

对量子力学与非线性科学的整体感悟

龚小庆¹, 范文涛²

(1. 武汉大学 数学物理系, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院 武汉物理数学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 庄子《逍遥游》中鲲化鹏接着飞往天池的过程暗示着一个“混沌走向有序”的“无为”即“自组织”过程。量子力学中描述微观粒子状态的波函数在观察者的测量过程中发生信息“缩编”的过程也可视为同样一个过程。庄子《应帝王》中七窍成而混沌死的寓言似乎暗示着系统走向有序的过程应该是一个与外界适应的过程。“存在”只有在与观察者的非线性耦合结构中作为一个自组织过程的目标才能被理解和确定。“存在”即结构的“稳态”, 或者说, 客观实在等于本征态。

关键词: 非线性; 双缝实验; 薛定谔猫; 波函数; 本征态; 混沌

中图分类号: N94-02 **文献标识码:** A

一、从庄子的《逍遥游》说起

“北冥有鱼, 其名为鲲。鲲之大, 不知其几千里也。化而为鸟, 其名为鹏。鹏之背, 不知其几千里也; 怒而飞, 其翼若垂天之云。是鸟也, 海运则将徙于南冥。南冥者, 天池也。”(《庄子·逍遥游》)

文本的意义效应取决于解释模式。因此, 这段被千古传诵的话语便可以有“仁者见仁, 智者见智”的不同解释, 关键在于你选择什么样的解释模式。如果我们选择“原型性隐喻”的神话模式, 那么这一段话不过是在叙述层面上通过鱼化鸟的过程向我们展现了神话宇宙模式中的又一个创世母题。叶舒宪认为: “北冥在象征意义上等同于地底的冥界之水, 而南冥在庄子的本文中说明是‘天池’, 显系上界即天界的象征, 所以从北冥到南冥的水平运动也就是自下界到上界的垂直运动。鲲, ……当属水族动物无疑; 鹏乃飞行动物, 与鹰同类。水族动物化为飞行动物, 从黑暗的北极向光明的南极运行, 这正是‘道’的运动, 太极的运动。当然也是太一即太阳的运动模式, 因为太阳是能以其循环运动而贯通上中下、海陆空三界的死而复生的象征。”^[1]

某些学者从语义学的角度将“鲲”与“混沌”联系在了一起。^[2]“鲲”冲出“混沌”之水, 化为秩序的象征——“鹏”, 然后飞向代表光明的“天池”, 从这一过程中我们似乎可感悟到如下几组相关联的状态之间的演化: 鲲

→鹏, 阴→阳, 混沌→有序, 不确定→确定。现在的问题是, 这几组相关联的状态之间的演化是如何完成的呢? 或者说是通过什么样的机制来完成的呢?

老子的解答是: “致虚极, 守静笃。万物并作, 吾以观其复。”(《老子》第16章) “道常无为而无不为。”(《老子》第37章) 强调“无为”强调“循环”是中国道家神话思维的特征, 然而, 这种“圣人抱一为天下式”的整体性思维离开了分析思维的否定, 必然使其永远停留在思维的原始阶段, 虽然像普里高津这样的诺贝尔奖获得者们曾高度评价了老庄的思想(他们读到的实际上是已被人加工后的现代西语读本, 有种观点认为阅读‘Reading’即误读‘Mis-reading’, 我们对此暂且不论), 但这依然不能改变其原始的特征。西方的科学家们是在将还原论的分析方法发挥到了极致却又无法感悟万物整体演化的内在机制后才将目光投向了东方的整体性思维从而进一步发展成现代系统论的, 也就是说他们是在对原始整体性思维“否定之否定”后在更高的层次上建立起现代整体性思维模式的。那么, 他们从东方思维中悟到了什么呢?

普里高津说: “我相信我们已经走向一个新的综合, 一个新的归纳, 它将把强调实验及定量表述的西方传统和以‘自发的自组织世界’这一观点为中心的中国传统结合起来。”^[3]

于是, 我们发现, 关于上述几个状态之间的演化过程, 西方科学家们从中国的“无为”中悟到了“自组织”。

可是,“无为”也好,“自组织”也好,它们名异而实同,并不能直接等同于我们所说的演化的机制。那么,这种演化机制究竟是什么呢?

答案是——非线性。

二、双缝实验与薛定谔猫——“存在”是被感知的

(一) 双缝实验^[4]

从光源一粒一粒发射光子(现代实验条件能够做到),穿过平板上开裂的缝,使底片感光,形成图像。在平板上有一条缝或两条缝这两种情况下,底片形成的图像是不同的。在前一种情况下,图像(一些分离的点)表明光子显示出粒子的行为,因而我们说“光子是经由一条缝穿过平板的”;而在后一种情况下,图像又表明光子显示了波的行为(有干涉条纹),形象的说法是“光子同时经由两条缝穿过平板”。因此,便有了两种说法:“光子是粒子——光子经由一条缝穿过平板”,“光子是波——光子同时经由两条缝穿过平板”。前一种说法还可理解,后一种说法便有点费解了。但不管怎样,就像演员在不同的舞台中扮演不同的角色一样,光子在不同的实验条件下表现出不同的行为方式也多少还是能够让人理解的。

继续上述实验。用两个计数器代替底片,平板上仍是两条缝。光子经过平板后只能击中一个计数器,从读数的变化容易观察到被击中的是哪个计数器。光子击中计数器使其读数增加1,表明这是一种粒子的行为。接着,在计数器与平板之间设置一张底片,不过这张底片被裁制成“百叶帘”,能随意打开或关上。打开,则光子能自由穿过它而击中某个计数器,行为像粒子;若关上,则它又成一底片,被光子击中而成像,此时光子经两条缝过平板,行为像波。现在到了实验的关键点:设光子已经过了平板,则按传统的因果观点,它“过单缝”还是“过双缝”就是已经发生的事情,无可改变了。然而,果真如此吗?现在我们在光子过平板后做一个决定:打开或关上“百叶窗”。若打开,则光子经由一条缝穿过平板;若关上,则光子同时经由两条缝穿过平板。于是便出现了一个有趣的现象:先发生的事情(过单缝或过双缝)需由后发生的事情(打开或关上百叶帘)来决定——即“后因果果”。

这个例子表明,由于观察者的参与,量子现象,作为一种不可逆的放大过程的结果,是抗拒做因果分析的。确切的性质,要等到一个有意识的观察者参与之后才能确定。爱因斯坦认为,因果性范畴并不象康德所说的那样是植根于人类精神的本性之中的,它与人

类所有创造物一样是长期适应的产物。现在,当人类开拓出新的天地时,我们应作出什么样的适应呢?

(二) 薛定谔猫^[5,6]

量子力学的奠基人之一薛定谔以戏剧性的手法,给出了一个现在著名的猫思想实验。

一只猫关在一个钢盒内,盒中有下述极残忍的装置(必须保证此装置不受猫的干扰):在盖革计数器中有一小块辐射物质,它非常小,或许在1小时内只有一个原子衰变,在相同的几率下或许没有一个原子衰变。如果发生衰变,计数管便放电并通过继电器释放一锤,击碎一个小的氢氰酸瓶。如果人们使这整个系统自在1小时,那么人们会说,如果在此期间没有原子衰变,这猫就是活的,否则猫将被毒杀。

经验告诉我们,那只猫是非死即活的,两者必居其一。可是,按照量子力学的规则,盒内整个系统处于两种态的叠加之中,一态中有活猫,另一态中有死猫。两种态叠加所对应的解是既死又活的猫。但是,一个又活又死的猫意味着什么呢?只要我们不打开盒子,那么猫将永远处于一种悬而未决的死活组合状态之中,直到有人打开盒子才会发现,猫要么已死,要么还生气勃勃,将永远找不到一群死活相间的猫。为什么会出现这样的悖论呢?

首先,描述量子力学的理论是线性数学,其理论框架是由五条假设构成的。^[7]

假设1,微观体系的运动状态由相应的归一化波函数描述。波函数中既有反映定域性的参量,又有反映非定域性的波描述。

假设2,微观体系的运动状态波函数随时间变化的规律遵从薛定谔方程:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = \hat{H} \Psi(\vec{r}, t) \quad (1)$$

其中 $i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ 是能量算符, $\hat{H}$ 是哈密顿算符, $\Psi(\vec{r}, t)$ 是假设1中提到的波函数。(1)是一个线性方程,而线性方程的解具有叠加的性质,这正是造成前面猫不死不活的原因。

假设3,力学量由相应的线性厄密(Hermite)算符表示。如前面提到的能量算符哈密顿算符等均为线性厄密算符。研究这样的算符需要 Hilbert 空间(这是一个线性拓扑空间)的算子谱分解理论。

假设4,力学量算符之间有确定的对易关系。两个算符对易的充分必要条件是它们有组成完全系的共同本征函数。也就是说,两个对易的算符所对应的力学量可以同时有确定的值。由于坐标算符与动量算符不可对易,故它们不可能同时具有确定的值。

假设5,全同的多粒子体系的波函数对于任意一对粒子交换而言具有对称性;玻色子系的波函数是对称的,费米子系的波函数是反对称的。

量子力学的这些假设的提出是建立在实验事实基础之上的,其正确性也已经实验事实检验。

回到双缝实验,用 Ψ_1 表示粒子穿过上面狭缝到达底片的状态波函数——它表示一个可能的世界; Ψ_2 表示粒子穿过下面狭缝到达底片的状态波函数——它表示另一个可能的世界;再用 Ψ 表示粒子穿过两个狭缝到达底片的状态波函数——两个可能世界的混合世界,则由线性方程的叠加原理,存在复数 c_1, c_2 使得 $\Psi = c_1 \Psi_1 + c_2 \Psi_2$, 于是粒子在底片上某一点出现的几率密度为:

$$\begin{aligned} |\Psi|^2 &= |c_1 \Psi_1 + c_2 \Psi_2|^2 \\ &= |c_1 \Psi_1|^2 + |c_2 \Psi_2|^2 + \\ &\quad c_1^* c_2 \Psi_1^* \Psi_2 + c_1 c_2^* \Psi_1 \Psi_2^* \end{aligned} \quad (2)$$

上式右边第一、二项分别表示粒子穿过上、下狭缝出现在底片某点的几率密度,第三、四项是双缝干涉项。(2)式意味着:混合的世界并不是两个可能世界的简单叠加,而是二者难以捉摸的结合;每一个世界都干涉另一个世界,从而形成了衍射图样。

因此,当我们说光子或其他某种粒子是波时,指的并不是任何实体或物质构成的波,而是某种知识或信息的波——几率波。它告诉你在什么地方可能有粒子,粒子具有这样或那样的属性(如旋转的方向、能量的大小等)的可能性有多大。另外,干涉项的存在意味着量子几率波的概念中同时也包含了量子因素的固有的测不准性和不可预测性。因此,为了适应新事实和新经验,采纳与因果律不同甚至不相容的一种概率观点,也就是顺理成章的事了。

但仅仅如此并不够,线性曾经是秩序的代名词,线性的世界曾经是还原论者畅行无阻的世界。然而现在,线性世界的可叠加性却造成解的多样性和不确定性,甚至造成了不死不活猫的存在悖论。几率的观点一般只有在大量的实验中才能说明问题,比如说,假如我们残忍地将薛定谔猫的实验重复做多次,那么几率的观点将能使我们正确地预测活猫和死猫出现的次数接近相等。可不管做多少次这样的实验,出现一只不死不活的猫的次数将肯定是零。为什么量子系统的信息一旦进入观察者的视野里,量子几率波就被“缩编”成唯一的描述——死猫或活猫呢?

回到量子力学的基本假设3,既然表示力学量的算符都是厄密算符,那么在适当的条件下, Hilbert 空间谱分解理论证明了它的本征值所对应的本征函数组

成一个完全系,即如果设 λ_n 为力学量 $\hat{F}$ 的本征值,其相应的本征函数为 $\psi_n(\vec{r})$, 则体系的任一波函数 $\Psi(\vec{r})$ 可表示为:

$$\Psi(\vec{r}) = \sum_n c_n \psi_n(\vec{r}) \quad (3)$$

其中 c_n 为与 $\vec{r}$ 无关的常数。假设3的进一步延伸为:当体系处于(3)式所描述的状态时,测量力学量 $\hat{F}$ 所得的数值,必定是算符 $\hat{F}$ 的本征值之一,测得 λ_n 的几率是 $|c_n|^2$ 。

于是前面的问题现在转换为:

为什么测量力学量 $\hat{F}$ 所得的数值,必定是算符 $\hat{F}$ 的本征值之一?

假设的合理性虽然被实验所一再肯定,但我们这里需要的是一种解释,一种基于科学的认识论的解释。

量子几率波的不确定性一经测量就被“缩编”成确定的唯一的存在状态,这仿佛又使我们看到了一个类似于“鲲→鹏,阴→阳,混沌→有序,不确定→确定”的演化过程。

庄子在内篇第七篇《应帝王》的最后描述了这样一个故事:“南海之帝为倏,北海之帝为忽,中央之帝为混沌。倏与忽时相遇于混沌之地,混沌待之甚善。倏与忽谋报混沌之德,曰:‘人皆有七窍,以视听食息。此独无有,尝试凿之。’日凿一窍,七日而混沌死。”

七窍是人用以视听食息与外界联系的“仪器”,七窍成而混沌死似乎暗示着:走向有序的过程应该是一个向外界开放的过程,同时存在内在形式的确定化取决于观察者自身的内在形式的确定化。于是,“存在”是被感知的,或者说,“存在”只有在与观察者的整体耦合关系中才能被确定。恩斯特·卡西尔指出:“‘存在’只能在‘行动’中得以理解。”^[9] 他说的正是这个意思。

那么,“存在”与观察者之间是一种什么样的整体耦合关系呢?

答案依然是——非线性。冲破线性的窠臼,我们将发现另一个活生生的世界。

三、非线性世界——整体论的世界

拉普拉斯说:“我们应当把宇宙的现状看作它先前状态的结果以及它的后继状态的原因。假定在某一时刻,有一种智慧能够把握自然界所有的力以及组成自然界的一切事物的特定状况——这种智慧博大精深足以对所掌握的资料进行分析——那么,它就将宇宙间从最庞大的物体到最微小的原子的运动全都囊括于同样的公式之中,对于它来说,没有什么是不确定的,未

来,一如过去,都出现在它的面前。”^[4]

这便是著名的拉普拉斯决定论。在拉普拉斯的眼里没有什么是不能确定的。

然而,果然如此吗?

在前面量子力学的几条基本假设尤其是在假设4中可以看见至少在微观粒子的层次中便不具有拉普拉斯所说的确定性,而且当代非线性科学告诉我们,即使是描述宏观物体运动的牛顿动力学方程也有其内在的随机性。所谓“内在的随机性”是指,由确定性牛顿力学方程导出的解是“混沌”的。混沌是一种“确定的随机性”,“确定的”是指它是由内在原因(非线性机制)而不是外来的噪声或干扰所产生的,“随机性”是指其不可操作性(如不可预测性)。“混沌解”的特点是,它的长期细节不能由有限精度的初始条件,按拉普拉斯决定论的要求精确地“操作”出来,从而顺理成章地宣告了拉普拉斯“操作性”决定论的破产。

事实上,拉普拉斯决定论有一个前提,即承认存在一种独立于观察者的客观性。然而,不论是量子力学还是当代非线性科学都告诉我们这样一个道理:人对任何事物的认识和描述都和观察者有关。原则上不可以将客体从观察者中独立出来后再对客体进行一种和观察者无关的纯客观描述,即观察者的建构积极参与了认知过程。因此任何一种存在,只要它是具体的、确定的,那么有关它的规定性和描述必定依赖于观察者的认知结构以及观察者和被观察物的关系(如使用什么样的观察仪器)。由于这种关系中存在着非线性效应——内在的随机性,因此,观察者对被观察物的任何长期预测将都是徒劳的。

恩斯特·卡西尔指出:“存在的僵死概念似乎被抛入流动之中,被抛入一般的运动之中,存在的统一性只有作为这一运动的目标,而不是作为起点才可能想象。”^[9]拉普拉斯决定论所谓的纯客观性实际上是预设了上帝的存在,将存在作为“起点”而不是“运动的目标”,它与科学世界观强调的建构与演化的观点格格不入,其失败在所难免。

量子几率波的不确定性一经测量就被“缩编”成确定的唯一的存在状态——本征态,可以认为是宏观世界的观察者(包括仪器)与微观世界的量子系统所组成的整体的一种突现(Emergence)。所谓“突现”,是指一种自行组织起来的结构、模式、形态。它们所呈现的特性、行为、功能,不是系统的构成成分所固有的,而是组织的产物、组织的效应,是通过众多组分相互作用而在整体上突现(涌现)出来的,是由组分自发产生的,带有明显的自组织的特征。在量子力学中微观粒子本身是什么并没有多大的意义,正如前面所提到的问光子

到底是什么的问题一样,离开观察者的测量是毫无意义的。其存在状态只能由波函数来描述,它可以表示为完备本征函数族的线性叠加,而满足叠加原理的线性系统是无法产生整体突现性的,系统的突现性是系统组成部分之间、系统与系统之间非线性相互作用的产物,是典型的非线性效应。显然,只有在特定的测量过程中才表现出来的微观粒子本征态是一种整体的突现行为。这表明,宏观观察者与微观粒子之间的耦合系统是一个非线性系统,其观测的结果——量子的本征态实际上就是这个非线性系统的某个稳态。微观粒子本征态的多样性表明,它与观察者(包括观测仪器)所组成的耦合系统同样具有内稳态的多样性,而具有多个稳态解正是非线性系统特征之一。

微观粒子在一次观测过程中表现出什么样的本征态可以认为是微观粒子与观察者适应的结果。这里所谓的适应意指系统的组分之间彼此竞争与合作、互动与互应的过程。在适应的过程中,微观粒子的行为将遵循广义因果律。广义因果律强调因果性与随机性的有机结合,是因果律与几率统计原则的结合体。微观粒子与观察者的相互作用理论上应该是一个因果过程,因此微观粒子应该表现出什么样的本征态也应该是一个因果过程,但这都是以观测系统必须处于自身的内稳态为条件的。由于在观测过程中仪器干扰的不可控性,微观粒子实际上面对的是一个随机的环境。它们耦合而成的系统便随时面临着系统内部随机涨落的影响,这种影响对于宏观物体是可以忽略不计的,但对微观粒子的影响有时却非常的显著。微观粒子必须时时“调整”自己的行为以适应环境的改变,从而导致本征态的跃迁。进化论最著名的一个论点便是——适者生存,而适应者必定是稳定者。因此从这个意义上我们说:“客观实在等于本征态。”^[8]

为什么本征态就是稳态呢?

设结构 M 在时刻 t 的输入集为 $X_t = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 输出集为 $Y_t = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 。由于输出由输入决定,从而有:

$$Y_t = F_M(X_t) \quad (4)$$

F_M 表示从 X_t 到 Y_t 的非线性映射,是结构的功能函数。设 M 是一个自耦合反馈系统,则 Y_t 同时也是结构下一阶段输入集,即 $Y_t = X_{t+1}$ 。如果结构是稳定的,则结构演化的目标就是迭代方程(4)的稳态解。设稳态解为 S_0 ,则有:

$$F_M(S_0) = S_0 \quad (5)$$

即此时输入等于输出。如果 F_M 不是一般的非线性函数而是非线性算子时,方程(5)称为本征方程, S_0 称为

方程的本征值。

现在回到量子力学。由假设3中力学量由一个线性厄密算符 $\hat{F}$ 表示,这一点与经典力学有明显的差别。算符本身便隐含着运算。在观察系统与微观粒子的自耦合整体中,输入集 $\{\psi\}$ 为微观粒子的状态波函数,观察者(包括仪器)与微观状态的相互作用可以认为是一个对 $\{\psi\}$ 反复运算的力学量 $\hat{F}$ 。如果 $\hat{F}$ 的本征值为 λ ,相应的本征态为 ψ_λ ,则有:

$$\hat{F} \psi_\lambda = \lambda \psi_\lambda \quad (6)$$

即经过变换后, ψ_λ 变为 $\lambda \psi_\lambda$ 。波函数前多了一个常数因子,与一般系统的本征方程(5)并不完全一致。与方程(5)还有一点关键的不同点,就是在方程(6)中算符 $\hat{F}$ 是线性的。

如何在非线性的框架中来统一方程(5)与方程(6)呢?

前面曾提到,波函数描述的是一种几率波。根据Bom的解释,波函数在某一时刻、空间某点的强度(振幅绝对值的平方)与该时刻该点呈现的几率成正比。并且通过简单的分析可知,几率只取决于波函数在各点的相对强度,而不取决于强度的绝对大小,即 ψ_λ 与 $\lambda \psi_\lambda$ 描述粒子状态是同一状态,这是几率波区别于经典波的重要特性。于是方程(6)与方程(5)在“输入等于输出”这一点上获得了统一。正是基于此种理解,方程(6)便具有了非线性的意义。虽然没有观察者的参与下波函数 $\psi(\vec{r}, t)$ 随时间的演化方程是线性方程,但是对观察者测量和预测有意义的却是几率密度 $w(\vec{r}, t) = C |\psi(\vec{r}, t)|^2$,其中 C 是归一化常数。虽然 $\hat{F}$ 是线性算符,但描述状态统计性质的几率密度却是波函数的一个非线性函数。另外,我们还有描述几率密度随时间演化的如下非线性方程:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{i\hbar}{2\mu} \nabla \cdot (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*) \quad (7)$$

于是我们在观察者与微观粒子耦合整体的非线性演化机制上同样获得了方程(5)与方程(6)的统一。

四、结 语

列子《天瑞》:“浑沦者,言万物相浑沦而未相杂也。……一者,形变之始也。清轻者上为天,浊重者下为地,冲和气者为人;故天地含精,万物化生。”

一方面,非线性导致确定性方程的混沌解,从而将秩序分解为混沌(浑沦),这似乎是非线性破坏性的一面。然而,另一方面,“对普里高津来讲,非线性代表宇宙的创造性。通过非线性,他希望展示宇宙混沌的创造力。通过非线性和不可逆性,他意欲引导我们思索展现‘自然之再生魅力’的宇宙”^[5]。从这个角度看,非线性乃秩序之源。

“黄帝既悟,怡然自得。”(列子《黄帝》)

参 考 文 献:

- [1] 叶舒宪. 中国神话哲学[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 1992.
- [2] 叶舒宪. 庄子的文化解析——前古典与后现代的视界融合[M]. 武汉: 湖北人民出版社, 1997.
- [3] [比] 普里高津. 从存在到演化[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
- [4] 陈可根. 上帝怎样掷色子[M]. 成都: 四川人民出版社, 1987.
- [5] [美] J·布里格斯, F·D·皮特. 湍流——混沌理论与整体性科学导引[M]. 北京: 商务印书馆, 1998.
- [6] [英] 戴维斯, 布朗. 原子中的幽灵[M]. 长沙: 湖南人民出版社, 1992.
- [7] 张哲华, 刘莲君. 量子力学与原子物理学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997.
- [8] 金观涛. 我的哲学探索[M]. 上海: 上海人民出版社, 1988.
- [9] [德] 恩斯特·卡西尔. 语言与神话[M]. 北京: 三联书店, 1988.

(责任编辑 于华东)