

4年生ゼミ説明会（2024年2月8日）

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 -

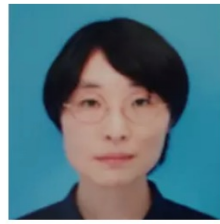
児玉 忠恭（こだま ただゆき）

E-mail: kodama@astr.tohoku.ac.jp

NGC2403 (Subaru/Suprime-Cam)



児玉 忠恭
Tadayuki Kodama
Professor



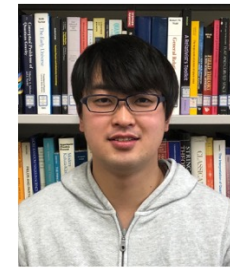
久保 真理子
Mariko Kubo
Assistant Professor



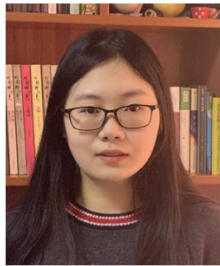
山本 直明
Naoaki Yamamoto
D3 student



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

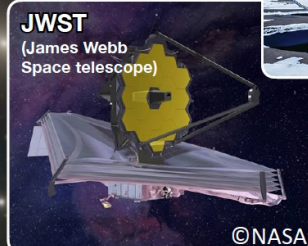
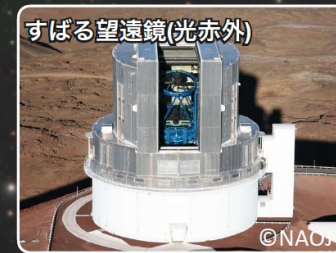
研究室のメンバー

<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】

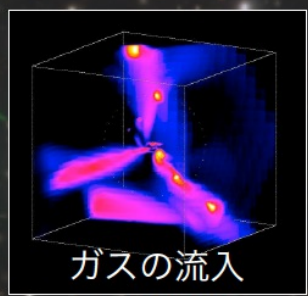
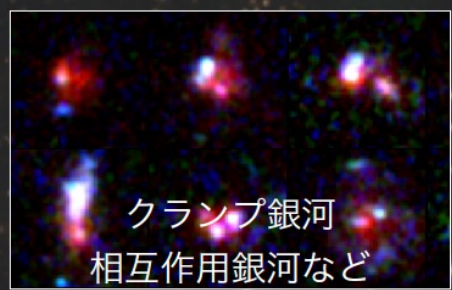


Our Website

<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

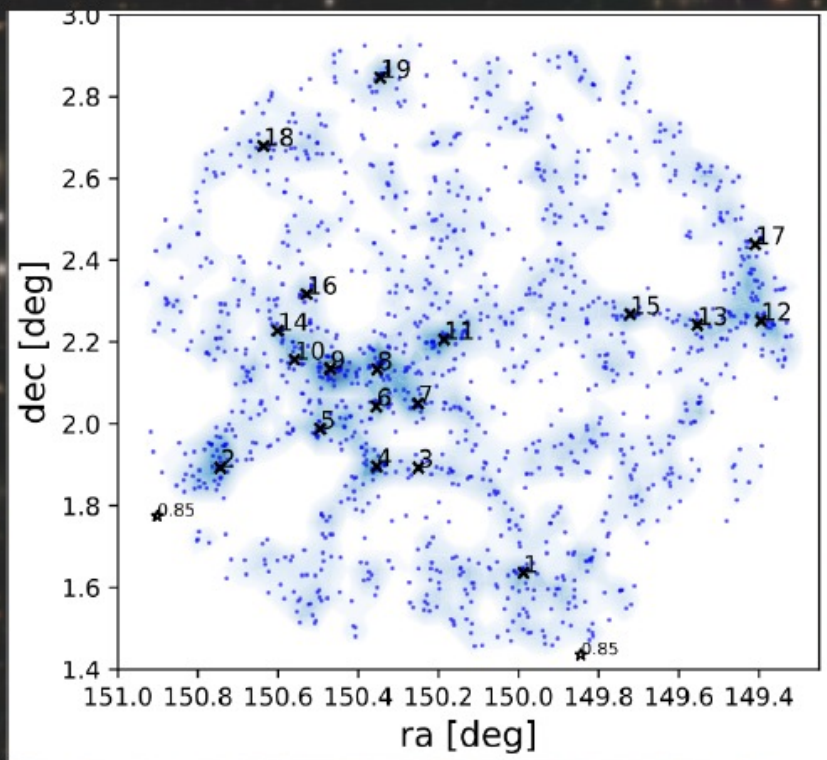


星形成の加速と減衰
ハロー・質量の集積
AGNとの共進化
形態の獲得、環境効果

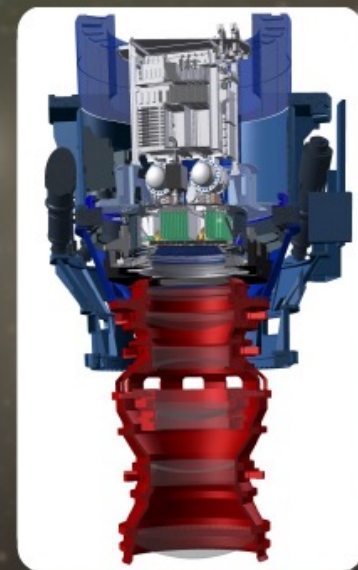
現在の銀河・銀河団



宇宙大規模構造の発展と銀河の進化



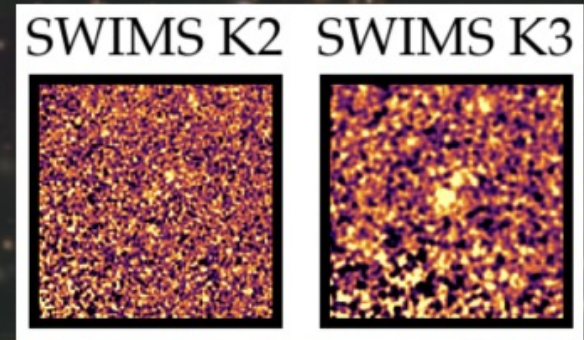
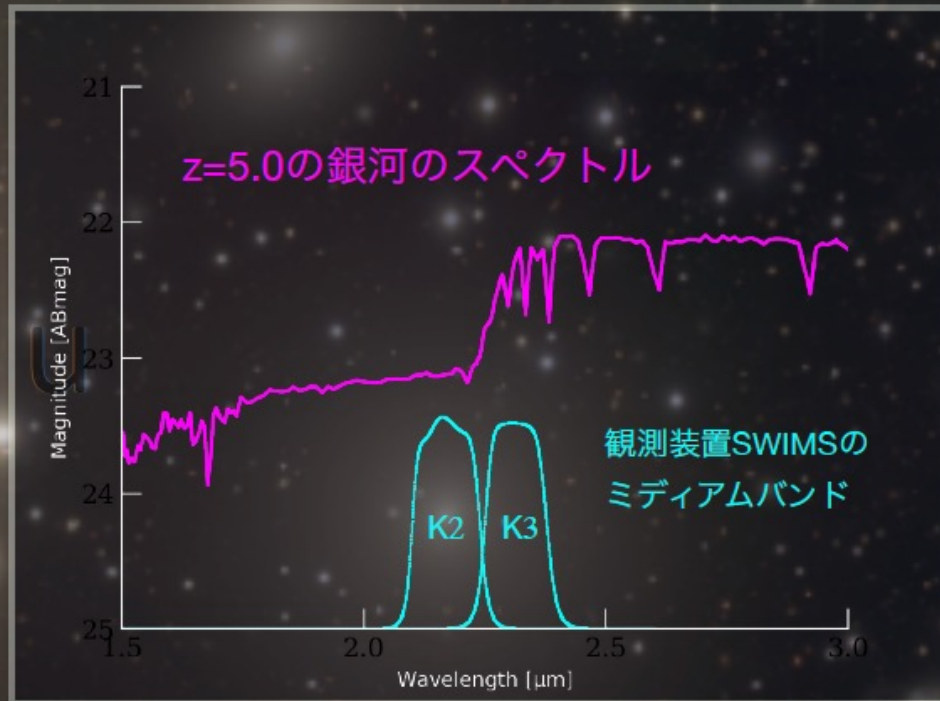
HSCによって見つかった大規模構造



Hyper Suprime Cam

宇宙の大規模構造の成長はそこに居る銀河の周辺環境を変化させ、星形成活動や活動銀河核(AGN)の発現に影響を与えると考えられます。この物理過程を明らかにするためには、様々な時代と環境を網羅した大規模な銀河サンプルを使った統計的な調査が重要になります。→ Subaru/HSC(可視撮像)、PFS(分光)、Euclid(近赤外撮像+グリズム分光)

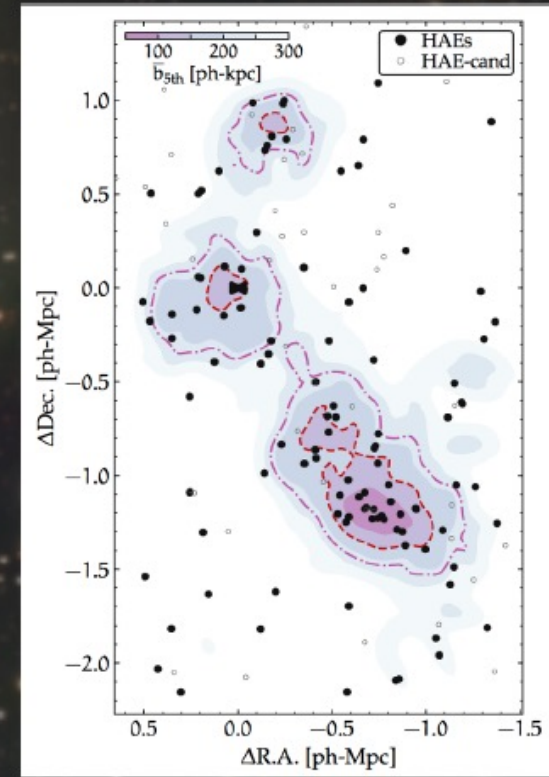
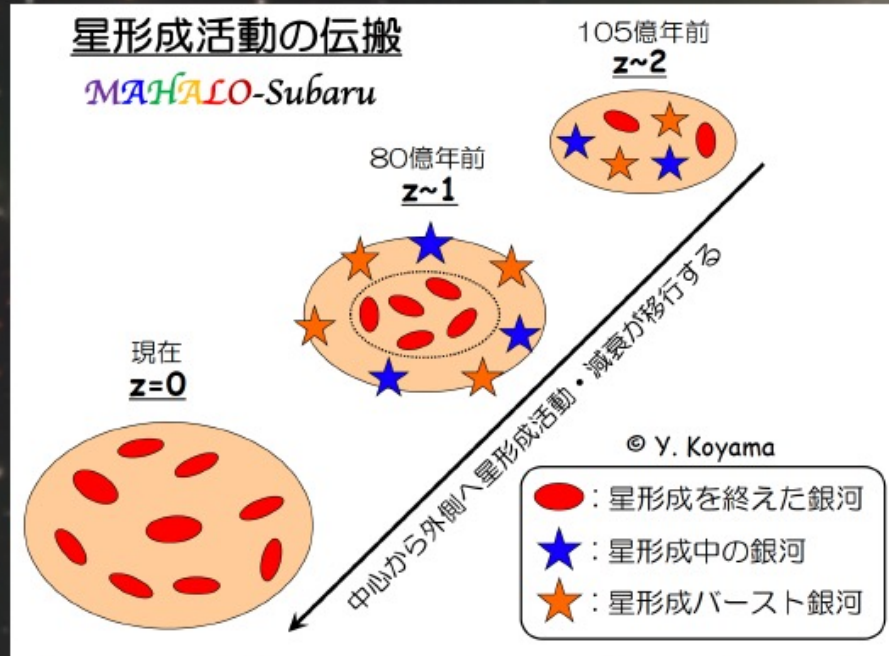
初期宇宙の巨大銀河誕生史



K2|K3フィルター
で撮影された巨大
銀河の候補

現在の標準的な銀河形成論では、小さな銀河が集まり合体しながら大きな物へと成長していくと考えられています。しかし物質が多く集まった高密度領域では銀河が加速的に成長できることが期待され、宇宙初期の時代であっても、巨大で成熟した銀河が既に形成されている可能性が考えられます。そのような遠方の星形成を終えた大質量銀河を発見することで銀河の誕生・成長史に強い制限をつけることができます。

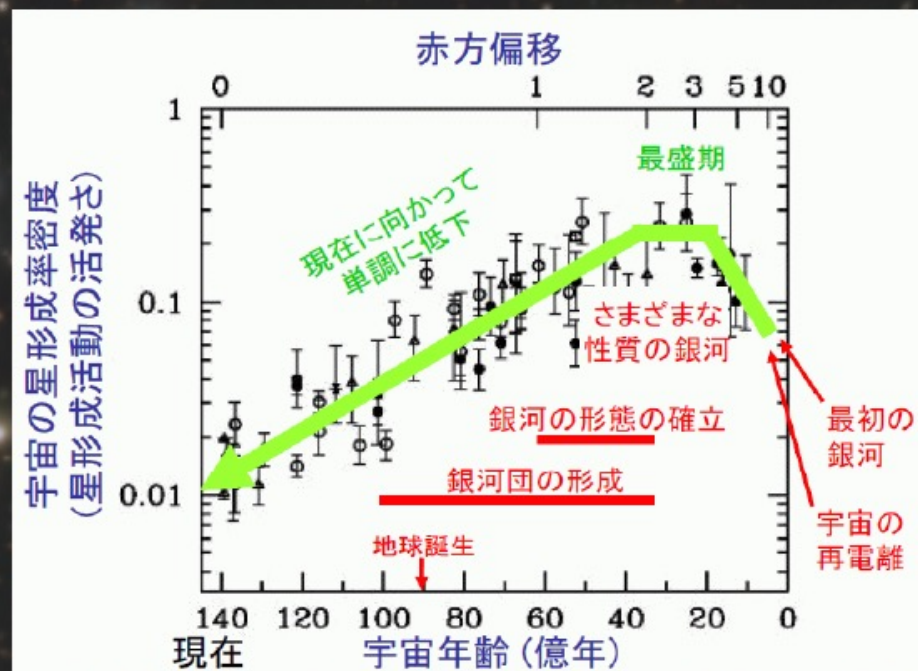
原始銀河団の形成と初期環境効果



110億年前の原始銀河団

銀河が密集した天体である銀河団には、既に星形成活動を終えた銀河が多く存在しており、銀河の棲む「環境」が銀河の形成進化に影響を与えています。我々は、初期宇宙から現在に至るまでに、環境が銀河の形成進化にどのような具体的な影響を与えているのかを研究しています。さらに今後は、JWSTによる観測によって、これまでには調べられてこなかったより小質量な銀河から大質量銀河までを包括的に調査を行い

銀河の形態獲得と活動性の変遷

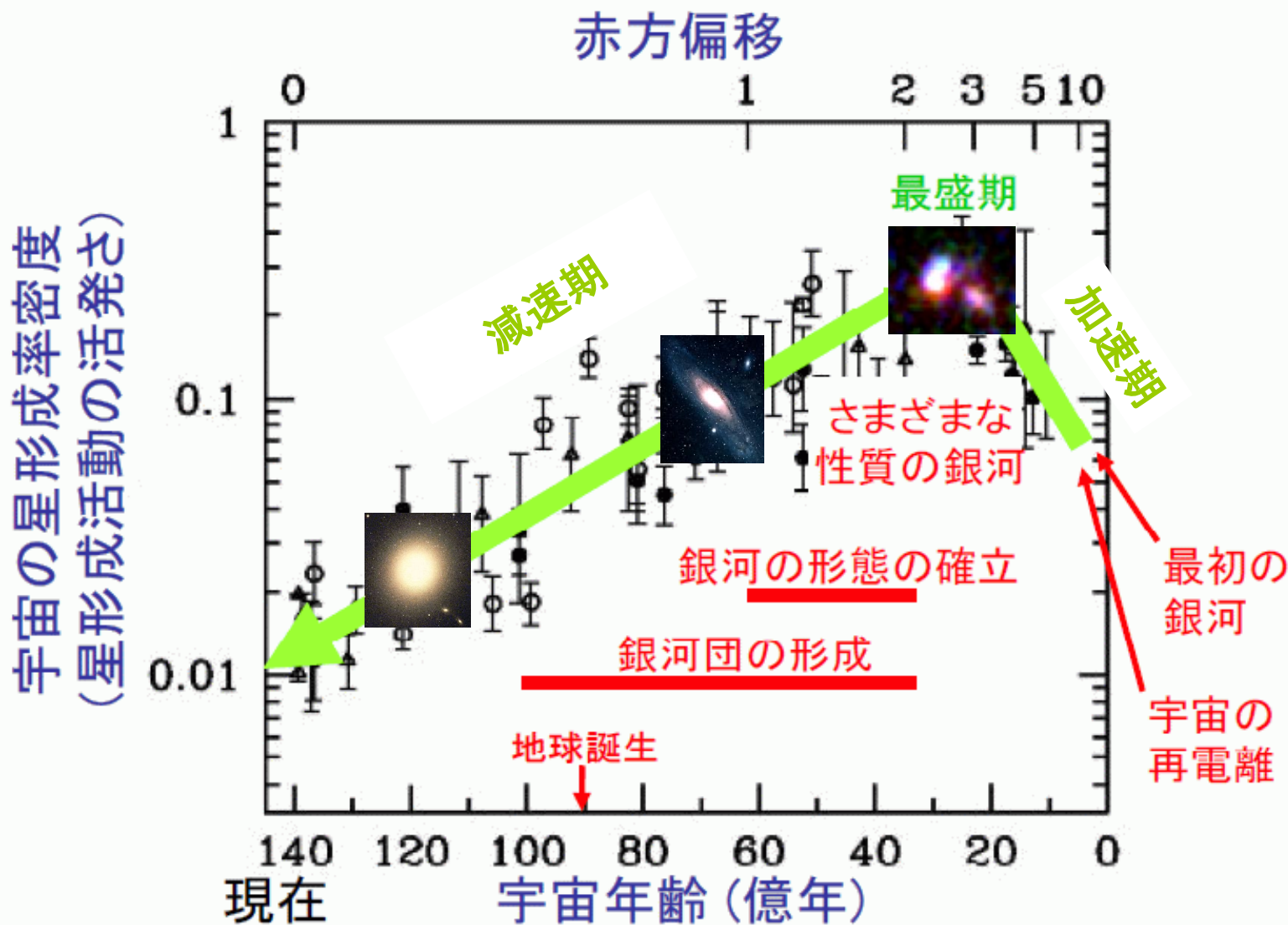


すばる望遠鏡/PFS

宇宙の星形成活動は今からおよそ110億年前にピークを迎え、その後減衰してきています。銀河の形態が分化し確立するのも同時期です。それらの変遷を司る物理を理解するには、様々な時代の宇宙の大規模銀河サンプルについて、高解像度の撮像と精密な分光観測を行い、銀河の構造や進化段階、物理状態を正確に把握することが重要です。宇宙望遠鏡JWSTや、すばる望遠鏡の新装置PFS (2400個の銀河を同時分光)が鍵。

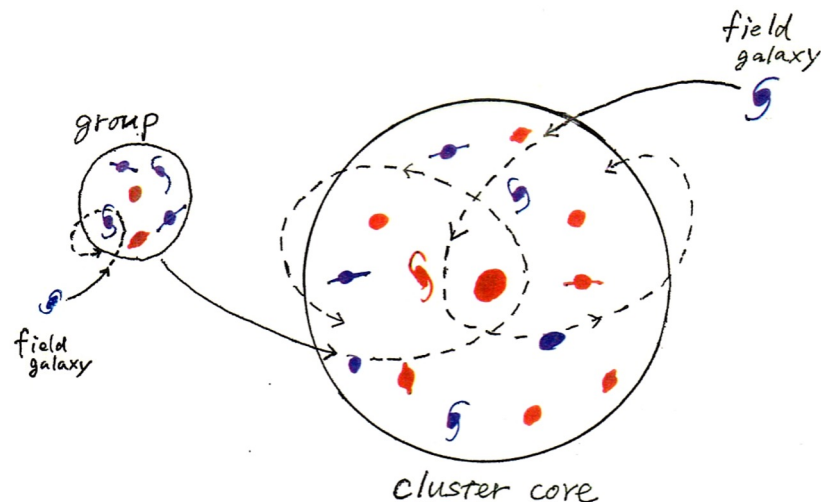
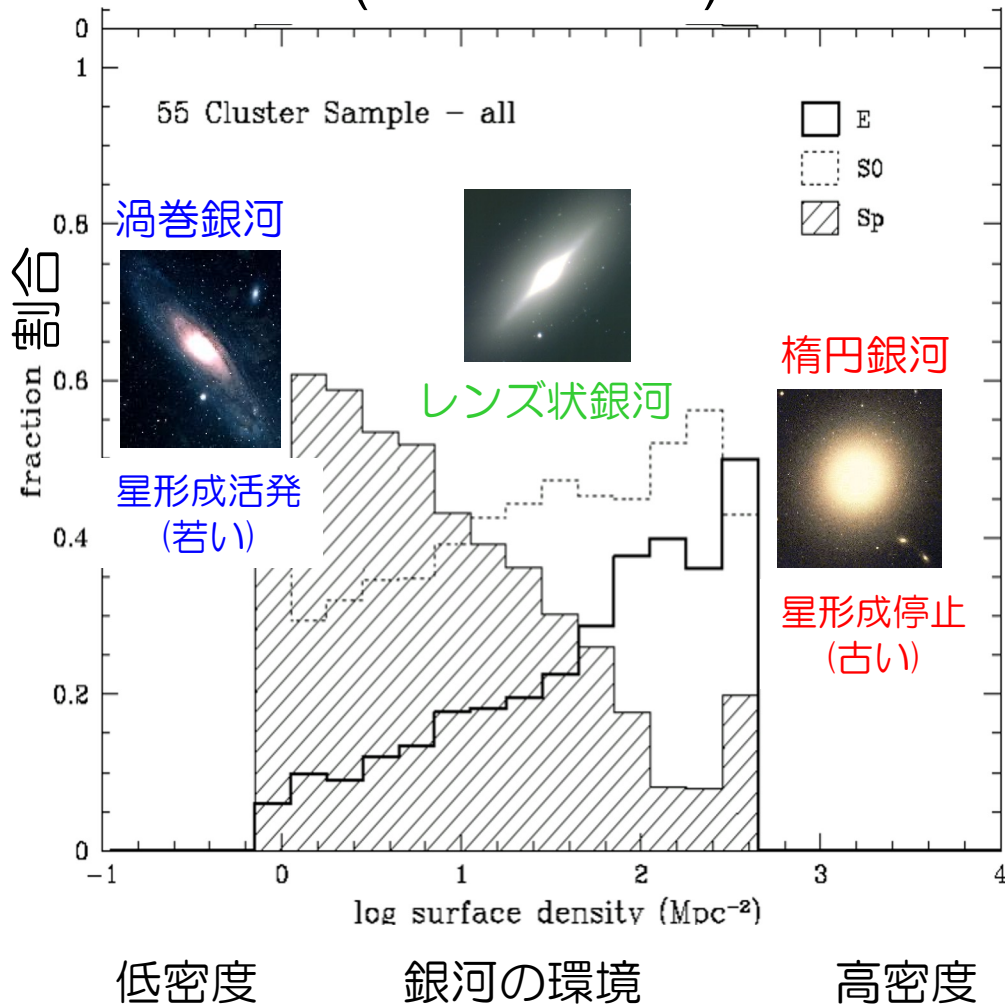
宇宙における星形成活動の変遷

「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)



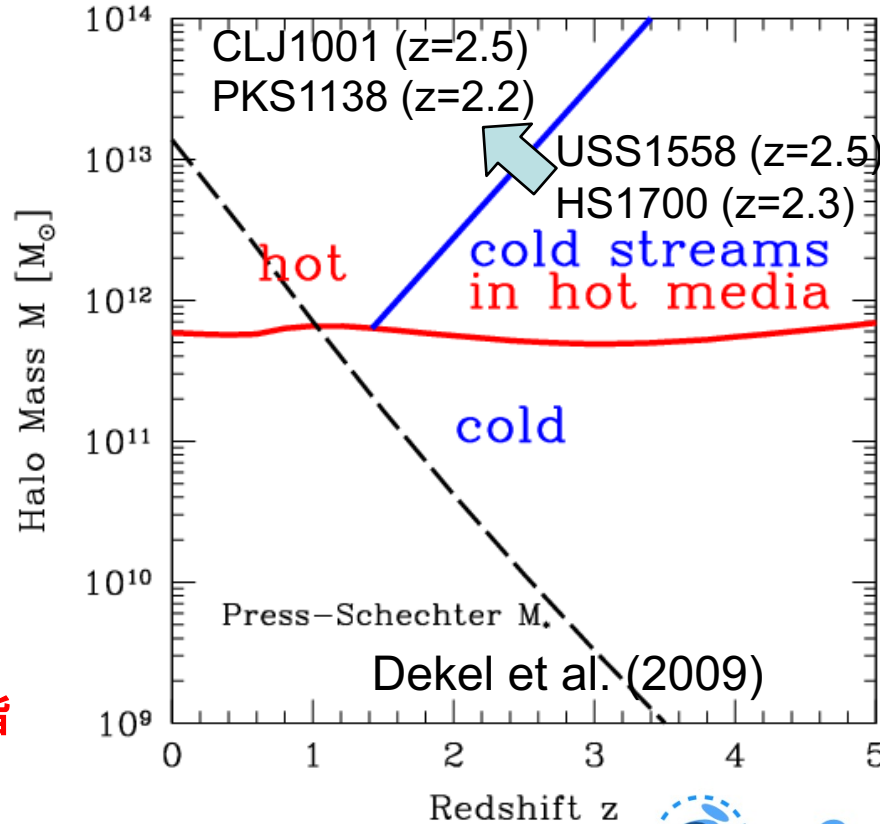
先天的（生まれ）？

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。

原始銀河団へのガス降着モードの切り替わり？



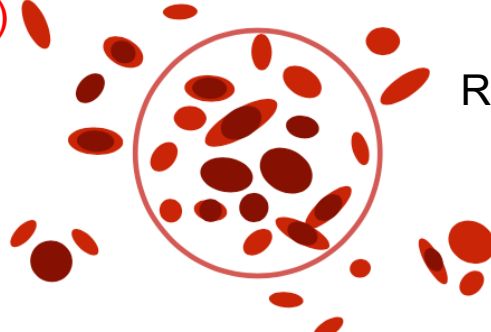
c.f., Valentino et al. (2015)
Daddi et al. (2022)

冷却非効率段階

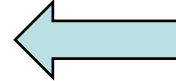
ガス降着卓越段階

CLJ1001 ($z=2.5$)
PKS1138 ($z=2.2$)

X線銀河団

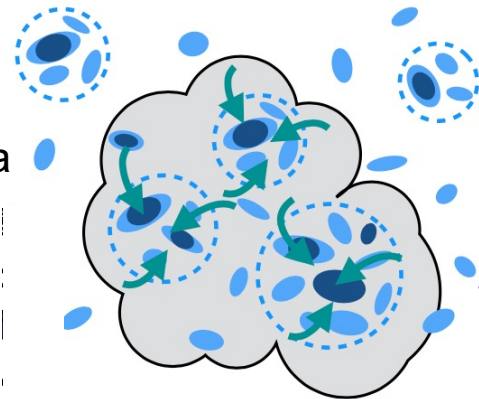


Credit:
R. Shimakawa



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

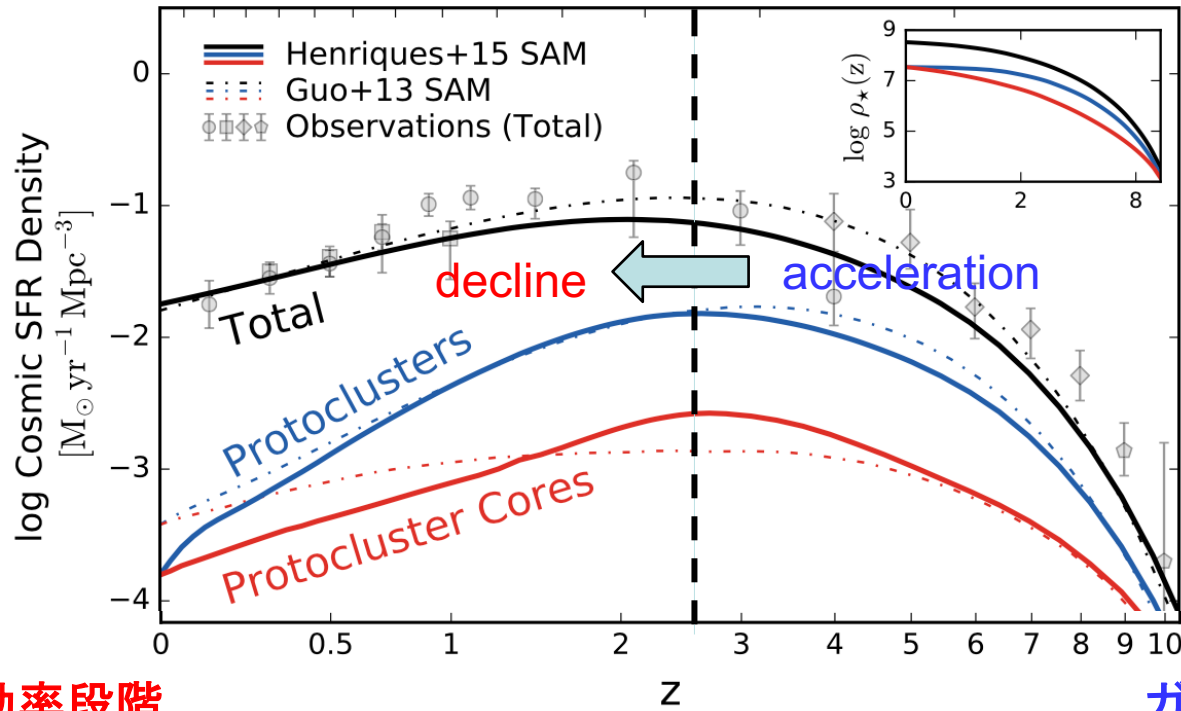
非X線銀河団



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。

原始銀河団へのガス降着モードの切り替わり？

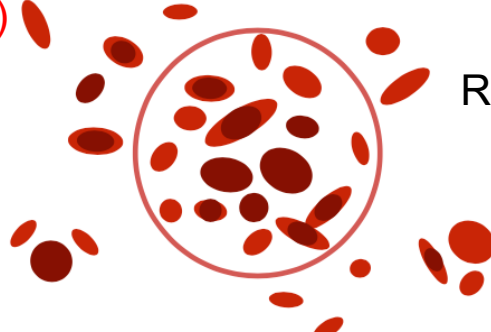


冷却非効率段階

ガス降着卓越段階

CLJ1001 ($z=2.5$)
PKS1138 ($z=2.2$)

X線銀河団

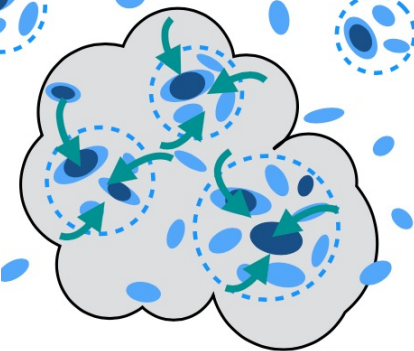


Redshift z
Credit:
R. Shimakawa



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

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。

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/>)

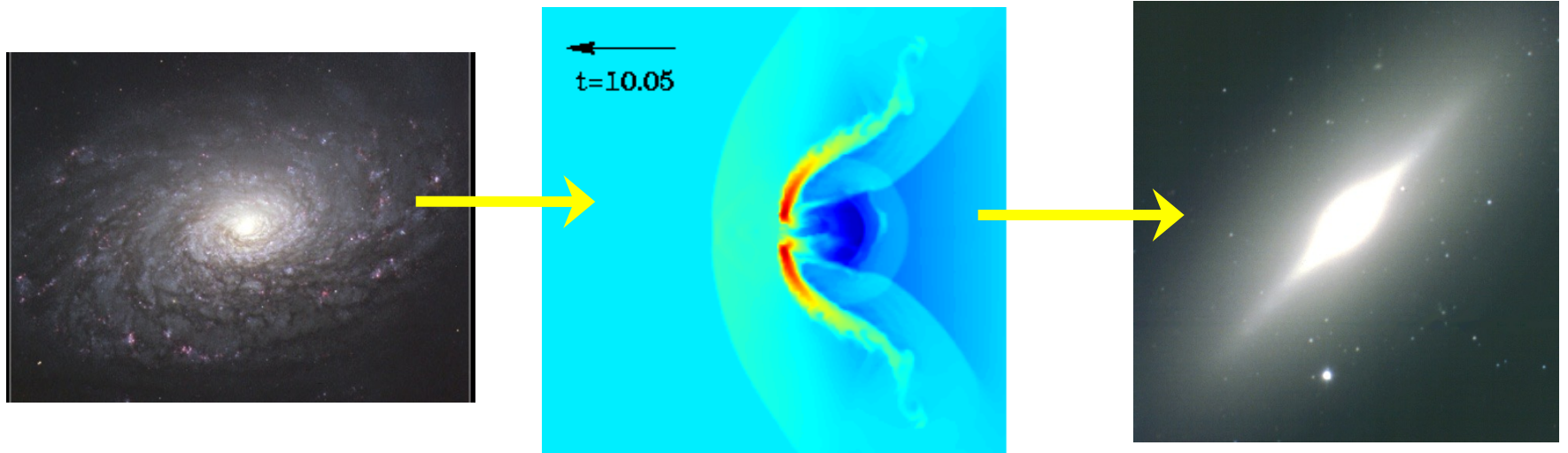


星形成バースト銀河からガスが吹き出す様子
(©すばる望遠鏡)

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？

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。

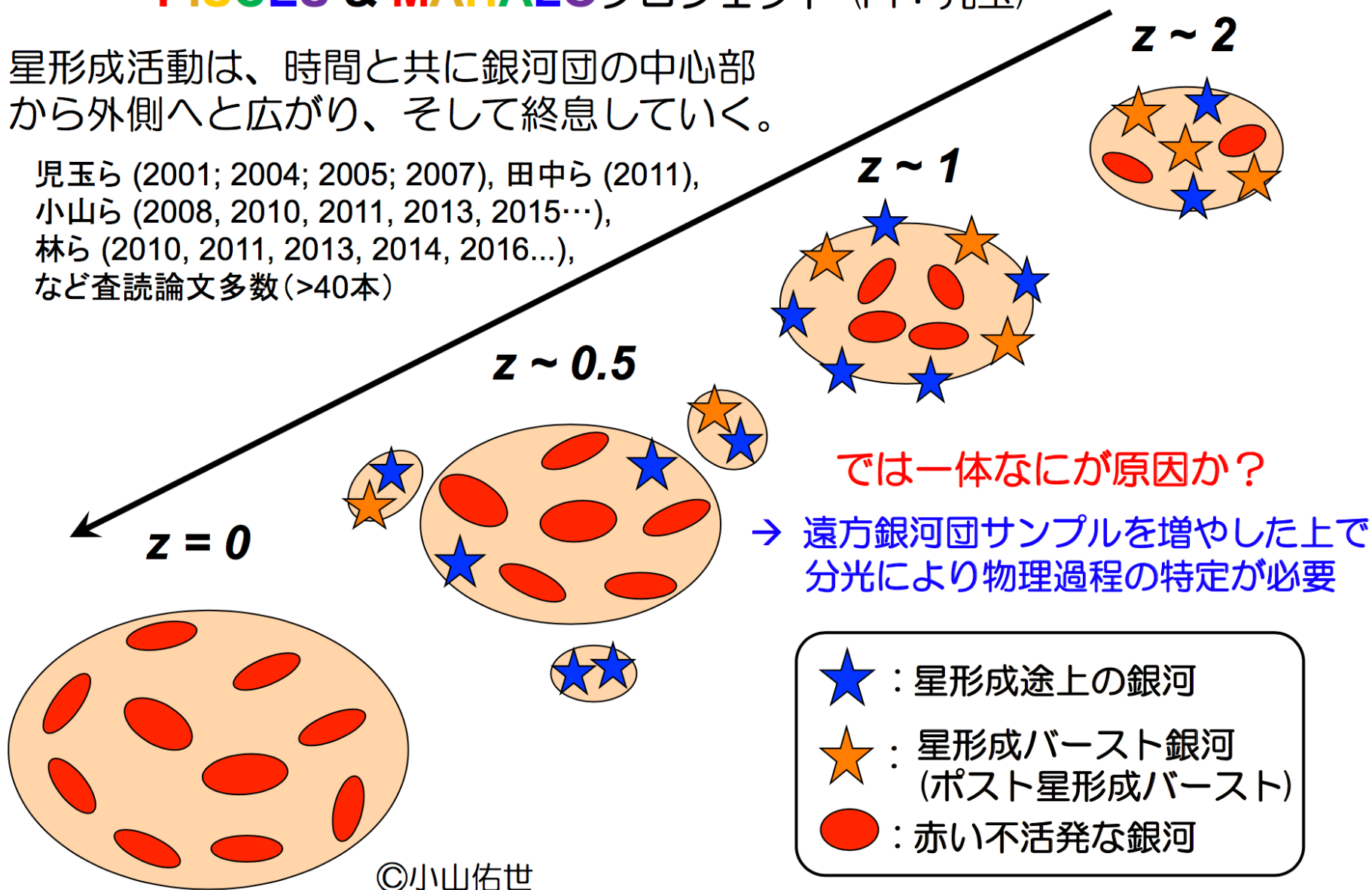
→ HST, GANBA, ALMA, JWST, ULTIMATE, TMT

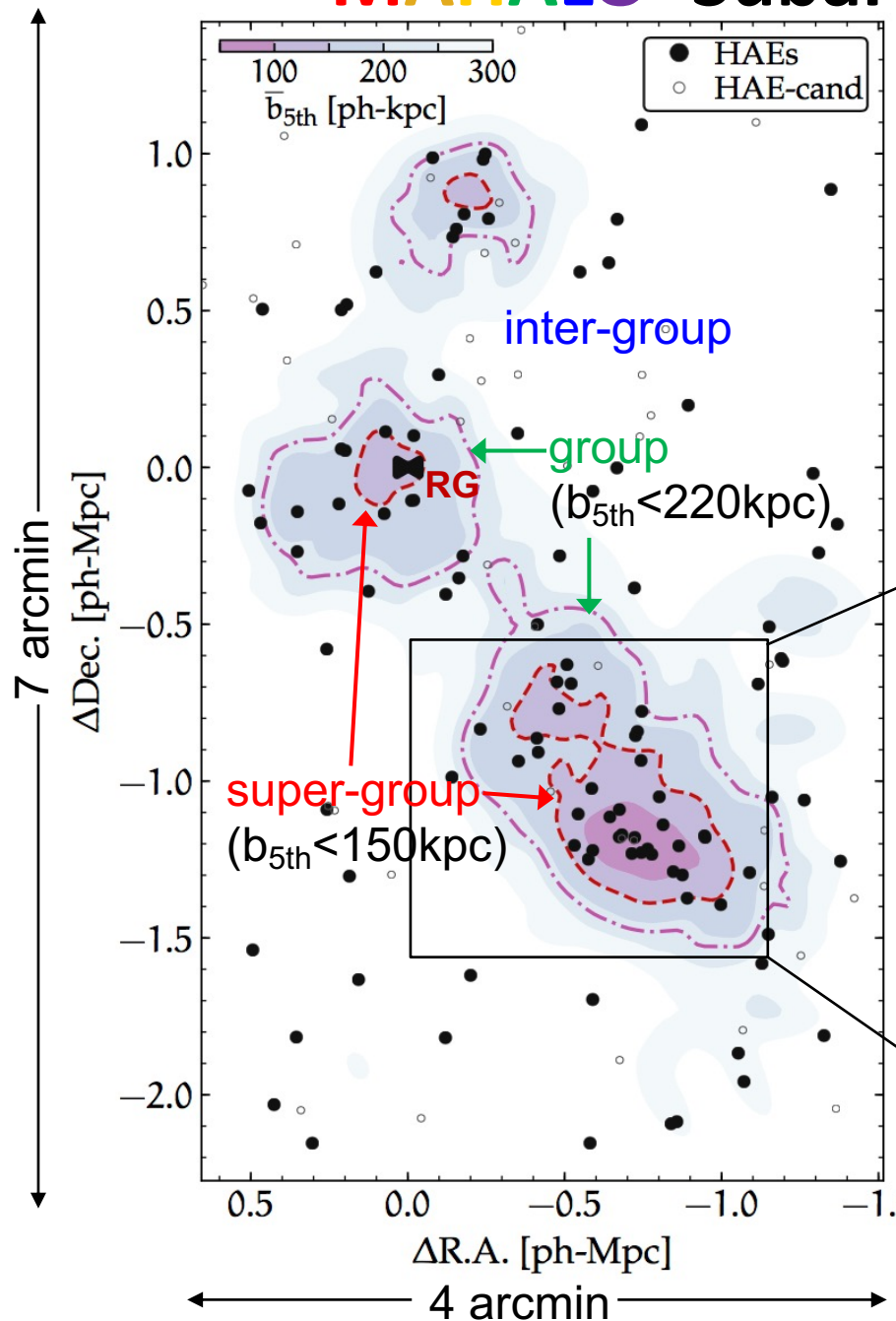
これまでの研究：すばる**広視野撮像**観測による銀河団とその周辺の星形成史

PISCES & MAHALOプロジェクト (PI: 児玉)

星形成活動は、時間と共に銀河団の中心部から外側へと広がり、そして終息していく。

児玉ら (2001; 2004; 2005; 2007), 田中ら (2011),
小山ら (2008, 2010, 2011, 2013, 2015...),
林ら (2010, 2011, 2013, 2014, 2016...),
など査読論文多数 (>40本)





110億年前の原始銀河団

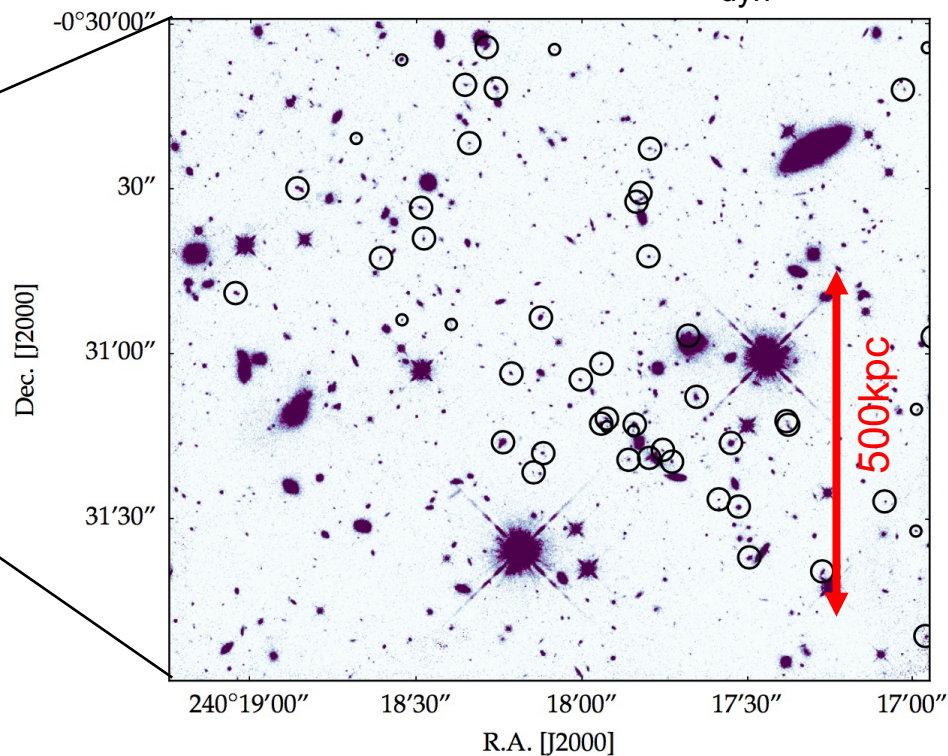
USS1558 ($z=2.53$)

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)

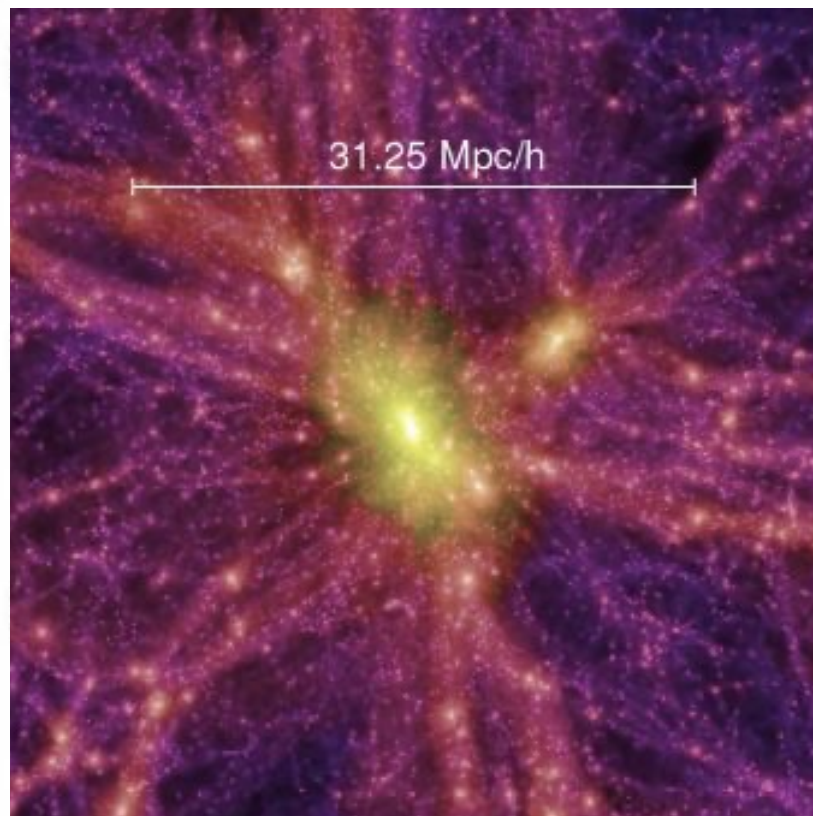
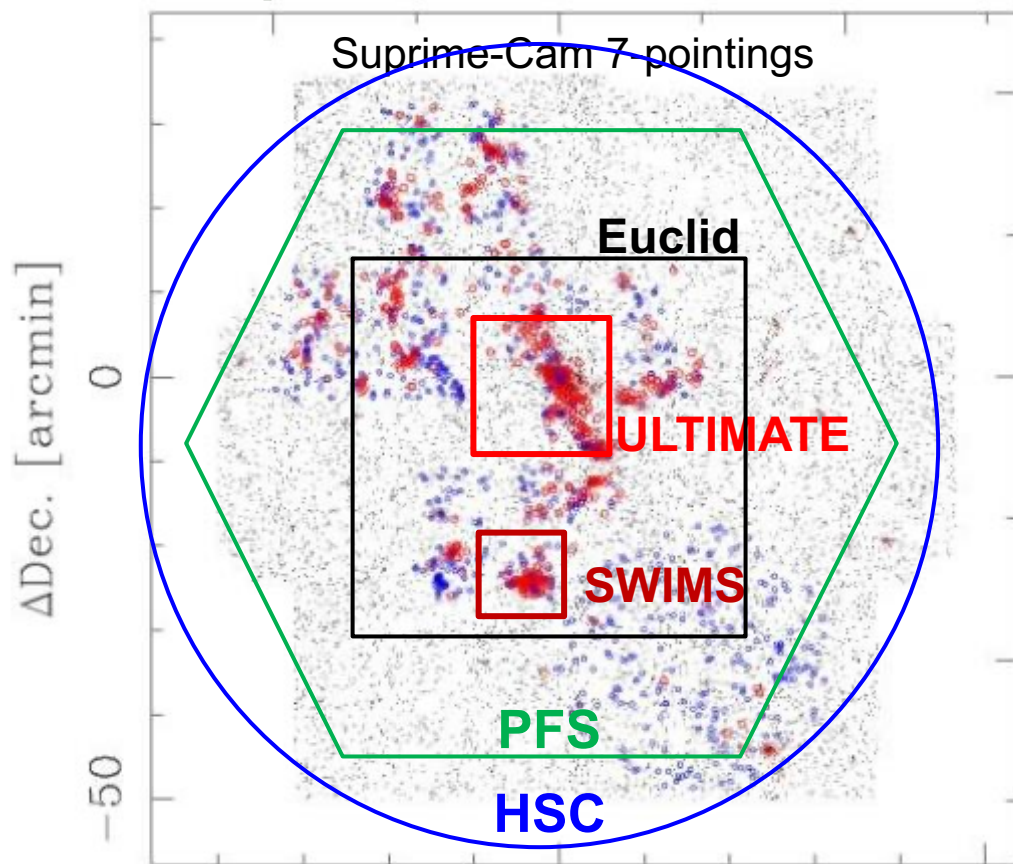
すばるHSC + PFS は、銀河団・大規模構造の研究に最適

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



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。

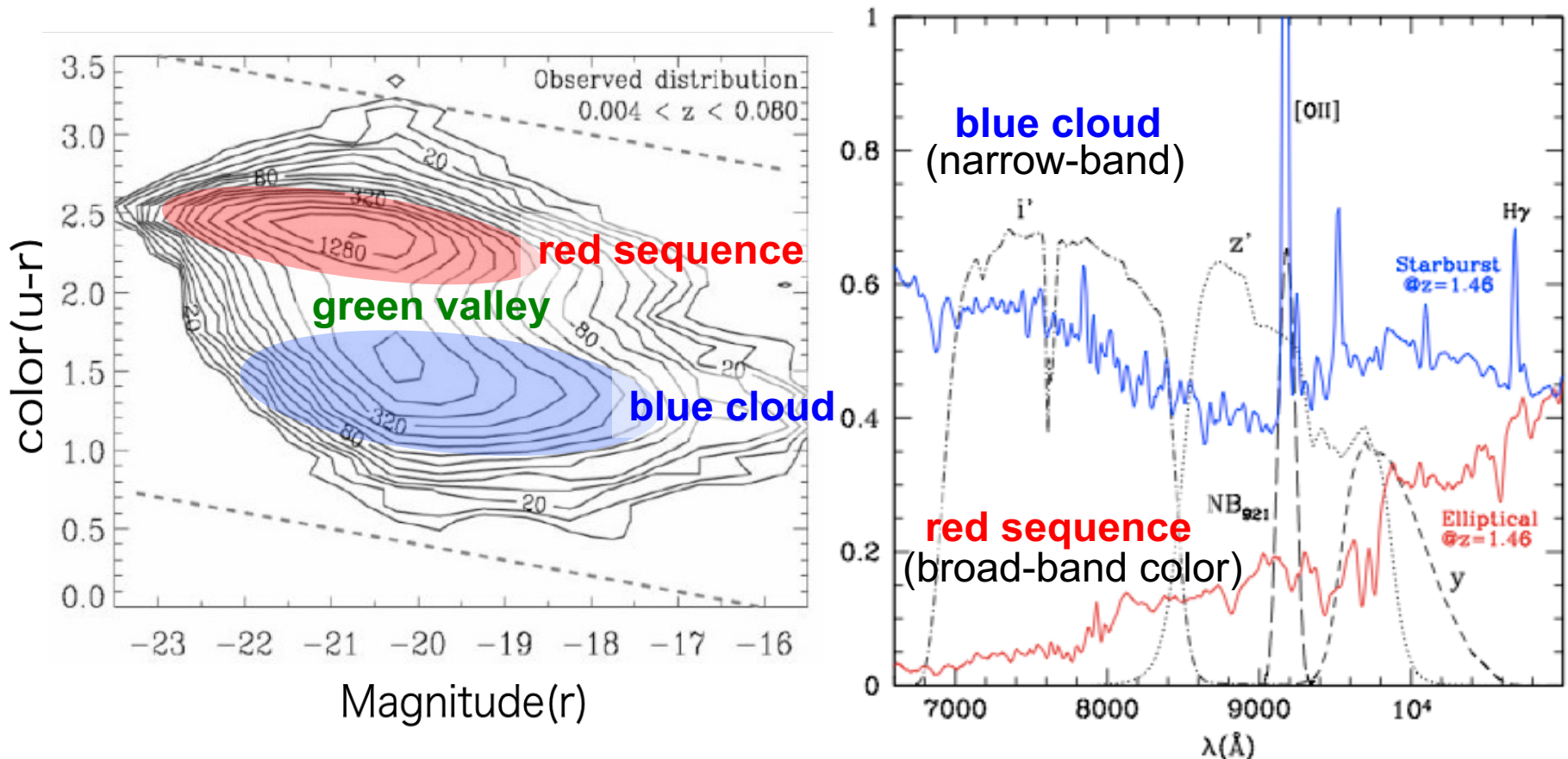
マクロ的アプローチ

すばるHSC遠方銀河団探査プロジェクト

HSC² : Hybrid Search for Clusters with HSC

HSC-SSP (Deep and Ultra-Deep layers; 27 deg²)

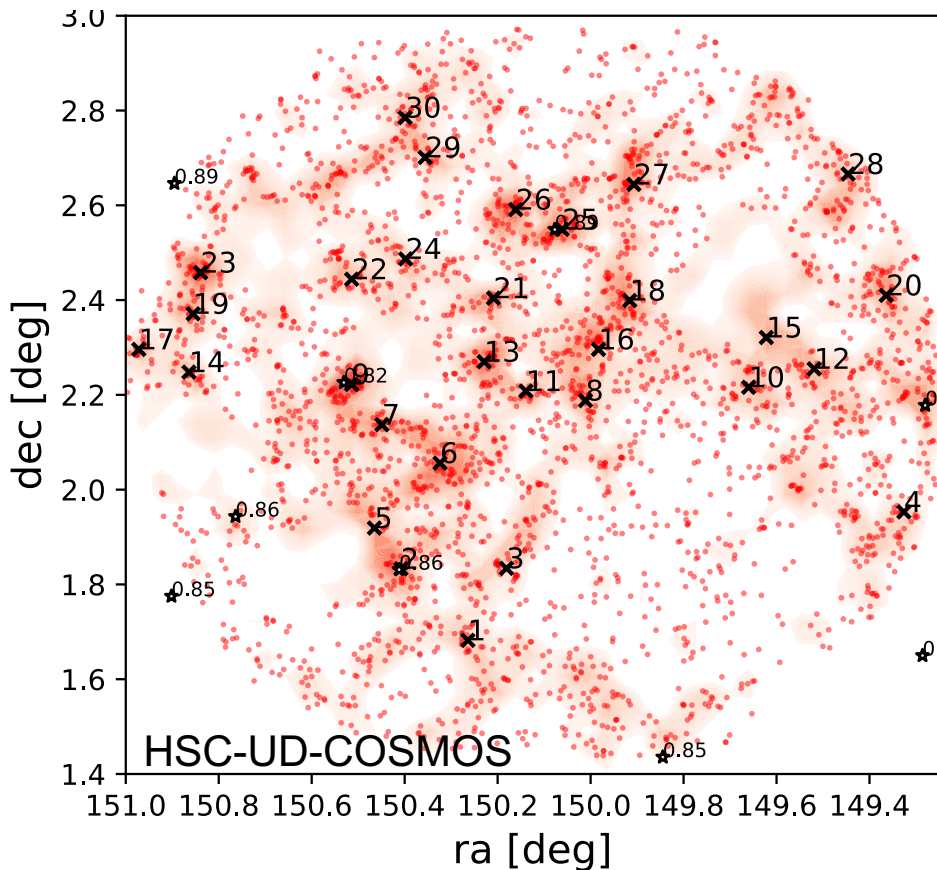
見つかる銀河団にバイアスがかからないよう、二つの銀河種族(星形成銀河と静的銀河)の両方を使う



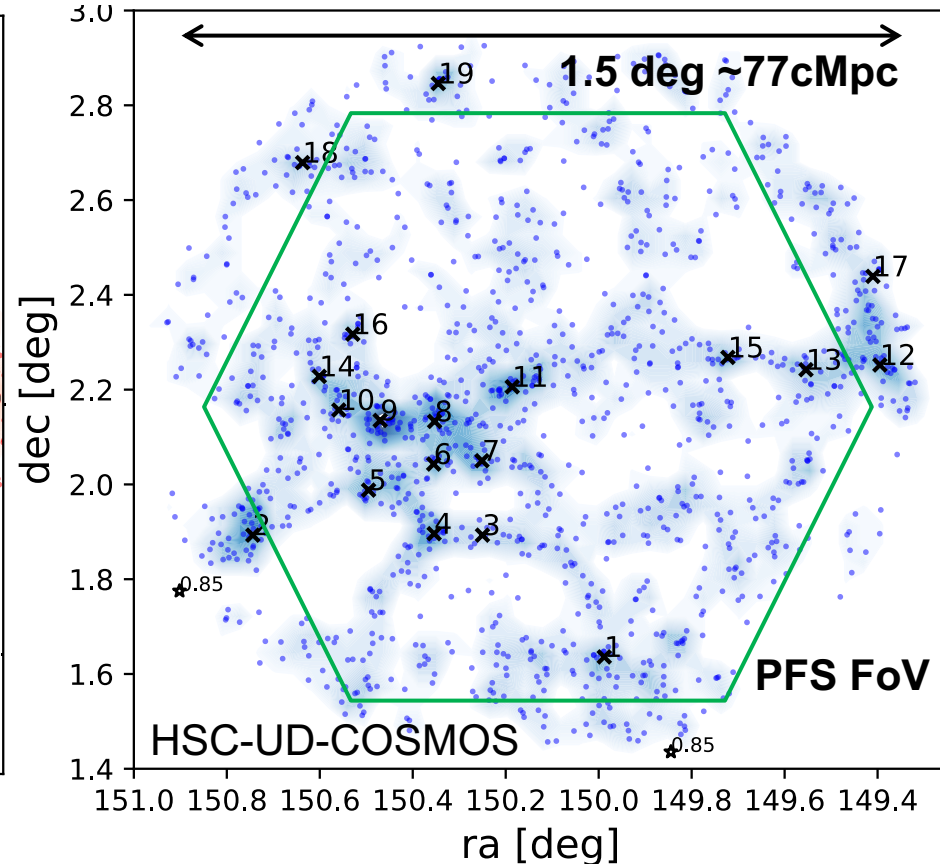
The conventional red seq. technique alone will bias your sample of galaxy clusters.
HSC² is a large, systematic cluster survey with little selection bias to $z \sim 1.7$

Hybrid Search for Clusters with HSC (HSC²)

Red sequence galaxies at $0.8 < z < 0.9$



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



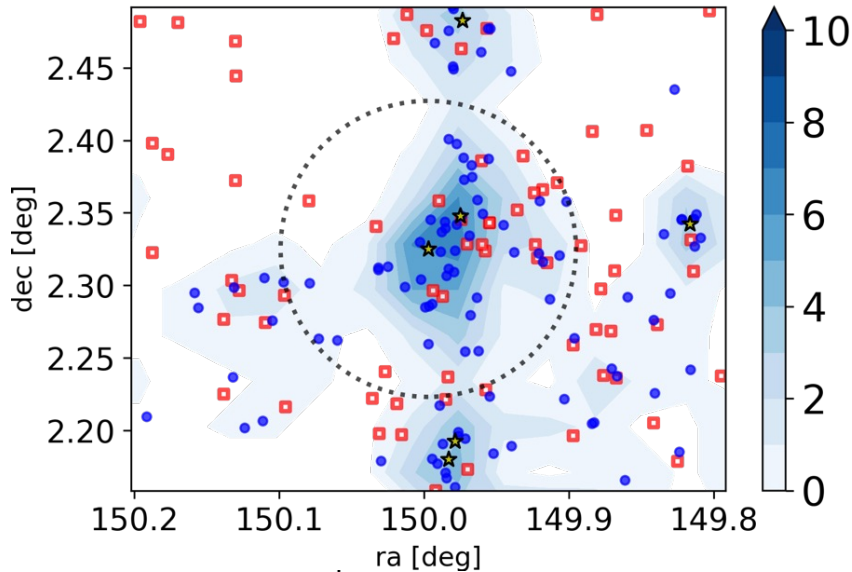
We have ~100s of cluster candidates, and systematic and intensive spectroscopic confirmation with PFS is critical (cluster mass function can also compare with cosmological models).

Panoramic Follow-up Spectroscopy with PFS (PFS²)

Two examples of HSC^2 selected clusters at $z \sim 1.5$ in COSMOS

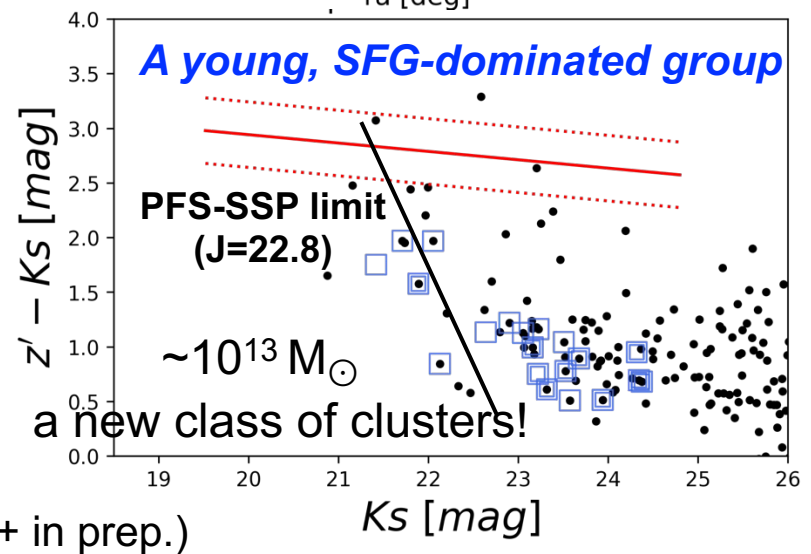
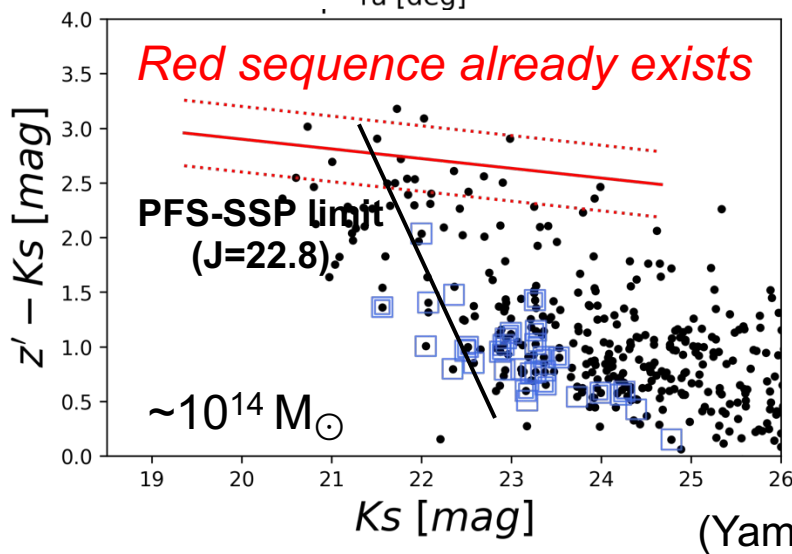
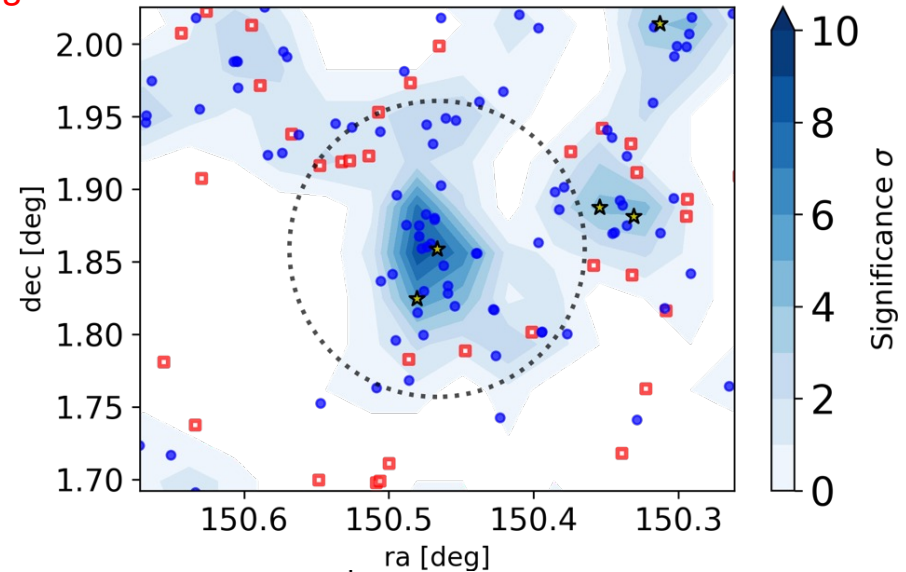
Dual (red + blue) cluster

CL1 @ $z=1.47$



Blue dominated cluster/group

CL2 @ $z=1.61$



(Yamamoto+ in prep.)

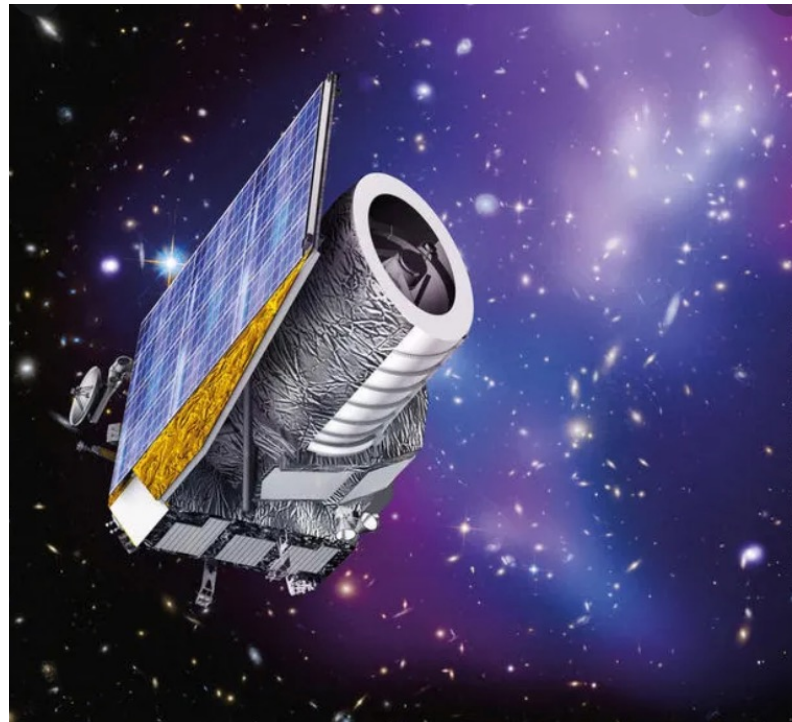
Euclid衛星 2023年7月にESAが打ち上げた

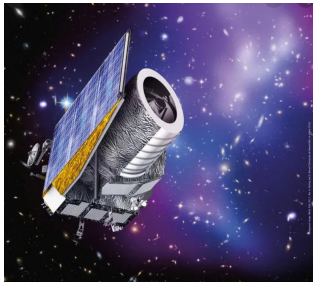
日本は、すばる望遠鏡インテンシブ観測(協調観測)を通してプロジェクトに参加
Wide Imaging with Subaru HSC of the Euclid Sky (WISHES; PI Oguri)

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

遠方銀河団探査に貢献

特に $1 < z < 3$ の原始銀河団探査





HySPeC-Euclid

Hybrid Search for Proto Evolving Clusters with Euclid

Kodama, Koyama, Shimakawa, Kubo, Ishida, et al.,

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

Similar to our HSC² concept (tracing both QGs and SFGs), but not limited to NB redshift slices!

* **VIS, z (Subaru), Y, J, H** can capture **4000Å/Balmer break** back to **z=3**

$$H=26 (5\sigma) \leftrightarrow 3 \times 10^9 M_{\odot} @z \sim 2$$

$$(CH1=24.8 (5\sigma) \leftrightarrow 6 \times 10^9 M_{\odot} @z \sim 2)$$

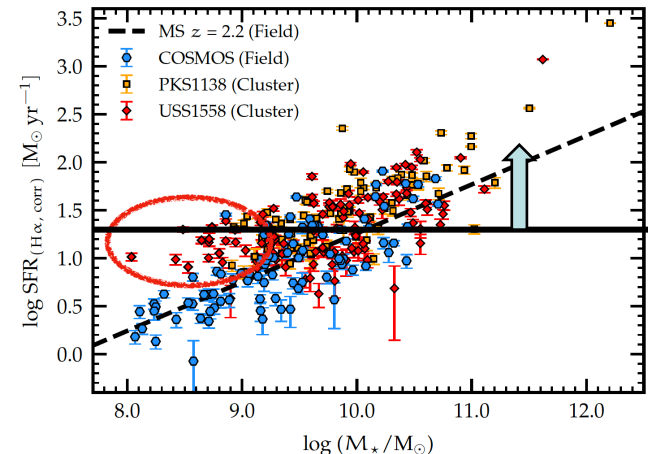
* **Grism** (R=260) can capture **H α** to **z=1.8**, **[OIII]** to **z=2.6**

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

$$5.2 M_{\odot}/\text{yr} @ z \sim 1$$

($A_{H\alpha}=1$ mag is assumed)

Future spectroscopic confirmation/characterization campaign is planned with Subaru/PFS and VLT/MOONS.



Panoramic Follow-up Spectroscopy with PFS (PFS²)

Confirming our large samples of HSC² cluster candidates
and
Revealing the full quenching history of galaxies since $z=2$

Key targets:

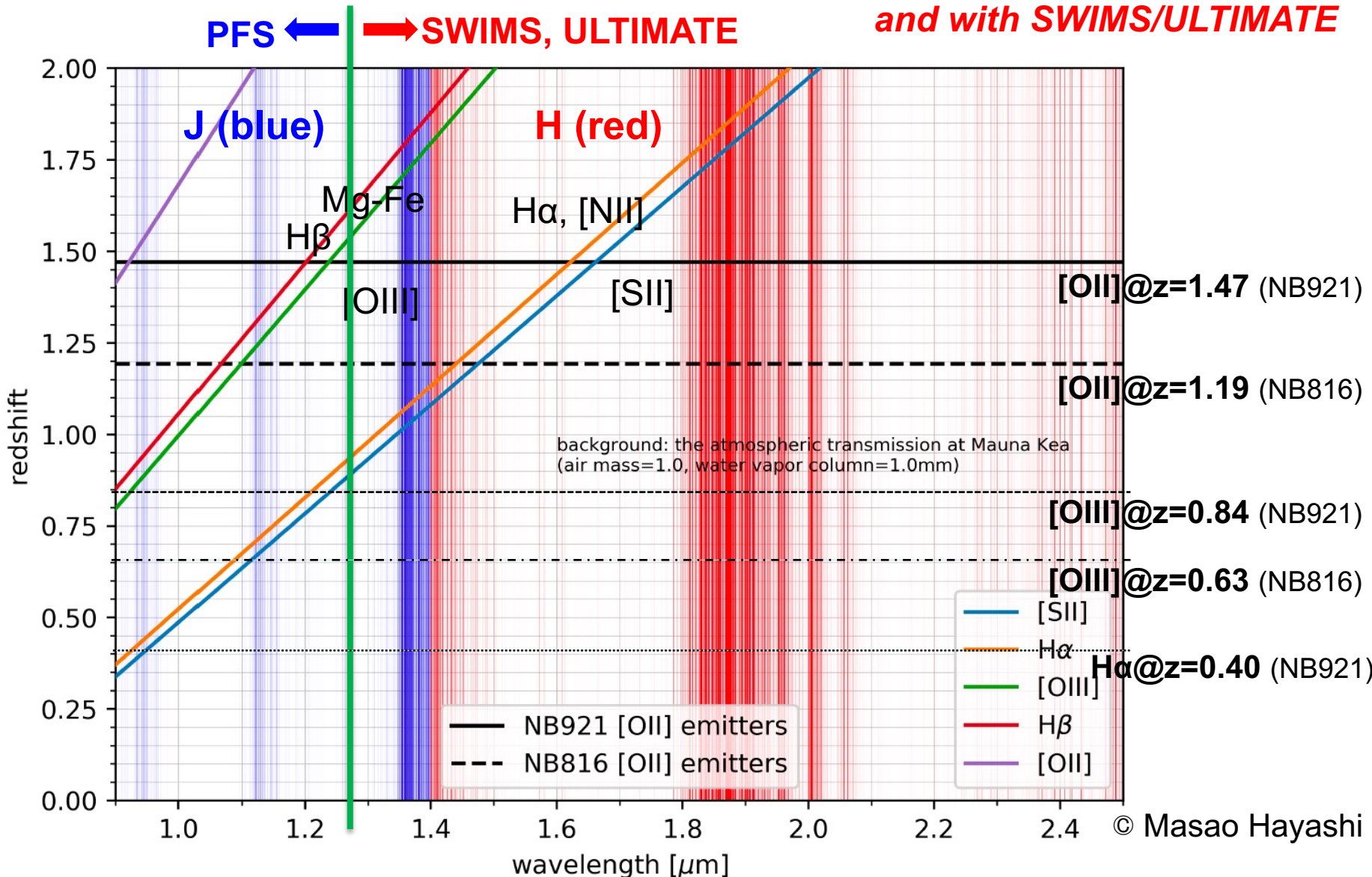
Large sample of galaxy clusters from our HSC² and HySPEC-Euclid surveys.
Rare objects such as RQGs, SBGs, and AGNs across Environments and M*

Key questions: when, where, and in what galaxies (mass/size) do they appear and why?

We can put constraints on the recent star formation histories (quenching time-scale, starbursts), chemical evolution (gas flows), AGN contribution, and their environmental dependences.

2025~

Panoramic Follow-up Spectroscopy with PFS (PFS²)



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

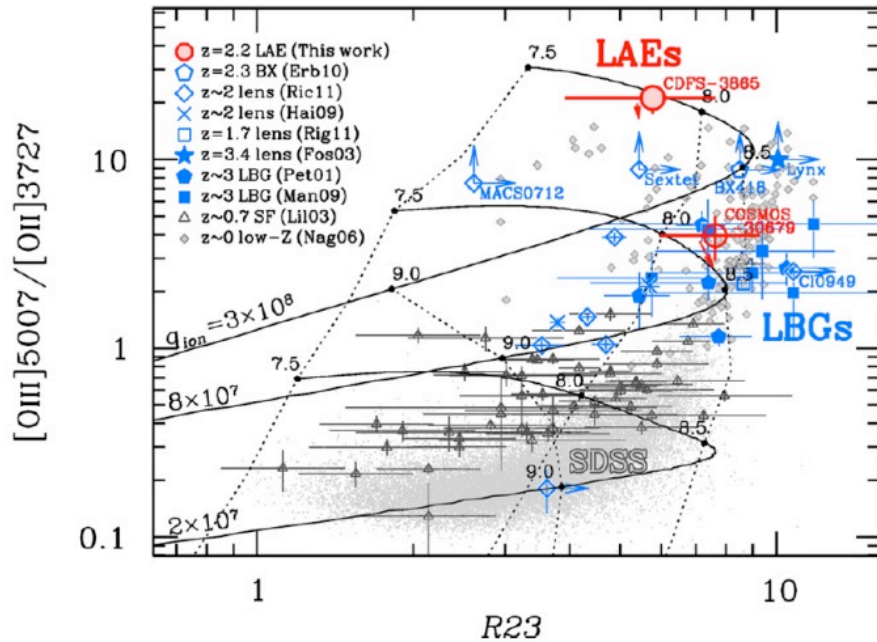
1 hr integration $\rightarrow f \sim 2.5 \times 10^{-17}$ cgs (5σ) \leftrightarrow $\text{SFR}([\text{OIII}])_{\text{corr}} \sim 10 M_{\odot}/\text{yr} @ z=1.5$

Emission line diagnostic (gaseous metallicity)

- to explore environmental dependence of SFH and gas in/outflows -
 Separation between ionization parameter (q) and metallicity (O/H)

[OIII]/[OII] vs. R23

Two solutions



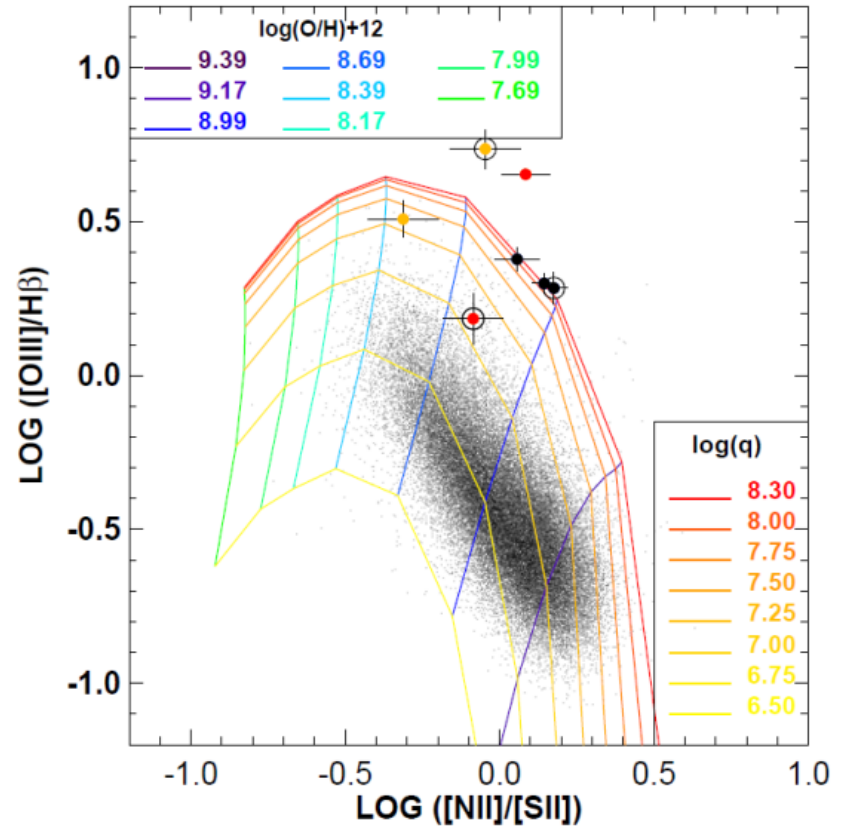
$$R23 = \frac{[OIII] + [OII]}{H\beta}$$

Nakajima+ (2013)

z < 1.5 with PFS

[OIII]/Hβ vs. [NII]/[SII]

Single solution



Kewley+ (2015b)

z < 0.9 with PFS

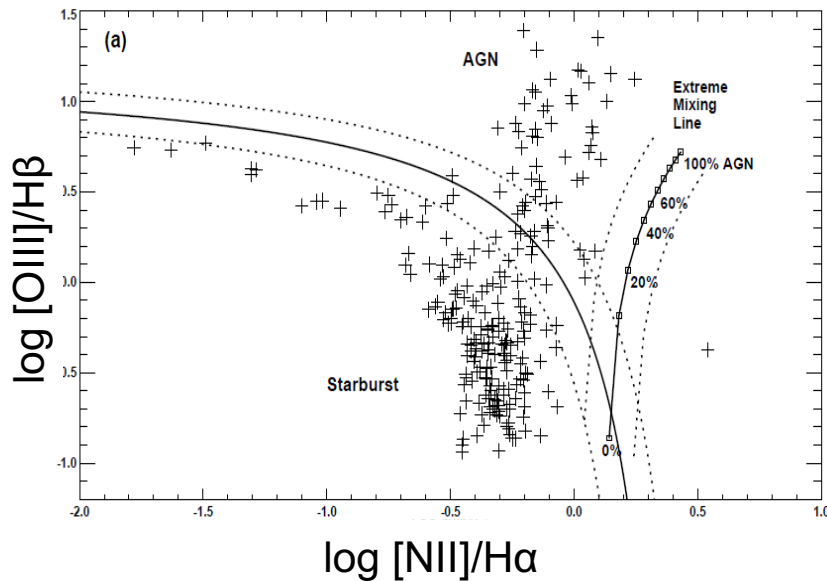
Emission line diagnostic (AGNs)

AGN quenching may also be related to environmental quenching if AGN activities are enhanced in clusters (e.g. interactions/mergers)!

Line ratios

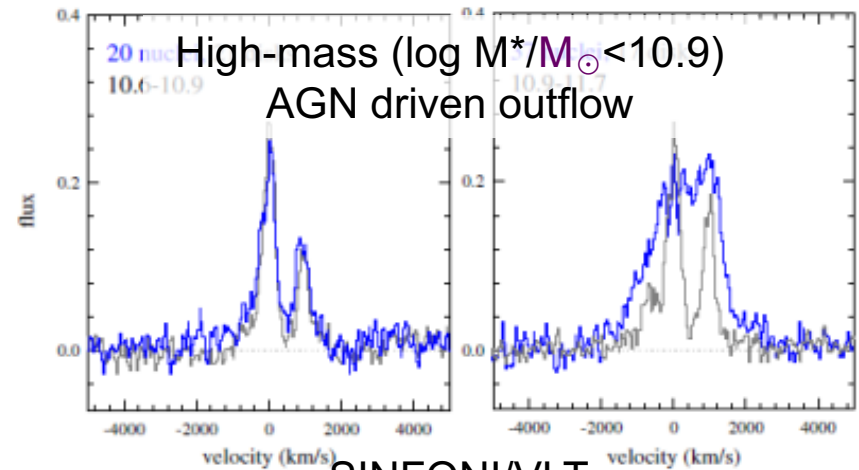
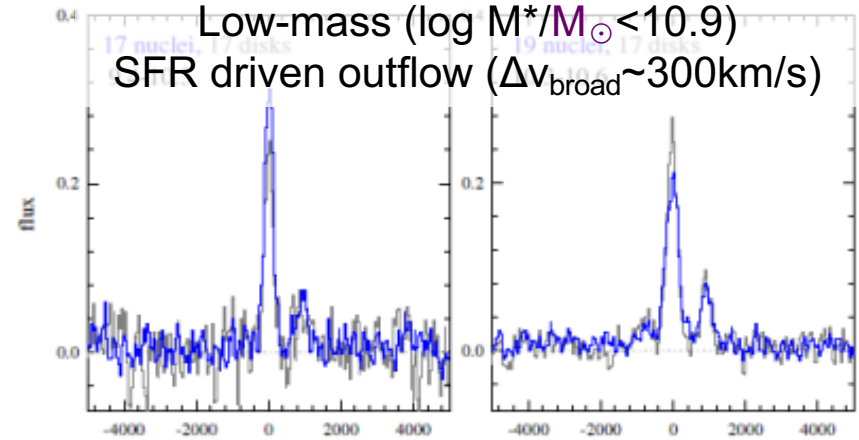
BPT-diagram

Separation between SFGs and **AGNs**



z < 0.9 with PFS

Line width



SINFONI/VL

Genzel et al. (2014)

AGNs are rare (a few %) objects.
PFS is ideal to make a statistical sample!

PFS: $R=3,000-5,000 \Leftrightarrow \Delta V=60-100 \text{ km/s}$

Absorption line diagnostic of RQGs

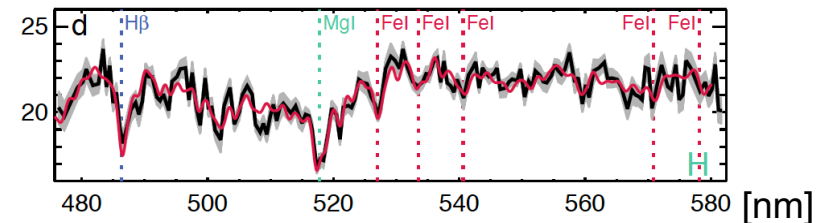
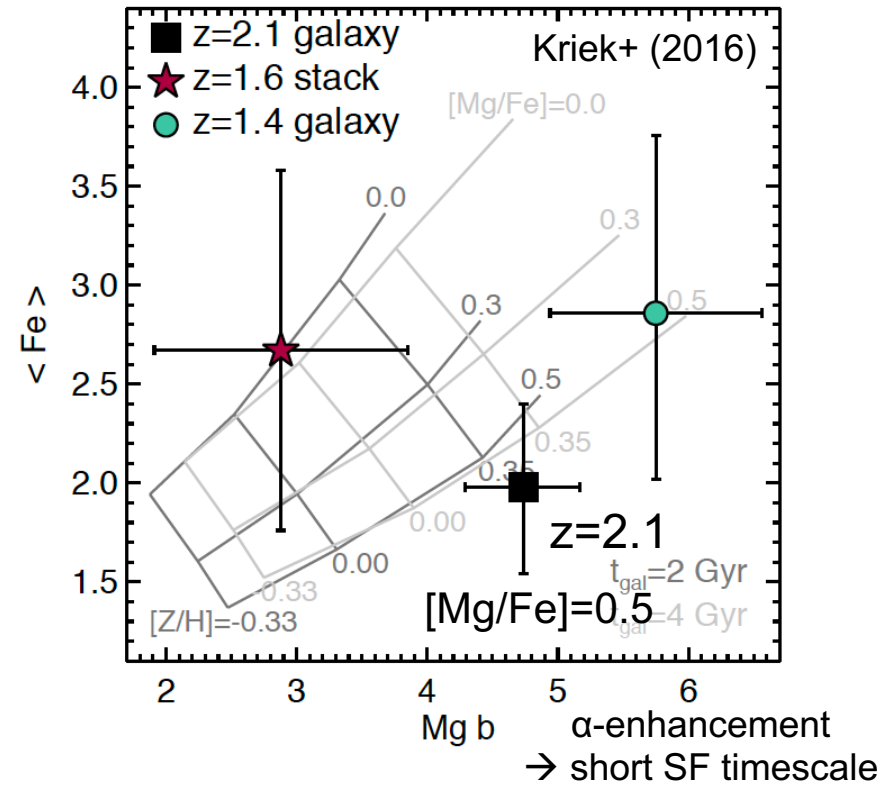
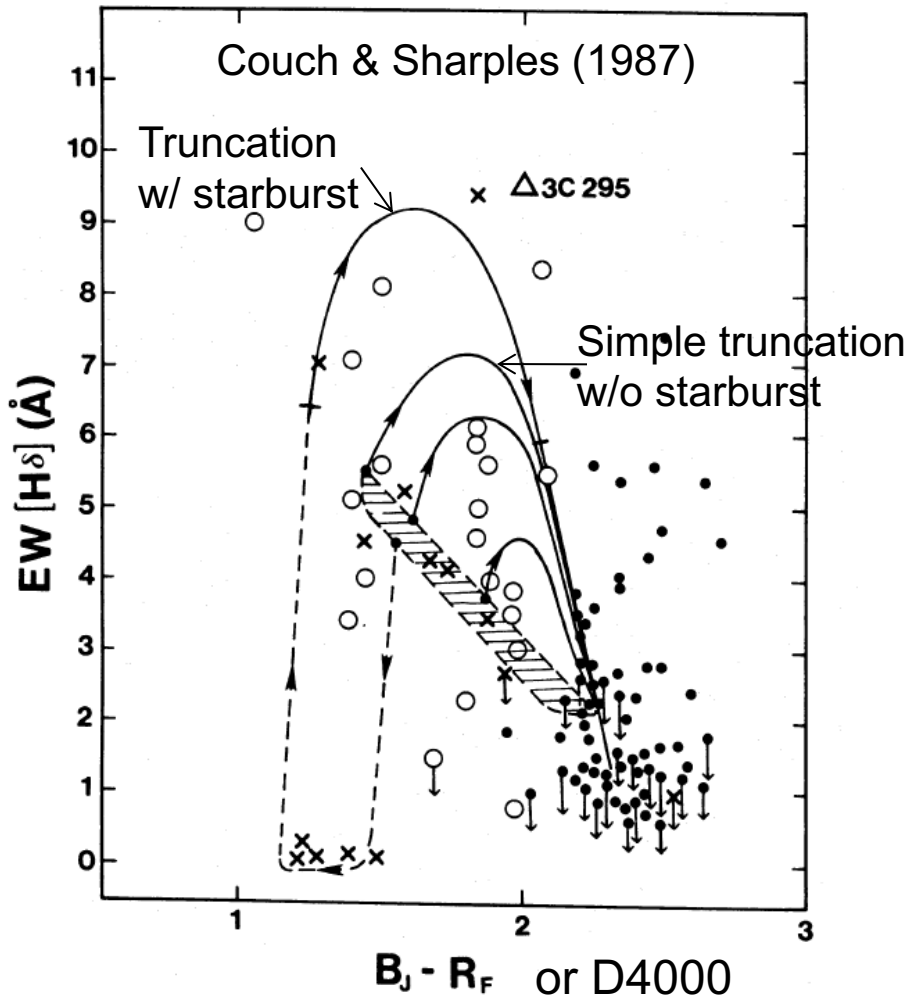
- to constrain the timescales of star-formation/quenching -

Balmer absorption lines (A-type stars)

→ timescale of quenching, existence of starburst

Mg/Fe ratio

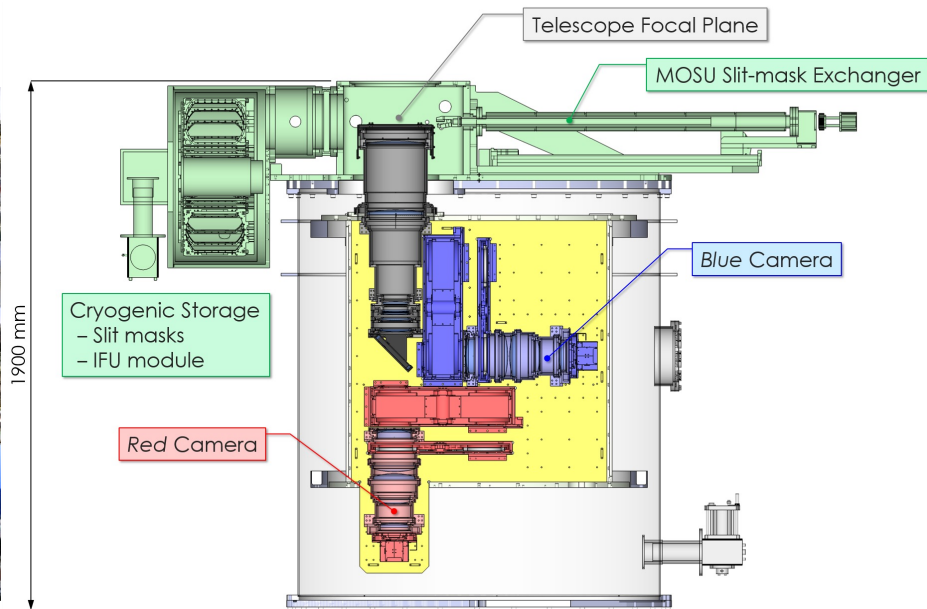
→ timescale of SF before quenching



We can access to these lines back to $z=1.5$ (Mg/Fe) ~ $z=2$ (H δ) with PFS

- A new NIR camera and Multi-Object Spectrograph developed for Tokyo Atacama Observatory (TAO) 6.5m telescope (Co. Chajnantor 5,640m)
- Initially operated at Subaru (2021~2022) and then moved to TAO (2025)
- FoV=6.6' x 3.3' (Subaru), 9.6' x 9.6' (TAO)
- 2-bands (0.9-1.4/1.4-2.4 μ m) simultaneous imaging/spectroscopy

※ Survey speed is doubled (imaging and spectroscopy).
Line ratio is not affected by slit loss (spectroscopy).



TAO 6.5m





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

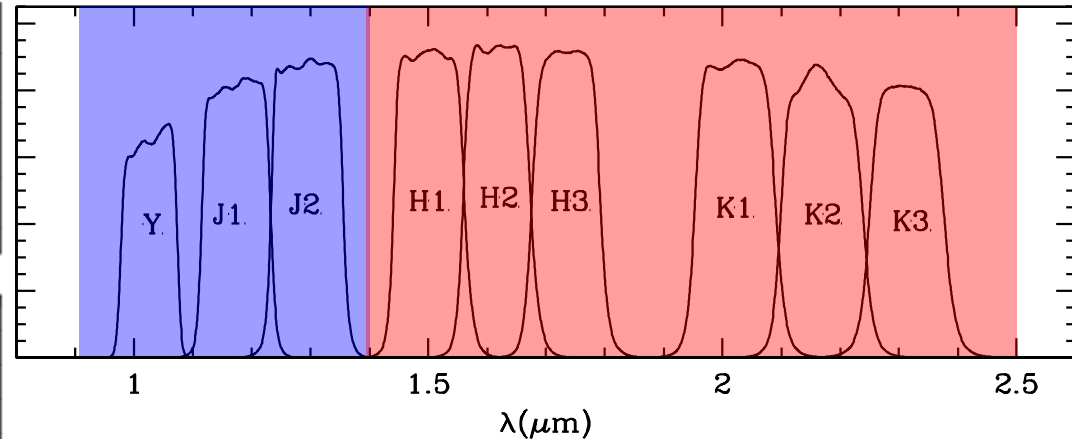
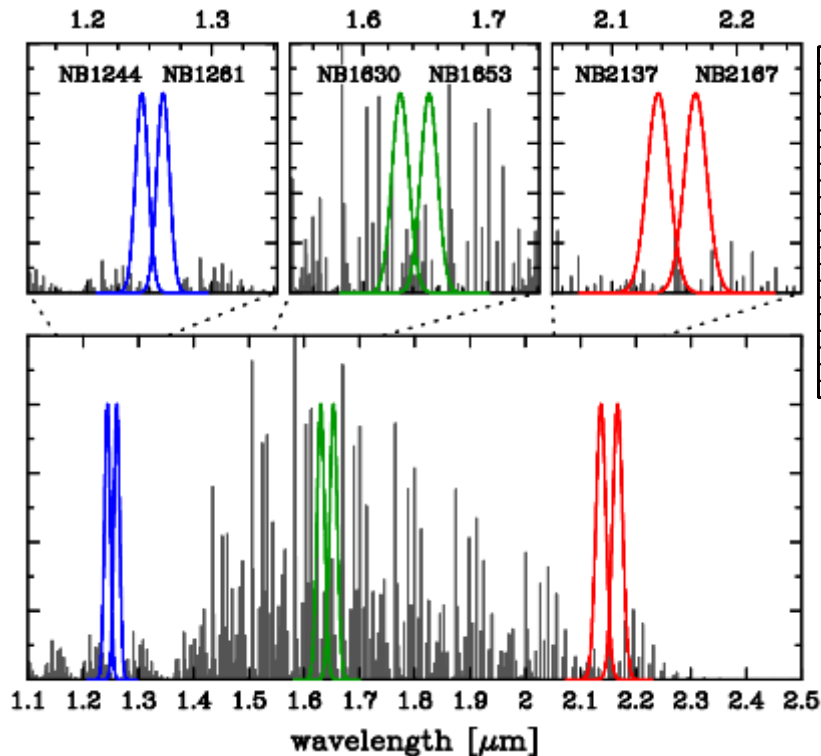
近赤外撮像

代表：児玉

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 α 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

Full survey of **SWIMS-18** on TAO (2025-)

survey layer	area (sq.deg.)	# of pointing	NB (red)	MB (red)	BB (red)	overheads	Time (/FoV)	Total time
Wide	1	100	3 hrs	2 hrs	1 hr	10-50%	32 hrs	3,200 hrs
Deep	0.1	8	18 hrs	12 hrs	6 hrs	10-50%	192 hrs	1,500 hrs

(1 mag deeper)

Blue filters are observed simultaneously with double exposure times

SWIMS-18-Wide (1 sq. deg.)

SFR-limited sample (HAEs) : $7.5 \times 10^5 \text{ Mpc}^3$ at each redshift

M^* -limited sample: $1.2 \times 10^7 \text{ Mpc}^3$ ($\Delta z=1$)

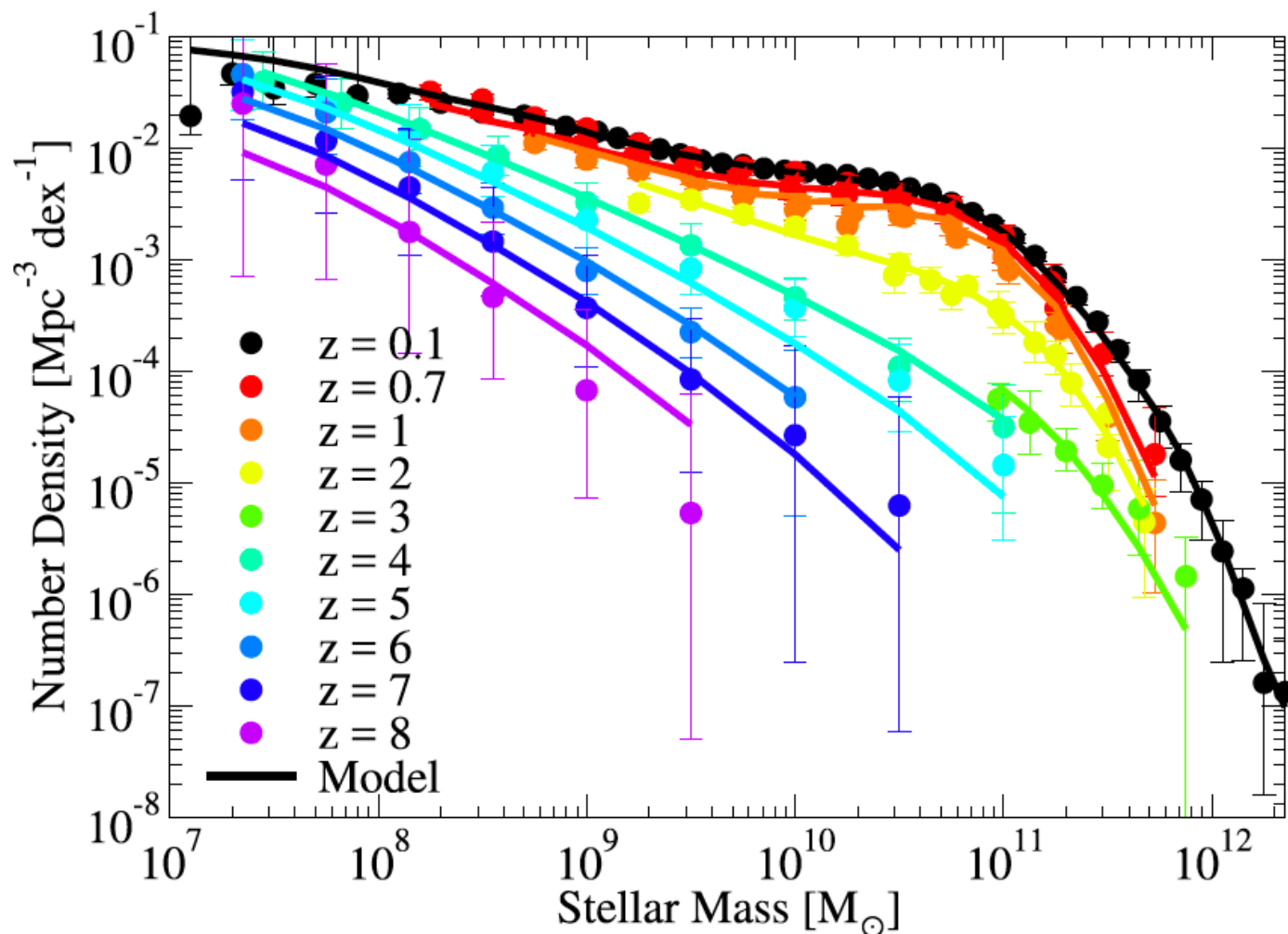
→ We require ~470 nights of observing time at TAO

This can be done in collaboration with IoA, Univ. of Tokyo.

Moreover, >33% of TAO observing time will be open to Japanese community.

初期宇宙では大質量銀河は極めて稀な存在(階層的な銀河形成論)

(>10^{10.5} M_⊙)

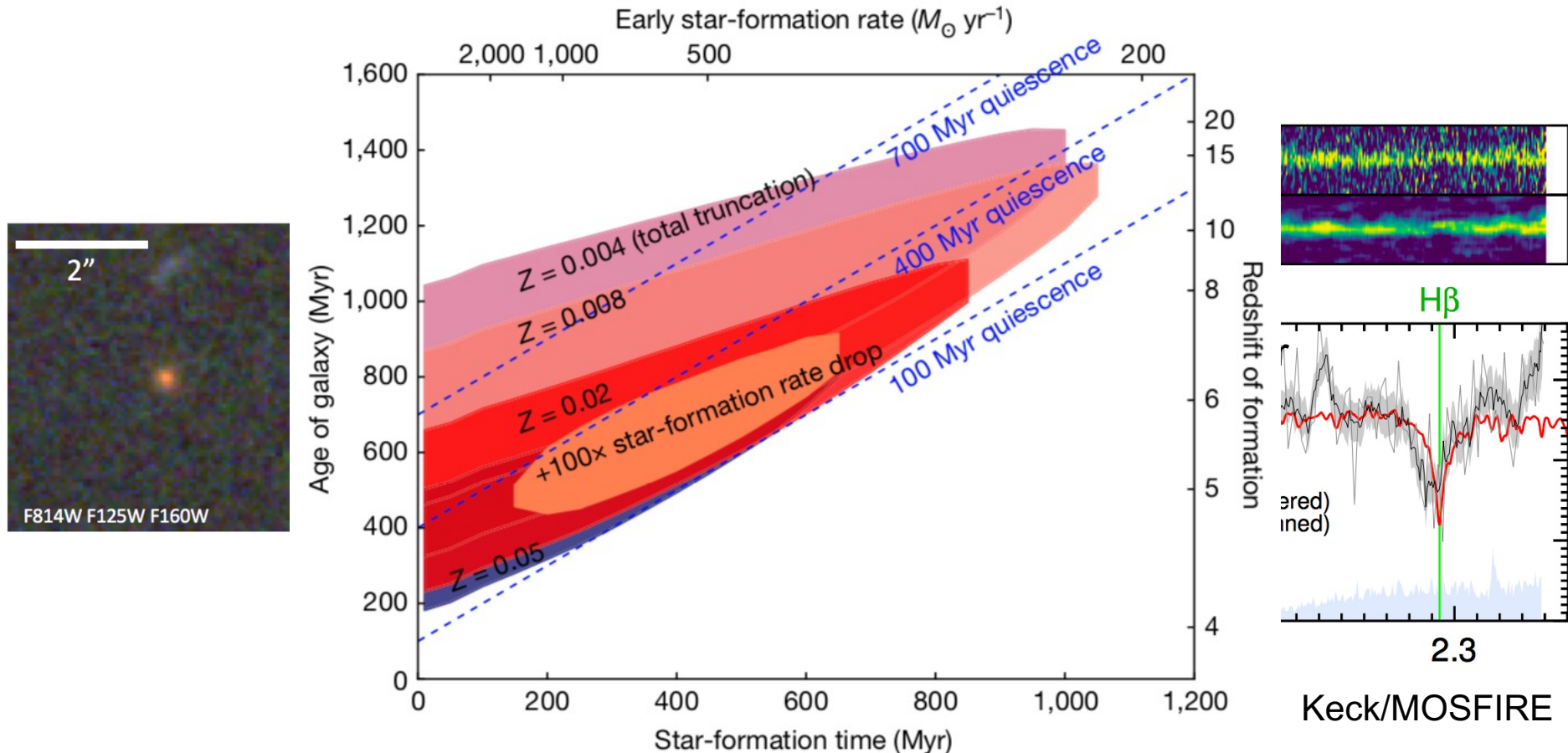


大質量銀河の存在頻度が銀河形成論に強い制限を与える！

Behroozi et al. (2019)

遠方の巨大銀河(モンスター)

118億年前の宇宙($z=3.7$)にすでに銀河系と同クラスの大きな銀河が存在!



宇宙初期に巨大で成熟した銀河が存在していたことは、銀河形成論に大きな制限を与える。
超初期宇宙($z > 7$)に銀河を発見するのと相補的な研究である。

→ 現在、すばるに搭載されたSWIMS装置と特注フィルターによって、
探査をさらに5億年遡って($z \sim 5$)実施中 (Kodama et al. 2021)

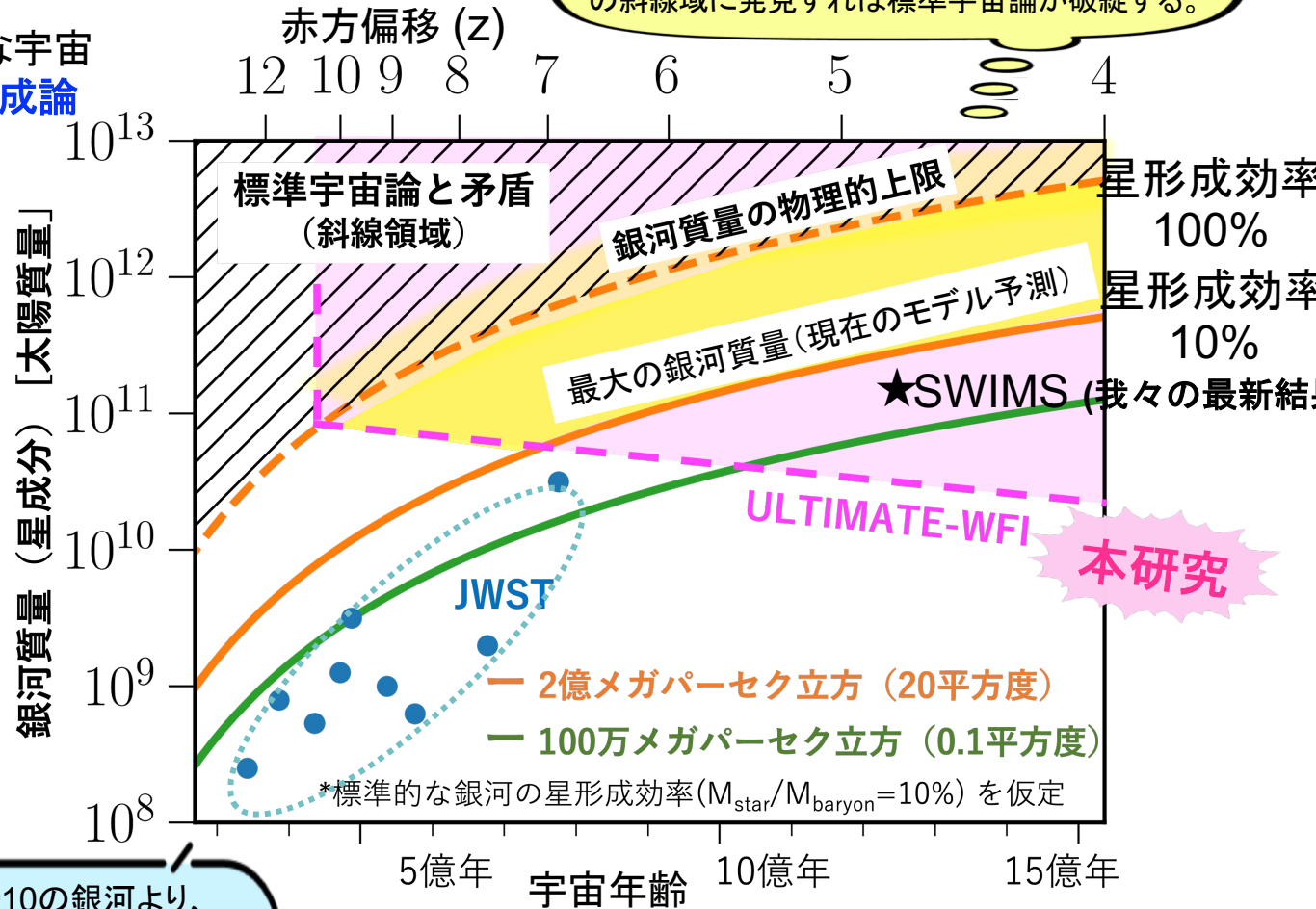
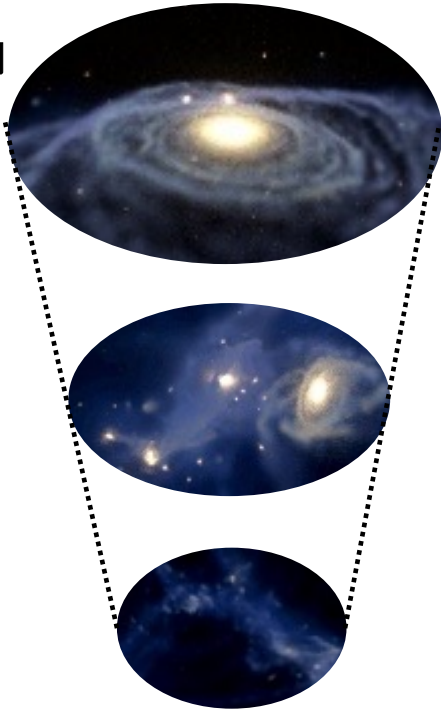
中間帯域撮像により宇宙初期に稀少で成熟した重い銀河を探查

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



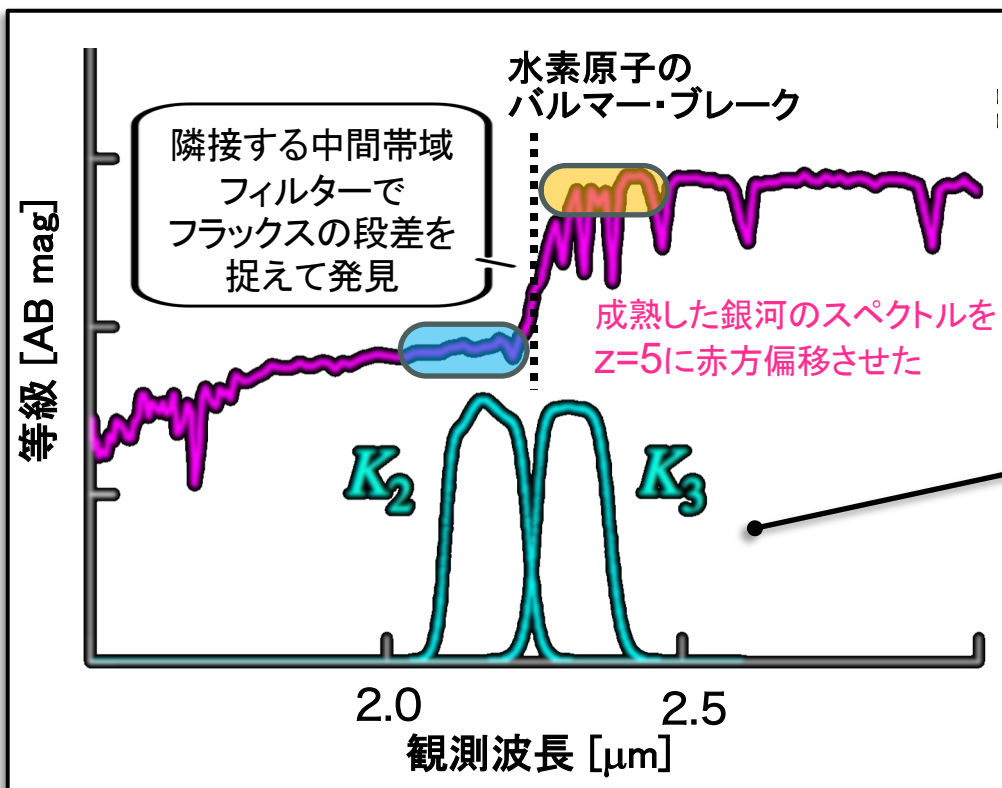
JWSTで見つかる $z \sim 10$ の銀河より、WFIで見つかる $z \sim 5$ の巨大銀河の方が、銀河形成論にとって脅威になりうる。

※) 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

中間帯域撮像により宇宙初期に稀少で成熟した重い銀河を探查

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 $z \sim 4$ までの探查に限られる。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

フラックスの段差を検出

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

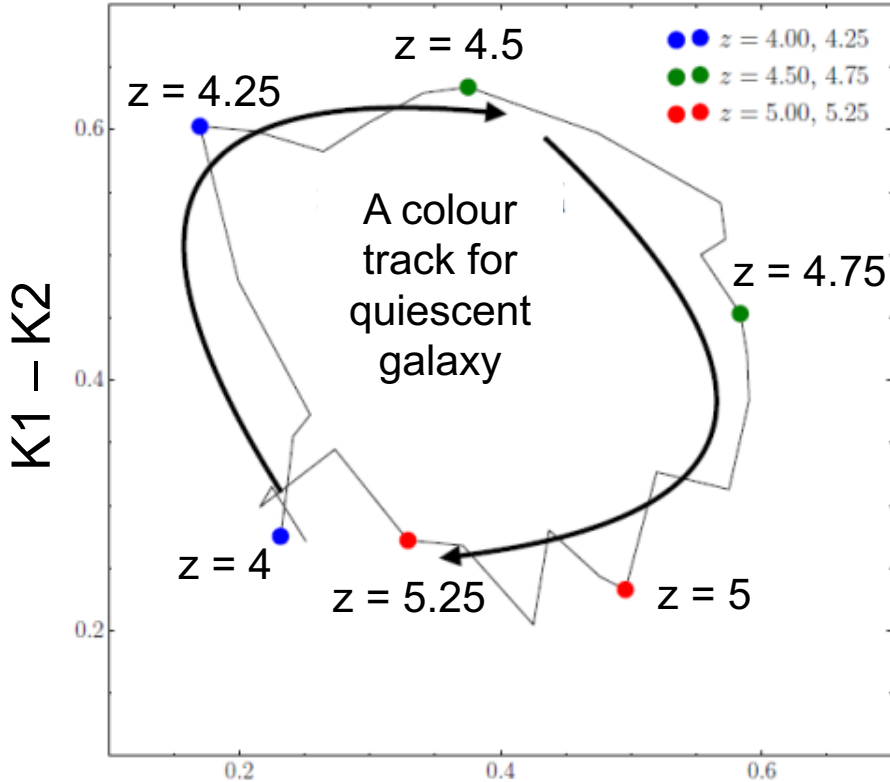
現在の天の川銀河より既に2倍も重い?

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

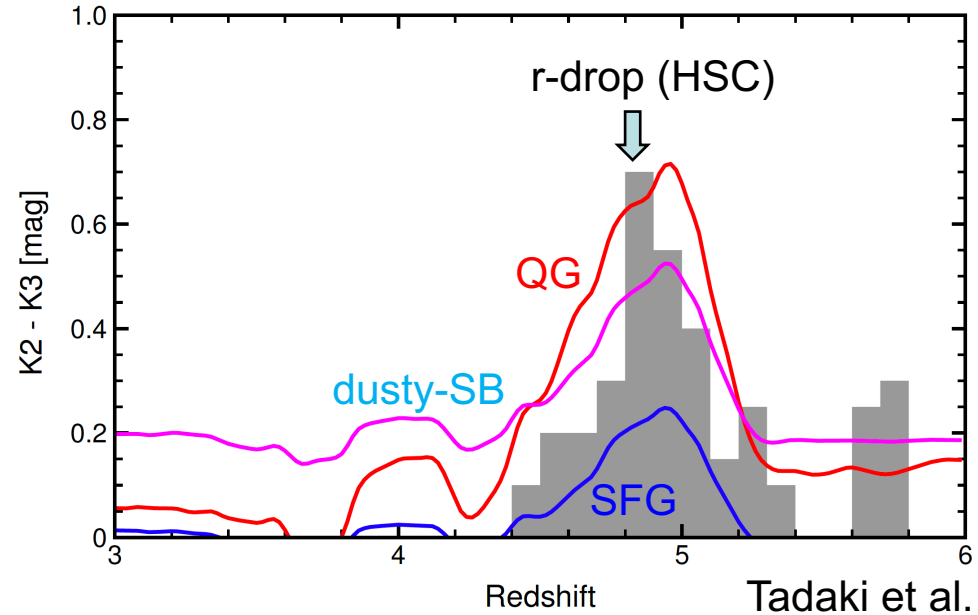
※ JWSTの狭視野では見つからない(分光確認に使う!)。Romanの広いフィルターでは同定不可能

K1, K2, K3 フィルターによる $4 < z < 5$ のバルマーブレイク銀河の選択

K1-K2 vs K2-K3



K2-K3 vs redshift

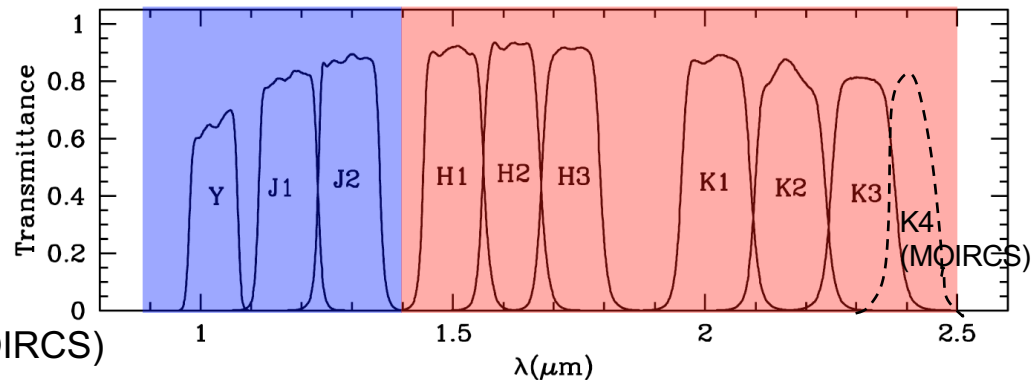


K2-K3 は r-drop 銀河 ($4.4 < z < 5.2$) のバルマー・ブレイクを捉えることができる!

Toshikawa et al.

K2 - K3

MB filter	λ_c (μm)	FWHM (μm)	z (Bal.break) 3645Å
K_1	2.03	0.14	4.38
K_2	2.17	0.14	4.76
K_3	2.31	0.14	5.14
K_4	2.41	0.12	5.45 (on MOIRCS)



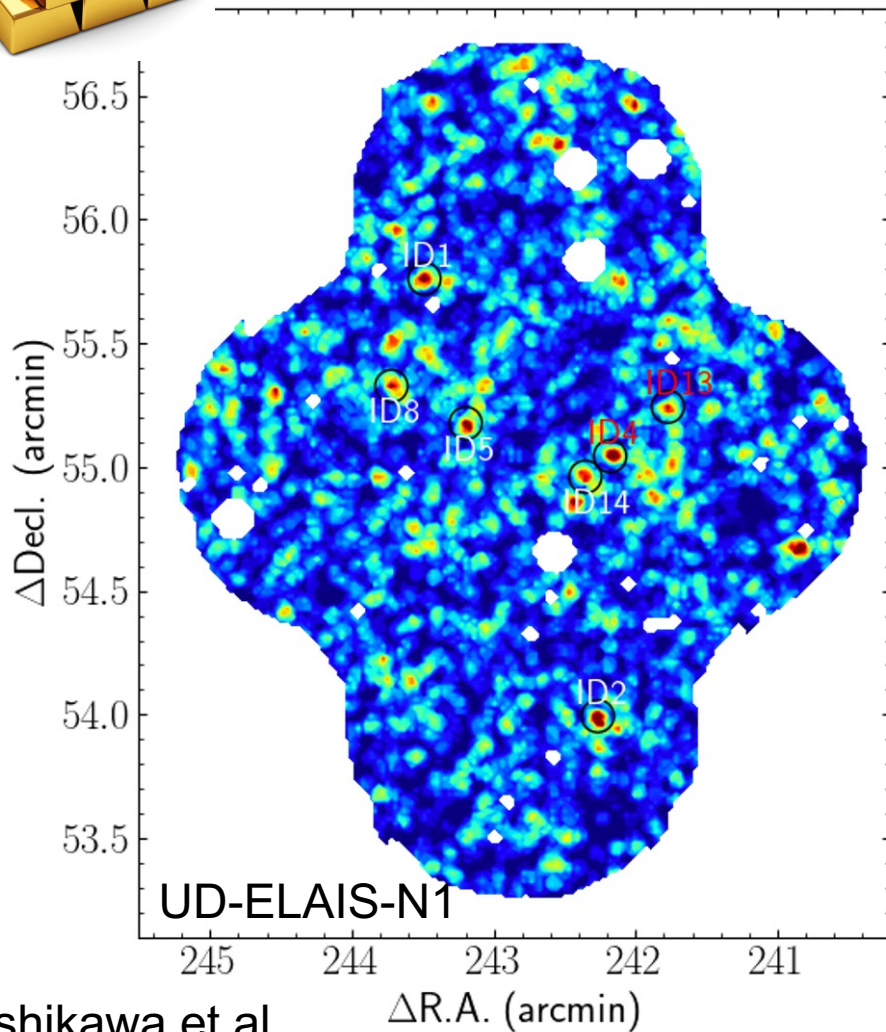
モンスター銀河は原始銀河団に宿る？

HSCで見つけた原始銀河団は遠方の巨大銀河探査に理想的な場所



GOLD-RUSH

r-dropout ($4.6 < z < 5.1$)



RUBY-RUSH

Red Ultra-massive
Billion-Year-Old Universe SHiners

GOLD-RUSH 鉱山に、 $z \sim 5$ の巨大な
ルビーを探せ！



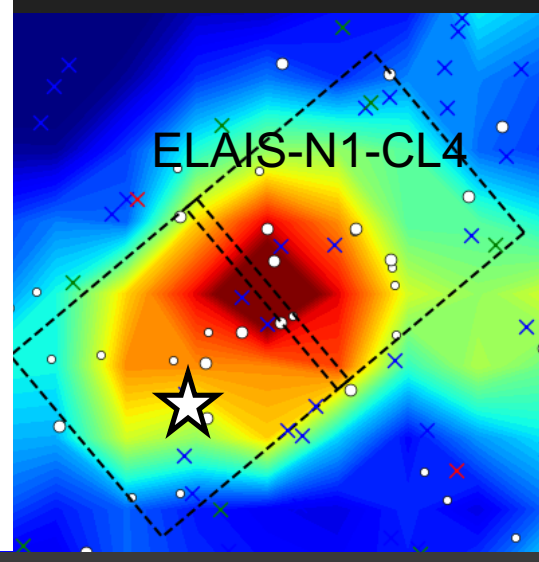
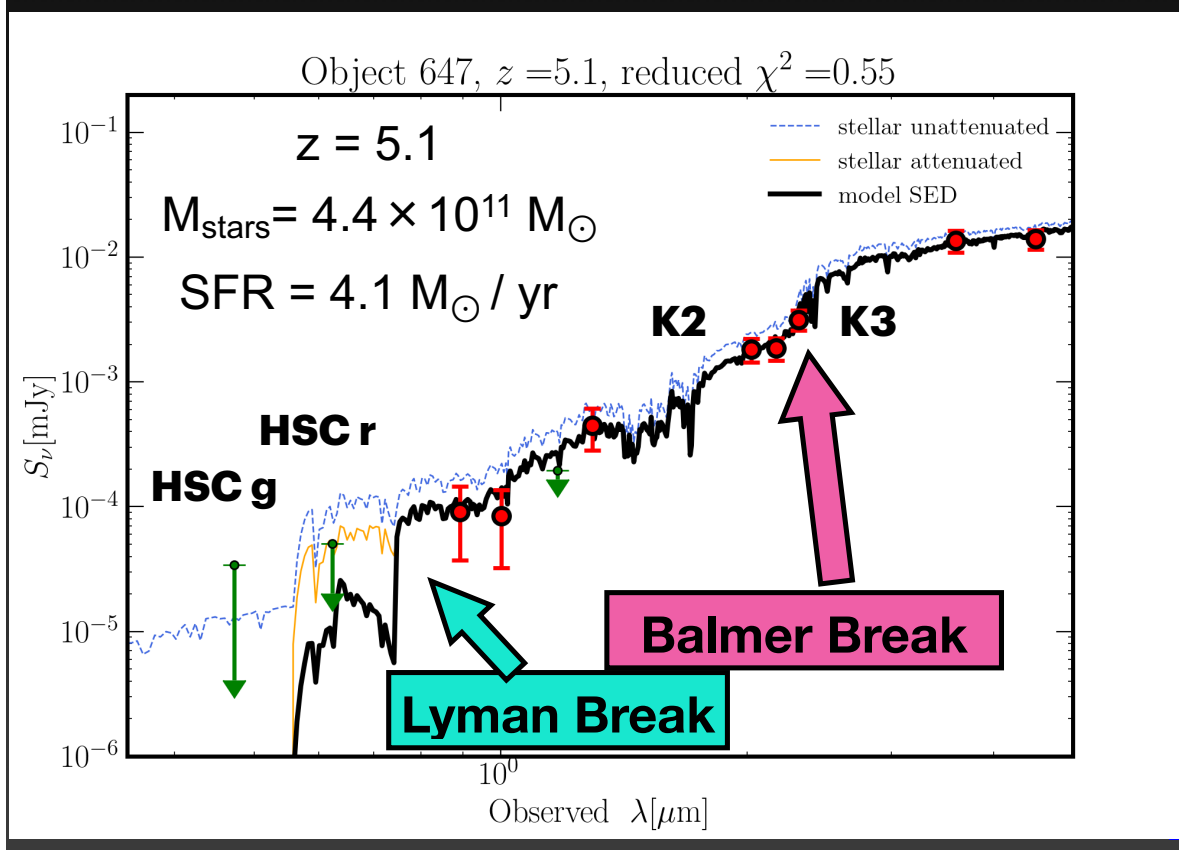
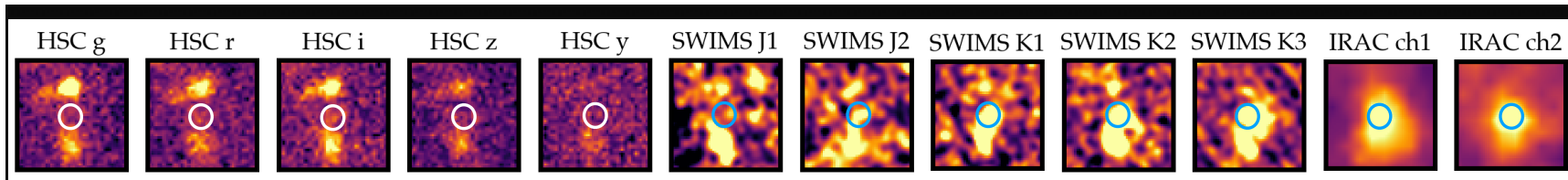
一般フィールドでの銀河個数密度と比較して、
原始銀河団での銀河形成バイアスを定量化する。

2021年～2023年にかけて、すばるで計12晩の観測

RUBY-RUSH



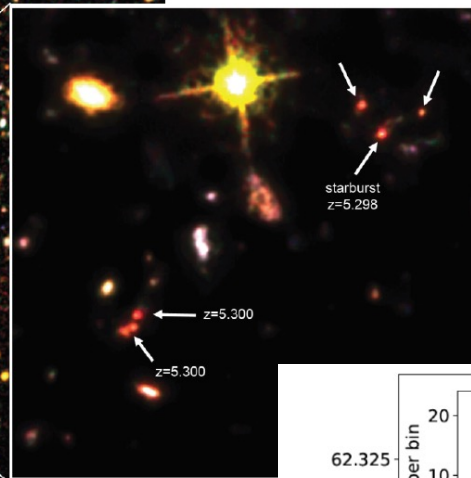
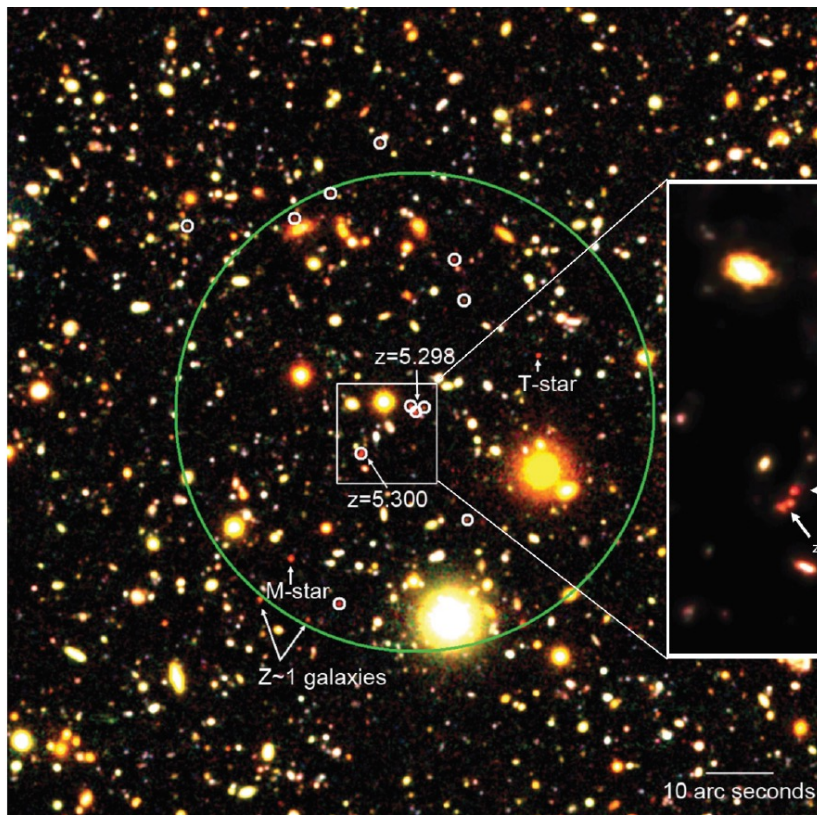
Candidate massive quiescent galaxies at $z \sim 5$



RUBY-RUSH

extension to $z=5.3$

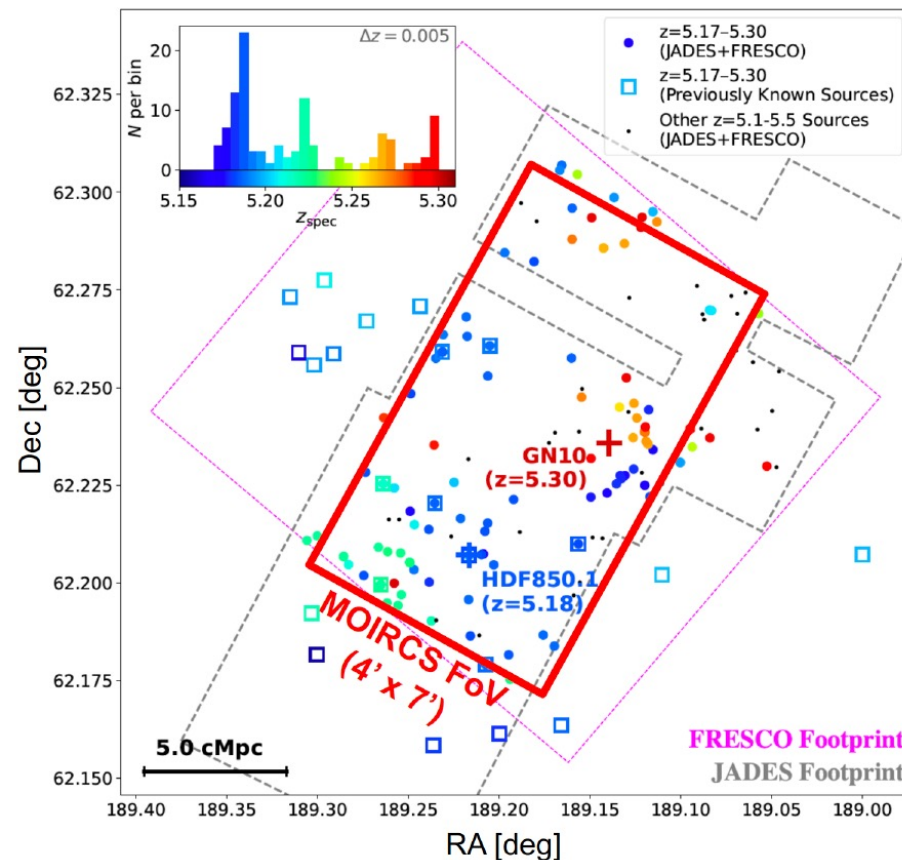
GN10/HSD850.1 structure
at $z=5.2-5.3$



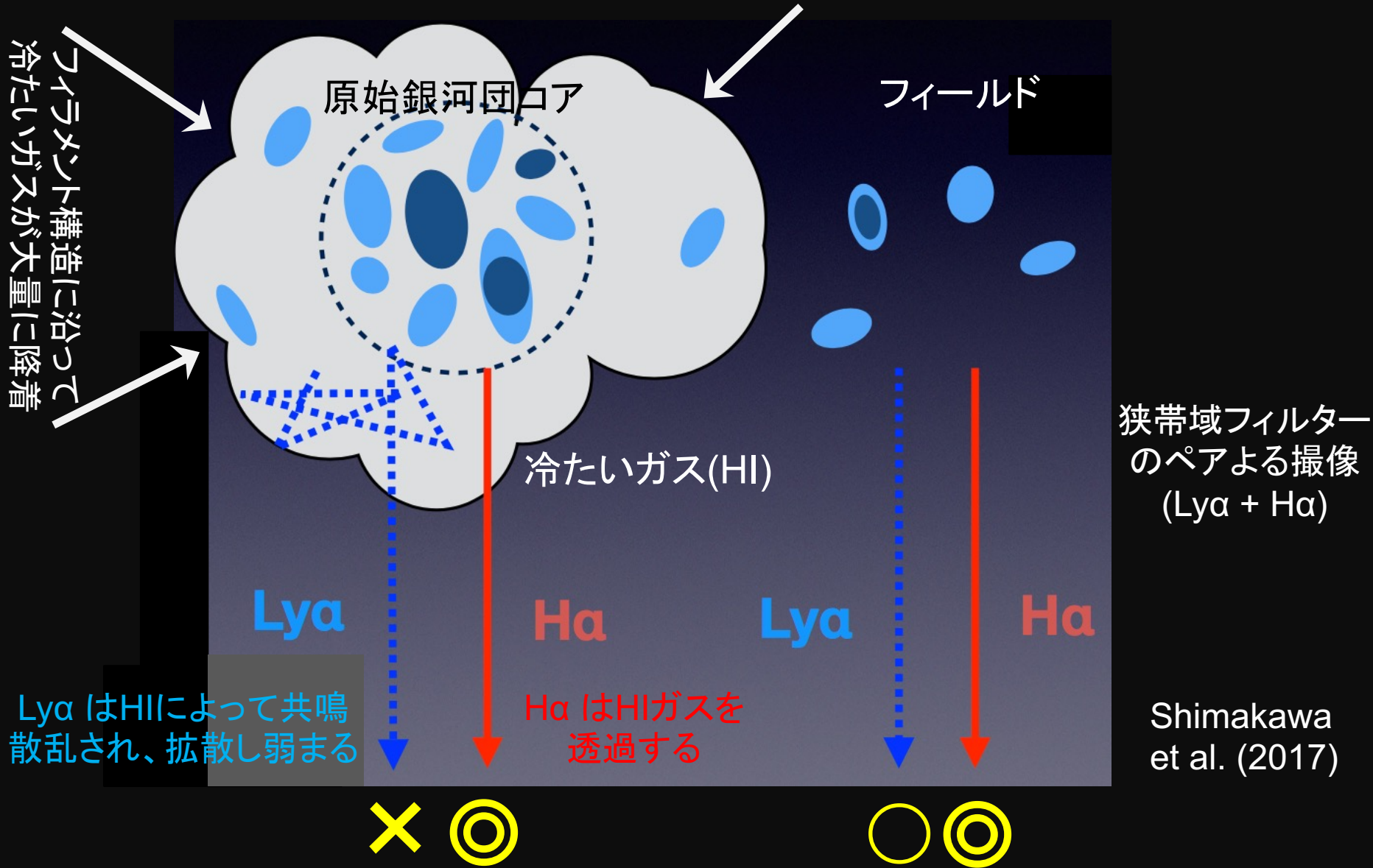
COSMOS-AzTEC3 cluster ($z=5.3$)

Subaru/MOIRCS K3 and K4 filters

MB filter	λ_c (μm)	FWHM (μm)	z (Bal.break) 3645Å
K_3	2.31	0.14	5.14
K_4	2.41	0.12	5.45



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

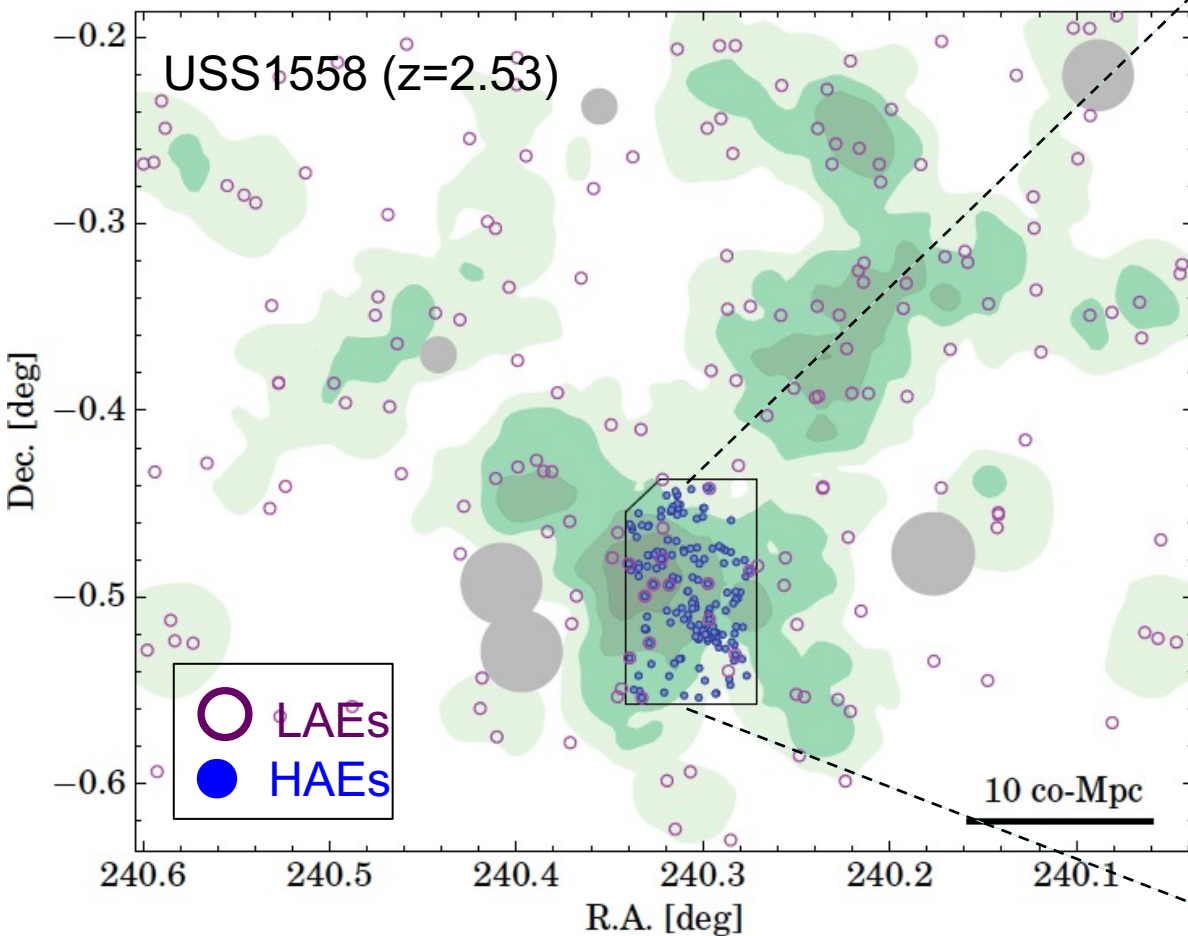


ある開口径内の Ly-alpha/H-alpha 比がHIガス量により変化(中性ガスのトレーサー) → ガス降着史

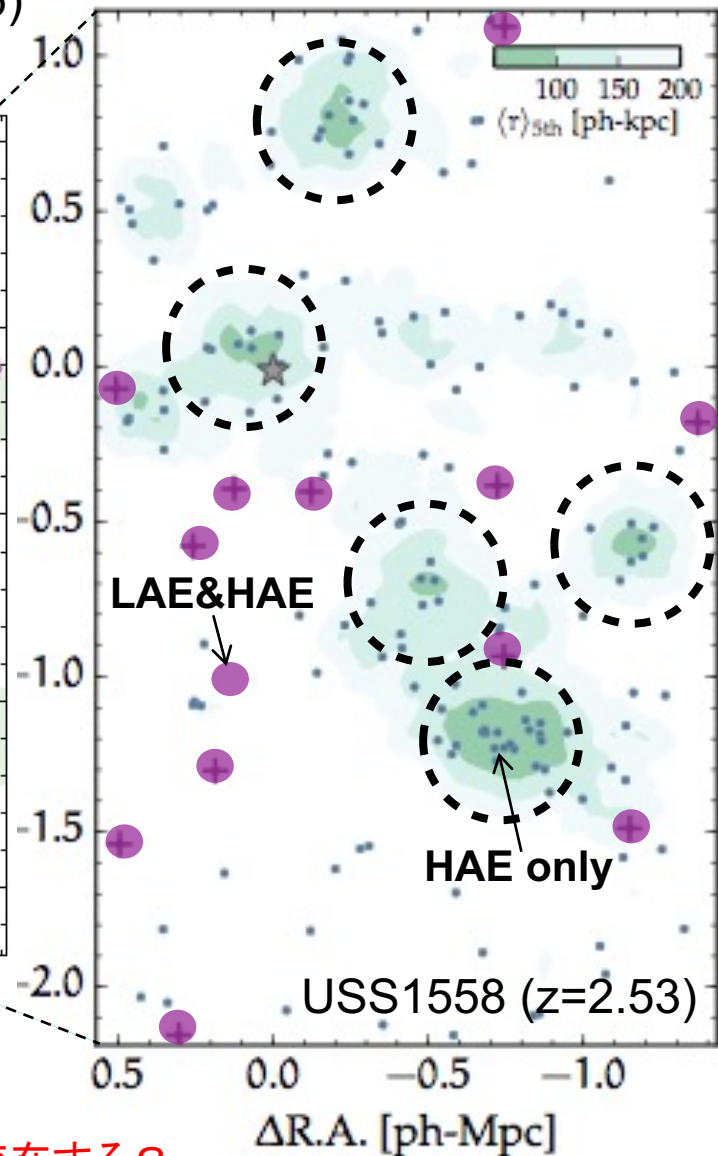
$z=2.5$ 原始銀河団のペア狭帯域フィルターによる ($L\alpha$, $H\alpha$)輝線銀河探査

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

Suprime-Cam (34' x 27') - NB429 ($L\alpha$)



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



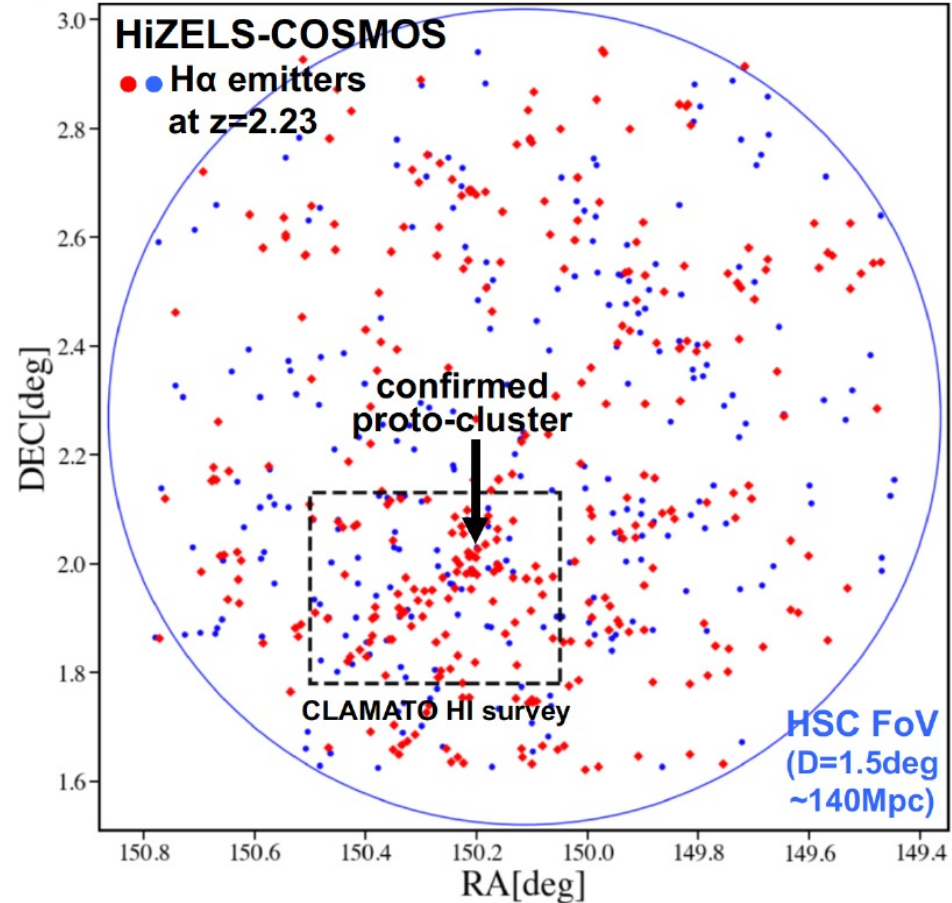
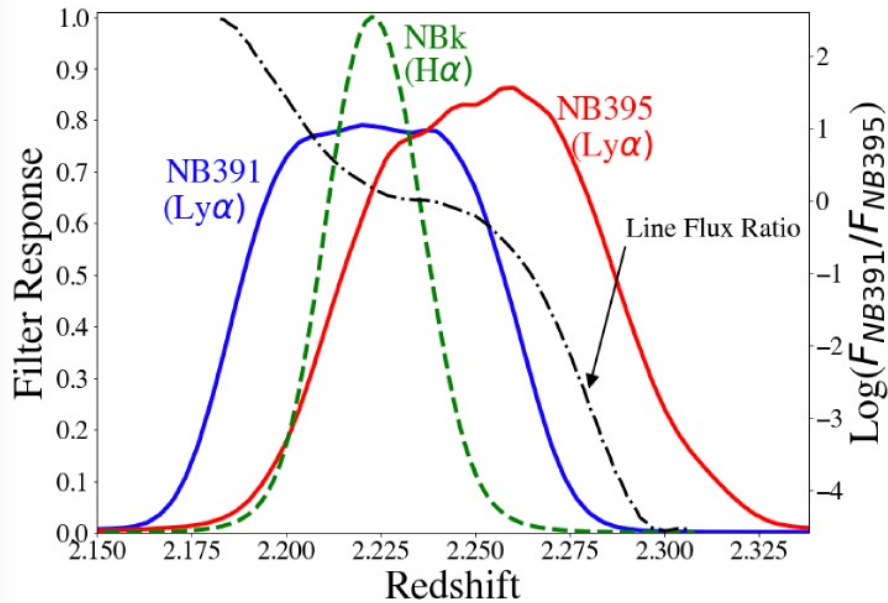
LAEは高密度クランプを避けて分布する！

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？

3つの狭帯域フィルターの撮像観測(すばる等)による、
遠方宇宙(z=2.3)の大規模構造のマッピングと、中性水素の分布から探る銀河ガス降着史

Ly α /H α 輝線比(共鳴散乱) \rightarrow HI ガスマップ



line	NBF	lambda	width	z_in	z_center	z_out	
Ly α	NB395-HSC	0.3952	0.0098	2.211	2.251	2.291	すばる
Ly α	NB391-HSC	0.3910	0.0100	2.175	2.215	2.245	すばる
H α	NBK-UKIRT	2.1210	0.0210	2.215	2.231	2.247	UKIRT

船木 (B4)

Triple NB imaging of high/low density regions in Deep2-3 at $z \sim 1.5$

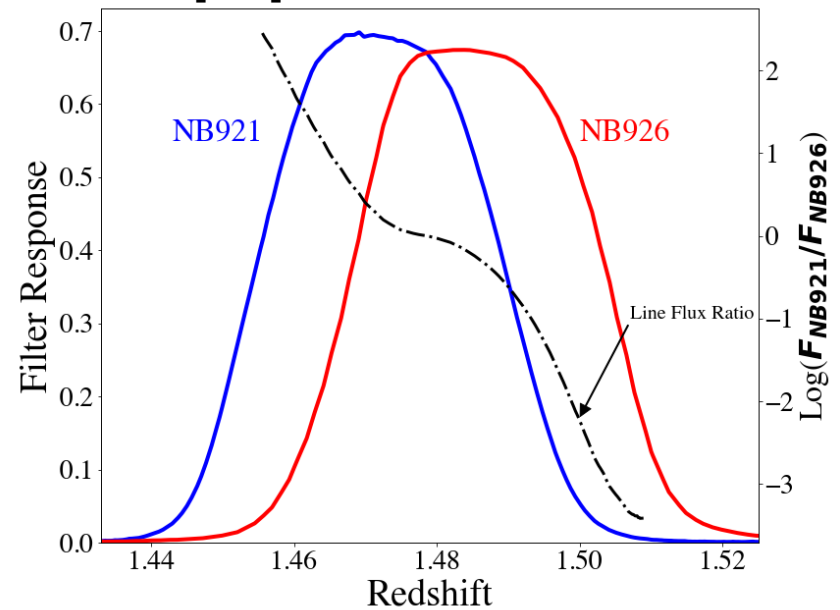
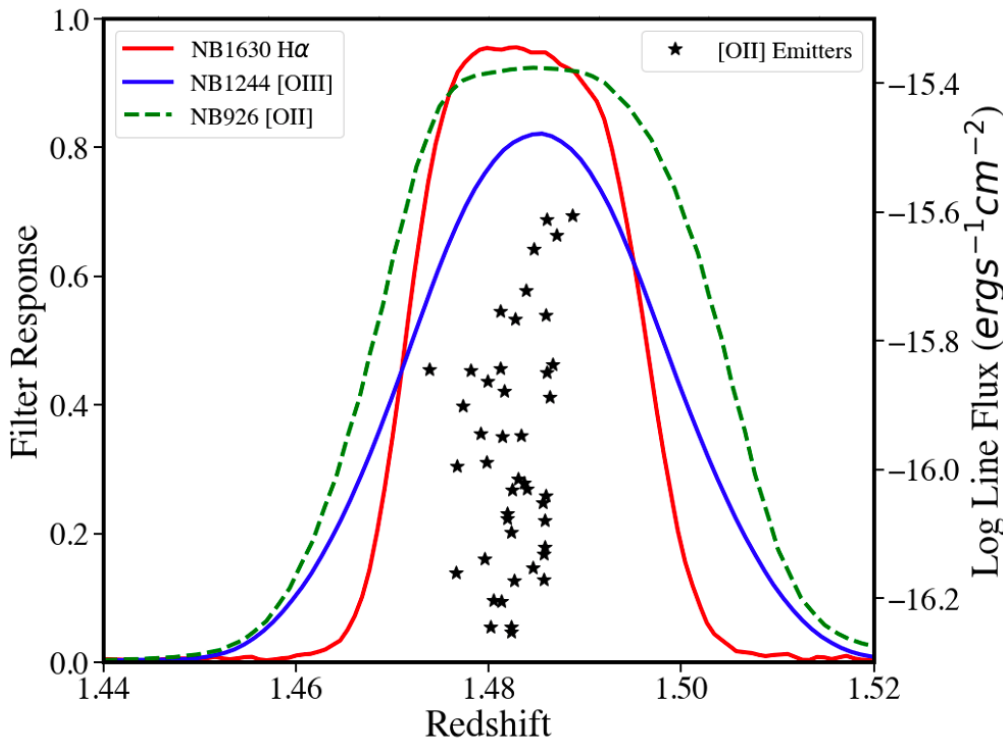
$z \sim 1.48$ [OII] emitter imaging with HSC partly overlapping NB921/NB926 filters

DEEP2-3 field (HSC-D)

H α (NB1630-SWS) + [OIII] (NB1244-SWS) + [OII] (NB926-HSC)

HSC NB921/NB926 ratio \rightarrow redshift

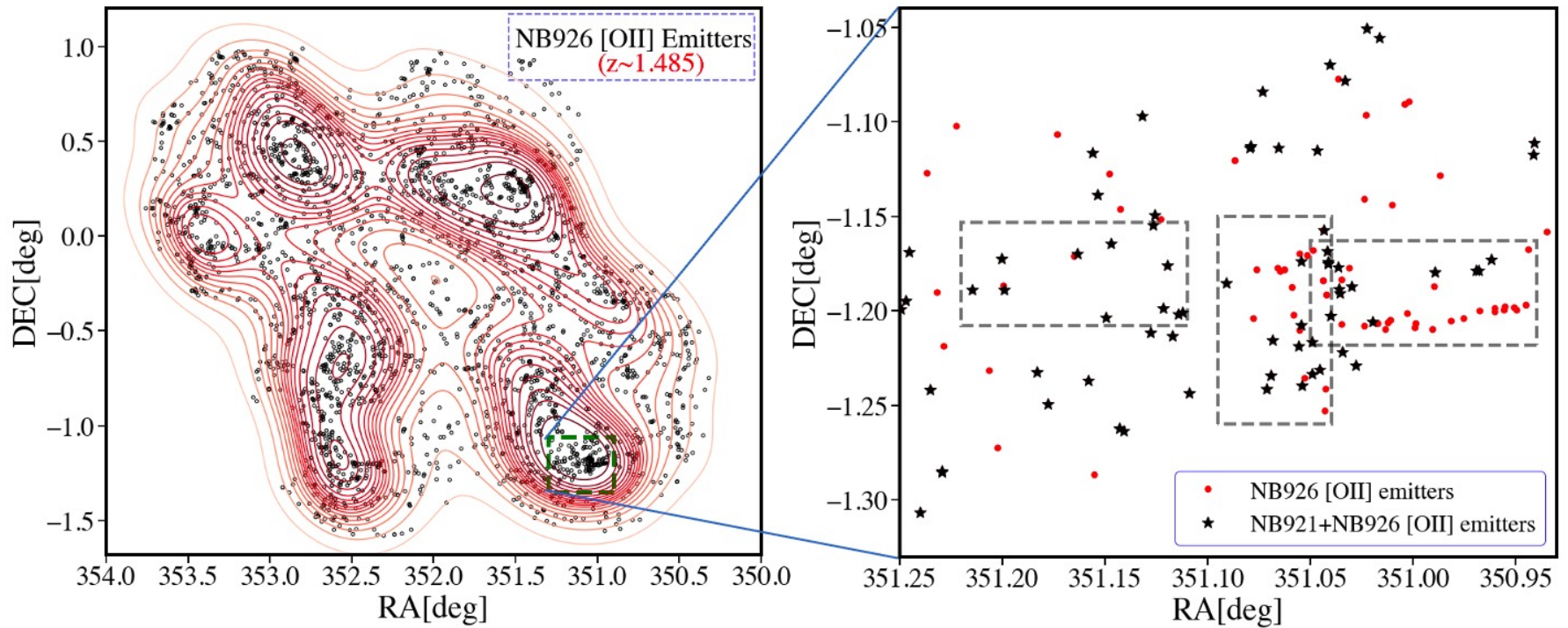
[OII] emitters at $z=1.48$



line	NBF-camera	lambda	width	z_in	z_center	z_out
Ha	NB1630-SWS	1.6302	0.0166	1.4713	1.4840	1.4966
[OIII]	NB1244-SWS	1.2443	0.0150	1.4701	1.4851	1.5001
[OII]	NB926-HSC	0.9260	0.0131	1.4670	1.4846	1.5021

Triple NB imaging of high/low density regions in Deep2-3 at $z \sim 1.5$

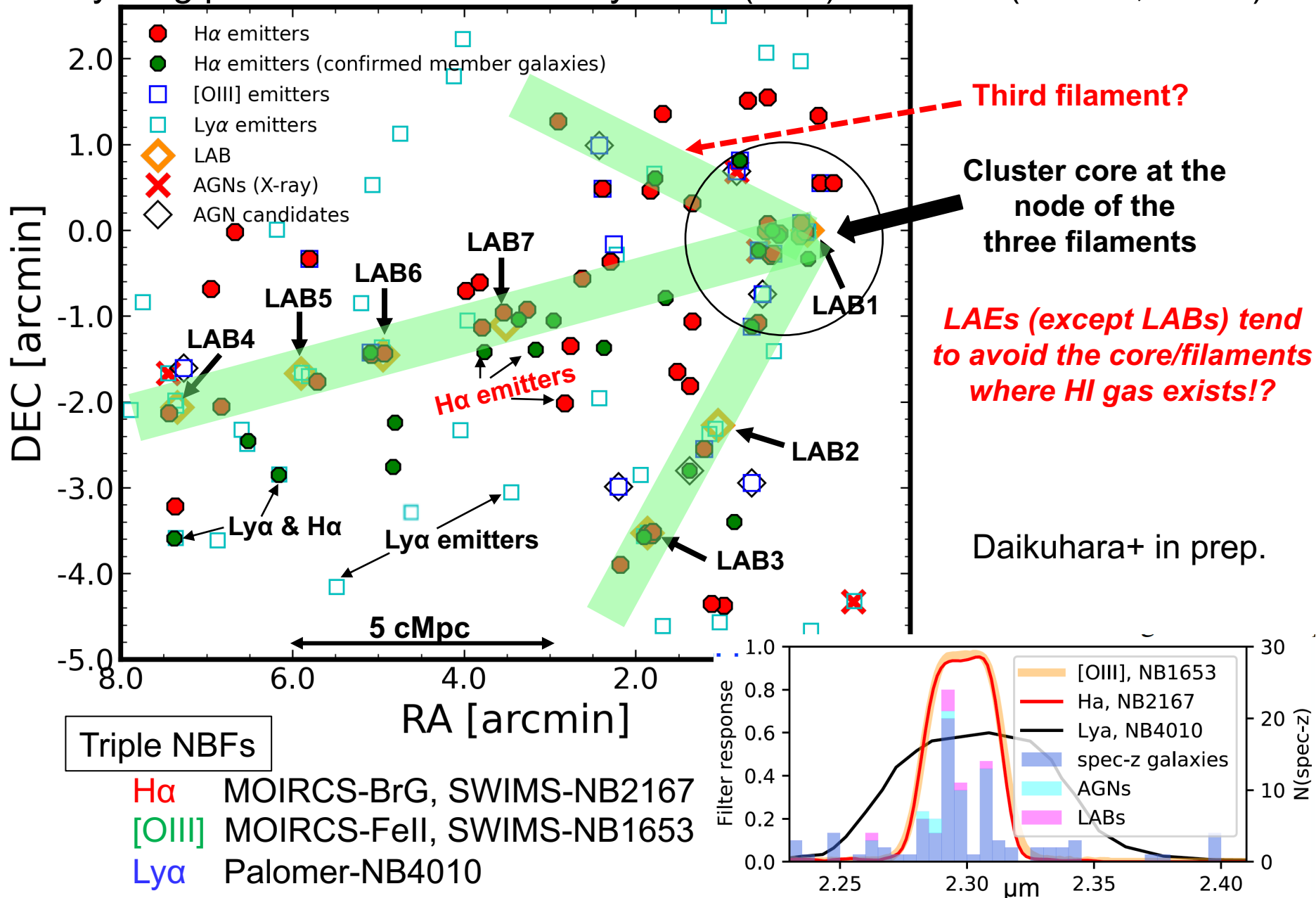
DEEP2-3 field (HSC-Deep)



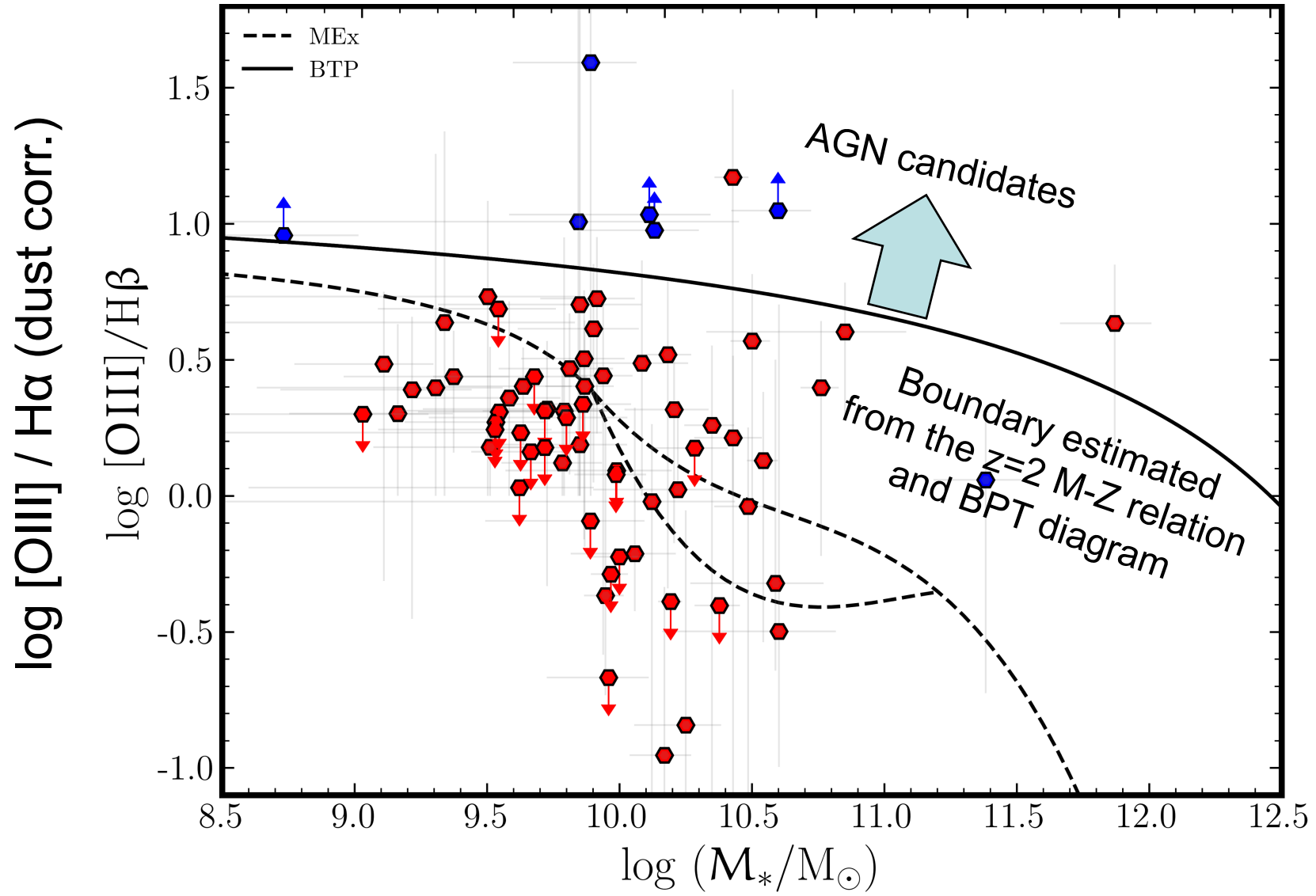
Laishram et al. (2021)

HS1700+64 ($z=2.30$)

A young protocluster with linear Ly α blob (LAB) filaments (Steidel, Erb...)

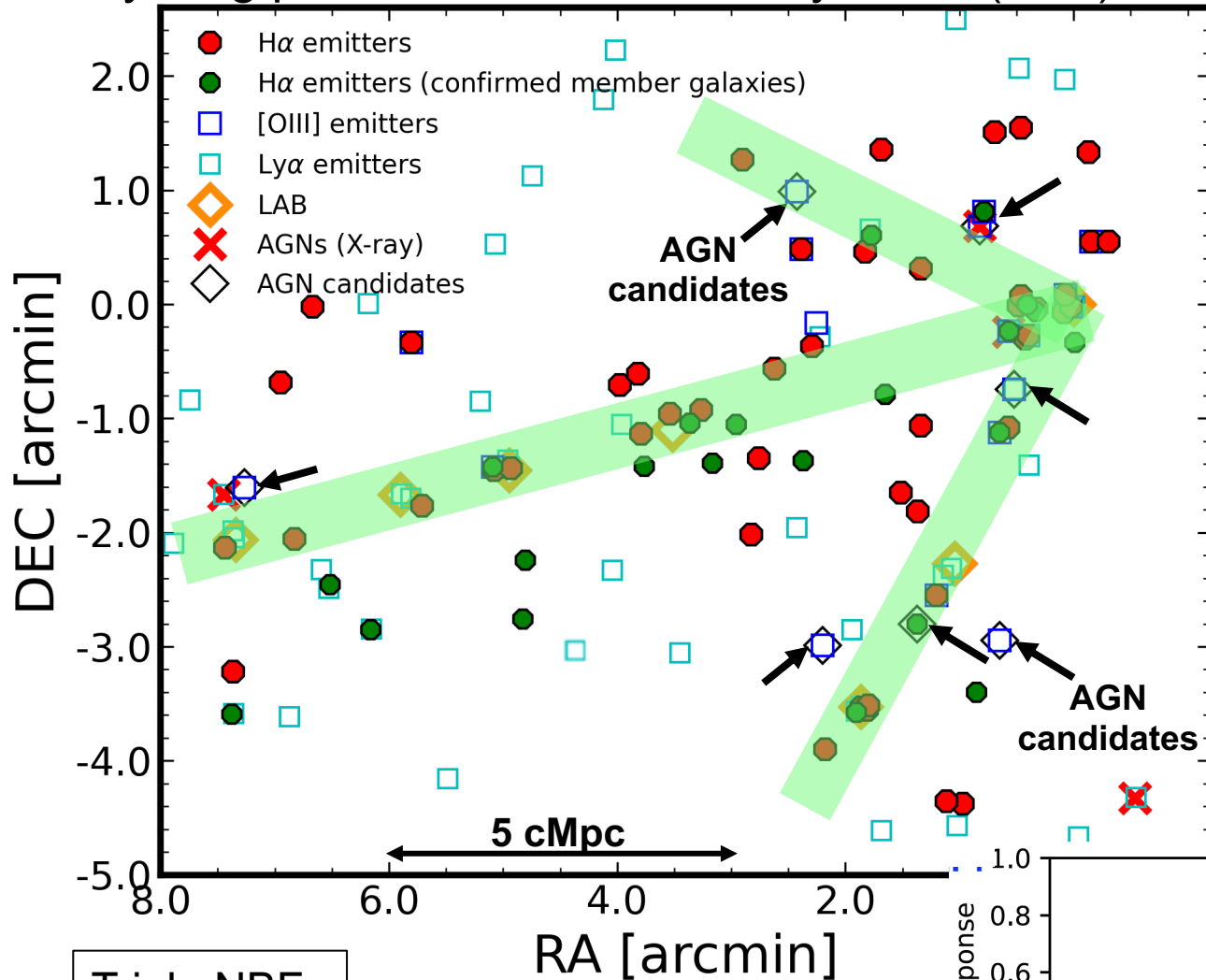


Dual NB imaging ($H\alpha$, $[OIII]$) can identify AGNs on the photometric MEx diagram



HS1700+64 ($z=2.30$)

A young protocluster with linear Ly α blob (LAB) filaments (Steidel, Erb...)



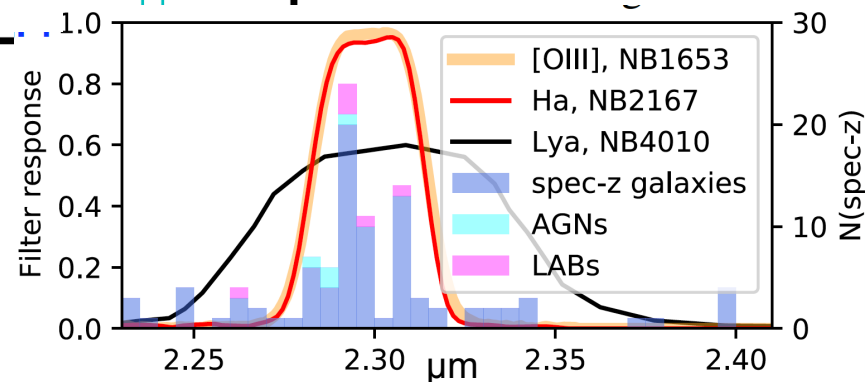
AGN candidates tend to be aligned on the three filaments.

→ Enhancement of AGN activities in filaments, where gas accretion is efficient?

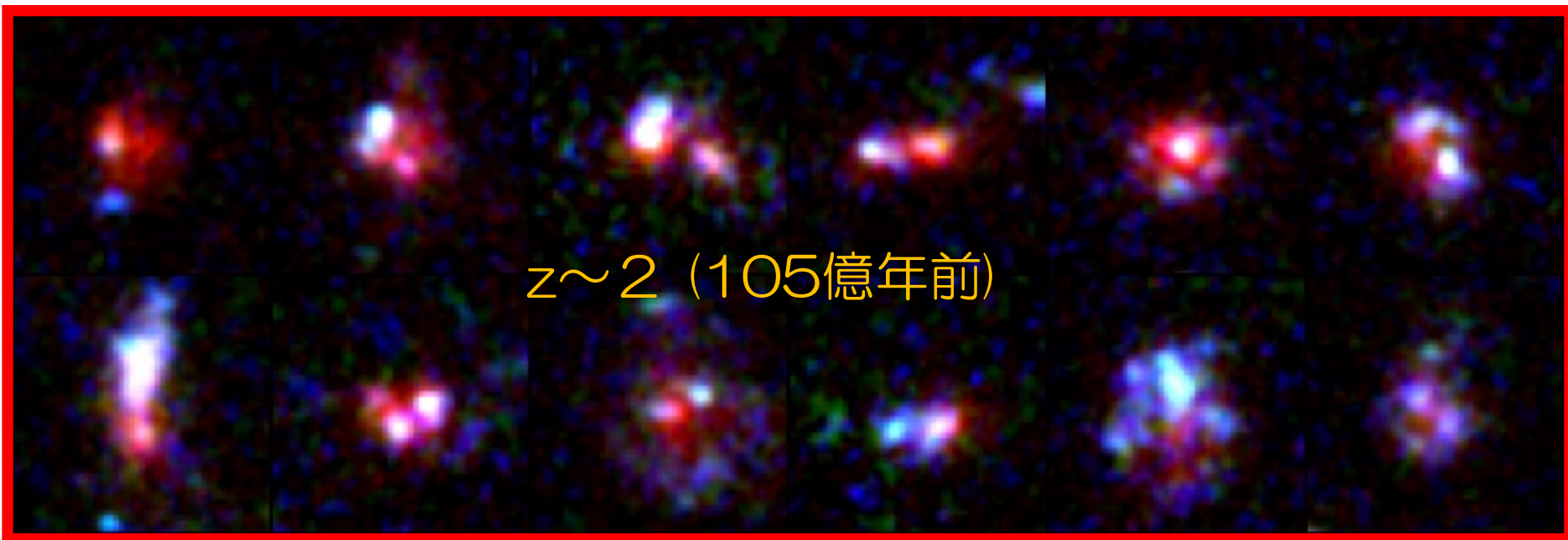
Daikuhara+ in prep.

Triple NBFs

- H α MOIRCS-BrG, SWIMS-NB2167
- [OIII] MOIRCS-FeII, SWIMS-NB1653
- Ly α Palomer-NB4010



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

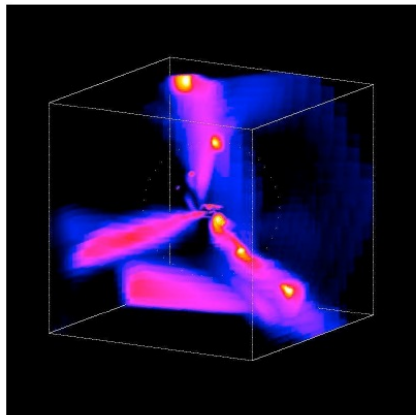


コンピューターの中の銀河



ぶつぶつに分裂しているものが多い!

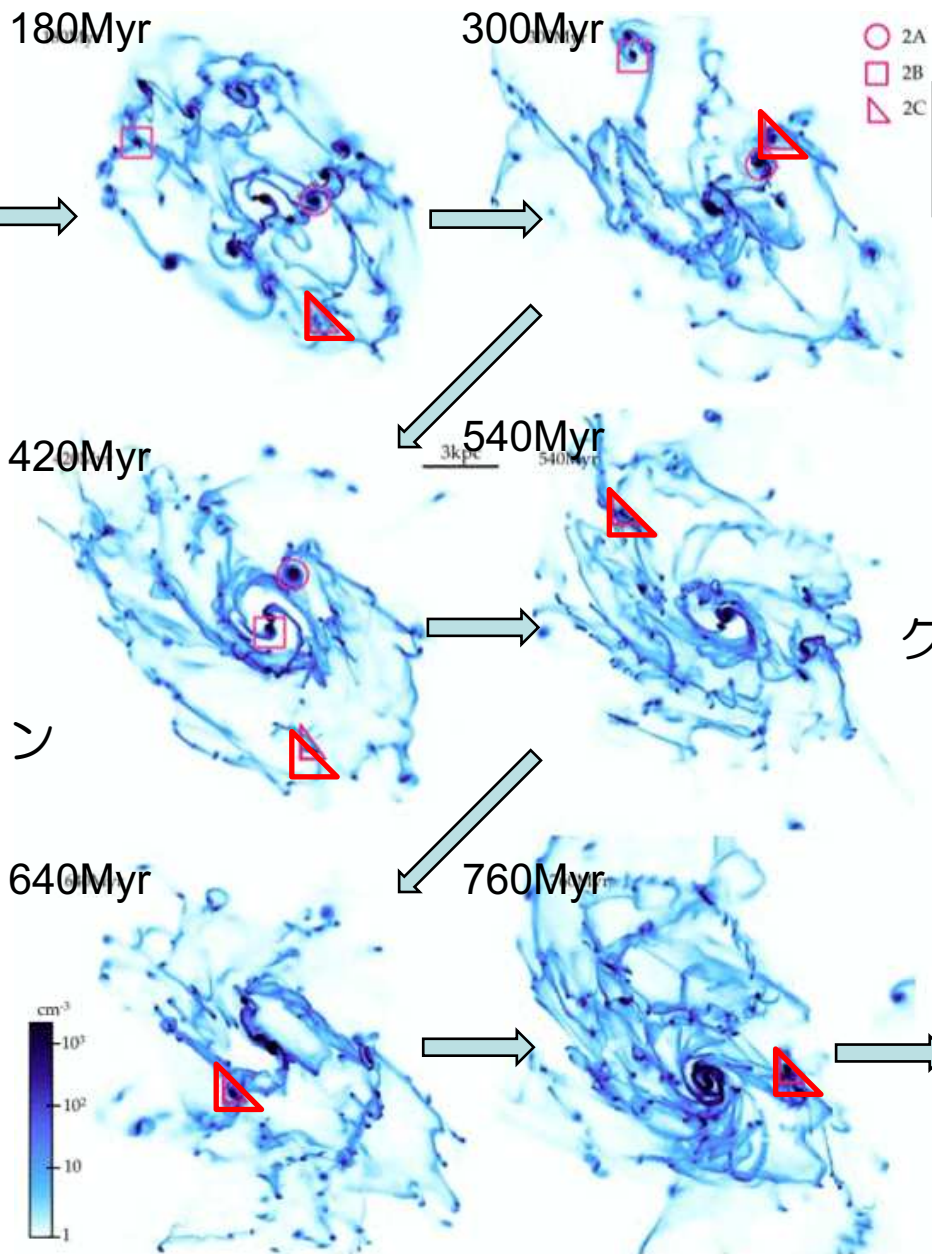
これは銀河の合体の現場か、それとも
自分で分裂しているのか?



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

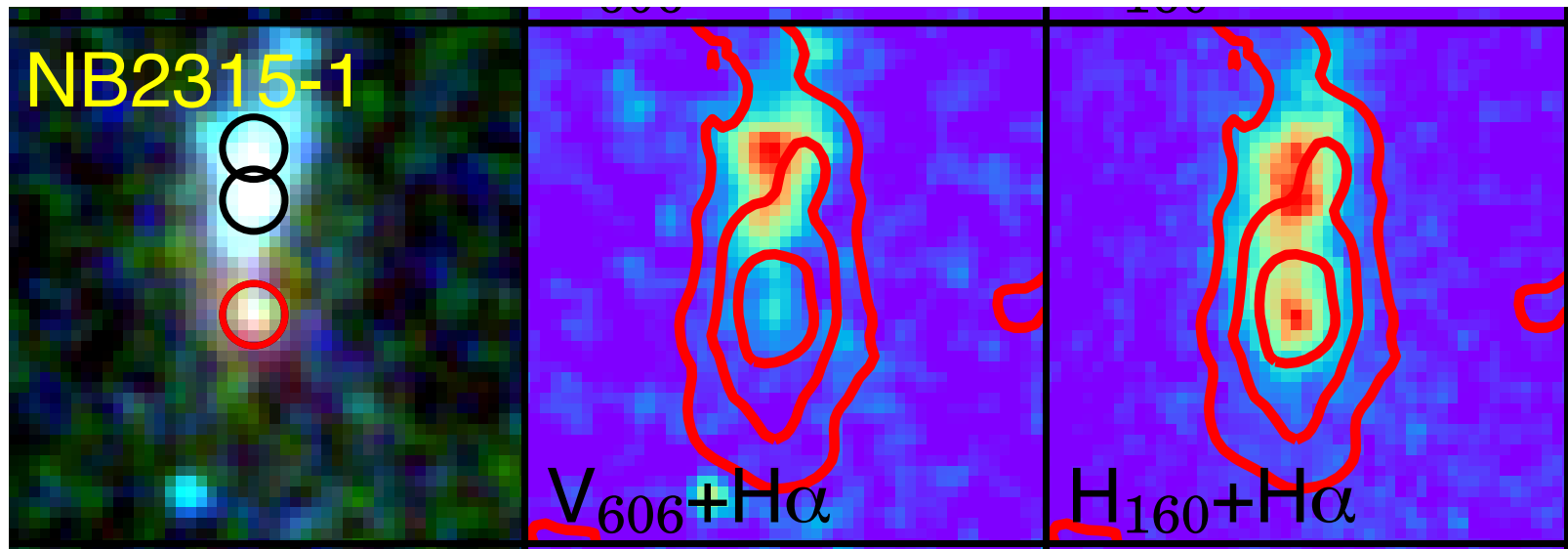
FIG. 2.— Same as Figure 1 for galaxy G2 (medium mass). Detailed sequences and movies of our fiducial models are available in Perret et al. (2013a).

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

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

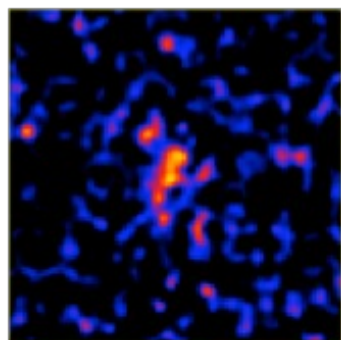
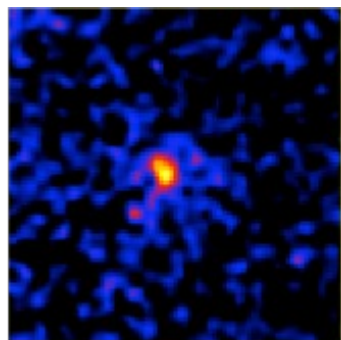
Galaxy **R**esolved **A**natomy with **CO** **I**nterferometry
And **S**ubmm observations with **ALMA**



高解像度(~ 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 α

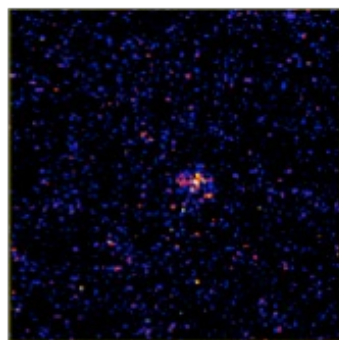
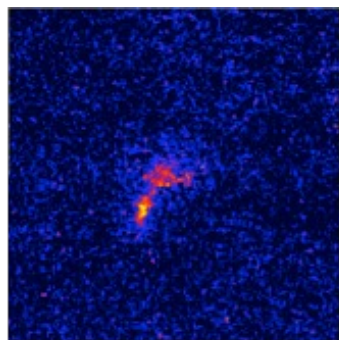
0.1"-0.15"



GANBA-Subaru

HST / ACS
SF traced by UV

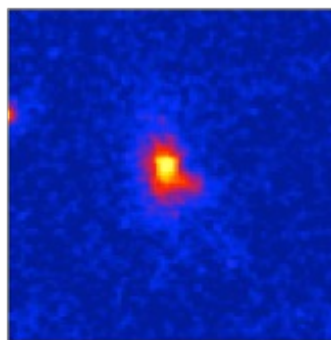
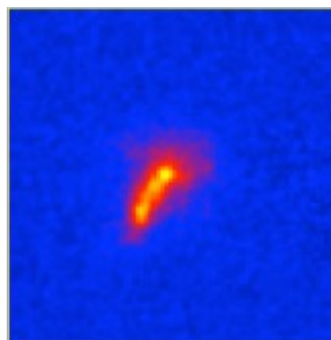
0.1"



HST imaging JWSTも!

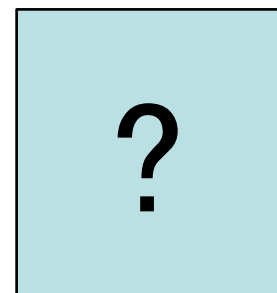
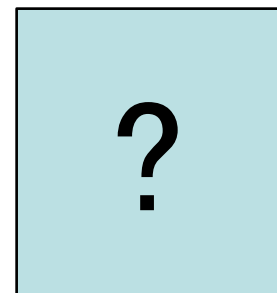
HST / WFC3
Stellar mass

0.16"



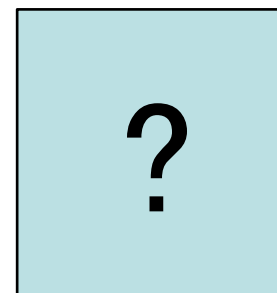
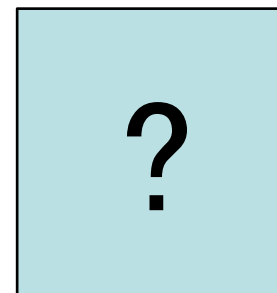
ALMA
Dust cont.

0.1"



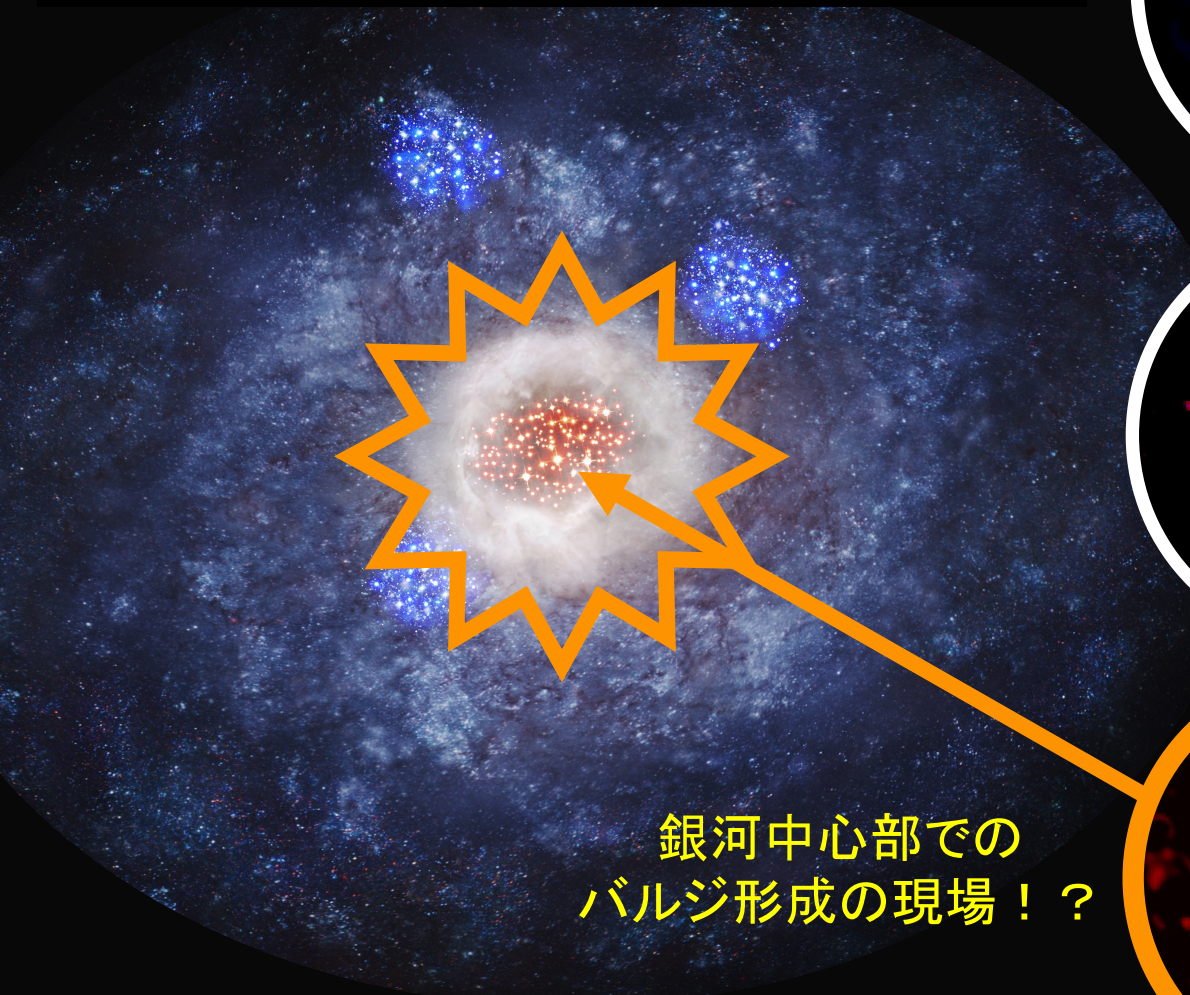
ALMA
CO line

0.2"



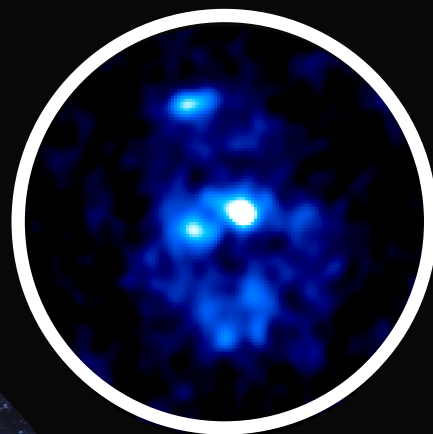
GRACIAS-ALMA

110億年前のクランプ銀河の 内部構造



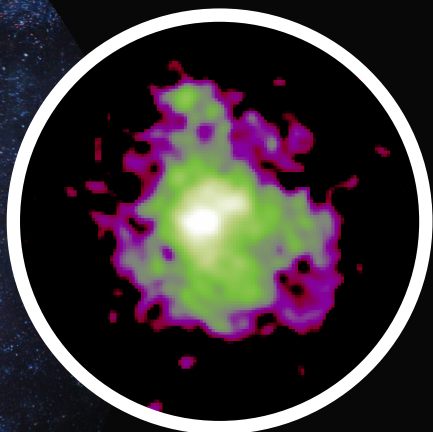
銀河中心部での
バルジ形成の現場！？

イメージ図



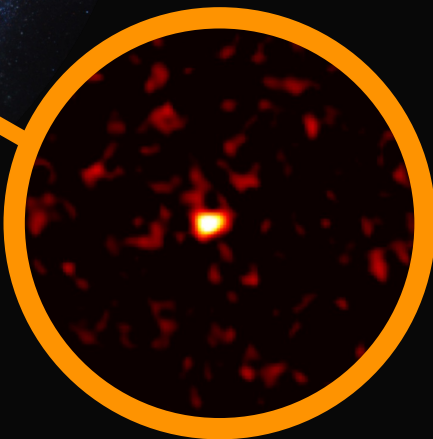
ハッブル
(可視光)

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

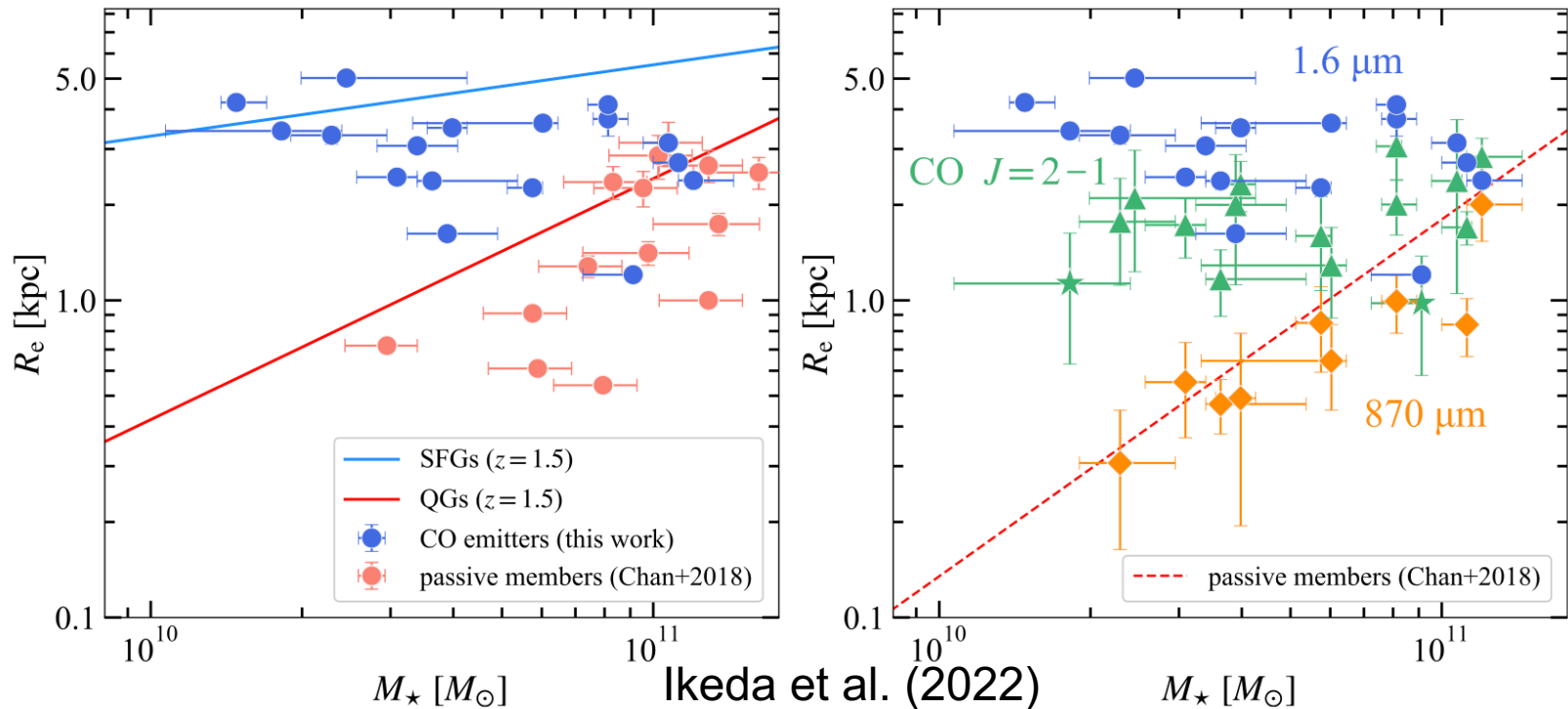


Figure 7. Stellar mass–size distribution of the galaxies in XCS J2215. Left: HST/1.6 μ m sizes are shown for 17 CO emitters (blue circles) and 14 spectroscopically confirmed passive members (red circles; Chan et al. 2018). The solid lines correspond to the best-fit mass–size relation of star-forming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

Unveiling the propagation of “intrinsic” SF activities across the proto-cluster and within individual galaxies

JWST cycle-1 GO program (Dannerbauer, Koyama, Kodama+)

Resolving and penetrating into the dusty Spiderweb and its surrounding protocluster with **Pa-beta imaging**

Dust-free SF tracer down to $\text{SFR}=3.5 M_{\odot} / \text{yr}$
(rest-frame $1.282\mu\text{m}$)

Scientific Category: Galaxies

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

Instruments: NIRCAM

Proposal Size: SMALL

Exclusive Access Period: 12 months

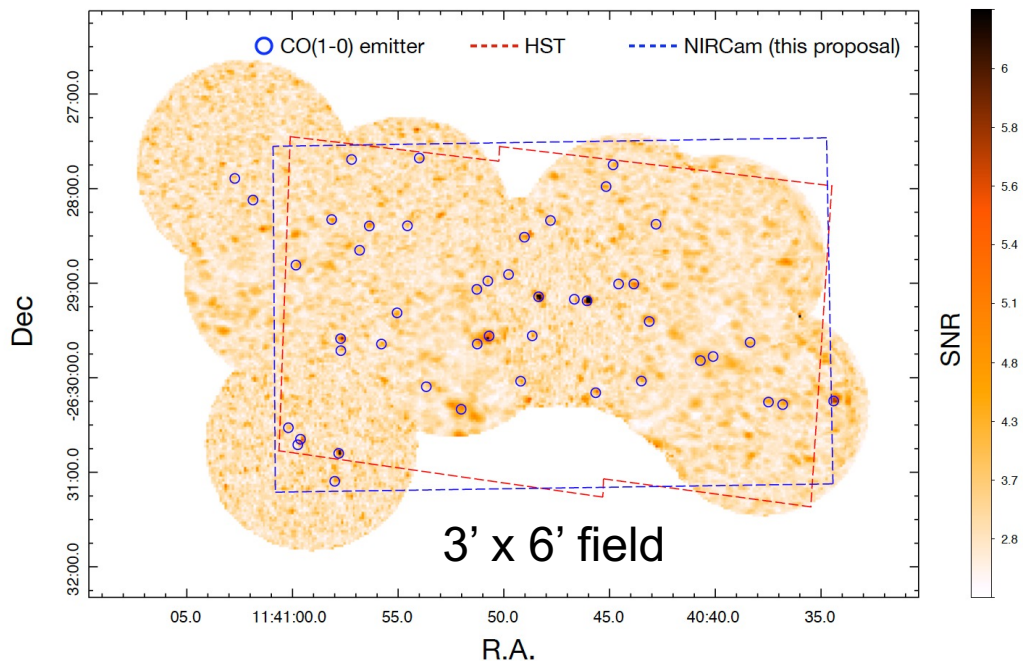
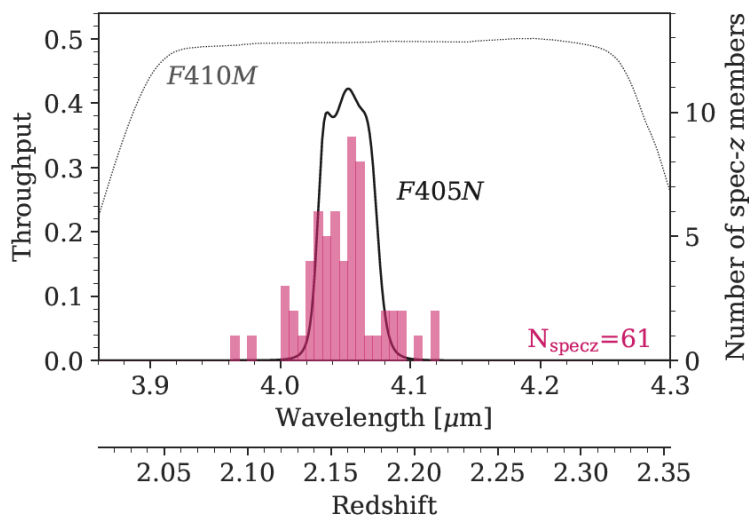
Data will be delivered in May-Jun 2023.

The spiderweb protocluster PKS1138 @z=2.16

Allocation Information (in hours):

Science Time: 1.4

Charged Time: 3.6



We can capture Pa β line (rest $1.282\mu\text{m}$) from the cluster members with F405N narrow-band filter.

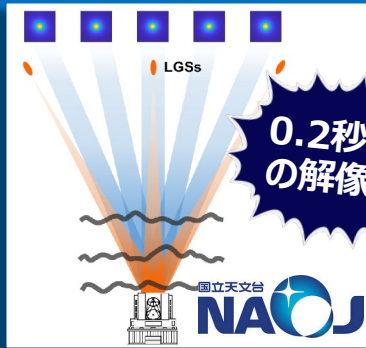
究極のすばる望遠鏡へ (ULTIMATE-Subaru)

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

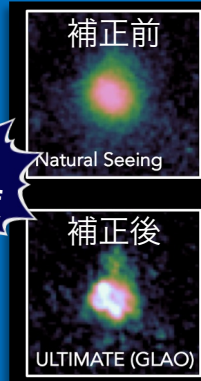
広視野補償光学(GLAO)

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)

既に
開発中



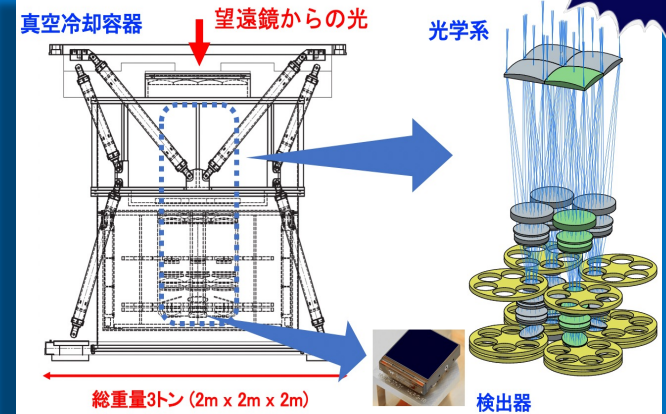
0.2秒角
の解像度



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')



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

2028-

Ultra-wide Laser Tomographic Imager and MOS with AO for Transcendent Exploration

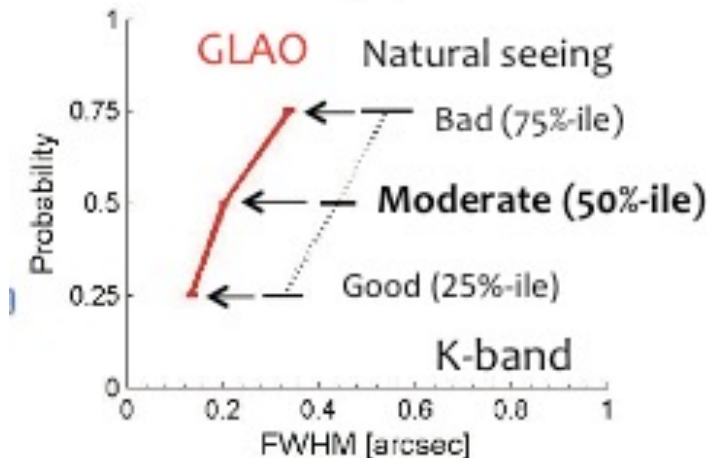
Ground Layer AO with Adaptive
Secondary Mirror (4 LGSs)

+

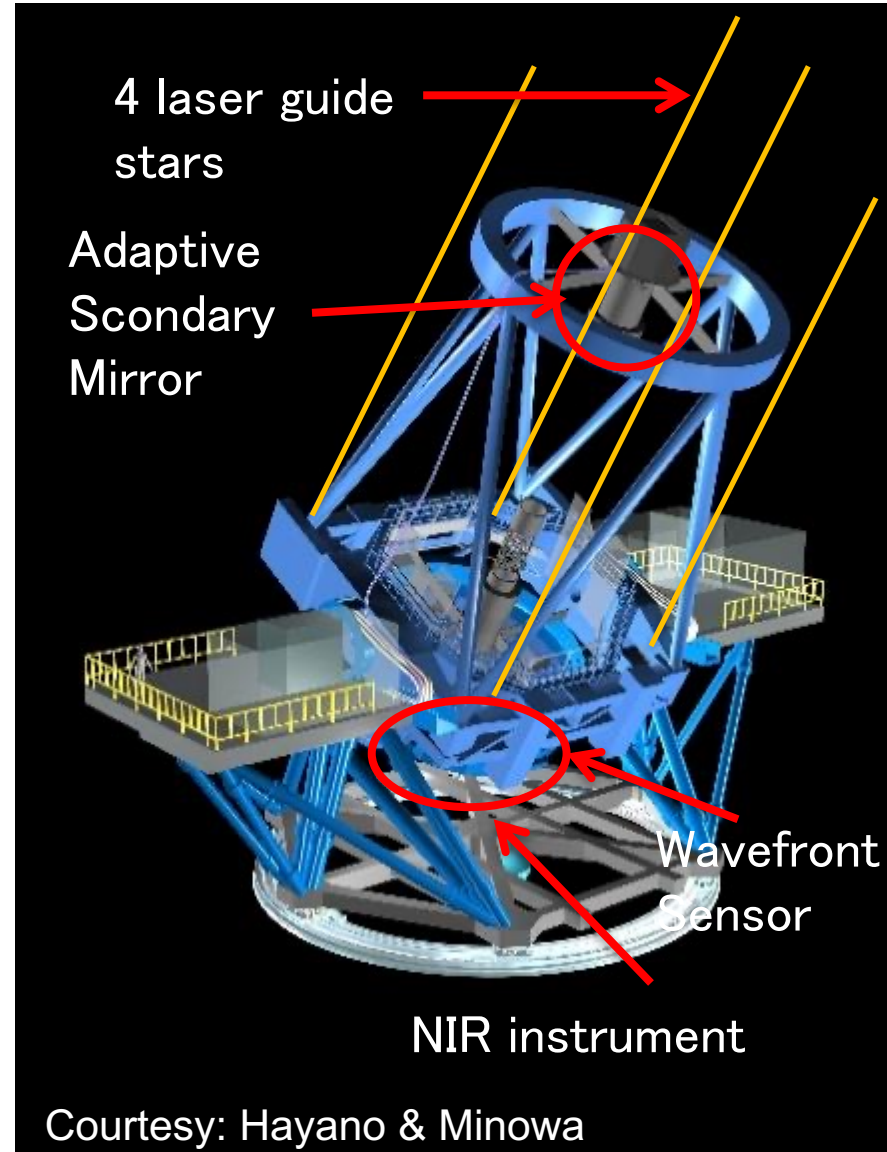
Wide-field (14') Near-IR Imager (WFI)

Seeing improvement
(FWHM 0.4" → 0.2" in K) over 14' FOV

(cf. ~0.4" over 7.5' with VLT/GRAAL)



→ 0.2" resolution for extended sources
1.5~2x higher sensitivity for point sources



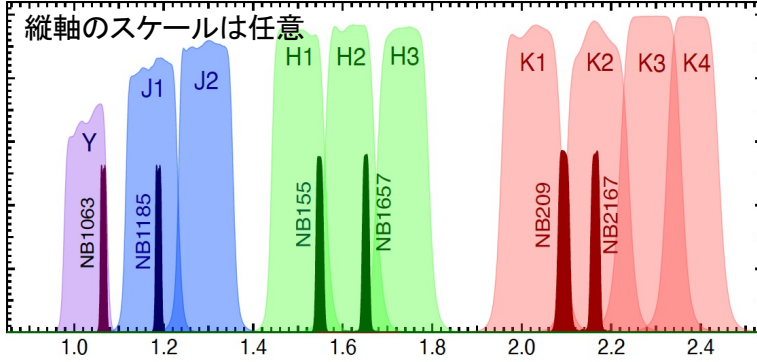
多彩で独創的なフィルター群、広視野宇宙望遠鏡と相補的

次世代広視野宇宙望遠鏡にはない多彩なフィルター群

ULTIMATE WFI (Subaru)

本研究

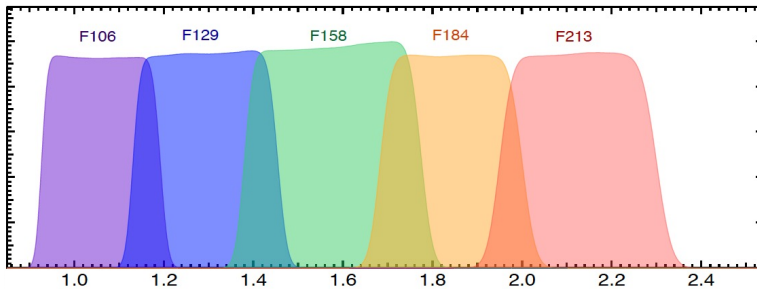
2028~



Roman

NASA

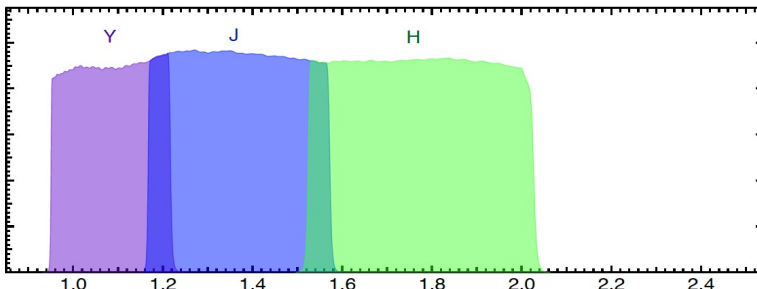
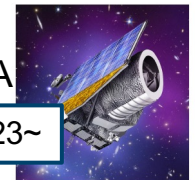
2027~



Euclid

ESA

2023~

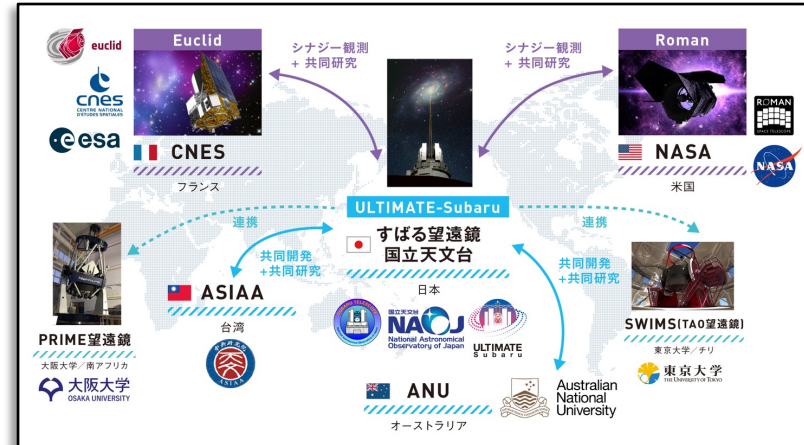


波長 [μm]

10枚の中間帯域フィルター(MBF)
6枚の狭帯域フィルター(NBF)

中間帯域フィルターは、国際先導研究
(代表: 宮崎聡(すばる所長), 児玉も分担者)
により先行して予算獲得済み

Euclid(欧州)/Roman(米国)側からもWFIに高い関心



SUPER IRNET

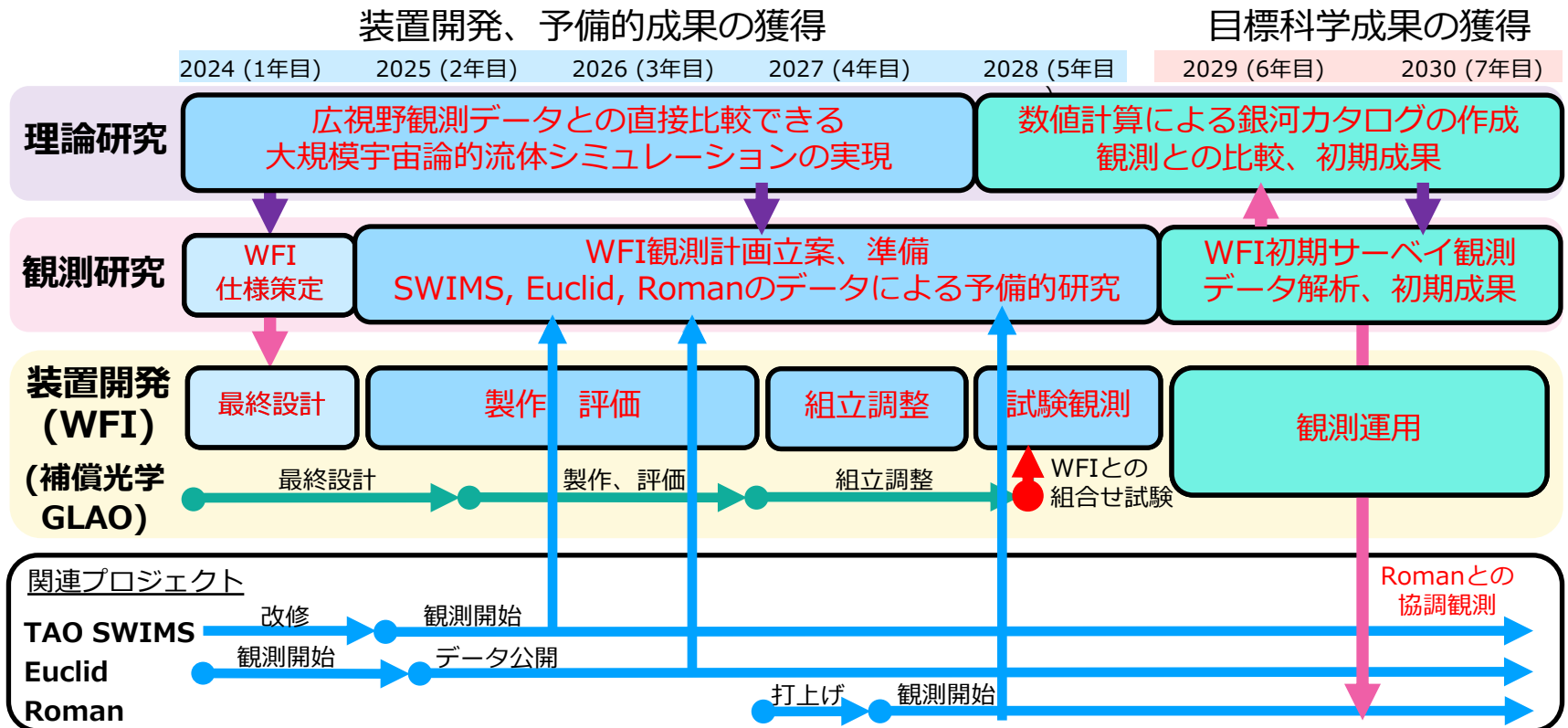
学振・研究拠点形成事業
代表: 吉田道利(国立天文台副台長)

特別推進研究（2024-2030年度、7億円、児玉代表）

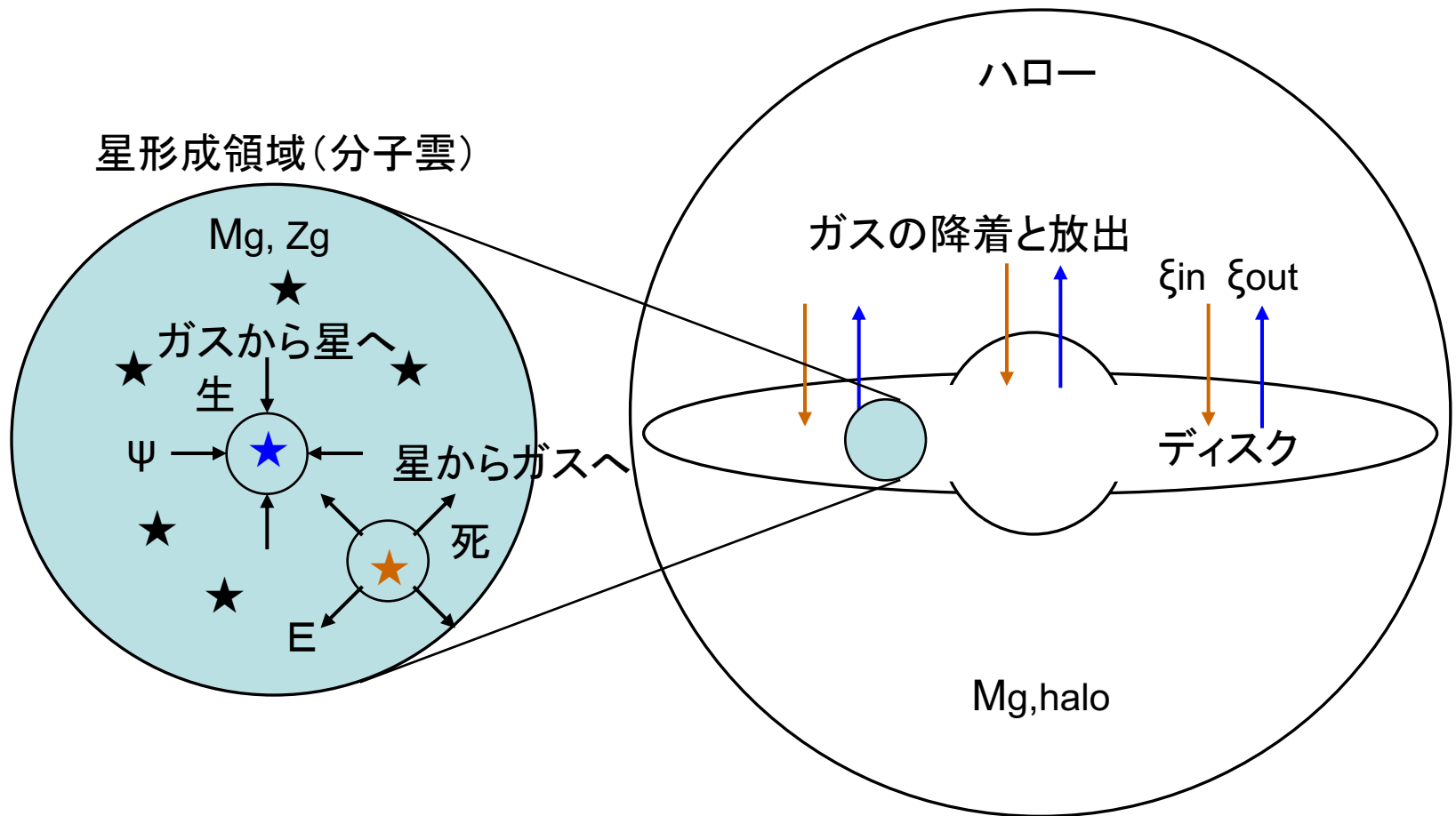
究極のすばる望遠鏡へ：広視野補償光学による近赤外深探査で解明する銀河宇宙史

児玉・秋山・久保（東北大）、本原・美濃和・小山・守屋（国立天文台）、井上（早大）、長峯（阪大）、矢島（筑波大）、杉村（北大）

研究計画（年表）

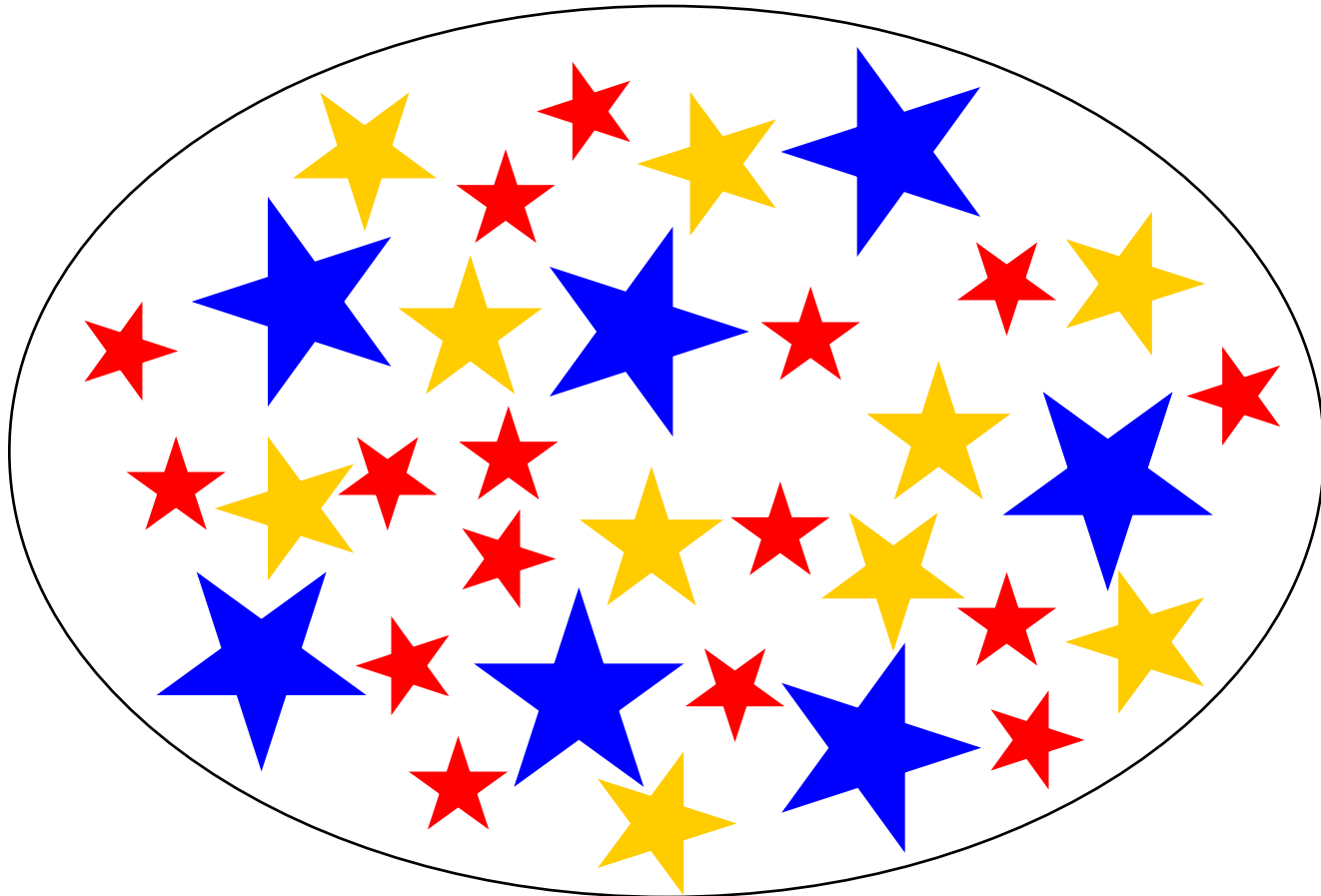


銀河の化学進化



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

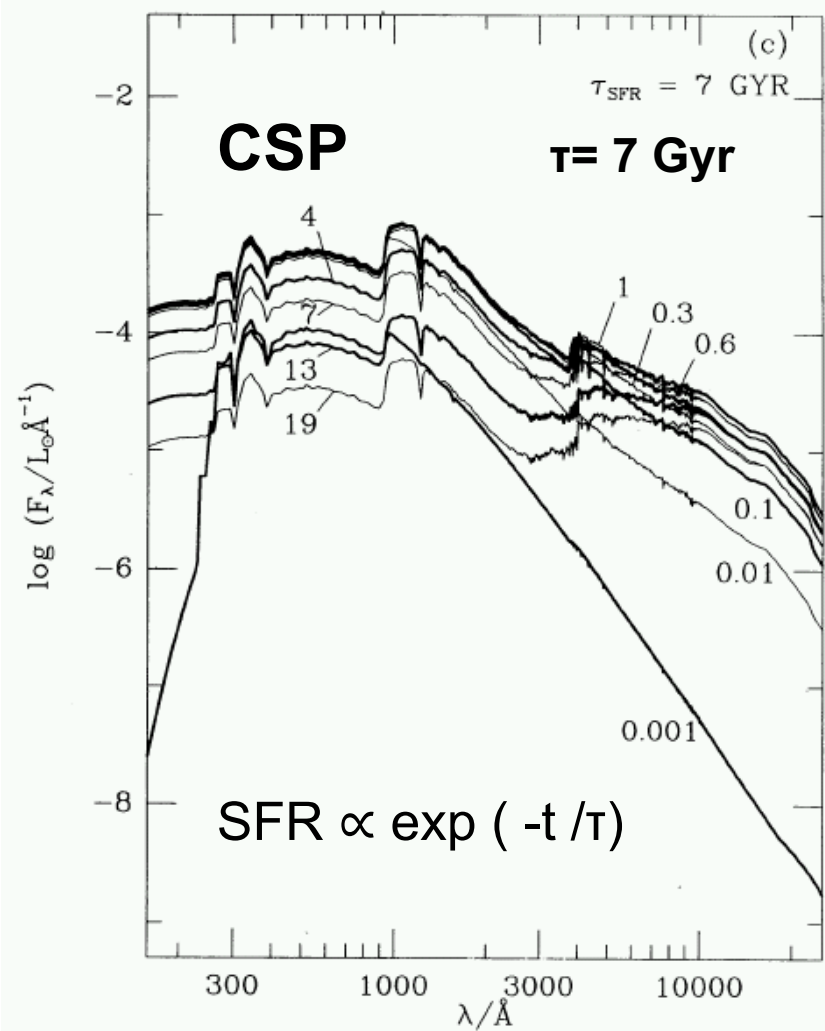
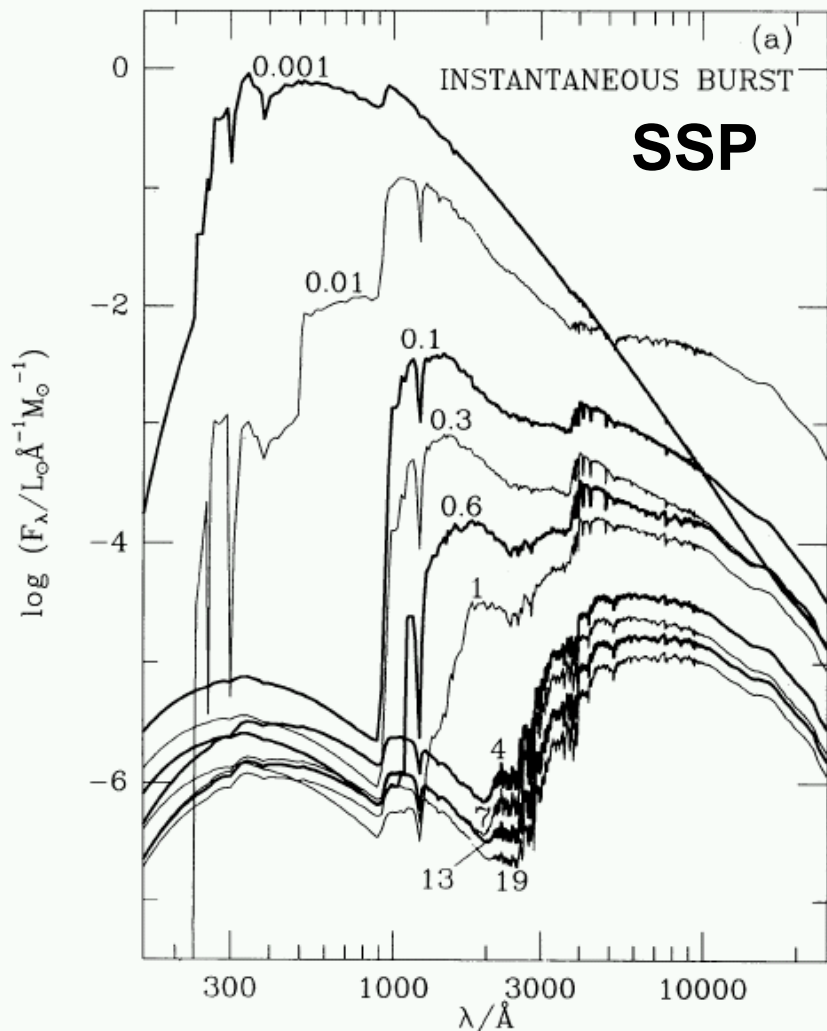


大質量星＝高温＝青い＝短命

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, SWIMS), 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の理解

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の理解

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）

❖ 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

▶ 現象論的モデルで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

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)

(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

実際の遠方銀河・銀河団の観測データを解析し、形成・進化を探る。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(CFHTLS-D1)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(CFHTLS-D1)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。



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。

前期は、まず研究対象となる銀河・銀河団の研究を始めるにあたり、現在の理解のまとめと今後の展望について、ARA&Aシリーズからいくつかを選択して輪読し、学習します。選択は相談に応じます。後期は、すばる等の観測データを実際に用いて、新しい遠方銀河団を探索してその大局的な進化を調べたり、個々の銀河の観測量をスペクトル進化・化学進化モデル等を使って解析したりするなどして、銀河・銀河団の形成・進化研究の最前線を経験します。具体的な研究内容と最終目標は、観測データの取得状況や本人の希望などにより、一緒に決めて行きます。意欲ある学生を望みます。