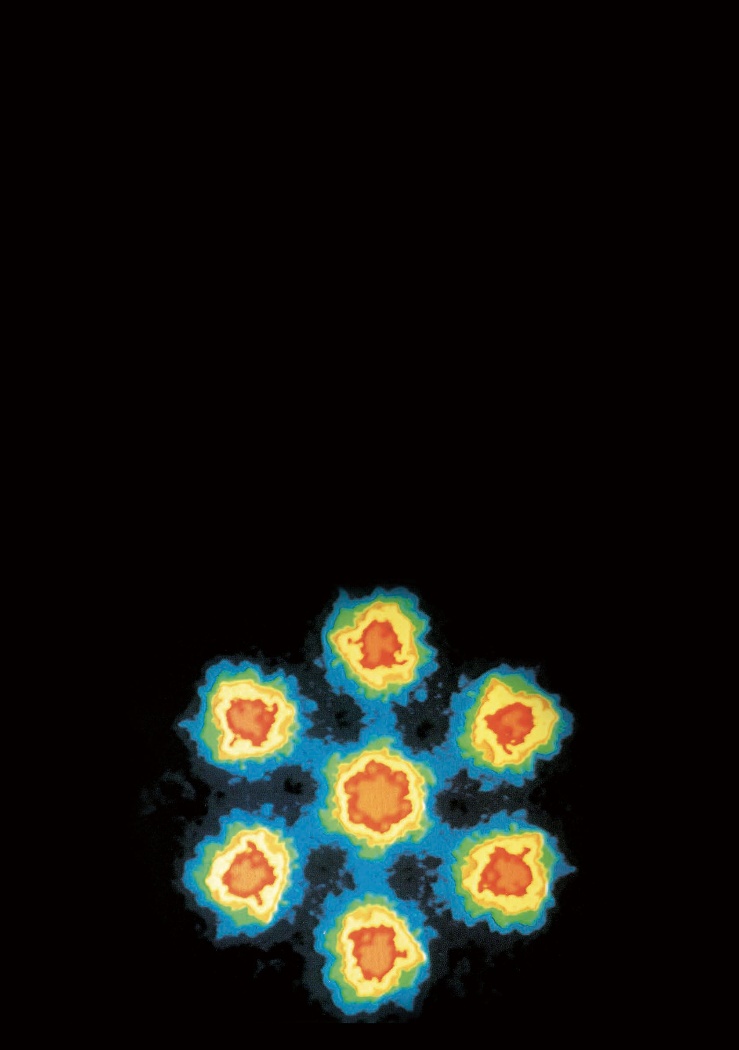
# 第四章 原子结构和波粒二象性

量子论的建立是 20 世纪物理学的最大成就之一。量子论解释了原子、分子等微观粒子遵循的规律，这些规律和牛顿力学等宏观、低速情况下的物理规律有很大不同。量子论不但深化和丰富了人类对自然界的认识，而且催生了一大批新技术，深刻地改变了人们的生活方式和社会形态。图为人们利用量子理论研制的电子显微镜拍摄到的铀酰微晶照片，放大倍数约为 1 亿倍，这是光学显微镜所做不到的。



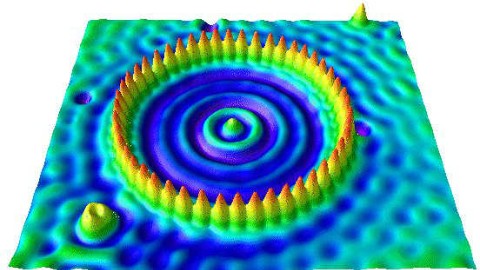
科学的历史不仅是一连串事实、规则和随之而来的数学描述，它也是一部概念的历史。当我们进入一个新的领域时，常常需要新的概念。

——普朗克

# 第四章 1 普朗克黑体辐射理论

## 问题？

量子论使人们认识了微观世界的运动规律，并发展了一系列对原子、分子等微观粒子进行有效操控和测量的技术。图为利用扫描隧道显微镜将48个铁原子排成的“原子围栏”。那么，人们认识量子规律的第一步是怎样迈出的？



## 黑体与黑体辐射

通过物理必修课的学习我们知道，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，这种物体就是绝对黑体，简称**黑体**（black body）。如图4.1**–**1，在空腔壁上开一个很小的孔，射入小孔的电磁波在空腔内表面会发生多次反射和吸收，最终不能从空腔射出。这个带小孔的空腔就可以近似为一个绝对黑体。

黑体虽然不反射电磁波，却可以向外辐射电磁波，这样的辐射叫作**黑体辐射**（black body radiation）。

19世纪，由于冶金、星体测温等需求，人们对热辐射进行了大量的研究。当时物理学家已有能力对热辐射的强度随波长的分布进行比较准确的测量。研究表明，对于一般材料的物体，辐射电磁波的情况除了与温度有关，还与材料的种类及表面状况有关，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。它可能反映了某种具有普遍意义的客观规律，人们因此对黑体辐射进行了深入的实验及理论研究。

图 4.1**–**1 带小孔的空腔

## 黑体辐射的实验规律

利用分光技术和热电偶等设备，可以测出黑体辐射电磁波的强度按波长分布的情况。图 4.1**–**2 画出了四种温度下黑体辐射的强度与波长的关系。从中可以看出，随着温度的升高，一方面，各种波长的辐射强度都有增加，另一方面，辐射强度的极大值向波长较短的方向移动。这些规律与日常经验是一致的。

1

7

0

0

K

15

0

0

K

1

3

00

K

1

1

0

0

0

2

4

辐射强度

K

*λ*/µm

图 4.1**–**2 黑体辐射的实验规律

物理学家总是力图用已有的知识去解释新发现的现象和规律。那么，怎样解释黑体辐射的实验规律呢？

我们知道，物体中存在着不停运动的带电微粒，按照当时物理学的认识，每个带电微粒的振动都产生变化的电磁场，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。

德国物理学家维恩在 1896 年、英国物理学家瑞利在1900 年，分别提出了辐射强度按波长分布的理论公式。[[1]](#footnote-1)他们提出的公式都只能解释一部分实验现象。维恩公式在短波区与实验非常接近，在长波区则与实验偏离较大；瑞利公式在长波区与实验基本一致，但在短波区与实验严重不符。

为了得出同全部实验相符的黑体辐射公式，德国物理学家普朗克做了多种尝试。1900 年 10 月，普朗克找到了一个数学公式，它与实验吻合得非常完美（图 4.1**–**3）。于是，普朗克尝试从电磁学、力学、统计物理学等物理学的基本理论出发，把这个公式推导出来。

图 4.1**–**3 普朗克公式与实验结果的比较

1

2

3

4

5

6

7

1600 K

0

*λ*/µm

实验数据点

普朗克公式

辐射强度

## 能量子

普朗克最终在 1900 年底发现，如果想推导出这个公式，就必须假定：组成黑体的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*……他把这个不可再分的最小能量值 *ε* 叫作**能量子**，它的表达式为

*ε* ＝ *hν*

这里的 *ν* 是带电微粒的振动频率，也即带电微粒吸收或辐射电磁波的频率。*h* 是一个常量，后人称之为普朗克常量，其值为

*h* ＝ 6.626 070 15×10−34 J·s

微观世界中的物理系统，如原子、分子和离子等，其能量正如普朗克所假设的那样，只可能取某些特定的值。

普朗克对微观带电微粒能量取值的假设和宏观世界中我们对能量的认识有很大不同。例如，一个弹簧振子，把小球推离平衡位置后开始振动，能量为 *E*，下一次我们可以把它推得稍远一些，使它振动的能量稍多一些，例如，1.2*E*或 1.3*E*，也可以把它推得更远，能量更大。弹簧振子的能量不一定是某个最小值的整数倍。只要在弹性限度以内，我们可以把小球推到任何位置，它的能量可以是任何值。

由此可见，宏观弹簧振子的能量值是连续的。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分立的。这是微观与宏观世界物理规律最重要的差别之一。因此，普朗克 1900 年的假设第一次为人们揭开了微观世界物理规律面纱的一角。从此，物理学进入了一个新的纪元。普朗克本人因此获得了 1918 年的诺贝尔物理学奖。

### 科学漫步

**普朗克**

普朗克 1858 年生于德国基尔。他在慕尼黑大学学习时选择物理作为学习的专业。当时一位物理学教授对他说，物理学中重要的事情都已经被别人发现完了，因此这门学科没有广阔的前景。普朗克没有因此而打退堂鼓。他觉得，自己学习物理，主要是为了了解自然界的基本规律，并不奢望作出重要的新发现。后来，他曾讲道：“外部世界是某种独立于人的东西，是某种绝对的东西，探索适用于这一绝对本体的定律，在我看来是一生最崇高的追求。”

普朗克先后师从亥姆霍兹、基尔霍夫等热学和辐射问题的名家。1879年，普朗克获得博士学位，博士论文题目是关于热力学第二定律的。之后，他先后在慕尼黑、基尔和柏林担任物理学副教授和教授等职务，并在基尔霍夫去世后继任他的职位。这个阶段，普朗克的主要研究方向也是热力学。在提出能量量子化理论之前，他大概发表了 40 篇论文。

普朗克在物理学方面最重要的成就，毫无疑问就是他在 1900 年创立的黑体辐射理论。在此之前，他已经在黑体辐射问题方面进行了 6 年左右的研究，并历经曲折。普朗克 1900 年的划时代突破，正是建立在他从大学时代开始多年的严格专业训练和辛勤研究的基础之上的。

普朗克曾努力把自己提出的能量子假说纳入已有的经典物理学的框架，但后来物理学的发展表明，能量量子化和经典物理并不相容，它是原子、分子等微观系统所遵循的独有的物理规律——量子规律的体现。普朗克的发现，正是人们在认识这一全新规律的道路上迈出的第一步。

由于普朗克巨大的成就，他从 1920 年左右开始成为德国科学界的领军人物之一。他在 1930年当选威廉皇家学会主席，成了德国科学界的最高权威。后来，为抗议希特勒，他辞去了这个职务。二战后，为了纪念普朗克，威廉皇家学会改名为马克斯·普朗克学会。

回顾普朗克的一生，不难看出，正是他中学毕业时遵从自己的好奇心和兴趣而作出的专业选择，成就了他后来事业上的辉煌。1918 年，在普朗克 60 岁生日的庆祝会上，爱因斯坦发表了题为《探索的动机》的著名演讲。他认为，科学工作者大体可以分为三类：第一类人从事科研是为了挑战自己的智力；第二类是出于纯粹的功利目的；而第三类则是为了探寻自然界的客观规律。第三类科学工作者“把世界体系及其构成作为感情生活的支点，以便由此找到他在个人经验的狭小范围内所不能找到的宁静和安定”。在爱因斯坦看来，虽然前两类人中包含很多成果卓著的科学家，但第三类才是科学家队伍中的中坚和灵魂，离开了他们，科学的殿堂就无法存在。普朗克就属于这一类科学家。

## 练习与应用

1．可见光波长的大致范围是400～760 nm。400 nm、760 nm 电磁辐射的能量子*ε*的值是多少？

2．在一杯开水中放入一支温度计，可以看到开水的温度是逐渐降低的。根据能量量子化理论，开水的能量是一份一份向外辐射的，为什么它的温度不是一段一段地降低呢？

# 第四章 原子结构和波粒二象性

## 课程标准的要求

3.3.1 了解人类探索原子及其结构的历史。知道原子的核式结构模型。通过对氢原子光谱的分析，了解原子的能级结构。

3.4.1 通过实验，了解光电效应现象。知道爱因斯坦光电效应方程及其意义。能根据实验结论说明光的波粒二象性。

3.4.2 知道实物粒子具有波动性，了解微观世界的量子化特征。体会量子论的建立对人们认识物质世界的影响。

## 一、本章教材概述

在量子力学建立之前，玻尔曾在前人关于原子结构研究工作的基础上，根据普朗克、爱因斯坦等科学家提出的能量子等概念建立了前期量子论，可以部分地说明原子的若干性质。虽然玻尔的理论能够解决的问题有限，并且被后来的量子力学所取代，但是应该看到，在物理学的发展史中，每一个重大进展都是建立在之前的认识基础上的，新的观念和理论都不会是凭空一蹴而就的。教科书中的“章首语”高度概括并阐述了本章的主要内容，即“量子论的建立是 20 世纪物理学的最大成就之一。量子论解释了原子、分子等微观粒子遵循的规律，这些规律和牛顿力学等宏观、低速情况下的物理规律有很大不同。量子论不但深化和丰富了人类对自然界的认识，而且催生了一大批新技术，深刻地改变了人们的生活方式和社会形态……”

本章在结构设计方面可划分为三个单元。第一单元由第 1 节“普朗克黑体辐射理论”和第 2 节“光电效应”组成，介绍了普朗克能量量子化假说和爱因斯坦光量子理论。第二单元由第 3 节“原子的核式结构模型”和第 4 节“氢原子光谱和玻尔的原子模型”组成，介绍了电子的发现对于人类认识原子结构的重要意义，以及卢瑟福提出的原子的核式结构模型，并进一步介绍了原子光谱的规律和玻尔在核式结构模型的基础上提出的新的原子模型。第三单元为第 5 节“粒子的波动性和量子力学的建立”，介绍了粒子的波粒二象性以及量子力学的建立过程。

具体来说，在编写本章内容时有以下一些思考。

### 1．从科学概念蜕变的历史轨迹中领悟科学家的科学探究

在普朗克提出能量量子化假说之前，人们总认为能量值是连续的。通过展示科学家探究黑体辐射的实验规律的历史轨迹，可以让学生感悟到物理学研究方法的进步中包含着传统观念的蜕变，以及科学家的独特思考与探索。

例如，1900 年，在黑体辐射问题面前，普朗克作出了与经典观念相冲突的假设，即辐射的能量是一份一份地向外发出的，基于这个假说的数学公式与实验吻合得非常完美。关于这个问题，《普通高中教科书物理必修第三册》第十三章第 5 节“能量量子化”已对黑体、能量子等概念进行了初步的介绍。本章再次介绍黑体辐射和普朗克的能量量子化假说，目的是突出黑体辐射的实验规律与经典电磁理论的矛盾，进一步引出能量量子化假说。关于普朗克为什么会想到微观粒子的能量是量子化的，他当时的具体想法已经不重要了，重要的是这个假说的推论与事实相符。这是反映科学家完成科学探究过程的关键要素之一，这一点在教学中应予以强调。

1905 年，爱因斯坦推广了普朗克假说，提出了光量子理论。为了解释光电效应，必须假定电磁波本身的能量也是不连续的，即认为“光”本身就是由一个个不可分割的能量子（光子）组成的，这一理论使光电效应的全部实验结果得到圆满解释。基于光量子理论得出的光电效应方程，圆满解释了光电效应，并经受了密立根实验的进一步检验。

### 2．学习康普顿效应，提高证据意识，深化电磁场物质性的认识

康普顿效应成为爱因斯坦的光量子理论的又一重要例证。它不能用经典理论解释，只有把光看成具有能量和动量的光子，光子与自由电子完全弹性碰撞，才能比较完满地解释康普顿效应。基于这个假定的理论结果与实验符合得很好。康普顿效应让人们对光子有了更深入的认识。康普顿最成功的地方在于引入了光子也有动量的观点，进一步完善了光的粒子学说。这一发现具有伟大的历史意义，它肯定了光的粒子性，而波粒二象性正是量子力学的基础之一。

康普顿效应的发现同样为我们展示了科学家所进行的科学探究过程。在这样一个科学探究的过程中，问题、证据、解释和交流等要素十分突出，教学中应该引起足够的重视。

另外，教学中应引导学生了解以下观点：光电效应和康普顿效应都说明光子具有粒子性，光电效应表明光子具有能量，康普顿效应表明光子既有能量又有动量。了解这样的观点对学生理解电磁波的物质性是很有必要的。教科书曾在《普通高中教科书物理必修第三册》第九章第 3 节“电场电场强度”、第十三章第 1 节“磁场磁感线”和第 4 节“电磁波的发现及应用”中，就告诉学生有关“磁场”“电场”“电磁场”的物质性问题。但是，为什么电磁场是一种物质？它与通常理解的物质，例如水、石块有什么共性？这些问题都未涉及。所以，在此之前关于电磁场物质性的说法都只是停留在字面上，无法让学生理解它的真正含义。康普顿效应要用动量守恒的关系来处理，表明电磁场不但具有能量而且具有动量。能量和动量是物质的最基本属性，至此，学生对电磁场物质性的认识才得以深化。

### 3．贯穿原子结构发现的历史和科学研究的方法

在中学物理课程中，学生可以通过自己的探究活动来学习科学探究、体验探究过程；也可以通过科学家的探究活动学习科学探究。学生在初中已经学过原子的核式结构，但并不了解这些知识是怎样获得的。教科书介绍了科学家怎样一步一步地深入认识了原子结构，学生通过这段历史可以进一步了解科学探究的过程，了解人类认识微观世界的方法和途径，有利于培养他们的学习兴趣，发展他们的思维能力。

教科书把人类认识原子结构的历程大致分为以下三个阶段，每个阶段都体现了科学探究的特点。第一阶段：发现电子，认识到原子内部也有结构。教科书首先介绍了人们对阴极射线本质认识的两种观点，以及 J．J．汤姆孙对阴极射线的研究，引出了电子的发现过程。电子的发现，对人类认识原子结构具有重大意义。它使人们改变了认为原子是组成物质的最小微粒的看法，认识到原子是由更小的微粒构成的。

教科书的线索如下：

发现阴极射线

阴极射线的本质——电磁辐射？带电微粒？

J．J．汤姆孙的实验（在电磁场中偏转）——阴极射线是带电粒子流

对其他现象的研究（光电效应、热离子发射、β 射线）

J．J．汤姆孙的实验（不同材料的阴极，不同的气体）——射线粒子的电荷与氢离子一样

对电子是所有原子的组成部分

第二阶段：推测原子中电荷的分布，认识到原子的核式结构。教科书介绍了卢瑟福根据 α 粒子散射实验结果提出的原子核式结构模型。在我们日常所处的宏观世界中，可以直接用眼睛观察物体的结构，但在原子尺度的微观世界里，已经不能靠眼睛来获取信息了。最常用的获取微观世界信息的方法是用中性的（如中子）或者带电的（如 α 粒子）粒子轰击所要研究的物质，使入射粒子与物体中的微粒相互碰撞。

教科书的线索如下：

J．J．汤姆孙的“枣糕”模型

被 α 粒子散射实验否定

根据假设进行数学推理，得出各个方向散射粒子的比例

卢瑟福作出假设——核式结构模型

与实验事实对照，证实了假设

第三阶段：在对电子运动的研究中，经典电磁理论遇到了矛盾（原子的稳定性和原子光谱的分立特征），玻尔提出了新的原子理论。

教科书的线索如下：

与经典电磁理论的矛盾

玻尔的新观念——轨道和能量的分立性

数学推理

玻尔理论的局限性

与实验事实对照（氢原子光谱的实验规律）

通过上述三个阶段的学习，学生可以感悟到，人类对微观世界的认识是逐步深入的，在认识各种未知事物时，理论（假说）与实验总是相互促进的。科学家通过对实验事实的分析，提出模型或假说，这些模型或假说又在实验中接受检验，正确的被肯定下来，经不起检验的被否定，在新的基础上再提出新的学说。科学研究就是这样不断向前发展的。人类对原子结构的认识，生动地体现了科学发展的这种过程。

### 4．正确认识创新与继承的关系

科学认识发展的历史，就是一部创新的历史。教科书希望学生通过对本章内容的学习，能够感悟创新思维的意义和方式，正确认识创新与继承的关系。例如，科学家在对原子结构的认识过程中，卢瑟福提出的原子的核式结构模型可以很好地解释 α 粒子散射实验，但是，无法解释原子的稳定性和原子的分立光谱。玻尔在发展卢瑟福的模型时，就保留了它的合理内容，即有原子核存在，而摈弃了其他不合理的内容。所以说，玻尔的原子理论和卢瑟福的核式结构模型之间有一种继承和发展的关系。同样，玻尔的原子模型也是不完善的，它解决了原子的稳定性问题，很好地解释甚至预言了氢原子的光谱，但是面对更复杂的原子，玻尔理论也无能为力。在后来发展的量子理论中，玻尔提出的定态和在定态之间跃迁的概念都被保留下来，而不正确的经典轨道概念就被抛弃了。

诺贝尔物理学奖获得者汤川秀树说：“对旧有知识的熟知和对新事物的敏感是一个人创造力的基础和源泉。”物理教学应该帮助学生在熟知已有知识体系的基础上，正确看待继承和发展的关系，提升对新事物敏感的思维品质，鼓励他们敢于解脱传统观念，勇于提出新见解。

### 5．突出量子理论对人类物理观念的改变

本章是围绕量子力学的建立过程展开的，力图向学生阐明：量子理论不仅以其概念、原理揭示了自然界中物质运动的诸多规律，同时，这一重大发现还改变了人们的自然观、科学观，成为人类思想和观念进步的伟大阶梯。

我们知道，人的科学素养不仅指科学知识方面的素养，它还有更高的层次，也就是对科学方法、科学意识和科学精神等方面的要求。具体来说，教科书介绍了普朗克黑体辐射理论、爱因斯坦光电效应理论、康普顿散射理论、玻尔氢原子理论以及德布罗意物质波假说等一系列理论，这些理论在解释实验方面又都取得了成功。而且，值得注意的是，这些理论都与普朗克常量密切相关，教科书用图 4.5–3 直观地向学生展示了这个关系。它预示着这些理论之间存在着紧密的内在联系，进而引出人们对建立描述微观世界的物理理论——量子力学的需求。

应该看到，本章介绍的这些新的物理观念都深刻地改变着人们的思维方式，以及人们对科学本身的认识。在经典物理学中，对于不同的宏观对象，我们以直接经验为基础，分别建立了粒子模型和波动模型，并得出了它们的运动规律。对于微观对象的属性，即使我们缺少直接的感知，也要设想一些模型来分析和研究它们的运动规律，例如，微观粒子的波粒二象性就是这种模型。然而，以我们的宏观经验来衡量，这种模型的行为显得十分古怪。但是，只要基于这种模型建立的概念及理论与实验结果一致，它就能够在一定范围内正确地代表我们所研究的现象。教科书在对有关量子理论的科学过程描述中，注意突显了量子理论对改变人类物理观念的影响。

## 课时安排建议

第 1 节 普朗克黑体辐射理论 1 课时

第 2 节 光电效应 2 课时

第 3 节 原子的核式结构模型 2 课时

第 4 节 氢原子光谱和玻尔的原子模型 2 课时

第 5 节 粒子的波动性和量子力学的建立 1 课时

# 第 1 节 普朗克黑体辐射理论 教学建议

## 1．教学目标

（1）知道黑体与黑体辐射，知道黑体辐射的实验规律及理论解释。

（2）了解能量子假说，领会科学解释中的科学假说方法。

（3）了解宏观物体和微观粒子的能量变化特点，体会能量量子化的提出对人们认识物质世界的影响。

## 2．教材分析与教学建议

本节内容由黑体与黑体辐射、黑体辐射的实验规律和能量子三部分组成。在必修课程的基础上，本节对相关内容进行了进一步的阐述，特别是对黑体辐射的实验规律与经典电磁辐射理论相矛盾的问题，有了更加严谨的科学过程解析，使普朗克的能量量子化假说的引入有了扎实的实验基础。本节重点是通过对不同温度下黑体辐射强度与波长关系的实验图像的分析，让学生感悟以实验为基础的科学探究方法。难点是如何让学生认识能量量子化假说。

教科书给出了不同温度下黑体辐射强度与波长关系的实验规律，介绍了经典理论结果与实验事实之间产生的矛盾，在此基础上引出普朗克的能量子假说。对于这部分内容，教科书是按物理学的历史脉络展开的，目的是使学生能从前辈大师的工作中体会科学探究的真实过程。教学中要注意引导学生感受科学家进行探究的科学方法与科学精神。

本节的知识对学生来说几乎没有相关的经验，理解起来有一定困难，比如对黑体辐射实验规律、为什么要研究黑体、黑体理想模型有什么用、“量子化”和“连续性”到底有什么差别等问题的理解。建议在教学中以教师的生动讲解为主，在讲解过程中作好知识铺垫，多设疑。

### （1）问题引入

量子论的建立是 20 世纪物理学的最大成就之一。量子论解释了原子、分子等微观粒子遵循的规律，这些规律和牛顿力学等宏观、低速情况下的物理规律有很大不同。在量子论的支持下，人们还发展了一系列对原子、分子等微观粒子进行有效操控和测量的技术。教科书“问题”栏目以扫描隧道显微镜下操纵 48 个铁原子排成“量子围栏”的事实创设情境。该栏目中的图片反映了电子密度的高低，“围栏”内是电子密度波的驻波。对此不要求向学生解释。该栏目设计的目的是让学生感悟到微观领域与宏观领域研究问题的差异，激发学生的好奇心，进而促使他们迫切希望了解人们认识量子规律的第一步是怎么迈出的，研究过程与方法又是什么？

### （2）黑体与黑体辐射

①黑体

黑体概念的引入，建议先对必修课程中的“热辐射”概念进行复习。让学生知道，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。大量实验结果表明，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。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，这种物体就是绝对黑体。这是一种理想模型。

②黑体辐射

与必修课程相比，教科书对黑体辐射概念的阐述略加详细。教学中要进一步向学生说明人们研究黑体辐射的意义，即黑体辐射电磁波的强度按波长的分布只与它的温度有关，这样的辐射可能反映了某种具有普遍意义的客观规律。因此，人们对黑体辐射进行了深入的实验及理论研究。

**教学片段**

**黑体与黑体辐射**

提出问题 有没有能完全吸收电磁波的物体？它是怎样吸收电磁波的？

实例分析 列举教科书图 4.1–1 的实例进行分析，并结合“从小孔射入空腔的光能反射出来吗？”“能看清里边的情形吗？”等学生的疑问进行推理，引出绝对黑体的概念。

提出问题 为什么要研究黑体呢？为什么要研究黑体辐射呢？生活中有黑体吗？

实例说明 黑体能完全吸收入射的各种波长的电磁波而不发生反射，是一种理想模型。在实际生活中，烟煤是很接近理想黑体的材料。

### （3）黑体辐射的实验规律

①黑体辐射强度与波长关系的图像

教科书给出了不同温度下黑体辐射强度与波长关系的实验规律。教学中要引导学生学会观察实验结果，重点培养学生观察、分析实验图像的能力。从实验图像中获取信息，基于证据得出结论并进行解释，这是高中生必备的科学论证能力。

**教学片段**

**分析黑体辐射强度与波长关系的图像**

引导观察 展示教科书图 4.1–2 所示的辐射强度与波长关系的图像。提醒学生看懂横坐标和纵坐标所表示的物理量，从图中可获知哪些信息？

分析解释 黑体辐射强度与波长关系的图像具有以下特点。

第一，说明在相同的加热温度下，黑体辐射的强度与辐射电磁波的波长（频率）有关，中间有一个极大值。

第二，不同的温度辐射强度不同，随着温度的升高，各种波长的辐射强度都有增加。

第三，温度越高，辐射强度的极大值越大。

第四，辐射强度的极大值随温度升高向波长较短的方向移动。

②黑体辐射的实验规律与经典电磁辐射理论的矛盾

教科书明确指出，物理学家当时提出的公式都只能解释一部分黑体辐射的实验规律。维恩公式在短波区与实验非常接近，在长波区则与实验偏离较大；瑞利公式在长波区与实验基本一致，但在短波区与实验严重不符。在此，要进一步向学生说明，瑞利公式是完全根据经典物理学理论推导出来的，其结果表明，该理论可能存在某些缺陷，黑体辐射的实验规律与经典电磁辐射理论的矛盾被显现出来。让学生了解这一科学过程，对其科学态度与责任的培养是十分有益的。

③对黑体辐射实验规律的解释

用经典电磁理论无法解释黑体辐射实验规律的情况下，为了得出同全部实验相符的黑体辐射公式，普朗克作了多种尝试，找到了一个与实验吻合的数学公式，普朗克公式与实验结果的比较如教科书图 4.1–3 所示。为了推导这个公式，普朗克提出了能量子假说，认为黑体辐射的能量是不连续的，是能量子e的整数倍，即能量量子化的全新观点。在教学中以讲授为主，重点要强调这个假说的推论与实验事实相符的重要价值。

### （4）能量子

关于能量子的内容，必修课程已有介绍。教学中可以帮助学生作一些简要的回顾，同时也可以先让学生通读教科书，然后结合教科书上的例子以及生活中的实例讨论他们心中的连续性和量子化有什么区别。学生只有对连续性和量子化有了认识之后才能认识到普朗克那句话：微观世界的某些规律，在我们宏观世界看来可能非常奇怪。

在讨论中，教师可作如下引导：比如，人数可以认为是“量子化”的，不能说某个家庭有 2.2 个小孩，因为一个小孩就是一个基本单位；楼梯也可以认为是“量子化”的，一个人上楼梯，他可以一次上一级、二级或三级台阶，但绝不可能上一级半。还可以让学生举例，让学生对量子化这一重要概念有所感悟。

需要注意的是，量子化是微观世界表现出的物质的本质特性，所有宏观现象的例子可以帮助理解“量子”的概念，但与微观世界量子化的本质是完全不同的。

关于普朗克提出能量子观点的过程，教师可以结合物理学史的内容适当补充。要让学生明白普朗克为了解释实验现象作了多种尝试，进行了激烈的思想斗争。在所有这些尝试都失败后，他才提出了能量子观点。让学生体会尝试与创新的重要性，并树立失败并不可怕的思想。正是基于普朗克的不断尝试与创新，将能量子引入物理学，是对经典物理学思想与观念的一次革命性突破。

**教学片段**

**能量子概念的由来**

任务 引导学生围绕能量子概念的由来，梳理本节教科书的内容线索，清晰地展示科学家进行科学探究的科学过程。

问题背景 冶金工业的发展及对恒星研究的需要促进了对黑体辐射问题的研究。

实验结果 当时物理学家已有能力对热辐射的强度随波长的分布进行比较准确的测量，可以获得黑体辐射强度与波长关系的图像。

数学推理 尝试用经典理论对黑体辐射实验规律进行解释。但是，难以解决的矛盾出现了，即维恩公式在长波区、瑞利公式在短波区与实验结果不吻合。为了让理论公式与实验结果全区域吻合，普朗克找到一个数学公式。

科学解释 普朗克发现，若想推导出这个公式，就必须假定组成黑体的振动着的带电微粒的能量只能是量子化的，这样与实验事实的对照才能完美吻合。普朗克提出的能量子概念，开启了物理学的新纪元。

## 3．“练习与应用”参考答案与提示

本节共 2 道习题。第 1 题在计算过程中渗透能量子基本概念，让学生了解可见光的能量范围，为光的波粒二象性这一观念的形成作好铺垫。第 2 题与第 1 题可以结合起来，通过对宏观现象和微观解释的联系，让学生知道宏观的连续性从微观层面看其实也是量子化的，只是由于人的感觉能力有限，感觉不到罢了。

1．4.97×10−19 J；2.62×10−19 J

提示：由 *ε* = *hν* = *h*计算可得，400 nm 电磁辐射的能量子 *ε* = *h*= J = 4.97×10−19 J；760 nm 电磁辐射的能量子 *ε* = *h*= J = 2.62×10−19 J。

2．开水向外辐射的每一份能量子能量很小（微观量），而水降低 1 ℃ 释放的能量很大（宏观量）。在宏观世界里观察不到能量量子化的效应，可以认为能量是连续的。所以，观察到的温度计的温度不是一段一段地降低的，可以认为开水的温度是连续变化的。

1. 瑞利公式曾被英国天体物理学家金斯修正过，所以这个公式又称瑞利－金斯公式。 [↑](#footnote-ref-1)