

# 量子信息的本质探究

吴国林

(华南理工大学政治与公共管理学院,广东 广州 510640)

**摘要:** 20世纪90年代以来,量子信息研究已取得重大进展,对量子信息的哲学研究产生了极大的影响。目前对量子信息的涵义还存在争论。我们认为,量子信息与经典信息既有联系,更有本质的区别。量子信息以量子相干性和量子纠缠作为其基础。量子信息是指在量子相干长度之内所展示的事物运动的量子状态与关联方式,它是微观物质的属性。量子信息不是量子实在,而是作为量子实在的状态、关联、变化、差异的表现。

**关键词:** 量子信息;经典信息;量子相干;量子纠缠

**中图分类号:** N031

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003 - 5680(2005)06 - 0032 - 04

自1900年,普朗克提出能量子概念,20世纪20年代建立量子力学的矩阵力学和波动力学,在近1个世纪的探索中,尽管量子力学的有关计算与预见都没有问题,但是,对量子力学的理解仍然存在极大的差距。1935年爱因斯坦、波多尔斯基和罗森在《物理评论》发表了《能认为量子力学对物理实在的描述是完备的吗?》一文,引发了对量子力学基本问题的论争。1964年,贝尔基于爱因斯坦的定域性原理,提出了检验定域性的方法——贝尔不等式。20世纪70年代以来,有一连串的物理实验开始检验贝尔不等式,并开始检验EPR佯谬本身。这是量子信息起源的一个方面。

另一方面,量子信息的概念与计算机技术的发展有关。1982年,著名物理学家费曼(Richard P. Feynman)首先推测,按照量子力学规律工作的计算机(量子计算机)可能避免能耗这一困难。1985年,多依奇(David Deutsch)定义了量子计算机。1994年,肖尔(Peter Shor)发现了具体的量子算法。1993年,本内特(C. H. Bennett)等四个国家的6位科学家联合在《物理评论快报》发表题为《经由经典和EPR通道传送未知量子态》的论文,引发了一系列富有成果的研究。1997年,中国与奥地利学者在《自然》杂志报道了量子隐形传态的实验结果。量子隐形传态是量子信息的根本性特点。20世纪后半期,量子计算、量子密钥分配算法和量子纠错编码等3种基本思想的出现,标志着以量子力学为基础的量子信息论基本

形成。

2000年,量子信息的权威本内特和的维尼诺(Di Vincenzo)在《自然》杂志上评述,量子信息理论已开始将量子力学与经典信息结合起来,成为一门独立的学科。目前,也创办了国际性的量子信息杂志和虚拟网络杂志。量子信息是近10年来受到国内外学术界高度关注的一个重要的理论和技术问题,出现了许多综述性论文,量子信息理论已取得了重大理论突破。但量子信息的哲学研究才仅仅展开研究,国外的重要杂志与有关国际会议已引起了较大注意。

国内有关量子信息理论与技术研究取得了重大进展,特别是中国科技大学的郭光灿院士等学者取得了国际性的研究成果。量子信息理论取得了重大进展,哲学应当作出自己的回应。量子信息哲学正在确立自己的话题、方法和理论,这意味着一个独立理论正在建立之中。本文仅在科学哲学的层面讨论量子信息的本质。

## 一 量子信息的基本涵义

从纯客观的通信理论来看,现有的经典信息以比特(bit)作为信息单元,经典比特只有一个或0或1的状态。一个比特是给出经典二值系统一个取值的信息量。从物理角度讲,比特是一个两态系统,它可以制备为两个可识别状态中的一个,例如,是或非,真或假,0或1等。在数字计算机中电容器

【收稿日期】 2005 - 06 - 01

【基金项目】 广东省哲学社会科学“十五”规划项目“量子信息的哲学研究”(编号03104B07)资助

【作者简介】 吴国林(1963 - ),男,四川营山人,哲学博士,主要研究物理学哲学、宇宙学哲学、复杂系统哲学与管理、开放实在论等。

平板之间的电压可表示经典信息比特,有电荷代表 1,无电荷代表 0。经典信息可以用经典物理学进行描述,不需要用量子力学描述。

量子力学用量子态来描述量子系统,即系统处于态空间(常用 Hilbert 空间来表述)的某种量子态。量子力学的波动方程可以描述量子态的演化。量子信息研究包括以量子态为信息载体的信息理论与技术。在量子通信理论中,量子信息的单元称为量子比特(qubit),有的国内学者称之为量子位。一个量子比特是一个双态系统,且是两个线性独立的态。两个独立的基本量子态常用狄拉克符号记为:  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$ 。量子比特是两态量子系统的任意叠加态,量子比特  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$  是二维复空间中的向量。例如:

$$|\psi\rangle = C_0|0\rangle + C_1|1\rangle$$

$$\text{且 } |C_0|^2 + |C_1|^2 = 1$$

其中系数  $C_0$  与  $C_1$  为复数。

如用矩阵表示  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  时,它们可以表示为:

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

量子比特可以处于  $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$  之间的连续状态之中,直到它被观测。当量子比特被观测,只能得到非“0”即“1”的测量结果,每个结果有一定的概率。经典比特可以看成量子比特的特例( $C_0=0$  或  $C_1=0$ )。

两个量子比特的态张成 4 维希尔伯特空间,它是两个量子比特的量子态的直积  $\otimes$ ,它存在 4 个正交的态,其基态可以取为:  $|00\rangle$ 、 $|01\rangle$ 、 $|10\rangle$  和  $|11\rangle$ 。

用量子态来表示信息是研究量子信息的出发点,有关量子信息的所有问题都必须采用量子力学理论来处理,信息的演化遵从薛定谔方程,信息传输就是量子态在量子通道中的传送,信息处理(计算)是量子态的幺正变换,信息提取便是对量子系统实行量子测量。在实验中,量子比特的物理载体是任何两态的量子系统,常见的有:光子的正交偏振态、电子或原子核的自旋、原子或量子点的能级、任何量子系统的空间模式等。一旦用量子态来表示信息,便实现了信息的“量子化”,于是信息的过程必须遵从量子物理原理。

## 二 量子信息涵义的论争

目前,对量子信息的涵义还存在争论。对量子信息的界定,主要从量子力学的角度或从操作角度来下定义的。其主要观点分为两大类:第一类观点认为量子信息在本质上不同于经典信息,第二类观点认为量子信息与经典信息没有本质区别。但主流的观点是量子信息显著不同于经典信息。

第一类量子信息观点可以分为以下几种:

(1) 量子信息是指存储在量子系统中的经典信息或申农信息。坎维斯(C. M. Caves)与芬奇斯(C. A. Fuchs)认为,“量子信息指的是量子系统的与众不同的信息处理性质,当量子信息从非正交量子态中存储或取回时,量子信息就产生了。”<sup>[11]</sup>

(2) 量子信息显著不同于申农信息。焦沙(R. Jozsa)认为,量子信息明显不同于经典信息,它提供了一个基本性和

诠释性的经典理论与量子理论的差别的新视角。<sup>[12]</sup>

(3) 从量子态的角度下定义。在国外非常著名的量子信息的教材《量子计算与量子信息(Quantum Computation and Quantum Information)》中,尼尔逊(Michael A. Nielsen)与昌(Isaac L. Chuang)认为,量子信息一词在量子计算与量子信息的研究中有两种不同的用途。第一种用途是可以被解释为与利用量子力学进行信息处理有关的所有操作方式的概括,这包括诸如量子计算机、量子隐形传态、不可克隆原理和本书其他全部内容。量子信息的第二个用途要专门得多,指对量子信息处理的基本任务的研究。<sup>[13]</sup>

国防科技大学的李承祖教授等学者认为,从物理观点看,信息归根结底是编码在物理态中的东西。而在物理上,量子态不同于经典态。量子信息是用量子态编码的信息,量子态具有经典物理态没有的特殊性质。<sup>[14]</sup>信息源于物理态在时空中的变化。量子信息和经典信息的根本区别就在于经典信息是以经典物理态编码为基础;而量子信息则是以量子态编码信息为基础,量子信息的存储、传输和处理都必须遵从量子力学规律。

中国科学院院士、中国科学技术大学著名量子信息专家郭光灿教授认为,经典信息以比特作为信息单元,从物理角度讲,比特是一个两态系统。用量子态来表示信息是量子信息的出发点,有关信息的所有问题都必须采用量子力学理论来处理。信息一旦量子化,量子力学的特性便成为量子信息的物理基础。<sup>[15]</sup>显然,这种定义是一种操作性的定义。

复旦大学倪光炯教授认为,信息并非原来就“客观”存在,它是主体(通过仪器)对客体进行操作(变革)时共同制造出来的。<sup>[16]</sup>而量子信息所处理的对象是量子态,它用波函数来描写,后者是对量子态做“虚拟测量”时获得的“几率幅”。抽象的量子态不包含任何信息。信息只是在测量时才被主体与客体共同制造出来,而作为相应的“虚拟测量”几率幅的波函数则给出了统计性的预言。实际上,我们不难发现,倪光炯的所谓信息是指经典信息。

第二类量子信息观点认为,量子信息不存在。申农信息概念足以描述量子信息理论。杜威尔(A. Duwell)认为,焦沙绝没有明确和完整地表达申农信息,也没有给出用于比较两种概念的量子信息,也没有提供有用的量子信息。杜威尔的论点是:首先,申农信息不依赖于经典物理学;其次,申农信息的转换不需要信息的局域传递者;第三,一个物理系统的申农信息的内容仅仅定量在通信系统的环境(context)中。<sup>[17]</sup>

由于量子信息理论还诞生不久,我们不能期望对量子信息能下一个共同的定义。从量子信息的发展历史来看,量子信息论的奠基者们的本意是用量子力学来辅助完成一些经典信息过程,然而随着研究的深入,后来者们逐步把量子力学与经典信息论真正地结合起来。在此过程中,许多重大问题(如消相干等)得到解决,各种新的奇异现象被发现,这使得研究者们越来越坚定地相信量子信息论已成为一门独立的学科。量子信息除了推广了经典信息中的信源与信道等概念外,还引入了其特有的量子相干与量子纠缠。量子纠缠是量子信息的关键。我们认为,量子信息与经典信息有本质

的区别。

### 三 量子信息与经典信息的联系与区别

信息作为一个科学概念,最早出现在通信领域。在20世纪20年代,哈特莱在探讨信息传输问题时,提出了信息与消息在概念上的差别,他认为,信息是包含在消息中的抽象量,而消息是具体的,消息负载着信息。1948年申农在《通信的数学理论》中提出了经典信息论。在一些有关通信理论或控制论的著作中,信息被认为是“不确定性的减少”。1950年,著名学者维纳认为:“信息这个名称的内容就是我们对外界进行调节并使我们的调节为外界所了解时而与外界交换来的东西。”<sup>[8]</sup>维纳的名言:“信息就是信息,不是物质也不是能量。”<sup>[9]</sup>他指出了信息不同于物质与能量。

自此以后,信息概念广泛深入到各学科之中。于是不同学科的学者从不同的视角给出了不同的信息的定义。从若干学科对于信息概念的不同理解和运用中,经过比较与分析,从复杂系统角度,中国人民大学陈禹教授认为,信息的若干实质属性是:局部构成整体时产生的新的质;以特定系统的状态所表达的抽象含义;系统演化过程的记录和痕迹;客观存在与主观效用的统一。这四点在一定程度上概括了若干学科对信息理解的共性。<sup>[10]</sup>

半个世纪以来,人们还没有给出一个为大家所接受的信息定义。这关键在于不同的学者从不同的学科领域、不同的知识背景来界定信息时,存在较大的区别。当然,以上这些是经典信息的涵义。在探讨量子信息的涵义之前,我们先就经典信息与量子信息进行比较。量子信息与经典信息既有联系又有区别。

量子信息与经典信息之间的联系主要表现在:

(1)量子信息与经典信息都需要有物质作为载体才能进行传递。就如经典物理学与量子力学的联系一样,经典信息可以归结为量子信息的特殊情形,实数可以归结为复数的特殊情形。

(2)量子信息与经典信息都是描述信息的不同层面,是相互联系的。量子信息与经典信息是相互补充、相互统一的。量子信息的传递和接收都不能离开经典信息,量子信息必须要有经典信息作为辅助手段。尽管量子信息通过量子纠缠表现出量子信息具有“超光速”的特点,但是,量子信息的传递和提取则不可能超过光速,因为量子信息必须有经典通信信道作为补充,而经典信息的传递速度不可能超过光速。可见,量子信息与经典信息统一在信息的传递过程中。

(3)从信息的最基本的载体来看,两者都需要一个两态的物理系统来作为载体。经典信息由两态的经典物理系统表达,而量子信息则由两态的量子系统来实现。

(4)从信息的传送通道来看,经典信息与量子信息都必须有经典信道才能完成经典或量子信息的传递。

尽管量子信息与经典信息是相互联系的,但它们之间有着本质的区别。具体表现在以下方面:

(1)两者依据的物理学基础不一样。经典信息处理依据经典物理学,而量子信息处理依据量子力学。经典信息属于

经典物理学范围,而量子信息属于量子力学的微观范围。

(2)经典信息不具有相干性和纠缠性,而量子信息具有相干性和纠缠性。量子相干性在各种量子信息过程中都起着至关重要的作用,但是,因为环境的影响,量子相干性将不可避免地随时间指数衰减,这就是量子消相干(decoherence)效应。而经典信息则没有。量子相干性是量子信息区别于经典信息的关键所在。消相干效应表明,量子信息受环境的影响很大。量子纠缠效应使量子信息的传递具有非定域性。可见,量子信息的处理与传递必须在量子相干长度之内。

(3)经典信息可以完全克隆,而量子信息不可克隆(No-Cloning)。所谓量子克隆是指原来的量子态不被改变,而在另一个系统中产生一个完全相同的量子态。克隆不同于量子态的传输。量子传输是指量子态从原来的系统中消失,而在另一系统中出现。量子不可克隆定理是指两个不同的非正交量子态,不存在一个物理过程将这两个量子态完全复制。如果可以准确地复制量子态,即存在着许多完全相同的量子态,我们就可以同时准确测量共轭量(如坐标与动量等),这就与量子力学的不确定性原理相矛盾。当然,量子不可克隆原理并没有限制不严格地复制量子态。郭光灿教授等人证明,两个非正交态通过适当设计的么正演化和测量过程结合,可以以不等于零的概率产生出输入态的精确复制。<sup>[11]</sup>

(4)经典信息可以完全删除,而量子信息不可以完全删除。已有学者证明,任何未知的量子态的完全删除是不可能的。<sup>[12]</sup>显然,这是量子信息不同于经典信息的重要特征。这或许意味着,经典信息的客观性程度没有量子信息的客观性的程度高。这一性质表明了量子信息不同于物质与经典信息的重要特征:物质不能被创生和消灭,经典信息可以被创造和消灭,而量子信息可以被创造但不能被完全消灭。

(5)从编码在经典物理状态中获得信息,可以不扰动经典物理状态;而从编码在非正交量子态中获得信息,必然要扰动这些量子态。<sup>[13]</sup>因为如果不扰动量子态,测量者就无法区分测量仪器的末态与被测量子态的演化末态。

(6)量子信息具有隐藏性,而经典信息可以完全读出来。在纠缠态中,通过贝尔基测量我们可以形成四维空间中的一组正交归一化的贝尔基,利用泡利算子可以构造出位相算子 $|^+ \rangle$ 与宇称算子 $|^- \rangle$ 。贝尔基是具有最大纠缠的量子态,当我们将2比特的信息编码在基 $\{|^+ \rangle, |^- \rangle\}$ 中,如果分别测量编码在每个量子比特中的信息,我们是无法译解出来的。可见,编码在纠缠量子态中的信息是不能局域地测量出来的。而经典信息可以局域地译解出来。

(7)经典信息不能够稠密编码,而量子信息可以稠密编码。量子位可以用来储存和传送经典信息。比如,传送一个经典比特串(10110),Alice可以发送5个量子比特给Bob,这5个量子比特依次制备在 $|1 \rangle, |0 \rangle, |1 \rangle, |1 \rangle, |0 \rangle$ 态。当Bob接收到这些量子比特时,使用基底 $\{|^+ \rangle, |^- \rangle\}$ 就可以得到比特串(10110),从而取出Alice编码在比特串中的信息。显然,这种通信方式与经典通信没有什么本质区别。但是,使用量子纠缠现象可以实现只传送一个量子比特,而传送2

个比特的经典信息。

(8) 经典信息在四维时空中进行,速度不慢于光速;而量子信息则在内部空间中进行,量子信息的变换可大大快于经典信息。所谓内部空间就是指微观粒子所具有的内禀变量或内部变量(如自旋)所形成的空间。内部空间与普通的三维空间是没有关系的,或者脱离了普通的三维空间。比如,量子信息已成功在自旋空间传递,量子信息的处理速度远高于经典信息。

(9) 基于经典计算机的纠错是位反纠错,而基于量子计算机的纠错则有位反纠错和位相纠错。位相纠错是量子信息特有的一类错误,是不能通过经典纠错方法纠正的。一个物理量子位态 $| \psi \rangle$ 在和环境相互作用中可能发生的情况包括四种情况:没有错误(D),位反错误(X),位相错(Z),位反转错+位相错(Y),一个量子位的一般错误可以表示为这些出错算子的线性组合。量子纠错不是利用态的拷贝,而是利用量子纠缠,采用以纠缠对纠缠的方法来实现量子纠错。

#### 四 量子信息的本质

按现代大爆炸宇宙学,宇宙的演化是从量子宇宙演化为经典宇宙,于是,在没有人类存在以前,就有与人无关的本体论量子信息与本体论经典信息,而当宇宙演化出经典宇宙并演化出人类时,本体论信息成为人类的认识对象时,才有认识论量子信息与认识论经典信息。为此,我们把量子信息分为本体论量子信息与认识论量子信息。

所谓本体论量子信息,是指在量子相干长度之内所展示的事物运动的量子状态与关联方式。所谓认识论量子信息,是指主体感受和所表述的在量子相干长度之内的事物运动的量子状态与关联的方式。

我们知道,事物的性质和展现的方式是由它的本质决定的,因此,事物的性质与展现的方式也必然反映了事物的本质。我们在定义中加入“量子相干长度之内”,这在于20世纪80年代以来的有关研究表明,只有在量子相干长度之内的微观客体才能用波函数或几率幅来描写,而限制量子相干长度的主要因素是环境与量子系统之间产生的消相干作用。定义的“关联方式”在于包括相干性与量子纠缠等性质,量子信息的本质是通过量子态、量子相干和量子纠缠等量子性质展现出来的。

我们能不能把量子信息看作是微观物质的普遍属性?

电子、质子等微观粒子的性质都可以用几率幅(波函数)得到很好的描述。尽管波函数描述的是位形空间(configuration space),比如,两粒子体系的波函数 $(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2)$ 描述的是6维位形空间中的波动而不是现实的三维空间的波动,但是,我们认为,几率幅(波函数)仍然提示了微观粒子的客观实在,反映了微观物质的存在方式。因为在位形空间中粒子体系的波函数通过测量与现实的三维空间相联系,位形空间仍然具有实在意义。这就如在量子宇宙学中,虚时间和实时间是一样实在的。

因此,我们认为,量子信息可以看作是微观物质的属性。处于量子相干长度之内的微观物质都可以成为量子信源,产生量子信息。量子信息的产生要以微观物质的运动作为前提。任何微观物质的量子运动都会有量子信息产生。量子信息只能由微观物质的运动才能产生,且微观事物处于量子相干长度之外。一般性的知识等不能产生量子信息。经典信息也不能产生量子信息。人的意识也不能产生量子信息。量子信息只能存在于量子系统之中,而不能存在于一般性的日常生活之中。人类社会的生活自身不能产生量子信息,因为人是宏观的,宏观的人不能产生量子关联。这是因为量子信息产生的物理基础是处于量子相干长度之内的微观物质或微观事物。

总之,量子信息不是量子实在,而是作为量子实在的状态、关联、变化、差异的表现。从哲学上讲,量子信息将信息从经典领域拓展到量子领域,丰富了信息的涵义,赋予了量子信息以独立存在的哲学意义。

#### 【参 考 文 献】

- [1] C. M. Caves, and C. A. Fuchs. Quantum information: how much information in a state vector? [J]. preprint quant - ph/9601025. 1996.
- [2] R. Jozsa, Quantum information and its properties, Lo H - K, S. Popescu and T. Spiller (Eds.) Introduction to Quantum Computation and Information[M]. Singapore: World Scientific, 1998. 49 - 75.
- [3] Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang, 量子计算与量子信息(一) [M]. 赵千里译. 北京:清华大学出版社, 2004. 47.
- [4] [13] 李承祖, 黄明球, 陈平形, 梁林梅. 量子通信和量子计算[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2000. 108, 109.
- [5] 李传锋, 郭光灿. 量子信息研究进展[J]. 物理学进展, 2000 (4): 408.
- [6] 倪光灿. 信息在测量之前就已经存在了吗?[J]. 光子学报, 2001(1): 108 - 112.
- [7] A. Duwell, Quantum information does not exist[J]. Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 2003(34): 479 - 499.
- [8] 维纳. 人有人的用处[M]. 北京:商务印书馆, 1978. 9.
- [9] N. 维纳. 控制论[M]. 郝季仁译. 北京:科学出版社, 1963. 133.
- [10] 陈禹. 复杂系统中的信息——概念、视角与特征[J]. 首都师范大学学报(社科版), 2003(2): 100.
- [11] Duan L. M., Guo G. C. A Probabilistic Cloning Machine for Replicating Two Non - orthogonal States [J]. Phys. Lett. A, 1998(243): 261.
- [12] Pati A. K. et al. Impossibility of Deleting an Unknown Quantum State[J]. Nature, 2000(404): 164.

(责任编辑 成素梅)