

4年生ゼミ説明会（2025年2月7日）

# 遠方銀河・銀河団・宇宙大 規模構造の形成と進化

Our Website



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

児玉 忠恭（こだま ただゆき）

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

すばる望遠鏡で撮影したRXJ0152銀河団( $z=0.83$ )



こだま ただゆき  
児玉 忠恭 研究室

2025.4~

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

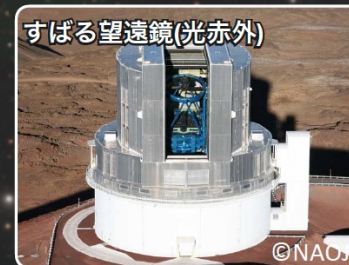
陳諾 (特任助教)、山本、Z.Liu (D3)、安達 (D2)、高橋、石田 (D1)、  
船木 (M2)、R.Stanto、萩原 (M1)【女・男】

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)

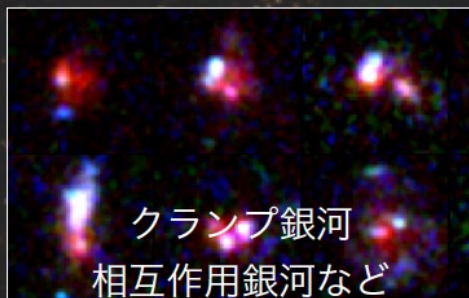


アルマ望遠鏡(電波サブミリ波)

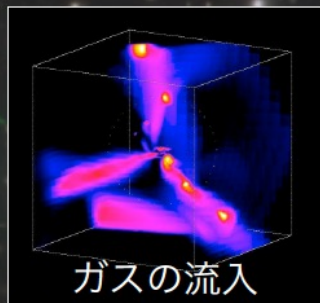


JWST  
(James Webb  
Space telescope)

## 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



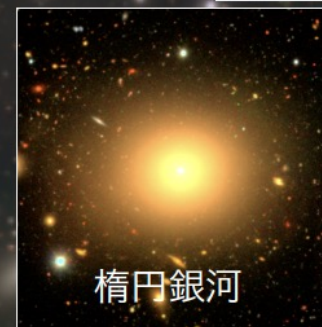
ガスの流出

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

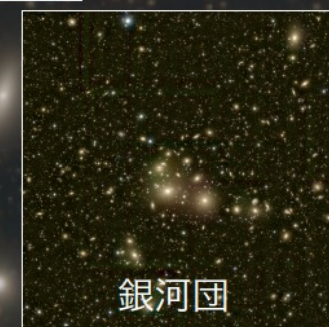
## 現在の銀河・銀河団



円盤銀河



楕円銀河



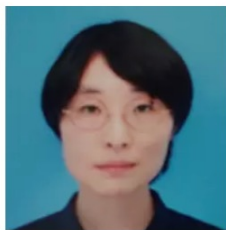
銀河団





兒玉 忠恭  
Tadayuki Kodama

*Professor*



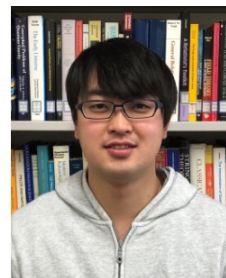
久保 真理子  
Mariko Kubo

*Assistant Professor*



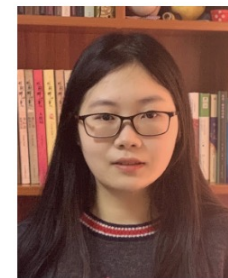
山本 直明  
Naoaki Yamamoto

*D3 student*



大工原 一貴  
Kazuki Daikuhara

*D3 student*  
3月末に転出



刘 兆然  
Zhaoran Liu

*D3 student*

3月末に転出  
4月から陳諾 (特任助教)が着任



安達 孝太  
Kota Adachi

*D1 student*



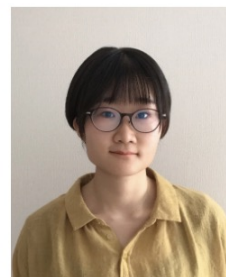
石田 光  
Ko Ishida

*M2 student*



高橋 宏典  
Kosuke Takahashi

*M2 student*



船木 美空  
Miku Funaki

*M1 student*



Ryo Sutanto  
*M1 student*



萩原 颯  
Hayate Hagiwara

*B4 student*



丸山 満ちる  
Michiru Maruyama

*B4 student* 3月末に転出

## 研究室のメンバー

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

2025.2.6現在

# 二つの研究手法

- 【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。

→ PISCES, 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



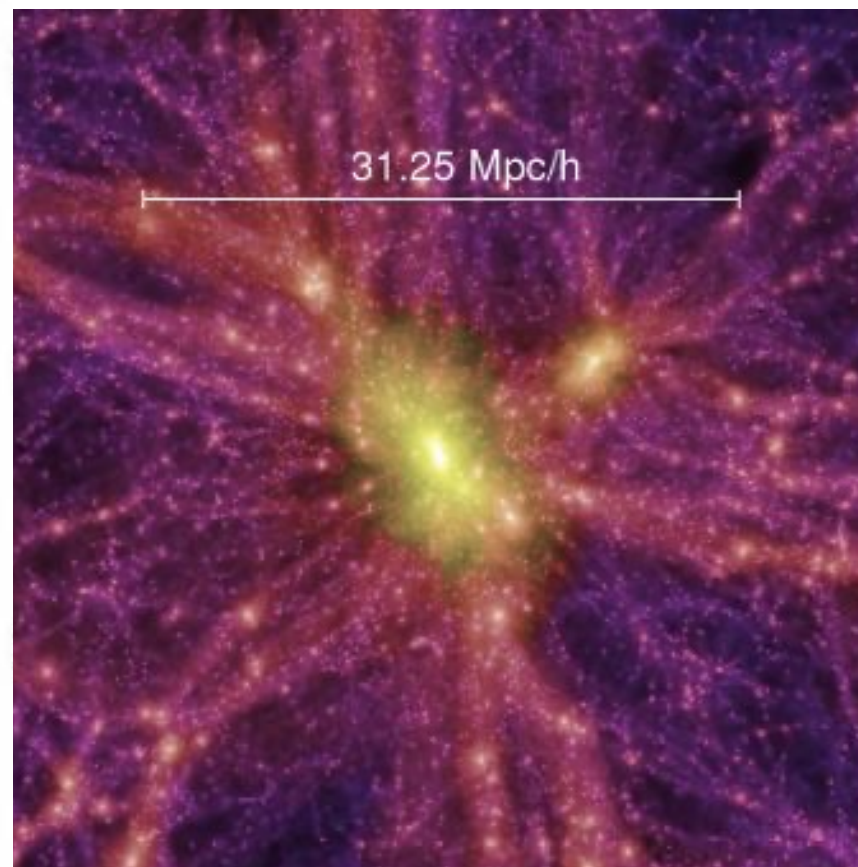
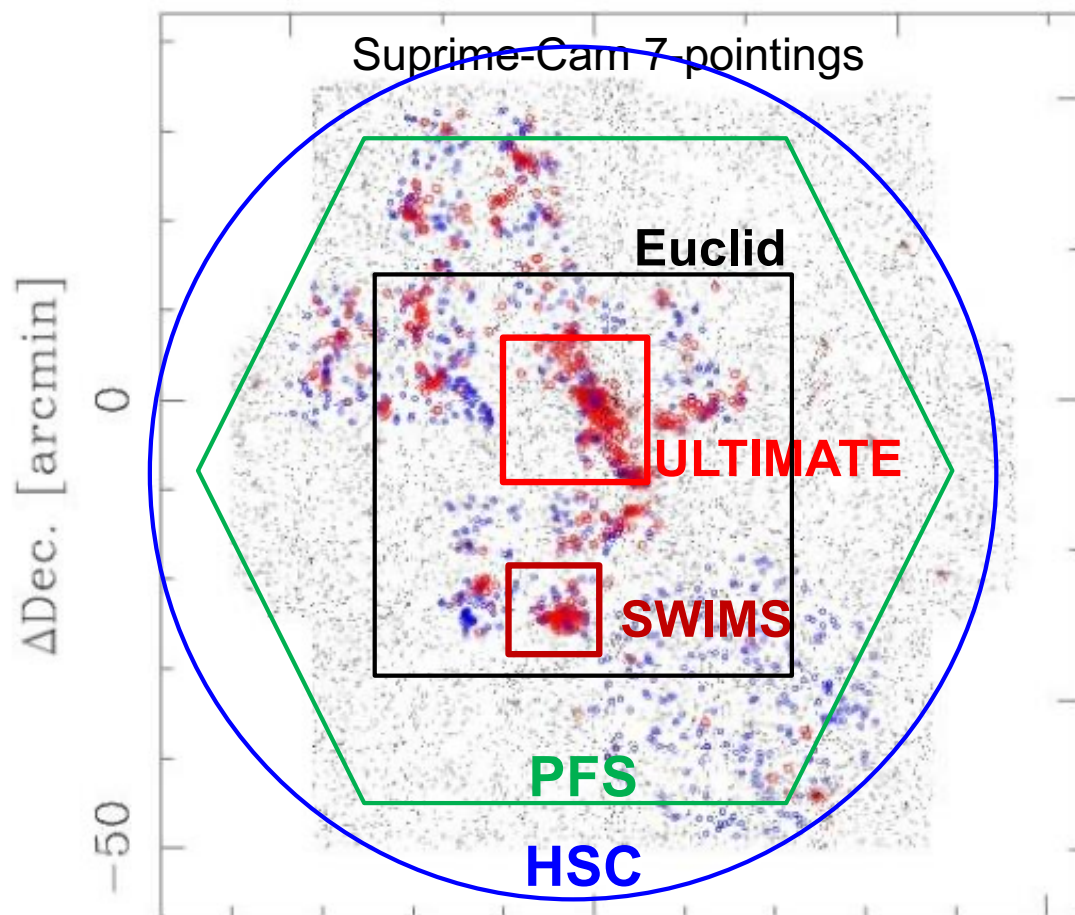
# 銀河宇宙大規模構造の発展

すばるHSC + PFS は、銀河団・大規模構造の研究に最適



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。

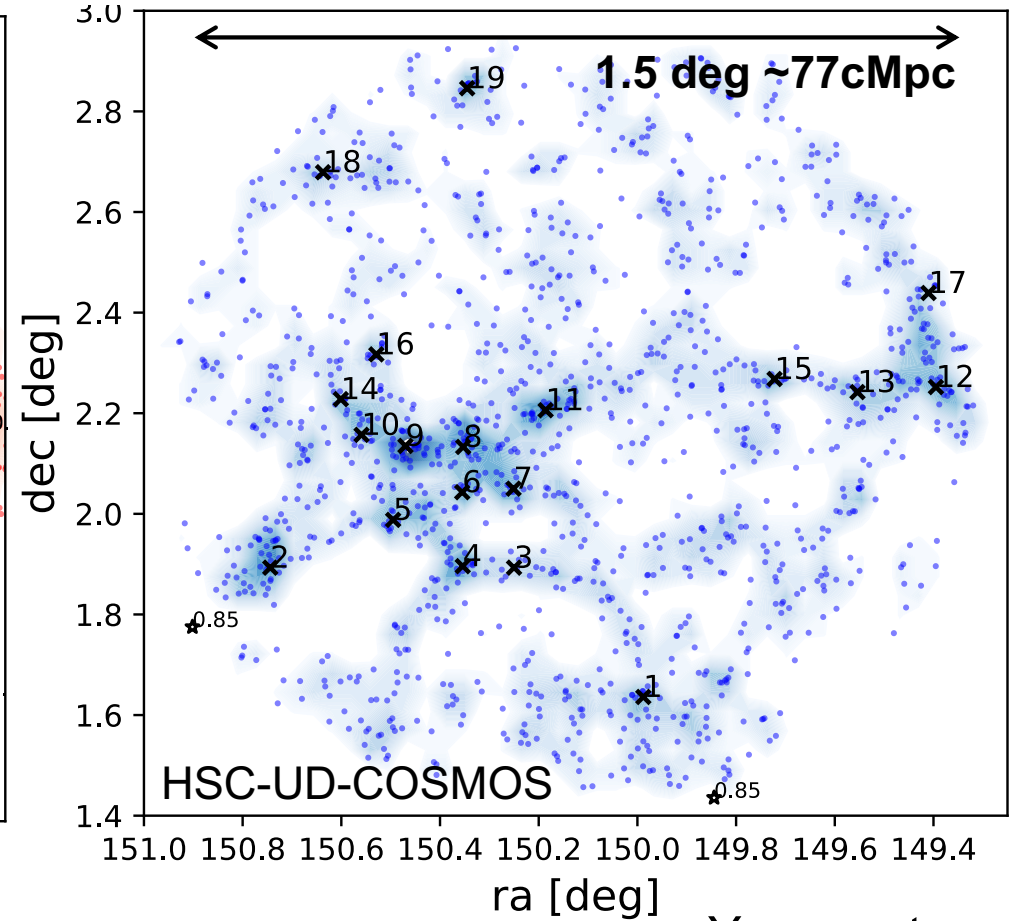
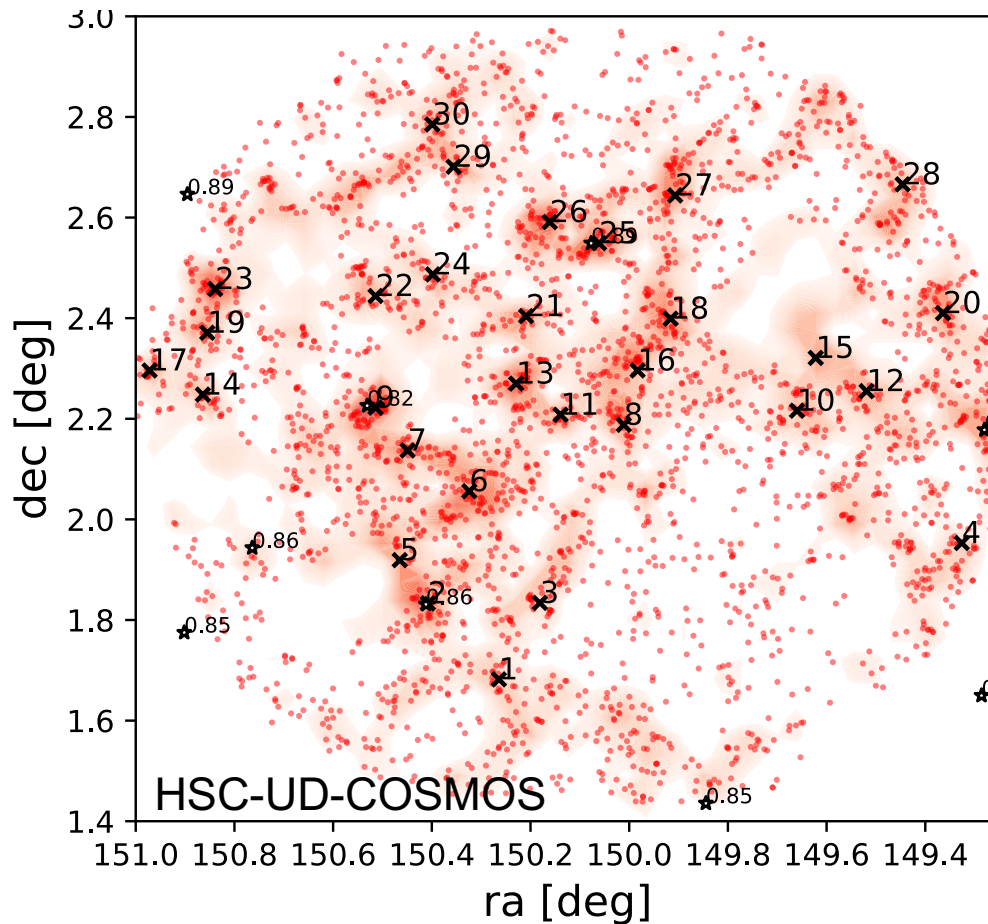
マクロ的アプローチ

# 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  $0.82 < z < 0.86$



Yamamoto+

大量の銀河団候補や大規模構造を発見 → 今後系統的な分光観測が必須

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





# 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)

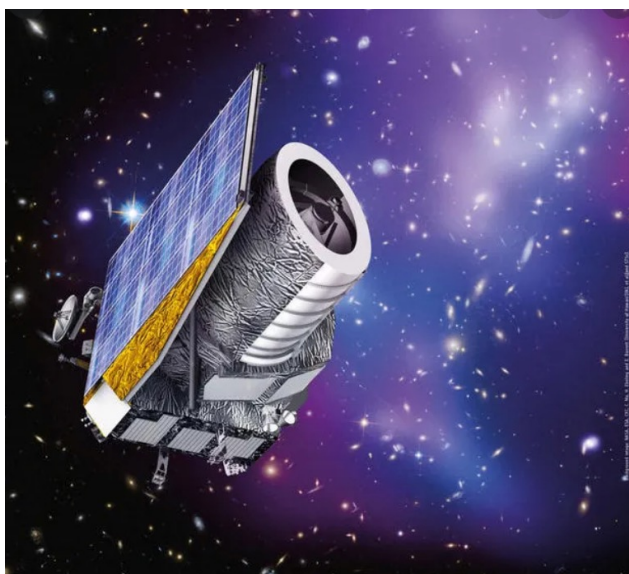
児玉は Japanese Euclid Consortium (JEC) メンバーの一員

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  $\sim 50 \text{ deg}^2$ )

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



Space X Falcon 9, Cape Canaveral, Florida, USA  
17:12 CEST, 1 July 2023

# 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

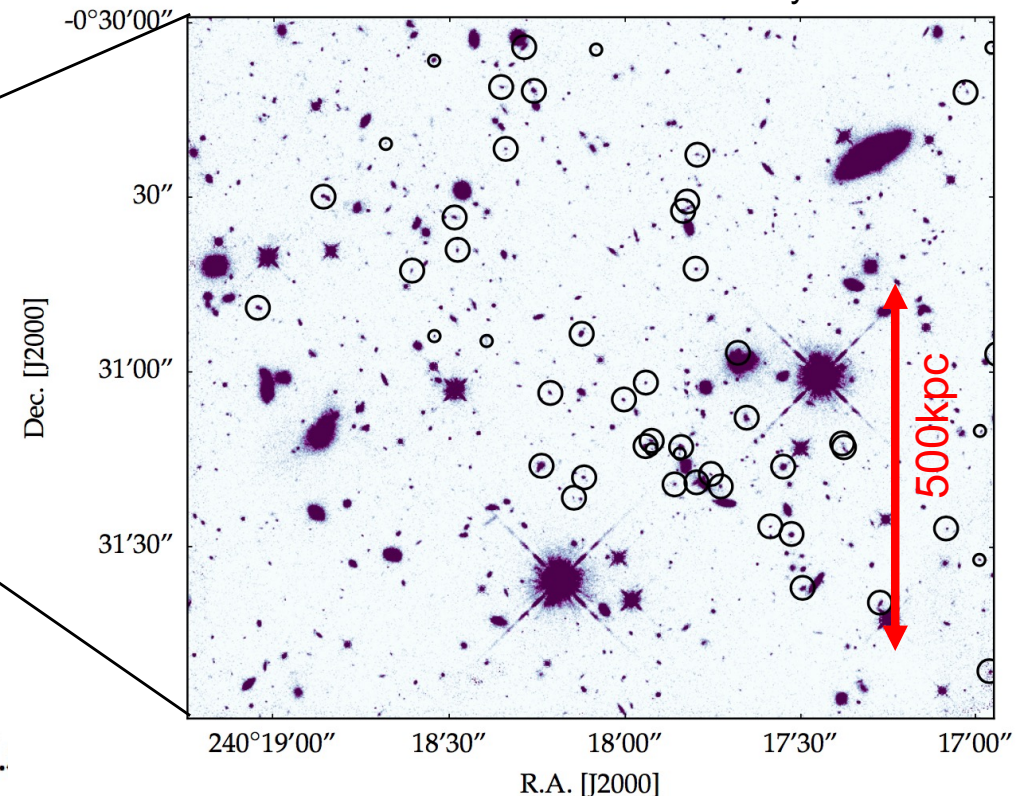
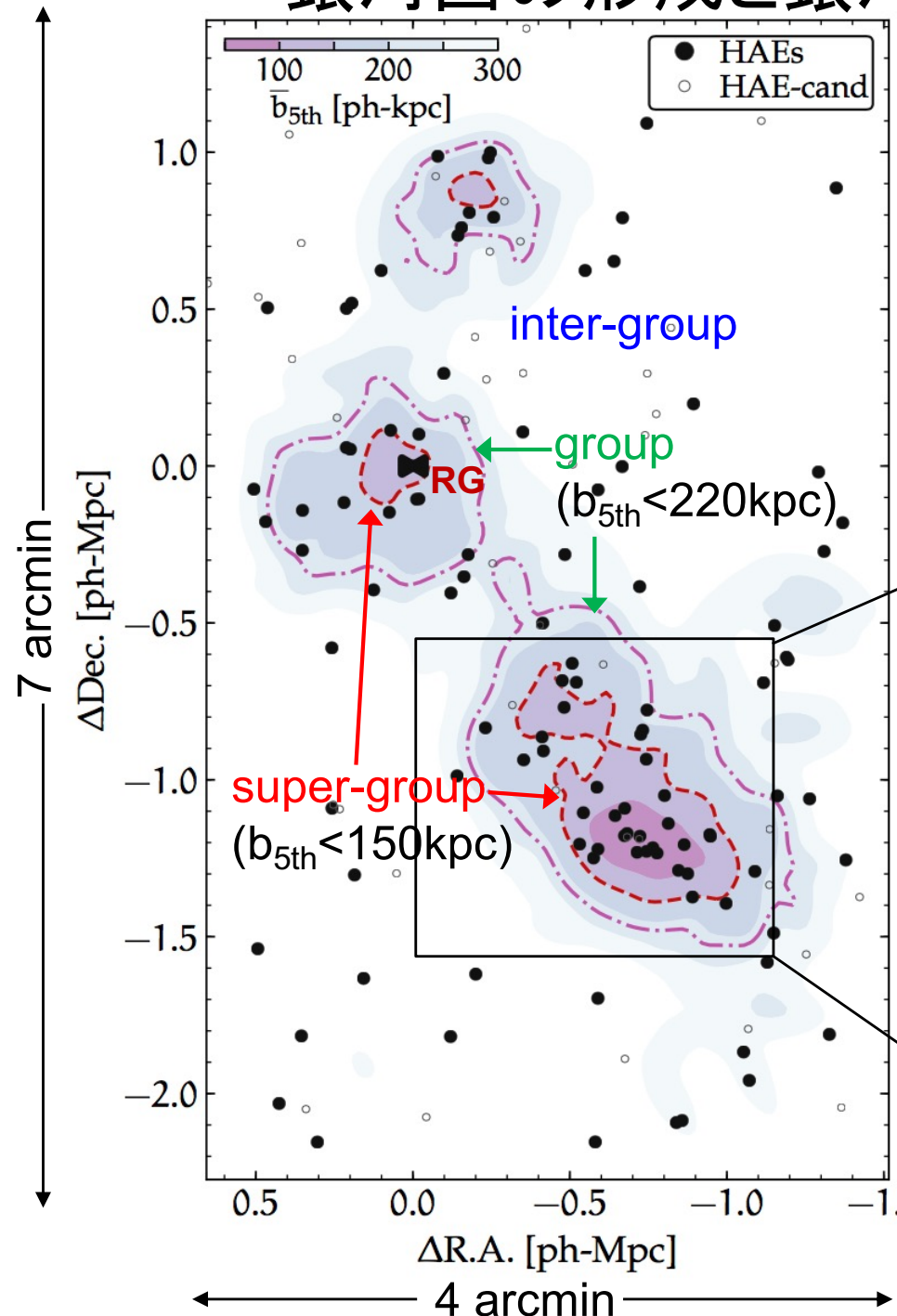
USS1558 ( $z=2.53$ )

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  $M_{\text{dyn}}=10^{14} M_{\odot}$

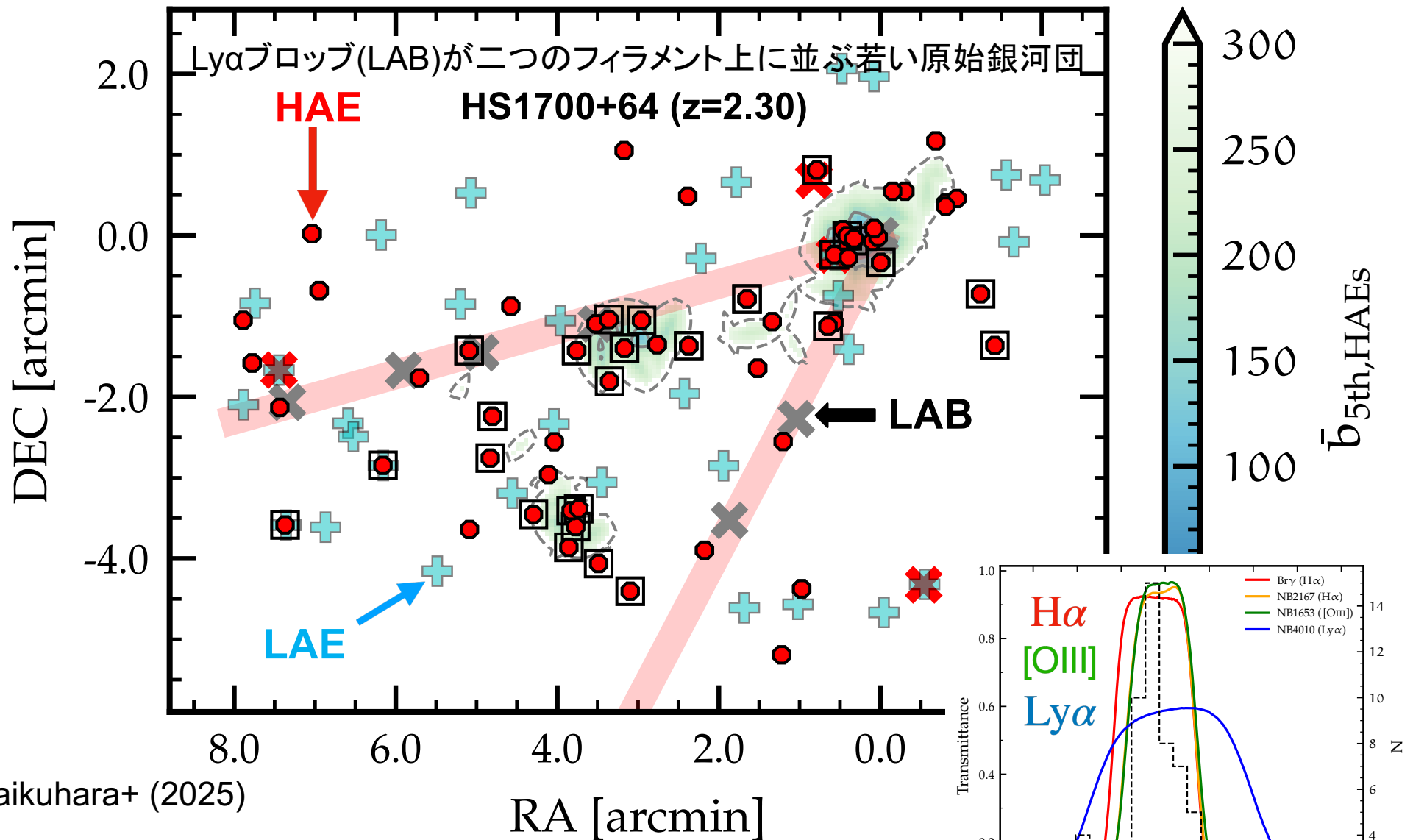


Shimakawa et al. (2017)



# HIMMEL: HI Mapping with Multiple Emission Lines

ペア狭帯域フィルターによる Ly $\alpha$ , H $\alpha$  輝線銀河探索

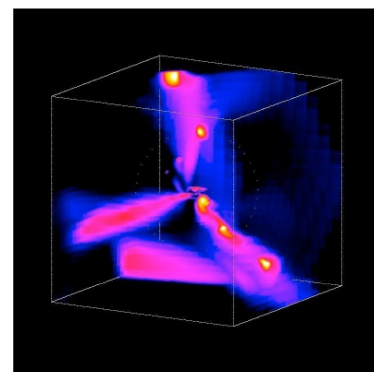
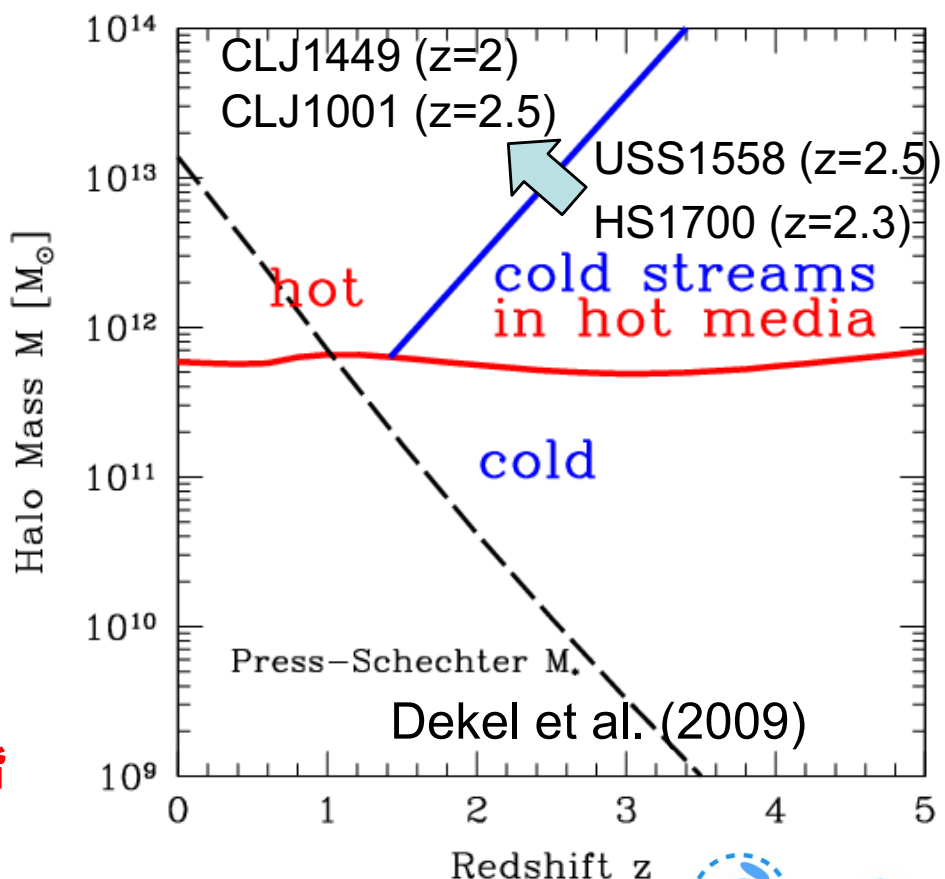
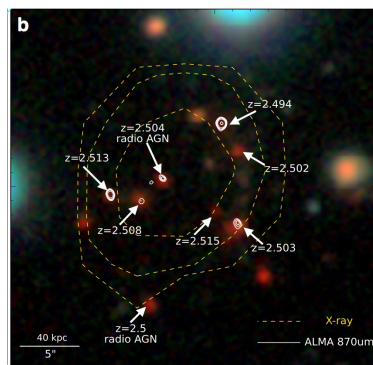


Ly $\alpha$ 輝線銀河(LAE)は原始銀河団コアとフィラメントを避けるように分布  
フィラメント上のLAEはLAB

→ 冷たい降着流によりフィラメント上とコアに中性ガス(HI)が多く存在か

# 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)



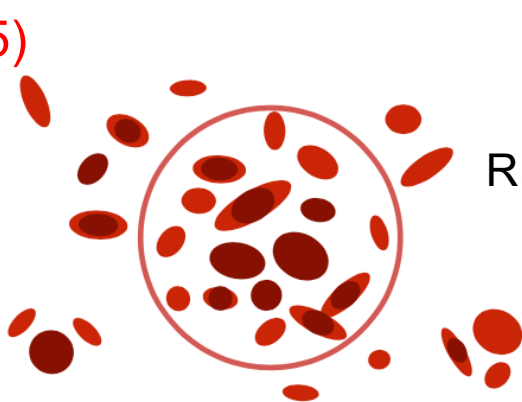
冷却非効率段階

ガス降着卓越段階

CLJ1001 ( $z=2.5$ )

CLJ1449 ( $z=2$ )

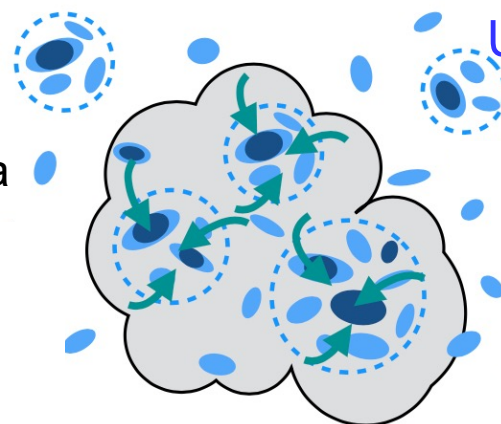
X線銀河団



USS1558 ( $z=2.5$ )

HS1700 ( $z=2.3$ )

非X線銀河団



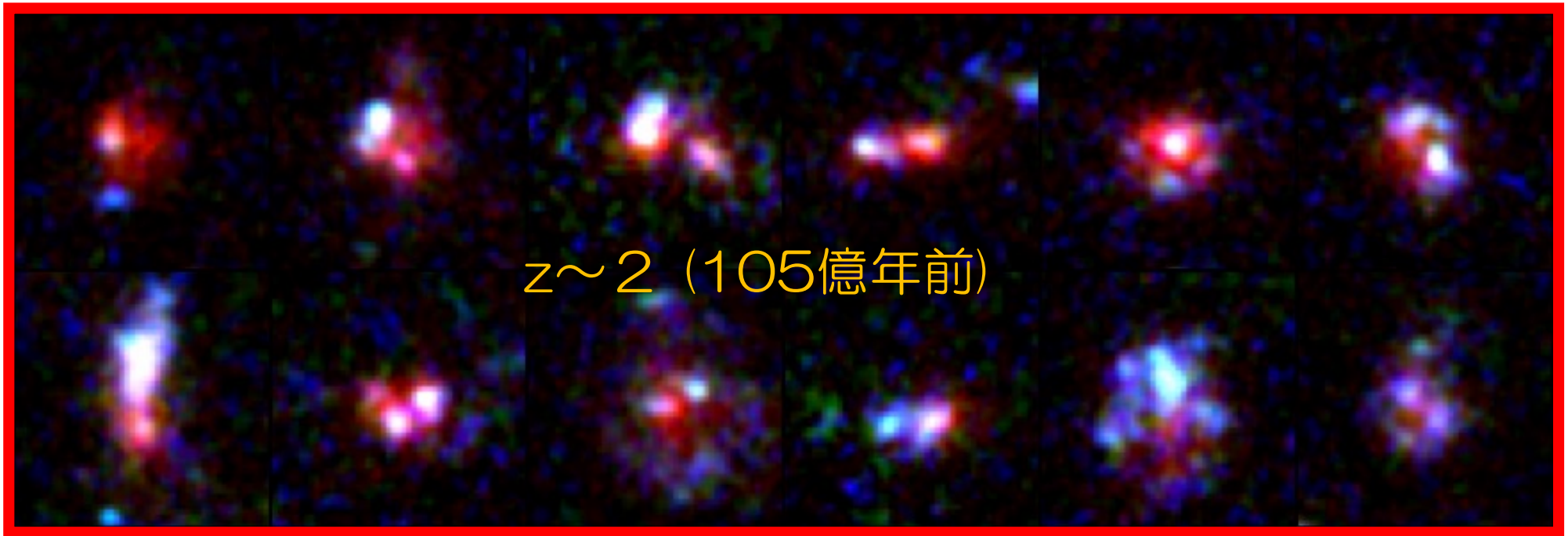
Credit:  
R. Shimakawa

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。



# 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



$z \sim 2$  (105億年前)

コンピューターの中の銀河

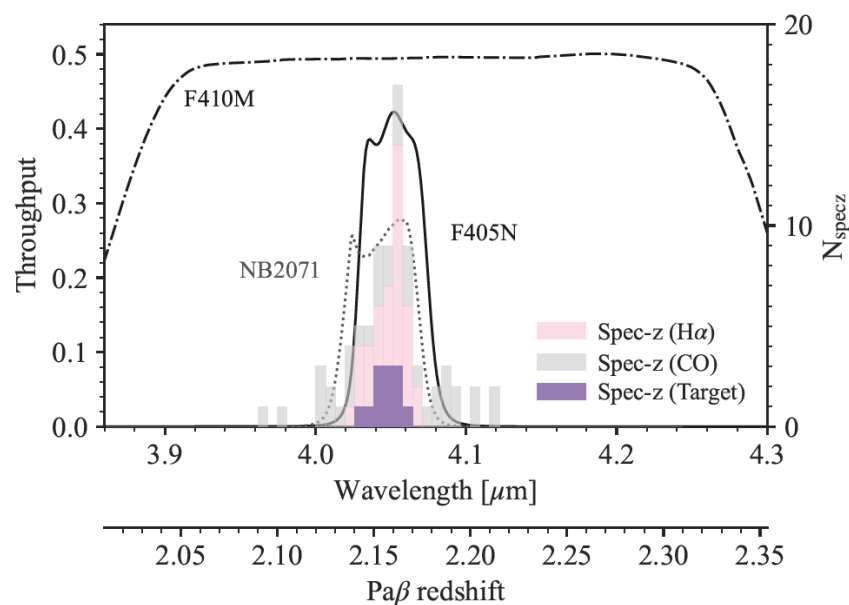


ぶつぶつに分裂しているものが多い！

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？

Tadaki, TK, et al. (2012)

# 銀河団の形成と銀河の進化(環境効果)



Normal HAEs (**SFGs**)

**X線AGNは、他の星形成銀河に比べて  
星形成領域が中心集中。フィードバック  
で外側のガスを失ったか？**

X-ray HAEs (**AGNs**)

PKS1138 (**Spiderweb**) protocluster at  $z=2.16$

110億年前の原始銀河団

(JWST cycle-1 program)

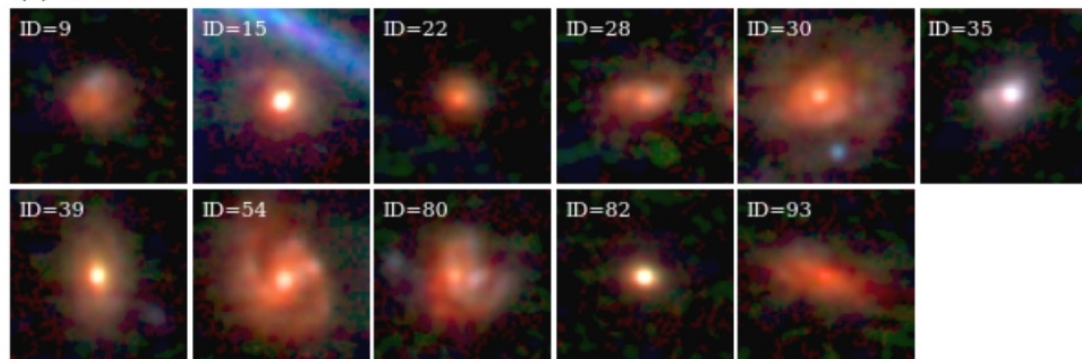
**Paβ** (rest  $1.282\mu\text{m}$ ) with F405N

**Rest-UVJ** with F115W, F182M and F410M

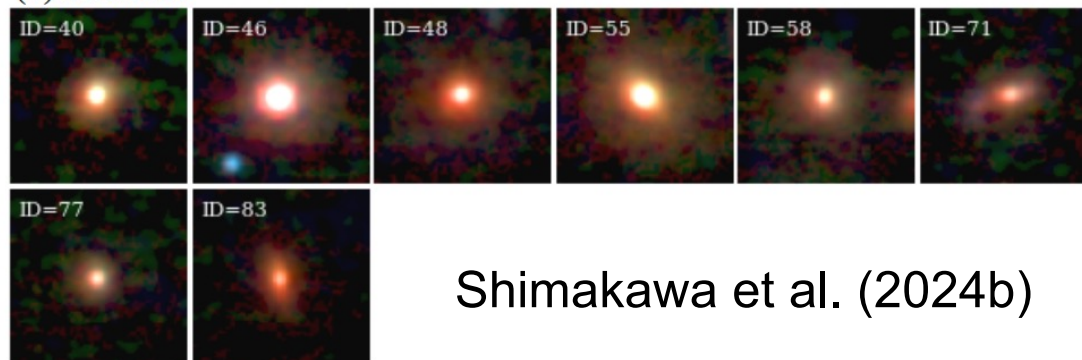
Postage stamps

(F115W, F182M, and F410M)

(a) N-HAEs

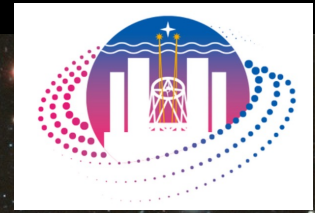


(b) X-HAEs



Shimakawa et al. (2024b)





ULTIMATE-Subaru

## 特別推進研究

究極のすばる望遠鏡へ：  
広視野補償光学による近赤外  
深探査で解明する銀河宇宙史

### チーム構成（代表者と分担者）

---

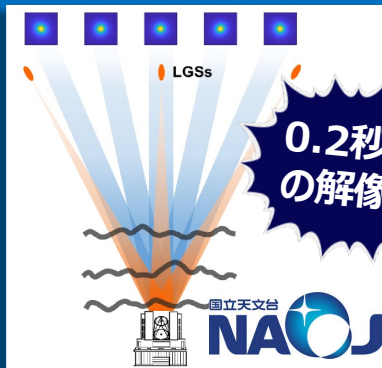
児玉 忠恭（東北大学: PI）	矢島 秀伸（筑波大学）
秋山 正幸（東北大学）	小山 佑世（国立天文台）
本原 顕太郎（国立天文台）	杉村 和幸（北海道大学）
長峯 健太郎（大阪大学）	守屋 堯（国立天文台）
井上 昭雄（早稲田大学）	久保 真理子（東北大学）
美濃和 陽典（国立天文台）	

# 究極のすばる望遠鏡へ（ULTIMATE-Subaru）

世界最大視野かつ宇宙望遠鏡並みの解像度を備えた近赤外広視野カメラ(WFI)を開発

## 広視野補償光学(GLAO)

国立天文台「すばる2」：大規模学術  
フロンティア事業 (2028年度完成予定)



0.2秒角  
の解像度

補正前

Natural Seeing

補正後

ULTIMATE (GLAO)

既に  
開発中



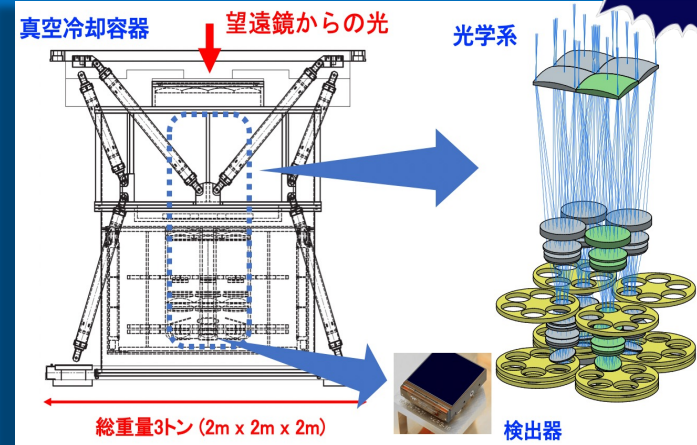
ULTIMATE  
S u b a r u



## 広視野近赤外カメラ(WFI)

視野200平方分角 (2028年度完成予定)

本研究  
で開発



Subaru/MOIRCS  
(4' x 7')



すばる現有  
近赤外カメラの**7倍**



VLT/HAWK-I  
(7.5' x 7.5')

現在世界最大視野を  
もつVLTの**約4倍**



Subaru/ULTIMATE-WFI  
(14' x 14')

@2μm

JWSTの  
20倍視野

ジェームズ・ウェッブ  
宇宙望遠鏡 (JWST)



JWST/NIRCAM  
(2 x 2.2' x 2.2')

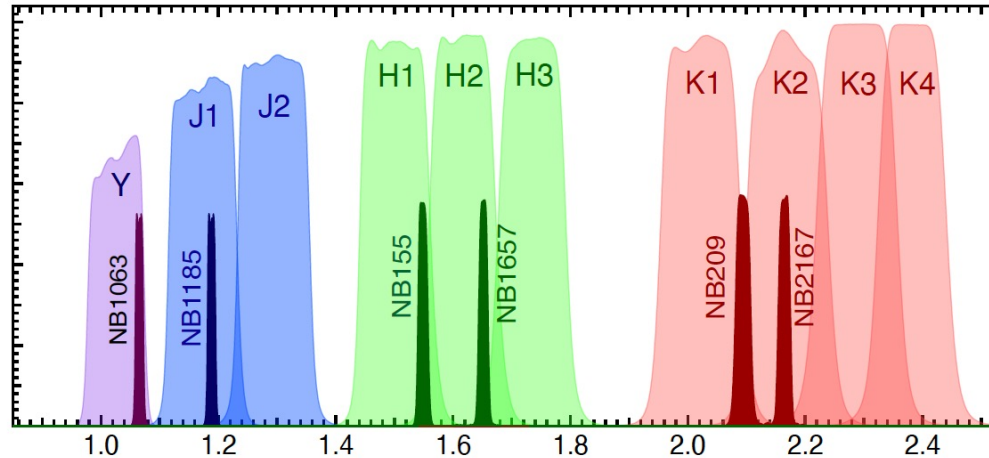
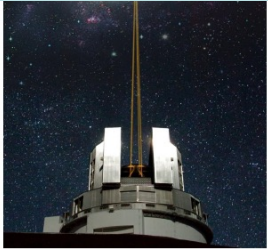


# 多彩で独創的なフィルター群、広視野宇宙望遠鏡と相補的

次世代広視野宇宙望遠鏡にはない多彩なフィルター群が、本研究の最大の特徴

## ULTIMATE WFI (Subaru)

This project

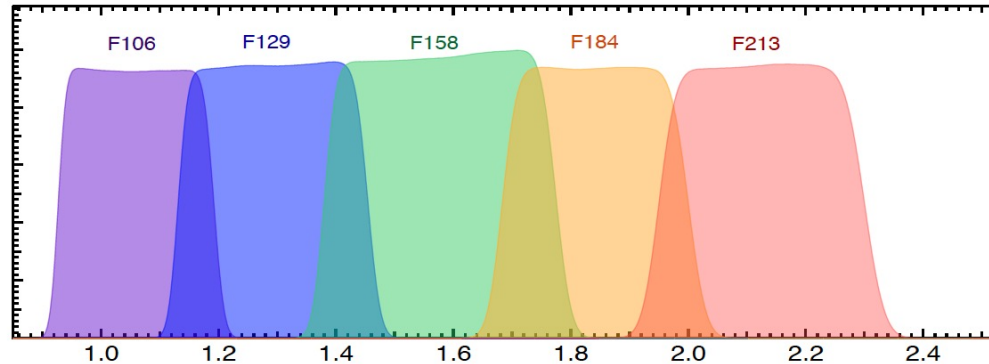
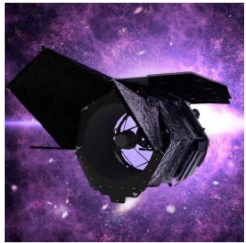


2028~  
2~20 deg<sup>2</sup>

- **Unique MBFs** (K1-K4)  
Balmer break to  $z \sim 5.4$
- **Pair NBFs** such as:  
H $\alpha$ -Ly $\alpha$  ( $z \sim 2.2$ ) (HI gas)  
H $\alpha$ -[OIII] ( $z \sim 2.3$ ) (AGN)

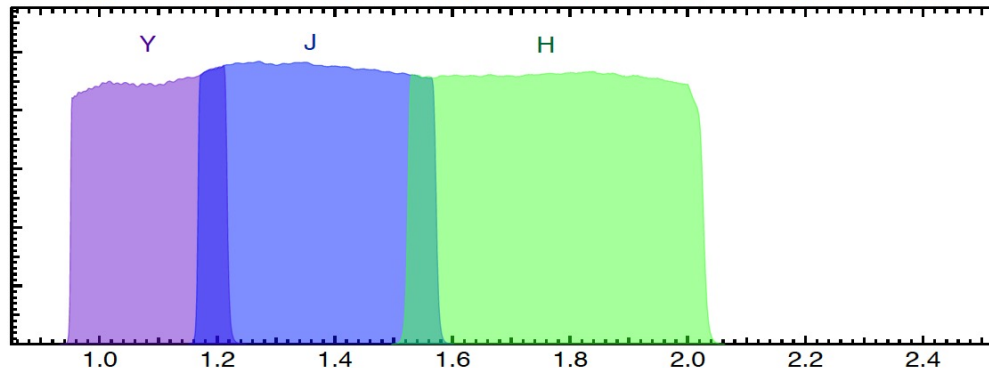
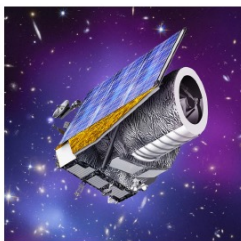
*Unique and complementary!*

## Roman



2027~  
2,000 deg<sup>2</sup>

## Euclid



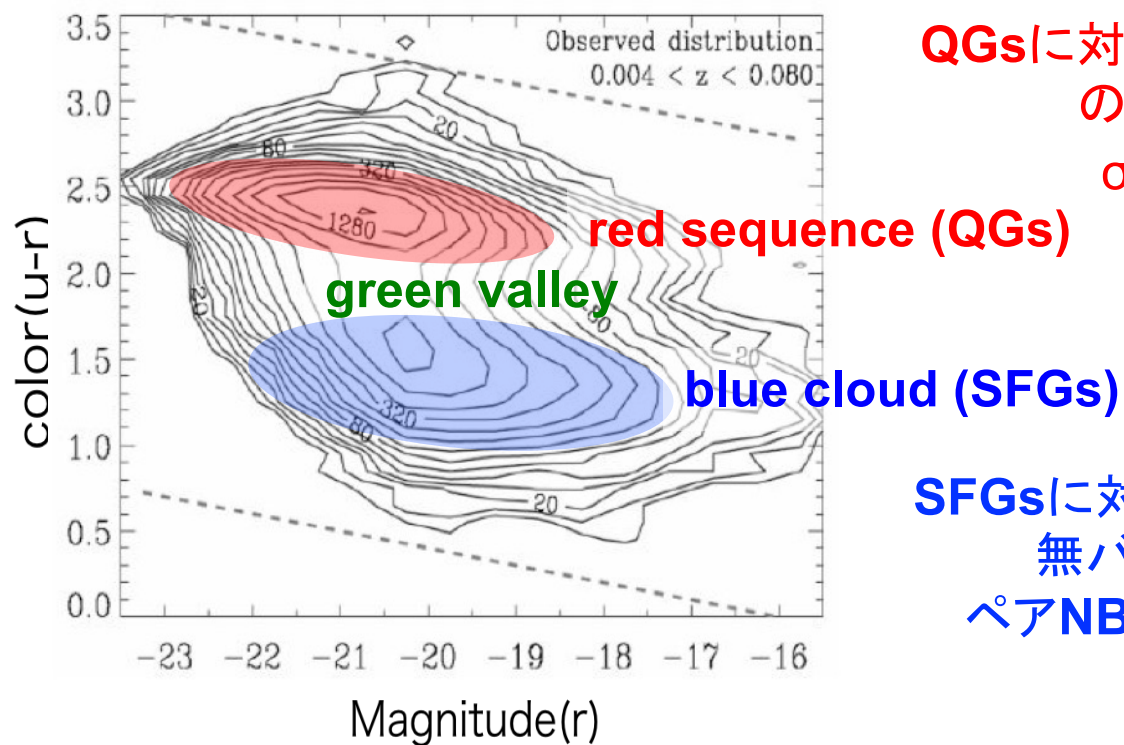
2023~  
Wide: 15,000 deg<sup>2</sup>  
Deep:  $\sim 50$  deg<sup>2</sup>

$\lambda$  [ $\mu$ m]



# ULTIMATE-Subaru

中間帯域フィルター(MBF)と狭帯域フィルター(NBF)の組み合わせ  
→ 静穏銀河(QGs)と星形成銀河(SFGs)の両方を捉えられる



QGsに対しては、MBFによる測光的赤方偏移  
の向上により、投影効果を抑制  
 $\sigma = \Delta z / (1+z) \sim 0.02$  to  $z \sim 5.3$

SFGsに対しては、NBF・MBFにより輝線銀河を  
無バイアスに捉え、投影効果もなし、  
ペアNBFにより撮像だけで輝線診断も可能



# ULTIMATE-WFIが取り組む系外銀河の主要科学テーマ

## 1. 初代銀河と宇宙再電離

WFI狭帯域フィルター撮像により、宇宙再電離期の電離バブルの成長を描き出す

初期宇宙の大規模構造  
形成論と宇宙再電離  
理論の実証

## 2. 初期の巨大質量銀河

WFI中間帯域フィルター撮像観測により、宇宙初期に稀少な成熟した重い銀河を発見する

標準のボトム・アップ  
銀河形成論とダークマ  
ターの性質への脅威

## 3. 冷たいガス降着と AGNとの共進化

WFIペア狭帯域フィルター撮像により、原始銀河団・大規模構造上  
の中性ガスやAGN活動を捉える

大規模構造に沿ったガ  
ス降着史と銀河・AGN  
の共進化の実態

## 4. 銀河内部構造の解剖

高解像度のWFI狭帯域フィル  
ター撮像により、形成途上銀河  
の内部の星形成活動を分解する

銀河の内部成長史への  
決着（インサイド・ア  
ウトかその逆か）

# 狭帯域撮像観測により宇宙再電離期の電離バブルの成長を描き出す

Time: 0.000000 (Myr)

宇宙再電離の進行 ( $z \sim 9$ )

$\Delta t = 100 \text{ Myr}$

FOREVER22 シミュレーション

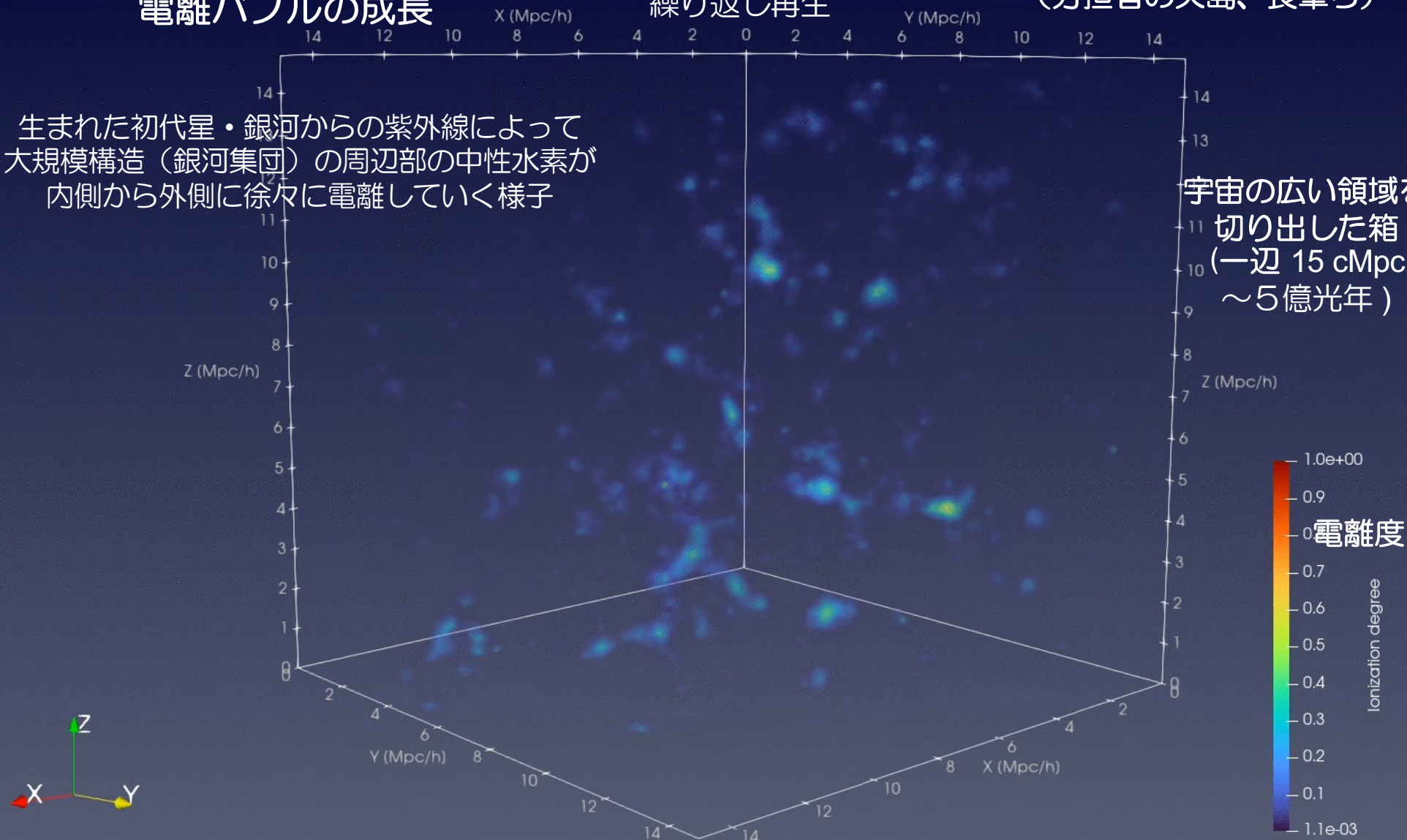
電離バブルの成長

繰り返し再生

(分担者の矢島、長峯ら)

生まれた初代星・銀河からの紫外線によって  
大規模構造（銀河集団）の周辺部の中性水素が  
内側から外側に徐々に電離していく様子

宇宙の広い領域を  
切り出した箱  
(一辺 15 cMpc  
~5億光年)



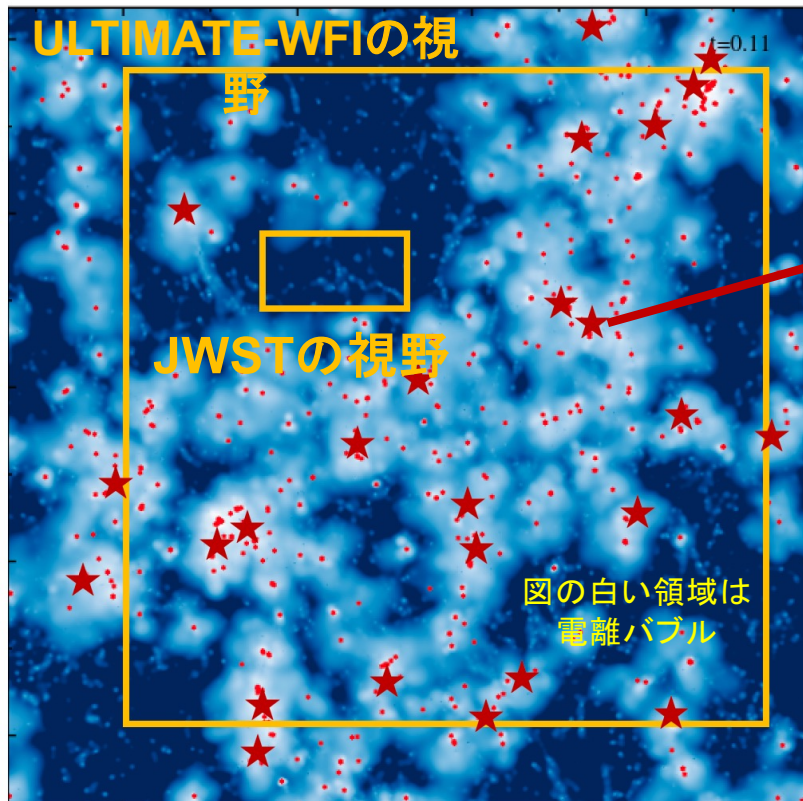


# 狭帯域撮像観測により宇宙再電離期の電離バブルの成長を描き出す

## 宇宙再電離進行の現場を実際に目撃する

銀河大規模構造に沿って、原始銀河団や周辺領域から順に電離していきバブルを形成すると理論が予想  
宇宙大規模構造に対する、Ly $\alpha$ 輝線銀河の分布から探る(電離バブルの中のものだけ見通せる)

宇宙再電離期の電離バブル(シミュレーション)  
z=8.3, 原始銀河団周辺のイメージ図

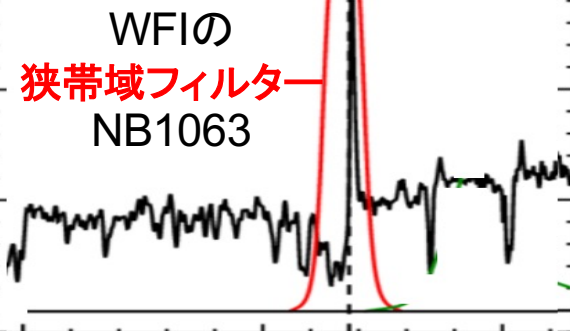


★ Ly $\alpha$ 輝線銀河(予想)・他の銀河(LBGなど)  
分担者&協力者: 長峯、矢島、杉村、福島、奥ら

WFIの狭帯域フィルター  
(NB1063, NB1185)が  
遠方宇宙(z=7.7, 8.7)の  
Ly $\alpha$ 輝線銀河を捉える

大きく赤方偏移した  
Ly $\alpha$ 輝線(z=7.7)

フラックス密度



波長 1.06 $\mu$ m

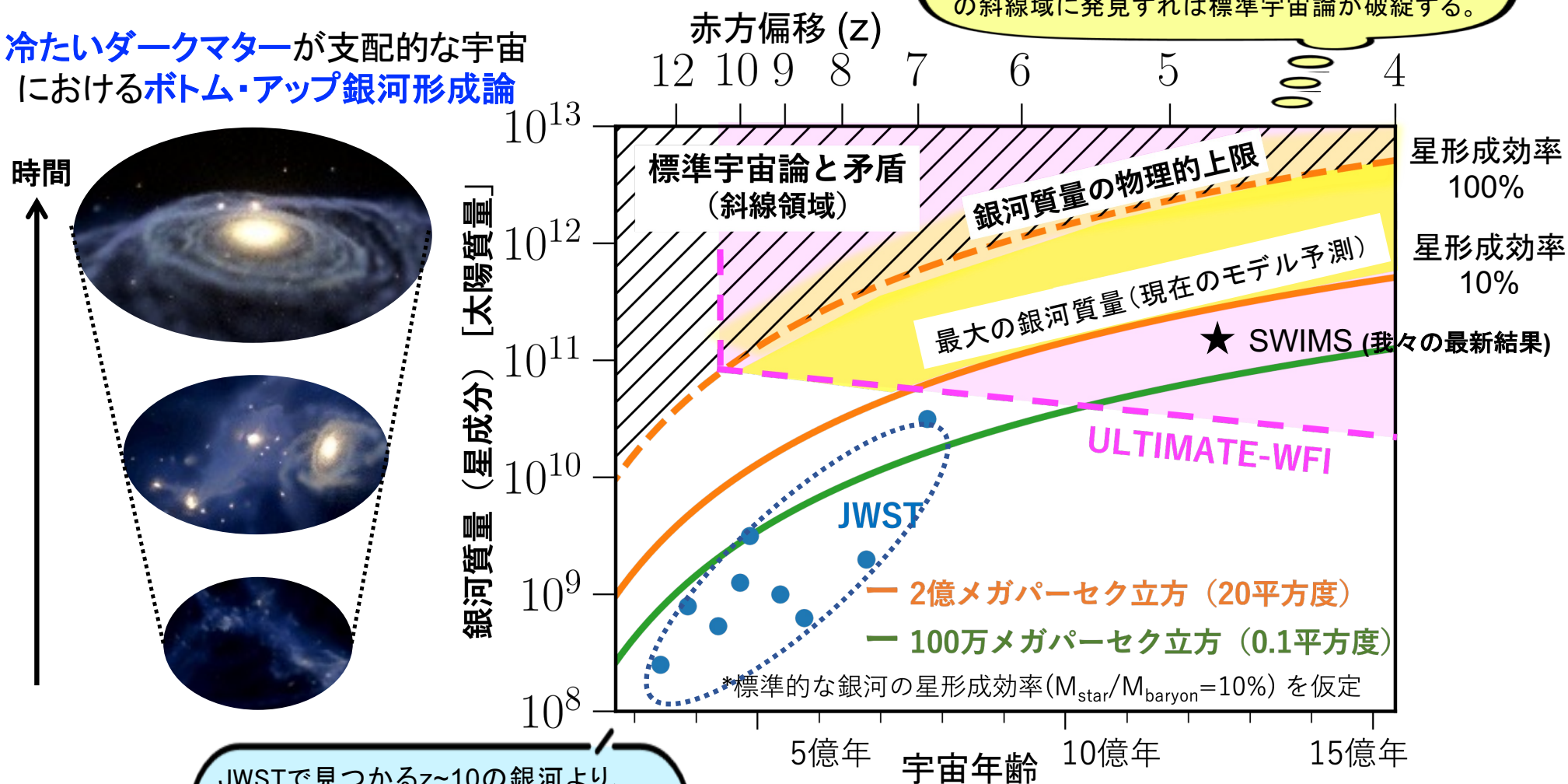
※ JWSTの狭い視野では、空間分布はわからない。  
Romanは狭帯域フィルターがないので探せない。

# 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

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

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。



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

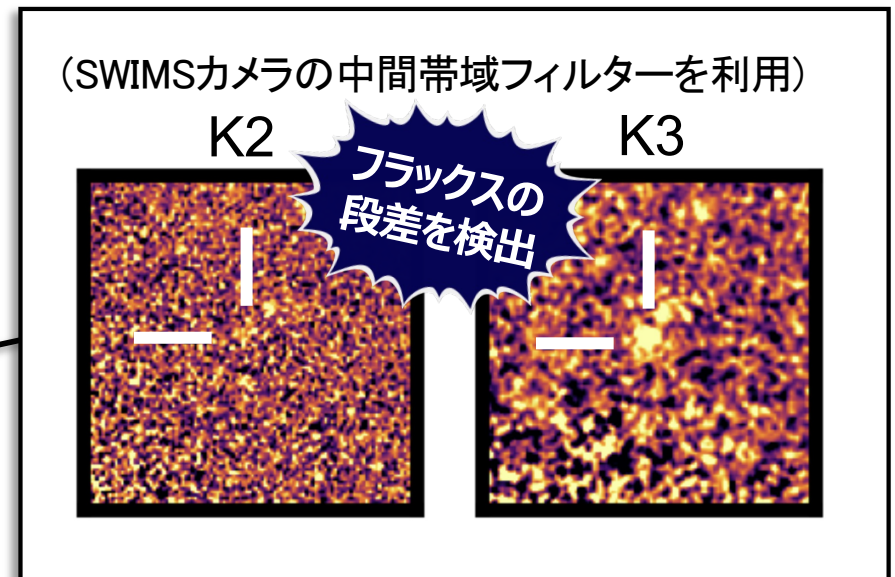
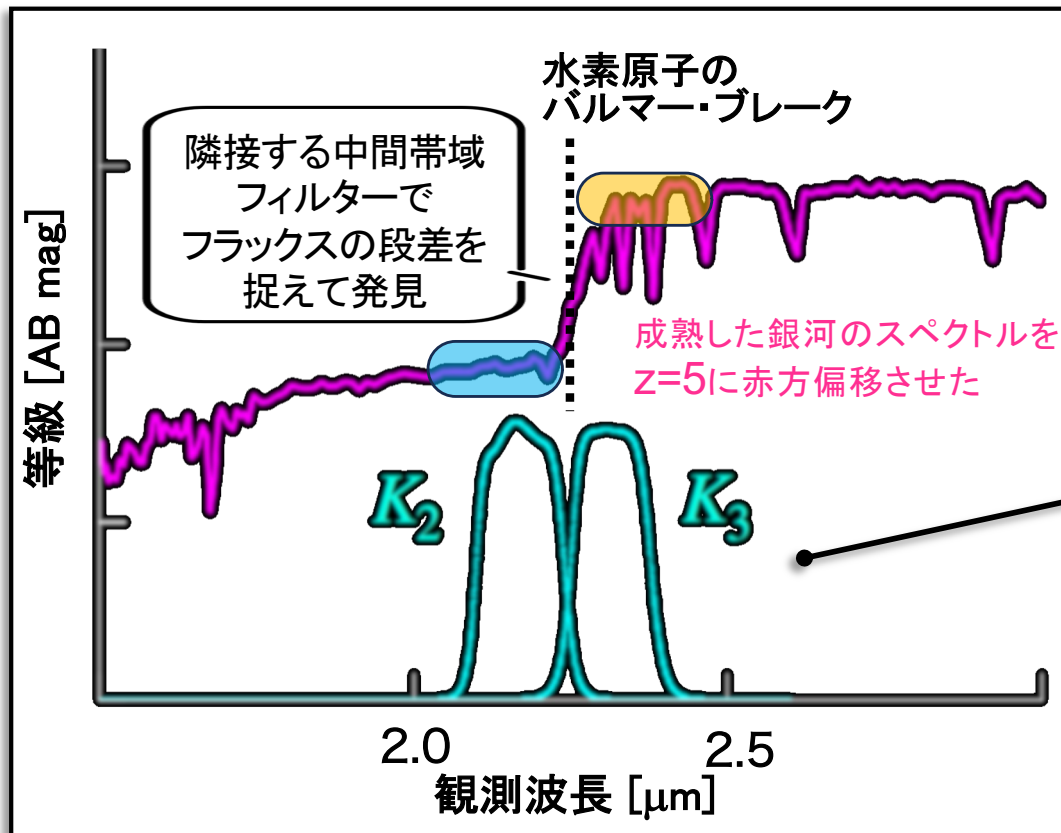
※) たとえ見つからない場合でも、銀河の質量関数を  
ボトムアップ銀河形成論と比較して定量的に検証できる



# 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！



※ 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

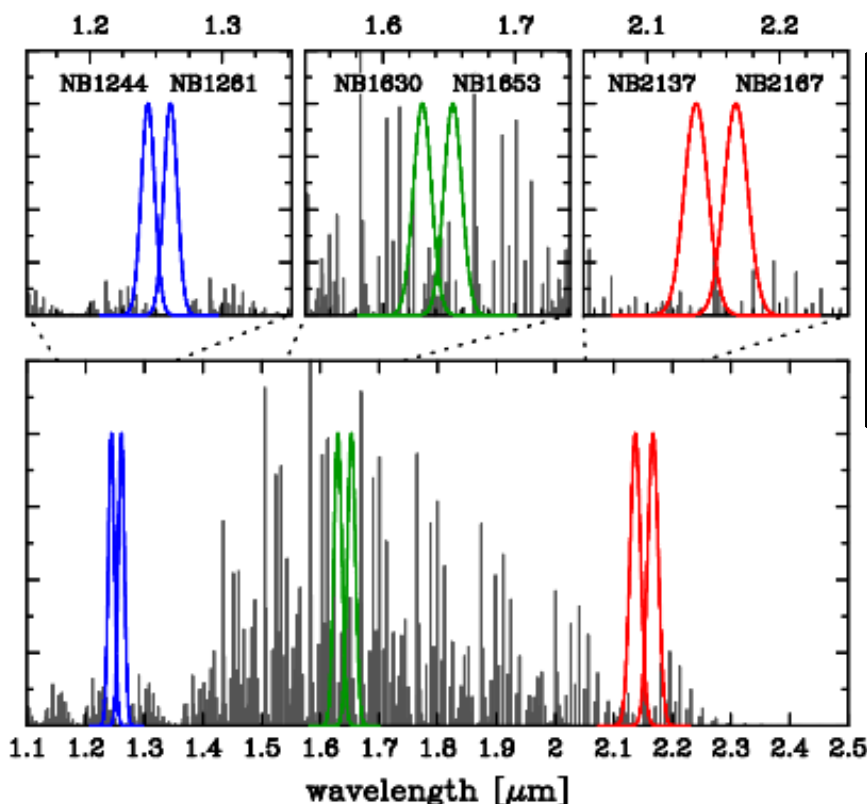
## SWIMS-18

代表：児玉

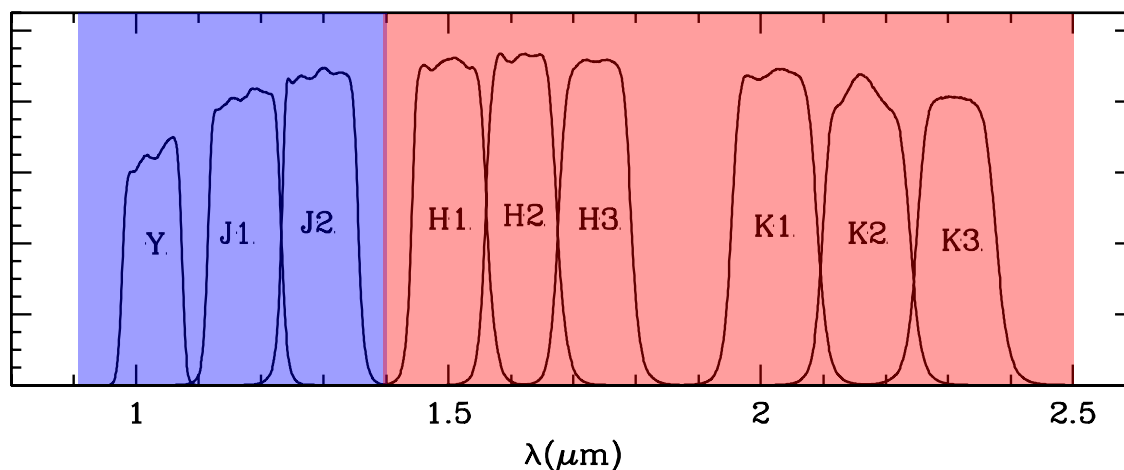
2021~2022年にすばるでパイロット観測  
2027年よりTAOで本格観測開始

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、系統的研究を行う。

4組のペアフィルター(Hα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



# 前期

銀河関係の最新結果・レビュー論文をいくつか輪読  
(Annual Review of Astronomy & Astrophysics Seriesなど)

参加者の希望により2~3個選択

(例)

- \* “Galaxy Formation and Reionization: Key Unknowns and Expected Breakthroughs by the James Webb Space Telescope” by B. Robertson
- \* “Star-Forming Galaxies at Cosmic Noon” by Forster Schreiber and Wuyts
- \* “The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe” by Heckman and Best
- \* “Theoretical Challenges in Galaxy Formation” by Naab and Ostriker
- \* “The Evolution of Galaxy Structure Over Cosmic Time” by C. Conselice
- \* “Galaxies in the First Billion Years After the Big Bang” by D. Stark
- \* “Physical Models of Galaxy Formation in a Cosmological Framework” by Somerville and Dave
- \* “The Evolution of the Star-Forming Interstellar Medium Across Cosmic Time” by Tacconi, Genzel, and Sternberg

目標: 今後銀河・銀河団の研究を始める上で、今何がわかっていて何が謎かを知る

# 後期

遠方宇宙の観測データや、宇宙論的シミュレーションデータを解析し、銀河・銀河団の形成・進化の歴史を探る。  
進捗によっては学会発表や論文執筆を目指す。

## 研究テーマの例

「すばるHSCやEuclid撮像データを用いた、原始銀河団・AGNの探査と進化史」

「すばる・TAO・JWST中間帯域撮像による、宇宙初期の大質量銀河の探査」

「すばる・TAO狭帯域撮像による、宇宙大規模構造と星形成・AGN・ガス降着史」

「すばる/MOIRCS・PFSの分光観測による、遠方銀河・AGNの形成・進化」

「すばる＋アルマデータのスペクトル・化学進化解析から探る星形成史」

など。観測データの取得状況と、本人の希望を聞きながら決定。



## 卒研テーマの例

1. Euclid撮像データを用いた、 $1 < z < 3$ の遠方銀河団の系統的探査と銀河進化
2. Euclid撮像データを用いた、遠赤外線超過原始銀河団(スターバースト銀河団)の形成
3. JWST狭帯域(F405N)撮像で構築した $z=2.2$ 原始銀河団のPa $\beta$ 輝線銀河の性質  
(銀河団内の星形成活動と、個々の銀河内の空間分解した星形成活動)
4. JWSTのCOSMOS-Webデータによる $1 < z < 6$ の宇宙大規模構造と銀河の形成・進化
5. すばる/MOIRCSの狭帯域(BrG)フィルターによる $z=3.3$ の原始銀河団の  
[OIII]輝線マッピングと、銀河団の形成・進化
6. すばる/MOIRCS狭帯域撮像による $z=4.57$ 原始銀河団の[OII]輝線マッピングと銀河団形成

## 修論(博論)テーマの例

7. TAO/SWIMSの中間帯域撮像による $z=5$ 原始銀河団と一般フィールドにおける  
大質量銀河の探査と銀河形成バイアスの研究
8. TAO/SWIMS+Subaru/HSCのトリプル狭帯域フィルター(H $\alpha$ + [OIII]+ [OII])撮像による  
 $z=1.48$ の銀河・AGNの大規模構造マッピングと銀河進化の研究
9. HSC・Euclid撮像で構築した $0.4 < z < 3$ の輝線銀河の、すばる/PFS分光による銀河進化史  
(大規模構造や銀河団・銀河群の同定と、銀河の星形成、金属量、電離状態、AGN)
10. HSC・Euclid・JWST撮像で構築した $1 < z < 3$ のポストスターバースト銀河のすばる/PFS分光  
観測から探る、星形成活動の終止(クエンチング)の物理過程
11.  $z=3.3$ 原始銀河団のHSCによるLy $\alpha$ 輝線銀河探査と中性水素分布の研究



# 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。児玉までご連絡ください。



鳥海山 in 2021