

# 天文学导论（四）星系与宇宙

第11讲：银河系

第12讲：星系

第13讲：膨胀的宇宙

第14讲：宇宙结构的起源

第15讲：宇宙的未来与极早期

# 天文学导论

## 第14讲

### 宇宙结构的起源

Cosmologists are often  
wrong but never in  
doubt

Lev Landau (1908–1968)



# 本讲内容

1. 星系团与大尺度结构
2. 结构的起源
3. 第一缕星光
4. 星系的演化

# 教材学习

- Chapter 23      Large-Scale Structure in the Universe

# 学习目标

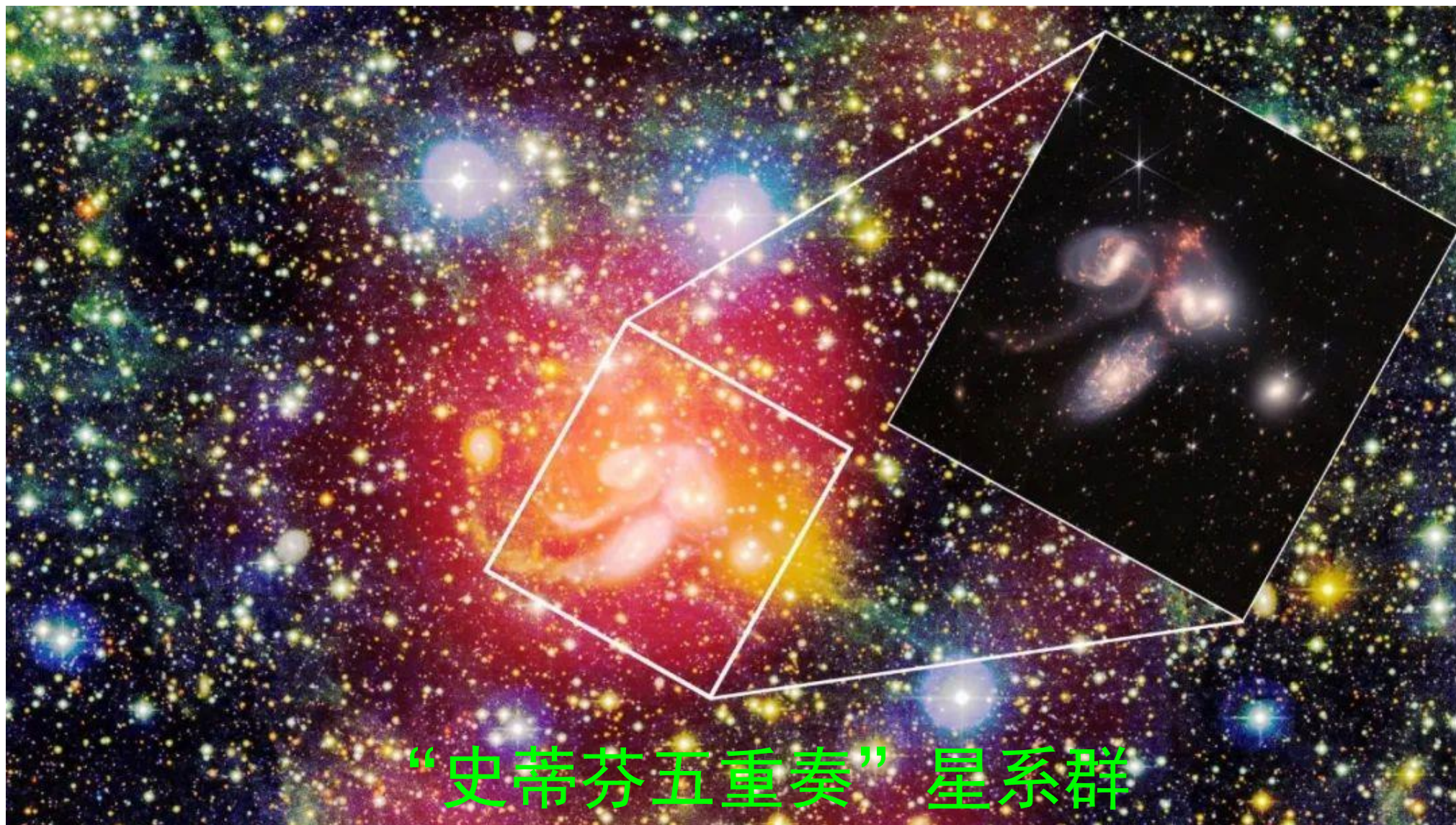
- 星系群、星系团、超星系团、宇宙大尺度结构
- 星系团（群）中暗物质的3类测量方法及结论
- $\Lambda$ -CDM 模型的主要概念，宇宙结构形成的主要过程
- 第一代恒星及星系的主要性质及观测现状
- 星系演化的基本概念及主要过程
- 超大质量黑洞成长的方式

# 1、星系团与大尺度结构

- 引力使星系聚集，形成宇宙的结构
  - 主要依靠星系之间的暗物质
- 根据成员星系的多少（形状），星系聚集为
  - 星系群：数十个星系，结构松散， $\sim 3\text{Mpc}$
  - 星系团：数千个星系，结构规则， $\sim 2\text{-}10\text{Mpc}$
- 孤立星系



\*FAST发现最大中性氢气体团（《自然》2022.10.19）



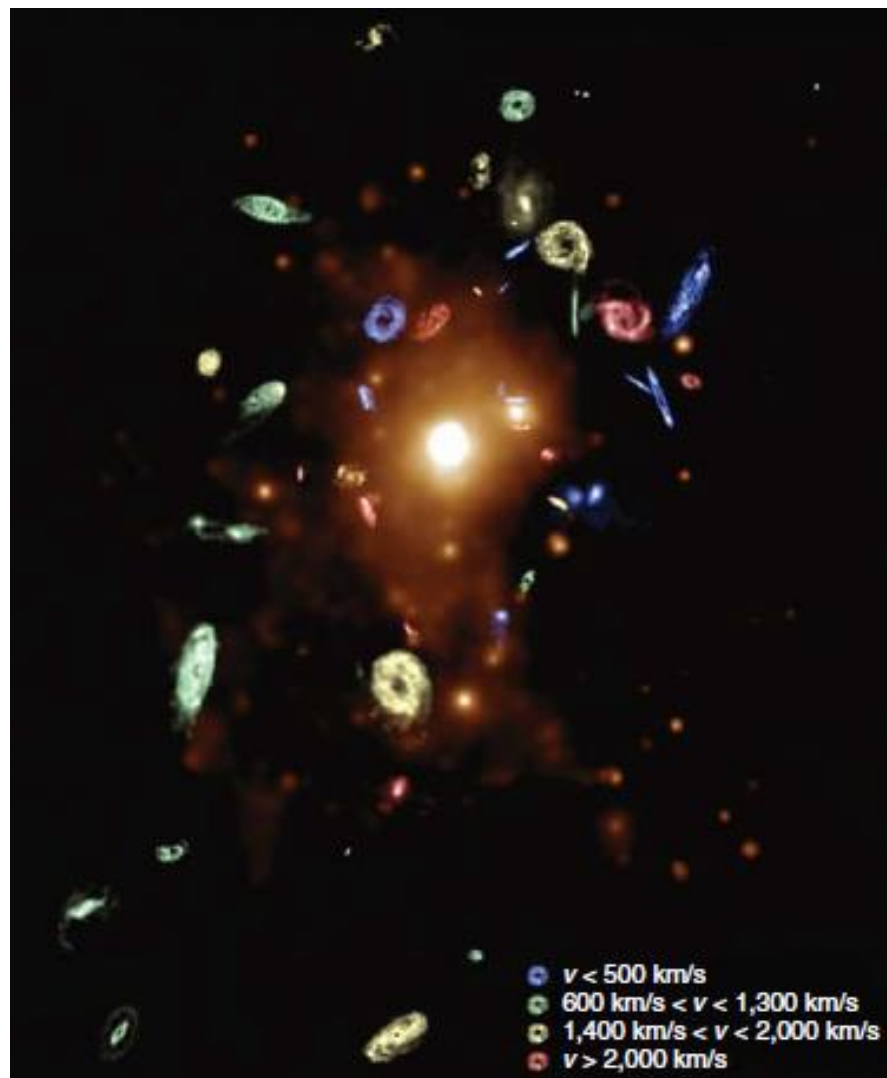
# 1.1、 星系团

- 矮星系数量远多于巨星系
- 旋涡星系常见
- $\sim 1/4$ 星系团中，椭圆星系主导
- 近邻星系团：室女星系团、后发星系团



# 室女星系团

- 距离16.5Mpc
- 跨度  $\sim 3$  Mpc
- 星系  $\sim 2500$ 个
- 大部分是旋涡星系
- 中心是被热气体的X射线辐射（桔色）环绕的3个巨椭圆星系M87等



# 后发星系团

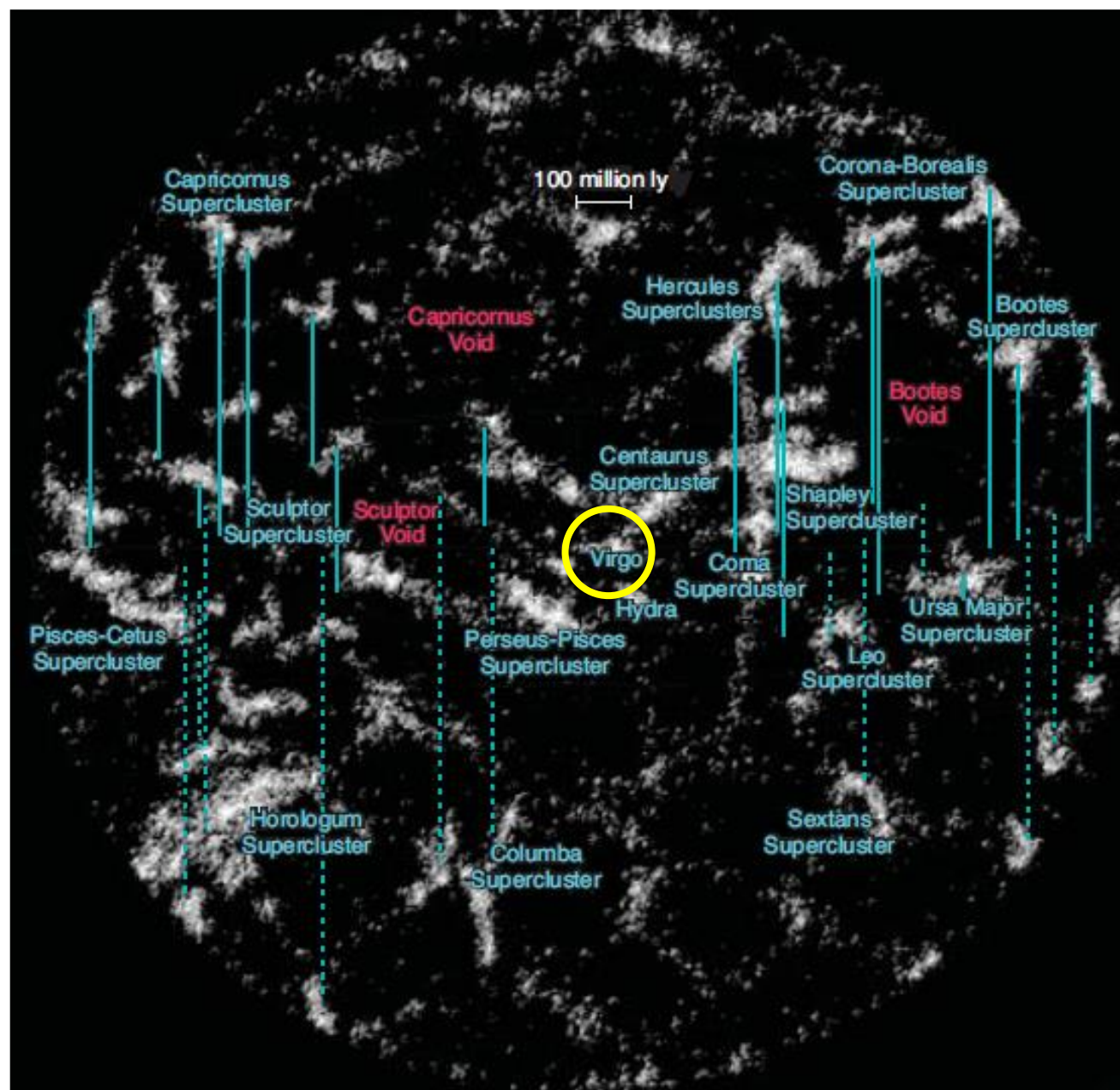
- 距离  $\sim 100$  Mpc
- 直径  $\sim 3$  Mpc
- 成员星系  $\sim 6700$
- 椭圆星系位于星系团中心
- 漩涡星系分布在外围



## 1.2、超星系团

- 由多个星系群和星系团所组成的更大结构
- 含数万-数十万个星系
- 尺度~30 Mpc
  
- 室女（本）超团：本星系群+室女星系团+.....
  - $10^{15}$ 倍太阳质量，数万个星系
  - 形状不规则，“中心”在室女星系团附近

## 近邻超星系团



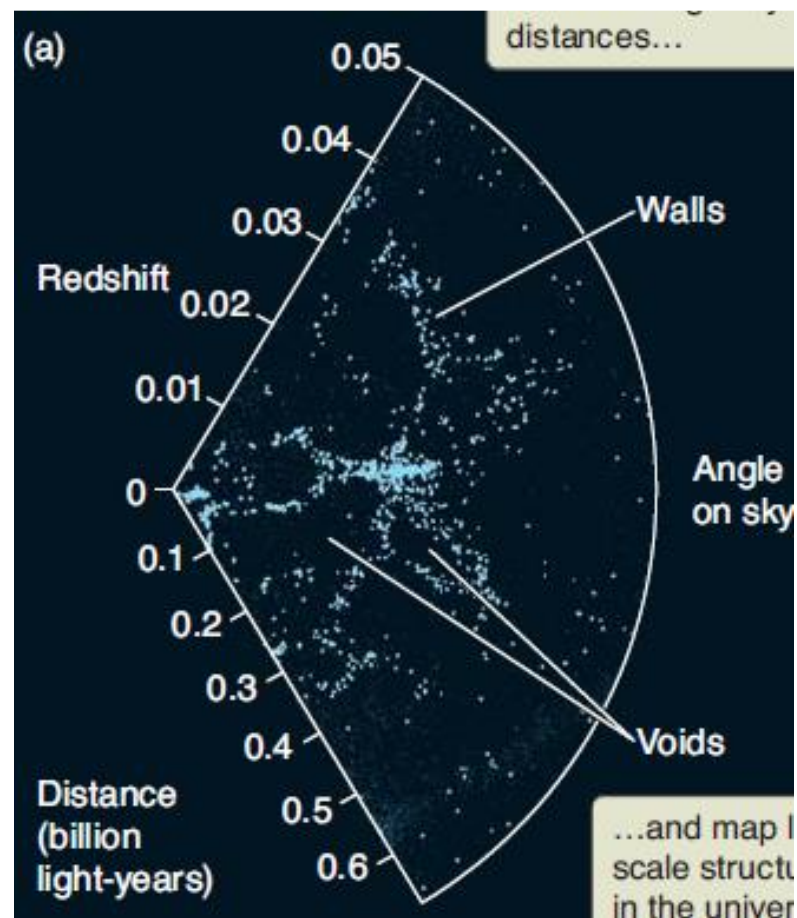
# 绘制宇宙的大尺度结构

星系红移巡天测量大量星系的距离

- 由星系光谱测量星系的红移
- 利用哈勃定律得出星系的距离

# 大尺度结构

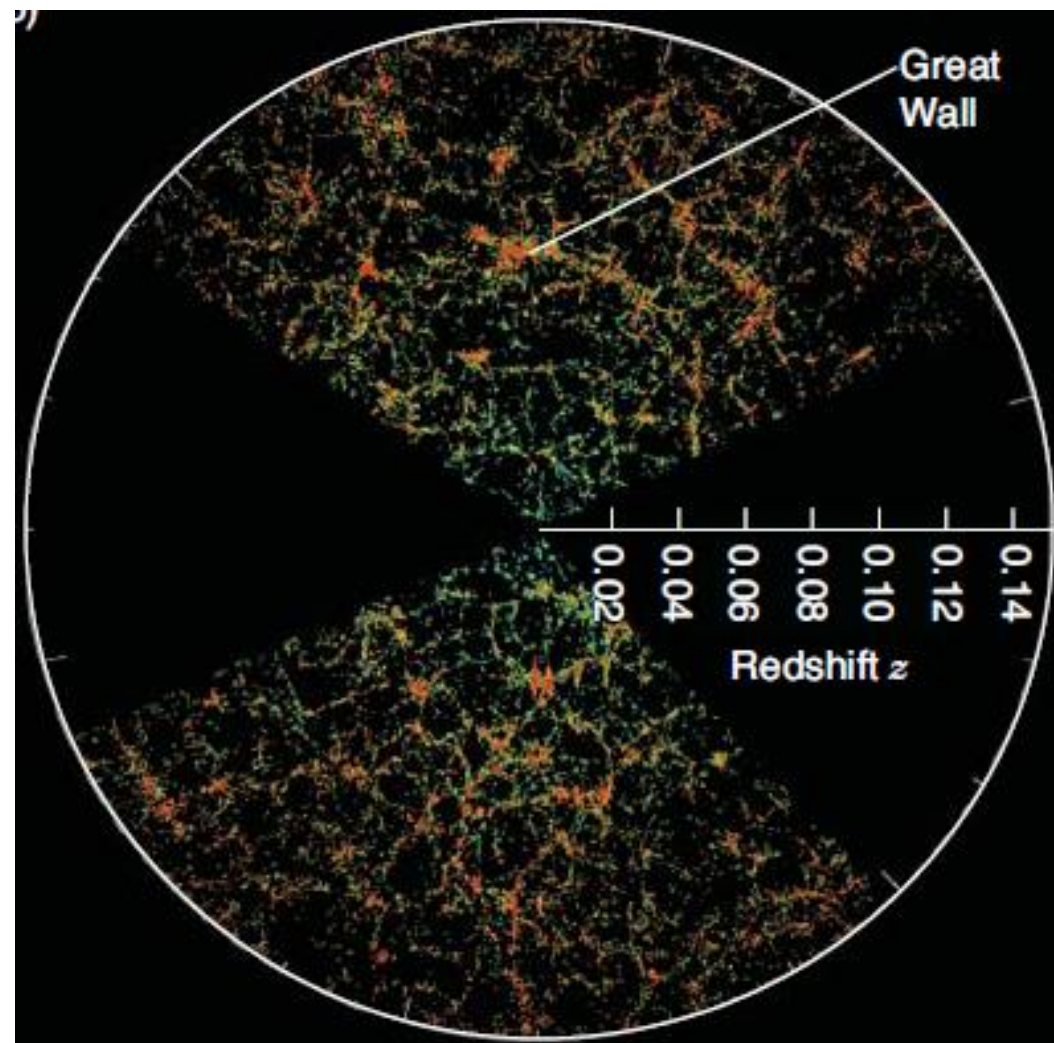
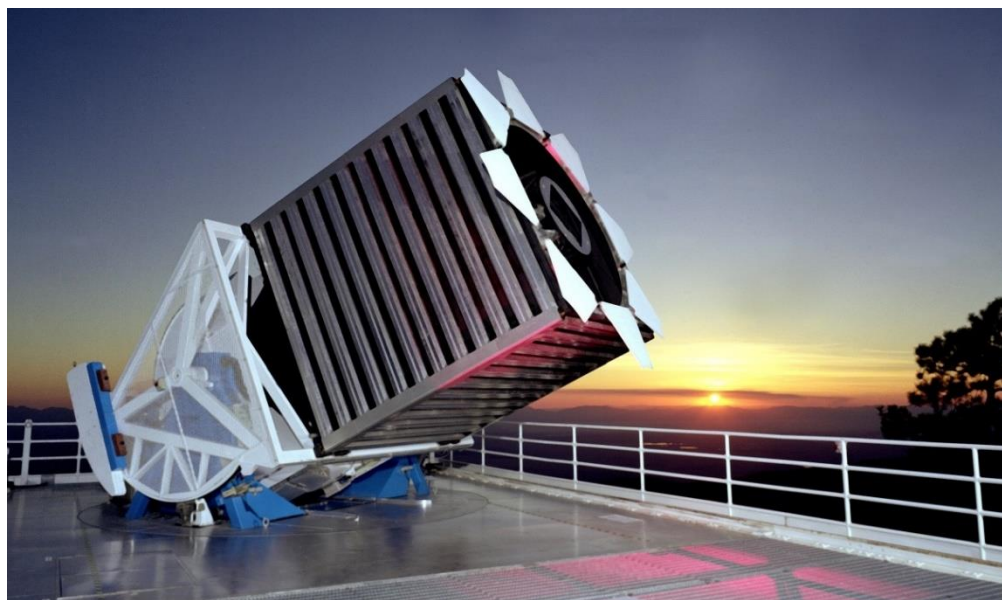
- 星系不是随机分布，而是组成复杂的网状结构
- 由星系组成的**纤维**和“**墙**”环绕着**巨洞** [几乎不含星系]



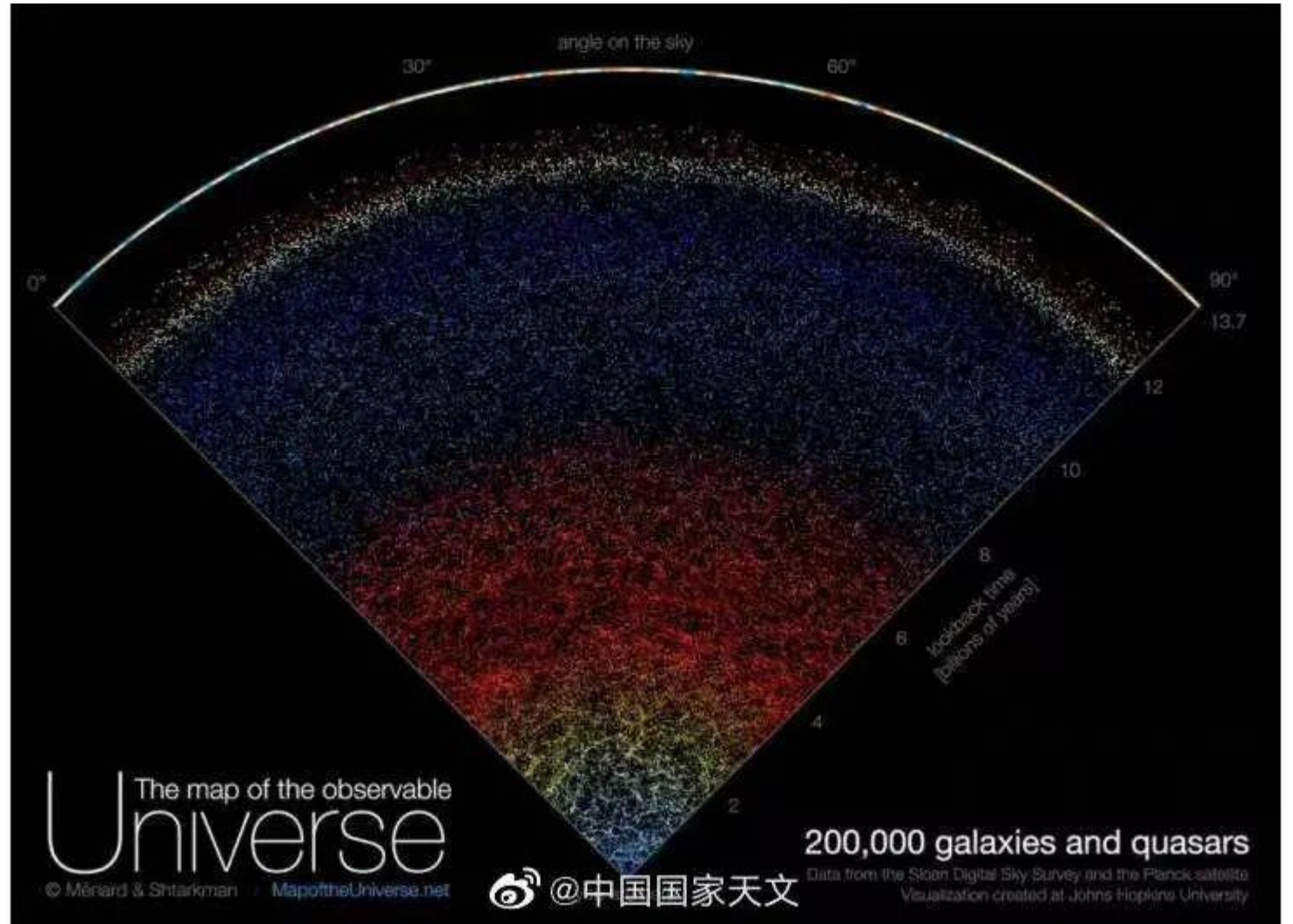


# The 2008 Sloan Digital Sky Survey map of the universe

- 距离达~20亿光年
- 67,000个星系
- 400 Mpc 长的长城



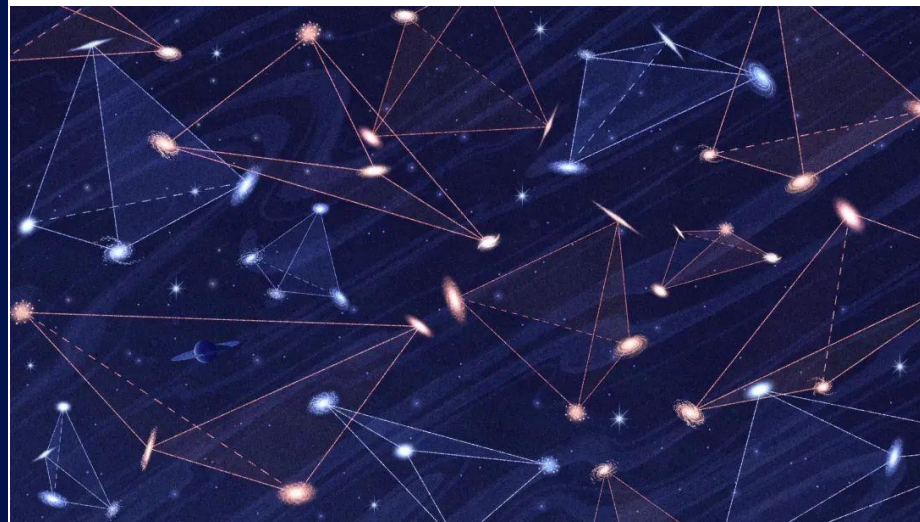
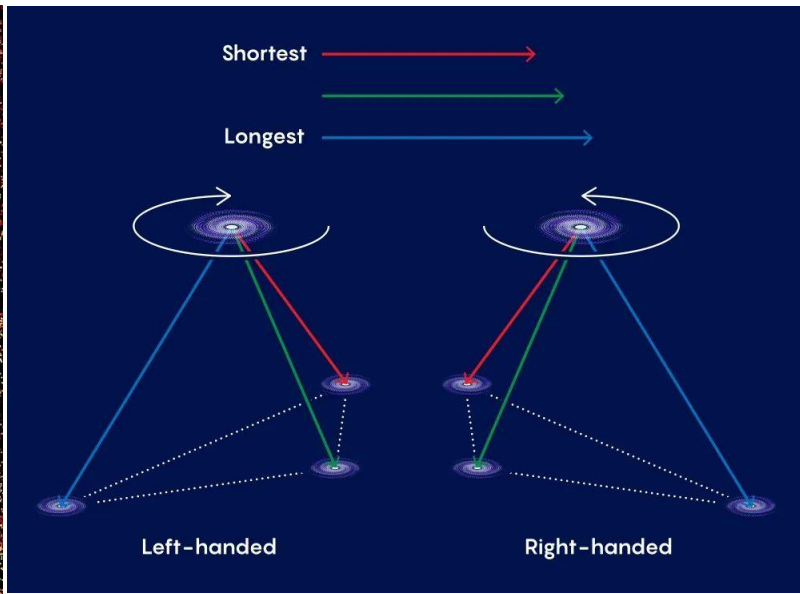
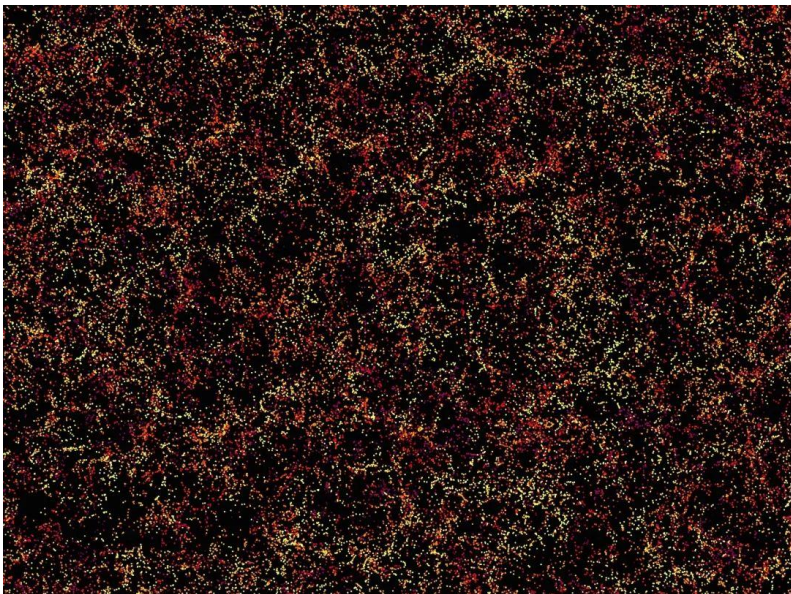
[\\*https://mapoftheuniverse.net/](https://mapoftheuniverse.net/)







最新研究表明，若将宇宙中四个星系连成一个四面体，该四面体形成某一种构型的概率比它的镜像构型的概率更大。如果被证实，那这将是诺奖级的成果。不过这个结论目前还需要进一步验证。



## 有望冲击诺奖！这一现象触及宇宙诞生的秘密

环球科学 环球科学 2022-12-15 21:00 发表于北京

撰文 | Katie McCormick

翻译 | 陶兆巍

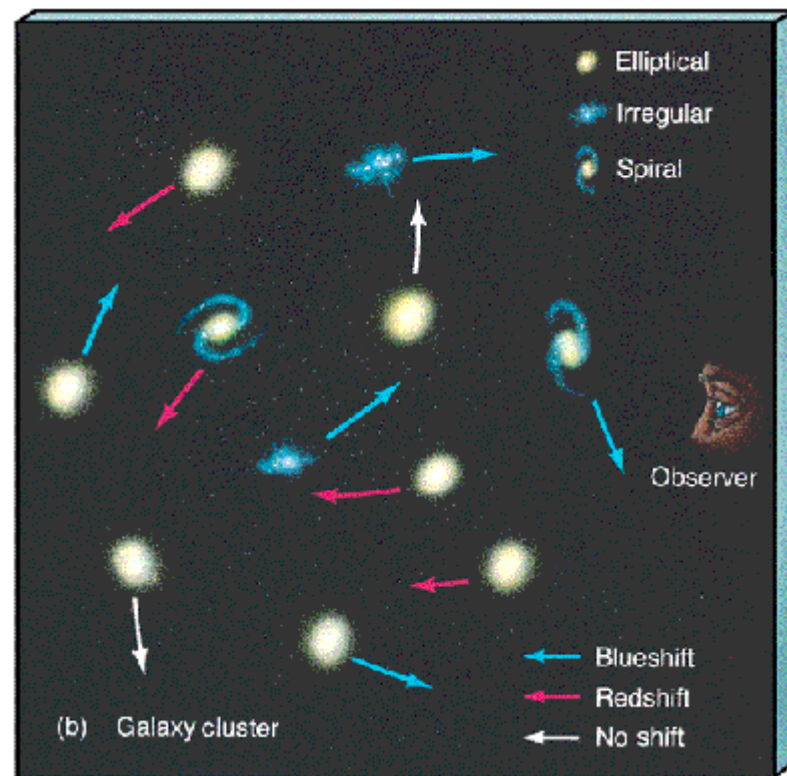
审校 | 王昱

## 1.3、暗物质主导星系团（群）

星系团中心有一巨星系，其它较小星系环绕其做轨道运动。某小星系轨道以内的引力质量为

$$M = \frac{rv_{\text{circ}}^2}{G}$$

星系运动表明暗物质主导  
星系群[团]的质量



例：星系团边缘的小星系到星系团中心的距离为3Mpc，其轨道速度=1,000km/s。则星系团的引力质量近似为

$$M = \frac{(9.3 \times 10^{22} \text{ m}) \times (10^6 \text{ m/s})^2}{6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2}$$

$$= 1.4 \times 10^{45} \text{ kg} \quad 7.0 \times 10^{14} M_{\odot}$$

暗物质=8-10倍亮物质

1933, Fritz Zwicky (1898–1974): 星系团的暗物质

1970s, Vera Rubin (1928– 2016): 星系的暗物质

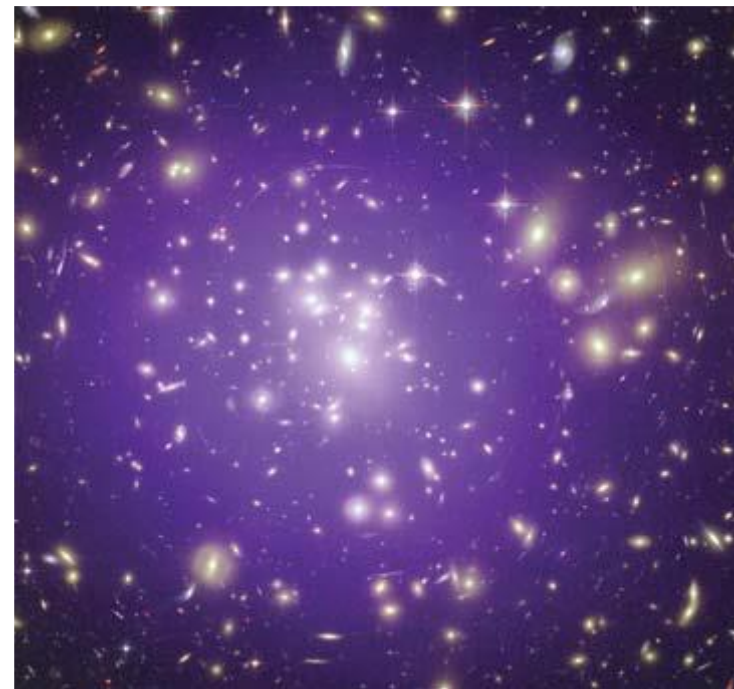




# 星系际空间的炽热气体表明暗物质大量存在于星系团

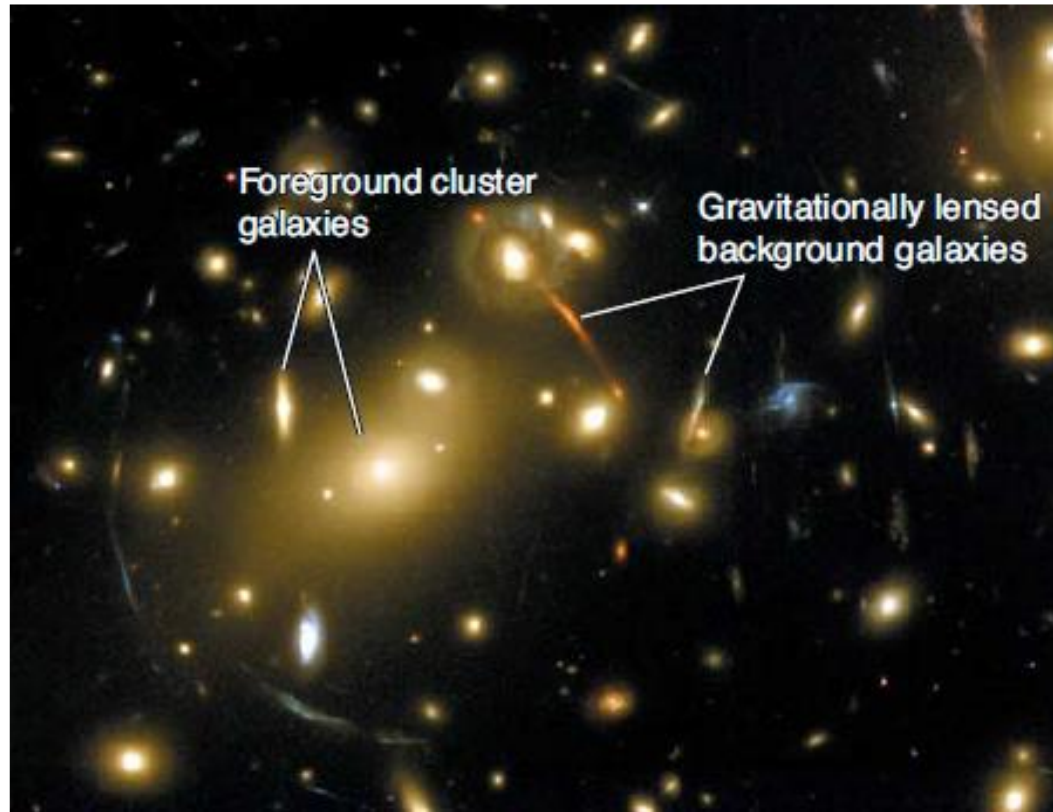


X射线

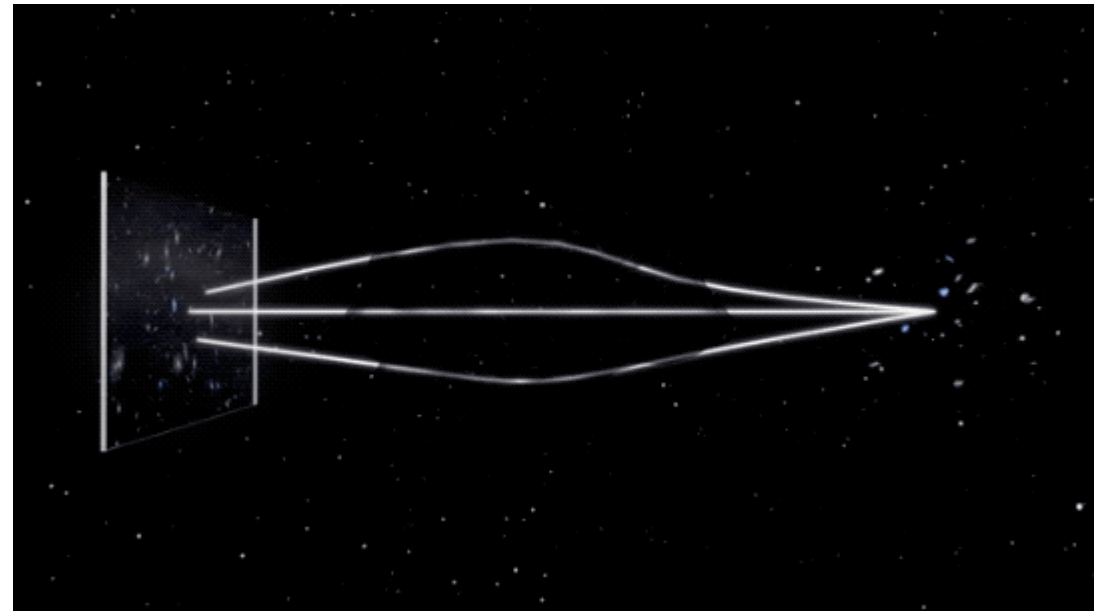
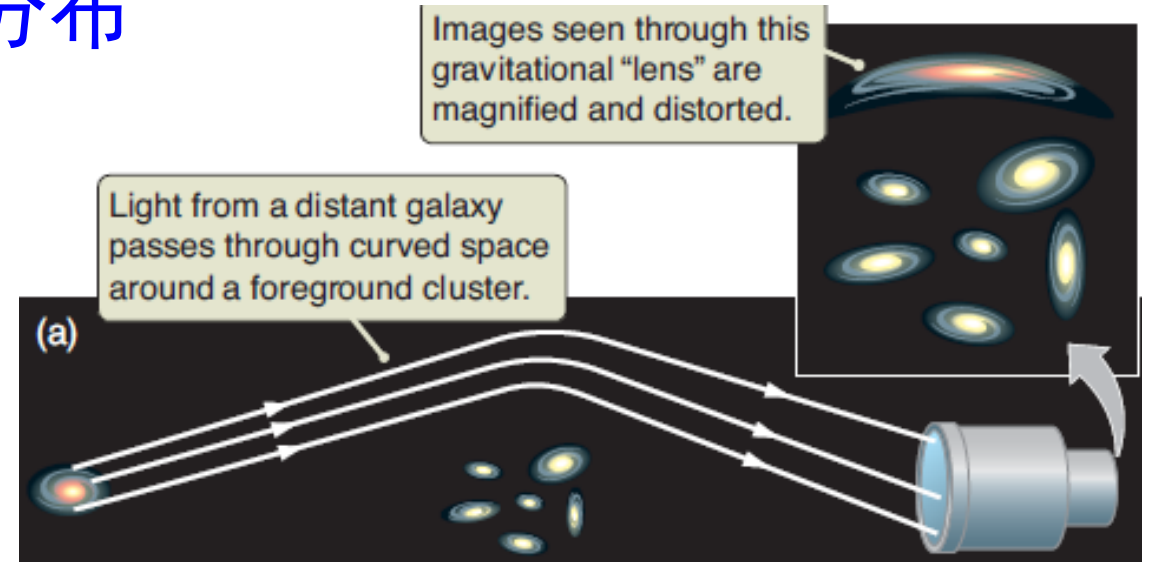




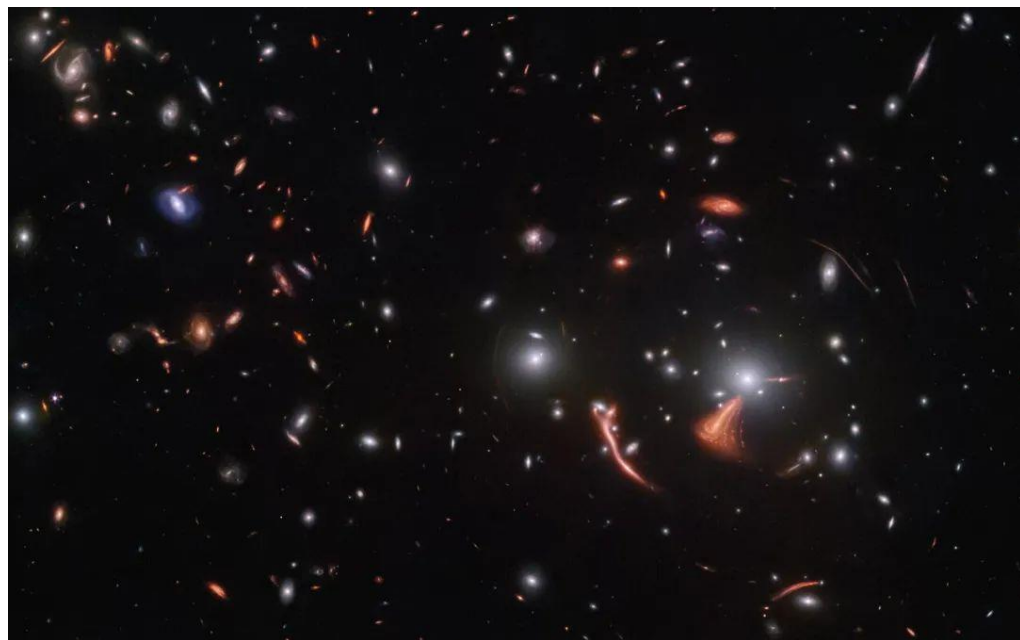
# 引力透镜测量星系团的引力质量分布



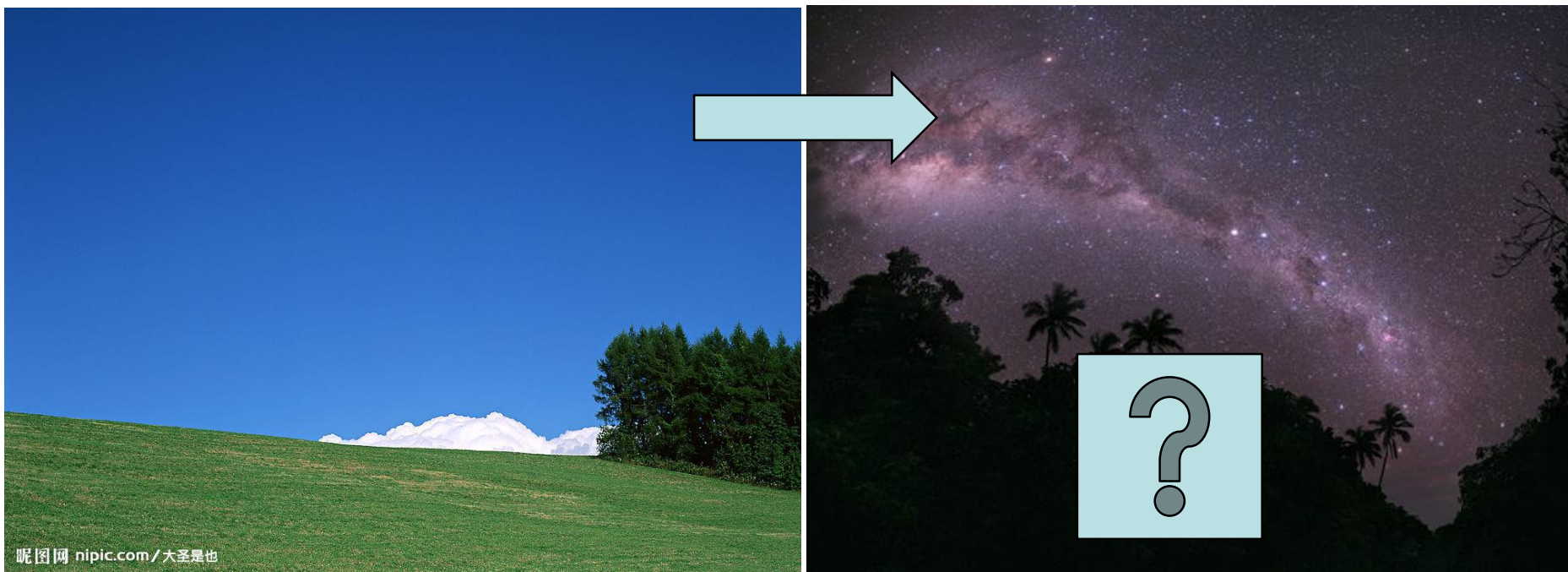
被星系团引力透镜**增亮**和**扭曲**的背景星系，表明暗物质主导星系团质量



## JWST拍摄的遥远星系团的图像



## 2、结构的起源



- 观测：遥远（年轻）的天体、CMB
- 理论：超级计算机模拟大小结构的成长

# 观测

- 不同红移的星系给出宇宙结构如何随时间演化
- 黑暗时代：大爆炸后38万年（今天的CMB， $z \sim 1100$ ）至~5.5亿年（第一代恒星 $z \sim 20$ 和星系 $z \sim 10$ 形成）
  - 观测（高度红移的）中性氢的21厘米辐射

Observed $z$	Age of Universe (years)
1,100	380,000 (recombination)
30	100 million
20	200 million
15	270 million
10	480 million
9	560 million
8	650 million
7	750 million
6	900 million
5	1.2 billion
4	1.6 billion
3	2.2 billion
2	3.3 billion
1	5.9 billion
0.5	8.6 billion
0.25	10.5 billion
0	13.7 billion



# 理论

- 宇宙暴胀时期的量子涨落产生了密度涨落，为星系和星系组合提供了“团块（种子）”
  - CMB各项异性是量子涨落的印记
- 引力不稳定把宇宙的密度涨落转变为星系
- [自下而上] 等级式成团：小结构（矮星系）先形成，大结构（星系团、超团、巨洞）后形成

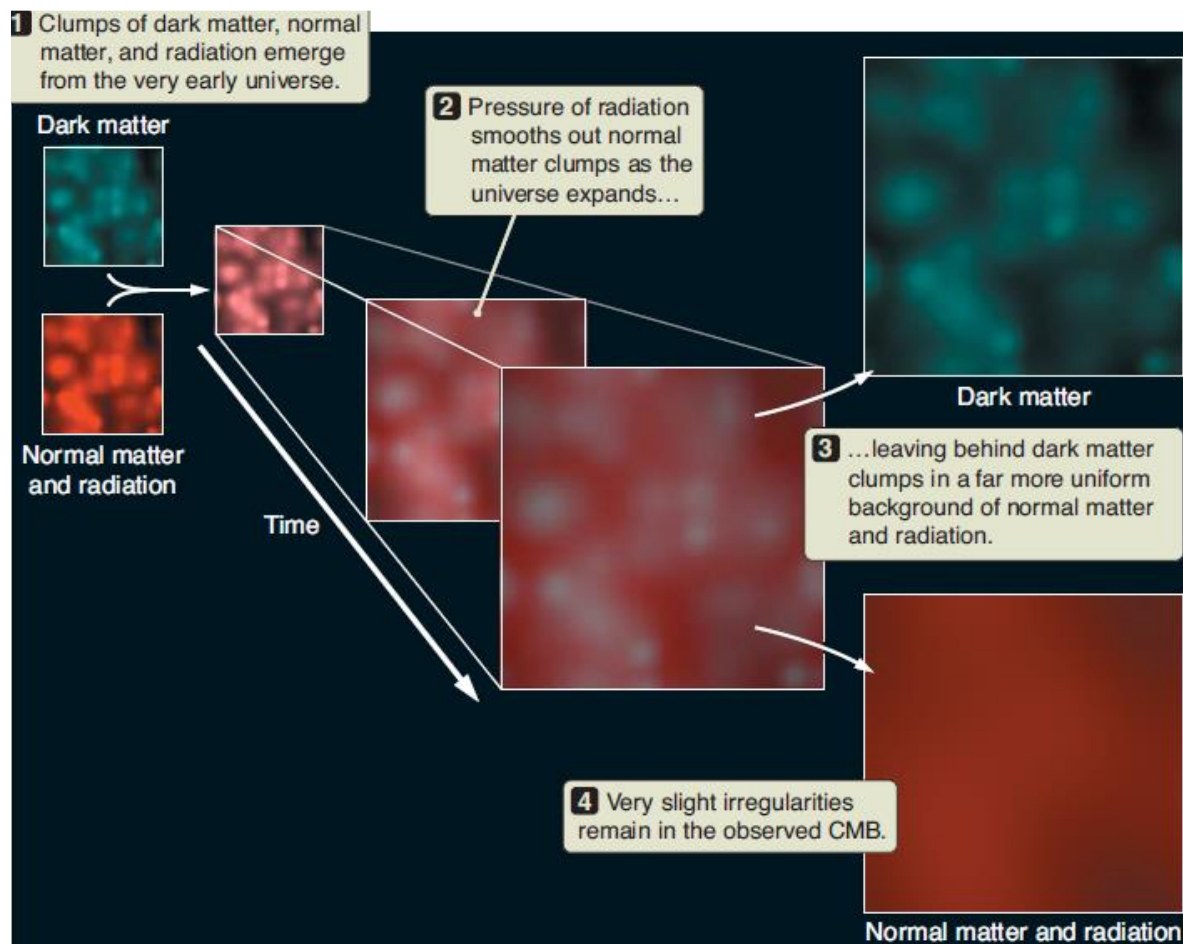
# Lambda-CDM 模型

- 大爆炸宇宙学的标准模型
- 参数（密度）：暗能量（ $\Lambda$ ）、（冷）暗物质（CDM）、亮物质； $H_0$ 
  - 影响结构的形成
- 形成结构的种子
  - CMB的不均匀性



# 亮、暗物质开始于等同的密度涨落

- 辐射压等减弱亮物质团块
- 暗物质团块不受影响
- 退耦前，亮物质微小的密度涨落“烙印”在今天的CMB上



# 不同尺度的结构与暗物质类型

- **冷暗物质**：未知基本粒子，质量大、运动慢

- 轴子
- 光微子

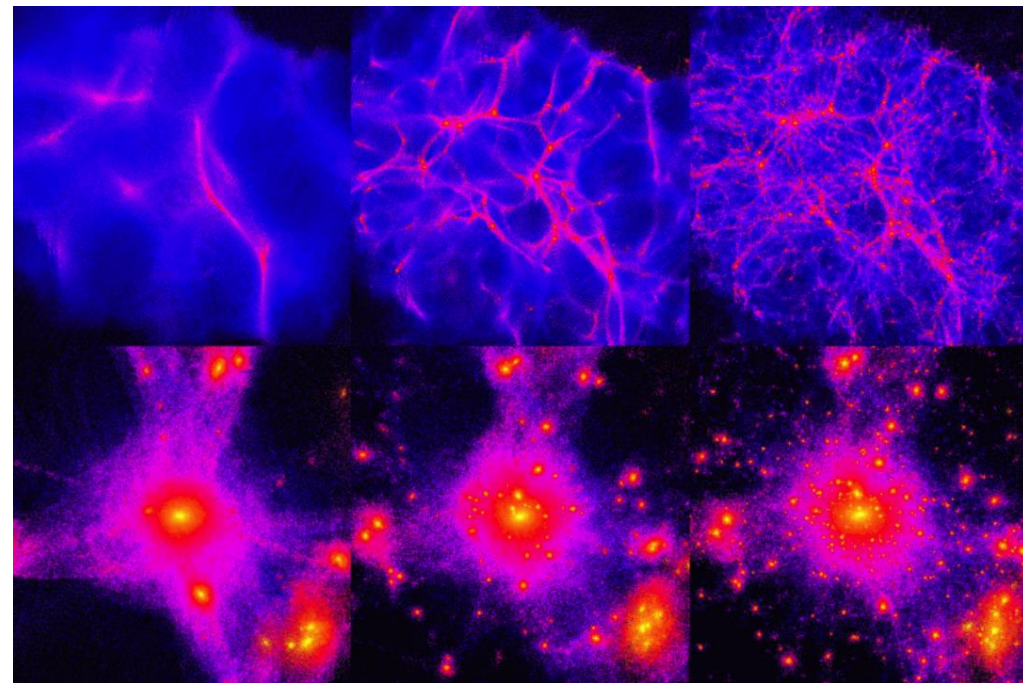
- **热暗物质**：粒子质量轻、运动极快

- 中微子：宇宙质量的百分之几

- **（温暗物质）**

- 热、冷暗物质共同形成最大尺度的结构

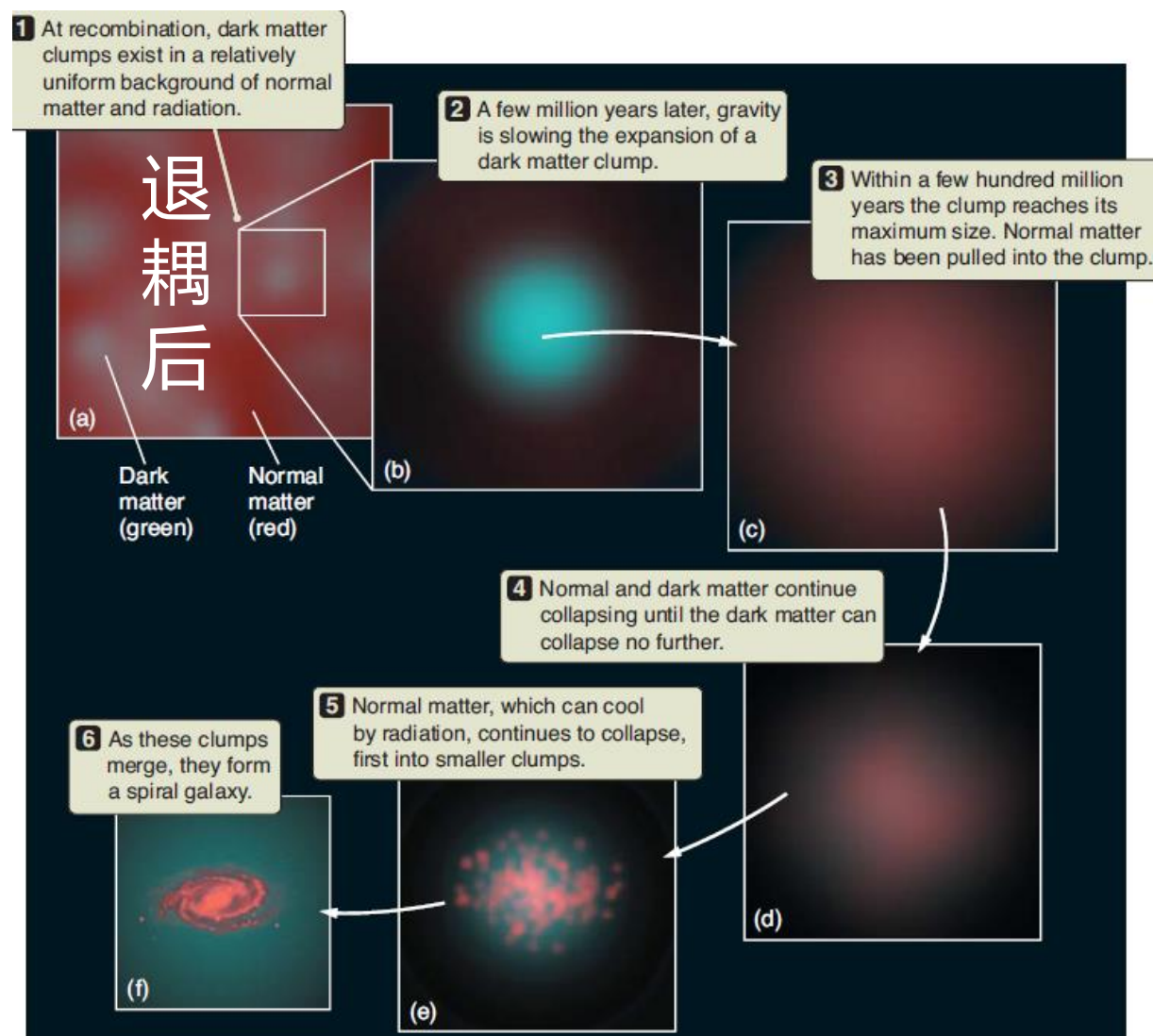
- 冷暗物质形成星系尺度的结构



不同温度的暗物质分布，从左到右  
分别是热、温、冷暗物质（版权：  
Ben Moore 苏黎世大学/）

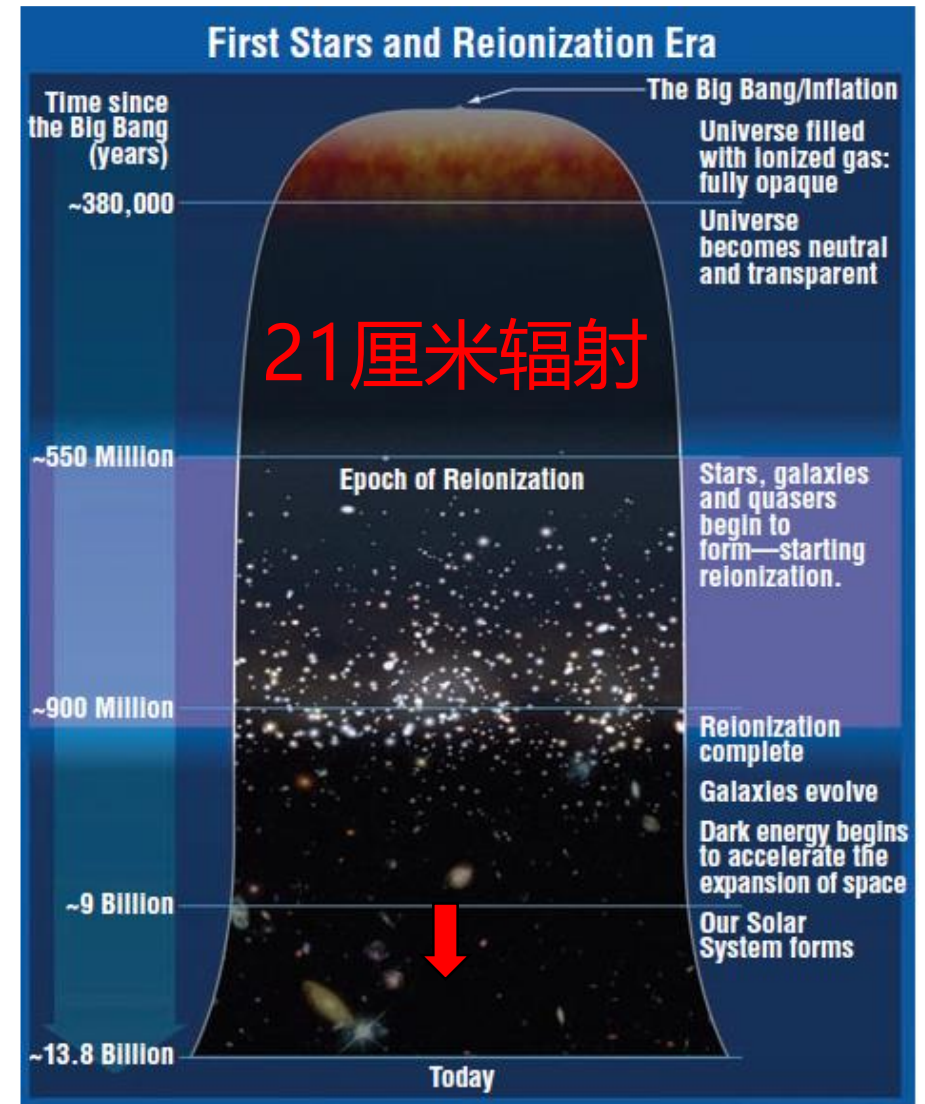
# 冷暗物质导致星系形成

- 自引力减缓并终止暗物质团块的膨胀
- 因暗物质团块的引力，亮物质聚集为一样的团块
- 亮、暗物质一起坍缩，直至暗物质停止坍缩
- 亮物质先形成小结构（有自转），后并合为旋涡星系



### 3、第一缕星光

- 黑暗时代(~5.5亿年)
  - 第一代恒星开始形成
- 再电离开始(~5.5亿年)
  - 第一代恒星紫外光子电离中性氢
  - 第一代低光度星系(恒星持续形成)
  - 第一代类星体 (超大质量黑洞)
- 再电离结束(~9亿年)





## \* 「早期星系改变宇宙的」确凿证据

EIGER合作团队使用詹姆斯·韦布空间望远镜（JWST）找到了证明早期星系引发早期宇宙再电离的有力证据。

再电离发生在大爆炸之后大约10亿年，主要是指氢气的离子化。这就使得如今的望远镜能够看到彼时氢气吸收的光。目前看来，再电离似乎发轫于局部气泡的生长及合并。这些气泡的来源则可能是各种辐射源，它们也可能来自星系中的恒星。

EIGER研究人员使用JWST的近红外照相机查看了古老类星体发出的光。这些光此前穿过了早期宇宙离子化的气泡。这些研究人员发现，星系位置与气泡之间存在关联，这意味着这些早期星系发出的光确实是再电离的成因。

2023年度物理学十大突破 | 《物理世界》

世界科学 未来科学论坛 2023-12-18 20:30 发表于北京

# 高红移天体揭示早期宇宙的信息

$z=8$ 的GRB：宇宙6.5亿岁时已有大质量恒星爆炸

$z=7$ 的类星体：宇宙7.5亿岁时已存在超大质量黑洞

$z=11$ ：GN-z11星系（134亿年前）

能观测到的最高红移天体及数量？（JWST）



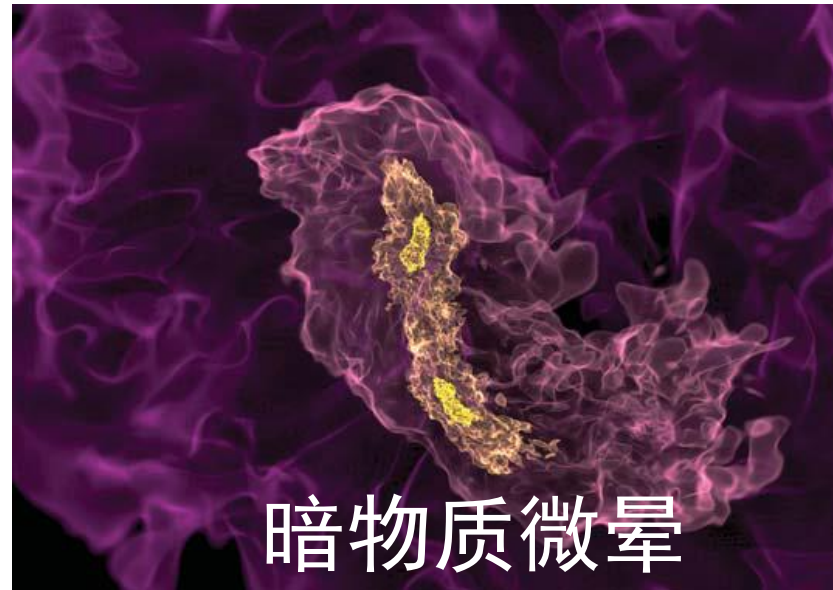
# 第一代恒星的形成

- 原初气体：无重元素，无尘埃，无冷而致密的分子云
- 形成方式与后代不同
- 不能形成小质量恒星

# “真” 第一代恒星

第一代恒星必定仅含有宇宙原初元素  
还未观测到！

计算机模拟“第一代”  
恒星（宇宙几亿岁时）

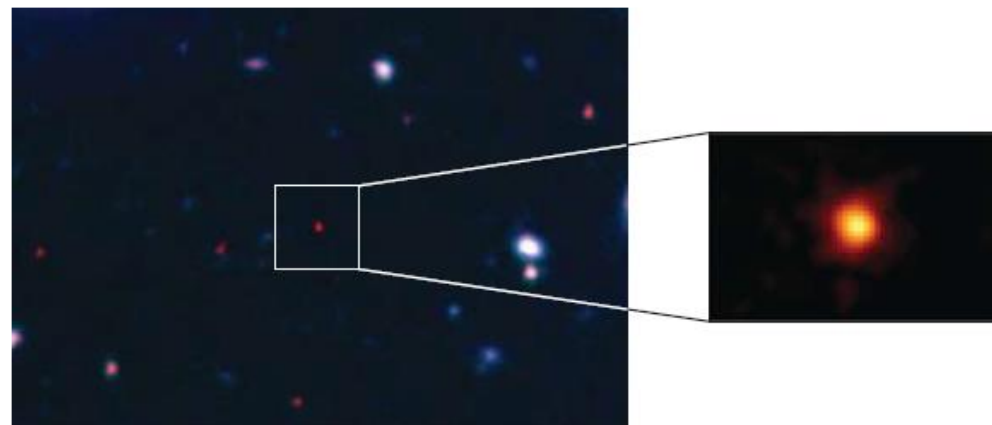


# 第一代恒星的形成：过程

- 宇宙几亿岁[ $z \sim 20-30$ ]时，在暗物质微晕 [0.5-1百万太阳质量、100pc大小] 中形成
- 原初气体云在一小部分中性氢形成分子氢、冷却气体云后，因压力降低而引力坍缩
- 微小原恒星通过吸积气体长大成大质量热恒星（10-100多倍太阳质量）：高光度，辐射峰值在紫外波段的光子电离周边气体

# 第一代恒星的消亡：GRBs

- 主序寿命极短，< 1千万年
- 超新星爆炸：抛射出重元素
- 如果黑洞快速自转，可能产生极端高光度的GRBs



宇宙5亿岁时产生的  $z=9.4$  GRB

# 第一代恒星的消亡：双星

- 如果双星，形成X射线双星
- 如果2或3个黑洞相距足够近，并合，引力波
- 并合的恒星质量黑洞成为星系中心超大质量黑洞的种子（比如银河系中心的黑洞）

# “第二代恒星”

- 第一代恒星核合成的重元素融入气体云，形成尘埃颗粒，更有效冷却气体云
- 第二代恒星的形成可能与目前的类似：形成于冷的分子云，但重元素丰度极低
- 形成环境比第一代恒星冷，可能形成小质量恒星
- 0.8-0.9倍太阳质量的恒星今天依然是主序恒星



# “第二代恒星”

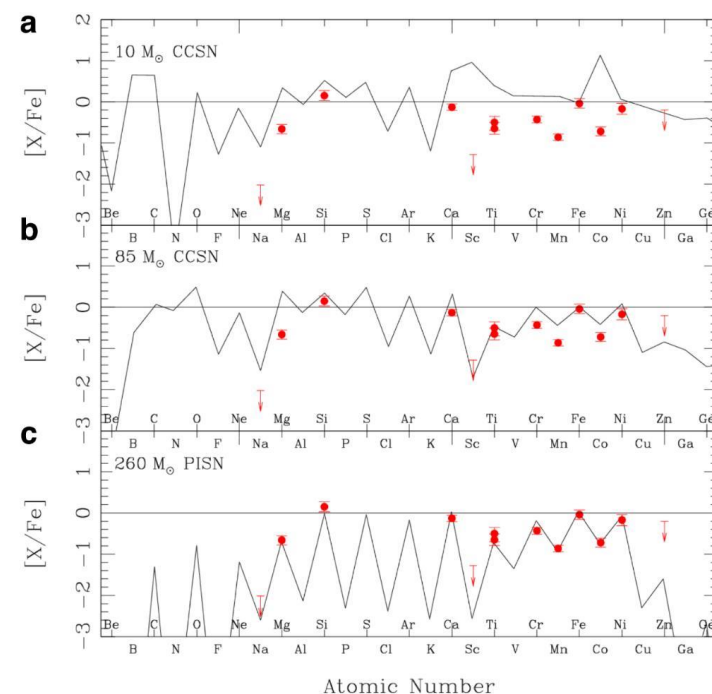
- 已在银晕中发现一些这样的（小质量）恒星：重元素丰度很低，但已包含元素周期表中的绝大部分元素，包括铀
- 第二代恒星提供关于第一代恒星的性质与银河系早期的物理条件的线索

# \*LAMOST通过第二代恒星发现第一代超大质量恒星化学遗迹



## 一颗化学丰度极为特殊的恒星 (LAMOST J1010+2358)

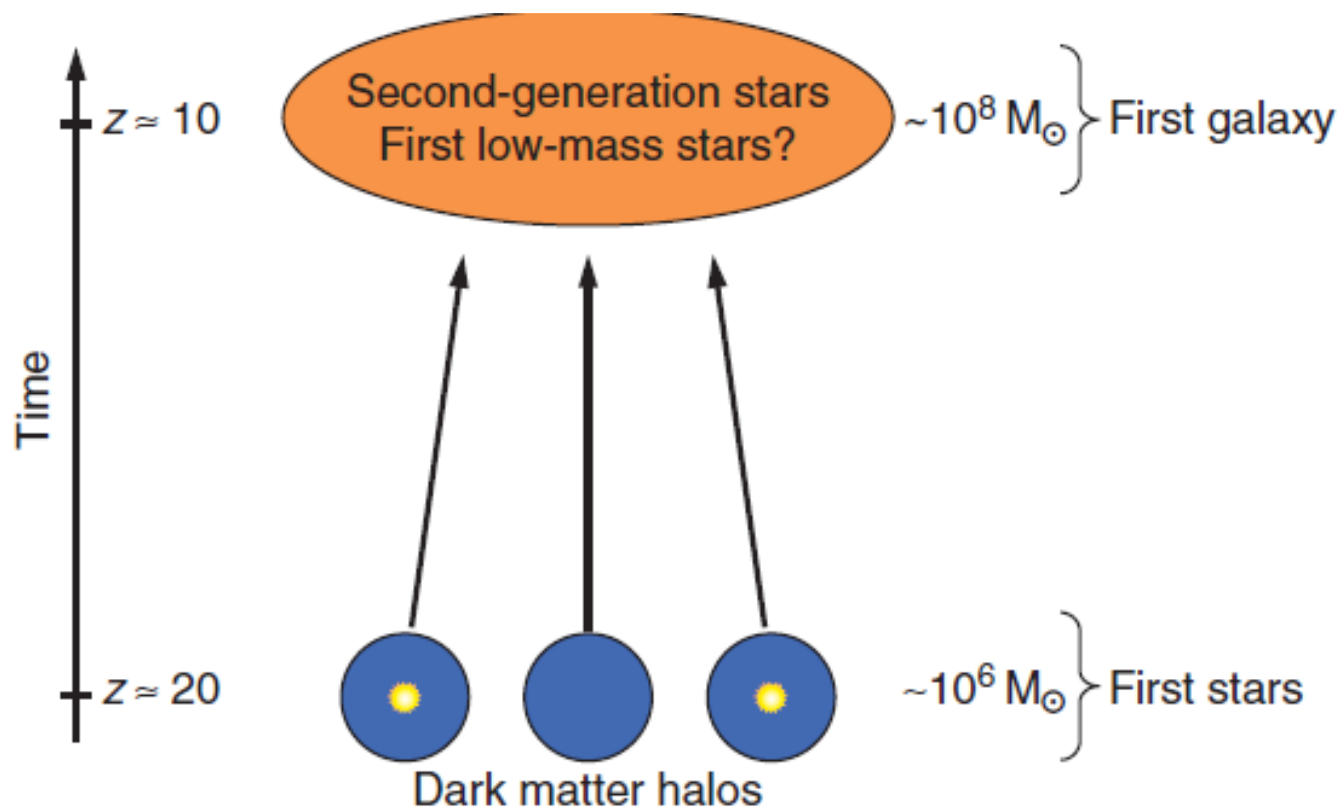
北京时间6月7日，国际学术期刊《自然》在线发表了中国科学院国家天文台赵刚研究员带领的国际团队的一项重要成果。研究团队率先在银晕恒星中发现了第一代超大质量恒星演化后坍缩形成的对不稳定超新星（pair-instability supernova, PISN）存在的化学证据。在此之前，理论研究曾预言这种特殊超新星的存在，但从未被观测发现。该成果证实这一超新星源自于一颗质量高达260倍太阳质量的第一代恒星，刷新了人们对第一代恒星质量分布的认知。



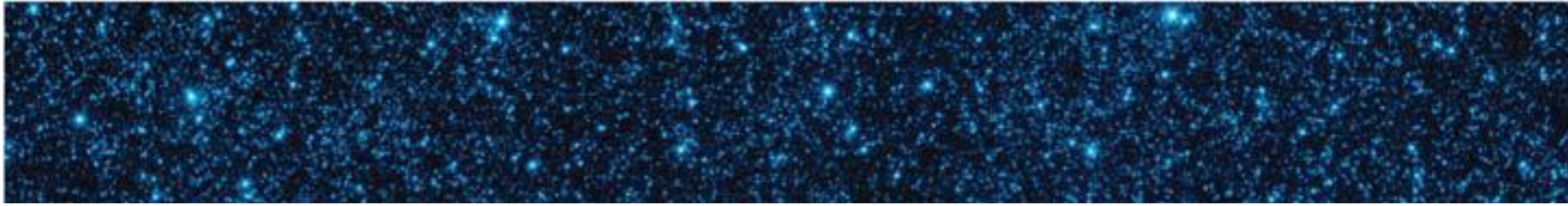
理论研究表明第一代恒星的质量可以达到太阳质量的数百倍，但人们一直未能从观测上发现相关证据。通常发现的极贫金属星保留了核坍缩超新星（core-collapse supernova, CCSN）的核合成产物，但这些超新星的前身星普遍小于100倍太阳质量。对于质量介于140-260倍太阳质量的第一代恒星而言，其核心处产生的正负电子对会减弱恒星内部辐射压力，并导致恒星坍缩形成一种特殊的超新星，即PISN。与核坍缩超新星相比，PISN产物具有极为特殊的化学组成，在其演化后形成的气体云中诞生的第二代恒星会展现出极其罕见的化学丰度模式。

# 第一代 [矮] 星系

- 等级式构建：由暗物质微云并合而成
- 形成时间：大爆炸后的~5亿年 ( $z \sim 10$ )



## 观测证据1：早期宇宙的红外图像



近邻宇宙的红外图像：恒星+星系+.....

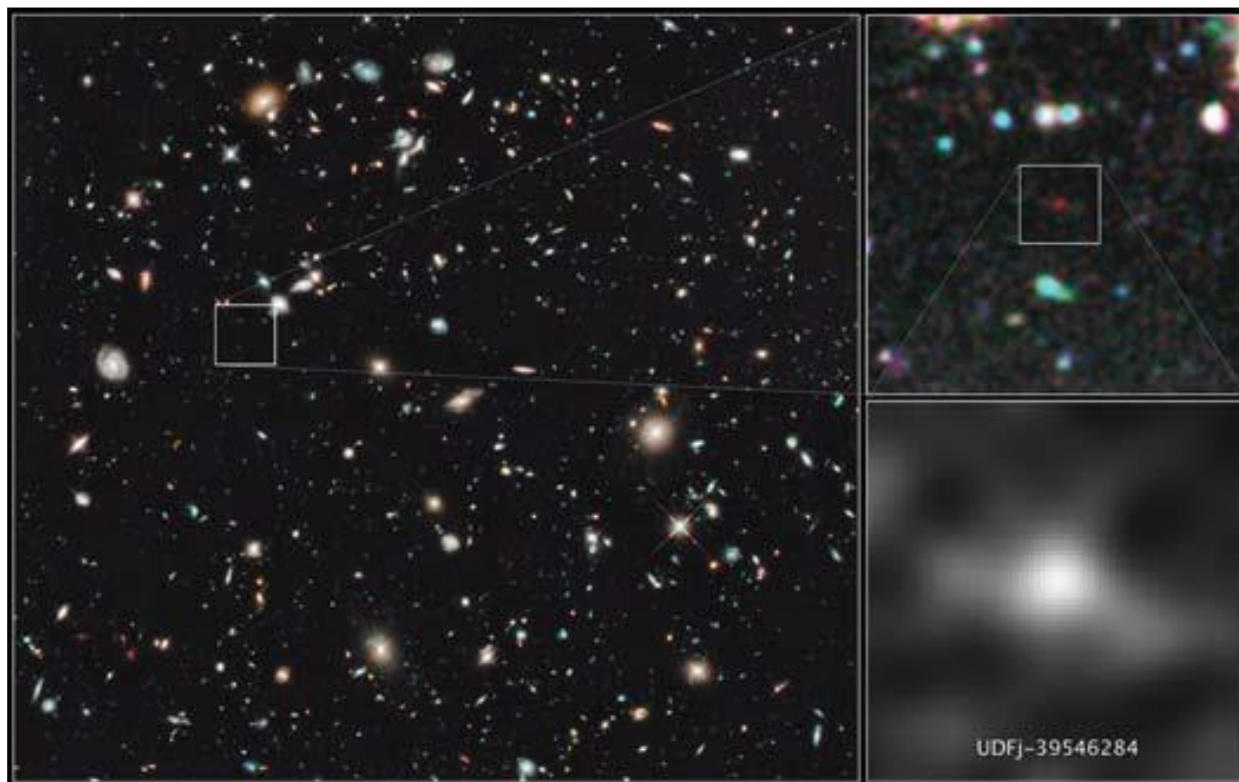


去掉恒星和星系后的图像：可能揭示第一代恒星和星系形成时的宇宙早期（~5亿岁）的结构



## 观测证据2：发现更高红移的星系

→ 第一代星系（第一代超大质量黑洞）开始形成的时间线

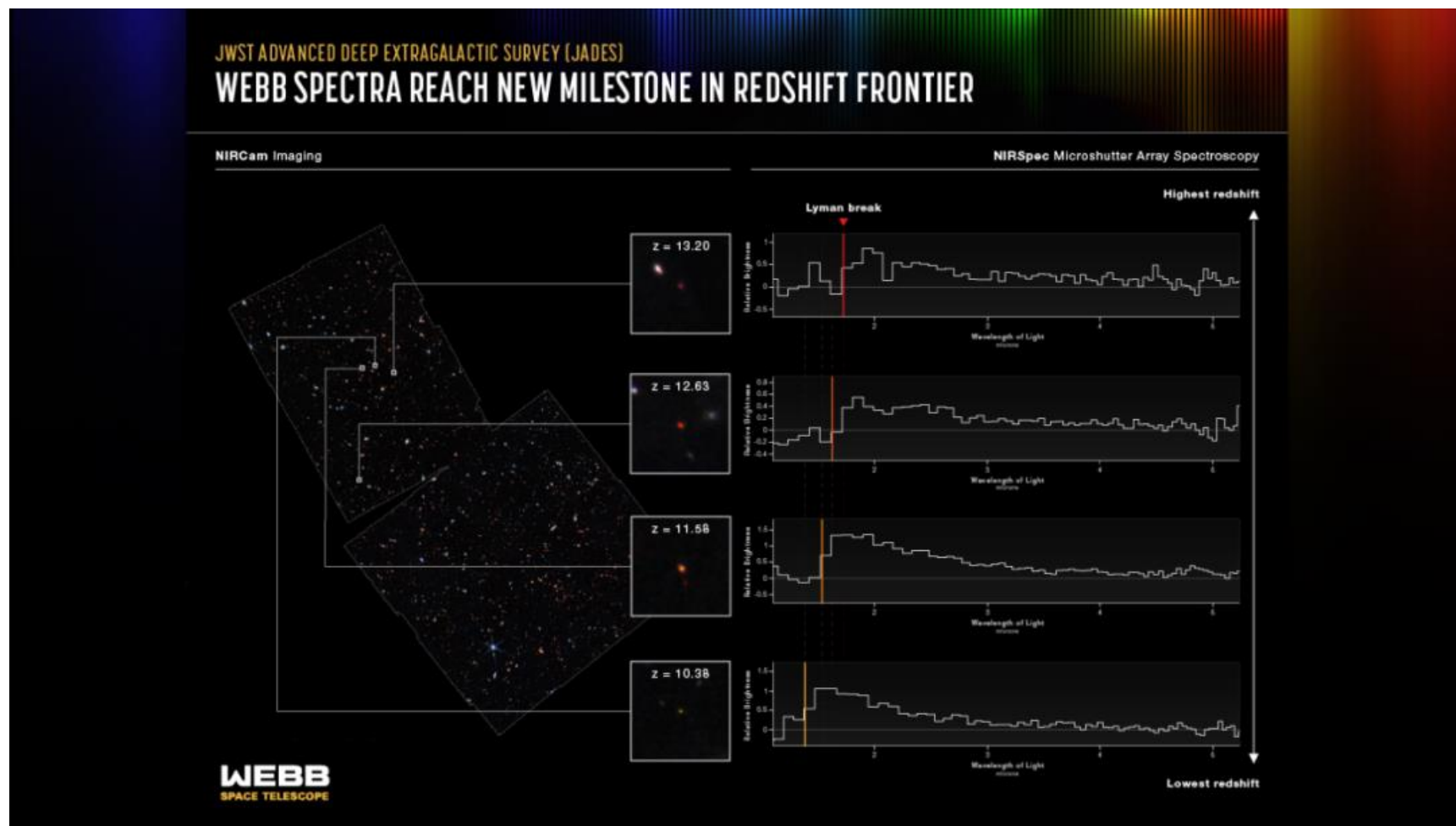


$z \approx 10$  (宇宙年龄~4.8亿年) 暗弱[小]星系的红外图像

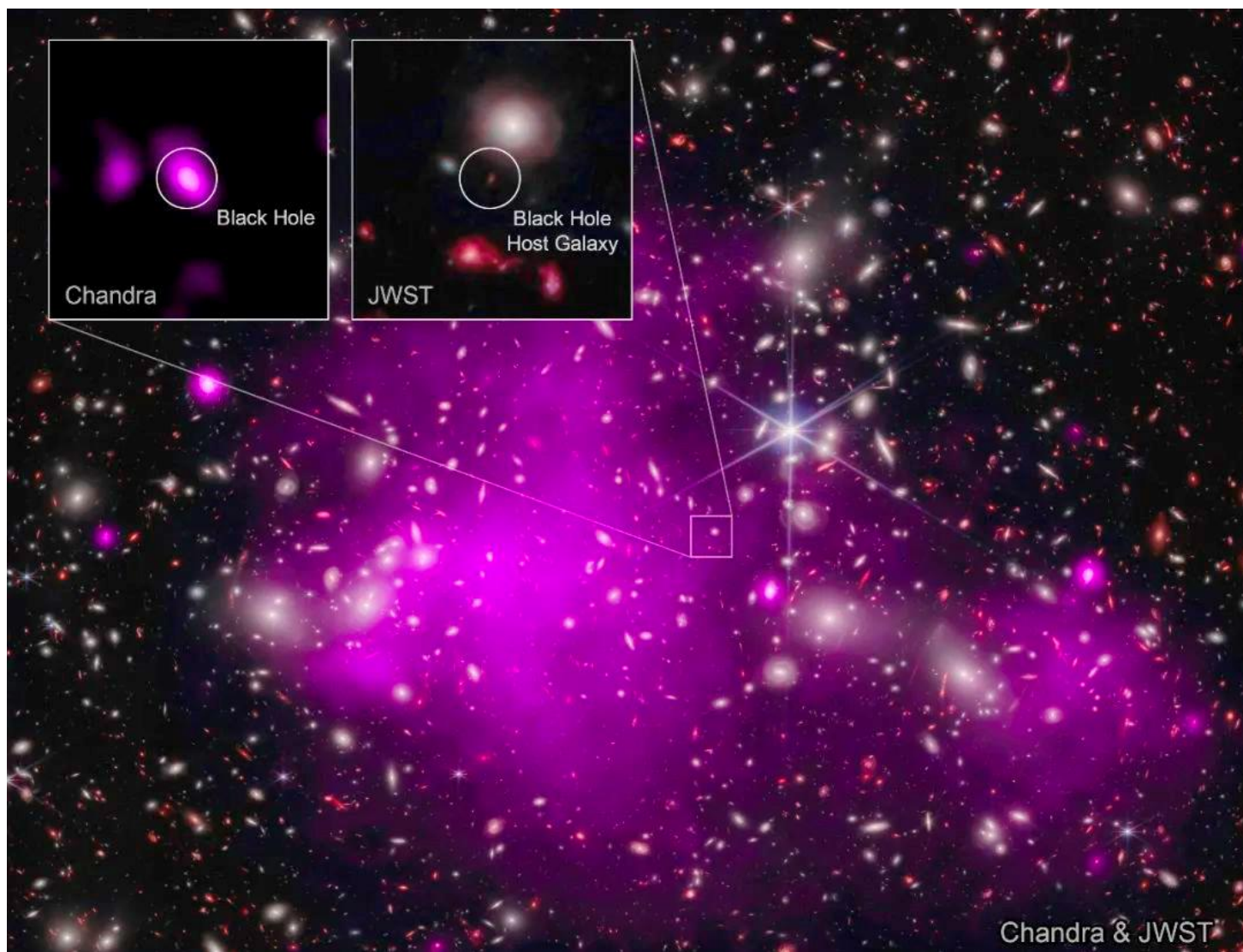


# \* 韦布望远镜发现4个最古老的星系 (STScI 2022.12.12)

红移13.2，宇宙  
年龄~3.5亿年时  
的星系，历时  
~134.5亿年



# \* JWST韦布发现破纪录最远的黑洞



这个正处于生长的早期  
阶段的黑洞诞生于宇宙  
大爆炸后仅4.7亿年

黑洞和宿主星系的质量  
相当

# 本星系群中的超弱矮星系

- 光度很低：1千-10万倍太阳光度
  - 暗物质主导
- 恒星：极低金属丰度、年老暗弱
  - 在第二代恒星形成后，可能没有再形成恒星
- 星系并合留下的最年老星系，环绕银河系转动
  - 第一代星系的化石？

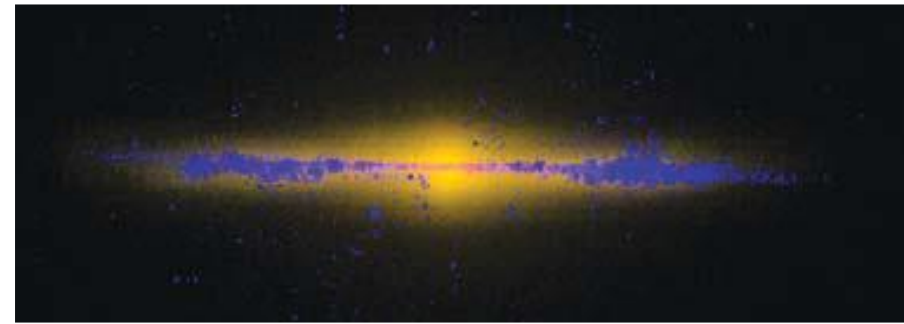
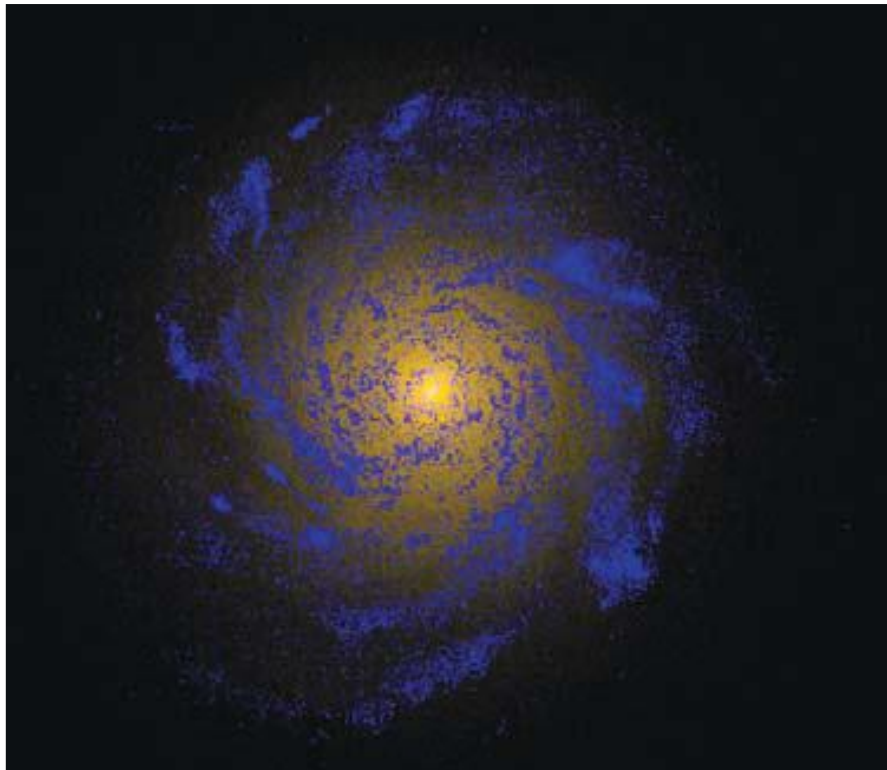
## 4、星系的演化

- 暗物质晕内的亮物质由于辐射冷却而凝聚、坍缩，形成小到球状星团，大到矮星系的星体
- 星系持续等级式演化：小的原星系逐步并合为更大的星系
- 早期宇宙更小、星体数量更多、星体更靠近 → 并合更频繁
  - 尺度因子 $\sim 1/(1+z)$ ，体积 $\sim 1/(1+z)^3$



# 大星系周围的环境显示“组装”过的痕迹

在大的旋涡星系附近，存在大量暗弱的矮椭圆星系（含暗物质）与最年老的球状星团（基本不含暗物质）。它们可能是遗留下来的原星系

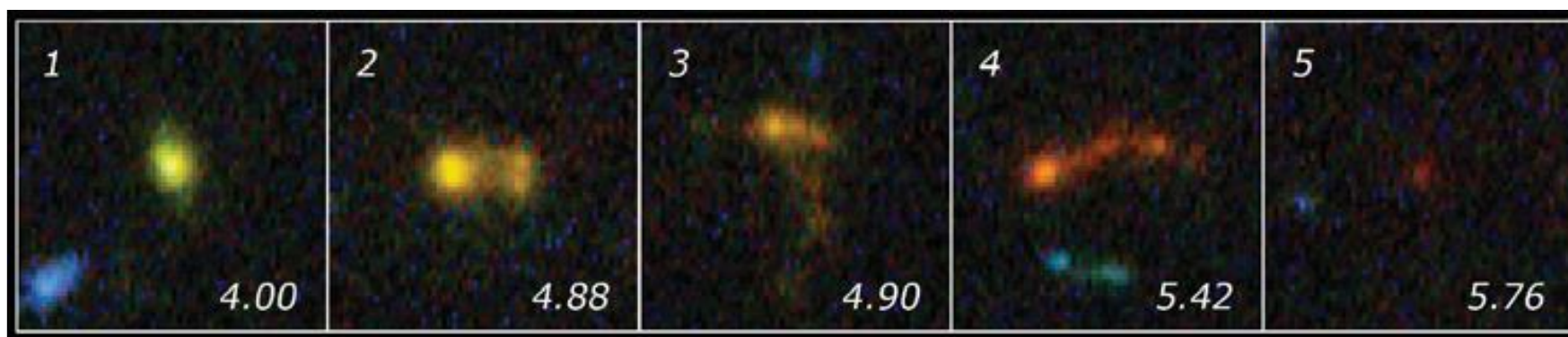


最老球状星团~135亿岁  
晕~115亿岁  
星系盘更年轻

## 越遥远（年轻）的星系，越暗弱混乱

$z=7$ , 星系太暗弱，看不出结构

$z=4-6$  [宇宙16亿-9亿岁], 结构显现



$z = 0.4-0.8$  (~60亿年前), 星系也相当不规则

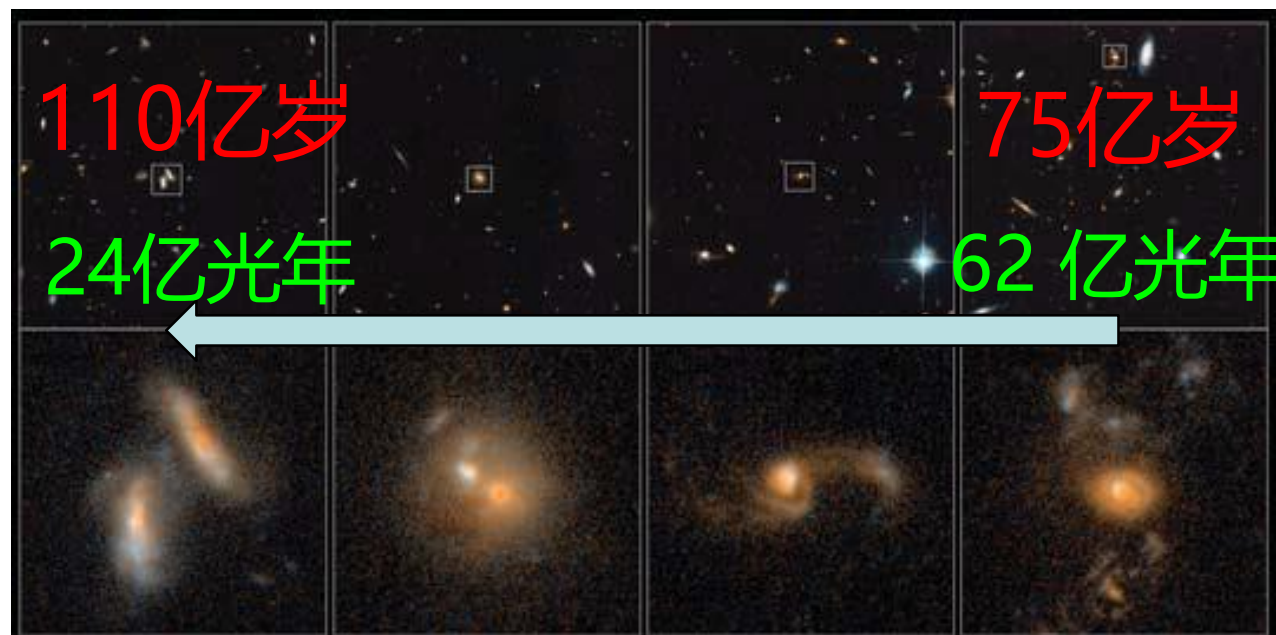
- $z=0.02-0.03$ 的近邻星系符合哈勃分类
  - 10%不规则星系
- $z=0.4-0.8$ ，更多混乱星系
  - ~50%星系不规则



# 不同距离 (宇宙年龄) 的星系并合

宇宙年龄

距离

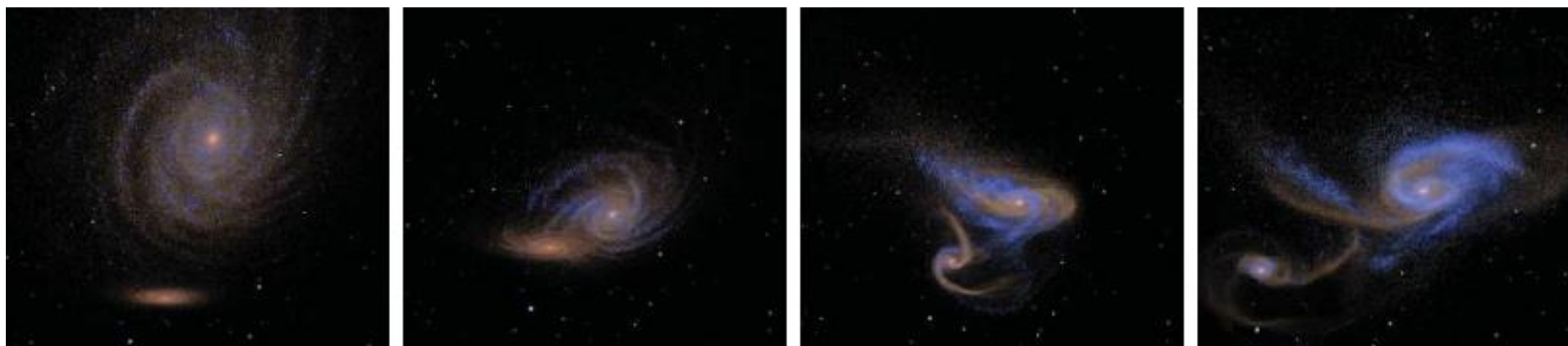
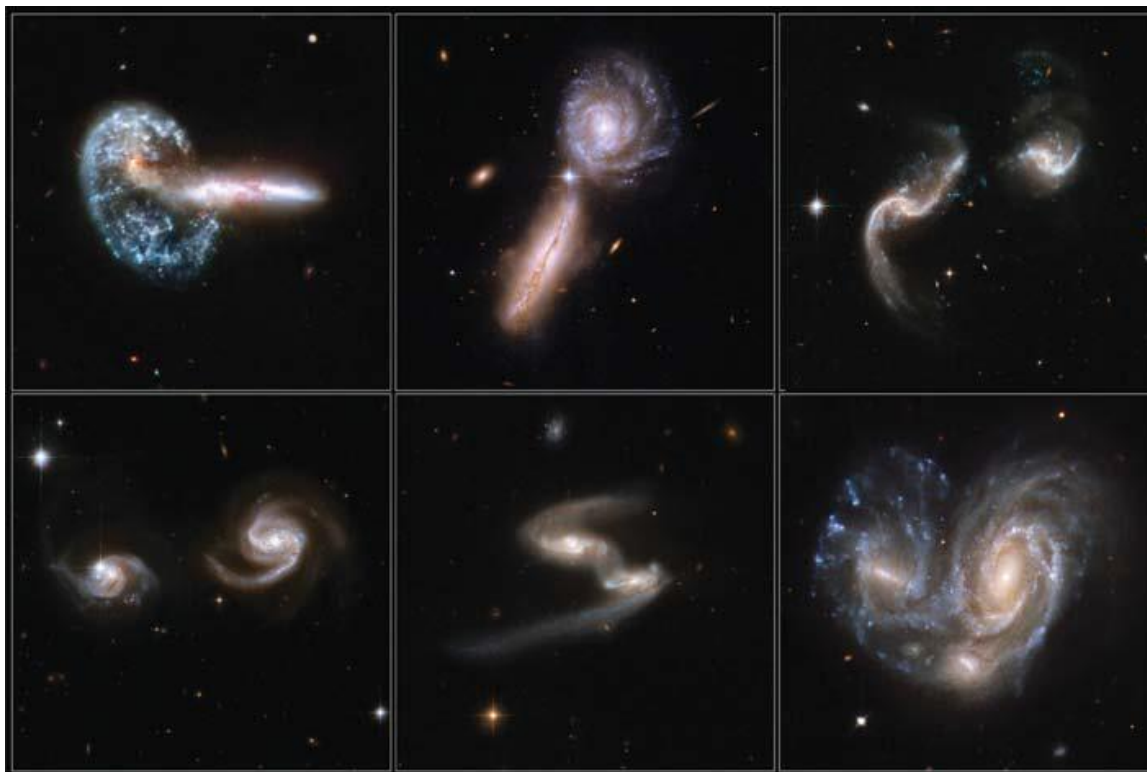


距离越远 —————> 越年轻越不规则星系的并合



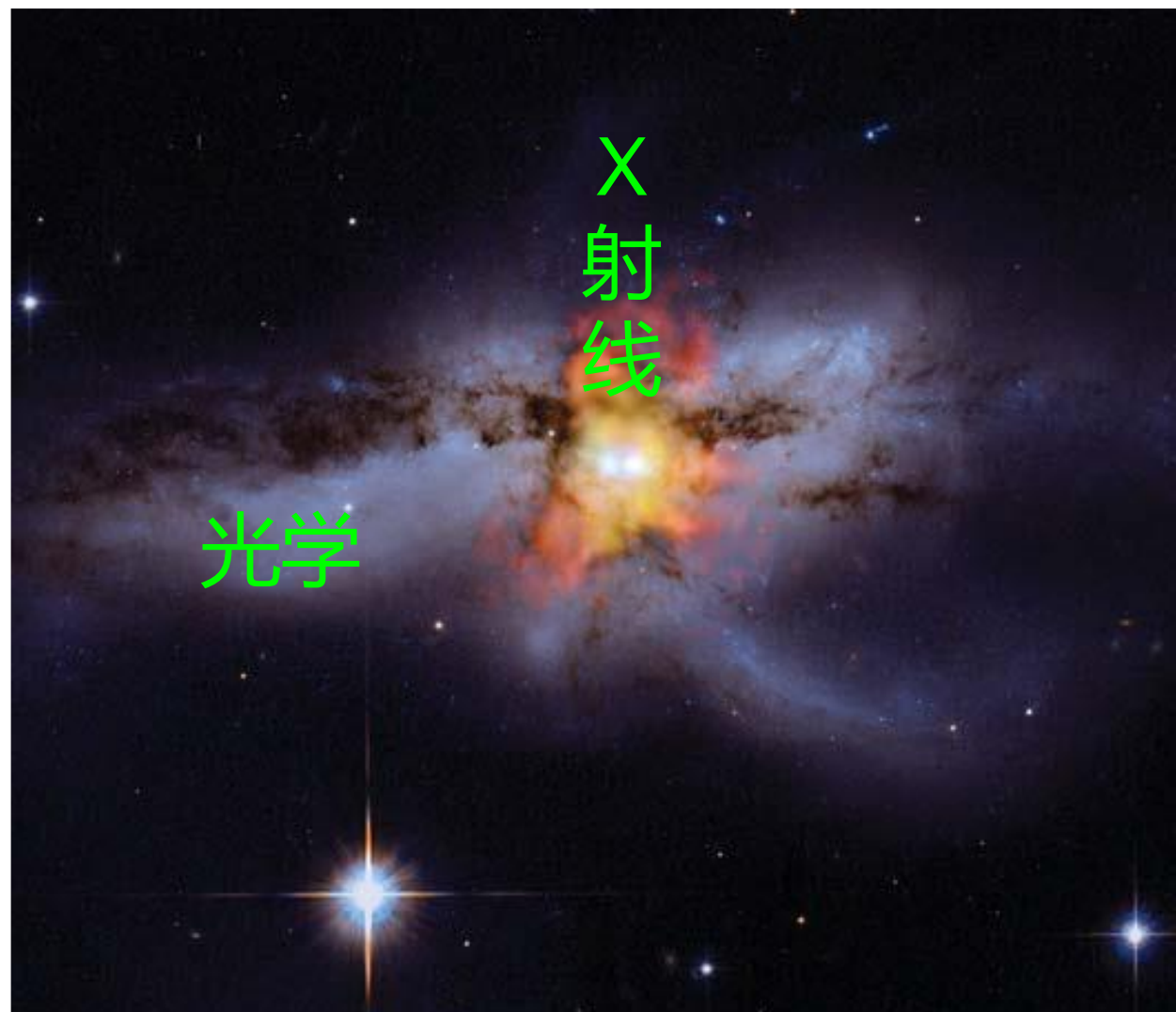
# 近邻年老星系的并合

椭圆星系由2-3个旋涡  
星系并合而成



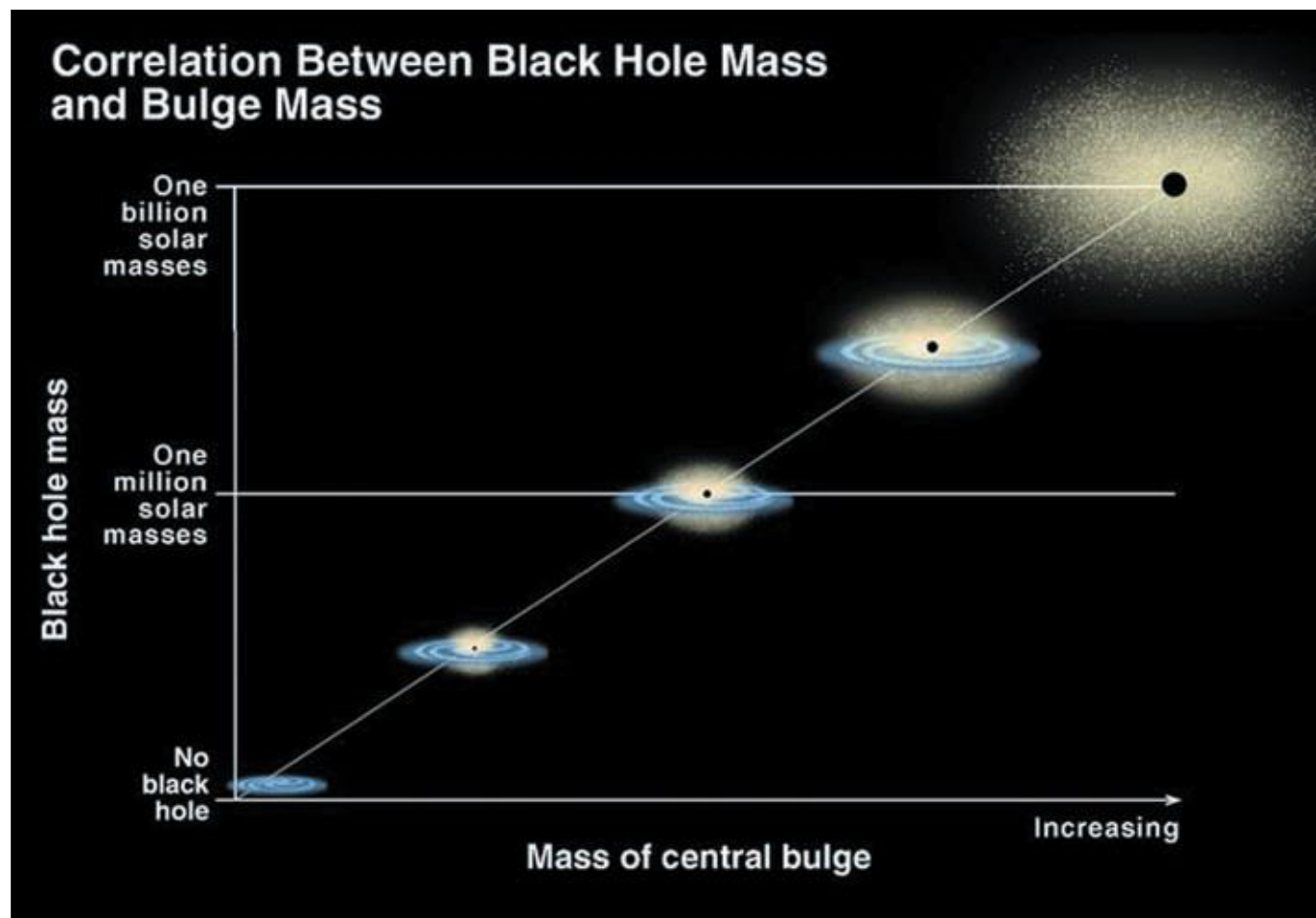
正在并合的近邻星  
系 NGC 6240

两个超大质量黑洞  
相距3,000光年，可  
能约1亿年后并合



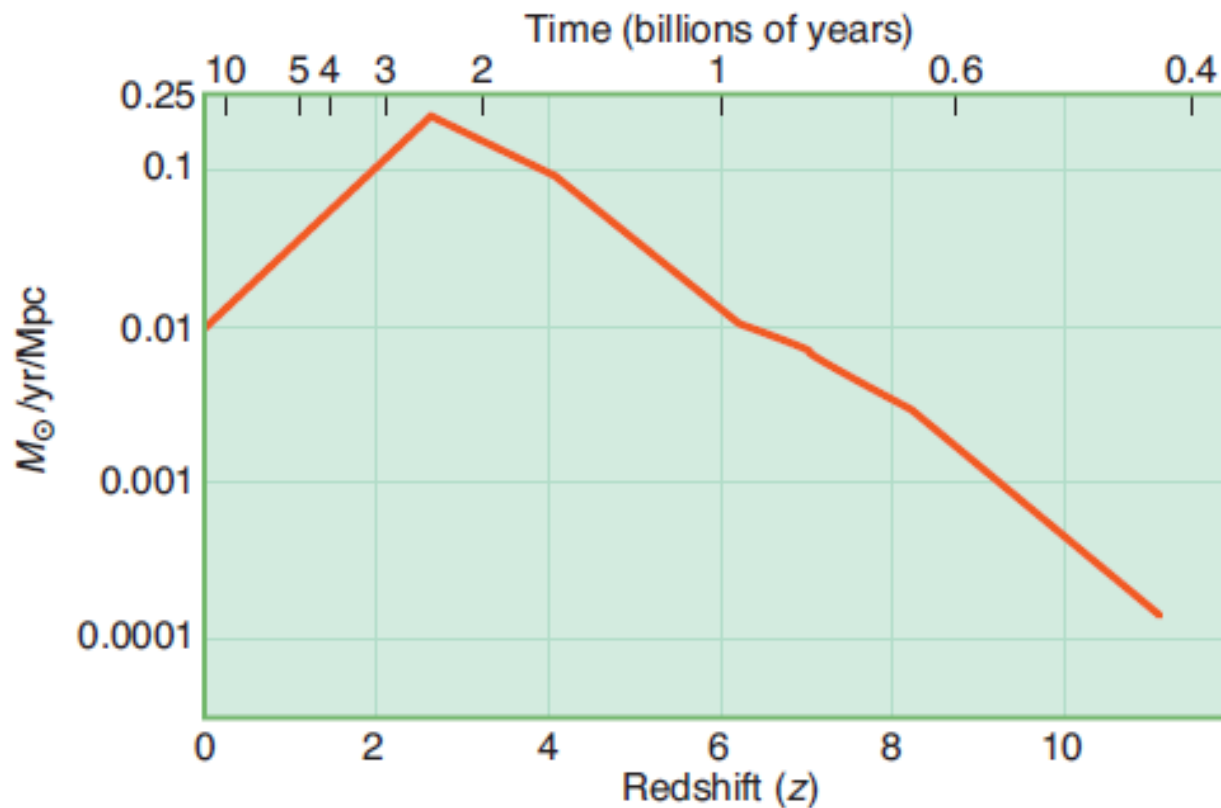
# 黑洞和星系同时增长

超大质量黑洞的质量与旋涡星系的核球和椭圆星系的质量正相关



- 在整个并合系统内，星系间的潮汐力 + 气体云间的碰撞，可能触发很多恒星形成区
- 星系等级式并合与超大质量黑洞的成长，影响星系的恒星形成率

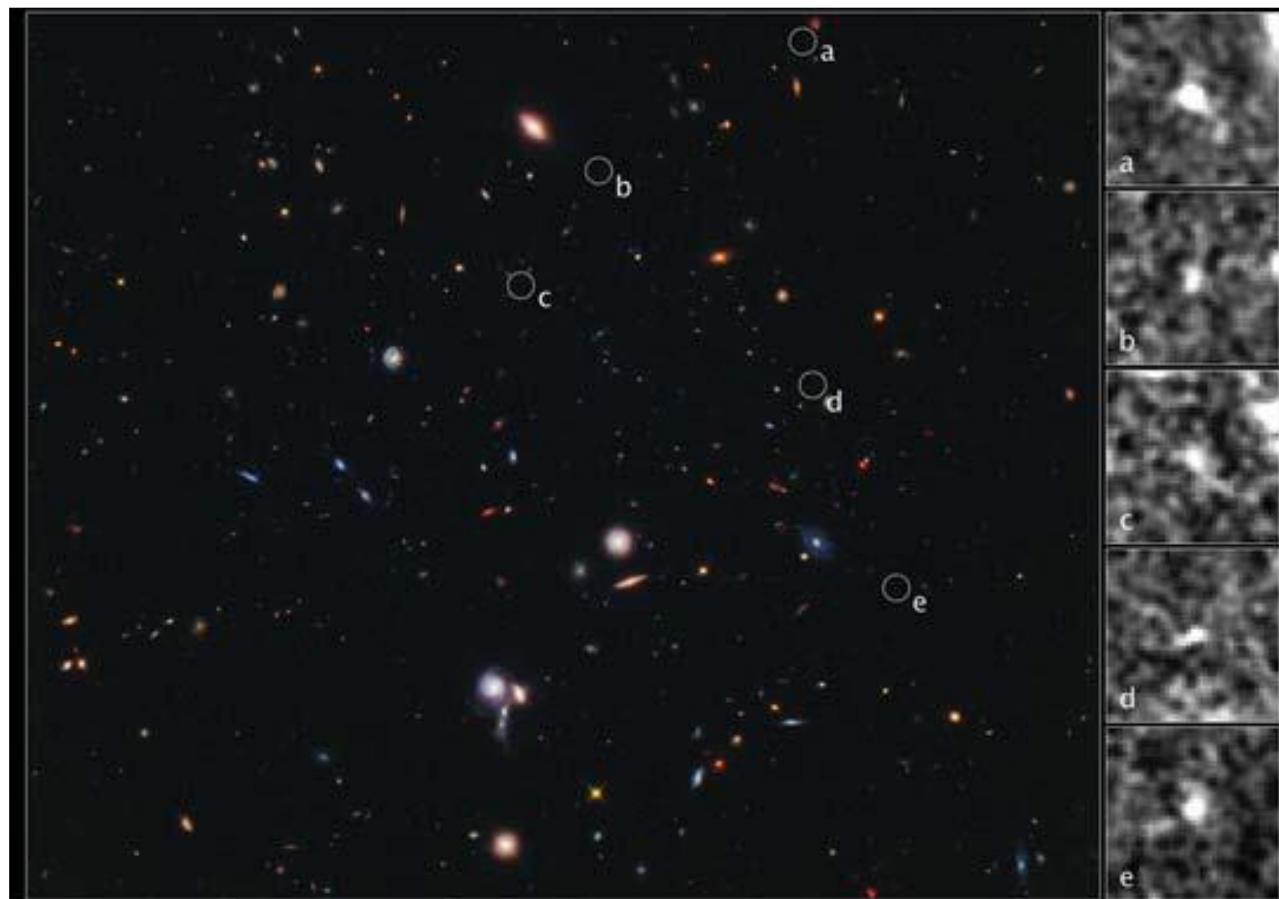
恒星形成率在  
宇宙~20-30亿  
岁 ( $z \sim 2-3$ )  
时最高



# 更大结构也由等级式并合构建

遥远的早型星系团比近邻的晚型星系团混乱

大爆炸后~6.5  
亿年( $z=8$ ), 年  
轻小星系  
(abcde) 正在构  
建原星系团



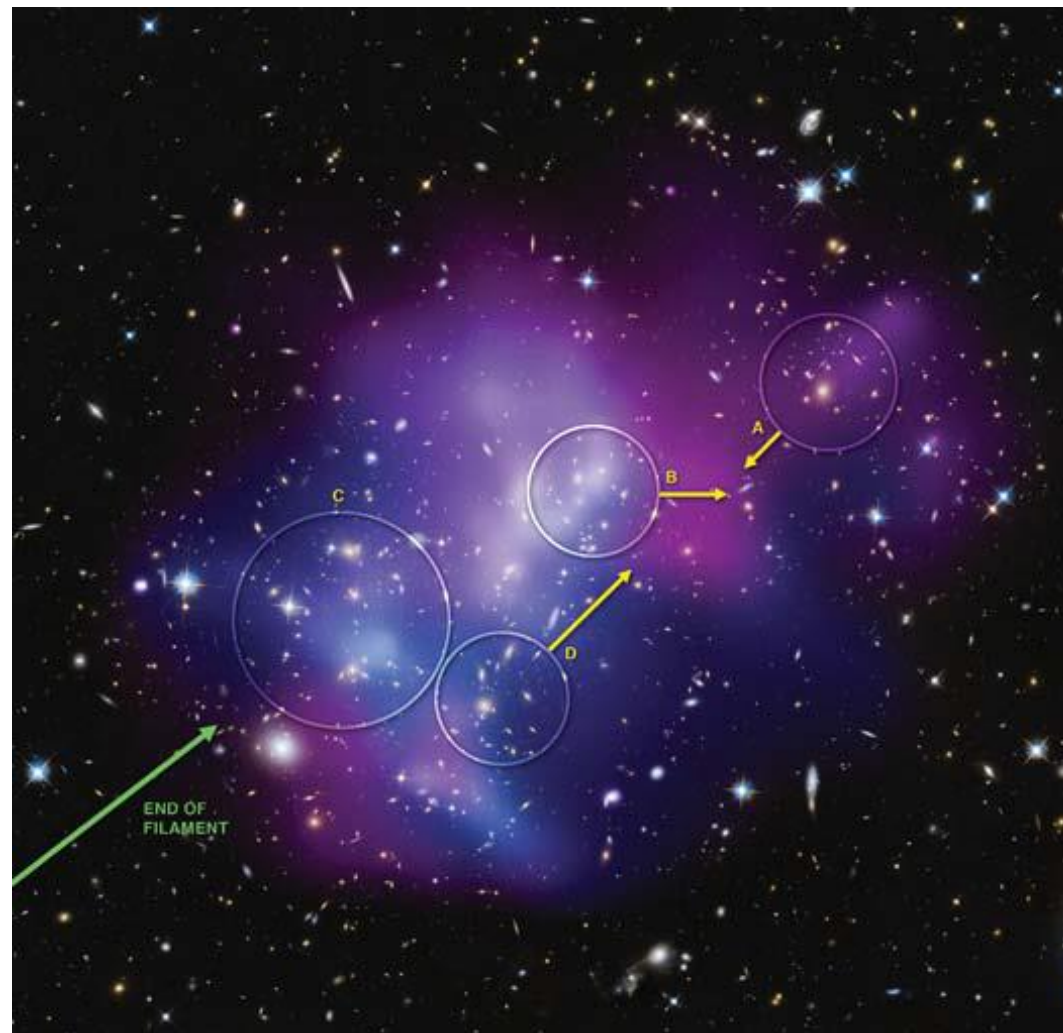


# 四个星系团的并合

X射线辐射：

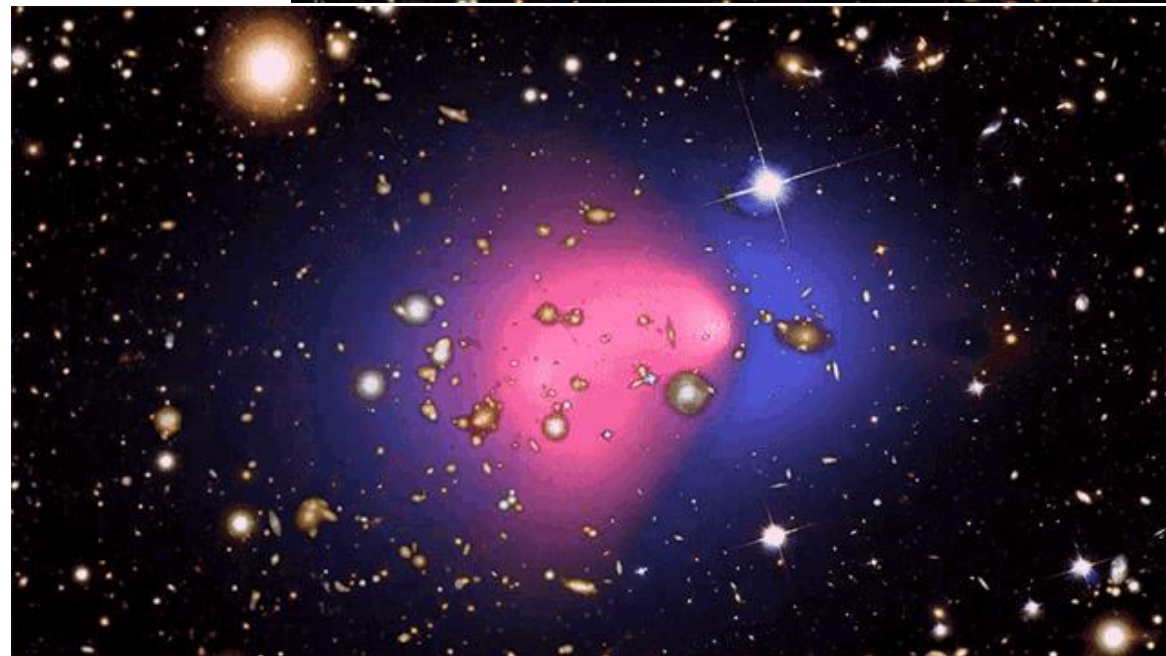
紫红色： 较冷气体

蓝色： 较热气体



# 子弹星系团：暗物质存在的证据

- $z=0.3$ （宇宙~100亿岁）
  - 红色：亮物质热气体的X射线辐射
  - 蓝色：引力质量分布
- 高速碰撞时，亮物质热气体减速，暗物质不减速



# 数值模拟宇宙的结构

- 几十亿暗物质粒子 + 最新宇宙学参数
- 模拟不同尺度结构的形成与演化：
  - 暗物质团块与晕
  - 纤维状结构，巨洞
  - 大小星系
  - 星系群
  - 星系团
- 模拟不同年龄（红移、距离）的宇宙结构
- 与观测比较



# 模拟不同宇宙年龄时的大尺度结构

看点：纤维与巨洞的增长

$z=10$

4.8亿岁

$z=3$

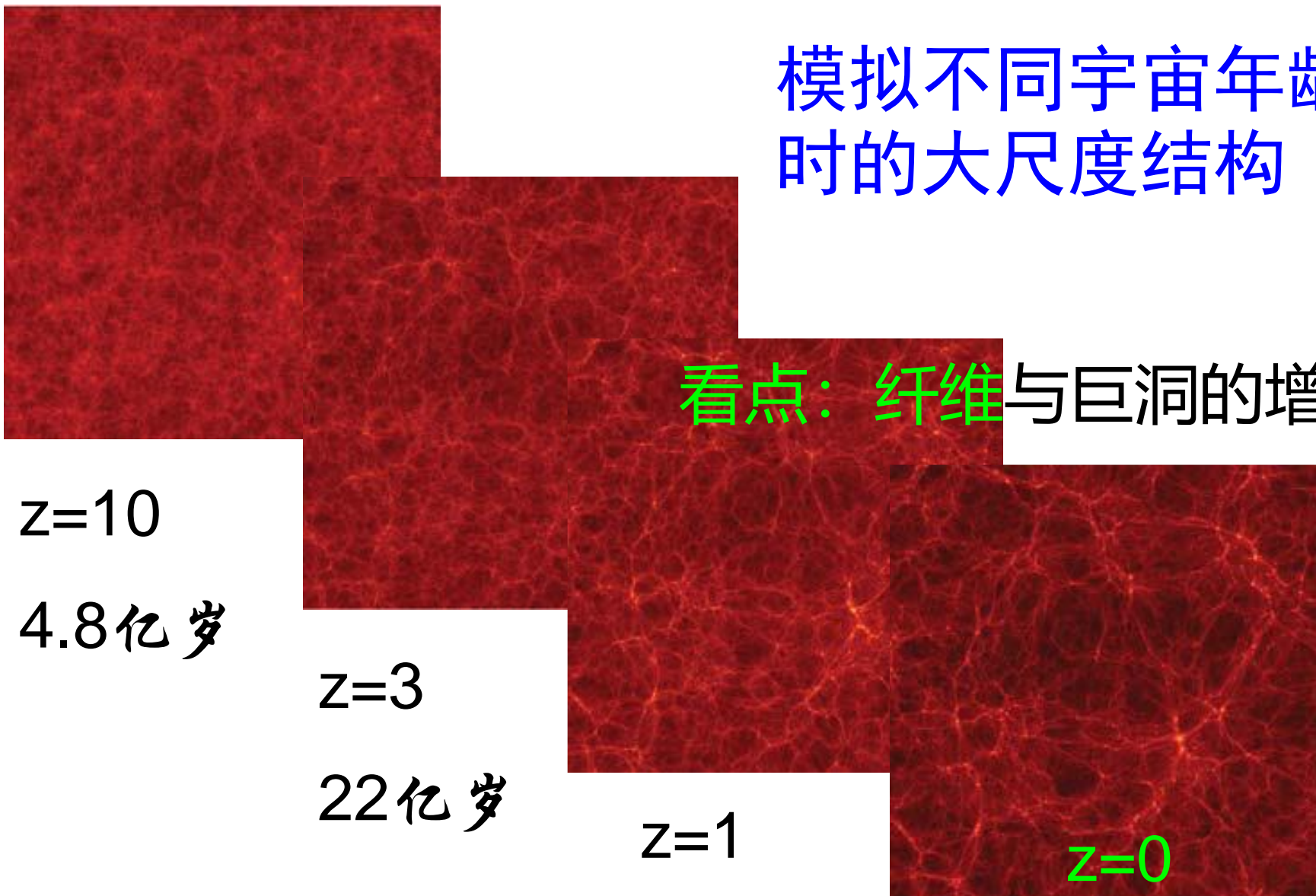
22亿岁

$z=1$

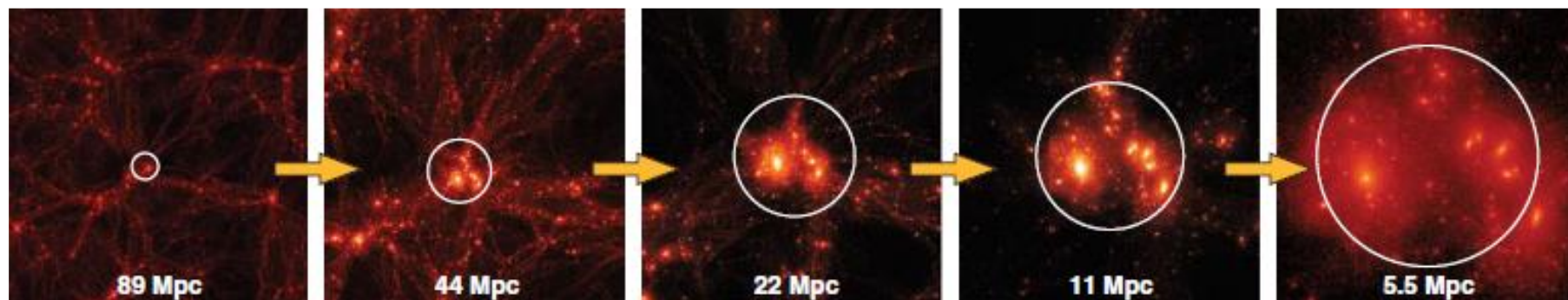
59亿岁

$z=0$

138亿岁



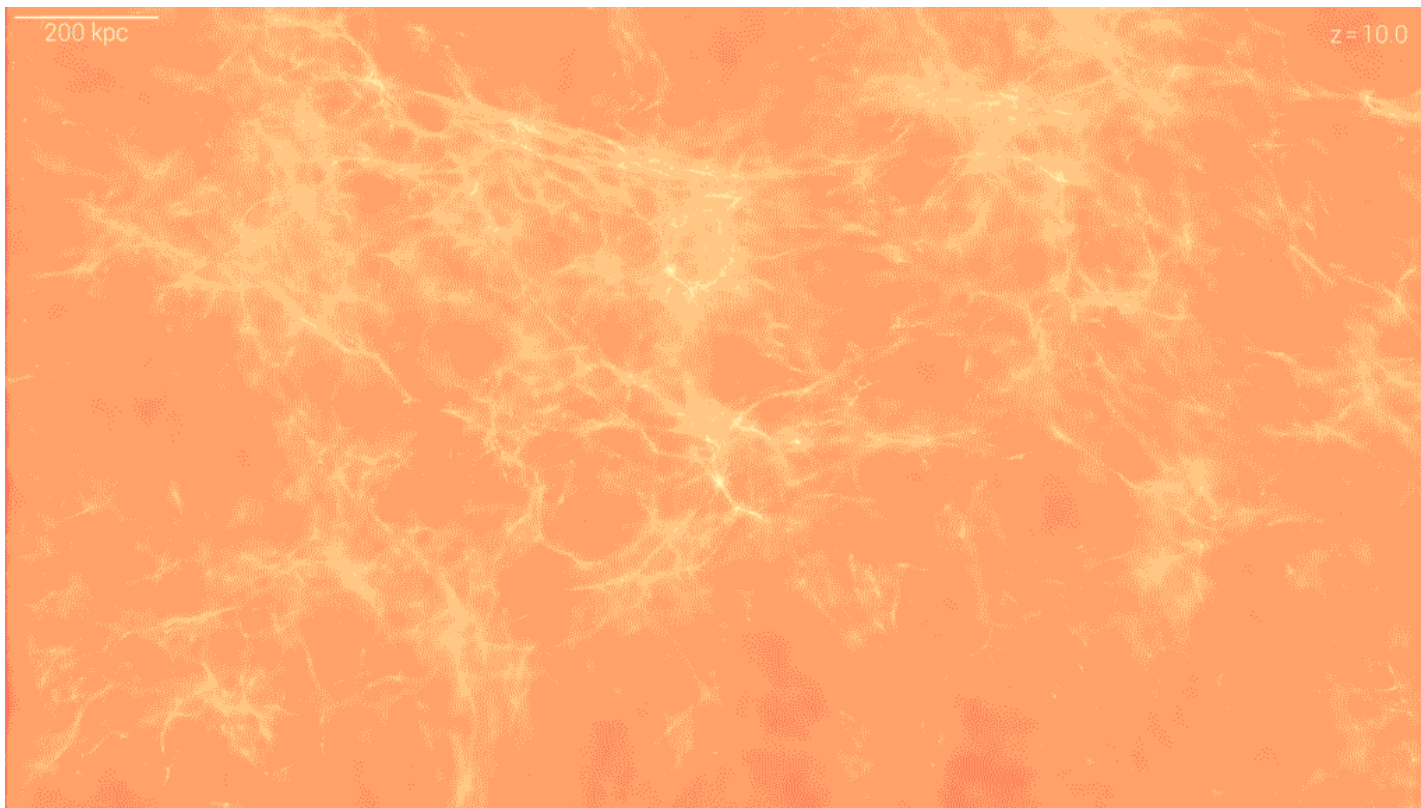
# 模拟不同尺度的结构



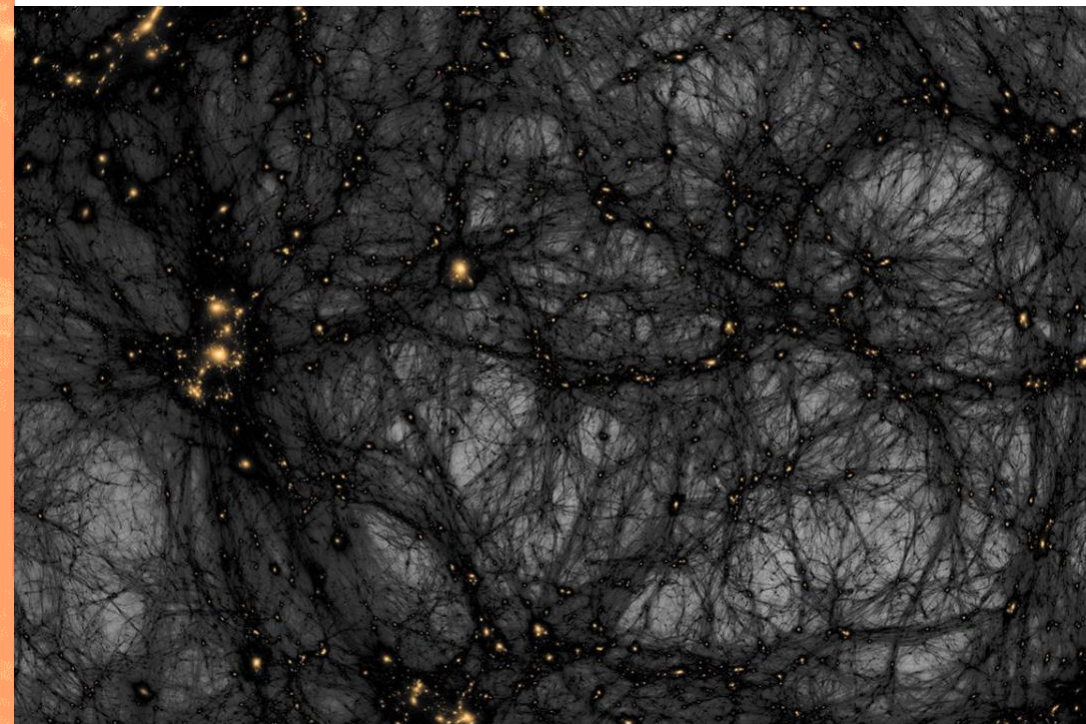
每个小亮斑代表一个暗物质晕，  
可能形成一个星系

星系团尺度

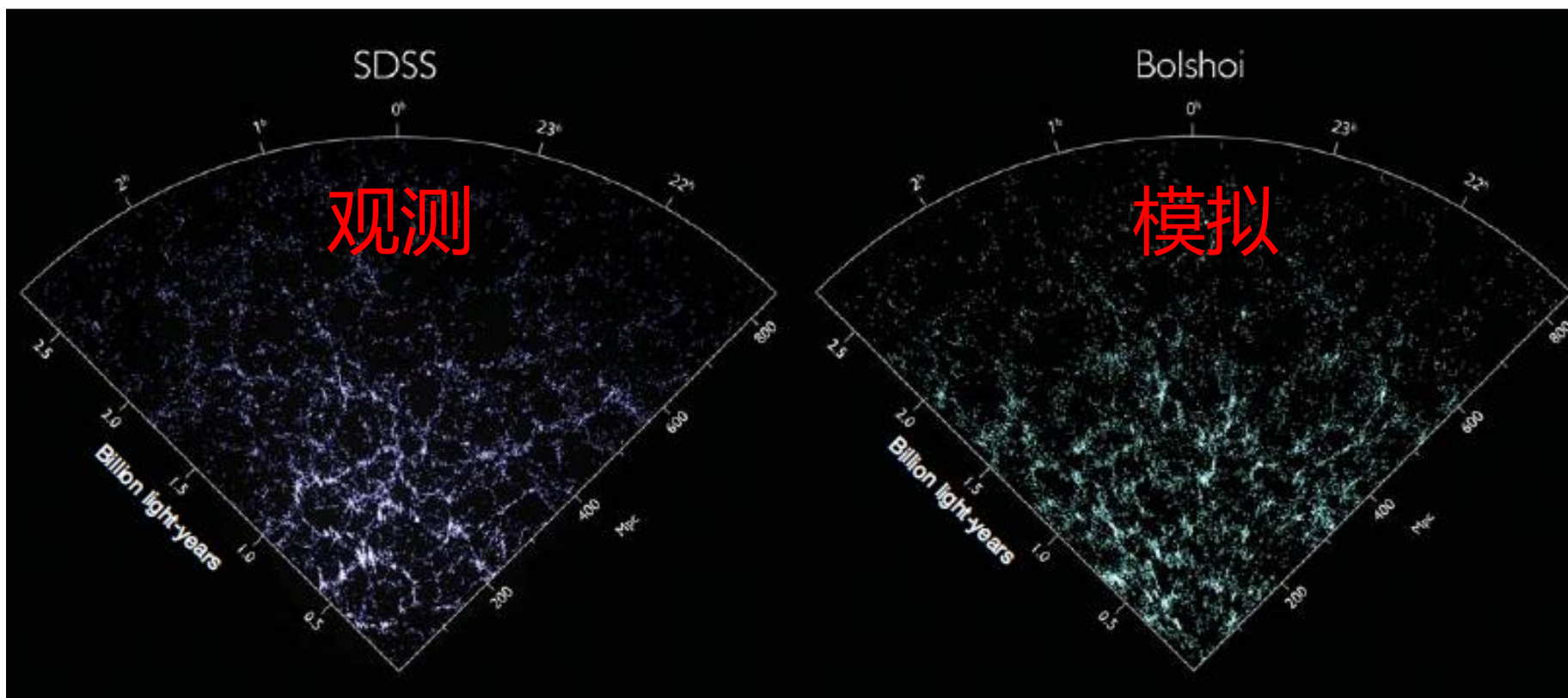




暗物质分布在宇宙大爆炸后几亿年到现在的演化，星系团会在暗物质集中的地方产生，并且通过暗物质晕的合并而“长大”。（版权：TNG Simulations）



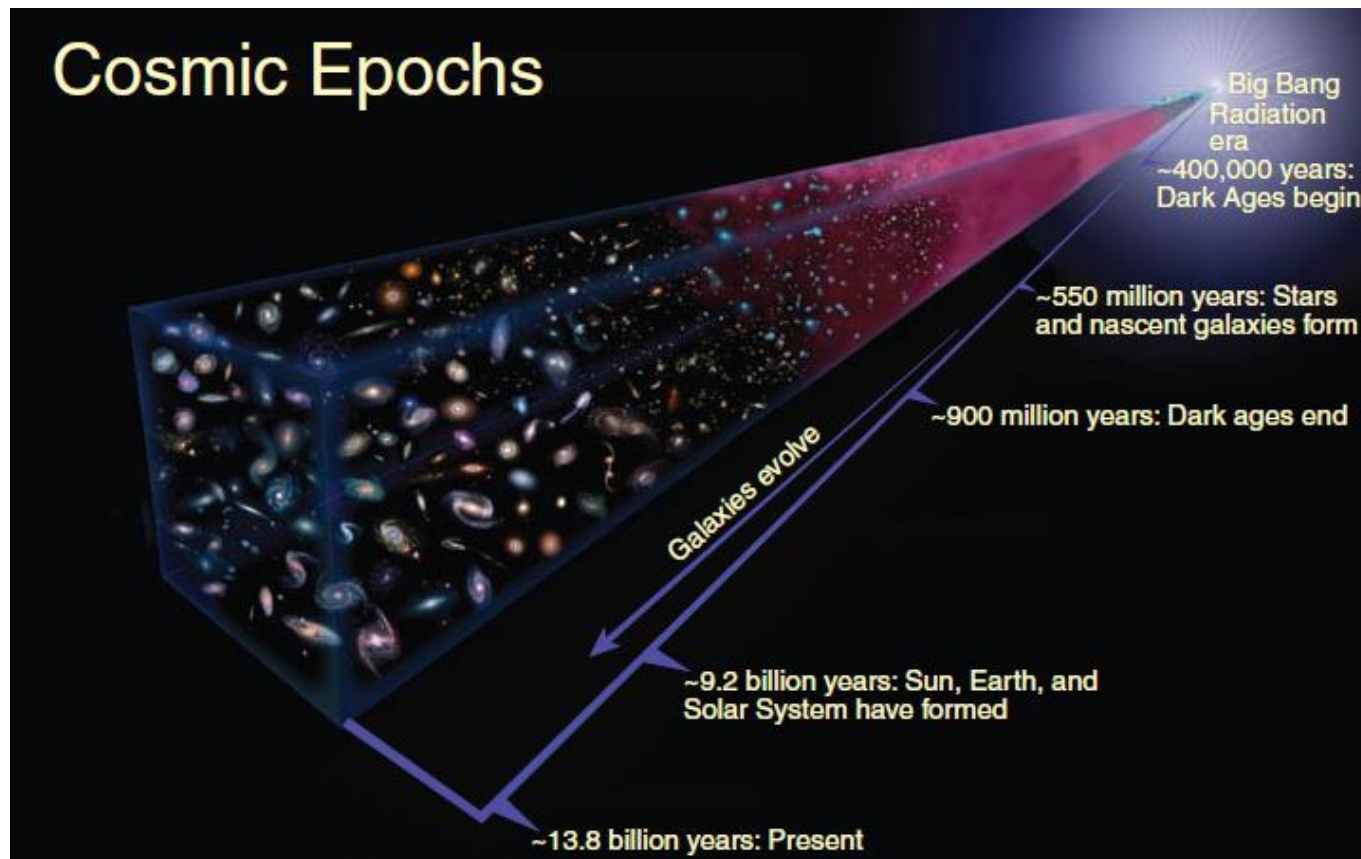
暗物质中的星系团，黑色为暗物质，黄色为星系团（版权：American Museum of Natural History）



模拟（暗物质的大尺度结构）与观测（星系的分布）惊人地一致

仅有特定宇宙学参数组合的模拟才能产生出观测到的大尺度结构





一幅快照所展示的不仅仅是星系的众生相，更是一部鲜活的宇宙演化（星系成长）史