

薛定谔猫与量子测量

——兼谈量子信息的发展

孙昌璞 (中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

在 20 世纪科学发展中,以量子力学为代表的基本物理学理论不仅在认识客观物质世界方面发挥了根本性的奠基作用,而且导致了一系列重大的高新技术变革,深刻地影响人类社会的物质生活。然而,自本世纪二十年代量子力学建立以来,人们对其中的基本问题的激烈争论却从未停止过。量子理论的开创者之一、丹麦物理学家尼尔斯·玻尔曾风趣地说:“任何能思考量子力学而又没有被搞得头晕目眩的人都没有真正理解量子力学。”

众所周知,物质在微观尺度上表现出完全不同于经典运动的量子行为,与经典物理的图象和人们的日常经验有很大区别,量子理论成功地描述了这类诸如原子光谱和黑体辐射的非经典现象。根据量子理论的波粒二象性学说,实物微观粒子运动会象光波、水波一样,具有传播、干涉和衍射的波动行为,形成物质波(或称德布罗意波)。由于这种量子特性,描述微观体系的状态不再是用位置和动量,而是用一个决定粒子出现几率的波函数。这就导致了所谓的态相干叠加原理:

如果 Φ_1 和 Φ_2 是物理体系的两个可能状态,则 $\Phi = A\Phi_1 + B\Phi_2$ 也代表物理体系一个可能状态:体系随机地即处在 Φ_1 上,又处在 Φ_2 上,相应的几率分别为 $I_1 = |A|^2$ 和 $I_2 = |B|^2$ 。

如图 1,笼统地用 Φ_1 和 Φ_2 分别代表通过缝 1 和缝 2 的波函数,则根据态相干叠加原理,叠加态 Φ 给出了如图 1 所示的实物粒子的物质波干涉现象,

$$I_{12} = |\Phi|^2 = I_1 + I_2 + A^* B \Phi_1^* \Phi_2$$

$$+ AB^* \Phi_1 \Phi_2^*$$

描述了底屏上粒子数密度分布,后两项代表干涉效应。对于较小的或结构简单的粒子,如电子和中子,人们不仅在实验上已观察到干涉现象和衍射图样,而且基于这个原理,成功地制备了现代测量技术必不可少的电子显微镜和中子干涉仪。

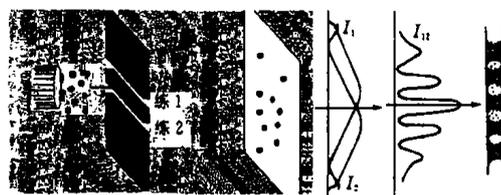


图 1 实物粒子的物质波干涉

考虑到日常所见中的宏观物体是由大量服从量子力学规律的微观粒子组成的,人们自然要问:由具有波粒二象性的微观粒子组成的宏观物体是否也具有这种量子特性?通过这样问题的提问,1935 年薛定谔提出了对量子力学哥本哈根解释的著名挑战,即所谓“薛定谔猫佯谬”:

“一只猫关在一个钢盒内,盒中有下述极残忍的装置(必须保证此装置不受猫的直接干扰):在盖革计数器中有一小块辐射物质,它非常小,或许在 1 小时内只有一个原子衰变。在相同的几率下或许没有一个原子衰变。如果发生衰变,计数管便放电,并通过继电器释放一锤,击碎一个小的氢氟酸瓶。如果人们使这整个系统自己存在 1 个小时,那么人们会说,如果在期间没有原子衰变,这猫就是活的。而第一次原子衰变必定会毒杀了猫”。

我们心里十分清楚,在日常生活里,那只猫非死即活,两者必居其一。可是,按照量子力学规则,盒内整个系统处于两种态的叠加之中。

$$|u\rangle = a|e\rangle \otimes |\text{死猫}\rangle + b|g\rangle \otimes |\text{活猫}\rangle$$

其中第一分量意味着死猫与原子激发态 $|e\rangle$ 的关联;第二分量意味着活猫与原子稳态 $|g\rangle$ 的关联(如图 2)。这样的关联状态就是所谓的量子纠缠态。

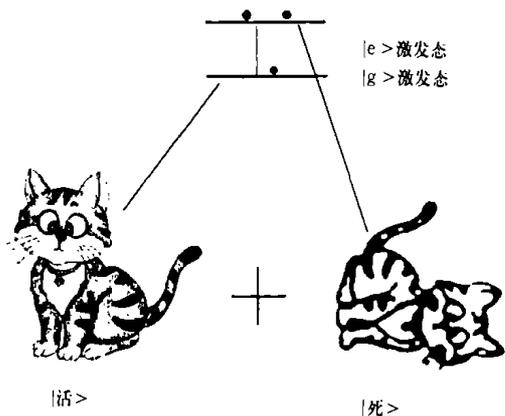


图 2 作为量子纠缠态的“薛定谔猫”

按照冯·诺意曼的推理,在这样的纠缠态上,直到某人窥视盒内看个究竟以前,不幸的猫继续处于一种悬而未决的死活叠加的状态之中。一个非活非死、又活又死的猫,是什么意思呢?理论上,猫自己还是知道是活还是死的。但根据量子测量的哥本哈根解释,处在这种怪态上,猫的生死不依赖打开盒子前的“客观存在”,而是决定于打开盒子后的“观察”。看上去这个推论是不合理的,因而称之为“薛定谔猫佯谬”。

试图在量子力学本身的框架下解决这一矛盾,首先要意识到“薛定谔猫”的物理本质是考察是否存在宏观量子态及其相干叠加。“薛定谔猫”的宏观特性,要求描述它的波包是可以区分的。直观地说,波函数可以区分性意味着广义的量子测量。而在量子测量理论中,量子态相干性的破坏主要是理想测量导致的波包塌缩(Wave packet collapse)。大家知道,在经典物理学中,对体系的测量不会本质地改变体系的状态,至少在理论上可以构造理想实验测量,使得

体系的状态在测量前后不发生变化。而在量子力学的测量理论中,测量仪器与被测系统的相互作用,一般会本质地改变体系的状态,引起波包塌缩。图 3 显示了中子干涉问题中相干性破坏的问题:一旦通过测量发现中子是沿着哪条路径到达屏,干涉条纹将不复存在了。这种由于测量或其它影响导致相干性消失的现象称之为量子退相干(Quantum decoherence)。对这种现象的初步解释是应用海森保的测不准关系:准确知道粒子通过路径 A 意味着在垂直于 A 的方向上完全确定粒子的位置,由测不准原理得知这个测量将对垂直于路径 A 方向上的动量产生一定的扰动,从而干扰到达屏 S 上粒子的位置,造成干涉条纹的模糊。

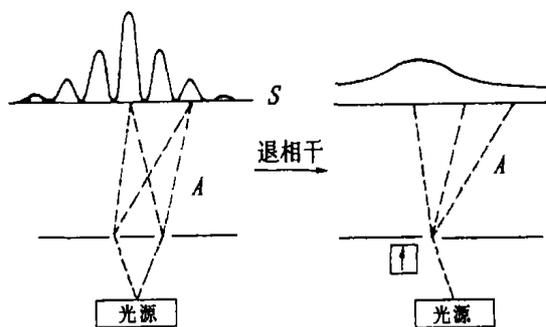


图 3 有效测量破坏量子相干性

稍加仔细考察就不难发现,干涉条纹消失的现象确实联系于量子力学测量的基本问题:对于微观粒子运动状态的有效测量,必将在可观测的意义上使粒子原来的运动产生不可逆的改变。在双缝干涉实验中,如果测量粒子通过了哪一个缝,便强调了波粒二象性的粒子特性,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。以上关于干涉条纹消失的讨论是依据标准的“哥本哈根解释”,或称量子力学的互补性原理(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。从这个意义上讲,测不准关系表明,用关于粒子特征的测量(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。这就是说,微观物体内部的测不准性是引起被测系统量子退相干

的一个重要原因。

然而,人们自然要问,量子互补性原理相应的坐标-动量测不准关系是否是量子退相干问题唯一的直接原因?为了从实验上对此进行精确的检验,德国 Rampe 研究小组最近设计了冷却原子的布拉格散射实验:通过 Rabi 转动把描述原子走哪条路径的空间状态和与原子内部状态关联起来,形成所谓的量子纠缠态。从而发现在不改变原子动量的条件下(不发生波包展宽,横向动量可以忽略),仅对原子的空间运动做内态标记,形成理想的纠缠态,完成“路径选择”(which-way)实验,干涉条纹便不再消失了。这个实验的一个基本解释是:代表两个不同路径的空间状态分别与两个正交的内部态关联,而内部态正交意味它们完全可区分,从而给出空间状态的理想测量,导致量子退相干。近年来,对于中子、光子和介观体系等不同物理系统,一些实验研究小组完成了类似的“which-way”实验,得到的结论与 Rampe 研究小组结果基本相同,即测不准关系决定的测量中的不可控制扰动,并非是量子退相干唯一直接原因,形成量子纠缠态是问题的关键。

基于上述量子力学测量理论的观点,我们可以从两个角度来理解薛定谔猫佯谬和为什么通常不存在宏观物体状态相干叠加。其中心思想是,人们说“猫是宏观的”,意味着猫由许多微观粒子组成,薛定谔猫态完整的描述必须包括无穷多内部微观自由度。一方面,虽然单个微观自由度和外部环境的合可能是十分微弱的,但由于猫是宏观的,外部环境的累计集体效应会十分可观,其有效的作用相当于进行量子测量。这种无时无刻不在的测量会自动导致宏观物体-猫的量子退相干。另一方面,我们谈到的宏观猫的“死”与“活”,只是代表猫的两种集体状态,其不同的内部微观状态与“死态”和“活态”相关联,形成量子纠缠态,导致内部微观状态对集体态“死”和“活”的有效量子测量,引起相干性退化。

对于薛定谔猫佯谬问题的这种分析,人们可能会提出以下质疑:为什么不同的集体态“死”和“活”会与不同的内部状态相关联?如果“死”和“活”只与相同的内部状态相关联,就没有有效的量子测量,不存在量子退相干。因此,可能存在宏观物体状态的相干叠加。的确,在极特殊的情况下,宏观量子态是存在的,如超导和玻色-爱因斯坦凝聚。然而,一般来讲,对于日常的实际物理问题,这是不可能的。由于薛定谔猫是一个宏观物体,它具有非常大的状态空间和特别密集的能谱。例如,我们假设“猫”是由 N 个二能级原子组成;每个粒子的基态能量为 0,而激发态的能量为 E ,则猫的总能量必处于 0 和 NE 之间,而可能存在的不同状态总数为 2^N ,则平均能量间隔为 $\frac{NE}{2^N}$ 。因此,当 N 很大时,能量间隔趋近于零。由于能级间隔很小,内部状态即便经历了一个很小的扰动,也很容易跃迁到不同的状态上。就是说,集体自由度在不同的状态上会对不同的内部状态产生不同的影响。上述不稳定性会导致与“死”和“活”关联的内部状态不一样。事实上,由于内态包含了很多分量,只要其中一个正交,便出现了量子退相干。

上述分析主要涉及到宏观物体的内部自由度对其宏观集体自由度的影响,这类问题最近正经历着精确的实验检验。最近奥地利 Zeilinger 领导的维也纳研究小组利用了 C_{60} 一个准宏观物体的量子干涉实验。虽然 C_{60} 分子还远远不是一个宏观系统,但这是迄今为止人们所能看到的最大的单粒子量子干涉。特别 C_{60} 是具有复杂的内部结构,在不同的情况下,会为量子相干和退相干的研究提供丰富的实验现象和定量检验。虽然目前实验还没有直接研究有限大系统的量子退相干问题,但在此基础上,有可能通过激发内部自由度与质心运动的耦合对量子退相干的动力学过程进行细致的研究,并给出定量的描述。

以上关于薛定谔猫佯谬问题的讨论,只是量子物理中诸多基本问题的一个。事实上,量子力学过去的成功和目前的发展潜力并不意味着它是一个彻底的、完善的物理学理论。人们对于量子力学本身的完备性及其一些基本观念的理解,甚至持有截然不同的观点,量子力学是在这些富有理性的学术争论中不断发展完善和走向成熟的。从1927年Solvay物理学会议开始,玻尔(N. Borh)和爱因斯坦(A. Einstein)的著名争论引发关于量子力学基本问题的全面论战,导致了一系列关于量子力学的思想观念的深入讨论,如爱因斯坦—波多斯基—罗森的EPR佯谬(1935年),冯·诺意曼测量假说和波包塌缩(1932年),玻姆的隐变量理论(1952年)和Bell不等式及其实验验证(1964年,1981年,1975年)。通过这些问题的讨论,人们更加全面深入地把握了量子力学的精神实质,并使它进一步应用于各个科学领域。最近,基于这些量子力学基本问题的研究,人们发现基本的量子力学观念也可能具有直接的应用价值。这就是目前关于量子信息的研究:量子力学的基本概念有可能改变人们对信息存贮、提取和传输过程的理解,从而加速信息科学的发展。

大家知道,在信息处理过程中,通常用0和1代表一个数据位(bit)。其物理实现是诸于高电位和低电位等的经典状态。随着器件的超小型化,量子效应变得越来越重要,0和1将分别变成两个量子态,形成所谓的量子位(Qubit)。与经典情况的基本差别是:量子位存在状态的相干叠加。经典情况下的计算,数据位非0即1,而对量子计算而言,关键是存在既0又1的相干叠加。对于量子通讯而言,其关键是利用量子纠缠态或称EPR对,其实质仍是利用二粒子态的相干叠加。形象地说,一个量子位是整个球面,而一个经典位是在这个球面上的两极。正是利用量子力学这种相干叠加特点,量子计算和量子通讯才能完成经典计算和经典通讯完全不能胜任的工作,如大数因子化和巨数据库

搜索。作为当代金融等领域加密的关键,所谓大数因子化是把一个给定的大数 N 分解成素数的乘积。经典数论告诉我们,这种分解是很难的。一旦给定 N ,分解的信息完全确定。从而可以用来加密。通常很容易通过一系列的素数相乘得到一个大数 N ,计算一步完成,是十分容易的,但其逆过程却是十分不容易的。因此,大数因子化的实际完成,会动摇国际金融和国防保密的技术基础。

从基本物理学的观点出发,量子信息过程可以理解为特定量子系统(统称量子比特系统)的时间演化,其中系统的非经典属性(如量子相干性)起着支配性的作用。利用这些纯量子特性,量子计算可以完成经典计算机难以胜任的高难度计算工作,如大数因子化和巨数据库搜索。因此,在实现量子计算的整个动力学过程中,保持量子相干性是实现有效量子信息过程的必然要求。

然而,要处理巨大量的任务数据,实际的量子信息系统必然要包含许多物理的量子数据位,存在大量的内部自由度。和宏观的薛定谔猫一样,实际的量子信息系统与环境耦合效应是不可忽略的,因为它倾向于破坏整个系统的量子相干性。根据过去的研究结果,由于环境是由大量的粒子或运动模式构成的,其运动方式带有很大的随机性,其中包括有限温度的热涨落和零温时的量子涨落。根据上述薛定谔猫佯谬解释的第二个方面,随着处理的数据对象的巨量增加,量子信息系统的量子数据位越来越大,内部自由度的随机性的影响也必须引起重视。这些都会引起量子信息系统的不可逆量子过程—量子耗散和量子退相干:前者意味着量子信息系统的能量损耗,后者则导致从量子过程到经典过程的转变,使得量子信息过程出现较大的误差,甚至完全失效。现代物理学关于量子不可逆过程的研究表明,对于大多数量子体系来说,量子耗散的时间标度远远大于量子退相干的时间标度。这就是说,人们有可能在能量

耗散起作用之前,完成一个具有若干步骤的量子信息操作,而此前量子退相干已经对量子信息过程产生影响。因此,只有克服量子退相干的发生,才能最终实现具有实际应用价值的量子计算和量子通讯。表面上看,人们几乎无法定量地了解量子退相干的全部动力学细节,从而控制和避免量子退相干的发生相当困难。人们为此已进行了一系列有意义的探索,提出了许多避免或修正量子退相干物理效应的编码方式和动力学方案,但由于实际的环境是十分复杂的,未取得最后成功。事实上,任何针对特定的环境模型所作的理论探索都必须具有一定的普适性,否则由此得到的结论和设计的方案可能不再具有实际价值。人们只有通过量子退相干普适性问题的深入研究,才能充分了解量子信息付诸于实际应用的各种困难,并从中找到解决这些问题的可能出路。

总之,选择和制备适当的量子系统,作为量子计算机在这些复杂的情况下有效地工作,是一件十分艰巨的任务。从目前量子计算机和量子通讯的研究到最终实现量子信息有实际应用的应用,还需要相当长的时间。由于量子信息涉及到物质的深层次复杂性乃至物理学和信息科学的根本性问题——信息提取的宏观不可逆性,这一发展过程还会更长、更艰巨,最终实现的量子信息方案也会与今天的设想有很大的差异。尽管如此,目前量子信息的研究至少可以从基本物理学的角度加深人们对量子信息的本源的认识。

从科技发展的历程中不难看出,科学和技术有着内在的互动关系。对科学真理的非功利追求也常常导致高新技术的变革,并深刻地影响人类的社会生活。从爱因斯坦的狭义相对论到原子能的广泛应用,从量子力学到激光和半

导体的发明,都是这方面典型的例证。我们希望,量子计算和量子通讯的发展,会为这个观点提供更有说服力的、更具发展潜能和更有实际用途的新的范例。最近,著名理论物理学家杨振宁在谈到二十世纪物理学发展时指出:

“二十世纪在人类的历史上是非常特别的一个世纪,有很多非常重要的事情在二十世纪发生了(人类第一次发现了第二种能源——比火还要强的核能,……创造出来半导体,引导出来了计算机,……引导出来了今天的生物工程的技术……成功地登上了月球……)不过如果我们仔细问,二十世纪的物理学发展的动力是什么呢?我们会得到一个结论,这个动力的来源并不真正是这许许多多的可以引以为傲的一些发展。而真正驱使物理学家在二十世纪里头致力于一些革命性的发展的,是一些基本原理性的深入的了解。通过了这些深入的了解,人类对于自然界许许多多的原始的现象,原始的观念(包括时间的观念、空间的观念、运动的观念、能量的观念、力的观念),所有这许多最基本的人类对于自然界的认识的原始的观念,在二十世纪都有了革命性的、新的了解。我想历史上会讲,这个二十世纪物理学真正的最重要的精神。”

引述杨振宁的这段话是要说明,目前关于量子力学基本问题的研究看上去只是为了深入理解物质世界的基本特性、探索其基本运动规律,但以长距离眼光看,不但其科学意义是极其深远的,其应用潜力也可能是非常巨大的。

自1991年起,作者关于量子测量问题及其相关应用的系列工作得到了国家自然科学基金的面上项目、优秀中青年人才专项基金和国家杰出青年基金,以及九五攀登计划“理论物理若干重大前沿问题”和霍英东教育基金的资助,谨此致谢!