

研究室紹介(2025/5/13)

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

NGC2403 (Subaru/Suprime-Cam)



兒玉 忠恭
Tadayuki Kodama
Professor



陳 諾
Nuo Chen
Assistant Professor



山本 直明
Naoaki Yamamoto
D3 student



刘 兆然
Zhaoran Liu
D3 student



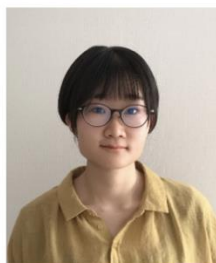
安達 孝太
Kota Adachi
D2 student



石田 光
Ko Ishida
D1 student



高橋 宏典
Kosuke Takahashi
D1 student



船木 美空
Miku Funaki
M2 student



Ryo Sutanto
M1 student



萩原 颯
Hayate Hagiwara
M1 student



我妻 竜真
Ryoma Wagatsuma
B4 student



松本 晴揮
Haruki Matsumoto
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

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

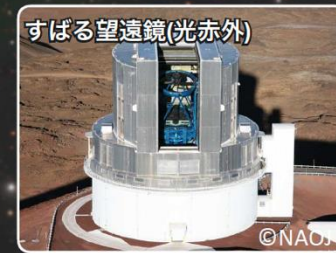
陳諾 (特任助教)、山本、Z.Liu (D3)、安達 (D2)、高橋、石田 (D1)、
船木 (M2)、R.Stanto、萩原 (M1)【女・男】

Our Website



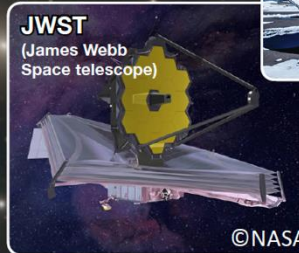
<http://mahalo.galaxy.bindcloud.jp>

『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)



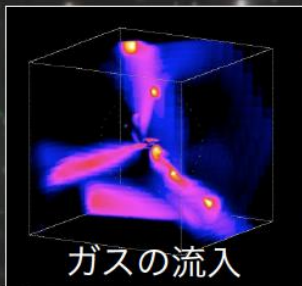
JWST
(James Webb
Space telescope)

©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



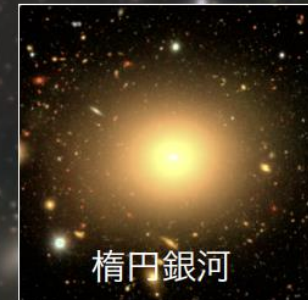
ガスの流出

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



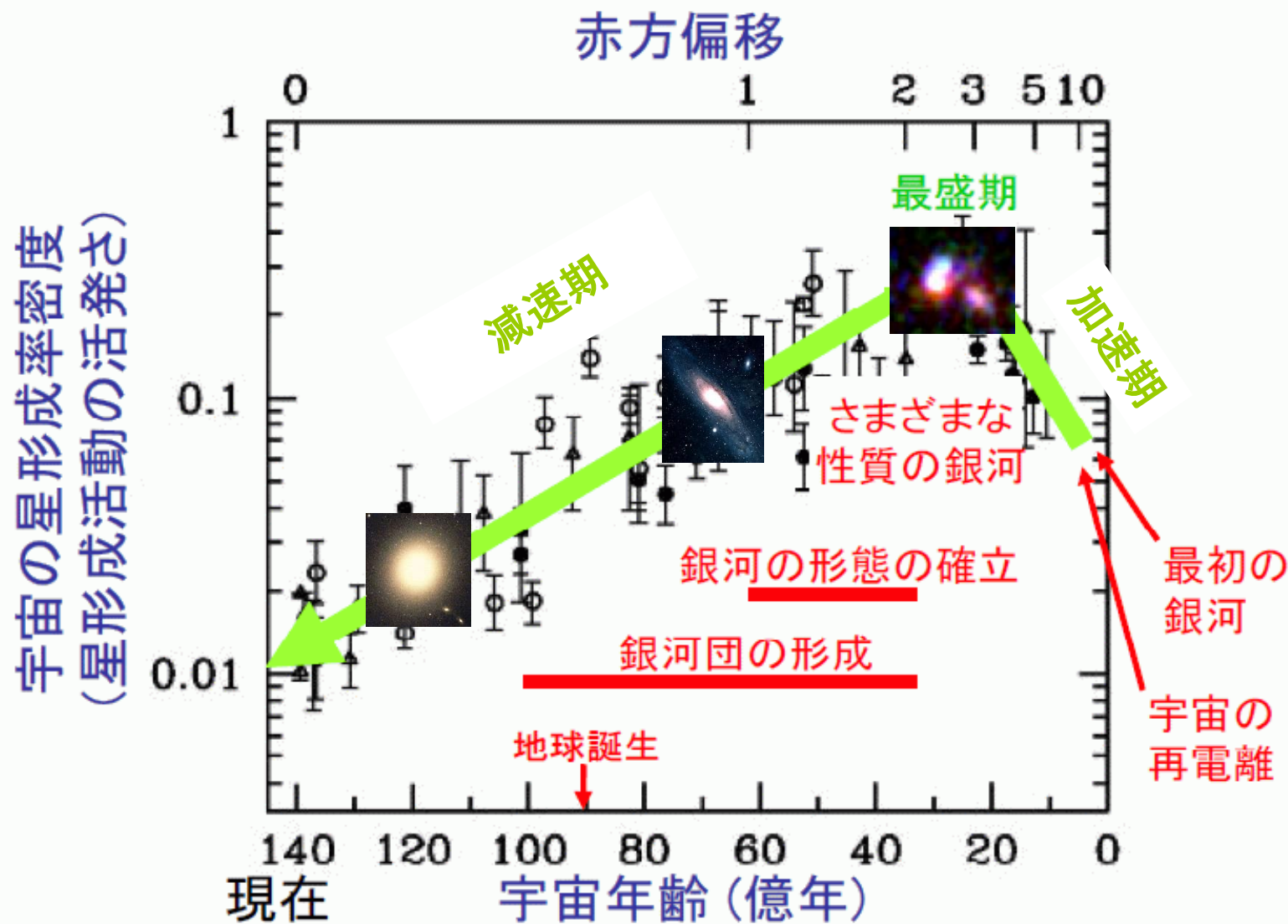
銀河団

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, PFS, ULTIMATE), 狭・中間帯域フィルター,
Euclid・Roman衛星による広視野サーベイ(すばるとの協調観測)
 - ❖ 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

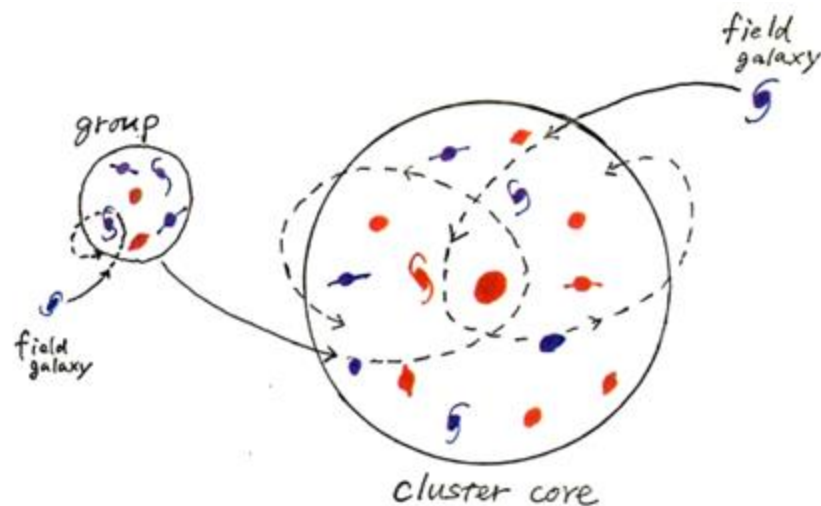
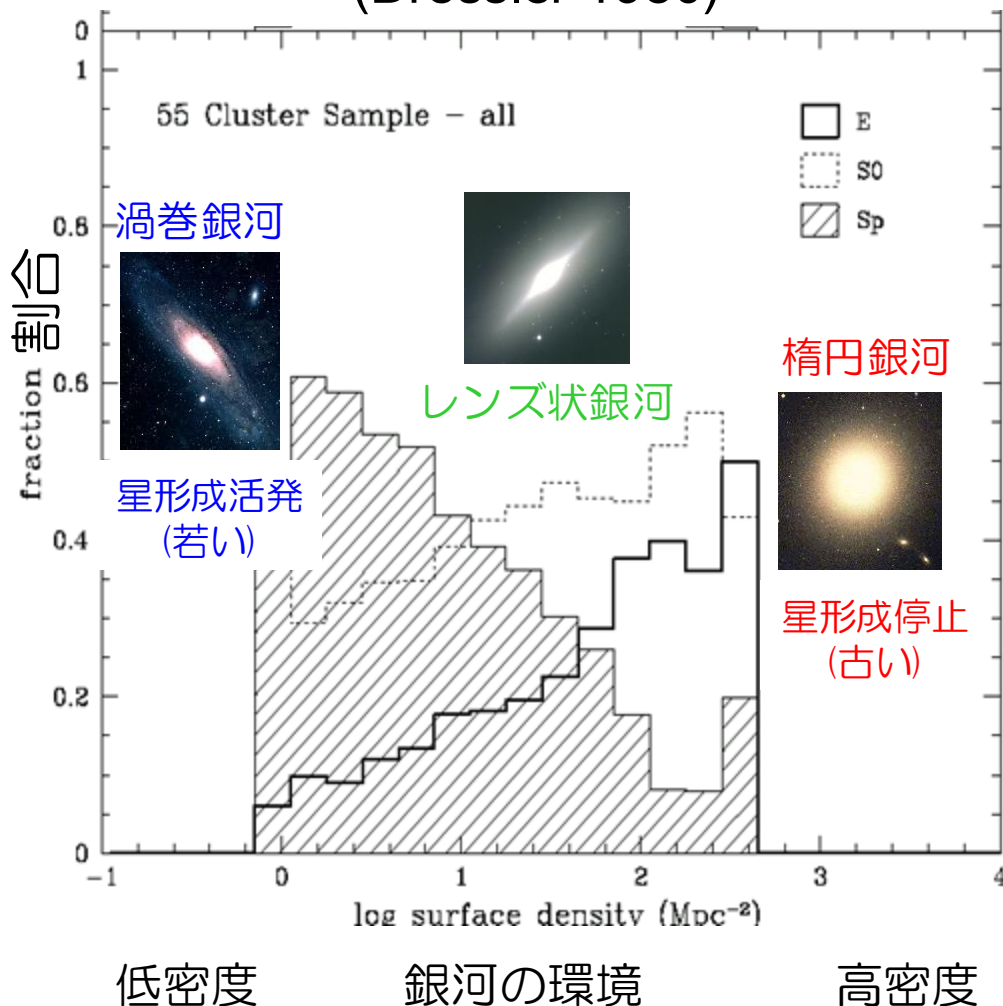
宇宙における星形成活動の変遷

「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/>)

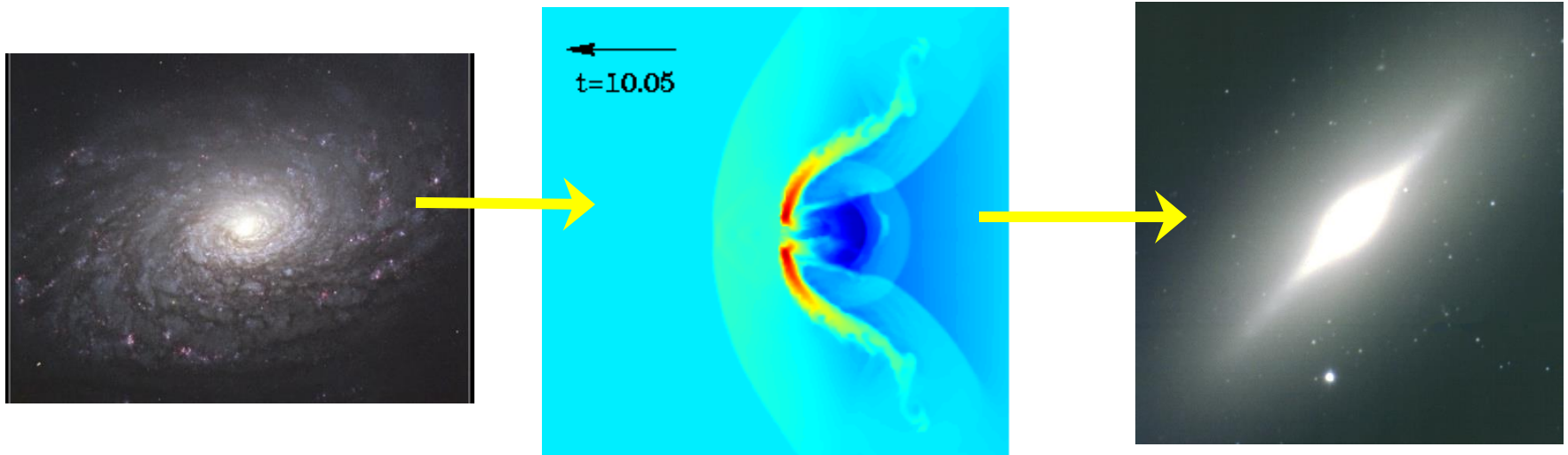


星形成バースト銀河からガスが吹き出す様子
(©すばる望遠鏡)

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. 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）？
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. 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？
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, 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

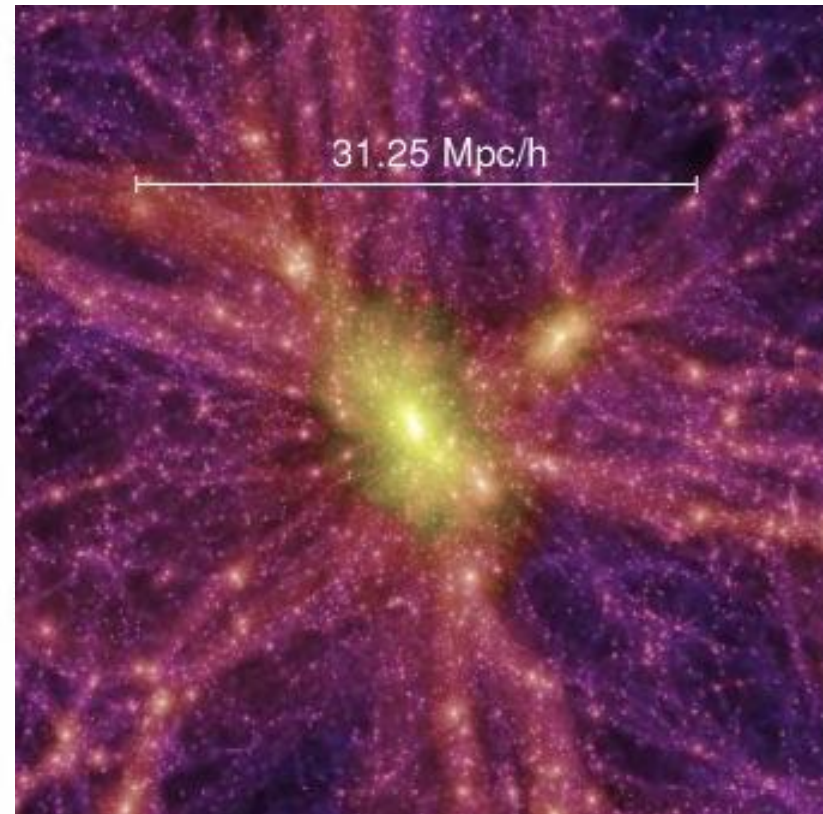
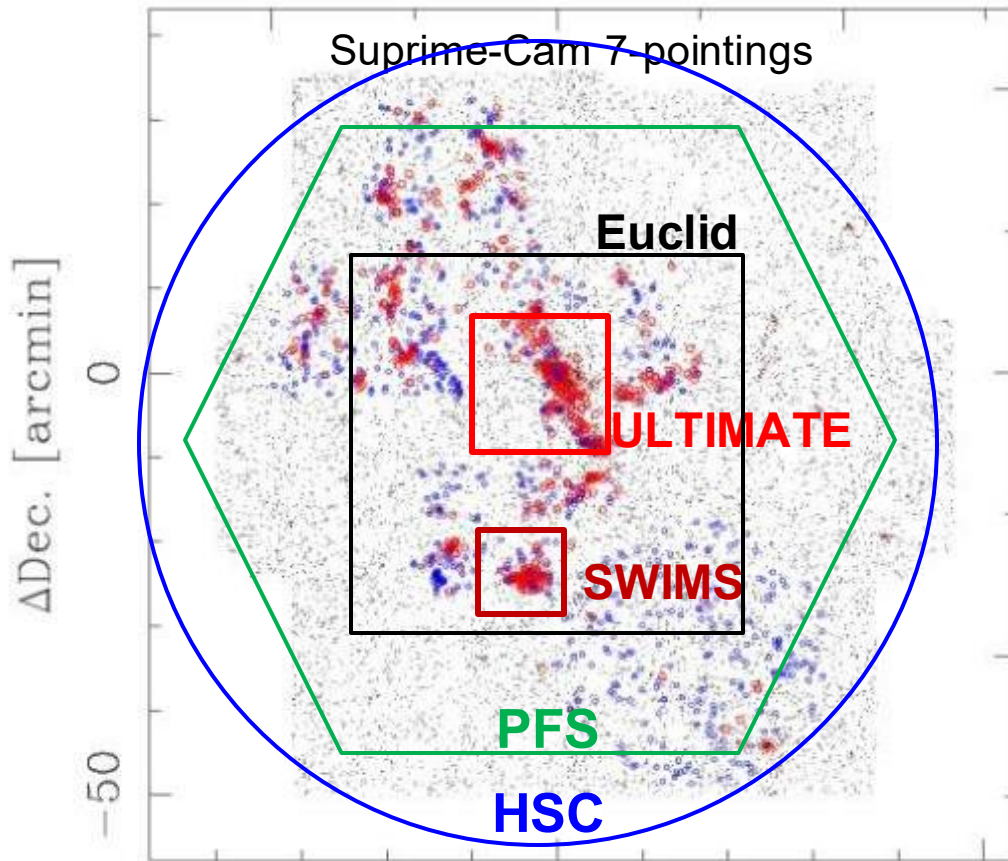
銀河宇宙大規模構造の発展

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

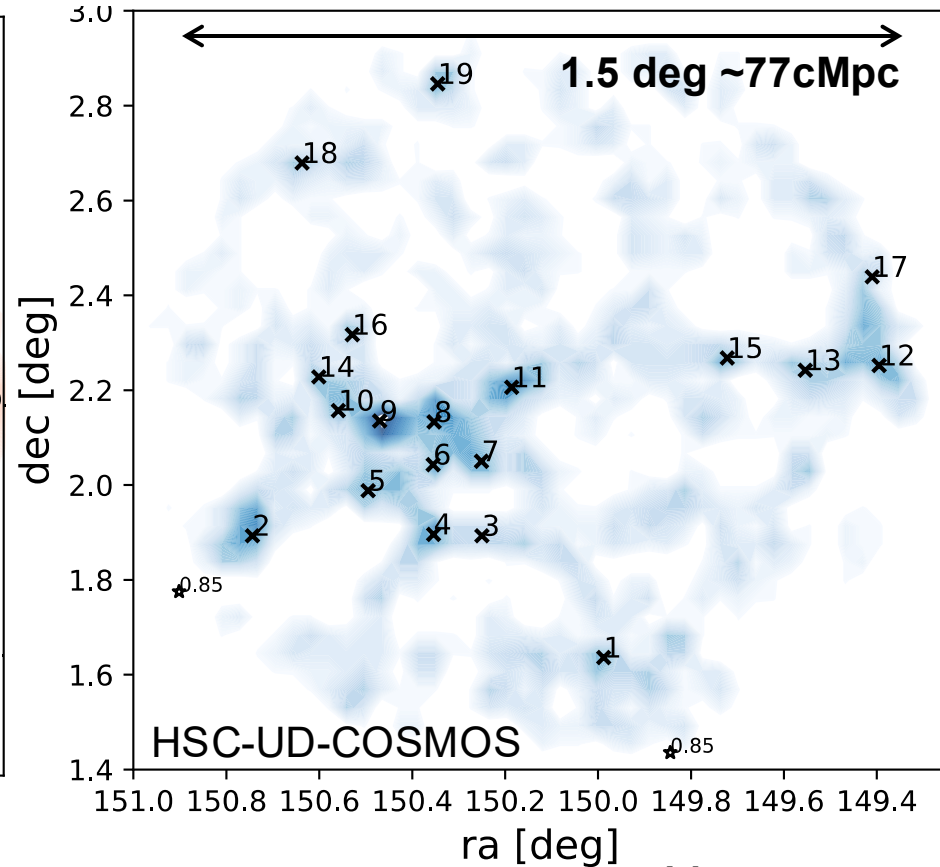
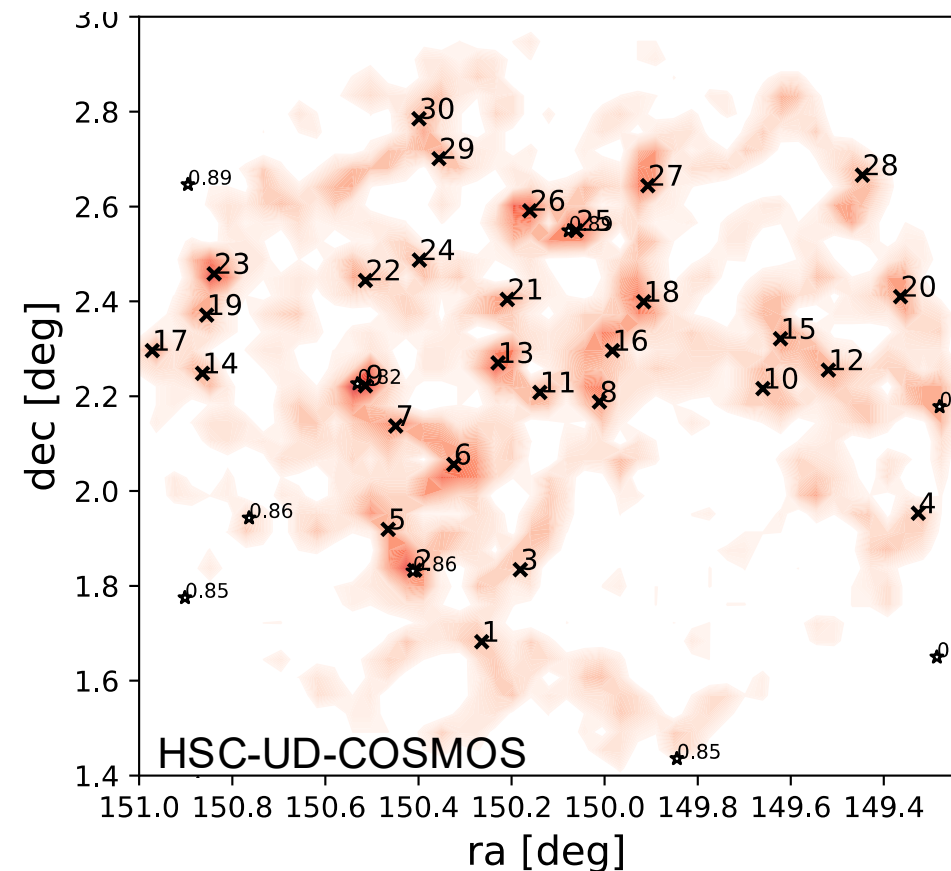
マクロ的アプローチ

銀河宇宙大規模構造の発展

Hybrid Search for Clusters with HSC (HSC+)

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は2025年2月より観測開始

(SUGRA)

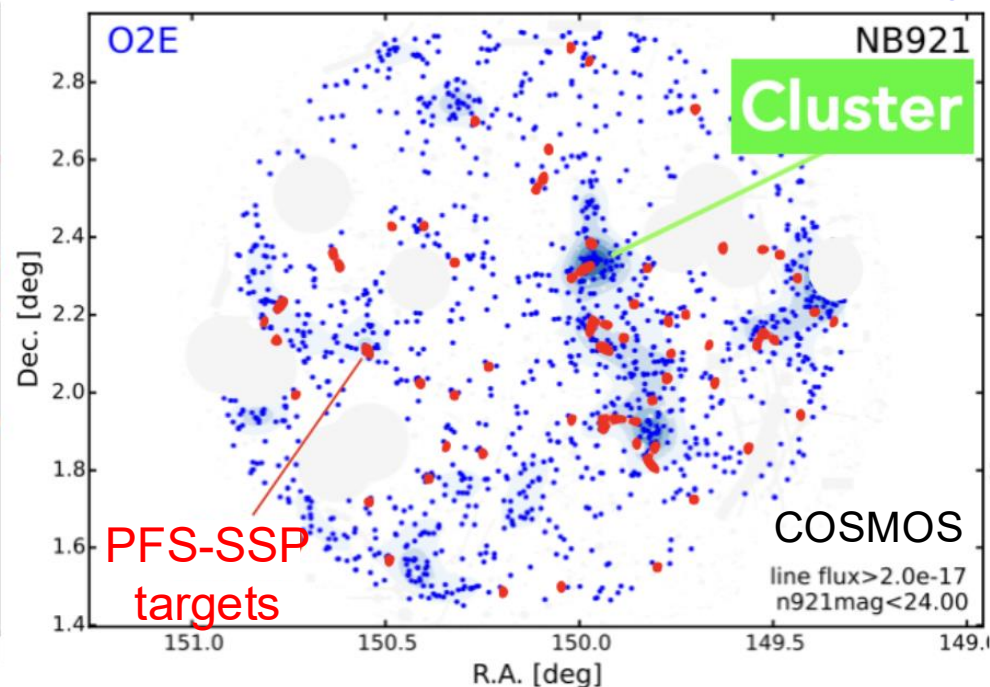
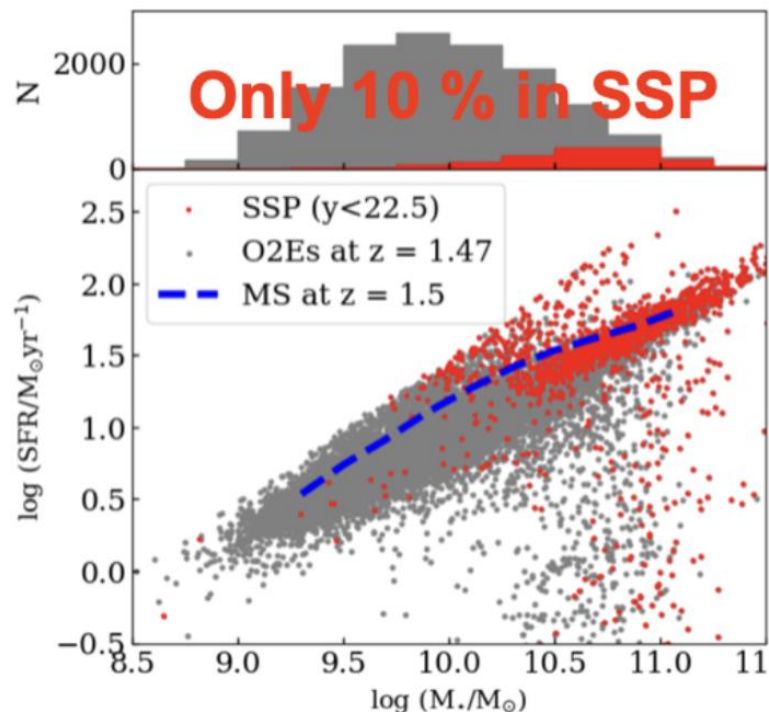
PFS on Subaru has just starting science observations from Feb 2025 (S25A)

PEGASUS: Pfs Emission-line GALaxies SURvey with Subaru

Targets: HSC-NB emitters at $0.4 < z < 1.6$

Kubo, Kodama et al. (S25A, approved)

[OII] emitters at $z=1.47$ traced with HSC-NB imaging



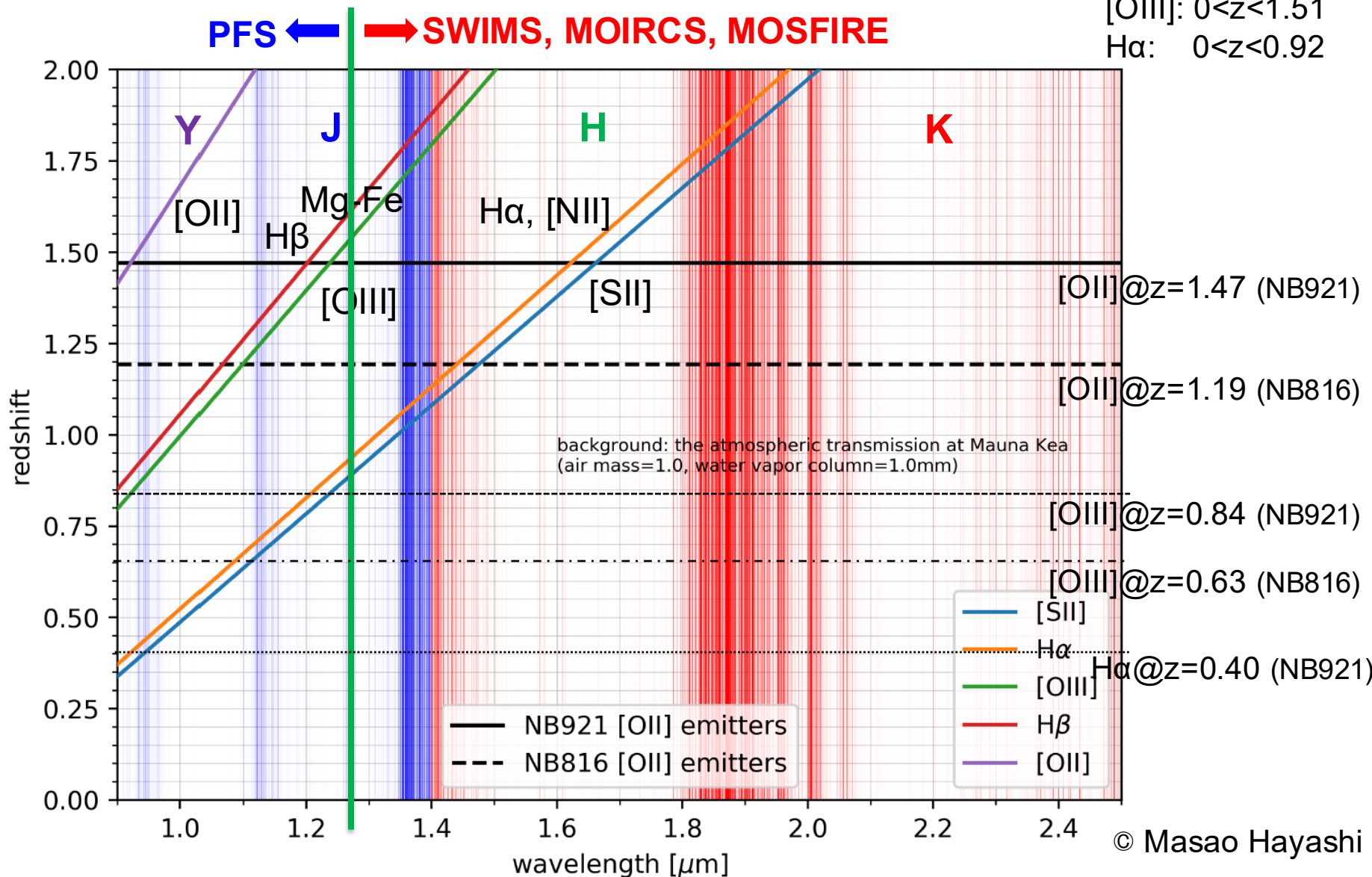
PFS-SSP will miss 90% of [OII] emitters associated to the LSSs at $z=1.47$ traced by HSC/NB921 imaging

We conduct a separate program dedicated to NB emitters!

Emission line properties (SFR, metallicity, A_v , ionization) as a function of z and env.

Panoramic Follow-up Spectroscopy with PFS

Ly α : $2 < z < 9.3$
 [OII]: $0 < z < 2.38$
 [OIII]: $0 < z < 1.51$
 H α : $0 < z < 0.92$



$z < 1-1.5$ with PFS and beyond up to $z < 3-4$ with SWIMS and MOIRCS

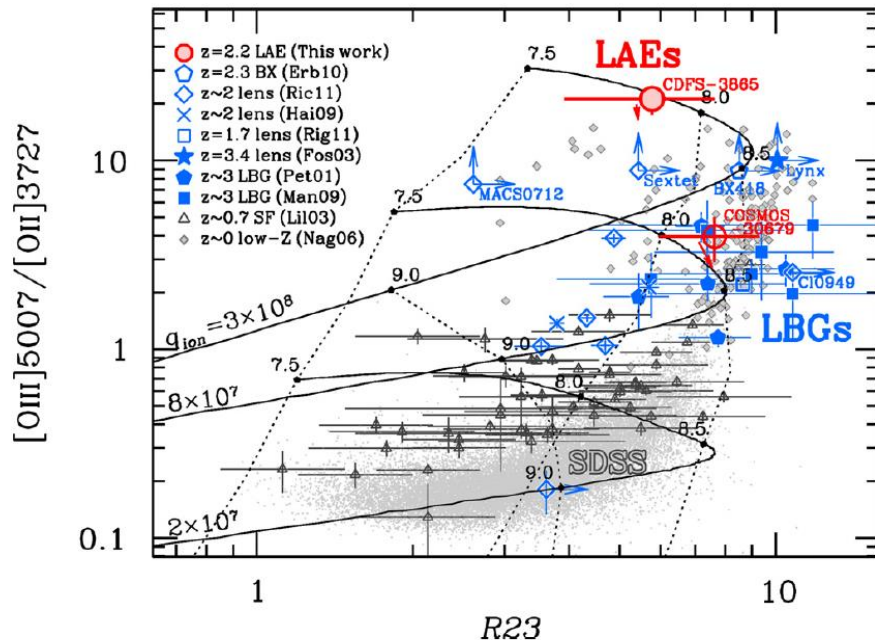
1 hr integration $\rightarrow f \sim 2.5 \times 10^{-17}$ cgs (5σ) \leftrightarrow $\text{SFR}([\text{OIII}])_{\text{corr}} \sim 10 M_{\odot}/\text{yr}$ @ $z=1.5$

Emission line diagnostic (gaseous metallicity)

- to explore environmental dependence of SFH and gas in/outflows -

Breaking the degeneracy between ionization parameter (q) and metallicity (O/H)

$[OIII]/[OII]$ vs. $R23$

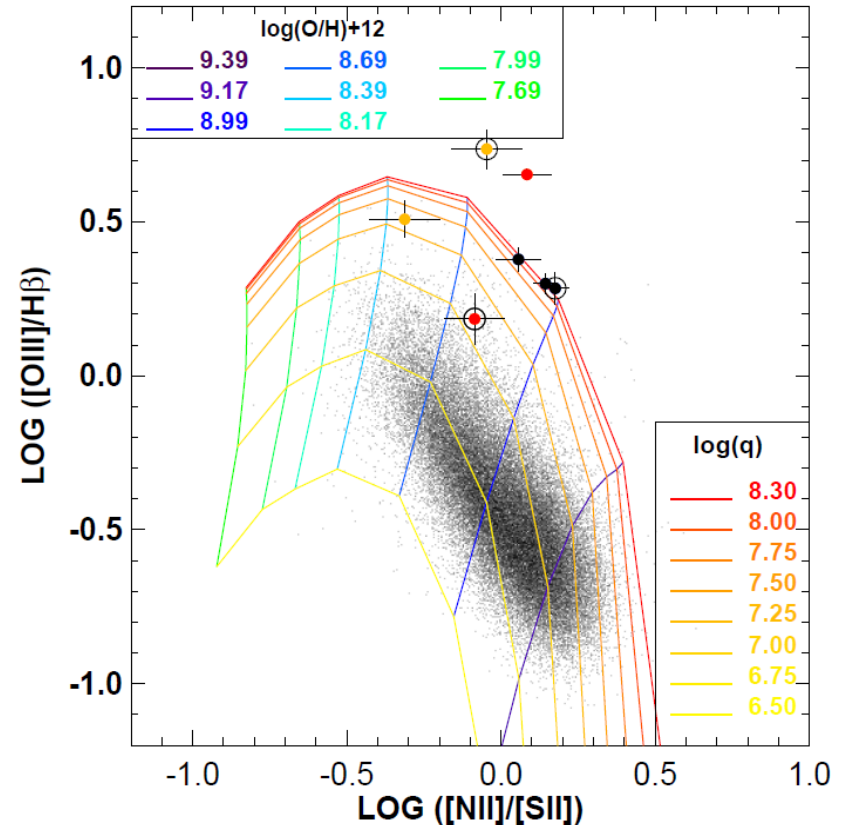


$$R23 = ([OIII] + [OII]) / H\beta$$

Nakajima+ (2013)

$z < 1.5$ with PFS

$[OIII]/H\beta$ vs. $[NII]/[SII]$



Kewley+ (2015b)

$z < 0.9$ with PFS

Direct method ($[OIII]\lambda 4363$) can also be applied by stacking many spectra.



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)

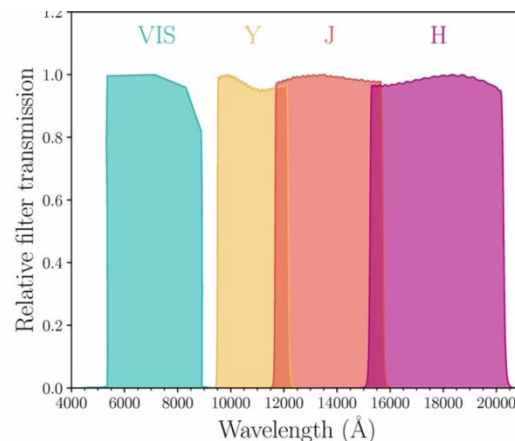
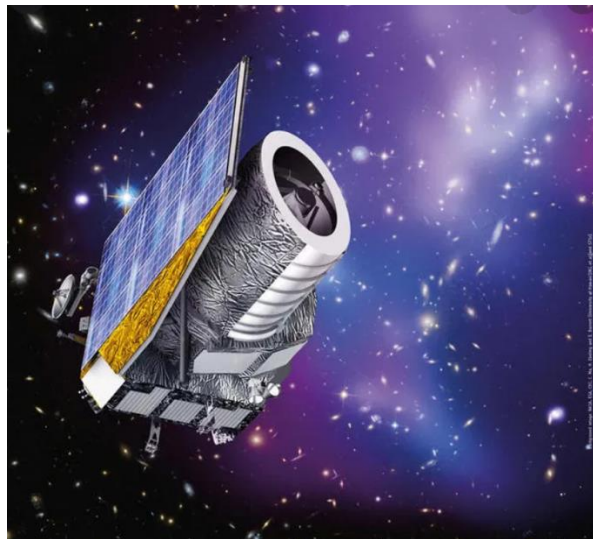
児玉は Japanese Euclid Consortium (JEC) メンバーの一員

原始銀河団探査を担当、 $1 < z < 3$ に拡張

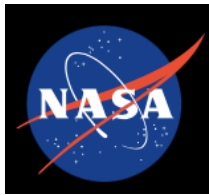
HySPEC- Euclid : Hybrid Search for Proto Evolving Clusters with Euclid

Red sequence survey + **Grism emitter survey** (Euclid-Deep over ~ 50 deg²)

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



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



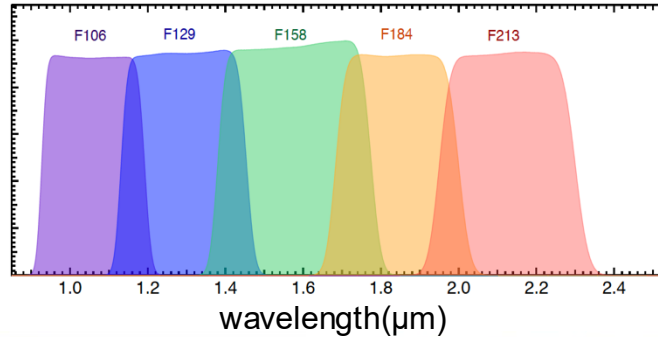
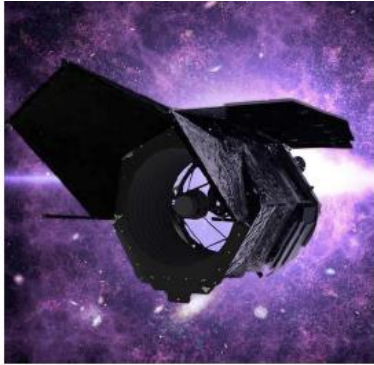
Roman Space Telescope

2.4m diameter space telescope

Launch: Oct 2026



Nancy Roman
(1925-2018)



WFI: near-infrared camera for imaging and slitless spectroscopy

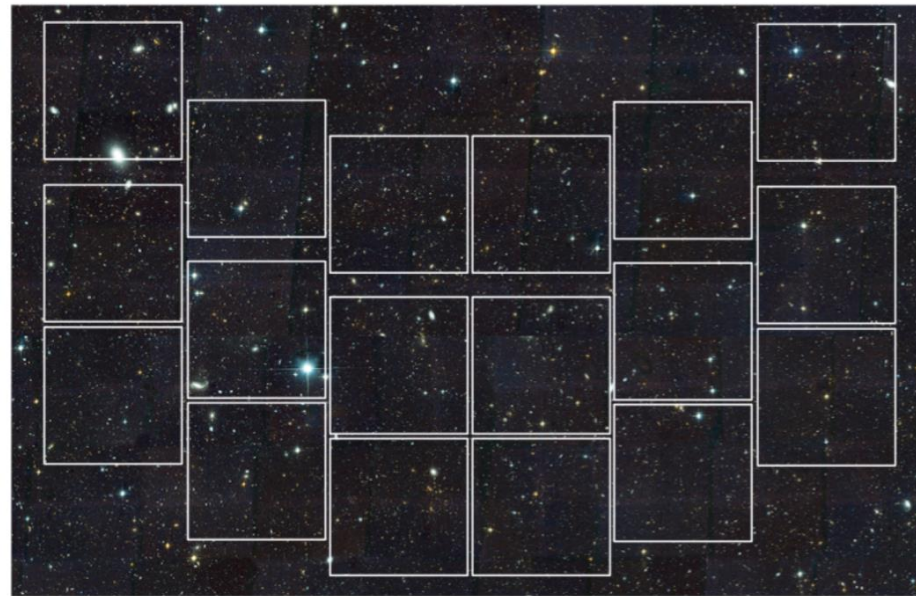
18 H4RG-10 (4k x 4k) detectors

0.11"/pix, FoV=0.28 deg²

resolution = 0.14" @F184



Moon (average size seen from Earth)



HST/ACS



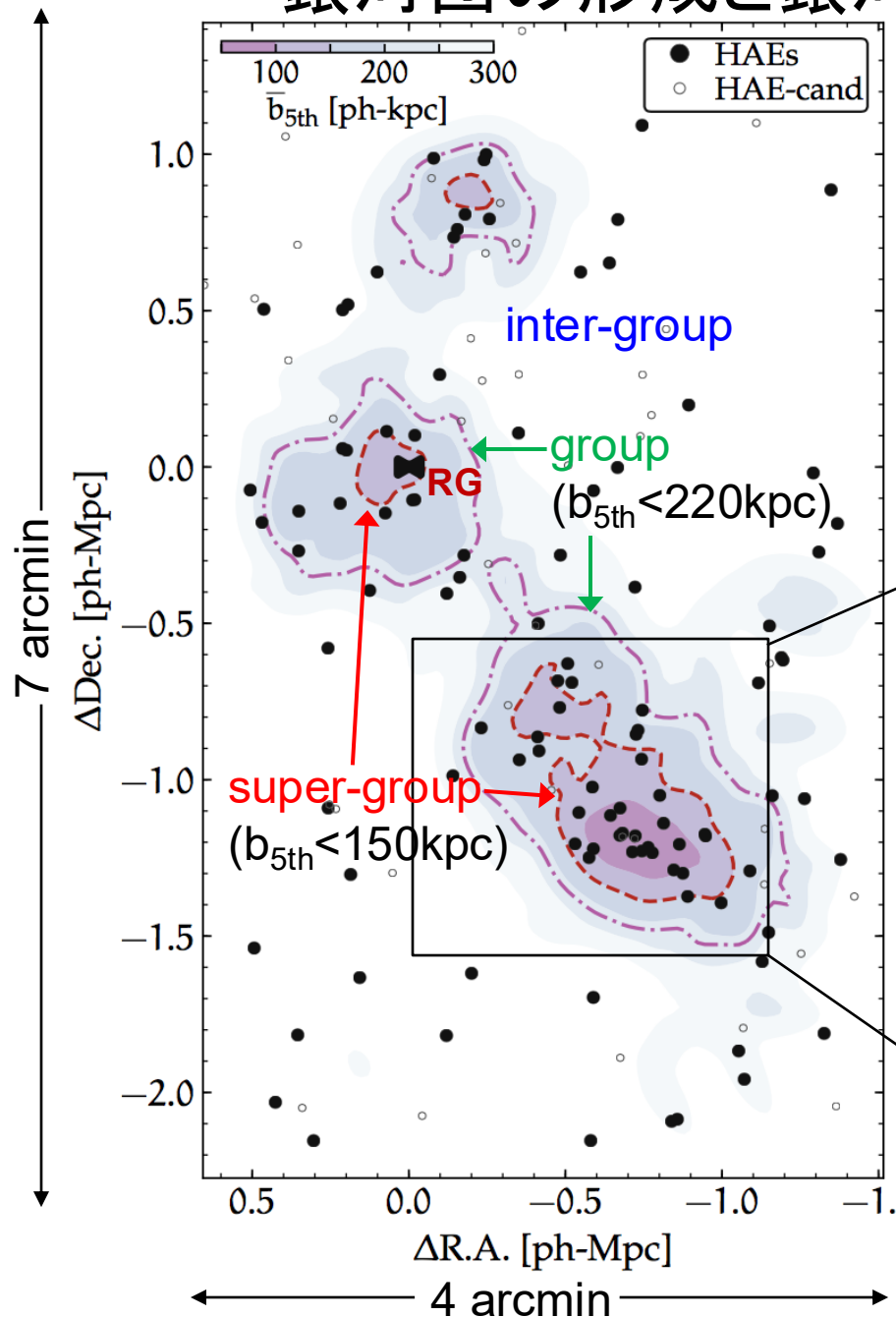
HST/WFC3



JWST/NIRCAM

100 Subaru nights have been allocated to Roman-Subaru synergy programs.

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

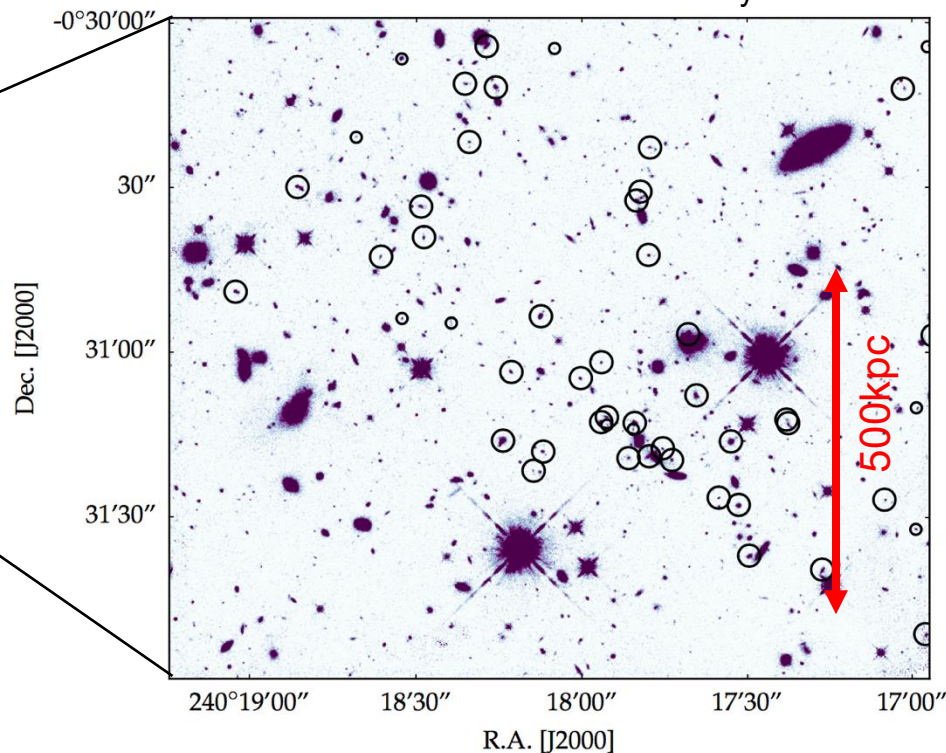
USS1558 ($z=2.53$)

Subaru/MOIRCS, NB2315 (H α) imaging

非常に活発な星形成活動

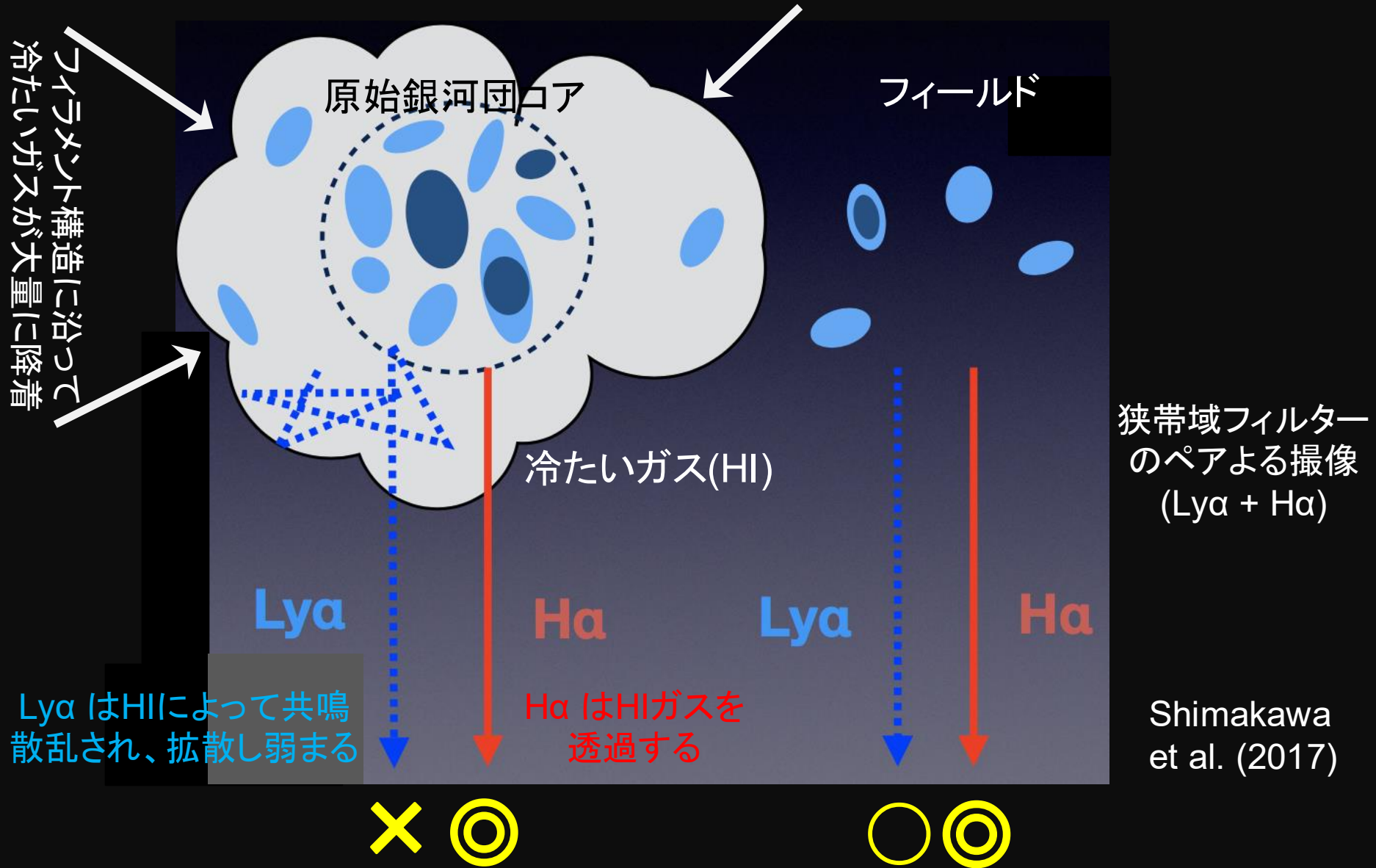
H α 輝線銀河(=星形成銀河)の集団

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



Shimakawa et al. (2017)

Ly α 輝線とH α 輝線強度比から中性水素(ガス降着史)をマッピング



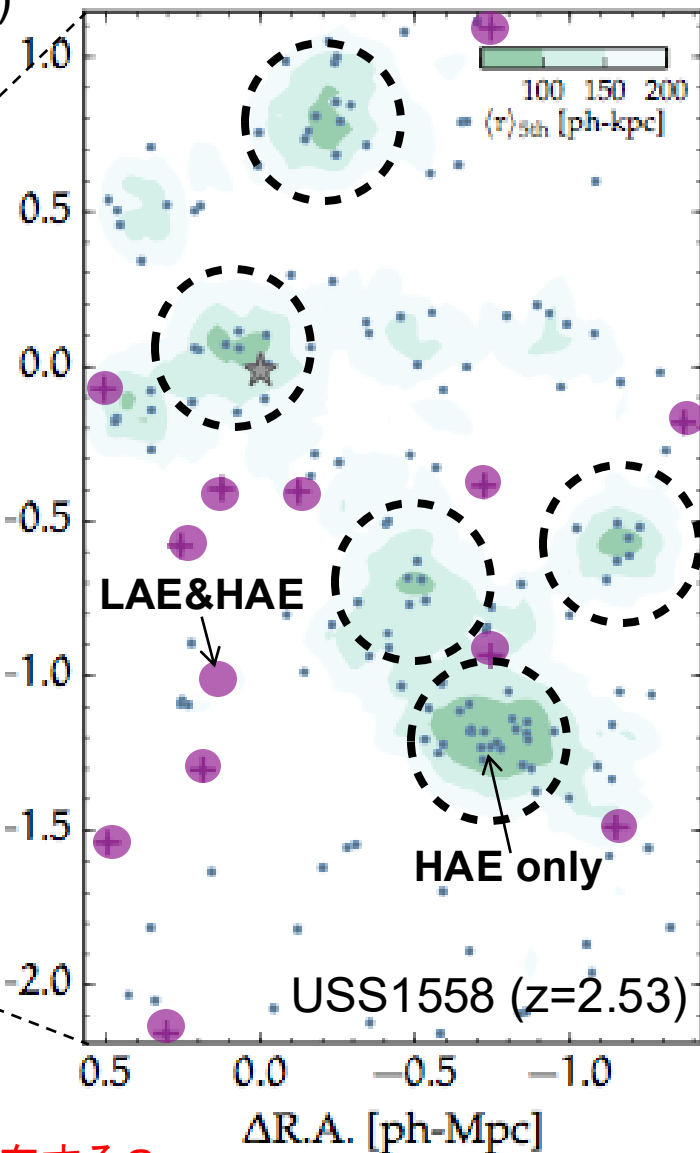
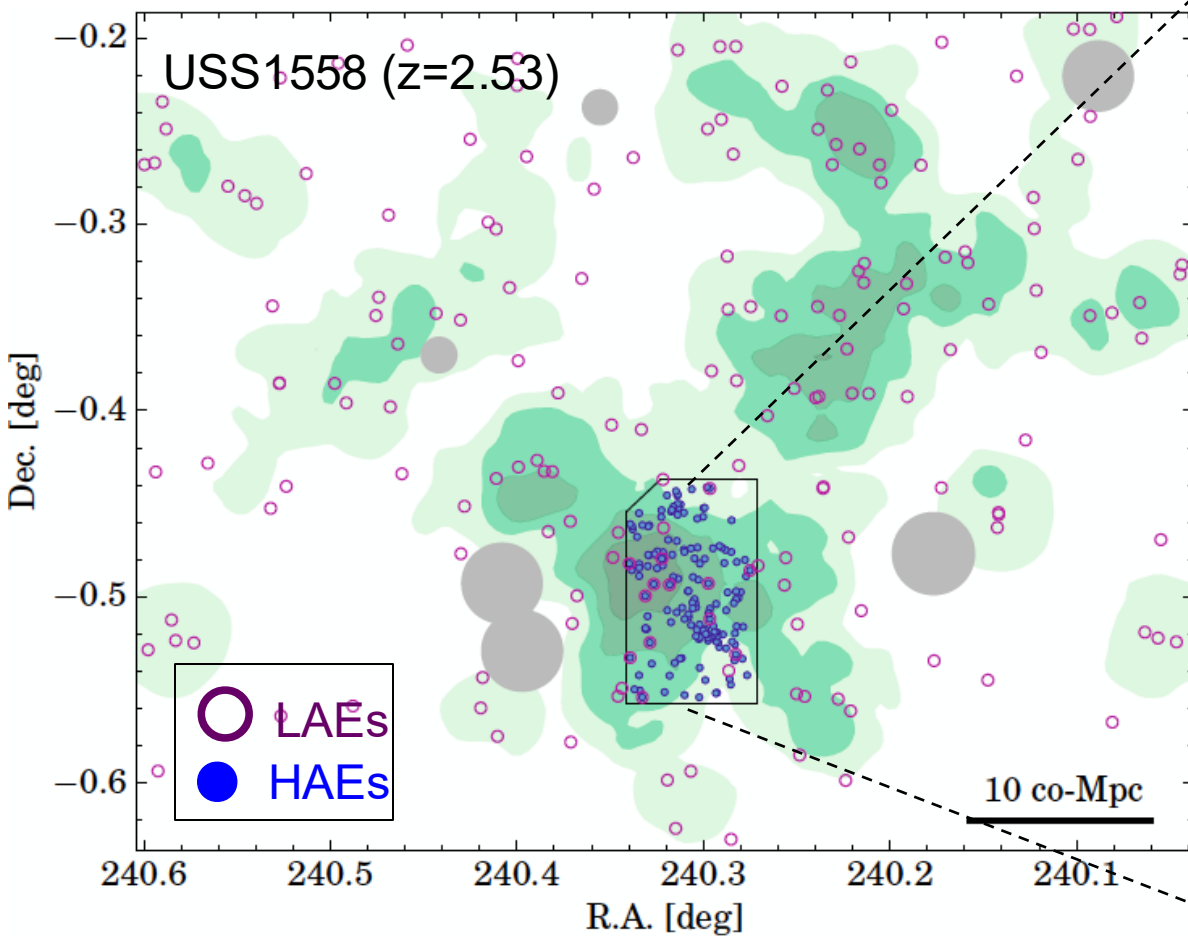
ある開口径内の Ly α /H α 比がHIガス量により変化(中性ガスのトレーサー) → ガス降着史

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

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

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

MOIRCS ($7' \times 4'$) – NB2315 ($\text{H}\alpha$)



LAEは高密度クランプを避けて分布する！

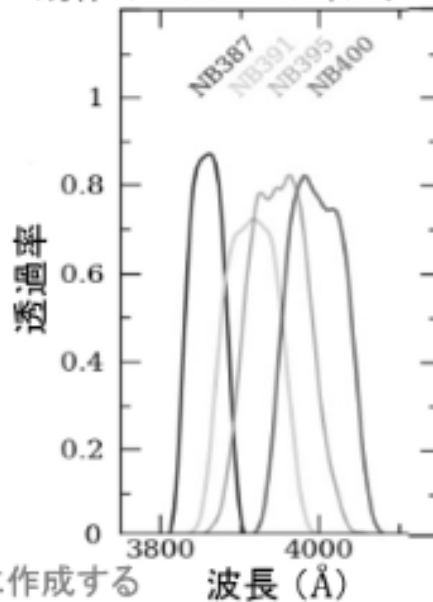
高密度クランプは冷たいガス流によって中性水素(HI)が多く存在する？

もしくはダスト吸収が強い？

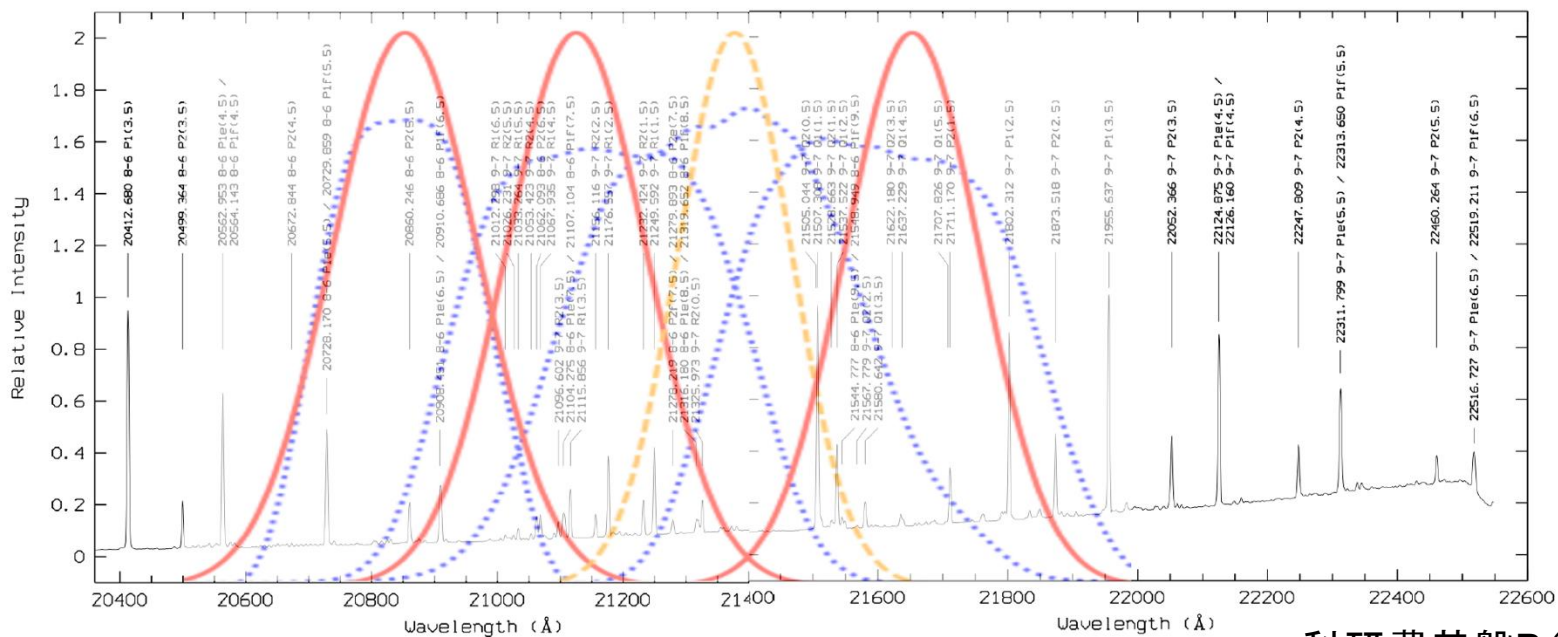
表1: Ly α -H α ペア・フィルター

HSC NBF (Ly α)	$\Delta\lambda$	redshift	SWIMS NBF (H α)	$\Delta\lambda$
NB387	90 Å	2.183	NB2089	300 Å
NB391	100 Å	2.215	NB2110	300 Å
NB395	100 Å	2.248	NB2137 すでに存在	210 Å
NB400	100 Å	2.289	NB2158	300 Å

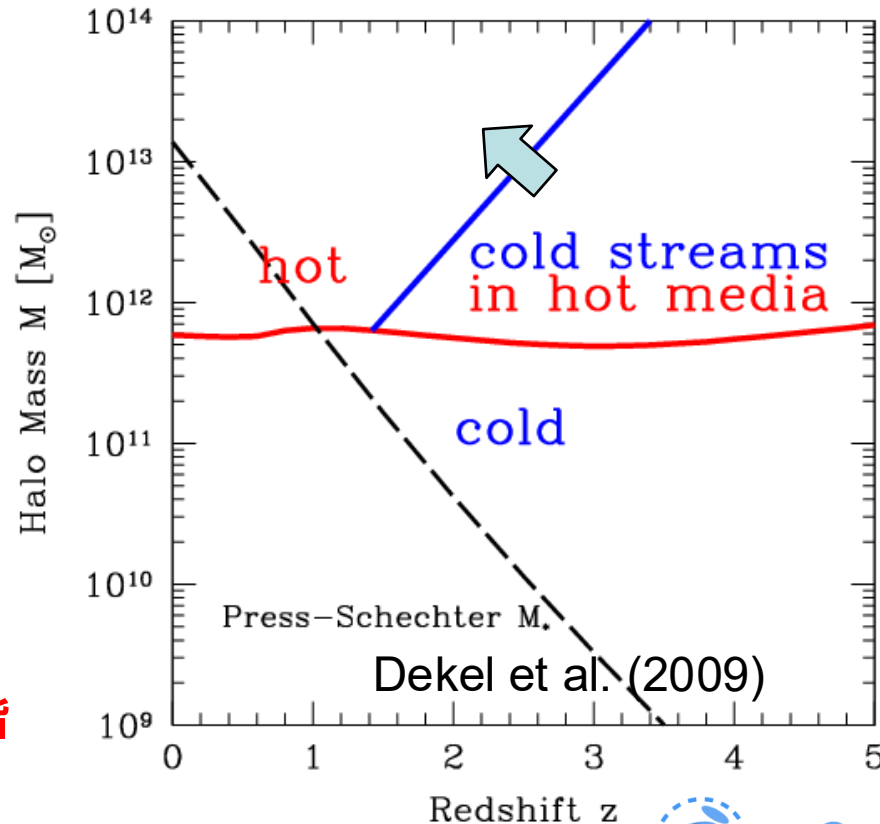
既存のHSC NBフィルター



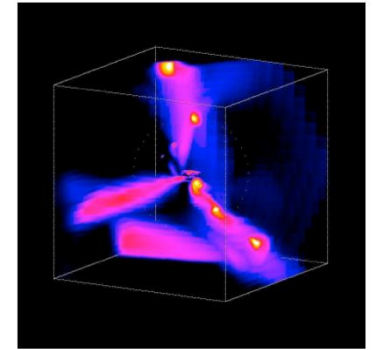
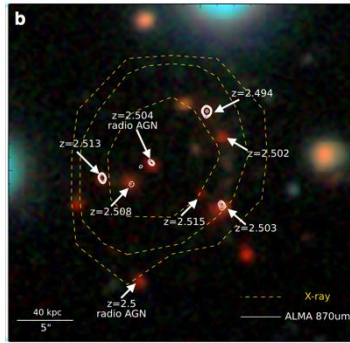
本課題でNB2089,2110,2158の3フィルター(H α)をSWIMSに作成する



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 ($z=2.3$)

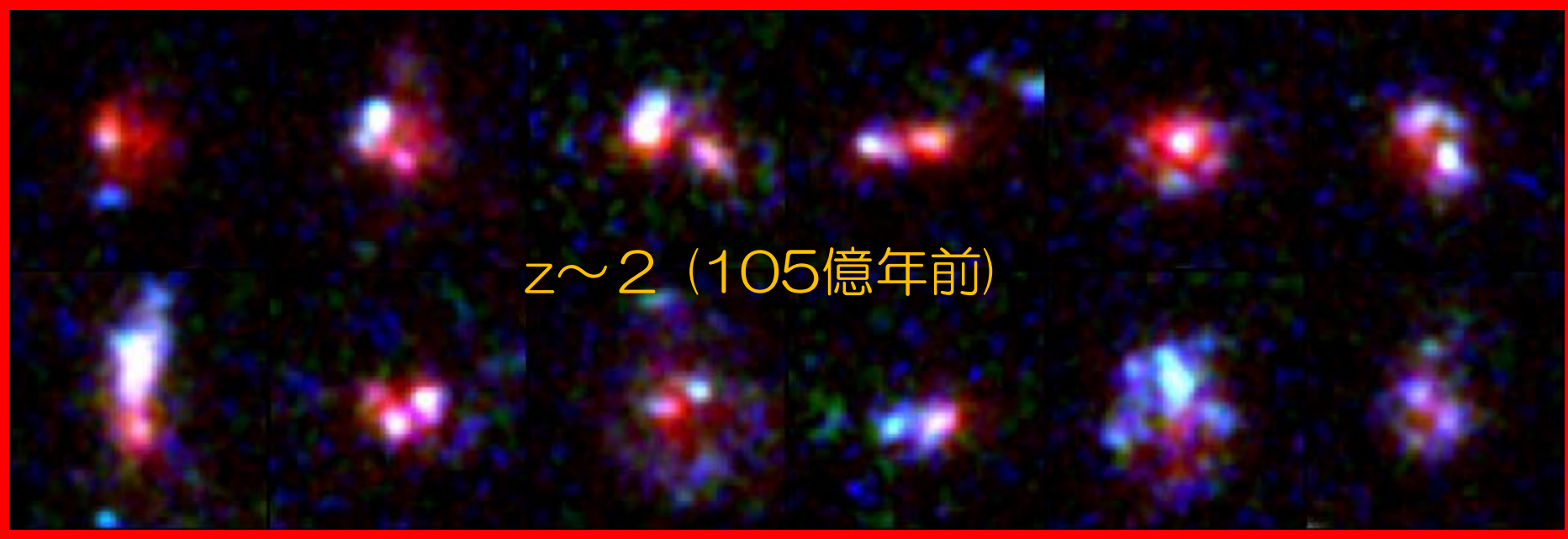
非X線銀河団

Credit:
R. Shimakawa

銀河団ハローが大質量に成長すると、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



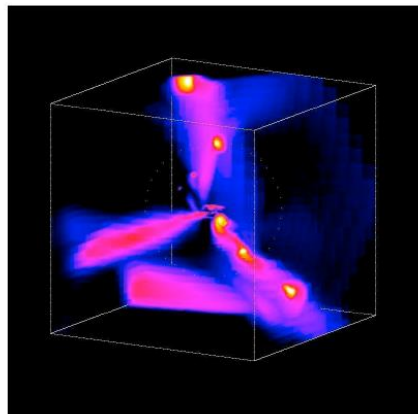
$z \sim 2$ (105億年前)

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！

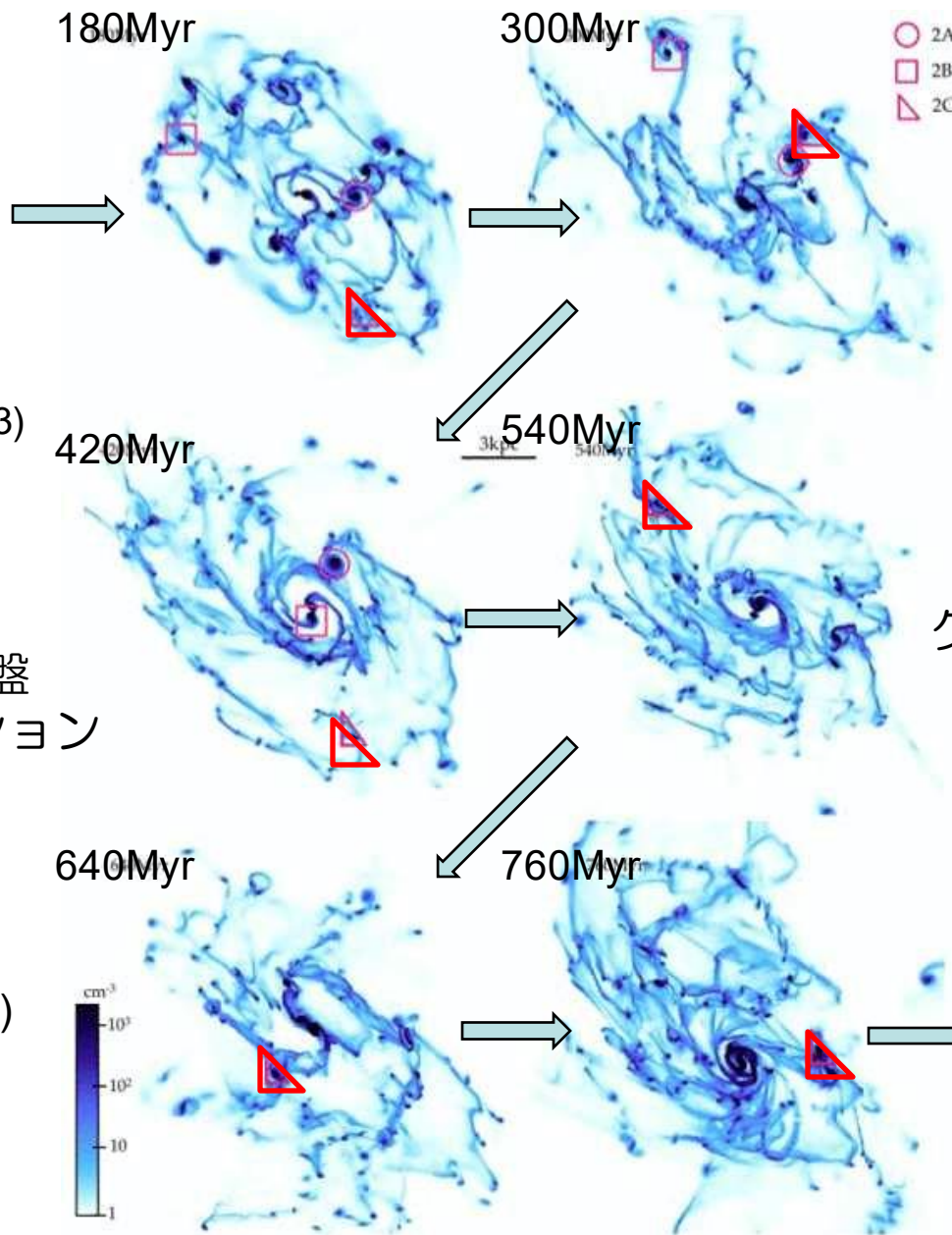
これは銀河の合体の現場か、それとも
自分で分裂しているのか？



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

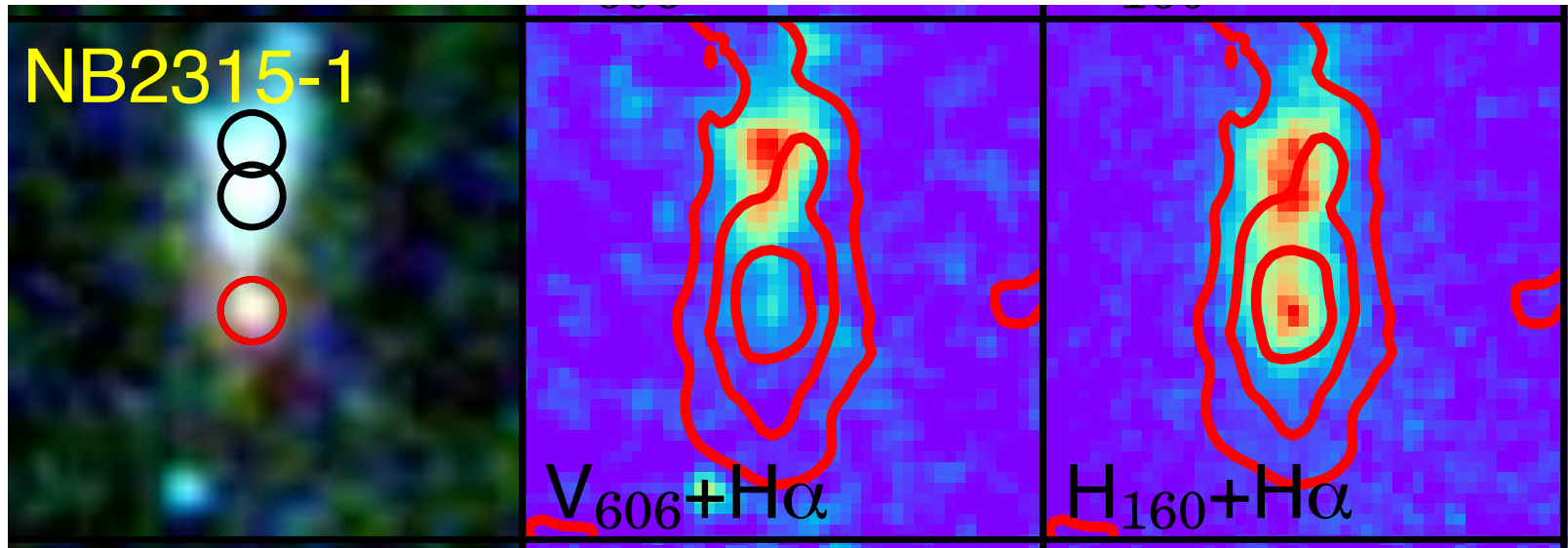
FIG. 2.— Same as Figure 1 for galaxy G2 (medium mass). Detailed sequences and movies of our fiducial models are available in Perret et al. (2013a).

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

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($\sim 1\text{kpc}$)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

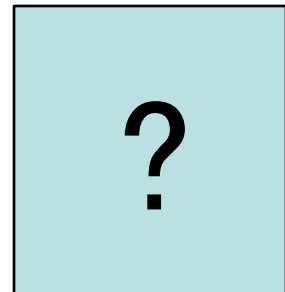
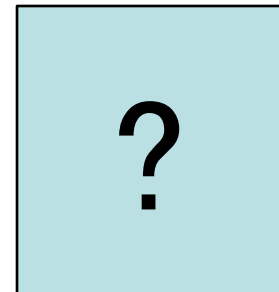
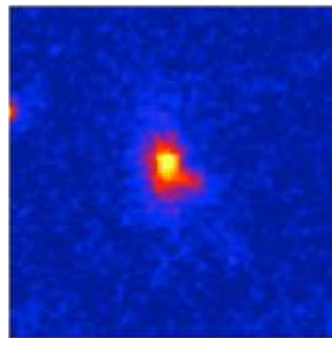
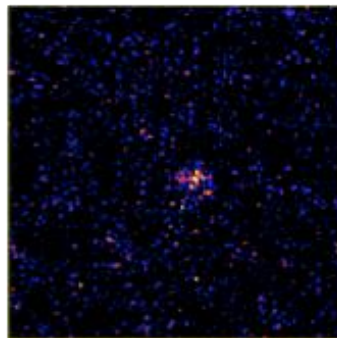
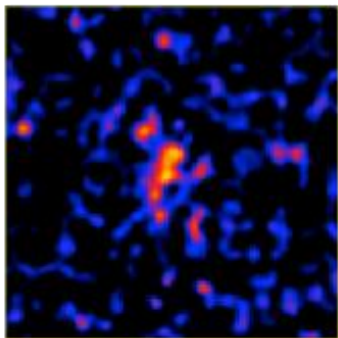
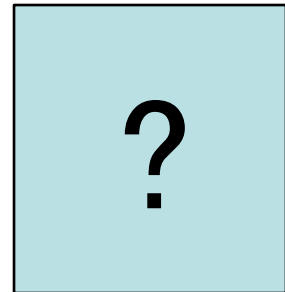
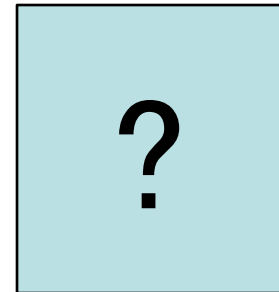
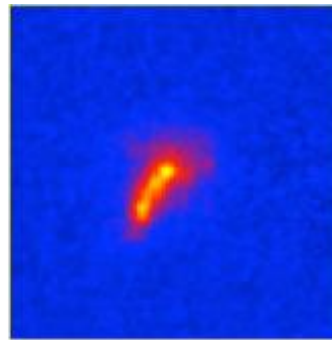
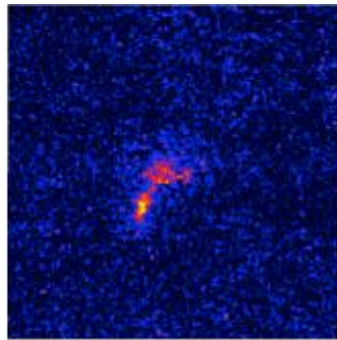
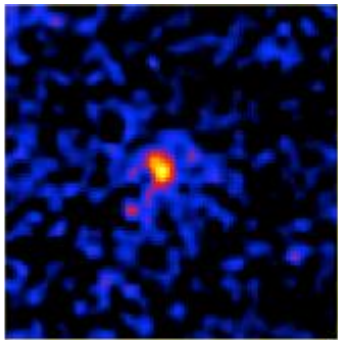
Subaru/IRCS NB+AO
SF traced by H α
0.1"-0.15"

HST / ACS
SF traced by UV
0.1"

HST / WFC3
Stellar mass
0.16"

ALMA
Dust cont.
0.1"

ALMA
CO line
0.2"

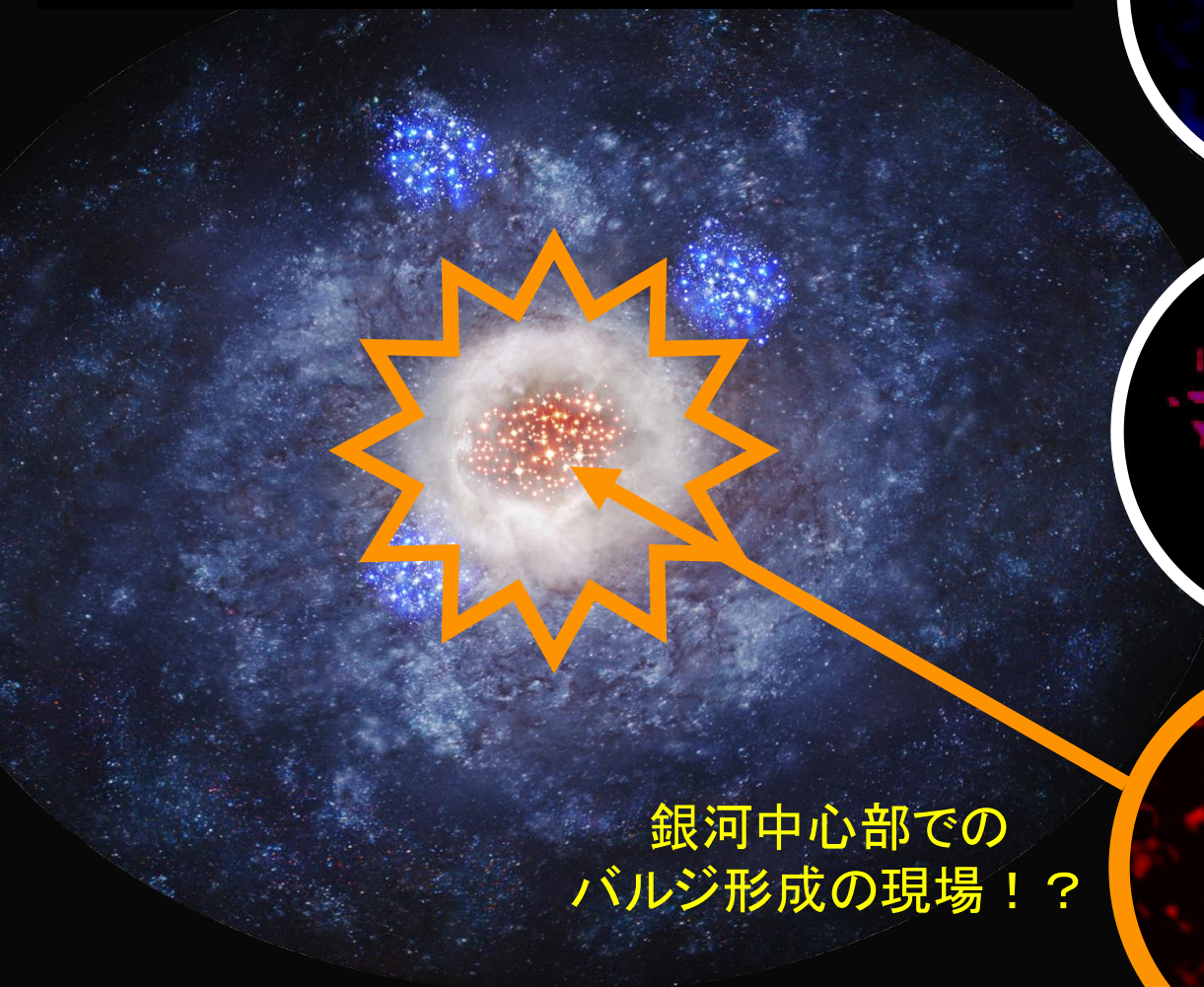


GANBA-Subaru

HST imaging JWSTも！

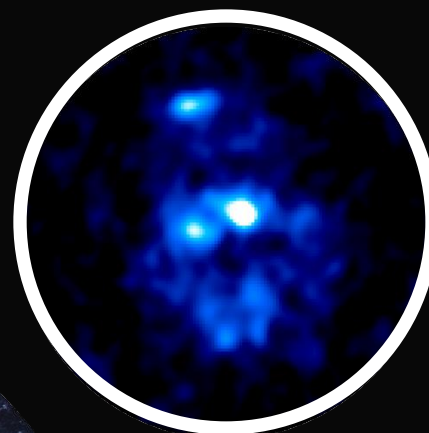
GRACIAS-ALMA

110億年前のクランプ銀河の 内部構造



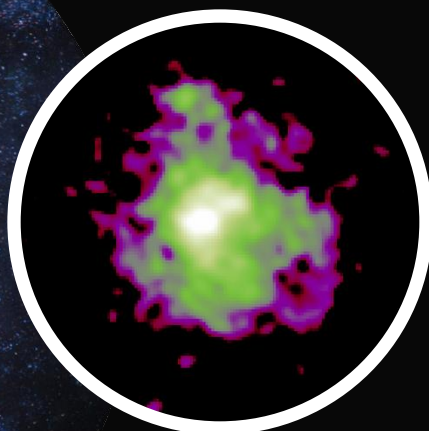
銀河中心部での
バルジ形成の現場！？

イメージ図



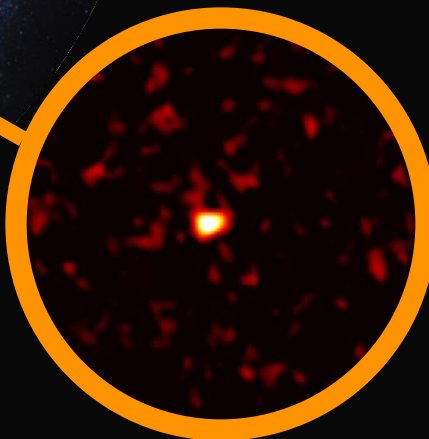
ハッブル
(可視光)

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 μ m)の高解像度観測

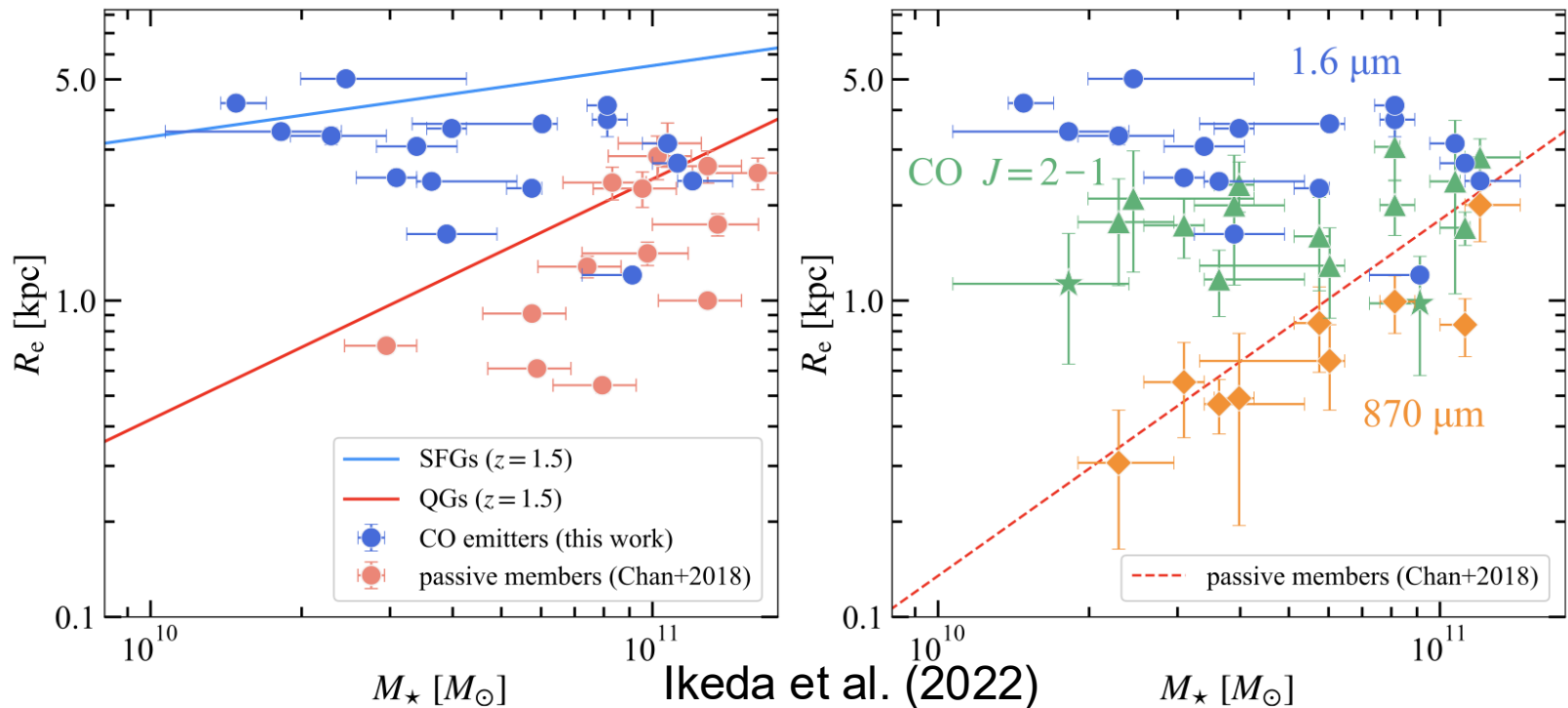


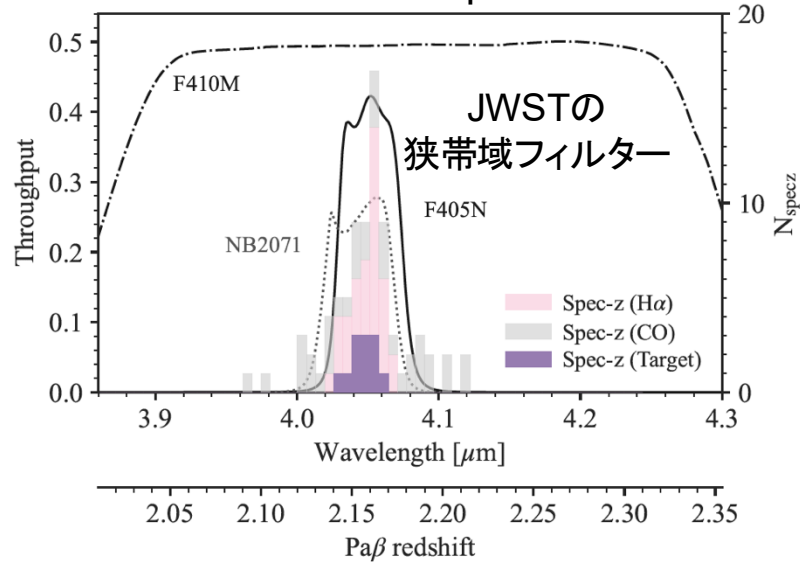
Figure 7. Stellar mass–size distribution of the galaxies in XCS J2215. Left: HST/1.6 μ m sizes are shown for 17 CO emitters (blue circles) and 14 spectroscopically confirmed passive members (red circles; Chan et al. 2018). The solid lines correspond to the best-fit mass–size relation of star-forming (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 μ m, CO $J = 2-1$ line, and 870 μ 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 μ 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

形成途上銀河内部の星形成活動・フィードバック

星形成領域からのPa β 輝線を捉える



Normal HAEs (SFGs)

**X線AGNを持つ銀河は、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)

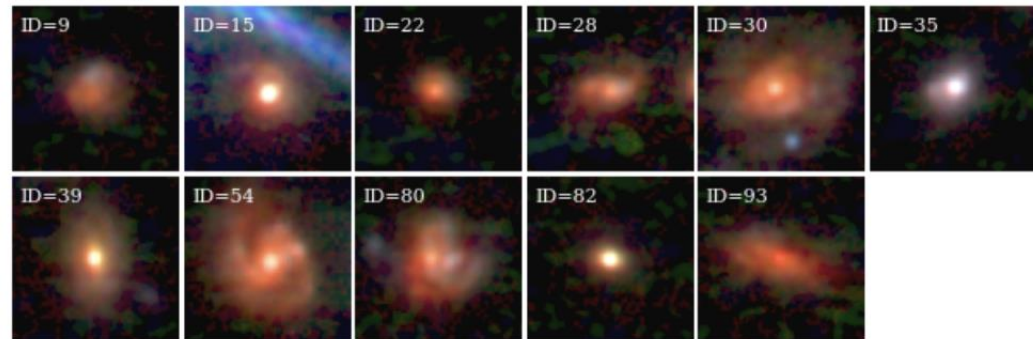
Pa β (rest $1.282\mu\text{m}$) with F405N

Rest-UVJ with F115W, F182M and F410M

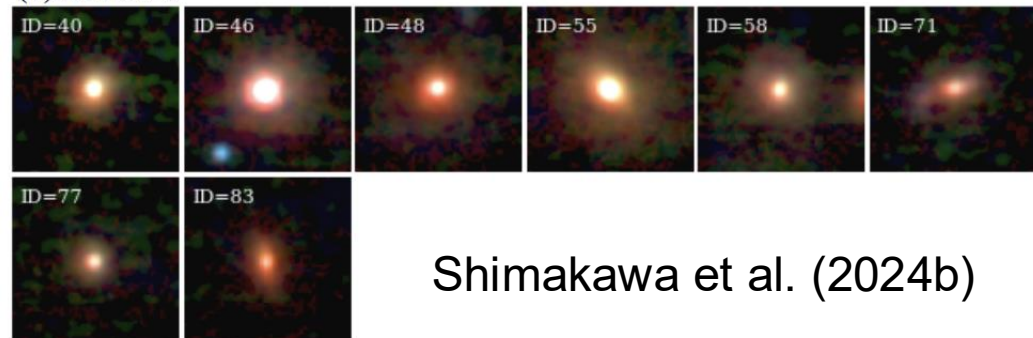
Postage stamps

(F115W, F182M, and F410M)

(a) N-HAEs



(b) X-HAEs



Shimakawa et al. (2024b)

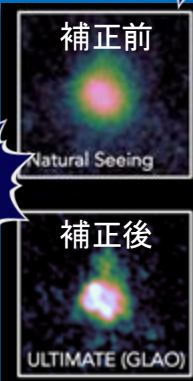
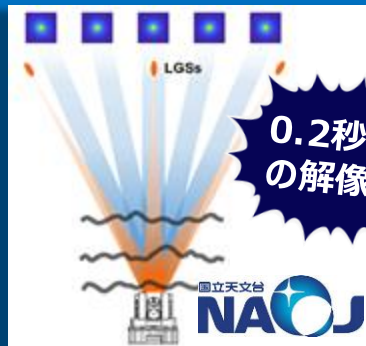
究極のすばる望遠鏡へ (ULTIMATE-Subaru)

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)

国立天文台が開発中



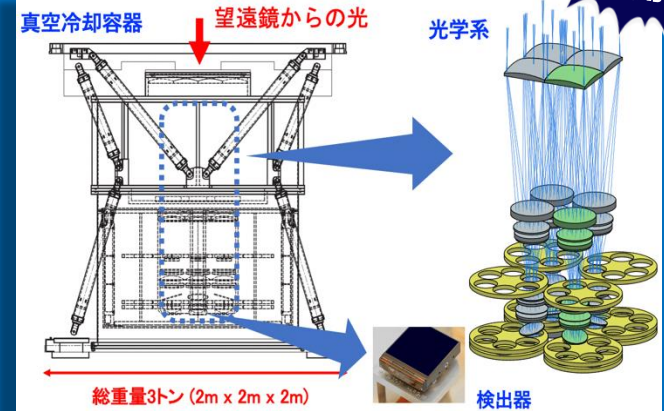
ULTIMATE
S u b a r u



広視野近赤外カメラ(WFI)

視野200平方分角 (2028年度完成予定)

特別推進研究で開発



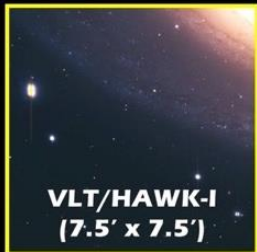
Subaru/MOIRCS
(4' x 7')



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')



JWSTの
20倍視野

@2μm

ジェームズ・ウェッブ
宇宙望遠鏡 (JWST)



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



ULTIMATE-Subaru

特別推進研究

(2024-2030年度の7年間で総額7億円)

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）	森鼻久美子	（国立天文台）
櫛引 洸佑	（国立天文台）		

研究体制



児玉忠恭 (東北大学)

研究代表者, 研究全体の統括

理論研究

長峯健太郎 (大阪大学)

- 銀河・銀河団の理論研究を統括
- 宇宙論的流体銀河形成シミュレーション

矢島秀伸 (筑波大学)

- 原始銀河団のシミュレーション
- 宇宙再電離プロセスの数値計算

杉村和幸 (北海道大学)

- 遠方大質量銀河の理論的予想
- 初代星・初代銀河のシミュレーション

守屋堯 (国立天文台)

遠方超新星の理論 + 観測 / Euclid・Romanを使った予備研究

研究員 (2028-2030)

観測研究

児玉忠恭 (東北大学)

- WFIの観測研究と成果創出を統括
- SWIMS/Euclid/Romanでの予備研究

井上昭雄 (早稲田大学)

- WFI狭帯域フィルター撮像観測
- 超遠方宇宙銀河・電離バブル探索

久保真理子 (東北大学→
関西学院大学)

- WFI中間帯域フィルター撮像観測
- 大質量銀河・原始銀河団の探索

小山佑世 (国立天文台)

WFIのサイエンス検討責任者 / WFI観測遂行とデータ解析

Nuo Chen 特任助教 (2025-)

装置開発

本原顕太郎 (東大)
櫛引洸佑 (国立天文台)

- WFIの開発責任者
- 検出器の調達

秋山正幸 (東北大学)

- GLAOとWFIのインターフェース
- WFIの冷却系担当

美濃和陽典 (国立天文台)
森鼻久美子 (国立天文台)

- GLAOの開発責任者
- WFIのハワイ側受入れ担当

研究員 (2025-2029)

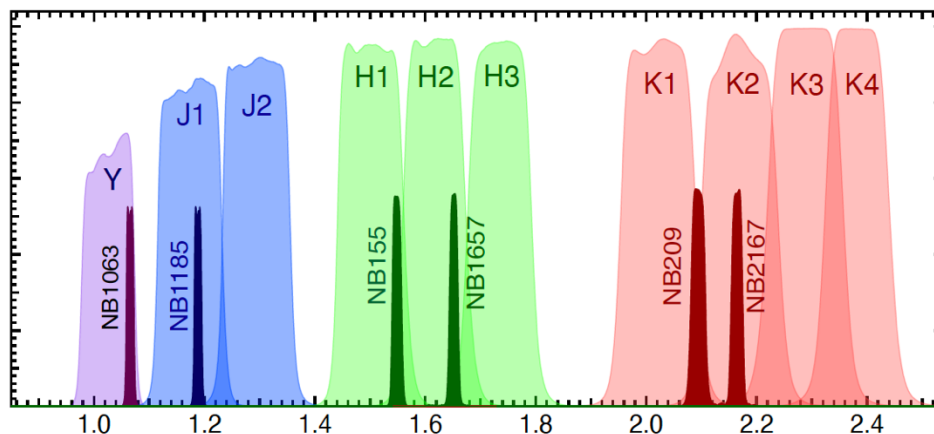


多彩で独創的なフィルター群、広視野宇宙望遠鏡と相補的

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

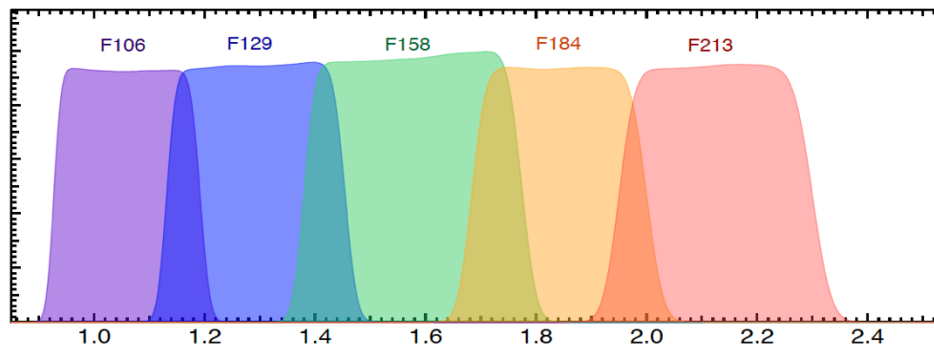


2029~
2~20 deg²

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

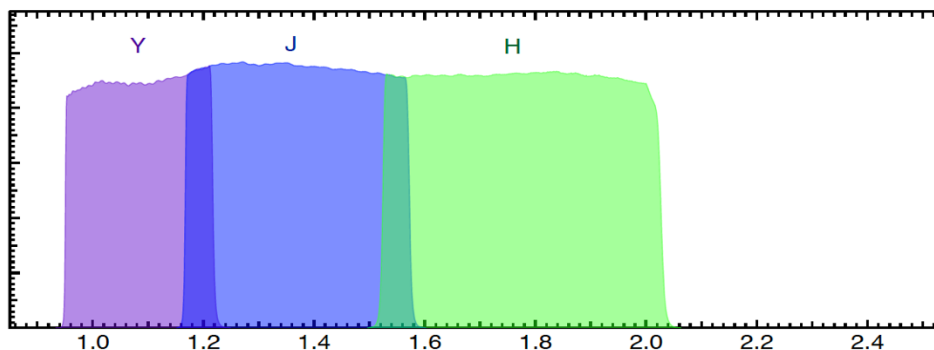
Unique and complementary!

Roman



2027~
2,000 deg²

Euclid



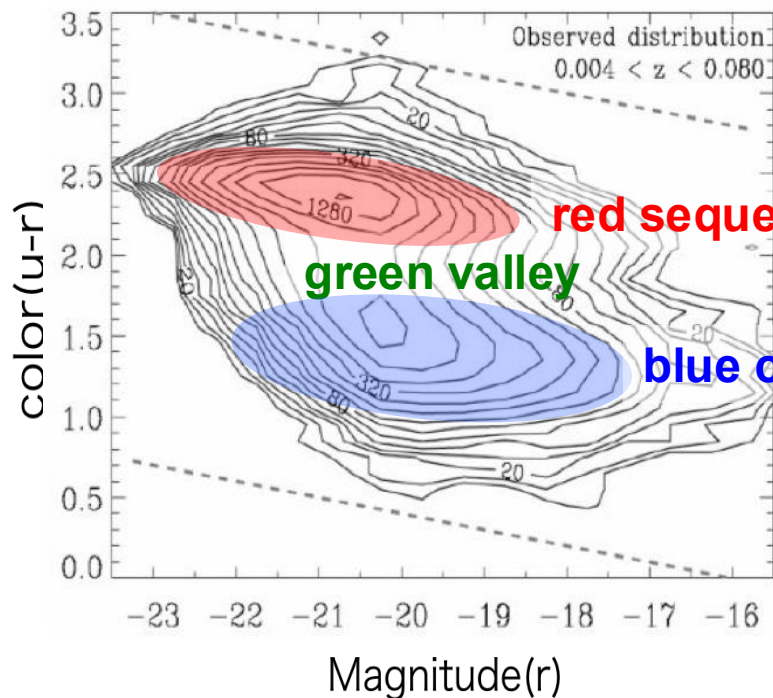
2023~
Wide: 15,000 deg²
Deep: ~ 50 deg²

λ [μm]



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

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

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

NBF: $\Delta\lambda/\lambda \sim 0.012 \leftrightarrow \Delta z \sim \pm 0.02$ or $\Delta v \sim \pm 1850 \text{ km/s}$ or $\Delta d \text{ (comoving)} \sim \pm 25 \text{ Mpc} @ z \sim 2$

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)

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

繰り返し再生

FOREVER22 シミュレーション

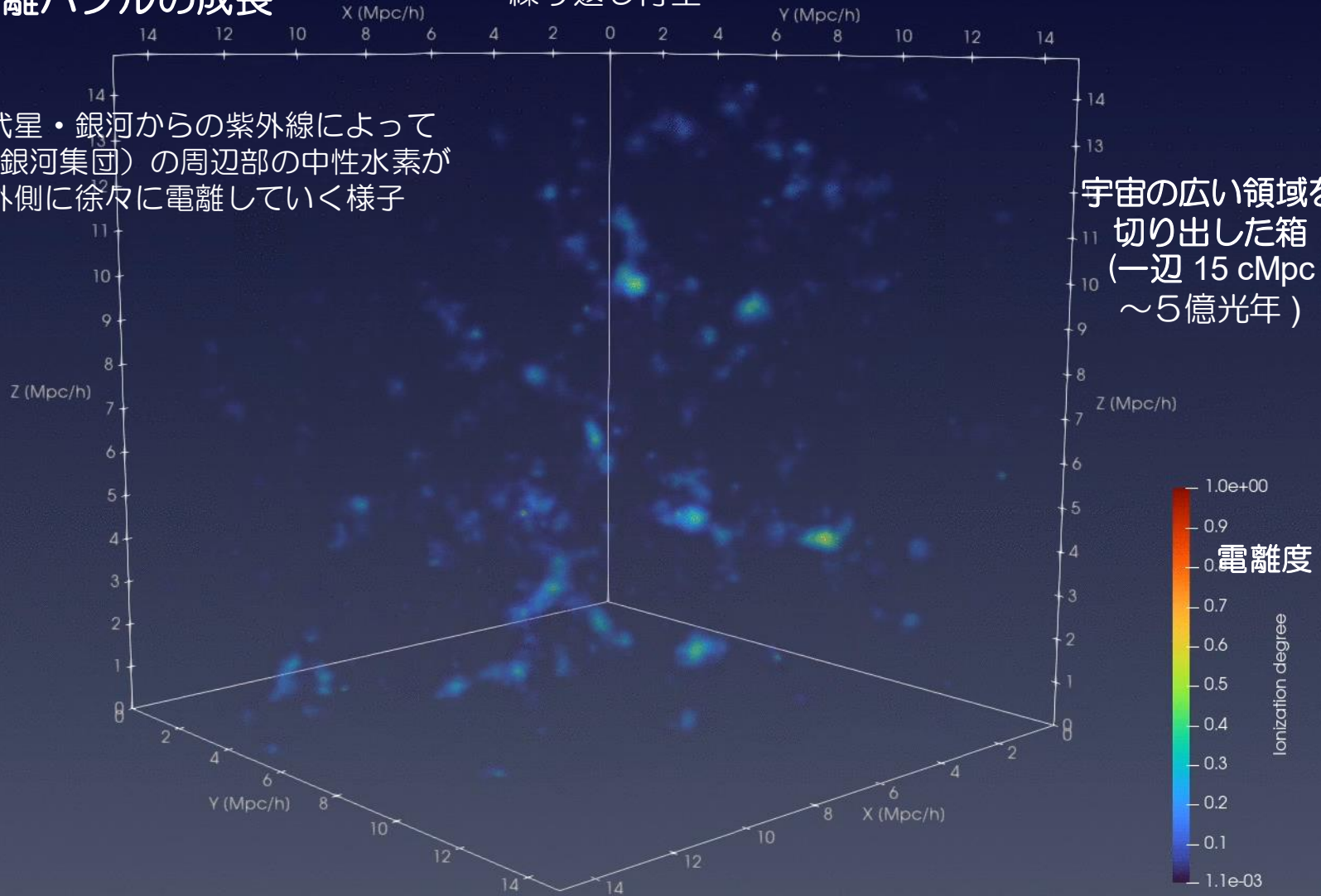
(分担者の矢島、長峯ら)

宇宙再電離の進行 ($z \sim 9$)

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

宇宙の広い領域を
切り出した箱
(一辺 15 cMpc
～5億光年)



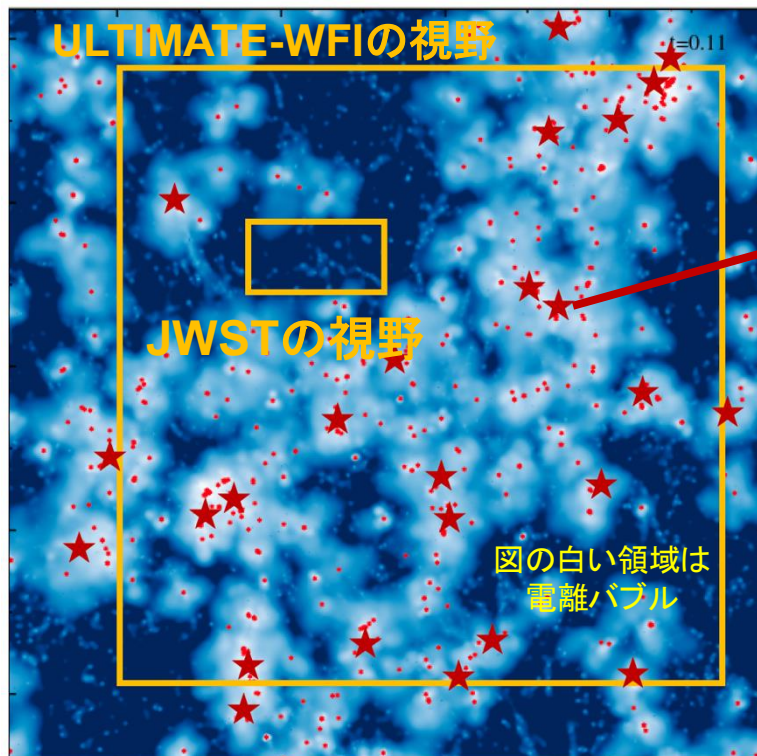
狭帯域撮像観測により宇宙再電離期の電離バブルの成長を描き出す

宇宙再電離進行の現場を実際に見撃する

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)

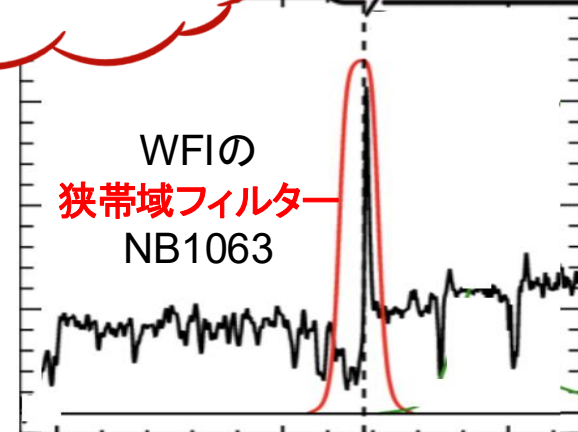
z=8.3, 原始銀河団周辺のイメージ図



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

大きく赤方偏移した
Ly α 輝線(z=7.7)

フラックス密度



波長 1.06 μ m

★ Ly α 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

4平方度でz~8のLAEが100個くらい受かるか

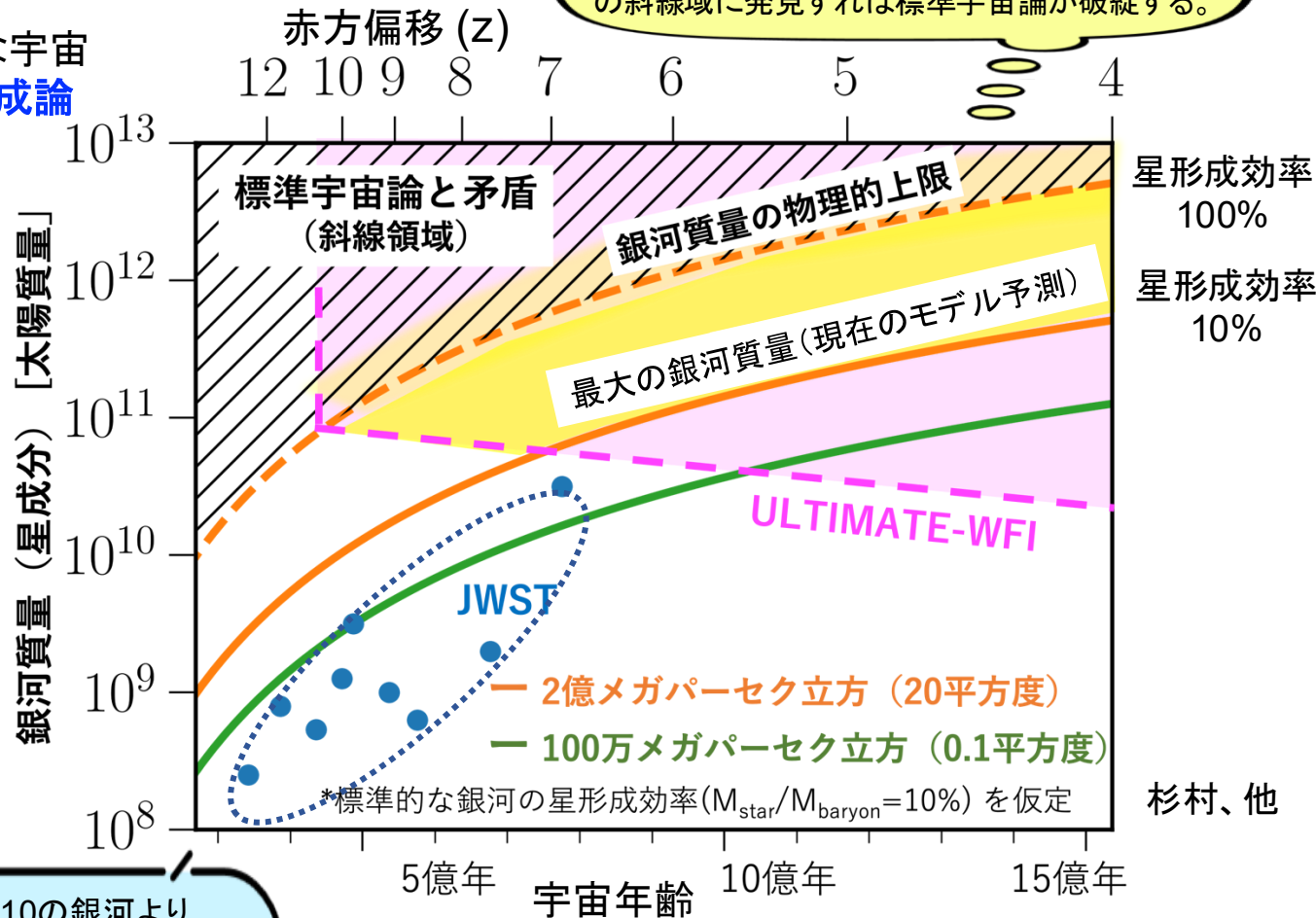
※ JWSTの狭い視野では、空間分布はわからない。
Romanは狭帯域フィルターがないので探せない。

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

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



杉村、他

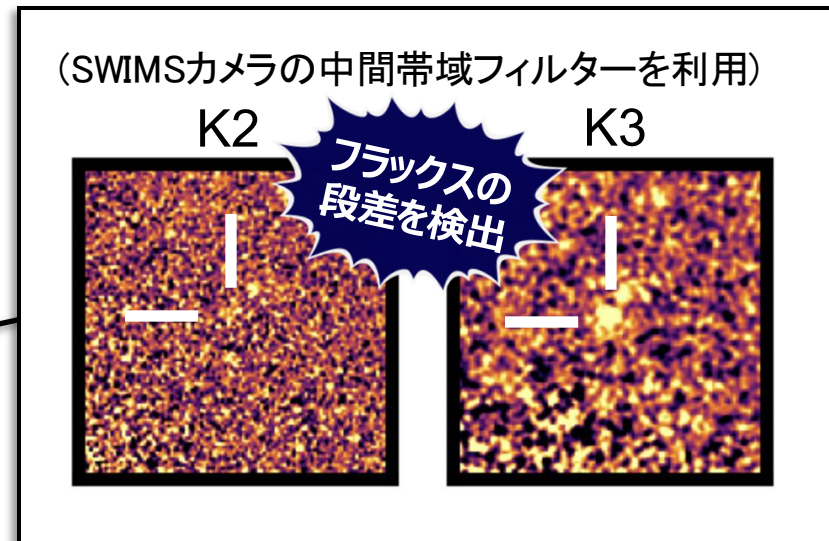
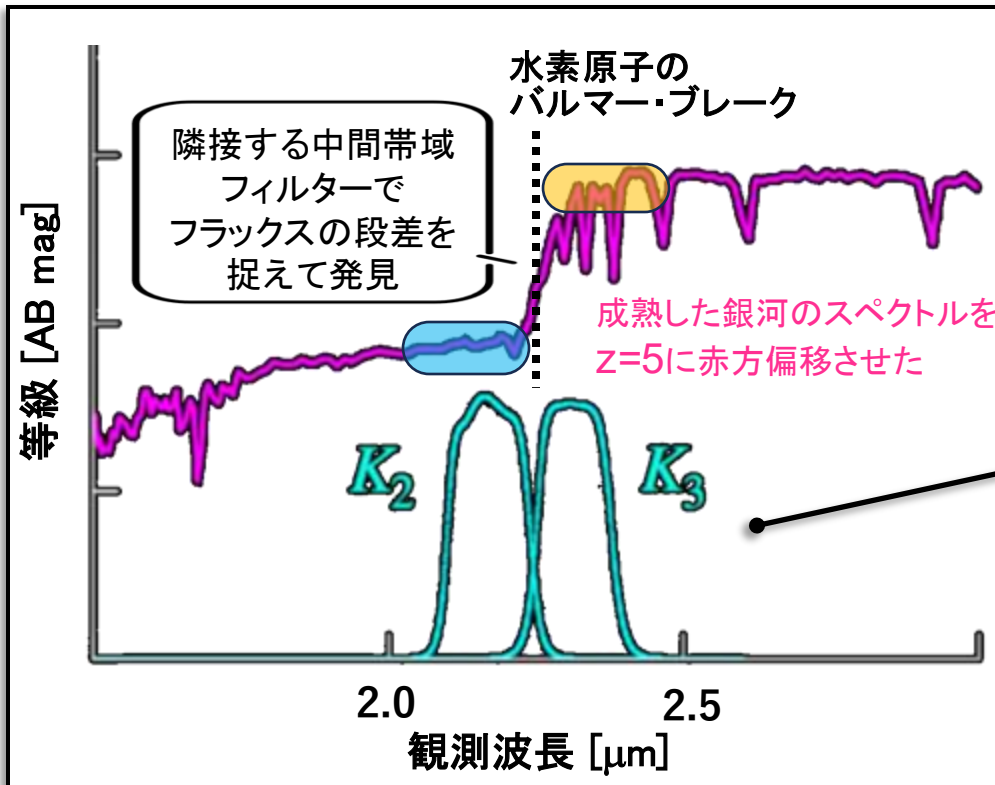
JWSTで見つかる $z \sim 10$ の銀河より、WFIで見つかる $z \sim 5$ の巨大銀河の方が、銀河形成論にとって脅威になりうる。

※) 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

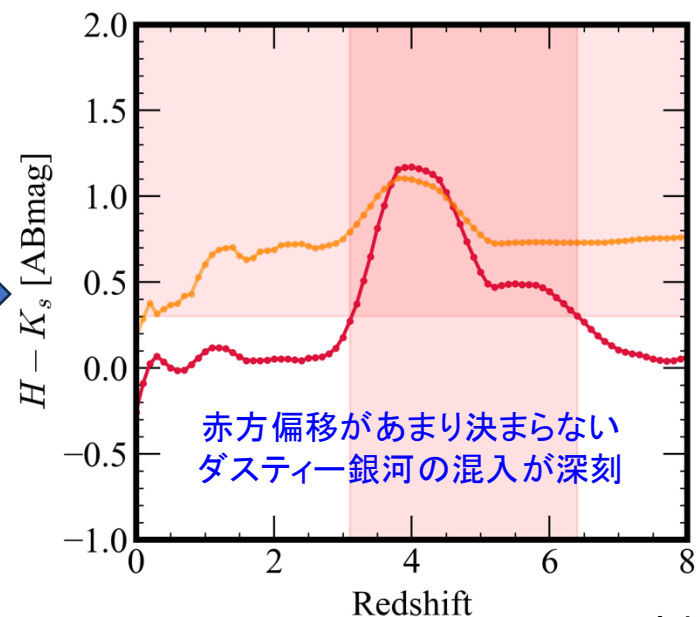
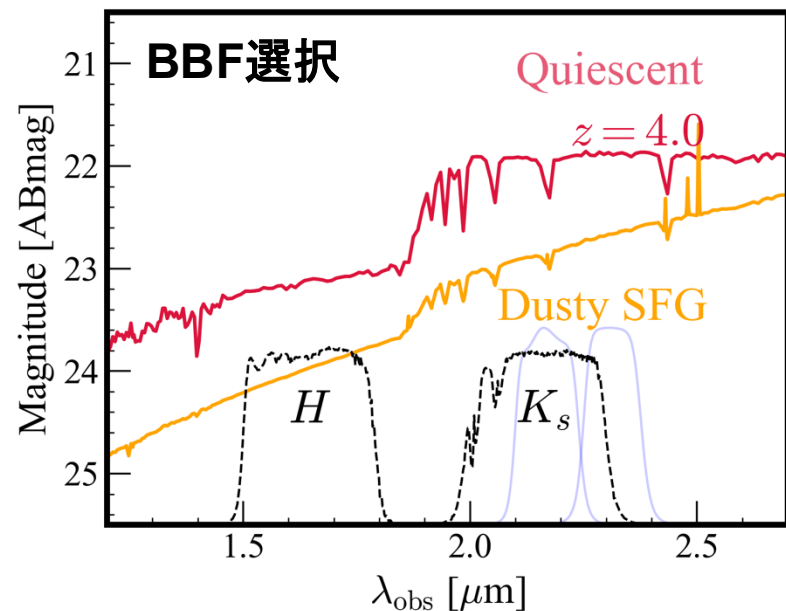
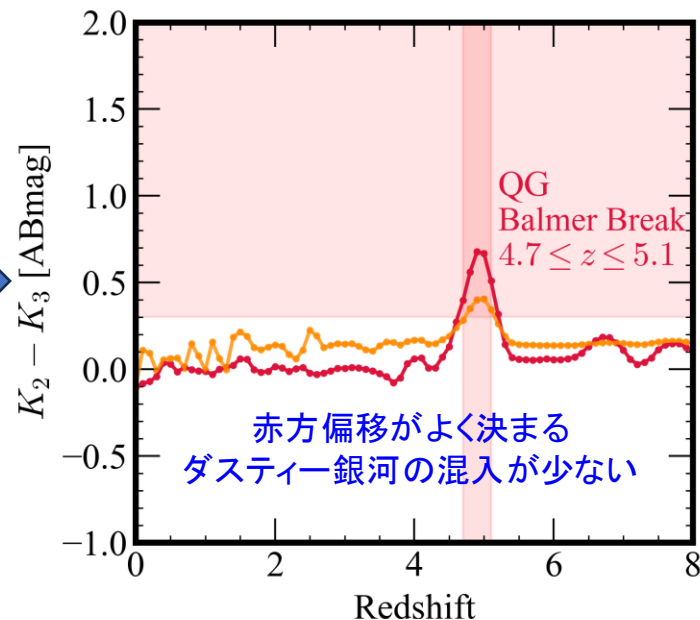
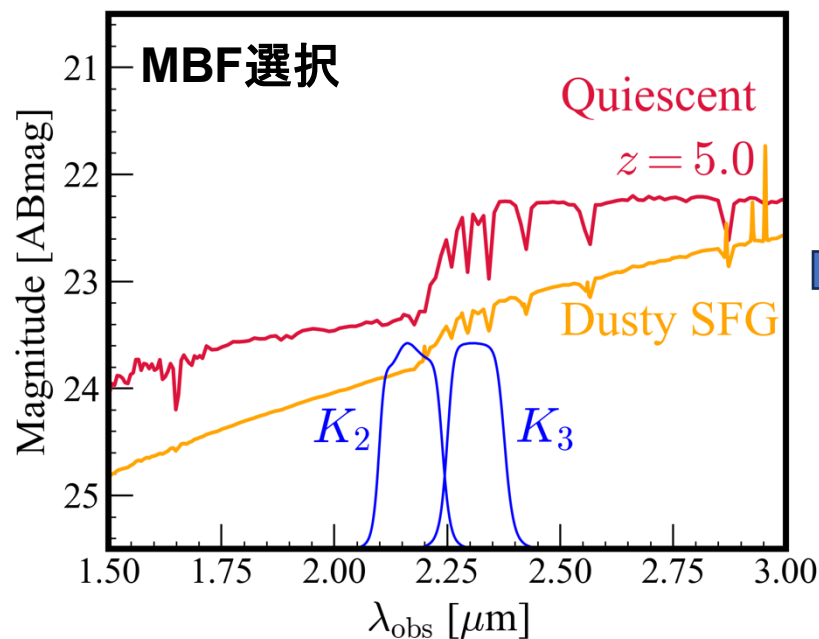
先行研究では $z \sim 4$ までの探査に限られる。WFIで、より過去の時代($z \sim 5$)へと拡張！



高橋(東北大)ら

※ JWSTの狭視野では見つからない(分光確認に使う！)

中間帯域フィルターでバルマーブレーク銀河を選択する利点





広視野近赤外線カメラ(SWIMS)による大規模撮像サーベイ

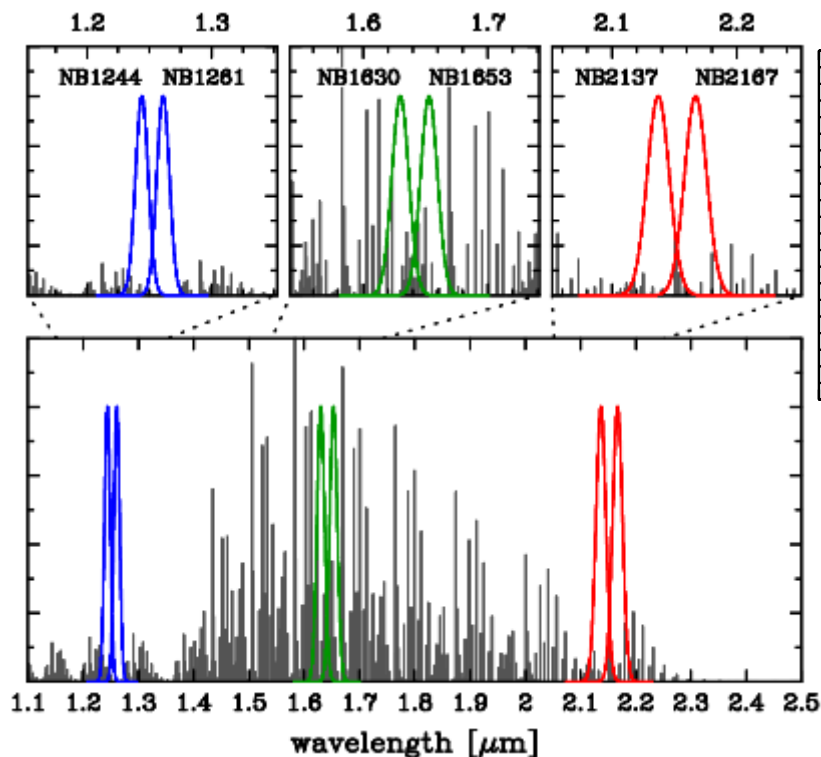
SWIMS-18

代表：児玉

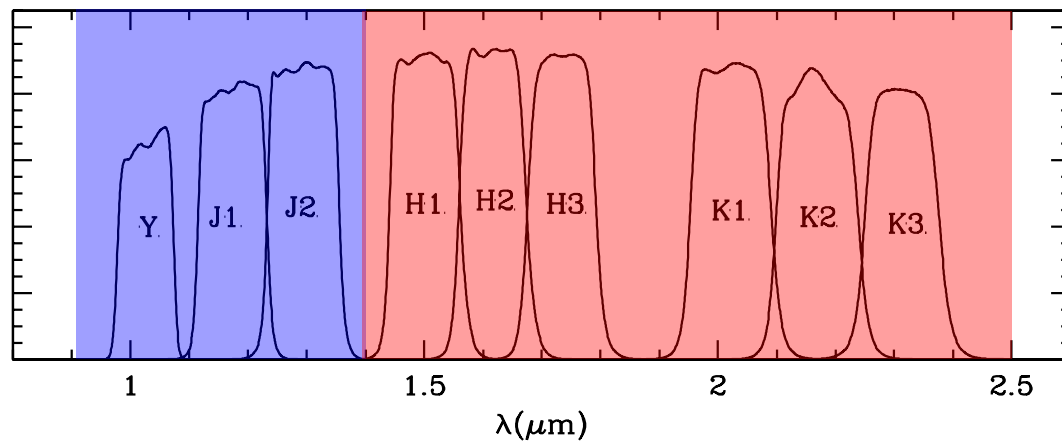
2021~2022年にすばるでパイロット観測
2025年よりTAOで本格観測開始

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)



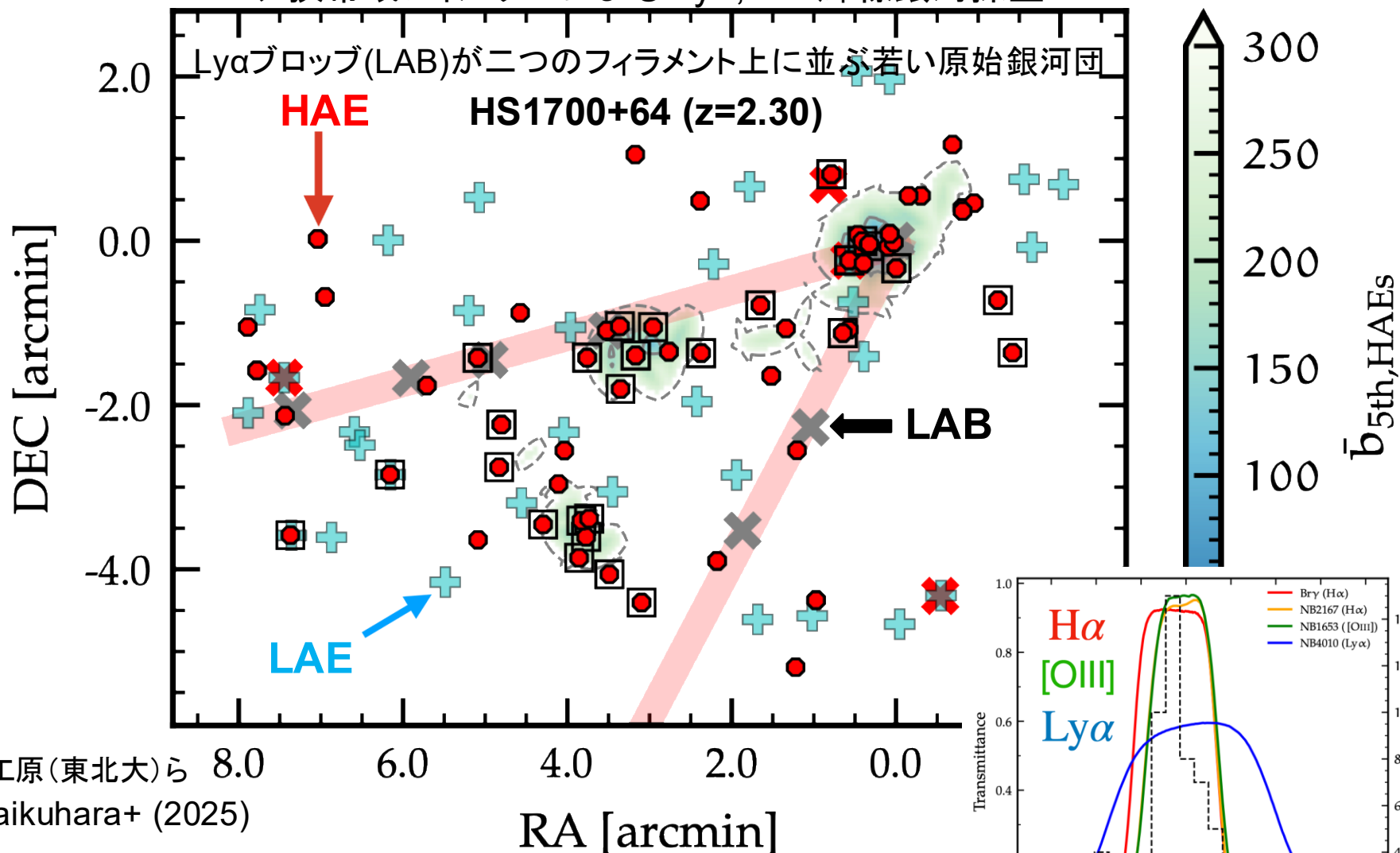
1<z<5の時代の、星形成率限界（輝線銀河）と星質量限界（一般銀河）の統計的銀河サンプルを構築し、系統的研究を行う。

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

HIMMEL: HI Mapping with Multiple Emission Lines

ペア狭帯域フィルターによる Ly α , H α 輝線銀河探索



大工原(東北大)ら
Daikuhara+ (2025)

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が多い

→ 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

空間分解した狭帯域撮像(輝線マップ=星形成領域マップ)

Galaxy Anatomy with Narrow-Band AO imaging with Subaru (GANBA)

Stacked images (Ks and NB) with FWHM=0.15-0.25" by IRCS+AO/Subaru

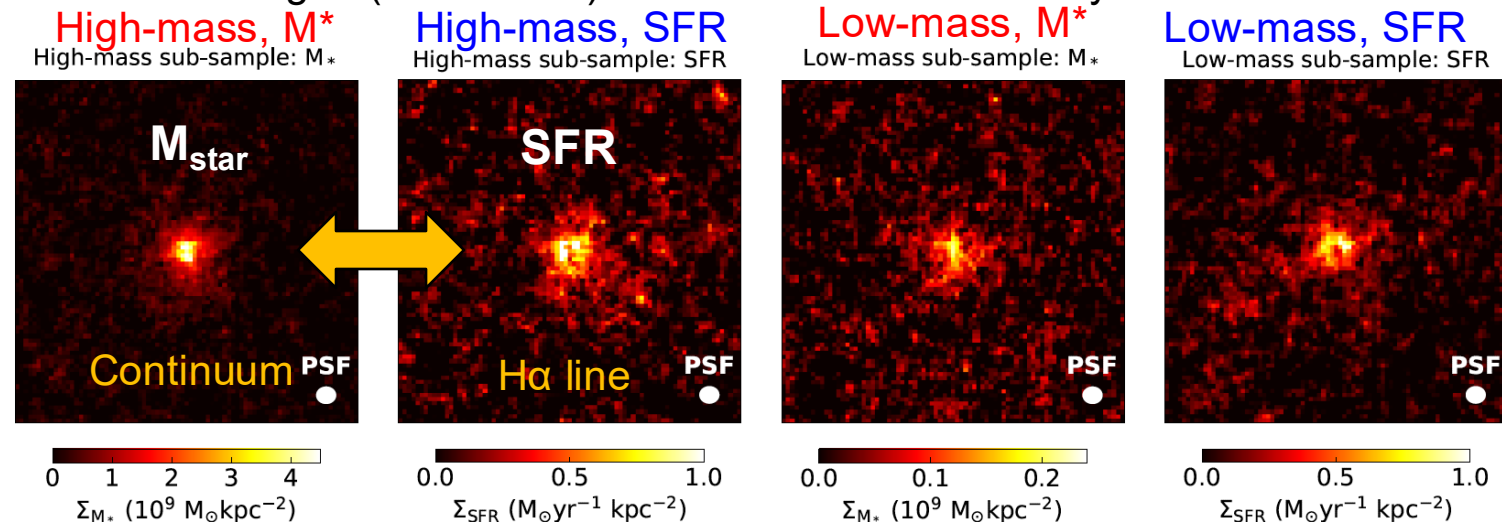
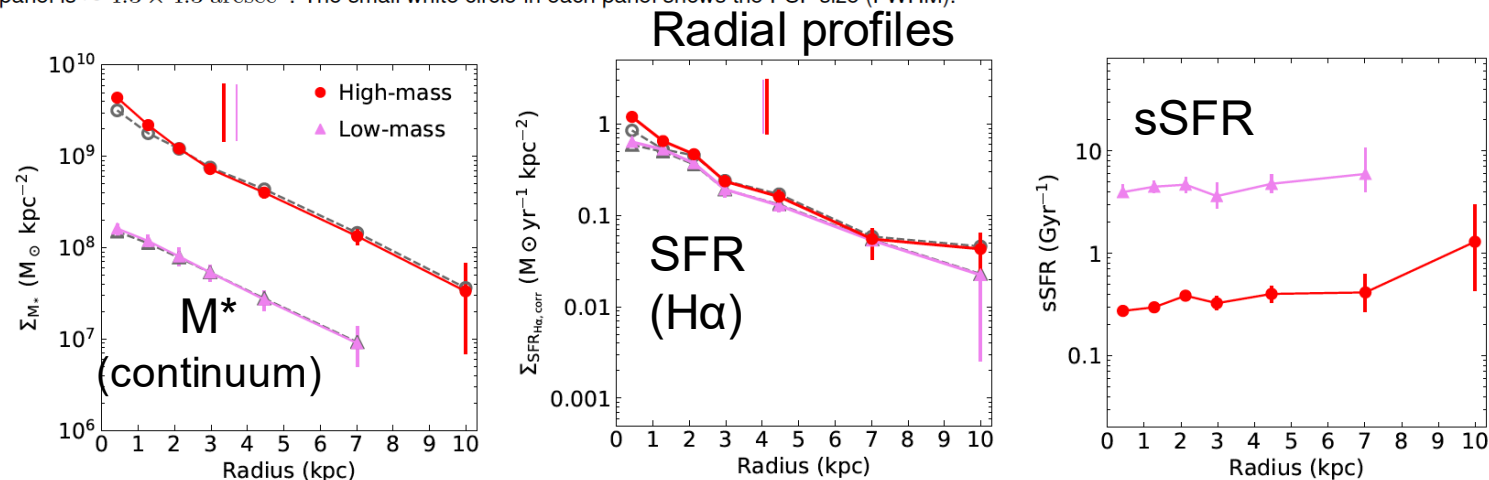


Fig. 4. Stacked images of the stellar mass and $\text{SFR}_{\text{H}\alpha, \text{corr}}$ for the two sub-samples with the radially dependent $A_{\text{H}\alpha}$ (subsection 4.1). The box size of each panel is $\sim 4.3 \times 4.3 \text{ arcsec}^2$. The small white circle in each panel shows the PSF size (FWHM).



インサイド・アウトな成長? 1arcmin² (IRCS) → 200 arcmin² (ULTIMATE)

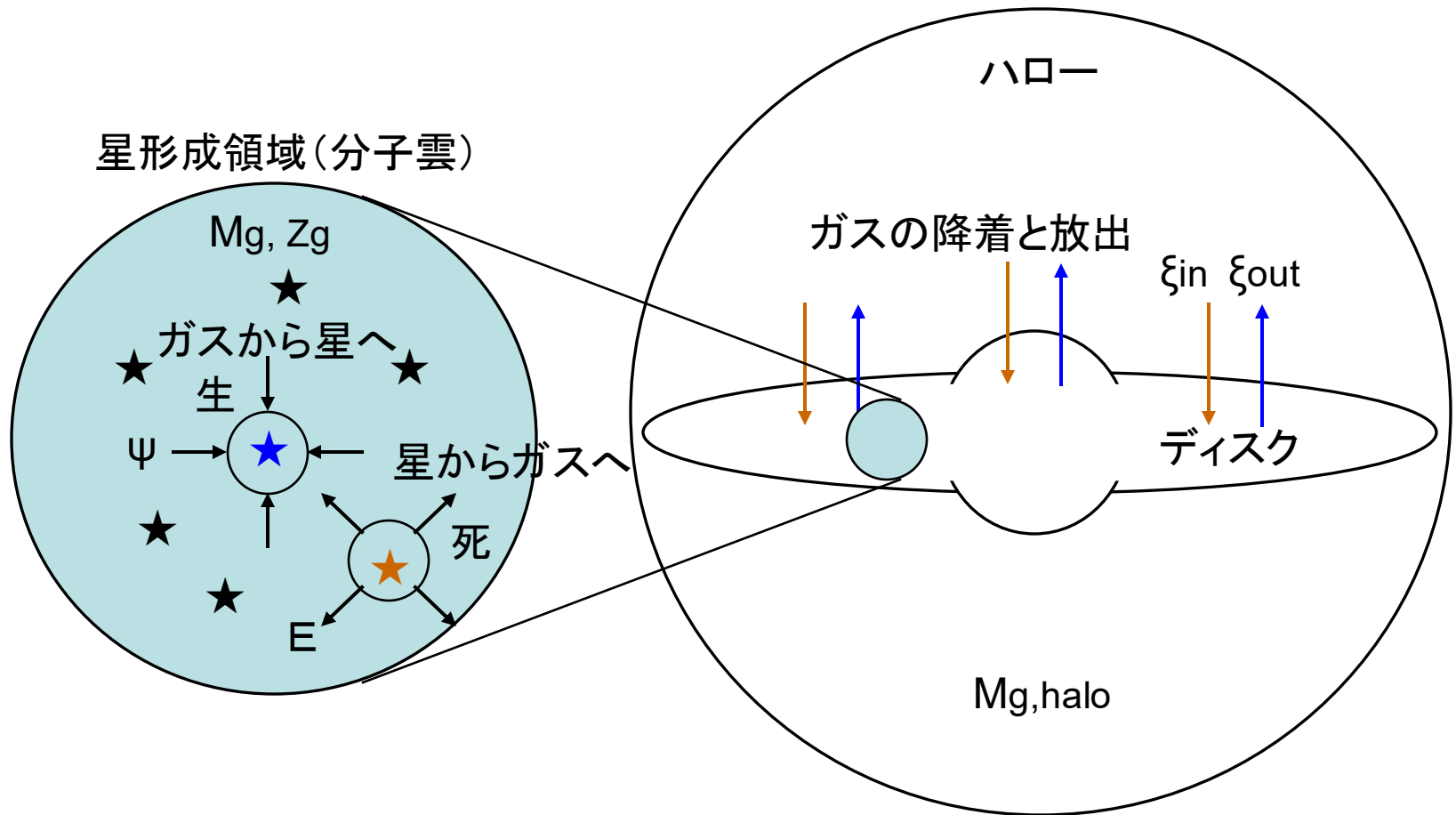
Suzuki et al. (2019)

ULTIMATE-Subaru



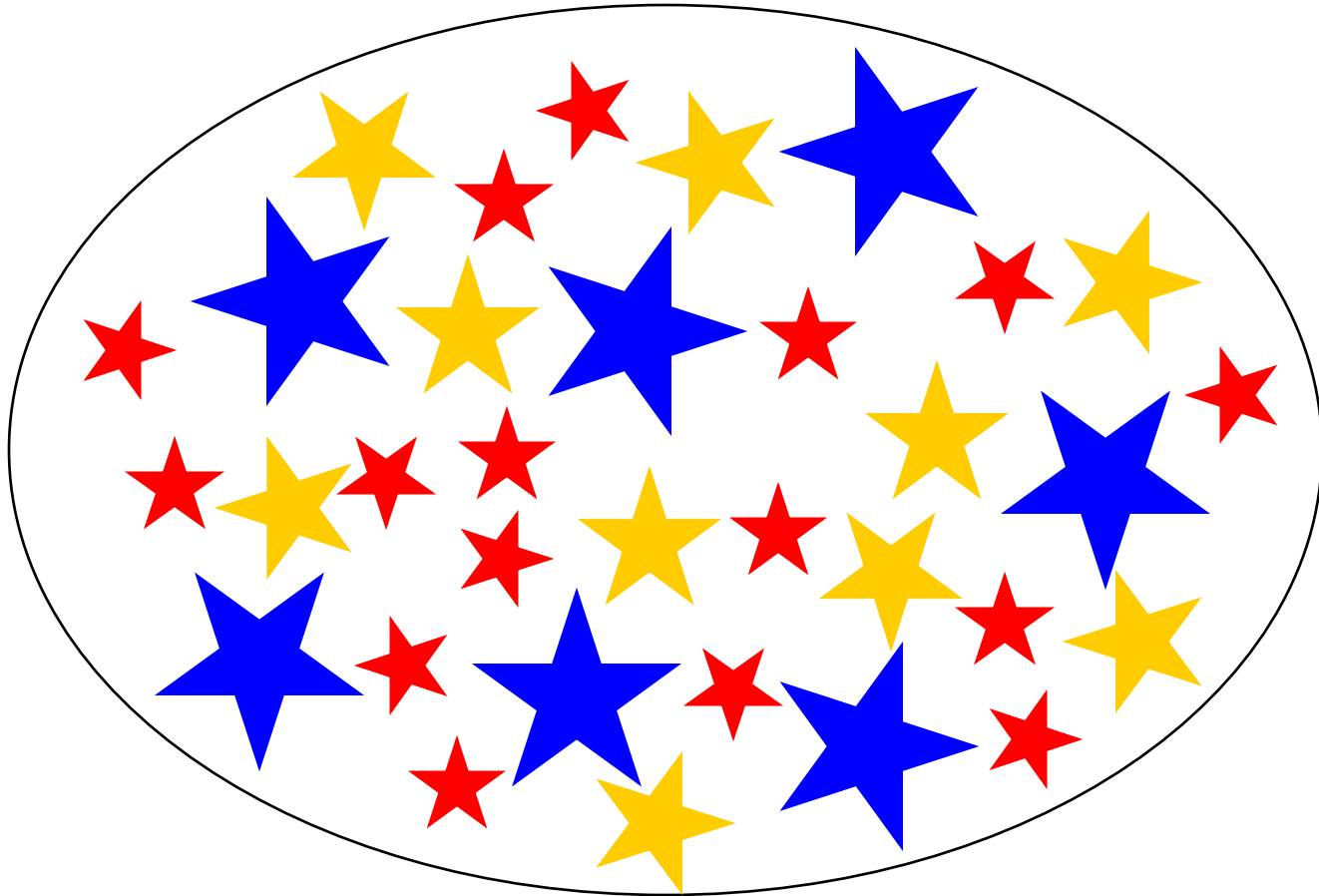
- **ULTIMATE-Subaru 計画 (GLAO + WFI) が、予算も獲得して2024年度より本格始動 (FWHM=0.2'' + FoV=14'x14')。2028年度ファーストライトを目指す**
- **静穏な銀河に対しては中間帯域フィルターが有効**
 - 遠方($z \sim 5.4$ まで)の重い銀河の探査
 - SEDフィットの精度向上により正確な物理量決定 (赤方偏移、星質量、年齢、星形成率)
- **星形成銀河+AGN に対しては狭帯域フィルターが有効**
 - 宇宙再電離史 (電離バブルの成長) w/ Ly α 輝線銀河 ($z=8 \sim 9$)
 - HIガス・トモグラフィーと AGN選択 w/ ペアNBフィルター ($z=2 \sim 2.5$)
 - 星形成活動の伝搬と終焉 w/ 空間分解したNB輝線マッピング ($z=1 \sim 3.7$)
- **Euclid/Roman などの広視野宇宙望遠鏡と相補的 (フィルターの多様性)**
- **JWST/ELT への優れたターゲットの供給**

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

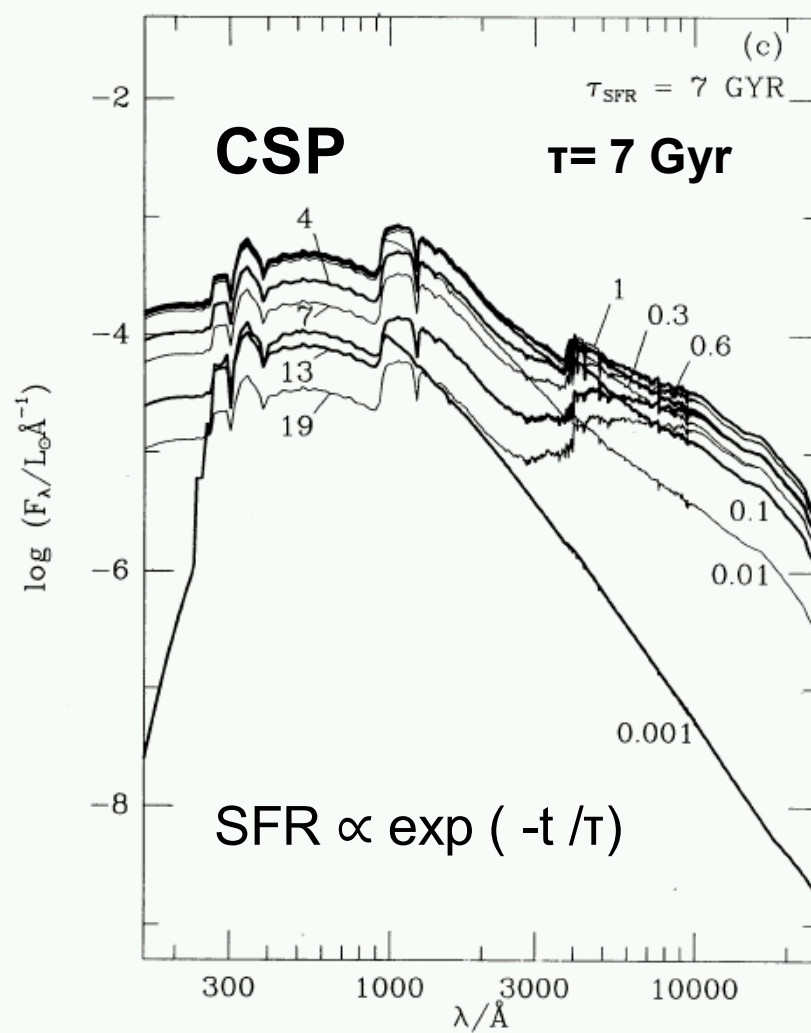
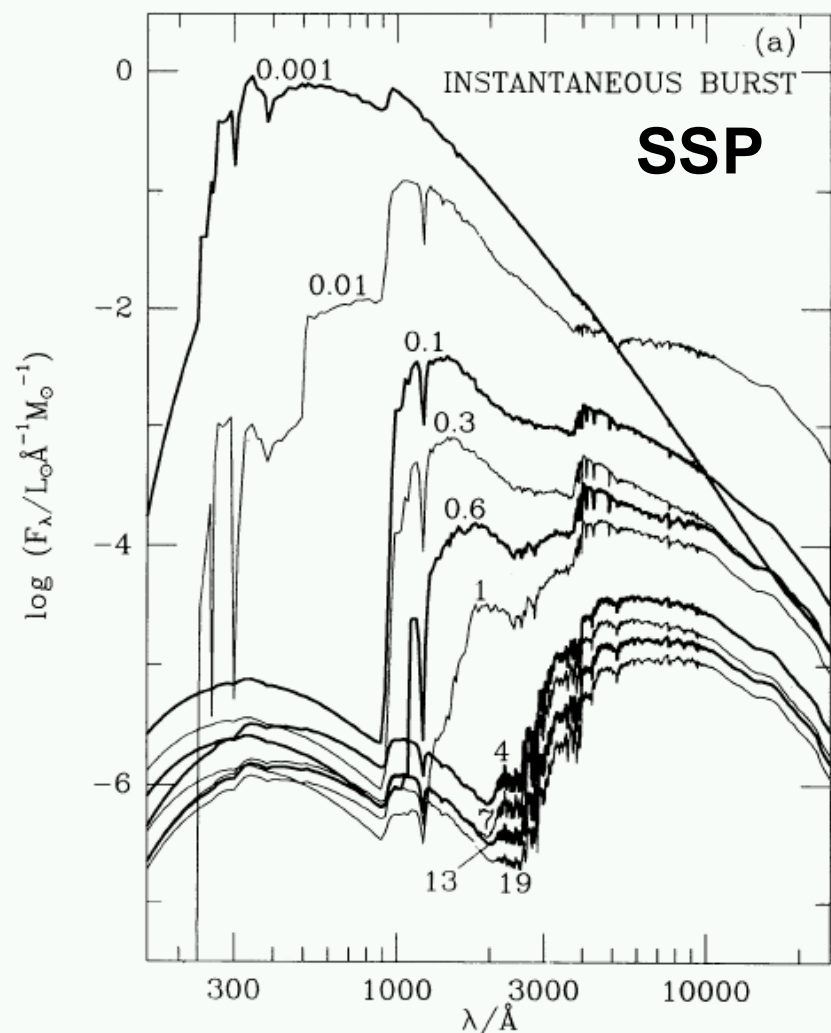


大質量星＝高温＝青い＝短命

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, PFS, ULTIMATE), 狭・中間帯域フィルター, Euclid・Roman衛星による広視野サーベイ(すばるとの協調観測)
 - ❖ 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。

