

第十三章 核天体物理学基础

对于核物理和粒子物理工作者而言，早期宇宙是一个难得的天然加速器，它所提供的粒子能量和密度是人工方法永远无法企及的。尽管不可能对早期宇宙中的现象做任何直接测量，但是通过对最终产物的分析和对各种反应的实验室研究，我们可以推知当时的许多情况。实际上，现在流行的大爆炸宇宙学正是基于广义相对论、粒子物理的标准模型、粒子与核反应数据、以及一些合理的假设。任何理论都必须首先能导出宇宙中早期形成的轻同位素的丰度。进一步是确定在恒星中重元素的形成原因。

从地球的角度看，宇宙的演化可以分为四个阶段：

原初核合成和原子的形成(约 10^6 年)；

星系凝聚(约20亿年)；

恒星核合成；

太阳系的形成(约50亿年)

§ 13.1 大爆炸及其实验依据

二十世纪最重大的发现之一，就是宇宙的膨胀。这一现象是哈伯在分析遥远星系的光谱时发现的。由遥远星系发出的光谱线，相对于地球上同样光源发出的谱线，向长波方向移动，这就是所谓的“红移”现象。与多普勒效应相类似，“红移”表明了光的发射体以一定的速度相对于地球远去。哈伯分析了星系后退的速度，并得到了哈伯定律：

$$v = Hd \quad (13.1-1)$$

H 是与距离无关的常量，被称为哈伯常量，即与距离无关。实验定的哈伯常量误差很大，分布在50-100 km/s/Mpc之间。分析表明，哈伯常量的平均值是67 km·s⁻¹/Mpc。Mpc是天文上使用的距离单位，一个Mpc等于3.26 x 10⁶光年。

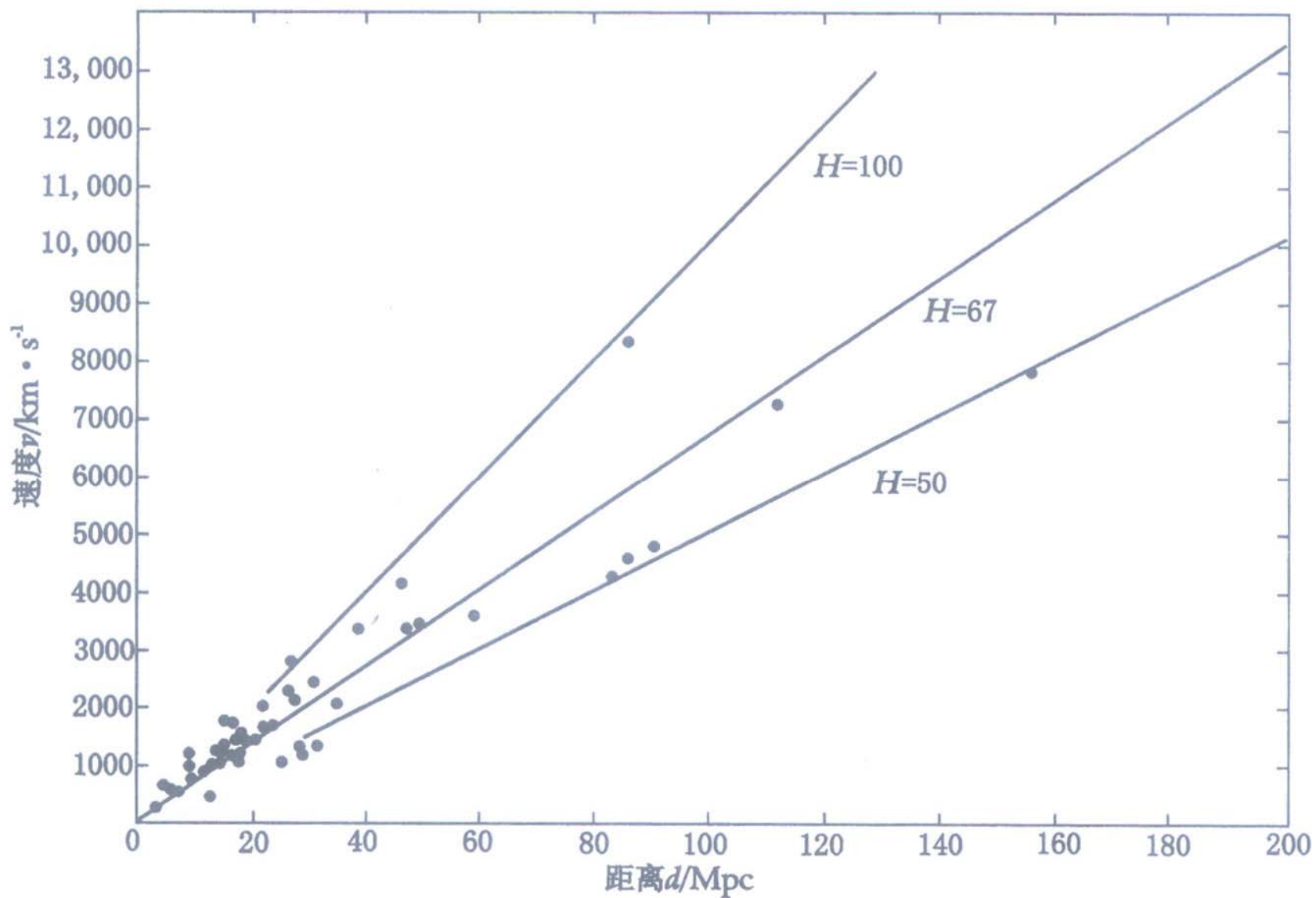


图 13-1 当今的星系距离与后退速度之间的关系

依据现在观测的结果，膨胀是宇宙的基本性质。但由于万有引力的作用，膨胀的特性是随时间变化的，即哈伯常量实际上是时间的函数。我们定义 $R(t)$ 为宇宙中任意星系间的典型距离，由哈伯定律：

$$H = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \quad (13.1-2)$$

利用广义相对论，可以导出 H 的时间依赖关系：

$$H^2 = \frac{(dR/dt)^2}{R^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (13.1-3)$$

其中 G 是牛顿引力常量， ρ 是宇宙的平均质量能量密度，它是随时间变化的。 k 是由基本时空几何决定的参量： $k=0$ 对应“平缓”的空间； $k=+1$ 对应“封闭”的空间； $k=-1$ 对应鞍状的弯曲空间。 Λ 是天体常量，在这里的讨论中可以略去。

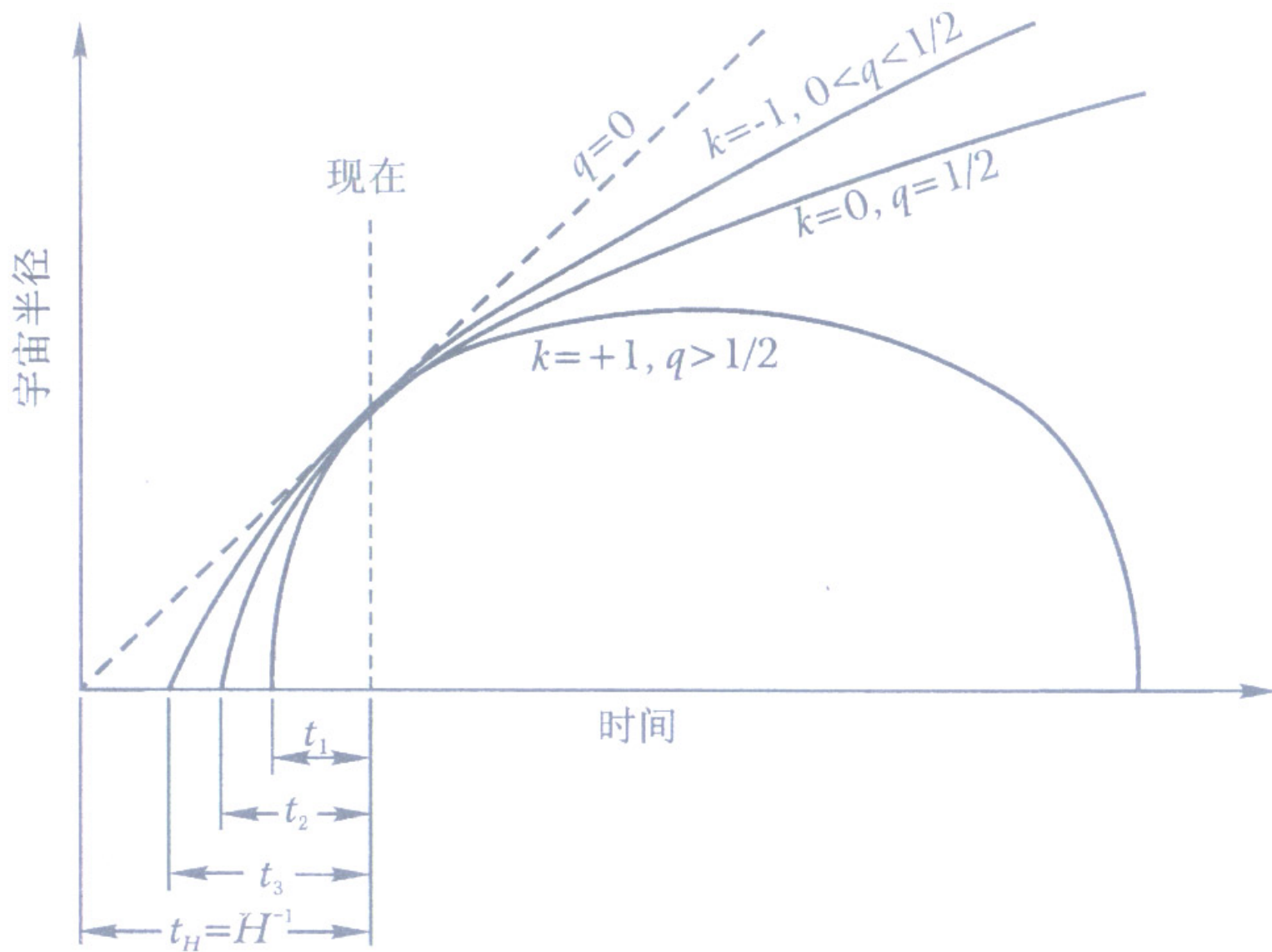


图 13-2 不同参量条件下宇宙的半径随时间的变化^①

如果宇宙从 $t=0$ 开始就以匀速膨胀，即 dR/dt 为常量，则13.1-1式可改写为 $d=vt$ 。按目前的哈伯常量，可以推出宇宙的年龄。这当然只是一个上限。由于过去宇宙膨胀速度比现在大（哈伯常量 H 比现在的大），因此宇宙的实际年龄应当比15Ga小一些。

上面的估算中，假定了宇宙有一个年龄的起点 $t=0$ ，此时宇宙的半径 $R=0$ 。这就是说，宇宙膨胀的观点必然导致一个时间的奇异点，在这个点上宇宙的所有物质（能量）被压缩在极小的范围内，导致无穷大的能量密度。这就是所谓大爆炸的产生点。为了分析方便，我们假定13.1-3式中的 $k=0$ 。在紧随大爆炸之后，可以想象只有能量极高的粒子以光速运动， $E=pc=hc/\lambda$ 成立。能量密度

$$\rho_R = \frac{E}{V} = E_q \cdot n_q \propto \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{R^3}$$

取。代入13.1-3式，得

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{8\pi GC}{3}} \frac{1}{R^2} \quad (13.1-4)$$

积分得:

$$t = \sqrt{\frac{3}{32\pi G \rho_R}} \quad (13.1-5)$$

如果用黑体辐射的能量密度 $u(T)$ 取代 ρ_R , 得到温度关系:

$$\rho_R = \sigma T^4 \quad (13.1-6)$$

其中 σ 是斯特藩常量。这样, 我们就可得到在辐射为主的阶段中时间 t (s) 和温度 T (K) 之间的重要关系:

$$T = \frac{1.5 \times 10^{10}}{t^{1/2}} \quad (13.1 \quad 7)$$

$$E = kT = 8.6 \times 10^{-5} \text{ eV/K} \\ \approx 10^{-4} \text{ eV/K}$$

温度是描写早期宇宙的重要参量。温度足够高时，光子和其它粒子处于平衡状态，正反粒子的产生和湮没也是平衡的。比如对于电子，过程是平衡的。为了使两个光子变成正负电子的过程能够发生，要求光子的能量至少为**0.511 MeV**，对应的温度是 **$6 \times 10^9 \text{ K}$** 。显然当温度低于这个值时，反应的平衡将被打破，正负电子湮没成光子，而逆过程却不能发生，宇宙中正负电子减少，而光子增加。

我们于是得到大爆炸宇宙学的框架如下：当今的宇宙是在无穷高温度和能量密度的时空奇异点上产生的，初始的成分是最基本的粒子和反粒子以及光辐射。随着宇宙的膨胀和冷却，各类正反粒子逐渐退出与光辐射的平衡。我们现今观察到的，是粒子湮没后的剩余部分以及不再能产生粒子的较低能量的光辐射。

除了宇宙的膨胀现象外，对大爆炸理论的另一个重要支持，是宇宙的微波背景辐射。这种背景辐射就是大爆炸的剩余辐射，它是在1964年由贝尔实验室的彭齐阿斯(Penzias)和威尔孙(Wilson)发现的。当时他们在调整一个用于联系人造卫星的天线。当波长调到73.5 mm时，发现一种无论如何也去不掉的背景“噪声”。他们最后认定这是一种在各个方向上均匀存在的真实信号，对应于3.1K温度的黑体辐射。随后天文学家们进行了全面的能谱测量，发现这种背景辐射的确满足黑体辐射的能量分布。现在得到的背景温度的最好结果是 2.7 ± 0.1 K。(年龄?)

尽管大爆炸理论已得到很好的证明，但仍有许多问题并不清楚。比如，是什么因素导致均匀分布的粒子凝聚成星系？在时空奇异点另一侧的宇宙是否与现存的宇宙对称？大爆炸时是否有我们现在未知的大量奇异粒子存在？等等。

(暗物质、暗能量?)

The Big Bang

15 thousand million years

1 thousand million years

300 thousand years

3 minutes

1 second

10^{-10} seconds

10^{-04} seconds

10^{-43} seconds

10^{32} degrees

10^{27} degrees

10^{15} degrees

10^{10} degrees

10^9 degrees

6000 degrees

18 degrees

3 degrees K

radiation

particles

W^+
 W^-
 Z } heavy particles carrying the weak force

quark

anti-quark

electron

\bar{e} positron (anti-electron)

p proton

n neutron

π meson

H hydrogen

D deuterium

He helium

Li lithium



MSI/AAAS