

## 简析量子力学的对应原理

白彤东

对应原理从被提出至今虽已七十余年，但对它的理解与讨论仍未间断。在物理学内部，它的正确性近来受到了挑战。

### 一、历史的回顾及对应原理的表述

对应原理最早由杰出的丹麦物理学家N.玻尔提出，萌芽见于1913年12月20日玻尔的一篇《论氢光谱》的演讲。在最初完成于1917年的《论线光谱的量子论》的论文中，作者提出了量子力学和经典力学之间类似性的一种假设，“对应关系”、“对应原理”两个名词则出现于玻尔在1920年发表的一篇演讲中。（〔1〕，第4页）在他1923年的一篇报告中，玻尔指出：“在这篇发言中，利用关于各元素光谱的研究和关于电场和磁场对谱线的效应的研究中得来的例子，证明了这条对应原理已经怎样得到了足够的支持，以致我们似乎在更加复杂的情况中也有理由用它作为一种指南。”（〔1〕，第5页）正如玻尔所说，对应原理在被推广后，便成为“20年代早期的量子论进展的主要指南，而且后来也被纳入了量子力学之内。”（〔1〕，第26页）

对应原理在早期被玻尔叙述为“在大量子数的极限下在量子的统计结果和经典辐射理论之间得到一种联系的可能性。”（〔1〕，第584页）而较为现代和完善的说法可从一些当代量子力学教科书中找到，如“量子物理学的定律必须这样来选择：在涉及很多量子的经典极限中，量子力学的定律作为平均结果应导致经典方程。”（〔2〕，p31）还有如：在可以把普朗克常数 $h$ 看成零的情况下，量子力学则会归结为经典力学。”（〔3〕，第180页）由此可见，对应原理与多数物理学原理相比较，有着一个突出的特点，即它是关于不同层次

的科学理论之间关系的一条原理。

### 二、对应原理所面临的挑战

近十多年，浑沌学逐渐兴起。正是在这门新兴的理论中，对应原理的正确性遭到了挑战。早在六十年代中叶，量子力学的奠基人之一海森伯就异常敏锐地指出量子力学的线性特征与经典力学的非线性特征间存在着一种不和谐，并且在量子力学通过取极限来与经典物理学相容的过程中（这一极限包括令 $t \rightarrow \infty$ 和令 $h \rightarrow 0$ ），对时间与普朗克常数取极限不可交换。（〔4〕）

在浑沌理论发展起来以后，一些科学家指出：量子浑沌（Quantum chaos）是不存在的，相反，经典物理存在着浑沌，这意味着：经典力学，而不是量子力学，是非决定论的和不可逆的。”（〔5〕）而美国物理学家J.福特等人进一步指出，以“量子猫”（Quantum cat）为例，无论 $h$ 多小（ $h \rightarrow 0$ 意味着经典极限），“量子猫”都不表现出浑沌特征，不趋向于浑沌的“经典猫”（Classical cat）。

因而对应原理失效。（〔6〕）尽管浑沌理论是一门较新的理论，它引出的这一问题仍待讨论，但这些问题提醒我们，应该对量子力学的对应原理，及其成立或失效的结果进行细致的分析。

### 三、对应原理的意义

粗略地看，对应原理的成立似乎是很自然的，因为经典物理在广泛的领域中得到了证实，那么若对应原理不成立，则量子力学与大量经典理论可解释的现象是矛盾的。这个结论似乎具有灾难性，它似乎在否定着量子力学。但事实上，任何程度、范围内的物理学，在广义上讲，都是唯象理论，即：试图描述和概括的是物理学的某些有限领域内的实验事实”的理论。（〔10〕）量子力学的产生正是意欲解释经典力学解释不了的现象，在它的早期形式——玻尔的旧量子论中这种唯象的特征更为明显，而且这类现象主要集中于微观领域。因

此，我们完全可以认为（至少在逻辑上）量子力学是这些领域内的唯象理论，这样，量子力学完全可以与经典理论不相容，因为我们可以把不与量子力学相容的理论归于其适用范围之外。

由以上分析可以看出，对应原理的失效的真正后果是使量子力学失去了普遍性。换句话说，对应原理正是：“量子力学是普遍的，而不仅是微观层次的唯象理论”这一思想的物理学表达。汤川秀树主编的《量子力学 I》一书在叙述对应原理前说道：“量子力学是在囊括了经典力学的基础上发展起来的。”（（3）第180页）威切曼也指出：“不应该以为‘量子物理学’是某种与宏观世界毫无关系的东西。实际上，整个物理学都是量子物理学；如我们今天所知，量子物理学的定律是关于自然最普遍的定律。”（（7），p.2）依笔者拙见科学理论的建立无非是人为自然“立法”的过程，我们不能期望着人可以为如此复杂的自然建立唯一的一套法律。具体到量子力学，这就意味着我们不能期望宏观客体与微观客体遵循同一套力学体系。从10米到米绝不仅意味着尺度的缩小，它还可能意味着理论的“跃迁”，或一种不连续性。强相互作用及相关理论只在极小尺度上有意义这个例子可能有助于让我们理解这一点。在经典物理学中，研究者通常将一个“大”的复杂的物体分割成许多“小”的、简单的组成部分来分别加以研究，之后再机械因果律组合起来，从而知道有关复杂物体的信息，量子力学的研究者们保留了这种分割方法，但是在分割与组合时采用量子力学的因果律。（（2），

【编者按】.144—172）若对应原理成立，则意味着这种经过量子力学修正的分析方法仍是可行的。若它失效，则可能是在其失效的特定领域内这种分割方法不能成立。如果说对应原理含有“大量子数极限”的条件，那么这种分析方法也必有此条件，而在“系统行为关键性地依靠少数量子的跃迁时，这种将世界分割成部分的抽象便不被允许了。”（（2），p.167）

#### 四、提出对应原理的原因

科学革命时期，新思想出现在对原体系的修补中，它也许最终会导致旧体系的瓦解。玻尔作为一个修补破缺时新思想的发现者，他和他的理论就带有新旧两面性：一方面是他的理论即旧量子论仍未抛弃位置、动量等经典概念和轨道运动等经典描述，另一方面，他的理论与经典理论是根本对立的，而经典理论的大厦在当时又占有根本不可怀疑的地位，这就使他必须让量子论符合于经典理论（而不是今天我们所看到的相反过程）。为了统一这种新旧两面性，更明确的是要将量子论的新芽接到经典理论的老树上，玻尔很自然地提出了对应原理。但到了后来，这一原理又变成了一个毁灭者，摧毁了经典理论普适性的根基，而将量子力学推上了这个宝座，为量子力学摆脱羁绊迅速发展作出了贡献。

提出对应原理的另一个原因是沿用经典语言的要求：物理学家在为自然立“法”时，要依赖科学语言。他们深受这种语言熏陶，接受过使用这种语言的严格训练，经典语言便是这些语言中最重要的一种。让物理学家完全放弃经典语言是对他们不利的，因为这使他们几乎完全丧失了立“法”的工具，在自然面前重归一种蒙昧状态并使几百年人们对经典语言的积累工作付之东流。另一方面，任何一个人也不可能超越他原有的一切，彻底地用新的方式去面对世界。并且，由于宏观与微观并没有清晰的分界，而大量的经典理论所描述的现象也是考察量子力学的方便工具。因此，物理学家们希望一定程度上沿用经典语言，希望用已有工具经适当改进以供他们利用，并在新的天地中施展本领。对应原理恰可以为他们这种沿用提供合法性。对经典语言的依赖可以为量子力学中极强的分析力学的痕迹所证实。

#### 参考文献

- [1] L.罗森菲耳德主编，戈革译，《尼耳斯·玻尔集》第三卷，科学出版社1990年。
- [2] D.Bohm, Quantum Theory, Constable and Company, 1954.
- [3] 汤川秀树主编，阎寒梅、张邦因译，《量子力学 I》，科学出版社1991年。
- [4] W. Heisenberg, Nontlinear problems in physics. PhysicsToday, Vol. 20, No 5, 1967, pp. 27—33.
- [5] W. Firth, et al..Workshop report on quaneum chaos andmeasurement. In Quantum Measurement and Chaos, ed. E. R. Pike, et al.. 1987, pp 251—254.
- [6] J. Ford, et al. . The Arnol'd Cat: failure of thecorrespondence principle. In ChaosIxaoc: Soviet—

American Perspectives on Nonlinear Science ed. D. K. Campbell. Reprint, pp. 447—493.

[7] E. H. Wichmann, Quantum Physics, Education Development Center, 1971.

[作者简介]: 白彤东, 1970年生, 现为北京大学科学与社会研究中心硕士研究生。

(本文责任编辑 吴国盛) \*