

# 异军突起的新光源

——夏绍建——

光的世界五彩缤纷,璀璨夺目,令人神往.光是我们每天都要遇到的一种物质.它是人类生存的基础,美化世界的画师,宇宙消息的信使,生产发展的工具.没有光,就没有我们这个繁花似锦的世界.

要研究光,利用光,就要有发光的物体,称为光源.太阳是天然光源,人类又制造了各种人工光源.可以说,光源的发展与科学技术向广度和深度的发展有着密切的联系.

油灯、蜡烛、石油灯、煤油灯、煤气灯这些火光源,伴随了人类几十万年的生活历程.1879年,爱迪生发明了碳丝白炽灯,开创了人类利用电光源的新纪元.种类繁多的白炽灯和气体放电灯,为现代社会的各个领域提供了良好的光源.本世纪初,世界上出现了第一个X射线管.随着科学技术的不断发展,这种X光源在实验室及工业上得到广泛的应用,特别是在X射线照相术和X射线晶体学方面的应用.1960年,世界上第一台激光器——红宝石激光器诞生,是人工光源发展的新的里程碑.激光光源的发展和应用,成为当代最活跃的科学技术领域之一.近十几年来,物理界又发展出一种高强度、高稳定性、有连续光谱的新型光源——同步辐射光源.由于它具有一系列优异特性,使之成为异军突起的新光源,并获得“神灯”的美称.

什么叫同步辐射呢?

带电粒子在作加速运动时,便会以电磁波的形式辐射能量.电子在磁场中作圆周运动时,由于受到向心加速作用也会辐射能量.当电子速度不大时,电磁辐射在垂直于加速度的子午平面上是各向同性的;当电子速度接近光速时,辐射将集中在一个沿电子运动的切线,方向的光锥内.由于电子在轨道上连续运动,因此辐射将呈扁平扇形发出,如图1所示.垂直方向的角度散度  $\theta_v \approx mc^2/E$ ,其中,  $m$  为电子的静止质量,  $c$  为光速,  $E$  为电子能量.同步辐射就是指的这种情况下发出的电磁辐射.

那么,又为什么称它为同步辐射呢?

1947年,在美国通用电器公司的一台70 MeV电子同步加速器上,实验工作者用反射镜观察加速器内部的情况,“偶然看到了发亮的小光点”.当时加速器

真空度很好,不可能是放电.光点是沿着轨道的切线方向上看到的,其亮度随电子能量增加而加大.用偏振片观察,证实光是偏振的.他们认为看到的光点,是一种可见光的电磁辐射,并称为电子同步加速器辐射

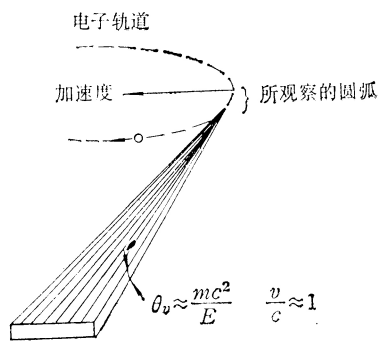


图1 圆形轨道运动电子发出的辐射  
(电子的速度接近光速)

(electron synchrotron radiation).后来,人们把它简称为同步辐射.实际上,这种辐射并不限于电子同步加速器的情况.

由于这种辐射要消耗粒子的能量,因此是加速高能粒子的障碍,给高能物理实验带来麻烦.早在1944年,苏联科学家就预言这种辐射会限制电子感应加速器的能量提高.进行高能物理实验时,必须对同步辐射加以屏蔽,还要采用一定厚度的吸收体,吸收反射的向背辐射.然而,人们发现:这种辐射具有很高的使用价值,可以成为许多科学实验和技术应用的理想光源.

把同步辐射作为光源的研究,六十年代后期在欧美及日本开始受到重视;到了1972年前后,同步辐射作为多学科研究工具,受到科学家的广泛注意;1975年英国批准建造世界上第一个GeV级的同步辐射专用装置,1976年美国建立专门小组,考虑同步辐射专用研究设备的需要;1977年末,欧洲科学基金会发表报告,讨论欧洲对于同步辐射研究设备的需要……到目前为止,全世界已建成或正在建造中的同步辐射专用装置和兼用装置有40多台,包括建成了全超导化的专用机.专用装置是电子贮存环专作同步辐射光源用;兼用装置则是既要用以进行高能物理研究,也要做同步辐射光源应用.我国已开始建造能量为  $2 \times 2.2$  GeV、兼用型的北京正负电子对撞机(BEPC)和能量为800

MeV、专用型的合肥同步辐射加速器。在海外学者的建议下,在台湾也开始建造能量高于1GeV、专用型的同步辐射装置。国际科学界对我国同步辐射研究计划的实施十分重视。

同步辐射的研究和应用,为什么得到如此迅速地发展呢?其原因就在于它提供了一种性能卓越的理想光源,具有许多其它光源所没有的优异特性:

1.光谱范围宽,并且连续可调。通常,同步辐射可使用的波长在0.1埃—10000埃之间,光子能量约在 $10^5$  eV—1eV之间,相应的电子能量约在5 GeV—100 MeV之间。可利用光栅、晶体单色器或反射镜,获得所需的单色光,成为波长连续可调的光源。

在这样广的光谱范围内,可研究蛋白质、分子、表面结构、原子及凝聚态物质的特性。在1埃—100埃左右的波段,最适合于研究固态物理、材料科学、表面物理、原子分子科学、超大规模集成电路及应用。任何一种利用单色光或连续谱的实验都可利用它作为光源,如紫外光谱,光电子光谱,小角度散射,X射线衍射等。

合肥同步辐射装置主要工作在真空紫外和软X射线区。运行初期,辐射特征波长为24埃,最短可用到4.9埃,以后加上超导扭摆磁铁(Wiggler),特征波长为5.8埃,可用到1.16埃,见图2。北京正负电子对撞机的贮存环,从弯转磁铁引出的同步辐射光,特征波长为2.63埃,加入超导扭摆磁铁后,特征波长为0.47埃,更适合做软X射线和硬X射线波段工作。同步辐射光的频谱分布示于图3。其中曲线A、B、C分别对应于从常规弯转磁铁(0.9T)、常规扭摆磁铁(1.8T)、超导扭摆磁铁(5T)引出的同步辐射光。

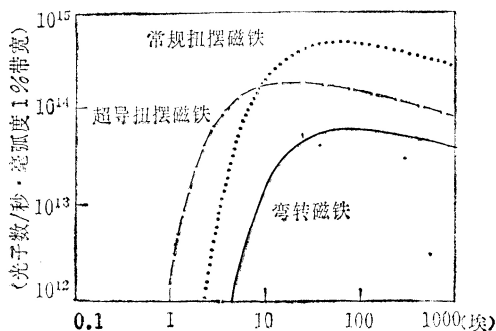


图2 合肥同步辐射装置所能提供的辐射频谱

2.具有天然准直、高辐射强度、高亮度的优点。同步辐射装置中,电子速度均接近光速,辐射的光束张角极小。例如,北京正负电子对撞机当电子能量为2.8 GeV时,垂直发散角仅为0.13毫弧度,比普通的激光束发散角还小,已接近平行光束,在距光源点20米处,得到一个水平辐射带,其垂直高度约为3.6毫米。方向集中,辐射能流密度就大,即辐射强度高。北

京正负电子对撞机如果电子束能量为2.8 GeV,电流强度为65毫安,储存环弯转半径为10.35米,其辐射总功率约为34千瓦。最大的旋转靶X光机平均辐射功率大约在10瓦左右,两者功率相差三千多倍。同步辐射光集中在一个很小的立体角内,其亮度比一个60千瓦的常规X射线管的标志谱高三个量级,比其连续谱高六个量级。

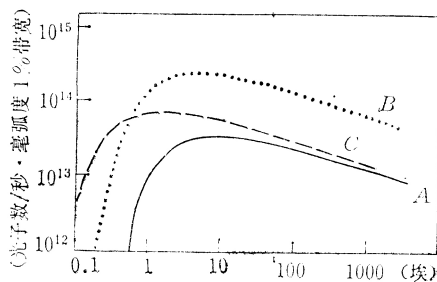


图3 北京正负电子对撞机所能提供的辐射频谱

利用高辐射强度的特点,进行广延X射线吸收精细结构(EXAFS)实验,分析一条谱线仅需要几分钟的时间,而且信噪比大大提高,可以研究痕量元素的近邻结构,如生物分子中少量金属原子的近邻结构及一些动态过程。在生物科学研究中,测定生物体复杂的蛋白质分子,如果用普通光源测定一次需几个月时间,用同步辐射光只需一两天。高亮度的同步辐射光,进行X射线形貌术实验,拍摄照片的时间只需几秒钟,使得各种动态研究成为可能。利用同步辐射光准直性好的优点,在距光源点几十米远的地方拍摄形貌术照片,仍可获得很好的分辨率。试样和底板之间的距离可以增大,以安装高低温装置、应变场、磁场、高压装置。使用高亮度、高准直性的同步光进行光刻,给人们带来极大的兴趣。波长为10—50埃的软X射线比起可见光和紫外光来,衍射效应小得多,这种光束可用在硅片上复制图形而无衍射半影。由于衍射效应,目前使用紫外光通过掩膜进行光刻,最小线宽限制在两微米左右。采用同步光进行光刻,线宽可达20埃,集成度提高上千倍,将大大推进超大规模集成电路的制造。高通量的同步辐射光,用来模拟核爆炸,研究材料和电子仪器的辐射效应;进行X射线血管造影,曝光时间只需几毫秒。如果这种技术得到推广应用,将对改善人类健康产生重大的影响。

3.高度偏振。如果光波的光矢量(电矢量)的方向始终不变,只是它的大小随位相改变,这样的光叫线偏振光。同步辐射主要是以电矢量平行于加速度矢量的方式而偏振,在电子轨道平面内,沿电子速度方向的光束几乎是100%的线偏振;离开轨道平面,偏振度迅速下降。从普通光源发出的非偏振光获得线偏振光主要是由反射与折射,由二向色性,由双折射三种方法产

生。但在 1050 埃以下的远紫外波段到 X 射线波段, 这些方法都无能为力, 使得同步辐射光几乎是唯一可使用的偏振光, 高度线偏振, 有利于提高辐射单色化的效率, 因为在所有的衍射角处, 偏振因数都接近等于 1, 可以在高的衍射角度, 使用较长的波长, 而避免由于偏振因数所带来的强度损失。同步辐射光在轨道平面上下是椭圆偏振光, 即光矢量的大小和方向都在有规律地变化, 光矢量末端沿着一个椭圆转动。

利用同一步光的偏振特性, 在 X 光荧光分析中, 在  $E_{90^\circ}$  方向可大大减少散射本底; 在 EXAFS 实验中, 当入射线的偏振方向与晶体某方向或表面成一角度时, 可以得到关于原子方位的信息; 在黄昆散射实验中, 可以略去偏振修正, 不但使数据处理简化, 而且还可以提高测量数据的可靠性。

4. 优良的脉冲时间结构。同步辐射光是一种脉冲光, 脉冲宽度通常小于 1 毫微秒, 脉冲间隔在几毫微秒至 1 微秒之间, 北京正负电子对撞机使用的谐波数最多允许填充 160 个束团, 高频频率为 199.53MHz, 所以光脉冲最小间隔约为 5 毫微秒, 因为可以按需要填充, 光脉冲之间的时间间隔可在 5 毫微秒至 800 毫微秒之间变化, 光脉冲宽度约为 0.5 毫微秒, 这种特定的时间结构, 使得同步辐射 X 射线特别适合于用来进行瞬时的光谱学实验, 观测瞬时的结构变化和反应, 研究电子态寿命, 许多动态过程的研究, 如肌肉的收缩、神经的活动、晶体的生长, 都可利用这种特性。目前已开始被应用于蛋白质分子的快速动力学实验中。

5. 稳定性好。由于贮存环内电子束稳定性高, 储存一次可维持使用数小时, 因此, 同步辐射光的强度和位置较稳定, 这一特性对许多实验是必须的, 而在 X 射线光刻中, 更具有重要意义。

6. 洁净性高。同步辐射是自由电子发光, 不产生任何杂质, 是纯粹的连续波谱。贮存环内为超高真空(真空度为  $10^{-9}$ — $10^{-10}$  托), 与表面物理实验所需的真空度相仿。如果样品置于真空中, 光束不受其它物质的干扰或吸收, 样品和光学元件不受污染, 对于使用真空紫外光研究表面物理等实验很有价值。例如用测光电子谱的方法来研究表面的性质以及测定固体表面的反射系数。洁净的环境对于黄昆散射实验量测也非常有利。

7. 光子通量、能量分布, 角分布等特性可准确计算, 本身可用做标准光源。辐射计量学需要不同波长的标准光源—对各种辐射源进行测量和定标, 但黑体辐射或电光源等以前使用的标准光源只适用于近紫外到红外波段, 同步辐射光可以作为软 X 射线和真空紫外波段的标准光源, 为各种探测器和辐射源定标, 以满足天体物理、等离子体物理、固体物理、化学等学科的需要。国外已用同步光来校准人造卫星上的光探测器, 还可校正或测定光学元件光的效率、偏振特性及滤

波器的透射率等。

8. 光源尺寸小。北京正负电子对撞机光源尺寸约为  $1 \times 5$  毫米<sup>2</sup>, 通过聚焦反射镜、弯曲晶体可得到很小的光斑尺寸, 这对于非常小的生物样品是适宜的。

另外, 如果在电子贮存环中设置扭摆磁铁波荡器等, 还可获得具有某些特殊性质的同步辐射。

同步辐射作为一种新型的人工光源, 与气体放电光源、传统的 X 光源相比, 具有不可比拟的优点; 从光源亮度、准直性、偏振、脉冲结构等性能看, 目前只有激光光源可以和它相比较, 但目前激光光源波长多在 1000 埃以上, 在这个范围内, 激光光强比同步辐射高, 能量分辨率比同步辐射好; 而时间分辨率和稳定性则不及同步辐射。同步辐射在光子能量可调性方面, 远胜于激光, 也就是说, 就覆盖波段范围之广而论, 同步辐射是独一无二的。可以说, 在目前所使用的人工光源中, 波段短于 1000 埃的范围, 尚没有任何光源能与同步辐射光源相比。目前不少国家正在积极研究而且不久会逐步投入使用的自由电子激光(FEL), 波长可连续可调, 效率高、功率大, 相干性好, 它的发展与应用是不能离开同步辐射装置的。

新光源的出现往往意味着新科学领域的开辟, 预示着新发现的到来。一台同步辐射装置可以引出几十条光束线, 几百个用户可以同时工作。光学、精密机械、电子学、计算机、真空、材料、加速器等专业的工程师和众多学科的物理学家聚集在同一个同步辐射装置周围利用这一理想的新型光源进行实验工作和卓有成效的学术交流, 有可能产生新的边缘学科和取得激动人心的科学进展。