



量子十问之二

“爱因斯坦幽灵”能用来实现超光速通信吗？

郭光灿[†]

(中国科学技术大学 中国科学院量子信息重点实验室 合肥 230026)

大家知道，爱因斯坦对量子力学的发展做出了极其重要的贡献。然而，爱因斯坦并不喜欢“量子世界的概率性”，他不相信上帝会以掷骰子的方式创造世界，尤其不能认同以玻尔为首的哥本哈根派对量子力学的诠释。因此，他多次与玻尔就量子力学基本问题发生激烈争论，不过每次他都以失败告终。后来，爱因斯坦便改变争论的策略，即从量子力学原理出发，推演出一个十分荒谬的结果，以期来证明，量子力学用于描述世界是“不完备的”，这就是爱因斯坦等人1935年提出的著名的“EPR佯谬”。

设想有一个量子系统由两个自旋为 $1/2$ 的粒子构成，每个粒子的自旋要么向上(\uparrow)，要么向下(\downarrow)，但两个粒子的总自旋为零，这意味着

它们总是处于自旋相反的状态。现在将粒子A和B分别配置于相距遥远的两个地方，例如，A在地球上，B在月球上。按照量子力学的预言，每个粒子的自旋方向是不确定的，在任何方向上测量会有一半概率向上，一半概率向下。但如果地球上的粒子A被测量并发现其自旋向下，那么月球上的粒子B即便不测量也能确定其自旋必定向上，因为AB自旋总是相反的。可见，地球上A未测量时，月球上B只有一半概率向上，而地球上A一旦被测量，并发现自旋向下，月球上的B立刻以百分之百概率处于自旋向上的状态。月球上B的状态似乎是瞬时被地球上A的测量所控制，这种控制行为以超光速方式发生。这就是从量子力学原理推演出来的必然结果。

爱因斯坦由此断定，“超光速”行为是绝对不可能发生，他称之为“幽灵般的超距作用”。量子力学造

就出这个不可能存在的“幽灵”，由此可见“量子力学是不完备的”，不足以正确地描述真实的世界。为了正确地描述世界，必须从量子力学理论体系之外引进新的参数(俗称为隐参数)，来消除“量子世界的概率性”，这个“幽灵”也自然就消失掉！这就是EPR佯谬的故事。

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

EPR佯谬提出后，《纽约时报》作为封面新闻报导

2018-09-12收到

[†] email: gguo@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20181107

那么量子力学如何应对EPR佯谬？如何解释这个神奇的幽灵呢？首先，在EPR实验中，月球上B虽然测到自旋向上，但仅从这次测量的结果，无法推断出它是以50%还是100%的概率获得此结果的。换句话说，它根本不可能由此知道地球上A是否被测量这个信息，因此这里根本不存在“信息传送”。即使“幽灵”超光速，也不违背狭义相对论“信息传送不能超光速”的原理。

上述EPR实验中，似乎地球上A的测量是“因”，而月球上B的后测量是“果”，而“幽灵”担负着这个“因果”关联的角色。

但是，如果同时在地球上和月球上分别测量A和B，结果应如何呢？量子力学预言，每次A和B的测量结果自旋总是相反的，而且多次重复这个实验，单独看每个粒子测量的结果系列是完全随机的，A和B两个随机序列则是完全关联，自旋总是相反的，所以实验结果是完全关联的随机数序列，这时不再存在“因”“果”之别了，“幽灵”并不从某处传到另一处，而是扮演将两个随机序列关联起来的角色！

设想我们有100份EPR粒子对(AB)，其中所有A粒子都在地球上，所有B粒子都在月球上，重复前面的实验，结果是地球上所测的100个A粒子自旋向上或向下是完全随机的序列，而且是大约一半向上，一半向下。同样的，月球上B粒子的测量结果也是向上、向下完全随机的序列，向上或向下的数量大约各占一半。但是最令人惊奇的是，地球和月球上分别测到的这两个随机序列是完全关联的：第*i*对EPR粒子中A_{*i*}与B_{*i*}自旋总是相反的。每对EPR粒子都毫无例外是这个结果。

我们知道，量子世界遵从量子态叠加原理。EPR中的量子系统，是由两个总自旋为零的粒子构成的，这个系统同样符合叠加原理。总自旋为零的状态只有两种可能： $|\uparrow\rangle_A|\downarrow\rangle_B$ 和 $|\downarrow\rangle_A|\uparrow\rangle_B$ ，因此，AB系统的状态应当是 $|\psi\rangle_{AB} = \alpha|\uparrow\rangle_A|\downarrow\rangle_B + \beta|\downarrow\rangle_A|\uparrow\rangle_B$ ($|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$)，这个特殊的状态称为“纠缠态”。处于纠缠态的粒子，即使空间上分离遥远，仍然存在内在量子关联，对其中一个粒子的任何操作都会瞬时地改变另一个粒子的状态。所谓“幽灵”，就是这种纠缠！一旦两个粒子存在纠缠，它们的量子关联与粒子之间的距离无关，与空间环境无关，任何电磁屏蔽、引力屏蔽等都无法斩断这种内禀关联。这种量子关联源于量子世界的一种基本属性，称为“非局域性”，这便是“幽灵”的本源！

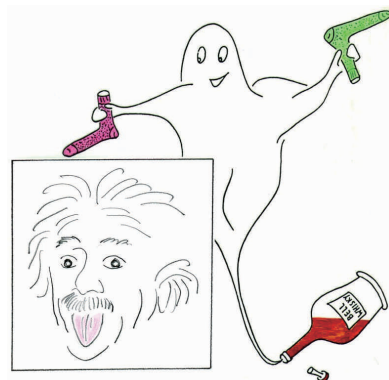
因此，物理学界对EPR佯谬的解释就出现两种截然不同的观点：爱因斯坦等人认为，“幽灵”不存在，世界是局域的，量子力学不完备，必须以“隐参数理论”代之；玻尔等人认为，量子世界是非局域的，“幽灵”理应存在，量子力学是完备的，无需引入“隐参数”。世界究竟是“局域”还是“非局域”这是个哲学问题，难以断定孰是孰非！多亏欧洲核子研究中心的理论物理学家贝尔(Bell)的贡献才打破了这个僵局。贝尔本人实际上是爱因斯坦的铁杆粉丝，他认为爱因斯坦更聪明，“隐参数理论”应当是正确的。1964年，他推导出一个有关EPR实验的不等式，即著名的“贝尔不等式”。如果能验证这个不等式被违背，则“隐参数理论”就不成立。

1982年，法国学者阿斯派克特首次在实验上证实，贝尔不等式被

违背。其后人们采用各种物理系统和实验手段开展实验研究，最终无漏洞地证实，贝尔不等式被违背，量子力学是完备的，非局域性是量子世界的重要基本性质。因此，关于EPR佯谬这场经历了60多年精彩绝伦的学术争论到了该谢幕的时刻了！爱因斯坦如果在天有灵，看到他质疑量子力学完备性而提出的EPR佯谬，终被证明是“佯”而不“谬”，反而揭示出量子世界的非局域性这个最基本性质，不知会有何感想？

为便于理解量子世界的非局域性，我们举个不太恰当的例子：在合肥的母亲，当她在深圳的女儿生下头胎婴儿的那一瞬间，她立刻升格为外婆，这就类似于EPR效应。这件事并不需要时间就发生了，尽管母亲并不知道关于她女儿生下婴儿的任何信息。原因在于母女之间的身份关联，女儿成为母亲的瞬间就必然导致自己的母亲成为外婆。

既然“量子世界”确实存在“超光速”的“幽灵”，那么人们自然会问，能否将这个“幽灵”引到我们的经典世界中来，开发出“超光速通信”？许多科学家进行了不懈努力，最终的结论是，这是绝对不会成功的。量子力学的基本原理业已证明，不可能利用纠缠态来实现超光速通信。



“幽灵”般的超距作用(图片来源于网络)