



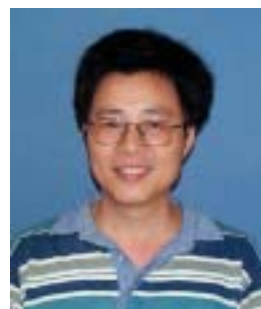
**姓名：陳啓東**

**學歷：**

Chalmers University of Technology (Sweden)  
(1994 年畢業)

**現職及經歷：**

中研院物理所副研究員 (2002 年)  
中研院物理所助研究員 (1997 年)  
日本 NEC 基礎研究做博士後研究 (1995 年)



**著作名稱：**

1. W. Kuo and C. D. Chen, "Scaling analysis of magnetic field tuned phase transitions in one-dimensional Josephson junction arrays", Phys. Rev. Lett. 87, 186804 (2001).
2. C. D. Chen et al., "Evidence for the suppression of superconductivity by spin imbalance in Co-Al-Co single electron transistors", Phys. Rev. Lett. 88, 47004 (2002).
3. W. Kuo and C. D. Chen, "Gate controlled spin polarized current in ferromagnetic single electron transistors", Phys. Rev. B 65, 104427 (2002).

**中文簡介：**

這次得獎的代表作有三篇，現分別做如下簡介：

第一篇的題目是 Scaling Analysis of Magnetic Field Tuned Phase Transitions in One-Dimensional Josephson Junction Arrays，發表在 Physical Review Letters, 87, 186804, (2001)。作者為郭華丞與陳啓東。此一著作是以實驗的方法探測並解析一維系統中超導絕緣相變的特性。

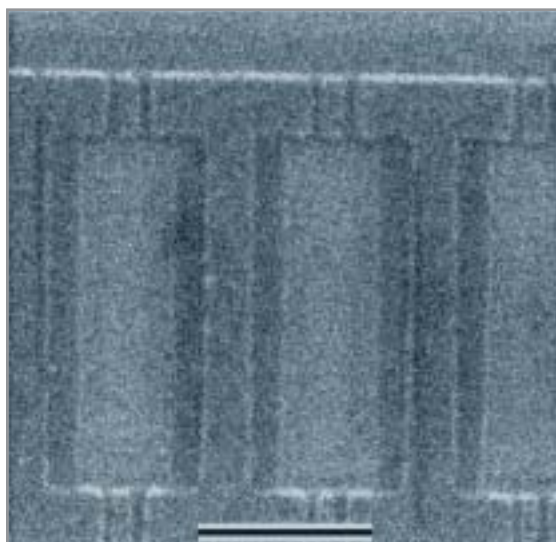
造成相變化的控制因素（如溫度、濃度、壓力等）有幾種，每一種都有理論上的詮釋模型。物理特性（如本質、外觀）完全不一樣的兩個系統，既使其相變控制因素也不一樣，如果它們的相變行為可用同一種理論

模型去描述，就稱它們的這種相變屬於同一種 universality。同屬於一種 universality 的相變，不論其控制因素為何，相變發生的機制是一樣的。物理上，相變機制是以同調長度 (coherence length) 隨控制因素的變化來描述。在相變臨界點，同調長度會發散。稍微離開臨界點，同調長度隨控制因素有可能是對數變化或是指式變化。由變化的形式與其冪數 (exponent) 的值可判斷此相變是屬於何種 universality。實驗上，二維體系的超導絕緣相變已經證實是屬於古典的 Kosterlitz-Thouless (KT) 形式，但一維體系的相變卻還是未知。此一研究的貢獻就是去找出在一維超導顆粒陣列中改變超導顆粒間耦合能量所造成的超導相到絕緣相的相變特性。

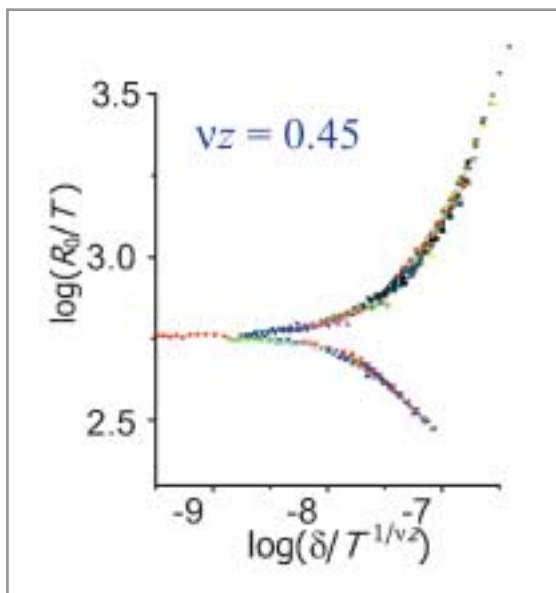
實驗上我們是用先進的電子束微影技術製作一維陣列的極微小超導量子干涉元件 (SQUID)，每個 SQUID 含有兩個並連的約瑟夫生接合 (Josephson Junction)，其接觸面積僅為 100 乘 300 平方奈米。電性量測的結果證實我們製作的一維陣列 (內含有數百個接合) 有極好的均勻度。量測時要把樣品降至 0.04~1K 的溫度，量其電流電壓特性曲線，以及電阻隨外加磁場、溫度的變化。這些電流電壓訊號都極微小，電阻的變化更可從  $10^3$  變到  $10^{10}$  歐姆，再加上樣品又是在及低溫的環境下做量測，所以我們要用自行設計及製作的電壓電流放大器做電性的量測。這實驗的結果證明我們在樣品製作與量測技術上已達到世界級的水準 (圖一、圖二)。

利用 SQUID 的結構，我們可以用外加磁場控制超導耦合能量的大小，這再配和儲存於微小接合內的電荷能，使我們可以控制超導絕緣的相變，其控制因素就是超導耦合

能量與電荷能的比值。一維系統內本無古典 KT 相變，但在量子理論上我們可導入一個虛擬的時間座標軸，而形成一個有效的二維體系。在此體系中，我們以量子超導絕緣 KT 相



圖一：樣品的電子顯微鏡相片。每個 I 字形“島”與左右的“島”各以 2 個長方形狀的約瑟夫生接合連接，形成 SQUID。整個一維陣列含有數十個至一百個 I 字形島。



圖二：經分析後，電阻隨溫度在不同磁場下的所有曲線可被併入為兩條對稱的曲線。向上彎曲的為絕緣相變，而向下彎曲的為超導相變，這兩種相變可以磁場控制。

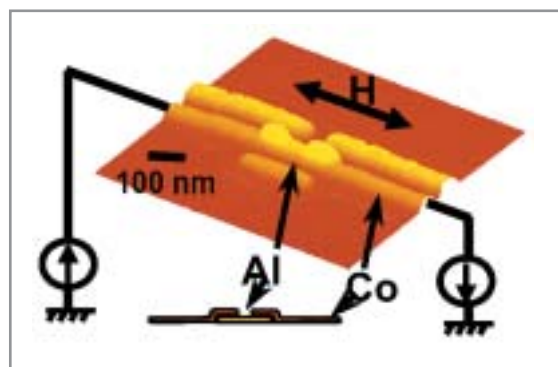
變分析所量得的數據，並成功的應用 scaling 理論把量得的所有數十條電阻隨磁場、溫度的變化曲線重疊成兩條曲線，它們分別代表超導及絕緣相變。由 scaling 的結果，我們證實了同調長度隨控制因素是呈現對數變化的，而且其冪數是明顯小於理論預測的 1，理應屬於一種新的 universality。這是目前第一次能以實驗量測分析到這些結果，對一維系統的量子相變提出很好的驗證，也增進了我們對相變的瞭解。

第二篇的題目是 Evidence for suppression of superconductivity by spin imbalance in Co-Al-Co single electron transistors，發表在 Physical Review Letters, 88, 047004 (2002)。作者為陳啓東、郭華丞、鐘道翔、徐嘉宏與吳憲昌。此一實驗的目的是觀察超導特性如何受到電子自旋堆積的影響。

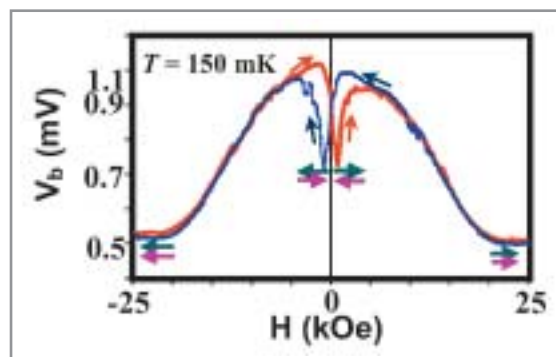
超導體內的傳導載子已知是由自旋方向相反的兩個成對的電子構成的，他們被稱為是 Cooper pair。但在磁性物質的一個磁區內，多數的電子有同一個自旋的方向。如果把這些電子注入超導體中並破壞超導體內電子自旋的平衡，自然會影響到超導體的性質。為了破壞其自旋的平衡，需要讓電子自旋能於超導體中積存，也就是要做到電荷與自旋的分離。

其實電子本來就不只帶有電荷，它也帶有自旋的訊息。但目前商用的主動電子元件都僅用到電荷，而未用到自旋的特性。在這實驗中，我們以單電子電晶體的架構，並以磁性材料鈷作源極(source)及汲極(drain)，而中央島(island)是以超導材料鋁製作。假設源極上磁區的磁化方向是相上排列，而汲極相

反的是向下排列，則會有較多的自旋向上電子進入中央島，但它們卻不容易離開中央島進入汲極。自旋向下電子進入中央島的量雖較少，但卻比較容易進入汲極。所以（圖三、圖四）中央島內自旋向下的電子將會取代自旋向上的電子進入汲極，達成電荷守恒，自旋不守恒，電荷與自旋分開的目的。這結果是造成中央島內自旋向上的電子比自旋向下的電子多，也因此自旋向上的化學位能會比自旋向下的化學位能高。這結果會相反的減少自旋向上的電子進入中央島的量，且增加自旋向下的電子進入中央島的量。所



圖三：樣品的原子力顯微鏡相片，顏色淺的代表高度高的區域。兩個較高的點是上層鈷下層鋁的結構，中央的鋁條是單電子電晶體的中央島。鋁在約1K時會成為超導體。



圖四：在定電流下，元件電壓隨外加磁場改變的情形。曲線下方的箭號指出兩邊鈷電極的磁化方向。在小磁場下兩電極磁化方向成反平行排列，電子自旋的堆積造成了超導能隙被衰減的現象。

以事實上中央島內自旋向上的電子數並不會無限上升，自旋向下的電子也不會消失，而是會自行達成一個平衡。在平衡狀態時，兩者的個數差造成相對的化學電位能差。此一化學電位能差將會造成超導的破壞，例如這差值等於原本超導體的能隙時，超導特性將完全消失。而且由於這化學電位能差值是隨電晶體偏壓提高而增加，超導特性的破壞是隨偏壓改變的。

實驗上這超導的特性就是指超導的能隙。我們先測得在低溫下，源極汲極磁區的磁化方向是相反排列時，單電子電晶體的電流電壓特性曲線。測得結果再比較理論上中央島為超導體（具有某個能隙值）時單電子電晶體應有的電流電壓特性曲線，可得到在每一個偏壓時的超導能隙值。結果證明超導能隙確實是比原本超導體的能隙小，而且隨偏壓提高，此能隙被減小得越厲害。

為了配合實際實驗所用到的單電子電晶體元件特性，我們也做了一套模擬計算，提供一個與實驗的比較。然而實驗所得到的超導能隙隨偏壓改變的曲線與理論所估算的並不完全吻合。這其中牽涉到幾個因數：在鋁金屬內電子自旋的鬆弛（也就是自旋翻轉）時間並不是無限長，而且在高偏壓時高能量電子的能量回弛（也就是回到基態）時間並不是等於零。如果實驗與理論要有更切確的比較，這些複雜的因數都需要列入考慮。反之，這套實驗也應能提供這類時間的資料。這些資料對以後自旋電子元件的開發與應用將會是很重要的參考依據。除外，這個實驗本身也提供一種能在臨界溫度下，以極小的磁場控制超導性質的方法。

第三篇的題目是 Gate-controlled spin

polarized current in ferromagnetic single electron transistors，發表在 Physical Review B, 65, 104427 (2002)，作者為郭華丞與陳啓東。這是一篇理論計算的論文，其目的是配合我們在磁性單電子電晶體的實驗（見第二篇論文）所做的理論計算。當然在實驗方面，我們所用的系統是超導的，在這裡我們是著重在當中央島是正常態金屬的情況。

在這篇論文中我們提出一個論點，那就是使用電子自旋堆積的原理，以磁性-常金屬-磁性單電子電晶體作為一個可調變磁偏量 (polarization) 的電子源。當中央島內電子自旋堆積時，會造成電位能的偏移。此總偏移與用閘極電壓控制中央島電位能的偏移有異曲同工之效應。所以我們預測利用閘極電壓可控制從汲極出去的電流的磁偏量。此外，在這篇論文，我們也討論了這電流的磁偏量是如何受到自旋翻轉及電子的cotunneling的影響。

## 評審簡評：

申請者於任職中研院物理所四、五年以來，終於完成建置能利用先進的電子束微影技術製作極微小超導量子干涉元件 (SQUID) 及單電子電晶體元件 (SET) 的實驗平台。所以這兩年相當獨立地分別探討一維系統中超導-絕緣相變的特性及電子自旋對超導能隙的影響。這兩篇高水準的論文均發表在物理領域最尖端的雜誌--物理評論通訊 (Physical Review Letters)，技術層面難度高、物理上亦極富意義，屬上乘工作。新進人員膽敢一開始選擇如此挑戰性的研究題目，加上幾年的堅持，值得大力鼓勵，並足及年輕學者的典範。