

# 台灣之光 台灣光子源

文／劉詠鯤  
美編／王涵聖

自從新聞報導出來台灣光子源因為經費不足，而使得這個台灣之光可能要停止運作後，大家才知道原來台灣有這麼一個世界級的機構。到底台灣光子源（同步輻射中心）在做什麼？可以提供學界、業界哪些強大的技術支援？而成為世界第一後，未來發展的方向為何？我們訪問到了同步輻射中心 X 光與紅外影像小組發言人宋艷芳博士及 X 光與紅外影像小組小組長湯茂竹博士。

（本篇乃是 2016 年 9 月台灣光子源啟用前，未及刊登於上期時空的專訪，內容或與現況有些出入）



國家同步輻射研究中心鳥瞰圖  
（大環為台灣光子源，小環為台灣光源）





台灣光子源加速器隧道區（左為儲存環，右為增能環）

（在以下訪談內容中，合稱宋艷芳博士與湯茂竹博士為「老師」）

老師：在同步輻射中心裡，有兩個環形的建築，一個是台灣光源，在 1993 年落成，一個則是台灣光子源，當初我們和科技部約定要在 2014 年出光，後來幾經波折在 2014/12/31 下午 1 點 54 分 45 秒打出第一道光。這個時間點大概整個光子源團隊的人都不會忘記！無論是台灣光源或是台灣光子源，他的本質都是同步輻射，只是差在新的光子源可以提供更高品質的光。而同步輻射的核心就是這個環型的加速器。新的環狀加速器一圈約 500 多公尺，我們稱這個加速器叫做儲存環，就好像電子被存在裡面。當電子在裡面環繞運動，由於具有加速度，所以會不斷在切線方向釋放電磁輻射。我們只要在切線方向上開個洞，就可以讓輻射出來，這個就是所謂的光束線（Beamline）。目前我們光子源可以開到 40 幾條光束線。每條光束線我們會依照需求，取出不同波長、解析力、聚焦強度

的光束。為了避免裡面的輻射跑出來，可以看到我們在邊緣都是用厚度 1m 以上的水泥牆包著。

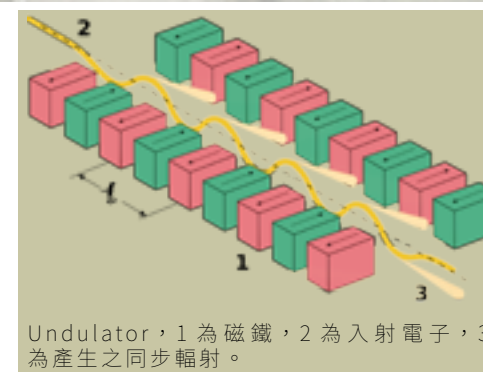
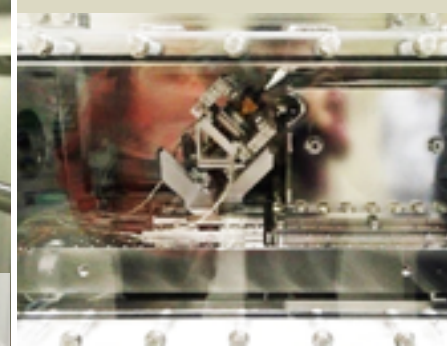
正常情況下電子會走直線，透過外加磁場，我們就可以讓電子產生加速度放出輻射。加速的方式主要有兩種，一種稱為偏轉化，就是讓電子通過南北極磁鐵，使之產生偏轉。另一種為 undulator 或 wiggler，這兩者皆是利用磁鐵陣列交錯排列，使電子震盪。在震盪的時候切線方向產生的光可以疊加，產生更高強度的光源。相對的，產生高強度的光意味著更大量的能量損失，所以通常整個同步輻射裡面不會有太多組 undulator 或 wiggler。

既然電子不斷產生輻射，那他的能量自然會不斷降低，因此我們利用 5Mhz 微波震盪器，藉由共振補充電子的能量，每當電子因輻射減少能量後就通過一個震盪器使他可以不斷的在環狀軌道裡運行。我們共有 3 個超導微波震盪器，他就像是整個光子源的心臟，維

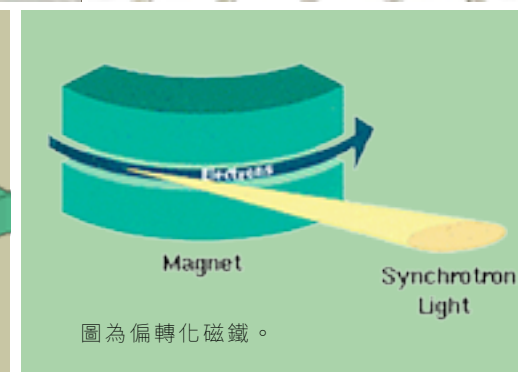


X 光基本還是會被空氣吸收、散射，所以需要把光路裡面抽真空，讓光直接打到樣品。

經過分光 and 聚焦的 X 光打在下圖中央暗紅色部分的樣品座上後，便可以利用繞射清楚看出材料的結構。



Undulator，1 為磁鐵，2 為入射電子，3 為產生之同步輻射。



圖為偏轉化磁鐵。

持著整個光子源的運作。軌道裡面的電流在今年達到 520mA，已經達到設計值，是世界上最亮的。像美國去年剛蓋好的，只能達到 200mA，所以在這方面上我們還是領先全球的。我們預計今年（2016）9 月開放外界用戶使用，目前還在試車階段，確保各種機能正常運作。

同步輻射可以產生全頻段的光譜，目前強項主要在於紅外線及 X 光的波段，在可見光不太過雷射。

紅外線在生物、化學上很好用，主要是用來看有極性的分子，像是  $N_2$ 。這些有極性的分子共振頻率剛好落在紅外線的波段。生物分子裡含有許多極性分子，在分辨癌細胞和正常細胞時，由於組成有些不同，我們就可以利用光譜辨別癌細胞的分布。而且，我們最

近還在 Nature 上發了一篇論文說我們在恐龍殘骸裡面發現了蛋白質、血液，我們在對殘骸切片以紅外線觀察後發現裡面竟然還有骨髓、血紅素。

前面提到了紅外線，X 光的應用領域更加寬廣。所謂強項是因為別的方法產生的 X 光沒辦法這麼強。像這個（右上圖）就是利用同步輻射做蛋白質繞射，X 光波長大概落在原子等級，可以利用繞射來對原子、分子進行觀測。當了解蛋白質結構後，不論是在新藥製作、生化研究都能有很大的幫助，這也是目前在我們這邊運行的計畫中算是蠻大的一個。在進行蛋白質繞射時，要先將蛋白質結晶，製成標本後給 X 光打。為了確保不要被熱運動干擾太嚴重，樣品都要使用液態氮冷卻，在結合機械手臂的技術，可以達成自動換取樣品、自動量測的技術。



這個實驗也是 X 光的應用，X 光從光束線出來後分光、聚焦、打在樣品座上（圖片中央暗紅色部分），上面是一個掃描式電子顯微鏡。

X 光打到樣品後會產生很多繞射，要用一顆二維偵測器來接收。在這條光束線我們主要是把光聚到 100~200nm，這樣單位面積下光子密度很大，可以清楚看到區域性的分布差異。像是多晶材料，在掃描下，就可以清楚看出結構。多晶材料和單晶結構的材料特性差異大，但成本便宜許多，我們可以利用這條光束線找出材料的結晶狀況、分布，再搭配通電、施加應力等測驗，就可以清楚知道晶體結構對材料的影響情況。

若是以光譜學的角度來利用 X 光，我們可以從好幾個角度切入：

1. 不同原子表面電子的吸收譜線不同，用 X 光照射材料表面找出不同元素的分布。
2. 不同原子的電子從高能階掉下來時放出的螢光不同，透過分析螢光來判斷原子種類。
3. 光電效應，觀測被打出的電子能量，了解材料表層的電子分布。
4. 用 X 光把內層的原子打到高能階，因為包利不相容原理，如果高能階某個部分有空位，電子才能打上去。這樣可以看出材料表面原子的價數、是否處於激發態等特性。

這些都是在材料方面很有用的偵測技術。

我自己的 beamline 可以把光聚到 30nm，達到很好的空間解析度，目前研究的重點是和郭瑞年老師合作進行半導體檢測。現在我們可以做到奈米級的元素辨別、也可以知道價數。利用 X 光激發原子，我們觀測發出的螢光，可以研究很多發光半導體材料。同步輻射不是雷射，並不是很同調。不過如果強度很強，我們可以從中選出同調光，把解析力做到幾 nm，做成 X 光顯微鏡，這是目前 X 光的顯學。我們也有對材料加入應力測試，

結果發現在特定應力下，電子可以跑得比較快，這是正在研究的問題。顯微鏡的解析力主要被限制在和波長同一個等級，電子顯微鏡因為聚焦鏡比較好做，只要利用電場和磁場就能控制，所以發展的比 X 光顯微鏡早許多。現在 X 光的顯微鏡，由於透鏡的關係最好只能做到 10 幾 nm。現在台積電都已經做到 16nm 製程，實在是趕不上。但 X 光顯微鏡的好處是在於 X 光具有較好的穿透性，電子很容易和物體表面發生反應，只能看到表層的影像。若是要看到元件裡面的結構，以前用電子顯微鏡，大多要一層一層把它洗掉再去看，但如果現在要觀測應力的作用，洗到最後看到的就不會是想觀測的應力。用 X 光來觀測，則是一種非破壞性的觀測方式。

光子源位在竹科，想必和科技業的關係密切吧？

老師：這是我們目前想拓展的業務，從前面的介紹可以感覺出來其實光子源的實用性很強，我們目前主要和半導體、生化產業有部分的合作。

有關半導體產業的合作

以台積電來說，他們目前有所謂的 failure analysis，也就是分析元件為何會出問題。像是電流過大時過熱、應力過大時斷裂等。在之前，台積電採用的方式是將有問題的樣品切片，以電子顯微鏡觀察。但隨著元件尺寸愈來愈小，切片之後得到的結果可能和實際情況差異甚大，因此他們找上我們希望用 X 光顯微鏡的技術來幫助它們找出問題。

有關生化、製藥產業的合作

我們現在做蛋白質都是比較基礎的科學，製藥很多是在蛋白質裡面加入一個小小的物質，看他在小範圍裏面繞射圖案的差異，可以看出蛋白質和小分子間的互動。我們舊的光源就有一條光束線是用來給製藥用的。不過製藥是一條漫長的路，而且開發的成功率很低，成本其實非常高。



台灣光子源加速器隧道區（左為增能環，右為儲存環）

現在做蛋白質主要是用低溫把它凍住，所以它其實像是個死掉的蛋白。而且一顆蛋白質其實無法直接觀測，通常都要用大量的蛋白質去結晶才有辦法觀測。在這過程中，一方面冷凍後可能部分功能、結構會喪失，像是有一種蛋白質它具有長長細細的吊鉤，可以用來勾住物質，不過在結凍的情況下很容易斷裂，這樣我們觀察到的現象就不完整。一方便再結晶和真的細胞裡面作用可能會不一樣。這過程就很像我們觀察恐龍化石，我們只能透過結構，大概猜出他是怎麼走路的。我們藉由分析蛋白質不同部分活性、電性分布，也可以大概猜測出它的功能。若是可以找到活性大，容易和癌物質互動的地方，我們可以用一些分子把它拴住。但是這些預測若要被證實，還需要各種生物實驗、臨床實驗一步一步確認，這可能就不是一個月兩個月才能作出來的了。

要做蛋白質結構分析還有另一種方法，那就

是利用自由電子雷射。自由電子雷射是一種脈衝雷射，目前大概能做到 60Hz，也就是每秒打 60 發，如果做得好，每個脈衝可以做到幾個 fs ( $10^{-15}$  s)。一般解蛋白質結構時，常常會因為樣本受光照射過久而損壞，若是用自由電子雷射，則可能一發脈衝打上去就足以累積足夠的資訊，也就是在樣本被打壞前就蒐集到想要的資料。所以現在美國、日本花了很多錢去蓋自由電子雷射，因為他們經過理論計算發現可行，但是蓋好了後才發現能量還差了 3 個數量級。（筆者：是差在那些地方？老師：他們算錯了，哈哈～）

不過其實要建 X 光高強度的自由電子雷射難度很大，出來的光束寬大概是幾個微米。而史丹佛用的加速軌道長 3km，一個磁鐵 2 公分，共 15 萬個磁鐵，為了維持良好的準直性，這些磁鐵排起來誤差不可以超過幾個微米，這裡面工程的技術非常偉大。不過大自然比我們想的還要強壯，2009 年蓋好之後，工程



還沒達到預計的標準，可是就成功出光了。

電子輻射的缺點是他每秒只能打 60 發，同步輻射每秒有 600 萬次，所以對於需要長時間穩定觀測的實驗來說，同步輻射就好用的多。而且自由電子輻射是亂槍打鳥，每次打的位置不一樣，有可能要解的分子就都打不到。

TPS 最主要的優點就是可以產生很亮的光，把它聚焦到很小以後，因為還有足夠的亮度，所以可以獲得很高的空間解析力。

同步輻射未來會往什麼方向發展呢？

老師：我只能說目前同步輻射這個環，還不是最後完美的環。有一個問題是，同步輻射出來的光，是扁橢圓的。這是因為在中間偏轉磁鐵出來的光，在垂直方向上會有很大的色散。在水平方向的光，因為太胖所以不容易聚焦。我們這邊的光在轉彎時用兩個偏轉磁鐵，瑞典那邊用了 7 個偏轉磁鐵。這在技術上是很困難的，不過它帶來的好處是由於光每通過一個偏轉磁鐵時都會色散，色散裡不同調的光會因為互相干涉而被吃掉，能夠順利通過 7 個偏轉磁鐵的光會具有非常好的同調性。這以前沒有人敢嘗試，因為工程上具有很大的挑戰。但有成功案例後接下來全世界新蓋的同步輻射可能都會走這一條路，我們可能會是最後一個。所以我覺得雖然我們現在是領先世界的，但是可能領先期不會太多，要趁現在趕快做。不過某種程度來說，我們目前採用兩個磁鐵的設計好處就是光源很穩定，大概可以用個 1 個月都在穩定範圍，這樣使用者就比較開心。若是用 7 個磁鐵的設計，可能 3 ~ 4 天就要停下來維護，那這樣使用者可能就比較不喜歡。此外由於現在光源都已經十分接近繞射極限，若是所使用的透鏡品質沒有跟上也是沒用，所以這是整套要一起提升的。當然等到那些技術更成熟，我們也可以更換現有的設備幫他升級。

比較長遠的目標來說，我比較期待我們能夠成為真正的國家級實驗室，也許應該更像台

大醫院而不只是檢驗院，能讓更多科學活動在我們這裡發生。我們目前比較像是一個供人使用的平台，讓人取個數據就走了，如果未來可以加入完整的觀測環境，整合高速電腦中心的計算能力。這些目前都還沒建立，不過我們這個機構還算年輕，還可以有更多的想法加入，這樣也許我們可以成為一個完整的研究機構。

(本文照片資料皆來自國家同步輻射研究中心授權使用)



台灣光子源光環系列公共藝術



湯茂竹博士