

同步辐射原理

1 同步辐射简介

同步加速器基本上是一个回旋加速器，其中相对论带电粒子在外加磁场下被迫遵循弯曲的轨迹，并且由于这种运动，它们发出电磁辐射（红外线到硬 X 射线），称为同步加速器辐射。

同步加速器由五个主要部件组成：电子源、增强环、存储环、RF（射频）电源和光束线。一般而言，电子是由作为源的热灯丝（电子枪）的热离子发射产生的。然后电子被微型加速器或直线加速器 (LINAC) 加速到数百 MeV 的能量。

然后将电子注入圆形加速器以增强其能量以接近主存储环电子能量，称为增强环。当存储环电流下降到 $1-1/e \sim 70\%$ 时，电子从增强环周期性地转移到存储环以维持束流。

存储环是同步加速器的主要部件，其中电子在磁场的作用下沿封闭路径行进。主要的磁性元件是一组磁铁：弯铁（偶极）、四级铁和六级铁。弯曲的磁铁迫使电子遵循封闭路径，光束由四级铁通过补偿电子库仑排斥力而聚焦。六级铁用作四级铁控制的色差校正器。

在存储环中，电子以 GeV 数量级的相对论 ($99.999\%c$) 速度和动能运动。现代环形结构由具有弯铁的周期性拱形部分和由插入装置组成的直线部分组成，用于产生强烈的同步辐射，被称为“第三代存储环”，如图 1 所示。

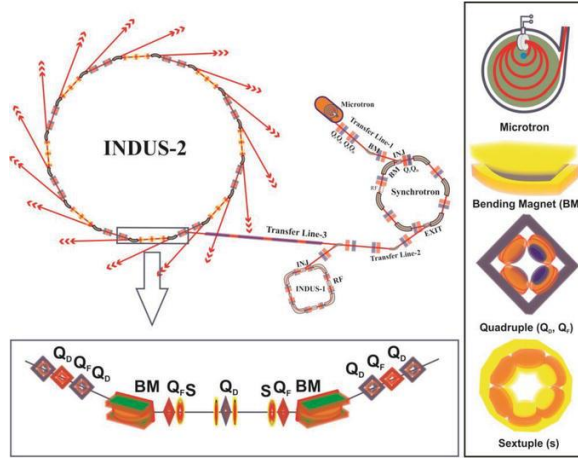


图 1 RRCAT--印度第三代同步加速器光源的详细外部结构。电子经由电子回旋加速器产生并传递到同步加速器用于使加速 e-beam。高能 e-beam 已经经由传输线从 INDUS-1 被引入到 INDUS-2。由几个周期性重复的磁性元件来保持电子按圆形轨道运动来产生光束（聚焦四级铁（QF），失焦四级铁（QD），六级铁（S），和弯铁（BM））。

当电子沿圆形路径加速时，它们以可见光、紫外线和 X 射线光谱区域的频率辐射并失去能量。每当电子通过微波腔（RF）时，获得合适的能量，以防止电子从存储环的内壁散射。

光束线沿着设计的插入件工作，并与弯铁和存储环相切。光束线专为特定的专用应用而设计，即 X 射线成像（断层扫描）、X 射线吸收光谱（X 射线吸收精细结构（XAFS）、近边缘和扩展边缘光谱（XANES、EXAFS））、X 射线散射（小角和广角 X 射线散射）和 X 射线荧光/发射光谱（XRF）。

2 同步辐射特性

同步辐射偏度振高，强度高，并且具有从红外线到硬 X 射线区域的宽光谱范围。这些特性是可调的，可以通过经典电动力学定律来理解。当带电粒子（电子）在能量远小于其基态能量 ($mc^2 = 0.51 \text{ MeV}$) 的圆形路径中运动时，它表现为各向同性辐射的弱偶极子。在相对论能量的情况下，向前折叠的辐射能量形成角 $\psi \sim \gamma^{-1} = mc^2/E$ 的窄圆锥，如图 2 所示。由于在一个小的锥形辐射光子，导致高强度和高功率，即使在距离储存环几十米的地方。

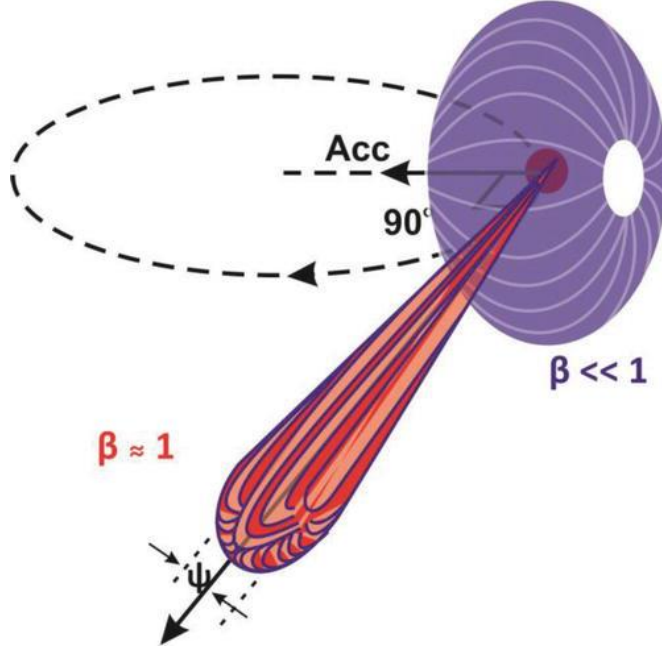


图 2 带电粒子绕圆形路径运动时辐射的能量。红色为接近光速，蓝色为远小于光速。

由狭义相对论， $E = mc^2 = \gamma m_0 c^2$ ，其中 $\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^2}}$ ， $\beta = \frac{v}{c}$ 。利用洛伦兹力公式

$$\mathbf{F} = e\mathbf{v} \times \mathbf{B} = m \frac{v^2}{r}$$

可以推出

$$ecB = \frac{\gamma m_0 c^2}{r}$$

进而得到运动半径

$$r = \frac{E}{ecB}$$

用常用的单位写成

$$r[m] = 3.3 \frac{E[GeV]}{B[T]}$$

这说明了磁插入件和储存环的半径限制了光束的能量。同步辐射光的特征角频率为

$$\Omega_c = \frac{3}{2} \gamma^3 \Omega_0 = \frac{3}{2} \gamma^3 \frac{c}{r}$$

同步辐射光源的临界能量恰好是弯铁产生总功率的一半

$$\hbar \Omega_c [keV] = 0.665 E^2 [GeV] B [T]$$

常用光通量和亮度来表征光源。光通量定义为单位时间单位带宽单位立体角内通过的总光子数

$$Flux = \frac{photons/s}{0.1\% bw \times mrad}$$

$$Brilliance = \frac{photons/s}{0.1\% bw \times mrad^2}$$

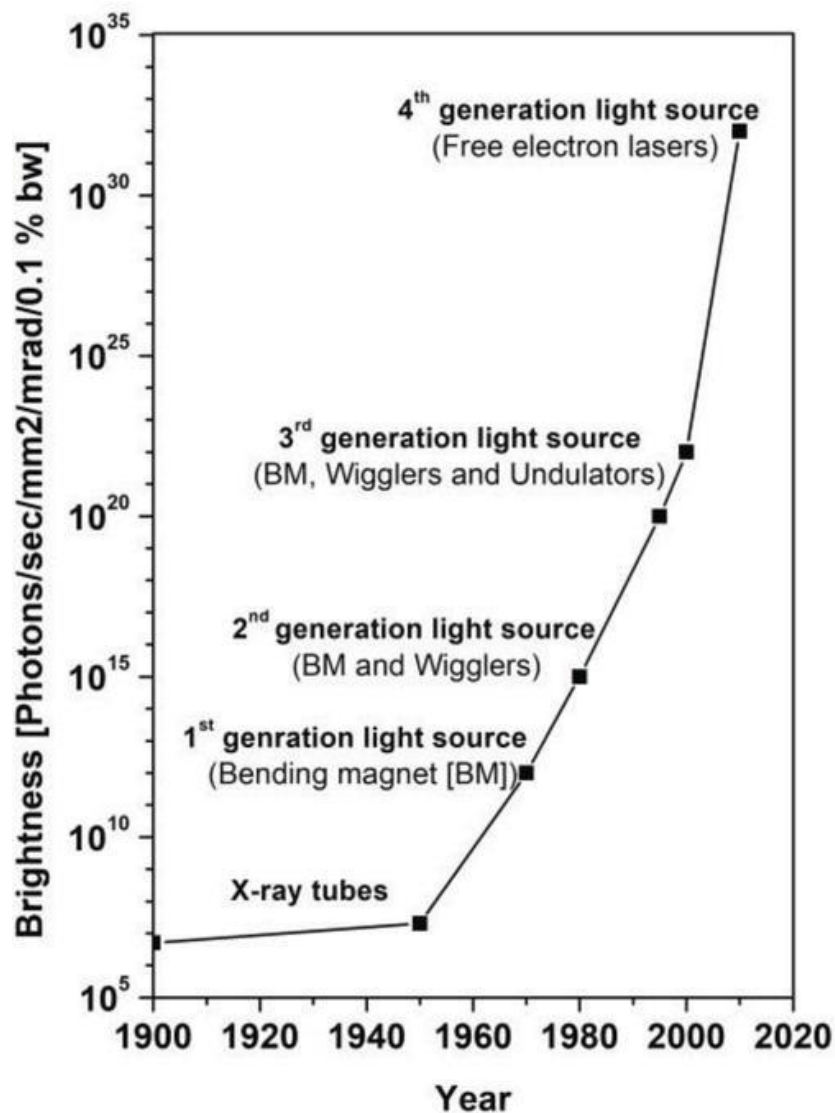


图3 X 射线光源亮度的变化

3 弯铁/超弯铁

存储环中的弯铁 (BM) 是主要的辐射源。尽管 (BM) 的主要目的是使 e⁻束在闭合路径中循环，但当电子被 BM 强迫以弧形移动穿过磁场时，它会在扁平锥体中产生辐射。BM 源产生固定垂直张角 $\psi \sim \gamma^{-1}$ (光子束发散) 的光束，水平幅度由 BM 弧的长度决定。同步加速器源的

临界能量取决于存储环能量和 BM 的磁场。具有不同磁场强度的 BM 源的通量如图 4 所示。但该技术限制了永磁体的场强 ≈ 1 T；只有在低温（液氮冷却）下由超导材料（铌合金）组成的电磁体才能提供约 5 T 的场强，称为超弯铁。通过这种方式，同步加速器源的临界能量可以提高到 4-5 倍。

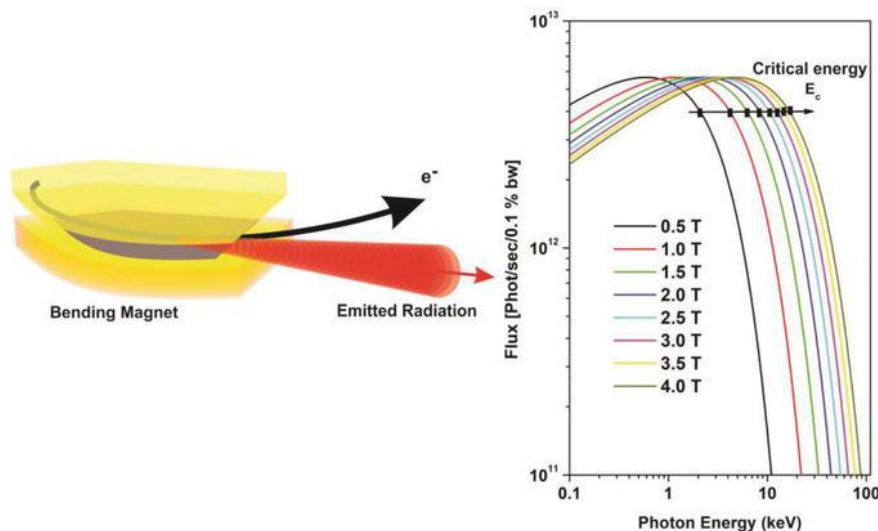


图 4 从弯铁产生 X 射线束的图形表示以及作为 BM 场强函数的通量谱的比较变化。图表显示了临界能量随磁场强度的增强。

4 插入件

插入件是可对电子在直线部分供给周期性磁场的磁性装置。所谓的“插入件”是由于其特有的作用而使用的，它可以在不影响正常运行的情况下从两个弯曲磁铁之间的漂移空间中添加或替换。基本上有两种类型的插入的设备：（1）扭摆器（wiggler）和（2）波荡器（undulator），其已被设计来增强辐射光子束的特性（如通量，亮度，能量）。

扭摆器是一种多极磁铁，具有长度（ λ ）的周期性（N）排列，它迫使电子围绕其自然路径周期性摆动，如图 5 所示。每个摆动当做通过一个弯铁，因此每个摆动的辐射叠加增强了通量和亮度，这与极数 N 和相应的磁场强度成正比。摆动辐射的水平幅度由 $K\gamma^{-1}$ 定义，其中 K 是磁偏转参数，定义为轨迹摆动角（ α ）与角孔径（ $1/\gamma$ ）的比率，给出为 $K = \alpha\gamma$

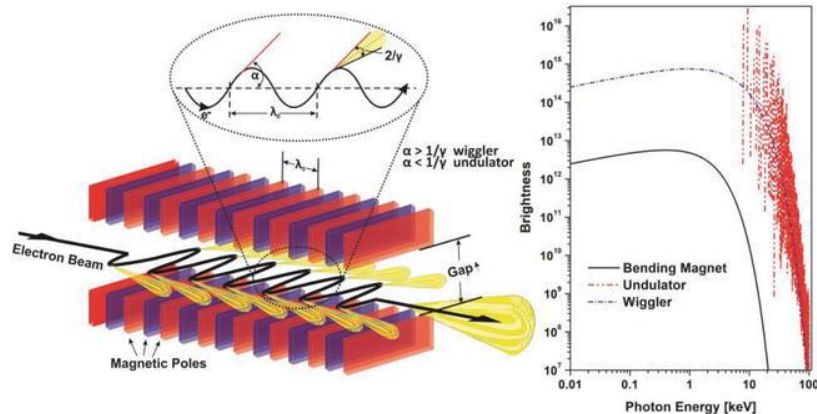


图 5 大多数第三代同步加速器光源中使用的永久多极摆动器/波荡器插入装置的辐射束发射布局。已经显示了来自单个设备源的发射辐射的亮度谱。

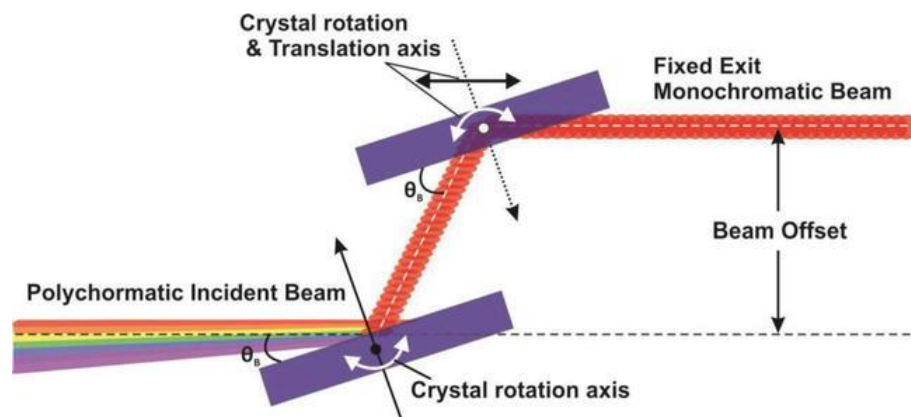
波荡器的工作原理与扭摆器相同，但 $\alpha \leq \gamma - 1$ 并且 $K \ll 1$ 如图 5 所示。在这种情况下，辐射光子环沿轨迹重叠并相互干涉。由于波荡器中各个极点对发射辐射的干涉效应，它产生称为谐波的近单色能带。

5 双晶单色器

同步辐射提供了许多在 X 射线实验中备受关注的特征（连续能谱、高通量、高度准直和偏振）。为了将这种辐射源用于广泛的 X 射线散射/吸收实验，必须优化同步辐射的各种参数。对于漫散射，需要高通量和低能量分辨率的光束，而对于非弹性散射，需要高能量分辨率。同步加速器辐射是高度可调的，并且可以通过在束线中适当选择光学设计来优化。

在凝聚态物理/材料科学中，大多数实验需要宽能量范围、高能量分辨率/精度、高通量和聚焦。特别是，单色器在调节 BM、摆动器和波荡器发出的辐射能量方面起着重要作用。BM 和扭摆器发出连续能谱，而波荡器产生近单色谱。

一般而言，大多数单色器具有称为双晶单色器的两次反射几何结构。在这种几何结构中，第一个晶体作为入射角函数对光进行衍射并使同步辐射单色化，而第二个晶体调整光束高度和方向，如图 6 所示。能量调谐可以通过晶体的平面旋转和弯曲第二个晶体的水平聚焦来实现。



晶体的选择取决于可用的晶体质量、热导率及其抵抗辐射损伤的能力。硅晶体因其丰度较高、热导率高而被广泛使用，并且由于其在半导体工业中的大量使用而被大量生产为几十厘米的完美单晶。由于高能辐射落在晶体上，失去能量并使表面变热，因此需要液氮冷却以最小化入射辐射引起的机械应变。

6 结论

已经讨论了来自不同来源的发射辐射的产生。已经研究了单个源对发射辐射亮度的影响，并提供了为特定应用选择正确源的理解。与基于实验室的/X 射线管源相比，同步加速器光源的如此高亮度使其成为材料实时研究的可能/合适的候选者。

同步加速器光束线专为特定应用而设计，即 X 射线成像（断层扫描）、X 射线吸收光谱（X 射线吸收精细结构 (XAFS)、近边和扩展边光谱 (XANES、EXAFS)）、X 射线散射（小角和广角 X 射线散射）和 X 射线荧光/发射光谱 (XRF)。此外，单个光束线可以用作同时进行的多表征工具，这肯定会探索对设备新物理学的洞察力。

这项工作让我们深入了解同步辐射的产生及其通过插入设备的可调特性，这是 X 射线光谱的基本要求。

参考

- [1] 同步辐射原理 <https://www.intechopen.com/books/synchrotron-radiation-useful-and-interesting-applications/fundamental-of-synchrotron-radiations>
- [2] 实物图 https://www.lightsource.ca/inside_the_synchrotron