

的基础科学的发展也必需立足于全民素质的提高。只有这样才能取得更多的理解和支持,才能向更高的水平进军。

(3) 积极开展科技咨询活动,为物理学的繁荣与发展,为国民经济建设献计献策。通过这项活动,一方面我们要从物理学的角度促进国家决策科学化,同时扩大会的影响,增加学会的显示度;另一方面搞好了也可增加学会经济收入,增加我们学会的实力。刚才广西和河北代表作了很好的发言,说明我们在这方面是能有所作为的。

(4) 继续加强物理教学研究,搞好教师的知识更新和培训工作。这对于青年学者的成长,对于培养素质高的接班人,都具有非常重要的意义。

(5) 发挥学会的特点和优势,把我们学会办成物理学工作者之家。学会要关心会员的疾苦,反映他们的心声,为他们说话,保障他们的合法权益,并以此增加学会的凝聚力。

上面的这些工作对我们来说无疑是相当艰巨的。当前我们还面临着一些困难。正象冯端

先生在工作报告中所指出的那样,目前社会上对物理的认识和重视还有问题;对基础研究的投入过低、经费紧张;人才流失和断层问题也还继续存在等等。面对这些困难,我们需要更加齐心的团结起来,努力工作,团结奋斗,克服困难,战胜困难。朱光亚主席在开幕式上讲话时指出物理学“既是一门历史悠久的基础学科,又是在不断发展,显示无穷生命力的重要学科,不断深化和丰富着人们对客观世界的认识”。我深信今后我国物理学的发展将继续对我国的科技进步、社会发展和经济建设发挥巨大的作用。我认为未来的世纪既是生命科学、信息科学的世纪也是物理科学的世纪。中国物理学的前途是光明的,我们学会的前途同样是光明的!

各位代表,全国科技大会不久将要召开。在中国科协的领导下,我们一定能团结全体会员为实现科学技术新的发展和大的解放而奋发拼搏,用新的探索和创造来迎接又一个科学的春天!

谢谢大家!

同步辐射应用的发展¹⁾

先 鼎 昌

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

摘要 本文综述了同步辐射的特点、世界上三代同步辐射装置发展的历史以及它们在科技领域中的应用概况,对我国同步辐射应用的现状与今后发展的方向提出了意见。

关键词 同步辐射,装置,应用,发展,国内现状

Abstract An overview on the features of synchrotron radiation, the history of the three generations of synchrotron radiation facilities worldwide and their applications in various scientific and technological fields are given in this paper. Comments are also made on the status and future development of synchrotron radiation applications in China.

Key words Synchrotron radiation, facilities, applications, development, status in China

1) 1995年5月12日在中国物理学会第六届全国会员代表大会上的报告。

1995年5月22日收到。

1 同步辐射的性质及其早期的应用研究

1947年,在美国纽约州 Schenectady 市的通用电器公司实验室里的一台 70MeV 的同步加速器上,首次在可见光的范围内观察到了强烈的辐射^[1],从此这种辐射便被称为“同步辐射”。同步辐射是速度接近光速的带电粒子在磁场中作变速运动时放出的电磁辐射,一些理论物理学家早些时候曾预言过这种辐射的存在^[2]。

同步加速器的出现^[3],开创了从 50 年代开始的粒子物理的黄金时代。在世界各地建成了一个个高能加速器,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讨厌的东西,因为它损耗了加速器的能量,阻碍粒子能量的提高。然而几位有远见的物理学家则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,虽然在当时大多数的高能物理学家都没有看到这个建议的重要性。

同步辐射应用的可行性研究工作是 60 年代初期开始的,在华盛顿的国家标准局的 180MeV 电子同步加速器、东京的原子核研究所的电子同步加速器、以及汉堡大学的电子同步加速器上,差不多都在同一个时期内进行了研究^[4]。其结果是极为令人鼓舞的。人们很快便了解到同步辐射具有下列杰出性能^[5]:

(1) 具有从远红外到 X 光范围内的连续光谱。光谱由一个叫做特征能量的参量 E_c 所表征。总辐射功率的一半由能量大于 E_c 的光子所贡献。在使用实用单位时, E_c 的定义为

$$E_c[\text{keV}] = 2.218 \times E^3[\text{GeV}]/\rho[\text{m}],$$

其中 E 为电子的能量, ρ 为电子的弯转半径。

(2) 高强度。沿着长度为 L 的弯转磁铁放出的同步辐射功率 P_{tot} 为

$$P_{\text{tot}} = 14.12 \times E^4[\text{GeV}]I[\text{A}]L[\text{m}]/\rho^2,$$

其中 I 为储存环中的电子电流。

(3) 高度的准直性。在每一瞬时同步辐射的发射呈一个很窄的锥状,锥轴与电子轨道相

切,锥的张角 ψ 与电子的能量 E 成反比:

$$\psi[\text{mrad}] = 0.511/E[\text{GeV}].$$

(4) 高度的极化性。在电子轨道平面上放出的同步辐射是完全线极化的,而离开电子轨道平面方向发射的同步辐射是椭圆极化的。

(5) 由于在储存环里的电子是束团状的,同步辐射是脉冲光源,脉冲的宽度为 100 皮秒量级,脉冲间隔为微秒或亚微米量级。这种强脉冲光源十分有利于对一些特定过程(例如化学反应、生命过程、材料结构的变化过程等)进行研究。

(6) 具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,而且没有任何如阳极、阴极和窗带来的污染。

(8) 性能极高的光源。设计精良的储存环使电子束在环中只有很小的截面和很小的发散角,插入件的使用还可使之更小。

从此,人们改变了对同步辐射的最初看法。虽然在最初,作为高能物理研究的副产品,同步辐射应用研究只在很小的规模上开始,但到后来,在几乎所有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。特别是在 1965 年,随着世界上第一个电子储存环在意大利 Frascati 建成,人们立即看到它可以作为一种强大的同步辐射光源的前景。从 70 年代开始,同步辐射应用便步入了它的现代阶段。至今,同步辐射装置的建造及在其上的研究、应用,经历了三代的发展。

2 第一代同步辐射装置及其应用

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,如美国斯坦福的 SPEAR 储存环、康奈尔大学的电子同步加速器、德国汉堡的 DORIS 储存环、意大利弗拉斯卡蒂的 ADONE 储存环等等。在中国科学院高能物理研究所的北京同步辐射光源在兼用模式下属于第一代同步光

源^[6]。

虽然第一代同步光源不是为同步辐射应用而专门特殊设计的,但是它的高强度与从远红外到硬X射线的宽阔的光谱已经使它具有无以伦比的能力,例如,很短的数据采集时间、可连续选择的波长变化和高的能量分辨率等等,从而开创了许多新的研究领域。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^[7],微电子学中的深亚微米软X射线光刻技术^[8],甚至对那些已经成熟的方法,如X射线晶体学分析、利用光与物质相互作用后的二次发射进行谱学分析的方法等,都因同步光源的出现而带来了新的机遇和新的活力。

很快地,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变成现实,而且,在这些第一代光源上还展示了一些非常重要的工业及社会应用的可行性,如使用同步辐射X射线的亚微米光刻、非插入性的心血管造影等。到了70年代的中期,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,这种强烈的要求反映在1976年美国国家科学院的一个正式的报告里。在欧洲和日本,建造新一代同步光源的潮流也是差不多在这个时期开始的。

3 第二代同步辐射装置及其应用

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作最优化的设计。在储存环中运动的电子,并不是都沿同一的轨道运动的,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横截面和发散角。在加速器物理学中,在每一方向上这二者的乘积称为在这个方向的“发射度”,它的单位是 $\text{nm} \cdot \text{rad}$ 。在相同的电子能量和电子电流的条件下,储存环的发射度越小,放射出的同步辐射的亮度也就越高。在同步辐射的应用中,许多尖端的实验要求高的亮度,这就要求作为光源的储存环的发射度小。一般说来,高能对撞物理用的储存环的发射度都较大,通常都达几百 $\text{nm} \cdot \text{rad}$ (见表1),也就是说,高能物理与同步辐射应用对储存环的要求是矛盾的。虽然自1975年,法国Orsay的正、负电子对撞机ACO在它的高能物理研究计划结束之后被转用为一台专用的同步光源,从而开始了将退役高能物理加速器

表1 三代同步辐射源的主要参数

代 别	装 置	$E(\text{GeV})$	$E_c(\text{keV})$	发射度 ($\text{nm} \cdot \text{rad}$)	典型亮度
第一代	SPEAR (美)	3	4.7	450	10^{12}
	ADONE (意)	1.5	1.5	290	
	DORIS (德)	3.7—5.5	9.2—23	270/560	
	BSRL (中)	1.6—2.8	0.38—4.7	660/76	
第二代	NLSL (美)	2.5	5.0	190	10^{14}
	PF (日)	2.5	4.1	130	
	SRS (英)	2.0	3.2	110	
	HEVSL (中)	0.8		170	
第三代	ESRF (欧)	6	14	7	$10^{16}—10^{18}$
	ELEKTRA (意)	2	3.2	7.1	
	SPRING-8 (日)	8	28.3	5.6	

转变为专用同步辐射光源的第一个记录,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,必须从设计开始就考虑到他们的要求。

为了减小发射度以提高同步辐射光源的亮度,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)发明了一种把加速器上的各种使电子起弯转、聚焦、散焦等作用的磁铁按特殊的序列组装的方法^[9]。这种组装序列后来被称为 却斯曼-格林阵列(Chasman-Green lattice),它及后来受它启发而提出的各种改进方案,不但是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。以却斯曼-格林阵列的采用作为第二代同步光源的标志是合适的。合肥的同步辐射光源属于第二代光源。

大部分第二代同步辐射源如英国 Daresbury 的 SRS,美国 Brookhaven 的 NSLS 以及日本筑波的光子工厂(PF),都是在 80 年代前后建成的。它们的发射度大约为 $100\text{nm} \cdot \text{mrad}$ (见表 1)。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极为众多的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,包括力学的、化学的、电学的、热学的、磁学的、光学的、生物学的以及其他方面的性质。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具有预期性能的新材料,从而为技术科学与工业应用开拓广阔的新前景。

在方法上,第二代同步辐射装置上的科学实验大致可以分成两类:

(1) 弹性散射,例如,物理学中历史悠久的 X 射线衍射法便属于此类。由这类实验可以确定物质中原子及分子的空间位置。从上述例子可以看出,从衍射图样中各个光斑的空间分布及强度可以推定各原子、分子在物质中的位置,这是自 1912 年劳埃的开创性工作以来物理学

的传统手段,但是同步辐射的高亮度与波长的可调性,使得不但使用散射时的振幅,而且利用其位相成为可能,这就为这种方法打开了新的局面,提供了前所未有的可能性。

(2) 谱学研究,例如,吸收谱、发射谱、荧光谱、光电子谱等。由这类实验可以确定物质的电子结构,包括化学键。这方面的研究也给出了一些物质的原子结构的信息,例如广延 X 射线吸收谱的精细结构(EXAFS)的研究。

除了基础研究和应用研究方面的活动,在第二代同步辐射装置上的工业应用也增多到令人瞩目的程度。据一份最近的报告,在真空紫外(VUV)能区的装置上与工业应用有关的份额,日本达 33%,美国的 BNL 更高,达 55%,欧洲比较落后,为 10%^[10]。新发展起来的同步辐射软 X 射线微机械加工的 LIGA 技术、同步辐射 X 射线精密加工技术等均具有很重要的价值,前者已经走出实验室,成为一门新的产业。同步辐射装置已经成为化学工业、石油工业、制药工业、新材料合成等工业应用的强有力的手段。

4 第三代同步辐射装置及其应用

第二代同步辐射装置对科学研究与工业应用的巨大推动,促使世界各国政府支持建造新一代,具有更高亮度的同步辐射光源,这就是目前在许多国家中正在建造的第三代同步辐射光源。

推动建造第三代同步光源的动力是科学技术上要求有更好的空间分辨、更好的时间分辨、更好的动量分辨和更好的能量分辨的手段。保证这些“更好”必须以更高的光源亮度为前提。

相对于第二代同步光源来说,第三代同步光源以更小的发射度和大量的插入件的应用为标志。

插入件的概念是苏联物理学家 V. Ginzburg 早在 1947 年就提出来的^[11],而这种器件的应用则是美国人 H. Motz 首次实现的^[12]。插入件用于同步辐射的产生是在 70 年代末至 80

年代初。

插入件是一系列周期地排列的磁铁，其周期数为 N ，周期长度为 λ ，它插入在储存环两个弯转磁铁组件之间的直线段，所以得到插入件的名称。当电子经过插入件时，在磁场的作用下，电子将沿一条近似地为正弦曲线的轨道运动，在插入件中摆动的次数刚好是 $2N$ ，摆动的曲率半径反比于磁场峰值 B_0 。插入件的性能由偏转参数 K 描述， K 的定义为^[13]：

$$K = eB_0\lambda_0/2\pi mc^2.$$

在实用单位下，有

$$K = 0.934\lambda_0[\text{cm}]B_0[\text{T}].$$

当 $K > 10$ 时的插入件叫做扭摆器，当 $K < 1$ 时叫做波荡器。一般的扭摆器是强磁场与较长周期的插入件，由于较高的磁场会使扭摆发生较大的形变，运动轨道的曲率半径 R 变小，由于同步辐射光谱的特征能量 E_c 反比于 R ，即

$$E_c = 2.218E^3/R,$$

这样，通过在储存环上安装高磁场的扭摆器，可以使同步光谱向高能方向移动，而且同步光的强度也将增强 $2N$ 倍。

在 1980 年试验成功的、利用当时新出现的稀土合金永磁体磁铁制成的波荡器，是插入件发展史上的一件大事^[17]。永磁体磁铁的采用可以将插入件磁铁周期缩短到几个厘米，从而大大地增加在给定的直线段中磁铁的周期数。这种插入件的磁场决定于永磁体磁铁间的磁隙。在低磁场和大周期数的情况下，电子在穿过这种插入件时，其轨道只作轻微起伏，因而得到了“波荡器”这样的名称。由于电子在波荡器中运动轨道的曲率半径很大，一般地说，波荡器是不能使同步光谱向高能方向移动的，但由于电子的偏转角小，从波荡器中不同的磁极上发射出来的光子相干地叠加，产生干涉效应，使得同步光谱中出现一系列尖峰。也就是说，波荡器给出一系列近乎单色的同步光，而且这些波长的同步光的强度要增强近 N^2 倍。在波荡器中产生的同步光，不但强度增加，而且发射角也减小，近似地说，是弯转磁铁上产生的同步光的发射角的 $1/\sqrt{N}$ 。这二者结合在一起，可以把同

步光的亮度增加 5 个数量级以上。

第三代同步光源的特征是为大量使用插入件而设计的低发射度储存环。这些环的发射度一般都小于 $10\text{nm} \cdot \text{rad}$ (见表 1)。它们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 射线光源要亮一亿倍以上！

从 1994 年开始，世界上已经有五个第三代同步光源投入运行。有为数更多的第三代光源在建造中 (见表 2)。

表 2 世界上的第三代同步辐射光源

装置	电子能量 $E(\text{GeV})$	发射度 ($\text{nm} \cdot \text{rad}$)	可用直 线段数 目	典型亮度	目前 状况
ESRF (欧)	6	7	29	2×10^{18}	运行
APS (美)	7	8	34		建造
SPring-8 (日)	8	5.6	38	3×10^{18}	建造
ALS (美)	1.5	3.4	11		运行
ELETTRA (意)	2.1	4.0/7.1	11		运行
BESSY II (德)	1.7	6.1	16		建造
MAX II (瑞典)	1.5	8.8	10		建造
SuperACO (法)	0.8	37	8		运行
SRRC (中国台湾)	1.5	19.2	6		运行
LNLS (巴西)	1.15	33.9	6		建造
PLS (韩)	2	12.1	10	5×10^{17}	建造
SLC (西)	1.3	15	12		批准
NANOHANA(日)	1.5/2.5				批准
SLS (瑞士)	1.5	1.6		2×10^{20}	设计
Siberia II (俄)	2.5				
Indus II (印)	1.4				

在第三代同步辐射装置上的科学实验的类型，比在第二代装置上的增加了一种，就是非弹性散射。以非弹性 X 射线散射为例，目前已经能够做到能量分辨达几个 meV ，传递动量分辨 $\Delta q/q \sim 0.03$ 。更为重要的是，研究手段从过去的静态的、较大范围内平均的手段扩展为空间分辨的与时间分辨的手段。

4.1 空间分辨型实验带来的新机遇

对于大多数的第一及第二代光源上的实验，由于亮度的限制，同步辐射光斑不能太小，照射到样品的面积也就较大，因此所得到的信息实际上是在这个面积范围内的平均信息。但是，科学技术的发展要求的不是这种平均的信息而是范围越来越小的局域的信息。

例如,微电子学的发展使得线宽为 $0.1\mu\text{m}$ (100nm) 的芯片问世在有望,这方面的技术发展要求对芯片的结构分析与成分分析局域化,这可以通过用空间分辨小于此线宽尺度的扫描 X 射线显微分析或扫描谱学分析来达到。在亚细胞水平的生物学和医学研究、高强度合金、陶瓷材料、聚合物等许多方面的研究中,都需要有纳米水平的结构、成分、化学键等方面的信息,这些都要求空间分辨型的实验。

随着科学的发展,许多学科都需要对在某些极端条件下(如极高的温度、极大的压力、极高的电场和磁场等)的物性进行研究,而在实验室中,这种极端条件只能在一个极小的区域中才能实现,这就要求待研究的样品被限制在一个很小的尺度内。地质学家感兴趣的地球内层,是由压力为 360GPa 与温度为 6000K 的固态铁-镍合金构成的;而天体物理学家感兴趣的是一些星体上的物态,例如木星和土星的内层,则要研究处在更极端的条件下的氢-氦混合物。目前由于高压物理实验手段的发展,这个水平的条件在实验室中是有可能达到的,但是只限于很小的体积内,一般小于 $100\mu\text{m}^3$ 。如果研究在 100GPa 下的固态氢,由于它极好的压缩性,样品的体积更小,只有几个 μm^3 。最好的第二代同步光源所能研究的最微小的样品约为 $300\mu\text{m}^3$,这就是为什么只有应用第三代同步光源才能研究一些极端条件下的物性的道理。

高亮度的微米束 X 射线,在很多领域中有非常广泛的应用,例如微区荧光分析、非破坏性应力的三维分布研究、非破坏性元素的三维分布研究等等。

第三代同步光源对许多蛋白质晶体的研究大有帮助,因为在许多情况下,制备大尺寸的蛋白质晶体是非常困难的。使用第三代同步光源,蛋白晶体样品的尺寸可以减小到 $\sim 20\mu\text{m}$,而在使用第二代同步辐射光源的情况下,这是不可能做到的。

4.2 时间分辨型实验带来的新机遇

同步光源是一种脉冲光源,脉冲宽度约为 100ps ,脉冲间隔约为 $0.01\text{--}1\mu\text{s}$ (取决于储存

环的周径与运行的电子束团数目)。这种光源对很大一片科技领域内的动态研究是十分有用的(图 1),然而,由于亮度的原因,这种脉冲性质在第一及第二代光源上基本上没能得到应用,而在第三代光源上,这方面的工作将会占越来越重要的地位。

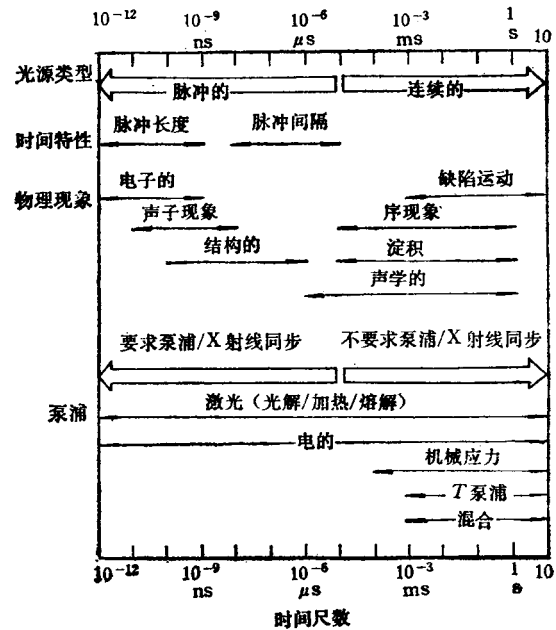


图 1 不同过程的时间尺度

以生命科学研究为例,了解生物大分子的结构只是进入分子生物学的第一步,第三代同步光源的出现使得通过结构的实时改变来了解许多生命过程成为可能,并从结构研究进入到功能研究的领域。作为例子,蛋白质动力学的不少领域的时间尺度是落在这个时间分辨领域中的,例如分子间振动 (fs--ns)、有序-无序转变 (ns--ms)、酶作用 (ms)、蛋白质-蛋白质相互作用 (ps--ms)、质子/电子迁移反应 (ps--ms)、金属-配合基 (ligand) 结合 (ps--ms)、等等。正是由于这个新机遇,无怪乎在新落成的欧洲同步辐射中心 (ESRF),有 45% 的实验申请来自生命科学家。

在第一与第二代光源上,由于信噪比差,同步辐射时间分辨谱学研究几乎可以说是没有得到开展,对于第三代光源来说,情况有根本的改变,原则上这类实验的时间分辨可以降到纳秒以下,这是一个牵涉到许多学科领域的大事。

5 同步辐射应用的发展趋势及关键的技术上、政策上的问题

5.1 作为多学科共同应用中心的同步辐射装置

在当代的科技发展中,学科交叉与科学技术在新的层次上的结合占有越来越重要的地位,导致许多重大的突破和新的科研领域的诞生.扫描隧道显微镜是后者一个好的例子,而前者可以生物医学科学的一些重要发展为例.

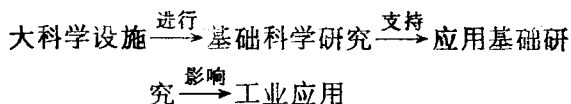
在第一及第二代同步光源上,生物医学科学家已经成功地开辟了许多新的领域:生物分子及蛋白晶体的结构分析,活的生物体在器官、细胞、细胞器以及分子水平上的结构分析,药物筛选、非插入的双色数字减除法心血管造影,在活的细胞中化学元素的三维拓扑构像等.这些都是生物医学家和物理学家、化学家、计算机科学家与工程师紧密合作的成果.第三代同步辐射光源的出现使得这些领域从基本上是静态的、结构的研究开拓到动态的、功能性的研究成为可能.而这些方面将会是下一个世纪的生物医学科学的研究重心.

过去的经验表明,同步辐射中心提供了一个多学科交叉与科学技术结合的自然场合,其重要性在今后的科技发展中会越来越明显地为人们所认识.

在今后,物理学仍将在仪器发展上起决定性的作用,在学科交叉研究中它也将是一个主要的伙伴.

5.2 同步辐射中心作为一种特殊模式的大科学设施

20世纪科学发展的一个重要特征是科学出现,而且,大科学设施的规模与建造的投资有越来越大的趋向,绝大多数的大科学设施的建造与运行是由国家支持的.为了得到公众的支持,一个必须回答的问题是:进行基础研究的大科学设施,它们对于生产力的发展有何影响?对于多数大科学来说,可以用如下的线性模式来说明它们的影响:



即,在大科学设施上进行的基础科学研究支持应用基础的发展,应用基础的发展最终在工业中的应用将影响生产力的发展.经验告诉我们,这种影响常常是一个漫长的过程.

如果按计算机的术语说,上面的线性模式是串行输出的模式的话,相反地,在同步辐射设施上这三类活动是同时进行的,亦即作为大科学装置的同步辐射设施对基础科学、应用基础与工业应用的关系是并行输出的:



正是由于这个特点,在世界上有条件的国家中,同步辐射设施的建造都得到优先的支持.

5.3 我国建造第三代同步辐射光源的一些科技关键问题

我国是否应当建造第三代同步辐射装置?

在读了上面的介绍后,回答是当然的:是!因为它是促进下一个世纪科技发展的一个十分重要的手段.

在我国虽然已有建造第一代与第二代同步辐射设施的成功经验,但要建造第三代同步辐射设施,则还有相当大的差距.

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,在其波荡器中的电子束的截面是椭圆形的,水平方向的长度是 $335\mu\text{m}$,而垂直方向的长度仅 $65\mu\text{m}$,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.反映在安装精度上,这就要求将它安装在周长近 200m 的近 200 个各类二极、四极等磁铁的中心,对设计位置的偏离小于 $150\mu\text{m}$.对于波荡器的要求更高:在其 5m 的长度上,每个磁极的位置安装精度应高于 $20\mu\text{m}$,而且这个精

度在 40t 的磁力作用下仍能保持! 其他对磁铁的加工精度、电源的稳定度、地基的抗振能力、磁场分布的精度等的要求, 同样都是相当苛刻的。在这些精度都达到后, 还需要有巧妙的电子束流监控系统, 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, 但是都属于成熟的技术, 只要有精密机械加工的保证和在设计、测试、安装等方面的严格把关, 这些苛刻的指标都是能够达到的。所有已经投入运行的 5 个装置的建造经验都证明了这点。

不过, 在国外属于成熟的技术并不等于说在我国已经掌握了这些技术, 同步辐射装置上用到的技术的最突出的特点是它永远在发展中。而我国在建造成功两个同步光装置之后, 由于种种原因, 同步辐射应用的技术发展处于停顿的状态, 这种状况是很不应当出现的。它影响到以下几个方面:

(1) 对第三代同步光源的加速器设计预算不足;

(2) 对插入件的技术没有足够的掌握: 迄今在北京与合肥两个储存环上还没有多极插入件的建造经验, 对插入件的发展情况也没有跟踪, 知识停留在 80 年代的水平上;

(3) 对束流位置监测及位置控制没有经验: 无论北京或合肥, 都没有进行这方面的工作, 且不说这是关系到第三代同步光源成败的重要关键, 即便在第一、二代光源上, 它们也属于必须掌握的经验;

(4) 对影响到第三代同步光源建造成败的其他关键技术掌握不足。

5.4 我国开展第三代同步辐射应用的一些关键科技问题

第三代同步光的应用, 必须解决三方面的问题: (1) 高功率密度下的光学元件设计; (2) 高计数率、高时间分辨及高空间分辨的探测器发展; (3) 高速度的数据采集、传输、在线分析和在线显示。

第一个问题, 合肥装置的电子能量较低, 没有予以较多的考虑是很自然的。但是在北京的

装置上已经出现了光学元件的散热的问题, 但是这些年来却连常规的水冷经验也没有补上, 许多在设计前必不可少的程序分析也没得到应有的注意, 这是很令人遗憾的。目前这方面的技术已经有很大的发展, 从水冷发展到液态金属冷却、液态气体冷却、应变光学元件设计等技术, 在这些方面, 我们的落后是惊人的, 而没有这些必要的经验积累, 说建造第三代同步光束线便是一句空话。

第二个问题, 举两个例子。EXAFS 类型的实验, 从能量逐点的扫描发展为能量色散与 QEXAFS 的方法, 以及晶体学的衍射的探测, 从单色光衍射发展为白光劳厄衍射, 再进而发展到变波长的准劳厄衍射, 都是不久前的事, 这些发展, 在北京的同步辐射装置上早就提出过要进行, 但是始终没有开展, 这也是很令人遗憾的。没有这些基础, 说要发展用于第三代光源的探测器将是一句空话。

第三个问题, 也是目前世界上所有致力于发展第三代同步光源应用的实验室遇到的共同问题, 这要求由应用的对象学科的专家, 与电子学、计算机、计算数学等有关方面的专家合作解决, 持之以恒, 不断更新改进, 成为本实验室的一个传统。很可惜, 国内这两个实验室在这方面做得很不够。同样, 没有这方面的技术, 要开展第三代光源的应用研究也是一句空话。

5.5 我国建造第三代同步辐射设施及开展应用的一些重要的政策

(1) 对于所有同步辐射装置(其实, 对于所有的大科学装置), 建成只是第一步, 政策上必须鼓励把这些装置的潜力推到极限, 只有这样才能取得作下一步发展的真正经验。这应包括对单位的经费支持和对工作人员的奖惩等方面的政策。

(2) 一个同步辐射中心的装置与应用的技术永远是在改进的过程中的, 没有不进行这些方面改进的同步辐射中心。如果说有的话, 那必定是个等待关门的中心。那些认为一个同步辐射中心只需抓好为用户服务就够了的观点是不正确的。

(3) 在一个同步辐射中心里,且不说光源与光束线,就是探测器与其附属设备,许多都需要自行设计与制作,没有现成产品可买的。从这个意义上讲,在同步辐射中心里,仪器与方法学的发展(instrumentation)也许比其他大科学中心有更大的份额。政策上必须保证这点。

(4) 从上面三点引伸的结论是:一个同步辐射中心的设备和应用技术的改进与发展是连续的,不可中断的,政策上必需保证此连续性。我国两个同步辐射实验室中出现的发展停步的现象必需迅速改变。

(5) 建造第三代同步辐射装置及在其上开展应用的技术,来源于总结与提高国内现有的技术经验,并在此基础上吸收国外的先进技术。在这里,政策应当保证全国一盘棋的发展路线。

(6) 由于发展的停顿不前引起的青年人才的流失现象应当迅速扭转过来。这需要得到政策上的保证。

致谢: 作者感谢任孟眉同志在本文写作过程中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] F. R. Elder, R. M. Gurewitsch, R. V. Langmuir et al., *Phys. Rev.*, **71**(1947), 829.
- [2] I. Ya. Pomeranchuk, *JETP*, **9** (1939), 915. D. Ivanenko and I. Ya. Pomeranchuk, *Phys. Rev.*, **65** (1944), 343.
- [3] J. Schwinger, *Phys. Rev.*, **75**(1949), 1912.
- [4] K. Codling and R. P. Madden, *J. Appl. Phys.*, **36**(1965), 380. T. Sagawa, Y. Iguchi, M. Sasayama et al., *J. Phys. Soc. Japan*, **21**(1966), 2587. R. Haensel and C. Kunz, *Z. Angew. Phys.* **23** (1967), 276.
- [5] E.-E. Koch *Handbook on Synchrotron Radiation*, North-Holland Publishing Company, (1983).
- [6] Xie J. L., Workshop on the Construction and Commissioning of Dedicated Synchrotron Radiation Facilities, ed. R. E. Klaffky, Brookhaven National Laboratory, BNL 51959 (1985), 126.
- [7] D. E. Sayers, E. A. Stern and F. W. Lytle, *Phys. Rev. Lett.*, **27**(1971), 1204. P. Eisenberger, B. Kincaid, S. Hunter et al., in *Proceedings of the IV International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics*, eds. E. E. Koch, R. Haensel and C. Kunz, Pergamon, Oxford, (1974), 806.
- [8] D. Spears and H. Smith, *Electronics*, April (1987), 979. W. D. Grobman, *Handbook on Synchrotron Radiation*, ed. E. E. Koch, North Holland Publishing Company, (1983), 1140.
- [9] R. Chasman and G. K. Green, in: *Proposal for the National Synchrotron Light Source*, ed. J. P. Blewett (Brookhaven National Laboratory Report No. 50595, Brookhaven, Feb. 1977), Vol. 1.
- [10] N. Kroo, *Synchrotron and Neutron Sources and Their Applications*, Report on the Panel, Geneva, 17 Feb. (1995).
- [11] V. L. Ginzburg, *Izv. Akad. Nauk. USSR. Ser. Fiz.* **11**(1947), 165.
- [12] H. Motz, *J. Appl. Phys.*, **22** (1951), 527. H. Motz, W. Thon and R. N. Whitehurst, *J. Appl. Phys.*, **24**(1953), 826.
- [13] S. Krinsky, *Handbook on Synchrotron Radiation*, North-Holland publishing Company, (1983), Ch. 2.