

準粒子與天使粒子

樂丕綱

有關發現「天使粒子」的新聞在去年 7 月占據了重要的科學新聞版面，這個原先在粒子物理中認為是假設的粒子，如今在凝態物理系統中等效地實現了，將來可能應用在拓樸量子計算中。

去年 7 月，一則關於發現「天使粒子」的科學新聞吸引了大家的注意。來自加州大學洛杉磯分校、加州大學爾灣分校、史丹福大學等名校的幾位華裔科學家何慶林、王康隆、夏晶、張首晟，與其他研究人員共 20 人，在《科學》期刊發表了這個新穎的研究成果。

有的報導說科學家尋尋覓覓這個粒子已經 80 年，如今終於找到了，因此是諾貝爾獎級的重要發現，必定獲獎。也有文章不認同這個說法，認為是凝態物理學家炒作過頭。究竟什麼是「天使粒子」？這個發現的重要性是什麼？能有哪些應用？筆者試著在這篇短文中做簡單的介紹。

天使粒子 (Angel particle) 原來的名字是馬約拉納費米子 (Majorana fermion)，是一個理論上探討過，可能存在，卻不曾在高能粒子加速器中確認的基本粒子。根據最簡單的定義，它就是一個「自己就是自己的反粒子」的費米子 (fermion)。其實在日常生活中無所不在的光子也是自己的反粒子，不過光子是零質量電中性的玻色子 (boson)，物理學家對它很熟悉，不像有質量卻與自己互為反粒子的馬約拉納費米子那麼稀奇與神祕。

根據張首晟教授的說法，一般的粒子與反粒子就像天使與魔鬼，而粒子與反粒子合體，或者說沒有反粒子，就像是只有天使而沒有魔鬼，因此他把馬約拉納費米子命名為天使粒子。



圖片來源：種子發

天使粒子原來的名字是馬約拉納費米子，
根據最簡單的定義，它就是一個「自己就是自己的反粒子」的費米子。

在沒有其他交互作用力與外在環境干擾的情況下，不同類別的全同粒子組成的系統具有不同的統計行為，而導致不同的巨觀物理現象。

不過，王康隆教授認為稱作太極粒子（Tai-Chi particle）或許會更貼切，因為它就像是陰陽合一，雌雄同體的粒子。

在量子力學出現之前，每當說到粒子，指的就是那種一顆一顆的東西，古典力學裡的質點就是基於這種觀念的粒子。量子力學建立了波與粒子的聯繫，把波動性與粒子性視為一體的兩面。一個量子粒子對應一種波，那個波方程描述的就是那種量子粒子的特性以及在實驗條件下的分布。怎麼確定那真的是粒子呢？答案是某種底片或偵測器可以測到不連續的空間資訊或時間訊號。至於這是不是等價於直觀上那種一顆一顆的粒子觀念？這個疑惑可以在觀察大量同類粒子的行為時獲得一部分解答。

在沒有其他交互作用力與外在環境干擾的情況下，不同類別的全同粒子（identical particles）組成的系統具有不同的統計行為，而導致不同的巨觀物理現象。其中一類別稱為玻色子，多個這類粒子可以分享一個共同的量子狀態，超導狀態中的古柏對（Cooper pair）就很近似於玻色子。

反之，若是滿足包立不相容原理所保證的排它性，一個量子狀態只能被一個粒子占據，那就是費米子，固體中的電子與電洞都可以視為費米子。一般物質的穩定性其實就是來自量子粒子的波粒二象性與費米子的排它性。這些多粒子系統的奇妙行為顯示它們依然是「一顆一顆」的粒子，只是它們具有不同於古典粒子的統計特性。

在高能物理的世界，物理學家可以根據實驗結果分析出粒子能量與動量之間的函數

關係、電荷、質量與自旋，以及該粒子參與哪些交互作用（強、弱、電磁、重力交互作用）。從這些特徵以及它們究竟是玻色子或費米子，就可以確認究竟發現了什麼粒子。

這就像所謂的「鴨子測試」：如果牠走路像鴨子、叫聲像鴨子、游泳像鴨子，那麼牠很可能就是鴨子。基本粒子跟鴨子的差別是，鴨子除了走路姿態、叫聲，以及游泳姿態之外還有其他特徵（例如羽毛分布或口感），但是基本粒子除了前面提到的幾則有限的特徵之外，並不具有其他特徵。

到了凝態物理裡，粒子的概念變得更加模糊了。某些這樣的粒子很像明星或政治人物，每當他們移動，身邊總跟著一群狗仔、粉絲或隨扈，使得我們看不清他們的原貌，而要把他們與這一層狗仔粉絲或隨扈的「外殼」放在一起看，整個視為一個準粒子（quasiparticle）。例如極化子（polaron）就是一個運動的電子帶著它周圍因受它的庫倫力影響而變形的晶格波一起移動所形成的一種耦合波。

還有一些凝態系統中的粒子是元激發（elementary excitation），對應於背景粒子的某種集體運動的波模式。晶體物質中的聲子就是固體晶格的集體振動波，在波長很長且頻率很低的情況下就對應平常所知的彈性波，其他如電漿子就是電磁波與電子運動耦合而成的波。通常這樣的耦合機制會修正粒子的一些特性，因此把它看成一個新粒子會更加方便。

以電漿子為例，耦合後的波既不像電子（因為它的靜止質量由電漿頻率決定，

近年來，拓樸材料或拓樸相變有關的理論與實驗的快速進展，為凝態系統中等效地實現馬約拉納費米準粒子創造了條件。

與電子的不同)，也不像光子（原來的光子並沒有靜止質量）。再以半導體中的布洛赫電子（Bloch electron）為例，雖然我們很習慣稱它為電子，但是它的等效質量主要是由晶體周期位能導致的能帶結構所決定，與真空中的自由電子的質量不同。

上述這些凝態系統的準粒子或集體激發，它們與「顆粒」有關的概念只剩下像是「波能量是基本能量的整數倍，電荷是基本電荷的整數倍」這類事實，而那個整數倍數就是代表粒子數。不過，有趣的是，準粒子不但靜止質量與能量—動量關係可以與自由粒子不同，甚至連基本電荷與統計特性（費米子 / 波色子分類）都可以修正。

古柏對（Cooper pair）是由配對的超導電子所形成，當它被視為準粒子時，它是一個波色子，具有兩倍的自由電子電荷。更奇特的是像分數量子霍爾效應（fractional quantum Hall effect）的準粒子，它具有分數倍的自由電子電荷，而且既不是波色子也不是費米子，而是一種任意子（anyon），遵循「分數量子統計」（fractional quantum statistics）。

在高能物理裡的費米子是由狄拉克方程（Dirac equation）所描述，狄拉克方程的波函數稱作旋量（spinor），具有四個分量，描述正粒子與反粒子的自旋上下狀態。如果選擇方程的正能量解，它描述的就是粒子，而負能量解就對應反粒子。一般而言，正反粒子除了能量相反外，還會對應相反的電荷。

1937年，義大利物理學家馬約拉納（Ettore Majorana）發現狄拉克方程的樣貌可以改造，而被他改造的狄拉克方程可以描述一種中性粒子，具有自己就是自己的

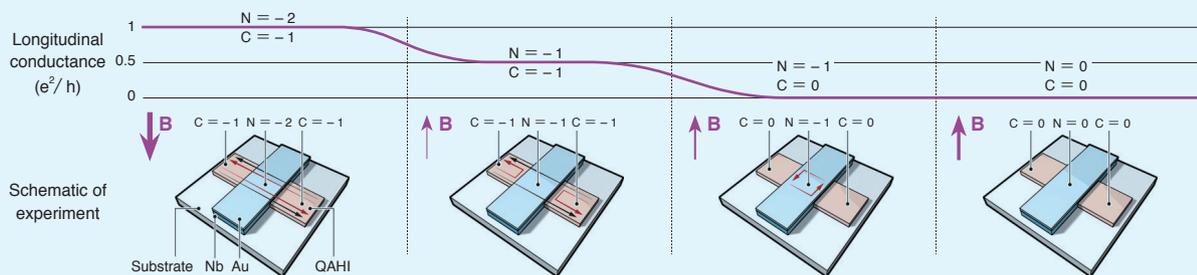


物理學家馬約拉納（圖片網址：https://en.wikipedia.org/wiki/Majorana_fermion#/media/File:Ettore_Majorana.jpg）

反粒子的特性，這就是前面所說的馬約拉納費米子。在發表這個奇特粒子的論文之後不久，馬約拉納就神祕地失蹤了，而馬約拉納費米子也沒有在高能物理的實驗中發現，雖然微中子（neutrino）被懷疑就是一種馬約拉納費米子。

近年來，拓樸材料或拓樸相變有關的理論與實驗的快速進展，為凝態系統中等效地實現馬約拉納費米準粒子創造了條件。所謂拓樸材料，就是它的某些物理特性受到在系統參數改變下不變的拓樸不變量保護而具有穩定性的材料。

以二維的拓樸絕緣體為例，它的內部是絕緣體，邊緣具有電流或自旋流



發現手徵馬約拉納費米子模的實驗架構示意圖，以及改變外加磁場所對應的4個不同的拓樸相。C 與 N 分別表示拓樸超導陳數與量子異常霍爾絕緣體陳數。(圖片來源：<http://science.sciencemag.org/content/357/6348/252/tab-figures-data>)

(spin current)。在材料參數（例如外加磁場或自旋軌道耦合作用的強度）的連續變化下，攜帶上述電流或自旋流的邊緣態 (edge state) 具有穩定不變的韌性，只會在參數變化幅度過大時發生改變拓樸（類似一顆球變成一個環，變化後多了一個孔）的跳躍性改變，而這樣的改變就定義為拓樸相變。

每個拓樸相對應一個拓樸不變量，例如陳數 (Chern number) 或 Z_2 不變量 (Z_2 invariant)，而系統哈密頓量 (Hamiltonian) 受參數調控在同一個拓樸相中的變化，可以比喻成在不改變拓樸特性的情況下改變物體的幾何形狀，就像是甜甜圈變成馬克杯，變化前後都維持只有一個孔。邊緣態或邊緣模 (edge mode) 所攜帶的電流或自旋流，會在拓樸保護下沿特定方向環繞一順時或逆時針轉一旦不受障礙物、雜質或缺陷影響。

理論上發現，當條件適合時，在拓樸超導體的邊界或表面可以創造出單向傳播的馬約拉納費米準粒子邊緣態，稱作手徵馬約拉納費米子模 (chiral Majorana fermion mode)。所謂拓樸超導體，其實是超導體與拓樸材料耦合而成的一種特殊結構。

在王康隆等人的這一篇論文中，選用的超導體是超導溫度之下的鈮 (Nb) 薄膜，被一層金 (Au) 薄膜所覆蓋，並被一種量子反常霍爾絕緣體 (quantum anomalous Hall insulator) 薄膜拓樸材料從中穿過，

最後並加上磁場以及驅動電流的偏壓。當調控外加的磁場並量測邊緣態電流電導時，系統會經歷幾個拓樸相變。在最關鍵的那個拓樸相，會量到半個量子化電導 $e^2 / 2h$ ，這說明了在拓樸超導的邊界上確實出現了馬約拉納費米準粒子。

這次的發現無論在理論上或實驗上其實都不算是第一次找到馬約拉納費米準粒子。不過，這次的實驗排除了一些其他造成同樣現象的可能性，是一個結果乾淨的實驗，因此是一個很重要的突破。

這個實驗中證實的馬約拉納費米準粒子與原來在基本粒子理論中的馬約拉納費米子不同，除了它是準粒子而不是基本粒子之外，它還是手徵型 (chiral) 的，也就是它是單向環繞的。此外，它是成對出現在超導的兩個邊界上，兩者分享一個量子位元 (quantum bit, qbit)，這表示以這種準粒子作量子位元的配置，在環境干擾下會具有較強的抗干擾能力。最後，它不是費米子，而是要用辮子群理論 (braid group theory) 描述其統計特性的拓樸性準粒子。

最後的這兩個特性使得採用這種拓樸性粒子編碼的量子計算程式較不容易被外在環境干擾，因此極可能在未來拓樸量子電腦的實用設計中找到應用的機會。

樂丕網
中央大學光電科學與工程系