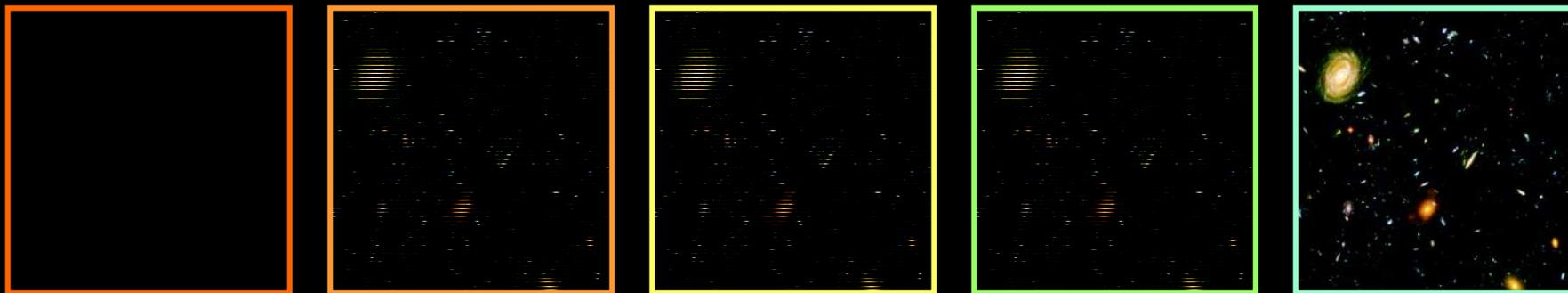


TMT 時代のサイエンス 銀河の形成と進化



嶋作一大 (東大)

この発表の目的

TMT の頃の銀河進化のサイエンスを考える
遠方銀河の観測に焦点を当てる

しかし誰のために？

銀河研究者のため？
各自やりたいサイエンスを持っている

天文コミュニティのため？
良い資料がすでにある

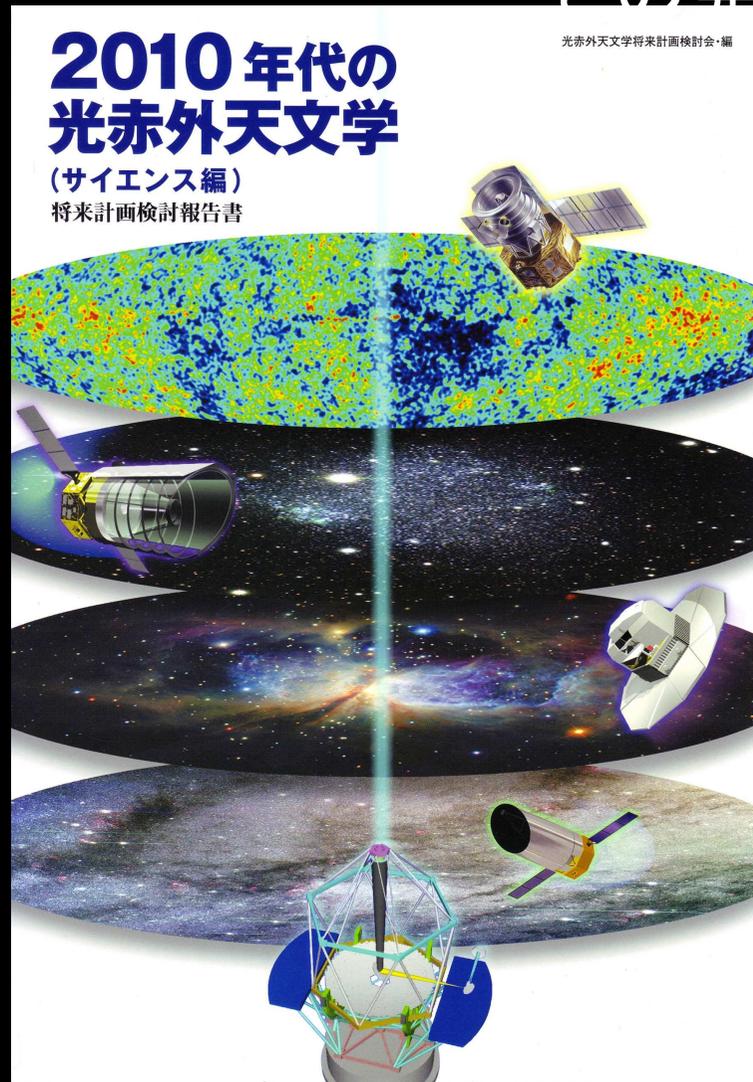
自分自身のため（現在の到達点、新たな動機付け）

+

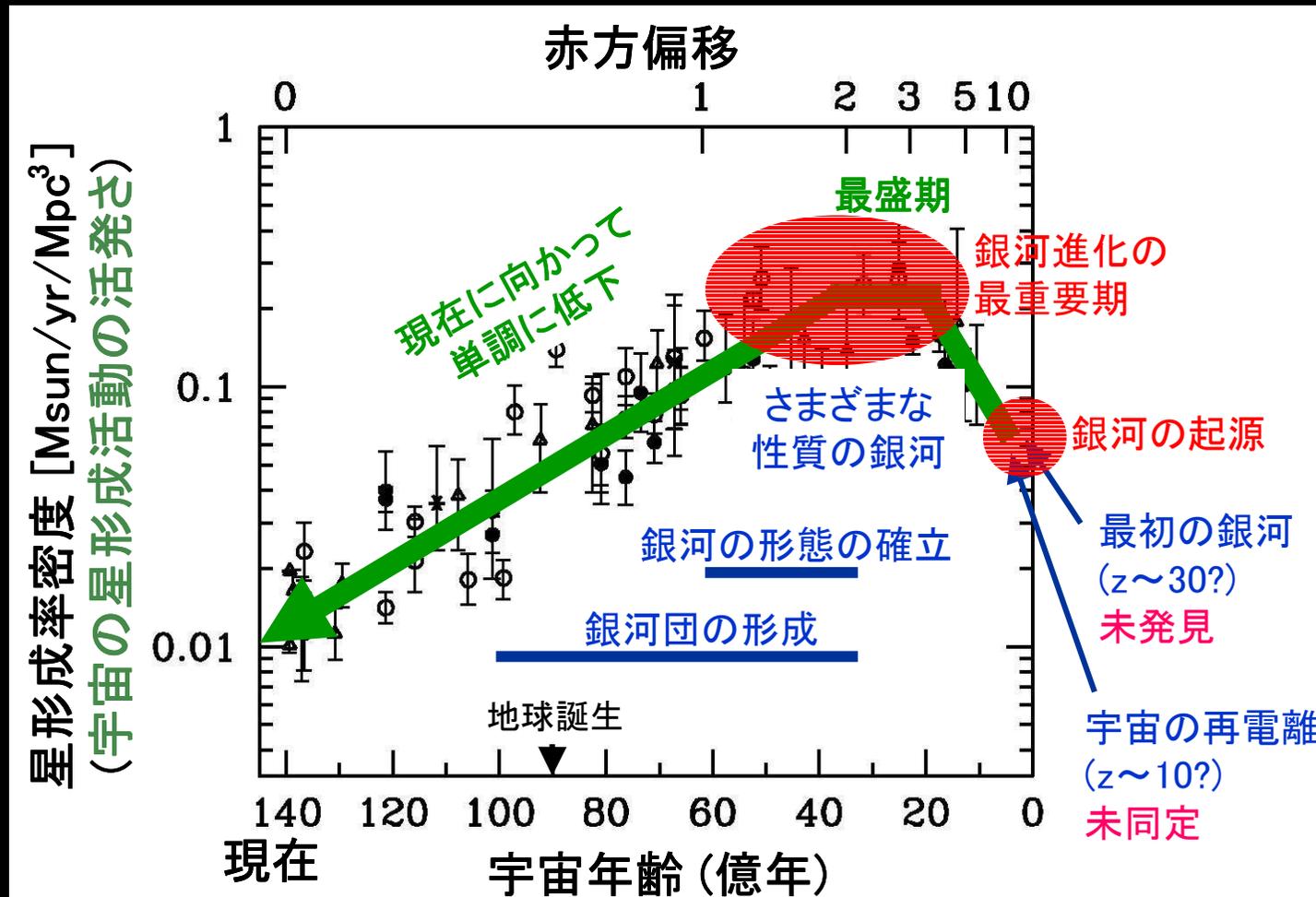
資料を読むのが面倒な他分野の人のため

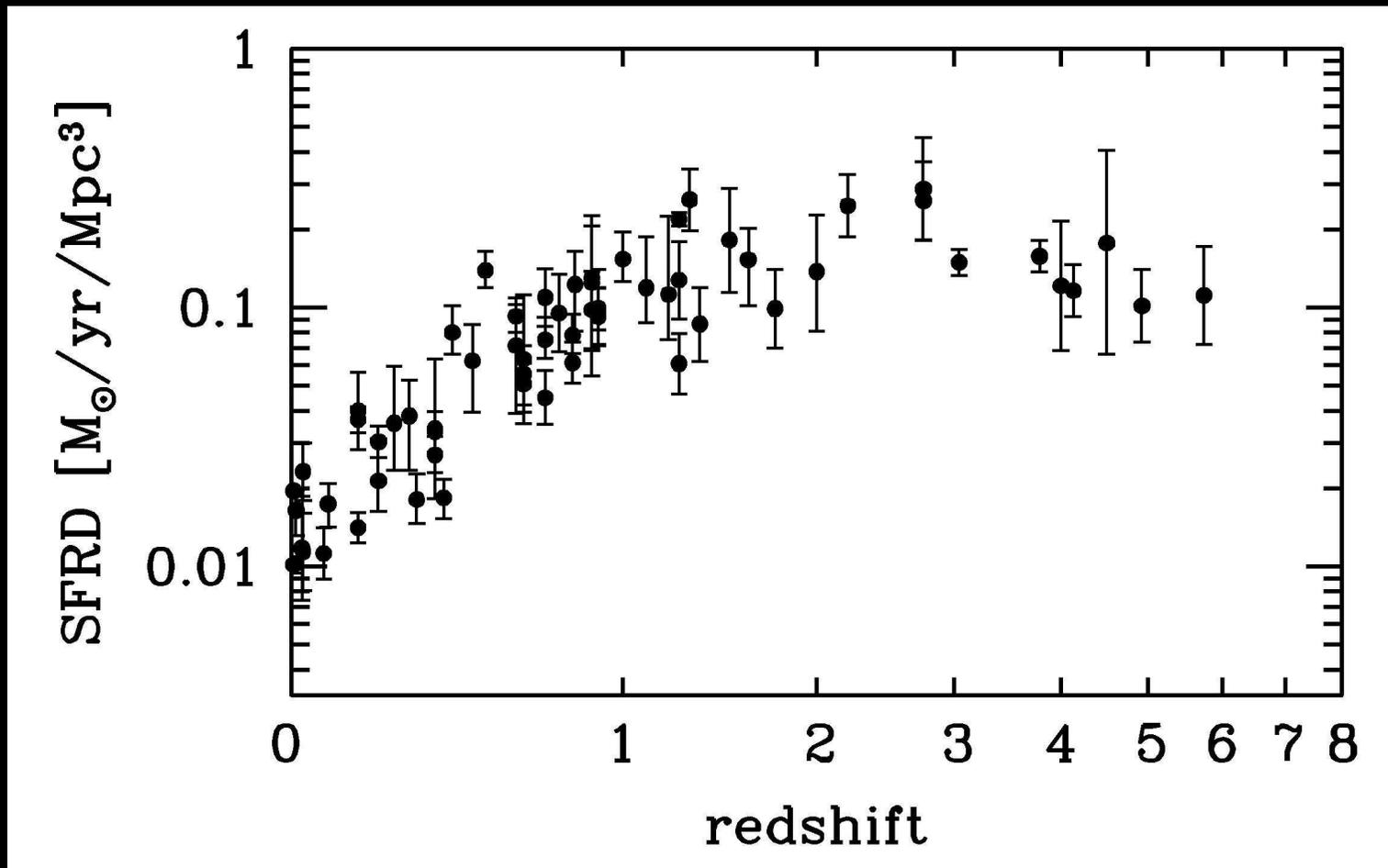
- 銀河進化という高山を俯瞰
- 登頂のための戦術を述べたものではない

この発表の目的

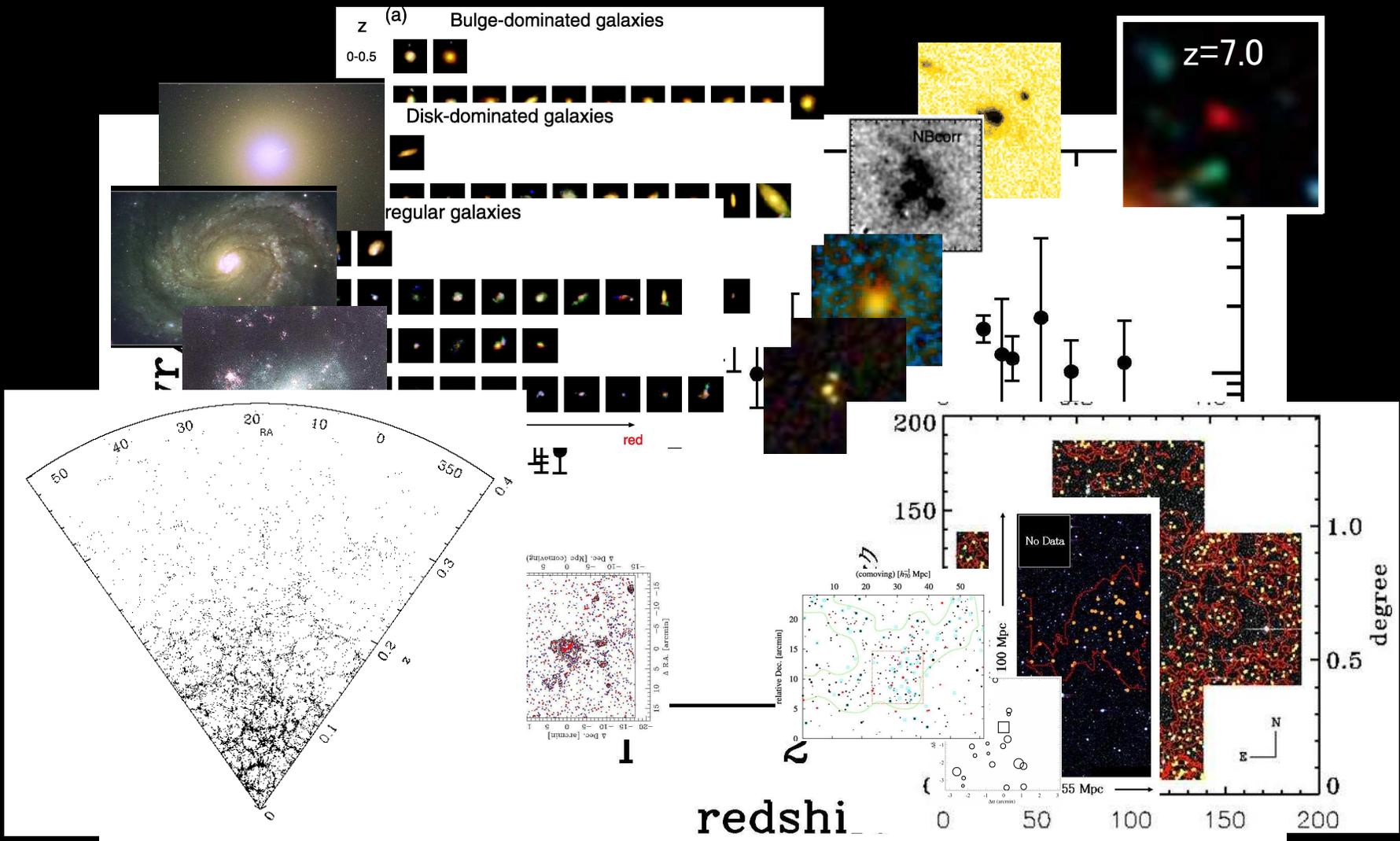


銀河の形成と進化の歴史：現在の理解





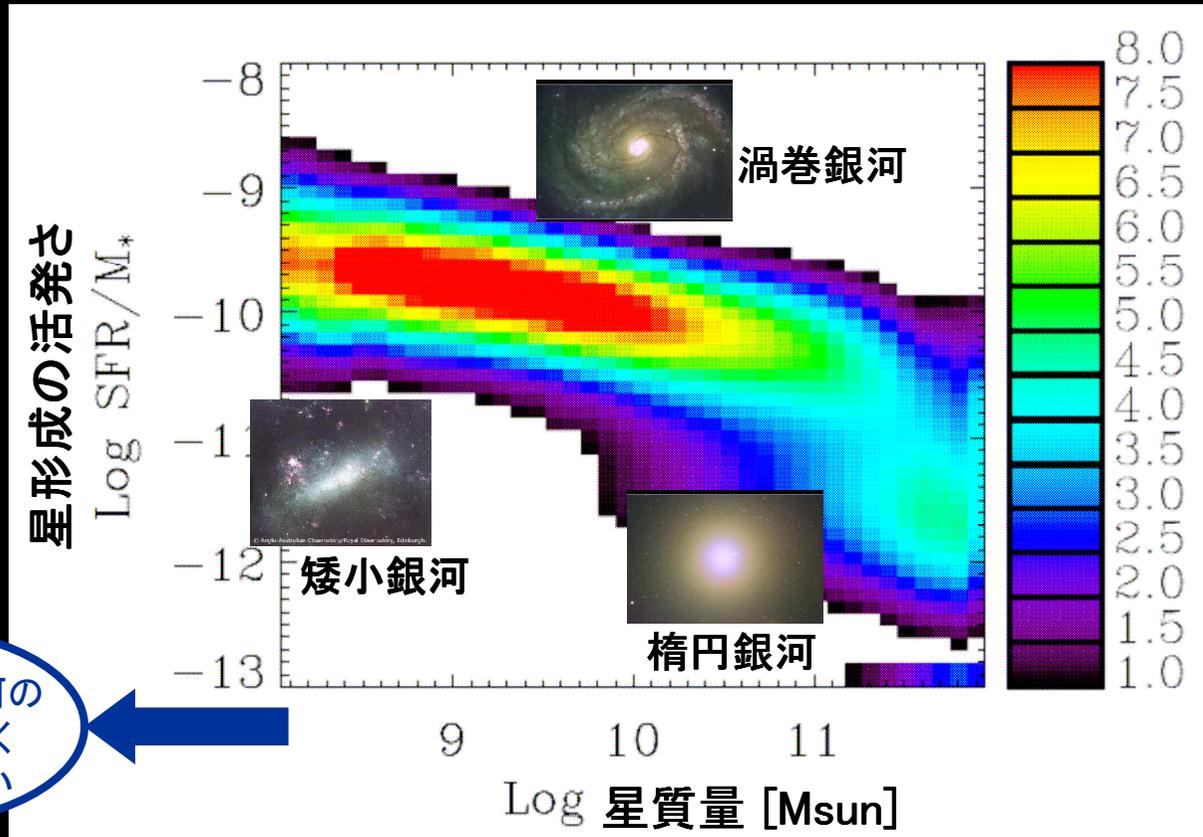
銀河の歴史のうわべをなぞったに過ぎない
(一部の明るい銀河の、一部の性質を調べただけ)



銀河の歴史のうわべをなぞったに過ぎない
(一部の明るい銀河の、一部の性質を調べただけ)

観測によると
銀河は、質量や環境によって性質が異なる

$z=0$ での銀河の星形成の活発さ vs 星質量



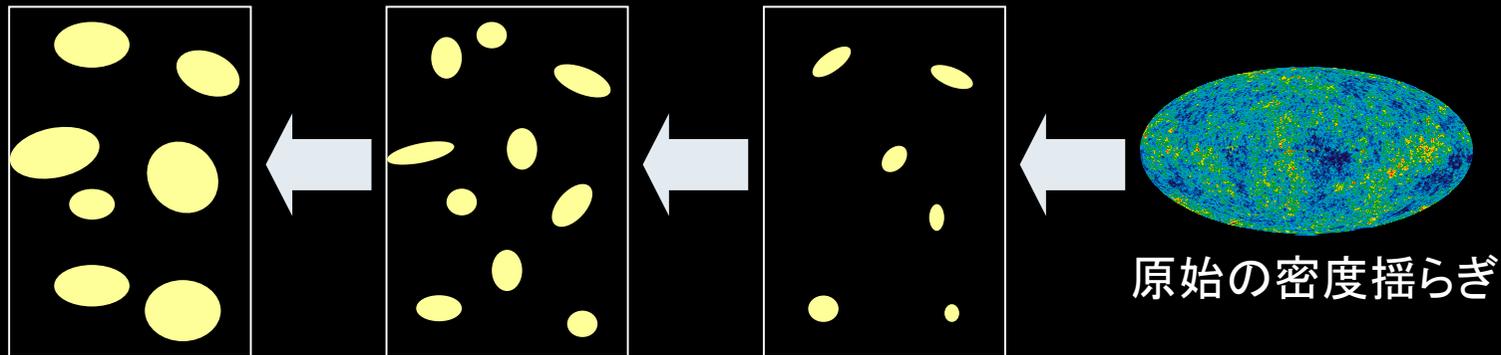
もっと軽い銀河の
数や性質はよく
わかっていない

Brinchmann et al. 2004

銀河全体の進化を知るには、遠方宇宙でも同様の観測が必要

理論によると 銀河の進化は質量や環境に左右される

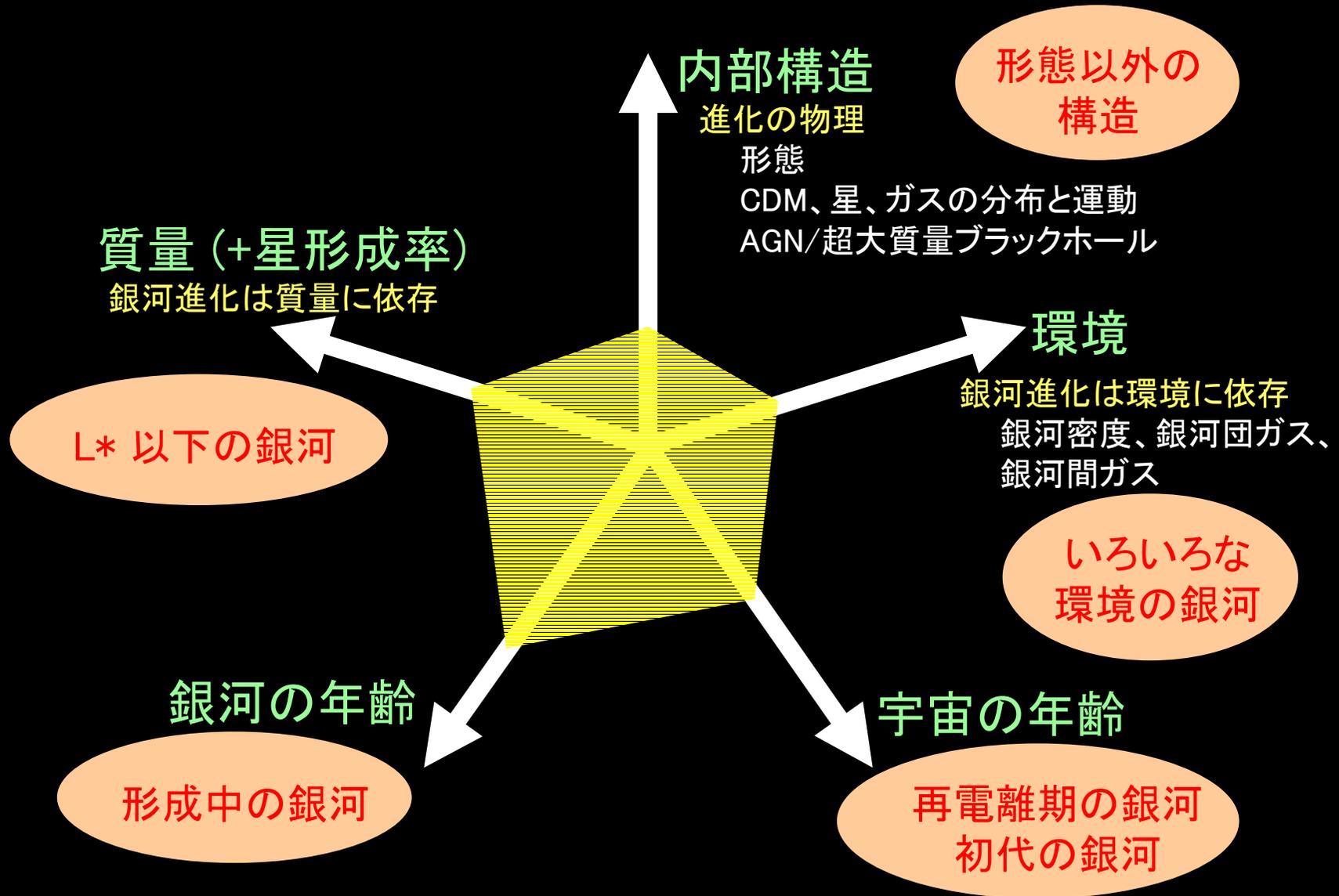
Λ CDM モデル = 宇宙定数 + 冷たい暗黒物質 + 少量のバリオン + 原始密度揺らぎ



- 軽い銀河から重い銀河への階層的構造形成
- 質量・時代・環境で異なる複雑なバリオン物理
 - ガスの冷却と星の形成
 - ガスへのフィードバック機構
 - 超新星による加熱 → 軽い銀河に効く
 - AGNによる加熱 → 重い銀河に効く
 - 環境効果 (銀河同士、銀河団物質、背景紫外線)
- ・これらのバリオン物理はまだ解かれていない
- ・未知の機構が隠れているかもしれない



カギとなるパラメータ



カギとなるパラメータ

未知のタイプの銀河
- 星のない銀河
- DM のない銀河

形態以外の
構造

内部構造

進化の物理

形態

CDM、星、ガスの分布と運動

AGN/超大質量ブラックホール

質量 (+星形成率)

銀河進化は質量に依存

環境

銀河進化は環境に依存

銀河密度、銀河団ガス、
銀河間ガス

L^* 以下の銀河

いろいろな
環境の銀河

銀河の年齢

形成中の銀河

宇宙の年齢

再電離期の銀河
初代の銀河

次世代望遠鏡の能力

TMT (30m)

集光力 = すばるの約 15 倍

角分解能 = すばるの約 4 倍 (どちらも AO)

点源の感度はすばるの約15倍

JWST (6.5m), SPICA (3.5m)

夜光なし ⇒ K-band 以降の感度が高い (大気吸収もない)

4.5Kに冷やすSPICAは中間・遠赤外でトップ

表面輝度の低い天体が観測できる

大気なし ⇒ 広い視野で回折限界の画像

限界等級 (K band)

Subaru Super Deep Field = 26.5mag AB (点源、AO)

TMT のノルマ = 32mag

- すばるより100倍暗い、という区切りの良さ

- サイエンスからの要求

- JWST は 34mag を狙う

2 μ m での回折限界

すばる 0."06 (500pc@z=3)

TMT 0."016 (130pc@z=3)

カギとなるパラメータ

未知のタイプの銀河
- 星のない銀河
- DM のない銀河

形態以外の
構造

内部構造

進化の物理

形態

CDM、星、ガスの分布と運動

AGN/超大質量ブラックホール

質量 (+星形成率)

銀河進化は質量に依存

環境

銀河進化は環境に依存

銀河密度、銀河団ガス、
銀河間ガス

L^* 以下の銀河

いろいろな
環境の銀河

銀河の年齢

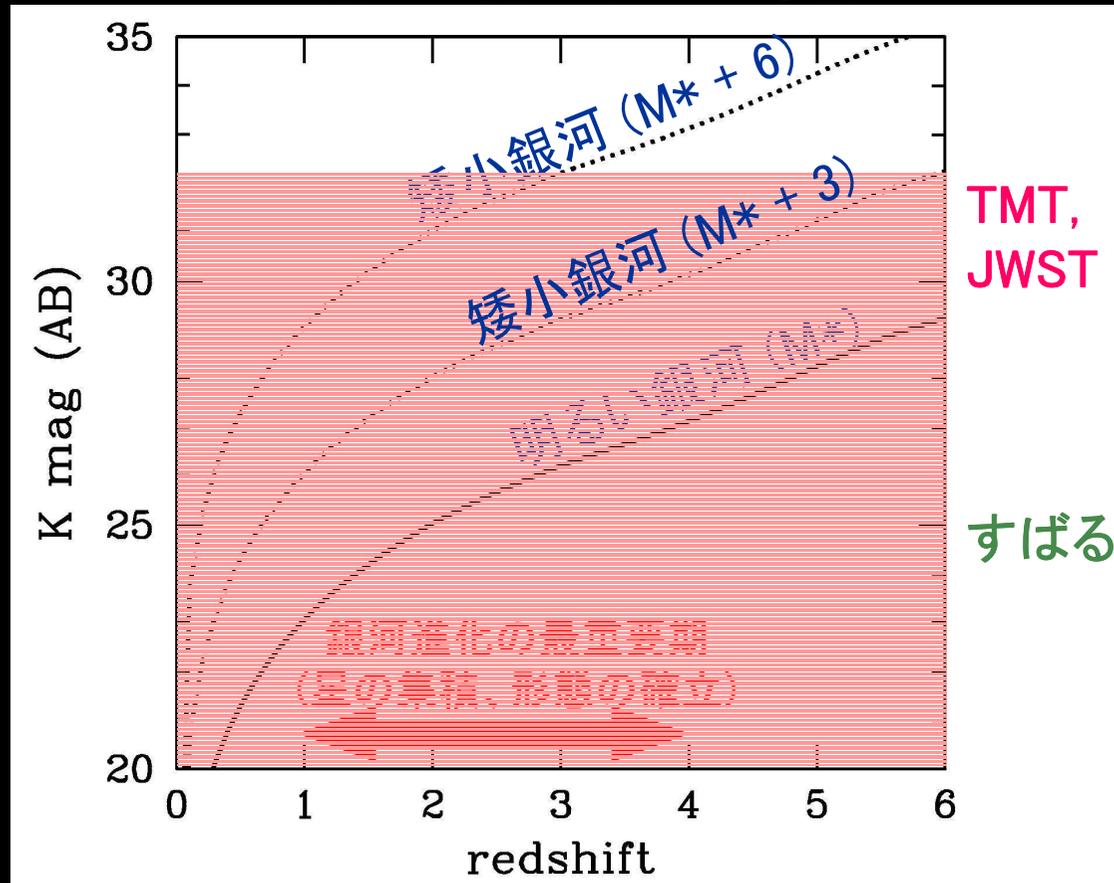
形成中の銀河

宇宙の年齢

再電離期の銀河
初代の銀河

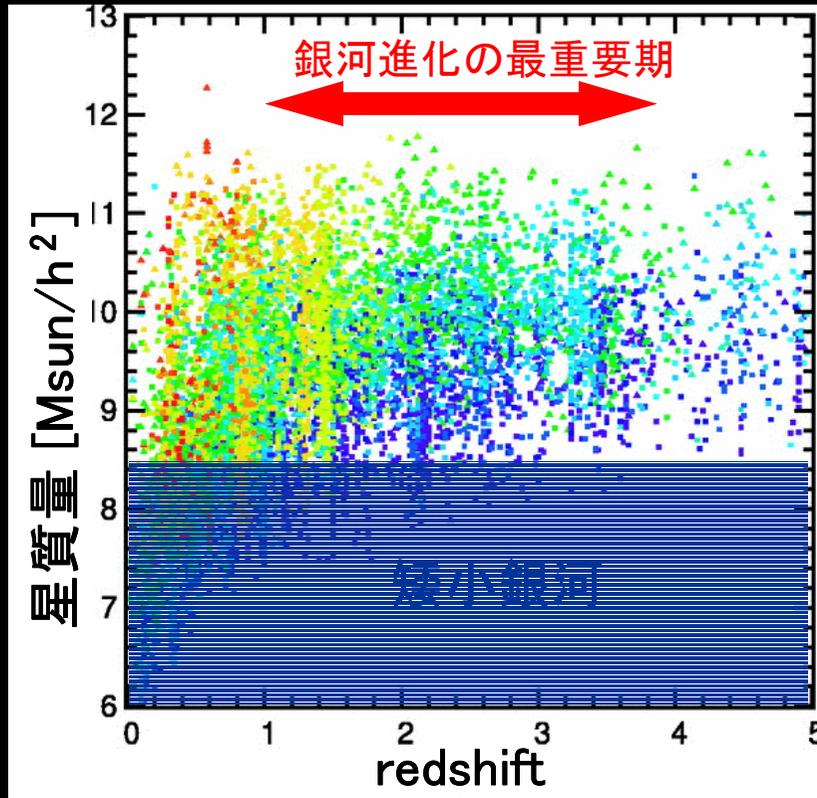
パラメータ #1: 質量軸

銀河の見かけの K 等級



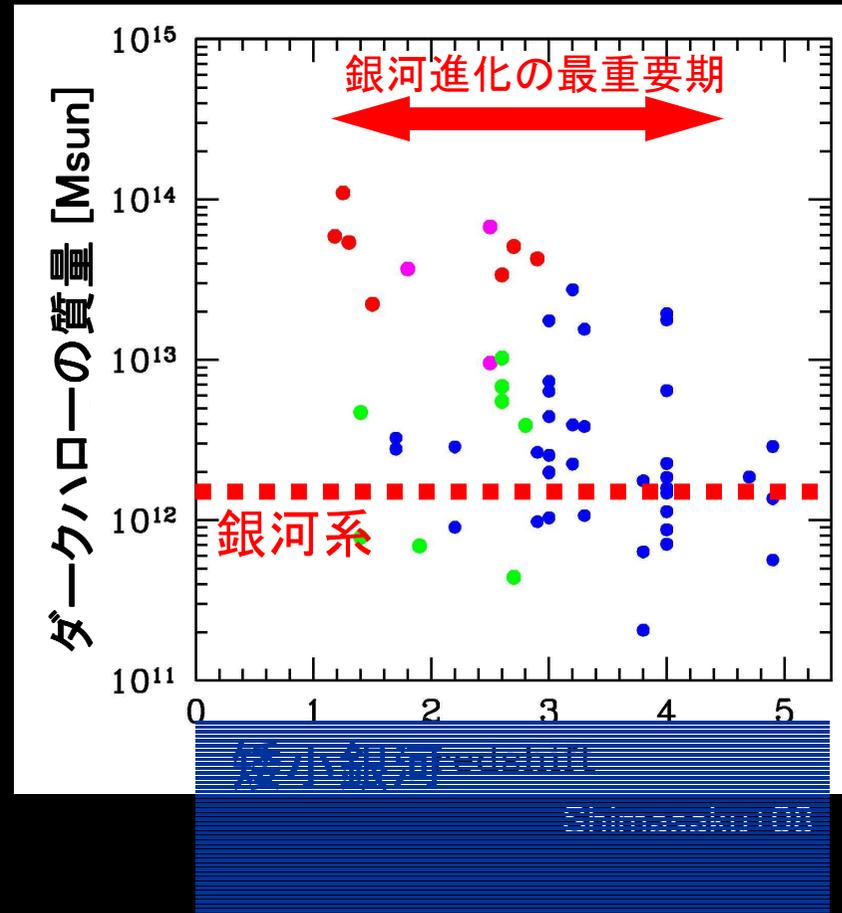
- 軽い銀河を、銀河進化の最重要期で観測できる
- 階層的構造形成の本質
 - 質量に依存するバリオン物理

銀河の星質量の推定の現状



Drory et al. 2005

銀河の総質量の推定の現状

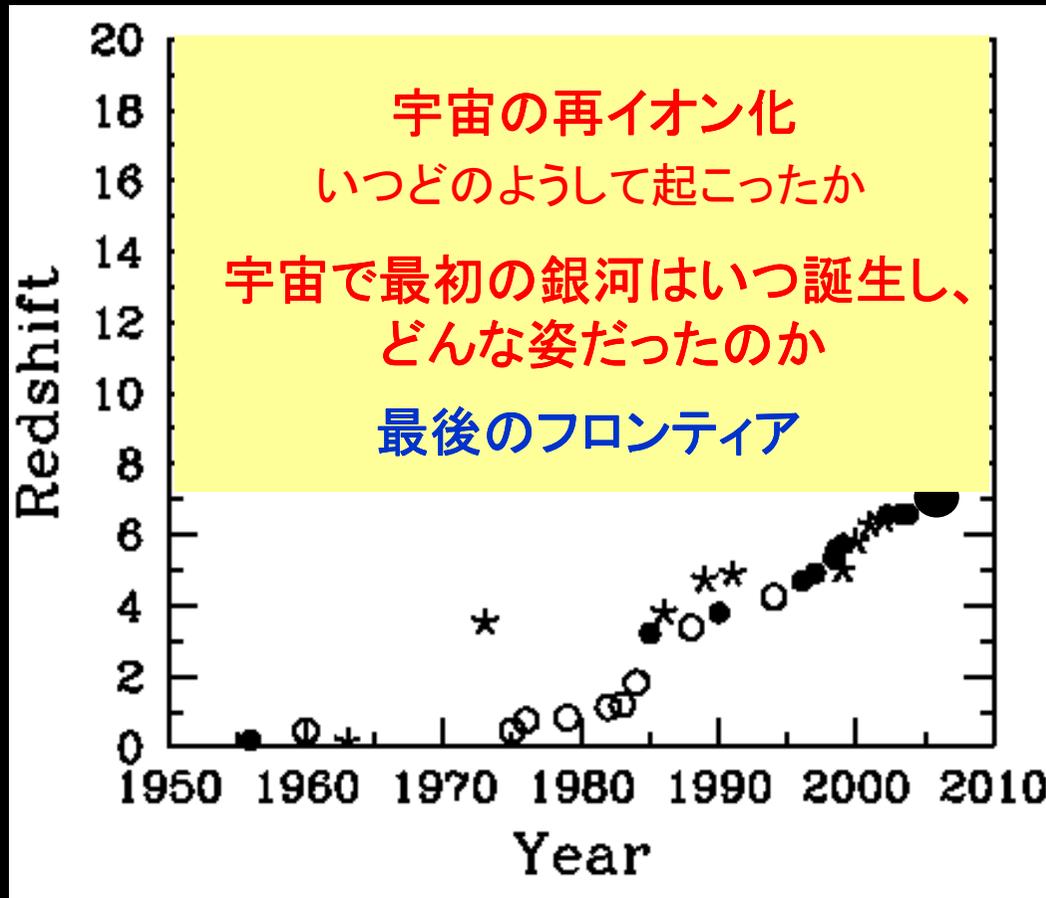


Shimasaku 08

最重要期の矮小銀河が見えていない

パラメータ #2: 宇宙の時間軸

銀河の最遠方記録の変遷



他分野にとっても特別な時代

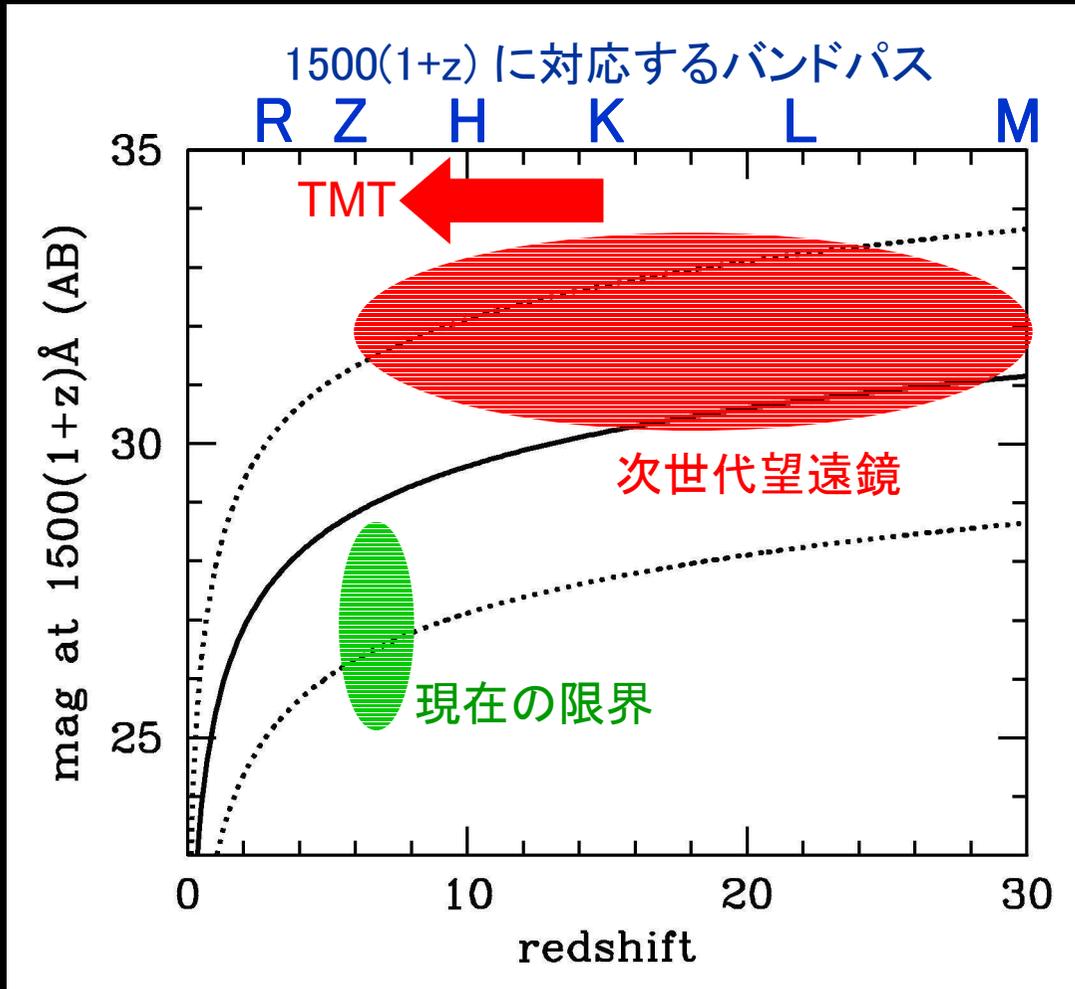
恒星進化

- 種族III星
- 極超新星
- ガンマ線バースト
- 重元素合成

星形成

- IMF の進化
- 原始ガスの冷却

超遠方銀河の見かけ等級 (静止系1500Åに対応)



0.1 Msun/yr

1 Msun/yr

10 Msun/yr

0.1-1 Msun/yr



1E+9 ~ 1E+10 MDH

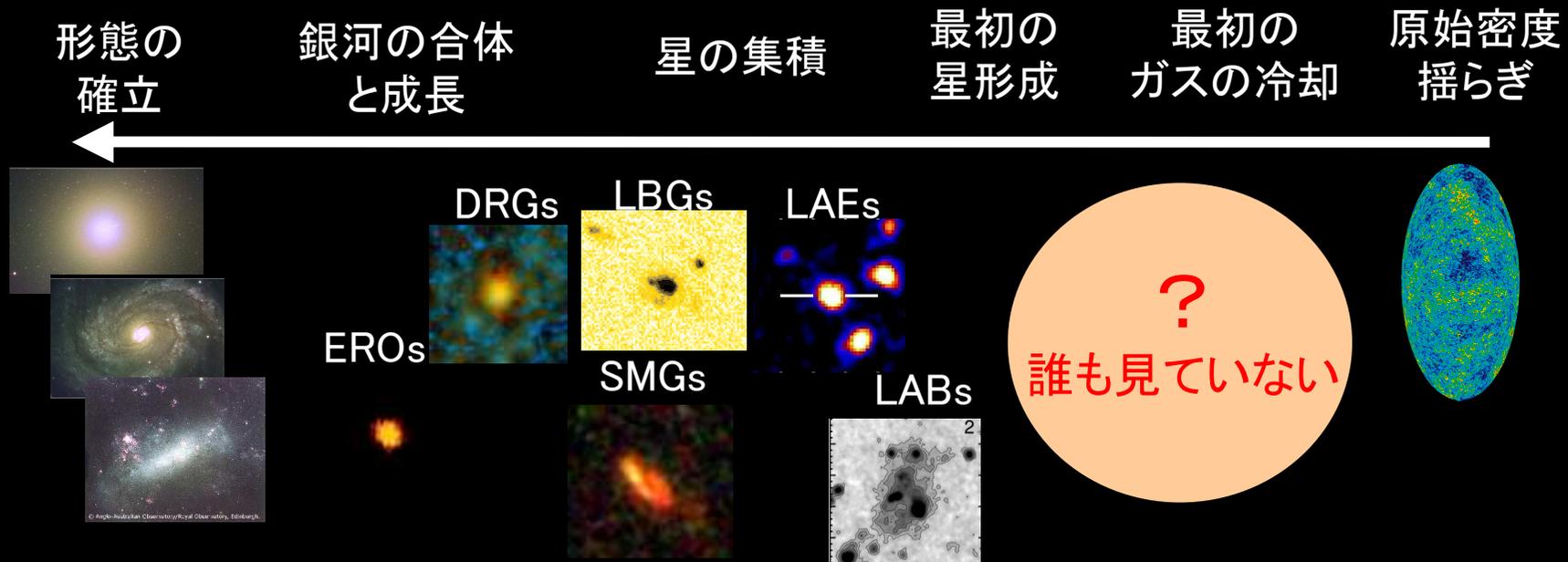
100 arcmin²

10 < z < 30

2E+6 Mpc³

再イオン化時代、暗黒時代の銀河が見えてくる

パラメータ #3: 銀河の時間軸

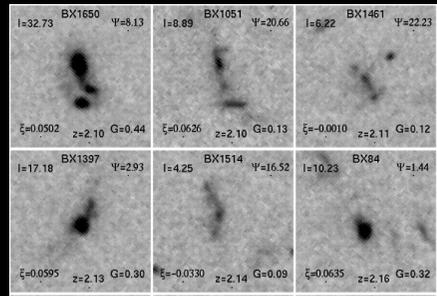


非常に若い銀河は数が少ない ⇒ すばるで探査 (Hyper Suprime-Cam)
次世代望遠鏡で詳細に観測

銀河の生まれ方が分かる

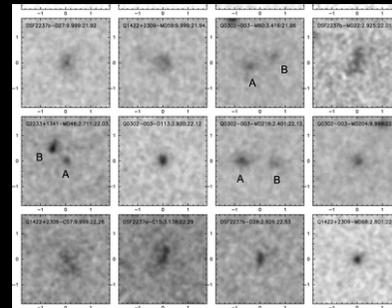
パラメータ #4: 内部構造

形態



Law+07

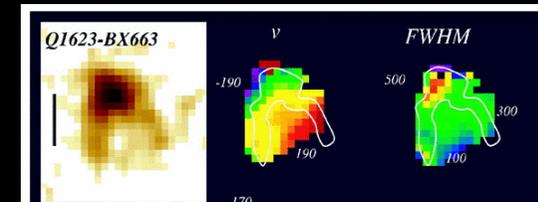
静止系紫外
(HST)



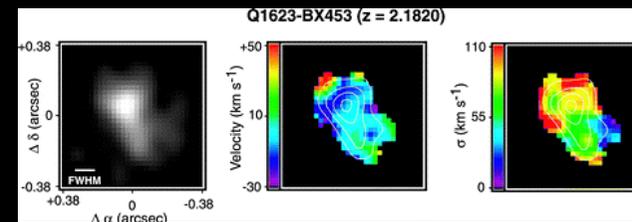
Akiyama+08

静止系可視
(すばる)

速度構造 (面分光)



VLT/SINFONI
F-Schreiber+06
($z=2.43$)



KeckII/OSIRIS
Law+07
($z=2.18$)

明るい銀河の形態と、ごく少数の銀河の内部運動しか調べられていない

次世代望遠鏡 (高い集光力と角分解能 + 面分光などの新技術)

- 暗い銀河への拡張
- 形態以外の構造
- AGN、超大質量ブラックホール

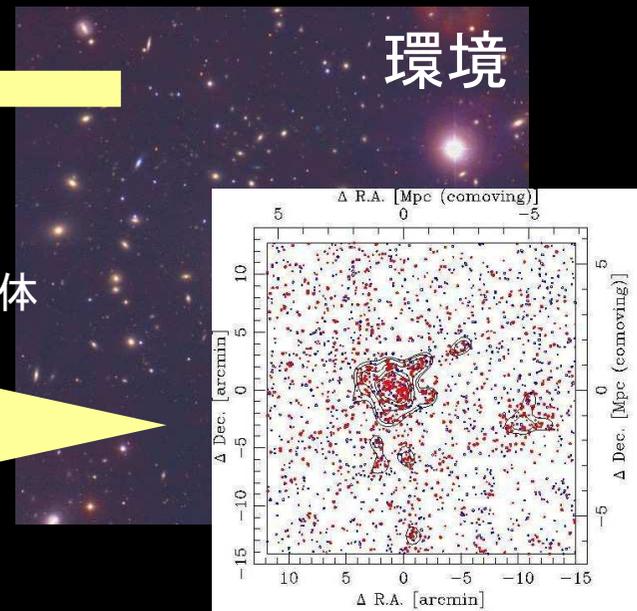
銀河進化の物理が分かる

パラメータ #5: 環境

銀河



環境



銀河間ガスの降着
電離紫外線
銀河団の高温ガス
銀河の相互作用、合体
銀河団の重力

銀河からのガスの流出
重元素汚染
電離紫外線の放射
AGNからのエネルギー放出

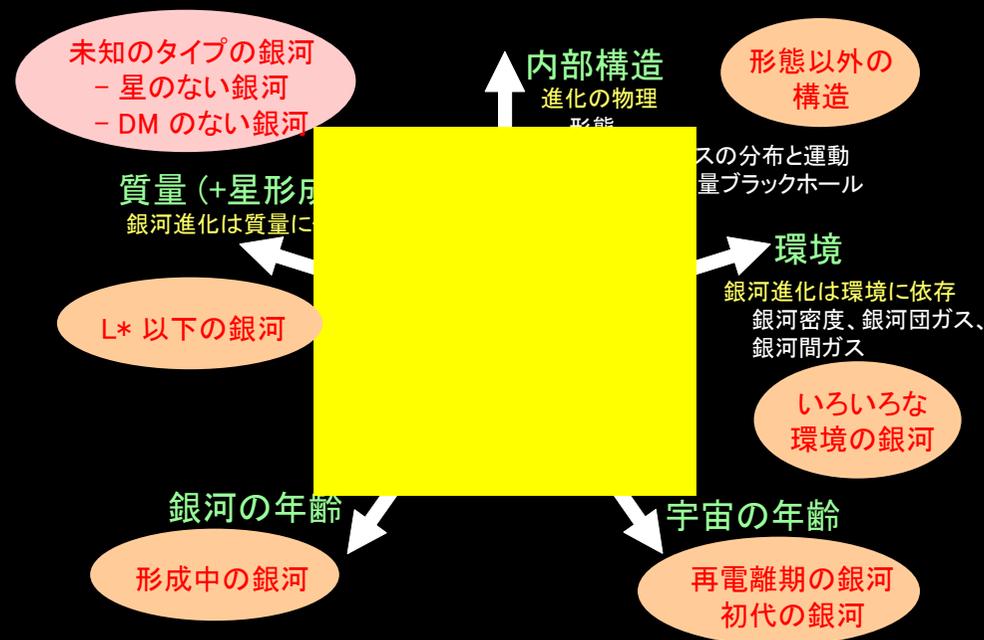
主に $z < 1$ についての、限られたデータしかない

次世代望遠鏡

- 銀河進化の最重要期である $z \sim 1-4$
- さまざまな環境での詳細な観測

環境効果の物理がわかる

次世代望遠鏡によって、見える部分は大幅に広がる



結末は？

- 銀河進化が解明されるかもしれない (登頂)
- 説明できない現象が見つかるかもしれない (遭難)
- 本質的な進展はないかもしれない (足踏み)

銀河進化が分かれば満足か

銀河進化

- 単に複雑なだけの応用物理？ (“知的な泥レス”)
- 宇宙で一回きりしか起こらない各論？

生物学

- 生命現象は物理法則（化学を含む）で記述できる
- 地上の生命進化は一回きりの各論
- 自然淘汰は物理法則を超えた普遍的概念

銀河進化にも物理を超えた「何か」はないか？
なさそう（だが決め付けは禁物）

天体物理学以外の視点での動機付けはないか？

銀河とは？

Sandage 1961, *The Hubble Atlas of Galaxies*

“Galaxies are to astronomy what atoms are to physics”

天文学にとっての銀河は、物理学にとっての**原子**

Binney & Tremaine 1987, *Galactic Dynamics*

“Galaxies are to astronomy as ecosystems are to biology”

天文学にとっての銀河は、生物学にとっての**生態系**

物理学から生物学へ

我々はなぜ、この宇宙の、この時代の、この銀河にいるのか

「銀河生物学」

銀河研究の動機付けの問題

できごと

log 年

The big bang	$t=0$
Planck Epoch	-50.5
GUT Epoch	-44.5
Electroweak phase transition	-17.5
Quarks become confined into hadrons	-12.5
Nucleosynthesis	-6

Matter domination	4
Recombination	5.5
First possible stellar generation	6
Formation of the Galaxy	9
Formation of the Solar System	9.5
Today: The Present Epoch	10
Our Sun dies	10.2
Close encounter of Milky Way with Andromeda (M31)	10.2
Lower bound on the age of closed universe	10.8
Lifetime of main-sequence stars with lowest mass	13
End of conventional star formation	14

Planets become detached from stars	15
Star formation via brown dwarf collisions	16
Lower bound on age of flat universe (with future $\Delta\rho/\rho > 1$)	18
Stars evaporate from the Galaxy	19
Planetary orbits decay via gravitational radiation	20
WIMPs in the galactic halo annihilate	22.5
Star formation via orbital decay of brown dwarf binaries	23
Stellar orbits in the galaxy decay via gravitational radiation	24
White dwarfs deplete WIMPs from the galactic halo	25
Black holes accrete stars on galactic size scale	30
Black holes accrete stars on cluster size scale	33
Protons decay	37
Neutron stars β -decay	38
Planets destroyed by proton decay	38
White dwarfs destroyed by proton decay	39

Axions decay into photons	42
Hydrogen molecules experience pycnonuclear reactions	60
Stellar-sized black holes evaporate	65
Black holes with $M = 10^4 M_\odot$ evaporate	83
Positronium formation in a flat universe	85
Galaxy-sized black holes evaporate	98
Black hole with mass of current horizon scale evaporates	131
Positronium decay in a flat universe	141
Higher-order proton-decay processes	-100-200

← ビッグバン (E-∞歳)

← 軽元素合成 (E-6歳)

← 晴れ上がり (E+5.5歳)

← 最初の銀河 (E+8歳)

← 現在 (E+10歳)

← 最後の主系列星 (E+13歳)

← 無限の未来

宇宙の年表

- 宇宙論パラメータの数値と解釈が正しければ、宇宙は無限の未来まで存在する
- 星の系としての銀河が存在するのは、1 億歳から 10 兆歳までの 5 桁の時間スケールのみ

宇宙の年表において銀河は儚い存在

- 儚いゆえにいとおいしい
- 我々生命は銀河と運命をともにする
宇宙の歴史の中で、我々生命は、いつ、どこに存在できるのだろうか

Cosmic Habitable Spacetime

宇宙の中で、生命の住める場所と時刻を特定する

生命は、適切な銀河の中の適切な場所にある適切な惑星に住める



どこ？（銀河系のオリオン腕は典型か）

← 銀河ごと、銀河内部の星形成史

いつ？（100億歳は典型か）

← 過去と**未来**の星形成史

銀河の研究は過去を振り返るばかりでは駄目

銀河進化モデルの構築が必要

惑星形成論との融合

生命は、ほとんど交流のない銀河と惑星の研究者が共有できる唯一の動機？

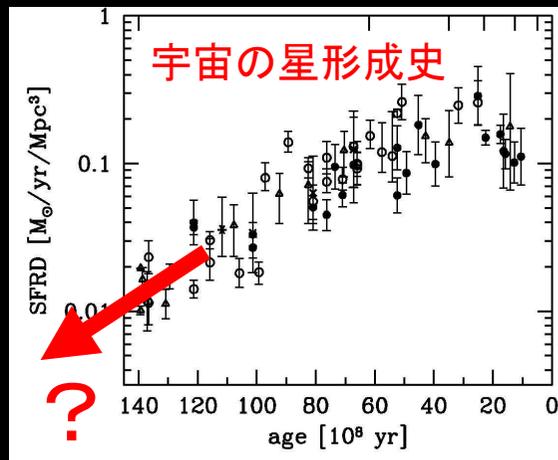
そもそも宇宙は永遠に存在するのか

暗黒物質と暗黒エネルギーの正体
物理定数は本当に定数か

これらは銀河を使って調べることができる

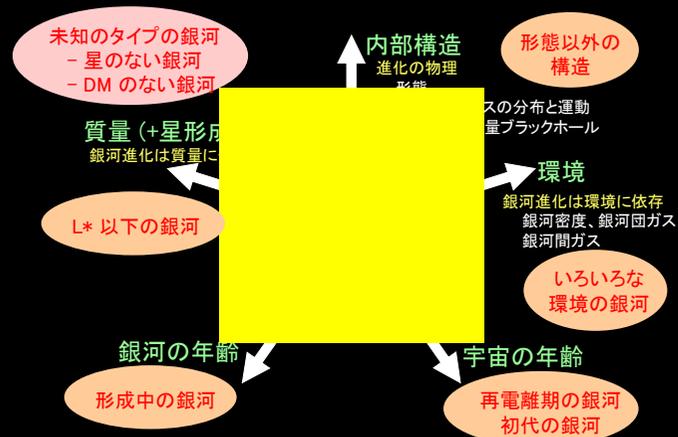
我々はなぜこの宇宙にいるのか

∞ ← 現在 ビッグバン



まとめ

次世代望遠鏡は、銀河のパラメータ空間を隅々まで照らし出す



銀河進化の謎が解けてしまう？
新たな謎が出てくる？
本質的な進展はあまりない？

とにかくやってみる

宇宙や我々の存在についての理解も進む

(質疑応答 — Q:質問, A:回答, C:コメント — 氏名無しは発表者の発言, 敬称略)

(C) 限界 32-33 等は点源を撮像する場合。銀河のような extended sources では様々な要因が入ってくるので、そこまで暗い銀河は見えないだろう。(市川た)

(C) 「銀河生物学」というフレーズは是非使いたい。銀河心理学という言葉があり、人がSDSS 渦状銀河の画像を用いて、これらが右巻きと思うか左巻きと思うか(正しくはS型かZ型か、らしい)を調べた所、わざわざ裏返しにした画像なども盛り込んでいたにもかかわらず、有意に左巻き[右巻き???]と答える人が多かった、という話がある。「銀河生物学」という言葉からこの話題を思い出した。(家)

(Q) TMTでのメインは分光観測になる。分光観測のサンプルはどのように用意するのが良いと思われるか?(山田と)

(A) ???

(Q) また、銀河の年齢に加えて、その銀河がいつ(宇宙年齢がいくつの時に)生まれたかも重要な要素と考えられるが?(山田と)

(A) その通りで、講演で示したパラメータ空間を埋めることで、それらがはっきりすると考えている。