

对我国同步辐射发展的思考

丁大钊* 姜晓明

(高能物理研究所北京正负电子对撞机国家实验室 北京 100039)

提要 同步辐射在物理、化学、生物、医学、生命、微加工技术及相关学科的研究与应用方面都是一个强有力的工具。本文就同步辐射应用研究的历史发展、该领域的现状及新一代光源的发展方向、国内研究的发展现状等问题进行了论述,并对发展我国第三代专用同步辐射光源提出了具体建议。

现代科学技术的发展,出现了许多新的交叉领域,这些交叉领域往往成为新学科的生长点。一个能吸引和集合众多学科的科学在一起共同开展研究工作的实验基地,将对今后科学的发展起到极大的推动作用。一个先进的同步辐射装置,正是可以起这种作用的实验基地。

一、同步辐射——联结各学科的纽带

同步辐射是环型加速器中做循环运动的高速电子在经过弯转磁铁时,沿电子轨道切线方向上的电磁辐射,也叫做同步光。同步辐射具有许多优异的性能,如高光强、高准直性、波段广、线偏振、亚纳秒级的时间结构和高稳定性,是比以往的人造光源性能更优异的新光源。

近 20 年来,同步辐射装置已在物理、化学、生物、医学、生命、加工技术及其相关学科的研究与应用方面成为一个强有力的工具。迄今为止,世界上已经建成并投入运行的同步辐射装置有 30 多台,分布在 20 多个实验室中,大约有 6000 多名科学家利用这些装置进行实验。尽管如此,这些装置还不能满足各学科急剧增长的需求。因此,自 80 年代以来世界有关实验室掀起了一股建造新一代性能更好、光强更高的所谓第三代同步辐射光源的高潮。

由于同步辐射应用及技术发展可以而且必须联合绝大部分的科学和技术领域,而使它变得十分重要。什么是生物学家、药学家、物理学家、医学家、化学家、材料科学家所共同关心的问题?答案是他们都关心与化学键和电子结构相关的现象。显微物理学,蛋白质的结构,污染尘簇团的形成,半导体的输运和光学性质,催化剂的机制,人造纳米结构的性质等等,可以列出一份长长的清单,而所有这些问题在原理上都与化学键和电子结构相关联。这些问题是当今

* 中国科学院院士。

科学和技术研究的重要方面,同步辐射是研究手段中的一个基本工具。

许多研究化学键和电子结构的技术都基于“探针”和所研究系统间的相互作用。现代科学技术诞生以来,电磁辐射就是一种最重要的探针。在大多数情况下,用来研究化学键的电磁辐射,至少必须满足两个基本条件中的一个:即它的波长与化学键的长度为同一数量级或它的光子能量与成键原子的电子能量相当。

在发现同步辐射之前,这些条件很难满足,因为具有所需波长和光子能量的光源并不存在。同步辐射是迄今为止在相应波段范围最高、最强、最灵活的光源。一个同步光源绝不只是一个单一用途的设施。它可以同时为许多不同的用户和许多不同的应用提供光源。象美国的 NSLS(国家同步光源)和日本的 PF(光子工厂)这类光源,可同时安排 50 多个不同的实验,容纳上千名不同学科的科学家开展工作。

二、同步辐射应用研究及其历史发展

同步辐射几乎对所有研究领域都有用,我们从核物理工作者的认识来谈谈同步辐射实验的特点和应用。同步辐射作为入射光入射到样品上(可以是晶体、非晶、生物细胞等),次级射线可能是透射光、散射光、荧光、光电子、离子等。入射光的可变量是光子光强 I_0 、入射角 θ_0 、能量 E_0 和光束能量分散 $\Delta E/E$ 。次级射线的可变量是光强 I' 、散射角 θ' 和 ψ' (透射和弹性散射过程)、光子能量变化 E' (非弹性散射过程)、荧光或光电子或离子的能量和能量分布 E'' 、 $\Delta E''$ 。

入射光与样品作用的方式有 20 多种,每一种实验技术都来源于一种电辐射与分子、固体或生物体系的相互作用。例如辐射的衍射,在晶体学中被用来确定由化学键决定的原子结构;辐射的反射和吸收,以及激励光电子或其他粒子的发射,构成了显微术和各种谱仪的技术基础;辐射也可以用来打断化学键,激励光化学过程或在生物体系中造成辐射损伤。

以上方法所观测的信息来自所研究对象的微观现象,还有一些方法是观测由微观现象产生的宏观信息量。如光声现象,当入射光达到一定强度时,可以测出光声效应所产生的反映晶格集体运动的频谱。

自 60 年代在高能加速器上开始进行同步光性能的研究和应用研究,70 年代正式投入应用,应用范围迅速扩大。到 80 年代,在光源和应用两方面都得到了进一步的发展。通常把同步辐射光源的发展历史分成三个阶段:

第一阶段是在高能加速器上对同步辐射的特性进行研究和开始应用研究。由于同步辐射寄生于高能加速器,称做第一代光源,电子束流发射度为几百纳米弧度,电子能量 2GeV 以上。同步光基本由弯转磁铁引出,其性能受到高能物理应用方面的制约,相应的光谱亮度在 $10^{13} - 10^{14}$ 左右。如美国斯坦福直线加速器实验室的 SPEAR 正负电子对撞机,在 1974 年发现了 J/ψ 粒子以后,就开始同步辐射的应用,于 1975 年建成了一条由弯转磁铁引出的光束线。属于第一代光源的还有美国的 CESR、德国的 DORIS、法国 DCI 及意大利的 ADONE。

由于兼用机在安装插入件和使用时间方面受到限制。因而在 70 年代中期建造了第二代同步辐射专用机器。Chasman-Green 聚焦结构的出现,使束团的发射度降低到 40—150 纳半弧度的水平,相应的光谱亮度增高了两个数量级,达到 $10^{15} - 10^{16}$,还可在直线节上加入插入

件,进一步提高光耀度。第二代同步辐射装置的代表有英国的 SRS。美国的 Aladdin 及 NSLS。德国的 BESSY 及日本的 UVSOR 和 PF 等,电子能量约为 0.8—1GeV 和 2.5GeV 两个能量段。这些装置能力巨大,有时可同时安排 50 多个实验,容纳上千名科学家工作,是目前同步辐射应用的主力机型。到 80 年代中,出现了第三代同步辐射加速器,束团的发射度已可压缩到 5—10 纳半弧度,更重要的是在该类机器上可安装大量的插入件,即所谓的波荡器或扭摆器。这不但可以灵活地选择不同能量的光子,而且大大提高了光谱的耀度,达到 10^{17} — 10^{19} 。

三、同步辐射现状及新一代光源的发展方向

下个世纪初同步辐射应用的主力将是第三代光源,它有更高的强度和灵活可调整的偏振性。这一代同步辐射装置电子能量所覆盖的范围可分为两段,即 2GeV 和 6GeV,由弯铁引出的同步光的光子特征能量分别为 2.5keV(软 X 射线)和 25keV(硬 X 射线)。正在拟议建造、建设及调试中的共有 15 台,有三台的能量超过 6GeV,分别为法国的 ESRF(6GeV)、美国的 APS(7GeV)、以及日本的 SPring-8(8GeV)。其余的均为 1—2GeV 内,如意大利的 ELETTRA(2GeV),美国的 ALS(1.9GeV),还有不少是属于第三世界的,如韩国的 PLS(2GeV),印度的 INDUS(2GeV)、台湾的 SRRC(1.3GeV)及巴西等等。这些装置的总投资在 20 亿美元以上,其中西欧的 ESRF 已于 1992 年调试成功,台湾的 SRRC 和美国的 ALS 于 1993 年相继建成。

在上述基础上,近一、二年在设计方面又有了一些新思想,值得指出的是 1993 年 9 月瑞士的 PSI(Paul Scherrer institute)建议的一台 2GeV 的同步辐射光源,通过引入六块 0.3 米长 4.7T 的超导磁铁,使该光源的光谱扩展到 50keV 的硬 X 射线区域。从而使得能量为 2GeV 的中规模机器也能产生与 6GeV 大机器相同的同步辐射光谱,这就大大扩充了该机器的用途,这可以说是对当前通常的第三代环的一个改进。当然它的结构比较复杂,投资相应也较高。

光谱耀度是同步辐射光源一个十分重要的参数。本世纪以来,常规 X 光源的应用延续了几十年,光耀度为 10^7 左右。60 年代发明的转靶 X 光机将光耀度提高了 10 倍。1975 年,美国 SPEAR 的光束线把光耀度提高了 4 个数量级,光耀度达到 10^{12} — 10^{13} ,北京同步辐射光源(BSRF)是寄生于北京正负电子对撞机(BEPC)的兼用光源,由于有一台扭摆磁铁,而且 BEPC 可以工作在同步辐射专用模式,光耀度可达到 10^{14} 。美国的 NLS 是典型的第二代专用光源,光耀度约为 10^{14} — 10^{16} 。第三代光源的光耀度已达 10^{17} — 10^{19} 。

至于光耀度更高的是第四代光源,目前有两个想法:一是把 70 年代建造的超高能正负电子对撞机如日本的 Tristan、美国的 PEP 等进行改造,使其运行在 10—12GeV。采用阻尼扭摆器把电子束发射度降到纳米弧度量级,再加入插入元件,可得到的光源耀度为 10^{19} — 10^{20} 。由于造价昂贵,不可能专门建造如此高能量的同步光源,因此利用退役的超高能对撞机不失为积极的思路;第二种想法是自由电子激光装置,它更有生命力。国际上自 80 年代中期开始研究,目前已成功地建成了红外波段和亚红外波段的演示性装置,并正在研究真空紫外和软 X 光波段的自由电子激光装置。它们技术路线各异,驱动器有电子直线加速器、环型加速器等,还都处在物理论证和技术可行性研究阶段。美国范德别尔特大学已建成了可供用户使用的红外装置,中科院高能物理所于 1993 年建成了一台 $10.5\mu\text{m}$ 红外波段自由电子激光装置(BFEL),得

到了饱和振荡光,在亚洲居第一位。美国 SLAC 实验室正在提议利用 SLC 对撞机开展软 X 光自由电子激光装置的研究,期望电子束发射度为 50 纳米弧度,光耀度达到 10^{21} — 10^{22} 。第四代光源从设想到建成装置还需要较长时间。

四、国内同步辐射研究的发展现状

当前中国已建成三台同步辐射装置,即北京同步辐射装置(BSRF,与粒子物理兼容,专用时能量为 2.2GeV,属于第一代),合肥的国家同步辐射实验室(NSRL,能量为 0.8GeV 的第二代专用环),台湾地区的同步辐射研究中心(SRRC,能量为 1.3GeV 的第三代环。)

但应指出,我国大陆的两台装置在性能及应用范围上有很大的局限性。首先,北京的 BSRF 是 BEPC 的一个组成部分,而当前及今后相当一段时间内 BEPC 必然以粒子物理为重点,每年充其量最多只能有大约 15% 的时间提供给同步辐射专用。而且为防止北京谱仪的飞行时间计数器中的晶体受高的辐射照射,专用模式时电子束的流强限制在 100mA 以下,使光耀度不能达到期望值;另外,虽然 BEPC 工作在对撞模式时可提供兼用的同步光,但对撞模式对电子束的要求与同步光专用模式是相矛盾的,前者要求电子束有大的发射度,以提高对撞亮度,而且由于束束相互作用的限制,流强不大可能超过 30mA;后者则要求小发射度和尽可能高的流强。这种矛盾进一步降低了兼用模式时的同步光性能。迄今为止,尽管 BSRF 已为全国六十余个科研单位及大学的百余个课题在材料、凝聚态、地矿、生物、化学及新技术等诸多领域的研究提供了约几千小时的机时,并取得了不少优良成果,但离开这些用户的要求还有相当的距离。合肥同步辐射光源则由于可提供的光波波长处于真空紫外到软 X 光,使应用及研究领域也受到了限制。可以肯定,随着我国科学技术的飞跃发展,上述两装置在 21 世纪初,是远不能满足那时用户的要求的。

由此可见,为了配合 21 世纪初我国科学技术的发展,建立一台新的能量适中的第三代同步加速器是完全必要的,是当务之急。只有这样才能把我国在这一领域中的研究工作推向前列。另外根据高能所若干年来的实际体会,无论是为提高加速器运行、粒子物理实验质量,还是为满足同步辐射用户对机时的要求,均应考虑建造同步辐射专用环,以使粒子物理及同步辐射应用各得其所。我们认为在 2000 年前,兴建一台能量在 2GeV 左右的中等规模第三代专用同步辐射光源是必要的,假定命名为“中国同步辐射光源(CLS, Chinese Light Source)”。

五、“中国同步辐射光源(CLS)”——建议及技术指标

丁大钊、方守贤及冼鼎昌曾建议在“九五”期间建造一台 2GeV 左右的第三代同步辐射光源,以满足下世纪初我国科学技术发展的需要。根据我国国情,可以参考瑞士一台光源的设计思想,储存环磁场结构为 8 个聚焦周期,每个周期内有三块弯转磁铁,其中间一块为 0.3m 长带软铁芯的超导磁铁(4.5T 磁场强度),另两块为常规电磁铁。主要性能参数为电子能量 2GeV,电子束发射度约 7 纳米弧度,流强为 300mA,束宽为 50ps。由常规弯转磁铁引出的同步光特征能量约为 3keV,而由超导磁铁引出同步光的特征能量约为 12keV,相当于电子能量为 5GeV 的大规模光源。有 4—6 个可供安放插入件的长度为 6 米的直线节,并有两个 16 米

的长直线节,供以后安放超长波荡器或开发自由电子激光装置。整个结构可以构成多达 32 个发光点。

同步辐射连续波谱中,高能端可用的同步光可延伸到特征能量的 5 倍处。这样从 CLS 可以得到从真空紫外到 60keV 的硬 X 射线的全波段同步光谱。值得一提的是,如果具有了 60keV 的 X 光,就可以使所有稀土元素的 K 边得到激发。稀土元素是我国特有的资源,在农业、生物、材料科学方面有很多应用,有待深入认识和开发。CLS 将不但是进行稀土元素研究的有力工具,而且将更广泛地开拓现有的应用领域和开辟新的学科领域。

CLS 将是一台技术上有特色、应用面广泛、性能上可以与下世纪初将成为主力机型的中规模第三代同步辐射装置相匹配的机器。

六、CLS 可拓展的研究领域

这样一台高亮度、全波段同步辐射光源的应用前景是非常好的。CLS 的高亮度、全波段与优越的时间结构,为不同实验方法与技术中的一些独特发展提供了可能性。这些发展都超出了目前通常的应用范围,将涉及微聚焦、材料、化学、原子及分子物理、核探针、地矿、生物、医学、环境及新技术开发等多种对下世纪科技发展至关重要的学科领域。它将为这些学科提供新的实验手段,获取新的科学信息。以下仅列举几例来说明:

X 射线显微术——其分辨率将达到 10nm 量级,不仅对材料科学、微电子学研究有重要意义,特别应指出的是水对波长为 4nm 的软 X 射线是透明的(所谓“水窗”),CLS 的高亮度将可以实现对活的生物体在极短时间内观察其显微图像。

蛋白质晶体学——除了一般意义的晶体衍射成像研究蛋白质结构外,利用高光强的特点裁剪出波长可调的窄线宽的 X 射线,采用反常散射术来得到特定元素在蛋白质中位置的讯息;利用快 X 射线探测器成像法,结合超短同步辐射光脉冲,用劳厄斑点成像法研究蛋白质的结构在特定条件下的变化。这种方法也为今后药物学的研究开辟了一个新途径。

表面分子状态研究——利用同步辐射在电子轨道平面内线极化的性质,将样品不同入射角几何条件与 EXAFS 技术相结合,可以研究材料表面的双原子分子的取向及其在表面上的结合状态,这将对催化剂、微电子学等的进一步研究具有意义。

时间分辨谱仪——利用同步光激发分子,然后用特定波长的激光经一定时间延迟后去探测其化学状态,这是光化学研究的一个新方向。利用强激光激发(或电离)分子或原子,再利用同步光去研究离子团的电子结构将成为原子及分子物理中的一个新的领域。

超高分辨率 X 光学——核探针要求光束的能量分辨率达到 10^{-10} ,以开展晶体内部磁场和电场梯度的研究。CLS 的高亮度使之在技术上成为可能。分辨率为 10^{-10} 以下的光学还是待开发的未知领域。

投影 X 光刻——目前采用的是贴近 X 光刻,可达到线宽为 $0.25\mu\text{m}$,正在受到准分子激光和相移掩模技术的挑战。如果应用投影 X 光刻方法,可以得到的线条宽度为 20nm,这是通常的光刻术所无法达到的。

微加工技术——LIGA 技术是制造毫微米级机、电、控一体的微型装置的一个极佳途径。美国已得到了直径如蚂蚁腿粗细的齿轮,可望研制成用于人体体内手术的微机电装置,比如将

微装置送入人体内实施心血管手术等。也许 15 年以后这些将会投入实际使用。

在强光源下,可以把谱学技术应用到 $0.1\mu\text{m}$ 空间分辨的水平,构成谱学显微镜;也可以把衍射与 EXAFS 技术结合起来,组成所谓 DIFFRAXAFS 技术,用来测定原子在晶体的位置。用强 X 光和高灵敏度探测技术,还可得到价态性质参数,这在光化学、生物、原子和分子物理中都很有用处。

列举这些新的技术发展方向只是表示在 CLS 上可能开发的一些方面。当然同步辐射应用是一个“大”的复杂的科学体系,它包括加速器研制、高性能 X 射线传输研究、X 射线探测方法研究及实验方法研究等方面,需要协调发展各有关技术及动员有关科学技术界的力量,使之真正成为一项代表我国 21 世纪初“大科学”水平的科研设备。

七、建造 CLS 的技术难点

CLS 是具有特色的第三代同步辐射光源,是大型综合性高技术科学装置。CLS 的建造无疑是对我国高技术的挑战。我们认为,它的技术的综合性及难度绝不亚于核物理和高能物理的加速器实验装置。

例如它的地基及建筑物等结构必需有极强的抗微机械振动的能力(在 $1-100\text{Hz}$ 频率内的振幅应小于 $0.1\mu\text{m}$)以保持实验站的光斑位置稳定在 $10\mu\text{m}$ 以内;对于机器本身如此小的发射度,同时又要求有几百 mA 的循环电流也不是一件容易的事;而最大的发展是束流诊断系统及反馈系统,尤其是束流位置探测(BPM)系统,它能给出高精度的、分辨率可达 $10\mu\text{m}$ 的单圈束流在环内的位置,对于多圈闭轨平均值分辨率也可达 $30\mu\text{m}$ 左右,这比目前对撞机的水平高得多。有了如此高的精度,当上述的机械微振动不能控制到 $0.1\mu\text{m}$ 时,就可以利用 BPM 给出的讯号反馈到校正系统使闭轨的变动控制在 $10\mu\text{m}$ 之内。

在光束线方面,高亮度光束的传输(包括光束的聚焦,特殊波长的选择)是比较困难的,为了得到高品质的光传输,自适应光学技术可能会成为束线技术的一个新内容。光束热效应的防护也有相当的难度,因为高亮度 X 射线所释放的功率密度可达 $5-10\text{kW}/\text{cm}^2$,这已与电弧的功率密度相当,必须采用复杂而巧妙的冷却机构及快速的反馈系统,以防光束打到没有冷却回路的元件上。

至于插入元件,这几年的发展更是推陈出新层出不穷,现已在研制圆偏振光的扭摆器。

总之,CLS 的建设为使我国的同步辐射应用走到国际前列提供了一个机遇,也为我国科学技术的发展提供了一个有力的工具。它更是一次挑战。从技术上看,无论是地基的稳定性、温度控制、加速器磁铁设计与制造、超高真空系统的制造、高性能插入件的研制、高强度辐射的吸收及屏蔽、高亮度束线的研制及光学器件的制造、闭环控制技术、光学元件热负载的缓释、新型 X 射线探测器的研制等,无不比目前我们已掌握的水平要高得多。

建设这样一个“多学科”的先进装置,要有高素质人员组成的科技队伍和相关学科的共同协力来承担。我们相信,经过国内同行及科技界的通力合作,这个计划是会实现的。