

谈谈纠缠态

方 玉 田

(天水师范学院近代物理理论研究所 天水 741000)

在 20 世纪科学发展过程中,以量子力学为核心的量子物理无疑是最深刻、最有科学成就的科学理论之一。然而对量子物理的基本原理和概念的理解仍然存在一些问题。纠缠态概念的提出与进一步研究却为从理论上和实验上解决这些问题提供了一把极为重要的钥匙。也把关于量子力学问题的争论从思辨领域上升到了实验研究确证的领域。

爱因斯坦提出了关于物理实在的定义,“要是对于一个体系没有任何干扰,我们能够确定地预测(即几率等于 1)一个物理量的值,那末对应于这一物理量必定存在着一个物理实在的元素。”

该定义与经典物理学是基本一致的。他亦要求客观实在在定域在每一个粒子上。他以物理实在的客观性和定域性作为对量子力学的基本原理和概念的诠释提出质疑和尖锐批评的出发点。玻尔抛弃了物理实在的客观性观点,他的观点的核心是:“一般地只在做了一次特定测量(或观察)之后,我们才能有意义地谈论单个量子系统的物理属性。显然,这赋予测量作用以一种严正而特殊的物理地位。”正如惠勒所说“归根到底,任何一种基本量子现象只在其记录之后才是一种现象。”也就是说,在与量子力学相一致的物理实在观中观察者是作为一个关键因素出现的。玻尔也认为量子世界本身具有不确定性和模糊性,强调了量子世界的整体性特征。这些正是量子力学哥本哈根解释的基础。由于以爱因斯坦为首的一派和以玻尔为首的一派的出发点不同,因而就量子力学的基本原理和概念的诠释展开了旷日持久的理论性的和思辨性的争论。

1964 年贝尔在隐变量理论和定域性两个假定的

基础上关于可分离系统同时实行测量所得的种种结果能够相互关联的程度,证明了一些很普遍的限制关系即贝尔不等式,该理论实质上跟粒子性质或作用力的细节无关,而是集中注意于支配测量过程的逻辑规则上,正是该定理奠定了对量子力学概念基础作出实验检验的理论基础。亦就把关于量子力学解释的争论从理论性、思辨性争论的阶段引导到了实验检验和确证的阶段。因此,“贝尔定理开辟了对量子力学的基础作出直接检验的通途,可在爱因斯坦的关于定域实在世界的思想与玻尔的关于充满亚原子共谋性的某种幽灵式世界的概念之间作出判决。”

随着物理理论和物理实验技术的发展为检验贝尔不等式提供了必要的基础,其中最有效的关于贝尔不等式检验的实验是 1982 年完成的阿斯派克特实验。迄今为止该实验被认为是对量子力学基础作出的最有决定性意义的实验检验之一,实验结果表明贝尔不等式不成立,与量子力学的预言结果完全符合。也就从实验上证明玻尔的观点是正确的,爱因斯坦的观点是错误的。现在已经出现了许多不同类型和不同程度上,用实验直接检验和探讨量子力学的基本概念和基本图像的研究工作及其相应的理论分析,揭示出一系列原则上全新的、从经典物理的观念不可能得到理解的物理现象。

经典物理学中一个物理系统可以用一组物理量作出完备的描述。量子力学则假定一个量子系统可以用一个波函数 $|\psi\rangle$ 来完备的描述。要测量该系统中某一力学量 A , 据量子态的叠加原理,波函数 $|\psi\rangle$ 可以用力学量 A 的本征波函数 $|n\rangle$ 的线性叠加来表示,即 $|\psi\rangle = \sum_n c_n |n\rangle$, 然而,本征态的叠加所

浮标、鱼控仪、鱼雷制导装置等;按装备对象可分为水面舰艇声纳、潜艇声纳、海岸固定声纳、机载声纳等。

声波是目前已知的惟一能在水中远距离传播的波动,故声纳已成为目前较有效的水下遥测技术而得到广泛应用。在国防上广泛应用于海军各兵种的导航、探雷、航道测量、水中通讯联络,成为舰艇、潜艇探测周围环境的主要耳目。在民用方面,用于船

舶导航、探测鱼类资源。在海洋资源开发方面,用于绘制海底地图、海底地质勘测、海底石油等资源的勘探等方面。

以上将雷达、遥感技术及声纳的工作原理和特点分别作了初步的介绍,我想这不过是使大家对“上九天揽月”“下五洋捉鳖”这种高科技的通讯,有所了解。

导致的测量结果的不确定性和不可预言性,完全是一种量子效应,并无经典对应。这是量子力学中最难理解,也是常常被人误解的基本概念。纠缠态中出现各种离奇性质,均源于此。

在对量子力学质疑的问题中最著名的是爱因斯坦等人(1935年)提出的“EPR 佯谬”和薛定谔(1935年)提出的“薛定谔佯谬”。纠缠态的概念最先是在“猫佯谬”的理想实验中提出来的。

薛定谔猫的理想实验如下:“设想在一个封闭的盒子里放一只猫和一个具有激发态 $|e\rangle$ 和基态 $|g\rangle$ 的两态放射性粒子。当它处于 $|e\rangle$ 态时,就会产生辐射衰变把猫杀死;当它处于 $|g\rangle$ 态时,就不会辐射,猫仍然活着。根据量子力学的态叠加原理,粒子可以处于 $|g\rangle$ 和 $|e\rangle$ 的叠加态

$$|\Psi\rangle = \alpha|g\rangle + \beta|e\rangle \quad (1)$$

在没有打开盒子观察猫的死活以前,猫会处于一个半死不活的状态。即会具有量子纠缠态的总体波函数

$$|\Psi_{\text{总}}\rangle = \alpha|g\rangle \otimes |\text{活}\rangle + \beta|e\rangle \otimes |\text{死}\rangle \quad (2)$$

其中 $|\text{死}\rangle$ 和 $|\text{活}\rangle$ 分别代表猫的两种基本状态。”该理想实验表明宏观(经典)世界也可以存在可以区分的量子态的叠加。薛定谔猫态就是宏观量子态活猫态和死猫态的叠加。在 EPR 佯谬的理想实验中也包含着纠缠态的概念和非定域性的概念。对“薛定谔猫佯谬”和“EPR 佯谬”的理解有赖于对纠缠态概念的阐明与澄清,现在已经知道,“只有让 A 和 B 彼此(直接或间接)相互作用,才能使 A 和 B 纠缠起来: $U(AB)(|\Psi\rangle_A \otimes |\Phi\rangle_B) \Rightarrow AB$ 纠缠态。”纠缠态是量子力学多体系(或多自由度体系)的一种特殊形式的、但又是普遍存在的量子态。例如,“EPR 粒子处在如下的所谓纠缠态上:这个量子态最大地违背 Bell 不等式,有着奇特的性质:我们无法单独地确定某个粒子处在什么量子态上,这个态给出的惟一信息是两个粒子之间的关联这类整体的特性。”纠缠态体现了量子关联的性质,因此纠缠态表现出许多非经典的特性和现象。

要了解经典系统的信息,就是通过测量仪器对被测系统干扰进行观察和测量来实现的。经典物理学假定,这种干扰从理论上讲可以任意地减小,从而不会导致被测的经典物理系统发生不可逆的转变,测量结果就反映了经典系统的真实状态。在量子力学中量子系统是用波函数来表示的,波函数是通过统计解释与具体实验相联系的,要了解量子系统的信息,就必须对量子系统进行测量,然而测量的

结果就导致波函数的坍缩或缩编。由于测量导致波函数发生不可逆的转变,在没有纠缠态概念的正统量子力学之内,你不可能产生出波函数的坍缩。因此如果没有纠缠态的概念,测量过程中量子系统的波函数坍缩和状态的不可逆改变是难于理解的。正是由于测量中波函数坍缩的性质才导致了观察创造实在的观点,这样观察者在量子体系的测量过程中扮演着极为重要的角色。经典物理学中观察者只具有次要的地位强调了物理实在的客观外在性。虽然质疑量子力学的问题各不相同,但它们均密切联系于量子力学测量的基本问题。

量子力学测量的基本问题是:“对微观粒子运动状态的有效测量,必将在可观测的意义上使粒子原来的运动产生不可逆的改变。”量子世界的根本特征是它的量子相干性。由于测量或其他影响导致相干性消失的现象称之为量子退相干。仅就量子测量而言,人们称之为波包坍缩。在量子力学的标准框架中,经典仪器的引入是不可避免的。人们希望量子力学成为一个描述整个宇宙的一个普遍理论,它不仅能够描述一个微观的物理系统,还应当描述观测着这个系统的宏观测量仪器,这就要求在量子力学的框架内建立一种动力学的量子测量理论,首先由 Von. Neumann 和威格纳提出的描述量子退相干的动力学理论,为在量子力学的框架内解决测量的问题开辟了新的道路。“量子测量可以描述为产生系统和仪器状态关联的动力学过程;通过适当的相互作用,产生系统和仪器的纠缠。”1971年,Hepp 和 Coleman 提出了一个量子测量的动力学模型(HC 模型)。以后又有一些科学家提出了好几种量子测量动力学模型。分析各种量子测量动力学模型中有效演化矩阵的共同特性,发现有效演化矩阵的因子化是实现波包坍缩的本质。在仪器和系统特定相互作用的动力学描述中,量子测量过程本质上是产生量子纠缠态的时间演化过程。量子纠缠态是量子测量问题的本质和实现波包坍缩和量子退相干的关键。纠缠态的概念构成了量子测量动力学的基础。已经证明在量子力学的框架内仪器的经典或宏观属性都会自动导致被测量子系统的退相干。从一定的意义上说,一个宏观仪器所起的作用与包围着系统的环境所起的作用有很多相似之处:宏观的环境会引起其中量子系统的退相干。但是环境诱导退相干与量子测量导致波包坍缩是有一定差别的,这就是环境除了引起量子退相干效应之外,还会引起系统能量

她用物理的情趣,引我们科苑揽胜; 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

2004年的《现代物理知识》继续设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯共8个栏目。欢迎大家向这些栏目踊跃投稿。

恳请大家注意如下几点:稿件最好用微机打印,请单面打印并留1.5倍的行距,不能打印的请用方格纸以正楷誊写;外国人名地名,请译成中文,有必要保留外文名称时则在文中首次出现时将外文用括号括在中译名后面,图表中的外文也尽可能译成中文;插图须在文稿中的相应位置标上编号,手绘插图线条及图中标注文字务必整洁清晰;文稿无需附“参考文献”“摘要”“关键词”等,但务必附上英文题目和作者的英文姓名;无论网上或邮寄投稿,务必将联系人姓名、详细地址、邮政编码以及电话、电子邮箱、传真等联系方式全部书写清楚;网上投稿请以Word文件(扩展名DOC)附件发送;请注意语言规范,例如,“其它”一律改为“其他”,“公里”改为“千米”,“公斤”改为“千克”,数字和百分数尽量采用阿拉伯数字,除了书刊名称用书名号外,一般文章的题目则用引号。

从2003年第3期开始,每期的扉页上都刊登本

刊的电话、传真、网址和电子信箱,欢迎各界人士与我们联系。

《现代物理知识》的读者对象颇为广泛,有科学工作者、教育工作者、科学管理干部、大学生、中学生和其他物理学爱好者。欢迎各界人士继续订阅!

在邮局漏订或需要过去杂志的读者,请按下列价格汇款到《现代物理知识》编辑部(100039,北京918信箱现编部)补订。1992年合订本,18元;1993年合订本,18元;1994年合订本,22元;1995年合订本,22元;1996年合订本26元;1993年增刊,8元;1994年增刊,8元;1996年增刊,15元;1997年合订本,30元;1998年、1999年合订本已售完,尚有1999年1、4、5、6期单行本,每本3元;2000年附加增刊合订本,38元;2000年增刊,10元;2001年合订本,48元;2002年合订本,48元;2003年合订本,48元;2004年每期7元,全年42元;《奇异之美——盖尔曼传》,32元;《反物质——世界的终极镜像》,18元(上海科技教育出版社“哲人石”丛书最近出版的两本)。以上所列,均含邮资或免邮资。

的损耗,即量子耗散。并且证明了在超短时间过程中,与量子耗散的影响相比,量子退相干是十分重要的。也就解释了宏观物体的定域化问题以及不存在宏观量子态的叠加问题。正是纠缠态概念架起了连接量子物理学和经典物理学的桥梁。目前的理论和实验研究都表明,可以用所谓的量子关联或量子纠缠的机制来解释干涉条纹消失的现象,增进了我们对干涉现象的新理解。

通过纠缠态的概念在量子力学的框架内使我们认识到量子态坍缩具有以下的特点:坍缩结果的随机性、坍缩方向的不可逆性、坍缩总是斩断相干性的、坍缩总是非定域的和时间和空间也是坍缩的。也认识到在量子理论中存在两种基本过程:对于孤立的量子系统,是可逆的、决定论的和保持相干性的动力学演化过程;不可逆的、随机坍缩的和切断相干性的量子测量过程。

正是纠缠态的概念和贝尔定理一起构成了对量子力学基本原理和概念基础进行实验检验的理论基础。通过纠缠态的概念从实验上确立了玻尔的非局域性理论,否认了爱因斯坦的局域实在论,说明量子力学理论在目前实验范围内是完全正确的。也在量子力学的框架内解释了“EPR佯谬”和“薛定谔佯谬”。1996年C. Monroe等成功地实现了介观尺度上的薛定谔猫态,1997年瑞士学者更直接了当地在10km光纤中测量到作为EPR对的两个光子之间的量子关联,因此纠缠态的概念促进了量子力学理论的扩展和完善。利用纠缠态的概念我们可以通过制备纠缠态和测量来实现量子隐形传态,也促进了新实验技术的创立。对于纠缠态概念的不断研究和理解导致了量子信息学的建立,也就为具有强大功能的量子计算机的理论研究和研制提供了诱人的前景和理论基础。