

# “薛定谔猫佯谬”的哲学研究

李宏芳

(清华大学科学技术与社会研究中心,北京 100084)

**摘要:**“薛定谔猫佯谬”的产生不仅有其科学渊源,而且有其哲学渊源。研究“薛定谔猫佯谬”的缘起和实质,不仅有助于我们理解量子力学的本质,而且有助于我们解决长久以来围绕量子力学问题展开的哲学基本观念之争。

**关键词:**薛定谔猫佯谬;哲学研究

**中图分类号:** N03

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003 - 5680(2005)02 - 0035 - 04

“薛定谔猫佯谬”是20世纪30年代由著名物理学家薛定谔(E. Schrödinger)提出的一个颇具困惑性的思想实验,它的产生不仅有其科学上的诱因,而且有其哲学上的渊源。这具体表现在量子力学所展示的自然界神奇的、反直观的量子叠加特征和薛定谔对于量子力学的“哥本哈根解释”关于物理实在解释的质疑两个方面。可以说,这两个方面是进行量子力学的哲学研究所不可回避的,因而“薛定谔猫佯谬”在量子力学问题的哲学研究中就显得非常重要。为此,本文将对“薛定谔猫佯谬”的缘起和实质进行较为深入的分析,以促进我们对量子力学的本质的进一步理解,同时解决长期以来围绕量子力学的概念基础所展开的哲学基本观念之争。

## 一 “薛定谔猫佯谬”产生的科学背景

量子力学堪称20世纪最有成就的科学理论。我们今天用到的许多高科技产品,如半导体、激光器等,都是量子力学开发应用的成果。然而,不顾量子力学的巨大成就,围绕量子力学概念基础所展开的思想观念之争,从其诞生之初就没有停止过。这些论争包括:1927年玻尔(N. Bohr)和爱因斯坦(A. Einstein)关于波粒二象性和测不准原理的论争;1932年冯·诺依曼(von. Neumann)提出的量子测量理论和波包塌缩假说;1935年爱因斯坦、波多尔斯基(Podolsky)和罗森(Rosen)提出的“EPR佯谬”;1935年薛定谔提出的“薛定谔猫佯谬”,等等。

量子力学为何会引起诸多的观念之争?一个重要的原因在于,量子力学作为深入到微观领域的理论,描述的是非

常小的尺度,大约是小于纳米(1纳米=10<sup>-9</sup>米)尺度,而在费米(1费米=10<sup>-15</sup>米)尺度范围内的,如原子、亚原子大小的物质的行为和性质。这是一个与我们的直觉经验完全不一致的世界,其显著的反直观的特征是用经典的思维模式难以理解的。例如,按照我们日常对宏观物体认识的习惯经验,一个物体在某一时刻只能处于一个确定的位置或者一种确定的状态,要么在这里要么在那里,或者是这样或者是那样,二者必居其一。例如一枚硬币落地时,必定或者正面朝上或者反面朝上,二者量子等价,几率均为1/2。

然而,在量子世界,由经典物理学规定的日常生活的习见规律不再适用。所有的微观粒子诸如电子、质子、光子等都有一个奇怪的性质:它们在同一个时刻可以既在这里又在那里,既是粒子又是波,就像有分身法术一样。当我们不去观测它们时,它们就这样同时以一定的几率处于多个位置或多种状态的叠加之中,因此你既不能谈论它们的轨迹,也不能说明它们的真实状态是什么。而一旦你去观测它们时,它们将以一定的几率处于一个确定的位置或者一种确定的状态。微观粒子的这种性质是与我们的习见经验大相径庭的,也曾使许多物理学家大惑不解,常常把微观粒子的这种多个位置或多种状态同时共存的性质,说成是微观粒子的量子相干叠加性。

微观粒子为何会有量子相干叠加性呢?根据量子理论,微观粒子的量子相干叠加性是由能极好地预测亚原子世界粒子运行方式的量子力学的数学表述——1926年薛定谔给出的薛定谔方程的线性特征决定的。根据薛定谔方程,如果

【收稿日期】 2004 - 11 - 30

【作者简介】 李宏芳(1972 - ),女,山西天镇人,哲学博士,清华大学科学技术与社会研究中心博士后,研究方向为科技哲学,自然科学中的哲学问题,科学思想史。

$|\psi_1\rangle$  和  $|\psi_2\rangle$  是描述微观粒子 A 的薛定谔方程的两个解,代表微观粒子 A 的两个本征态,则它们的线性叠加  $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$  也是这个薛定谔方程的一个解,代表微观粒子 A 的一个量子叠加态,其中  $c_1$  和  $c_2$  是几率幅,满足  $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$ 。这就意味着,描述微观世界量子行为的薛定谔方程本身所蕴含的量子叠加特征,决定了微观粒子 A 能以一定几率  $|c_1|^2$  和  $|c_2|^2$  同处于  $|\psi_1\rangle$  态和  $|\psi_2\rangle$  态。

在量子力学中,叠加存在的一个很好的实验说明是汤姆森·杨(Thomas Young)的双缝干涉实验。这个实验是在 19 世纪早期为了证明光是由波组成而发展起来的。双缝干涉实验告诉我们,叠加在亚原子水平确定发生,因为有可观察的干涉效应。在这种干涉效应中,一个单粒子被表明同时以一定的几率处于多个位置的叠加之中。为了说明这一点,可以简单地分析一下这个实验,双缝干涉实验是让一束光束射在有两个竖直狭缝的光栅上,光通过缝所成的图像记录在一块照相底板上。如果一个缝被遮盖,图像将是所期望的:光的一条单线,与无论哪个缝打开一致。直觉地,人们期望如果两条缝都开着,光的图像将反应为这样的事实:光的两条线,和缝一致。然而事实上,照相底板上呈现的是完全分离的许多明暗相间的线。这个结果说明干涉在通过缝的波或说粒子之间发生。

我们可能期望,如果光粒子束或光子流足够弱以致于一次只有一个光子击在底板上,可能没有干涉,光的图像将是光的两条线,与缝一致。即一个单光子穿过一条缝或者另一条,终止在两个可能光线区中的一个。然而实际情形并非如此,经过长时间的累积后,所成的图像仍然显示干涉。这意味着什么?单光子与它自己发生了干涉?为了说明这如何可能发生,实验聚集在跟踪单光子的路径。在这种情形中发生的是测量以某些方式扰乱光子的路径,这时照相底板上呈现两条光线,与光栅上的缝一致。然而,一旦终止了这种跟踪测量后,图像又变成明暗相间的许多条纹。这就表明,单光子态确实是以一定的几率同时移动于可能路径的叠加上,而对光子路径的探测就造成光子态的叠加塌缩到一个确定的位置上。这里的叠加是一个光子的两个本征态的相干叠加,相干是一个光子自己的两个本征态的相干。

长期以来,人们把测量造成的光子态的量子相干叠加性的消失,归结为玻尔的互补性原理或者海森堡的测不准原理。然而,1998 年德国一研究小组对铷原子束在干涉中究竟走哪条路径的实验检验表明,如果沿两条路径的铷原子的内部状态完全相同,则会观察到干涉条纹;如果沿两条路径的铷原子的内部状态完全相反,则观察不到干涉条纹。这时,粒子的运动状态与内部状态的纠缠即量子关联造成了退相干。这种量子关联相当于,测量粒子的内部状态可确定粒子走哪条路径,干涉条纹消失了。实验还说明,测量装置对原子的作用远远小于描述原子质心运动的自由度与描述内部运动的自由度的量子态的纠缠作用。<sup>[1]</sup>这就使得我们对双缝干涉实验和测量造成的干涉项消失的原因的理解前进了一步。这就是测量前微观粒子确实处于相干叠加态,体现的是非定域性,而所谓的测量造成量子相干性的消失,则主要是

由于被测系统和测量仪器两个量子系统之间的纠缠作用。

总之,叠加作为描述原子、亚原子水平的物质和力的性质和行为的一个极富挑战性的概念,不仅是量子理论的一个基本原则,也是实验观察的结果。正是微观粒子内在固有的量子叠加性,确保了微观世界量子叠加现象的普遍存在。然而,微观粒子这种反直观的量子叠加性所体现出来的量子态的非定域的量子关联特征,曾经使得人们在理解量子测量中的微观粒子的客观实在性问题上颇感困惑。因为根据量子理论,如果对两个关联的量子态中的一个进行测量,就决定了另一个态的性质,即另一个量子态也发生了“波包塌缩”。这似乎意味着信息的传递可以“超光速”,从而与狭义相对论直接相冲突。爱因斯坦等人提出的“EPR 佯谬”,正是由此产生的一个测量问题。事实上,不仅爱因斯坦对量子理论的一些说法表示异议,甚至薛定谔,这位量子力学的重要创建者之一,也不高兴他所发现的所暗示的这种远距离的量子关联,更不赞同“哥本哈根解释”对于量子测量所作的“实用主义”解释。而这可以说是“薛定谔猫佯谬”产生的重要诱因。下面我们再来具体分析“薛定谔猫佯谬”产生的哲学背景。

## 二 “薛定谔猫佯谬”产生的哲学背景

20 世纪 20 年代中期,以物理学家玻尔为首的“哥本哈根学派”对刻画微观世界物质运动规律的量子力学的概念基础进行了全面的理论诠释,提出了量子力学的“哥本哈根解释”。通常这也被认为是量子力学的标准解释。根据“哥本哈根解释”,在微观世界,由于测量仪器对于微观粒子存在着“不可控制”的干扰作用,因而我们对于微观粒子性质的认识,不再是一个独立于观测作用的客观过程。这一解释的一些极端说法甚而认为,微观粒子不再是一种独立于观察者主体的客观存在。

“哥本哈根解释”的这种说法,不仅在物理学家内部引起了激烈的哲学论争,产生了长达数十年的玻尔——爱因斯坦之争,并且一直持续到两位伟人相继逝世都未平息;而且在国际哲学界也引起了追随科学前沿的不同哲学流派的关注。实证论者认为,量子力学表明,离开了观察和测量,就不能谈论什么是有意义的;不可知论者认为,量子力学表明,感觉以外是否存在“客观存在”,是一个“未知”的命题,最多只能认为是一种“假设”;主观唯心论哲学家进一步认为:现代物理学的发展原来证实了贝克莱大主教的“存在就是被感”的哲学论断。“月亮在没人看它时确实不存在”!而唯物论哲学家则说:自然科学是辩证唯物主义的天然同盟者,现在自然科学的发展无论如何也不会反戈一击,来否定辩证唯物主义的基本原理。

于是,在整个哲学界,围绕量子力学问题就展开了一场关于哲学基本问题的大论战。中国受国际思潮的影响,曾经在 20 世纪 80 年代到 90 年代,也展开了量子力学哲学问题的大讨论,不同哲学派别的学者、哲人都发表了大量的观点各异的文章,从而使讨论变得异常激烈,最后竟发展到哲学基本观点的大论战,甚至引起了强烈的感情冲突。

量子力学的“哥本哈根解释”所引发的这一场哲学基本

问题的大论战,也使量子力学这座宏伟大厦的一位卓越缔造者——薛定谔卷入其中。薛定谔是一位对哲学有着浓厚兴趣的物理学家,他有两个自认为构成了科学方法的基础的哲学原理:自然的可理解性原理和客观化原理。自然的可理解性原理说:自然界是可以理解的,微观客体的真实状态是可知的。与之相应,对自然界及微观客体进行的理论解释也应该是可以理解的。客观化原理的内容虽然比较复杂,但有一条是:在物理学研究和在日常生活中,不能摒弃朴素的实在论,不能取消真实的外在世界的观念。<sup>[2]</sup>然而,在他看来,“哥本哈根解释”恰恰在这些方面是成问题的。1928年薛定谔在关于波动力学的演讲中说:“有人对波动现象提出了一种超验的、几乎是心理上的解释,这种解释立即受到绝大多数第一流的理论家的欢呼,把它当作唯一符合于实验的解释,而且这种解释现在已经成为人人都接受的(只有少数值得注意的人除外)正统教义了。当我们听到这些情况时,德布罗意(L. de Broglie)必定也同我一样地感到震惊和失望。”<sup>[3]</sup>德布罗意是物质波概念的提出者。在对待“哥本哈根解释”的态度上,他和爱因斯坦、薛定谔基本上是一致的。

为此,薛定谔点名批评玻尔和海森堡(W. Heisenberg)(量子力学的另一位重要建造者,也是“哥本哈根解释”的另一位主要发言人)说:“他们以为客体不能不依赖于观察主体而存在。他们认为物理学的新近发展已经推进到主观和客观的神秘边界,从而使这一边界已经变得不再是一条明晰的边界了。”<sup>[4]</sup>“物理学发现本身无权强迫我们放弃把物理世界描绘为客观实在的习惯。”<sup>[5]</sup>又说,“有一种广泛流行的假说,说什么在任何以前为人们所相信的解释中的实在的客观映象不能够存在了。只有那些乐观主义者(我认为我是其中的一个)认为这是一种哲学的偏向,是在面临巨大危机时自暴自弃的办法。”<sup>[6]</sup>对于薛定谔的批评,海森堡却反驳说:“所有哥本哈根学派的反对者有一点是一致的。这就是,按照他们看来,应当回到经典物理学的实在概念,或者,用更普通的哲学术语来说,回到唯物主义的本体论。”<sup>[7]</sup>

正是因为有哲学上的倾向,不满量子力学的哥本哈根学派对物理实在所做的解释,或者说,正是因为“哥本哈根解释”作为一条引燃各种哲学流派发生思想交锋的导火索,在哲学家甚至物理学家中间产生了强烈的哲学基本观点的分歧,薛定谔才会在提出量子力学的波动方程9年之后,于1935年把量子理论应用到宏观世界,具体而言,是把描述微观世界方面已经取得了极大成功的量子力学的叠加原则,扩展到传统上用经典物理学描述的宏观系统,提出了著名的“薛定谔猫佯谬”,以此来质疑量子力学的“哥本哈根解释”对量子实在解释的荒谬性。事实上,薛定谔和爱因斯坦、德布罗意以及他们之后的几代物理学家所遇到的问题都是不得不应付物理实在。在他们看来,量子叠加是与物理实在不相容的,“哥本哈根解释”对物理实在的解释是成问题的。那么,“薛定谔猫佯谬”到底说的是什么?它的实质问题又是什么呢?

### 三 “薛定谔猫佯谬”及其哲学蕴涵

简单地讲,“薛定谔猫佯谬”思想实验是这样的:一只猫

被关在一个密闭的钢盒中,盒中有一个极其残忍的装置可以致猫于死地,原因是这个装置中的辐射原子会发生衰变,通过一组仪器会让一个装有毒气的小瓶破碎,从而毒死这只猫。当然,这样的事情也可能不会发生,因为辐射原子也可能不发生衰变。这完全是因为微观量子受量子统计规律的支配。如果整个过程持续一小时,那么在这段时间,由于辐射原子既可能发生衰变也可能不发生衰变,因而这只猫既是死的又是活的,即猫处于了一种死活叠加的奇怪状态。根据“哥本哈根解释”,这只不幸的猫在某人打开盒子往里看个究竟之前,只能处于这种不死不活、亦死亦活的叠加状态。只有当人打开盒子往里看时,猫的死活才变得真实。显然,这里已经把“主观者的参与”带入了猫的死活决断过程中,从而使猫的死活不再是一种独立于观察者主体的客观实在,而是依赖于观察者的测量。<sup>[8]</sup>

问题由此变得复杂。薛定谔根据量子力学规律所设想的这只死活叠加的猫存在吗?为什么我们在日常生活中从没有看到过这样一只死活叠加的猫?难道我们日常所见到的诸如猫这样的宏观物体所呈现出的确定状态都是人眼观察的结果?在没有人类出现之前,我们整日与之面对的自然界并不存在?抑或说独立于人的意识之外的客观存在是虚幻的,至少是无意义的?由量子测量派生出的这种“极端工具主义”的说法,自然难以使信奉唯物主义的哲学家和物理学家信服。那么,如何来理解“薛定谔猫”产生的这种哲学上的“佯谬”呢?

可以说,由“薛定谔猫佯谬”可以延伸出两个科学问题:

量子力学是否适用于宏观世界?在量子测量中,量子叠加态如何向统计混合态过渡?与之相应,也可以延伸出两个哲学问题:量子态是否是一种真实的客观存在;如果是,它能否被客观地认识。显然,哲学问题的解决是与科学问题的解决紧密相连的。然而,在薛定谔的时代,由于争论的这些关键性在当时无法用实验检验,长期以来一直停留在思辨性的层面上,因此,难免就使许多人产生了理解上的偏差,包括薛定谔本人,也不能例外。

根据薛定谔,相信猫处于一种不确定的死活叠加的状态,直到有意识的观察者进行观察才能确定猫的死活,自然是天真的想法。在他看来,这一荒谬的结果不仅表明,“薛定谔猫佯谬”是当我们试图调和量子世界的规律与日常的宏观世界的规律时所产生的一个佯谬,而且意味着量子力学不是对物理实在的适当描述,是“坏的科学”。因为如果量子力学是逻辑自洽的基本理论,就应该不仅可以描述微观粒子世界,解释原子尺度粒子如光子的特性;而且也可以描述由微观粒子组成的宏观物体,如月亮、猫等的特性。可是,为什么我们在日常生活中没有看到过这些物体的量子叠加态?如果量子力学不能回答这个问题,就说明量子力学可能存在内在不自洽之处。

也就是说,薛定谔发明这个棘手的实验不是想要说明对猫而言发生了什么,而是通过质疑量子力学的“哥本哈根解释”对量子实在的解释的荒谬性,企图出示现存的量子理论对诸如猫这样的宏观物体有令人困惑的方面。在他看来,量

子叠加原则涉及到像原子一样小,并且遵守量子力学规则的物体时,是很适合的,但是涉及到大物体时情况又是如何呢?所以,这里引人注目的问题是:当量子力学不被应用于基本粒子,而是应用于像猫或者人类这样的宏观物体时,量子理论会显得是如何地荒谬。毕竟,由薛定谔本人提出的量子力学的数学形式是线性的,这暗示一个量子叠加效应的普遍发生。然而,在宏观层次没有看见这样的干涉现象,而这没有发生的事情对确定物理事物的存在甚至又是本质的。我们如何理解经典物理学与量子力学基本概念的这种冲突?

这种困难的情形能用一个寓言来很好地说明:有一个生长在天堂中的天使,他思维的大脑完全是用数学和逻辑营养起来的。他预期要造访地球,所以需要先了解地球的规律。为此,天使长开始向他讲授书本上的量子力学原理。年轻而聪明的天使轻松地理解了书中的一切,因此他知道,当到达地球时能期望看到大量叠加的、同时发生的现象,这些现象是从远古的时代起就被许多小的量子事件累积而产生的。然而,当他真的到达地球时,天使却惊奇地发现事实恰好相反。地球上随处可见的是一个轮廓清晰而分明的物理实在。在他的印象中,除了天上的白云外,地球上再没有什么梦游般令人模糊的图像,而只有硬而分明的轮廓。他震惊于他的所见,始终不能从中清醒过来。

可见,关于量子测量中与微观物理量相关联的宏观可观察层次物理实在的性质实际暗示了什么,是量子理论最为尴尬的领域之一。薛定谔正是通过这个猫的案例,以一种非常尖锐的方式指出了量子测量中存在着的这一困难,假定每个人将意识到这样一只死活叠加的猫是不可能的。因此,除非存在某种机制来破坏活猫和死猫的相干叠加,否则量子力学的合理性和普适性均要受到严重的挑战和责难。然而,半个

多世纪以来,“薛定谔猫佯谬”一直处于哲学思辨之中。薛定谔本人曾经在生命的晚期不无懊悔地说,他希望从未遇见这只猫。那么,“薛定谔猫佯谬”是否真的表明量子力学内在不自洽?近年来,量子测量关于“薛定谔猫”研究的实验和理论的新进展都给予了否定的回答。这些新进展表明,量子力学不仅自洽而且普适。微观世界有量子叠加性,宏观世界也有。我们之所以在日常生活中看不到宏观量子叠加效应,是因为自然界存在着自动的退相干效应。在特殊的情形中,像“薛定谔猫”这样的宏观量子叠加态也可以存在。这样一来,“薛定谔猫佯谬”确实就成为一个“佯谬”,一个源于“科学上”的理解不足而产生的“哲学上”的“佯谬”。

#### 【参 考 文 献】

- [1] Durt, S., Nonn, T., Rampe, G. Nature, 1998. 395:33.
- [2][3] 薛定谔. 关于波动力学的四次演讲[M]. 代山译. 北京: 商务印书馆, 1965. 58, 44.
- [4] Schrodinger, E. Science and Humanism: physics in our time [M]. Cambridge University Press, 1952. 50.
- [5] Schrodinger, E. Science Theory and Man [M]. New York: Dover Publications Inc., 1957. 203.
- [6] Heisenberg, W., Schrodinger, E. View On the Modern Physics [M]. New York: Potter, 1961. 38.
- [7] Heisenberg, W. Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science [M]. New York: Harper & Row, 1958. 129.
- [8] Schrodinger, E. Discussion of Probability Relations Between Separated Systems [J]. Proc. Camb. Phil. Soc. 1935 (31): 555 - 563. This translation: Proceedings of the American Philosophical Society [J], 1980(124): 323 - 338.

(责任编辑 成素梅)