

量子力学测量问题与量子信息

孙昌璞



孙昌璞, 1962年7月17日生于辽南农村, 1987年东北师范大学物理系硕士研究生毕业, 1992年于南开大学获得博士学位, 现任中国科学院理论物理研究所研究员、博士生导师, 以及清华大学、吉林大学和华中理工大学等校的兼职教授。主要从事量子力学基本问题、光与物质作用、量子信息理论和数学物理前沿问题的研究。在群表示理论物理应用和量子测量理论等方面完成了一些有意义的工作, 发表学术论文百余篇,

在国际上被大量引用。美国《科学》(1995)杂志评价中国科学发展时, 列举了他的工作。他的研究工作得到了国家杰出青年基金等基金的资助, 获得了美国ISI的《经典引文奖》、中国科学院青年科学家一等奖、第三届中国青年科技奖等奖励和全国先进工作者等荣誉称号。

从量子物理的基本问题到量子信息:

量子理论是二十世纪科学进步的一个伟大的里程碑。它的创立和发展不仅导致了原子能、激光和半导体等重大技术发明, 创造了人类的物质文明, 而且使得人们对微观世界运动规律有了基本正确的、革命性的理解。然而, 自量子力学诞生以来, 以量子测量问题为核心, 关于量子力学的思想基础和基本问题的争论, 从来就没有停止过。近年来, 伴随着技术的进步, 过去仅限哲学思辩式探讨的量子论基本问题, 已经能够在实验室里加以精确的检验。特别是, 最近由于量子信息的发展, 量子测量等基本问题的研究进一步得到了广泛的重视。

根据计算机发展的摩尔定律, 中心处理器的运行速度每 18 个月就会提高一倍, 相应地, 芯片上晶体管集成的数目随时间呈 e 指数增长。这预示着计算机芯片元件不久将会达到它的极限尺度, 突破芯片元件尺度的极限是当前信息科学所面临的一个重大科学问题。从物理学角度看, 信息的载体必定是一些特定的物理系统, 信息的传递和处理必定是某种物理过程。随着物理的存储单元会变得越来越小(甚至变成单个原子), 量子效应会越来越明显地凸现出来, 基本量子特性—量子相干性会在信息的存储、传递和处理过程中起着核心的作用。

量子信息的研究是以量子力学原理为基础、充分利用量子相干性的独特性质(量子并行、量子纠缠和量子不可克隆), 探索以全新的方式进行计算、编码和信息传输的可能性, 为突破芯片极限提供新概念、新思路和新途径。从本质上讲, 量

子信息关键,是直接利用量子相干性的物理观念以及由此引起的量子效应,而不只是利用量子力学的物化产品(如半导体器件)。量子计算的优势源于量子相干性导致的量子并行,量子通讯则依赖于多粒子相干叠加代表的量子纠缠,而量子密码则直接源于量子测量导致的波包塌缩。

总之,量子力学与信息科学结合,充分显示了学科交叉的重要性。但是,虽然量子信息的研究已经取得日新月异、令人叹为观止的进步,但最终要实现有实用价值的量子计算、量子通讯和量子密码,不仅在实用化中存在着相当大困难,而且有的困难甚至是原理性的。从一般原则上讲,这些困难的根源正是量子力学的测量问题。

事实上,量子力学所展示的微观世界图景,完全不同与经典物理“精确描述”的物质世界。通过测量从微观世界提取经典观察者可以感知的信息,看上去更是令人捉摸不定。正是在经典与量子的交汇处,量子力学测量问题的被很自然地提了出来:

1. 为什么量子测量会引起被测量子系统不可逆的改变-波包塌缩(或称量子退相干, decoherence) ?
2. 能否避免和有效地控制量子退相干,使得人们能够从微观系统的量子态读出有效的“信息” ?
3. 量子测量是否意味着人们对微观世界的“主观介入” ?

量子测量问题与量子相干性:

为了明晰上述量子力学测量问题的基本含义,首先要了解什么是量子相干性。量子力学告诉我们,微观世界不同于经典世界的根源在于它具有量子相干性,波粒二象性是其直接体现。在经典物理中,坐标和速度能够给出了粒子运动状态的正确刻画,但在量子力学中,由于波粒二象性,动量和坐标不能被同时测准,从而使得微观粒子的经典描述失败。正是源于这一点,爱因斯坦和玻尔在 1927 年的 Solvay 会议上的学术论战,引发后来的一系列关于量子力学基本问题的深入讨论。

力学量 A 的本征态 $|n\rangle$ 的量子相干叠加 $|\phi\rangle = c_1|1\rangle + c_2|2\rangle + \dots + c_n|n\rangle$ 刻画了对力学量 A 测量的不确定性。但是,一旦在一次测量中得到 A 的一个本征值 a_n , 则系统便塌缩到一确定的本征态 $|n\rangle$ 上。对于量子测量引起的这种不可逆改变,至今最恰当的解释是考虑量子世界的互补性 (Complementarity): 物质运动具有粒子和波的双重属性,但在同一个实验中二者是相互排斥的。例如,在双缝干涉实验中,测量粒子通过了哪一个缝,等于强调了波粒二象性的粒子方面,与粒子性互补的波动性便被排斥了,干涉条纹便不再存在了。这种由于测量或其它影响导致相干性消失的现象称为量子退相干;就量子测量而言,人们称之为波包塌缩。海森堡的测不准关系表明,通过具有“粒子特征”的测量(如同时测量动量和坐标),去描述具有“波粒二象性”的物质运动,会带来测量的不确定性,引起量子退相干。但最近德国 Rampe 小组的冷原子布拉格散射实验表明,测不准关系不是退相干的唯一起因,通过相互作用,测量仪器和被测系统形成的量子纠缠态(Entangled state)才是问题的关键。

量子相干性及其量子测量的特别之处,在于它们描述的波包塌缩是整体的.例如,一个粒子在 $t=0$ 时刻处在一个局域的空间点 A 上,在 $t=T$, 测量其动量得到确定的动量,则波包塌缩为平面波,其空间分布在时刻 T 以后是均匀的,不再定域:在过 A 点的光锥之外的 B 点,也有可能发现粒子,即使 A 和 B 两点是类空的.要指出的是,这种波包塌缩现象只意味着“概率意义”的超光速: T 时刻测量粒子动量,会导致体系以一定几率(通常很小很小)“超光速”地塌缩到动量本征态上.波粒二象性的观念或几率解释是这种佯谬出现的本质.事实上,单一测量并不能确定地在 B 点发现粒子,“事件” A 和 B 的联系只是概率性的,并不破坏的因果关系.近期,有不少“概率意义”下的超光速的报道,在非专业的范围内引起一些误解,其根源在于对量子测量本身的误解。

对于多粒子或多分量系统,量子相干性及其测量涉及到“薛定谔猫”佯谬和 EPR 问题的探讨.其发展导致了量子纠缠态的观念产生和应用.量子纠缠态是多粒子或多分量系统的非平凡的相干叠加(不能够分解为单个相干叠加态的直积).玻姆给出了 EPR 量子纠缠态的直观例子:

$$|EPR\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+z\rangle |-z\rangle + |-z\rangle |+z\rangle)$$

其中, $|+z\rangle$ 和 $|-z\rangle$ 是双电子体系的自旋单态, z 代表自旋的轴, \pm 代表沿 z 轴的方向.当第一个电子被发现在沿 $+z$ 方向,整个波函数被塌缩到态 $|+z,-z\rangle$ 上.这时再测量第二个电子,必得到确定的结果—自旋沿 z 轴向下.即使是两个粒子分开得很远,这种关联仍然是存在的.这种情况看上去与经典情况相似:在放了一个白球和一个黑球黑盒子里,伸手拿到了一只黑球,就可以断定留在盒子里一定是白球.然而,量子情况并非如此简单, $|EPR\rangle$ 同样也可以描述沿 x 方向自旋 S_z 的关联,或沿任意方向 n 自旋的关联 S_n . 这种用一个态描述不同方向自旋关联的奇妙特性,是量子纠缠的本质。

要指出的是,直接利用这种量子纠缠是不能传递经典信息的.因为它代表的关联是依赖于选择的测量,测 S_z , S_x 还是 S_n . 然而, Bennet 等指出,利用纠缠态,通过在经典信道中送 2 个比特的信息破坏空间某点的量子态,可以在空间不同点制备出相同的量子态.目前世界上已有几个实验组完成了这种量子离物传态 (Quantum Teleportation) 实验. 以上分析表明,微观信息与经典信息有着本质的不同,任何一种经典方式不会恰如其分地描述微观信息全部特性.量子力学测量的问题和困难均源均于此,这也许是量子力学互补原理更深刻的体现。

量子测量是量子信息研究的“双刃剑”:

量子力学测量问题的困难,在量子信息方面的体现是量子退相干问题.在量子信息中,经典信息数据位状态 0 和 1 变成了量子态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$. $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 及其相干叠加态 $|S\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$. (a 和 b 是复数) 一起描述了量子信息存储单元—量子位或量子比特.由于么正变换可以同时作用于 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$,量子信息具有极大的并行性.基于这一点,1994 年, P. Shor 巧妙地利用了量子测量,提出了大数因子化的有效算法,使得以此为基础公开密钥保密体系 (RAS) 遭到了原理上的威

胁。从此，量子计算引起了学术界、工商界及至各国政府对量子信息研究的重视，掀起了目前的研究热潮。

然而，围绕着微观粒子的量子相干性，量子测量是量子信息研究的“双刃剑”：一方面，充分地利用量子相干性及其量子测量，量子信息具有经典信息无法比拟的威力；另一方面，量子信息之所以可以成为信息，必须在它与经典世界衔接起来、被生活在经典世界中的人所感知，才有意义。然而，量子信息的提取本质上是一种量子测量。一旦进行有效的量子测量，从量子信息给出确切的经典预言，相干性就会被破坏。事实上，量子信息研究的重要任务之一，就是协调“双刃剑”带来的得失比例，产生一个正的信息净量。克服这个两难性矛盾方法有二：一是大量复制原来的量子态，这被“量子不可克隆定理”（相干性的直接推论）所禁戒；二是制备宏观物体的量子相干态，这里存在“薛定谔猫”问题。要指出的是，对于后者，人们已完成了一些实验，在极特殊条件下制备了“薛定谔猫”，但目前尚未直接应用到量子信息。

事实上，客观存在的环境也相当于一种广义的测量仪器，它会对量子态产生致命的、不可逆的影响，破坏量子相干性。量子比特会从具有相干性的量子态变成不具有相干性或相干性大量减少的经典、半经典状态，大大降低以后量子信息处理的效率。对于微观的量子态，环境的影响是不可忽略的。例如对于二能原子系统构成量子比特，真空背景的电磁场是无处不在的。通过增加量子比特，纠错码的方案可以部分地克服量子退相干的负面影响。但随着附加比特的增多，会产生新的退相干，多比特相干控制比少比特更困难。仅限于演示实验，或许可以克服之，但对实际应用，还有相当遥远的崎岖道路要走，切不可等闲视之。

量子测量的认识论问题：

通过相互作用描述量子力学测量过程的思想，可以追溯到 1935 年冯·诺意曼的开拓性研究。由于仪器是由服从量子力学的微观粒子组成，它的整体也应当用量子力学加以描述。因此，适当地引入被测系统和仪器间的相互作用，从系统+仪器的总系统的薛定谔方程，自然可以推导出波包塌缩。基于这一考虑，量子系统的退相干可以是一个逐渐出现的物理过程，而不一定是哥本哈根学派描述的经典仪器引起的瞬间塌缩。法国 Haroche 小组 1996 年完成的腔 QED 退相干过程实验恰好证实这一点。

然而，从仪器-系统相互作用观点出发，冯·诺意曼对量子测量进行了更深入的理论探索，但得到的推论却是令人费解：必须有观察者的“最后一瞥”，才可能导致系统的波包塌缩。冯·诺意曼论证的大意是，仪器 I 和系统 S 之间的相互作用会导致了总系统从因子化初态到纠缠态的转变，使得被测系统没有量子相干性。但是，对于量子系统 S 加仪器 I 的复合系统，相干性仍然是存在的。为了消除这种较大复合系统的相干性，就必须引入仪器 II，形成更大的纠缠态。要求 S+I 没有相干性，是为了保证从仪器态“经典地”读出系统的态：仪器和系统的关联，应当由经典的几率描述，不应具有量子相干性。正如天气预报一样，预报明天降雨概率为百分之三十是一个客观的概率性事件，并不依赖人们去观察什么。为了消除 S+I 的干涉项，就需要引进仪器 II，而进一步就要引进仪器 III，仪器 IV，... 这仿佛形成了一条无限的仪器链 - 冯·诺意曼链。按照冯·诺意曼的观点可以推

论，波包的塌缩最后必须由“主体”来决定，人的意识决定了微观测量结果的“存在”。由此，甚至可以引申出更加似是而非的结论：量子力学理论必须有“主观介入”，微观概念不再具有“客观性”，量子微观世界不会独立于主体之外。

然而，作为冯·诺意曼相互作用模型的适当推广，在目前的量子测量理论中，无须“主观介入”，冯·诺意曼链就能够以某种方式终断，从而自恰地描述了真实的量子测量。这些理论的物理本质在于强调仪器和微观系统的本质区别：仪器必定是宏观的，否则人们无法直接读数。要求仪器必须有无穷多个自由度组成，仪器的量子态本身必须包括集体态（仪器读数）和仪器内部态。由于测量只关心集体态，可以忽视仪器内部的信息，得到仪器和系统的经典关联。这时，由仪器完全以经典几率的方式定出被测系统状态，得到完全有用的信息。这些量子测量理论正在经历实验的进一步检验，相信其最终目标是正确的。

量子宇宙学中的测量问题:

我们生活在经典宇宙之中，但量子宇宙学告诉我们，大爆炸后的早期宇宙必定是量子的。因此，在量子宇宙学中，退相干导致宇宙趋向经典的想法十分重要。然而，通常退相干的论证，依赖于存在系统与外部系统的相互作用，但对于整个宇宙而言，通常不存在外部的观察者和环境，量子测量何在？为什么我们的宇宙会变成经典的？

回答这一问题的关键点在于，描述宇宙时我们忽略了其内部的信息，只关注其“集体自由度”。而宇宙内部的细节，虽然不改变其集体运动的状态，但会与之纠缠起来，使之发生退相干。Griffiths, Omnes, Hartale 和盖尔曼等人曾深入地研究过这种“没有观察者”的量子宇宙学，指出了广义测量导致退相干的实质。他们借用了“退相干历史”的概念（Decoherence Histories）。其大意是，整个宇宙是处于一个量子纯态上，它描述了宇宙各个部分之间的彼此关联，代表了完全精粒化的历史（Completely fine-grained histories）。然而，人们所关心和能够“看到”的是一种粗粒化的历史（very coarse-grained history），它可以视为各种精粒化历史的等价类，对于这些等价类而言，无须外部测量，量子退相干就发生了。

结束语：沟通经典与量子的量子测量:

本文的分析表明，作为量子信息研究和量子力学基本问题的关键所在，量子测量问题的寓意是十分明确和深刻的。一方面，量子测量沟通了经典与量子世界，提供了从量子力学过渡到经典力学的退相干描述；另一方面，这种沟通干扰了微观世界，它带来的量子信息损失，甚至使得“观察”到的世界有时面目全非。的确，在量子与经典边界上，量子测量会告诉了人们许多自然界的秘密，但到目前为止，人们尚不能确切地知道这个边界究竟在哪里。我们相信，通过逐渐“剥离”观察者和客观世界的“纠缠”，精巧的量子测量会逐步逼近客观世界的“真实”，找到量子与经典边界，从而导致二十一世纪物理学的重大进展。