

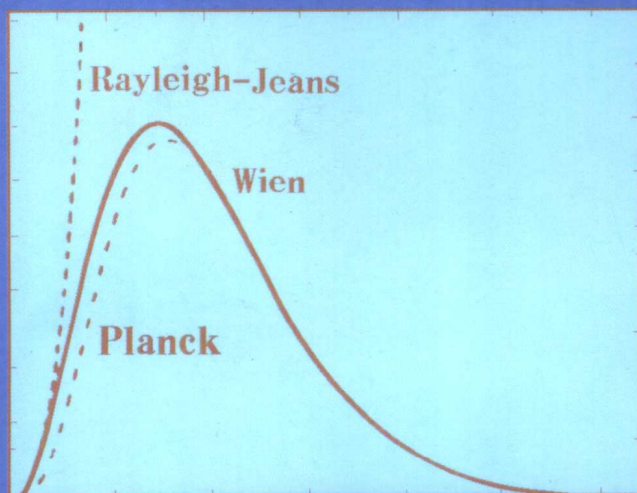
[德] 瓦尔特·顾莱纳

著

» **QUANTUM**
MECHANICS *an INTRODUCTION*

量子力学：导论

王德民 汪厚基 译 张启仁 审校



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



Springer

量子力学：导论

(第三版)

[德] 瓦尔特·顾莱纳 著
汪厚基 王德民 译
张启仁 审校

北京大学出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:01-2001-1587 号

图书在版编目(CIP)数据

量子力学: 导论/[德] 顾莱纳(Greiner, W.) 著;汪厚基,王德民译. —北京:北京大学出版社,2001.4

ISBN 7-301-04939-0

I. 量… II. ①顾… ②汪… ③王… III. 量子力学—高等学校—教材 IV. 0413.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第20534号

Originally published in under the title:

“Theoretische Physik, Band 4: Quantenmechanik Teil 1. Eine Einführung” by Walter Greiner

Copyright ©Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main 1989

Translated from the English edition:

“Quantum Mechanics. An Introduction”

Copyright ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1989, 1993, 1994

All Rights Reserved

本书德文版《理论物理第四卷:量子力学》由 Verlag Harri Deutsch 出版。英文版由 Springer-Verlag 出版。中文版由 Springer-Verlag 授权北京大学出版社出版

书 名:量子力学:导论

著作责任者:[德]瓦尔特·顾莱纳著 汪厚基 王德民译

责任编辑:王原

标准书号:ISBN 7-301-04939-0/O·0505

出 版 者:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址:<http://ebs.pku.edu.cn>

电 话:出版部 62752015 发行部 62754140 编辑部 62757513

电子信箱:zpup@pup.pku.edu.cn

排 版 者:兴盛达打字服务社 62549189

印 刷 者:中国科学院印刷厂

发 行 者:北京大学出版社

经 销 者:新华书店

787毫米×1000毫米 16开本 25.25印张 600千字

2001年5月第一版 2001年5月第一次印刷

定 价:40.00元

英译本前言(节译)

全世界不止一代说德语的学生正是用瓦尔特·顾莱纳的教材为引导了解和欣赏了现代理论物理以及作为科学根基的数学的力量和美。

用一系列密切相关的教科书连贯而完整地表达科学的一个整领域并不是新想法。许多老物理学家怀着愉悦的心情回忆他们通过索末菲的,普朗克的,以及朗道和栗弗席兹的经典丛书开拓自己的道路,进行探索和发现时的感受。从学生的观点看,用一致的符号,逻辑地组织题材和连贯的表达有许多明显优点:此外,对科学的完整概括给作者以难得的机会来表达对自己学科的热爱。

顾莱纳丛书的完备性使它对学生和教授都特别有益。他排除了常用语“于是……”,这种表述背后往往隐藏着好几页的数学推导,而使学生莫名其妙。他常用实验数据解说理论观点,这些数据像理论内容一样在不断改进和扩充讲稿的过程中一再更新。丛书就在这种讲稿的基础上形成。

还有,顾莱纳在每卷中收入成百完全做出的例题而大大增加了丛书的价值。对学生来说没有什么比详细看到物理学家感兴趣的问题如何由所学的理论概念和方法解决更加重要。最后,顾莱纳在每一章加入了对所表述的理论概念和(或)实验数据有贡献的人的传略。奥古斯特·孔德(1798—1857年)在他的《实证哲学》中曾指出:“要了解一门科学必须知道它的历史。”这是现代物理教学中经常被忘却的。顾莱纳架设的通向科学先驱者的桥梁值得欢迎。我们的工作正是建筑在他们工作的基础上。

此外,丛书对训练有素的物理学家也颇有益。读者会一再发现,当他深入某一卷去检视某一特别课题时,会从浏览而进一步被他原先不熟悉且常常是迷人的新见解和发展所吸引。

我在耶鲁的教学和研究工作中用过几卷顾莱纳教程的德文原版。我欢迎这套新的改进的英文译本,愿热情地将它们推荐给每一个寻求对物理学有一连贯纵览的人。

D. A. Bromley
Henry Ford II 物理教授
耶鲁大学
New Haven, CT USA

中译本序

这套理论物理丛书的目的 在于由浅入深地引导学生,最终获得本领域的渊博知识。当然,它们也可用作科学 研究人员的参考书或帮助准备讲演的资料。它们是由作者在美因河畔法兰克福哥德大学理论物理研究所的教学讲义的基础上发展而成。丛书开始是经过多年改进的德文版。许多次德文版后,整套丛书被译为英文,且正在出法文版和日文版。

作者特别高兴中文版即将问世。希望丛书能像在世界其他地方那样也有益于中国学生和科学工作者。作者非常感谢中文版的问世,并且特别引以自豪,因为这里有中国和德国物理学家的长期合作。来自中国(北京、上海、兰州、……)不同大学和研究所的教授、博士后和学生访问过法兰克福的理论物理研究所,并在此作过研究工作。

我们很高兴亲身体验到来自中国的年轻科学家的出色教育并希望中国的学生和教授们同样喜欢这套丛书,希望在这个伟大的国度里找到许多朋友。

法兰克福哥德大学的理论物理课程包括:理论力学 I (第一学期),理论力学 II (第二学期),经典电动力学(第三学期),量子力学 I (第四学期),量子力学 II —— 对称性和相对论量子力学(第五学期),和热力学与统计力学(第五或第六学期)。研究生课程自量子力学 II 和热力学与统计开始,继以量子电动力学,规范理论与弱作用,量子色动力学,和其他关于核和固体理论以及宇宙学等更为专门的课程。

这套丛书现在已到德文第四版。许多年来不少学生和合作者作出习题和例题。我们欣赏 Steffen A. Bass, Adrian Dumitru, Dirk Rischke(现在哥伦比亚大学)和 Thomas Schönfeld 的热心奉献。Astrid Steidl 为本丛书作图。对此我们表示衷心的感谢。我们还要感谢丹麦 Aarhus 大学 Jes Madsen 教授和挪威 Bergen 大学 Laszlo Csernai 教授对正文和例题提出的宝贵意见。我们特别感谢 Fort Collins 科罗拉多州立大学的 Martin Gelfand 教授和他的学生们提醒我们注意一些物理问题。

最后我们要感谢纽约斯普林格出版社,特别是 Hans-Ulrich Daniel 博士和 Thomas von Foerster 博士的鼓励和耐心,以及 Margaret Marynowski 女士的熟练编辑。我们特别要感谢张启仁教授(北京大学)和潘欧嘉博士(北京大学出版社)组织翻译和编辑中文版。

顾莱纳

1998 年 1 月 14 日于美因河畔的法兰克福

中译本审校者序

顾莱纳教授及其同事们所著的理论物理丛书中文版即将问世。这是中德文化交流的一件大事,对我国理论物理的教学和研究必将有所促进。

瓦尔特·顾莱纳教授是世界知名的理论物理学家,在原子核物理、原子物理、场论和粒子物理的广大领域都有独特的、首创的和系统的贡献。他领导下的法兰克福哥德大学理论物理研究所是一个出成果、出人材、具有世界影响的研究集体。在这个集体的长期努力下,相对论量子力学中的克莱恩(Klein)佯谬及其影响终于得到彻底的理解。在此基础上他们对巨核(Giant Nuclei)超临界电荷可能引起的真空衰变作了系统的理论研究,并提出了用重离子碰撞中形成的短暂的巨核分子态对真空衰变进行实验研究的方法。虽然由于实际的复杂性,这方面的研究仍在继续进行中,他们的理论贡献无疑为此问题的最终解决奠定了基础。在壳效应可能导致超重核的问题上,顾莱纳和他所领导的集体也是最早和最系统的研究者之一。他们还首先预言了集团放射性,这种新型放射性正被实验证实。他们还对比重离子碰撞中核波的形成和发展作过系统研究,指出这是压缩和加热核物质的关键机制。这也被实验所证实。在这些具体的研究中他们还建立了一些理论模型,如广义集体模型,被称为格诺埃斯-顾莱纳(Gneuss-Greiner)模型,和双中心壳模型;也发展了一些独特的计算方法,如双中心狄喇克方程的数值解法等。以下数字可能说明一些问题。这个集体有顾莱纳署名的论文在 600 篇以上,会议报告和评述论文 150 篇以上,讲演 300 篇以上。

顾莱纳还是一个教育家,在指导众多的研究生和年轻的研究工作者的同时长期坚持讲授基础理论课。在他指导下获得博士学位的超过 150 人,其中 39 人在世界各地的大学中已成为教授和学术领导。他与合作者所著的教材和专著超过 10 本,这些书在更大范围内发挥着培养年轻人的作用。

用经验丰富、硕果累累来形容顾莱纳的科学研究和教育工作实不为过。这使我们相信将他和其同事们所著的理论物理丛书翻译成中文将有益于我国年轻物理学家的培养。

顾莱纳教授还是中国人民的朋友。多年来他特别支持中德合作。许多中国学者和学生曾到他领导的研究所工作,他也曾多次来华访问讲学,并被聘为北京大学客座教授。在这套丛书的翻译过程中他还把最近教学中作的一些修改寄来。这意味着中译本将是这套丛书的最新版本。

张启仁

1998 年 4 月 8 日于承泽园

第一版前言(节译)

正如在其他场合多次提到的,我们按照归纳法叙述量子力学,这一方法与物理学家的科研方法论最为接近:由某些关键实验开始,这些实验是理想化的,循序渐进地引入新学科的基本概念.例如,在本书中,我们介绍了“系统的态”和“本征态”的概念;此后,这些概念直接导致基本的运动方程,即薛定谔方程;再经过若干经典的,历史上重要的有关物理系统量子化和各种辐射规律的观察之后,我们推断有波动和粒子二象性,我们以玻恩的“导向场”概念理解这种二象性.

然后,进一步发展量子力学的有关基本问题(不确定关系,多体系统,经典系统的量子化,在唯象泡利理论范围内和借助于波方程线性化的自旋等等),应用(谐振子,氢原子,斯特恩-盖拉赫、爱因斯坦-德哈斯、夫兰克-赫兹和拉比实验),和它的数学结构(表象理论初步,S矩阵、海森伯、薛定谔和相互作用图象的简介,本征微分和连续谱波函数的归一化,微扰论等等).在原子和原子核物理学的许多应用中极为重要的角动量代数的要点,也在此作了阐明.这一点还将在《量子力学-对称性》一书中以更宽广的理论脉络予以陈述.

显然,一个关于量子理论的入门课程,不可能(也不应该)包括全部范围.我们对课题的选择,是按照其物理重要性、教学价值及其在发展中的历史影响来进行的.

学生在法兰克福的第四学期,得益于前两年坚实的数学教育.然而,在这些课程中,仍然有新的数学工具和方法及其运用要讨论.按分类来说,是特殊微分方程(特别是超几何和合流超几何微分方程)的解,矩阵元运算的回顾,本征值问题的方程建立和(简单的)微扰法的说明.在全部课程中,这些都是与所遇到的物理问题密切关联的.这样,学生就会感觉到数学方法的实际用处.还有许多已解的例题和练习阐明和完善了新的物理学和数学.

瓦尔特·顾莱纳

1989年7月,法兰克福

第二版前言

就像德文版姊妹篇一样,我们教科书丛书的英文版也拥有了很多朋友,于是,要为本书准备第二版. 本书没有必要作大的修订. 然而,我借此机会作了点小的改变,并订正了几处错印. 感谢为改进本书提出建议的同事和学生. 我确信,本书将会继续作为一本通往量子力学神奇话题的入门书.

瓦尔特·顾莱纳
1992年11月,法兰克福

目 录

第 1 章 物理量的量子化	(1)
1.1 光量子	(1)
1.2 光电效应	(1)
1.3 康普顿效应	(2)
1.4 里兹并合原理	(3)
1.5 夫兰克-赫兹实验	(4)
1.6 斯特恩-盖拉赫实验	(4)
1.7 人物小传(5)	
第 2 章 辐射定律	(9)
2.1 物体辐射的预备知识	(9)
2.2 什么是空腔辐射?	(10)
2.3 瑞利-金斯辐射定律——空腔的电磁本征模式	(13)
2.4 普朗克辐射定律.....	(15)
2.5 人物小传.....	(23)
第 3 章 物质的波动性质	(25)
3.1 德布罗意波.....	(25)
3.2 物质波的衍射.....	(29)
3.3 物质波的统计解释.....	(32)
3.4 量子力学中的平均值(期望值).....	(36)
3.5 三个量子力学算符.....	(38)
3.6 量子力学中的叠加原理.....	(39)
3.7 海森伯不确定原理.....	(42)
3.8 人物小传.....	(53)
第 4 章 量子力学的数学基础 I	(55)
4.1 算符的性质.....	(55)
4.2 两个算符的组合.....	(56)
4.3 刁和刃记号法.....	(57)

4.4	本征值和本征函数	(57)
4.5	同一时刻不同可观察量的可测量性	(63)
4.6	位置算符和动量算符	(64)
4.7	对于任意可观察量的海森伯不确定关系	(65)
4.8	角动量算符	(66)
4.9	动能	(69)
4.10	总能量	(70)
4.11	人物小传	(83)
第5章	数学补充	(85)
5.1	本征微分和连续谱本征函数的归一化	(85)
5.2	本征函数展开	(87)
第6章	薛定谔方程	(94)
6.1	量子力学中的粒子数守恒	(117)
6.2	定态	(118)
6.3	定态的性质	(119)
6.4	人物小传	(136)
第7章	谐振子	(127)
7.1	振子方程的解	(131)
7.2	用产生算符和湮没算符描述谐振子	(139)
7.3	算符 \hat{a} 和 \hat{a}^+ 的性质	(140)
7.4	振子哈密顿量用 \hat{a} 和 \hat{a}^+ 表示	(141)
7.5	\hat{a} 和 \hat{a}^+ 的解释	(142)
7.6	人物小传	(146)
第8章	经典力学到量子力学的过渡	(149)
8.1	平均值的变动	(149)
8.2	埃伦费斯特定理	(150)
8.3	运动恒量, 守恒定律	(151)
8.4	曲线坐标中的量子化	(153)
8.5	人物小传	(162)
第9章	磁场中的带电粒子	(164)
9.1	带电粒子与电磁场的耦合	(164)
9.2	氢原子	(173)
9.3	三维电子密度	(179)
9.4	氢原子光谱	(179)
9.5	氢原子中的电流	(182)

9.6	磁矩	(183)
9.7	类氢原子	(185)
9.8	人物小传	(195)
第 10 章	量子力学的数学基础(II)	(197)
10.1	表象理论	(197)
10.2	算符的表象	(200)
10.3	本征值问题	(207)
10.4	么正变换	(208)
10.5	S 矩阵	(210)
10.6	薛定谔方程的矩阵形式	(212)
10.7	薛定谔表象	(213)
10.8	海森伯表象	(213)
10.9	相互作用表象	(214)
10.10	人物小传	(215)
第 11 章	微扰论	(216)
11.1	完态微扰论	(216)
11.2	简并性	(219)
11.3	里兹变分法	(230)
11.4	含时微扰论	(232)
11.5	不含时微扰	(236)
11.6	连续态间的跃迁	(237)
11.7	人物小传	(257)
第 12 章	自旋	(258)
12.1	双分裂	(259)
12.2	爱因斯坦-德哈斯实验	(260)
12.3	自旋的数字描述	(261)
12.4	含自旋的波函数	(264)
12.5	泡利方程	(266)
12.6	人物小传	(276)
第 13 章	含自旋非相对论性波动方程	(278)
13.1	薛定谔方程一次化	(278)
13.2	外场中的粒子和磁矩	(284)
第 14 章	量子力学多体问题基础	(287)
14.1	多粒子体系的总动量守恒	(289)
14.2	量子力学中多粒子体系的质心运动	(291)

14.3	量子力学多粒子体系中的总角动量守恒	(295)
14.4	多粒子体系的小振动	(304)
14.5	人物小传	(313)
第 15 章	全同粒子	(314)
15.1	泡利原理	(315)
15.2	交换简并	(316)
15.3	斯莱特行列式	(316)
15.4	人物小传	(327)
第 16 章	量子力学的形式框架	(329)
16.1	量子力学的数学基础- 希耳伯空间	(329)
16.2	希耳伯空间中的算符	(331)
16.3	本征值和本征矢	(332)
16.4	连续和分立-连续(混合)谱的算符	(335)
16.5	算符函数	(336)
16.6	么正变换	(338)
16.7	直积空间	(339)
16.8	量子力学公理	(340)
16.9	自由粒子	(343)
16.10	微扰论概要	(353)
第 17 章	量子力学的概念和哲学问题	(356)
17.1	决定论	(356)
17.2	定域论	(357)
17.3	隐变量理论	(358)
17.4	贝尔定理	(362)
17.5	测量理论	(364)
17.6	薛定谔猫	(367)
17.7	主观理论	(367)
17.8	经典测量	(367)
17.9	哥本哈根解释	(368)
17.10	抹不掉的记录	(368)
17.11	分裂的宇宙	(370)
17.12	现实问题	(371)
名词索引	(372)

例题和练习的目录

2.1	空腔辐射	(11)
2.2	普朗克对辐射定律的推导	(17)
2.3	黑体辐射	(19)
2.4	维恩位移定律	(21)
2.5	黑体发射的能量	(22)
2.6	宇宙黑体辐射	(22)
3.1	单能 X 射线生成的衍射图样	(30)
3.2	电子和中子的散射	(31)
3.3	动能的期望值	(39)
3.4	平面波的叠加, 动量概率	(40)
3.5	用狭缝作位置测量	(44)
3.6	把粒子封闭于盒子里的位置测量	(45)
3.7	用显微镜作位置测量	(45)
3.8	用衍射栅作动量测量	(46)
3.9	物理补充: 光栅的分辨本领	(47)
3.10	高斯波包的性质	(49)
3.11	波函数的归一化	(51)
3.12	量子田地里的瓜	(52)
4.1	动量算符的厄密性	(61)
4.2	位置算符和动量算符的对易子	(61)
4.3	对易子的计算规则	(61)
4.4	动量本征函数	(62)
4.5	算符不等式的证明	(70)
4.6	两种不确定关系之间的差别	(71)
4.7	算符的级数展开	(71)
4.8	勒让德多项式	(72)

4.9	数学补充:球谐函数	(79)
4.10	球谐函数加法定理	(82)
5.1	动量算符 \hat{p}_x 的本征函数归一化	(88)
5.2	δ 函数的表示	(89)
5.3	柯西主值	(91)
5.4	作为钟罩形曲线极限的 δ 函数	(92)
6.1	在无限高势阱中的粒子	(96)
6.2	在一维有限势阱中的粒子	(98)
6.3	δ 热	(101)
6.4	量子统计学中的分布函数	(103)
6.5	费米气体	(108)
6.6	经典的理想气体	(110)
6.7	双中心势中的粒子	(111)
6.8	球面波的流密度	(120)
6.9	周期势中的粒子	(121)
7.1	数学补充:超几何函数	(128)
7.2	数学补充:厄密多项式	(133)
7.3	三维谐振子	(143)
8.1	对易关系	(151)
8.2	维里定理	(152)
8.3	球坐标中的动能算符	(157)
8.4	经典力学中几个有用关系式的回顾:拉格朗日括号和泊松括号	(157)
9.1	电磁场中的哈密顿方程	(167)
9.2	带电粒子的拉格朗日函数和哈密顿函数	(169)
9.3	朗道态	(171)
9.4	氢原子波函数的角度相关部分	(185)
9.5	双原子分子的能谱	(189)
9.6	雅可比坐标	(192)
10.1	氢原子基态的动量分布	(199)
10.2	算符 \mathbf{r} 的动量表象	(204)
10.3	动量空间中的谐振子	(205)

11.1	斯塔克效应	(220)
11.2	微扰解与精确解的比较	(223)
11.3	二能级的交叉	(224)
11.4	简谐振子的谐振微扰	(227)
11.5	线性微扰谐振子	(228)
11.6	里兹变分法的应用: 谐振子	(231)
11.7	单位时间的跃迁概率——费米黄金规则	(243)
11.8	电子被原子核的弹性散射	(245)
11.9	小动量转移的极限	(251)
11.10	函数 $f(t, \omega)$ 的性质	(252)
11.11	介电常数的基本理论	(253)
12.1	均匀磁场中的自旋运动	(269)
12.2	拉比实验(自旋共振)	(270)
12.3	简单塞曼效应(弱磁场)	(272)
13.1	泡利矩阵的完备性	(281)
13.2	泡利矩阵的计算规则	(282)
13.3	满足薛定谔方程的旋量	(284)
14.1	反常塞曼效应	(300)
14.2	原子的质心运动	(302)
14.3	外场中的双粒子体系	(309)
15.1	氦原子	(317)
15.2	氢分子	(320)
15.3	范德瓦耳斯作用	(323)
16.1	算符的迹	(334)
16.2	证明	(335)
16.3	算符函数	(336)
16.4	幂级数与本征值方法	(337)
16.5	动量空间中的坐标算符	(344)
16.6	计算传播函数积分	(347)
16.7	不同表象中的一维谐振子	(348)

第 1 章 物理量的量子化

1.1 光量子

为解释由光引起的现象,出现了两种观点,这两种观点在物理学历史上各有其地位. 几乎同在 17 世纪后半期,牛顿(Newton)发展了光的微粒说,惠更斯(Huygens)创立了光的波动理论. 光的直线传播和反射等基本性质,这两种理论都能解释. 而另一些现象,例如干涉,光与光相加处可导致暗纹的事实,只能由波动理论解释.

19 世纪麦克斯韦电动力学的成功,这个理论把光看作电磁波,像是最终确认了波动论. 随后,1887 年海因里希·赫兹(Heinrich Hertz)发现光电效应,从此开始发展一种依赖于特殊的问题或者所考虑的实验,将光看作粒子或波动来描述的观点. 光的“粒子”称为光量子或光子,表示了波动性和粒子性共存的波粒二象性.

以下,我们将讨论一些实验,这些实验只能由光量子解释.

1.2 光电效应

由光照导致的电子从金属表面的发射,称为光电效应. 菲里普·勒纳德(Philipp Lenard)做的实验表明,发射出的电子能量由辐照光的频率给出(图 1.1).

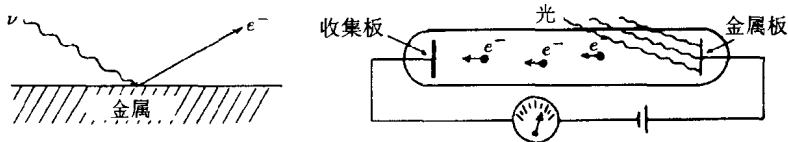


图 1.1 光电效应测量:光(—→)照在金属面上,有电子(e^-)释放出来

单色光产生确定能量的电子. 光强增大导致更多电子的发射,但是,并不改变电子的能量. 这与经典波动理论明显有矛盾,经典理论中波的能量是由其强度决定的. 如果我们用不同频率的单色光进行实验,会得到能量与频率之间,如图 1.2 所示的线性关系.

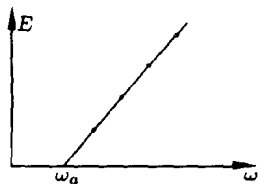


图 1.2 光电子的能量随入射光的频率 ω 线性增长

频率极限, 电子不可能从金属里出来. 这意味着, 使电子从金属表面出来需要确定的逃逸能 $\hbar\omega$.

由于不得不假定, 用来解释光电效应的光量子以光的速度运动. 因此, 按照爱因斯坦的相对论, 光子的静质量等于零.

若在总能量关系式

$$E^2 = (m_0 c^2)^2 + p^2 c^2 = \hbar^2 \omega^2 \quad (1.3)$$

中, 取静质量为零, 并用波数 $k = \omega/c$ 表示频率, 光子的动量就是

$$p = \hbar k = \hbar \omega / c, \quad (1.4)$$

或者, 写成矢量恒等式, 假定光子动量的方向为光波传播的方向,

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}. \quad (1.5)$$

1.3 康普顿效应

当 X 射线被电子散射时, 可得到频移, 移动的大小依赖于散射角. 这个效应在 1923 年由康普顿 (Compton) 发现, 并由康普顿本人和德拜 (Debye) 同时基于光子的图像予以解释.

图 1.3 表明这一运动的情景. 我们假定电子是非束缚的, 并在碰撞前静止. 于是能量守恒和动量守恒可表示为:

$$\hbar \omega = \hbar \omega' + \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - m_0 c^2, \quad (1.6)$$

$$\hbar \mathbf{k} = \hbar \mathbf{k}' + \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (1.7)$$

为得到散射角和频移之间的关系, 将 (1.7) 式分为平行入射方向和垂直于入射方向的分量. 通过 $k = \omega/c$ 产生,

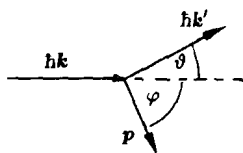


图 1.3 康普顿散射中动量守恒