

新聞稿

即時發佈

港大物理學者與合作團隊

在超構材料體系中發現了能對應高維空間的拓撲態

為研發新型集成光子線路器件帶來契機

2021 年 8 月 26 日

由香港大學（港大）物理學系張霜教授領導的團隊，首次通過實驗觀測到互相纏繞的外爾表面（Linked Weyl surfaces），一種存在於五維空間中的新型拓撲相。這個工作為研究五維物理體系的各種拓撲相、它們之間的轉變，以及與之對應的表面態效應提供了一個獨特的平台。該研究論文近期剛於著名學術期刊《科學》中發表。

拓撲相和外爾表面有何重要？

在幾何學中，拓撲性質僅與形狀的全局特徵有關，而與具體的細節無關——其中一個著名的例子是拓撲等價的咖啡杯和甜甜圈（圓環），它們可以通過連續的形變而相互轉變，期間不會經歷劇烈的變化，例如開孔、撕裂、粘合等。

拓撲學已被成功應用於各種物理體系，並產生了許多有趣的現象，例如量子霍爾效應（quantum Hall effect），以及魯棒的無背向散射的單向傳播（robust one-way surface wave）的表面態。拓撲物理學為電子學和光子學中的新型器件和應用帶來了契機，例如成就了大規模拓撲量子計算和拓撲激光器等高端技術。

在各種拓撲物理系統中，「外爾點」作為能帶拓撲理論中貝里曲率的源頭，因而受到了特別的關注。在一個外爾點附近，色散關係沿着所有動量方向均呈線性，因而構成一種無質量的粒子態。外爾粒子（Weyl particles）於 1929 年由德國物理學家赫爾曼·外爾首次預測，卻一直未有以基本粒子的形態被發現。近年，人們提出外爾點可以以準粒子的形式存在於某些凝聚態系統中，並於 2015 年首次被實驗觀測。外爾點是石墨烯（由單層石墨構成的二維繫統）中發現的著名的狄拉克點的三維對應。外爾點從三維到更高維度的拓展預

計會引入更為複雜和有趣的拓撲現象，例如高維量子霍爾效應。簡單來說，在五維動量空間裏有兩種可能的構型存在——楊單極子（Yang monopoles）和外爾表面。其中，楊單極子由楊振寧教授於 1978 年首次提出，是存在於五維動量空間中的孤立點，可以視為產生非阿貝爾貝里曲率的拓撲荷（non-abelian Berry curvature）。而外爾表面的纏繞特徵，可以看作成第二陳數的一個很重要的直接特徵。最近，有團隊在完全的合成維度空間上實現了楊單極子；然而，直到現在，還沒有對外爾表面的直接實驗觀測。

透過實驗觀測複雜的外爾表面

張霜教授的團隊聯同吉林大學、香港科技大學和清華大學的研究團隊，通過超構材料 (metamaterial) 的精巧設計實現了具有相互纏繞的外爾表面的系統。超構材料是一種人工設計的電磁共振結構，具有奇異的光學特性，如負折射和隱形斗篷等。作者通過把三個真實動量空間維度和兩個額外的合成動量維度構建了一個等效的五維物理系統。這些額外的維度是由超構材料實現的獨特電磁性質「反對稱雙各向異性」所提供。他們設計的超構材料的單元結構是由八個不同手性的金屬螺旋通過精細排列組成。通過精心設計每個螺旋的幾何形狀和方向，可以實現任意可控的合成動量。通過進一步降低結構的整體對稱性，可以讓外爾表面在五維空間進行旋轉，並把其纏繞特性投影到三維實動量空間，因而可以在實驗中直接觀測。根據不同的旋轉，纏繞的外爾表面在三維子空間可以表現為不同的形式，如被一個球面包裹的點，被一個平面分隔開的兩個點，或者三維空間中兩個相互纏繞的節線環，如圖所示。這種纏繞直觀地揭示了系統的非平凡的第二陳數。這個高維空間存在的有趣的拓撲特徵在低維體系中找不到任何對應；作者進一步觀察到這種不尋常拓撲相的關鍵特徵——在五維系統的四維邊界的表面態中存在的一維的外爾弧。

研究高維度拓撲相的新方向

這項工作為研究高維度的各種拓撲相打開了大門。它提供了低維繫統不同拓撲相的統一視圖，如外爾點、節點線和狄拉克點，並展示了低維繫統中不存在的一些拓撲現象；對於器件應用，通過把器件的設計參數作為新的額外維度，並利用高維拓撲的概念，可用以控

制電磁波在人工設計的電磁結構中的傳播，亦可以實現不受散射損耗影響的單向拓撲體態的集成光路，並可應用於光信息處理。

合成維度下的高維平台還將各種人工規範場和有效磁場帶入拓撲光子學。除了手性的零階朗道能級（chiral zeroth Landau levels）之外，還可以在超構材料系統中探索其他難以捉摸的現象，例如量子振盪、蟲洞效應，以及非阿貝爾規範場引起的效應。通過引入有效電場，即空間相關的頻率響應，還可以設計實現高維的手徵異常。張教授表示：「我們的工作是對五維空間中外爾曲面和外爾弧之間聯繫的首次實驗觀測，利用超構材料的設計靈活性和可調性，它將引入一個高維拓撲相探索的新時代。」

論文詳情：超構材料中的纏繞的外爾表面和外爾弧。

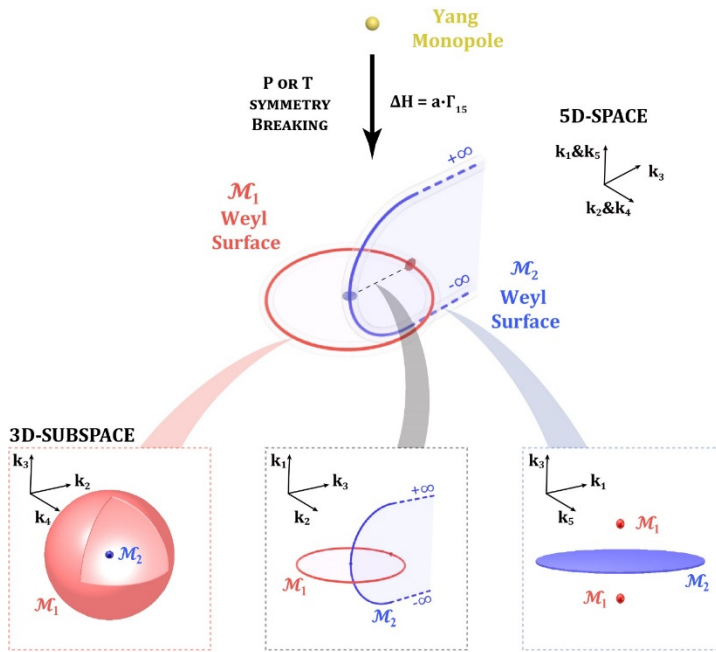
作者列表：馬少傑（香港大學）、畢宴剛（吉林大學）、郭清華（香港科技大學）、楊鏢（香港科技大學）、遊歐波（香港大學）、馮晶（吉林大學）、孫洪波（清華大學）、張霜（香港大學）。

《科學》雜誌：373 卷，6554 期，572-576 頁。

論文網址：<https://science.sciencemag.org/content/373/6554/572>

圖片下載及說明：<https://www.scifac.hku.hk/press>

傳媒如有查詢，請聯絡港大理學院外務主任杜之樺（電話：3917 4948；電郵：caseyto@hku.hk）或助理傳訊總監陳詩迪（電話：3917 5286；電郵：cindycst@hku.hk）



圖片：楊單極子和互相纏繞的外爾表面，其中纏繞的外爾表面可以通過降低楊單極子系統的對稱性形成。由不同的三維子空間觀測，纏繞的外爾表面可以表現為不同的形式，如由球面包裹的點，相互纏繞的節線，或由無限大簡併平面分隔開的兩個點。

圖片提供：馬少傑博士。