

学校项目编号：[19561]

国家/上海市项目编号：[]

复旦大学本科生学术研究资助计划 (FDUROP)

曦源项目结题报告

(2017 年版)

课题名称	<u>黑体辐射演示仪的研制</u>		
所属学科	<u>物理学</u>	[代码	<u>140</u>]
项目负责人	<u>陈浩然</u>		
院 系	<u>物理学系</u>		
指导教师	<u>吕景林</u>		
填表日期	<u>2020 年 3 月 24 日</u>		

复旦大学教务处制表

二、结题报告

黑体辐射演示仪的研制

物理学系 陈浩然

指导教师 吕景林

摘要：我们将开有小孔的空腔作为黑体的等效替代，制作了黑体辐射和黑体吸收的演示仪器。该仪器可以帮助学生理解黑体的概念，并且可以演示黑体和灰体在辐射、吸收上的差别。实验现象明显，具有较好的演示效果。

关键词：黑体辐射 黑体吸收 演示仪器

Abstract: In this paper, a cavity with a small opening is used as an equivalent substitution for an ideal black body. According to this theory, an instrument demonstrating black body radiation and absorption are made to help students get a better understand of black body. This instrument can also show the difference of black body and gray body on radiation and absorption. Obvious phenomena are generated by the instrument, to get better demonstrating effect.

Keywords: black body radiation black body absorption demonstration instrument

引言

理想黑体可以吸收所有照射到它表面的电磁波，并将这些能量转化为热辐射，其光谱特征仅与该黑体的温度有关，与黑体的材质无关[1]。黑体辐射理论在物理学发展史上有着特殊的意义，对于黑体辐射实验的解释导致了量子力学的诞生。但是在物理课程的学习中，由于黑体是一种假想的理想物体，概念过于抽象，黑体辐射过程又很难展示，导致一直以来黑体辐射相关理论都是教学中的难点。刚刚接触物理的低年级学生往往难以理解，因此需要制作演示仪器帮助学生学习理论。

国内现有的黑体辐射演示仪器很少，且往往是用黑色的物体代替黑体[2][3][4]（图 1），物理概念不够清晰。本课题从开有小孔的空腔这一普遍认可的黑体模型入手[5]，对黑体进行等效替代，制作演示黑体辐射和吸收的仪器。



图 1 现有的黑体辐射演示仪

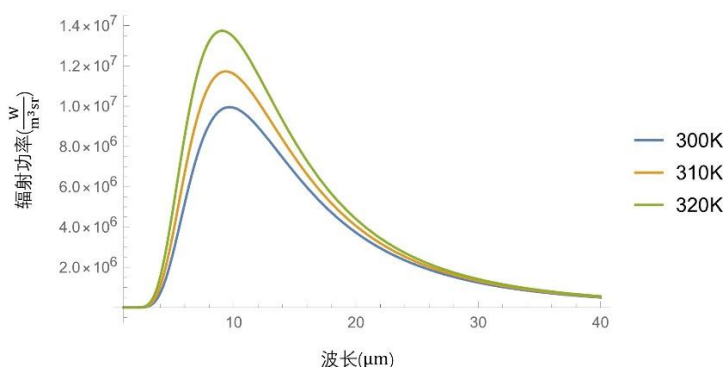


图 2 室温附近的黑体辐射谱

1 黑体辐射、吸收的基本原理

1. 1 黑体辐射的规律

理想的黑体在一定温度下发出的不同波长的辐射能量密度满足普朗克辐射定律

$$u_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

将所有波长的能量加起来，黑体辐射的总能量满足斯特藩-玻尔兹曼定律

$$j = \epsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

ϵ 为黑体的黑度。对于理想的黑体， $\epsilon = 1$ 。假如发出辐射的物体并不是理想的黑体，而是灰体，那么 $\epsilon < 1$ 。

图 2 给出了 27℃、37℃、47℃的黑体辐射谱。室温附近的黑体辐射波长分布在 5 μm 到 30 μm 的远红外波段，可见光波段的分量非常少，因此我们看不到室温下的物体在发光。随着温度的 10℃ 的小幅度增加，峰值波长的改变并不明显，但辐射功率的增加非常明显。因为根据式 (2)，总辐射功率和温度是四次方的关系，温度微小的改变可以造成总辐射功率极大的变化。

1. 2 黑体吸收的规律

理想的黑体可以吸收照射到其上的所有角度、所有波长的电磁辐射。对于灰体而言，其黑度越高，辐射能力越强，吸收能力也越强。基尔霍夫辐射定律指出，黑度为 ϵ 的灰体，它只能吸收辐射中 ϵ 的比例。

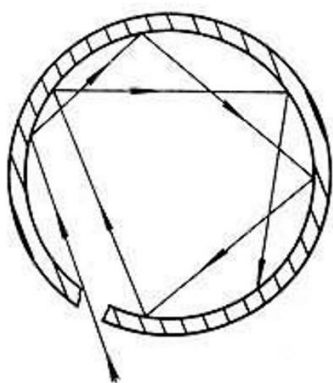


图 3 开有小孔的空腔

1. 3 黑体的等效替代

黑体是一个理想模型，在实际当中无法研究。因此，我们需要对黑体进行等效替代。开有小孔的空腔是人们最为普遍接受的黑体的等效替代。图 3 是一个开有小孔的空腔，光从小孔射入空腔后，在空腔内壁来回反射，无法逃逸，空腔上的小孔相当于是一个黑体。实际当中的空腔，光在空腔壁上发生多次反射，光强不断衰减，会有一定的光强从小孔中逃逸出来。空腔越大、小孔越小，射入小孔的光逃逸率就越低，小孔的黑度就越高。

2 空腔吸收辐射的数值模拟

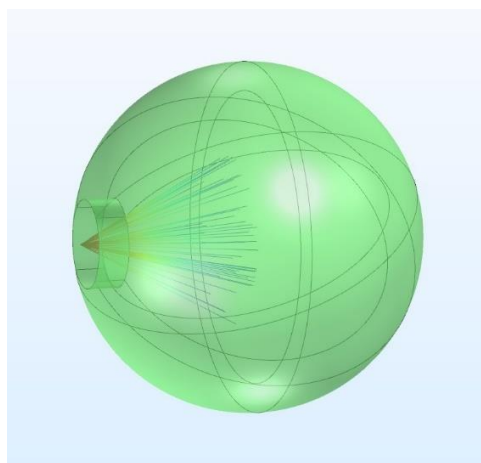


图 4 COMSOL 模拟模型

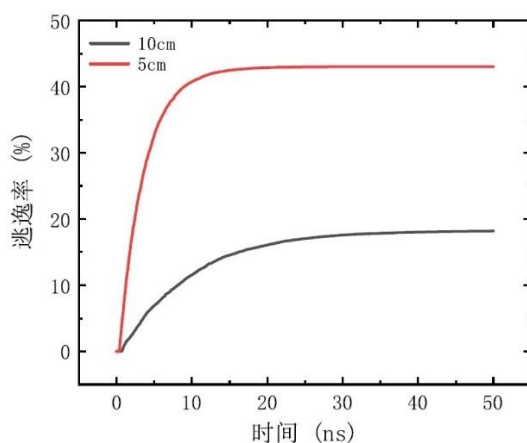


图 5 模拟结果

2. 1 模型的搭建

我们用 COMSOL Multiphysics 软件的几何光学模块对空腔进行建模。如图 4 所示，空腔的内径为 5cm，厚度为 0.5cm，开孔的直径为 1.5cm。将空腔的开孔处作为光线的生成位置，发光点遍布整个小孔区域。对于每一个发光点，又可以在 60° 顶角的圆锥内发出各种角度的光线。该光源设置模拟了实际当中各向同性自然光的情况，光源总计发出不同位置、不同角度的光线 50000 条。

对于光线在空腔内壁的反射，我们采用的漫反射和镜面反射相结合的规则。射到空腔内壁上的光线有 50% 的概率发生镜面反射，程序根据反射角等于入射角生成反射光线；还有 50% 的概率会发生漫反射，程序将一条入射光线变为 100 条在半球内均匀分布的反射光线，每条反射光线的光强变为原来的 $1/100$ 。该反射情况和实际情况较为接近。在实验中，我们观察了光线在空腔表面的反射，该反射在各个方向均可见，这说明有漫反射的存在。同时，如果我们在入射角等于反射角的方向观察，会发现空腔表面更亮，这说明有镜面反射的存在。但是，由于镜面反射和漫反射的比例未知，我们在模拟中假定两种光线分别各占一半。

此外，我们给空腔内壁设置了 1% 的吸收率。因为如果不设置吸收率，任何一条光线都可以在足够多次反射之后逃出空腔。

2. 2 模拟结果

我们做了内径为 5cm 和 10cm 的两个空腔的数值模拟，结果如图 5。随着反射次数的增多，逃逸的光线逐渐增多。经历了足够长时间之后，光线要么已经逃逸，要么已经被空腔内壁吸收，空腔内不再存在传播的光线，系统达到稳定。从图中可以看出，5cm 的空腔先达到稳定，稳定后逃逸率为 43%；10cm 的空腔后达到稳定，稳定后逃逸率为 13%。数值模拟证明了 5cm 的空腔和 10cm 的空腔在光线的逃逸率上能产生足够大的差别。因此，在仪器制作中，我们也会采用这两个尺寸的空腔作为对比。

3 黑体吸收演示仪的制作

3. 1 尝试的过程

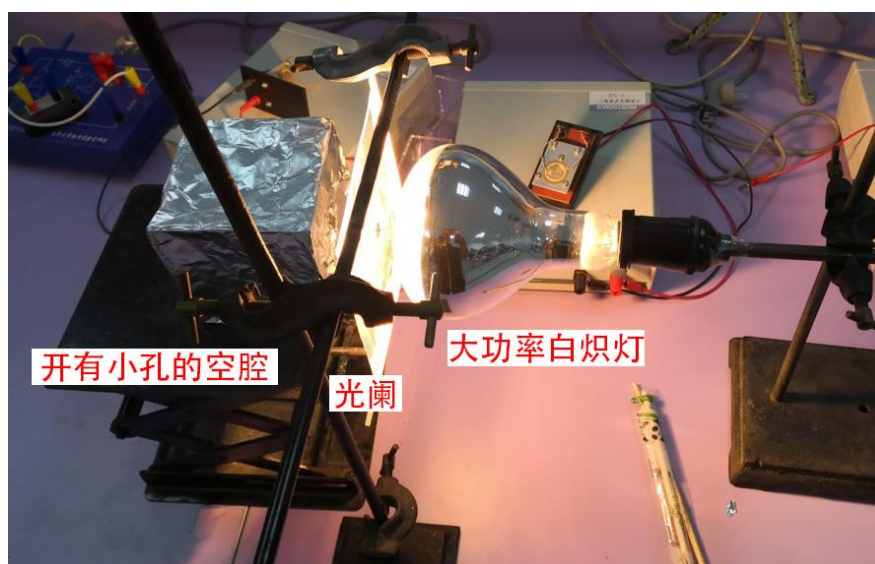


图 6 利用辐射的热效应制作的黑体吸收演示仪器

在黑体吸收演示仪的制作中，我们用开有小孔的空腔代表黑体。在小孔大小相同的情况下，空腔的直径越大，越接近黑体，对射入小孔的辐射吸收越多。为了检测空腔吸收辐射的多少，我们首先想到了辐射的热效应。通过检测物体受到辐射照射前后的温度变化，我们就能判断该物体吸收的辐射功率大小。图 6 是我

们根据热效应制作的黑体辐射演示仪器。图 6 左边是空腔，由铝箔制作，形状为立方体，开有边长 1cm 的正方形小孔。大空腔边长 20cm，小空腔边长 10cm。图 6 右边是 300W 的白炽灯，作为辐射源。将手放在白炽灯前 50cm 处，可以感受到明显的发热，因此大功率白炽灯是合适的辐射源。图 6 中间是光阑，将小孔区域以外的光挡住，防止空腔外壁直接受到加热。

经过测试，我们发现受到白炽灯照射前后，大空腔上升了 2℃，小空腔上升了 5℃。这与我们的预期不符。分析后发现大的空腔热容比小的空腔大，且空腔增大带来的热容增加比吸收增加更为严重。因此即使大空腔吸收的辐射比小空腔多，升高温度也比小空腔低。

3. 2 最终的设计方案

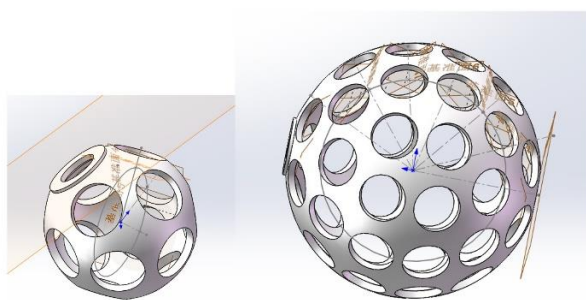


图 7 两个空腔的设计图

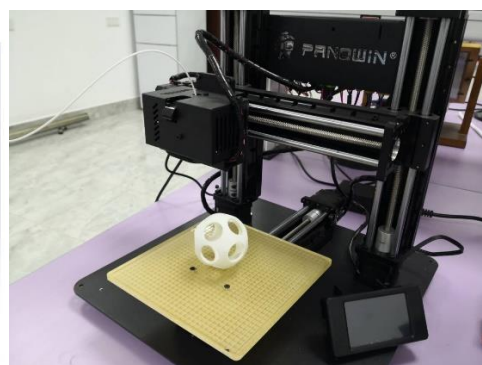


图 8 用 3D 打印机制作空腔



图 9 贴满光电池的空腔

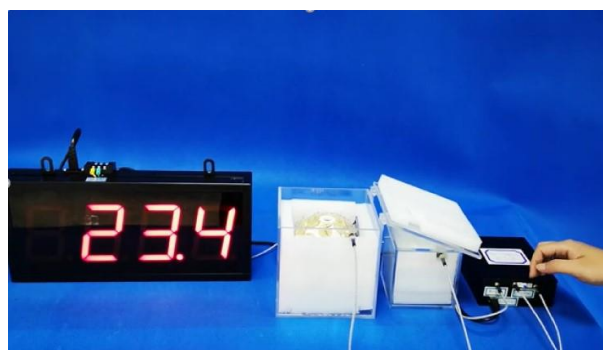


图 10 完整的黑体吸收演示系统

在意识到检测热效应是不可靠的之后，我们决定直接检测黑体吸收的辐射功率。光电池是检测辐射的电子元件，可以将可见光及近红外的辐射转化为电流信号，具有线性好、光谱范围宽、量程大的好处。我们先用 Solidworks 设计了两个空腔，如图 7。小的空腔直径为 5cm，开有 14 个孔；大的空腔直径为 10cm，开有 56 个孔。大小空腔的开孔部分面积均占空腔内壁表面积的 50%。之后，用 3D 打印机对空腔进行制作，如图 8。最后，在开孔处安装光电池，如图 9。

将所有光电池并联后，连接电流表，测量总的短路电流。根据光电池的特性，短路电流与受照的辐射功率成正比。因此，我们测得的电流可以代表黑体吸收的总辐射功率。实验测得在自然光下，大空腔的光电流为 129.3 μA ，小空腔的光

电流为 $67.1\ \mu\text{A}$ 。大空腔吸收的辐射是小空腔的两倍，现象明显，符合预期。此外，如果我们直接用肉眼观察大小空腔上小孔的亮度，会发现大空腔上的小孔更黑一些，这说明大空腔比小空腔更加接近黑体。

至此，我们已经形成了可行的黑体吸收演示仪设计方案。但是，作为演示仪器，还需要设计一套便于教师在课堂上进行展示的演示系统。该演示系统包含四个模块：装有光电池阵列的空腔（10cm、5cm 两个）、微安电流采集卡、Arduino Mega 单片机、大尺寸数码管，如图 10。装有光电池阵列的空腔产生微安量级的电流信号；微安电流采集卡对电流信号进行测量，转化为数字信号；单片机从电流采集卡接收电流数据，并将数字格式化之后发给数码管；数码管对电流数据进行显示，便于学生观察。

由于系统包含多个模块，我们必须对接线进行简化处理。首先，我们将电流采集卡和单片机合并为了一个模块，称为数据处理模块。并且，我们在每个模块上都安装了 3.5mm 音频插座，该插座包含三个触点，一次插拔便可实现多根线的连接。在做演示实验的时候，只需要给数据处理模块和数码管接上电源，之后再用音频线连接数据处理模块和数码管、空腔，就可开始演示。切换不同尺寸的空腔，也只需插拔音频插头就可完成，较为方便。

4 黑体辐射演示仪的制作

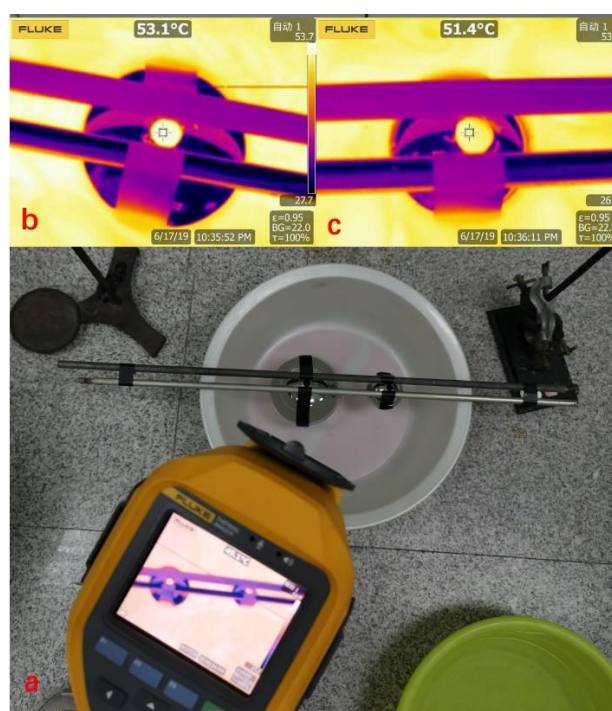


图 11 用热成像仪观察空腔的辐射

4.1 可行性的论证

在黑体辐射演示仪中，我们同样采用开有相同大小的孔、不同直径的空腔作为黑体和灰体的比较。我们购买了直径 10cm 和 5cm 的不锈钢球壳作为空腔，并用电钻在球壳上打了直径 1cm 的孔。将大小球壳浸在同一盆热水中，以保证温

度相等。热水浸没除小孔以外的全部球壳。为验证方案的可行性，我们用热成像仪观察了大小空腔的黑体辐射，如图 11。需要注意的是，热成像仪直接测量的是物体上某个点的红外辐射总功率，显示的温度并不代表实际温度，而是产生这么多辐射功率的黑体的温度。因此，相同温度的不同物体在热成像仪下完全可能显示出不同的温度。测量发现，大空腔开口处的辐射功率对应 53.1°C 的黑体辐射，小空腔开口处的辐射功率对应 51.4°C 的黑体辐射，大空腔小孔处的辐射功率更大。而大小空腔都的温度是完全相同，因此大空腔比小空腔更加接近黑体。这样的结果已经证明，该设计方案是可行的。

由于热成像仪比较昂贵，作为演示仪器的一部分并不合适。我们需要寻找更合适的黑体辐射探测器。在室温下，黑体辐射处于远红外波段（ 5 至 $30\text{ }\mu\text{m}$ ）。热电堆传感器是一种宽频的远红外传感器，非常适合探测室温附近的黑体辐射（实际上热成像仪的感光元件就是热电堆阵列）。我们使用的热电堆传感器包含信号调理电路，已经完成了从辐射功率到温度的换算，输出的物理量直接就是温度，而且精度为 0.01°C 。将热电堆传感器放在大小空腔的小孔处，测得的温度差为 2°C ，与热成像仪的测量结果相符。



图 12 完整的黑体辐射演示系统

4. 2 演示系统的搭建

黑体辐射演示系统的组成和黑体吸收类似，都是由信号采集模块、信号处理模块、显示模块组成，如图 12。我们可以照搬黑体吸收演示系统的设计，只是信号采集模块换成了热电堆红外传感器。

我们将 10cm 和 5cm 的空腔固定在一个塑料盒的盖子上，并在接缝处涂上密封硅脂，起到防水作用。使用时，在塑料盒内装上一定量的热水。将盖子盖上，即可将大小空腔均压入热水中，并且保证水完全浸没空腔。此时，盒子完全密封，可以保护电子元件不与水接触。

5 取得的成果

经过本次的曦源项目课题研究，我们制作了两套演示仪器：黑体辐射演示仪和黑体吸收演示仪。这两套仪器均能独立运作，操作方便，现象明显，适合老师

上课时进行课堂演示。总体上符合开题报告中的预期。

同时，我们携带该仪器参加了全国高等学校第十四届物理演示实验教学仪器评比，获得了一等奖。（参评仪器 111 件，一等奖 23 件）



图 13 全国高等学校第十四届物理演示实验教学仪器评比现场

参考文献

- [1] 康永强,杨成全,姜晓云,刘炎松.黑体辐射定律研究及验证[J].大学物理实验,2010,23(04):18-19.
- [2] 张祖南.黑体辐射的简易演示装置[J].大学物理,1985(10):37.
- [3] <https://detail.1688.com/offer/573612851653.html>
- [4] <https://b2b.hc360.com/supplyself/422819731.html>
- [5] 黄永义.普朗克黑体辐射定律的建立过程[J].广西物理,2011,32(03):32-36.

致谢：感谢吕景林老师在课题研究中对我的耐心指导。感谢复旦大学曦源项目基金委为我们提供的经费支持。感谢复旦大学物理学系本科生物理实验教学中心为我们提供的创新平台和各种公共仪器。