

光的拓扑物理

(中国科学院物理研究所 李永庆 编译自 Mohammad Hafezi, Jacob M. Taylor. *Physics Today*, 2014, (5): 68)

在拓扑绝缘体中，电子围绕着材料在边界上运动，不会进入到体内。不带电荷的光子可被诱导出类似的行为。

物理学家用很多性质对系统进行分类和理解，例如大家熟知的有颜色、质量和长度。本文的主题是一个更微妙的性质，即一个系统的拓扑。上世纪八十年代，物理学家就认识到一些物理性质完全由系统的拓扑来决定。

拓扑现象的一个典范是量子霍尔效应。考虑一个带电粒子被限制在一个二维平面内运动，如果垂直于该平面施加磁场，带电粒子会做回旋运动。远离样品边缘的粒子在闭合轨道上运动，它们对电导没有贡献。然而，接近边缘的轨道不能闭合，粒子可沿着边缘进行跳跃式行进。这一内部绝缘、边缘导电的系统被称为拓扑绝缘体。

六年前，Haldane 和 Raghu 指出，拓扑效应也可用光观察到。然而，他们的方法依赖于光学频率很微弱的磁光效应，相关的研究因此局限于微波频段。最近，本文作者及其合作者探索出了实现光的拓扑效应的另外途径。

早前发现的拓扑效应背后的物理实际上是由电子围绕一个环运动时电子波函数所获得的相位来支配。这样的相位可以用任何粒子，甚至是光子这样的中性粒子来构造。在图 1(a)中，在环形轨道上运动的电子获得的相位 $e^{-i\phi}$ 用以下方式直观地表示：相位因子 ϕ 每改变 2π 对应着一次摆动。图中的两个轨道都对应着整数次摆动，以确保波函数能被明确地定义。沿着环形路径运动的电子积累的相位与穿过轨

道的磁通有关。对于顺时针方向的路径，磁通的贡献为正值，逆时针的路径为负值。这两个方向的环绕运动导致不同数目的位相摆动，尽管它们包围着相同的面积。这就是本文作者想要用光来复制的效应。

用光展示拓扑物理的一个简单方案是采用图 1(b)所示的环形谐振器平面组合：光子沿顺时针方向环绕每个谐振器运动。当光子由其中一个谐振器泄露到相邻的另一个时，可依据其方向构造出不同的传播路径。在这个四谐振器组合中，逆时针方向的路径距离比顺时针路径更长；对于前者，光子获得了更多数目的相位摆动。

一个恰当设计的光学谐振器阵列(图 1(c)为实际器件的显微图)可模拟在磁场中带电粒子从一个位置跳

到另一个位置。要观察光子沿着谐振器阵列边缘的跳跃行进，可对漏出器件的光直接成像(图 1(d))。因为不需要磁场，这样的系统类似于其他时间反演不变的拓扑系统，如量子自旋霍尔系统。

目前，用光类比拓扑绝缘体的研究集中于两个方面。一个是把这种器件用于应对光子系统所面临的一些实际挑战，例如增加光纤中传输信息的密度。另一个则与增强相互作用有关。迄今为止，实验上的努力局限于无相互作用的系统。然而，强相互作用的存在会带来极端丰富的物理，如分数量子霍尔效应。增强相互作用需要把光子与一个材料系统结合起来，如非线性光学介质和约瑟夫森结。最近的一些进展昭示着相互作用的光子正向我们走来。

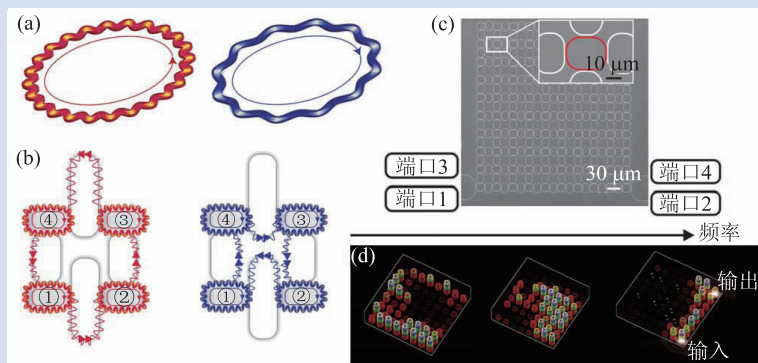


图1 用谐振器展示拓扑物理 (a)带电粒子在磁场中沿逆时针(红色)和顺时针(蓝色)方向运动时，波函数的 2π 相位摆动的整数数目不同，其差值正比于穿过环形轨道的磁通；(b)利用波导耦合起来的一个四谐振器平面组合。光子运动逆时针路径为红色，顺时针为蓝色，前者路径更长，这导致两个路径所获得的相位不同；(c)一个谐振器阵列器件的电子显微图。光从器件底部的左侧和右侧波导端口进出。上面的嵌入图中，谐振器为红色，波导为白色；(d)取决于输入该阵列的光的频率，光可以选取从输入端口绕到输出端口的长路(左)，或被限制于阵列内部(中)，或者只在一个边缘传播(右)