



## 量子力学的哥本哈根解释

黄永义

(西安交通大学物理学院, 陕西 西安 710049)

**摘要** 本文较详细地阐述了量子力学的哥本哈根解释, 包括玻尔并协性原理和海森堡不确定原理、经典仪器、波函数坍缩、哥本哈根解释视角中的因果律。本文还列举了基于该解释的两个典型的测量实例: 惠勒延迟选择实验和没有相互作用的相互作用; 简要介绍了其他有影响力的量子力学解释: 多世界解释、自洽历史理论、量子贝叶斯模型等。

**关键词** 玻尔并协性原理; 海森堡不确定原理; 经典仪器; 波函数坍缩; 因果律; 量子测量效应

## COPENHAGEN INTERPRETATION OF QUANTUM MECHANICS

HUANG Yongyi

(School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049)

**Abstract** The paper demonstrates the Copenhagen interpretation of quantum mechanics in detail, including Bohr's complementarity principle, Heisenberg's uncertainty principle, the classical apparatus, the wavefunction collapse, the causality of the classical physics seen from the Copenhagen interpretation. It also presents the two typical measurement examples: Wheeler's delayed choice thought experiment and interaction without interaction. Other influential interpretations of quantum mechanics are briefly introduced; the multi-worlds interpretation, the self-consistent histories approach and the quantum Bayesianism.

**Key words** Bohr's complementarity principle; Heisenberg's uncertainty principle; classical apparatus; wavefunction collapse; classical causality; quantum measurement effect

量子力学奠定了不同物理学分支中理论基础, 直接推动了核能、激光和半导体等现代技术的创新, 量子力学成功地预言了各种物理效应并解释了诸多方面的科学实验, 成为当代物质科学发展的基石。量子力学的数学公式建立以后, 人们就努力挖掘这些公式的内涵, 理解量子力学对自然的描述, 从而形成了量子力学的解释。在诸多量子力学解释中哥本哈根解释出现得最早, 将测量仪器设定成经典仪器后, 又唯像地引入波函数坍缩假设, 哥本哈根解释变成了理解量子力学描述自然的十分简洁而又有效的认识论。根据哥本哈根解释, 人们甚至能预测不同测量过程可能产生观测效应, 由此哥本哈根解释赢得了大多数物理学家的支持从而成为量子力学的正统解释, 对人们的哲学观念产生了深远的影响。严格讲, 哥

本哈根学派并没有关于哥本哈根解释的统一观点, 而是集中了以玻尔为首的这个圈子中若干相似的观点, 它们之间有时各有不同甚至冲突, 因而很难说清楚这个学派的确切论点。有关哥本哈根解释的文章多见诸于玻尔和海森堡等人的演讲稿, 这些经典著作晦涩而难懂。现有的关于哥本哈根解释的资料往往是借鉴外文资料, 又夹杂一些作者的适当发挥, 可谓资料越多越是混乱。大家并不完全清楚哥本哈根解释的真实内涵, 对哥本哈根解释也只有碎片化的模糊印象, 更是很难抓住哥本哈根解释的精髓。本文整理大师们的著作, 较准确较完整地阐述哥本哈根解释, 阐明了该解释对经典因果律的看法, 列举了该基于该解释的两个典型的测量实例: 惠勒(J. Wheeler)延迟选择实验和我们提出的没有相互作用的相互作用,

收稿日期: 2020-05-23; 修回日期: 2020-07-24

基金项目: 西安交通大学“名师、名课、名教材”建设工程项目(校 2018); 西安交通大学第二批“课程思政”示范课程项目(校 2019)。

作者简介: 黄永义, 男, 副教授, 主要从事原子物理教学和研究工作, yyhuang@xjtu.edu.cn。

引文格式: 黄永义. 量子力学的哥本哈根解释[J]. 物理与工程, 2020, 30(6): 3-11, 14.

还概要地介绍了其他有影响力的量子力学解释,如埃弗里特(H. Everett III)多世界解释,格里菲斯(R. Griffiths)和盖尔曼(M. Gell-Mann)自洽历史理论,富克斯(C. Fuchs)、沙克(R. Schack)等人量子贝叶斯模型等。

## 1 基本原理

当我们看到理论在各种情况的实验结果,同时已经检查过理论的应用不包含内部矛盾时,我们相信我们能理解理论的物理内容。例如我们相信能理解爱因斯坦时空概念的物理内容,因为我们能前后一致地看到爱因斯坦时空概念的实验结果,当然这些结果有时会和我们的日常时空物理概念不符合。量子力学的物理内容(解释)却充满了内部矛盾,因为它包含了相互矛盾的经典物理学的语言(人们日常语言被推广和严格量化后成为经典物理学语言),如粒子和波,连续和不连续。在经典物理中给定一个质点,我们很容易理解这个质点的位置和速度。然而在量子力学中质点的位置和速度(动量)的基本对易关系  $qp - pq = i\hbar$  成立,我们每次不加修正地使用质点的位置和速度就变得十分不准确甚至会出现矛盾。当我们承认不连续是在小的区域很短的时间内发生的某种典型的过程,质点的位置和速度矛盾就变得相当尖锐。例如图 1 所示我们考虑一个质点的一维运动,在连续视角看,其位移和时间的变化关系,质点某时刻的速度为曲线上该时刻点的切线的斜率。而从连续视角看图中的曲线被一系列有限距离的点代替。在此情况下谈论某位置的速度是没有意义的,因为:(1)两点才能定义速度,(2)任何一点总是和两个速度相联系。由此我们意识到使用通常的经典物理学的语言来理解量子力学的物理内容是不可能的。量子力学的数学方案不需要任何的修改,因为它已被无数实验所证实。能否不使用经典物理学的语言描述量子力学的物理内容呢?不行,必须认识到人们使用经典术语描

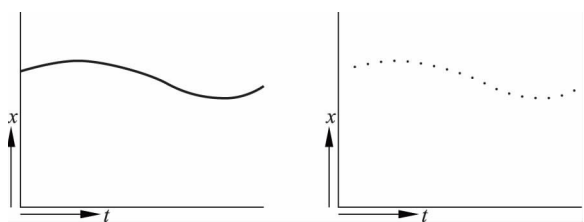


图 1 连续和不连续视角下质点的运动

述实验现象的必要性,因为经典物理学概念正是日常生活概念的提炼,并且是构成全部自然科学基础的语言中的一个主要部分,正如魏扎克(von Weizsäcker)指出的自然比人类更早,而人类比自然科学更早。如何调和经典概念在描述量子现象时出现的矛盾呢?1927年玻尔提出了并协性原理<sup>[1]</sup>,同时海森堡提出了不确定原理<sup>[2]</sup>。

**玻尔并协性原理:**描述自然规律的一些经典概念的应用不可避免地排除另外一些经典概念的应用,而这另外一些经典概念在另一些条件下又是描述现象不可缺少的,必须而且只需将所有这些既互斥又互补的概念汇集在一起,才能而且一定能对现象作出详尽无遗的描述。

**海森堡不确定原理:**粒子在客观上不能同时具有确定的位置坐标和相应的动量。

我们认为玻尔并协性原理和海森堡不确定原理都抓住了问题的实质,认识到经典概念的局限性,在描述量子现象时会相互矛盾。玻尔并协性原理强调了相互矛盾的经典概念在各自的应用场合是相互排斥的,而对研究现象作出详尽无遗的描述必须且只需将所有这些互斥概念汇集在一起,而这体现出经典概念的互补性。海森堡不确定原理则定量地给出了相互矛盾的物理量被同时测量时的误差之间的关系。玻尔并协性原理和海森堡不确定原理表述方式体现了玻尔和海森堡的研究特点,玻尔直觉强大,喜欢描述性的论述,海森堡则用定量的数学结果描述他的思想。有了并协性原理和不确定原理,可以回答这个问题了,即能否用经典概念达到对量子力学物理内容的准确的理解呢?玻尔并协性原理回答是能,海森堡不确定原理则要求经典概念使用时要受到它的限制。玻尔并协性原理和海森堡不确定原理是量子力学统计特性的根源,因为我们看到不确定原理中同时测量两个共轭量,则两个量均出现测量误差,有误差必然存在平均值,有平均值则测量物理量时必然出现一系列的测量值。我们知道可以用波函数的玻恩规则来计算物理量的平均值,事实上波函数的玻恩规则在哥本哈根解释中只是计算物理量观测值的工具,并未达到原理的高度。

## 2 主要内容

哥本哈根解释两个核心假设:经典仪器和波函数坍缩。将微观系统的观测仪器设定为经典仪

器,这个设定是哥本哈根解释最微妙、最务实的地方,因为观测者是宏观世界的人,观测者使用的仪器也是经典的仪器。经典仪器的功能有两个,一则是它可以被实验者感知和操作,二则是经典仪器测量微观系统时会引起系统波函数的坍缩。波函数坍缩是哥本哈根解释的唯像假设,这个假设是有效的、实用的、简洁的,当然也是成功的。经典仪器的多个自由度使得它对系统测量时会对系统产生不可控制的干扰,测量过程是不可逆的,测量时会随机得到系统的某个本征值,波函数会瞬间坍缩到系统相应的某个本征态,波函数坍缩过程不遵循薛定谔方程。

在量子力学中,例如对云室中一个电子的运动感兴趣,并且能用某种观测决定电子的初始位置和速度。但是这个测定将不是准确的,它至少包含由于不确定关系而引起的不准确度,可能还包括由于实验困难产生的更大误差,正是由于这些不准确度,才容许人们将观测结果转达成量子力学的数学方案。波函数已经在初始时间通过观测决定了以后,人们就能够从量子力学计算出以后任何时间的波函数,并能由此决定一次测量给出受测量的某一特殊值的概率。当对系统的某种性质做新测量时,波函数才能和实在联系起来,而测量结果还是用经典物理学的术语叙述的。对一个实验进行理论解释需要三个明显的步骤:(1)人们必须用经典物理学的术语来描述第一次观测的实验装置,并将初始实验状况转成一个概率函数,即制备初态;(2)系统随时间变化的波函数服从量子力学的定律按薛定谔方程演化,它随时间的变化关系时能从初始条件计算出来。波函数结合了客观与主观的因素,包含了关于系统可能性或较大倾向的陈述,而这些陈述是完全客观的,它们并不依赖于任何观测者。同时它也包含了关于人们对系统知识的陈述,这是主观的,因为它们对不同的观测者就可能有所不同。正是由于这个原因,观测结果一般不能准确地预料到,能够预料的只是得到某种观察结果的概率,而关于这种概率的陈述能够以重复多次的实验来加以验证。波函数不描述一个确定事件而是描述种种可能事件的整个系综,至少在观测的过程中是如此。(3)关于对系统所作新测量的陈述,测量结果可以从波函数推算出来<sup>[3]</sup>。对于第一个步骤,满足不确定关系是一个必要的条件。第二个步骤不能用经典概念的术语描述,因为这个步骤需要完全不

同于经典物理的量子力学。这里没有关于初始观测和第二次测量之间系统所发生的事情的描述,因为经典概念不能用在两次观测之间的间隙,只能用于观测的那个时刻,而要求对两次观测之间所发生的事情进行描述在哥本哈根解释看来是自相矛盾的。例如初始观测发现电子处于氢原子激发态,第二次观测发现电子处于基态,人们无法描述两次观测之间(电子从激发态向基态跃迁过程中)电子的运动状况。只有到第三个步骤,人们才又从可能转变到现实。观测本身不连续地改变了系统的波函数,系统从所有可能的事件中选出了实际发生的事件。因为通过观测,人们对系统的知识已经不连续地改变了,它的数学表示也经受了不连续的变化,这个过程被称为量子跳变。只有当对象与测量仪器发生了相互作用时,从可能到现实的转变才会发生,它与观测者用心智来记录结果行为是没有联系的。然而,系统波函数中的不连续变化是与仪器记录的行为一同发生的,因为正是在记录的一瞬间人们关于研究对象知识的不连续变化在波函数的不连续变化中有了映象,实质上就是系统的波函数在经典仪器测量的一瞬间坍缩到某个本征态。

关于观测,哥本哈根学派还有这些共同的观点。量子力学中波函数是一个对粒子状态的完备描述,量子态包含了关于这个粒子运动状态的一切信息,不存在任何其他的“尚未发现”的东西可以告诉我们额外的信息,哥本哈根解释不认可隐变量理论。系统的量子态有一个非常奇特的性质,那就是态叠加原理,任何一个量子态都可以看做是其他若干量子态相互叠加的结果。与量子态对应的是可观察量,即当我们观察这个粒子某个可观察物理量时,能够实际得到什么结果。量子态的态叠加原理使得将要发生的可观察量的测量结果总是不确定,我们不会得到粒子“既在这儿又在那儿”,观测的结果只能是不确定的情形,粒子或者在这儿或者在那儿。一旦系统被制备到某个量子态,测量系统时可以得到物理量的某个本征值,同时系统波函数坍缩到本征值对应的本征态。如果重复制备同样的量子态,同样的测量会产生不同的结果。每个测量值出现的概率用玻恩规则即波函数模平方来确定,测量值的概率或连续的(如位置或动量)或者分立的(如自旋),这取决于被测的物理量,测量过程被认为是随机的和不可逆的。在哥本哈根解释中,观测本身也有特殊的

不确定性,人们既可以把研究对象算在被观测体系中,又可以把它看成一种观测手段。

现代量子力学认为当我们观察一个粒子的时候,种种奇怪而神秘的事情发生了。粒子原本的叠加态本来是可以按照任意的方式来叠加的,由于我们想要观察的可观测量并不相同,粒子有着不完全自由的选择,只能从我们想要观察的可观测量的一组本征态中选择,测量结果只能是其中之一,而其他的叠加方式都不存在了。比如说,我们观察动量的时候,实际上就限制了这个粒子,让粒子只能在一组动量本征态中选择它的观测结果。在我们观察的瞬间,我们迫使这个粒子从这些本征态中随机地选择其中一个本征态,而扔掉其余所有的状态,变成了一种确定的状态,这就是所谓的波函数坍缩。这个过程是在所谓玻恩规则支配下的完全随机的过程。当我们完成观察以后,粒子就会待在它所坍缩到的状态上。也就是说,我们的观察使得量子态发生了一个随机的突变,让它从一个叠加态变成了某一组确定的本征态的其中之一。根据我们想观测的变量不同(位置、动量、能量……),这个世界竟然会变幻它的面目来响应!如此渺小的人类,在宇宙间犹如沧海一粟,我们的一个“我想要观察一下”这样的决定竟然导致了整个宇宙的巨变<sup>[4]</sup>!玻尔认为“按量子力学,仪器对客体有相互作用,只有当决定某一物理量的实验装置选定后,人们才能谈论、预言这个量的值。离开了仪器,观测结果就毫无确定性可言,要准确地预言什么,就得知道用什么观测仪器”。玻尔还认为“在微观领域内,可观测的物理量本身都离不开测量装置,物理实在只有在测量手续、实验安排等完全给定的意义下才能在量子力学中毫不含糊地使用”<sup>[5]</sup>。

哥本哈根解释明确地反对独立于观察者的客观现实这种概念,如果不观察一个系统,这个系统的真实状态实在是毫无意义。因为不管人们怎么描述它,都无法确知描述是否正确。因而,那些所谓对真实客观现实的描述都是一种随意的呓语:没有观察它,谈何真实?海森堡说:“我们观察到的不是自然界本身,而是自然界根据我们的观察方法展示给我们的东西。”惠勒也说:“现象在没有被观测到时,绝不是现象。”<sup>[6]</sup>波函数就是、也只能是一种概率波,它不是真实的物理状态,而只是告诉了我们能够对现实期望些什么,也即是我们对现实的认知,而不是现实本身。在哥本哈根解释

看来现实是什么完全依赖我们对其观察,只有当我们真正观察到了,我们才能有信心认为它的真实状态是什么。因而,一个不依赖于观察者的现实无异于胡说八道。真正的现实不是现实本身,而是我们看到了什么,这当然就取决于我们如何去看。由此看出,哥本哈根解释本身就是典型的实证主义。哥本哈根解释如何看待薛定谔猫悖论呢?在我们不观察猫的时候,它是死的还是活的?哥本哈根解释认为这种问题是自相矛盾的,在不观察的前提下,根本就谈不到事物的真实状态:不存在一种不依赖于观察的现实!自然而然地哥本哈根解释不屑于去回答叠加态到底是什么这种问题,真正的问题是,当我们观察时,我们会看到什么,以及我们用何种观察手段,会看到何种现象。实验者观测到活猫就是活猫,观测到死猫就是死猫。半死半活的猫是什么,没有观测到,就不关心猫是什么状态。类似地爱因斯坦就很困惑地问派斯(A. Pais):“你是否相信,月亮只有在看着它的时候才真正存在?”爱因斯坦的问题暗示着如果人们不观测月亮,月亮就不存在,很有唯心主义哲学家贝克莱(G. Berkeley)“存在即感知”的意思。月亮不被观测时当然是存在的,但是我们无法知道它的真实状态,只有我们用不同观察手段才能从不同角度揭示月亮的性质,从而获得月亮各个方面的知识。

### 3 哥本哈根解释中的因果律

事实上,经典物理学的因果律在哥本哈根解释看来也不再成立了,因为经典因果律暗示着一个确定的结果联系于一个确定的原因。显然因果律只有在人们能够对原因和结果进行观测,且在观测过程中对它们不产生影响时才有意义。但哥本哈根解释认为人们对研究对象特别是原子物理中的现象每一次观测都会引起有限、一定程度上不可控制的干扰。此时就既不能赋予现象又不能赋予观察仪器以一种通常物理意义下的独立实在性了。因此在哥本哈根解释中任何观测的进行都以放弃研究对象的观测现象的过去和将来之间的联系为代价,因为每次观测都打断知识或事件的连续演化,并突然引进新的起始条件(波包坍缩),事实上只要观测取决于研究对象被包括在所观测的体系之内,观测的概念就是不确定的。从而很小但不为零的普朗克常数使人们完全无法在现

象和观测现象的测量仪器之间画一条明确的分界线。这种分界线是经典物理中观测的依据,从而形成经典运动概念的基础,因果律是经典物理中一个基本的规律。经典物理中的一个基本特征是物理规律的时空标示和因果率要求的无矛盾的结合,量子力学的本性使人们不得不承认物理规律的时空标示和因果要求是依次代表着观察的理想化和定义的理想化的一些互补而又互斥的描述特点。量子力学中一方面一个物理体系态的定义要求消除一切外来干扰,但依据量子力学没有测量仪器和对象的不可控的测量的干扰,任何观察都将是是不可能的,此时时空的概念也不再具有直接意义;另一方面,如果人们为了使观察成为可能而承认体系和不属于体系的适当观察仪器之间有某些相互作用,体系的态的一种单义的定义就不可能,从而通常意义下的因果性问题也不复存在<sup>[7]</sup>。经典意义的因果律在量子力学中不再成立还可以用一个简化的方法进行论证,由于不确定关系的存在,任何仪器都不能同时准确地测量一个粒子的位置和动量。因为人们无法准确地知道现在粒子的位置和动量,人们一定不能确切地同时知道未来粒子的位置和动量,粒子未来的状态不能由现在的状态推知,经典的因果律在量子力学范畴内也就失去了意义。简言之,人们不能确切地知道现在,人们也就不能确切地知道未来,经典因果律用到量子力学范畴不是结论有问题而是前提出了问题。

量子力学已有一套精确严密的数学定律,这些形式上因果律的数学关系不能表述为时间空间上存在着各个客体之间的简单关系。理论所给出的能够观测验证的预言只能近似地用时间空间上各个客体来描述,原子过程的时间空间的不确定性是人类观测行为为不确定性的直接后果。而当用时空描写客体现象时,必须加上不确定关系的限制才能在一定程度上用于原子现象,在量子理论中两种方法的描述之间有统计上的关系。玻尔互补的概念也不仅仅是粒子图景和波动图景的互补,描述自然现象的严密因果律和时间空间描述方法之间也不可能同时完全被满足,两者之间既有互相排斥又有互相补充的联系。放弃经典的因果律绝不意味着量子力学描述范畴的任何局限,因果律合理的定义即一个场合和另一场合之间定量定律的关系预示着互补性观点是因果概念一种合理的推广。

#### 4 哥本哈根解释和量子测量实例

依据哥本哈根解释,人们对量子体系的观测都会对被测系统产生有限的、一定程度上不可控制的干扰;并且由人们想要观察的可观测量,系统波函数只能选择这些可观测量的一组本征态的叠加,而其他的叠加方式都不存在了。人们观察的瞬间,观测行为迫使系统从这些叠加的本征态中随机地选择其中一个本征态。因此量子测量有时会产生新的物理(观测)效应,如薛定谔猫,惠勒延迟选择实验,量子芝诺效应,Vaidman 炸弹检测器等,惠勒更是将哥本哈根解释的精髓归结为“现象在没有被观测到时,绝不是现象”。下面列出两个例子可以很好地理解哥本哈根解释的意义,也可以很吃惊地感受一下量子力学中的现象和人们日常的直觉之间的巨大差别。

第一个典型的例子是 1978 年惠勒提出的延迟选择实验<sup>[8]</sup>,其实验示意图如图 2 所示,激光脉冲源发射的光子经过分光镜 BS1(光子有一半的概率穿过反射镜到达 M2,一半概率被反射镜反射到达 M1),两个全反射镜 M1 和 M2 把两个路径的光子汇集起来,从探测器 D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub> 的嘀嗒声可以判断光子的路径是 BS1-M1 或者 BS1-M2。令人吃惊的现象出现了,在光子的交汇处再放置和 BS1 一样的分光镜 BS2,调整 BS1-M1-BS2 和 BS1-M2-BS2 的相位,可使得两个路径的光子在 BS2 处发生反相干涉, $\langle a_{out}^\dagger a_{out} \rangle = \sin^2(\varphi/2)$ , $\langle b_{out}^\dagger b_{out} \rangle = \cos^2(\varphi/2)$ 。反相干涉的产生必定是一个光子同时从 BS1-M1-BS2 和 BS1-M2-BS2 两个路径到达 BS2 处相干叠加形成,因为光子单独走

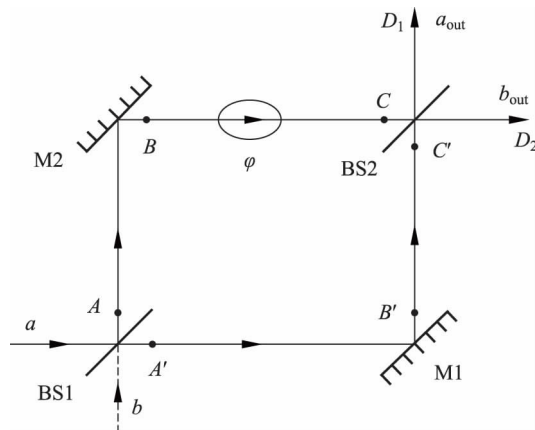


图 2 惠勒延迟选择实验



BS1-M1-BS2 或 BS1-M2-BS2 路径都不会产生干涉现象;如果不放置分光镜 BS2,则一个光子通过分光镜 BS1 后要么沿 BS1-M1-BS2 路径要么沿 BS1-M2-BS2 路径到达 BS2 处没有干涉现象  $\langle a_{out}^\dagger a_{out} \rangle = \langle b_{out}^\dagger b_{out} \rangle = 1/2$ 。放置 BS2 时光子表现出波动性的,同时走 BS1-M1-BS2 和 BS1-M2-BS2 两个路径形成干涉图样,不放置 BS2 光子表现出粒子性,或者走 BS1-M1-BS2 路径,或者走 BS1-M2-BS2 路径,干涉图样消失,这正是哥本哈根解释的精髓,人们的观测活动改变了量子系统的状态,即光子行走的路径。更令人吃惊的是如果在光子通过 BS1 快到达而还没有到达交汇点时,人们把 BS2 放置在交汇点,会出现什么现象呢?按通常的观念,光子通过 BS1 后光子的路径已经确定了即要么沿 BS1-M1-BS2 路径要么沿 BS1-M2-BS2 路径到达交汇处,但无论光子沿哪条路径,探测器  $D_1$ 、 $D_2$  都不会观测到干涉条纹,但 2007 年法国一个研究小组的实验结果表明<sup>[9]</sup>,探测器  $D_1$ 、 $D_2$  依然观测到干涉条纹。结果意味着虽然光子已经经过 BS1,但它的飞行路径依然随着人们的观测活动而改变,这个现象就是惠勒延迟选择实验。通俗一点来说,人们现在的观测活动改变了光子过去的飞行路径,人们可以在事情发生之后再决定它之前是如何发生的,经典物理学的因果律遭到了彻底的颠覆。

第二个例子是没有相互作用的相互作用(interaction without interaction)。我们在研究利用离子束探测简谐振动时,提出了一个新的没有相互作用的相互作用量子测量效应。如图 3 所示,当一束离子束受交变电场的作用在垂直与束流方向做简谐振动时(图中圈叉表示),离子探测器在小于振动周期  $T$  的  $\Delta t$  时间内的计数存在一个由简谐振动引起的修正因子  $\Delta t/T$ ,即  $N' = N \cdot \Delta t/T$ ,式中的  $T$  是简谐振动的周期, $N$  表示没有横向简谐振动时  $\Delta t$  时间内离子的数目<sup>[10]</sup>。事实上离子束的横向简谐振动和纵向飞行的平移运动相互垂直,没有相互作用,但当测量与纵向平移运动有关的物理量—离子数目时,横向简谐振动也会对

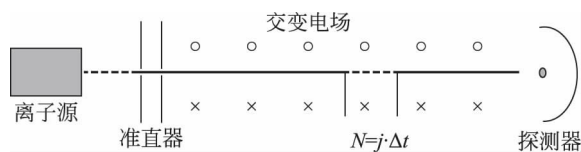


图 3 原子束探测简谐振动

离子数目的测量结果产生影响,多出一个振动因子,因此起名为没有相互作用的相互作用量子测量效应。简言之,两个运动本来没有相互作用,一旦进行测量它们就产生相互作用,故没有相互作用的相互作用是对这个理论预言形象而准确的描述。该测量效应本质很简单,因为离子束横向振动和纵向平动没有相互作用,故哈密顿量可写为  $H = H_A + H_B$ ,体系的量子态为  $\rho = \rho_A \otimes \rho_B$ ,式中 A 代表离子的纵向平动,B 代表离子束的横向简谐振动。探测器测量到的纵向的离子数目为  $\langle N \rangle = Tr_A(\rho_A N) \cdot Tr_B(\rho_B)$ ,通常  $Tr_B(\rho_B) = 1$ ,故没有相互作用的两种运动对各自对应的物理量的测量没有影响。然而如果探测时间  $\Delta t$  小于振动周期  $T$ ,那么就有  $Tr_{B,\Delta t}(\rho_B) = \Delta t/T < 1$ ,于是出现了我们得到的结果,即探测器记录的原子的数目小于实际入射的原子数目。原本没有相互作用的两种运动也会对另一种运动所对应的物理量的测量产生了影响,它的本质当然是一种量子测量效应。该量子测量效应不但给出令人吃惊的结果,而且也可视为宏观量子效应,因为经典简谐振动和离子数目被离子探测器的记录都是宏观事件。简谐振动对离子束计数的修正因子与简谐振动的振幅和相位无关表明无论多么小振幅的简谐振动都能被检测到,这个量子测量效应有可能为引力波探测提供新的方法。

新的没有相互作用的相互作用量子测量效应可以用哥本哈根解释给出满意的说明<sup>[11]</sup>。在小于一个周期时间内测量离子数目小于入射的离子数目,离子跑哪去了呢?实际测量离子数目时,要求探测器和离子束同频共振。在入射方向垂直的横向上离子束和探测器是相对静止的,被探测器记录的离子数目(假设探测器的探测效率为 1)应该等于入射的离子数目,既然如此为什么还会出现一个所谓的振动因子  $\Delta t/T$  呢?谁不被量子力学迷惑过,谁就没有理解它。其实所有的秘密都藏在离子探测器里面,按量子力学的哥本哈根解释,量子测量过程中被测对象必然和经典实验仪器相互作用,对象的测量过程必然存在一定程度上的不可控制的干扰,此时被测对象和经典仪器都不在拥有经典物理世界的那种独立实在性,被测对象和经典实验仪器之间也不再明确的分界。在离子束探测的问题上,离子探测器和离子束同频共振,它们具有完全相同的相位,振幅和频率。横坐标  $x$  代表离子束和探测区域振动的位

移,纵坐标是简谐振动的概率密度,即波函数的模平方,如图4所示。探测器便具有了双重功能:①记录到达探测器的离子的数目;②抽取离子束横向简谐振动的信息,包括相位,振幅和频率。搞清楚了探测器的作用,以上两个问题迎刃而解。离子束的离子跑哪去了呢?因为探测器和离子束同频共振,在横向的探测器相对于离子束是静止的,所有的离子都跑到探测器了。既然如此,所谓的振动因子从何而来呢?如上图所示,在小于周期的时间间隔 $\Delta t$ 内,探测器从 $x$ 振动到 $x+dx$ ,而探测器在 $x$ 到 $x+dx$ 范围内的概率恰好为 $\Delta t/T$ 。这样探测器测量的离子数目就等于入射的离子数目 $N$ 乘以探测器本身在 $x$ 到 $x+dx$ 范围内的概率 $\Delta t/T$ ,与理论计算的结果完全一致,正是探测器从离子束抽取的简谐振动的信息产生了奇特的振动因子。

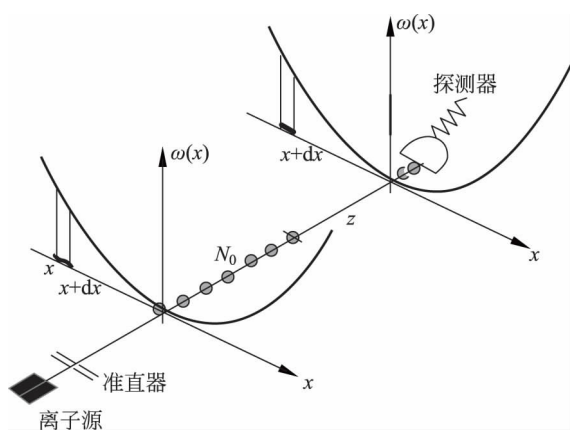


图4 当原子束有一个整体的横向的经典谐振动时,小于周期的时间内探测的原子数会变少

## 5 量子力学解释的发展

哥本哈根解释强调了经典物理学语言描述量子世界时的互补性,在同一实验中经典概念又相互排斥,玻尔并协性原理和海森堡不确定原理是量子力学概率性的根源。哥本哈根解释派认为经典仪器对系统测量时必然有不可控制的干扰,测量影响了观测结果,只有当决定某一物理量的实验装置选定后,人们才能谈论预言这个量的值。实验者对系统所作的实验意图、测量仪器安排和实验手续都是主观的,这样看来人们把一个主观论因素引入了理论,即系统所发生的事情依赖于人们观测它的方法,或者依赖于人们观测它这个事实。这似乎表明,观测在系统演化中起着决定

性作用,并且实在因为人们是否观测系统而有所不同。1935年冯诺依曼在哥本哈根解释的基础上提出了一般的量子测量理论<sup>[12]</sup>,该理论形象的看,好像一条无限延伸的仪器链。该理论的推论是波函数的坍缩最后归结为人的意识,是人的意识决定了量子测量的结果。

针对量子力学的哥本哈根解释,爱因斯坦等人坚持认为,物质世界的客观性是人类通过科学阐释自然规律的必要基础。寻求一个没有意识介入的客观的量子力学诠释无论对物理学还是对认识论都具有根本的意义。1957年埃弗里特提出了多世界解释<sup>[13]</sup>,该解释认为世界遵循量子力学的规律,测量仪器、被测系统和观察者整体构成一个宇宙波函数。测量前宇宙波函数是系统、仪器和观察者的乘积,测量后,宇宙波函数变成若干乘积态的相干叠加。以薛定谔猫为例,测量前原子处于激发态和基态叠加态,猫是活的,人准备观察;测量发生后,原子、猫和人构成的宇宙波函数瞬时分裂为两个宇宙,人也分裂到两个宇宙里。在一个宇宙里人看到了死猫和原子辐射,在另一个宇宙里人看到了活猫和原子不辐射,量子测量使得宇宙分裂为多个宇宙,每个宇宙间不能交流和通信。

后来埃弗里特本人也坚信量子力学普适性,宇宙也不可分裂。多世界解释启发了人们把量子测量视为一种客观的、没有意识介入的物理过程。格里菲斯,盖尔曼发展的自治历史理论认为宇宙中物理过程,没有外部测量,也没有外部环境,一切都在宇宙内部衍生,宇宙就可以看成从量子化宇宙约化出来的经典世界<sup>[14,15]</sup>。量子力学一切都是离散而非连续的,所以我们讨论的“一段时间”,实际上是包含了所有时刻的集合,从 $t_0, t_1, t_2$ ,直到 $t_n$ ,量子力学的历史是指对应时刻 $t_k$ ,系统有相应的量子态 $A_k$ 。自治历史理论赋予每个历史一个经典概率,对任何瞬间宇宙发生的事情作精细化描述,就得到一个完全精粒化历史(completely fine-grained history)。不同精粒化的历史相互干涉,此过程是量子演化过程不能用独立的经典概率加以描述,例如电子的双缝干涉实验,电子通过左缝和通过右缝两个历史不是独立自主的,是相互干涉相互纠缠在一起,即电子同时通过了双缝。由于宇宙内部的观测者能力的局限性或不同需求,只能用简化的图像描述,本质上对大量精粒化历史进行分类粗粒化(coarse-grained)描述。如一

场足球比赛,甲队获胜是粗粒化历史,而甲队和乙队比赛 $1:0, 2:1, 2:0, 3:1\cdots$ 这些可能的比分会以一定概率出现,它们是精粒化历史。类内运动、无规运动抹除各类粗粒化历史之间的相干性,使得粗粒化历史成为一种退相干的历史。我们只关心比赛的胜负结果,而不关心具体比分时,事实上就是对每一种可能的比分遍历求和。当所有精粒历史被加遍以后,它们之间的干涉往往会完全抵消,或几乎完全抵消,这时两个粗粒历史的概率又变得像经典概率一样可加了。也许我们分不清一场比赛是 $1:0$ 还是 $2:0$ ,但粗粒历史的赢或平总能分清,而粗粒历史的赢或平之间不再是相干的。现在考虑薛定谔猫的情况,那个决定猫命运的原子经历这衰变或不衰变的精粒历史,猫死或猫活是模糊的陈述,是两大类历史的总和。当我们计算猫死和猫活之间的干涉时,其实穷尽了这两大类历史下每一对精粒历史( $10^{27}$ 量级的原子)之间的干涉,而它们绝大多数都最终抵消掉了。猫死和猫活两类粗粒历史之间相互干涉相互纠缠的联系被切断,它们退相干,最终只有其中一个真正发生,或者猫死或者猫活,这样就解释了薛定谔猫悖论。

20世纪90年代末,尤其是2000年之后,随着量子计算和量子信息方面研究进展,又一股新势力渐渐崛起,这就是量子信息诠释,最典型的就是量子贝叶斯模型(Quantum Bayesianism),或简称为量贝模型(QBism)。量贝模型的主张是从认识概率的本质入手,提出了一些极为大胆的新观念。我们认为如果说高冷傲娇的哥本哈根诠释,只是摆出“事实就是这样,你不理解我也没办法”的姿态,外表妖艳内心善良的多元世界诠释则在想尽办法帮助人们形象地理解量子理论,那么霸道的量子信息诠释,则像是大声地怒吼,“放弃一切还原论的幻想吧,地球人!构成世界的基础根本不是物质,而是纯粹的信息。而且这些信息,也只是你头脑中的主观投射结果而已。”

量贝模型将量子理论与贝叶斯派的概率观点结合起来<sup>[16,17]</sup>,它也认为波函数并非客观实在,只是观察者所使用的数学工具,波函数非客观实在也就没有什么量子叠加态,如此便能避免诠释产生的悖论。根据量贝模型,概率的发生不是物质内在结构决定的,而是与观察者对量子系统不确定性的置信度有关。量贝解释将与概率有关的波函数定义为某种主观信念,观察者得到新的信息之后,根据贝叶斯定理的数学法则得到后验概率,

不断地修正观察者的主观信念。尽管认为波函数是主观的,但量贝模型并不是虚无主义理论否认一切真实。量子系统是独立于观察者而客观存在的。每个观察者使用不同测量技术,修正他们的主观概率,对量子世界作出判定。在观察者测量的过程中,真实的量子系统并不会发生奇怪的变化,变化的只是观察者选定的波函数。对同样的量子系统,不同观察者可能得出全然不同的结论。观察者彼此交流,修正各自的波函数来解释新获得的知识,于是就逐步对该量子系统有了更全面的认识。根据量贝模型,盒子里的薛定谔猫并没有处于什么既死又活的恐怖状态,但盒子外的观察对里面的猫态的知识不够,不足以准确确定它的死活,便主观想象它处于一种死活二者并存的叠加态,并使用波函数的数学工具来描述和更新观察者自己的这种主观信念。量贝模型创建者之一的富克斯证明了计算概率的玻恩规则几乎可以用概率论彻底重写,而不需要引入波函数。因此,也许只用概率就可以预测量子力学的实验结果了。富克斯希望,玻恩规则的新表达能够成为重新解释量子力学的关键,企图用概率论来重新构建量子力学的标准理论。量贝模型为量子力学的解释提供了一种新的视角。

## 6 小结

本文较详细地阐述了量子力学的哥本哈根解释,包括玻尔并协性原理和海森堡不确定原理,经典仪器的作用,波函数坍缩的唯像假设,其精髓是现象在没有被观测到时,绝不是现象;阐明了哥本哈根解释对经典因果律的看法,即经典因果律在量子力学中不复存在;列举了两个典型的量子测量实例,惠勒延迟选择实验和没有相互作用的相互作用;还介绍了其他有代表性的量子力学解释,如埃弗里特多世界解释,格里菲斯和盖尔曼自治历史理论,富克斯、沙克等人量子贝叶斯模型等。

哥本哈根解释给人们一个信念:微观世界也是可以被人们认知的,实验者使用可以被其操作和感知的经典仪器对量子系统进行测量,就可以从微观世界提取经典实验者可以感知的信息。当测量仪器和研究对象发生相互作用之后,系统波函数只能选择被观察的可观测量的一组本征态的叠加,人们观察行为迫使系统从这些叠加的本征态中随机地选择其中一个本征态,不同的观测者



测量的结果往往是随机的,不可逆的。

依据哥本哈根解释,人们对量子体系进行主观期望的某物理量的测量时,测量会对系统产生干扰,测量有时会产生新的物理(观测)效应,如薛定谔猫态、惠勒延迟选择实验、量子芝诺效应、Vaidman 炸弹检测器、没有相互作用的相互作用、量子信息擦除、量子鬼成像等。现在火热的量子信息学所有涉及的测量问题,也都直接使用哥本哈根解释的结果。

我们认为哥本哈根解释与其说是量子力学的解释,倒不如说它是经典仪器测量系统时引起波函数坍缩的一个理论模型,这个理论是有效的、简洁的、实用的、睿智的、成功的,当然也是唯像的。理论中的唯像假设也是哥本哈根解释不足的地方,它只给出了经典仪器测量时系统波函数会坍缩,却回答不了波函数为什么会坍缩、怎么坍缩这样深层次的问题。这些问题引导人们研究开放的量子系统,促进量子理论的发展,如 Zurek 提出了环境诱导超选择理论(Environment induced superselection 或简称为 Einselection)<sup>[18]</sup>。

哥本哈根解释还有一个问题没有解决,经典理论是独立于量子理论的存在,而并不能从量子理论中合理推论出来。玻尔认为我们不能指望从量子力学中得到我们对观察结果的合理解释,因为我们作为宏观物体必然是经典的,我们所需要的观察仪器也是经典的。这种经典-量子边界就在观察过程中起到了迫使波函数坍缩的作用:波函数生活在微观领域,我们对观察结果的接收必然处在宏观领域,那么对波函数的观察,必然要使得观察结果穿越这种边界,从量子变为经典,从“既此又彼”的叠加态变为“非此即彼”的概率。如果真的存在经典-量子这样的边界,那么这个边界在哪里?对于这样一种十分重要的界线,海森堡说:“在一边,是我们用来帮助观察的仪器,因而必须看作是我们(经典世界)的一部分,在另一边,则是我们想要研究的物理系统,数学上表现为波函数,在这中间我们需要划分一条分界线。……这条划分被观察系统和观察仪器的分界线是由我们所研究的问题本身的性质决定的,但是很显然在这种物理过程中不应该有不连续性。因而这条线在什么位置就有着完全的自由度。<sup>[19]</sup>”哥本哈根解释宣称存在这么一个边界,然后却不说它在哪儿?事实上,直到今天人们一直都在寻找这个边

界是否存在,人们在越来越大尺度的物体上观测到了量子现象,例如,双缝干涉实验已经做到了由 810 个原子组成的巨大分子尺度,仍然发现量子现象的存在<sup>[20]</sup>。随着人们在越来越宏观尺度上直接观测到量子效应,人们完全有理由相信,宏观物体从根本上来讲,也是遵循着量子规律的。

我们认为哥本哈根解释是一个具有深远影响的量子哲学,告诉人们如何从宏观经典世界认识和改造微观的量子世界,但它不会也不可能是终极理论,它的不足也能促进量子理论的发展。哥本哈根解释还催生了量子力学的其他解释,寻求一个没有意识介入的客观的量子力学解释时埃弗里特提出了多世界解释,格里菲斯和盖尔曼发展了自洽历史理论,富克斯、沙克等人又提出了一种量子贝叶斯模型,企图用概率论来重新构建量子力学的标准理论。各式各样的量子哲学都试图从各自的视角探究着宇宙中最深奥的秘密。

#### 参 考 文 献

- [1] BOHR N. The quantum postulate and the recent development of atomic theory[J]. Nature, 1928, (121): 580-590.
- [2] HEISENBERG W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und mechanik[J]. Zeitschrift für Physik, 1927, (43): 172-198.
- [3] 海森伯 W. 物理学和哲学[M]. 范岱年,译. 北京:商务印书馆, 1981: 15-16.
- [4] 贾明子. 哥本哈根诠释,成功与缺陷[EB/OL]. 知乎 [https://zhuanlan.zhihu.com/c\\_186387023](https://zhuanlan.zhihu.com/c_186387023)[2020-03-05]
- [5] BOHR N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? [J]. Phys. Rev., 1935; 48:696-702.
- [6] WHEELER J, ZUREK W. Quantum theory and measurement[M]. Princeton: Princeton University Press, 1983: 202.
- [7] 玻尔 N. 原子物理学和人类知识论文续编 1958—1962 年[M]. 郁韬,译. 北京:商务印书馆, 1978.
- [8] WHEELER J. Mathematical foundations of quantum theory [M]. Cambridge Massachusetts: Academic Press, 1978.
- [9] JACQUES V, WU E, GROSSHANS F, et al. Experimental realization of Wheeler's delayed-choice gedanken experiment[J]. Science, 2007, 315(5814): 966-968.
- [10] HUANG Y Y. One atomic beam as a detector of classical harmonic vibrations with micro amplitudes and low frequencies[J]. J. Korea. Phys. Soc., 2014, 64(6):775-779.
- [11] HUANG Y Y. The quantum measurement effect of interaction without interaction for an atomic beam[J]. Results in Physics, 2017, (7): 238-240.

(下转第 14 页)

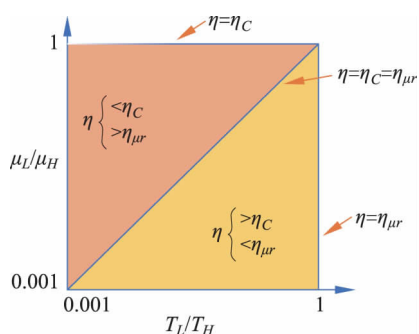


图3 在不同温度比  $T_L/T_H$  和化学势比  $\mu_L/\mu_H$  条件下效率  $\eta$  的示意图

应于  $T_L/T_H < \mu_L/\mu_H$ ,  $\eta < \eta_C$ , 但  $\eta > \eta_{\mu r}$  的情况。

### 3 讨论

由式(4)、图2或图3可看出,化学热机的效率即可大于工作在温度分别为  $T_H$  和  $T_L$  的两个热源间热机的卡诺效率  $\eta_C$ ,又可大于工作在化学势分别为  $\mu_H$  和  $\mu_L$  的两个物质源间化学机的可逆效率  $\eta_{\mu r}$ 。这些结果并不违背卡诺定律。因为卡诺定律仅适用于工作在两个纯热源间的热机,运行中热机仅受到温度场的驱动。然而,化学热机是工作在两个热物质源之间,同时受到温度场和化学势场的驱动,使得它的效率大于  $\eta_C$  或  $\eta_{\mu r}$ ,是符合热力学第二定律的。

像化学热机一样,工作在两个压缩热源间热机<sup>[6-8]</sup>的效率也可能大于工作在相同温度跨度下热机的卡诺效率。因为压缩库不是纯热源<sup>[9]</sup>,工作在压缩热源间的热机同时受到温度场和压缩势场的驱动。总之,当一热力学循环除了受到温度

场的驱动外,同时还受到其他势场的驱动时,它的效率可能大于工作在相同温度跨度下热机的卡诺效率,这是热力学第二定律所允许的。

### 参 考 文 献

- [1] GORDON J M. Maximum work from isothermal chemical engines[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 73: 8-11.
- [2] GORDON J M, Orlov V N. Performance characteristics of endoreversible chemical engines [J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74: 5303-5309.
- [3] 林国星,陈金灿. 质量传递不可逆性对化学转换器性能的影响[J]. 南京大学学报,1997,33:216-218.  
LIN G, CHEN J. Effects of the irreversibility of mass transfer on the performance of a chemical converter[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1997, 33: 216-218. (in Chinese)
- [4] GUO J, WANG Y, CHEN J. General performance characteristics and parametric optimum bounds of irreversible chemical engines[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112: 103504.
- [5] 陈金灿,苏国珍. 热力学与统计物理学—热点问题思考与探索[M]. 北京:科学出版社,2010:23.
- [6] HUANG X, WANG T, YI X. Effects of reservoir squeezing on quantum systems and work extraction[J]. Physical Review E, 2012, 86: 051105.
- [7] MANZANO G, GALVE F, ZAMBRINI R, et al. Entropy production and thermodynamic power of the squeezed thermal reservoir[J]. Physical Review E, 2016, 93: 052120.
- [8] ROBNAGEL J, ABAH O, SCHMIDT-KALER F, et al. Nanoscale heat engine beyond the Carnot limit[J]. Physical Review Letters, 2014, 112: 030602.
- [9] ALICKI R, GELBWASER-KLIMOVSKY D. Non-equilibrium quantum heat machines[J]. New Journal of Physics, 2015, 17: 115012.

(上接第11页)

- [12] VON NEUMANN J. Mathematical foundation of quantum mechanics[M]. translated by R. Beyer. Princeton: Princeton University Press, 1955.
- [13] Everett III H. Relative state formulation of quantum mechanics[J]. Rev. Mod. Phys., 1957, 29(3): 454-462.
- [14] Griffiths R. Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics[J]. J. Stat. Phys., 1984, 36(1-2): 219-272.
- [15] 曹天元(Capo). 量子物理史话—上帝掷骰子吗[M]. 沈阳:辽宁教育出版社,2008.
- [16] FUCHS C, SCHACK R. Quantum-Bayesian coherence [J]. Rev. Mod. Phys., 2013, 85(4): 1693-1715.

- [17] 张天蓉,拿什么拯救你量子力学—浅谈量子贝叶斯[EB/OL],科学网博客 <http://blog.sciencenet.cn/blog-677221-1054026.html>. [2017-11-23](2019-10-11).
- [18] ZUREK W. Decoherence, einselection and the quantum origins of the classical[J]. Rev. Mod. Phys., 2003, 75: 715-775.
- [19] HEISENBERG W. Philosophic problems of nuclear science [M]. New York: Pantheon Books Inc, 1952: 49.
- [20] EIBENBERGER S, GERLICH S, ARNDT M, et al. Matter-wave interference of particles selected from a molecular library with masses exceeding 10000 amu[J]. Phys. Chem. Chem. Phys., 2013, (15): 14696-14700.