

## 用原子团实现 EPR 佯谬

(浙江大学 颜波 编译自 Margaret D Reid. *Physics*, May 30, 2023)

1935年，爱因斯坦、波多尔斯基和罗森(EPR)提出一个论点，声称量子力学对实在性的描述不完整。该论点基于“局域实在性”假设。约翰·贝尔随后提出了一种实验方案来检验这些“局域实在性”假设，这些贝尔测试已经在一些小的系统，例如电子或光子，否定了这个假设。现在，瑞士巴塞尔大学的Paolo Colciaghi及其同事在由数百个原子组成的更大的原子团上检验了EPR佯谬。

大多数贝尔测试是在成对的单粒子上进行，而Colciaghi及其同事使用的是数百个铷-87原子构成的原子团。他们首先在势阱中制备单个玻色—爱因斯坦凝聚体，然后调控相互作用使凝聚体内的原子产生纠缠(如图所示)。一旦从势阱中释放出来，凝聚体会膨胀形成两团相互纠缠的原子团，相隔可达100 μm。为了对佯谬开展检验，需要测量两个非对易可观察量。Colciaghi及其同事没有像EPR设想的那样使

用位置和动量，而是使用“赝自旋”——一对量子态，它们像自旋一样构成了一个两能级系统。这些“自旋”由两个超精细能级定义，每个原子团的自旋由一个能级的原子数减去另一个能级的原子数决定。为了测量第一个非对易自旋可观测量，直接计数每个能级中的原子。互补的第二个自旋可观测量是在计数之前使用一个与原子相互作用的脉冲来测量的。之前科学家已经使用原子系综进行了EPR测试，但这里有一个重要的不同：在这个实验中，测量设置的选择，意味着测量两个非对易自旋中的哪一个，是为每个原子团独立做出的。这种独立性对于真正的EPR佯谬是必不可少的，没有它，我们不能排除系统之间的影响。

Colciaghi及其同事通过确定从原子团B的自旋测量中推断原子团A的自旋的误差来探测EPR相关性，首先是在没有脉冲时，然后是当脉冲同时应用于A和B时。

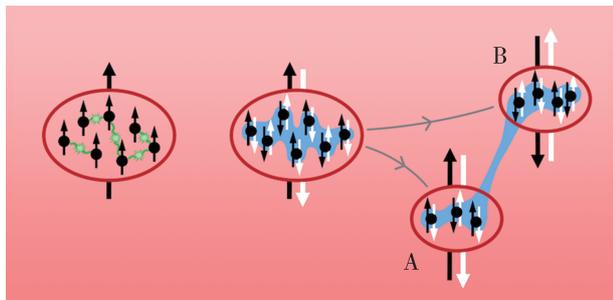
虽然不为零，但这些误差的乘积相对于实验中测得的海森伯不确定性乘积的下界较小。贝尔不等式被违反，因此佯谬得到证实。

然后，研究人员对他们的实验进行了非常有启发性的修改。

1935年，薛定谔用他著名的处于叠加的猫态(薛定谔猫)的例子回应了EPR的论点。鲜为人知的是他提出一种通过调整测量设置，同时测量两个互补变量，“一个通过直接测量，另一个通过间接测量。”薛定谔考虑过这种测量设置(当设置固定但在测量最终确定之前)是否会影响到两个变量精确测量，他质疑这种值的确定是否与量子力学兼容。Colciaghi及其同事通过操纵测量脉冲控制测量哪个自旋来创建了这样一个场景：保持原子团B的设置固定，他们改变原子团A的设置。

研究人员表明，他们可以直接测量原子团A的一个变量，同时从原子团B上的测量间接推断互补变量的值。此外，通过再次调整A的设置，他们展示了与原子团A的相关性如何被B处的测量恢复。这说明改变原子团A的设置不会改变通过测量B对A处的互补变量做出的预测的正确性。这些实验的介观特性似乎加强了薛定谔的论点：一旦测量设置确定，即使没有最终测量，可观测量将是固定的。

这些结果的含义还没有彻底弄清楚。要确认间接获得的A处值，需要进一步作用来更改设置，这意味着量子态会发生变化。因此，在测量之前确定两个自旋值的说法并不违反不确定性原理；贝尔定理也不排除这些值，该定理指的是在固定设置的相互作用之前定义的变量。这些问题仍然悬而未决，很可能通过对最近的实验进行更仔细的分析来阐明。



Colciaghi及其同事使用由数百个铷-87原子组成的两团“赝自旋”对EPR佯谬进行了检验。当原子以玻色—爱因斯坦凝聚体被囚禁时(左)，原子之间会发生相互作用，导致它们纠缠在一起(中)。当凝聚体被释放时，它形成了两个独立的原子团，彼此之间的赝自旋纠缠在一起