

粒子物理和宇宙学

俞允强 陈 时

(北京大学物理系) (中国科学院理论物理研究所)

粒子物理学的研究对象是基本粒子,其尺度范围小于 10^{-13}cm ,质量小于 10^{-23}g ,是所谓的微观物理学.宇宙学的最小研究对象是星系,其尺度范围大于 10^{19}cm ,质量大于 10^{39}g ,是所谓的宇观物理学.热大爆炸宇宙模型使两者发生了密切的联系.近十几年来,这种联系日益深化,一方面使宇宙学臻于成熟,另一方面也推动着粒子物理学的发展.

以可靠的物理规律为基础的宇宙学研究,是在有了广义相对论之后才开始的.宇宙的膨胀则是在 1929 年 Hubble 发现了河外星系的退行规律后才逐渐被认识的.四十年代末, Gamow 及其合作者以宇宙膨胀的观念为基础,首先成功地讨论了宇宙中约占四分之一的氢元素的起源,从而表明,宇宙早期的温度至少曾高达 10^{11}K .

宇宙介质因膨胀而逐渐降温,介质的组分则取决于温度.当温度降至 $T = 10^4\text{K}$ (粒子热运动能量 $E = 1\text{eV}$,宇宙年龄 $t = 10^{12}\text{s}$),介质中的氢与氦等原子核与电子结成中性分子,光子气体与它们失去了耦合,作为宇宙背景存在下去,并继续因膨胀而降温.1950年,Alpher 和 Herman 估计今天背景光子气的温度是 $T_{\gamma 0} = 5\text{K}$.这低温光子场的峰值波长是 1mm ,属微波波段.1965年, Penzias 和 Wilson 准备用一台战争遗留的雷达天线作卫星观测时,偶然地接收到了这微波信号.此后,大量观测结果支持了他们的发现,并定出背景光子的温度为 2.8K .这样,大爆炸宇宙理论才确立了它在宇宙学中的主导地位.

当能量达到 Planck 能量¹⁾ $(M_p = \frac{1}{\sqrt{G}} = 1.22 \times 10^{19}\text{GeV}$, 其中 G 是引力常数) 的量级

时,引力的量子效应变得重要,作为经典理论的广义相对论不再适用.据此,大爆炸模型的适用范围应追溯到 $T = 10^{30}\text{K}$ ($E = 10^{17}\text{GeV}$, $t = 10^{-40}\text{s}$).直至七十年代初,由于没有一个描述强相互作用的基本理论,对原子核合成阶段以前的追溯实际上无法进行.

六十年代末至七十年代初,粒子物理学中关于规范理论的研究取得了几项重大进展,使得不但是电磁作用,而且其他的弱作用、强作用和引力作用也都可以用规范理论来描述.六十年代末建立起来的统一描述弱作用和电磁作用的 Weinberg-Salam 模型在解释弱作用低能现象方面的成功和七十年代初提出的描述强作用的量子色动力学在解释强作用高能实验现象方面的成功,鼓舞着人们去探索能统一描述弱电作用和强作用的规范理论,即所谓的大统一理论.按照这种理论,强作用和弱电作用在高能下由一种统一的相互作用描述,它的破缺尺度约为 10^{15}GeV .

1983年,发现了弱电统一理论所预言的弱矢量玻色子 W^{\pm} 和 Z^0 ,用规范理论把基本相互作用统一起来的努力得到了最直接的实验支持.但是要直接验证破缺尺度是 10^{15}GeV 的大统一理论,是地球上可能建立的任何加速器所无法企及的.根据大爆炸模型,甚早期宇宙却正好为此提供了一个绝无仅有的“实验室”,那时发生过的某些过程会在今天的宇宙中留下遗迹.因此,利用现有猜测性的粒子理论来研究甚早期宇宙,既有助于了解宇宙的演化,又能借此检验这些理论的正确性.这样,宇宙学不

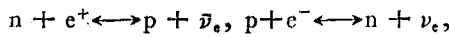
1) 我们将一直采用 $\hbar = c = k = 1$ 的自然单位制.在该单位制中,温度,能量和质量具有相同的量纲和单位.

只是被动地等待粒子物理学的输入,它也能动地为粒子物理学提供制约和鉴别.本文将介绍宇宙学中的几个主要问题,并阐述粒子物理学和宇宙学之间的这种相辅相成的关系.

一、轻元素的合成和中微子种数

当 $T \approx 10^{11} \text{K}$ ($E = 10 \text{MeV}$, $t \approx 0.01 \text{s}$) 时,宇宙介质的主要组分是光子 (γ),正负电子对 (e^+ , e^-) 和各种中微子对 (ν_i , $\bar{\nu}_i$), 质子 (p) 和中子 (n) 虽数量较少,却是演化的主角.

起初这些组分都保持着热平衡, p 和 n 靠弱作用相互转化,



从而维持化学平衡,即数密度之比服从玻耳兹曼分布 $n_n/n_p = \exp(-\Delta m/T)$, 这里 Δm 是 n 与 p 的质量差.随着宇宙膨胀,温度下降,要维持化学平衡,必须有一定量的中子能及时转化为质子.因此, p 和 n 的转化率必须大于温度的下降率.

温度下降率由 Hubble 参量 H 表征,

$$H \equiv \frac{\dot{R}}{R} = -\frac{\dot{T}}{T},$$

其中 R 是宇宙尺度因子.由动力学方程给出

$$H = \left(\frac{4\pi G}{3} \rho\right)^{1/2} = \left(\frac{4\pi^3 G}{45} g_*\right)^{1/2} T^2,$$

其中 ρ 是宇宙介质密度, g_* 是介质中相对论性粒子的等效自由度.这些粒子包括 γ, e^+, e^- 和各种轻中微子, $g_* = \frac{11}{2} + \frac{7}{4} N_\nu$, 这里 N_ν 是轻中微子种数.由于粒子物理学目前并不能回答自然界里究竟有多少种中微子,因此 N_ν 并不确定,已发现的有三种.

质子和中子的转化率 Γ 可由粒子理论算出,即

$$\Gamma = 0.2 G_F^2 T^5,$$

这里 G_F 是弱作用费米耦合常数.

在 $\Gamma = H$ 后,中子开始停止转化为质子,这时的宇宙温度 $T_* \sim 1 \text{MeV}$.这样,中子的质

子的数密度之比冻结为 $\exp(-\Delta m/T_*)$. 这数值在很大程度上决定了以后的氦丰度.

元素合成的第一步是形成氘 (D), $n + p \rightarrow D + \gamma$. 当温度高于某个临界值 T_D , 这个反应是可逆的,因此氘不会大量产生. $T = T_D$ 后,多数光子不具有足够的能量来引起氘的分裂,这时才形成大量氘.除已知因素外,临界温度 T_D 主要取决于介质中核子数 ($n_N \equiv n_p + n_n$) 和光子数 (n_γ) 之比 $\eta = n_N/n_\gamma$. 现在知道 T_D 约为 0.1MeV .

氘大量形成后很快与 p 或 n 继续反应形成 ^3H 或 ^3He , 随即再形成 ^4He . 这就是自然界中大量氦的主要来源.氦形成后的后继反应应产生原子量 A 为 5 ($^4\text{He} + p, n$) 或 8 ($^4\text{He} + ^4\text{He}$) 的元素.但核结构的因素决定, $A = 5$ 或 8 构不成稳定的原子核.此后,实际上只产生少量的 ^7Li . 因此,元素合成阶段的产物主要是 ^4He , 伴随有少量的 ^3D 和 ^3He , 以及更少的 ^7Li . 温度降至 $E = 0.01 \text{MeV}$ 时,核反应完全停止.

关于轻元素宇宙学合成的详尽计算是从七十年代中开始的.取定 N_ν 值,以 η 为参量,可算出各种轻核的丰度.图 1 示出最新的结果,其中 Y 是 ^4He 的质量丰度, Y_A 是原子量为 A 的核与氢的粒子数比.

丰度的观测结果能较可靠地给出 Y_1 的下限: $Y_1 \geq (1-2) \times 10^{-3}$ 及 $Y_2 + Y_3$ 的上限: $Y_2 + Y_3 \leq (6-10) \times 10^{-3}$. 这些数据与理论相对照,预言了 η 的范围:

$$4 \times 10^{-10} \leq \eta \leq 7 \times 10^{-10}.$$

下面将看到,这是一个极重要的宇宙学信息.

氦丰度 Y 的观测值是 0.24 ± 0.02 , 对 ^7Li 有 $0.8 \times 10^{-10} < Y_7 < 8.6 \times 10^{-10}$. 在上述 η 范围内,理论结果与这些数据能很好地相合,表明了理论的可信性.相应地定出中微子的种数 N_ν 需满足

$$2 \leq N_\nu \leq 4.$$

这是宇宙学向粒子物理输出的一个重要结果,而当时的粒子物理实验只对 N_ν 给出一个极松的上限: $N_\nu < 10^3$.

七十年代对恒星演化的研究曾为 N_ν 提供

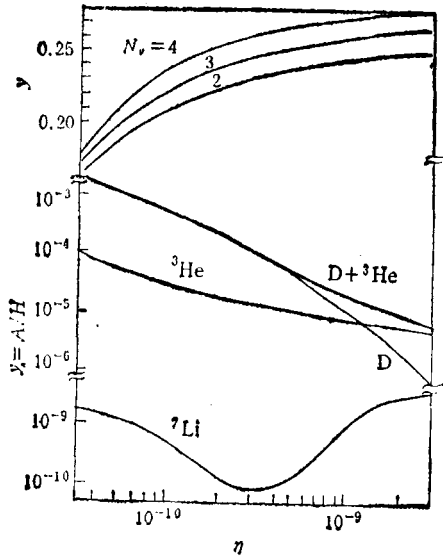


图1 轻核丰度的理论值

过较好的上限。晚期恒星会通过产生中微子对而耗散内部的能量。 N_n 越大，这种能耗越厉害。人们从红巨星的研究给出 $N_n < 760$ ，从碳燃烧星的研究给出 $N_n < 23$ 。中子星冷却的研究也能给出 N_n 的上限。借助中子星 RCW 103 的年龄和温度的数据，算出 $N_n < 50$ 。

与所有其他结果相比，宇宙学轻核合成理论预言的 $N_n \leq 4$ 给出了最严的上限。当然人们这时会关心，宇宙学的预言在多大程度上是可靠的。

有趣的是在 1985 年间，粒子物理实验为 N_n 提供的上限有了极大的改进。最先报道的是，由弱作用规范粒子 Z^0 衰变实验定出 $N_n < 20$ 。而后相继报道，由正负电子对撞实验定出 $N_n < 14$ ，由正反质子对撞实验定出 $N_n < 5.4 \pm 1.0$ 。粒子物理实验的结果迅速地向着宇宙学的预言靠拢，使人们相信，宇宙学不仅需要粒子物理的帮助，它也完全能对粒子物理未解决的问题提供重要和可靠的信息。

二、重子不对称性和大统一的破缺

重子是质子、中子等参与强作用的费米子的统称。它们的反粒子叫反重子。引入一个量

子数叫重子数 B ，重子有 $B = 1$ ，反重子有 $B = -1$ 。实验表明，一切粒子反应保持总重子数守恒。

如果重子数守恒是严格的自然规律，那么今天宇宙中有大量的重子却没有相应的反重子，就成了一个难以解释的现象。这就是宇宙学中著名的重子不对称疑难。

很自然的想法是，宇宙的总重子数原来是零，即重子和反重子是等量的，今天重子远多于反重子是宇宙演化的后果。1967 年 Sakharov 指出，这种演化的实现需具备三个条件：

- (1) 存在改变 B 数的相互作用；
- (2) C 和 CP 反演¹⁾也都守恒；
- (3) 系统对热平衡有偏离。

条件 (1) 表明重子数不严格守恒，它的必要性是很显然的。条件 (2) 是保证系统中重子数增加的过程不被相应的反粒子过程抵消。条件 (3) 是保证重子数增加的过程不被相应的逆过程抵消。七年后，大统一理论的出现使这一想法有了实现的可能。

按大统一理论，强作用与弱作用是一种统一的规范相互作用在低能条件下的不同表现。这样，重子和轻子的截然界限也消失了，重子可以转化为轻子。只因传递这个作用的介子 X 很重，低能条件下转化的几率非常小。无论如何，大统一理论使条件 (1) 具备了。若要求这种作用也具备条件 (2)，那么重子不对称疑难就可望得以解决。

设想宇宙开创时重子的粒子数密度 n_B 与反重子的粒子数密度 $n_{\bar{B}}$ 相等。当宇宙温度 T 高于 X 的质量 m_X 时， X 粒子与其它粒子处于热平衡。这阶段虽有改变 B 数的过程，但逆过程会抵消它的效果。 n_B 与 $n_{\bar{B}}$ 保持相等。在 $T = m_X$ 后，热碰撞产生 X 粒子的过程失效。 X 粒子开始因衰变而减少。如果 X 粒子的减少跟不上温度下降的步伐，热平衡就会被破坏，即条件 (3) 也具备了。按 Sakharov 的理论，这样重子对称的宇宙就会演变成重子不对称的宇

1) C 反演是正反粒子共轭变换， CP 反演是正反粒子共轭和空间反射的联合变换。

宙.

这种不对称当初是极微小的,即 n_B 与 $n_{\bar{B}}$ 之差比 n_B 本身小很多. 待温度下降至质子质量以下, 重子与反重子大量成对湮灭. 留下的只是由微小不对称造成的少量过剩重子. 于是, 宇宙呈现只有重子, 没有反重子的不对称景象.

定量讨论涉及一个参量 ϵ , 它是一对 X 和 \bar{X} (X 的反粒子) 衰变产生的净重子数. 这参量反映 C 和 CP 对称的破坏程度, 因此是与宇宙学无关的纯粒子物理参量. 在 X 衰变前, 热平衡决定 $n_X = n_{\bar{X}} = n_\gamma$, 这里 n_γ 是作为比较基准的光子数密度. 全部 X 和 \bar{X} 衰变后, 产生的净重子数密度为 $n_B = \epsilon n_X = \epsilon n_\gamma$. 从而可知, ϵ 是该时刻重子与光子的数密度比 η . 温度 $T = 0.1 \text{ MeV}$ 时的 η 值, 已由轻核合成理论定出为 $(4-7) \times 10^{-10}$, 由此推出

$$\epsilon = \eta(T = m_X) = (4-7) \times \frac{1.7g}{g_*} \times 10^{-10},$$

其中 g 和 g_* 分别是 $T = m_X$ 和 0.1 MeV 时相对论粒子的等效自由度. 这就是重子不对称疑难对大统一理论提出的定量要求.

这样, 大统一的概念为重子不对称疑难的解决提供了自然而优美的方案. 为定量解决这个疑难, 宇宙学又向大统一理论提出了具体要求. 迄今还没有一个能自然地满足这定量要求的大统一模型.

三、甚早期宇宙学疑难和对称破缺相变

前已提到, 由于引力的量子效应, 标准大爆炸模型的适用范围只可追溯到 $T = 10^{30} \text{ K}$ ($E = 10^{17} \text{ GeV}$, $t = 10^{-40} \text{ s}$). 在叙述这个标准模型的初始条件时, 人们却发现一系列疑难, 其中最著名的有视界疑难, 平坦性疑难等.

所谓视界, 粗略讲, 是指宇宙中能有因果联系的区域. 其线度为 $2t$, 即在 $t = 10^{-40} \text{ s}$ 时为 10^{-29} cm . 按标准模型推算, 今天整个观测宇宙在 $t = 10^{-40} \text{ s}$ 时的线度为 10^{-2} cm , 即当时视界线度的 10^{27} 倍. 对于由 10^{81} 个相互没有因果联系的区域构成的初始宇宙, 是什么使它成为

均匀的呢? 这就是视界疑难.

宇宙密度参数 $\Omega \equiv \rho/\rho_c$ ($\rho_c \equiv \frac{3H^2}{8\pi G}$ 是临界密度) 有明确的几何意义. 若 $\Omega = 1$, 宇宙是平坦的, 否则宇宙是弯曲的. 如果 $\Omega \neq 1$, 按标准模型估算, $|\Omega - 1| = \frac{1}{R^2 H^2}$ 几乎随时间成正比地增大. 从 $t = 10^{-40} \text{ s}$ 至今, 它约增大 10^{55} 倍. 观测的综合分析表明, 现在的 $|\Omega - 1| \leq O(1)$. 这样, 在 $t = 10^{-40} \text{ s}$ 时应有 $|\Omega - 1| \leq O(10^{-55})$. 为什么 Ω 的初始值会在如此高的精度上接近于 1, 即为什么宇宙会如此微小地偏离平坦性, 这就是平坦性疑难.

1981 年, Guth 在研究大统一理论的基础上, 提出了一种能自然地解决这些疑难的方案, 引起了广泛的关注. 这就是甚早期宇宙的暴胀理论.

大统一理论是以规范对称性自发破缺的概念为基础的. 导致这种破缺的是一种有自作用的标量场 ϕ , 它的自由能密度 $V(\phi)$ 随温度的变化如图 2 所示. $V(\phi)$ 的极小代表真空态. 当温度远高于临界温度 T_c 时, $\phi = 0$ 是真空态. 因它与系统的哈密顿量具有相同的对称性, 所以称系统这时处于对称相. 当 $T = T_c$ 时, 在 $\phi = 0$ 和另一 $\phi \neq 0$ 处出现了真空态的简并. 到 $T < T_c$ 时, $\phi = 0$ 成了亚稳的假真空, $\phi \neq 0$ 处才是真实真空. 因为这个真空失去了系统原来具有的某些对称性, 所以称系统这时处于对称破缺相. 按大统一理论, $T_c = 10^{23} \text{ K}$ ($E = 10^{15} \text{ GeV}$).

在宇宙的甚早期演化中, $T > T_c$ 阶段宇宙处于对称相. 当温度降至小于 T_c 时, 由于要穿透势垒, 相变不会立即发生, 宇宙暂时地处于对称相的过冷状态. 由于物质密度 $\rho_r \propto T^4$, T 的大幅度下降会使 $\rho_r \ll V(0)$, 系统近似地变成假真空态. 在一个远小于 T_c 的温度下, 势垒变得既矮且窄. 从假真空过渡到真实真空的相变才得以发生. 相变时, 两种真空的巨大能差将作为潜热放出, 使宇宙得到重新加热. 相变后的系统是在对称破缺真空基础上温度接近

四、非重子暗物质和星系形成

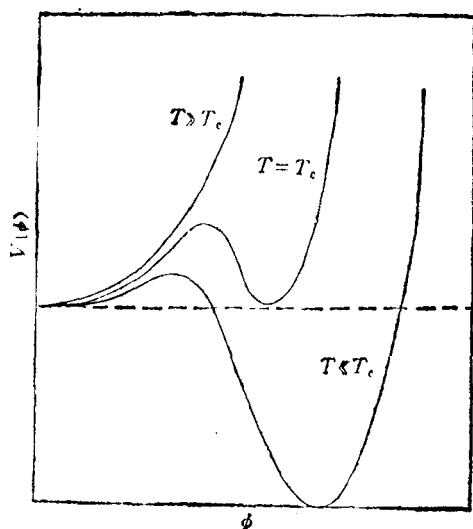


图2 $V(\phi)$ 随温度的变化

于 T_c 的高温气体。

相变过程中对演化动力学有重要影响的是宇宙能密度 $[\rho \equiv \rho_r + V(T)]$ 近似地等于 $V(0)$ 的短阶段。由演化动力学方程可知, 当 ρ 为常数, 宇宙尺度因子 R 将按指数律膨胀。这就是所谓暴胀。我们知道, 在标准模型中, 早期有 $\rho \propto R^{-4}$, 从而解出 R 仅按 $t^{1/2}$ 律膨胀。如果这暴胀阶段会持续得足够长 (例如 10^{-32} s), 从而使尺度因子增加 10^{28} 倍以上, 那么前面指出的视界疑难和平坦性疑难就都不存在了。

按对称破缺的概念, 甚早期宇宙的暴胀是自然发生的, 而暴胀又能使许多宇宙学疑难得以自然解决。这样, 粒子理论又一次为宇宙学的发展展示了美好的前景。并不意外的是, 为要使各个疑难都得以定量解决, 人们又遇到了困难。最近几年人们找到了若干种克服困难的方案, 但都显出有人为的痕迹。总之, 虽然人们普遍认为甚早期宇宙的暴胀是一个重要的概念, 但它至今还没有发展成为成熟的理论。

暴胀理论有一重要的预言: 今天的宇宙物质密度应在很高的精度下与临界密度相等, 即宇宙实际上是平坦的。这预言与宇宙暗物质问题密切相关。这个问题我们将在下面讨论。

早在三十年代人们就发现, 为要解释某些星系团中某些星系的非常大的速度, 必须假设这些星系团中除可见物质外, 还有大量暗物质存在。经过近二十年来的认真研究, 由一系列观测事实和对天体现象的理论分析推断, 宇宙中普遍存在大量暗物质, 可见物质 Ω_{vis} 与暗物质 Ω_{DM} 之比 $\Omega_{vis}/\Omega_{DM} \leq 0.07$, 即 $\Omega \equiv \Omega_{vis} + \Omega_{DM} \geq 0.2$ 。上节末还提到, 如果接受宇宙早期暴胀的观念, 那么今天应有 $\Omega = 1$ 。

按常规的天体物理观念, 人们容易设想, 这些暗物质是一些非常暗的星, 如行星、小恒星、冷却了的白矮星、中子星和黑洞以及弥漫气体和宇宙尘埃等, 它们都是由重子构成的。然而, 大多数的暗星的存在是已有的恒星生成和演化理论所无法解释的, 更何况, 按轻元素的宇宙学合成理论, 可以由氦核的观测下限推断出重子数与光子数之比 $\eta < 7 \times 10^{-10}$, 这意味着今天重子对于宇宙平均密度的贡献 $\Omega_b < 0.1$ 。

这些结果暗示了宇宙中存在着大量非重子的暗物质, 它们可能是什么? 这又只能从粒子物理中去寻求答案。

能在宇宙演化了一百多亿年后仍大量存在的物质必须是由稳定的或寿命极长的粒子构成的。从已发现的粒子表中能找到的候选者只有中微子, 如果它有 $10-30$ eV 的质量, 就可以对 Ω 有主要贡献。过去人们都认为它的质量为零, 但是并没有严格理论或精确实验为依据。近些年来, 人们致力于中微子质量的测量, 还没有得到确切的结果。

除中微子外, 其它候选者只能从粒子理论所预言而尚未被发现的粒子表中去寻找了。讨论较多的有轴子和光微子。轴子是理论上为守恒强作用 CP 守恒而引入的一种标量粒子, 光微子是光子的超对称对应物。它们的共同特点是相互作用极其微弱。如果这些至今只存在于理论家想象中而尚未在实验室中露面的粒子竟然是宇宙中的主角, 那当然是一件很戏剧性的

事。如果它们确实大量存在于宇宙中，就会比其它未发现的粒子有更多的机会来展示自己的存在。近年来人们已设计了很多种实验和观测手段来揭示它们是否存在，但还没有得到结果。而星系形成理论却从另一个侧面暗示了它们的存在。

按照大爆炸模型，早期的宇宙是由高温、高密度的无结构弥漫介质构成的。而今天宇宙最显著的特点是具有有层次的结构。它是在重子物质结成中性分子后，介质在自引力作用下碎裂造成的。但是，如果设想今天的宇宙物质主要由重子构成，人们发现很难使宇宙有足够的时间来形成从星系到超星系团的各个层次的结构。而宇宙以非重子暗物质为主的观念正好为星系形成理论开拓了新局面。由于非重子物质较早就与其它物质脱离了耦合，它能在重子物质开始碎裂之前率先碎裂，在率先结团的非重子物质的引力影响下，重子物质会加速自己的碎裂进程。这样，上述时间问题可望得到解决。

从对星系形成的影响看，非重子暗物质可粗分为两大类。一类物质退耦时粒子的热速度仍接近光速，称为热暗物质。质量为几十电子伏的中微子若存在，应属此类。另一类物质退耦时粒子热运动已很慢，称冷暗物质，轴子和光微子若存在，应属此类。宇宙中为主的暗物质是热的还是冷的，对星系形成进程的影响是不一样的。

热暗物质模型中，非重子物质将先以超星系团的质量尺度碎裂，形成薄饼或纤维状结构，然后再逐级碎裂，形成星系团和星系。这在定

(上接第 157 页)

散斑技术的实际应用领域越来越广，特别是对位移场和形变场的测量。在无损伤检测中，除了应用激光散斑、全息、莫尔效应及其混合技术外，其它一些新的技术也显示了它们的生命力，例如电子散斑干涉仪 (ESPI)^[7]，剪切干涉仪^[8]，白光散斑^[9]等。当然，为了满足实际应用的需要，所有这些技术都必须配备高速度、高精度的自动分析系统。

性与观测到可能存在巨大纤维状结构和空洞的迹象相容。然而定量处理却显示出严重困难。特别是为兼顾星系间的关联，超星系团仍必须形成较晚。这样，理论就与类星体观测所表明的星系形成时间发生矛盾。到八十年代初，人们认识到，以单纯的热暗物质模型难于统一解释大尺度和小尺度的结构现象。于是有人开始把注意力转向了冷暗物质模型。

按冷暗物质模型，首先碎裂的是星系质量尺度，而后再形成更大尺度的结构。近年来，人们又引进了星系有偏袒地形成的概念，认为宇宙中重子物质的分布基本上是均匀的，星系不是重子物质的好的代表，它们在物质密度偏高的区域内形成过多，而在物质密度偏低的区域内形成过少或根本不形成。用分析方法和数值模拟研究了星系有偏袒地形成的冷暗物质为主的宇宙中各种结构现象，结果是令人鼓舞的。它成功地使各种尺度很不相同的现象得到了较好的统一的解释，从而使人们感到它可能是星系形成理论的一个雏形。有趣的是，如果这个理论最终得到肯定，那么宇宙物质中为主的组分应是一种至今尚未发现的粒子。无疑地，这对粒子物理学将意味着新的有益的启示。

通过以上的介绍可以看到，宇宙学的研究离不开粒子物理学，而粒子物理学又在其对宇宙学的应用中获得制约和启示，随着两门学科的不断深入，这种相辅相成的关系正在日益深化。相信在很多有待解决的重大问题的解决过程中，两门学科之间的这种关系还将发挥更大的作用。

- [1] G. H. Kaufmann et al., *J. Phys. E*, **13**(1980), 579.
- [2] W. H. Lee, *Appl. Opt.*, **23**(1984), 4280.
- [3] F. Ansari et al., *Appl. Opt.*, **26**(1987), 1688.
- [4] B. Ineichen et al., *Appl. Opt.*, **19**(1980), 2191.
- [5] G. H. Kaufmann, *Opt. Laser Technol.*, **12**(1980), 207.
- [6] H. Bruhn et al., *Eletro-Optics/Laser Inter. '82 UK. Conf. Proc.*, Butterworth Scientific, (1982), 285.
- [7] R. Jones, *Eletro-Optics/Laser Inter. '82 UK. Conf. Proc.*, Butterworth Scientific, (1982), 272.
- [8] Y. Y. Hung, *Opt. Eng.*, **21**(1982), 391.
- [9] Gou Wanfu et al., *Proc. SPIE*, **599**(1986), 124.