

粒子加速器的原理與應用

■ 劉毅志、簡源震

同步輻射光是 1947 年通用電子公司在 70 MeV 的電子同步加速器中觀察到的輻射現象。

1895 年倫琴 (Wilhelm Röntgen) 發現 X 光後，馬上就發展成醫學影像的重要研究工具，他也因為這個重大的發現而獲頒 1901 年的首屆諾貝爾物理學獎。同步輻射光是 1947 年通用電子公司在 70 MeV 的電子同步加速器中觀察到的輻射現象。同步輻射光不僅出現在同步加速器中，1953 年什克洛夫斯基 (I. Shklovsky) 在解釋蟹狀星雲發出的連續光譜特性時，認為它是一種接近光速的電子受強磁場影響做旋進運動而放出的電磁輻射光，因此也是一種同步輻射光。



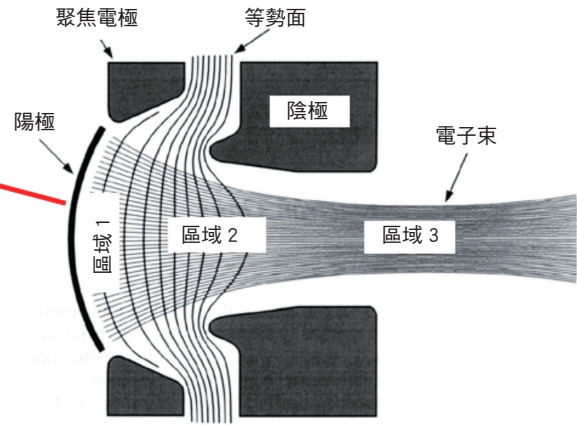
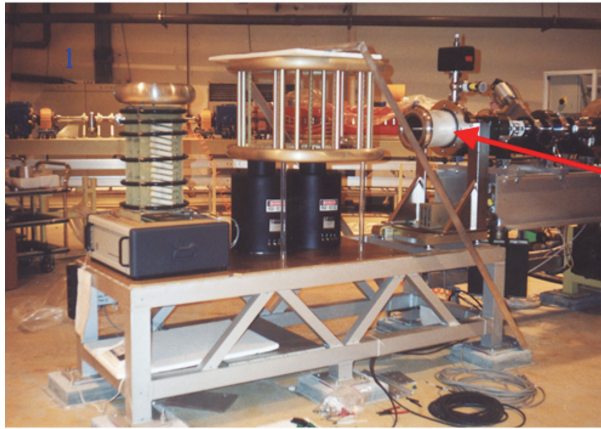
儲備式熱陰極，其表面積是 1 平方公分。

工作原理

在簡介粒子加速器的工作原理之前，須先對加速器各元件有初步的認識。

熱陰極電子槍—這是一種電子源，具備防止輝光放電保護環的直流電源供應器與電壓倍增電路模組、140 KV 電子槍觸發控制光纖模組，以及電子槍的白色絕緣陶磁外殼，上述組件還須有儲備式熱陰極的嵌入才算是完整的熱陰極電子槍。

熱陰極加熱到攝氏 900 ~ 1,000 度，使電子獲得的動能足以克服鋇鋁氧化化合物表面的功函數。熱陰極上閘極的電壓可以控制是否要讓電子從熱陰極表面發射出來和發射出電子束團的長度，電子槍的聚焦電極則具備特定的幾何結構，皮爾斯 (J.R. Pierce) 在 1940 年曾提出電子束形成直線流的各種方法。

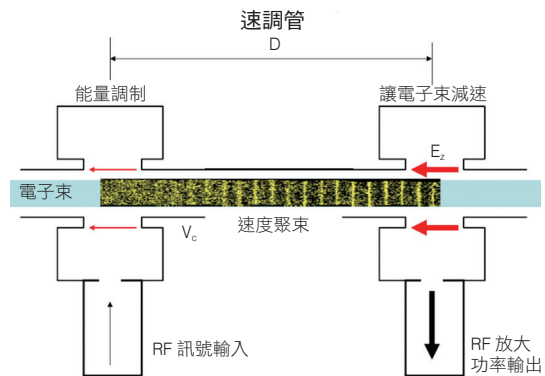


圖左半部是台灣光源建造期間安裝的電子槍與其高壓源，圖右半部是電子束由熱陰極發射出電子束團的截面圖。

聚焦磁鐵—電子束團中電子之間的庫倫斥力造成的空間電荷會導致電子束團截面積隨電子束的行進不斷變大，若沒有適當的規範，電子束團橫向截面積會很快就變得比真空管的截面積大，並因撞到真空管壁而損失能量，因此必須安排適當的聚焦磁鐵以聚焦。四極磁鐵或螺線管都是可用的元件，但各應用在不同的能量範圍，如螺線管對低能量電子束團的聚焦效果較好。

直線加速器與微波源—微波源負責提供直線加速器所需的能量，台灣的光源直線加速器工作頻率是 2.998 GHz，我們常以微波或無線電波（radio frequency, RF）稱之。這微波訊號被送進速調管（klystron）內放大後，再經由波導管送到直線加速器內。

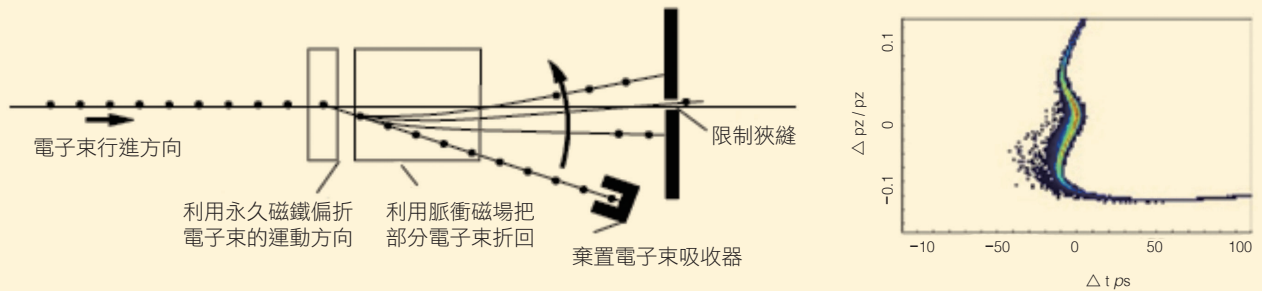
電子束經過共振腔時受到 RF 訊號的影響，能量分布會產生變化，這個過程稱為能量調制。當電子束行進一段距離後，能量調制的效果會逐漸顯現，可以用衝浪者為例來說明相位與加速電場間的關係。衝浪者總是趴在衝浪板上等大浪來襲，當大



速調管的工作原理示意圖，可以用來解釋利用雷射加速電子的第四代光源自由電子雷射（free electron laser）光源設施工作原理。

浪出現後，衝浪者騎在大浪上嘗試跟上波浪，浪的大小代表加速電場的振幅，波浪的不同位置表示因為相位的不同，帶電粒子看到的加速電場振幅也隨之改變。

因為速度不同，電子束會產生聚束效應，經過聚束之後的電子束團經過另一個共振腔，當微波的相位與電子束團相位共

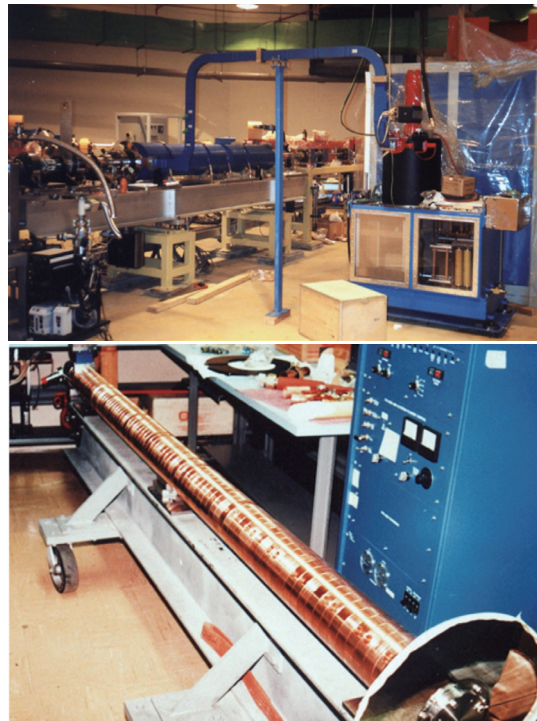


圖左半部說明斬波器的工作原理，圖右半部說明電子束經過斬波器與聚束器的作用後，電子束縱向動量在時間軸的分布。

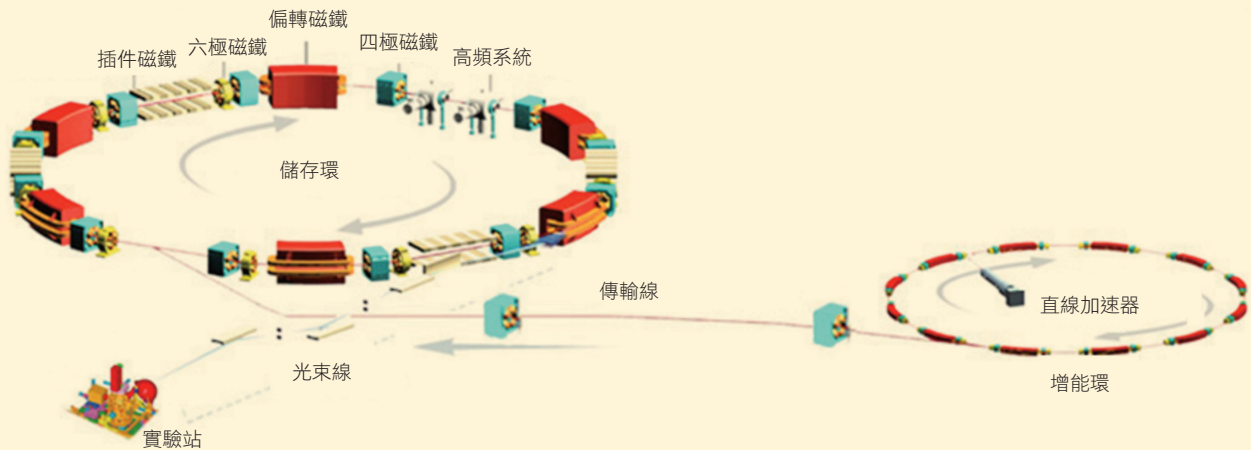
振時，電子束被減速而微波訊號被放大，速調管的能量轉換效率約為 50%，電子束損失的能量轉換成熱能，由冷卻水帶走。微波能量透過波導管及連接器以耦合方式進入盤荷波導管，電子束進入盤荷波導管後可能被 RF 電場加速或減速，利用斬波器與聚束器可以選出具適當相位的電子束團進入盤荷波導管中加速。

斬波器與聚束器—電子束經過加速之後，能量分布會因相位加速場的不同而變化，可用能散度來描述加速後能量分布的大小。假設電子束的能散度小於 1%，要達到這個目標可以從有效加速電場的範圍開始考慮，決定有效加速電場的範圍所占的角度。

以台灣光源為例，電子從 140 KeV 的電子槍開始加速至 0.619 倍光速時，會經過適當的橫向聚焦，並經過斬波器選取合適相位的電子束團與縱向聚焦後，進入 3 公尺長的直線加速器再加速至 50 MeV，這時電子的速度可達到 0.999949 倍光速。電子束團再經直線加速器與增能環之間的傳輸



圖的上半部是台灣光源建造期間安裝直線加速器與微波源的照片，在紅色的速調管包覆黑色的螺線圈磁鐵中，其高壓電源部分浸入絕緣油箱中。圖的下半部是直線加速器中的盤荷波導管，外部還沒有加上冷卻水管，它有 86 個共振腔。



台灣光源加速器的組成，包含電子源、直線加速器、增能環、傳輸線與儲存環，同步輻射光經光束線引至實驗站，用戶利用各種不同類型的實驗站規劃與進行實驗。

線四極磁鐵的適當聚焦，並且讓電子束團進入增能環的入射條件，以符合增能環的磁格設定所規範的電子束可運行範圍，若兩者差異愈小，電子束在增能環加速過程中的傳輸效率就愈高。

增能環的高頻共振腔的電場會隨著間隙電壓的增加而變大，因此電子束的加速能量隨之增大，為了保持電子束繞增能環的運行軌道不隨之改變，二極磁鐵磁場必須隨著電子能量的增加而等比例增強。同樣地，四極磁鐵的電場也須隨電子能量的增加而增強，50 MeV 的電子在 208,333 圈通過高頻共振腔的加速後能量會增加到 1.5 GeV，其後電子束被引出到傳輸線，再經傳輸線注入儲存環中。

儲存環內的儲存電子束除了注入時受到偏踢磁鐵與隔板磁鐵脈衝磁場的擾動外，儲存電子束也會做貝他創振盪 (betatron oscillation)，而且注入電子束因為入射角度與位置的差異，貝他創振盪的幅度會更大。電子束的振幅在 1 毫秒之後就會因為輻射阻尼作用而衰減至穩定的運行軌道，

儲存電子束便沿著這穩定的軌道放出同步輻射光，並且在經過高頻共振腔時會補充繞儲存環運行一圈因為同步輻射所損失的能量。

雖然儲存電子束的能量已獲得補充，但不代表儲存電子束的生命期會很長，因為儲存電子束的生命期和儲存電流大小有關。電子的損失率與電子總數成正比，與儲存環的真空度也有關，電子束可能會因與殘存氣體分子碰撞而損失能量，一旦其能量超出穩定區就難逃丟失的結果。

另一個影響電子束生命期的因素是束團內電子的彈性散射。同一束團內的電子都以接近光速繞儲存環運動，但各電子的橫向動量並不相同，因此電子間可能發生彈性碰撞，重新分配彼此的動量。當電子的動量超出縱向動量接受度時，電子也會逸出穩定區而丟失。

目前台灣光源的儲存環以 360 毫安培恆定電流運轉模式開放給用戶使用，採每分鐘注射方式補充儲存環損失的電子，這稱為恆定電流運轉模式，有別於每 8 小時

同步輻射光的研究人員利用了數種同步輻射的技術，
臨場觀察電池充放電過程的化學變化，以改善電池效能。

或 12 小時才重新注射的電流衰減模式。恆定電流運轉模式可消除儲存環位置偵測器、真空腔、光束線光學元件等所受電流效應的影響，大幅提高光源的品質。

在 2001 年之後，恆定電流運轉模式逐漸成為第三代同步輻射光源運轉模式的主流，而台灣光源早在 2005 年 10 月就成為世界上第三個採用恆定電流運轉模式的光源。

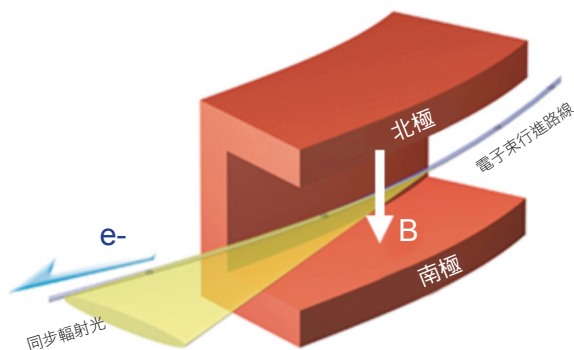
粒子加速器的應用

同步輻射光的應用發展可分成幾個階段。

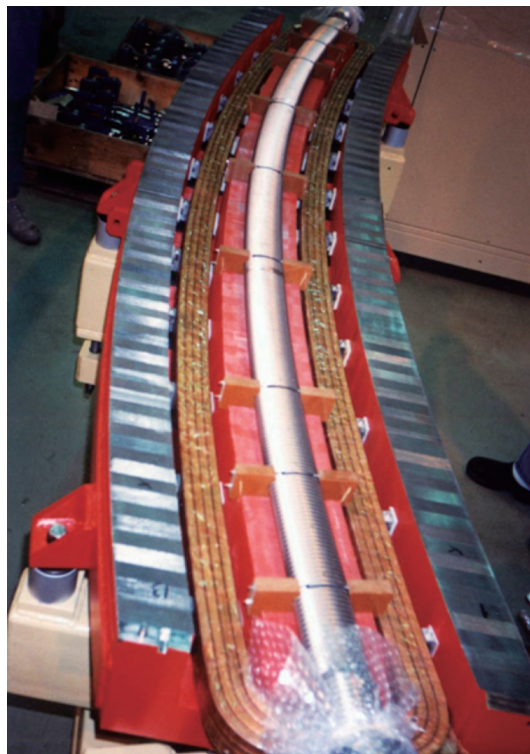
第一個階段是附屬於環型正負電子對撞機的應用，稱為第一代的同步輻射光源。因為同步輻射光的產生代表正負電子能量的損失，但在高能物理的研究中卻不希望粒子碰撞時能量有不必要的損失，環型正負電子對撞機中的同步輻射光正是促使正負電子對撞機由環型轉向直線加速器發展的主要原因。而因為質子的質量是電子的 1,836 倍，因此在強子對撞機中，質子產生的同步輻射光所造成的能量損失可以忽略不計。

在第二個階段，隨著同步輻射光的特性逐漸為人們了解，先進國家開始建造以同步輻射光應用為主的加速器—第二代的同步輻射光源。

當同步輻射光的應用逐漸朝向對光子能量愈高與光通量愈強的需求時，同步輻射光的技術也發展成可涵蓋從紅外線、紫外線、軟 X 光到硬 X 光的全電磁波譜。而由二極轉彎磁鐵產生的同步輻射光的能量範圍通常在紅外光、紫外光與軟 X 光之間，



二極轉彎磁鐵產生同步輻射光的張角示意圖

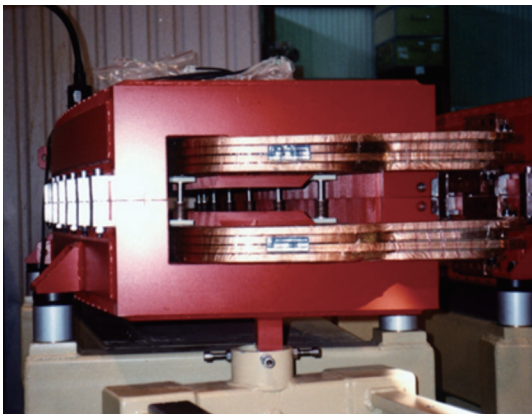


二極轉彎磁鐵的剖面圖並放置真空腔管，本圖是增能環的二極轉彎磁鐵，真空腔管僅做為規範電子束的運動範圍，它的設計不需考慮同步輻射光引出口與同步輻射光造成的熱效應。

電磁波譜



電磁波譜與同步輻射光譜涵蓋範圍



二極轉彎磁鐵

因此增強光子能量與光通量的增頻磁鐵與聚頻磁鐵就陸續發明出來。第三代光源就是把增頻磁鐵、聚頻磁鐵等插入件磁鐵放在電子同步加速器中，以產生更強與更亮的同步輻射光。

本文最後就以利用 X 光對電池效能與壽命的研究做為結尾。近幾年電動車因可

以有效減輕空氣污染的問題，其發展倍受重視。但是電動車推廣的最大阻力，是來自電池的效能與壽命。

同步輻射光的研究人員利用了數種同步輻射的技術，臨場 (in-situ) 觀察電池充放電過程中的化學變化，以改善電池效能。例如利用 X 光顯微鏡觀察電池充放電時的形貌變化，利用 X 光繞射研究電池充放電時晶體的構造變化，再利用延伸 X 光吸收精細結構的方法觀察電池充放電時化學結構的變化演進，種種方式的探討就是為了找出延長電池壽命與提高電池效能的方法。

劉毅志、簡源震
國家同步輻射研究中心