

图解量子力学

【日】新藤兼人 著 高·安·达曼恩 著
陈其南 译 倪光南 校

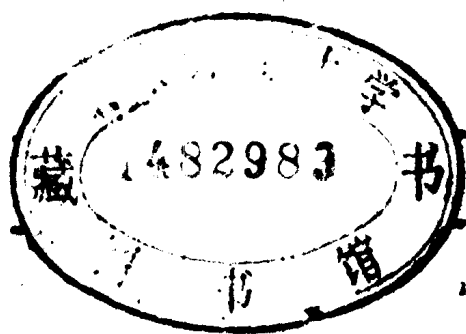
上海科学技术出版社
约翰·威利父子出版公司

图解量子力学

[德] S·勃莱恩脱 H·D·达曼恩 著

陈苏卿 译 倪光炯 校

JY1/B2/19



上海科学技术出版社

约翰·威利父子出版公司

The Picture Book of Quantum Mechanics

Siegmund Brandt, Hans Dieter Dahlen

John Wiley & Sons, Inc. U. S. A., 1985

责任编辑 汪沛霖

图解量子力学

【德】S·勃莱恩脱 H·D·达曼恩 著

陈苏卿 译 倪光炯 校

上海科学技术出版社

约翰·威利父子出版公司

合作出版

(上海瑞金二路 450 号)

本书由上海发行所发行 商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 18.25 插页 4 字数 416,000

1983 年 4 月第 1 版 1983 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—2,500

ISBN 7-5323-0632-1/O·64

定价: 10.50 元

内 容 提 要

初学量子力学的人感到最大的困难是内容十分抽象,没有任何直觉。如果能把量子力学的抽象概念通过计算机程序编制成图解变成更直观的概念,则学习量子力学的人就容易理解了。

本书是国内第一本译出的利用图解方法来阐明量子力学基本概念的参考读物,书中约有一半篇幅是插图。原著者勃莱恩脱和达曼恩教授曾化了不少心血,完全从读者易于理解量子力学内容考虑,总结较长时期教学经验,利用专用的计算机程序编制了很多插图,使量子力学的抽象概念更形象化。

本书篇幅不大,内容精炼,虽并不求全,但有些论题,如可分辨与不可分辨的耦合谐振子等,是别的同类书上很难找到的。每章后附有习题,便于读者消化和巩固已学习的基本概念。这些习题并不太难,读者完全可以自己解题。

本书特别适合化学系、数学系以及有关研究单位初学量子力学的人员学习使用,对已学过量子力学的物理系教师、研究生和学生亦有极大参考价值。

中 译 本 序

中国科学家对促进现代科学的发展和进步作出了重要的贡献。我们两人已经从这些科学家的工作中学习到许多理论概念和实验结果。在这些科学家中，就物理领域来讲，最著名的科学家是诺贝尔奖金获得者李振道博士和杨振宁博士关于宇称不守恒定律的思想和吴健雄博士对这一定律的实验验证以及丁肇中博士的对 J/ψ 粒子的发现。

我们怀着最崇高的敬意注视着二千多年以来中国文化的优秀传统和杰出成就。对《图解量子力学》一书的中译本能在中国出版，我们感到十分骄傲。我们衷心地希望本书能对科学交流和科学合作的繁荣昌盛作出一点小小的贡献！

S. Brandt

H. D. Dahmen

1987年5月于 Siegen

译者序

量子力学是近代物理学的主要分支之一，也是现代科学技术中应用很广的学科之一。因此，不但物理系，而且许多其它系如化学系、数学系等都纷纷开设了这门课程。目前国内外出版的有关量子力学的书籍越来越多，在这种情况下，一本新的量子力学书籍要问世，就必须具有一定的特色和丰富的内容才能受到读者的欢迎。由美国约翰·威利父子出版公司 (John Wiley & Sons Inc.) 出版的西格蒙德·勃莱恩脱 (Siegmond Brandt) 和亨斯·狄特·达曼恩 (Hans Dieter Dahmen) 编著的《图解量子力学》 (“The Picture Book of Quantum Mechanics”) 就是这样一本很有特色的书。

它写得很深吗？不，请一位真正懂得量子力学的人翻阅一下，就知道它并不深，甚至可以说相当浅。但是他一旦读了以后毫无疑问会被它的精采内容吸引住了。

作者通过专用的计算机程序进行计算并精心绘制了很多插图，从而形象地显示了和透彻地说明了许多量子力学的基本概念和基本过程。经过这样一讲，就把量子力学的抽象概念变成更直观的了，这是别的已出版的量子力学书上未曾见过的。读者通过它，对微观粒子的波粒二象性，波的反射和透射，隧道效应，作为驻波的定态束缚态，共振散射等概念，都可获得清晰的直观的了解。因此本书对于想真正掌握量子力学的特点和原理的读者来说，无疑是良师益友，同时对物理系的广大教师和同学来说，也是一本颇有价值和用处的参考书。

许多学过量子力学的人，可能知道一些公式，会计算一些题目，但还不一定能真正理解它的内容，原因就在于对这些基本概念和基本问题缺乏直观的图象，而仅仅停留在一些抽象

的概念上。正是在这一点上,本书可以给予很大的帮助。

本书的篇幅不大,内容较为精炼,虽并不求全,但是也有一些论题,如可分辨与不可分辨的耦合谐振子等,是别的同类书上很难找到的。附在各章后面的习题是为消化和巩固基本概念而列出的,并没有什么难题,读者可以自己来思考和完成,还可以参看书后的题解。

译者从事多年量子力学的教学和科研工作,深深体会到编写这样一本很有特色的书,要付出多少心血和劳动。考虑到作者的学识、经验和为读者着想的愿望,在书中得到了充分的反映,加上国内还没有这样的一本量子力学的书籍,译者特地将它译出,希望并相信我国读者会喜欢它。

陈 苏 卿

1987年7月

序

学生们学习经典力学时可以依靠日常生活的经验来帮助他们理解并运用力学概念。即使一块石头并不是一个质点，扔石头的经验肯定能帮助他们去理解和分析在重力场中的质点轨道。此外，学生们能够在牛顿定律的基础上去求解许多力学问题，并且在这样做的时候获得了附加的经验。当学习波动光学的时候，他们发现有关水波的知识，以及在波纹起伏的水槽中的实验，都非常有助于形成关于干涉和衍射的典型波动现象的直觉观念。

可是在量子力学中，初学者就没有任何直觉了。因为量子力学现象是在原子或亚原子尺度上发生的，我们在日常生活中没有关于它们的任何经验。原子物理中的那些实验或多或少地要涉及复杂的仪器并且决不是容易解释的。即使学生们想当然地接受了薛定谔方程，就象许多学生想当然地接受了牛顿定律一样，对他们来说，通过求解许多问题仍然很难获得量子力学中的经验。只有很少几个问题可以不用计算机来处理。而且就算已经知道了那些解的闭合形式，它们的复杂结构以及那些学生往往是第一次遇到的特殊数学函数，也对产生一种启发式的直观的理解构成严重的障碍。然而，最困难之点莫过于把问题用量子力学的语言表述出来，这是因为现在的这些概念与经典力学的概念是完全不同的。事实上，这些概念连同薛定谔表述中量子力学的那些方程，与其说是接近力学，不如说更接近于光学。再有，我们感兴趣的那些量——诸如跃迁几率、截面等等——常常与力学概念如一个质点的位置、动量或轨道等没有什么关系。不过，对一个过程的实际的洞察力乃是为理解其量子力学描述并解释其在量子力学中基本性质诸如位置、动量、角动量以及截面、寿命等等的

先决条件。

实际上,学生们必须产生一种直觉,以了解经典力学中的概念应如何改变,并如何被光学的论证所补充,以获得量子力学大体上正确的图象。特别是必须仔细研究那些微观物理体系的时间演化以建立它与经典力学之间的对应。在这里计算机和计算机作图提供了难以置信的帮助,因为它们提供了大量例子,这些例子非常详尽,可以在其时间演化的任何一个阶段去看。举例说,在运动中波包的研究(没有计算机的帮助是不可能的)显示出从经典力学引伸出来的直觉只有有限的正确性,这种研究使我们获得对诸如隧道效应和共振等现象的认识,而这些现象由于干涉的重要性,只可能通过光学的类比来理解。在各种不同情况下不少体系都能在计算机上模拟,并依靠各种类型的计算机作图法加以研究。

本书包括以下这些论题:

- 波包和稳恒波的散射,
- 隧道效应,
- 亚稳态的衰变,
- 各种势阱内的束缚态,
- 能带,
- 可区别的与不可区别的粒子,
- 角动量,
- 三维散射,
- 截面和散射振幅,
- 三维势场中的本征态,例如氢原子中的本征态,
- 分波和共振。

而辅助的图解则从

- 一维问题中波函数的时间演化,
- 研究(举例说)在一段能量范围内散射的参数依赖性,
- 表示二粒子波函数的三维表面图,

直到

- 显示三维散射的起伏水槽样图形。

只要有可能,图中都指出体系的粒子按照经典力学将有什么样的位置或轨道。我们也附带地把量子力学中典型的特殊函数,诸如勒让德多项式,厄密多项式和拉盖尔多项式,球谐函

数和球贝塞尔函数等都画出一族图画出。

本书旨在介绍波动力学的基本概念。作为引言的第一章是基础，用光电效应和康普顿效应的重要实验发现来讨论光的粒子性，还讨论了由电子衍射所显示的粒子的波性。由这些实验所抽象出来的理论概念在第二章中作了介绍，那里研究了光的波包在空间中传播以及被玻璃平板反射和折射时的行为。光子是作为包含一个能量量子的光的波包而被引入的。

为了指出物质粒子与光子之间的相似性，在第三章中以德布罗意波的波包形式引入粒子。通过群速度，海森堡的测不准原理和玻恩的几率解释的详细的讨论，我们解释了德布罗意波在描写粒子的力学行为上的能力。而薛定谔方程则被发现为粒子的运动方程。

第四到第八章致力于讨论一维的量子力学系统。研究粒子被势的散射帮助我们去了解粒子在力的影响下是如何运动的，以及为解释透射和反射的共同效应时几率解释是如何起作用的。我们研究了一个粒子的隧道效应以及一个亚稳态的激发和衰变。并详细地研究了束缚的定态。我们还研究了被限制在势场力程范围内的波包的准经典运动。

第七和第八章包括了二粒子系统。采用耦合的谐振子阐明了不可区分粒子的概念。以此来显示由不同的粒子所组成的体系，全同的玻色子体系，和服从泡利原理的全同的费米子体系之间的显著的差异。

第九到第十三章的主题是三维量子力学。我们从角动量的详细研究开始，讨论了求解薛定谔方程的方法。通过引入分波的分解，微分截面，散射振幅和相移等概念，我们研究了平面波的散射。在第十三章，我们详细地研究了共振散射，它是许多物理研究领域的主题。在第十二章我们讨论了三维情况下的束缚态。在我们所讨论的题目中还有氢原子以及在简谐力的作用下波包在椭圆轨道上的运动。

最后一章致力于讨论从原子，分子，固态，原子核和粒子物理的实验中得到的结果。通过图片的帮助和本书的讨论可以定性地理理解这些结果。例如我们从原子和亚原子物理的领域中介绍了下面的结果。

- 典型的散射现象，
- 束缚态的谱和在模型帮助下对它们的分类，
- 在总截面中的共振现象，

- 散射的相移分析和共振的雷吉(Regge)分类,
- 作为亚稳态衰变的放射性。

把这些实验结果和书中由计算机所画出的图相比较,并考虑到对它们的解释将使读者隐约地看到科学的广阔的领域,在那里各种事物只有在量子力学的基础上才可能得到理解。

在各章之后,总共约有100个以上的习题。许多习题的设计是为了帮助学生从图中获得物理概念。另一些习题将给学生以掌握理论概念的实践机会。在本书的最后一页是经常使用的符号的表格,一张关于物理常数的短的表格和一张把SI单位转换成实用物理单位的简明的表。这些常数和单位将使数值计算更为容易。

所有由计算机画出的图是由一个相互作用的计算机程序(它是特别为本书而设计的)作出的。一个例外,图9.5是由彼得·贾曾博士(Dr. Peter Janzen)作的。手画的那些图和其它图上的字母是由马恩弗莱德·尤特诺依阿(Manfred Euteneuer)完成的。吕弟格·许茨(Rüdiger Schütz)对计算机图的某些技术要点给予了帮助。吉特鲁德·克勒茨(Gertrud Kreuz)小心地打印了手稿。狄泰哈特·许勒教授(Diethard H. Schiller),弗列茨·鲍帕教授(Fritz W. Bopp),和亨斯-裘根梅约博士(Dr. Hans-Jürgen Meyer)读了手稿并且提供了有益的批评。我们感谢所有这些给予友好合作的人们。

我们特别感谢尤根茂茨-巴许尔教授(Eugen Merzbacher),因为他对我们的计划表示十分有兴趣和他的许多有价值的建议,它们有助于本书的改进。

西格蒙德·勃莱恩脱(Siegmund Brandt)

亨斯·狄特·达曼恩(Hans Dieter Dahmen)

德国西格恩

(Siegen, Germany)

目 录

中译本序

译者序

序

1. 引论	1
习题	7
2. 光波, 光子	9
2.1 简谐平面波, 相速度	9
2.2 入射到玻璃表面上的光波	13
2.3 经过玻璃平板的光波	15
2.4 自由的波包	17
2.5 入射到玻璃表面上的波包	21
2.6 穿过玻璃平板的波包	25
2.7 光子	26
习题	27
3. 物质的几率波	29
3.1 德布罗意波	29
3.2 波包, 色散	29
3.3 几率解释, 测不准原理	33
3.4 薛定谔方程	41
习题	42
4. 一维薛定谔方程的解	45
4.1 时间和空间坐标的分离, 定态解	45
4.2 稳恒的散射解, 连续能谱	46

4.3 束缚的定态	55
习题	60
5. 一维的量子力学: 势散射	61
5.1 一个粒子的突然加速和减速	61
5.2 隧道效应	66
5.3 亚稳态的激发和衰变	68
5.4 有确定动量的定态	73
习题	77
6. 一维量子力学: 在势内的运动, 稳恒的束缚态	79
6.1 深的方势阱内的能谱	79
6.2 在深的方势阱内粒子的运动	80
6.3 谐振子势的能谱	82
6.4 粒子的简谐运动	85
6.5 有限深方势阱的能谱	90
6.6 周期性势, 带状能谱	92
习题	95
7. 耦合的谐振子: 可分辨的粒子	97
7.1 二粒子波函数	97
7.2 耦合的谐振子	100
7.3 定态	107
习题	109
8. 耦合的谐振子: 不可分辨的粒子	111
8.1 不可分辨粒子的二粒子波函数	111
8.2 定态	113
8.3 波包的运动	115
8.4 从经典观点来看不可分辨的粒子	119
习题	121
9. 三维空间中的波包	125
9.1 动量	125
9.2 角动量, 球谐函数	128
9.3 薛定谔方程	136
9.4 自由运动的薛定谔方程的解	137
9.5 球贝塞尔函数	138

9.6 在角动量表象中的简谐平面波	141
9.7 经典粒子的自由的波包和角动量	144
习题	148
10. 三维薛定谔方程的解	151
10.1 散射的定态解	152
10.2 束缚的定态	154
习题	156
11. 三维量子力学: 势场的散射	157
11.1 简谐平面波的衍射分波	157
11.2 散射波和散射截面	161
11.3 散射相位和振幅, 么正性和阿甘图	167
习题	171
12. 三维量子力学: 束缚态	173
12.1 在一球形方势阱内的束缚态	173
12.2 球对称谐振子的束缚态	179
12.3 三维空间内简谐粒子的运动	189
12.4 氢原子	189
习题	194
13. 三维量子力学: 共振散射	199
13.1 吸力势的散射	199
13.2 共振散射	199
13.3 相移分析	207
13.4 束缚态和共振	210
13.5 一斥力壳引起的共振散射	214
习题	227
14. 原子、分子、固态、原子核和粒子物理中的例子	229
14.1 原子、电子、中子和 π 介子在各种靶上的 散射	231
14.2 原子、原子核和晶体中束缚态的能谱	232
14.3 原子和原子核的壳模型分类	235
14.4 从分子、原子、原子核和粒子上产生的共振 散射	241
14.5 在核物理和粒子物理中的相移分析	245

14.6 在雷吉轨迹上共振的分类	247
14.7 作为亚稳态的放射性核	248
习题解答	251

1.

引 论

经典物理的各基本领域,一方面是力学和热学,另一方面是电磁学和光学。力学和热学的现象涉及到由牛顿方程决定的粒子运动。电磁学和光学则处理由麦克斯韦方程描述的各个场和波。在粒子运动的经典描述中,对任一给定时刻粒子的位置是严格地确定的。相反,波现象是由展布在空间的某一确定区域中的干涉图样所表征。但是,在原子和亚原子的过程中,粒子和波动物理的严格区分不再是有意义的了。

量子力学的起源可以追溯到麦克斯·普朗克在 1900 年的发现。他指出频率为 ν 的谐振子的能量是量子化的。也就是说,一个谐振子发射或吸收的能量只能取值 $0, h\nu, 2h\nu, \dots$ 。仅当取值为普朗克能量量子

$$E = h\nu$$

的倍数才是可能的。普朗克常数

$$h = 6.262 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

是自然界的基本常数,也是量子物理中的核心常数。人们常常愿意采用谐振子的角频率 $\omega = 2\pi\nu$, 并把普朗克能量量子写成如下形式:

$$E = \hbar\omega$$

这里

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

简单地是普朗克常数被 2π 除。普朗克常数是一个十分小的量。因此在宏观的系统中量子效应是不明显的。但是,在原子和亚原子物理中普朗克常数是十分重要的。为了使这一叙述更加精确,我们来看一下几个实验,它们显示了如下的基本现象:

- 光电效应

- 康普顿效应
- 电子的衍射

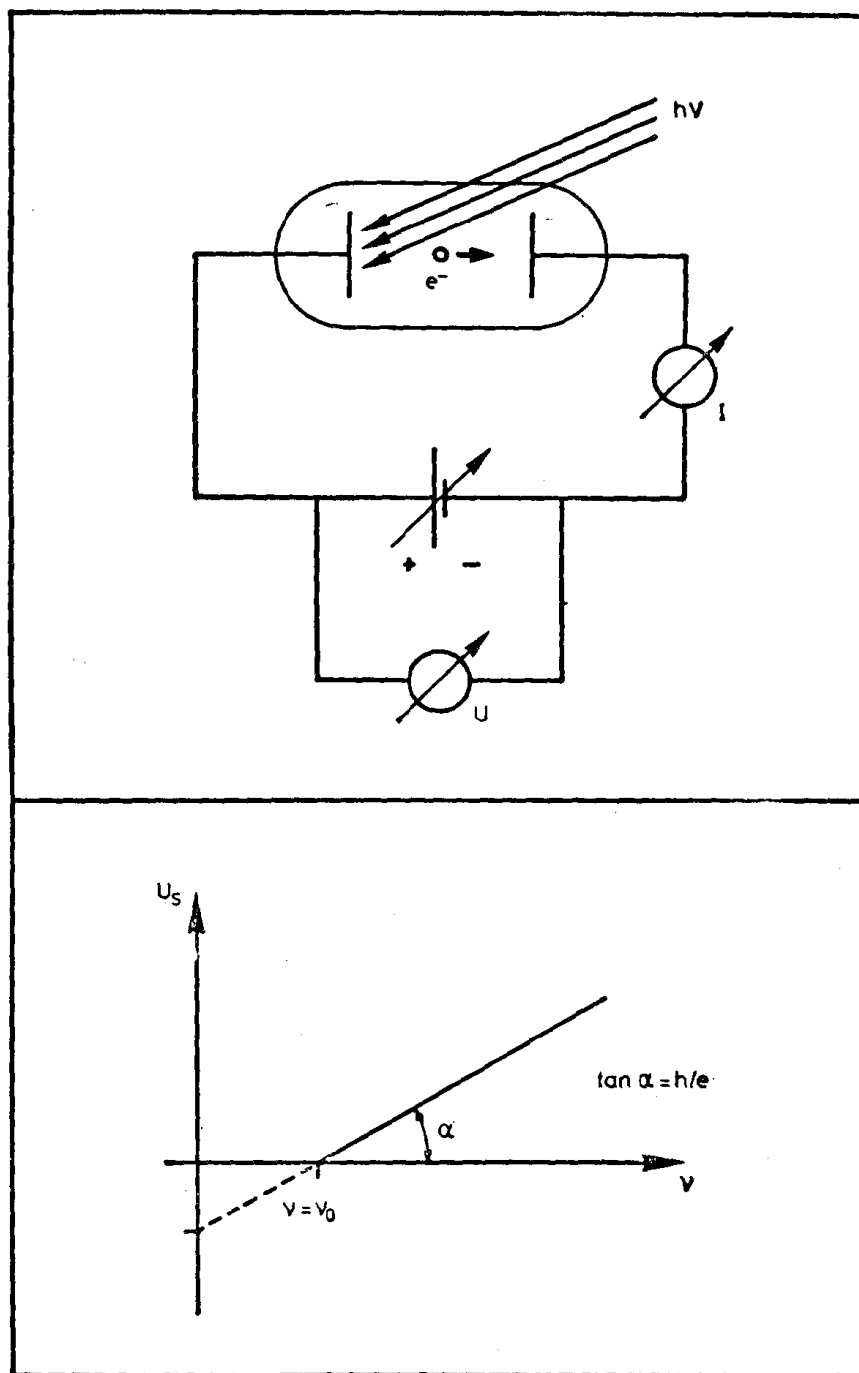


图 1.1 光电效应

(a) 测量这个效应的仪器由一个包含有两个电极的真空管所组成。频率为 ν 的单色光射在阴极上使电子被释放，这些电子可达到阳极并在外电路中产生电流 I 。在真空中电子的流动受外电压 U 的阻挡。一旦 U 超过 U_s 值，电子的流动就停止了。(b) 频率 ν 和电压 U_s 之间存在一线性关系。

光电效应是在 1887 年由亨里希·赫芝发现的。维尔罕姆·哈尔华赫 (Wilhelm Hallwachs) 在 1888 年和菲里普·兰那 (Philipp Lenard) 在 1902 年对它作了更详细的研究。我们在这里所讨论的定量实验是密立根 (R. A. Millikan) 首先在 1916 年作出的。他的仪器在图 1.1a 中示出。可变频率的单色光打在真空管中的一个光阴极上。在光阴极的对面是一个