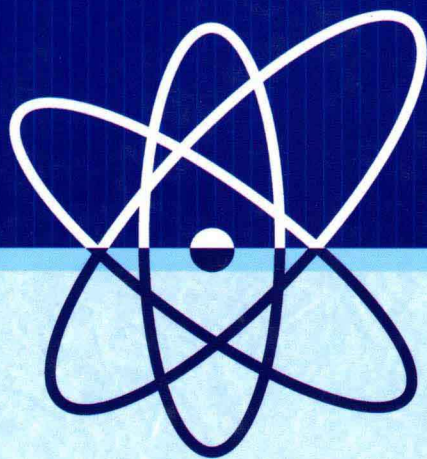


现代物理学丛书



量子力学 卷I

(第五版)

曾谨言 著

 科学出版社

现代物理学丛书

量子力学

卷 I

(第五版)

曾谨言 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者根据多年在北京大学物理系和清华大学物理系(基础科学班)教学与科研工作的经验而写成,20世纪80年代初出版以来,深受读者欢迎。物理有关专业本科生、研究生和出国留学学生几乎人手一册。本书还在台湾以繁体字出版发行,广泛流传于华裔读者中。作为《现代物理学丛书》之一,本书是其中仍在出版发行的唯一的一部学术著作,每年都重印发行。本书先后做了几次修订,现在出版的是第五版。本书第二版(1990)做了大幅度修订与增补,分两卷出版。卷Ⅰ可作为本科生教材或主要参考书,卷Ⅱ则作为研究生的教学参考书。本书也是物理学工作者的一本有用的参考书。

卷Ⅰ内容包括:量子力学的诞生、波函数与 Schrödinger 方程、一维定态问题、力学量用算符表达、力学量随时间的演化与对称性、中心力场、粒子在电磁场中的运动、表象变换与量子力学的矩阵形式、自旋、力学量本征值的代数解法、束缚定态微扰论、量子跃迁、散射理论、其他近似方法。为帮助读者更深入掌握有关内容,书中安排了适当的例题、练习题和思考题。每一章还选入了适量的习题,供读者选用。

图书在版编目(CIP)数据

量子力学. 卷Ⅰ/曾谨言著. —5版. —北京:科学出版社,2013.10
(现代物理学丛书)

ISBN 978-7-03-038722-6

I. ①量… II. ①曾… III. ①量子力学 IV. ①O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 229960 号

责任编辑:窦京涛/责任校对:胡小洁

责任印制:钱玉芬/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1981年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2013年10月第 五 版 印张:36 1/2

2013年10月第十九次印刷 字数:669 000

印数:55 751—59 250

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第五版序言

——纪念 Bohr “伟大的三部曲”发表一百周年，
暨北京大学物理学科建立一百周年

(一) 它山之石，可以攻玉

2013 年，迎来了北京大学物理专业建系一百周年纪念。一个偶然，但很愉快的巧合，同时迎来了 N. Bohr “伟大的三部曲” (The Great Trilogy)^① 发表一百周年。此文敲开了原子结构量子理论的大门。之后的十几年中，在 Bohr 思想的影响下，经一批杰出物理学家的共同努力，使当时还比较落后的欧洲小国丹麦首都 Copenhagen 的 Bohr 研究所，成为世界公认的量子物理学研究中心。在北京大学建设世界第一流的物理学科院所之际，《玻尔研究所的早年岁月，1921—1930》^② 一书所讲述的经验很值得借鉴。“它山之石，可以攻玉”^③。按照我的理解，这些宝贵经验是：

(1) 科学进步本身有赖于鼓励不同思想的自由交流，也有赖于鼓励不同国家的科学家提出的各具特色的研究方法的相互切磋与密切合作^④ (p. 127)。Bohr 的原子结构的量子理论就汇合了当时物理学两支主要潮流。一是以英国人 E. Rutherford 和 J. J. Thomson 为先驱的有关物质结构的实验发现，另一是德国物理学家 M. Planck 和 A. Einstein 引导的关于自然规律的理论研究^⑤ (p. 61)。表征 Bohr 研究所初期特色的不是一张给人深刻印象的庞大的物理学家名单，而是存在于这个集体中的不寻常的合作精神。不断地讨论和自由交换思想，给每个物理学家带来了最美好的东西，常常提供了一个能引起决定性突破的灵感或源泉。Bohr 不是一个人孤独地工作，把世界上最活跃的，最有天赋和最有远见的物理学家集聚在他的周围是他最大力量所在。矩阵力学的奠基人 Heisenberg 说过：“Science is rooted in conversation”^⑥ (p. 134)。对量子力学和相对论量子力学做出

① N. Bohr, *Philosophical Magazine*, **26** (1913), *On the Constitution of Atoms and Molecules*, 1-25, 471-502, 857-875.

② 《玻尔研究所的早年岁月，1921-1930》，杨福家，卓益忠，曾谨言译，[北京，科学出版社，1985]。译自 P. Robertson, *The Early Years, The Niels Bohr Institute, 1921—1930*. AkademiskForlag, 1979.

③ 《诗经·小雅，鹤鸣》。

了杰出贡献的 Dirac 在获得 Nobel 物理学奖后给 Bohr 的信中提到：“我感到我所有最深刻的思想，都受了我和你谈话的巨大而有益的影响，它超过了与其他任何人的谈话，即使这种影响并不表现在我的著作中，它却支配着我进行研究的一切打算和计划”^③ (p. 153)。Bohr 相信，国际合作能在物理学发展中发挥积极的作用。在 20 世纪 20 年代，Bohr 研究所已成了培育世界各国物理实验室和研究所的未来指挥员的一个苗圃^④ (p. 155)。

(2) 相对论与量子力学是 20 世纪物理学的两个划时代的贡献。A. Einstein 的名字被神话般地在人群中流传，可能是因为相对论主要是由他一人完成。与此不同，量子力学的建立是如此困难和复杂，不可能由一个人独立完成。在此艰辛的征途上，闪烁着当时最优秀的一群科学家的名字：M. Planck, A. Einstein, N. Bohr, W. Heisenberg, W. Pauli, L. de Broglie, E. Schrödinger, M. Born, P. A. M. Dirac 等。值得注意的是，他们都是在青年时代 (≤ 45 岁) 对量子力学理论做出了杰出贡献，之后获得 Nobel 物理学奖。Bohr 研究所的一条重要经验是：不仅仅要依靠少数科学家的能力和才华，而是要不断吸收相当数量的年轻人，让他们熟悉科学研究的结果与方法。只有这样，才能在最大程度上不断提出新问题。新思想就会不断涌进科研工作中^⑤ (p. 32)。

(3) 进行理论性研究工作，必须每一时刻把理论的这个或那个结果与实验相比较，然后才能在各种可能性之间做出选择。这种工作方式表现在量子力学理论体系提出之前，Bohr 的原子的电子壳层结构理论对于化学元素周期律的唯象探索工作中。尔后，Pauli 的第 4 个量子数和不相容原理的提出，也深受其影响。“Bohr 的巨大力量之一在于他总是凭借神奇的直观就能了解物理现象，而不是形式地从数学上去推导出同样的结果”^⑥ (p. 116)。同样，实验研究工作者必须与理论研究密切结合，这样可以减少实验工作的盲目性^⑦ (p. 15)。实验结果永远是检验一个自然科学理论正确与否的决定性的判据。

(二) 量子论是科学史中经过最准确检验的和最成功的理论

量子论诞生 100 周年之际，物理学界的主流认为：“量子论是科学史中经过最准确检验的最成功的理论”^⑧。量子力学理论在微观领域（原子与分子结构，原子核结构，粒子物理等），物质的基本属性（导电性，导热性，磁性等），以及天体物理，宇宙论等众多宏观领域都取得了令人惊叹的成果。但由于量子力学的基本原理和概念与人们日常生活经验是如此格格不入，人们对它的疑虑和困惑长

① D. Kleppner & R. Jackiw, *Science* **289** (2000) 893; A. Zeilinger, *Nature* **408** (2000) 639; M. Tegmark & J. A. Wheeler, *Scientific American* **284** (2001) 68.

期存在. J. A. Wheeler 把量子力学原理比作“Merlin principle”^⑤. (Merlin 是传说中的一个魔术师, 他可以随追逐者而不断变化, 让追逐者感到困惑). 回忆量子理论的一百多年的进展历史, 真是光怪陆离. 忽而柳花明, 忽而又迷雾重重. N. Bohr 曾经说过: “Anyone who was not shocked by quantum theory has not understood it”. R. P. Feynman^⑥ 也说过: “I think I can safely say that nobody today understands quantum mechanics.”

20 世纪伊始, Planck 和 Einstein 以及 Bohr 的辐射(光)和实物粒子的能量的量子化所展示的离散性(discreteness)与经典物理量的连续性(continuity)的概念格格不入. 1927 年 Heisenberg^⑦ 的不确定性原理(uncertainty principle)动摇了经典力学中用相空间(正则坐标和正则动量空间)描述粒子运动状态的概念. 1935 年, EPR 佯谬^⑧文章对量子力学正统理论的完备性提出质疑 [主要涉及波函数的几率诠释和量子态的叠加原理所展示的“非局域性”(non-locality)]. 同年稍早, Schrödinger 猫态佯谬^⑨提出的“纠缠”(entanglement), 对量子力学正统理论是否适用于宏观世界提出质疑. 在尔后长达几十年时期中, EPR 佯谬与 Schrödinger 猫态佯谬一直成为人们争论的课题. 但迄今所有实验观测都与基于局域实在论(local realism)而建立起来 Bell 不等式(CHSH 不等式)矛盾, 而与量子力学的预期一致^⑩. 量子非局域性在 R. P. Feynman 提出的“路径积分”(path-integral)理论中, 特别是在 AB(Aharonov-Bohm)效应中, 表现得特别明显^⑪. 例如, 电子经过一个无磁通的空间中的轨迹, 依赖于此空间以外的磁场. 此外, 迄今人们所知的所有基本相互作用, 与 AB 效应一样, 都具有规范不变性.

尽管量子力学理论的所有预期(predictions)已为迄今所有实验观测所证实, 人们对其实用性已经没有什么怀疑. 但仍然有人对量子力学理论的正统理论(Copenhagen 诠释)提出非议, 认为它是“来自北方的迷雾”(the fog from the north)^⑫. 特别是对于电子的双缝干涉实验的诠释, Feynman^⑬ 认为是“量子力学中核心的问题”. 在此干涉实验中, 人们不知道电子是经过哪一条缝而到达干涉屏上的, 而一旦人们能确定电子是经过哪一条缝 (例如紧靠一条缝放置一个适

⑤ S. Popescu & D. Rohrlich, *Foundations of Physics*, **24** (1994) 379.

⑥ T. Hey & P. Walters, *The New Quantum Universe*. Cambridge University Press, 2003, page xi. 中文译本, 雷奕安译, 新量子世界, 湖南科技出版社, 2005.

⑦ W. Heisenberg, *Zeit. Physik* **43** (1927) 172; 英译本见 *Quantum Theory and Measurement*, J. A. Wheeler & W. H. Zurek 主编, Princeton University Press, NJ, 1984, p. 62.

⑧ A. Einstein, B. Podolsky, & N. Rosen, *Phys. Rev.* **47** (1935) 777.

⑨ E. Schrödinger, *Naturwissenschaften*, **23** (1935) 807.

⑩ A. Aspect, *Nature* **398** (1999) 189; S. Gröblacher, et al., *Nature* **446** (2007) 871.

⑪ M. Schlosshauer, *Nature* **453**(2008) 39.

⑫ *The Feynman Lectures of Physics*, vol. 3, *Quantum Mechanics*, Addison-Wesley, Reading.

当的测量电子位置的仪器), 干涉条纹就立刻消失. Copenhagen 诠释认为: 这是由于**测量仪器的不可避免的干扰**(“unavoidable measurement disturbance”)所致. 近期 Dürr 等^⑬在原子干涉仪上做了一个“**测定路径的实验**”(which-way experiment), 即用一束冷原子对光驻波(standing waves of light)的衍射, 可观测到对比度很高的衍射花样. 在此实验中未用到双缝, 也不必测定原子的位置, 而是用原子的内部态来标记原子束的不同的路径. 此时, 衍射花样立即消失. 在此实验中, “the ‘back action’ of path detection is too small (about four orders of magnitude than the fringe separation) to explain the disappearance of the interference pattern”. 他们认为不必借助于测量仪器的不可控制的干扰来说明此现象. 他们提出另一种看法: 即用 “correlations between the which-way detector and the atomic motion”, 即用“**纠缠**”(entanglement)来说明. P. Knight^⑭指出:

“Entanglement is a peculiar but basic feature of quantum mechanics. Individual quantum-mechanical entities need have no well-defined state; they may instead be involved in collective, correlated (‘entangled’) state with other entities, where only the entire superposition carries information. Entanglement may apply to a set of particles, or to two or more properties of a single particle”.

(三) 如何理解不确定度关系的表述

近期, 在文献中有不少涉及不确定度关系的评论. 在量子力学教材中, **不确定度关系**(uncertainty relation)通常表述如下: 对于任意两个可观测量 A 和 B ,

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{1}{2} |\langle [A, B] \rangle| \quad (1)$$

上式中, $[A, B] \equiv (AB - BA)$, $\Delta A = \sqrt{\langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2}$ 与 $\Delta B = \sqrt{\langle B^2 \rangle - \langle B \rangle^2}$ 是标准偏差, $\langle A \rangle = \langle \psi | A | \psi \rangle$ 与 $\langle B \rangle = \langle \psi | B | \psi \rangle$ 是可观测量 A 和 B 在量子态 $|\psi\rangle$ 下的平均值. 不确定度关系(1)首先由 Robertson^⑮, Kennard^⑯ 和 Weyl^⑰ 给出. 在量子力学教材中, 不确定度关系(1)是基于波函数的统计诠释和 Schwartz 不等式得出的. 它的确切含义是: 对于完全相同制备的大量量子态(即系综), 可观测量 A

⑬ S. Dürr, T. Nonn & G. Rempe, Nature **395** (1998) 33.

⑭ P. Knight, Nature **395** (1998) 12.

⑮ H. P. Robertson, Phys. Rev. **34** (1929) 163.

⑯ E. H. Kennard, Zeit. Phys. **44** (1927) 326.

⑰ H. Weyl, *Gruppentheorie und quantenmechanik*, Hirzel, Leipzig, 1928.

和 B 的独立测值的标准误差的乘积受到的限制^⑮。不确定度关系并不涉及一个测量的精度与干扰，而是给定的量子态 $|\psi\rangle$ 本身的不确定度所固有的，不依赖于任何特定的测量^⑯，并已经在许多实验中得到证实^⑰，是没有争议的。但不确定度关系(1)常常被误解为：对于给定的量子态 $|\psi\rangle$ ，如果 $\langle\psi|[B, A]|\psi\rangle \neq 0$ ，则人们不能对 A 和 B 联合地(jointly) [或相继地(successively)]进行测量^⑱。关于不确定度关系含义的更全面的讨论，可参见 p. 39 中的注。

不确定度关系的物理内涵就理解为**不确定性原理**(uncertainty principle)。例如，对于一个粒子的坐标和动量， $A=x$ ， $B=p_x$ ， $C=\hbar$ ，是一个非 0 的常量，因此，一个粒子同一时刻的坐标和动量不可能具有完全确定的值；或者说，一个粒子的坐标和动量不可能具有共同本征态。

Schrödinger 很早还指出^⑲，与不确定度关系(1)的平方相应的表示式的右侧，还应加上一项正定的协变项

$$(\Delta A)^2(\Delta B)^2 \geq \left| \frac{1}{2} \langle\psi|AB - BA|\psi\rangle \right|^2 + \frac{1}{4} [\langle\psi|AB + BA|\psi\rangle - 4\langle\psi|A|\psi\rangle\langle\psi|B|\psi\rangle]^2 \quad (2)$$

在一般情况下，不确定度关系式(1)给出的 $(\Delta A)^2(\Delta B)^2$ 小于 Schrödinger 给出的式(2)。

应该指出，Heisenberg 原来讨论的是**测量误差-干扰关系**(measurement error-disturbance relation)^⑳

$$\epsilon(A)\eta(B) \geq \frac{1}{2} |\langle[A, B]\rangle| \quad (3)$$

其中 $\epsilon(A)$ 是可观测量 A 的测量误差， $\eta(B)$ 反映可观测量 B 受到的测量仪器的干扰(包括反冲等)。我国老一辈物理学家王竹溪先生把 Heisenberg 原来讨论的关系译为**测不准关系**，是有根据的。文献^㉑已指出，测量误差-干扰关系(3)形式上不完全正确的。后来，Ozawa^㉒证明，测量误差-干扰关系(3)应该修订为

$$\epsilon(A)\eta(B) + \epsilon(A)\Delta B + \eta(B)\Delta A \geq \frac{1}{2} |\langle[A, B]\rangle| \quad (4)$$

⑮ C. Branciard, PNAS **110** (2013) 6742–6727.

⑯ L. A. Rozema, A. Darabi, D. H. Mahler, A. Hayat, Y. Soudagar, and A. M. Steinberg, Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 100404.

⑰ O. Nairz, M. Arndt, & A. Zeilinger, Phys. Rev. **A65** (2002) 032109，以及所引文献。

⑱ E. Schrödinger, Sitz. Preuss. Akad. Wiss. **14** (1930) 296–303；英译本见 arXiv：quant-ph 9903100 v2 15 Jun 2000.

⑲ L. EBallentine, Rev. Mod. Phys. **42** (1970) 358.

⑳ M. Ozawa, Phys. Rev. **A67** (2003) 042105；Phys. Lett. **A320** (2004) 367.

近期，文献^{39④}给出了 Ozawa 测量误差-干扰关系(4)的借助于所谓弱测量 (weak measurement) 的实验验证. 由此，引发了涉及不确定性原理的很多议论. 有人认为，应该把有关内容写进量子力学教材中去，而有人对于 Ozawa 的测量误差-干扰关系持不同的观点^⑤. 最近，C. Branciard³⁸提出了另外一个关系式，他称之为对于近似联合测量 (approximate joint-measurement) 的 error-tradeoff relation

$$\Delta B^2 \epsilon_A^2 + \Delta A^2 \epsilon_B^2 + 2 \sqrt{\Delta A^2 \Delta B^2 - \frac{1}{4} C_{AB}^2 \epsilon_A \epsilon_B} \geq \frac{1}{4} C_{AB}^2 \quad (5)$$

(5) 式中 ΔA 与 ΔB 是标准偏差， ϵ_A 与 ϵ_B 是测量误差的方均根偏差， $C=i\langle[B,A]\rangle$.

在经典力学中，一个粒子在同一时刻的坐标和动量可以精确确定，粒子的运动状态用相空间(正则坐标与正则动量空间)中的一个点来描述. 对于给定 Hamilton 量的体系，其运动状态随时间的演化，由它在相空间的初始点位置和正则方程完全确定，这就是经典力学中的决定论.

在量子力学中，基于 Heisenberg 不确定性原理，一个粒子的同一时刻的坐标和动量不具有确定值. 表现在量子态只能用 Hilbert 空间中的一个矢量 $|\psi(t)\rangle$ 来描述. 而对于给定 Hamilton 量的体系，量子态随时间的演化由它的初始量子态 $|\psi(0)\rangle$ 和 Schrödinger 方程完全确定. Heisenberg 不确定性原理的提出，是科学史中的一个重大发现. 不确定性原理展现出量子力学中的非决定性(indeterminacy)与经典力学中的决定论(determinism)形成截然反差，它标志量子力学理论与经典力学理论的本质的差异.

我们认为，测量误差-干扰关系(测不准关系)与不确定度关系的含义不同，不可混为一谈. 更不可把测量误差-干扰关系与不确定度原理混为一谈. 测量误差-干扰关系的修订，不会动摇 Heisenberg 不确定性原理的普适性和量子力学理论的基础.

(四) 纠缠的确切含义与纠缠态的 CSCO 判据

现今人们已经普遍认同，1935 年 Schrödinger 提出的纠缠，是一个非常基本但又很奇特的概念¹⁴. 不确定度关系与纠缠之间的密切关系，值得人们注意^⑥. 关键点是要搞清量子纠缠的确切含义.

对于一个量子纯态的纠缠，一种看法是：“与波动-粒子二象性属于单粒子性

④ J. Erhart, S. Sponar, G. Sulyok, G. Badurek, M. Ozawa and Y. Hasegawa, Nature Physics **8** (2012) 185.

⑤ R. Cowen, Nature **498** (2013) 419, 以及所引文献.

⑥ M. Q. Ruan & J. Y. Zeng, Chin. Phys. Lett. **20** (2003) 1420.

质相反, 量子纠缠至少涉及两个粒子^{②7}。另一种看法是: 纠缠并不一定涉及两个粒子, 而只涉及不同自由度的(至少)两个彼此对易的可观测量。这一点在 P. Knight 的文献^{②8}中已提及。在 V. Vedral^{②9} 文中更明确提到:

“What exactly is entanglement? After all is said and done, it takes (at least) two to tangle, although *these two need not be particles*. To study entanglement, two or more subsystems need to be identified, together with the appropriate degrees of freedom that might be entangled. These subsystems are technically known as modes. Most formally, *entanglement is the degree of correlation between observables (pertaining to different modes)* that exceeds any correlation allowed by the laws of classical physics.”

只涉及单个粒子的不同自由度的两个对易的可观测量的纠缠纯态的实验制备, 已经在很多实验室中完成。例如, 在 Dürr 等^{③0}的实验中, 制备了一个原子的质心动量与它的内部电子态的纠缠纯态。在 C. Monroe 等^{③1}实验中, 实现了在 Paul 阱中的一个⁹Be⁺离子的内部态(电子激发态)与其质心运动(即离子的空间运动)的纠缠纯态。在文献^{③2}中, 分析了一个自旋 $\hbar/2$ 为的粒子的自旋与其路径的纠缠态。

对于一个给定的量子纯态的纠缠问题, 已经有很多的理论工作, 但问题似未得到很好解决。下面给出一个纯态的纠缠判据。

一般而言, 量子纠缠涉及不同自由度的至少两个可对易可观测量。为确切起见, 谈及一个纠缠纯态, 必须指明, 它是什么样的两个(多个)对易的可观测量的共同测量之间的关联^{③3}。例如, 可对易的两个可观测量 A 和 B 的纠缠纯态, 有如下两个特点^{③4}:

- (a) 测量之前, A 和 B 都不具有确定的值(即不是 A 和 B 的共同本征态)。
- (b) A 和 B 的共同测量值之间有确切的关联(概率性的)。

我们注意到, 按照不确定度关系, 一般说来, 在同一时刻, 不对易的可观测量不能同时具有确定值, 或者说, 它们不能具有共同本征态^{③5}。不确定度关系本身, 不明显涉及自由度的问题。如果两个可观测量属于不同自由度, 则彼此一定对易, 因而不涉及不确定度关系。而纠缠则是涉及不同自由度的两个或多个可观

②7 A. Aspect, Nature **446** (2007) 866.

②8 V. Vedral, Nature **453** (2008) 1004.

②9 C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King, D. J. Wineland, Science **272** (1996) 1131.

③0 T. Pramanik, et al., Phys. Lett. **A374** (2010) 1121.

③1 A. Mair, A. Vaziri, G. Weihs & A. Zeilinger, Nature **412** (2001) 313.

③2 J. Y. Zeng, Y. A. Lei, S. Y. Pei & X. C. Zeng, arXiv: 1306.3325(2013).

测量(彼此一定对易)的共同测量值之间的关联。所以,量子纠缠与不确定度关系应该有一定的关系。但在此,一定会涉及多自由度体系。

一个多自由度或多粒子体系的量子态,需要用一组对易可观测量完全集(CSCO)的共同本征态来完全确定^③,而一组对易可观测量原则上是可以共同测定的。在实验上,相当于进行一组完备可观测量的测量,用以完全确定体系的一个量子态。一组对易的可观测量完全集的共同本征态,张开体系的 Hilbert 空间的一组完备基,体系的任何一个量子态都可以用这一组完备基来展开。

设 $(A_1, A_2, \dots)$ 构成体系的一组 CSCO,其共同本征态记为 $\{|A'_1, A'_2, \dots\rangle\}$,同样,设 $(B_1, B_2, \dots)$ 构成体系的另一组 CSCO,其共同本征态记为 $\{|B'_1, B'_2, \dots\rangle\}$,定义厄米对易式矩阵 $C=C^+$,其矩阵元素为 $C_{\alpha\beta}\equiv i[B_\beta, A_\alpha]$ 用以描述 $(A_1, A_2, \dots)$ 中的任何一个可观测量与 $(B_1, B_2, \dots)$ 中任何一个可观测量的对易关系。与不确定度关系相似, A_α 与 B_β 也满足与不确定度关系相似的关系,

$$\Delta A_\alpha \Delta B_\beta \geq \frac{1}{2} |\langle [A_\alpha, B_\beta] \rangle| = \frac{1}{2} |C_{\alpha\beta}| \quad (6)$$

下面考虑,在 CSCO $(A_1, A_2, \dots)$ 的某一个给定的共同本征态下,彼此对易的各可观测量 $(B_1, B_2, \dots)$ 的共同测量值之间的关联。以下给出一个纯态的纠缠判据:[证明见本书卷 II, 3.4.3 节]

(a) 设矩阵 C 的每一行 $i(i=1, 2, \dots)$,至少有一个矩阵元素 C_{ij} 不为 0, [即每一行 i 的所有元素 $C_{ij}(j=1, 2, \dots)$,不完全为 0].

(b) 对于所有 $\{|\psi\rangle=|A'_1, A'_2, \dots\rangle\}, \langle\psi|C|\psi\rangle$ 不完全为 0.

如以上两个条件都满足,则在量子态 $\{|\psi\rangle=|A'_1, A'_2, \dots\rangle\}$ 态下,对 $(B_1, B_2, \dots)$ 进行完备测量时,它们的测量值是彼此关联的(几率性),即 $\{|\psi\rangle=|A'_1, A'_2, \dots\rangle\}$ 是 $(B_1, B_2, \dots)$ 的纠缠态。

如果只有条件(a)满足,而条件(b)不满足,则不能判定所有量子态 $\{|\psi\rangle=|A'_1, A'_2, \dots\rangle\}$ 都是,或都不是, $(B_1, B_2, \dots)$ 的纠缠态。

可以看出,上述量子纯态的纠缠判据与不确定度关系,在结构上有相似之处。读者不难从一些常见的纠缠纯态来进行验证(参见卷 II, 3.4 节)。

(五) 量子力学理论与广义相对论的协调

在纪念量子论诞生一百周年之际,Amelino-Camelia^④提及:量子理论与相对论是 20 世纪物理学的最成功的两个理论。广义相对论是一个纯经典的理论,它描述的空间-时间的几何是连续和光滑的,而量子力学描述的物理量一般是分立

^③ P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, 4th ed, 1958, Oxford University Press, 或见本书 4.3.4 节。

^④ G. Amelino-Camelia, *Nature* **408** (2000) 661; **448** (2007) 257.

的。这两个理论是不相容的，但都在各自的不同的领域取得巨大成功（“大爆炸”现象除外）。量子力学成功地说明了微观世界以及一定条件下的一些宏观现象的规律，而广义相对论成功说明了宇观领域的一些现象。把相对论与量子理论结合起来，是人们必须克服的一个巨大障碍，而在解决两者冲突的过程中可能诞生新的物理学规律。

关于纠缠和非局域关联，N. Gisin^⑤ 谈道：“在现代量子物理学中，纠缠是根本的，而空间是无关紧要的，至少在量子信息论中是如此，空间并不占据一个中心位置，而时间只不过是标记分立的时钟参量。而在相对论中，空间-时间是基本的，谈不上非局域关联。”

涉及纠缠和非局域关联的近期工作，应提及 Schrödinger 的操控（steering）^⑥ 以及信息因果性（information causality）^⑦。操控是一种新的量子非局域性形式，它介于纠缠与非局域性之间。信息因果性作为一个原理，它对于能够进行传递的信息总量给出了一个限制。特别应该提到 J. Oppenheim & S. Wehner^⑧ 的不确定性原理与非局域性的密切关系的工作。该文提到：

“量子力学的两个核心概念是 Heisenberg 不确定性原理与 Einstein 称之为‘离奇的超距作用’的一种奇妙的非局域性。迄今，这两个基本特性被视为不同的概念。我们指出，两者无法分割，并定量地联系在一起。量子力学的非局域性不能超越不确定性原理的限制。事实上，对于所有物理理论，不确定性与非局域性的联系都存在。更特别提及，任何理论中的非局域度（degree of non-locality）由两个因素决定：不确定性原理的力度和操控的力度，后者决定在某一个地点制备出来的量子态中，哪些量子态可以在另一个地点被制备出来”。

与任何一个自然科学理论一样，量子力学是在不断发展中的一门学科，而且充满争议。从更积极的角度来看过去长时期有关量子力学理论的争论，C. Teche^⑨ 说：

“The paradoxes of the past are about to the technology of the future.”

的确，在过去的 20 多年中，量子信息理论和技术，量子态工程，纳米材料学科等领域都有了长足的进展。

在 20 世纪即将结束之际，P. Davis 写道^⑩：

“The 19th century was known the *machine age*, the twentieth century will go down in history as the *information age*. I believe that the twenty-first century will be the *quantum age*.”

⑤ N. Gisin, Science **326** (2009) 1357.

⑥ N. Brunner, Science **326** (2010) 842, 以及所引文献.

⑦ M. Păntowski, et al., Nature **466** (2003) 1101; S. Popescu & D. Rohrlich, Foundations of Physics **24** (1994) 379.

⑧ J. Oppenheim & S. Wehner, Science **330** (2010) 1072.

对此，有人持不同看法，认为 21 世纪将是生物学和医学的时代。作者认为，这两种说法都有一定道理。不同学科领域的进展是互相影响和互相渗透的。显然，如果没有物理学的进展，例如，光谱学、显微镜、X 射线与核磁共振等技术，现代生物学和医学的进展就难以理解。物理学研究的是自然界最基本的，但相对说来又是比较简单的规律。生物学与医学的规律要复杂得多，它的发展与化学和物理学等学科的进展密切相关。可以期望，在 21 世纪，这些领域都可能会有出乎我们意料之外的进展。

*

*

*

作为《现代物理学丛书》之一，本书从 1981 年出版以来，受到广大读者的欢迎和同行专家的肯定。考虑到量子力学近期的进展，本书曾经几次再版，并且每年都大量重印。多年以来，本书的繁体字版本还在台湾大量发行。三十多年过去了，本书是《现代物理学丛书》中至今仍在发行的唯一著作。本书的历届责任编辑：陈菊华、张邦固、昌盛、贾杨、窦京涛的长年细致工作，保证了本书出版的高质量。裴寿镛教授对本书第五版的修订提了很多宝贵建议。作者在此表示感谢。欢迎广大读者和同行教师对本书提出宝贵的修改意见，以便再版时进行修改。

作者于北京大学

2013 年 8 月

第四版 (2007 年) 序言 (摘录)

量子论的提出, 已经历一百多年. 量子力学的建立已有 80 年的历史. 简单介绍一下国际学术刊物的一些文献对量子力学的评价及有关实验结果, 对读者是有裨益的.

在纪念量子论诞生 100 周年之际, D. Kleppner & R. Jackiw 写道^①:

“Quantum theory is the most precisely tested and most successful theory in the history of science.”

尽管量子力学已经取得如此重大的成功, 由于量子力学的基本概念和原理 (波动-粒子二象性与波函数的统计诠释, 量子态叠加原理和测量问题, 不确定度关系等) 与人们日常生活经验严重抵触, 人们接受起来有很大难度. 正如 N. Bohr 所说:

“Anyone who is not shocked by quantum theory has not understood it.”

对待量子力学基本概念和原理的诠释, 一直存在持续的争论. 而大多数争论集中在著名的 EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) 佯谬^②和 Schrödinger 猫态佯谬^③两个问题^④.

对于 EPR 佯谬的争论, M. A. Rowe 等 (2001)^⑤ 做了如下表述:

“Local realism is the idea that objects have definite properties whether or not they are measured, and that measurements of these properties are not affected by events taking place sufficiently far away. Einstein, Podolsky and Rosen used those reasonable assumptions to conclude that quantum mechanics is incomplete.”

很长一段时间, 争论一直停留为纯理论性或思辨性的. 但^⑤

“Starting in 1965, Bell and others constructed mathematical inequalities whereby experiments tests could distinguish between quantum mecha-

① D. Kleppner and R. Jackiw, *Science***289**(2000)893.

② A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**(1935)777.

③ E. Schrödinger, *Naturwissenschaften***23**(1935)807-812, 823-828, 844-849; 英译文见, *Quantum Theory and Measurement*, ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek (Princeton University Press, NJ, 1983), p. 152~167.

④ A. J. Leggett, *Science***307**(2005)871.

⑤ M. A. Rowe, et al., *Nature***409**(2001)791.

ysics and local realistic theories. Many experiments have since been done that are consistent with quantum mechanics and inconsistent with local realism.”

Bell 不等式^{①②}所揭示的局域实在论 (local realism) 与量子力学的矛盾是统计性的. Bell 不等式是对 2 量子比特的自旋纠缠态 (自旋单态) 的分析得出的. Greenberger, Horne & Zeilinger 对 Bell 的工作做了推广^③, 他们分析了 $N (\geq 3)$ 量子比特的纠缠态 (GHZ 态), 发现量子力学对某些可观测量的确切预期 (perfect prediction) 结果与定域实在论是矛盾的^{④⑤}. 后来的实验观测结果与量子力学预期完全一致, 而与定域实在论尖锐矛盾^⑤. A. Zeilinger 在纪念量子论诞生 100 周年的文章^⑥中写道:

“All modern experiments confirm the quantum predictions with unprecedented precision. Evidence overwhelmingly suggests that a local realistic explanation of nature is not possible.”

Schrödinger 猫态佯谬一文提出了一个疑问, 即“量子力学对宏观世界是否适用?”这也涉及量子力学和经典力学的关系 [注意, 不可把“经典” (classical) 与“宏观” (macroscopic) 等同起来]. 近年来, 在特定的实验条件下, 已相继制备出介观尺度和宏观尺度的 Schrödinger “猫态”^{⑦⑧}. H. D. Zeh 和 W. H. Zurek^{⑨⑩⑪} 提出用退相干 (decoherence) 观点来描述微观世界到宏观世界的过渡. 他们认为^⑩:

“States of quantum systems evolve according to the deterministic, linear Schrödinger equation

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi\rangle = H |\psi\rangle$$

① S. J. Bell, *Physics* **1**(1964)195.

② J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony and R. A. Holt, *Phys. Rev. Lett.* **23**(1969)880.

③ D. M. Greenberger, M. A. Horne, A. Shimony, and A. Zeilinger, *Am. J. Phys.* **58**(1990) 1131.

④ N. D. Mermin, *Phys. Today*, June, 1990, p. 9~11.

⑤ J. W. Pan, D. Bouwmeester, M. Daniell, H. Weinfurter and A. Zeilinger, *Nature* **403**(2000)515.

⑥ A. Zeilinger, *Nature* **408**(2000)639.

⑦ C. Monroe, *et al.*, *Science* **272**(1996)1131.

⑧ C. H. Van der Wal, *et al.*, *Science* **290**(2001)773.

⑨ H. D. Zeh, *Found. Phys.* **1**(1970)69, W. H. Zurek, *Phys. Rev.* **D24**(1981)1516; **D26**(1982) 1862.

⑩ W. H. Zurek, *Phys. Today*, Oct. 1991, p. 36~44; *Rev. Mod. Phys.* **75** (2003)715.

⑪ D. Giulini, E. Joos, G. Kiefer, J. Kipsch, I. Stamatescu and H. D. Zeh, *Decoherence and Appearance of A Classical World in Quantum Theory*, Springer, Berlin, 1996.

That is, just as in classical mechanics, given the initial state of the system and its Hamiltonian H , one can compute the state at an arbitrary time. This deterministic evolution of $|\psi\rangle$ has been verified in carefully controlled experiments.”

同时他们又指出，由于实在的宏观物体不可避免与周围环境相互作用，从而导致相干性迅即消失。在一般情况下，不可能观测到宏观量子叠加态。对此，G. J. Myatt 等写道^①：

“The theory of mechanics applies to closed system. In such ideal situations, a single atom can, for example, exist simultaneously in a superposition of two different spatial locations. In contrast, real systems always interact with their environment, with the consequence that macroscopic quantum superpositions (as illustrated by the Schrödinger’s cat’ thought-experiment) are not observed.”

对于量子力学基本概念的持续多年的争论，R. Blatt (2000) 评论道^②：“The apparently strange predictions of quantum theory have led to the notion of ‘paradox’, which arises only when quantum systems are viewed with a classical eye.”

而 C. Tesche 认为^③：

“The paradoxes of the past are about to the technology of the future.”

人们看到，伴随这个长期的争论，一些新兴的学科领域，例如量子信息论（量子计算，量子远程传态，量子搜索，量子博弈等），量子态工程等，正方兴未艾。

当然，尽管量子力学已在如此广泛和众多领域取得极为辉煌的成功，19 世纪末物理学家的历史经验值得注意。量子力学是经过大量实验工作验证了的一门科学，它的正确性在人们实践所及领域内毋庸置疑。但量子力学并非绝对真理。量子力学并没有，也不可能关闭人们进一步认识自然界的道路。人们应记住 Feynman 的如下告诫：

“We should always keep in mind the possibility that quantum mechanics may fail, since it has certain difficulties with philosophical prejudices that we have about measurement and observation.”

此外，量子力学与广义相对论的矛盾，还未解决^④。关于量子力学的争论，或许

① G. J. Myatt, *et al.* Nature **403**(2000)269.

② R. Blatt, Nature **404**(2000)231.

③ C. Tesche, Science **290**(2001)720.

④ G. Amelino-Camelia, Nature **408**(2000)661.

是一个更深层次的有待探索的问题的一部分^①。正如中国古代伟大诗人屈原的《离骚》中所说：

“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。”

在进一步探索中，人们对于自然界中物质存在的形式和运动规律的认识，或许还有更根本性的变革。

作者于北京大学

2007 年 1 月

^① M. Tegmark and J. A. Wheeler, Scientific American **284**(2001)68.