

双色光量子比特

(北京大学 王树峰 编译自 Philipp Treutlein. *Physics*, November 23, 2016)

单个光子可以被置于两种不同颜色的叠加态，这种双色光子的实现将在量子信息处理中发挥重要作用。

光子是光的量子形态，它的发现是量子物理的关键一环。如今在诸如量子计算、安全通信以及精密测量等量子技术中，光子是最重要的基石之一。这些应用通常依赖对光子偏振或空间模式的量子控制。但令人诧异的是，光的颜色(频率)这一最显见的特性却很难在量子水平上加以控制。

根据量子物理理论，频率为 ν 的单色光由具有能量 $E=h\nu$ 的光子组成(h 为普朗克常数)。而诸如来自太阳的多色光则包含有许多不同的频率，其中每一个光子独立地具有某一确定的频率和能量。有趣的是，量子物理中的叠加原理允许另外一种多色光：处于两个分立频率(颜色) ν_A 和 ν_B 叠加态的单个光子。此时，光子的频率和能量都不确定，或者说，这种双色光子同时具有两种颜色，但是人们利用光谱仪或者

眼睛观察的时候，只能看到其中之一。

产生和操控双色光子是一个很大的挑战，困难之处在于这个过程要求不同频率间光子的相互作用，即单光子非线性过程。已经有一些实验成功地产生了可用的单光子非线性。最近，来自纽约康奈尔大学的Stéphane Clemmen及其同事利用光纤的非线性过程成功产生了双色光子，实现了操控并展示了相干性。

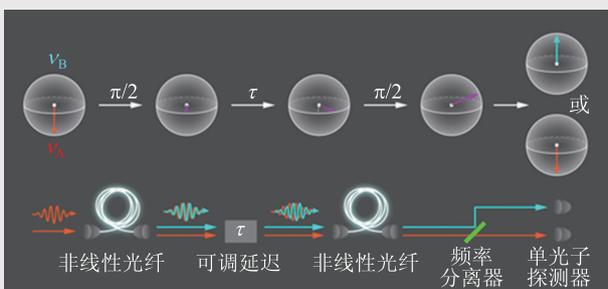
他们的实验基于一种布拉格散射四波混频过程，在一根100 m长的光纤中实现了高效的单光子频率转换。他们用两束不同频率的激光泵浦光纤产生所需的非线性响应，光束间的频率差决定了用于叠加的 ν_A 和 ν_B 间的频率差。利用这一装置，他们将具有频率 ν_A 的单光子送入光纤，通过非线性过程，将光子

调整泵浦激光，使得两个光子频率等量叠加。随后，通过介质传播延迟来调整相对位相 ϕ ，再第二次将光子送入光纤。最后，将产生的光子中的两个频率成分分开，并用单光子探测器加以探测。当改变传播延迟(即改变 ϕ)时，探测到光子的概率在两个探测器间以正弦形式振荡。这些条纹可观测衬比度达到了65%，证明了相干叠加的产生。同时，研究展示了每次探测到超过一个光子的概率很小，这确证了他们所获得的叠加态保留了初始的单光子特性。

这项研究引人注目之处是单个光子可以处于两种不同颜色的叠加态。他们所采用的波长是近1280 nm的红外光，波长差为4 nm。将来，这种方法可以连接不同工作频率的红外量子系统，比如固态和原子量子存储。我们可以想象这两个物理上不同的量子存储器分别吸收处于频率叠加态的单个光子的一部分。这两个量子存储通过以相干的方式分享同一激发，从而产生纠缠。这种连接方式会有助于创建量子网络，该网络构成了量子通信、计算与模拟的基础。双色量子比特的另外一种应用是仅用少量光检查量子比特态的光谱依赖位相变化。

更多内容详见：Stéphane Clemmen et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117: 223601。

转化为 ν_A 和 ν_B 的叠加态(见图)。重要的是，Clemmen等人证明了他们产生的是一个相干叠加而不是一个非相干的混合(后者是指光子随机地具有这两个频率的其中之一)。他们



图中表示单一频率(颜色)光子转换为双色叠加态，随后用拉姆齐(Ramsey)谱验证了光子的相干性。底图为单个频率为 ν_A (红色)的光子被送入非线性光纤，转化为 ν_A 和另一个频率 ν_B (蓝色)的叠加。顶图中布洛赫球上的极角为 θ ，方位角为 ϕ 的矢量表示多个转换步骤中的光子态