

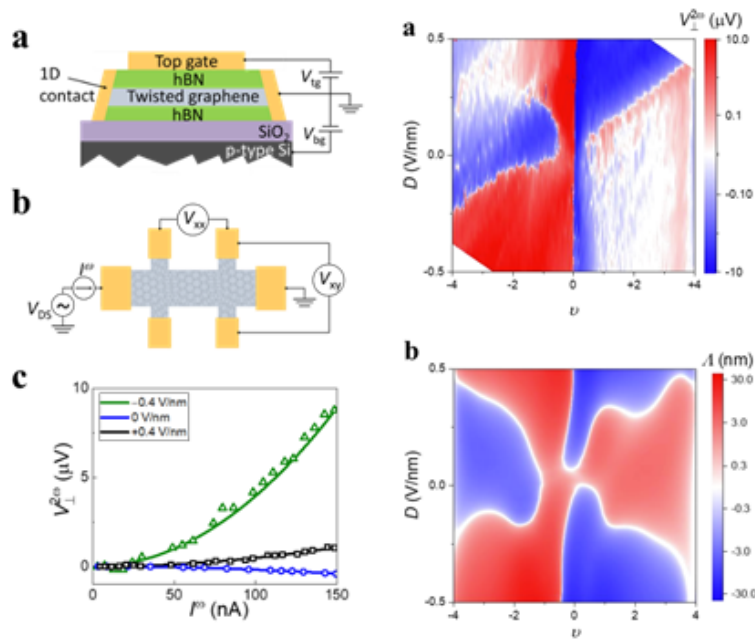
新聞稿

即時發放

## 港大與科大物理學家解開了在扭轉雙層石墨烯中可控非線性霍爾效應

為新材料和量子信息等行業帶來廣泛的應用前景

2023年10月11日



扭轉雙層石墨烯的實驗裝置（左）及理論計算與實驗結果的完美比較。此圖片經過編輯，原圖取自《*物理評論快報*》，2023，10.1103/physrevlett.131.066301。

由香港大學（港大）和香港科技大學（科大）共同領導的國際研究團隊，最近在量子材料領域上取得了突破性發現，揭示了扭轉雙層石墨烯 (Twisted Bilayer Graphene) 中的可控非線性霍爾效應 (Controllable Nonlinear Hall Effect)，為二維量子莫爾材料的獨特性質提供了新的線索，並有望在新材料和量子信息等行業中廣泛應用，以實現室溫下超高靈敏度的太赫茲檢測 (Terahertz Detection)。這些發現已經在著名物理學期刊《*物理評論快報 (Physical Review Letters)*》上發表，並且獲得編輯推介 (Editors' Suggestion article)。

研究團隊成員包括港大物理學系博士研究生張栩及其導師孟子楊博士，以及科大王寧教授及其博士後研究員黃美珍和吳澤飛（現為英國曼徹斯特大學副研究員），還有美國密芝根大學的孫鏜教授。團隊結合理論、計算和實驗進行了深入的研究，發現通過調整扭轉雙層石墨烯中拓撲平帶的色散，可以輕鬆控制和操縱在霍爾效應中起關鍵作用的貝里曲率偶極矩(Berry Curvature Dipole)（詳情請參見補充說明）。

研究人員通過垂直施加的電場，發現扭轉石墨烯中平帶的色散可以輕易地被控制和操縱，並且在施加橫向驅動電流時在縱向上觀察到明顯的非線性電壓響應。響應隨外加場、應變和扭轉角的調整而變化顯著，表現出增加、減少和方向的改變。這些實驗觀察證實了非線性運輸行為（Nonlinear Transport Behaviour）對拓撲平帶中貝里曲率熱點（Berry Curvature Hotspots）滑動的敏感性，並可以通過理論計算得到完美的解釋（詳情請參見補充說明）。

研究人員還研究了摩爾勢（Moiré Potential）和扭轉角在扭轉雙層石墨烯可控非線性霍爾效應中的作用。他們發現，摩爾勢的強度在確定觀察到的非線性響應的大小方面起着關鍵的作用。通過改變石墨烯層之間的扭轉角，研究人員能夠操縱摩爾勢，從而控制非線性運輸行為。

在扭轉雙層石墨烯中展示的可控非線性霍爾效應對於在新的實驗平台中實現量子霍爾材料和非線性霍爾效應具有巨大的潛力。與傳統電子器件不同，石墨烯中的非線性霍爾效應由低頻電流驅動，沒有電壓閾值或轉換時間限制。這為使用低頻電流的倍頻和整流應用，尤其是在太赫茲頻率範圍內實現室溫下的顯着響應和超高靈敏度開關了可能性（詳情請參見補充說明）。

團隊在扭轉雙層石墨烯中發現了可控的非線性霍爾效應，此發現代表了量子材料領域的重大進展，同時為凝聚態物理、新材料和量子信息領域進一步的探索和應用鋪路。此研究還證明了學術機構間合作的重要性，強調了跨領域合作在推動科學知識邊界方面的顯著作用。

本研究獲香港研究資助局卓越領域計劃（AoE 2D 材料）及協作研究基金（CRF 量子莫爾材料研究的多體範式）資助，突顯香港政府在二維量子材料，尤其是量子莫爾材料如扭轉石墨烯等研究方面的支持。

本研究進行的大規模數值計算均在港大資訊科技服務高性能計算平台 HPC2021 和港大物理系的「黑體」超級計算機上進行的。

有關研究論文：<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.131.066301>

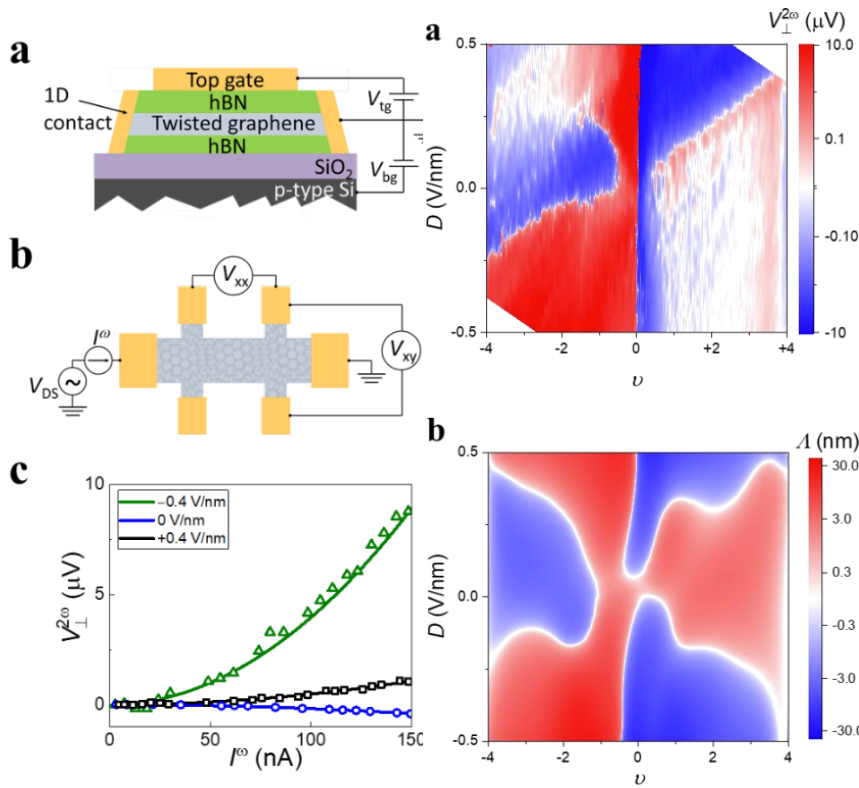


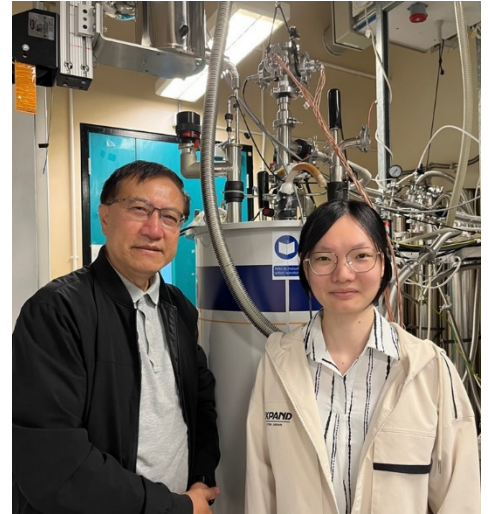
圖 1 (左)：扭轉雙層石墨烯的實驗裝置。a. 具有兩個柵電極的扭轉石墨烯樣品的結構，允許獨立控制垂直電場強度和載流子濃度。b. 非線性霍爾效應測量裝置示意圖。c. 當扭轉石墨烯的填充因數為-1.5 時，非線性霍爾電壓隨電場變化顯著，並且總是與注入電流呈二次方關係。此圖片經過編輯，原圖取自《物理評論快報》，2023, 10.1103/physrevlett.131.066301。

圖 2 (右)：理論計算與實驗結果的完美比較。a. 扭轉角為  $1.30^\circ$  的扭轉雙層石墨烯樣品。非線性霍爾效應數

據，同時改變垂直電場和電子填充因數時得到的非線性霍爾效應數據。b. 實驗樣品條件下的理論計算結果。該計算考慮了單軸應變為 0.3% 的貝里曲率偶極子  $\lambda \equiv \sum_n \int_k \partial f_0 \Omega_n$ 。貝里曲率的符號（分別用紅色和藍色表示正負）與實驗觀察結果非常匹配。此圖片經過編輯，原圖取自《物理評論快報》，2023, 10.1103/physrevlett.131.066301。



港大物理學系博士研究生張栩（左）及其導師孟子楊博士。



科大物理學教授王寧教授（左）及其博士後研究員黃美珍博士。

### 補充說明

#### 1. 量子霍爾效應和貝里曲率

量子霍爾效應 (The Quantum Hall effect, QHE) 是霍爾效應的量子力學版本。一般可分為整數量子霍爾效應 (Integer Quantum Hall Effect, IQHE) 和分數量子霍爾效應 (Fractional Quantum Hall Effect, FQHE)。整數量子霍爾效應是由德國物理學家馮·克里欽 (Klaus von Klitzing) 發現的，他亦因此發現於 1985 年獲得諾貝爾物理學獎。分數量子霍爾效應是由美籍華裔物理學家崔琦、德國物理學家施特默 (Horst Störmer) 和美國材料學家戈薩德 (Arthur Gossard) 發現的。基於此，崔琦和施特默在 1998 年與美國物理學家羅伯特·勞克林 (Robert Laughlin) 共同獲得了諾貝爾物理學獎。

整數量子霍爾效應描述的現象是，當二維電子氣體受到橫向電流時，測得的縱向電導率在基本自然常數的倍數處表現出平台狀態。整數量子霍爾效應中出現的整數是拓撲量子數  $\frac{e^2}{h}$ 。在數學和拓撲學中，它們被稱為陳數（以紀念中國數學家陳省身），它們與固體材料能帶結構中的非平凡貝里曲率密切相關。量



子霍爾效應及其衍生的現象，如量子反常霍爾效應、量子自旋霍爾效應、最近在扭轉雙層石墨烯中發現的非線性霍爾效應等，都表現出新穎且廣泛適用的電運輸性質和非平凡貝里曲率的數學本質。

## 2. 扭轉雙層石墨烯中的霍爾效應

扭轉雙層石墨烯作為二維量子莫爾材料的代表，具有易控性的突出優勢。通過連續掃描扭轉角，施加電場和磁場，可以微調系統中相互作用和電子填充。這突破了傳統量子霍爾效應器件，如二維電子氣體材料的局限性。扭轉雙層石墨烯具有複雜的能帶結構（具有長程關聯效應的拓撲平帶體系），在模型計算中須考慮莫爾尺度上的應變和不均勻性等因素，這些因素遠大於晶格尺度。在是次合作中，理論團隊通過模型設計和大規模計算發現，扭曲石墨烯與典型的拓撲材料不同，其獨特的拓撲平帶可以有效控制貝里曲率的動量空間分佈。實驗小組亦確實觀察到理論團隊的發現，當向扭曲的石墨烯施加頻率為 $\omega$ 的橫向驅動電流時，在縱向上具有明顯的頻率為 $2\omega$ 的非線性電壓回應。

這項研究的成功對新材料和量子信息等行業，特別是在涉及低頻電流倍頻和整流的應用中具有潛在的影響。可以預見的是，通過控制扭曲石墨烯中的貝里曲率偶極矩，可在室溫下實現具有顯著回應和超高靈敏度的太赫茲檢測。

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](mailto:caseyto@hku.hk) / 助理傳訊總監陳詩迪（電話：3917 5286；電郵：[cindycst@hku.hk](mailto:cindycst@hku.hk)）。

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