

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15讲 宇宙的未来与极早期

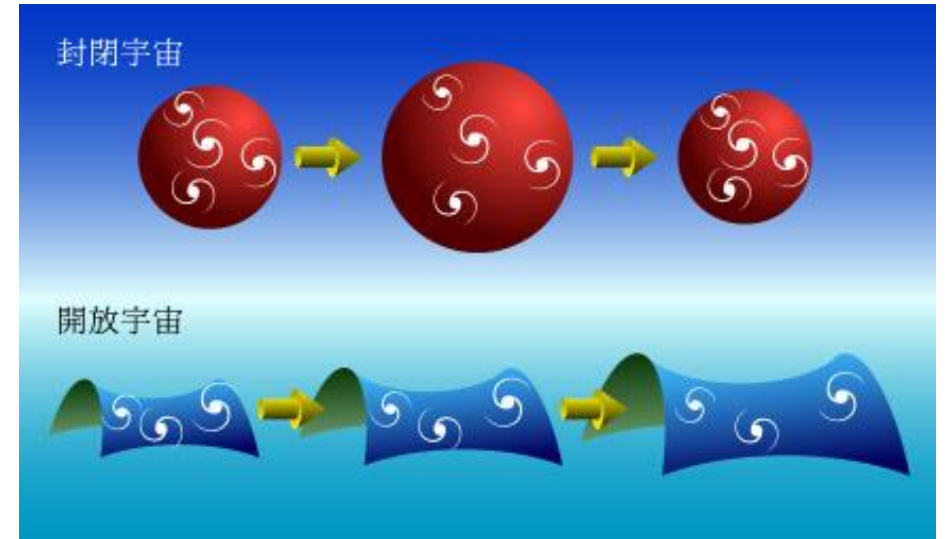
A man said to the universe:

“Sir, I exist!”

“However,” replied the universe,

“The fact has not created in me

A sense of obligation.”



Stephen Crane (1871—1900)

本讲内容

1. 宇宙的物质密度
2. 加速膨胀的宇宙与暗能量
3. 早期宇宙
4. 暴涨宇宙
5. *多重宇宙
6. * “绝对的” 未来

教材学习

- Chapter 22 Modern Cosmology

学习目标

- 发现宇宙加速膨胀的天文观测
- 暗能量的性质
- 宇宙的物质密度参数和暗能量密度参数的不同组合如何影响宇宙的年龄和未来
- 当前对宇宙的物质密度参数和暗能量密度参数的限制范围
- 暴胀宇宙对平直和视界疑难问题的解释
- 宇宙大爆炸后的物质诞生过程
- *多重宇宙的基本概念

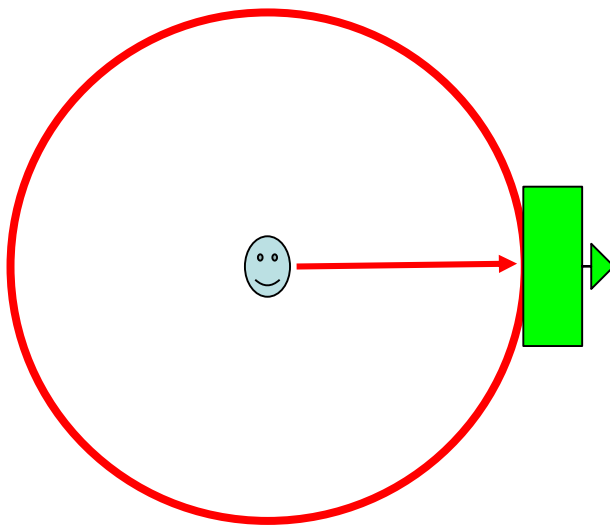
1、宇宙的物质密度

- 宇宙会永远膨胀下去吗？
- 宇宙质量的引力使膨胀减速
- 减速的程度取决于什么？
- 一个天体表面的逃逸速度由其“平均密度”决定

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2} v_{\text{circ}}$$



- 宇宙膨胀的未来命运由宇宙的“逃逸速度”或平均密度决定
- 令目前宇宙的膨胀速度= “逃逸速度”，得到对应的宇宙密度称为宇宙的临界密度 ρ_c



宇宙的临界密度

Alexander Friedmann (1888–1925):

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \qquad H_0 = \frac{70 \times 10^3 \text{ m/s}}{3.1 \times 10^{22} \text{ m}} = \underline{2.3 \times 10^{-18}/\text{s}}$$

$$\rho_c = \frac{3 \times (2.3 \times 10^{-18}/\text{s})^2}{8 \times \pi \times (6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2)}$$

$$= 9.5 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

$$\sim 6 \text{ H} / \text{m}^3$$

宇宙的物质密度参数 Ω_{mass}

$$\Omega_{\text{mass}} = \frac{\rho}{\rho_C} = \frac{\text{宇宙密度（观测）}}{\text{宇宙临界密度（理论）}}$$

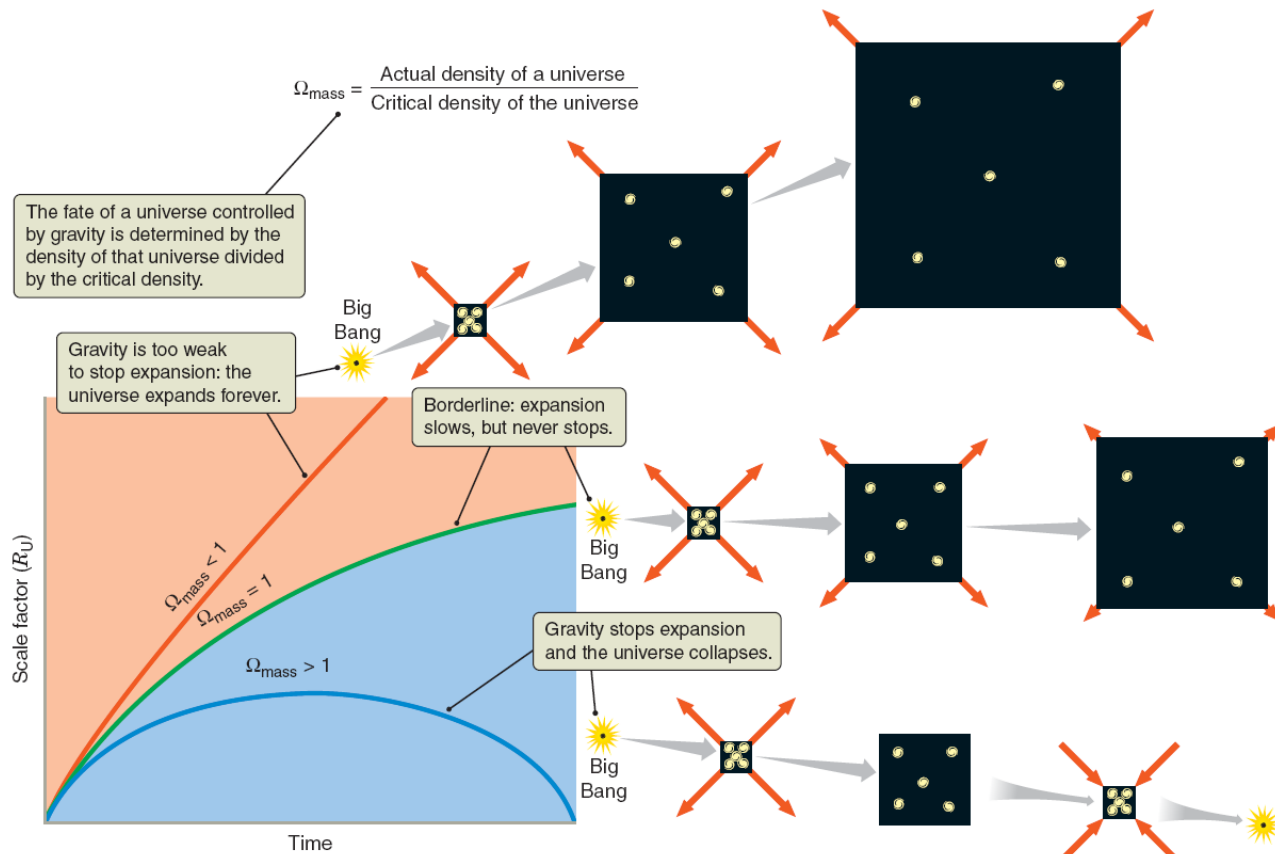


FIGURE 21.1 Three possible scenarios for the fate of the universe based on the critical density of the universe, but ignoring any cosmological constant.

$$\Omega_{\text{mass}} \approx 0.32$$

(亮物质 0.05 +
暗物质 0.27)

我们的宇宙将永远
“减速” 膨胀下去

如宇宙只含物质，其将来的三种命运

2、加速膨胀的宇宙与暗能量

- 物质的引力使宇宙的膨胀减速
 - 宇宙过去的膨胀（速度）比目前的要快
- 减速膨胀宇宙：遥远天体的视亮度1应亮于由等速膨胀宇宙所给出的视亮度2：
 - 视亮度 + “标准烛光光度” \rightarrow 距离1 < 退行速度【红移】+ 哈勃定律 \rightarrow 距离2

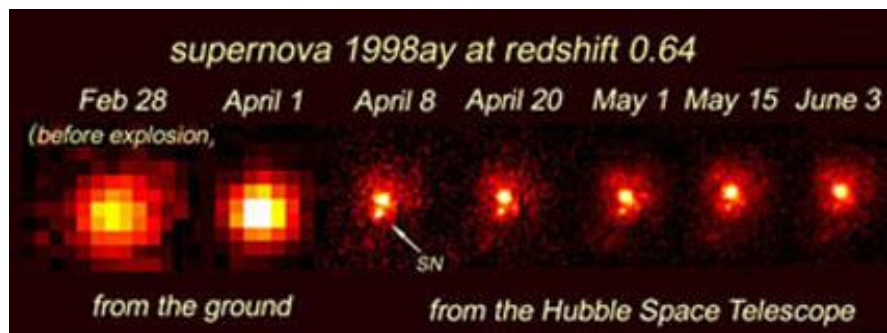
标准烛光-距离1

红移哈勃定律-距离2

相同退
行速度

宇宙膨胀在加速！

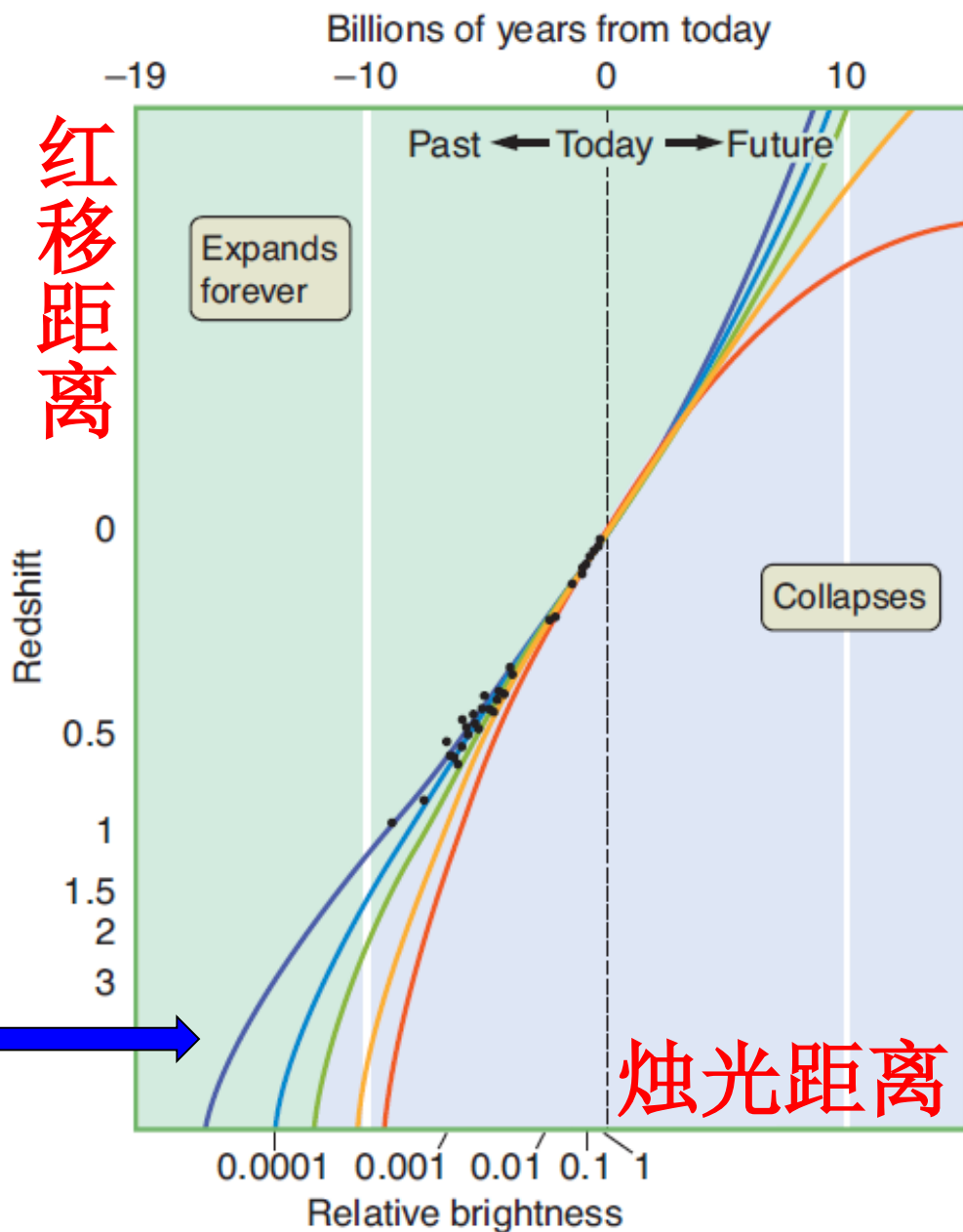
- 1998年，两个研究团组分别发现：遥远星系中Ia型超新星的视亮度**暗于**由等速膨胀所预言的视亮度，与期待结果相反！
- 表明宇宙膨胀不仅不随时间减速，而是在**加速**！



相同退
行速度

不同的膨胀模式给出不同的红移和视亮度之间的模型关系与观测关系的比较

高红移Ia超新星能更好地区分膨胀模型



2011年诺贝尔物理学奖

“通过观测遥远的超新星发现宇宙正在加速膨胀”



索尔·珀尔马特
Saul Perlmutter

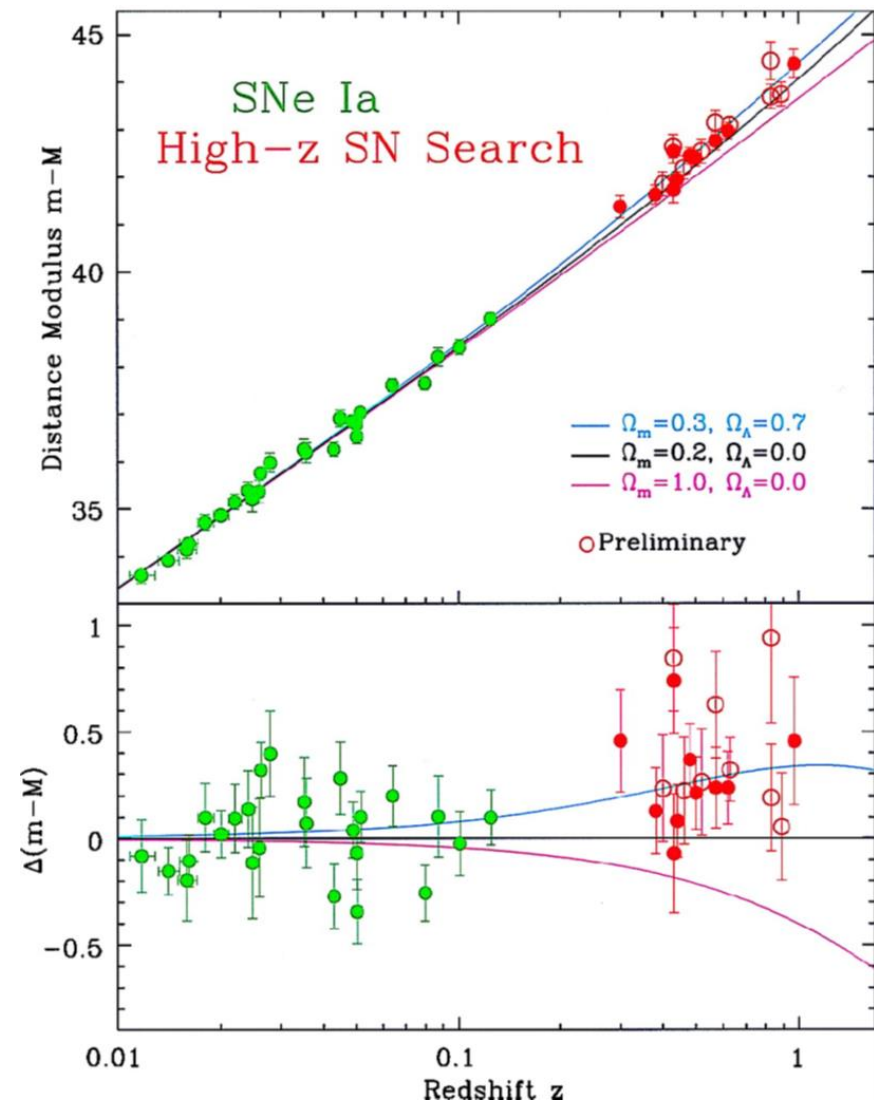


布赖恩·施密特
Brian P. Schmidt



亚当·里斯
Adam G. Riess

WMAP等观测验证了宇宙是在加速膨胀



“反引力”

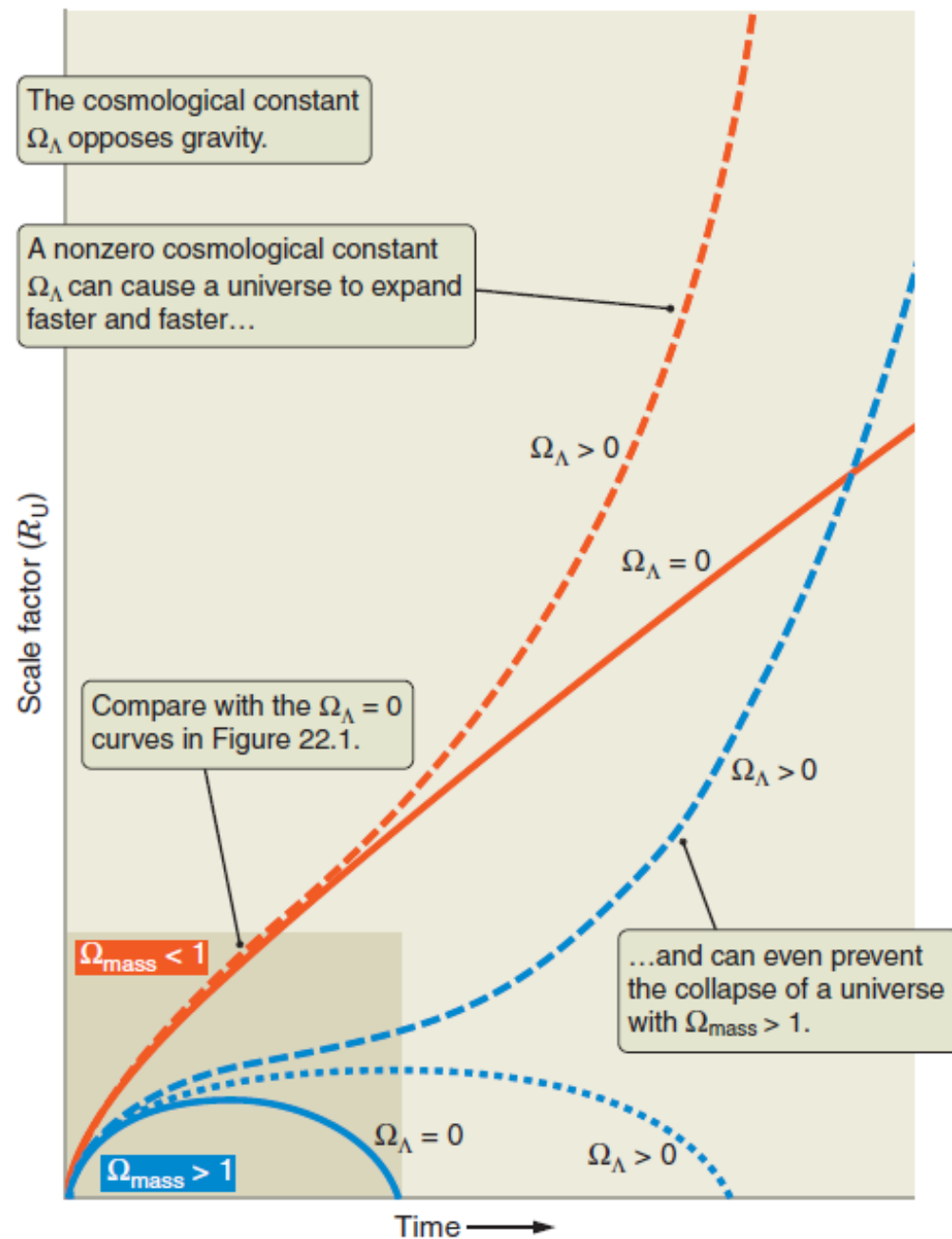
- 需要一个与引力作用相反的斥力解释宇宙加速膨胀的观测事实
- 1917年，爱因斯坦把广义相对论应用于宇宙，表明包含质量的宇宙不可能静止
- 但在哈勃发现宇宙膨胀（1929年）的10多年前，爱因斯坦认为宇宙应该是静态的
- 因此，爱因斯坦在其方程中人为地加入一个起长程斥力作用的“宇宙学常数” Λ ，用来抵消引力，从而得到一个稳定的宇宙

宇宙学常数 = 真空能 = 暗能量dark energy

- 宇宙时空具有“真空能量”，称为暗能量，能产生加速膨胀所需的斥力
- 暗能量也是宇宙的组成成分，定义相应的暗能量密度参数， Ω_Λ
- 暗能量均匀分布，不聚集成团，仅在巨大时空尺度上起作用
- 暗能量在宇宙早期不重要，在约一半宇宙年龄前宇宙膨胀是减速的
- 随着宇宙膨胀，引力越来越弱，暗能量越来越强，使膨胀由减速转为加速

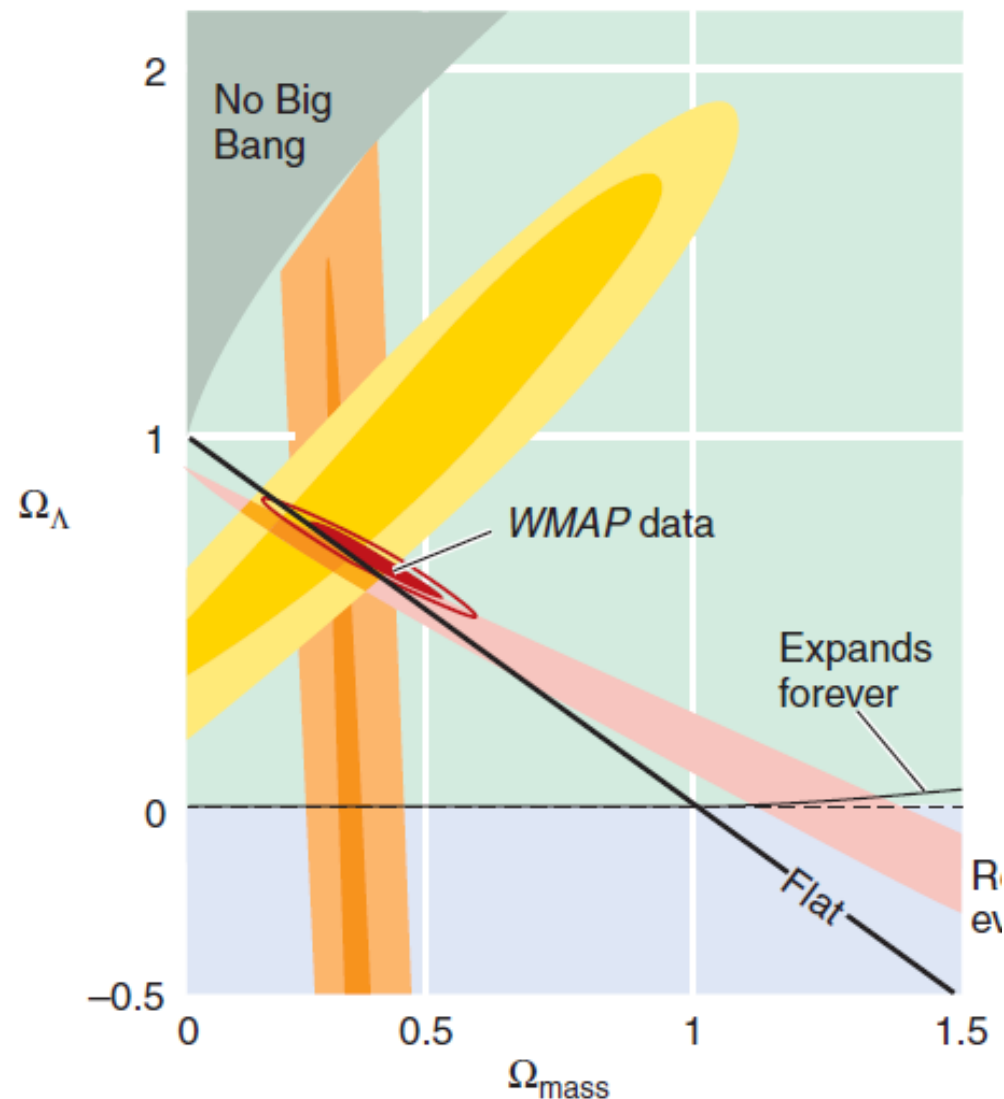
宇宙的膨胀模式是**物质和暗能量**（**时间演化**）共同作用的结果

在暗能量存在的情况下，没有足够质量的宇宙终将加速膨胀



$$\Omega_{\text{mass}} \sim 0.32, \quad \Omega_{\Lambda} \sim 0.68$$

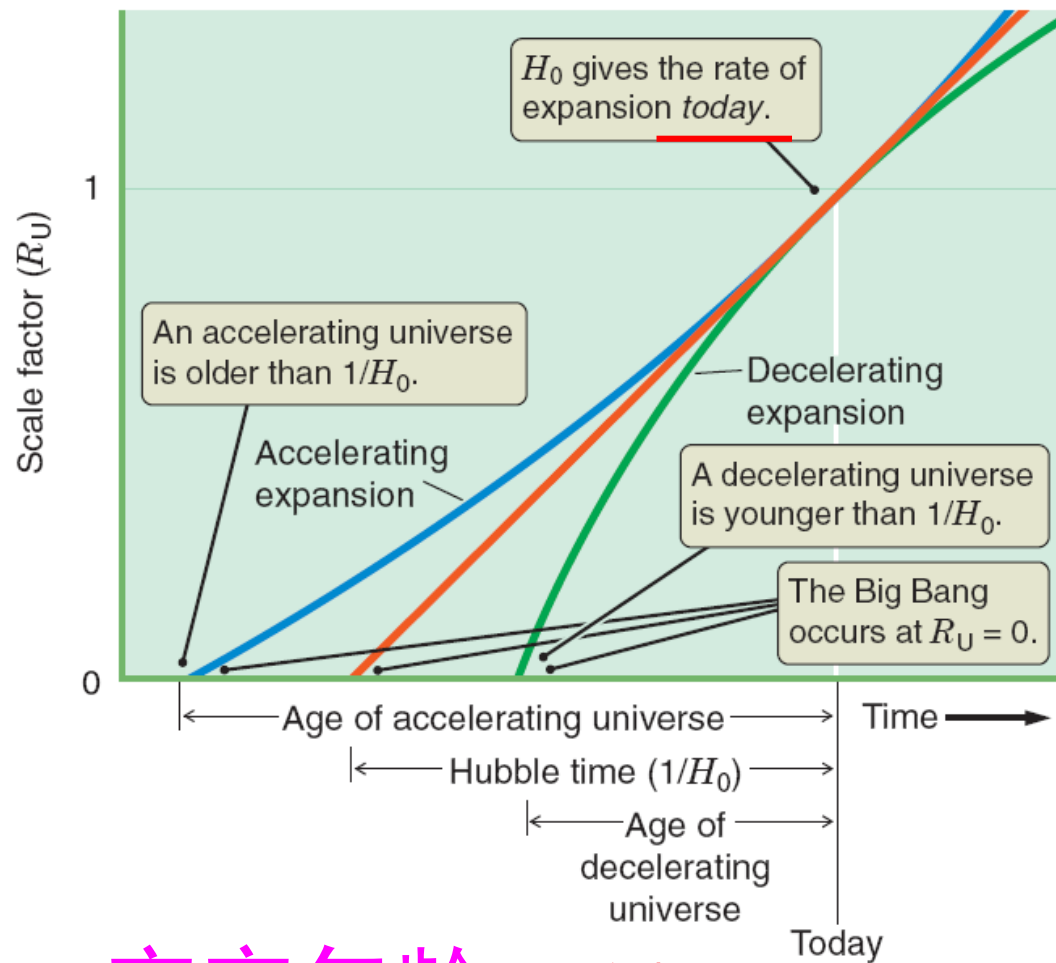
- 目前的观测表明暗能量主导宇宙
- 暗能量不再让位于物质
- 宇宙的膨胀将永远是加速的



Ω_{mass} 与 Ω_{Λ} 的观测值影响宇宙的年龄

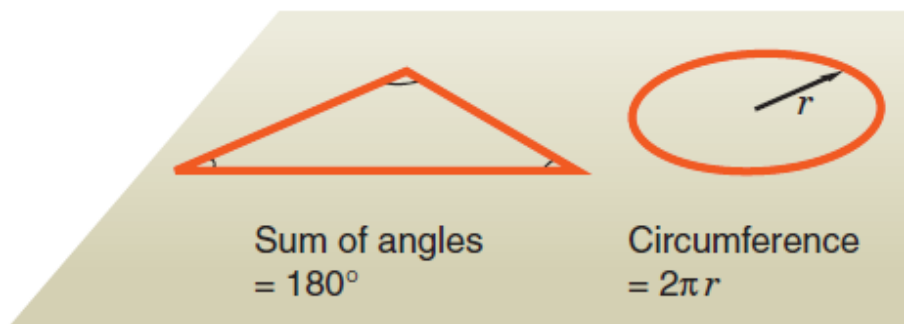
哈勃时间 = $1/H_0$

- 如宇宙等速膨胀, 宇宙年龄为 $1/H_0$
- 如宇宙膨胀减速, 宇宙年龄小于 $1/H_0$
- 如宇宙膨胀加速, 宇宙年龄大于 $1/H_0$



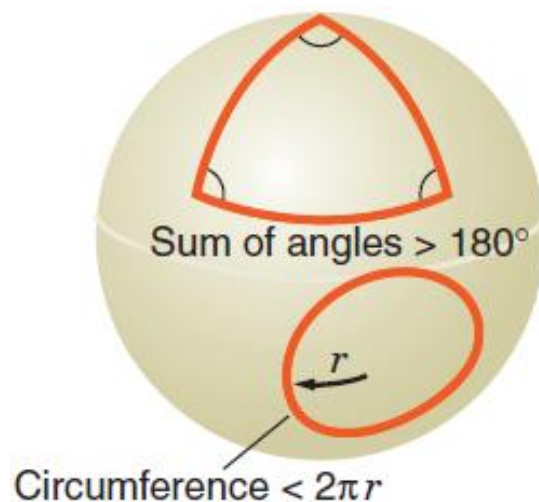
宇宙年龄 $\sim 1/H_0$

宇宙的总密度参数 $\Omega_0 = \Omega_{\text{mass}} + \Omega_{\Lambda}$ 决定宇宙的形状



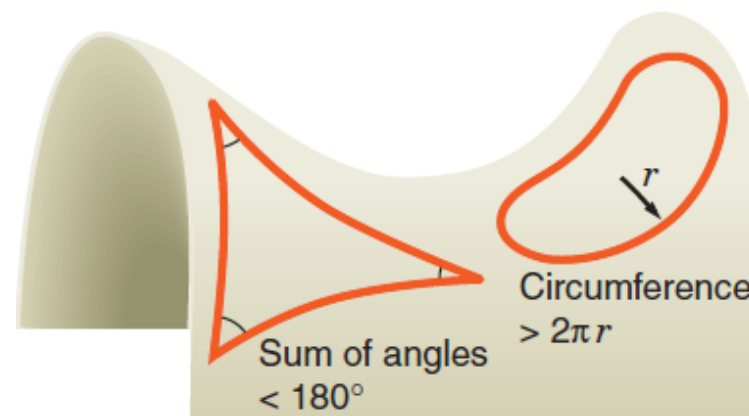
$$\Omega_{\text{mass}} + \Omega_{\Lambda} = 1$$

平直[开]宇宙



$$\Omega_{\text{mass}} + \Omega_{\Lambda} > 1$$

闭宇宙



$$\Omega_{\text{mass}} + \Omega_{\Lambda} < 1$$

开宇宙

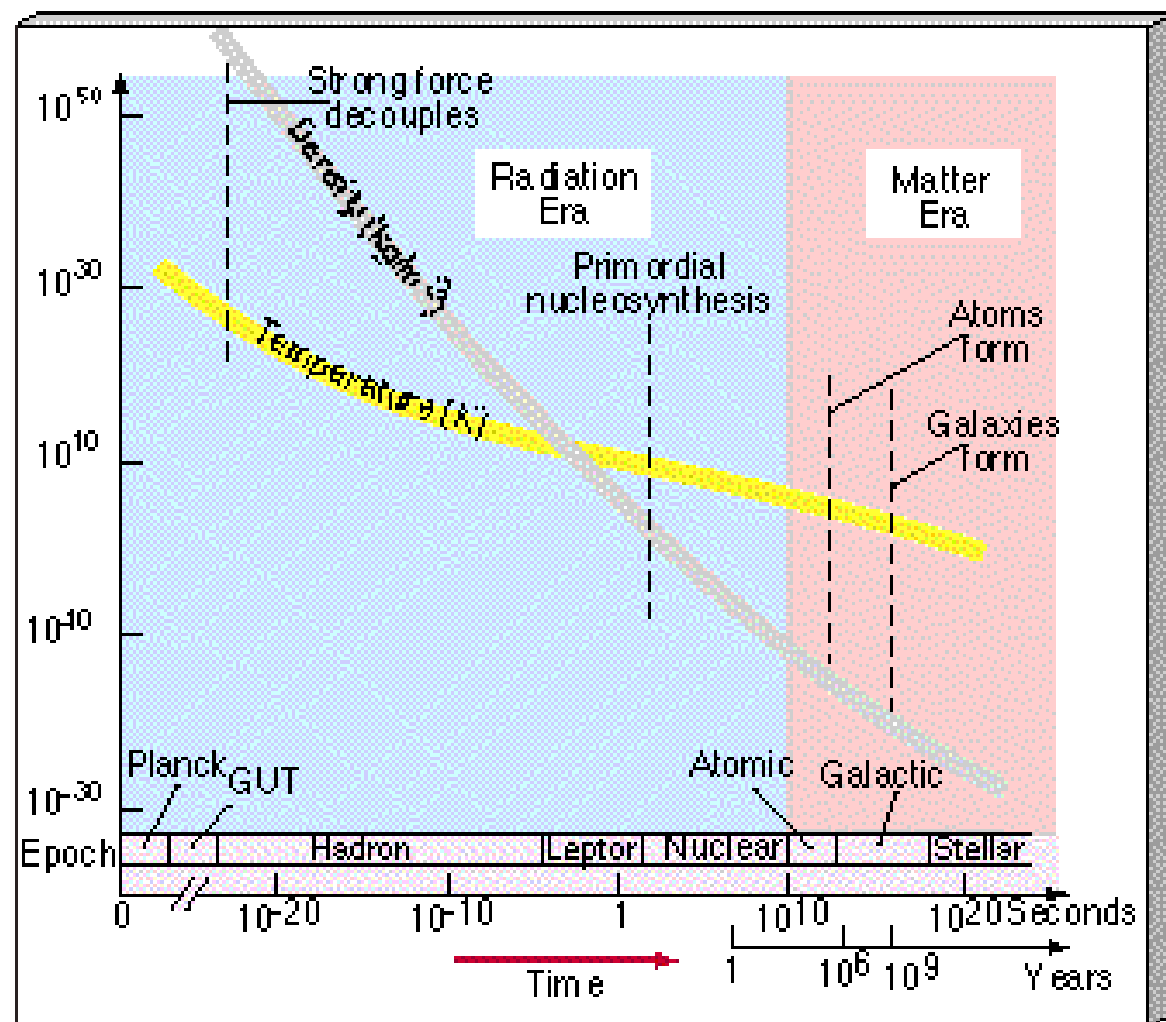
宇宙的组成

- 宇宙是一个由三种组分构成的近似均匀的混合体：
 - Ω_m (~ 0.32) + Ω_Λ (~ 0.68) + 辐射
- $\Omega_0 = \Omega_{\text{mass}} + \Omega_\Lambda = 1.0 \rightarrow$ 宇宙是平直的 \rightarrow 宇宙的总质量-能量密度 = 宇宙的临界密度
 - 质量密度： $\sim 3 * 10^{-27} \text{ kg /m}^3$
 - 暗能量密度： $\sim 6 * 10^{-27} \text{ kg /m}^3$
 - 辐射（CMB）： $\sim 5 * 10^{-31} \text{ kg /m}^3$

宇宙各成分的演化不同

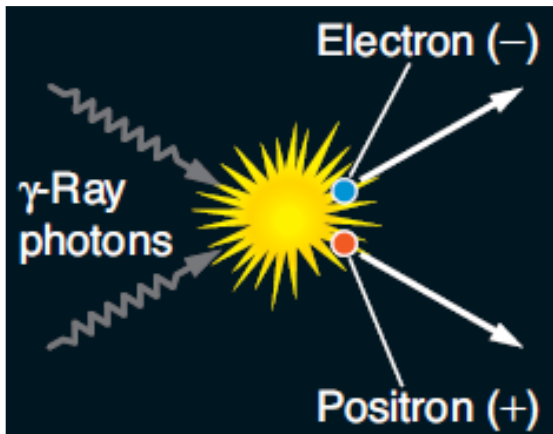
- 随着宇宙膨胀：
 - 由于宇宙学红移，辐射能量密度比物质密度下降得更快
 - 暗能量密度维持不变
- 在大爆炸后~5万年，宇宙由辐射主导转为物质主导
- 在~40-60亿年前，宇宙由物质主导（减速膨胀）转为暗能量主导（加速膨胀）

3、早期宇宙

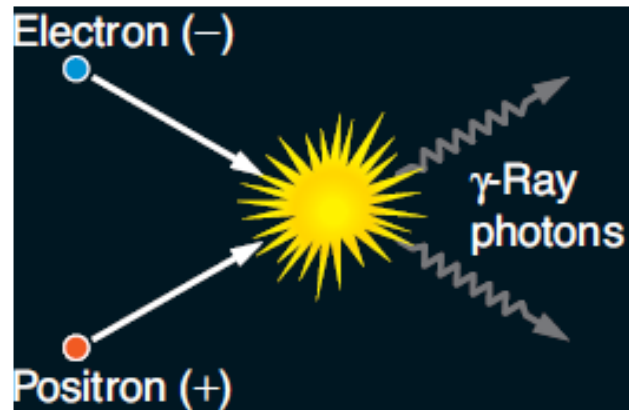


粒子（物质）的创建

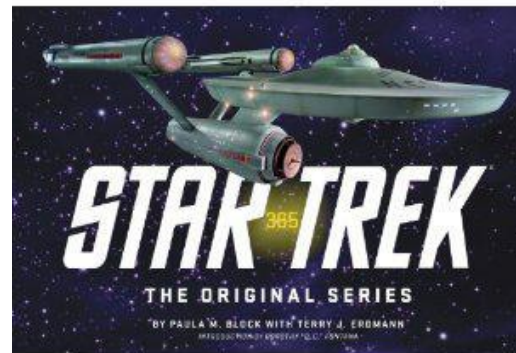
- 对产生：两个伽马射线光子碰撞，产生正反粒子对



- 粒子与反粒子对湮灭，质量转为能量



质量和能量守恒定律：辐射场温度越高，所创建的粒子的质量越大

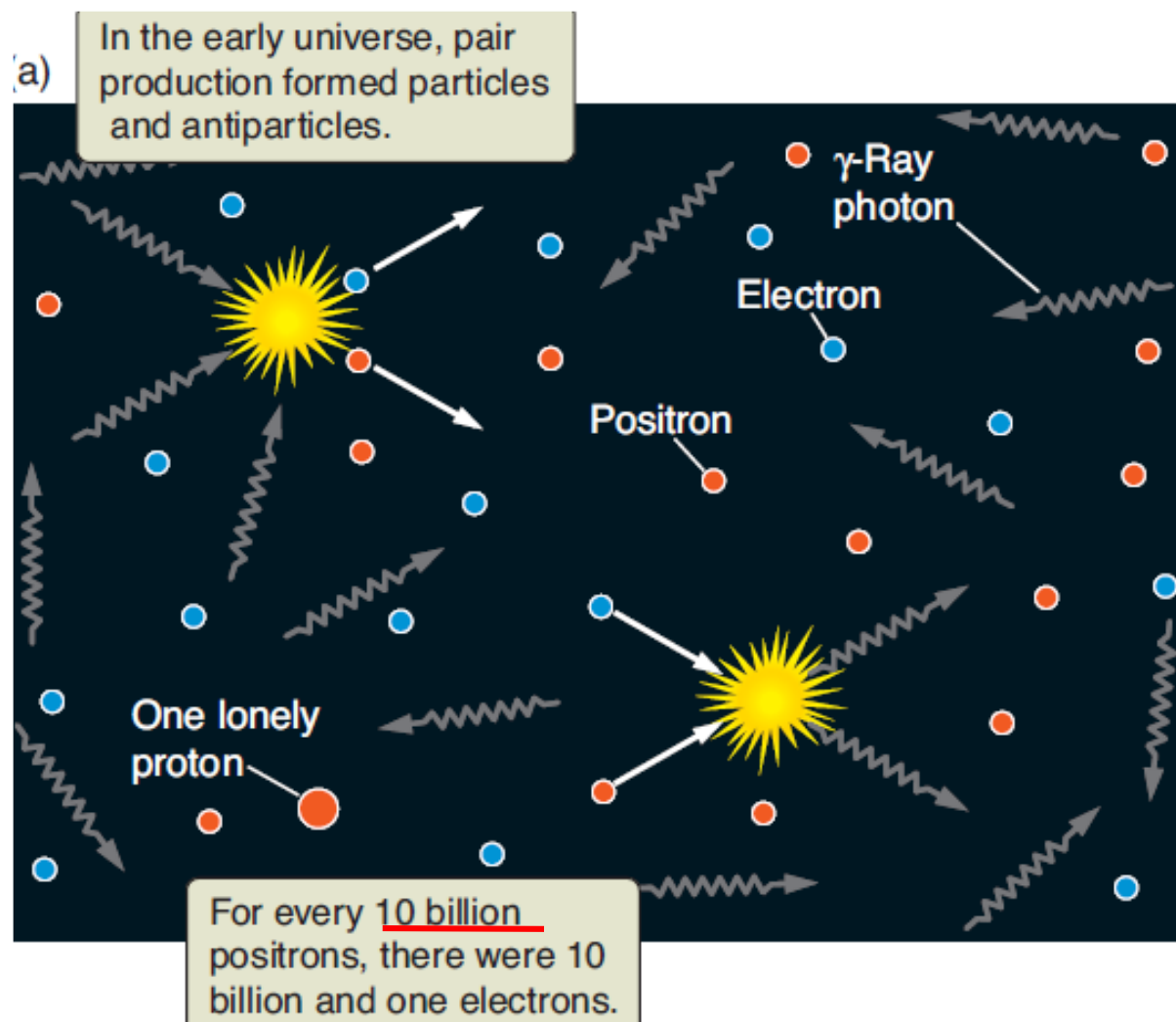


粒子创建的阈值温度

- 质子（-反质子）： $1.45 \times 10^{13} \text{ K}$
 - 电子（-正电子）： $7.92 \times 10^9 \text{ K}$
- $$T = \frac{2mc^2}{3k}$$
- 在阈值温度之上，粒子-反粒子对和辐射处于热平衡状态，即对产生和对湮灭平衡
 - 在阈值温度之下，对湮灭之后粒子不能再被创建
 - 宇宙年龄~0.0001秒后，质子不再创生
 - 宇宙年龄~100秒后，电子不再创生

物质略微超过反物质

每10亿个粒子-反粒子对，多出一个额外的粒子



*反物质不会违反引力效应



ALPHA合作组织证明反物质回应引力的方式与正常物质非常相似。物理学家使用欧洲核子研究中心（CERN）的ALPHA-g实验装置第一次直接观测到了下落中的反物质原子——由一个反质子和一个反电子构成的反氢原子。

他们在一个长长的圆柱形真空舱室中完成了实验。实验前，研究人员首先在真空舱室中把反氢原子束缚在一个磁阱中。实验开始后，磁阱释放反氢原子，并且允许它们在真空舱室壁上湮灭。

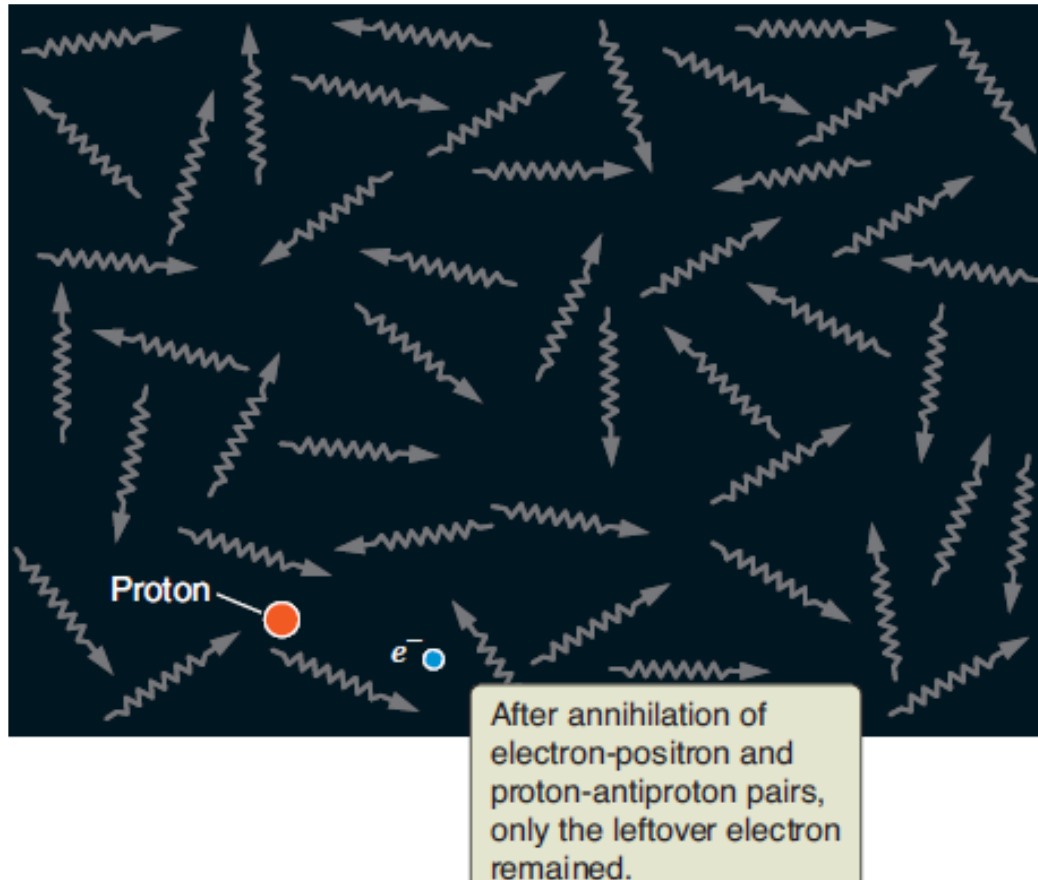
这个研究团队发现，湮灭发生的位置比施放反氢原子的位置低。即便考虑到反氢原子的热运动，还是能得出反氢原子下落的结论。有意思的是，反氢原子的引力加速度大约是正常物质的75%。

当然，这个测量结果的统计学显著性较低，但它仍然打开了标准模型之外全新物理学理论的大门。

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

随着宇宙膨胀冷却，对湮灭后对产生不再发生，这些幸存的没有配对的正粒子从辐射场中冻结出来，其数量一直恒定至今



粒子-反粒子的不对称性由大统一理论描述

电弱破缺时，希格斯玻色子[上帝粒子]赋予粒子质量

四种基本力

- 强核力
- 电磁力
- 弱核力
- 引力

Force	Relative Strength	Range of Force	Particles That Can Carry the Force	Example of What the Force Does
Strong nuclear	1	10^{-15} m	Gluons	Holds protons and neutrons together in atomic nuclei.
Electromagnetic	10^{-2}	Infinite	Photons	Binds the electrons in an atom to the nucleus.
Weak nuclear	10^{-4}	10^{-16} m	W^+ , W^- , and Z^0	Responsible for beta decay.
Gravitational	10^{-38}	Infinite	Gravitons	Holds you to Earth; binds together planetary systems, stars, galaxies, clusters of galaxies, etc.

宇宙演化的8个时代

1、 $t=0-10^{-43}$ 秒：普朗克时代：

- 四种基本力是统一的一个力
- 描述这个时代的理论（TOE）还在发展中（量子引力理论？）

2、 $t=10^{-43}$ - 10^{-35} 秒：大统一时代：

- 引力分离出来，而强力、弱力和电磁力还是统一的
- 描述这个时代的理论被称为大统一理论（GUT）
- 宇宙中充满辐射和众多亚原子（暗物质和亮物质）粒子（由粒子对产生，与辐射热平衡）

2、 $t=10^{-43}$ - 10^{-35} 秒：大统一时代：

- 随着宇宙膨胀，不同类型的质量非常大的（暗物质候选）粒子由于宇宙温度降低到停止其粒子对产生的阈值温度以下而相继冻结出来。
- 由于把电磁力、弱力和强力统一为一个“超力”的粒子的质量大于质子质量的 10^{15} 倍，因此这三个基本力的统一需要大于 10^{28} K的极高温。
- 当 $t=10^{-35}$ 秒时， $T < 10^{28}$ K，强力冻结出来（与电弱力分离），大统一时代结束。

3、 $t=10^{-35}$ - 10^{-4} 秒：夸克（重子）时代

- 夸克、质子和中子与辐射处于热平衡态
- $t \sim 10^{-10}$ 秒， $T \sim 10^{15}$ K：传递电弱力的W和Z粒子不能产生，弱力冻结出来（与电磁力分离）
- $t \sim 0.1\text{ms}$ ， $T \sim 10^{13}$ K，质子和中子不再创建，夸克时代结束

4. $t=10^{-4}$ -100秒：轻子时代

- 轻子粒子（电子、中微子、介子）与辐射处于热平衡态（与轻子数量相比，宇宙仅剩极少数量的质子和中子）
- $t \sim 1$ 秒， $T \sim 3 \times 10^{10}$ K：宇宙变得足够稀薄，中微子基本不再与其它任何粒子相互作用
- $t=100$ s， $T \sim 10^9$ K，电子不再创建，轻子时代结束。宇宙密度 ~ 10 倍水密度

5、 $t=100$ 秒 - 15 分钟：核时代

- 更高的温度对大爆炸核合成是无效的
- $T \sim$ 几亿K：质子和中子主要合成为氦原子核，也合成微量的氘、锂等轻原子核
- $t \sim 15$ 分钟，宇宙温度降低，不再合成更重的原子核，原初核合成时代结束

6、 $t \sim 50,000$ 年 - ~ 1 亿年：原子时代

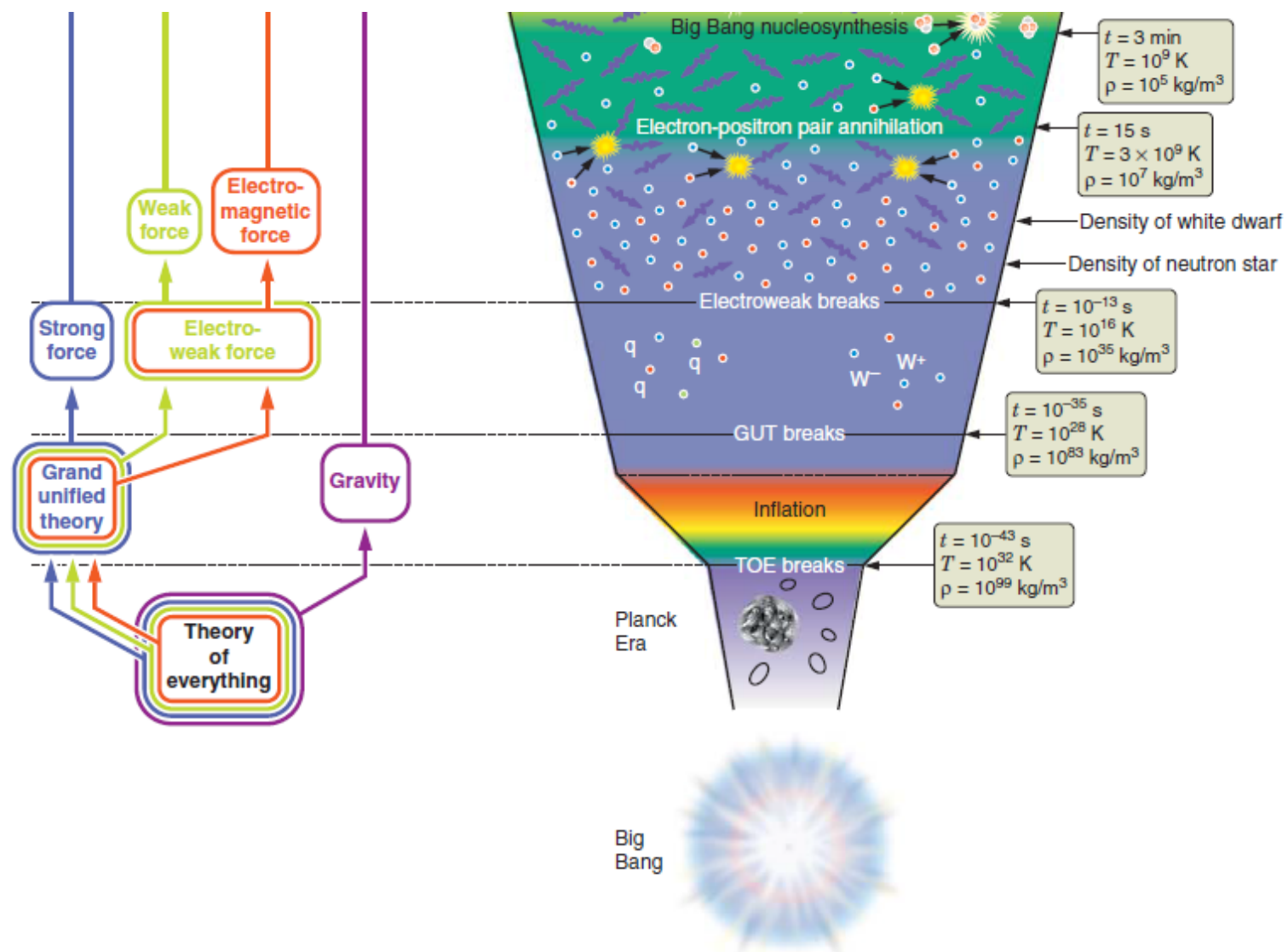
- $t < 5$ 万年，宇宙足够热，原子无法形成
- $t = 5$ 万年，辐射主导结束
- $t = 38$ 万年，宇宙足够冷，原子形成并与CMB（ $T \sim 3000\text{K}$ ）退耦

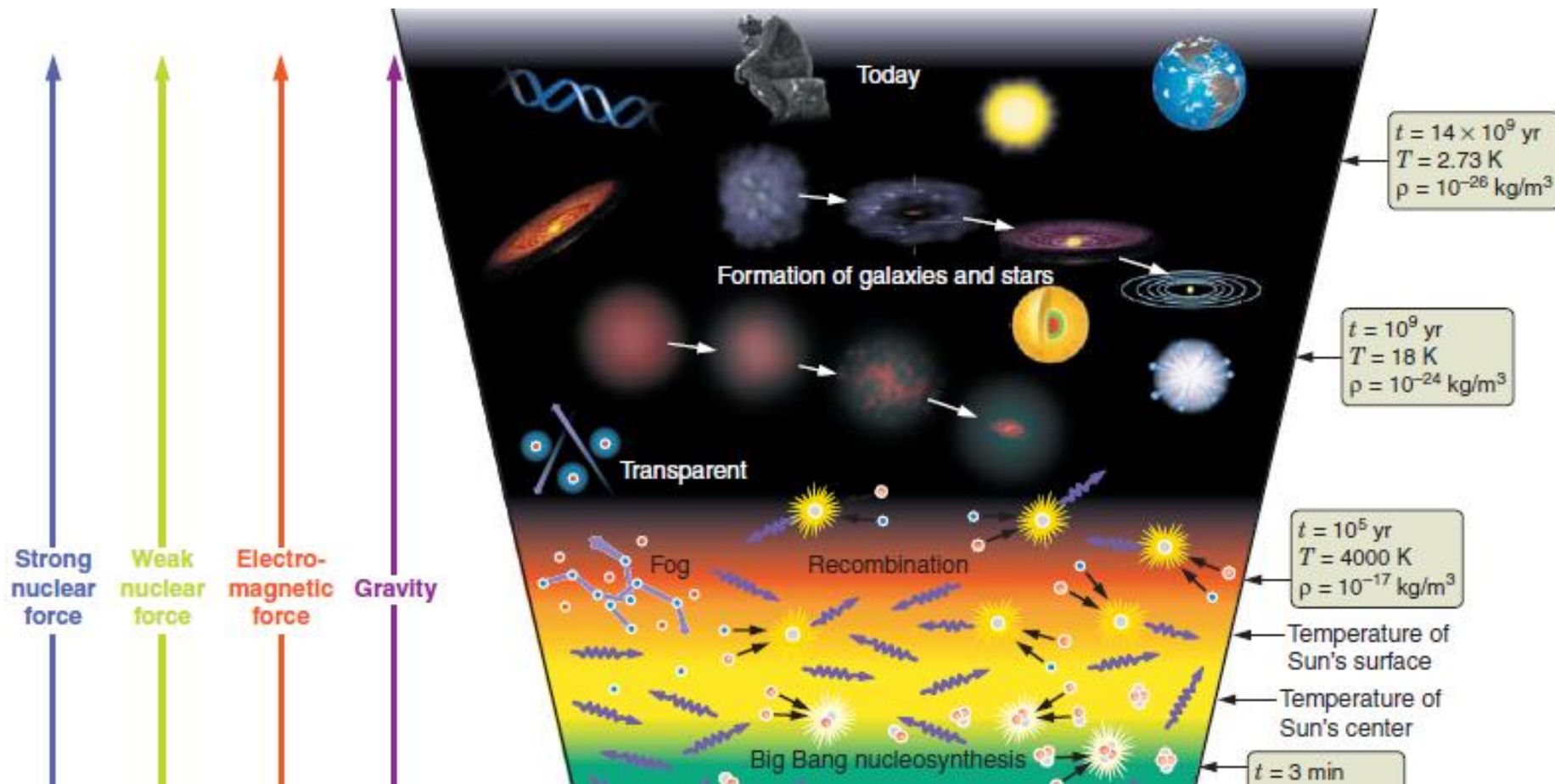
7、 $t \sim 2$ 亿年 - ~ 30 亿年：星系时代

- $t \sim 2$ 亿年，第一代恒星形成，并再电离宇宙
- $t \sim 30$ 亿年，星系和大尺度结构基本形成，宇宙在宏观上由辐射期的总体均匀转变为大物质团块的宏观结构
- 类星体闪耀

8、 $t > \sim 30$ 亿年：恒星时代

- 星系继续并合和演化
- 恒星形成率达到高峰
- 行星和生命出现





4、暴胀宇宙

标准大爆炸宇宙学模型不能解释

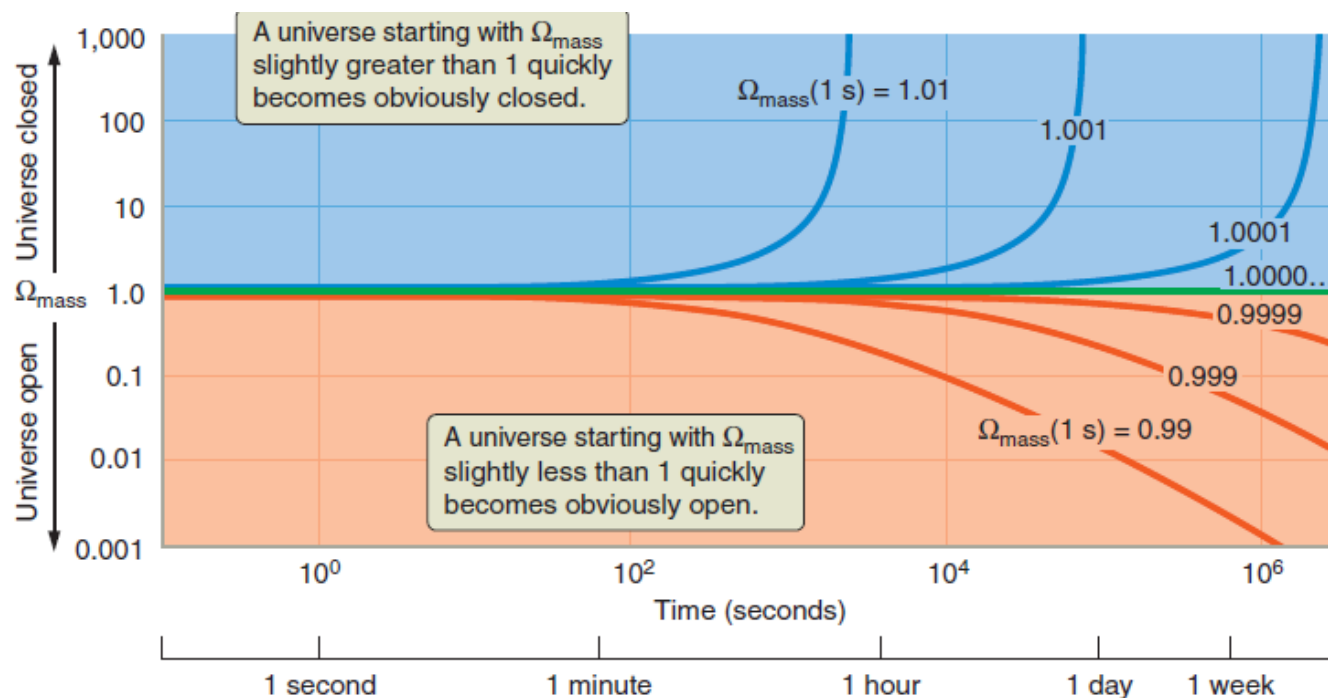
平直疑难问题

视界疑难问题

.....

平直疑难问题

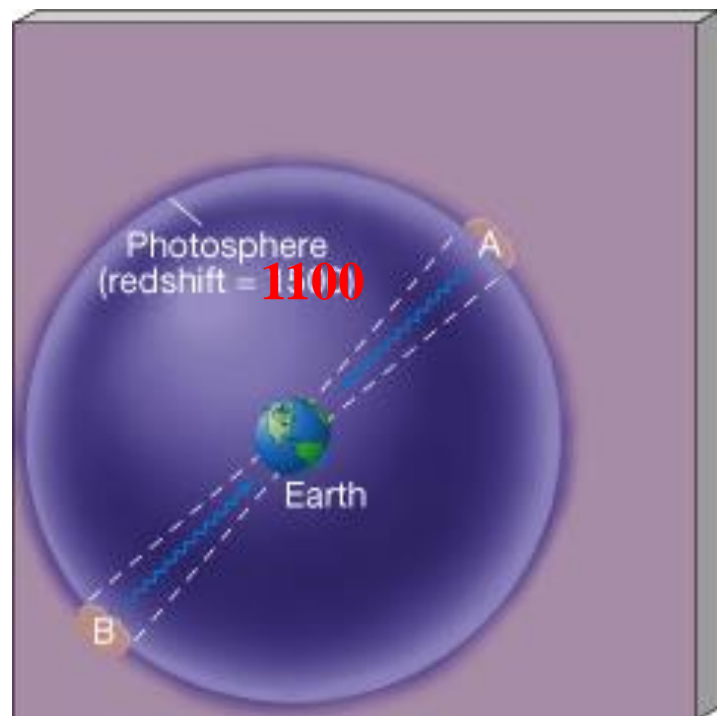
- $\Omega_0 = \Omega_{\text{mass}} + \Omega_{\Lambda} \sim 1.0$ ，即今天宇宙的总密度极其接近其临界值
- 用时空曲率描述：今天的宇宙是平直的
- （如果.....）为什么宇宙在过去的密度**必须**极端接近临界值？



视界疑难问题

CMB是高度各向同性的

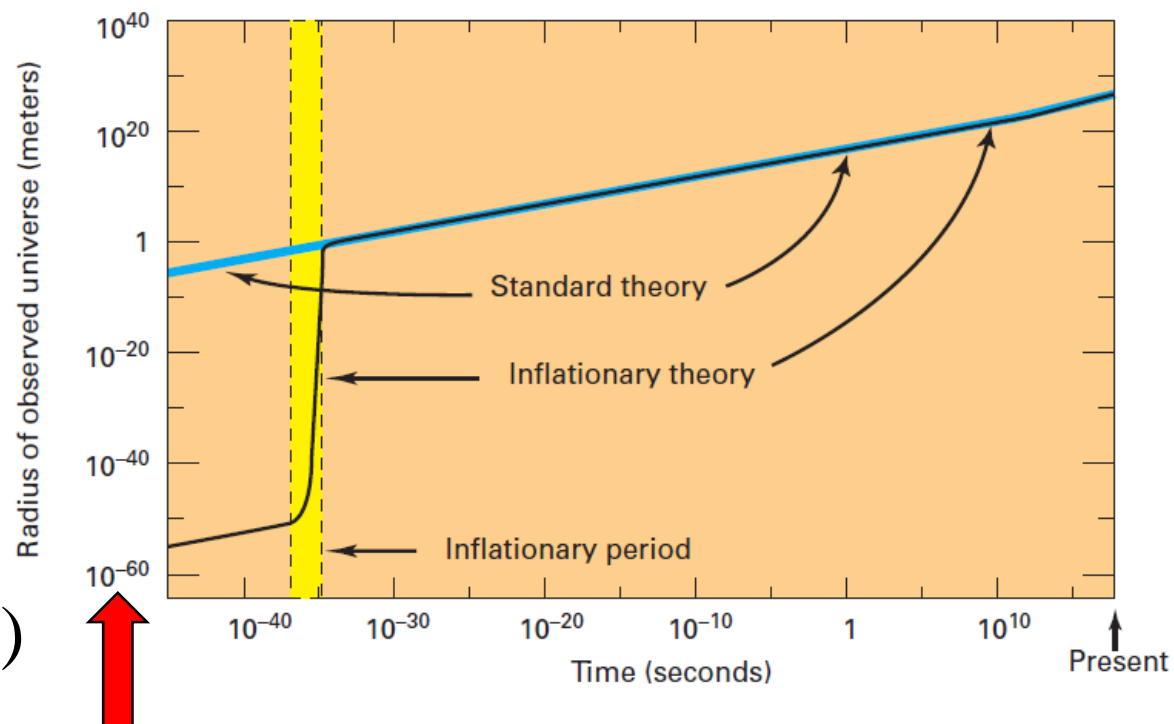
- A点和B点都在对方的宇宙视界之外
- 那为什么A和B的当前温度会相同？
- （如果……）为什么A和B的初始温度会相同？



- 1980s, 古斯等提出, 宇宙在大爆炸后的 10^{-35} s -- 10^{-33} s 经历了简短的**暴胀期**: 宇宙尺度急剧增大 10^{50} 甚至 10^{100} 倍
- 暴胀源于极早期宇宙的**随机量子涨落**



Alan Guth (1947-)



对平直问题的解释

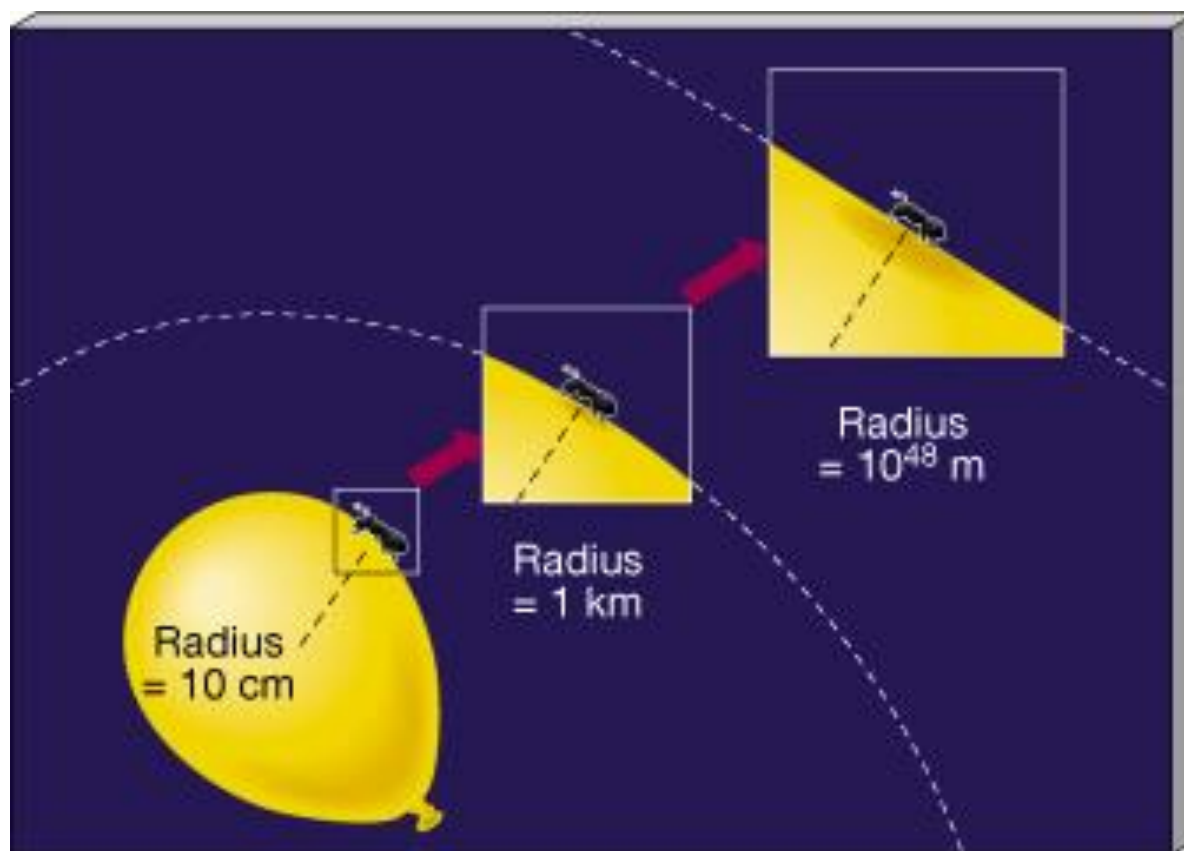
无论宇宙起初是否高度弯曲，经过暴胀后都会变得“精确的”平直

暴胀后：

$$\Omega_{\text{mass}} + \Omega_{\Lambda} \sim 1.0 + 1 / 10^{60}$$

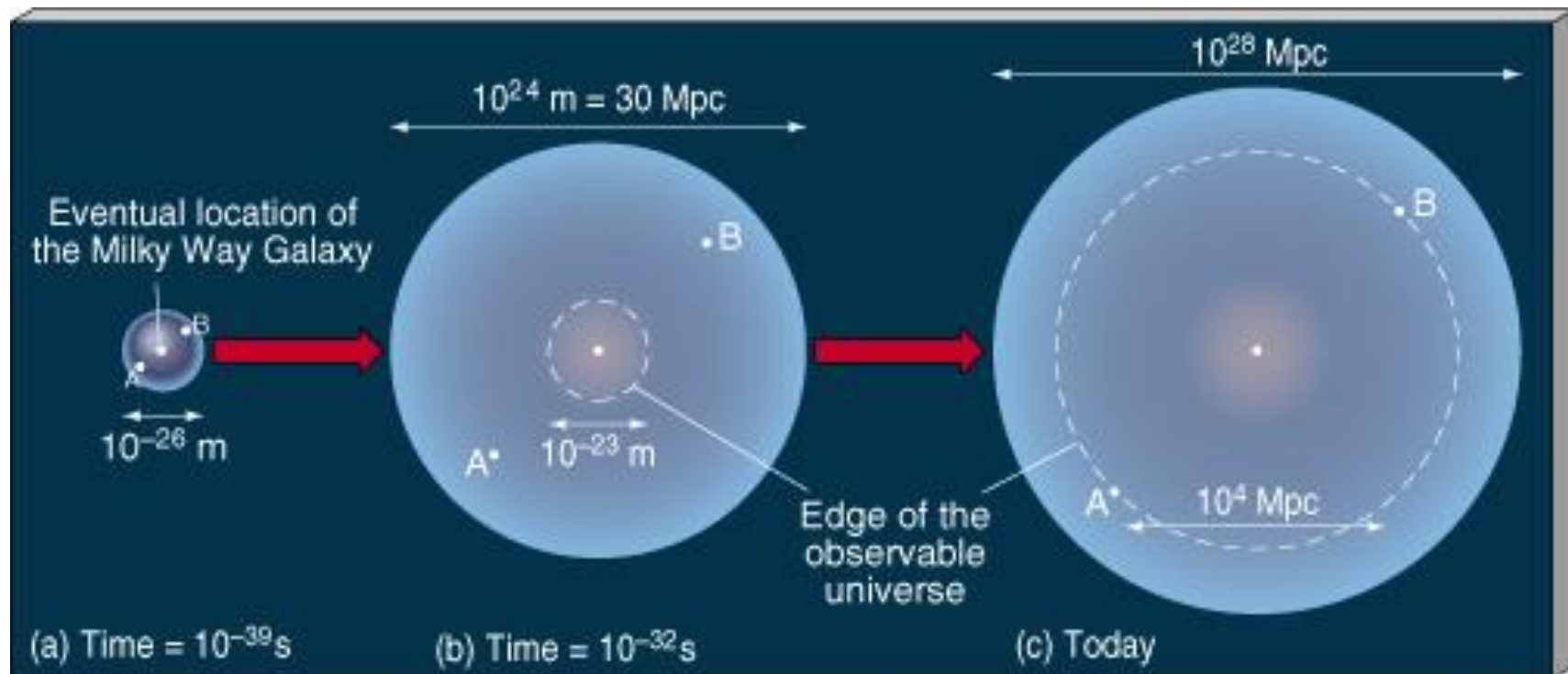
目前：

$$\Omega_{\text{mass}} + \Omega_{\Lambda} \sim 1.0$$

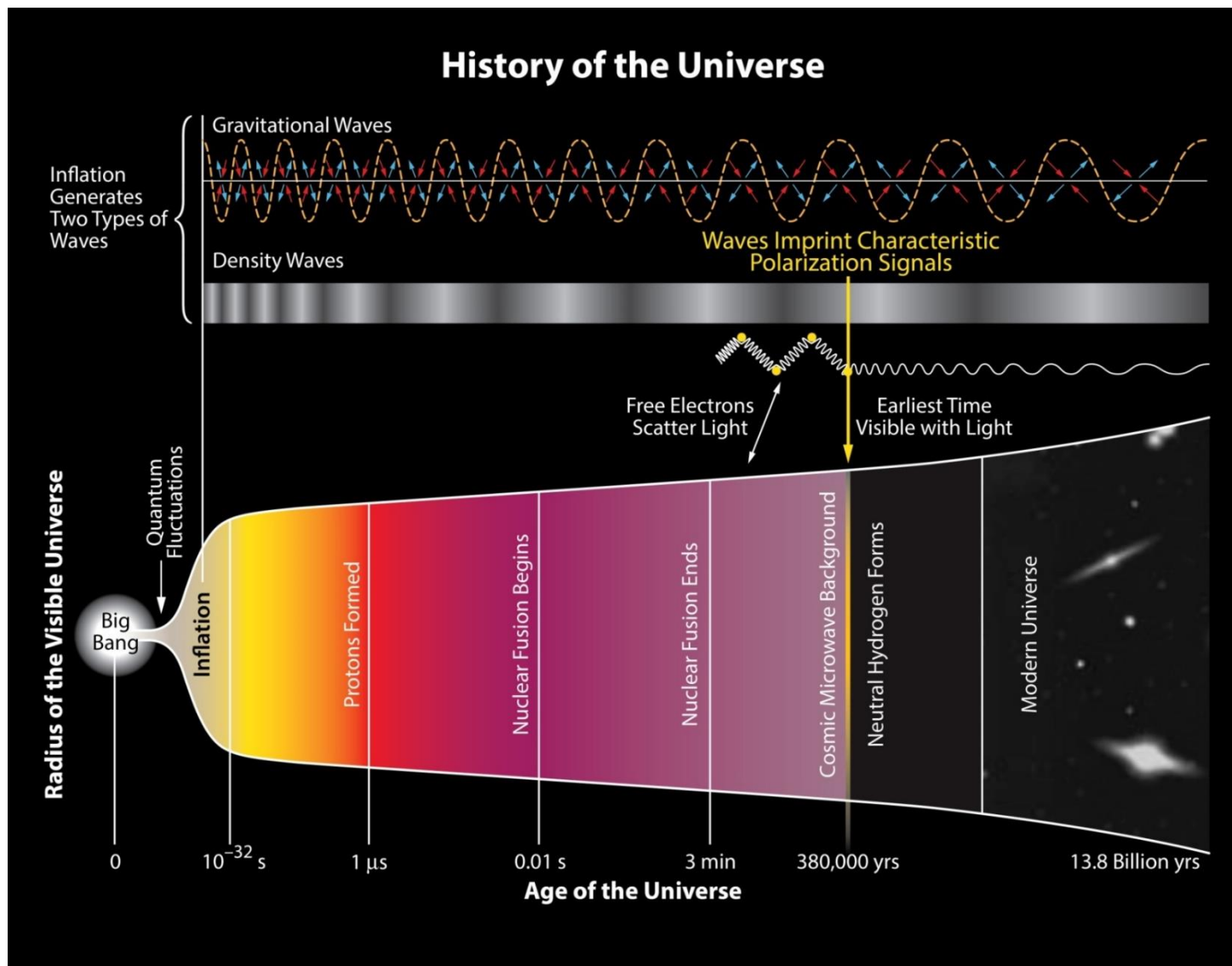


对视界问题的解释

- 暴胀前，宇宙任何两点（A和B）都在对方的**宇宙视界**之内，因而可以具有相同的温度
- 今天处于对方视界之外的宇宙的任何两点就必然具有相同的温度

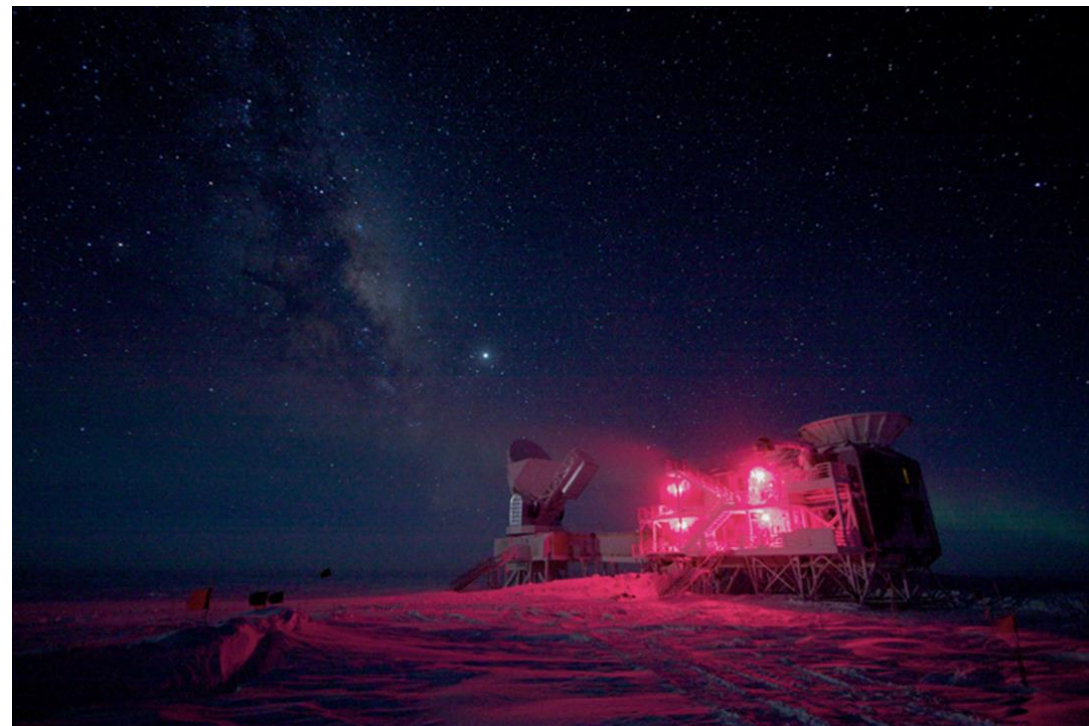
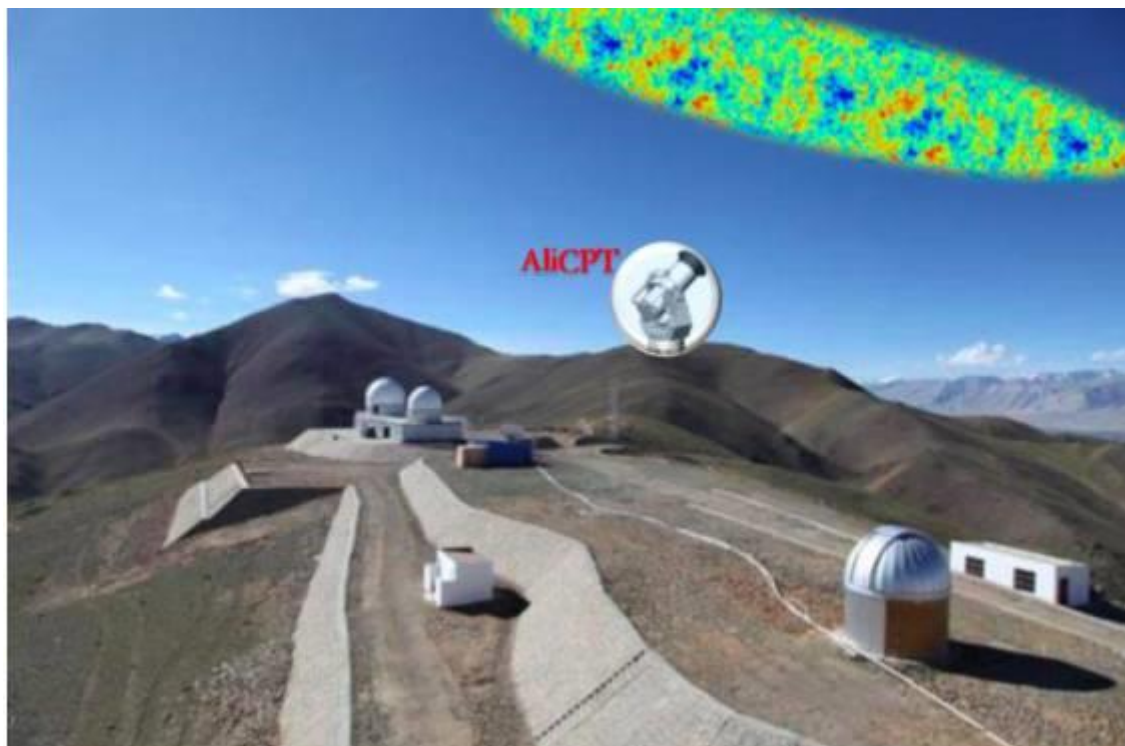


暴胀余波：原初引力波造成CMB偏振



CMB B-模偏振的起因：

- 暴胀引力波
- 银河系尘埃的散射



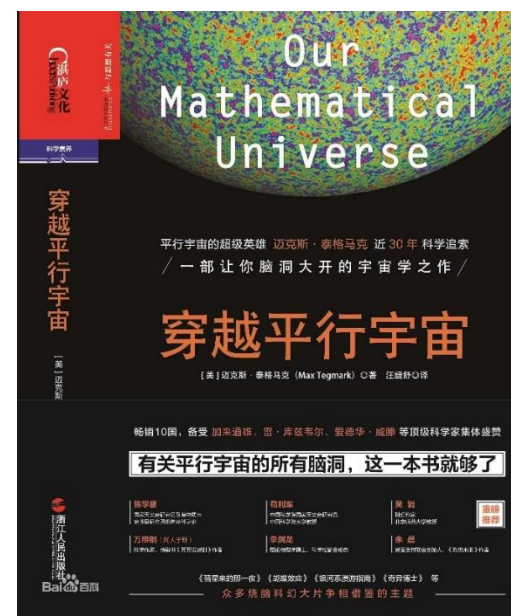
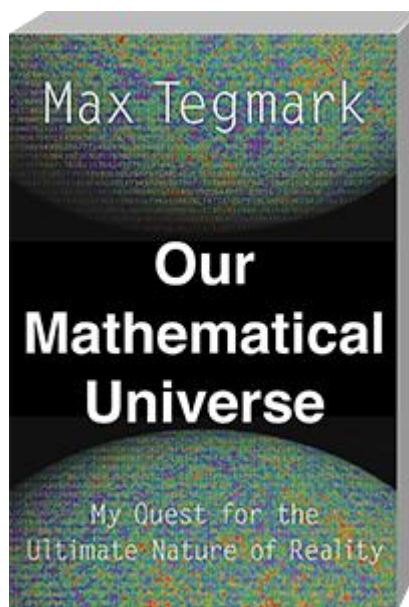
2014年，BICEP2 探测到的
CMB偏振可能不是原初引力
波造成的

*5、多重宇宙 multiverses

- 四个层次的多重宇宙
- 同一层次的无数个宇宙称为本层次的平行宇宙
- 某层次平行宇宙的集合是高一层次多重宇宙中的一个

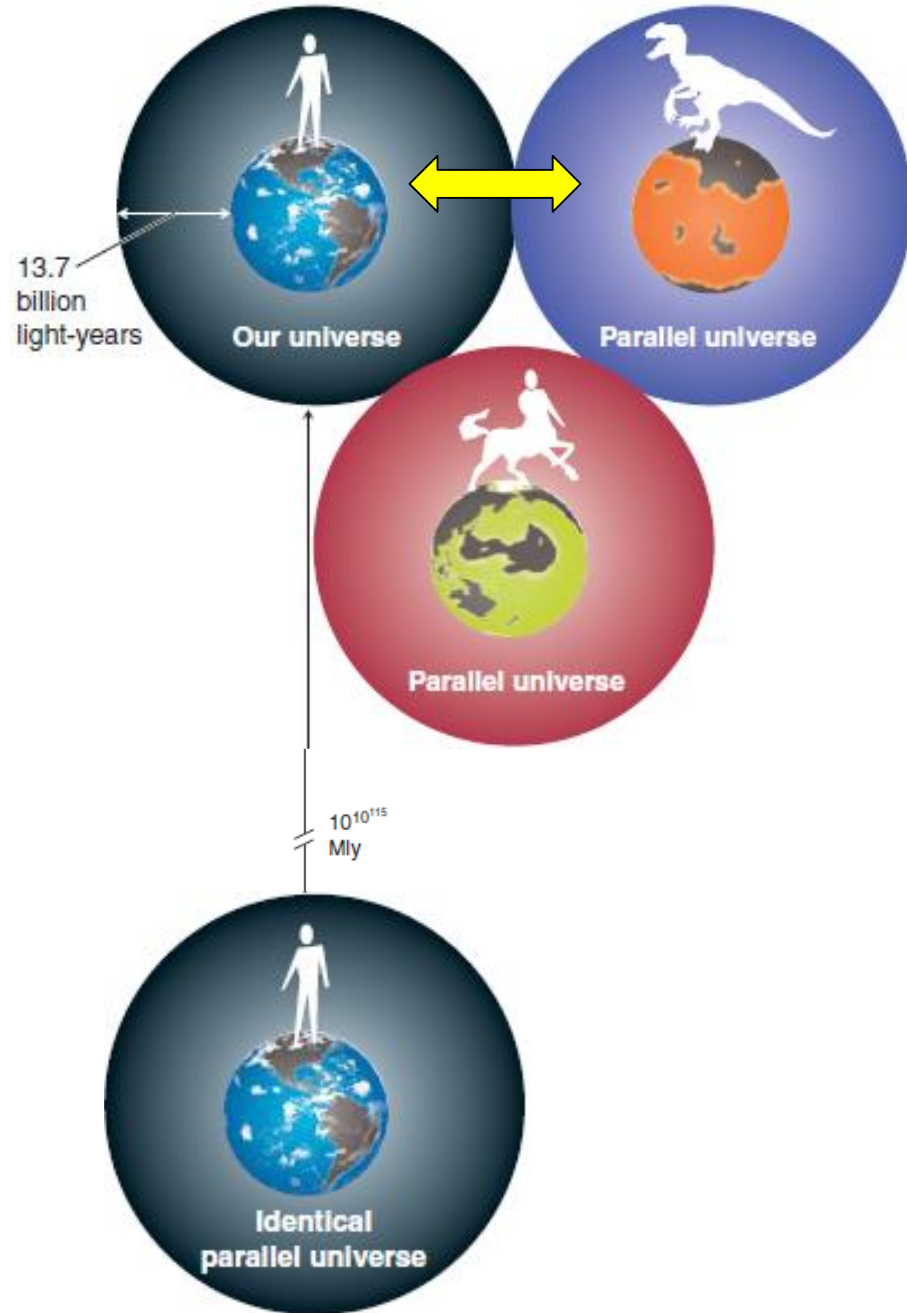


Max Tegmark (1967 -)

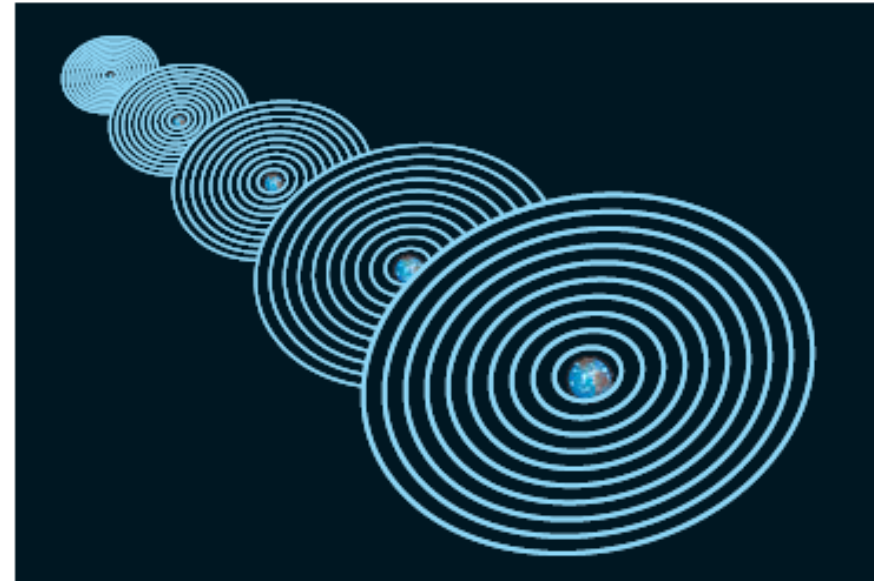


第一层平行宇宙

平直宇宙是无限的，包含无数个相似的**可观测（平行）宇宙**加速膨胀，相互分离的“可观测宇宙”变得越来越分离



(a) Type I: Regions beyond our cosmic horizon



第二层平行宇宙（泡泡宇宙）

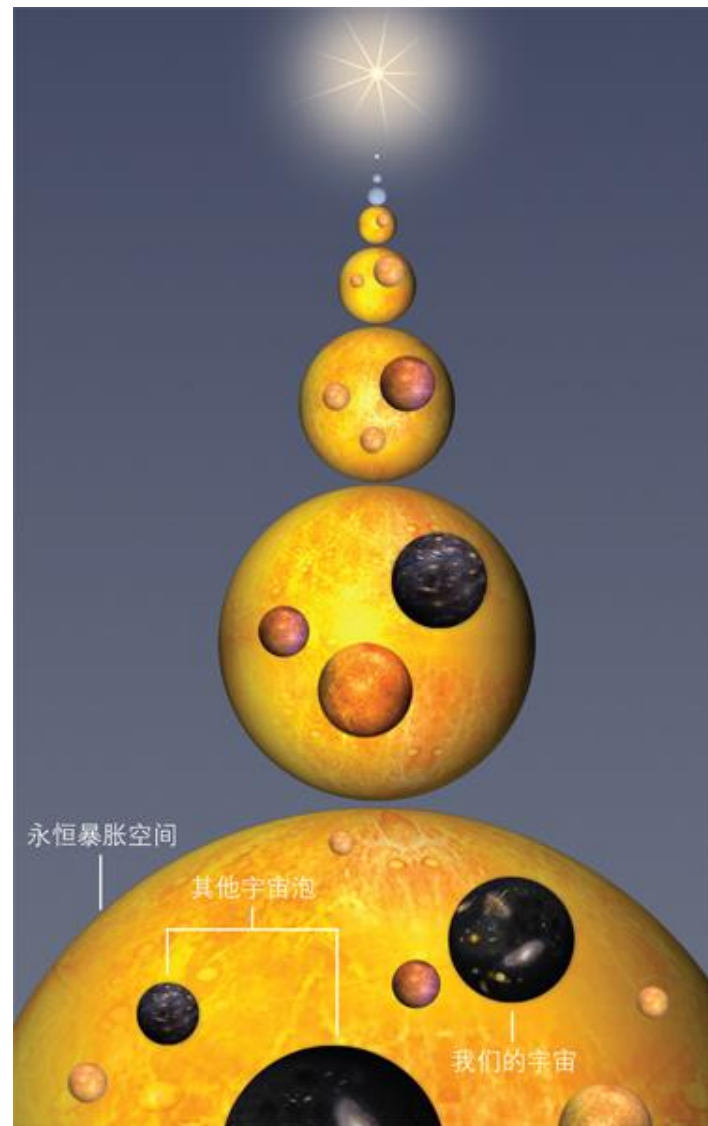
Andrei Linde (1948—): 永恒暴胀

量子涨落：泡泡

某些区域膨胀慢，其暴胀很快结束，地球位于其中

回答了我们的爆炸之前是什么

新的大爆炸泡泡持续产生



人择原理

- 如果永恒暴胀描述我们的宇宙，那么不同的泡泡宇宙可能具有不同的基本物理常数
- 人择原理：“我们的泡泡宇宙”必须具备能够允许智慧生命发展的物理特性
- 某宇宙： G 更大，恒星演化更快，没有足够的时间让智慧生命在一个行星上出现
- 某宇宙：强核力更弱，恒星由于无法热核聚变而无法发光，没有重元素就没有生命
- 某宇宙：强核力更强，所有氢被消耗，无水，无有机分子，无生命

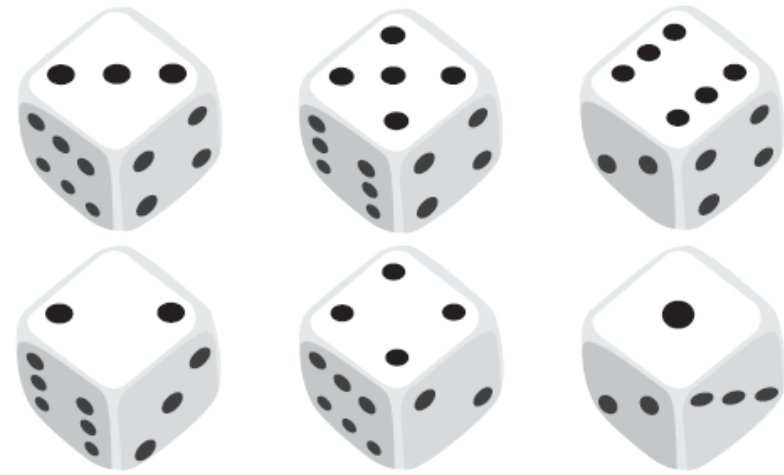
$$\Omega_{\Lambda} \sim ?$$

- 20倍大，加速膨胀更早发生，星系没有足够时间形成
.....
- 负值：宇宙更早收缩
- 我们的**泡泡宇宙**必须具备能使我们存在发生的正合适的物理特征
 - Ω_{Λ} 的值必须限制一个特别的范围

第三层平行宇宙

- 量子力学概率
- 衰变
 - 发生或未发生：概率
 - 原子分裂成两个平行宇宙，一个宇宙中的原子衰变，而另一个宇宙中的原子没有衰变。观测者相应分裂为对应的两个平行宇宙

(c) Type III: The many worlds of quantum physics

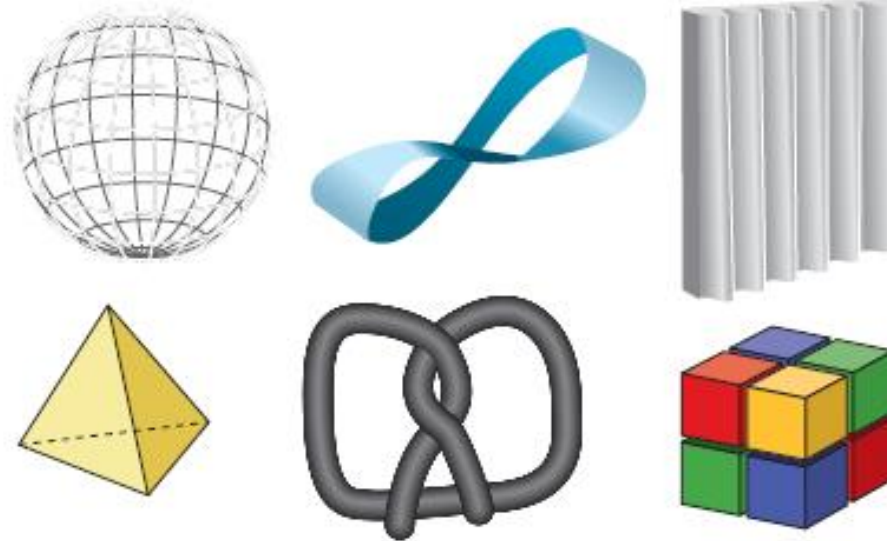


占据相同空间的新宇宙不断产生，但不能互相联系

第四层平行宇宙

每个平行宇宙的物理不同，其数学描述也不同
包括一切的情形，各种行为的宇宙都是可能的

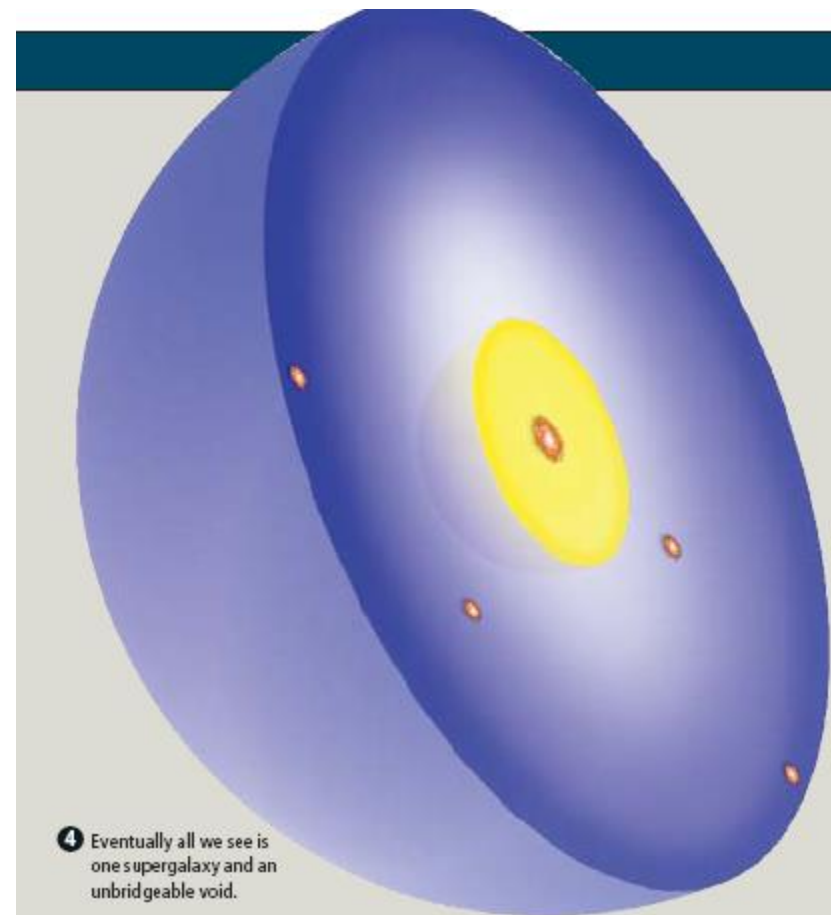
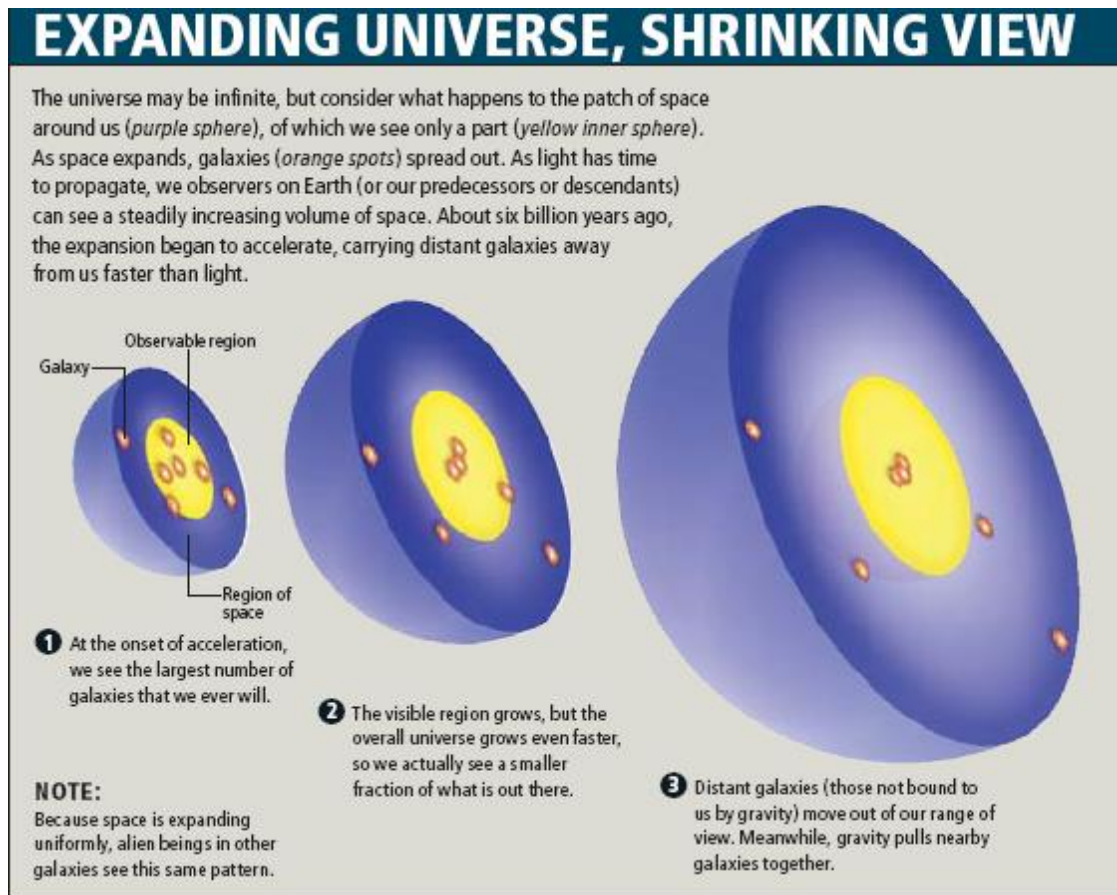
(d) Type IV: Other mathematical structures



*6、“绝对的”未来

- 大挤压 “基本” 被排除
 - “宇宙质量足够大、暗能量足够小”
 - 宇宙所有结构重回纯能量，可能开始一个新宇宙
- 大撕裂（热寂-最大熵）得到当前观测的支持
 - 暗能量效应随时间增强
 - 宇宙膨胀越来越快
 - 在有限时间内，宇宙将变得“无限”大
 - 所有结构被撕裂

加速膨胀的宇宙导致我们的宇宙视野在相对缩小



加速膨胀的宇宙会磨灭它起源的证据

星系

远星系退出视野

近邻星系并合

宇宙微波背景辐射

波长>可观测宇宙尺度

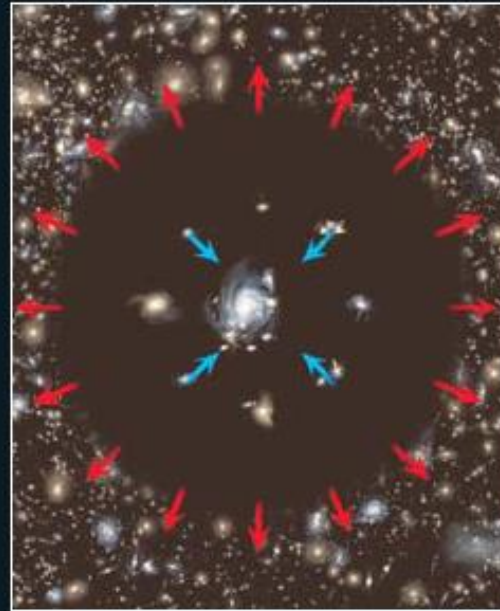
稀释得不可探测

轻元素（H, He）相对丰度

N代恒星将改变原初元素丰度

THE APOCALYPSE OF KNOWLEDGE

The accelerating cosmic expansion is beginning to undermine the three observational pillars of the big bang theory: the motion of galaxies away from one another, the cosmic microwave background radiation, and the relative quantities of light chemical elements such as hydrogen and helium.



TODAY all three pillars are prominent. We see distant galaxies recede from us (*red arrows*) as nearby ones pull tighter (*blue*); background radiation suffuses space; and cosmic gas largely retains the chemical mix produced early in the big bang.



BILLIONS OF YEARS LATER nearby galaxies have merged and distant ones have receded from view. The background radiation is undetectably dilute. Multiple generations of stars have contaminated the original chemical mix.

陷入黑暗

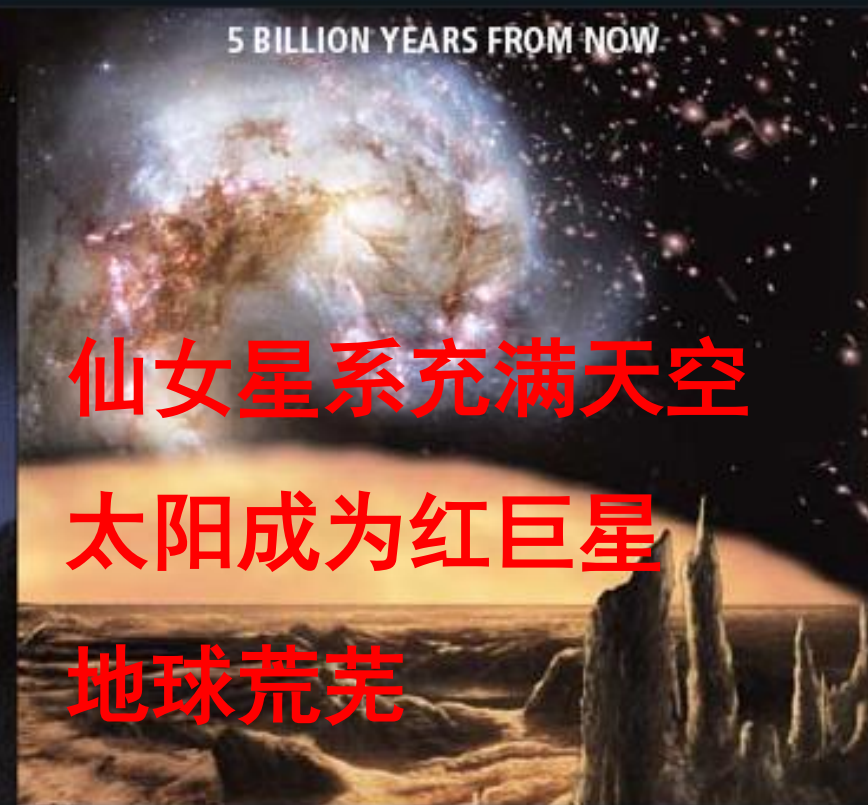
FADE TO BLACK

The night sky on Earth (assuming it survives) will change dramatically as our Milky Way galaxy merges with its neighbors and distant galaxies recede beyond view.



NOW

DIFFUSE BAND stretching across the sky is the disk of the Milky Way. A few nearby galaxies, such as Andromeda and the Magellanic Clouds, are visible to the naked eye. Telescopes reveal billions more.



5 BILLION YEARS FROM NOW

仙女星系充满天空
太阳成为红巨星
地球荒芜

ANDROMEDA has been moving toward us and now nearly fills the sky. The sun swells to red giant size and subsequently burns out, consigning Earth to a bleak existence.

永恒黑暗

1千亿年后

1百万亿年后

100 BILLION YEARS FROM NOW

100 TRILLION YEARS FROM NOW



SUCCESSOR to the Milky Way is a ball-like supergalaxy, and Earth may float forlornly through its distant outskirts. Other galaxies have disappeared from view.

LIGHTS OUT: The last stars burn out. Apart from dimly glowing black holes and any artificial lighting that civilizations have rigged up, the universe goes black. The galaxy later collapses into a black hole.