

张永德 著

清华大学出版社

量子菜根谭

量子理论专题分析



閩縣林志志鈞書
武進劉南策監

张永德 著

量子菜根谭

量子理论专题分析

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书广泛考察了现代量子理论的理论基础,归纳为 28 个专题。它们大多是些疑惑、困难、争论、流传错误的问题,也有部分热点问题,涵括量子力学、高等量子力学、量子统计、量子信息、量子场论诸领域。鉴于一直以来整个量子理论总是被一层朦胧而迷惘的薄雾所笼罩,再加上,现代量子理论不但成为整个物理学的共同理论基础,而且正在成为整个现代自然科学的共同理论基础,因而这种不回避问题的考察十分重要和重要。特别是,书中叙述总始于就事论事,继而分析提高,常归于自然观和方法论,尽力得出某些经验教训,于是,它是一本重要的参考书,为学过量子力学的大学生、研究生、教师和研究工作者提供一步思索的空间与启迪线索。

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. --北京:清华大学出版社, 2012.1
ISBN 978-7-302-27028-7

I. ①量… II. ①张… 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 202595 号

责任编辑:邹开颜 赵从棉

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

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:185×230

印 张:22.25

字 数:482 千字

版 次:2012 年 1 月第 1 版

印 次:2012 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:49.00 元

产品编号:042710-01

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是：自然界中竟然无时无刻不存在着各种各样永恒普适的规律。用 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。

现在的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理解的方式、用能够接受的语言将它们表述出来，成为“可道”之“道”，就只能相对真理。这些由人们创制出来的“可道”之“道”当然不是不可以更替的“常道”之“道”，不是绝对真理。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，非但没有赋给人类创造绝对真理的能力，甚至连完全彻底一次性认识绝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

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

^② H. Poincare 编著，叶蘊理译，科学与假设，北京：商务印书馆，1989，第 63, 65 页

人们努力地一步一步地去“思”，去“悟”！

物理学，顾名思义是讲“物质世界运动变化的基础道理”。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)是讲解微观物质世界运动变化的基础道理。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、物理本质、物理逻辑、……。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、逻辑自洽性、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、理论可重整性是否必要、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结果？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很容易，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，则相当不容易。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，第一，体察：人类最先掌握的经典物理学只是离自己最近的物理学，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；不信积习，不信成见”的科学求真精神；第三，认知：人类在建立“可道”理论过程中必然引入的绝对化、理想化、局域性、片面性中所固有的人为、近似和相对的属性。

本书遵循总结、深入、提高、面向未来的精神，以专题讲解形式深入辨析 QT 中的疑难争议问题。各讲力求分析物理概念，明确认知边界，剖析思维路线，讲究治学方法。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。对此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，复经长年思考积累，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。那些讲稿当时曾挂在清华网上，其后又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。这期间作者也从未中断过斟酌修改、丰富扩充的努力，直至暂且成为现在这个付梓的样子。这 28 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 的同学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”。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。我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。除了用到的数学少些，能够说得明白些的考量外，我认为最重要的原因还是：**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治性相对最好的部分。**

我相信别人也有这个看法。对我来说，它来自个人科研教学经历。自 1981 年底从三线国防单位转到学校任教以来，我讲授次数最多的课程就是理论物理专业的量子场论（两学期 2×80 学时）。粗粗看去，量子场论的数学计算不少；而仔细看来，除了一堆谁都说不清的问题外，值得推敲的实质性物理问题并不多。我说这番话的用意，无非是想提个醒：**在看清并超越量子力学力学特征的同时，不被量子场论的并不古怪的场量子化方法以及冗长数学计算所眩惑，如此便可以返璞归真地看到量子场论继承量子力学本质的特征。**

另一方面，深入想想，“勤奋”实在应当划分三个层次：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勤于动脑：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，进入开悟境界。倘若能够提高悟性，仿佛脑力大增，看什么都看得清、掌握快、体会深。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。到此只能说一句道家或禅宗的口头语：“大道无形，只可意会，不可言传”了。

总之,在整个量子理论范畴中,和前沿热点问题相比,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”。作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。

这就是借用“菜根谭”这个有味、好玩、平易近人的名词的原因。

最后,作者感谢清华大学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”的精神,对作者的尊重和信任。那次讲课有助于作者凝聚本书的最初思路。作者感谢复旦大学施郁教授帮助校阅部分稿件。

张永德

2010.10.26—2011.4.5

目 录

[第 1 讲] 广义 Young 氏双缝实验

——“量子力学的心脏”

1.1	令人为难的 Young 氏双缝实验讲述	1
1.2	Young 氏双缝实验讲述中经常出现的错误	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 Young 氏双缝实验, 广义 Young 氏双缝实验	9
1.6	大强度电子束入射的 Young 氏双缝实验	13
1.7	分析与结论	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	20

[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	$e^{i\alpha r}/r$ 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	von Neumann 正交测量模型	29
4.4	量子测量分类	31
4.5	局域测量——广义测量与 POVM(正值算符测度)	32
4.6	Neumark 定理与考虑 POVM 的 GHJW 定理	36
4.7	非破坏测量	39

[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	40
5.2	测量导致退相干模型	44
5.3	量子测量问题小结	48

[第6讲] 量子测量中主观性与客观性的对立统一

——量子测量理论几点附注(III)

6.1	引言	51
6.2	预选择、后选择;半透片	52
6.3	Mach-Zehnder 干涉仪——延迟选择	54
6.4	Young 氏双缝实验中的后选择	55
6.5	预选择、后选择与相干性恢复	55
6.6	小结	57

[第7讲] 电子怎样从空间一个观测点运动到另一观测点?

——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?	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] 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	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 Hamiltonian 求解 71
- 8.5 中子干涉量度学(Neutron-Spinor Interferometry)几个著名实验 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 效应存在性的理论论证与分析 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 Block 球分解

——很含糊的“可道”!

- 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 Block 球表示 92
- 10.3 混态概念的含糊性,与温度比较 96

[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 100
- 11.2 超冷全同雾状原子 Bose-Einstein 凝聚相变的定性半定量估算 101
- 11.3 低能共振散射 104
- 11.4 超冷全同原子凝聚体 Feshbach 共振(I)——基本理论 106
- 11.5 超冷全同原子凝聚体 Feshbach 共振(II)——多体效应 116

[第 12 讲] “一次量子化”与“二次量子化”

——“古怪”与“不古怪”

- 12.1 前言 121
- 12.2 量子力学的建立——“无厘头”的一次量子化 121
- 12.3 Maxwell 场协变量子化——需要“鬼光子”的一次量子化 123
- 12.4 “Schrödinger 场”的二次量子化——其实不古怪 131
- 12.5 自作用“Schrödinger 场”二次量子化——再次的古怪 142
- 12.6 二次量子化方法评论——可以理解的古怪 147

[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 149
- 13.2 通常 Schrödinger 方程给人的错觉 150

13.3	误解之一——量子力学线性性质的终极性,不可能建立非线性量子力学	151
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	151
13.5	误解之三——Schrödinger 方程“线性化”“导出”Pauli 方程	152
13.6	相互作用必定导致 QT 的非线性	152
13.7	关于 QT 的“渐进自由态空间的量子态叠加原理”	155
13.8	无自旋 Schrödinger 方程经过所谓“线性化处理”能够“导出”含自旋的 Pauli 方程?!	157
13.9	QT 的困难并不来源于“QT 的线性性质”!	158

[第 14 讲] 再论物理学中的“人造事物”

——“可道”的附体“魔鬼”!

14.1	前言——人造事物概论	159
14.2	δ -函数势与概率流守恒及波函数导数连续边条件	160
14.3	中心场负幂次势 $V(r) = -\beta/r^n (n > 2)$, $-\beta/r^2$ 与波函数塌缩问题	161
14.4	连续谱中的束缚态问题	162
14.5	平面波散射理论中的发散问题	162
14.6	奇性势和奇性态(非物理态)问题的启示	163

[第 15 讲] Schrödinger 方程补充分析

——方程若干再考量

15.1	前言	165
15.2	定态解稳定性的理解	165
15.3	中心场定态解球对称性缺失的理解	166
15.4	两个独立解问题	167
15.5	定域规范变换不变性到定域规范变换不变原理	168
15.6	势垒内部情况分析	169
15.7	对应原理失效分析	169

[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	171
16.2	近独立全同粒子平衡态系综统计理论的基本假设	171
16.3	两个假设的初步分析	172
16.4	第三假设——统计与自旋关系的 Pauli 基本定理	175

[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 的能谱必须有下界 182
- 17.2 自由粒子波包弥散——时间反演不变性并不等价于演化可逆性 183
- 17.3 反么正变换与 Dirac 符号的局限性 186

[第 18 讲] 可观测性与完备性

——常被忽略的基本问题

- 18.1 力学量可观测性与其算符本征函数族的完备性 188
- 18.2 一些相关问题的分析 190
- 18.3 力学量算符本征函数族完备性的几个定理 192
- 18.4 C-H 定理的应用 195

[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 199
- 19.2 算符么正分解与引入位相算符的可行性 200
- 19.3 Boson 与 Fermion 算符的位相算符和位相差算符 203

[第 20 讲] 量子理论内在逻辑自治性分析

——又一个常被忽略的基本问题

- 20.1 前言 206
- 20.2 NRQM 内在逻辑自治性分析 207
- 20.3 RQM 内在逻辑自治性分析(I)——Klein-Gordon 方程作为量子力学方程的缺陷 208
- 20.4 RQM 内在逻辑自治性分析(II)——Dirac 方程作为量子力学方程的缺陷 213
- 20.5 QFT 内在逻辑自治性分析 223
- 20.6 总结 224

[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 225
- 21.2 关于 Berry 相位的争论 225
- 21.3 “Berry 相位本质”争论的澄清 230
- 21.4 Berry 相位几何本质的再澄清 231
- 21.5 小结 239

[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	241
22.2	传统量子绝热理论及存在的问题	242
22.3	Berry 后的绝热理论(I)——绝热不变基	243
22.4	Berry 后的绝热理论(II)——绝热不变基的变系数展开	245
22.5	Berry 后的绝热理论(III)——例算与分析	251
22.6	Berry 后的绝热理论(IV)——与 Berry 位相的关联	252

[第 23 讲] 态的叠加纠缠与“定域物理实在论”的矛盾

——一论 Einstein“定域实在论”

23.1	Einstein“定域物理实在论”	254
23.2	态叠加原理与“物理实在论”的矛盾	256
23.3	量子纠缠与“物理实在论”的矛盾	257
23.4	EPR“物理实在论”与 QT 矛盾小结	259

[第 24 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”

24.1	QT 的空间非定域性	262
24.2	EPR 佯谬所引起的 Bell 不等式路线	266
24.3	CHSH 不等式及其最大破坏	268
24.4	GHZ 定理	269
24.5	Hardy 定理	270
24.6	Cabello 定理	272
24.7	Bell-CHSH-GHZ-Hardy-Cabello 路线评述(I)——Bell 型空间 非定域性本质	273
24.8	Bell-CHSH-GHZ-Hardy-Cabello 路线评述(II)——理论路线简略评论	275

[第 25 讲] 量子理论与定域因果律相互融洽?!

——三论 Einstein“定域实在论”

25.1	前言	276
25.2	因果律与相对论性定域因果律	277
25.3	与相对论性定域因果律矛盾的 QT 禀性——QT 因果性分析(I)	278
25.4	塌缩—关联塌缩不是因果关联?——QT 因果性分析(II)	279
25.5	Feynman 公设路径分析——QT 因果性分析(III)	282

25.6	QT 的因果观——QT 因果性分析(IV)	284
[第 26 讲] 量子态 Teleportation		
——首次实验、评论、三代 Teleportation		
26.1	Quantum-Teleportation 方案——第一代量子态超空间传送	288
26.2	对首次实验的评论与改进	292
26.3	Quantum-Swapping——量子纠缠的超空间制造——第二代量子态超空间传送	293
26.4	Open-Destination Teleportation——第三代量子态超空间传送	294
26.5	量子态超空间传送的普遍理论方案	295
26.6	量子态超空间传送的奇异性质	297
[第 27 讲] 广义量子擦洗		
——恢复与建立相干性技术		
27.1	前言	298
27.2	不确定性原理和波包交叠——单粒子态的量子擦洗	299
27.3	正交再分解——单粒子不同组分态的量子擦洗	299
27.4	GHJW 定理——混态纠缠纯化与广义量子擦洗	300
27.5	Swapping——遥控相干性恢复技术	306
27.6	全同性原理应用——全同多粒子态的相干性恢复技术	306
[第 28 讲] 论波粒二象性		
——“大道归一,返璞归真”		
28.1	波粒二象性是微观粒子最基本的内禀性质	308
28.2	此禀性是不确定性关系的物理根源	309
28.3	此禀性是全同性原理的物理根源	311
28.4	此禀性是保证二次量子化成功的充要条件	315
28.5	此禀性是路径积分公设的物理基础	316
28.6	此禀性必定导致 QT 的空间非定域性	316
28.7	此禀性必定导致 QT 的纠缠叠加与或然性	317
附录 A 证明: $a/\hbar \rightarrow \infty$ 时 Landau 结果趋近于 Pauli 结果		318
附录 B 科学、物理学、量子力学(提纲)		319
B.1	前言	319
B.2	西方近代科学	319
B.3	科学中的物理学	322

B. 4 物理学中的量子力学	323
附录 C 量子物理百年回顾	327
附录 D Einstein 的有神论与宗教观	335
附录 E S. Weinberg《终极理论之梦》(节录)	337
附录 F 盲人摸大象图	339
The Blind Men and the Quantum Mechanics	

第 1 讲

广义 Young 氏双缝实验

——“量子力学的核心”

- 1.1 令人为难的 Young 氏双缝实验讲述
- 1.2 Young 氏双缝实验讲述中经常出现的错误
- 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 大强度电子束入射的 Young 氏双缝实验
- 1.7 分析与结论

1.1 令人为难的 Young 氏双缝实验讲述

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。因为，它表面浅显易懂，其实深邃难以捉摸，难于理解和表述；它很容易利用程差简单说明，但又难以精确求解 Schrödinger 方程，以得到强度分布；它出现在所有量子力学教材中，是众所周知的基础性实验，却又常常被人们忽略了它许多重要和必要的侧面；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。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**。它确实是理解量子力学本质的关键。如果说量子力学是位美女，Young 氏双缝实验就是这位美女捉摸不透的心！

实验中，被接收屏上某点探测器接收到的电子是由电子枪发射出来，并穿过双缝屏到达的。那么，这些电子究竟是怎样穿过双缝的呢？

这是一个令人难以回答的问题。不算没穿过去的情况，不外乎三种答案：随机地从上缝穿过去，随机地从下缝穿过去，从两缝同时穿过去。三种答案都难以想通和选定。

要是回答：“每个电子都是（随机地）从两条缝之一穿过”，即“确定，但不确知”，那么肯定不能产生双缝干涉条纹。这导致否定 Young 氏双缝干涉实验现象，人们不敢如此回答。

要是回答“每个电子都是从两条缝同时穿过的”，这样，产生双缝干涉条纹是没有问题了，但电子被分成了两半，可是谁也没有看到过半个电子。人们不愿意这样回答。



(此图来自 Charles Addams, *The New Yorker* (1940))

1.2 Young 氏双缝实验讲述中经常出现的错误

1. 各种错误的回答

经典观念牢固：电子不是孙悟空，只能从两缝之一穿过去。

承认没有想清楚：这是个两难回答的问题——回答困难。

绕过去不回答：缝屏前的人射电子消失了，在缝后接收屏上某处电子被探测到了。

本质上是经典观念：电子客观上是在空间某处，只是我们不知道。一旦知道了，状态就会改变。

用经典观念来概括：(客观上)是确定的，但(我们)不确知。

直截了当拒绝回答：这是个科学之外的问题。

还是直截了当地拒绝回答：不必问电子是怎样穿过双缝的，因为那是哲学的东西。我们是研究物理规律的。

平庸的错误：一束电子集体构成一个波束，这个波束同时穿过双缝，形成干涉花样。这实质是主张：电子的波动性只是电子集体的相干性行为，不承认单个电子有内禀的波动性质。

引人遐想的错误：电子是漂浮在波函数海面上的一艘船，它往哪走由海流引导，一旦被发现，则是这艘船的完整的本身。

有的书似是而非地否定：说电子从两条缝同时穿过去是不对的。因为，这和电子是个局域性的东西相矛盾。何况，从来没人看到过从两条缝同时穿过去的实验现象。似乎有理的否定：又说电子从两条缝同时穿过去，又不能真正明白地测量发现这件事。这是违背科