

## 第二讲 宇宙微波背景辐射\*

章德海<sup>†</sup>

(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 简单介绍了近年来关于宇宙微波背景辐射在观测上取得的重大进展,以及有关它的解释、理论和意义.宇宙微波背景是我们了解宇宙奥秘的一个至关重要的窗口.在未来几年,它还将扮演更加重要的角色.

**关键词** 宇宙微波背景 暗能量,宇宙暴涨

### Cosmic microwave background radiation

ZHANG De-Hai<sup>†</sup>

(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Recent important progress in the observation of cosmic microwave background radiation is reviewed with comments on its explanation, theory and significance. As a key window through which the riddle of our Universe can be explored, the cosmic microwave background will play a more important role in the future.

**Key words** cosmic microwave background radiation, dark energy, inflation

近四年来,在宇宙学方面取得了重要进展.通过一系列的实验观测,从1998年的Boomerang和Maxima的南极气球探测开始,到2003年的WMAP(威耳逊微波背景辐射各向异性探测器)卫星探测,对宇宙微波背景辐射的观测更加深入细致.

1964年被首次观测到的CMBR(宇宙微波背景辐射)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的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三大强有力证据之一.另外两大证据分别是宇宙的哈勃红移和原初轻元素丰度.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,但那时分辨率仅为7度.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,在引力坍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.

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四十万年时,由于宇宙的膨胀冷却,自

\* 2004-09-02收到初稿,2004-11-04修回

<sup>†</sup> Email: dlhzhang@gucas.ac.cn

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,光波发生膨胀红移,从而形成了现在的宇宙微波背景辐射.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谷结构的形成原因.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),出现了温度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,唯有 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以  $1\mu\text{K}$  的精度和 0.2 弧度的分辨率测出全天温差分布图必有非凡手段. WMAP 测得的第一峰在功率谱中的位置即多极数为  $220 \pm 1$  (以 180 为分子,以多极数为分母相除可换算为天区角度数,圆周为 360 度),温度涨落为  $75 \pm 1\mu\text{K}$ . 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 1.00 到 1.04 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 年以来通过观测高红移(约 0.4 至 1.7,折合约 40 至 90 亿光年之遥) Ia 型超新星发现的后期宇宙由减速膨胀变为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(相当类似于宇宙学常数)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光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只有十万分之一的高度均匀性?这正是宇宙的暴涨理论赖以生存的基本点.该理论推测宇宙的极早时期(约  $10^{-32}\text{s}$ )可能有过一段短暂的极快加速的持续膨胀(所谓“慢滚暴涨”),它急速地把一个具有量子涨

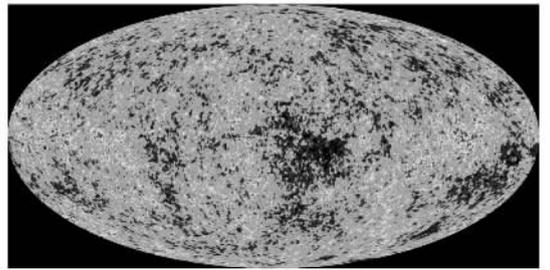


图 1 宇宙微波背景辐射各向异性温差天球图

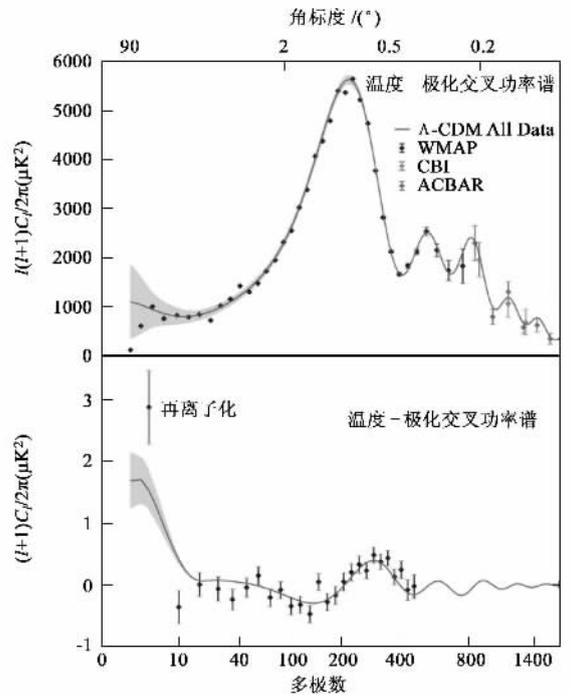


图 2 CMBR 功率谱

落的仅有微观尺度的极小块因果相关区猛烈拉大,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

和一个接近无标度的原始功率谱,由此推算出的 CMBR 谱特征正是 WMAP 所观测到的谱特征!即 WMAP 所观测到的结果是对宇宙暴涨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涨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.基于此据, 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意义将非同小可.也许好奇的人会问,宇宙为什么最初会暴涨?或许宇宙的量子诞生能回答这类问题.但越是追向宇宙的甚早期,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,以致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.

WMAP 的观测结果也给了我们更多的信息.理

论预言谱中应出现多峰结构,特别是第二、三峰.观测结果果然显示有第二、三峰.正是这个第二峰对于决定宇宙重子数起绝对关键的作用,它的压低代表了重子成分对光子气体惯性的增加.由此决定了重子物质的比例为 4%. CMBR 得出的重子密度与大爆炸核合成得出的结果完全一致.这更加证明了 CMBR 理论的辉煌成功.2007 年欧洲将发射更高精度和分辨率的 Planck 卫星,特别是将对至关重要的 CMBR 极化信息进行探测.极化信息在 WMAP 中已有初步测定,这就是 TE 交叉分量,在 Planck 观测中有可能测到更关键的 EE 和 BB 分量.这将使人们探测到宇宙暴涨期的引力波信息,对检验暴涨模型起到关键作用.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.宇宙学曾被看作是最不精确的“科学”,现在一个“精确宇宙学”的新时代已经到来.

### 参考文献

- [1] Bennett C L *et al.* astro-ph/0302207  
[2] Hu W, Sugiyama N, Silk J. Nature, 1997, 386: 37

# BSOE 北京晨辉日升光电技术有限公司

## BEIJING SUNRISE OPTOELECTRONICS CO., LTD.

——专业激光及光电产品代理商

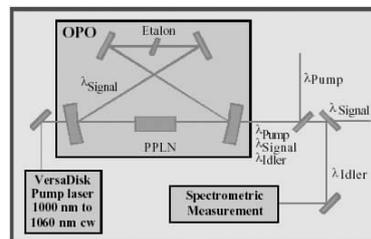
### 德国 ELS 公司

**VersaDisk:** 连续固体激光器,采用德国斯图加特大学专利 Thin Disk 技术 (DE 19835107A1), 获得 Excellence Award 2003 大奖。

- 1030nm, 连续输出:
  - 输出功率: 5/10/20/30/50/100W, TEM<sub>00</sub> 模, 并有大于 50W 的单频输出 (线宽<5MHz)。
  - 波长可以在 1000-1060nm 范围选择。
  - 自锁模型 (采用可饱和吸收镜技术), 重复频率 100MHz, 脉宽 500fs。
  - 应用: 原子冷却, 光镊, 中红外高分辨率光谱 (与连续可调谐 OPO 一起使用)。
- 515nm, 连续输出: 可选 515/1030nm 双波长输出。
  - 单频输出功率 (线宽<5MHz): 2.5/5/10/15W, TEM<sub>00</sub> 模。
  - 波长可以在 514-517nm 范围选择, 可完全替代氩离子激光器。
  - 应用: 高功率钛宝石和染料激光器泵浦、绝对频标、干涉、全息、印刷。

**SpectroStar:** 高功率连续中红外 (2-5  $\mu\text{m}$ ) 参量振荡器 (OPO):

- 谱段范围: 2-5  $\mu\text{m}$ ; 峰值输出功率: 3W@2954nm(泵浦功率 20W); 线宽:  $<5 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$  (15MHz); 连续扫描范围:  $5 \text{cm}^{-1}$  (150GHz)。
- 应用: 中红外高分辨率光谱, 如大气科学中的痕量气体分析, 光声光谱, 废气检测, 机载大范围陆地和海洋污染探测, 大气污染分析等。



欲了解我公司产品详细信息, 请参阅我公司网站: [www.bjlaser.com](http://www.bjlaser.com)

公司地址: 中国北京市朝阳区望京新城 A5 区 422 楼 806 室 邮编: 100102

电话: 010-84718152

传真: 010-64740680

电子邮件: [zzw512@vip.sina.com](mailto:zzw512@vip.sina.com)