

# 组合式黑体辐射实验装置的搭建和探究

杨平京 马世红

(复旦大学 物理学系, 上海 200433)

**摘要:** 利用 HFY-200BII 型黑体辐射源和相应的热辐射探测器以及微伏特计搭建了一套组合式黑体辐射实验装置。该装置的设计比较完善, 操作比较简单和成熟, 具有良好的可扩展性, 可以使学生充分理解其物理模型。笔者在该装置上验证了黑体辐射的基本规律, 论证了黑体辐射实验方法的可行性。

**关键词:** 黑体辐射; 辐射源; 探测器;

## 一、引言

作为近代物理的一个重要概念, 黑体辐射定理 (Stefan-Boltzmann 定理) 为热辐射的研究提供了非常好的基础, 并且该定理在现代自然科学研究的许多领域都有着广泛的应用。因此, 理解和掌握这一关系有重要的实际意义。

所谓黑体, 就是能够吸收外界所有波段的电磁波物体。黑体仅是一种理想模型, 自然界中不存在真正的黑体。实际应用的黑体是开有小孔并达到热平衡的密闭空腔。当物体的温度达到 0 K 以上时, 任何物体都会发射各种波长的电磁波, 称之为热辐射 (温度辐射)。作为黑体也是要产生热辐射的, 亦即为黑体辐射。黑体单色辐出度 (黑体表面单位面积发出的单位波长间隔内的辐射功率) 比相同温度下其他任何非黑体物质的单色辐出度要大很多, 黑体是一个完全的温度辐射体, 其辐射能力仅与其温度有关。与黑体辐射相联系的温度, 通常称之为色温。

黑体辐射实验是高等学校物理学专业学生必修课“近代物理实验”的实验内容之一, 其主要是借助于黑体实验装置来开展黑体辐射定律的实验验证。本文结合教学实践, 就 HFY-200BII 型黑体辐射源来搭建该实验装置和探究黑体辐射实验教学过程中常见的问题。

## 二、黑体辐射的实验原理

### 1. 热辐射:

物体受热会辐射热量, 温度够高时, 则可见光的份量多到肉眼可查觉, 这是人们多年的经验。1859 年 Kirchhoff 由热平衡推论, 所有物理的辐射能力和吸收率的比值都是一样的。即  $E/A = C$ , 其中  $E$  为辐射能力, 定义为单位面积单位时间内所辐射的能量,  $A$  为能量吸收率, 即吸收的能量和入射的能量的比值。因此, 吸收率高的物体应当也拥有比较高的发射能力。对于完全吸收的物体  $A = 1$ ,  $E = C$ , 具有最高的辐射能力, 我们称之为黑体。黑体在常温下辐射的能量大多是红外线, 肉眼无法观察, 而投射于黑体上面的可见光却完全被它所吸收。

### 2. 黑体辐射定律:

1879 年 Stefan 发现了一个经验公式:  $E(\lambda, T) = e\sigma T^4$ ,  $e$  为辐射率, 数值取 0 到 1, 对于黑体而言, 其值取 1。  $\sigma$  为常数, 取值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ 。 Boltzmann 在 1884 年从热辐射的压力和

-----  
**基金项目:** 国家自然科学基金“国家基础科学人才培养基金”项目 (J1103204, J0730310) 赞助。

**作者简介:** 杨平京 (1990-), 男, 上海市人, 复旦大学物理学系 2008 级物理学专业本科生。

**指导教师:** 马世红 (1963-), 男, 河南人, 复旦大学物理学系教授. E-mail: shma@fudan.edu.cn

热力学第二定律推导出了  $T$  的四次方与  $E$  成正比这样一个关系，因此我们称之为 Stefan-Boltzmann 定律， $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数。1894 年 Wien 分析空腔作绝热膨胀或收缩时候，由器壁反射的热辐射的 Doppler 效应得到热辐射的频率分布形式为  $E(\nu, T) = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$ ， $f$  为未知函数，通过某一温度对应的频率就可以得到任何温度的频率分布，得到 Wien 平移定律。

1899 年 Lummer 和 Pringsheim 对频率分布做了测量，Wien 定律在高频时较为符合，在低频时候误差较大。1900 年 Rayleigh 和 Jeans 将空腔热辐射分解为驻波形式，并得到了频率分布  $E(\nu, T) = \frac{2\pi h}{c^2} KT$ 。与 Wien 位移相比，这一公式在低频时结果较为相符，高频时候趋向无穷大（如图 1 所示）。

Planck 利用震荡电荷能量不连续的假设得到了 Planck 频率分布公式  $E(\nu, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/KT} - 1}$ ，其中  $h$  为实验数据决定的常数，这一公式在高频时符合 Wien 的结果，低频时符合 Rayleigh-Jeans 的结果，并且能够推导出 Stefan-Boltzmann 定律。直到 1916 年，Millikan 的工作计算出了 Planck 常数  $h$ ，与利用黑体辐射得到的数值只有 0.5% 的偏差，从而奠定了量子理论的胜利。

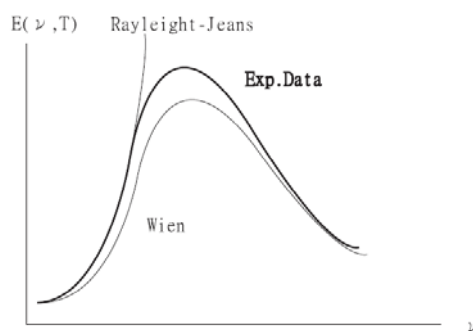


图 1 黑体辐射的频率分布示意图

### 三、实验装置

一个理想的黑体，最简便的方式是制作一个开有小孔的恒温炉，小孔的作用是保障进入其中的光子无法逃出。以使得恒温炉成为一个完美的吸收体。于是，当恒温炉设定于某个绝对温度  $T$  时，自小孔放射出来的辐射就是黑体辐射。黑体的辐射以及光谱分布只与温度以及波长相关。

实验所用 HFY-200BII 型黑体辐射源（温度范围：室温  $+5^{\circ}\text{C}$ ~ $1000^{\circ}\text{C}$ ；温度分辨率： $0.1^{\circ}\text{C}$ ；有效发射率：0.99；温度精确度： $\pm 1.5\%$  ( $<600^{\circ}\text{C}$ )， $\pm 0.25\%$  ( $>600^{\circ}\text{C}$ )；黑体前光栏直径： $\Phi 3$ 、 $\Phi 4$ 、 $\Phi 5$ 、 $\Phi 6$ 、 $\Phi 8$ 、 $\Phi 10\text{mm}$ （可选）；探测器： $K$  型热电偶；外形尺寸/重量：黑体  $380 \times 255 \times 290\text{mm}$  /  $9\text{Kg}$ ；调制器频率范围： $4\text{Hz}$ ~ $2000\text{Hz}$ ）由标准黑体（ $\text{Cr}_{18}\text{Ni}_9\text{Ti}$  材料），智能化控温仪，稳压电源，光栏和调制器（盘）组成（如图 2 所示）。

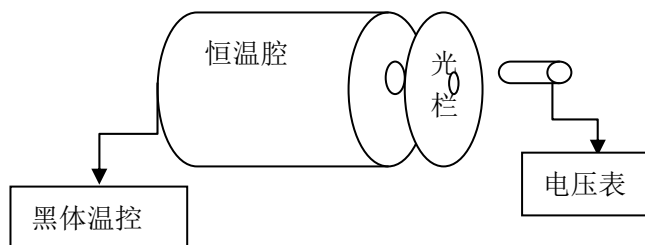


图 2 HFY-200BII 型黑体辐射实验装置示意图

笔者自行设计采用的探测系统为热电堆探测器与放大电路和电压表的组合。在温差  $\Delta T$  很小时，热电偶（堆）的输出电压  $V$  与  $\Delta T$  成正比即  $V \propto \Delta T \propto P$ ，输出电压和吸收功率  $P$  成正比。由于所用的热电偶（堆）是一种热辐射探测器，不是量子探测器，这使得其可工作的波长范围

较大, 约为  $0.15\ \mu\text{m}$  到  $15\ \mu\text{m}$ , 但是其缺点在于响应速度较慢, 且灵敏度低。为了克服上述缺陷, 笔者设计一个放大倍数为一千倍的放大电路接入热电偶 (堆) 之后, 其所得的输出电压值就可以直接由电压表直接测量。

因此, 通过电压读数, 可以观察到黑体的输出特性。再通过测量探测器和黑体放射源之间的距离  $d$ , 发射源孔径大小以及接受器大小可以计算出 Stefan-Boltzmann 常数数值。

#### 四、实验测量及数据

实验中, 在温度  $30^\circ$  到  $400^\circ$  的范围内, 每隔  $10^\circ$  采集一个数据点, 就可以方便地得到实际温度与电压的关系曲线 (如图 3 所示), 进而可以验证或获得相关的黑体辐射关系。

另外, 每隔  $20^\circ\text{C}$  采集一个数据点, 在温度  $400^\circ\text{C}$  到  $700^\circ\text{C}$  范围内的测量结果如图 4 所示。

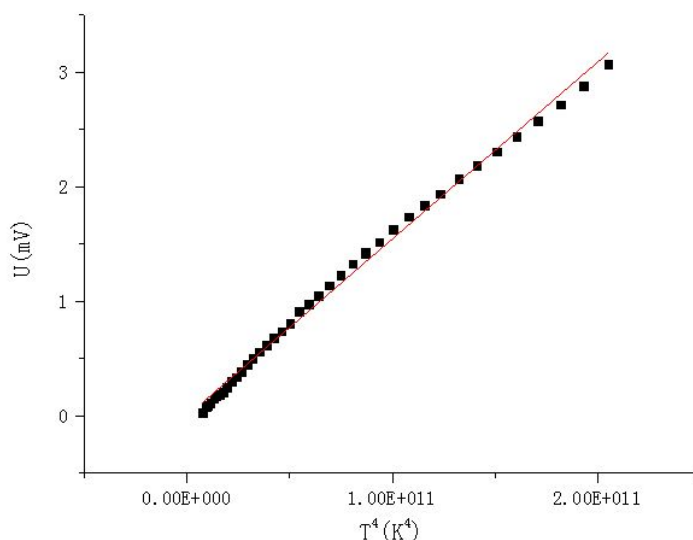


图 3 黑体的温度 - 电压 (功率) 关系曲线 (温度范围  $30^\circ \sim 400^\circ$ )

上述的实验结果均表明: 测量所得的实验数据比较稳定, 其温度  $T$  的四次方和电压的关系满足线性的物理规律。需要说明的是: 在低温范围内进行测量时 (详见图 3 所示), 结果发现其

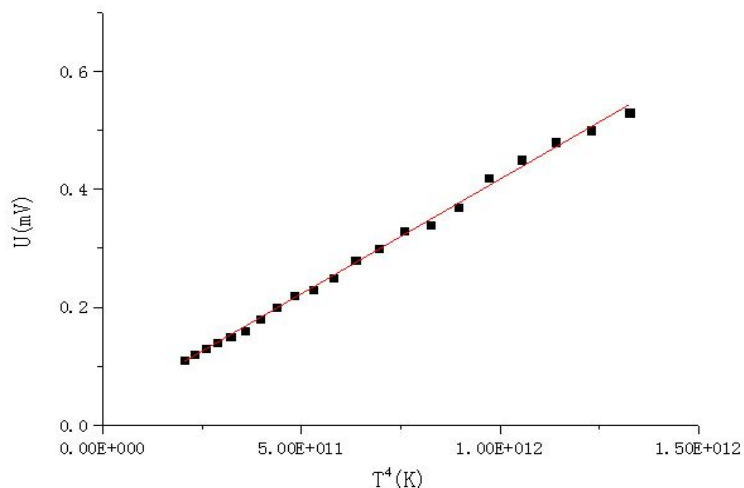


图 4 黑体的温度 - 电压 (功率) 关系曲线 (温度范围  $400^\circ \sim 700^\circ$ )

温度在  $100$  度以下对线性的变化关系有一定的偏离。其产生的可能原因为热电偶 (堆) 的失准, 亦即在低温范围内, 其难以对较低辐射强度进行准确地响应, 进而导致上述实验测量结果存在一定程度的偏差。另外, 由于实验环境并非是全黑空间, 即使是在实验装置外部加了一个黑纸箱子, 依然无法使其避免周围环境的背景辐射影响。

另外, 利用探测器的响应率, 实际上还可通过其电压数值得到黑体的吸收功率 (该部分实验内容还在进行中)。

#### 五、小结

考虑到国内大学物理实验室的实际条件限制, 以及希望实验结果所达到的积极效果, 对实验器材进行开放式的设计将会有比较好的教学效果。笔者在设计实验器材的过程中, 对各种探

测装置的实际效用, 以及电子电路的设计理解有了充分的理解。下一步的工作, 将是进一步提高该实验装置的准确度, 并且规范化实验内容和具体的实验步骤等。

**参考文献:**

1. 杨福家. 原子物理学(第四版) [M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
2. Max Planck. On the law of distribution of energy in the normal spectrum [J]. *Annalen der Physik*, 1901 (4) : 553-559.
3. 李正平. 微机扫描黑体辐射实验研究 [J]. *物理实验*, 2004, 24(4): 16-19.
4. 陆婉珍. 现代近红外光谱分析技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2000.
5. 段宇宁. 黑体辐射源研究综述[J]. *现代计量测试*, 2001(3): 7-11.
6. 张 平. 准确测量斯特藩-玻尔兹曼常数的一种实验方法[J]. *实验室研究与探索*, 2001, 20(6): 62-67.
7. 陈晓明. 黑体辐射定律及实验教学相关问题探讨 [J]. *实验室研究与探索*, 2009, 28(5): 27-29.
8. 郭奕玲. 大学物理中的著名实验[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

## **Investigation on Combined Black-Body Radiation Facility and Related Experiment**

YANG Ping-jing, MA Shi-hong

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, CHINA)

**Abstract:** HFY-200BII Blackbody source, with thermal radiation detector and micro-voltmeter, can be used to set up a combined black-body radiation experimental facility. The experimental facility with good scalability has been developed completely and the operation steps by the students are simple and direct. Therefore, students can fully understand the physical model of Black-body radiation through the experiment. In this article, the author verified the basic law of black-body radiation, demonstrated the feasibility of the method and gave a future prospect of the experiment.

**Key words:** Black-Body Radiation; Radiation Source; Detector