

超 流 體

趙 午

——節譯自 James Clerk Maxwell 著 superfluid——

超導性 (Superconductivity) 是 H. Kamerlingh Onnes 在 1911 年發現的，他以水銀做實驗來研究金屬的導電性對絕對溫度的關係。他非常驚奇的發現當溫度降低時水銀的電阻先作等速降低，降到 4°k 時，電阻突降至 0。這就是說，如果我們用某些金屬做一個環，在某一低溫下使它產生一個電流，那麼這個電流將永遠流下去。

如果畫出各元素的原子體積 (atomic volume) 和原子序 (atomic number) 的圖形，我們發現超導體都是些原子體積不大不小的金屬。例如鈹的原子體積稍大，而金稍小，以至兩者都非超導體，但其合金 Au₂ Bi 卻是超導體了。這也表示了超導性不是原子本身的性質，而是與自由電子在金屬的能量光譜 (energy spectrum) 的重新排列情形有關的。在低溫下，能量差的數量級是 10^{-4} 電子伏特，因此在各個原子中不容易有能量的轉換 (energy transition)。此外比熱 (specific heat) 也會在溫度低到產生超導性時發生變動。這些都是不易解釋的奇怪現象。

Kamerlingh Onnes 在 1908 年發現了液態氦，他測量液氦的氣化熱時驚奇的發現在氣化熱和溫度圖形曲綫上有一個開口。他又發現液氦的密度在溫度下降時，先是增加，到 2.2°k 時密度反而減小。這個實驗加上 Keesom 及 Clusius 量得的比熱和溫度曲綫構成了一個難題。Keesom 的圖中，比熱約在 2.2°k 的位置上分成了兩支，這分支點叫做 lambda-point，此點之左 Keesom 把這種狀態下的氦叫做 He II，之右叫 He I。當我們降低 He I 的溫度時，溫度一低到 lambda-point 以下時，原來強烈的沸騰狀態突然停止。這個奇怪現象被 Keesom 解釋了，Keesom 發現在這裡熱傳導的能力會隨溫度的百萬倍增加，此外，導熱性還隨容器和測量方法之不同而不同。同樣的情形適用於液氦的粘滯性，He II 的粘滯性也有這兩種性質——百萬倍增加和

隨測量方法而不同。更重要的是我們發現將液氦以高速通過狹小的孔道時與壓力幾乎不發生關係，這就是超流體的由來。

還有一個奇怪而有趣的現象是薄膜流 (film flow)，把一個開口瓶口朝上壓入液氦中，但不使液氦由口中流入，不多久瓶中即存有與瓶外液面等高的液氦了，再將瓶拿出液面，液氦又會一滴一滴的滴出，這都是因為薄膜流的緣故。任何固體與 He II 接觸時，全部會被 10^{-6} cm 厚的液氦蓋起，液氦就在這個膜內流動。但是奇怪的是當流動進行時，雖然流體所需流過的路程和壓力都改變了，流速卻始終是個常數，此與鐳的放射性不受外界影響甚為相似。我們不知道一個鐳原子會在什麼時候分裂，同樣的，我們也不知道什麼時候一個氦原子會爬上瓶壁。

薄膜流的另一個實驗顯示出液氦流動時不受阻力，此與超導體的電阻等於零極相似。

超導體和熵 (entropy) 有什麼關係？我們知道熵的內涵就是次序 (order) 而且熵在大自然裡是增而不減的。我們先由比熱曲綫導出熵的圖形，在溫度下降時，熵起先是向著原點直綫遞減 (He I 或金屬附近的熵卻增加的更多，整個系統的熵仍是增加的)，在由正常狀態 (He I 或金屬) 一進入超流體狀態時，曲綫下降斜率突然增大。這些性質我們用所謂的 two-fluid model 來解釋，我們假想起先超流體都是相同的質點，當溫度一冷到轉換點時，一些質點就變到低能階去，冷到 0°k 時全奇質點都變了。只要不進入原子的能階，這個 model 解釋了很多問題。例如：前面所提的永久性電流可視為只有具有超導性的部分電子在流動，從細管通過的液氦也只有具超流性的質點在運動。

具有超流性的質點的熵等於零，所以才會在當突然通過轉換點 (突然產生了超流性質點) 時，熵

更深的自信。可是歷史會繼續下去，雖然量子論的發明者並不願意打破他們的幻夢。

「物理學的任意性」完全反對「至理」存在的觀點和「科學推理」scientific inference 有很密切的關係。D. Hume懷疑我們如何能從無法觀察到的事實得到知識，他不認為過去和現在的經驗能正確的推論將來的事實。這種論點破壞了科學的紀律性，因為他表示我們不能保證假說的推論一旦證實過就將永遠是正確的。現在 Hume的懷疑論已在由經驗推論或經驗發現的理論上有很大影響。但在由任意選擇而建立的理論上却不發生作用。物理學的歷史也堅信在早期推論的重要會被懷疑。有一個很好的例子便是伽利略在力學中介紹了瞬時速度的觀念。這種任意的論調在當時被認為是不合理的而難以被人接受。

對 質

有些人可能會說早期物理並沒有「任意性」這回事。難道說我們的祖先是就現成的事實觀察而不是尋找或選擇後用適當的方法解釋嗎？歷史告訴我們，不是那麼簡單。像亞里斯多德着重於分類學而

上接 44 頁 超流體

會突減。這和熱學第三定律也無衝突，因為我們無法不改變溫度而把這兩種質點分開。

我們知道，要預測一個質點的運動，要先知道這個質點的「位置」和「動量」，這兩個量的關係就好比鎖和鑰匙，祇有鎖和鑰匙是沒用的，必須兩個都有。一旦我們考慮了動量，那麼次序(order)就有了一個新的意義，我們要把次序和動量的關係找出來。如果假設超流性的基本現象是動量的凝結（各質點相互運動不變），那麼我們還能進一步說，這個假設是很基本的，因為超導體中的電子依 Fermi-Dirac statistics運動，而不帶電荷的 He 原子卻依另外一個 Bose-Einstein statistics運動。超流體狀態下的動量空間（momentum-space）應與晶體的位置空間相同，此模型很具一般性，在很多完全不同的過程中都得到類似的性質——都成了晶體。

最後一個問題是：He 系超導體是否是唯一的

阿基米得在數學分析方面有研究。物理學家可用任意方法解釋物理現象，我們只消想一想關於物質的構造有原子理論及連續（Continuum）介質論，關於熱的性質有卡路里（Caloric）學說及力學理論，關於光的性質有粒子（Corpuscular）說及波動說。某人認為正確的解釋對別人來說並不一定對。

當然我們可找到一些例子關於科學家沒有任意選擇的機會，如法拉第當時要去發現電和磁，電和光，電和重力的關係時完全不須要想像，那些都是顯而易見的事實，可是馬克斯威爾發明位移電流（displacement current）而導至電磁波的理論就是一種大膽的假說而不為當時人接受。他預示一種任意抽象的理論建立法。在量子力學結構中介紹波動函數，修正了古典觀念就是一個很好的例子。與核子結構及基本粒子有關的核子物理也是一個憑臆測任意建立的例子。目前散射矩陣理論已使時空連續性的觀念完全失效。聰明的科學家總會利用任意的型式去做實驗的理論基礎。此種「任意性」並可防止科學的教條化。

譯自 Physics Today Dec. 1967.

這種總集情況的代表（固體中各質點相互位置不變，我們叫它作位置的總集情況——a state of aggregation——在這裡，動量也叫它作一種總集狀態——）。地球上，動量的總集很少發生，好像只在實驗室裡才有，但在外太空如有一個低溫星球，則很可能對它而言位置的總集狀態反而難得，也說不定所謂固體對宇宙來說是個很奇怪的東西。

這只是一種可能，還有一種可能，我們假想有一種位置動量混合的凝結。這種狀態很難想像，但卻可以知道一些它的性質。第一，它的熵很低，因為它達到次序的可能性很大。第二，它有位置次序的性質——它們摸得到，有一定體積和形狀。第三，它有動量凝結的性質，當我們切斷一個流有永久電流的超導體環時，電流馬上停止，所以第三個特性可說是：當它被切斷時它的動量凝結失去意義。這些性質在生物的構造裡確能同時成立。然而，這只是有趣的空論罷了。