

# 一個簡單的原子物理實驗——光吸收實驗

易台生

中央大學物理系

e-mail: tsyih@phy.ncu.edu.tw

簡介：

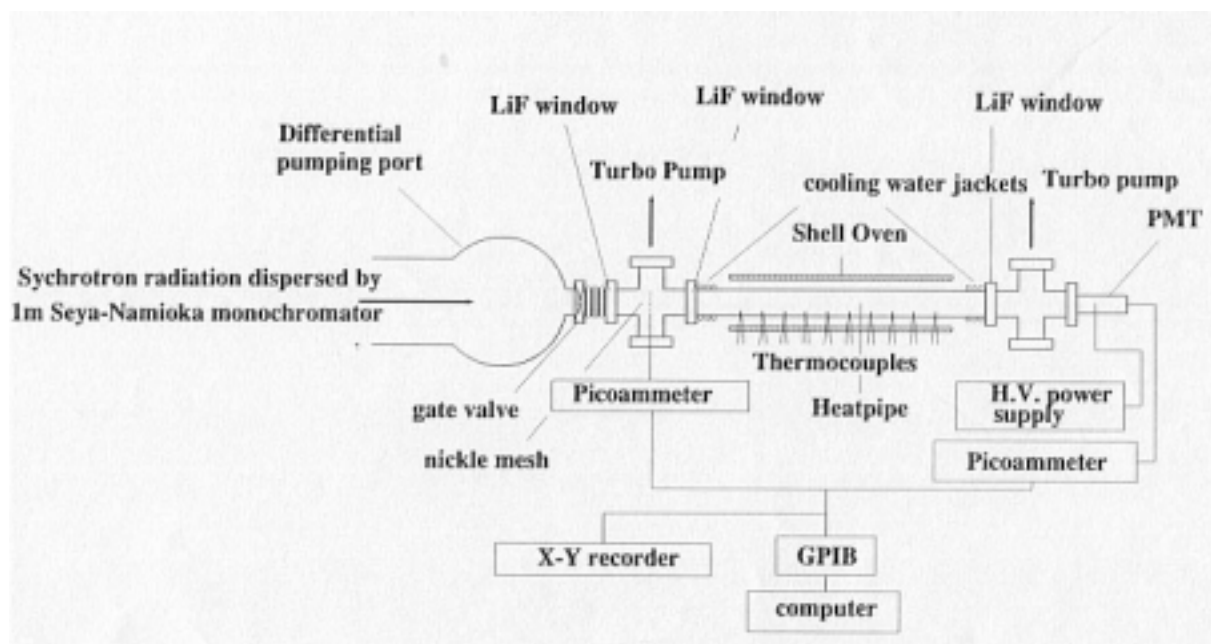
原子物理的發展歷史已經超過百年。原子物理的發展稱得上是物理知識中比較精密而且成熟的一門。由於原子外圍的電子受到光的電磁場作用容易起反應，誘發各式各樣的物理與化學過程，所以近期的原子物理、分子物理的發展已經和光學密切結合，三者歸為一類學問了。它們的研究工作基本上標榜在闡釋物理的基本定律、瞭解物質在原子和分子尺度的結構以及對外在因素的反應情形、並瞭解光的各個面向與物質的交互作用、以及研發嶄新科技與精密工具。

原分子物理與光學涵蓋的知識既廣且深，非筆者所能窺全豹。因此只能在此為各位讀者介紹我們所作的與原子物理相關的一個實驗；我會儘量由淺入深逐步解說，希冀各位讀後能對原子物理略有認識，能有一些印象留下，最好能引發學習的興趣，將來投入這門研究領域作個生力軍。

原子的光吸收實驗本身是一個概念簡單的實驗。大致來說是利用一道光束通過待測物，穿透的光強度比上入射的光強度正比於原子的吸收截面大

小。而所謂的原子吸收截面就是針對特定能量的光子而言，它所看到的原子擋在面前的大小用面積來敘述稱之。換言之，截面大的原子就表示這個光子與該原子有較強的相互作用，它的能量較容易被該原子吸收，用來改變原子的能階、將電子游離、或是和週圍的其他粒子交換能量種種物理或化學過程。吸收是所有這些過程的上游步驟或說是全部效果的總成。

光吸收實驗本身已經有商業化的成套儀器多年。在定性分析與定量分析上都是很好的工具。可是進入原子物理的領域裡就走了樣。惰性氣體的實驗沒有甚麼爭議，精密的程度每天在和理論工作競賽，人力和儀器的需求量不是國內的規模可以參與，故此略過不表；提到金屬蒸氣的實驗結果就麻煩大了。細觀文獻記載，居然每個人作的結果都不一樣。不同的方法結果當然不同；同樣的方法結果也是不同。說來令人汗顏，近百年的歷史發展還不能解決這一個簡單實驗帶來的矛盾結果。我自己的十來年經驗告訴我，這個實驗簡單，但要得到正確數據還真是很困難。詳情在後文中再說。

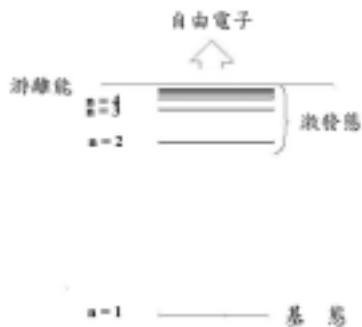


圖一．典型的光吸收實驗裝置示意圖

話說原子的能階結構是影響原子對光的吸收能力的最重要參數之一。原子的波爾模型告訴我們每當光子的能量等於原子的能階差時，光子會被吸收，讓原子轉換能階。這是個共振現象，共振時原子的吸收截面大增。但由於高能階的原子待不久，所以這個共振的規模是不可能無限大的。讓我們想像一張光譜圖，讓我們自由地改變光子的能量。每當光子能量碰到一個共振，吸收截面就會急劇升高。由於一般的光吸收實驗溫度不至於上千度，原子大致都在基態。所以看到的吸收光譜就是由基態一步步往高能階激發的過程。這些能階我們稱為主系列能階(principle series)。它們的能量遵守理德堡公式(Rydberg formula)。光子能量超過原子的游離能就進入連續能階，原子可以吸收任一光子來作電子的游離動作；按理說原子的吸收截面不會再跌到零。作了這個實驗才領會到柳暗花明的新境

界。其實多半不是連續游離那麼簡單的一回事<sup>[1]</sup>。

除了氫原子外，原子的電子都不止一個。當光子的能量足夠游離一個電子時，它所帶的電場其實看到了所有的電子和原子核的存在。只是對不同的原子核言，它外圍的電子遮蔽效果各不相同。於是針對同一能量的光電場，各原子演出各自的戲碼。有單電子激發、有雙電子激發、甚至於三個以上的電子同時激發<sup>[2]</sup>。電子與電子之間的相關效應、電子與原子核間的作用、以及相對論性效應出現在速度較高的電子身上，在在影響了這個原子對高能量光子的吸收截面。由實驗結果可以略窺梗概。當然，真正深入地解析與瞭解，必須倚賴理論推演的分析，差幸最近理論的進展快速，我們可以看到後面幾個尖端的理論結果令人滿意。



圖二. 氫原子的能階示意圖

由實驗獲得的教訓：

光吸收實驗用到的公式是 Beer Lambert law ,

$$I = I_0 \exp[ - n_a a - n_m m - n_i i ]L$$

式中 I 為穿透光的強度， $I_0$  為入射光的強度， $n_a$  為原子個數的單位密度， $a$  為原子的吸收截面大小， $n_m$  為分子的個數密度， $m$  為分子的吸收截面大小， $n_i$  為雜質的個數密度， $i$  為雜質粒子的吸收截面大小，而 L 為吸收體所在的有效長度。

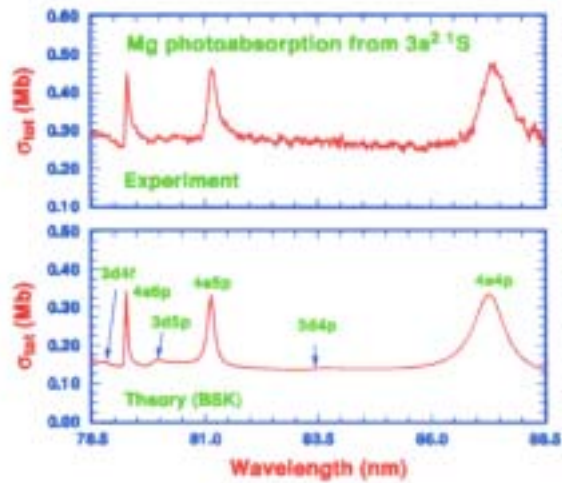
目前實驗儀器精良，數據的跳動所造成的誤差約略可以控制在數個百分比之內。加計儀器的不準度、操作的誤差、光源強度的跳動等等各種可能的牽連在內，數據的精確度，可以達到 12% 的標準偏差大小。

由 Beer's law 可以看出，實驗數據是會受到分子和雜質的影響的。實驗的困難度其實就在雜質的控制與排除以及適當光源的取得。國內現成有同步輻射研究中心提供最佳光源，所以我們的實驗困難就只是有的雜氣或物質不斷地干擾實驗系統難以去除。不同物質的物性與化性不同，得利用不同的物理或化學方法，才能生效。舉例來說，買來的金屬樣品很純，但是在加熱到融點以上時，經常發現

它們釋放出很多氣體。有氫氣、氮氣或不知名堂的雜氣。這些氣體會劇烈地吸收真空紫外光。(真空紫外光指的是波長在 2 埃到 2000 埃之間的光而言，空氣強烈地吸收它們，所以只能在真空中傳播，因此得名。它們的能量接近或是大於原子的游離能，常用來激發原子，以觀察原子的後續反應，是原子物理界的好工具之一。同步輻射光源就是最佳的真空紫外光源之一。) 如果不處理掉雜氣，會誤以為原子的吸收比較強。難在降溫時金屬又把這些髒氣融回去了。最好的辦法當然是用上雜氣吸塵器，這就得利用物理與化學方法偏好這些雜氣的運動過程讓它們和旁邊的吸收體作用，而獨留實驗用的金屬氣體不往外跑。我們在實驗區旁併聯了一管爐子，內裝銀金屬。乾淨的銀很能吸附一般不想要的雜氣。熱管(heat pipe)內又充有惰性氣體，能有效防止金屬原子擴散到爐管的冷區。利用熱管的物理特性配上銀的優良化性，可以解決大部分的雜氣困擾。值得一提的是用熱管封裝金屬氣體作實驗，只要不用高功率雷射光照射，經年累月也不會讓金屬鍍上兩邊冷區的光窗上。

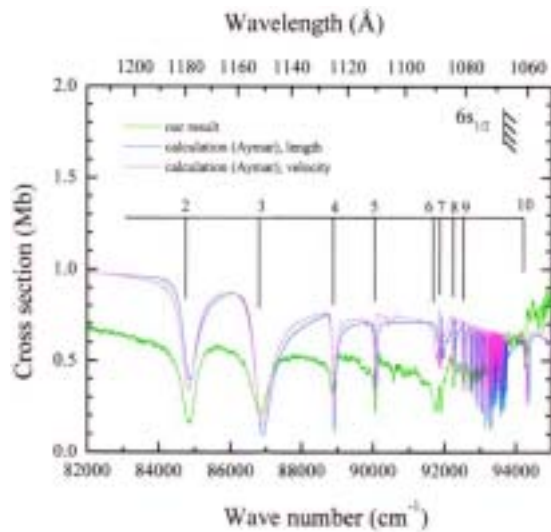
另一個值得提的因素就是公式中的  $n_a L$  是和  $a$  並列的因子。作實驗的同仁都知道儀器的解析度會影響測量的譜線寬度。若譜線的寬度比解析度還小，測出的譜線強度一定比理想值低。同步輻射研究中心的馮學深博士<sup>[3]</sup>最近的分析發現不只如此，在較窄的譜線實驗中， $n_a L$  的數值高低也會影響到測出的譜線強度。依據南加大張圖南教授的推算<sup>[4]</sup>，譜線寬度是譜線能量的  $10^{-6}$  時， $n_a L$  數值變化  $0.001 \times 10^{18} \text{cm}^{-2} \sim 0.05 \times 10^{18} \text{cm}^{-2}$ ，譜線強度會變化約達 7 倍之劇。我們如果選擇一條很窄的原子譜線來測污染物的濃度，必須慎選  $n_a L$  條件，否則推算出的





圖五. 鎂的吸收光譜，圖中可見理論值幾乎與實驗結果完全一致。兩個價電子加上離子核的相互作用幾乎被理論計算妥善地掌握住。

第二個令人折服的理論計算<sup>[7]</sup>得到圖六的結果。圖中可以看出理論與實驗的結果大致得到相似的外觀。這是 Sr 的光窗共振系列。這型共振能階在鹼土金屬中都已由實驗證實存在。但是它的複雜性卻令人驚訝。圖四中最左邊的兩個譜線居然會是同一個共振態造成的。這些光窗式共振的吸收截面都接近零，表示原子對這些能量的光子是視而不見，讓它們自由通過。別忘了這些光子的能量原來是都足以將原子游離的。



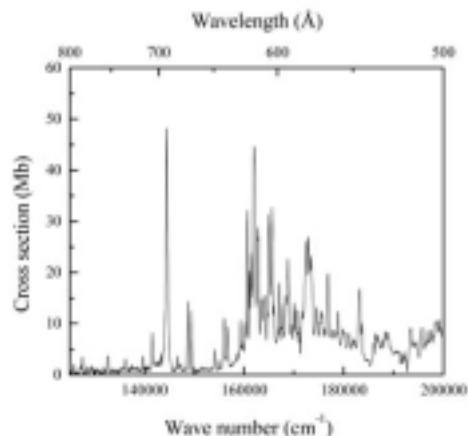
圖六. 光窗式原子共振吸收光譜。

第三個令人折服的計算是原分所黃克寧教授和王伶如博士作的鋅原子游離光譜的推演<sup>[8]</sup>。鋅是原子序為 30 的重原子。31 個粒子在那兒運動，相互作用，相對論的重要性不言而喻。他們的預測結果外形居然和實驗結果大致相符，雖然數值上有很大的差距，可是能處理那麼重的原子和如此多的粒子，得到這樣的結果，是原子物理理論重要的發展成就之一。詳如圖七。

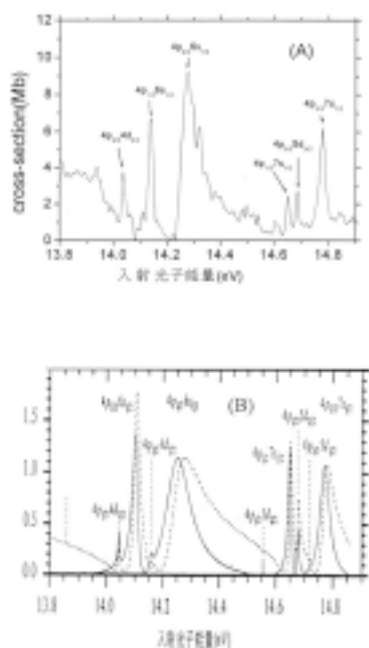
結語：

光吸收實驗的結果告訴我們原子碰到高能量的光電場時，波函數的反應多不是單電子的行為。兩個或三個電子交互作用的結果多不按簡單模式，光窗式共振就是一例。在下圖中的高能量光子部分的吸收光譜，細查之下會發現實驗結果混雜無序，譜線的規則性蕩然無存，電子相關作用的效果連最佳的理論都無法清楚瞭解。各位讀者，除了氫與氦之外的原子，數十電子伏特的光子擠壓原子時的反

應，很多地方出人意料。設想我們自己是一個數十電子伏特的光子，碰到一個金屬原子時，有可能將它的外層價電子游離，也可能將內層電子激發，除了內外層電子間交互拉扯之外，原子核還在旁邊等著分一杯羹。搶食能量的結果就如圖八一般<sup>[9]</sup>。細節如何至今還是個謎，原子內部的祕密實在還有待大家的努力去逐步揭啟。



圖八. 錫的高能量光子的吸收光譜，除了左手邊的數條譜線已經可以辨認之外，其餘譜線糾結的情形還有待大家的繼續努力來釐清。



(A)為本實驗所測量之吸收截面圖；  
(B)為王伶如<sup>[8]</sup>使用 MCRKPA 的理論計算虛線為不包括 CS 效應，實線為包括 CS 效應。

圖七. 鋅的吸收光譜，上部為實驗結果，下部為理論計算的結果。大致的譜形已被理論所掌握住。

參考資料：

1. U. Fano, Phys. Rev. **124**, 1866 (1961).
2. L. M. Kiernan, E. T. Kennedy, J-P. Mosnier, J. T. Costello, B. F. Sonntag, Phys. Rev. Lett., **72**, 2359 (1994).
3. 馮學深，國立中央大學博士論文，1998.
4. T. N. Chang, Y.X. Luo, H. S. Fung, T. S. Yih, J. Chinese Chemical Society, **48**, 347 (2001)
5. C. H. Greene and L. Kim, Phys. Rev. **36**, 2706 (1987)
6. H. S. Fung, H. H. Wu, T. S. Yih, T. K. Fang, T. N. Chang, Phys. Rev. in press (2001).
7. M. Aymar, J-M Lecomte, C. C. Chu, H. S. Fung, H. H. Wu, T. S. Yih, J. Phys. B**31**, 5135 (1998).
8. 王伶如，國立台灣大學博士論文，1999.
9. 朱慶琪，國立中央大學博士論文，1998.