

建造一台第三代同步辐射储存环的建议

A Proposal of Constructing a Storage Ring as a Third Generation Synchrotron Light Source

方守贤

(高能物理研究所, 中国科学院学部委员 北京 100039)

一、国际发展现状

当前,作为同步辐射光源的正负电子加速器装置已经成为物理、化学、生物及其相关的子学科在研究与应用方面的强有力的工具。迄今为止,世界上已经建成并投入运行的同步辐射装置30多台,分布在约20多个实验室中,大约有6 000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方面急剧增长的需求。因此,建造新一代性能更好、光强更高的同步辐射光源已提上日程。目前,正在进行设计与建造的第三代同步辐射加速器约有14台,除美国、西欧及日本在建造能量为6~7吉电子伏的大型同步辐射装置外,大部分能量均在1~2吉电子伏范围内,不少是属于发展中国家的,如印度、巴西、韩国等。这些装置的总投资在20亿美元以上,估计在1995年前后陆续投入使用。附表是世界上已有的和正在建造中的同步辐射装置。由表看出,同步辐射装置所覆盖的能量范围可分为三段,即0.8吉电子伏、2吉电子伏、6吉电子伏,相应的光子能量为0.5千电子伏(真空紫外)、2.5千电子伏(软X射线)、20千电子伏(硬X射线)。

二、第三代同步辐射加速器及其特点

目前,同步辐射加速器发展已进入第三代。第一代为兼用机,起源于50年代初,是利用一些高能物理实验的对撞机所产生的同步辐射光兼作其他学科的研究。如美国的SPEAR和CESR、前联邦德国的DORIS、法国的DCI及意大利的ADONE。该类装置中的束团发射度较大,约为几百纳米·弧度,相应的光谱的耀度较低,在 $10^{13} \sim 10^{14}$ 个/s·mm²·mrad²·10⁻³bw左右(即每秒·每平方毫米·每平

方毫弧度·千分之一带宽内有 $10^{13} \sim 10^{14}$ 个光子)。由于兼用机在安装插入元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装置专用机器。Chasman—Green聚焦结构的出现,使束团的发射度降低到40~150纳米·弧度,相应的光谱的耀度也增高了两个数量级即 $10^{15} \sim 10^{16}$ 个/s·mm²·mrad²·10⁻³bw。作为第二代装置的代表如英国的SRS,美国的Aladdin及NSLS,前联邦德国的BESSY及日本的NVSOR和PF等。这些装置能力巨大,有些可同时安排50多个实验,容纳上千名科学家工作。到80年代初,出现了第三代同步辐射加速器,束团的发射度可压缩到5~10纳米·弧度,更重要的是在该类机器上可安装大量的插入元件,即所谓的波荡器或激波器。这不但可以灵活地选择所产生的不同能量的光子,而且提高了光谱的耀度,达 $10^{17} \sim 10^{19}$ 个/s·mm²·mrad²·10⁻³bw。

第三代同步辐射加速器需要有更高的技术。比如,高耀度光束的传递(包括聚焦和特殊波长的选择)是极困难的事情。还有光束热效率的防护也有相当的难度,必须采取复杂而巧妙的冷却机构,因为高亮度X射线所释放出的功率密度达5~10千瓦/厘米²,这已与电弧的功率密度相当。为了不使光束万一打到没有冷却回路的元件上,必须对储存环的闭轨畸变有极严格的控制,通常为±5~10微米范围内。这大大严于当前高能加速器闭轨畸变允许值0.2毫米的水平。另外由于Q铁位置误差引起闭轨畸变可放大100倍之多,所以要求地基及建筑物等结构均有极强的抗微机械振动的能力。这些对当前的科学家及工程师来说是一个新的挑战。

为了产生如此小的发射度,同时也要求有几百毫安的循环束流。因此,加速器的设计和部件的制造(如C形磁铁、超高真空室及高精度的插入元件等)也并不是一件容易的事,必须进行大量的预制研究。

特别要指出的是,为了得到强而稳定的束流,防止正离子的俘获引起的不稳定性,第三代同步加速器均利用正电子来产生同步光而排除通常用的电子。

三、第三代同步辐射光源的用途

第三代同步辐射光源具有更高亮度、更高准直性、可变偏振性、脉冲宽度极短等特点,从而为科学技术的发展开辟一个新的天地。在物理、化学、地球科学等学科中,极端条件下物态的研究是学科的前沿。而实验室里只有在很小的范围内才能达到这些极端条件,所涉及的样品也极小。这就要求更高亮度的同步辐射光来研究诸如在1兆巴下的结晶学、不同元素化合物的相变、微米级的单晶、毫秒级的实时测量、微米束的扫描荧光分析及CT成像等。

使用波荡器可以得到高亮度的单色光,可以开展穆斯堡尔(Mossbauer)效应的实验工作,不局限于有限的几种同位素所提供的光源的穆斯堡尔谱的工作。这是一个有巨大应用前途的广大领域。

同步辐射光的应用极大地推动了对晶体材料缺陷的研究,但仍局限在晶态、准晶态或随时间发展相对缓慢的现象。应用第三代同步辐射光源产生的高亮度同步光可以进行晶体生长、相变过程的研究,以及对瞬时应力和声波现象等的直接观测。

在生物学方面,要制备较大的蛋白质晶体是困难的。第二代同步辐射光源要求晶体的尺寸大于300微米³,第三代同步辐射光源的出现可将此要求降低到20微米⁴,这就极大地扩展了蛋白质晶体研究的领域。

四、具体建议

目前我国已建成两台同步辐射光源。一台是北京正负电子对撞机(BEPC),其能量范围为1.2~2.8吉电子伏。这是一台兼用机,在磁聚焦结构的设计中考虑了同步辐射的工作模式,因而具有接近于第二代同步辐射装置的性能。在最近的调试实验中得到的结果表明,其能量在2.2吉电子伏时流强可达100毫安,发射度接近76纳米·弧度。唯一的不足是缺少安置插入元件的空间,使光束亮度受到一定的限制。另外在最初几年中将以高能物理研究为主,用于其他学科方面的研究将受到一定的限制。初步估计这台对撞机在高能物理方面的寿命为10年,10年后将变为专用的同步辐射装置,能量可达3吉电子伏。另外一台是合肥中国科技大学的同步辐射专用机器,能量为0.8吉电子伏,目前正在调试中。它属于第二代同步辐射加速器,可安置少量的插入元件。由于能量较低,在使用上也受到一

定的限制,其性能与第三代装置尚有相当的距离。

经过上面两台加速器的建造,我国在加速器、光束线及其相应的实验装置的设计与建造方面均积累了一定的经验,为今后十年中同步辐射研究及应用打下了一个良好的基础。但是绝对不能停止不前,为了迎头赶上,必须同时进行第三代同步辐射加速器的研制,并着手规划新的装置建设。具体建议是建造一台能量为1.0~1.5吉电子伏的同步辐射加速器及其相应的光束线,地点建议在高能所。主要理由如下:

1. 高能所通过BEPC的建造,培育了一支高水平,并能顽强拼搏的科研工程队伍,实践证明这支队伍能承担这一艰巨的新任务。

2. BEPC已有的一台注入器可以提供能量为1.0~1.5吉电子伏的正电子束流,正符合第三代同步辐射装置全能量正电子注入的要求。因此,利用高能所现成的注入器可以大大节省投资。

3. 该储存环周长140米,平均直径约40米,再加上周围的同步辐射实验室,恰好能安置在高能所BEPC附近的一块80平方米的空地上,而不需要另外征地。并且可以充分利用现有的公有设施以及必不可少的服务设施。这不仅节省投资,而且可以缩短建设周期。

4. 最高能量为1.5吉电子伏的同步辐射装置所产生的光子能量覆盖了真空紫外及软X射线区域,不但可以作大量的研究和应用工作,而且投资适当。在国外这样的一台装置需要投资1亿美元左右(不包括光束线和实验设备)。而我们由于有以上的有利条件,总耗资在1亿人民币以内(按1990年不变价估计)。如果建造更大的如6吉电子伏的同步辐射装置,国际上将耗资4~5亿美元,这已大大超过了我们国家所能支持的能力。

初步设想在“八五计划”的头三年进行预制研究,待国家经济情况一旦好转,即开始建造,可望在3~4年内建成。这样,在90年代中后期,我们将有一台性能优异的同步辐射装置为更多的学科提供服务。届时,国家实验室将成为名符其实的综合性研究中心。

五、方案举例

1. 储存环及主要部件与结构参数

储存环周长	131.2米
聚焦结构	TBA(每周期三块弯转磁铁的消色散聚焦结构)
超周期数:	8 直线节数目:6(长度6.6米)
磁铁:	24块
Q 铁:	48块 S 铁: 16块
校正磁铁:	32块

2. 储存环主要性能参数

注入能量	1.5 吉电子伏
束流能量	1.5 吉电子伏
束流强度	400 毫安
β 函数振荡频率	9.74/5.62
直称节对称点处 β 值	10.0 米/4.0 米
动量压缩系数	2.79×10^{-4}

自然能散度

阻尼时间:

RF 频率

谐波数

7.7×10^{-4} 纳米秒

水平 7.2 毫秒

垂直 10.0 毫秒

纵向 6.2 毫秒

(~ 203 兆赫)

(88)

附表 世界上现有及正在建设中的同步辐射光源

国 家	光源名称	所在地和实验室	电子能量(吉电子伏)	工作方式和状况
巴 西	LNLS	里约热内卢	2.0	D. UC.
中 国	BEPC	北京 高能物理所	2.0-2.8	P.
	HESYRL	安徽 中国科技大学	0.8	D.
	SRRS	台湾 新竹科学园区	1.3	D.
英 国	SRS	Daresbury	2.0	D.
	HELIOS	伦敦 牛津	0.7	D. UC.
法 国	ESRF	格列诺布	6.0	D. UC.
	DCI	奥塞	1.0	D.
	SUPCRACO	奥塞	0.8	D.
德 国	DELTA	多特蒙特	1.5	D. UC.
	BESSY I, II	柏林	0.8, 1.5	D.
	DORIS	汉堡 DESY 实验室	5.0	P.
	ELSA	波恩大学	3.5	D.
意大利	ELETTRA	的里亚斯特	2.0	D. UC.
	ADDNE	Frascati 高能物理实验室	1.5	D.
韩 国	POHANGLS	汉城 浦项同步辐射光源	2.0	D. UC.
日 本	SOR	东京大学	0.5	D.
	UVSOR	分子科学研究所(IMS)	0.75	D.
	TERAS	东京 高能物理所		
	PF	东京 高能物理所	2.5	D.
	TRISTAN AR	东京 高能物理所		
	Spring-8	滨库县理化所	8.0	D. UC.
瑞 典	MAX	隆得大学	0.7	D.
印 度	INDUS I, II	新德里 高科技中心	0.45, 2.0	D. UC.
美 国	TANTALUS	威斯康星同步辐射中心	0.25	D.
	ALADDIN	威斯康星	0.8	D.
	SURF 2	NBS	0.3	D.
	NSLS I, II	BNL 国家实验室	0.75, 2.5	D.
	ALS	劳伦兹贝克莱实验室	1.9	D. UC.
	XRAY	国家同步辐射光源(NSLS)	2.5	D.
	CESR	麦得逊大学	5.0	D.
	SPEAR(SSRL)	斯坦福直线加速器中心	5.0	P.
	PEP	斯坦福直线加速器中心	8.0	P. PL.
	APS	阿岗国家实验室	1.5	D. PL.
俄罗斯	SIBERIA. 1-2	莫斯科	0.45, 2.5	D.
	NTK. 1-2	莫斯科	0.45, 2.5	D.
	S60	莫斯科	0.6	P.
	VEPP-2m	新西伯利亚	0.67	D.
	VEPP-3	新西伯利亚	2.27	D.
	VEPP-4	新西伯利亚	5.0-7.0	D.
	M-100	哈尔柯夫	0.1	D.
	SIRIUS *	托姆斯克	1.36	P.
	YP11 *	叶列温	1.8	D. PL.
	ARUS *	叶列温	4.5	D.

D. 专用光源, P. 寄生光源, PL. 计划之中的光源, UC. 正在建造中的光源

* 是否属俄罗斯不祥.

(责任编辑 刘光曙)