



清华大学学术专著

量子力学的前沿问题

(第2版)

张礼 葛墨林 编著



清华大学出版社

清华大学学术专著

量子力学的前沿问题 (第2版)

张礼 葛墨林 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书 1~6 章内容主要介绍关于量子力学几率诠释的爱因斯坦与玻尔争论问题的研究、波粒二相性进展以及量子力学基础理论在其他方面的发展,例如:波函数的几何相、拓扑相、量子力学与经典力学的界限与宏观水平量子力学等.7~9 章论述了腔量子电动力学、量子霍尔效应和玻色-爱因斯坦凝聚等领域的进展.10~12 章着重介绍了杨振宁-巴克斯特系统与量子力学的密切关系.

本书的读者对象是物理学工作者,本书对相关专业的研究生和大学本科生从基础理论学习过渡到专题科学研究起引导作用.

版权所有,侵权必究.侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

量子力学的前沿问题/张礼,葛墨林编著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2012.3

(清华大学学术专著)

ISBN 978-7-302-27792-7

I. ①量… II. ①张… ②葛… III. ①量子力学—研究 IV. ①O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 281658 号

责任编辑:陈朝晖

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:32.75

字 数:791 千字

版 次:2000 年 4 月第 1 版

2012 年 3 月第 2 版

印 次:2012 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:118.00 元

产品编号:018889-01

Synopsis

There have been in recent years important progress in the research concerning the probabilistic interpretation of quantum mechanics, especially the dispute between Einstein and Bohr. In order to demonstrate the wave particle duality and the complementarity principle, the “thought experiments” were used in textbooks on quantum mechanics.

These “experiments” actually could not been realized in the physics laboratory. Thanks to break-through developments in the experimental methods in physics many of such experiments have already become reality in the laboratory. The fundamental theory of quantum mechanics has had many developments including the geometrical phase, the topological phase of wave functions, the boundary between quantum and classical mechanics, quantum mechanics on the macroscopic level and so on. Quantum information and quantum computing has evolved into a new rapidly developing field of study. It has strong impact on various branches of physics, especially the quantum mechanical state entanglement and decoherence, quantum measurements and others which serve as its basis, as well as cavity quantum electrodynamics and physics of cold quantum gas (Bose-Einstein condensation) which serve as its possible realization. The extension and depth of research in related directions are being broadened and deepen. We introduce the above mentioned developments in chapter 1~7.

Significant progress in the frontier research of various branches of physics has been achieved by making use of the insights and judgements originating from quantum mechanics. In chapters 8~10 we discuss developments in cavity quantum electrodynamics, quantum Hall effects and the Bose-Einstein condensation.

Yang-Baxter system originated from the many-body problem in quantum mechanics and the eigenvalue problem in statistical models. It has developed into an important direction in mathematical physics. It is a successful theory in treating non-linear problems. In chapters 11~12 we introduce the close connection between Yang-Baxter system and quantum mechanics, attempting to rely upon as much physics intuition as possible.

This book is intended for people working in physics. It provides some guide for graduate students and upper class undergraduates of related disciplines in the transition from course study to active research.

前言

写这本书的缘起,可以追溯到1983年,那一年杨振宁教授在美国石溪纽约州立大学开设了现代物理专题十二讲。作者葛墨林曾有幸听讲,受到很大启发。杨先生强调物理学研究课题会涉及不同的分支学科,问题的解决也需要融合各方面的知识。研究生在学习中应该广泛注意物理学各方面出现的新的概念、进展及其联系。

1986年杨振宁教授应中国科技大学研究生院邀请,在北京以“相位与近代物理”为题做了9次学术报告。内容涉及近代物理中很多重要概念的萌芽、发展和确立,不仅深刻阐明它们的理论内涵,还介绍了澄清概念的关键实验。杨先生在每次报告之后,都要和各单位的研究生代表共进工作午餐,进行无拘束的座谈。在讲座、报告及座谈中杨先生对青年的工作、学习都给予了热情的关心和指导。他再三强调青年不仅要从事当前的课题研究,关心自己从事的研究方向,而且要关心物理学各方面出现的一些新概念的发展,注意有关期刊上的报道。作者张礼听了全部讲座,深为杨先生严格精辟的报告和他对青年的关怀所折服。以后作者二人谈到分别听课的经历,有强烈的共识,决心要在各自的工作中实践杨先生的思想,并且决定合作写一本《量子力学的前沿问题》。

近年来物理学的许多新进展都与量子力学中的一些概念发展有关,可以从量子力学基础理论找到根源。在这些前沿领域中的进展同时也促进了量子力学理论本身的发展。在量子力学的几率诠释上存在著名的爱因斯坦与玻尔有关量子力学描述是否完备的争论。为了解决这个争论,多年来的理论与实验研究已经取得重要进展。有一些基础问题,例如电子通过双狭缝的干涉问题,从在经典物理学中形成的真观出发,理解是困难的。在量子力学的教科书中多用“想象中的实验”来解释。这些实际上不能实现的实验只能教人如何去思考,但却不能很令人信服。近年来实验方法的惊人发展使得想象变成了现实。一系列新的实验使得许多概念上的难点得到澄清。在当前量子力学的研究领域开辟了一个极具挑战性的方向——量子信息学和量子计算。在这里被处理和传递的信息不再是经典的,它是量子态的叠加。这是基础科学和重大科技领域密切结合的又一个例子。近年来量子力学波函数的几何及拓扑相位在许多问题中占据了主要位置。在量子力学与经典力学界限问题以及介观与宏观体系能体现量子相干性质等方面都有许多进展。上述的这些进展使人们对量子力学的本质和基础加深了认识,本书第1~7章介绍了这些内容。

在物理学的一些前沿领域,研究工作所得到的结果往往需要具有洞察力的分析。凝聚态物理中分数量子霍尔效应能从二维电子集体态的波函数出发加以解释,从而揭示了新的一种量子流体的存在。这个例子说明量子力学的应用促进物理学各分支的发展,其成果也扩大了量子力学的用武之地。本书第8~10章选择了腔量子电动力学、量子霍尔效应、玻色-爱因斯坦凝聚等问题展开讨论。

杨振宁-巴克斯特系统是处理多体系统的一大类非线性量子可积模型的普遍理论。30

年来的进展使它成为数学物理中的一个蓬勃发展的分支. 理论物理中不少问题, 包括量子力学中最基础的氢原子的对称性、波函数相位的量子化等问题, 都和它密切相关. 本书第 11~12 章从这个角度对它做了初步的论述.

量子力学前沿的研究方向和课题是很广泛的, 本书仅涉及了其中部分重要内容. 本书所讨论的问题以量子力学(包括二次量子化)及统计物理教程的知识为基础. 对超出上述知识范围以外的必要理论概念, 本书有较系统的介绍. 物理学各分支之间有着极为密切的联系, 概念、方法往往彼此借鉴、移植. 对一个问题的研究也往往涉及多个分支, 这一点在本书多个章节中有所反映. 为了便于读者阅读有关参考书籍, 在有关章节中列出了本书涉及较多的专著或会议文集.

本书读者对象是物理学工作者. 在国际上往往通过学术会议、高等进修班或讲座的出版物对一些研究前沿进行较系统的报道. 这些书籍或会议记录专业性很强, 水平也较高, 对初次接触这些内容的工作者, 特别是研究生和高年级本科生学习起来会有不少困难. 本书希望能帮助他们缩短进入研究工作的过程.

有关量子理论的书, 公式推导要占相当篇幅. 本书在推导中着重说明推导的目的性、采取的关键步骤以及必要的细节, 以期读者不致为太多的“可以证明”或太多的且并不理解的“显然”所苦恼. 物理学中重要概念的发展, 往往有一个过程, 有的过程甚至是很曲折的. 许多概念往往在物理学各分支出现, 它们具有同一个根源. 本书尽量不只用定义引入概念, 尽可能从发展和概念的相互关系上做必要的说明. 量子力学的创立与初期的发展是建立在实验基础上的. 近年来它的一些深刻的基础概念和多年的争论都经过许多高水平的实验所澄清或取得更为深刻的认识. 这些实验在人们面前打开一片又一片的新天地. 尽管描述实验不是我们的所长, 但还是努力介绍其设计构思及采用方法的精妙, 并阐明这些实验对深入理解理论、澄清争论问题所起的作用和意义. 希望读者能了解到现象后面的物理实质.

本书第 1 章至第 10 章由张礼执笔, 第 11 章至第 12 章由葛墨林执笔. 作者二人一起详细讨论了全书的指导思想及章节编排, 并共同审定了各章内容. 以我们的水平和能力, 要想实现本书设定的目标, 势必捉襟见肘, 会有不少缺陷和错误. 诚恳希望各位专家和读者提出批评改进意见.

张 礼

清华大学物理系 清华大学高等研究中心

葛墨林

南开大学数学研究所 清华大学高等研究中心

1999 年 11 月 15 日

目 录

第 1 章 波动、粒子二重性,并协原理,Bell 定理及有关实验	1
1.1 电子干涉图像的累积	2
1.2 并协原理的原子干涉仪验证	5
1.3 并协原理的量子光学验证	11
1.4 单光子干涉实验	14
1.4.1 独立光子束之间的干涉	16
1.5 多粒子干涉学	18
1.5.1 二粒子双缝干涉学	18
1.5.2 下转换光子干涉实验	19
1.5.3 发射时间的干涉	21
1.5.4 相干与路径可区分性	23
1.6 双光子干涉仪量子涂消器	25
1.7 Einstein 和 Bohr 关于量子力学的争论,Bell 定理	32
1.7.1 1930 年 Einstein 对量子力学的批评:“量子力学是不自洽的.”	32
1.7.2 Einstein-Podolsky-Rosen 佯谬:“量子力学描述是不完备的.”	33
1.7.3 Bell 定理	35
1.7.4 推广到现实系统的 Bell 不等式	36
1.8 Bell 不等式的实验验证	38
1.9 Wheeler 的推迟选择实验	42
1.10 不涉及不等式的 Bell 定理	44
1.10.1 三粒子完全关联	44
1.10.2 不涉及不等式的 Bell 定理:二粒子情况	47
1.10.3 二粒子体系不涉及不等式 Bell 定理的实验验证	49
1.10.4 三光子缠绕态的实验实现以及对定域实在论的否定	51
1.10.5 在缠绕与非定域性意义下的 EPR 佯谬	54
1.10.6 单光子的非定域性	56
1.11 量子非破坏性实验简介	58
1.11.1 标准量子极限与反作用回避(BAE)实验	58
1.11.2 量子非破坏性(QND)实验	60
参考文献	61

第 2 章 量子缠绕及其对量子信息和量子计算的应用	63
2.1 量子计算简介	63
2.1.1 量子数据及数据处理	63
2.1.2 量子并行性与有效量子算法	64
2.1.3 量子信息	66
2.2 量子缠绕	68
2.2.1 缠绕态的密度矩阵表征	68
2.2.2 Schmidt 分解	70
2.2.3 EPR-Bell 态的进一步讨论	71
2.3 缠绕对量子信息学的应用	73
2.3.1 致密编码	74
2.3.2 量子密码学、EPR 量子钥分布	74
2.3.3 量子非克隆定理	75
2.3.4 量子远程传态	76
2.4 结束语	78
参考文献	78
第 3 章 量子力学中的几何相	81
3.1 Aharonov-Bohm 效应	81
3.2 Aharonov-Bohm 效应的实验验证	85
3.3 Aharonov-Casher 效应	88
3.4 平行输运, 联络, 曲率和非完整性	90
3.5 Berry 相	94
3.6 Aharonov-Anandan 相	99
3.7 Berry 相的实验显现	100
3.7.1 光子 Berry 相的量子干涉现象	101
3.7.2 螺旋磁场中中子自旋旋转的 Berry 相实验	102
3.7.3 自旋绝热旋转造成的核四极共振频率分裂	104
参考文献	105
第 4 章 量子力学与经典力学的界限, 缠绕与退相干	107
4.1 Schrödinger 的谐振子波包, 相干态	108
4.1.1 相干态的基本性质	110
4.1.2 正则相干态	111
4.2 氢原子圆轨道波包与径向波包	114
4.3 氢原子的 $SO(4)$ 对称性, Runge-Lenz 矢量, Kepler 椭圆轨道波包	119
4.3.1 经典 Kepler 运动的 Runge-Lenz 矢量	119
4.3.2 量子力学中的 Runge-Lenz 矢量, 动力学对称与氢原子能级	121
4.3.3 Kepler 椭圆轨道波包的构成	123

4.3.4 量子力学中的 Rutherford 原子	127
4.4 波包恢复及分数恢复	131
4.5 态叠加原理与量子退相干	133
4.6 与环境的相互作用导致退相干	137
4.7 一个退相干的动力学模型	140
4.8 量子动力学的经典极限	142
4.9 实验室中实现的 Schrödinger 猫	144
4.9.1 单原子级的 Schrödinger 猫	144
4.9.2 Schrödinger 位相猫	148
4.9.3 宏观 Schrödinger 猫	151
4.9.4 热辐射发射造成退相干	154
4.10 波函数塌缩和量子 Zeno 效应	154
参考文献	156
第 5 章 路径积分方法, 衰变态的瞬子方法	158
5.1 量子力学中的路径积分方法	158
5.2 瞬子与双阱中能级的相干劈裂	165
5.3 密度矩阵与路径积分	169
5.4 衰变态的瞬子方法	174
附录 1 “二次加三次”势的隧穿	178
附录 2 计算路径积分二次变分的平移法	183
附录 3 谐振子前置因子的另一种算法	184
参考文献	185
第 6 章 宏观水平上的量子力学	187
6.1 具有宏观意义的波函数	187
6.2 耦合超导体, Josephson 效应	191
6.3 置有 Josephson 结的超导环, SQUID	196
6.4 Josephson 体系的宏观量子隧穿和宏观量子相干	200
6.5 环境对宏观量子现象的影响	203
6.5.1 关于正则变换和绝热近似	204
6.5.2 有耗散的电磁体系的 Hamilton 量	205
6.5.3 非绝热性的修正, 耗散体系的微观 Lagrange 量	207
6.5.4 微观参量与宏观耗散参量的关系	210
6.5.5 耗散与宏观量子隧穿	211
6.5.6 耗散与宏观量子相干	215
6.6 有关 Josephson 结的宏观量子隧穿实验	217
6.7 磁的宏观量子隧穿, 自旋相干态	220
6.8 单畴铁磁粒子的宏观量子现象	222

6.8.1 量子相干: 能级隧穿劈裂	223
6.8.2 量子隧穿	224
6.8.3 量子干涉(拓扑淬灭)现象	226
6.9 单畴反铁磁粒子的宏观量子现象	228
6.10 磁体系宏观量子现象实验	231
6.11 磁性大分子的宏观量子现象	234
6.12 自旋奇偶效应的量子力学基础	236
参考文献	239
第 7 章 量子体系的拓扑相因子	242
7.1 Heisenberg 模型的自旋波理论	242
7.2 $O(3)$ 非线性 σ 模型, 对称自发破缺与 Goldstone 定理	249
7.3 一维量子反铁磁链, 拓扑相因子, 到 $O(3)$ 非线性 σ 模型的映射	251
7.4 Lieb-Schultz-Mattis 定理	257
7.5 拓扑项的意义	258
7.6 非 Abel 规范场的 Θ 真空	260
7.6.1 非 Abel 规范场	260
7.6.2 规范变换的等价类	261
7.6.3 Θ 真空	263
7.7 拓扑项与反常	264
参考文献	267
第 8 章 腔量子电动力学, van der Waals 力和 Casimir 效应	268
8.1 辐射场与原子相互作用	269
8.1.1 原子中电子场的量子化	269
8.1.2 辐射场的量子化	269
8.1.3 电子场与辐射场相互作用, 自发辐射率	270
8.2 Jaynes-Cummings 模型	272
8.2.1 耦合原子-腔体系的本征态	273
8.2.2 非共振情况下的原子能级光能移	275
8.2.3 态随时间的演化	277
8.3 自发辐射的抑制与加强	278
8.4 微脉泽	280
8.5 逆 Stern-Gerlach 效应	282
8.6 原子-腔色散相移效应	283
8.6.1 单光子的量子非破坏探测, 单光子的诞生及死亡的 量子非破坏探测	287
8.7 体系对外来扰动的响应, 涨落-耗散定理	290
8.7.1 电容率对频率的依赖, Kramers-Krönig 色散关系	290

8.7.2 涨落的关联与广义极化率	292
8.7.3 涨落-耗散定理	294
8.8 van der Waals 相互作用	297
8.9 考虑推迟的 van der Waals 相互作用	299
8.9.1 振荡偶极子的场	299
8.9.2 在均匀介质中电磁场的涨落	301
8.9.3 Casimir-Polder 相互作用	303
8.10 零点能,场真空涨落与 van der Waals 相互作用	305
8.11 Casimir 效应	310
8.12 强耦合机制下的腔量子电动力学	312
参考文献	315
第 9 章 量子 Hall 效应	317
9.1 经典 Hall 效应	317
9.2 电子在均匀磁场中的运动, Landau 能级	318
9.3 磁通量子化	322
9.4 整数量子 Hall 效应	323
9.4.1 磁平移, Hall 电导的拓扑意义	329
9.5 分数量子 Hall 效应, Laughlin 波函数	332
9.5.1 少数电子的量子化运动	333
9.5.2 $\nu=1/m$ 态 Laughlin 波函数	337
9.5.3 准粒子激发	339
9.5.4 不可压缩量子流体的集体模式	341
9.5.5 分数量子 Hall 流体的无能隙边缘态	346
9.5.6 分数量子 Hall 效应的等级态	349
9.5.7 复合 Fermi 子 Jain 构造法	350
9.6 分数量子 Hall 效应的 Landau-Ginzburg 理论	351
9.6.1 张首晟-Hansson-Kivelson 映射, 陈省身-Simons-Landau-Ginzburg 作用量	351
9.6.2 平均场解,分数量子 Hall 效应现象学	354
9.6.3 代数非对角长程序	356
9.6.4 分数量子 Hall 流体的拓扑序	358
9.7 量子 Hall 效应的整体相图	359
参考文献	364
第 10 章 Bose-Einstein 凝聚	366
10.1 Bose-Einstein 凝聚的一些基本关系	367
10.1.1 BEC 本质上是量子统计现象	367
10.1.2 Bose-Einstein 温度	368

10.1.3	Bose 气体的热力学性质	369
10.2	Bose-Einstein 凝聚的序参量与非对角长程序	374
10.3	Bose-Einstein 凝聚的本质: 对称自发破缺和相位相干性	376
10.4	弱相互作用 Bose 气体: 均匀凝聚体	384
10.4.1	Bogoliubov 弱相互作用 Bose 气体理论	384
10.4.2	非理想 Bose 气体	388
10.5	弱相互作用 Bose 气体: 非均匀凝聚体	390
10.5.1	凝聚性质与外场的关系	390
10.5.2	阱中弱相互作用 Bose 气体的 Bose-Einstein 凝聚	392
10.5.3	Gross-Pitaevskii 方程	395
10.5.4	量子相位动力学	397
10.6	各向异性势阱中的 Bose-Einstein 凝聚	400
10.7	涡旋及 Bose-Einstein 凝聚体的稳定性	402
10.8	旋量凝聚体	405
10.8.1	基态结构	407
10.8.2	阱中旋量凝聚体的集体模	408
10.8.3	铁磁态涡旋的内在稳定性	409
10.8.4	无核的涡旋	410
10.8.5	碎裂的凝聚体	410
10.9	在光晶格中的冷 Bose 原子	414
10.10	Feshbach 共振和共振超流性	421
10.10.1	Feshbach 共振	421
10.10.2	简并 Fermi 气体	423
10.10.3	Fermi 原子组成分子以及分子的 BEC	425
10.10.4	Fermi 原子对的凝聚体	426
	参考文献	431
第 11 章	量子力学中的 Yangian 对易关系	434
11.1	氢原子的张量算符与 Yangian	434
11.2	Yangian 代数	437
11.3	$Y(SL(2))$ 在量子力学中的其他实现	440
11.4	长程相互作用的一维链模型	443
11.5	Hubbard 模型	448
11.6	$SL(3)$ 一维表示和八维表示间的 Yangian 跃迁	452
	参考文献	454
第 12 章	RTT 关系与 Yang-Baxter 方程	455
12.1	对易关系的矩阵直乘形式	455
12.2	RTT 关系	461

12.3	杨振宁-Baxter 方程	463
12.4	守恒量集合, Hamilton 量	465
12.5	量子行列式, 余乘法	470
12.6	RTT 关系展开式与对易关系	475
12.7	氢原子与 RTT 关系	477
12.8	Yangian 的表示和氢原子能谱	480
12.9	Yangian 和 Bell 基	485
12.10	S-波到 P-波超导的转变	487
12.11	量子代数	490
12.12	双频谐振子与量子代数对易关系	493
12.13	相干态平移算符与量子代数	495
12.14	相位量子化的可能性与量子代数的循环表示	499
参考文献		503
名词索引		505

第 1 章

波动、粒子二重性,并协原理,Bell 定理及有关实验

围绕量子力学的基本原理问题自 1925 年量子力学创建起一直存在争论. 随着实验工作和理论工作水平的不断提高,一些具体争议解决了,新的问题又提了出来,争论在更高的水平上进行. 在研究前沿上不断出现新的成果.

物质的波动、粒子二重性是量子力学的基础,电子和中子在晶体上的衍射早已为人所知. 1961 年 C. Jönsson 做了电子双缝(以及三缝、四缝)衍射实验. 量子力学教程中为了讲清概念,多用双缝衍射为例说明. 在双缝衍射中涉及的基本概念包括: ①电子落在屏幕上,是作为粒子个别落下的. 应该能演示在开始时电子落在屏幕上如夜空随机分布的点点星体,然后逐渐显出干涉条纹的极大和极小. 条纹极大代表落在该处电子数目最多,而这个几率分布是由波函数确定的. ②Dirac 在他的《量子力学原理》中指出,电子是自己和自己干涉. 一定要允许它(即一个电子)从两个缝通过才会有干涉发生. 在实验上要演示这一点,要创造条件,在任何时间只能有一个电子处于狭缝与屏幕之间. 在 20 世纪 80 年代末期以前要达到观察干涉条纹的积累过程以及保证在仪器中只能存在一个电子的条件是困难的. 本章 1.1 节介绍殿村(A. Tonomura)在 1989 年所做的满足了以上要求的实验.

光的双缝实验是 19 世纪初 Thomas Young 首创的. 从光的波动性讲,理解是很直接的. 但如果从二重性的观点把光也看成光子时,理解的困难和上面讨论到的电子双缝实验一样,即一个粒子如何同时通过两个狭缝. 更有甚者,常用的光源,包括激光器在内,都属“经典光源”,无法保证在一个光子通过仪器时没有第二个光子存在,不论光源是多么弱. 本章 1.4 节介绍的单光子干涉实验(1986 年,Aspect)是企图解决与经典光源相联系的困难的.

近年来出现的“多光子干涉学”,实际上是演示一对关联的光子自己和自己的干涉现象,并且体现了单光子干涉与双光子干涉现象不能并存,这些都加深对量子力学的理解. 本章 1.5 节将对此作出介绍.

处于量子力学原理的争论核心的还是并协原理. 它包括若干相互联系的问题. 电子通过双缝能发生干涉,因为给它提供了两条路径的选择可能,这样它才会显示波动性. 如仍开放两条缝,但用光把缝照亮,使电子通过时能够“看见”它从哪一个缝通过——使它显出粒子性,这时条纹便会消失. 这是量子力学的并协原理预言的,果真如此吗? 这在书上被称为“想象中的实验”,意思是实际上是没法做的实验. 困难在于,光和电子相互作用太弱. 即使用光照亮狭缝,电子通过缝时虽绝大多数是通过了,却未被发现. 现在,“想象”已变成了现实. 如

果用原子代替电子,而用以照它的是调谐好的共振光,这样相互作用足够强以至原子难以漏网(1995年,Pritchard),便可以证实量子力学的预言.用光驻波作为衍射栅进行的原子干涉仪实验(1998年,Rempe等人)也明确对此给予验证.我们在1.2节介绍这些发展.

另一个有关的问题是:电子显示的波动性为什么在用光照它时会遭到破坏?过去的标准解释往往是,如果要观测它,例如用光照一下,光子在它上面散射时会改变它的动量.这类相互作用是无法控制的,因为光散射是概率过程,且给它的动量也是有一个分布的.在一些情况下,这会是主要原因,但不同情况也会有不同机制.例如在1.2节中Pritchard实验中,造成干涉损失的原因是光子散射造成的有效相移,这个有效相移是可以实验控制的.有效相移加大,干涉条纹对比度减小. Rempe实验表明,路径与原子的可观察性质(在此情况下是原子的内部状态)的缠绕是干涉丧失的原因.传统的解释源于对Heisenberg不确定性原理的物理分析.其标准译法是“测不准原理”.是不是不测就可以准呢?本章1.6节将介绍的量子光学中微脉泽实验就避免了这种“不可控制的相互作用”,而是通过电子与光子自由度的关联(缠绕)而导致相干丧失;同样,如果抹去这个关联,相干就会恢复.本章的1.6节量子涂消器介绍这个内容.

Feynman说过:“只有在一个装置中无法在物理上互相区分的状态才能干涉.”邹兴宇、王力军和Mandel实验表明,只要实验不提供区分的可能性,便有干涉,但如实验提供可能,甚至不必放探测器去实测,干涉就消失了(请见本章1.5.4节).

有一种说法,量子客体如何表现(例如表现波动性或粒子性)关键在于它如何“感知”测量装置的情况.你用一种方法,它根据关于装置的信息决定呈现波动性或粒子性.1978年J. A. Wheeler提出一个妙法,叫“推迟选择实验”,大意是:先设定好条件,等客体已经通过了设备(即表现已经确定),在探测它之前,再突然改变条件,看结果如何.本章中不止一个实验涉及推迟选择,如1.9节中所述.当然,客体的行为只和最终的实验条件有关,它不会根据信息预作准备.

在所有的争论中,显然最著名的是A. Einstein和N. Bohr的争论,或称Einstein-Podolsky-Rosen(EPR)佯谬.对于量子力学对微观客体性质做出的实验预言,早已没有什么异议,量子力学已经在科学和工程中大量、广泛地应用,并且很成功. Einstein的挑战是,量子力学的描述是不完备的,意即客体的性质比量子力学能描述得要多.多年来许多研究人员打算去挖掘这种潜藏的可能.有的失败于不能自治,但有的好像言之不无道理.这后面一类理论的一个共同名称叫“隐变量”理论,也有的叫“定域实在性”理论,争辩起来十分困难.1965年J. S. Bell提出了一个定理:定域实在性理论如果要和量子力学做出同样预言,它就必然要满足一个不等式.这就为争论提供了一个极明晰的判据.从20世纪60年代后期起一大批实验投入了不等式的验证.结果愈来愈精确地验证了不等式被破坏.从那时起过了30多年,争论都没有停止.原因是任何一个实验几乎不可能没有“漏洞”,于是便有人提出异议.近代物理学的实验方法的确使人叹服,目前已能使Bell不等式的破坏超过了100个标准偏差.这还不算完结,最近又出现了不涉及不等式的Bell定理,用实验直接反驳“定域实在性”理论.这些将在本章1.7~1.10节讨论.

1.1 电子干涉图像的累积

在量子力学教科书中常用电子双缝实验说明电子的波动性.在实验中电子通过狭缝落在屏幕上,逐个被探测器记录,星星点点地积累起来的电子逐渐形成干涉图像,干涉图像是

因为通过两个狭缝的波 ψ_1 和 ψ_2 叠加而形成的,在屏幕上的强度和 $|\psi_1 + \psi_2|^2$ 成正比.形成干涉图像的条件是电子的 de Broglie 波长要大于双缝距离,波的相干长度要大于两条干涉路径的程差,并且不对电子通过哪一个狭缝进行测量.如进行这类测量(例如在一个狭缝附近放置光源或使狭缝平面自由悬挂),则在屏幕上记录的只是电子通过两个单狭缝图像的和,即 $|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2$. Feynman^[1]指出:“这是绝对不能用任何经典方式解释的.在其中包含了量子力学的核心.”“实际上它包含了唯一的奥秘.”他还指出:“这个实验尚没有实际进行过,因为仪器的尺度需做得不能实现地小.”原因是电子束能量必须足够单一,而满足要求的电子束能量就显得太大,其 de Broglie 波长就比双缝的尺度小得太多.这类实验被称为“想象中的实验”^①,书中的实验是为了说明(而非证实)量子力学的基本原理.

A. Zeilinger^[2]等人实现了中子干涉图像的积累形成.他们采用相当于速度为 200m/s 的极冷中子,波长为 2nm.宽度为 $22\mu\text{m}$ 和 $23\mu\text{m}$ 的两个狭缝,间距为 $104\mu\text{m}$.探测平面在狭缝平面下游 5m 处.所得干涉图样示于图 1.1.衍射实线代表理论预言(已经考虑了仪器的具体条件).此外,观测到的中子强度低到平均 2s 1 个计数.实验演示了显出波动性的干涉图样实际上是由中子一个接一个落于观测平面上而形成的,而且在中子单独通过仪器时是自己和自己干涉.

为了克服 Feynman 提到的实验观测的困难,殿村等人^[3]用配置了电子双棱镜的电子显微镜和位置灵敏电子探测系统实现了电子干涉图像的积累.电子双棱镜的工作原理如图 1.2 所示,双棱镜由两个平行接地的平板电极以及一个半径为 a 的细丝组成,细丝与平板距离为 b ,细丝处于正电势.静电场的势为 $V(x, z)$,入射波为 $e^{ik_z z}$.在有电磁场(其 4 维势为 A_μ)存在时的波函数 ψ 和没有电磁场的波函数 ψ_0 的关系是^②

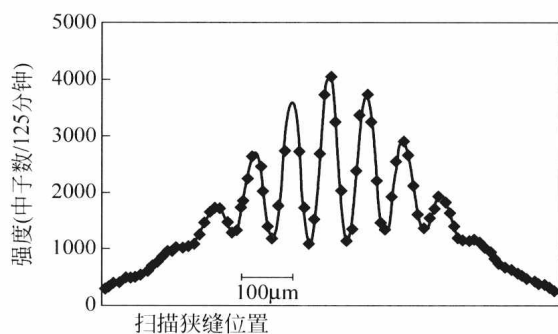


图 1.1 极冷中子的双缝衍射图样

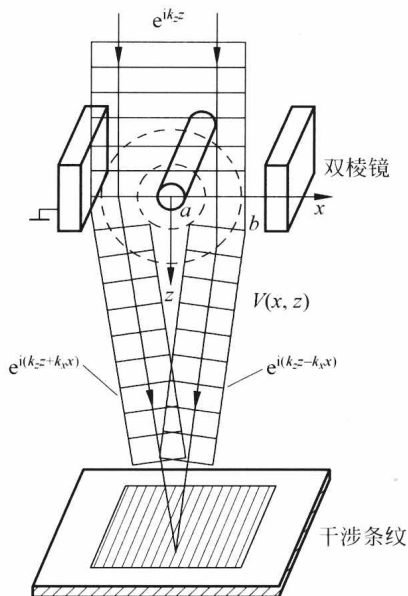


图 1.2 电子平面波通过双棱镜产生干涉条纹

① thought experiment, 多译为理想实验. 更确切地应译为想象中的实验, 因为它们曾被认为是不能实现的.
② 请参阅本书第 3 章 3.1 节.

$$\phi(\xi) = \exp\left(-\frac{ie}{\hbar} \int_{\eta}^{\xi} A_{\mu}(\eta) d\eta^{\mu}\right) \psi_0(\xi). \quad (1.1.1)$$

指数上的积分是从任一参考点积至 ξ , ξ 与 η 均为 4 维时空坐标. 4 维势在此处只有标量分量 $A_0 = V(x, z)$, 而势 $V(x, z)$ 对坐标 x 是对称的, 因此积分为

$$\int V(x, z) dt = \int V(x, z) \frac{ds}{v_z} = \frac{m}{\hbar k_z} \int V(x, z) ds,$$

此处 $v_z = \frac{\hbar k_z}{m}$ 是电子的速度, ds 为线元. 取参考点为 $z = -\infty$, 式(1.1.1)中的相因子为

$$\exp\left(-\frac{iem}{\hbar^2 k_z} \int_{-\infty}^z V(x, z') dz'\right).$$

进入双棱镜的电子波函数为

$$\phi(x, z) = \exp i\left(k_z z - \frac{em}{\hbar^2 k_z} \int_{-\infty}^z V(x, z') dz'\right). \quad (1.1.2)$$

电子在通过时受力基本是在 x 方向, 其大小为 $-e \frac{\partial V}{\partial x}$. 将 V 在 $x=a$ 附近展开 ($x \geq a$) 得

$$V(x, z') = V(a, z') + \left. \frac{\partial V(x, z')}{\partial x} \right|_{x=a} x,$$

对于 $x \leq -a$, 有 $\frac{\partial V(-x, z')}{\partial x} = -\frac{\partial V(x, z')}{\partial x}$. 对 $x \geq a$, 通过双棱镜的电子波函数是

$$\phi(x, z) = \exp i\left(k_z z - \frac{em}{\hbar^2 k_z} \int_{-\infty}^z V(a, z') dz' - x \frac{em}{\hbar^2 k_z} \int \left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_{x=a} dz'\right),$$

括弧中第二项与 x 无关, 归结为只与 z 有关的相因子. 电子通过后, 获得在 x 方向的动量是 (记它为 $-\hbar k_x$)

$$\int dt \left(-e \frac{\partial V}{\partial x}\right) = \int dz' \frac{m}{\hbar k_z} \left(e \frac{\partial V}{\partial x}\right) = -\hbar k_x,$$

故 $\phi(x, z)$ 右方括弧中第三项实际上是一 $k_x x$. 最后得到

$$\phi(x, z) = \exp i(k_z z \mp k_x x + \phi(z)), \quad (1.1.3)$$

符号“ $-$ ”适用于 $x > a$, 符号“ $+$ ”适用于 $x < -a$. 两束波会聚后总的波函数为

$$\phi(x, z) = e^{i(k_z z + \phi(z))} (e^{-ik_x x} + e^{ik_x x}).$$

干涉图像由下式给出

$$|\phi(x, z)|^2 = 4 \cos^2 k_x x. \quad (1.1.4)$$

对圆柱状细丝, 在它附近的静电势为

$$V(x, z) = V_a \frac{\ln(\sqrt{x^2 + z^2}/b)}{\ln(a/b)},$$

此处 V_a 为丝上的电势. 从 k_x 的定义式可得

$$k_x = \frac{\pi e V_a}{\hbar v_z} \ln \frac{b}{a}. \quad (1.1.5)$$

从实验装置的参数所决定的干涉条纹距离 $d = \frac{\pi}{k_x}$ 很小, 不能直接观察. 用电子光学的技术, 可以在电子显微镜的像平面之后再加两个投影透镜将条纹距离 $7000 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) 放大 2000 倍, 达到 1.4mm, 再采用位置灵敏的电子记录技术. 电子在屏幕上的累积过程示于图 1.3. 实验中电子到达探测平面的数目约为 10^3 个/s, 从电子源(场发射尖端)到屏幕的距