

宇宙学的新进展*

褚耀泉 朱杏芬

(中国科学技术大学天体物理中心)

提 要

本文全面介绍了近几年在宇宙学研究中的新进展,特别是一些最新的引人注目的观测结果。COBE 卫星对宇宙微波背景辐射的测量,LEP 实验等,进一步支持了热大爆炸模型;同时对宇宙中物质大尺度结构探索中的新发现,例如宇宙长城、巨大吸引物、星系红移分布的周期性等,又对标准的宇宙学模型提出了严峻的挑战。

一、前 言

正当目前天文学家们聚集在一起欢庆宇宙微波背景辐射发现 25 周年之际,宇宙学研究领域中传来了一系列使人惊奇不已的新发现。最新的观测事实既有进一步支持热大爆炸理论模型的令人振奋的新进展,另一方面对宇宙中物质分布的巨大结构的探索,也向标准的宇宙学观点提出了严峻的挑战。

早在本世纪初,哈勃发现了河外星系普遍的退行运动。宇宙膨胀的发现对人类的世界观带来了彻底的变化。静止的宇宙观被废弃了,其重要性可与哥白尼的革命带来的变化相比拟。25 年前宇宙微波背景辐射的发现,是近代宇宙学发展中的又一个里程碑,使得热大爆炸模型成为现代物理学中的“标准模型”之一。经过数十年的努力,宇宙中轻元素的丰度和原初核合成理论也成为对大爆炸模型的又一强有力的支持。80 年代兴起的暴胀模型,把基本粒子理论中的一些新概念扩大和补充到热大爆炸模型之中,成功地解决了它的一些基本的困难。例如,视界问题,宇宙的平直性问题等……,并对正反粒子的不对称性宇宙早期密度的量子扰动等提出了解释。综合了大量观测事实的宇宙标准模型已被科学界广泛接受。但是在这个模型框架内,对于宇宙中物质分布的大尺度结构和星系的形成,目前仍没有一个令人满意的解释,这一点成为标准模型中一个十分令人遗憾的缺陷。

1990 年夏季,作者分别参加了国际纯粹和应用物理学会在东京大学举办的“原初核合成和早期宇宙的演化”讨论会和法国 Blois 举办的庆祝宇宙微波背景辐射发现 25 周年“物理宇宙学”讨论会。宇宙学领域中许多著名的学者出席了这两次会议,会上讨论了宇宙学中几乎所有的重要的方面,近年来一些重大的进展和最新的信息,引起了与会者极大的兴趣。

* 国家自然科学基金资助项目。
1991 年 1 月 11 日收到。

本文将这些新进展介绍给广大读者。

二、宇宙背景辐射和 COBE 卫星

1989 年底, 美国宇航局(NASA)发射了称之为“宇宙背景探测器”(Cosmic Background Explorer, 简称 COBE) 的第一颗用于研究宇宙起源的卫星, 它携带着旨在对宇宙背景辐射进行基础测定的三个互补的检测器。科学家们希望通过测定整个天空中从 $1\mu\text{m}$ 到 1cm 波段的背景辐射, 以求获得能够解决早期宇宙成因和演化的许多奥秘的新资料。

按照标准宇宙模型, 在大爆炸之后宇宙处于以辐射为主的时期, 当时温度非常高, 物质都处于电离状态。辐射和物质之间的耦合很强, 两者之间达到了热平衡, 在热平衡状态下辐射具有黑体谱。宇宙膨胀时, 辐射的温度持续下降, 当宇宙的温度下降到 4000K 时(大约在大爆炸后 30 万年), 电子和质子开始复合而形成氢原子及其他电中性原子。由于脱耦以后物质基本上不与辐射相互作用, 辐射与物质开始各自独立地演化。随着宇宙进一步膨胀, 辐射也不断地冷却, 但是始终保持着黑体谱。宇宙背景辐射的黑体谱性质, 是热大爆炸理论一个最重要的观测验证。

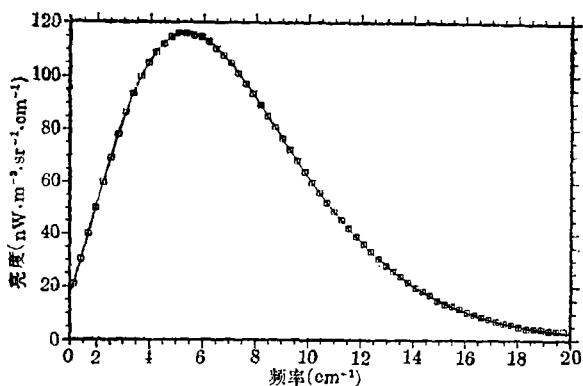


图 1 COBE 卫星测得的北银极天区附近的宇宙微波背景辐射谱。图中数据精确地符合温度为 2.735 ± 0.06 普朗克黑体辐射谱^[1]

1990 年 1 月, 在 COBE 卫星发射成功仅 8 周之后, 发表了第一批观测结果, 利用卫星上的远红外绝对分光光度计 (Far Infrared Absolute Spectrometer 简称 FIRAS), 对北银极天区进行了 9 分钟的观测, 得到了从 1cm 到 0.5mm 波长范围的宇宙背景辐射谱(图 1)。辐射精确地符合温度为 $2.735 \pm 0.06\text{K}$ 普朗克黑体辐射谱, 在 1% 的精度上看不到与理想的黑体谱有任何偏离^[1]。大爆炸宇宙学的预言再一次得到辉煌的证实。观测结果曲线之完美甚至超出了人们的预料, 其精度和波长覆盖的范围都远

超过所有以前的观测。据估计 COBE 卫星在天上经过一年观测之后, 累积的资料可以使谱的精度提高到 0.1%。

宇宙背景辐射与黑体谱的任何微小偏离, 都可能意味着在脱耦时代之前就有一些重要的高能过程破坏了热平衡, 或者脱耦以后物质改变了背景辐射的性质(例如星系形成之前生成的第一代天体星族 III, 温度高达 $\sim 10^6\text{K}$ 的热星系际介质……等等)。COBE 的观测结果严格地限制了有关早期宇宙演化的各种理论。值得指出的是, 近年来日本名古屋大学和美国贝克利加州大学共同合作, 利用高空火箭和先进的红外探测器, 声称发现了宇宙背景辐射的红外过剩。一时形形色色的理论都企图来解释这种过剩, 而如今 COBE 的结果完全否定了这种红外过剩存在的可能性^[2]。

宇宙背景辐射的第二个重要特征是它的亮度随着空间不同方向变化的程度。背景辐射的各向异性可能是由于脱耦时代物质和能量的成团分布所引起的, 或是由于宇宙中不同部分的相对运动引起的。这种各向异性可以解释为现代宇宙中大尺度结构形成的“种子”。

COBE 卫星的第一批结果中也包括了利用较差微波辐射计(Differential Microwave Radiometers 简称 DMR), 通过 3 星期时间的观测, 得到在 9.5, 5.7 和 3.3mm 三个波长上宇宙背景辐射全天区的分布图。初步分析结果表明, 除了地球相对于宇宙背景辐射的运动引起的偶极矩外, 大尺度上的不均匀性(在 7 角分间隔上), 即温度的偏差小于 10^{-4} 。估计一年以后经过对全天空多次扫描, 精度还可以提高一个数量级。

由于脱耦以后, 物质基本上不与辐射相互作用, 今天观测到的宇宙背景辐射就给我们提供了宇宙年龄仅为 30 万年时($Z \sim 1000$)当时环境的“快照”, 因此对于理解星系和大尺度结构的形成和演化具有关键性的意义。如果我们认为促使宇宙大尺度结构演化的唯一重要力量是引力, 则宇宙背景辐射的各向同性与目前已观测到的可见物质的高度成团性就很难互相协调起来, 这就构成了大爆炸宇宙学模型的一个基本的困难。这一点我们将在以后几节中进一步讨论。

三、LEP 实验和中微子的种类数

热大爆炸宇宙模型最成功点之一, 是说明了宇宙中轻元素的起源。原初核合成过程发生在宇宙历史的更早期, 当宇宙年龄约为 1 s 时, 温度高达 10^{10} K, 此时的能量约为 1 MeV, 正好是核过程的尺度。当时宇宙中只有中子、质子、电子、中微子及光子等粒子。宇宙的冷却使中子、质子合成轻的原子核, 各种轻核的产量可以根据核截面及宇宙模型有关数据加以计算。标准大爆炸模型预言的 D, ^3He , ^4He , ^7Li 等元素的丰度与目前的观测结果符合得很好^[3]。

利用这个成功的理论, 宇宙学家预言了中微子种类数。根据原初核合成理论, ^4He 丰度取决于重子密度和宇宙膨胀速率两个因子, 而宇宙膨胀率则决定于轻粒子(即中微子、光子等)的种类数。一般说来, 轻粒子的种类数越多, 宇宙膨胀得越快, ^4He 丰度就越高。现今观测到的宇宙中 ^4He 丰度为 $Y = 0.23 - 0.27$ 。理论计算表明, 相应中微子的种类数 $N_\nu < 3.4$ ^[4,5]。

目前已知就有三种中微子, 即 e 中微子, μ 中微子, τ 中微子。因此只要再发现一种新的中微子, 就会破坏宇宙学的预言。最近, 从欧洲日内瓦 CERN 传来了令人兴奋的好消息, LEP 实验十分漂亮地证明了确实只有三类中微子。图 2 显示了四组 LEP 实验的综合结果, 图中的曲线是根据弱电统一理论预言的中微子种类数为 2, 3 和 4 时 2° 粒子宽度的理论值, 实验结果令人信服地表明 $N_\nu = 3$! 回顾一下历史可以看到粒子物理学家花费了巨大的努力来探索中微子种类的上限, 在 1984 年时, 粒子物理实验给出的上限 $N_\nu < 10^5$, 1985 年初达到 $N_\nu < 20$, 到 1985 年夏把上限下降到 $N_\nu < 5.4 \pm 1$ 。如今 LEP 实验可以说是第一次在地面上用粒子加速器验证了在热大爆炸模型框架内的原初核合成理论, 为此花费了昂贵的代价(据说其费用高达 25 亿美元, 恰好与美国空间望远镜费用相同)。LEP 实验结果对宇宙学的影

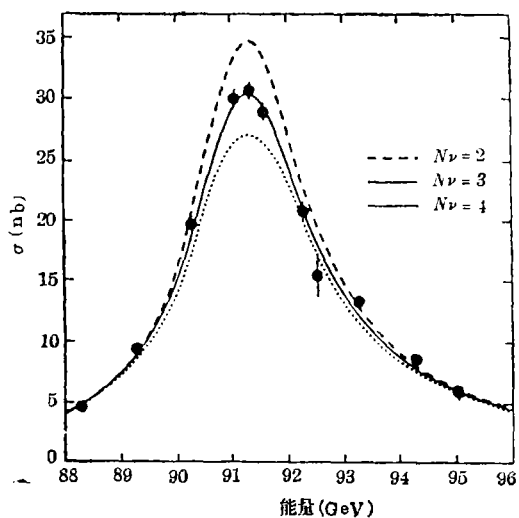


图 2 LEP 实验结果(圆点), 图中的曲线是根据弱电统一理论运算而得的中微子种类数为 2, 3 和 4 时理论预言值^[6]

响当然不仅此一点, 它对宇宙中的暗物质, 重子物质密度等都提供了许多有用的信息, 在此就不一一细述了^[8]。

四、“宇宙长城”

宇宙中的物质如何从脱耦时代十分均匀地分布, 演化到今天观测到的星系、星系团、超星系团等高度成团的结构, 一直是现代宇宙学的一个基本课题。在过去十年中, 宇宙大尺度结构的研究一直是天体物理研究中一个非常活跃和富有成果的领域。近年来由于技术上的进步, 特别是高度灵敏的探测器的使用, 使得测量一个邻近星系的红移, 从哈勃时代在 100 英寸望远镜上需几个小时, 减少到在 60 英寸望

望远镜上只需几分钟。使得测量大尺度上星系三维分布的工作成为可能, 并发现了“宇宙长城”、“巨大吸引体”等尺度达到数亿光年的巨大结构, 震惊了天文学界。

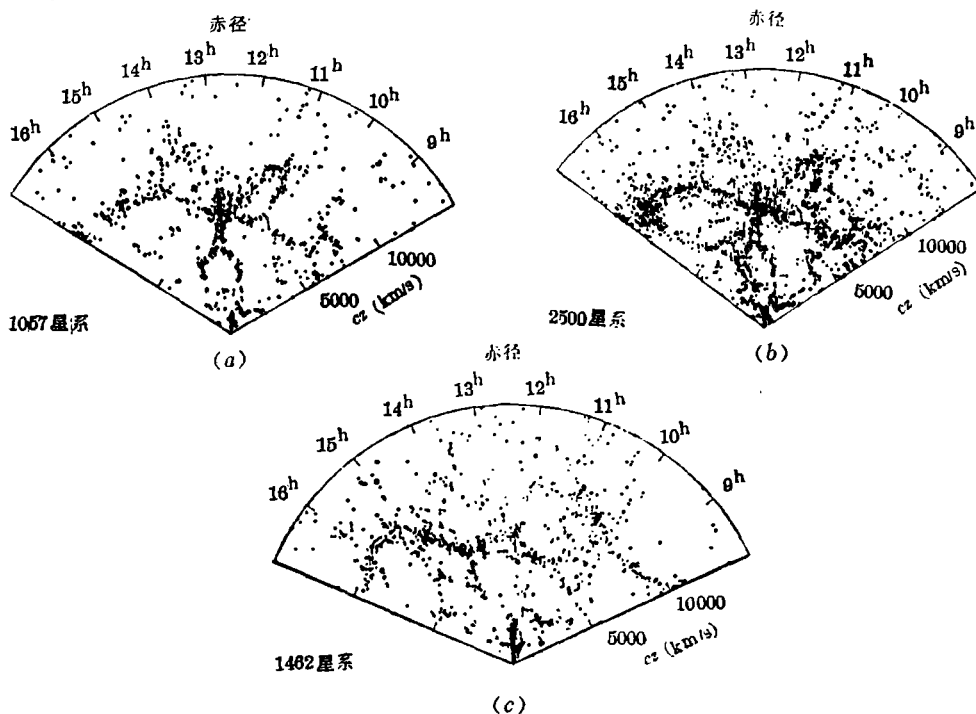


图 3 (a)1986 年发表的 CfA 巡天的第一个结果, 赤纬范围 $26^{\circ}.5N \leq \delta \leq 32^{\circ}.5N$ ^[8];
(b)扩展了的 CfA 巡天, 赤纬范围 $26^{\circ}.5N \leq \delta \leq 44^{\circ}.5N$ ^[8];
(c)赤纬范围 $8^{\circ}.5N \leq \delta \leq 14^{\circ}.6N$ 的第四个 CfA 巡天“切片”, 在 $cz \sim 10000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 处依然存在着与图(a), (b)中相似的结构^[8]

星系的红移巡天, 一般可采用两种方式: 一种是所谓铅笔束式巡天 (pencil-beam survey), 即在一个很小的天区内作深度巡天, 探测红移尽可能大的暗星系; 另一种是覆盖尽可能大的立体角范围, 测量所有视星等亮于某一特定值的星系, 以求得邻近星系的三维分布特征。美国哈佛-史密松尼天体物理中心 (Harvard-Smithsonian CfA) 的巡天目的就是测量银纬 $b_{\text{r}} \geq 30^\circ$, 极限星等为 $m_{B(0)} = 15.5$ 的 Zwicky 星表中全部 15000 个星系的红移值。目前已测量了约 10000 个星系, 其中 75% 的星系是用 Mount Hopkins 1.5 米望远镜测量的, 其红移的误差为 $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。为了能在有限的观测时间里找到尽可能大尺度的结构, CfA 巡天选择一系列窄长的天区为观测对象。每一个“切片”是在 Palomar 巡天底片上一条宽为 6° 长为从赤径 8^{h} 到 17^{h} 约 135° 的天区。

1986 年在北京召开的 IAU Symp. No. 124 会议上, 首次公布了 CfA 巡天的第一批结果^[7](图 3(a)), 其中包括 1057 个星系的红移。从图中可以清楚地看到半径为数十 Mpc 的空洞存在。所有的星系都分布在一些细长的结构中, 这些细丝构成了空洞的壁, 壁的厚度与空洞的直径相比是非常小的。这一重要发现立即引起了宇宙学家的广泛兴趣。图 3(a) 看上去很像泡沫状结构的一个截面, 而星系则聚集在这些“泡泡”的壁上。为了进一步搞清星系在空间分布的性质, CfA 小组的 Geller 和 Huchra 在紧接着第一个巡天区域北面又观测了另外 2 个“切片”, 证实了星系的分布确实呈“薄片状 (sheet-like)”。从图 3(b) 中我们看到图 3(a) 中的空洞和薄片仍然存在, 只是薄片显得厚了一些, 显然这是由于星系构成的薄片相对于巡天的切片平面是弯曲或倾斜的。

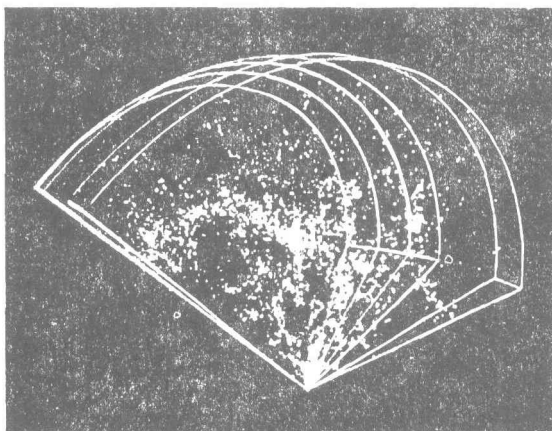


图 4 四组 CfA 巡天(即图 3)中 (b) 和 (c) 叠加后所显示的星系在三维空间中分布。图中星系分布的密集区即所谓的“宇宙长城”^[8]

关键性的发现是 Geller 和 Huchra 在 1989 年发表的第四个“切片”, 它位于原来巡天天区的南面较远的地方 ($8^\circ.5 < \delta < 14^\circ.5$) (图 3(c))。令人吃惊的是在新的巡天中依然出现了与原先巡天中同样的结构, 这表明薄片结构贯穿了整个赤纬范围, 即从 $8^\circ.5$ 直到 $44^\circ.5$ (图 4)。他们把这一新发现的巨大结构称之为“长城” (The Great Wall)^[8]。

宇宙长城的扩展范围目前仅仅受到巡天范围的限制, 我们还不知道它的全部尺度。从目前 CfA 巡天资料看, 其空间范围至少为 $170h^{-1} \cdot \text{Mpc} \times 60h^{-1} \cdot \text{Mpc}$, 而厚度 (大约在红移的方向上) 只有 $\leq 5h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 。形如一巨大的壁。据估计它的质量为 $\sim 2 \times 10^{16} M_{\odot}$, 比本超星系团的质量大 10 倍以上。宇宙长城可能是一个单一的结构, 也可能是一系列连接在一起的空洞的表面。目前的观测资料尚未能扩展到足以确定大尺度结构的拓扑性质。

宇宙长城是目前我们已观测到的宇宙中最大的结构, 并且表明我们目前还没有足够大的巡天样品可以定量地确定宇宙中物质在三维空间中的分布特征。按照标准宇宙学理论, 宇宙中的物质在大尺度上的分布应该是均匀和各向同性的, 看来至少在几百个 Mpc 尺度上这一

点还不能满足, 我们是否可以期望在更大的尺度上物质是均匀分布的呢? 要知道, 目前整个观测的宇宙范围只有约几十亿或数百亿秒差距!

五、星系的本动速度和“巨大吸引物”

星系除了参与宇宙的整体膨胀以外, 同时也会受到其他周围物体的吸引而运动, 这个偏离宇宙均匀膨胀的附加速度称之为“本动速度”。对星系大尺度本动速度的研究也可以提供宇宙中物质分布不均匀性的重要信息, 是宇宙学理论的又一重要检验^[6]。

1986年 Faber, Dressler 等七人[被称为“七骑士”(The Seven Samurai)]发表了 60Mpc 范围内 400 余个椭圆星系的红移和弥散速度, 随后他们通过减去我们地球自身的本动速度, 以求得这些星系相对于宇宙共动坐标系的退行速度的分布。使他们非常吃惊的是, 在距离和速度的分布图上, 这些星系并不像所预期的那样呈现出各向同性的哈勃膨胀, 而是表现出这些星系大尺度上的整体运动, 即所谓的普遍的流动(streaming), 本动速度高达 $700 \pm 300 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向大致指向同一目标。计算表明, 这种流动可能是由于在长蛇座-半人马座超星系团方向上, 其中心距离我们约 40Mpc 处的一个巨大质量聚集区的引力而引起的。其质量高达 $3 \times 10^{16} M_{\odot}$, 我们称它为“巨大吸引物”(The Great Attractor)。

尽管随后的一些观测工作都证实了星系存在着巨大的本动速度, 但对于“巨大吸引物”模型一直存在着怀疑, 因为现行的宇宙的大尺度结构形成理论, 无法解释如此巨大质量聚集区域的形成和大尺度上速度场的分布。然而, 1990年 Dressler 和 Faber 报告了一个更有力的新证据, 他们成功地观测到在“巨大吸引物”后面的星系掉向巨大吸引物的证据^[10]。

从 1988 年起, Dressler 和 Faber 等人把他们的观测工作作了两方面的深化: 首先他们把样品从椭圆星系推广到旋涡星系, 因为旋涡星系的空间成团性比椭圆星系为弱, 被认为可以更好地代表星系在宇宙中的分布, 而且利用 Tully-Fisher 方法测定距离要比 Faber-Jackson 方法更为可靠一些。其次, Faber 和他在 Santa Cruz 的同事发展了一套与 Tully-Fisher 方法相对应的光学观测技术, 即不是测量氢 21cm 微波谱线, 而代之以测量 H α 谱线的多普勒位移来测定旋涡星系的转动速度。这样就避免了利用 Tully-Fisher 方法必须使用最大的射电望远镜从而在观测时间上受到限制的缺陷。

Dressler 等人测量了 125 个旋涡星系, 把观测的范围扩展到在巨大吸引物方向上 80Mpc 以外, 达到了它的后面。把椭圆星系和旋涡星系的结果叠加在一起, 进一步证实了巨大吸引物的存在。图 5(a) 显示出在巨大吸引物方向 273 个星系在哈勃图上的分布。从图中可以看到其分布呈现出明显的 S 型, 中心约在距我们 43Mpc 的地方。这表明在巨大吸引物方向上, 距离小于 43Mpc 的星系有较大的退行速度, 而大于 43Mpc 的星系则退行速度要比由哈勃关系预言的更慢一些。这恰恰正是如果在 43Mpc 处有一个巨大质量的吸引物所期待的星系退行速度变化的结果。图中 S 型虚线就是 Faber 和 Burstein 根据简单的球对称分布模型计算所得。作为比较, 在图 5(b) 中画出了在其他方向星系在哈勃图上的分布: 除了随机的弥散分布外, 退行速度和距离基本上呈现简单的线性关系。很显然, 由于巨大吸引物的存在, 完全破坏了人们曾一度认为的宇宙膨胀是一种非常平滑的流动(即哈勃流)的观念。

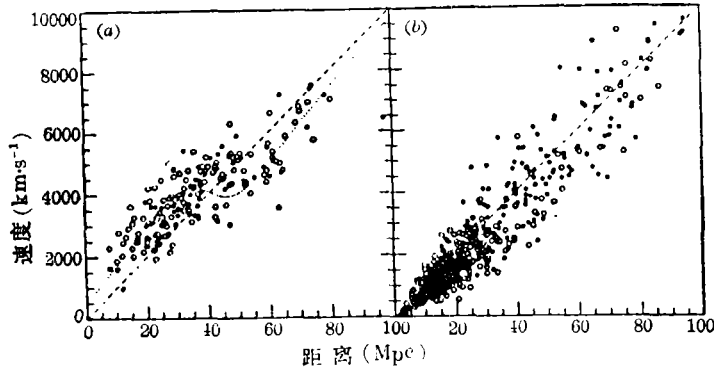


图 5(a) 在巨大吸引物方向上星系速度与距离分布的哈勃图, 黑点表示椭圆星系, 圆圈表示漩涡星系。图中 S 型虚线是根据在 40Mpc 存在着巨大吸引物的模型计算而得;

(b) 在其他方向上星系的哈勃图

(引自 Physics Today, June 1990, p. 22)

六、星系红移分布的周期性

上面两节描述的, 基本上还是我们附近星系的分布特征, 其尺度并没有超过 100Mpc 太多。在更远的距离上星系的分布将会呈现出什么样的结构呢? 在目前大望远镜有限的观测时间条件下, 利用多目标光谱仪等新技术得到的铅笔束式巡天的结果, 揭示出完全出乎人们预料的星系红移分布的周期性特征, 表明在极大尺度上宇宙物质分布的一种非常有规则的结构。

1990 年 2 月, Broadhurst, Ellis, Koo 和 Szalay 在 *Nature* 杂志上发表了一篇简讯^[11], 他们综合分析了四组巡天样品, 其中三组取自美国国立光学天文台(Kitt Peak), 一组取自 AAT(Anglo-Australia Telescope)巡天, 样品取自南北银极区域, 基本上是方向相反的(在 $0^\circ.4$ 的精度内), 面积小于 1 平方度, 红移扩展到 $Z \sim 0.5$, 从而把整个探测的范围延伸到约为 $2000h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 。图 6 画出了在南北银极方向星系的红移分布。选择两个银极方向为研究对象, 是为了减少由于银河系内物质的吸收而引起的选择效应。四组样品基本上满足在确定的视星等极限下统计上完整的样品, 而且每个星系红移的测量精度都小于图 6 直方图中的间隔。这些样品是由不同的作者利用不同的仪器观测所得, 因而很难设想在红移测量上会有系统的选择效应。从图 6 中可以清楚地看到, 星系的红移分布呈现出一种规则性的周期分布。这些峰值之间相应的间隔为 $128h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 。更为引人注目的是, 如果我们计算在红移方向上每组星系对之间的间隔距离的分布(图 7a), 在相应于 $128h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 的整数倍的距离上, 星系对的数目出现显著的峰值。为了确定这种周期性分布的统计置信度, 他们使用

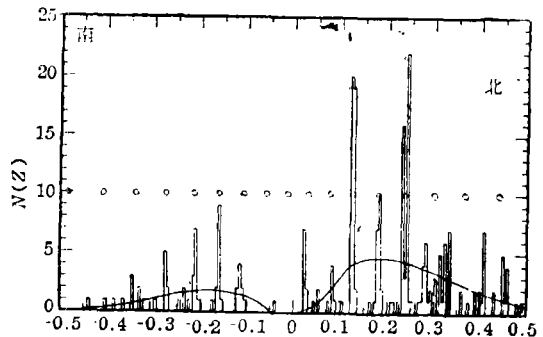


图 6 在南北银极方向上星系的红移分布。图中曲线表示观测中的选择效应^[11]

了两种统计方法：其一是一维自相关函数，考虑到在小尺度上星系分布的成团性（由两点相关函数 $\xi(r) = (r/r_0)^{-1.8}$ 所表示），计算了在每一间隔中星系数目可能的变化，发现红移分布中出现这些峰值已达 $4-6\sigma$ 水平；其次是利用功率谱(power-spectrum)方法(图 7b)，则在均匀分布的假定下，出现这些峰值的几率只有 $\sim 3 \times 10^{-4}$ ！

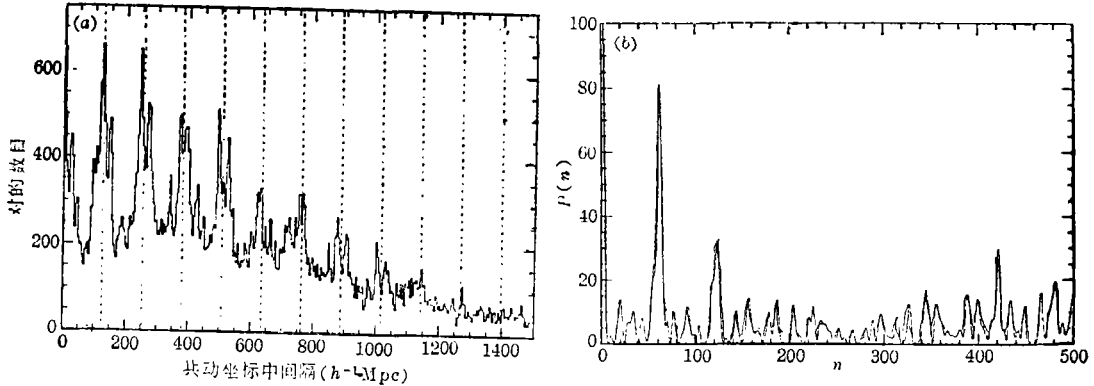


图 7(a)在南北银极方向上星系对的一维距离分布，虚线表示 126 Mpc 的间隔；(b)功率谱分析的结果^[11]

如何来解释星系红移这种有规则分布呢？一种可能的解释是：如果星系确如 CfA 巡天所揭示的那样，在三维空间中是分布在一些薄片壳层上，而这些壳层围绕着一典型尺度为几十 Mpc 的空洞，整体上呈现出一种蜂窝状或海绵状结构，则一个小天区上的铅笔束状的巡天，可能穿过几个空洞后才遇到密集的星系团，因而产生了尺度为 100 Mpc 的一维有规则分布。显然这种周期性的尺度将依赖于视线与蜂窝轴的夹角，亦即巡天位置在空间的取向。由此可以预言，在其他方向上的巡天将得到完全不同的周期性尺度，甚至可能在某些方向上只有很强的成团性而无任何周期性。即使如此，我们可以问一问：为什么恰好在银极方向上呈现出如此规则的周期性？似乎我们银河系恰巧位于宇宙中一个非常特殊的位置上，这岂不又违反了宇宙学原理吗？

星系红移分布周期性的发现，确实使宇宙学家、天体物理学家百思不得其解。正如美国贝克利加州大学 Marc Davis 在同一期 *Nature* 杂志上著文介绍这一发现时说：“If the galaxy distribution is truly periodic, it is safe to say we understand *less than zero* about the early Universe”（斜体字为引者的理解）。难道真的我们对宇宙早期演化一无所知吗？

其实，说到红移分布周期性并不是一件全新的事。自从 60 年代发现了类星体后，Burbidge 等学者就指出，类星体的红移分布存在着周期性。近年来我们在这方面做了一系列的分析工作，系统地分析了类星体发射线红移^[12]，类星体吸收线红移分布^[13]，类星体 Ly- α 吸收线^[14]，与低红移星系成协的类星体红移分布^[15]和射电选类星体^[16]等各种不同样品，发现它们都存在着周期性分布，并且满足同一公式： $\Delta \ln(1+Z) = 0.2$ 。中国科大天体物理中心的研究小组并提出了在标准宇宙学模型框架内，可以利用多连通拓扑的模型(T_3 模型)，统一地解释这些现象。目前这方面工作进一步引起广泛注意。正如 Davis 在同一篇文章中评述了周期性的发现引起宇宙学的困难后指出，也许这表明我们宇宙的空间拓扑确实是多连通的^[17]。最近 Burbidge 著文也指出，在标准宇宙学模型中目前只有这个模型可以解释

周期性现象^[18]。

七、回顾和展望

自从 1940 年 G. 伽莫夫提出热大爆炸模型后, 半个世纪过去了。按照这个标准模型, 今天我们观测到的宇宙中的大尺度结构, 是由于在极早期宇宙中极小的密度涨落通过引力作用而发展起来的。80 年代提出的暴胀宇宙模型的一个十分吸引人之处, 在于它可以从极早期宇宙中剩余的量子涨落来给出宇宙中的初始扰动, 特别是它的谱, 即高斯型随机扰动。从某种意义上讲, 它也是目前唯一的一种理论, 其预言可以严格地与观测结果进行比较。然而, 目前观测发现的大尺度结构远远超出了暴胀理论所能预言的尺度! 与此同时, 各式各样的模型层出不穷, 但是至今仍没有一种模型可以很好地解释上面我们所提出的那些新的观测事实。Peebles 在 1990 年法国会议的总结报告中, 又拿出了 A. Dekel 在 Vatican 会议上展示的一张图 (图 8), 图中显示了目前各种理论模型流行程度随时间的变化, 可以作为在这一领域研究工作的一个很有意思的总结。

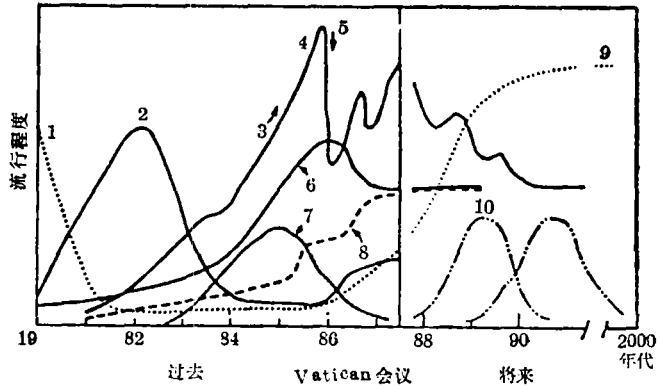


图 8 宇宙中大尺度结构形成的各种理论模型流行程度的演化

1. baryons: 重子(模型), 2. γ 中微子(模型) 3. biasing 偏袒假设
4. CDM(冷暗物质) 5. streaming 大尺度流动 6. strings 宇宙弦
7. DPC 衰变粒子模型 8. exploding 爆炸模型 9. CBM 冷重子暗物质
10. new fashions 新的流行模型

从图中可以看到 80 年代中最引人注目的理论是冷暗物质模型(CDM), 认为宇宙中 90% 的物质是不发光的非重子暗物质, 即 WIMPs(非常弱相互作用的重质量粒子, 粒子物理理论预言了这类粒子的存在, 但是迄今为止实验上并没有发现任何一种这类粒子)。特别是在引入了“偏袒”(biasing)机制后, 这种理论在 80 年代中期达到了高潮。但是这种模型只能解释尺度小于 10Mpc 的结构, 特别是 1986 年发现了大尺度流动现象后, CDM 模型的可信性直线下降。随着近几年来宇宙学中越来越多的新发现, 它的重要性将越来越下降。即使是 CDM 理论研究的几位权威人士, 也不得不承认这一点。具有非零静止质量的中微子也是暗物质的一个重要候选者, 称之为“热暗物质”。80 年代初与粒子物理实验中有人声称测到中微子的静止质量相呼应, 热暗物质模型在宇宙学中也受到重视, 特别是 Zeldovich 的“薄饼”理论。但是很快就发现这种模型虽然能说明很大尺度上的超团结构, 但它无法解释星系的形成和小尺度上的结构, 因而受到冷落。其他各种理论模型, 例如宇宙弦、爆炸模型、甚至更加奇异的拓扑效应“Domain Wall”、“Textures”……都有各自的一番兴衰史, 但是看来都不可能成为 90 年代的主流。在图 8 中, Peebles 等人把一直受到忽视的重子物质模型在 90 年代中抬到了新的高度。其根据是最近的观测倾向于 $\Omega \approx 0.2$, 而且重子型的暗物质(白矮星、行星、尘埃、气体, 甚至中子星、黑洞)都是客观存在而容易被天文学家所接受, 当

然也不可避免渗入由于作者本人目前正在从事这方面理论研究而引起的个人偏爱。

综上所述,目前标准宇宙学模型遇到了严峻的挑战,预言将来宇宙学发展的方向将是一件十分困难的事情。现存的种种理论都有其难以克服的困难,当然肯定还会有不少学者继续企图修正目前的理论,使之适合新的观测事实,或者对目前的观测结果作进一步的分析,使之与理论的矛盾趋于缓和。另一方面一些全新的概念,时髦的新模型,从物理学其他分支移植过来的新理论将会不断涌现,掀起一阵阵新的高潮。甚至完全否定热大爆炸的标准模型也不是不可能的。例如最近 Arp, Burbidge, Hoyle 等人在 *Nature* 杂志上发表的一篇长文^[10], 全面否定大爆炸, 否定宇宙学红移, 重新提起了 25 年前被宇宙背景辐射所否定的稳恒态宇宙学模型, 就是一个重要的动向。形势尽管错综复杂, 展望宇宙学将来的发展, 有一点是可以肯定的: 今后十年宇宙学的研究将会出现一个百家争鸣、蓬勃发展、欣欣向荣的新时期, 宇宙学无疑将是天体物理学中最活跃的前沿领域之一。

作者附注: 最近一段时间以来, 对宇宙学标准模型提出挑战的新观测事实似乎层出不穷, 接二连三地涌现出来。在本文成稿以后, 又看到一些新成果发表出来。例如牛津大学天文学家所做的 APM 星系巡天又一次在宇宙学界引起轰动。APM 星系巡天用计算机搜寻了 185 个 UKST 底片, 覆盖了约 4300 平方度的广阔天空, 证认了亮于 $b_J = 20.5$ 的星系共 200 万个(见 Maddox, S. J., Efstathiou, G. et al., *Mon. Not. R. astro. Soc.*, 242 (1990), 43), 并进行了星系两点角相关函数分析。这个巡天工作小组成员 Efstathiou 在介绍他们的工作时说, “我们找到了尺度至少为冷暗物质模型所预言的两倍的成团性的证明”, 因此 CDM 模型要么必须修改, 要么就废弃。由于 Efstathiou 是首创冷暗物质模型的所谓“四人帮”之一, 他的意见使得所有宇宙学家都感到震惊。限于篇幅不能在此详细介绍, 希望以后有机会再向读者介绍这方面的进展。

参 考 文 献

- [1] Mather, J. and Cheng, E. et al., *Ap. J. Lett.*, 354 (1990), L 37.
- [2] Schwarzschild, B., *Physics Today*, 43 (1990), No. 3, 17.
- [3] Boesgard, A., Steigman, G., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 23 (1985), 319.
- [4] Steigman, G. and Olive, K. et al., *Phy. Lett.*, B 175 (1986), 33.
- [5] Olive, K. and Schraunn, D. et al., *Phy. Lett.*, B (1990), in press.
- [6] Proceedings of the ESO-CERN topical workshop on LEP and the universe, ed. by J. Ellis, P. Salati and P. Shaver, ESO preprint No. 715, (1990).
- [7] Geller, M. J., Huchra, J. P. and Lapparent, V. d., in *Observational Cosmology*, ed. by A. Hewitt, G. Burbidge and L. Z. Fang, Reidel Dordrecht, p. 301, (1987).
- [8] Geller, M. J. and Huchra, J. P., *Science*, 246 (1989), 897.
- [9] 向守平, 程福臻, 刘建敏, *天文学进展*, 8 (1990), 267.
- [10] Dressler, A. and Faber, S. M., *Bulletin of American Astronomical Society*, 21 (1990), No. 2, 1140.
- [11] Brodhurst, T. J., Ellis, R. S., Koo, D. C. and Szalay, A. S., *Nature*, 343 (1990), 726.
- [12] Fang, L. Z., Chu, Y., Liu, Y., Z. and Cha, Ch., *Astron. Astrophys.*, 106, (1982), 287.
- [13] Chu, Y., Fang, L. Z. and Liu, Y. Z., *Astrophys. Lett.*, 24 (1984), 95.
- [14] Chu, Y. and Zhu, X. F., *Astron. Astrophys.*, 222 (1990), 1.
- [15] Zhu, X. F. and Chu, Y., *Acta Astronomica Sinica*, 31 (1990), 132.
- [16] Arp, H. C., Bi, H. G., Chu, Y. and Zhu, X. F., *Astron. Astrophys.*, (1990), in press.
- [17] Davis, M., *Nature*, 343 (1990), 699.
- [18] Lurbidge, G. and Hewitt, A., *Ap. J. Lett.*, 359 (1990), L 33.
- [19] Arp, H. C., Burbidge, G. and Hoyle, F. et al., *Nature*, 346 (1990), 807.

New Progress in Cosmology

Chu Yaoquan Zhu Xingfen

(Center for Astrophysics, University of Science and Technology of China)

Abstract

Recent progress in cosmology in particular new spectacular observational results, is reviewed in an all-round way. The new measurements of the cosmic microwave background radiation by the COBE satellite and the LEP experimental results support strongly the hot Big Bang model. On the other hand, recent discoveries of the gigantic structures in the universe, such as the Great Wall, the Great Attractor and the periodic distribution of redshift of galaxies, seriously challenge the standard view of cosmic model.