

新聞稿

即時發放

港大物理學家探索量子世界的新突破
透過退禁閉量子臨界點揭示量子物理學中的隱藏秩序



圖中為港大物理學系研究團隊，左起：趙家瑞博士、博士研究生宋孟涵及孟子楊教授。

量子物理學是一個充滿神秘的領域，其中粒子的行為往往違背我們所熟悉的物理規則。而在這個奇妙世界中，隱藏着一個令科學家着迷的謎題：退禁閉量子臨界點（deconfined quantum critical points, DQCPs）。這種特殊的量子現象發生在兩種有序態之間，徹底顛覆了經典物理對相變（有序態與無序態的轉換）的理解。

近日，香港大學（港大）物理學系孟子楊教授與博士研究生宋孟涵，聯同香港中文大學、耶魯大學、加州大學聖塔芭芭拉分校、波鴻魯爾大學及德勒斯登工業大學的研究團隊，成功揭示了 DQCP 的部分本質。該研究提供了突破性的證據，顯示量子物質在這些神秘臨界點的行為可能包含尚未被理解的新物理規則。這項研究已在《科學進展》（*Science Advances*）上發表，並有望重塑我們對量子力學、材料科學乃至宇宙本質的認知。

從退禁閉量子臨界點看秩序之間的轉換

在日常生活中，水結成冰或蒸發成蒸氣的過程稱為「相變」，這些現象都是可由經典熱力學完美解釋。然而，在量子世界中，相變的驅動因素並非溫度，而是粒子在微觀尺度上的量子漲落——即粒子的隨機運動。量子相變通常發生在絕對零度（-273.15°C），其特徵是在一個特殊的點——量子臨界點上發生。傳統上，量子臨界點被視為有序態（粒子規則排列）與無序態（粒子混沌運動）之間的分界，其理論基礎由凝聚態物理的「聖杯」、朗道理論來奠定；然而，退禁閉量子臨界點（DQCPs）卻徹底打破了這個範式。

DQCPs 並非分隔有序與無序的邊界，而是存在於兩種不同的有序態之間。這種「秩序與秩序之間的轉換」徹底顛覆了傳統相變理論，引發了學界數十年關於其本質是連續相變（平滑漸變）還是一級相變（劇烈突變）的激烈爭論。

糾纏熵：打開量子黑盒子的金鑰

為了研究這奇特的量子現象，港大研究團隊透過量子蒙特卡洛模擬（一種量子系統的電腦建模方法）與理論分析的深度結合，系統性地研究了二維 $SU(N)$ 自旋模型（一種能實現 DQCP 的晶格模型）中的糾纏熵行為。糾纏熵是一種描述粒子量子關聯強度的物理量，猶如一扇窺探量子系統深層結構的窗口，能窺探量子系統的深層結構。研究發現了突破性的證據：當對稱性參數 N 較小時，退禁閉量子臨界點處的糾纏熵呈現反常「對數行為」，即糾纏熵隨系統大小以對數函數增長，而非傳統理論預測的線性或其他標度行為。這一結果與傳統連續相變理論的預測直接矛盾，顯示在低 N 的情況下，DQCPs 可能無法用傳統連續相變理論描述，暗示量子漲落中存在尚未被認知的新物理機制。更具顛覆性的是，團隊發現了對稱性參數 N 的關鍵閾值效應：當 N 超過該閾值時，DQCPs 展現出與共形不動點一致的行為特徵，顯示系統在此條件下可能真正實現了連續量子相變。這項發現為統一理論解釋提供了關鍵線索，表明量子臨界行為可能對系統對稱性具有高度敏感性，只有在特定條件下才能展現連續相變的特性。

此研究的深遠意義

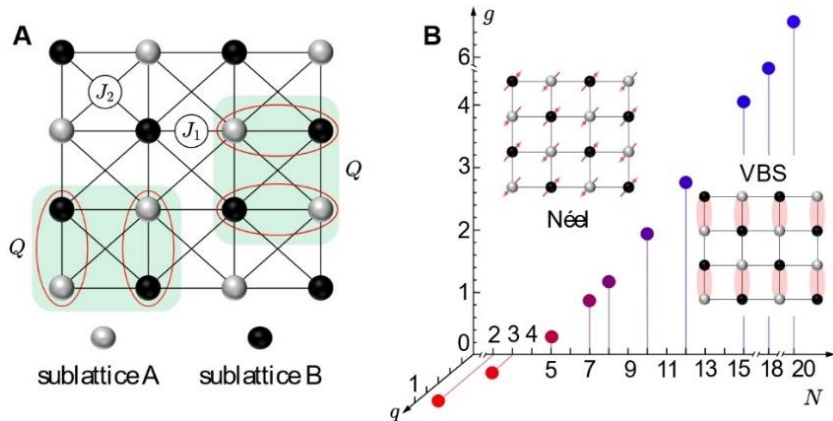
退禁閉量子臨界點（DQCPs）提供了一個獨特的窗口，讓我們可以深入探索量子力學、對稱性與臨界現象之間的複雜關係。了解它們的本質可能帶來以下幾方面的重要啟示：

1. 奇異量子態：DQCPs 與量子自旋液體等新奇物態密切相關，後者被認為是拓樸量子計算的理想載體。
2. 基礎理論革新：挑戰朗道-金茲堡範式，推動發展超越傳統對稱性破缺理論的新框架。
3. 科技革命前瞻：提供設計高溫超導體、量子磁性材料等全新理論指導。

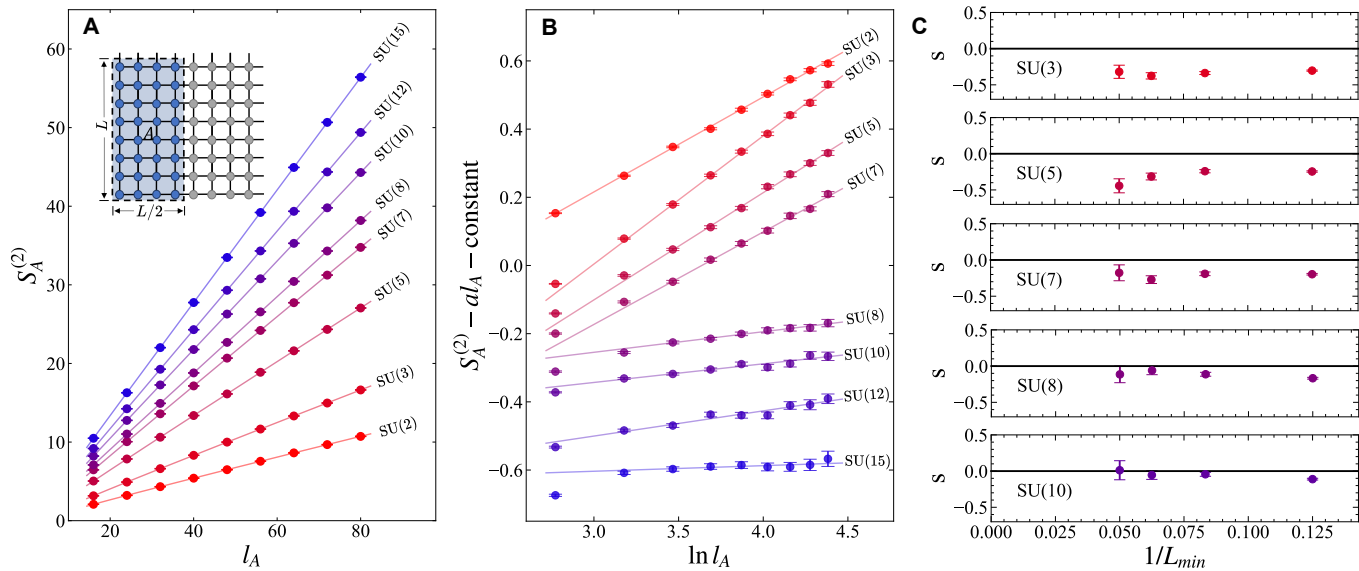
退禁閉量子臨界點作為量子力學中的重要課題，位於現代物理研究的前沿，展現了探索未知領域的巨大潛力。透過對糾纏熵與 $SU(N)$ 自旋模型的深入分析，研究者逐步揭示了這些臨界現象的內在機制，為理解量子臨界點的本質邁出了重要一步。

以上研究以《Evolution of entanglement entropy at $SU(N)$ deconfined quantum critical points》為題，發表在國際知名期刊《科學進展（*Science Advances*）》。如欲參閱完整論文，可透過以下連結瀏覽：
<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adr0634>

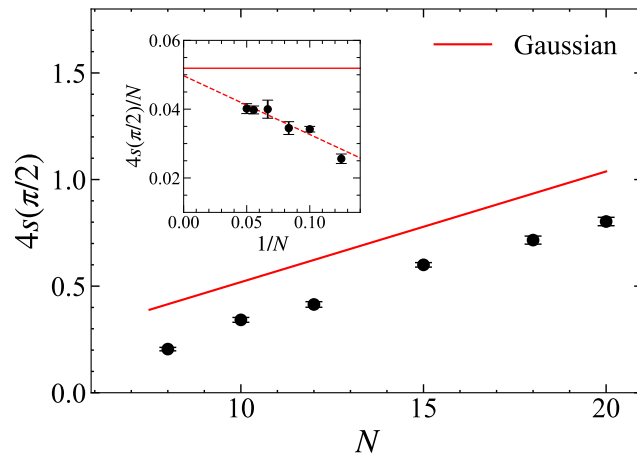
本新聞稿內容以英文版本為準。



圖一：(A) 實現退禁閉量子相變的晶格模型。(B) 正方晶格 $SU(N)$ 模型的相圖。點表示量子相變點。紅點表示非連續相變點，藍點表示此相變點與共形場理論一致，即真正的退禁閉量子相變候選者。



圖二：SU(N) 退禁閉量子相變點處糾纏熵 (EE) 的標度行為。在 $N \leq N_c \approx 8$ 時，糾纏熵的標度行為中展現出非零的對數修正，表現為圖(B)中紅線的正斜率；而在 $N > N_c$ 時，異常的對數修正消失。因此，這些地方的退禁閉量子相變點可能是連續相變點。



圖三：展示了在大 N 區域中，4 個 $\pi/2$ 的角帶來的對數修正係數，紅線表示在各個 N 下對應的高斯值。內部插圖展示了 $4s(\pi/2)/N$ 隨著 $1/N$ 的變化。虛線的線性擬合在 $N \rightarrow \infty$ 時和高斯值吻合。

傳媒如有查詢，請聯絡港大理學院（電話：852-3917 4948/ 852-3917 5286；電郵：caseyto@hku.hk / cindycst@hku.hk）。

圖片下載與說明：<https://www.scifac.hku.hk/press>