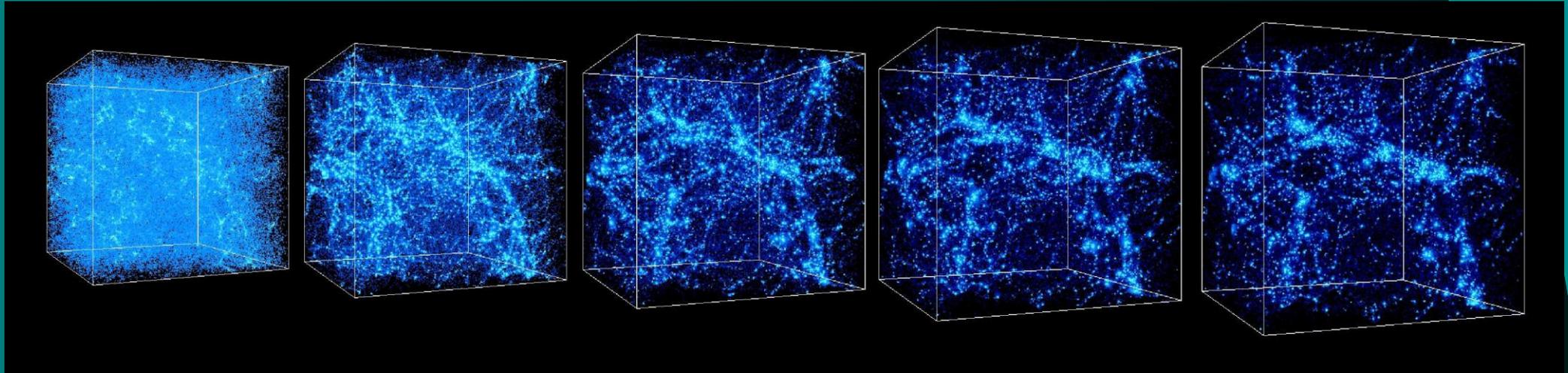
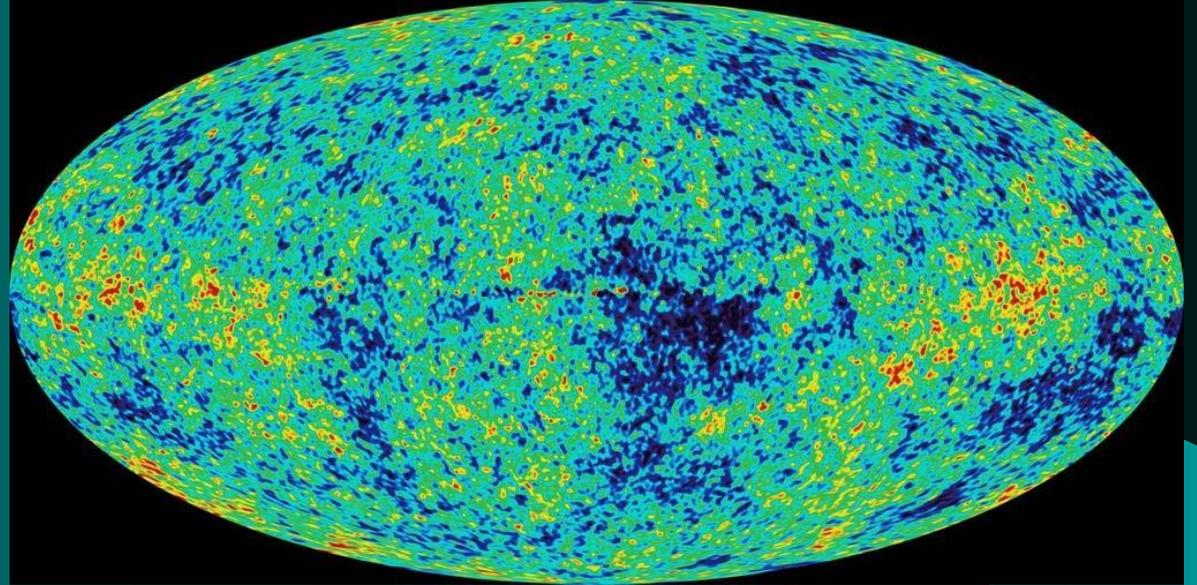
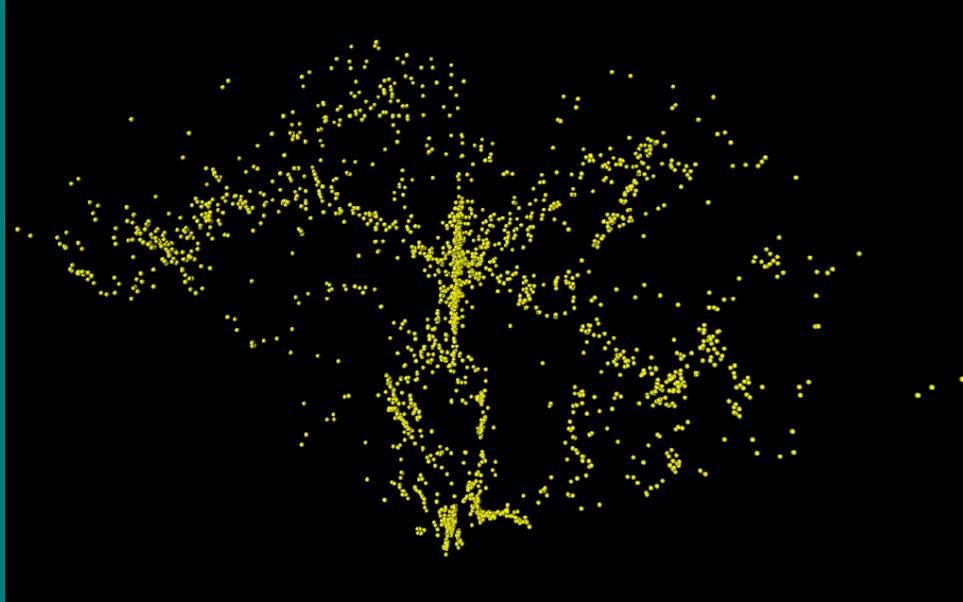


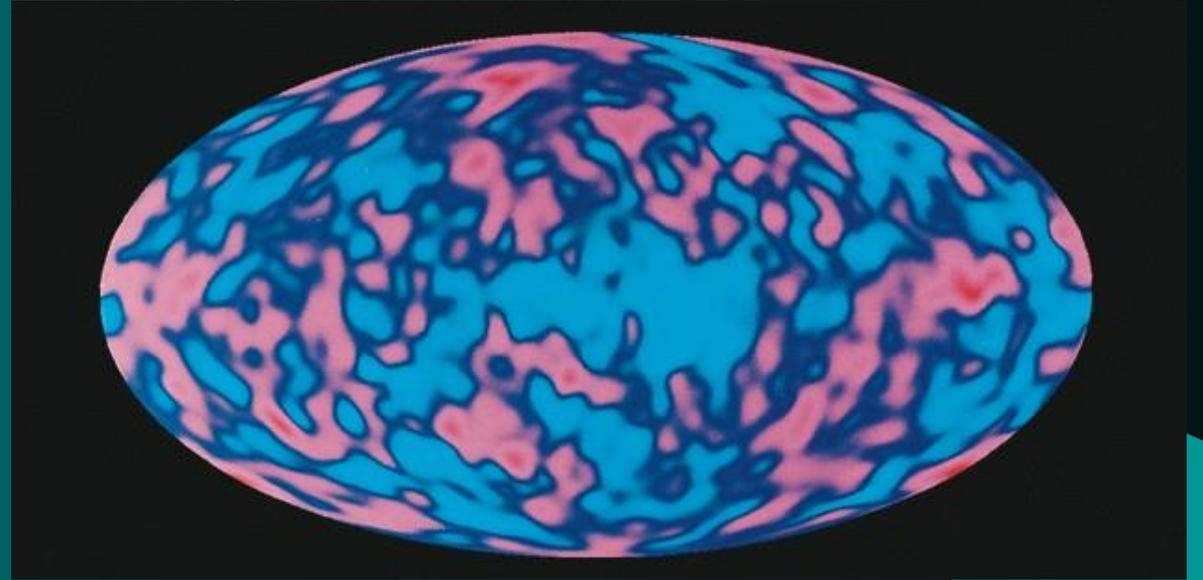
Cosmology 宇宙論



- 宇宙是什麼玩意兒？現在處於什麼狀態？
- 有起點嗎？有終點嗎？有邊界嗎？
「沒有」是多麼難以想像的事情
如果「有」，那更不可思議...起點之前、
邊界之外又是什麼？
- 如果宇宙就是「全部的東西」，那有別的宇宙嗎？這是什麼意思呀？

宇宙是個甚麼東西？

宇：上下四方（空間）
宙：古往今來（時間）



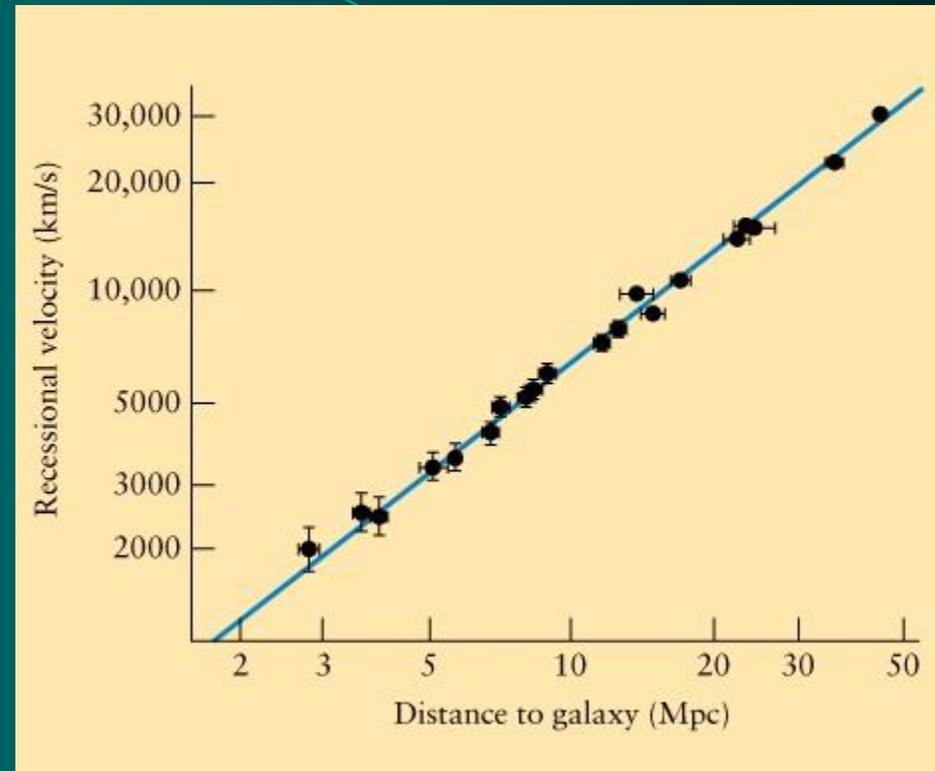
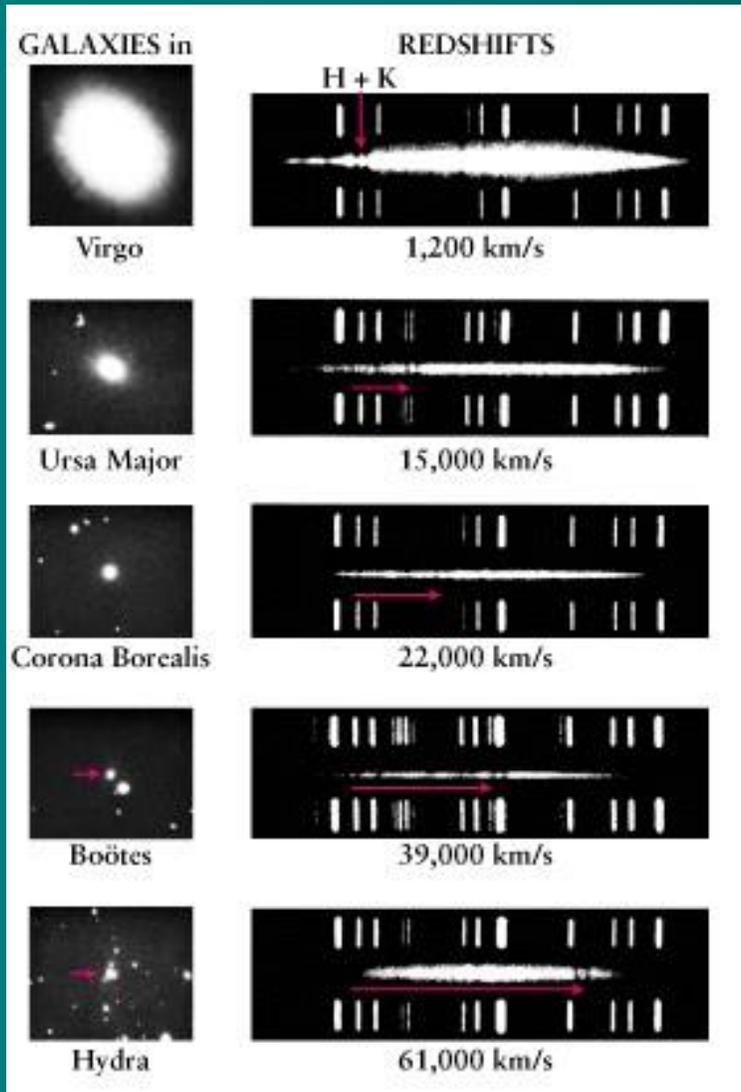
太古之初，混沌一片
而後 輕者上浮為天 重者下沉為地
而後 天地之間有了萬物
而後 — 很久、很久以後 — 有了萬物之靈

- 開車到高雄，共300公里，以時速100公里前進，需要____小時
- 距離越長，需要的時間越____
- 同樣的距離，要是時速越快，則所需的時間越____

- 把銅板往空中丟，丟的力量越大，銅板升到的高度越____，在空中停留的時間越____
- 銅板為什麼會掉回來？

or, why not?

哈柏定律描述宇宙現在處於膨脹狀態—— 越遠的星系，離我們遠去的速度越快



原來 這上下古今，有個起點！ → **Big Bang**

*A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY
AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE*

BY EDWIN HUBBLE

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

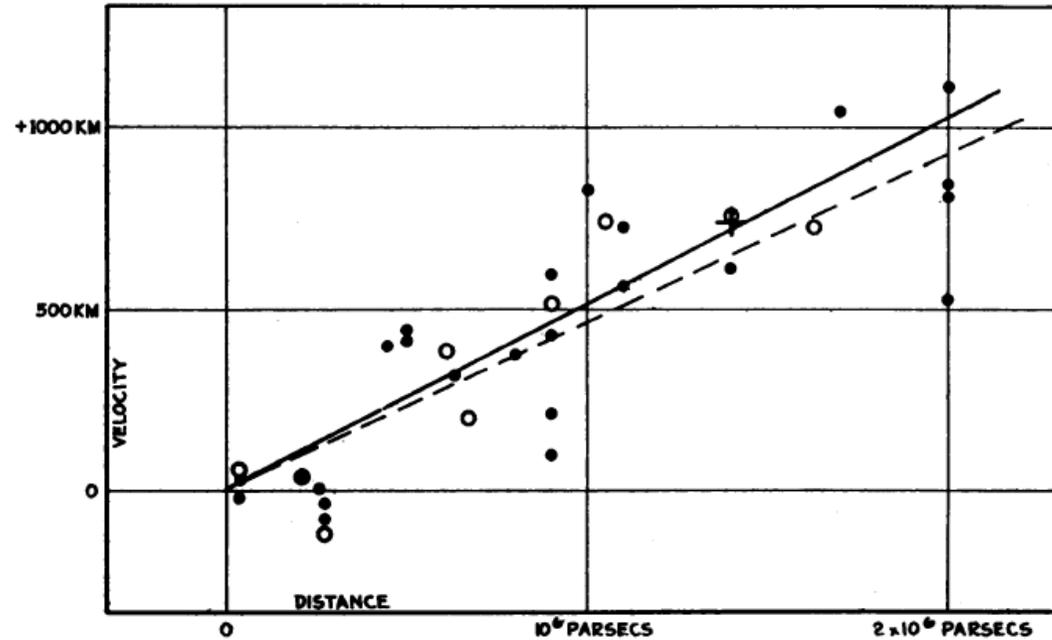


FIGURE 1

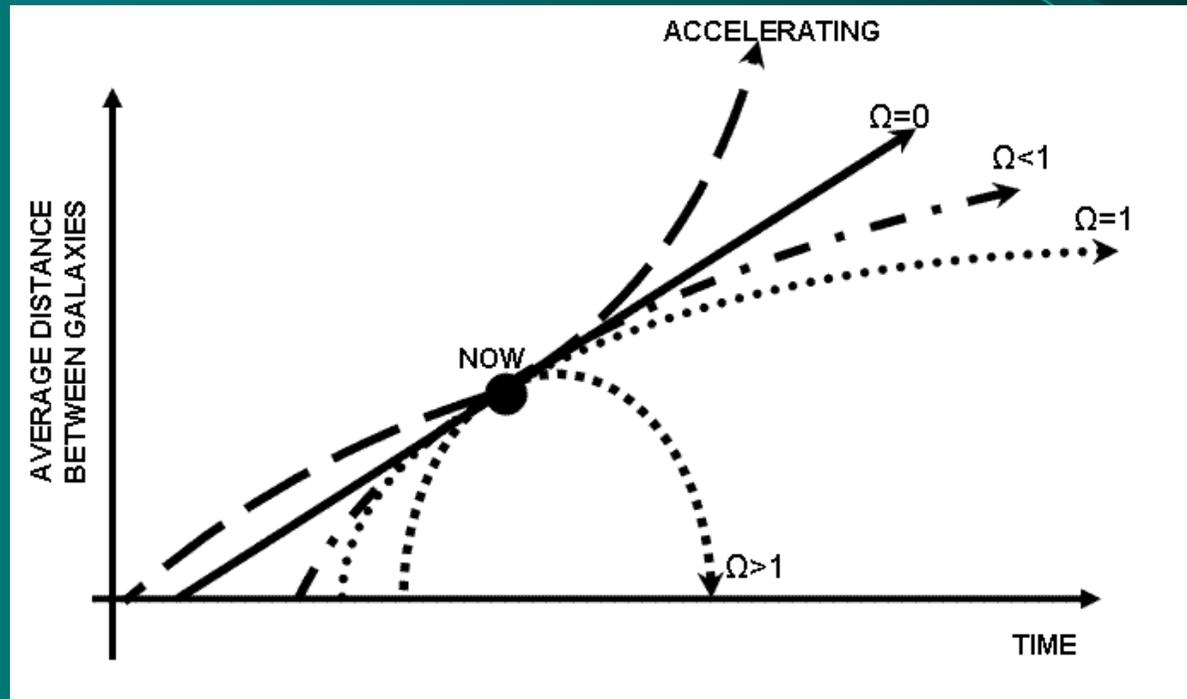
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

宇宙的創生

- 宇宙膨脹源於同一點 → 大霹靂 (**Big Bang**)
也稱為**大爆炸**，當時的宇宙一定非常熱
- 距離 ÷ 速度 = 時間
- **哈伯定律發現**
星系後退的速度 = $H_0 \times$ 星系的距離
 H_0 稱為哈伯常數
- H_0 的倒數便是宇宙的年齡
- 目前測量到 H_0 約為 73 km/s/Mpc
- 也就是說宇宙的年齡約為 **137億年**
- 宇宙並非等速膨脹 → 誤差約 20 億年

想要從距離與速度得到所經過的時間（也就是宇宙的年齡），需要知道運動的情形（等速、加速、減速、亂速）



哈伯常數其實應該稱為 Hubble parameter。它隨時間而變，下標的“0”表示現在的數值

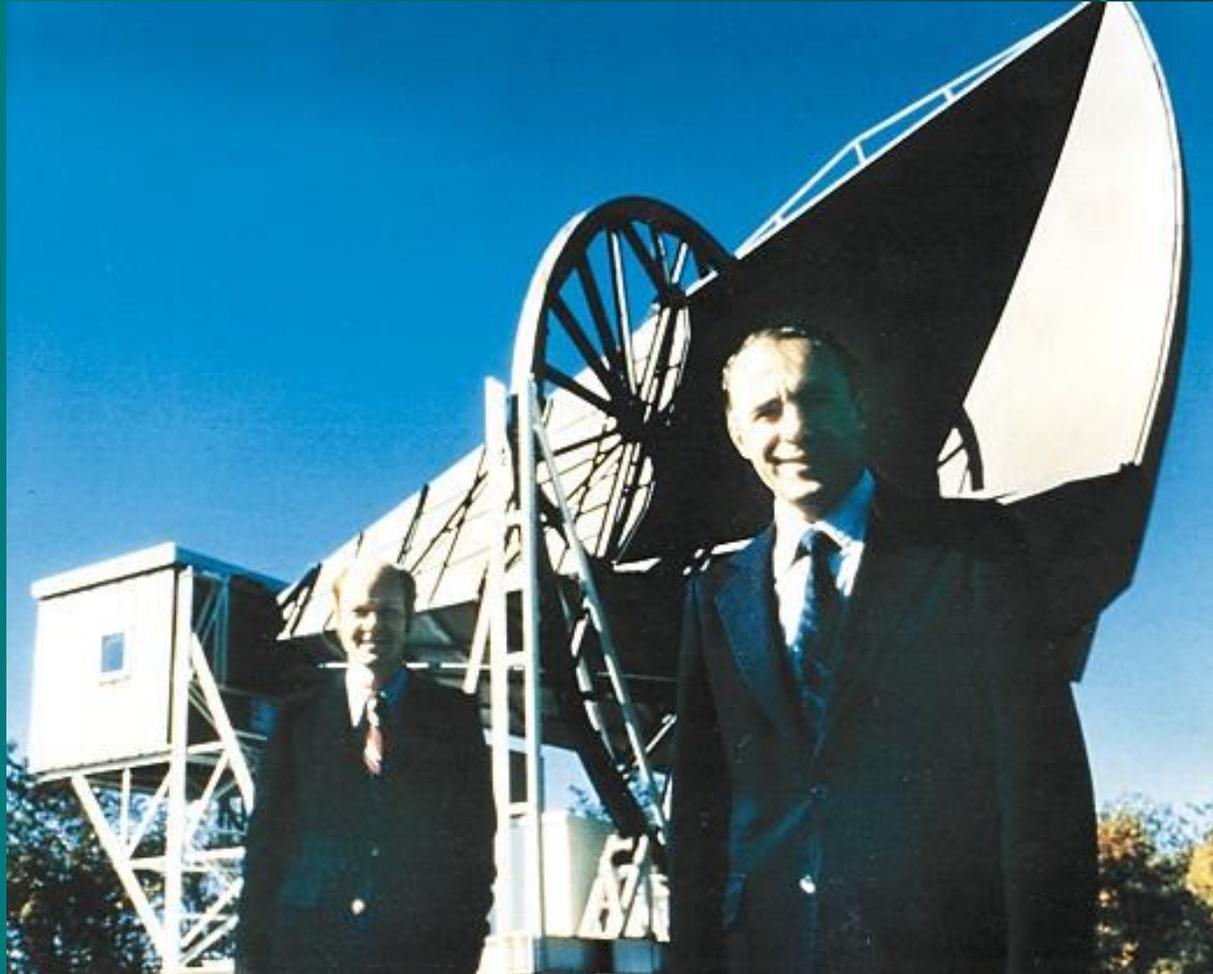
To calculate the Hubble Time from the Hubble constant

$$H_0 = 73 \text{ km/s/Mpc}$$

$$\begin{aligned} 1/H_0 &= \frac{\text{Mpc} \cdot \text{s}}{73 \text{ km}} = \frac{60 \times 3 \times 10^{13} \text{ km s}}{73 \text{ km}} \\ &= \frac{300 \times 10^{17} \text{ s}}{73} \frac{1 \text{ yr}}{3 \times 10^7 \text{ s}} \approx 1.37 \times 10^{10} \text{ yr} \end{aligned}$$

也就是說，宇宙的年齡大約為 137 億年

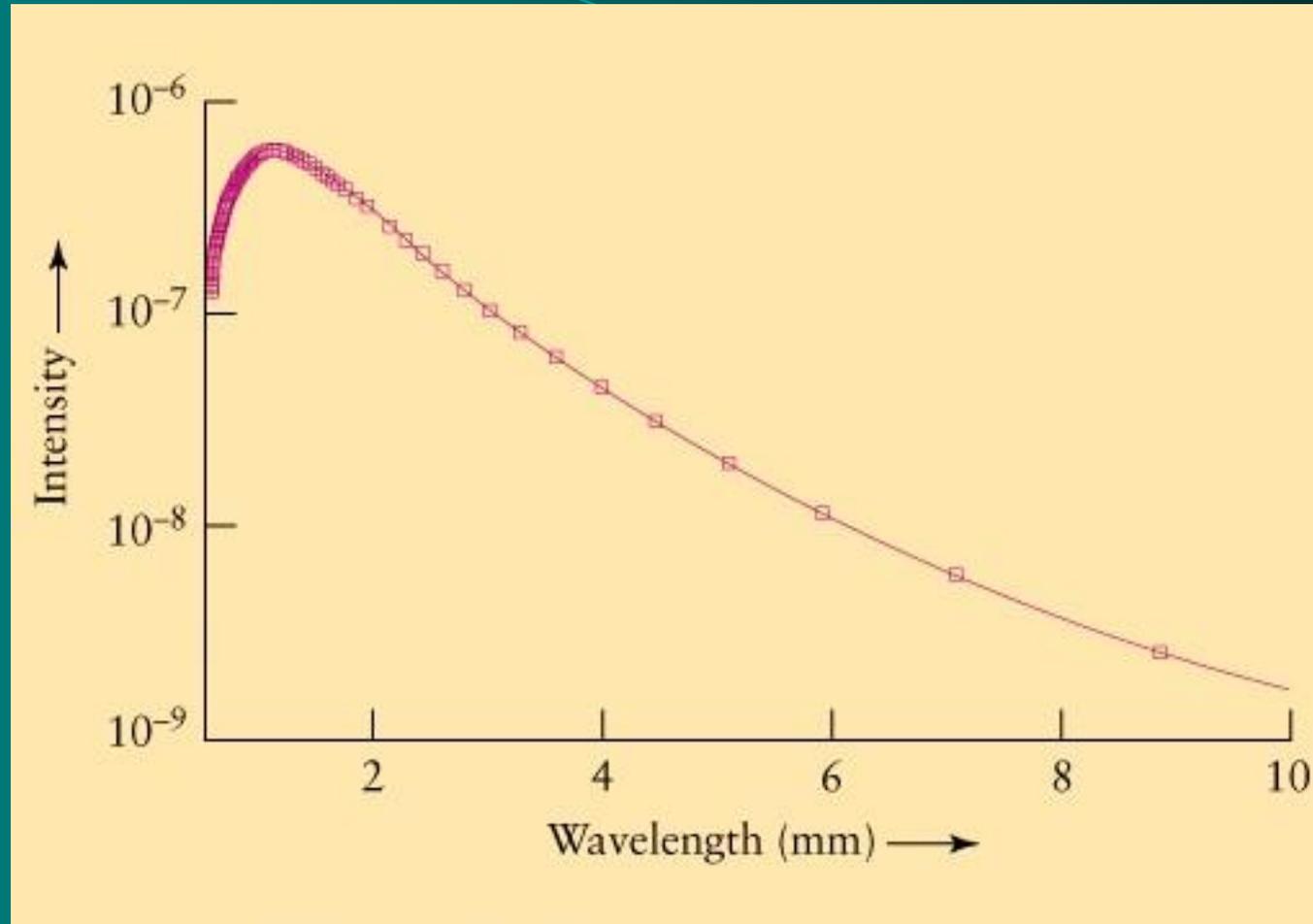
Arno Penzias（右）以及 Robert Wilson 於1965年利用此位於紐澤西貝爾實驗室角狀天線發現了宇宙微波背景輻射（大霹靂之後的餘溫）



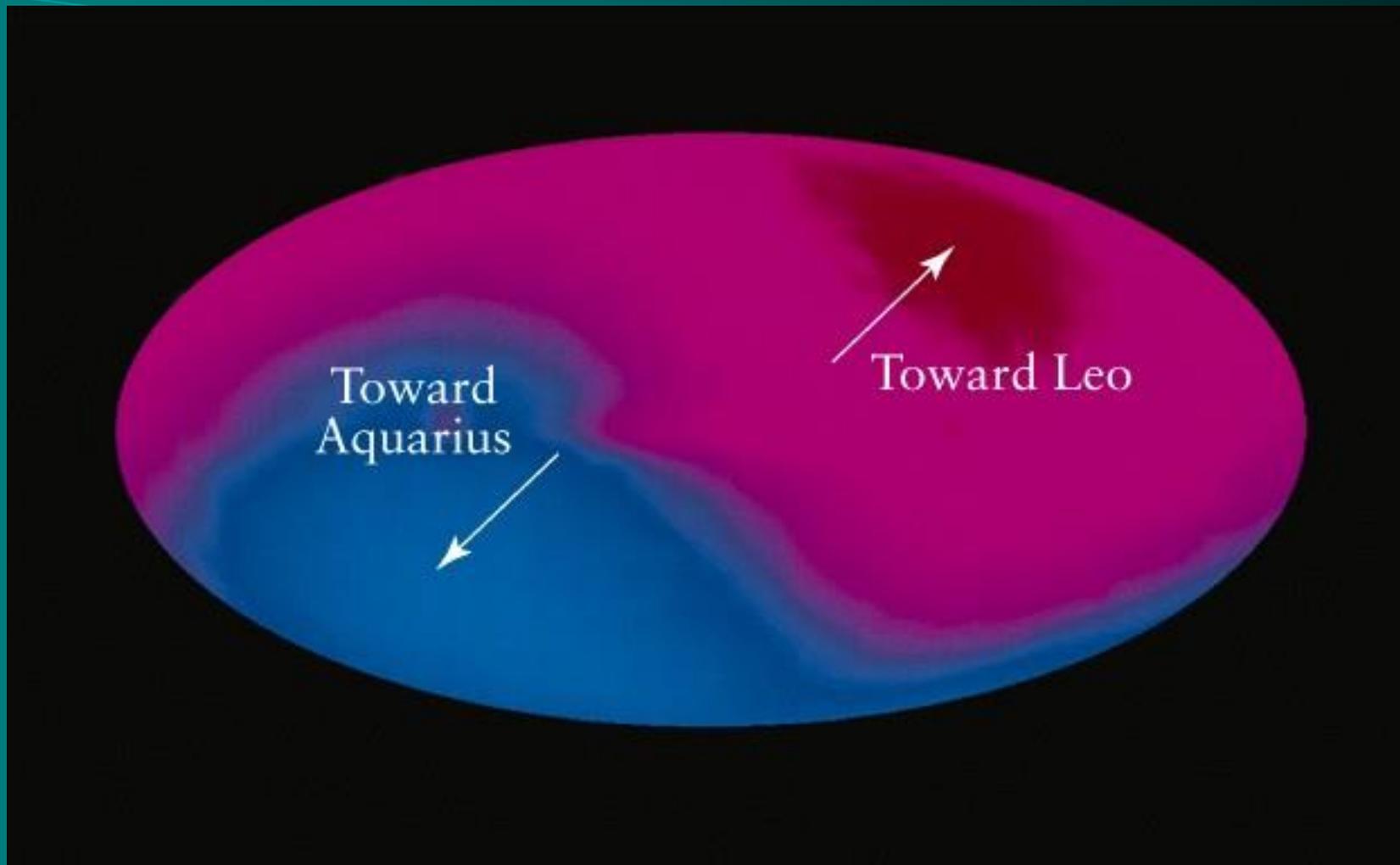


COBE (Cosmic Background Explorer) 衛星
1989~1994

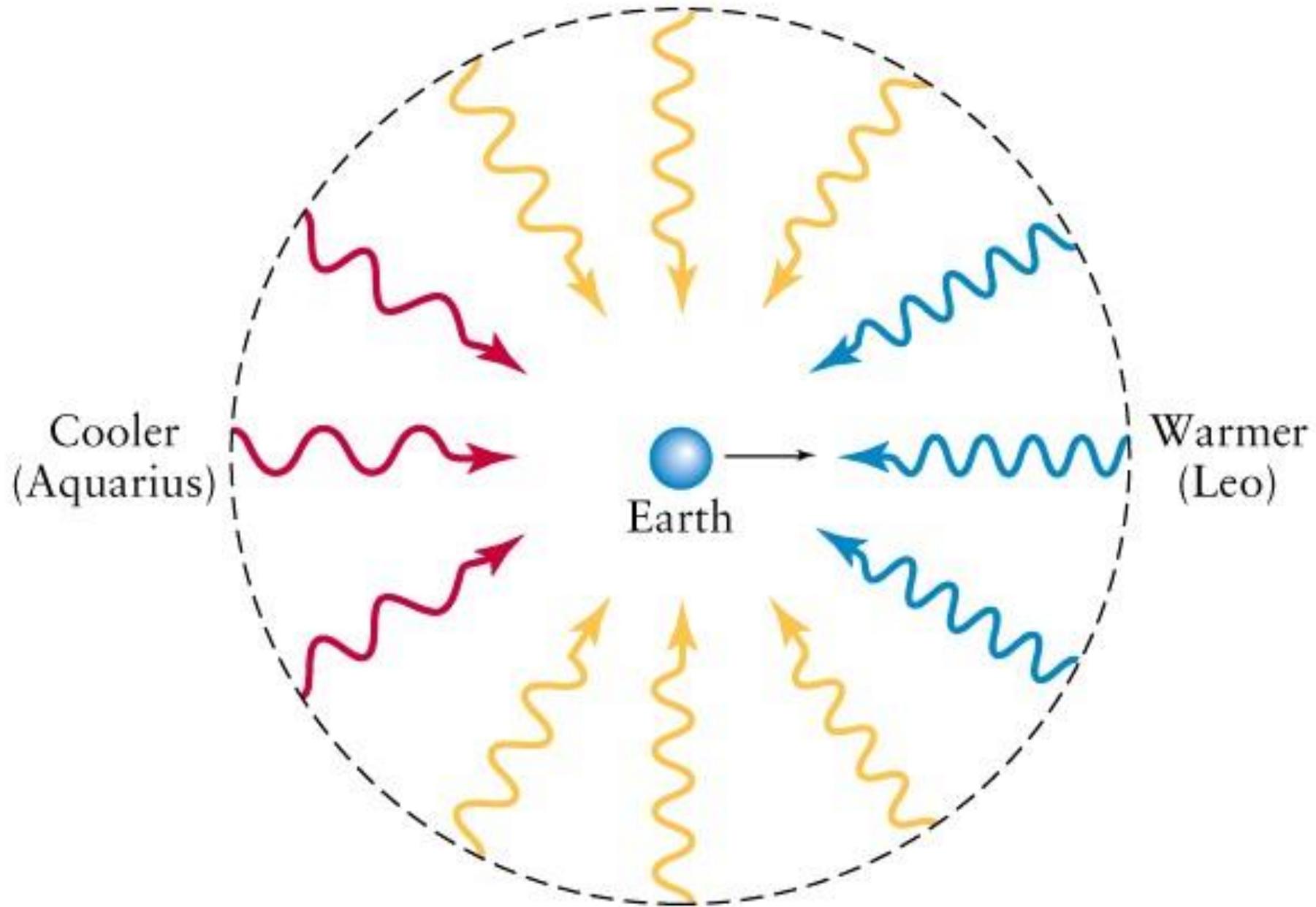
宇宙的平均溫度為 2.73 K

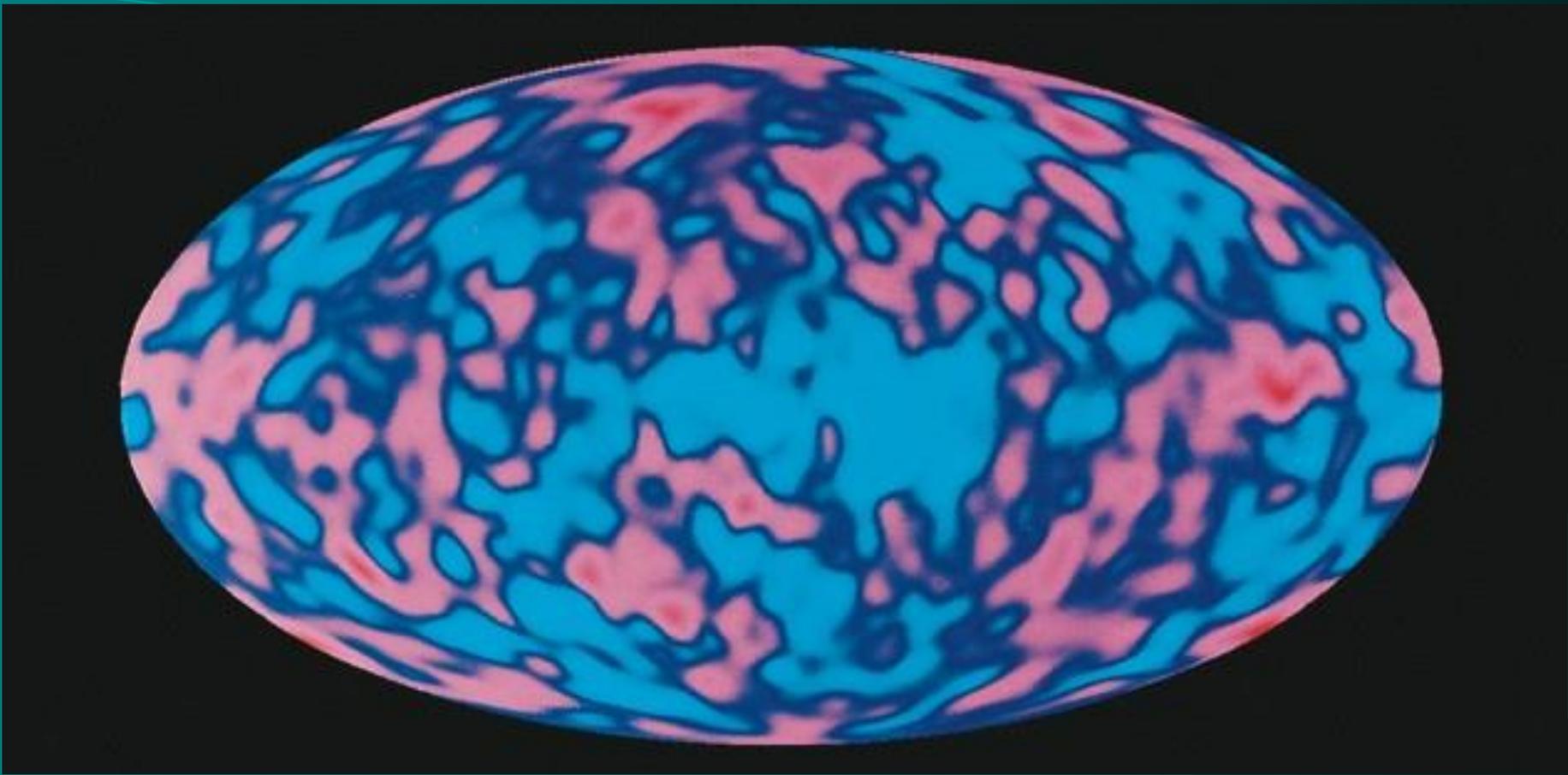


COBE 測量到宇宙的背景輻射與 2.726 K 的黑體輻射相符。輻射最強之處波長為 1.1 mm



COBE 量到的宇宙微波圖。顏色表示溫度，粉紅色表示溫暖，藍色表示溫冷，圖中紅藍兩團（與平均值 2.726 K 差了 0.0033 K ）來自地球在微波輻射中的運動

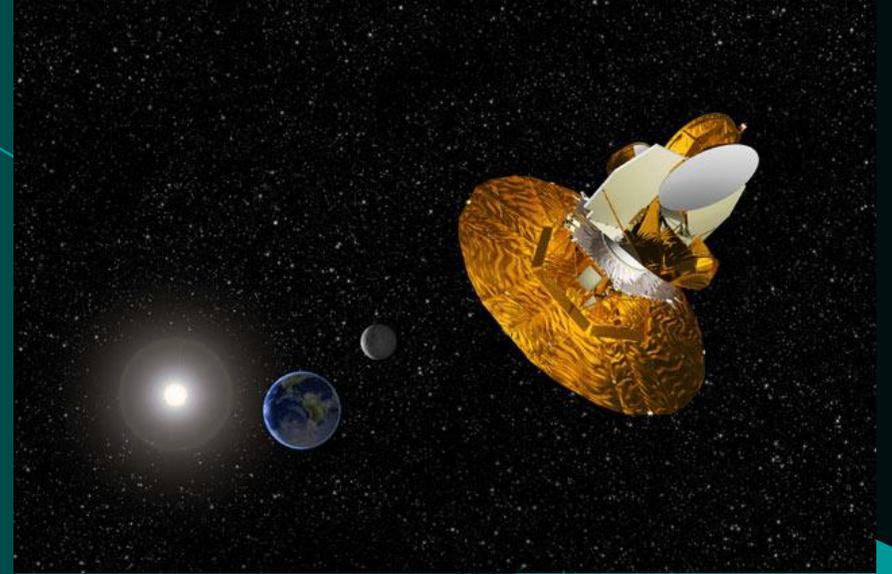




COBE 衛星繪製的宇宙微波強度分佈圖，顯示大霹靂之後 300,000 年，當時宇宙溫度的高低起伏。粉紅色區域比平均 2.73K 高了約 0.0003K，而藍色部分則比平均低了 0.0003K，這些起伏形成了宇宙大尺度結構

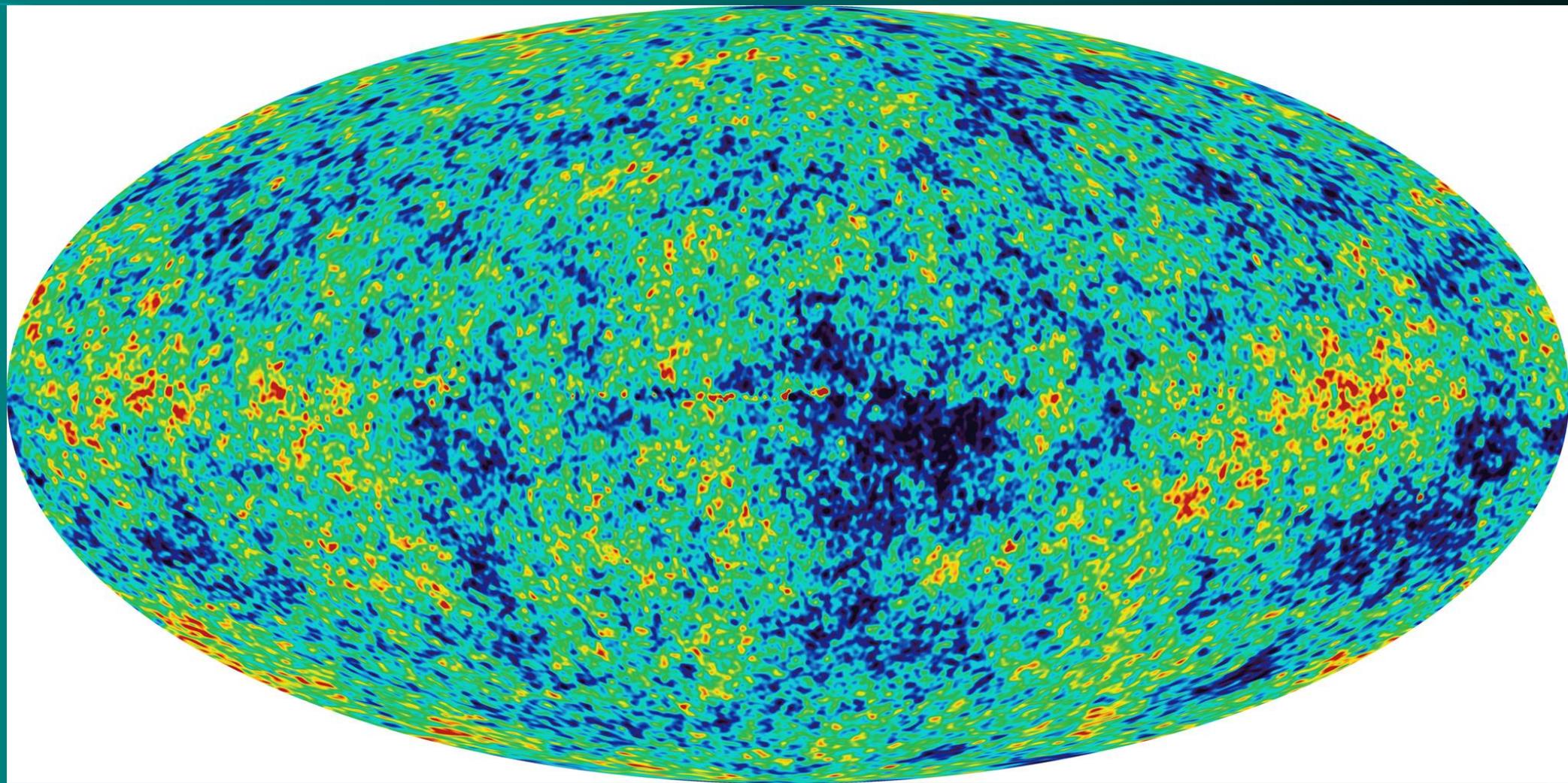
COBE 之後的觀測

The *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (**WMAP**)
太空船，2001年發射

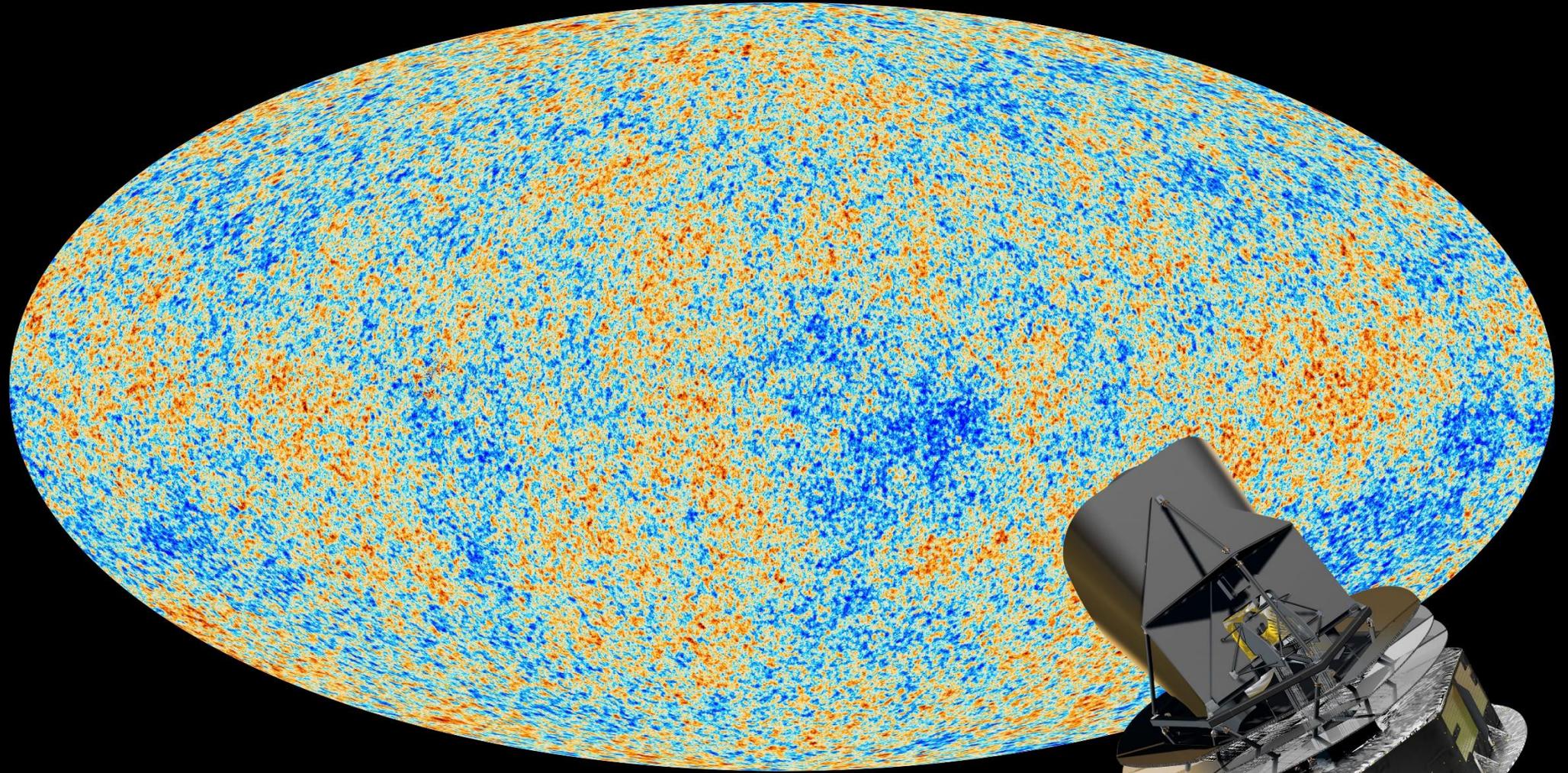


高空氣球實驗 Balloon Observations of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics (**BOOMERANG**), 在南極上空測量10天，得到的解析力，比 COBE 好10倍

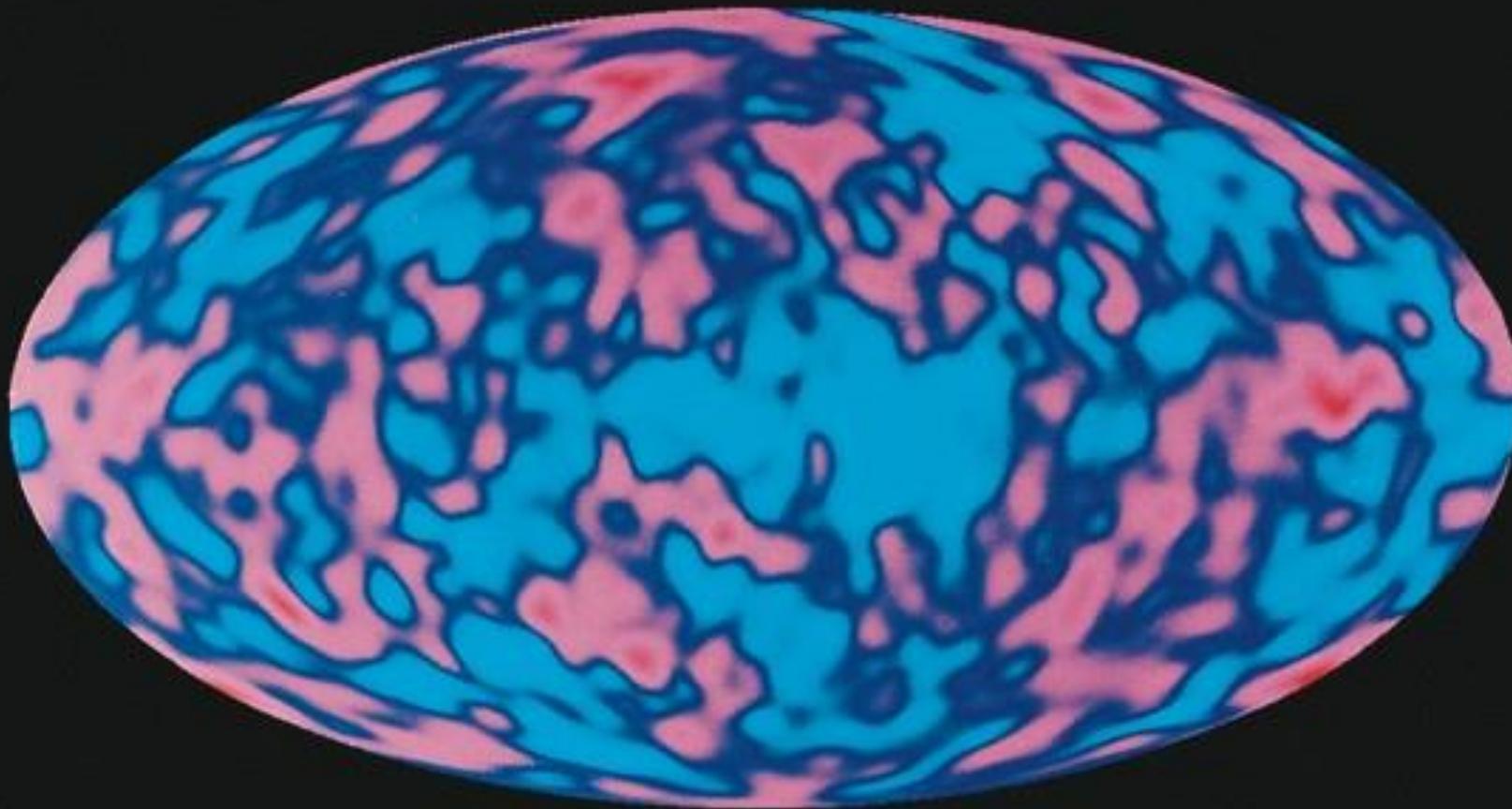




WMAP 衛星繪製的大霹靂379,000年之後，宇宙輻射強度（溫度）分佈圖。紅色區域比平均溫度 2.73K 高了約 0.0003K，而藍色部分則比平均低了0.0003K。



Planck and Cosmic Microwave Background
2013

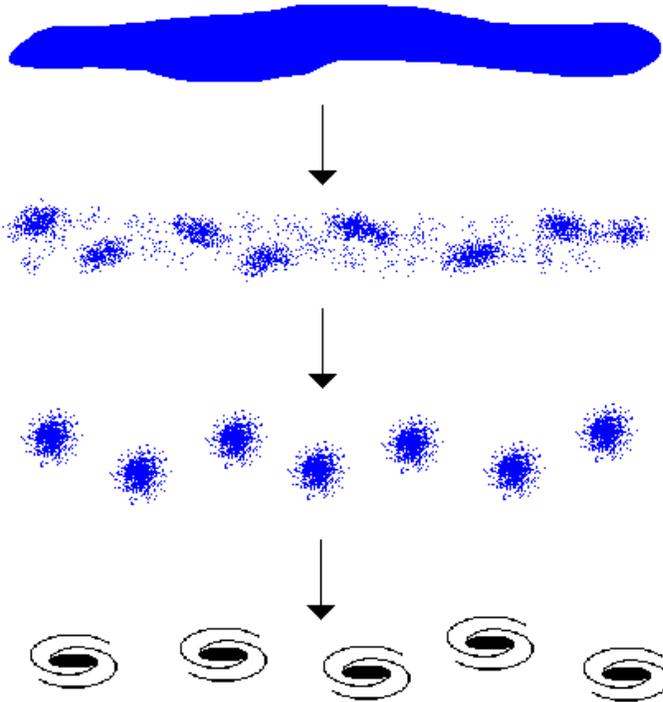


COBE

由大而小形成結構

Top-Down Structure Formation

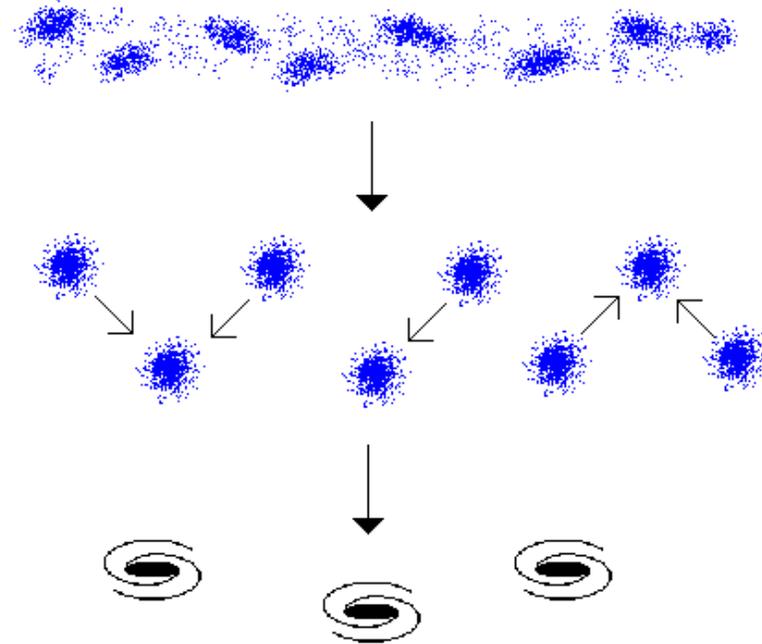
in a top-down scenario, large pancakes of matter form first, then fragment into galaxy-sized lumps



由小而大形成結構

Bottom-Up Structure Formation

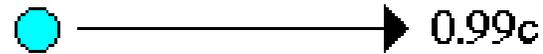
in a bottom-up scenario, small, dwarf galaxy-sized lumps form first, then merger to make galaxies and clusters of galaxies



Structure formation: top-down versus bottom-up

Hot Dark Matter (HDM)

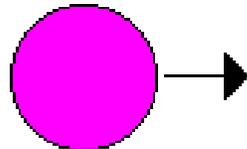
top-down scenarios require that dark matter be composed of a weakly interacting, high velocity particle



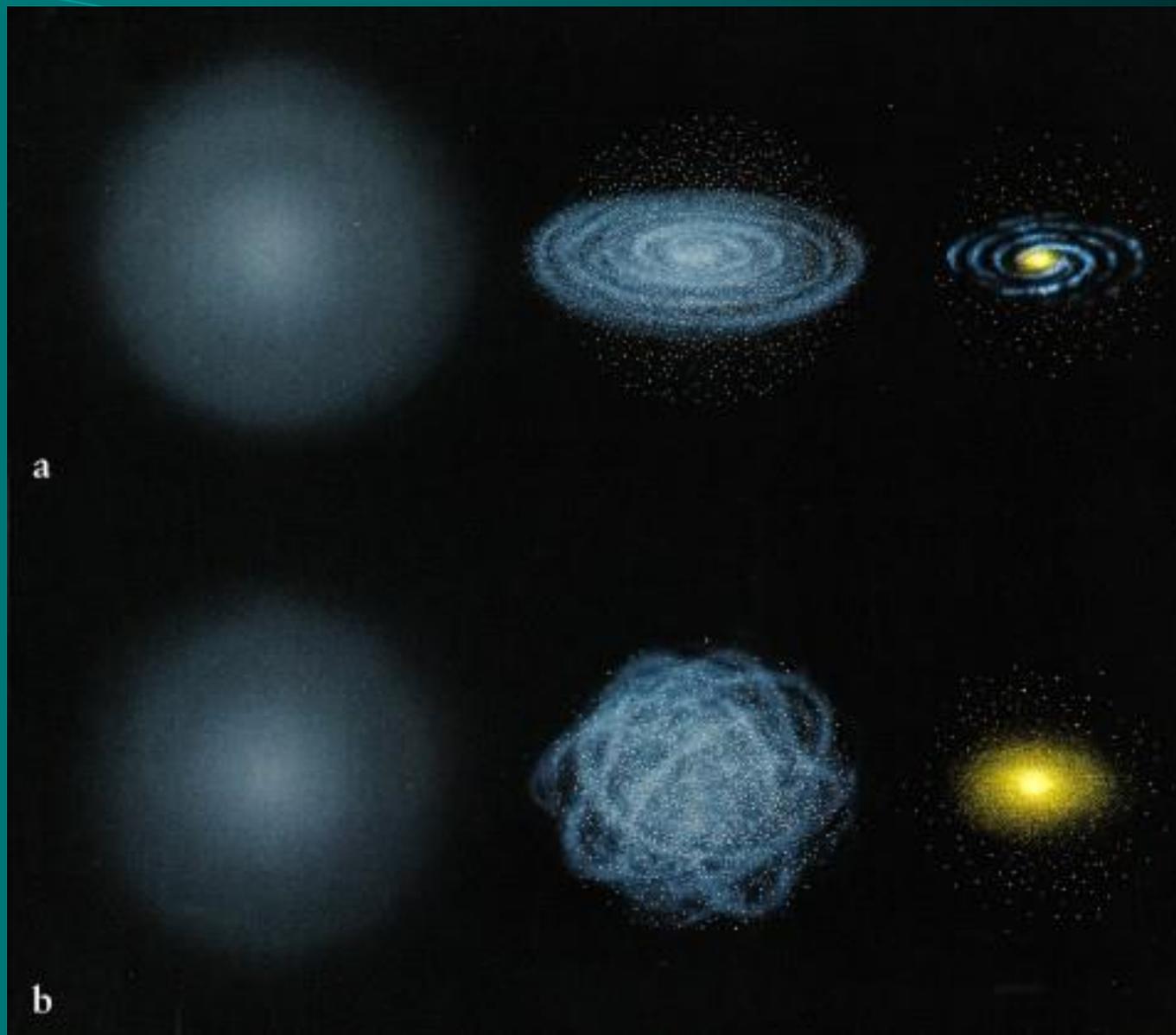
a massive neutrino is a good candidate for an HDM particle

Cold Dark Matter (CDM)

bottom-up scenarios require that dark matter be composed of a highly massive, slow moving particles



note that neither of these particles are baryons, the ordinary matter makes up stars or planets

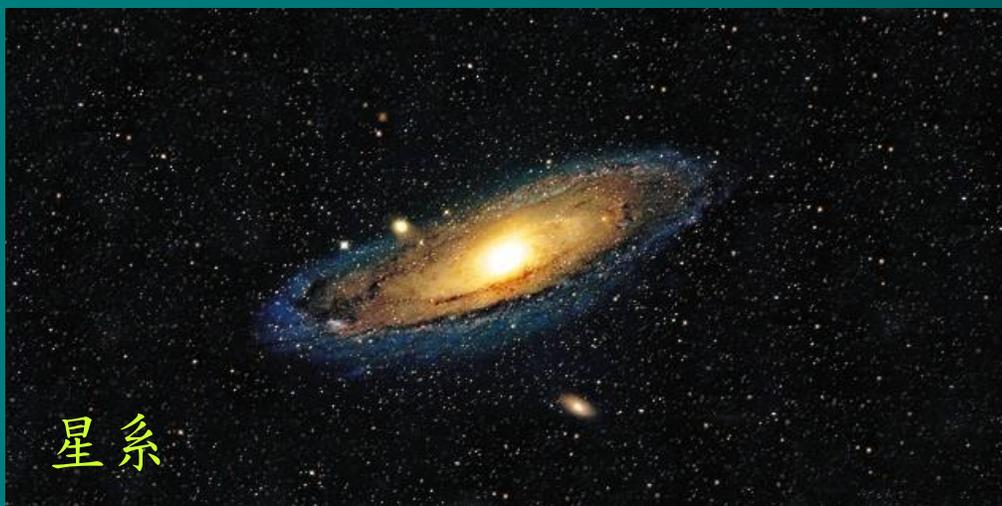


巨大雲氣各自收縮形成了星系

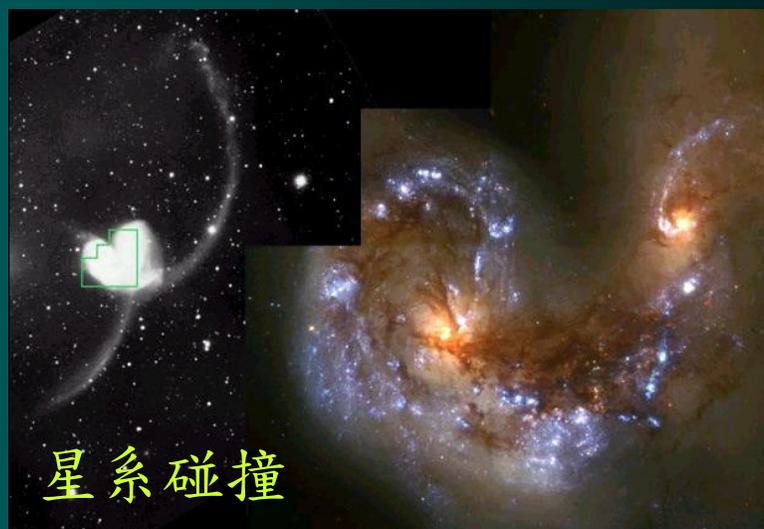
宇宙中的物質，有的發強光，有的發弱光，有的不發光…
有些緊密有序，有些疏離分散…



星系團



星系



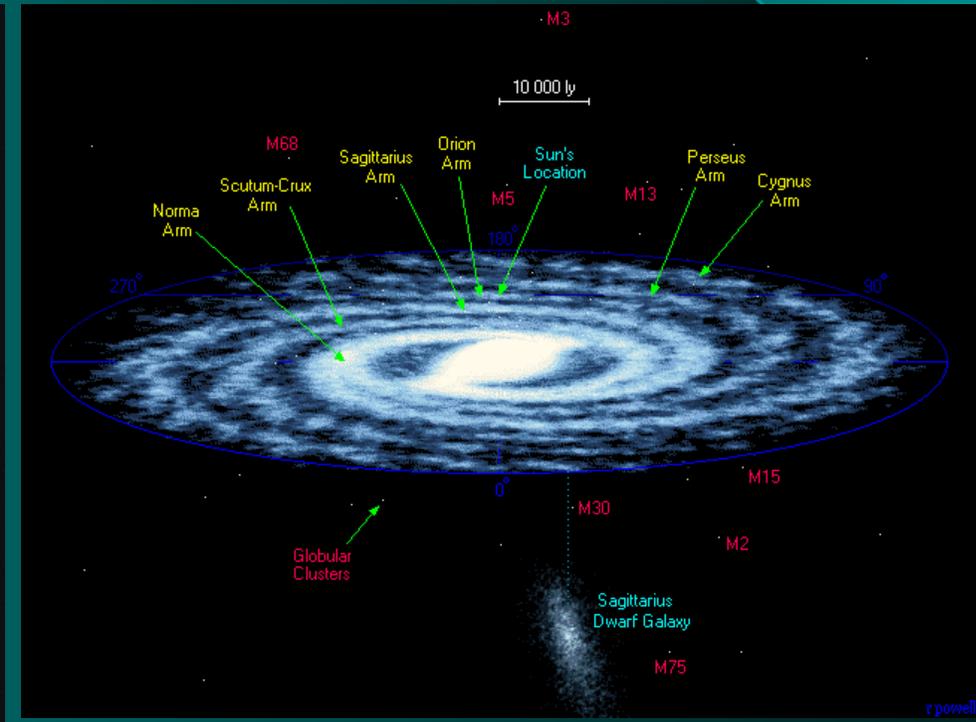
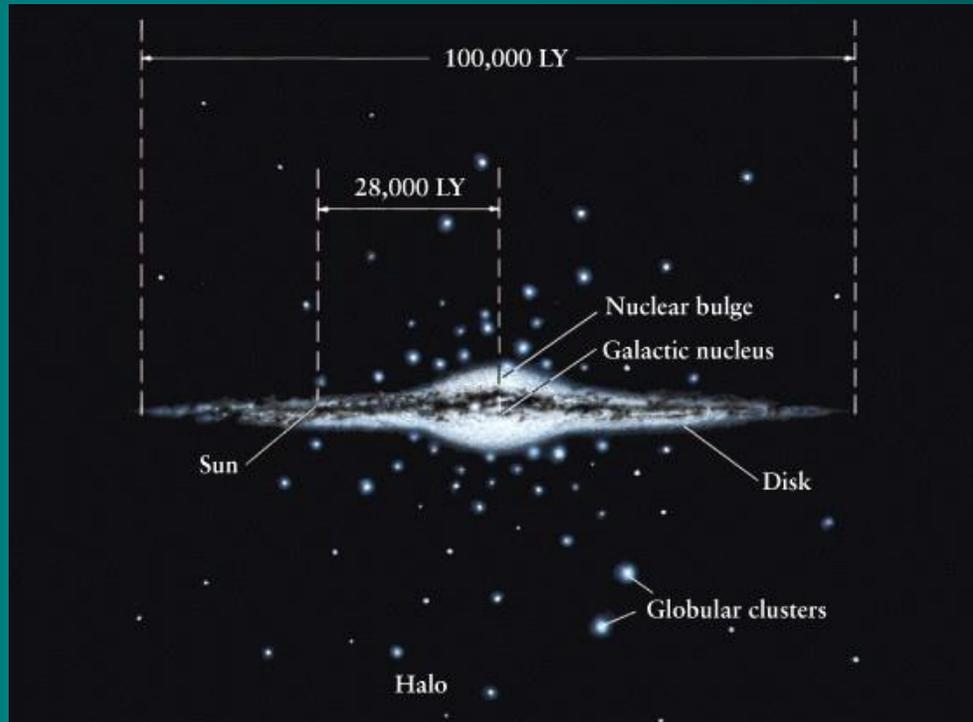
星系碰撞

星系雲氣（大致成球形）開始成群形成恆星

→ 早期形成的星團留在原地 → **球狀星團**

→ 剩下的雲氣繼續收縮、旋轉 → **銀河盤**

→ 沈澱到銀河盤中央的雲氣持續形成恆星



銀暈

銀盤



Q：銀暈裡的恆星與銀盤中的恆星有何不同？

A：銀暈裡的恆星（星團）

球狀星團

‘metals’ 比較少
自己繞著銀河中心運動
分佈在銀盤上下四方



銀盤裡的恆星（星團）

疏散星團

重元素豐度高
分佈在銀河盤面上
繞行銀河系中心、易受拉扯
（久了就散了！）



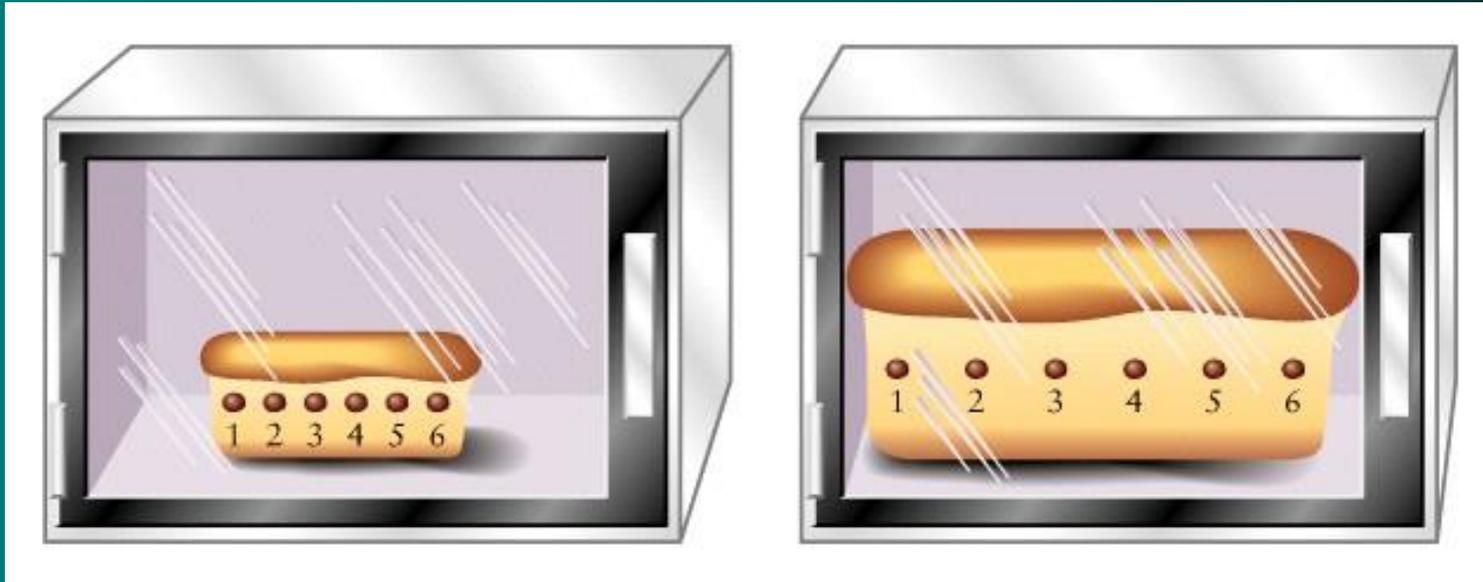
宇宙膨脹 —

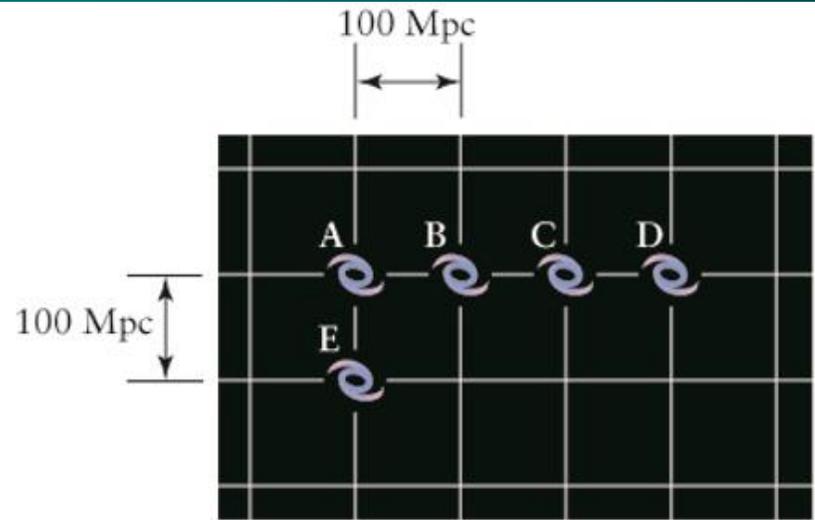
整個時空展開

其中的物質只是「跟著膨脹」

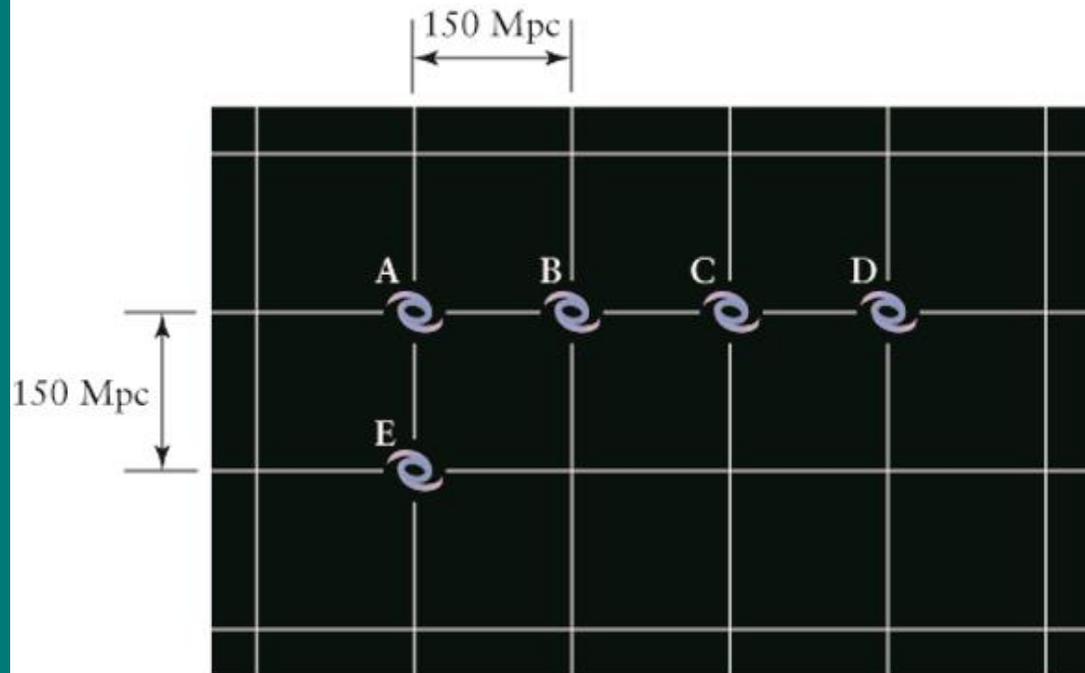
每個角落看到一樣的情形，都是大家離去

→ 沒有特定中心 有限而無界



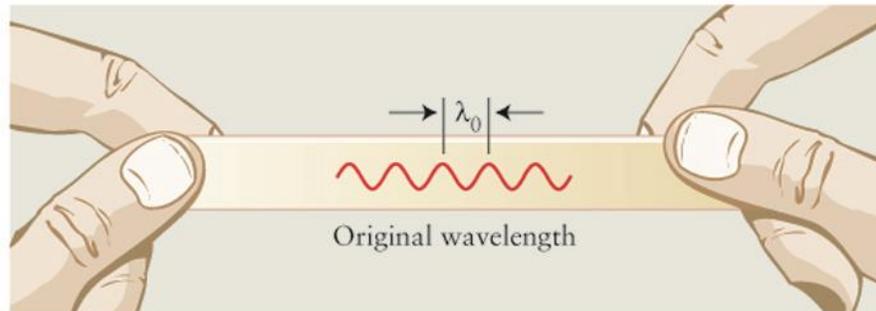


(a) Five galaxies spaced 100 Mpc apart

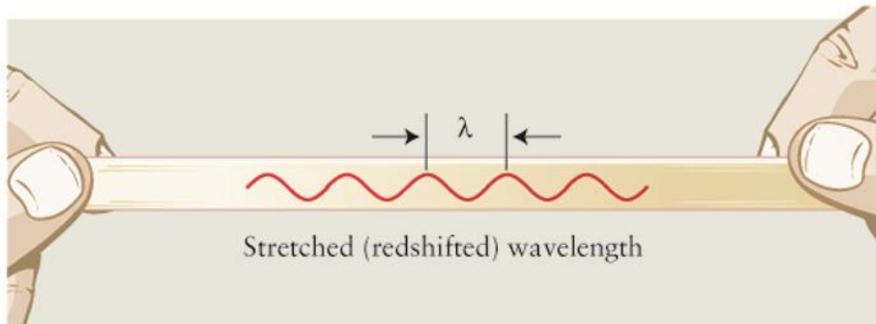


(b) The expansion of the universe spreads the galaxies apart

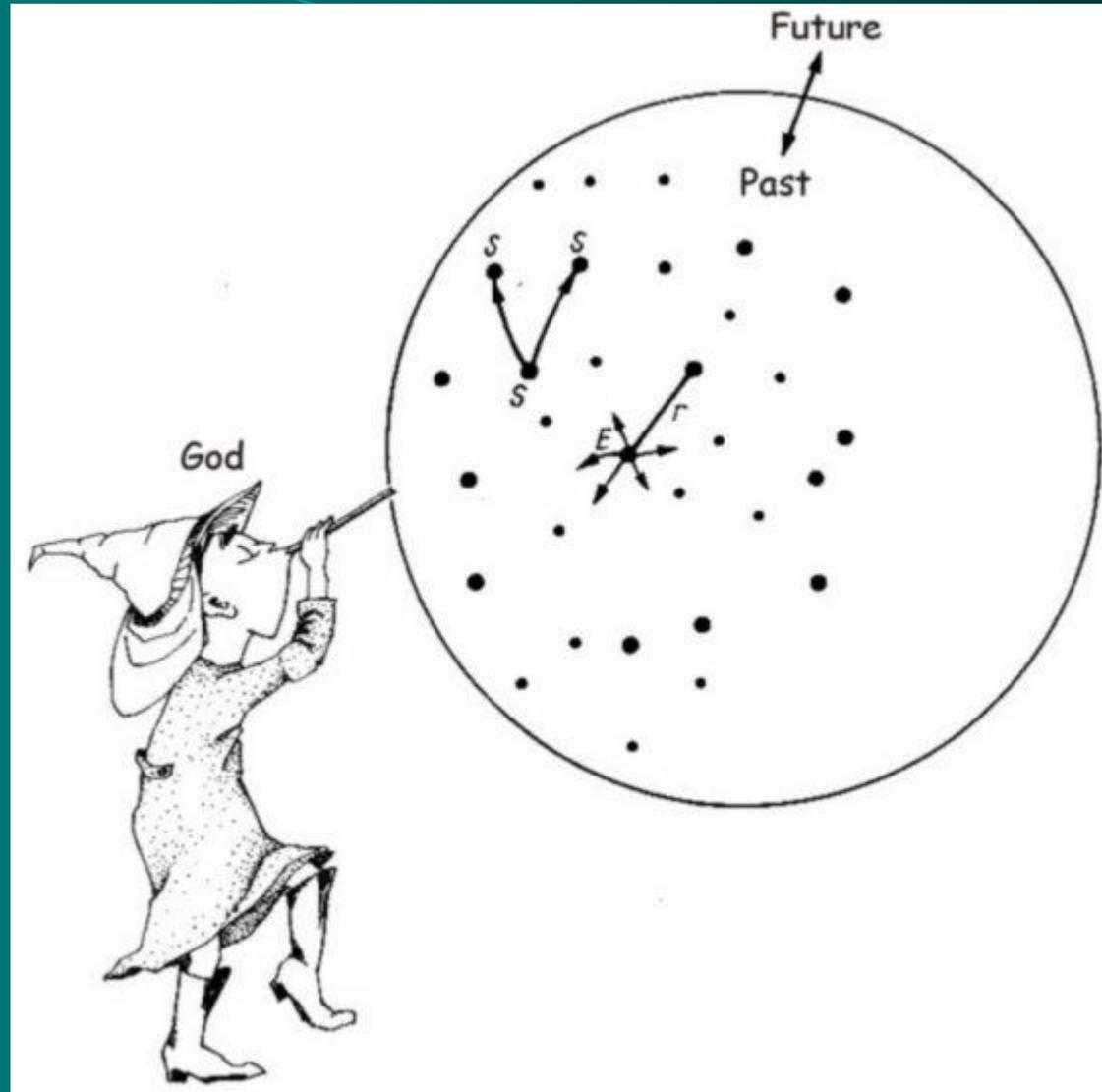
Cosmological Redshift



(a) A wave drawn on a rubber band ...

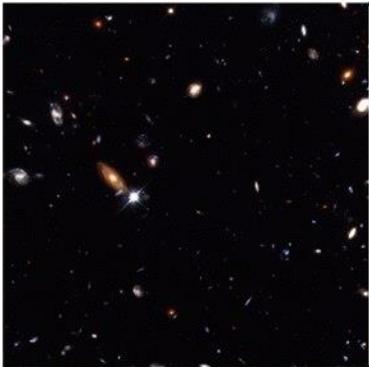


(b) ... increases in wavelength as the rubber band is stretched.



The dashed circle represents our cosmic **light horizon**, a sphere centered on the Earth. Light from objects on this horizon is only now reaching us.

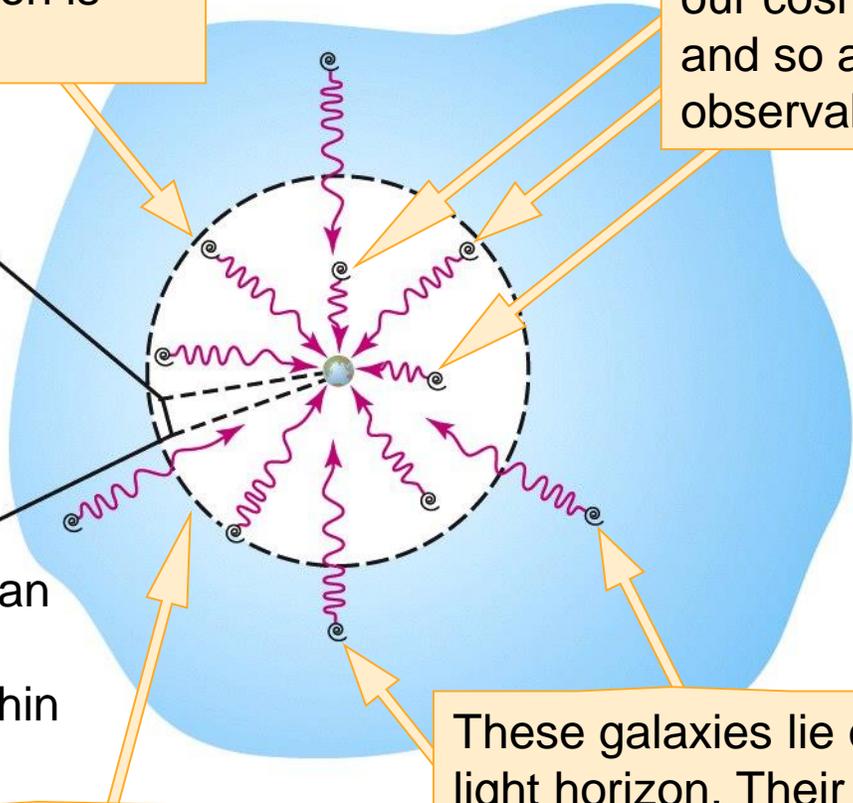
These galaxies lie within our cosmic light horizon, and so are part of our observable universe.



All of the objects that we can see with even the most powerful telescopes lie within our observable universe.

Because the universe has continued to expand the past 13.7 billion years, the radius of our cosmic light horizon is greater than 13.7 billion light-years. The present radius is about **47 billion light-years**.

These galaxies lie outside our cosmic light horizon. Their light has been traveling toward us for 13.7 billion years, but they are so far away that the light has not yet reached us. Hence they are outside our **present-day observable universe**.



Radiation and Matter

- 宇宙所有「東西」：「物質」與「能量」
- 能量：輻射與暗能量
- 質量與能量何者重要？怎麼比較呢？
- Energy density u $c = 4\pi J$

where $J = F/\pi$ and $u = \rho_{\text{rad}} c^2$ (cf. $E = mc^2$)

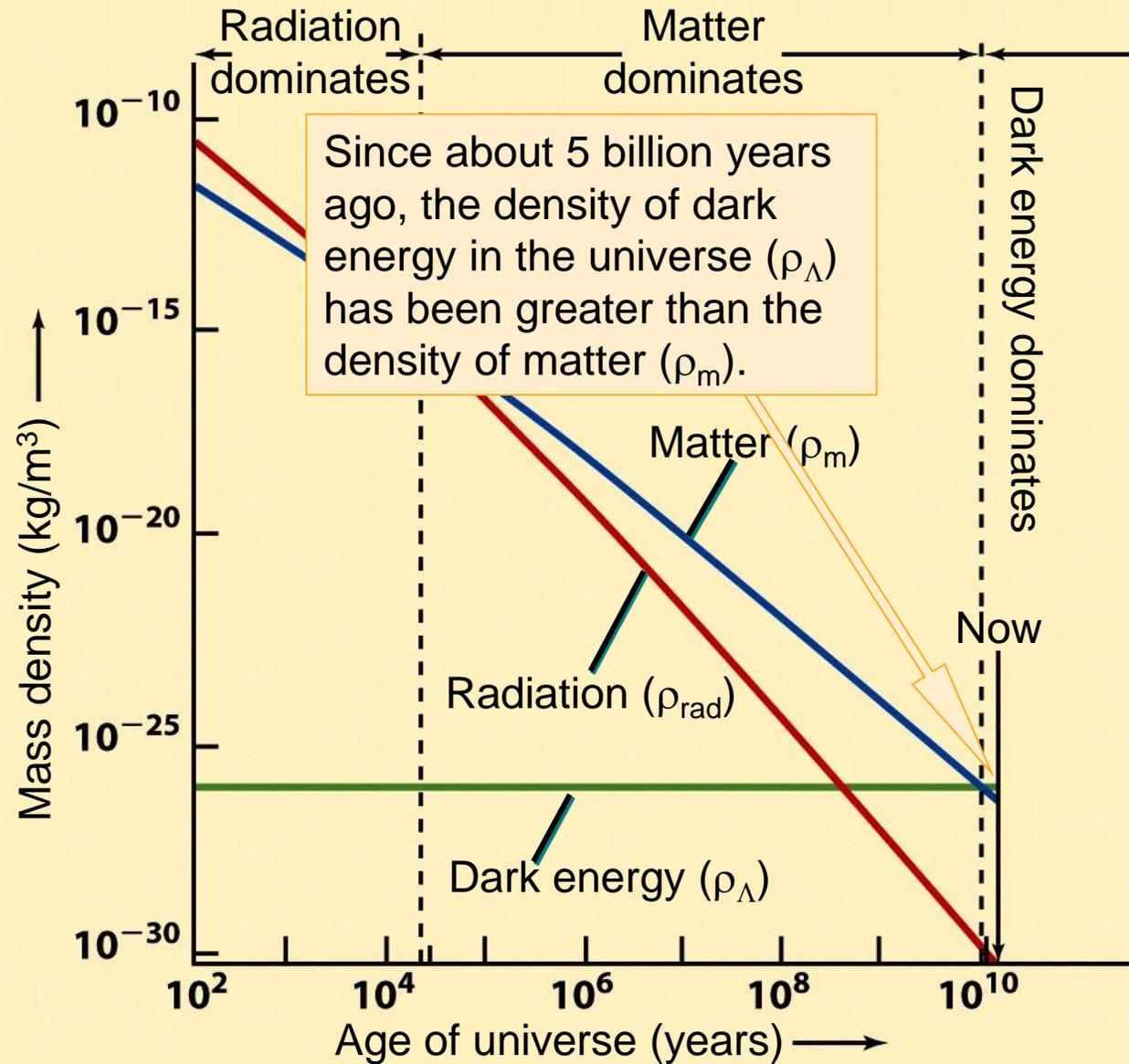
So, $\rho_{\text{rad}} = 4\sigma T^4/c^3$ and given $T = 2.725$ K

$$\rho_{\text{rad}} = 4.6 \times 10^{-31} \text{ kg/m}^3$$

- Mass density hard to determine, clusters of galaxies \rightarrow

$$\rho_{\text{m}} = 2.4 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

1.4 H atom/m³



宇宙的溫度

Average energy of particles

10^{19} GeV 10^{14} GeV 100 GeV

10^{32} K 10^{27} K 10^{15} K

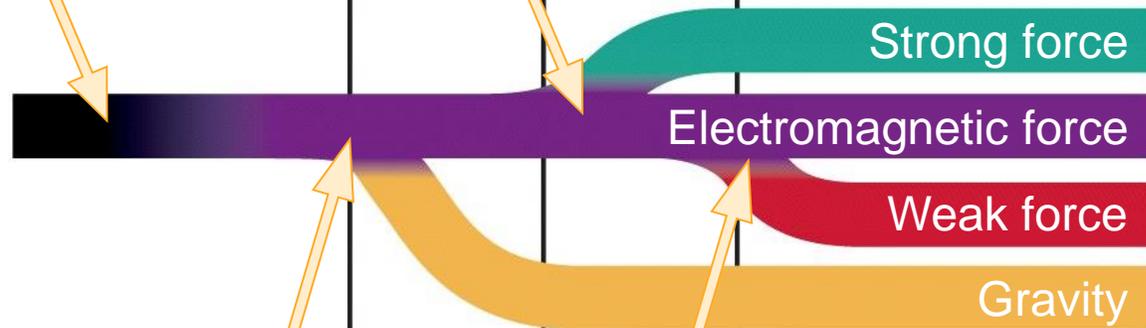
The earlier the time, the higher the temperature and the greater the energy of particles.

1. Initially all four forces were equally strong.

3. The strong force became distinct from the electroweak force.

2. Gravity became a distinct force, weaker than the others.

4. The electromagnetic and weak forces became distinct, leaving a total of four forces.



大霹靂之後

10^{-43} s

10^{-35} s

10^{-12} s

To the present

現在

Planck time

*The most incomprehensible thing about the
Universe is that it is comprehensible.*

- Einstein -

Planck time --- 重力與 **GUT (Grand Unified Theory 大統一
理論)** force 分開

- 當時的宇宙只有現在一個原子的大小
- 沒有能量與物質的差別，混沌一片 (chaos)，宇宙有些地方溫度高些，有些低些
- 要是這些在普朗克時間的 fluctuations 隨宇宙膨脹而放大，現在我們應該看到很大的密度反差

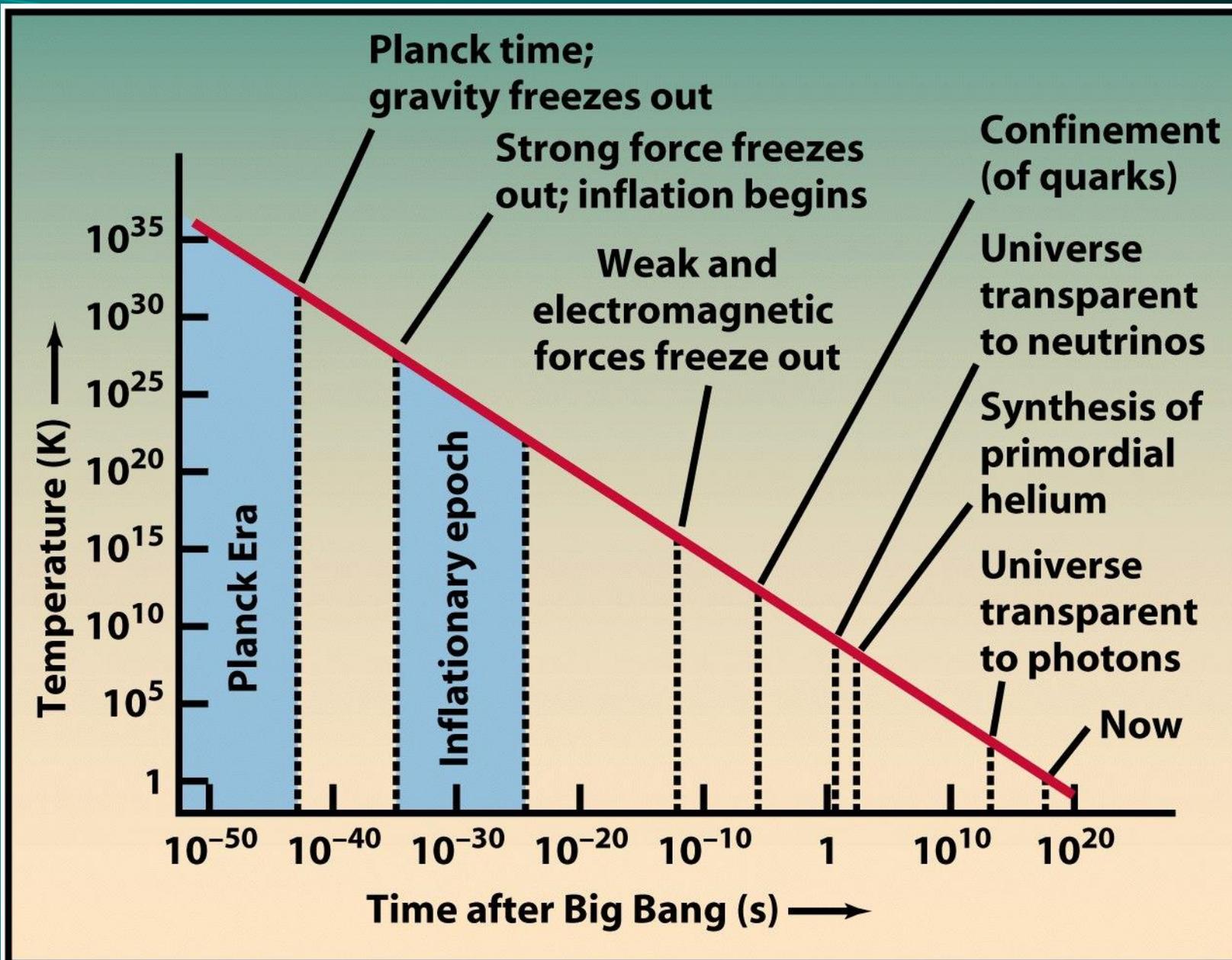
但是觀察到的宇宙背景輻射差別不大

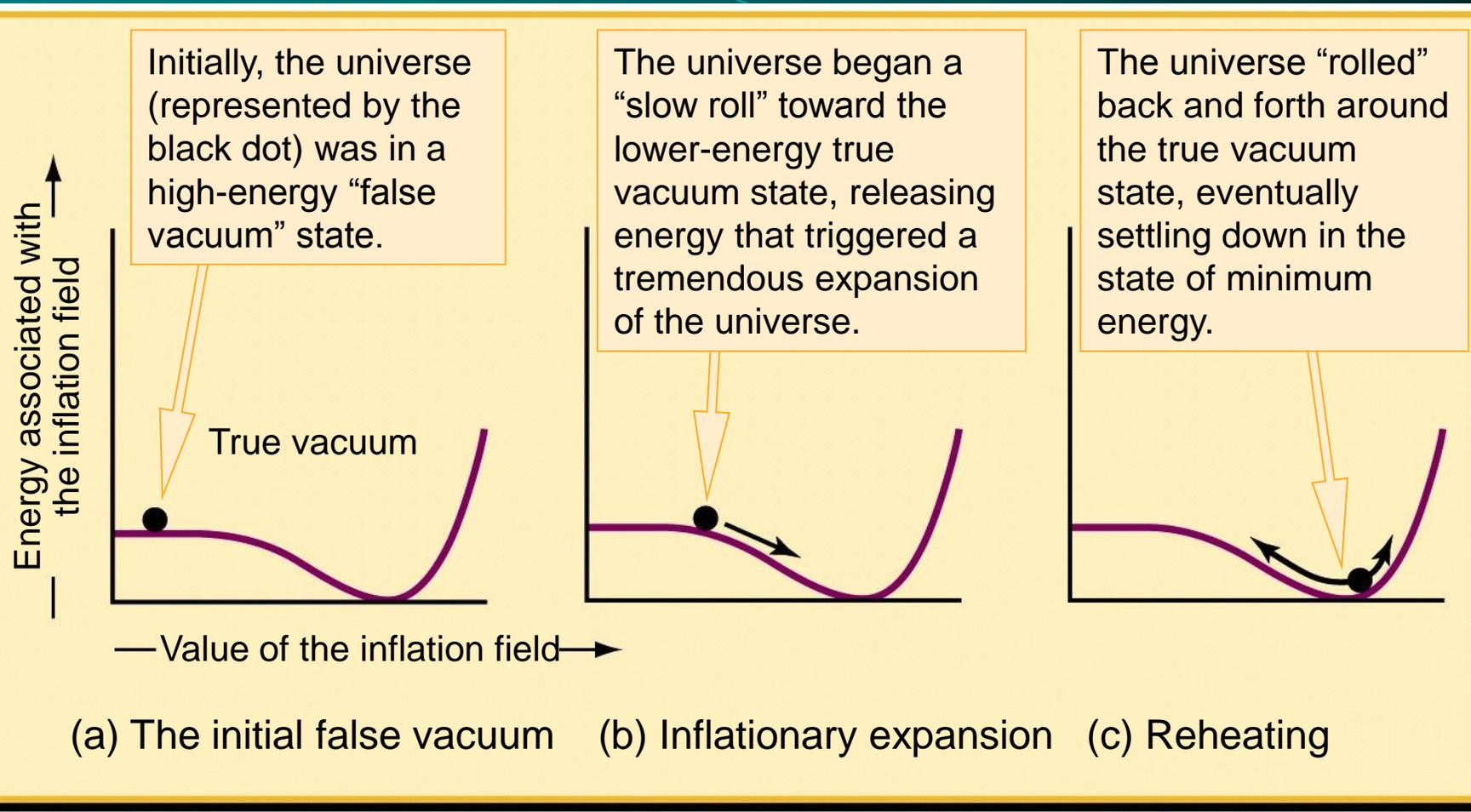
→ “isotropy problem” or “horizon problem”

→ **inflation 暴脹**

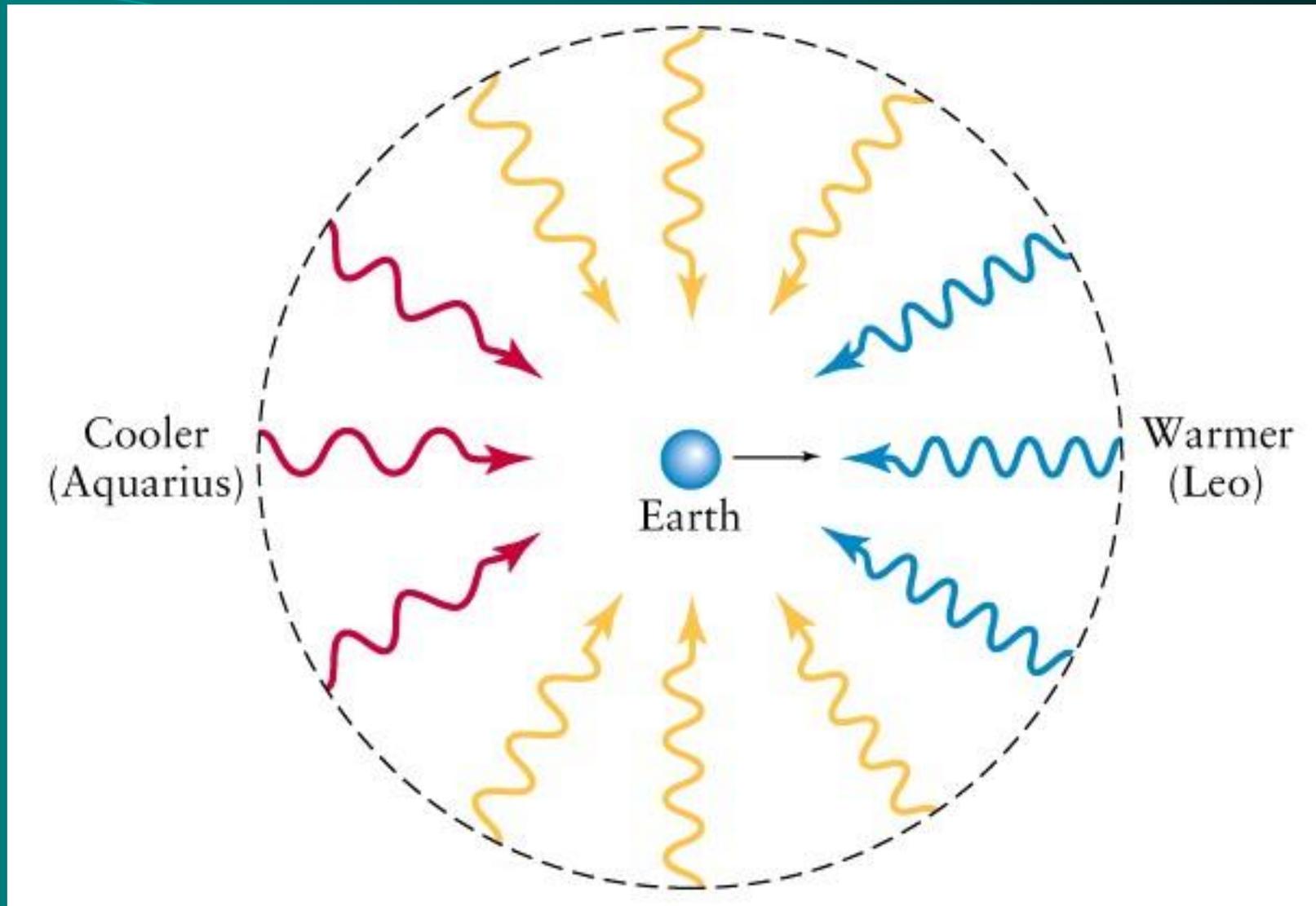
在 10^{-35} 內，宇宙冷卻到 10^{27} K，強作用力分離出來。
在此之前，宇宙處於 **false vacuum**，乃極不穩定的狀態。之後宇宙躍遷成穩定的 **true vacuum**，原來就在膨脹的宇宙得以瞬間加速

在 10^{-35} 到 10^{-33} 秒內，宇宙暴增了 10^{50} 倍！
造成後來「均勻」的宇宙



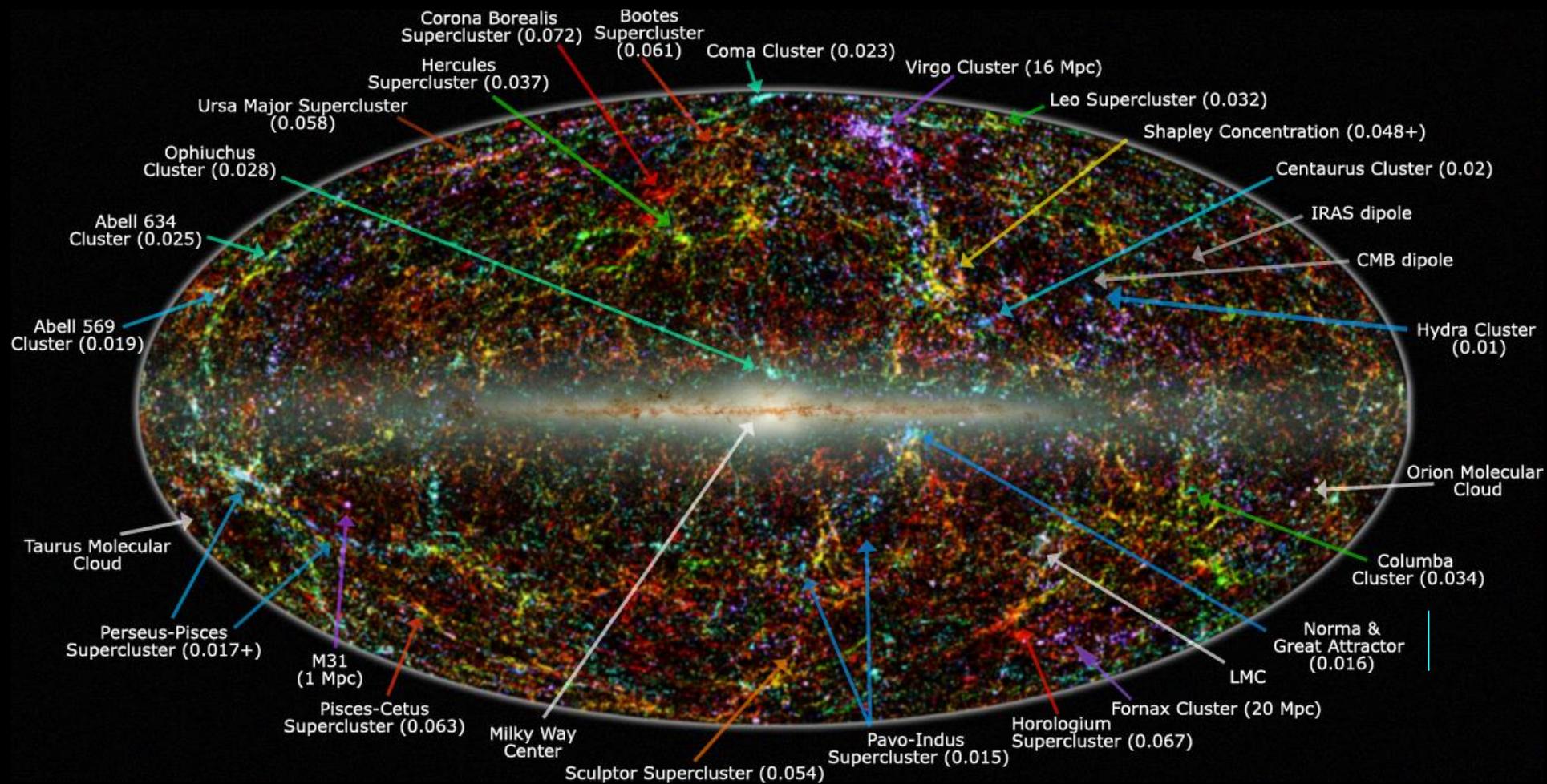


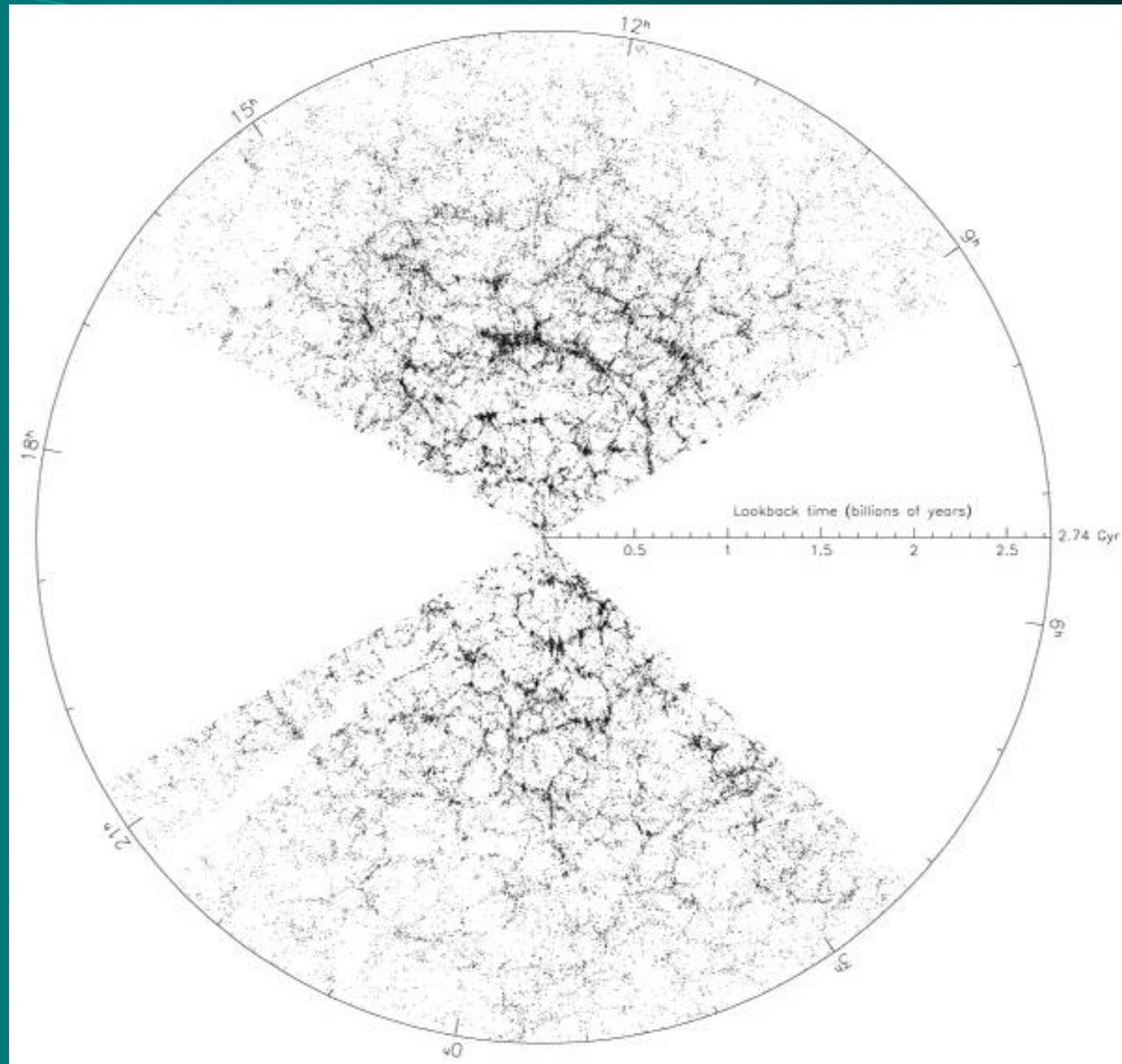
- ◆ Inflation epoch 之後，宇宙有如足球般大小。quarks, electrons, protons 等基本粒子（以及他們的反粒子）開始出現
- ◆ 宇宙變得非常大，只有其中一部份（我們不知道比例）成了我們能夠觀測的宇宙。
- ◆ 成為我們現在宇宙的當時那一小區時空，非常均勻，但由於 quantum fluctuations，因此並非完美均勻。
- ◆ 造成了現在宇宙的**均勻性 (homogeneous)** 與**各向同性 (isotropic)** → **cosmological principle**

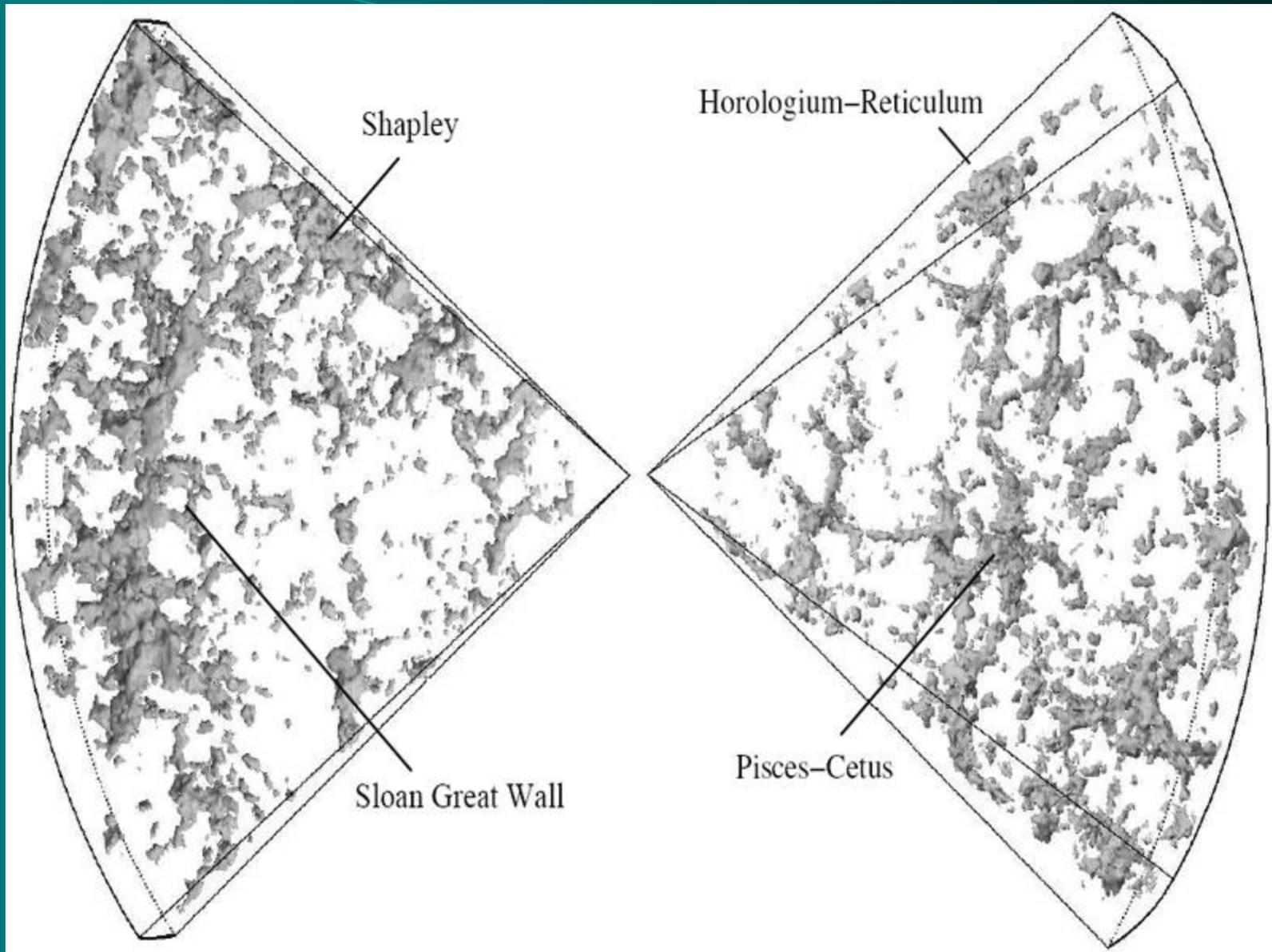


相對於宇宙背景輻射，太陽系朝著 Leo 的方向，以 371 km/s 的速率運動

- 事實上 Local Group of galaxies，以及其他上千個星系，都朝著 Hydra-Centaurus supercluster 的方向移動
- 包括 Hydra-Centaurus supercluster 本身也往那個方向運動
- 那個地方有龐大物質，稱為 *The Great Attractor*，距離我們 47~79 Mpc
- 宇宙結構在約 100 Mpc 的尺度顯得凹凸不平 (clumpy)，只有在更大尺度才呈現 homogeneous and isotropic



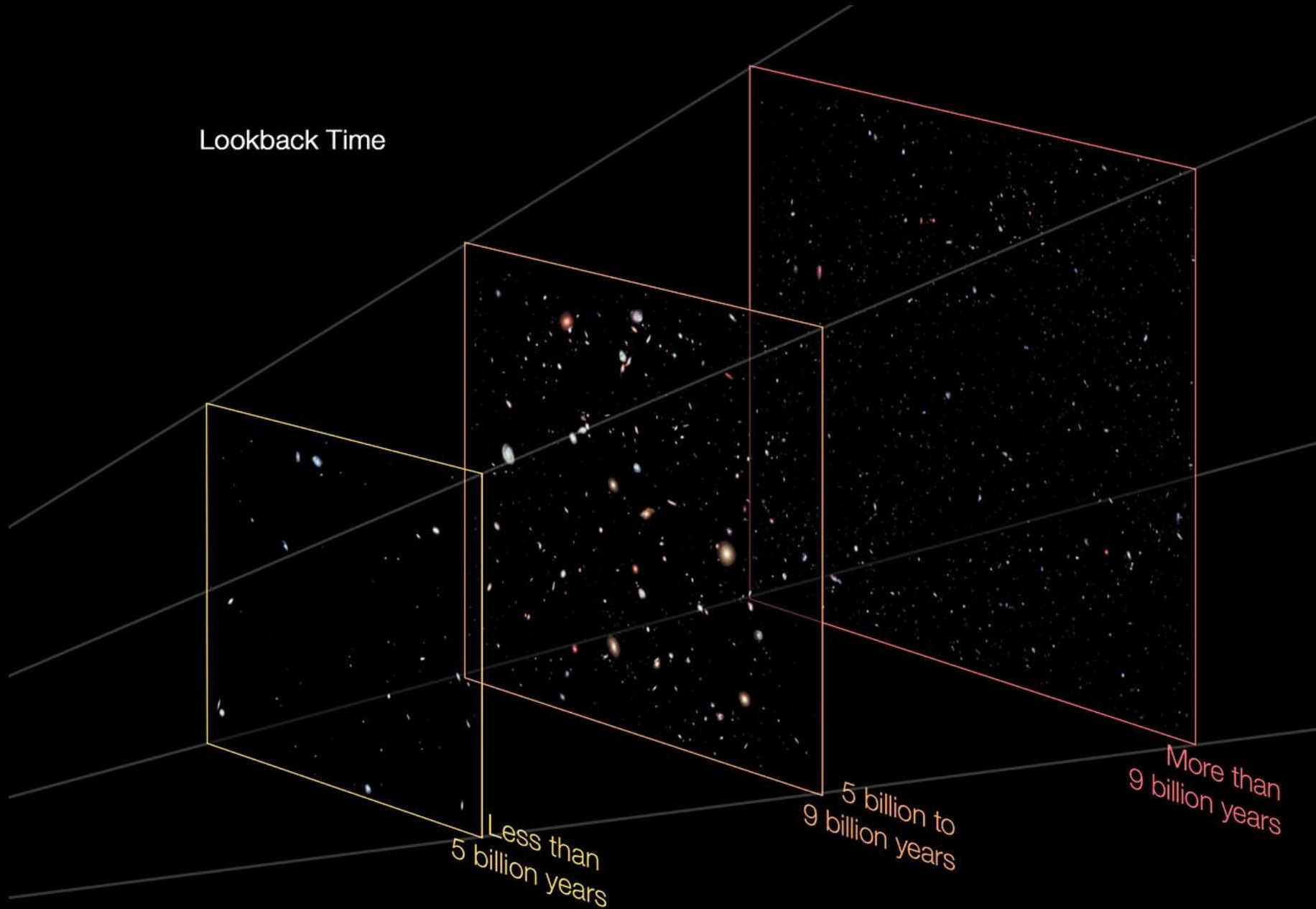






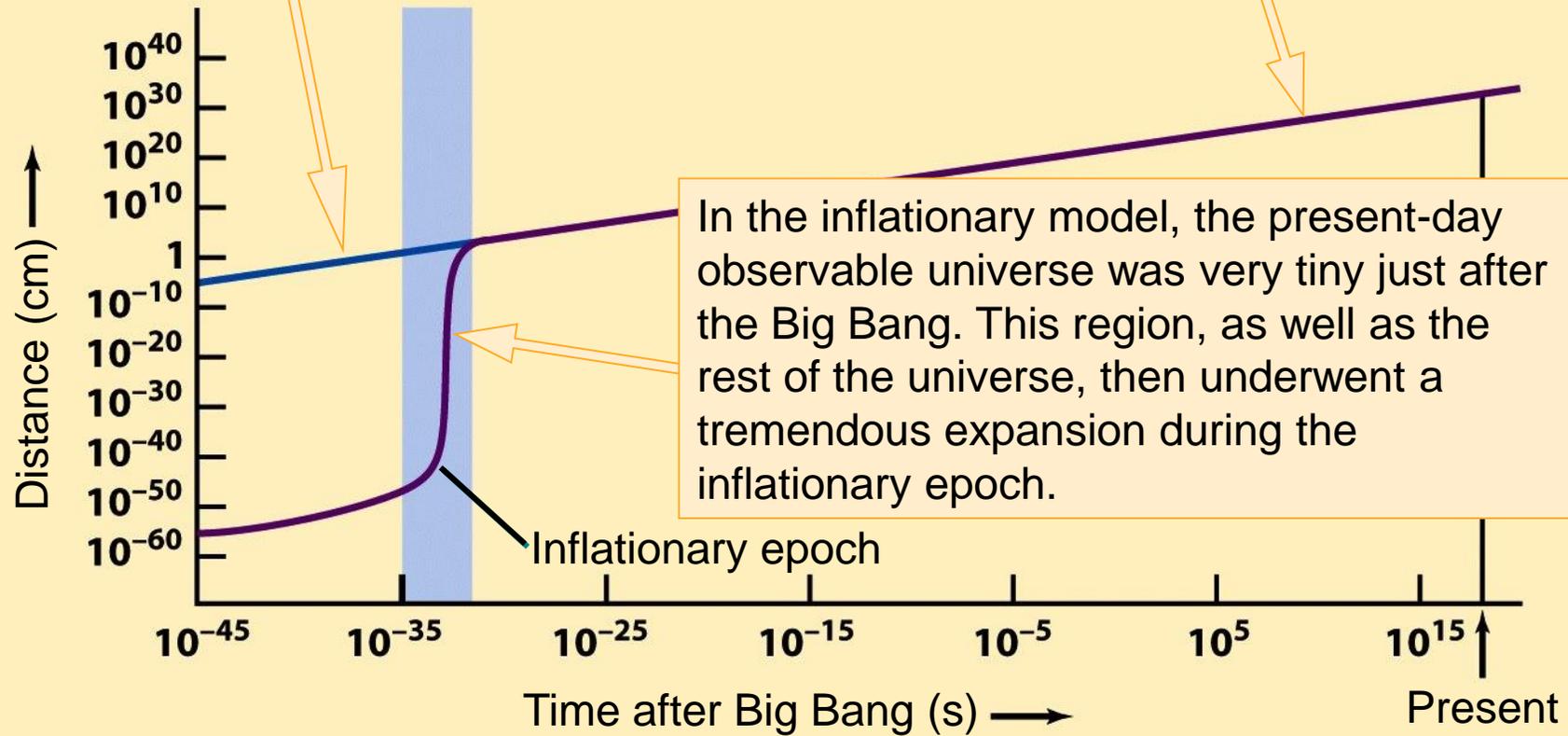
Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

Lookback Time

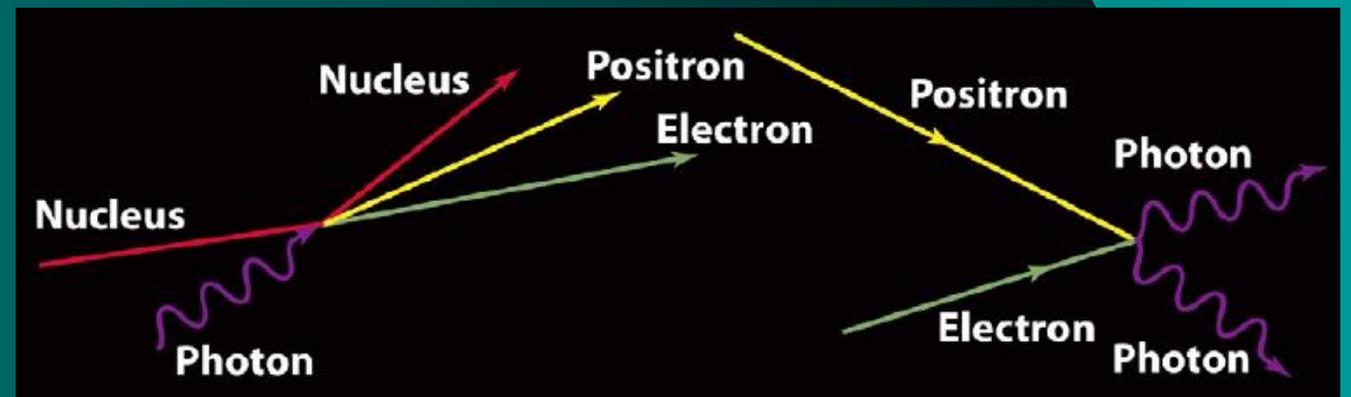


Had inflation not taken place, the present-day observable universe would have had to have been relatively large just after the Big Bang.

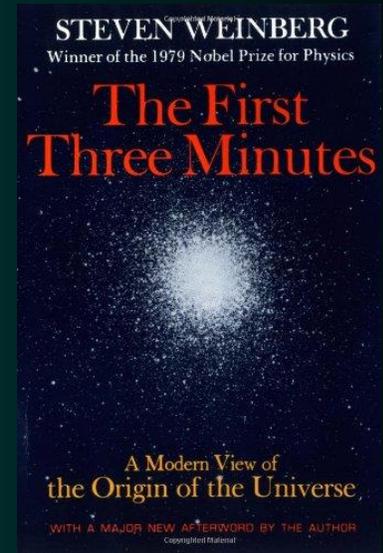
Once the inflationary epoch had ended, the universe continued to expand in a more gradual way down to the present day.



- 暴脹結束後，在 10^{-12} 秒時，宇宙冷卻到 10^{15} K，電磁力與弱作用力分離
- 四種基本力各自獨立，各自與粒子（構成中子與質子的夸克、反夸克，以及微中子、反微中子、電子、正子等）作用
- 在 10^{-6} 秒時，溫度降到 10^{13} K，原來各自獨立的夸克得以聚集在一起 (**confinement**)
- 光子撞擊到原子核 → **pair production**（亦即同時產生一般物質與對應的反物質）

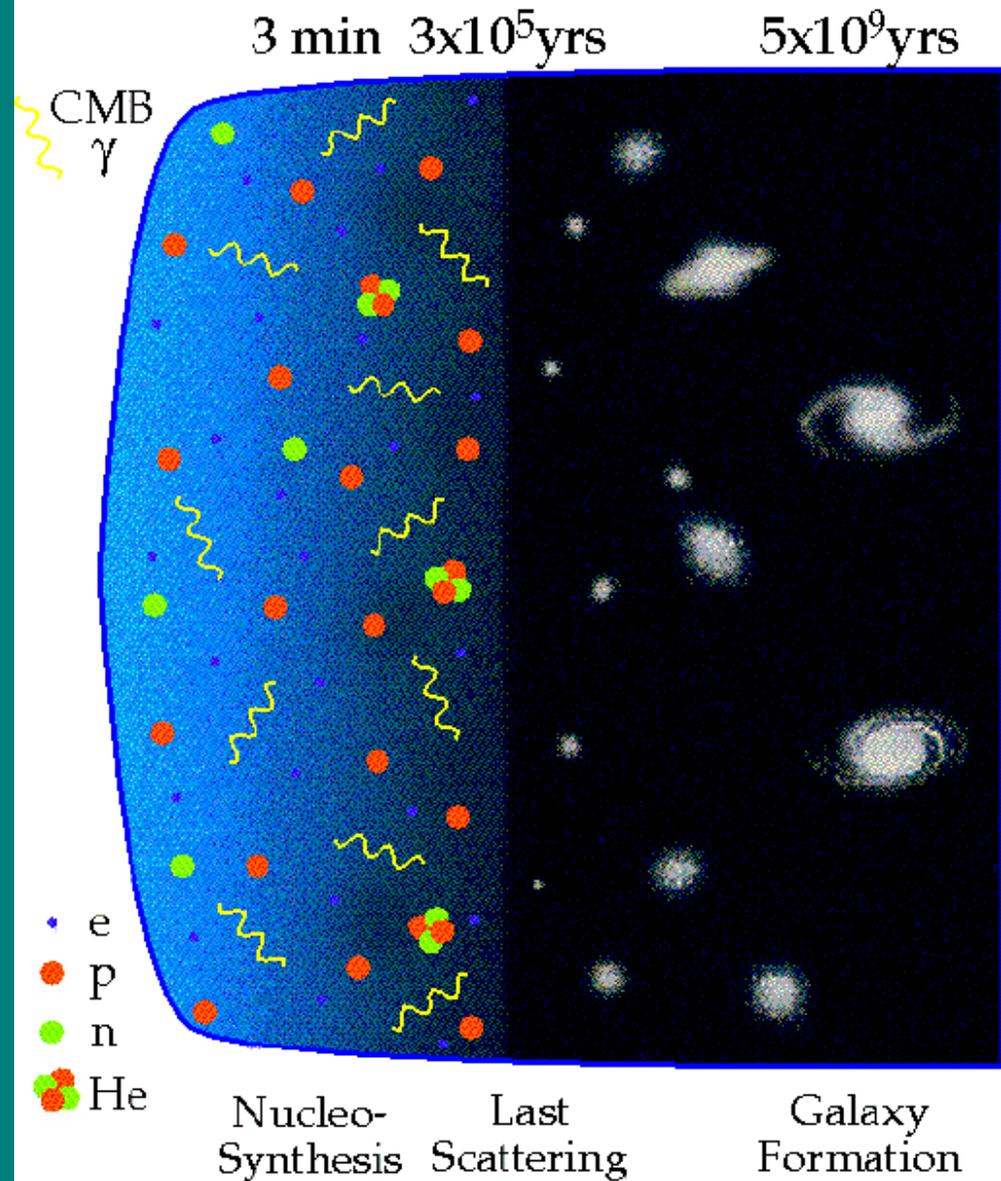


- 大霹靂之後大約 3 分鐘，核融合反應製造了氦元素與少量的鋰 (lithium)
- 又過了幾分鐘，溫度更低，融合出更重的原子核（碳、氧等），但是極微量
- 氫、氦、鋰是質量最小、最簡單的元素，其他重元素絕大多數都是恆星演化的產物
- 大霹靂後 24,000 年 ($z = 5200$) 之前，宇宙由輻射（能量）所主宰 (radiation-dominated) 變成由物質所主宰 (matter-dominated)，物質彼此吸引，形成恆星，聚集成星系等。 $T_{\text{rad}} \propto (1 + z) = 5200 \times 2.725 \approx 14,000 \text{ K}$

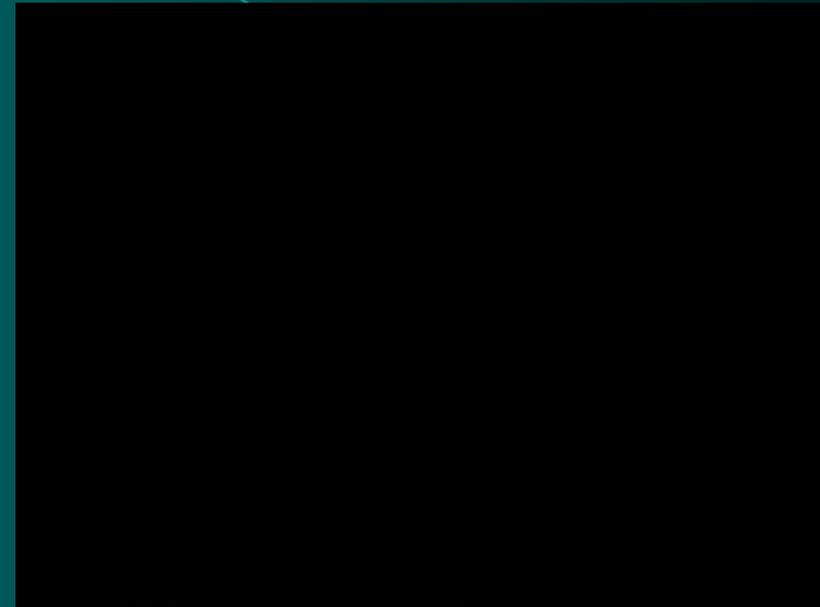


- 宇宙在形成後 380,000 年之前 ($z \sim 1100$)，電子與離子無法結合（電漿態），光子跑不遠。整團電漿發光，但是看不到來自「裡面」的光，這時的宇宙處於 **primordial fireball** 狀態
- 之後，光子與物質分離 (**decoupling**)，電子得以繞行原子核，才得以形成原子 (**era of recombination**)。由於原子間很寬廣，光子不易被吸收，宇宙從不透明變成透明。我們也才「看得到」最初的宇宙（這是我們能看到最早的宇宙）。當時宇宙溫度為 3000 K → 輻射最強處波長為 0.001 mm, i.e., microwave
- 我們完全無法看到 380,000 年以前的宇宙

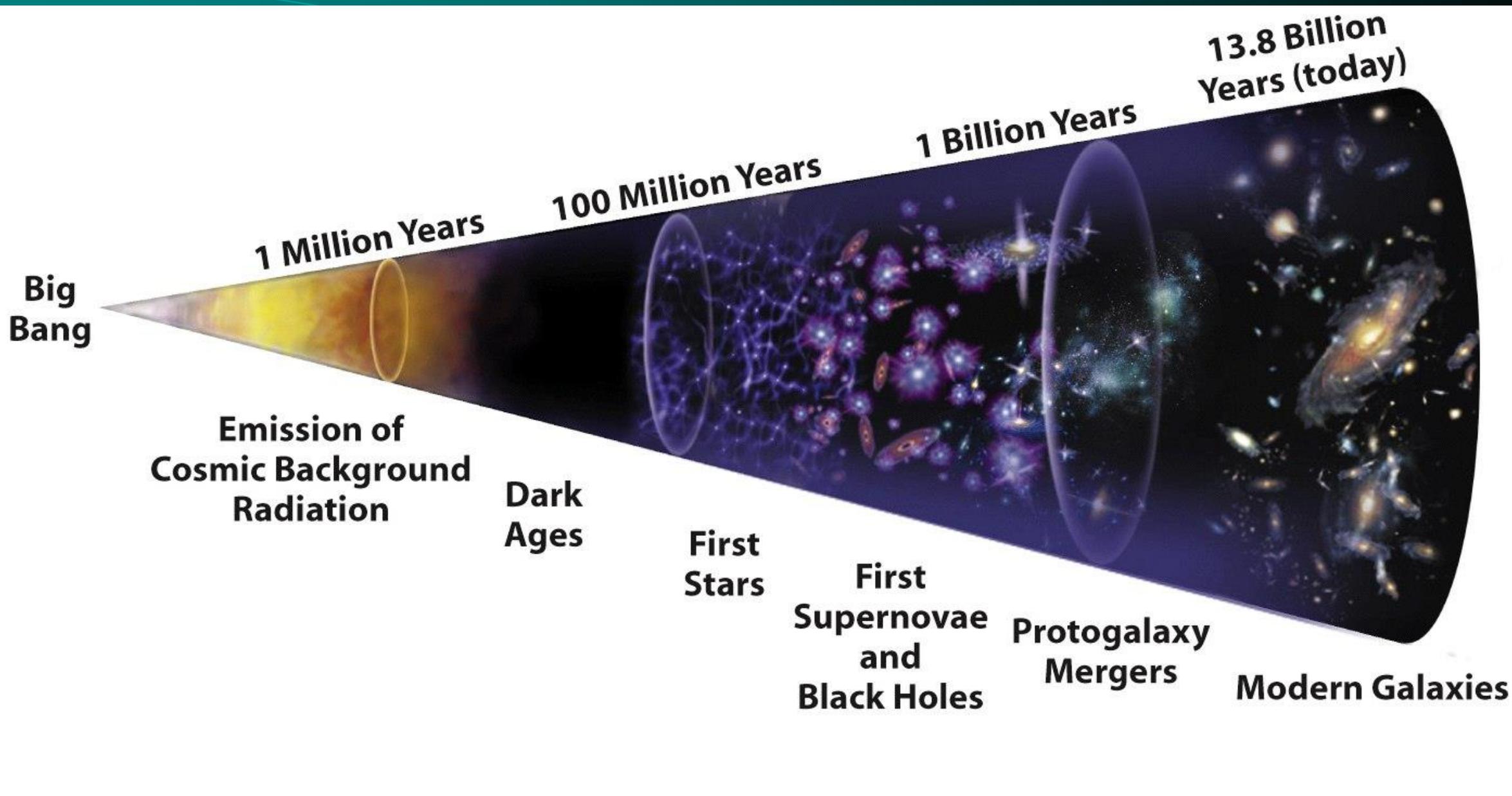
(Very) Brief History

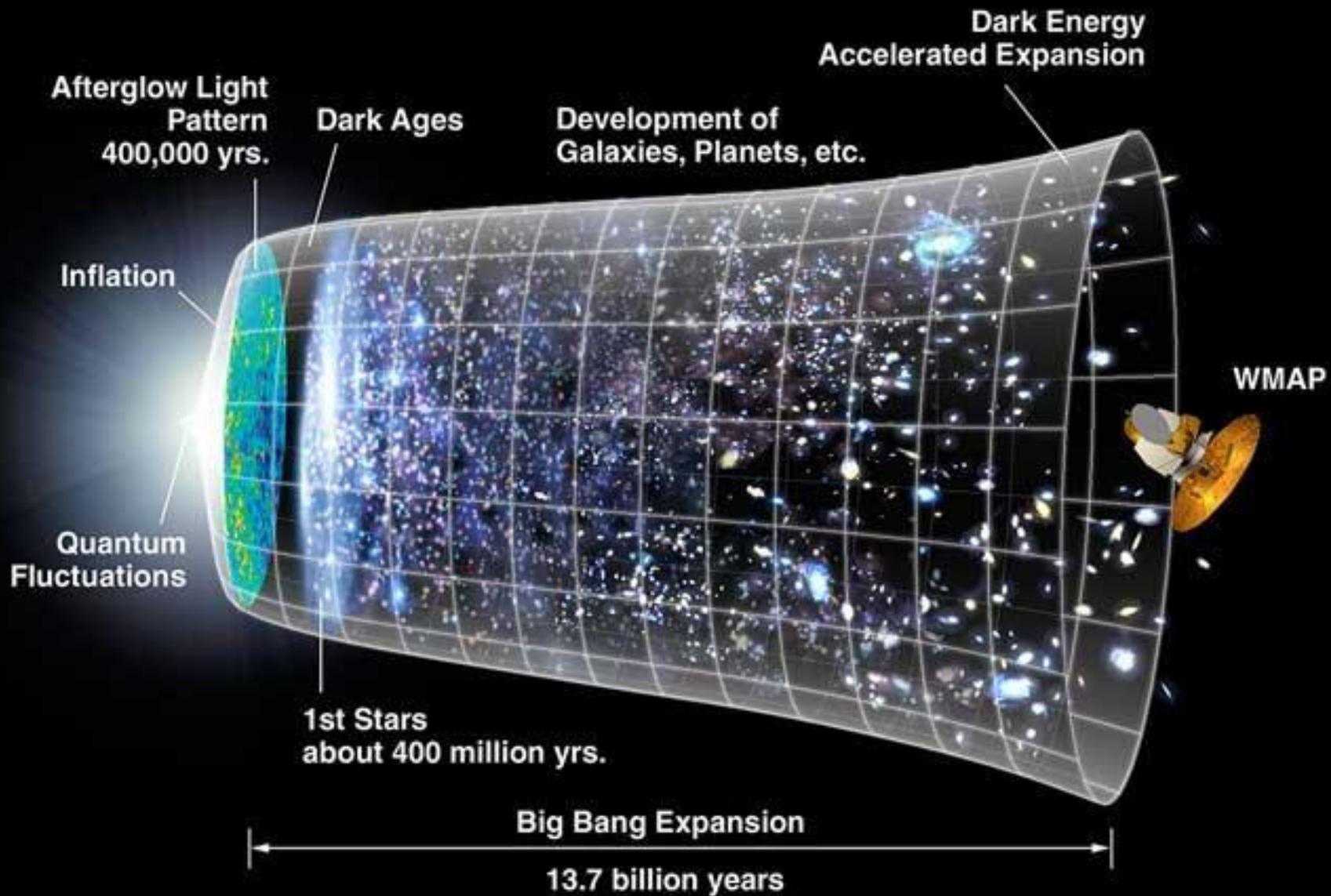


Structure formation

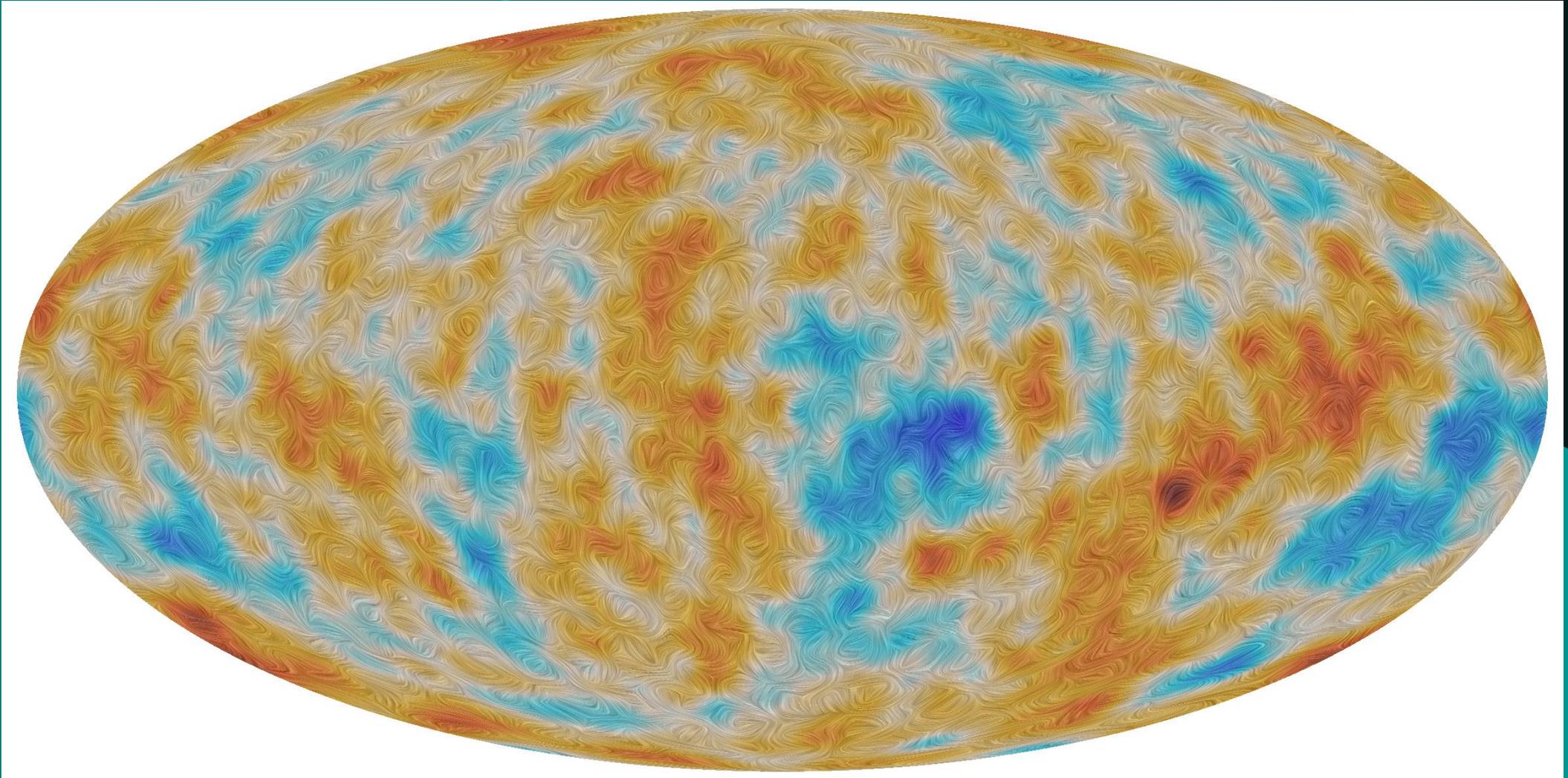


- 觀測顯示 Population II stars 在大霹靂之後2億年開始形成，星系在大霹靂之後6億年開始成形，而20億年之內聚集成星系團
- 第一代只有超大型恆星100-500 M_{\odot}
- 從 380,000年 decoupling 到第一代恆星形成，當時的宇宙處於“dark age”
- 在 600 Myr 到 6 Byr 之間，恆星大量形成。OB 等大質量恆星隨後死亡，星系中缺乏雲氣形成下一代恆星 → 橢圓星系
- 螺旋星系當中則不斷有恆星形成活動
- 恆星形成過程決定了星系早期結構





Color: Temperature differences Texture: Direction of polarized light

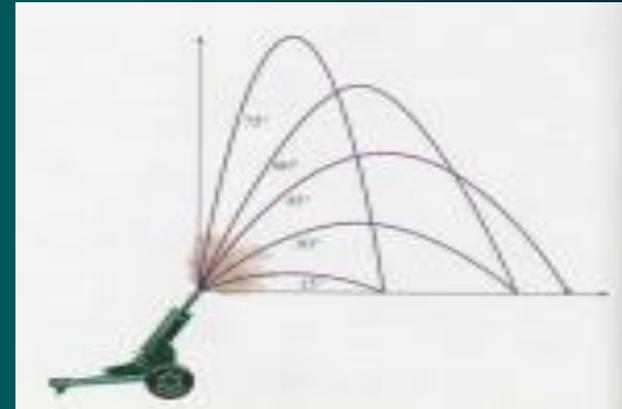
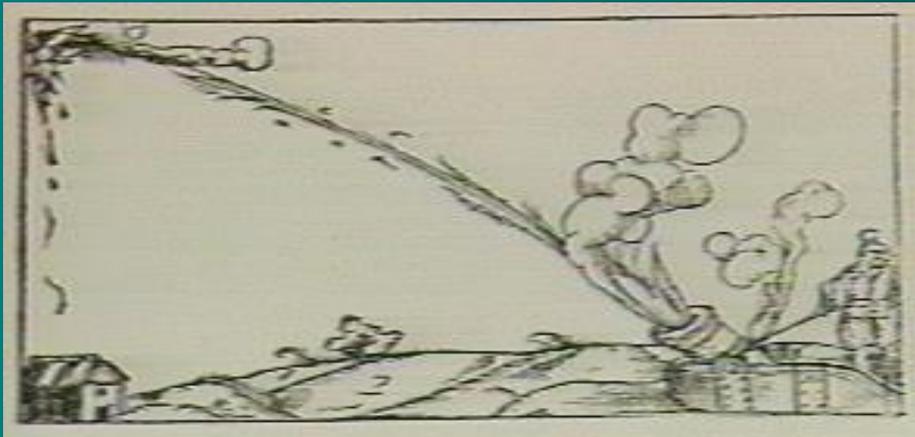
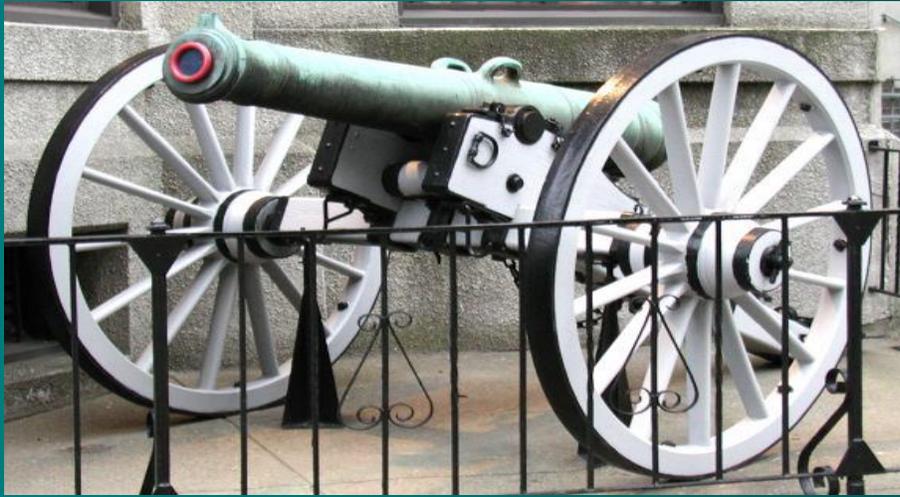


Polarization of the CMB measured by the *Planck* mission
Polarization \leftarrow last scattering of CMB with electrons

宇宙的命運

- 端視宇宙「拉回來」的力量有多強
- 也就是宇宙包含了多少物質，這些是萬有引力的來源，提供了拉回來的力量
- 物質多 → 膨脹減速 → 膨脹停止 → 收縮
最後宇宙回復到一個點 → **大崩陷 (Big Crunch)**
- 物質少 → 膨脹減速 → ... → 永遠膨脹下去
→ **溫度越來越冷，最後一切歸於死寂**

上去的，不一定下得來！

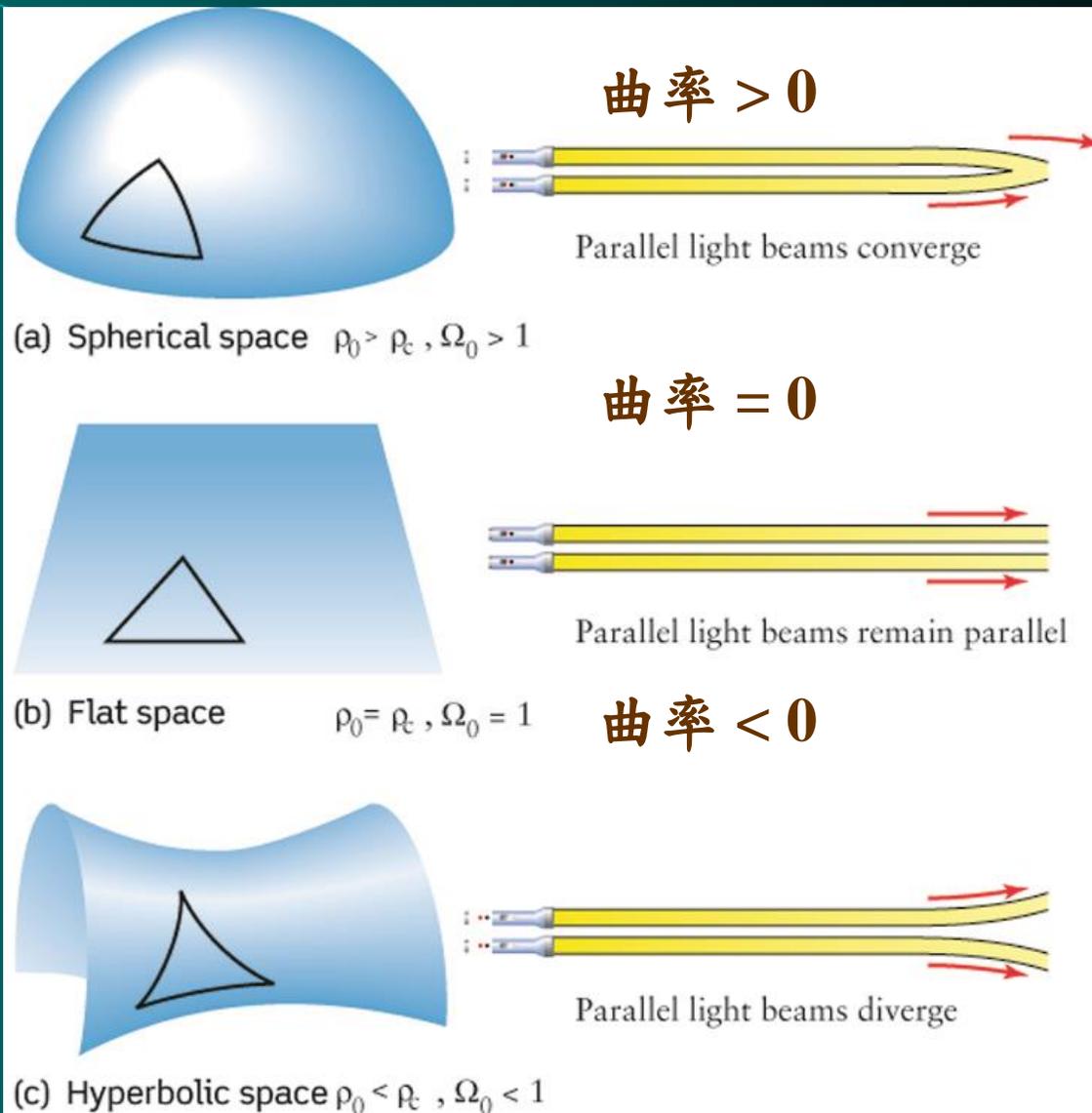


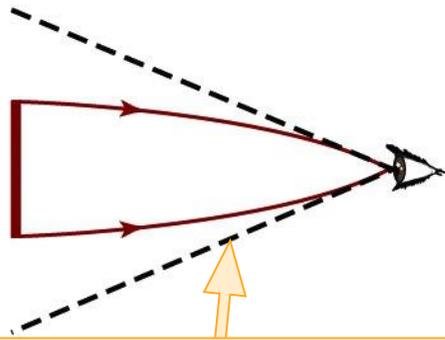
宇宙的幾何形狀

A closed universe

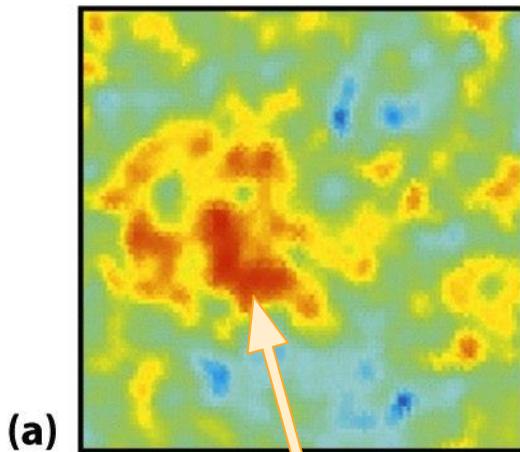
Space is flat, with
no limit.

An open universe

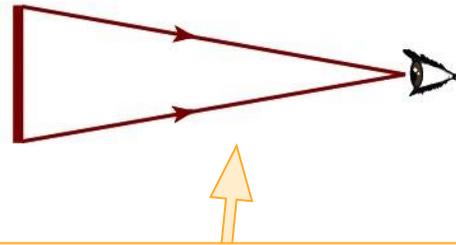




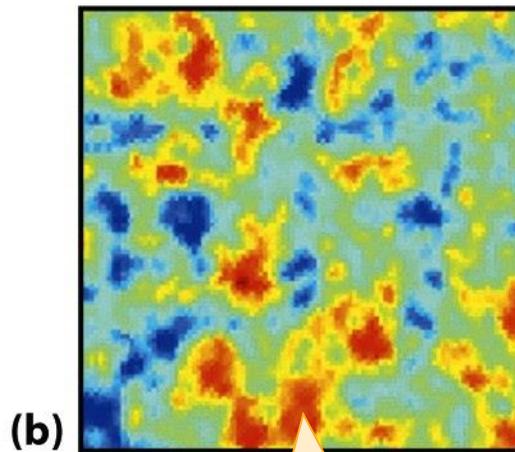
If the universe is closed, light rays from opposite sides of a hot spot bend toward each other ...



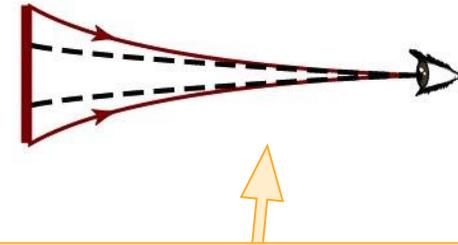
... and as a result, the hot spot appears to us to be larger than it actually is.



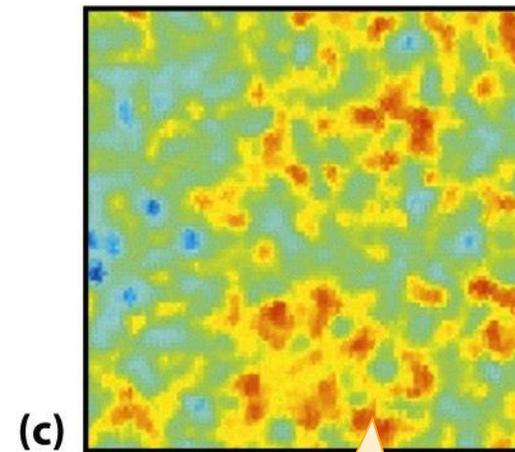
If the universe is flat, light rays from opposite sides of a hot spot do not bend at all ...



... and so the hot spot appears to us with its true size.

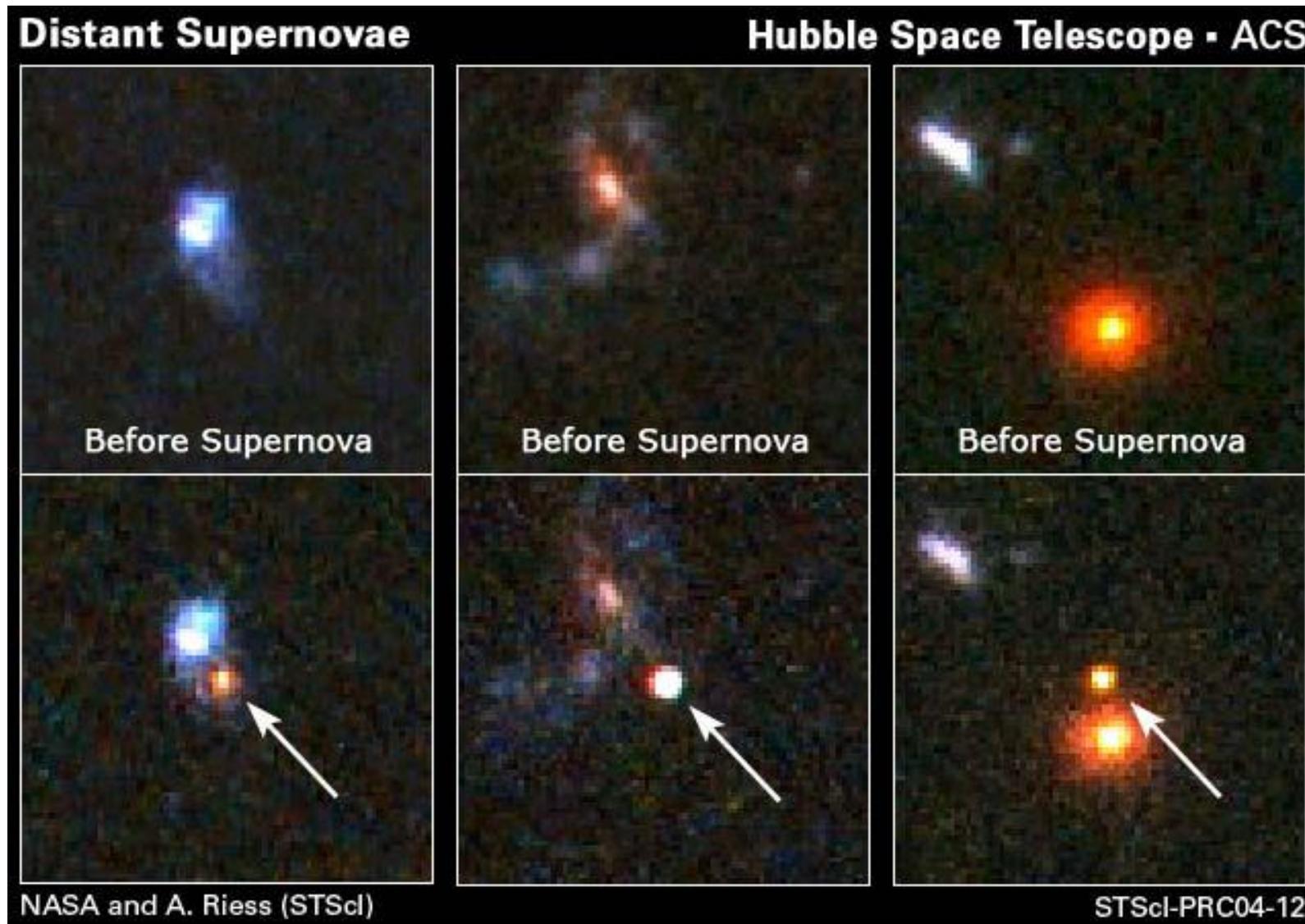


If the universe is open, light rays from opposite sides of a hot spot bend away from each other ...

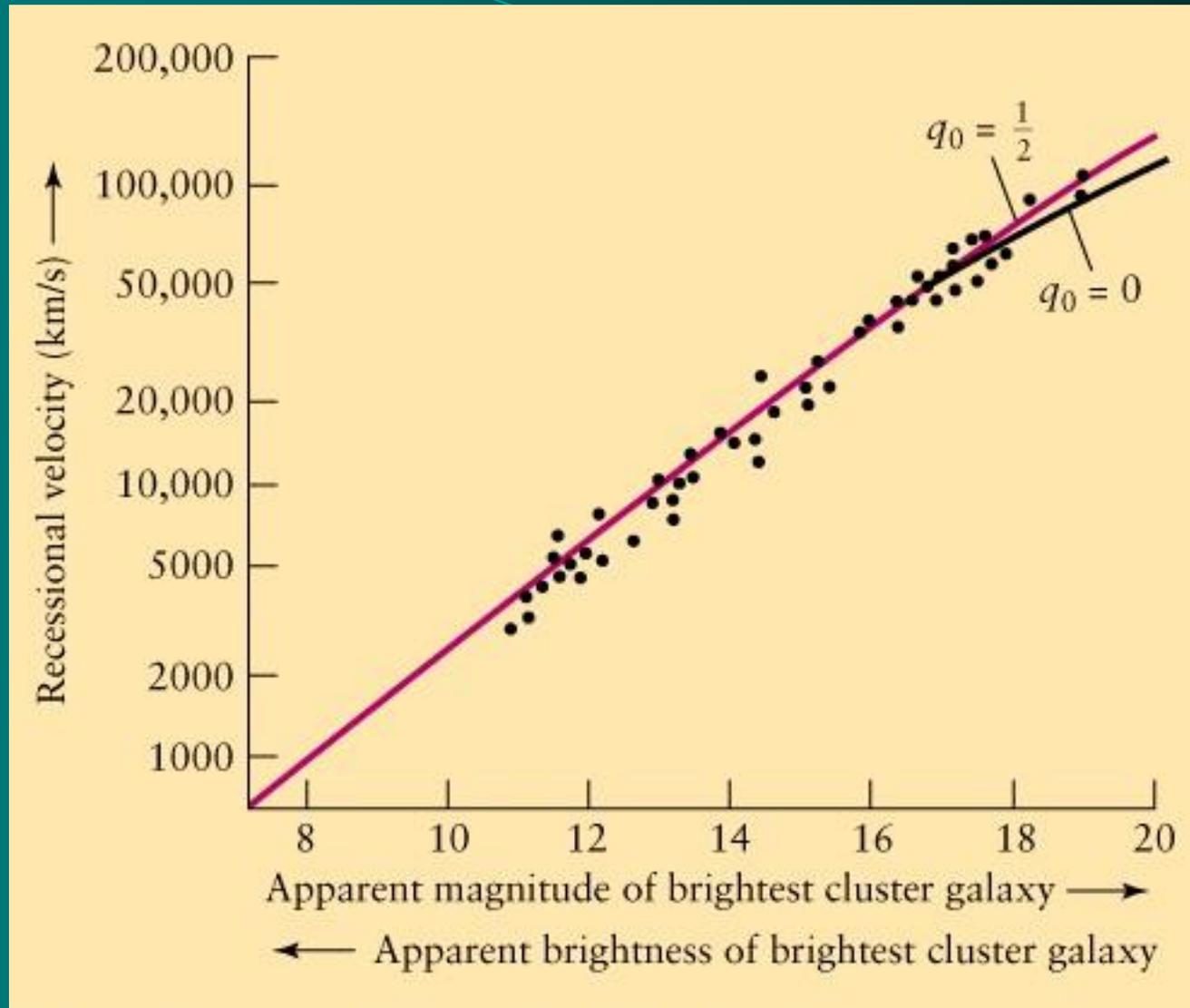


... and as a result, the hot spot appears to us to be smaller than it actually is.

觀測遙遠星系中的超新星 → 宇宙如何膨脹



以前的宇宙膨脹得比較慢 → 宇宙加速膨脹

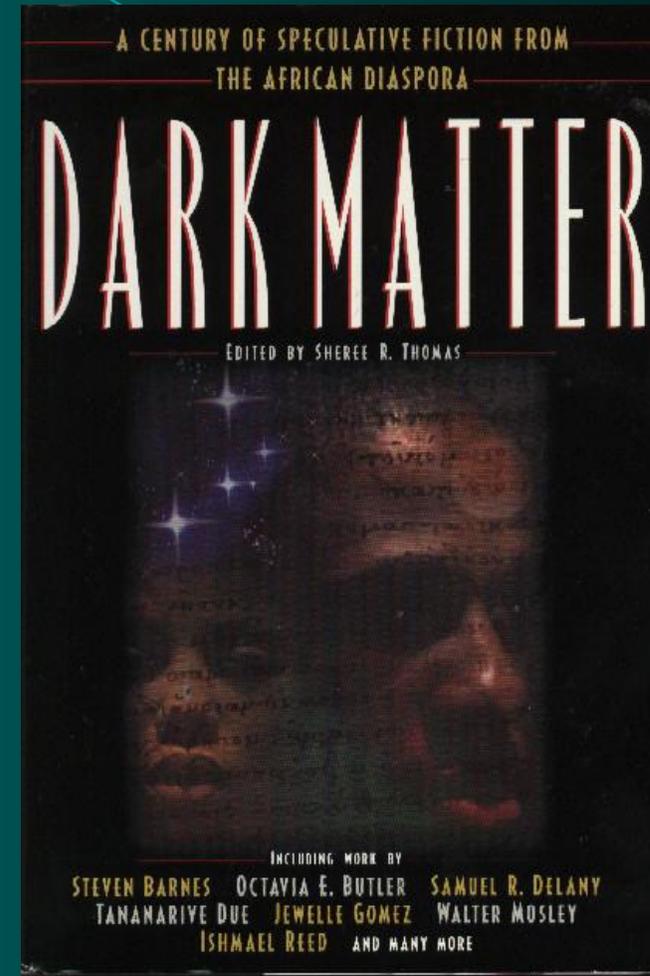
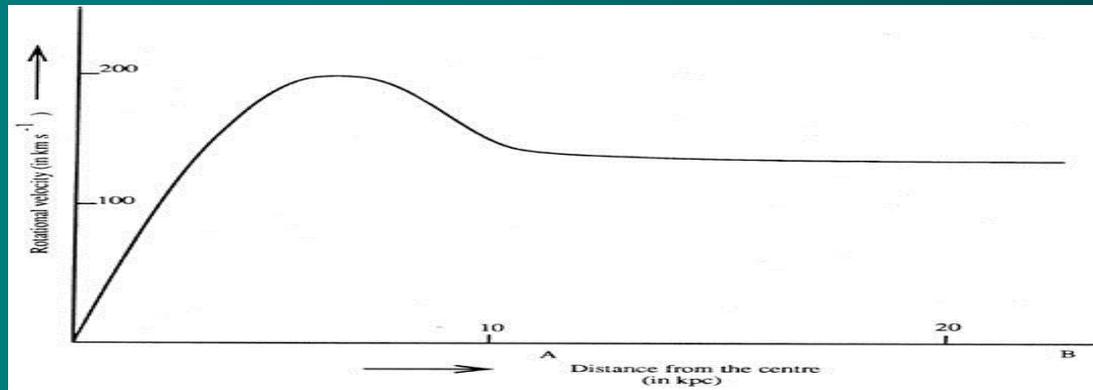
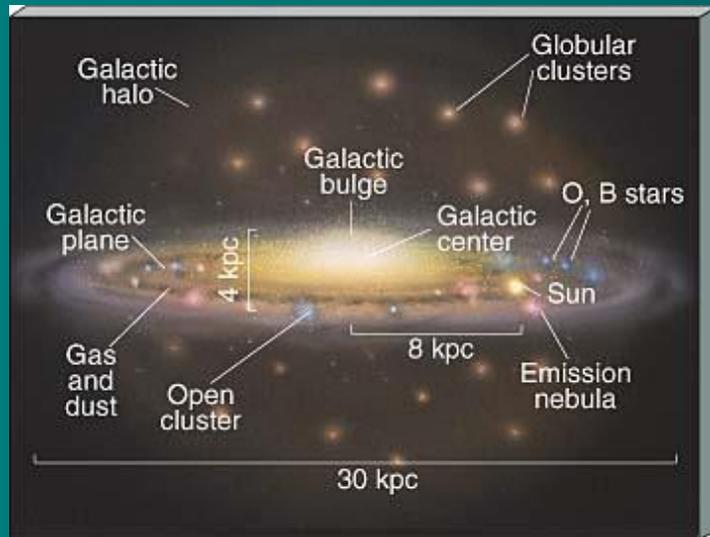


- 宇宙充滿**黑暗物質**(dark matter)，它們不發光，但是我們確定它們存在，因它們的萬有引力影響了發光物質的運動
- 目前的觀測證據顯示，宇宙是開放的，也就是將會無限擴展下去
- 這兩年新的研究結果，顯示宇宙在**加速**膨脹
→ **黑暗能量** (dark energy)

想像在地面向上丟銅板，不但不減速，反而向上加速！？

- 死寂宇宙將加速到來？

宇宙仍有太多未知 X 射線、X 行星、X 檔案 —— 暗物質



暗物質是什麼東西？

- 不知道！
- 但它確實存在，因為雖然它不發光（電磁波），但是它的萬有引力會影響會發光物質的運動



Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

暗能量

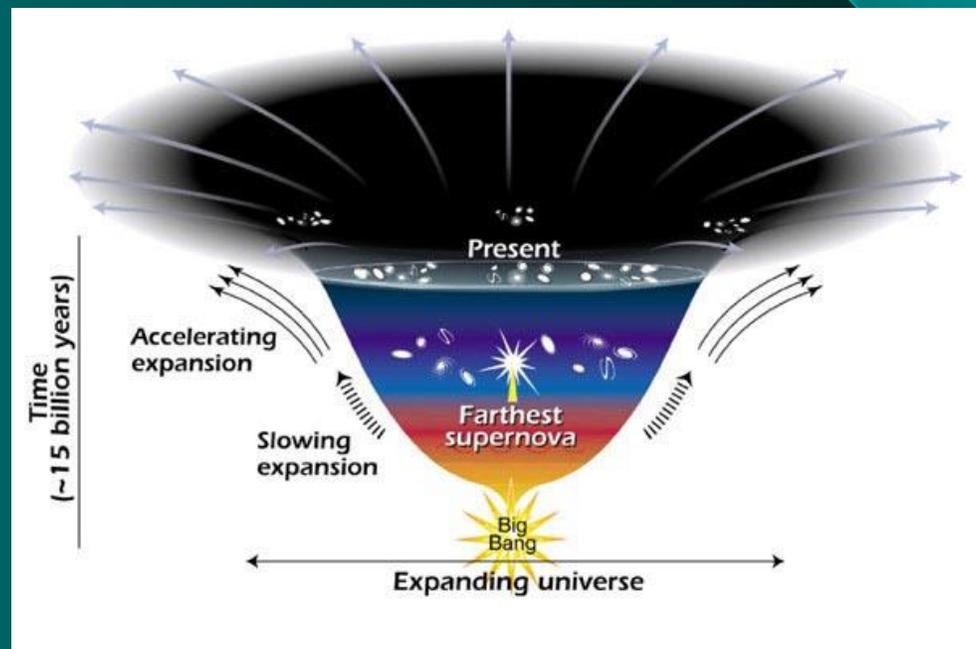
萬有引力只有「吸引力」

所以宇宙天體應該彼此吸引，即使目前在膨脹，也應該越來越慢

往上拋銅板，向上時越來越慢；
向下時越來越快

但觀測顯示宇宙卻
似乎越膨脹越快！
這到底怎麼回事？

不知道！



宇宙中的東西，大部分我們完全不曉得它們是什麼

