

奇古怪呈不规则形状的，这些星系离我们都在一百万光年以上。20 世纪 60 年代以来又发现了一批“类星体”，它们离我们更远，距离都在几十亿到一百亿光年以上，这大概是人类今天所能观测到最远的星体范围，也就是今天我们所说的能够观测到的宇宙尺度。

宇宙中除了可以观测的星系以外还有其他的物质，如不再辐射的星体、大大小小的黑洞以及星际气体和尘埃等。此外还有各种频率的辐射、宇宙线以及大量的中微子，所有看不见的物质天文上称为暗物质，对宇宙质量的贡献非常巨大。目前天文学家估计暗物质可能是主要的，要占宇宙质量的 90%，但目前人类对暗物质的了解还非常少。因此，要估算出宇宙的总质量或者密度等是一个十分困难的工作。上面所说的宇宙是“可观测宇宙”。可观测宇宙是有限的，一方面受观测设备条件的限制，另一方面由于光速的传播有限，宇宙年龄有限，所以能够观测的宇宙总是有限的。现代宇宙学认为整个宇宙在大尺度上（以星系团为基本尺度）是宏观均匀的，我们的观测宇宙就是整个宇宙中的一个典型区域，从观测宇宙的研究出发，我们就能够得出对整个宇宙的科学观念和正确结论。

相对论宇宙学是以广义相对论为基础，研究整体宇宙的时空特性，宇宙结构以及演化的理论。从广义相对论看来我们平时时空满足欧几里得空间性质，只是因为以引力场很弱，广义相对论的弯曲效应并不明显而已。那么什么样的引力场是强引力场？有明显的时空的弯曲特性？必须用广义相对论的引力论。那就是当物体在引力场中的引力能量与总能量可以比拟时：

$$GmM/R \approx mc^2,$$

$$GM/(c^2R) \approx 1。$$

这就是强引力场条件，其中 M 为引力源的质量， G 为引力常量， c 为光速， R 为引力源的限度。下面是常见的物体质量 $GM/(c^2R)$ 的值。

引力源	质子	人	地球	太阳	银河
$GM/(c^2R)$	10^{-40}	10^{-25}	$10^{-8.9}$	$10^{-5.4}$	10^{-6}

可见它们全都远小于 1，这就是牛顿万有引力理论为什么在大量问题中适用的原因，也就是说大部分场合不需要用广义相对论。在爱因斯坦创立广义相对论时，只有宇宙整体的上述值可以达到 1，即对于宇宙的研究必须用广义相对论。所以，1915

年广义相对论刚刚创立，爱因斯坦就把广义相对论用于宇宙的研究。1917 年发表了他的第一篇宇宙学论文“根据广义相对论对宇宙所作的考察”，这可以说是相对论宇宙学的第一篇开创性论文。

牛顿认为宇宙是一个三维的欧几里得式的无限空间，无穷的天体则分布在这一无限的空间之中，相互间以万有引力联系。然而，这样一个无限宇宙是与牛顿万有引力定律直接矛盾的，这个矛盾深刻地反映在两个著名的佯谬之中。一是光度学上的奥勃斯佯谬，又称为黑夜问题。这是 1826 年提出来的一个著名问题。若认为宇宙是无限的，恒星又是均匀地分布在这无限的时空之中，而且光在星际空间中传播时实际上减弱很少，那么就很容易得出整个星空应该永远是明亮的结论，即黑夜的星空与白天的应当一样明亮，但这个结论与日落天黑的基本事实显然不符合，这就是所谓的黑夜疑难。二是斯格列佯谬，这是 1874 年提出的所谓无穷大引力的谬误。问题是这样产生的：当我们考虑宇宙中全部物质对空间中任何以质点的引力作用时，假如认为宇宙是无限的，天体又是均匀分布于整个宇宙之中的，那么在空间每一点上都会受到无穷大的引力的撕拉，这明显与我们生活在宇宙之中仅受到有限引力作用的基本事实相悖，这就是历史上所说的斯格列佯谬。

古典宇宙学的原则困难，从以上分析可见主要来自无限宇宙这一传统观念，爱因斯坦大胆地冲破了这一传统观念的偏见，第一次提出了“有限无边”的宇宙模型。他从广义相对论的引力理论出发，认为现实空间是弯曲的黎曼空间，不是平直的欧几里得空间，宇宙则是一个三维空间中的二维球面，它的面积是有限的，而球面向任何方向行走，总遇不到界限，只能回到原地。爱因斯坦的“有限无边”的宇宙模型很自然地消除了以上两个问题，克服了古典宇宙学的原则问题。

爱因斯坦首次提出的宇宙模型是静态的，并不符合以后天文观测所发现的事实，即宇宙不断膨胀，但他是建立在广义相对论基础之上的，对宇宙时空性质研究的基本思想与现代宇宙学的发展奠定了基础。

1924 年俄罗斯科学家弗里德曼根据广义相对论，从理论上论证了宇宙要么膨胀，要么收缩，绝不会保持静止。这有点像太空中四面抛出一把石子，要么继续飞散开来，要么在相互引力作用下聚拢，不可能处于某个空间位置保持相对静止。1929 年美

国天文学家哈勃在仔细研究了一批星系的光谱后发现，绝大多数星系的光谱都要表现出红移（光谱线向波长较长的红端移动），红移量大致与星系间的距离成正比。如果红移是由多普勒效应引起的，这就意味着所有星系都在离我们而去，其退行速度正比于距我们的距离，这一关系称为哈勃定律，比例常数称为哈勃常数。哈勃定律的直接推论就是：宇宙中所有的星体都在远离彼此。宇宙处于普遍的膨胀之中，哈勃定律为弗里德曼的宇宙理论提供了直接的证据，从而动摇了静态宇宙观念，为进一步研究宇宙的起源与演化开辟了道路。所以，哈勃关于膨胀宇宙的发现是 20 世纪天文学重大成就之一！我们所说的膨胀指的是宇宙空间尺度随时间不断地增大。如果把宇宙比为二维球面，那么膨胀的宇宙就像一个不断吹大的气球。当气球不断胀大时，气球表面上的许多点间的距离越来越大，它们的密集程度也就越来越小了，如图 1 所示。

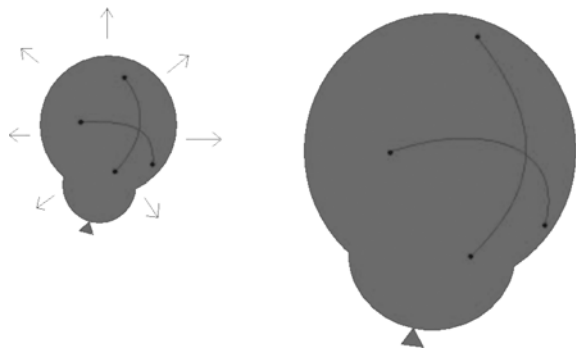


图 1

宇宙既然是一直膨胀的，那么逆着时间往上推，追根究底，早期的宇宙一定比现在的小得多、密度更大。如果追寻到奇点，初始的奇点体积是无限小、密度是无限大的。大爆炸是空间本身的“爆炸”，就是充满整个空间的爆炸，而不是有什么东西在现成的空间中爆炸。目前比较流行的是热大爆炸宇宙学。这一学说的主要的观点是：宇宙曾经有过一段从密到稀、从热到冷的演化过程，按照这种观点来研究宇宙中物质演化过程，统称为大爆炸宇宙学。

大爆炸宇宙学是在 20 世纪 40 年代由伽莫夫、阿尔芬和赫尔曼提出来的。他们认为宇宙是在 100 多亿年前由一个超高温、超密度的原始火球发生大爆炸产生的。他们从开始，经过许多科学家的努力，到目前我们已经能够推断出宇宙形成和演化的过程。

1. 大爆炸：宇宙开始于一个原始奇点，那时它

有无限高的温度和无限大的密度。目前还不能用已知的知识去解释当时的情况。只能假设宇宙产生于时空奇点的大爆炸之中，时间从此开始，空间由此不断膨胀。

2. 宇宙暴涨：大爆炸后 10^{-43} s，那时宇宙的密度是 10^{93}kg/m^3 ，温度是 10^{32} 开（地球平均密度是 $5 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ，温度是 300 开；宇宙的平均密度是 10^{-27}kg/m^3 ，温度是 3 开）。这是宇宙没有任何粒子，只有时间、空间和真空场。在 10^{-35} s，温度是 10^{28} 开时，发生一次暴涨，它的直径迅速增大 10^{50} 倍。激烈的暴涨引起数目惊人的粒子的产生。但由于能量非常高，这时强作用与电磁作用没有区别，都是统一的一种力，而产生的粒子也每有区分。这时期重子数不守恒的过程大量进行，造成重子略多于反重子。暴涨过后，宇宙继续膨胀，强作用、弱作用和电磁作用逐渐区分出来。

3. 强子时代：大爆炸后一百万分之几秒，这时温度降至 10^{13} 开，夸克才结团而构成质子和中子一类的强子，这时宇宙中除了质子和中子外还有电子、光子、中微子、 μ 子、 π 介子、超子等。

4. 轻子时代：大约在大爆炸后百分之几秒，温度降到 10^{11} 开时，粒子的热运动能量远低于重子（中子、质子等）的静能，因此，产生重子的反应停止，短寿命的重子迅速衰变而消失，正、反重子对迅速湮灭，反物质也消失了。结果，重子中剩下一些质子和中子。这时宇宙中主要成分是光子、各种中微子以及正、负电子对。

5. 4s 以后：这时温度降低到 10^9 开以下，相对应的能量不足以产生正、反电子对。因此，正、反电子对迅速湮灭。此时中微子脱耦合，使得质子和中子之间的转变的反应基本停止。根据粒子物理的计算，这时中子数约占 14%，质子数占 86%。

6. 3 分钟以后：温度降到 10^8 开以下，这时的温度不足以破坏氦核。于是中子和质子迅速结合成氦核，氦核又通过各种反应形成氢核。由于中子占 14% 左右，当中子全部和质子结合成氦核后，氦约占总质量的 28% 左右，其余是氢、锂、铍。这时各种粒子相互碰撞，由于能量不够，不能相互转化（少量湮灭）。从这时起至今，宇宙中各种元素的丰度基本没变。这时的宇宙的年龄大约是 30 分钟。今天实测的氢的丰度与这一理论相近，是大爆炸理论让人相信的证据之一。

7. 100 万年后：大爆炸半个小时后，由于大量的正反粒子的湮灭，产生了大量的光子、中微子、反中子，这时的宇宙中光子数和重子数之比约 10^9 ，所以当时的宇宙是光子的海洋。这时的温度仍然很高，光子有足够的能量击碎任何短暂形成的原子。但是随着宇宙的膨胀，光子的能量不断减少，这是多普勒效应的结果。由于宇宙的膨胀，光子达到任何一点时，都将因退行引起大的多普勒效应而使其波长和能量减少。退行速度随宇宙的膨胀而逐渐增大，这些光子就会因为波长的不断增大而能量减少。大约经过 40 万年，这些在大爆炸初期产生的光子的能量就会降到不足以击碎原子甚至激发原子的程度。于是原子和光子变成没有耦合的两种对立的部分，此后原子的气体的变化不再影响光子气体，宇宙就进入退耦代，宇宙变得完全透明。这时宇宙的温度降低到 4000 开，原子开始形成，起先只是产生较轻的元素，较重的元素是在星系、恒星形成后在恒星的内部形成的。因为，在恒星形成后，在各恒星内部才发生各处不同的温度适合重元素的形成。

从退耦代开始，宇宙中脱离耦合的光子气体叫宇宙辐射背景光子。这些大爆炸初期产生的光子随着宇宙的膨胀，能量不断减少。伽莫夫根据此提出一百几十亿年以后这种显示大爆炸遗迹的背景光子应该仍然存在，它还算出这种光子现在的波长是 1mm，相当于无线电波，和这种光子相对应的温度应该是 5 开左右。这一预言在 1965 年被美国贝尔实验室的两位工程师证实，所以大爆炸模型很快被人们公认为最好的宇宙模型，称为“标准模型”。

8. 今天的宇宙：宇宙从大爆炸中开始至今大约

有 100 多亿年，宇宙的这一年齡的估值，根据大爆炸宇宙学容易算得，利用哈勃定律将星系的距离 D 除以其退行速度 v_0 ，即 $T=D/v_0=1/H_0$ ，这个宇宙年齡等于哈勃常数的倒数，即：

$$T_0=1/H_0=1/1.5 \times 10^4 \text{ 百万光年}/(\text{m/s}) \approx 1.8 \times 10^{10} \text{ 年,}$$

大约 100 亿至 200 亿年之间，宇宙的年齡估值跟放射性年代法测定银河系中最古老星系的年齡相符。也就是说已知的宇宙间最古老星系物质的年齡，都不违背大爆炸宇宙学的要求，这也是支持大爆炸宇宙学的观测事实之一。

宇宙中的气体物质靠引力的作用以及扰动，气体物质局部坍塌，逐渐发展出星云、星系、星团、恒星、行星……，根据大爆炸理论，宇宙目前正处在不断膨胀之中，而且可以肯定还会继续膨胀下去。至于宇宙以后是怎么样，是一直膨胀下去，还是膨胀到一定程度就收缩？根据现代宇宙学的观点，宇宙未来是膨胀还是收缩完全取决于宇宙的物质密度。当宇宙的物质密度太小，小于临界密度 $\rho_c=3H_0^2/8\pi G$ (H_0 为哈勃常数， G 为引力常数，即 $\rho_c=4.5 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$) 时，宇宙将继续膨胀下去；当宇宙物质密度大于临界密度 ρ_c 时，宇宙膨胀后收缩。根据目前的测量宇宙将一直膨胀下去。但这个结论还不是最后的结果，因为宇宙物质平均的测定常常因新的天体的观测或者粒子物理的新发现而改变。所以宇宙的未来命运还是有各种可能的，没有绝对的定论。

(江苏连云港灌云县伊山中学 222200)

本文获“我心目中的现代物理”征文优秀奖

科苑快讯

土星环大得超乎想象

土星环系统远比原来想象的大，以前认为火星环最大只有土星半径的 3~8 倍，新发现却比这个值大得多，应该至少是其半径的 128~207 倍。而厚度则达半径的 40 倍。

美国弗吉尼亚大学维毕斯策 (Anne Verbiscer) 和同事利用斯必泽空间望远镜 (Spitzer Space Telescope) 的多波段成像光度计 (Multiband Imaging Photometer) 通过阳光导致的热发射捕捉到了相关图像。其内缘起点距土星 595 万千米，再向土星周围的太空延伸约 1195 万千米。新光环据信源自环绕土星运行、直径只有 214 千米的土卫九 (Phoebe) 卫星。

这道光环有助于解开土星第三大卫星土卫八 (Lapetus) 的“阴阳脸”之谜。科学家推测土卫八的黑色半球，是因遭到土星这道外围光环的尘砾撞击，在其表面形成厚达几米的黑色物质。用所谓“热隔离理论” (Thermal Segregation) 来解释，土卫八黑色半球能吸收更多阳光，热度足以让当地水冰蒸发，蒸汽随后会环绕运行并凝结在最近的冷点，也就是土卫八明亮的另一面。其结果是，黑暗的半球因为失去表面的冰层而越来越黑，另一面则随着冰的累积而越来越明亮。

(高凌云编译自 2009 年 10 月 30 日《欧洲核子研究中心快报》)