

# 銀河宇宙物理学 II

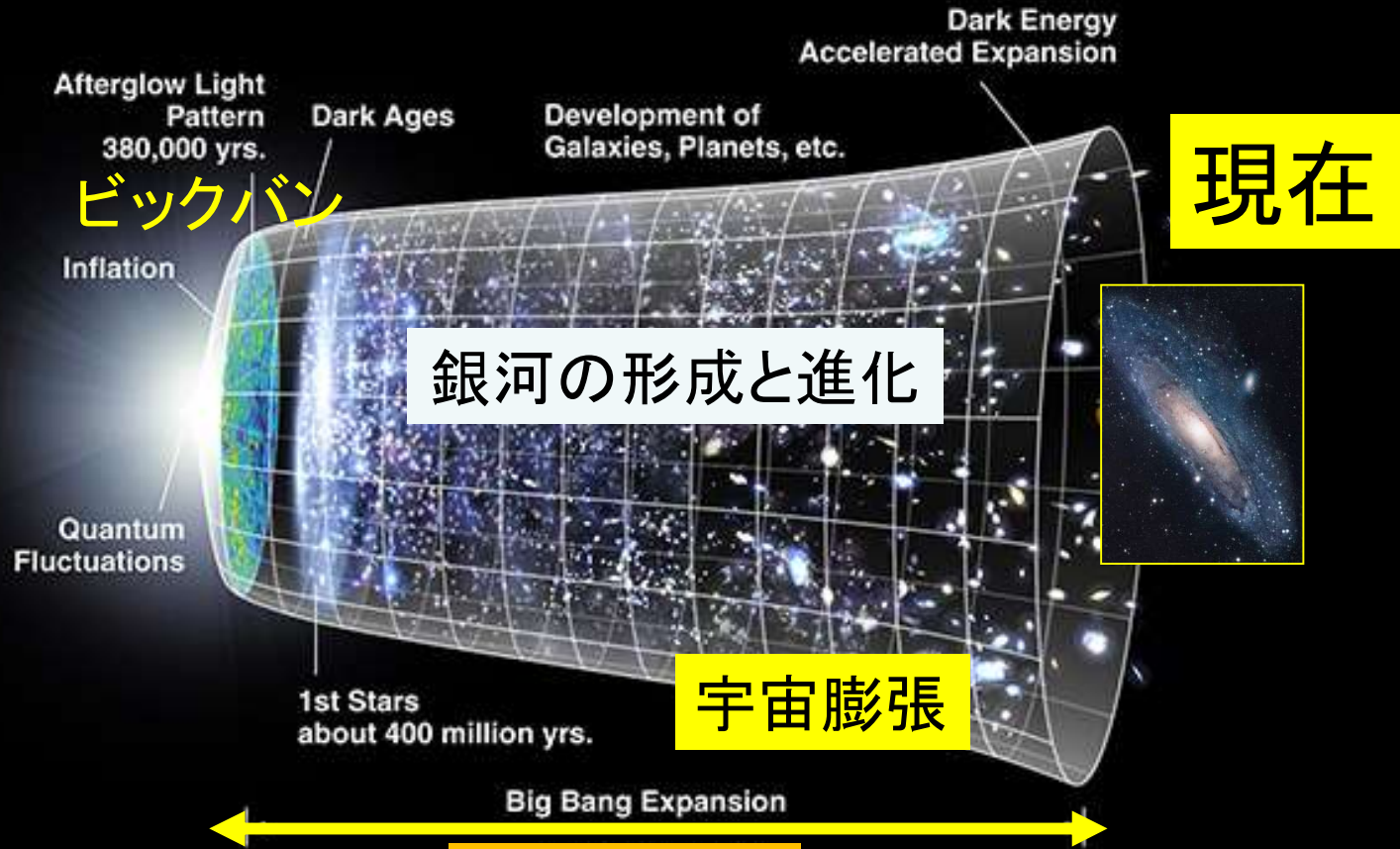
<https://www.astr.tohoku.ac.jp/~chiba/lecture/Ginga2023/index.html>

1. 銀河宇宙物理の基礎
  - 銀河天文学の基本概念
  - 銀河・銀河系の構造
2. 銀河の年代学と観測的宇宙論
  - 球状星団・高赤方偏移銀河の年齢
  - 膨張宇宙のダイナミクスと年齢
  - 銀河の距離決定法
3. 銀河形成理論
  - 密度揺らぎの成長と構造形成
  - 散逸系の物理と銀河形成
  - 銀河の光度・色進化
4. 円盤銀河の形成とダイナミクス
  - 円盤構造の形成
  - 銀河のと化学動力学と進化
  - 銀河古成分の形成と進化
5. 宇宙の暗黒物質
  - 暗黒物質の構造
  - 暗黒物質の構成要素
  - 重力レンズで探る暗黒物質

## 参考書

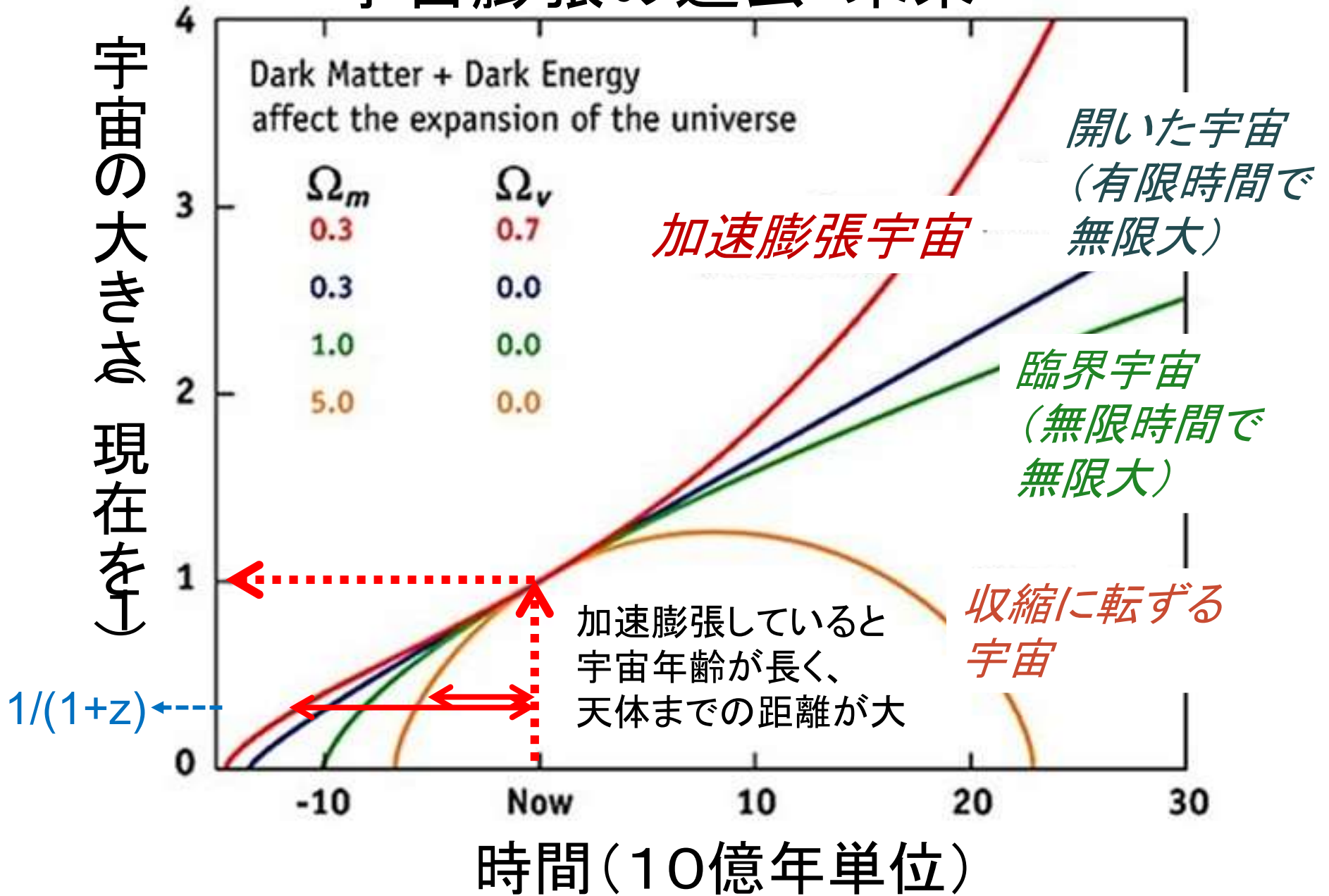
- [Galaxy Formation and Evolution](#)  
Mo, van den Bosch, & White 2010  
(Cambridge U. Press)
- [Extragalactic Astronomy and Cosmology](#)  
Schneider 2006 (Springer)
- [Galactic Astronomy](#)  
Binney & Merrifield 1998 (Princeton U. Press)
- [宇宙論II - 宇宙の進化](#)  
シリーズ現代の天文学第3巻  
二間瀬 他編 2007 (日本評論社)
- [銀河I - 銀河と宇宙の階層構造](#)  
シリーズ現代の天文学第4巻  
谷口 他編 2007 (日本評論社)
- [銀河II - 銀河系](#)  
シリーズ現代の天文学第5巻  
祖父江 他編 2007 (日本評論社)

# 宇宙の歴史

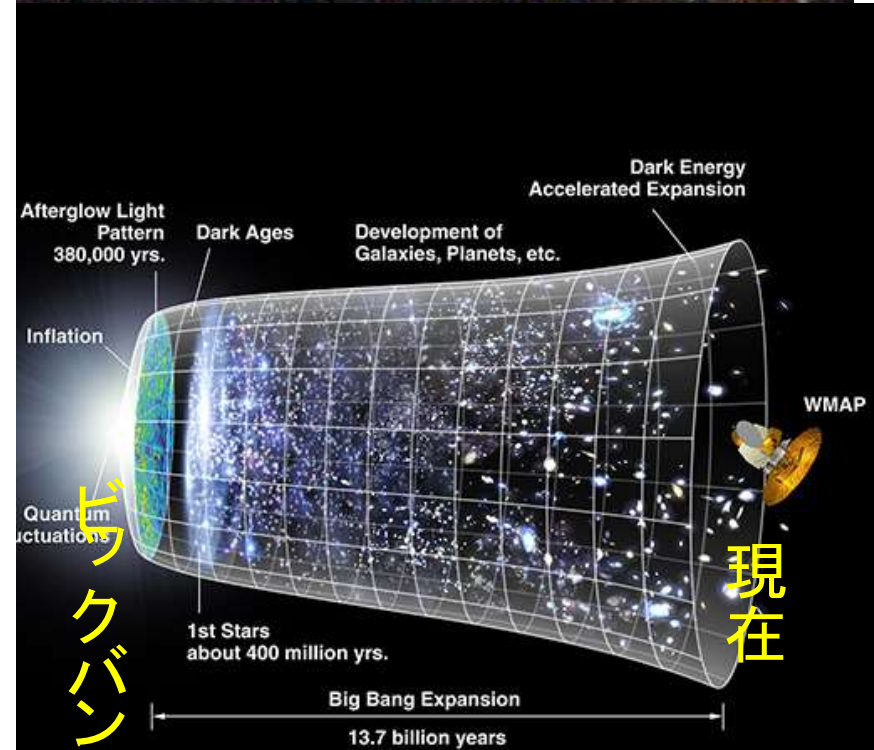
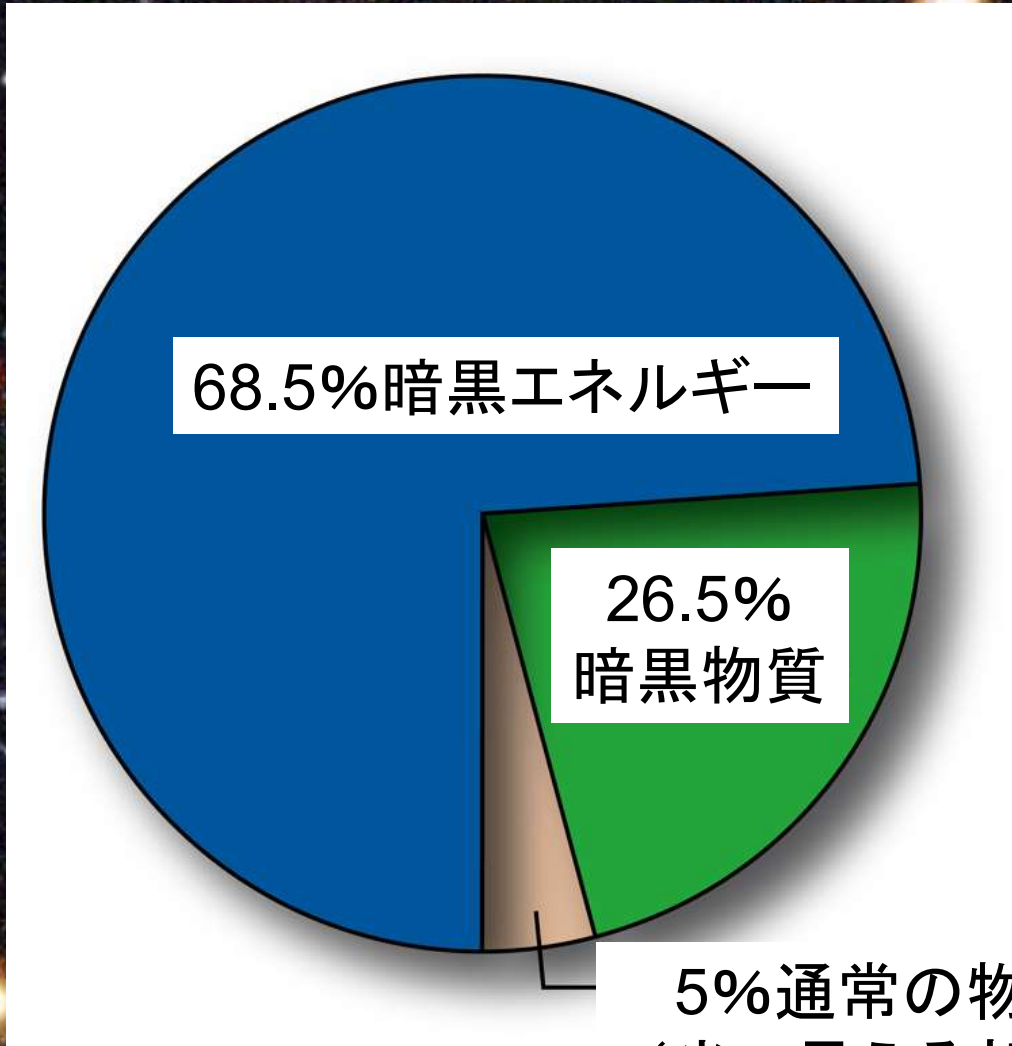


- 宇宙はどのように進化(時間発展)してきたのだろうか
- 銀河はいつどのように生まれ進化して現在に至ったのだろうか

# 宇宙膨張の過去・未来

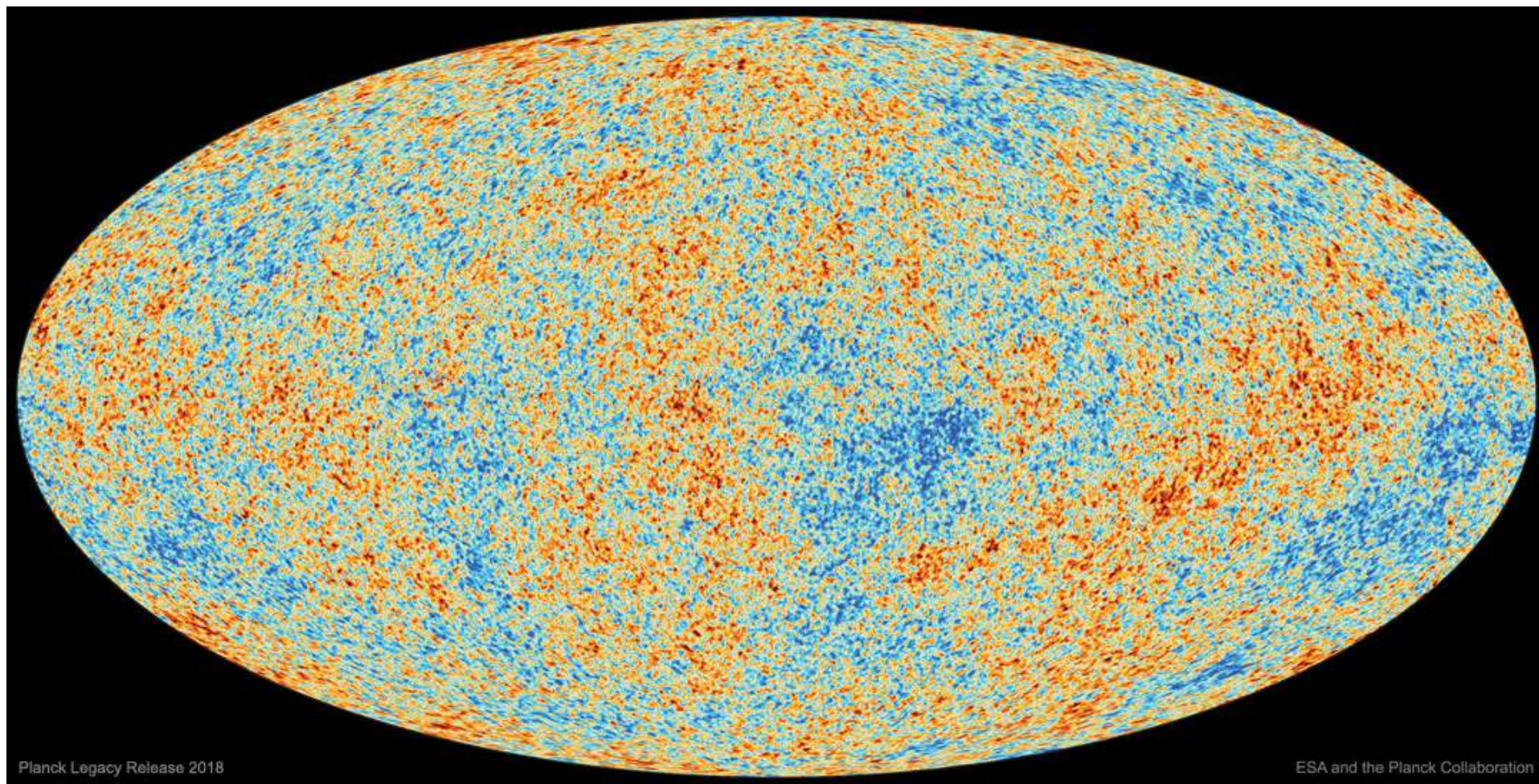


# 宇宙のエネルギーの内訳 (現在のベスト値)



宇宙の年齢: 138億年  
(現在のベスト値)

# Planck衛星による宇宙背景放射の温度地図 (2009~2013)

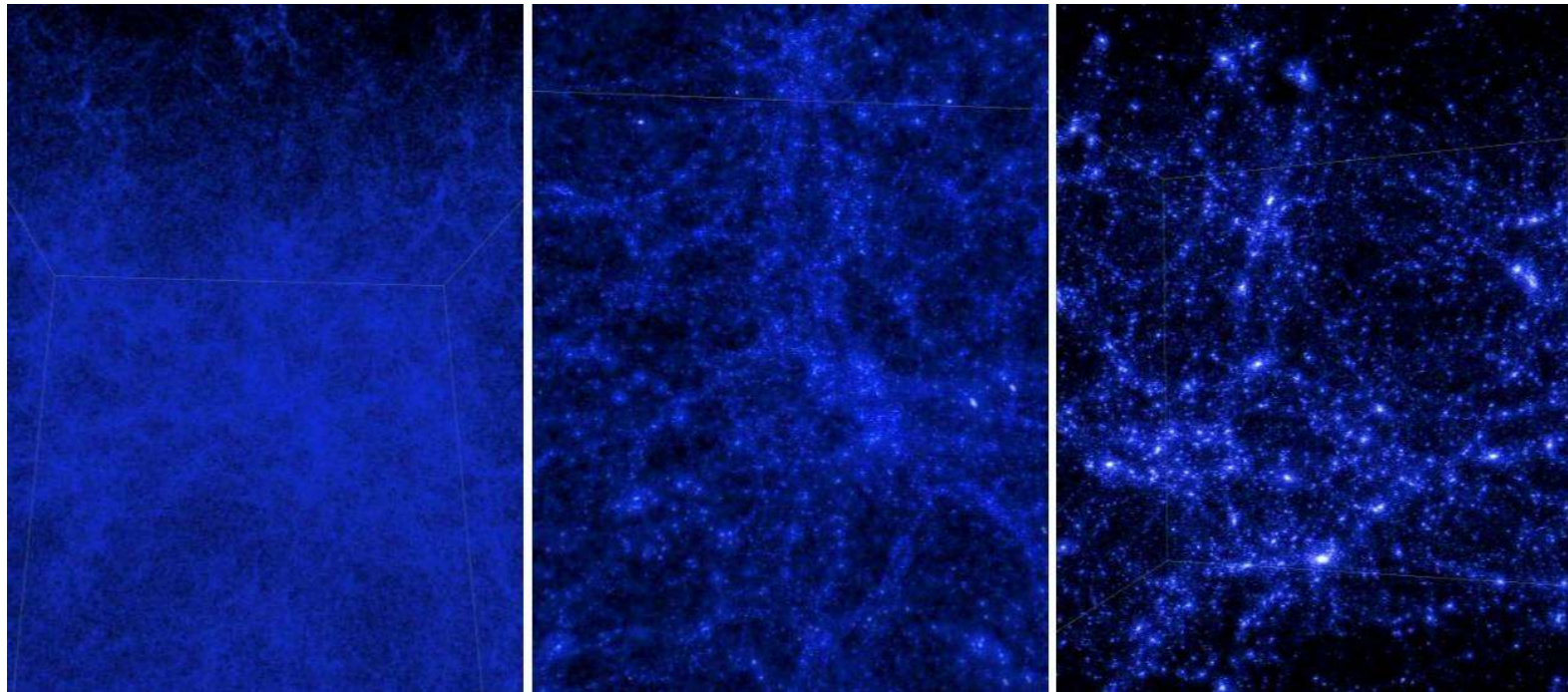


ゆらぎ $\sim 10^{-5}$

# 冷たい暗黒物質による構造形成

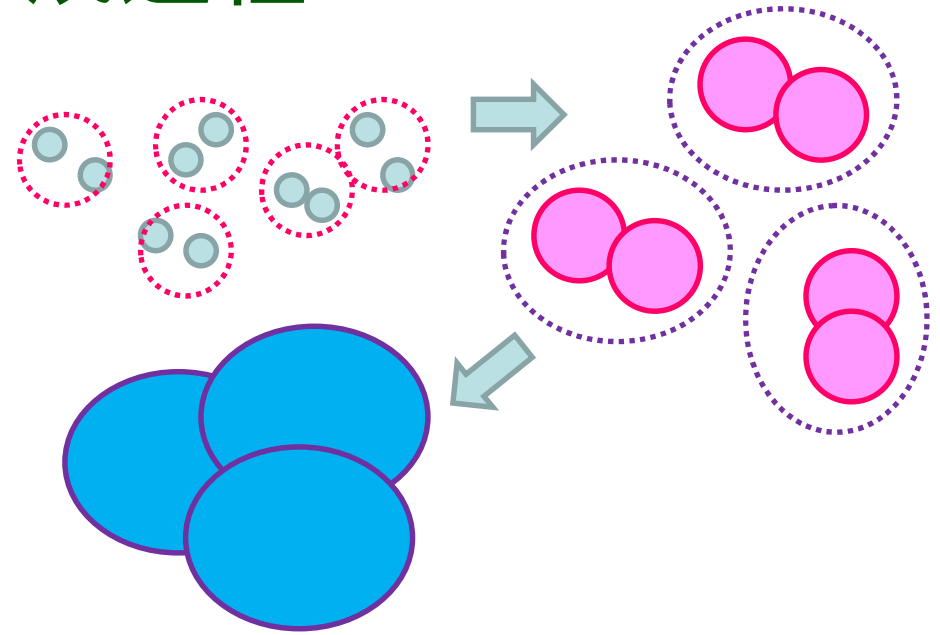
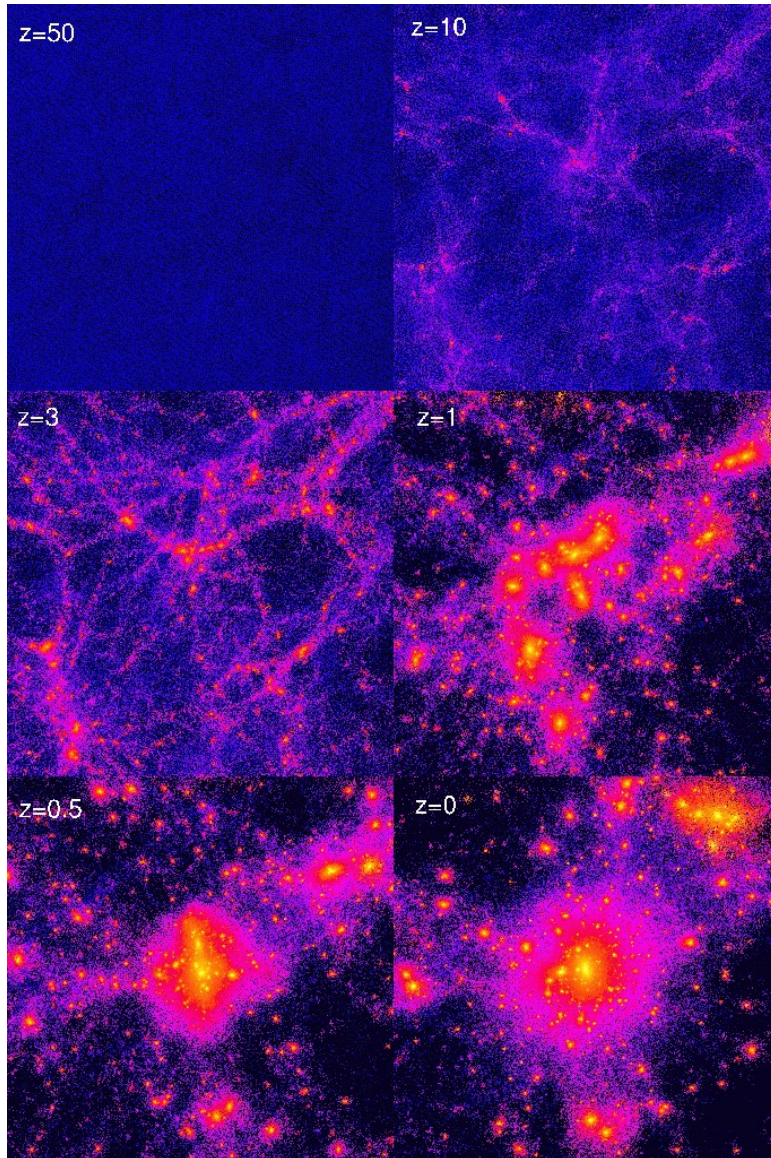
暗黒物質の分布の時間発展

時間



冷たい暗黒物質 Cold Dark Matter (CDM) 例: ニュートラリーノ  
小さなかたまりが最初にできて、合体・降着を経てより大きな  
スケールの構造が形成。様々なスケールの宇宙構造を再現。

# 銀河の形成過程

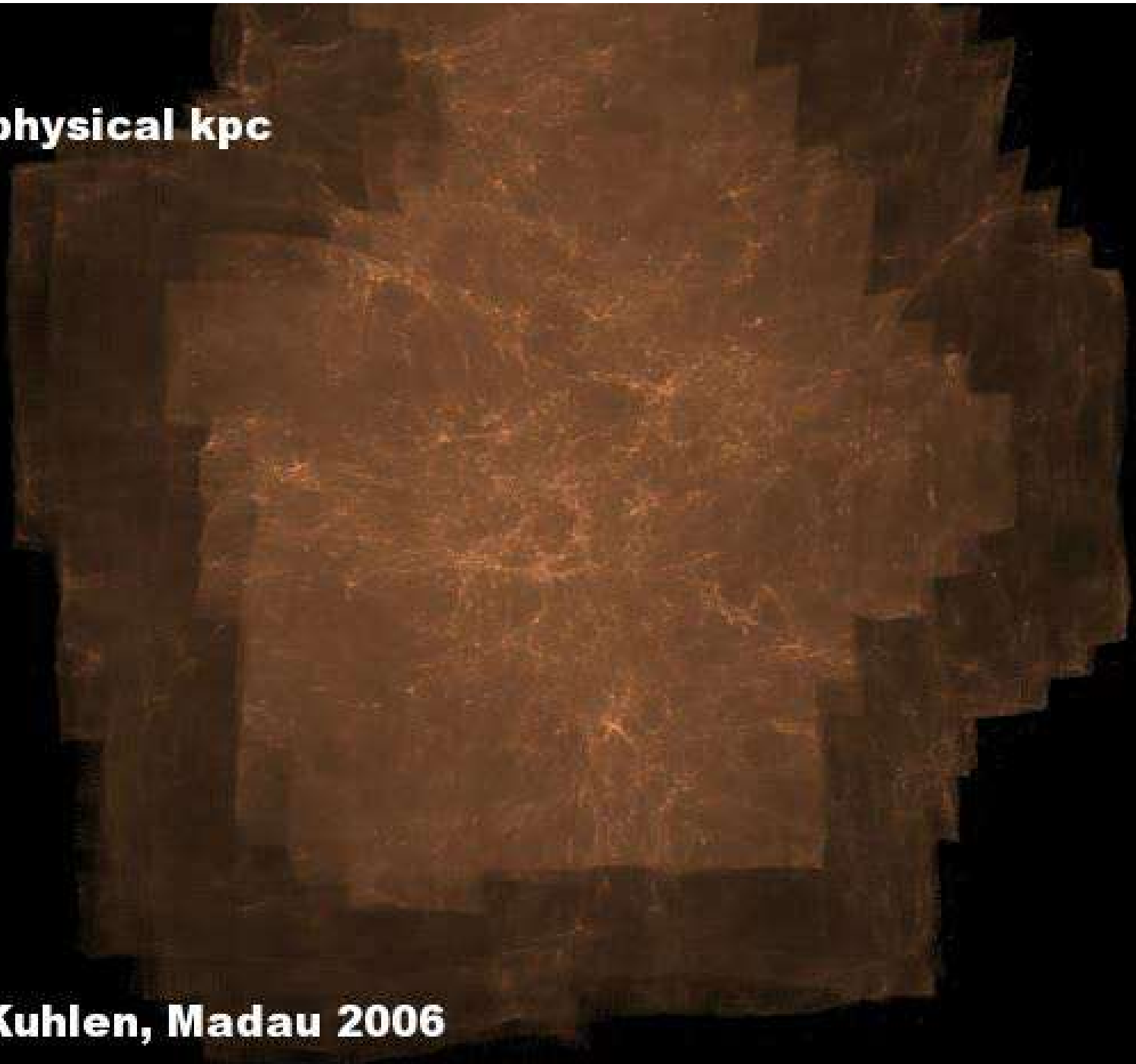


自己重力による  
階層的合体過程  
(ボトムアップ)

暗黒物質粒子のクラスタリング

**$z=11.9$**

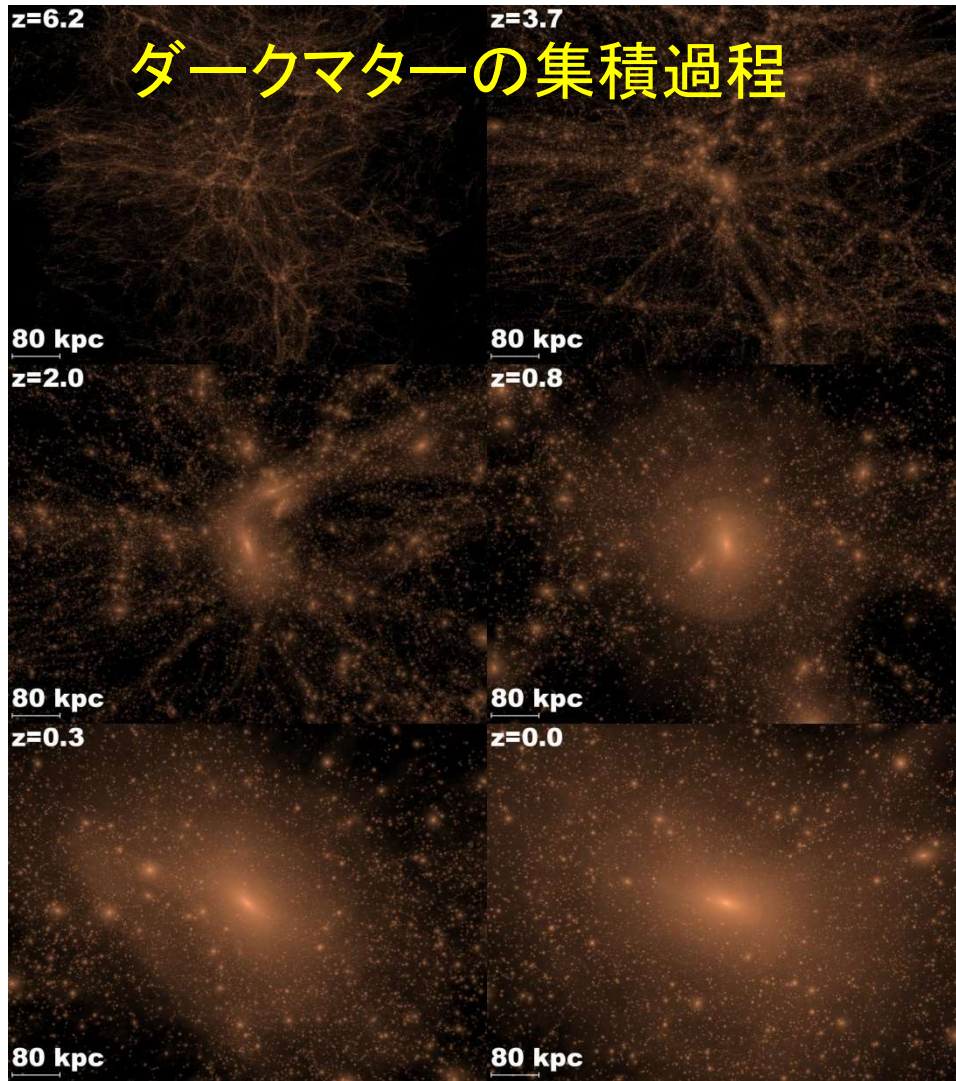
**800 x 600 physical kpc**



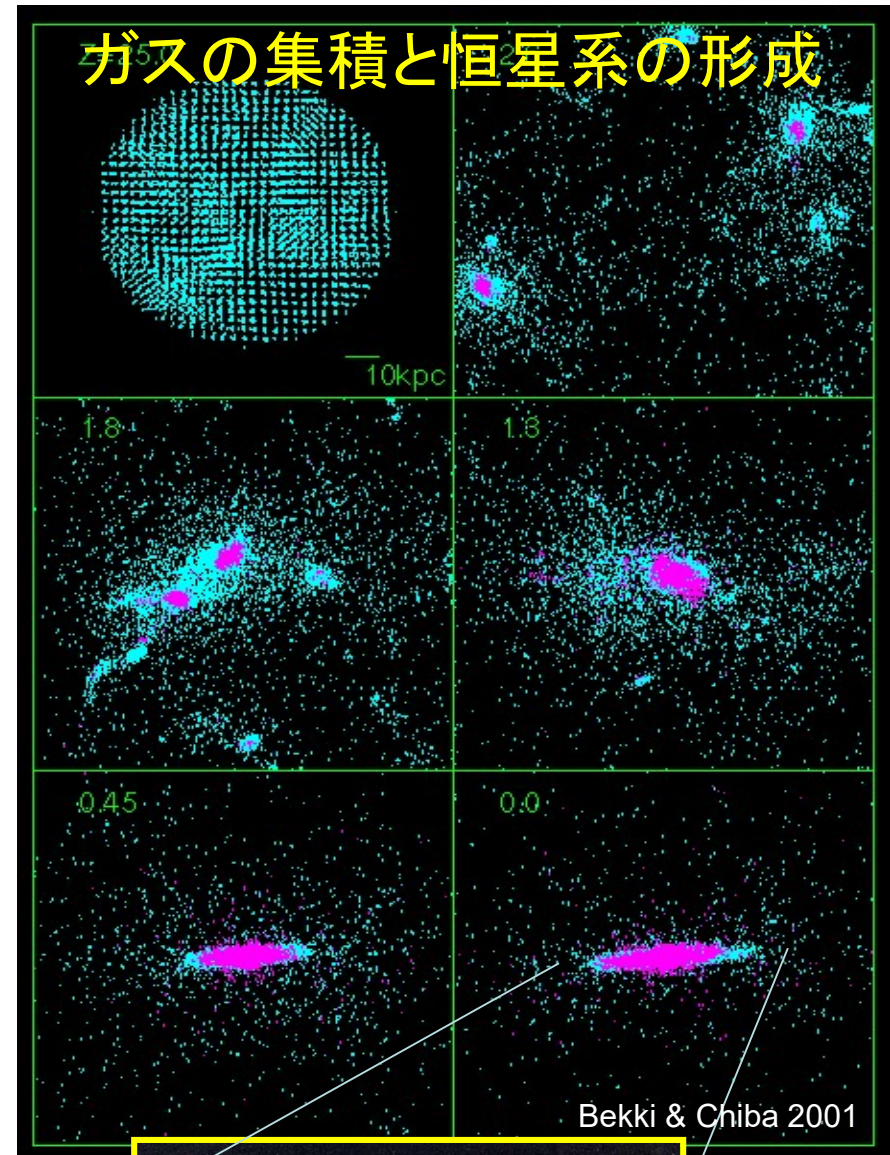
**Diemand, Kuhlen, Madau 2006**



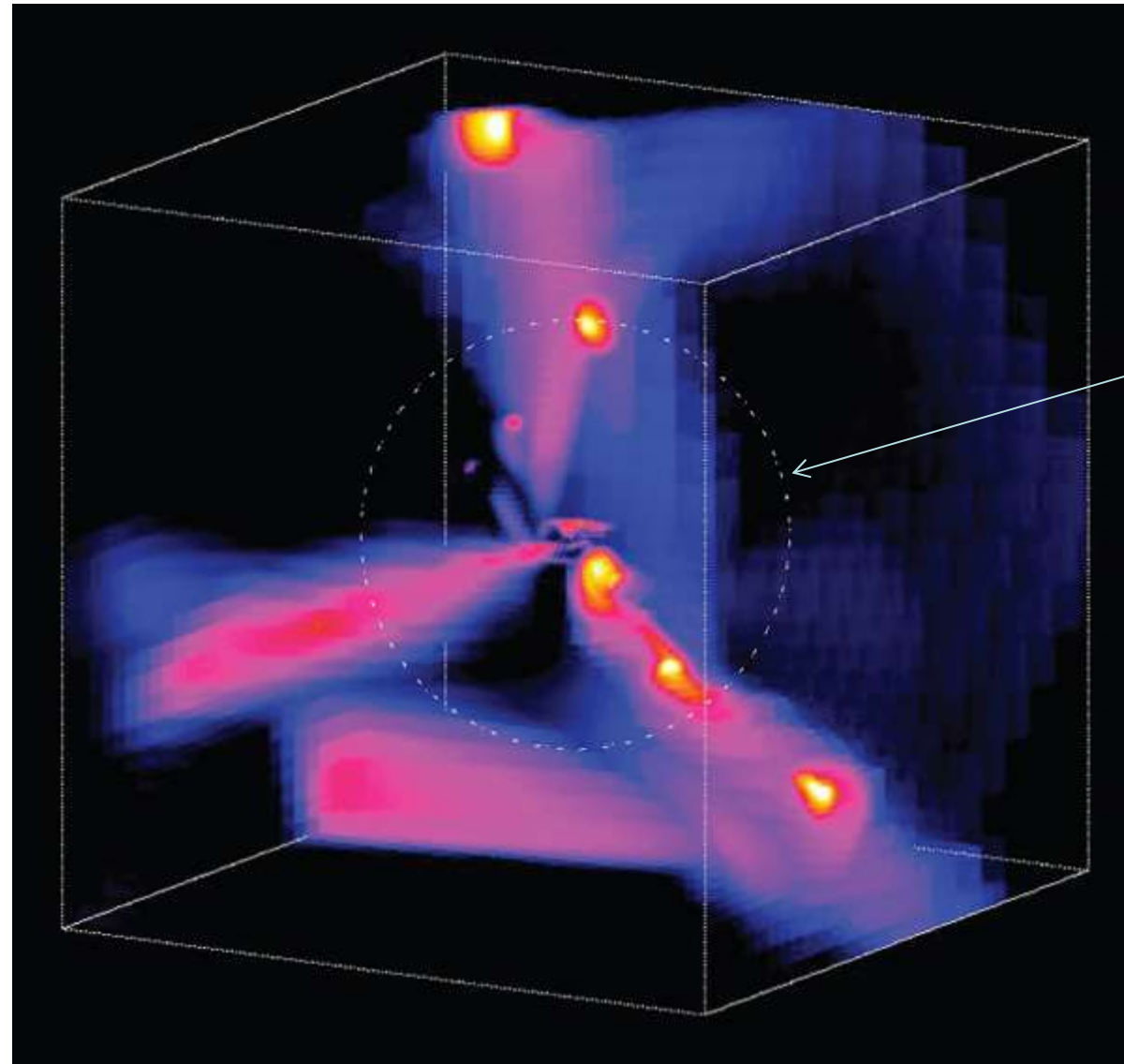
# 冷たい暗黒物質の階層的合体による銀河形成



Via Lactea simulation  
(Diemand+07)



冷たいガス流 (cold stream) による銀河形成  
Dekel et al. (2009)

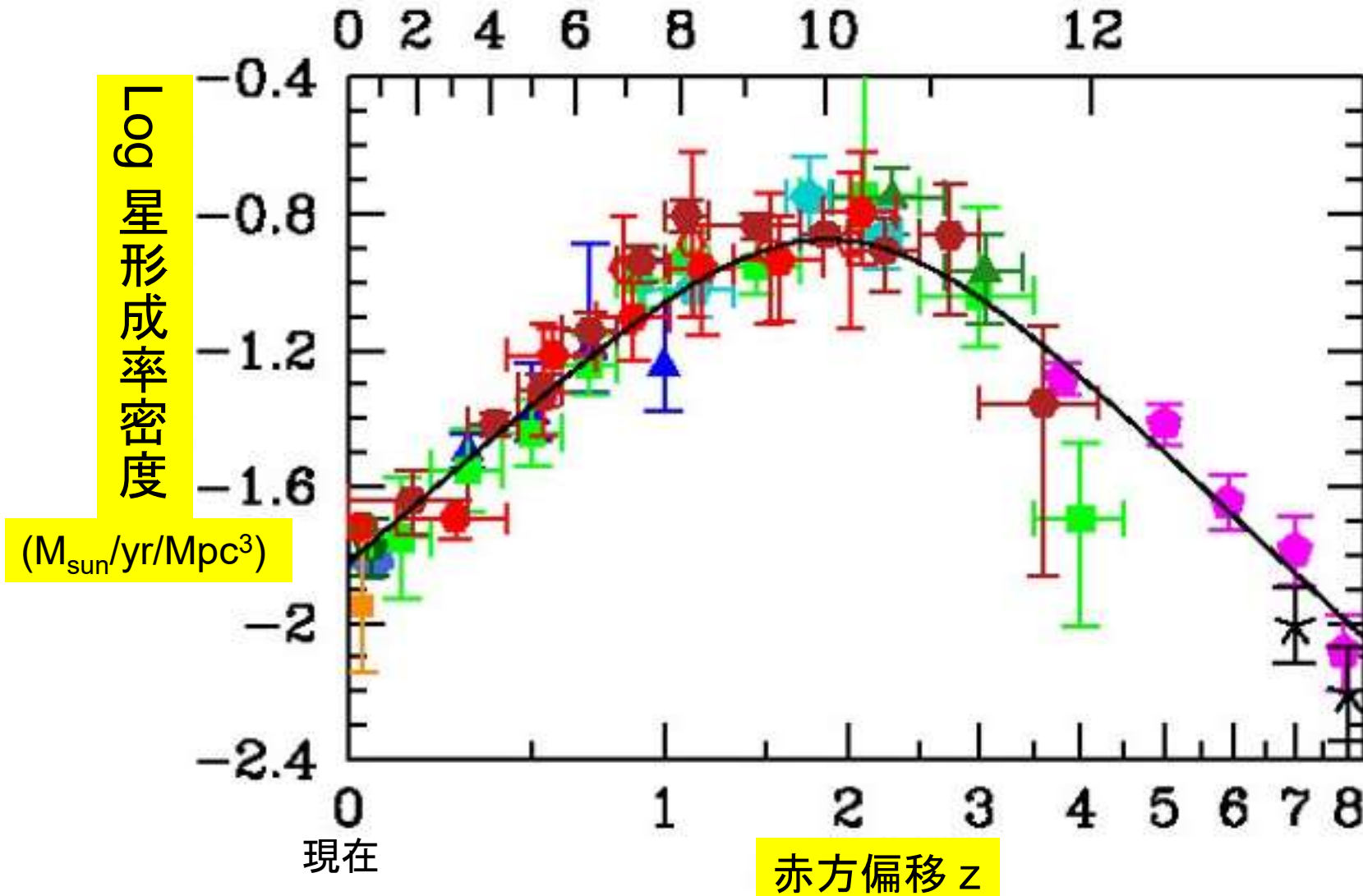


ダークハローの  
ビリアル半径

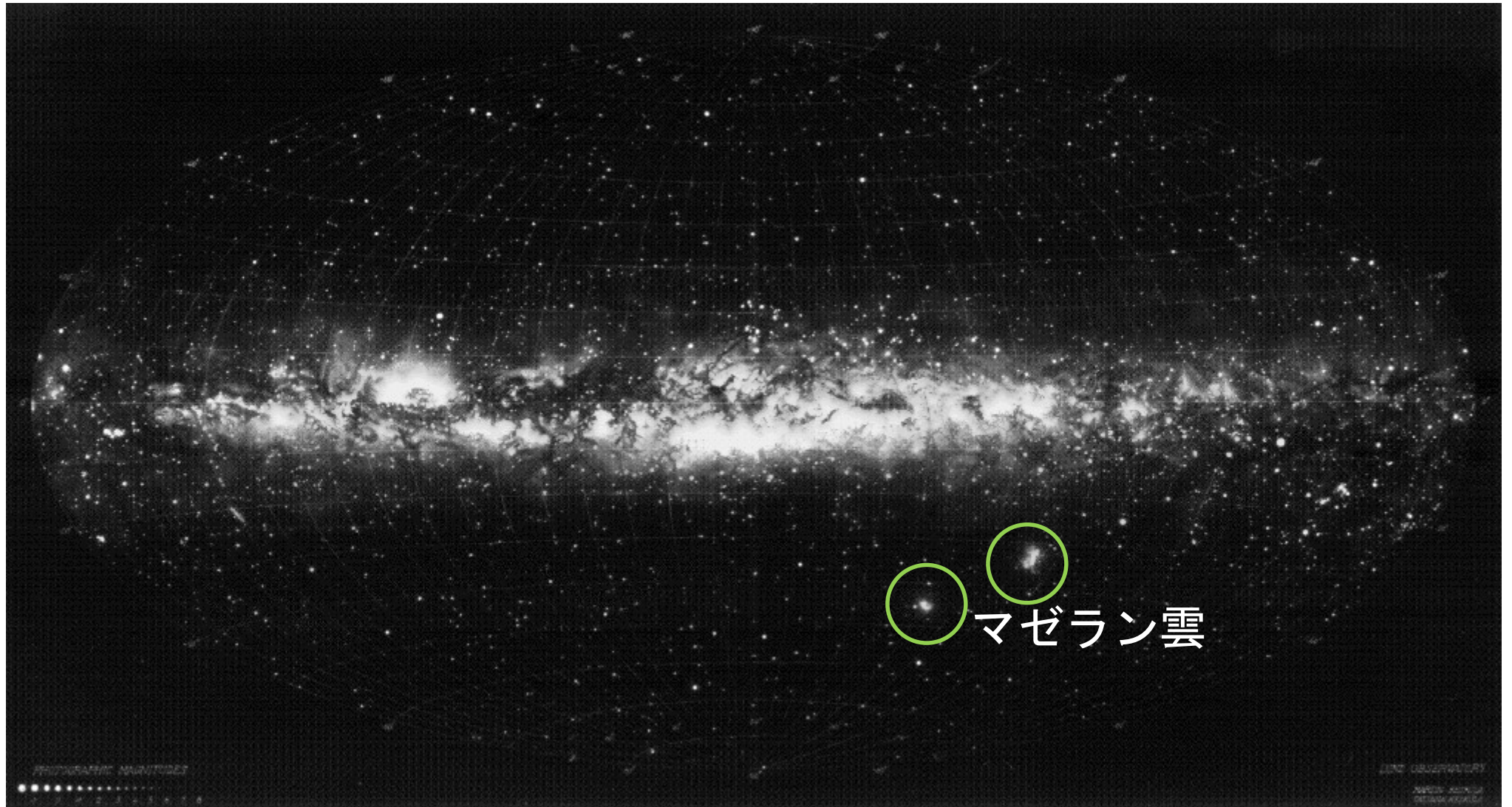
# 様々な観測から求められた宇宙における星形成史

Madau & Dickinson (2014)

現在から遡った時間(10億年単位)



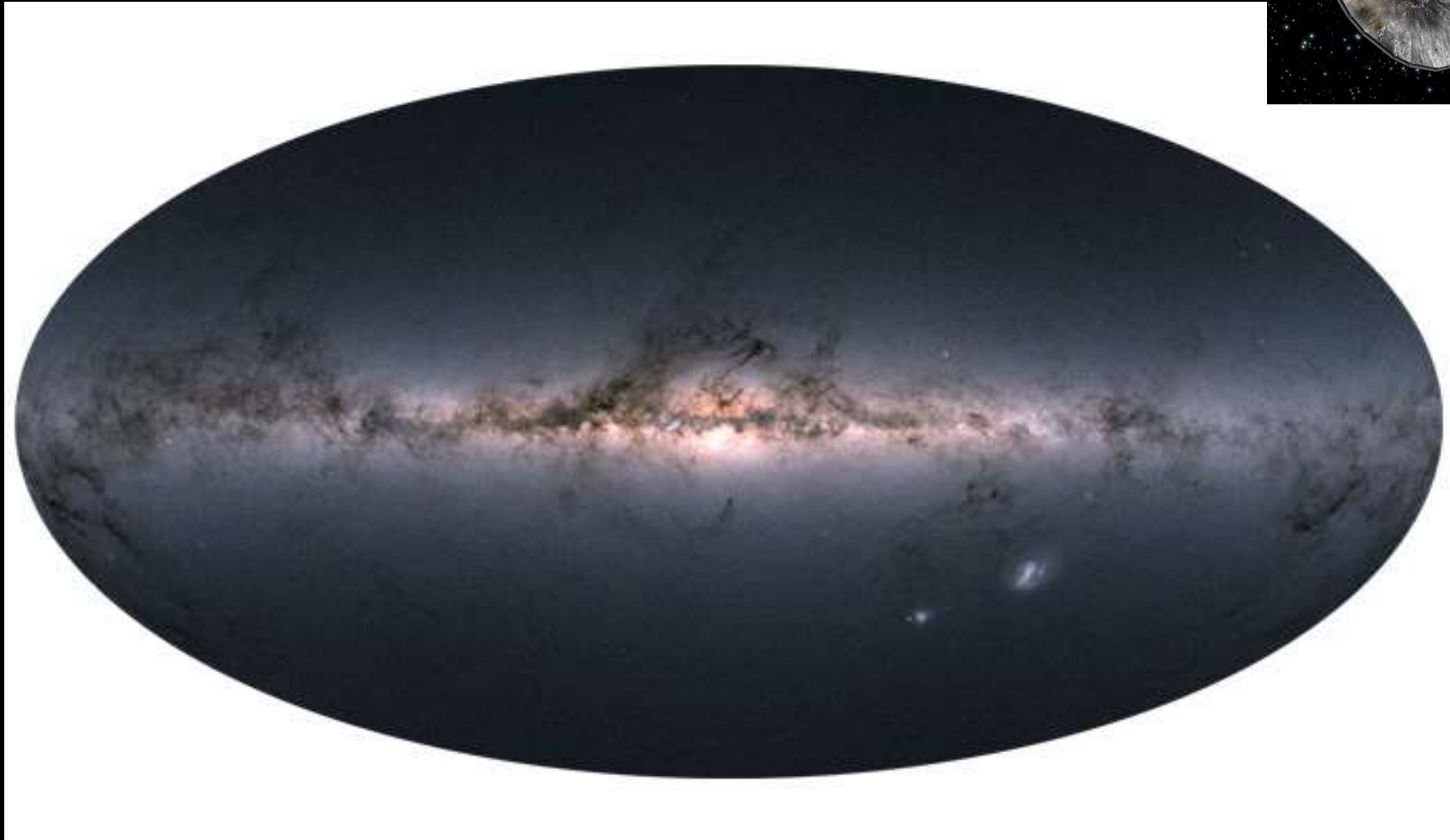
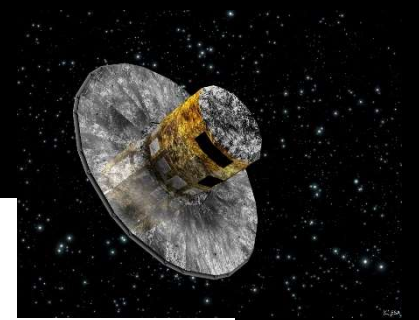
# 天の川 The Milky Way (Lund Observatory)



ガイア衛星

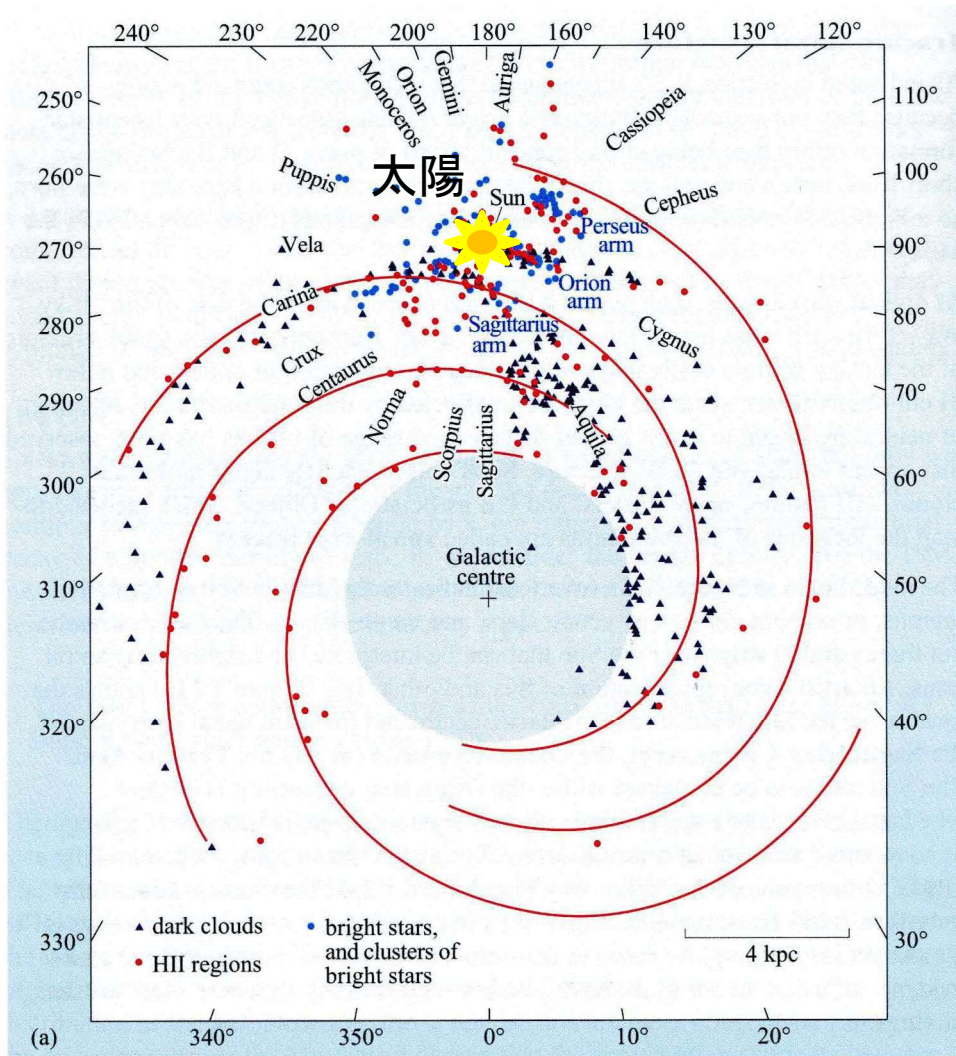
# 天の川(銀河系)

ガイア衛星による地図

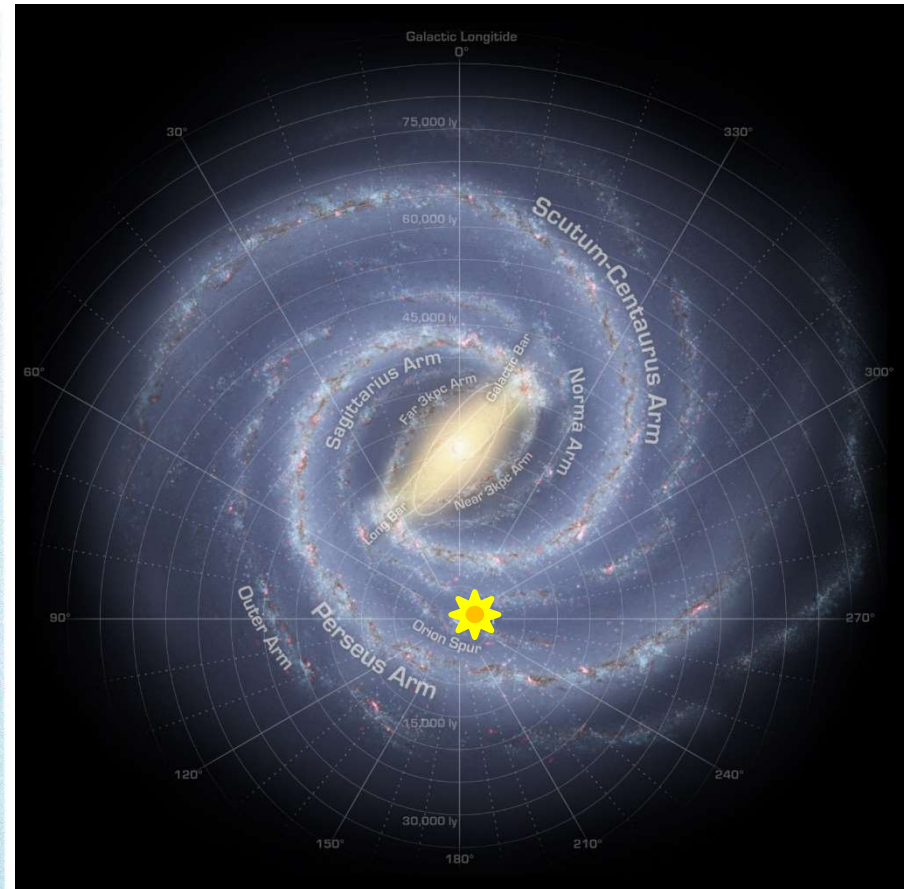


# 銀河系の構造

HII領域、暗黒星雲、明るい星の分布



最も確からしい銀河系の想像図

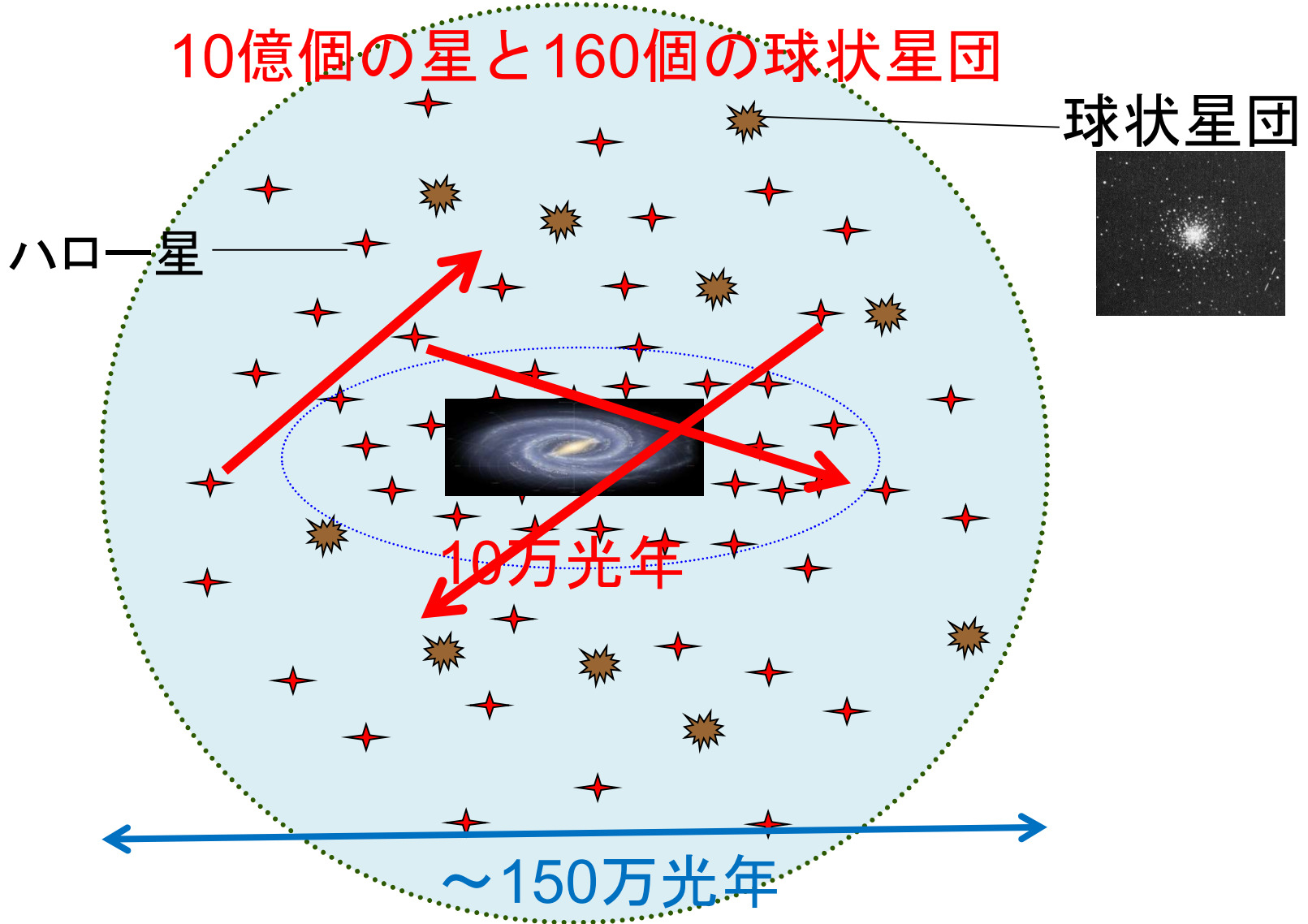


棒状銀河

# 銀河系の古い恒星系の空間分布

## ハロー

10億個の星と160個の球状星団



# 銀河系ハローにある多数の恒星ストリーム

0: VOD/VSS	1: Monoceros	2: EBS	3: Her-Aq	4: PAndAS	5: Tri-And	6: Tri-And2	7: PiscesOv	8: EriPhe
9: Phoenix	10: WG1	11: WG2	12: WG3	13: WG4	14: Acheron	15: Cocytos	16: Lethe	17: Styx
18: ACS	19: Pal15	20: Eridanus	21: Tucana III	22: Indus	23: Jhelum	24: Ravi	25: Chenab	26: Elqui
27: Aliqa Uma	28: Turbio	29: Willka Yaku	30: Turranburra	31: Wambelong	32: Palca	33: Jet	34: Gaia-1	35: Gaia-2
36: Gaia-3	37: Gaia-4	38: Gaia-5	39: PS1-A	40: PS1-B	41: PS1-C	42: PS1-D	43: PS1-E	44: ATLAS
45: Ophiucus	46: Sangarius	47: Scamander	48: Corvus	50: Sgr-L10	51: Orphan	52: Pal5	53: GD-1	54: Tri/Pis
55: NGC5466	56: Alpheus	57: Hermus	58: Hyllus	59: Cetus	60: Kwando	61: Molonglo	62: Murrumbidgee	63: Orinoco
64: Phlegethon	65: Slidr	66: Sylgr	67: Ylgr	68: Fimbulthul	69: Svol	70: Fjorm	71: Gjoll	72: Leipttr

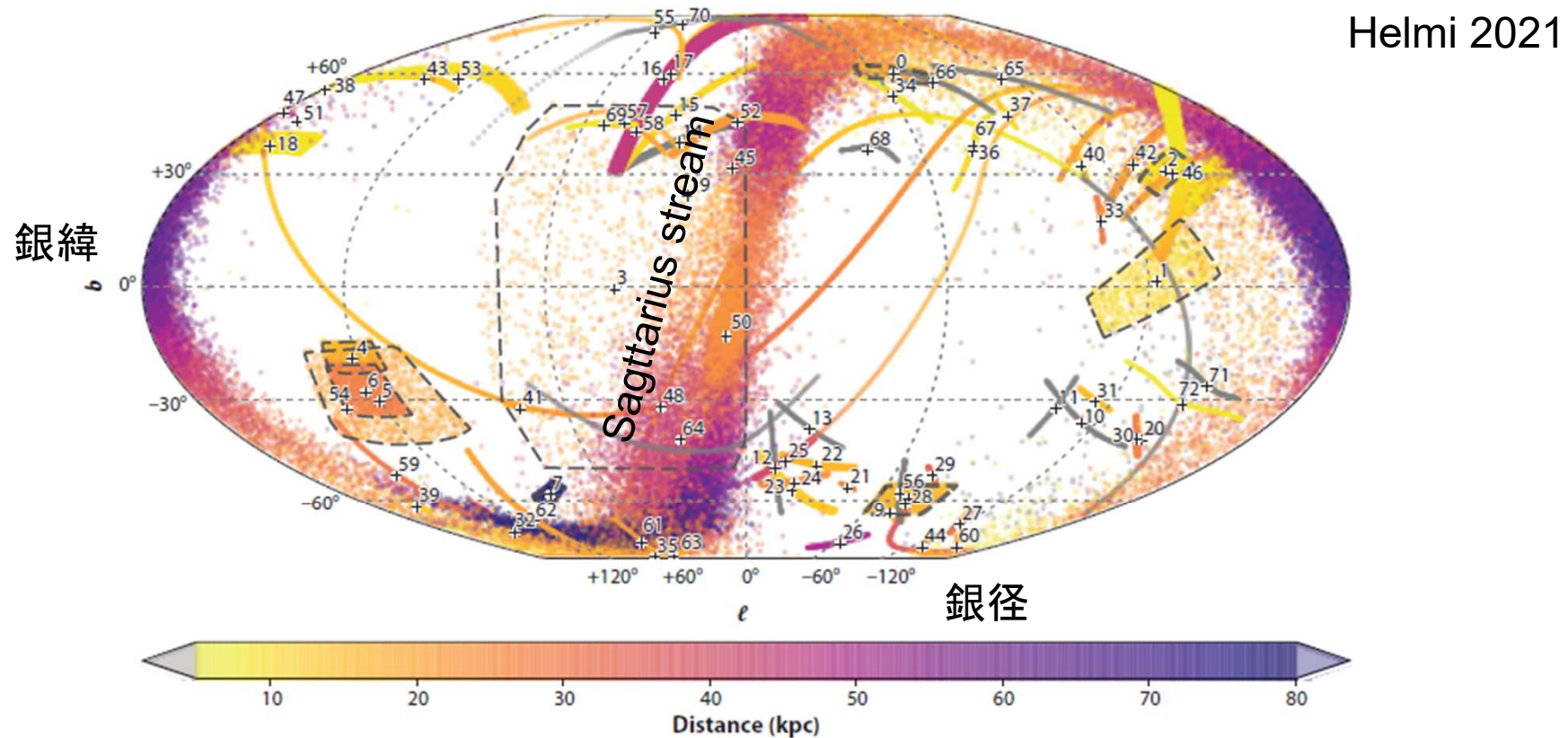


Figure 11

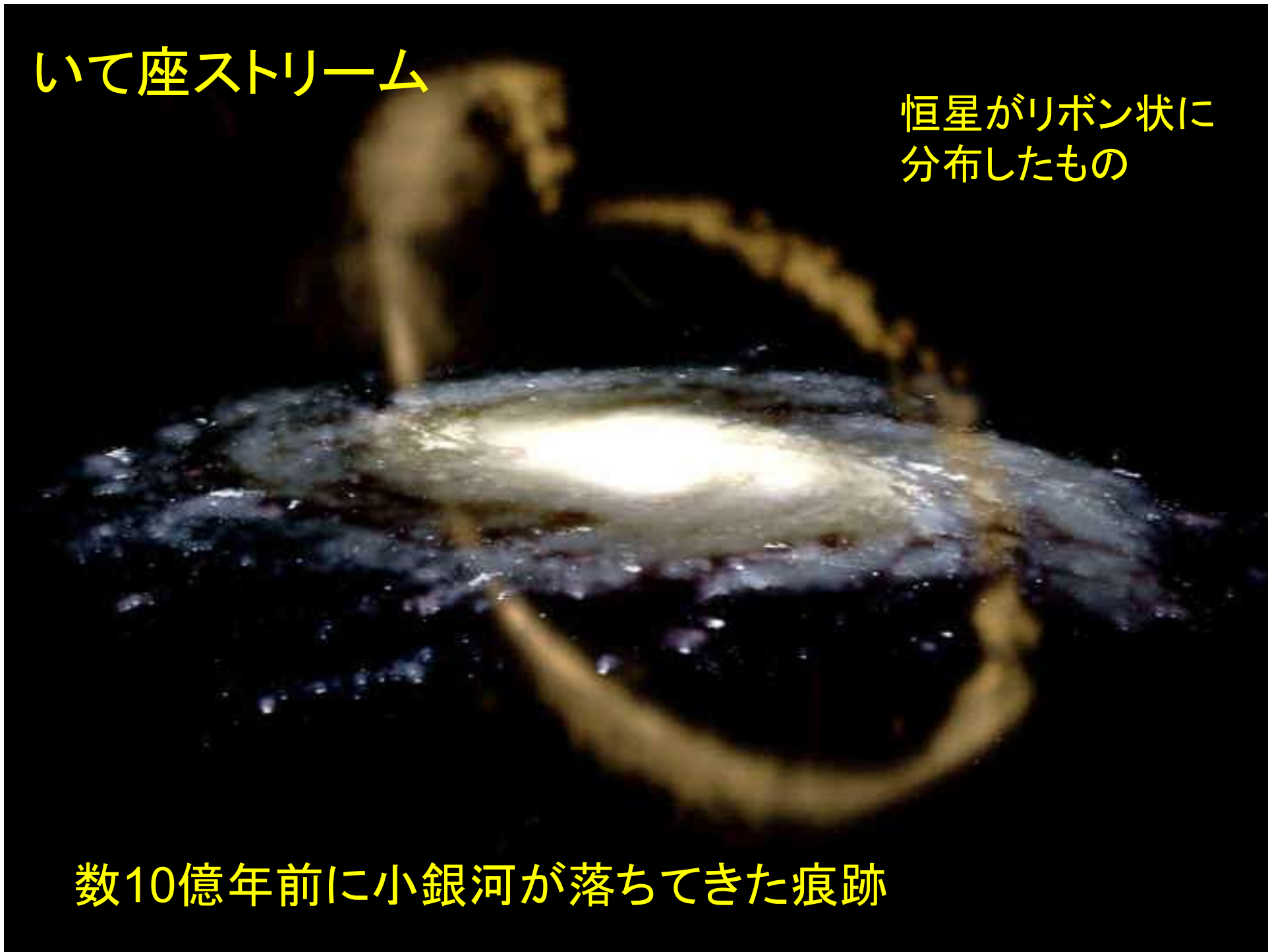
Sky distribution of currently known spatially coherent streams and overdensities (indicated as regions delimited by dashed lines, and in boldface in the inset) produced using the `galstreams` package by Mateu et al. (2018). Adapted with permission from C. Mateu and E. Balbinot.



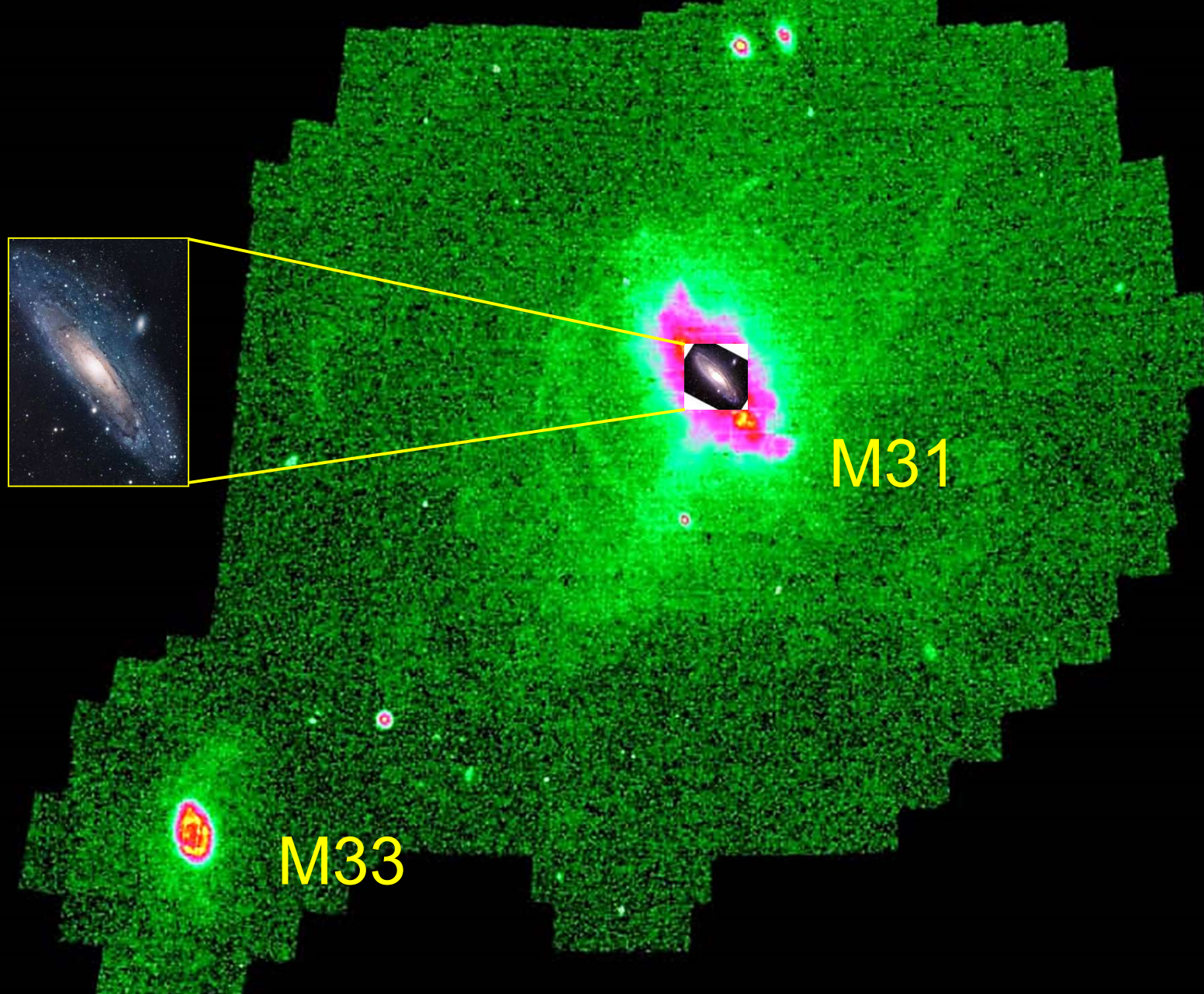
いて座ストリーム

恒星がリボン状に  
分布したもの

数10億年前に小銀河が落ちてきた痕跡



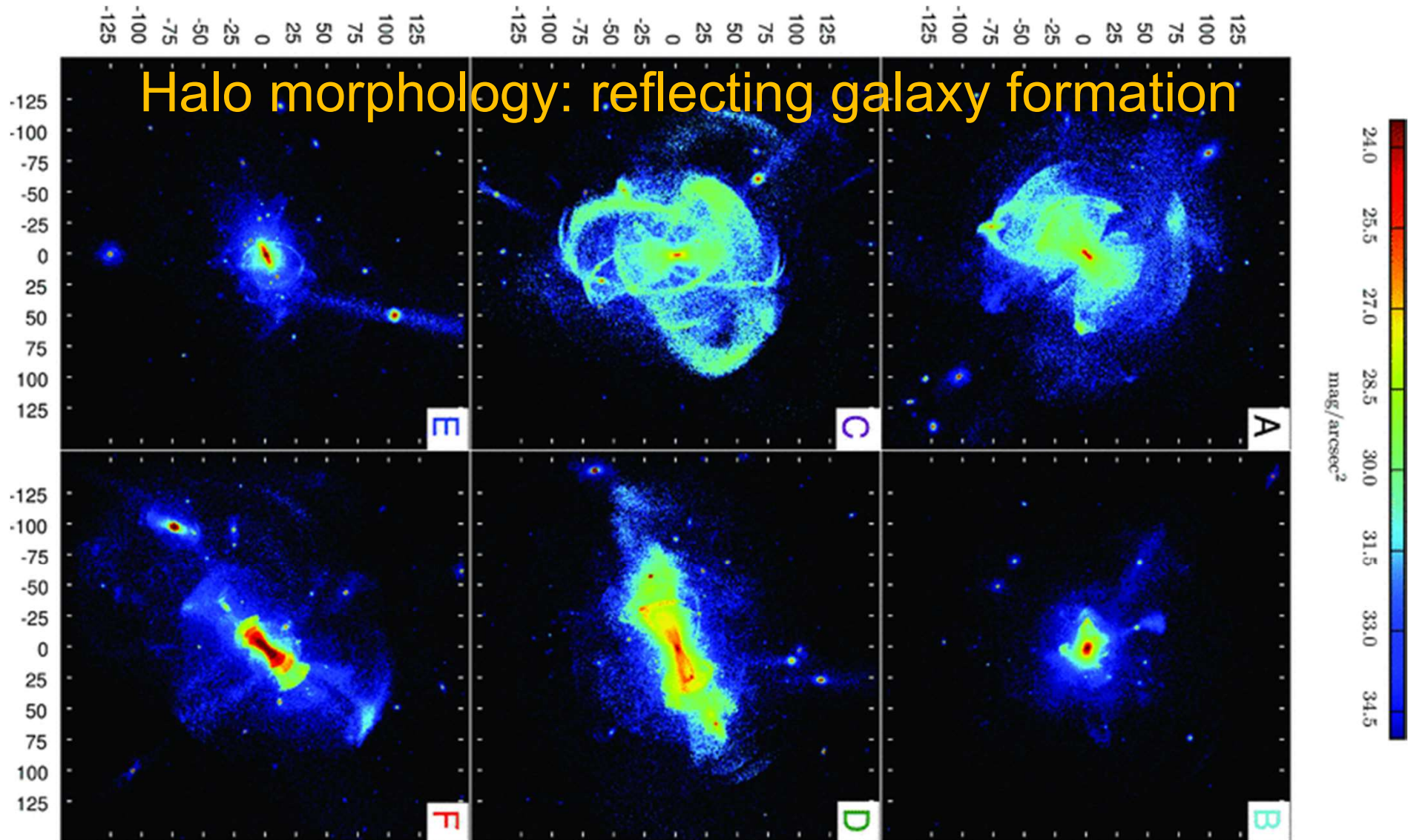
# M31・M33のハロー構造



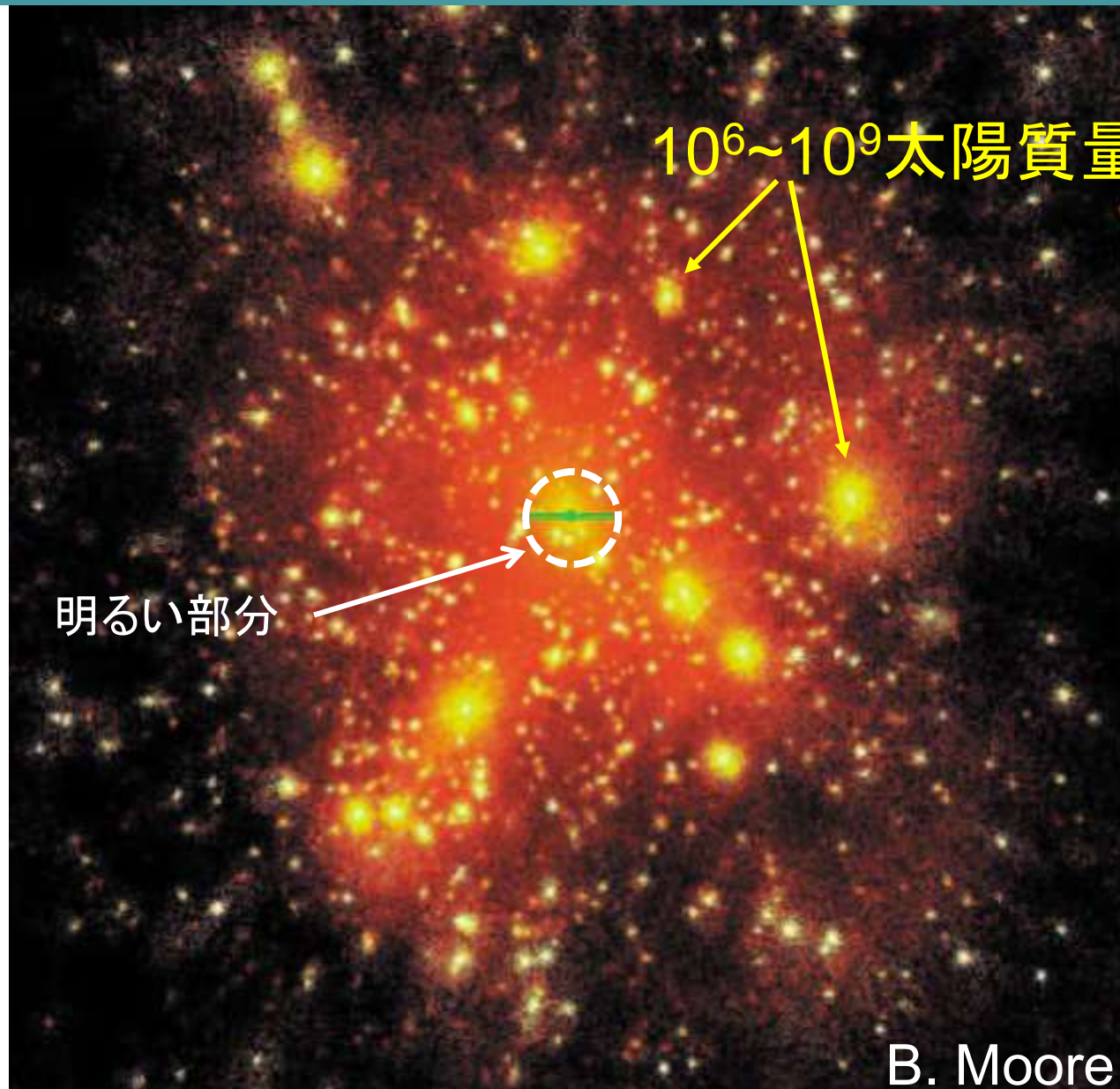
# Stellar halos in various MW-sized halos

~varieties due to different merging histories~

Cooper et al. 2010



# 暗黒物質ハローに囲まれた円盤銀河



# 暗黒物質の候補

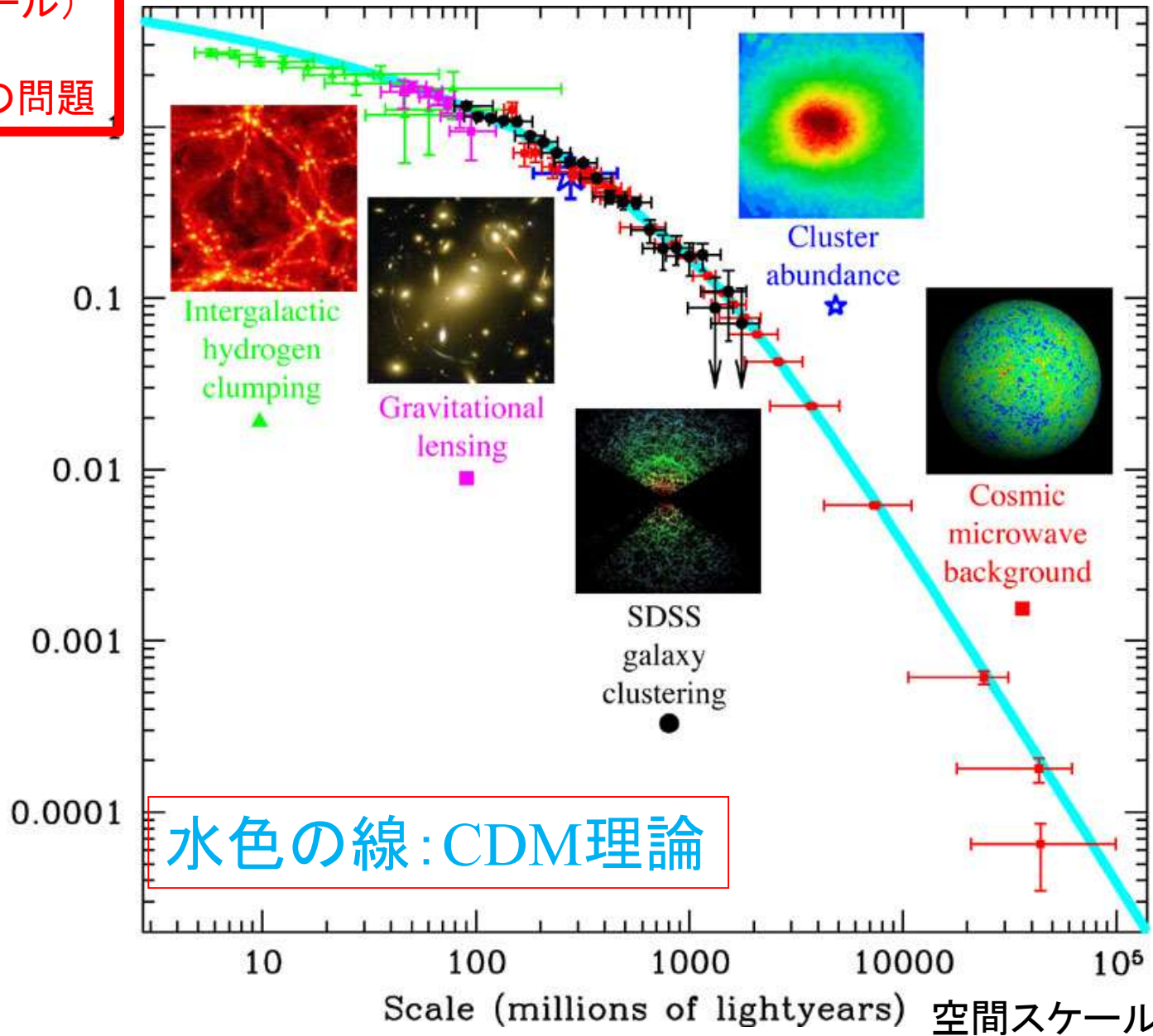
- Baryonic matter (陽子や中性子といった通常の物質 : バリオン)
  - 白色矮星、中性子星、(原始)ブラックホール
  - ひとつひとつは重くてコンパクトな天体？
  - MACHOs (Massive Compact Halo Objects )
- Non-baryonic matter (バリオンではない物質)
  - まだ見つかっていない微小な素粒子
  - axion, neutralino, massive neutrino, ....
  - WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)
    - 冷たい暗黒物質 (Cold Dark Matter: CDM)
  - あるいは他の素粒子か？

しかし、  
さらに小スケール  
(銀河スケール)  
 $L < 1 \text{ Mpc}$   
でいくつもの問題

# 宇宙の大規模構造のスケール依存性

密度揺らぎの強さ  
一様密度からのずれ

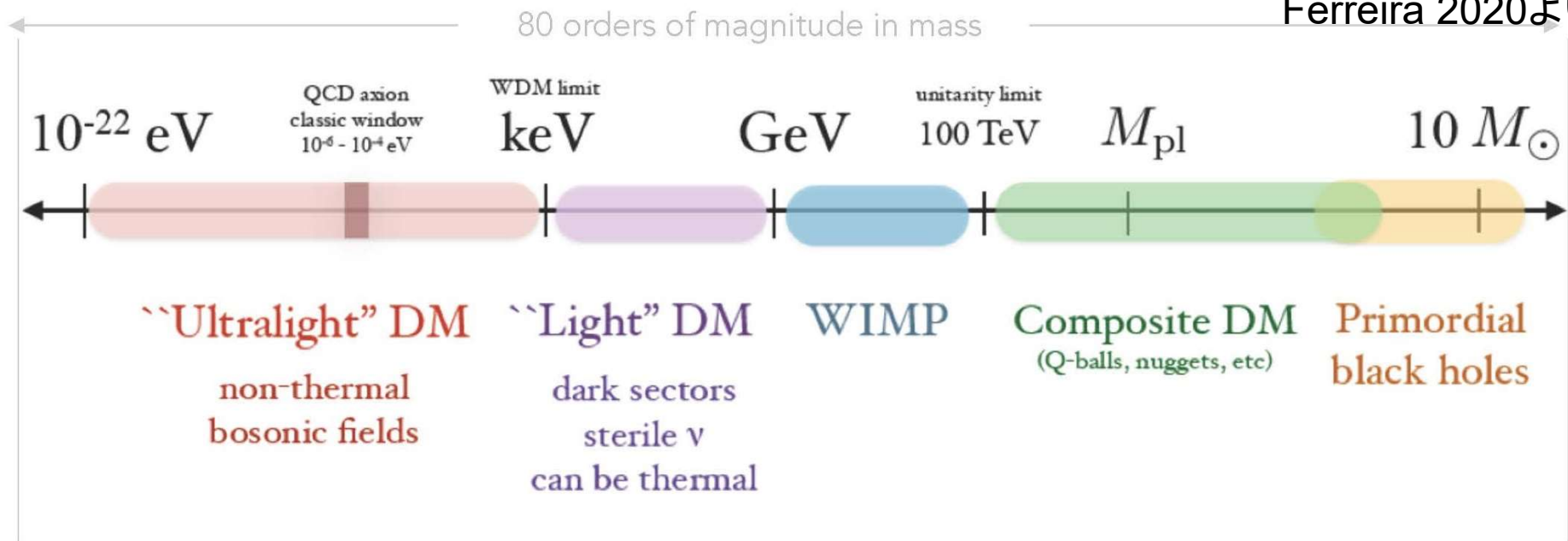
Density fluctuations



# 暗黒物質候補は実は乱立状態

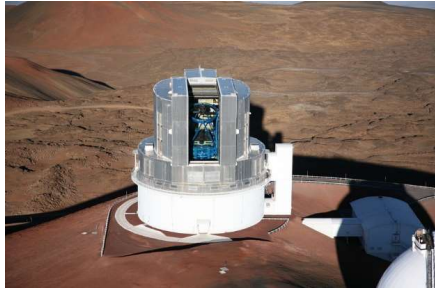
Mass scale of dark matter  
(not to scale)

Ferreira 2020より



WIMPが最有力候補だが、、、未検出

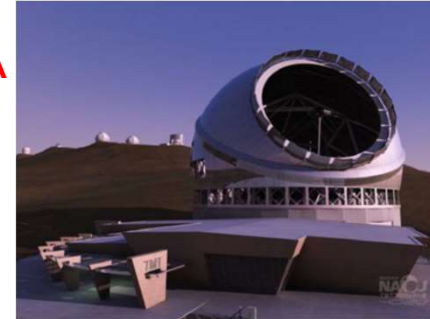
# 銀河宇宙物理学の展開



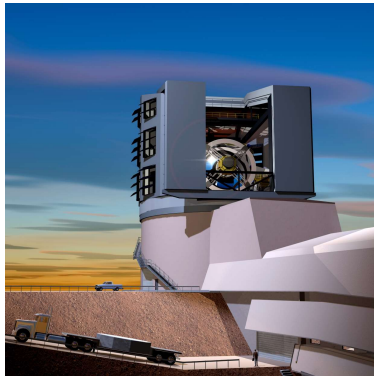
Subaru  
HSC  
PFS:2024~  
Ultimate:



ALMA



TMT  
WFOS  
HROS  
NIRES  
2030~



Vera C.  
Rubin  
(LSST)  
2024-



Gaia



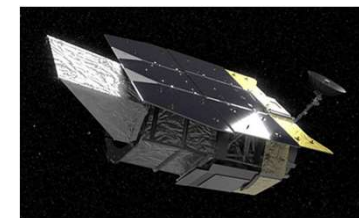
JWST  
NIRCam  
NIRSpec  
MIRI  
2022-



Euclid  
YJH  
2023-



JASMINE  
NIR astrometry  
Late 2020



Nancy Grace  
Roman Space  
Telescope  
(WFIRST)  
2026-

銀河形成と暗黒物質の正確・精密な理解