

量子力学的挑战和辩护 ——贝尔不等式实验模型的判决性意义

郭伟明

(中国人民大学哲学系 北京 100872)

〔摘要〕 爱因斯坦和玻尔之间的争论是对客观世界诠释的不同方式,他们分别从客观实在的两个侧面对量子行为进行考察。量子科学的进一步发展,尤其是实验手段为量子行为的合理解释提供了可能。现代物理学倾向于标准量子力学解释。

〔关键词〕 贝尔定理 局域隐变量理论 量子理论 〔中图分类号〕 N0 O3 O4

〔文献标识码〕 A 〔文章编号〕 1000-7857(2004)08-0025-03

THE CHALLENGE AND JUSTIFICATION OF QUANTUM THEORIES: THE CRITICAL SIGNIFICANCE OF BELL'S THEOREM

GUO Wei-ming

(Department of Philosophy ,Renming University of China,Beijing 100872, China)

Abstract: The debates between Einstein and Bohr demonstrate the different ways to interpretate the world. They were exploring the actions of quantum from both sides of reality. Local hidden variable theories, derived from the ideas of Einstein ,are in danger of falsification. Now with the advance in the physics ,especially in the experimental techniques, modern physics opts for standard quantum theories.

Key Words: Bell's theorem, local hidden variable theories, quantum theories

CLC Number: N0 O3 O4

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2004)08-0025-03

1 对量子理论的发难

按照玻尔的观点,量子行为的不确定性、模糊性、统计特征是量子世界固有的,而不仅仅是对它们不完全感知的结果。他进一步将量子行为解释发挥到哲学高度(互补哲学)。他认为:在量子世界中观察者,即人的主观行为,成了不可避免的作用因素之一;依存性和相关性是量子行为的固有特征,是测量中无法回避的问题。当我们观察微观世界时,无法像观察宏观世界那样把观测者的影响排除在外。

爱因斯坦在这个问题上有着完全不同的看法。他认为,量子理论之所以会得出如此结论是因为我们认识能力的暂时不足。玻姆(Bohm,D)等科学家认为有一些尚未观测到的因素在起作用,也就是所谓的隐变量。一旦随着科学的发展和实验仪器的完善,终究会揭示出这些隐变量,从而将微观世界和宏观世界完美地统一在一个精确的理论中。

局域隐变量理论的信心来自爱因斯坦对完备性和独立性的要求。独立性和完备性密切相关——一切可测量的属性应在独立于测量的理论中得到全面说明。这个观点在认识论上与起源于日常思维的对独立个体的承认有很大关系。对局域性假设和隐变量假设的前提是基于世界的实在观,这也是对本体论实在原则可操作的具体证实手段。

量子客体在隐变量理论中包含着局域性和完备性的假定,它们的行为是独立的、类空分离的事件,因此被理所当

然地认为有一个完全确定的性质。完备性要求内在属性可以单独测量,对它的否定已经成为科学哲学所密切关注的一组问题。

局域性假设是光速不可超越的直接推论,有时也称为“可分性”“定域性”假设:当物体在空间分离(即不占同一空间)时,它们之间不可能有即时的物理相互作用。局域性假设是狭义相对论的逻辑外延和直接推广,光速界定了域的上限,只能在这个范围内探讨实在属性。所以一般把局域性和实在论结合起来,称为局域实在论。此类观点预设于贝尔定理的各种变形中。

通过假设局域性和隐变量的存在,隐变量理论尝试重新在量子领域恢复决定论和独立存在。贝尔定理的自旋量子关联检测装置,从其基本假设思想来看与局域实在论是一致的。为了检验这些理论,贝尔定理模型实验假定了一切隐变量理论的核心,即局域性和独立存在,从而推导出预测这些理论在一组实验中相关结果的一个不等式。1972~1982年的12个实验表明不等式不能成立。其中最激动人心的实验结果出现在1982年由法国人阿莱恩·阿斯派克特(Alain Aspect)完成的一个最能直接作出判决的钙原子实验。实验结果清楚地表明,贝尔定理的推导结论与实验记录不符。因此,爱因斯坦的“局域实在性”假设中可能存在问题。

毫无疑问,爱因斯坦的实在论观点,是多数物理学家所持的观点,因为它和我们所观察到的经典世界是相符的。客

观实在性意味着外部世界不以人的意志为转移,它就在“那里”存在着。这种实在论假定,预设了某种不依赖于人类观察而独立存在的物理存在。从本体实在论的角度,人们已经习惯将与主体相并存的客体的实在当作展开科学研究的前提和基础。许多人将它解读为科学家的世界观,它被认为是科学家从事认识活动的最深层的信念。在认识论的角度,爱因斯坦就断言量子物体在任何时候以及在确定的意义上应该具有所有动力学属性。

2 实验结果的经验辩护

1965年,日内瓦欧洲核子研究中心的贝尔(Bell, J.S.)研究了二粒子量子体系并证明了一个强数学定理。作为定量的数学描述,贝尔的不等式表明:如果爱因斯坦正确,那么不等式成立。后来的科学家如伽瑞特(Jarrett, J.)发展了其中的思想,并把它转化为可操作的实验。

贝尔不等式的实验模型假设在量子源两侧各放置1个偏振检测器,检测器到光源的距离相等。它们三者在一一直线上,这样当量子源发出的量子向两侧反向运动时,检测器就能同时检测到量子的状态,并把它们记录下来。偏振器的作用和光学偏振透镜一样,只能记录到特定状态的量子。比如 $+1/2$ 自旋分量或 $-1/2$ 自旋分量的量子,这样量子的状态记录大为简化。同一量子源发出的量子动量守恒,它们在离开量子源之后,假设它们之间不再有任何联系,左侧检测器可能记录到A、B、C 3种可能;同样,右侧检测器也有A'、B'、C' 3种自旋钮调整的可能。

每个检测器就像偏振光透镜一样,透过并落到其上的某些光线只有一部分能通过。量子不携带偏振性,与检测器相独立;检测器可在相对于量子源的 120° 间迅速切换,1次只能有1个切换,任何一次切换都是检测器自身由旋钮在A、B、C位置之间的迅速转换,它们的调整是独立随机的。所以记录的所有可能结果互不受干扰,各种组合是等概率的。数量极多的量子对被送到检测器,其反应被记录下来。

在贝尔定理的实验模型中,就是根据的这些假定(比如检测器偏振性独立于测量)。量子的可测属性是内在的、固有的,独立于类空(spacelike)分离的旋钮设置事件之外。在这个意义上,可以预先设定“空间上有距离的事物之间的相互独立存在”,所测出的记录是实在性元素(EPR element)。如果量子通过,检测器记录+,要是没通过检测器则记录-。相对于两侧分离的检测装置,我们可以对结果之间的相关性进行判断。

贝尔不等式在技术层面上蕴含了局域隐变量理论的独立性假设:(1)一侧检测器的旋钮设置独立于另一侧的检测器旋钮设置;(2)量子源发出的量子的行为独立于两侧检测器的调整概率;(3)一侧检测器记录反应独立于另一侧检测器的反应概率。因此我们可以独立地对到达两侧的粒子进行记录,并且设想这种记录完全体现了粒子的自身状态,对它的描述也是完备的。

这样,贝尔定理开辟了对量子力学基础作出直接检验的通途。我们可以在爱因斯坦的关于定域实在世界的思想和玻尔关于微观粒子共谋性的某种幽灵式世界的概念间作出判决。这个判决性实验将量子理论与局域隐变量理论直接对质,极其简明、清晰地刻画了两侧量子的状态。实验结果直接否定了贝尔不等式。其现象似乎表征了两侧量子间

有某种超距关系(distant correlations)。对于这个出乎意料的结论,人们不愿意假设对一侧的测量能够影响到另一侧,至少不可能即时地直接受到影响。因为按照狭义相对论,物理信号或影响不可能运动得比光还快,至少在光穿过两侧装置的时间之内,一侧就不可能知道对另一侧进行了测量。也就是说,不可能出现一种超距作用(action-at-a-distance)。依据相对论在四维时空中类空(space-like)分离性,类空分离的事件之间不可能发生通讯行为。既然光速上限对隐变量理论和量子力学同样适用,那么寻求解释两次测量结论的物理关联或“共谋”就只得另辟蹊径了。

对实验现象的理解,似乎可以从两个方面加以怀疑:(1)量子客体本身不可独立确定;(2)我们的观察实验干扰了这种内在确定性。否定第一个方面要与一系列哲学世界观相冲突;对第二方面的重新阐释则取决于我们的认识能力。一方面,可以认为我们的认识能力有限,存在我们还未认识的隐变量;另一方面,我们可能不得不承认仪器(包括人的观测)干扰了事物客体的本来状态。

所以人们需要重新考虑是哪一个假设造成了不等式的失效,由此发展出不少新的解释,大概地说,以玻姆为代表的隐变量理论解释还不能最后被推翻,物理学家还寄希望于发展新的隐变量来拯救实在元素(EPR element);实验物理学家也试图通过新的检测手段为隐变量的存在提供依据。可以说,只要本体论意义上的实在观不为人类所放弃,这种努力就不会终止。

按照玻尔的观点,量子力学预言:在某些环境中,合作的程度会超过所设定的定域,即量子力学的标准解释要求在分离系统间合作(或共谋)的程度超过任何“定域实在性”理论中的逻辑许可程度,即发生超距关系(distant correlations)。对于哥本哈根学派的拥护者来说,只要放弃“决定实在性”,就可对实验现象予以解释。但是这涉及到观察者相对于实验的作用和地位,而这一问题在认识论中争论得十分激烈。

3 对量子行为的思考

相关量子模型结论的经验意义在于:量子间存在着神秘的关联性和非局域性,表明分离的实体——每个检测器上可测粒子的单独属性和相互联系的整体这两者的表现特征难以调和。

贝尔定理和隐变量理论,以及局域实在论三者的地位关系并不完全相同。贝尔定理有着明确的物理含义和精确的经验基础,因而实验物理学家对它讨论得较多。隐变量理论是一整套物理理论的笼统的说法,比如随机隐变量理论、决定隐变量理论等,它们预设了一个独立于观察者的世界的存在。局域性假设由光速的不可超越性来确立;隐变量理论则尝试在量子领域重新恢复客观个体内在属性的存在,并且认为这种客体属性是独立的、固有的,不因外界的检测而发生变化;贝尔定理和局域隐变量理论都可看作是实在观的一个推论,由此可以引伸出丰富的哲学思想。

根据标准量子力学(即哥本哈根学派)的观点,我们原先所认同的对象由测量活动表征,实在只有通过测量活动才能变成时空的现象。而我们所描述的不是客体对象的实在属性,只有在具体的实验安排下测量才能考察对象;量子本身的自在性应该受到怀疑,它不是具体的自为的时空存

黄河下游防洪减淤对洪水水沙搭配的要求*

梁志勇¹ 刘继祥² 张厚军²

(中国水利水电科学研究院¹ 北京 100038; 黄河水利委员会勘测规划设计研究院² 郑州 450003)

〔摘要〕 本文总结了以往对黄河下游河道冲淤临界条件的研究情况,分析了下游河道淤积严重的水沙搭配情况;利用 1960~1999 年 422 场洪水资料建立了黄河下游 4 个河段洪水排沙比与综合水沙与边界系数的关系,该系数包括流量、含沙量、洪峰流量变幅、洪水沿程衰减系数、洪水历时、平滩流量、前期累积淤积量等因素;利用 4 个河段的冲淤临界条件勾画出了 4 个河段洪水冲淤调整与来水来沙搭配之间的关系;该关系可为小浪底水库调度决策以及黄河下游治理提供参考。

〔关键词〕 水沙搭配 冲淤临界条件 综合水沙与边界系数 黄河下游 防洪减淤 泥沙运动 河床演变

〔中图分类号〕 TV 〔文献标识码〕 A 〔文章编号〕 1000-7857(2004)08-0027-04

CRITICAL BETWEEN SCOUR AND SILTATION FOR FLOOD SEASONS IN THE LOWER YELLOW RIVER

LIANG Zhi-yong¹ LIU Ji-xiang² ZHANG Hou-jun²

(1.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2.Reconnaissance, Planning, Design and Research Institute of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The channel bed of the lower Yellow River changes tremendously during flood seasons because of great sediment. Critical conditions between scour and siltation are distinct in different river reaches. The paper summarized previous researches on the critical conditions for the lower Yellow River, analyzed statistically the hydrological data of 422 floods from 1960 to 1999 and set up critical equations for the 4 river reaches. The critical relations between flow discharges and sediment concentration for the 4 river reaches are

*“十五”国家科技攻关课题“维持黄河下游排洪输沙基本功能的关键技术研究”。

在;它本身的客观性受整个测量系统的约束,其自身没有所谓完全确定、可测量的属性。因此,偏振仪记录的不是未经测量对象的状态,而是测量后受过测量“污染”的整个系统显示的一种结果。

物理实在论是站在量子理论对立面的角度,从哲学的高度对它进行审查,它是一种世界观和哲学倾向,当然它也与一定的实验相联系,而且它的这些观点可以预设实验的设计和表述方式中。实验对贝尔定理的否定,摧毁了我们原先认同的客观内在的假定,在哲学上的震动非常深远。与此同时,实验与量子力学解释的一致又增强了我们对量子力学的信心。

就对本体论的震动来说,测量意味着客体不可避免地会受一种干扰。宏观状态下,这种干扰只不过被看成对于具体、确定的事物产生的干扰,原则上可以经过调整设得非常小,而且在任何情况下都能估计和纠正。以致测量之后,我们可以准确地推导出被观察的物体所发生的一切。如果这是事物的真实状态,就能毫不犹豫地说,在对物体的观察之前和以后,物体实际具有一组完全的动力学属性(如位置、动量和能量)。于是,原子的微观特征在与宏观事物比较时,并不因尺度差异而危及它的实在性地位。然而根据哥本哈根学派的解释,测量事件是量子事件向宏观世界中的一次不可逆放大。这就在认识论上打破了原先的直观观念。

实验结果有力地证明,我们必须在独立存在的信念世界中建立一个相关量子模型。实验客体之间,客体与仪器之间,甚至客体与整个实验装置之间存在着某种纠缠效应(entangled effect)。观测仪器和被测对象组成一个按照量子力学所涉及的无形整体或互相补充的系统。从哲学上看,客体的孤立存在和量子现象的模糊性是量子力学解释和局域实在观争论的根源。

参考文献(Reference)

- [1]美·雅默. 秦克诚译. 量子力学的哲学[M].北京:商务印书馆, 1989
- [2]Bohr N. Atomic Theory and the Description of Nature [M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1934
- [3]Bohm D. Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables[J]. I and II "Physical Review, 1952, Reprinted in Wheeler and Zurek, 1983
- [4]Fine A. Hidden Variables, Joint Probabilities, and the Bell Theorems. [J]. Physical Review Letters, 1982b
- [5] Redhead, M. Nonlocality and Peaceful Coexistence [J]. In: R Swinburne (ed.). Space, Time and Causality, Dordrecht: Reidel, 1983
- [6]Shimony A. Contextual Hidden Variable Theories and Bell's Inequalities [J]. British Journal for the Philosophy of Science, 1984b

(责任编辑 王宏章)