

论 EPR 实验中的因果性——以 Everett 诠释为例

摘要

本文指出在 EPR 实验中，两侧不存在因果联系，如果某个因果模型想要符合共因原则，那么就会导致超光速的信息传播。即便是把非局域隐变量作为共同因子，也不能说明两边的测量结果可以相互影响，它们只是相互有关联，但不是对应的因果关系。

EPR 实验中的“统计相关性”不具有可操控的效果，因为任意一边会测出什么结果都是完全随机的。实验员无法通过操控仪器去控制让另一边出现他想要传递的结果，两位实验员只能在事后比对时才会发现彼此的数据呈现关联性，他们也无法利用这种关联性来传递信息，否则就会违反不可通信定理。

本文画出因果模型图来分析 EPR 实验，并采用 Everett 诠释和量子线路图两种观点来论证。说明 EPR 实验中的因果悖论其实是由于错误地理解哥本哈根诠释中的“测量”和“塌缩”所导致，如果采用没有“塌缩”概念的 Everett 诠释，就可以避免在解释 EPR 实验时出现因果悖论。

在 Everett 诠释中，对一个粒子进行“测量”的物理意涵就是将该粒子与测量仪器纠缠在一起，本地粒子被测量时只会与本地仪器纠缠，所以不存在任何非局域作用，某一边粒子的状态不会因为另一边粒子被测量而发生任何变化。不论左右两边是谁先测量都不会相互影响，不存在先测量的结果通过超光速作用去影响后测量的结果，也不会出现推翻因果顺序的悖论。

关键词：EPR 实验 Everett 诠释 量子力学 因果性 量子线路

前言

爱因斯坦认为：“相信有个独立于感知主体的外在世界是所有自然科学的基础。”^①直到 20 世纪以前，科学家们都认为这个外在世界有一些实质的状态等待人们去发掘，而科学的目的则是完善那些告诉人们世界如何组成和演化的知识。尽管科学的方法需要观察和测量来达到此目的，但我们相信这些被描述的物理“实在”是独立于操作手段而存在的。爱因斯坦还说：“物理学就是在尝试从概念上理解现实，且它独立于被观察的事物。”^②

^① Einstein A. Maxwell's influence on the development of the conception of physical reality[J]. James Clerk Maxwell: A Commemoration, 1931, 1831: 66-74.

^② Schilpp, P. A. Albert Einstein: Philosopher-Scientist[M]. Evanston: Library of Living Philosophers, 1949. p. 81.

爱因斯坦将这些想法总结为“局域实在论”，他在1935年发表《能认为量子力学对物理实在的描述是完全的吗？》^①中描述了此概念，他设计出一个思想实验，本文中称为“EPR实验”。借着检验两个量子纠缠粒子所呈现出的关联性的物理行为，EPR实验凸显出局域实在论与量子力学完备性之间的矛盾，因此，这些论述也常常被称为“EPR悖论”，以设计一个思想实验悖论的形式针对量子力学的哥本哈根诠释提出重要批评。

在经典力学的框架中，随机事件都不是真正的随机，如果你有足够的信息，就可以精确推导出结果。例如掷骰子的机率性是从哪里来的？因为骰子会和桌面进行很多次复杂的碰撞，而普通人对这些碰撞完全不了解，无法预测结果，只能笼统地预测各个面都有相同的机率朝上。假设仔细研究骰子和桌面各自是由什么材料做的、材料的弹性等各种因素，知道骰子以某个角度和桌面碰撞以后会如何被弹起来，在空中如何运动等。基于这些知识，我们就可以准确预言骰子在停下来后会哪个面朝上。只要拥有骰子掷出瞬间的位置、速度、转速、旋转的方向以及骰子各个面的指向后，掷骰子就不再是一个不确定事件，无需用机率来描述。如果考虑了这些复杂因素，就可以放弃机率理论，准确预言骰子的哪个面会朝上，对于骰子的机率理论来说这些因素就是“隐藏的”变量。爱因斯坦认为量子力学所呈现出的机率性也是由于我们对量子态不够了解所导致，通过这些隐变量人们就可以摆脱机率进而准确预言量子测量结果。

对于EPR悖论，哲学家们展开了许多争论。Hans Reichenbach认为：“因果原则绝不能同量子物理相容。”^② Judea Pearl指出：“‘因果关系’这个词在量子理论中并不是必不可少的，量子层级的因果关系遵循其自身的规则和直觉。”^③ Olivier Costa de Beauregard提出，EPR实验可以用这样一种因果模型来解释：从对一个粒子的测量开始，因果影响在时间上逆向传播，直到早先两个粒子直接相互作用的情况，因果关系通过时间倒流传播去影响另一个粒子的测量结果。^④

Richard Healey说：“关于EPR实验是否在这些测量结果之间建立了因果联系，哲学家们还没有达成共识。[.....]而物理学家们通常也不愿意接受类空事件之间存在因果联系，包括EPR实验中的测量结果。”^⑤ Brian Skyrms指出：“我们必须说在EPR实验中，‘左边测出自旋向下’和‘右边测出自旋向上’这两个测量结果是互为因果的，这就形成了一个相当奇怪的封闭因果链，由两个类空间隔的分离事件所组成。‘左边测出自旋向下’是‘右边测出自旋向上’的充分必要条件，并且在统计上呈正相关。”^⑥

^① Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?[J]. *Physical review*, 1935, 47(10): 777.

^② 汉斯·赖欣巴哈. 量子力学的哲学基础[M]. 候德彭译, 北京: 商务出版社, 2018. p. 12.

^③ Pearl J. *Causality*[M]. Cambridge University Press, 2009. p. 257.

^④ Costa de Beauregard O. Two lectures on the direction of time[J]. *Synthese*, 1977, 35(2): 129–154.

^⑤ Beebe H, Hitchcock C, Menzies P. *The Oxford Handbook of Causation*[M]. Oxford University Press, 2009. pp. 681-682.

^⑥ Skyrms B. EPR: Lessons for metaphysics[J]. *Midwest Studies in Philosophy*, 1984, 9(1): 245-255.

Bas van Fraassen 从逻辑上论证，EPR 关联不符合任何因果律模型，其理由是：任何试图描述 EPR 关联的因果律模型实际上都必须是一个决定论模型，而任何这样的决定论模型都必定违反贝尔不等式。^{①②} Arthur Fine 认为，EPR 实验的两翼之间不可能存在任何超光速影响，并且在 EPR 实验中，类空分离的两翼之间的如果存在任何因果联系都会与量子力学的基础相矛盾。^③ Michael Redhead 试图证明量子力学和狭义相对论可以和平共处，他指出根据只有类时相关事件才能建立因果联系的假设，在 EPR 实验的结果事件之间无法建立直接的因果关系。^④

本文将分析 EPR 实验中所可能蕴含的因果关系，并反驳 Costa de Beaugregard 的观点，EPR 实验不需要采用时间倒流来解释。也反驳 Brian Skyrms 的观点，相反两翼上的纠缠粒子对不可能发生因果联系，这意味着任何一种局域隐变量理论都不可能适用于 EPR 实验，而且根据狭义相对论^⑤，超光速的因果关系在物理学中也是无效的。

Huw Price 提到：“人们普遍认为，EPR 关联性不允许以快于光的速度发出信号，但在贝尔对之间是否存在因果关联的影响，这个问题就不是那么简单的了。无论影响的性质如何，人们关注的部分问题似乎是狭义相对论已经表明，从某个惯性参照系的角度来看，任何类空（即超光速）的影响都会导致一种逆向因果性。因此对于 EPR 实验的解读带来了巨大的问题，包括因果关系的悖论等等。”^⑥

本文指出，宣称 EPR 实验推翻了因果性是不正确的，EPR 实验只是推翻了局域实在性，而并没有推翻因果性。而且，虽然在量子力学中，进行测量操作所导致的结果是不确定的，但是量子态的演化（薛定谔方程）仍然是确定的。^⑦

张夏硕和 Nancy Cartwright 提出一种观点，他们认为可以对 EPR 实验中所

^① Van Fraassen B C. The Charybdis of Realism: Epistemological implications of Bell's inequality[J]. *Synthese*, 1982, 52(1): 25-38.

^② Van Fraassen B C. *Quantum mechanics: An empiricist view*[M]. Oxford University Press, 1991. p. 94.

^③ Redhead M, La Rivière P. The relativistic EPR argument[M]//Potentiality, Entanglement and Passion-at-a-Distance: Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony Volume Two. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997: 207-215.

^④ Fine A. Do correlations need to be explained?[M]//In James T. Cushing & Ernan McMullin (eds.), *Philosophical Consequences of Quantum Theory*. University of Notre Dame Press, 1989: 175-194.

^⑤ 如果不知道速度存在极限的话，超距作用也不会违反因果律，例如牛顿虽然觉得万有引力这种不需要介质传递力量且能对物体隔空瞬间作用的现象很奇怪，但他也提不出矛盾之处，因为在那个时代并没有光锥这种概念。Newton I. *Newton: philosophical writings*[M]. Cambridge University Press, 2014. p. 102.

^⑥ Price, H. (1997). *Time's arrow and Archimedes' point: New directions for the physics of time*. Oxford University Press. pp. 247-248.

^⑦ 冯·诺伊曼 (John von Neumann) 指出在量子力学中有两种截然不同的量子态演化方式：(1) 波函数塌缩；(2) 量子态按照薛定谔方程进行的动力学演化。前者是不连续非么正的；后者是连续且么正的。这两种量子态演化的不同源于系统的差异：进行么正演化的系统是孤立的量子系统，即量子系统与外界没有任何能量和物质交换；而发生波函数塌缩的量子系统和测量系统有相互作用 (Von Neumann J. *Mathematical foundations of quantum mechanics*[M]. Princeton university press, 2018. p.230)。

揭示的超距关联给出一种因果解释。他们还认为狭义相对论并不禁止 EPR 实验中存在超光速传播的类空因果性。他们为 EPR 实验中的超光速相关性提出了一个因果模型，在他们的模型中，因果关系通过两翼之间的直接传播而得以保留。因为如果改变其中一边的测量仪器的设置就会影响另一边测量结果的概率，于是在 EPR 实验中存在因果联系，如果不是对电子测量的结果真的影响了对正电子的测量结果，我们便无法解释两组数据的相关性。^① Iain Martel 指出，只要我们允许把非局域隐变量作为共同因子，就可以设计出一个让 EPR 实验满足因果马尔可夫条件的共同原因模型。^②

然而 Wesley Charles Salmon 指出，所有诉诸采用“隐变量理论”来解释 EPR 实验的尝试都遇到了严重的困难，并且我坚信找到令人满意的“隐变量理论”来解释 EPR 实验的希望是渺茫的。^③ van Fraassen 也认为 EPR 实验的远距同时关联违反了 Reichenbach 共因原则。^④

本文反驳对 EPR 实验中所揭示的超距关联给出一种因果联系，EPR 实验的结果类似于掷共享同步硬币，有一种特殊的硬币能使得第二个掷硬币的人看到的总是与第一个人的相反，但如果不进行经典交流（例如藉由打电话通知），两个人都无法知道自己是第一个还是第二个掷硬币的人。另外，因果关系应该满足解释条件：原因可以解释结果。我们不能说在 EPR 实验左边和右边的测量结果可以相互解释，它们只是相互有关联，但并不是对应的因果关系。

本文支持 Lev Vaidman 的观点，我们应该从贝尔不等式中学到的教训不是量子力学需要某种超光速远距作用，而是它让我们相信平行世界的存在。^⑤ 本文会说明 EPR 实验的因果悖论源自于对波函数塌缩的错误理解，而如果采用 Everett 诠释，测量的本质是量子纠缠，“测量过程”是一个连续的么正演化

^① Chang H, Cartwright N. Causality and realism in the EPR experiment[J]. Erkenntnis, 1993, 38(2): 169-190.

^② Martel I. The Principle of the Common Cause, the Causal Markov Condition, and Quantum Mechanics[J]. Philosophy of Science, 2008: 242-261.

^③ Salmon W C. Scientific explanation and the causal structure of the world[M]. Princeton University Press, 1984. p. 254.

^④ Van Fraassen 的证明如下：

给定相互作用的合成态(A+B)，相应的可观察量的值为 c，之后该合成系统分离成遥远的子系统 A 和 B。

Alice 测量子系统 A，测得可观察量的可能值为{ai}，同理，Bob 测得的可能值为{bi}， $i=1, \dots, n$ ，n 为量子系统的自由度。

两位实验员测量出任何一个态的机率都是 $1/n$ ：

$$P(a_j/c) = 1/n, \quad P(b_j/c) = 1/n$$

又因为 a_j 和 b_j 是相互纠缠的，所以当 Alice 测出 a_j 时 Bob 必同时测出 b_j ，于是有：

$$P(a_j \& b_j/c) = P(a_j/c) = P(b_j/c) = 1/n$$

而这与 Reichenbach 共因原则相违背，因为如果 ACB 形成连结叉(conjunctive fork)，事件 C 为事件 A 与事件 B 的共因，则这三个事件的机率将满足：

$$P(a_j \& b_j/c) = P(a_j/c) * P(b_j/c) = 1/n^2$$

只有当 $n=1$ 时两式才会相等，也就是决定论的情形。

Van Fraassen B C. The scientific image[M]. Oxford University Press, 1980. p. 30.

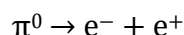
^⑤ Bell M, Gao S. Quantum Nonlocality and Reality: 50 Years of Bell's Theorem[M]. Cambridge University Press, 2016. pp. 195 - 203

(可逆), 舍弃了在哥本哈根诠释中, 测量将会导致塌缩的非么正过程(不可逆)。如此一来, 便可以避免在解释 EPR 实验时出现因果悖论。

如果放弃局域性而保留实在性, 那么量子纠缠就会出现“鬼魅般的超距作用(spooky action-at-a-distance)”这种悖论, 因为事实上, 如果粒子没有确定的自旋, 就不需要“超距作用”。如果我们承认量子力学所预言的机率是粒子本质的固有部分(也就是说量子力学中不存在“实在性”, 一切实验结果都只能表达为机率分布), 那么 EPR 实验就是只能预言两个粒子间的相关性, 而不是一个粒子因为另一个粒子被测量而改变状态的结果。

玻姆版本的 EPR 实验

1957 年, David Bohm 提出了一种实现 EPR 实验的方案^①, 有些人将其称为 EPR-Bohm 实验, 考虑一个 π^0 介子衰变成正负电子对:



π^0 介子的自旋是零, 所以角动量守恒要求正负电子对处在单态纠缠态^②:

$$(\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow) / \sqrt{2}$$

如果电子的自旋向上, 则正电子的自旋必须向下, 反之亦然。在任何一个特定的 π^0 介子衰变中, 量子力学无法预测将得到哪一种自旋组合, 但是它明确指出正负电子对的自旋测量结果会相互关联。而且平均来看得到两种组合的概率各为一半。

假设我们让电子和正电子各自沿反方向飞行一段距离, 如果身在某侧的实验员测得电子的自旋为向上, 他立即也就知道另一侧正电子的自旋为向下。这对于实在主义论者来说并没有什么新奇的, 实在主义论者认为在 π^0 介子衰变的那一刻, 电子就已经被固定为自旋向上(正电子的自旋向下), 只是量子力学无法告知我们而已。在经典世界中也存在这种相互关联, 例如现在有一黑一白两颗球, 随机的放入两个盒子中, 你和朋友各自带一个盒子到远处打开, 当你一看到盒子中为黑球时你立刻就知道他拿着白球, 没有人会怀疑这违反了什么物理规律, 一切都符合日常生活经验。所以物理学家很长一段时间也确实认为自旋单重态和红白球这两种超距关联并没有什么区别^③。

但哥本哈根学派认为在“测量前”粒子的自旋是不确定的(不是能力不足或是还不知道, 它就是不确定)。而正是测量这个操作导致电子的波函数塌缩,

^① Bohm D, Aharonov Y. Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky[J]. Physical Review, 1957, 108(4): 1070.

^② 也可以表达成: $(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) / \sqrt{2}$ 或 $(|\uparrow-\rangle \otimes |\downarrow+\rangle - |\downarrow-\rangle \otimes |\uparrow+\rangle) / \sqrt{2}$

^③ 我们现在知道这两者有很大区别, 因为颜色是“经典变量”, 对于经典系统, 我们只能侦测这种事先选好的变量。而对于量子系统, 我们可以临时决定改测两球的其它变量, 比如测量者临时改变心意, 突然改变测量工具, 要测测看这一对粒子在“红配绿”的设定下谁是红色, 他也能在测得一号粒子为红色的情况下立刻得知另一个粒子会测得绿色。即使临时改变测量变量却依然能得到他们在测量前是纠缠态的结论。

同时“瞬间影响”了远处正电子的自旋。爱因斯坦认为这样鬼魅般的超距作用是十分荒谬的，违反了狭义相对论中信息传输不可超过光速的限制。他笃定哥本哈根学派的观点是站不住脚的，电子和正电子始终有确定的自旋，你无法确定只是因为目前的量子力学理论还不完备。

EPR 的论据是基于任何信息的传播速度都不能快于光速，这个原则被称为局域性。你可能会认为波函数塌缩或许并不是瞬间的^①，然而这将会导致角动量不守恒，因为如果我们在电子波函数塌缩的消息传达到远方之前就去测量正电子的自旋，那将有一半的机率发现正负电子对两者自旋都向上。所以，波函数不能以有限速度塌缩，而是在瞬时之间就完成塌缩。

张夏硕设计出 EPR 实验的因果模型

张夏硕举了以下例子说明无法使用经典力学的因果关系来描述量子力学：当我们加热一块金属，电子会从金属表面发射出来，我们用一定距离外的探测器能探测到电子。我们只能知道电子会出现在探测器上是因为它产生于金属源，但它究竟是如何从金属源头到达探测器的呢？量子力学无法回答这个问题。波粒二象性表明，我们不能将电子视为在连续轨迹上运动、在任何给定时间都位于特定区域的粒子，而是得用漫布在整个空间中的波函数来描述。

(Chang, 1993. P.178)

当电子在某个点被探测到，原本散布在广阔空间区域的整个波函数就突然以比光还快的速度瞬间聚集在一起，并只出现在那个点上。因此张夏硕认为波函数塌缩跟相对论是不兼容的，测量所导致的波函数塌缩是可以超光速的。于是，量子世界中有不同于经典世界的因果律，量子力学似乎允许遥远的事件相互关联。(Chang, 1993. P.187)

张夏硕指出：量子力学的波函数塌缩，这是相对论在被发明时所未知的现象，所以如果我们为了解释 EPR 悖论而必须在相对论和量子力学二者中放弃一个理论的话，那我们倾向于放弃相对论。爱因斯坦坚持：“如果两个粒子之间是类空分离的，那么对其中一个粒子进行测量就不会影响到另一个粒子”，但这一坚持被贝尔证伪，并且也与实验结果相悖。(Chang, 1993. P.187)

基于此，张夏硕设计出一套 EPR 实验的因果模型：“

1. EPR 正负电子对在分裂源头 π^0 介子获得一个共同因子 λ ，这使得它们在未来的某个时刻能够进行因果影响。存在一个共同因子 λ 是必要的，否则，对 EPR 粒子对进行的测量结果就不会呈现相关性。因子 λ 被编码在量子态中，如果没有受到外部干扰，EPR 粒子对在离开分裂源头后， λ 会一直被保留下来。

^① 波函数塌缩究竟需不需要时间，这在目前依然是个悬而未解的问题，但至少目前知道这个时间短到难以测量。高山还探讨了是否可以藉由波函数塌缩来进行超光速信号传递。Gao S. Is superluminal signaling possible in collapse theories of quantum mechanics?[J]. Foundations of Physics, 2023, 53(5): 87.

2. 对其中一个粒子进行测量会得到一个纯随机的结果。

3. 由于共同因子 λ 的存在，被测量的粒子能够立即将测量结果的信息传送给其在远处的伙伴粒子。

4. 接着对伙伴粒子进行测量，则结果将与第一次测量的结果紧密相关，如果一边是自旋朝上，另一边就必为自旋朝下。这两个测量结果紧密相关的原因是，它们是从一个共同的分裂源头 π^0 介子中制备出来的，并且量子态中有个共同因子 λ 被编码在其中，于是它们可以通过 λ 来相互传递信息。” (Chang, 1993. P.181)

最后张夏硕总结：“相对论与量子力学在处理测量问题上的不一致，关键在于波函数塌缩是瞬时的，也就是说，弥漫整个空间的波函数会在一瞬间塌缩到一个点上，不论 EPR 正负电子对哪一边的实验员先进行测量，两边的粒子都瞬间同时塌缩了，于是这就导致了超光速的因果关系有可能发生。EPR 实验反驳了‘没有信息的传播速度能超过光速’这一论点，量子力学中的测量现象超出了狭义相对论的应用范围，只要我们愿意认真处理量子力学中的测量过程，就确实可以对 EPR 实验作出因果解释。” (Chang, 1993. P.188)

从狭义相对论的角度来看，上述的 EPR 实验因果模型存在两个瑕疵：

首先，根据第 3 点“被测粒子能够立即将测量结果的信息发送给远方的伙伴”，这暗示了其中一个粒子需要“先于”另一个粒子被测量，然而在类空分隔的两起事件中谈论先后是没有意义的，因为通过适当地改变参考系，我们总是能把“后面”的事件变成“前面”的事件^①。如果两起事件无法明确定义时间先后顺序，我们还能把它称为“因果关系”吗？当我们在谈论因果关系时，其实就已经默认原因必须“先于”结果出现，原因必须先发生，然后才会导致结果发生。

其次，这个模型需要假设因果信息的传播速度可以超过光速，但是根据狭义相对论，超光速信息传输是不可能发生的。在狭义相对论的框架中，因果关系只能存在于光锥之内，所有的因果关系都必须在光锥中被连接起来，也就是类时事件，这样才能保留时间顺序准则。任何有效的信息都不能超光速传播，因为如果某个事件连它发出的光都还没有传递到我这里，那么我也没有任何其它的途径可以得知这件事情已经发生，于是这件事情也就不可能影响到我。

在我看来，张夏硕所提出的因果模型只是一种类似于玻姆导航波理论的量子力学诠释，其中，共同因子 λ 是某种非局域的隐变量，接下来我们会论证导航波理论是否能传递因果信息。

^① 如果存在某个信息的传播速度能够超过光速，那么这就会违反因果关系，因为任何超光速传播在进行参考系变换之后，都将被视为在另一个参考系中朝着时间的逆方向进行传播（因为在狭义相对论中，会藉由发送光信号来同步数个距离遥远的时钟，所以在一个参考系中跑得比光速还快的信号将在某些其他参考系中等价于往过去传递信号）。但是如果不传递信息的话，例如机械波的相速度是可以超过光速的。

用导航波理论来解释 EPR 实验

在 EPR 实验中，假定实验者能够在—组纠缠的正负电子对处于飞行和类空分离的状态时改变想要测量的自旋方向（例如，通过快速改变测量仪器的磁场角度）。

支持导航波理论的物理学家认为，测量仪器的状态必须包含在导航波的“量子势”^①中（量子势的状态类似于张夏硕模型中的共同因子 λ ）。因此，当仪器的磁场角度旋转时，这种变化会改变量子势的所有部分，包括引导远处粒子所能展现出的测量结果，并且这种变化的传播速度是超光速瞬间发生的。

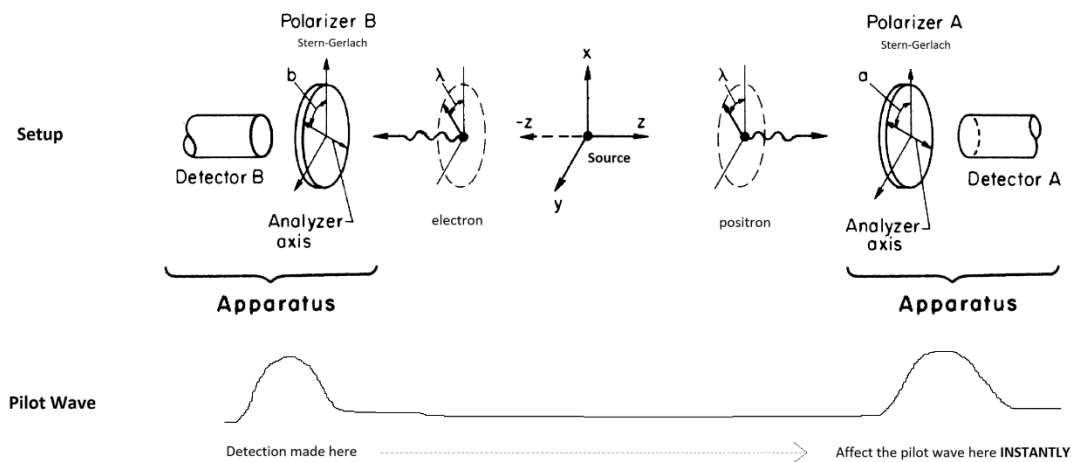


图 1：EPR 实验的装置设计^②

那我们是否能用导航波来发出信号，从而以超光速来传递信息呢？

粒子在导航波上的初始位置是未知的，我们只能将其写成一个机率分布，此分布需要满足玻恩规则：分布与波函数的振幅平方成正比（所有的量子力学诠释都必须推导出这一点，或者明确写入它们的公理中，这样才能与观测结

^① 导航波与粒子之间的作用只能是单向的，导航波是主动方，粒子是被动方，不存在粒子对导航波的反向作用。导航波向粒子“展示”自己振幅的曲率，从而“告诉”粒子该如何运动。量子势的大小与导航波携带的振动能量无关，导航波在对粒子“实施作用”时，也没有动用自身的能量。这种不能交换能量，又只能是单向的作用，已经不符合物理学对“相互作用”这个概念的定义。玻姆认为，这是一种基于信息传递的作用机制，所以也称为“信息势（information potential）”，而且量子势所传递的信息是超光速瞬间发生的。量子势是一个非局域的全局量。如果每个粒子都要从这个全局的量子势中获取信息，来决定自己的运动方式，那么就必须得先承认信息能够在空间中不受光速限制的传递。这里需要指出，狭义相对论所限定的信息和因果关联无法超越光速，是先假定了信息传递需要以能量交换为基础，实际上狭义相对论所限定的只是能量传递的速度无法超越光速。而玻姆理论所引入的新作用机制，恰恰不依赖能量交换，所以可以不受光速的限制。

^② 图片改编自：Clauser J F, Horne M A. Experimental consequences of objective local theories[J]. Physical review D, 1974, 10(2): 526.

果一致)。所以量子力学的不可通信定理 (No Communication Theorem) 在导航波理论中仍然成立, 因为初始粒子分布的统计数据会“阻止”你通过导航波去传递超光速信息。也就是说: 由于你只能通过对粒子进行测量来探测导航波的结构, 而这些粒子具有恰好能掩盖超光速信息传输的初始条件, 因此你永远无法通过量子纠缠来传输超光速信息。

导航波的初始机率分布至关重要, 它在恰好的位置以恰好的数值加进了对粒子初始位置的机率分布, 从而掩盖了所有可能携带超光速信号的信息。初始统计数据的“巧合”恰好掩盖了潜在的超光速效应, 很多物理学家认为如果有必要诉诸这样的“巧合”来解释量子现象, 这反而说明导航波理论存在着瑕疵, 此理论复杂繁琐又难以服众^①。再者由于导航波方程自身没有协变性, 所以玻姆理论很难跟现有的场论融合在一起, 这就导致玻姆理论的推广非常受限。

接下来再回到张夏硕的 EPR 模型。

即使正负电子对存在一个共同因子 λ 使他们彼此能够“对话”, 但如果实验员无法控制粒子之间的对话内容, 那也就无法通过这对粒子去传递信息。考虑两侧磁场角度相同的情况, 测量结果之间存在着完美的反相关性, 但是, 在我们进行测量时, 我们无法控制测量结果。这就是量子测量过程的纯随机性。即便测量结果的信息可以通过共同因子 λ 传递到另一端, 但这也是不受实验员控制的信息, 因此对于在另一端监测测量结果的实验员来说, 这并不是有效的信号^②。

具体来说, 一个操作电子探测器的人没有任何方法可以用他的测量来向对面的正电子探测器发出信号, 因为他并不能控制他自己的测量结果。虽然左边的实验员可以决定是否去进行一次测量, 但是右边的实验员是在类空分隔的另一端进行测量的, 右边并不知道左边的电子究竟有没有被测量。数据的采集是在两端分开进行的, 双方都是完全随机的得到一串 $\{+1, -1, -1, +1, \dots\}$, 任何一边的实验员都不能利用测量去主动进行编码 (例如一边的实验员通过调整仪器确保一定会测量出 $\{+1, -1, -1, +1, \dots\}$ 来做二进制编码), 只有在测量完成以后比较两端得到的结果才会发现相关性。所以其实人们无法利用这种共同因子 λ 去传递信息, 因为两侧会测到什么都是完全随机的。信息的传播速度依然不能超过光速!

贝尔定理的结果表明不存在局域的隐变量理论, 但依然为非局域的隐变量理论留下了可能性。甚至贝尔本人也认为世界上存在客观的非局域联系, 虽然

^① 量子势场弥漫在整个宇宙中, 使它每时每刻都对周围的环境了如指掌, 不论是实验员或是粒子在某地有任何变化, 无处不在的量子势便会感应到这一变化, 并能在一瞬间将此变化传递到整个宇宙中的所有地方, 从而引导每个粒子改变它的行为模式。玻姆假设一个粒子具有确定的轨迹, 却又规定因为隐变量的随机扰动, 我们绝对观察不到这样的轨迹。这就违反了奥卡姆剃刀原则: 说某个东西存在却又绝对观测不到, 这和不存在又有什么区别呢?

^② 这也是不可通信定理所要求的, 即便存在某个超光速的势场, 人们依然不能用此来传递信息, 否则就会违反狭义相对论。

这违反了爱因斯坦的狭义相对论。贝尔定理要求假设量子系统的性质与未来可能对该系统进行的任何测量的性质无关，这意味着隐变量与后来的测量操作无关。就像爱因斯坦一样，贝尔对量子理论的直觉具有强烈的实在主义特征，他被一个独立于人类观察者而存在的客观世界的观点所吸引，并倾向于认为量子力学只是给了我们这一客观现实的不完整描述。因此，贝尔与那些依然坚持实在论的物理学家们一样，也更喜欢玻姆的导航波诠释。

如果需要引入超光速信息传输来解释波函数塌缩，这更是说明了波函数塌缩是个不太完善的理论，在本文中我会说明如果采用 Everett 诠释来解释 EPR 实验，那就不会出现超光速信息传递这样的悖论。

EPR 实验中的因果模型

张夏硕的结论是，EPR 纠缠对中任何可能的直接因果联系都必须以超光速传递。然而本文提出，EPR 纠缠对的哈密顿量中并没有代表两个遥远粒子之间可能存在物理相互作用的项，因此在 EPR 实验中不可能存在超光速联系。由于狭义相对论的限制，两个类空事件之间不可能有因果联系，所以任何因果模型都无法解释遥远的相关性。

David Lewis 提出一个有效的因果关系应该要至少满足以下几点^①：

1. 原因是结果在其他条件不变 (*ceteris paribus*) 下的绝对充分条件。
2. 原因是结果在其他条件不变下的绝对必要条件。
 - 2-1. 先决条件 (2 的反事实版本)：没有原因，就不会有结果。
3. 作为解释的因果关系：原因可以解释结果。
4. 因果关系的统计理论：在相关背景因素的条件下，原因与结果具有积极的统计相关性。
5. 可操控性：如果在实验中操作原因变量，则结果变量也会相应地受到影响。
6. 从原因到结果之间有能量-动量的转移。

而 Reichenbach 认为物理学中的因果律要满足以下几点^②：

- 有限速度条件：狭义相对论规定所有因果过程最快以光速传播，所有的因果关系都必须能在一个光锥中连接起来，也就是类时事件。
- 时空连续性条件：每个原因及其结果都必须通过在空间和时间上连续的因果过程连接起来。
- 共因原则 (The Principle of the Common Cause)：为了表达变量之间的

^① Lewis D. Causation[J]. The journal of philosophy, 1973, 70(17): 556-567.

^② Reichenbach H. The direction of time[M]. University of California Press, 1956.

因果关系，可以画一条从原因变量指向结果变量的箭头，表示在这两个变量之间存在因果关系，其中箭头的方向表示因果关系的方向。任何变量，给定其父节点，都和它的非后代统计独立。

接下来我们对 EPR 实验分别检验以上几点。

左右两侧纠缠的 EPR 对之间是否存在因果关系呢？是否可以说当实验员在左边“测出了”自旋朝上的行为，“导致”右边测出了自旋朝下呢？是否某一边的操作会“影响”另外一边的结果呢？

在已知一边得到测量结果为自旋向上的前提条件，在另一边得到测量结果为自旋向下的条件概率是 100%。所以 Lewis 的 1,2 点都是满足的，当左边测出了自旋朝上，右边必定得测出自旋朝下，也就是说，右边想要 100%测出朝下的充分必要条件是左边测出朝上。

然而 EPR 实验不满足第 3 点，不能说左边和右边的测量结果可以相互解释，它们只是相互有关联，但并不是对应的因果关系。

我们不能说左边的测量结果“造就了”右边的测量结果，这两个结果只是可能有所关连。这个现象是休谟所提出的“恒常连结”（constant conjunction），恒常连结代表当我们看上去左边的测量结果总是“造成”右边的测量结果时，我们所看到的其实是左边总是与右边“恒常连结”。因此，我们并没有理由相信一件事物的确造成另一件事物，两件事物之间并没有因果关系。

1982 年 Alain Aspect 做出实验证明了贝尔定理，他也在 2022 年获得诺贝尔物理学奖。因此证实量子力学在基础上就是纯随机的，EPR 实验的正负电子对之间只是存在着统计学上的关联但并无相互作用亦无因果关系，正负电子对之间也不存在瞬间的超光速效应，局域隐变量理论是错的。

第 4 点，如果多次重复进行 EPR 实验，当在一侧记录下一串{+1,-1,-1,+1,...}，则另一侧必是相反的{-1,+1,+1,-1,...}。虽然两位实验员分别采集到的数据看上去都是完全随机的，但当他们在测量完成以后进行比较，就会发现彼此得到的数据是完全对称的。所以两侧的数据具有积极的统计相关性。

可是这种“统计相关性”不具有可操控的效果，因为任意一边会测出什么结果在那边的实验员眼中都是完全随机的。如果是这样的因果结构： $\text{Mag}_L \rightarrow \text{Mag}_R$ ，那我可以通过操控 Mag_L 去影响 Mag_R ，但是在 EPR 实验中不存在这样的控制，左边的实验员无法通过操控他的测量仪器去进行控制而让右边出现他想要的结果，两边的实验员只能在实验结束后比对数据时才发现彼此的数据呈现关联性，他们也无法利用这种关联性来传递信息。

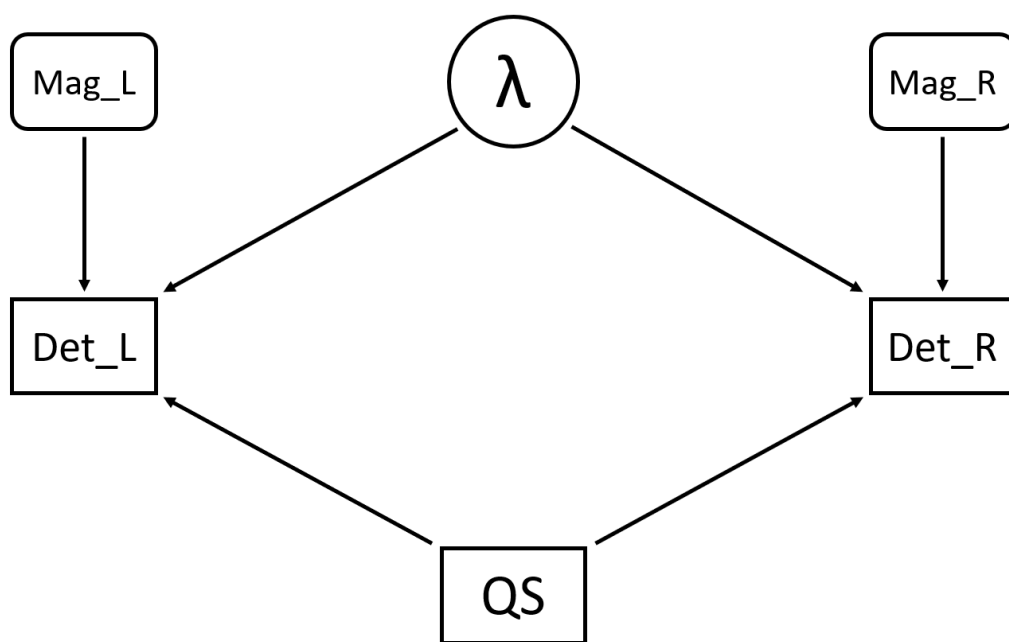
例如在抛掷硬币时硬币随机出现的正反两面，正反两面虽然在统计学上有关联，例如在硬币的上下方各有一位观察者，当上方的观察者看到一面的结果时便会立刻知道另一面应该是什么，但这并不代表硬币上方的观察者能透过某种操作告诉下方的观察者，他们之间也无法建立瞬间的超光速沟通。所以 EPR 实验不满足第 5 点的可操控性。

第 6 点可以跟有限速度条件合在一起检验，如果说左边的测量操作是“造就了”右边测量结果的原因，那么从左边到右边之间就需要存在能量-动量的转移，然而根据不可通信定理，量子纠缠不允许以超光速来传播信息，于是也就不满足。

而且在张夏硕的模型中，时间顺序准则也没有被保留，所以我们不能称之为“因果”模型，“超光速因果关系”这个词与狭义相对论非常矛盾，由于狭义相对论中的因果关系被解释为描述时空中发生的某些事件可以影响另外一些事件，而两个类空分离的事件之间不可能有因果关系，因为相对论禁止信息的传播速度超过光速。

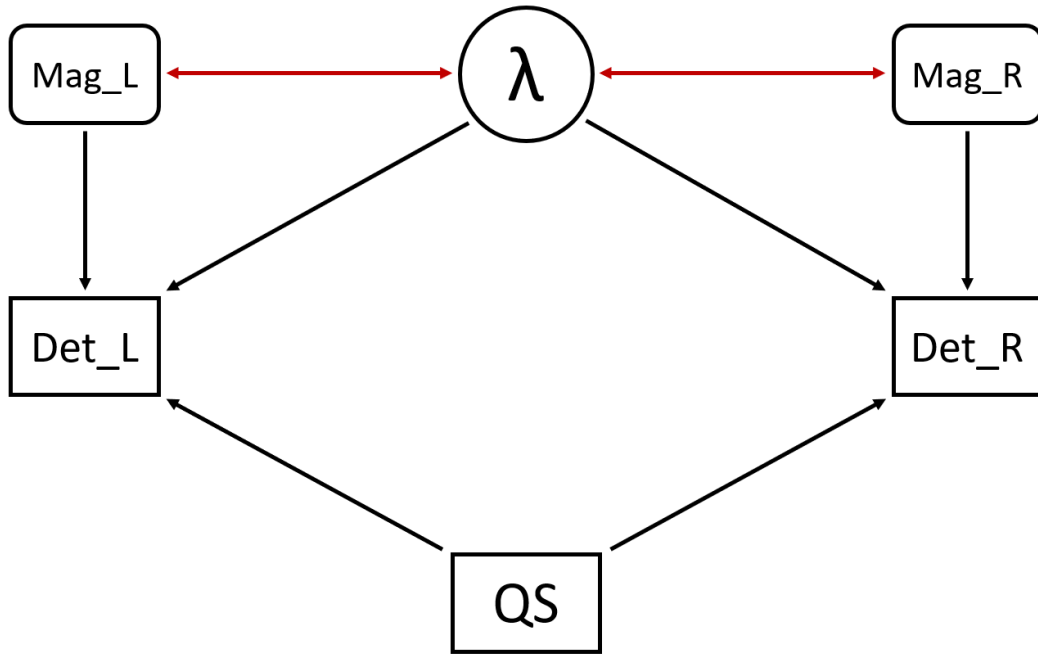
最后来检验共因原则。EPR 实验的因果结构是 $\text{Mag}_L \rightarrow \text{Det}_L \leftarrow \text{QS} \rightarrow \text{Det}_R \leftarrow \text{Mag}_R$ ^①，除了探测磁场以外，周围就没有任何其他会影响因果关系的因素了。两边测量结果的唯一可能共同来源是源头的量子态，于是如果采用局部的隐变量理论，EPR 实验显然违反了共因原则，按照因果图的箭头方向， Det_L 与 Det_R 之间不存在因果联系。

EPR 实验的因果图模型如下所示，注意图中的共同因子 λ 不能以超光速传递信号：



而张夏硕认为 EPR 实验的因果图模型如下所示（多了两条红色双箭头）：

^① 我们用变量 QS 来表示量子态（Quantum State）。左右两个 Stern-Gerlach 磁场的角度设置由变量 Mag_L 和 Mag_R 表示，探测器的测量结果由二进制（上或是下）变量 Det_L 和 Det_R 来模拟。



当仪器的磁场角度旋转时，这种变化会通过共同因子 λ （这是非局域的隐变量），将“信息”超光速瞬间传递给对面的粒子，张夏硕为了使 EPR 实验符合共因原则，他的模型错误地假设在左边进行测量操作会瞬间影响右边的测量结果，但是如此一来就违反了有限速度条件。

在 EPR 实验中，测量结果是类空相关的，因此在两翼之间没有直接的因果关系，这意味着任何一种局域隐变量理论都不可能适用于 EPR 实验，而且根据狭义相对论，超光速的因果关系在物理学中也是无效的。因此，本文指出 EPR 实验推翻了局域实在性，如果某个 EPR 因果模型想要符合共因原则，那么它就会违反有限速度条件。

以 Everett 诠释来描述 EPR 实验

本节指出 EPR 实验中的因果悖论其实源自于对波函数塌缩的错误理解，而如果采用 Everett 诠释，测量的本质是量子纠缠，“测量过程”是一个连续的么正演化（可逆），舍弃了在哥本哈根诠释中，测量将会导致塌缩的非么正过程（不可逆）。在 Everett 诠释的框架中，波函数永远只有么正演化，不存在塌缩，因此就可以避免在解释 EPR 实验时出现因果悖论。

同样用玻姆版本的 EPR 实验举例， π^0 介子衰变成正负电子对的单态纠缠态^①：

$$(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) / \sqrt{2}$$

^① 也可以等价地表达成： $(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) / \sqrt{2}$ 或 $(|\uparrow_{\text{左}}\rangle \otimes |\downarrow_{\text{右}}\rangle - |\downarrow_{\text{左}}\rangle \otimes |\uparrow_{\text{右}}\rangle) / \sqrt{2}$

我们约定左边的箭头代表往左飞的电子，而右边箭头代表往右飞的正电子，在下文中为了表达式的简洁，有时会忽略下标中的(+/-)符号，这并不影响想要推导的结论。

现在假设左边的实验员将测量仪器的磁场旋转了某个角度。写下新的量子态。当单重态系统中的一个自旋旋转一个角度时，系统的量子态会发生相应的变化。让我们用“R”来表示对左边电子自旋的旋转操作。这种旋转对电子的自旋向上态和自旋向下态的作用可以表示如下：

$$R|\uparrow\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$$

$$R|\downarrow\rangle = c|\uparrow\rangle + d|\downarrow\rangle$$

式中 a, b, c, d 是代表叠加系数的复数，它们的具体数值将取决于旋转角度和旋转轴，在此我们不需要写出它们的具体数值。

将旋转后电子的量子态代入 EPR 正负电子对的单重态中，得到系统的新状态 $|\psi'\rangle$ 就变成了：

$$|\psi'\rangle = (R|\uparrow\rangle \otimes |\downarrow\rangle - R|\downarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle) / \sqrt{2}$$

将其展开，得到：

$$|\psi'\rangle = ((a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle) \otimes |\downarrow\rangle - (c|\uparrow\rangle + d|\downarrow\rangle) \otimes |\uparrow\rangle) / \sqrt{2}$$

进一步展开并重新排列，得到：

$$|\psi'\rangle = (a|\uparrow\downarrow\rangle + b|\downarrow\downarrow\rangle - c|\uparrow\uparrow\rangle - d|\downarrow\uparrow\rangle) / \sqrt{2}$$

这就是其中一位实验员将测量仪器的磁场旋转了某个角度后，EPR 系统的新量子态。

现在考虑两位实验员分别对两个粒子自旋态进行测量，写出测量前后的自旋状态和观察者的指针。这里我们采用 Everett 诠释来推导，在 Everett 诠释中，测量不会使粒子的波函数塌缩，而是将粒子与测量仪器的量子态纠缠在一起。让我们考虑这样一种情况：两个实验员分别对自旋进行 z 方向的测量。我们将观测者指针的状态分别记为 $|P_u\rangle$ 和 $|P_d\rangle$ ，表示分别对应于测量出自旋向上和自旋向下的指针状态（pointer state）。

在测量之前，EPR 系统态和观察者指针的组合状态可写为：

$$|\Psi_{\text{before}}\rangle = |\psi'\rangle \otimes |P_0 P_0\rangle$$

这里， $|\psi'\rangle$ 是上段中讨论的其中一位实验员将测量仪器的磁场旋转了某个角度后，EPR 系统的新量子态，而 $|P_0 P_0\rangle$ 代表两个指针的初始状态，表示还没有进行测量。

在测量后，系统的综合状态演变为所有可能测量结果的叠加，每个结果都与相应的指针状态纠缠。测量后的状态 $|\Psi_{\text{after}}\rangle$ 可以写成^①：

^① 对于 $|\uparrow\downarrow\rangle \otimes |P_u P_d\rangle$ 这项，详细的表达法是 $|\uparrow\rangle_{\text{左}} \otimes |\downarrow\rangle_{\text{右}} \otimes |P_u\rangle_{\text{左}} \otimes |P_d\rangle_{\text{右}}$ ， $|P_u\rangle$ 代表仪器测量出自旋上， $|P_d\rangle$ 代表仪器测量出自旋下。

$$|\Psi_{\text{after}}\rangle = (a|\uparrow\downarrow\rangle|P_u P_d\rangle + b|\downarrow\downarrow\rangle|P_d P_d\rangle - c|\uparrow\uparrow\rangle|P_u P_u\rangle - d|\downarrow\uparrow\rangle|P_d P_u\rangle)/\sqrt{2}$$

其中 $|\uparrow\downarrow\rangle|P_u P_d\rangle$ 所代表的物理意涵是：左边的仪器测量出电子自旋向上（指针处于状态 $|P_u\rangle$ ），和右边的仪器测量出正电子自旋向下（指针处于状态 $|P_d\rangle$ ）。 $|\Psi_{\text{after}}\rangle$ 这个叠加态中的四项代表了四种正负电子自旋状态的可能组合，并且正负电子自旋状态和仪器的指针状态纠缠在一起。

在 Everett 诠释中，对一个粒子进行“测量”的物理意涵就是将该粒子与测量仪器纠缠在一起形成 $|\uparrow\rangle_{\text{左}} \otimes |P_u\rangle_{\text{左}}$ ，本地的粒子被测量时只会与本地的仪器纠缠，两边的测量都是各自进行的，所以不存在任何非局域作用，右边另一个粒子的状态不会因为左边的实验员对左边粒子进行了测量而发生任何变化。这便是采用 Everett 诠释来描述 EPR 实验与采用哥本哈根诠释相比最大的不同，也不存在鬼魅般的超距作用。不论左右两边是谁先测量谁后测量都不会相互影响，不存在先测量的结果通过超光速作用去影响后测量的结果，也不会出现推翻因果顺序的悖论。

爱因斯坦和玻尔那一代的物理学家，由于都采用哥本哈根诠释，所以他们的思想会限制在非要用“塌缩”去解释“测量”，因此才会出现“其中一边的实验员先做了测量，导致一个粒子的量子态先塌缩，这个塌缩的‘信息’会以超光速传递到对面去，导致另一边的粒子也塌缩”这种很荒谬的结论。而张夏硕所提出的共同因子 λ 起到了一种非局域隐变量的作用，在两边之间以超光速去传递这个塌缩的“信息”。

以量子线路来描述 EPR 实验

本节用量子线路图来说明 EPR 实验的两侧之间并不存在信息传递，实验装置的设计仍按照图 1 所示，左右两边的实验员分别是 Alice 和 Bob，两个偏振器用 R 表示，Stern-Gerlach 磁场可以各自旋转不同角度 θ, φ ，于是可将图 1 的结构画成如下的量子线路图：

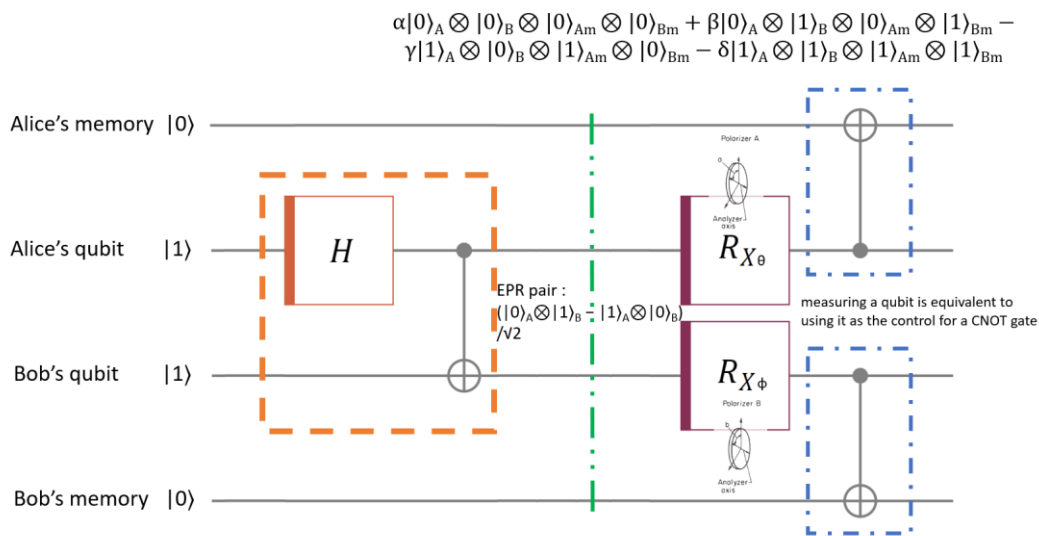


图 2: EPR 实验的量子线路

首先初始化两个量子比特:

$$|1\rangle_A \otimes |1\rangle_B$$

应用 Hadamard 闸到量子比特 A 得到:

$$1/\sqrt{2} * (|0\rangle_A - |1\rangle_A) \otimes |1\rangle_B$$

应用 CNOT 闸到量子比特 A 和 B 得到:

$$1/\sqrt{2} * (|0\rangle_A \otimes |1\rangle_B - |1\rangle_A \otimes |0\rangle_B)$$

于是这样就创建出 Alice 和 Bob 之间的 EPR 纠缠对 (上图中的橘色方框)。

接下来, 左右两边的实验员分别对 Stern-Gerlach 磁场旋转不同角度, 这在量子线路图中以红色方框 $R_{x\theta}, R_{x\phi}$ 来表示, 代表两个偏振器各自旋转 θ, ϕ 角度, 得到新纠缠量子态为:

$$\alpha|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B + \beta|0\rangle_A \otimes |1\rangle_B - \gamma|1\rangle_A \otimes |0\rangle_B - \delta|1\rangle_A \otimes |1\rangle_B$$

其中 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 是代表叠加系数的复数, 它们的具体数值将取决于旋转角度 θ, ϕ , 在此我们不需要写出它们的具体数值。

最后, 图中的两个蓝色方框代表两位实验员分别对两个粒子进行测量。在 Everett 诠释中, “测量过程”的本质是量子纠缠, 而不会退相干到环境中, 于是可以用 CNOT 来代表 Everett 诠释中的测量 (附注会说明为何这是可行的)。最上方和最下方的两条线路分别代表 Alice 和 Bob 用仪器测量出的数据, 记作 Alice's memory (Am) 和 Bob's memory (Bm)。

得到测量结果为:

$$|\Psi_{\text{measure}}\rangle =$$

$$\alpha|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B \otimes |0\rangle_{Am} \otimes |0\rangle_{Bm} + \beta|0\rangle_A \otimes |1\rangle_B \otimes |0\rangle_{Am} \otimes |1\rangle_{Bm} -$$

$$\gamma|1\rangle_A \otimes |0\rangle_B \otimes |1\rangle_{Am} \otimes |0\rangle_{Bm} - \delta|1\rangle_A \otimes |1\rangle_B \otimes |1\rangle_{Am} \otimes |1\rangle_{Bm}$$

可以和上节的测量结果 $|\Psi_{\text{after}}\rangle$ 进行对比：

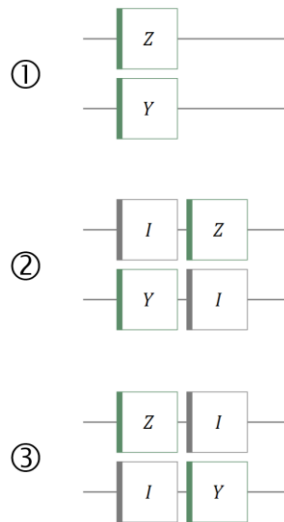
$|\Psi_{\text{after}}\rangle =$

$$a|\downarrow\rangle_{\text{右}} \otimes |\downarrow\rangle_{\text{左}} \otimes |P_d\rangle_{\text{右}} \otimes |P_d\rangle_{\text{左}} + b|\downarrow\rangle_{\text{右}} \otimes |\uparrow\rangle_{\text{左}} \otimes |P_d\rangle_{\text{右}} \otimes |P_u\rangle_{\text{左}} - \\ c|\uparrow\rangle_{\text{右}} \otimes |\downarrow\rangle_{\text{左}} \otimes |P_u\rangle_{\text{右}} \otimes |P_d\rangle_{\text{左}} - d|\uparrow\rangle_{\text{右}} \otimes |\uparrow\rangle_{\text{左}} \otimes |P_u\rangle_{\text{右}} \otimes |P_u\rangle_{\text{左}}$$

如果忽略所有迭加系数并假设 Alice 是右边的实验员、Bob 是左边的实验员， $|0\rangle$ 代表自旋向下 $|\downarrow\rangle$ 、 $|1\rangle$ 代表自旋向上 $|\uparrow\rangle$ ，两个记忆态分别对应指针状态，可以看出用量子线路来描述 EPR 实验所得出的结果和用 Everett 诠释来描述是相同的。

从量子线路图中可以发现，制备出 EPR 纠缠对之后（绿色虚线往右），Alice 和 Bob 两位实验员之间就再也没有任何联系了，上方两条线路和下方两条线路之间不存在任何相连接的结构，这就说明了后续不论 Alice 所做的任何操作（旋转偏振器磁场或是进行 CNOT 操作）都完全不会影响 Bob 那边的结果。由于我们在量子线路图中采用 CNOT 来代表 Everett 诠释中的测量，而不涉及整体 EPR 态的塌缩，所以 Bob 那边粒子的状态不会因为 Alice 对粒子进行测量而发生任何变化。

由于在量子线路图中，平行作用的逻辑闸在数学上会使用张量积来表示，再根据张量积的混合乘积性质^①，对两个逻辑闸 Z, Y，有 $Z \otimes Y = (I \otimes Y)(Z \otimes I) = (Z \otimes I)(I \otimes Y)$ ，因此以下三组量子线路图是等价的：



此等式的含意即是：Bob 先操作 Y 闸 Alice 后操作 Z 闸和 Alice 先操作 Z 闸 Bob 后操作 Y 闸的效果是相同的。

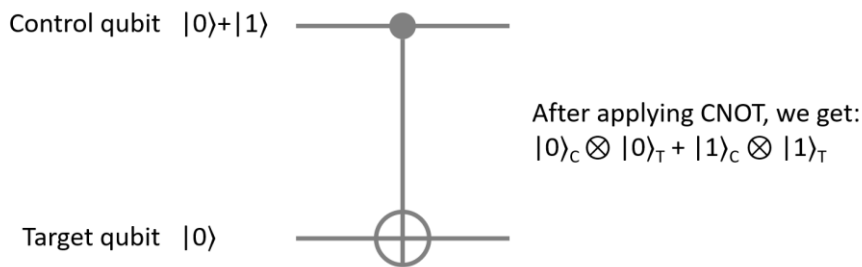
这就说明了不论两位实验员，谁先旋转偏振器磁场或是进行 CNOT 操作的结果都是完全相同的，也不会影响对方。在量子线路图中也没有与时间相关的

^① 如果 A, B, C, D 是四个矩阵，且矩阵乘积 AC 和 BD 都存在，那么有： $(A \otimes B)(C \otimes D) = AC \otimes BD$ 。

参数，因此不论左右两边是谁先进行 CNOT 操作都不会互相影响，双方也根本无从知晓对方是否有进行过 CNOT 操作，不存在先测量的结果通过超光速作用去影响后测量的结果。

这也说明了 EPR 实验的两翼之间不可能存在因果联系，因为如果假设 Alice 的先前操作是“原因”，导致后续 Bob 测量的“结果”；那么同样可以说 Bob 的先前操作是“原因”，导致后续 Alice 测量的“结果”。于是这就形成了因果循环的悖论，无法指出两者中究竟谁是原因谁是结果，这也不满足 David Lewis 的因果关系第 3 点。

【注】说明等价关系：测量一个量子比特等价于用它作为 CNOT 的控制，从而控制一个辅助量子比特。



考虑有两个量子比特，量子比特 C（控制量子比特）和量子比特 T（目标量子比特），它们处于纠缠态，如：

$$|0\rangle_C \otimes |0\rangle_T + |1\rangle_C \otimes |1\rangle_T$$

现在，如果对量子比特 C 进行测量并得到它处于状态 $|0\rangle$ ，那么两个量子比特的联合状态会塌缩到 $|0\rangle_C \otimes |0\rangle_T$ ，也就是 CNOT 闸实际上不起作用，不在目标量子比特上执行 NOT 操作。如果测量量子比特 C 并发现它处于状态 $|1\rangle$ ，那么联合状态会塌缩到 $|1\rangle_C \otimes |1\rangle_T$ ，也就是 CNOT 闸会翻转目标量子比特的状态到 $|1\rangle$ 。

这说明了为什么测量控制比特 C 的效果等同于使用它作为 CNOT 闸的控制：测量结果影响了目标比特 T 是否经历了 NOT 操作（这就是 CNOT 闸的效果）。如果控制比特 C 测量为 $|0\rangle$ ，则不对目标比特 T 执行任何操作；如果控制比特 C 测量为 $|1\rangle$ ，则对目标比特 T 执行 NOT 操作。这种由“测量过程”所导致的量子纠缠正好契合 Everett 诠释的框架。

目标比特的状态等价于仪器的指针状态，指针状态的物理意涵是仪器测量出的结果，纠缠态 $|0\rangle_C \otimes |0\rangle_{\text{Det}} + |1\rangle_C \otimes |1\rangle_{\text{Det}}$ 代表粒子 C 处于状态 $|0\rangle_C$ 且仪器测得 $|0\rangle_{\text{Det}}$ ，在 Everett 诠释中，“测量过程”可以由粒子和仪器进行量子纠缠来描述。其实测量就是把被测量的粒子和一个宏观系统（测量仪器）耦合起来，如果粒子的

比特是 $|0\rangle_C$ ，仪器显示 $|0\rangle_{\text{Det}}$ ；如果粒子的比特是 $|1\rangle_C$ ，仪器显示 $|1\rangle_{\text{Det}}$ ，其作用原理就跟 CNOT 闸相同。^①

结论

本文指出在 EPR 实验中，测量结果是类空相关的，因此在两个纠缠粒子对之间没有直接的因果联系，这意味着任何一种局域隐变量理论都不可能适用于 EPR 实验，而且根据狭义相对论，超光速的因果关系在物理学中是无效的，如果某个 EPR 因果模型想要符合共因原则，那么它就会违反有限速度条件。

本文反驳 Nancy Cartwright，张夏硕，Iain Martel 认为可以对 EPR 实验中所揭示的超距关联给出一种因果解释，并反驳他们认为狭义相对论不会禁止 EPR 实验中存在超光速传播的类空因果性。

即便是把非局域隐变量作为共同因子，EPR 实验依然不是一个有效的因果关系。因果关系应该满足解释条件：原因可以解释结果。我们不能说在 EPR 实验左边和右边的测量结果可以相互解释，它们只是相互有关联，但并不是对应的因果关系。

EPR 实验中的“统计相关性”不具有可操控的效果，因为任意一边会测出什么结果在那边的实验员眼中都是完全随机的。左边的实验员无法通过操控他的测量仪器去进行控制而让右边出现他想要传递的结果，两位实验员只能在实验结束后比对数据时才会发现彼此的数据呈现关联性，他们也无法利用这种关联性来传递信息，否则就会违反不可通信定理。

本文最后说明 EPR 实验中的因果悖论其实是由于错误地理解哥本哈根诠释中的“测量”和“塌缩”所导致的：认为先测量其中一边的粒子，会导致塌缩，然后塌缩的信息以超光速“传递”到另一边，于是导致另一边的粒子也瞬间塌缩。而如果采用一种没有“塌缩”概念的诠释来检视此实验，例如在 Everett 诠释中，波函数永远只有么正演化，舍弃了非么正的塌缩，就可以避免在解释 EPR 实验时出现因果悖论。

在 Everett 诠释的框架中，不会出现“某一边的测量操作能够超距影响另一边的测量结果”如此超光速的结论。左边测量结果的统计分布完全独立于右边所做的任何事情。在理论计算上，两位实验员的测量结果的独立性是通过他们的观察量与其他人的观察量可对易这一事实来保证的；在量子场论中，局域性是通过类空分离点处的场算符彼此可对易这一事实来表达的，这也确保了任何因果影响的传播速度都不能超过光速。

^① 另一种理解是：将某一比特作为 CNOT 闸的控制所得到的纠缠态，进行 partial trace 后，求出子系统的密度矩阵和进行测量后的密度矩阵都是相同的对角矩阵。

On Causality in EPR Experiments—Taking Everett’s Interpretation as an Example

Abstract:

This article points out that in the EPR experiment, there is no causal connection between the two sides. If a causal model wants to comply with the principle of common cause, it will lead to faster-than-light information propagation. Even if non-local latent variables are used as common factors, it does not mean that the measurement results on both sides can influence each other. They are only related to each other, but not corresponding causal relationships.

The "statistical correlation" in the EPR experiment does not have a controllable effect, because the results measured on either side are completely random. The experimenter cannot control the other side to produce the results he wants to transmit by manipulating the instrument. The two experimenters can only discover the correlation between each other's data when comparing them afterwards, and they cannot use this correlation to transmit information, otherwise the incommunicability theorem will be violated.

This article draws a causal model diagram to analyze the EPR experiment, and uses the Everett interpretation and the quantum circuit diagram to demonstrate. It shows that the causal paradox in the EPR experiment is actually caused by a misunderstanding of "measurement" and "collapse" in the Copenhagen interpretation. If the Everett interpretation without the concept of "collapse" is adopted, it can be avoided when interpreting the EPR experiment. Paradox of cause and effect.

In Everett's interpretation, the physical meaning of "measuring" a particle is to entangle the particle with the measuring instrument. When the local particle is measured, it will only be entangled with the local instrument, so there is no non-local interaction. The state of the particle does not change in any way because the particle on the other side is measured. No matter who measures first on the left or right, there will be no influence on each other. There will be no effect of the result of the first measurement on the result of the later measurement through superluminal action, and there will be no paradox that overturns the order of cause and effect.

Keywords: EPR experiment, Everett interpretation, quantum mechanics, causality, quantum circuit

参考文献

- Beebe H, Hitchcock C, Menzies P. The Oxford Handbook of Causation[M]. Oxford University Press, 2009.
- Bell M, Gao S. Quantum Nonlocality and Reality: 50 Years of Bell's Theorem[M]. Cambridge University Press, 2016.
- Bohm D, Aharonov Y. Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky[J]. Physical Review, 1957, 108(4): 1070.
- Chang H, Cartwright N. Causality and realism in the EPR experiment[J]. Erkenntnis, 1993, 38(2): 169-190.
- Clauser J F, Horne M A. Experimental consequences of objective local theories[J]. Physical review D, 1974, 10(2): 526.
- Costa de Beauregard O. Two lectures on the direction of time[J]. Synthese, 1977, 35(2): 129–154.
- Einstein A. Maxwell's influence on the development of the conception of physical reality[J]. James Clerk Maxwell: A Commemoration, 1931.
- Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?[J]. Physical review, 1935, 47(10): 777.
- Fine A. Do correlations need to be explained?[M]//In James T. Cushing & Ernan McMullin (eds.), Philosophical Consequences of Quantum Theory. University of Notre Dame Press, 1989: 175-194.
- Gao S. A new EPR-Bohm experiment with reversible measurements[J]. 2022.
- Gao S. Is superluminal signaling possible in collapse theories of quantum mechanics?[J]. Foundations of Physics, 2023, 53(5): 87.
- Lewis D. Causation[J]. The journal of philosophy, 1973, 70(17): 556-567.
- Martel I. The Principle of the Common Cause, the Causal Markov Condition, and Quantum Mechanics[J]. Philosophy of Science, 2008: 242-261.
- Newton I. Newton: philosophical writings[M]. Cambridge University Press, 2014.
- Pearl J. Causality[M]. Cambridge University Press, 2009.
- Price, H. (1997). Time's arrow and Archimedes' point: New directions for the physics of time. Oxford University Press. pp. 247-248.
- Redhead M, La Rivière P. The relativistic EPR argument[M]//Potentiality, Entanglement and Passion-at-a-Distance: Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony Volume Two. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997: 207-215.
- Reichenbach H. The direction of time[M]. University of California Press, 1956.
- Salmon W C. Scientific explanation and the causal structure of the world[M]. Princeton University Press, 1984.
- Schilpp, P. A. Albert Einstein: Philosopher-Scientist[M]. Evanston: Library of Living Philosophers, 1949.
- Skyrms B. EPR: Lessons for metaphysics[J]. Midwest Studies in Philosophy, 1984, 9(1): 245-255.
- Van Fraassen B C. The Charybdis of Realism: Epistemological implications of Bell's inequality[J]. Synthese, 1982, 52(1): 25-38.

Van Fraassen B C. Quantum mechanics: An empiricist view[M]. Oxford University Press, 1991.

Van Fraassen B C. The scientific image[M]. Oxford University Press, 1980.

Von Neumann J. Mathematical foundations of quantum mechanics[M]. Princeton university press, 2018.

汉斯·赖欣巴哈. 量子力学的哲学基础[M]. 侯德彭译, 北京: 商务出版社, 2018.