# 第十三章 5 能量量子化

## 问题

把铁块投进火炉中，刚开始铁块只是发热，并不发光。随着温度的升高，铁块会慢慢变红，开始发光。铁块依次呈现暗红、赤红、橘红等颜色，直至成为黄白色。为什么会有这样的变化呢？



## 热辐射

我们周围的一切物体都在辐射电磁波，这种辐射与物体的温度有关，所以叫作热辐射。物体在室温时，热辐射的主要成分是波长较长的电磁波，不能引起人的视觉。当温度升高时，热辐射中波长较短的成分越来越强。例如，随着温度的升高，铁块从发热，再到发光，铁块的颜色也不断发生变化（图 13.5–1）。

图 13.5–1 铁块从发热到发光的颜色变化



大量实验结果表明，辐射强度按波长的分布情况随物体的温度而有所不同。

除了热辐射外，物体表面还会吸收和反射外界射来的电磁波。常温下我们看到的不发光物体的颜色就是反射光所致。如果某种物体能够完全吸收入射的各种波长的电磁波而不发生反射，这种物体就叫作黑体。黑体虽然不反射电磁波，但是却可以向外辐射电磁波。因为黑体辐射电磁波的强度按波长的分布只与它的温度有关，所以，在研究热辐射的规律时，人们特别注意对黑体辐射的研究。

物体中存在着不停运动的带电微粒，带电微粒的振动会产生变化的电磁场，从而产生电磁辐射。于是，人们很自然地要依据热学和电磁学的知识寻求黑体辐射的理论解释。但是，用经典的电磁理论解释黑体辐射的实验规律时遇到了严重的困难。

## 能量子

为了得出同实验相符的黑体辐射公式，德国物理学家普朗克进行了多种尝试，进行了激烈的思想斗争。最后他不得不承认：微观世界的某些规律在我们宏观世界看来可能非常奇怪。

1900 年底，普朗克作出了这样的大胆假设：振动着的带电微粒的能量只能是某一最小能量值 *ε* 的整数倍。例如，可能是 *ε* 或 2*ε*、3*ε*……这个不可再分的最小能量值 *ε* 叫作**能量子**（energy quantum），它的大小为

*ε* = *hν*

*ν* 是电磁波的频率，*h* 是一个常量，后人称之为**普朗克常量**（Planck constant），其值为

*h* = 6.626 070 15×10−34 J·s

借助于能量子的假说，普朗克得出了黑体辐射的强度按波长分布的公式，与实验符合得非常好。

普朗克的能量子假设是对经典物理学思想与观念的一次突破，连普朗克本人都很犹豫，当时的多数物理学家自然更难接受。

在电工学和电子技术中，频率常用*f*表示，而在研究微观世界的物理学中，频率常用希腊字母*ν*表示。

能量子的观点与宏观世界中我们对能量的认识有很大不同。例如，一个宏观的单摆，小球在摆动的过程中，受到摩擦阻力的作用，能量不断减小，能量的变化是连续的。而普朗克的假设则认为微观粒子的能量是量子化的，或者说微观粒子的能量是不连续（分立）的。

年轻的爱因斯坦认识到了普朗克能量子假设的意义，他把能量子假设进行了推广，认为电磁场本身就是不连续的。也就是说，光本身就是由一个个不可分割的能量子组成的，频率为 *ν* 的光的能量子为 *hν*，*h* 为普朗克常量。这些能量子后来被叫作**光子**（photon）。

## 能级

微观世界中能量取分立值的观念也适用于原子系统，原子的能量是量子化的。这些量子化的能量值叫作**能级**（energy level）。通常情况下，原子处于能量最低的状态，这是最稳定的。气体放电管中的原子受到高速运动的电子的撞击，有可能跃迁到较高的能量状态。这些状态的原子是不稳定的，会自发地向能量较低的能级跃迁，放出光子。

原子从高能态向低能态跃迁时放出的光子的能量，等于前后两个能级之差。由于原子的能级是分立的，所以放出的光子的能量也是分立的，因此原子的发射光谱只有一些分立的亮线（图 13.5–2）。

图13.5–2 氦原子光谱

19 世纪末和 20 世纪初，物理学研究深入到微观世界，发现了电子、质子、中子等微观粒子，而且发现它们的运动规律在很多情况下不能用经典力学来说明。20 世纪 20 年代，量子力学建立了，它能够很好地描述微观粒子运动的规律，并在现代科学技术中发挥了重要作用。核能的利用，计算机和智能手机的制造，激光技术等的应用都离不开量子力学。是量子力学引领我们迈入了现代社会，让我们享受到丰富多彩的现代生活。

## 科学漫步

**“聆听”宇宙**

宇宙浩瀚无垠，神秘莫测。古人通过肉眼观察星空，绘制星图。望远镜的发明拓展了人类的视野，使人们对天体的了解更加清楚。

通过可见光波段观测宇宙是有局限的。实际上，天体的辐射覆盖了整个电磁波段。例如，宇宙微波背景辐射是一种充满整个宇宙的热辐射，特征和温度与 2.725 K的黑体辐射相同，频率属于微波范围；宇宙中到处存在的中性氢可以产生波长为 21 cm 的谱线，这一谱线书写了宇宙的故事；脉冲星（一种高速旋转的中子星）会发出周期性的电磁脉冲信号。

射电望远镜是在无线电波段观测天体的。由于无线电波可穿透宇宙中大量存在而光波又无法通过的星际尘埃，因而射电望远镜可以观测更遥远的未知宇宙。实际上，宇宙微波背景辐射、星际有机分子、脉冲星等重要天文发现都与射电望远镜有关。

射电望远镜与光学望远镜不同，它既没有望远镜镜筒，也没有物镜、目镜，它由天线和接收系统两大部分组成。望远镜的直径越大，会聚的无线电波越多。来自太空天体的无线电信号极其微弱，阅读宇宙边缘的信息需要大口径射电望远镜。

本章的章首图是我国于 2016 年 9 月 25 日在贵州落成启用的世界最大的 500 m 口径球面射电望远镜（简称 FAST），被誉为“中国天眼”，其接收面积达到 30 个标准足球场。与号称“地面最大的机器”的德国波恩 100 m 望远镜相比，FAST 灵敏度提高约 10 倍；与被评为人类 20 世纪十大工程之首的美国 Arecibo 300 m 望远镜相比，其综合性能提高约 10 倍。FAST 像一只庞大而灵敏的耳朵，捕捉来自遥远星尘最细微的“声音”，洞察隐藏在宇宙深处的秘密。

FAST 作为一个多学科基础研究平台，有能力将中性氢观测延伸至宇宙边缘，通过观测中性氢的分布来研究宇宙膨胀速度，并推算暗能量的性质。FAST 能观测和发现更多的脉冲星，可以利用脉冲星探测引力波、为太空飞船导航；FAST 能使深空通信数据下行速率提高数十倍，同时填补美国、西班牙和澳大利亚三个深层空间跟踪站在经度分布上的空白；FAST 还能搜寻、识别星际通信信号，开展对地外文明的搜索。

FAST 工程是我国科学工作者奋发图强、立志创新的具体实践，其中被人们誉为“天眼之父”的南仁东则是这个群体的杰出代表。他的诗句“感官安宁，万籁无声。美丽的宇宙太空以它的神秘和绚丽，召唤我们踏过平庸，进入它无垠的广袤”体现了一位科学家的追求与胸怀。

南仁东（1945—2017）

## 练习与应用

本节的第 1、2 题通过计算让学生真切感受能量子有多大。第 3 题用能量子解释自然现象，学以致用。

1．对应于 7.4×10−19 J 的能量子，其电磁辐射的频率和波长各是多少？

**【参考解答】**1.12×1015 Hz，2.68×10−7 m

提示：根据公式 *E* = *hν* 和 *ν* = 得 *ν* = = Hz = 1.12×1015 Hz，*λ* = = 2.68×10−7 m。

2．氦氖激光器发射波长为 632.8 nm 的单色光，这种光的一个光子的能量为多少？若该激光器的发光功率为 18 mW，则每秒发射多少个光子？

**【参考解答】**3.14×10−19 J；5.73×1016

提示：*ε* = *hν* = *h* = 3.14×10−19 J。每秒发射的能量子个数为 *n* = = = 5.73×1016。

3．晴朗的夜空繁星闪烁（图13.5–3），有的恒星颜色偏红，有的恒星颜色偏蓝。对于“红星”和“蓝星”，你能判断出哪种恒星的表面温度更高么？说出你的道理。

图 13.5–3

**【参考解答】**恒星的表面颜色取决于它的表面温度，温度越低，颜色越偏红，温度越高，颜色越偏蓝。所以，蓝色恒星的表面温度更高。

# 第 5 节 能量量子化 教学建议

## 1．教学目标

（1）了解黑体辐射及其研究的历史脉络，感悟以实验为基础的科学探究方法。

（2）了解能量子的概念及其提出的过程，领会这一科学概念的创新性突破中蕴含的伟大科学思想。

（3）了解宏观物体和微观粒子的能量变化特点，体会量子理论的建立极大地丰富和深化了人们对于物质世界的认识。

## 2．教材分析与教学建议

本节内容包括两部分，黑体和黑体辐射实验规律同经典理论的矛盾冲突、能量量子化概念的提出和理论的发展。

本节课的教学重点是能量量子化的基本概念和创立过程。教学难点是理解能量的量子化与能量的连续性存在着根本颠獯性的概念冲突；理解物理学家提出能量量子化理论是对客观世界本质的尊重和近代物理学发展的必然要求，也是当今现代化社会、现代化科技发展的动力源泉和根基。

教科书以 19 世纪末科学家研究热辐射的规律为切人点，指m科学家发现用经典的电磁理论解释黑体辐射的实验规律时遇到了严重的无法克服的困难，德国的物理学家普朗克尝试着提出了克服这一困难的能量量子化假设——黑体辐射时的能量是量子化的，使得这个困难得到了解决。这是一个颠覆性的创新概念，当时几乎所有的人都难以接受，包括普朗克本人。接下来又阐述了量子化观念的推广：爱因斯坦提出光子的概念，很好地解释了光电效应的实验规律（未展开）；玻尔建立原子能级假设，很好地解释了氢原子光谱，进一步证明能量的量子化确实是微观世界的普遍规律。量子物理的新世界，极大地丰富和深化了人们对于物质世界的认识。

能量量子化假设与我们宏观世界的生活经验以及当时已经成熟的经典电磁理论都是格格不入的，其概念的冲突是颠覆性的。对于中学生来说，相关生活经验少，理解起来有一定困难。例如，什么是黑体？为什么要研究黑体理想模型？“能量的量子化”和“能量的连续性”的概念冲突为什么使得当时的物理学家难以接受？因此，建议在学生课前充分预习和课上适当讨论的基础上，教学难点的突破均以教师的生动讲解为主。多铺垫、多设疑，按照物理学史的发展进程展开，让学生从前辈物理大师的科学探索活动中，体会到物理学惊心动魄的发展历程，学习物理大师实事求是的科学方法和勇于创新的科学精神。

### （1）问题引入

本节以“火烧的铁块颜色如何变化”激发学生的兴趣，引导学生思考物体温度和它辐射的电磁波波长的关系，为研究黑体辐射过程中不同温度下辐射强度与波长的关系做好铺垫。

### （2）热辐射

学生已经知道热传递的三种方式，即传导、对流和辐射，对“辐射”这个概念并不陌生。为了让学生理解热辐射强度与电磁波波长的关系，建议先带领学生回顾上一节中光的颜色和光的波长的关系，让学生在观察被加热的铁块呈现暗红色、赤红色、橘红色和黄白色等颜色的照片或视频以后，得出结论：物体的温度升高，其热辐射强度增大，辐射的电磁波的波长也会变化。即，热辐射强度按波长的分布情况随物体的温度而有所不同。

接下来，教科书提出了黑体的概念和解释黑体辐射规律遇到的困难。在课堂教学中，学生可能会问：生活中有黑体吗？科学家为什么要研究黑体辐射？这些问题是极好的教学生长点，对于推进有效教学，突破教学难点十分有益。教师可以回答：19 世纪末，人们探求新光源以及工业上的高温测量的需要，导致黑体辐射的实验研究。因为一般物体的热辐射，除了与物体的温度有关外，还与材料的种类、表面状况有关，而黑体辐射电磁波的强度按波长的分布只与黑体的温度有关，而且黑体材料在加热到同样温度时发出的热辐射比其他的物体强，因此黑体是用来建立热辐射定律的理想辐射体。建议教师用一些近似黑体的物体提高学生的感性认识，例如在一个空心的不透光的黑盒子上面开一个小孔。

**教学片段**

**热辐射和黑体辐射**

教师活动：引导学生思考：①在火炉旁边有什么感觉？②投在炉中的铁块一开始是什么颜色？过一会儿又会是什么颜色？教师可以播放相关实验视频，以使学生的感性认识过渡到理性思维。

学生活动：回答问题①，“感到‘热’”，知道热辐射就在自己身边。

教师活动：提问：火炉和人保持一定距离，并没有直接接触，那么这种“热”怎么会传到人身上呢？从而引出“热辐射”的概念。引导学生回顾上一节有关电磁波的知识，使学生认识到“热辐射”的本质就是电磁波（主要是红外线）的辐射。

学生活动：对于问题②，学生回答可能不全面。通过教科书图片或者相关视频，体会铁块颜色的变化表明辐射电磁波的强度按波长的分布情况与物体的温度有关，知道湿度升高时，波长较短的成分越来越强。

教师活动：介绍物体表面除了辐射电磁波，还会反射和吸收电磁波。如果某种物体能够完全吸收入射的各种波长的电磁波而不发生反射，这种物体就叫作黑体。提问：你能说出生活中类似黑体模型的物体吗？

学生活动：发散思维、积极思考，在教师引导下说出开一个小孔的黑盒子或者烟煤可近似为黑体模型。

教师活动：说明黑体辐射电磁波的强度按波长的分布只与黑体的温度有关，因此黑体是用来建立热辐射定律的理想辐射体。物体中存在着不停运动的带电微粒，带电微粒的振动都产生变化的电磁场，从而产生电磁辐射。当时人们做了大量的黑体辐射实验，但是其结果却是非常令人吃惊的。

学生活动：阅读或者聆听讲解，感受经典热学和电磁学的理论与黑体辐射实验规律严重不符，激发学习兴趣。

教师活动：讲解物理学家依据当时的经典热学和电磁学的理论去寻求对黑体辐射实验规律的解释时，遇到了严重的困难。尤其在高频的短波波段，实验结果和理论预期差别太大，其矛盾是无法调和的。物理学史上称之为“紫外灾难”或“19 世纪末物理学天空的一朵乌云”。很多物理学家表示出悲观失望。但是也有一些物理学家表现出异常兴奋的积极态度，他们似乎看到了新物理学诞生的一缕曙光。他们在反复思考，开启着创新性的思维，他们即将成为 20 世纪科学革命的领袖。历史将会永远铭记这样两位德国物理学家，他们的名字是——普朗克和爱因斯坦。

### （3）能量子

这部分内容是本节的核心和重点。在教学过程中，应该让学生深切地感受到，在这场惊心动魄的科学革命的历史关头，物理学家们表现的各种复杂必态和激烈的思想斗争历程。建议先让学生仔细阅读教科书并查阅相关资料，理解普朗克提出能量量子化的艰难思想斗争过程：普朗克为了能够解释黑体辐射的实验规律，开始做了极力维护经典物理理论的各种尝试，但是最后均以失败而告终。最后普朗克经过激烈的思想斗争，勇敢地抛弃了经典物理中“能量是连续的”根深蒂固的物理观念！

**教学片段**

**能量子**

教师活动：提出问题，引导学生思考：一个单摆，小球离开平衡位置后开始摆动，在摆动的过程中，受到摩擦阻力的作用，能量不断减小，它所处的高度值和能量值的变化是连续的吗？

学生活动：可以肯定高度值和能量值的变化是连续的：，

教师活动：普朗克为了解释黑体辐射实验规律，做了多种尝试，进行了激烈的思想斗争。在所有这些尝试都失败后，1900 年底他提出大胆假设：振动着的带电微粒的能量只能是某一最小能量值的整数倍，辐射时发出的电磁波能量是不连续（分立）的，是量子化的。每一个能量子的能量为 *hν*。

教师活动：引导学生进行比喻和讨论，帮助学生理解连续性和量子化的概念。人就是量子化的，可以说某个班级有 35 名或者 40 名学生，不会有 30.8 名学生。因为一名学生就是一个基本单位，不能有 0.1 名或者 0.8 名学生。

学生活动：寻找实例区别“连续”和“量子化”概念。如山坡的高度是连续变化的，楼梯的高度是量子化的，一个人上楼梯可以一次上一阶、两阶，但他绝不可能上一阶半定在那里。

教师活动：介绍最早认识到能量子概念的意义和正确性的是年轻的爱因斯坦。他在 1905 年发表了《关于光的产生和转化的一个试探性观点》的论文，指出普朗克关于辐射问题的崭新观点还不够彻底，仅仅认为电磁波在吸收和辐射时，才显示出不连续性是不够的，实际上电磁辐射的能量本身就是不连续的。也就是说，光本身就是由一个个不可分割的能量子组成的。这些能量子后来被称为光子。

### （4）能级

玻尔原子模型是人们认识原子结构的一个重要的里程碑。教科书在这一部分并没有具体展开玻尔的三个假设，只是定性地让学生了解玻尔把“能量是分立的”量子观念引入到原子理论中，提出了原子只能处于一系列不连续的能量状态，这些量子化的能量值叫能级。由于学生具备了原子核式结构的知识基础，教学中可以介绍玻尔为什么提出原子能级的量子化观点。电子在核外做加速运动应该辐射电磁波，电子能量逐渐减小，电子运行的轨道半径也要减小，电子沿螺旋线落入原子核，轨道半径连续变化，辐射电磁波的频率也是连续变化的，由此推出原子光谱是连续的。这与原子光谱是线性的相矛盾，唯有引入原子能级的量子化观点才能很好地解释原子的线状光谱。

本节内容让学生通过几段历史，让“量子化”的物理观念不断冲击学生传统的物理观念和思维方式，使学生了解到物理学的每一重大发现都改变着人类的自然观、科学观和思维方式，了解到在科学研究中科学家对实验事实进行分析从而提出模型或假说，这些模型或假说又在实验中接受检验。正确的被肯定，经不起检验的被否定，再提出新的学说，科学研究就是这样不断向前发展的。在教学中要发挥好这部分内容的育人功能。

## 3．“练习与应用”参考答案与提示

本节的第 1、2 题通过计算让学生真切感受能量子有多大。第 3 题用能量子解释自然现象，学以致用。

1．1.12×1015 Hz，2.68×10−7 m

提示：根据公式 *E* = *hν* 和 *ν* = 得 *ν* = = Hz = 1.12×1015 Hz，*λ* = = 2.68×10−7 m。

2．3.14×10−19 J；5.73×1016

提示：*ε* = *hν* = *h* = 3.14×10−19 J。每秒发射的能量子个数为 *n* = = = 5.73×1016。

3．恒星的表面颜色取决于它的表面温度，温度越低，颜色越偏红，温度越高，颜色越偏蓝。所以，蓝色恒星的表面温度更高。