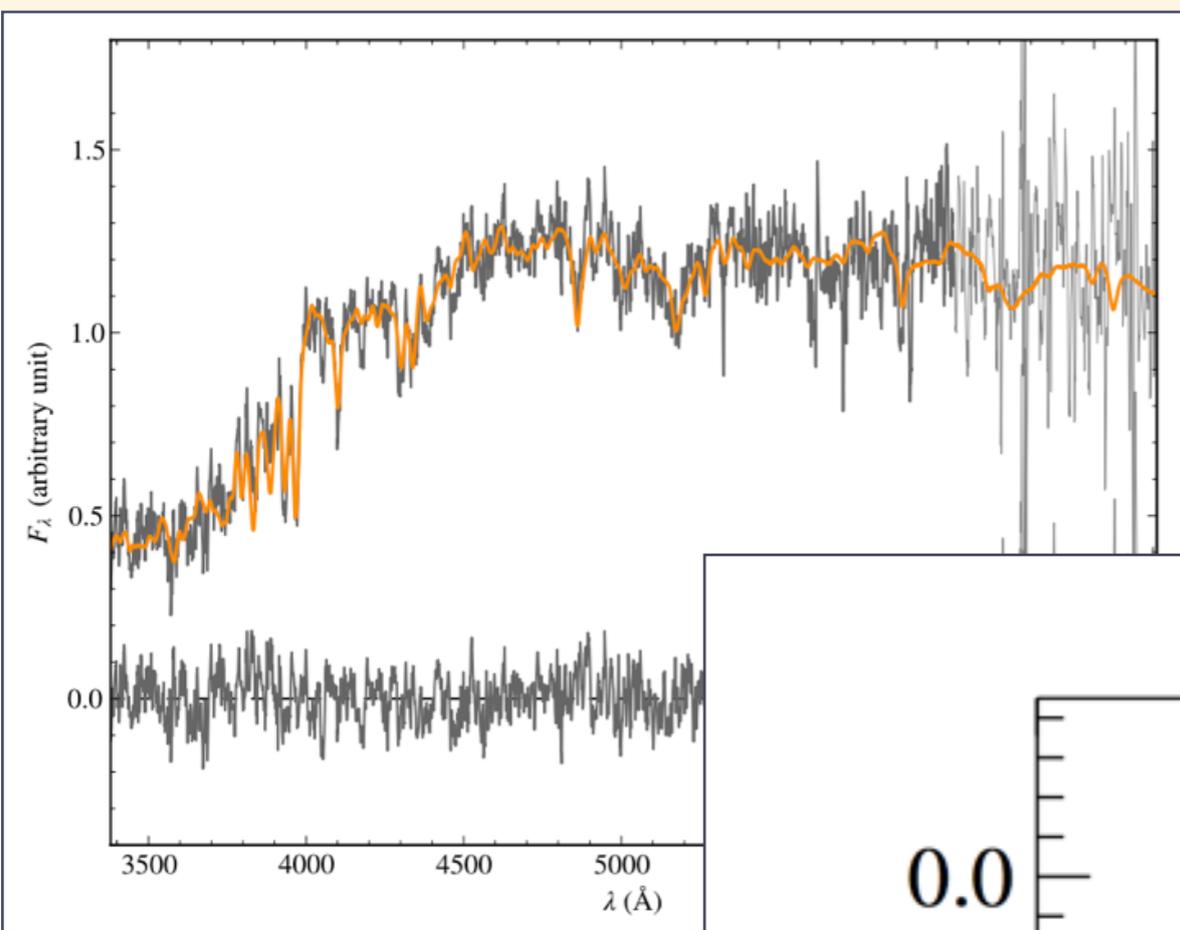


- メリット

- 使える情報が多い
- 関数系の仮定なしで星形成史を求めることができる
- 輝線の影響も同時に推定可能

- デメリット

- フィッティングが非線形で、しかもパラメータが多い
- ダスト減光やフラックス較正の影響が大きい
- ノンゼロ $[\alpha/\text{Fe}]$ を扱っているSSPモデルがまだ少ない  
(Vazdekis et al. 2015)



# 実際の恒星種族の研究

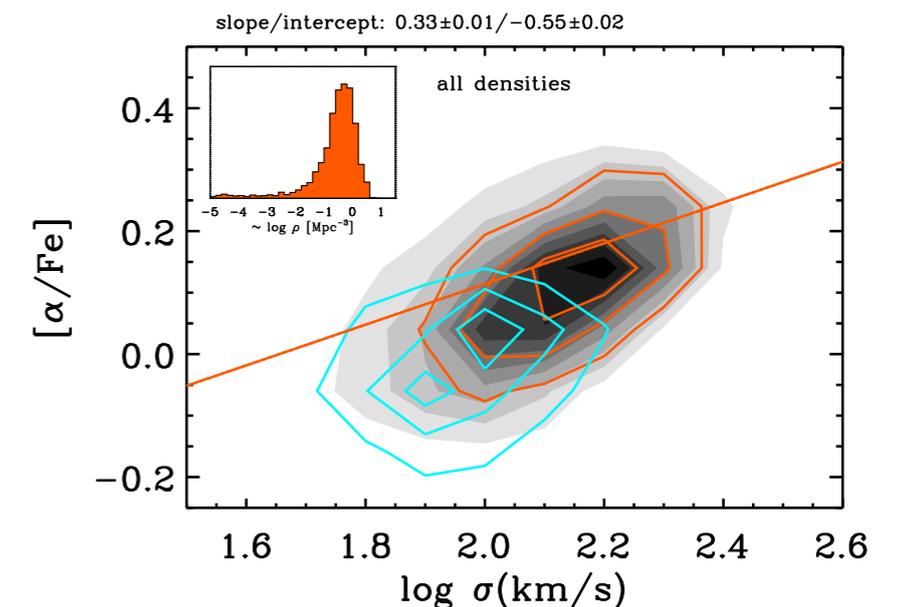
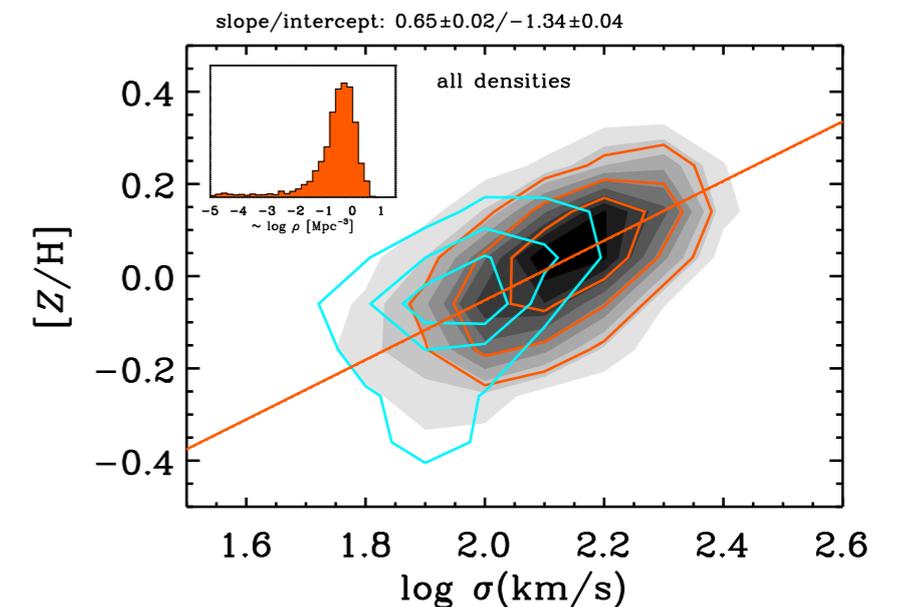
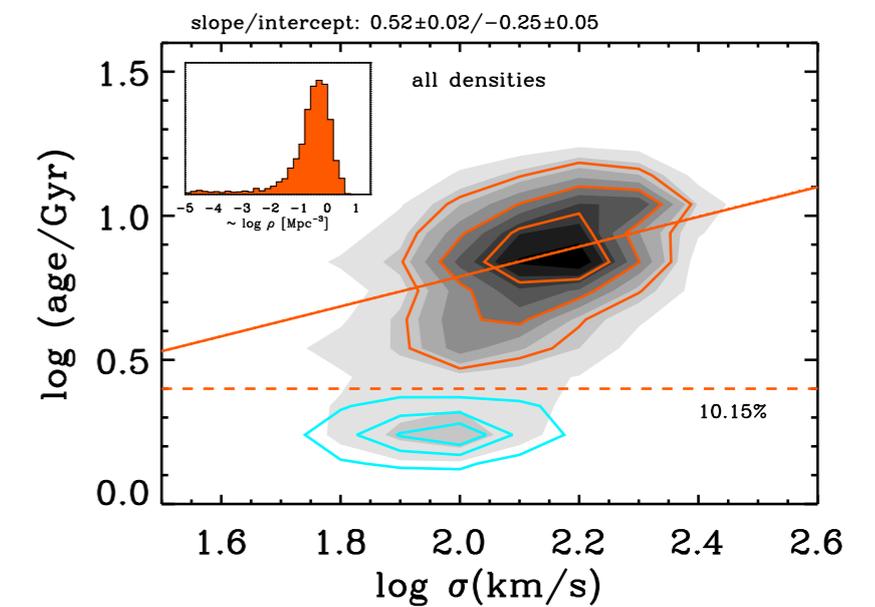
- インデックスを使った歴史的な手法は SSP を仮定してきたため、楕円銀河のような星形成が止まった銀河にしか適用できない
- 星形成銀河についても full spectral fitting 等、手法の発達によって恒星種族の研究が可能に
- このあとは、特に断らない限り、主に楕円銀河の恒星種族について

※楕円銀河、早期型銀河、静的に進化する銀河、などなど、だいたい同じ意味で使用します

# 近傍楕円銀河の恒星種族

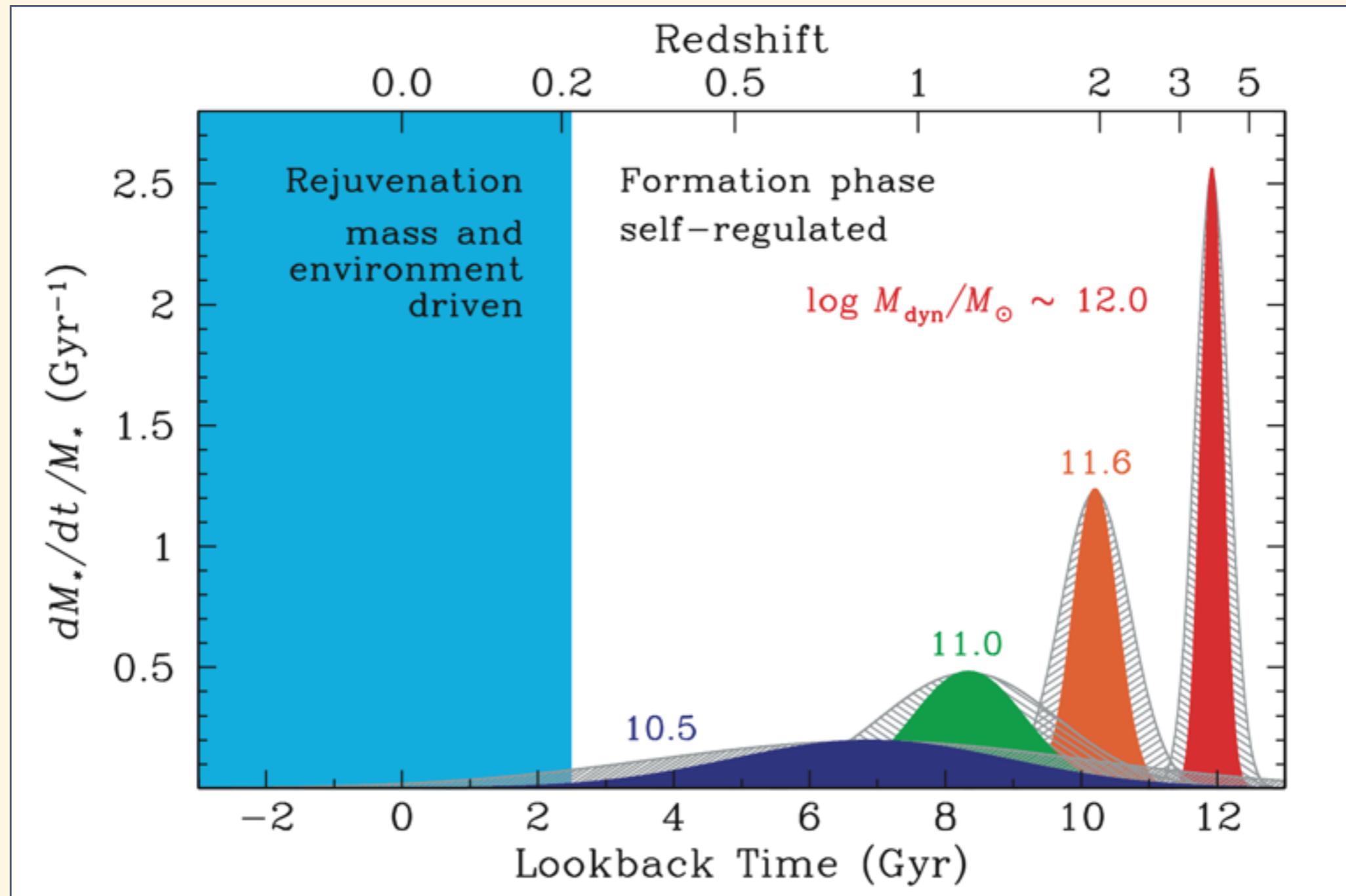
# 近傍楕円銀河の 恒星種族

- 速度分散 (質量) と恒星種族パラメータに相関がある
- 大質量銀河ほど、古く、金属量が高く、 $\alpha$ 元素が鉄に比べて多い傾向
- 年齢を形成期に、金属量を星形成の量に、 $[\alpha/\text{Fe}]$  を時間スケールに翻訳できる



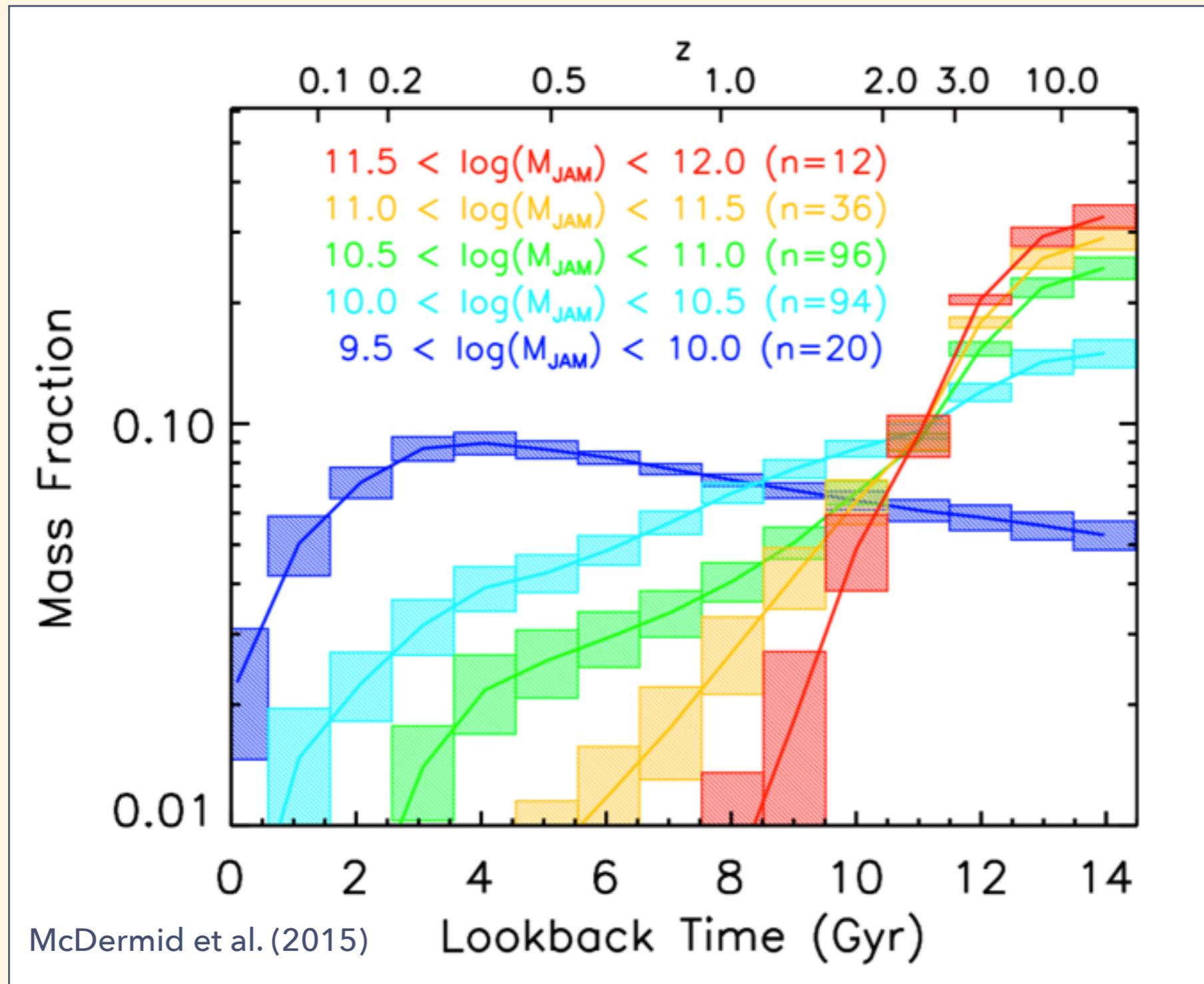
# 近傍楕円銀河の星形成史

## Lick インデックス版



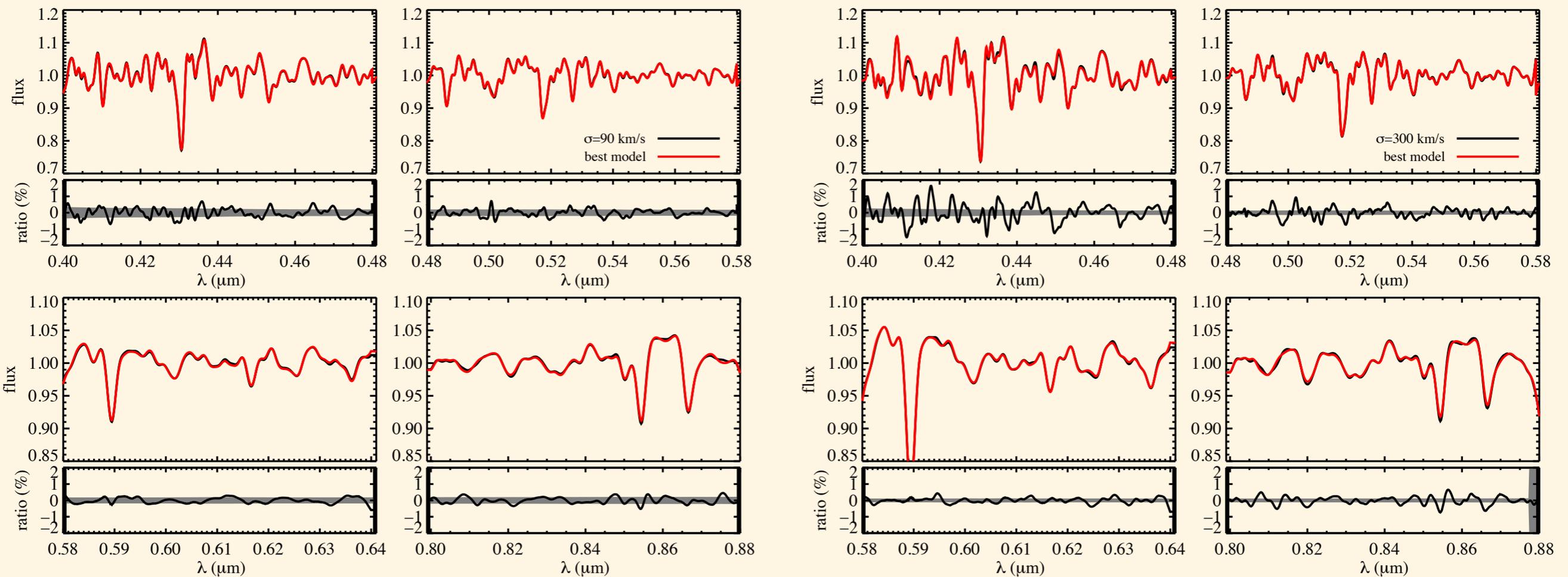
# 近傍楕円銀河の星形成史

## Full Spectral Fitting 版

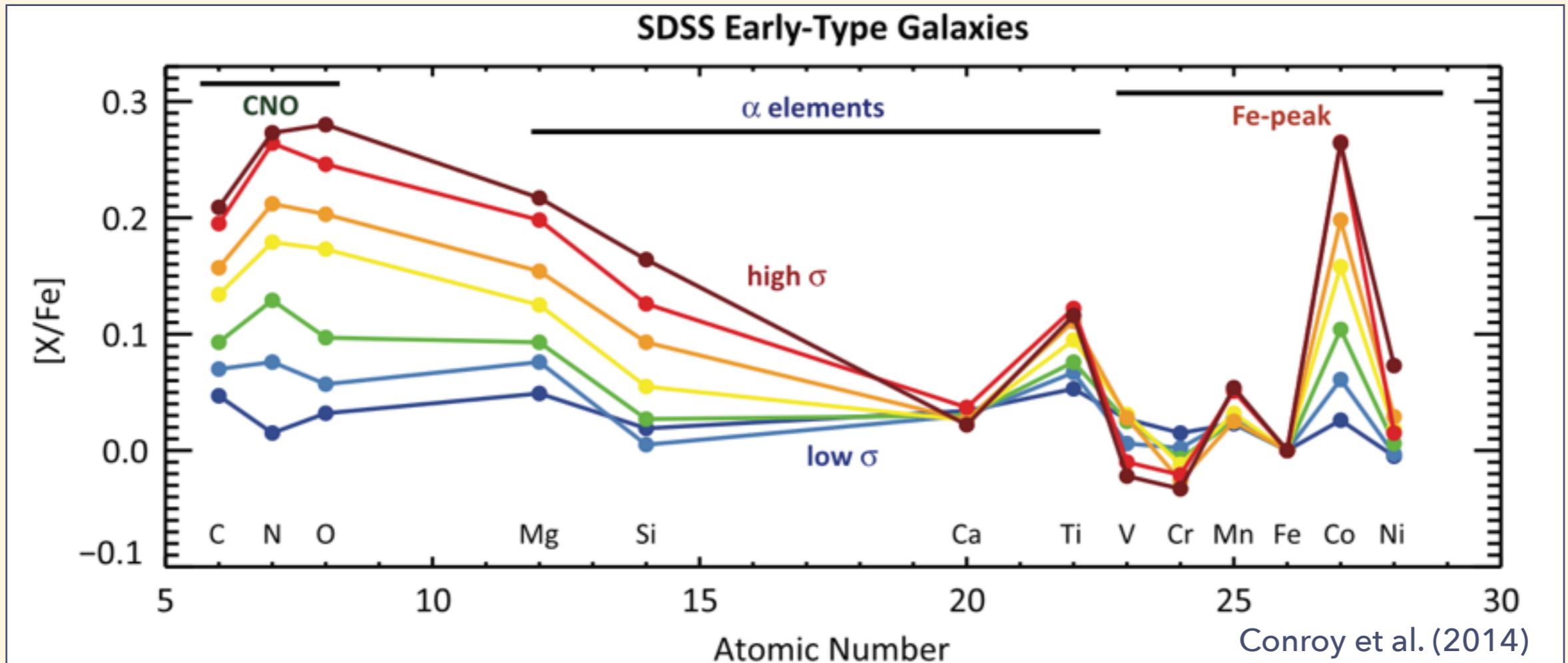


# 近傍楕円銀河の考古学

- SDSSの銀河を大量にスタック ( $S/N > 1000$ )



# 近傍楕円銀河の元素組成比

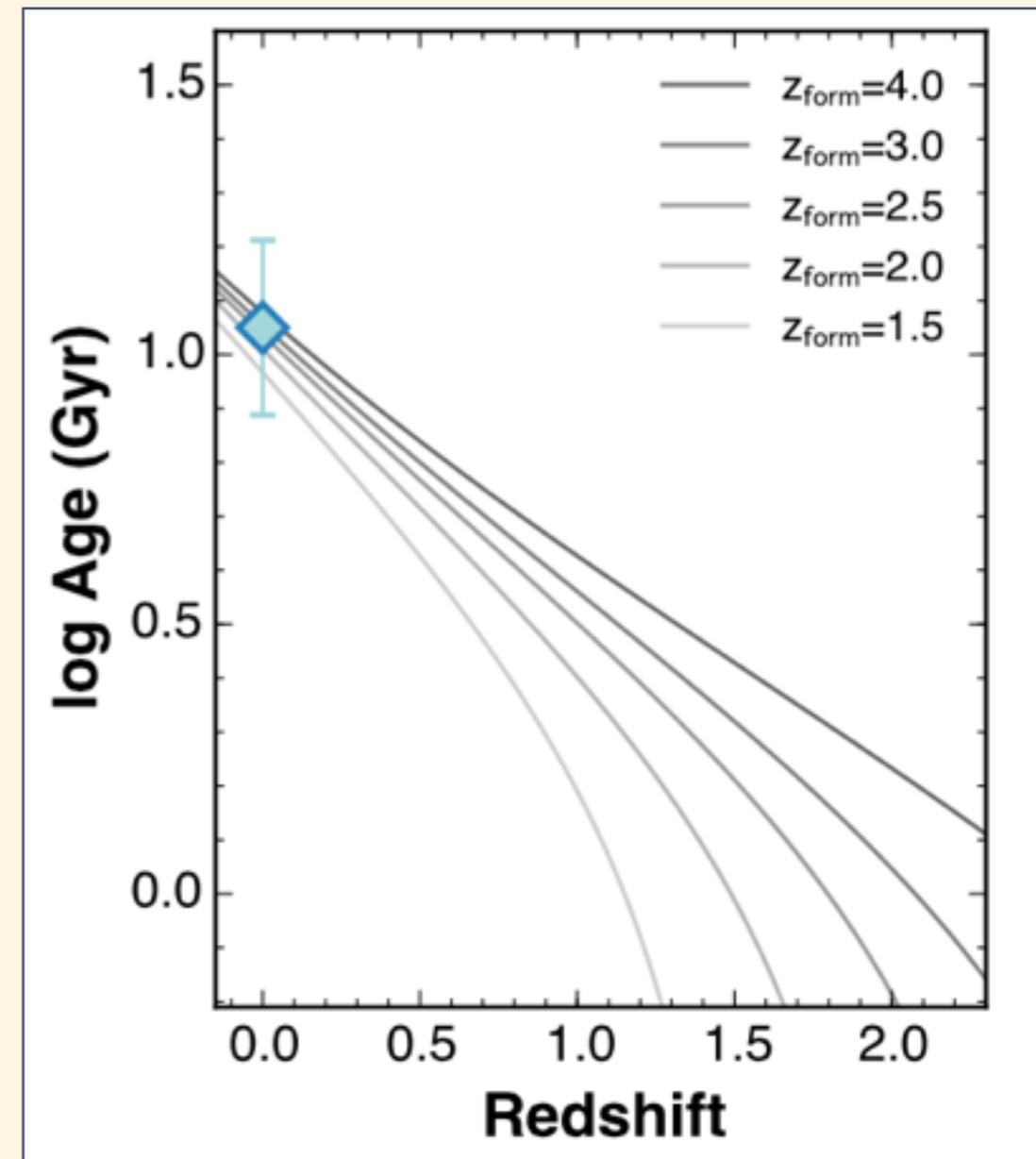


- 主要な元素について、元素組成比の楕円銀河の質量依存性を調べられるようになってきた

# 遠方楕円銀河の恒星種族

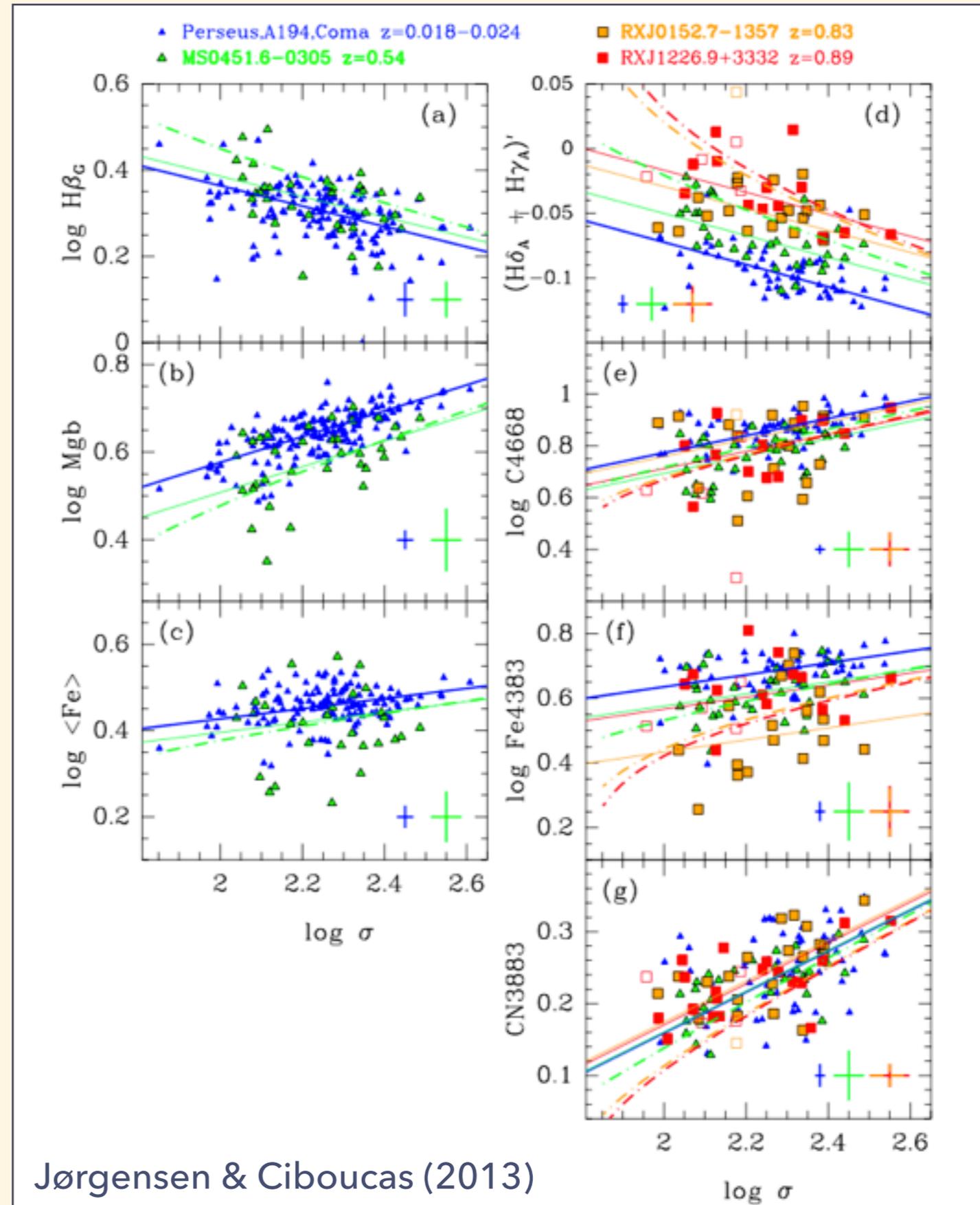
# 近傍の化石情報だけでは不十分？

- 近傍楕円銀河で求めた星形成史は正しいのか？
- 星形成の停止後は静的な進化だけだったのか？
- 高齢の恒星種族は年齢の決定が実は困難
- 遠方の方が楕円銀河の形成期に強い制限
- より新鮮な化石を見たい

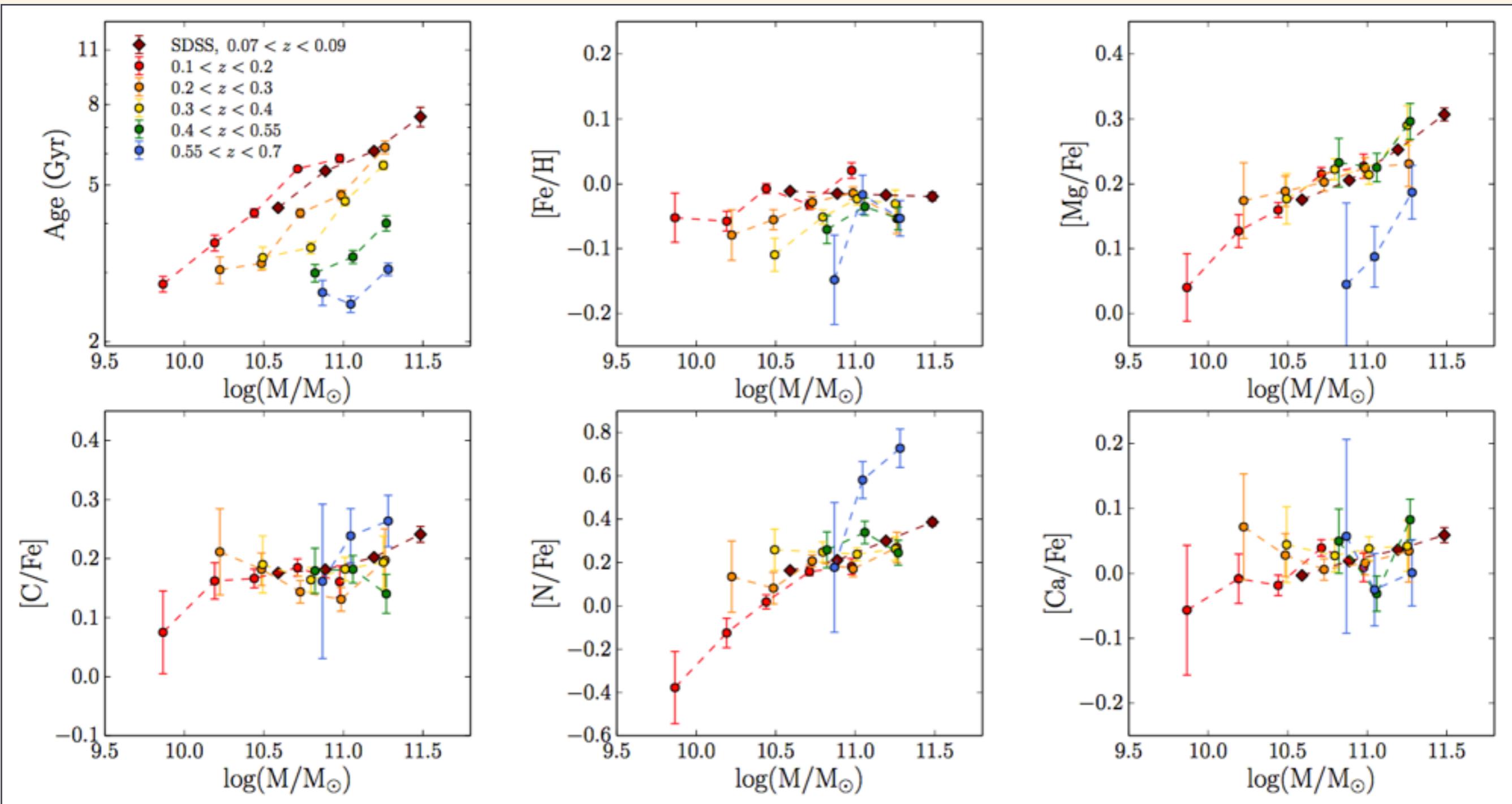


# 銀河団銀河

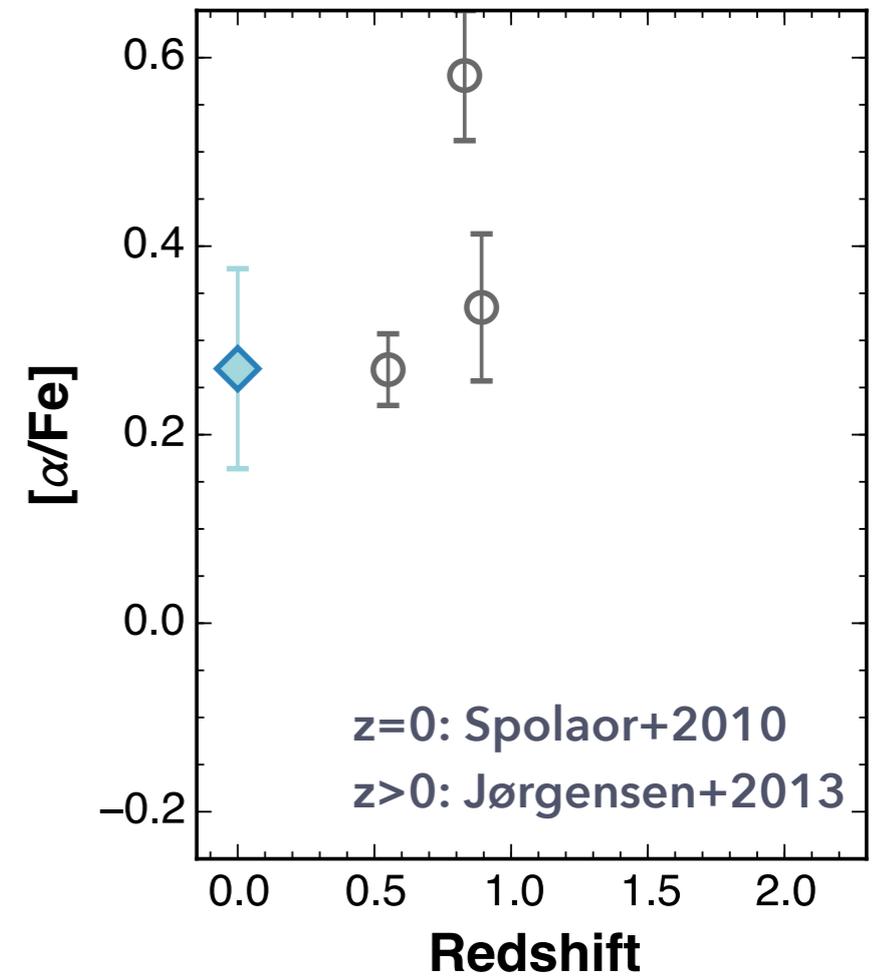
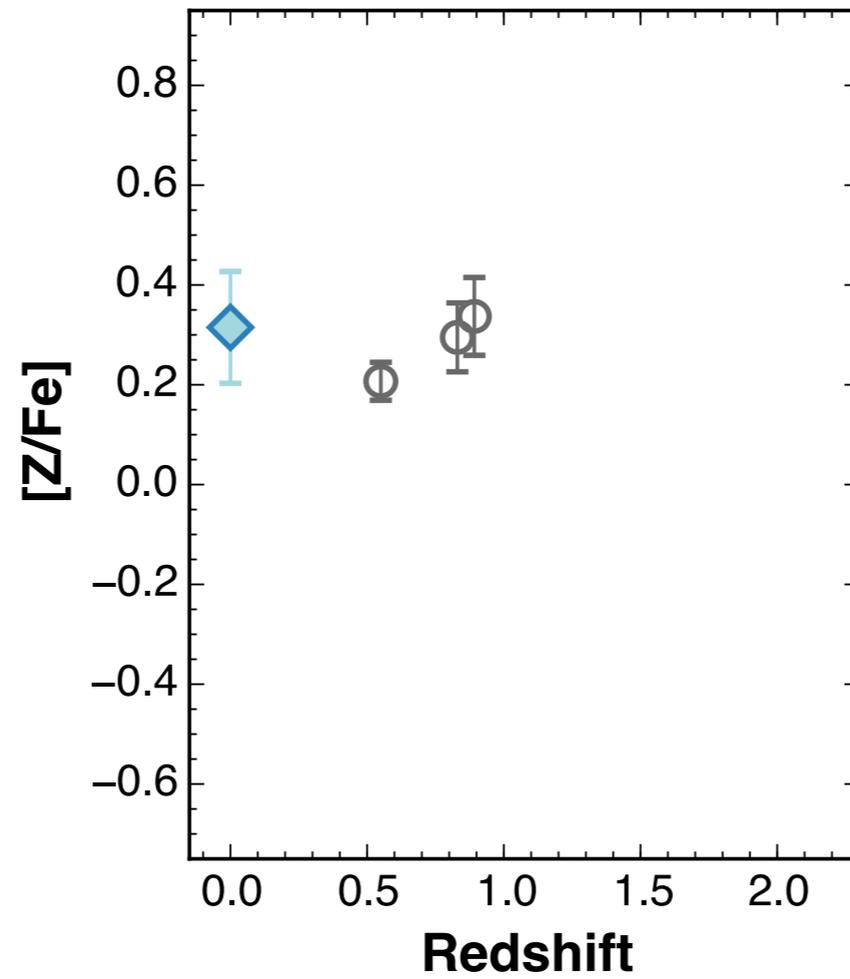
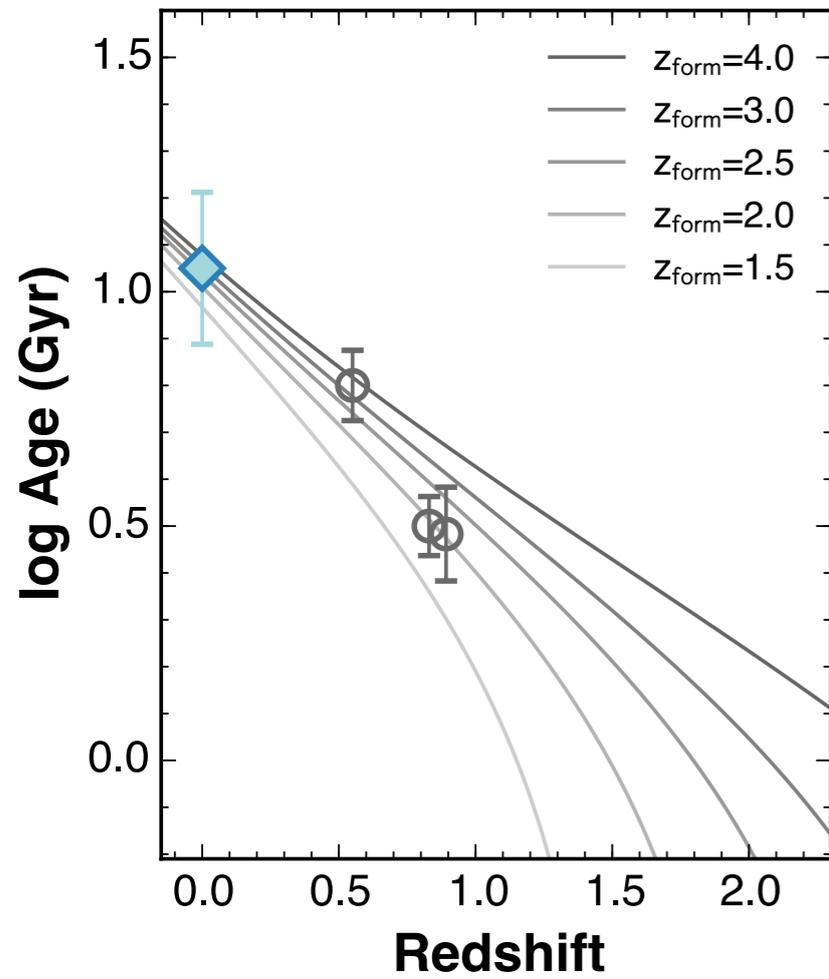
- $z < 0.9$
- $z = 0$ と同じ傾向
- 一部、若い楕円銀河
- だいたい静的な進化と整合的



# フィールド銀河 ( $z < 0.7$ )

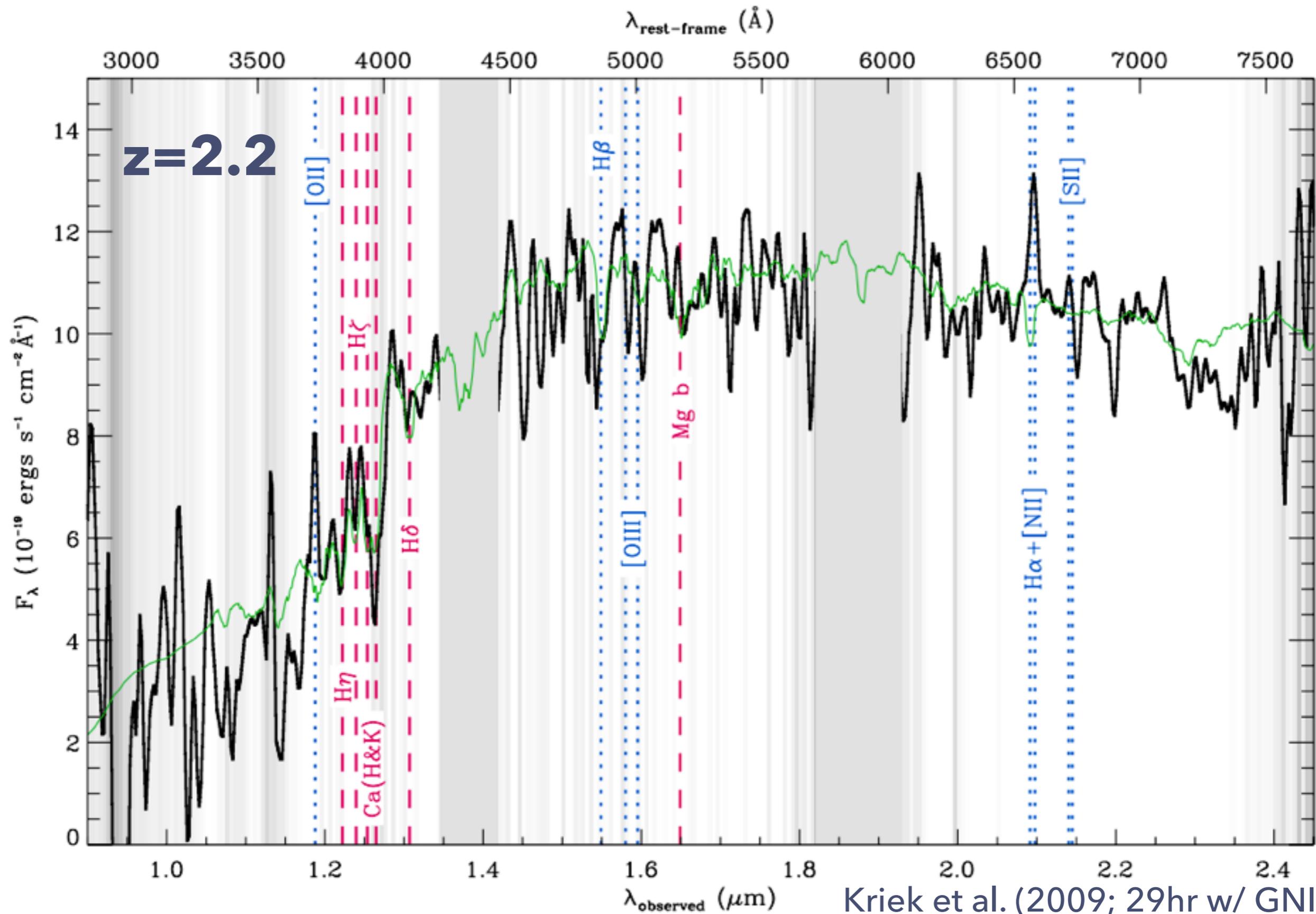


# 赤方偏移進化



# もっと遠方 ( $z > 1$ ) をしらべたい

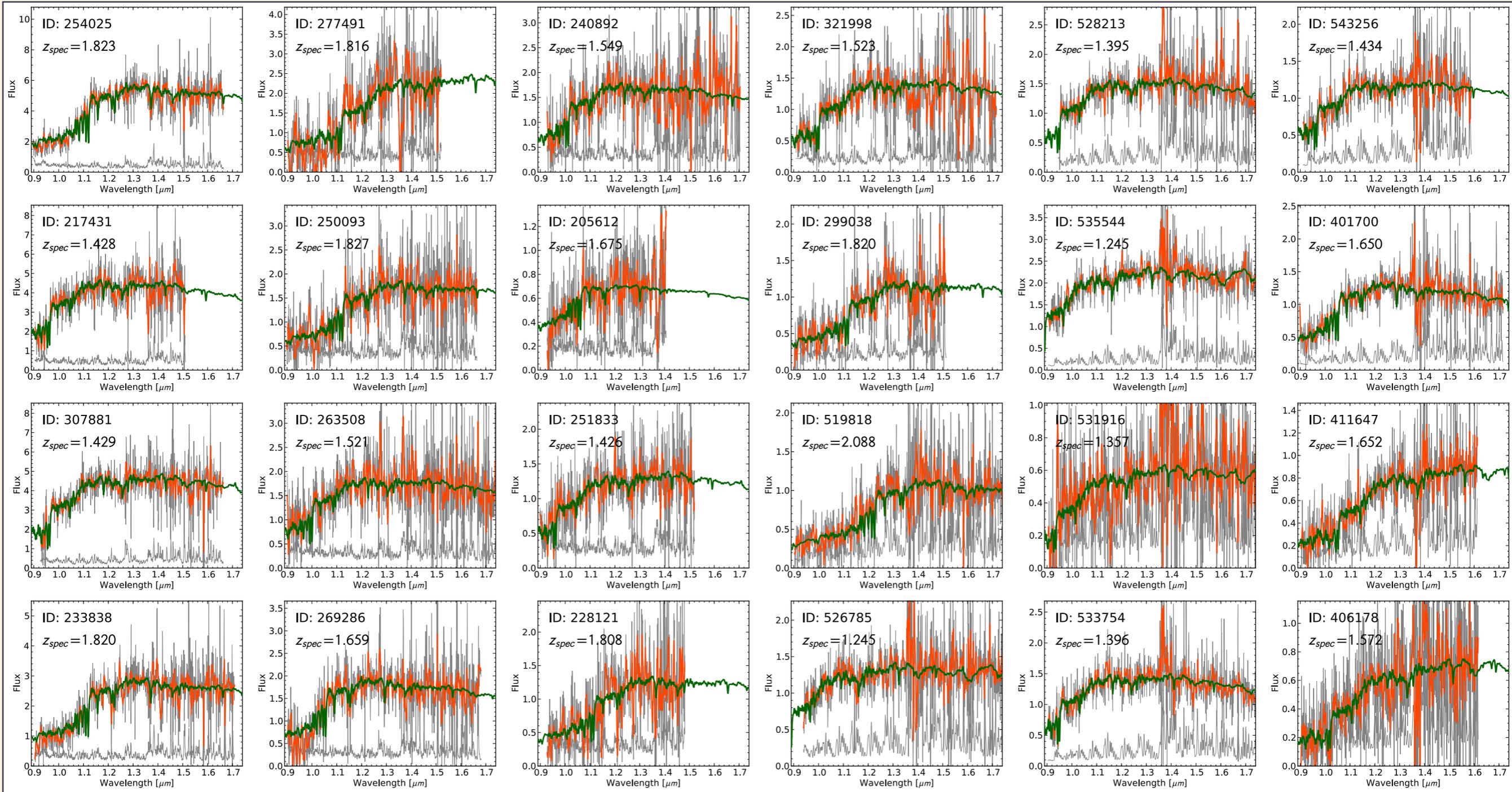
- 静止系可視は近赤外線に移動
- 実視等級が暗くなる
- 赤方偏移を決めるだけでも割と大変
- 恒星種族のことをスペクトルを使って調べるのはもっと大変



Kriek et al. (2009; 29hr w/ GNIRS)

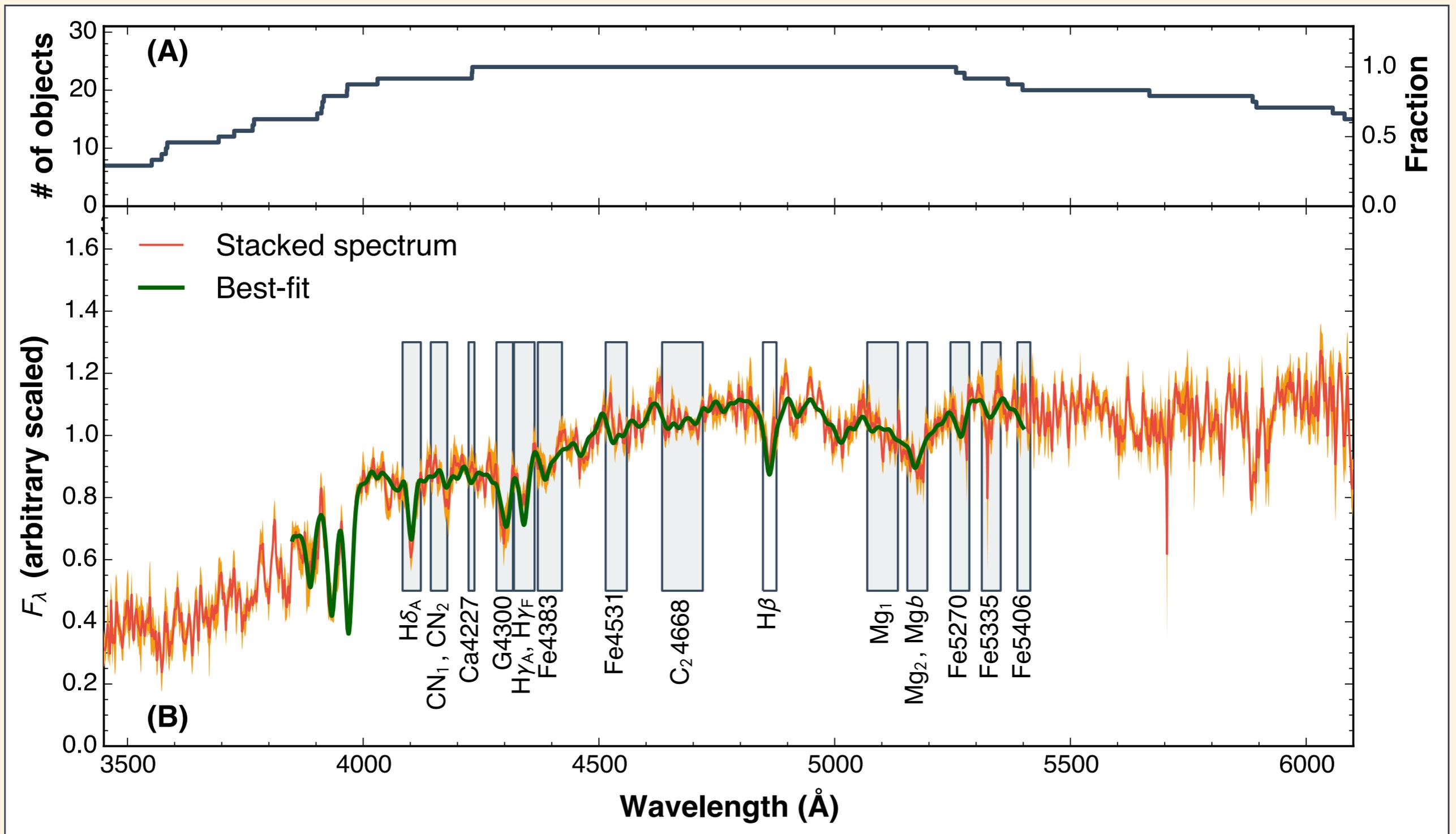
Kriek et al. (2008; 1-5hr w/ GNIRS)

# 1.25 < z < 2.09

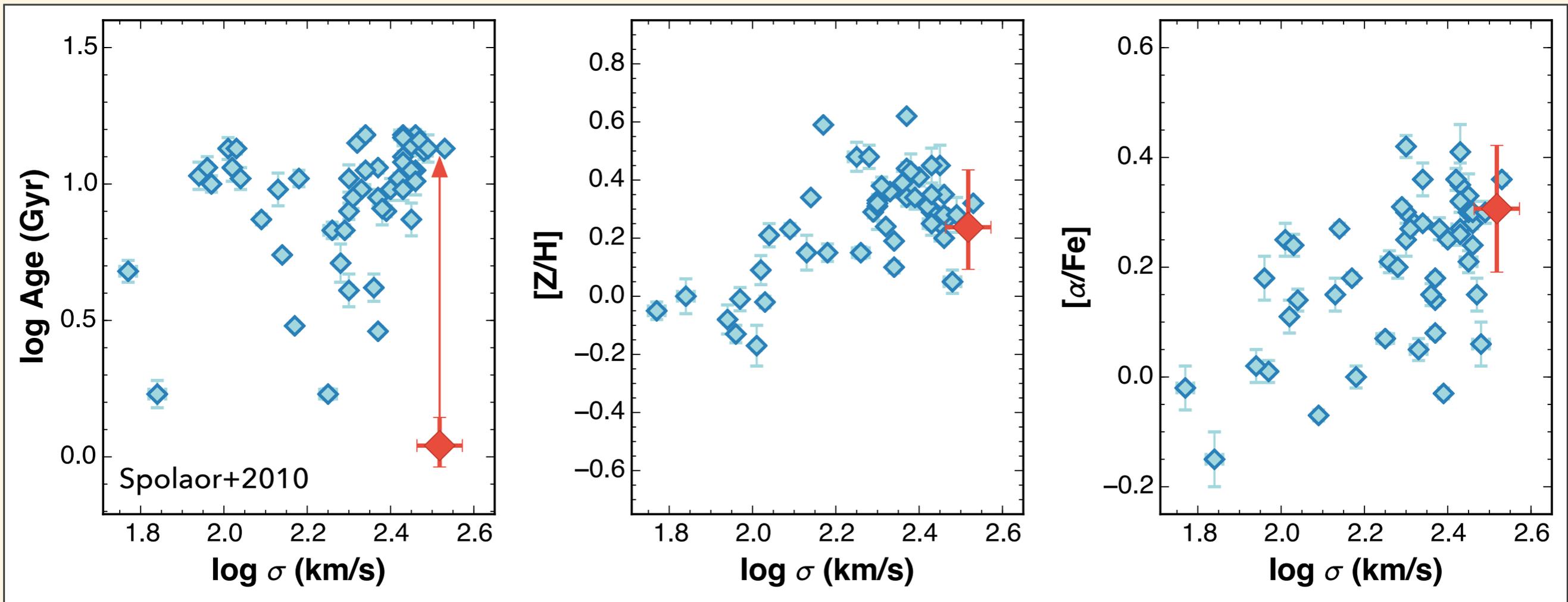


Onodera et al. (2012, 2015; 7-9hr w/ MOIRCS)

# スタックしてLickインデックスを測りました



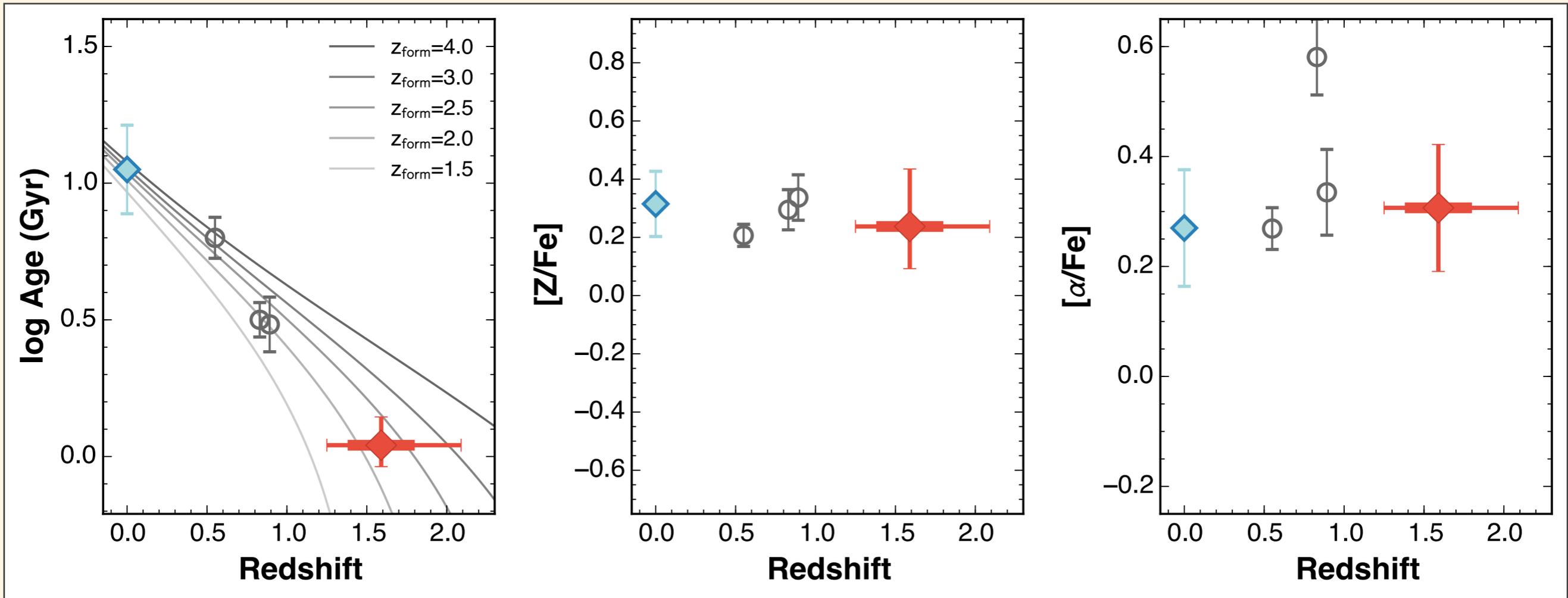
# 近傍楕円銀河との比較



Onodera et al. (2015)

静的進化だけで  $z=0$  の楕円銀河の性質によく一致

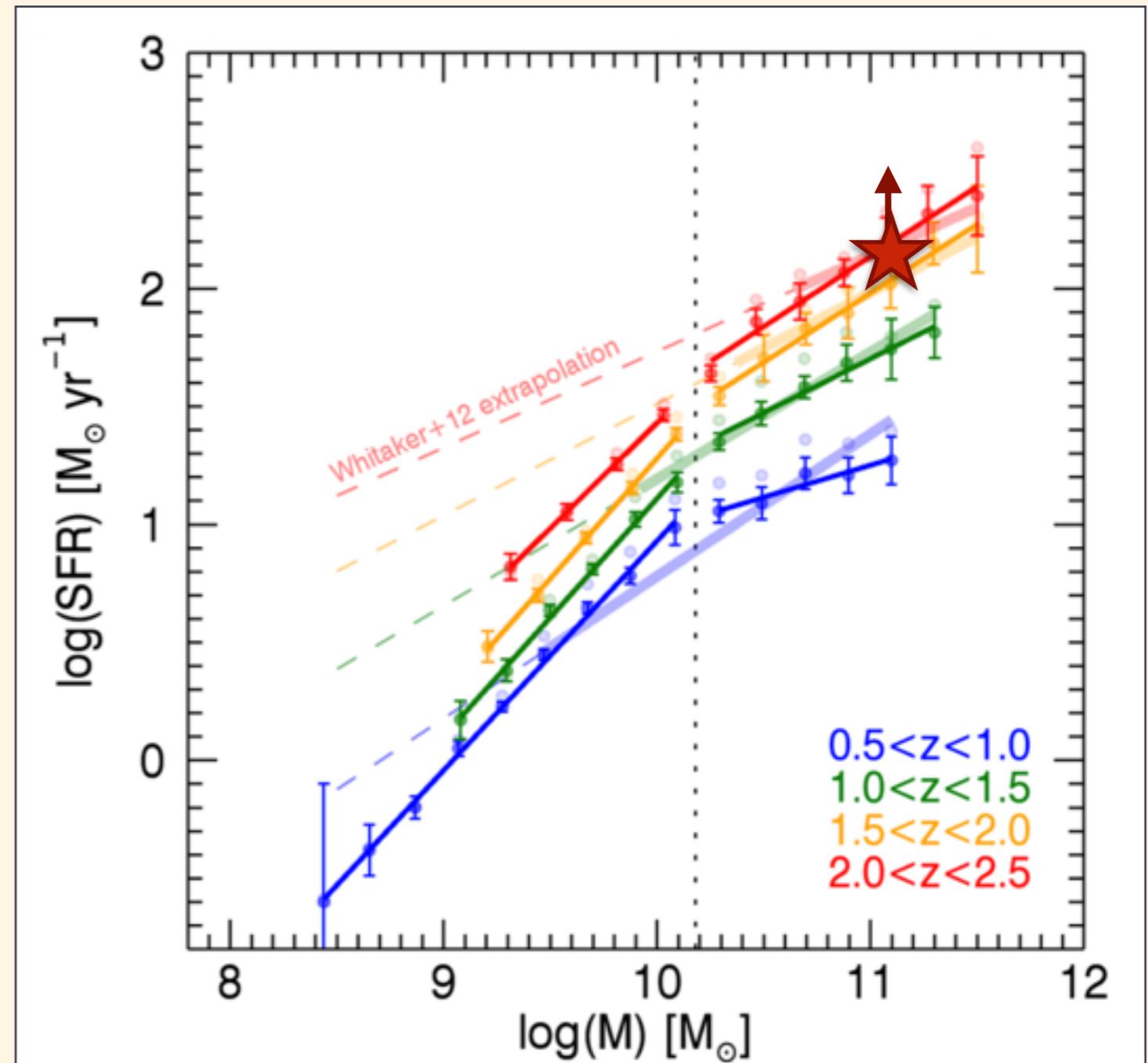
# 赤方偏移進化



- 大質量楕円銀河の形成期:  $z_{\text{form}} \sim 2.3$
- [alpha/Fe]から示唆される星形成の時間スケール:  $< 1 \text{ Gyr}$
- 楕円銀河の祖先は  $z=2.3$  の星形成銀河

# $z=2.3$ に祖先を探す

- $M_* = 2.3 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$
- $\text{SFR} > 200 M_{\text{sun/yr}}$
- $z=2.3$  の星形成銀河の  
主系列で説明可能

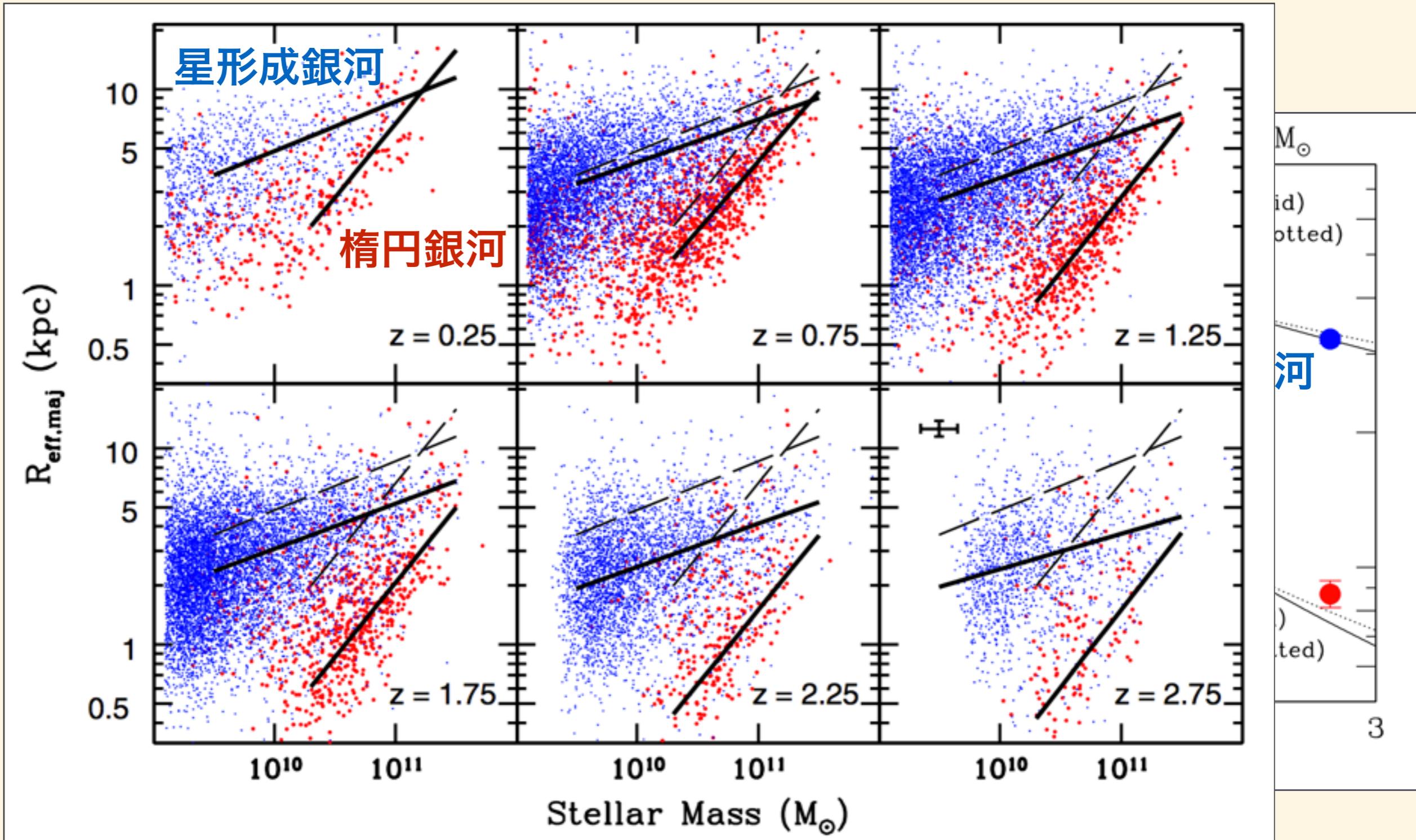


Whitaker et al. (2014)

# 恒星種族が鍵となる 銀河進化の問題の例

# コンパクト楕円銀河問題

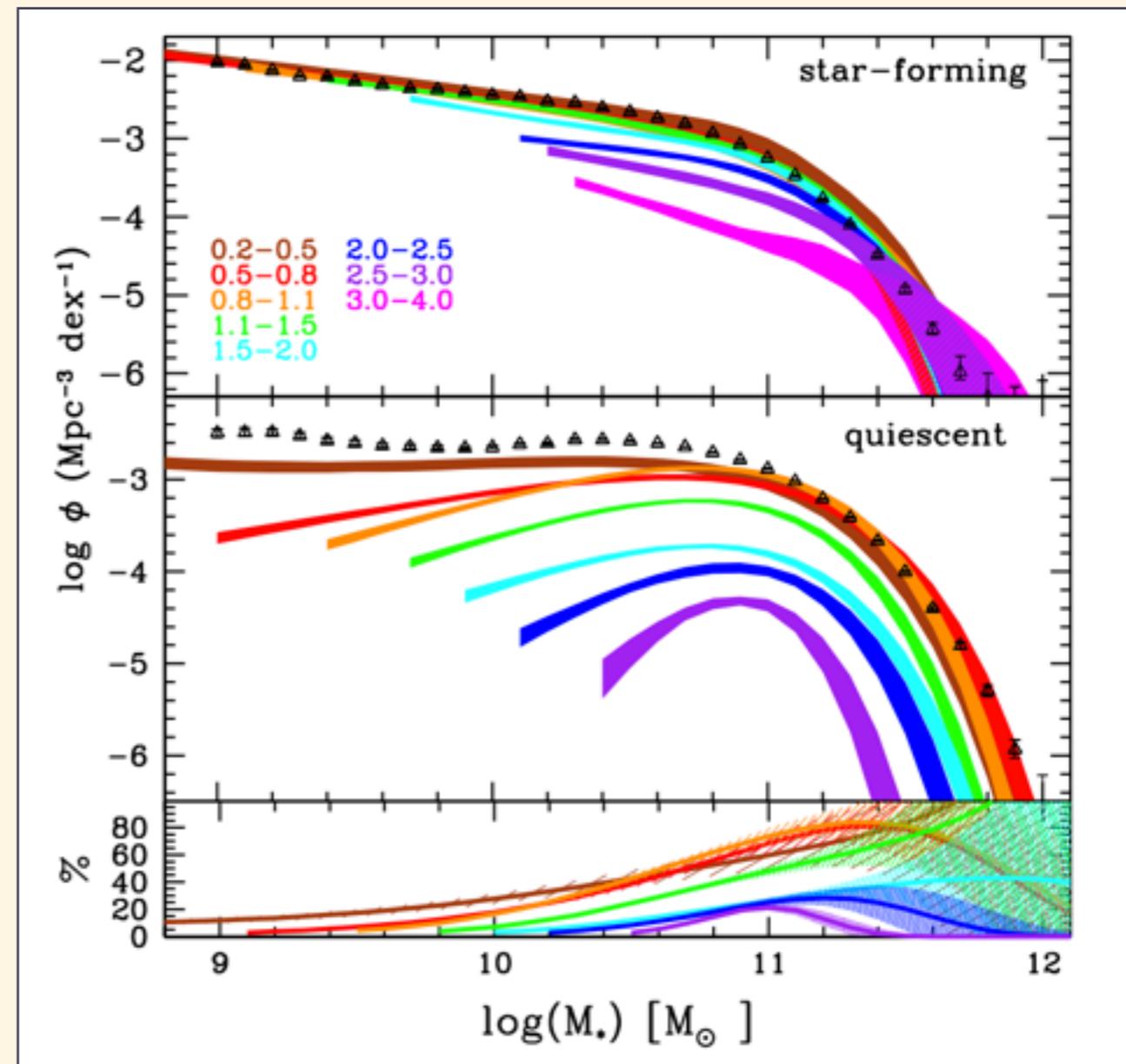
# 楕円銀河のサイズー質量関係



# ふたつのサイズ進化シナリオ

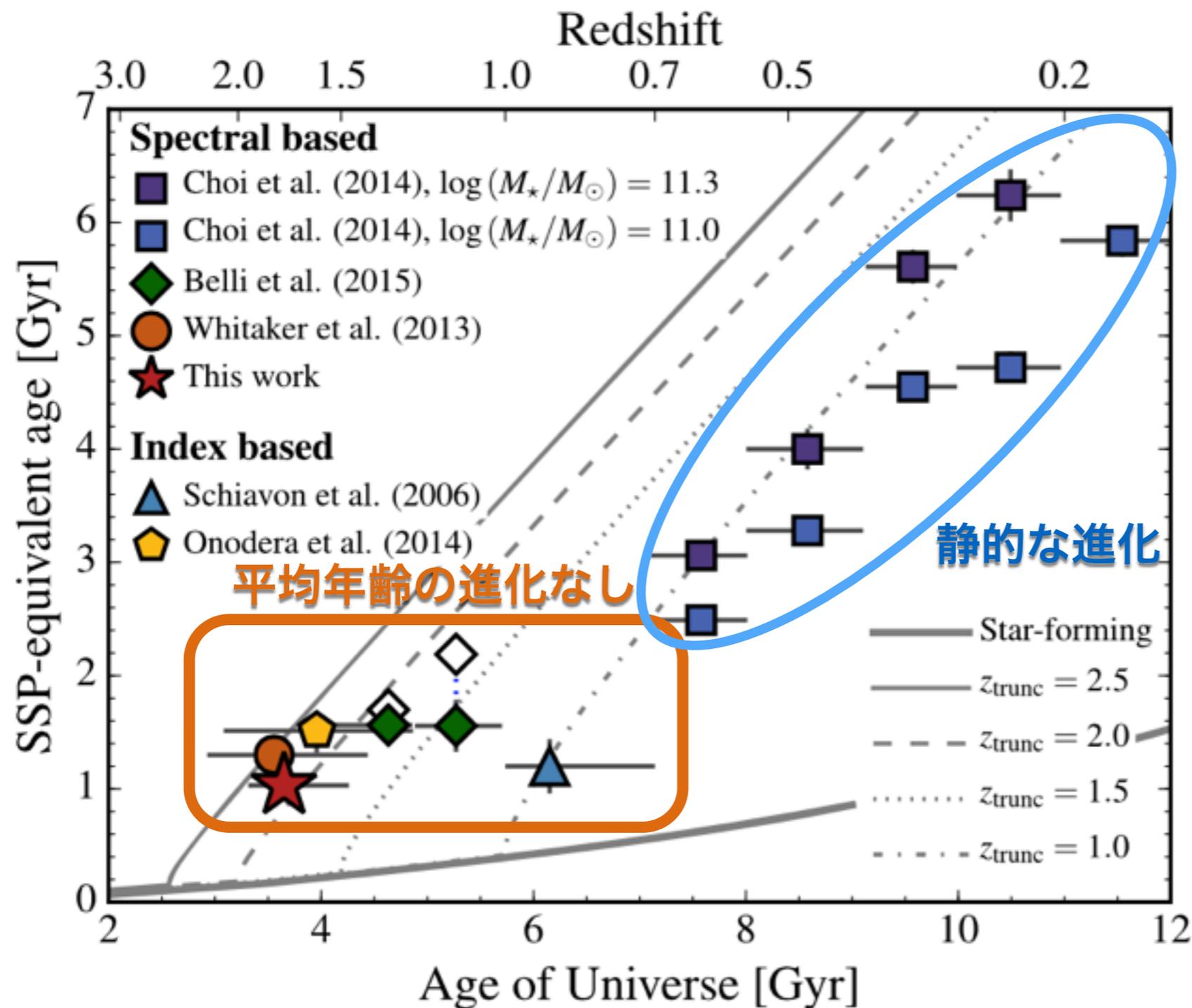
1. 何らかのメカニズムで、個々の銀河のサイズが成長 (マイナーマージャーが有力候補; e.g., van der Wel et al. 2014)

2. サイズの大きな星形成銀河が星形成を止めて、あらたに楕円銀河種族に加わる ("progenitor bias" とよばれる; e.g., Carollo et al. 2013)



Ilbert et al. (2013)

# 大質量楕円銀河の年齢進化



新しい楕円銀河が実際に  $z > 1$  では生まれ続けているようだ

# サイズ進化と恒星種族

シナリオ1の場合、銀河はコンパクトに生まれ、衛星銀河の降着でサイズを増加

→ 大きな楕円銀河が古い (長期間銀河を降着可能)

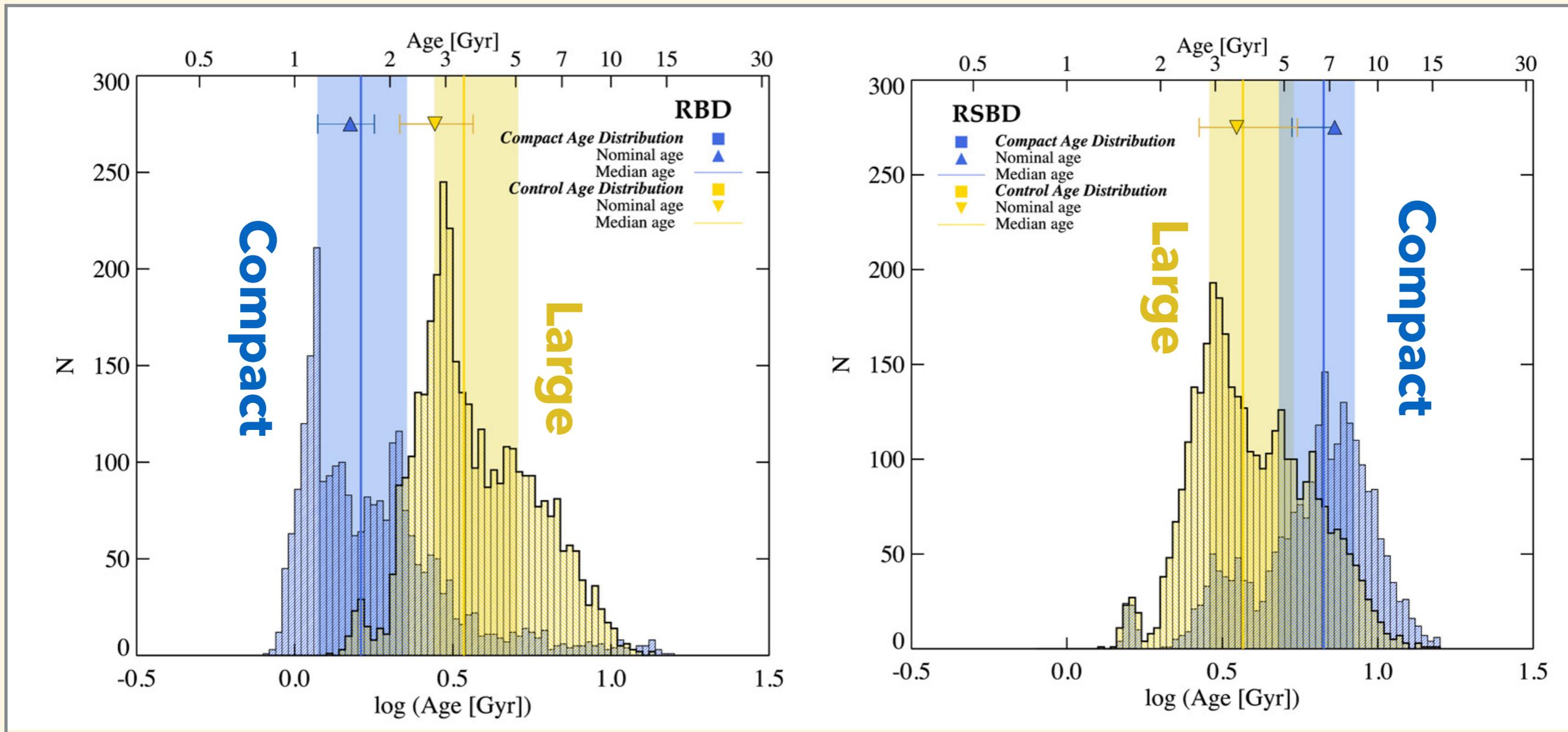
シナリオ2の場合、あとから星形成を止めた銀河が大きな楕円銀河として誕生

→ 大きい楕円銀河が若い

# 例1

色＋形態＋表面輝度のなめらかさ

色＋形態

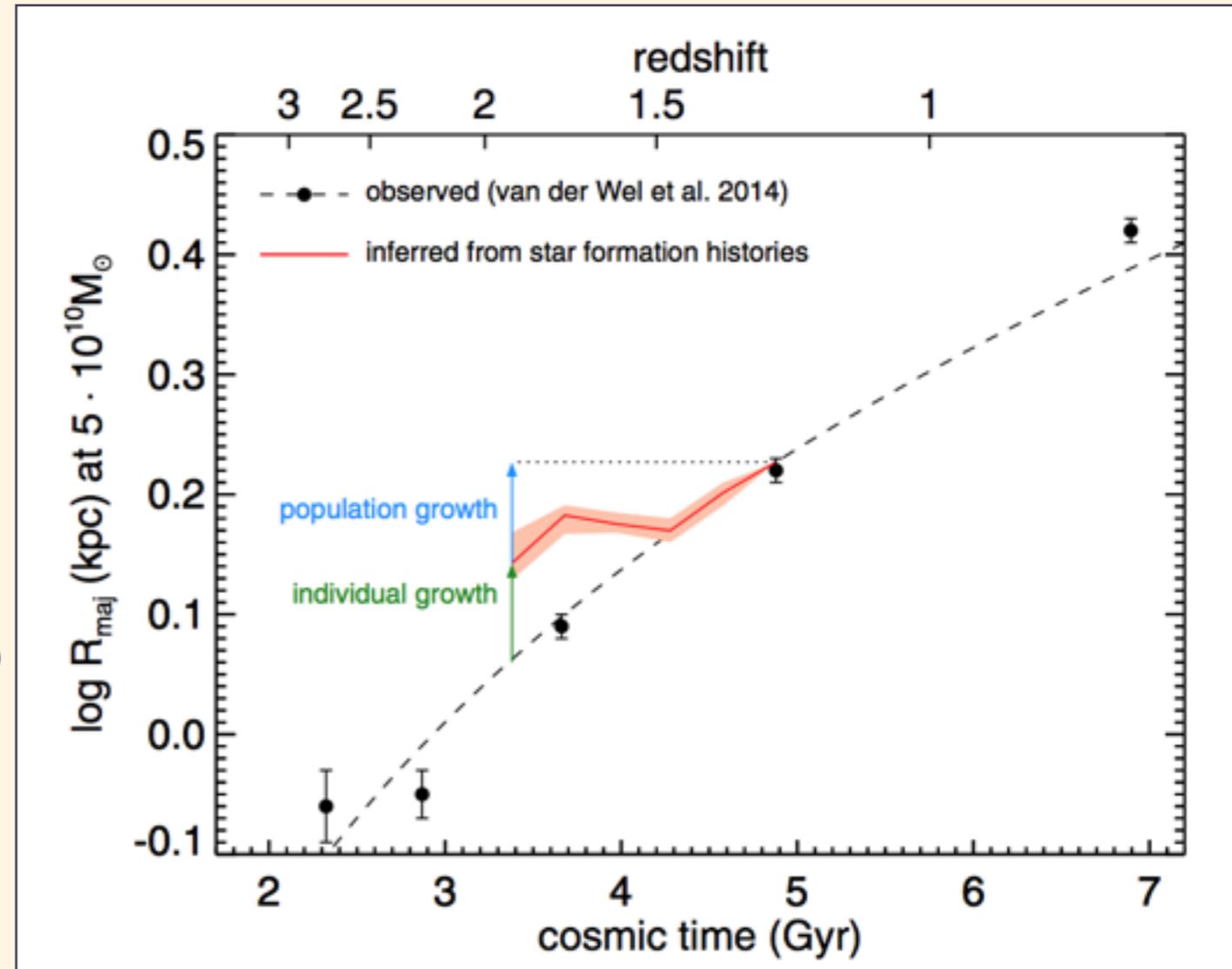


- DEEP2 スペクトルをスタック @  $z \sim 0.7$
- $R_e = 2 \text{ kpc}$  でサンプルを分けて年齢を求める
- サンプルの選び方で反対の結果になる

Keating et al. (2015)

## 例2

- $z=1-1.6$ の楕円銀河の星形成史を full spectral fitting で求める
- 星形成史をさかのぼり、各 $z$ で星形成が止まっている銀河のサイズを見る
- 実際のサイズー質量関係からのずれを2つのシナリオの寄与に分離
- どちらも半々程度の寄与か？



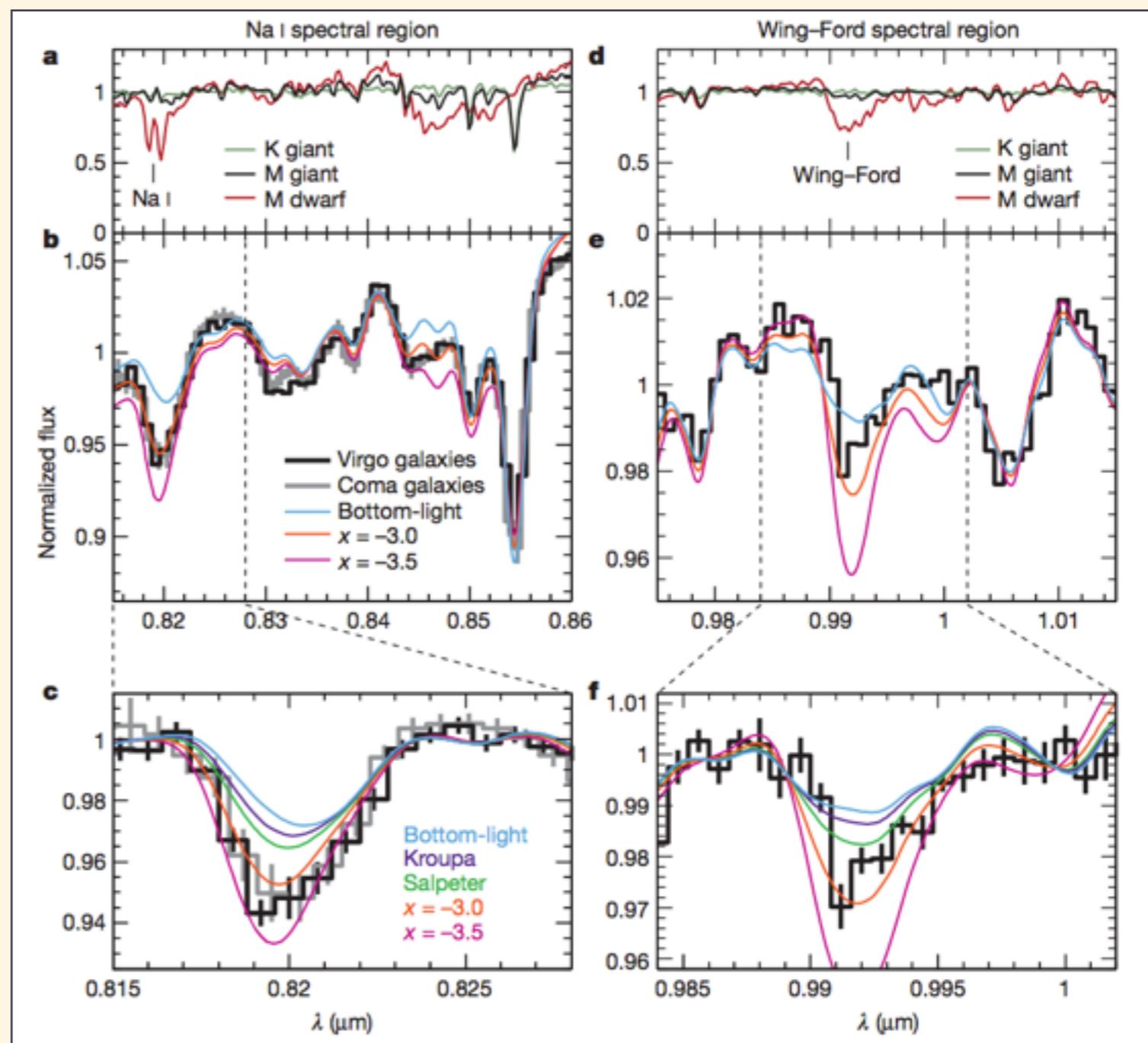
Belli et al. (2015)

**初期質量関数**

**Initial Mass Function**

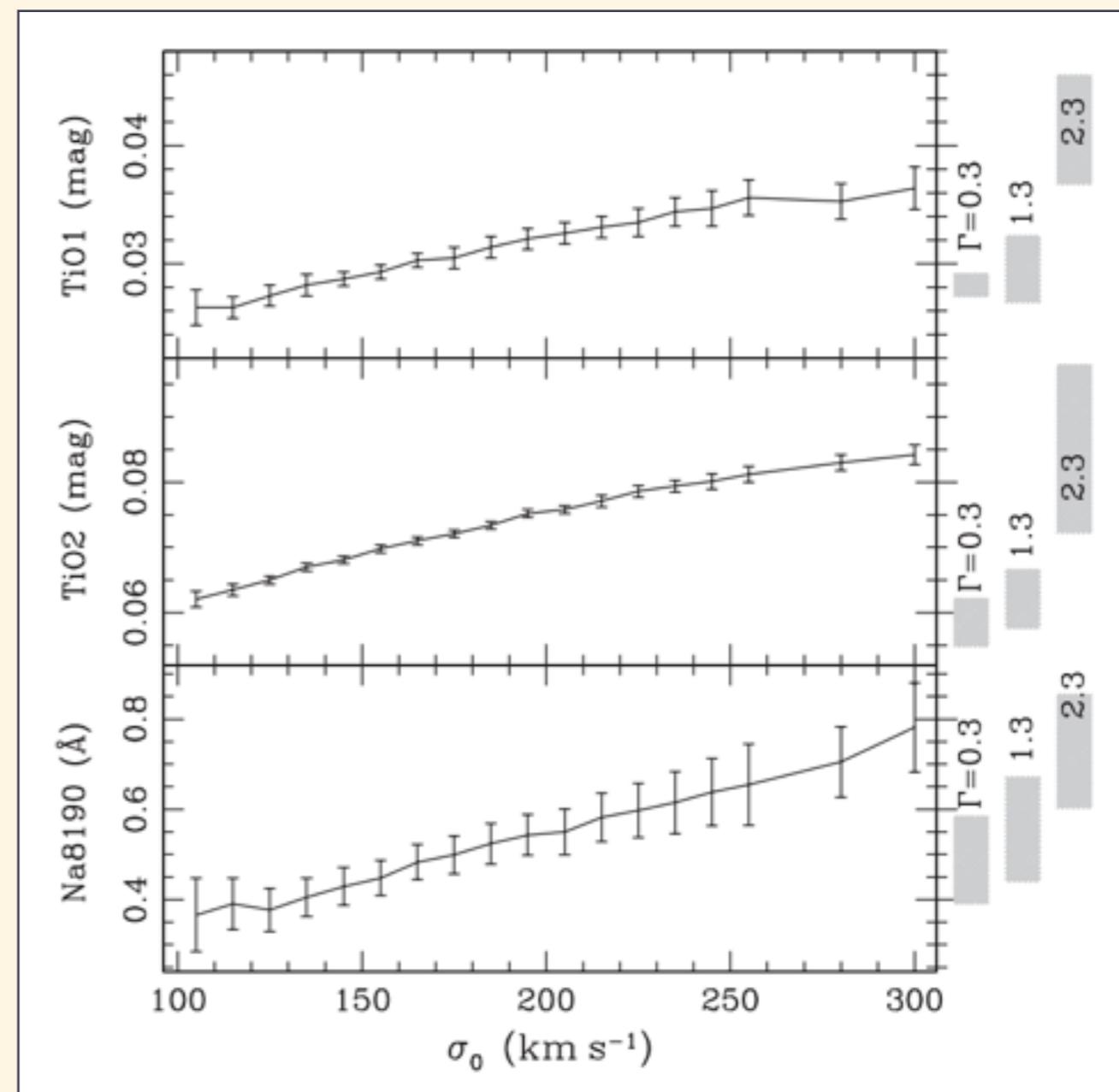
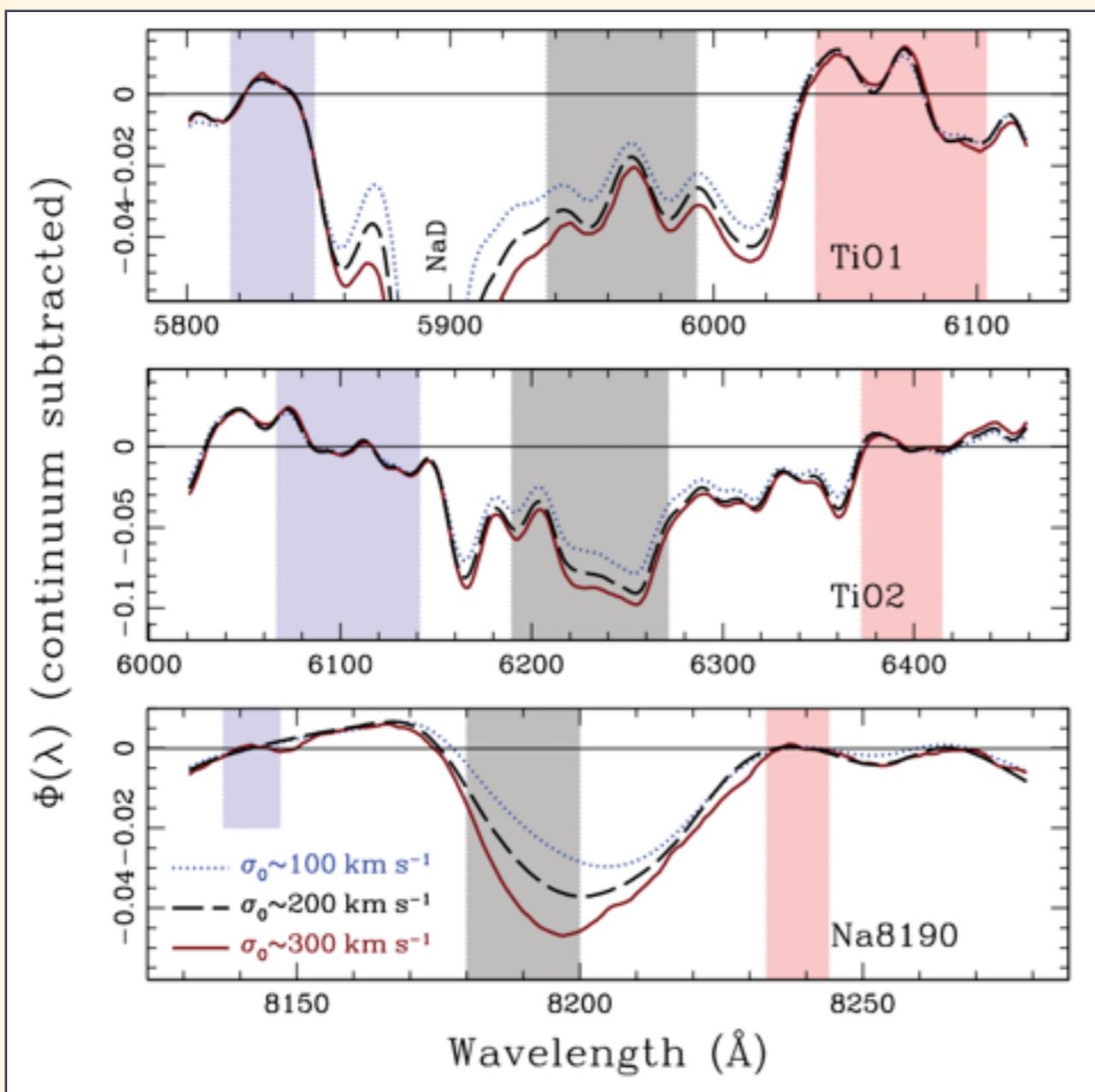
# 楕円銀河の IMF

- 低質量星 ( $<0.3 M_{\text{sun}}$ ) の指標となる吸収フィーチャーが長波長側にある
- 大質量楕円銀河で強く、Salpeterより急な IMF の冪と整合的
- 恒星質量や星形成率の推定に大きく響く重要なパラメータ



# IMFの冪の質量依存性

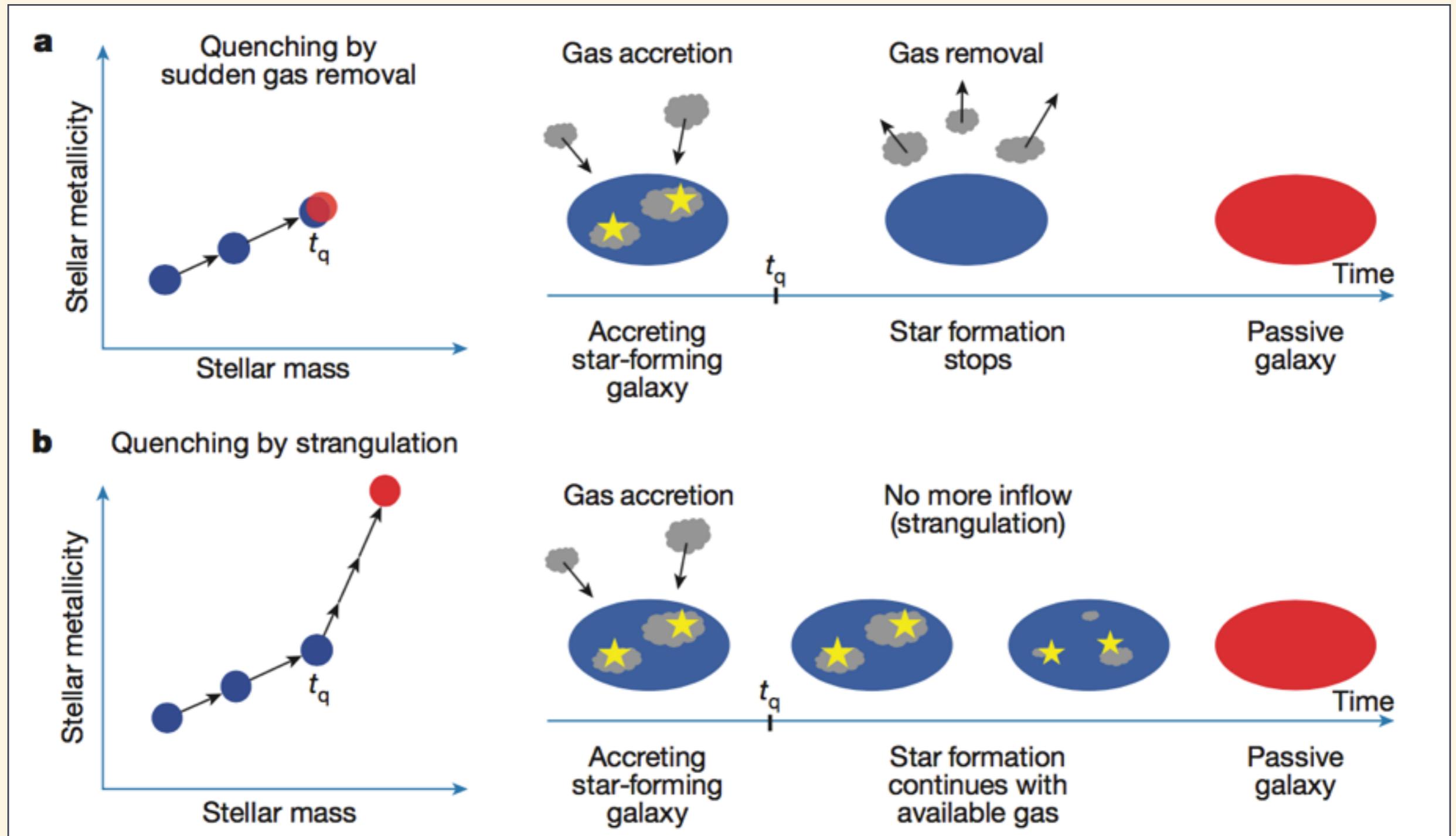
Ferreras et al. (2013)

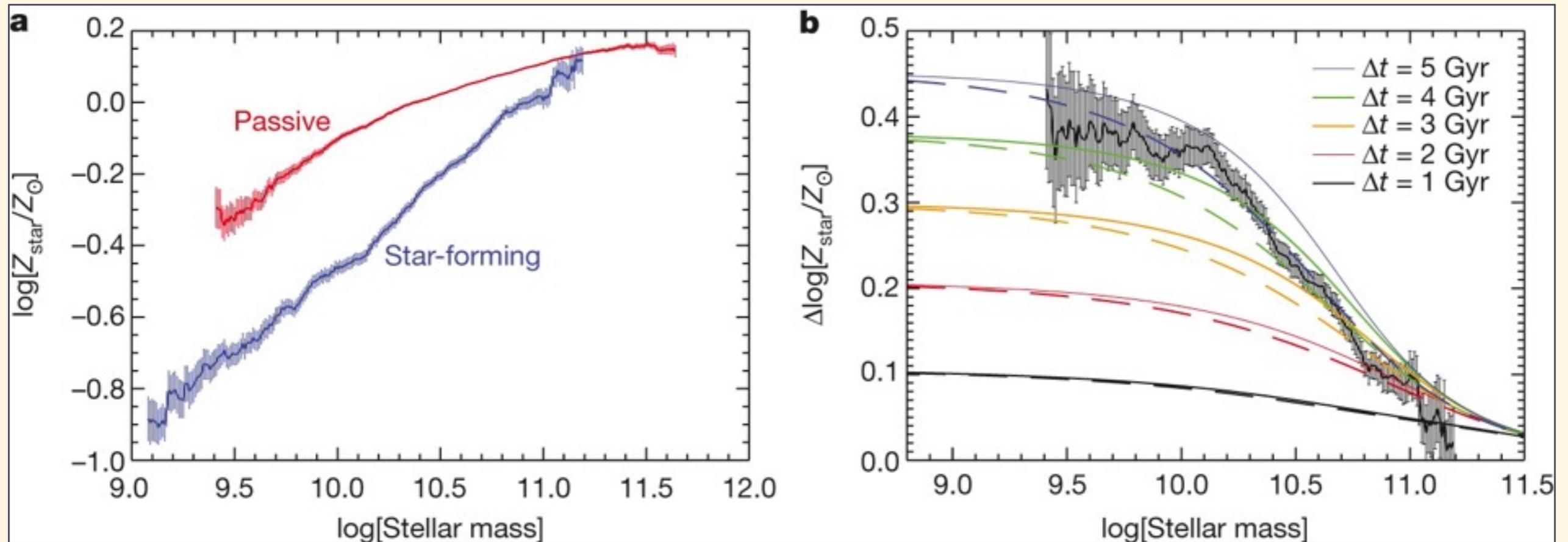


- 大質量銀河の方が IMF の冪が急である
- 低質量側は Salpeter や Kroupa/Chabrier とも整合的

# 星形成銀河の恒星種族と 星形成の停止過程

# 星形成銀河の恒星種族と星形成の停止過程



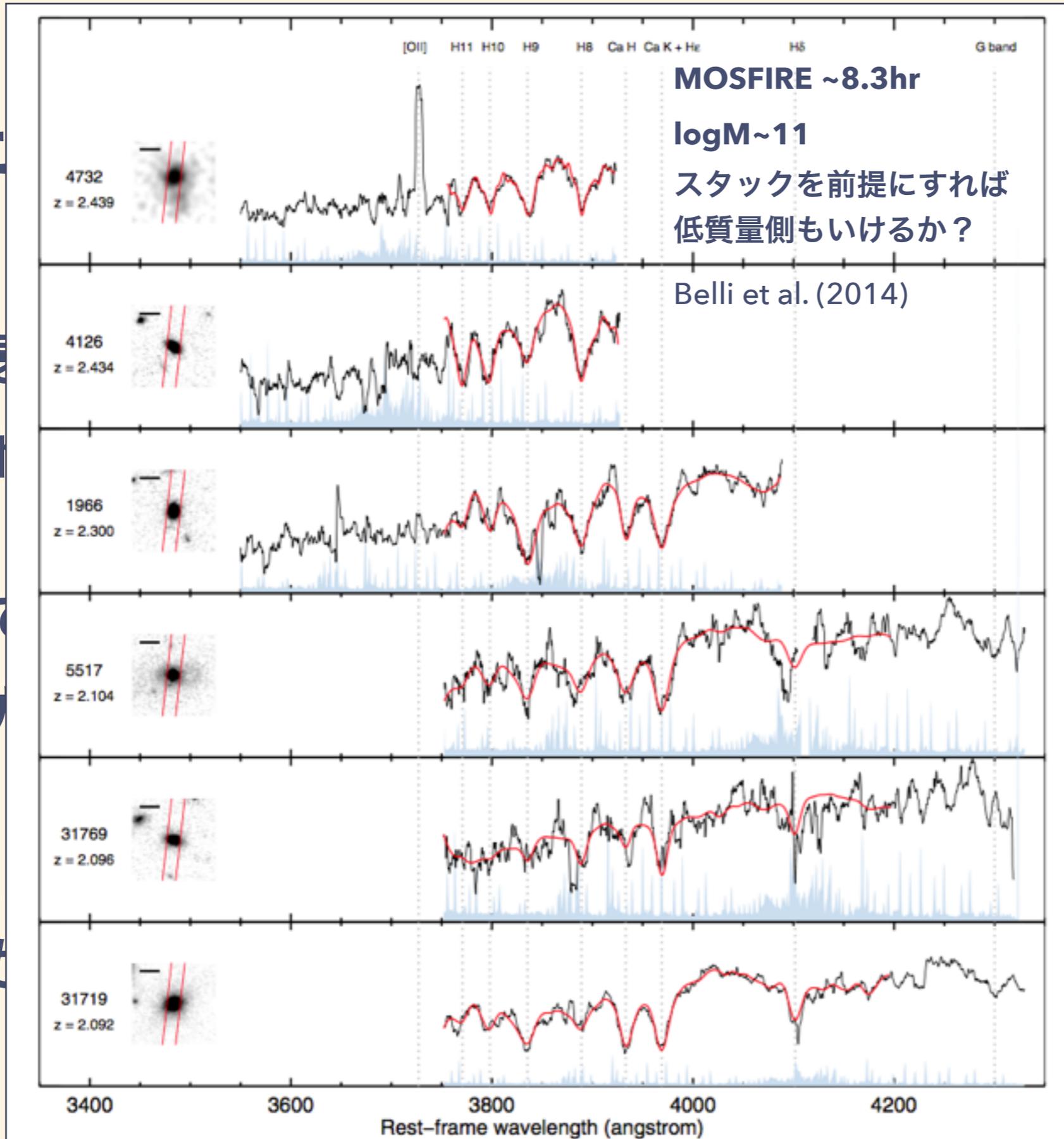


- SDSS の楕円銀河と星形成銀河の星の金属量を比較
- 大質量側は、ガスがすべて系から一度に抜けるシナリオで説明できる
- 低質量側は、4Gyr くらいの時間スケールでガスを消費するモデル (Strangulation) に整合的
- 近傍の星形成銀河は近傍楕円銀河の直接の祖先ではないことに注意

# 今後の課題と展望

# 恒星

- 現在遠く
- 基本的
- 近傍で
- が遠く
- 特に、
- 舞いた



# 系

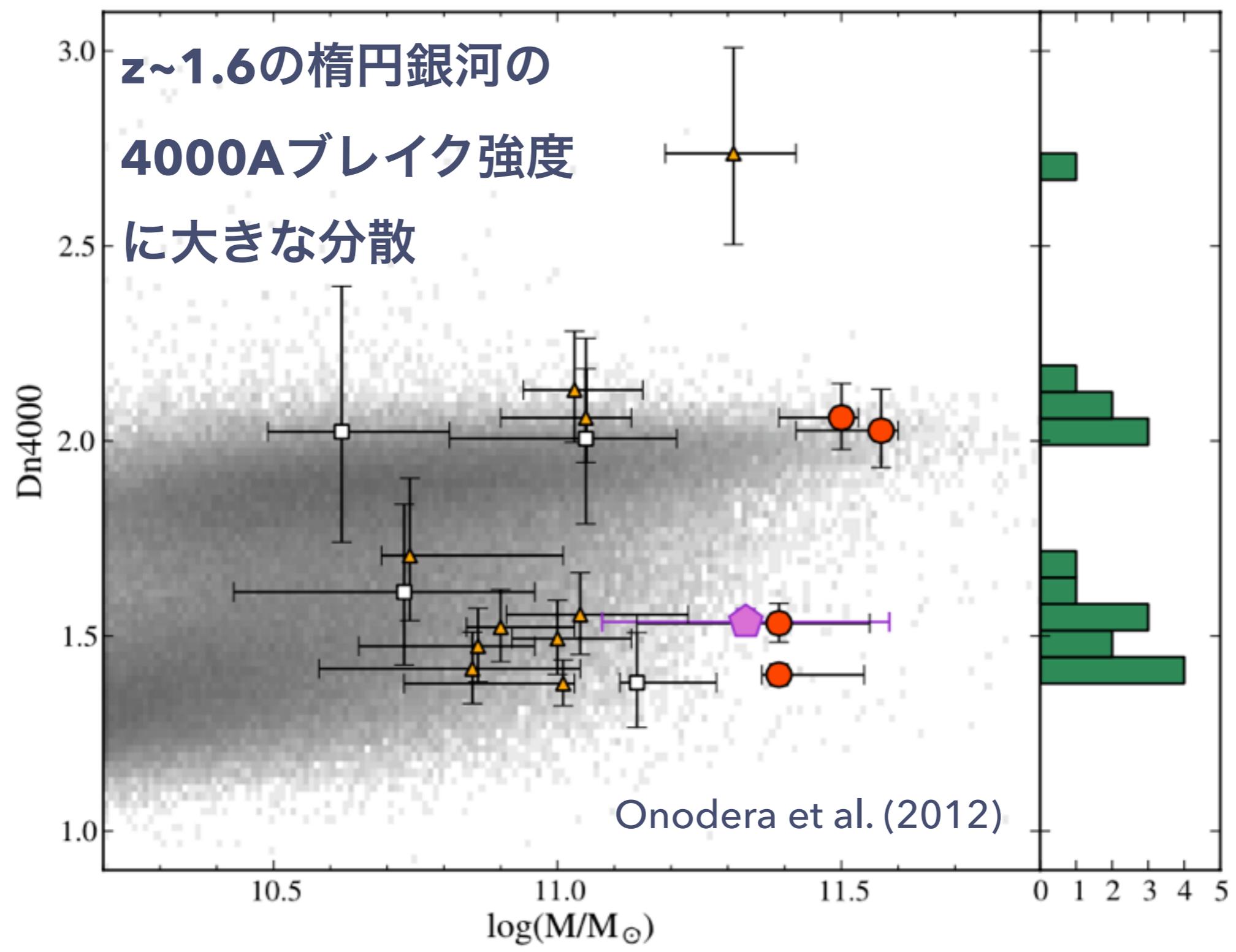
ものは、

その関係

きは?)

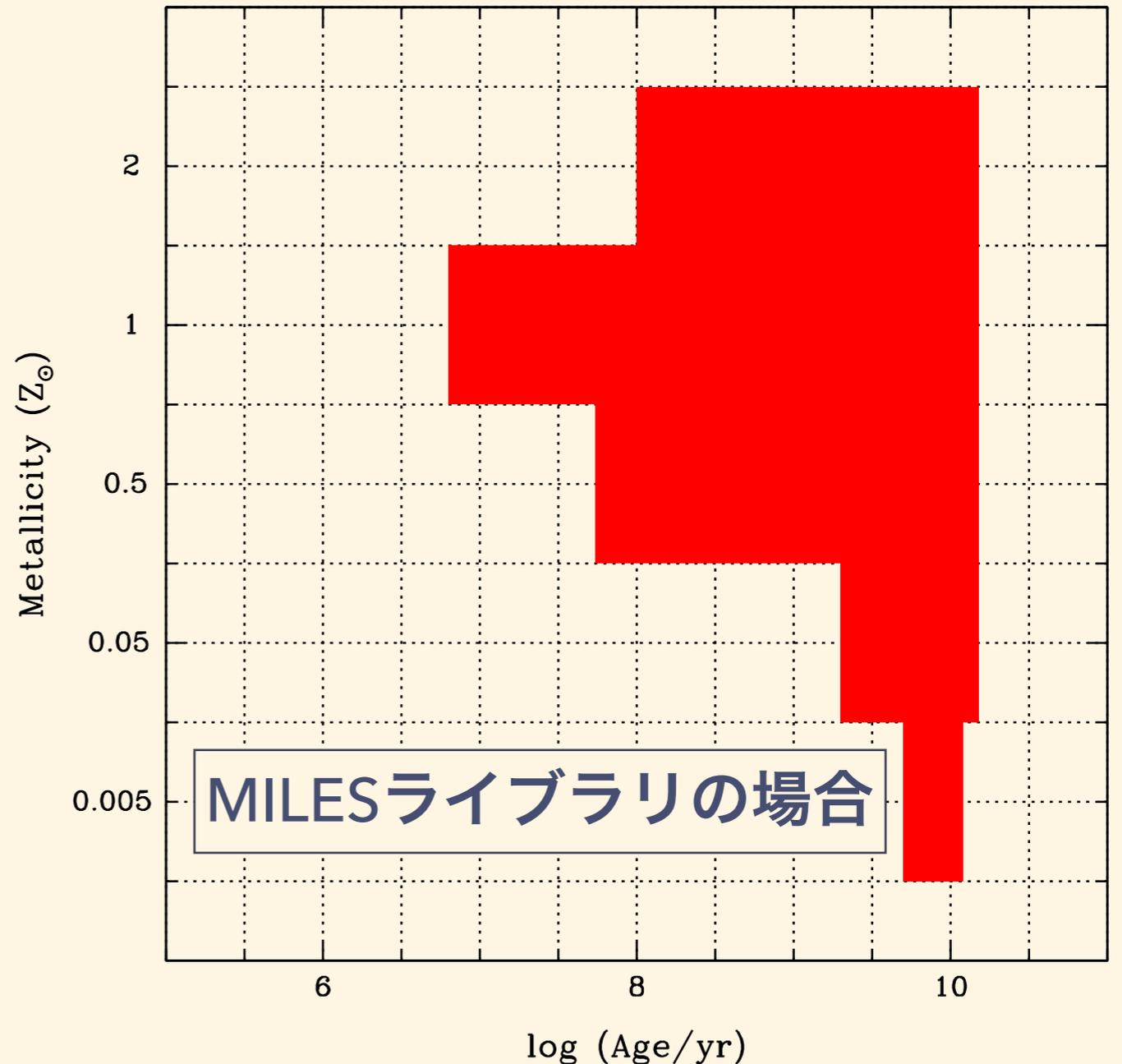
の振る

個



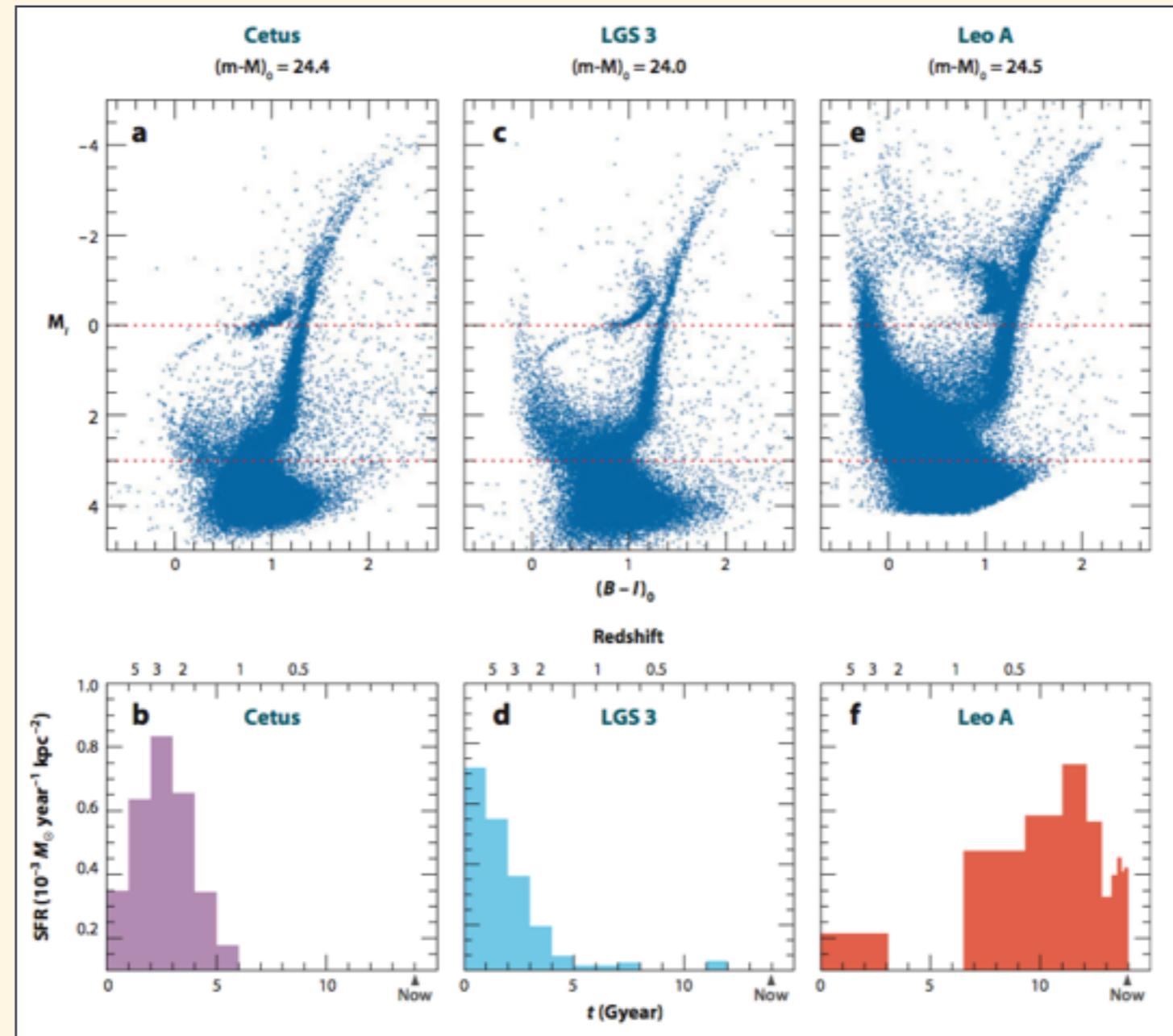
# 恒星の種族合成モデル

- モデルも不完全
- 材料になる星のテンプレートが不完全
- 若くて $[\alpha/\text{Fe}]$ が高く、 $[\text{Z}/\text{H}]$ が低い星
- 古くて $[\alpha/\text{Fe}]$ が低く、 $[\text{Z}/\text{H}]$ が高い星



# 楕円銀河の星の色-等級図

- JWSTや30m級望遠鏡で、大質量楕円銀河の星の色-等級図を初めて描ける
- 個々の星の年齢や金属量から星形成史を再構築
- スペクトルで求めた星形成史の答え合わせ



Tolstoy et al. (2009)

# まとめ

- 恒星種族を調べることで、銀河の星形成史 (形成の時期、時間スケールなど) がわかる
- 遠方を調べることで、星形成史の微分量を実際にマッピングできる
- 恒星種族からのアプローチが重要な銀河進化の問題がある
- まだまだ不定性が多い部分もある
- 若いみなさんの参入を期待します (あまり日本ではやっている人がいないとのことなので)