

研究室紹介 (2024/3/19)

銀河・銀河団・宇宙大規模構造の形成と進化  
- 遠方宇宙の最新観測データと現象論的モデルで解き明かす -

児玉 忠恭 (こだま ただゆき)

E-mail: [kodama@astr.tohoku.ac.jp](mailto:kodama@astr.tohoku.ac.jp)

NGC2403 (Subaru/Suprime-Cam)



児玉 忠恭  
Tadayuki Kodama  
*Professor*



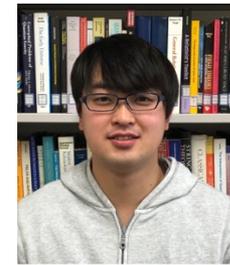
久保 真理子  
Mariko Kubo  
*Assistant Professor*



山本 直明  
Naoaki Yamamoto  
*D3 student*



Ronaldo Laishram  
*D3 student*



大工原 一貴  
Kazuki Daikuhara  
*D2 student*



刘 兆然  
Zhaoran Liu  
*D2 student*



安達 孝太  
Kota Adachi  
*M2 student*



岡崎 莉帆  
Riho Okazaki  
*M2 student*



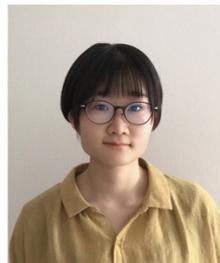
田村 真大  
Masaharu Tamura  
*M2 student*



石田 光  
Ko Ishida  
*M1 student*



高橋 宏典  
Kosuke Takahashi  
*M1 student*



船木 美空  
Miku Funaki  
*B4 student*

## 研究室のメンバー

<http://mahalo.galaxy.bindcloud.jp>

こだま ただゆき  
児玉 忠恭 研究室

2024.4~ <http://mahalo.galaxy.bindcloud.jp>

久保真理子 (助教)、山本、Laishram、大工原 (D3)、Liu (D2)、  
安達 (D1)、高橋、石田 (M2)、松木 (M1)、新留学生 (M1)【女・男】

Our Website



<http://mahalo.galaxy.bindcloud.jp>

『銀河・銀河団の形成と進化の歴史、  
特にその秩序と多様性の起源を、  
すばる, アルマ, JWST等による最新の  
観測と現象論的モデルで解き明かす』



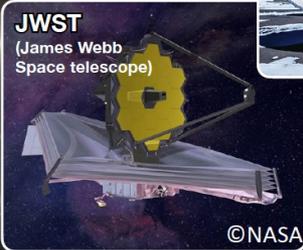
すばる望遠鏡(光赤外)

©NAOJ



アルマ望遠鏡(電波サブミリ波)

©NAOJ



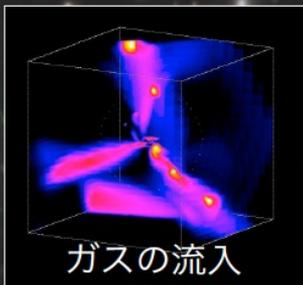
JWST  
(James Webb  
Space telescope)

©NASA

形成途上の銀河



クランプ銀河  
相互作用銀河など



ガスの流入



ガスの流出

星形成の加速と減衰  
ハロー・質量の集積  
AGNとの共進化  
形態の獲得、環境効果

現在の銀河・銀河団



円盤銀河



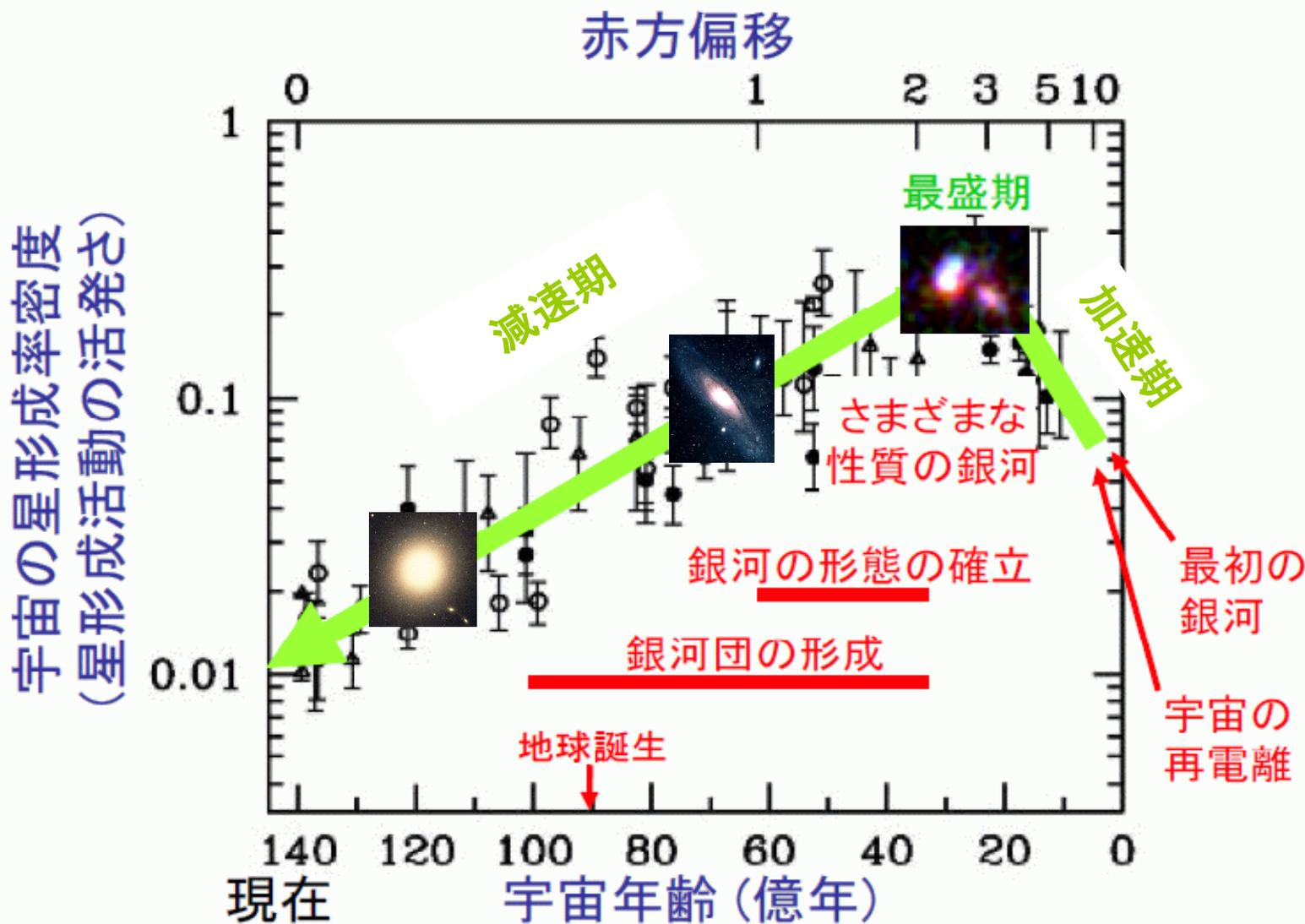
楕円銀河



銀河団

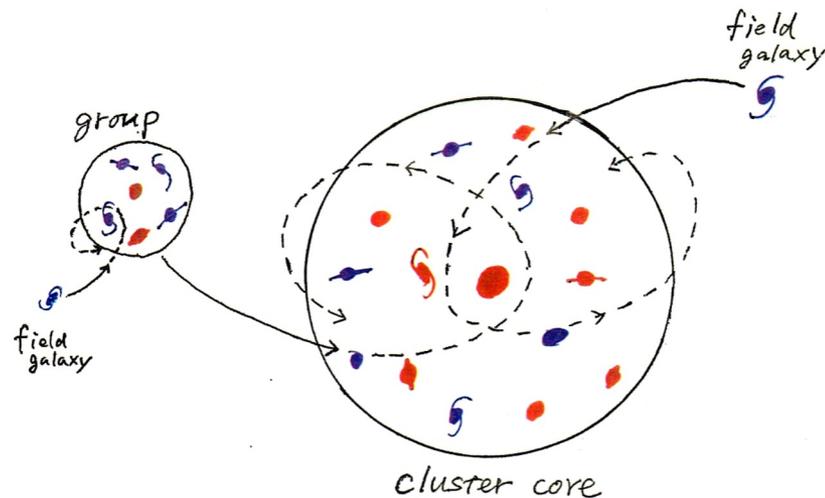
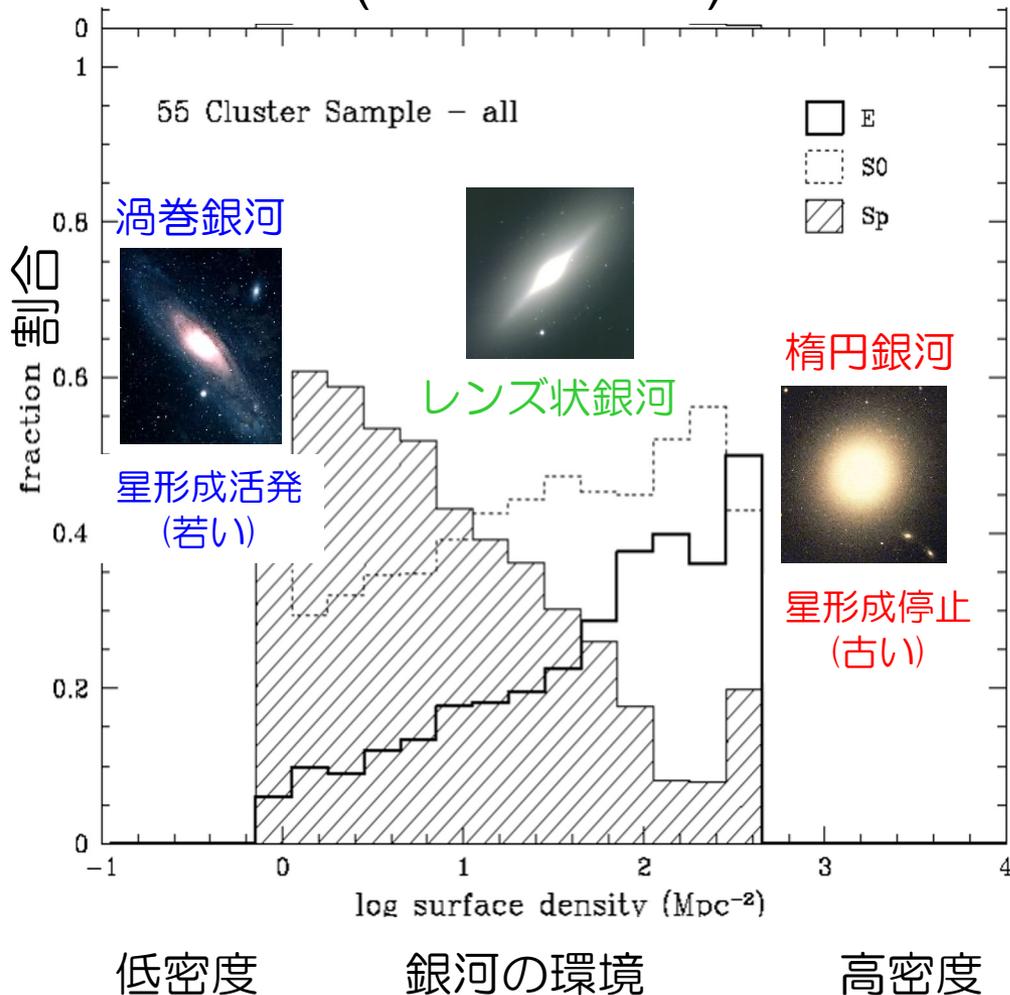
# 宇宙における星形成活動の変遷

「なぜ、どのように、ピークを迎え、その後減衰したか？」



# 銀河種族のすみ分け（環境効果）

銀河の形態－密度関係  
(Dressler 1980)



先天的（生まれ）？

楕円銀河は初期宇宙に高密度領域で生まれ、渦巻き銀河は少し遅れてフィールドで生まれる。

後天的（育ち）？

集団化の過程で渦巻き銀河が楕円銀河やレンズ状銀河に変化する。

# 銀河形成・進化への内的効果

大量のガスが降り積り、活動銀河核 (AGN) や星形成バースト (SB) を誘発し、その後それらによるフィードバックで、ガスを銀河の外へ吹き出して失い、星形成活動が止まる。

銀河の質量 (ポテンシャル) に大きく依存する。



活動銀河核からジェットが吹き出す様子  
(<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/bonn04/>)

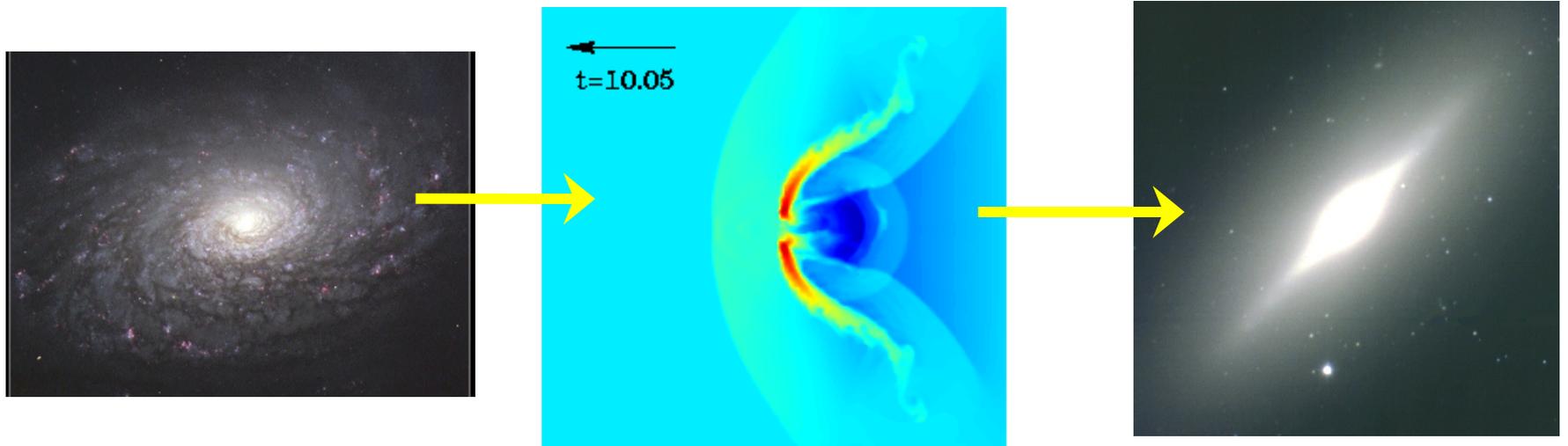


星形成バースト銀河からガスが吹き出す様子  
(©すばる望遠鏡)

# 銀河形成・進化への外的効果（環境効果）



銀河の合体時にガスがはぎ取られたり、爆発的星形成を起こしてガスが使い果たされる？ 形も楕円銀河になる？ 銀河団で卓越？



銀河団ガスからの動圧によって銀河がガスをはぎ取られ、星形成が止まりレンズ状銀河になる？

# 原始銀河団・銀河の形成・進化における重要な未解決問題

1. 銀河団環境は銀河の形成・進化過程をいかに加速しているか（早期に速いタイムスケールで成長）？
2. 星形成・AGN活動、そのクエンチング（終止）は銀河団中でどのように伝搬するか？銀河団内部で星形成活動が周辺より活発になることはあるか？それとも周辺領域で既に星形成が減衰してから銀河団に集合するか？
3. 銀河団星形成活動はダストによりどれくらい隠されているか？ダスト吸収の強さ（星形成モード）に環境依存性があるか？
4. 銀河団へのガス降着はいつどのように効率的から非効率的になるか（中性水素ガスから高温のX線ガスへの相転移）？
5. 銀河からのガスの吹き出しや剥ぎ取りが環境にどう依存し、どのように銀河進化へ影響を与えるか？

# 二つの大きな方向性

- 【銀河統計学：マクロ】 星質量限界サンプルと星形成率限界サンプルを様々な時代と環境で構築し、銀河の形成と進化を統計的に探る。

銀河解剖学へのサンプル供給。

→ MAHALO, HSC<sup>2</sup>, PFS<sup>2</sup>, SWIMS-18, Euclid, ULTIMATE

- 【銀河解剖学：ミクロ】 形成途上の銀河を解剖し、銀河形成・進化を制御する物理過程を、直接かつ詳細に探る。

銀河統計学への発展。

→ HST, GANBA, ALMA, JWST, ULTIMATE, TMT

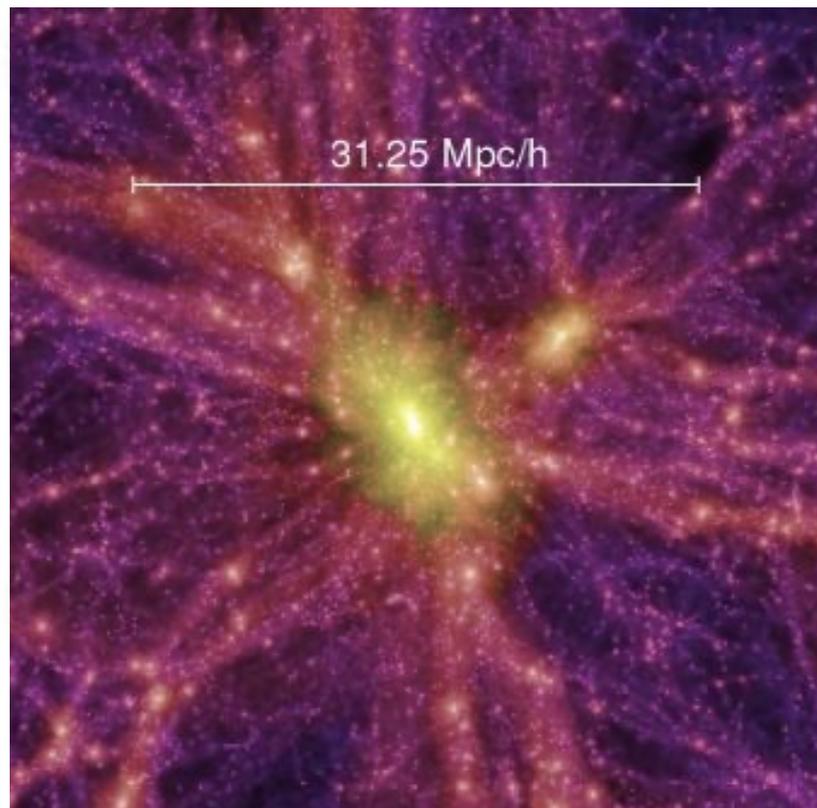
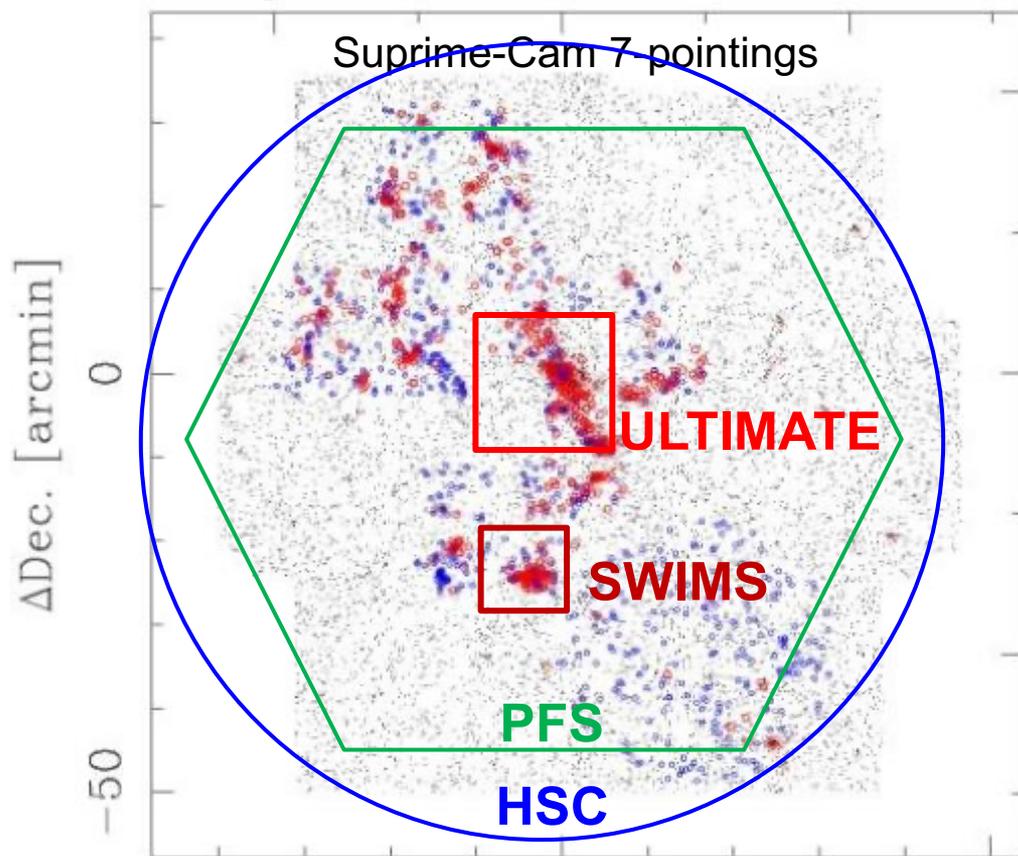
すばるHSC + PFS は、銀河団・大規模構造の研究に最適

$1.3^\circ = 75 \text{ Mpc (} z=1), 100 \text{ Mpc (} z=1.5), 118 \text{ Mpc (} z=2) \text{ in co-moving}$



CL0016 cluster ( $z=0.55$ )  
(Tanaka, M. et al. 2009)

ミレニアム・シミュレーション  
(Springel et al. 2005)



銀河団の周りに広がる巨大な蜘蛛の巣構造  
1200 個の銀河を分光し距離を測定。  
赤が銀河団メンバーで、青は非メンバー。

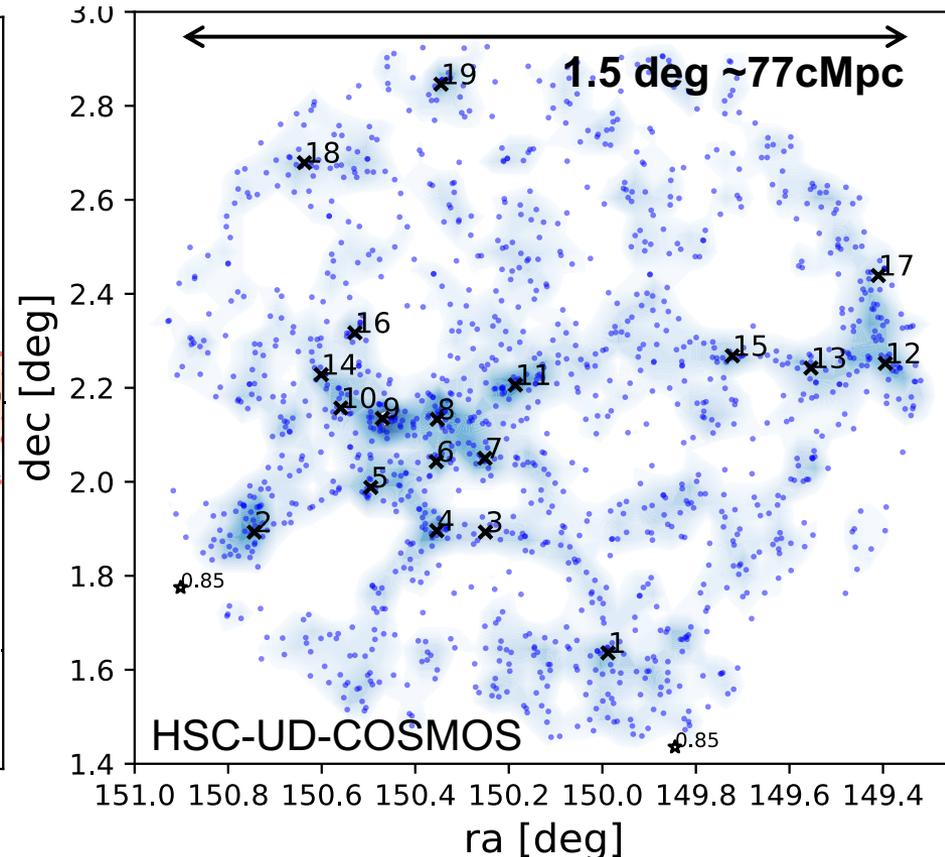
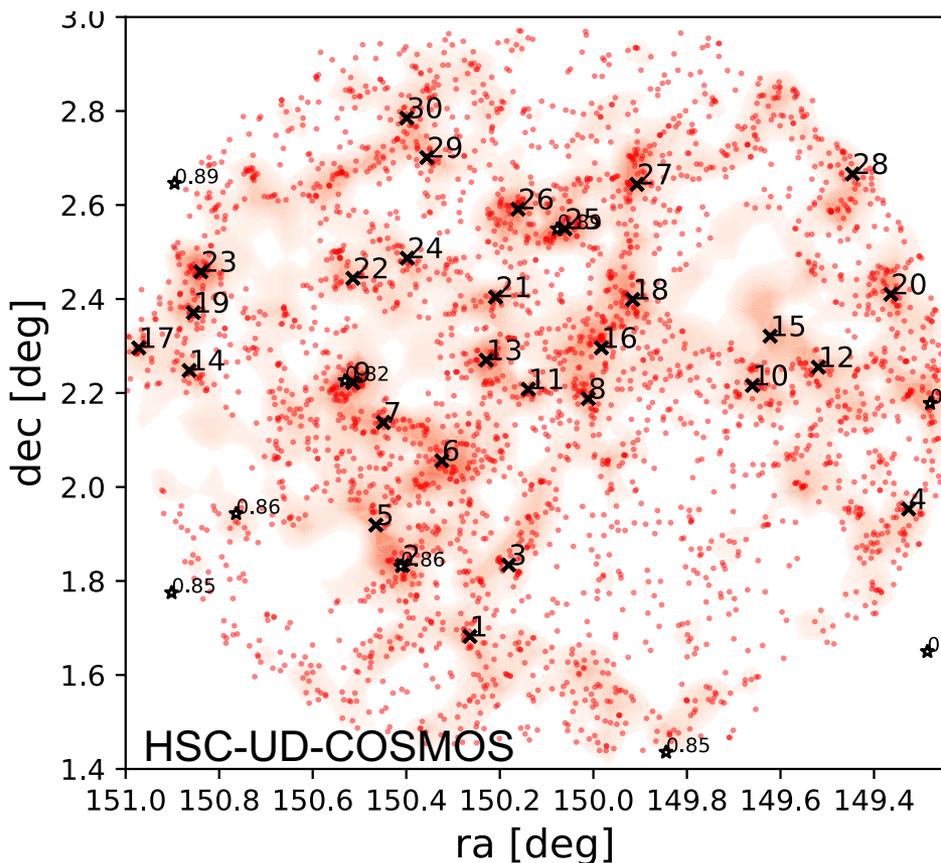
マクロ的アプローチ

# 銀河宇宙大規模構造の発展

*Hybrid Search for Clusters with HSC (HSC<sup>2</sup>)* w/ すばるHSC

Red sequence galaxies at  $0.8 < z < 0.9$

[OIII] line emitters at  $0.82 < z < 0.86$



We have ~100s of cluster candidates, and systematic and intensive spectroscopic confirmation with PFS is critical (cluster mass function can also compare with cosmological models).

*Panoramic Follow-up Spectroscopy with PFS (PFS<sup>2</sup>)* PFSは2025年より観測開始

# 銀河宇宙大規模構造の発展

Euclid衛星 2023年7月にESAが打ち上げ

日本は、すばる望遠鏡インテンシブ観測(協調観測)を通してプロジェクトに参加  
Wide Imaging with Subaru HSC of the Euclid Sky (WISHES; PI Oguri)

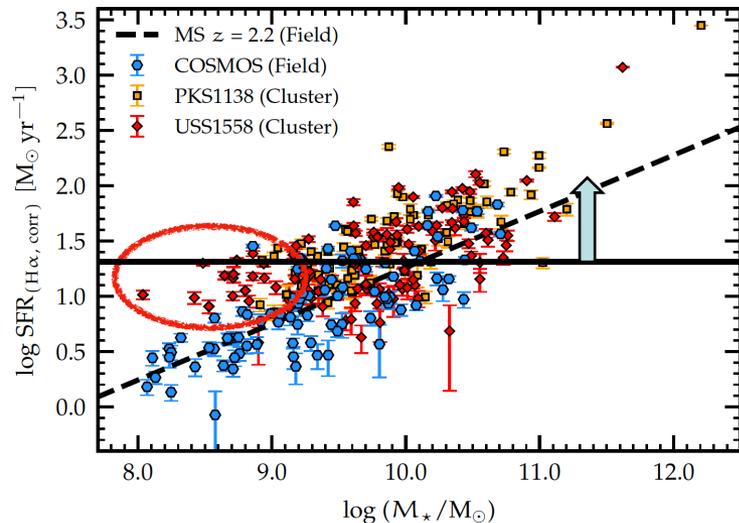
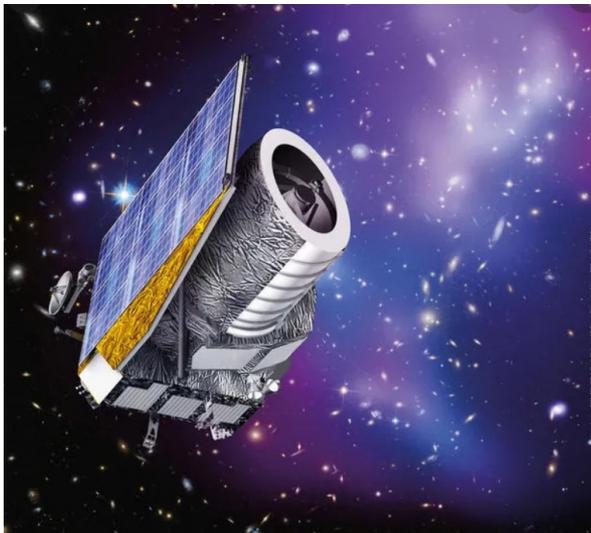
見玉は Japanese Euclid Consortium (JEC) メンバーの一員

原始銀河団探査を担当、 $1 < z < 3$ に拡張

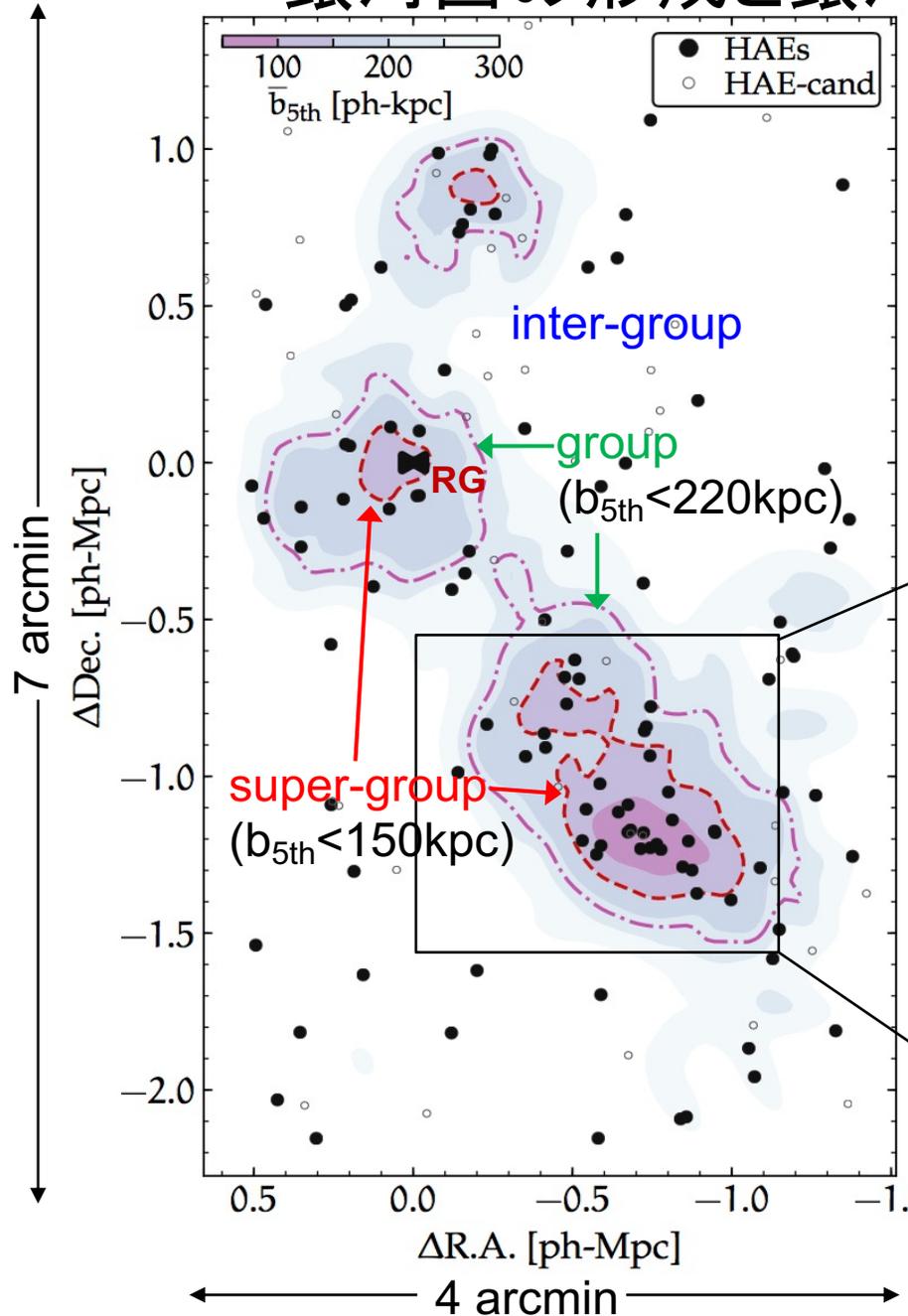
*HySPEC-Euclid* : Hybrid Search for Proto Evolving Clusters with Euclid

Red sequence survey + Grism emitter survey (Euclid-Deep over  $\sim 50 \text{ deg}^2$ )

$H=26 (5\sigma) \leftrightarrow 3 \times 10^9 M_{\odot} @ z \sim 2$     $5 \times 10^{-17} \text{ cgs} (3.5\sigma) \leftrightarrow 22 M_{\odot}/\text{yr} @ z \sim 1.8$



# 銀河団の形成と銀河の進化(環境効果)



## MAHALO-Subaru

110億年前の原始銀河団

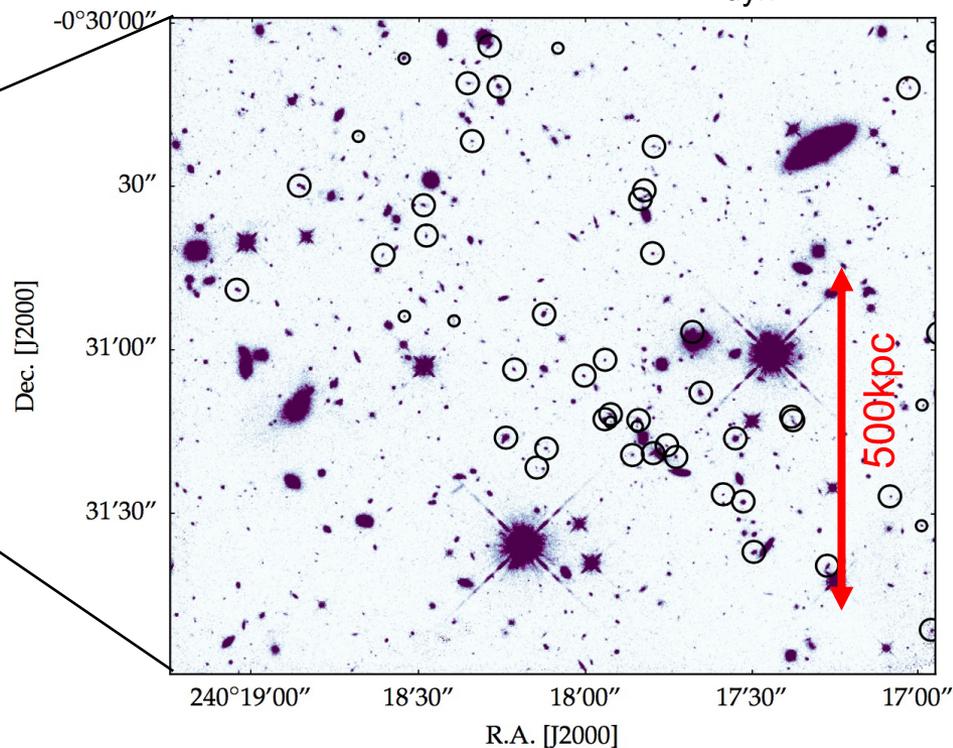
USS1558 ( $z=2.53$ )

Subaru/MOIRCS, NB2315 (H $\alpha$ ) imaging

非常に活発な星形成活動

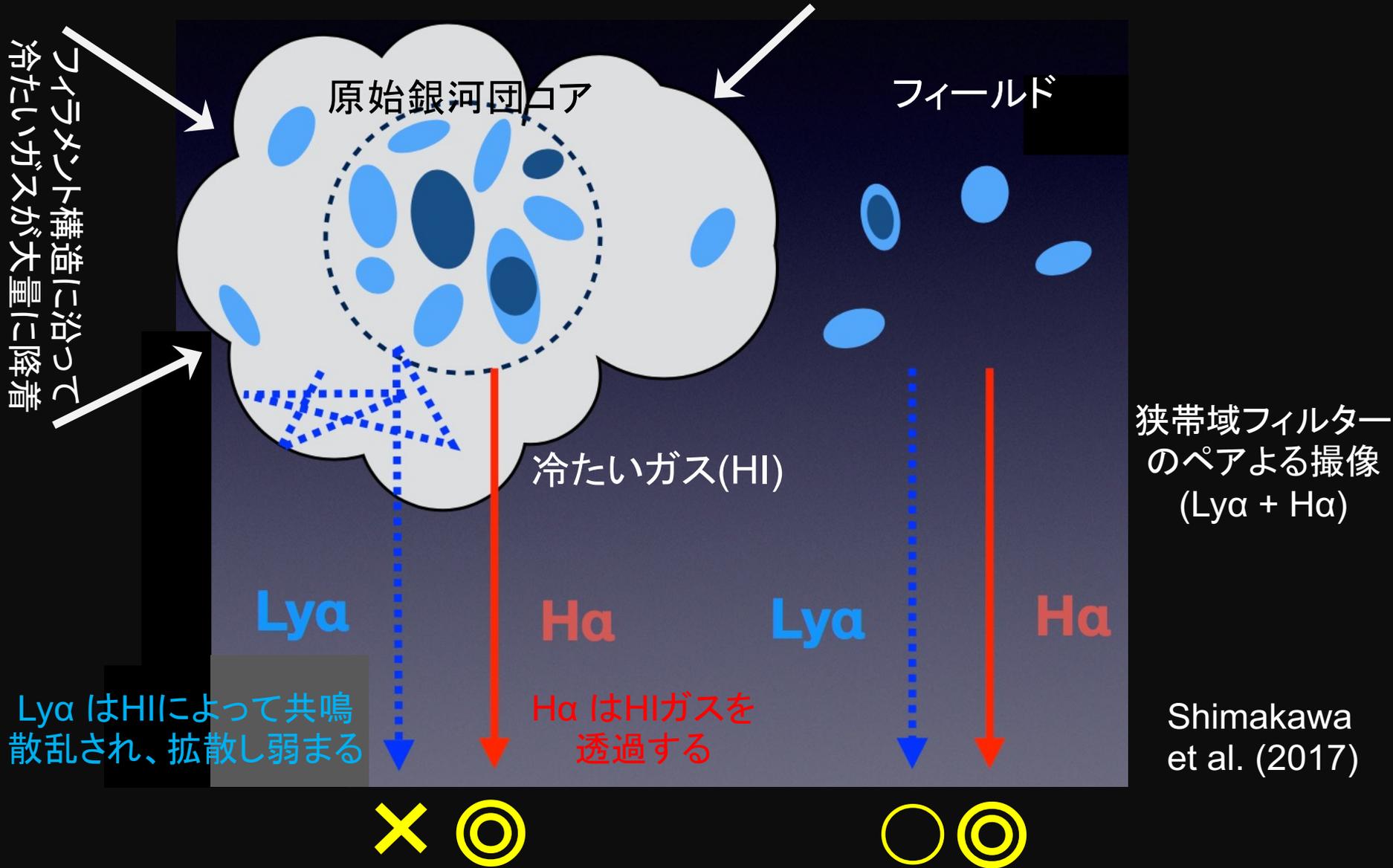
H $\alpha$ 輝線銀河(=星形成銀河)の集団

一般フィールドの20倍の密度  $M_{dyn}=10^{14} M_{\odot}$



Shimakawa et al. (2017)

# Lya輝線とHα輝線強度比から中性水素(ガス降着史)をマッピング

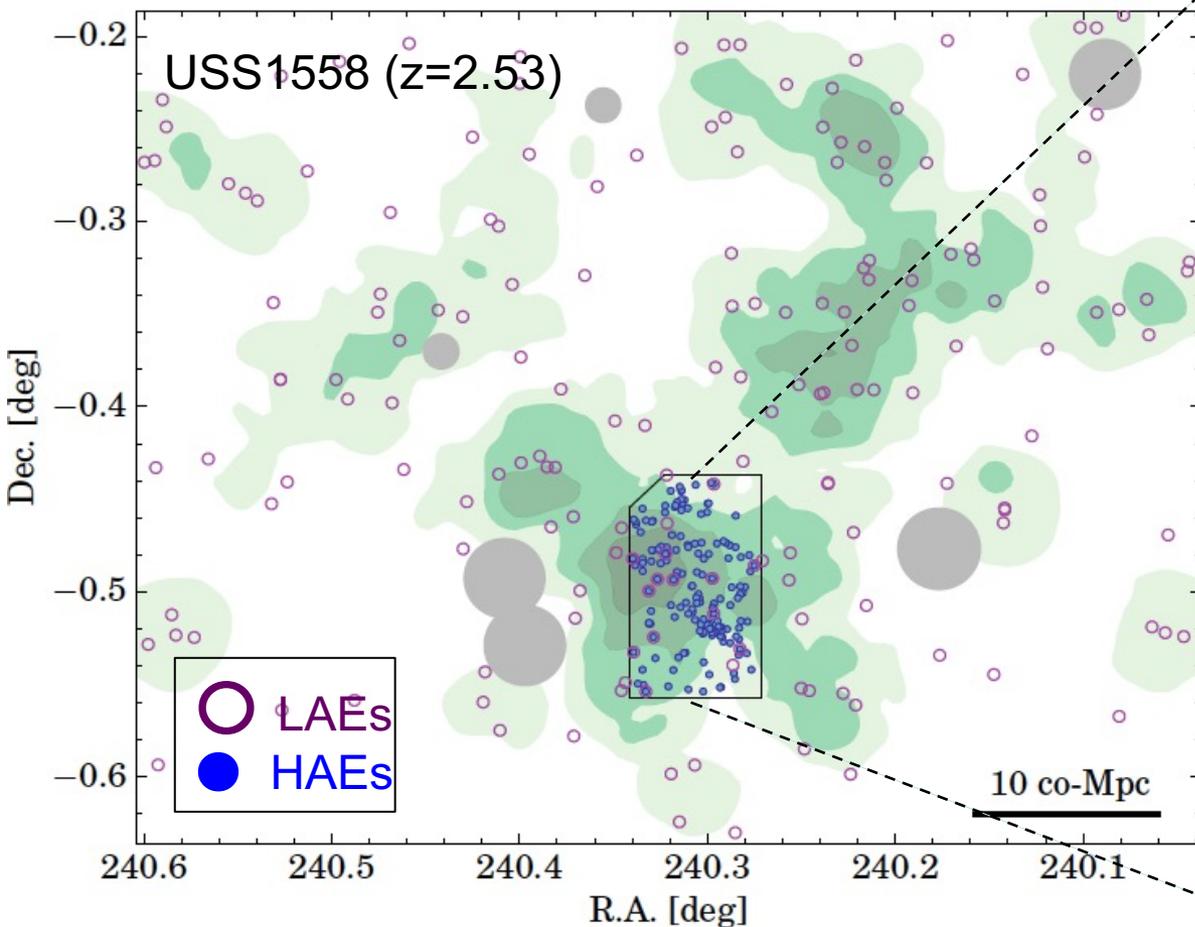


ある開口径内の Ly $\alpha$ /H $\alpha$  比がHIガス量により変化(中性ガスのトレーサー) → ガス降着史

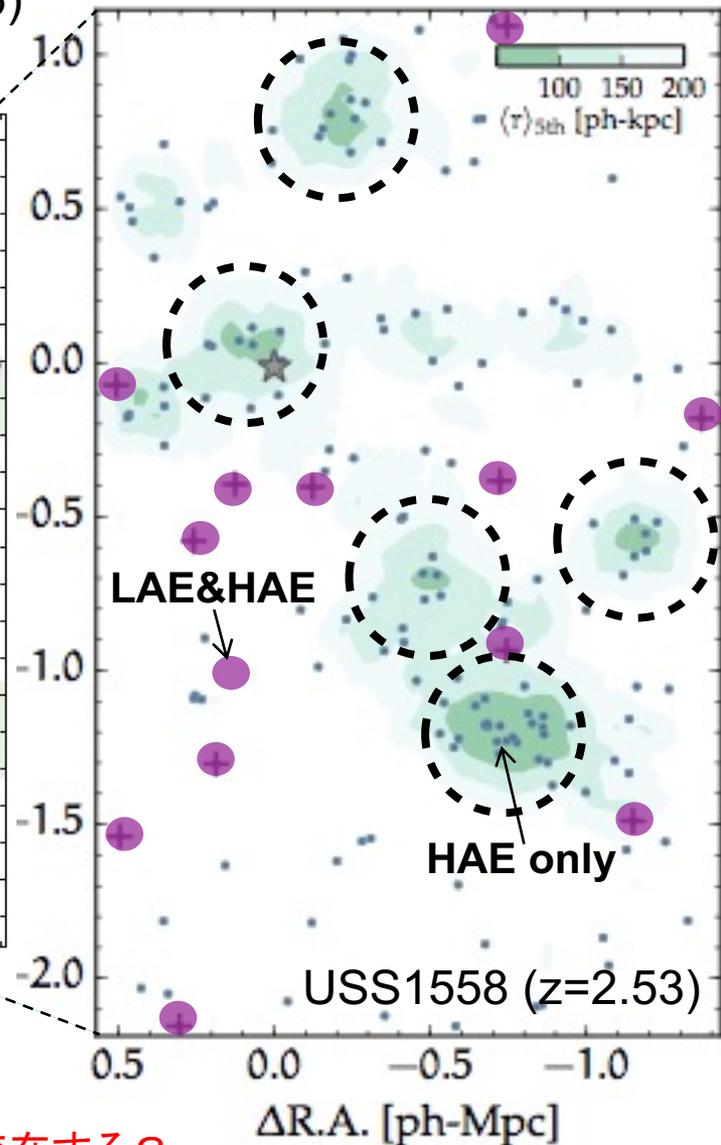
# $z=2.5$ 原始銀河団のペア狭帯域フィルターによる ( $\text{Ly}\alpha$ , H $\alpha$ )輝線銀河探査

Shimakawa et al (2017), Hayashi et al. (2012; 2016)

Suprime-Cam (34' x 27') - NB429 ( $\text{Ly}\alpha$ )



MOIRCS (7' x 4') - NB2315 (H $\alpha$ )

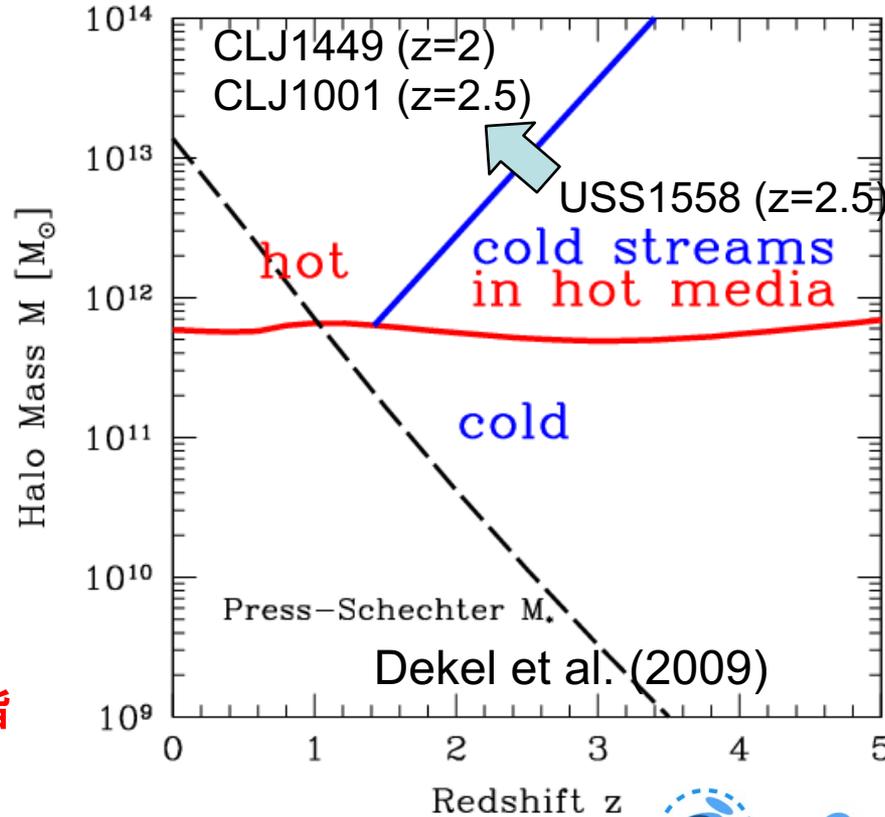


LAEは高密度クランプを避けて分布する！

高密度クランプは冷たいガス流によって中性水素(HI)が多く存在する？

もしくはダスト吸収が強い？

# 原始銀河団へのガス降着モードの切り替わり？



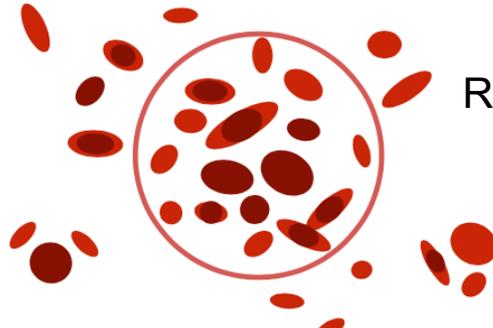
c.f., Valentino et al. (2015)

冷却非効率段階

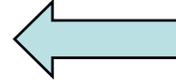
ガス降着卓越段階

CLJ1001 ( $z=2.5$ )  
CLJ1449 ( $z=2$ )

X線銀河団

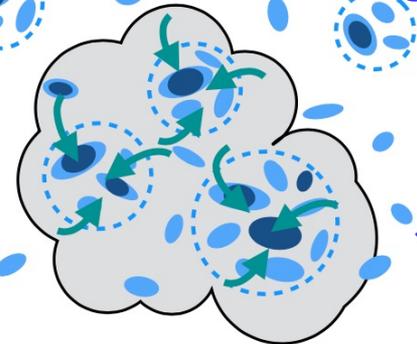


Credit:  
R. Shimakawa



USS1558 ( $z=2.5$ )  
4C23.56 ( $z=2.5$ )

非X線銀河団



銀河団ハローが大質量、高密度へと成長すると、  
ガスは高温に加熱され、X線を放射するようになる。

フィラメント構造に沿って冷却ガスが流れ込み、  
ガスが銀河団コアへと効率よく供給される。

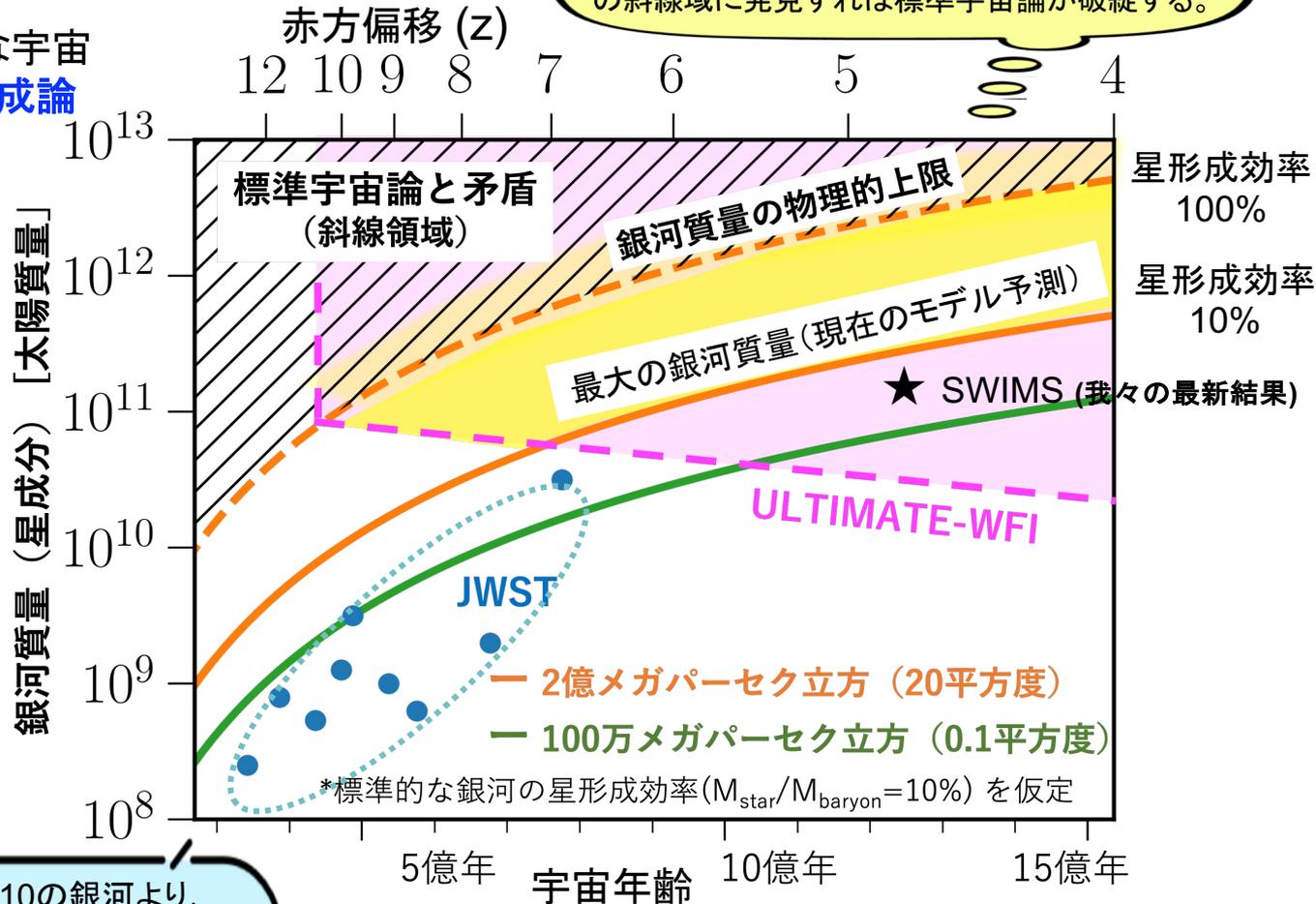
# 初期宇宙の巨大銀河誕生史

標準的ボトムアップ銀河形成論の重大な検証または破綻

黄色の領域に銀河を発見すれば理論予測を超え、銀河形成モデルの見直しが必要になる。さらに上の斜線域に発見すれば標準宇宙論が破綻する。

冷たいダークマターが支配的な宇宙におけるボトム・アップ銀河形成論

時間



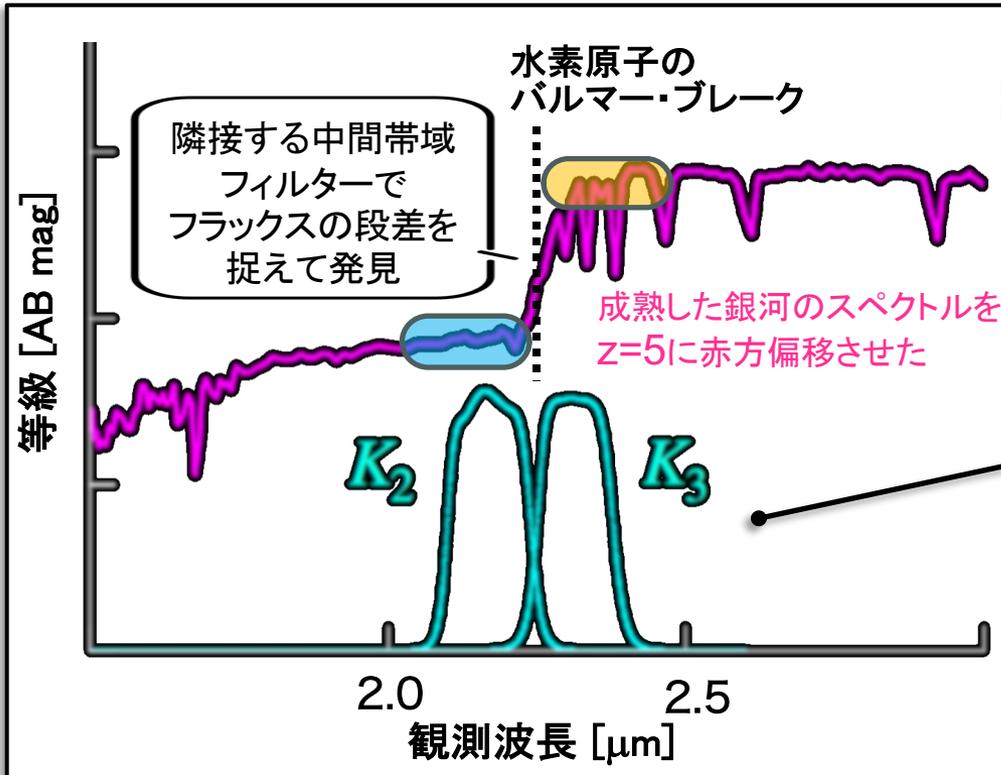
JWSTで見つかるz~10の銀河より、WFIで見つかるz~5の巨大銀河の方が、銀河形成論にとって脅威になりうる。

※) たとえ見つからない場合でも、銀河の質量関数をボトムアップ銀河形成論と比較して定量的に検証できる

# 初期宇宙の巨大銀河誕生史

標準的なボトムアップ銀河形成論の重大な検証または破綻

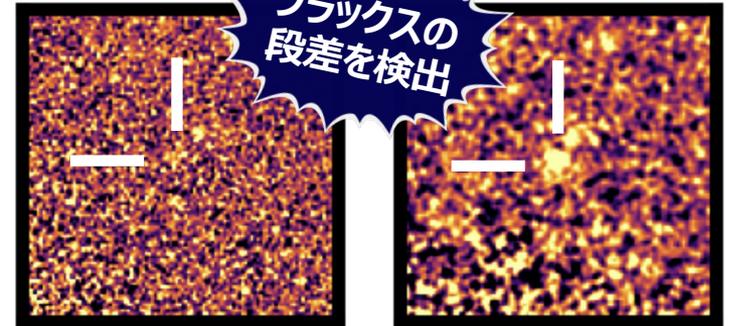
先行研究では $z \sim 4$ までの探査に限られる。WFIで、より過去の時代( $z \sim 5$ )へと拡張!



我々の先行パイロット観測  
(SWIMSカメラの中間帯域フィルターを利用)

K2

K3



$z = 4.8$  星質量 =  $1.1 \times 10^{11} M_{\odot}$

現在の天の川銀河より既に2倍も重い?

$z \sim 5$ の大質量銀河候補を1個発見  
高橋(東北大M1)&児玉ら

※ JWSTの狭視野では見つからない(分光確認に使う!)



# 広視野近赤外線カメラ(SWIMS)による大規模撮像サーベイ

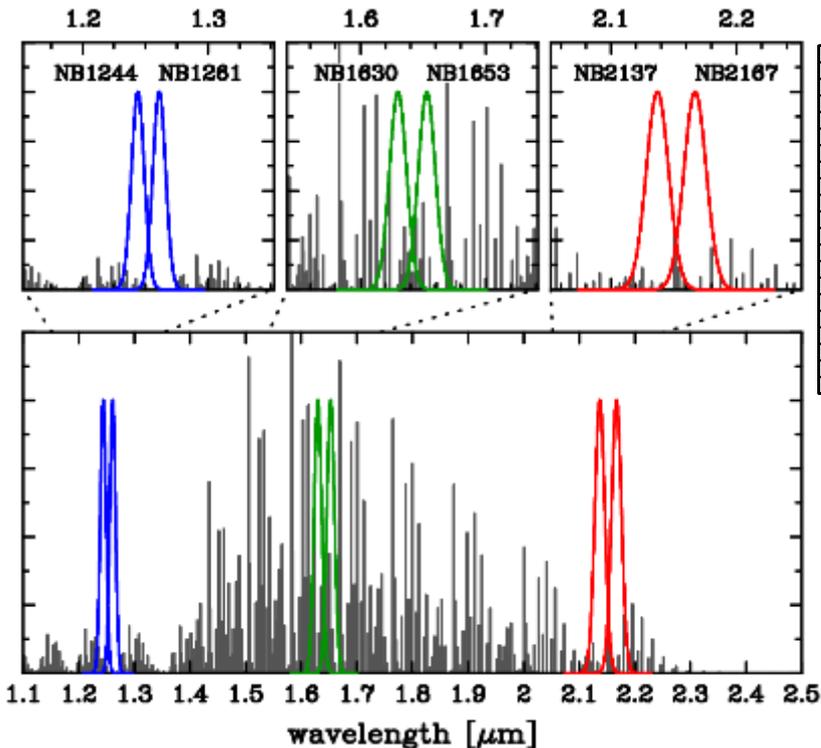
## SWIMS-18

代表：児玉

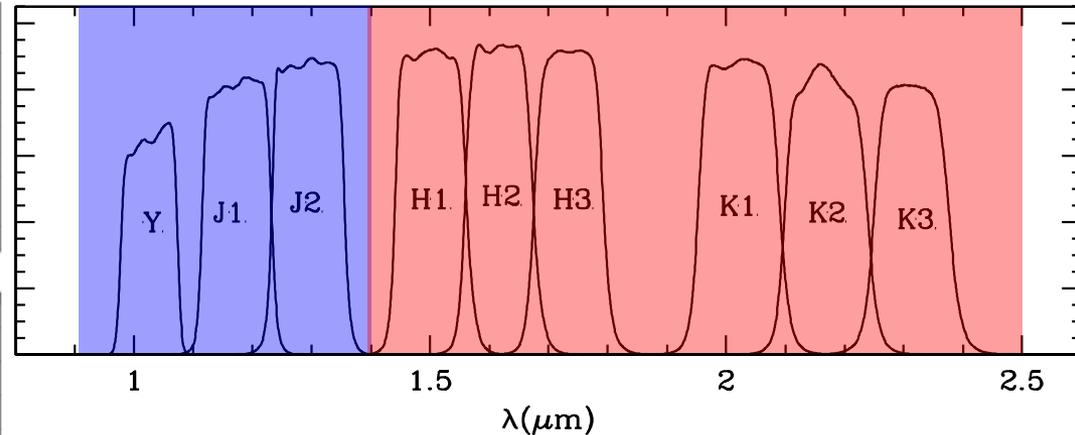
2021~2022年にすばるでパイロット観測  
2025年よりTAOで本格観測開始

広視野カメラSWIMSに6枚の狭帯域フィルターと9枚の中間帯域フィルターを作成し、3枚の広帯域フィルターと合わせた計18枚のフィルターを用い、すばるとTAOで行う計1平方度規模の広くて深い近赤外線撮像サーベイ。

### 狭帯域フィルター(6枚)



### 中間帯域フィルター(9枚)

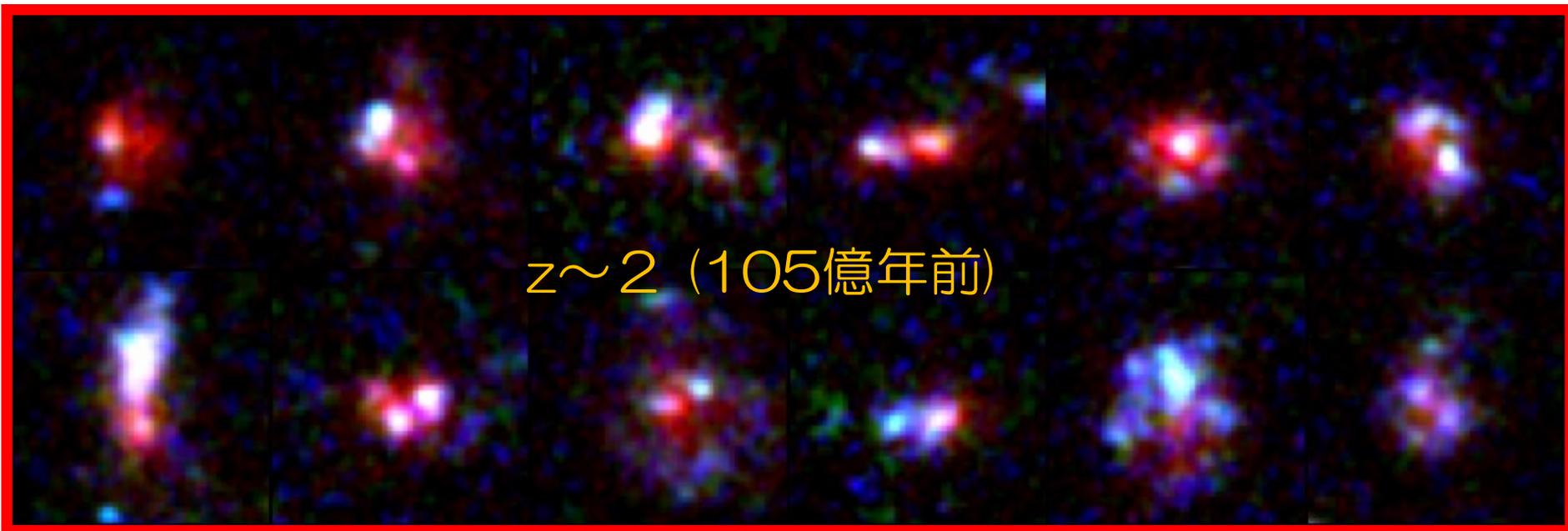


1<z<5の時代の、星形成率限界(輝線銀河)と星質量限界(一般銀河)の統計的銀河サンプルを構築し、系統的な研究を行う。

4組のペアフィルター(H $\alpha$ と[OIII]@z~1.5, 2.3)  
→赤方偏移、星形成率、AGN選択

→ 初期宇宙の稀な大質量銀河(4<z<5)や、  
大量の原始銀河団(1<z<5)の発見も期待

# すばるとHSTが見た、銀河形成最盛期 (銀河宇宙の白昼) の銀河の姿

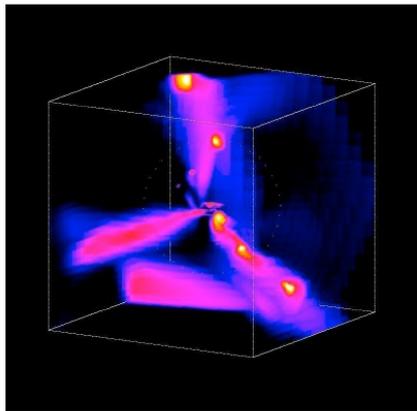


コンピューターの中の銀河



ぶつぶつに分裂しているものが多い!

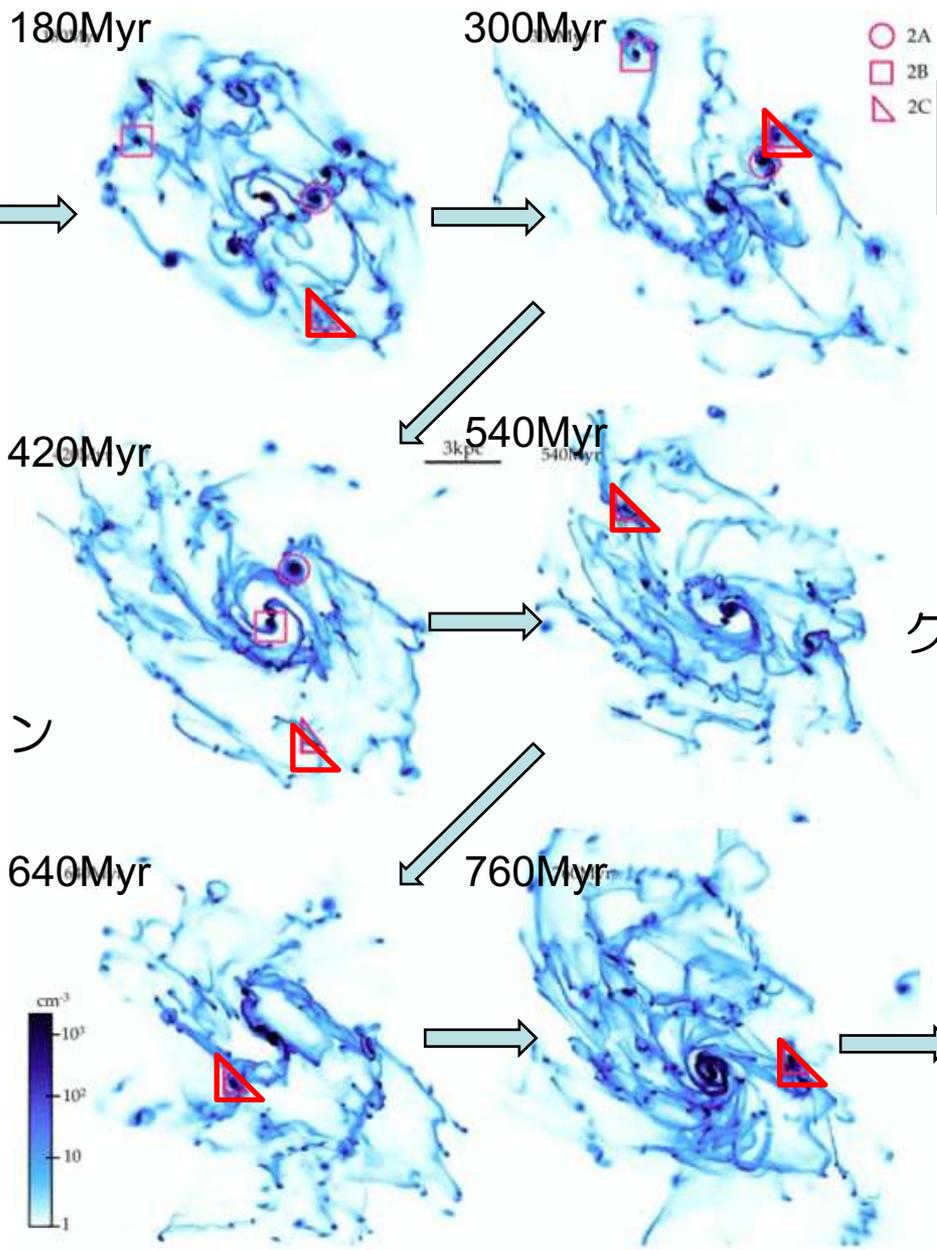
これは銀河の合体の現場か、それとも  
自分で分裂しているのか?



ガスの冷却流 (Dekel+ 2013)

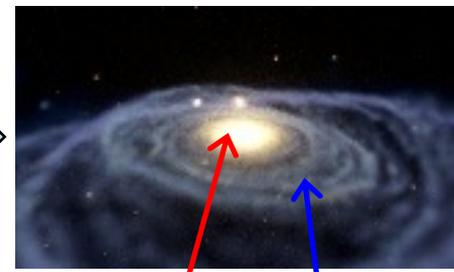
ガスが豊富な円盤  
銀河のシミュレーション

Bournaud et al. (2014)  
Noguchi (1999)



**円盤銀河の  
新たな進化仮説！**

大量なガスの降着  
↓  
ガスが豊富な円盤  
↓  
クランプに分裂  
↓  
クランプが中心に落下  
↓  
中心に丸い成分  
(バルジ) ができる



バルジ      円盤

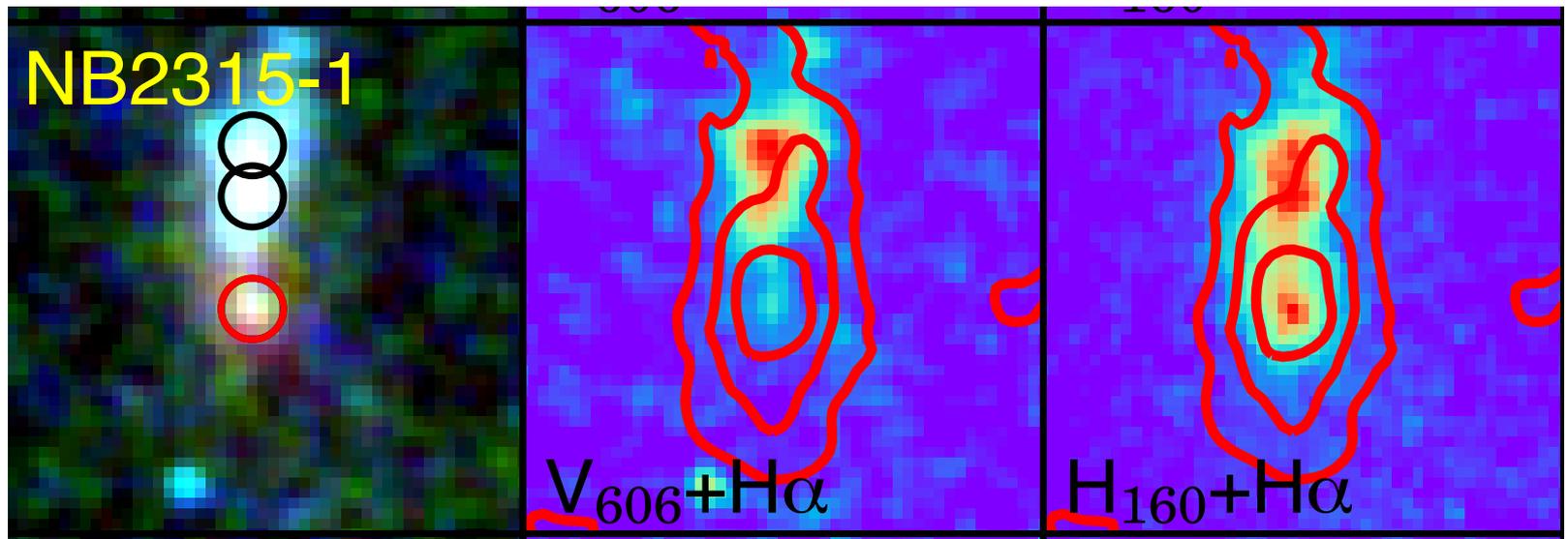
FIG. 2.— Same as Figure 1 for galaxy G2 (medium mass). Detailed sequences and movies of our fiducial models are available in Perret et al. (2013a).

$$M_{\text{dyn}} = 3.5 \times 10^{10} M_{\odot}$$

# 銀河中心部のバルジの形成現場？

クランピーな星形成銀河 ( $z=2.5$ )

赤コントア：星形成領域の分布 ( $H\alpha$ 輝線)



赤いクランプで爆発的な星形成活動が起こっている。

→ バルジ形成の現場？

Tadaki, TK, et al. (2014)

いくつかの空間的に広がった遠方銀河は自然なシーイングで分解できる。  
しかし大多数のものについてはより高い空間分解能が必要。

→ 地上補償光学、宇宙望遠鏡、アルマ

# GRACIAS-ALMA

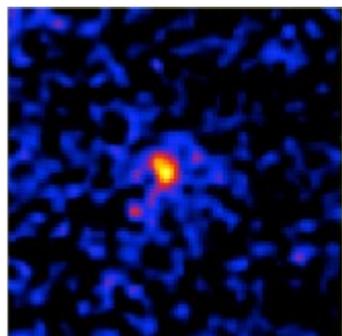
Galaxy **R**esolved **A**natomy with **CO** **I**nterferometry  
And **S**ubmm observations with **ALMA**



高解像度( $\sim 1$  kpc)で遠方星形成銀河の内部構造と  
速度場を分解し、銀河形態の分化の過程を暴く

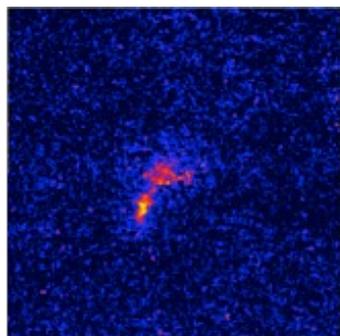
**Subaru/IRCS NB+AO**  
SF traced by H $\alpha$

0.1"-0.15"



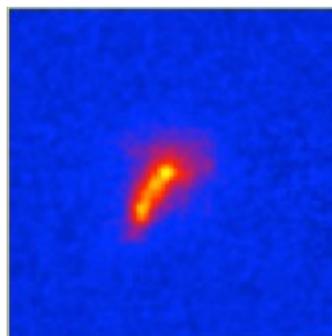
**HST / ACS**  
SF traced by UV

0.1"



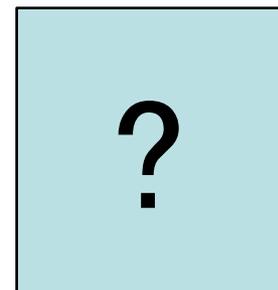
**HST / WFC3**  
Stellar mass

0.16"



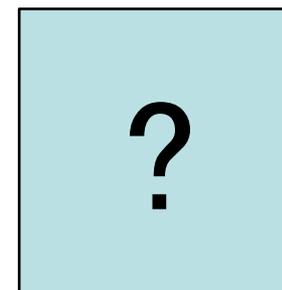
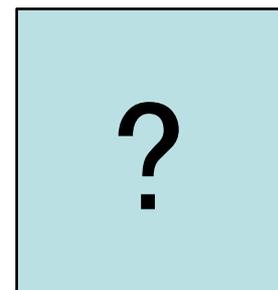
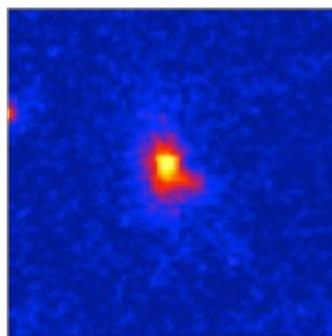
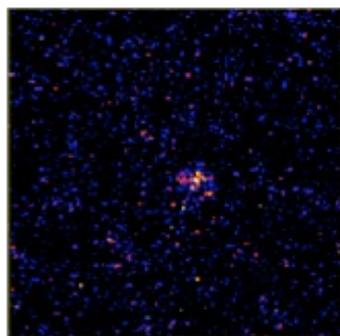
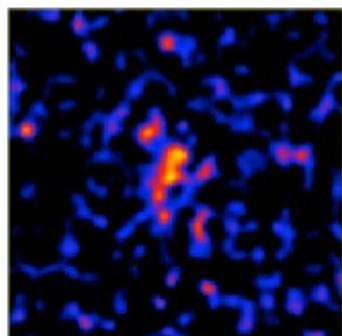
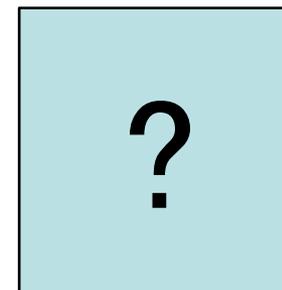
**ALMA**  
Dust cont.

0.1"



**ALMA**  
CO line

0.2"

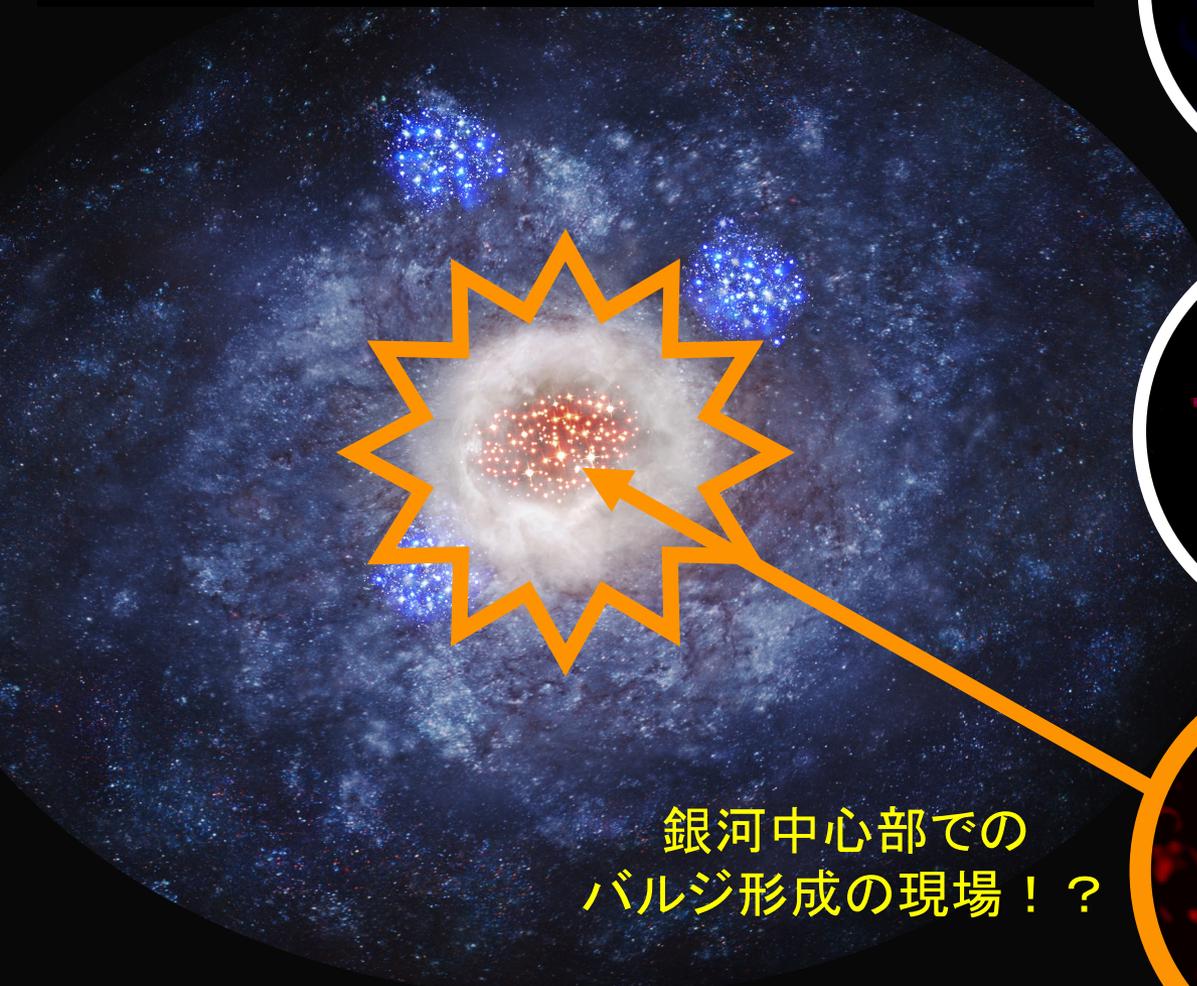


GANBA-Subaru

HST imaging JWSTも!

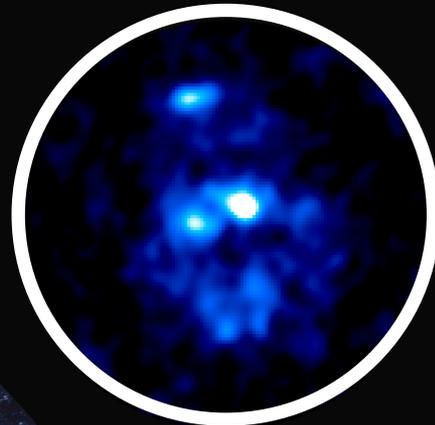
GRACIAS-ALMA

# 110億年前のクランプ銀河の 内部構造



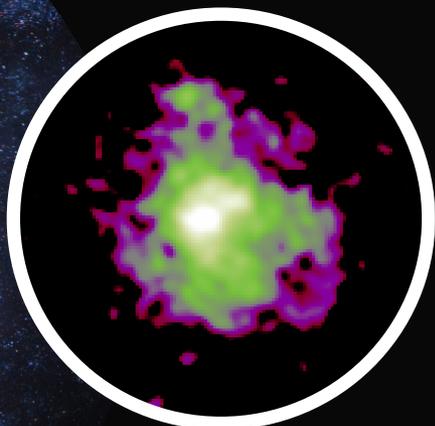
銀河中心部での  
バルジ形成の現場！？

イメージ図



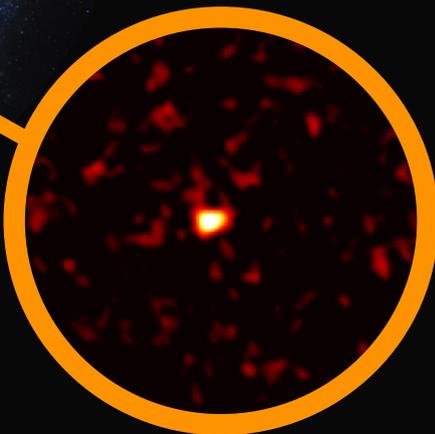
ハッブル  
(可視光)

比較的若い星



ハッブル  
(近赤外線)

古い星



アルマ  
(電波)

今星を作っ  
ているガスや塵

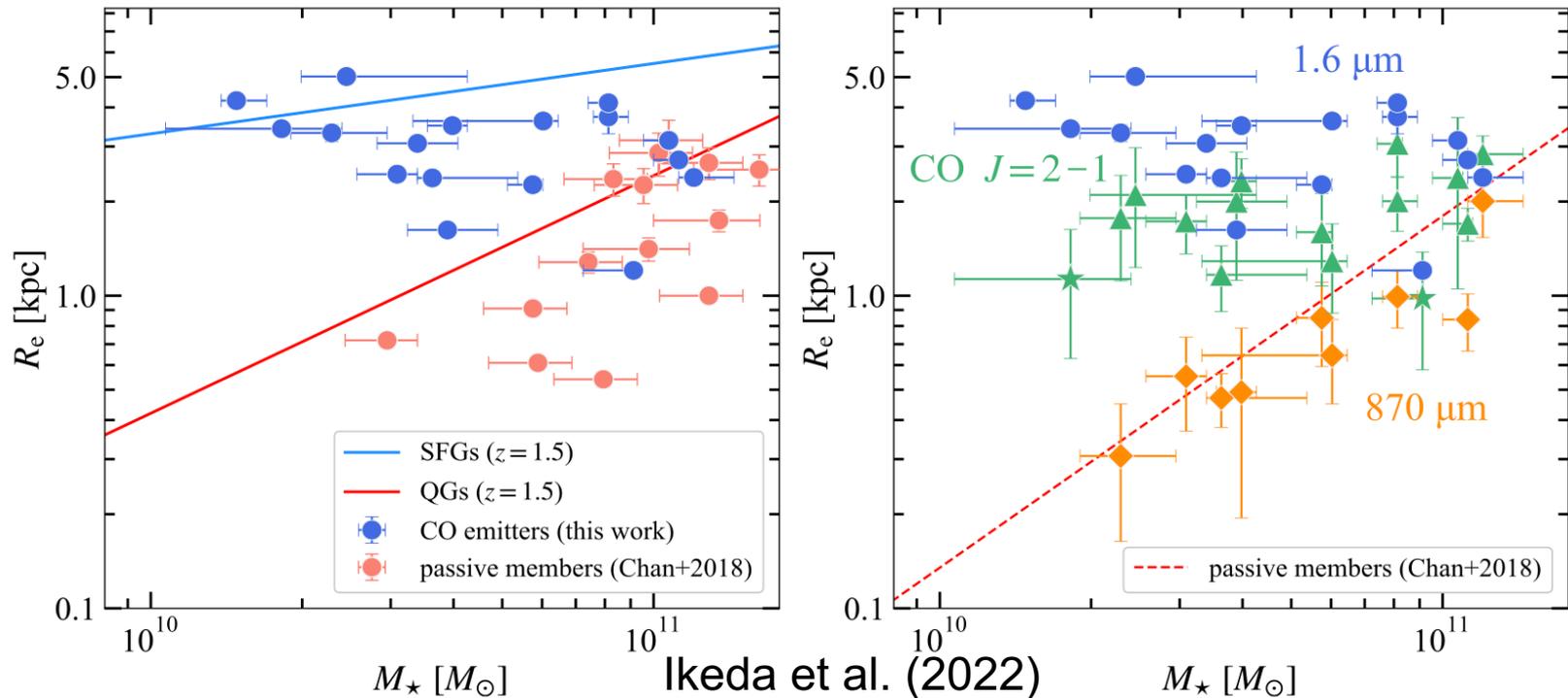
実際の画像

# 銀河団銀河のサイズ比較 ダスト連続光<分子ガス<星

→ 銀河の中心部で高い星形成効率でバルジが生まれている最中？

XCS2215銀河団 ( $z \sim 1.47$ )

ALMAによるCO(2-1)輝線とダスト連続光(870 $\mu\text{m}$ )の高解像度観測



**Figure 7.** Stellar mass–size distribution of the galaxies in XCS J2215. Left: HST/1.6  $\mu\text{m}$  sizes are shown for 17 CO emitters (blue circles) and 14 spectroscopically confirmed passive members (red circles; Chan et al. 2018). The solid lines correspond to the best-fit mass–size relation of star-forming (blue) and passive (red) galaxies at  $z = 1.5$  (van der Wel et al. 2014). Right: comparison of the sizes of the CO emitters measured from different tracers. The blue circles, green triangles or stars, and orange diamonds indicate the effective radii of the HST/1.6  $\mu\text{m}$ , CO  $J = 2-1$  line, and 870  $\mu\text{m}$  continuum, respectively. Two AGNs (ALMA.11 and ALMA.14) are shown with green stars for the CO size. The red dashed line is the best-fit mass–size relation of the passive members of XCS J2215 at 1.6  $\mu\text{m}$ , as presented in the left panel.

似た結果が $z \sim 2$ のフィールド銀河にも見られる (Tadaki et al. 2017)

環境効果は？ → 直接比較できるデータが必要

# 原始銀河団中の星形成マッピング (銀河団の場所ごと、個々の銀河の内部)

JWST cycle-1 GO program (Dannerbauer, Koyama, et al.)

## Resolving and penetrating into the dusty Spiderweb and its surrounding protocluster with **Pa-beta imaging** (rest-frame 1.28 $\mu\text{m}$ )

**ダスト吸収の影響を受けない星形成の指標!**

Scientific Category: Galaxies

SFR=3.5  $M_{\odot}$ /yrまで到達

Scientific Keywords: Galaxy Environments, High-Redshift Galaxies, Starburst Galaxies, Ultraluminous Infrared Galaxies

Instruments: NIRCAM

2023年6月に取得済み。鋭意解析中。

Proposal Size: SMALL

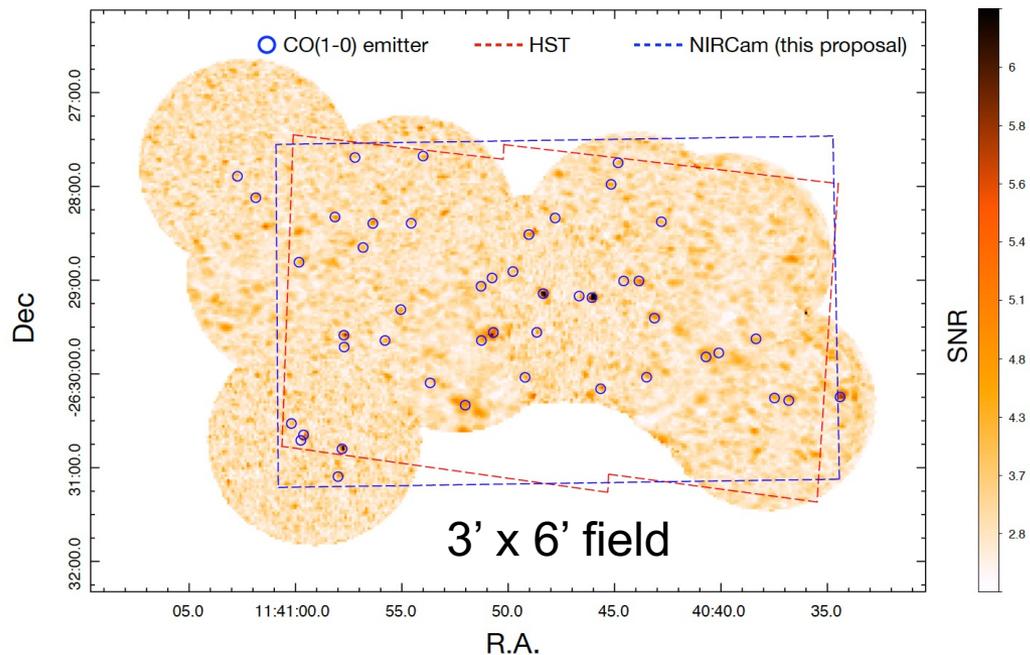
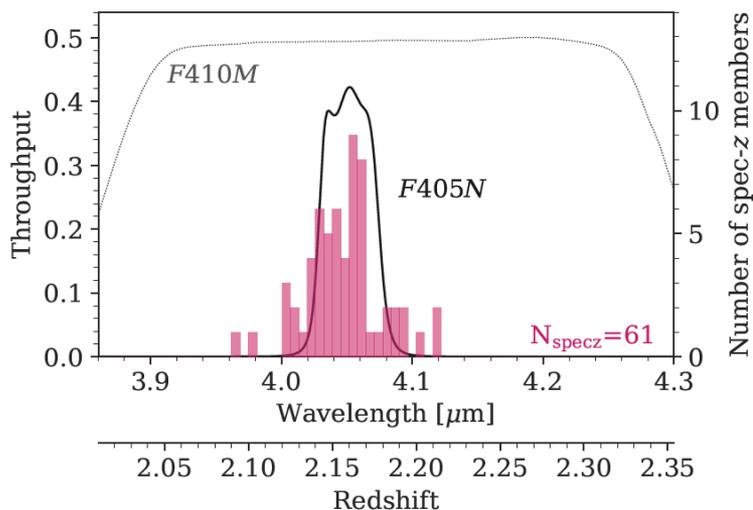
Exclusive Access Period: 12 months

*The spiderweb protocluster PKS1138 @z=2.16*

Allocation Information (in hours):

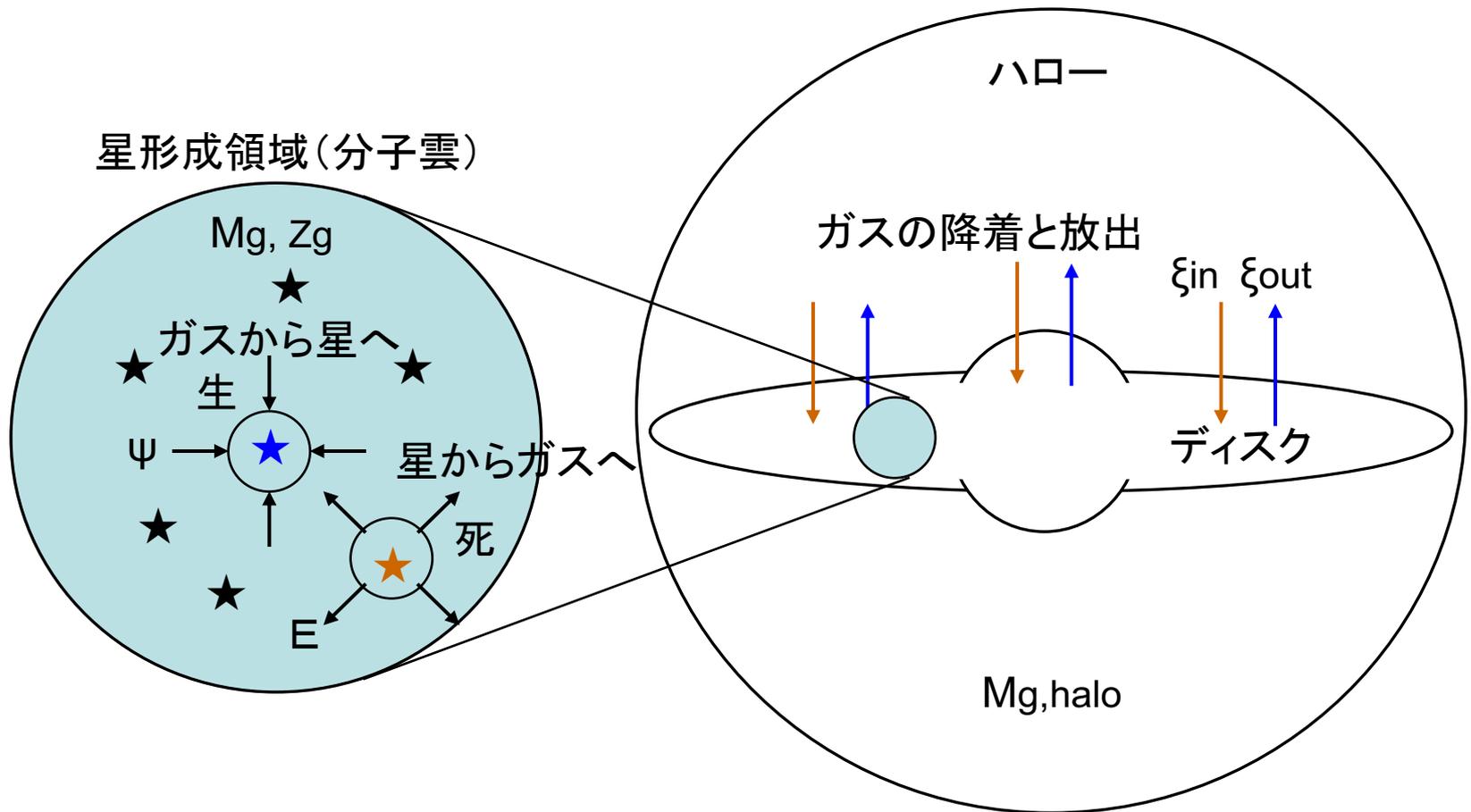
Science Time: 1.4

Charged Time: 3.6



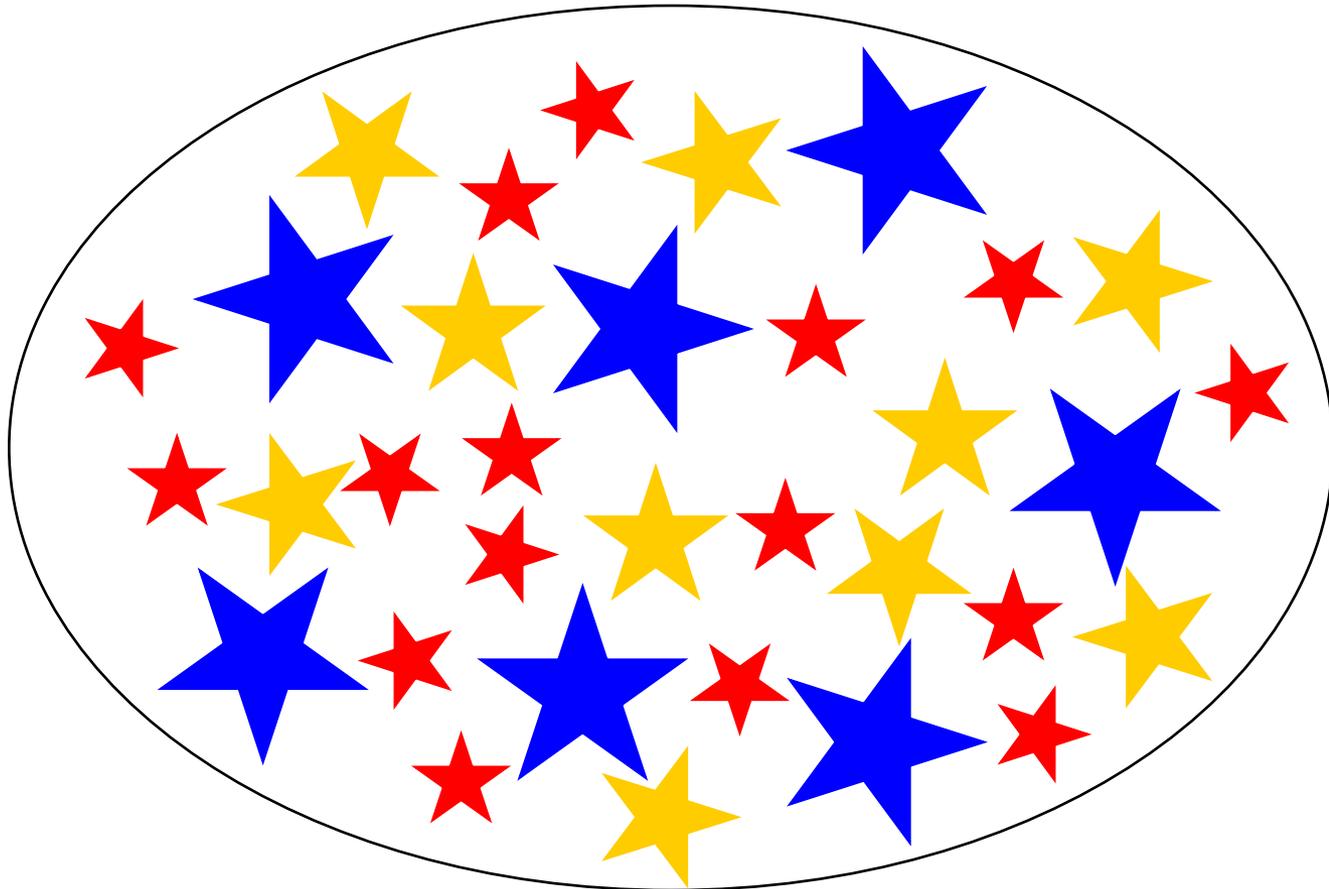
狭帯域フィルター F405N により、銀河団メンバー銀河からの水素のPa $\beta$ 線 (静止波長1.28 $\mu\text{m}$ ) を捉える

# 銀河の化学進化



星は銀河の中で分子雲から誕生する。星の内部で合成される元素は、星の寿命が尽きると超新星として爆発し、星間空間に吹き飛ばす。周囲の星間ガスはこの超新星爆発によって汚染され、その中から次の世代の星が形成される。この様にして、銀河の中ではガスから星、星からガスへの物質のやり取りがなされ、その都度あらたな重元素が生成され、重元素量が上昇する。これを**銀河の化学進化**という。

# 星の集合体としての銀河進化

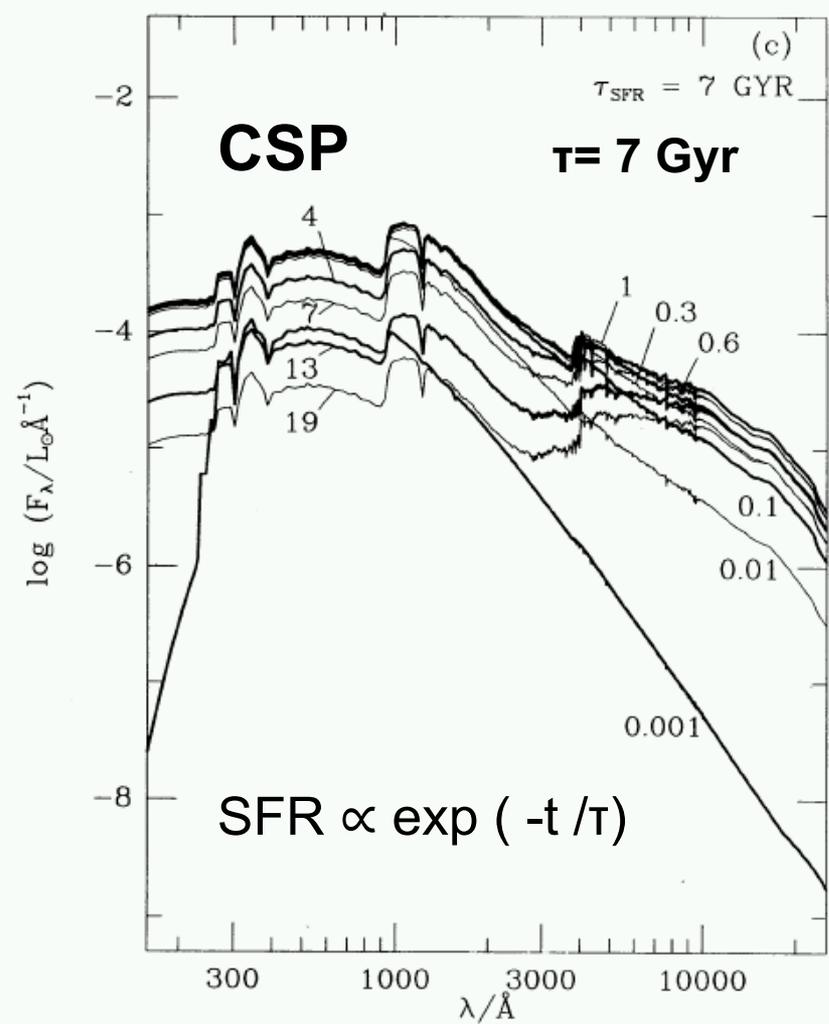
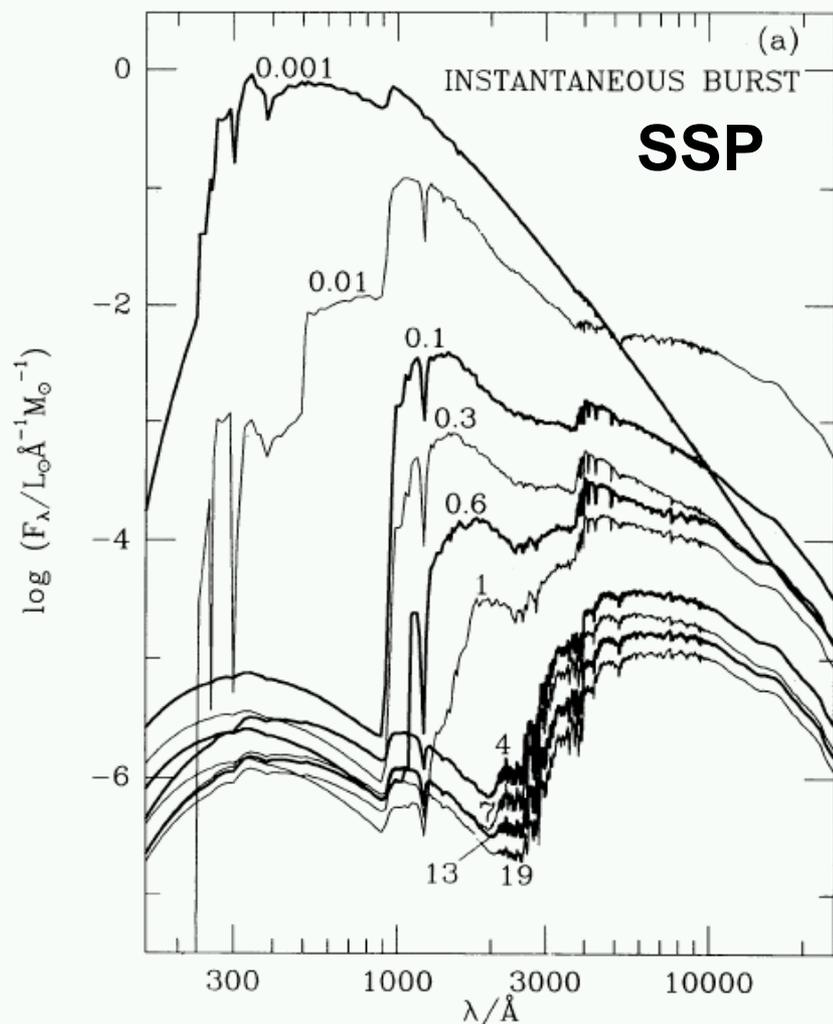


大質量星＝高温＝青い＝短命

中質量星

小質量星＝低温＝赤い＝長命

# 銀河のスペクトル進化モデル



Bruzual & Charlot (1993)

# 児玉研究室の研究手法・主要内容 『着眼大局、着手小局』

- ▶ 遠方銀河・銀河団の大局的な物理特性とその進化を探る（マクロ）
  - ❖ 広域探査による遠方巨大銀河、原始銀河団の発見  
すばる広視野装置 (HSC, MOIRCS), 狭・中間帯域フィルター, Euclid衛星による広視野サーベイ (すばるとの共同研究)
  - ❖ 撮像観測による大局的な物理特性とその進化の測定  
銀河における星形成および質量集積の歴史 (時間、環境、階層)
  - ❖ 分光観測による詳細な物理特性とその進化の測定  
重元素量, 星年齢, 電離状態, AGNとの共進化
- ▶ 遠方銀河の内部構造を解剖(空間分解)する（ミクロ）
  - ❖ JWSTや地上補償光学による近赤外高解像観測 (星、電離ガス)  
円盤やバルジの形成, 力学構造 (ガス流出入, 回転, 合体)
  - ❖ アルマ干渉計による電波サブミリ波高解像観測 (分子ガス、ダスト)  
分子ガスと星の空間分布差, 力学構造, 星形成モード, 化学進化
- ▶ 現象論的モデルにより、起こっている物理過程を理解する
  - ❖ スペクトル進化 (星種族合成)、化学進化モデルの構築  
観測データを再現するように進化モデルの物理パラメータを制限  
→ 星形成史、AGN活動、ガスの流出入、フィードバック

# まとめ

## 銀河・銀河団・宇宙大規模構造の形成と進化： 「遠方宇宙の最新観測データと現象論的モデルで解き明かす」

銀河・銀河団は今から100～120億年前の宇宙で形成の最盛期を迎えたと考えられています。私の研究室では、その最も重要な時代をまたぐ宇宙を広く見渡し、大局的な進化の描像を統計的に明らかにするとともに(マクロ的アプローチ)、個々の銀河を空間分解し詳細に調べることによって、銀河の中で起こる物理過程を解明することを目指しています(ミクロ的アプローチ)。時代と周辺環境に翻弄されながら生まれ成長する銀河の生態を、最新の観測データとそれを解釈する現象論的モデルによって実証的に解明します。そのため我々は国内外の共同研究者と共に様々な望遠鏡を用いた独創的な研究プロジェクトを推進しています。最先端の研究を意欲持って進めてくれる学生を望みます。

# 天文山の会

東北の雄大な山々を、年に5回くらい天文の仲間と登っています。  
興味のある方は参加歓迎します。見玉までご連絡ください。

