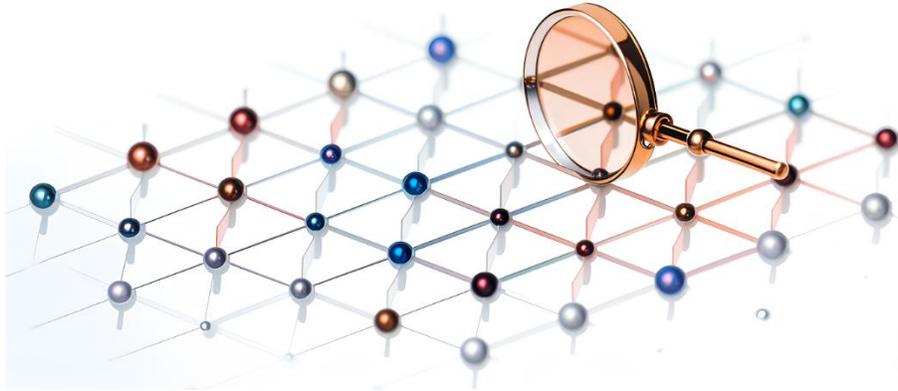


新聞稿

即時發放

港大研究團隊開發「糾纏顯像」演算法 揭示量子多體系統中粒子糾纏的奧秘

2025年1月23日



圖一：港大物理學系團隊揭示了量子多體系統中粒子糾纏的奧秘。圖中為糾纏顯像算法的概念圖。

量子糾纏 (Quantum Entanglement) 是量子物理學中最神秘的現象之一——無論粒子間相距多遠，它們的量子態依然緊密相連。然而，理解複雜量子系統中糾纏的行為一直是一項艱巨的任務。

最近，香港大學（港大）物理學系的研究團隊及其合作夥伴開發了一種名為「糾纏顯像」 (Entanglement Microscopy) 的量子物理演算法，首次在微觀尺度上呈現和描繪這一非凡現象。透過這項技術，科學家得以放大並觀察糾纏粒子之間複雜的相互作用，揭示量子物質的隱藏結構，這不僅為技術革新提供了新的可能性，還能擴闊對宇宙的理解。

這項研究由港大物理學系孟子楊教授主導，博士研究生汪丁冬和宋孟涵共同撰寫，並與加拿大滿地可大學 (University of Montreal) 的 William WITCZAK-KREMPA 教授及博士研究生呂柳可合作，揭示了多體系統中量子糾纏的隱藏結構，為理解量子物質的行為提供了新的視角。他們的研究成果已在著名期刊《自然通訊》 (Nature Communications) 上發表。

映射量子糾纏的突破

量子糾纏描述了粒子之間一種深層次的聯繫——即使相隔多遠，當一顆粒子的狀態發生變化時，與它相連（糾纏）的另一顆粒子的狀態會瞬間受到影響。這種現象可以用一個簡單的比喻來說明：想像在不同地點擲出兩顆骰子，無論它們相隔多遠，只要其中一粒骰子擲出結果，與它糾纏的另一粒骰子總會擲出與之相關聯的結果。這種現象被愛因斯坦稱為「鬼魅般的超距作用」 (spooky action at a distance)。

除了理論層面的研究價值，量子糾纏也在量子計算、密碼學，以及對特殊材料和黑洞的研究發揮着關鍵作用。然而，由於在量子多體系統中涉及的數據量極其龐大，想要用計算或數學分析的方法來了解其中的糾纏信息非常困難。

有見及此，研究人員透過開發「糾纏顯像」演算法來應對這項難題。這個演算法利用一種強大而創新的模擬技術——大規模量子蒙特卡羅模擬(Large-scale Quantum Monte Carlo Simulation)，能夠從量子系統的小區域中提取出量子糾纏的信息。透過聚焦這些微觀區域，科學家能觀察粒子之間是如何以複雜的方式互相影響並組成結構，揭示粒子的相互作用方式，尤其是在量子相變的臨界點(critical point)附近，系統行為正在發生劇烈變化時。

他們的研究集中在凝聚態物理中兩個基本且重要的二維模型：橫場伊辛模型(Transverse-field Ising Model)和費米子 t-V 模型(Fermionic t-V model)。其中，費米子 t-V 模型與一種特殊的量子相變——Gross-Neveu-Yukawa (GNY)相變——密切相關，這種相變涉及狄拉克費米子(Dirac fermion)的動力學，幫助我們理解粒子間的複雜互動。這兩個模型分別揭示了量子糾纏在不同物理系統中的性質與特徵。

研究發現，在伊辛量子臨界點的糾纏是短程的——這意味着粒子之間的糾纏僅限於較短的距離之內，而這種糾纏對外部條件非常敏感，會因距離或溫度的變化而「突然失聯(sudden death)」。相比之下，在費米子 t-V 模型中，即使相距較遠，其糾纏也會以漸緩的方式減弱，這表明粒子儘管相距較遠仍能「保持通話」。這種對比揭示了兩種模型在量子糾纏性質上的顯著差異。

有趣的是，他們發現在二維伊辛模型相變中，並未偵測到三體糾纏(Tripartite Entanglement)，而這種三體糾纏卻存在於一維系統中。這表明，系統的維度對量子糾纏的性質具有顯著影響。以社交網絡作比喻，低維度系統就像一個較小的朋友圈，朋友之間更容易建立緊密的聯繫；而高維度系統則類似於一個龐大的社交網絡，當網絡規模變大且結構變得更複雜時，個體之間反而難以形成深層次的交流與聯結。這項發現不僅揭示了量子糾纏在不同維度中的行為差異，也為理解糾纏結構如何隨着系統複雜性的增加而演變提供了重要的理論基礎與啟示。

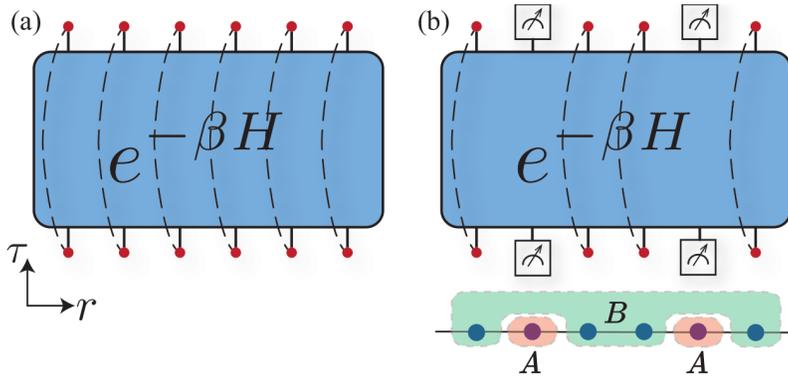
應用與影響

這項突破對推動量子技術的發展具有重要意義。對量子糾纏更清晰的理解，不僅有助於優化量子運算硬體和演算法，還能提升密碼學和人工智慧等領域的解難速度。此外，這項發現有望為設計下一代量子材料提供新的方向。這些材料在能源、電子學和超導性方面具有廣泛應用的潛力。同時，這項成果能夠加深我們對基本物理學的理解，同時提升化學和生物學中的量子模擬能力。這些應用不僅推動了科學研究的前沿發展，也為各行業的技術革新注入了新的動力。

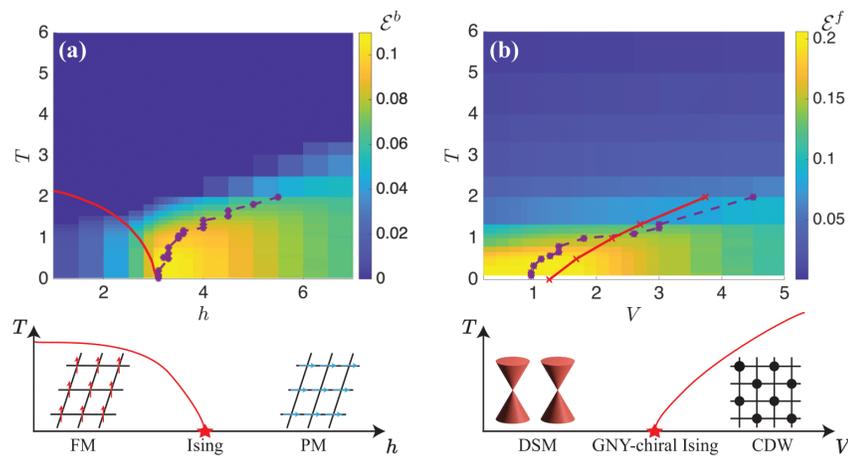
以上研究以 *Entanglement Microscopy and Tomography in Many-Body Systems* 為題，已正式發表在國際知名期刊《*Nature Communications*》。如欲參閱完整論文，可透過以下連結瀏覽：<https://rdcu.be/d5oSa>

本新聞稿內容以英文版本為準。

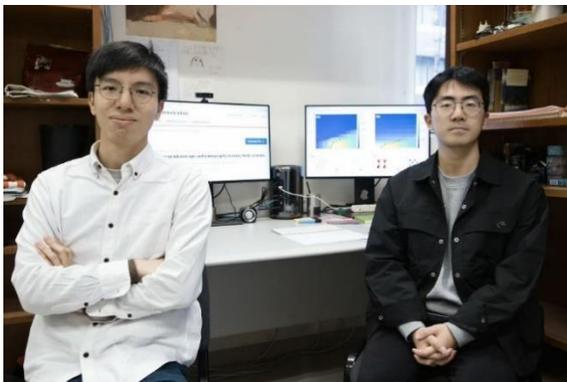
傳媒如有查詢，請聯絡港大理學院助理經理（傳訊）Casey To（電話：3917 4948；電郵：caseyto@hku.hk）/助理傳訊總監Cindy Chan（電話：3917 5286；電子郵件：cindycst@hku.hk）。



圖二：透過路徑積分量子蒙卡取樣約化密度矩陣 (a) 在一般的量子蒙卡模擬中虛時具有週期性；(b) 透過在虛時上打破任意格點(A 區域)的週期性來取樣約化密度矩陣。



圖三：在橫場伊辛 (圖 a) 和 t-V 模型 (圖 b) 中，近鄰格點的糾纏負性隨着溫度的變化。



圖四：圖中為本研究的作者，港大物理學系博士研究生汪丁冬 (左) 及宋孟涵。

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