

高溫超導體

古煥球

1908 年荷蘭物理學家翁內斯 (Onnes) 首次成功的將氮氣液化 (一大氣壓時液化溫度為 4.2 K)，並以液氮為冷卻劑，進行低溫物理的研究。1911 年他發現汞的電阻在 4.2 K 時突然降低到零 (實際轉變溫度為 $T_c = 4.153 \text{ K}$)，這就是第一個超導體的發現。翁內斯也因這些成就在 1913 年榮獲諾貝爾物理獎。

從第一個超導體的發現至今七十年間，我們來看看超導體的發展到了怎樣的地步：

(一) 前五十年中 (1911 ~ 1961) 所找到的超導體範圍最低是 0.4 K，最高到 18 K。

(二) 1961 ~ 1971 間，因低溫技術的發展，超導體的範圍延長到從 0.2 mK ($2 \times 10^{-4} \text{ K}$) 到 21 K。

(三) 到目前為止，最高的超導轉變溫度可達 23

K。

(四)基本的超導性理論，在1957年由巴定(Bardeen)、庫柏(Cooper)和薛立佛(Schrieffer)三人提出的微觀理論(BCS理論)得到成功的解釋，BCS理論是透過電子—聲子—電子的交互作用，電子和電子間互相吸引形成庫柏對(Cooper pairs)，而使金屬在低溫時有超導性的現象。此三人因這個理論在1972年拿到了諾貝爾物理獎。

而今天的題目：高溫超導體(high-temperature superconductors)，主要是指 $T_c > 10$ K的超導體。我們為什麼要找高溫超導體，高溫超導體的特性和好處又在那裏呢？

超導體轉變溫度因為低於23 K，因此必須用液態氦來冷卻以保持超導性(其他液體除氦外在24 K以下已成固體，氦的融點為14 K，沸點為20 K，但相當危險，因此通常不用)。但氦在大氣層中存量非常低，只有在地下礦坑中從天然氣提煉才符合經濟價值，但主要產地在美國中南部礦井，世界其他各地很少(聽說我國四川有產)。因此如果能找到超導體其 T_c 在30 K左右，則可改用液態氦做冷卻劑，液態氦單位體積冷卻能力比液態氦多四十倍，而價格又便宜得多，因此如能找到高溫超導體，則現有的技術將起全面的革命化。我們可以超導材料來做電力傳送、交直流發電機、高磁場磁鐵、磁浮火車等等。這些應用已在研究實驗階段中，高磁場超導磁鐵則已普遍用在各種實驗室中，及在粒子加速器中泡沫室、粒子儲存環及加速器中導引聚焦磁鐵中。

但是如何去找高溫超導體呢？理論預測方面因此牽涉參數太多很難做正確的預測，所以目前絕大部分是利用實驗中累積的經驗定律(empirical laws)來做指導。所以我們首先分析已知的超導體。現已知的超導體已接近一萬種，在分析中我們可以畫分為超導元素和超導化合物：

一、超導元素

在1960年以前，超導元素的數目還很少，但最近二十年中，因此冶金技術的進步，使元素純度大為提高，加上低溫技術的發展(現已可達 μ K= 10^{-6} K左右)，使很多超導元素陸陸續續的出現。圖上顯示出現在已知的超導元素在週期表上的位置。有些元素在常壓或大體積時是普通導體甚至是

半導體，但加高壓或做成薄膜後電子結構改變而成超導體。銩(Am)是第一個超鈾超導元素(1978 $T_c=0.6\sim 1$ K)，而金到現在量到0.22 mk(1981)仍舊不是超導體。

到現在為止，常壓下最高溫的超導元素是鈮(Nb)。 $T_c=9.25$ K(用雷射處理後可達10.1 K)，而鐳(La)在210 K bar(1 bar = 0.987 atm = 10^5 N/m²)的高壓下 T_c 可達12.9 K。這是超導元素中最高的轉變溫度。

二、超導化合物

既然元素中不太可能有高溫超導體(最近俄國人宣稱硫加高壓後 T_c 達到28 K，在沒有人證實前必須存疑!)，所以很早就有人在合金(alloys)、二元化合物(binary compounds)、三元化合物(ternary compounds)或多元固態溶液(solid solutions)中來尋找高溫超導體。

到現在為止最成功的超導系統的晶體結構是 β -鎢(β -W)結構或慣稱A15結構(Stukturbericht)， β -鎢的結構是立方晶格，很多二元化合物有這種結構，1954年錫化鈮(Nb_3Sn)被發現超導性，其 T_c 為18 K，1967年鋁鎢化鈮($Nb_3(Al_{0.75}Ge_{0.25})$)假二元化合物 T_c 被發現可達21 K。1976年鎢化鈮(Nb_3Ge)薄膜則 T_c 高達23 K。以前大家認為矽化鈮(Nb_3Si)如能被合成 T_c 將超過23 K，但今年(1981)終於成功合成後發現 T_c 只有18 K。

在應用方面，不但需要高轉變溫度而且需要其他特性來配合。例如說超導磁鐵材料就同時需要具備高臨界磁場和高臨界電流密度兩種特性。現在普通是用鈦鈮合金(Nb-Ti)，在4.2 K時其臨界磁場為10 teslas(1 tesla = 10^4 gauss)，臨界電流為 10^5 amperes/cm²但 Nb_3Sn 其臨界磁場超過20 teslas，臨界電流可達 10^6 amperes/cm²，因此冶金技術成熟後現已開始被用來做磁鐵材料。前幾年又發現一種新的三元超導體——硫化鉛鉬($PbMo_6S_8$)，其臨界磁場在4.2 K時可達50 teslas，可能成為下一代的磁鐵材料。

在純粹科學的觀點來看，高溫超導體在自然界是屬於半穩定狀態。電子和電子的弱吸引力很容易被溫度、雜質、晶體結構轉變或電子結構變化等打消。因此高溫超導體只能用人工合成，強迫形成特殊的結構，希望其適合超導性的條件。如果從過去

的發展來看將來二十年， T_c 應可提升到 27~30 K 左右。

尋找超導體並不只限於高溫超導體，現在最熱門的研究題目是磁性超導體 (magnetic Superconductors) 一如 $ErRh_4B_4$ 、有機超導體 (Organic Superconductors)、不均勻超導體 (Inhomogeneous Superconductors) 和非晶形超導體 (Amorphous Superconductors)。

在技術應用方面，超導計算機 (Superconducting Computer) 的發展到現在還不明朗。其原理是用約瑟夫遜效應 (Josephson Effects，此人因這理論在 1973 年拿諾貝爾物理獎) 來做干涉器 (Josephson Interferometers) 形成大型電子計算機，據估計可比現有半導體計算機快 50 倍，因其循環時間 (cycle time) 可達 1×10^{-9} 秒，如果超導計算機問世，那又是另外一個技術上的革新了。

科學的發展很難預料，很可能高溫超導體會在完全意外的情況出現，且讓我們一邊努力，一邊拭目以待。

(謹以此文紀念先師馬蒂亞斯 (B. T. Matthias)。

[介紹讀物]

- 1 B. T. Matthias, *Physics Today* 24, 21 (1971).
- 2 J. K. Hulm, J. E. Kunzler and B. T. Matthias, *Physics Today* 34, 34 (1981).
- 3 T. H. Geballe and J. K. Hulm, *Scientific American* 243(5), 138 (1981).
- 4 J. Matisoo, *Scientific American* 242(5), 50 (1980).

