

# 同步輻射光束線的特性介紹— 生命科學中的應用

## Introduction to Synchrotron Radiation Beamlines— Properties and Applications in Bioscience

馮學深

Hok-Sum Fung

國家同步輻射研究中心的台灣光源自 1993 年出光以來，光束線工作能區已由 4–1800 eV 延伸至紅外光區及 33 keV 以上的能區。光束線數目亦由 3 條增至 28 條，而使用同步輻射作生命科學研究的用戶亦大幅增長。本文希望透過通俗的文字與圖表，提供非同步輻射光束線專業的研究人員，能對光束線的特性有初步的觀念與了解，並希望能由此增進各研究領域人員使用同步輻射的興趣。

The energy range covered by the beamlines at the TLS (Taiwan Light Source) ring of NSRRC has expanded from a range of 4–1800 eV, provided by the first three beamlines in 1993 when TLS started operation, to a much broader range now covering infrared to hard X-ray up to 33 keV, with 28 beamlines in operation/commission. Users performing experiments on life science research at NSRRC have grown enormously in recent years. This article provides an introduction to the researchers with the basic principles of beamlines using accessible language and figures, with the aim to stimulate interests in a broad audience in various fields of research for synchrotron radiation research.

### 一、前言

1993 年台灣同步輻射中心的儲存環首次成功儲存電子束開始，至 1994 年同步輻射中心開始對外來用戶開放，標誌著同步輻射光源在台灣科學研究上的開始。早期只有 1 m (SNM)、6 m L-SGM 及 6 m H-SGM 三條光束線<sup>(1)</sup>，同步輻射只能提供由紫外光至軟 X 光區的光束線。這主要是受限於儲存環電子束能量，無法提供硬 X 光光源。1997 年在直段裝入增頻磁鐵 wiggler 後，TLS 可提供之能量

才擴展至硬 X 光區。而近年超導科技的進步引入超導磁鐵，令 TLS 的能量區往更高的能區擴展。

同步輻射在生命科學的研究於 2008 年二月出刊的物理雙月刊中曾由同步輻射中心同仁撰寫「同步輻射在生命科學上的應用與發展」<sup>(2)</sup>一文，此文對於目前在 TLS 所作的生命科學研究作了一系列的報導，包括蛋白質結晶學、同步輻射圓二色 (circular dichroism, CD) 光譜學、小角度 X 光散射在溶液中蛋白質的結構、多片層 X 光繞射技術測量生物膜結構、X 光吸收光譜、奈米 X 光顯微術

及高解析傅立葉轉換紅外光譜顯微術等技術，在生命科學上的應用作了詳盡的報導。本文主要就同步輻射中心現有的光源及光束線作一概述性介紹，俾使非同步輻射光束線專業的研究人員，能對光束線的特性有初步的概念與了解，並希望能由此增進各研究領域人員使用同步輻射的興趣。

## 二、同步輻射在生命科學的應用

由於同步輻射光光譜能量涵蓋紅外光、真空紫外光、軟 X 光至硬 X 光，就光譜學而言，同步輻射光是一理想的光源。而光譜分析是了解物質構成的一項有力工具。以生物樣品為例，可利用某些化學鍵在紅外光區有特定吸收峰之特性，利用紅外光吸收光譜，測定某些化合物在樣品中之含量。而各種重金屬在硬 X 光區有特定的吸收峰，則可據此測定生物樣品內的重金屬種類，而同時同步輻射具有高通量的輸出，故可大幅改善吸收光譜的訊噪比。

硬 X 光由於波長短至 0.2 至 2 Å，如利用 X 光繞射技術，可進行蛋白質單晶之研究，而近年來同步輻射已成為蛋白質結晶學中十分重要的工具。由於同步輻射光可聚焦至數十微米級之光斑，故可進行微小晶體之 X 光繞射實驗，此點對某些難以形成大型單晶的蛋白質十分重要，如生物膜之研究則可利用多片層 X 光繞射 (lamellar X-ray diffraction, LXD)，以量測生物膜在不同溫度及濕度下的結構，在膜蛋白質結構、蛋白質－生物膜作用及生物晶片等生命科學領域有廣泛的應用。

同步輻射光由於發散度小 (在 mrad 量級)，十分適合於小角度 X 光散射 (SAXS) 的實驗，利用此技術可進行生物分子在水溶液與脂肪膜 (membranes) 的結構與功能、水溶液的蛋白質與蛋白質複合體構型，以及蛋白質與蛋白質、核酸、ligand 分子之咬合結構等研究。由於同步輻射光具有十分良好的偏振性，適合作為真空紫外光至軟 X 光之圓二色儀 (circular dichroism, CD) 之光源，而圓二色光譜是研究物質二次結構的有力工具。

同步輻射的低發散度與高準直特性，令同步輻射光較傳統大發散度光源如放電管、X 射線管等容易聚焦，故同步輻射光源適合作為顯微儀之光源。

以 TLS 為例，現有高解析傅立葉轉換紅外光譜顯微鏡之空間解析力達 10 μm。軟 X 光掃描式光電子顯微鏡 (SPEM) 之空間解析力達 100 nm。在硬 X 光區有穿透式顯微鏡 (XTM)，其空間解析力可達 30 nm。

由於同步輻射光涵蓋能量十分大，不同能區須使用不同磁鐵作光源，而同時光束線之設計亦有異，以下將對現有 TLS 光源及光束線作一綜合性介紹。

## 三、同步輻射光源

目前 TLS 共有六種不同光源：偏轉磁鐵、聚頻磁鐵、增頻磁鐵 wiggler、超導移頻磁鐵 (superconducting multipole wavelength shifter, SWLS)<sup>(3)</sup>、superconducting multipole wiggler (SMPW)<sup>(4)</sup> 及 In-Achromat superconducting wiggler (IASW)<sup>(5)</sup> 等，光譜能量範圍涵蓋紅外光區到硬 X 光區。圖 1 列出現有 TLS 光源與 TPS 光源不同磁鐵的發光特性，由圖中可看出同步輻射在光譜能量範圍涵蓋紅外光區到硬 X 光區，提供連續及高通量的光源。而不同磁鐵之光特性亦不同，聚頻磁鐵可大幅提高光源的光通量，增頻磁鐵和移頻磁鐵可把同步輻射的光子能量往 X 光波段推展。新 TPS 計畫之電子束能量為 3 GeV，比 TLS 之 1.5 GeV 高，故聚頻磁鐵便可產生 8.0 keV 以上的硬 X 光，而增頻磁鐵和移頻磁鐵在 TPS 更可將同步輻射的光子能量推至 100 keV 以上的硬 X 光波。

圖 2 是 TLS 與 TPS 的光源輝度比較，由於 TPS 電子束發散度很低，能產生低發散度的同步輻射光，故 TPS 的光通量並沒有大幅增長，但 TPS 的輝度遠優於 TLS，故在 TPS 易於產生微米級的光子束，適合用於微樣品及顯微術的實驗。

## 四、光束線基本結構<sup>(1)</sup>

同步輻射光源是靠電子束偏轉而產生的輻射光作為光源，由於氣體分子會干擾電子束運轉，電子束必須在超高真空下才能穩定運作，及有足夠生命週期供作光源使用，故同步輻射的電子束儲存環必

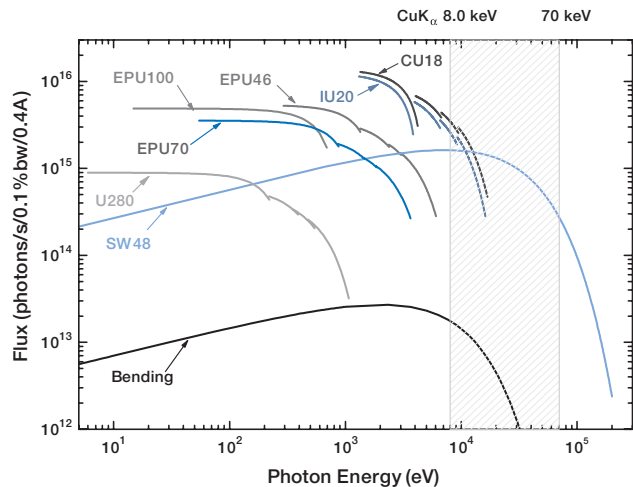
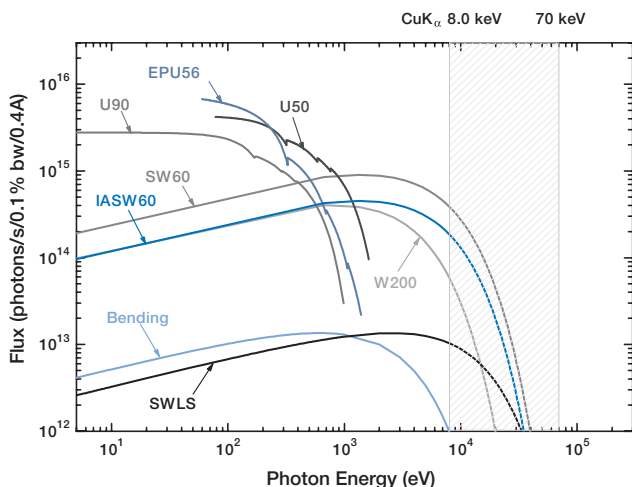


圖 1. TLS 與 TPS 光源不同磁鐵所產生的光通量與光子能量關係圖。TPS 由於電子束能量較高，故可產生至 70 keV 之硬 X 光。

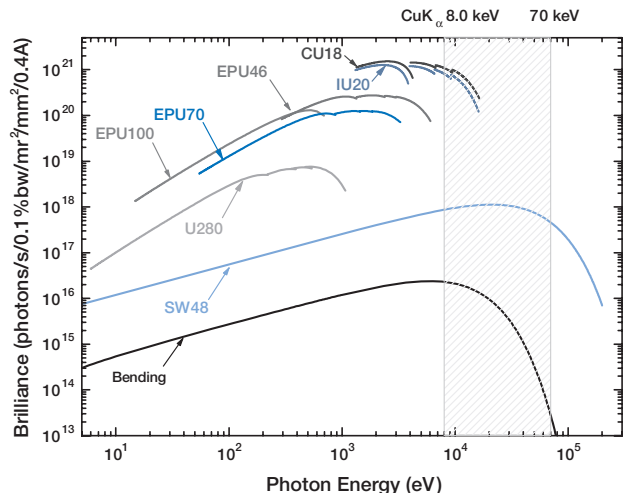
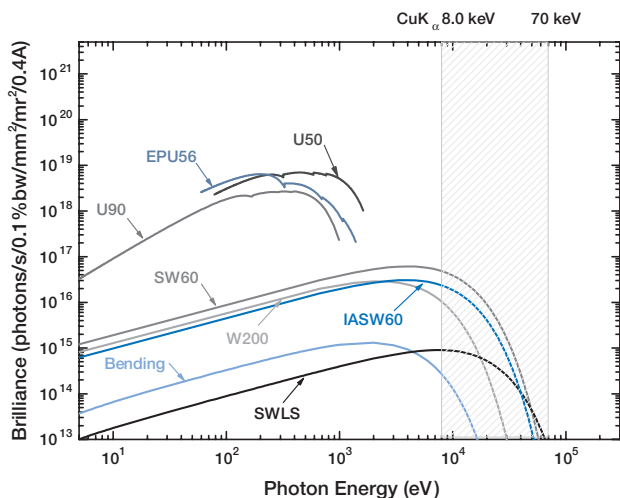


圖 2. TLS 與 TPS 光源不同磁鐵所產生的輝度 (brilliance) 與光子能量關係圖。

須維持在超高真空狀態。但大部分的生命物質必須在充足的空氣、水分及適當的溫度環境下才能保持活性，故生命科學研究用的實驗站必須考慮到此特性，因此如何分隔實驗站與儲存環的真空，便成為一個重要的課題。由於此課題涉及過多的技術細節，在此不作細述。

光束線是連結同步輻射光源與各實驗站之間的橋樑，不同的實驗需要有不同的光束線與實驗站與之匹配。而光束線基本上可分為三部分，現分述如下。

## 1. 前端區

前端區 (front end) 直接與儲存環真空腔相接，主要包含水冷式光遮門 (water-cooled photon shutter)、超高真空閥 (UHV gate valve)、快速關閉閥 (FCV)、輻射安全遮門 (safety shutter or heavy metal shutter)、傳遞管 (transition tube)、光束位置監測器 (BPM) 及下游超高真空閥等，主要功能是對維護儲存環超高的真空環境與保護實驗操作人員和設備的安全，以避免受到意外的輻射暴露或傷害。

## 2. 光學系統

光束線的光學系統主要包含分光儀、狹縫組與鏡箱，同步輻射分光儀一般採用反射式光柵或晶體晶面來分光，而常用於同步輻射光束線的反射鏡與光柵的形狀有平面形、球面形、圓柱面形 (cylindrical)、圓環面形 (toroidal) 及橢球面形 (ellipsoidal) 等，依其光學設計的安排，光學系統主要是將入射的同步輻射之連續波長光譜作適當的偏折、濾光、聚焦及分光儀分光，而得到某一需要單波長的光，以符合實驗要求。

## 3. 實驗站

實驗站是光束線最後端的系統，因而也稱為末端站 (end station)，主要包含實驗樣品靶真空腔及實驗偵測系統、實驗操控儀器與實驗數據處理或分析的空間，在真空紫外光範圍使用的光束線實驗站，其環境都保持在超高真空狀態，因此對一些低真空狀態如氣態的實驗，光束線與實驗站真空腔之間必須有壓差抽氣 (differential pumping) 來保護光束線的超高真空環境。

## 五、光束線分類與應用

同步輻射光源可涵蓋由紅外光至硬 X 光光區，而不同光區的光束線，由於光區特性不同，光束線的設計完全不同。表 1 列出目前在 TLS 及本中心在 SPring-8 共 28 條光束線的光源、操作能

區、分光儀型式及解析力。現對各種不同光區的光束線其基本特性作一概括性介紹。

## 1. 紅外光光束線

目前 TLS 有一座紅外光光束線 (BL14A)<sup>(6)</sup>，其光學布置如圖 3 所示。此光束線光源為偏轉磁鐵，光束線第一面反射鏡為鍍金的水冷式平面鏡，用以收集同步輻射光。由於同步輻射每一出光口輸出功率都在數百瓦到千瓦以上，在分光前，每一個光學元件都須承受數十至數百瓦以上的功率，故每組分光前之光學元件都需有足夠之冷卻，以防止元件被同步輻射光損壞，或產生熱變形，使光束線功能下降，故第一面平面鏡除具有光收集及轉向功能外，亦同時具有將熱帶走的功能，以降低其他光學元件的熱負載。

當第一面平面鏡把光轉至水平聚焦鏡，令光束在水平方向聚焦，並轉向垂直聚焦鏡，再由垂直聚焦鏡把光束作垂直方向聚焦。此種水平方向及垂直方向利用不同鏡子聚焦的方式，名為 K-B (Kirkpatrick-Baez) 鏡組系統。經聚焦後的光束，通過三片 2 mm 厚的溴化鉀 (KBr) 光窗後，利用引光鏡組把光引入紅外光顯微實驗站，溴化鉀光窗主要功用是分隔聚焦鏡與導向鏡組之真空，如圖 3 所示，當光束線在運作時，光束線直接與儲存環連通，所有真空閥門必須打開，避免同步輻射光被閥門阻隔，故光束線運作時，亦須處於  $10^{-9}$  Torr 的真空度，若光束線的真空不佳，會影響儲存環真空

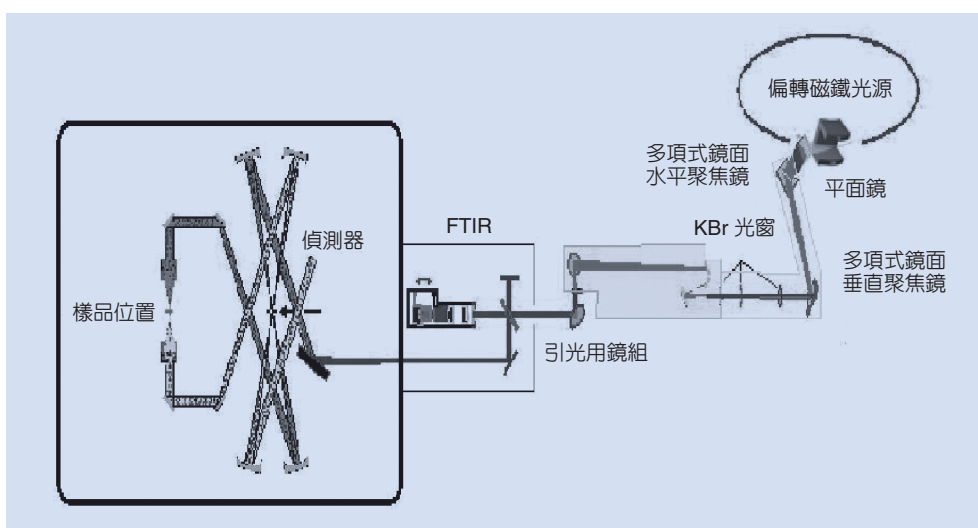


圖 3. BL14A 紅外光束線簡圖。以偏轉磁鐵為光源，利用平面鏡、水平聚焦鏡及垂直聚焦鏡等鏡組，把光引入紅外光顯微鏡及 FTIR 光譜儀。

表 1. 目前在國家同步輻射研究中心，在 TLS 及 SPring-8 所有運轉／試車中的光束線，目前能量範圍涵蓋了紅外線至硬 X 光區。

光源	編號	光束線名稱	分光儀型式	能量範圍 (eV)	解析力	現況
SWLS	01A	SWLS X 光成像光束線	無	> 5 k		運轉中
	01B	SWLS X 光散射光束線	DCM	6 k–20 k	7,000	運轉中
	01C	SWLS 高能量 X 光吸收繞射光束線	DCM	6 k–33 k	7,000	運轉中
BM	03A	高通量 VUV 光束線	CGM	4–40	50,000	運轉中
	04B	Seya 光束線	SNM	4–40	5,000	運轉中
EPU	05A	EPU 非彈性軟 X 光散射光束線	AGM	400–1.5 k	20,000	試車中
	05B	EPU 5.6 自旋解析 SPPEs、PEEM 及 RXS 光束線	SGM	60–1.5 k	20,000	運轉中
BM	08A	低能量 SGM 光束線	SGM	15–200	20,000	運轉中
	09A	U5 SPEM 及能譜學光束線	SGM	60–1.5 k	10,000	運轉中
	11A	龍光束線	SGM	8–1.5 k	10,000	運轉中
SW6	13A	SW6 生物膜散射光束線	ACCM	12 k–14 k	1000	運轉中
	13B	SW6 蛋白質結晶學光束線-13B	DCM	5 k–20 k	7,000	運轉中
	13C	SW6 蛋白質結晶學光束線-13C	ACCM	12 k–14 k	1,000	運轉中
BM	14A	紅外線光束線	FTIR	1–25 $\mu\text{m}$		運轉中
	16A	柔 X 光光束線	DCM	1 k–9 k	7,000	運轉中
W20	17A	W20 X 光繞射光束線	ACCM	4 k–15 k	1,000	運轉中
	17B	W20 X 光散射光束線	DCM	4 k–15 k	7,000	運轉中
	17C	W20 X 光吸收光譜光束線	DCM	4 k–15 k	7,000	運轉中
BM	18B	微機械光束線	無	> 500		運轉中
	19A	X 光光刻術光束線	無	800–1.8 k		運轉中
	19B	光激發釋氣光束線	無	白光		運轉中
	20A	高能量 SGM 光束線	SGM	110–1.5 k	10,000	運轉中
U9	21A	U9 化學動力學光束線	無	4–500	50	運轉中
	21B	U9 能譜學光束線	CGM	4–100	100,000	運轉中
IASW6	23A	小角度 X 光散射光束線	DCM	5 k–23 k	5,000	運轉中
BM	24A	寬頻 SGM 光束線	SGM	10–1.5 k	30,000	運轉中
	SP*12B	生物結構與材料研究光束線	DCM	5 k–100 k	7,000	運轉中
U	SP*12U	非彈性 X 光散射光束線	DCM	5 k–30 k	1,000,000	運轉中

ACCM：非對稱切割彎晶分光儀

DCM：雙晶分光儀

SGM：球面光柵分光儀

SPEM：掃描式光電子顯微儀

AGM：主動式光柵分光儀

EPU：橢圓偏振聚頻磁鐵

SNM：Seya-Namioka 分光儀

SPPES：自旋解析光電子

CGM：柱面光柵分光儀

PEEM：光電子發射顯微儀

SWLS：超導移頻磁鐵

SW6：超導增頻磁鐵

度，引致電子束生命期變短及軌道不穩，導致同步輻射的光源品質下降。

由於溴化鉀光窗能阻隔真空，而紅外光亦能穿透，故導向鏡組即使在  $10^{-6}$  Torr 的真空度下工作，紅外光光束線仍能正常運作。引光鏡組與紅外光顯微實驗站之間，利用一片 5 mm 厚的溴化鉀光

窗後作分隔。由於紅外光顯微實驗站是在大氣壓力下操作，故溴化鉀光窗須有足夠厚度，以對抗大氣壓力，防止光窗破裂。由於空氣中水蒸氣在  $1400-1700\text{ cm}^{-1}$  及  $3500-3600\text{ cm}^{-1}$ 、二氧化碳在  $2350\text{ cm}^{-1}$  附近有很強的吸收，故整個大氣端的光束線實驗站皆填充氮氣，以淨化光路，減少雜氣對光譜

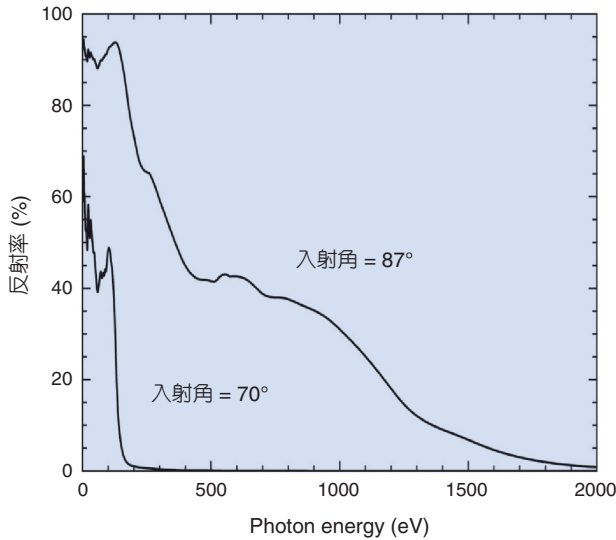


圖 4. 金的光學薄膜在光束不同入射角情況下，反射率隨光子能量之變化。

測量的影響。

此光束線使用傅氏紅外光譜儀 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)，利用紅外光干涉及傅氏轉換進行紅外光譜測量。光譜範圍為  $650-5000\text{ cm}^{-1}$ ，光譜解析度達  $0.125\text{ cm}^{-1}$ ，同時與紅外光顯微鏡結合，令系統空間解析力達  $10\text{ }\mu\text{m}$ ，在此不再贅述。

## 2. 真空紫外光／極紫外光／軟 X 光光束線

此類型光束線主要工作能區介於  $6-2000\text{ eV}$ ，能量介於  $6-40\text{ eV}$  左右之紫外光為真空紫外光 (vacuum ultraviolet, VUV)，能量在  $40-100\text{ eV}$  之光子名為紫外光 (extreme ultraviolet, EUV)，在  $100-2000\text{ eV}$  能量之光子則為軟 X 光。由於空氣對此能區的光波有強烈的吸收，故光束線實驗站基本上須在真空中操作，如需在較高氣壓下工作，則必須有特殊設計，這部分將在本節結尾處作討論。

此類光束線主要由反射鏡、反射式光柵及狹縫組等組成，依系統區分，則大致可分為聚焦系統與分光儀兩大部分。聚焦系統有兩項主要功用：(1) 將同步輻射光引入分光儀，(2) 將分光儀分光後的單色光引入實驗站。由於在  $12-2000\text{ eV}$  大部分物質對此能區的光子有很強的吸收，故不能使用透鏡組作聚焦系統，必須使用反射鏡組組成聚焦系

統。而目前多使用鋁、金或碳化矽 (SiC) 的光學反射膜作為鏡子的反射膜，反射膜的選擇取決於光束線的工作能區。

光束線的幾何構型主要可分為垂直入射 (normal incidence) 與掠角入射 (grazing incidence)。垂直入射設計由於入射角小，鏡面可以較小，而且球面像差較小，但反射膜的反射率與光的入射角度有關。圖 5 是金的光學薄膜在入射角  $70^\circ$  及入射角  $87^\circ$  (掠射角  $3^\circ$ ) 時的反射率，明顯地看出小入射角時在  $200\text{ eV}$  以上之光子幾乎不反射，故  $100\text{ eV}$  以上的光束線，其光學設計必須採用掠射角之設計，而垂直入射設計只適用於光子能量小於  $40\text{ eV}$  的情況。

現以常用於軟 X 光區的龍型光束線<sup>(7, 8, 9)</sup>為例，為各位介紹  $6-2000\text{ eV}$  光束線的基本構造。圖 5 是龍型光束線的基本構造，其特色是利用 K-B 鏡組的方式，令光束線在水平方向及垂直方向獨立聚焦，而垂直方向的焦點在入光狹縫上。此設計可改善光斑成像的品質，使光斑在入光狹縫上成像能優化。由於分光儀的解析力與入光狹縫大小相關，當分光儀解析力要達  $10,000$  以上，入光狹縫可能要關至  $10\text{ }\mu\text{m}$  左右。光斑必須在入光狹縫處有良好聚焦，令大部分的光可通過入光狹縫，令光束線在高解析力的情況下仍可保有一定的光通量輸出。

同步輻射光經入光狹縫進入分光儀後，經曲面光柵進行分光與聚焦的動作。在光柵曲率半徑不變的情況下，光柵的繞射角度與焦點位置是光子能量的函數，分光儀進行能量掃描時須轉動光柵作角度的補償，以維持分光後光束之角度，同時移動出光狹縫位置，令分光儀之解析力與光通量達最佳條件。而由光柵的分光效率與光柵的光入射角度、刻線密度及刻線之幾何形相關，故在不同能區要選用不同的光柵，以使光束線的光通量在整個工作能區達到實驗所需。而在能量較低的區域使用偏向鏡組，使分光儀的入射光束與分光後光束夾角變小，這可提升分光儀的解析力。

在分光儀出光狹縫後為單色光，其解析力由光柵線刻密度與出／入光狹縫的狹縫大小所決定。此單色光利用圓環面形鏡，同時作水平及垂直方向的聚焦，把單色光匯聚到樣品上。

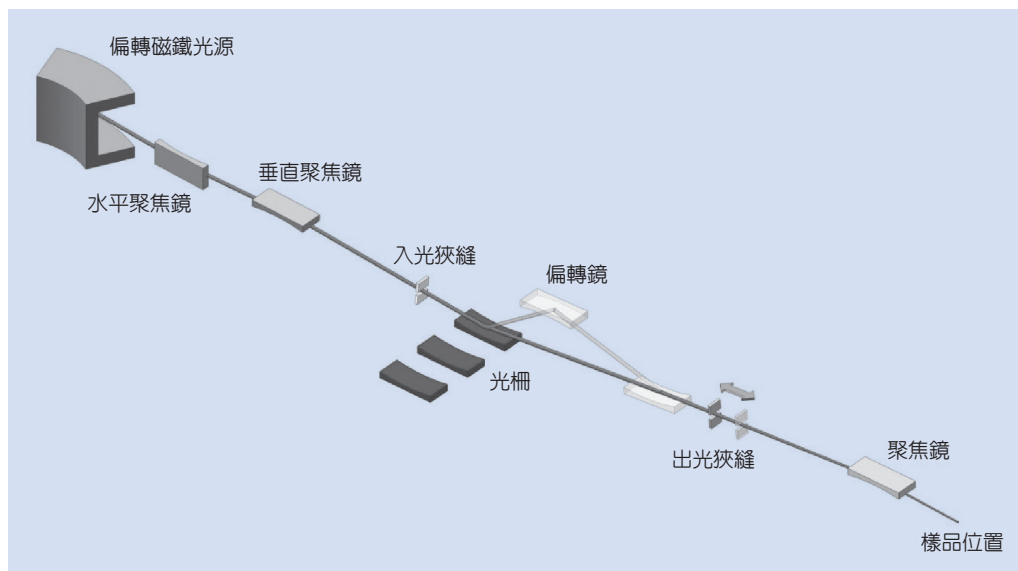


圖 5.  
BL11A 龍型光束線  
簡圖。

### 3. 硬 X 光光束線

一般能區大於 2000 eV 歸類為硬 X 光，此型光束線與軟 X 光光束線有兩項重大差別。(1) 由於硬 X 光對於物質有很強的穿透性，故可使用鈹 (Be) 作為光窗，分隔實驗站與光束線之真空，在大氣環境下操作。(2) 由於傳統光柵在 2000 eV 以上反射效率極差，無法作硬 X 光分光元件，故在硬 X 光區多使用晶體或多層膜繞射原理作為分光元件。同步輻射中心目前主要使用兩種型式 X 光分光儀：(1) 非對稱切割彎晶分光儀 (ACCM)，(2) 雙晶分光儀 (DCM)，現將其特性分述如下。

#### (1) 非對稱切割彎晶分光儀<sup>(10)</sup>

BL13A 蛋白質光束線是非對稱切割彎晶分光儀光束線，現以此為例子，介紹此型光束線之特

點。圖 6 是 BL13A 蛋白質光束線的光學布局。以 SW6 超導移頻磁鐵為光源，其臨界能量為 4.64 keV，輸出功率達 3 kW。高通量光源伴隨著高熱量傳遞於下游之光學鏡面，導致鏡面熱變形，進而降低光束線效能。為降低光學鏡子所受的熱功率，首先用鈹濾片濾去 2000 eV 以下的光，以減少其後各光學元件之熱載。在鈹濾片後為鈹窗，用以分離光束線的高真空與低真空區。光離開鈹窗後，利用垂直聚焦鏡作垂直聚焦，其成像點設計在樣品上。然後利用非對稱切割彎晶，進行分光及水平聚焦的工作，其水平聚焦點為樣品位置。由於不同光子能量在晶體上的繞射角度不同，故不同能量，其水平聚焦點的位置會改變。為達到最佳之成像條件，非對稱切割彎晶之曲率必須能改變，以符合固定像距之條件。同時樣品之位置亦須移動，以配合不同能

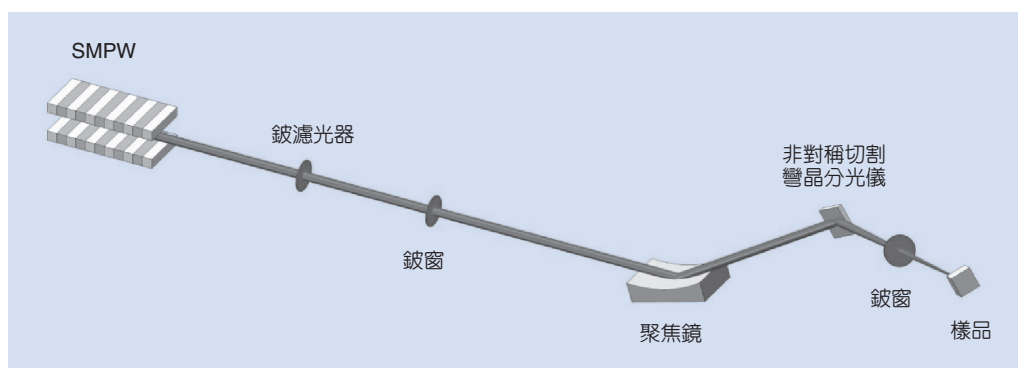


圖 6.  
BL13A 蛋白質光束  
線簡圖。

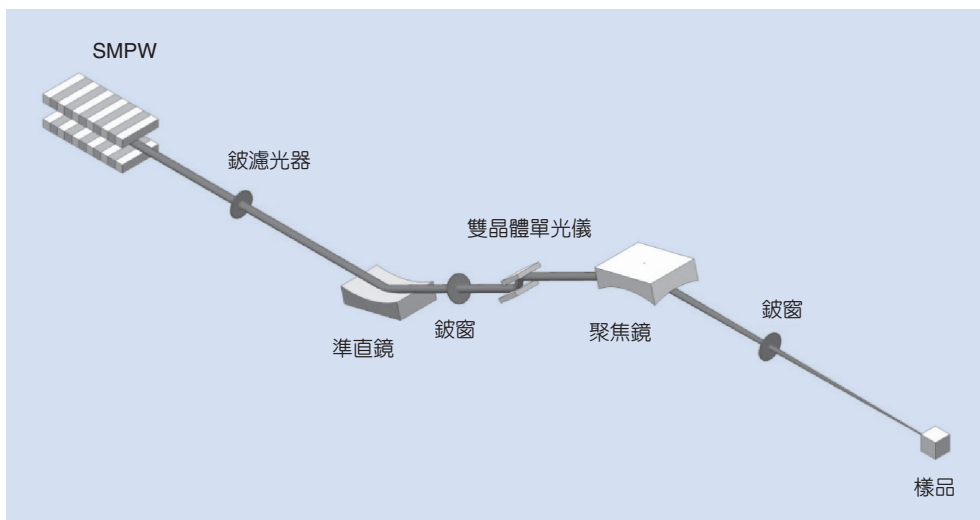


圖 7.  
BL13B 蛋白質光束線簡圖。

量時聚焦光點之移動。如圖所示，此類型光束線光學元件數目不多，結構簡單。但由於只使用一面分光晶體分光，作能量掃描時光點會移動，故不適用於光譜學之實驗。

## (2) 雙晶分光儀<sup>(11, 12)</sup>

BL13B 蛋白質光束線是雙晶分光儀光束線，現以此為例，介紹此型光束線之特點。圖 7 是 BL13B 蛋白質光束線的光學布局，此光束線與 BL13A 及 BL13C 共用 SW6 超導移頻磁鐵光源，各自引出所需之水平張角。與 BL13A 相同，首先用鈹濾片濾去 2000 eV 以下的光，以減少其後各光學元件之熱載。在鈹濾片後為準直鏡，準直鏡的目的是使同步輻射光束在垂直方向之發散光束變為接近平行光的光束。雙晶分光儀其能量解析力與入射光的垂直發散度相關，當入射光為平行光時，雙晶分光儀之解析力才可近似於該選用晶體之最高解析力。在分光儀與準直鏡間利用鈹窗分隔，使兩者間的真空能分隔開。主要原因乃由於準直鏡為第一面受光源衝擊之鏡子，須承受高熱載，為防止鏡面的光學薄膜在高通量及高能光子的照射下產生氧化及積碳，導致鏡子反射率降低，間接影響光束線性能，故鏡子必須維持在  $5 \times 10^{-9}$  Torr 的高真空環境下。而雙晶分光儀由於其結構複雜，一般真空度只能維持在  $1 \times 10^{-7}$  Torr，故須使用鈹窗分隔兩者間的真空，以保護上游端、甚至是儲存環內之真空條件。

雙晶分光儀是利用晶格的 Bragg 繞射原理分光，而雙晶體之分光項次，選擇為相反。這種架構令分光後之光束出射位置不會隨能量變化而改變。以一般常見之 Si (111) 晶體而言，能量解析力都可達到 7,000。如實驗需要光通量而捨能量解析力，可使用多層膜反射鏡分光體，此時能量解析力會下降至 1,000 以下，但光通量可增加兩個量級，此種設計目前已應用在 BL23A 小角度 X 光散射光束線。分光後之單色 X 光利用圓環面形鏡，同時作水平及垂直方向的聚焦，把單色光匯聚到樣品上，在鏡子與樣品之間利用鈹窗分隔實驗站與光束線間之真空。

## 六、結論與展望

目前 TLS 同步輻射光源，光束線的光譜範圍已涵蓋紅外光至硬 X 光 (33 keV) 波段，而實驗站的功能包括吸收光譜術、螢光光譜術、真空紫外光圓二色光譜術、紅外光顯微術、軟 X 光顯微術、硬 X 光顯微術、硬 X 光繞射、硬 X 光小角度散射等，上述實驗技術都可應用於生命科學上。而未來當 TPS 光源完成後，光通量可增加一個量級，亮度增加二個量級，光譜範圍將可擴至 100 keV。由於 TPS 光源特性遠優於 TLS，故提供了一個契機，把現有技術的測量極限推升，如 X 光顯微術的空間解析力推至 10 nm，硬 X 光繞射的樣品可小至 20  $\mu\text{m}$  等，從而擴展研究上的視野。

## 參考文獻

1. 陳慶曰, 科儀新知, **16** (2), 8 (1994).
  2. 李耀昌等, 物理雙月刊, **30** (1), 8 (2008).
  3. C. S. Hwang, B. Wang, R. Wahrer, H. H. Chen, C. H. Chang, F. Y. Lin, T. C. Fan, and C. T. Chen, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **12** (1), 686 (2002).
  4. C. S. Hwang, B. Wang, J. Y. Chen, R. Wahrer, C. H. Chang, T. C. Fan, F. Y. Lin, H. H. Chen, M. H. Huang, and C. T. Chen, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13** (2), 1209 (2003).
  5. C. H. Chang, C. S. Hwang, H. H. Chen, and F. Y. Lin, *IEEE Trans. Applied Supercond.*, **16** (2), 1862 (2006).
  6. 李耀昌, 陳慶曰, 科儀新知, **27** (3), 20 (2005).
  7. C. T. Chen, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect.*, **A256**, 595. (1987).
  8. C. T. Chen and F. Sette, *Rev. Sci. Instrum.*, **60**, 1616. (1989).
  9. Y. F. Song, J.-Y. Yuh, Y.-Y. Lee, S. C. Chung, L. R. Huang, K.-D. Tsuei, S. Y. Perng, T. F. Lin, H. S. Fung, C.-I. Ma, C. T. Chen, and K. L. Tsang, *Rev. Sci. Instrum.*, **77**, 085102 (2006).
  10. C. I. Ma, C. H. Chang, L. J. Huang, C. C. Chen, P. C. Tseng, H. S. Fung, S. C. Chung, S. Y. Perng, D. J. Wang, Y. C. Jean, K. L. Tsang, and C. T. Chen, *AIP*, **705**, 687 (2004).
  11. Y. F. Song, C. H. Chang, C. Y. Liu, L. J. Huang, S. H. Chang, J. M. Chuang, S. C. Chung, P. C. Tseng, J. F. Lee, K. L. Tsang, and K. S. Liang, *AIP*, **705**, 412 (2004).
  12. P. C. Tseng, C. H. Chang, H. S. Fung, C. I. Ma, L. J. Huang, Y. C. Jean, Y. F. Song, Y. S. Huang, K. L. Tsang, and C. T. Chen, *AIP*, **705**, 408 (2004).
- 

- 馮學深先生為國立中央大學物理博士，現為國家同步輻射研究中心助研究員。
- Hok-Sum Fung received his Ph.D. in physics from National Central University. He is currently an assistant research scientist at National Synchrotron Radiation Research Center.