

f
LINE
📷

焦點新聞

解開凝態物理界謎團，仲崇厚教授團隊獲刊《美國國家科學院院刊》

國立陽明交通大學在基礎科學研究上取得重大突破。電子物理系仲崇厚教授帶領博士後研究員王江帆、張永業解開凝態物理界謎團，成功解釋稀土磁性金屬化合物(magnetic rare-earth intermetallic compound)於極低溫時其電子之電荷(charge)與自旋(spin)受量子力學擾動影響而產生之「奇異金屬 (strange metal)」現象之形成機制[1]。其研究成果登上國際頂級期刊《美國國家科學院院刊》(Proceedings of the National Academy of Sciences, PNAS)，為國內首度基礎理論物理團隊獨力完成並獲得PNAS刊登之研究，極具指標。

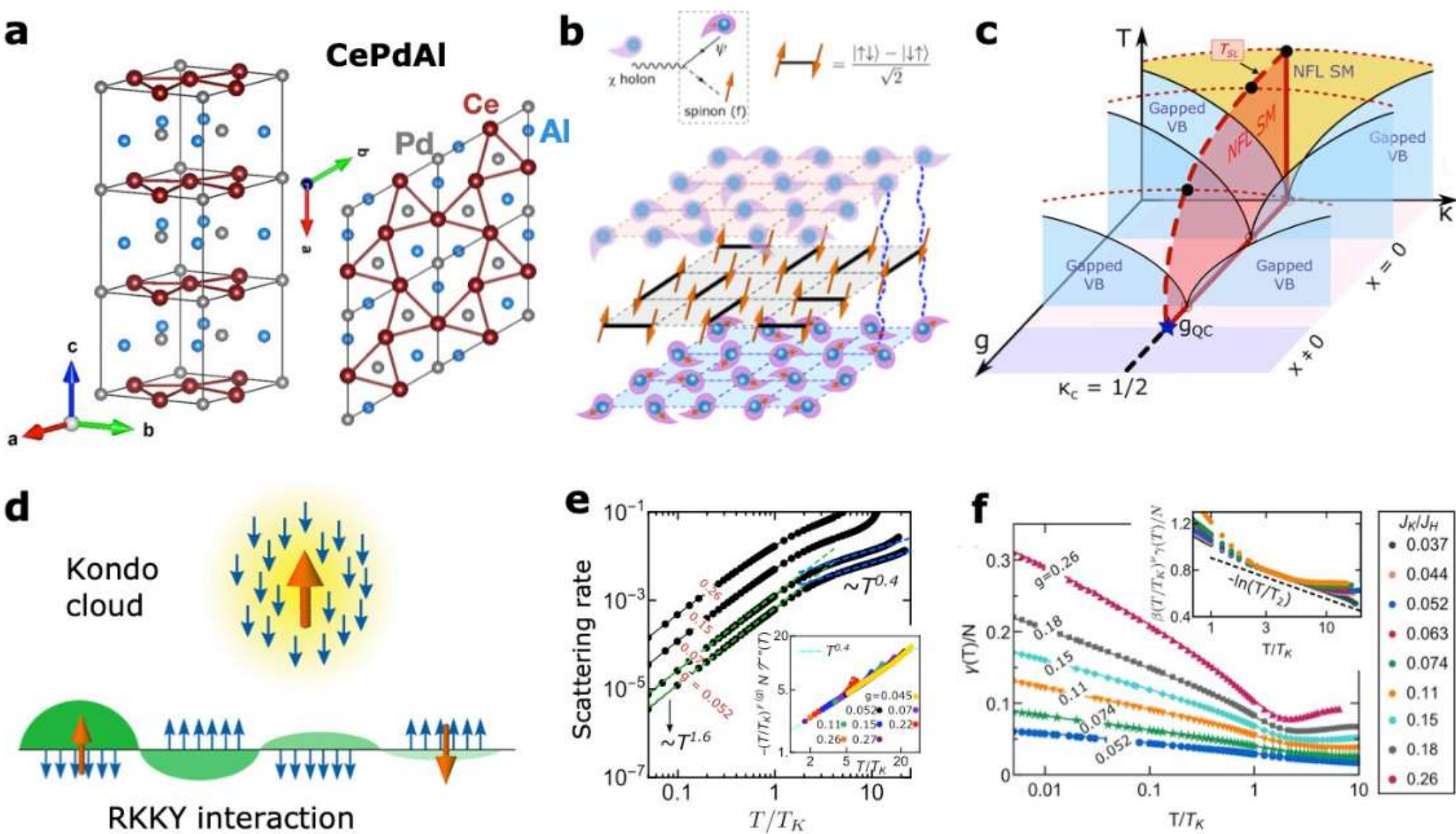


仲崇厚教授指出，一般金屬(如：銅、鋁等)在超導性尚未出現的低溫範圍中，其電阻率會隨著溫度的平方而降低，其比熱係數則是與溫度無關的常數。物理學家對這類金屬的現象早已熟知，並在1956年蘇聯物理學家列夫.藍道(Lev Landau)所建立的「費米液體理論」(Fermi liquid theory)獲得很好的解釋。然而，近30多年來，物理學家在許多不同的新穎磁性金屬化合物(如：高溫超導體、鐵基超導體、稀土族金屬與超導體等)陸續發現違反此理論的金屬性質，稱為「非費米液體」(non-Fermi liquid)或「奇異金屬」行為。這些完全不同的金屬材料因其電子間有很強的關聯交互作用，在超導態尚未形成時的低溫狀態下都會共同出現有別於普通金屬的奇異金屬性質，其共同特點為隨溫度降低其電阻率呈現與溫度接近線性(quasi-linear-in-temperature)的方式下降、比熱係數以溫度的對數(logarithmic-in-temperature)方式上升。要同時解釋兩種奇特的金屬現象十分困難，雖然這些現象常發生在兩種互相競爭的量子狀態處於勢均力敵且不穩定的量子臨界點(quantum critical point)附近(註1)，是一種電子間高度量子糾纏的新物質狀態，但這種廣泛出現且新穎的物質狀態形成原因與機制，至今仍是物理界公認尚待解決的重要謎團之一。

仲崇厚教授認為，此一謎團具備「實驗證據非常充分、理論解釋待建立，知其然而不知其所以然」的特徵，正是理論物理研究者的好機會。研究團隊自2017年起跳脫其他團隊之方法，獨立建構新的微觀理論計算模型試圖解決此一難題，由仲崇厚教授提出理論架構與方法、兩位博士後研究員進行解析及數值計算，共同討論理論結果並用於解釋實驗現象。經多年努力，今年初終獲突破性研究成果，成功解釋跨國實驗團隊在2019年發表於國際頂尖物理期刊《自然物理》(Nature Physics)中有關稀土族「鈰鈹鋁」金屬化合物(CePdAl)(圖a)中發現的「奇異金屬相」(strange metal phase)，一種更令人費解但穩定存在的量子基態[2]。

仲崇厚教授說明，在巨觀尺度下，水的存在方式有三相：固態相(冰)、液態相(水)、氣態相(水蒸氣)，而在微觀原子尺度下的量子世界中，因為物質同時具有粒子及波動兩種性質，並滿足「海森堡測不準原理」無法同時準確測得此兩種性質，使得量子力學造成上述強關聯物質或材料在低溫時出現意料之外的新樣態，稱之為「量子相(態)」(quantum phase/state)，奇異金屬相(態)可視為一種在低溫時因量子臨界擾動現象而產生之新穎物質狀態「量子臨界相(態)」(quantum critical phase/state)。研究此一課題有助於從基礎理解因量子力學而出現的新而奇特的物質狀態，一探量子世界的奧秘。

仲崇厚教授解釋，稀土族材料中具有活躍的導電電子(c電子)及不活躍的局域不導電電子(f電子)，團隊發現奇異金屬現象產生的原因為系統處於因這兩種電子產生的兩種磁性交互作用、相互競爭下不穩定的量子臨界點(quantum critical point)附近；其中一種磁性交互作用為c-電子與f-電子間反鐵磁作用力(或稱為近藤Kondo效應)(圖d)，另一種則為f-電子之間的反鐵磁(anti-ferromagnetic 或稱RKKY)交互作用(圖d)，而此局域不導電電子之RKKY交互作用因晶格幾何排列呈現日本竹籃Kagome形狀而產生磁性阻挫(magnetic frustration)，因此可形成具有「短程磁有序」(magnetic short-ranged order)之「自旋液體態」(spin-liquid)(圖b三層結構之中層)。因而，奇異金屬態可被理解為近藤與自旋液體兩種效應互相拉扯而出現之新穎量子臨界現象(圖b)，其中最關鍵的因素是近藤效應之量子臨界擾動(quantum critical Kondo fluctuation)具有電荷與自旋互相分離之特性，可由三層結構示意圖中三種不同性質之粒子來描述，分別是近藤擾動之電荷空穴子(charge holon)(上層)、自旋液體中之自旋子(spinon)(中層)與一般導電電子(conduction electron)(下層)；三種粒子因近藤量子擾動而有交互作用，進而形成奇異金屬態。更有趣的是，團隊發現原本不穩定的量子態在特殊對稱性下可成為穩定存在的「量子臨界相(態)」(quantum critical phase)(圖c)，其理論同時解釋了鈰鈹鋁金屬化合物中出現的兩種奇異金屬性質(圖e、f)及其穩定存在的「量子臨界相」。本研究成功地解開這類材料中出現「奇異金屬相」的謎團，也對解開近三十年來其他奇異金屬態形成之謎向前邁進一大步。



仲崇厚教授表示，PNAS為國際頂尖綜合性科學期刊，由美國國家科學院院士主導編輯與審查程序，過程嚴謹，有相當高之學術價值及學術影響力。其刊出論文多以國際頂尖研究團隊實驗研究成果為主，本論文為純理論研究且無跨國合作之優勢，獲得本論文之編輯、英國牛津大學物理系教授Seamus Davis及評審們之肯定更顯珍貴，同時也是對台灣基礎物理研究的鼓勵與認可。團隊將持續發展獨立研發理論，期在基礎研究上深入而全面地解釋新穎而奇特的量子現象，感謝科技部、國家理論科學中心與陽明交大長期的支持與肯定。

[1] Jiangfan Wang, Yung-Yeh Chang and Chung-Hou Chung*, A mechanism for the strange metal phase in rare-earth intermetallic compounds, PNAS Vol. 119, No. 10, 1-9 (2022)
<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2116980119>
[2] H. Zhao et al., Quantum-critical phase from frustrated magnetism in a strongly correlated metal. Nat. Phys. 15, 1261–1266 (2019).

註1：量子相變及量子臨界現象
在古典熱力學中，物質會因溫度改變而改變其存在之狀態，例如水從固態的冰到液態的水、再到氣態的水蒸氣之改變，此為「古典相變」(classical phase transition)，而量子相變(quantum phase transitions)是在絕對溫度零度(-273度C)時，物質在微觀尺度中因量子力學的擾動而產生的基態或量子相的改變。系統同時受到兩種穩定的量子態相互拉扯，會產生一種新穎的物質狀態－「量子臨界狀態」(quantum critical state)：其低溫的熱力學性質與溫度(T)或外在可調參數(如：磁場、壓力)出現規律而漂亮的「幂次方發散的統一標準度律」(universal power-law scaling)，如：比熱係數 $C_v/T \sim (p-p_c)-a_1$ ： a_1 稱為「臨界指數」(critical exponent)。無論用任何的尺度探測，都會得到同樣的臨界現象。近30年來越來越多量子相變與量子臨界現象於具有電子與電子強關聯交互作用的固態材料中被發現，然而對此不穩定態之理解卻超出當今固態物理對一般金屬的典範(paradigm)架構-即藍道之費米液體理論之外。