

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



児玉 忠恭（こだま ただゆき）

E-mail: 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>

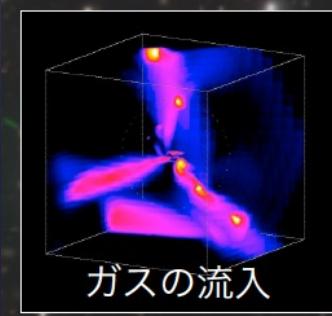
『銀河・銀河団の形成と進化の歴史、
特にその秩序と多様性の起源を、
すばる、アルマ、JWST等による最新の
観測と現象論的モデルで解き明かす』



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



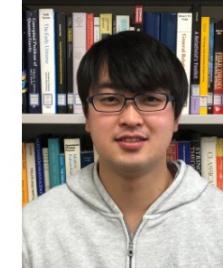
兒玉 忠恭
Tadayuki Kodama
Professor



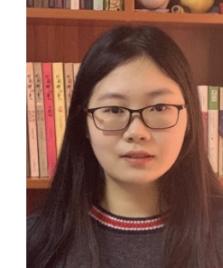
久保 真理子
Mariko Kubo
Assistant Professor



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



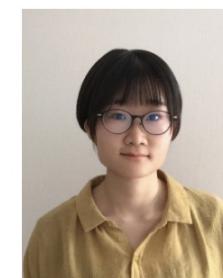
安達 孝太
Kota Adachi
D1 student



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

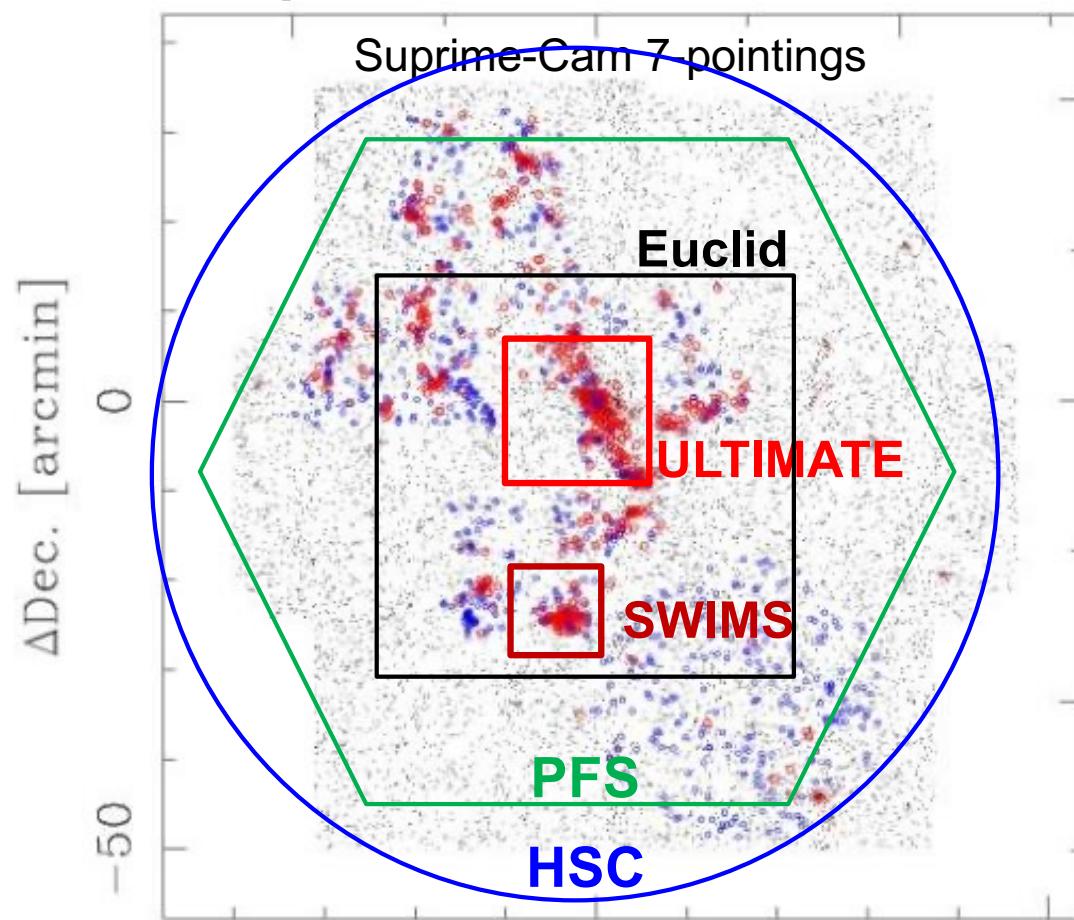
- 【銀河統計学：マクロ】 星質量限界サンプルと星形成率限界サンプルを様々な時代と環境で構築し、銀河の形成と進化を統計的に探る。
銀河解剖学へのサンプル供給。
→ PISCES, MAHALO, HSC², PFS², SWIMS-18, Euclid, ULTIMATE
- 【銀河解剖学：ミクロ】 形成途上の銀河を解剖し、銀河形成・進化を制御する物理過程を、直接かつ詳細に探る。
銀河統計学への発展。
→ HST, GANBA, ALMA, JWST, ULTIMATE, TMT

銀河宇宙大規模構造の発展

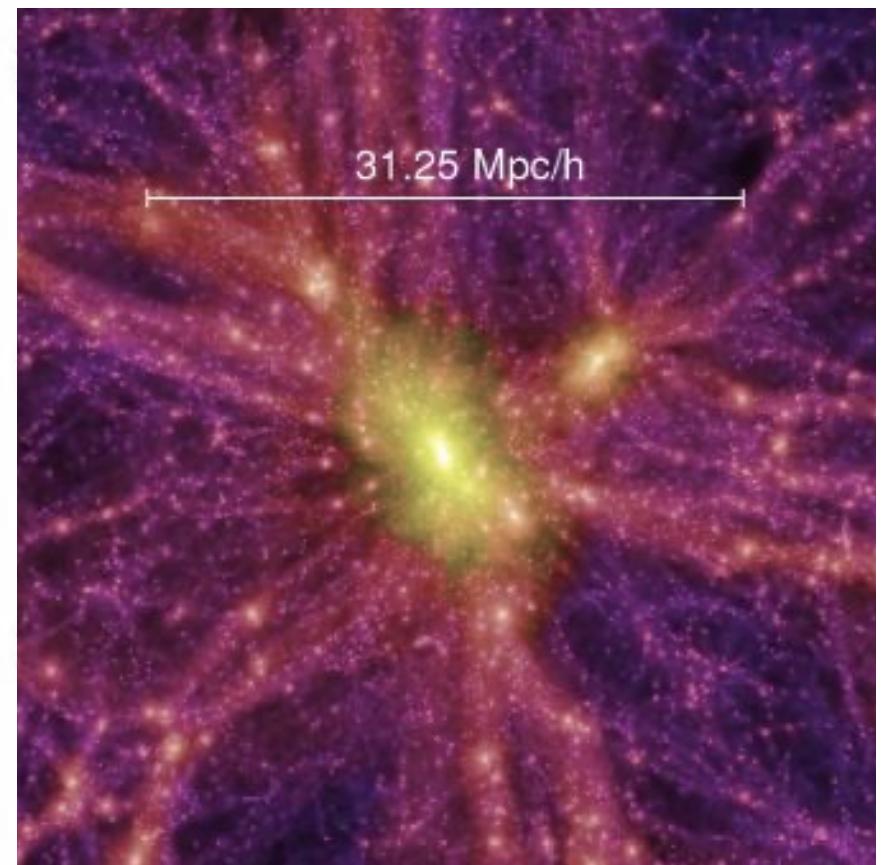
すばるHSC + PFS は、銀河団・大規模構造の研究に最適



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。

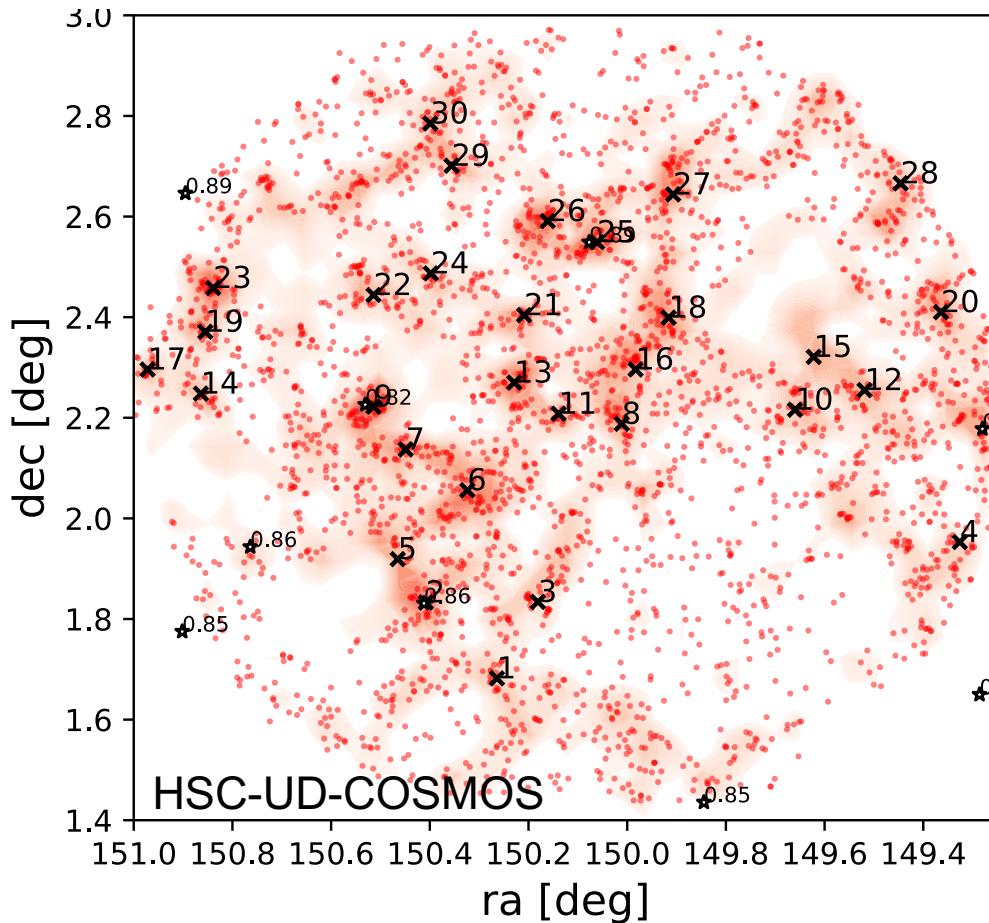
マクロ的アプローチ

銀河宇宙大規模構造の発展

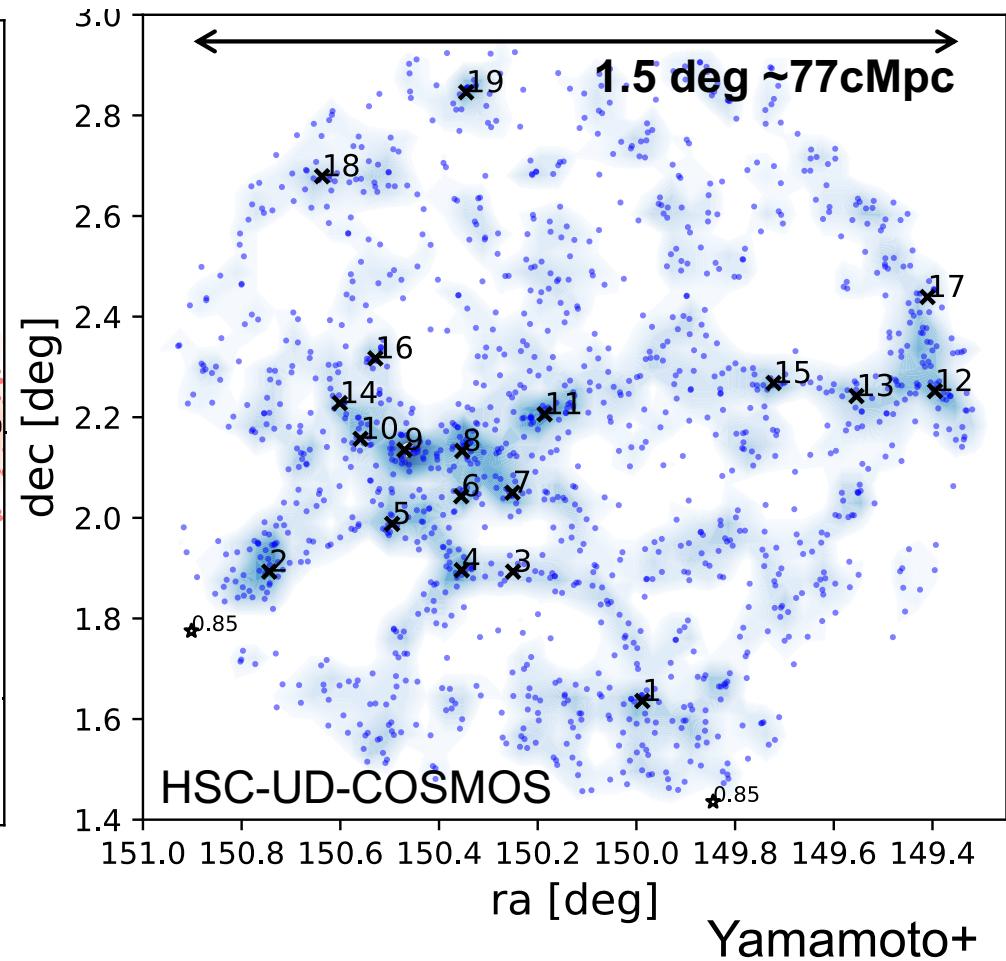
Hybrid Search for Clusters with \mathcal{HSC} (\mathbf{HSC}^2)

w/ すばるHSC

Red sequence galaxies at 0.8<z<0.9



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



大量的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 (PFS²) 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 (WISHERS; PI Oguri)

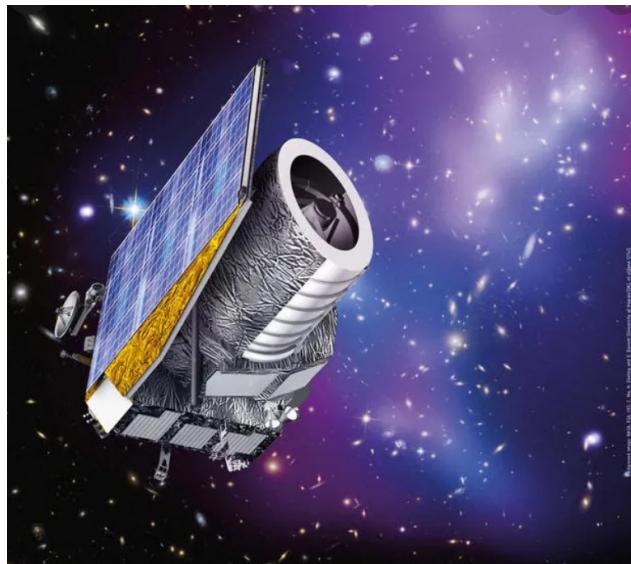
児玉は Japanese Euclid Consortium (JEC) メンバーの一員

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

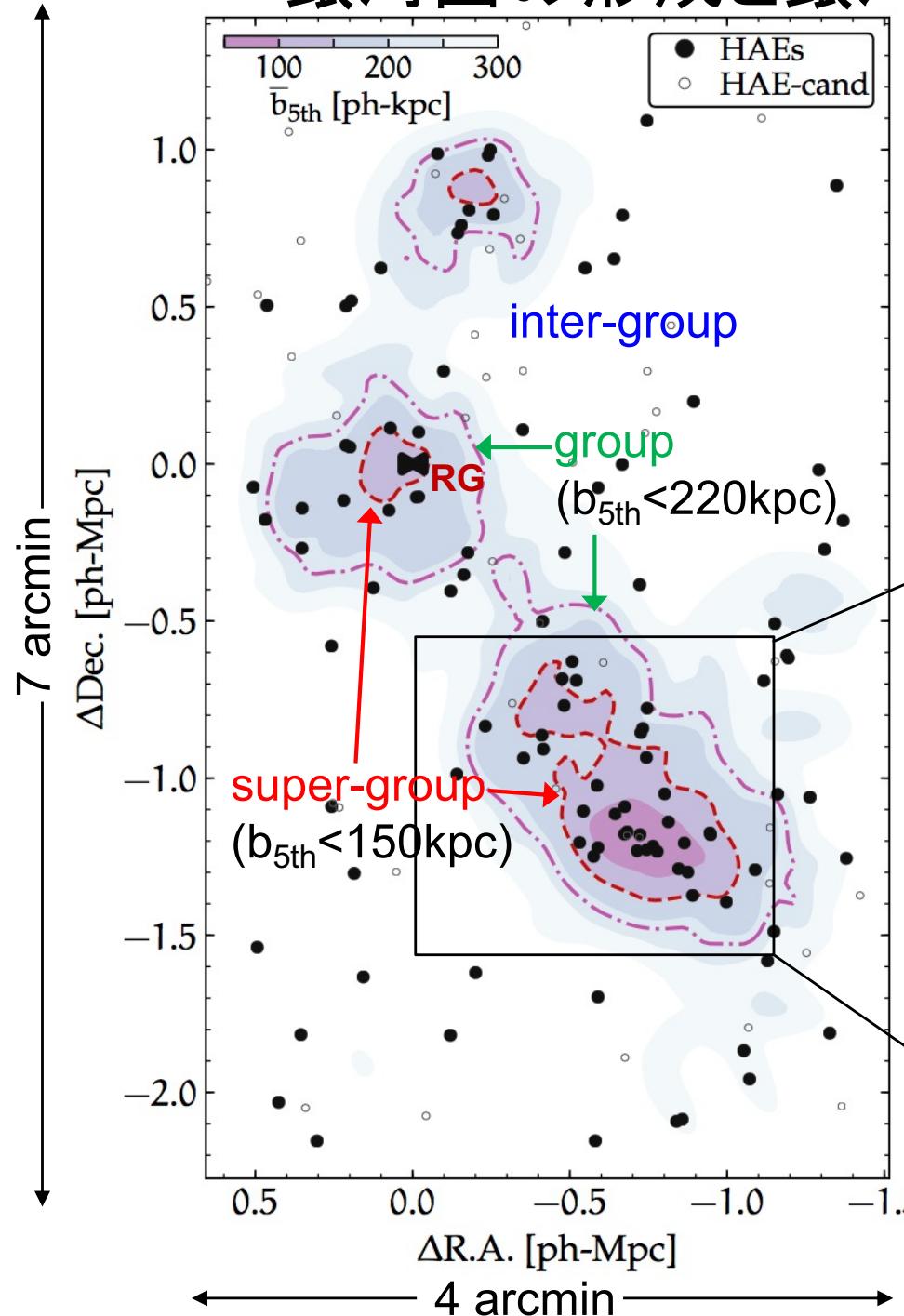
Red sequence survey + Grism emitter survey (Euclid-Deep over $\sim 50 \text{ deg}^2$)

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



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

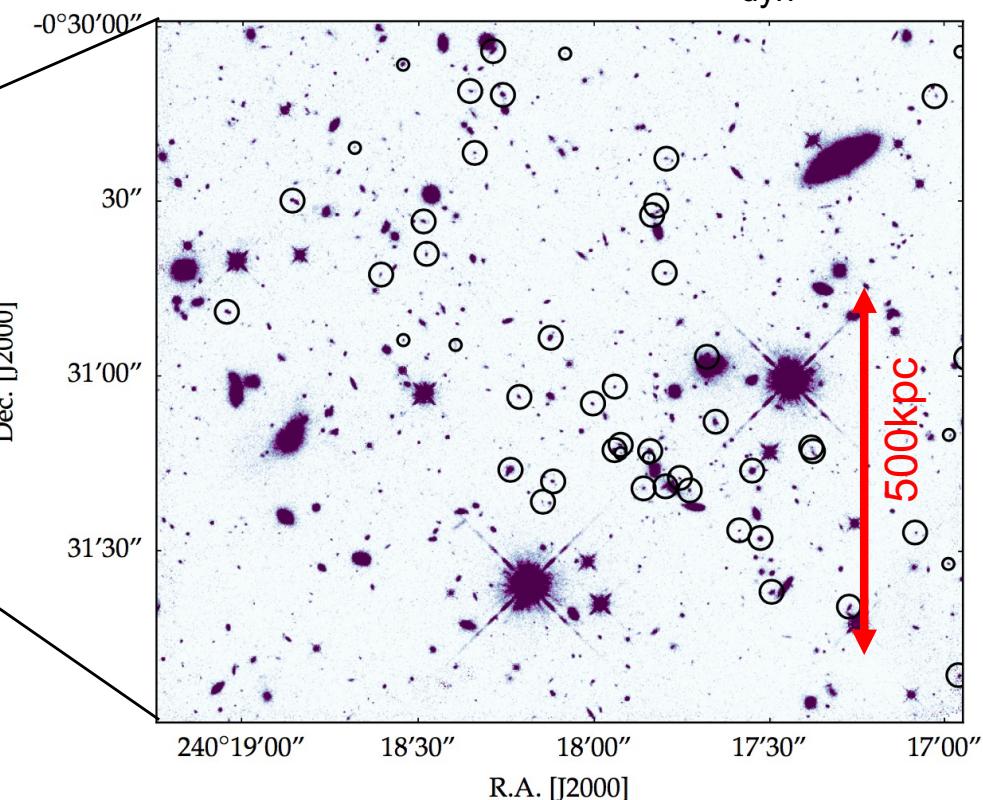
USS1558 ($z=2.53$)

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

非常に活発な星形成活動

$\text{H}\alpha$ 輝線銀河(=星形成銀河)の集団

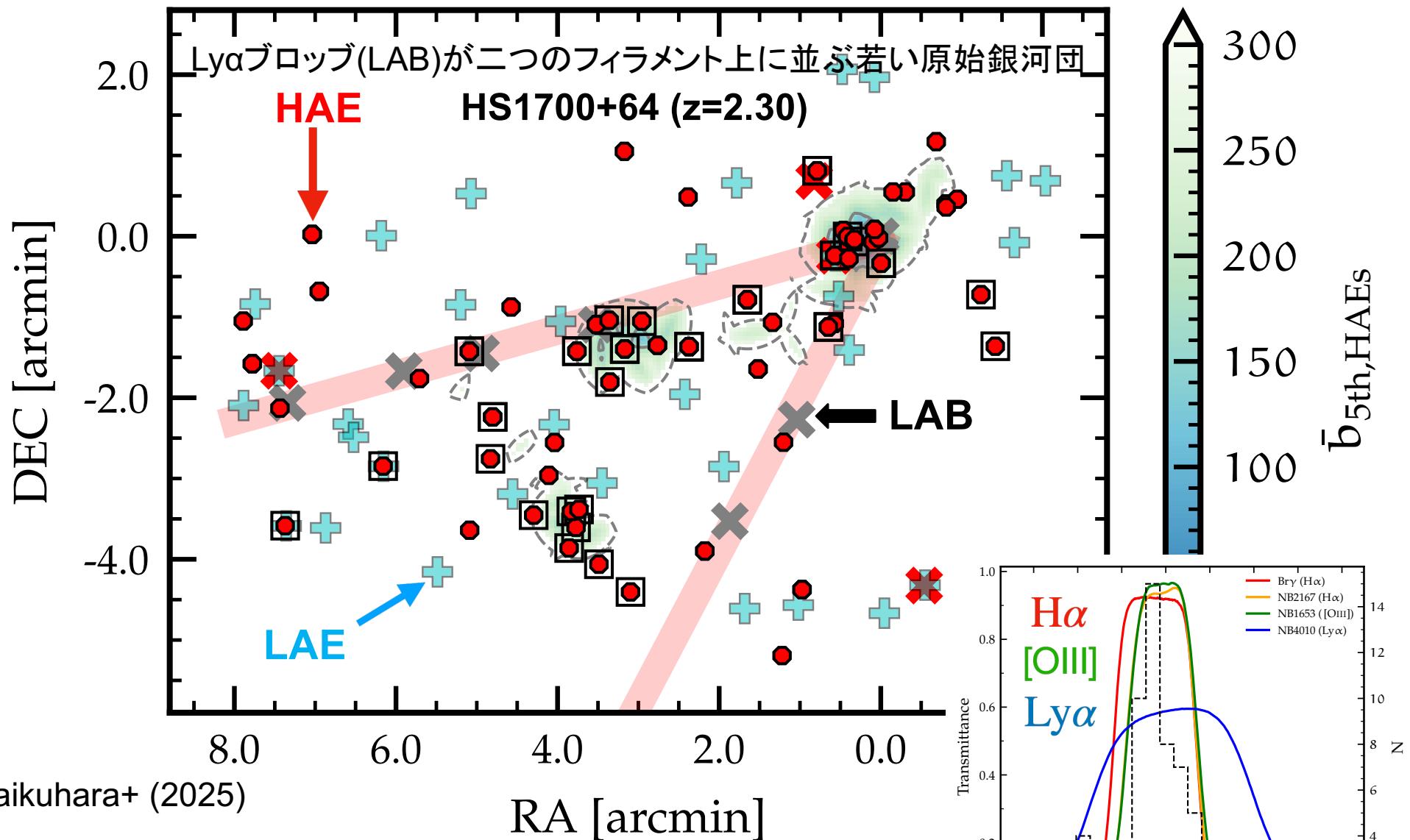
一般フィールドの20倍の密度 $M_{\text{dyn}} = 10^{14} M_{\odot}$



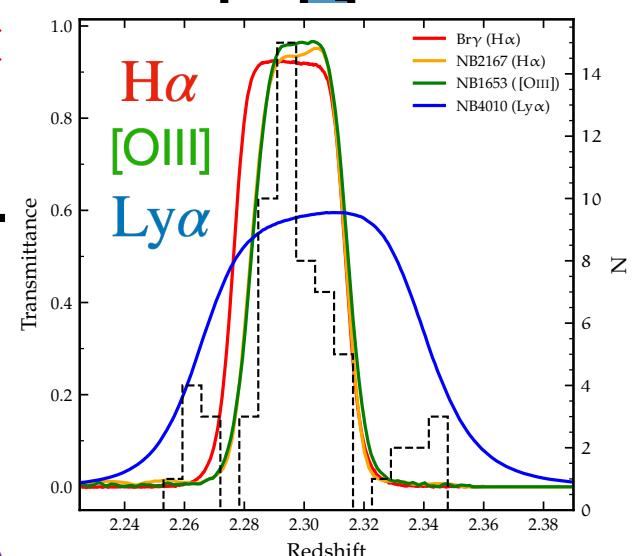
Shimakawa et al. (2017)

HIMMEL: HI Mapping with Multiple Emission Lines

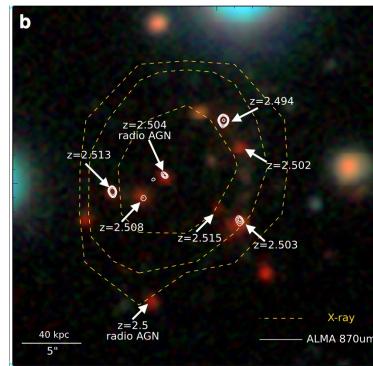
ペア狭帯域フィルターによる Ly α , H α 輝線銀河探査



Ly α 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



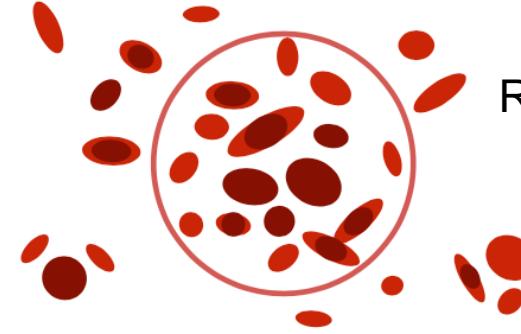
原始銀河団へのガス降着モードの切り替わり



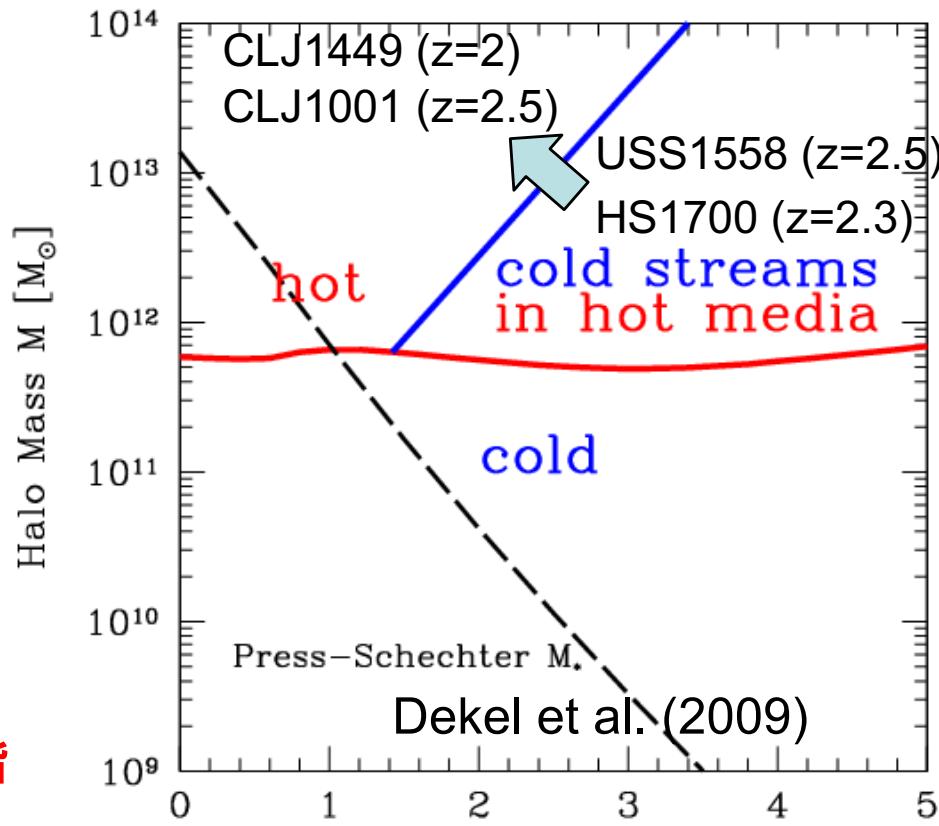
冷却非効率段階

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

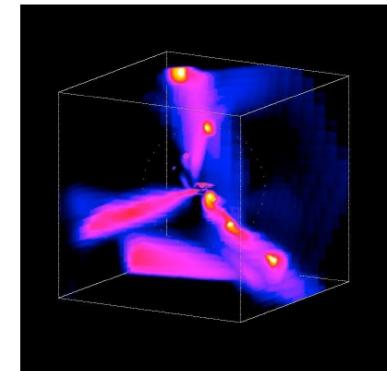
X線銀河団



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。



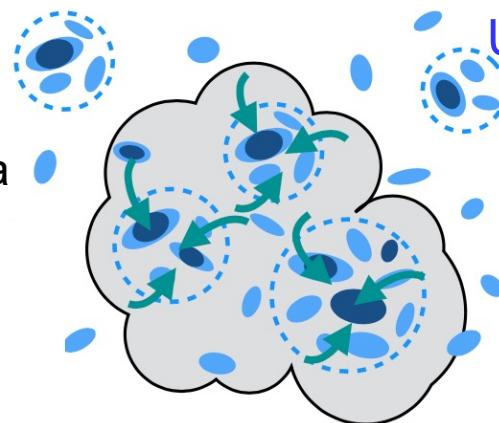
c.f., Valentino et al. (2015)



ガス降着卓越段階

Redshift z

Credit:
R. Shimakawa



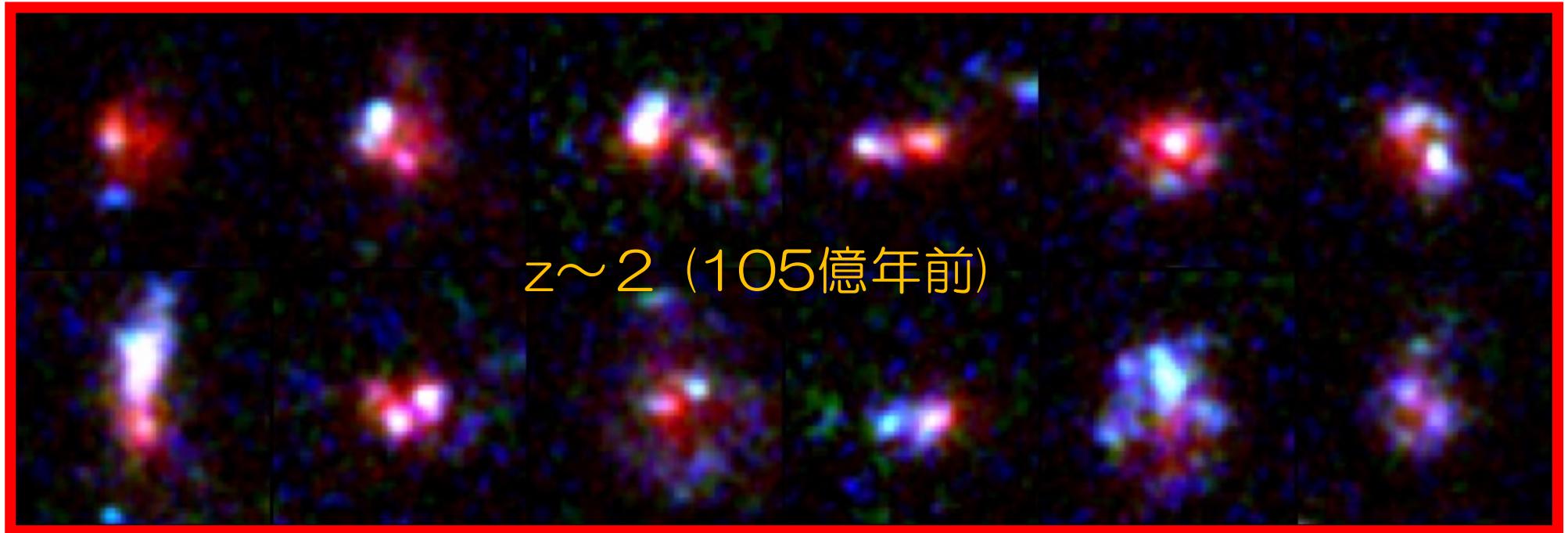
USS1558 ($z=2.5$)
HS1700 ($z=2.3$)

非X線銀河団

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。

ミクロ的アプローチ

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

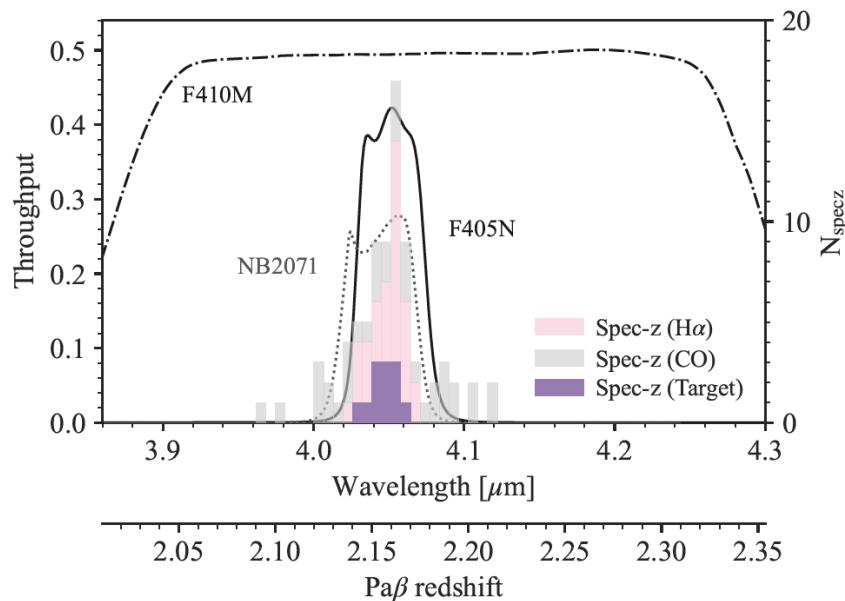


ぶつぶつに分裂しているものが多い！

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？

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 $z=2.16$

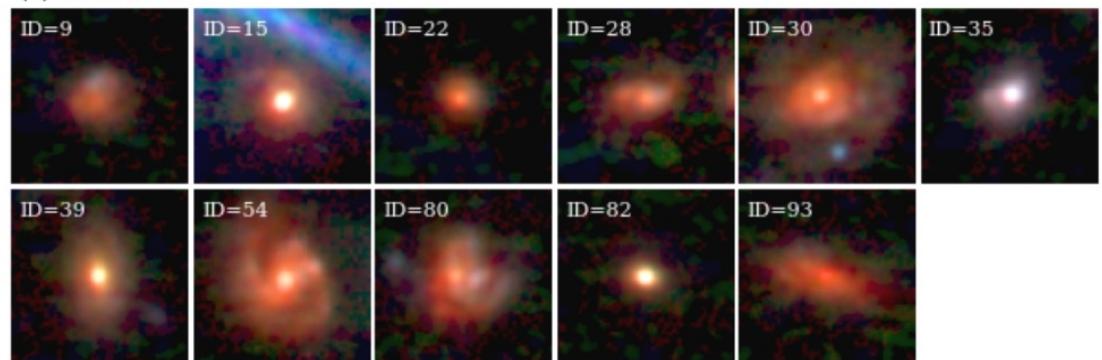
110億年前の原始銀河団

(JWST cycle-1 program)

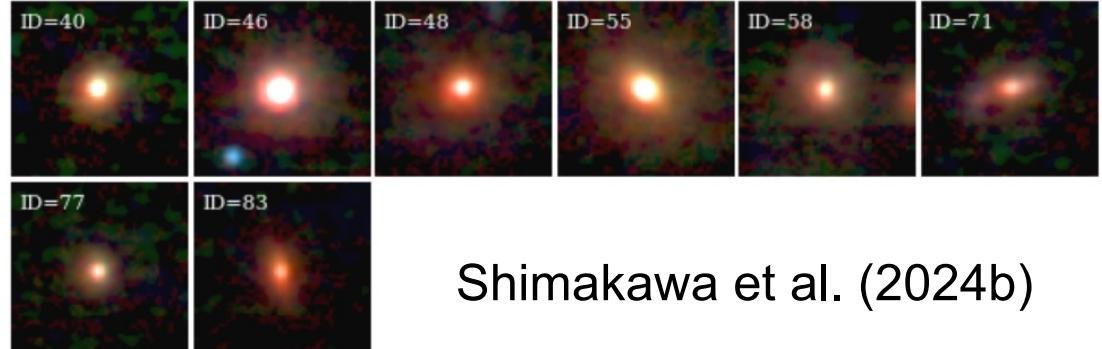
Pa β (rest $1.282\mu\text{m}$) with F405N

Rest-UVJ with F115W, F182M and F410M

Postage stamps
(F115W, F182M, and F410M)



(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 順太郎（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 基（国立天文台）

井上 昭雄（早稲田大学） 久保 真理子（東北大学）

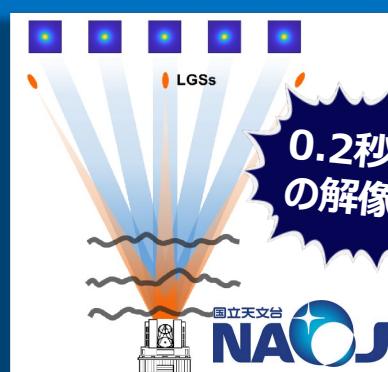
美濃和 陽典（国立天文台）

究極のすばる望遠鏡へ(ULTIMATE-Subaru)

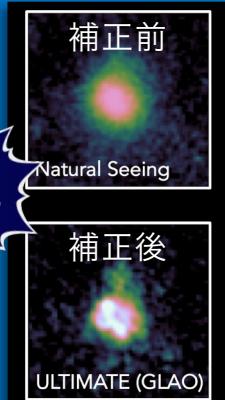
世界最大視野かつ宇宙望遠鏡並みの解像度を備えた近赤外広視野カメラ(WFI)を開発

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

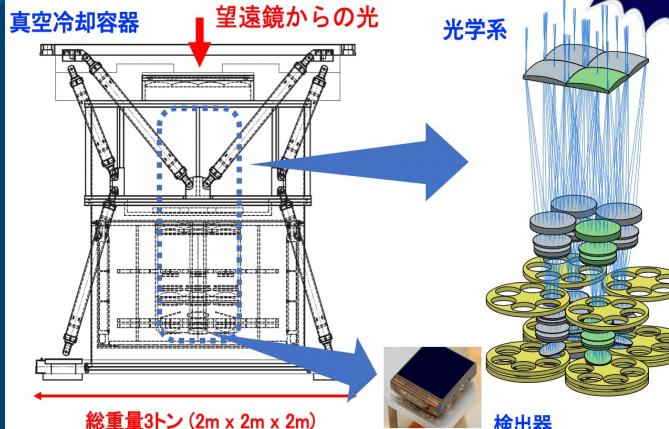


既に
開発中



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

現在世界最大視野を
もつVLTの約4倍

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



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)



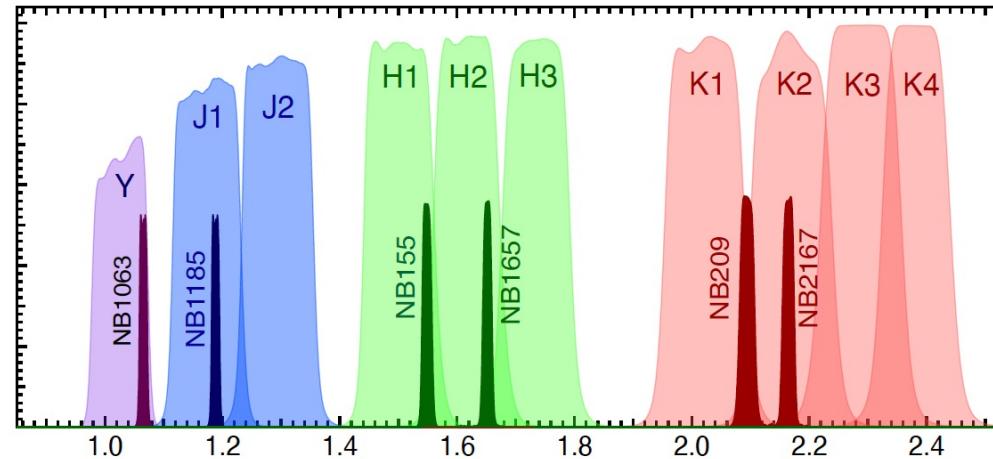
JWST/NIRCAM
(2 x 2.2' x 2.2')

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

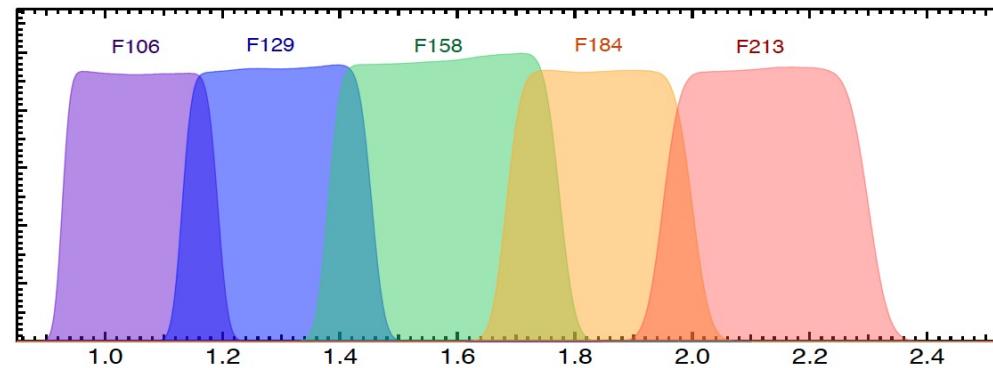
次世代広視野宇宙望遠鏡にはない多彩なフィルター群が、本研究の最大の特色

ULTIMATE WFI (Subaru)

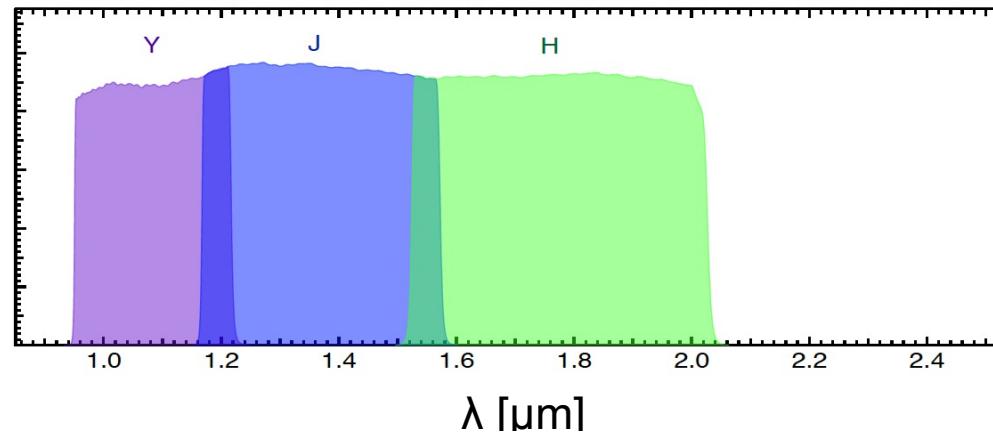
This project



Roman



Euclid



2028~
2~20 deg²

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

Unique and complementary!

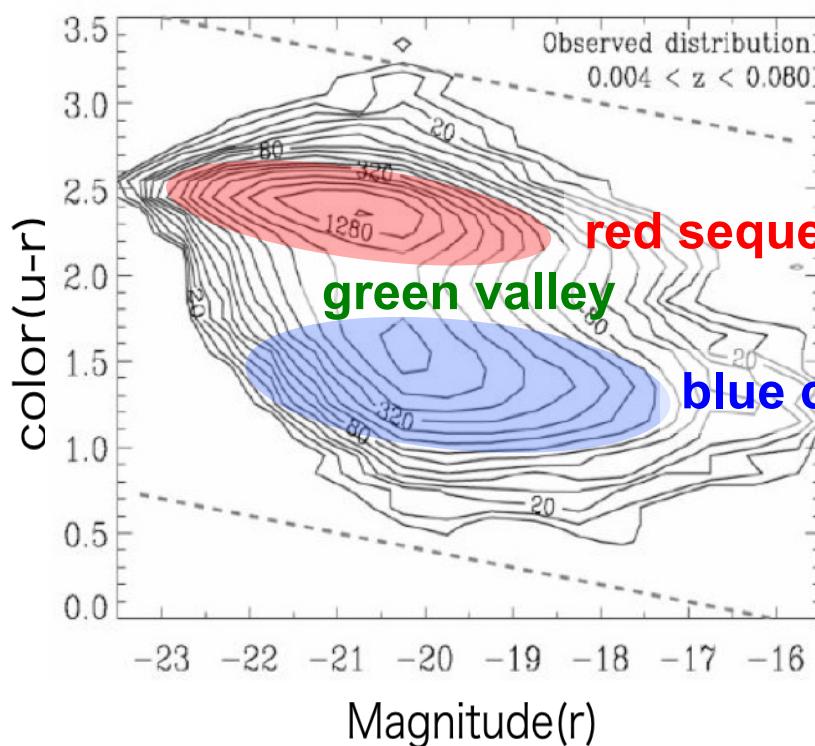
2027~
2,000 deg²

2023~
Wide: 15,000 deg²
Deep: ~50 deg²



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

$$\sigma = \Delta z / (1+z) \sim 0.02 \text{ to } z \sim 5.3$$

red sequence (QGs)

blue cloud (SFGs)

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）

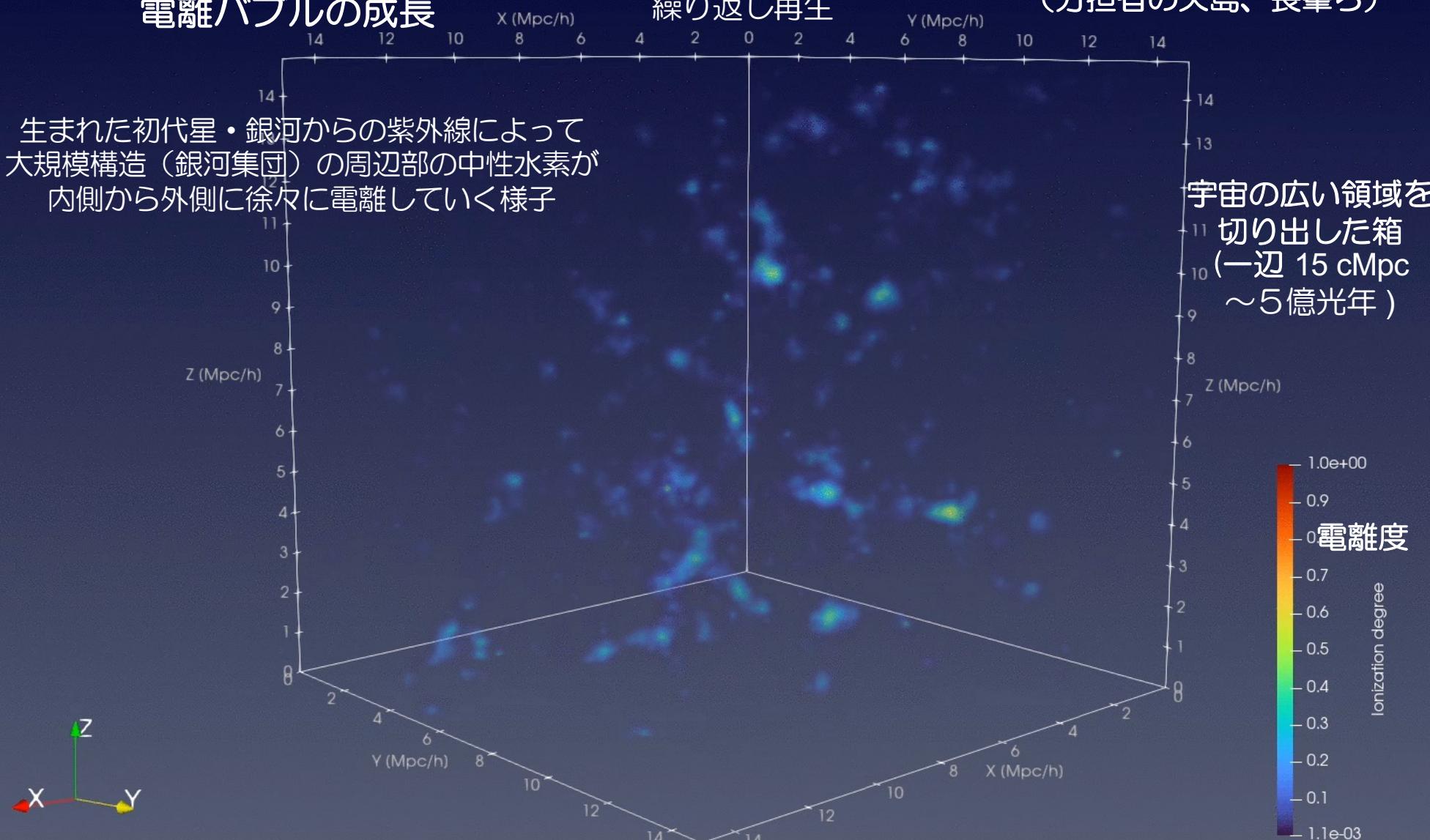
狭帯域撮像観測により宇宙再電離期の電離バブルの成長を描き出す

Time: 0.000000 (Myr)

宇宙再電離の進行 (z~9)

電離バブルの成長

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

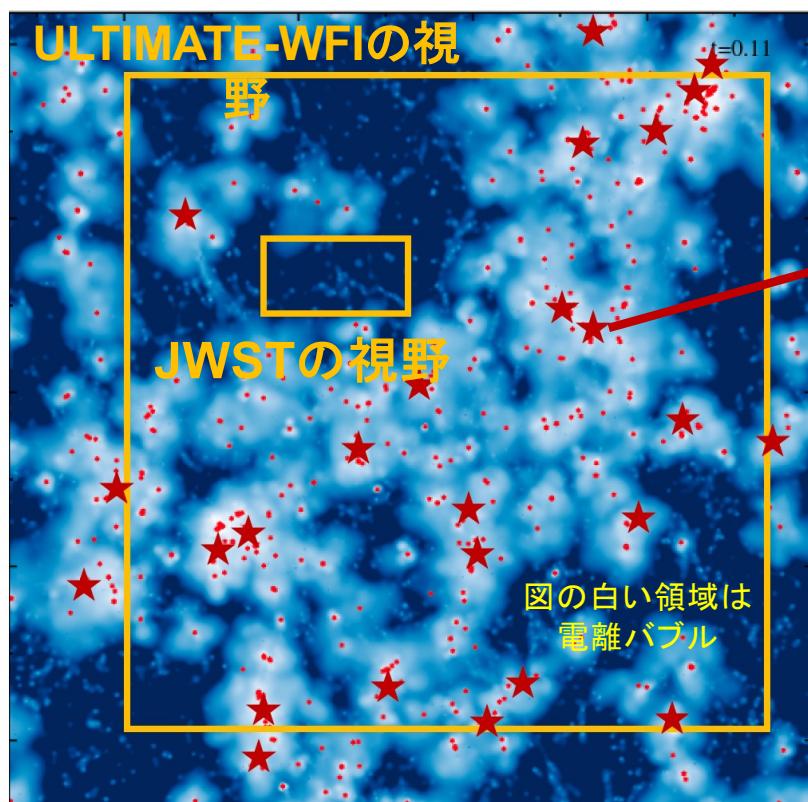


狭帯域撮像観測により宇宙再電離期の電離バブルの成長を描き出す

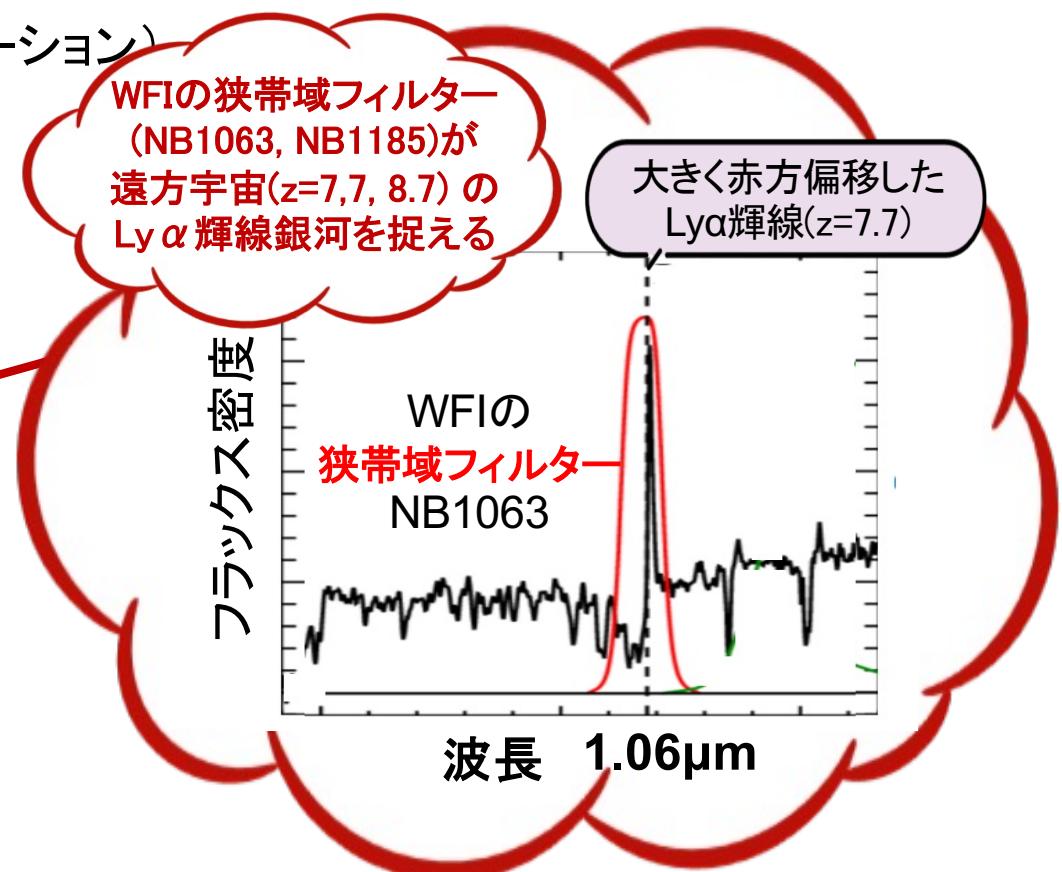
宇宙再電離進行の現場を実際に目撃する

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 α 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

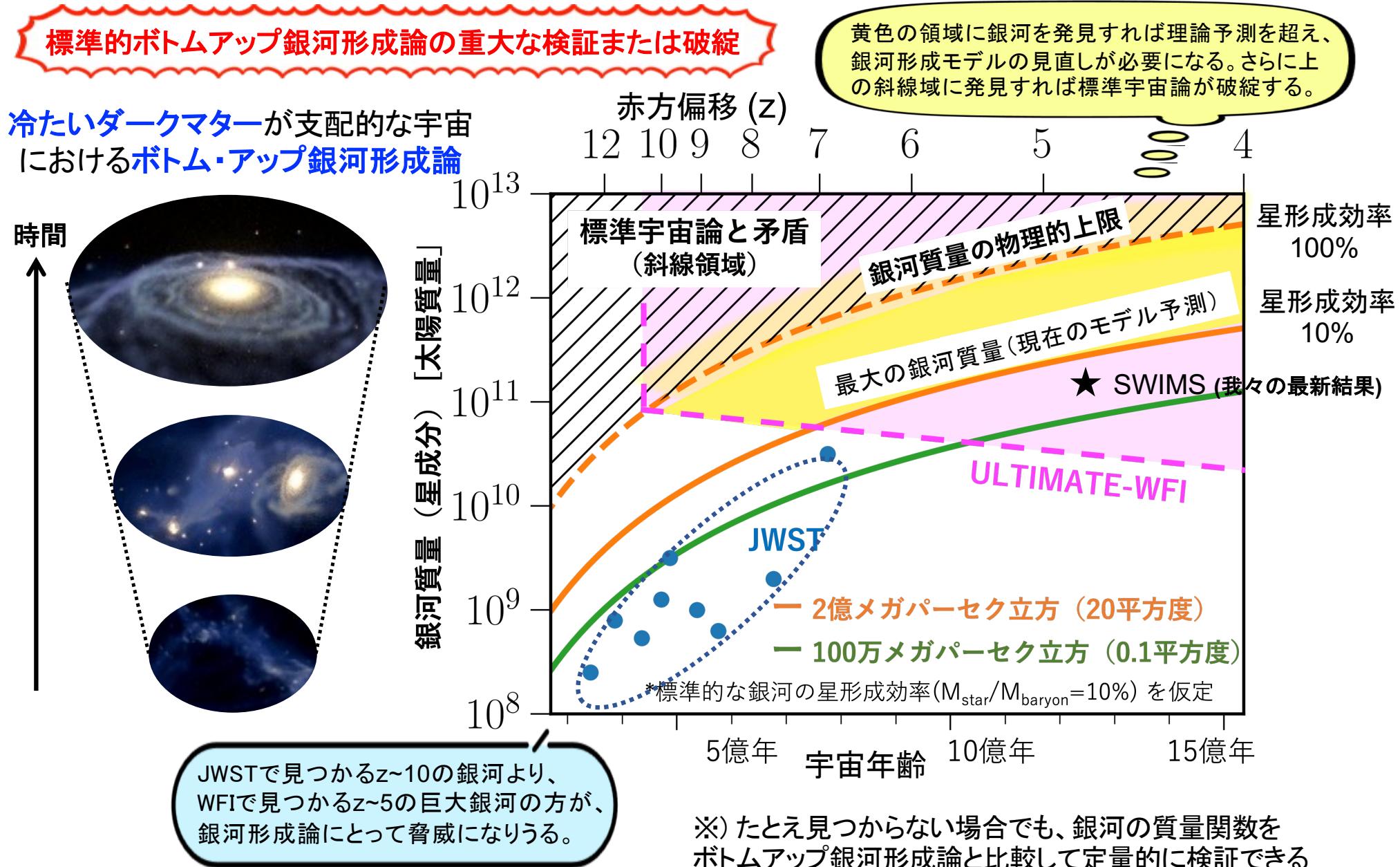


分担者 & 協力者: 長峯、矢島、杉村、福島、奥ら



※ 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。

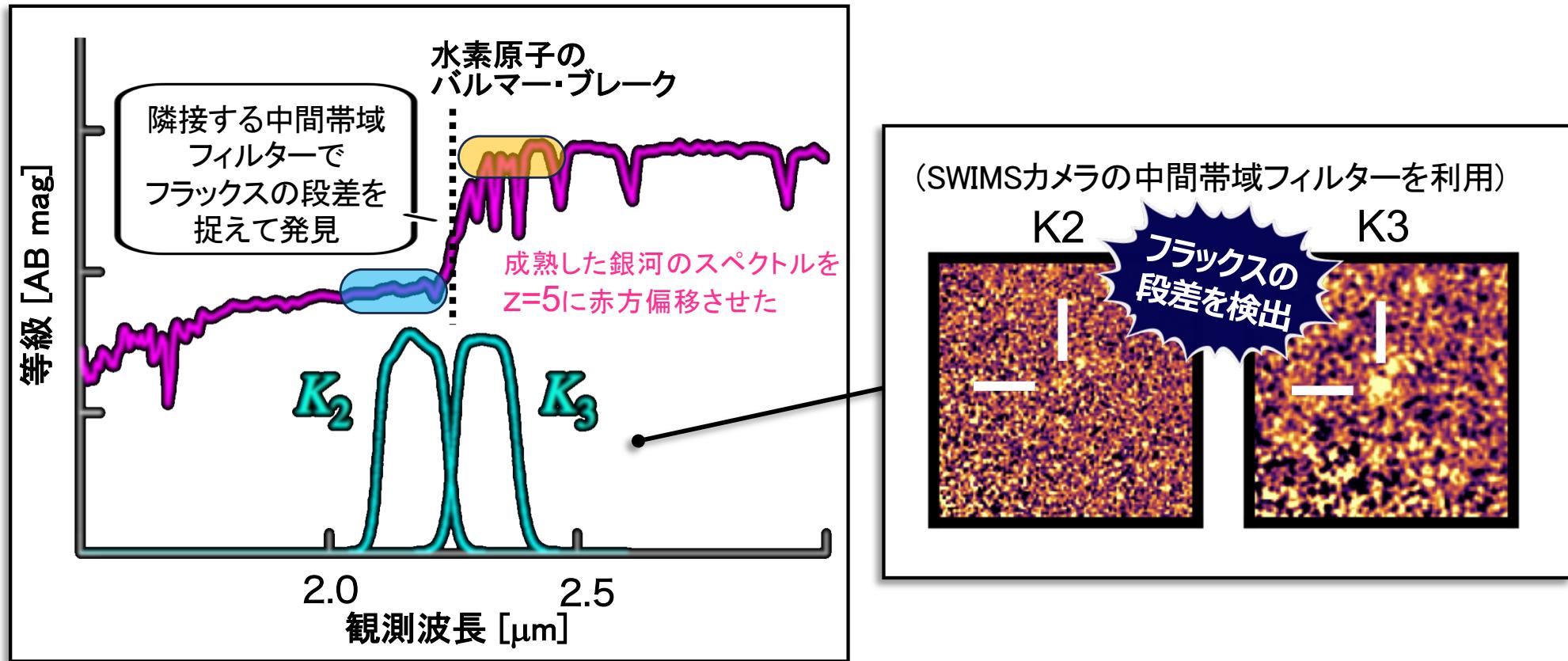
初期宇宙の巨大銀河誕生史



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

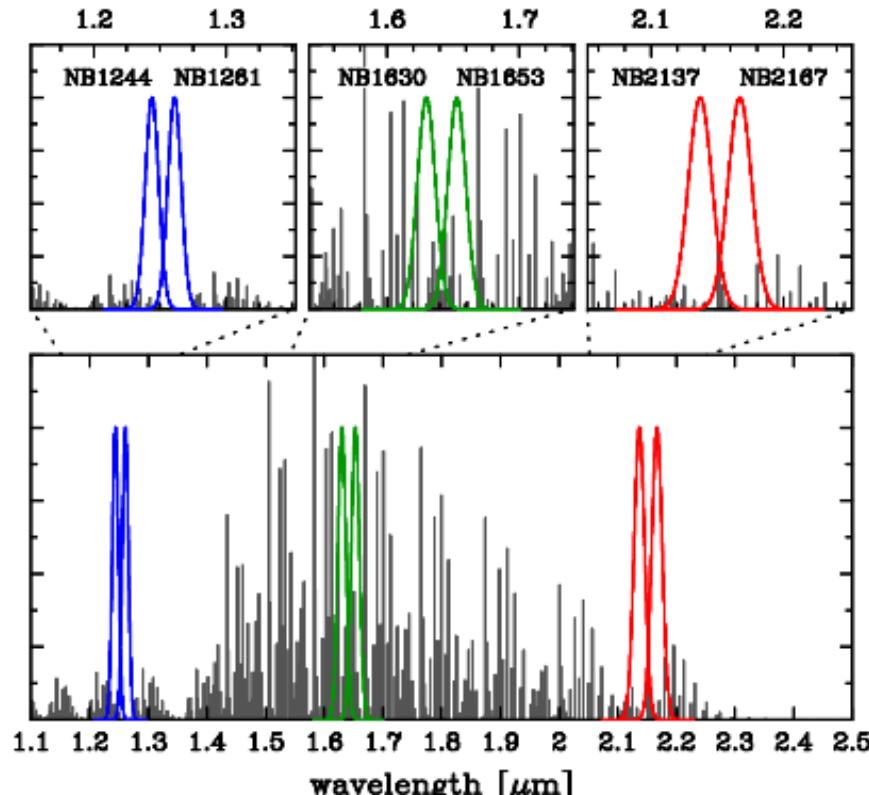
SWIMS-18

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

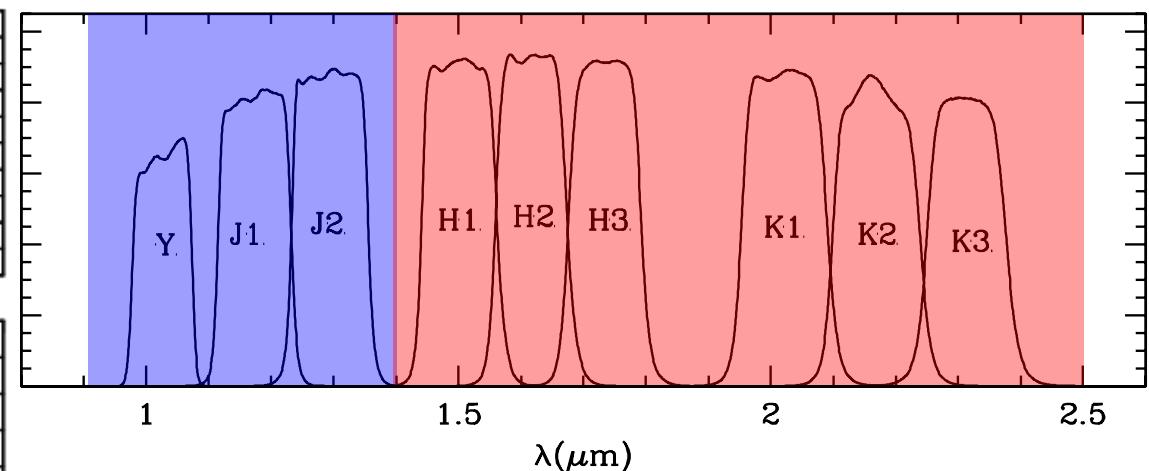
広視野カメラSWIMSに6枚の狭帯域フィルターと9枚の中間帯域フィルターを作成し、3枚の広帯域フィルターと合わせた計18枚のフィルターを用い、すばるとTAOで行う計1平方度規模の広くて深い近赤外線撮像サーベイ。

狭帯域フィルター(6枚)



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

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。

→ 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、今何がわかつ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 β 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 α +[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 α 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