

同步輻射光源之應用

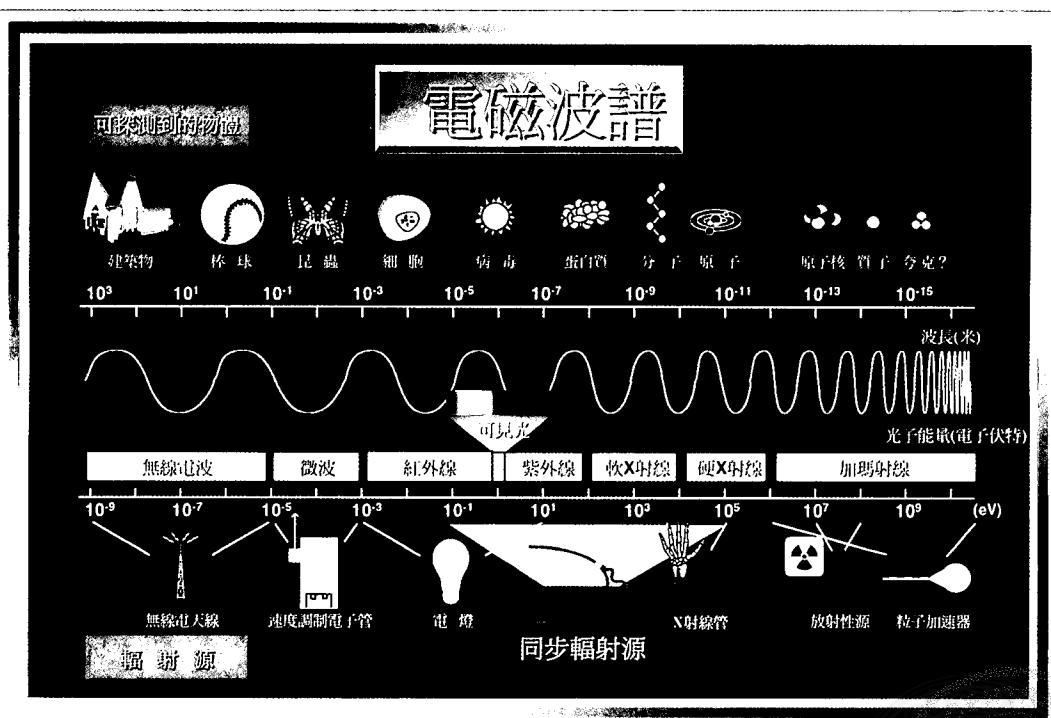
陳建德

壹、光源的簡史

「光」向來是人類觀察及研究大自然不可或缺的憑藉。廣義的來說，所有的電磁波都可以叫做光。電磁波這個家族按照波長長短順序來說，無線電波波長最長，可以長到數百公尺，適合用來觀察宇宙恆星巨大的世界，其次是微波，雷達觀測飛機、船艦和颱風用的就是這個波段（1～100厘米）。再其次是紅外線，是夜視系統和飛彈追蹤熱源所用的波長（0.001～0.1厘米）。接下來便是我們肉眼唯一能看到的波

長範圍，叫做可見光（400～700毫微米）。然後是觀察氣體分子及凝態物理電子結構的紫外光（10～400毫微米）。到了X光（0.001～10毫微米），波長已經短到祇有原子間距離的大小，是研究晶體結構的極佳工具，最後，波長最短的伽瑪射線（小於0.001毫微米）則可用來探索原子核以內的世界。

產生這些光的設施就叫做光源。直到一八七九年一距今不到一百二十年，愛迪生發明電燈之前，人類所依賴的光源就祇有陽光和火燭。十九世紀末，一些氣體放



圖一

電管陸續問世，這些放電管所發出的光成為日後發展原子理論重要的依據，現代城市裡用的霓虹燈和高速公路上所用的鈉光燈都是類似的光源。一八九五年，德國科學家倫琴發現X光，人類開始製作X光機，透視萬物的內在世界。除了具體的影像外，X光還能因為物質結晶而產生繞射的斑點，由這些斑點可以推算出物質的原子結構，像後來遺傳基因的形狀和高溫超導體的結構都是用這種方法定出來的。本世紀初，愛因斯坦為雷射理論奠定了基礎，這種純淨的光除了可以將唱片上的刻痕轉換成優美的音樂和清晰的影片外，還能用來研究氣體分子或產生立體影像。以上所舉例的光源，所產生的波長各不相同，但也各自具有特色。每當更新或更強的光源出現，常常開拓嶄新的科學研究領域，從而導致重大的新發現。

一九四七年，在美國通用電氣公司的同步加速器上，意外地發現能輻射出如薄片般的光，這種光含有非常豐富的紅外線、可見光、紫外線以及X光，因為這種輻射是在同步加速器上第一次看到，於是就命名為「同步輻射」。

同步輻射之特性

1. 強度極高、穩定性佳
2. 波長連續、可調、範圍寬廣
3. 具高度偏振性
4. 具時間脈波結構
5. 準直性特佳
6. 光束截面積極小
7. 超高真空環境

圖二

早期，同步加速器是高能物理學家專門用來尋找基本粒子，探索宇宙本質的重

要工具，我國的丁肇中博士就是利用這種加速器發現了J粒子，而獲得諾貝爾獎。後來，一些物理和化學家們利用高能物理研究的空檔，使用同步加速器所發出的輻射做研究，這一種寄生式的同步輻射，後人稱它為第一代同步輻射光源，美國康奈爾大學的加速器就是一個例子。

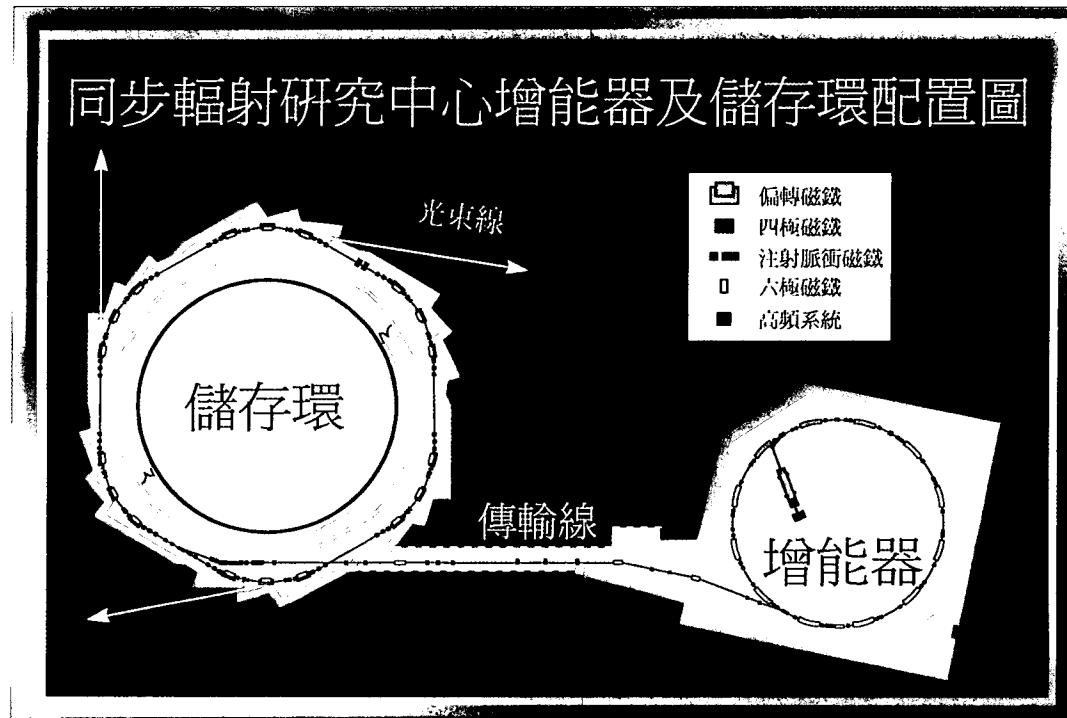
一九七〇年代，科學家們逐漸體認到，同步輻射是人類有史以來最優異的研究光源，於是紛紛開始興建同步輻射專用的加速器，就成了所謂的第二代同步輻射加速器，位於日本筑波的光子工廠加速器即屬於這一類。

一九八〇年代，科學家們提出一個構想，在加速器中加入一些所謂的插件磁鐵，並且把整個加速器的規格要求提高十倍，便能將同步輻射光的亮度提高一千倍以上。於是，先進國家開始設計建造這種最新型的第三代同步輻射光源。第一座第三代機器於一九九二年（民國八十一年）完工啓用，它是位於法國，由歐洲各國合資興建的「歐洲同步輻射設施」（ESRF），第二座則是一九九三年和我國同一個月啓用，由美國政府出資在加州柏克萊建造的「先進光源」（ALS）。

貳、同步輻射光的原理與特性

根據電磁學的理論：帶電的粒子受到加速時會輻射出電磁波。當電子以接近光速飛行時，若受到磁場的作用而發生偏轉，便會因相對論效應，在其切線方向放出極強的輻射光，這就是同步輻射光。

產生同步輻射的設備主要可分為：注射器、儲存環與光束線三大部分。注射器的功用是將帶電粒子迅速加速到接近光速（大於0.9999999倍之光速），再注入儲存環中；儲存環的功用則是將電子收集累積起



圖三

來，使電子能在固定環型軌道上持續地放出穩定的同步輻射。環內各種磁鐵就像光學系統的各式透鏡，使電子束不斷地偏轉並聚集在纖細如絲的軌道上。電子束必須在超高真空的軌道腔中飛行；以避免與空氣分子碰撞而損耗，如此便能增加儲存環內電子束的運轉時間。此外，環內還有高頻腔系統，用來補充電子因輻射所耗損的能量。

理論上，在每一處電子偏轉的地方都可以打開一個窗口，利用一條導管及內部的光學元件將同步輻射導引出來，我們稱這個系統為光束線；實驗工作者利用光束線選取他所要的光波段，然後導入實驗站以進行實驗。

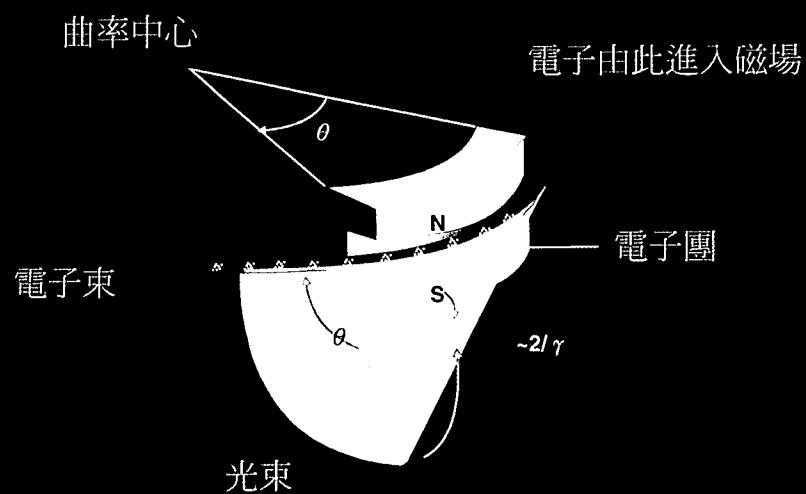
利用這種方式所產生的光，有許多前所未有的優點。舉例來說：同步輻射光是一種連續光譜，藉由光束線分光儀的調變，可以由紅外光、可見光、紫外光、一

直掃瞄到X光。所有的科學觀測都可在同一地點完成，任何的訊息都不會遺漏，就好像醫院的患者僅需在同一病床上，同時接受超音波、X光、電腦斷層掃瞄、心電圖等檢驗，其功能之強大，可以想見。

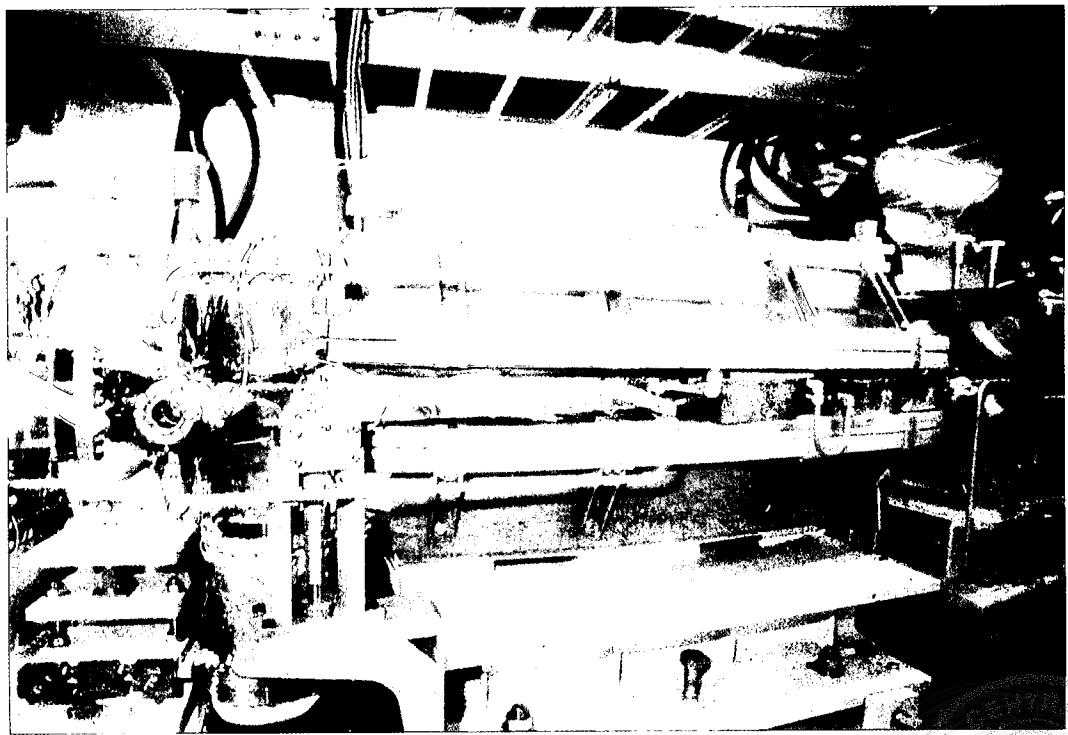
另外，如同在光線充足的地方眼睛才能清楚地辨別影像，同步輻射是一種相當亮的「光」，它所產生的光，比傳統X光管或放電管所能產生的還要亮一萬倍以上，如此一來，再細微的結構都可看得一清二楚。

同時，在傳統的實驗室裡，就像古老的攝影術，由於使用亮度較低的光源；需要較長的曝光時間。在同步輻射實驗室中便沒有這些困擾。以往幾個月才能完成的實驗，現在平均只要幾個鐘頭便能得到結果。在紊亂的光源下，我們不容易看清影子的輪廓，同步輻射的光源是來自纖細如絲般的電子束，能夠產生最鮮明的影像。

偏轉磁鐵放出同步輻射光的原理



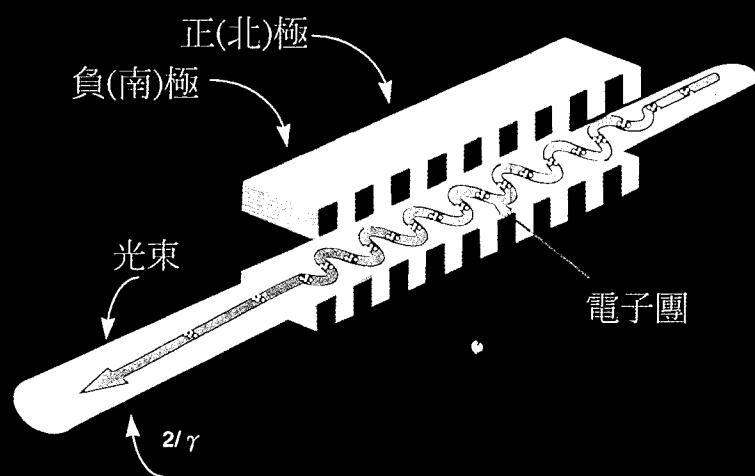
圖四



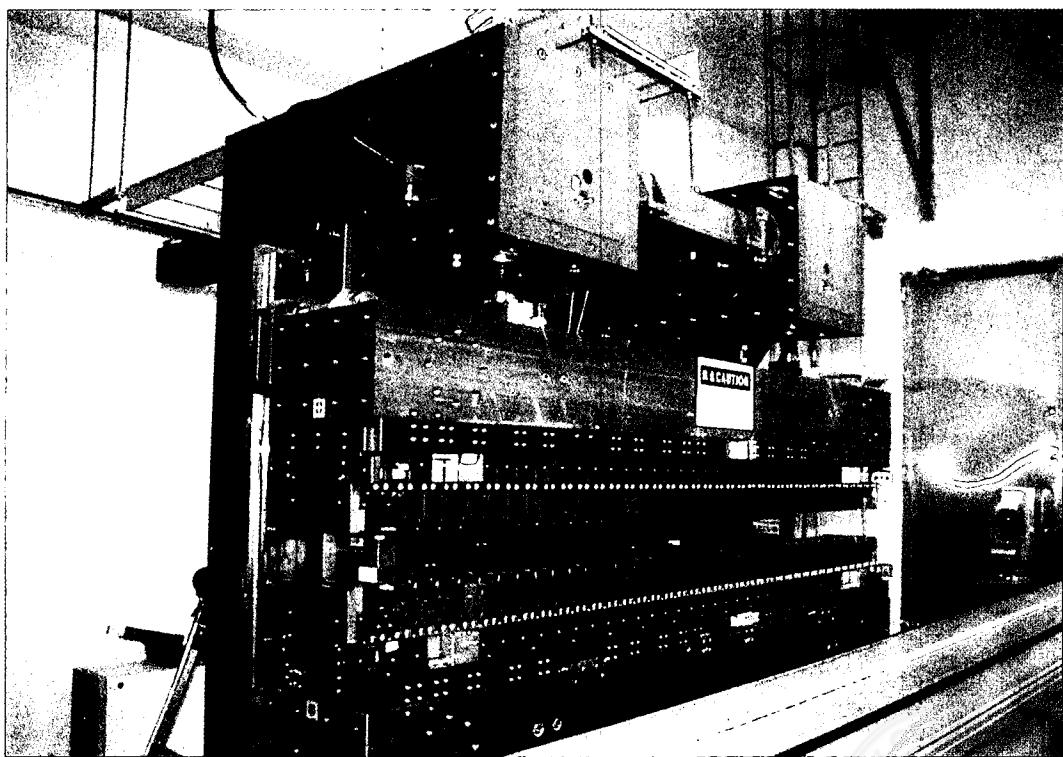
圖五

插件磁鐵發出同步輻射光的原理

電子由此
進入磁場



圖六



圖七

不但如此，同步輻射儲存環中的電子是以光速等速地繞著儲存環飛行，每一圈都會按著節奏放出輻射，所以基本上同步輻射可說是精確無比的大時鐘。配合這樣的特性，我們便能以紫外線或X光，拍攝出電影般的動態影像，許多化學反應、或是癌細胞的分裂過程，便能歷歷在目地呈現。

同步輻射具有這麼多的優點和廣泛的應用，使得科學家們給了它一個稱號—「現代神燈」！

參、世界同步輻射光源之現況

到目前為止，全世界已有七十多座的同步輻射光源，大部分集中在科技先進的國家。美國是同步輻射的發源地，已建造了十餘座同步輻射加速器。日本是發展同步輻射研究最積極的國家，除了政府不遺餘力的興建相關設施外，許多私人企業和地方政府也擁有同步輻射加速器。另一個同步輻射重鎮則是前蘇聯管轄的區域，而歐洲各國也各自擁有一至三座不等。至於開發中國家，台灣與韓國各有一座第三代加速器，大陸、印度及巴西各擁有一至二座第二代同步輻射光源。

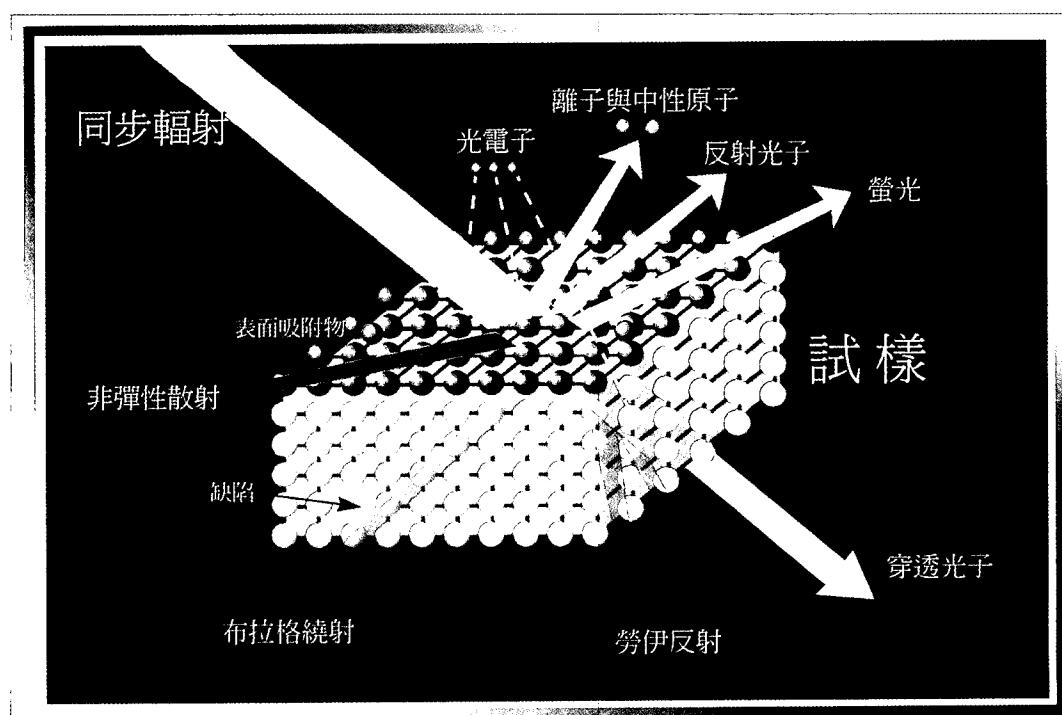
國家	第一代同步輻射設施		第二代同步輻射設施		第三代同步輻射設施	
	設施名稱	能量	設施名稱	能量	設施名稱	能量
台灣					SRRC	1.3-1.5
大陸	BEPC	1.5-2.8	HESYRL	0.8		
日本	TSSR Accum. Ring TRISTAN MR	1.5 6.5 6-30	UVSOR SOR-Ring TERAS Photon Factory	0.75 0.38 0.8 2.5-3	HISOR Nanohana ISSP SPring-8 NIJI IV	1.5 2.5 2.0 8.0 0.5
韓國					PLS	2.0-2.4
印度					INDUS II	2.0
美國	SURF II CESR SPEAR	0.28 5.5 3-3.5	CAMD Aladdin NSLS I NSLS II	1.2 0.8-1 0.75 2.5-2.8	APS ALS FELL NCSTAR	7.0 1.5-1.9 1.0-1.3 2.5
巴西			LNLS-1	1.15	LNLS-2	2.0
英國			SRS	2	Sinbad Diamond	0.6 3.0
法國	DCI	1.8	Super ACO	0.8	ESRF SOLEIL	6.0 2.15
德國	ELSA DORIS III PETRA II	1.5-3.5 4.5-5.3 7-13	BESSY I	0.8	DELTA BESSY II	1.5 1.5-2.0
義大利	DAΦNE	0.51			ELETTRA	1.5-2.3
西班牙					Catalonia SR	2.5
瑞士					SLS	1.5-2.1
瑞典			MAX I	0.55	MAX II	1.5
荷蘭	AmPS EUTERPE	0.9 0.4				
丹麥	ASTRID	0.6				
俄羅斯	VEPP-2M VEPP-3 VEPP-4	0.7 2.2 5-7	Siberia I Siberia II TNK	0.45 2.5 1.2-1.6		
烏克蘭	N-100 HP-2000	0.1 2.0			KLS	0.8

○已完成之第三代同步輻射設施能量單位為十億電子伏特

在先進國家各大學及研究機構裡所進行的科學研究，常常會因實驗光源亮度不夠或解析度差而無法得到明確的結果，這時候研究人員就會申請使用同步輻射光源來完成決定性的實驗，沒有這項設備的國家就難以享有這樣的優勢。以我國同步輻射研究中心這樣大小的儲存環為例，最多可以容納四十餘條光束線，由於同步輻射的高亮度，一個複雜的實驗在一到兩個星期便會有結果，用這樣的效率來估算，一年將可從事千餘項研究，這些研究涵蓋物理、化學、生物、醫學、材料、冶金、化工、環保、能源、機械、電子、資訊等領域。可以想見，各國間的科技競爭將更加的熱烈。

肆、同步輻射在科學研究上的應用

雖然同步輻射光源之應用十分廣泛，但其科學實驗之基本原理卻頗為簡單。絕大部分同步輻射之科學實驗，乃在藉測量物質吸收光子後所放出之電子、光子、或其他粒子來推斷該物質之幾何、電子、或磁性微觀結構。讓我們以在黑夜裡打會發光的高爾夫球來做個比喻，雖然我們無法看到地面，但倘若我們觀察到球著地不反彈，則可推論該著地點十之八九為沙堆；倘若我們看到球消失不再顯現，則落球點必為水池；倘若球在果嶺上滾動軌跡彎曲，則地形必不平坦。由此可知，即使我



圖八 科學家以同步輻射研究物質試樣的結構時，使用同步輻射光照射試樣。量測反射、繞射、散射及穿透試樣的光之強度、能量，並量測被光子由物體激發出來之電子及離子，以進一步瞭解試樣之幾何、電子及磁性結構。

們只觀察球本身，卻可推敲出球場的地表狀況。同樣地，雖然我們只觀察到光子或其他粒子的行徑、我們卻能揭開物質微觀結構的奧秘。

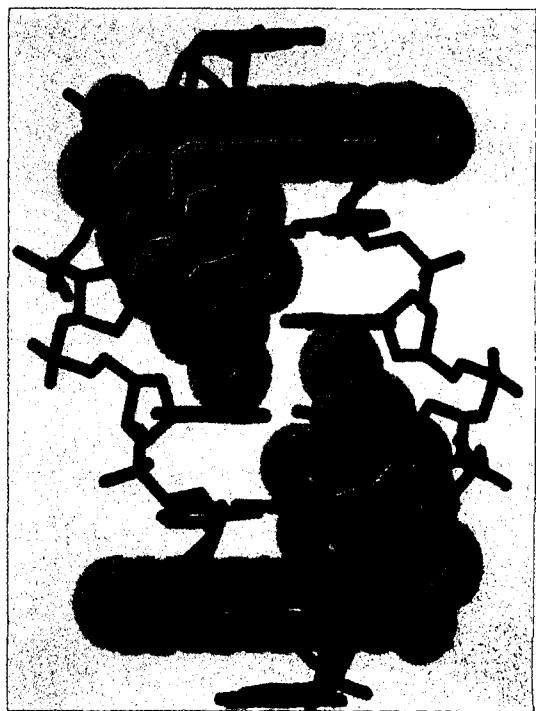
最常用的實驗技術之一是測量光激發所產生的電子。此方法我們稱之為「光電子能譜學」，它能提供我們物質內在電子的排列及運行的情形，幫助我們了解有關導電性等之物理現象。近幾年來，同步輻射「光電子能譜學」已被成功地應用到偵測銅、氧高溫超導體之電子結構，從而對各種高溫超導的機制提出嚴格的檢驗，也為解開高溫超導之謎做出貢獻。

同步輻射「X光吸收能譜學」，乃利用同步輻射連續光的特性，藉著不同波長的X光掃描，就能標定特定原子周圍的化學結構，對工業生產所用的觸媒研究有決定性的幫助。舉例來說，自二次世界大戰以來，工業界一直是利用一種高溫高壓的方法來生產氮，這種方法極耗費能源。而自然界裡落花生的根卻能很容易地製造氮。利用同步輻射「X光吸收能譜學」，人們終於了解原來是根瘤菌中的一種酶，它所含的鉬元素在扮演著催化劑的角色。國科會支助而由幾所大學組成的一個研究團隊，現正從事有關工業觸媒的研究。

在金屬提煉與合金製造過程中，任何細微的成分差異，都會完全改變材料的特性，材料科學家利用同步輻射的高亮度，發展出「微量元素分析術」，可以研究出提升材料品質的製程或發明新的材料。地質學家常要模擬地殼承受巨大壓力時所造成的效果，一般是將力量施加在接觸面積極小的鑽石砧上來產生這麼大的壓力。測試用的地質標本則放置於這個極小的面積上，對於這種極小標本的檢測則非同步輻射「微量元素分析術」莫屬了。

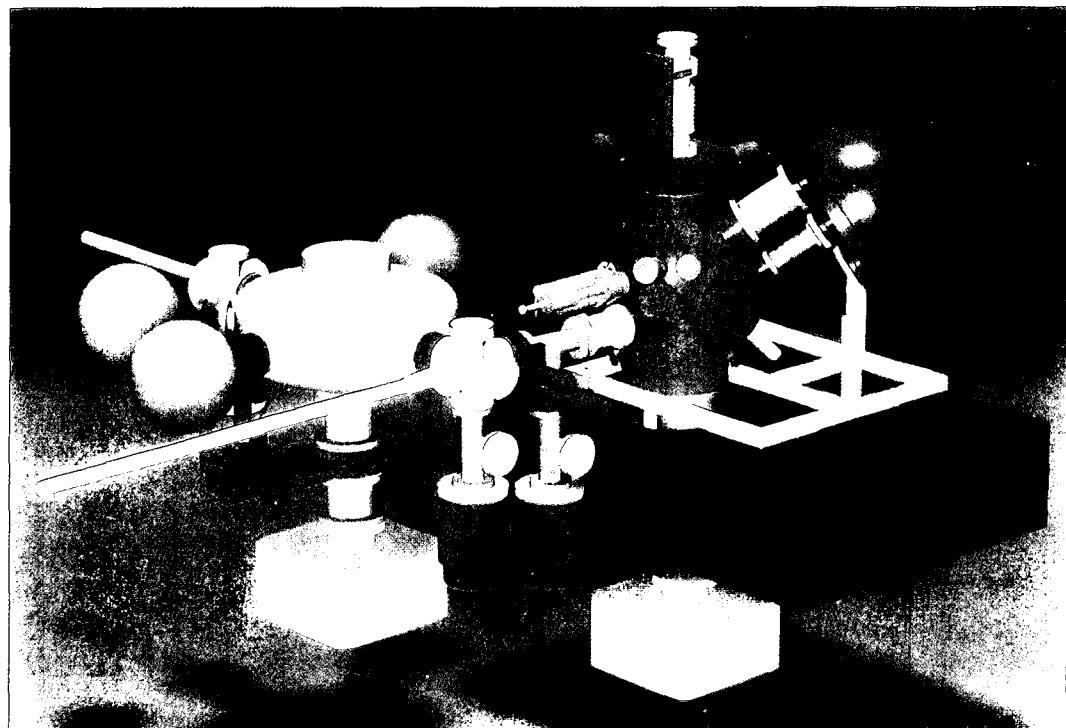
以往的光學式顯微鏡，因為可見光波長不夠小，祇能看到細胞大小的層次，對於細胞內更細微的組織就無能為力了，電子顯微鏡雖然可以看到原子的世界，但分辨不出碳和氧等重要生命元素，而且祇能觀察死細胞。我們現在正與中研院合作，利用同步輻射成像鮮明的特性以及光與物質間多重的作用，建造一座世界一流的「X光能譜顯微鏡」。它不但具有前面兩種顯微鏡所沒有的優點，還能看到其化學組成，是研究生物活體、表面化學、及磁性材料的絕佳工具。

傳統的X光受限於亮度和解析度，只能判讀結構簡單的分子晶體，但對於人類切



圖九 最近發現了一種植物藥材能殺死癌細胞，但不曉得其機制，經由X光大分子結晶學分析，發現該植物特有的ADRIAMYCIN成份可以破壞癌細胞的分裂而有此藥效。





圖十 正在建造中，世界最先進的同步輻射X光能譜顯微鏡，可以看到比一般顯微鏡還要清晰的影像，同時還能辨認組成元素和化學特性。

身相關的千萬種蛋白質及其所構成的酶、肌肉、神經等等可就一籌莫展了。原因是這些蛋白質的分子既大且複雜，很難培養出夠大的晶體。若能經由對這些蛋白質結構的認知來了解人類生理現象的究竟，就可進一步找出治療癌症或抵抗愛滋病的方法。同步輻射「大分子結晶學」就是利用同步輻射高亮度、高解析度的特性開始將生物的蛋白質結構成功地逐一解出。醫學界最近發現一種名為紅豆杉的植物中含有可以殺死癌細胞的物質，但並不清楚其機制。利用同步輻射的這種技術，發現原來是該植物特有的紫杉醇成分可以破壞癌細胞的分裂。

絕大部分的燃燒反應發生在物質的表面或是氣體分子之間，而氣體分子反應中有一極為重要的能量範圍，就是真空紫外

光區。除了同步輻射加速器外，沒有第二種光源能有效提供這個波段的連續光譜。諾貝爾獎得主李遠哲院長在回國前主持美國柏克萊「先進光源」的一條光束線，領導研究群從事化學動力論方面的研究，探討氣體分子的反應過程，對改善能源使用效率以及空氣品質極有助益。

伍、同步輻射在工業製程上的應用

除了在基礎與應用研究的廣泛使用外，同步輻射也是工業生產的工具。例如，美國IBM、AT&T、Motorola、和Siemens聯手，共同研究利用同步輻射光蝕刻術來製造下一代的電腦晶片，日本及韓國各大企業亦投入驚人的財力，利用他們的同步輻射設施建造專用的光束線作類似

的研究，目前的晶片生產所用的是○・三五微米之技術，而X光蝕刻術的製程目標應可小於○・○五微米，相當於頭髮直徑的千分之一大小。雖然技術困難度遠比現有的晶片生產高出許多，但倘若成功，每個晶片的容納量將百倍於現在，屆時台灣現有的生產技術可能將會面臨重大的挑戰。有鑑於此，在國科會的推動下，我們配合了毫微米國家實驗室及其他研究單位成立了一支團隊，以非常有限的資源著手進行一些初步的研究工作。

再例如，歐洲各國目前已合組一跨國研究團隊，利用同步輻射X光深刻術，結合晶片製造方法，發展微機械製造技術。此技術很有可能改變現有的生產觀念，掀起另一次的工業革命。一個不可思議但未來有可能實現的例子是：以往腦部或內臟外科手術常需要在人體上開個大洞，失血大、危險性高，準確性也差。以後可以利用微機械技術製造比螞蟻還小的迷你潛艇，注入人體內，有微感系統測量血壓、血流、血液成分，有微視系統將體內映像傳給外科醫師，醫師則操作艇上的微機械手臂進行手術。目前，在國科會的產學合作計畫下，我們結合工研院、中科院及民間機構也進行微機械有關之研究。譬如，我們和新光紡織公司正用同步輻射微機械技術發展一種紗口，其噴嘴將比蠶的口器還要精緻，可以抽出一種劃時代的人造絲，織出前所未有的高價值的布料。

陸、展望

當初同步輻射研究中心成立的目的是要提供國人一個尖端的科技研究設施與環境，今後我們將謹守這個目標，朝下列方向努力：

(一)不斷提昇光源品質

由於中心這部加速器是由國人自行設計與建造，我們能完全掌握機器的特性，一方面延伸出成熟的維修能力，使得運轉成功率在啓用的頭兩年內就已達到百分之九十以上之國際水準，並已開始提供全天候廿四小時的運轉服務。另一方面，以本土性的自主技術，持續推進機器的功能，目前已可以將儲存電流增加到原先設計規格的一倍，光的亮度也隨著倍增，許多新發展出來的回授系統使得輻射光一天比一天穩定。

(二)擴大國內學術界與工業界的參與

自從民國八十二年，三條光束線試車成功，開始提供光源給國內各大學及研究機構使用。過去兩年來每年約有廿餘所大學或研究機構及數個國外研究團體，五百餘人次，利用同步輻射光源進行了近百項研究計畫。顯示在國科會大力輔導及中心多年來培育同步輻射光源應用人才已有初步的成果，再過三年，中心內的光束線將增加到二十條，使我國的同步輻射研究環境步入成熟階段。

(三)發展更高能量的光源

雖然同步輻射涵蓋的波長範圍甚廣，但不同能量的同步加速器各有其所擅長的波段，通常波長越短，所需要的能量也越高，儲存環的半徑也需要增大，環的造價也隨著提高。高能量的環在X光區表現優異，且最能直接支援民生工業發展。繼先前過位於法國，由多國合力建造完成的六十億電子伏特高能量儲存環，美國也建造另一個第三代的七十億電子伏特的儲存環，將在今年開始運轉。日本則建造了全世界最高能量的八十億電子伏特儲存環，將在明年試車。

我國早年由於經費有限和欠缺加速器人才與技術，先從能量較低的十三億電子

伏特加速器做起，雖然現在能提供世界一流的真空紫外光和軟X光給國內研究人員使用，卻無法供應先進的硬X光給國內工業及學術界從事與高科技產業，譬如石化、半導體、及製藥等，有密切關係之研究。所以，除了已加裝能產生部份硬X光的高磁場插件磁鐵外，我們也積極研究加裝超導磁

鐵的可行性。此外，我們還透過國際合作，安排國內硬X光研究群至美、日等國之高能量加速器做實驗。長遠之計，國內還是需要擁有自己的高能量同步輻射光源。
(本文摘錄自八十五總統府六月份國父紀念月會報告，作者陳建德博士現為同步輻射研究中心研究員兼副主任)

