

宏观物体的退相干与量子宇宙的经典约化

Decoherence of macroscopic object and the transition of quantized universe to classical

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(或称量子相干性):物质运动既具有干涉和衍射的波动行为,又可以用粒子特征(位置和动量)在一定的精度内加以描述。可以说波粒二象性是量子物理学观念的核心。

然而,宏观物体是由大量满足薛定谔方程的微观粒子组成,但它们通常不具备量子相干的特征。也就是说,宏观物体通常不存在长时间的相干叠加。这个问题可以归结为所谓“薛定谔猫佯谬”^[1]:为什么通常不存在死猫和活猫的相干叠加?20世纪50年代,玻恩和爱因斯坦在通信中也深入地讨论了量子力学能否正确描述宏观物体的自由运动的问题。20世纪80年代以后,一些理论物理学家如深入研究了这些问题。而最近人们已经开始通过实验(如巴黎高师的腔QED实验,美国国家标准局的冷却离子实验和维也纳大学的C₆₀实验^[2]),全面地检验这方面的各种观点与结论。

理论上,可以用量子纠缠诱导量子退相干的观点,对薛定谔猫佯谬和宏观物体的空间定域化问题给出可能的物理解答。定性地说,宏观物体所处环境的随机运动,会与宏观物体耦纠缠起来。环境的每个组元的作用,相当对宏观物体集体自由度进行量子测量,从而环境粒子能够记录宏观物体的“which-way”信息。随着组元个数增多,与之相互作用的量子系统会出现所谓的波包坍缩或量子退相干,使得量子相干叠加名存实亡。从这一角度,Wigner及Joos和Zeh研究了环境粒子在一些实际宏观物体上的散射,展示了宏观物体与散射粒子(真空光子,空气的原子分子)量子纠缠产生的动力学。另一方面,依据Omnes“内部环境”观念,文献[3]发展了量子退相干的因子化理论。它认为,组成宏观物体的内部微观粒子的个体无规运动,也会与宏观物体的集体自由度耦纠缠起来。因此,即使把宏观物体与其环境完全隔离开,量子退相干也会发生。这一观点,有可能对量子宇宙的经典约化给

出合理的解释。

以上量子退相干导致量子系统趋向经典世界的论证,依赖于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(仪器)和环境,为什么我们观察着的宇宙是经典的?量子宇宙到经典世界的约化是这样发生的?要回答这个问题,其要点在于描述宇宙时,不能只关注宇宙的“集体自由度”,而忽略了它内部的信息。这些相当于内部自由度的细节,虽然不改变宇宙“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”的量子宇宙退相干问题。他们借用了“退相干历史”的(decourence histories)概念^[4]。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,量子退相干就发生了。

以上讨论启发我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极限?以上关于经典力学是量子力学有效理论的想法是相当直观的、但又十分深刻。对复合系统的量子态通过某种“等价类”粗粒化,损失信息,给出到经典物理的约化。缘此,我们可以重写第二个问题的提法:量子态是否是一种更深物质层次上状态的等价类,而量子力学恰如是某种更深层次理论在这些等价类上,通过损失信息衍生(emerging)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^[5],其正确与否有待于未来工作的考验。一个理论的正确与否必须能够通过实验加以检验。目前,特·胡夫特理论预言了量子信息的极限。就量子计算而言,它限定了可进行有效因子化的最大数是 10^{4000} 。由于量子计算机尚未实际建造起来,在相当长的时间,人们不可能对此进行检验。应当指出,特·胡夫特理论还是相当初步的,但它对量子力学与引力结合的重要问题有深刻的启发意义。因此,通过高能尺度的量子退相干理论的研究,有可能解决20世纪物理学这个悬而未决的问题,成为建立21世纪新理论的开端。

参 考 文 献

[1] Zurek H W, Phys.Today. 1991(及所引文献).

- [2] Arndt M et al. Nature, 1999, 14:401(及所引文献).
- [3] Zhang P, Liu X F, Sun C P. Phys. Rev. A 2002, 66: 042104 (及所引文献).
- [4] Gell-Mann M, Hartle J B, Phys.Rev. D 1993, 47: 3345.
- [5] 't Hooft G, Class.Quant.Grav. 1999, 16: 3263-3279.

撰稿人: 孙昌璞

中国科学院理论物理研究所