



北京同步辐射装置

十年回顾与十年展望 (上)

唐鄂生

北京同步辐射实验室过去的10年里从无到有,从纸面设计到装置建成,从抽象概念到具体实践,经历了近10个春秋,在参加者的共同努力下,目前已取得了可喜的成果。北京正负电子对撞机(BEPC)在同步辐射专用模式下已正常运行了~600小时。截止到1991年6月申请同步辐射机时的用户已经超过60,他们中的大部分人已经在北京同步辐射装置(BSRF)上做了实验并且取得了满意的结果。过去的10年是值得纪念的10年。

在过去很长的一段时间里,同步辐射(SR)作为高能加速器的副产品而与高能物理实验密切联系在一起,由于同步辐射光源的许多优异特性,概括地说,通量大,准直性好,频谱宽并连续可调,良好的偏振特性以及特定的时间结构等优点,使其在基础学科和应用技术的发展中有着广泛的应用,并且起着极为重要的作用。同步辐射的研究和应用已逐渐发展成为一个新兴的独立的分支,自七十年代起,在一些发达国家中,在用于粒子物理研究的对撞机上建设了不少寄生运行的第一代同步辐射装置和许多第二代专用于同步辐射研究的储存环。八十年代后期在美、日、西欧及一些发展中国家中正在建设具有不同能量的储存环成为性能更好的第三代同步辐射装置。

BSRF 总概述

北京同步辐射实验室筹建于1982年,正式建立于1985年,它是BEPC工程的一部分。BEPC是我国建造的第一台高能加速器,它于1983年4月正式批准建造,同年12月列入国家重点工程。建造BEPC的基本目标是开展粒子物理实验研究。为了充分开发BEPC的能力,建设初即确定“一机两用”的方针。把同步辐射应用作为广泛领域的基础研究、应用研究和技术开发的有力工具,而列为重要的建设项目。BEPC的两项任务,确定了它的两种运行模式:对撞模式和同步辐射专用模式。在这两种运行模式下,BEPC的主要参数见表1所示。

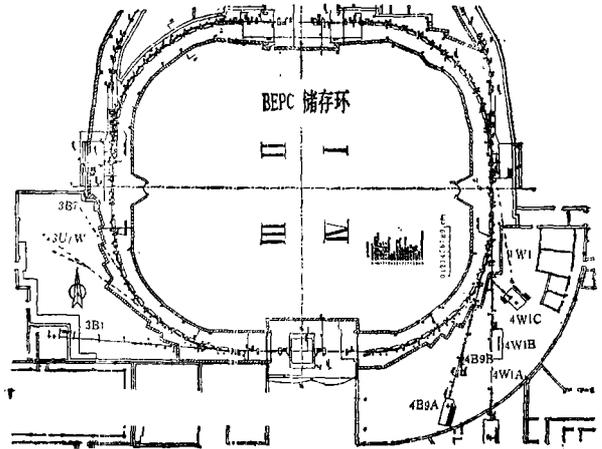


图1 “七五”期间已建和拟建的实验站(分别用实线与虚线表示)

表1 BEPC 贮存环的重要参数

能量 [GeV]	1.55*	2.2
设计流强 [mA]	30×2	100
电子数/束团	1.5×10 ¹¹	5.1×10 ¹¹
水平自然发射度 [mm mrad]	0.4	0.07
束流寿命 [hr]	8	7
最大磁场强度 [kG]	5.14	7.09
束流半径 [m]	10.345	10.345
最大水平 β [m]	49.7	17.4
最大垂直 β [m]	71	15.4
束团数/束	1	1—160
临界能量 [keV]	0.89	2.28
扭摆磁铁磁场 [T]	/	1.8
周期长度 [m]	/	1.7
临界能量 [keV]	/	5.8

* 目前在 J/ψ 能区进行高能物理研究

同步辐射装置涉及到各类现代化光、机、电、超高真空、计算机、自动控制等高科技的综合技术。按其组成系统,它包括:插件件(扭摆磁铁或波荡器),前端区(将同步辐射光从贮存环引出防护墙),光束线(将同步辐射光单色并聚焦到实验站)及实验装置(进行科学研究的各种实验设备,分析器、环境室以及实验数据的获取与处理等)等四大部分。

在北京同步辐射装置建设的第一期工程中:建造了1个插件件,3个前端区,8条光束线及分支束线

表 2 BSRF 光束线的基本参数

束线	4W1A	4W1B/C	4B9A	4B9B	3B1A/B
接受角 [mrad]	1×0.1	4×0.1	5.5×0.36	4.5×1.0	7.5×0.3
光子能量 [keV]	3.5—22	3.5—22	3—7	10eV—1000eV	0.6—3
光源光子通量 [P/s · mr · 0.1%BW] (2.8G, 100mA)		1.5×10 ¹⁴	5×10 ¹²	4×10 ¹²	>20mW/cm
镜子	/	/	压弯柱面镜	超环面	柱面扫描镜 椭球面镜
单色器	/	双晶	双晶	球面光栅	球面光栅
能量分辨	/	2×10 ⁻⁴	4×10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻⁴
光束尺寸 [mm]	43×4.3	23×2.3	3×1.5	3.2×1.5	35×35 0.5×0.5
束线长度 [m]	43	23	29.5	23.3	33/25
实验站	形貌 荧光	EXAFS 荧光漫散射	衍射 小角散射	光电子谱	A: 光刻 B: 生物光谱
现状	正常运行	B: 正常运行 C: 试运行	试运行	试运行	A/B: 试运行

9 个实验站。BSRF 的平面布置见图 1, 图中包括了第一期和第二期工程布置。能谱亮度分布见图 2。束线及实验站的主要参数列于表 2。

BSRF 的主要特点

1) BSRF 是一个寄生模式状态下工作的同步辐射光源。

BEPC 建造的目的首先是进行粒子物理的实验研究, 因而设计指标追求的是对撞亮度, BEPC 理论设计的亮度在能量为 $2 \times 2.8 \text{ GeV}$ 时为 $1.7 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 贮存环内电子束流的发射度比较高。为了使北京谱仪的噪声本底不致太高, BEPC 在对撞模式下工作时, 电子的流强不能太大, 一般控制在 65 mA 以下。正负电子的对撞能区是根据粒子物理实验要求来确定的, 在前一阶段是架素物理实验, 对撞能区选在 1.548 GeV 。BEPC 建造的第二任务是提供 VUV 以及 X 射线波段的同步辐射光。从同步辐射应用的目的来讲, 追求的是同步辐射的能谱亮度 (Brilliance) $[\text{ph/s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1\% \text{ BW}]$ 或者是通量 (Flux) $[\text{ph/s} \cdot 0.1\% \text{ BW}]$, 因而希望贮存环能提供低的发射度, 大的流强 (100 mA 以上) 和较高能量的电子束以便提高临界能量, 而这与粒子物理对撞实验的要求是相矛盾的。在当前以高能物理实验为主的情况下, 这就基本上决定了 BSRF 的性能只能是第一代的同步辐射光源。当然 BEPC 也可以工作在同步辐射专用模式, 此时 BEPC 的运行参数将调整在较低发射度高流强的状态, 使电子束流发射度接近于第二代的同步辐射光源, 为 $0.7 \times 10^{-11} \text{ m-rad}$ 。BEPC 兼用机带来的第二个困难就是机时的分配。加速器本身需要作机器研究, 北京谱仪需要累积事例, 同步辐射需要向用户提供实验机时, 因而在机时分配上必然存在矛盾, 这是兼用机固有的困难, 最

好的解决办法是建造第三代的专用的同步辐射光源。

2) BEPC 是一台高能电子贮存环, X 射线能区覆盖面较宽。

BEPC 设计的电子能量为 $1.5 \sim 2.8 \text{ GeV}$, 对应的同步辐射的临界能量为 $0.7 \sim 4.7 \text{ keV}$ (B 铁), 这是一个很好的 X 射线环。BEPC 环上还有 4 个可利用的直线节, 加上插入件后, 可将能谱亮度的高端截止能量大大提高。已经建成的 4W1 就是一个单周期的波长移动器, 它使临界能量增加到 5.8 keV (2.2 GeV) 截止能量约 23 keV 。在 BSRF 第一期工程中, 各条束线能区互相交叠补充, 形成较宽的能区覆盖面。图 3 示出了第一期工程和第二期工程中的各束线的能谱分布及可能的实验范畴。由此看出 BSRF 覆盖了大量的实验能

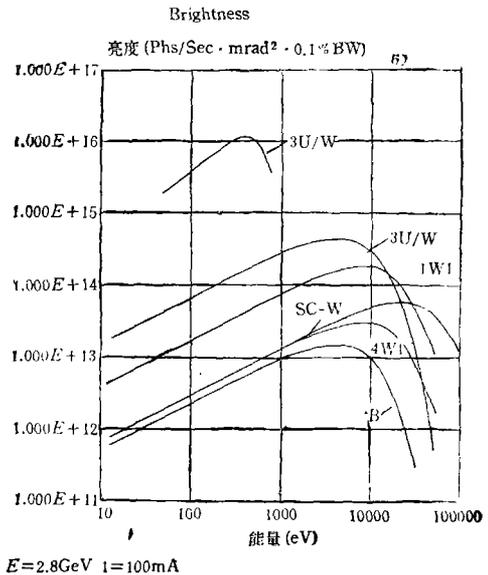


图 2 各条束线的能谱亮度分布

区(图3见下期)。

3) BSRF 配备有各种类型的反射镜与单色器。

在光束线的设计建造中,主要包括两类重要的光学元件:一是反射镜,用以改变辐射的行进方向,准直光束线,抑制高次谐波,转移热量和聚焦。在已经建成的光束线上,使用了平面镜、柱面镜、压弯柱面镜、球面镜、超环面镜及抛物面镜等,其大小从80~800mm不等。实验表明:非球面镜聚焦效果固然好,但加工工艺困难,造价较高,选用时要综合考虑。在X波段,反射镜的掠入射角极小,一般在 $0.5^{\circ}\sim 5^{\circ}$,因此对镜面的表面粗糙度及面型精度等都有极高的要求。二是单色器,在VUV及软X波段,通常采用光栅作为分光元件,在已经建成的3B1B光束线上采用了Seya-Namioka正入射单色器(扫描波长1300~6000Å)分辨率 10^{-3} 。在4B9B束线上采用了掠入射球面光栅单色器(能量扫描范围10~1200eV)配以适当的入射和出射狭缝,分辨本领达2000。为了保持有较为均匀的光栅效率,用4块球面光栅互相切换,用以覆盖较宽的能量范围。对X波段,4B9A束线上采用T机构的双晶单色器Si(111),对3.5~7keV能区分辨率为 $2\sim 3\times 10^{-4}$ 。4W1B束线采用通常的固定出口双晶单色器,分辨率 2×10^{-4} 。4W1C束线上使用了斜切弯晶,起着既单色又聚焦的双重作用。多种类型的反射镜与单色器的调试成功,为今后同步辐射性能的改进提高和发展提供了许多重要的第一手经验。

4) BSRF 的调束与运行。

同步辐射从前端区出光,经准直、单色、聚焦到实验站,并投入正常运行,这是一项细致而复杂的工作,决定于许多因素:首先由于在高能储存环上光束线的长度通常都在20m以上,因此电子束团轨道的任何微小的变化都会严重影响到同步辐射出光的方向和强度。其次,在光束线上设置了多个用以准直,偏转,单色等作用的光学部件:曲面镜、光栅、晶体等。由于X光的反射率极低,因此镜面的掠入射角通常很小,只有 $0.5^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。因此反射镜的面型、转角、倾角、摆角、高度

等的任何微小变化(这种微小变化是以秒级计算的)以及束线上的各种狭缝的位置,开度(以 μm 计算的)等的变化都会严重影响光斑的位置形状,能量分辨,强度等重要参数。因此,多条束线与实验站的联调成功,并要互相兼容,稳定运行,往往至少要经过一年或者更长的时间,并且要与加速器的运行人员共同努力,协同配合,反复调试才能成功。到今年6月底为止,现有的8余束线或分支束线,在专用运行模式下,已经全部出光,并与实验站连通。但要达到设计指标尚需付出巨大努力。

BSRF 上的实验工作举例

BSRF自1989.12部分束线通过国家级技术鉴定以来,进入了试运行阶段。到91.6底,在专用模式下已安全稳定地运行了~600小时,来自全国各研究所、大学及工业部门等共30多个单位的用户,进行了近50多个课题的研究,绝大部分取得了满意的结果。例如,最先投入正常运行的4W1A及形貌站,最近用实时X射线电视成像系统成功地观测了 KNbO_3 和 LaAlO_3 晶体相变的动态全过程,并且还首次发现了 LaAlO_3 晶体在 200°C 及 700°C 附近的两个新的相变区,并记录了相变发展的全过程,这在常规X光机上是绝对不能实现的。上述结果充分显示了同步辐射光源在形貌学研究中的优越性。4W1B荧光站用单色同步辐射激发能量色散X荧光法测量了 Fe^0 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Ni^0 、 Ni^{2+} 的K吸收限的化学位移,以及 Pt^0 、 Pt^{4+} 的化学位移,得到Pt的L吸收限的位移为2eV,这在国内属首次,这只能用高分辨的单色强X光激发才能实现。在4W1B束线上还进行了Cu的EXAFS标准谱的测定,其结果与日本PF上测得的谱完全一致,符合得很好。3B1光刻束线与光刻机已联调到位,并显示了亚微米光刻实验过程,获得了清晰的亚微米线条。对弯铁束线4B9,计划进一步调试到兼用状态下工作,以扩大束线机时的利用率。

(待续)

要想了解物理学的最新进展和动态,请您选择中国物理学会主办的通报类月刊——《物理》(科学出版社出版,国内外发行,各地邮局均可订阅,邮发代号2-805,国外刊号M51)

《物理》——具有当代中国特色的《今日物理》,1972年创刊。

《物理》——科研工作的向导,教学工作的助手,继续教育的良师,新技术、高技术研究、应用的益友。

《物理》——宗旨是深入浅出地介绍当代物理学及其交叉学科的新知识和新进展,介绍与物理学关系密切的新技术、高技术的原理和应用,介绍物理学史、物

理学家、前沿领域的动态和中国物理学会活动等。

《物理》——读者对象包括:具有大学水平在科技界、教育界、企业界以及有关的交叉学科、新技术、高技术领域从事物理学研究、教学、应用开发、科研管理人员,高校物理系(或有关系)的教师、研究生和大学生。

《物理》——主要栏目有《知识和进展》、《物理学和经济建设》、《物理学史和物理学家》、《前沿和动态》等。

《物理》——有以学部委员为首的包括各分支学科、各专业领域的学术带头人,研究、教学的骨干,新、高技术开发的专家在内的一批作者队伍。

《物理》——已成为世界六大检索系统(四个以上)的“座上客”(获此殊荣的我国科技期刊共15家)。