

(发表于《自然辩证法通讯》2010年第5期(Vol.32, Sum No.189), pp26-34。发表时有校对错误。第四节标题“量子理论对经典实在的颠覆”混排在正文中,第五节变成第四节,结语变成第五节。这里是重新校对后的文稿。)

为什么量子力学会引起我们的困惑? *

——兼谈玻尔的“现象”概念及互补原理

田松

(北京 北京师范大学哲学与社会学学院 100875)

内容提要: 量子物理所描述的微观世界(量子实在)与经典物理所描述的宏观世界(经典实在)有着巨大的差异,让人困惑,从而需要解释。经典实在与人类的日常经验是相协调的,可以用日常语言进行描述。物理学试图将在这个实在进行扩展,但是在超宏观的宇宙尺度上,以及微观的亚原子尺度下都遇到了障碍。量子物理所描述的对象已经不是物理实体,而是物理“现象”。这些现象不可能构建成为经典实在中单一的可视模型,而必须采用两种矛盾的模式,这就是玻尔的互补原理。

关键词: 解释, 现象, 互补原理, 实在(经典实在、量子实在), 基本感官尺度, 可视模型

玻尔曾说,如果一个人第一次听到量子物理而不感到困惑,那他一定是没有听懂。量子物理给出的实在图景与我们日常经验有着根本上的差异,从而引发了一系列关于实在的困惑。关于薛定谔的猫、海森伯的测不准原理、德布罗意的波粒二相性、爱因斯坦提出的“月亮在没有人看到它的时候是否存在”,以及惠勒提出的延迟选择实验¹等,直到今天仍然吸引着科学哲学学者的关注。在物理学家给出的各种解释中,玻尔的互补原理被认为具有很强哲学意味。本文首先对“解释”本身进行了解释,并利用玻尔的现象概念,以及完形心理学对于人类视觉认知的研究,对于互补原理以及量子力学解释本身,提出一种可能的解释。

一、解释·物理学与实在

首先需要解释的是“解释”本身。什么是解释?为什么有些事情需要解释,有些事情不需要解释?在这里,我不打算对“解释”进行哲学意味的定义,而是采用相对形象的方式对“解释”进行“解释”。

一个解释,必然涉及被解释对象,涉及听众。一个没有语境的、绝对的解释是不存在的。所谓解释,就是把一个听众不大熟悉不大理解的东西(被解释对象),用听众熟悉的语言(作为听众缺省配置^①的背景知识),讲一个能够让听众认可的故事(把被解释对象镶嵌在听众

*基金项目: 国家社会科学基金一般项目“量子现象的非实在论整体观研究”(10BZX002)

【收稿日期】2009年12月30日

【作者简介】田松(1965-),男,吉林四平人,哲学博士,理学(科学史)博士,北京师范大学哲学与社会学学院副教授,主要研究方向为科学哲学(物理学哲学与科学哲学一般问题)、科学思想史、科学人类学和科学传播等。Email: tiansong@bnu.edu.cn

^① 原为计算机术语,指计算机出厂时的一些基本设置。北京大学刘华杰教授以此来比喻我们大多数人头脑里所视为当然的基本的思想观念,这些观点基本上是中小学教育阶段被建构出来的。

的知识体系中，在必要的情况下，要对听众的背景知识体系进行改造，当然，这种改造也必须能够为听众所认可，也就是说，这种改造同样是在这个背景知识框架内部进行的。简而言之，所谓解释，就是讲一个故事，讲一个听众能够听懂并且认可的故事。

自人类有自我意识以来，人类就不断对我们所生存的世界、对实在本身进行解释。对于先民来说，神话不是文学，而是哲学、是历史、是律法，是先民的形而上的解释体系。每个民族都有自己的创世神话，这些神话是他们可以理解并且能够接受的故事，也就成为他们对宇宙创生、人类起源的解释。物理学（科学）也必须讲出能够让听众听懂，并且能够接受的故事。历史地看，物理学，与能够听懂并接受物理学的听众，这两者是互相建构的。随着物理学本身的发展，听众（的背景知识）也在不断地变化。物理学必须生产出自己的听众，才能使自身成为对实在的解释。

在拉祜族的创世神话中有这样的故事。天神造人时，人祖闷在一个葫芦里出不来。小米雀听到了人的声音，跑过来啄葫芦，但是没有啄开；老鼠听到了，也跑过来咬葫芦，终于把葫芦咬开了。于是人类从葫芦中走出来。在人类诞生的过程中，小米雀和老鼠都作出了贡献，人类应该有所回报。小米雀贡献小，可以在大田里吃粮食；老鼠贡献大，可以住在粮仓里。对于拉祜人来说，小米雀和老鼠享用人类的劳动成果，是它们的天赋权利。这是一个拉祜人能够听懂，并且接受了的故事，于是，这个神话就构成了对小米雀、老鼠和人类关系的一种解释。而对于不相信这个神话的其它民族，这个神话就只是一个故事，而无法构成解释。

在我们寻找对于量子力学的解释时，我们常常忽略了这样的问题：是哪些人需要对量子力学进行解释？在什么意义上进行解释？对于一个完全接受了量子力学，彻底熟悉量子事件的物理学家来说，测不准或者波粒二相之类的事情可能是不需要解释的。他完全可以把这些事件作为理所当然的前提，只要能对这些现象进行计算，进行几率意义上的预言，就够了。对于蒲松龄笔下的崂山道士来说，量子力学的隧道效应（低能量粒子有穿过高能势垒的几率）也不需要解释，因为在他的缺省配置里，一个人修炼到了一定境界就可以穿墙而过。这没有什么可以奇怪的，也就不需要解释。

那么，当我们说要解释量子现象的时候，我们要在哪一个知识框架里进行解释呢？通则不痛，没有困惑，就不需要解释。量子力学之所以特别地需要解释，是因为它引起了我们的困惑——确切地说，是引起了我们这些受过经典物理教育的人们的困惑；是因为量子世界的物理对象所表现出来的行为，与我们对于实在的缺省配置，与经典物理学的实在观不能协调。因而实际上，我们需要解释的是实在本身。

现代物理学是古希腊自然哲学的延续，它继承了自然哲学对世界的思考，并在定量的层次上建立了巨大的理论体系。随着牛顿物理学的传播，这种物理学所代表的机械论、还原论、决定论的实在观也得以传播，成为现代人的主流意识形态和大众话语的一部分。只有少数哲学家和科学家有能力看到物理学自身的问题。在20世纪，量子论和相对论的相继出现使得实在问题更加深入地由哲学问题变成科学问题。量子困惑引发了玻尔和爱因斯坦长达几十年的争论，在争论的最后，爱因斯坦发表了一篇重要文献：《能认为量子力学对于实在的描述是完备的吗？》，而玻尔则以同题论文予以回应。“实在”，这个哲学命题成为两位物理学大师的讨论核心。惠勒也说：“我无法阻止自己去琢磨存在（existence）之谜。从我们称之为科学根本的计算和实验，到这个最宏大的哲学问题，其间连接着一个不间断的链条。在这个链条上不会存在这样一个特殊的点，一个真正有好奇心的物理学家会说：‘我就到这儿了，不再往前走了。’”²

现在，我们把实在本身作为物理学的对象，“实在是什么”这个问题就转换成：我们怎样获得关于实在的知识，或者说，我们是怎样观测我们称之为实在的那个东西的？毫无疑问，我们观测实在的基本工具，就是我们的感官。³

世界是我们感知的世界；
我们感知的世界是我们能够感知的世界；
我们能够感知的世界首先是我们的感官所能够感知的世界。

二、基本感官尺度的经典物理实在观

我们的感官所能感觉到的世界是有限度的，柯林武德说：

我们关于自然界的经验知识依赖于我们通过实验观察对这些自然过程的了解，这种了解有一个时间和空间上的下限，因为我们无能力去观察任何占据比某种空间更小比某种时间间隔更短的过程；也有一个上限，那是因为我们不可能观察任何空间上比人类视野还广，时间上比人类记忆还久的过程，也因为观察比如下时间更长的过程是极为不便的：即我们所能作到的专心致志地持续观察它们的时间。我们的观察在时空上的限度，上限和下限，已经被现代科学家的仪器大大地扩展了，但它们依然存在，而且因为我们作为动物身体的有限尺寸和生活的有限范围，它们最终总要约束我们。比我们更大或更小的动物，它们的生活处在一个更快或更慢的节律中，它们将看到完全不同类型的过程，因而就自然界是什么样的问题，它们通过这些观察达到一个与我们完全不同的观念。⁴

感官的限度，已经先天地限定了我们所能够观察的实在。我们所理解的整体实在，是根据我们有限的感知和观察建构起来的。我把我们的感官所能直接感知的世界的时空范围，定义为**基本感官尺度**。我们的日常语言，和基本的实在观，都是建立在这个尺度之上的。按照柯林武德的说法，人类对于这个尺度的观察是比较“方便”的。

感官并不必然地唯一地决定实在观。现代人和原始民族拥有近乎相同的感官，但是我们感知的世界有着很大的差异。许多原始民族都能够切实感觉到他们与神灵生活在一起，亚里斯多德的物理学中也充满了目的论的内容，因为他们的所接受的关于实在的观念（故事）与我们不同。惠勒说：“实在是由几根观察的铁柱及其间的想象和理论的混合结构组成的。”⁵根据同样的观察的铁柱，可能建构起不同的认知完形（实在观、故事）；反过来，接受了不同的完形，也会观察到不同的铁柱，或者对同样的铁柱进行不同的解释。^①经典物理学不仅对我们的感官经验进行了解释，也反过来影响了我们的感官经验，影响了我们的认知模式。

各传统文明的解释世界的形而上体系随着地域、文化的不同，呈现出丰富的多样性。但是在工业革命之后，随着工业文明在全世界的扩张，作为其形而上体系的科学也随之在全球蔓延，成为制度化教育中的主流意识形态。我们的实在观，是由牛顿范式的机械论、还原论、决定论的经典物理学建构的。在康德的描述里，牛顿的经典物理学是一种先天综合判断，是具有绝对确定性的知识，是真理。E.伯特指出：

牛顿的权威丝毫不差地成为一种宇宙观的后盾。这种宇宙观认为人是一个庞大的数学体系的不相干的旁观者，而这个体系的符合机械原理的有规则的运动，便构成了这个自然界。……从前人们认为他们所处的世界，是一个富有色、声、香，充满了音乐、爱、美，到处表现出有目的的和谐与创造性的理想的世界，现在这个世界却被逼到生物大脑的小小角落里去了。而真正重要的外部世界则是一个冷、硬、无色、无声的沉死世界，一个量的世界，一个服从机械规律性、可用数学计算的运动的世界。⁶

^① 关于惠勒之实在图示的具体描述，亦请参考拙文《所见即所能见》。

概而言之，经典物理学给出的机械论、还原论、绝对论的世界图景大致有如下内容：

1) 我们及我们所生存的世界是由物质构成的；物质世界是按照某种规律运行的；这种规律是可以被人所掌握的；这些规律是可以表达为数学方程的；这些数学方程是可以计算的。

2) 物质存在着构成它的基本单元；物质世界处于绝对空间和绝对时间之中；绝对空间是可以欧式几何进行描述的；

3) 世界是连续的。物体在任意给定的时刻，都在空间中占据一个确定的位置。位置随时间变化，在空间中留下一条轨迹。

这种实在观与我们的日常语言、与我们的感官经验是一种相互建构的关系。所以我们能够得心应手地用我们的日常语言描述这种实在观。反过来，当我们试图用这种语言描述另外一种实在观的时候，就会感到圆凿方枘，力不从心。

三、基本感官尺度认知模式或经典实在观的延伸

基本感官尺度的世界是我们的认知模式、日常语言以及经典物理学得以建立的基础。当我们的感知对象的尺度向大小两方面扩展时，我们自然而然地继续以这样的认知模式去面对扩展了的世界，或者说，将这种实在观向外拓展。

在大尺度的方向上，光学望远镜使我们能够看到肉眼看不到的距离。当然，我们可以比较容易地证实我们通过望远镜所看到的景象是“真实的”实在，而不是幻觉。那就是走到前面去，用肉眼看到，用手摸到适才在望远镜里看到的東西。于是我们可以利用望远镜将视觉在大尺度方向延伸。

同样，在小尺度的范围内，光学显微镜也使我们的视觉得到延伸，我们可以对微生物、细胞有直接的视觉感知。这个视觉感知甚至还可以有间接的触觉确认。

这样，可以把基本感官尺度的实在观扩展到光学望远镜和光学显微镜的工作范围。因此，我把光学望远镜和光学显微镜的工作范围作为基本感官尺度的上限和下限。

世界是我们感知的世界，我们通过我们的感官感知我们的世界。对于经典物理学而言，最重要的感知元素是视觉元素。这部分地由于，经典物理学是以欧式几何为模本的。所谓“眼见为实”，在我们的认知模式中，来自视觉的信息是最重要的部分。听觉、触觉和味觉常常只是作为对视觉的辅助和确证。因而，当我们试图认识和描述基本感官尺度之外的世界时，当我们试图拓展经典物理的实在观时，我们会本能地试图赋予新尺度的物理对象以可视模型。这个可视的模型，其实是把新尺度的物理对象缩小或者放大到基本感官尺度。

比如在太阳系的范围内，我们设想出这样的可视模型：各行星在各自的轨道上围绕太阳运转；卫星围绕各自的行星运转；行星自转。这个模型并不是我们能够直接看到的。甚至地球的圆形，在人类进入太空之前，也从未被人类直接用眼睛看到，只能通过某些视觉元素间接推断。比如船在海上由远及近，岸上的人们会首先看到桅杆，然后才逐渐看到整个船身，这大概是对地球球形的最直接的感知例证——但是，仅仅由这个感知例证而推断地球本身是圆形，存在着巨大的逻辑跳跃。地球围绕太阳的运行更不可能被直接看见，反倒是太阳像月亮一样围绕着地球运转更容易想象。太阳系模型与我们在基本感知尺度建立起来的认知模式是完全吻合的，于是我们的经典实在观就拓展到了太阳系的尺度。对于接受了现代教育的人们，太阳系的可视模型似乎成了其视觉经验的一部分。

类似于太阳系这样的视觉模型还可以延伸到银河系乃至河外星系。然而，在超出了光学望远镜的尺度，进入到射电望远镜所“看到”的宇宙尺度之后，基本感官尺度的视觉图景已不能适用。现代宇宙学所认定的有限无界的宇宙是欧氏几何无法描述的，从而超出了基本感

官尺度的认知模式。但是，人们在试图理解这种宇宙理论的时候，仍然力图建立视觉模型，比如用吹气球来比喻宇宙的膨胀，试图为非欧空间建构出一个基本感官尺度的可视图景来。

在小尺度方向，类似的扩展也在进行着。在光学显微镜的工作范围之外，人们进入到了原子的尺度。

原子说本是古希腊的一种哲学思辨，到了19世纪，被道尔顿发展为一种化学理论。原子被想象为构成物质的基石，它们之间靠作用力相互结合、分离，不同的组合表现为宏观物质的不同性质。人们本能地赋予原子以可视模型，想象原子与原子之间的作用类似于钢球与钢球之间的作用。

进而，人们发现原子本身具有结构，具有更小的组分。人们又本能地为原子结构建立可视模型。先是汤姆逊建立了西瓜模型，认为原子中的负电荷就像西瓜籽一样镶嵌在带正电的西瓜瓤上。卢瑟福以 α 粒子散射实验否定了这个模型，并提出了轨道模型：带负电的电子围绕着带正电的原子核旋转，如同一个微型的太阳系。依据经典理论，这个模型是不稳定的。直到玻尔强行命令电子遵守量子化条件，才使之稳定下来。但是，经典物理学却不适用了。基于基本感官尺度的经典实在观的在微小方向的延伸，到此为止。

在经典实在观向微观尺度的延伸过程中，人们本能地认为，微观世界应该具有与基本感官尺度中类似的物体的结构。在模型的建立者看来，这些模型不仅仅是一种描述方式，而且对应着原子及亚原子世界的实体。人们相信，如果原子具有某种结构，必然可以用可视模型表示出来。物质无限可分的还原论，就是希望建立一个无穷递进的可视模型系列。但是，这种拓展在亚原子尺度完全失效了。

思考一个对象的可视模型就是对这个对象进行对象化。一个事物被看见，必定是这个物体摆在看者的面前，且与看者存在一个适度的距离。看者审视被看者，被看者在看者的审视下成为看者的对象。在我们思考一个对象的可视模型时，我们必须使自己与被看者分开，才能使被看者成为我们的对象。经典物理学所描述的观察者和被观察者，就是这种看与被看的关系。

经典实在的所有特性我们都可以做视觉上的想象。一个物体是一个客观存在，在任何一个给定的时间里，这个物体必然在空间中具有一个确定的位置，占据一定的体积。不同时间的位置连接起来是一条唯一的轨迹。物体的存在与否与观测无关。月亮在没有人看到它的时候依然存在，并且沿着我们计算出来的路线和速度运行。比如有一个封闭的屋子，屋子里有两个房间，两个房间是连通的。我们把一只猫放进去，知道确实有一只猫在屋子里，然后我们离开一段时间，再回到屋子，并找到这只猫，确认这只猫仍然在屋子里。在我们离开而没有人看到这只猫的这段时间里，按照经典物理，猫都是存在的，而且在任何时刻都存在于两个房间中的一个，非此即彼。而且，如果我们能知道猫的运动方程，猫就会像月亮一样，即使在没有人看到它的时候也会有确定的位置和轨迹。

同样，如果有一个封闭的盒子，盒子被有孔的隔板分成左右两个部分，在盒子里有一个电子，可以两边自由来往。会怎么样呢？人们本能地会把基本感官尺度下猫的行为推广到电子之上——当我们试图做出这样的想象的时候，就已经开始了这个推广。这是海森堡讨论过的例子。他指出：按照经典逻辑，电子或者在左边的箱里，或者在右边的箱里，没有第三种可能。但是，在量子逻辑中，却有第三种可能，这就是前两者的混合态。⁷这个第三态，在经典逻辑下是无法想象的，所以量子力学会引起人们的困惑。与此类似，在著名的薛定谔猫的理想实验中，直到盒子被打开之前，薛定谔猫一直处于死和活的混合态。在延迟选择实验中，光子除了走上面和走下面之外，也存在第三种可能：同时走两边。

在我们进行这样的表述时，我们是在进行这样的努力：用基于基本感官尺度的日常话语，

讲一个量子世界的故事，并试图让这个故事，在经典实在的框架下，可以被听众听懂，并且接受。

然而，基本感官尺度的经典图景完全不能描述原子尺度之下的物理对象的行为。就盒中电子的案例而言，按照量子力学，在我们观察之前，我们不能说电子以什么样的状态存在，



图 1 隧道效应的滑雪图

也不能设想电子在不同隔间中穿梭来往的轨道——它完全可能像一团气一样，弥散在每一个房间之中。然而，在我这样设想的时候，仍然是在试图赋予它一个基本感官尺度的可视图景。这是我们的语言本身所必然导致的困境。

当我们看到左面这幅滑雪图^①的时候，我们本能地感到困惑，首先这幅二维的漫画会引起我们三维的想象，使我们产生这样一种联想，左边那位滑雪者的左脚经过了树的左边，与此同时，右脚经过了树的右边，他就这样滑过去了。——在我们基本感官尺度的经典实在中，这当然是不可能的。所以我们会和右面的画中人一样感到困惑，他是怎么过去的？

当我们试图把量子世界的现象用日常话语进行描述的时候，我们会遇到这样的困惑。量子世界中物体的行为与经典世界截然不同，类似于图中的景象在量子世界中是时时发生的。

四、量子理论对经典实在的颠覆

经典物理的实在观在漫长的科学史中不断得以加强和完善，直到20世纪，量子力学和相对论所描述的世界超出了感官所能延伸的范围，尤其是量子力学，对经典实在观造成了革命性的冲击。将基本感官世界的实在观加以改造，可以延伸到相对论的世界，却无法延伸到量子世界。所以惠勒强调：“量子力学要求一种新的实在观。”⁸

1900年，普朗克拼凑出一个能够很好描述黑体辐射实验曲线的公式。为了从已有理论导出这个公式，就必须假定，辐射能量不是连续的，而是一份一份的。在经典的物理世界里，时间、空间、物质、能量都是连续的，正如数轴是连续的。我们所行走的道路，是连续的柏油路，而不是中间有空隙的梅花桩。量子论与经典物理的冲突如此巨大，以至于普朗克当时就已经意识到，“或许只有牛顿的发现才能和它相比。”⁹ 普朗克自己并不喜欢这个发现，他曾努力完全用经典物理来解释量子现象，最终归于失败。

此后，1905年，爱因斯坦用量子论来解释光电效应；1913年，玻尔用量子论来解释氢原子光谱；1924年德布罗意提出波粒二象性；1925年海森堡提出矩阵力学；1926年薛定谔提出波动力学。这两种量子力学在形态上截然不同，但是对同一个物理事件能给出相同的结果。这表明，理论与实在之间，并不一定具有一一对应的关系。这两种形态很快被薛定谔证明在数学上是等价的。量子力学与经验观测符合得非常好，但是在波动力学提出之初，方程中的变量波函数竟然还没有物理意义。一段时间之后才由波恩给出波函数的几率诠释，把波函数解释为一种几率波。在玻尔的领导下，量子物理在物理意义朦胧不清的情况下迅速发展成为庞大的理论体系。

在量子理论发展的每一步，都给出了经典物理所难以解释的物理现象。在解释这些现象的过程中，不断对经典实在观进行冲击。量子力学描述了一幅截然不同于经典物理的实在图景。它大致有以下几个特征¹⁰：

^① 这是惠勒用过的一幅漫画，用来说明量子实在的困惑。

1. 量子论——实在由连续的变成了分立的。空间、时间、能量、物质，一切都是量子化的，都有最小的基本单元；

2. 物体不再有确定的、唯一的形态

按照波粒二象性，量子系统的对象既是粒子又是波，或者既不是粒子又不是波。在经典物理的语言框架中，粒子是物质，波是能量。而在量子系统中，粒子的有无都是不定的。粒子可以按照爱因斯坦的质能关系转换成能量，能量也可以凭空转换成一对正负粒子。甚至在没有能量的情况下，也可以产生和湮灭虚拟的正反粒子对。这在普朗克长度的尺度下变得尤为突出。

3. 实在与观察者之间的关联

在量子理论中，实在并不是外在于观察者就“在哪儿”的东西，而是与观测相关的。惠勒反复强调玻尔的这句话：“在一个基本量子现象被观测到之前，没有一个现象是现象。”物理对象由物质实体被玻尔用现象来代替。这个关联被惠勒推到了极端，就是他所提出的“参与的宇宙”。观察者被引入到物理学中来：在经典物理中，人是一个旁观者，观察这个世界，在量子力学中，人是参与者，参与了量子的行为。独立于人之外的客观世界不复存在。

4. 整体论¹¹

量子理论的整体论原则主要有两个层面的意义，其一是量子系统与测量仪器乃至观察者是不可分的整体；其二是波函数所描述的量子系统是一个整体，不能简单还原为各个部分，因为其各个部分具有作为整体的关联，这种关联甚至在系统分离之后依然存在，就是所谓EPR长程关联。原则上，我们也可以把包括人在内的整个宇宙作为一个系统，用一个波函数来描述。这样，整个宇宙都是一个不可分的整体。

5. 物质的逐层还原不再成立

物质由分子构成；分子由原子构成；原子由原子核与电子构成；原子核由质子和中子构成；中子和质子由夸克构成；这样一个逐层还原的套盒结构在夸克那里到了终点。在核子及以下层次，粒子之间是互相构成的，不存在更基本的粒子。

6. 某些物理概念失去定义：经典物理的很多概念失去了原来的物理意义，在亚原子的世界里，空间的左右，时间的先后，都失去了意义。在未被观测的时候，粒子并不一定占据某一个确定的空间，也不一定在空间中有一个轨道。甚至时间和空间的概念，在普朗克长度的尺度下，都失去了意义。

7. 因果性

因果性是实在本身的属性还是人安排实在的一种方式。这个问题在经典物理学那里，答案毫无疑问是前者。而在量子理论中，答案倾向于后者。

8. 或然论

经典理论给出的结论是决定性的。量子理论只能给出几率性的预言。

量子实在与经典实在之间的巨大差异让人困惑，从而需要我们对量子力学进行解释。

所谓解释，就是讲一个故事，讲一个能够为听众听懂并认可的故事。量子力学的解释同样与听众有关，早期的量子力学阐释就是要努力将量子世界的奇怪行为，归结到基本感官实在的认知模式中去。然而，早期的种种努力都失败了。

五、互补原理，现象与完形转换

在量子力学阐释的过程中，玻尔于1927年提出的互补原理（Complementary principle）

是一个重要环节^①。惠勒甚至认为，互补原理是量子思想的核心。这个原理有时被认为是测不准关系的推广，但据戈革先生考证，“玻尔甚至在1927年海森堡提出测不准原理以前就已经具备了类似的而且是更本质的认识。”¹²乃至可以追溯到玻尔的大学时期。

互补原理一直遭到各种各样的误解，但玻尔却从未对互补原理给出一个定义性的叙述，他总是通过各种例证进行说明。戈革先生对互补原理有非常精当的阐释：

我们的概念、图像等等，常常分成两类。设用A和B代表两个概念、图像、现象、描述方式、单词的含意或两种不同的人类文化等等，那么，说A和B是“互补的”，就意味着A和B满足下列条件：

- (1) A和B具有某些互相反对的性质或行为（例如分别满足叠加原理和守恒原理，分别具有连续性和分立性，分别是分布开来的和集中成一点的，等等）；
- (2) A和B不能按照人们以前所知的任何逻辑法则而被结合成一个统一的、唯一的、无矛盾的图像或体系；
- (3) 但是，为了得到所研究对象的完备描述，A和B都是同样地不可缺少的；我们只能按照适当的条件（或自由选择条件）来分别地应用A或应用B，而不能一劳永逸地彻底抛掉A或B。¹³

根据互补原理，经典物理的日常用语对于描述微观世界是不够充分的，或者说不够方便的。但是如果我们要描述它，解释它，又只能采用日常话语，所以，就要采取一种折中的手段。即交替采用两种不同的图景，两套不同的概念，而这两套图景或者概念，还不仅仅是不同，在某种意义上可能是对立的，冲突的，比如波和粒子。当我们用波来描述光的时，光就表现为光波；当我们用粒子来描述光时，光就表现为光子；我们必须交替采用波和粒子来描述光，而无法取消其中一种，或者把其中一种纳入到另外一种之中。

互补原理后来被发展成一种普遍的哲学原理，所应用的范围远远超出了物理学。戈革先生指出：“用同样的方法，玻尔处理了人种学、人类学、语言学、人类文化以及一般的科学认识问题。他到处都揭示了某种形式的互补关系，揭示了和量子物理学中的局势有点类似的局势。这样一来，在他的心目中，互补原理就成了一条十分普遍的原理，而他的那一套观点也就形成了一种独特的互补哲学。”¹⁴ 互补原理的独特性为戈革先生所再三强调：“意义较宽的互补性概念，有时也许可以在中外各家的学说中找到它的‘影子’，而严格意义下的互补性则代表了人类未之前闻的一种全新的逻辑关系；正如他的对应原理一样，玻尔的互补原理也是‘独一无二的，我们在以往的物理学、哲学、心理学、宗教或任何别的东西中都找不到任何和它相像的东西。’”¹⁵

然而，互补原理同样是难以解释的。初看起来，互补原理的解释方式比较牵强，仿佛不是一个解释，而只是一个规定。就像玻尔在其早期原子核模型中对原子能级所做的规定一样。进一步，这种互补到底是什么意思，微观世界为什么会表现出这种互补，都让人心存疑虑。在某种意义上，互补原理似乎并未对量子力学构成解释，它本身反而也成了需要解释的对象。

1938年，玻尔又引入了“现象”一词，用“现象”取代经典物理中的物体、或者某种客观实体，作为量子理论的研究对象。我发现，使用“现象”一词，结合完形心理学的某些概念，可以对量子力学进行某种“解释”。这种解释不是演绎性的，而是类比性的，说明性的。

^① 互补原理，另译为并协原理。戈革先生取前者。但是他并不排斥后者。他认为二者各有缺陷，都不能完整地表达愿意。并协一词有生造之嫌，而互补容易被误解，容易被庸俗化。本文从戈革先生译法。

玻尔指出：“现象一词仅仅代表在包括整个实验装置的叙述在内的指定条件下得出的观察结果。在这样的术语下，观察问题不会再有什么特殊的复杂性，因为在实际的实验中一切观察结果都是用无歧义的叙述来表达的。”¹⁶ “和量子力学符号体系的结构及诠释更加协调得多，也和基本的认识论原理更加协调得多的作法，显然是把‘现象’一词保留下来，用以表示在给定的实验条件下观察到的各效应的综合。”¹⁷ 通过现象一词，玻尔表达了与马赫相一致的思想：把物理学建立在感知元素的基础上。现象一词所代表的便是观察者所能感知到的包括仪器读数在内的各种感知实在元素的集合。

所谓“无歧义的叙述”，就是把所观察到的“现象”用日常话语表述出来。在一个实验过程中，实验仪器的设置、实验操作的过程、各种仪表的读数、云雾室的痕迹、照相底片上的感光，所有这些，都是可以观察到的“现象”，都可以做“无歧义的叙述”。而“中子”、“电子”、“光子”，这些在经典物理中应该作为基本物理对象的“基本粒子”，则可以看作为了解释“现象”所构造出来的概念。但是，在日常话语下，这些概念自然而然地被理解为与基本感官尺度的“粒子”相似的东西。然而，问题在于，相似的仪器设置、相似的实验过程、相似的仪表读数等，所产生的相似的“现象”，在另外的实验中，用类似粒子的概念则无法对之构成解释，而只能用“波”来解释。

我们必须意识到，“中子”、“电子”这些我们一度视为物理实体的东西，是我们从来没有直接观察过的。在以往的描述框架中，可以这样表述：我们观察到的是它们表现出来的现象。然而，这个表示仍然假定了其实体的存在。事实上，我们更可以做这样的表述：我们观察到了某些现象，然后，我们假设了一些叫做“中子”、“电子”之类的物理实体，用来解释这些现象。

这样一来，我们就可以用“现象”，来解释为什么量子力学会引起我们的困惑，并解释互补原理。

在《所见即所能见》¹⁸中，通过惠勒的实在观与完形心理学之间的关联，我讨论了科学与认知模式之间的对应关系。这里继续利用这种对应进行讨论。

现代派画家玛格利特有一副著名的作品，画面上画着一只烟斗，下面题字是“这不是烟斗”。在林林种种的理论分析中，有一种解释是：这不是烟斗，这是一幅画。的确，画布上并没有一只烟斗，只有油彩构成的色块和线条——这些是观察者所看到的“现象”。但是，观察者的视觉认知机制，会自动地把这些“现象”构建成一只烟斗，于是我们“看”到了一只烟斗——这是一个在人类的基本感官尺度可以理解并接受的视觉形象。西方古典的油画作品都用油彩描绘某种具体的形象，比如人物或者风景；成功的作品也的确能让观察者直接“看”到画家所要呈现的那些形象，而不会首先意识到，那些形象是由油彩的“现象”建构起来的。在这种情况下，画布上的油彩，只能建构出一种“完形”，或者说，用一种单一的“完形”，已经可以对画布上的“现象”进行解释。

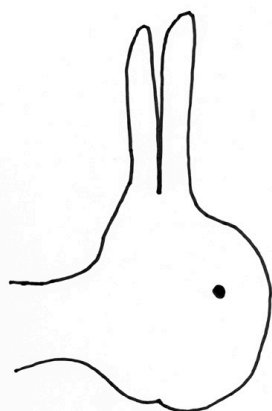


图 2 鸭兔图

但是，对于图2，我们的视觉机制在处理上就发生了困惑。你可以把他看作一只低头的兔子，也可以把它看作一只仰面向天的鸭子。在你把这些线条看成鸭子的时候，就不能把它看成兔子；反过来，当你把它看成兔子的时候，也不能把它看成鸭子。这里，鸭子和兔子的形象就是互补的。这幅图形常常被完形心理学作为解释完形认知机制的一个例子。同样的线条，在兔子完形和鸭子完形中，具有完全不同的解释。我们也可以说，不是我们看到了鸭子或者兔子，而是我们把这些线条解释成了鸭子或者兔子。

艾舍尔的《魔带立方体》(图3)更加突出地表达了人类的视觉机制所遇到的困惑。在这幅版画中,有一个在三维空间中不可能存在的立方体;在这个立方体上,缠绕着两根魔带。当你盯着魔带上的半圆球,沿着魔带依次看过来,你就会产生困惑。因为上面的半圆球,一会被你看成是凸起的,一会被你看成是凹下的。

这幅画与互补原理构成了非常好的对称。画面所提供的现象,不能构建成单一的完形。为了解释现象,我们的视觉机制必须构建出两套完形,交替使用。当你看到它凸起的时候,它就没有凹下;当你看到它凹下时,它就没有凸起。凸起和凹下,就构成了一对共轭量。

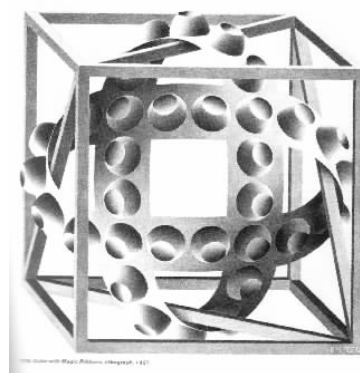


图3 埃舍尔 魔带立方体, 石板画

对于经典物理而言,我们可以把“物体”当作基本对象,而“现象”则是物体在不同场合下的种种表现。但是在量子尺度,我们的感官直接观察到的只是“现象”。人类的认知模式本能地会期望不同层面的实在具有一致性。因而,我们自然而然地将基本感官尺度的实在观延伸到量子尺度,并试图用日常话语赋予原子世界以一个基本感官实在的可视模型——仍然把“物体”视为基本对象,把“现象”视为“物体”的表现形式。但是这一次,基本感官尺度的实在观向量子尺度的延伸遭到了失败。按照惠勒的说法,我们遇到了实在的边界。

在原子尺度以下,人们已经无法再设计出既具有可用日常语言描述的可视形象,又能符合所有可观测量的一致性模型。比如玻尔的原子模型只能在部分情况下使用,另一些时候则需要用电子云来代替电子轨道。至于原子核的内部景象,任何可视模型都失去了意义。

实际上,对于宏观世界,也可以认为,“现象”是基本的,而“物体”是为了解释现象所建构出来的。但是,这种叙述方式在宏观世界会造成很多麻烦,因为在宏观世界,“物体”是可以被感官直接观察的。

通过现象一词,我们在互补原理和完形心理学给出的人类认知模式之间找到了对应。

六、结语

为什么量子实在总是引起我们的困惑?我们把困惑的“过程”重新阐述一下,就比较清楚了。在量子世界中,类似于图1的滑雪图景是经常的,每日每时每秒都在发生着的,当我们试图用基本感官尺度的日常话语对这样的图景进行描述的时候,困惑自然发生。

量子世界超出了我们的基本感官尺度,在我们的基本感官尺度之外。量子世界,是我们通过仪器的读数、云雾室的轨迹、光电探测器的计数、乳胶上的印痕建构出来的。我们要通过这些观测资料建构出一个缩小了的基本感官尺度下的可视图景。然而,我们发现,我们不得不同时建构出两套图景,交替使用,才能对相关“现象”进行完整的解释,这就是互补原理。

为什么量子实在就是互补的?当我们问这个问题的时候,隐含着一个前提,即实在或者自然界,在不同尺度上的图景是统一的,一致的。然而,这个前提是一个假设,一个信念,它从来也没有得到过证明。而当我们放弃这个前提,接受互补原理作为基本的公理,则互补原理就不需要进一步的解释了。它可以作为量子实在的逻辑起点。

为什么我们总是对量子实在感到困惑,因为我们总是想要把我们在基本感官尺度形成的认知模式推广到这个尺度之外。实际上,这种推广不仅在量子尺度不能成功,而且在宏观的宇宙尺度,同样没有成功。因为按照广义相对论,宇宙尺度的实在已经不能用三维欧氏几何进行描述了。日常语言在宇宙尺度同样失效了。

2001年4月24日
2005年6月29日
北京 稻香园
2008年8月17日
2009年1月4日
北京 向阳院
2009年2月3日
Sunshine loft, Berkeley

参考文献

-
- ¹ 此实验的具体描述见：田松，延迟选择实验及其引发的实在问题，自然辩证法研究，2004年第5期。
- ² John A. Wheeler and Kenneth Ford, 1998, *Geons, Black Holes and Quantum Foam*, New York: W. W. Norton & Company. p.263
- ³ 关于实在与感官这一部分，我在另一篇文章中有相关的讨论，参见：田松，所见即所能见——从惠勒的实在图示看科学与认知模式的同构，哲学研究，2004年第2期。
- ⁴ 柯林武德. 自然的观念. 吴国盛, 柯映红译. 北京: 华夏出版社, 1999. 25.
- ⁵ 惠勒, 物理学和质朴性, 安徽科学技术出版社, 1982.16
- ⁶ E. A. Burtt, *The Metaphysical Foundations of Modern Science*, New York, 1925, p.236. 转引自丹皮尔. 科学史: 及其与哲学和宗教的关系. 北京: 商务印书馆, 1994. 249.
- ⁷ 海森堡. 物理学与哲学. 范岱年译. 北京: 商务印书馆, 1999. 120-121.
- ⁸ John A. Wheeler, *At Home in the Universe*, Springer, 1996. p.295.
- ⁹ 海森堡. 物理学和哲学. 范岱年译. 北京: 商务印书馆, 1999. 4.
- ¹⁰ 胡新和对经典实在与量子实在的差异有过很好的归纳, 参见: 胡新和. 现代物理学视野中的自然观念. 自然哲学 (第1辑). 吴国盛主编. 北京: 中国社会科学出版社, 1994. 228-239.
- ¹¹ 金吾伦教授在《生成哲学》中, 对量子理论所引发的各种整体论见解做了详尽的分析. 参见金吾伦. 生成哲学. 保定: 河北大学出版社, 2000. 66-85.
- ¹² 戈革. 尼耳斯·玻尔和他的互补原理. 史情室文帚. 北京: 中国工人出版社, 1999. 463. 黑体为原文所有。
- ¹³ 戈革. 尼耳斯·玻尔和他的互补原理. 史情室文帚. 北京: 中国工人出版社, 1999. 470-471.
- ¹⁴ 戈革. 尼耳斯·玻尔和他的互补原理. 史情室文帚. 北京: 中国工人出版社, 1999. 469. 黑体为原文所有。
- ¹⁵ 参见: 戈革. 尼耳斯·玻尔和他的互补原理. 史情室文帚. 北京: 中国工人出版社, 1999. 472. 黑体为原文所有。句中所引文字为D. Favrholt语。
- ¹⁶ 玻尔. 尼耳斯·玻尔集 (第七卷). 戈革译. 北京: 科学出版社, 1998. 206.
- ¹⁷ 玻尔. 尼耳斯·玻尔集 (第七卷). 戈革译. 北京: 科学出版社, 1998. 204.
- ¹⁸ 田松. 所见即所能见. 哲学研究. 2004(2).

Why Quantum Mechanics Makes Us Puzzled? --- An Explanation for Niels Bohr's Complementary Principle from His Concept of "Phenomenon"

Tian, Song

(Beijing Normal University, Beijing, 100875)

Abstract:

The great difference between the sub-atom dimension reality described by quantum physics and the ordinary reality by classical physics makes people puzzled and thus calls for explanation.

There is no absolute explanation workable in any context. I argued that, to give an explanation is to tell a story which can be understood and accepted by the audience to whom you expect to give the explanation. Therefore, an explanation must be related with the general idea of the audience. Only when the audience feels puzzled will an explanation be needed. If the audience does not feel puzzled, the explanation is not necessary. For the people living in Hogwarts School of Witchcraft and Wizardry, the magical things happen in "quantum reality" is just ordinary things in their world, so they won't search for an explanation for quantum reality. If some people feel puzzled and need an explanation, it means that what those people are familiar with is a different kind of reality, and it also means that those people expected to see a same or at least similar reality with what they are familiar with.

I argued that, the world is the world what we are able to see; the world we are able to see is what our eyes (sense organs) are able to see; what we see is defined by the cognitive model of our sense organ. The explanation for what we see is in some extent related with our culture context. I named the scale that human sense organs are able to "observe" as "primary sensual dimension". Classical physics is an explanation system for the world within primary sensual dimension, and it is compatible with ordinary languages. This is the classical view of reality: the world consists of matter or objects that exists, acts and reacts in space and time; the world is continuous; an object consists of smaller objects, and etc. The limitation of the primary sensual dimension is defined by optical telescope and optical microscope. This view of reality is accepted by most of people who trained by modern education. People try to extend this view of reality to larger and smaller scale, but it does not work either on the cosmos dimension or the sub-atom dimension. As for the world under the sub-atom dimension, a physical object may not have a specific shape or occupy a specific position; the continuous in classical reality is replaced by the disperse, and the determined causal relation is replaced by the probability relation, etc.

1938, Niels Bohr introduced a term "phenomenon" into quantum physics to replace its counterpart concept "object" in classical physics. The quantum reality cannot be observed directly by human's sense organs. All "objects" in the quantum world are theoretical construction by "phenomena" such as the data of instrument, the trace in cloud chamber, the image of film and such which can be observed directly. However, it is not possible to construct a single visible model to explain those phenomena. Two paradoxical and alternative models, like particle and wave, are needed in the explanation, and this is the "complementary principle".

Key Words: explanation; phenomenon; complementary principle; reality (classical reality;

quantum reality); the primary sensual dimension; visible model

Tian, Song(1965-). Ph.D. in Philosophy and History of Science. An associate professor in College of Philosophy and Sociology. Research fields: philosophy of science (general theory, philosophy of physics), the thought history of science, science anthropology, science communication, and criticism of industrial civilization.

Reference,

- 1, TIAN, Song. Delayed-choice Experiment and the Puzzle of Reality It Raised, *Studies in Dialectics of Nature*, Beijing, 2004(5)
- 2, John A. Wheeler and Kenneth Ford. *Geons, Black Holes and Quantum Foam*, New York: W. W. Norton & Company. 1998, p.263
- 3, Tian, Song. What We See Is What We Can See: On the Isomorphism Between Science and Human's Cognitive Pattern by Wheeler's Diagram of Reality, *Philosophical Researches*, Beijing, 2004(2);
- 4, Robin Crearge Collingwood. *The Idea of Nature*, (Chinese version), Huaxia Press, Beijing, 1999. 25.
- 5, John A. Wheeler. *Physics and Austerity*, (Chinese Verision), Anhui Science and Technology Press, 1982.16
- 6, E. A. Burt. The Metaphysical Foundations of Modern Science, New York, 1925, p.236.
- 7, John A. Wheeler. At Home in the Universe, Springer, 1996. p.295.
- 8, W. Heisenberg. *Physicis and Philosophy*. (Chinese Version). Beijing, The Commercial Press, 1999. 4.
- 9, Hu, Xinhe. The Concept of Nature within the Concept of Modern Physics, *Nature Philosophy*, Vol.1, ed. By Wu, Guosheng, Beijing, China Social Science Press, 1994. 228-239.
- 10, Jin, Wulun. Genesis Philosophy, Baoding, Heibei Univerisity Press, 2000. 66-85.
- 11, Ge Ge. Niels Bohr and His Complementary principle, Collection of Shiqingshi, Beijing, Worker Press, 1999. 463.
- 12, Niels Bohr. *Niels Bohr Collection*, Vol.7, (Chinese version), Beijing, Science Press, 1998. 206.

Why Quantum Mechanics Makes Us Puzzled? --- An Explanation for Niels Bohr's Complementary Principle from His Concept of "Phenomenon"

Tian, Song

(Beijing Normal University, Beijing, 100875)

Abstract:

The great difference between the sub-atom dimension reality described by quantum physics and the ordinary reality by classical physics makes people puzzled and thus calls for explanation. There is no absolute explanation workable in any context. An explanation must be related with the our culture context. Classical physics is an explanation system for the world within "primary sensual dimension", the scale that human are able to "observe" directly by sense organs. Classical physics, primary sensual dimension and ordinary languages are compatible with each other. The limitation of the primary sensual dimension is defined by optical telescope and optical microscope. People try to extend this view of reality to larger and smaller scale, but it does not work either on the cosmos dimension or the sub-atom dimension. Niels Bohr introduced a term "phenomenon" into quantum physics to replace its counterpart concept "object" in classical physics. All "objects" in the quantum world are theoretical construction by "phenomena" such as the data of instrument, the trace in cloud chamber. However, it is not possible to construct a single visible model to explain those phenomena. Two paradoxical and alternative models, like particle and wave, are needed in the explanation, and this is the "complementary principle".

Key Words: explanation; phenomenon; complementary principle; reality (classical reality; quantum reality); the primary sensual dimension; visible model