

# 宇宙微波背景辐射的发现

林木欣

(华南师范大学物理系)

许国材

(广东教育学院物理系)

## 一、Penzias 和 Wilson 检测到 多余的天线温度

1963年初,在美国贝尔实验室,两位青年人把一台通讯接收设备改为射电望远镜,开始了他们的射电天文学事业。一位是来自哥伦比亚大学的 A. A. Penzias,另一位是来自加利福尼亚理工学院的 R. W. Wilson。两人都是在1962年取得博士学位的。

他们原来的计划是测量银河系内高纬星系的银晕辐射<sup>[1]</sup>。他们的射电望远镜由天线和辐射计组成。采用的20ft喇叭型天线是该实验室于1960年为接收从“Echo”卫星上反射回来的信号而建造的,包括一个逐渐扩展的方形波导管(喇叭)和一个扇形旋转抛物面反射器。喇叭的顶点跟抛物面的焦点重合,沿着抛物面轴线传播的平面波,聚焦到顶点的辐射计接收。辐射计是测量辐射强度的装置,安放在喇叭顶端的小屋内,以便尽量减少联接导管引起的损耗和噪声。它采用滤波器选出需要的频率,然后用检波器输出正比于输入功率的电压。检测器前面装有放大器以增强信号,他们装备了当时世界上噪声最低的红宝石行波微波激射器,使得辐射计非常灵敏。为了排除地面的辐射,辐射计由喇叭很好地屏蔽<sup>[2]</sup>。

射电望远镜的基本性能是灵敏度和分辨率<sup>[3]</sup>。灵敏度的提高,主要是受接收系统的噪声限制,特别是辐射计的噪声。Penzias等人由于采用了微波激射器,其灵敏度有了保证。分辨率的提高主要是受天线孔径限制,他们的天线孔径虽然不算很大,分辨率也就不算很好,但

对于测量大角尺度的射电源来说,已完全满足要求。

他们打算用21cm的微波作为工作波段。因为根据已有的射电观测推算,银晕在21cm波段足够明亮,同时他们还准备进一步观测中性氢原子约21cm的谱线。由于他们正好有一台现成的7.35cm红宝石行波微波激射器可供利用,这是“Telstar”通讯卫星的备用设备,于是他们先在7cm波段上开始天线的测试工作。

为了精确测量天线本身和背景的噪声,他们把天线与一个参考噪声源相比较。他们采用液氮致冷的一段波导管作参考噪声源,因它能产生确定功率的噪声。由于这种源的噪声功率只与基本物理定律(平衡热辐射)相联系,故可取作噪声基准。噪声功率用等效温度表示。估计天线温度测量值的误差为0.3K,在天顶处所测得的总的天线温度为 $6.7 \pm 0.3\text{K}$ <sup>[4]</sup>。他们对天线各项噪声的等效温度作了如下分析:大气辐射温度为 $2.3 \pm 0.3\text{K}$ ,天线和波导器件损耗温度为 $0.8 \pm 0.4\text{K}$ ,背瓣温度小于0.1K,故天线的等效噪声温度只有 $3.2 \pm 0.7\text{K}$ 。把总的天线温度减去上述各项噪声源的温度,得到 $3.5 \pm 1\text{K}$ (这是第一次公布的数据)。他们得到的多余温度值3.5K远大于实验误差1K,这是一个实际存在的问题。除非他们能够找出原因,否则他们测量银晕辐射的计划无法继续进行。

他们用了近一年的时间,耐心地寻找和分析可能产生多余温度的原因:

(1)有些射电天文学家认为,大气的微波吸收不是2.3K,应为5K。但是,他们重新测量的结果,肯定了原来的数值是正确的;

(2)考虑可能有的射电辐射源,他们排除

了银河系外离散源与银河系内对天线产生这一多余温度的可能性；

(3) 他们反复测试地面来的噪声，证实背瓣的噪声值确实很低。

因此，他们又把天线本身看作是多余噪声的来源。他们再核实理论计算和进行实测，清洗和校准各部件之间的接头，在喇叭的铆接处贴上铝带以减小损耗，但这些措施只能使天线温度稍有降低而已。最有戏剧性的是，他们曾发现一对鸽子栖息在喇叭的喉部，驱逐鸽子以后，看到喇叭喉部内表面有一层鸽子留下的白色脏物，估计有可能会是多余噪声温度的来源。但是他们在1965年初拆开清洗后，多余的天线温度还是降低很少。

Penzias 和 Wilson 由此而感到困惑。因为实验是严密的，精确的，而天线的多余温度却总找不到产生的原因，怎么办？

## 二、Dicke 小组当时正在寻找宇宙残留辐射<sup>[5]</sup>

Penzias 等人的射电望远镜座落在克劳福德山上，著名的普林斯顿大学离那里只有几英里远。该校有位老资格的实验天体物理学家 R. H. Dicke，领导着一个小组正在开展一项探索性的研究。1964年，他设想可能存在着由宇宙早期的炽热高密度时期残留下来的某种可观测的辐射。Dicke 的设想有其局限性，他以宇宙的“振荡”理论为基础，即认为宇宙是反复地膨胀和收缩的。当宇宙收缩到  $10^{10}\text{K}$  的高温时，会把前一阶段的重元素破坏掉，而在这极密、极热状态下应存在着高密度的光辐射，后来这光辐射会随宇宙的膨胀而冷却，成为今天在宇宙中残留着可观测的背景辐射。Dicke 建议 P. G. Roll 和 D. T. Wilkinson 进行观测，于是他们在普林斯顿大学的 Palmer 物理实验室的屋顶上，动手建造有能力对 3cm 热辐射作绝对测量的辐射计和喇叭天线，以寻找这种宇宙背景辐射。

Dicke 还建议 P. J. E. Peebles 对这问题

进行理论分析，研究宇宙背景辐射测量结果的宇宙学意义。Peebles 于1965年3月写出了论文，并以预印本形式传送。这论文明确地把现存的残余辐射说成为一种可探测的微波现象，并叙述在极热宇宙中的重元素分解后，轻元素重新产生的图景。他在霍普金斯大学作过一次讲演，阐述这种想法和推论。

就在1965年春的某一天，Penzias 和麻萨诸塞理工学院 (MIT) 的射电天文学家 B. Burke 通电话，顺便谈及他们难以解释的多余噪声温度。Burke 想起在卡内基研究所工作的一个同事 K. Turner 曾谈及过 Peebles 的讲演，于是建议 Penzias 与普林斯顿大学的 Dicke 小组联系，可能他们对这些难以理解的结果会有一些有趣的想法。

Penzias 与 Dicke 通了电话，Dicke 马上寄来一份 Peebles 的预印本，接着 Dicke 及其同事访问了克劳福德山，看了 Penzias 和 Wilson 的天线设备，并一起讨论了测量的结果。Dicke 小组相信 Penzias 等人的测量精度，认为所得到的结果正是要寻找的宇宙微波背景辐射。

双方协议在《天体物理杂志》上同时发表两篇简讯，一篇是 Dicke 小组的理论文章《宇宙黑体辐射》<sup>[6]</sup>，另一篇是 Penzias 和 Wilson 的实验报告《在 4080MHz 处天线多余温度的测量》<sup>[4]</sup>。Penzias 和 Wilson 宣称：“有效的天顶噪声温度的测量，得出一个比预期高约 3.5K 的值。在我们观察的限度以内，这个多余的温度是各向同性的、非偏振的，并且没有季节的变化(1964年7月—1965年4月)”。他们小心地不谈背景辐射的宇宙起源理论，只是提到：“所观察的多余噪声温度的一种可能的解释，由本期中 Dicke, Peebles, Roll 和 Wilkinson 所写的另一篇简讯给出”。因为他们考虑到自己还未做过宇宙学方面的研究工作，并且测量是独立于理论的，可能比理论更经得起考验。

## 三、确认天线的多余温度来自宇宙背景辐射

上述两篇简讯发表以后，引起了极大的反

响。天线的多余温度是否真的来自宇宙背景的辐射？这就需要分析这种辐射的特征，看测量结果是否与预言相符。

按理论分析，在宇宙早期极热状态下，光辐射是处于热平衡状态的。热平衡辐射（或称黑体辐射）具有以下特点：一是各向同性；二是辐射能量密度  $u_\lambda$  的分布遵从普朗克定律：

$$u_\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

进一步的分析表明，随着宇宙的膨胀，宇宙会逐渐冷却，残留的光辐射虽然不再是平衡辐射，但仍然保持着普朗克分布的谱形。由于各向同性已被 Penzias 和 Wilson 的观测初步证实，故检验这种辐射在不同波长的能量密度是否遵从普朗克分布定律，是对天线的多余温度可以用宇宙背景辐射来解释的严峻考验。

1965年12月，Dicke小组的 Roll 和 Wilkinson 完成了他们在 3.2cm 波段的测量，得到的结果是  $3.0 \pm 0.5K$ 。不久，T. F. Howell 和 J. R. Shakeshaft 在 20.7cm 上测得  $2.8 \pm 0.6K$ 。随后 Penzias 和 Wilson 在 21.1cm 上测得  $3.2 \pm 1K$ 。但从 3K 黑体辐射的分布曲线看出，辐射强度的峰值在波长为 0.1cm 附近。而以上测量都在波长较长的范围进行，故只有取得比 0.1cm 更短的波长处的测量值，才能充分说明宇宙背景辐射是否符合普朗克分布。但是，这个频段的实验较难做，需要在高空中进行，因为 0.1cm 处于远红外范围，大气对它的吸收强烈。1972年，康奈尔大学的火箭小组和 MIT 的气球小组进行了观测，认为在远红外区域的宇宙背景辐射有相当于 3K 的黑体分布。1975年，伯克利加州大学的 D. P. Woody 领导的气球小组确定<sup>[7]</sup>，从 0.25cm 到 0.06cm 波段的宇宙背景辐射，也处于 2.99K 温度的分布曲线范围内，这是一项极为重要的验证。

因此，到了 70 年代中期，观测数据已肯定这种辐射有大约 3K 的黑体谱，实验结果与理论曲线符合较好，如图 1 所示。图中的圆点及其误差范围是观测值，理论曲线为 3K 黑体谱，阴影区域是 Woody 小组的 P. L. Richards 等

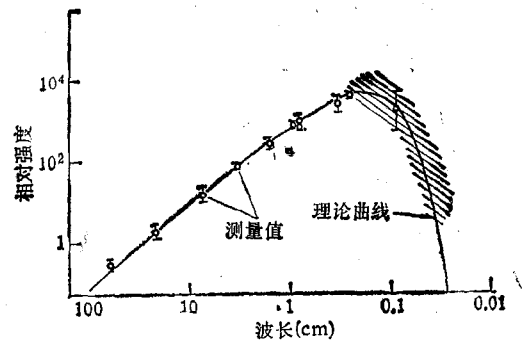


图 1 实际测量值与 3K 黑体谱的比较

人在红外短波范围的测量结果。

事实上，人们早在 1941 年就在实验上观察到宇宙微波背景辐射的影响，只是一直未认识到罢了。原来在蛇夫座  $\zeta$  星的光谱中早就发现了 3875 Å 的光学吸收线，据分析，在这方向的空间有氰分子 (CN) 的星际云存在<sup>[5]</sup>。1941 年，W. S. Adams 和 A. McKellar 发现这吸收线是分裂的，它有 3874.608 Å，3875.763 Å 和 3873.998 Å 三个成分。第一条吸收线对应于由 CN 的基态到某个振动态的跃迁；另外两条吸收线对应于基态之上的一个转动态跃迁到其他的振动态，因而星际云中的氰分子的相当部分应处在这个转动态中。McKellar 应用已知的基态与转动态的能量差及所观察到的各吸收线的相对强度，估计氰分子受到某种微扰，并且这微扰的有效温度为 2.3K。但是，当时没有什么理由把这种微扰与宇宙起源相联系，因而没有引起人们的深究。直到 1965 年，Penzias 和 Dicke 等人的工作发表以后，G. Field 等人才认识到使氰分子产生转动的微扰就是宇宙微波背景辐射。因此，对宇宙背景辐射也可以通过观察星际空间的分子的光学吸收谱来研究，Field 等在 1966 年对蛇夫座  $\zeta$  星和英仙座  $\zeta$  星的底片进行重新测量，得出激发温度分别为  $3.22 \pm 0.15K$  和  $3.0 \pm 0.6K$ 。

总之，自 1965 年以来，人们还没有找到解释多余的天线温度的另外原因，因此普遍承认 Penzias 和 Wilson 的天线接收到的神秘噪声干扰确实是宇宙微波背景辐射。这种辐射存在于宇宙空间各处，各向同性，并且具有大约 3K

的黑体谱,这是实验观测确认的事实。至于宇宙微波背景辐射是否属于早期宇宙辐射的遗迹,那是一种理论假设,但现在的观测事实是有利于这个假设的。

#### 四、宇宙背景辐射的发现推动着宇宙学的发展

宇宙微波背景辐射的发现,对宇宙学的研究有着非常重大的历史意义。为此, Penzias 和 Wilson 荣获了 1978 年诺贝尔奖金物理学奖。

宇宙学是在本世纪初才随广义相对论的提出而进入科学研究领域的<sup>[8]</sup>。早期的研究就提出了宇宙膨胀模型。1929 年,哈勃(E. Hubble)从星云的红移与距离的观测归纳出哈勃定律,即星系的视向退行速度与距离成正比,这就给出了宇宙膨胀的有力证据。在这个基础上,结合元素的核合成问题又提出了新的宇宙模型。40 年代后期, G. Gamov 及其同事 R. A. Alpher 和 R. C. Herman 提出了宇宙的大爆炸起源论,认为宇宙起源于炽热的高密度的原始火球,在膨胀过程中温度与密度不断下降。他们还对早期宇宙的元素形成进行过具体计算,结果表明,在核合成时期还应存在极高的光辐射密度,他们曾断言这种辐射的残余到现在还存在,目前的热辐射值约为 5K<sup>[9]</sup>。他们计算出宇宙中氢分子与氦分子的数目比为 7:1—10:1 之间<sup>[10]</sup>。但是,当时科学界普遍承认稳恒态宇宙模型,而未认真对待大爆炸理论。在研究元素起源的学者中,当时多数人认为元素更可能在恒星中形成。因此, Gamov 的预言并未产生多大影响。Dicke 等人是独立地重新作出宇宙残留辐射的(上接第 251 页)

Withers 博士,澳大利亚 Sydney 大学电镜中心 Cockayne 博士曾来实验室进行 1—3 个月的合作研究,完成了三篇论文。实验室在 1987 年及 1988 年都获得了国际理论物理中心(Trieste)的资助,召开了“准晶”及“电镜在材料科学中的应用”两次国际学术讨论会,有国际上知名学者 70 多人参加。准晶会议文集(651 页)

猜测的。

宇宙微波背景辐射的发现,为大爆炸理论提供了最有力的证据。这种辐射具有黑体谱的特性,是大爆炸理论的推论,用其他理论难以解释。根据宇宙在膨胀和宇宙存在着微波背景辐射,可推断宇宙是在演化的,它早期必处于极热极密的状态。这就把当时流行的另一种稳恒态宇宙理论彻底否定了。利用这种辐射温度约为 3K,还可计算出当今宇宙中的光子数密度  $n_\gamma \approx 500$  个/cm<sup>3</sup>;由观测估计当今宇宙中物质的重子数密度  $n_B \approx 0.2$  个/m<sup>3</sup>,可得光子数与重子数之比  $n_\gamma/n_B \approx 10^9$ 。理论上认为,这个比值是在宇宙膨胀过程中不变的重要数据。利用这些数据, Peebles 等人计算得宇宙早期氦的丰度。按质量计,氦核占 25—30%,氢核占 70%。这个结果与 50 年代的估计接近,而且与 60 年代的天文观测相容,于是氦的丰度又成为大爆炸宇宙论的另一重要证据。此外,人们还企图确定宇宙是开放的还是闭合的,因数据不足,尚未能得出结论。

- [1] R. W. Wilson, *Rev. Mod. Phys.*, 51(1979), 433.
- [2] A. B. Crawford et al., *Bell System Tech. J.*, 40 (1961), 1095.
- [3] 王绥琯等,射电天文方法,科学出版社,(1988).
- [4] A. A. Penzias and R. W. Wilson, *Astrophys. J.*, 142 (1965), 419.
- [5] S. Weinberg, *The First Three Minutes*, Basic Books Inc. Publishers, New York, (1977).
- [6] R. H. Dicke et al., *Astrophys. J.*, 142(1965), 414.
- [7] D. P. Woody et al., *Phys. Rev. Lett.*, 34(1975), 1036.
- [8] J. 希尔克,宇宙的起源与演化——大爆炸,科学普及出版社,(1988).
- [9] R. A. Alpher and R. C. Herman, *Phys. Rev.*, 75 (1949), 1089.
- [10] R. A. Alpher et al., *Phys. Rev.*, 92(1953), 1347.

已在国外发行,后一会议的文集也已在 1989 年初出版。此外还主编了“中国的电子显微学”论文集,作为专刊,于 1987 年在 *J. Electron Microscopy Techniques* 上发表。

实验室正在创始阶段,研究设备还要不断充实,研究方向也要不断开拓,希望继续得到各方的支持,进一步提高我们的科学研究水平,办成一个国际上知名的实验室。