

·讨论· 文章编号: 1007-6654(2002)02-0047-04

结合双模压缩真空态对 EPR“佯谬”与量子力学几率波的统一性解释

荆杰泰, 张俊香

(量子光学与光量子器件国家重点实验室; 山西大学光电研究所 山西 太原 030006)

摘要: 文章分析了爱因斯坦等人对量子力学不完备的论证过程, 通过对双模压缩真空态的偏振正交两光束 EPR 关联实质讨论, 结合 EPR 光束对的实验产生, 给出了量子力学几率波解释与 EPR“佯谬”的统一性解释, 从而在肯定 EPR 关联实在性的基础上, 肯定了量子力学几率波解释的完备性。

关键词: EPR 佯谬; 几率波; 测量理论

中图分类号: O431 **文献标识码:** A

0 引言

量子力学是本世纪最伟大的理论之一。它的诞生导致许多科学领域根本性的变革, 改变了人类对微观领域的认识。可以说没有量子力学的发展就不会有当今的许多科学界的重大发现, 就不会有原子领域的辉煌成就, 更不会有许多相关的子学科的发展。虽然量子力学是一个和谐的数学形式体系, 但是, 对其基本概念及原理解释, 直到今日, 物理学家们也未达成一致的意见。量子力学的物理诠释远远落后于它的数学表述和实际应用。

量子力学的正统解释是哥本哈根学派的纯几率解释, 其代表人物是 Bohr、Heisenberg、Born 等人^[1-3]。哥本哈根解释接受了 Born 对波函数的几率解释, 他们认为对于一个处于叠加态的物体, 它随机地选择一种状态, 其几率由波函数确定, 并且认为几率解释是最终的解释, 不能对它再作进一步分析。它是微观世界的本性。可以说, 今天的大多数物理学家都是在默认量子力学波函数诠释正确性的基础

上, 从事有关科研工作。

然而微观世界真的是被几率解释所支配, 再没有更深层次的理论来解释量子力学了吗? 伟大的物理学家爱因斯坦对此一直持否定态度, 二十世纪三十年代以后, 直到他去世, 在量子力学解释的根本问题上, 不断挑起新的争论, 写下了许多文章, 其中最著名的是与 Podolsky、Rosen 合作发表在物理评论上的《量子力学对物理实在的描述完备吗?》一文^[4]。在这篇文章中, 他们给出了一种按照量子力学的逻辑来论证它不完备的证明。随后 Bohr 以同一题目发表文章^[5]来论证量子力学的完备性, Bohr 认为 EPR 假想实验当中的两个粒子即使在离开很远以后, 也存在着某种关联, 对粒子 1 的测量不可避免的会影响到粒子 2 的状态, 所以不会推断出粒子 2 会同时具有位置和动量两个物理实在与测不准原理相违背的结论。Bohr 的关键思想是不承认 EPR 关于物理实在的判据, 而认为一个物理量只有被测量之后才是实在的。

双模压缩真空态在理论和实验上已经用来描述

收稿日期: 2002-05-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(69837010)

作者简介: 荆杰泰(1977-), 男, 山西阳泉人, 山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室在读博士。研究方向: 量子光学与量子信息。

连续变量的 EPR 关联^[6-8],用光场两个正交分量代替原始 EPR 假想实验中的位置和动量。我们在本文中就是要结合双模压缩真空态,运用测量理论,对 EPR 佯谬和量子力学几率波诠释给出统一性解释。我们知道,对于双模压缩真空态,闲置光与信号光之间在分开之后存在着非局域关联,对任何一方的测量不可避免地影响到另一方,我们不能把它们简单的看作两个实体,而应该看作一个实体,这样 EPR 佯谬也就不奇怪了,波函数解释仍然成立。本文分为五个部分,第二部分分析爱因斯坦等人对量子力学波函数解释不完备的论证过程的逻辑,第三部分阐述双模压缩真空态的 EPR 关联实质,第四部分统一量子力学几率波诠释与 EPR 佯谬,最后是结论。

1 爱因斯坦等人对量子力学不完备的论证

爱因斯坦等人首先认为一个成功的理论应该是正确的并且是完备的,所谓完备性指的是物理实在(physical reality)的每个要素必须在这个理论中有一个对应。接着给出了一个关于物理实在的判据(criterion):

如果没有干扰系统就能确切地预测系统的一个物理量的值,那么相应于这个物理量就存在一个物理实在的要素。

另外,在量子力学中有一个普遍结论:无论采取何种精确的实验方法,我们不能同时知道关于一个系统的非对易的两个物理量的值。也就是说,对一个物理量的精确描述原则上阻止了对另一个与其非对易的物理量的精确描述。这种阻止是原则上的,不能克服的。所以结合上面关于物理理论完备性的概念,可以得出以下结论:要么①量子力学中用波函数对物理实在的描述是不完备的;要么②非对易的物理量不能有同时的实在性。

以 Bohr 为首的量子力学的哥本哈根学派认为 Born 提出的波函数统计解释对物理实在的描述是完备的。从下面分析可以看出承认这一观点,也就是否定①,再结合关于物理实在的判据,我们将得出

对②的一个否定,从而肯定①,即量子力学中用波函数对实在的描述是不完备的。

首先,假定波函数对物理实在的描述是完备的。设想有两个系统 I, II,它们在初始时刻有相互作用,在分开以后不再有任何相互作用,考虑系统的两个物理量位置和动量,系统 I, II 的位置和动量分别记为 $(X_1, P_1), (X_2, P_2)$ 。在 T_1 时刻测量系统 I 的位置 X_1 ,由此可以推知系统 II 的位置 X_2 ,根据物理实在的判据,可得 X_2 是系统 II 的一个物理实在要素,在 T_2 时刻测量系统 I 的动量 P_1 ,由此可以推知系统 II 的动量 P_2 ,同样根据物理实在的判据,可得 P_2 也是系统 II 的一个物理实在要素,两次测量都没有干扰系统 II,所以有以下结论成立:

不对易的两个物理量可以同时具有物理实在性。

也就是说,①的否定,导致了②的否定。这样我们不得不得出量子力学用波函数对物理实在的描述是不完备的结论。

总结以上,我们可以看出 EPR 佯谬主要包括两方面:1,量子力学波函数描述的完备与否;2,量子力学对定域原则的违背。

2 双模压缩真空态的 EPR 关系联实质

Bell 不等式^[9]的提出把关于量子系统物理实在的争论从哲学范围转变到实验物理的领域,近 30 年来,Bell 不等式的实验检测已经越来越接近理想 EPR 方案^[9]。在实验上又获得 EPR 光束^[8,11,12],为解释 EPR“佯谬”打下实验基础。下面我们用测量理论对双模压缩真空态^[6,7]作 EPR 佯谬描述。

假定我们对双模压缩真空态的第一个模场施行正交振幅分量的测量,即测量投影算符为 $|X_1\rangle\langle X_1|$,其中 $X_1 = \frac{1}{2}(\hat{a}_1 + \hat{a}_1^\dagger)$,那么第二个模就会塌缩到以下未归一化的条件输出态:

$$\langle X_1 | \hat{S}_{1,2}(\xi) | 0,0 \rangle_{1,2}, \quad (1)$$

将双模压缩真空态在粒子数表象中展开:

$$\hat{S}_{1,2}(\xi) | 0,0 \rangle_{1,2} = \sqrt{1-\lambda^2} \sum_n \lambda^n |n, n\rangle_{1,2} \quad (2)$$

可得条件输出态为:

$$\langle X_1 | \sqrt{1-\lambda^2} \sum_n \lambda^n | n, n \rangle_{1,2} = \sqrt{1-\lambda^2} \sum_n \lambda^n \frac{e^{-X_1/2}}{\sqrt{\pi^{1/2} 2^n n!}} H_n(X_1) | n \rangle_2 \quad (3)$$

其中归一化系数为:

$$\begin{aligned} & \sqrt{(1-\lambda^2) \sum_n \lambda^n \sum_{n'} \lambda^{n'} \frac{e^{-X_1/2}}{\sqrt{\pi^{1/2} 2^n n!}} \frac{e^{-X_1/2}}{\sqrt{\pi^{1/2} 2^{n'} n'!}} H_n(X_1) H_{n'}(X_1) \langle n | n' \rangle_2} \\ &= \sqrt{(1-\lambda^2) \sum_n \lambda^{2n} \frac{e^{-X_1}}{\pi^{1/2} 2^n n!} H_n(X_1) H_n(X_1)} \end{aligned} \quad (4)$$

所以归一化的状态为:

$$\frac{\sum_n \lambda^n \frac{e^{-X_1/2}}{\sqrt{\pi^{1/2} 2^n n!}} H_n(X_1) | n \rangle_2}{\sum_n \lambda^{2n} \frac{e^{-X_1}}{\pi^{1/2} 2^n n!} H_n(X_1) H_n(X_1)} \quad (5)$$

将一这状态在双模正交压缩真空态的正交位相分量的本征态 $| X_2 \rangle$ 中展开,其中 $X_2 = \frac{1}{2}(\hat{a}_2 + \hat{a}_2^\dagger)$, 则(5)式变为:

$$\frac{\int dX_2 | X_2 \rangle \sum_n \lambda^n \frac{e^{-X_1/2}}{\sqrt{\pi^{1/2} 2^n n!}} H_n(X_1) \frac{e^{-X_2/2}}{\sqrt{\pi^{1/2} 2^n n!}} H_n(X_2)}{\sqrt{\sum_n \lambda^{2n} \frac{e^{-X_1}}{\pi^{1/2} 2^n n!} H_n(X_1) H_n(X_1)}} \quad (6)$$

当 $\lambda \rightarrow 1$ 时,即双模压缩真空态达到 100% 的压缩时,我们有:

$$\begin{aligned} & \sum_n \lambda^n \frac{e^{-X_1/2}}{\sqrt{\pi^{1/2} 2^n n!}} H_n(X_1) \\ & \cdot \frac{e^{-X_2/2}}{\sqrt{\pi^{1/2} 2^n n!}} H_n(X_2) = \delta(X_1 - X_2) \\ & \sum_n \lambda^{2n} \frac{e^{-X_1}}{\pi^{1/2} 2^n n!} H_n(X_1) H_n(X_1) = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

所以(6)式立即化为:

$$\int dX_2 | X_2 \rangle \delta(X_1 - X_2) = | X_1 \rangle_2 \quad (8)$$

由此可知,在双模正交压缩真空态的第一模施行正交振幅参量测量后,第二模就被相应的塌缩到与第一模完全相同的正交振幅分量的本征态上,反之,对第一模的正交位相的测量,会使第二模塌缩到与第一模正交位相分量相差 π 的本征态上。

事实上,上述测量理论相应于量子力学的基本对易关系,我们很容易求得:

$$[(X_1 - X_2), (Y_1 + Y_2)] = 0 \quad (9)$$

同时 $X_1 - X_2, Y_1 + Y_2$ 的起伏相等且等于 $\langle \delta^2(X_1 - X_2) \rangle = \langle \delta^2(Y_1 + Y_2) \rangle = 2e^{-2r}$ (r 是压缩参量)。当 $r \rightarrow \infty$ 时, $\langle \delta^2(X_1 - X_2) \rangle = \langle \delta^2(Y_1 + Y_2) \rangle = 0$ 。即此时对耦合模 $X_1 - X_2$ 和 $Y_1 + Y_2$ 的测量值为 0,即 $X_1 - X_2 = Y_1 + Y_2 = 0$ 。由此可得: $X_1 = X_2, Y_1 = -Y_2$ 。

3 量子力学几率波解释与 EPR 佯谬的统一

从表观上看,量子力学的几率波解释与 EPR 佯谬之间存在着不可调和的矛盾,要么承认量子力学的完备性,要么承认 EPR 佯谬观点的正确性。然而目前关于双模压缩真空态^[8]以及偏振纠缠对^[13]的实验充分证明了 EPR 佯谬的真正的实在性。那么是量子力学不完备吗?答案是否定的,量子力学的完备性在 EPR 问题中也是同样成立的。事实上, EPR 问题当时之所以称之为“佯谬”是对 EPR 问题中的一个系统中两个子系统看成为两个实体而造成。如果我们将两个子系统看成是不可分割的一个实体,那么由双模压缩真空态的量子理论可看出,所谓的测 X_1 , 推知 X_2 , 以及测 Y_1 , 推知 Y_2 的问题应该理解为一个实体中的两个互相对易的物理量 $X_1 - X_2$ 和 $Y_1 + Y_2$ 是可以同时精确测量的量子力学几率解释。而且实验也证明 EPR 对或压缩态是由一个光参量过程同时产生的包括两种相互垂直偏振光的一束耦合光。它不是由两束完全独立的偏振光所组成,因此在考虑 EPR 对是一个总的实体,而不是两个独立实体的意义上, EPR“佯谬”与量子力学几率波解释是完全统一的。

4 结论

我们从 EPR 最初对量子力学几率波解释的怀疑观点的理论出发,通过对双模压缩真空态的

EPR 实质性讨论,给出了量子力学几率波与 EPR “佯谬”的统一性解释,从而在肯定 EPR 关联实在性的基础上,肯定了量子力学几率波解释的完备性。

参考文献:

[1] BOHR N. *Phil Mag*, 1913, **26**(1): 471,857.

[2] HEISENBERG W. *The Physical Principles of the Quantum Theory* [M]. University of Chicago Press, 1930.

[3] BORN M. *Zur Quantenmechanik der Stossvorgange* [J]. *Z Phys*, 1926, **37**: 863 - 867.

[4] EINSTEIN A, PODOLSKY B, ROSEN N. Can quantum - mechanical description of physical reality be considered complete? [J]. *Phys Rev*, 1935, **47**: 777 - 780.

[5] BOHR N. Can quantum - mechanical description of physical reality be considered complete? [J]. *Phys Rev*, 1935, **48**: 696 - 702.

[6] REID M D, DRUMMOND P D. Quantum Correlations of Phase in Nondegenerate Parametric Oscillation [J]. *Phys Rev Lett*, 1989, **60**: 2731 - 2733.

[7] DRUMMOND P D, REID M D. Correlation in nondegenerate parametric oscillation. II. Below threshold results [J]. *Phys Rev A*, 1990, **41**: 3930 - 3949.

[8] OU Z Y, PEREIRA S F, KIMBLE H J, PENG K C. Realization of the Einstein - Podolsky - Rosen Paradox for Continuous Variables [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **68**: 3663 - 3666.

[9] BELL J S. *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* [M]. Cambridge University London, 1987.

[10] ASPECT A. Bell's inequality tell: more ideal than ever [J]. *Nature*, 1999, **398**: 189 - 190.

[11] ZHANG Yun, WANG Hai, LI Xiao - ying, JING Jie - tai, XIE Chang - de, PENG Kun - chi. Experimental Generation of Bright EPR beam from Narrowband Nondegenerate Optical Parametric Amplifier [J]. *Phys Rev A*, 2000, **62**: 023813.

[12] LI Xiao - ying, PAN Qing, JING Jie - tai, *et al*. Quantum Dense Coding Exploiting Bright EPR Beam [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**(4): 047904.

[13] BOUWMEESTER D, PAN J - W, MATTLE K, *et al*. Experimental quantum teleportation [J]. *Nature*, 1997, **390**: 575.

An Unitive Explanation for Einstein - Podolsky - Rosen Paradox and Probabilistic Wave Quantum Mechanics with Two - mode Squeezed Vacuum State

JING Jie - tai, ZHANG Jun - Xiang

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto - Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: We analyzed the argumentation process of the incompleteness of probabilistic wave quantum mechanics by Einstein et al and gave an unitive explanation for Einstein - Podolsky - Rosen Paradox and probabilistic wave quantum mechanics through the discussion of the EPR correlation between the two polarization - perpendicular beams generated from the nondegenerate optical parametric amplifier. We accepted the probabilistic wave quantum mechanics and the existence of the EPR nonlocal correlation at the same time.

Key words: EPR paradox; probabilistic wave; measurement theory