

同步輻射光源之加速器磁格簡介

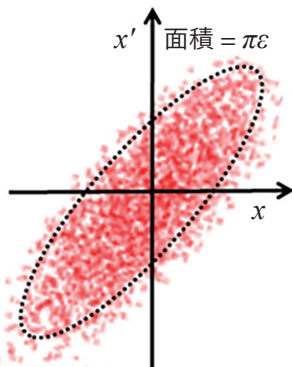
邱茂森 博士

國家同步輻射研究中心 射束動力小組

新竹科學園區為我國甚至是全世界高科技產業的重鎮之一，從空中俯瞰園區全景，會發現有棟外觀看似蘋果電腦位於美國加州庫帕提諾新總部的環形建物，它便是國家同步輻射研究中心所屬，周長為 518.4 公尺、電子能量為 3 GeV 的台灣光子源 (Taiwan Photon Source, TPS)；而旁邊與之相切較小的圓形建物，便是周長為 120 公尺、能量為 1.5 GeV 的台灣光源 (Taiwan Light Source, TLS)。同步輻射光源為一精密且複雜的大型科研設施，更是一國科技實力的表徵，TLS 和 TPS 同屬高品質的第三代同步輻射光源，其核心設施即為同步加速器 (Synchrotron)。

同步加速器成環形結構，而 TLS 和 TPS 皆有 2 個環。電子首先會由電子槍產生，經由線性加速器加速到一定能量後，再注入到第一個環，稱為增能環。其負責將電子加速至所需的能量，再經由偏踢磁鐵將達到預定能量的電子引出，並透過傳輸線將電子注入到第二個環，稱為儲存環。電子在超高真空的環形腔體內運行，環形腔體的周圍則放置一定數量的磁鐵，藉以引導電子在固定的軌道運行。因此如何配置磁鐵達到最佳的電子束特性，便關係到加速器磁格的設計。

環形加速器的磁格具週期性結構，一如構成品體物質的基本單元稱為晶格。第一代同步輻射光源主要是高能物理加速器的附屬品，到了第二代，同步輻射光源已發展成為專屬光源。其中 1980 年所誕生位於英國 Daresbury Lab. 的 Synchrotron Radiation Source (SRS, 1980 – 2008)，便是第一座第二代光源，其儲存環採用 FODO 磁格 (focusing



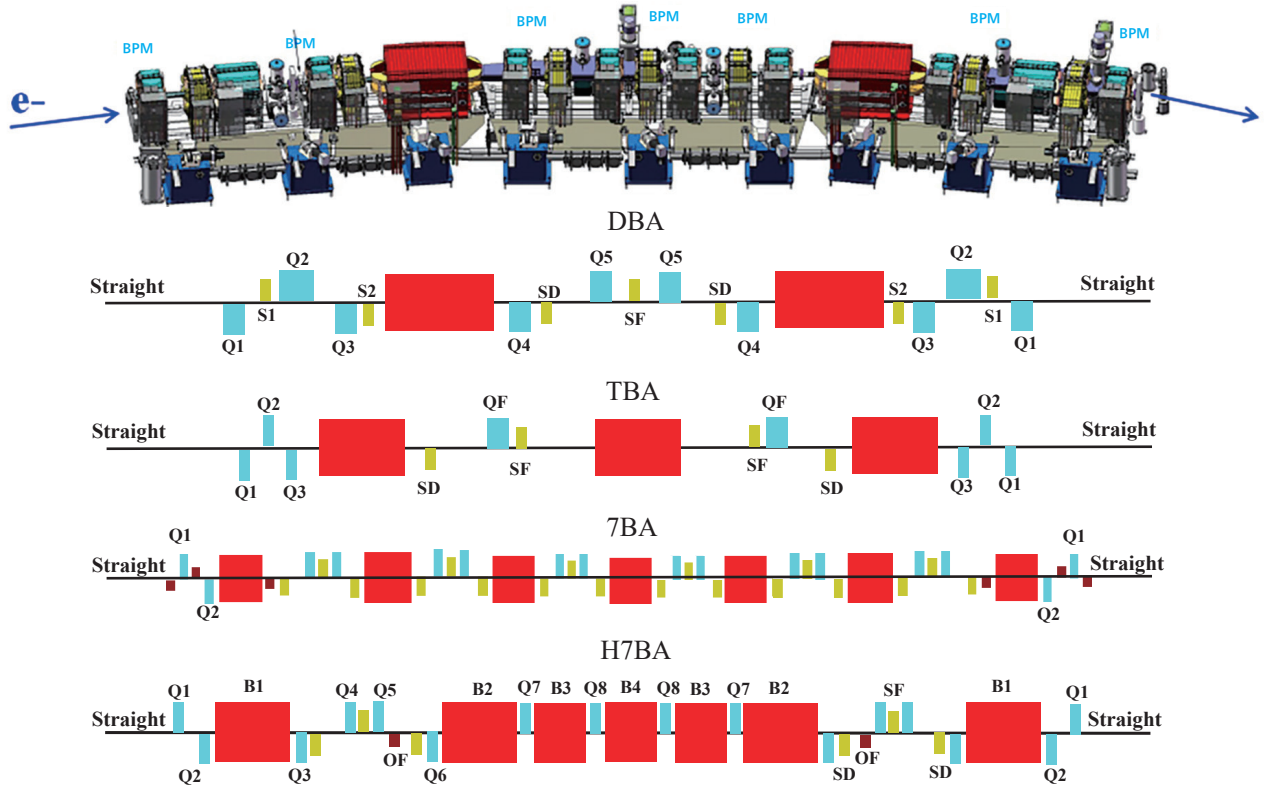
圖一 電子束團水平運動方向的相空間示意圖。紅色的點代表每顆電子的運動狀態 (x : 位移, x' : 動量)，虛線橢圓圍繞區域的面積大小代表電子束團的發射度。

defocusing) 設計，此時的同步輻射光主要由偏轉磁鐵所產生。而 1992 年問世的 European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)，儲存環則是採用 DBA 磁格 (double-bend achromat, 有 2 顆二極磁鐵)，其電子的發射度 (emittance) 更低，因此大幅提高同步輻射光的亮度，也標識進入第三代同步輻射光源的世代。自此，同步輻射光源如雨後春筍般陸續在世界各地開枝散葉，其中儲存環多數採用 DBA 磁格，例如：TPS (2016-)；少數採用 TBA 磁格 (triple-bend achromat, 有 3 顆二極磁鐵)，例如：TLS (1993-)。隨後啟用的 MAX-IV，其儲存環則採用 7BA 磁格 (seven-bend achromat, 有 7 顆二極磁鐵)，使得發射度可以再小一個數量級，從此開啟了第四代同步輻射光源的世代。ESRF 則是在 2020 年升級為 ESRF-EBS，其採用了 H7BA 磁格，使得發射度進而大幅降低達 30 倍。

由加速器磁格的發展歷史我們可以發現，人們追求的是如何降低電子束團的發射度，而發射度則為衡量同步加速器性能的重要指標之一。如圖一電子束團水平運動方向的相空間示意圖所示，其定義為電子束團在相空間的面積大小，發射度越小則光源的亮度跟同調性也越高。儲存環電子束團的發射度由能量跟偏轉角度所決定，當磁格單元中的二極磁鐵數目越多時，電子束團的發射度就越小。

文中所提到的 FODO, DBA, TBA, 7BA, H7BA 為構成環形加速器的磁格單元，而儲存環磁格設計的初期，即須先選定磁格單元種類並決定能量跟出光口數量。出光口數量會決定要使用多少磁格單元，因為電子繞一圈為 360 度，因此一旦磁格單元的數量確定了，二極磁鐵的偏轉角度也跟著就確定了。以 TPS 儲存環為例，則有 24 個 DBA 磁格單元，由於每個 DBA 磁格單元有兩顆二極磁鐵，由此可得出每顆二極磁鐵的偏轉角度為 $360/24/2 = 7.5$ 度。DBA 配置如圖二所示，其中兩顆二極磁鐵間有 4 顆四極磁鐵，左右兩邊各有 3 顆四極磁鐵，因此總共會有 10 顆四極磁鐵。另外，還有 7 顆六極磁鐵，以及 7 顆水平垂直電子軌道修正磁鐵。

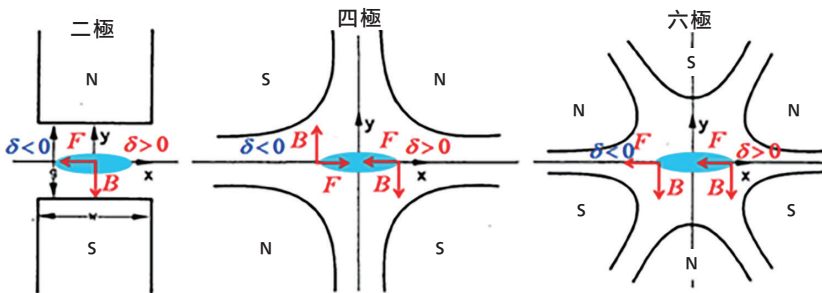
二極磁鐵的作用為讓電子沿著設計的環型軌道前進，同一電子束團內不同能量的電子，在通過二極磁鐵時會散開，如同白光通過三菱鏡會分光，因此須用四極磁鐵聚焦電子束團，其功能類似幾何光學中的透鏡。另外由於同一電子束團內不同能量的電子其聚焦程度會不同，因此須用六極磁鐵將



圖二 儲存環磁格單元，依序為 DBA、TBA、7BA、H7BA，其中二極磁鐵為紅色、四極磁鐵為水藍色、六極磁鐵為綠色、八極磁鐵為咖啡色。

聚焦程度不同的電子聚在一起，稱為色散修正。如圖三所示，這些不同形式的磁鐵各有各的功能，各司其職。

同步加速器的性能，例如：發射度、能散、射束生命期、軌道穩定性等，決定了同步輻射光源的品質，而加速器磁格設計的完善與否則決定了加速器的性能。由此可知，加速器磁格的設計工作便是其中的重中之重。目前無論是新建的或既有的同步輻射光源升級，皆開始採用發散度更低的 MBA (multi-bend achromat) 磁格，而本中心也已開始進行 TPS 儲存環升級計畫的研究，預計在提升光源品質且大幅節約能源的目標之下，能夠擠身為世界先進的第四代光源中的一員。



圖三 電子束團（藍色橢圓區域，由紙面射出）經過二極、四極、六極磁鐵受力示意圖。 δ 代表能散， $\delta < 0$ 代表能量稍小於設計能量的電子， $\delta > 0$ 代表能量稍大於設計能量的電子，N 跟 S 代表磁鐵的磁極，B 為磁場，F 為磁力。

用戶資訊

1. 自 2023-2 期起試行「學生用戶人才培育暨實習獎勵方案」

本中心為促進同步輻射相關領域之人才培育，自 2023-2 期起試行「學生用戶人才培育暨實習獎勵方案」，以鼓勵國內大專院校具正式學籍之在學學生用戶，使用「台灣光源」或「台灣光子源」光束線進行學術研究實驗。歡迎國內外單位計畫主持人之實驗計畫加入此試行方案，符合人培獎勵規定的學生用戶，將可申請獲得獎勵金與免費住宿 NSRRC 招待所。用戶入口網之人培獎勵相關服務已於 7 月上線，如有任何問題，請洽用戶行政與推廣室 (03-578-0281 分機 8205、8207、8215)。

