

2003年諾貝爾物理獎得主--- 萊格特(A. Leggett)

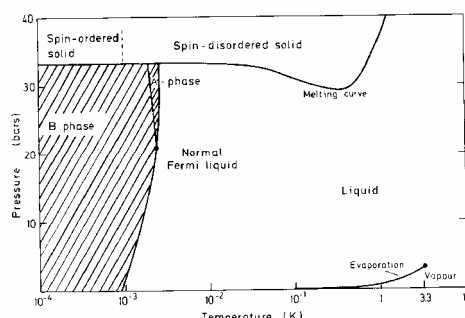
文 / 葉崇傑

液態氦在能取得的最低溫下，是唯一保持液態的，這是有別於所有其他在實驗室裡的物質，他們均將固化。在極低溫度的時候，它變成超流(Superfluid)，亦即它能夠毫無阻力地流動。

事實上，有兩種超流液氦的形式，氦三(^3He)和氦四(^4He)。儘管構成此兩種液體的元素，在原子核裡只差一個中子，但其在低溫下，由於量子統計的關係，有顯著不同的特性。氦四原子是一個玻色子(Boson)。氦四裡的超流體，發生在溫度於大約 2 K，這是早已被發現的(在 1930 年代)。大體而言，其基本物理是與玻色凝聚(Bose-Einstein Condensation)現象有關。

然而，今年頒給 Leggett 的諾貝爾獎涉及到超流體氦三。氦三是一種帶有(原子核)自旋二分之一的費米子(Fermion)。(它有兩個形成封閉 1s 軌域的電子，和一個包含兩個質子和一個中子的原子核)。在大約 2 K 時，雖然費米統計變得重要，而且系統形成正常的費米液體(Normal Fermi Liquid N)(見圖一)--像在正常金屬裡的電子--系統本身沒有發生明顯的變化。液氦三僅在約 mK 時才變成超流體。這個超流性質是直至 1972 年在美國康乃爾大學(Cornell University)，由 David Lee, Bob Richardson 和 Doug Osheroff 完成的實驗才被發現[2]。這三個實驗學家已在 1996 年被頒與諾貝爾獎。在這項發現之前，已經有了很多有

關氦三是否會變成超流，在什麼溫度這會發生，和什麼樣的有序(Ordering)與此超流有關的推測(特別是有配對(Pairing)應該是 d-wave 的推測。也應該被注意到，即使人們知道配對是我們現在所知的 p-wave, triplet, 序參量是一個三乘三複數張量。所以有許多可能的態基本上是可以存在的，而且在真實世界裡，哪些是真正形成的態是一個非單純問題。請參見下面更多的討論。



圖一：液氦三的相圖(出自於參考文獻[1])。

A 和 B 都是超流的相。

一開始，實驗學家並不確定他們發現了新的超流體：實際上，他們給他們的論文[3]命名為“Evidence of a new phase of solid ^3He ”(固態氦三新相的證據)(就我們現在所知，固體直至一個非常低的溫度，都沒有磁性轉變，見圖一)。在第一個實驗裡，系統是以 Pomeranchuk cooling 冷卻，換句話說，就是對一個固液混合物施加壓力。由於在費米液體裡的簡併，在溫度低於大約 0.3 K 時，液體實際上比 ^3He 固體(原子核自旋基本上是自由的)有更少的熵

(entropy) 這從圖一中,液-固相邊界負的 dP/dT 斜率反應出來。因此,固液混合物的壓縮會導致系統的冷卻。實驗學家他們在增壓與減壓時,觀測到壓力隨時間的關係(粗略的說,冷卻率)在某些壓力(因此,溫度)下發生變化。(我們現在知道,沿著圖一中的融化曲線有 N-A 和 A-B 之間的兩個相變;N=正常費米液體,A 和 B 都是超流的相)。

稍後,他們做了核磁共振(nuclear magnetic resonance)的實驗(樣品被放至於磁場中,原子核被無線電頻率場擾動,在發生共振時的頻率被監測。)實驗學家觀測到,經過相變化下,共振頻率偏移向較高的值。

Leggett 從 NMR 資料分析,指出系統實際上已經進入了超流相。他解釋了如何從一個超流相能夠導致觀測的頻率偏移。再者,他提議數個其他 NMR 實驗去理解原子將會有哪種有序。Leggett 的提議和分析,導致 A 和 B 相有序(幾乎是)決定性的鑑定。這些鑑定,在稍後被許多其他測量,如超音波衰減(ultrasonic attenuation),證實。

就這一點,有助於我們回憶從 Bardeen, Cooper, 和 Schrieffer 的超導理論裡知道了什麼。電子也是費米子,而且,在低溫,他們也形成正常費米液體。超導性是由在費米面附近的電子,經過稱為庫柏配對(Cooper pairing)的現象所發生的。反過來說,這配對允許了規範對稱破缺(broken gauge symmetry)的發生,因此有一個複數的序參量 Ψ [和一個超電流(super-current)的形式

$$J \propto \frac{1}{i} [\Psi^*(\nabla\Psi) - (\nabla\Psi^*)\Psi] \quad (1)$$

這個表示式非常像有空間性複數的波函數 Ψ 的量子粒子。更詳細的內容,請看由牟中瑜教授在這相同的刊物所寫的文章。在超

導(有序)相裡,下面的期望值,經常稱作"異常平均(anomalous average)",變成是有限的:

$$\langle a_{k\uparrow} a_{-k\downarrow} \rangle = \langle a_{-k\uparrow} a_{k\downarrow} \rangle = - \langle a_{-k\downarrow} a_{k\uparrow} \rangle \quad (2)$$

在這裡, $\langle \dots \rangle$ 意指期望值, a 是消滅算符。我們可以將方程式(1)裡的量想成系統的庫柏對波函數[反過來,在方程式(1)裡的 Ψ 正比於這些在方程式(2)裡的"異常平均"]。第一個等式對應到配對(pairing)是獨立於動量 \vec{k} 的方向的事實(對大部分的超導而言,這是真的,參見下文;第二個等式是從費米算符的反對易關係(anti-commutation relations)。注意,方程式(2)要求自旋矩陣 $\langle a_{k\alpha} a_{-k\beta} \rangle$ 在對於交換自旋腳標 α 和 β 下為反對稱。根據配對波函數的對稱性,我們稱這些超導體是"s-wave"(獨立於動量方向),而且是 singlet(自旋旋轉不變)。

Leggett 認為, NMR 偏移實際上指出了液體進入一個 triplet 且是奇宇稱(odd parity)的配對狀態。這裏,注意到一個自旋守恆作用不能引起任何 NMR 頻率偏移是非常有用的。然而,在氦三原子核之間,有一個小的偶極交互作用(dipole interaction),所以自旋守恆不是嚴格的。這個自旋不守恆的交互作用力太弱,以至於在正常態下,不能產生任何顯著的效應。然而,在一個有庫柏配對的狀態裡,這個交互作用被增強很多,因為現在系統有一個巨觀數量的配對,以相同的方式"行動"。進一步的想法是配對波函數的動量關聯(必然發生,因為它是奇宇稱),這提供一個額外的"角動量"向量給那些偶合的自旋。這個給在磁場下運動的自旋額外的復原力矩,是觀察到頻率偏移的原因。在 Leggett 的工作之前,完全不受賞識的是,在庫柏配對和偶極交互作用之間的相互影響的重要性,和可以單獨從 NMR 實驗觀察出來大量資訊。

由於過度冗長的關係,在此不對 Leggett 如何能從存在的 NMR 實驗(和他提議的另外

幾個), 推導出在兩個超流相裡的配對形式, 做細節的討論。有興趣的讀者, 可以查閱他在 1975 年的回顧論文[3]。然而, 還是讓我們試著描述我們現在知道的序參量的形式。

在我討論細節前, 讓我們回顧一下, 我們有一團液體, 而且因此, 在正常態(和在沒有其他有方向的場)下, 系統是完全的轉動不變。讓我們也回憶一下, 一個角動量 $L=1$ 的波函數的一些性質(比較原子軌域)。例如, k_z 代表擁有角動量 $L_z=0$ 的 z 分量的波函數。同樣的, k_y 代表擁有角動量 $L_y=0$ 的 y 分量的波函數。然而, 請注意, $k_y=1/(2i)[(-k_x+ik_y)+(k_x+ik_y)]$, 因此這也能夠被視為是 $L_z=1$ 和 $L_z=-1$ 的線性組合。相同的講述可應用到自旋上。因此, 特別地, 沒有 z 分量自旋的狀態 $|\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow\rangle$, 當從垂直 z 軸方向看的時候, 也能被視為是 $|\uparrow\uparrow\rangle$ 和 $|\downarrow\downarrow\rangle$ 的線性組合。

誠如上述, A 和 B 相都是 triplet 且 p-wave, 但他們的配對波函數不同。A 相能被配對波函數(除了是一個完全的複數振幅, 在此, 為了符號的簡易, 我們會將他閒置一旁)描述

$$\langle a_{k\alpha} a_{-k\beta} \rangle \propto \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} (k_x + ik_y) \quad (3)$$

也就是說, 它僅有 $|\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow\rangle$ ($S_z=0$) 的配對(如果有人從一個適當的軸觀察它的话, 在此是 z 軸)。然而, 這配對有角動量 $L_z=+1$ 。實際上, 此為使偶極能量(dipole energy)最小化的結構

B 相可以被描述為

$$\langle a_{k\alpha} a_{-k\beta} \rangle \propto \begin{pmatrix} -k_x + ik_y & k_z \\ k_z & k_x + ik_y \end{pmatrix} \quad (4)$$

亦即 $|\uparrow\uparrow\rangle$ 配對有角動量 $L_z=-1$, $|\downarrow\downarrow\rangle$ 有 $L_z=+1$, 此時, $|\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow\rangle$ 配對有 $L_z=0$ 。以另

一個方法來說(這也許不是完全明顯的), 對於沿著一個動量方向 \vec{k} 的粒子, 如果某個人也使自旋沿著此軸量子化, 那麼配對只有 $|\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow\rangle$ 配對了。

然而, 有其他的複雜情況: 實際上, 這不是使偶極能量最小化的結構。事實是, 使其最小化的結構, 是對應到一個以角度為 $\cos^{-1}(-1/4)$, 介於自旋和動量空間之間方程式(4)的相對轉動。

然而, 在超流相裡, 偶極能量仍是非常小。因此, 當系統存在其他的擾動時, 如上所述的自旋和空間軸相互轉動會變的完全可能(而且實際上時常導致如此)。例如對 A 相, 自旋 $S_z=0$ 和角動量 $L_z=+1$ 的軸不需要重疊。(從方程式(3), 自旋藉由沿著 x 軸旋轉 $\pi/2$ 得到的)態也可以在許多情況發生。相同的講述也可應用到 B 相上。

$$\langle a_{k\alpha} a_{-k\beta} \rangle \propto \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} (k_x + ik_y) \quad (5)$$

由於序參量擁有非常豐富的結構, 超流氦三有非常罕見的性質。例如:

- (1)相 A 顯示了各向異性的性質, 包含了磁化率(susceptibility)和超流體密度。
- (2)因為各向異性的性質, 序參量, 特別是對於 A 相而言, 能夠以外加擾動的方式定出方向, 像是磁場, 超流體流, 和表面。就某種意義來說, 它是磁鐵而且也是液體晶格, 加上是一個超流體。
- (3)對 A 相而言, 在動量空間中[在方程式(3)或(5)裡的 z], 有一個方向(節點)實際上是沒有配對的。準粒子激發因此存留至低溫, 而且擾動也可以產生更多這樣的激發, 因為在節點附近沒有或僅有很小的能隙(gap)。
- (4)A 與 B 相有不同的磁化率(magnetic susceptibility), 而且因此 AB 相變是場關聯

的。

- (5)因為內秉的自由維度,加上配對的有限自旋和動量,在氦三裡的漩渦(vortices)是非常不同於那些在 s-wave 超導體裡的;特別是有核心結構。在某些環境下,甚至沒有奇點(singularity)(參見由 Baruch Rosenstein 在這相同的刊物所寫的文章),而且它們不需要單獨的被量子化。漩渦的拓普是完全不同於那些 s-wave 超導體的。
- (6)序參量可以在他們的時間關聯微擾下形成的平衡附近振動,亦即在系統中,有集體模(collective modes)的序參量,這是可以被測量的,例如利用聲波。(實際上,之前描述的 NMR 自己本身可以被視為是一種集體模)。

氦三因此被認為是”非傳統”BCS 配對的範例。許多新超導體的研究被在氦三裡產生的相似問題所驅動著,而且我們從氦三裡學到的經常被利用到這些新的系統。我們現在已經知道許多超導體有,或是非常可能有,不是 s-wave 的配對。最眾所皆知的家族可能是”高轉變溫度”氧化物超導體(“high-Tc” oxide superconductors),其配對是 singlet,但有 $\hat{k}_x^2 - \hat{k}_y^2$ 形式的動量關聯。在最近熱烈的研究下另一個例子是 Sr_2RuO_4 --一個與氧化物有相同結構,但是更像是 triplet p-wave 配對的化合物--有非常相似於(但非完全正確)在方程式(5)裡 A 相的序參量。其他例子包含了許多”重費米子(heavy-fermion)”超導體:例如 UPt_3 , UBe_{13} 。所有這些超導體有一些非常不同於”傳統(conventional)”s-wave, singlet 超導體,例如 Al 或 Pb 的性質。

這篇論文基本上是出於我在台大和交大給的演講。我感謝清大物理系黃柏倫同學將英文原稿翻譯成中文。

參考資料:

- [1] “The Superfluid Phases of Helium 3”, D. Vollhardt and P. Wölfle, Taylor and Francis, 1990.
- [2] D. D. Osheroff, R. C. Richardson and D. M. Lee, Phys. Rev. Lett. **28**, 885 (1972).
- [3] A. J. Leggett, Rev. Mod. Phys. **47**, 31(1975).

作者簡介

葉崇傑, 美國伊利諾大學香檳分校物理博士, 現任職中央研究院物理研究所研究員。

E-mail: yip@phys.sinica.edu.tw