21 世纪高等院校经典教材同步辅导

ERSHIYISHIJIGAODENGYUANXIAOJINGDIANJIAOCAITONGBUFUDAO

量子力学教程

第二版

全程导学及习题全解

段　辰　李榜全　苗明川　编　张志勇　主审

中国时代经济出版社

量子力学教程

第二版

全程导学及习题全解

中国时代经济出版社

图书在版编目(CIP)数据

量子力学教程(第二版)全程导学及习题全解 / 段辰,李榜全,苗明川编.
—北京:中国时代经济出版社,2011.9
(21世纪高等院校经典教材同步辅导)
ISBN 978-7-5119-0949-7

Ⅰ.①量… Ⅱ.①段… ②李… ③苗… Ⅲ.①量子力学—高等学校—教学参考资料 Ⅳ.①O413.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第149234号

书　　名: **量子力学教程(第二版)全程导学及习题全解**

出 版 人: 王鸿津

作　　者: 段 辰 李榜全 苗明川

出版发行: 中国时代经济出版社

社　　址: 北京市丰台区玉林里25号楼

邮政编码: 100078

发行热线: (010)83910219

传　　真: (010)68320584

邮购热线: (010)88361317

网　　址: www.cmepub.com.cn

电子邮箱: zgsdjj@hotmail.com

经　　销: 各地新华书店

印　　刷: 北京市优美印刷有限责任公司

开　　本: 787×1092 1/16

字　　数: 120千字

印　　张: 10.625

版　　次: 2011年9月第1版

印　　次: 2011年9月第1次印刷

书　　号: ISBN 978-7-5119-0949-7

定　　价: 18.60元

内容简介

本书是根据高等教育出版社出版、周世勋先生编著的《量子力学教程》(第二版)编写的配套的参考书。《习题全解指导》按照《量子力学教程》各章节顺序对教材中所给的习题进行了详细的解答。较好的方便了读者掌握各章知识要点和基本解题方法。每章均分为知识重点,习题全解,补充题和内容小结。小结将《量子力学教程》中主要概念、理论、公式加以归纳总结。补充题则是对原书中习题的补充和提高。习题全解是本书的重点,按原教科书所列习题进行详细求解和证明。对其中部分习题还给出了多种解法或是不同的集体思路。另外本书在原《量子力学教程》基础上增加了附录,为复习量子力学提供参考,以便读者更好地学习。

本书可作为广大理工科院校或是相关从业人员的参考书,亦可帮助报考研究生进行复习备考,或作为相关教学人员的教学参考书。

前 言

量子力学作为“四大力学”之一，是物理学中一门重要的基础理论课程。它是研究微观粒子的运动规律的物理学分支学科，它主要研究原子、分子、凝聚态物质，以及原子核和基本粒子的结构、性质的基础理论，它与相对论一起构成了现代物理学的理论基础。量子力学的基本原理包括量子态的概念，运动方程、理论概念和观测物理量之间的对应规则和物理原理。鉴于该学科的重要性，国内高校的物理类专业及某些工科类专业均开设了量子力学课程。但是随着近年来专业范围的拓宽，原有基础理论课程学时逐渐减少，习题的数量及难度也相应的降低。为此我们希望编写这本《量子力学教程解题指导》来帮助同学更好地掌握、理解基本理论并掌握相关问题的分析和处理方法，以解决同学们在解题过程中所碰到的问题。

本书与周世勋先生编著的《量子力学教程》(第二版)相配套。全书由绪论、波函数和薛定谔方程、量子力学中的力学量、态和力学量的表象、微扰理论、散射、自旋与全同粒子、量子力学若干进展等章组成。

本辅导教材根据《量子力学教程》中的内容，编写以下几方面的内容：知识重点归纳：精练了各章中的主要知识点，理清各知识点之间的脉络联系，囊括了主要定理及相关推论和重要公式等，帮助读者迅速了解本章重要知识点，系统理解各章的体系结构，奠定扎实的理论基础。习题全解：依据教材各章节的习题，进行详尽的解答。考虑到不同层次读者的需求，在解答过程中，对于重点和难点习题进行了分析和讲解，归纳解题技巧。为了给读者拓展视野，本书每章后增加了大量补充题。这些题选自不同参考资料(见附录)，有些补充题中存在不同的瑕疵，但为尊重原题，我们保持原有特点，未对其进行修改，仅供读者参考。本书在原《量子力学教程》基础上增加了附录，为复习量子力学提供参考，以便读者更好地学习。

本书由段辰、李榜全、苗明川等编写。全书由张志勇教授主审。张志勇老师高深的学术造诣，严谨的治学态度，使编者受益匪浅，在此深表感谢。本书编写过程中得到林一强、王天磊等给予大力支持和帮助，同时还得到中国时代经济出版社的领导和有关编辑的大力支持，编者深表谢意。

对《量子力学教程》(第二版)教材的作者周世勋、陈灏教授，表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，加之时间仓促，本书难免有缺点和疏漏，存在不妥之处，敬请各位专家及广大读者批评指正。

编 者

2011 年 8 月

目　　录

第一章　绪　论

本章重点内容

- Planck 黑体辐射理论
- Einstein 光量子理论
- Bohr 旧量子论
- De Broglie 物质波
- 波粒二象性

本章知识重点

1. Planck 黑体辐射公式

为解决黑体辐射谱问题，1900 年 Planck 提出 Planck 公式

$$\rho_\nu \mathrm{d}_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{\mathrm{d}\nu}{e^{h\nu/k_B T}-1}$$

并提出了相应的物理解释，即对一定频率 ν 的辐射，物体只能以 $h\nu$ 为单位吸收或发射能量，h 即普朗克常量，$h = 6.626\times10^{-34}\mathrm{J\cdot S}$

2. Einstein 光量子假说

为解释光电效应，1905 年，Einstein 提出了光量子假说，认为光由光量子组成，每个光量子的能量 $\varepsilon = h\nu$，动量 $p = \hbar k$，并得到 Einstein 光电效应方程 $h\nu = \frac{1}{2}m_e v_m^2 + W_0$。

可圆满地解释光电效应。

3. Bohr 旧量子论

1913 年，Bohr 为解决 Rutherford 原子模型稳定性问题提出了原子的量子理论

(1) 定态的概念

(2) 定态间跃迁

(3) 角动量量子化，后来 Sommerfeld 在此基础上提出 Sommerfeld 量子化条件

$$\oint p\mathrm{d}q = \left(n+\frac{1}{2}\right)h, \qquad (n = 1,2,3,\cdots\cdots)$$

其中 q 是粒子的广义坐标，p 是粒子的广义动量

这一理论成功地解释了氢原子光谱的实验规律。但也存在许多不足,如无法解释氦原子及更复杂的原子结构等。

4. De Broglie 物质波

$$\psi = Ae^{\frac{i}{\hbar}(\boldsymbol{p}\cdot\boldsymbol{r}-Et)}$$

1923 年 De Broglie 将光的波粒二象性,推广到一切微观粒子,认为微观粒子也具有波动性,即满足 De Broglie 关系

$$E = \hbar\omega = h\nu \quad \boldsymbol{p} = \hbar\boldsymbol{k} = \frac{h}{\lambda}\boldsymbol{n}$$

这一理论为后来的电子衍射实验,电子双缝干涉实验,中子衍射等实验所证实。

5. 物质的波粒二象性

由 De Broglie 关系出发描述物质粒子性与波动性的两组力学量通过 Planck 常量相互联系,波粒二象性是微观粒子的基本属性,这一结论被以后的诸多实验所证实。

习题全解

1.1 由黑体辐射公式导出维恩位移定律:能量密度极大值所对应的波长 λ_m 与温度 T 成反比,即

$$\lambda_m T = b(\text{常量});$$

并近似计算 b 的数值,准确到二位有效数字。

[**证明**] 由普朗克黑体辐射公式(以频率为变量)

$$\rho(\nu)\mathrm{d}\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{1}{\exp(h\nu/k_BT)-1}\mathrm{d}\nu \tag{1}$$

及波长频率间关系 $\nu = \frac{c}{\lambda}$

即 $\mathrm{d}\nu = -\frac{c}{\lambda^2}\mathrm{d}\lambda$ 代入(1)得

以波长为变量的普朗克公式

$$\rho(\lambda)\mathrm{d}\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5}\frac{1}{\exp(hc/\lambda k_BT)-1}\mathrm{d}\lambda \tag{2}$$

对波长 λ 求导数

$$\frac{\mathrm{d}\rho(\lambda)}{\mathrm{d}\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^6}\frac{1}{\exp(hc/\lambda k_BT)-1}\cdot$$

$$\left[-5+\frac{hc}{\lambda k_BT}\frac{1}{1-\exp(-hc/\lambda k_BT)}\right]$$

由 $\frac{\mathrm{d}\rho(\lambda)}{\mathrm{d}\lambda} = 0$ 得

$$5[1-\exp(-hc/\lambda k_BT)] = hc/\lambda k_BT$$

令 $x = hc/\lambda k_B T$，则

$$5(1-e^{-x}) = x \tag{3}$$

这是个超越方程，可以用数值方法或图解法

得到 $x = 4.97$

即 $\frac{hc}{\lambda_m k_B T} = 4.97$

得 $\lambda_m T = \frac{hc}{4.97k_B}$

代入 h、k_B、c 的数值得

$$\lambda_m T = 2.9 \times 10^{-3}\,\mathrm{m \cdot K} \tag{4}$$

即 Wien 位移定律。它的物理意义是若物体温度升高，则辐射能量峰向短波长（或高频）移动

[说明] 本题主要考查 Planck 公式的推论

1.2′ 在 0K 附近，钠的价电子能量约为 3 电子伏，求其德布罗意波长。

[解] 由德布罗意关系

$$\lambda = \frac{h}{p} \tag{1}$$

由相对论动量与能量关系

$$E^2 = p^2c^2 + m_e^2c^4 \tag{2}$$

得 $p = \sqrt{\frac{E^2}{c^2} - m_e^2c^2}$

电子 $m_e c^2 = 0.511 \times 10^6\,\mathrm{eV}$

0K 附近电子德布罗意波长

$$\lambda = hc/\sqrt{E^2 - (m_e c^2)^2} \tag{3}$$

其中 $hc = 1.24 \times 10^{-6}\,\mathrm{eV \cdot m}$

$E = 3\mathrm{eV} + m_e c^2$（这里认为价电子能量即动能）

$m_e c^2 = 0.511 \times 10^6\,\mathrm{eV}$

得 $\lambda = 0.71\mathrm{nm}$

我们也可以把(3)式写成

$$\lambda = hc/\sqrt{(E_k + m_e c^2)^2 - (m_e c^2)^2} = hc/\sqrt{E_k^2 + 2E_k m_e c^2}$$

由于 $E_k \ll m_e c^2$

$$\lambda \approx hc/\sqrt{2E_k m_e c^2} \tag{4}$$

由此式：
- 当粒子质量越大则波长越短，波动性越弱
- 当粒子动能越大则波长越短，波动性越弱

因此宏观物体或者高能粒子的粒子性较强

[说明] 本题主要考查物质波，注意要区分相对论粒子与非相对论粒子

1.3 氦原子的动能是$E=\frac{3}{2}k_BT$(k_B为玻耳兹曼常数),求$T=1\text{K}$时,氦原子的德布罗意波长。

[解] 同上题,对于 He 原子可以认为是非相对性粒子

因此 $p=\sqrt{2mE_k}$ (1)

由德布罗意关系 $\lambda=\frac{h}{p}$ 及 $E_k=\frac{3}{2}k_BT$

得 $\lambda=\frac{h}{\sqrt{3k_BTm}}$ (2)

代入数值 $\lambda=0.37\text{nm}$ (3)

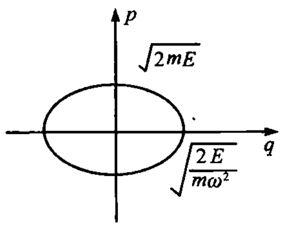
(2) 式说明体系温度越低粒子波动性越强

1.4 利用玻尔－索末菲的量子化条件,求:

(1) 一维谐振子的能量;

(2) 在均匀磁场中作圆周运动的电子轨道的可能半径。

已知外磁场$H=10$特斯拉,玻尔磁子$M_B=9\times10^{-24}$焦耳/特斯拉,试计算动能的量子化间隔ΔE,并与$T=4\text{K}$及$T=100\text{K}$的热运动能量相比较。



解图 1－4(a)

[解] (1)**[解法一]**

一维谐振子能量 $E=\frac{p^2}{2m}+\frac{1}{2}kq^2$ (1)

在相空间中轨迹是椭圆

$$\frac{p^2}{(\sqrt{2mE})^2}+\frac{q^2}{(\sqrt{\frac{2E}{k}})^2}=1$$

两半轴 $a=\sqrt{2mE}$ $b=\sqrt{\frac{2E}{m\omega^2}}$(其中$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$)

Sommerfeld 条件 $\oint p\mathrm{d}q=nh$ (2)

上式左边即相空间中椭圆面积πab

故 $\pi\sqrt{2mE}\cdot\sqrt{\frac{2E}{m\omega^2}}=nh,n=1,2\cdots$

求得 $E = nh\omega/2\pi = nh\nu = n\hbar\omega$ (3)

此式说明能量是等间隔分布的量子化能级。后来严格的量子力学给出了更准确结果

$$E = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega (n = 0,1,2\cdots)$$

并预言存在零点能 $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$

[解法 2] 一维谐振子方程

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega^2 q = 0 \quad (1)$$

通解 $q = A\sin(\omega t + \psi)$ (2)

广义动量 $p = m\frac{dq}{dt} = Am\omega\cos(\omega t + \psi)$

因此
$$\oint p dq = A^2\omega^2 m\int_0^T \cos^2(\omega t + \psi)dt \quad (3)$$
$$= \frac{1}{2}A^2\omega^2 m\int_0^T [1 + \cos(2\omega t + 2\psi)]dt$$
$$= \frac{1}{2}A^2\omega^2 mT$$

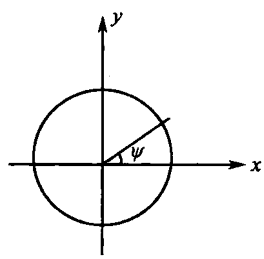
后一项余弦函数周期为$\frac{T}{2}$,因此在 $0 \sim T$ 积分为零

由 Sommerfeld 量子化条件 $\oint p dq = nh (n = 1,2\cdots)$

得 $\frac{1}{2}A^2\omega^2 mT = nh$ (4)

对于谐振子能量 $E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mA^2\omega^2$

因此 $E = \frac{nh}{T} = nh\nu = n\hbar\omega (n = 0,1,2\cdots)$ (5)



解图 1－4(b)

(2) 电子在匀强磁场中作匀速圆周运动时洛仑兹力提供向心力,即

$$m\frac{v^2}{R}=evB \tag{6}$$

求出半径 $R=\frac{mv}{Be}$ (7)

我们以角度 ψ 作为广义坐标求广义动量 p_ψ

拉格朗日函数 $L=T-V=T=\frac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2}m(R\dot{\psi})^2$

因此广义动量 $p_\psi=\frac{\partial L}{\partial\dot{\psi}}=mR^2\dot{\psi}=mRv=BeR^2$

由 Sommerfeld 量子化条件，把 p_ψ、ψ 代入

$$\oint p\mathrm{d}q=nh(n=1,2,3\cdots)$$

得 $\oint p\mathrm{d}q=\int_0^{2\pi}p_\psi\mathrm{d}\psi=\int_0^{2\pi}eBR^2\mathrm{d}\psi=2\pi eBR^2=nh$

即 $R=\sqrt{\frac{n\hbar}{eB}},n=1,2\cdots$ (8)

下面求动能，把(7) 式代入下式

$$E_k=\frac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2}m(\frac{BeR}{m})^2=\frac{B^2e^2R^2}{2m}$$

把(8) 式代入上式有

$$E_k=\frac{n\hbar eB}{2m}(n=1,2\cdots)$$

又玻尔磁子 $M_B=\frac{e\hbar}{2m}$ 得

$$E_k=nBM_B(n=1,2\cdots) \tag{4}$$

能级间隔为 $\Delta E=BM_B=9\times10^{-23}\mathrm{J}$ (5)

能量均分定理 $E=\frac{n}{2}kT$(热运动能量，n 为自由度) (6)

这里是平面运动取 $n=2$

所以 $E=kT$ 利用 k 的数值 1.38×10^{-23}，求出

$T=4\mathrm{K}$ 时 $E=5.52\times10^{-23}\mathrm{J}$ 小于能级间隔 ΔE

$T=100\mathrm{K}$ 时 $E=1.38\times10^{-21}\mathrm{J}$ 大于能级间隔 ΔE

[**说明**] 本题主要是准经典 Sommerfeld 关系的应用

1.5 两个光子在一定条件下可以转化为正负电子对。如果两光子的能量相等，问要实现这种转化，光子的波长最大是多少?

[**解**] 反应 $\gamma+\gamma\longrightarrow e^++e^-$ 转化条件 $h\nu\geqslant m_ec^2$

对心碰撞时能量最小，即波长最长

由 $h\nu=\frac{hc}{\lambda}=m_ec^2$ 得

$$\lambda = \frac{h}{m_e c} = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^8} m = 2.4 \times 10^{-3} nm$$

这里数值即电子的 Compton 波长 0.024Å

[说明] 本题涉及物质波与质能关系

补充题解析

补充题 1－1　质量 m 的粒子在宽 a 的一维无限深势阱中运动。利用 de Broglie 驻波条件，求能量可能取值

[解] 驻波条件在本题中为 $a = \frac{n}{2}\lambda (n = 1,2,3\cdots)$

而粒子动量大小 $p = \frac{h}{\lambda} = \frac{n\pi\hbar}{a}$

粒子能量 $E = T = \frac{p^2}{2m} = \frac{\pi^2 n^2 \hbar^2}{2ma^2} (n = 1,2,3\cdots)$

补充题 1－2　用 Sommerfeld 条件求解上题

[解] 设某一时刻粒子从 $x = 0$ 出发到 $x = a$ 碰墙后原速返回，$x = 0$ 处形成一个周期运动

由 Sommerfeld 条件得

$$nh = \int_0^a p \mathrm{d}x - \int_0^a (-p) \mathrm{d}x = 2ap$$

于是 $p = \frac{\pi n\hbar}{a}$

能量 $E = T = \frac{p^2}{2m} = \frac{\pi^2 n^2 \hbar^2}{2ma^2}$

补充题 1－3　利用不确定关系估算一维谐振子基态能量

[解] 一维谐振子能量 $\overline{E} = \frac{\overline{p^2}}{2m} + \frac{1}{2} m\omega^2 \overline{x^2}$

由于对称性 $\overline{x} = 0 \quad \overline{p} = 0$

由此 $\overline{(\Delta x)^2} = \overline{(x - \overline{x})^2} = \overline{x^2}$

$\overline{(\Delta p)^2} = \overline{(p - \overline{p})^2} = \overline{p^2}$

由此 $\overline{E} = \frac{\overline{(\Delta p)^2}}{2m} + \frac{1}{2} m\omega^2 \overline{(\Delta x)^2}$

$$\geqslant 2\sqrt{\frac{\overline{(\Delta p)^2}}{2m} \cdot \frac{1}{2} m\omega^2 \overline{(\Delta x)^2}} = \omega \sqrt{\overline{(\Delta p)^2}\ \overline{(\Delta x)^2}}$$

按不确定关系 $\overline{(\Delta p)^2}\ \overline{(\Delta x)^2} \geqslant \frac{\hbar^2}{4}$

因此 $\overline{E} \geqslant \frac{1}{2}\hbar\omega$

基态能量 $E_0 \approx \frac{1}{2}\hbar\omega$

补充题 1－4　正电子 e^+ 与电子 e^- 在库仑作用下形成束缚体系称电子偶素，试用 Bohr 理论计算从 $n=2$ 跃迁到 $n=1$ 所发射谱线波长

［**解**］Bohr 理论能级公式

$$E_n = \frac{E_0}{n^2}$$

其中　$E_0 = -\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \frac{mZ^2}{2\hbar^2}$

折合质量 $m = \frac{1}{2}m_e, Z = 1$

因此 $E_0 = -13.6\text{eV}/2 = -6.8\text{eV}$

$$E_n = -\frac{6.8\text{eV}}{n^2}$$

$$E_2 = E_0/4 = -1.7\text{eV}$$

$$E_1 = E_0 = -6.8\text{eV}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi\hbar c}{E_2 - E_1} = 243\text{nm}$$

补充题 1－5　电子在半径 R，总电荷 Ze，均匀带电球内运动，球心电势分布 $\varphi(r) = \frac{2e}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{3R^2 - r^2}{2R^3}\right)$。试用 Bohr 理论求能级分布

［**解**］体系动能 $T = \frac{p^2}{2m}$

按玻尔量子化条件 $p = mv = \frac{n\hbar}{r}(n = 1,2,3\cdots)$

因此 $T = \frac{n^2\hbar^2}{2mr^2}$ 而 $V = -e\varphi(r)$

总能量 $E = \frac{n^2\hbar^2}{2mr^2} - \frac{2e^2}{8\pi\varepsilon_0 R^3}(3R^2 - r^2)$

由稳定条件 $\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}r} = 0$ 求出 $r_0^4 = \frac{4\pi\varepsilon_0 n^2\hbar^2 R^3}{2e^2 m}, n = 1,2\cdots n_{\max}$

代回能量表达式得

$$E_n = \frac{2e^2}{4\pi\varepsilon_0 R}\left[\sqrt{\frac{4\pi\varepsilon_0}{2mR}}\frac{n\hbar}{e} - \frac{3}{2}\right]$$

补充题 1－6　由 Planck 定律推导 Stefan 定律

［**解**］$\int_0^\infty \rho(\nu)\mathrm{d}\nu = \frac{8\pi\nu^3}{c^3}\frac{h\mathrm{d}\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$

令 $x = h\nu/k_B T$

$$\omega = \frac{k_B^4 T^4}{\pi^2 \hbar^3 c^3}\int_0^\infty \frac{x^3 \mathrm{d}x}{e^x - 1}$$

积分$\int_0^\infty \frac{x^3 \mathrm{d}x}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$

因此 $W = \left(\frac{8\pi^5 k_B^4}{15c^3 h^3}\right)T^4$

于是 $\sigma = \frac{8\pi^5 k_B^4}{15c^3 h^3} = 5.67051 \times 10^{-8}\,\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot k^{-4}}$

本章内容小结

表 1—1　Planck 黑体辐射理论

背景	黑体辐射曲线　Stefan 定律　Wien 定律
假设	黑体辐射的能量为 $\varepsilon = nh\nu (n = 1, 2\cdots)$
结论	Planck 公式　$\rho_\nu \mathrm{d}\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{\mathrm{d}\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$
推论	Wien 定律　Stefam 定律 高温区化为经典 Rayleigh-Jeans 公式

表 1—2　Einstein 光量子理论

背景	光电效应实验
假设	光量子假设　$\varepsilon = h\nu$
结论	Einstein 方程　$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W_0$*
推论	光电效应实验现象

表 1—3　Bohr 旧量子论

背景	氢原子能级与线状光谱

* W_0 称为金属的逸出功，即使电子脱离金属表面所需最小能量

假设 1	原子具有不连续的能量定态满足$\oint p dq = nh (n = 1,2\cdots)$
假设 2	不同定态之间可以发生跃迁　频率满足 $\nu = \frac{E' - E}{h}$
结论	推导出了氢原子光谱公式以及氢原子基态半径
缺陷	无法解释原子的精细结构、无法定量计算谱线强度

表 1—4　De Broglie 物质波

背景	光的波粒二象性能否一般化?
结论	物质具有波粒二象性
推论	De Broglie 关系　$E = h\nu$　$p = \frac{h}{\lambda}$

表 1—5　证实物质波粒二象性的重要实验

年代	实验	结论
1887	Hertz 光电效应实验	光的粒子性
1923	Compton 效应实验	光的粒子性
1927	电子衍射实验	实物粒子的波动性
1961	电子双缝衍射实验	实物粒子的波动性