

量子力学定态不是驻波*

刘全慧[†] 刘天贵 朱正华 曾永华

(湖南大学理论物理研究所和应用物理系 410082 长沙)

摘要 作为一种经典或半经典的观点,可以认为定态是由波的干涉形成的驻波.但在量子力学中,定态本身是基本的,不是驻波.

关键词 量子力学,半经典理论,定态,驻波

A quantum mechanical stationary state is not a standing wave

LIU Quan-Hui[†] LIU Tian-Gui ZHU Zheng-Hua ZENG Yong-Hua

(School of Theoretical Physics and Department of Applied Physics, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract In the classical or semiclassical theory, a stationary wave can be considered as a standing wave formed by the interference of two propagating waves, whereas in quantum mechanics the stationary wave itself is a fundamental rather than a standing wave.

Key words quantum mechanics, semiclassical theory, stationary state, standing wave

在经典力学的基本框架下,可以引入玻尔-索末菲量子化条件来说明量子化的起源.这时的理论,叫做旧量子论.后来建立的量子力学才是微观物质运动的完备理论.量子化是算符表示力学量的必然结果.至于为什么力学量要用算符表示,没有更深入的物理上的起源.人类智力的伟大,在于发现了这一自然的秘密.2002年初,Nature上发表的地球引力场中中子运动量子化的实验文章,认为量子力学定态是由波的干涉形成的驻波.本文作者注意到了许多文章评述这一重要结果时,也采用了相似的观点.尽管有许多物理学工作者认同这一观点,但是量子力学中定态和驻波实质上是有区别的.

在历史上就已经弄清楚了,在经典力学和旧量子论中驻波是定态,量子力学中的定态不是驻波.1926年,量子力学诞生.在此之前的一项最重要的工作是1924年的德布罗意的博士论文《量子论的研究》.在这篇论文的第三章《轨道稳定性的量子化条件》中,他把在更早的时候由玻尔提出的定态解释为他的相位波的干涉(原文称为共振)而形成了驻

波^[1].这种做法在现在的原子物理学教科书中还很常见^[2],在旧量子论中,无疑也是对的.由于爱因斯坦的推崇,德布罗意的这篇论文影响广泛.它直接导致了薛定谔给出一个波所服从的运动方程,即薛定谔方程.德布罗意的这篇论文比他后来的任何一篇论文的影响都大,当波动力学建立后,德布罗意写了一篇总结性论文《新波动力学原理》^[3].在该论文的第二章《不变场中运动的稳定性》中,德布罗意明确指出是薛定谔方程给出的“在各种情况下可应用的稳定条件”^[3].也就是定态不是由波的干涉构成的,而是由薛定谔方程的定态解决定的.许多人(包括爱因斯坦)也没有充分注意到德布罗意对定态乃驻波这一思想的自我扬弃.

因此,德布罗意正确区分了量子力学定态和驻波这两个概念.在量子力学中,定态是基本的,没有更进一步的波结构.而驻波的定义是,一个物理系

* 教育部优秀青年教师资助项目;优秀留学回国人员资助项目

2003-02-26收到初稿,2003-06-24修回

[†] 通讯联系人. E-mail: qhliu@hnu.cn

统以单一的频率振动,其中在一些固定的点上出现波腹和波节.驻波一般是由反射波和入射波的干涉而形成的.也就是说,驻波意味着组成它的行波的存在.如果定态是驻波的话,组成它的行波将服从什么样的动力学方程呢?在量子力学中,只能认为这些行波也服从薛定谔方程,但薛定谔方程在给定初值问题时的解是惟一的.如果给出的是定态解(例如基态),量子力学中认为它已经是最基本的波了.量子力学的基本原理不允许再将定态分解为更为基本的行波.注意,不要把定态在非哈密顿量(例如动量)的完备本征态上的展开混为一谈.量子力学的创始人们在这一问题上没有给予充分的注意,这是可以理解的.例如,泡利就认为无限深势阱中的量子力学定态是驻波^[4].

但是,2002年1月17日Nature上发表的地球引力场中中子运动量子化的实验文章也认为定态是由于驻波形成的.这一实验结果为引力场中的量子现象提供了一个新的检验.被很多国家(包括中国^[5])评选为2002年国际十大科技新闻之一.这篇文章涉及的理论完全是初等量子力学.它的经典图像是,一个中子在地球表面自由下落碰到反射镜后会反弹.如果在反射镜上方平行放置一块中子吸收板,则镜子与吸收板间就会形成一个高度为 h 的狭小空间.在高度 h 为 $40\mu\text{m}$ 及其以下时,中子的运动是明显量子化的.简单计算表明,空间只有足够开阔到 $14\mu\text{m}$ 时才允许基态存在.当开阔到 $40\mu\text{m}$ 时将会出现前四个定态(即基态,第一、二、三激发态).可是,该文的作者们却这样陈述定态的形成:“中子波由于镜面而与自身发生干涉……这一自我干涉形成了中子密度的驻波……”^[6]实际上,文中自始至终讨论的是中子的前四个量子力学定态.如果将中子波等同于德布罗意波,利用玻尔-索末菲量子化条件是给不出与量子力学完全一样的结果的.这里明显认为量子力学定态是由驻波构成的.同一时期Nature上还发表了该文的评述,同样是类似的句子:“当中子落向镜面时,中子波由于镜面上的引力势垒而反射,驻波就形成了……”^[7]几乎所有的科学新闻媒体(包括电子媒体)都报道了这一实验,但大都混用了这两个概念.到了2002年12月份,美国Journal of Chemical Education发表专文评述有关

实验结果时,走得更远,“当粒子的运动受到限制,根据量子力学原理,物质的波动性质会导致相长和相消干涉构成了量子化的起源.”^[8]似乎,其中的“根据量子力学原理”改为“根据德布罗意相位波理论”更为确切.当然,另外有文章专门评述有关实验结果时十分小心地陈述了定态出现的条件,细致地区分什么是经典估计,什么是量子力学结果,例如Physics Today^[9],Physics World^[10]等.他们认为,由于中子德布罗意波从镜面上反射后与入射波发生干涉,从而形成了驻波^[9,10].或者说,正像电子会束缚在氢原子核周围出现分立的能级一样,量子力学认为中子在地球场中的能量取一些分立的值^[9,10].

从本文可以看出,作为一种经典或半经典的观点,认为定态是由波的干涉形成的驻波的确很形象,与实际物理也相差不远.但是,量子力学才是描述微观物质运动的完备理论,在量子力学中,定态的确不是驻波.这一点,作为大学物理学教师尤其要弄清楚.

参 考 文 献

- [1] 何祚麻,侯德彭主编.量子力学的丰碑——纪念德布罗意百年诞辰.桂林:广西师大出版社,1994.232—249[Ed. He Z X, Hou D P. A Monument in Quantum Mechanics. Guilin: Guangxi Normal University Press, 1994. 232—249(in Chinese)]
- [2] 杨福家.原子物理学(第3版).北京:高等教育出版社,2001.79—84[Yang F J. Atomic Physics(3rd ed.). Beijing: Higher Education Press, 2001. 79—84(in Chinese)]
- [3] 何祚麻,侯德彭主编.量子力学的丰碑——纪念德布罗意百年诞辰.桂林:广西师大出版社,1994.250—268[Ed. He Z X, Hou D P. A Monument in Quantum Mechanics. Guilin: Guangxi Normal University Press, 1994. 250—268(in Chinese)]
- [4] 刘全慧.光子学报,1998,27:778[Liu Q H. Acta Photonica Sinica, 1998, 27: 778(in Chinese)]
- [5] 科学时报,2003年1月27日[Science Time, Jan. 27, 2003]
- [6] Nesvizhevsky V V et al. Nature, 2002, 415: 297
- [7] Bowles T. Nature, 2002, 415: 297
- [8] Rioux F. J. Chem. Ed. 2002, 79: 1404
- [9] Schwarzschild B. Phys. Today, 2002, 55: 20
- [10] Cartlidge E. Phys. World, 2002, 6: 9