

试论互补原理——兼论量子力学的哥本哈根诠释

On the Complementarity Principle——to Copenhagen Explanation of Quantum Mechanics.

韩 锋

(新疆师范大学物理系 乌鲁木齐 830053)

提 要 本文讨论了N. 玻尔的互补原理及其评价,批判地分析了量子力学的哥本哈根诠释中关于“被观测对象和测量仪器之间不可控制的相互作用”以及量子力学中的因果性和决定论问题。认为,互斥又互补的两种属性,当一种属性显现出来时,另一种属性是潜藏着的。阐述了从潜在的可能性向现实的可能性转化的问题以及测量的意义,因果律的非决定论形式等。最后,分析了互补原理的辩证本质。提出,除了不可调和的矛盾之外,还可能存在可以调和的矛盾。对于互补原理,应该采取实事求是的态度予以扬弃,肯定它在方法论上的指导意义,以推动理论的发展。

如果从1927年海森堡提出测不准关系和玻尔形成互补性思想算起,量子力学的哥本哈根诠释从形成到现在已经将近60年了,中间经历了种种考验。一种观点经历了这么长的时间,以致被至今大多数物理学家所接受,不能说它完全没有道理。尽可能对这个问题作出一个比较客观的分析,看看在这里哪些是应该肯定的,哪些是不能接受的,以求对这个问题有一个比较正确的态度,应该说是非常必要的。

在量子力学的哥本哈根诠释中,争议最大而又最敏感的问题,也是哥本哈根诠释的核心问题,莫过于玻尔的互补原理(Principle of Complementarity,或译作并协原理)了。互补原理为什么引起了如此大的争议?我们认为,这有多方面的原因。首先在于,哥本哈根学派提出了一种新的思想,而任何新的思想,无论是正确的还是错误的,都会和旧思想发生冲突而引起争论。再者,哥本哈根学派也确实曾经在这个问题上说过一些错话,在问题的表述上又有不少含混的地方。尤其是,在这个问题的哲学概括上不够慎重,归结失当,而有时用词不确,有时又前后不一,留下了许多漏洞。其次,由于众所周知的爱因斯坦对量子力学哥本哈根诠释的不同意见更使这个问题变得异常严重。爱因斯坦,由于他在当代物理学中当之无愧的旗手地位,他的意见自然是极有分量而需要认真对待的。关于量子力学理

论体系本身不存在逻辑矛盾的问题,现在是已经澄清了,而关于量子力学的完备性问题,则还不能说已经得到解决。也许,由于实验结果违反贝尔不等式而支持“不可分离性”,这个问题可能显得更复杂化了。我们准备在这里详细讨论这些问题。但是,迄今为止,所有那些建立在机械决定论基础上的尝试,无论是薛定谔的“波包”(Wave Packet),还是德布罗意的“导波”(Pilot Wave),都没有能经住进一步的推敲而站住脚,这也是事实。

最后,应当指出的是,以往在学术观点上简单地贴“政治标签”的错误做法,严重地阻碍了各种学术思想的正常交流、争鸣和发展,堵塞了各个不同学派的观点在争论中逐步取长补短,取得统一认识的道路。一种学术观点的形成和发展往往伴有它自己独特的、不以人的意志为转移的客观规律,它不是哪种哲学观点的验证。一个经受了实践检验的理论往往包含着前此人类一切先进思想的精华,如果马克思主义哲学确实称得上是人类历史上一切进步思想在当代水平上的升华,那么它就一定会发现辩证唯物主义基本原理在当代科学中新的表现形式。而且,“随着自然科学领域中每一个划时代的发现,唯物主义也必须要改变自己的形式。”(恩格斯,《马恩选集》第4卷p. 224)而不是相反,用陈旧的框架去套科学上新的发现,以判断哪些是对的,哪些是错的。我们是从事实出发,不是从原则出发,“原

则不是研究的出发点,而是它的最终结果。”(恩格斯,《反杜林论》,人民出版社(1970),p. 32)这也是马克思主义的一个基本观点。

一、原理的形成和理解

一种完全没有诠释的形式体系最多只能成为数学理论,而绝不可能是一种物理理论。要做诠释,就离不开形象化,但量子力学从一开始就是不顾及什么物理图像,甚至是以排除形象化为己任的。这也难怪,量子物理学是关于微观现象的科学,想完全从日常经验出发去建立那远离日常经验的微观现象的图像,也确实是不可可能的。我们只能从观测结果出发,追本溯源,构造理论,而这个理论中出现的基本量和它们的关系,却需要给出解释,这是无法回避的。1927年当海森堡基于对一些基本过程的分析得出测不准关系的结论时,才真正引起了震动。在经典理论中,明确定义一个力学状态所必不可少的坐标和动量,竟然在原则上就是不可能同时准确测量的,这真使人们感到不可思议。物理学面临着认识论上的飞跃,对已具雏形的互补性思想做进一步哲学上的概括已经是不可避免的了。几乎与此同时,玻尔的互补原理应运而生。当玻尔第一次在著名的“科摩演讲”中正式提出互补原理的时候,人们一时还没有完全体会到它的意义。经过一段时间的回味和消化,这个观点在整个物理学界乃至全世界的知识界所引起的反响就越来越强烈了,它逐渐为人们所理解和接受,成了哥本哈根诠释最引人注目的精神支柱。

互补原理作为一种思想,它的基本意思是很清楚的。由于对微观现象的描述必须应用经典概念,而用经典概念去描述微观的现象则有着根本的局限性。一些经典概念的任何确切的应用不可避免地将排斥另一些经典概念的同时应用,而这另一些经典概念在另一些条件下又是描述现象所不可缺少的。必须将所有这些既互斥又互补的概念汇集在一起,才能形成现象详尽无遗的描述。对微观现象的描述就是由这些既互斥又互补的两个方面共同构成的。它们是互斥的,因为从一个“角度”(一种实验装置)只能观测到客体的一个“侧面”(一种用经典语言描述的属性),但它们又是互补的,因为只有把在不同“角度”观测到的结果同时考虑到,才能形成对客体的一个完整的描述。

玻尔认为最能说明问题的一个例证就是物质的波粒二象性。他议论说,微观客体在一种实验条件下表现得象一个粒子(如在光电效应、康普顿效应中),在另一种实验条件下却又表现得象一种波(如在干涉、衍射现象中)。在这里,真实的存在就是“波粒子”或者说“量子态”。如果一定要用“波”或者

“粒子”这些经典概念去描述它,那它们就会是互斥的,我们不可能在同一个实验中同时使它们显现。当然,它们又是互补的,因为只有二者共同考虑,才能构成对客体的完整描述,缺一不可。

玻尔又曾用硬币作比喻,通俗地说明它的正面和反面是互斥又互补的。在每一次投掷中,只能出现其中的一面,但只有两个面才共同组成这个硬币整体。

那么,当一方显现时,另一方就是否不存在了呢?当然不是。在某一种测量中,当客体的一种属性显现出来时,它的另一种属性是潜藏着的。测量装置的改变就能使那潜在的可能性转化成为现实的可能性。实验装置从威尔逊云室换成单狭缝,原来潜在的波性就会显现出来。通过狭缝后的电子打在金属板上,光电效应就能把潜藏的粒子形式再现出来。换句话说,波性和粒子性是物质的两种基本属性,无所谓哪种更基本一些。确切地说,它们是互斥又互补的两种潜在的可能性。哪种潜在的可能性显现为现实的可能性,那要由它与周围“环境”的相互关系来定。有如一个人表现为儿子还是父亲,要看他是在父亲面前还是在儿子面前而定,一个电子表现出波性还是粒子性,也要看测量仪器是什么和如何布置而定。这就是说,微观客体到底显示出波性还是粒子性,归根结底确切地说,取决于微观客体和观测仪器之间的相互作用。

当然,我们也不应该把这种理解绝对化,认为在一种属性显现时,在所有情况下,它的另一种属性就绝对地不显现。情况不完全是这样。例如,屏上电子衍射花样亮度的不规则振动说明,在这种典型的波的现象中,电子的能量也是定位在电子上的。但是,两种互斥属性如果同时出现,就必然使二者都变得模糊起来,在微观现象中,其关系由测不准关系给出。

二、再议“被观测对象和测量仪器之间不可控制的相互作用”

测不准关系被海森堡提出以后,哥本哈根学派提出了测量仪器对被观测对象不可控制的相互作用的问题。海森堡那个著名的光子显微镜的理想实验是众所周知的。为了准确测量粒子(比如电子)的位置,就要用波长更短的光去照亮它,但这就增大了光子的动量($P=h/\lambda$),光子打在粒子上就引起了它动量更大的不准。玻尔正确地认为,这是物质波粒二象性的结果。因为这里同时使用了光波和光子的概念,但是微观客体的波性和粒子性这一对互斥又互补的概念是不能同时使用的,如果硬要同时考虑,那就会使二者都变得模糊起来,也就势必会导致描述的不准确性。在利用电子单缝衍射得出测不

准关系定量表述的过程中,实际上也是由于同时应用了电子既是波又是粒子的概念的结果。

那么,玻尔关于被观测对象和测量仪器之间不可控制的相互作用的观点到底想要说明什么问题,得到什么结论,有什么重大意义呢?实际上,它和物质的波粒二象性以及测不准关系、互补原理实质是一致的,是一个统一的概念体系。由于二象性在微观过程中显得很突出,就导致明显的“测不准”,而要测得准,就必须使观测所引起的对物体行为的扰动成为可以忽略的。这在宏观情况下,在一定程度上也许做得到,但在微观情况下却完全不可能。也就是说,比如,精确测定电子的位置意味着对电子运动的干扰极其强大,而精确测定电子的速度则要求有足够长的时间,使其位置变得不确定。微观现象中测不准关系所造成的限制将是实质性的,观测中所产生的误差在原则上就不可能像经典实验那样得到校正或补偿。正如L. 罗森菲尔德所说的:“为了在概念和原子系统实际行为之间建立起一种联系,我们必须使用由大量原子组成的——我们自身也是由大量原子构成的——某些测量仪器。这就不可避免地导致互补性关系和因果性关系的统计型式。”

关于测量仪器(人也是一种测量仪器)与被观测对象之间相互作用的问题,还可以作些引伸。客体在未被认识之前,只是一种“自在之物”,并不包含什么信息,一切信息都是当“自在之物”转化为“为我之物”时,被我们提炼出来的。人的认识过程决不是一种被动、消极的反映过程,物理量并不是简单地贮藏在“自在之物”中的数据,人取得信息是一个变革过程。或者也可以说,任何测量都是一种相互作用。由于被观测对象和测量仪器之间的相互作用,我们测量到的数据,已经不是我们在未测量它们以前的物质状态所具有的本来“数据”了。(我们假设客体那时具有某种“结构信息”,就是这里所说的本来“数据”,以区别于前面所说的信息,或称之为“传递信息”,就是测量得到的数据。)也许,在医学上长期寻而未得的人体经络系统,是只有在活体中才存在。须知,生命活动停止以后的尸体已经不是原来活着的人了。同样,当研究人的心理活动时,实验研究本身将对被研究的心理活动产生扰动,……如此等等。一般说来,实验的结果只是反映了已被扰动以后的对象的情况。它和我们要研究的“纯对象”本身是有区别的。经典分析方法的主要任务之一,就是尽可能地鉴别,哪些是研究对象本身所固有的,哪些是由于测量的“干扰”所带来的。哥本哈根观点认为,在微观现象中这种“干扰”(或影响、相互作用等)是不可区分,无法控制的,又是不能忽略的,从而量子现象在本质上是统计性的。人们过去曾经长期习惯于经典的分析方法,为了简单

起见往往把对象从系统中隔离出来加以研究,然而这是一种理想化。就像人的本质是一切社会关系的总和一样,粒子的性质是与环境有关的,客体是与环境不可分割地联系在一起的。在过去,生物体与环境的关系是注意到了,但非生物与环境的关系并没有引起必要的注意。如果说在经典理论中这样做还勉强可以的话,在量子理论中问题就尖锐地暴露出来了。系统论把对象放到更大的系统中去研究,当我们研究微观粒子时,不可避免地应该把粒子(对象)、测量仪器(有时甚至包括观测者本人)一起作为一个整体来研究,因为事物之间的普遍联系要求这样做。物理学的任务也正是为了把所研究客体的行为从这种联系中区分出来。我们并不认为测量到的东西就是事物的本质,承认在它的背后还有独立于人的意识之外的存在,这不是“不可知论”,而正是避免了“形而上学”。

三、关于量子力学中的因果性和决定论

爱因斯坦最不满意量子力学关于量子力学完备性的问题,实际上就是量子力学本质上的统计性。关于这个问题,我们认为,肯定爱因斯坦所给出的完备性判据的本质方面,而在其具体内容(前提条件)上放宽要求,即承认物理实在是不以观测者的主观意志为转移的客观存在,但并不要求无干扰的观测,那么这个问题是可以得到解决的。现在的问题是,量子力学中的统计性是本质的,最后的呢,还是只是一种权宜之计;它是否象经典统计性那样,是建立在有可能对粒子作非统计描述上的一种“二级理论”。

考虑这样一种设想也许是饶有趣味的。爱因斯坦曾经说过:“在思考时,要拓宽形象,使自己变成思考对象。比如,思考原子时自己就变成原子,思考电子时就变成电子。这样做了,就能逐步搞清原先头脑中的一些朦胧的东西,并会有新的发现。”如果真能使我们自己变成与原子同数量级大小,那时我们看到的也许就是清晰的电子轨道,统计性自然也就不存在了。然而,那仅仅是幻想。观测仪器和我们人本身都属于由大量原子组成的另一个物质层次,而一切观测结果最终也都要表述成人所能够理解的语言。在这个物质层次中有着全然不同的特性和规律,统计性也许就是它的特征之一。

不管我们喜欢也好,不喜欢也好,量子现象测量中的统计性质看来是无法避免的。企图在与量子力学的同一层次上消除量子规律统计特征的各种“隐变量”理论迄今没有取得积极的成果,看来也与此有关。然而,无论是统计性的规律还是非统计性的规律,或者说无论是决定论的还是非决定论的,都是因果关系的体现。爱因斯坦认为只有经典决定

论的因果性才是因果性才是最后的,否认统计性的规律也属于因果关系的范畴,是不妥当的。而哥本哈根学派认为非决定论不体现因果关系,那也是错误的。我们认为,在肯定互补原理的同时,保留事物的因果描述,仍然是可能的。微观客体和测量仪器之间的相互作用仍然遵从一般的物理规律,并不是无迹可寻的。当然,它是否可以人为地加以控制,那又是另一回事了。我们既不认为电子有什么“自由意志”,也不认为物理学完全建立在决定论因果关系上是必要的,自然界丰富的多样性也就体现在这里。对统一的追求是科学的理想,然而统一不是单一,它是建立在多样性基础上的统一。决定论和非决定论就统一在因果性这一基本点上,这就是我们的结论。

从另一方面来说,波函数 $\psi(\vec{r},t)$ 遵从的薛定谔方程就是决定论形式的,但是波函数的物理解释又是统计性的、非决定论形式的。可以说本质上是非决定论的量子力学也没有完全摆脱决定论的因果关系。话又说回来,难道本质上是决定论形式的力学规律就完全摆脱了统计性吗?也没有。观测值总是大量观测结果的统计平均。对任何自然事件的严格精确预言从来就是不可能的。绝对的真值是什么呢?难道就是那完全排除了干扰的测量值吗,我们知道那是不存在的。

决定论和非决定论都是因果关系的表现形式,因果关系就是必然性和偶然性的统一。而且,只有同时考虑到决定性和随机性这两个互补的方面,才能给出客体的完全描述。

四、互补原理的辩证本质

互补原理提出以后,争论迭起,褒贬不一。有人认为它是“本世纪中最革命的科学思想”,称赞互补原理充满了辩证法,是“我们这个时代的最革命的哲学观念”,它“在我们对于自己生活于其中的这个宇宙的理解方面开始了新的篇章”。而坂田昌一则认为,哥本哈根的哲学思想已经成了遮蔽现代物理学发展道路的“哥本哈根之雾”。更有人说:“在当代物理学的各种唯心主义倾向中所谓的哥本哈根学派是最反动的。”当然,也有人支持和反对得不那么彻底,认为它既不是唯心主义的,也不是唯物主义的,而是包含了它们之中的各种要素。同意玻尔的海森堡就认为,玻尔的认识论“包含着许多使人想起黑格尔哲学方法的特征”。反对玻尔的爱因斯坦则幽默地称互补原理为“海森堡—玻尔的绥靖哲学,或绥靖宗教”,认为它是如此精心策划的,使它得以向那些信徒暂时提供了一个舒适的软枕”。

玻尔本人却认为,他的互补原理不仅限于在微观物理领域适用,而且可以推广,可以发展成为一

个普遍的认识论原理。关于这个问题,不少作者都曾经作过介绍和评论。微观粒子的波性和粒子性,不仅是互相对立,相互排斥的,而且也是互相依存、相互转化的(不是波转化成粒子或者相反,而是波性显现和粒子性显现这两种表现形式的相互转化,是此显彼隐,此隐彼显),二者不可分割地共存于微观客体这个统一体中。过去的辩证法认为对立面一定是同时出现的,互补原理在这一点上是一个发展,即认为对立着的双方除了同时出现的情形以外,还可能(在微观现象中)是不同时出现的。它们不可能按照人们已经习惯了的古典逻辑规则组成一个无矛盾的逻辑体系,在这里是一种新型的——量子逻辑。

也有人认为,承认互斥又互补的双方共同构成对事物的完整描述是一种“调和”。我们倒认为这正是事实。我们认为,矛盾除了对抗性的和非对抗性的区分以外,还有可调和的与不可调和的区分,互补原理正是那种可调和和矛盾的一种反映。我们不认为只有那种单一模式的“一分为二”是可能的,在那里只有一方消灭另一方才能使矛盾最后得到解决,自然界反映的大量现象说明还可能有另一种情况,那就是双方各以对方为自己存在的前提,互为依赖,长期共存的并协精神、互补态度。不是所有的矛盾都必须此长彼消,一方消灭另一方才能得到解决,还有的矛盾是同长同消,在一定条件下使矛盾双方相互适应,相互平衡,相互调和,逐渐丧失其对立面而达到融合,归于消灭的。这样的例子可以举出很多,比如民族的融合(而不是同化),精子和卵子形成合子等等。

玻尔互补原理使人们想起了黑格尔。想起了黑格尔的什么呢?那就是彻底的辩证法思想。黑格尔曾举例这样说过,“花虽说具有多样的性质:如香、味、形状、颜色等,但它却是一个整体。在这一朵花里,这些性质中的任何一种都不可缺少,这朵花的每一个别部分,都具有整个花所有的特性。”他还说:“在感性事物里我们可以承认这些殊异的性质是凑合在一起,但在精神现象里,有区别的被认为是反对立的。花的色和香虽然是相反的,却仍同在一个对象里,我们不把两者彼此对立起来,我们并不觉得这是矛盾或违反事实。但是理智和理智性的思想却认为不同的东西摆在一起是不能容忍的。”这与我国古代思想家公孙龙子在《坚白论》中的思想十分相似。

最后,我们还要谈一下互补原理与东方哲学的关系。中国古代丰富的哲学遗产包含着十分深刻的辩证法思想。美国物理学家惠勒就曾经说过:“在西方,互补观念似乎是革命性的。然而,玻尔高兴地发现,在东方,互补观念乃是一种自然的思想方法。为了采用象征性的方法来表述互补性,玻尔选择中文

的“阴阳”。玻尔本人也说,他的互补性思想的许多类例“甚至要到前辈思想家如释迦牟尼和老子所遭遇的那样一些认识论问题中去找”。值得一提的是,玻尔家族族徽的中心图案就是一个象征着阴阳互补、相克相生、相反相成的太极图。这里,我们引用前面曾经提到过的公孙龙子在他的《坚白论》中的论述来说明中国古代哲学界中的互补思想。他说:“视不得其所坚,而得其所白者,无坚也,拊不得其所白,而得其所坚者,无白也。”看一块白色的硬石块,只能看到它的白色,感觉不到它的坚硬,而用手摸它,可以知道它的坚硬,但无法知道它的颜色。这是说石块的坚硬和白色这两种性质是互斥的。但它们又是互补的,因为只有坚、白二者才可能共同构成对石块的完整描述。

文化背景不同的民族之间常常都表现出一些相反相成、既互斥又互补的特点。恐怕互补原理本身就是西方哲学中对立统一和东方哲学中的阴阳分析的互斥(有区别)互补(根本一致)的产物。

五、结 语

正如海森堡正确地指出过的,爱因斯坦创立相对论的意义“并不在于它能解释许多到目前为止不能解释的实验,而在于它创立了一种新的思想方法,这种思想方法是科学家们以前所没有发现的”。玻尔的互补原理也是一种新的思想方法。这种思想方法的适用范围可能早已远远超出了物理学,对自然科学和社会科学广阔领域的研究都有重要的启发作用。对于如何理解粒子性和波动性的对立和统一问题、主体在认识中的作用问题,以及认识的界限问题、量子力学中的因果性问题等,互补原理为我们提供了一个言之成理而又足够宽广的框架。不管人们对互补原理以及哥本哈根诠释的评价如何,我们都赞赏作为一位科学家和思想家的玻尔及其哥本哈根学派在推动人类科学进步的事业中所作出的顽强努力。正是由于他们对世界多样性和谐发展的深刻理解,才使我们对这个世界的认识达到了

如此的高度。研究他们发现真理的道路,分析他们在科学和哲学上的成功和失误,从而推动理论的进一步发展,它的意义并不比发现更小。

(责任编辑 蔡德诚)

(上接第 64 页)

为雷达吸波材料所覆盖,机体的边缘由复杂的雷达吸波结构构成。在 1991 年初的海湾战争中,F-117A 的隐身能力在袭击巴格达时得以充分发挥。飞机不带外挂,机腹舱内可带 2 枚 905 公斤的激光制导炸弹。

飞机的翼展 13.20 米,机长 20.08 米,机高 3.78 米;最大起飞重量 23814 公斤。飞机的最大平飞速度 M1⁺,正常使用速度 M0.9。

图 2 美国 F-22 空中优势战斗机,图为试飞原型机(YF-22)

美空军正在研制的新一代先进技术战斗机,两架竞争试飞用原型机 YF-22 已于 1990 年 9~12 月完成试飞,目前已在进行生产型飞机的工程研制,第一架工程研制样机预定于 1995 年试飞。

F-22 的主要特点是:超视距攻击能力,低可见信号特征(雷达反射面积小),不开加力可进行超音速巡航,优于任何现役和研制中战斗机的瞬时和持续机动能力,配备崭新的战斗机综合航空电子系统。

飞机的动力装置为两台 F119 涡扇发动机。飞机的翼展 13.56 米,机长 18.92 米,机高 5.0 米;最大飞行速度 M2⁺,最大设计机动过载 12g。

图 3 前苏联苏-27 超音速远程制空战斗机

80 年代中期装备部队,主要用于执行国土防空和为深入敌后的攻击/轰炸机护航。

飞机在设计上采用了多项新技术,选用两台加力式涡扇发动机,采用翼身融合体气动技术和放宽静稳定性设计,装用全权四余度电传操纵系统和新型电子/火控系统。因而苏-27 在技术水平和作战能力方面均在当代现役战斗机中名列前茅,在性能和操纵性方面,甚至与美国 F-15 的最新改型 F-15E 相媲美。

飞机的翼展 14.7 米,机长 21.935 米,机高 5.932 米,正常起飞重量 23000 公斤,最大起飞重量 33000 公斤。飞机最大飞行速度 M2.35,最大机动过载 9g,最大航程 3680 公里。

(责任编辑 刘永培)