

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13讲 膨胀的宇宙



本讲内容

1. 宇宙学原理
2. 宇宙在膨胀
3. 宇宙开始于一次大爆炸
4. 宇宙微波背景辐射
5. 大爆炸核合成

教材学习

- Chapter 21 The Expanding Universe
- Chapter 19
 - 19.2 Astronomers Use Several Methods to Find Distances to Galaxies

学习目标

- 宇宙学原理及其观测证据
- 哈勃定律，由此得出宇宙在膨胀
- 宇宙距离阶梯，标准烛光测距离所需光度与观测量的关系
- 由哈勃定律得出宇宙开始于一次大爆炸
- 星系红移的本质，星系红移与距离、宇宙大小及年龄、星系年龄的关系
- 宇宙微波背景辐射，重要的宇宙学参数
- 宇宙大爆炸核合成，原初元素及其丰度
- 大爆炸学说，3个观测证据

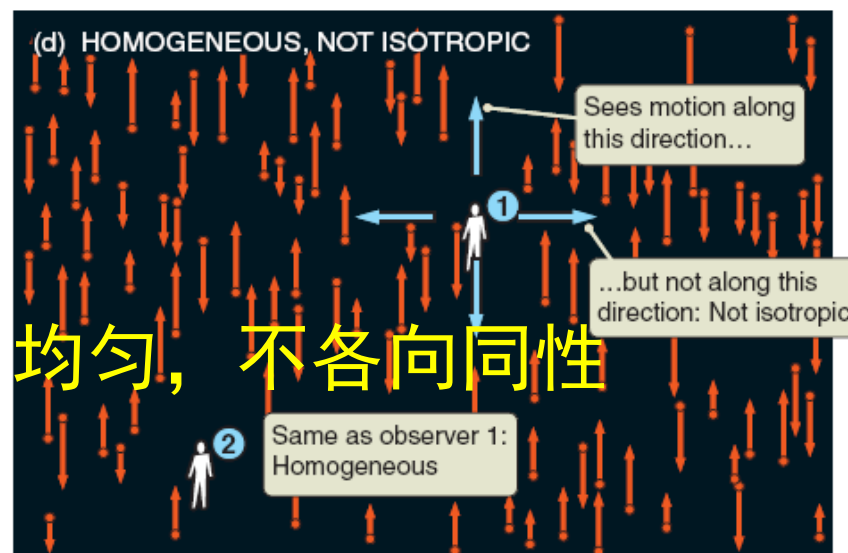
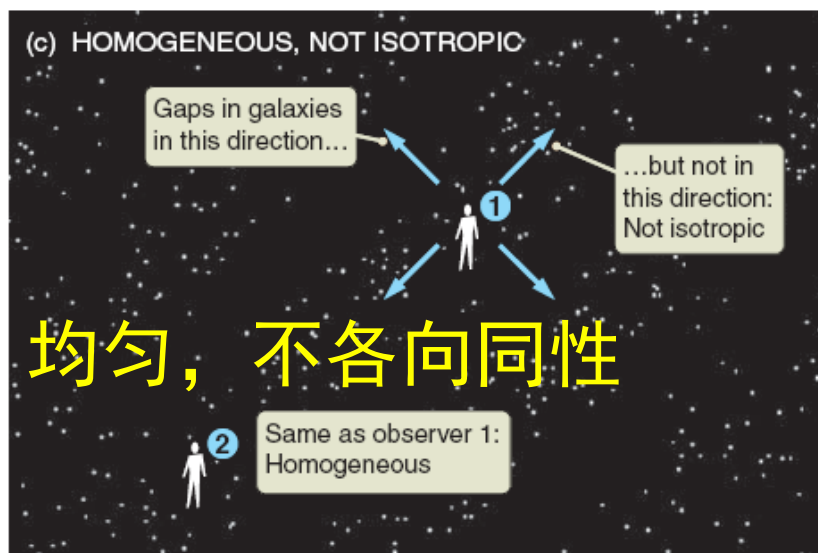
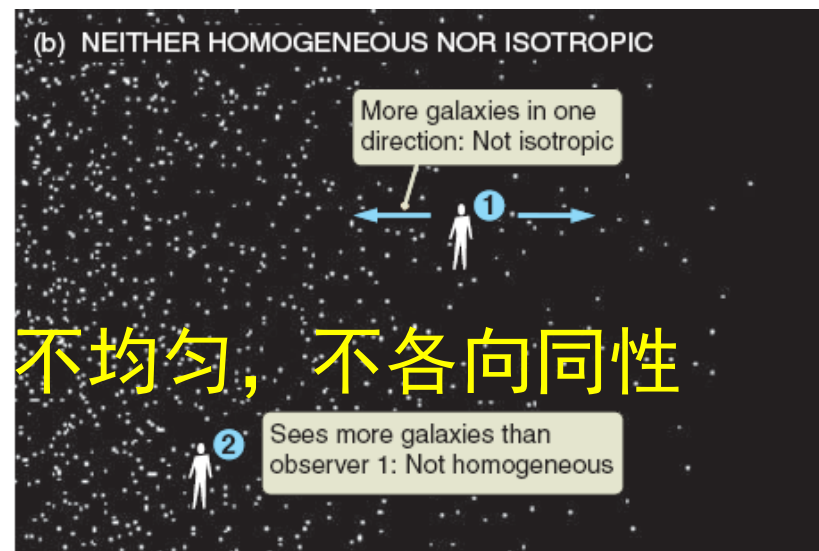
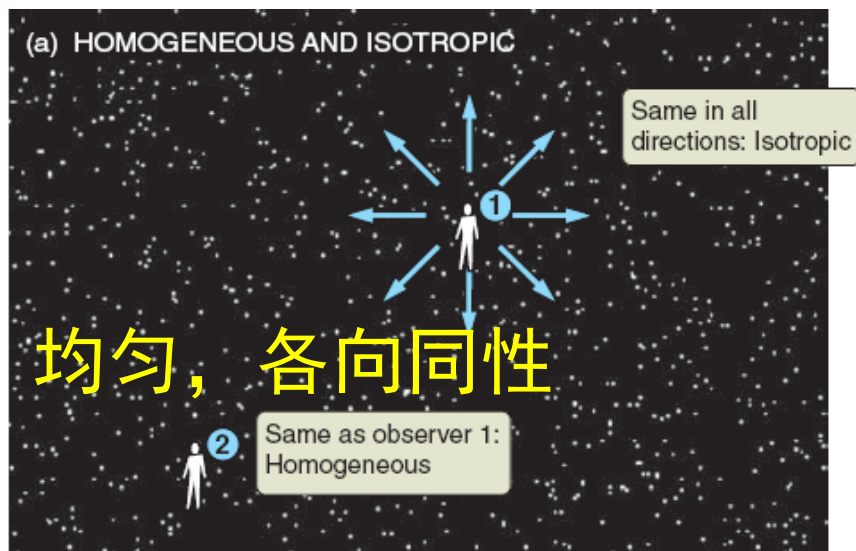
1、宇宙学原理

- 1920s, 弗里德曼(Alexander Friedmann 1888–1925)利用广义相对论建立宇宙的数学模型, 假设
 - 地球在宇宙中并非处于一个特别的位置
- 宇宙学原理: 同样的物理定律适用于宇宙不同的地方

宇宙学原理的含义

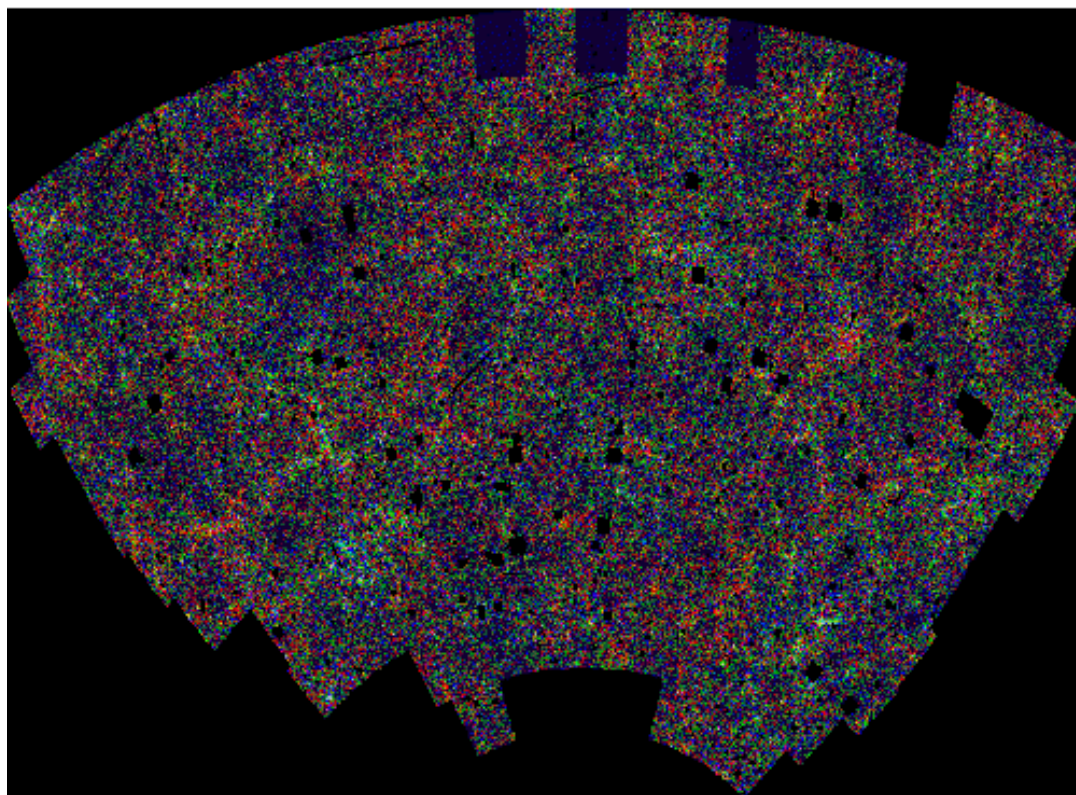
- 宇宙任何地方[在同一时刻]的“观测者”都应看到相同的宇宙
- 在大尺度上，宇宙（物质分布）是
 - 均匀的
 - 各向同性的
- 宇宙学原理是一个可检验的科学理论

星系的大尺度分布是宇宙学原理的直接检验



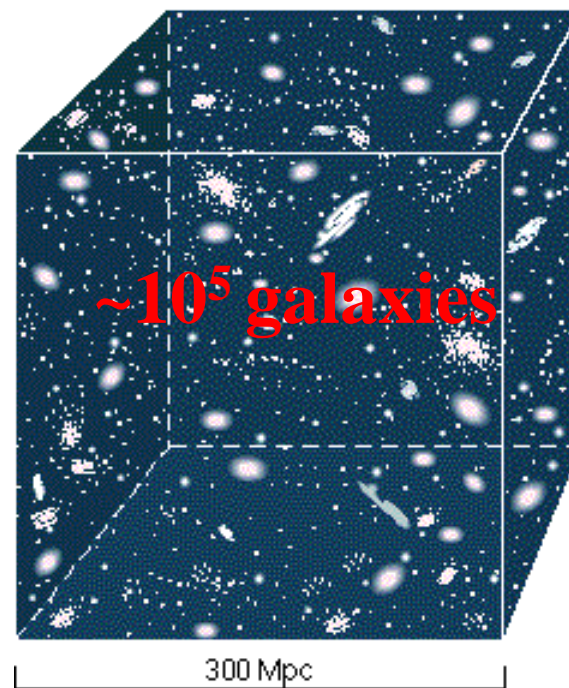
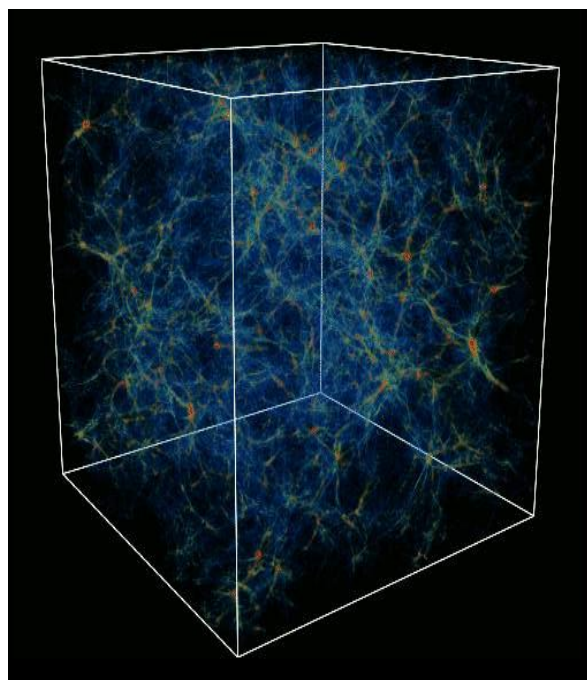
星系分布的各项同性

【例】约100万个星系
在约30度天空范围内
和约20亿光年距离以
内的分布，每个方向
的星系计数大致相同



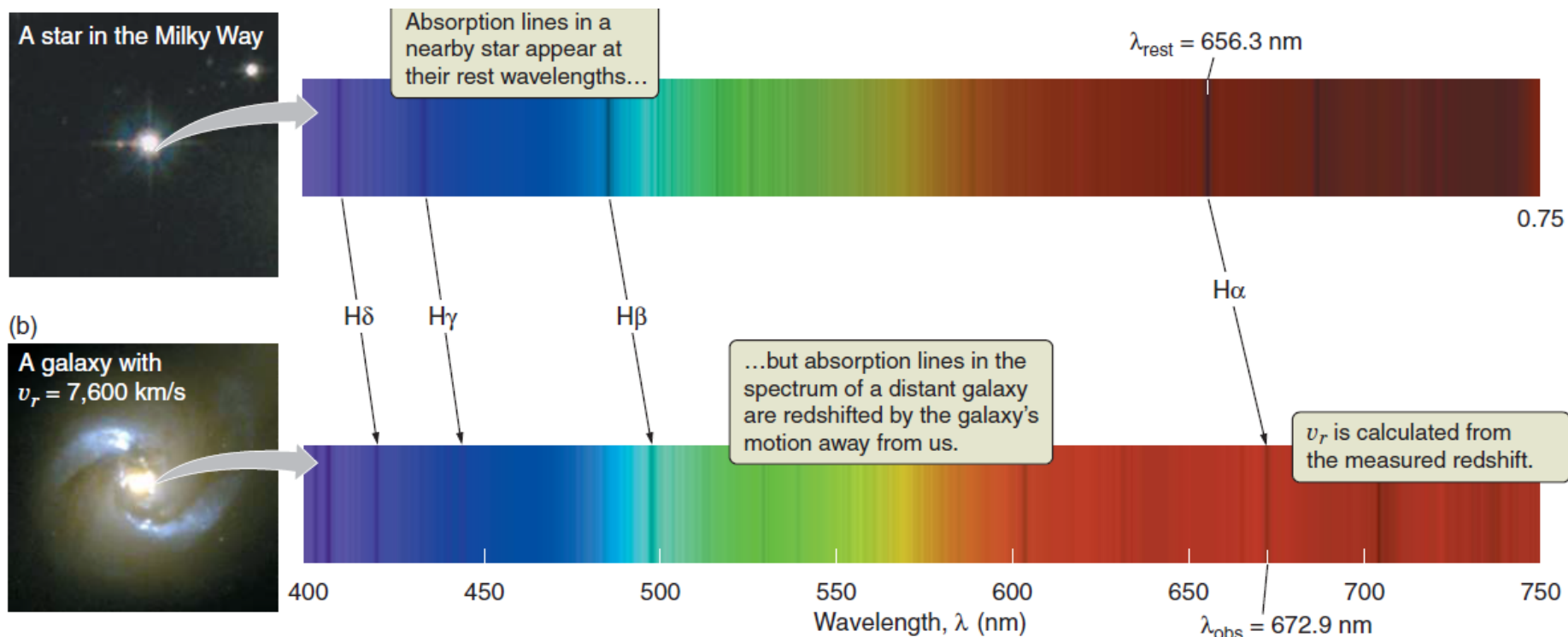
星系分布的均匀性

宇宙在大尺度（大于几亿光年的**超星系团**尺度）
上均匀 [星系数量、形状、结构等]



2、宇宙在膨胀

1920s, 维斯托·斯莱弗 (Vesto Slipher 1875–1969) 发现绝大部分星系的光谱谱线的波长变长



红移 z

- 斯莱弗把观测到的星系谱线波长的增加称为红移，用 z 表示

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{rest}}}{\lambda_{\text{rest}}}$$

- 哈勃把此红移解释为多普勒位移，由此得出绝大部分星系在远离银河系

哈勃定律

1929年，哈勃发现星系退行速度与其距离成正比

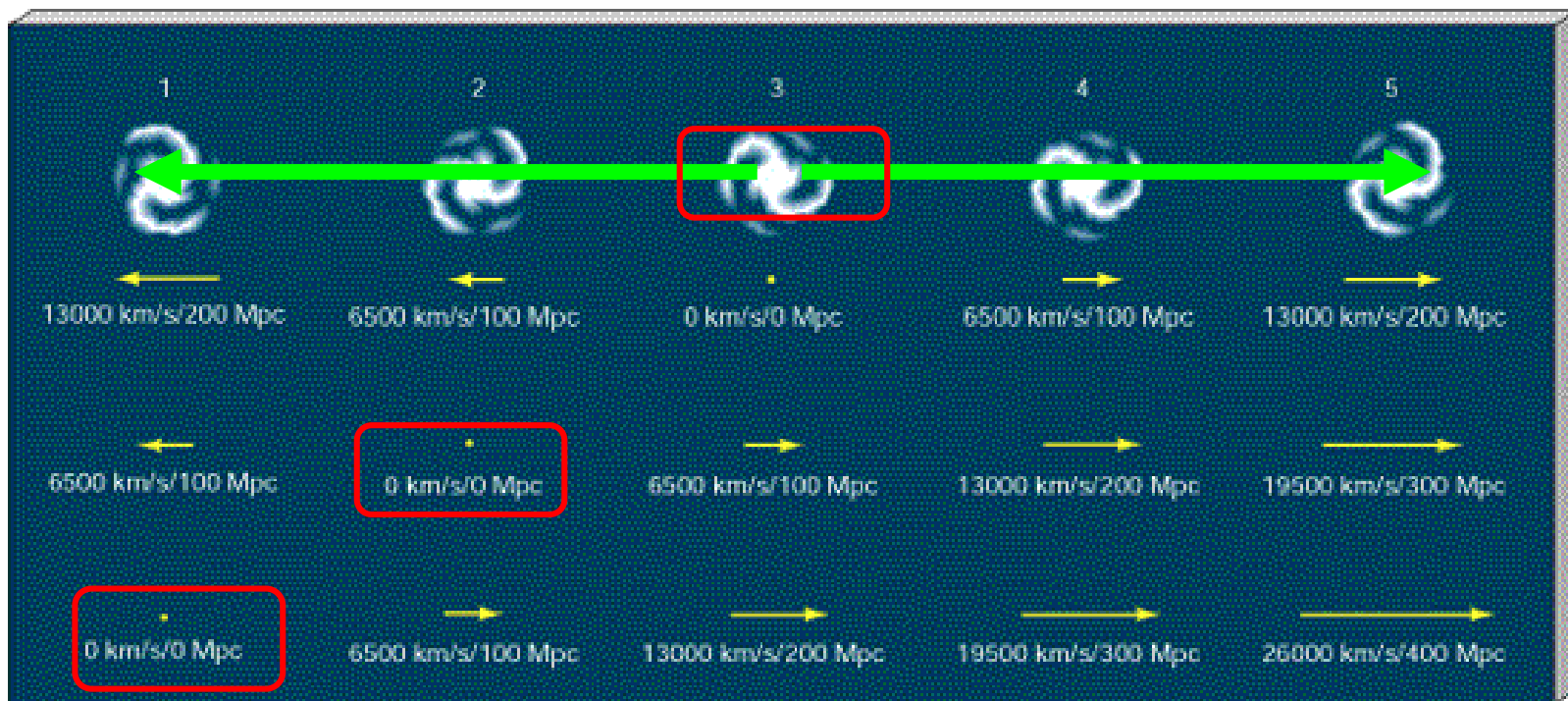
$$v_r = H_0 \times d_G$$

H_0 ：哈勃“常数”

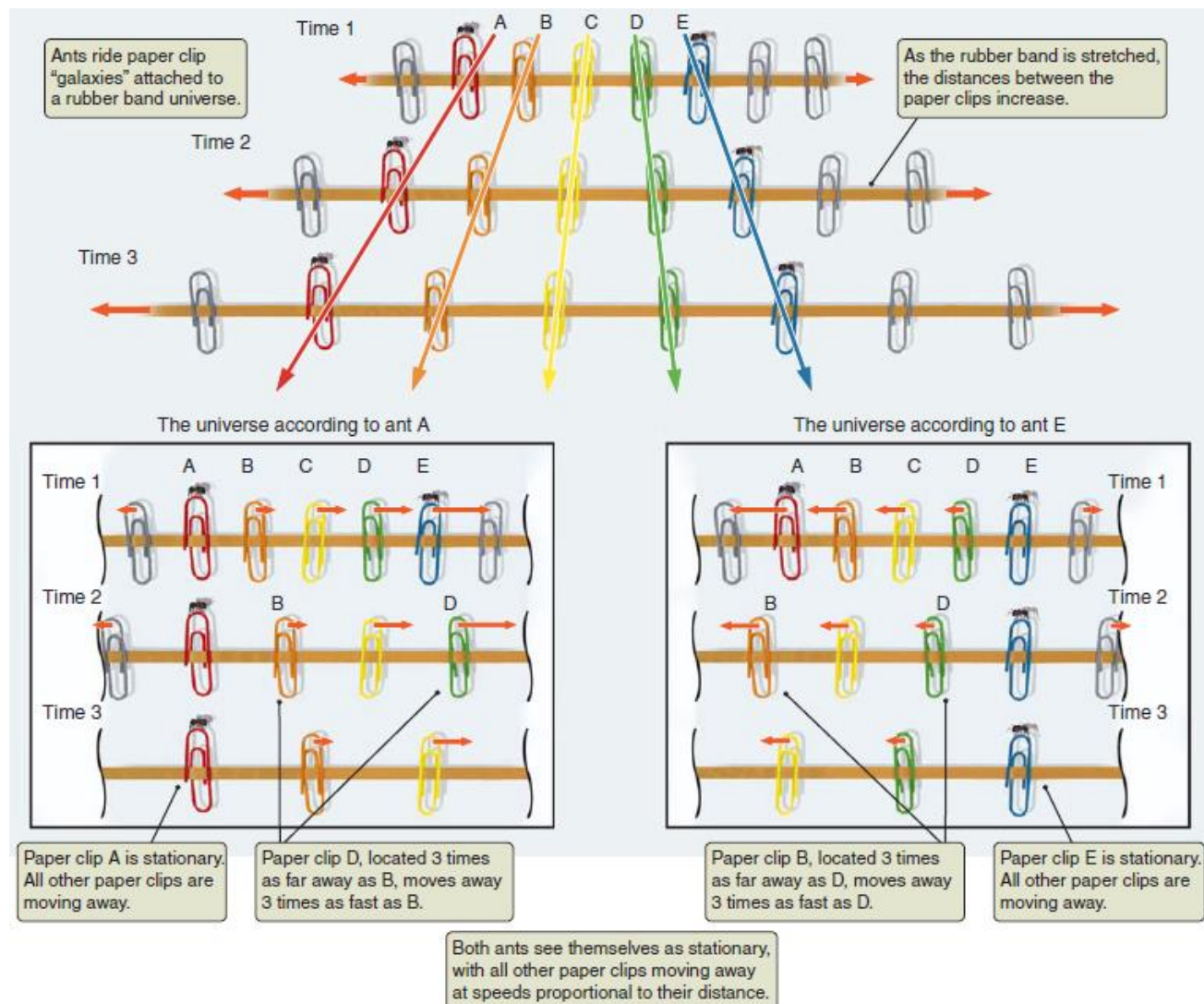


哈勃定律（因而宇宙）是

- 各项同性的
- 均匀的



哈勃定律表明宇宙空间是**均匀**（=各项同性）**膨胀**的



哈勃定律是宇宙学原理的观测证据

- 哈勃定律也意味着宇宙物质是均匀各项同性分布的，否则，局域（或一方向）超强引力所引起的星系的本动速度会显著干扰由宇宙均匀膨胀而引起的星系退行速度，因而不会存在哈勃定律
- 由宇宙膨胀而引起的星系红移称为宇宙学红移（ z ）

*在 BEC 中模拟膨胀的宇宙

德国海德堡大学的Celia Viermann 和Markus Oberthaler 、德国耶拿大学的Stefan Floerchinger以及西班牙马德里康普顿斯大学、德国波鸿鲁尔大学和布鲁塞尔自由大学的同事们，比利时，使用玻色-爱因斯坦凝聚体（BEC）来模拟膨胀的宇宙及其内部的量子场。在这个模拟系统中，凝聚态代表了宇宙，而穿过凝聚态的声子则扮演了量子场的角色。通过改变 BEC 中原子的散射长度，研究小组使「宇宙」以不同的速率膨胀，并研究了声子如何在其中引发密度波动。宇宙学理论预测，类似的效应导致了早期宇宙中大规模结构的形成，因此模拟的宇宙可能会产生有价值的见解，让我们了解真实的宇宙是如何变成今天的样子的。

Physics World公布2023年十大年度突破性成果

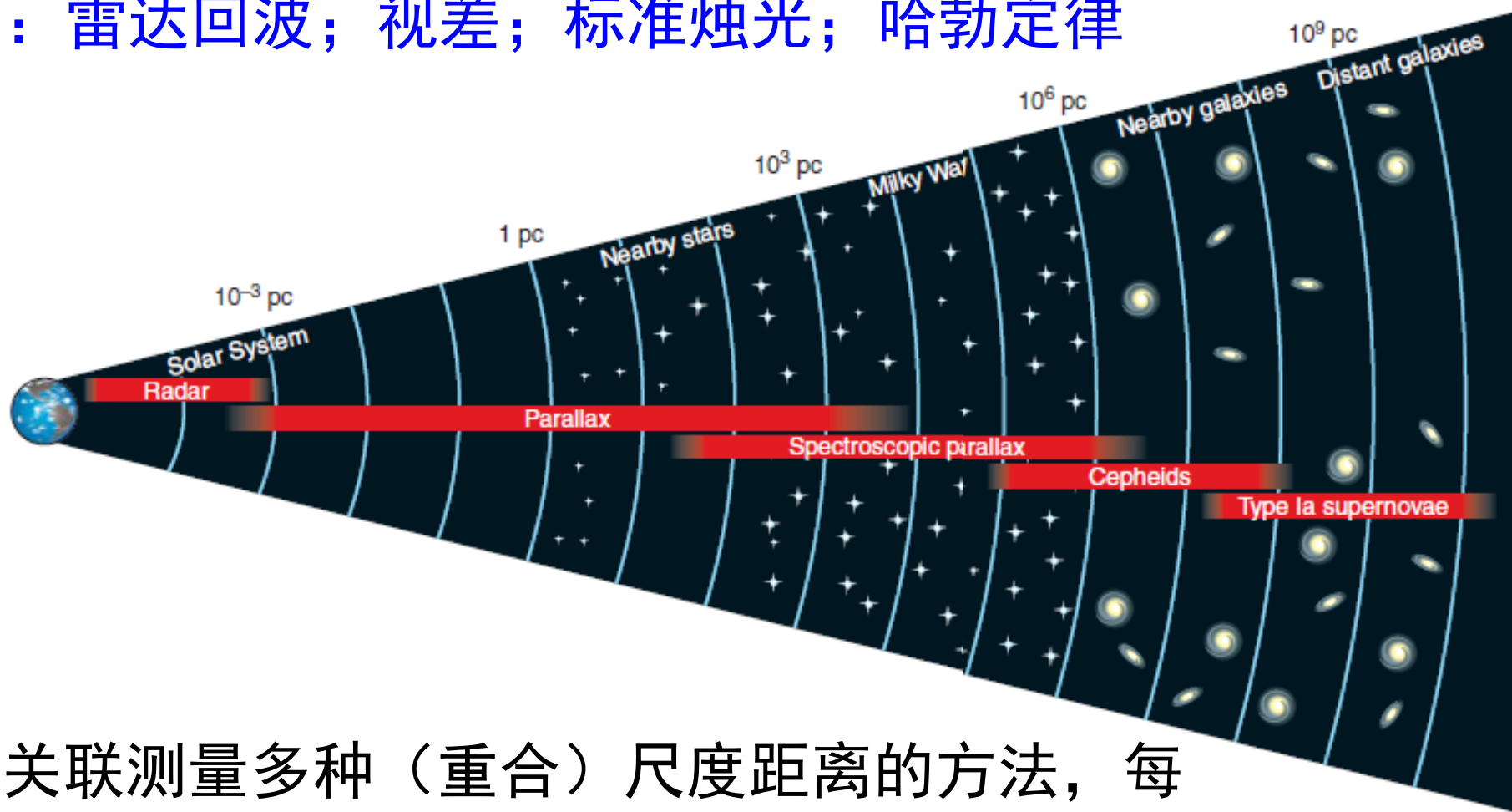
现代物理知识杂志 2023-12-15 18:45 发表于北京

哈勃常数 H_0 = 宇宙现在的“膨胀速率”

$$v_r = H_0 \times d_G$$

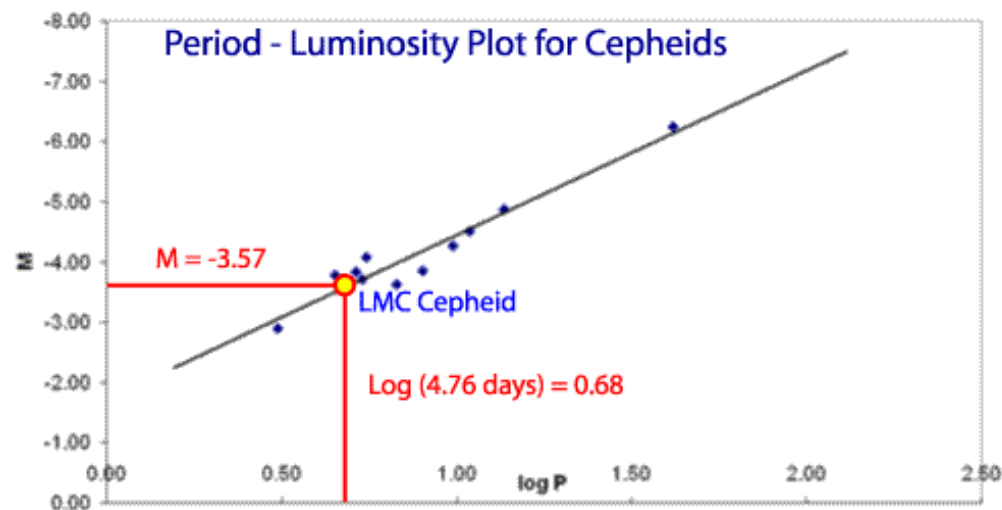
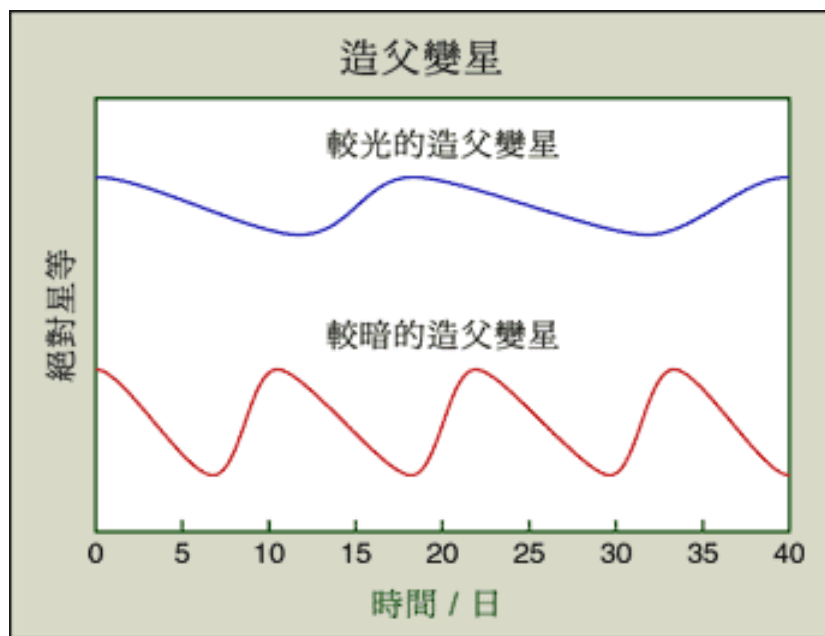
- H_0 是重要的宇宙学参数，确定它需要测量一批星系的退行速度与距离
- 星系的退行速度（哈勃流）即红移测量容易
- 测量距离（特别是很遥远的距离）则要困难得多
 - 由于星系本动速度的影响，需要测量足够远的距离

四类测距法：雷达回波；视差；标准烛光；哈勃定律



- 距离阶梯关联测量多种（重合）尺度距离的方法，每一种方法建立在上一种方法的基础上
 - 分光视差法是基于视差法

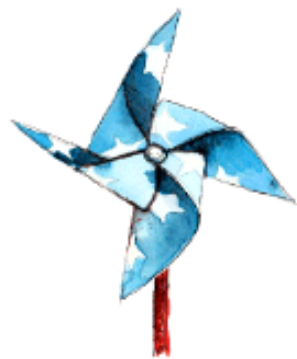
- 用来测量距离的天体称为**标准烛光**，是光度“已知”的某类型天体，且光度高
- **造父变星**是重要的一类标准烛光，基于勒维特发现的造父变星的**周光关系**，HST测量的星系距离可达 ~ 30 Mpc（由视差法标定）



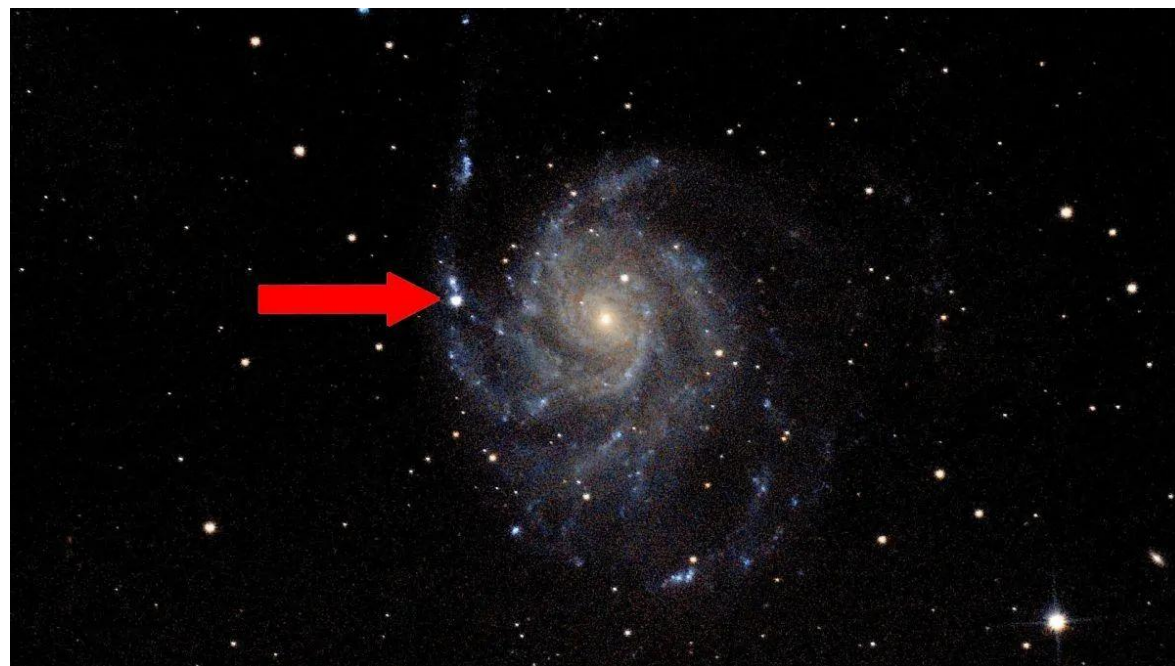
Ia型超新星是光度很高的标准烛光



SN2011fe (Ia型)



风车星系M101



SN2023ifx (II型)

其它标准烛光：旋涡星系、……

【例】Ia型超新星2011fe的[星系]距离

$$\text{Brightness} = \frac{\text{Luminosity}}{4\pi d^2} \quad d = \sqrt{\frac{\text{Luminosity}}{4\pi \times \text{Brightness}}}$$

2011fe的最大亮度： $7.5 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$

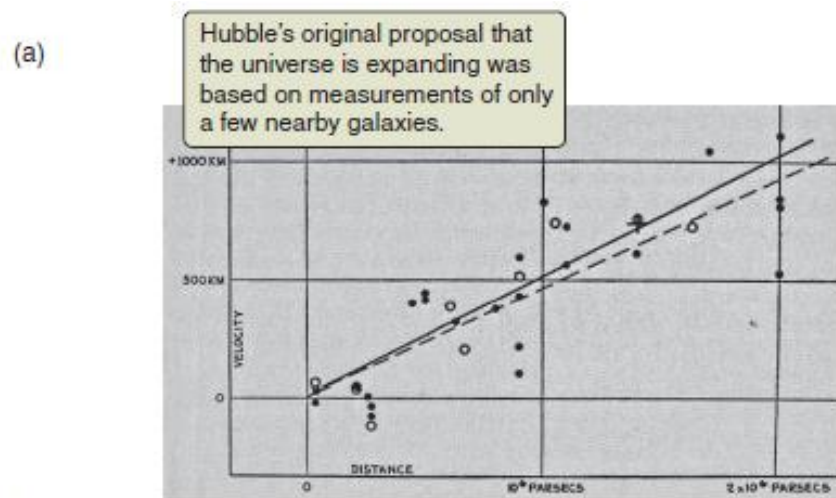
Ia型超新星的“最大光度”： $L = 9.5 \times 10^9 \times L_{\odot}$

$$= 9.5 \times 10^9 \times (3.9 \times 10^{26} \text{ W}) = 3.7 \times 10^{36} \text{ W}$$

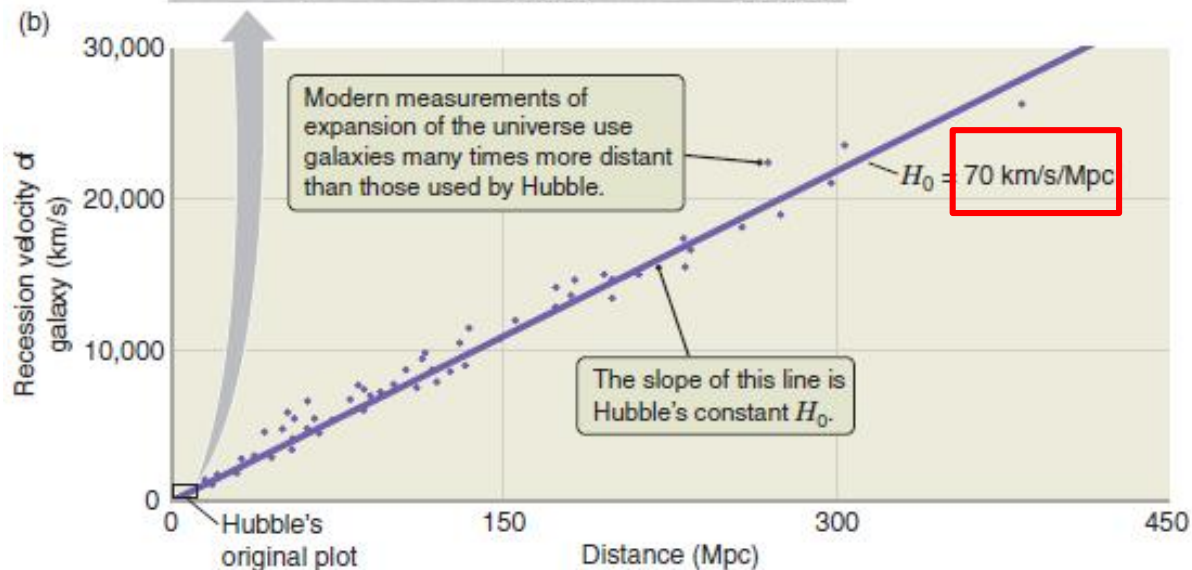
2011fe(风车星系)的距离： $d = \sqrt{\frac{3.7 \times 10^{36} \text{ W}}{4\pi \times 7.5 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2}} = 2.0 \times 10^{23} \text{ m}$

$$d = \frac{2.0 \times 10^{23} \text{ m}}{3.1 \times 10^{22} \text{ m/Mpc}} = 6.4 \text{ Mpc}$$

哈勃图的直线拟合斜率=哈勃常数 H_0



$$v_r = H_0 \times d_G$$



“红移即距离”

$$v_r = H_0 \times d_G$$

- 一旦 H_0 已知，哈勃定律使得（更遥远）距离的测量变得容易：

星系：光谱 → 红移 → 退行速度 → 距离

- 哈勃定律提供了绘制可观测宇宙结构的工具
- [*其它方法测 H_0 ：Hubble Tension 新物理？]
- [*宇宙膨胀速率随宇宙年龄的演化：哈勃参数 $H(t)$]

【例】由星系红移测量星系距离

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{rest}}}{\lambda_{\text{rest}}} = \frac{379 \text{ nm} - 373 \text{ nm}}{373 \text{ nm}} = 0.0161$$

$$v_r = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{rest}}}{\lambda_{\text{rest}}} \times c$$

$$v_r = z \times c = 0.0161 \times 300,000 \text{ km/s} = 4,830 \text{ km/s}$$

$$v_r = H_0 \times d_G \quad d_G = \frac{v_r}{H_0} = \frac{4,830 \text{ km/s}}{70 \text{ km/s/Mpc}} = 69 \text{ Mpc}$$

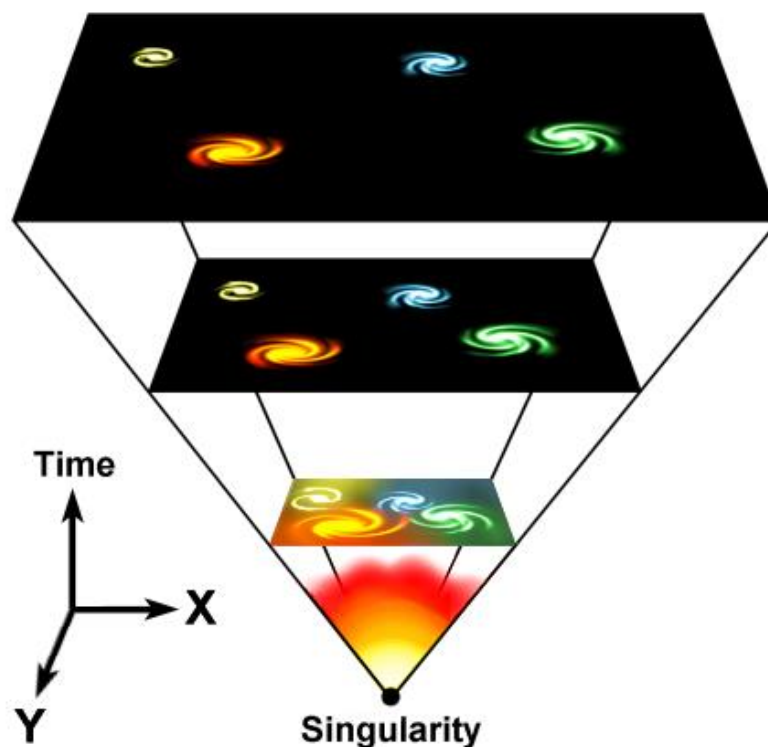
回溯时间：“红移（距离）即时间”

- 光速有限意味着距离遥远的天体是宇宙年轻时的信息
- 回溯时间是遥远天体所发出的光到达地球所经历的时间
- 由于宇宙膨胀，当前距离大于 光速 x 时间

红移z	距离[亿光年]	回溯时间[亿年]
0.00	0	0
0.01	1.39	1.39
0.1	13.7	13.0
10	318	133

3、宇宙开始于一次大爆炸

哈勃定律揭示宇宙的起源：宇宙有一个起点！



哈勃时间

哈勃定律表明星系之间相互远离所经历的时间相同，称为哈勃时间

$$\text{时间} = \frac{\text{距离}}{\text{速度}} = \frac{\text{距离}}{H_0 \times \text{距离}} = \frac{1}{H_0} = \text{哈勃时间}$$

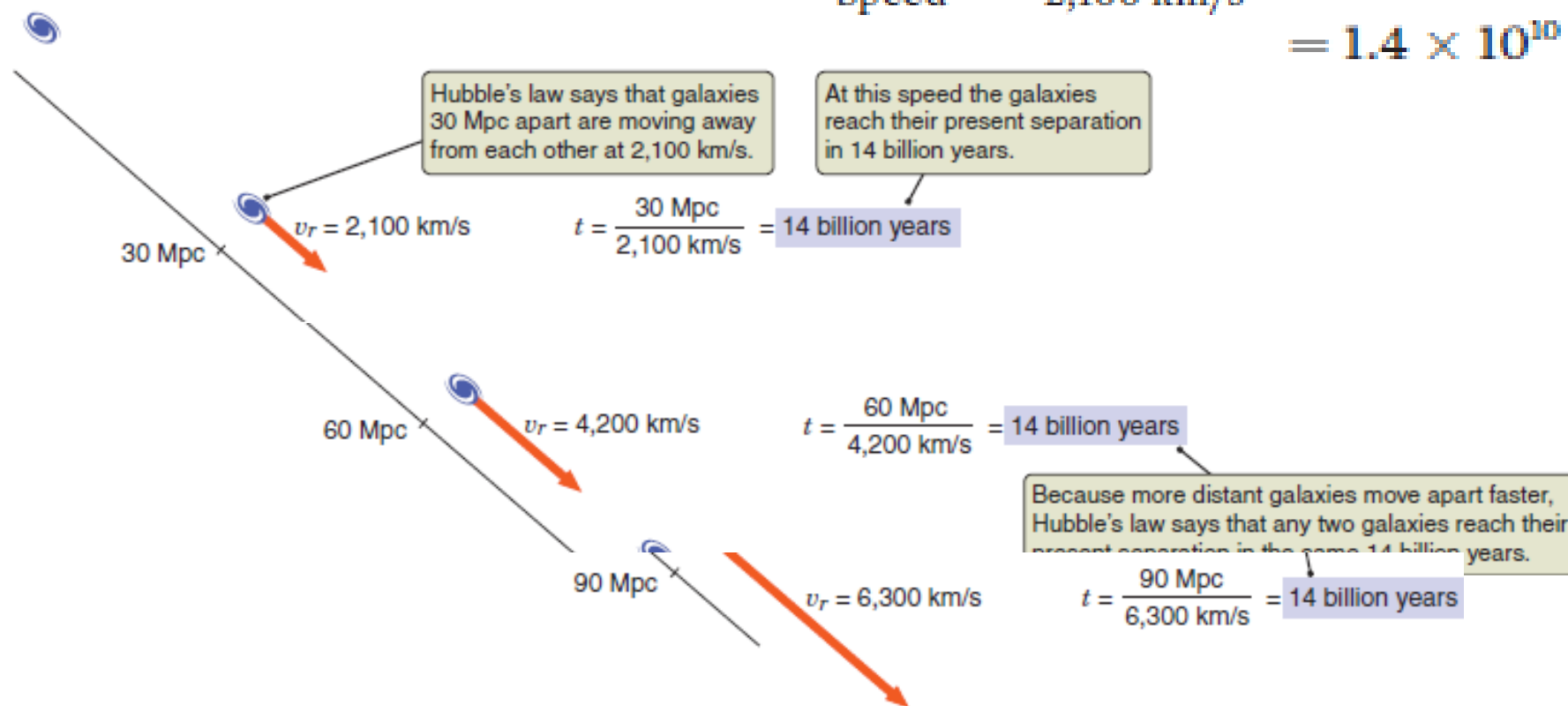
宇宙“等速”膨胀 $\rightarrow 1/H_0$ 为宇宙年龄

$H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc} \rightarrow$ 宇宙年龄 $\sim 140(138)$ 亿年

$$\begin{aligned}
 v_r &= H_0 \times d_G \\
 &= 70 \text{ km/s/Mpc} \times 30 \text{ Mpc} \\
 &= 2,100 \text{ km/s}
 \end{aligned}$$

“任何” 两个星系远离的时间相同

$$\begin{aligned}
 \text{Time} &= \frac{\text{Distance}}{\text{Speed}} = \frac{9.3 \times 10^{20} \text{ km}}{2,100 \text{ km/s}} = 4.4 \times 10^{17} \text{ s} \\
 &= 1.4 \times 10^{10} \text{ yr}
 \end{aligned}$$



$$v_r = H_0 \times d_G = 70 \text{ km/s/Mpc} \times 60 \text{ Mpc} = 4,200 \text{ km/s}$$

$$\text{Time} = \frac{18.6 \times 10^{20} \text{ km}}{4,200 \text{ km/s}} = 4.4 \times 10^{17} \text{ s} = 1.4 \times 10^{10} \text{ yr}$$

标志宇宙开始的事件称为宇宙大爆炸

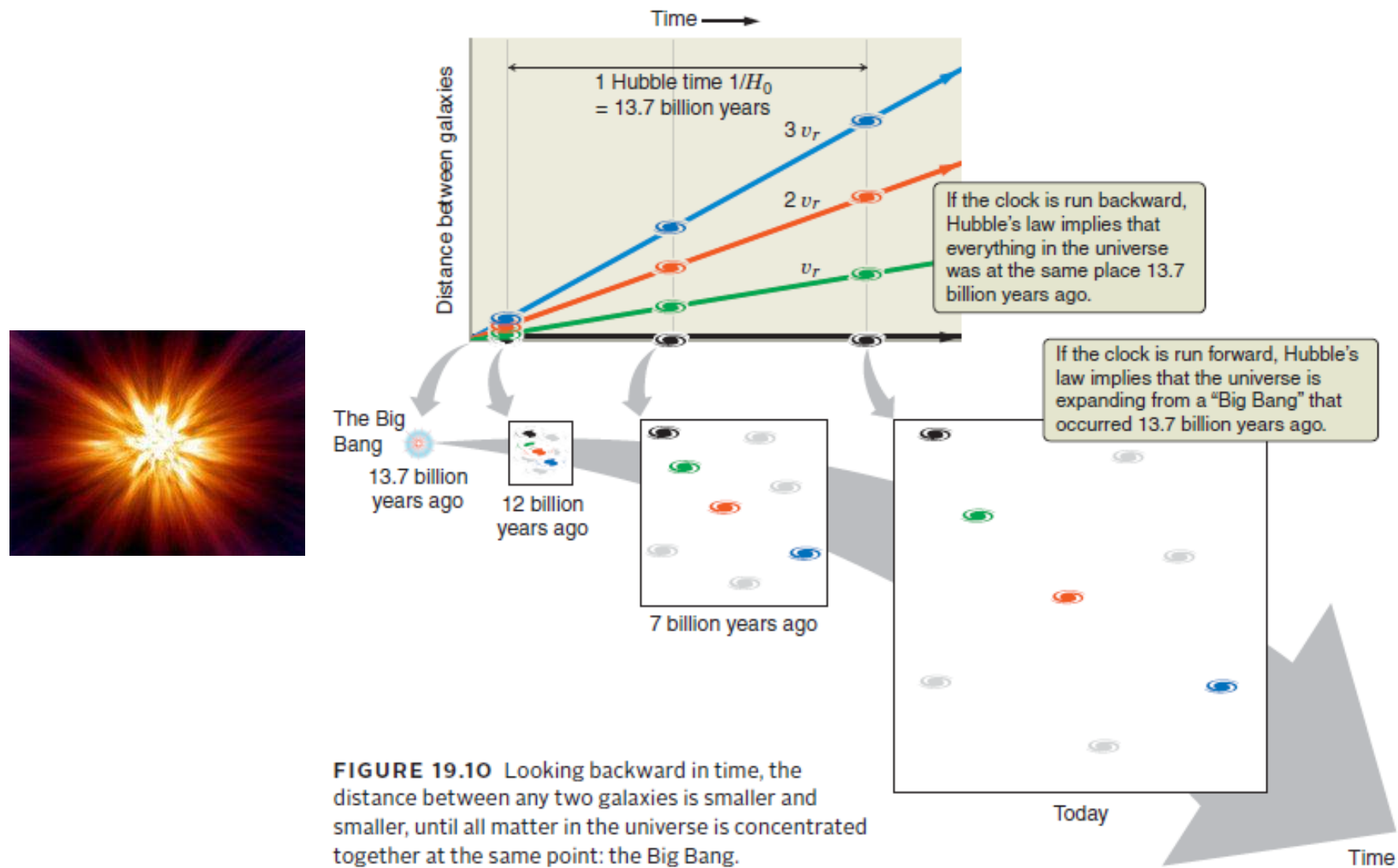


FIGURE 19.10 Looking backward in time, the distance between any two galaxies is smaller and smaller, until all matter in the universe is concentrated together at the same point: the Big Bang.

谁是提出宇宙大爆炸/膨胀 /哈勃定律的第一人？

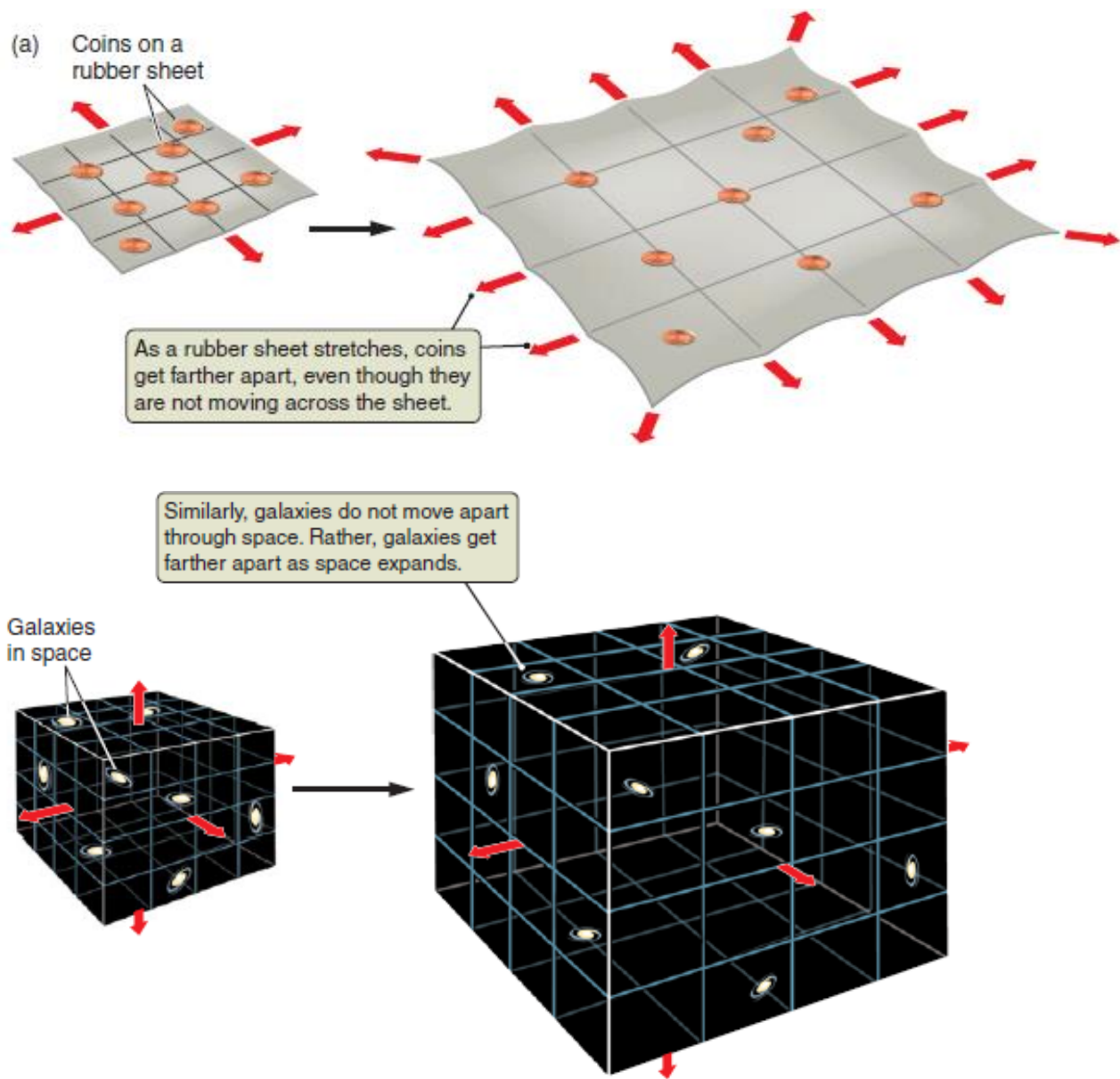


- 1920s, 弗里德曼 (Alexander Friedmann 1888–1925)
- 1927年, 勒梅特 (Georges Lemaître 1894-1966) 指出广义相对论预言: 过去的宇宙必定比今天的宇宙具有更小的空间尺度
 - 宇宙有一个起始之点, 称为“原始原子”
- 哈勃定律 → 哈勃-勒梅特定律 (2018年10月)

宇宙大爆炸发生在哪里？或者说宇宙的中心在哪里？

- 宇宙大爆炸（起点）发生在任何地方，或者说宇宙是没有中心的
- 因为，星系并非在已存在的宇宙空间中相互远离
- 宇宙时空与大爆炸同时出现，并随宇宙膨胀而被持续创建
- 大爆炸宇宙是均匀各项同性的，符合宇宙学原理

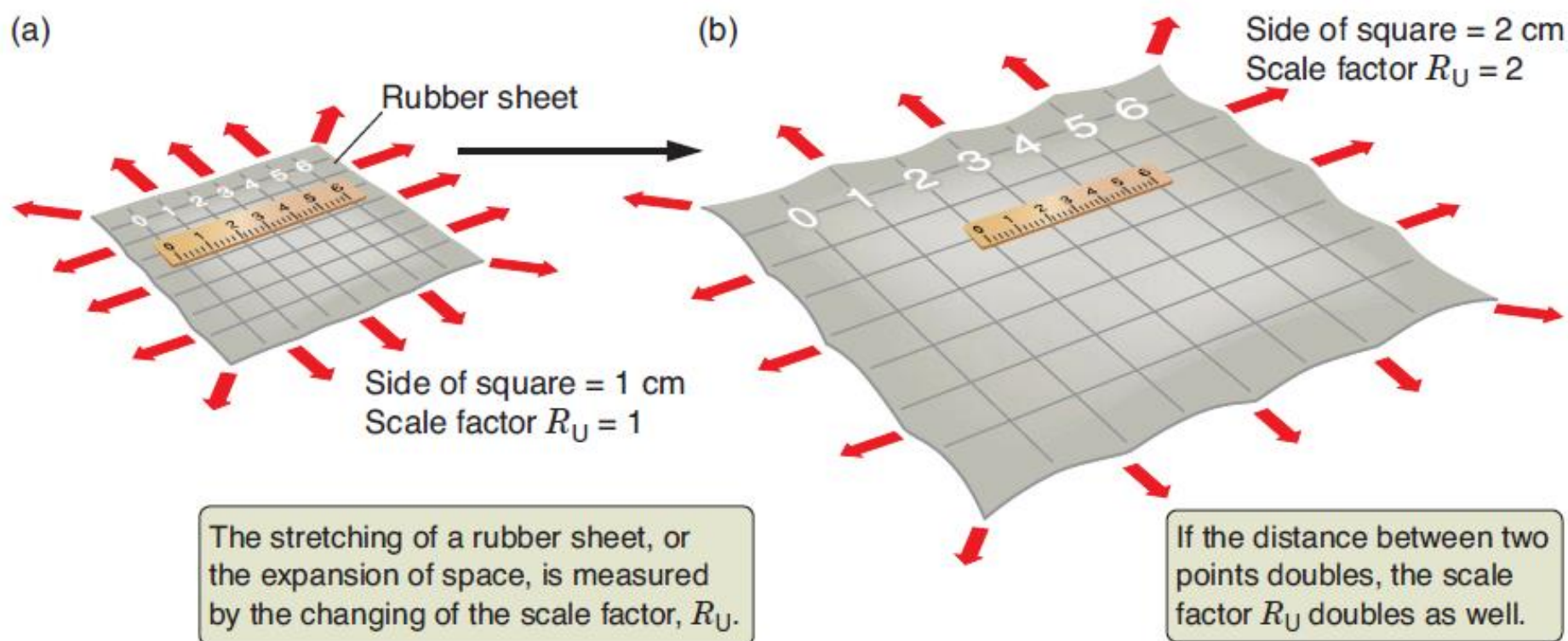
哈勃定律是大爆炸
宇宙（均匀各项同
性膨胀）这一事实
的自然结果



宇宙尺度因子 (R_U)

量度宇宙大小的（相对）变化，随宇宙膨胀而变大：

定义：现在=1，过去<1 未来>1

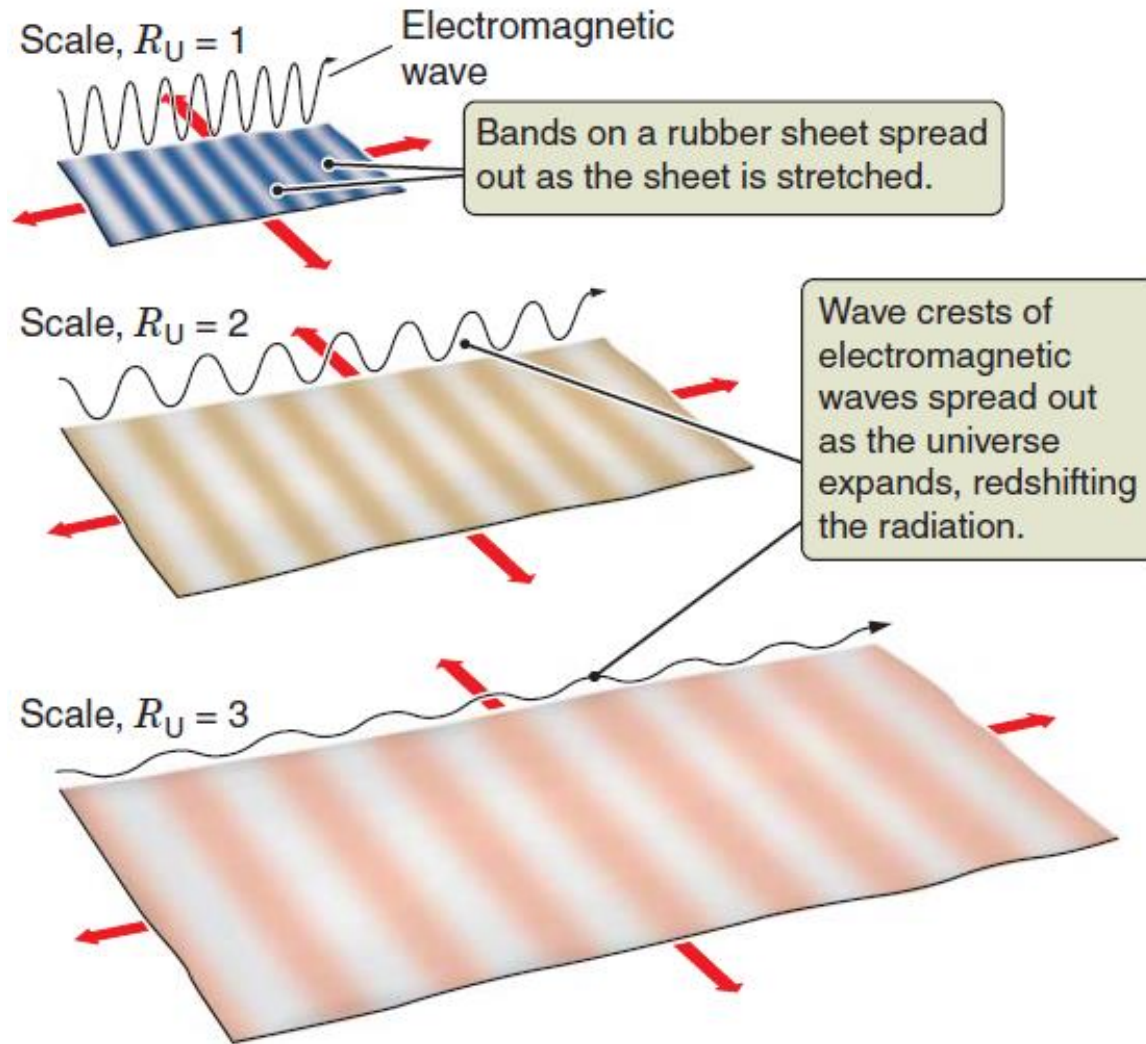


宇宙膨胀“不影响”局域的物理规律

非宇宙学尺度：原子、恒星、星系等的大小及物理特征维持不变

- 原子内和原子间的核力与电磁力
 - 邻近天体之间的引力
- >> 宇宙膨胀（~斥力）

星系红移是宇宙膨胀的结果



星系红移的本质
是宇宙膨胀拉伸
了在其中传播的
电磁波的波长

红移直接测量，辐射在从星系发出至到达地球的过程中，宇宙膨胀（尺度因子改变）了多少倍

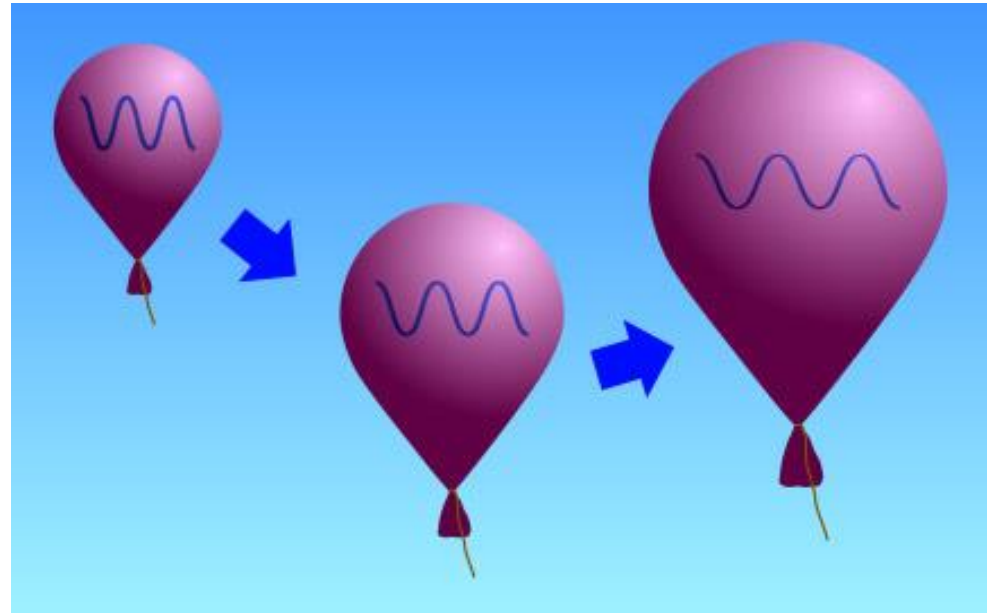
$$R_u = \frac{1}{1+z}$$

$$Z=0, \quad R_u=1$$

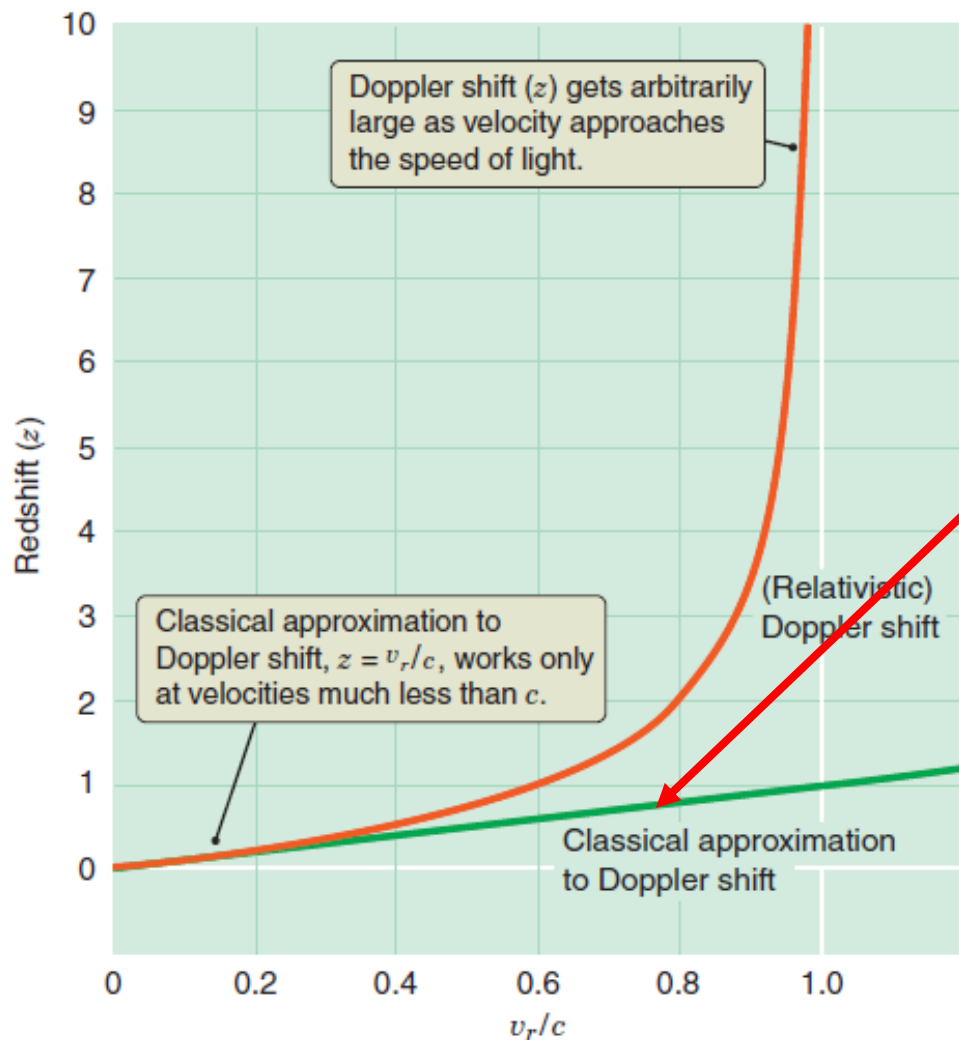
$$Z=1, \quad R_u=1/2$$

$$Z=2, \quad R_u=1/3$$

.....



红移 > 1 ，星系退行速度 $>$ 光速？



$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{rest}}}{\lambda_{\text{rest}}}$$

$$v_r = z \times c$$

相对论速度时，需要考虑狭义相对论的时钟变缓效应，红移可任意大

宇宙视界：退行速度=光速， z 无限大！

4、宇宙微波背景辐射

The Cosmic Microwave Background (CMB) Radiation

宇宙大爆炸发生的证据是什么？



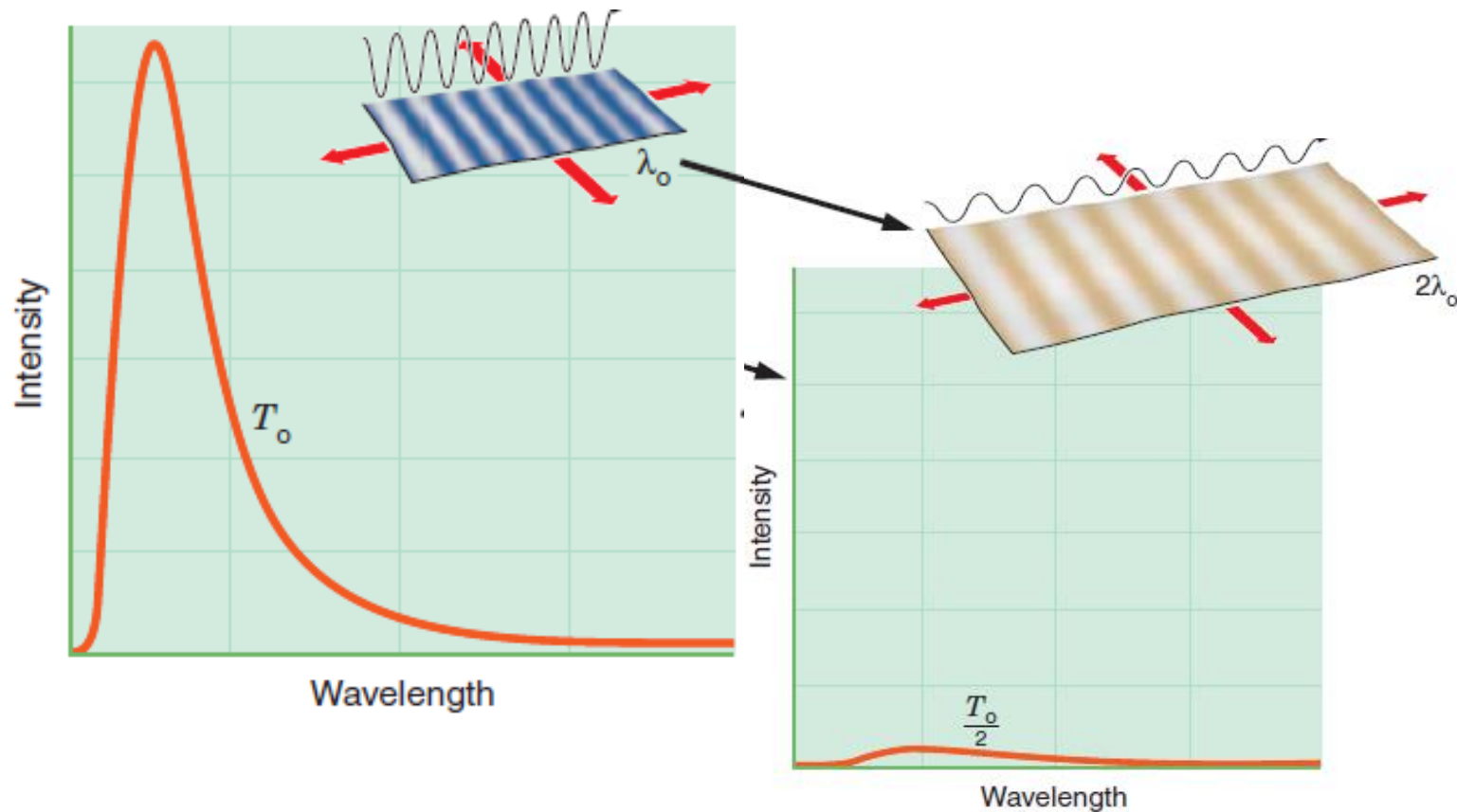
大爆炸宇宙学



1948年，伽莫夫（George Gamow 1904–1968）等人提出宇宙起源的热大爆炸宇宙学模型：极端密集、温度极端高的早期宇宙必定充满极高能的热辐射。

“ $\alpha\beta\gamma$ ”论文（化学元素的起源）

热辐射随宇宙膨胀红移，宇宙温度下降



$$T = (2,900,000 \text{ nm K}) / \lambda_{\text{peak}}$$

CMB是宇宙大爆炸发生的重要证据

- 随着宇宙的膨胀和冷却，热辐射从极高能的伽马射线波段逐步红移到今天的微波波段。
- 当前宇宙的热辐射谱应为温度为~几K的黑体谱。
- CMB是宇宙大爆炸的遗迹（余辉）。

- 伽莫夫等人的学说并未受到重视
- 1964年, Dicke, Peebles, Roll 和 Wilkinson 独立得出, 宇宙早期是炽热的, 遗留到今天的辐射是温度 $\sim 10\text{K}$ 的黑体谱



Phillip James Edwin Peebles (1935 -)

2019诺奖: “对于物理宇宙学方面的理论发现”

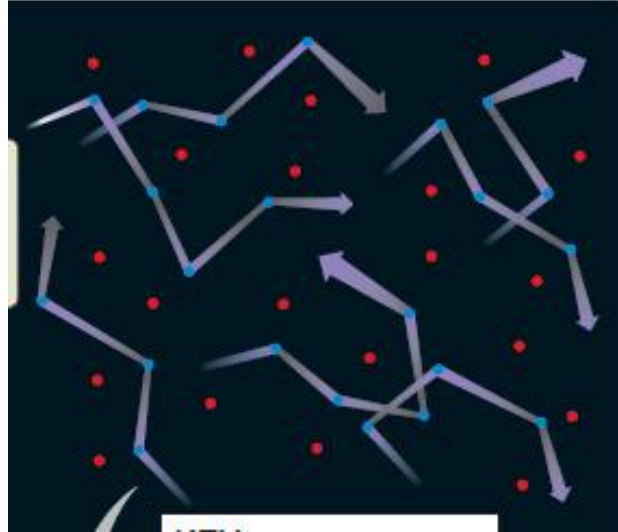
- 迪克等人建造微波天线来寻找时，
- 1965年, 贝尔实验室的 Arno Penzias（彭齐亚斯）和 Robert Wilson（威尔逊） 在7.35厘米波长发现宇宙中存在各向同性的辐射
- Dicke等把它解释为温度为 3 K的CMB

1979年诺贝尔物理学奖

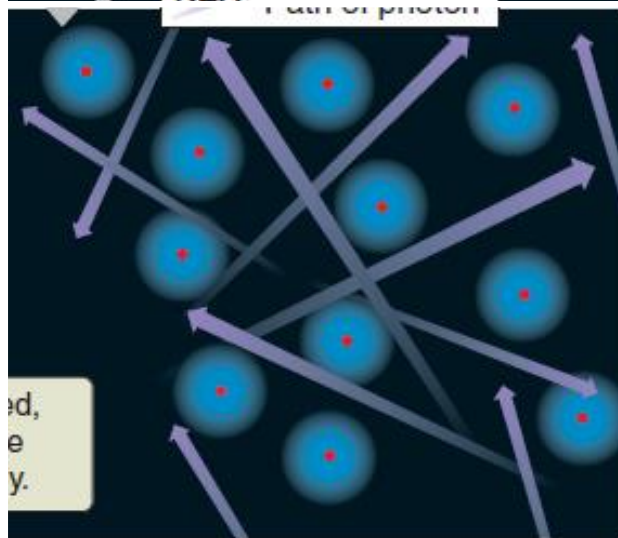


CMB是能看到的宇宙最早期的辐射

宇宙电离
状态



宇宙复合：
辐射与物质
退耦



- 宇宙在~38万岁时复合（中性化），温度~3千K，热辐射峰值波长~1微米。
- 相对于复合时期的宇宙，今天宇宙的
 - 大小增加了~1100倍；
 - 黑体谱峰值波长红移~1100倍，即~1毫米
 - 温度下降~1100倍；
- → 今天的CMB为温度~2.73K的黑体谱

$$\lambda_{\max} = \frac{0.29 \text{ cmK}}{T} \sim 0.1 \text{ cm}$$

- CMB的发现不能很好地确定其黑体谱属性
- 地球大气吸收微波
- 1989年，宇宙背景探测器（Cosmic Background Explorer [COBE]）对0.5毫米-10厘米波段的CMB进行观测

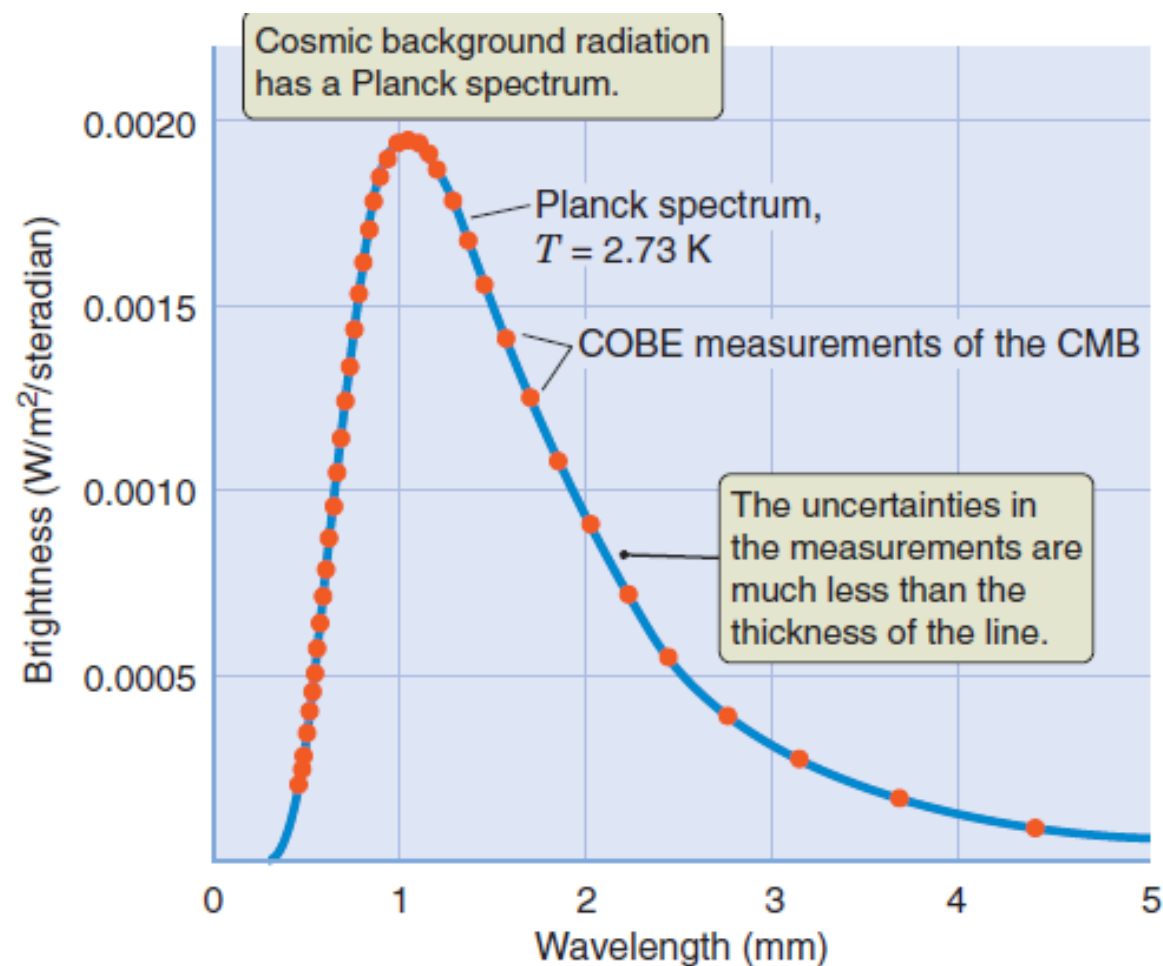
COBE 卫星



COBE确认CMB的黑体谱属性

CMB可由2.73K黑
体辐射谱完美描述

CMB高度各向同性



CMB可测量地球相对宇宙自身的运动

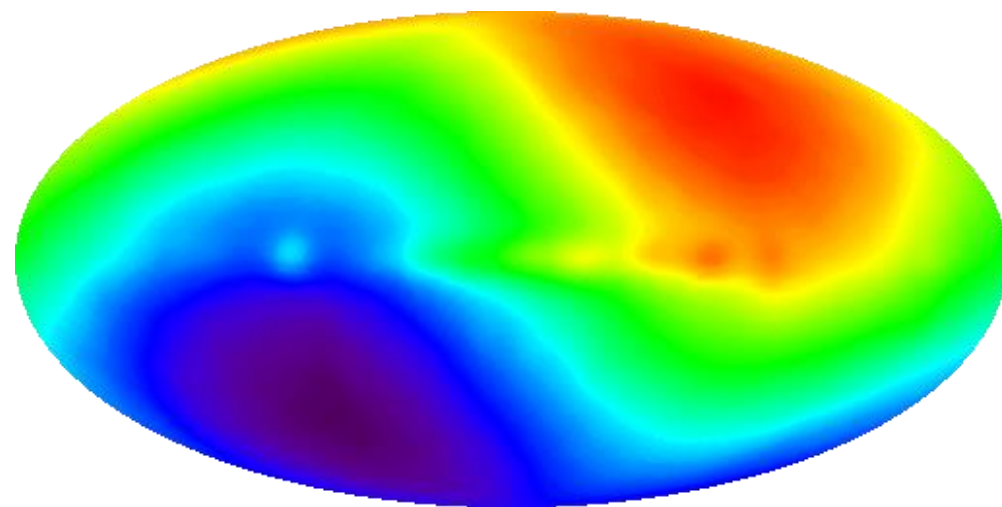


CMB的偶极不对称性：地球穿越宇宙空间所引起的CMB温度的涨落

→ 地球相对CMB的速度~380 km/s，大致朝狮子座方向

地球运动的朝向与背向方向的温度相对于平均值升高/下降~ 10^{-3}

（蓝色：2.724 K，红色：2.732 K）

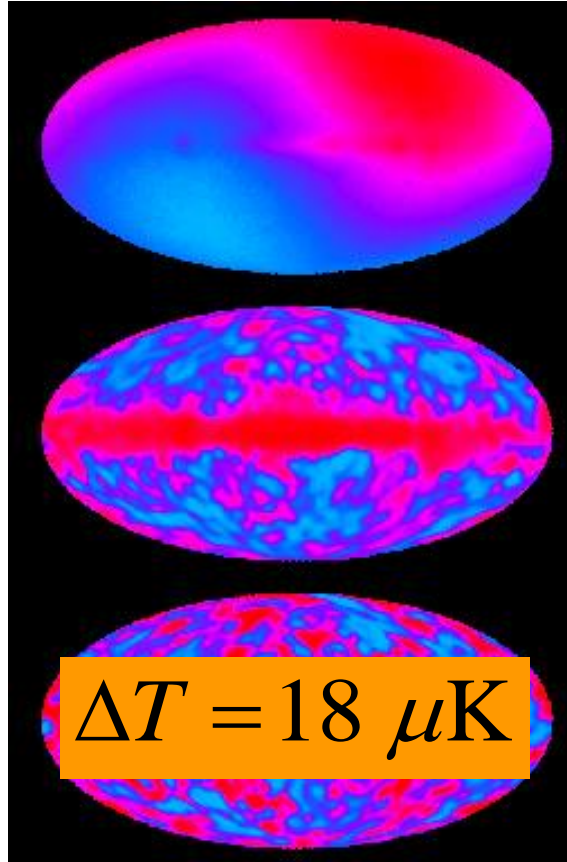


$$\Delta T = 3.353 \text{ mK}$$

COBE发现CMB的各向异性！

扣除CMB的偶极不对称

扣除银河系的尘埃辐射
(+其它天体辐射)



得到真实的CMB：
最古老的宇宙天图

CMB在高度各项同性的基础上有十万分之几的各项异性！

The Nobel Prize in Physics 2006

"for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation"



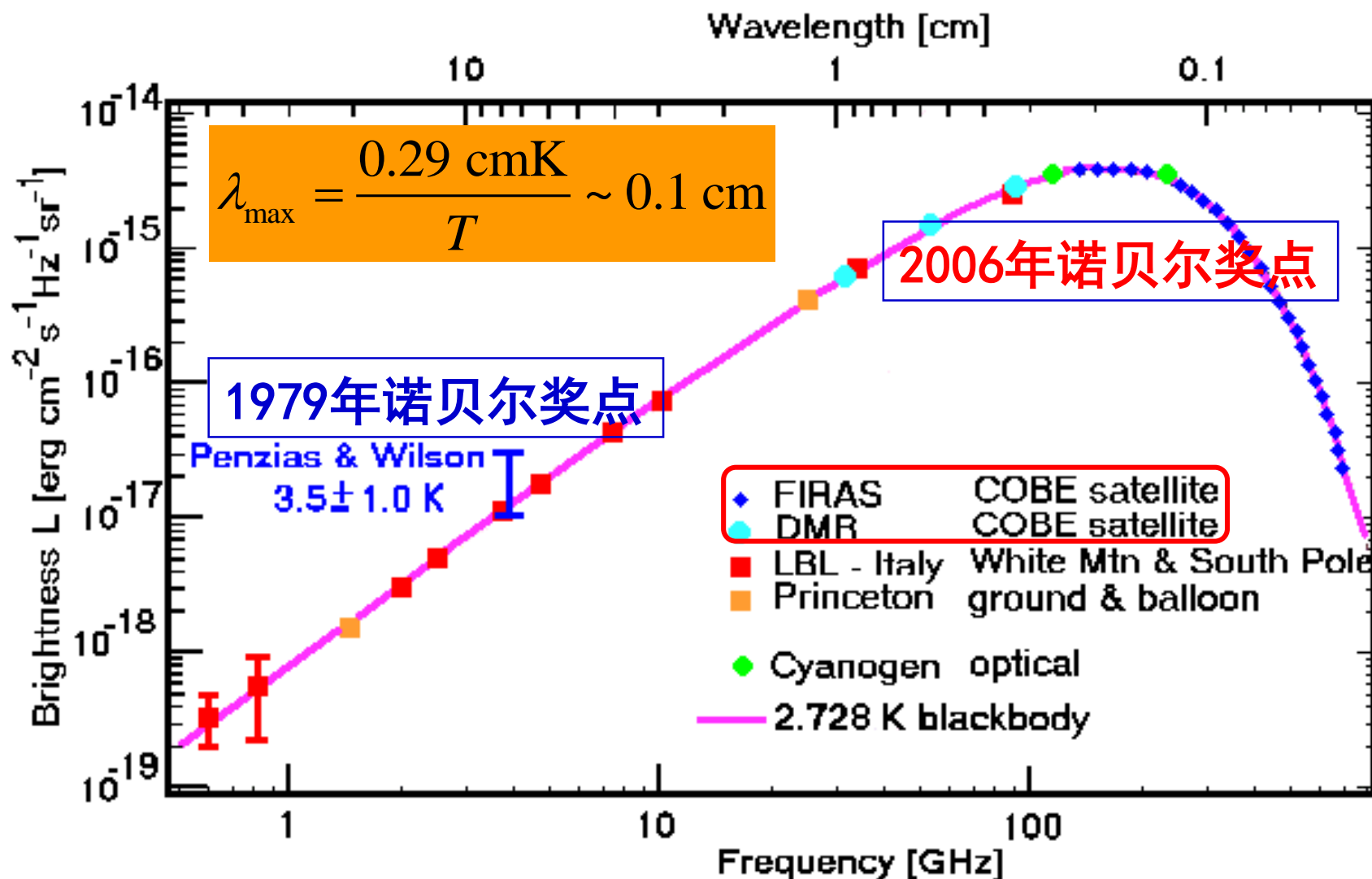
John C. Mather
1/2 of the prize
NASA Goddard
Space Flight Center
Greenbelt, MD, USA
b. 1946

“发现了宇宙微波背景辐射的
黑体谱形式和
各项异性”



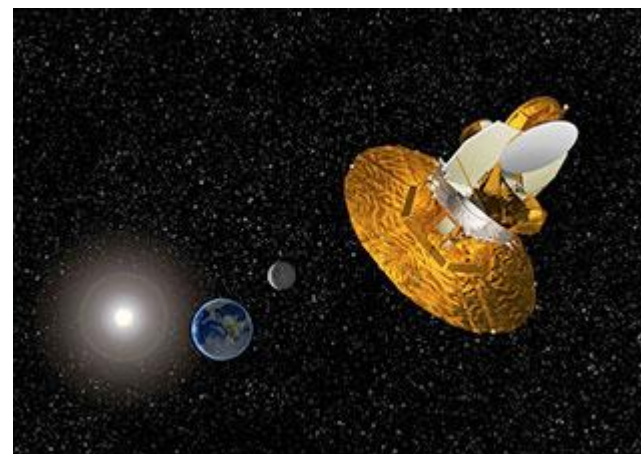
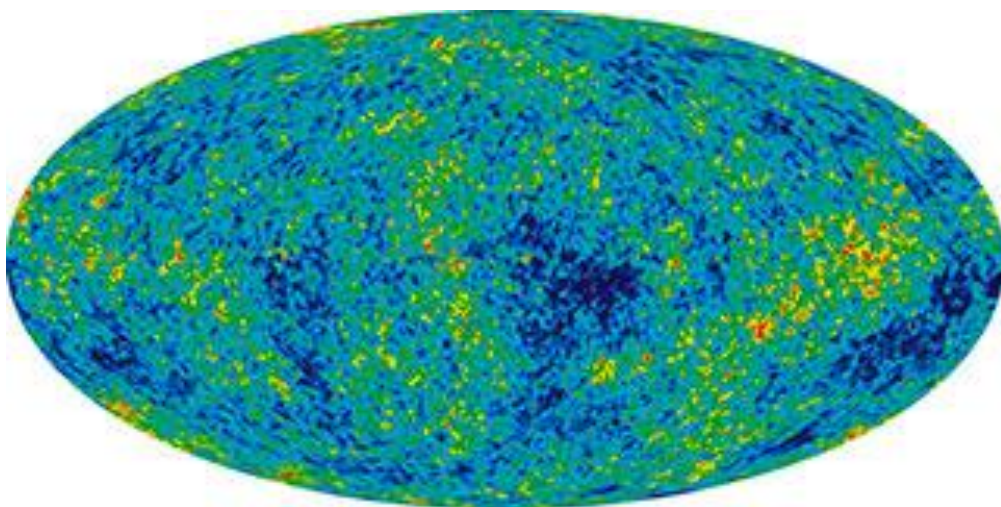
George F. Smoot
1/2 of the prize
University of
California
Berkeley, CA, USA
b. 1945

CMB辐射谱是完美的2.73K黑体谱

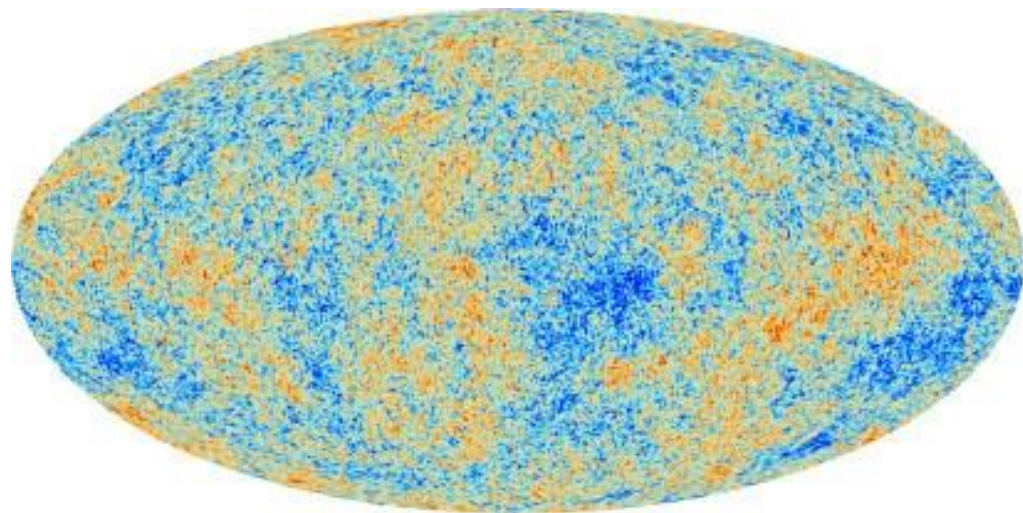


The Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)

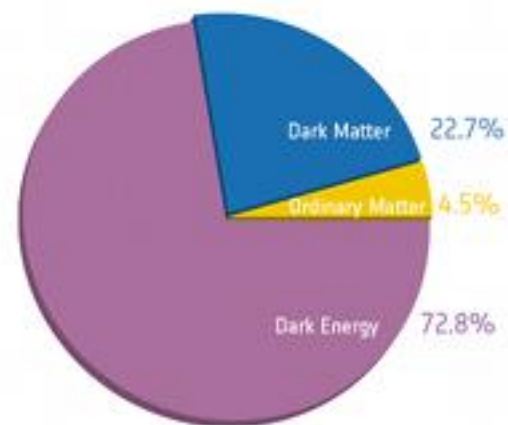
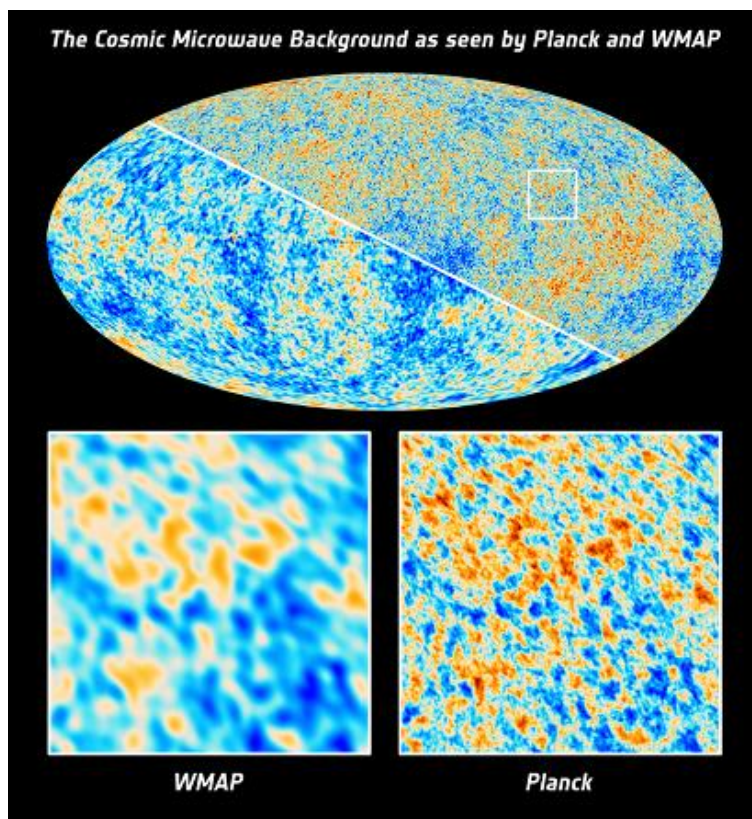
- 2001.6.30 发射的WMAP卫星，在3.2-13mm的五个波段测量CMB在 $0.2^\circ - 1^\circ$ 尺度上的各项异性
- WMAP给出CMB在小于1度尺度上的万分之二的涨落



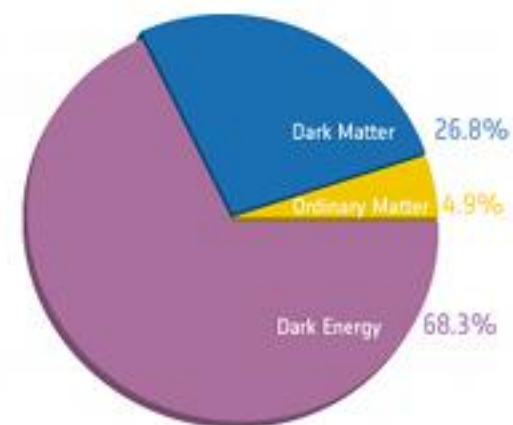
2009年发射的 Planck 卫星给出更精确的CMB各项异性天图



- H_0 : 71 → 67.3 km/s/Mpc
- 宇宙年龄: 137 → 138.1 亿年



Before Planck



After Planck

5、大爆炸核合成

- 恒星核合成能解释宇宙中重元素的丰度
- 但氦的产量明显低于氦的观测丰度（以质量计~25%）
 - 氦的数量基本上是宇宙形成之初、恒星形成之前就被创造出来了
- 在宇宙年龄 $t \sim$ 几分钟时，其温度及密度足够高，质子碰撞合成轻原子核：氘核、氦3、**氦**、锂、铍、硼，这个大爆炸（原初）核合成确定了宇宙的原初（轻）元素丰度

原初轻元素的创造

- $t \sim 2$ 分钟, $T < \sim 9$ 亿K, 质子+中子 \rightarrow 氦核+能量, 氦核的持续形成是关键的一步
- 氦核通过众多反应形成原初的轻元素:
 - 氦核+质子 \rightarrow 氦3+能量
 - 氦核+氦核 \rightarrow 氦3+中子+能量
 - 氦3核+中子 \rightarrow 氦核+能量
 -
- $t \sim 15$ 分钟, $T \sim 3$ 亿K, 原初核合成结束, 宇宙物质主要由氢和氦组成

大爆炸核合成预言今天宇宙的轻元素丰度

亮物质密度只有宇宙临界密度的百分之几，与观测结果一致

→ 暗物质不是由重子构成的

