通俗科學演講摘要

近代光電子能譜—發現光子一百週年

沈志勳教授是國際知名凝態物理學家，主持許多尖端研究計畫，曾多次獲得研究傑出的榮譽獎項，目前是美國Stanford大學物理系、應用物理系及SSRL教授。其專門研究領域為複雜材料的多體現象，特別是利用角解析光電能譜實驗研究高溫超導相關現象。沈志勳教授於2005年3月3日訪問本中心，研究組特別邀請沈教授給一場通俗科學演講。本中心多位同仁與沈教授熟識，誠如沈教授描述與同步輻射結緣時，特別感謝梁副主任：「二十年以前，在美國新澤西讀書的時候，就在人生決擇要投入什麼樣的專業、要走什麼樣的路時，很幸運的能夠遇到梁耕三先生，彼此做了些交談，這也成為日後在Stanford 讀書時，學習同步輻射的一個起點。」。以下節錄自當天演說內容。

美國Stanford大學 沈志勳 教授

1983年獲得諾貝爾物理獎的Kai Siegbahn，用光電能譜發現了chemical shift，成為高能物理與原子物理的傳統和材料與固體物理傳統的結合。

2005 年是Einstein發現光電效應的一百週年，我們也都知道光電效應是物理學中三個重要實驗之一，奠定了量子力學的基礎，其餘兩個是氫原子光譜及黑體輻射。光電現象於1887年由Hertz所提出，當時並沒有電子的概念，但在Hertz的研究中非常清楚的記錄此現象的存在，由兩個電子的放電（discharge）研究得到。再來就是1905年Einstein發現的著名公式：$E_{kin}=h\nu - E_b - \Phi$，對未來的衝擊是非常大的，一個就是量子力學發展的重要地位；且個人認為在二、三十年後，太陽能電池（solar cell）將成為一個重要的能量來源，也與光電效應有關。另一個就是今天的主題光電能譜（Photoelectron spectroscopy）。Einstein在1905年提出此概念時，並不被當時許多著名的物理學家所接受，Einstein的好友Max Planck （Planck因提出光子為$h\nu$ 的觀念而知名，h稱為Planck常數）亦曾表示他對Einstein光電能譜解說質疑[1]。另一位朋友Max von Laue也在誤傳Einstein放棄研究光電效應時，於1907年寫信給Einstein提及"I would like to tell you how pleased I am that you have given up your light-quantum theory."，這是光電效應的一些歷史。在Einstein文章發表後50年發生了兩件重要的事件，一件就是在貝爾實驗室發明了太陽能電池，另一件就是

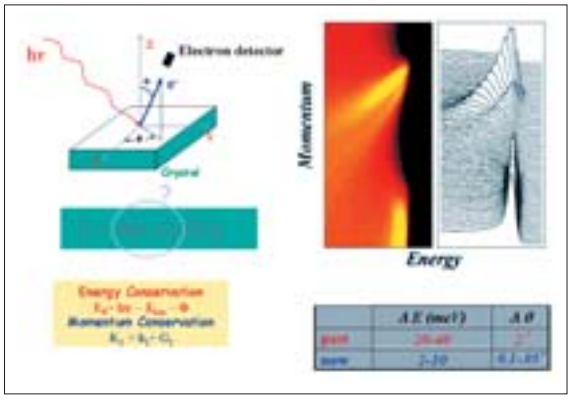
光電子發射能譜

基本來說，光電子發射能譜研究可以分成四個層面，一個就是科學儀器，第二個就是好的樣品，再來就是資料處理，最後則是科學題目，只有這四個組合在一起，才可以得到優秀的結果。

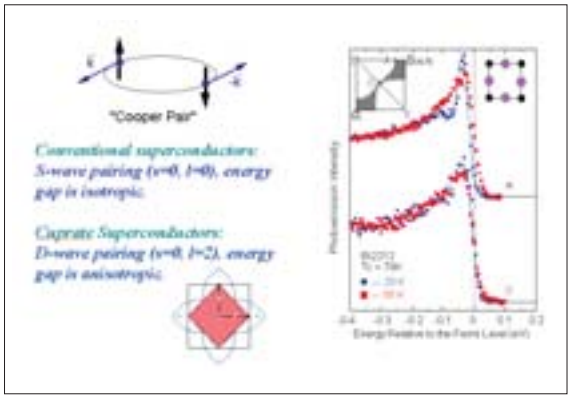
而對於儀器來說，同步輻射是一個很好也是非常重要的光源，其能量的可調性是無法抹滅的，近年來UV雷射的發展也有很大的突破，其能量分辨率為絕佳的優點，唯其能量非連續。現今普遍常用的半球型電子能量分析儀（hemispherical energy analyzer），經過長時間的發展，已有許多的優點，另一個問題就是time of flight，在二十年前能量分辨ΔE為20 - 40 meV，2°的解析度，今日則是0.4 meV，0.1 - 0.05°的解析度。以下幾個例子可見近幾年的物理實驗不斷地證實光電能譜的重要性。

角解析光電發射能譜學（Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy）之能夠成為現今物理重要的方法（如圖一所示），乃其探討微觀的層面，且量測的為一個非常基本的物理量，也就是單電子的格林函數（Green's Function），了解一個物質的格林函

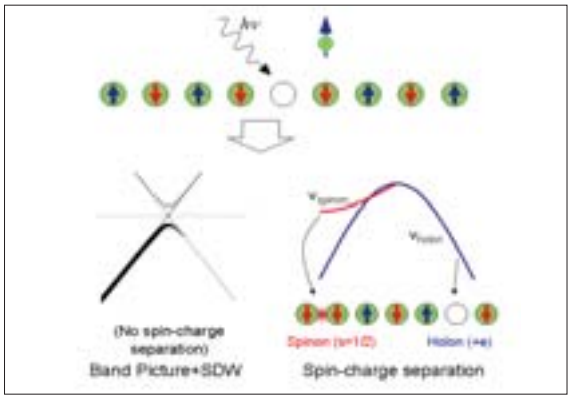
數，即可得知此物質的許多訊息。在固態物理或材料物理中，可以從熱力學得到許多資料，但要真正看的很深很透（deep inside），往往要從能譜（spectroscopy）才能獲得，因為能譜是很微觀的一個層面。



圖一 Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy（角解析光電子能譜學）



圖二 Superconducting Gap: the Binding Energy of a Cooper Pair（超導能隙：Cooper 電子對的束縛能）



圖三 Spin-charge Separation（自旋電荷分離）

在1993年本人曾發表了一篇文章（Shen, *et al.*, PRL **70**, 1553 (1993)），發現了高溫超導的配對為*d*-wave配對，圖二中在B點量測的話，不同溫度所量測的圖譜是相同的，但如果在A點量測，因有很大的gap，所以在超導臨界溫度T_c以上及以下所量測到圖譜則有顯著的不同。當時量測每個光譜需三個小時，但今日每個圖譜只需三秒左右的時間，最近研究Sr_2RhO_4的band mapping，於高能往低能量測時，可以很清楚的從3D變化中發現能帶有明顯的變化，也可以清楚的了解到固態物理中的life time變化，費米面（Fermi surface）與質量的變化關係。

一維系統的電子自旋與電荷分離現象

Landau說過，在一個擁有10^{22}個電子的複雜固體中，不論有多麼複雜，其基本的粒子的自旋是1/2，電荷是*e*，一個成功的科學家，是能在複雜的系統中，看到其最基本的原理，這是非常重要的。Landau的Fermi liquid理論在1D時是錯的，在1D時，一個電子的自旋與電荷自由度是可被分開的，這可由間接的方式來證明，如圖三所示，假設有一個1D的反鐵磁序列，一個光子進來後把一個電子游離，形成一個電洞，當此電洞躍遷時將會形成two topological defects，即是所謂的spinon與holon。因此當一個電子單獨存在時，帶有一個自旋及一個電荷，這是永遠不能分開的。但在一維空間裡許多電子在一起時，這行為則完全不同；spinon並不帶電，holon並沒有自旋。原本單電子能譜只會有一個能帶存在，如果產生自旋-電荷分離現象的話，則成為two band-edge singularity，間接的從1D及2D,3D的不同來證明此論點。我們觀查1D的$SrCuO_2$與2D的$Sr_2CuCl_2O_2$兩材料能帶的不同，發現了1D的材料能帶比2D的材料能帶要寬，這違反了量子力學的最基本概念，所以我們以電子自旋與電荷分離（spin-charge separation）來解釋此現象（Kim, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77**, 4054 (1996)）。

複雜材料的極端物理性質

高溫超導材料是由J. Bednorz 及K. Muller於1986年發現，這種複雜的材料，在凝態物理上是一個很大的挑戰，這時同步輻射就變的非常的重要。高溫超導這類複雜材料，有許多極端的性質：例如：Mott-Hubbard insulator：用一般理論解釋為金屬，但卻是非常好之絕緣體；Heavy Fermions：其有效質量為一般電子質量的一百倍，高溫超導材料因為有localized的*d*和*f* band，加上一個d localized orbital，這兩個之間交互作用後產生的許多性質。我們也量測$Bi_2Sr_2CuO_2O_8$的費米面，費米面是可以得知其物理性質；現今可以更詳細的量測其*d*-wave energy gap；再來就是Antiferromagnetic scattering（Q factor）可直接證明磁性性質對電學性質的的直接影響程度；最後就是隨著參雜量的不同，其理論計算與實際數據的比較。

（下接第14頁）