

张永德 著

量子菜根谭

量子理论专题分析

(第2版)

清华大学出版社

张永德 著

量子菜根谭

量子理论专题分析

(第2版)

清华大学出版社

北京

清华大学出版社
地址：北京清华大学学研大厦A座
邮编：100084
电话：(010)62770175
网址：http://www.tup.tsinghua.edu.cn

10-230227

内 容 简 介

本书广泛、深入地考察了现代量子理论的理论基础,归纳为29个专题。它们大多是些疑惑、困难、争论、流传错误的问题,也有部分前沿热点问题,范围涵盖量子力学、高等量子力学、量子统计、量子信息、量子场论诸领域。鉴于现代量子理论已经成为当代物理学各分支学科的共同理论基础,并且正在成为整个现代自然科学各门学科的共同理论基础,更鉴于整个量子理论经常被一层迷惘甚至误解的薄雾所笼罩,朦朦胧胧,“能理解度”较差,因而实行不回避问题的考量十分必要和重要。书中叙述通常始于就事论事,继以分析提高,归于自然观和方法论,尽力得出某些经验和教训,重点在于物理内涵的剖析。这是一本重要的参考书,可以为学过量子力学的大学生、研究生、教师和研究工作者提供进一步思考的空间与启迪的线索;对于广大科技工作者,它也是一本有关自然观、方法论和量子理论内涵分析的有益的参考书。

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

量子菜根谭:量子理论专题分析/张永德著.--2版.--北京:清华大学出版社,2013

ISBN 978-7-302-32710-3

I. ①量… II. ①张… III. ①量子力学 IV. ①O413.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第125528号

责任编辑:邹开颜 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:宋 林

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×230mm 印 张:23 字 数:497千字

版 次:2012年1月第1版 2013年8月第2版 印 次:2013年8月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:58.00元

产品编号:052525-01

再版前言

本书出版后,我又习惯性地从头至尾再次反复斟酌,虽然没有发现重要错误,但仍然发现不少需要改进的地方。主要是叙述不够清楚,编排不利于阅读,分析和挖掘未能到位。所以决定对全书再作一次比较彻底的校改。历时一年多完成的现在这个版本,各讲和附录都做了或多或少的改动,其中改动较大的是第4、5、6、11、14、15、16、17、18、27、28等讲,再就是新增加了第23讲。另外,为了便于读者临时查找,增加了一个内容索引。

历经长期思索和反复修改之后,在此寄出再版书稿之时,作者真诚谦卑地期盼能对得起本书读者,对得起借来的“菜根谭”三个字。

作者十分高兴能趁本书再版的机会向潘建伟教授、林海青教授、萧旭东教授、孟国武教授表达感谢之情,因为本书的改进以至作者本人都得益于他们很多的关心和帮助。感谢清华大学出版社邹开颜、赵从棉和石磊的费心编辑、精心设计和对本书的重视,正是由于他们的辛勤努力,才使得本书装帧呈现出江南水乡般的清新秀丽。

作者

2013年2月27日

序 言

道，可道，非常道；
名，可名，非常名。
无，名天地之始；
有，名万物之母。

——老子《道德经》

自然界最不可思议的事情是：自然界中竟然无时无刻不存在着各种各样永恒普适精美的规律！用 Einstein 的话概括就是：

The most incomprehensible thing about the world is that it is comprehensible.

爱因斯坦认为：每一个严肃地从事科学事业的人都深信，宇宙定律中显示出一种精神，这种精神大大超越于人的精神，我们在它面前必须感到谦卑^①。

现在，人们将这些亘古不变、万有普适的规律统称为“绝对真理”，是老子说的第一个“道”。它们是外在于人类的客观永恒的存在。但是，一旦人们以人类能够接受的方式、用能够理解的语言将它们表述出来，成为“可道”之“道”，就只能是相对真理。这些由人们创制出来的“可道”之“道”当然不是不可以更替的绝对真理——非“常道”之“道”。说到底，人们能够掌握并表述出来的东西永远是“相对真理”！Poincare 说：几何点是人的幻想。又说：几何学是不真实的，但是有用的^②。他强调的正是这个观念。人类只能通过一次次建立“相对真理”去接近“绝对真理”，永远达不到掌握“绝对真理”的境界，更谈不上创造“绝对真理”！

可以有个比喻：上帝创造了世界，很是自豪。为了使杰作不成为“锦衣夜行”，希望能有智慧生命体欣赏、歌颂他的杰作，他创造了人类，赋予人类以认识自然规律的能力。但是，上帝并不是那么慷慨，非但没有赋予人类创造绝对真理的能力，甚至连完全彻底一次性认识绝

① 安·罗宾逊. 爱因斯坦 相对论一百年. 张卜天译. 长沙: 湖南科技出版社, 2006: 188.

② H. Poincare. 科学与假设. 叶蕴理译. 北京: 商务印书馆, 1989: 63, 65.

对真理的能力也没有给,只给了人类认识相对真理的能力。即便这种相对的认识能力,还得让人们努力地一步一步地去“思”,去“悟”!

物理学,顾名思义是讲述“物质世界运动变化的基本道理”。从非相对论量子力学到相对论量子场论的整个量子理论(QT)是讲述微观物质世界运动变化的基本道理。QT是应当而且能够讲清道理的,但却又是最不容易讲清道理的道理。许多老师将基本道理和物理解释推向未来,常常向学生强调,先掌握数学计算再说。等到时间一长,学生也就不太管那些解释和道理了。其实,QT远非只是计算对易子、求解本征方程、算算概率、算算 Feynman 图、减减发散等。数学计算只是 QT 的外衣,更重要也更难的是理解它的灵魂——物理动机、物理观念、物理思想、物理图像、物理本质、物理逻辑、物理分析、物理结论、物理意义、……。QT 的物理属性极其丰富,除了常说的波粒二象性、不确定性、全同性这“老三性”之外,还有完备性、可观测性、内禀非线性、相干叠加性、纠缠性、逻辑自治性、不可逆性、因果性、或然性、多粒子性、空间非定域性等。这些物理属性交织衍生、演绎变幻,谱写出“八部天龙”般雄浑开阔、壮丽诡异的景观,铸成 QT 独特的理论品味。就连它的数学外衣,也涉及本征函数完备性、算符奇性、非 Gauss 型路径积分的数学基础、可重整性是否必要、相对论性定域因果律的处理等尚未解决的重要数学问题。

更何况,QT 虽然历经百余年长足进展,逐步建成雄浑博大、深邃精美的科学宫殿群落,但从原理上看,仍然有许多地方没弄清楚。主要是:怎样充实量子测量和粒子产生湮灭描述的唯象性质?如何避免定域描述的消极影响?究竟怎样解释理论的或然性质?怎样理解空间非定域性? QT 和相对论性定域因果律相互兼容吗?等等。

正因为如此,Feynman 说:“I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.”显然,他这句话并非针对学生和普通人说的,而是针对当时的物理学界说的,其中也许还包括他自己。的确,真正懂得量子力学并非易事。强记硬背量子力学基本内容不难,就事论事地讲清量子力学的数学外衣也容易。但传授对量子力学物理思想的理解,深化对量子力学物理逻辑的分析,懂得量子力学的本质,相当不容易。即便是颇有建树的物理学家或是教授量子力学几十年的老教师,也未必总能满意地回答莘莘学子基于直觉提出的问题。

所以,学习和掌握 QT 的时候,要时时注意摆脱经典物理学先入为主的成见、人择原理的偏颇、宏观观念的束缚、人造虚像的干扰。这里最重要的是体察和认知:第一,人类最先掌握的经典物理学只是离自己手边最近的物理学,未必是自然界最基础层面的物理学;第二,“只信实验,只信逻辑;不信积习,不信成见”的科学求真精神;第三,人类在建立“可道”理论过程中必然会引入的绝对化、理想化、局域性、片面性的纯属人造的属性。

书中遵循总结、深入、提高、面向未来的思路,以专题讲解形式深入辨析 QT 中的疑难争议问题。各讲尽力以深入浅出的方式分析物理概念,明确认知边界,剖析思维路线,讲究治

学方法。作者深知这个目标对自己来说绝对是力不从心的,但觉得还是应当本着赤子之心尽力去追求。《诗经·秦风》有曰:“蒹葭苍苍,白露为霜。……”

应当指出,QT的发展史中也出现过许多名噪一时的量子佯谬,引起过热烈议论,也算得上是一些疑难热点问题。比如说:单光子干涉实验、延迟选择实验、de Broglie 胶片问题、负能问题、Klein 佯谬、鬼态、算符厄米性问题、Schrödinger-Cat 态、Einstein 啤酒瓶、EPR 悖论、Zeno 佯谬,等等。但因时过境迁,除少数问题还保持着生命力之外,多数由于对其已经理解,或实验已经证实,失去了往昔的神秘感和吸引力。本书也相应地予以省略。

本书的构思最初来自作者多次参加和主持高校量子力学研究会的年会活动,复经常年思考积累,逐渐形成作者在2003年清华大学物理系讲解“量子力学疑难杂症”专题讲座课程的讲稿,记得课程是3个学分。那些讲稿当时随讲随挂在清华网上,后来也曾不断复制给一些同行和同学。其中不少内容在国内外多所大学讲过。由于电子版讲稿有所流传,时受叮嘱出版。这期间作者也从未中断过斟酌修改、丰富扩充的努力,直至暂且成为现在的样子。这29讲的主要目的是:通过讲解一些疑难争议问题,着重谈谈QT的“道”。以便为学过QT并对QT有兴趣的人提供一点思考驰骋的空间:除了增加一点知识,希望有利于锻炼思辨能力、加深认识、提高见识、活跃思想、添点兴趣。本书论题也许多半不是“穷巷多怪”,惟盼所论内容并非“曲学多辩”。

本书书名原打算用“量子力学疑难争议专题辨析”或是“量子专题评论”。之所以改成现在这个,想说明一下。

所有了解近代物理学争论的人都知道,著名物理学家们在阐述观点、争论问题的时候,从来都用量子理论中的量子力学说事,很少用量子场论说事。人们当然不能无端揣度那是由于他们不了解迟些出现的量子场论。我认为,除了用到的数学少些,能够说得通俗易懂白些的考量外,最重要的原因在于:如果人们看清量子力学力学特征的同时,也不被量子场论的并不古怪的场量子化方法及冗长数学计算所眩惑,便可以返璞归真地看到量子场论继承了量子力学的本质特征。可以说,量子理论的几乎所有重要问题都蕴涵在量子力学这个层次上!就是说,量子力学蕴含着量子理论的几乎所有基因!在整个量子理论中,相对而言,非相对论量子力学又是逻辑自洽性最好的部分。我相信不少人都这样认为。

另一方面,深入想想,“勤奋”实在应当划分为三个层次:勤奋,多思,求悟。勤奋的普通阶段就是多用力气,多花时间。但是,勤奋的高一级阶段,也就是更善于勤奋的人是勤于思索,善于思考。然而,勤奋的最高境界,也就是最会勤奋的人,是注意提高悟性,进入所谓开悟的境界。这时将会理解快、体会深、看得透、联想多,比较容易做到“举一反三,触类旁通”。虽然同属“可道”之“道”,量子理论却不像经典物理学,深入理解还是需要一点悟性的。

总之,在整个量子理论范畴中,与前沿热点问题相比,基础问题看似“菜根”块块,其实它们饱含物理,更蕴藏理论发展变革的无限生机,味道“甘美醇厚耐咀嚼”。笔者深盼本书有益

于读者提高对量子理论的悟性。希望读者在比对把玩时,专心思索、耐心揣摩、潜心领会。

这就是本书书名借用“菜根谭”这个有味、好玩、平易近人的名词的原因。

笔者十分怀念与国内外许多同行好友的交流讨论,数不清的切磋琢磨使笔者受益匪浅。感谢朱邦芬教授和吴念乐教授的邀请,以及他们本着清华“有容乃大”精神对笔者的尊重和信任。那次讲课有助于笔者凝聚本书的最初思路。感谢施郁教授校阅了部分书稿,感谢张鹏飞副教授重新译校了附录C量子物理百年回顾。

张永德

2012年11月2日再版修改

目 录

第 1 讲 Young 氏双缝实验→广义 Young 氏双缝实验→Qubit

——物理概念：“量子力学的核心”

1.1	令人为难的 Young 氏双缝实验解释	1
1.2	Young 氏双缝实验解释中常见的错误和缺点	2
1.3	实验中电子究竟是怎样穿过双缝的?	5
1.4	Young 氏双缝实验的两个理论计算	7
1.5	各种翻版的 Young 氏双缝实验, 广义 Young 氏双缝实验	9
1.6	关于大强度电子束入射 Young 氏双缝实验问题	13
1.7	分析与结论: 广义 Qubit	13

第 2 讲 无限深方阱粒子动量波函数的争论

——“量子力学的数学是错的”?!

2.1	无限深方阱模型简单回顾	15
2.2	Pauli 和 Landau 的矛盾——基态动量波函数的不同解	16
2.3	矛盾分析与结论	18
2.4	设想实验的佐证	19
2.5	产生问题的根源	19

[附注] Pauli 结果是 Landau 结果在 $a/\hbar \rightarrow \infty$ 时的极限

第 3 讲 自由定态球面波解争论和中心场自然边条件的由来

——等式两边同除以零的后果!

3.1	前言	21
3.2	e^{ikr}/r 是自由粒子定态球面波解吗?	21
3.3	从此处奇性说开去(I)——中心场 $r \rightarrow 0$ 自然边条件的由来	22
3.4	从此处奇性说开去(II)—— δ 函数的一些运算	23
3.5	自由粒子定态球面波的正确解	25

第4讲 量子测量的理论基础、广义测量

——量子测量理论几点附注(I)

4.1	前言	27
4.2	量子测量基础——唯象模型分析	27
4.3	量子测量分类	29
4.4	局域测量——广义测量与 POVM(正算符测度分解)	30
4.5	Neumark 定理	34
4.6	非破坏测量与弱测量	37

第5讲 量子光学部分器件作用分析,测量导致退相干

——量子测量理论几点附注(II)

5.1	量子光学部分器件作用分析	38
5.2	测量导致退相干模型(I)——von Neumann 测量模型	42
5.3	测量导致退相干模型(II)——Kraus 模型	44
5.4	测量导致退相干模型(III)——Neumann-Hepp-Coleman-Kraus 模型	44

第6讲 量子测量中主观性与客观性的对立统一,小结

——量子测量理论几点附注(III)

6.1	引言	48
6.2	预选择、后选择;半透片	50
6.3	Mach-Zehnder 干涉仪与延迟选择	52
6.4	Young 氏双缝实验中的后选择	52
6.5	预选择、后选择与相干性恢复	52
6.6	量子测量解释现状小结	53

第7讲 电子怎样从空间一个观测点运动到另一个观测点?

——没有轨道的“轨道”!

7.1	电子怎样从空间一个观测点运动到另一观测点?	55
7.2	Dirac、Pauli、Wheeler、Feynman 等人的回答	55
7.3	量子自由运动随机性分析	57

第8讲 1/2 自旋的电子与中子

——不同于“矢量”的“旋量”

8.1	1/2 自旋算符计算补充	60
8.2	两个核子间非相对论性相互作用的唯象推导	64
8.3	级联 Stern-Gerlach 装置对自旋态的分解与合成	66

- 8.4 纯自旋算符 Hamiltonian 求解 67
- 8.5 中子干涉量度学(Neutron-Spinor Interferometry)几个著名实验 72

第 9 讲 从量子 Zeno 佯谬到量子 Zeno 效应

——越看越烧不开的“量子水壶”

- 9.1 量子 Zeno 佯谬成了量子 Zeno 效应 77
- 9.2 量子 Zeno 效应存在的理论论证与分析 78
- 9.3 量子 Zeno 效应的某些应用 81
- 9.4 量子反 Zeno 效应——又成了“Zeno 佯谬”? 82

第 10 讲 $1/2$ 自旋密度矩阵的 Bloch 球分解

——很含糊的“可道”之“道”!

- 10.1 纯态与混态,两能级系统 83
- 10.2 $1/2$ 自旋单体密度矩阵的 Bloch 球表示与 Bloch 球分解 88
- 10.3 混态概念的含糊性,与温度比较 92

第 11 讲 超冷全同原子 Bose-Einstein 凝聚体的 Feshbach 共振

——可爱的自由度

- 11.1 序言 96
- 11.2 超冷全同雾状原子 Bose-Einstein 凝聚相变的定性半定量估算 97
- 11.3 低能共振散射 99
- 11.4 超冷全同原子凝聚体 Feshbach 共振(I)——基本理论 102
- 11.5 超冷全同原子凝聚体 Feshbach 共振(II)——多体效应 110

第 12 讲 “一次量子化”与“二次量子化”

——“古怪”与“不古怪”

- 12.1 前言 114
- 12.2 量子力学的建立——何必借助这个“无厘头”的一次量子化 114
- 12.3 Maxwell 场协变量子化——需要“鬼光子”的一次量子化 116
- 12.4 “Schrödinger 场”的二次量子化——逻辑结论,不古怪 123
- 12.5 自作用“Schrödinger 场”的二次量子化——再次不古怪 135
- 12.6 二次量子化方法评论——有理性基础的推广 139

第 13 讲 现有的量子理论是线性的?!

——这是一个很大的误解!

- 13.1 前言 142
- 13.2 通常 Schrödinger 方程给人的错觉! 143

13.3	误解之一	144
	——量子力学线性性质的终极性,不可能建立非线性量子力学?!	144
13.4	误解之二——量子理论是线性理论,必须并可以建立非线性量子理论?!	144
13.5	误解之三——Schrödinger 方程“线性化”“导出”Pauli 方程?!	145
13.6	相互作用必定导致 QT 非线性!	145
13.7	关于 QT 的“渐进自由态空间的量子态叠加原理”	148
13.8	无自旋 Schrödinger 方程经过所谓“线性化”能够“导出”含 $\hbar/2$ 自旋的 Pauli 方程?!	149
13.9	QT 的困难并不来源于“QT 的线性性质”!	150

第 14 讲 Schrödinger 方程补充分析

——“人为约定自由原理”及多体效应考量

14.1	前言	151
14.2	单体定态解补充分析	151
14.3	多体效应分析之一——自然规律的“人为约定无效原理”	155
14.4	多体效应分析之二——对应原理失效原因分析	156

第 15 讲 再论物理学中的“人造事物”、奇性与和谐

——“可道”之“道”的关联分析:自然规律三原理

15.1	“人造事物”与奇性引论	160
15.2	δ 函数势与概率流守恒及波函数导数连续	161
15.3	中心场负幂次势 $V(r) = -\beta/r^n$ ($r \rightarrow 0$) 奇性分析,波函数塌缩问题	163
15.4	连续谱中束缚态问题	164
15.5	平面波散射发散问题	164
15.6	“可道”之“道”的启示:自然规律三原理	166

第 16 讲 量子统计基础的一些考量

——合抱之木,生于毫末

16.1	前言	168
16.2	近独立全同粒子平衡态系综统计理论的基本公设	168
16.3	两个公设的初步分析	169
16.4	第三公设——Pauli 基本定理证明及分析	172

第 17 讲 时间反演不变性、演化可逆性及能谱下确界

——兼及 Dirac 符号是“有缺陷的美”

17.1	量子系统 Hamiltonian 能谱必须有下界	179
17.2	自由粒子波包弥散——时间反演对称性不等价于演化可逆性	180

17.3	反么正变换与 Dirac 符号的局限性	184
------	---------------------------	-----

第 18 讲 可观测性、完备性与中心场塌缩

——三者的含义与关联

18.1	力学量可观测性与其算符本征函数族的完备性	187
18.2	几个相关问题的分析	189
18.3	力学量算符本征函数族完备性的几个定理	191
18.4	C-H 定理的应用	194
18.5	小结: 可观测性、完备性、波函数塌缩的关联分析	197

第 19 讲 位相算符与位相差算符

——取决于“算符的指数”!

19.1	算符指数与 Atiyah-Singer 定理	198
19.2	算符么正分解与引入位相算符的可行性	199
19.3	Boson 与 Fermion 算符的位相算符和位相差算符	202

第 20 讲 量子理论内在逻辑自洽性分析

——又一个常被忽视的基本问题

20.1	前言	205
20.2	NRQM 内在逻辑自洽性分析	206
20.3	RQM 内在逻辑自洽性分析(I) ——Klein-Gordon 方程作为单粒子量子力学方程的缺陷	207
20.4	RQM 内在逻辑自洽性分析(II) ——Dirac 方程作为单粒子量子力学方程的缺陷	212
20.5	QFT 内在逻辑自洽性分析	221
20.6	总结	222

第 21 讲 Berry 相位争论分析

——可积与不可积? 动力学与几何?

21.1	前言	224
21.2	关于 Berry 相位的争论	224
21.3	“Berry 相位本质”争论的澄清	229
21.4	Berry 相位几何本质的再澄清	230
21.5	小结	237

第 22 讲 传统量子绝热理论的不足与解决

——“后 Berry”量子绝热理论

22.1	前言	239
22.2	传统量子绝热理论及存在的问题	240
22.3	Berry 后的绝热理论(I)——绝热不变基	241
22.4	Berry 后的绝热理论(II)——绝热不变基的变系数展开	243
22.5	Berry 后的绝热理论(III)——例算与分析	249
22.6	Berry 后的绝热理论(IV)——与 Berry 相位的关联	250

第 23 讲 高量散射理论教材和讲授问题商榷

——三个层次与三个要

23.1	前言	252
23.2	量子散射理论要点回忆	253
23.3	高量散射理论讲授中常见偏颇商榷	260
23.4	高量散射理论讲授建议三“要”	261

第 24 讲 量子态叠加和纠缠与“定域物理实在论”的矛盾

——一论 Einstein“定域实在论”

24.1	Einstein“定域物理实在论”	263
24.2	量子态叠加原理与“物理实在论”的矛盾	266
24.3	量子纠缠与“物理实在论”的矛盾	267
24.4	EPR“物理实在论”与 QT 矛盾小结	269

第 25 讲 Bell-CHSH-GHZ-Hardy-Cabello 空间关联非定域性研究路线述评

——二论 Einstein“定域实在论”

25.1	QT 的空间非定域性	271
25.2	EPR 佯谬所引起的 Bell 不等式路线	275
25.3	CHSH 不等式及其最大破坏	277
25.4	GHZ 定理	278
25.5	Hardy 不等式	279
25.6	Cabello 不等式	281
25.7	Bell-CHSH-GHZ-Hardy-Cabello 路线评述(I) ——Bell 型空间非定域性本质	282
25.8	Bell-CHSH-GHZ-Hardy-Cabello 路线评述(II) ——理论路线简略评论	284

第 26 讲 量子理论与相对论性定域因果律相互融洽?!

——三论 Einstein“定域实在论”

26.1	前言	285
26.2	因果律与相对论性定域因果律	286
26.3	与相对论性定域因果律矛盾的 QT 禀性——QT 因果性分析(I)	287
26.4	塌缩—关联塌缩不是因果关联?——QT 因果性分析(II)	288
26.5	Feynman 公设路径分析——QT 因果性分析(III)	291
26.6	QT 的因果观——QT 因果性分析(IV)	293

第 27 讲 量子态 Teleportation

——首次实验、评论、四代 Teleportation

27.1	Quantum Teleportation 方案 ——量子态的超空间传送——第一代量子态超空间传送	297
27.2	对首次实验的评论与改进	301
27.3	Quantum Swapping ——量子纠缠的超空间制造——第二代量子态超空间传送	303
27.4	Open-Destination Teleportation ——非定域存储的超空间传送——第三代量子态超空间传送	304
27.5	Two-Qubit Composite System Teleportation ——复合体系量子态的超空间传送——第四代量子态超空间传送	305
27.6	量子态超空间传送的普遍理论方案	306
27.7	量子态超空间传送的奇异性质	307

第 28 讲 广义量子擦洗

——恢复与建立相干性技术

28.1	前言	308
28.2	不确定性关系和波包交叠——单粒子态的量子擦洗	309
28.3	正交再分解——单粒子不同组分态的量子擦洗	310
28.4	GHJW 定理——混态的纠缠纯化与广义量子擦洗	310
28.5	Swapping——遥控相干性恢复技术	316
28.6	全同性原理应用——全同多粒子态的相干性恢复技术	316

第 29 讲 论波粒二象性

——“大道归一,返璞归真”

29.1	波粒二象性是微观粒子最基本的内禀性质	318
------	--------------------	-----

29.2	此稟性是不确定性关系的物理根源	319
29.3	此稟性是全同性原理的物理根源	321
29.4	此稟性是保证二次量子化成功的充要条件	325
29.5	此稟性是 Feynman 公设的物理基础	326
29.6	此稟性必定导致 QT 的空间非定域性	326
29.7	此稟性必定导致 QT 的纠缠叠加与或然性	327
附录 A 科学、物理学、量子力学(提纲)		328
A.1	前言	328
A.2	西方近代科学	328
A.3	科学中的物理学	331
A.4	物理学中的量子力学	332
附录 B Einstein 的有神论与宗教观		336
附录 C 量子物理百年回顾(转录)		338
附录 D 盲人摸大象图		346
内容索引		347

第 1 讲

Young 氏双缝实验→广义 Young 氏 双缝实验→Qubit

——物理概念：“量子力学的核心”

- 1.1 令人为难的 Young 氏双缝实验解释
- 1.2 Young 氏双缝实验解释中常见的错误和缺点
- 1.3 实验中电子究竟是怎样穿过双缝的
- 1.4 Young 氏双缝实验的两个理论计算
- 1.5 各种翻版的 Young 氏双缝实验, 广义 Young 氏双缝实验
- 1.6 关于大强度电子束入射 Young 氏双缝实验问题
- 1.7 分析与结论: 广义 Qubit

1.1 令人为难的 Young 氏双缝实验解释

Young 氏双缝实验是量子力学中最初的、最普通的、最著名的、最奇特的实验, 也是最富于量子力学味道的实验。全部疑惑在于, 实验中可以将入射电子束流强度调得很低, 以致每个电子都是单独穿过狭缝的。显然, 如此实验只涉及每个电子的自身性质, 并不涉及电子集体行为。但集体的结果却是造成了体现波动性的干涉花样。这说明实验中体现波动性的相干现象来自每个电子, 每个电子都是自身干涉的!

总之, 它表面浅显易懂, 其实难以理解和表述; 它很容易利用程差简易说明, 但又难以求解 Schrödinger 方程得到强度分布; 它出现在所有量子力学教材中, 是众所周知的基础性实验, 但人们常常忽略了它许多重要的侧面; 它是量子力学中最古老、最普通的实验, 但近代却又不断出现花样翻新的新版本^①。最后, 正是对它的深入思索导致 Feynman 产生路径积分思想。

由此就能理解 Feynman 的话: **Young 氏双缝实验是量子力学的核心**。它确实是理解量

^① 比如, 观察单光子在双缝实验中平均路径的文章: *Science*, 2011, 332: 1170.