

科学家首次观察到周期倍增的布洛赫振荡

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/25975.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

科学家首次观察到周期倍增的布洛赫振荡。上海交通大学叶芳伟课题组首次观察到了布洛赫振荡的周期倍增现象，借此测量了一类特殊的拓扑不变量 μ ，该拓扑不变量反映系统能带的交叉次数。相关成果于北京时间2024年1月29日发表在Physical Review Letters上。

论文的第一作者是课题组博士生Naveed Khan和王鹏博士后，通讯作者是傅其栋博士后和叶芳伟教授。

布洛赫振荡是指在周期性势场中的一个粒子——该粒子不是纯粹的粒子，而是由量子力学波包描述——在恒定外力的作用下，呈现周期性来回振荡的现象。波包完成一次完整的振荡周期，对应着在布里渊区扫描能带一次。由于直接对应着波矢空间的能带遍历，因此，布洛赫振荡成为揭示系统的能带结构和输运特性的一个有力工具。

布洛赫振荡本质上是系统平移不变性的物理反映。因此，作为一个普遍的波动现象，布洛赫振荡不但出现在普通的材料系统中，也可以出现在所谓的拓扑材料中。拓扑材料的能带具有独特的内在拓扑结构，可通过特定的拓扑不变量来描述。这些拓扑不变量直接引发了一些基本的物理现象，如量子霍尔效应和受拓扑保护的表面态。因此，准确判断和测量拓扑不变量对于拓扑材料的识别和表征至关重要。作为该方面一个有力的探测工具，布洛赫振荡已被用于测量拓扑材料的Zak数 Z_2 ，Chern数 C 或Berry相位 Φ 等拓扑不变量。

然而，平移对称性并非是周期结构唯一可能具有的对称性。在很多实际的晶体结构中，除了平移对称性之外，还存在一类所谓的非点式对称性(nonsymmorphic symmetry)。图1所示的枝条两侧的树叶分布，其以枝条为对称轴，就满足一种特殊的非点式对称性——滑移镜射对称性(glide-reflection symmetry)：枝条上侧的树叶和下侧的树叶目前并不满足镜像反射对称性。但是，如果将上侧的树叶沿着对称轴方向向右（或向左）平移半个周期，那么，上侧的树叶就和下侧的树叶满足镜像反射对称性。类似地，图1右图所示的一对脚印也满足此种滑移镜射对称性。注意，图1的树叶或者脚印图样本身还具有基本的平移对称性，因此，滑移镜射对称是叠加在基本的平移对称基础上的一类特殊的对称性。



图1 枝条两侧的树叶（左图），沙滩上的一对脚印（右图），均呈现出滑移镜射对称性。该类对称性是非点式对称性的一种特殊类型。

那么，像图1这样的系统——在基本的平移对称性基础上叠加有滑移镜射对称性（或者更一般地，叠加有非点式对称性）的系统——其能带结构有何特点？研究表明，这类系统的能带会出现交叉，交叉的次数为 $\mu-1$ ， μ 为整数。 $\mu=1$ 对应普通周期结构，即无能带交叉； $\mu=2$ 对应上下能带在布里渊区交叉一次，图1所示的树叶和脚印系统均属 $\mu=2$ 的情况。更加复杂的情况出现在具有所谓的滑移-旋转对称性的系统中，此时的 μ 可能取 2, 3, 4, ……。由于这些系统能带交叉的次数是由对应的非点式对称结构保护的，因此， μ 被称为一类特殊的拓扑不变量。问题是：如何探测系统的非点式对称阶数 μ ？即，如何探测系统中能带是否发生了交叉？如果发生了交叉，则发生了几重交叉？

在本研究中，课题组利用布洛赫振荡，通过振荡的周期，直接探测了非点式拓扑不变量 μ 。在实验中，首先利用光诱导法，在一种名叫铌酸锆钽的光折变晶体中，制备了具有滑移对称性的二维光子晶格结构，见图2（左）。这是一个呈蜂窝状的光子晶格，中间暗红色区域为一个呈之字形的畴壁（domain wall）。不难发现，整个结构，除了在竖直方向上具有基本的平移对称性之外，以该畴壁为中心，结构的左半部和右半部还满足滑移镜射对称性。因此，该复合晶格的能带一定会发生交叉，即 $\mu=2$ ，见图2（右）。图中红色曲线代表局域在畴壁上的两种模式的能带。对于同个波矢 k ，这两种模式之间的相对位相始终维持为 π ，且在布里渊区边界（ $k_y/K=\pm 0.5$ ）处，它们的强度分布完全相同，相位相反（分别为 $\pi/2$ 和 $-\pi/2$ ），于是发生了模式简并，此时两个模式的波函数互为复共轭，也即所谓的Kramer's简并。这种简并受系统的滑移镜射保护，因此，结构上的微扰，比如，晶格的尺寸、振幅、晶格常数并不会解除简并。

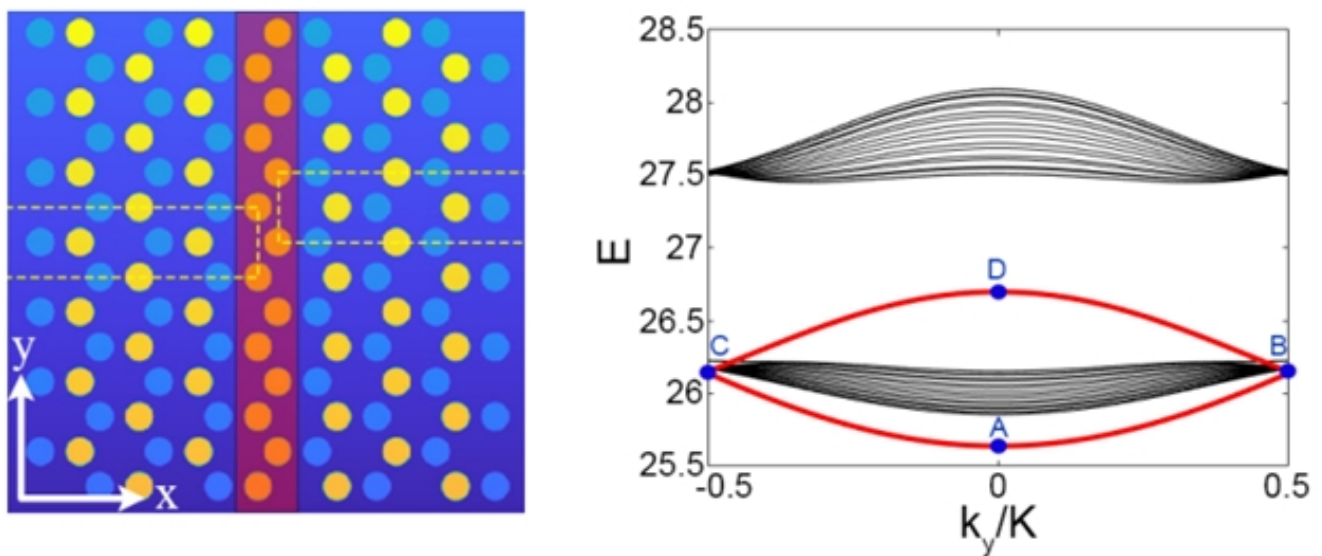


图2 蜂窝状晶格中的之字形畴壁（暗红色区域，左），和对应的能带结构图（右）。左图结构关于畴壁中心呈现滑移镜射对称性。右图中两条红色曲线代表局域在畴壁上的两种模式，黑色曲线则代表体态模式。如果激发出畴壁上的局域模式A，则在外加梯度力的作用下，该波包将沿着A - B - C - D - B - C - A的顺序扫描布里渊区两次（而不是一次！），从而完成一次完整的布洛赫振荡，即本文所谓的周期倍增。

能带的简并导致了布洛赫振荡的周期发生了显著的变化。在实验中，研究人员选择性地激发了畴

壁上的模式： $k_y=0$ 的模式，对应图2中的A点。再通过对整个晶格施加一个沿着竖直方向的折射率的梯度，使得激发的模式波包在梯度力作用下，开始沿着畴壁方向运动。在波矢空间中，这个波包从下能带的A点出发，一直向上运动到B点，然后出现在了C点（C点和B点等价）：模式的位相分布决定了下能带的B点和上能带的C点对应的模式一致，因此波包完成了一次能带之间的无缝跃迁，从下能带跑到了上能带，然后开始在上能带上运动，直到最终又到了B点，此后，它无缝跃迁回到了下能带，最终回到了出发点A，完成了一次完整的布洛赫振荡。很显然，在整个过程中，波包扫描了布里渊区两次，这和传统的布洛赫振荡只需要扫描布里渊区一次即可完成一次完整的周期振荡构成了鲜明对比。实验上，通过比较之字形畴壁和胡须形畴壁上波包的布洛赫振荡，并通过追踪波包质心的轨迹，在不同实验条件下，都清晰地观察到了前者的振荡周期是后者两倍的现象（图3）（后者系统对应 $\mu=1$ ，即能带无交叉的情况，波包在其中经历常规的布洛赫振荡）。

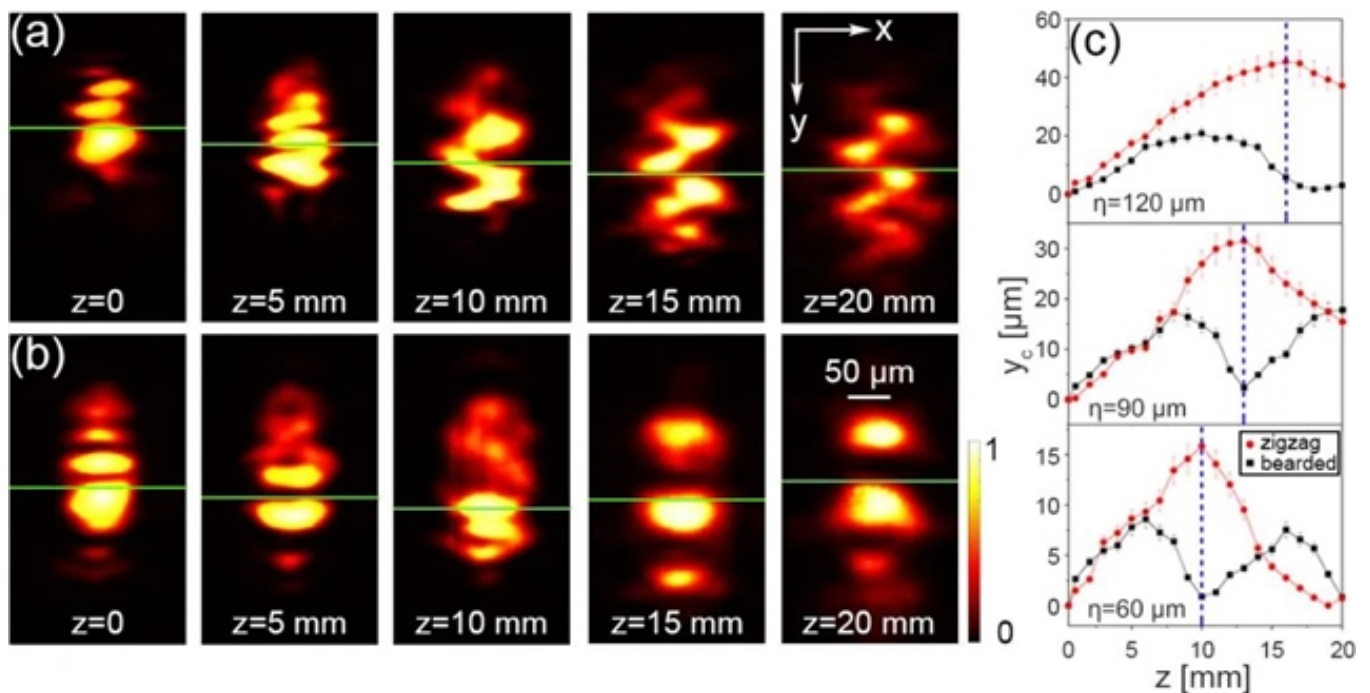


图3 畴壁中波包的布洛赫振荡。(a) 图对应之字形畴壁，(b) 图对应胡须形畴壁。(c) 图比较了不同梯度力作用下，两种畴壁中模式经历布洛赫振荡时的质心轨迹图，图中的竖直蓝色虚线表示之字形畴壁中的波包达到最大位移处的位置，此时它完成了振荡周期的二分之一。可以看到，这个位置刚好对应胡须形畴壁中的波包完成了一个完整的振荡周期，意味着之字形畴壁中波包的布洛赫振荡的周期是常见振荡周期的两倍。

因此，该研究是继通过布洛赫振荡观察到了Zak数 Z_2 、Chern数 C 或Berry相位 Φ 等拓扑不变量之后，观察到的又一类新的拓扑不变量——非点式对称结构中的拓扑不变量 μ 。该研究反映了布洛赫振荡在探测和揭示能带的非平凡结构方面的特殊用途，有望推广应用于检测更一般的非点式对称结构中更为复杂的能带交叉或简并结构。

论文的合作者为来自KAUST的尚策博士后（课题组2019届毕业生）。Naveed Khan是在中国政府留学生基金CSC项目支持下，从巴基斯坦来中国攻读博士学位的研究生。近年来，上海交通大学通过持续改进国际学生教育和培养体系，积极推动国际化教育的发展。本次论文成果为上海交通大学以国际学生为第一作者在Physical Review Letters上发文，显示上海交通大学和物理与天文学院在留学生教学和培养质量方面的快速进步和不断提升。（来源：科学网）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.053801>

作者：叶芳伟等 来源：《物理评论快报》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发