

光子量子开关

(清华大学 龙桂鲁 任宝藏 编译自 Ashley G.Smart. *Physics Today*, 2014, (9): 15)

经典信息网络中数据包通过路由器被准确地发送至收信地址。同样，在量子信息网络中，信息在网络节点间的准确传输也需要量子开关(量子路由器)。光子系统是量子通信和量子计算中常用的信息载体，因此光子量子开关需要在不破坏光子所携带信息的情况下控制光子的传输路径。最近，以色列霍雷沃特的魏茨曼科学研究所 Barak Dayan 小组的一项研究有望解决这一问题。

他们设计了一个光子量子开关，实验原理如图 1 所示。通过控制耦合于微球谐振腔的铷原子量子态，能够实现量子开关对光纤中光子传输路径的选择(包含两个输入路径和两个输出路径)。通过原子与光子的连续相互作用，光子量子开关能够达到控制光子传输路径而不破坏编码在光子叠加态中的量子信息的效果。

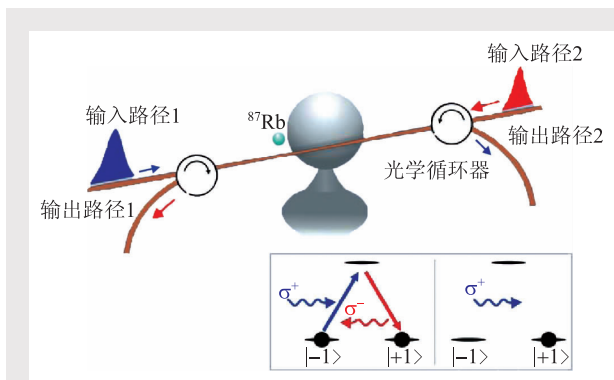


图1 光子量子开关。耦合于微球谐振腔的铷原子用于控制光纤中光子的传输方向(两个输入路径和两个输出路径)。从左向右传输的光子为 σ^+ 光子(蓝色)，而从右向左传输的光子为 σ^- 光子(红色)。通过原子 $| +1 \rangle$ 态和 $| -1 \rangle$ 态的切换能够控制光子的输出路径。 $| -1 \rangle$ 态反射 σ^+ 光子透射 σ^- 光子，而 $| +1 \rangle$ 态透射 σ^+ 光子反射 σ^- 光子。光学循环器用于将输出光子引入输出光纤

光子量子开关的核心技术是利用回音壁模式(WGM)二氧化硅微球谐振腔束缚光子，即光子在微球谐振腔中沿着球的赤道传输，并被微球的内壁完全反射。当回音壁谐振腔靠近光纤约为几百纳米时，它们的电磁场会发生耦合，光子能够在谐振腔和光纤之间来回跃迁。光子进入谐振腔会与附近的原子发生耦合。最后光子跃迁回光纤。光子在光纤中的传输方向由谐振腔的传输模式决定。谐振腔有两种传输模式：顺时针方向和逆时针方向。向左传输的光子与顺时针方向模式耦合，向右传输的光子与逆时针方向模式耦合。

在回音壁谐振腔中，光子的电磁场有一部分投影到光子的传输方向。因此被束缚的光子有可能处于 TM 模，即光子的电场具有纵向分量，但磁场仍然是严格横向的。TM 模光子

电场的纵向和横向分量具有不同的振荡相位，因此会产生电场旋转的圆偏振光。在谐振腔中，顺时针方向和逆时针方向传输的光子电场具有不同的旋转模式。维也纳理工大学的 Arno Rauschenbeutel 发现 TM 模光子的自旋角动量能够改变原

子的自旋方向。因为光子的自旋模式与光子的传输方向有关，所以原子能够区分向左传输和向右传输的光子。

在谐振腔中，向右传输的光子接近于右旋圆偏振光(σ^+)，而向左传输的光子接近于左旋圆偏振光(σ^-)。光子与一个三能级铷原子相互作用。铷原子在激发态和基态之间的跃迁分别对应于磁量子数 $+1$ 和 -1 。 $| -1 \rangle$ 态原子能够吸收 σ^+ 光子，并通过辐射 σ^- 光子衰减为 $| +1 \rangle$ 态(原子不会通过辐射 σ^+ 光子衰减为 $| -1 \rangle$ 态)。 $| +1 \rangle$ 态原子反射 σ^- 光子，而 $| -1 \rangle$ 态原子透射 σ^- 光子。利用光子能够切换量子开关的状态，即：从输入路径 1 入射的光子能够将原子切换到 $| +1 \rangle$ 态，之后入射的光子经过量子开关后从输出路径 2 射出。同样，从输入路径 2 入射的光子能够将开关切换到输出路径 1。

Dayan 小组的实验方案是将一团激光冷却的原子束缚于二氧化硅谐振腔的上方并释放原子。自由下落的原子会进入距离谐振腔表面 100 nm 的范围，以达到与谐振腔的电磁场相互作用且不会落到谐振腔表面的效果。在现阶段，光子量子开关中光子的透射率为 90%，反射率为 65%。理论上，透射率和反射率能够达到 100% 和 90%。如果实验操作的成功率能够达到理论上限，利用光子量子开关能够完成更多复杂的可扩展量子信息操作，例如量子存储和量子逻辑门等。