# 面分光で探る星形成銀河 ~近傍から遠方まで~

#### 小野寺仁人 (国立天文台)



- わたしと面分光
- イントロダクション
- Subaru/FOCAS IFU をもちいた z=0.4 の
   コンパクトな Ha 輝線銀河の観測
- 課題とまとめ

# わたしと面分光

2005

- VLT/SINFONI: z~2 の星形成銀河の分光フォローアップ (Onodera et al. 2010)
- AOナシ、空間分解した議論はおこなわなかった

#### 2009

- Keck/OSIRIS: COで回転運動などが測定された z~1.6の星形成銀河のフォローアップ
- 装置トラブルで良いデータが取れず

#### 2008 – 2015

• VLT/SINFONI: SINS, zC-SINF プロジェクト(あとで紹介)

(Shapiro et al. 2008; Förster-Schreiber et al. 2009; Tacchella et al. 2015)

#### 2013 -

• VLT/MUSE : MUSE GTO で MUSE Atlas of Disks プロジェクト(あとで紹介)

(Erroz-Ferrer et al. 2019; den Brok et al., submitted)

#### 2019 -

• Subaru/FOCAS: z=0.4 の星形成銀河(あとで紹介)

## 大質量 quiescent 銀河の恒星種族



- 大質量 quiescent 銀河 (log M\*>~11)の恒星種族は z=2 程度までは静的進化と無矛盾
- [a/Fe] が高く、z>~2.5 で短期間 (<~1 Gyr) に星が形成された
- なんらかの星形成を止めるメカニズムがある (ガス供給の停止、AGN、バルジの発現などが 提唱されている)

## 大質量 quiescent 銀河の運動学的性質



z=0 では 2x10<sup>11</sup> Msun あたりを境に 重い側では slow rotator が卓越

z>2 では 10<sup>11</sup> Msun より重い quiescent 銀河で高い割合で回 転が見られる

## 遠方の円盤(回転)銀河の星形成



VLT/SINFONI をもちいた z~2 の星形成銀河 の大規模 IFU+AO サーベイ (SINS/zC-SINF)

Ha 分布から星形成率分布、HST/WFC3 データから質量分布を求める



Förster-Schreiber et al. (2018)

#### 星形成活動の空間分布@z=2.2



Tacchella, MO et al. (2015)

## 銀河円盤での星形成

**MUSE Atlas of Disks** (MAD; PI: C. M. Carollo)

MUSE GTO のプロジェクトのひとつ

~50 Mpc より近傍の比較的 face-on の 円盤銀河 38 天体

AO なしの MUSE で1時間露出

Main sequence 星形成銀河

Size-mass 関係に載っている銀河

~100 pc 程度の空間スケールを分解



https://www.mad.astro.ethz.ch/

Carollo, MO et al. (in prep)

#### 銀河円盤での星形成



https://www.mad.astro.ethz.ch/

Carollo, MO et al. (in prep)

#### V(b), R(g), I(r) continuum image







#### Ha(r), [SII](g) [OIII](b)











#### Ha(r), I(g), V(b)









Erroz-Ferrer, MO et al. (2019); Onodera et al. (in prep)

# 空間分解して見たスケーリング関係



100 pc スケールでも (1) main sequence, (2) 質量 – 金属量関係が成り立っている

Inside-out disk formation と整合的

Erroz-Ferrer, MO et al. (2019)

#### コンパクトな遠方銀河



- 遠方になればなるほど銀河はちいさくなる。特に quiescent 銀河で顕著
- 平均的な星形成銀河がそのまま円盤での星形成を止める、いわゆる disk fading (Carollo et al. 2014) だけでは説明できない
- コンパクトな星形成銀河が z>2 に存在し、コンパクト quiescent 銀河の progenitor として有力

van der Wel et al. (2014); Barro et al. (2014)

#### コンパクトな銀河の進化は early track?



コンパクトな星形成銀河は円盤銀河の散逸過程により形成され、爆発 的な星形成を起こしてコンパクトな quiescent 銀河になるというシナ リオが提唱されている

Barro et al. (2013, 2014)

# 近傍でのコンパクト quiescent 銀河探査



- これらのうち1割程度は、サイズ進化せず z=0 まで進化しているという理論的な予想
- このような生き残り銀河であれば、明るいので詳しく調べられる
- SDSSデータから、z~0.1 のコンパクトな quiescent 銀河を探したところ、少ない (~0.03%) ながらもその存在が確認された

Trujillo et al. (2009)

#### 遠方コンパクト quiescent 銀河の生き残りか否か



- 恒星種族の年齢はせいぜい 2Gyr 程度、運動学的にも fast rotator に分類
- 遠方の大質量コンパクト quiescent 銀河の生き残りとはいえない
- 逆に考えると、z~0.4 くらいに projenitor のコンパクト星形成銀河がいるはず

Ferre-Mateu et al. (2012)

#### 遠方コンパクト quiescent 銀河の生き残りか否か



- 恒星種族の年齢はせいぜい 2Gyr 程度、運動学的にも fast rotator に分類
- 遠方の大質量コンパクト quiescent 銀河の生き残りとはいえない
- 逆に考えると、z~0.4 くらいに projenitor のコンパクト星形成銀河がいるはず

Ferre-Mateu et al. (2012)

#### コンパクト Ha 輝線銀河サンプル @ z=0.4

- HSC SSP DR2 Deep/UltraDeep で選択され た NB921 (z=0.4 の Ha に対応) 超過の見ら れる天体 (Hayashi et al. 2018, in prep)
- サイズは i バンドの determinant radius (r<sub>det</sub>)を採用
- z=0.4 で 2 kpc 程度に対応する rdet は約 0.4
   秒で、このくらいまではr<sub>det</sub>で区別できる
- ・ 恒星質量 log(M\*)>10.5 を選択
- r<sub>det</sub><2kpc が 8 天体 (Priority 1)、2<r<sub>det</sub>/
   kpc<2.5 が 23 天体 (Priority 2)</li>
- WISEのカラーやX線データからは AGN の兆 候がみられない





 FOCAS IFU による面分光観測

 2019年6月29、30日、7月1日(最終日は望遠鏡トラブルでノーデータ)

 VPH850+SO58 (R~1350)

 Priority 1 から 5 天体、Priority 2 から 3 天体を観測

 合 2 時間 (6x1200 秒) 積分 (一部2時間未満)

 シーイング FWHM 0.5-0.8 秒

今回の発表では、1日目に取得した Priority 1 の 3 天体について紹介 なお、観測した全天体が z~0.4 であることが確認された

※ この先、 preliminary

# FOCAS IFU データのリダクション

cube01.wcut.fits

a 23:21:20.5528 \$

HSC\_S18A\_DUD\_4161432893

-0.56.01.250

Color Region WCS Anal



(1) 尾崎さん作成のパイプラインで、各天体 フレームに対して、バイアス引き、宇宙線 除去、フラットフィールド、スライスの切 り出し、波長較正、フラックス較正、デー タキューブ化

(2) ZAP (Soto et al. 2016) によるスカイ引き

(2) 位置合わせ、WCS上にreprojection(Montage mProjectCube)、足し合わせ

https://zap.readthedocs.io/en/latest/; http://montage.ipac.caltech.edu/

(1)



Scale Color Region WCS Analysis

sc\_s18a\_dud\_41614328972997951\_p1\_combined.fits[DAT/

SC\_S18A\_DUD\_41614328972997951\_I

#### 天体が密集しているところでのIFUの優位性



#### FOCAS IFU データの解析



- 銀河系吸収の補正 (Schalafly & Finkbeiner 2011)
- Haの波長±25ÅのトータルのS/Nが20以上になるように Voronoi 分割 (Cappellari & Copin 2003)
- 各 Voronoi bin ごとにスペクトルの足し合わせ
- 輝線+連続光のフィッティング(今回は Haと[NII]のみ)

# **Voronoi** 分割の結果



だいたい中心から直径2-3秒くらいの範囲が意味のある分割になっていると思われる

上段: HSC i バンド; 下段: Voronoi 分割

# 速度と速度分散の構造



- 100-200 km/s の回転が見られる
- 速度分散中心で高く >~150km/s

#### 星形成率と sSFR の分布



- 中心で星形成率も sSFR も高い
- Inside-out quenching の兆候は少なくともこれらの天体では見られない

# [NII]/Ha 比の分布



- 全体的に[NII]/Ha比が高い(HII領域由来だと<~0.5)</li>
- ショック、もしくはAGNによる電離の可能性
- 高い[NII]/Ha 比は中心に限定されない
- SINS/zC-SINF など z~2 の星形成銀河と似ている (Förster-Schreiber et al. 2014)

#### Broad Ha 輝線

- 明らかに broad な成分が Ha にみえている1天体について、Haのみ2成分フィットした(とても preliminary)
- 中心にむかって broad Ha のフラック スが大きくなっている
- Broad Ha の速度幅は、必ずしも中心
   が最大にはなって折らず、典型的には
   σ=1000-1200 km/s
- Type II AGN 由来の outflow か?
   (Förster-Schreiber et al. 2014)



今後の課題

恒星種族による連続光の分離(MUSE解析では既に実装済)

恒星種族の性質(年齢、金属量、運動)の導出

ダスト減光の補正(星の吸収を補正したHβフラックスの測定が必要)

Hβ, [OIII], [OI], [SII] などの複数輝線をつかった電離ガス診断

電離ガスの金属量、電子密度

シーイングの影響の見積もり

などなど

より高空間分解能でのフォローアップは VLT/MUSE の NFM が必要

#### まとめ

- 遠方コンパクト銀河での星形成とクエンチングの関係を詳しく調べるために、そのアナロ グ天体として、HSC SSP データから z=0.4 の コンパクト Ha 輝線銀河サンプルを構築した
- Ha コンパクト輝線銀河サンプルについて、Subaru/FOCAS をもちいて面分光観測をおこなった
- 面分光データの解析にもちいるための(ある程度)汎用のソフトウェアの開発をおこなっ ている
- 初期解析した3天体について、回転運動、中心での高い Ha 輝線等価幅 (sSFR)、場所にほどんど依存しない [NII]/Ha 比が見られた
- 一天体については、σ>~1000 km/s の broad Ha 輝線がみられ、これも場所にあまり依存 しない傾向が見られた
- WISEデータやX線からはAGNの兆候が見られないが、Type II AGN によるアウトフローかもしれない
- 複数の輝線を使った診断などを含めて、より詳細な解析や各種確認をおこなったリダクションにもとづいた議論が必要