FACULTY OF SCIENCE
THE UNIVERSITY OF HONG KONG
香港大學理學院

DEAN
Professor Qiang ZHOU

新聞稿 即時發放

港大與中科院物理學家結合理論與實驗

揭示新型量子態「Dirac自旋液體」

2024 年 5 月 13 日

香港大學（港大）物理學系博士後研究員周成康博士和孟子楊教授與中國科學院物理研究所（中科院）的博士研究生曾振源和李世亮研究員，以及日本大強度質子加速器研究中心（J-PARC）的中島健次（Kenji NAKAJIMA）教授合作的一項研究，在量子物理領域取得重大發現。研究團隊成功捕捉到備受關注的准粒子 - 自旋子（spinon）的譜學信號。他們的研究成果已於《自然物理學》（*Nature Physics*）期刊上發表。

自旋子准粒子因其行為類似於著名 Dirac 粒子，遵循相對論性 Dirac 方程，因而被稱為 Dirac 自旋子。根據相關理論預言，這種准粒子可以在一種被稱為量子自旋液體態的新型量子態中被觀測到。團隊透過實驗發現，Dirac 自旋子表現出與高能物理中的 Dirac 粒子和石墨烯和量子莫爾材料中的 Dirac 電子高度相似的行為，例如能量和動量之間的線性色散關係。以往要觀測這種自旋為1/2的電中性准粒子，一直是研究領域內的極大挑戰性，而在這項研究之前，尚未有在量子磁性材料激發譜中明確捕捉到 Dirac自旋子的先例。

「在量子磁體中發現 Dirac 自旋子是幾代凝聚態物理學家的夢想，現在我們在量子磁性材料中看到了它們存在的跡象，人們可以開始思考這種高度糾纏的量子材料的無數潛在應用前景。也許終有一天，人們將用它構建量子電腦，就像過去半個世紀以矽為基礎的電腦一樣。」論文的通訊作者之一孟子楊教授說。

研究中的自旋子准粒子是量子磁性材料內部自旋的集體行為所導致的激發。作為凝聚態物理研究的焦點之一，這類激發經常被處理為一系列的粒子。團隊的研究重點是一種名為YCu3-Br的獨特材料。這

是一種具有籠目狀晶格（Kagome Lattice）結構的磁性材料。該材料的籠目狀晶格結構和阻挫量子磁性相互作用導致了Dirac自旋子的產生。先前的研究揭示了該材料在低溫條件下可能處於量子自旋液體態，使其成為研究Dirac自旋子的理想實驗材料。為了使YCu3-Br成為觀測自旋子的樣品，研究團隊克服了重重困難，將大約5000塊單晶拼合在一起，以滿足進行非彈性中子散射等實驗的條件(如圖1d所示)。通過使用非彈性中子散射等先進技術，該團隊探測了該材料的自旋激發譜，並觀察到了圓錐形自旋連續譜圖像。這樣的圓錐型連續譜很可能是由 Dirac 自旋子導致的。然而，由於此實驗存在限制，直接探測單個自旋子是極為困難的。為了進一步確認圓錐型連續譜的來源，該團隊將他們的發現與理論預測進行了比較，從而確認了圓錐型連續譜是Dirac自旋子導致的獨特譜學信號。

尋找激發譜中Dirac自旋子信號一直是富有挑戰性的課題。本研究發現提供了令人信服的關於 Dirac 量子自旋液體態存在的證據，不僅推進了我們對凝聚態物理和高能物理基本理論的理解，還打開了進一步探索YCu3-Br的性質和應用的大門。它可以被比作在此研究領域中的一聲呼喊，劃破了尋找量子自旋液體態激發譜信號中的重重迷霧。

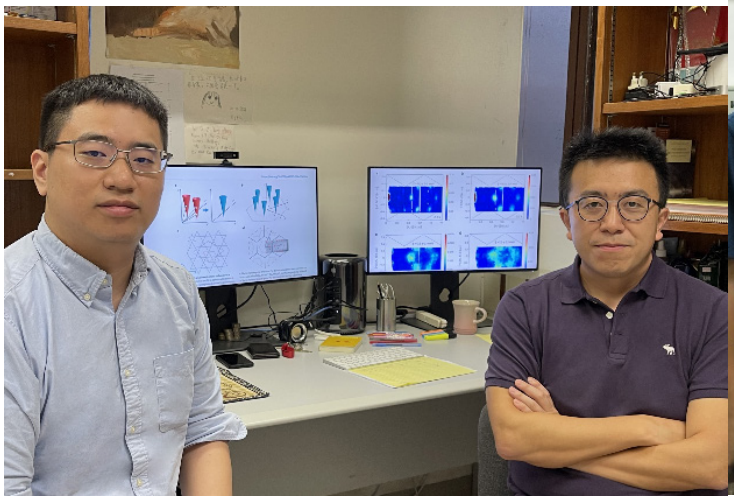
量子自旋液體態存在着分數化的自旋激發，可能與高溫超導和量子資訊相關。在這種態下，自旋高度糾纏，即使在低溫下仍保持無序。因此，研究遵循Dirac方程的自旋子產生的激發譜信號將提供更廣泛的對量子自旋液體態的理解。這種理解也將為更廣泛的應用前景提供了指引，包括對高溫超導和量子資訊的探索。

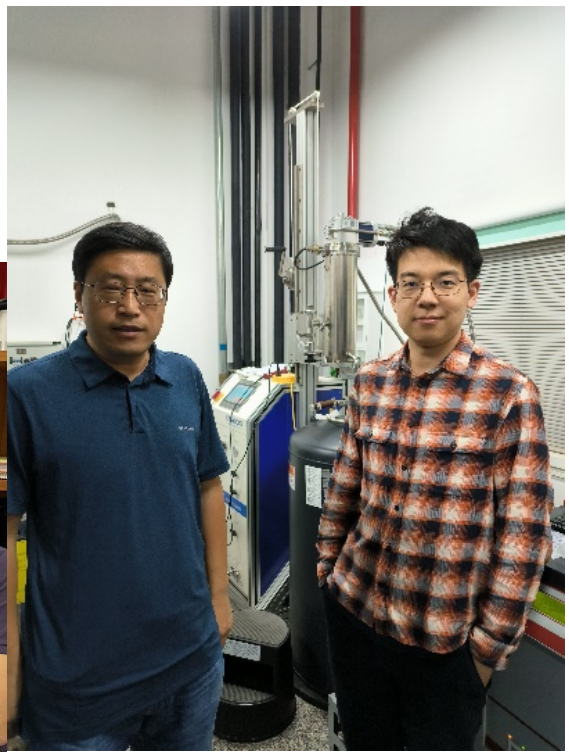
關於該研究的詳細解釋，請訪問此處：https://www.scifac.hku.hk/page/detail/8595

相關研究論文：https://www.nature.com/articles/s41567-024-02495-z

這項研究獲得中國科學技術部、中國科學院和香港研究資助局的資助。研究中的中子散射測量部分是在日本 J-PARC 的 AMATERAS 實驗儀器上進行; 研究論文的理論部分由港大物理學系博士後研究員周成康博士和他的導師孟子楊教授完成。港大團隊獲香港研究資助局的合作研究基金和 ANR/RGC 聯合研究計畫的支持，突顯了香港政府對量子材料研究的支持和前瞻性視角。研究中的理論計算是在香

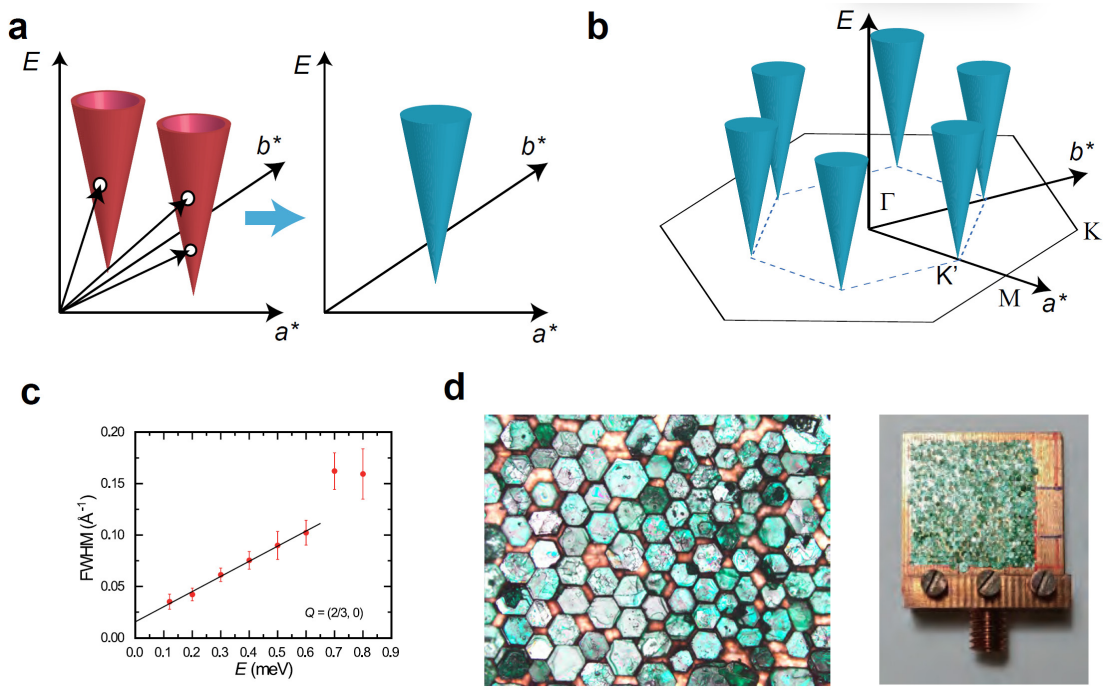
港大學資訊技術服務部的高性能計算平台和物理學系的黑體超級電腦上進行，北京並行科技公司也爲研究提供了充足的計算資源(https://cloud.paratera.com)。





圖一（左）：香港大學物理學系的周成康博士（左）和孟子楊教授（右）。

圖二（右）：中國科學院物理研究所的李世亮研究員（左）和博士研究生曾振源先生（右）。



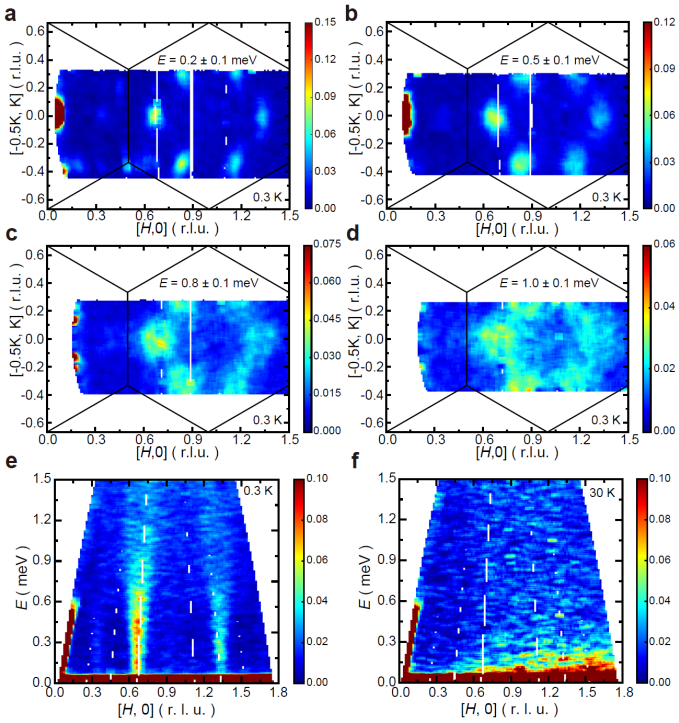
圖三

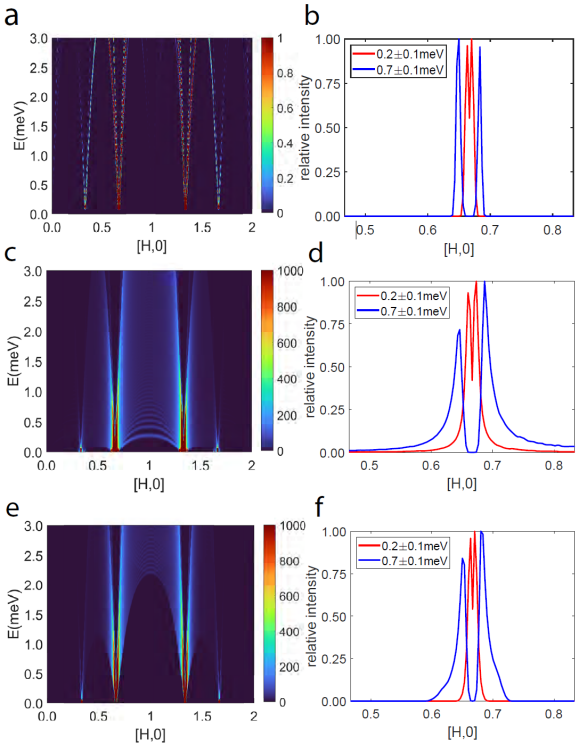
a. Dirac自旋子的錐形激發示意圖和由兩個自鋋子形成的錐形連續激發譜的示意圖。

b. $YCu_3(OH)_6Br_2[Br_{0.33}(OD)_{0.67}]$中錐形自旋激發的示意圖。

c. 半峰寬與能量之間的關係。實線表示線性擬合。

d. 共線YCu3-Br晶體的放大圖像，以及兩個銅板上共線樣品的正視圖。





圖四（左圖）：通過中子散射測量得到的$YCu_3(OD)_6[Br_{0.33}(OD)_{0.67}]$ 中的自旋激發。e和f是隨着E和Q的變化，沿着[H, 0]方向在0.3 K（e）和30 K（f）時的INS結果的強度等高線圖。

圖五（右圖）：在籠目狀晶格上的線性自旋波預測：a和b顯示了沒有引入無序效應的自旋譜。c和d顯示了具有相同參數但引入無序效應以擬合實驗結果的譜。e和f顯示了具有不同種類無序的譜。

傳媒查詢，請聯絡港大理學院外務主任杜之樺女士（電話：3917 4948；電郵：caseyto@hku.hk /助理 傳訊總監陳詩廸女士（電話：3917 5286；電子郵件：cindycst@hku.hk）。

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