量子非定域性的逆向因果解释

Retrocausality Explanations for Quantum Non-locality

栗钰杰 /LI Yujie　　高山 /GAO Shan

（山西大学科学技术哲学研究中心，山西太原，030006）
(Research Center for Philosophy of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi, 030006)

摘　要：因果关系是经典物理学的基础，但无法适用于目前的量子力学，尤其是量子纠缠引起的非定域性假设，成为量子力学的一个特有属性，暂时无法与狭义相对论相兼容。本文通过逆向因果理论，即未来对过去或现在会产生因果影响，认为其所构建的特殊的因果模型能为解决非定域性问题提供一个新的路径，并给出相关论证。

关键词：量子非定域性　逆向因果　EPR论证　贝尔定理

Abstract: Causality, as the foundations of physics, is applicable to classical physics. However, it does not be applicable in quantum theory, especially in the non-locality assumption resulting from quantum entanglement, which seems to be a unique property of quantum mechanics, and it's not consistent with special relativity. In this paper, a special causality model is constructed to solve the problem of non-locality through retrocausality theory and provide a fresh approch, which the future causally affects the past or present, and give the relevant argument.

Key Words: Quantum mechanics; Backward causation; EPR argument; Bell's Theorem

中图分类号：O413.1; N031　　**文献标识码：**A　　DOI: 10.15994/j.1000–0763.2024.08.002

引　　言

在量子力学中有诸多“诡异”的现象，完全颠覆了经典力学对世界的认知，以至于一度将作为经典物理学基础的因果关系，排除在理论之外，正如玻尔的见解：“量子力学需要最终放弃经典的因果关系”。[1]早期人们质疑量子力学不存在因果关系是由于海森堡的不确定性原理，由于测量问题引起的“有因无果”“有果无因”的问题。而在最近问题的争论则集中在非定域量子相关性违背贝尔不等式的问题上，尤其是量子力学在经验预测、实验现象上取得的成功，再次将经典的因果关系挤压在了理论边缘处。尽管在目前所构建的几种主流量子理论中在微观层面提供了一定程度的因果解释，但每一种解释中所提供的因果模型都包含了明显的非经典因果特征，甚至完全与经典物理学中我们所认识到的因果关系不同。而量子力学的逆向因果解释（retro-causal interpretations of quantum mechanics）作为一种非主流的量子力学解释，为我们提供了一个新的角度，它的可选择性是丰富的，虽然这可能使我们放弃了原因先于结果的假设前提，彻底违反了我们的因

基金项目：国家社科基金一般项目“量子模拟的方法论价值和认识论意义研究”（项目编号：22BZX021）。
收稿日期：2022年10月10日；**返修日期：**2024年3月14日
作者简介：栗钰杰（1996–）男，河南安阳人，山西大学科学技术哲学研究中心博士研究生，研究方向为物理学哲学。Email: liyujie199696@163.com
高　山（1971–）男，辽宁辽阳人，山西大学科学技术哲学研究中心教授，研究方向为物理学哲学。Email: gaoshan2017@sxu.edu.cn

果直觉，但它的优势是在某种程度上会缓和量子力学与狭义相对论不相容的问题，保留了经典力学中定域因果性的假设。我们将在下一节简要回顾EPR论证与贝尔定理，在第二节阐明逆向因果理论的主要思想并分析逆向因果理论对非定域性的解释，最后在第三节将对比主流量子理论的解释与逆向因果理论在量子非定域性问题上的区别，并论证逆向因果理论在解释非定域性问题上是最佳解释。

一、EPR论证与贝尔定理

在经典力学中我们曾以为是荒谬的事情，都出现在量子力学之中，爱因斯坦也因此一度反对量子力学，其中一个理由就是物理上的可观测量如粒子的位置和动量，本质上是不确定的，量子力学无法确定地预测位置和动量，这表明量子力学不是对实在的完整描述。爱因斯坦认为，这背后一定存在着潜在的真相，而这些真相最终会被更加完备的理论揭示出来。1935年爱因斯坦与波多尔斯基（B. Podolsky）、罗森（N. Rosen）合作试图通过一个严格的思想实验来证明这一观点，即对量子力学完备性提出质疑的EPR论证（Einstein-Podolsky-Rosen argument）。[2]EPR论证主要基于一个定义与一个假设：

物理实在元素的定义：一个系统的实在元素是在不需要以任何方式与系统有相互作用下，可以被预测且具有绝对确定性（至少在原则上）的量。通过该定义，实在元素就与系统所拥有的实际物理属性联系了起来。

定域性假设：系统的实在元素只能受到定域范围内相互作用的影响。定域范围是指服从狭义相对论的相互作用或者说系统过去光锥之外的事件不能影响该系统的实在元素。

在最初的EPR论证的思想实验中，涉及共同制备的双粒子系统且总动量为零，以动量守恒为基础指出，在对其中一个粒子的动量进行测量之后，我们能够不以任何方式与另一个粒子相互作用从而确定地预测出其动量，因此这对粒子符合上面对物理实在元素的定义。而进一步我们在理论上可以假设这对粒子有一个类空间隔，那么定域性假设就意味着对其中一个粒子的测量不会影响到另一个粒子的实在元素。因此，如果粒子的动量在测量之前就是实在元素，那么它在测量之后也一定是实在元素。根据EPR论证，动量应该是粒子的一个实在元素（相同的论证过程也可以适用于位置），然而根据量子力学的不确定性原理，粒子无法同时具有确定的位置和动量，如果量子力学是完备的，这就意味着违反了定域性原则，否则我们就必须违反相对论的定域因果关系原则，在这种情况下EPR论证得出结论，量子力学不能提供对所有实在元素的描述，所以量子力学一定是不完备的，应该保留相对论的定域因果关系原则。

EPR论证在后续的发展中被证明它的结论通常是不正确的。EPR论证表明两个类空分离事件之间存在着某种特殊的关联，在玻姆（D. Bohm）版本中（后简称EPR-B实验），通过观察双原子分子的分离，其总自旋角动量始终保持为零来展示EPR思想实验。[3]假设一对粒子从发射源向相反方向发射，其在z轴自旋测量情况为：

$$|\Psi\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}|u\rangle_1|d\rangle_2-|d\rangle_1|u\rangle_2$$

该式表示两个不同粒子，在飞出一段时间遇到测量自旋特性的仪器，经过测量会发现它们之间存在一种特殊的关联，且与空间距离无关。由于角动量是守恒的，而且自旋属于角动量的一种，当其中一个粒子在被测方向z轴上自旋为“up”，另一个粒子将在相同方向上有自旋为“down”，量子力学也预言了这种概率相关性。在经典力学下我们认为当两个粒子处于类空间隔时，它们中彼此的测量都处于在另一个测量的后向光锥之外，它们之间是相互无关的，即使有间接影响也是应该存在于后向光锥之中。这表明测量粒子自旋中的结果相关性，暗示了一种超距作用，即非定域性影响的存在。

EPR-B实验中测量结果的相关性在贝尔定理中得到了更充分的表述。贝尔定理表明任何被实验证实的量子力学预言都必须违反定域因

果性原则，这一原则是因为贝尔（J. S. Bell）所说的：“事件的直接原因（结果）就在附近，即使是间接原因（结果）也不会比光速快”。[4]我们用公式可以将贝尔的定域因果性原则表示如下：

$$P_{a,b}(A|B,\lambda)=P_a(A|\lambda)$$
$$P_{a,b}(B|A,\lambda)=P_a(B|\lambda) \quad (1)$$

可参照下图1理解，该公式表明A即测量结果概率只取决于它的测量设备a和隐变量λ，而设备b或其结果B的改变对A不会产生影响，反之亦然。贝尔定理证明了量子力学违背了公式（1），且所有要符合量子力学对实验预言的理论也都必须违背公式（1），所以贝尔定理对所有现在或未来的物理理论作出限制，它们必须要满足量子力学的预言。

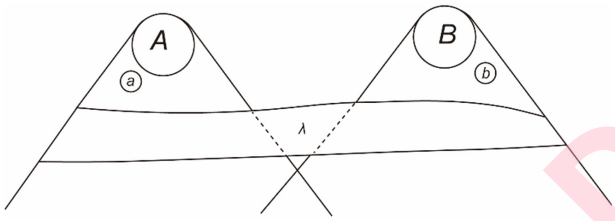

图1 贝尔实验示意图①

二、对贝尔非定域性的解释

首先在爱因斯坦看来，这种预测是由于量子理论的不完备而造成的，一个完备的物理理论可以不诉诸于任何非定域性的影响而解释这种类空间隔的测量结果之间的相关性，定域性假设不会被违背。在贝尔看来这里的“定域性”要求是指对超光速因果关系的禁止，也即认为是一种狭义相对论的限制，它排除了一个类空间隔的事件之间存在被认为是“真实”的影响，违反定域性就意味着违反了狭义相对论。因此，在这样一个实验中我们观察到了在两个类空分离的粒子，它们的测量结果之间具有一种相关性，而由于它违背了贝尔不等式，所以无法用一个因果关系去解释这种类空分离事物之间的相关性。然而为了保留因果解释，许多人因此诉求于赖欣巴哈（H. Reichenbach）的共因原则，如果两个不相关的事件之间有因果关系，那么他们之间的相关性可能是由于它们之间有一个共同的原因，这个共同原因屏蔽了相关性——这个共同原因处在两个事件后向光锥的重叠部分——以共同的原因为条件，相关事件之间概率是独立的，即它们的联合概率可分成它们的单一概率。

其次EPR-B实验所展示出的概率相关性违反了我们通常称之为的“因式可分解性（factorizability）”条件，即联合概率等于单个事件的概率乘积，它要求测量设备a和b独立于隐变量λ。贾勒特（J. P. Jarrett）将因式可分解性条件进一步分为参数独立（parameter independence）和结果独立（outcome independence）。[5]参数独立是定域因果原则成立后必然的结果，而结果独立则是由定域因果原则和共因原则得出的结果，那么违反因式可分解性就意味着我们要拒绝其中之一，所以因式可分解性的失效意味着两种可能：参数独立不成立，则是测量设备对隐变量λ会产生一些影响；结果独立不成立，隐变量λ以某种方式影响测量设备。

第一种选择会涉及违背定域因果原则。考虑以下两种情况，首先我们可以引入非相对论时空结构，承认存在一种超光速影响，这是最直接简单的一种选择，它将在物理的最基本层面上拒绝时空结构的洛伦兹不变性假设，这是玻姆理论以及在其基础上发展出的理论的立场，因为在玻姆理论中，粒子的速度不仅是它自身的位置函数，还是任何与它纠缠的粒子的位置函数，这意味玻姆理论的动力学需要一个与距离无关的同时性存在，而这是相对论和定域因果原则都不允许出现的。其次是通过接受存在逆向因果关系使得测量结果影响粒子早期的态，这需要假设从测量发生到制备粒子对的初始态之间有逆向因果关系，因为粒子对在制

①a代表左侧测量设备，A代表左侧的结果；b代表右侧测量设备，B代表右侧的结果，λ代表可能存在的隐变量即可能会影响被测量子系统的行为。

备源时的初始态分布取决于实际测量的结果，[6]德博勒加德（C. de Beauregard）首先提出这种方法来解决EPR论证中粒子之间的这种相关性，他认为如果我们允许因果影响可以在光锥内向过去与未来两个方向传递，并相应地调整关于定域性的概念，那么EPR论证将不再是问题，这一思想最后经克拉默（J. G. Cramer）发展成为量子力学交易诠释（Transactional Interpretation）的一部分。

第二种选择将涉及测量设备的自由选择问题，这种情况下EPR-B实验中成对粒子的态是与测量设备相关的，这是由于它们过去的因果关系中有一个共同原因，而这将会带来超决定论的问题，超决定论是比决定论要更强的一个条件①。

伍德（C. J. Wood）和斯皮肯斯（R. W. Spekkens）对此也进行了分析，他们认为既然量子力学的预测已经被诸多实验证实，我们放弃现有的一些理论假设来满足对量子力学的解释也是非常合理的。[7]然而，我们通常是不愿舍弃一些传统的理论假设，这可能是来自于我们的哲学偏见，但也不得不承认否认其中任意一个假设都会给我们带来其他的问题。相比之下，选择违背定域因果原则在形而上学上似乎更令人满意，它不需要在时空结构上寻找一个可能的共同原因，唯一的问题就是可能会出现超光速影响或逆向因果关系的存在。当然，我们也可以继续采用赖欣巴哈的共因原则，然而它所建立的因果解释方法使得粒子的属性与测量选择之间有一个共同原因，但正如伍德和斯皮肯斯指出，它的代价则是会使得忠实性原则（Faithfulness）、因果马尔可夫条件以及量子力学的预言是正确的这三个假设所形成的集合不一致。其次我们很难发现测量设备与粒子之间的这种联系的机制是什么，它必须要有一个巨大、潜在的因果秩序和物理机制来产生这种相关性，从而绕开贝尔定理，所以共因原则也是具有争议的，我们将在下文进行更详细的论述。

最后，定域性假设并非是贝尔定理的唯一假设，为了满足量子力学在预言上的成功，我们认为其违反了定域性假设，非定域性因果关系成为量子力学的基本特征，但我们会发现其面临诸多问题，尤其是与相对论的冲突，而在量子力学的逆向因果理论中它假设违背的并非是定域性假设而是贝尔的独立性假设，以此来挽救测量结果相关性的定域性因果解释。逆向因果理论假设测量结果是系统在测量前完整态的原因，系统的初始状态不仅受到其后向光锥中事件的影响，而且受到未来对系统进行测量的影响，克拉默的交易诠释是这一思想最完善的理论。交易诠释是受惠勒（J. A. Wheeler）和费曼（R. P. Feynman）吸收体理论启发对正统量子力学的逆向因果解释，由“发射体”（emitters）和“吸收体”（absorber）之间进行的“交易”（transaction）构成了量子力学基本相互作用的因果机制。通常薛定谔方程 ψ 代表供给波（offer wave）朝正向时间行进和其复共轭薛定谔方程 ψ^* 代表确认波（confirmation wave）朝后向时间行进，发射体发出供给波使其与吸收体相互作用进而激发出相应的确认波，克拉默将这种发射体与吸收体之间这种相互作用描述为在完成交易之前会循环重复发生。[8]

如图2，交易诠释展示出了逆向因果模型下的EPR-B实验。通常在标准量子力学解释中，波在粒子源处发射向测量设备行进，在测量设备中波会随机坍缩到自旋向上或向下的一个本征态中，从而在探测屏上被检测到。但在逆向因果模型下，从粒子源处发出的供给波并不会使得粒子坍缩到某一确定的本征态，而是激发吸收体发出与供给波振幅相同但时间方向向后行进的确认波从测量设备返回到粒子源处，从本质上讲是回溯了最初“供给波”的路径（需要注意的是图中箭头表示为因果方向而非时间方向），也正是“确认波”到达粒子源而完成交易进而导致了坍缩事件的发生，“供给”与“确认”实际上是随机选择的，概率由返回粒子源处的确认波振幅的平方给出。在此EPR-B实验中，每次测量结果的概率是由粒子源处完

①超决定论要求测量设备的选择将取决于过去某个时间的条件，但本文将不展开详细讨论。

成交易的完成态（complete pair-state）决定的，而完成态是受测量仪器的选择或测量结果影响的。这种逆向因果的模型不需要违反定域性假设来解释EPR-B实验所表现出的相关性，因为粒子初始态的性质受到了测量设备返回的波的影响，因此可以反映它们在测量上的表现。

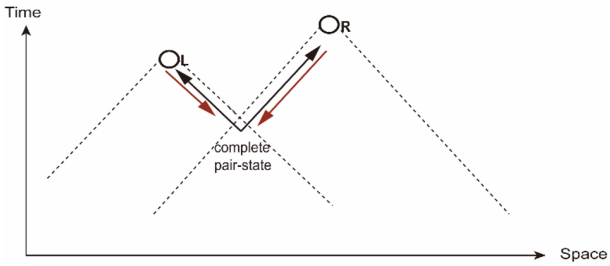

图2 定域逆向因果解释下EPR-B实验的因果影响时空示意图①

显然，在逆向因果解释中通过假设存在一种上述的逆向因果影响，使得量子力学避免了主流解释中所遇到的非定域性问题，从而为反驳量子力学与相对论不一致提供了一种新的可能。

三、非定域性的量子力学主流解释与逆向因果理论

关于EPR-B实验所证实的量子系统之间所存在的特殊关联否定的是贝尔定理中的定域性假设，一种观点认为定域性假设并非是贝尔不等式成立的唯一条件，可以从两个独立的假设即可离分性假设（separability）和定域作用假设推出贝尔不等式。

可离分性假设：每个系统都有一个单独的态来决定其定性的内在属性，而任何复合系统的态完全由其子系统的态来决定。

定域作用假设：是指只有以小于光速的速度传播物理效应才能改变彼此分离的客体的实在状态。

因此对于实验所违反的条件可以有两种情况。第一，实验所否定的是可离分性假设，量子力学的非定域性是指非可离分性，而不是指具有非定域性的相互作用即超距作用，对于该问题所提出的解决方法是诉诸于赖欣巴哈的共因原则。第二，我们认为实验所违背的是定域作用假设，认为类空分离的两个事件之间存在一种超距作用，存有超光速的因果影响。后者对于我们来说似乎是更容易接受的，因为在量子力学理论中因果关系本身就是一个灵活多变的概念，尽管它与狭义相对论产生了矛盾，但矛盾归矛盾，即使它是20世纪物理学两大基础理论之一，如果它与量子力学的解释不一致，那就有理由认为狭义相对论是不合理的，是需要被质疑。特别是在主流量子力学解释中，玻姆理论的动力学是决定论以及非定域性的，粒子系统总是有确定的位置即隐变量，它们在特定时间的位置以及波函数共同决定了它们在未来任何时间的测量结果。而GRW理论则是将自发坍缩的机制放入波函数的动力学演化规律中，因此它本身具有一种随机性，尽管可以重现EPR-B实验中的量子概率，但确实违反定域性假设。因此它们都对量子现象提供了一定的因果解释，尤其是粒子的轨迹与波包，但对EPR-B实验中所出现的量子相关性却都肯定了非定域因果关系的存在从而与狭义相对论不相容。

那么，如果我们想保留相对论的定域因果关系，似乎多世界理论能够提供这种可能，多世界理论中微观物理的因果关系有两个明显的特征：用波来代替粒子的轨迹以及在解释中不可避免地要加入“观察者”所在的分支位置。首先，多世界理论排除了波函数动力学中的坍缩假设，波函数始终通过薛定谔方程演化，因此它本身是完全定域性的。再者，多世界理论并不认为每次测量都只有一种确定结果，所有的可能结果都是真实存在于不同的世界之中，从而利用测量结果不唯一来规避贝尔对非定域性的证明。尽管多世界理论对我们观察到的事物做出了因果的定域性解释，但这将又带来另一个问题，每次测量并不只有一个确定的结果，而测量结果的唯一性是贝尔定理的另一个潜在假设②。

①图中箭头表示为因果方向而非时间方向。
②拒绝每次测量只得到单一结果是多世界理论以及所有拒绝测量假设的量子力学解释所选择的方法。

如果转而选择实验违反的是可离分性假设，则量子力学的主流解释是不适用的。EPR-B实验的相关性的共因原则解释是基于某种整体性或不可离分性，当共同原因在实验的一侧产生结果时，必须考虑到另一侧发生的事情，而这种共同原因的整体性是非常奇怪的。尽管如此，玻姆理论对该问题提供了一个非常有趣但却并不完善的理论模型，即萨瑟兰（R. I. Sutherland）在玻姆力学的基础上进行修正并提出的因果对称的玻姆模型，它是对量子力学的定域、决定论的逆向因果解释，此理论为EPR-B实验提供了一个决定论的定域隐变量模型，这对赖欣巴哈的共因原则提供了新的可能，在这个模型中它的共同原因是粒子源处的完成态屏蔽了测量结果之间的关联，其中的任何事件的原因都限制于其前向或后向光锥之内。[9] 除此之外，因果对称的玻姆模型在本体论上有明显的优势，位置是其唯一的基本属性，而其他属性则是互文性的（contextual）①，而这种特征将减少我们无意之中将自己的认识论观点构建为基础本体论的风险。其次，另一个优点是概率由初始条件的分布所决定，和经典统计力学一样。

第二种选择是将非定域性或超距作用视为量子力学的本质特征而被接受的，当量子力学接受非定域性影响将必然与相对论产生矛盾，而通过假设逆向因果关系则可以使得量子力学规避此类问题，不仅可以缓解量子力学与狭义相对论的冲突，而且也可保留爱因斯坦的定域性原则。虽然逆向因果理论似乎比起共因原则来更不可信，但一方面，在微观物理学中的逆向因果关系可以通过潜在的时间对称定律而发生，另一方面，依赖一个未来的原因并不需要一个强大的物理机制即未来的粒子必须得与任何一个对其进行测量的设备有相互作用。显然，对逆向因果的讨论会将我们带入对时间哲学的思考中，特别是“块状宇宙”（block universe）理论是与逆向因果关系的概念相一致的，未来的事件是与现在的事件一样真实、确定的，因此未来的事件可以作为原因。对此的争论并非是论文的重点，笔者只是表明对于逆向因果关系而言，它在概念上是连贯的，这样的概念与我们对时间和因果关系的直觉是相吻合的，因为在近代历史中，科学总是发现世界并不完全是如人类常识所描绘的那样。

结　语

总而言之，逆向因果理论在对量子力学非定域性解释上相较于主流量子理论解释存在一定的优势，但依然要谨慎对待，除非有一个无论在实验和理论上都非常完善的逆向因果理论摆在面前。就目前逆向因果理论而言自身也面临许多挑战。首先逆向因果理论相较主流解释不具有吸引力，因为就其概念而言似乎只是一种形而上学的假象，我们无法在真实物理世界中找到一个实验证据表明逆向因果是一种真实现象；第二，逆向因果的存在可能使得科学方法论复杂化，实验科学对各种相关因素的控制是非常重要的，而逆向因果的存在会限制这种可控性；第三，逆向因果会导致因果悖论的产生，即不一致的闭合因果循环，而这种循环将使得测量结果没有一个合理的因果解释，但所有关于因果循环的不一致或不可能论证都是基于有争议的前提的，因此也不能以因果悖论为由而排除逆向因果关系的可能性。[10]

目前，就交易诠释与因果对称的玻姆模型之外，还有多种模型致力于发展这一理论。阿哈罗诺夫（Y. Aharonov）提出一种具有两个波函数的理论：标准波函数在时间上向前演化，加上一个新的波函数在时间上向后演化；[11] 普莱斯（H. Price）提出的一种非波函数的离散本体论，其中量子粒子具有两套属性，一个被过去的相互作用约束，另一个被其未来的相互作用约束。[12] 可以看出逆向因果理论的选择是多样的，它成功与否现在评论还为时尚早，至少它已经为量子力学的解释和非定域性引起的因果性问题上提供了新的哲学思考与方向。

①即其余属性的测量不能只依赖于单独的测量或观察，还依赖于对位置的测量。

［参 考 文 献］

［1］Bohr, N. 'Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?'［J］. *Physical Review*, 1935, 48(8): 696–702.

［2］Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. 'Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? '［J］. *Physical Review*, 1935, 47(10): 777–780.

［3］Bohm, D. *Quantum Theory*［M］. New York: Dover, 1989.

［4］Bell, J. S. 'On the Einstein Podolsky Rosen Paradox'［J］. *Physics Physique Fizika*, 1964, 1(3): 195–200.

［5］Jarrett, J. P. 'On the Physical Significance of the Locality Conditions in the Bell Arguments'［J］. *Noûs*, 1984, 18(4): 569–589.

［6］Price, H. *Time's Arrow & Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*［M］. Oxford: Oxford University Press, USA, 1996.

［7］Wood, C. J., Spekkens, R. 'The Lesson of Causal Discovery Algorithms for Quantum Correlations: Causal Explanations of Bell-Inequality Violations Require Fine-Tuning'［J］. *New Journal of Physics*, 2015, 17(3): 033002.

［8］Cramer, J. 'The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics'［J］. *Reviews of Modern Physics*, 1986, 58(3): 647–687.

［9］Sutherland, R. I. 'Causally Symmetric Bohm Model'［J］. *Studies in History & Philosophy of Science Part B Studies in History & Philosophy of Modern Physics*, 2008, 39(4): 782–805.

［10］Berkovitz, J. *On Explanation in Retro-Causal Interpretations of Quantum Mechanics*［M］. Dordrecht: Springer, 2010, 115–155.

［11］Aharonov, Y., Rohrlich, D. 'Towards a Two Vector Formulation of Quantum Mechanics'［A］, Anandan, J. S. (Ed.) *Quantum Coherence*［C］, Singapore: World Scientific, 1990, 221–231.

［12］Price, H. 'Does Time-Symmetry Imply Retrocausality? How the Quantum World Says "Maybe"?'［J］. *Studies in History & Philosophy of Modern Physics*, 2012, 43(2): 75–83.

［责任编辑　王巍　谭笑］