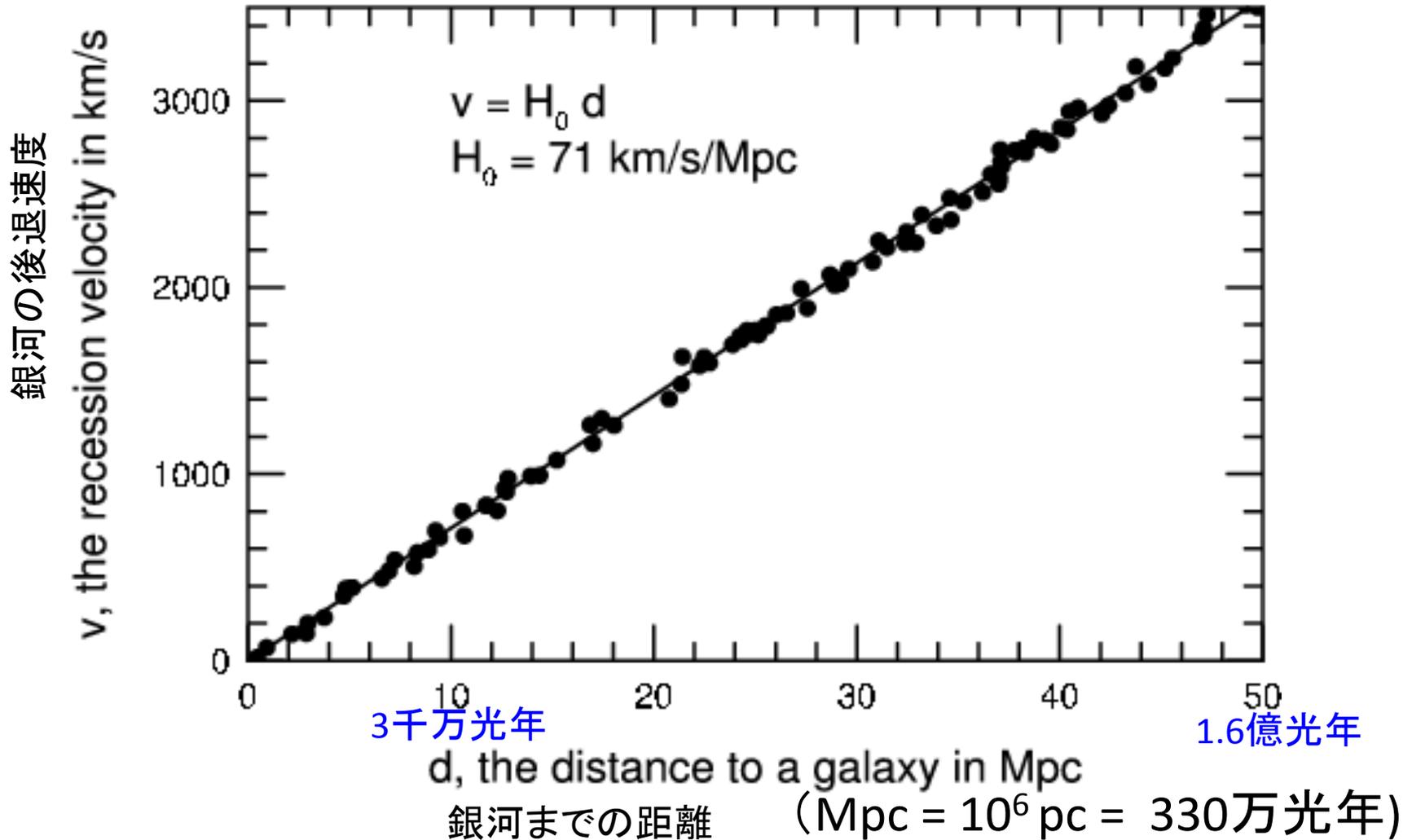


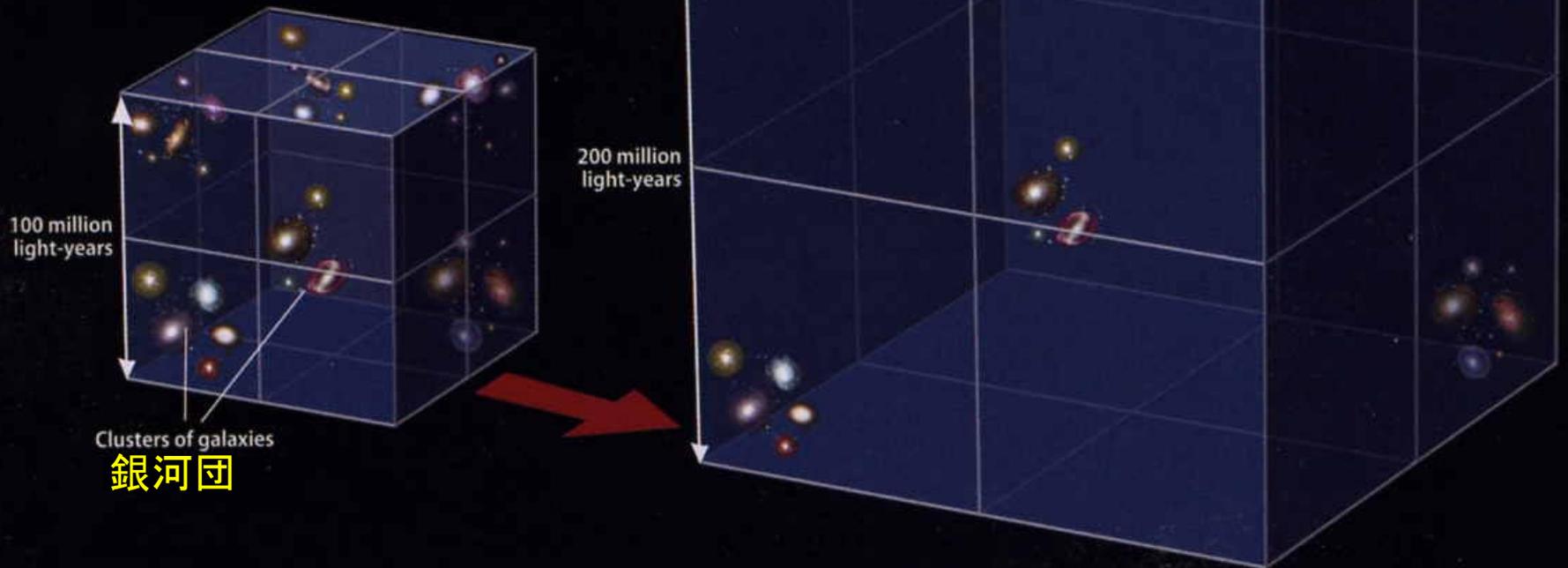
# 銀河の後退速度と距離の関係 — ハッブルの法則

Hubble's Law



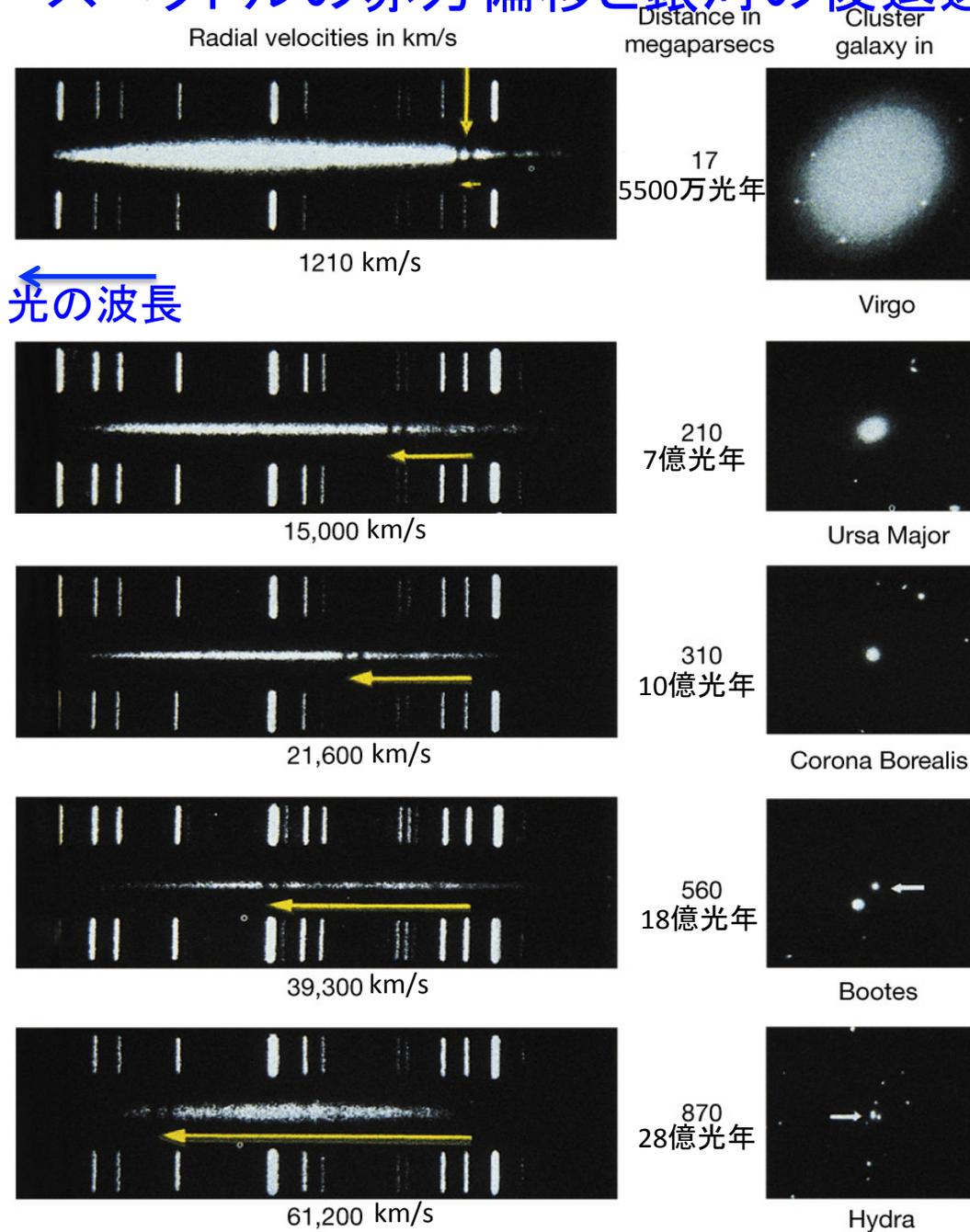
# 宇宙の膨張 = ハッブルの法則

## Cosmic expansion



(重力で束縛された系内部では宇宙膨張の影響を受けない)

# スペクトルの赤方偏移と銀河の後退速度



# 宇宙膨張による赤方偏移 $Z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ 光の波長変化 元の波長

$\lambda$  = 光の波長、  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{v}{c} \quad \text{if} \quad \frac{v}{c} \ll 1$$

$$Z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\frac{v}{c} + 1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$Z + 1 = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} + 1 = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} + 1 = \frac{\lambda}{\lambda_0}$$

宇宙空間が  
広がっただけ  
波長が長くなった

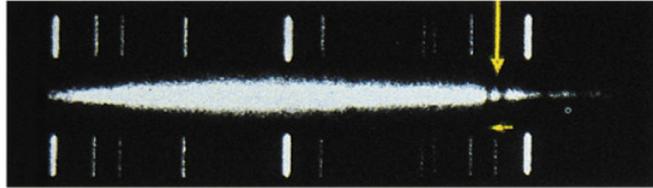
宇宙が  $\frac{1}{Z+1}$  の大きさであった頃に発せられた光

# スペクトルの赤方偏移と銀河の後退速度

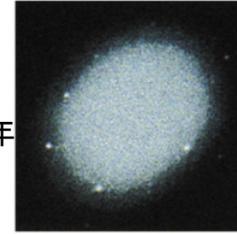
Radial velocities in km/s

Distance in megaparsecs

Cluster galaxy in



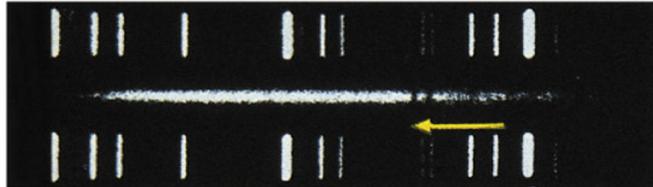
17  
5500万光年



Virgo

1210 km/s

←  
光の波長



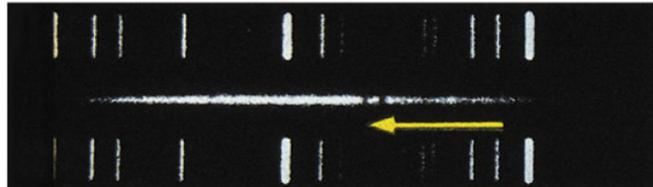
210  
7億光年



Ursa Major

15,000 km/s

$Z = 0.05$

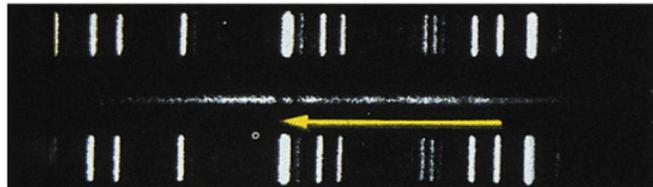


310  
10億光年



Corona Borealis

21,600 km/s

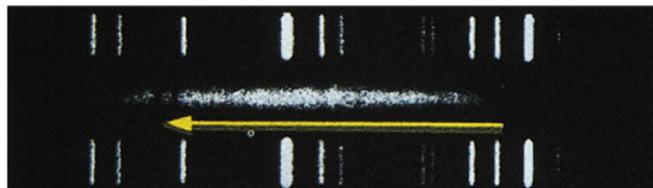


560  
18億光年



Bootes

39,300 km/s



870  
28億光年



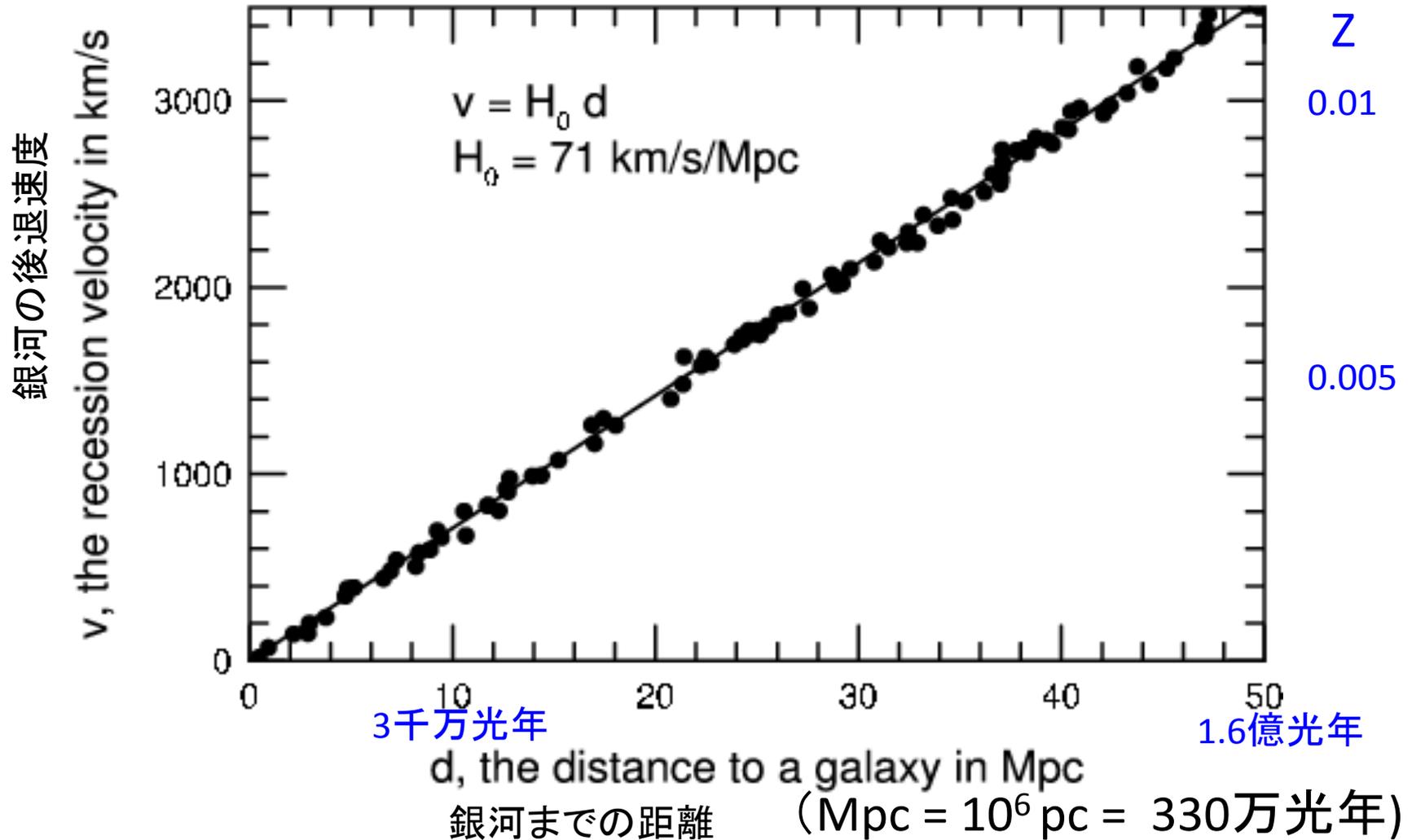
Hydra

61,200 km/s

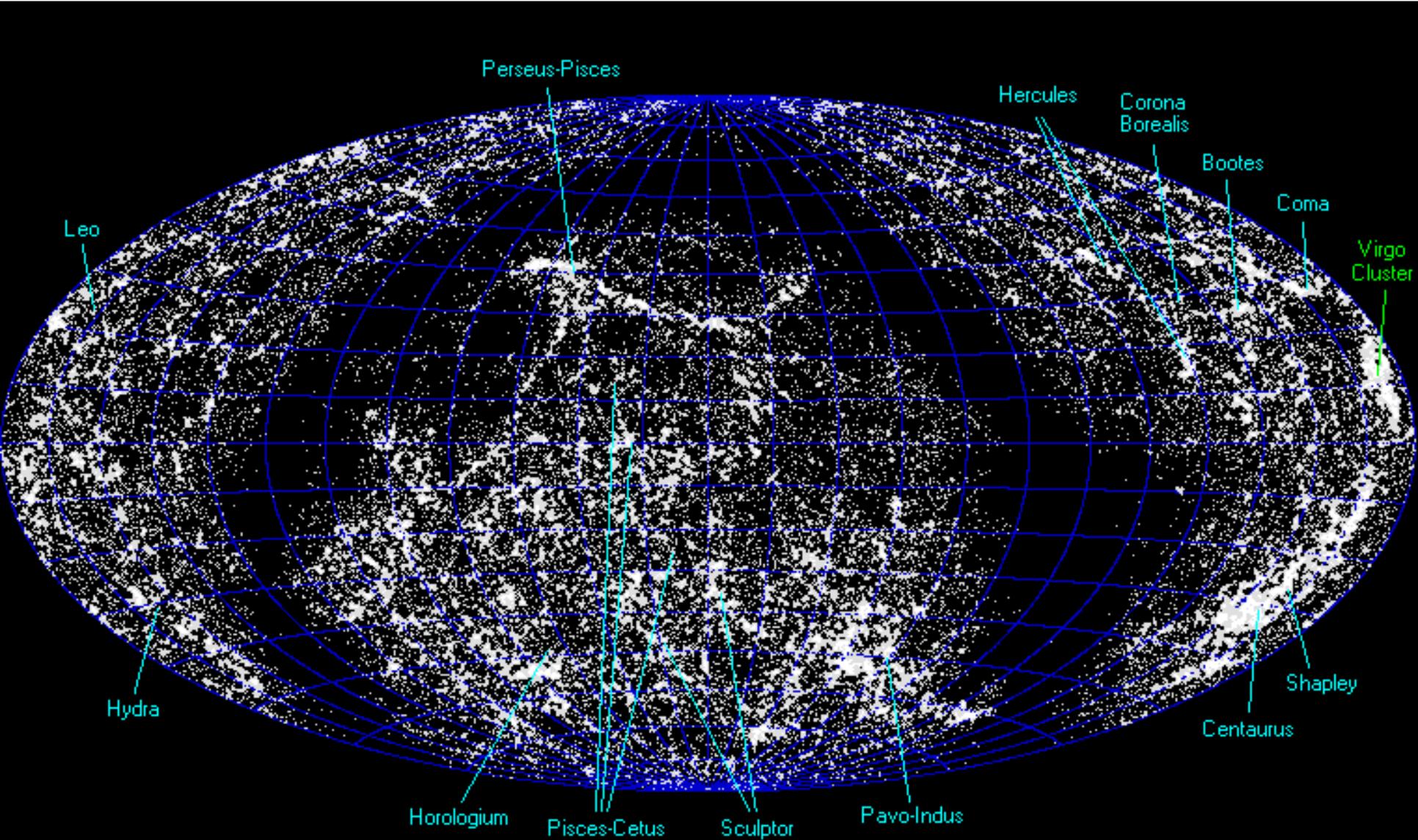
$Z = 0.2$

# 銀河の後退速度と距離の関係 — ハッブルの法則

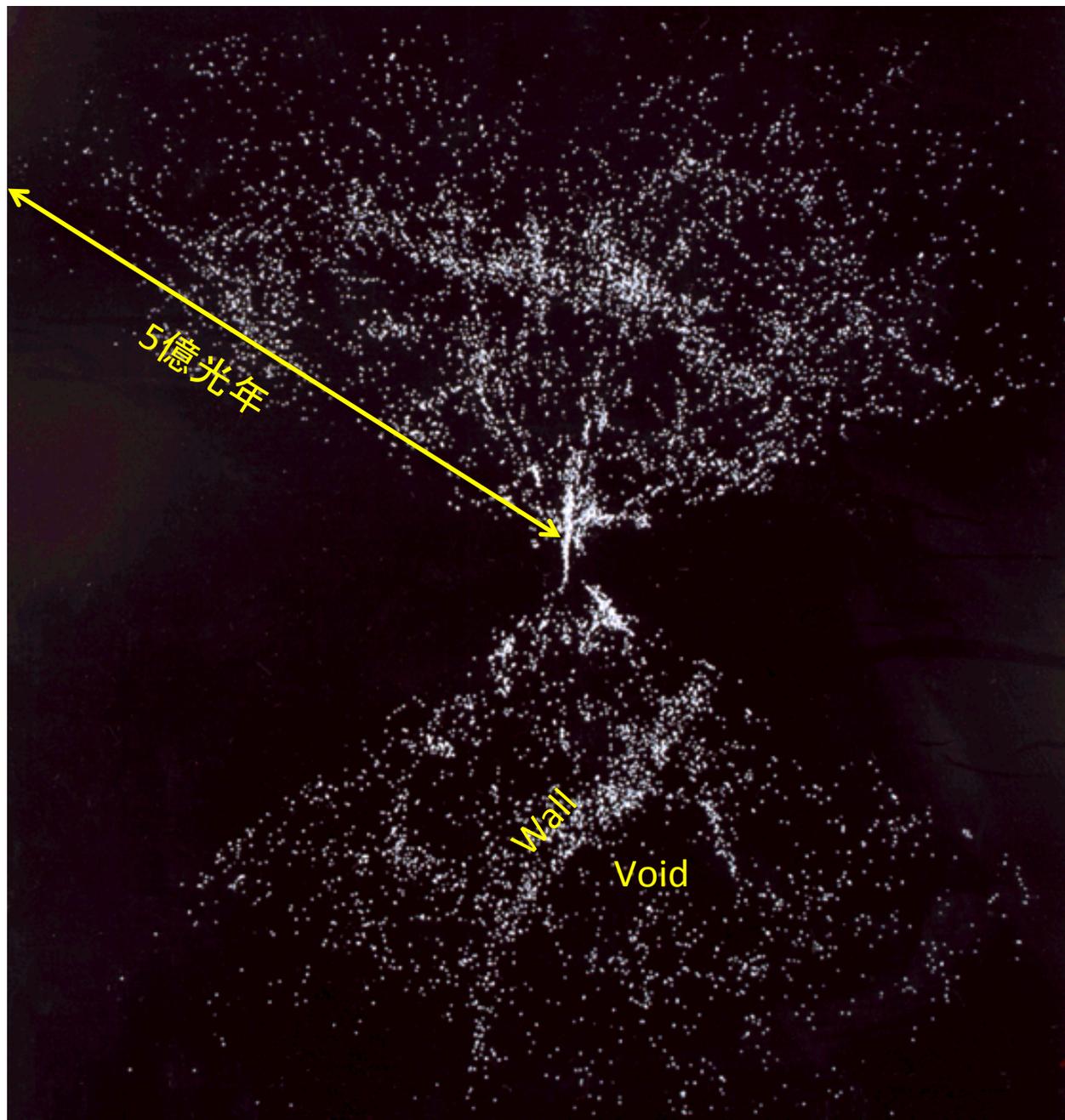
Hubble's Law



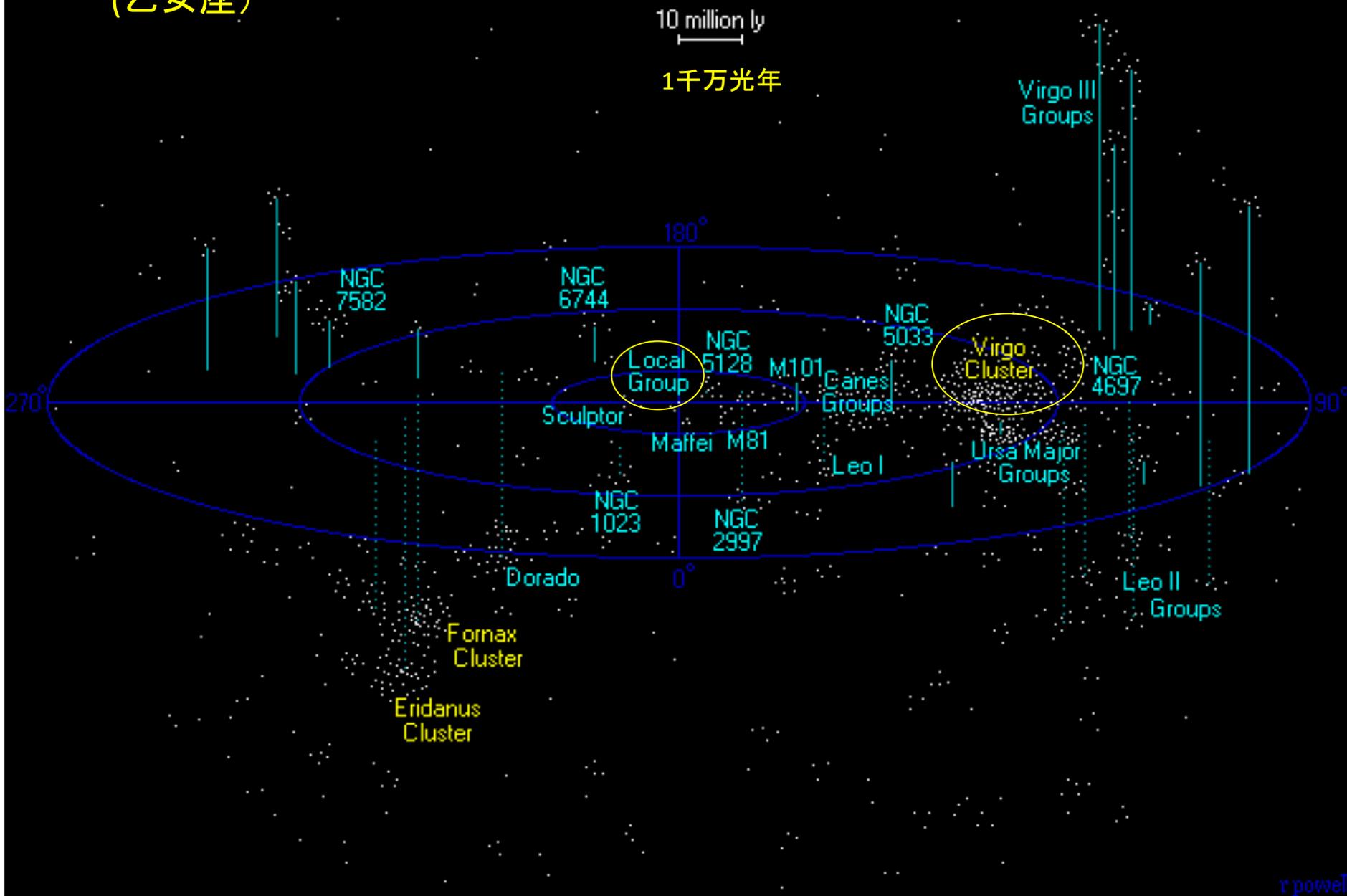
6万個の最も明るい銀河(各点)の全天投影分布  
(銀河の分布しない帯状の領域は我々の銀河円盤による)



観測された5億光年先までの銀河の分布(各白い点が個々の銀河)



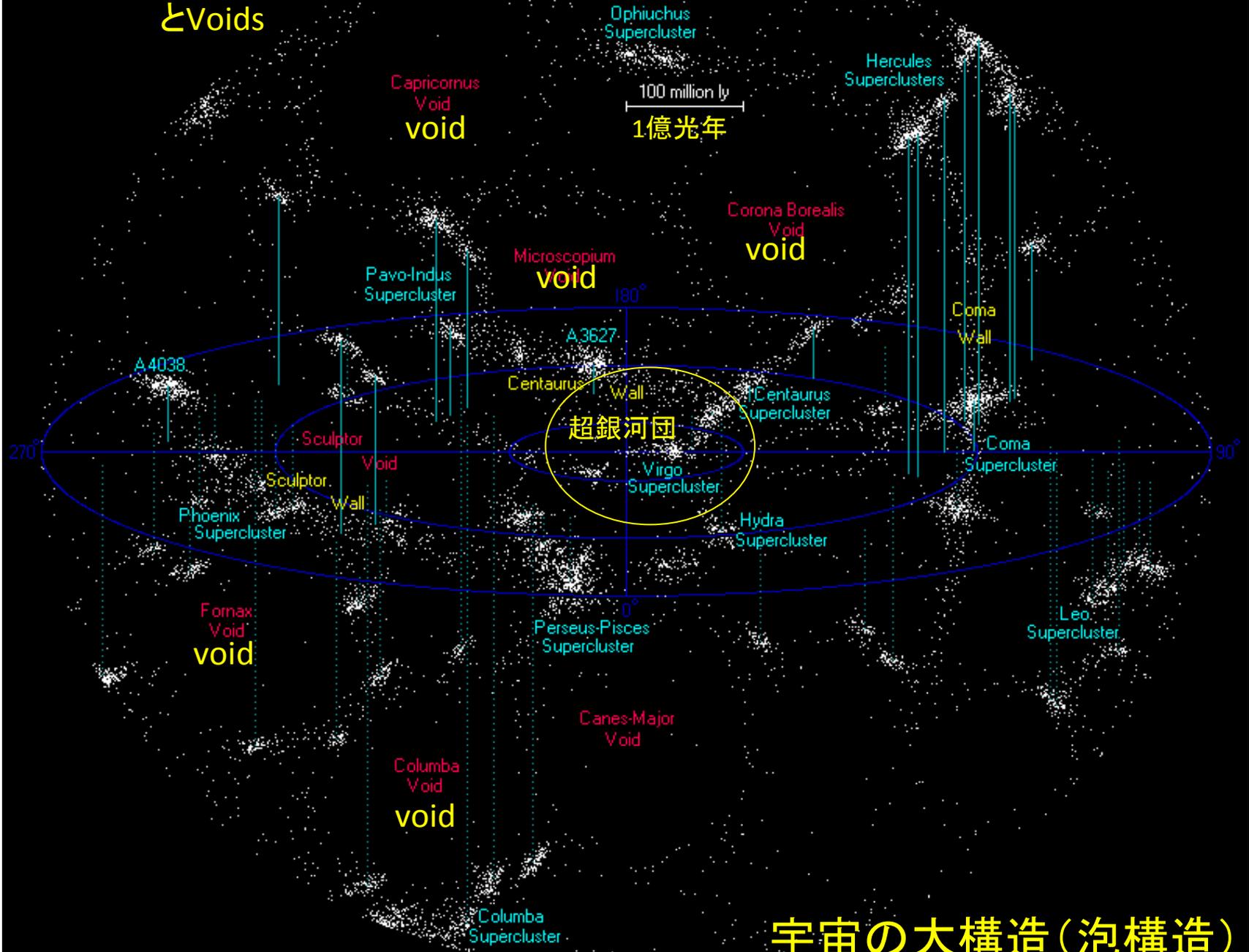
# Local (Virgo) Super Cluster (超銀河団)内の銀河群(group)と銀河団(cluster) (乙女座)



Virgo 銀河団  
(乙女座)

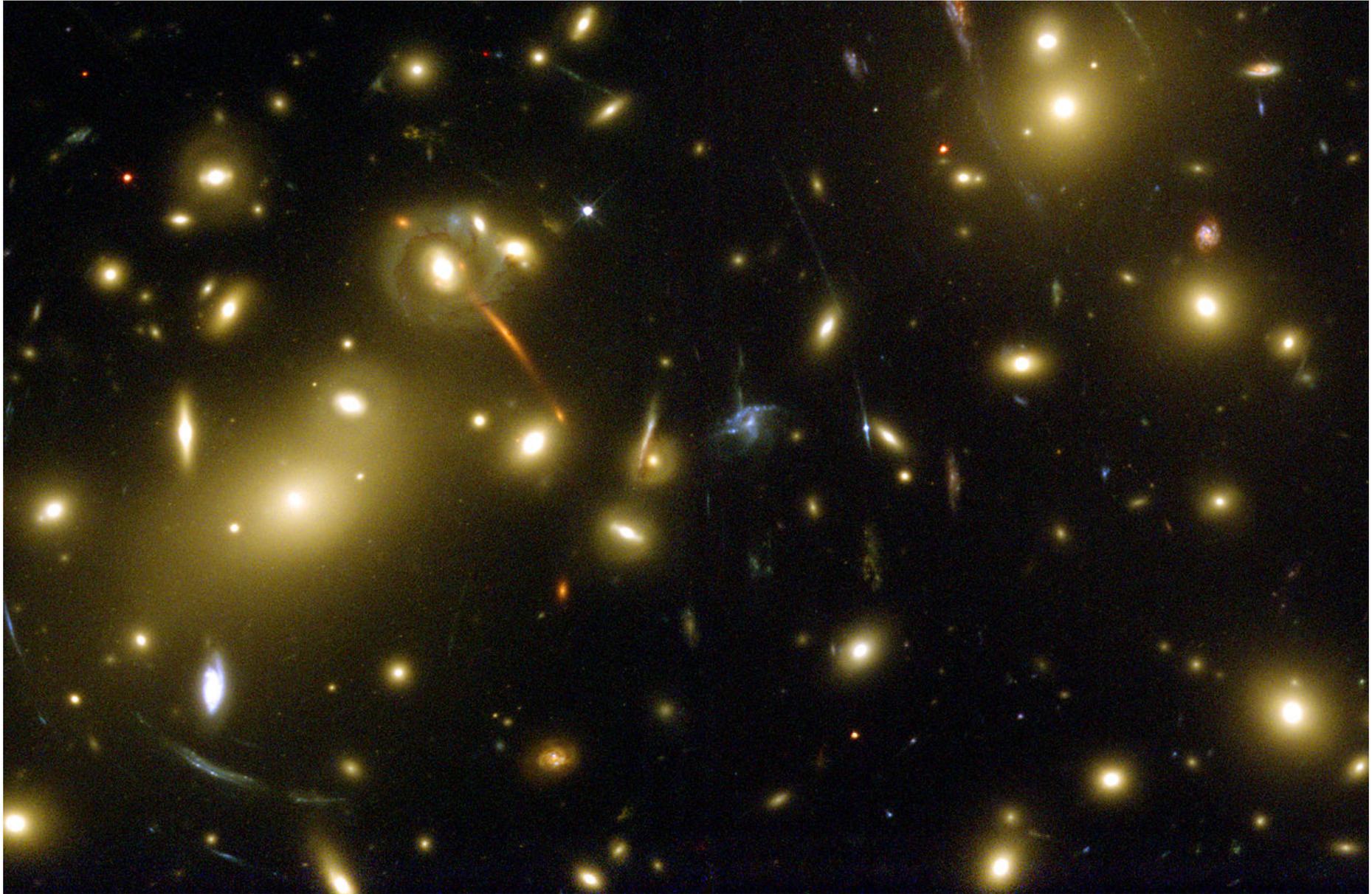


# 近傍の超銀河団(super clusters) とVoids

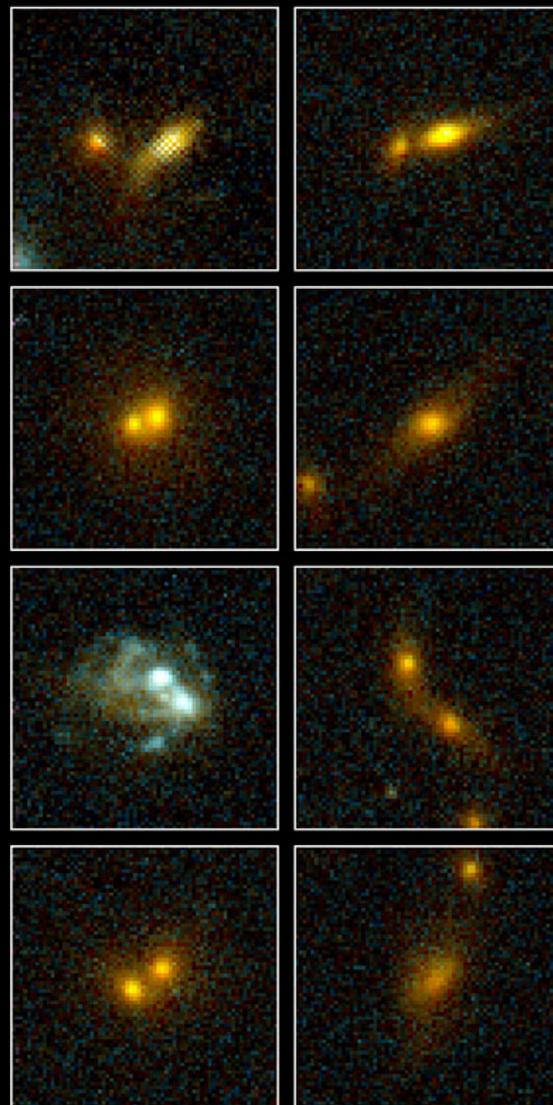
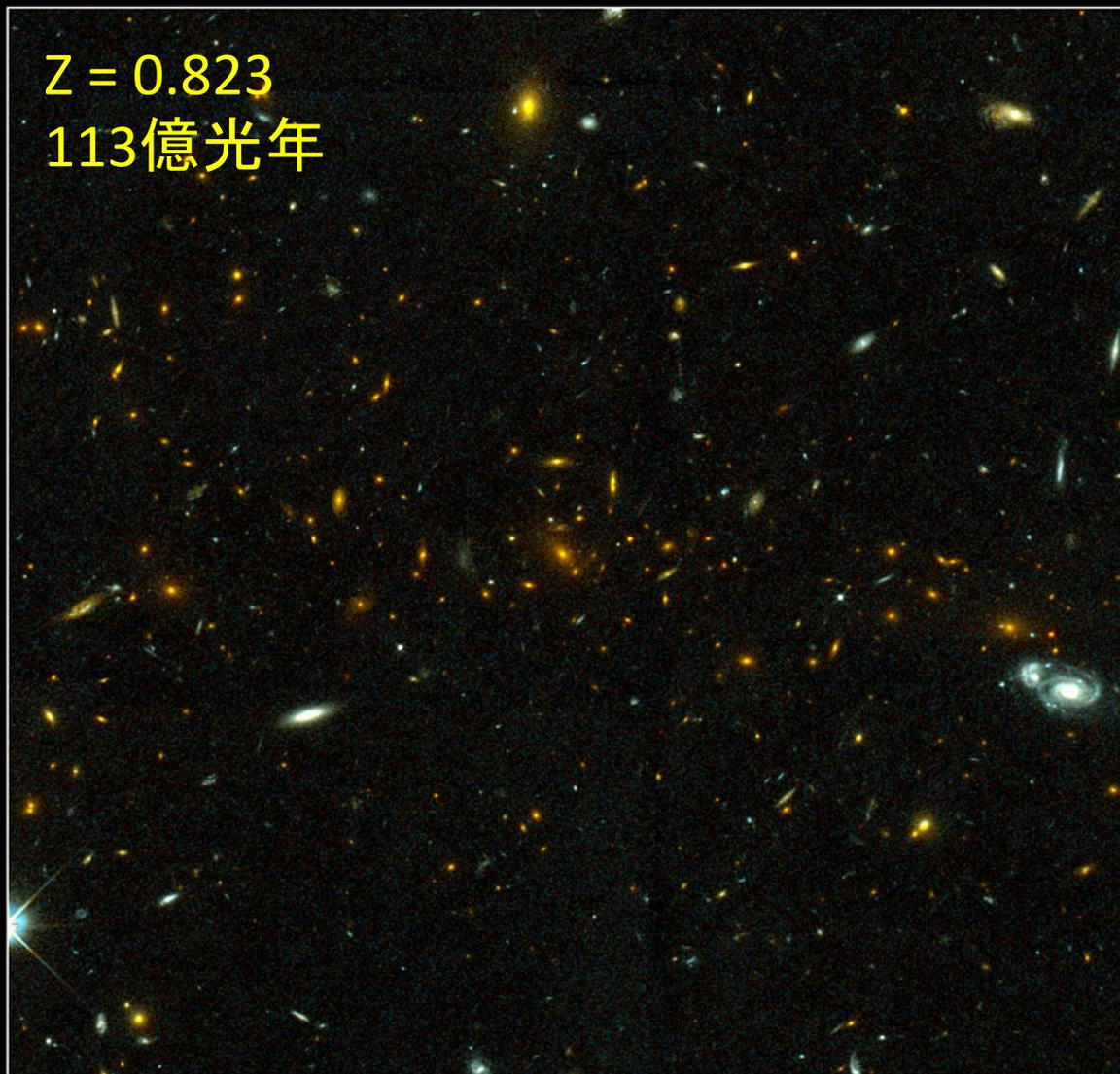


宇宙の大構造(泡構造)

20億光年遠方の銀河団 Abell 2218;  $Z = 0.18$



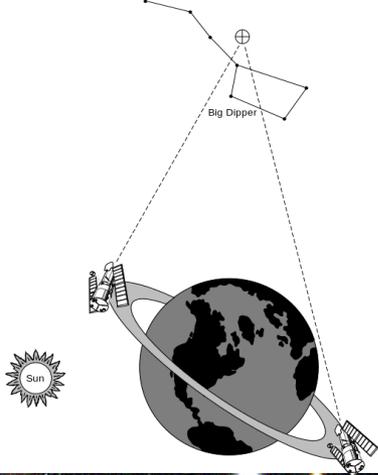
$Z = 0.823$   
113億光年



## Galaxy Cluster MS1054-03

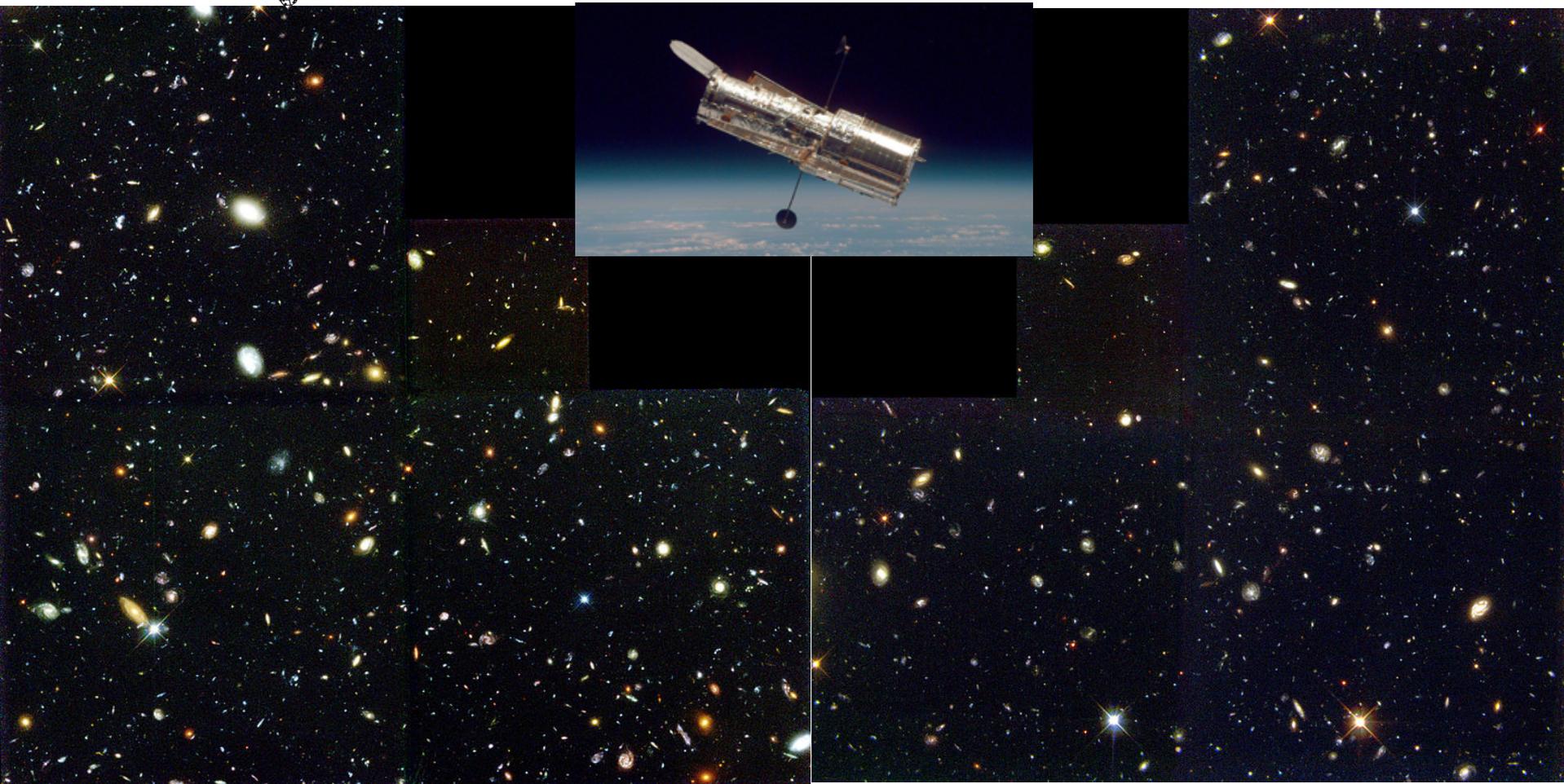
Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

# Hubble Deep Fields

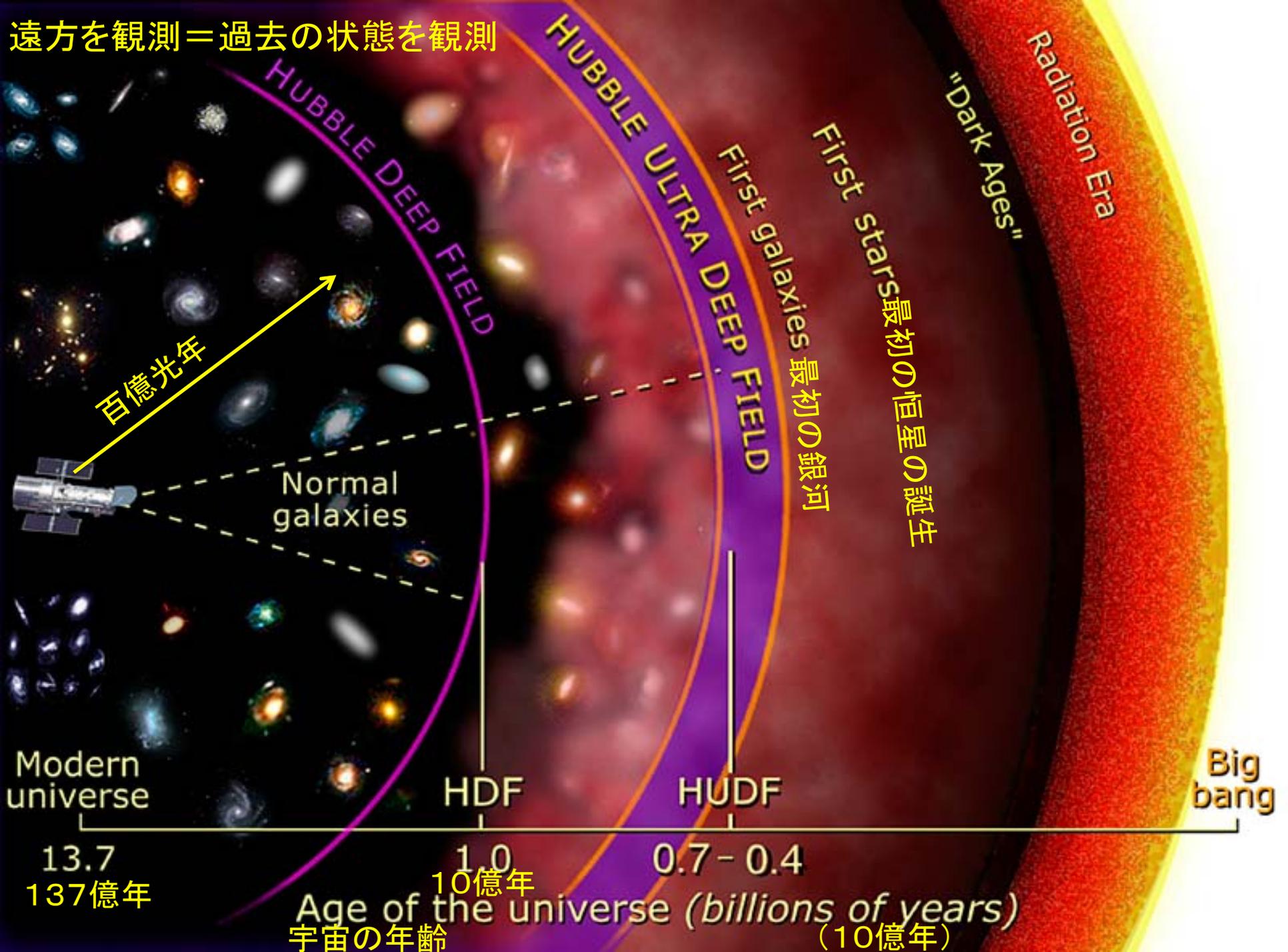


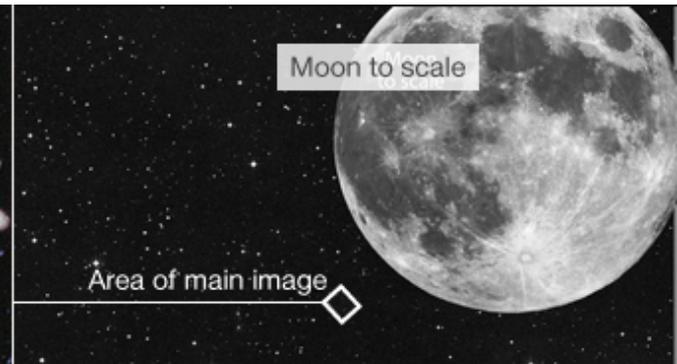
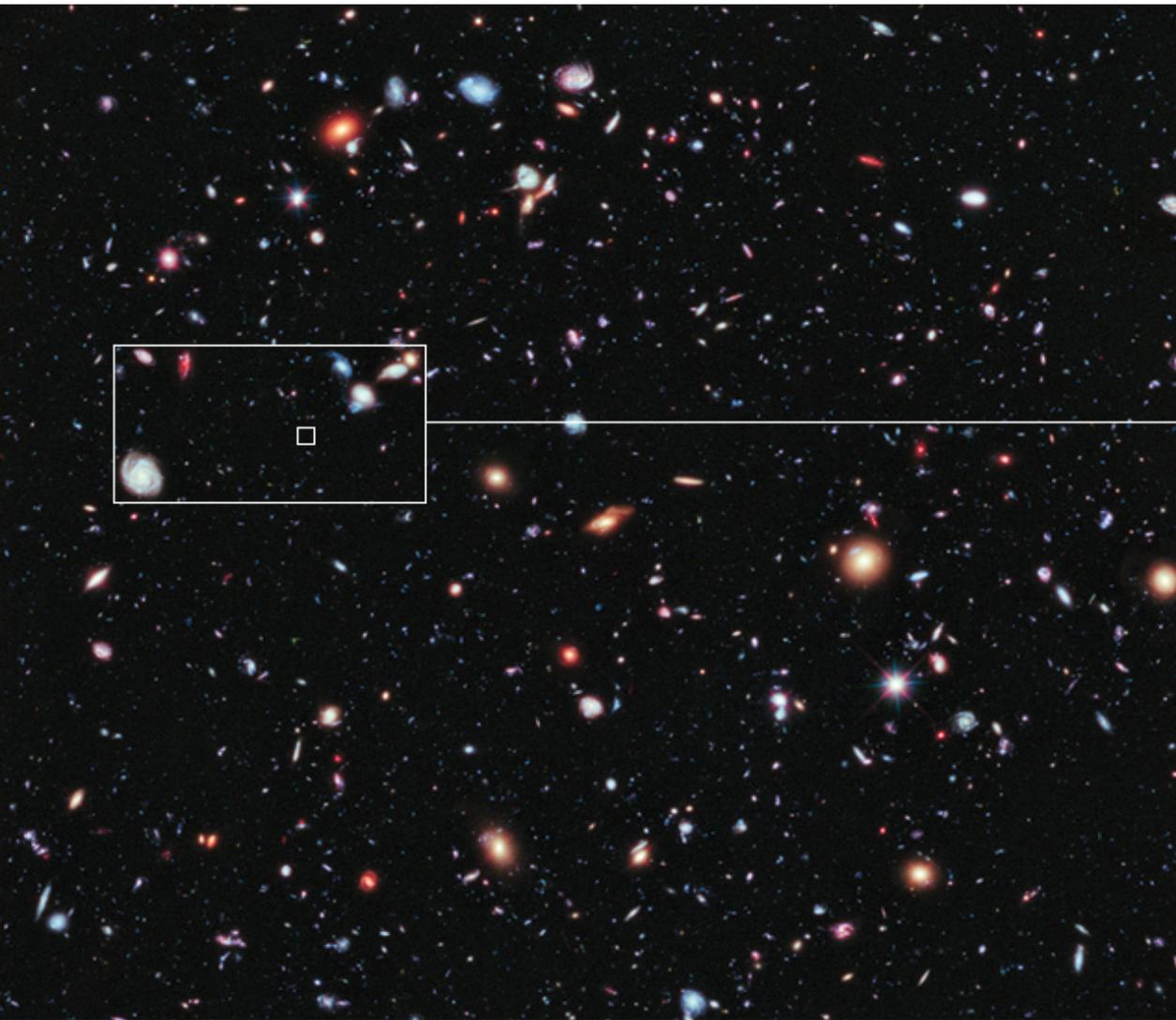
North Field

South Field



遠方を観測＝過去の状態を観測





Moon to scale

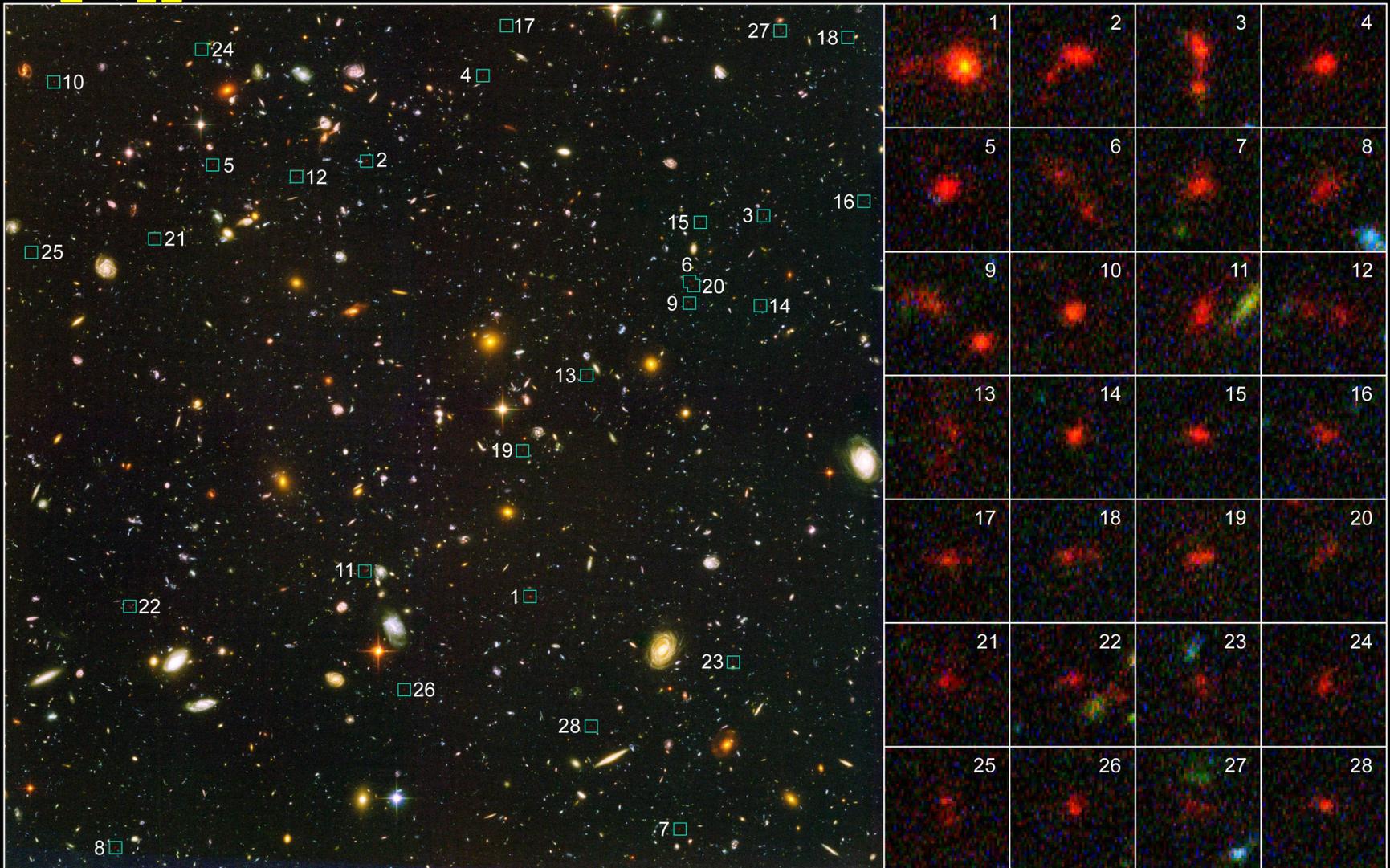
Area of main image



UDFJ-39546284  
Most distant galaxy

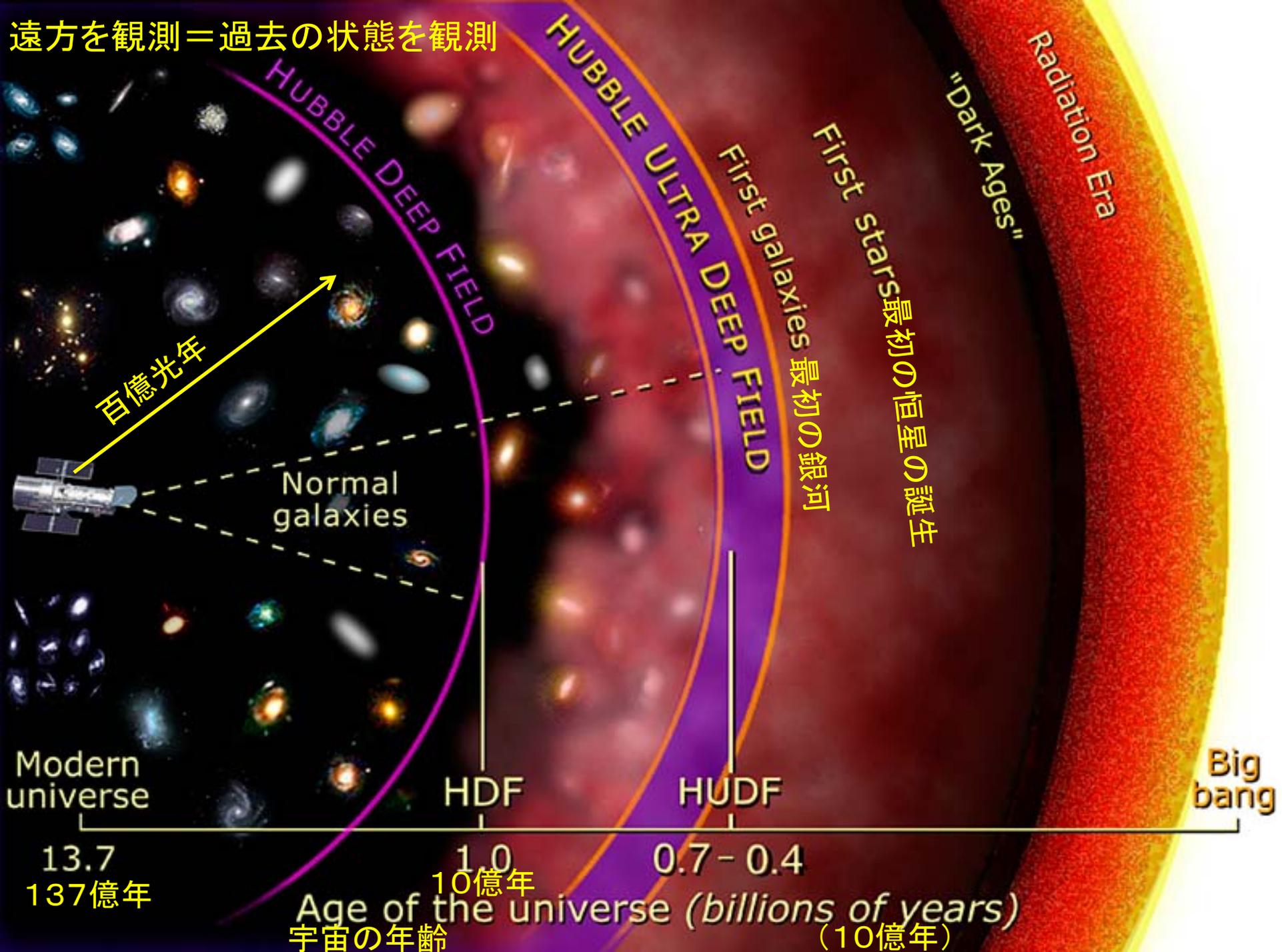
**5,000** galaxies  
**2,000** separate exposures  
**500 hours**  
Total exposure time

$Z < 12$



**Distant Galaxies in the Hubble Ultra Deep Field**  
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

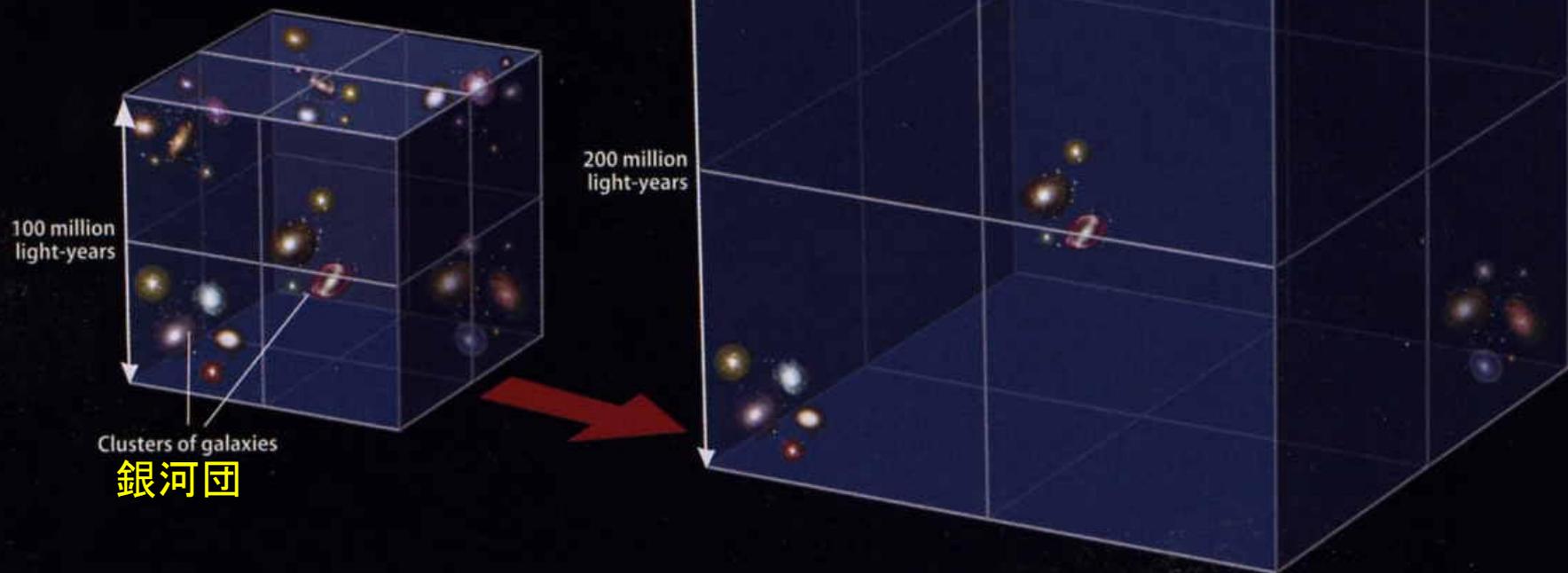
遠方を観測＝過去の状態を観測



# 宇宙の膨張 = ハッブルの法則

## Cosmic expansion

$$\text{銀河の後退速度} = H_0 \times (\text{距離})$$



1億年で 0.73 % 宇宙が膨張する

100 % 膨張するのにかかる時間は  $100/(0.73)$  億年 = 137 億年

宇宙の年齢！

ハッブルの法則 —— 宇宙は膨張している

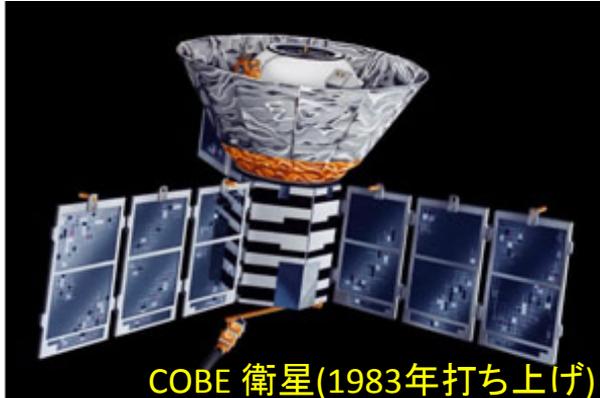
—— 宇宙には始まりがあった？

—— 定常宇宙（定常的に空間が創生）？

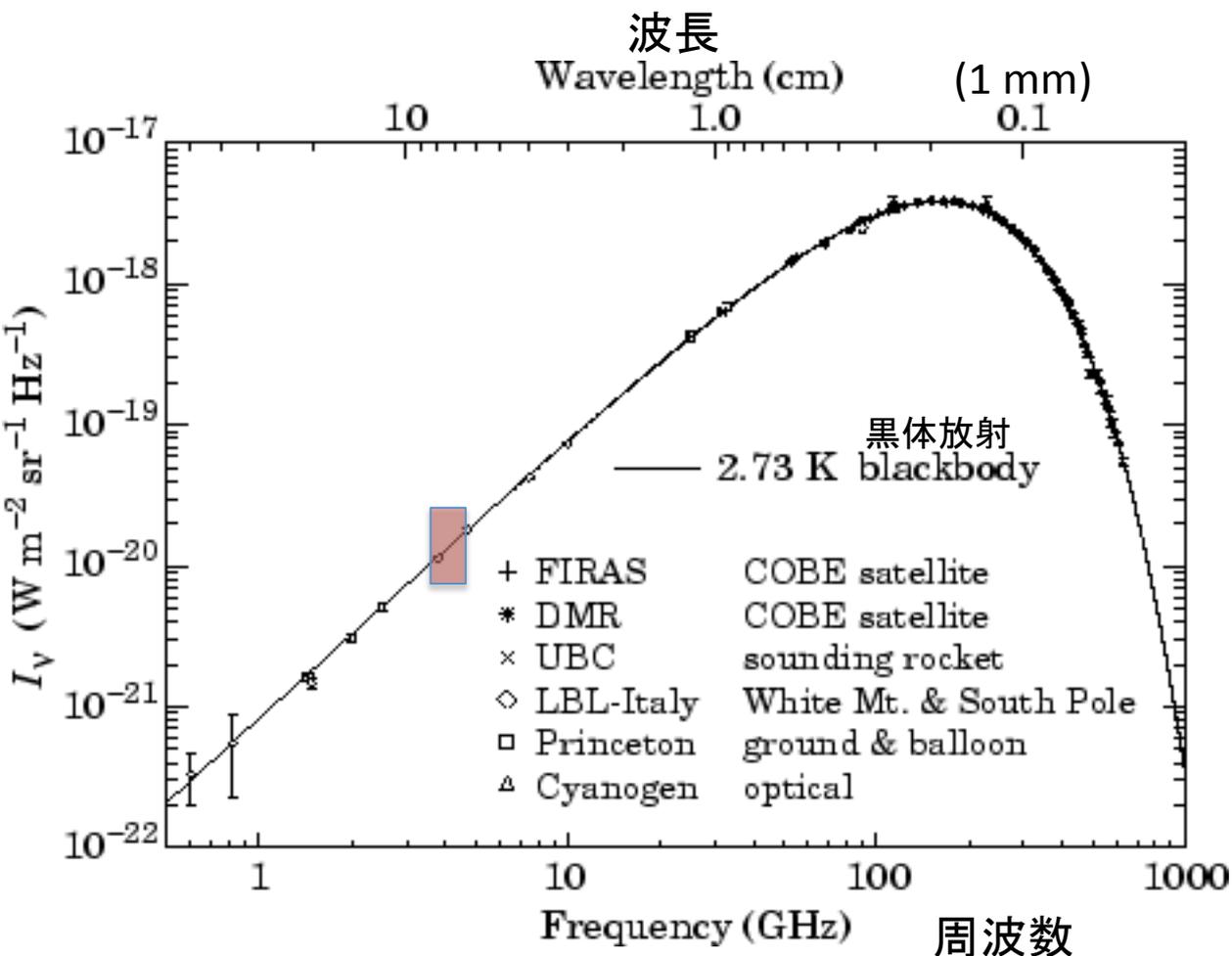
宇宙の始まりは 高温だった？

# 宇宙の始まりを物語る宇宙背景放射

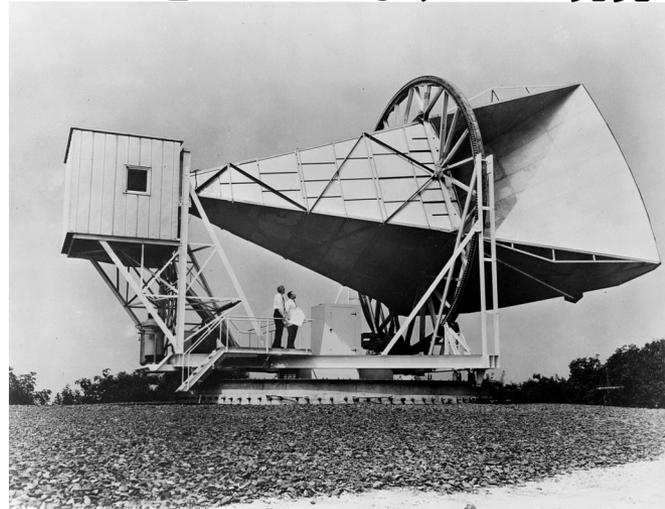
## — 絶対温度2.73 Kの黒体放射

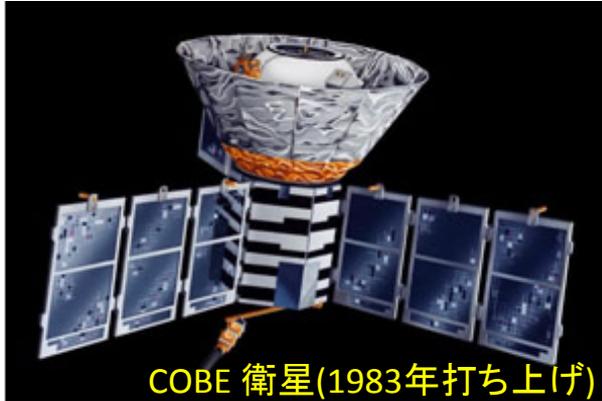


COBE 衛星(1983年打ち上げ)



Penzias と Wilson により1964に発見



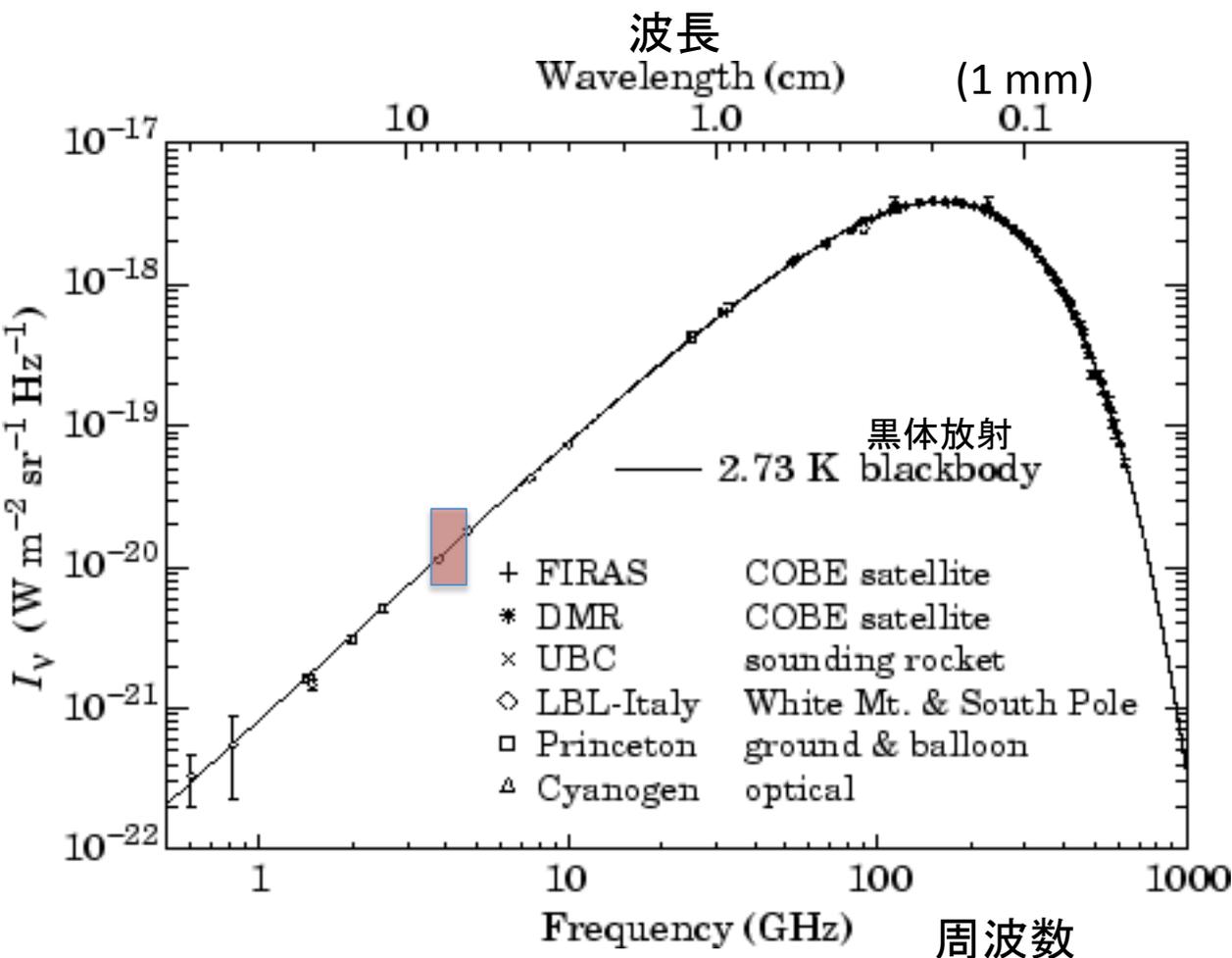


COBE 衛星(1983年打ち上げ)

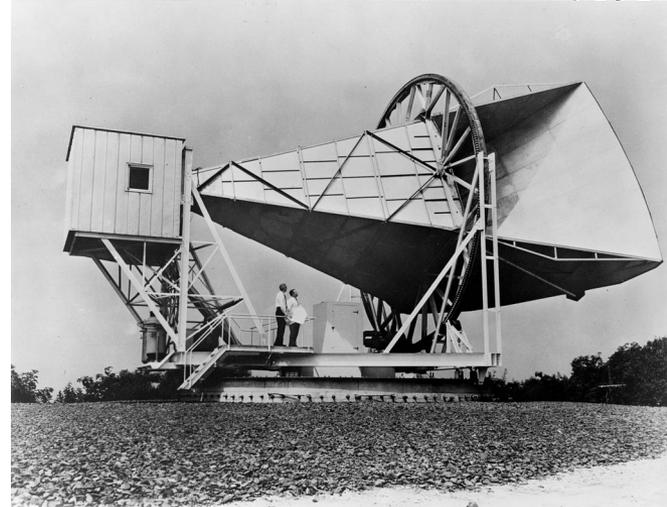
# 宇宙の始まりを物語る宇宙背景放射

## — 絶対温度2.73 K の黒体放射

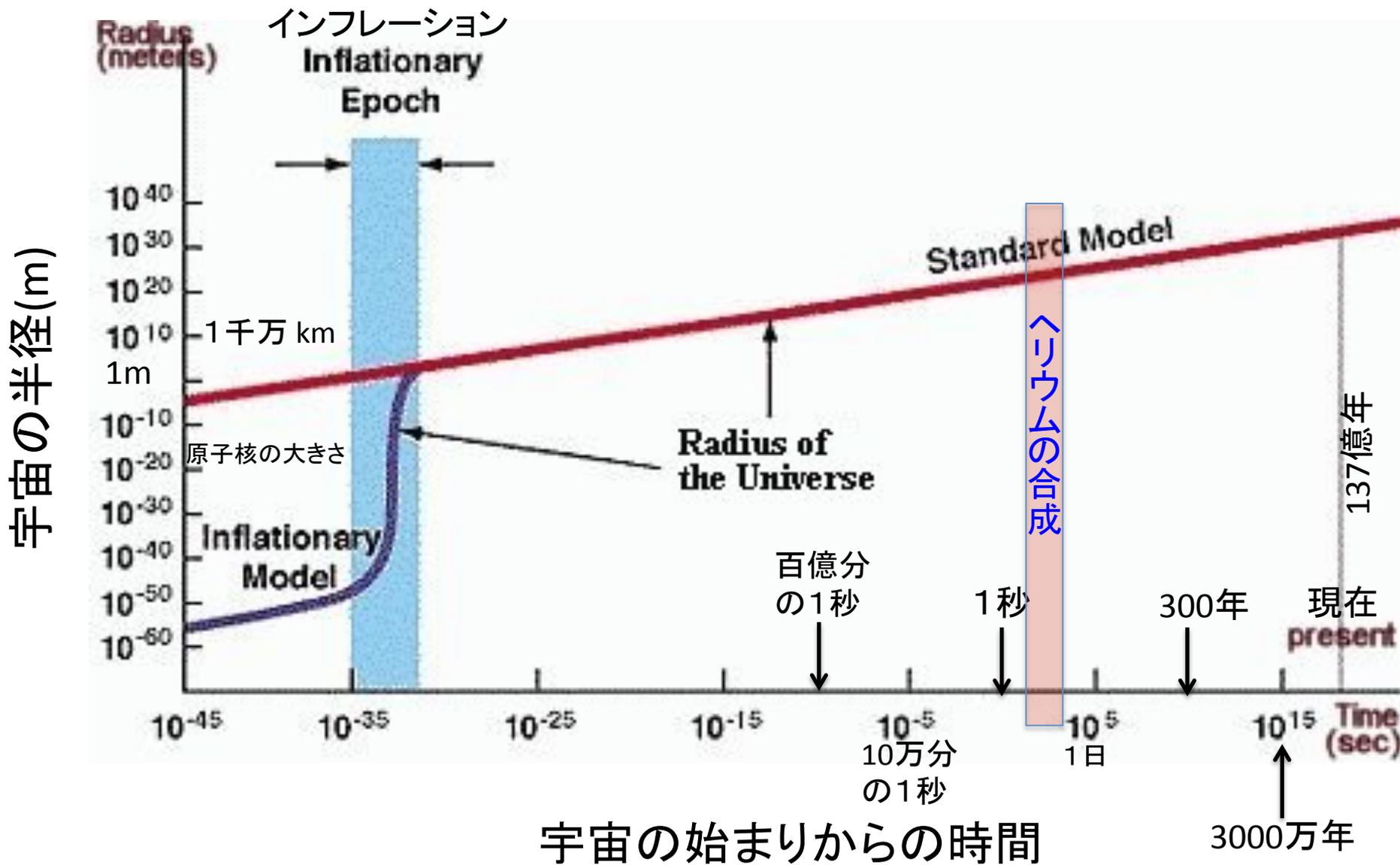
3000 K  $\xrightarrow{\text{宇宙膨張}}$  2.73 K



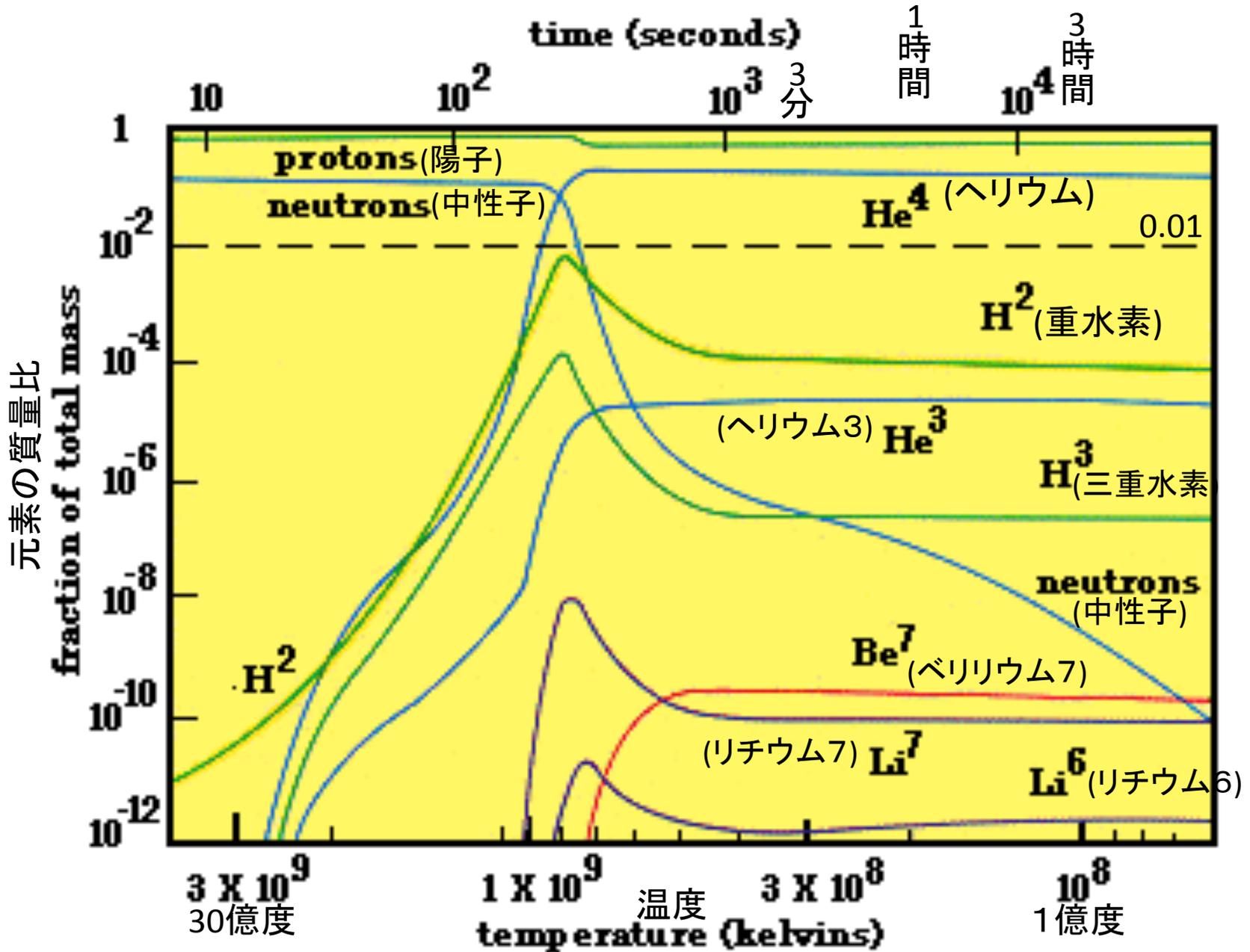
Penzias と Wilson により1964に発見



# 宇宙の膨張

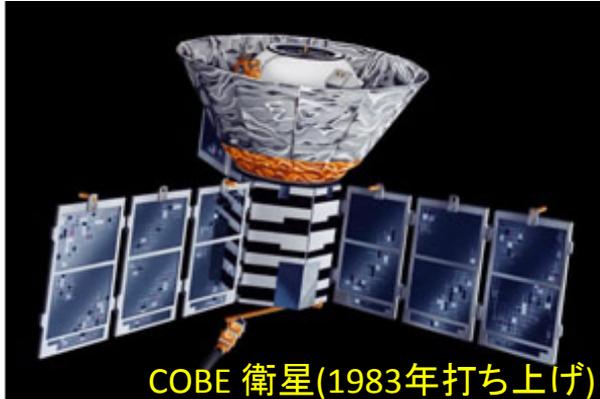


# 宇宙が始まって最初の数分に合成される原子

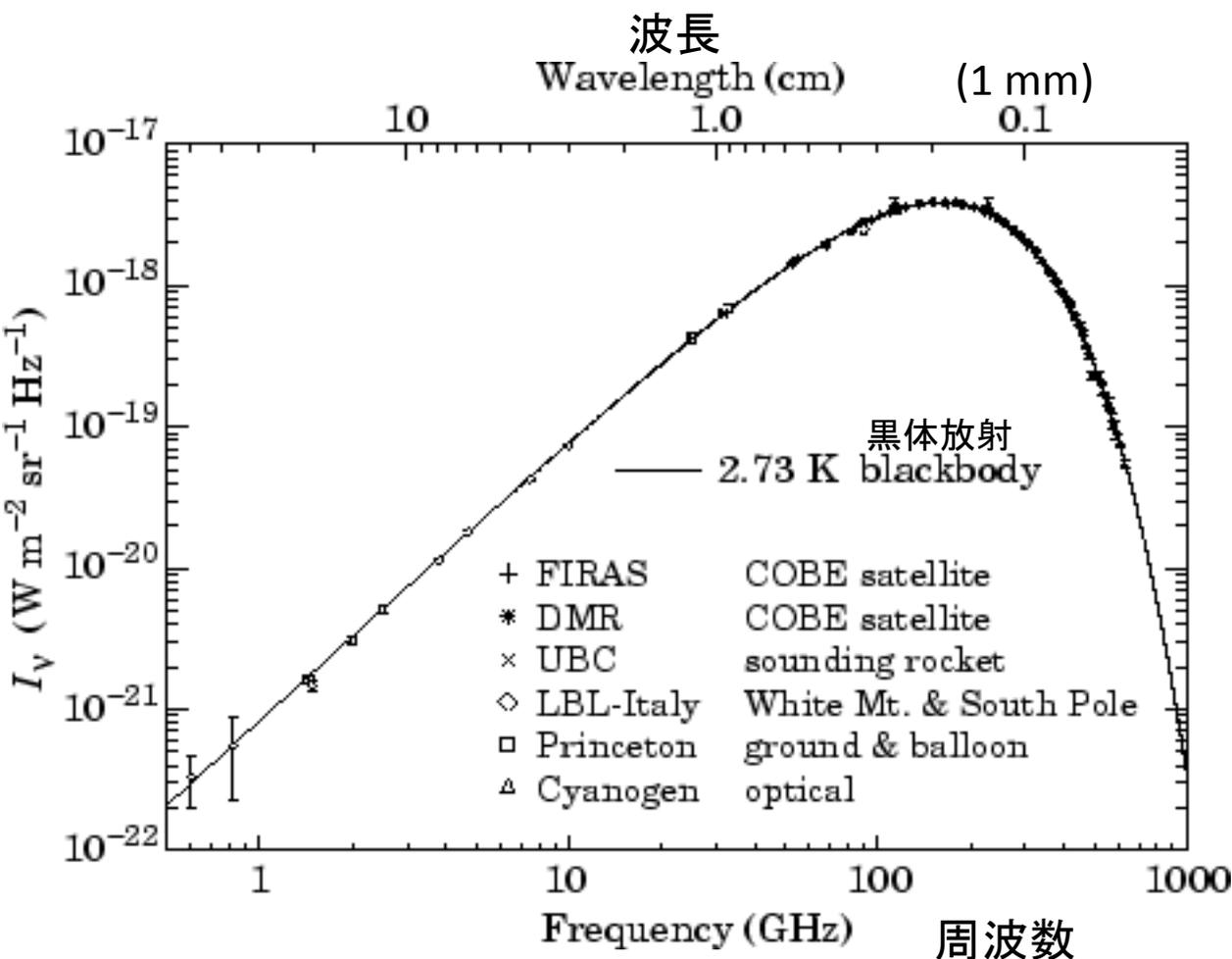


# 宇宙の始まりを物語る宇宙背景放射

## — 絶対温度2.73 Kの黒体放射



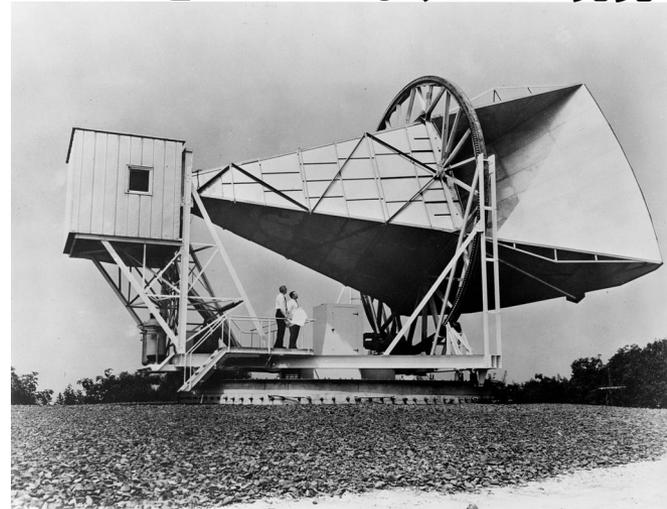
COBE 衛星(1983年打ち上げ)



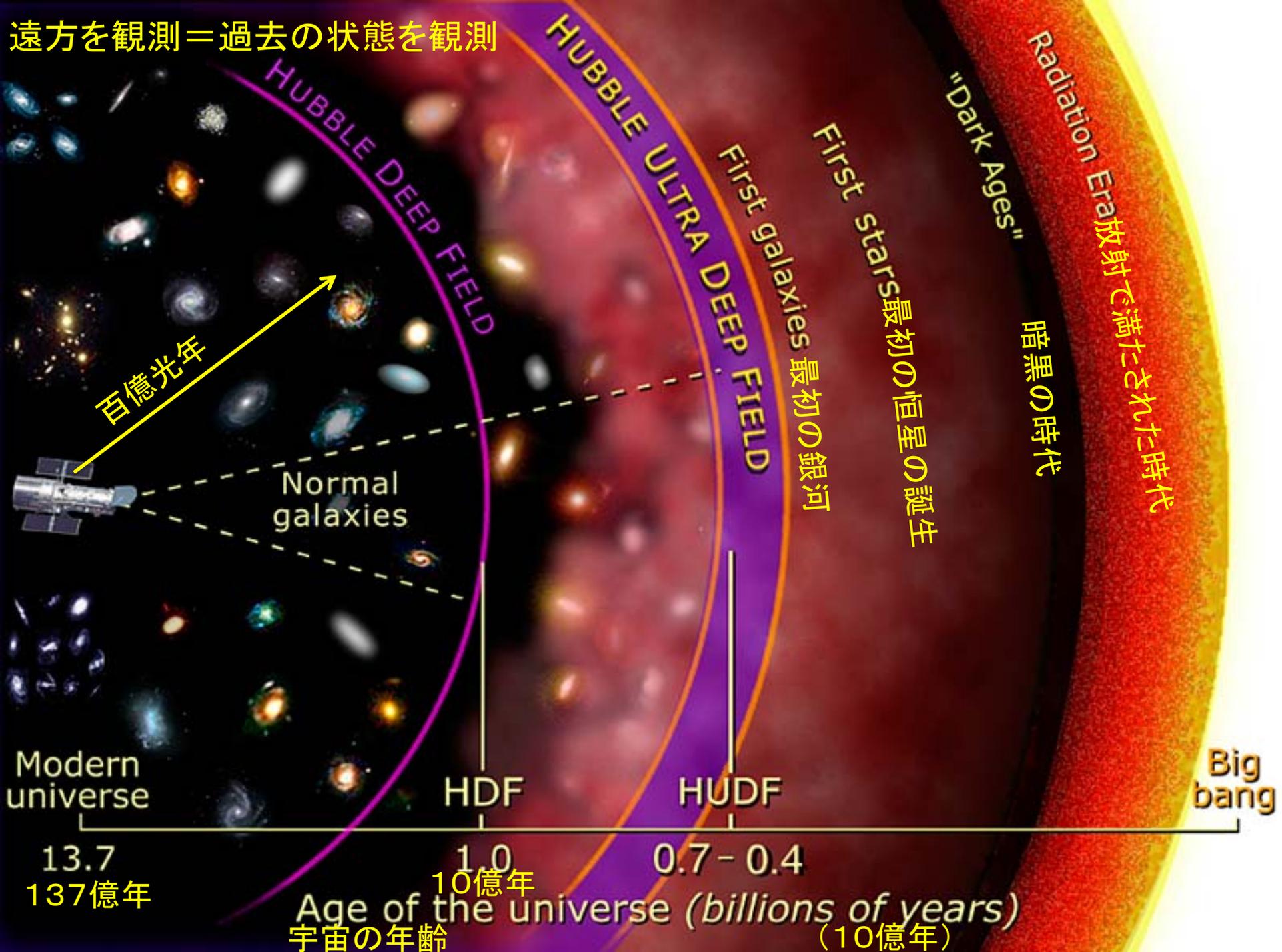
3000 K  $\xrightarrow{\text{宇宙膨張}}$  2.73 K

陽子 + 電子  $\rightarrow$  中性水素  
宇宙が透明に (38万年後)

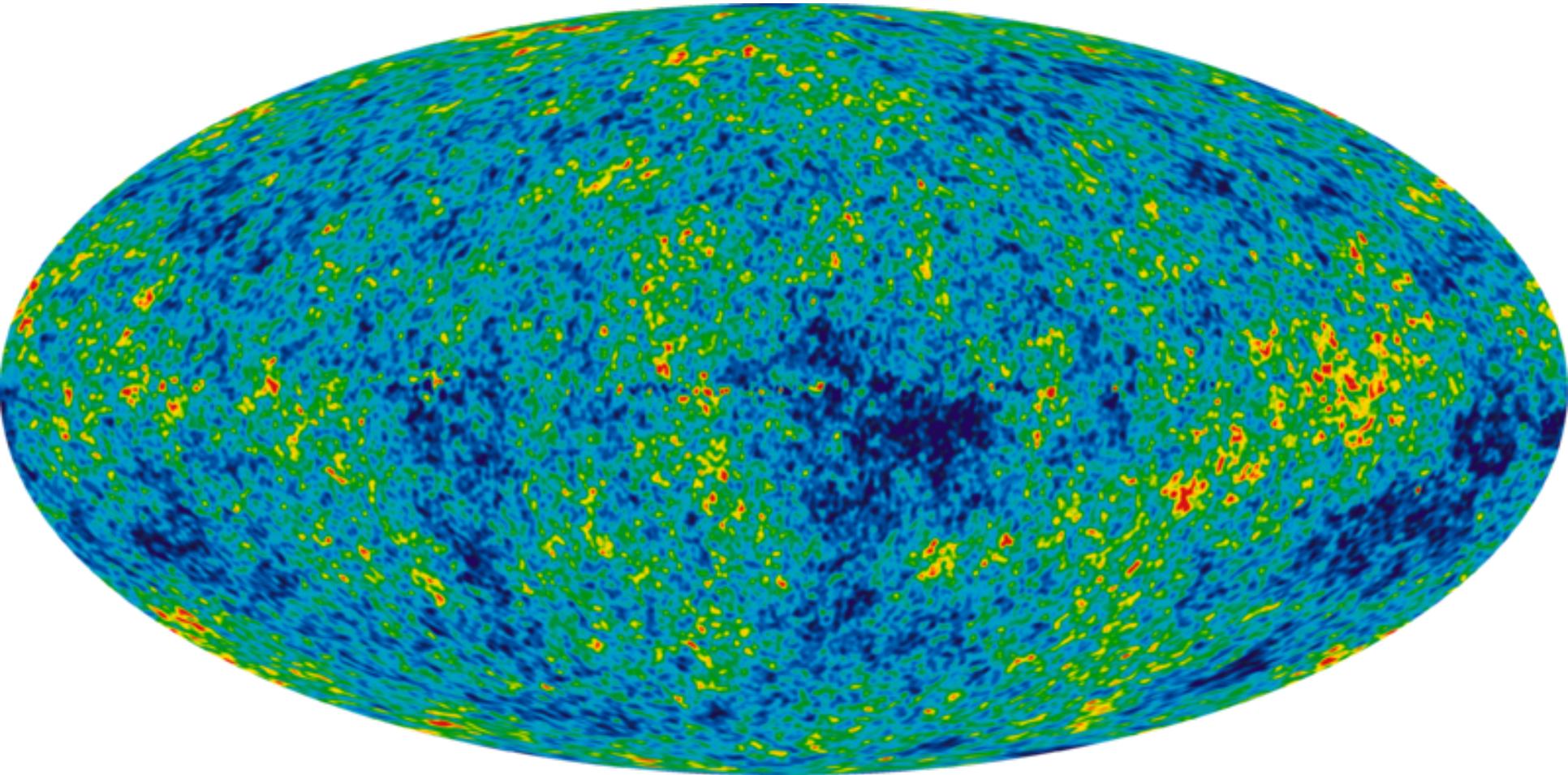
Penzias と Wilson により1964に発見



遠方を観測＝過去の状態を観測

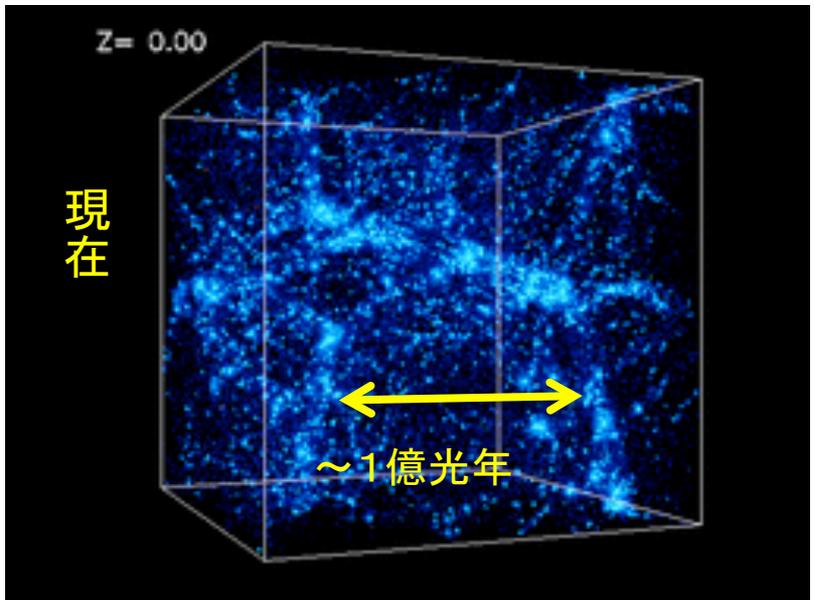
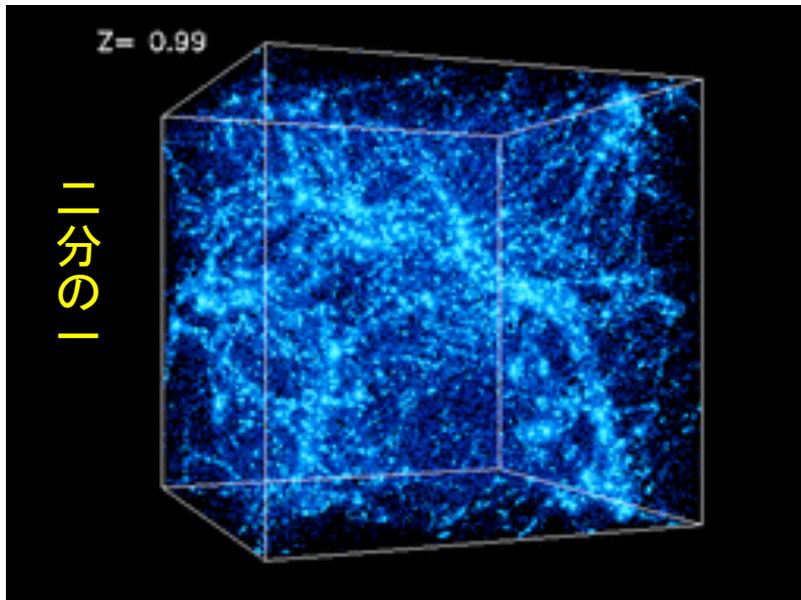
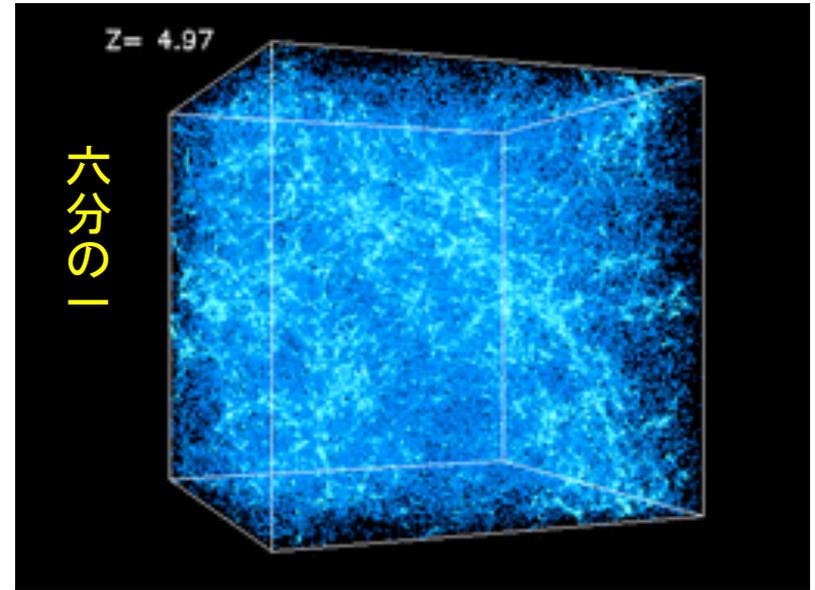
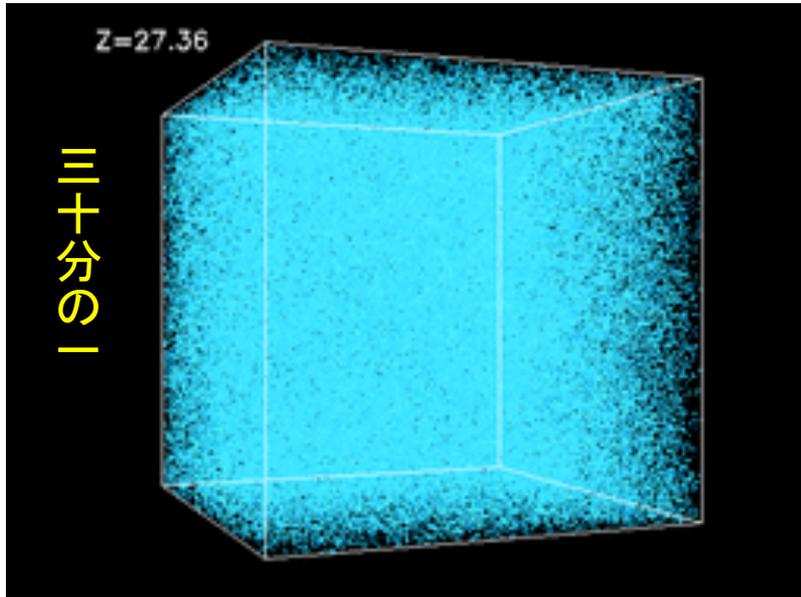


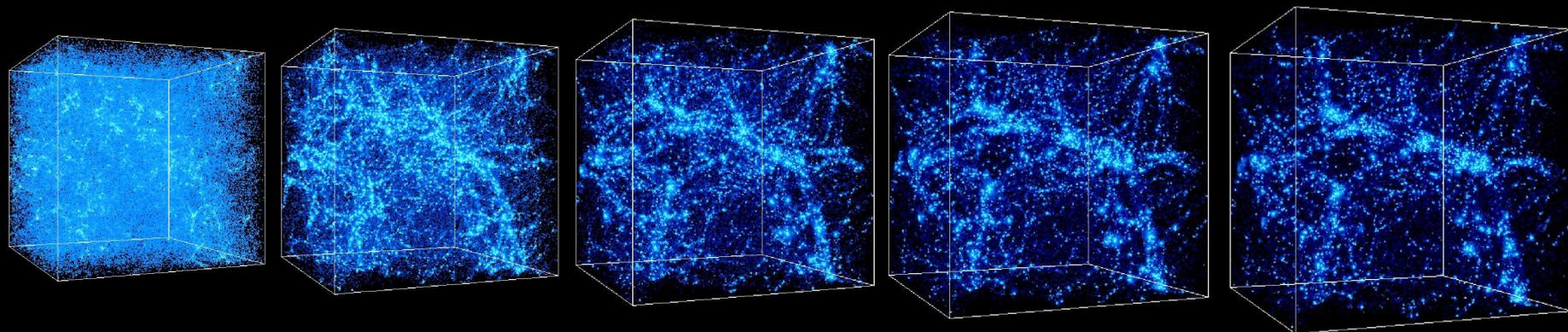
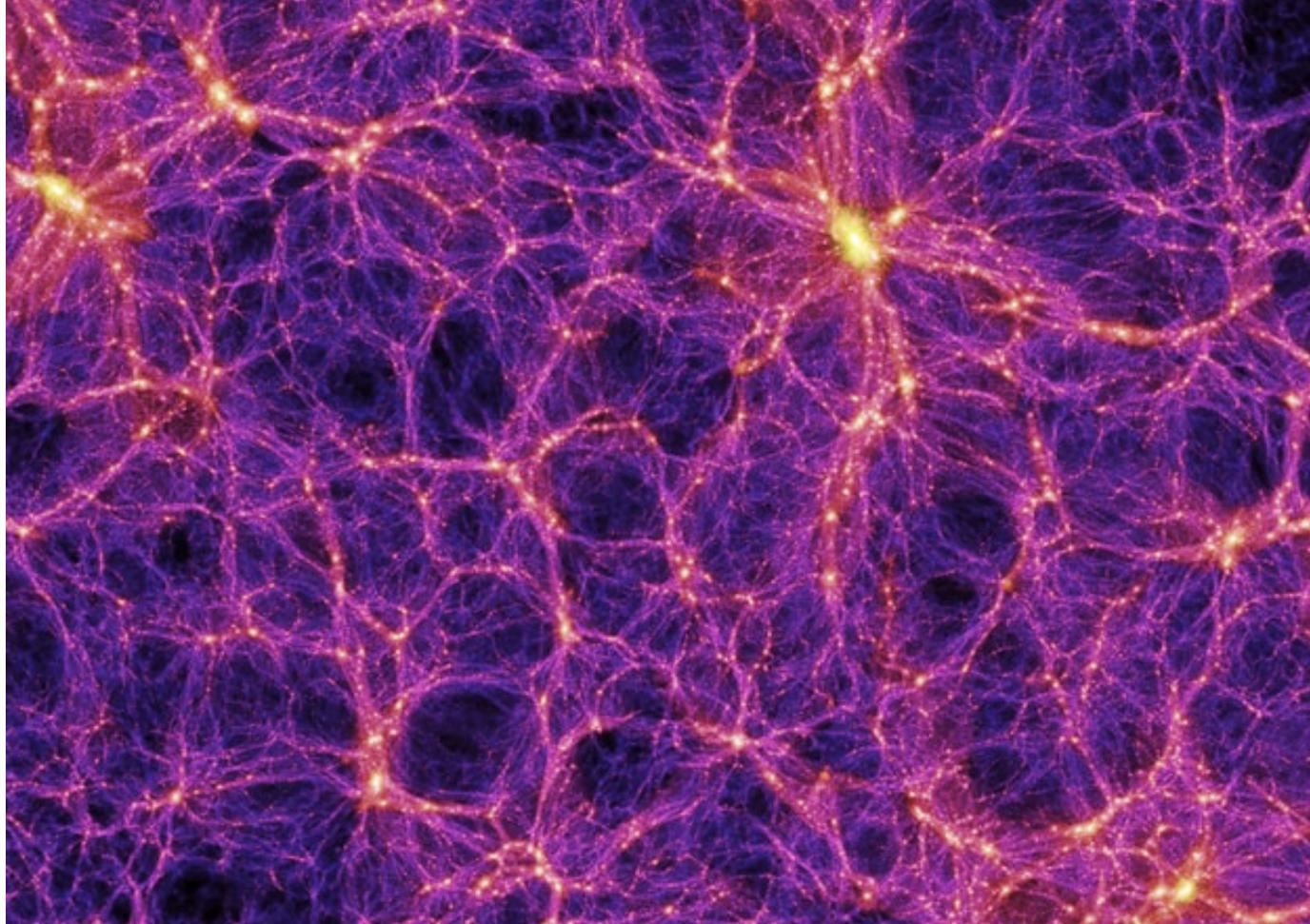
WMAP衛星の9年間の観測で得られた  
宇宙背景放射の温度の揺らぎの分布



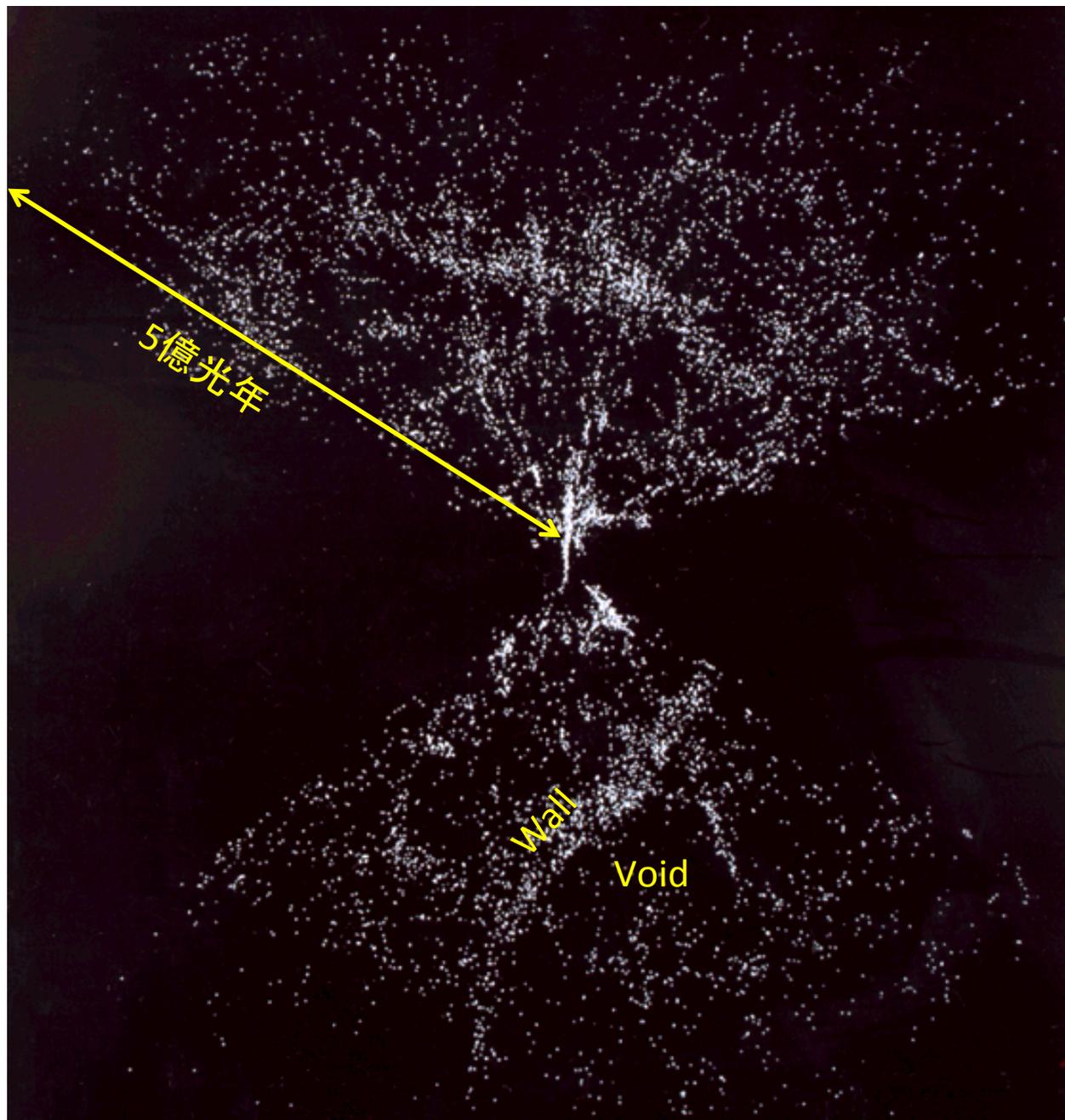
0.001%の温度揺らぎ → 同程度の密度揺らぎ

# 宇宙誕生初期の密度揺らぎが重力によって成長し 銀河、銀河団、宇宙の大構造が形成される

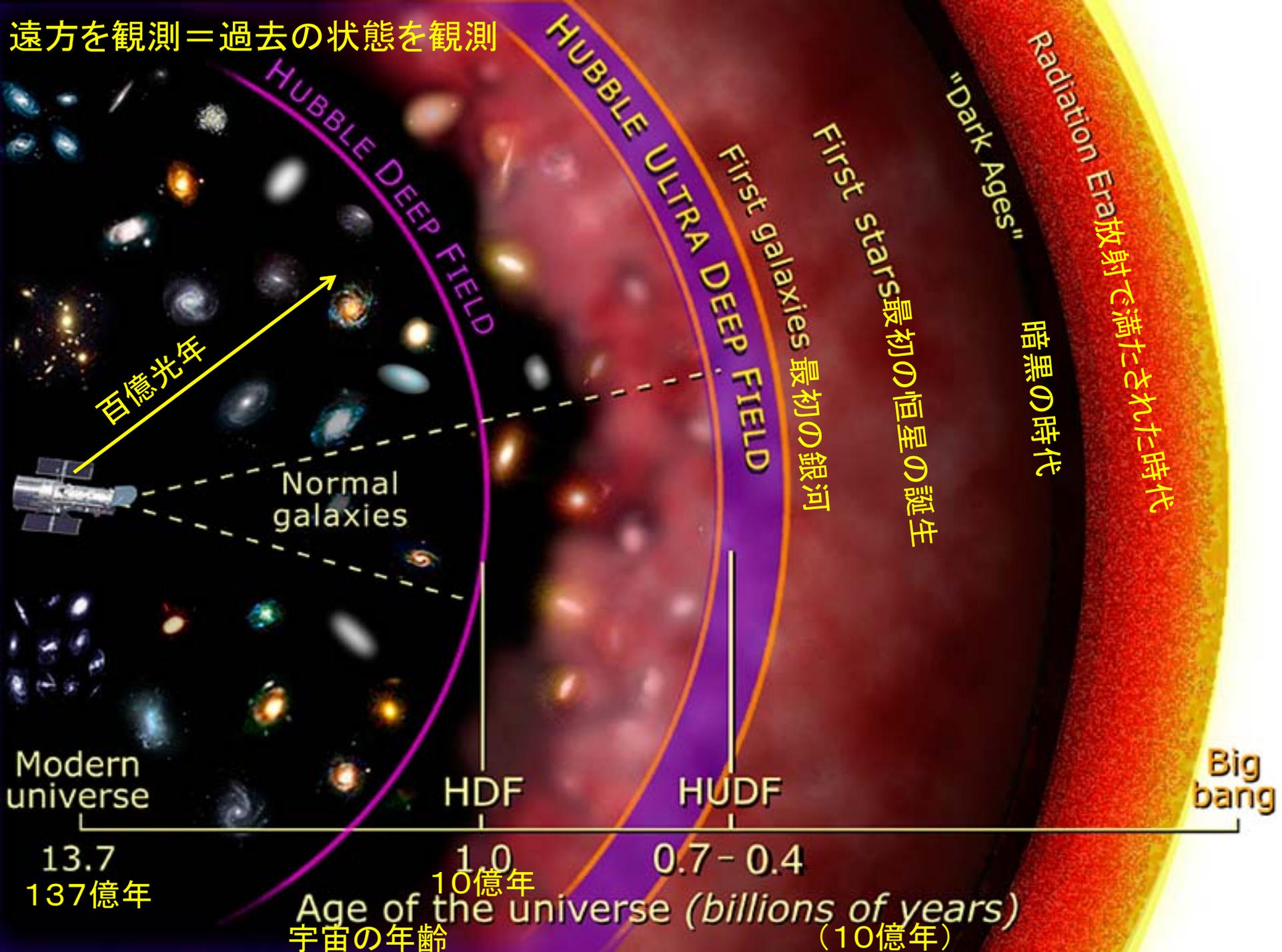




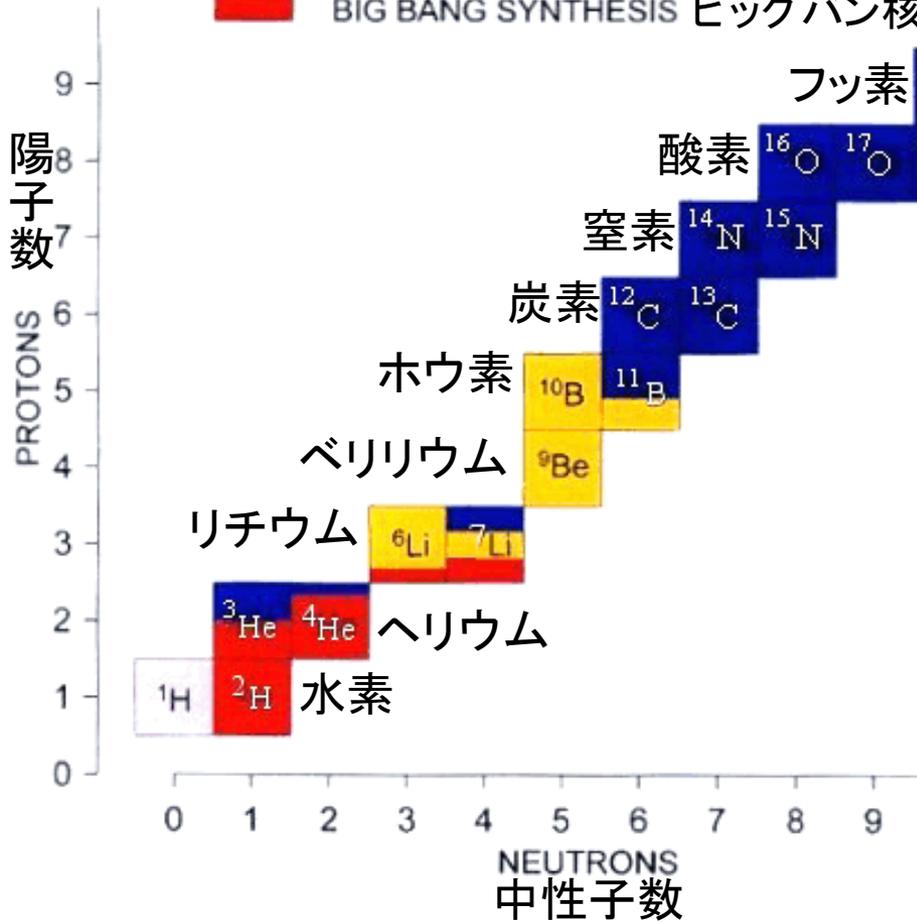
観測された5億光年先までの銀河の分布(各白い点が個々の銀河)



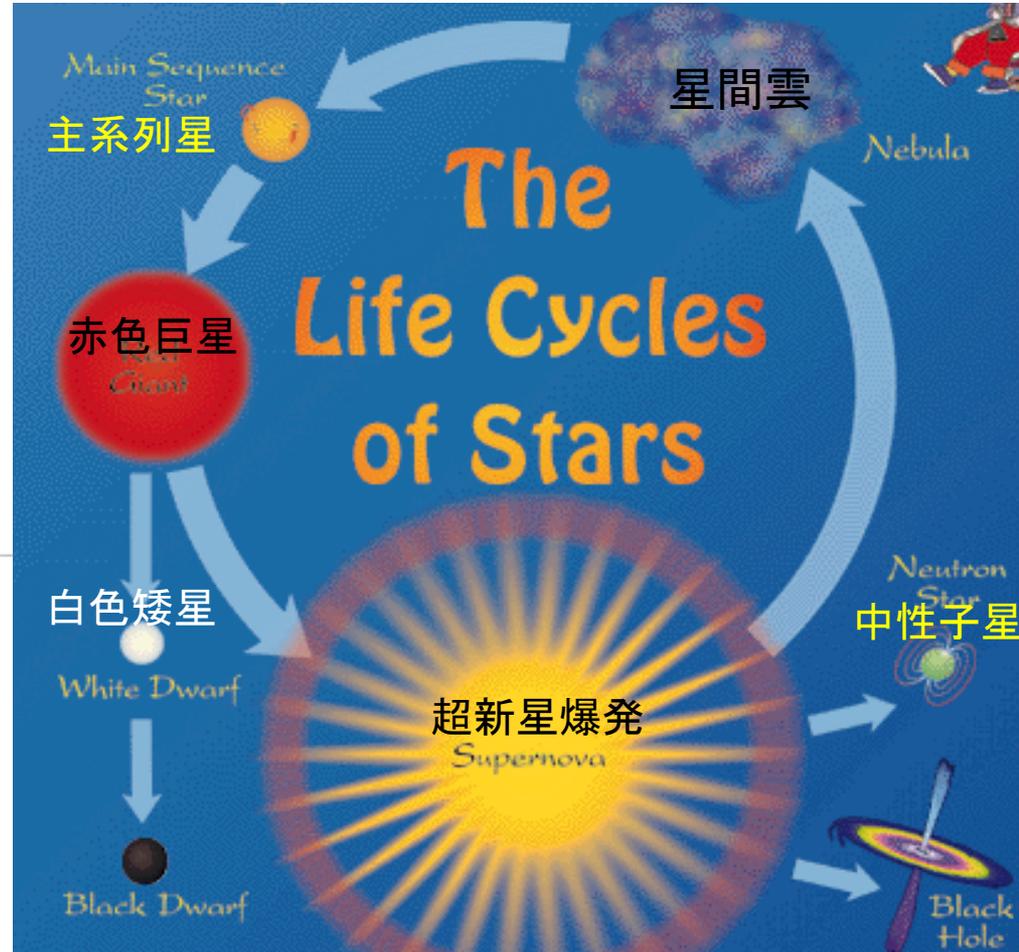
遠方を観測＝過去の状態を観測



- SYNTHESIS IN STARS 恒星内部での核合成
- COSMIC RAY SPALLATION 宇宙線による原子核破碎反応
- BIG BANG SYNTHESIS ビッグバン核合成



恒星の誕生と死の繰り返しにより  
銀河の元素組成が変化してゆく



水素、重水素、ヘリウムの大部分、およびリチウムの一部は宇宙誕生直後の核合成でつくられ、炭素及びそれよりも重い原子核は恒星内部で合成される

# 宇宙の始まりから現在まで

