

张永德 著

量子菜根谭

现代量子理论专题分析

(第3版)

清华大学出版社

张永德 著

量子菜根谭

现代量子理论专题分析

(第3版)

清华大学出版社

北京

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30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。范围涵括量子力学、高等量子力学、量子场论、量子统计、量子信息诸领域。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,并且正在成为当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“雾霭”所笼罩,朦朦胧胧,“能理解度”较差,因而实行不回避问题的认真考量十分必要和重要。

各讲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,尽力得出一些经验教训。本书论述多关注物理内涵剖析,侧重见解分析评论,是一本有特色的辅助教材,为学过量子理论的学生、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。对广大科技工作者,它是一本有关自然观、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:现代量子理论专题分析/张永德著.—3版.—北京:清华大学出版社,2016
ISBN 978-7-302-44276-9

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(2016)第153125号

责任编辑:佟丽霞 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:刘海龙

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:24.5 字 数:532千字

版 次:2012年1月第1版 2016年11月第3版 印 次:2016年11月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:69.90元

产品编号:070082-01

第3版前言

这次历时两年的全面修改,主要针对第3、4、6、7、11、12、13、14、15、16、17、18、20、26各讲。修订了附录A和附录B。删去了原来的23讲,因为它只涉及高量散射的教学研究。增加了第23、30两讲,添了个后记。

作者十分感激,在本书写作过程中一直得到中国科学技术大学潘建伟教授、北京计算技术研究所林海青教授和朱诗尧教授、维也纳原子研究所 Helmut Rauch 教授、奥地利科学院 Anton Zeilinger 教授、维也纳技术大学 Gerald Badurek 教授、北京计算物理研究所张信威教授、南京大学邢定钰教授、中科院大学乔从丰教授,以及香港中文大学萧旭东教授的许多关心、支持和帮助。这极大促进了作者对本书的思考和改进。十分感谢中国科学技术大学近代物理系郁司夏教授,他应作者请求阅读了部分书稿,提出了宝贵意见;十分感谢香港科学技术大学孟国武教授、南京大学吴盛俊教授,他们提供的资料和讨论有助于本书的改进。

作者

2016年5月

第2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,疏漏了对个别流传错误的分析。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

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的理性自洽、普适永恒、精美绝伦的规律！用爱因斯坦(Einstein)的话概括就是：

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

他认为：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、用人类能够理解的语言将它们表述出来，成为人们创制的“可道”之“道”，就只能是相对真理！而绝非不可以更替的永恒的绝对真理——绝非“常道”之“道”。简单说，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，赋予人类认识自然规律的能力。但是，上帝并不是那么慷慨，他非但没有赋给人类制定自然法则、创造绝对真理的能力，甚至连完全彻

^① 安·罗宾逊. 爱因斯坦 相对论一百年. 张卜天, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2006: 188.

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

底一次性认识绝对真理的能力也没给,只给了人类第三等的能力——认识相对真理的能力。即便具有了这个第三等的能力,人们还得努力地、一步一步地去“思”、去“悟”才能得到!

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?那些基本物理常数由何决定?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。即便是著名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:第一,体察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,树立“只信实验,只信逻辑”的科学理性精神;第三,警惕人类建立“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。作者深知实现这个目标十分艰巨,但认为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 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,也算得是一些疑难热点问题。比如: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、算符厄密性问题、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数十年参加和主持全国高校量子力学研究会的年会活动,复经常年思悟积累,初步形成作者在 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。那些讲稿当时曾挂在清华网上,中间也曾不断复制给一些同行和同学。其中不少内容也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。迄今为止,作者并未中断过斟酌修改、丰富扩充的努力,直至成为现在这个付梓的样子。

应当说,在整个量子理论范畴中,和前沿热点问题相比,基本问题看似是一块块“菜根”,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”。这 30 讲的主要目的: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;除了传授一点知识,更希望锻炼读者的思辨能力,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”。作者深盼本书有益于提高读者对量子理论的悟性。希望读者在对比把玩时,专心思索、耐心揣摩、潜心领会。

作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作者受益匪浅。感谢朱邦芬教授和吴念乐教授,他们本着清华“有容乃大”精神,给作者以充分尊重和信任,正是那次讲课使作者凝聚起本书的最初思路。

张永德

2010 年 10 月

目 录

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

——“量子力学的心脏”

1.1	Young 氏双缝实验解释确实令人为难	1
1.2	Young 氏双缝实验解释常见的错误和缺点	2
1.3	实验中电子究竟是怎样穿过双缝的?	4
1.4	Young 氏双缝实验的两个理论计算	6
1.5	各种翻版的 Young 氏双缝实验,广义 Young 氏双缝实验	9
1.6	高强度电子束入射的 Young 氏双缝实验	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	20

第 3 讲 自由定态球面波解的争论和中心场自然边条件的来由

——等式两边同除以零的后果!

3.1	前言	21
3.2	$e^{i\mu r}/r$ 是自由粒子定态球面波解吗?	22
3.3	从此处奇性说开去(I)——中心场自然边条件的来由	22
3.4	从此处奇性说开去(II)——与 δ 函数有关的一些奇性运算	23
3.5	δ 函数不是严格意义上的函数,但它却是严格意义上的线性泛函数	25
3.6	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

——量子测量理论几点注解(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	30
4.4	局域测量——广义测量与 POVM(正算符测度分解)	31
4.5	Neumark 定理	35

第5讲 量子光学部分器件作用分析,测量导致退相干

——量子测量理论几点注解(II)

5.1	量子光学部分器件作用分析	39
5.2	测量导致退相干模型(I)——von Neumann 测量模型	43
5.3	测量导致退相干模型(II)——Kraus 模型	45
5.4	测量导致退相干模型(III)——Neumann-Hepp-Coleman-Kraus 模型	45

第6讲 量子测量中主观性与客观性的对立统一,小结

——量子测量理论几点注解(III)

6.1	引言	49
6.2	预选择、后选择;半透片	51
6.3	Mach-Zehnder 干涉仪,延迟选择	53
6.4	Young 氏双缝实验中的后选择	53
6.5	预选择、后选择与相干性恢复	53
6.6	不确定性关系争论简单小结	54
6.7	量子测量解释现状简单小结	54

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个观测点	58
7.2	Dirac、Pauli、Wheeler、Feynman 等人的回答	58
7.3	量子自由运动随机性分析	60

第8讲 电子与中子的旋量波函数

——不同于“两分量矢量”的“两分量旋量”

8.1	1/2 自旋算符计算补充	63
8.2	两个核子间非相对论性相互作用的唯象推导	67
8.3	级联 Stern-Gerlach 装置对自旋态的分解与合成	69

8.4 纯自旋算符 Hamilton 量求解	70
8.5 中子干涉量度学(neutron-spinor interferometry)	75

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	81
9.2 量子 Zeno 效应存在的理论论证与分析	82
9.3 量子 Zeno 效应的某些应用	85
9.4 量子反 Zeno 效应——又成了“Zeno 佯谬”	86

第 10 讲 1/2 自旋密度矩阵的 Bloch 球分解

——“可道”之“道”的含糊

10.1 纯态与混态,两能级系统	87
10.2 1/2 自旋单体密度矩阵的 Bloch 球表示	92
10.3 混态概念的含糊性,与温度比较	96

第 11 讲 “一次量子化”与“二次量子化”

——“无厘头”与不“无厘头”

11.1 前言	100
11.2 量子力学的建立——何必借助这个“无厘头”的一次量子化	100
11.3 Maxwell 场协变量子化——需要“鬼光子”的一次量子化	102
11.4 “Schrödinger 场”二次量子化——非相对论二次量子化 是逻辑结论,不“无厘头”	110
11.5 自作用“Schrödinger 场”二次量子化——再次不“无厘头”	121
11.6 二次量子化方法评论	126

第 12 讲 量子理论是线性的?!

——这是一个很大的误解

12.1 前言	131
12.2 通常 Schrödinger 方程给人的错觉	132
12.3 误解之一——量子力学的线性性质具有终极性, 不可能建立非线性量子力学	132
12.4 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	133
12.5 误解之三——Schrödinger 方程“线性化”“导出” Pauli 方程	133
12.6 关于 QT 的“渐近自由态空间的量子态叠加原理”	134

12.7	相互作用必定导致 QT 非线性	135
12.8	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?!	139
12.9	QT 的困难并不来源于“QT 的线性性质”	140

第 13 讲 Schrödinger 方程补充分析

——兼谈 Schrödinger 方程中“人造事物”的奇性

13.1	前言	141
13.2	单体定态解补充分析	142
13.3	Schrödinger 方程奇性再考察	145
13.4	为什么力学运动的基本微分方程都是二阶的	149

第 14 讲 能谱无界性与演化因果不可逆性的关联

——时间反演分析

14.1	时间反演变换与时间反演对称性	150
14.2	量子体系能谱必须有下界	152
14.3	能谱无上界量子体系含时演化不存在因果颠倒的逆演化	153
14.4	举例:自由运动和中心场运动的因果可逆性分析	156
14.5	反么正变换与 Dirac 符号的局限性	159

第 15 讲 可观测性、完备性与中心场塌缩

——三者的含义与关联

15.1	力学量的可观测性与其算符本征函数族的完备性	161
15.2	几个相关问题的分析	163
15.3	力学量算符本征函数族完备性的几个定理	165
15.4	C-H 定理的应用	168
15.5	小结:可观测性、完备性、波函数塌缩的关联分析	171

第 16 讲 宏观量子现象与传统对应原理改进

——量子多体效应考量

16.1	序言	172
16.2	宏观量子现象对传统对应原理的否定——量子多体效应分析(I)	172
16.3	超冷全同雾状原子 Bose-Einstein 凝聚——量子多体效应分析(II)	174
16.4	超高密度介质简单估算——量子多体效应分析(III)	178
16.5	对应原理的正确提法	178

第 17 讲 超冷全同原子 Bose-Einstein 凝聚体的 Feshbach 共振

——可爱的自由度

17.1	序言	180
17.2	低能共振散射	181
17.3	超冷全同原子凝聚体 Feshbach 共振(I)——基本理论	183
17.4	超冷全同原子凝聚体 Feshbach 共振(II)——多体效应	192

第 18 讲 量子统计基础的一些考量

——量子统计只有一个公设吗?

18.1	前言	196
18.2	近独立全同粒子平衡态系综统计理论的基本公设	197
18.3	两个公设的初步分析	197
18.4	Pauli 基本定理——证明与分析	200

第 19 讲 位相算符与位相差算符

——取决于“算符指数”!

19.1	算符指数与 Atiyah-Singer 定理	207
19.2	算符幺正分解与引入位相算符的可行性	209
19.3	Boson 与 Fermion 算符的位相算符和位相差算符	211

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	214
20.2	NRQM 内在逻辑自洽性分析	215
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	216
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	221
20.5	QFT 内在逻辑自洽性分析	231
20.6	总结	232

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	233
21.2	关于 Berry 相位的争论	233
21.3	“Berry 相位本质”争论的澄清	238

21.4	Berry 相位几何本质的再澄清	239
21.5	小结	246

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	248
22.2	传统量子绝热理论及存在的问题	249
22.3	后 Berry 的绝热理论(I)——绝热不变基	250
22.4	后 Berry 的绝热理论(II)——绝热不变基的变系数展开	252
22.5	后 Berry 的绝热理论(III)——例算与分析	258
22.6	后 Berry 的绝热理论(IV)——与 Berry 相位的关联	259

第 23 讲 光子描述

——光子有“坐标波函数”吗?

23.1	前言	261
23.2	光子有动量波函数	262
23.3	光子没有坐标波函数	263
23.4	光子角动量问题分析	267
23.5	光子自由度问题	271

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”	273
24.2	量子态叠加原理与“物理实在论”的矛盾	276
24.3	量子纠缠与“物理实在论”的矛盾	277
24.4	EPR“物理实在论”与 QT 矛盾小结	279

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	281
25.2	EPR 佯谬引起的 Bell 不等式路线	285
25.3	CHSH 不等式及其最大破坏	287
25.4	GHZ 定理	288
25.5	Hardy 论证	289
25.6	Cabello 论证	291

25.7	Bell-CHSH-GHZ-Hardy-Cabello 路线评述(I)	
	——Bell 型空间非定域性本质	292
25.8	Bell-CHSH-GHZ-Hardy-Cabello 路线评述(II)	
	——理论路线简略评论	294
第 26 讲 量子理论与相对论性定域因果律相互融洽吗		
——三论 Einstein“定域实在论”		
26.1	前言	295
26.2	因果律与相对论性定域因果律	296
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)	297
26.4	塌缩—关联塌缩是因果关联吗——QT 因果性分析(II)	298
26.5	Feynman 公设路径分析——QT 因果性分析(III)	301
26.6	QT 的因果观——QT 因果性分析(IV)	303
第 27 讲 量子态 Teleportation 实验的历程与评论		
——首次实验、评论、五代 Teleportation		
27.1	Quantum Teleportation(量子态的超空间传送)方案	
	——第一代量子态超空间传送	307
27.2	对首次实验的评论与改进	312
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	313
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	314
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	315
27.6	Satellite Quantum Teleportation——第五代量子态超空间传送	316
27.7	量子态超空间传送的普遍理论方案	316
27.8	量子态超空间传送的奇异性质	318
第 28 讲 广义量子擦洗		
——恢复与建立相干性技术		
28.1	前言	319
28.2	不确定性关系和波包交叠——单粒子态的量子擦洗	320
28.3	正交再分解——单粒子不同组分态的量子擦洗	321
28.4	GHJW 定理——混态的纠缠纯化与广义量子擦洗	321
28.5	Swapping——遥控相干性恢复技术	327

28.6	全同性原理应用——全同多粒子态的相干性恢复技术·····	327
------	------------------------------	-----

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·····	330
29.2	此禀性是不确定性关系的物理根源·····	332
29.3	此禀性是全同性原理的物理根源·····	333
29.4	此禀性是保证二次量子化成功的充要条件·····	337
29.5	此禀性是 Feynman 公设的物理基础·····	338
29.6	此禀性必定导致 QT 的空间非定域性·····	338
29.7	此禀性必定导致 QT 的纠缠叠加与或然性·····	340

第 30 讲 现代量子理论中的雾霾与自然科学基本公设

——再论自然科学为“可道”之“道”

30.1	引论——现代量子理论中的三重雾霾·····	341
30.2	自然科学第一基本公设——“人为约定无效公设”·····	345
30.3	自然科学第二基本公设——“自然无奇性公设”·····	346
30.4	自然科学第三基本公设——“自然理性自洽公设”·····	347

附录 A	科学、物理学、量子力学(提纲)·····	349
------	----------------------	-----

A.1	前言·····	349
A.2	西方现代科学·····	349
A.3	科学中的物理学·····	352
A.4	物理学中的量子力学·····	353

附录 B	量子物理百年回顾(转录)·····	356
------	-------------------	-----

附录 C	Einstein 的有神论与宗教观·····	364
------	------------------------	-----

附录 D	云门山石刻碑文·····	367
------	--------------	-----

后记	·····	368
----	-------	-----

内容索引	·····	370
------	-------	-----

第 1 讲

Young 氏双缝实验→广义 Young 氏 双缝实验→Qubit

——“量子力学的核心”

- 1.1 Young 氏双缝实验解释确实令人为难
- 1.2 Young 氏双缝实验解释常见的错误和缺点
- 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 高强度电子束入射的 Young 氏双缝实验
- 1.7 分析与结论: 广义 Qubit

※ ※ ※

1.1 Young 氏双缝实验解释确实令人为难

Young 氏双缝实验是量子力学最初的、最普通的、最著名的实验,也是最奇特的、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,并不涉及电子的集体行为。但重复实验的集合结果却出现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,每个电子都能自身干涉!然而,人们每次测到单个电子却总给人以粒子质点形象!于是无法想象一个个质点每个都同时穿过两条缝!

总之,Young 氏双缝实验表面浅显易懂,其实难于理解;它很容易利用程差作简易说明,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(结合作用量

^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.