

同步輻射簡介

蘇賢錫

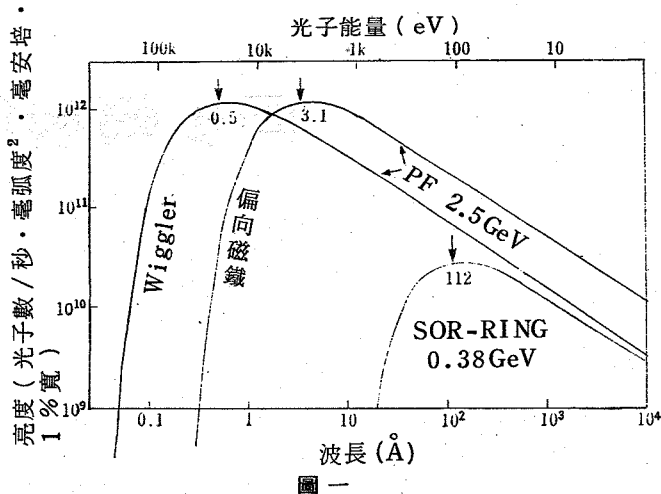
國立臺灣師範大學物理系

一、電子加速器與同步輻射

同步輻射 (Synchrotron Radiation) 是幾乎以光速運動的高能電子在磁場中被偏轉時所發出來的光。這種發光現象是古典電磁學的基本問題之一，其理論在本世紀初期已經開發，其性質為衆所週知。將這問題當近代物理學的課題而認真研討的是，在第二次世界大戰後，為基本粒子實驗而開始計畫建造巨大電子加速器（尤其是電子同步加速器）時。設電子的能量為 E （單位為 $m_0 c^2 = 0.51 \text{ Mev}$ ，即 $E = \gamma m_0 c^2$ ），則因同步輻射的發生而電子損失的能量與 E^4 成正比，因此，欲加速電子以達高能量狀態時，輸入的電能最後幾乎全變成光，電子的速度達到某種數值後，就不划算。欲避免這種輻射損失的困難，有兩種方法。其中之一是，不加速電子而加速質子。另一種方法是，在直線或曲率半徑很大的軌道上加速電子。質子比電子重得多，加速緩慢，所以不致發光，而直線軌道上的加速與圓形軌道相較，其能量損失只有 $\frac{1}{E^2}$ 。因此，戰後高能加速器的主流變成質子同步加速器與直線或大型圓形軌道的電子加速器。

然而，在加速器的設計過程中所認識的同步輻射之性質，1950 年代開始普受世界各國光譜學家的注意。第一，這種輻射是強烈白色光，其光譜包括無線電波、可見光、紫外光以及 X 射線，是沒有間斷的連續光譜。無線電波成為最長波長（通常是數兆赫），是因為使用無線電波當加速電子的電力源之緣故，而最短波長則由電子的能量來決定。例如，圖 1 表示日本運轉中的代表性同步輻射源加速器——筑波的高能物理研究所 (KEK) 的 Photon Factory (PF) 光源 (2.5 GeV) 與田無市的東京大學物性學研究所 SOR-RING (0.38 GeV) 的光譜。圖中，縱橫軸均以對數刻度，橫軸代表光子能量與波長，縱軸代表亮度，亦即在軌道運行的每 1 毫安培電子束，以軌道的切線為中心

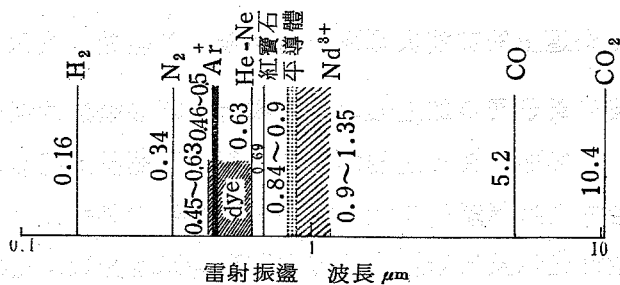
，每秒在 1 (毫弧度) 2 立體角，在 1% 的帶寬 (例如 $\lambda = 100\text{\AA}$ 時， $\Delta\lambda = 1\text{\AA}$) 範圍內所射出的光子數。用這種單位表示時，光譜在短波長方面急遽下降，但在長波長方面緩慢下降，箭頭所示特性波長，PF 在 $3\text{\AA}$ 處，SOR-RING 在大約 $112\text{\AA}$ 處。圖中 λ_c 在峯值附近偏向短波長的一側，與軌道半徑 ρ 成正比，而與 E^3 成反比。實用的可能最短波長，其標準為 $\lambda_c/5$ ，在最佳條件之下，可以達到 $\lambda_c/10$ 。



圖一

二、雷射與同步輻射

談到強烈的光，讀者大概立刻想到近代科學的偉大成果之一——雷射。雷射常常成為同步輻射的比較對象，但在強度方面，同步輻射完全比不上雷射。然而，目前當實用光源的雷射，其應用範圍並不廣大。圖 2 表示主要實用雷射所應用的波長範圍。雷射主要從可見光、紅外光與紫外光的範圍來運用，而亮度特別強烈的雷射，其應用僅限制在某些特定的波長。染料雷射是波長可調的雷射 (tunable laser) 但其範圍不及 1 倍頻程 (octave)，利用非線性光學現象，把雷射的波長領域從紫外光延長到軟 X 射線，這種研究非常蓬勃，卻尚未成為實用階段。一般而言，雷射的振盪，波長愈短愈難，其理由之一是自發射 (spontaneous emission) 與受激發射 (stimulated emission) 的機率比與 λ^2 成反比，



圖二

另外一個理由是，在短波長領域，一些固體不反射光，故將光線關閉起來，使光線在雷射媒質中反覆通過的共振器，其製作不容易。這些都是原理上的困難，很不容易克服。因此，在實用雷射能夠應用的可見光、紅外光與紫外光的波長範圍內，利用同步輻射，

並無益處，但在波長比這些光為短的領域，亦即所謂真空紫外光的廣大領域與 X 射線的領域，目前同步輻射是強度最大的光源。

三、同步輻射當人工光源

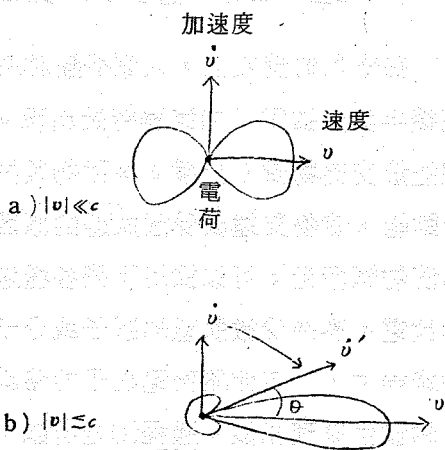
在悠久的歷史上，人類不斷利用各種方法來製造人工光源。然而，同步輻射在本世紀後半葉建造電子加速器時始出現。在宇宙的空間中，光到處與物質發生交互作用，光把能量交給物質（激發），而物質把因受激發而得到的能量轉變成為光、熱或物質碎片的動能。使物質達成受激狀態的原因不只是光，加熱與撞擊亦可發生激發現象。因此，為使物體發光，可以採用下列各種過程：(1)在導線上通電，使成高溫狀態；(2)利用氣體的放電，製造受激狀態的原子或分子；(3)以電子或離子撞擊固體，使原子的電子游離；(3)的過程中，一定伴隨帶電粒子的路線在核場被彎曲的制動輻射(4)，而這過程(4)與同步輻射的發生原理相似。過程(1)是所謂「熱輻射」，溫度是決定光譜的唯一參數，與物質的「特性」幾乎沒有關係，但是，假如限定使用「固體」光源，則波長比紫外光為短者不能使用。傳統上一直使用過程(2)、(3)、(4)當紫外線與 X 射線的光源，但是過程(4)相當微弱，而過程(2)與(3)受到物質「特性」的限制，只能在不連續的波長（帶）發光。在無線電波領域中，現代的電子技術能夠控制電子來產生任何波長（或頻率）的無線電波，而同步輻射可以說是，把被物質所束縛的電子自由化後加以控制，以便產生任何短波長的光之高能電子技術。

四、同步輻射的特性

同步輻射為什麼是連續光譜？為什麼強烈？為什麼發光？要直接回答這些看似簡單的問題非常困難，只能勉強說明如下。

靜止中的電荷，在其周圍建立各向同性的電場，遵守庫侖定律。這電場在觀測者的位置建立縱向電場，其方向沿著連結電荷與觀測者的直線（距離 = R ）。設這電荷突然受到某力而開始運動，則電荷拖動自己周圍的庫侖場。電場的空間分布改變時，由電磁感應而產生磁場，又因場的變化之傳遞速度等於光速 C ，故觀測者在 $t = R / C$ 的時間後始知這變化，這就是電磁波或光，可以觀測電場與磁場的橫向振動。電荷被加速的方向朝觀測者時，電場的變化只發生在縱向，不伴隨磁場，故這方向不產生電磁波。速度

與加速正交時，例如圓形加速器中的帶電粒子在磁場中受到與運動方向成垂直的力時，電磁波以加速度向量軸為中心，向周圍發出，如圖 3a 所示，然而，同步輻射朝向速度向量周圍的狹窄圓錐中放射，如圖 3b 所示，失去圖 3a 的軸對稱性。這是所謂相對論效應，電子幾乎以光速運動時，若在實驗室坐標系觀察隨著這電子旋轉的電磁場，則加速向量 $\dot{v}$ 向前伸出而變成 $\dot{v}'$ ，光能多半集中在以半角 θ 所決定的小圓錐中。 θ 的大小與電子的能量 γ 成反比，能量愈高，光的定向性愈強。這是同步輻射強度很大的原因之一。同步輻射強度很大的另外一個原因是，電子在圓形軌道上運行，受到向心加速度而發光，假如增加電子的數目，強度就更為增加。但是，實際上儲存在加速器中的電子數，受到各種限制，不能無限多。



圖三

電子在速度方向以強大定向性輻射，同步輻射的這種特性與同步輻射的其他性質也有密切關係。(由於能夠看見同步輻射的角度只有 $1/\gamma$ ，電子的週期 T 中，能夠見光的時帶 Δt ，就實驗室坐標系的觀測者而言， $\Delta t = T/2\gamma^3$ 。PF 的 $T = 0.6$ 微秒， γ 大約 5000，故 Δt 為 10^{-15} 秒以內。)實際上，電子由 312 束聚成在軌道上運行，一束電子通過某點需時大約 10^{-10} 秒，而每隔 2×10^{-9} 秒通過一次，故每 2×10^{-9} 秒發出 10^{-10} 秒寬的脈衝光。由於各個電子的發光脈衝的自然寬度 Δt 比實際電子束發出的脈衝光寬度小得多，這種脈衝性得以準確維持。

同步輻射是連續光譜，這種性質也是因上述脈衝性（亦即相對論效應）而來。一般而言，脈衝波形依其頻率成分而分析時，經常包含高次諧波，脈衝寬度時間愈短，高次成分愈多。由於脈衝寬度 Δt 與 γ^3 成反比， γ 愈大，同步輻射的光子能量 $h\nu$ 之分布愈向高能方面伸出（參閱圖 1）。因為電子形成電子束，所以這脈衝的基本頻率不是一個電子的軌道頻率，而是高頻加速的頻率（PF 為 500 MHz）。

既然是某基本頻率的高次諧波之集合，則同步輻射的光譜會不會是分散的數值而不是完全的連續帶？或許有人這樣懷疑。然而，事實上不是如此，至少在光的領域中，光譜是完全的連續帶。電子束中的電子能量在許可的某寬度內搖擺，而通常這寬度夠大，能把分散的高次諧波成分之間完全填補。

由上述可知，同步輻射有下列特長：

1. 自無線電波到 X 射線的連續光譜
2. 強光
3. 定向性良好
4. 脈衝發光

此外，

5. 在軌道面內擁有電向量的線偏振光

在不容易產生或探測偏振光的紫外光與 X 射線領域，這種特性非常重要。就偏振性而言，同步輻射是線偏振光，而可以利用這性質來做實驗。

以上這些特長，理論物理學家早已預言，但是實際上怎樣？關於同步輻射的光譜、絕對強度、角度分布、偏振光性等，1950 年代開始由世界各國做實驗來調查，而大致上可以說已經證實。其中，絕對強度與偏振光的測定，在技術上相當困難，而且加速器有各自的特性，理論值與實驗值的比較並不簡單，二者的一致，在最理想的情形下也不過 2~3% 而已。雖然如此，各國積極進行實驗工作，其理由是同步輻射的強度在紫外光與 X 射線的領域中可能是最標準的。理論上，同步輻射的性質可以某些參量來預測，而且獲得證實，這就表示同步輻射已經滿足標準的條件。測光用的機器，例如分光計、受光計、光源等，必須校正其分光特性，而整個工業計測，宇宙射線計測，核融合爐的電離體診斷等，均須確立這種標準。

五、追求新光源

爲了基本粒子的實驗而建造的電子加速器，把它當光源來利用，這種狀況在 1950~60 年代的世界各國極其普遍。然而，到了 60 年代後半期，同步輻射的價值受到認定，專門建造加速器來當光源使用的想法出現，而現在 80 年代，這種想法已經變成常識。日本爲了確立這種概念而建造的第一部光源用加速器是，現在東京大學物性學研究所的主要設備——0.4 GeV 的電子儲存型加速器「SOR—RING」。

基本粒子實驗用加速器與光源用加速器的目的不同，所以設計原理與運轉方法當然也不同，在光源的觀點上，必須要求安定性與高亮度。在安定性方面，與早期的主要電子加速器「電子同步加速器」相較，60 年代以後開發的儲存型加速器把一定能量的電子儲存在軌道，所以安定得很多。然而，除了儲存的電流壽命較長以外，軌道也必須安定。換言之，軌道的位置與方向必須保持不變。在高亮度方面，不但電流要大，電子束

的截面也要小，軌道的發散角也要小才好。另一方面，爲了把電子束縛在軌道，需要恢復力，電子軌道因而受到振動。同時，電子束與真空容器壁或高頻無線電波以及殘留氣體分子或離子發生交互作用，故有諸多不安定的要因。一般而言，電流密度愈大，這種要因愈多。因此，安定性與高亮度是互相矛盾的要求，其最佳化的問題尚未解決。如此，光源用電子加速器可以說是今後的課題。

此外，由利用者的立場來想同步輻射的理想特性時，繼承高能物理學的傳統圓形加速器，並不是最好的形狀。

同步輻射是範圍廣泛的連續光譜，可以選擇任何波長。雖然如此，實際上不是一次可以使用所有的波長，而是利用分光裝置由其中只取出一部分波長領域來使用。因此，不用的波長領域的光，必需隔開，否則變成分光計的干涉光或高次繞射光來搗亂，有時甚至使光學系統受到損傷。於是，不去觀測沿著圓形軌道切線方向出來的連續光譜，而使電子沿著直線軌道蛇行好幾次，在前方觀測其光的所謂 undulator，最近已開發到實用階段，以代替傳統的圓形軌道同步輻射儀，是普受注目的新光源。電子蛇行 n 次後，光的強度不是變成 n 倍，而是由於干涉效應，理論上變成 n^2 倍，光譜的帶寬 $\Delta\omega/\omega$ 變成 $1/n$ 。換言之，可以得到帶域狹窄而且強度較大的光，只要控制使電子在軌道上蛇行所需的磁場之強度，其波長容易予以改變。因爲同步輻射的方便性本質不在「帶域廣大」，而在波長可調性 (tunability)，所以這種 undulator (干涉性同步輻射) 的特性，其實用價值可以說相當大。干涉性同步輻射技術是下一代同步輻射的主題，今後將有急速發展，同步輻射科學的研究確實朝向這方面迅速進行。把干涉性同步輻射關閉在共振器中，令它與電子發生交互作用來獲得雷射振盪的所謂自由電子雷射，其開發也正在世界各國進行中，而最近法國已經領先其他各國，順利完成雷射振盪。

另一方面，在電子軌道的一部分插入超導電磁鐵來造成局部急彎軌道，僅在這局部產生波長特別短的強光之裝置 (wiggler)，亦在 PF 及世界各國試驗，其中一部分已達實用階段。由圖 1 可知，PF 使用 X 射線光源時，6 忒斯拉 (Tesla) 的三極超導電 wiggler 的同步輻射特性波長爲 $0.5\text{\AA}$ ，屬於硬 X 射線領域，而將來把這種裝置插入小型同步輻射源來擴大短波長的領域時，光源的建造成本將顯著降低。

除了具有短波長光源的用途以外，wiggler 的大量輻射損失亦能壓抑電子束的振動，能使光源安定，而且能夠提高亮度，可以說是重要的軌道組元，今後將逐漸採用在加速器中。介在多週期 undulator 與三極 (一週期) wiggler 之間的數週期 wiggler，把它插入軌道所做的實驗，已在美國史丹佛大學完成。

六、為何使用同步輻射？

人工光源「同步輻射」的出現，將來可能使近代科學與社會生活發生震撼。雖然其影響還沒有像雷射那樣涉及科技的每一部門，但是，不久的將來，其效果必然以各種形態出現。

光與物質的交互作用是自然界最普遍而且最基本的過程，在宇宙的形成或地球上生命的發生與演化中也扮演主角，同時，在人類認識自然的過程中，也是最重要的物理現象。二十世紀前半葉，人類確認原子構造，明瞭支配原子構造定律——量子力學，其線索是原子的發光與光電效應的觀測。二十世紀後半葉，半導體裝置使電子技術達成革命性進步，但是，支持半導體裝置的發展，並且產生雷射這種超自然光的，都是依靠人類對光與物質的交互作用之進一步認識。現代電腦與光學通訊技術的進步，各種自動化技術的革新，所謂資訊化社會的急速進展，本質上都是近代物理學的產物。

然而，現代科學對社會生活的這種衝擊只是在起步階段，可能僅僅是表面上的短期間影響，真正深遠的影響或許發生在數十年後，因為光與物質發生交互作用最劇烈的領域，亦即光與原子內的束縛電子交換能量的主要範圍是由紫外光到X射線的十數倍頻程領域，換言之，是同步輻射的領域，究竟在此處發生何事，我們在同步輻射的協助之下，現在才開始理解它。而且，依靠同步輻射的無限可調諧性與極大強度，我們開始迅速理解物質因光而發生的各種過程，又以即時作業方式，利用光來研究物質的構造與其變化，同時，同步輻射的引進將使材料的檢查與加工技術突飛猛進。尤其是利用同步輻射的半導體精密加工技術，1974年IBM的研究人員在西德漢堡首次試驗以來，已經把同步輻射技術應用在下一代電腦的運算與記憶元件之生產工程。現在，同步輻射已經從研究領域踏出一步，成為工業技術。本來PF是日本文部省直屬的國立大學共同利用機構「高能物理學研究所」的設備，雖然如此，PF也酌收費用開放給一般民間利用，就是反映這種觀念的轉變。

七、世界各國的同步輻射研究

以上所述同步輻射的研究，日本以PF，東京大學物性學研究所SOR設備，以及電氣綜合研究所為中心，積極展開。當然，這種動向是世界性的，歐美各國與蘇俄，現在運轉中的機具超過20具，並且認真研討以undulator，wiggler，自由電子雷射為主件

的下一代同步輻射源之建造計畫。其中最值得注目的是美國勞倫斯。伯克來研究所的國立新材料研究中心（NCAM）與歐洲原子核共同研究所（CERN）的計畫，可能80年代後半期即可實現。

此外，由於同步輻射科學對現代科技的衝擊是極其多方面而且綜合性的，許多開發中國家把它當全國性計畫來促進國家近代與技術高度化。

（取材自日文「數理科學」No. 243, SEPTEMBER 1983）

古中國科學管窺——候風地動儀（下）

編輯室

民國二十五年——一九三六；民國三十二年——一九四三年，先後有中國學者王振鐸氏及西方學者米倫氏，日本學者荻原、今村兩氏於「燕京學報」、「中國文化談叢」專題發表研究張衡候風地動儀的「復原」考案及其模型。

王振鐸氏所考案復原的模型：為以擺錘為中心連接一組屈柄，在擺錘感受震動而擺動時牽動屈柄，使屈柄一端所接之龍首下腭張開墜下銅丸，落於下方仰承的蛙口內，以測知地震的方位。但考「張衡傳」內所述，僅應對向地震方位之一龍首吐落銅丸，而王氏復原之模型，擺錘將同時牽動正反方位之另一屈柄，致相對反向的兩龍首均將各吐一丸！俟經再度改進於屈柄一端各裝一小鉤，使之一度牽張龍口墜下銅丸後即自行停止運動而不致牽動反向的屈柄。

日本學者所考案的模型，則較王氏一案為單純，其設計係用一「重墜」懸吊擺錘於蓋上，蓋上針對八方位各刻有溝槽，而擺端直對龍口銅丸處各嵌一細棒，在擺錘感受地震而擺動時推動接嵌細棒頂出龍口銅丸，同時蓋上「重墜」亦隨之沒入蓋上溝槽而制使擺錘靜止。

上述兩種復原考案，均頗引起當時研究地震學者之重視，惟其精密度與感應度，是否一如原儀，殊令人懷疑！考「張衡傳」所敘隴西地震，原儀得以於洛陽正確測出，其敏感程度殊高，而將不類今日復原內部構造之單純可比擬！

嗣後復經王氏繼續研求於一九五二年採前述兩種設計之長，另造模型，據云已獲致相當發展，惟其文獻內容不詳殊令人惋惜。