

*Do deeper principles underlie quantum uncertainty and nonlocality?*

# 量子非局域、量子纠缠及其可能揭示的新物理

陈哲, 韩永建\*

中国科学技术大学, 中国科学院量子信息重点实验室, 合肥 230026

\* 联系人, E-mail: smhan@ustc.edu.cn

2016-01-26 收稿, 2016-02-02 修回, 2016-02-02 接受, 2016-03-03 网络版发表

中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)(KFJ-EW-ST5-074)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB03030100)、国家自然科学基金重大项目(41190081)和“第三极环境(TPE)”国际计划资助

**摘要** 爱因斯坦等人提出的EPR佯谬和Bell隐变量理论揭示了量子力学两个相互关联的重要特性: 非局域性和量子纠缠. 它们使得微观量子系统之间可以建立非局域的超越经典的关联. 非局域性和量子纠缠是量子力学最本质的特征. 这些性质的发现不仅为解决量子力学的基本问题提供了可能, 同时也揭示了量子力学不同于其他力学的根本所在, 为研究量子力学与经典力学、相对论之间的关系与融合提供了新的洞察. 量子非局域性和量子纠缠还提供了研究多体物理(新的拓扑相)的新工具.

**关键词** 量子非局域性, 量子纠缠, 量子测量

自建立伊始, 量子力学就以其难以置信的精度对微观世界(原子, 电子等)进行解释和预言, 并成为现代物理学的两大支柱之一(另一支柱是广义相对论). 尽管量子力学无论在理论还是应用上取得了巨大的成就, 然而对量子理论基础的不满和尝试建立微观新理论的努力都从未停止过.

人们对量子力学基础的不满, 很大程度上是来自于量子力学所表现出的与宏观世界完全不同的性质. 当量子力学中的“叠加性原理”(系统可以同时处在不同状态上)与宏观世界相结合时就会产生神奇的效果. 薛定谔(E. Schrödinger)在1935年提出了著名的“薛定谔猫”的思想实验就源自于此<sup>[1]</sup>. 实验中的猫(显然是一个宏观物体)与一个微观系统(比如原子)相互作用形成一个整体. 按量子力学的叠加原理, 这只猫就应该处于生与死的叠加状态上, 换言之, 这只猫既是活的, 又是死的. 这一结论严重违背了人们对宏观世界的认识.

另一个严重违背人们对宏观世界认识的量子力

学性质是首先被爱因斯坦、波多尔斯基和罗森在1935年发现的EPR佯谬<sup>[2]</sup>. 如果两个电子的自旋状态纠缠在一起<sup>[3]</sup>, 无论这两个电子被分离得多么远, 如果对其中一个电子进行了测量, 那么, 另一个电子的状态就会瞬间发生变化(称这种超越经典关联的现象为量子纠缠). 这种引起远距离电子状态发生变化的“作用”, 其传播的速度是可以超光速的, 爱因斯坦称之为“幽灵般的超距作用”(量子力学这种特有的“超距作用”已被实验证实). 这种超距作用与经典物理是相矛盾的. 据此爱因斯坦认为, 量子力学是不完备的. 需要指出的是, 这一“幽灵般的超距作用”并不能实现信息的超光速传播, 因而并不违背因果律.

由于对量子力学基础的不满, 人们期望能将量子力学建立在与经典力学相同的基础之上. 利用额外的隐变量来重构量子力学是从量子力学建立之初就开始的尝试. 这一尝试的目的是希望利用确定性的经典理论来消除量子理论中那些违背经典直觉的现象. 尽管, 一些隐变量理论(如波姆力学理论)的确

**引用格式:** 陈哲, 韩永建. 量子非局域、量子纠缠及其可能揭示的新物理. 科学通报, 2016, 61: 1072-1074

Chen Z, Han Y J. Quantum nonlocality, quantum entanglement and new physics (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1072-1074, doi: 10.1360/N972016-00123

可以再现量子力学所预言的所有已知结果,但这一理论中却包含了超越经典理论的非局域隐变量<sup>[4,5]</sup>.如果对隐变量加上局域的限制(这也是经典力学所要求的),Bell<sup>[6]</sup>的研究表明,这种模型可以通过实验检测所谓的Bell不等式来和量子力学区分开. Aspect<sup>[7]</sup>对Bell不等式进行了最初的实验检测,但这个检测是有漏洞的,无漏洞的实验<sup>[8]</sup>检测也在最近实现了,所有这些实验都无一例外地表明量子力学的确是而非局域的.这种非局域特性的发现,不仅揭示了微观世界的本质特征,而且也为研究者打开了一扇探索物理世界的新窗户,有可能发现全新的物理.

量子纠缠与非局域特性有着密切的联系, Bell首先指出纠缠态(Bell态)中的非局域关联无法在局域隐变量模型中被重构<sup>[6]</sup>. Bell不等式的违背表明量子系统间有超越经典的关联存在. 而且,进一步的研究表明,关联在量子力学框架下也是有上限的, CHSH不等式的量子上限是 $2\sqrt{2}$  (经典的上限是2)<sup>[9]</sup>. 更重要的是,这一量子力学的上限和因果律所限定的上限不一致,因果律所给出的上限是4<sup>[9]</sup>. 是什么样的原因使得量子力学的关联受到了限制? 是否可能增加新的公理来获得这样的限制? 这后面是否有新的物理? 一些新的尝试已被提出来,如信息因果<sup>[10]</sup>. 对这一问题的深入研究可能会给出更多量子力学基本的信息,结识一些还不了解的新物理.

量子纠缠在量子测量中也起着重要的作用. 根据哥本哈根解释,量子态在测量过程中会出现塌缩. 这一解释将测量仪器和待测的量子系统割裂成两个不同的系统并区别对待,如何在量子力学的统一框架下来解释这一过程? Zurek<sup>[11]</sup>就提出了测量仪器与待测量子系统纠缠,宏观仪器退相干来解释这一过

程. 退相干过程是解释宏观经典世界和量子世界之间界限的关键步骤. 发现新的退相干机制是发现新物理和夯实量子理论基础的关键所在. 新的退相干机制中,最引人瞩目的是引力导致的退相干机制<sup>[12]</sup>. 在这一机制中,引力在宏观物体的退相干中起着关键作用,让研究者看到了一丝构造量子力学和引力相容的物理理论的曙光.

最近的研究进一步表明,量子纠缠甚至有可能是引力几何化的基础. Raamsdonk<sup>[13]</sup>发现了边界模型中的量子纠缠与体宇宙模型中空间之间的关系,当边界模型中的纠缠趋于零时,空间将被割裂成很多小碎片. 而边界模型和体宇宙的描述是对偶的,两者描述应该等价. 由此可见,量子纠缠是形成体宇宙的基础. 更进一步, Maldacena和Susskind<sup>[14]</sup>还猜想爱因斯坦-罗森桥和两个黑洞纠缠是等价的,即:由爱因斯坦-罗森桥相连接的两个黑洞是相互纠缠的,反之,两个纠缠的黑洞之间都有爱因斯坦-罗森桥相连接. 如果这一猜想属实,不仅可以解决AMPS关于黑洞的佯谬<sup>[15]</sup>,还将极大地促进量子引力理论的发展.

量子纠缠还可能是发现和预言新物相的工具. Wen<sup>[16]</sup>认为量子纠缠特别是长程的量子纠缠是刻画拓扑量子态的关键. 利用量子态长程纠缠的不同形式可以将物理系统分成不同的相,这些相都对应于不同的拓扑性质. 利用这样的分类,研究者可以预言一些以前所不知道的量子相. 更进一步, Wen等人甚至认为,量子纠缠可能是基本粒子、引力等的起源.

由此可见,量子非局域性和量子纠缠,不仅隐藏着量子物理最本质的特性,也可能隐藏着统一引力与量子理论,时空起源的钥匙.

## 参考文献

- 1 Schrödinger E. Die gegenwärtige situation in der quantenmechanik. *Naturwissenschaften*, 1935, 23: 823–828
- 2 Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys Rev*, 1935, 47: 777–780
- 3 Bohm D. *Quantum Theory*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1951
- 4 Bohm D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “Hidden” variables I. *Phys Rev*, 1952, 85: 166–179
- 5 Bohm D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “Hidden” variables II. *Phys Rev*, 1952, 85: 180–193
- 6 Bell J S. *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. 196–200
- 7 Aspect A. Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell’s inequalities. *Phys Rev Lett*, 1982, 49: 91–94
- 8 Hensen B, Bernien H, Dreau A E, et al. Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometers. *Nature*, 2015, 526: 682–686

- 9 Popescu S. Nonlocality beyond quantum mechanics. *Nat Phys*, 2014, 10: 264–270
- 10 Marcin P, Tomasz P, Dagomir K, et al. Information causality as a physical principle. *Nature*, 2009, 461: 1101–1104
- 11 Zurek W H. Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Rev Mod Phys*, 2003, 75: 715–775
- 12 Bassi A, Ghirardi G C. Dynamical reduction models. *Phys Rep*, 2003, 379: 257–426
- 13 Raamsdonk M V. Building up spacetime with quantum entanglement. *Gen Rel Grav*, 2010, 42: 2323–2329
- 14 Maldacena J, Susskind L. Cool horizons for entangled black holes. *Fortschr Phys*, 2013, 61: 781–811
- 15 Almheiri A, Marolf D, Polchinski J, et al. Black holes: Complementarity or firewalls? *J High Energy Phys*, 2013, 2: 62
- 16 Wen X G. Topological order: From long-range entangled quantum matter to a unification of light and electrons. *Condens Matter Phys*, 2013, 2013: 198710

## Quantum nonlocality, quantum entanglement and new physics

CHEN Zhe & HAN YongJian

*Key Laboratory of Quantum Information, Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

EPR paradox proposed by A. Einstein and Bell's hidden variables theory discovered two related important characteristics of quantum mechanics: quantum nonlocality and quantum entanglement. These characteristics guarantee that two remotely separated particles can be prepared in quantum state with correlation beyond classical physics. Quantum nonlocality and quantum entanglement are the intrinsic characteristics of quantum mechanics. They may offer new insights for fundamental of quantum mechanics. They also show the intrinsic difference between quantum mechanics and other physics, such as classical mechanics and general relativity, and they potentially play the key roles in solving the consistency of gravity and quantum mechanics. They also provide novel tools to discover new physics, such as new topological phases in many-body physics.

**quantum nonlocality, quantum entanglement, quantum measurement**

doi: 10.1360/N972016-00123



### 韩永建

教授, 博导. 1977年生于成都, 1996年进入中国科学技术大学学习, 2000年师从于郭光灿院士, 于2005年获得博士学位. 2005~2006年于中国科学技术大学从事博士后研究工作, 2006~2010年在密歇根大学从事博士后研究工作, 2010年回中国科学技术大学任教至今. 其主要研究兴趣包括: 利用简单的量子系统(离子阱, 线性光学系统)进行量子模拟, 检验基本的物理原理; 在离子阱中实现可扩展的量子计算; 对多体物理的计算机模拟等.