

现代宇宙学进展

方励之

(中国科学院北京天文台)

宇宙学作为物理学的一项内容,到现在整整三百年了. 1987年是牛顿发表《自然哲学的数学原理》的三百年,在这第一本讨论物理动力学的书中,已经有宇宙学的内容了. 在《原理》中有这样一段话:

“如果把一个桶吊在一根长绳上,将桶旋转多次而使绳拧紧,然后盛之以水,并使桶与水一道静止不动,接着在另一力的突然作用下,水桶朝反方向旋转,因而当长绳松开时,水桶将继续这种运动. 水面最初与桶旋转前一样,是平的,但此后桶逐渐把运动传给水,使水旋转起来,并逐渐离开中心而向桶的边缘凹起……. 起初,当水在桶中的相对运动最大时,这种相对运动并没有使水产生离开轴心的任何倾向,……而保持着水平,所以它的真正的圆运动尚未开始. 但是,后来水的相对运动减小,水就因此趋向桶的边缘……,这说明水的真正的圆运动在不断增大,一直到水在桶内处在相对静时达到其最大数量…….”

这是熟知的牛顿水桶实验的原始表述. 在这里,“真正的圆运动”就是相对于绝对静止,或宇宙的最基本的参考系的运动. 因此,水桶实验可以说是第一个企图用局部实验来断定整个宇宙的动力学性质的实验.

三百年来,物理学和宇宙学都极大地丰富了. 首先是实验条件和观测条件的改进. 我们只举两个例子. 图1表示天体位置测量精度的发展史. 古希腊的伊巴谷的观测精度约为3分,牛顿之前不久的第谷的观测精度为半分. 即将发射的天体测量卫星,也叫伊巴谷,它的精度可达千分之二秒. 图2表示光学观测的灵敏度的发展. 用肉眼最多只能看到可见光范围上的六等星. 四十年前启用的200英寸望远镜,能观测23等星,比肉眼提高七个量级(每五个星等

相差两个量级),即将发射的空间望远镜,在可见光波段又提高了两个量级.

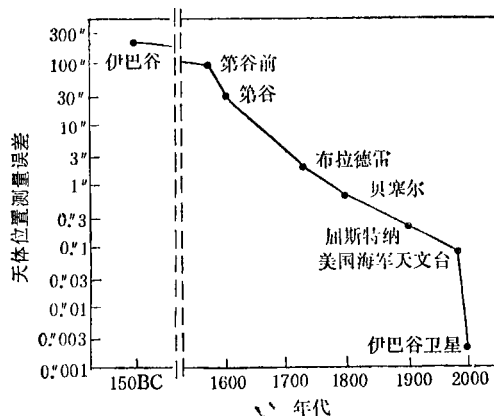


图1 天体位置测量精度的提高

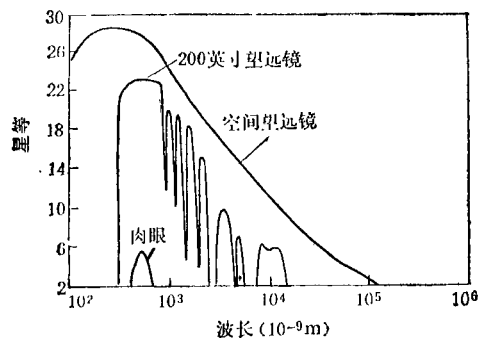


图2 光学观测灵敏度的提高
(纵轴为相应波长上的可观测的极限星等)

今天,关于整个宇宙的演化,我们已经有了一个标准的模型,即热大爆炸模型^[1]. 这一模型的建立首先得益于爱因斯坦于七十年前创立的代替牛顿引力理论的广义相对论. 另外,对建立热大爆炸宇宙模型有关键作用的几个最重要的观测发现是: 星系的红移; 恒星及球状星团的年龄; ^4He 的天体丰度; 微波背景辐射.

图3是热大爆炸宇宙学的简单的表述,其中纵坐标表示宇宙的年龄,横坐标表示宇宙空间的相对尺度. 由于宇宙膨胀,宇宙的空间尺

度越来越大。图3中还写出宇宙各时期的一些主要的物理过程。宇宙演化有几个关键时期：最早的是创生期，相应的宇宙年龄为 10^{-44} s，这是时空本身的形成阶段，由量子宇宙学描写。其次是宇宙极早期，年龄约为 10^{-36} s，主要的过程发生大统一(GUT)相变，以致宇宙膨胀极快，称为暴胀。再次之是宇宙早期，宇宙年龄约为100s，这是各种轻元素形成的时期。最后，当宇宙年龄达到十万年之后，宇宙从均匀状态演化到有结构的状态。各种尺度的星体及星体体系，就是在这一时期中逐渐形成的。现在的宇宙年龄大约是二百亿年。

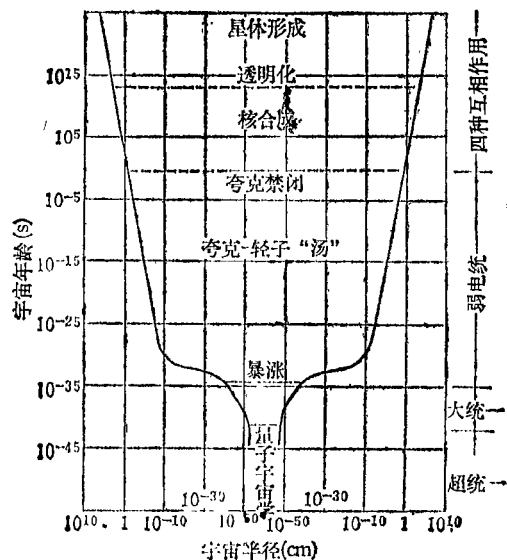


图3 宇宙演化简图

宇宙学的发展，是与物理学的发展相平行的。可以说，物理学每前进一步，我们对宇宙早期的研究也推进一步。因为，宇宙演化的整个过程是从高温到低温，从高能到低能的。越早期的宇宙学需要越高能量的物理学。另一方面，物理学的发展是从低能到高能，牛顿力学是能量最低、相互作用最弱的现象的物理学。随着年代的推移，物理学进入越来越高的能量层次。所以，物理学每次向高能范围推进一步，宇宙学就向更早期发展一步。

图4表示上述的相关发展，其中横轴上列举了各种物理理论，它们从左到右的排列是从

低能到高能。纵轴上列举各种宇宙现象，从上到下的顺序是从宇宙早期到近期。图中圆点表示物理理论与宇宙现象的相关，即该种现象需用哪些理论来解释，或者该种理论与哪些宇宙现象联系。

从图4看到，圆点的分布在一个从左下到右上的斜带上，这表示低能物理对应于宇宙近期，高能物理对应于宇宙早期。左下一端的宇宙学比较成熟，越向右上越不成熟。图4中的实心圆表示该课题上已有获得诺贝尔物理学奖的工作，它们分别是：射电综合孔径方法与射电源计数；脉冲星的发现；微波背景辐射；核天体物理学与元素起源；白矮星质量上限与引力坍缩。得奖的年代大体也是先左下后右上。根据这种历史趋势似乎可以外推，下一批诺贝尔奖的候选者应是图4中标有⊗的课题。这些课题正是目前宇宙学中最活跃的领域，最有可能得到突破性成果的地方。因此，图4可以称为宇宙学研究的战略图。

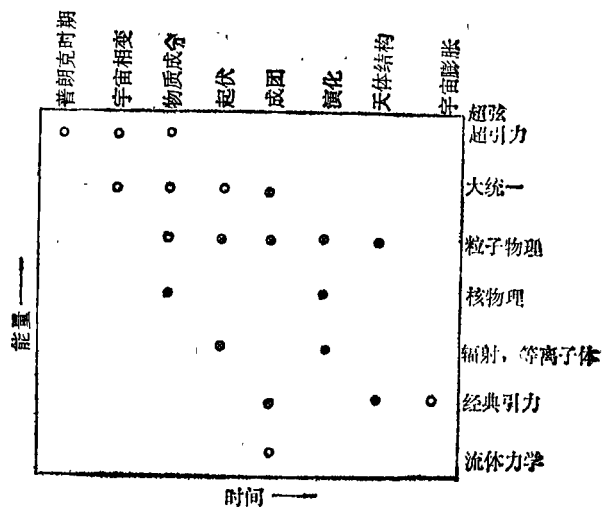


图4 宇宙学的重要课题的分布

下面我们选择图4中的三个课题较为仔细地介绍一下，以便大家对宇宙学的成功与困难有一个直接的了解。

第一个课题是轻元素起源及中微子的种类数。

轻元素起源是热大爆炸宇宙学最成功之

处。按照这一模型,在宇宙早期,没有任何化学元素,只有中子、质子、电子、中微子及光子等粒子。当宇宙年龄约为 100s 时,宇宙冷却到可以进行核合成过程,即中子、质子合成轻的原子核。各种轻核的产量可根据核截面及宇宙模型数据加以计算^[2]。

核合成过程首先形成氘,然后迅速形成大量的 ${}^4\text{He}$, 因为 ${}^4\text{He}$ 是更稳定的核。 ${}^4\text{He}$ 的产量取决于两个因子:核合成时代的重子密度及宇宙膨胀率。重子密度可以根据现今的重子与光子密度之比求出。膨胀率则决定于轻粒子(即中微子、光子等)的种类数。由此求得的 ${}^4\text{He}$ 丰度为 23—27%, 这与观测符合得很好。关于 D, ${}^7\text{Li}$ 等轻核的丰度,理论结果也不与观测矛盾。这部分内容已进入关于标准宇宙学的教科书。

利用这个成熟的理论还可以得到更多的知识。由于核合成时代的宇宙膨胀率决定于轻粒子的种类数,因此也就决定于中微子的种类数。一般说,轻粒子的种类越多,宇宙膨胀越快, ${}^4\text{He}$ 的丰度也越高。所以,中微子种类数越大,则 ${}^4\text{He}$ 丰度应越高。这样,应用 ${}^4\text{He}$ 丰度的观测值可以给出中微子种类数的一个上限。图 5 表明求上限的方法,图中纵坐标 Y 表示 ${}^4\text{He}$ 丰度,横坐标 η 是现今宇宙中的重子数密度与光子数密度之比, τ 是中子的寿命, N_ν 为中微子种类数。由图 5 看到,若取 $\tau = 10.4\text{min}$, $\eta > 4 \times 10^{-10}$, 并取 ${}^4\text{He}$ 丰度的观测上限为 $Y < 25\%$, 则得 $N_\nu \leq 4$, 即中微子最多只可能有四种。

现今已知有三种中微子,即电中微子、 μ 中微子、 τ 中微子,所以,上述上限是一项非常“危险”的预言,即若再发现一种中微子就可能破坏宇宙学的 N_ν 上限。然而,事情的发展越来越证明宇宙学的预言是正确的。因为,根据 Z^0 粒子的宽度也可以给出中微子上限。在 1984 年时,粒子物理实验给出的上限是 $N_\nu < 10^3$, 1985 年初达到 $N_\nu < 20$, 到 1985 年夏更下降为 $N_\nu < 5.4 \pm 1$, 可以说它与宇宙学上限完全一致。这是粒子宇宙学的一项最新成功^[3]。

第二个课题是宇宙的大尺度结构,或星系

物理

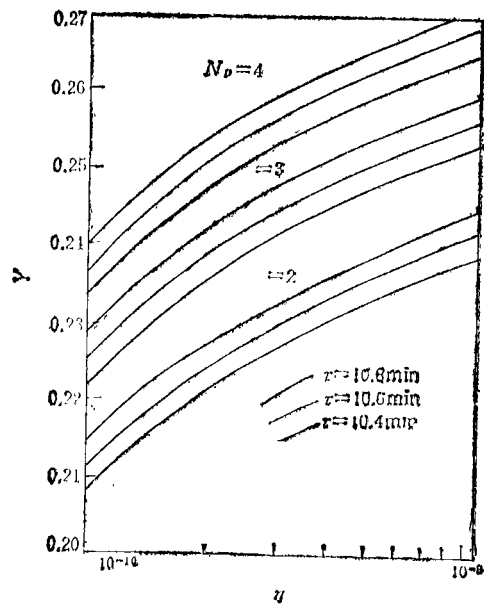


图 5 ${}^4\text{He}$ 丰度 Y 与重子与光子数密度比 η 的关系 τ 为中子寿命; N_ν 为中微子种类数

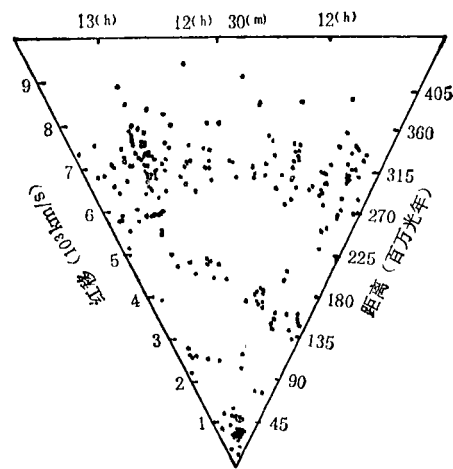


图 6 星系的大尺度分布

的大尺度分布。

最近三、四年来,天文观测开始系统地研究空间尺度高达数亿光年上的星系的分布。一个重要的发现是天体系统的几何形态的不同。我们知道,天体或天体系统大多具有规则的对称的形状。例如,星球都是球状的,太阳系是盘状的,银河系也是盘状的,甚至由众多星系构成的星系团也大体是球形的。可是,尺度再大,大到千万光年以上,天体体系的形状就不再具有对

称的形状了。例如,超星系团虽然称之为团,但并不具有规则的团状或球状。图6是一个典型的星系分布图,其中每个点代表一个星系,显然它们的分布相当不规则,而是片状、带状或纤维状^[4]。

因此,一个基本问题是:为什么尺度小于千万光年的天体系统呈对称形状,而大于千万光年的体系则不具有对称性?这个问题的答案是在宇宙极早期,原初的宇宙,是十分光滑均匀的。当宇宙年龄为 10^{-36} s 时,发生大统一理论所描写的相变,即一种 Higgs 相变,相变所引起的线状或弦状的非均匀性,成为宇宙非均匀性的起源^[5]。这种宇宙弦非均匀性,是相当小的。随着宇宙的膨胀,它被放大,经分裂,再吸引周围的物质,逐渐形成我们今天看到的各种尺度的天体或天体系统。

相变产生的宇宙弦是不规则的,但吸引物质后会变成规则的形状。这是因为任何体系经弛豫之后最终会变成稳定的平衡态,而自引力体系的稳定平衡态是球状或盘状的。显然,小尺度体系的弛豫时间短,而大尺度体系的长。根据这个道理可以求出具有对称形状的天体的尺度上限:

$$R_m \sim (G\mu)^{1/2} c t_0. \quad (1)$$

它的意义是 $R < R_m$ 的天体应具有规则形状, $R > R_m$ 的则是不规则的。上式中 t_0 是宇宙现在的年龄,无量纲因子 $G\mu$ 表示最初的宇宙弦每单位长度的质量,它决定于

$$G\mu = (m_{ph}/m_{pl})^2, \quad (2)$$

其中 $m_{pl} = 10^{19}$ GeV 是 Planck 能量, m_{ph} 是相变相应的能量尺度。如果取大统一的能量尺度 $m_{ph} = 10^{16}$ GeV, $t_0 \simeq 2 \times 10^{10}$ 年,则由(1),(2)有

$$R_m \sim 10^7 \text{ 光年.}$$

这正好符合观测。所以,大尺度天体体系的规则或不规则,是由大统一理论参数决定的。

相变引起的非均匀性,看其表面的分布是很不规则的,但往往存在极规则的统计性质,例如自相似性等。最近,对星系分布作了类似的统计分析,分析结果的确证明了星系分布具有

相变非均匀性常有的统计特征。

对星系、星系团及超星系团的相关函数分析之后,发现了几点系统性的性质^[6]: (1) 所有星系、星系团及超星系团的相关函数都具有幂律形式,即

$$\xi(r) = \alpha r^{-l}, \quad (3)$$

而且它们的幂指数都有 $l = 1.8$; (2) 相关强度 α 与体系的富性 $\langle N \rangle$ 的关系为

$$\alpha = \beta \langle N \rangle^m, \quad (4)$$

其中幂指数 $m = 0.7$; (3) 相关强度 α 与体系中统计对象的平均距离 d 之间也有幂律关系:

$$\alpha = \gamma d^n, \quad (5)$$

其中 $n = 1.4$ 。

(1),(2),(3)三个相关性质,说明宇宙大尺度结构具有非常好的系统性的特征。利用宇宙弦模型可以对这些系统性特征给出一个统一的解释^[7]。如果宇宙弦在分裂过程中具有自相似性,则尺度为 R 的宇宙弦的密度可以表示为

$$n(R) \sim R^{-D-1}, \quad (6)$$

其中 D 为宇宙弦的分形 (fractal)。由此可以证明,幂指数 m, n 应满足下列关系:

$$m = \frac{1}{2} n. \quad (7)$$

这与(4),(5)式的结果很好地符合,再一次支持了宇宙大尺度结构是极早期的相变所引起的观点。

最后一个问题是宇宙整体时空的拓扑。这是宇宙创生期或普朗克时期的问题。这一时期的时空尺度分别是普朗克时间 $t_p \simeq 10^{-44}$ s 及普朗克长度 $l_p \simeq 10^{-33}$ cm。在这种尺度上,经典的时间空间概念失效了,时空不再是一个提供各种物理过程表演的平坦舞台,而它本身也成了一个动力学量。所以,宇宙创生期就是宇宙时空的形成期。

研究宇宙创生期的方法和研究其他时期完全一样,需要寻找并研究该时期的遗留物。表1中列出宇宙各个时期的遗留物。关于宇宙 3min 时的元素丰度以及宇宙 10^{-36} s 时的相变,我们已经介绍过了。现在讨论一下 10^{-44} s 时的时空拓扑。

既然在普朗克时期宇宙整体时空拓扑是动力学量，因此时空形成理论应当能预言宇宙创生期的时空拓扑。另一方面，普朗克时期之后，

表 1 宇宙各时期的遗留物

宇宙时代(年龄)	遗留物
$10^{-44}s$	时空拓扑
$10^{-36}s$	相变非均匀性
3min	轻元素丰度
10^7y	微波背景辐射
$\sim 10^{10}y$	大红移天体

宇宙时空性质由经典的引力理论，即广义相对论描写。在广义相对论中时空曲率等局部性质是动力学量，而时空拓扑这种整体性质不再是动力学量，因此，今天的时空整体拓扑应与宇宙创生期形成的拓扑一样。这就提供了研究宇宙创生期的一个途径。

迄今虽然还没有成熟的量子引力理论，尽管如此，已经得到了一些初步的有价值的结果。在各种空间的量子形成理论中，形成几率中都含有因子 $\exp(-I)$ ，其中 I 是相应于经典引力的宇宙解的作用量。一般说， I 比例于该宇宙解的空间体积。因此，对于空间体积为无限的宇宙解，其生成概率应为零。

另一方面，观测宇宙学表明，现今的宇宙时空多半是由 $k=0$ 的 Robertson-Walker 度规描写的。熟知， $k=0$ 宇宙解，在单连通的拓扑情况，空间体积为无限，即它的生成概率应为零，与观测要求矛盾。

解决这个困难的唯一途径是考虑多连通的拓扑。 $k=0$ 宇宙解是空间曲率为零的解，或者说，宇宙的三维空间部分是欧几里得的。一个二维的单连通的欧几里得空间是个无限大的平面，其上曲率处处为零，即有欧几里得度规

$$dl^2 = dx^2 + dy^2. \quad (8)$$

如图 7 所示的二维环面，也是曲率处处为零的，也由欧几里得度规描写。它是由有限大小的长方形平面的相对两边 (A 及 A, B 及 B) 贴合而构成的。显然，二维环面具有有限的面积。这个例子说明，整体的拓扑的不同会改变整体性质。类似地也有三维“环”形，它是由有限的

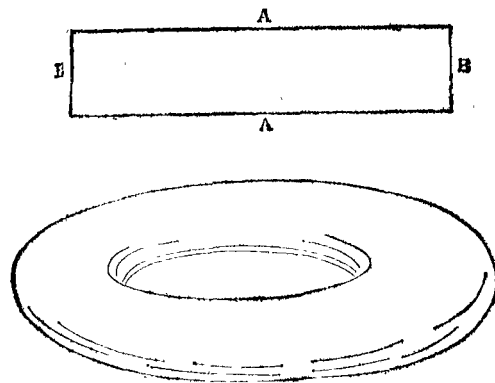


图 7

长方体相对两面(上及下,前及后,左及右)贴合而成的。显然,三维“环”的体积是有限的。

这样,由空间形成的量子理论可以推测,在普朗克时期所形成的不是单连通的 $k=0$ 空间,而可能是多连通的三维“环”空间。这是一个可以检验的预言^[8]。

在三维“环”拓扑中,一个观测者可能看到天体分布具有极大尺度的周期性,其周期长度是沿着“环”走一圈的长度,就如同在一个具有周期格子结构的晶体中一样。

目前的确已发现天体分布可能具有极大尺度的周期性^[9]。第一个可能的证据是类星体红移分布的周期性,即在某些特定的红移值附近类星体特别多,这些特定的红移值具有下列的周期性:

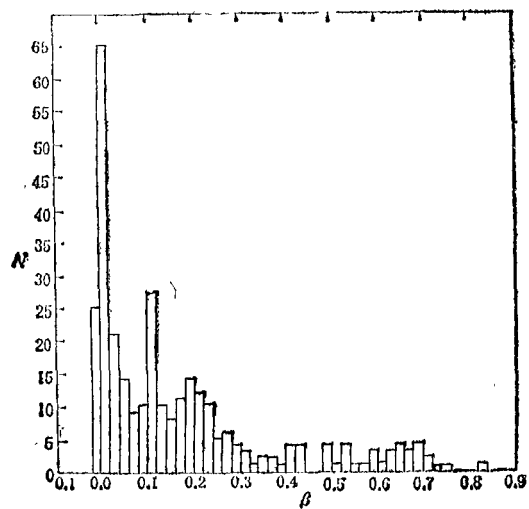


图 8 类星体对 β 的分布

$$Z = nD + E, \quad (9)$$

其中 n 可取 0 及正整数, D 及 E 为常数. 由于红移代表距离, 所以, 红移分布的周期性, 就是距离分布的周期性.

另外, 类星体的吸收线红移分布也有周期性. 吸收线红移是由吸收云形成的, 吸收线红移分布周期性表示吸收云的距离分布的周期性. 图 8 是类星体吸收线数相对于 β 的分布, β 定义为

$$\beta = \frac{(1 + Z_{em})^2 - (1 + Z_{ab})^2}{(1 + Z_{em})^2 + (1 + Z_{ab})^2}, \quad (10)$$

其中 Z_{em} 及 Z_{ab} 分别为类星体的发射线及吸收线红移. 从图 8 中可以明显地看到几个周期分布的峰. 这也许就是多连通性的结果. 更有趣的是, 由发射线红移分布所确定的周期长度和由图 8 求得的周期长度, 是一样的. 这进一

(上接第 512 页)

研究中, 在相变、化学反应过程研究中光散射都有令人瞩目的结果.

虽然, 目前在工业生产中还没有广泛地使用光散射技术, 毫无疑问这只是时间问题. 光散射的优点 (对环境要求低、可实时原位测量、分子水平信息等) 肯定会在工业生产的监控、检测中发挥作用, 并取得效益.

在中国物理学会领导下, 在化学、生物、仪器仪表、矿物等学科的工作者的积极参与和支持下, 于 1981 年成立了光散射专业委员会. 此后我国光散射研究更加系统、全面, 发展也更快了. 这几年中召开了三次全国光散射学术会议, 从会后出版的文集^[13]可以更清楚、全面地了解我们的研究领域和水平. 由于从一开始就重视学术交流和学科的交叉, 国内光散射研究水平提高很快, 已经有一批具有较高水平或独创性的工作在国际会议上或国际刊物上发表, 并受到国际同行的高度重视.

国内的喇曼谱仪已经有几十台, 布里渊和瑞利散射谱仪有几台, 这些谱仪在研究中发挥着重要作用. 但是, 谱仪的型号单一, 功能局限, 与其他仪器联配不多是个问题, 应受到重视, 予以解决.

步支持了宇宙多连通的预言.

参 考 文 献

- [1] L. Z. Fang and R. Ruffini, Basic concepts in relativistic astrophysics, World Scientific, (1983).
- [2] J. Audouze, Proceedings of IAU Symposium No. 124 Observational Cosmology, eds. A. Hewitt, G. Burbidge and L. Z. Fang, Reidel, (1987).
- [3] A. Salam, Proceedings of the fourth Marcel Grossmann meeting, ed. R. Ruffini, North Holland, (1986).
- [4] V. De Lapparent, M. J. Geller and J. P. Huchra, *Astrophys. J.*, **302**(1986), L1.
- [5] R. H. Brandenberger, *Inter. J. of Mod. Phys.*, **A2** (1987), 77.
- [6] N. Bahcall and W. S. Burgett, *Astrophys. J.*, **300** (1986), L35.
- [7] L. Z. Fang, *Mod. Phys. Lett.*, **1** (1986), 601.
- [8] L. Z. Fang and H. J. Mo, Proceeding of IAU Symposium No. 124 Observational Cosmology, eds. A. Hewitt, G. Burbidge and L. Z. Fang, Reidel, (1987).
- [9] L. Z. Fang and H. Sato, *Gen. Rel. Grav.*, **17** (1986), 1117.

致谢: 作者诚挚地感谢李荫远教授的支持和有益讨论. 感谢国内光散射的同行们的关心和支持.

参 考 文 献

- [1] a. W. Hayes and R. Loudon, Scattering of Light by Crystals, John Wiley and Sons, (1978);
b. M. Cardona and G. Guntherodt, ed., Light Scattering in Solids, Springer-Verlag, (1975—1984), I, II, III, IV.
c. D. A. Long, Raman Spectroscopy, McGraw-Hill, (1977).
- [2] G. Güntherodt, 中-西德固体能谱讲习班讲义, 北京, (1979).
- [3] X. P. Gao, F. Z. Liu, W. P. Zhuang and P. X. Zhang, *Chinese Phys. Lett.*, **3**(1986), 477.
- [4] M. Grimsditch, M. R. Jahn, A. Kueny and I. K. Shuller, *Phys. Rev. Lett.*, **51** (1983), 498.
- [5] Lord Rayleigh, *Phil. Mag.*, **47**(1890), 375.
- [6] L. Brillouin, *Ann. Phys.*, (Paris), **88**(1922), 17.
- [7] C. V. Raman and K. S. Krishnan, *Nature*, **121** (1928), 501.
- [8] M. Cardona, See [1b], Vol. II.
- [9] M. Moscovits, *Rev. Modern. Phys.* **57** (1985), 783.
- [10] A. Otto, See [1b], Vol. IV.
- [11] Proceedings of the Tenth Inter. Conf. on Raman Spectroscopy, ed. by W. L. Peticolas and B. Hudson, Eugene Oregon, USA, (1986).
- [12] Zhang P. X. and W. Zinn, *Phys. Rev. B*, **35**(1987), 5219.
- [13] a. 全国光散射学术会议论文集, (第一、二届), 方俊鑫等编, (1983), 四川大学物理系出版.
b. 全国光散射学术会议论文集, (第三届), 方俊鑫等编, (1986), 南开大学物理系出版.