

物质世界的量子图景

撰文/孙昌璞

量子理论是20世纪最重要的科学理论之一，是人们从微观世界出发理解物质运动规律的当代科学基石。它导致了以激光、半导体和核能为代表的新技术革命，深刻地影响了人类的物质、精神生活。

然而，量子理论的基础部分却存在诸多争议，以玻尔为代表的哥本哈根学派的量子力学“标准”诠释不断遭遇挑战。有关学术争论引申出的观念和思想，不仅促进了量子理论自身的发展，而且使量子力学走向交叉科学领域，如量子信息学等。当代量子理论的新发展大多基于实验，人们对量子理论基础的重新考察也不仅仅局限于哲学思辨。

量子理论认为，微观物体具有完全不同于经典运动的量子行为，其典型特征是所谓的波粒二象性（或称为量子相干性）：物质运动既具有不同状态叠加导致干涉和衍射的波动行为，又可以用粒子特征（位置和动量）在不确定性关系限制的精度内加以描述。应用到两个或少数粒子系统，波粒二象性就表现为量子纠缠，使得空间远离的微观粒子具有某种不可思议的关联，这导致了量子通讯方案的提出。

这种关联现象也可以存在于由大量服从量子理论的微观粒子组成的宏观物体中，但要求其中每一个微观粒子物质波的位相一样或者保持一定的比例关系。面对这样的复杂体系，当代量子理论结合统计物理，直接研究超越个体特性“演生”（emerging）出来的合作、凝聚现象。选择特定的温度和参数，复杂体系会发生对称性自发破缺，形成各种长程关联、有序的新的物质状态，包括超导、超流和玻色-爱因斯坦凝聚。

然而，为什么日常的宏观物体不具有长时间的相干叠加？这个问题可以归结为20世纪30年代提出“薛定谔猫佯谬”：是否存在死猫和活猫的量子相干叠加？20世纪80年代以后，一些理论物理学家深入研究了这个问题，并通过了一系列实验检验（如获得2012年诺贝尔奖的巴黎高师的腔QED实验和美国国家标准局的冷却离子实验）。定性地说，大量粒子组成的宏观物体可以用某种集体自由度（如其质心或宏观磁矩等）描述，猫的“死”与“活”本质上就是这样的集体自由度。外部环境的随机运动可以与宏观物体纠缠起来，客观上对其集

体自由度（“死”和“活”）进行了某种量子测量，测量的结果是引起组成宏观物体的每个微观粒子的位相的随机分布，从而宏观物体整体就没有确定的位相，其带有波动特征的量子相干性就会消失，即发生量子退相干，使得“死”与“活”的量子相干叠加名存实亡。即使把宏观物体与外部环境彻底隔离，宏观物体内部的微观粒子的无规运动，也会与其集体自由度纠缠起来，“死”与“活”叠加的量子退相干也会发生。

退相干的观点可以用来理解量子宇宙中是怎么衍生出经典现象的。对于微观组元和时空背景都服从量子理论的整个宇宙而言，不存在外部的观察者（仪器）和环境，但为什么观察到的宇宙或引力现象是经典的（诸如苹果落地和卫星绕地飞行等）？回答这个问题的要点在于，描述整个宇宙不能仅仅关注其“集体自由度”，而忽略了它内部的信息。格里菲斯（Griffiths）和盖尔曼（Gell-Mann）等人发展了“退相干历史”的观念，揭示了“没有观察者”的量子宇宙退相干的本质：宇宙所处的量子纯态，描述了世界各个部分彼此的关联，其每一个包含所有细节的时间演化过程代表了一个完全“精粒化”的历史。但人们所关心和能够“看到”的是一种“粗粒化”的历史。与内部精粒化的历史关联或纠缠，可观测的粗粒历史叠加会发生量子退相干。打比方来说，一个台球可以有各种路径从A点打入洞B，对应的的时间演化服从牛顿定律。台球是由许多微观粒子组成的，在其运动过程中，内部粒子十分复杂的、服从量子力学和统计力学的微观演化过程代表了其精粒化的历史，其经典运动轨迹就是台球粗粒化的历史，是精粒化历史某种“平均”的约化结果。

上述量子论的发展可以启发人们思考更基本的问题：既然经典力学是量子力学的极限，量子力学本身会不会是某种更精确理论的某种极限？量子态是否是更深层次上物质原初状态的粗粒化，使得当前的量子理论恰好是某种深层次理论通过损失信息衍生出来的有效理论？最近，著名物理学家特·胡夫特（t Hooft）从量子引力出发提出了这样一种理论框架，其正确与否有待于未来工作的检验。



孙昌璞，理论物理学家，中国工程物理研究院北京计算科学研究中心教授，中国科学院院士，发展中国家科学院院士。1984年毕业于东北师范大学物理系，1992年于南开大学获博士学位。主要从事量子物理、数学物理和量子信息理论的研究。曾获国家自然科学基金二等奖、中国科学院青年科学家一等奖、国家教委科技进步一等奖和美国ISI经典引文奖等。