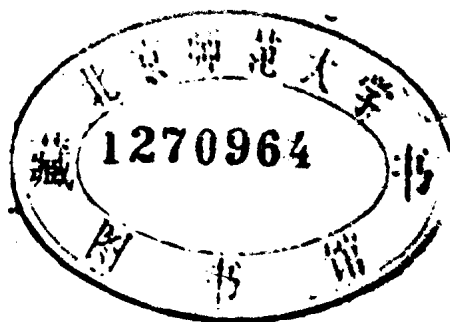


量子力学入门

〔日〕野村昭一郎著

李 彬 黄东律等 译



高等教育出版社

量子力学入门

〔日〕野村昭一郎 著

李 彬 黄东律 等译

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 8.125 字数 197,000

1985年1月第1版 1985年1月第1次印刷

印数 00,001—10,400

书号 13010·0832 定价 2.00 元

孙/221/08

译者的话

量子力学是研究微观物质运动的基本规律，所以物理学、化学、生物学等基础科学的教育工作者和科研工作者都必须掌握这门学科的基本概念及其原理。现在，由于许多工程技术的发展，也都与量子力学有一定联系，例如：激光、脉泽、半导体以及原子核工程等等，都必须应用量子力学规律，所以工程技术人员也有必要熟悉量子力学。

本书译自日本理学博士、东京工业大学工学部教授野村昭一郎著的《量子力学入门》的第四版（1976年）。该书原是为学习量子力学的工科学生和技术人员写的，主要叙述了量子论的形成、测不准原理、薛定谔方程式及其在氢原子、谐振子等研究中的应用，也介绍了微扰论等近似计算方法和相对论量子力学。该书自1973年初版问世以来，深受日本广大读者喜爱，是一本畅销书。此书特点是由浅入深，取材丰富，概念明确，语言生动活泼，文字通畅易懂。尤其是原书作者善于引用人类历史和社会生活以及自然界各种现象，形象地介绍量子力学的基本概念和知识，叙述带有一定的启发性。原书作者从初学者立场出发，在每章中都附有例题、习题和答疑性的问题讨论。这些都有利于引导初学者入门，并能引起初学者对量子力学的学习兴趣。因此，对初学者来说，是一本很好的入门书；对教学来说，无论对教师，还是学生，都是一本较好的参考书。

参加翻译工作的有：黄东律、康昌鹤（序言、第一章、第四章、第五章）；何志新、李彬（第二章、第三章、第六章至第十章）。参加校阅工作的有：李彬、康昌鹤。全书由李彬同志修改

定稿。

由于我们水平所限，译文中错误不当之处在所难免，切望读者予以批评指正。

译 者

1981年10月

前 言

近来,我觉得讲授量子论的内容,不仅在理科而且在工科学生的教学中逐渐多起来了。量子论从它建立起已经过半个多世纪,其有效性已在许多领域得到了证实。量子论和相对论一样都是人类对自然现象进行严密思考的产物,不但其内容本身,而且作为方法论也有许多应该学习的地方。

然而,一般认为量子论是很难理解的,特别是在学生时代没有机会学习量子论,而现在又不得不应用量子论结果的那些工作在各研究领域的人员、技术人员当中,有一些人对量子论抱有某种高不可攀的自卑感,或者往往感到有如雾里见物看不清楚而非常着急的心情。

从前,我在听一位教师讲授时,曾有过即使教师讲的是浅显易懂的问题,也不理解,找遍参考书也领会不了,从而有过困惑不解的体验。现在,关于量子论方面出版了许多优秀的教科书,只要用心去读有许多疑问都可以解决,不过我想也许有不少人象我所体验过的那样,在入门时感到困惑。

这本书是为将要学习量子论的工科学生和技术人员而写的。主要叙述了关于量子论的基础量子力学,并且在各章中都附有例题、习题和讨论题,尽力作到使读者易懂。特别是在讨论题中也包括从初学者的立场出发对各章有关内容的答疑,读者也许能够从这种答疑中领会到问题的核心。

承担本书出版的コロナ (Corona)社编辑部的中俣宽、岡田博隆两位先生给了许多帮助,在此表示衷心感谢。另外对帮助我进行校对等工作的东工大大学院学生河内正夫(现在电气公司茨城

电气通信研究所任职)、内野研二两人,也在此表示谢意。

1973年10月

作 者

目 录

译者的话	1
前言	1
第一章 量子论的形成	1
1.1 量子论的产生	1
1.2 原子光谱	3
1.3 玻尔的氢原子模型	5
1.4 光电效应和光量子说	9
1.5 X射线谱	11
1.6 康普顿效应	14
1.7 物质波和电子衍射	16
1.8 光的二象性	19
1.9 量子论的完成	21
问题讨论	23
习题	27
第二章 测量和测不准原理	28
2.1 宏观现象和微观现象	28
2.2 测不准原理	33
2.3 测定装置和被测物之间的相互关系	38
问题讨论	40
习题	45
第三章 波动现象	46
3.1 波的基本方程式	46
3.2 谐波	49
3.3 变数分离	50
3.4 叠加原理	54
3.5 傅里叶解析	55

3.6 波束·····	59
3.7 波束的运动·····	62
问题讨论·····	66
习题·····	68
第四章 量子力学的概要 (一) ·····	69
4.1 物质波的波动方程式·····	69
4.2 波束模型和几率波·····	73
4.3 量子力学的基本原理·····	74
4.4 定态和非定态·····	86
4.5 几率密度和几率流密度·····	89
4.6 可能同时确定的观测量·····	91
4.7 不可能同时确定的观测量·····	93
4.8 厄任费斯脱定理·····	97
问题讨论·····	99
习题·····	104
第五章 简单波动方程式的解法 ·····	106
5.1 方势阱中的粒子·····	106
5.2 谐振子·····	115
5.3 阶梯形势垒反射和贯穿·····	126
5.4 隧道效应·····	130
问题讨论·····	133
习题·····	137
第六章 氢原子 ·····	138
6.1 关于重心体系的运动·····	138
6.2 用球坐标表示的波动方程式·····	141
6.3 波动方程式的解·····	143
6.4 氢原子的波函数及其特征·····	150
问题讨论·····	155
习题·····	157
第七章 波动方程式的近似解法 ·····	158
7.1 与时间无关的微扰·····	158

7.2 与时间有关的微扰	166
7.3 变分法	171
问题讨论	175
习题	178
第八章 量子力学的概要 (二)	180
8.1 算符和波函数的矩阵表示	180
8.2 矩阵的变换	184
8.3 矩阵的对易性和对角化	187
8.4 海森伯的运动方程式	189
8.5 谐振子	191
问题讨论	196
习题	198
第九章 角动量	199
9.1 轨道角动量算符	199
9.2 磁矩	203
9.3 自旋的存在	207
9.4 自旋角动量算符	207
9.5 总角动量和它的本征值	209
9.6 角动量的矩阵表示	214
9.7 拉莫尔旋进	217
9.8 自旋轨道相互作用	220
问题讨论	222
习题	224
第十章 相对论的量子论	225
10.1 克莱因-戈登方程式	225
10.2 狄拉克方程式	226
10.3 自由粒子	231
10.4 自旋算符	235
10.5 自旋磁矩	237
问题讨论	239
习题	242
索引	243

第一章 量子论的形成

理解所谓量子现象是怎么一回事，对学习量子论是非常重要的。原子光谱等是我们熟悉的现象，也是一种量子现象，而这种现象如用经典物理学就无法得到满意的解释。

在这一章中，叙述了量子现象或量子效应的要点，简单地介绍量子论产生以前的背景及其特点。

1.1 量子论的产生

在1900年12月召开的物理学会会议上德国理论物理学家普朗克(P. Planck)发表了关于热辐射的量子假说，一般认为这是量子论的开始。当物体加热到高温时，能发射出各种不同波长的电磁波，这就是熟知的热发射或称为热辐射。

由热辐射产生的电磁波谱，一般来说是与物质种类及其表面状态有关，是非常复杂的。但是，如果采用所谓黑体则可整理出与物质种类无关的关于热辐射的实验结果，并能和理论相符合。所谓理想的黑体，就是指具有能完全吸收入射线那种表面的物体。实际上虽然并不存在这种物体，但如果在空腔上开一小孔，如图1.1所示，则入射波在其中

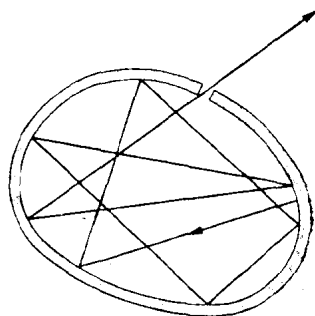


图1.1 空腔辐射

进行无数次反射，几乎完全被吸收，这就可以实现接近黑体的状态。从这个小孔中辐射出来的射线称为空腔辐射。

黑体辐射的能谱，如图1.2所示。维恩(Wien)、瑞利(Rayleigh)、金斯(Jeans)等人虽然都曾试图解释这个曲线，但正象图1.2所示的那样，只取得了部分成功。例如瑞利建立的模型认为空腔壁由电振子形成，它能辐射或

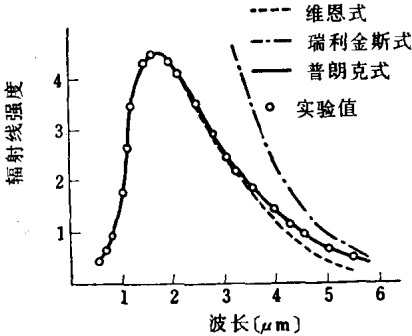


图1.2 热辐射波长的强度分布

吸收能量以保持热平衡，以此为基础得出了理论公式。按经典力学，可以使振子的能量连续发生变化，如果从这种观点出发，则在高频范围空腔具有的电磁能就变成无限大。在当时认为振子模型大致是正确的，可是上述结论确使当时的人们感到费解。

普朗克为了说明热辐射谱，提出了这样一种量子假说，如振子的频率为 ν ，认为电磁辐射的能量只允许以 $h\nu$ 为单位的整数倍进行吸收或辐射。这里 h 称为普朗克常数，其值为

$$h = 6.6256 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$$

这就是说，最好把振子的能量看成如图1.3所示那样以 $h\nu$ 为间隔排列着。这种所取的能量值的分立现象称为能量的量子化。

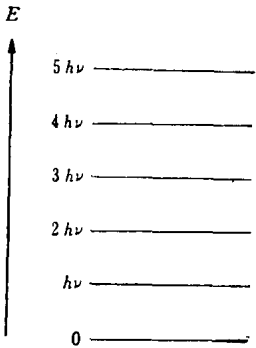


图1.3 振子量子化的能量

普朗克就这样利用这种大胆的假定，出色地解释了辐射谱。他虽曾努力从经典理论中寻找这种能量量子化的根据，但无疑仍以失败

而告终。量子论就是在热辐射这样既熟悉而又意外地复杂的现象中产生的。

例题1.1 电磁波的频率 ν 为 $10^5[\text{Hz}]$ (中波)、 $10^9[\text{Hz}]$ (微波)、 $10^{14}[\text{Hz}]$ (可见光) 时, 试求出用电子伏特 $[\text{eV}]$ 为单位的 $h\nu$ 值。

解: 因 $1[\text{eV}] = 1.6021 \times 10^{-19}[\text{J}]$, 如果 $h\nu$ 用电子伏特表示时, 则

$$\begin{aligned} h\nu &= 6.6256 \times 10^{-34} \nu [\text{J}] \\ &= 4.1355 \times 10^{-15} \nu [\text{eV}] \end{aligned}$$

于是它们的能量分别为 4.1355×10^{-10} , 4.1355×10^{-6} , $4.1355 \times 10^{-1}[\text{eV}]$ 。可知近紫外线的能量大约相当于 $1[\text{eV}]$ 。

1.2 原子光谱

当充气放电管电极上加几千伏的高压电时, 充入的气体就会产生它所特有的发光。在最简单原子的氢的情况下, 可以得到如图1.4那样的线状光谱。用分光仪研究的结果已得知谱线的波数 $\tilde{\nu}$ (波长 λ 的倒数)¹⁾

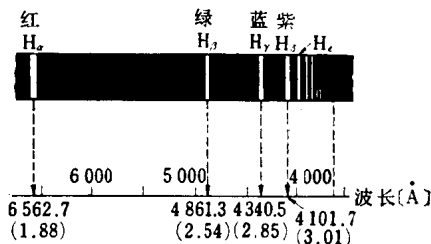


图1.4 氢原子的可见线状光谱 () 内的数值以电子伏特表示

可用下述关系式表示:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1.1)$$

$$(m = 2; n = 3, 4, 5, \dots)$$

式中的 R_H 称为氢原子的里德堡 (Rydberg) 常数, 其值为 $1.096776 \times 10^7 [\text{m}^{-1}]$ 。出现在可见部分的这个谱系称为巴尔麦 (Balmer) 系。

1) 要注意, 也有人将 $\frac{2\pi}{\lambda}$ 称为波数。

已知，在可见部分以外也有谱系，它们的分类列在表1.1中。各谱系是以发现者的名字命名的。式(1.1)不仅能对谱线进行简单地整理，而且还有下述的重要意义。波数可以表示为以整数为

表1.1 氢原子的光谱系

谱系	m	n	区域
莱门(Lyman)	1	2, 3, 4, ……	远紫外
巴尔麦(Balmer)	2	3, 4, 5, ……	可见
帕欣(Paschen)	3	4, 5, 6, ……	红外
布拉开(Brackett)	4	5, 6, 7, ……	远红外
芬德(Pfund)	5	6, 7, 8, ……	超远红外

特征的二项之差，各项分别称为光谱项，这些项如以 T_m 、 T_n 表示，则式(1.1)变成：

$$\tilde{\nu} = T_m - T_n \quad (1.2)$$

这种关系不仅对氢原子，而且对碱土金属等更复杂的元素光谱也成立，不过这时光谱项的形式不再象式(1.1)那样简单，变得复杂一些。式(1.2)的关系称为里德堡-里兹(Rydberg-Ritz)的组合原则。光谱项能用整数作为参数表示这一事实启示我们，怎样理解发光机理，才能认为原子的状态可以用包含整数值的量来描述。

1910年前后，英国的卢瑟福(Rutherford)根据关于原子结构的研究结果，明确了原子是由一个又重又小的原子核(10^{-17} [m]数量级)和绕核周围而旋转的电子构成的。对氢原子来说，因原子核是质子，所以由带正电荷 e 的质子和带负电荷 $-e$ 的电子这两个粒子组成的体系。氢原子能发出如式(1.1)或式(1.2)所表示的谱线的光，这在当时是无法解释的。

1.3 玻尔的氢原子模型

为要研究带电粒子的运动，可以应用牛顿力学和麦克斯韦的电磁学。氢原子是由质子和电子构成的，它们之间有库仑力作用，如给电子以适当的速度，就可以认为它会作如图1.5的实线所示的那种轨道运动，这正如地球由于受万有引力作用而在太阳的周围作旋转运动一样。可是，如果没有一个适当的运动方向，则电子将不是被质子吸住，就是向远处飞去。

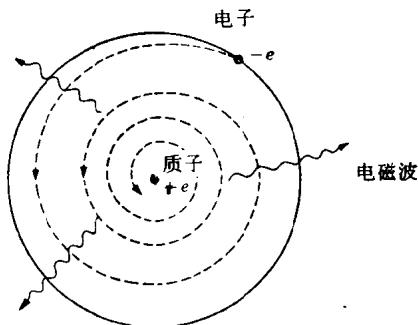


图1.5 氢原子的经典模型

然而，认为电子象地球在太阳周围稳定的连续旋转那样也能围绕质子永远稳定的旋转，那就错了。旋转运动是加速运动。根据电磁理论可知带电粒子在作加速运动时，要伴随着放出电磁波，体系的能量逐渐发生损失。这一点正如图1.5的虚线所示，电子的旋转轨道半径逐渐变小，它意味着终究会被质子吸住，而且这种运动过程中放出的电磁波的波长是连续变化的，则氢原子的光谱不是线状光谱，而应得到连续光谱。

为了说明氢原子的发射光谱，1913年丹麦物理学家玻尔（Bohr）提出了下面那样的氢原子模型，试图对不连续光谱进行说明。这就是熟知的玻尔的量子假说。

〔假设1〕 稳定轨道条件

电子只能在固定的圆形轨道上运动，这时不发光（电磁波）。在这种稳定轨道上运动的电子角动量的 2π 倍等于普朗克常数 h 的整数倍。

设电子的质量为 m ，圆形轨道半径为 r ，速度为 v 时，则：

$$mvr \times 2\pi = nh \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (1.3)$$

稳定轨道的半径由整数 n 决定，这个 n 称为量子数。

〔假设 2〕频率条件

只有当电子从一个稳定轨道跃迁到另一个稳定轨道时才能发生光的发射和吸收，设变化前后的能量分别为 E_m 、 E_n ，则发射或吸收的光的频率 ν 可由下式表示：

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h} \quad (1.4)$$

当 $E_m > E_n$ 时，发生光的发射。当 $E_m < E_n$ 时，发生光的吸收。

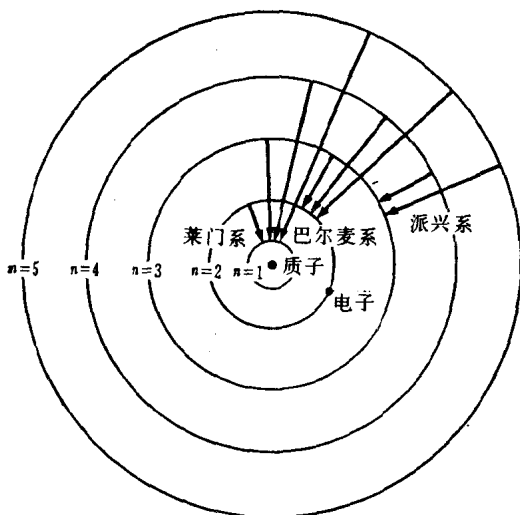


图1.6 玻尔的氢原子模型（图中，轨道半径大小是任意的）

如上述假设用图来表示，如图1.6所示。电子在以半径为 r 的圆形轨道上运动时，如电子的电荷为 $-e$ ，则电子和质子之间作用

的库仑力为 $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ (ϵ_0 : 真空的介电常数), 如果把它作为发生等速圆周运动的向心力来考虑, 则下式成立:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1.5)$$

由式(1.3)和式(1.5)则得:

$$r = \frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{\pi m e^2} = 0.529 \times 10^{-10} n^2 [\text{m}] \quad (1.6)$$

对应于 $n=1$ 的是最小的轨道半径, 称为玻尔半径, 设其为 a , 则 $a = 0.529 \times 10^{-10} [\text{m}] = 0.529 [\text{\AA}]$ 。利用玻尔半径可以作为大致衡量原子大小的标准。

因为电子的能量是动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 与势能 $-\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ 之和, 所以当联系式(1.5)时, 并以 n 为电子能量 E 的下角标, 则

$$E_n = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} \quad (1.7)$$

将式(1.7)代入式(1.4)则为

$$v = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \left| \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right| \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} \text{波数} \quad \tilde{\nu} &= \frac{v}{c} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left| \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right| \\ &= R_y \left| \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right| \end{aligned} \quad (1.9)$$

代入数值后进行计算, 则 $R_y = 1.09733 \times 10^7 [\text{m}^{-1}]$, 可知, 它与式(1.1)的 R_H 几乎一致。这个 R_y 称为里德堡常数。

式(1.9)表示组合原则, 光谱项则对应于各轨道。 $n=1$ 是氢原子所取的最低能态, 称为基态。 $n>1$ 表示能量较高的状态, 从能量最低的状态开始, 顺次称为第一激发态 ($n=2$)、第二激发态 ($n=3$)……。 $n=\infty$ 表示电子脱离了质子的束缚, 变成了自由状态。因为这时的能量取为零值, 所以 $n=1$ 时的能量 ($E_1 = -2.17 \times 10^{-18} [\text{J}] = -13.58 [\text{eV}]$) 的绝对值, 就等于电子脱离质