

量子力学的模态解释*

贺天平 郭贵春

量子力学的“测量难题”是物理学家和科学哲学家长期争论的焦点之一。1972年，美国哲学家范·弗拉森(Von Fraassen)开创性地将模态逻辑的语义学分析方法移植到量子力学，提出“量子力学的模态解释”，试图消解微观世界的测量症结。这一解释给“测量难题”的解决提供了新的视角，也为物理学哲学的发展开辟了新的方向。该思想经过Kochen、Diecks、Vermmas、Healey、Clifton、Dickson、Bub、Bacciagaluppi等人的发展和完善，形成了一种很有影响力且最具有发展前景的量子力学解释理论。

模态解释仅仅有30年的发展历程，无论从物理学还是哲学的角度来讲，都是一种全新的理论。国外在该方面的研究已经形成文章百余篇、专著数本，并召开过一次模态解释国际会议。所以，积极把握这一最新的研究成果，发掘量子力学模态解释的全新思想，具有重要意义。

一、模态解释产生的背景及其发展

模态解释的产生源于消解量子力学“测量难题”的想法。最早的且系统的测量理论是冯·诺伊曼所创，他认为，量子系统在两种情况下遵循不同的方式演化：(1)在非测量过程中，态函数按照薛定谔方程决定性地演化；

(2)在测量过程中，态函数发生突变，即波包塌缩(the collapse of wave function)。“测量难题”的症结就出现在第二种演化方式上。考虑一个量子测量过程，设被测微观客体和测量仪器的初始波函数分别为整个演化过程可以表示为：这样，在每次测量中，微观客体总是由其初始关于本征矢的叠加态 Ψ_0 突变为其中某一个本征态 Ψ_n ，即 $\Psi_0(x) = \sum c_n \Psi_n(x)$ 突变为 Ψ_n 。

波包塌缩形象地刻画了测量前后系统状态不连续、非因果的变化，以至于使得“测量”成为微观世界独有的、难以理解的而又神秘的物理现象。

波包塌缩从提出之日起，就不断受到猛烈的抨击，最刻薄的挑战就是大家熟知的“薛定谔猫论”和“魏格纳朋友悖论”。1952年，美国著名物理学家玻姆提出隐变量理论，这是消除波包塌缩的最早尝试；其后又有埃弗雷特的多世界解释。除此之外，还有许多科学家也在不懈地努力并提出各自的观点。可惜的是，这些解释都不能很好地解决测量难题，总是在某一方面解释得更好的时候，在其它方面却显得更加薄弱。

1972年，范·弗拉森从一个全新的即模态解释的角度尝试消除波包塌缩。“模态解释 (Modal Interpretation)”一词，在产生之初仅仅指一个单一的解释，即范·弗拉森的解释。现在这个词涵盖了一大类的解释，用来指代分析量子力学结构(包括概念和数学)的方法。

80年代，比范·弗拉森持更强实在论观念的其他哲学家发现，范·弗拉森的方法能用来处理其他的哲学问题。这就促进了著名的KDH(Kochen-Diecks-Healey)理论的诞生，该理论已经将模态解释从哲学的思考提升到了物理学理论的高度，而且该理论日臻成熟。

90年代初期，模态解释的发展获得了更大的动力，它使这种解释面对更广泛的读者，且使它更容易被接受，一大批研究者开始在这个领域内工作。与此同时，科学家在回答关于这种解释描述世界的物理方法和理论问题上遇到了挑战。这就促使了许多结果的形成，例如描述特性的数学结构、这些特性的力学体系和相关性、模态解释描述测量的方法、一个人如何从哲学和物理学方面促动模态解释，等等。

90年代中期，有人发现模态解释越来越缺乏直接的物理动机。1995年，克林夫顿(Rob Clifton)发表《Kochen-Diecks模态解释的独立动机》，其后一系列相关的文章接踵而至。Bub、Goldstein等人围绕该问题提出了模态解释的新版本。

90年代后期，范·弗拉森量子力学解释理论的核心思想已由一大批物理学家和物理学哲学家发展成一个较为稳定的学派思想，其中由荷兰国家物理学会等研究机构于1996年6月在荷兰乌特勒支大学组织召开的首届模态解释国际会议可看作是第一个研究高潮。自1990年以来，模态解释学者们已相继在《物理学评论》(Physics Review)等权威物理杂志和《科学哲学》(Philosophy of Science)等权威科学哲学杂志上发表了百余篇相关论文，并有数本相关专著被收入“波士顿丛书(Boston Studies)”等著名学术论丛。在近年来出版的全面介绍量子力学基础研究或量子力学解释的主要著作中，一些物理学家也已开始将模态解释与正统解释、隐变量解释、多世界解释等主要量子测量解释相提并论。

模态解释已经发展为非常成熟的理论，成为量子力学解释的一个最好的方向。在这一解释中，物理学本质和哲学内涵相一致，这种一致性是多年来科学家和哲学家共同追求的。而且，它的理论框架确定性地描述了物理世界，是任何一种解释理论不曾完成的事情。

二、模态解释的思想内核

模态解释从量子力学的基本原理出发，分两步建构其基本框架以避免测量诘难。

第一步，区别微观系统的态的性质。模态解释从量子力学的根基人手，在量子力学的基本体系中严格区分了在测量中扮演不同角色的量子态。

(1)微观系统X在时刻t处于态S，称系统X有态S： $X \rightarrow 4St$ ；

(2)微观系统X的某一可观察量B在时刻t有值b： $X \rightarrow Bt=b$ 。前者描述的是系统x在时刻t的存在形态，它是客观实在的，无论测量与否，该属性都按照薛定谔方程决定性地演化，它强调系统本身如何发展与作用；后者描述的是系统x的某一可测量量在时刻t所预设的值，它强调系统的可测量量是否存在值和值是多少。前者被称为理论态(Theoretical State)，用Ts表示；后者被称为事件态(State of Affairs)，用SOA表示。由于发展的历史较短，二者的称谓还不统一，范·弗拉森将它们分别称作动力量子态(Dynamic State)和值态(Value State)；Dieks将它们分别称作数学态(Mathematical State)和物理态(Physical State)，此外还有许多说法。在各种模态解释的变体中，严格区分微观系统量子态的两种属性是建构模态解释所必需的，也是最基础的。

理论态和事件态相互区别又相互联系。首先，理论态是事件态的本体论基础。理论态为事件态提供了一个平台，理论态实实在在地刻画了微观系统的本质和结构演化。其次，事件态是架构微观系统与宏观主体之间的桥梁。它将微观系统少数的可测量的值揭露出来，使得理论态更加有价值，它是理论态的表现或一面镜子。再次，测量是一个相互作用，测量结果的预言属于理论态的任务，理论态的概念具有优先性，事件态的概念具有滞后性。

事件态又分两种。量子力学基本理论指出，量子力学的态是由一组本征态叠加而成的，每一种本征态的出现都是“可能的”，而每一个本征态都对应于一个确定的值，被称为“可能事件态(possible SOA)”；而测量的结果只能是该组本征态中任何一个本征态所对应的本征值，该本征态的出现是“一定的”，具有唯一性，被称为“实际事件态(actual SOA)”。经过测量，微观系统的态由多元“突变”到唯一，这一事实告诫了科学家理论与经验之间存在着—道鸿沟，科学家就用“波包塌缩”、“隐变量”、“多世界”等等来架起跨越这道鸿沟的桥梁，而模态解释利用模态逻辑的推理完成这项任务。

第二步，“测量”是从理论到经验的过渡，也是从可能事件态到实际事件态的过渡。“测量”过程是不可逆的、斩断相干性的、非定域性的，“这是一个深邃的人类尚未了解的未知过程”(张永德等，第26—27页)。这个过程是非连续性和随机的，它不能用经典逻辑、数理逻辑来进行推理，历史上的“波包塌缩”、“投影假设”、“隐变量”、“多世界”等等理论对该突变的解释也是勉强和蹩脚的。然而，模态逻辑在明确区分两种态的基础上，合理地引进了模态逻辑方法，很好地解决了这个难题。

根据量子力学理论，微观系统的量子态是由一系列本征态叠加而成。如果量子态正好处于其中的一个本征态，那么测量的结果肯定是一个稳定的值，即该本征态的本征值；如果量子态不处于其中的任何一个本征态，那么测量的结果是不稳定的，但是本征值出现的概率是确定的。从多种“可能”怎么就变成一种“实在”了呢？原来的量子理论对此是无法解释的，但是用模态逻辑来分析却是很自然的。我们举个例子来说明：

P1：量子态 Ψ 可能处于 Ψ_1 ；

P2：量子态 Ψ 必然处于 Ψ_1 ；

P3：量子态 Ψ 处于 Ψ_1 。

P1和P2是模态命题，四是非模态命题；更具体点说，P1是可能命题，P2是必然命题，而 P3是实然命题。三者之间存在一定的关系：P1=◇P3，P2=□P3。

根据模态六角图所揭示的命题之间的对当关系，运用如下推理形式：

有效式：□P→P；P→◇P；□P→◇P

非有效但满足式：◇P→P；P→□P则有：有效式P3→P1和P2→P1；非有效但满足式P1→P3。

通俗一点讲，逆着时间演变，当我们看到测量结果(实然命题)而“回溯”测量前理论所预言的多种可能(可能命题)时，整个分析是逻辑推演的必然结果。反过来，顺着时间演变，根据测量前理论所预言的多种可能(可能命题)，跟踪下一步测量结果(实然命题)，这是非有效的；但是，我们可以说，从某一种可能到某一个结果是可以满足的。所以，从“可能的”理论到“实然的”事实证明只可满足，而非永远有效，事实证明也就是如此。

概括地说，测量是一种模态演化。理论态的演化与测量无关，永远遵循薛定谔方程，而且是符合模态逻辑规则的。这样一来，模态解释就消解了冯·诺伊曼的解释规则和投影假设，并且预言了原来量子力学所预言的一切。在冯·诺伊曼解释中仅有一种态的两种变化，在模态解释中有相应的两种态的变化。模态解释中的第一种态(即理论态)的演化与冯·诺伊曼解释中的态的第一种演化完全相同，即按薛定谔方程决定性地演化；冯·诺伊曼解释中的态的第二种非决定性的非因果突变，在模态解释中是不需要的。我们从测量结果的仪器指针所显示的确定值，可运用模态关系回溯到理论态的可能值。理论态自身在整个测量进程中始终没有发生塌缩，模态解释以这种方式描述了所有时间内系统的性质，而无论是否作了一次测量。模态解释由此对量子测量作出了逻辑一致性的解释。

所以，可以这样定义模态解释(Vermmas, P. 26)：

一个理论的解释是模态解释，当且仅当：

(A)用一个或更多“可能事件态”解释一个系统的理论态Ts，人们从这些可能事件态描述“实际事件态”；

(B)若系统的理论态Ts不唯一地决定实际事件的态SOA(即如果Ts用两个或更多不同“可能事件态”来解释)，则该系统应有一个更精确的理论态Ts'可唯一地决定事件的真实态SOA。

量子力学模态解释存在许多变体，按照人物来划分有：范·弗拉森的模式解释，Kochen-Dieks-Dickson的模式解释，Bohm-Bub的模式解释，Clifton的模式解释，Bacciagaluppi-Hemmo的模式解释等；按照主题来划分有：事件模态解释(MI of Events)，概率模态解释(MI of Probability)，频率模态解释(MI of Frequency)等；按照方法来划分有：范·弗拉森的哥本哈根模态解释，双正交分解模态解释(the bi modal interpretation)，谱分解模态解释(the spectral modal interpretation)，基元式模态解释(the atomic modal interpretation)，恒定式模态解释(the fixed modal interpretation)等等。

三、模态解释的方法论意义

模态解释是一股新生的力量，“直接针对的是物理哲学家而不是物理学家，在这种意义上讲，模态解释是真正的哲学家对量子力学的理解”(Vermmas, p. ix)。所以从物理学哲学的角度来看，该解释所采用的方法具有非常重要的意义。

第一，引入模态逻辑的语义学分析方法，是对量子力学语言分析上的一次突破。

现代模态逻辑的创始人是美国的逻辑学家刘易斯(C. I. Lewis)。自1914年刘易斯提出严格蕴涵的命题演算以来，现代模态逻辑的发展已经历了三个阶段。第一阶段(19世纪末至20世纪30年代)，刘易斯等人提出了模态命题逻辑的种种理论根据。在第二阶段(20世纪30—40年代)中，卡尔纳普(R. Carnap)等人建立了模态谓词演算，在这一阶段模态逻辑也不断地受到批评，最著名的批评家就是奎因(W. V. O. Quine)。如果说前两个阶段是模态逻辑的语形发展阶段的话，第三阶段(从50年代起)则是确立模态逻辑的语义理论阶段，其中克里普克(S. Kripke)的可能世界语义理论较为流行。这种语义理论移植到量子力学，显示出模态逻辑不凡的解释力。

奎因曾认为，一个科学理论的整体结构除了狭义科学理论中的数学陈述、物理学陈述和经验陈述外，还应包括逻辑陈述与哲学陈述(即形上学陈述)。在整体结构中，不仅每个层次的陈述内部要有逻辑上的自洽，而且在不同层次的陈述之间也必须协调。以往任何量子力学理论都在这五个方面遇到诘难，而范·弗拉森综合了多人的理论精髓以满足这几点要求。

范·弗拉森坚持微观系统始终按薛定谔方程决定性地演化(无论是否作了测量)，遵循冯·诺伊曼的主要数学处理方法，以新的理论假设给予量子测量以一般物理相互作用的解释，满足科学理论整体结构的数学陈述和物理学陈述。同时，范·弗拉森恰当运用模态逻辑和量子逻辑的主要成果，弥补了哥本哈根解释中不确定关系物理诠释与互补性哲学解释之间从物理学陈述层次跳过逻辑陈述层次而直达形上学层次的不协调。(参见万小龙)最后，在语义学分析方法的基础上，充分挖掘量子力学的形而上学基础和形而上学陈述的契机，以完成科学理论整体结构的建构，并恢复了原有量子力学所预言的一切。

模态解释从逻辑分析找到突破口，又从逻辑上去弥补量子力学的不足。更值得注意的是，它能够将量子力学和逻辑学、语义学三者结合在一起，这是量子力学语言分析方法的一次重大突破。

第二，模态解释构建特殊的语境，为模态逻辑语义分析方法的应用提供了平台和坚实的基础。

现实生活中的一切现象和自然界中的万事万物时时刻刻处于一种状态，每一种状态都可以表达成一种模态命题，同时每一种模态又都处于一定的语境当中。因此，语境是普遍存在的，任何模态都概莫能外地以一定的语境为其条件。但是，语境在科学解释活动中所起的重要作用，依赖于语境的特有功能，而这些功能又主要取决于解释语境的宏观与微观结构。将模态逻辑的语义分析方法移植到量子力学之后，首先要在模态逻辑的语境下理解和解读量子力学，所以说，量子力学的模态逻辑语境为量子力学的语义分析提供了一个平台和基础。这是该语境建构的第一个层面。

模态解释中定义，从初态到终态变化的过程称为一个事件(affair)，事件所处的状态称为物理情态(situation)，一个完整的物理情态包括被测系统和环境两部分。这里的初态包括位于态W的量子系统和拥有确定特性In的环境(包括处于基态的、在测量相互作用之前的仪器，其读数指针位于。位置)，终态包括位于态W'的系统和拥有确定特性Out的环境(包括测量相互作用后的仪器，其读数指针位于1位置)。

所以，一个完整的测量过程可以这样来表示：

$In, W \rightarrow W'$ ，Out这里的In、Out正是初始语境和最终语境的体现，在这里模态解释特别突出地强调了测量过程中前后语境的地位。在这里模态解释的语境得到一次凸显，使得语境在模态解释的理论中具有本体论的地位。这是语境建构的第二个层面。事件发展的前后所处的状态是语境化的，而整个过程的发展是伴随语境转换的。从定义可以看出，在模态解释中，存在着“必然”到“实然”的语境转化。概言之，可能性具有概然性的含义，可能性的程度表示就是概率；必然性具有确定性的含义，但是含有“必然”的模态命题是一种推理，而非事实；含有“实然”的模态命题是事实的表达，表示真实发生。哥本哈根解释并没有对微观系统从耦合态到系统的测量结果作出正面说明，而量子力学模态解释正是运用了这种模态关系克服了以往解释在逻辑上的跳跃，完成了从“必然”的模态语境到“实然”的模态语境的转换，回答了测量过程中潜在趋势转化为现实事件的原因和理由。这样，语境就从测量前以理论态为核心的初始语境转换到以事件态为核心的最终语境。这是语境建构的第三个层面。然而，我们绝对不能认为这种语境转换如同多世界解释中不同“世界”间的跳跃。多世界解释将世界分成许多真实的世界分支，每一个分支均关联于这些可能结果之一。作为结果，非决定论仅是表象：实在并不是在可替代的诸世界中作选择，而是包含了它们的全部。为此埃弗雷特引入了一些很奇怪的特性，他用“相对态”思想来解释。虽然模态解释认为多世界解释是一个实在论的解释，但是它不符合解释的严格的形而上学标准。

总之，模态解释从语境建构、语境凸显、语境转换三个层面阐述理论，建立了量子力学分析方法的一个新的思路，具有重要的价值。

第三，巧妙地应用隐喻方法是模态解释的一种重要的语言分析方法。

模态解释是一种典型的非塌缩解释理论。从方法论的角度来讲，它成功的重要一点就在于更巧妙地运用了科学隐喻的分析方法。事实上，自从开普勒时代起，物理学的发展就逐渐被数学的形式化语言所支配，以保证物理洞察的精确性和可靠性。由于数学公式必须与可测量的对象相关联才能产生它的物理意义，作为一种描述语言，数学的形式体系不可避免地存在着自身的局限性。同时，数学化的语言形式与非形式化的概念结构需要提供物理意义的一致性，因此物理学对隐喻方法的引入就成为一种必然的选择。更重要的是，当物理学家们考察肉眼看不见的微观世界时，宏观世界的种种规则及原理不再适用，但是为了更好地理解，往往不得不从隐喻语言中寻求合适的描述表达法。正如海森堡所说：“当进入原子领域时，语言只能在诗学的，意义上被使用。量子力学为我们提供了事实的显著的例证，……尽管我们只能在图像和隐喻的意义上谈论它们。”(Radman, p. 53)

隐喻既是非常丰富的，又是非常困难的语言使用。从模态解释的思维方法和特征、定义来看，模态解释自始至终渗透着浓厚的科学隐喻分析的方法。首先，模态逻辑为隐喻分析提供了非常有力的概念工具。模态解释如同其他的解释理论一样，均在希尔伯特空间定义系统的量子力学描述，系统的物理量由自伴算符A或密度算符 ρ 给定，并没有假定存在一个由不同于密度算符表征的更精确的态。换句话说，模态解释以量子力学标准体系为理论框架，没有建构过多的变量。但是，为了更好地应用模态逻辑，科学家将微观系统所处的状态统称为情态，将从初态到终态的演化称为事件，用日常生活中的概念去理解深奥的量子力学精髓。这就提供了许多有用的概念分析工具。其次，模态解释为隐喻分析提供了很好的解析结构。从语义学角度来讲，隐喻是连接“可能世界”和“现实世界”的纽带(参见安军)。在我们测量之前，微观系统的量子态存在多种可能的状态，而且我们永远都不可能准确地知道，只能计算或测量出该量子态的不同存在状态的几率。在测量之后，量子态就由不可精确知道的“可能世界”跳跃到了我们的“现实世界”之中，我们得到一组测量结果，该结果告诉我们测量后量子态所处的状态。所以，模态解释理论结构本身就为隐喻分析提供了很好的解析空间。再次，模态解释的语境整体性为隐喻分析提供了很好的平台。隐喻是离不开语境而存在的，正是特定语境中语形构造、语义映射、语用选择的统一，决定了相关隐喻的生成及其本质意义，所以说，一个隐喻的有意义的实现是通过相关语境的选择性和规定性所保证的。然而，模态解释又是在模态语境中生成和发展的。既然隐喻离不开语境而存在，模态解释的思维方法是语境凸显和语境转换的本质体现，那么模态解释的隐喻思维必然伴随着语境的变换而转化。语境无形之中为隐喻分析奠定了基础。

概言之，“从本质上讲，隐喻的生成是语境的功能，隐喻的转化是语境的交换，隐喻的更迭是‘再语境化’的结果。”(郭贵春，第92页)英国科学哲学家玛丽·海西(Mary Hesse)的“一切语言都是隐喻性的”著名论点在量子力学模态解释中得到了更有力的体现。

模态解释中语义学的移植、语境分析方法的应用、隐喻的巧妙介入都是未来科学哲学发展的很好的方向。模态解释在30年的发展历程中，将哲学家和物理学家融为一体，将物理方法和哲学思维合流，这也是未来科学发展的一个途经。参考文献

安军，2003年：《隐喻的语境分析与科学解释》，硕士毕业论文。

郭贵春，2004年：《科学隐喻的方法论意义》，载《中国社会科学》第2期。

万小龙，2002年：《范·弗拉森的量子力学哲学》，博士毕业论文。

张永德等，2002年：《量子信息论——物理原理和某些进展》，华中师范大学出版社。

Radman, Zdravko, 1997, *Mataphors: Figures of Mind*, Kluwer Academic Publishers.

Vermmnas, P.E., 1999, *A Philosopher's Understanding of Quantum Mechanics: Possibilities and Impossibilities of Modal Interpretations of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press.

注解

* 本论文受国家社会科学基金研究项目“科学隐喻在科学解释中的方法和意义”和山西省教育厅基金项目“量子力学模态解释的哲学精髓”资助。

(作者单位：山西大学科学技术哲学研究中心)

责任编辑 朱葆伟

[回主页](#)

中国社会科学院哲学研究所 版权所有
地址：北京市建国门内大街5号哲学所 邮政编码：100732