

北京同步辐射装置及科学活动¹⁾

董宝中 唐鄂生 姜晓明 凌如昭

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要 简要介绍了北京同步辐射装置 (BSRF) 及其在生物科学、材料科学、催化剂、地矿和 X 射线光刻等领域的科学研究进展。

关键词 同步辐射, 科学研究

Abstract The main specifications of the Beijing Synchrotron Radiation Facility are given. New progress in research on the material sciences, biology, catalysis, mineralogy and technological science is described.

Key words synchrotron radiation, scientific research

北京同步辐射装置 (BSRF) 是北京正负电子对撞机 (BEPC) 上的兼用设备。BEPC 于 1988 年 10 月首次实现正负电子束对撞。BSRF 则于 1989 年 5 月在前端区首次观察到同步光, 于 1992 年初建成, 投入使用。

1 概述

图 1 为正负电子对撞机的示意图。注入器为长 200m 的直线加速器, 为储存环提供 1.4—1.55GeV 正、负电子束。注入器分为三部分: (1) 30MeV 的预注入器使电子束形成窄的束团; (2) 120MeV 直线加速节和用于产生正电子的可移动的钨靶, 在钨靶之后是用于正电子收集的脉冲绝热压缩螺旋线圈; (3) 主加速节, 可将正电子和负电子加速到 1.1—1.4GeV。

储存环的外形类似一个跑道, 它的总周长为 240m。其磁聚焦结构由如下三部分组成: (1) 低 β 插入节, 可为对撞区提供小尺寸束; (2) 分离型的 FODO 磁聚焦结构, 将束偏转 90°; (3) 用于注入的对称节。

北京谱仪 (BES) 放置在储存环的南侧的 5m 长的粒子物理实验区。该区的两侧放有静电分离器。环的东、西两侧是负电子和正电子的注入区, 安装有注入单元。在环上有 8 个 2m 长的直线节, 其中四个可以安装用于同步辐射

的扭摆磁铁, 其余四个安装控制电子束发射度的扭摆磁铁。

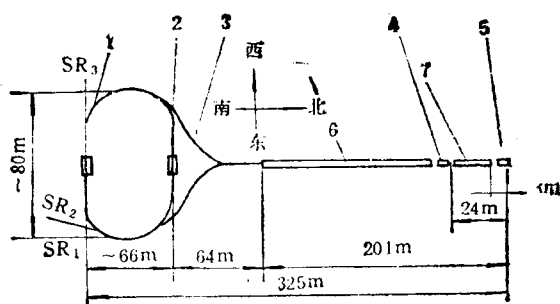


图 1 BEPC 示意图

- 1——储存环; 2——探测器; 3——束输运系统;
- 4——正电子靶; 5——30MeV 预注入器;
- 6——直线加速节; 7——120MeV 直线加速节

北京正负电子对撞机有兼用和专用两种同步辐射运行模式。表 1 给出了两种运行模式下储存环的主要参数。在兼用模式下, 储存环的参数调节依据高能物理实验要求确定, 而在专用模式下运行时, 环的能量、电流等参数均按同步辐射实验要求调节。专用模式下电子束的发射度比兼用模式小约 5 倍。

2 同步辐射装置

在储存环的 3 区和 4 区可以引出同步辐射

1) 1995 年 6 月 19 日收到。

表 1 BEPC 储存环的主要参数

模 式	兼用模式	专用模式
能量 (GeV)	1.6—2.2	2.2
周长 (m)	240.4	240.4
亮度 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$(2-7) \times 10^{10}$	
电流 (mA)	2×26	65
旋转频率 (MHz)	1.247	1.247
水平自由振荡次数	5.83	9.38
垂直自由振荡次数	6.69	5.14
水平发射度 ($\text{nm} \cdot \text{rad}$)	390	76.0
垂直发射度 ($\text{nm} \cdot \text{rad}$)	26	7.6
水平色品	-11.5	-14.4
垂直色品	-19.57	-8.24
弯转半径 (m)	10.345	10.345
束流寿命 (hr.)	7	6
弯转磁场强度 (kG)	4.99—7.09	7.09
最大水平包络函数 (m)	49.87	23.61
最大垂直包络函数 (m)	83.4	24.9
谐波数	160	160

束线。现已建成了一个扭摆磁铁、3个前端区、7条光束线和11个实验站。表2给出了各条束线的参数。

现将各条束线及实验站简介如下：

2.1 前端区

前端区指储存环与光束线之间的过渡区，是储存环到辐射防护墙之间的部分。已建成4W1扭摆磁铁、4B9弯转磁铁和3B1弯转磁铁三个前端区。

2.2 扭摆磁铁和硬 X 射线束线

2.2.1 4W1 扭摆磁铁

4W1扭摆磁铁安装在储存环4区的一个直线节处。这是一个单周期的电磁扭摆磁铁。其峰值磁场强度为18kG。4W1A、4W1B和4W1C三条束线从该前端区引出。

2.2.2 4W1A 束线和形貌学、荧光及高压

表 2 BSRF 束线与实验站基本参数

光束线	4W1A	4W1B	4W1C	4B9A	4B9B	3B1A	3B1B					
发光原件	电磁扭摆器	电磁扭摆器	电磁扭摆器	弯铁	弯铁	弯铁	弯铁					
工作模式	专用	专用	专用	专/兼用	专/兼用	专/兼用	专/兼用					
水平接收角 (mrad)	1	1	1	5.5	4.5	7.5	3					
垂直接收角 (mrad)	0.1	0.1		0.36	1							
光子能量 (keV)	3.5—22	3.5—22	4.9, 8.05, 13.93	3.9	0.01—1.1	0.6—3	1400—500nm					
镜子	无	无	柱面镜	弯曲柱面镜	超环面镜	柱面镜	抛物面镜椭圆面镜					
单色器	无	双晶	三角弯晶	双晶	球面光栅	无	球面光栅					
光斑尺寸 (mm ²)	45×14	25×2.5	1.4×0.9	3.0×1.5	3.0×1.0	35×35	0.5×0.5					
分辨率		2×10^{-4}	1×10^{-3}	2×10^{-4}	1×10^{-3}		1×10^{-3}					
样品处光通量* (2.2GeV, 60mA)	1×10^{13}	5×10^9	1×10^{10}	1×10^9	1×10^9							
实验站与研究领域	形貌站	凝聚态物理 材料科学	XAFS 站	漫散射站	凝聚态物理 材料科学	衍射站	材料科学 地质科学	光电表面物理	光刻站	亚微米光刻 LIGA	生物光谱站	生物光谱
	荧光站	材料科学 地质与资源	凝聚态物理 材料科学			小角散射站	凝聚态物理 材料科学		软 X 射线站	多层膜 计量学		
	高压站	高压下物理 研究	催化剂 分子生物学									

* Phs/s.mm² · 0.1%BW

衍射实验站

4W1A 束线是一条白色 X 射线束线,束线长 43m,提供能量为 3.5—22keV 的同步辐射光。束线终点建有形貌学等实验站。

形貌学实验站配置有白光形貌相机、应力台、多功能环境室、四晶单色光形貌相机和电视摄像系统。该站主要在材料科学和固体物理学领域研究晶体的相变、位错、畴结构和晶界等。

X 射线荧光站配置有 Si(Li) 半导体探测器和高精度三维平移、一维转动的样品台。可以开展微束计算机断层扫描术和微区扫描 X 射线荧光分析。该站主要进行地矿、医学等领域的研究。

高压衍射实验站配置有四刀狭缝、金刚石压砧装置(DAC)、测角仪、Si(Li) 探测器、He-Ne 激光器和实验平台及调整支架。主要进行高压条件下材料科学的研究。

2.2.3 4W1B 束线和 X 射线吸收谱精细结构(XAFS)实验站

4W1B 束线是一条非聚焦的单色光束线。XAFS 实验站配备有低温样品室、精密移动平台、电离室和荧光 XAFS 探测系统。主要进行凝聚态物理、材料科学和分子生物学的研究。

2.2.4 4W1C 束线和漫散射实验站

4W1C 束线是一条聚焦单色光束线,单色器为三角弯晶。漫散射实验站配有五圆衍射仪、二圆衍射仪和低温样品室。主要进行材料科学和凝聚态物理方面的研究。

2.3 4B9 弯转磁铁和 X 射线束线

4B9 弯转磁铁位于储存环 4 区,由此引出 4B9A 和 4B9B 二条束线。

2.3.1 4B9A 束线与 X 射线衍射和小角散射实验站

4B9A 束线是一条聚焦单色光束线,聚焦镜为压弯柱面镜,单色器为双晶单色器。衍射站配置有六圆衍射仪、多维运动平台、探测器、电子学系统及在线控制和数据获取系统。进行凝聚态物理、材料科学、地质学等领域的研究。

小角散射实验站配备有小角散射装置、探测器、在线控制及数据获取系统和准直平台。主

要进行材料科学和分子生物学等领域研究。

2.3.2 4B9B 束线及光电子谱实验站

4B9B 束线是一条聚焦的单色软 X 射线束线。单色器为球面光栅。光电子谱实验站配备有光电子谱仪,包括分析室、样品制备室和外延生长室三部分。主要进行表面物理方面研究。

2.4 3B1 弯转磁铁和软 X 光及真空紫外束线

3B1 弯转磁铁位于储存环 3 区。

2.4.1 3B1A 束线和光刻及软 X 射线实验站

3B1A 束线是一条软 X 射线束线。束线上有一柱面扫描镜。光刻实验站配备有光刻机,反射式扫描电镜和超净工作间。主要进行掩膜、光刻胶及 X 射线光刻工艺的研究。软 X 射线实验站配备有反射率计,主要进行多层膜和探测器特性研究。

2.4.2 3B1B 束线和生物光谱实验站

3B1B 束线是一条紫外和可见光束线。生物光谱实验站配备有样品室、光弹性调制器、光电倍增管探测器。主要进行生物样品的圆二色谱的研究。

3 BSRF 科学活动概况

BSRF 是 1991 年开始向国内外科技界开放的国家实验室。历年来各实验站接受用户申请及实际提供的机时列于表 3。迄今四年多来在同步辐射专用模式下运行了 4000 小时,安排了约 180 个课题研究。在许多基础研究和应用领域,诸如凝聚态物理、表面物理、化学、材料科学、生物学、地矿学、微电子学和软 X 射线学等方面都取得了大量成果,已完成了研究工作近 100 项,发表论文近 200 篇。

BSRF 每年出版中、英文年报各一本,每年举行一次用户会议,聘请客座研究员协作指导工作,并不定期举行各种专业会议、讲习班等。

4 典型成果介绍

4.1 生物学和医学

表 3 1991—1994 年 BSRF 研究工作按实验站分布统计

实验站	申请课题数	申请机时	使用机时	发表论文数
形貌学站	35	2577	1380	33
X射线荧光站	47	3684	1565	34
高压衍射站	10	640	642	12
XAFS 站	87	7438	2818	52
漫散射站	7	497	390	5
光电子能谱站	17	4524	2634	23
衍射站	21	29443	1045	7
小角散射站	13	2438	928	4
光刻站	11	4620	1138	3
生物光谱站	5	1160	375	2
软X射线站	6	550	1463	17
总计	259	31017	14376	192

(1) 在 3B1B 束线的生物光谱站测量了活的捕光色素 (light harvest chlorophyll) 的圆二色 (CD) 谱, 如图 2。用于阐明该色素蛋白复合物的二级结构, 如 α 螺旋、 β 折迭、无规则卷曲等。从而探索光合作用的机理。

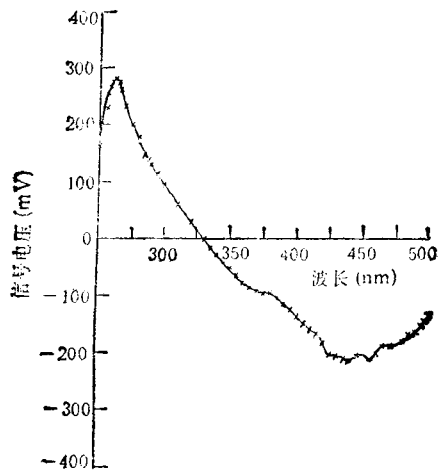


图 2 捕光色素的圆二色谱

(2) 在 XAFS 站用荧光 XAFS 方法测量了锌合血清蛋白中锌的 K 吸收边的荧光 XAFS 谱 (图 3)。蛋白中锌的含量约为万分之五。通过分析该 XAFS 谱, 可以给出血清蛋白中金属锌周围的原子配位结构, 为国内生物大分子结构的研究开创了新的途径。

(3) 小角散射站测量了不同浓度的表面活性剂 Triton X-100 对嗜盐菌紫膜蛋白视紫红质三体结构的影响。图 4 为测量得到的小角散射曲线。从图中可以看出, 随着表面活性剂浓

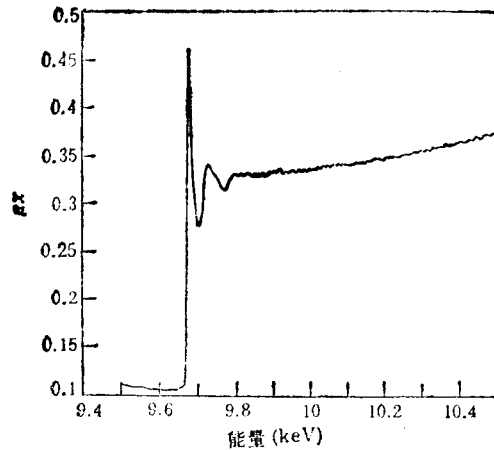


图 3 金属蛋白中锌的荧光 XAFS 谱 (含锌万分之五)

度的增加, 嗜盐菌紫膜蛋白视紫红质分子发生了裂变。类脂分子从膜蛋白分子上分离了出来。

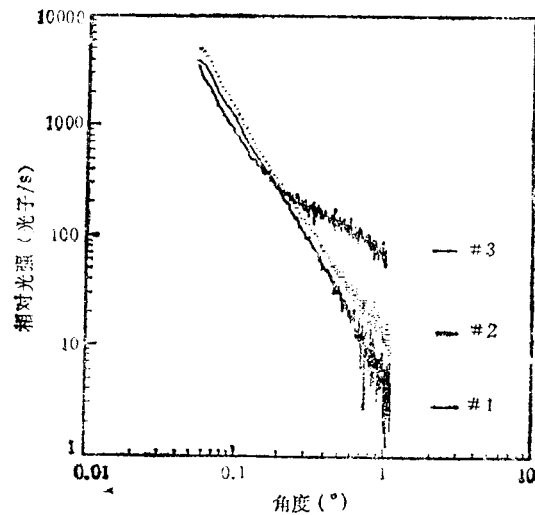


图 4 嗜盐菌紫膜蛋白的小角散射信号
1 为 0.2% Triton X-100; 2 为 0.42% Triton X-100;
3 为 12.96% Triton X-100

4.2 材料科学

(1) 压力是影响物质结构的一个重要参数。HgBaCaCuO 高温 (T_c) 超导材料的临界温度与压力有关。高压衍射站观察了高压下 HgBaCaCuO 超导材料的结构变化。图 5 为 Hg₁Ba₂Ca₀Cu₁O_{4+δ} 高 T_c 超导材料在不同压力下的能量色散 X 射线衍射谱。横坐标为光子能

量, 纵坐标为相对光强。由图 5 可以看出在 10—13GPa 间发生了相变, 表明其压缩率是各向异性的。该现象为我实验室首先观察到。

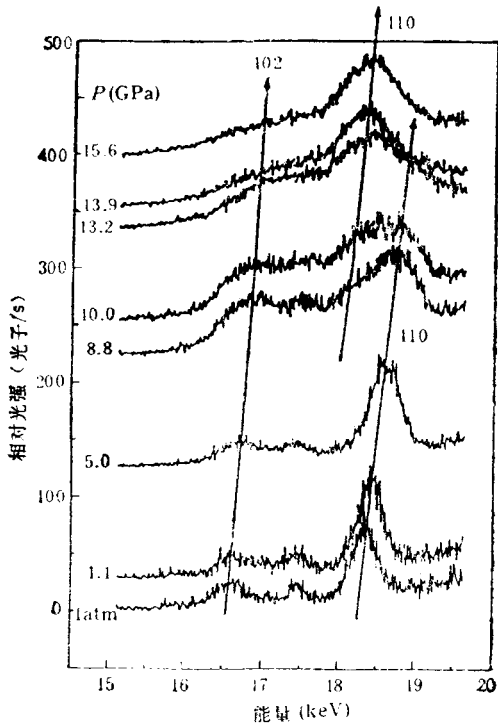


图 5 Hg1201 的 EDXD 谱

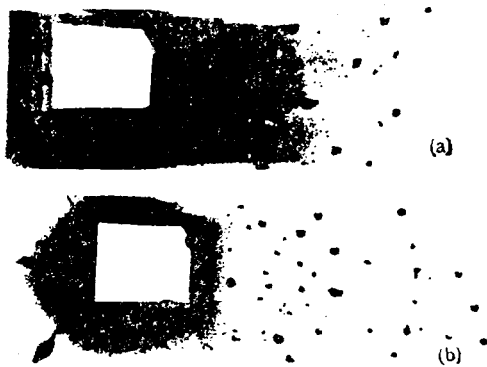


图 6 C_{60} 单晶 Laue 衍射图
(a) 在 293K 温度下; (b) 在 245K 温度下

(2) 形貌站用白光形貌方法研究了汽相法生长的 C_{60} 单晶, 比较了不同工艺下生长的单晶质量, 结果表明采用单温度梯度生长的单晶质量优于双温度梯度生长的单晶质量。并首次观察了 C_{60} 单晶从常温(约 295K)到相变温度(约 249K)以下的衍射变化^[1]。图 6 给出了 C_{60} 单晶在低温下发生相变时从面心立方点阵变为

简单立方点阵的情况。

4.3 催化剂机理研究

许多工业上有重要价值的催化剂、吸附剂及其他材料常常就是一些氧化物和盐类在 $\gamma-Al_2O_3$ 分子筛等载体表面的分散体系。性能决定于组成与结构。由于表面体系的复杂性, 长期以来很少有确切阐述其结构的手段。透射 XAFS 给出的信息包含有表面的与体相的贡献。在 $NiO/\gamma-Al_2O_3$ 体系的研究中成功地分离出了分散相的 XAFS, 从而得到了表面相的配位结构^[2]。实验结果清楚地展示了 NiO 分散到载体表面后是以单层和亚单层的方式存在, 具有与晶相结构不同的配位规律, 为单层分散模型提供了有力的证据。对 $CuBr_2/\gamma-Al_2O_3$ 体系的 XAFS 研究, 证明了多相催化剂中活性组分具有在载体(通常为氧化物或复合氧化物)表面自发分散的倾向的假设^[3]。

4.4 地矿学

采用同步辐射 X 射线荧光方法对新疆哈图金矿样品进行亚毫米束二维分析^[4]。从金与其他伴生元素的二维分布图可知金与砷、铁等其他元素不相关, 而与银线性相关, 线性相关系数为 0.94, 说明金在矿石中以金银合金状态分布于石英中, 并不存在于伴生的毒砂矿物中。此外还发现可能与微量铂和汞共生, 意味着矿中的金可能来源于地幔。

4.5 X 射线光刻

用 X 射线光刻的方法成功地研制出 900 MHz 的声表面波器件。其核心部分是将铌酸锂基片上的 200nm 铝膜用光刻的方法在 $2mm \times 1.5mm$ 的面积上刻出 261 条线宽和间隔均为 $0.8\mu m$ 的铝线条。它的研制成功反映了 BSRF 的 X 射线光刻技术的水平。

参 考 文 献

- [1] LI Chaorong et al., *Chin. Phys. Lett.*, **12-4** (1995), 217.
- [2] X. H. Cai et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (SU-PPL 32-2) (1993), 505.
- [3] X. H. Cai et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (SU-PPL 32-2) (1993), 502.
- [4] 应育浦等, 科学通报, **33**(1993), 349.