

·学科进展与展望·

同步辐射的现状和发展

沈鼎昌*

(中国科学院高能物理研究所, BEPC 国家实验室, 北京 100049)

[摘要] 同步辐射是一种先进光源, 其应用具有很高的现代科技融合性和集成性, 因此同步辐射装置的建立为几乎所有的前沿科技研究提供了一个先进的、不可替代的实验平台。本文简要介绍了同步辐射装置发展的历史、现状、应用和当前的主要发展趋势, 以及在纳米科技研究中的一些重要应用。

[关键词] 同步辐射, 三代光源, 当前发展状况, 在纳米科技中应用

1 简单回顾

同步辐射就是高速的荷电粒子在速度改变时放出的电磁辐射。1907年英国数学家萧特为了解释氢原子发射光谱的不连续性, 计算了一个相对论电子沿着原子中的不同轨道运动时的电磁辐射谱。他原来是试图建立一个氢原子模型而做此项研究的, 当然没有成功, 在玻尔的原子模型确立之后, 他的工作很快就被遗忘, 仅在物理学史中被提到。

到了20世纪40年代, 物理学中一些新分支——宇宙线和加速器物理的发展, 重新引起对高速荷电粒子在地球磁场中和加速器中速度改变时的电磁辐射的兴趣, 在这方面当时苏联的科学家做了先行性的理论工作。第一篇关于同步辐射性质最详尽的论文是我国物理学家朱洪元在1947年写出的, 他在1947年被推荐到英国皇家科学院院刊发表的论文, 与至今经常被人们引用的许温格(J. Schwinger)的文章同属全面性的理论工作。人工产生的这种辐射是于1947年在美国纽约州的通用电器公司实验室里的一台70 MeV的同步加速器上首次被观察到的, 波长在可见光范围, 正是理论所预期的。从此这种辐射便被称为“同步辐射”。

同步加速器的出现, 开创了从20世纪50年代开始的粒子物理的黄金时代。在世界各国建成了一个又一个高能加速器, 能量也越来越高。但是长期

以来, 同步辐射却是高能物理学家所不欢迎的东西, 因为它消耗了加速器的能量, 阻碍粒子能量的提高。虽然几位有远见的物理学家提出把电子同步加速器中的同步辐射利用到非核物理的领域中去, 然而在当时大多数的高能物理学家都没有注意到这个建议的重要性。

同步辐射应用的可行性研究工作是20世纪60年代初期开始的, 在美国、日本和德国差不多都在同一个时期内进行了研究, 结果是极为令人鼓舞的。从此作为高能物理研究的副产品, 开始了同步辐射应用研究。1965年, 随着世界上第一个储存环在意大利的 Frascati 建成, 人们立即看到它可以作为一种强大的新光源——同步辐射源的前景。从20世纪70年代开始, 同步辐射应用便步入了它的现代阶段。

2 同步辐射光源的现状

人们很快便了解到同步辐射具有下列优异性能:

(1) 具有从远红外到 X 光范围内的连续光谱。电子的能量越高、弯转半径越小, 光谱的高能 X 光就越多。可以用单色器调出光谱中适用的波长的光。

(2) 光强高。电子能量越高、弯转半径越小, 辐射功率越大。

* 中国科学院院士。

本文于2005年9月19日收到。

(3) 有高度的准直性。

(4) 高度极化, 而且极化可调。

(5) 是脉冲光源, 脉冲的宽度为纳秒量级, 脉冲间隔为微秒量级。

(6) 有精确的可预知的特性, 可以用作各种波长的标准光源。

(7) 绝对洁净, 因为它是在超高真空中产生, 没有任何如阳极、阴极和窗带来的污染。

于是人们改变了对同步辐射的最初看法, 在几乎所有运行的高能电子加速器上, 都建造了同步辐射光束线及各种应用同步光的实验装置。

至今, 同步辐射光源的发展历经了三代。和市场产品不太相同, 新一代光源的建造并不意味着前一代光源的完全结束。目前, 世界上正在运行的同步光源中以第二代光源为多数, 甚至可以见到第一代光源, 当然它们都有为同步辐射应用的专用运行, 此时属于第二代同步辐射; 而第二代光源也在不断改进它们的性能, 使之接近第三代光源的水平。

第一代同步辐射光源是在那些为高能物理研究建造的储存环和加速器上“寄生地”运行的, 如美国康奈尔大学的电子同步加速器、中国科学院高能物理研究所的北京同步辐射装置在做高能实验时的运行属于第一代同步光源。

虽然第一代同步光源不是为同步辐射应用而专门设计的, 但是它的高强度以及从远红外到硬 X 射线的宽阔的光谱, 已经使它具有了无与伦比的能力: 很短的数据采集时间、可连续选择的波长、高的能量分辨率和超高真空的纯净环境等等。从而开创了許多新的研究领域, 例如, 在固体和液体中确定某些特定元素的近邻环境的研究, 甚至对那些已经成熟的方法, 如 X 光晶体学分析, 利用光与物质相互作用后的二次发射进行结构分析的方法等, 都因同步光源的出现带来了新的机遇和新的活力。

不仅物理学家, 而且化学家、生物学家、冶金学家、材料科学家、医学家和几乎所有的学科的基础研究及应用研究的专家, 都从这个新出现的光源看到巨大的机会, 它使许多研究者长久以来所追求的梦想很快地变成现实。到了 20 世纪 70 年代中期, 第一代同步辐射装置的数目迅速增加。然而, 在对储存环性能的要求上, 同步辐射的用户与高能物理学家的观点是矛盾的, 它使同步辐射的用户们完全有正当的理由不满足于第一代同步光源, 要求建造不是作为高能物理的“寄生”应用, 而是专门为同步辐射应用设计的第二代同步光源。在美国、欧洲和日

本, 建造新一代同步光源的潮流也差不多是在上世纪 70 年代后期开始的。

第二代同步光源是专门为同步辐射的应用而设计的。为改进所产生的同步辐射的质量需要将储存环的结构进行最优化的设计。在储存环中运动的电子, 并非都沿同一个轨道运动, 事实上, 它们的运动轨道大都偏离理想的轨道, 这就使得电子束团有一定的大小和发散角。在加速器物理学中, 这二者的乘积称为“发射度”。高能物理实验与同步辐射应用对储存环的要求是矛盾的。一般说来, 高能对撞物理用的储存环的发射度都较大, 而同步辐射应用要求小发射度以得到高亮度。虽然自 1975 年起不少高能加速器在它们的高能物理研究计划结束之后被转为专用的同步光源, 但是同步辐射的用户很清楚, 这种第一代光源是不能满足他们越来越高的要求的, 必须从一开始的电磁铁阵列设计中就考虑到他们的要求。为此美国 Brookhaven 实验室的两位加速器物理学家却斯曼 (R. Chasman) 与格林 (K. Green) 发明了一种为同步辐射应用优化的阵列, 成为第二代同步光源的基础, 也是更新的第三代同步光源的基础。

大部分第二代同步辐射装置, 如英国 Daresbury 的 SRS, 美国 Brookhaven 国家实验室的 NSLS 以及日本筑波的光子工厂 (PF), 都是在 20 世纪 80 年代前后建成的, 它们的发射度为几十 $\text{nm}\cdot\text{rad}$ 。随着第二代同步辐射源的投入使用, 出现了在一个实验设施上聚集着来自众多学科的科技人员川流不息地工作的空前景象。在科学上, 同步辐射的应用主要是通过物质中原子的位置 (物质的原子结构) 和原子核外电子的状态 (物质的电子结构) 的分析来研究物质的各种性质: 力学的、化学的、电学的、热学的、磁学的、光学的、生物学的等方面的性质。反过来, 弄清楚这些性质与结构的关系, 便有可能通过对上述两类结构的控制与改变来设计有着预期性能的新材料, 从而为技术科学与工业应用开拓广阔的新前景。

第三代同步光源是为了得到亮度更高、光斑更小、相干性更高、极化度更可调的同步光而建造的, 在设计中大量使用了插入件——用以达到这些目的的一系列周期排列的南北极相间的磁铁组。第三代同步光源的发射度在 $30 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ 以下, 所发出的同步光的亮度比最亮的第二代光源至少高 100 倍, 比通常实验室用的最好的 X 光源要亮一亿倍以上!

更高的亮度意味着: 谱学分析中更高的能量分辨本领、显微学及微区分析中更高的空间分辨和成

像中更大程度的相干光, 这些进展极大地加强了同步辐射应用的能力。

同步辐射应用技术本身的尖端性和综合性使其具有很高的现代科技融合性和集成性, 同步辐射装置的建立为几乎所有的前沿科技研究提供了一个先进的、不可替代的实验平台。常规光源不可能实现的实验, 使用同步辐射可以完成。在这个平台上可以同时进行基础科学研究、应用基础研究和高新技术的开发, 所涉及的学科之众多, 应用的领域之广泛, 是空前的。它对科学技术的发展产生了巨大的影响, 例如, 同步辐射技术已成为现代生物大分子结构研究的必要手段。生命科学是同步辐射应用发展最快、重大成果最多的领域, 用户之众, 可以与材料科学比拟, 1998年和2003年诺贝尔化学奖得主都是同步辐射应用的受益者。

同步辐射光源及其应用水平已成为显示一个国家科技发展水平和知识创新能力的标志。

我国在20世纪90年代初, 在北京和合肥先后建成了两个能量分别为2.2 GeV和800 MeV的同步辐射光源, 北京的在兼用运行时属第一代, 在专用运行时属第二代, 合肥的属第二代。2004年国家批准在上海建立一个第三代光源, 计划在2008年建成。此外, 90年代后期台湾在新竹建成了一个能量为1.3 GeV的第三代同步辐射装置。

3 同步辐射装置的当前发展

第三代同步光源对工程技术的要求是苛刻的。以美国伯克莱的ALS为例, 其插入件里的电子束的截面是椭圆形的, 水平方向的长度是335 μm , 而垂直方向的长度仅65 μm , 相当于一根头发的直径。实验上要求电子束流有很高的稳定性, 稳定到其截面尺度的十分之一。反映到安装精度上, 就要求安装位置(在周长近200 m的约200个各类电磁铁的中心)对设计位置的偏离小于150 μm 。对于插入件的要求更高, 在5 m的长度上, 每个磁极的位置安装精度要小于20 μm , 而且这个精度在40吨力的磁力作用下仍能保持稳定! 其他对磁铁的加工精度、电源的稳定度、地基的抗振能力、磁场分布的精度等等的要求, 甚至对整幢建筑在一天中由于天气温差引起屋顶、墙壁的尺度变化控制, 同样都是十分苛刻的。在这些精度都达到后, 还需要有巧妙的电子束流监控系统和反馈系统, 随时监测电子束流的位置并给以必要的校正, 以保证束流位置的稳定。

虽然这些技术都是当前的尖端技术, 但是属于

成熟技术, 只要有精密机械加工的保证和在设计、测试、安装、施工、监控等方面的严格把关, 都是能够达到的。1994年, 世界首个第三代同步光源投入运行。目前已经建成并在运行的第三代光源已超过10个, 它们的建造和运行经验都证明了这点。

近年来同步光源的一个最重要的进展是电子流的经常性补充。几十年来的做法是: 注入 \rightarrow 电子束流衰减到一定程度 \rightarrow 打掉束流 \rightarrow 再注入。这样一来实验工作者就必须周期性地停止实验, 而且在电子束流衰减时光学元件上和样品上的热负载是变化的, 会影响实验的精度。现在成功地实现了经常性补充, 使电子束流近似为恒值, 为实验者带来巨大的好处。目前已建成的第三代光源都在做这方面的改造。

另外一个十分重要的发展是缩短同步光脉冲的长度, 方法是在两个直线段之间加入一种特殊设计的腔(螃蟹腔), 从当中的弯铁中得到1 ps级脉冲, 代价是增大电子束的能散。这种方法如果成功, 将大大增强同步辐射时间分辨实验的能力和相干光的产生。

同步辐射在离开加速器之后进入光束线, 经过种种特定的光学元件, 成为具有各种不同特性的光, 才被引入实验站供用户使用。因此同步辐射装置主要是指加速器和光束线两大部分。

从能量说, 光束线一般常见的有: 远红外、红外、真空紫外、极紫外、软X、X、硬X等, 用近来发展的反康普敦散射方法甚至可以得到更高能量的 γ 光束。

使光束获得不同特性的常见元件有:

(1) 插入件, 其中扭摆器用以提高光子能量, 波荡器用以提高光子产量及亮度、或用以调制光子的偏振或相干度;

(2) 聚焦系统, 用以对光束聚焦, 用于不同波长的聚焦系统无论从原理、材料、结构上都有很大的差异;

(3) 扩束系统, 常用于扩展光束的横向尺度以满足某些实验的需要;

(4) 准直系统, 用于使光束进一步准直以满足实验目的;

(5) 单色器, 用于从同步辐射的连续谱中取出需用波长的光, 用于不同波段的单色器无论从原理、材料、结构上都有很大的差异;

(6) 偏振器, 一般是波荡器之外的改变光子偏振的元件, 往往要求能够快速调整。

由于不同波长的光被物质吸收的性质不同,而且实验对光的纯净性要求也不同,不同光束线要求不同的真空度,超高真空、高真空、低真空都有。为了保持真空度和束线中的光学元件,需要有特殊的真空保护系统。

4 同步辐射应用的当前发展

同步辐射应用的基础是通过光和物质的相互作用进行的。主要的原理有三:光吸收、光散射以及在这两种过程中物质被激发后的退激发射。当然,按每种原理发展出来的方法可以有几十种,许多还只能用同步辐射才能进行,例如,从吸收原理发展出来的 EXAFS 谱和 XANES(X 光吸收谱精细结构和 X 光近边吸收谱学)方法。在第一代光源上的应用,几乎全是单一方法的应用。在第二代光源上,开始发展一个以上方法的联合应用。到现在,多方法的联合使用已经为许多学科提供了空前有力的研究手段。由于发展迅速和篇幅所限,以下只能介绍与材料和纳米科技研究有关的进展中的一部分。应当注意如下一些特征:

(1) 高的通量或亮度,这是当前改进的各代光源首先要达到的目的,也只有在这基础上才能谈到下面的进展;

(2) 能量分辨,1 eV 为低分辨,100 meV—几百 meV 为中等分辨,30 meV—100 meV 的分辨装置已实现,30 meV—几 meV 的分辨装置在建造中,它对谱学应用、散射衍射应用发展有关键性意义;

(3) 高动量分辨,足以扫描直到布里渊区边界的 q -矢量;

(4) 高空间分辨,百 nm 级的为通常、30—50 nm 级已建成,不久 30 nm 空间分辨的探针将用于纳米材料的分析,5 nm 级在建造中,1 nm 级为当前目标;

(5) 高时间分辨,ms 至几十 ps 已实现,200 fs 在规划中。

正是由于这些进展,出现了微和纳衍射、微和纳 X 光吸收精细谱学、微荧光谱学、微和纳尺度断层分析、纳米分辨光电子发射显微术、纳米角分辨光电子谱学、微和纳成像及表征、纳米磁学、纳衍射显微学、纳米-皮秒分辨的快速过程研究、纳米尺度部件评估、纳米厚度薄膜研究等等新领域。当前在美国第三代同步辐射光源 APS 上计划建造一条“纳米探针光束线”,其光斑为 1 nm,以开展不能用其他手段来做的成像、谱学、衍射等方面的研究。

在实验方法上,近年来急剧发展起来多种同步

辐射方法的联合应用,前所未有地增强了同步辐射的应用能力。以下给出两个例子。

第一个例子是 X 光异常衍射(XAD)和精细吸收谱(XAFS)联合应用发展出来的新方法 DAFS(异常衍射精细结构谱)。XAFS 是利用同步辐射的波长精细可调性,对样品中待研究的元素的一个吸收边附近进行吸收谱扫描,从而解出此种元素的原子尺度的近邻情况以及吸收电子价态,这种方法具有元素选择性,是在第一代同步辐射装置上就开始了的传统方法,至今广为众多学科研究使用。X 光衍射是研究晶态物质的传统手段,以不同的入射及探测方法可以研究 3 维、2 维及 1 维晶体的结构,但在通常应用中只利用了散射振幅中 Thomson 散射部分,它与 X 光能量没有直接的关系,与能量有关的是异常散射振幅,不过只有入射 X 光能量能够在吸收边中很狭窄的变域中精细变化的前提下才能加以应用。近年来结构生物学家使用多波长异常衍射方法,很好地解决了生物大分子结构研究中的相位难题,使这种手段成为蛋白质结构研究的主流手段。这两种方法的联合使用发展出的 DAFS,可以定出在晶态体材料或超晶格薄膜材料中不同位置上某种元素的占位情况、有序畸晶格变化的状况等等物性。它对元素分辨,位置分辨,近邻序分辨是十分有力的手段。

第二个例子是目前美国正在建造的硬 X 光纳米探针光束线,入射 X 光的光斑聚焦到 30 nm(还研究进一步缩小到 1 nm 的方案),在样品后用透射 X 光进行吸收或相衬度纳米尺度断层成像、结合荧光谱分析及微衍射分析,以得到纳米材料、器件、技术尽可能多的综合信息。

5 结语

同步辐射装置以其光源的优异性,应用手段的多样性,早已成为极为广泛的多学科交叉研究和相互融合的平台。同步辐射光源与应用方法近年迅猛发展,对纳米科技发展也有着极为重要的推动作用。纳米科技的根本目的是在逐个原子添加水平上了解功能物质,包括生命物质和功能材料,从而在原子尺度水平上设计具有全新性质的功能材料。有人将之誉为即将到来的“科技革命”,这种对人类具有巨大意义的前景最早是费曼指出的。

这当然是一件极为艰巨的事业,需要把迄今人们得到的众多科技门类——物理、化学、生命科学、材料科学、电子学、工程学、计算科学等都放到纳米

尺度中以新的角度加以审视和综合。

在国外发展纳米科技的部署中,特别注重先进科学设备和实验方法的应用,排在一、二位的是同步辐射和高通量中子源,它们是远远超出通常实验室所能单独负担的大科学装置。2001年美国启动了纳米科学、技术及工程的项目,作为支持,美国能源部建立了5个新的纳米尺度科学研究中心,于2003年开始对用户开放。在这5个中心里,3个有同步辐射装置(2个三代光源,1个二代光源)。这一

动态十分值得我们关注,他们的经验值得我们认真吸取。

我国自20世纪90年代后期以来有北京、合肥两个同步辐射装置建成并投入运行,分属第一、二代和第二代装置,另一个先进的第三代装置已得到国家批准,并于2004年底在上海开工建设。现在一个同步辐射纳米科技研究平台已经在北京同步辐射装置上初步建立,我衷心希望这个平台能够促进我国纳米尺度研究的发展,开拓纳米科技研究的新领域。

PRESENT STATUS AND DEVELOPMENT OF SYNCHROTRON RADIATION

Xian Dingchang

(Institute of High Energy Physics Research, CAS & BEPC National Laboratory, Beijing 100049)

Abstract Synchrotron radiation is an advanced light source, which exhibits distinguished characteristics of strongly merging and integrating various modern sciences and high technologies in whose applications, therefore, the synchrotron radiation centers since their establishment have been serving for the frontier researches of nearly all disciplines of sciences and technologies as advanced, unique and irreplaceable platforms. In this paper we give a brief review on the history and the present status of synchrotron radiation facilities development, main applications on the present facilities and the main trend of application developments, as well as some important applications of synchrotron radiation in nano-science researches.

Key words synchrotron radiation, three generations of synchrotron light sources, present status of development, application in nano-scale science and technology

·资料·信息·

清华大学在纳米科技研究领域取得重要进展

清华大学化学系李亚栋教授研究组在纳米科技领域取得重要研究进展。2005年9月1日《自然》杂志发表了该研究组题为“A General Strategy for Nanocrystals Synthesis”的研究工作。同时国际 Nanotechnology 网站(<http://www.nanotechweb.org>)以“Phasing in Nanocrystals”为题,报道和评述了这项在国家自然科学基金等长期持续资助下取得的重要成果。

纳米科技领域主要探索物质在纳米尺度的合成、结构、性能及其应用。如何在纳米介观尺度范围内实现对材料结构与性能的调控,是纳米材料功能化及其应用的关键。由于不同化合物晶体结构、性质等方面的差异,发展通用的纳米材料合成方法是

当前纳米科技领域研究的热点和难点之一。针对这一重要的问题,该研究组提出了一种“液体-固体-溶液”相转移、相分离(Liquid-solid-solution phase transfer and separation)的机制,成功实现了贵金属、半导体、磁性、介电、荧光纳米晶与有机光电半导体、导电高分子及羟基磷灰石等生物医学材料等系列尺寸均一、单分散功能纳米晶的合成制备,突破了现有合成方法通常只能适用于某些单一或有限种类纳米材料的局限。该方法的建立将有助于纳米材料、纳米技术在化学、物理学、材料科学、信息技术乃至生物医学等相关领域得到进一步的应用。

(宣传处 供稿)