

探索量子与经典的界限

——宏观系统内 Leggett—Garg 不等式的实验检验

周宗权 李传锋[†] 郭光灿

(中国科学技术大学物理学院 中国科学院量子信息重点实验室 合肥 230026)

2015-10-23 收到

[†] email: cfi@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20160105

量子力学是现代物理学的支柱理论,它精确地描述了微观世界的粒子行为。以量子理论为基础,人类发展出半导体、激光、核磁共振、电子显微镜、量子信息等一系列重大技术。量子力学的应用极大促进了人类物质文明的进步,然而,关于量子力学的理解与表述却众说纷纭,至今争议不断^[1]。

量子力学使用波函数描述系统状态,它允许系统处于任意叠加态,测量后叠加态随机地塌缩到本征态上。这与我们对宏观世界的经验是显著不同的,宏观系统永远处于确定的状态,且与测量装置无关。那么从量子到经典是如何过渡的?量子力学会是普适的理论吗,它应用的边界在哪里,这一问题自量子力学诞生之初就引起物理学界^[1]乃至哲学界^[2]广泛的兴趣。

针对量子力学违背直觉的叠加态描述,薛定谔于1935年提出著名的“薛定谔的猫”佯谬。如果存在一种微观系统向宏观系统的量子态传递机制,是否就可以制备宏观量子叠加态?该佯谬也与量子力学的测量问题直接相关,因为存在一些非常规的量子塌缩理论,比如Ghirardi—Rimini—Weber理论^[3]以及彭罗斯提出的引力塌缩理论^[4],从根本上否定了宏观量子叠加态的存在。为了在实验上解决该佯谬,1985年Leggett与Garg提出了Leggett—Garg (LG)不等式,以探索单体系统演化的时间关联^[5],量子力学和宏观实在理论对于该不等式给出了相矛盾的结果。对LG不等式的实验检验可用于寻找量子与经典、微观与宏观的界限,且有望最终判定宏观实在理论和量子力学的正确性。除了在基础物理学探索中的应用外,LG不等式也可以用于高阶量子相变的见证^[6]、量子密钥分配的攻击免疫^[7]、开放系

统的马尔科夫性判定^[8]以及量子计算的判定^[9]等领域。

针对局域实在论的Bell不等式已经得到广泛的实验检验,然而LG不等式的实验检验举步维艰。其困难主要来自LG不等式的初始假设^[5]。一条假设是宏观实在性描述,即系统总是处于宏观可区分状态中的一个;另一条是非破坏测量假设,即能够以不破坏系统状态及其后续演化的方式执行测量。其中非破坏测量假设饱受争议,因为这条假设的正确性无法检验,故标准LG不等式的违背难以区分是源于宏观实在性假设还是非破坏测量假设的违背^[10]。

2010年至今,国际上几个研究组在单个光子^[11, 12]、单自旋^[13]、单原子^[14]以及微米尺度的超导系统^[15]内执行了多个LG不等式的实验检验。主要测量手段包括弱测量^[15]和负性测量^[13, 14]。弱测量是基于量子力学的一种概念,它本质上只是降低了测量的“量子破坏性”,对实在论者并无意义。弱测量的破坏性与强测量并没有区别^[10]。负性测量是指测量装置只观测两种结果中的一种,如果观测到就丢弃结果,未观测到则推测系统处于另一个状态且认为系统演化未受影响。这种看法符合人们生活的经验,但它在不同理论框架下的正确性却是值得怀疑的^[14]。一个典型反例是波姆力学框架下的单缝衍射^[16],把有单缝的屏幕看作负性测量,屏幕上没有记录可以推测粒子穿过了单缝。然而穿过单缝的粒子行为是受衍射越过单缝的导引波引导的,它与无屏幕条件下的平面波导引的粒子表现是完全不同的。测量是测量者获取被测系统信息的唯一手段,作为测量者也就几乎永远无法知道测量的破坏性。目前这些LG不等式的实验检验都存在这一显著漏洞,并且这

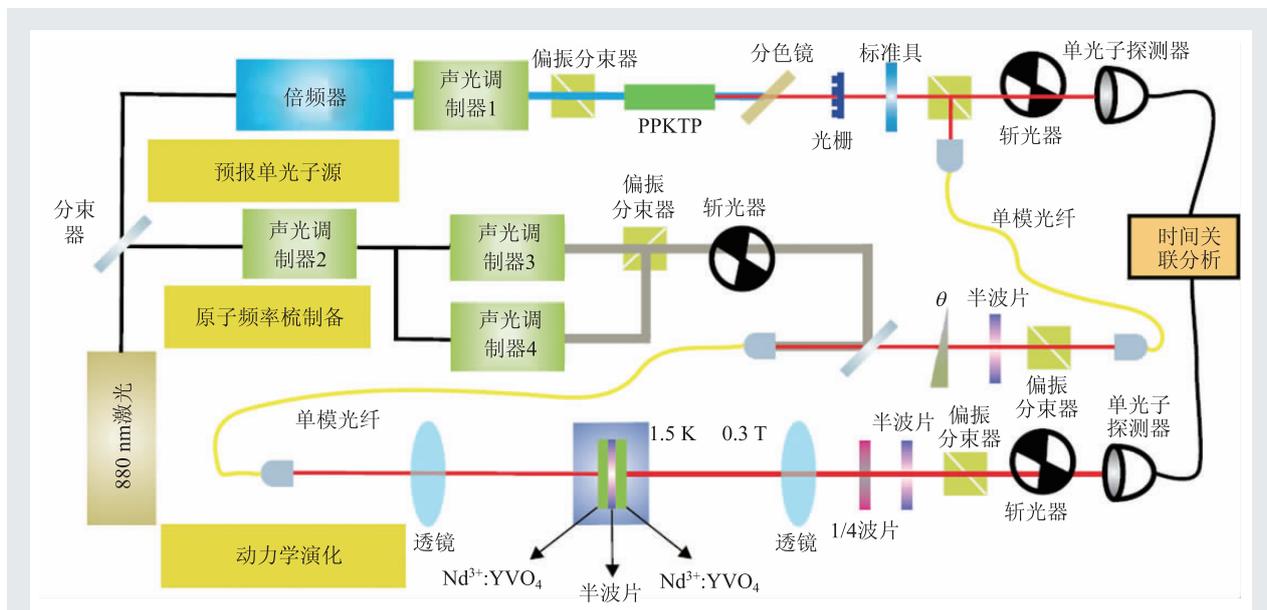


图1 利用量子存储器检验LG不等式的实验装置

些实验都局限在单个微观粒子或者微米尺度的超导系统中。

为避开非破坏测量假设，Huelga教授1995年提出静态假设型的LG不等式^[17]。2014年该理论进一步发展^[10]，得到其完整假设为：宏观实在性假设(A1)、系统静态演化(A2)、系统马尔科夫演化(A3)以及系统可以确定初态制备(A4)。这种新型LG不等式排除了非破坏测量假设，且A2、A3、A4的正确性可以执行独立的实验予以检验，故LG不等式的违背可以严格归因于A1宏观实在描述的错误。

我们研究组于2011年建立了基于稀土掺杂晶体的固态量子存储研究平台。量子存储器可以把单个光子量子态存储为系综原子的集体激发模式，故天然地实现了微观光子和宏观物质系统的量子态传递。在近年的实验中，我们基于量子存储平台发展出一种全新的偏振依赖的原子频率梳技术，可以对存储器的集体激发模式实现精确可控的动力学演化，这就满足了LG不等式检验所需要的系统演化。图1给出了我们的实验装置^[18]，研究组基于窄带参量光技术制备了波长为880 nm的预报单光子^[19]。该单光子被送入两块空间分离2 mm、厚度为3 mm的Nd:YVO₄晶体中，并激发出存储器集体激发模式的量子叠加态。这两块晶

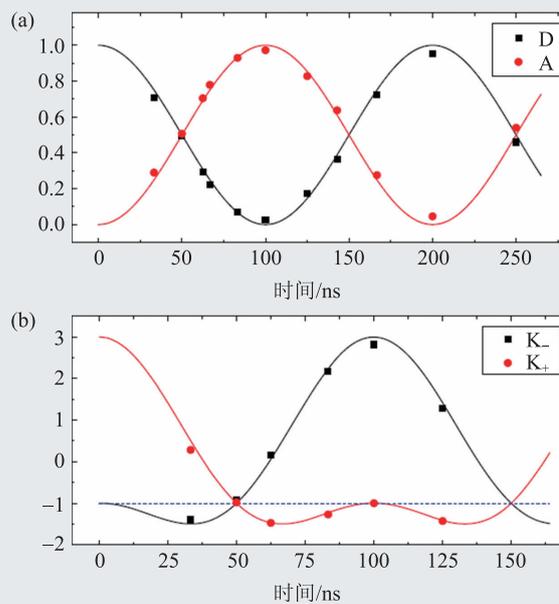


图2 (a)存储器集体激发模式叠加态的演化(图中黑色方块和红色圆点分别表示晶体处于D态和A态的观测几率。D和A分别为第一块晶体和第二块晶体处于相干激发叠加态的两个正交测量基)；(b)LG不等式的实验结果(图中黑色方块和红色圆点分别表示两种LG不等式K₋和K₊的实验观测结果)。图中所有实线为基于量子力学的理论预言

体采用研究组自主设计的“三明治”结构^[20]。第一块和第二块晶体可以分别接受光子的水平和垂直两种偏振成分的激发并独立演化。最终原子集体激发模式量子态被转化为光子回波发射，并通过偏振态分析态演化过程。图2(a)给出量子态演

化的过程，可以看到是接近理想的么正演化。图2(b)给出了LG不等式的结果，蓝色虚线所示的纵坐标数值-1为宏观实在理论预言的极限，实验结果对LG不等式的违背超过6个标准差。研究组与Huelga教授合作，进一步完成了对A2、A3、A4假设的独立实验检验，故LG不等式的违背直接证明了对宏观晶体内集体激发模式这一观测量的实在性描述不能成立，而量子力学的叠加态描述符合实验结果。

关于该量子态的宏观性是个有趣的话题，我们的晶体尺寸为人眼可见的毫米尺度，集体激发模式涉及了约 10^{10} 个Nd离子的集体行为，然而所考虑的两个状态真正的可区分度只是一个光子。按照Leggett提出的宏观性判据^[21]，这个量子态只能看作是宏观物体内的微观量子激发。为了进一步提升量子态的宏观性，可以考虑把入射光子源替换为多光子纠缠源，比如利用单光子一相干态的纠缠提升集体激发的光子数，则有望在宏观物体内部制备出具有宏观性的量子叠加态，并用于宏观实在理论的严格实验检验。更苛刻的宏观性判据^[22]则要求制备出系统质心的量子叠加态，这种

质心量子叠加态可直接用于引力相关的宏观实在理论的检验，并促进引力理论与量子力学的融合与统一。

该工作首次在光与物质界面的系统中检验LG不等式，观察到毫米尺寸宏观晶体内的微观量子态演化，并发展出一套普适的宏观量子相干性的实验探测手段，进一步的工作有望基于物质系统制备出具有宏观性的量子叠加态。

近百年来，量子力学作为人类最有力的工具激发了无数的新技术，人们一直关心的是“做什么”，现在我们认为，是时候进一步追问“为什么”了。在沿着LG不等式方向的基础量子物理探索中，我们认为以下问题值得进一步思考。理论研究上，给出实验更易实现的宏观量子态判据，给出假设更加简洁且严谨的LG不等式；实验研究上，应持续提升系统量子态的宏观性，延长系统相干寿命，并努力制备质心的量子叠加态。我们相信在量子力学诞生的第二个百年，物理学界有望最终统一对量子力学的表述及认识。

参考文献

- [1] Cabello A. arXiv:1509.04711, 2015
- [2] Popper K R. Foundations of Physics, 1992, 22: 1303
- [3] Ghirardi G C, Rimini A, Weber T. Phys. Rev. D, 1986, 34: 470
- [4] Penrose R. Foundations of Physics, 2014, 44: 557
- [5] Leggett A J, Garg A. Phys. Rev. Lett., 1985, 54: 857
- [6] Gomez-Ruiz F J *et al.* arXiv: 1509.00314, 2015
- [7] Aravinda S *et al.* arXiv: 1310.0438
- [8] Souza A M *et al.* arXiv: 1308.5761
- [9] Morikoshi F. Phys. Rev. A, 2006, 73: 052308
- [10] Emary C *et al.* Rep. Prog. Phys., 2014, 77, 016001
- [11] Goggin M E *et al.* PNAS, 2011, 108: 1256
- [12] Xu J S *et al.* Scientific Reports, 2011, 1: 101
- [13] Knee G C *et al.* Nature Commun., 2012, 3: 606
- [14] Robens C *et al.* Phys. Rev. X, 2015, 5: 011003
- [15] Palacios-laloy A *et al.* Nature Physics, 2010, 6: 442
- [16] Bacciagaluppi G. arXiv: 1409.4104
- [17] Huelga S F *et al.* Phys. Rev. A, 1995, 52: R2497
- [18] Zhou Z Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 115: 113002
- [19] Zhou Z Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 115: 070502
- [20] Zhou Z Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 190505
- [21] Leggett A J. Prog. Theor. Phys. Suppl., 1980, 69: 80
- [22] Nimmrichter S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 160403