

# 量子力学革命是一次“小写的近代科学革命”

肖显静

(华南师范大学 科学技术与社会研究院, 广东 广州 510006)

**摘要:**科学革命分为“大写的科学革命”和“小写的科学革命”。“旧量子论”是经验拟合的“特设性假说”。“新量子论”的革命性特征与近代科学相符合:量子力学认识对象本体论预设是机械的,认识论预设认识对象与认识者是分离的且是真理追求,方法论预设是祛魅的且是机械还原的。就此而言,量子力学革命是近代科学革命的延续,是一次“小写的近代科学革命”。至于现代科学革命,是有机论自然观基础上相应的方法论原则,如返魅性原则、复杂性原则、整体性原则、非决定性原则的贯彻。以此考察量子力学,它不属于现代科学革命。

**关键词:**量子力学;范式;科学革命;自然观;方法论

[中图分类号]N09 [文献标识码]A [文章编号]1672-934X(2024)03-0024-12

DOI:10.16573/j.cnki.1672-934x.2024.03.004

## The Quantum Mechanics Revolution: A "Secondary Modern Scientific Revolution"

Xiao Xianjing

(Institute for Science, Technology and Society, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract:** Scientific revolution can be divided into "the meta-scientific revolution" and "the secondary-scientific revolution". The "old quantum theory" is an "ad hoc hypothesis" of empirical fitting. The revolutionary features of the "new quantum theory" are in line with modern science, which are as follows: The ontological presupposition of the cognitive object of quantum mechanics is mechanical, the relationship between both the cognitive object and the epistemologist of epistemological presupposition is separated and pursued by truth, and the methodological presupposition is a kind of disenchantment and mechanical restoration. In this sense, the quantum mechanics revolution is a continuation to modern scientific revolution, a "secondary modern scientific revolution". The contemporary scientific revolution is the corresponding methodological principles on the basis of organistic outlook on nature, such as the principles of reenchantment, of complexity, of wholeness and of non-determinism. To examine quantum mechanics accordingly is not a part of contemporary scientific revolution.

**Key words:** quantum mechanics; paradigm; scientific revolution; outlook on nature; methodology

收稿日期:2024-02-28

基金项目:国家社会科学基金重大项目(16ZDA112);教育部哲学社会科学后期资助重大项目(22JHQ003)

作者简介:肖显静(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事自然哲学(科学思想史)、科学哲学(生态学哲学)、科学技术与社会(科学技术与环境论)研究。

## 一、问题的提出及其研究策略

库恩提出了科学革命的理论,认为科学革命的进行就是由新范式代替旧范式。不过,对于范式的内涵,学术界存在争论。笔者认为,范式可以分为两种:一是抽象的哲学层面的范式,包括科学认识的本体论、认识论、方法论和价值论,是科学认识的形而上学基础;二是具体的科学层面的范式,包括认识的理论体系(概念、命题、假说、理论等)、方法体系(观察、实验、数学、测量、比较、分类、类比、假说—演绎等)、工具体系(仪器、设备、操作、程序、技艺等)的变革。

在这样区分之后,笔者把抽象的哲学层面的范式变革所引发的科学革命称为“大写的科学革命”[The Scientific Revolution],它是由自然观的变革、认识论的转移、方法论的创新引发的,如近代科学之于古代科学,现代科学之于近代科学,未来科学之于现代科学,都是如此,都应该在此层面或意义上加以理解和区分。同时,把在“大写的科学革命”完成之后,遵循它的“大写的”哲学层面的范式和科学层面的范式进行进一步研究,而获得的科学认识的进一步突破。此时,或者发生了“小写的科学层面的范式变革”,或者发生了“小写的”科学层面和哲学层面的范式变革。这被称为“小写的科学革命”[scientific revolutions],它是由具体的科学认识的理论体系、方法体系、工具体系的变革带来的。

根据上述对“大写的科学革命”和“小写的科学革命”的界定,“大写的科学革命”也可称为“大的科学革命”[The Great Revolution(s)]、“元科学的革命”[The Meta-scientific Revolution(s)]、“形而上的科学革命”[The Metaphysical-scientific Revolution(s)]、“奠基的科学革命”[The Founding-scientific Revolution(s)];与之相对应,“小写的科学革命”也可称为

“小的科学革命”[The Small Science Revolution(s)]、“次科学的革命”[The Sub-scientific Revolution(s)]、“形而下的科学革命”[The Physical-scientific Revolution(s)]、“一般的科学革命”[The General-scientific Revolution(s)]。

“大写的科学革命”可以带来其形成过程中科学认识的理论、方法和工具的变革,这样的变革相对于“大写的科学革命”之前的科学认识来说是翻天覆地的,如伽利略数学物理学的提出、牛顿经典力学的建立、波义耳实验化学的诞生等。“小写的科学革命”是在“大写的科学革命”所形成的哲学层面的“范式”基础上或背景下展开的,它也可以带来科学认识的巨大变革,如麦克斯韦电磁理论的建立、沃森和克里克DNA双螺旋结构的发现等。发生“大写的科学革命”的时候不一定会发生“小写的科学革命”,但发生“小写的科学革命”的时候一定会发生“大写的科学革命”。就此而言,“小写的科学革命”是衍生于“大写的科学革命”的,“小写的科学革命”又可称为“衍生的科学革命”[Derivative Scientific Revolution(s)]。

以这两种科学革命的区分为依据,现在广为人们称道的“量子力学革命”究竟是“大写的科学革命”还是“小写的科学革命”呢?

要回答上述问题,首先要区分两种量子力学。广义地说,量子力学的发展分为两个阶段:一是从“黑体辐射”开始,到普朗克“量子”概念的提出,再到爱因斯坦、玻尔分别用“光量子假说”解释“光效应”以及构建新的“原子结构模型”,最后到索末菲对玻尔原子结构模型的修改,这被称为“旧量子论”。二是从电子的波粒二象性实验及其诠释开始,涉及量子力学理论的各种诠释和争论,典型的有哥本哈根诠释、爱因斯坦的反驳与玻姆隐变量理论的提出、爱因斯坦与玻尔之间的争论以及多世界诠释和退相干诠释等,这被称为“新量子论”。

“新量子论”的提出及其发展开始于20世纪20年代。这一时期量子理论的发展与之前的“旧量子论”有很大的不同。首先,德布罗意于1923年提出物质波理论,并在1924年提出电子具有“波粒二象性”的假说。之后,人们进行电子“波粒二象性”实验,得到令人迷惑的结果——电子究竟是什么?是“作为粒子的电子”,还是“作为波的电子”,抑或两者都是?<sup>①</sup>

为了便于理解,薛定谔将微观量子现象与宏观事件联系起来,设计了著名的“薛定谔的猫”思想实验,喻示着作为量子效应的显现,猫处在生与死两种状态的叠加,这就是“量子叠加态”。薛定谔创立了波动方程对这一问题进行了探讨。

如果对薛定谔方程进行扩展,就必然得出一个电子的态可以由其他态叠加而成。这表现在两个方面:一是“干涉现象”,正如在单光子的双缝干涉实验中,一个光子会同时通过两个缝而产生干涉,就像两列波叠加在一起。此时,光子既在这里也在那里吗?二是“量子纠缠”,即量子系统由纠缠关系或结构束缚在一起,量子关联中的所有状态属性决不能还原为相互独立的单个量子系统的某些东西。

对此,薛定谔本人感到疑惑,其他人也表示怀疑。如对于“薛定谔的猫”,爱因斯坦认为,猫不可能存在于死和活的两种叠加状态中,一定丢失了某种东西,如果是这样,那么量子理论就是不完备的,没有抓住真实的存在。鉴此,需要增加一些东西(即隐藏的变量),让理论回到与直觉现实一致的轨道上来。

问题是:如果不是这样,那么该如何解释量子理论呢?对此,有不同的解释,还有对相关解释的争论。一是哥本哈根诠释,涉及玻恩电子位置分布的概率论解释、海森伯测不准原理以及玻尔“互补原理”;二是爱因斯坦与玻尔之间的争论,涉及量子力学理论是否完备的问

题;三是其他关于量子力学理论,如多世界解释理论等。

不仅如此,要回答上述问题,还要澄清量子力学如果是一次“大写的科学革命”,那么这样的革命应该有什么特征?我们知道,近代科学是以机械自然观为基础的,遵循的是祛魅性原则、简单性原则、还原性原则和决定性原则,运用的是实验和数学方法,获得的是关于认识对象的规律性的可重复认识。与之相对应,作为“大写的科学革命”的现代科学革命,应该是以有机自然观为基础,遵循返魅性原则、复杂性原则、整体性原则和非决定性原则,运用相应的不同于传统的科学实验方法和数学方法,获得与近代科学特征不一样的认识。

本文就是在上述概念界定的基础上进行的。首先,从“旧量子论”的建立及其内涵分析“旧量子论”是否是一次“大写的科学革命”,然后概括性地梳理“新量子论”(量子力学)的发展及其诠释,再进一步从“新量子论”(量子力学)的建立和检验两个方面,对量子力学是否是一次“大写的科学革命”加以分析,最后得到相关结论。

## 二、“旧量子论”是经验拟合的“特设性假说”

在国内,人们普遍认为“能量子”概念是由普朗克提出的,并且认为普朗克基于“紫外灾难”创立了相关理论。其实“能量子”这一概念早在普朗克之前,于1872年已由玻尔兹曼在研究热力学的过程中假设,只不过他假设的是分子动能的量子化。1894年,普朗克就已经开始研究黑体辐射问题,并且试图用一个公式来表示黑体辐射的实验数据。1900年10月7日,普朗克在与另外一位物理学家交流后,就假设了“能量子”概念,并且给出了其公式。1900年10月19日,在德国物理学会的会议上,普朗克宣布了 $E=h\nu$ 这一公式,其中, $E$ 是能量, $h$ 是普朗

克常量,  $\nu$  是频率。

这一公式被称为“普朗克公式”,是普朗克使用一种分列式对维恩公式和瑞利-金斯公式进行内插转化合并而成的。该公式能够很好地描述测量结果,但是并没有充分的理论阐释,只是一个半经验公式。为了更好地从理论上解释这一公式,同年12月14日,在德国物理学年会上,普朗克在《论正常光谱的能量分布定律的理论》的文章中,提出了“能量子假说”,即在光波的发射和吸收过程中,发射体和吸收体的能量变化是不连续的,能量值只能以最小分量的整数倍一份一份地发射或吸收,这个最小的能量单位就叫“能量子”(energy quanta)。

从普朗克假设“能量子”概念并且创立一个公式来表示辐射实验结果来看,他的目的是为了了解决维恩公式和瑞利-金斯公式在解释黑体辐射实验结果中的不完备问题。而且,普朗克“能量子”概念的提出以及相应公式的创立,确实回答了“紫外灾难”这一质疑,但是,普朗克将“能量子”这一概念应用于黑体辐射研究中,确实不是在所谓的“紫外灾难”之后,而是在此之前的1900年<sup>[1]</sup>。

“能量子”概念表明,能量不是无限可分的,它也像物质一样,能够以粒子或波包的形式存在;能量只能以量子整数倍的形式发射,物体在低频下辐射比较容易,而在高频下辐射比较困难。这样就较好地解决了维恩公式和瑞利-金斯公式所面临的问题。

由此,“能量子”概念确实是一个革命性的概念,其所提出的“辐射过程是不连续的”与日常生活经验相违背,也与经典物理学的基本原理相对立。要接受这一假说,就意味着要放弃传统物理学中“物质运动绝对连续”的观念。这对于当时的绝大多数科学家来说,是难以接受的。如当时的金斯就拒不接受普朗克的“能量子”概念及其理论,以至于他于1905年对瑞利

公式进行修正从而产生了“瑞利-金斯公式”,直至1910年,金斯最终接受了“能量子”概念。其实,普朗克本人也曾对“能量子”概念表示怀疑,他不能容忍“能量子”假说威胁经典物理学,试图把“能量子”假说纳入经典物理学的框架之中。1911年,普朗克提出能量只有在释放时才是量子化的,三年后,他又提出只有当振子同自由粒子碰撞从而导致能量变化时,能量才表现出不连续性。

爱因斯坦根据“能量子”概念于1905年提出“光量子”假说,成功地解释了“光电效应”;玻尔根据“能量子”概念和“光量子”概念,于1913年提出核外电子运动轨道理论,认为核外电子并不能连续地发射辐射,只能以量子的形式,即以特定大小的包形式发射(或吸收)能量。爱因斯坦的“光量子”假说和玻尔的“原子结构模型”相对于原先的理论确实是一次革命,都是对经典力学理论的突破。

但是,必须清楚地认识到,普朗克“能量子”假说以及相关公式的提出,并没有预设一个完全不同于机械自然观的有机整体性自然观,而只是对机械自然观的一个局部变革。而且,从上述“旧量子论”的提出及其发展历程可以看出,“量子”以及进一步的“能量子”和“光量子”的提出是一次革命,但是,据此解释光电效应以及微观层次实验并进而创立新的理论,是内插法和经验拟合法运用的结果,仍然是在近代科学的理论框架之内,并没有突破近代科学“大写的”哲学层面的范式。

不仅如此,比较经典物理学与普朗克、爱因斯坦和玻尔的量子理论,可以发现:在经典物理学中,能量和物质是连续变化的,就像小球沿着一面光滑的斜坡运动,而在他们提出的量子理论中,物质并不是连续变化的,而是依据其本身的能量大小处在一定的能级之上,当物质从一个能级跃迁到另一个能级时,需要吸

收或者辐射一定的能量,否则,这样的跃迁就不可能发生。这是一种对牛顿自然观的变革。不过,这样的变革并没有完全否定牛顿经典力学的机械自然观,对宏观低速的对象而言,牛顿的经典力学仍然是正确的。当涉及微观粒子或在微观层面上解释事物时,就需要量子概念了。

更重要的是,对于上述各种量子理论,“从某种意义而言,它根本没有构成一个统一的理论,只是一些处理特定问题的特设(ad hoc)方法”<sup>[2](P287)</sup>。如此,这样的量子理论还不成熟,在学术界还存在争论,还没有形成统一的观点和理解,属于库恩所谓的“前科学”,不能把它看作是对牛顿经典理论的彻底变革,只能算作是一次不完整的科学革命,是一次“小写的科学革命”。这应该是学术界通常把普朗克、爱因斯坦和玻尔所提出的观点称为“旧量子论”的重要原因。

### 三、“新量子论”的革命性特征与近代科学相符合

#### (一)量子力学研究遵循的仍然是机械自然观下的方法论原则

量子力学遵循的研究路线仍然是与机械自然观下的近代科学相一致的,即沿着本体论的还原论路径,将物质还原为原子以下的层次——亚原子层次,并对此展开研究。根据这样的还原,亚原子层次的存在应该是一个机械性的存在,而不是一个有机性的存在,是一个没有智能、意志和思维的存在,甚至应该是一个最简单、最接近世界本原的基本存在。就此而言,它的存在状态与机械自然观视域下的研究对象一致,是一个机械性的存在。可以说,量子力学的研究就是以此为基础进行的,它采取的仍然是近代科学的认识论原则,如祛魅性原则、简单性原则、还原性原则、因果决定性原则,所采用

的具体认识方法仍然是近代科学的实验方法和数学方法。近代科学认识论原则和具体方法的运用本身似乎没有过错,但是其产生是源于对宏观对象的认识,并与宏观对象相对应。当将此应用到微观亚原子层次时,就是在不知道对象存在或不存在的条件下,以及在不知道对象是如何存在的条件下,按照传统的近代科学方法去认识它,这就类似“盲人摸象”引发的“大象非象论”,导致目前量子力学解释的多义性、实验验证的不确定性等问题。

#### (二)“测不准原理”与机械自然观最根本的性质不相违背

是什么原因造成海森伯的“测不准原理”?有人认为,这是所用的测量方法和仪器的不完备性所致,即在获得某一共轭量的同时,无法控制地干扰了粒子的运动,使得粒子失去展现另一互补共轭量的能力。海森伯认为,“观测在事件中起着决定性作用,并且实在因为我们是否观测它而有所不同。”<sup>[3](P19)</sup>“我们必须记得,我们所观测的不是自然的本身,而是由我们用来探索问题的方法所揭示的自然。”<sup>[3](P24)</sup>玻尔也指出,“在经典物理学的范围内,客体和仪器之间的相互作用可以忽略不计,或者,如果必要的话,可以设法将它补偿掉,但是,在量子物理学中,这种相互作用却形成现象的一个不可分割的部分。因此,在原理上,真正量子现象的无歧义の説明,必须包括对于实验装置之一切有关特色的描述。”<sup>[4]</sup>举例来说,在试图确定电子的位置时,实验者必须要使用强光照射才能看到它,但是,在亚原子层面,光波将不可避免地对电子产生重大影响,并在确定它位置的那一刻改变电子的动量,如此,就不可能同时确定电子的位置和动量,这就好像你试图通过向小猫喷射高压水柱来确定这只小猫的位置一样<sup>[2](P288)</sup>。如果是这样,人类所获得的对电子的认识,就只是人类在仪器作用下对所能够认识到仪器对电

子作用的系统认识,至于这一认识背后电子的真实存在状态,我们永远不得而知。

哈瑞对这类仪器与研究对象之间的关系进行了分析,认为它们是“仪器—世界复合体”(apparatus-world complexes),是一类“玻尔式人工物”(Artefactos de Bohr)。在“仪器—世界复合体”中,仪器完全与世界混合在一起,仪器以及世界这两个组成部分都不能够从产生现象的现实中分离出来,导致的结果是“科学就是对于仪器—世界复合体的研究”<sup>[5](P29)</sup>。对于此类研究所导致的现象,哈瑞称为“玻尔式现象”。“玻尔式现象既不是仪器的性质也不是由仪器所引起的世界的性质。它们是一种新的实体的性质:仪器与世界即仪器—世界复合体的无法分解的结合。”<sup>[5](P31)</sup>这种无法,就是无法“回推自然”(back inference to nature),<sup>②</sup>而只能是从自然的倾向性(disposition)、潜在性(potential)和可供性(affordances)作出解释<sup>[5](P34-38)</sup>。

如果是这样,当我们改进实验仪器及其实验操作后,原则上可以解决“不可控制的作用”,进而“回推自然”,获得对电子本征状态的认识,此时,所测量出来的电子位置和动量,可能就不会呈现“测不准原理”所描述的现象。在这样的思想指导下,科学家进行了量子非破坏性测量理想实验,结果表明,即使在获取某共轭量的同时,保证粒子的运动没有受到不可控制的干扰,即在装置不受不确定关系影响的情况下,仍然不能同时确定另一共轭量,即互补性仍然存在<sup>[6]</sup>。

这样,“不确定难题的存在就与仪器精密度及仪器对微观对象的作用无本质的、必然的关联,而与微观对象的互补性质有本质的关联。即微观对象的不完全确定性是由微观对象的本性决定”<sup>[7]</sup>。微观对象如电子,在任何给定的时间都没有精确的位置和特定的动量。正是由于这一点,要想同时准确地确定这一对象的位置和动量是不可能的。“照此,粒子的这一本性给

人类关于微观对象的认识提出了原则性的限制,即人类原则上不能获得对微观对象的完全认识。因为微观对象的运动、变化、发展要遵循一定的自然规律,受到自身性质、结构的限制,它只能做它能做的事。”<sup>[7]</sup>这不是人类的认识能力所致,而是事物的本性使然。

在20世纪20年代,一些物理学家就持有这种观点。他们认为,在亚原子层次,事物的性质是不确定的,这种不确定性不是人类认识上的不确定,而是事物本身的特性。如果是这样,那么其所预设的如此这般的存在就与机械自然观最根本的性质——非有机生命性不相违背,而只是对机械自然观的局部反抗,即一种严格的事物共轭性质不能独立地以确定的形式存在,而只能以非独立的非确定的形式存在。

### (三)非定域性、不可分离性、非个体性不是亚原子层次对象本身的特性

量子力学理论及其诠释呈现非机械式的特征,如非定域性、不可分离性、非个体性,可能不是亚原子层次对象本身的特征,而是人类在复杂仪器的作用下,具有机械性特征的亚原子层次对象呈现的一种研究对象与研究对象之间难以区分的复杂状态。这样的复杂状态不是亚原子层次本身所固有的,而是人类为了获得对亚原子层次的认识,采取各种各样的手段,如实验操作和数学建构等产生出来的。如果没有实验操作及相关的数学建构,这些现象就不可能存在,就此而言,这些现象以及对现象的相应解释不是人类在实验室中发现的,而是人类在实验室中“制造”出来的、用数学“建构”出来的。这样的“制造”和“建构”创造了亚原子层次认识的复杂性表象,从而也相应地导致了对所获得认识的各种各样的解释,结果是对亚原子层次对象的认识就不像传统科学那样具有可重复性、确定性、规律性以及真理性。这样认识的真理

性缺乏,从根本上来说,是由对象的微观及其对此作用的宏观造成的。试想,如果人类有一天能够像在显微镜下观察并操作细胞那样来“观察”并“操作”亚原子层次的对象,那么就很可能获得关于此对象确定无疑的认识,也许到那时,我们可能会获得关于此层次对象机械性的、确定性的、无疑的认识,而非像现在的量子力学那样得到其非定域性、不可分离性和非个体性的认识。

#### 四、“新量子论”被错认为“大写的科学革命”的原因

“新量子论”被错认为“大写的科学革命”,与“新量子论”的建立及检验紧密相关。

对于传统科学,理论建构是建立在事实基础上的。如果说早期量子力学的建构主要是建立在量子事实的基础上,那么到了弦论和圈量子引力论这里,基于事实的建构就几乎不可能了。因为,此时相关研究已经深入到普朗克尺度,与之相应的普朗克能量的值极其巨大,达到 $10^{22}$ 兆电子伏,而普朗克时间的值却极其微小,为 $10^{42}$ 秒,获取与之相应的量子事实需要建造极大的粒子加速器,而人力、物力、财力、技术等方面都难以满足建造的要求,因此,相应的量子事实也就无法获得。

在这种情况下,弦论和圈量子力学的建立就更多地以先验的概念和理论建构框架为基础。对于理论中的先验概念,主要是为适应理论需要所建构的、本质上属于先验的假设,如弦论中的弦、多维空间以及超对称等。对于理论建构的框架,“物理学家逐渐从经验研究,转向纯数学上的理性推理和对基础概念的带有哲学色彩的分析 and 讨论,物理学、数学和哲学再次携手一起研究新出现的问题。在这一阶段理论的发展中,经验的地位逐渐弱化,数学成为唯一的逻辑途径,数学和物理学之间的界限越来越模糊,可能的发展趋势为在数学和物理学分别走

向统一的基础上,走向建立在物理学大统一基础上的数学大统一”<sup>[8]</sup>。

这样的理论建构方式与传统的科学,如传统物理学是不一样的。传统的物理学是以经验事实为基础创立科学假说或理论,以便解释或预言科学事实,而量子力学的新发展则以先验概念为基础,解释和预言理论范围内的科学事实,至于这样的科学事实能否被检测到则另当别论。而且,数学在传统的物理学那里,更多的只是作为物理学家描述物理事实的工具,而在新发展起来的量子力学这里,则成为建构相关理论进而引导物理事实的基石。量子力学理论的人工建构性增强了,物质依赖性减弱了,其更多地成为人工科学理论。<sup>③</sup>其一,它表明量子力学(量子引力理论)的建构趋势是从经验建构到理论建构,从物理建构到数学建构。其二,从量子力学(量子引力)的检验来看,鉴于量子引力对象的特殊性,通过实验获取量子事实是异常困难的,同样地,通过诸如此类的实验来检验相关的理论也是异常困难的。在这种情况下,有些物理学家提出还是应该更多地从理论自身的完备性以及理论与理论之间的一致性来评价。另外,一些物理学家认为,应该更多地从量子引力理论内部的解释力和预言力来评价,而不是从基于量子事实的量子引力的解释力和预言力来评价。这样一来,科学理论的检验就成了科学理论自身内在逻辑一致性的评价,一旦超出这一范围,其合理性就不能保证。科学的真理观也就从“符合论”——一个信念和命题为真,当且仅当它与客观实在相符合,走向“一致论”(“融贯论”)——一个信念和命题为真,当且仅当它与其他背景理论和命题在逻辑上相一致,以及走向“实用论”——一个信念和命题为真,当且仅当它有“功用”或“效用”。

即使不考虑量子引力理论检验的困难,假设量子理论检验的实验能够进行,由于量子力学对象的特殊性以及实验过程的复杂性,也很

难获得确定的量子力学理论真理性检验。

如海森伯提出“测不准原理”,再进一步给予“误差—扰动诠释”。他认为,(a)电子在测量前具有确定的位置和动量,只是(b)在测量时不可控制地干扰了被测电子,从而(c)宏观地显示电子不具有同时确定的位置和动量。其中(a)是关于电子的\*\*本体承诺,或命题假设\*\*;(b)是关于\*\*本体论承诺或命题假设的实验检验中的方法特征\*\*;(c)是关于\*\*实验结果,以宏观的人类可见的方式呈现\*\*。上述认识的\*\*真理性就在于对这三者的认定\*\*。例如,如果假设海森伯的上述“测不准原理”的“误差—扰动诠释”是正确的,那么就表明(a)(b)(c)都是成立的,只是由于在测量时不能消除不可控制的干扰,因此所获得的认识不是关于被认识对象(电子)的,而是关于被认识对象(电子)与仪器不可分离的作用所构成的系统。相对于被认识对象的本体论承诺或命题假设,这样的认识是无效的,不具有认识的\*\*真理性\*\*;相对于被认识对象与仪器不分离的作用所构成的系统,这样的认识是有效的,具有认识的\*\*真理性,只是这样的真理性已经不是传统意义上的真理性了,即不是关于自然界中存在的自在对象或者可以还原为自然界中存在的自在对象的人工对象的真理性认识,而是关于人类和潜在的自然对象之间不可分离的作用后的对象的真理性认识\*\*。

后一种认识的\*\*真理性已经把作为认识者的人不可分离地包含于要被认识的对象之中。问题是,作为认识者的人,如何判断自身对自身与潜在对象构成的不可分离的系统的认识的真理性呢?这是不能判断的。这种情况类似于“提起靴袪以自立”。因此,关于此类认识的真理性,还是应该根据认识过程中所认识到的对象与要被认识的对象是否一致来判断。如果这样,那么有关“测不准原理”检验的真理性如何呢?

这一问题的答案,与人们是否认同前文所述海森伯对“测不准原理”所作的本体承诺(a)、方法特征(b)、认识结果(c)有关。如果人们认同海森伯本体承诺(a)、方法特征(b)、认识结果(c),则认识到的对象是原先要被认识的对象与仪器构成的且在认识论上不可分离的系统,与要去认识的微观对象的目标不一致,相对于要去认识的微观对象,这样认识的真理性不能成立,这对应于表1中的“情形(1)”。其他情形参见表1的情形(2)至情形(8)。表1表示的是在对海森伯本体承诺(a)、方法特征(b)、认识结果(c)不同的认同情形下,以“认识到的对象与要去认识的对象一致”为依据所判断的认识的真理性。其中,“√”表示相应的理解与海森伯的陈述一致,“×”表示相应的理解与海森伯的陈述不一致。

表1 基于对海森伯“测不准原理”陈述的认同与否及其认识的真理性确定

情形	本体承诺(a)	方法特征(b)	认识结果(c)	认识到的对象与去认识的对象一致(认识真理性)
(1)	√	√	√	不一致,且(c)与(a)相悖,真理性不能确立
(2)	√	√	×	不一致,虽(c)与(a)相符,真理性不能确立
(3)	√	×	×	一致,且(c)与(a)相符,真理性能够确立
(4)	×	×	×	一致,但(c)与(a)相悖,真理性不能确立
(5)	×	×	√	一致,且(c)与(a)相符,真理性能够确立
(6)	×	√	√	不一致,虽(c)与(a)相符,真理性不能确立
(7)	√	×	√	一致,但(c)与(a)相悖,真理性不能确立
(8)	×	√	×	不一致,且(c)与(a)相悖,真理性不能确立

根据表1可知,理论上8种关于“测不准原理”真理性检验的情形,其中,只有在情形(3)和情形(5)这两种情形下能够确立相关认识的真理性,在其他情形下都不能确立相关认识的真理性。更为重要的是,在确立真理性的两种情形中,被检验的仅仅是认识结果与本体承诺之间的一致性,至于本体承诺本身是否可知,则不能确定。

后一种情况与玻尔“互补性原理”体现出来的认识论内涵紧密相关。对于玻尔来说,可以确定电子同时具有确定的位置和动量,或者同时不具有确定的位置和动量,但是,不确定的是,我们不能事先认识到电子具有或者不具有确定的位置和动量,只有等到我们进行了具体的测量,才知道由电子微观系统与宏观仪器系统不可控制的相互作用具有或不具有确定的位置和动量。这样,通常所说的“电子同时不具有确定的位置和动量”,事实上指的是电子微观系统与宏观仪器系统不可控制的相互作用系统不具有确定的位置或动量。这点对于作为粒子或是作为波的“电子”都是如此。玻尔认为,“‘我们不能同时知道一个电子的位置和动量’这样的陈述,立即会提出原子客体的这两种属性的物理实在性问题,这个问题只能这样来回答:通过参考一方面对时空协调的明确使用,另一方面对动力学守恒定律的明确使用的互斥条件。”<sup>[9]</sup>

这涉及量子力学一个根本性的认识论问题:“事物本身究竟是怎样的”,它是不可知的,可知的是某些概念框架以及实验系统。这有点类似于康德认识论,即物自体本身是不可知的,人类是利用“先天综合判断”来认识我们的世界,对于认识论层面背后的本体论承诺,则不关心。如此,科学认识走向了反实在论,其具体体现可以是经验建构论,也可以是工具论或结构实在论。

这种反实在论的分析表明,量子力学所认

识的系统——量子系统,事实上是人类所认识的潜在对象(未知对象或假设对象),与人类为了获得对该对象的认识所施加的操作系统(实验操作和数学建构),所构成的一个在认识论上不可分离的复杂系统;量子力学所揭示的所谓的量子系统的属性以及相关的蕴涵,如不可分离性及其内禀属性、非定域性及其赖态属性、非个体性及其关系属性等,不是就所要认识的对象而言的,而是就量子系统而言的,且这不是自明的,而是诠释而成的。这不是我们的认识者预设了认识对象具有这样的特性和属性,从而再运用相应的方法论原则认识了这样的特性和属性,而是我们的认识者在认识认识者和认识对象(建构出来的)的过程中,揭示出它们所组成的不可分离的系统可能具有这样的特性。就此,我们不是以某种自然观变革为基础,揭示对象具有这样的自然观蕴涵,而是在建构一个潜在对象的基础上,获得了人与认识对象所构成的不可分离的复杂系统所可能具有的自然观。这样的自然观不是认识对象所内禀的,而是人类对对象的建构所赋予的,是不能离开人的。就此,爱因斯坦的定域实在论是站不住脚的,而结构实在论有一定道理。曹天予指出,“关系结构哲学基于态的纠缠关联,对于量子系统的不可分离性、非定域性和非个体性的强调,把传统实在论关注形而上学的对象个体转移至对象涉身其中的关系结构,看到了关系结构在科学理论发展中的连续性,对于应对库恩和劳丹的反实在论挑战具有重要意义。但是,关系结构哲学对于相关属性的强调,对于内禀性质的回避或否定,容易陷入关于结构的数学柏拉图主义和关于粒子的现象主义。因此,一个实在论者应有的态度是在传统实在论和关系结构哲学之间保持必要的张力,把一个越来越精致化的数学关系网看作是一种了解物理实在的方式。这样,我们所拥有的相关属性或是关系知

识就是关于组分结构在整个结构关系网中所占据的位置和它们所扮演的功能的某种关系知识,而不是关于它们的内禀性质的精确知识。”<sup>[10]</sup> 弗兰奇和莱德曼也认为,在量子时代,我们对于科学理论的本体论蕴涵,认识的只是物理结构、数学结构和动力方程那样的东西,这些东西关系实在,而个体客体不过是这样关系中一些能自我支持和比较持久的东西<sup>[11]</sup>。

也正因为这样,在量子力学领域不能获得确定的、唯一的、不容置疑的理论,量子理论层出不穷,竞争理论此起彼伏,关于量子力学的争论普遍存在,对量子力学的接受成了某些科学家之间诠释、商谈、妥协并最终达成一致的结果。传统的科学标准降低了,科学真理性诉求弱化了。这引起了某些科学家的不满,他们以弦理论和多世界理论为例,认为当今物理学内部越来越多地呈现一种趋势,即基于理论检验困难的增加,而淡化或放弃理论的实验检验,尤其是理论的证伪。对于这一点,有学者认为是错误的,必须改正<sup>[12]</sup>。

事实上,“改正”并非易事。这涉及人类的智力水准与被认识对象难度之间的关系。有学者认为,对量子力学基础的真正解释很可能超出了人类的认知能力,就像微分学超出了任何一只狗的理解一样。量子力学基础可能永远超出任何人的理解能力。我们没有原则性的方法来辨别那些东西是什么,因为我们必须比我们自己预计的更聪明,才能界定我们自己理解的界限。也许有一天,我们会创造出一台比我们更聪明的量子计算机,它也许能够告诉我们哪些科目不需要费心去理解,但是,前提是我们必须首先找到一套可以如此简单地表达量子规则的基础<sup>[13](P138)</sup>。

这给我们提出了一个非常严肃的问题:人类究竟在多大意义上能够实现对亚原子层次,尤其是普朗克尺度对象的真理性认识? 在这条

道路上,人类究竟能够走多远? 这也告诉我们,近代科学革命之路并非一目了然的平坦之路,有许多本体论的问题、方法论的问题和认识论的问题需要我们探讨,有许多具体的科学认识难题需要我们破解。

## 五、结论及其讨论

“范式”可以分为抽象的哲学层面的范式和具体的科学层面的范式,范式的变革也有“大”“小”之分。据此,科学革命可以分为“大写的科学革命”和“小写的科学革命”。“大写的近代科学革命”相对于古代科学,既是一次抽象的自然观变革、认识论转换、方法论创新的哲学层面的“大写的科学革命”,也是一次具体的科学理论、科学方法以及科学认识工具的科学层面的“小写的科学革命”。被广泛视为现代科学革命的“量子力学革命”,从其发生的起源预设来看,仍然是机械的自然观、认识者与认识对象的二元分离以及实验和数学方法的建构传统,不同的只是鉴于认识对象存在的潜在性、复杂性、特殊性以及人类存在的认识的局限性,导致对亚原子层次对象认识的复杂性、不确定性和认识者与认识对象的二元不可分离性,从而需要对此进行进一步的多元诠释。这样的诠释赋予了认识对象的非机械性、认识者与认识对象的二元不可分离性以及实验和数学方法的建构性,不过,这不是由世界的本原存在(亚原子层次本原存在以及人类与亚原子层次关系的本原存在,物自体)决定的,而是由认识对象的本原存在的潜在性、复杂性、特殊性,以及人类的本原存在及其认识的局限性使然。这表明,人类只能通过建构(实验建构和数学建构)以获得对亚原子层次与人类认识系统所组成的复合系统的一种“纠缠”“叠加”“多世界”式的认识。这就需要对这样的认识进行诠释,努力澄明。但是澄明没有达

到,结果是一种误解,即把一种对亚原子层次对象与人类认识系统不可分离的复合系统的认识诠释所体现出来的、这一复合系统可能具有的非局域性特征、不可分离性特征以及非个体性特征,当作是这一复合系统的特征。事实上,量子力学的探索本身并非是在这一自然观或本体论基础上,采取相应的认识论原则和方法论途径进行的。这一特征的获得仍然是基于近代科学的机械自然观的背景、主客二元分离的认识论前提,以及原有的实验方法和数学建构的方法论展开的。就此而言,量子力学没有改变“大写的近代科学革命”中的自然观和方法论等,所改变的只是所预设的机械性对象的非机械性特征的认识。之所以其认识结果呈现异于近代科学的一面,是因为其研究对象的微观以及人类认识能力的有限造成的,就此而言,其认识结果的各种革命性呈现,并不是真正的革命性呈现,而是特殊对象在人类有限认识前提下呈现的不成熟的认识状态。概而言之,量子力学革命是一次“小写的近代科学革命”而非一次“大写的现代科学革命”,它与17世纪后所发生的那些科学革命并非截然不同。

从“大写的科学革命”视角考虑,现代科学革命应该是以有机整体性自然观为基础的,采用相应的方法论原则,如有机性原则、复杂性原则、整体性原则、非因果决定性原则进行的革命。就此来说,量子力学革命肯定不是一次现代科学革命,更不用说它是一次“大写的现代科学革命”,它只是近代科学革命的延续,一次以近代科学哲学范式为基础的,且具有革命性科学认识形式的一次“小写的科学革命”。如果说它是现代科学革命,那么就必须预设亚原子的对象具有有机整体性,“宇宙之砖”具有思维,宇宙本原具有心灵,而这是难以想象的。

在上述背景下,就可以理解国外学者的这

段话了:“量子力学之所以具有革命性,是因为它推翻了看起来如此显而易见且被经验充分证实的科学概念,而这些科学概念被认为是毫无疑问的,但这是一次不完整的革命,因为我们仍然不知道量子力学将引领我们前进的方向,甚至也不知道为什么它必须是真的!”<sup>[13](PXV)</sup>

其一,需要对量子力学的出路进行反思。李·斯莫林认为,物理学在过去30年里取得的进展比18世纪以来的任何可比时期都要少。对此,他将部分原因归咎于对弦理论的痴迷,但他同时认为,在现代理论物理学的研究方式上,还有其他系统性的障碍。其中,最大的障碍是大多数现代物理学家未能对他们的工作进行哲学思考,这阻碍了创新,因为相关量子力学研究涉及时间、空间、测量或因果等概念的深层次理解,这些只能通过哲学思维来推进。关于这一点,20世纪的物理学家如爱因斯坦、玻尔、海森伯和薛定谔等物理学的伟大先驱,都是如此。他们不仅技术娴熟,而且受过广泛的人文教育,对哲学有着浓厚的兴趣,他们在科学研究中的关键性突破来自他们对深蕴在科学中的哲学意义的探求<sup>[14]</sup>。

其二,既然量子力学不是一次“大写的科学革命”,甚至也不是一次确定无疑的具有牢固基础的“小写的科学革命”,而是一次具有诸多“不确定性”的“小写的近代科学革命”,那么,以此为基础的、被当代人认可的以及被大力发展的所谓的“量子技术革命”又是什么呢?考察以往各种各样的技术革命,都是建立在确定无疑或基本上确定无疑的科学革命的基础之上。在此,技术变革是以科学认识为基础,在技术创新生产新产品的过程中,一旦科学认识出了问题,技术能够产生吗?所产生出来的技术是什么样的呢?这样的技术与机械力学基础上产生出来的机械技术、电磁理论上产生出来的电磁技术有什么不同呢?由“量子

力学”——“机械式”科学——科学认识的不确定以及由此引发的对认识对象规定的“模糊性”——非个体性、不可分离性、纠缠叠加性等——不确定性的科学,能够导致确定性的量子力学的应用——量子技术吗?这是一个值得深刻反思的问题。

### [注释]

- ① 事实上,对于上述实验,所谓的“作为粒子的电子”和“作为波电子”,并不意味着我们在实验中观察到了电子,而是表明如果电子是那种存在——潜在的存在,那么会产生照相底片上的那种显在。
- ② 所谓“回推自然”,根据哈瑞的观点,有两种情况:一是“作为自然系统驯化版本的物质模型”(material models as domesticated versions of natural systems)的仪器。这些仪器是一种自然发生的物质设置的物质模拟,如用于做实验的果蝇群体等。对于此类模拟,在仪器和自然设置之间并不存在本体论的不同,仪器和程序的选择保障了这种同一性,因为仪器就是自然发生的现象以及物质设置的某种版本,在其物质设置中,现象发生了。二是仪器作为“因果地关联于世界的工具”(causally related tools to the world)。这类工具是因果地受自然过程影响的,工具中的变化是物质世界相应状态的效应,典型的如温度计。对于这两类仪器,它们与对象的作用机制清楚明白,能够被进一步分析,而得到仪器与对象作用之前对象的状态或者仪器与对象作用之后对象的状态。
- ③ 弦论和圈量子引力是量子引力理论,不能等同于量子力学,只能说在普朗克尺度或者量子引力尺度理论描述脱离经验,但是量子力学本身是不存在经验问题的。当下的物理学量子力学和广义相对论是两个独立的体系,分别而论都是没有问题的,但是结合起来问题很多,量子引力试图融合两者。因此,严格意义上量子力学和量子引力是完全不同的,不能混淆。

### [参考文献]

- [1] 曹则贤.黑体辐射公式的多种推导及其在近代物理构建中的意义(Ⅲ)[J].物理,2022(1):37-42.
- [2] Henry J. A short history of scientific thought[M]. Basingstoke,Hampshire:Palgrave Macmillan,2012.
- [3] [德]W.海森伯.物理学与哲学[M].范岱年,译.北京:商务印书馆,1984.
- [4] [丹麦]N.玻尔.尼耳斯·玻尔哲学文选[M].戈革,译.北京:商务印书馆,1999:233.
- [5] Harré R. The materiality of instruments in a metaphysics for experiments[M]//Radder H. The philosophy of scientific experimentation. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press,2003.
- [6] Englert B G, Scully M O, Walther H. Complementarity and uncertainty[J].Nature,1995,375(6530):367-368.
- [7] 肖显静.作为客体的科学仪器[J].自然辩证法通讯,1998(1):16-23,11.
- [8] 高策,乔笑斐.后真相时代的科学哲学:物理学哲学的视角[J].中国社会科学,2019(2):26-37,204-205.
- [9] Bohr N. On the notions of causality and complementarity [J].Science,1950,111(2873):51-54.
- [10] Cao T Y. Structural realism and the interpretation of quantum field theory[J].Synthese,2003,136(01):3-24.
- [11] French S, Ladyman J. Remodelling structural realism: quantum physics and the metaphysics of structure[J]. Synthese,2003,136(01):31-56.
- [12] Ellts G, Silk J. Scientific method: defend the integrity of physics[J].Nature,2014,516(7531):321-323.
- [13] Peacock K A. The quantum revolution: a historical perspective[M].London:Greenwood Press,2008.
- [14] Lee S.The trouble with physics:the rise of string theory,the fall of a science,and what comes next[M].Boston:Houghton Mifflin,2006.