

牛顿宇宙观

受牛顿力学规律支配的宇宙，在时间和空间上都是无限的；宇宙是永恒的、稳定的；宇宙中的物质分布是不均匀的。

绝对空间，就其本性而论与任何外界情况无关，始终保持相似和不变。

问题：物质不均匀、存在中心→宇宙不稳定→引力→宇宙坍缩

解决办法：修改牛顿理论
放弃经典时空概念



Isaac Newton

Einstein的相对论宇宙学模型

- ❖ 1915年爱因斯坦的广义相对论发表

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

(空间弯曲, 时空度规 ~ 能动张量)

- ❖ 1917年Einstein将广义相对论引力场方程应用于宇宙的结构

Einstein发现方程的解是不稳定的, 表明宇宙在膨胀或者收缩。

- ❖ 静态的宇宙 ← 加入起斥力作用的“宇宙学常数”项
爱因斯坦的宇宙观: 静态、有限无边, 没有中心

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

Einstein稳态解是不稳定的! Einstein's greatest blunder?

Friedman膨胀宇宙模型

- ❖ 1922年，俄国气象学家、数学家A. Friedman求得不含“宇宙常数”项的引力场方程的均匀的和各向同性的通解。
- ❖ 宇宙从一个“奇点”开始膨胀，膨胀宇宙的演化取决于宇宙中的物质自引力或密度 ρ 的大小



A. Friedman

宇宙的命运

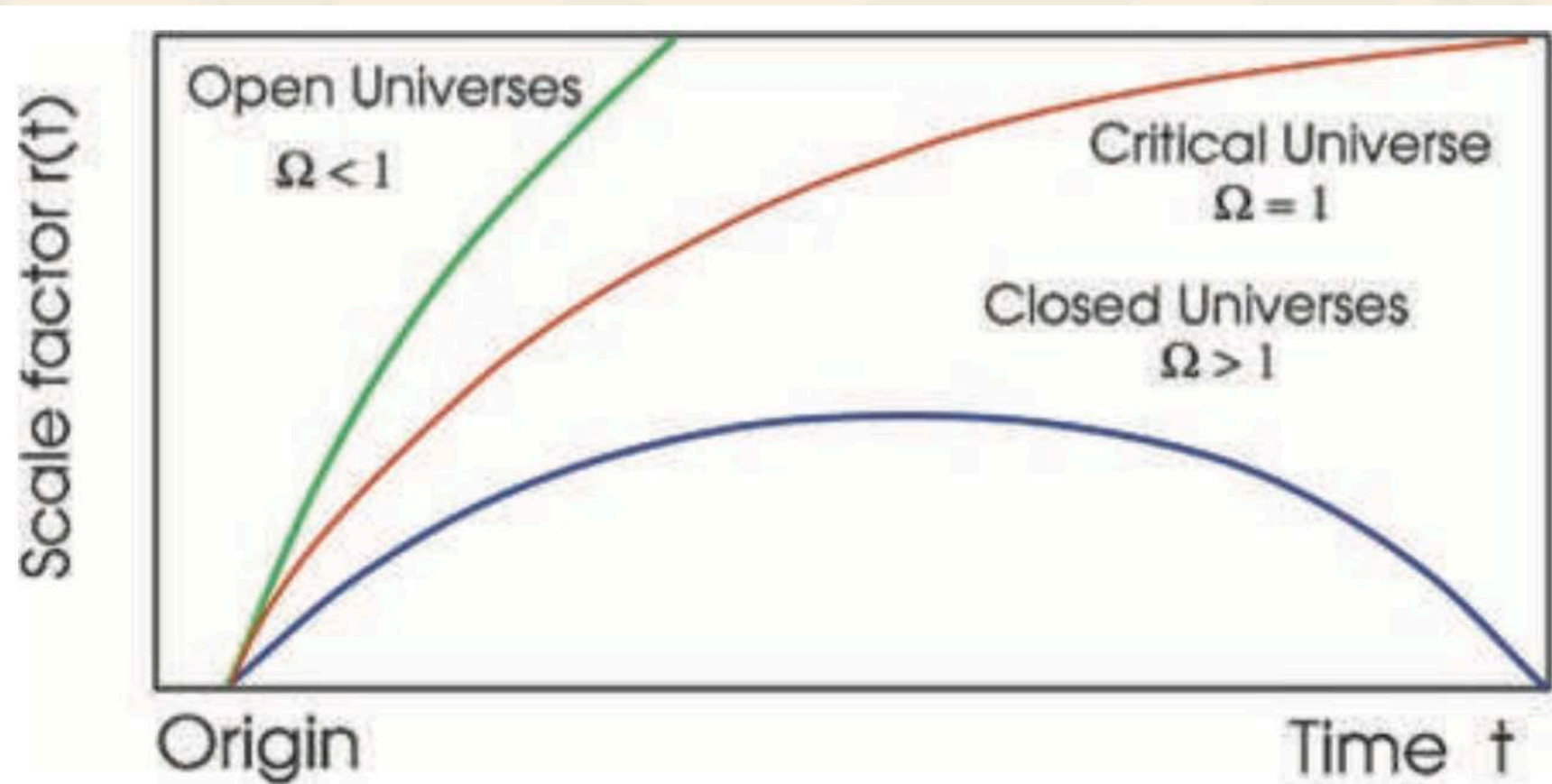
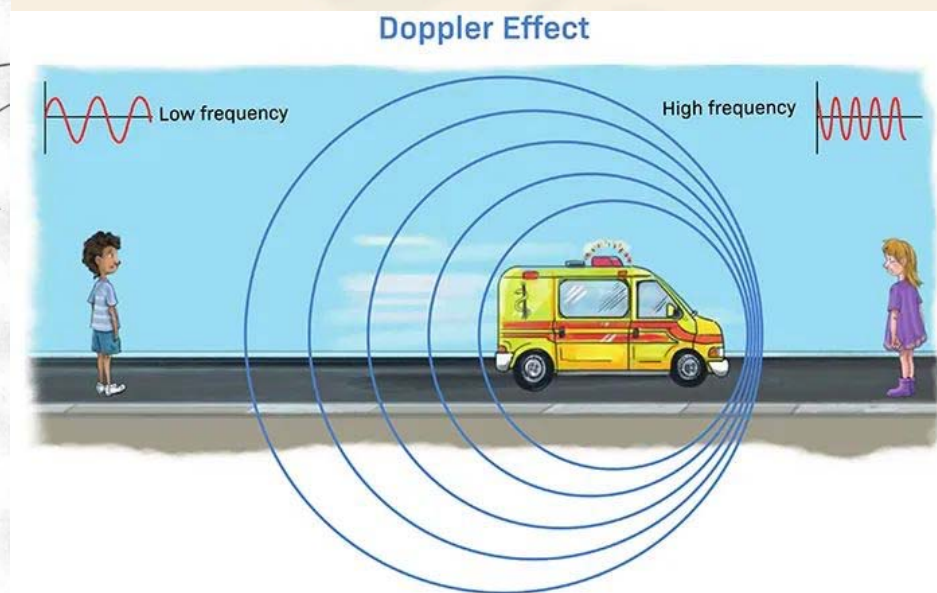
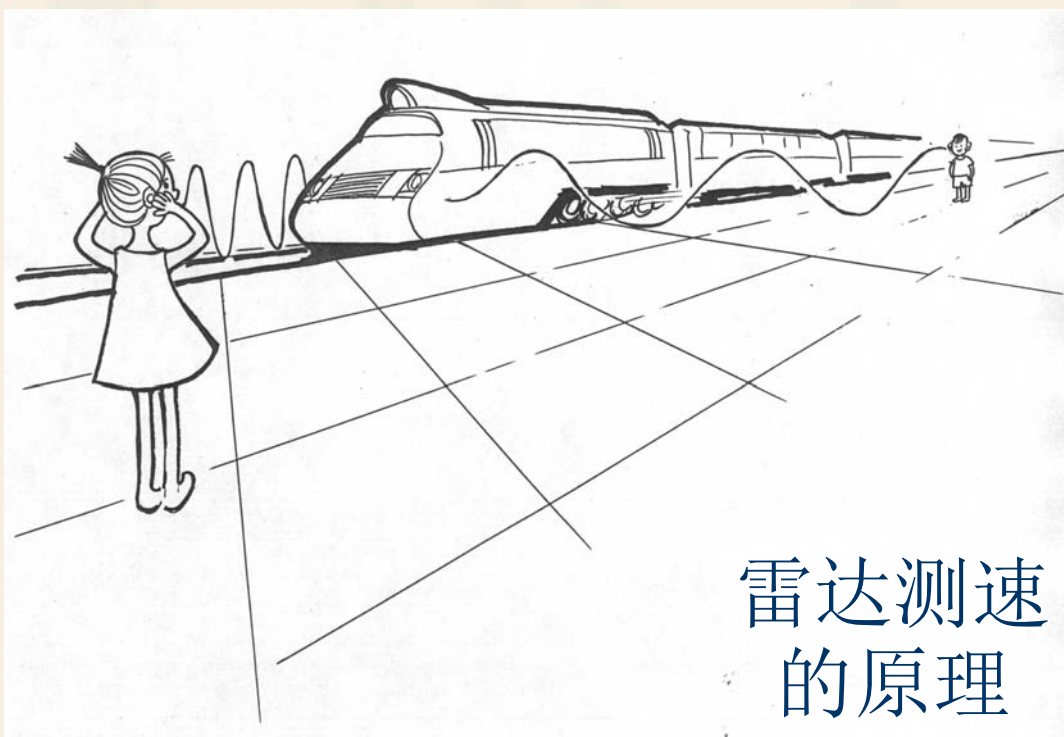
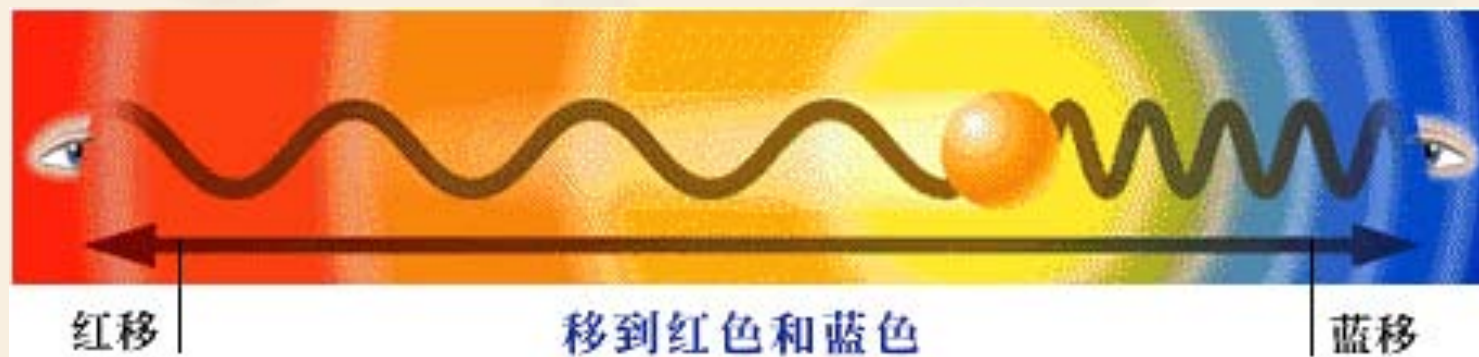


Figure 9.2 The Friedmann models of an expanding universe.

类似于地球的逃逸速度: $\sim 11.186 \text{ km/s}$

星系的红移和蓝移



❖ 红移—速度测量（多普勒红蓝移vs.宇宙学红移）

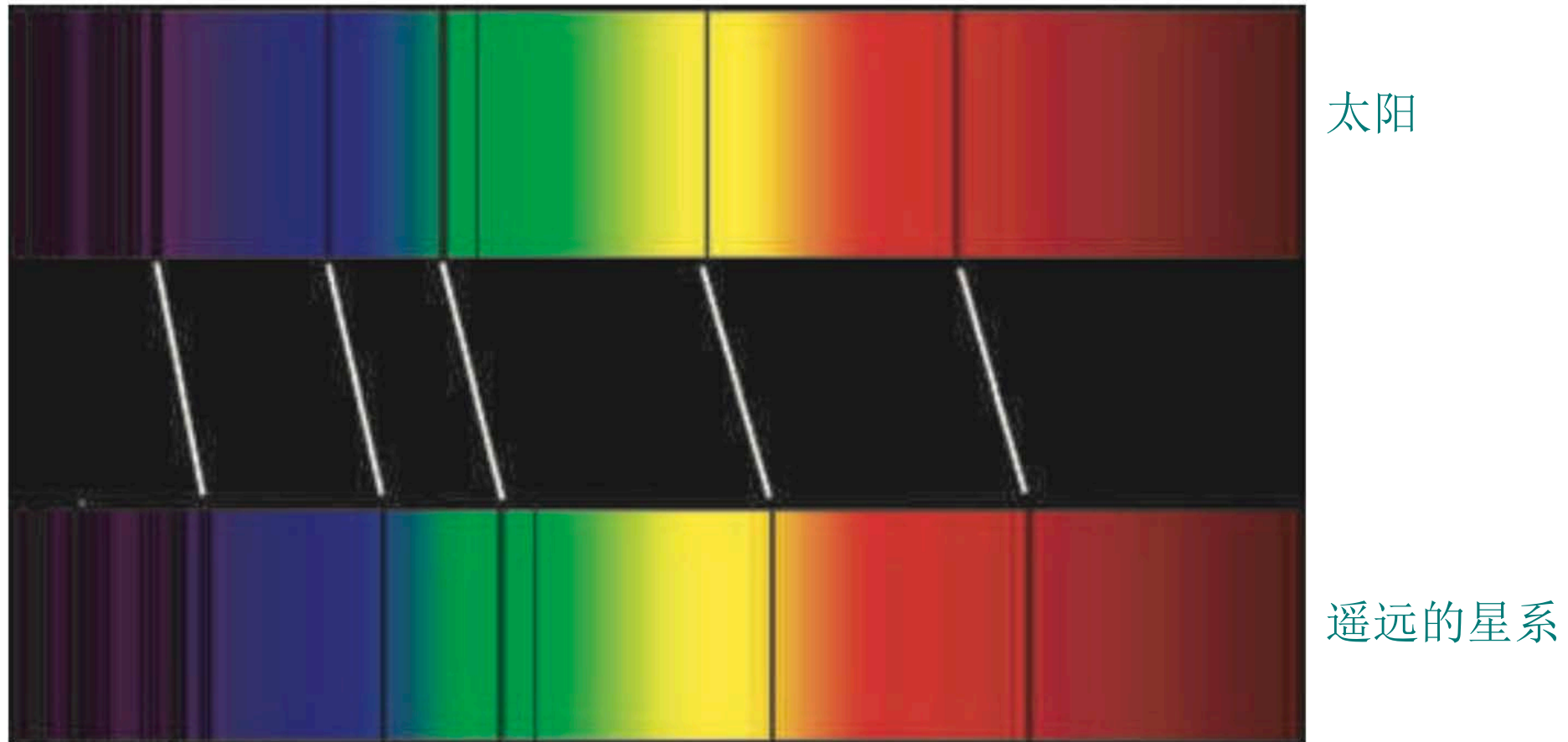


Figure 9.3 The redshift in the spectral lines from a distant galaxy (below) relative to those observed in our Sun (above). Image: Wikipedia Commons.

$$\Delta f/f = \Delta \lambda/\lambda = v/c$$

(退行或接近的 v 远小于 c 时,
 $z=v/c$)

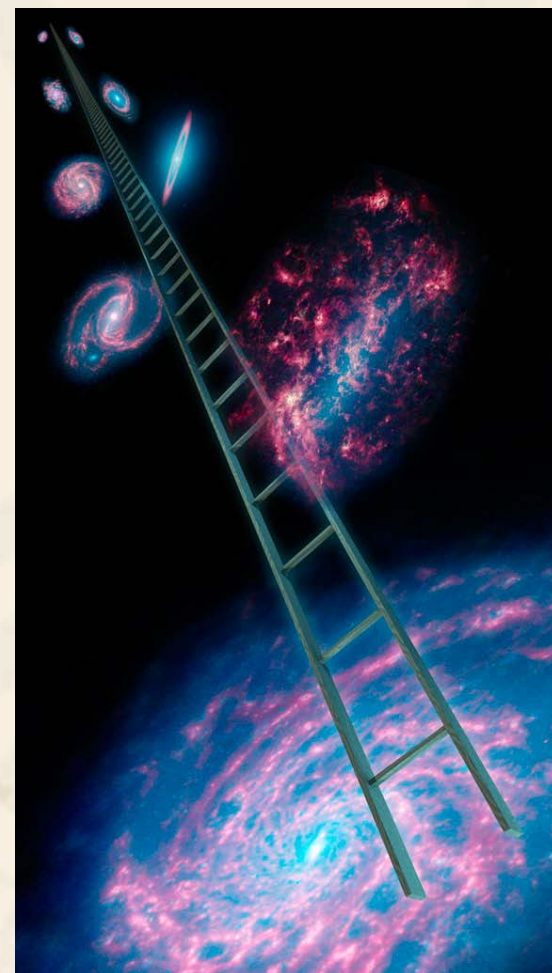
星系红移和蓝移早期观测

- ❖ 美国天文学家：Vesto Slipher
- ❖ 1913年，Slipher发现Andromeda（仙女座星系）的蓝移为： $\sim 300\text{km/s}$ ，太阳绕银河系中心的速度为： $\sim 220\text{km/s}$ ，仙女座星系与银河系的靠近速度约为： $\sim 100\text{km/s}$
- ❖ 1915年，Slipher测量了15个星系，其中11个红移，两年以后，发现另外6个星系存在红移
- ❖ 基本结论：仅近邻星系（本星系群之内）显示蓝移；给出星系退行或接近的速度

河外星系

- ❖ “星云”的发现
- ❖ 哈勃测定了星云的距离
 - ∞ 利用造父变星
 - ∞ 发现星系在退行

宇宙在膨胀！！

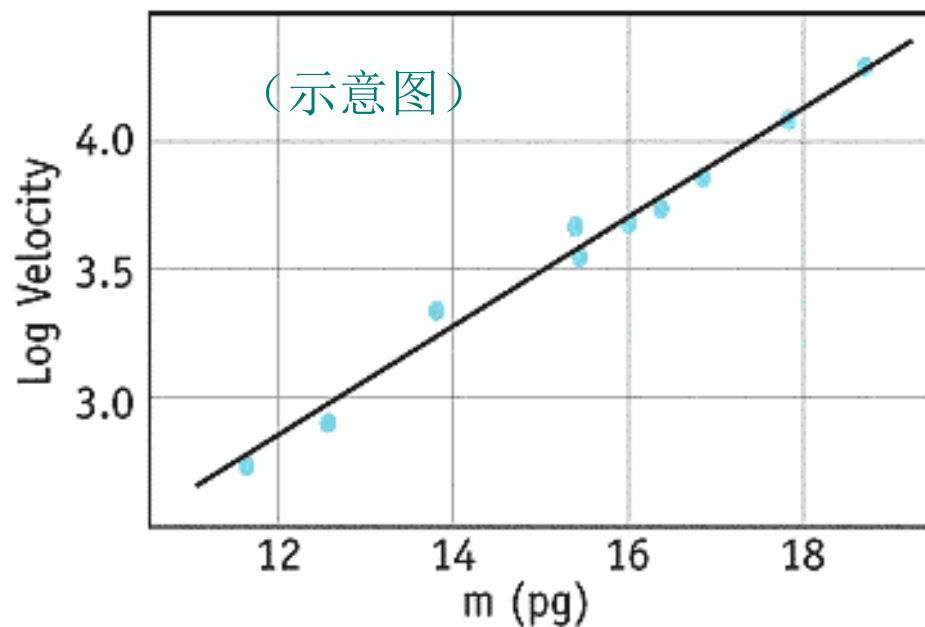


宇宙的膨胀

DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE

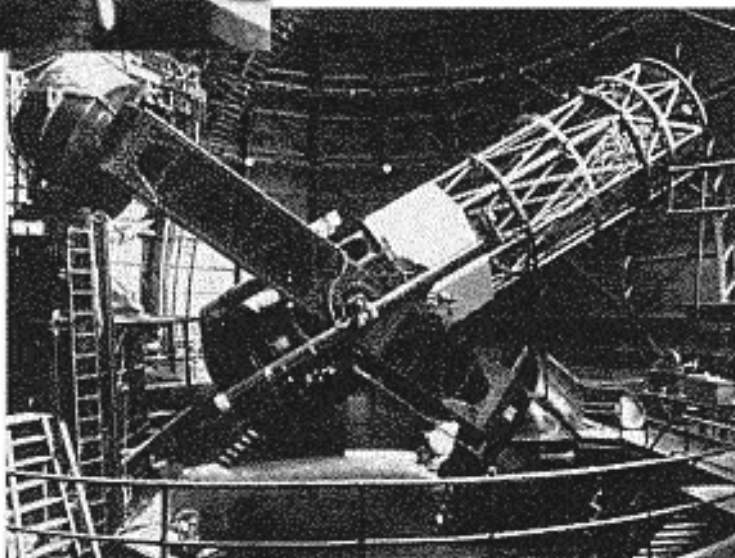


Edwin Hubble



速度

星等（距离）



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

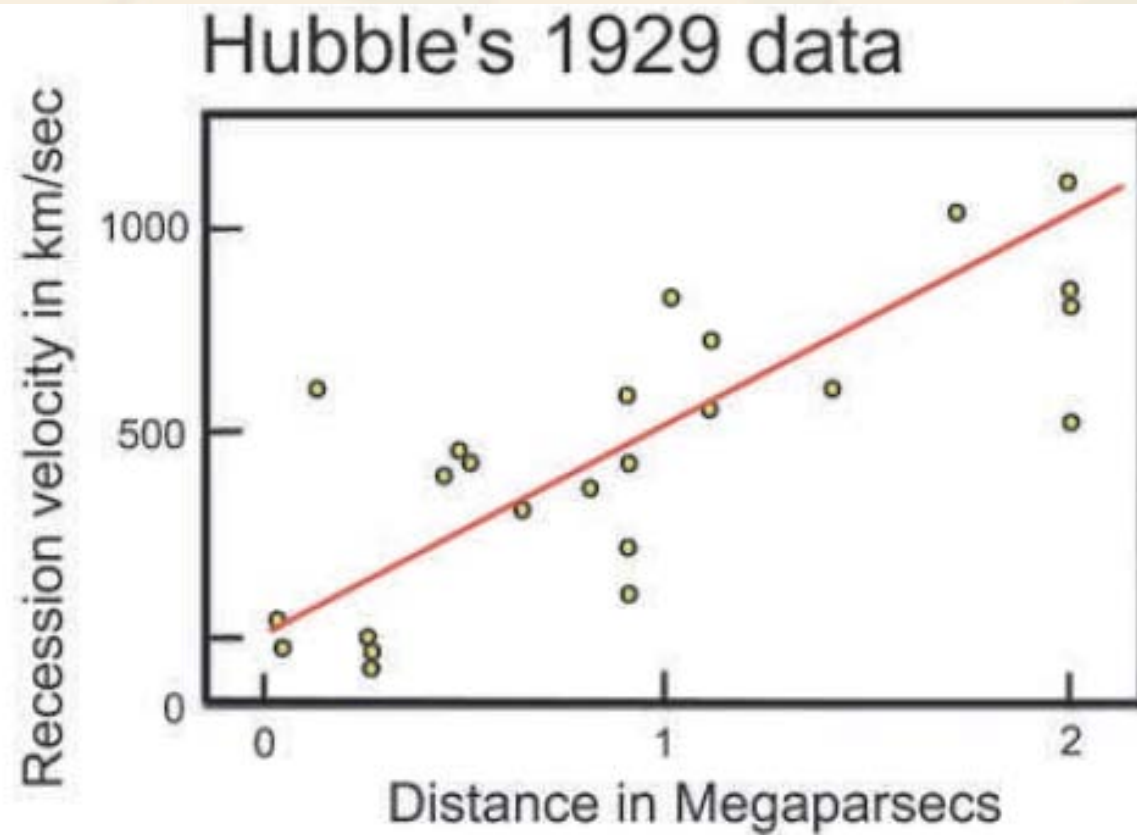


Figure 9.4 Hubble's plot of recession velocity against distance.

$$V = H_0 D, \quad H_0 \sim 500 \text{ km/s/Mpc}$$



Figure 9.5 A simple 'universe' to demonstrate Hubble's Law.

Hubble年龄: ~20亿年

$$\begin{aligned} 1/H_0 &= 1 \text{ Mpc}/500 \text{ km s}^{-1} \\ &= 3.26 \text{ million light years}/500 \text{ km s}^{-1} \\ &= 3.26 \times 10^6 \times 365 \times 24 \times 3600 \times 3 \times 10^5 \text{ s}/500 \\ &= 3.26 \times 10^6 \times 3 \times 10^5 \text{ years}/500 \\ &= 1.96 \times 10^9 \text{ years} \\ &= \sim 2 \text{ billion years} \end{aligned}$$

宇宙的实际年龄应该小于Hubble年龄，
因为宇宙在过去膨胀速度更快。

对平坦宇宙：

$$t = \frac{2}{3H_0} \sim 13 \text{ 亿年}$$

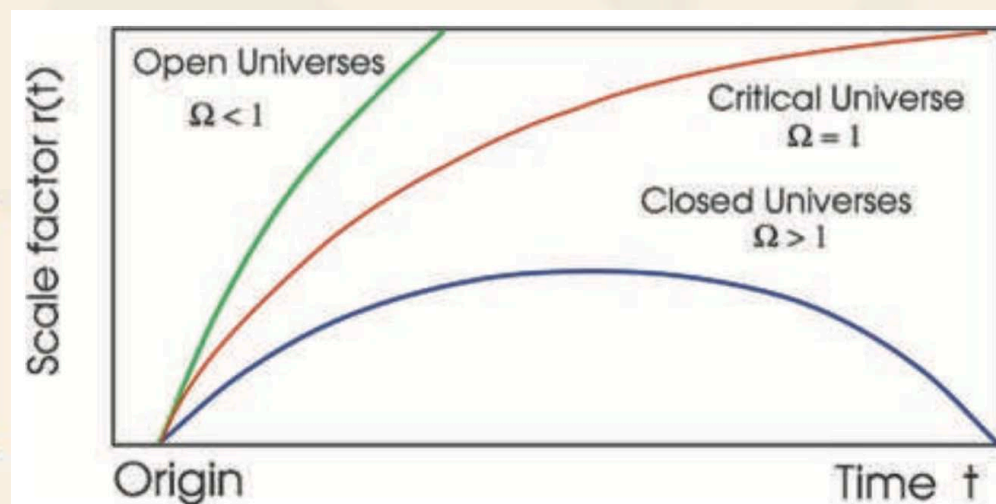


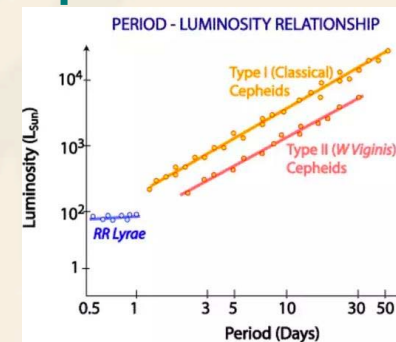
Figure 9.2 The Friedmann models of an expanding universe.

宇宙的年龄问题：

- 太阳系的年龄：~45亿年
- 一些恒星的年龄：~100-120亿年（Hoyle等）
- 球状星团的年龄：~120亿年

Hubble常数的测定

- ✓ Walter Baade用Mt Wilson 100in Hooker 望远镜，发现仙女座星系中存在两类造父变星，Hubble观测到的造父变星比那些用于距离定标的造父变星亮四倍（实际距离应变大两倍）： $\rightarrow H_0 \sim 250 \text{ km/s/Mpc}$
- ✓ HST：观测到19个星系（最远： $t \sim 1.08$ 亿光年）中 ~ 800 个造父变星： $\rightarrow H_0 \sim 72 \pm 8 \text{ km/s/Mpc}$
- ✓ 引力透镜观测： $\rightarrow H_0 \sim 71 \pm 6 \text{ km/s/Mpc}$
- ✓ WMAP： $\rightarrow H_0 \sim 73.5 \pm 3.5 \text{ km/s/Mpc}$
- ✓ WMAP+其它观测： $\rightarrow H_0 \sim 70.8 \pm 1.6 \text{ km/s/Mpc}$
- ✓ PLANCK (2013)： $\rightarrow H_0 \sim 67.3 \pm 1.2 \text{ km/s/Mpc}$



Hubble年龄：~140亿年，平坦宇宙年龄：~93亿年

宇宙学红移

- ✓ 红移的定义：
(多普勒效应)

$$z = \frac{\lambda_{\text{observed}} - \lambda_{\text{emitted}}}{\lambda_{\text{emitted}}}$$

$$z = \frac{f_{\text{emitted}} - f_{\text{observed}}}{f_{\text{observed}}}$$

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{observed}}}{\lambda_{\text{emitted}}}$$

$$1 + z = \frac{f_{\text{emitted}}}{f_{\text{observed}}}$$

- ✓ 宇宙学红移的解释：宇宙在膨胀，尺度在增加

$$1 + z = \frac{a(t_{\text{obs}})}{a(t_{\text{em}})}$$

例： $z=6.4$ QSO, $a \sim a_{\text{obs}}/(1+6.4)$

- ✓ 退行速度（ z 比较小的时候）：

$$v = cz$$

例：3c273@ $z=0.158$, $v \sim cz \sim 47000 \text{ km/s}$,
 $d \sim v/H_0 \sim 650 \text{ Mpc}$, 比仙女座星系远1000倍

稳恒态宇宙学模型

- ✓出发点：膨胀宇宙学模型中的年龄问题；不喜欢宇宙起源于某瞬时
- ✓1948：Herman Bondi, Thomas Gold, Fred Hoyle
- ✓完美的宇宙学原理：在任何时刻，在宇宙的任何位置，宇宙都是一样的，宇宙没有中心
- ✓宇宙在膨胀，星系在分离，新的物质（氢原子）不断在中间产生，最后形成新的星系，星系的密度不变
- ✓宇宙既没有开始，也没有结束

稳恒态还是大爆炸？

- ✓ 60年代，观测检验：比较不同红移处星系的密度
- ✓ 剑桥大学的**Martin Ryle**，发现过去射电星系的密度要高于现在射电星系的密度，不支持稳恒态模型
- ✓ 1963年，宇宙微波背景的发现，支持宇宙的大爆炸模型

大爆炸宇宙学

- ❖ 1940s Gamov和Alpher首先提出宇宙起源于约100-150亿年前一次猛烈的巨大爆炸
- ❖ 宇宙的爆炸是空间的膨胀，物质则随着空间膨胀（宇宙是无中心的）
- ❖ 随着宇宙膨胀和温度降低，构成物质的原初元素相继形成
- ❖ $t \sim 38$ 万年，光子与电子退耦，那时， $z \sim 1100$ ， $T \sim 3000\text{K}$ ，目前： $\sim 3\text{K}$ 温度的宇宙背景辐射（Gamov: $\sim 5\text{k}$ ）



George Gamov

暴涨 (Inflation)

✓ 1970s, 发现大爆炸宇宙学模型存在一些问题

1. 平坦性问题

2. 视界问题



图1 从左到右分别是阿兰·古斯 (Alan Guth), 安德烈·林德 (Andrei Linde) 和阿列克谢·斯塔罗宾斯基 (Alexei Starobinsky)

✓ 暴涨模型 (能量标量场主导): Alan Guth 1979

1. 可见的宇宙起初的大小和质子差不多大

2. 10^{-35} 秒之后, 开始指数膨胀, 10^{-32} 秒时, 宇宙尺度约为1米, 增长了 10^{26} 倍 (原初扰动→大尺度结构的种子) !

3. 暴涨之前, 可见宇宙足够小, 热平衡; 暴涨使得空间“变平” (类比膨胀气球表面)、粒子视界指数膨胀

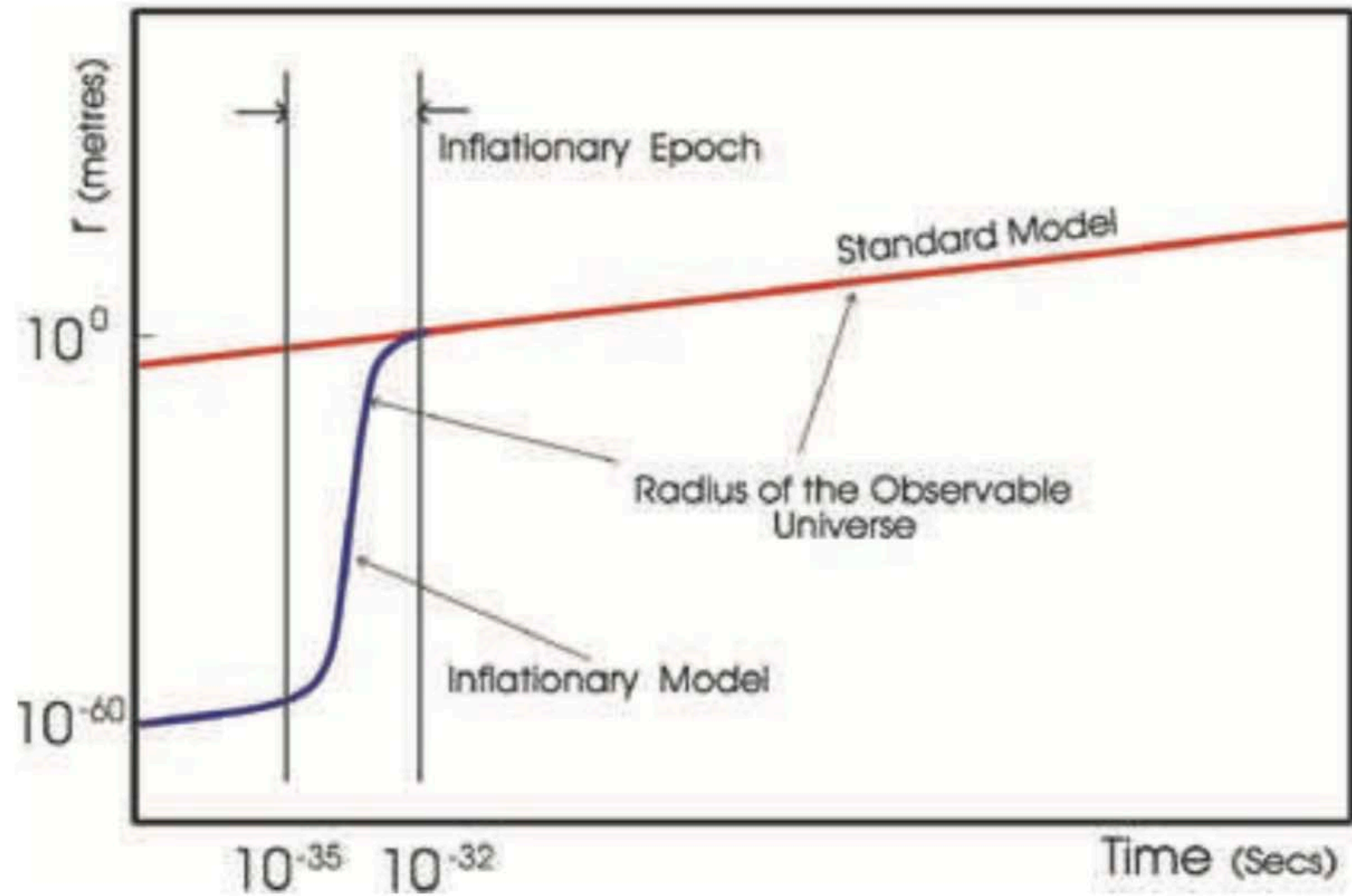


Figure 9.7 The inflationary epoch in the early universe.

大爆炸与原初轻元素的合成

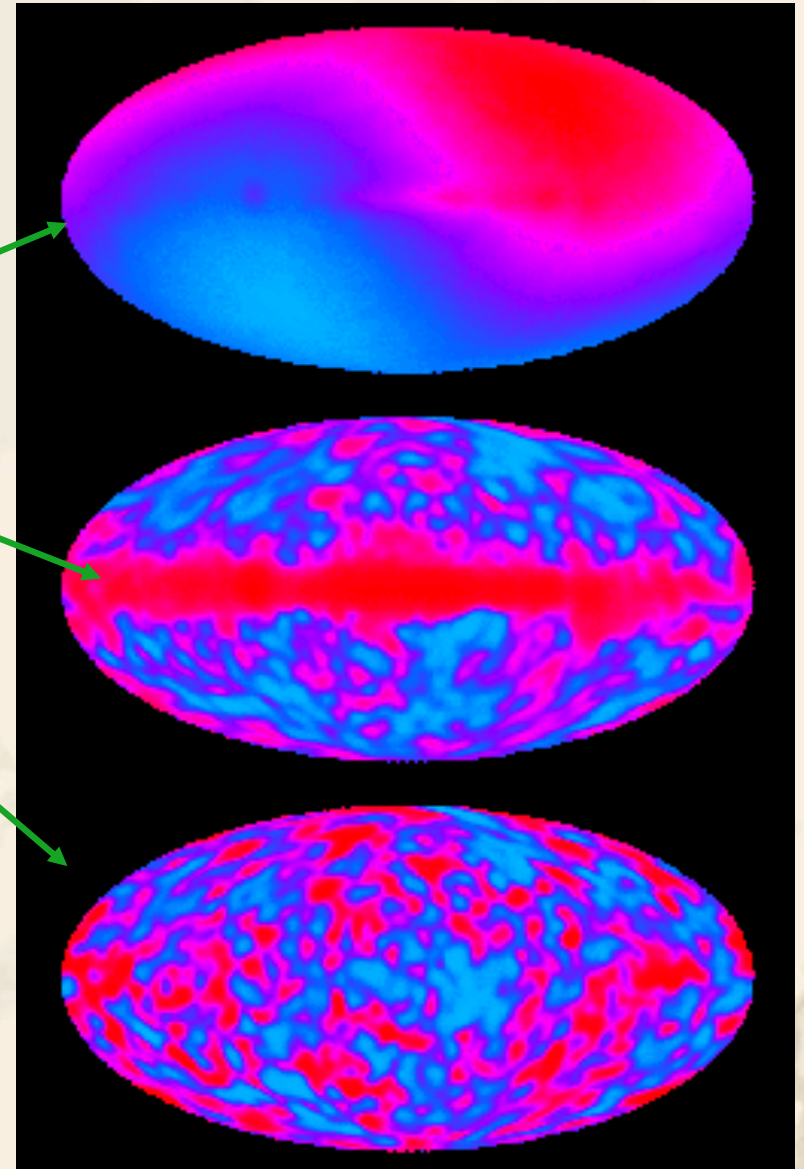
- ✓ 暴涨阶段引力势能的一半转化为动能，再转化为基本等量的物质和反物质粒子

$$\frac{n_B - \bar{n}_B}{n_B} \sim 10^{-9}$$

- ✓ 随着宇宙的膨胀，正反物质湮灭：少量的重子物质（主要以夸克形式存在），处于高温辐射场中
- ✓ $t \sim 1\text{s}$ ，夸克形成基本等量的质子和中子
- ✓ 自由中子不稳定，随着宇宙膨胀，中子数会少一些
- ✓ $t \sim$ 三分钟，质子和中子形成He核+剩余的质子+电子
- ✓ 75%He+25%H

微波背景辐射的各向异性

- ❖ 扣除微波背景辐射的偶极不对称和银河系尘埃辐射的影响后，微波背景辐射表现出大小为十万分之几的温度变化： $\sim 6 \times 10^{-5} \text{K}$ 。
- ❖ 这种细微的温度变化表明宇宙演化早期存在微小的不均匀性，正是这种不均匀性导致了星系的形成。



$$\Delta T \sim 6 \times 10^{-5} \text{K}$$

✓ $t \sim 38$ 万年，光子能量足以电离原子，等离子态

1. 辐射场与物质处于热平衡，辐射场为黑体谱

2. 等离子体非常均匀，因为光子“搅拌”

✓ 冷却，氢原子形成，光子退耦。开始时物质均匀分布，均匀物质在引力的作用下开始成团，形成恒星和星系（ $6E-5 \rightarrow$ 需要 $t \sim 80-100$ 亿年）。但实际上，星系在 $t \sim 4$ 亿年的时候（甚至更早时）已经存在！

✓ 暗物质—非重子物质，与辐射场无相互作用，大爆炸之后就开始在引力的作用下成团，重子物质和辐射场退耦之后，重子物质开始在暗物质的引力势阱中快速成团，形成星系

CMB的不均匀性—暗物质的影响

- ✓ **Sachs-Wolfe效应(1967):** CMB光子在暗物质引力势阱中的引力红移效应
- ✓ 对应毫米波观测，受水蒸汽吸收影响。卫星：**COBE、WMAP**；气球观测：**Boomerang和Maxima**；高海拔的沙漠：**CBI和VAS**；南极：**DASI**



Figure 9.9 The cosmic background imager in the Atacama Desert, Chile. Image: CBI/Caltech/NSF.

观测CMB可以给出宇宙曲率的信息

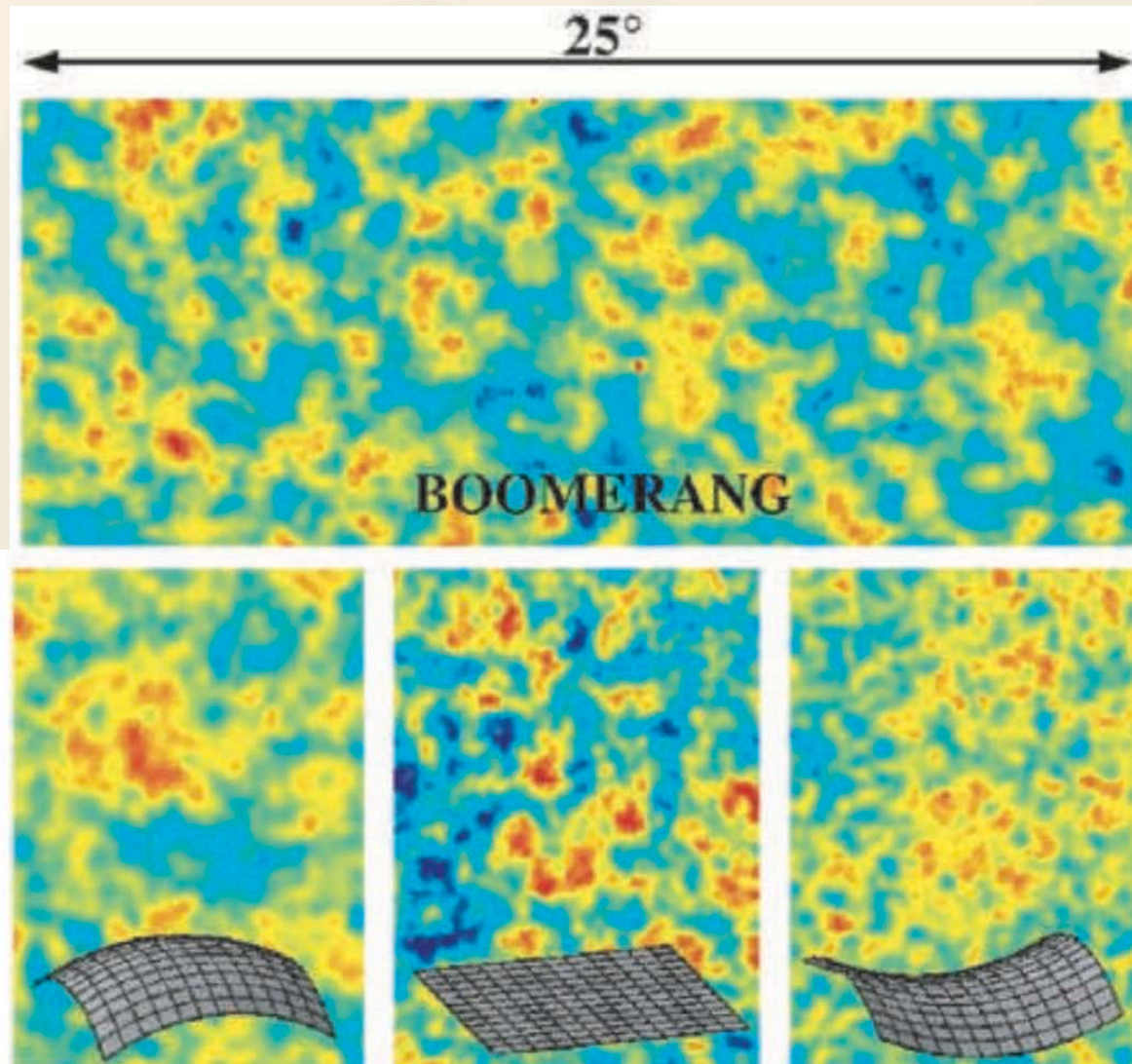


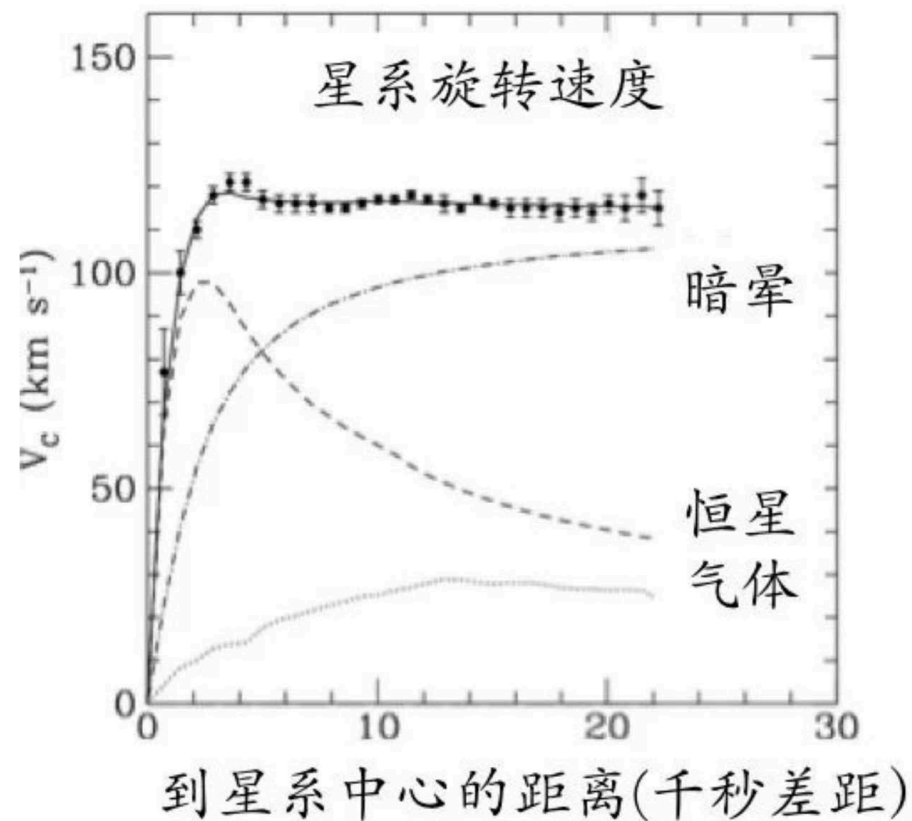
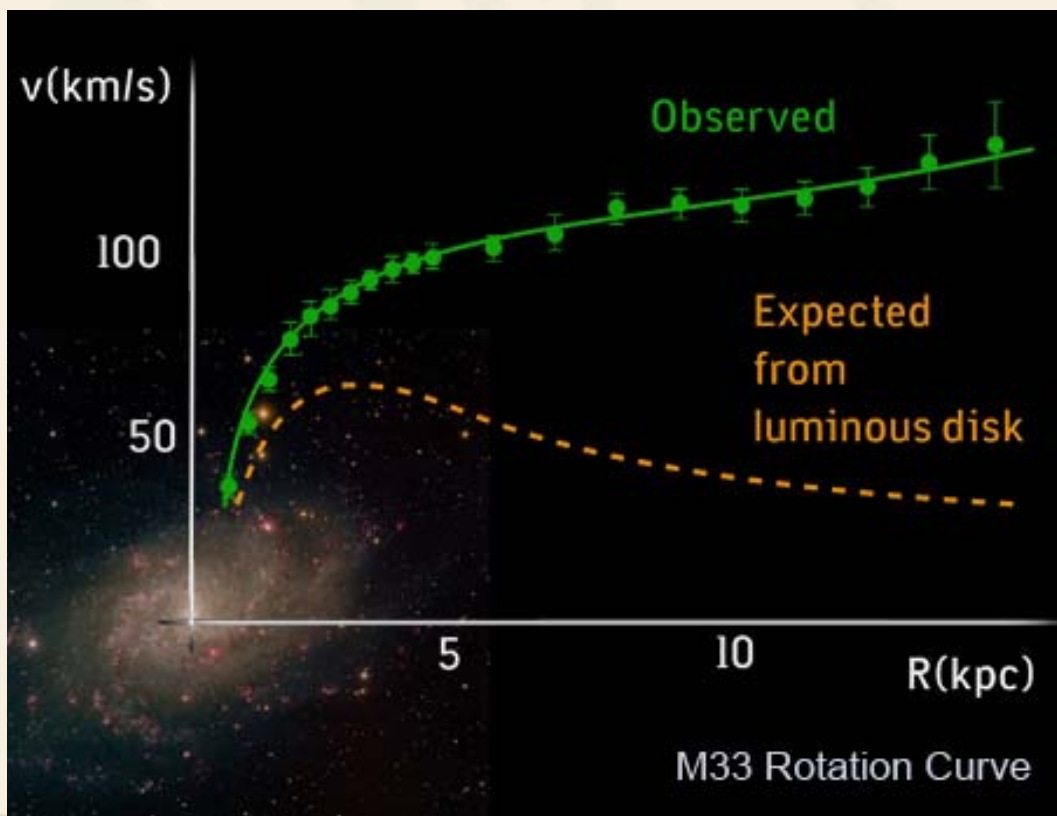
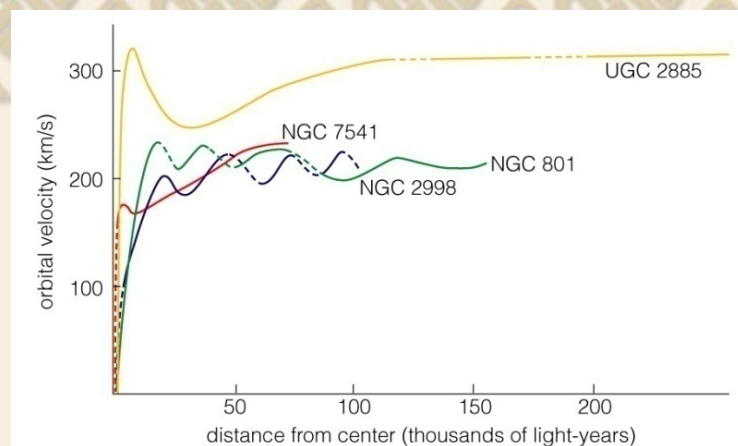
Figure 9.10 Boomerang observed fluctuations in the CMB that are consistent with space being 'flat'. –(Above) Boomerang map. (Below) What would be observed with positively curved, flat and negatively curved space. Image: The international BOOMERANG consortium.

暗物质与暗能量

- ✓ 暴涨和CMB观测给出宇宙是平坦的，如果精确测量 H_0 ，就可以给出可见宇宙的平均密度和总质量
- ✓ 宇宙中总的发光物质只占总质量的 $\sim 1\%$! 99%看不见!
- ✓ Massive Astronomical Compact Halo Objects（不发光的重子物质 褐矮星、中子星、黑洞等?）?
- ✓ 重子物质只占： $\sim 4\%$
 1. 大爆炸产生的轻元素（氢、氦、锂及其同位素）的相对丰度依赖于重子/光子比，给出 $\sim 4\%$ 上限
 2. 如果有大量MACHOs，会产生微引力透镜，最终被观测到（但是没有）；无法解释missing matter。

暗物质的证据

✓ 漩涡星系的旋转曲线



暗物质的证据

- ✓ 漩涡星系的旋转曲线
- ✓ 星系团的动力学（Zwicky 1930s, Coma）
- ✓ 星系中的热气体俘获：椭圆星系NGC4555中的总质量10倍于恒星的质量，300倍于气体云的总质量

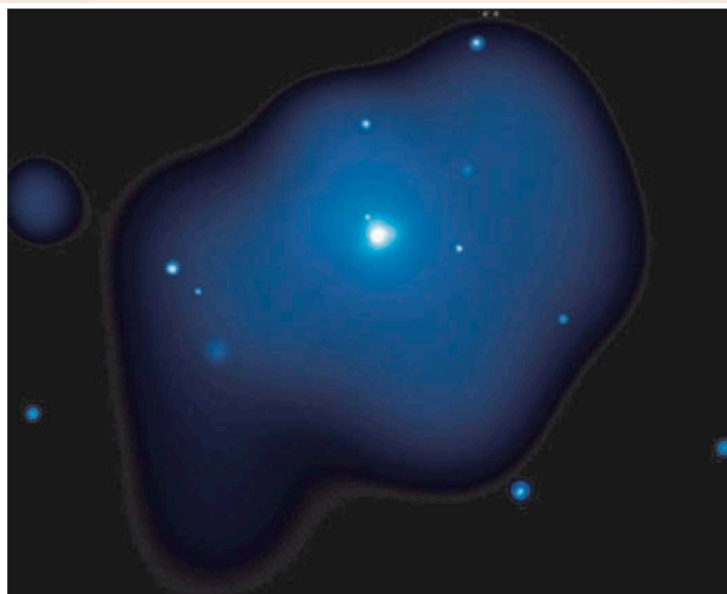
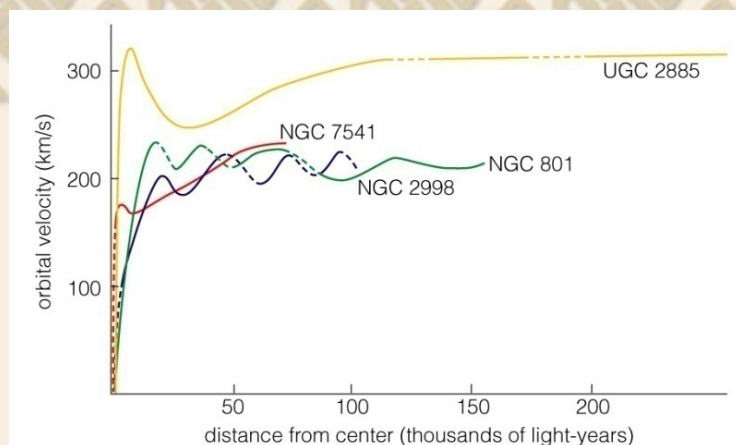


Figure 9.11 NASA's Chandra X-ray satellite image of hot gas surrounding the galaxy NGC 4555. Image: NASA/CXC/E.O'Sullivan et al.

✓引力透镜

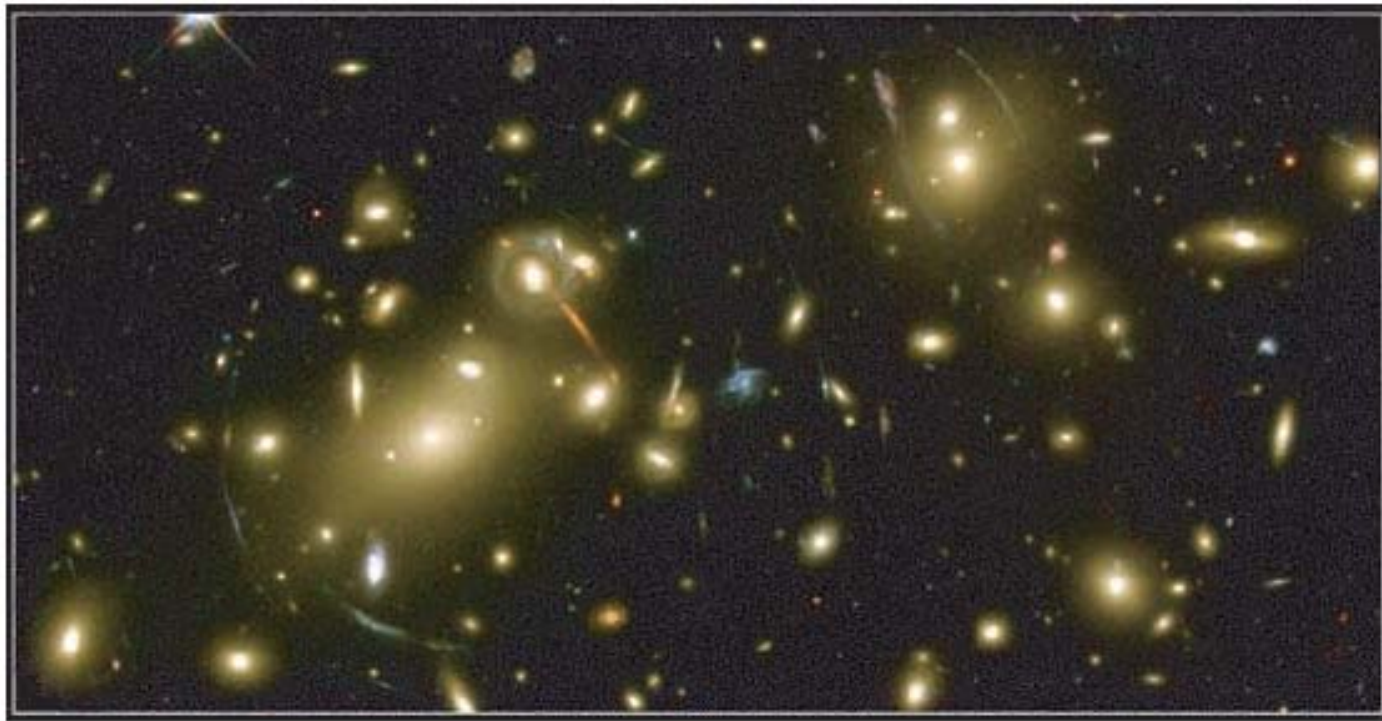


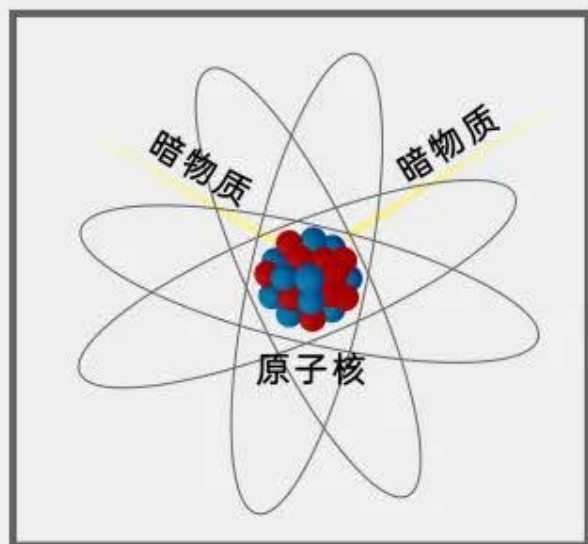
Figure 9.12 The Abell 2218 cluster imaged by the Hubble Space Telescope. Image: NASA, A. Fruchter and the ERO team, STScI.

✓暗物质的比例：最直接的方法为分析CMB
fluctuations, $\sim 23\%$; 剩下的 $\sim 73\%$ 是什么？

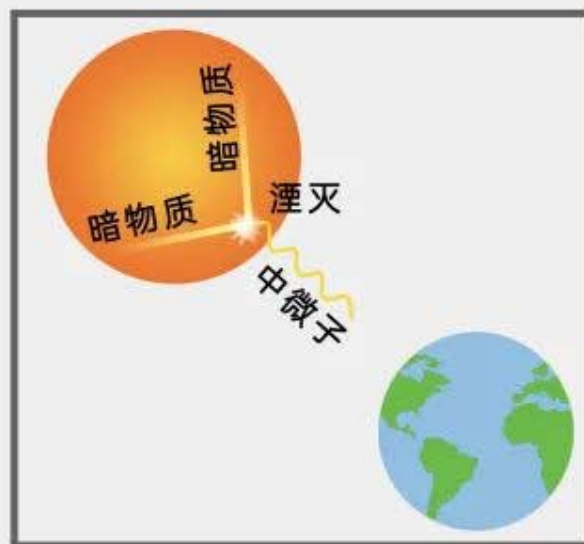
暗物质是什么？

- ✓ 目前仍然不清楚！
- ✓ 粒子物理的标准模型没有预言暗物质的存在，新物理？
- ✓ 热暗物质（中微子？）和冷暗物质
- ✓ 宇宙结构形成的模拟与CMB的不均匀性都需要冷暗物质占主导
- ✓ 轴子（？）：轻、中性，Peccei-Quinn理论预言（1977），数密度： $\sim 10^{13}/\text{cm}^3$ ，在强磁场中可以与光子相互转化
- ✓ WIMP（？）：Weakly Interacting Massive Particles（例如：neutralino）

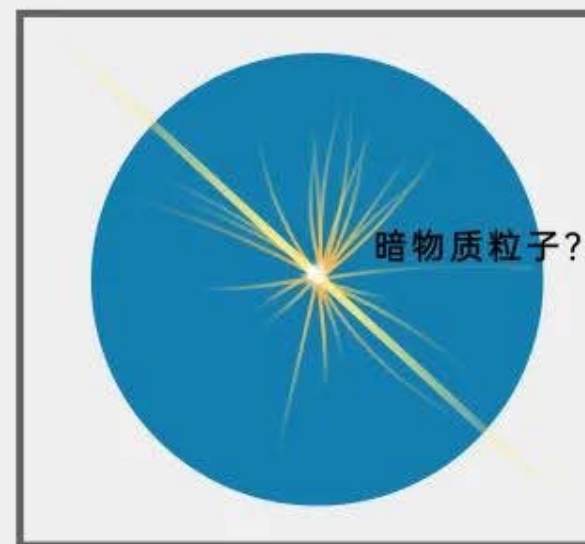
探测暗物质粒子的三种途径



直接探测：
在地下实验室捕捉暗物质
与原子核碰撞的证据



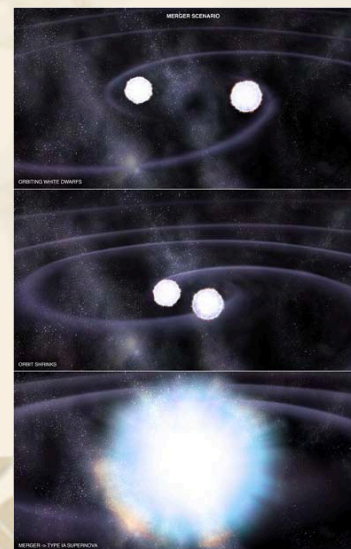
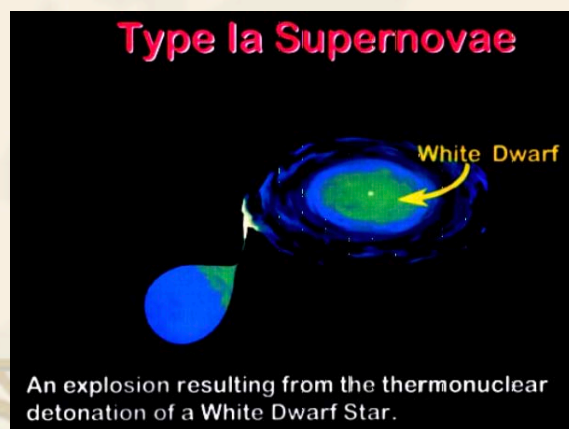
间接探测：
在伽马射线和中微子等数
据中寻找暗物质粒子的湮
灭或衰变的产物



对撞机探测：
在对撞机中让高能粒子束
对撞，直接产生暗物质粒
子

暗能量

- ✓ 宇宙中~73%是暗能量：斥力，会使宇宙加速膨胀
- ✓ 开始时，辐射场占主导，接着物质占主导，在这两个阶段，宇宙减速膨胀。再接着暗能量占主导（近~60亿年以来），宇宙加速膨胀
- ✓ 暗能量存在的证据：用**SN Ia**作为标准烛光定距离（**SN Ia**具有基本确定的绝对光度和光变曲线），**SN Ia**光度很大，可以测量~1000Mpc的距离（造父变星：~10-20Mpc）



暗能量之谜是众多宇宙学观测项目的主要驱动之一

更精确地限制暗能量参数

- 通过探测宇宙的膨胀历史（距离-红移关系）

- 标准烛光（Ia型超新星）

- 标准尺子（重子声波振荡）

- 标准汽笛（双星合并引力波）

-

- 通过探测宇宙的结构形成历史（成团性-红移关系）

- 大尺度结构的弱引力透镜效应

- 星系成团性的红移畸变效应

-

暗能量的本质

- ✓ 暗能量均匀，密度极低 $\sim 10^{-29}\text{g/cm}^3$ ，仅有重力（斥力）作用，很难探测
- ✓ 真空能？Heisenberg不确定原理允许粒子不断产生和消失，真空不是一无所有，而是充满虚粒子对！理论值超过观测值120个数量级！

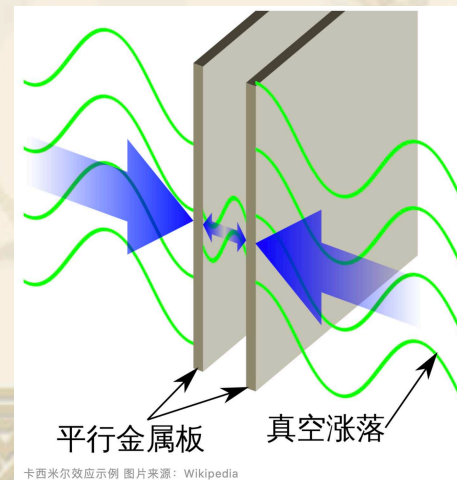
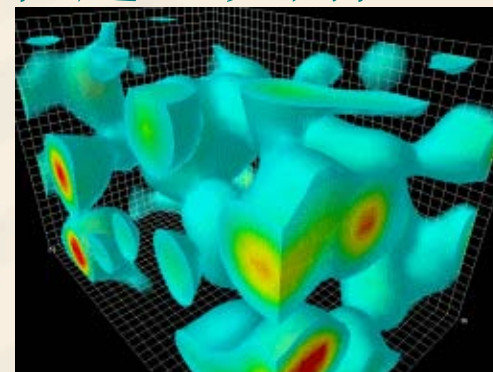
$\Delta E \times \Delta T$ is of order $h/2\pi$
where h is Planck's constant ($6.626 \times 10^{-34} \text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$).

1. 例如：虚质子对， $E=3 \times 10^{-3} \text{erg}$, $t \sim 3 \times 10^{-25} \text{s}$

2. 真空能实验：Casimir效应，真空中两金属板足够近，小于虚粒子对的波长，两金属板之间相互吸引

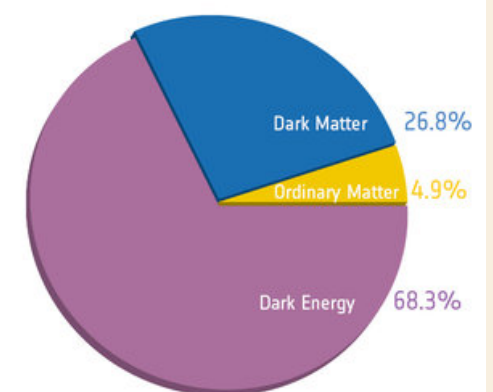
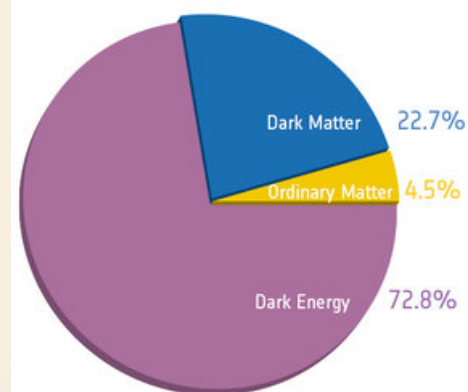
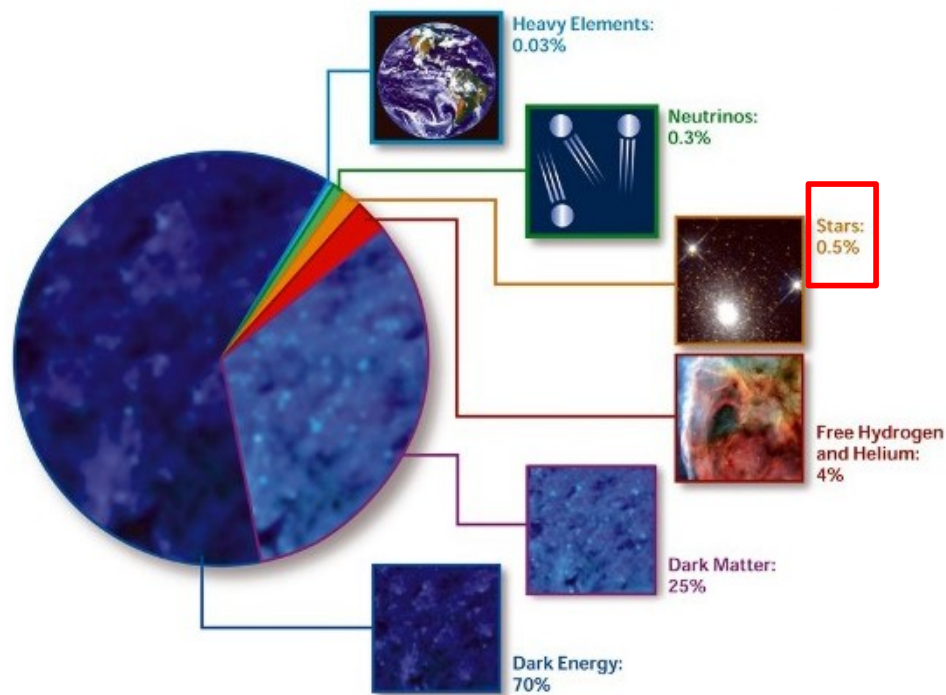
- ✓ 最简单的解释-宇宙学常数： Λ CDM模型

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$$



卡西米尔效应示例 图片来源: Wikipedia

宇宙的组成



宇宙成分：

源于CMB、SNIa、H0、星系空间分布等观测结果

适合智慧生命生存的宇宙

- ✓ 人择原则: *Just Six Numbers* by Martin Rees
- ✓ 1、 Ω : 如太大, 宇宙很快塌缩, 生命没时间演化; 如太小, 星系与恒星不能够形成
- ✓ 2、 Λ : 如太大, 阻止恒星与星系的形成
- ✓ 3、CMB的不均匀性-涨落 ($\sim 10^{-5}$) : 如太小, 暗物质的聚集度更小更松散导致星系的结构比较松散, 恒星的形成不有效, 行星系统就不能形成; 如 $< 10^{-6}$, 星系就根本不能形成! 如太大, 比星系更大的结构将随处形成, 并塌缩成超大质量黑洞 (没有生存处) !
- ✓ 4、空间的维数3维: 2维/4维度都不适合生命存在

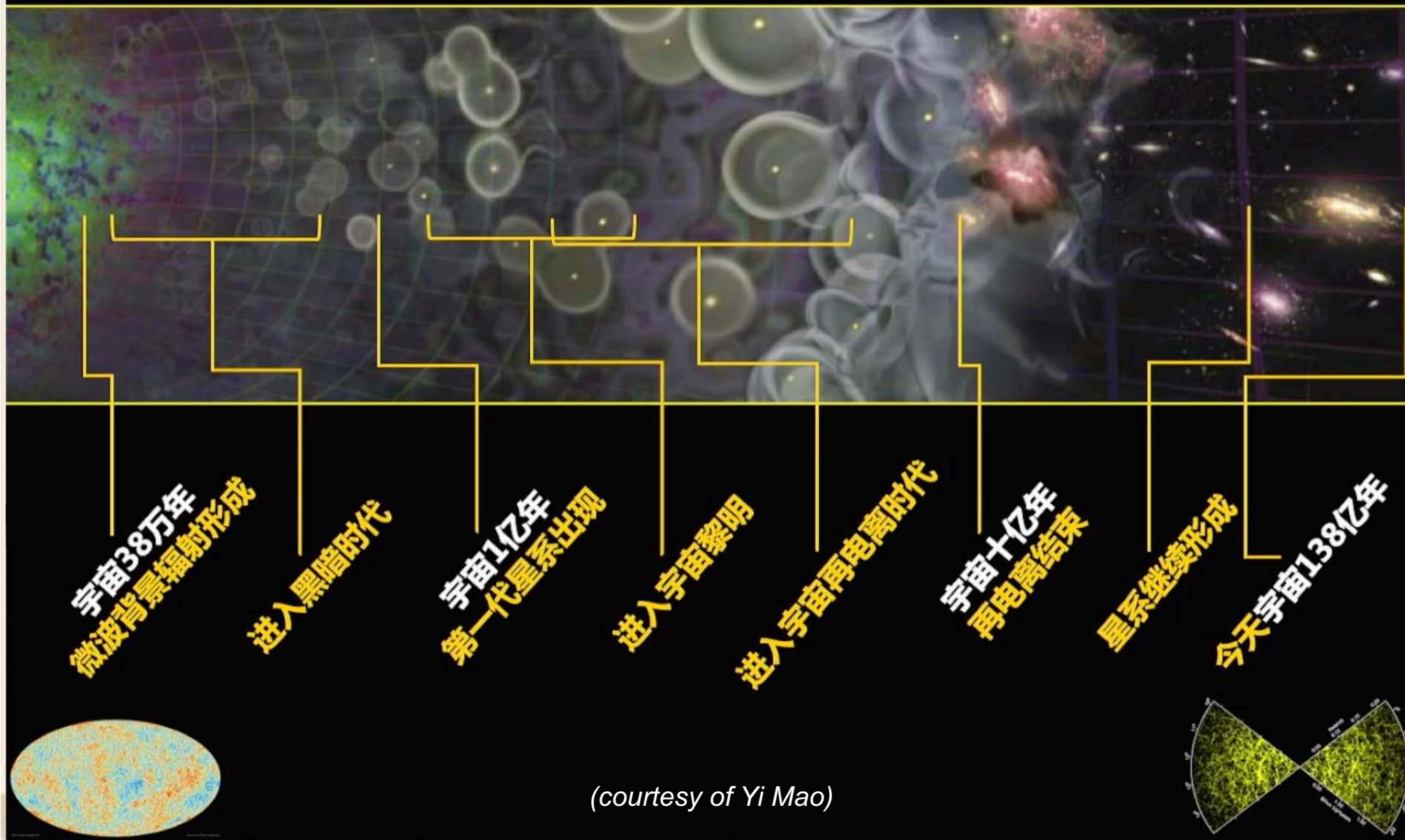
- ✓ 5、引力常数**G**：引力/电磁力 $\sim 10^{-36}$,如太大，太阳和行星变小，星系很小、挤满恒星，恒星相互作用，不适合行星的形成；小恒星很快耗尽核燃料，生命来不及演化
- ✓ 6、氢聚变产能率 ~ 0.007 ；如太小， ~ 0.006 ，氦不稳定！反应进行不下去；如太大， ~ 0.008 ，核力比电磁力强，质子-质子在一起，不能留下氢原子，作为恒星的燃料；影响3 alpha过程，从而影响C的形成，生命需要碳！
- ✓ 多重宇宙？为什么物理常数恰好适合生命的演化？
多重宇宙，在我们宇宙的视界之外，我们的宇宙是其中最幸运的一个！

“解释不通，穿越时空。逻辑不够，平行宇宙。☺”

宇宙的命运

- ✓ 目前宇宙加速膨胀
- ✓ 假设在 $t \sim 1000$ 亿年，我们将看到更远处，但其它星系由于宇宙加速膨胀早已移出我们的视界，除了自己的星系（本星系群合并成一个星系），宇宙空无一物！
- ✓ 那个时候无法了解宇宙的信息：**CMB**温度太低、信号太弱，无法探测
- ✓ 可以从星系的化学丰度知道星系的年龄，但是，无法知道宇宙的演化（仅有自己的星系），如是否起源于**Big Bang**
- ✓ 目前暗物质和暗能量相当，且**CMB**易测，我们从而推知暗能量存在及宇宙从大爆炸以来的演化和将来失控膨胀的命运
- ✓ 如果宇宙太年轻，暗能量不起主要作用，无法知道暗能量的存在；如果太老，无法知道宇宙的膨胀及暗能量的存在，恒星都已死亡，关于宇宙形成与演化的所有证据都已消失！

宇宙空白的记忆：理论图像



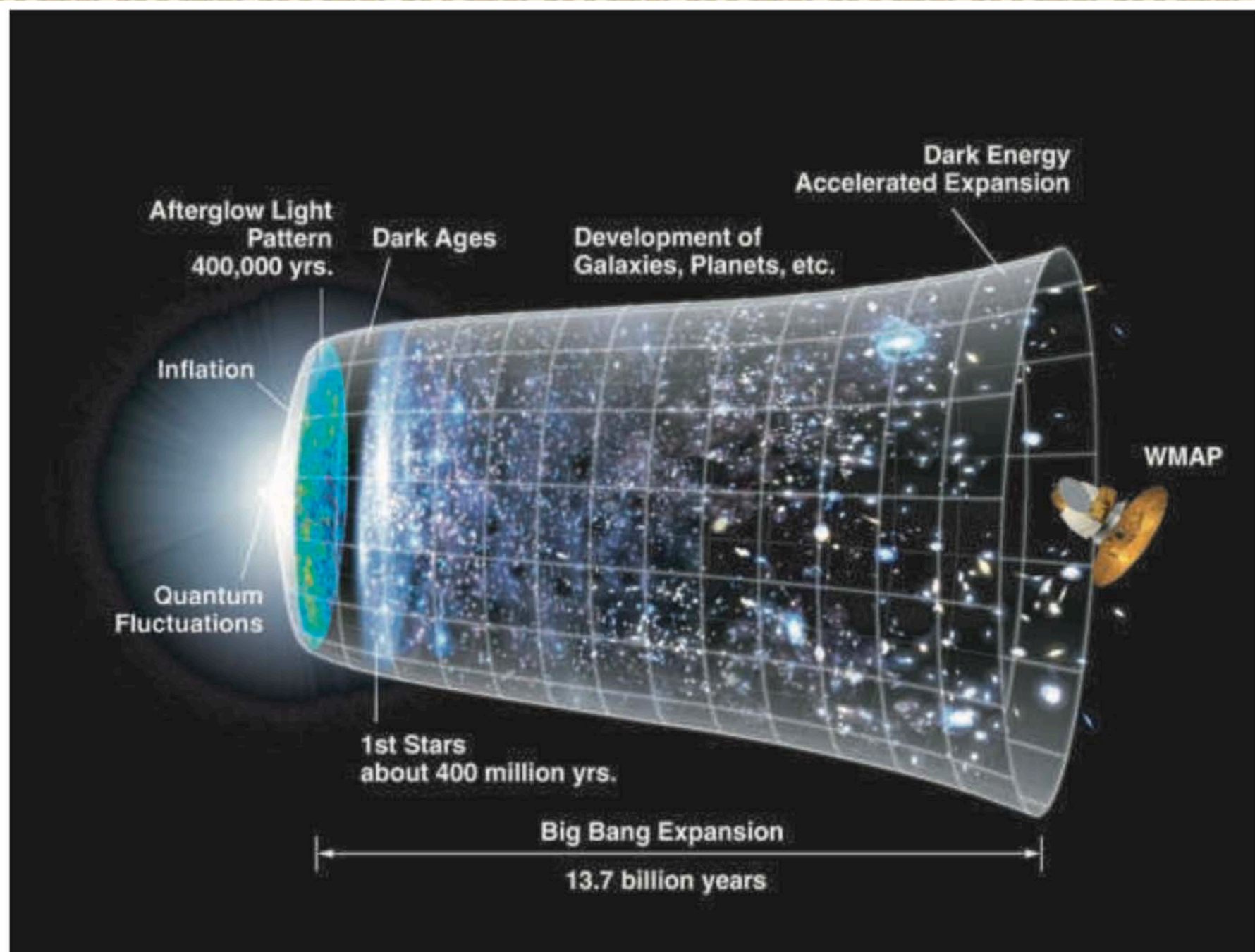


Figure 9.15 A time-line of the universe. Image: NASA/WMAP Science Team.

- **大撕裂：宇宙中的所有物质最终将瓦解为不受束缚的基本粒子和辐射**

“大撕裂”（Big Rip）假说认为如果暗能量的密度随着时间增加而增加，不管宇宙的空间结构是闭合、平直还是开放的，随着宇宙的不断膨胀所有物质（甚至时空本身）最终都会被逐渐撕碎。如果暗能量是状态方程小于-1的“幽灵暗能量”（phantom dark energy），那么它的密度随着时间的推移而不断增加，从而导致宇宙膨胀的速度越来越快，最终就会使得宇宙中的所有物质都瓦解为不受束缚的基本粒子和辐射。

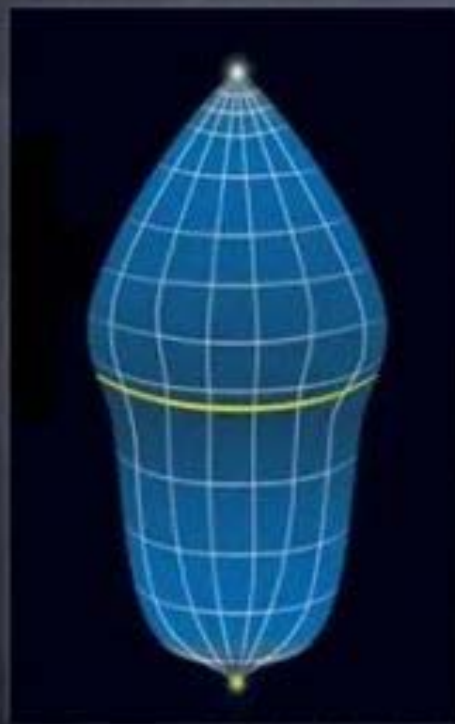
- **大冻结：宇宙温度最终将趋于绝对零度**

“大冻结”（Big Chill/Big Freeze）也被称为“热寂”（heat death）。这种假说认为随着宇宙的膨胀，气体作为恒星形成所必需的材料，变得越来越稀薄，最终会不足以支撑新的恒星形成。随着恒星形成的停止，宇宙温度越来越低，并最终演化到一种没有热力学自由能的状态，也就是达到热力学平衡（即具有最大熵），同时宇宙温度也将趋近（但并未达到）绝对零度（零下273.15摄氏度），从而任何宏观物理过程和生命都不复存在。

- **大坍缩：物质的引力作用使得宇宙最终停止膨胀并发生坍缩**

“大坍缩”（Big Crunch）假说认为由于物质的引力作用宇宙的膨胀速度会不断变慢，从而终将停止膨胀并发生坍缩。然而在坍缩之后又将发生什么尚不能确定。其中一种可能性就是宇宙坍缩到它的初始状态并再次发生大爆炸，从而使得宇宙处于“大爆炸”到“大坍缩”再到“大爆炸”这样一种循环的状态。从目前的宇宙学观测来看，产生负压的暗能量肯定存在，而且它的密度高于物质的，因此宇宙的膨胀不会停止，“大坍缩”是不太可能发生的。

宇宙的终极命运——大坍缩



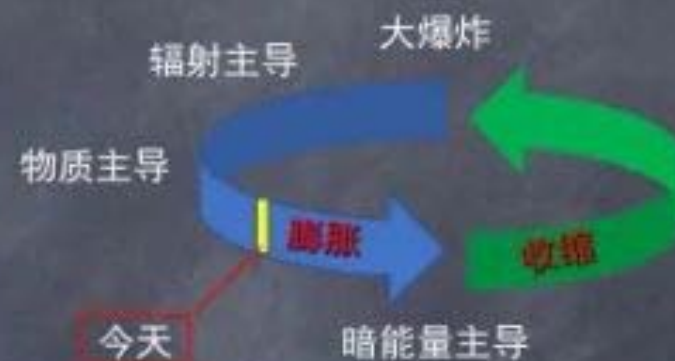
(蔡一夫 中科大)

宇宙的终极命运——大撕裂



(蔡一夫 中科大)

宇宙的终极命运——循环/振荡宇宙



2003年，以张新民为代表的中国宇宙学家首次提出了精灵暗能量模型。2007年，我们指出了它会带来**振荡**的宇宙命运。综述请见：Cai, et al., 2009

精灵模型
(Quintom)

(蔡一夫 中科大)