

## 量子关联呈现出一种新的形态

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 Matthew F. Pusey. *Physics*, September 30, 2019)

具有三角形几何的一个量子网络显示出非经典的相关性，这些相关性似乎与迄今经 Bell 测试发现的相关性有根本的不同。

Bell 实验或许提供了最清晰的证据，说明量子物理学是如何从根本上脱离经典物理学的。在这类实验中，用特殊的纠缠态制备了一对量子粒子，并分别进行了测量。测量结果发现，与任何局域经典理论所允许的数值相比，两个量子间有更强的相关性。在过去的几十年里，人们在理论和实验上做出了巨大的努力来研究这一现象——最近才做出了第一次无懈可击的演示——并将其应用于量子信息。但所有这些工作都停留在 John Stewart Bell 50 年前使用的同一个模板上：两个或更多的粒子由同一个源联合制备，然后独立测量。现在，日内瓦大学的 Marc-Olivier Renou 和他的同事们

打破了这种模式，发现了一种新的量子关联形式。它出现在一个更复杂的、由源和观察者组成的三角网络中(见图)。这一结果提供了一个诱人的暗示，即可能存在不同种类的、与 Bell 识别完全不同的非经典关联。

1935 年，Albert Einstein, Boris Podolsky 和 Nathan Rosen (EPR) 指出，量子理论在两个相距遥远的纠缠粒子对中，预言了奇特的关联。他们提出了一个局域性假设——对一个粒子的测量不应该立即对另一个粒子的状态产生影响——他们认为需要完备量子理论才能解释这些关联。但 Bell 后来证明，实验也许能够揭示足够强的量子关联，从而排除了 EPR 上述乏味的解释。

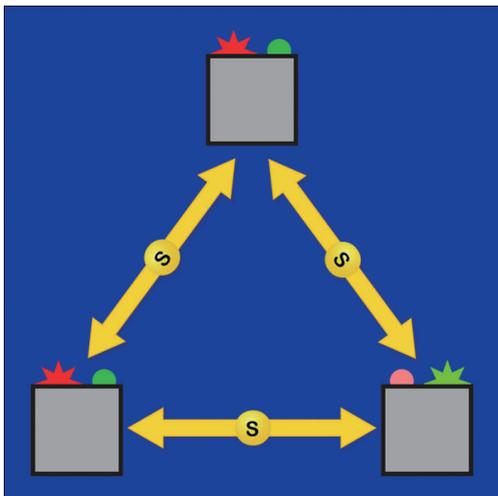
在理论方面，研究人员对 Bell 非局域做出了较好的数学理解，将其推广到较大数量的纠缠粒子，并提出了该现象的若干加密应用。在实验方面，在更严格的条件下展示了难以解释的相关性。最终完成了“无漏洞”演示。

所有这些研究都涉及相同的“Bell 场景”：一个共同的量子源，制备两个或多个粒子，它们之间相互纠缠；然后观察者对每个粒子进行随机的、独立的测量。在刚刚过去的 10 年里，研究人员开始着眼

于更复杂的量子源和测量网络，寻找可能导致量子信息应用的非经典新形式。例如，在双局域场景，2 个独立的源与 3 个观察者共享纠缠对。这个场景可以用来研究纠缠交换(entanglement swapping)——一种不直接相互作用的粒子纠缠方式。

无论是双局域还是三角形方案，这些例子最终归结为违反了标准的 Bell 不等式。然而，有理由相信，Renou 和他的同事所确定的量子关联是三角形场景中固有的，提供了第一个与 Bell 场景有根本不同的关联示例。研究人员的方法是专注于三角形场景，并寻找正确的相关性。遗憾的是，人们很快就发现，当这些状态和测量数据结合在一个三角形网络中时，它们的量子性就会抵消掉，从而导致关联并不比经典的关联更强。

识别这些新的关联形式只是第一步。所选择的被测量子属性和测量程序——本征地与三角形几何学相联系——是一个强烈的暗示，表明关联不可能仅仅是标准 Bell 非定域性的表达。除了 Bell 场景，还有许多其他的场景，新类型的量子关联可能正在等待被发现。正如 Bell 非局域性，已经被证明是密码任务的一种资源——例如量子密钥分配和随机比特的产生——一些新的量子关联形式可以应用于新的任务中。



在三角形场景中，三角形边上的 3 个独立源将纠缠态分配到位于三角形顶角处的 3 台测量装置上。每台测量装置对来自近邻的量子粒子进行联合测量