

# 微波背景辐射谱和宇宙的结构

章 德 海

(中国科学院研究生院 北京 100039)

2000 年公布了宇宙学领域中的一项重大观测结果, 这就是 Boomerang 和 Maxima 两实验组利用毫米段微波望远镜较准确地测得了宇宙微波背景辐射(CMBR)功率谱, 特别是其第一峰。微波望远镜是一个由液氦三超低温冷却并由氮化硅微网吸收器组合的阵列辐射仪, 被吊挂在巨型探测气球之下。以 Boomerang 组为例, 气球于 1998 年底在 38 千米高空沿南纬 80 度线绕南极一圈巡航了 10 天, 多遍扫描了占全天空 3% 的南极天



区, 经漫长的数据处理后, 直到 2000 年 4 月才公布了部分数据的处理结论。2001 年, 两实验组又有更精确的观测数据问世。

1964 年被首次观测到的 CMBR 是弥漫在整个宇宙空间中的光子气体, 其温度很低只有绝对温度 2.726 度。在如此低的光子温度下, 光子的平均自由程比我们的可见宇宙还大, 它们之间不可能发生碰撞, 因此它目前绝对不可能处于由热传递建立的平衡态中, 但它却具有宇宙间我们遇到的最精确的黑体辐射谱。这充分表明光子气体在遥远的过去确曾处于高温高密的热平衡状态中, 宇宙均匀膨胀并不改变其能谱, 这是宇宙曾经历过大爆炸的 3 大强有力证据之一。另外两大证据分别是宇宙的哈勃红移和轻元素合成。尽管这些光子气体的分布是高度均匀和各向同性的, 它实际具有温度差为五万分之一度左右的静态涨落, 这种涨落在 1991 年第一次被 COBE 卫星观测到, 但那时分辨率太差。这种涨落并非在各种尺度(或角度)下都是等幅的, 它有一个构形丰富的功率谱, 其中蕴藏着早期宇宙的大量珍贵信息。正是以这些微小涨落为种子, 在引力塌缩和宇宙膨胀的双重作用下, 该涨落首先被冷暗物质逐渐放大, 从而形成了各类星系, 星系团, 空洞等宇宙的大尺度结构。科学家们不必求助于未知的物理

知识, 只要作出极少简单合理的假定和给定少数几个宇宙学参数, 就能运用成熟的物理理论准确预知 CMBR 涨落的结构。反过来, 只要测量到 CMBR 的功率谱, 人们就可以检验宇宙模型和推知许多重要的宇宙学参数。例如, 宇宙中有多少重子型物质和非重子型暗物质? 宇宙有没有非零真空能? 宇宙中有没有大量的拓扑缺陷? 宇宙究竟是闭的, 平的, 还是开的(其曲率分别为正, 零, 负)? 这些问题关系到宇宙的起源, 根本结构和未来命运。

运。

理论的重要预言是功率谱中存在多峰结构, 第一峰即最大热斑张开约天区 1 度略小的弧长, 幅值最高(近万分之一度的温差); 其余各峰(冷或热斑)尺度几乎成倍减小, 幅值下降。CMBR 是宇宙大爆炸开始发动后约 30 万年时, 由于宇宙的膨胀冷却, 自由电子被氢原子核俘获, 高温光子气体停止了与自由电子的相互散射, 于是光子开始了它的自由传播和膨胀红移所形成的, 它是宇宙大爆炸火球的余烬。在光子与电子退耦之前, 当时宇宙中的物质能量密度刚刚超过辐射能量密度, 宇宙刚刚转入物质为主时期不久, 光子与重子以电子为粘接剂强烈耦合形成重子光子单一流体, 在重力和辐射压强的竞争作用下发生类似声波那样的疏密振荡。突然由于宇宙温度冷却到一个临界点, 电子被氢原子核俘获形成中性氢原子, 光子与重子间的强烈耦合突遭退耦, 其振荡间的关联被瞬间保留了下来, 这就是 CMBR 中各向异性功率谱峰结构的形成原因。我们可以把它形象化为一锅沸汤突遭冻结, (从最后散射面的观点看) 出现了崎岖不平的静态表面。今天的宇宙已有约 140 亿年的漫长历史, 大多数宇宙的远古遗迹已消失殆尽, 惟有 CMBR 各向异性图谱像宇宙初生时(红移高达 1100, 即那时的宇宙比现在

的宇宙小 1100 倍, 那时的光子波长也比现在的背景光子波长小 1100 倍) 的一幅快照被保留下来展现于人们的眼前, 这不能不说是宇宙留给我们的一份珍贵遗产, 是破译宇宙奥秘的罗塞塔石碑。

要在周边环境的众多强干扰下测出十万分之一度的温差分布图必须有非凡手段。Boomerang 测得的第一峰在功率谱中的位置即多极数为 197 加减 6 (以 180 为分子、以多极数为分母相除可换算为天区角度数, 圆周长为 360 度), 温度涨落为 69 加减 8 微度。这一多极数观测值接近平坦宇宙的理论预言值, 于是宇宙极可能是平的, 以宇宙临界密度为单位的宇宙总密度在 0.88 到 1.12 之间, 这是宇宙学家所焦急等待的结果。带峰大值温度涨落初步淘汰了宇宙大尺度结构起源于宇宙拓扑缺陷的简单型理论。第一峰位置再配合 1998 年通过观测高红移(约 0.4 左右, 折合约 40 亿光年之遥) Ia 型超新星发现的后期宇宙极慢加速的膨胀现象, 宇宙学家可初步肯定, 在宇宙的临界总质能密度中, 物质(其主要成分为冷暗物质) 约占 30%, 其余的约 70% 是物理学家非常陌生的宇宙暗能量, 这是极为惊人的结论。本来物理学家就为继续成为新世纪之谜的冷暗物质的本质和探测所困惑, 现在又要为宇宙暗能量(颇为类似于宇宙学常数) 的非零性和微小性及其本质而大伤脑筋。这是对宇宙产生重大影响的质能新形态。宇宙为我们认识未知世界打开了崭新的窗口, 往往出乎意料地向基本物理理论提出严峻的挑战。

CMBR 涨落也暴露了标准大爆炸宇宙学的基本疑难。既然复合期之前光子气体处于热平衡中, 为什么它不干脆把十万分之一的涨落彻底抹去而只留下极小的热涨落? 当然一个原因是那时的宇宙年龄太短, 相互作用来不及传递到当时的视界(即从宇宙诞生到当时可能传播的最远距离) 以外。于是问题又反过来, 既然那时的视界比当时的宇宙小很多, 为什么被视界分割的毫无因果联系的各区域竟然有十万分之一的高度均匀性? 这正是宇宙的暴胀理论赖以提出的基本点。该理论推测宇宙的极早期(约  $10^{-23}$  秒) 可能有过一段短暂的极快加速的持续膨胀(所谓“慢滚暴胀”), 它急速地把一个具有量子涨落的仅有微观尺度的极小块因果相关区急剧拉大。当宇宙转为减速膨胀后看上去就存在了多个相互高度均匀的非因果区。这样的理论预言了一个平

宇宙和一个近无标度的原始功率谱, 由此推算出的 CMBR 谱特征正是 Boomerang 和 Maxima 所观测到的谱特征! 即, Boomerang 和 Maxima 所观测到的结果是对宇宙暴胀理论的一个有力支持。CMBR 的涨落乃至宇宙大尺度结构追根到底起源于暴胀时期微观的固有量子涨落, 这是宏观微观相互融合统一的奇观和证据。基于此 CMBR 搭起了通向宇宙极早时期和极高能量物理(接近大统一能标) 的可供观测的桥梁, 这是地球上的传统实验乃至大型加速器所难以或原则上不能达到的能标, 它在人类认识宇宙及其物理规律的过程中其意义将非同小可。也许好奇的人会问, 宇宙为什么最初会暴胀? 或许宇宙的量子诞生能回答这类问题。但越是追问宇宙的甚早期, 我们越缺乏赖以推理的有关甚早期或甚高能物理的可靠知识, 供选择的可能性越多, 以至久经考验的爱因斯坦时空概念都将会有根本性的改变, 于是我们越不能作出较为确定的或可供观测检验的预言。CMBR 的奇特之处就在于, 它居然把我们对宇宙的一种可供检验的认识推到那么遥远那么深邃的令人难以置信的程度, 这标志人类对宇宙的认识已取得了重大的进展。

最初的 Boomerang 和 Maxima 的观测结果也给我们带来了一些困惑。理论预言谱中应出现多峰结构, 特别是第二第三峰。但观测结果显示有第三峰, 但第二峰很不明显。正是这个第二峰对于决定宇宙重子数有绝对关键的作用, 它的压低代表了重子成分对光子气体惯性的增加。于是各种新解释纷纷涌现, 一个特别的提案是宇宙的实际重子密度可能比大爆炸核合成预期值高。观测结果还显示第一峰位置略为偏低, 预示宇宙可能是略为闭的, 这或另有原因, 或是将对暴胀理论提出新的挑战。今年新的更精确的观测结果表明这些矛盾完全没有最初显现的那么大, 与标准理论预言符合得相当好, CMBR 得出的重子密度与大爆炸核合成得出的结果基本一致。这更加证明了 CMBR 理论的辉煌成功。2001 年美国将发射高灵敏度高分辨率的 CMBR 观测卫星 MAP, 2007 年欧洲将发射更高精度的普朗克卫星。可以预期将来几年 CMBR 的数据会更加精确, 对理论的检验会更加严格, 更深地推进我们对宇宙的认识。宇宙学曾被看做是最不精确的“科学”。现在一个“精确宇宙学”的新时代正在到来。