

孕育中的 强儿 6GeV 储存环

卢盛宽 编译

近年来,科学家们对同步辐射研究应用于物理、化学、生物、地质和其它物理学科及相关的技术领域的兴趣日臻浓厚。世界上现已建成的同步辐射光源有二十余台,美国布鲁克海文国立实验室的同步辐射光源(NSLS)就是其中的一个。这个光源自一九八二年投入运行时起,来自世界各地的科学家应接不暇,为了增加用户实验室和一些有关的辅助设施,一九八五年,NSLS 开始了第二期工程的建设(即扩建实验厅)。利用同步辐射这一强有力的光源,许多丰硕的科研成果应运而生。同时,随着科学技术的日益进展,运用更新技术去建造更高质量的同步辐射光源的任务已提到议事日程上来了。一九八五年,美国已经提出建造一个六十亿电子伏特(6GeV)储存环的方案。这个储存环将装有周期性变换的磁插入设备——摇摆磁铁和波荡器,该装置可使光源的功率再提高 10^4 到 10^6 倍,即可以把美国现有的同步辐射研究的能力提高一倍。它将成为科学家大有作为的一个新天地。

如果说,二十世纪五十年代和六十年代的固体物理技术革命带来了电子学和计算机科学的重大变革的话,那么,可以满怀信心地说,八十年代对复杂材料的研究将会导致科学技术领域的更大规模、更广范围的变革。目前,一些边缘学科如电子显微学、中子扫描术、激光基础测量、各种波谱学如核磁共振等有了重大的进展。尤其在同步辐射光源得到应用之后,利用紫外到X射线范围内的光子来研究复杂材料方面有了更大的突破。

正在筹建中的 6GeV 储存环则具有更强的能力,它是名符其实的先进的光子研究装置,我们称它为 APRF。

APRF 的设计

建造 APRF 的详细计划并不是一成不变的,因为有许多种设计都是可行的。一般地讲,这台装置的储存环直径大约为 800 米,弯转磁铁的场强为 10 千高斯,特征能量为 25 千电子伏特(如图 2 所示)。环上有 32 个直线节(每个长约 5 米),可用来安放插入设备。机器的能量选择基于下列两个因素,其一,现有的磁铁技术所能达到的产生一个足够大的磁场来供给一个很高强度的同步辐射束流所需要的最小磁周期 λ_u 约为

1.5 厘米。该束流可从直径为 1 厘米的磁极间隙的中心通过,之所以留有如此大的间隙是为了防止束流与真空盒壁碰撞所造成的损失。其二,实践表明,波荡器所需要的辐射的特征能量大约为 20keV,如果将 $\lambda_u = 1.5\text{cm}$ 和 $\lambda_p = 0.61\text{\AA}$ (其对应值为 20keV)代入方程式(2),对应的磁场强度 B(当 $K \approx 0.5$)的储存环的能量一个合理的数值为 6GeV ($\gamma = 1.7 \times 10^4$)。

APRF 也能产生波荡器的低能辐射(见图 1)。在这里须把 λ_u 加长,例如 $\lambda_u = 50$ 厘米,可产生特征能量为 150keV;波荡器的基本参数为 $K = 2.7$,有很大的带宽,这是因为在 5 米长的直线节里 N 只能等于 10 的缘故。因此,APRF 不仅能提供波荡器的硬 X 射线区域内的辐射,而且在低于 1keV 的低能情况下照样

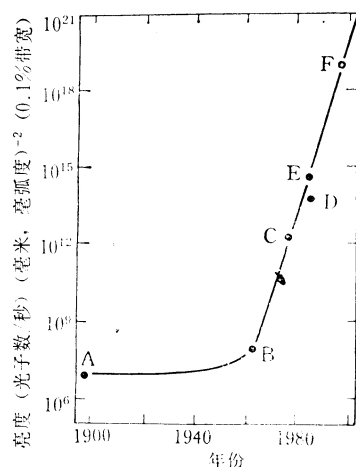


图1 X射线光源的亮度的改善的编年图。亮变愈高,做实验的能量越高,角度分辨率和空间分辨率也高,灵敏度也高。
A, X射线管; B, $\text{CuK}\alpha$ 旋转阳极; C, SSRL 弯转磁铁; D, NSLS 弯转磁铁; E, SSRL 54 极摇摆磁铁; F, 6GeV 的波荡器(筹建中)。

可将放大倍数提高几个数量级。最近,在西德的高能环上所做出的实验结果表明,在这个区域内可建造 1 到 2GeV 的光源(ALS),能产生具有优良品质的同步辐射。

为了使新光源的波荡器所产生的同步辐射的有利的特性得以发挥,正电子束的尺寸和发散度必须很小才能凑效。虽然正电子束的尺寸和发射度是随着穿过各种限制它的轨道的磁透镜而变化的,但它们的乘积在给定的机器里大致是守恒的。对于X射线的波荡器的标准数值是,尺寸为 $50\mu\text{m}$,发射度为 $50\mu\text{rad}$ 。

美国科学院估计一台 APRF 的造价为 1.6 亿美

元,其中 1.25 亿美元为机器建造费,0.35 亿美元为仪器费用(其中包括十个插入设备的全套装备和二十条实验线的费用,这些实验线含有单色化和聚焦设备以及为满足特殊实验需要而截取不同值域的辐射的装备等;且光束线部件的设计必须能满足承受高功率密度的辐照的要求。)

同时,还要考虑到直线节的设备和弯转磁铁的全部运行,可同时容纳从红外到 X 射线区的 200 多个实验,每条实验线至少要有四个独立操做的实验者。如果每年运行费为二千万美元,每年每个实验者可均得费用二万五千美元。由此看来,在装备的应用和运行这两项费用上,APRF 都是利用得很有效的。

APRF 的辐射能力比美国现在所拥有的任何光源都强。图 2 为 APRF 的布局。

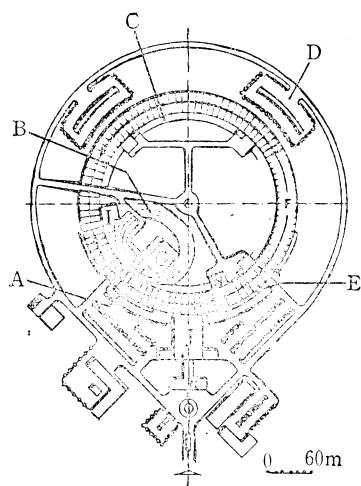


图 2 APRF 示意图

注入器 (A) 使带电粒子束流具有适度的能量,然后注入同步加速器 (B) 中再加速到 6GeV 后注入储存环 (C)(包括磁铁电源、插入设备和弯转磁铁等,规模较大,可同时容纳 200 个实验。); D 为停车场; E 为实验室和办公室; F 为实验区; G 为同步加速器电源; 射频 (RF) 仪器、真空系统和束流诊断仪器等; H 为储存环电源; I 为储存环射频 (RF) 仪器; J 为机械和实验支持部门; K 为管理部门和总设备处。

同步辐射研究的过去、现在和将来

自一九四七年发现同步辐射之后,关于它的性质的探索就曾在当时已建成的康乃尔大学的 0.3GeV 的同步加速器上完成了。到了本世纪六十年代初期,美国国家标准局在 0.18GeV 的同步加速器上进行了气体的光子吸收的基础研究。从首次将同步辐射用做结构探针 (structural probe) 以来,已经进行了大量的关于原子和分子的电子结构和动力学的研究。APRF 将

提供更强的研究能力,利用它可以同时观察由于光子吸收过程所产生的电子和离子,研究它的受激状态和进行分子束流的实验。

一九六八年,建在美国威斯康辛的斯塔夫坦 (Stoughton) 的 0.240GeV 的 Tantalus 储存环开始运行,虽然该机器原本是为高能研究而设计的,但它却变成了做同步辐射的第一台专用环。就是在这台机器上首次进行了固体和表面的同步辐射的光子发射测量,它开创了用同步辐射的产物进行各种材料的表面和立体电子学特性研究的新纪元。其它有关的技术,如角分辨光子发射、光子激发解吸 (photon-stimulated desorption) 和光电子折射等在这些研究中均得到了应用和发展。尤其是能随着同步辐射源调节的角分辨光电子发射提供了一种明确判定固体的能带结构的一种新方法。

波荡器的首次应用是做俄歇电子的角分辨研究。俄歇电子是从镍的表面的单层吸收质如 CO 和 N₂ 的内层电子受激发后而发射出来的。波荡器上的实验结果比在弯转磁铁光束线上所做的同样的实验要提高四个数量级。这些实验,会同其它的有关的实验可以共同证明 APRF 的一个功能就是可同时探测原始的光电子和激发后的俄歇电子。此功能可用来将不同能量束缚在表面的不同位置上,例如束缚在表面的层间边缘的原子上,有选择地研究俄歇电子进而就可以研究该表面的电子学特性。此外,这种新光源还可用来研究在实时反应条件下微量成份不纯的作用以及表面电子结构的变化。

第一次显微术的研究是于一九七二年在剑桥的电子加速器上完成的。它充分地显示了将高亮度、可调节的同步辐射光用于 X 射线显微术和成像是具有巨大的潜力的。在欧洲,另一个成像是用同步辐射的基本形貌学来研究固体的细微位移和变形。接踵而来的一个进展是从一九七八年开始的,用同步辐射的 X 射线光刻技术来制造微型电路和用空间分辨率好于 100 Å 的生物结构的照像。这些研究起源于在布鲁克海文的 0.75GeV 储存环工作的 IBM 公司和在柏林的 BESSY 第四个专用储存环,他们共同探索了同步辐射用于电子学领域的微型电路复制术的能力。

同步辐射成像学的另一应用是非侵入型的血管造影术(关于血液细胞和心室的造影)。这种造影术只需要非常简单的小剂量的碘的静脉注射,它比常规所采用的导管插入术既安全,又具有质量高而经济开支少等优点(因为导管插入术不但医疗费用昂贵,而且患者还要冒生命危险)。

在显微探针术中,X 射线远胜于带电粒子。其优越性在于,X 射线在能量上可调,换言之-它可以更有效地激发一种元素或多种元素。其效率在于用等量的 X 射线或电子入射到样品中,X 射线至少可探测到 10⁴ 到 10⁵ 个原子,或者说,在探测原子数只有 10³ 到 10⁴

的样品时,用X射线比用电子束所造成的能量沉积为少,因而损伤也小。直到目前为止,生产的X射线尚未达到人们所期望的高亮度。然而,新光源(APRF)将产生比以往高得多的亮度,使用它可进行空前的微细衍射的探测,可进行广延X吸收边精细结构(EXAFS)的研究以及化学和元素分辨的俄歇和光电子能谱学的研究等。鉴于上述事实,美国现已决定投资十亿美元来建造这种电子微探针——APRF。这不仅对材料科学是至关重要的,而且对于物理学、化学、生物学、地质学和医学也是具有特殊意义的。

用这种新光源产生的同步辐射来进行全息照像,因其波长特别短,所以可以达到非常高的空间分辨率。此应用最早出现是在新的、高亮度的布鲁海文的0.75 GeV的储存环,用31 Å的辐射去拍一张0.5到2 μm长的石棉纤维的全息照片。

同步辐射这一重要领域的研究工作于1972年开始在斯坦福的0.4 GeV的正电子-电子积累环(SPEAR)上展开了。(虽然这个机器是为高能物理研究而建造的,用它发现了粒子。)为此还与丁肇中分享了1980年的物理学的诺贝尔奖金。此粒子命名为J/ψ粒子。

从1974年就开始了同步辐射的EXAFS研究。EXAFS的重要特性是有能力确定围绕原子(核)类的区域原子的结构(如束缚距离、数量、相邻原子的类型等)。这些原子之所以被选用是因为它们可以在具有很强的吸附能力的区域内调节辐射。该技术用于通用的X光源,其困难和局限性在于把同步辐射的强度和可调性传输给一个高倍数的通用的分析工具。在现有的光源上可以确定原子(核)类的结构在百万分之几的水平上,这只能包括表面单层的一小部分原子。后者的能力发展为表面EXAFS,简称SEXAFS。

EXAFS技术成功地运用于非常广泛的科技领域里。在生物学领域里,许多生命酶(例如血红蛋白),特别是膜约束的氧化蛋白酶和磷酸酶(这些酶类不能承受结晶学的研究),可用EXAFS的来研究它们的结构参数从而可以定义它们的运动模式。EXAFS可以用来研究植物的固氮作用以及一些抗癌药物的结构等;在化学领域里包括单金属,双金属基和沸石的催化的基础研究。非常重要是对在真实的反应条件下的催化剂变化的研究;在材料科学研究中,EXAFS是探索电子学、地质学、冶金学都很感兴趣的固体和液体的各种低能组元的好方法。例如,对含镍0.05~2%,含钒、钛的高强度,低合金钢的研究,有助于确定沉积在钢中的碳、氮等元素对钢的性能的影响。再例如,对时间分辨率的研究有助于预测工艺本身的性质。

使用APRF可望将化学和生物化学系统对媒介物的时间分辨率的研究的EXAFS的能力扩展到含量极小的情况(在一定程度上可达十亿分之几)。现行的EXAFS光谱的最短时间为小于1秒的量级,但是应用

了新设备就可达到亚毫秒级。如前所述,APRF有望将EXAFS和显微术结合起来去研究异质材料,这些材料对许多材料科学和技术的问题具有特殊的重要性。EXAFS已经成为同步辐射研究的重要课题并且在将来会继续对同步辐射的研究做出更重大的贡献。

APRF这一强光源对X射线的散射实验有很深的影响。X射线散射和成像技术逐渐成为同步辐射科学的重要方面。最常见的X射线散射技术是X射线结晶术,它囊括了关于立体材料的原子结构(简单到硅,复杂到大分子如脱氧核糖核酸(DNA))的全部内容。1971年在德国DESY的同步加速器上进行了首次采用同步辐射的结晶术实验。起初,是用高强度的同步辐射来研究与时间相关的飞行肌肉。这种应用同步辐射去进行与时间相关的研究现在有了不断的发展。康乃尔高能同步辐射光源(CHESS)的科学家用储存环来做硅的激光热处理是近来最成功的实验之一。这个研究有助于确定激光热处理的基本机制。极短的脉冲长度,或许短到40微微秒,再伴以高亮度将使APRF的时间分辨率有了大大的改进。这种能力将用到与时间相关的涉及到温度、压力和化学方面的结构变化,甚至跨入了分子动力学的领域。

到了二十世纪七十年代中期,同步辐射结晶术的研究已经扩展到运用可调节的辐射去解决相位问题,因为这个问题限制了许多结构的测定。利用同步辐射的高通量可以从样品上(在样品被X射线破坏之前)获取更多的数据。自此以后,应用同步辐射的结晶术的研究便迅速地发展起来了。应用摇摆磁铁作为插入设备,可以完成固体表面的单个外部原子层的衍射研究或者进行表面的准单层的任意吸附质(例如氢气(H₂))的衍射研究。同样成功地完成了对厚度为二到数百层的多层液体结晶膜的研究。就这样运用相同的结晶术可以探索吸收质处于表面的二维世界和其内部结构,因为这种技术已使我们具备了关于实体材料的三维世界的许多知识。同步辐射的亮度仍然是用结晶术来研究小至1立方微米的晶体的不可或缺的工具。该技术为研究一些特殊种类的材料例如沸石或生物系统开辟了一条重要的途径,因为这些材料不可能生成使用常规光源所必需的足够大的单晶体。

最近,Exxon-Lawrence-Berkeley实验室和SSRL用54个极的摇摆磁铁所做的同步辐射实验证明了X射线同样可以用来研究磁自旋结构,而且用它比通常采用中子的标准方法为好!X射线做磁自旋的截面仅为那些用中子研究和通常X射线电子结构截面的百万分之一。然而,由于同步辐射的亮度很高,这就大大补偿了小截面上的损失,所以仍可提高研究的能力。因为APRF可以用足够高的分辨率研究磁相位转变中的微小晶体,所以它开辟了研究表面磁学的一个全新的领域。

同步辐射散射技术的另一个应用是研究材料表面的二维相变和单层膜以及吸收质。例如,惰性气体被石墨所吸收,多层液晶体,在铜表面的单层铅等完全不同的系统都可以用二维相变的透视法来研究。

还有一些散射技术,因其信号很弱,所以要求辐射的性能要很好才行。典型的例子是小角散射和非弹性X射线散射。有迹象表明,小角散射的研究是从对聚合物的裂纹和染色体(DNA)与凝聚的实时研究而发展来的。APRF可将该研究的波长范围扩展到 $10\text{ \AA}$ 到 $10,000\text{ \AA}$ 。后者现在只能用激光技术来研究,而且只限于透明媒质。APRF还可增强对比度,从而可以完成动力学的研究。使用中子的非弹性散射可以使我们了解原子运动的大千世界,例如在晶体中振动的模型等。随着单色器的改进(虽然这是困难的,但完全是可能的),新光源将具有用X射线对样品的分辨率小到 0.001 到 0.01 eV (此分辨率比采用中子的实验的分辨率要小)。

事实表明,APRF在新的散射和成像技术方面具有巨大的潜力,这全在于新光源具有的亮度和连续性是非常适合于散射和成像实验对角度、空间和能量的高分辨率的要求的。如果说同步辐射的科学和技术在过去是繁荣、昌盛的话,那么可以坚信,APRF辐射将使未来的同步辐射科学和技术更加欣欣向荣。

虽然同步辐射科学的崛起是从本来为做高能物理研究而设计的机器上开始的,但自从1974年东京的SOR 0.4 GeV 的同步加速器开始以来,新设计的专用储存环与日俱增。美国布鲁克海文的NSLS,从1982年开始运行它的 0.75 GeV 的UV环,它的 2.5 GeV 的X射线环是在1985年投入使用的。日本具有了全部的同步辐射装置,欧洲和苏联也是如此。在一些急待

发展技术的国家和地区如,中国、印度和台湾也都实施了发展同步辐射装置的计划。从发展同步辐射装置的插入设备的前景来看,欧洲似居领先地位。法国的 0.8 GeV 的Super ACO机器正在建造中;联结欧洲各国的欧洲同步加速器研究装置(ESRF)的 6 GeV 机器已经获准定于1986年开始建造。最近获悉,日本的 6 GeV 装置将1992年做为它的竣工目标。美国也不甘落后,它的APRF计划到1988年二月开始建造,工期定为四年。

结 语

同步辐射研究使各个学科联合起来共同克服技术难关,不断壮大实力。物理学家和工程师们协同一致,设计机器,发挥各自的专长,提供必要的仪器,使装置投入运转。凝聚态物理学家,解决了大部分的光束线上所必须的单色化、聚焦等问题,控制辐射使之性能优化从而可以满足特殊实验的需要。当然,这里会聚了各个学科的专家,如地质学家,他们将同步辐射的研究应用于自己的专业并且制造了相应的特种仪器。总之,各学科的专家协同作战,已为同步辐射研究的发展建立了不可磨灭的功绩。可以断言,这种合作关系在将来会更加发扬光大。请到布鲁海文的两个储存环去转一转吧,在那里,各个学科的能人们联合起来共同捕捉同步辐射所赐予的一切良机,简直令人叹为观止的!

对于许多科学和技术的领域,同步辐射是一种兴奋剂,而APRF具有更大的刺激作用,仅此一台装置就可以给广泛的科技界以巨大的推动力。总之,随着建造计划的实现,也就是到八十年代末和九十年代,复杂的材料科学及其相关的技术,卫生、工业和国防各部门的技术都会有重大的突破。