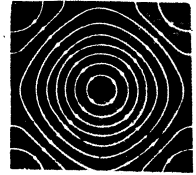


漫談超導體



趙一雄

一九一三年十二月十一日翁尼斯 (Onnes) 在諾貝爾領獎會中，談到了所作的一項實驗，測量汞的電阻與溫度之關係；他發現一件令人驚異的現象，當溫度降低到 4.2°K 時，汞的電阻突然變成極小。這是一種突變而非漸近的變化，因此汞在 4.2°K 時是一種新的狀態。翁尼斯當時就把這種特性稱為超導性、這就是超導性首次為人類發現的經過。同時翁尼斯加磁場於超導體上，發現當外加磁場強度大於 H_c (臨界磁場強度) 時，這種超導性也就消失。第二年，他以超導性的綫圈感應而產生電流，從荷蘭的來登 (Leiden) 攜至劍橋 (Cambridge)，但是綫圈上的感應電流卻沒有衰減。

一九三三年麥斯納與奧森弗 (meissner & Ochsenfeld) 發現超導體和完全導體一樣都具有完全反磁性。將溫度降低到超導體之轉遞溫度 T_c (Transition Temperature) 以下時，雖然在外加磁場 (磁場強度小於 H_c) 的作用下，磁力線卻不能通過超導體的內部，亦即超導體內部之感應磁場為零。自然，為了隔絕外加磁場對內部的影響，在超導體的表面勢必產生穩定的逆磁電流。

一九三四年葛特和卡斯米爾 (Gorter & Casimir) 首次以用作解釋液態氦之雙流質模式 (Two Fluid model) 來觀察超導體在臨界溫度下時，第二相轉變 (Second-order phase transition) 的情形和其它有關熱力學方面的特性。他們假設電子的流動可以視為一種流質 (Superfluid)，其餘的電子則是正常流質 (Normal fluid) 因此電子密度 ρ 可以寫成 $\rho = n_n + \rho_s$ ，其中 ρ_s/ρ_n 是代表被凝聚成具有超導性之超流質密度與正常流質密度的比。當溫度由 T_c 降到絕對零度時 ρ_s/ρ_n 之值由 0 增至 1，也就是在絕對零度時，所有的電子都被凝聚成超流質了。

第二年倫敦兄弟 (Fritz & Hans London) 根據超導體電磁方面的特性，提出了一項合乎現象性的理論 (Phenomenological Theory)。依照他們的推論，在向量位 \vec{A} 的空間，超流質的電流密度為 $\vec{J}_s = -\frac{1}{\Lambda_c} \vec{A}$ 而且在溫度低於 T_c 時，外加磁場所能穿透超導體表面的深度為不超過 $\lambda_L = \frac{\Lambda_c}{4\pi H}$ ，根據估計 λ_L 的大小在 10^6

cm ，但實驗的數值是該值的數倍。又由這個理論發現，通過一個封閉超導體綫圈的磁通量是 $\phi_s = \frac{n\hbar c}{e}$ 。極明顯的，磁通量是成量子化的形態。但是無論如何精確的量度，實驗值正好是理論值的一半，這一點讓他們感到極大的困惑。當時倫敦認為，具有逆磁性質 (Diamagnetism) 的超流質電流密度 J_s 是可以從量子力學的觀點推導出來。電子所處的狀態一空間的位置和動量的大小，不論從空間的結構或從動量的結構來看，都可以用一個狀態函數 (State function) 來描寫 (所謂動量結構的狀態函數是描寫空間某一位置上的電子在動量空間動量變化的情形，而空間結構的狀態函數是描寫具有某一動量的電子，在空間位置改變的情形)。當外加磁場時，正常電子的狀態將會改變，因此其狀態函數亦即改變了。但是超流質的狀態函數却是固定的，不會因外加磁場的影響而改變，根據這個假設，在基態 (Groundstate) 的超流質可以看成一種電子平均動量的凝聚體。這種在動量空間的凝聚作用，可以使得每一個超流質電子的動量即使在動量空間內仍然保持一定的常數而不改變。在激態 (excited state) 的正常電子因動量改變而被激發到較高的能階，但超流質的動量不變影響，因而仍然停留在基態的能階，所以超導體之能帶 (energy spectrum) 勢必因超流質與正常電子間能量的差距，而導致有能溝 (energy gap) 的出現。這些觀念對於以後超導性理論的展是很有幫助的，因為有關電子在動量空間的凝聚作用之研究，正是以後 BCS 理論的基礎，而根據古柏 (Cooper) 的討論，能溝之存在，正是支配超導體各種特性的主要原因。

一九五〇年馬克斯威和雷諾 (Maxwell & Reynolds) 分別發現了超導體之轉遞溫度 T_c 是與該超導體同位素之質量 M 有關係，這就是所謂的同位數效應： $T_c \propto M^{-1/2}$ 超導體的離子核 (Ion core) 是成規則的晶格排列，這些離子核在晶格的位置上，並非靜止，而是作簡諧振動，從量子力學知道，簡諧振動的能量是與振動的頻率成正比，亦即與離子核質量的平方根成反比，並且是成量子化之形式，因此像

這種量子化晶格的振動稱為聲子(Phonon)。由同位素效應的事實，顯示出超導性的起因，除了離子核外圍的電子變成超流質之因素外，亦與晶格上離子核的振動（聲子）有關係。就在同一時候，弗羅律希(Fröhlich)由電子與聲子間的相互作用力，推尋出同位素效應的結果，但是却不能解釋超導體其他方面的特性。不過這是首次企圖以微觀的立場來解釋超導體的理論。

一九五五年畢柏(Pippard)從許多實驗的結果，認為每一種超導體都有一個稱為凝聚長度 ξ (Coherence length)的參數相對應。也就是，將干擾加於超導體時，能夠影響到超流質最大的範圍是 ξ 。當溫度低於 T_c 時，純金屬的 ξ 值是 10^{-4} Cm，這個結果比倫敦所求的磁場滲透值 Λ_L 大 10^3 倍。電子都有處於最低能階的自然傾向，因為鮑利的不相容原理(Pauli exclusive principle)，在絕對零度時，電子在動量空間的組態是從最低能階開始排到最高能階，電子所能存在的最高的能階稱為費米能(Fermi energy)而此時電子所具有的動量即為 P_F 。因為電子只能被激發到原來沒有電子存在的能階，所以超導的電子能夠從基態被激發的，只有在費米能階附近的電子。如果引用畢柏的凝聚長度 ξ ，根據海森堡測不準原理，估計超導體之電子從基態被激發時，動量之改變 ΔP ，即 $\Delta P \sim \frac{h}{\xi} \sim 10^{-4} P_F$ ，也就是只有動量比 P_F 而在 $10^{-4} P_F$ 附近的電子，才能夠被激發。那麼倫敦所謂的在動量空間電子之凝聚體該是指處於這種狀態下的電子吧。

巴定(Bardeen)自始就認為必定能夠用能講的模式來解釋超導體，一九五五年邀約了古柏和薛里弗(Schrieffer)共同對超導體之理論從新作一番探討；首要的問題是如何去找一個基態的狀態函數。假設基態之狀態函數 Ψ_0 可以視為各種可能存在的狀態函數 ϕ_n 的線性結合，即是 $\Psi_0 = \sum a_n \phi_n$ 。那麼對應它求出來的本徵能量(Eigen energy) $E_0 = \langle \Psi_0 | H | \Psi_0 \rangle = \sum Q_n^* Q_n \langle \phi_n | H | \phi_n \rangle$ 一定是要最小值，欲滿足這個條件， a_n 的選擇一定要受到限制；當他們著手這方面的研究時，古柏發現在晶格中電子與電子間似乎可以假設真有相互吸引的作用力存在，然而自由電子間的靜電庫倫力，使得這種電子間的相互吸引力被認為是太不可思議，但是在晶格中，由於第一個電子的出現，將會使得鄰近的正離子核之排列受到干擾而偏向第一個電子。分佈在正離子核附近的第二個電子會因正離子的偏移而向第一個電子

方向移動，那麼兩電子間豈不是藉著晶格之偏移可視為相互吸引麼？所以這種電子間的相互吸引力是屬於一種電子—聲子—電子三者間間接作用力。在這個作用力下，基態的兩個動量相反且自旋方向(Spin)也相反的電子將會被牢固地束縛在一起，構成總動量與自旋均為零之“古柏電子對”(Cooper electron pair)這些“古柏電子對”可視為是一種Boson，不受“互斥原理的限制。一九五七年一月他們引用了“Bogoliubov處理液態氦的狀態函數的方法，成功地找到了超導體的基態函數，並且發現了超導體基態與激態間確實有能溝之存在。這就是著名的超導體BCS理論。

由於能溝之存在，使得超導體的永恆電流，磁通量子化等許多特性都可以獲得解釋。在導體中，電流之所以會衰減，是因為電子在晶格中與聲子或雜質之散射而消耗能量，但是在超導體中，電子是以成對的“古柏電子對”出現，欲使原來動量為 $(K \uparrow)$ 與 $(-K \downarrow)$ 的“電子對”經過一次散射後分別獲得動量 Q ，而變成動量為 $(K+Q \uparrow)$ 與 $(-K+Q \downarrow)$ 的狀態，首先必須在這散射過程中，提供足以破壞原先為 $(+K \uparrow)$ 與 $(-K \downarrow)$ 之“電子對”的束縛能，對聲子或是雜質來說，這是不可能的；因此“電子對”雖被散射，但是動量不會改變，所以超導體一旦產生電流後，這電流將維持一段時間而不衰減，也就是超導體的電阻係數極微小而近乎零。至於倫敦從現象性理論所得到的結果。磁通量的量子化 $\phi_n = \frac{nhc}{e}$ ，如果式中以 $2e$ 代替 e ，那麼理論值與實驗值不就相符合麼！那正是超導體中，電子或“古柏電子對”出現的有力證明。

超導體是近半世紀以來物理界的一項重大發現，觀其發展的經過，從實驗中的探索分析，現象邏輯之推論，以至於BCS理論的建立。誠如薛里弗在前年諾貝爾領獎會時所說：「超導體理論的發展，不只是巴定，古柏和我個人的努力所能得到的，其實應歸功於近半世紀以來許許多多科學家們一致研究，群策群力的一項成果。」但是能夠從純粹微觀立場作為理論基礎，而又圓滿地解釋超導體各種有關的問題，這一點正是BCS理論偉大之處。

現在有關超導體的研究工作已漸漸偏向於如何達到實用的階段。譬如企圖應用到長距離的電力輸送；以及利用超導體之永恆電流產生感應磁場藉以減少車輪與車軌間摩擦力之高速磁性火車等。這些都是利用超導體之電阻近乎於零的特性，藉以節省

因電阻存在而產生的大量功率消耗。但是一般超導體的轉遞溫度 T_c 值都非常低；這種低溫的保持工作卻是科技和經濟方面所極欲克服的難題。到目前所發現的超導體中，具有最高轉遞溫度的一種叫 $T\text{CNQ}^+$ (Tetracyanoquinodimethan) 在 60°K 時其導電性突然增大至常溫的500倍，但是這個收值距離現在能夠以經濟方法達到的最低溫度—液體空氣(77°K)尚有一段距離。所以如何去尋求一

種物質，其超導性之轉遞溫度能在液態空氣溫度之上，正是今日許多科學家們所一致努力研究的工作。(附註)

*：參考 Taylor, Philip L. ^a A quantum approach to the solid state, Engle wood Cliffs, NJ · Prentice - Hall (1970)

+：參考 Physics today · May, 1973



他校概況

編輯

想會長剛上任時，雄心萬丈，要收集各大專院校物理系研究概況的資料，再和國科會所訂的全國物理發展計劃比較，看看能否得出什麼「霧裏乾坤」。怎奈各校自珍敝帚，僅收集到中央大學地球物理系和交通大學的資料。為不辜負聯絡同學的熱心，現就陳述於下，以供同學參考。

交通大學

一師資：現有教授三十一位，其中博士十四人，碩士四人，學士十三人。副教授三十八位，其中博士二十二人，碩士七人，學士九人。講師三十八位，其中碩士二十八人，學士十人。另有助教十四位

二研究發展：

(A)半導體方面：與工業研究所合作，自製 waf er (IC 材料) 和發光二極體。

(B)計算機科學及其應用：中文電腦、利用電視機作為計算機之發展終端

(C) IC 和 TV：利用 IC 改良電視機

(D)雷射通訊及其在工業上的應用

(E)電子交換方面：改進電話通訊

(F)微波半導體元件方面

(G)運輸控制：最佳自動光控制會車

(H)管理科學

三裝備：新有一套製 IC 的儀器，一部 W A N 3300 供研究生研究，並即將有一部雷達與供實驗

中央大學地球物理系

各研究人員所做的專題如下：

陳滌清 (副教授)：交互作用粒子相對論性運動之研究。

劉海北 (副教授)：二原子分子位能曲線之研究。

胡三奇 (教授)：大氣觀測儀器改良之研究。

余貴坤 (教授)：台灣火山岩物理性質之區域分佈。

吳永順 (教授)：台北地區電離層散射 E 層之太陽活動變化之研究。

蔡木金 (教授)：台灣西北部沿海鹽分含量與氣象因素之關係。

林敏一 (教授)：最小二乘方平滑莫子之頻率分析。

另外，由胡三奇教授領導方雲志副教授，李秀雄、陳平獲、吳幸鴻三位講師和鄒玉華助教在做地殼傾斜與地震預測之研究。