

- [25] Du D S ,Zhao Z Y. Phys. Rev. Lett. ,1987 ,59 :1072 ;Du D S. Phys. Rev. 1986 ,34 :3414
- [26] Braaten E ,Li C S. Phys. Rev. D ,1990 ,42 :3888 ; Braaten E ,Li C S , Yuan T C. Phys. Rev. Lett. ,1990 ,64 : 1709
- [27] He H J ,Kuang Y P ,Li X Y. Phys. Rev. Lett. ,1992 ,69 : 2619
- [28] Chang C H ,Chen Y Q. Phys. Rev. D ,1992 ,46 :3845

## 我国粒子加速器的现状和发展 \*

方守贤

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 文章对我国主要的粒子加速器——北京正负电子对撞机(BEPC)、兰州重离子加速器(HIRFL)、合肥国家同步辐射装置(NSRL)3台机器以及新的第三代光源——上海同步辐射装置项目的现状进行了简要介绍。另外,对应用低能加速器也作了扼要回顾。

**关键词** 加速器,现状

### BRIEF OVERVIEW OF PARTICLE ACCELERATORS IN CHINA

Fang Shouxian

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract** The present status and further development of three main particle accelerators in China—the Beijing Electron Positron Collider (BEPC), Heavy Ion Accelerator of Lanzhou (HIRFL), Hefei Synchrotron Radiation Facility (HESYRL) and the new Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) are briefly reviewed. In addition, low energy accelerators used chiefly for applications are also described.

**Key words** accelerator, status

## 1 基础研究用的加速器

### 1.1 北京正负电子对撞机(BEPC)

BEPC建造的主要目的为高能物理实验并兼顾同步辐射应用,最佳时每年正常运行时间平均约为5500h,运行效率可达95%。

对于高能物理实验,随着运行经验的积累, BEPC的积分亮度从1992年至1995年不断得到提高,近10年来,获取了大量实验数据,做了一些非常重要的物理实验。如轻子质量的测量精度提高了10倍,胶子球候选者(2230)粒子的确认和新的衰变道的发现及研究,  $D_s$  粒子

的研究,  $J/\psi$  粒子共振参数的测定,物理的研究,以及2—5 GeV能区的  $R$  值测量等。

在同步辐射方面,每年大约有两个多月的时间在专用模式上运行,此时电子的能量为2.2 GeV,流强为80—100 mA,大约有100多个从研究所及大学来的用户在现有11个实验站上进行不同学科领域里的研究。

1995年至1998年间, BEPC进行了多方面的改进及提高,首先是直线加速器,一台由美国

\* 1999-04-19收到初稿,1999-06-01修回  
作者1999年5月8日在中国物理学会第7届全国会员代表大会暨学术报告会上所作的邀请报告

引进的以及一台自制的 65MW 的速调管已经投入运行. 在 1996 年 5 月, 直线加速器的能量已从 1.3 GeV 提高到 1.55 GeV, 这就可以在做 J/ψ 粒子的物理实验时实现全能量注入, 使性能有所提高. 可惜的是, 由于近几年来工厂提供的 30MW 速调管的质量有所下降, 以及管理上的问题, 致使上述能量的提供未能持久, 最近, 经过一段时间的努力后, 已得到改善.

BEPC 的中心控制系统、局部控制系统以及安全连锁保护系统等已得到了改进及重建. 中心控制系统已经改为基于 DEC 网络的分布式系统, 不但反应速度快, 而且更稳定可靠. BEPC 的束流控制系统包括束流位置的探头、束流自由振动频率及束团尺寸的测量手段均得到了改进, 使得测量的速度及精度都有提高.

此外, 几乎重建了北京谱仪 BES. 目前它的动量、位置及时间的分辨率以及数据获取率均得到很大的改进, 遗憾的是重建的主漂室由于美国方面提供的定位子绝缘性能随时间变坏, 迫使整个 BES 改进计划的完成受到影响, 目前采用混合高压的方法, 虽然能使 BES 投入运行, 但看来只能作为应急措施, 新的主漂室的重建势在必行, 并已开始进行准备工作.

为了进一步提高 BEPC 的亮度, 将对撞区的插入四极铁的位置向对撞点推进了 40cm, 这样可以将垂直方向的包络函数从 8.5cm 下降到 5cm, 从而在 1996 年 5 月使 J/ψ 能区 (1.55 GeV) 的亮度提高了 1 倍, 即达到  $5.8 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . 进一步的提高看来需要采用单对撞点的方法, 目前正在调试中.

在 BSRF 同步辐射应用方面, 多极的永磁扭摆器已经建成, 该扭摆器为 5 周期, 场强为 1.5T. 在此基础上, 建立了新的束流线 (即 3W1A 及 3W1B 两条). 自 1991 年以来, 专用模式总的束线供光时间约为 5000h, 来自国内 35 个大专院校、研究所的 100 多个用户约 200 多个建议被采纳, 并在上面进行了实验, 得到了很多重要的成果. 例如在 1997 年 6 月份的一次运行, 荧光分析实验站开展了地矿包裹体的研究, 成功地探测到油气储层岩流体包裹体所含的微

量元素溴 (Br) 和氪 (Kr), 可为地矿的成因和探矿、找矿提供信息; 又如图像光电子工艺中心在氮化物光电子材料的研制过程中, 利用漫散射实验站非常清楚地显示了 InGaN 和 GaN 的 (002)、(004) 衍射峰, 证明已经成功地长出了质量良好的世界水平的 InGaN 材料等.

为了进一步发展 BEPC, 下一步有两种可能的方案:

第一, 在原有的基础上不断地改进, 使亮度在现有的基础上再提高 10 倍, 即达  $5 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  左右, 主要是利用原有的环, 采用麻花形的轨道 (见图 1), 实现单点多束团 (约 5 到 6 个) 对撞, 同时也必须对谱仪作大的改进, 以达到提高亮度的目的.

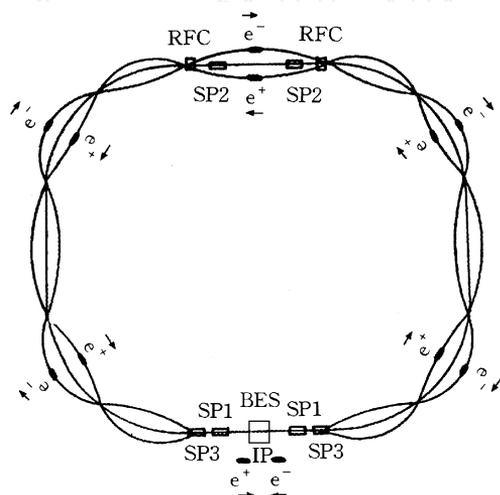


图 1 麻花形轨道

第二, 再建一台亮度高达 100 倍的名为轻子-粲粒子工厂 (LEUCO) 的正负电子对撞机. 此对撞机有直径为 380m 左右的两个环, 每环中有 86 个束团, 实现单点对撞 (图 2). 大约花了两年多的时间对它的很多关键问题的可行性作了探讨及研究, 如强流多束团现实性、束

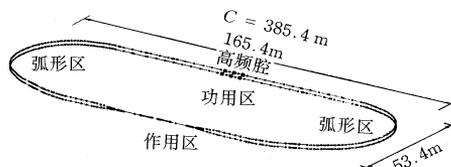


图 2 LEUCO 工厂的示意图

流的不稳定性压制、超导腔及磁体的相关技术的发展等,目前正在作进一步的研究和论证。

### 1.2 兰州重离子加速器(HIRFL)

它是由一台作为注入器的扇形聚焦加速器(能量参数  $K=69$ )及一台作为主器的分离扇形回旋加速器( $K=450$ )组成,目前它每年的供给物理实验用的时间为3500h左右,它可提供从碳元素到氙元素的离子。近几年来,在此加速器做了很重要的实验,如11种新元素的合成( $^{208}\text{Hg}$ ,  $^{201}\text{Hg}$ ,  $^{185}\text{Hf}$ ,  $^{186}\text{Hf}$ ,  $^{237}\text{Th}$ ,  $^{239}\text{Pa}$ ,  $^{235}\text{Am}$ ,  $^{175}\text{Er}$ ,  $^{335}\text{Gd}$ ,  $^{121}\text{Ce}$ 等),还建立了5种重要核素的衰变纲图( $^{153}\text{Er}$ ,  $^{157}\text{Yb}$ ,  $^{201}\text{Fr}$ ,  $^{129}\text{Ce}$ ,  $^{130}\text{Ce}$ )。

为了满足物理实验进一步的要求,近两年

来进行两项改进:

一项为SFC注入器方面的改进,包括:新建一台具有更高流强、更高电荷态的微波离子源(ECR),SFC垂直注入系统的改造以及真空系统的改进。当ECR离子源完成后,HIRFL加速的范围可从氙再扩展到铀,而且流强可以提高10倍。

另一项改进是在SSC后面建造一条新的名为兰州放射性离子束线(RIBLL),它采用很强的聚焦及双消色散的特性,并提供短寿命、高性能、高强度的放射性束的极化的放射性束流,以提供放射性束物理的研究,该束流的性能已居世界领先地位。

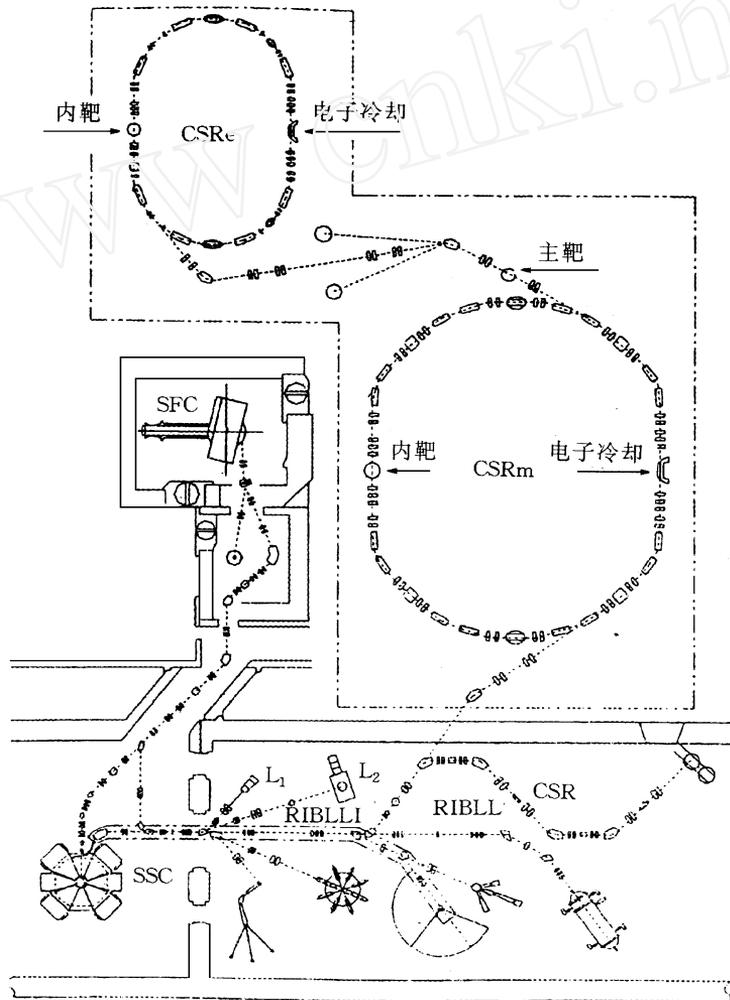


图3 兰州重离子冷却环

为了进一步开展放射性束核物理的研究,HIRFL 已提出建造一台多目的冷却储存环(CSR)的计划,并已在去年底获批准(见图3)。

CSR 包括一周长为 161m 的主环(CSRm)以及一周长为 94m 的实验环(CSRe),其最大磁刚度分别为 10.6T 及 8.4T,而原有的两台回旋加速器将作为它的注入器系统。从 SSC 出来的能量为 10—100MeV/u 的重离子将在主环中积累、冷却并被加速到能量为 400—900MeV/u,然后将其引出,以产生放射性离子束或重离子的高电荷态束。此后,此束将再度注入到实验环中进一步冷却加速,最高到 600MeV/u,以进行内靶实验或者进行高精度的质谱分析。

CSR 建成后将可提供能量范围广(10—900MeV/u)、多品种(碳到铀稳定束,2000 余种放射性束,高剥离态重离子束、极化束)的高品质的重离子束,特别是短寿命放射性束,以满足多学科前沿的要求,计划在 2004 年建成,建成后处于国际先进水平,为我国原子核物理和原子物理的研究的某些领域在 21 世纪步入世界先进行列提供了可能性。

### 1.3 国家同步辐射实验室(NSRF)

NSRF 主要是由 200MeV 直线加速器及 800MeV 储存环组成。自从 1993 年来已经提供给用户共 25000h 的机时,典型的运行参数为 800MeV,150mA,束流发射度为 166nm·rad,寿命为 10h。

目前,NSRF 在真空紫外线及软 X 射线区具有 5 条光束线及实验站,即 X 射线光刻线站、时间分辨光谱线站、光化学站、软 X 射线显微术线站及光电子谱线站。

NSRF 正式向国内外开放以来,已有注册用户 100 多家,批准申请课题 120 多项,已接待几十家用户开展实验研究,并得到了一批重要的成果。例如,利用超细微加工(LIGA)技术可加工直径为 35 $\mu$ m,厚度为 100 $\mu$ m 的微齿轮;利用 X 射线光刻已得到线宽小于 0.2 $\mu$ m 的图形,以及宽度小于 50nm 的金量子线,做出了癌细胞的软 X 射线显微照片,分辨率达 60nm;首次

做出了 X 射线全息图样。

为了满足进一步的要求,在下一个五年中,一个新的改进计划已获批准,其主要改进如下:

(1) 储存环方面的改进。为了把束流的发射度由 166nm 减少到 27nm,也就是说把储存环运行在一高亮度模式上(HBLS)上,原注入系统用的 3 块单匝空心线圈的冲击器将改换成安放在一个长直线节内的 4 块铁氧体的冲击磁铁;为了把环的故障率从 10% 降到 7%,原来的储存环稳流电源将进行改进或更换,储存环的高频机及高频腔将予以重建;为了使实验站的束流光斑的稳定度好于  $\pm 50\mu$ m,将增加一个新的反馈系统以稳定束斑。

(2) 新建永磁波荡器。为了在高亮度模式工作时把亮度提高到  $10^{17}$ 光子/(s·mm<sup>2</sup>·mrad<sup>2</sup>·0.1 频宽),将建造一块新的 2.668m 长、周期数为 29 的永磁波荡器。

(3) 将要再增建 8 条光束线及实验站。为了充分发挥机器的潜力,并满足更多用户的需要,将新建 8 条光束线站,例如,表面物理 X 射线衍射及散射、微机械加工、原子及分子站等(见图 4)。

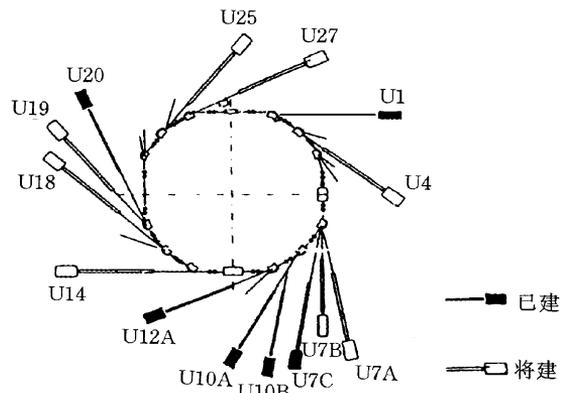


图 4 合肥 NSRF 新建光束线示意图

工程的总投资为 1 亿 2 千万,计划在 2000 年完成。

尽管我们已有两台同步辐射装置,但属第一代及第二代同步光源的水平。因此,为了更好地迎接 21 世纪,我国的科学技术的发展尤其是在上海地区,在 1993 年已经建议我国应建造一台新的名为上海同步辐射设备(SSRF)的第三

代光源(见图 5). 此项目的预制研究已于 1998 年获得批准.

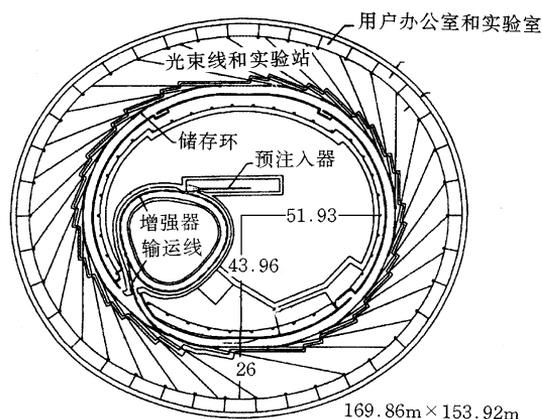


图 5 SSRF 的示意图

SSRF 的主要参数为:最高能量 3.5 GeV, 周长 384m, 平均流强为 200—300mA, 束流自然发射度  $10.2 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ , 直线节长度  $20 \times 6.8 \text{ m}$ . 注入前增强器的注入的能量提高到 300MeV, 以使用来开展深紫外自由电子激光的研究.

建成后的 SSRF 的能量将居世界第四位(日本、美国、欧洲、中国), 性能超过现有的同能区的第三代光源的水平[在 VUV 的最高亮度可  $10^{17} \text{ 光子/s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1 \% \text{ BW}$ , 10eV (波荡器); 在软 X 射线能区为  $10^{18} \text{ 光子/s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1 \% \text{ BW}$ , 3keV (波荡器); 在硬 X 射线区为  $10^{17} \text{ 光子/s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1 \% \text{ BW}$ , 5—20keV]. 因此, 在从真空紫外到硬 X 射线能区, 其性能接近世界最好水平.

## 2 低能加速器

在过去 10 年中, 低能加速器在我国获得发展, 下面将简单介绍最近的发展概况.

### 2.1 直线加速器

目前, 电子直线加速器在对付人类面临的癌症方面起着极为重要的作用, 单独的放射性治疗或者结合外科手术或化疗等, 对某些癌的治疗是十分有效的.

在中国, 估计目前每年大约有 160 万新的癌症患者, 每年死于癌症的有 130 万, 所以最近几年, 在我国大量癌症患者治疗的强烈需求的刺激下, 医用电子直线加速器得到了迅猛的发展. 据不完全统计, 到目前为止, 医用电子直线加速器的总数已达 220 台, 然而这仍然远不能满足整个国家的需要, 其中大约有一半是国产的, 而比较先进的医用加速器则是进口的. 表 1 是国产医用电子直线加速器的一览表.

BJ-14 是一台 14MeV 的驻波直线加速器, 由北京医疗器械研究所研制. 它可以提供 6MV 及 14MV 两种不同能量的 X 射线, 还可以提供 6, 8, 10, 12, 14MeV 五种不同能量的电子束. 如果运行在 X 射线模式下, 最大剂量率为  $2.5 \text{ Gy/min} \cdot \text{m}$ , 如运行在电子束模式, 则为  $4.0 \text{ Gy/min} \cdot \text{m}$ , 而辐射场的尺寸为  $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ .

金属及非金属的无损探伤用的电子直线加速器也获得了发展, 但用于辐射照相的并不算太多. 表 2 给出了该类加速器的主要情况.

表 1 国产医用电子直线加速器

型号	加速管	能量/ MeV	辐射线	数量/ 台	制造商
BJ-4	驻波	4	X	55	北京医疗器械研究所
BJ-6M	驻波	6	X	9	北京医疗器械研究所
BJ-6B	驻波(计算机化)	6	X	10	北京医疗器械研究所
BJ-14	驻波(计算机化)	14	X,e	1	北京医疗器械研究所
WDVE-6	驻波	6	X	35	广东威达医疗器械集团公司
WDVE-14	驻波(计算机化)	14	X,e	1	广东威达医疗器械集团公司
ZI-10	行波	10	X,e	10	上海核子医疗仪器厂
NYZ-18	行波	18	X	1	南京第一医疗仪器厂

表2 国产探伤用电子直线加速器

型号	加速管	能量 / MeV	数量 / 台	制造商
BT - 4	驻波	4	1	北京医疗器械研究所 北京机械工业自动化研究所
DZ - 4/ 500	驻波	4	1	北京机械工业自动化研究所
D - 9/ 3000	驻波	9	1	北京机械工业自动化研究所
	行波	9	1	清华大学
RAPHYTRON - 2	驻波	2	1	中国原子能科学研究院
RAPHYTRON - 4	驻波	4	1	中国原子能科学研究院

清华大学最近几年来首次成功地将 9MeV 的行波电子直线加速器用于海关大型集装箱检测系统,提供 X 射线,使海关能快速对走私武器、毒品夹带及违禁品等做在线检查,直接为保护国家利益和国家安全服务.该加速器的剂量率为 40Gy/ min ·m,束斑尺寸小于  $\phi 2\text{mm}$ ,能满足在计算机屏幕上全面看到集装箱内部射线投影图像,同时清华大学还发展了它的全部检测系统,目前已投入小批量生产.

DZ - 9/ 3000 是一台 9MeV 的驻波直线加速器,用于射线照相.此机器能提供很强的 X 射线.在束斑为  $\phi 1.5\text{mm}$  时,剂量率超过 30Gy/ min ·m,其微波源为 S 波段,2.6MW 的可调磁

控管,加速器的流强可达 120mA.

除了上面的应用,最近几年,有些直线加速器被用来进行自由电子激光(FEL)的研究,中国科学院高能物理研究所的 30MeV 的直线加速器被用于建立一台康普顿红外自由电子激光(IRFEL),1993 年输出功率已达饱和,输出脉冲的平均功率为 2—5kW.在这台装置中采用了微波电子枪,提供高亮度束注入.

中国工程物理研究院的一台 3.5MeV 的电子感应直线加速器被用来发展成毫米波段的 FEL 放大装置,在 1994 年其输出脉冲功率为 140MW.中国原子能科学研究院也建造了一台 L 波段的 4MeV 高亮度( $3 \times 10^9/\text{m}^2 \cdot \text{rad}^2$ )直线加速器,用来发展 100—200 $\mu\text{m}$  的 FEL.

表 3 给出了一些我国基于电子直线加速器 FEL 的主要参数.

具有准 CW 模式性能的高亮度电子枪是发展高平均功率 FEL 的关键部件.北京大学超导腔组最近几年来发展了一台由锁模激光器、光阴极制备室、直流高压引出加速室组成的激光驱动直流光电子枪,它可以产生数十皮秒,甚至亚皮秒的高亮度电子束团.制备光阴极是光电子枪的关键技术,除了通常采用的化学蒸镀或物理沉积外,该枪配有小型离子注入系统,该组于 1998 年成功地研制出离子注入型镁铯光阴极.

表3 基于直线加速器的 FEL 主要参数

装置名称 (地点)	BFEL (中国科学院高能 物理研究所)	SG - 1 (中国工程物理 研究院)	CEAP (中国工程物理 研究院)	CAEP (中国工程物理 研究院)	CIAE (中国原子能科学 研究院)
类型	振荡器	放大器	振荡器	振荡器	振荡器
加速器类别	射频直线加速器	电子感应直线加速器	射频枪注入器	L - 波段直线加速器	L - 波段直线加速器
能量/ MeV	10—30	3—3.5	2	17	4
峰值电流	10—20A	1—1.5kA	10A	10A	> 15A
能散度(EWHM)	1 %	4 %	1.5 %	1.5 %	1 %
规一化发射度 / mm ·mrad	< 30	$4.7 \times 10^3$	1.5	2	2.2
宏脉冲	4 $\mu\text{s}$	60ns	4 $\mu\text{s}$	4 $\mu\text{s}$	10 $\mu\text{s}$
微脉冲	4ps		20—25ps	20—25ps	50ps
振荡器周期/cm	3	11			
振荡器长度/m	1.5	3—4	54.4		1.5
振荡器类型	永久磁体	电磁脉冲	永久磁体	永久磁体	永久磁体
波长	8—11 $\mu\text{m}$	8.67m	1.6cm		
腔长	2.25m		1.38m		2.7m
输出峰值功率	2MW	140MW			

与此同时,自 1988 年开始,北京大学的同一小组开展了射频超导加速技术的实验研究.于 1994 年成功地用国产铌材研制出 1.5 GHz 频率的铌腔.

突出的成果是国产铌材的改性,经过处理后的国产铌材的残留电阻比由 50 增加到 470.改性后的铌腔加速梯度达到 12MV/m,1.8 K 时腔的品质因素可达  $8 \times 10^9$ .目前,该组正在进行铜铌溅射腔的研制,第一只用于重离子直线加速器的超导腔目前正在进行低温实验.

下一步的计划将激光驱动直流电子枪与超导加速段连结起来,进行超导腔中的电子束加速实验.一只为此实验准备的,可工作在 2 K 的复合式恒温器已研制成功.

## 2.2 质子直线加速器以及重离子高频四极场加速器(RFQ)

最近几年来,我国唯一的一台中国科学院高能物理研究所 35MeV 质子直线加速器,主要是用于医疗方面,并得到了一些有趣的结果.把 35MeV 的质子束轰击铍靶后产生的快中子用于癌症治疗的研究,迄今为止大约有 300 多位癌症患者接受了快中子治疗.实践表明,对于某些癌症,中子治疗是有显著效果的,如鼻咽癌、前列腺癌、胰腺癌、骨髓癌等,与此同时,该加速器还用来生产医用短寿命同位素,如  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{11}\text{C}$  及  $^{18}\text{F}$ .该加速器还用来做一些核物理研究,在 1995 年第一次合成新的中子核素  $^{235}\text{Am}$ .

关于重离子 RFQ,北京大学已建造了一台 26MHz,300keV 整体分离环 RFQ,它属于四杆型 RFQ.这台 RFQ 自 1994 年出束后,一直在进行束流试验研究,它可将  $\text{N}^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}^-$  离子从 22keV 加速到 300keV.此 RFQ 腔的长度为 0.9m,直径为 0.5m,当高频峰值功率为 40kW、负载因子为 1/6 时,其极间电压可达设计的 75kV 值.它加速的  $\text{O}^+$  离子峰值流强达到 280 $\mu\text{A}$ ,束流传输效率为 84%.用此 RFQ 还实现了正、负离子的同时加速.在 1/6 负载因子时,测得同时加速  $\text{O}^+$  与  $\text{O}^-$  的总峰值流强为

126 $\mu\text{A}$ ,与在相同条件下分别加速  $\text{O}^+$  与  $\text{O}^-$  流强之和相同,说明在此流强范围内正、负束流间还无相互作用.

在上述 RFQ 的基础上,北京大学现正在建造一台 26MHz,1MeV 氧离子 RFQ.它的腔长为 2.6m,直径为 0.75m,现已加工完毕,正在安装,预计 1999 年内出束,该 RFQ 将主要用于重离子 RFQ 及离子注入的研究.

## 2.3 回旋加速器

除了上面说过的兰州重离子加速器外,在我国目前还有 7 台回旋加速器,其中有 4 台是小型回旋加速器,分别位于中国原子能科学研究院、中国科学院上海原子核研究所、北京自动化机械研究所及北京师范大学,这些加速器主要是用于同位素产生.

另一台是中国科学院上海原子核研究所的超灵敏小型回旋加速器质谱仪(SMCAMS),还有两台建于 60 年代,安装在上海原子核研究所及四川大学,前者已于 1983 年改成 1.44m 的扇形聚焦、能量可变、等时性回旋加速器,有时还用于核物理研究.

北京工业机械自动化研究所的一台是 1984 年从美国进口的紧凑型回旋加速器,质子能量为 26MeV,束流强度为 50 $\mu\text{A}$ ,而上海原子核研究所的那一台是 1993 年从比利时进口的,并于 1995 年建成.中国原子能科学研究院的一台小型回旋加速器于 1995 年投入运行,它也是一台等时性回旋加速器,可将  $\text{H}^-$  离子加速到 30MeV,引出束的流强可达 350 $\mu\text{A}$ ,而总的功率消耗为 100kW.它的设计是以比利时 IBA 公司的产品为参考,进行了重新设计.例如主磁铁由于国产材料的磁化曲线不同,叶片角度也作了改变,铁轭尺寸与结构也按国内的要求进行了修改.其他的主要部件也作了相应改进,除了离子源及剥离器外,所有的部件,例如高频、电源真空及水冷系统均由我国制造,运行结果十分令人满意.制备了 7 种医用短寿命同位素,其中部分出口美国、加拿大等国.北京师范大学的回旋加速器是由美国 UCLA 供应的,目前正在调

试.

上海超灵敏回旋加速器质谱仪主要是用 $^{14}\text{C}$ 来进行断代分析,1993年调束,目前已经得到质量分辨好于3000,丰度灵敏度为 $10^{-15}$ 的结果,已达到设计指标,这表明我国独立设计的新型回旋加速器的思想及采取的技术路线是完全正确的.

## 2.4 高压型加速器

### 2.4.1 串列质子加速器

自从1981年我国第一台清华大学的 $2 \times 1.0\text{MW}$ 串列加速器运行以来,到目前全国共15台,表4中列举了几台主要的串列加速器.

表4 国内运行的主要串列加速器

能量	类型	数量/台	地点
$2 \times 13\text{MV}$	美国 HVEC	1	中国原子能科学研究院
$2 \times 6\text{MV}$	国产	1	上海原子核研究所
$2 \times 6\text{MV}$	国产 HVEC	1	北京大学
$2 \times 3\text{MV}$	美国 NEC	1	上海复旦大学
$2 \times 2\text{MV}$	国产	1	中国科学院近代物理研究所
$2 \times 1.7\text{MV}$	美国 HVEC	7	中国原子能科学研究院,北京大学
$2 \times 1.0\text{MV}$	美国 NEC	2	清华大学,上海金属研究所

其中最大的要算原子能研究院的 $2 \times 13\text{MV}$ 串列加速器(HI-13),它是美国高压工程公司生产的,采用斜场及大孔径加速管,Ladestron型的输电梯系统及水平卧式腔.它于1986年开始正常运行,情况一直良好,近年的运用时间平均为4000h,而其中供束时间平均为3600h.其中某些主要的备件(如输电梯、分压电阻以及真空部件)均由国内自己生产,而且其性能好于进口产品.直到1998年年底,在它上面进行了约120项实验研究,其中核物理、核数据的测量及核技术应用各占1/3,物理实验已取得一批优秀成果,如快中子激发函数测量.最近,中国原子能科学研究院正在考虑如何在HI-13的基础上建立新的放射性核素的装置,并首先合成了新同位素 $^{90}\text{Ru}$ 等.

北京大学从英国牛津大学运来的EN串列加速器经过改建后于1990年投入运行,每年提

供给实验研究的时间约1000h.加速器谱仪是该加速器的主要研究及应用领域,可加速从铍到溴的各种离子.在该器中,采用了高强度多靶铯(Cs)溅射离子源、快速变换的注入系统、束流输运系统及分析元件、粒子探测器以及数据获取系统等.整个加速器质谱仪的 $^{14}\text{C}$ 测量精度可达0.5%,束流输运效率为80%,机器的测量灵敏度为 $6 \times 10^{-15}$ ,极限灵敏度为 $1.0 \times 10^{-15}$ .自1993年以来,约进行了600多个样品的测试,得到了一些非常有兴趣的结果,例如在考古学与古人类学方面,对广西庙岩和玉蟾岩出土的陶片进行了年代测定,其年代均在1.5万年左右,为目前世界上最古老的陶制品.在地球科学方面,对我国北方干旱、半干旱区东西向地质大断面中的若干典型剖面进行了研究,以期系统总结该地区过去气候的变化规律,从而更好地预测未来环境发展的趋势,制定正确的环境政策和措施.更有趣的是研究了具有强烈致癌作用的硝基衍生物NNK与DNA的加合作用,DNA加合物与正常DNA的含量的测量灵敏度达到了 $10^{-11}$ ,与其他方法相比,要高3—6个数量级.目前又承担了国家重大科研项目“夏商周断代工程的研究”.

中国科学院上海原子核研究所的 $2 \times 6\text{MeV}$ 串列加速器是我国自制的最高端电压的这类加速器,1992年投入运行,主要从事加速器的质谱仪的研究和应用,以及进行低能核物理实验研究,由于经费不足,每周仅开机一到两天.

还有一些小的串列加速器,如上海复旦大学的 $2 \times 3\text{MV}$ 串列加速器,中国科学院近代物理研究所的 $2 \times 2\text{MV}$ 串列加速器,北京大学、北京师范大学、中国科学院物理研究所的 $2 \times 1.7\text{MV}$ 串列加速器,主要的研究及应用领域为:利用卢瑟福背散射技术进行离子束分析(IBA)及离子注入、隧道背散射(CRB)、质子感应X射线发射(PIXE)、核研究分析(NRA)以及微米及亚微米技术等.

### 2.4.2 单极静电加速器

大部分单极静电加速器已退役,仍然有少

数的这类加速器继续很好地运行着,例如,北京大学国产的 4.5MV 加速器,自 1991 年以来作为单色中子源用,最大的质子能量为 4.6MeV,电压稳定度优于 0.1%,靶上束流强度为 10—30 $\mu$ A.

### 2.4.3 辐照工业用的电子加速器

辐照工业在我国改革开放以来有较快的发展,用于工业辐照的加速器功率在千瓦级以上的约有 50 台,总的束功率目前为 2MW,辐照加

工年产值已达 10 亿元,主要的应用是辐照交联电缆电线,辐照热收缩制品,食品及医疗用品的辐照处理等.表 5 给出了我国生产用于工业辐照的加速器.目前用得较多的是高频高压型电子加速器(地那米型),生产这类加速器的有上海先锋电机厂,中国科学院高能物理研究所及上海原子核研究所.辐照用电子加速器的特点是能量一般在 10MeV 以下,但束流功率大,在 10—120kW.

表 5 国产工业辐照用电子加速器

类型	加速器	能量/ MeV	数量/ 台	制造商
GJ - 2	地那米	2	15	上海先锋电机厂
KFG- 1	地那米	2.5	3	北京科辐公司
	地那米	3	1	中国科学院上海原子核研究所
	地那米	3	1	中国科学院高能物理研究所
	地那米	3	1	中国科学院高能物理研究所
FDJ - 0.3	绝缘芯变压器	0.3	2	北京机械工业自动化研究所
FDJ - 0.6	绝缘芯变压器	0.6	3	北京机械工业自动化研究所
FDJ - 1.2	绝缘芯变压器	1.2	1	北京机械工业自动化研究所
ILU - 6	单腔驻波	2.5	1	中国原子能科学研究院
BF - 5	行波直线	5	2	北京医疗器械研究所
	行波直线	9	1	南京大学
	行波直线	20	1	南京大学
	电子帘	0.2	1	北京机械工业自动化研究所
NBL - 10	倍压加速器	0.4	2	上海先锋电机厂、东风电机厂
	射频直线	8	1	宁波云环电子加速器技术研究所

在环保方面,利用大功率电子加速器(单台束功率在 300kW 以上)对燃煤电厂产生的有害烟气进行脱硫脱硝的处理是极有前途的应用,中日合作的一个示范工程已在成都投入运行,如果证明在技术经济上具有优势,则将会有巨大的发展前景.中国科学院上海原子核研究所及机械工业自动化研究所均积极努力开展这方面的工作,但由于未能列入国家项目,缺乏资金投入,步履艰难.

### 2.4.4 强流相对论电子束加速器 (IREB)

从 1960 年开始,强流相对论电子束加速器技术在我国得到迅速发展,迄今为止,已有 25 台 IREB 加速器在运行,其中主要的有,中国工程物理研究院的闪光 号 (8MeV, 100kA, 80ns) 及电子直线感应加速器 (10.3MeV, 2.1kA, 70ns),西北核技术研究所的闪光 号 (1MV, 1MA, 70ns). 最近几年来,西北核技术研究所致力于发展电感储能及高重复率脉冲电

子束加速器的有关技术,与俄罗斯合作,建立了峰值功率为 8GW、重复频率为 100Hz 的电子束加速器,平均功率为 20kW 的电感储能脉冲电子束加速器,以及输出功率大于 2TW、脉冲宽度可调的电感电容储能组合式多用途高功率脉冲电子束加速器.

IREB 主要用于闪光 X 射线照相及核爆炸模拟,包括电子线路瞬态辐照效应、闪电磁脉冲效应以及材料和结构的热力学效应研究等.与此同时,对一些关键技术开展了研究,例如,高功率高重复频率脉冲开关、强流电子束产生及传输、脉冲陡化技术、脉冲同步触发和控制、等离子体融断开关、纳秒级高电压及强束流的测量等.

### 2.4.5 倍压加速器

能量为 100—600kV 的倍压加速器主要用于产生强中子源和进行离子注入技术的研究,目前这类加速器总数为 25 台.

兰州大学是我国研究强中子发生器的一个重要基地,它的倍压加速器的主要指标为:能量 30keV,靶流强 30mA,束斑大小  $< 2\text{cm}$ ,旋转内靶的直径为 20cm,每秒产生的中子数为  $3.3 \times 10^{12}$  个中子,而最大通量为  $3.2 \times 10^{11} \text{n/s} \cdot \text{cm}^2$ ;采用双等离子源,在电压为 15—20kV 时,可引出 40mA 直流的氘核素,离子源的寿命主要取决于阴极,一般为 500h.

为了适应核工业、核动力及核数据的需要,中国原子能科学研究院于 1996 年建造了一台新的毫微秒的脉冲中子发生器,其主要参数为平均流强为 30—50 $\mu\text{A}$ ,中子数为  $1 \times 10^{12} \text{n/s}$ ,中子飞行距离为 8m.他们还有一台氘核加速器,用来做中子物理实验.

### 3 结论

随着我国国民经济的发展,工业辐照及医

疗方面对加速器的需求将不断增长,在下一个五年中,低能的应用加速器不仅是在数量,而且在性能及品种上都将会有很大的发展,与此同时,基础研究所需的大型加速器的性能将会得到不断改进及提高,与我国国民经济相适应的先进的大型加速器,也会得到有力的支持及发展,它仍然是加速器事业中的火车头.

致谢 作者向魏宝文、何多慧、裴元吉、樊明武、关遐令、林郁正、顾本广、方家训、邱爱慈、张天爵、朱惜安、庄杰佳、郭之虞、孙官清、王书鸿、唐金媛等同志在写作过程中所提供的帮助,表示衷心的感谢.

## 前沿和动态

### 全国近代物理研究会第 5 次学术年会简讯

经国家教育部批准,全国近代物理研究会第 5 次学术年会于 1998 年 8 月 1 日至 5 日在中国矿业大学召开,来自全国 22 个省、市的 69 名代表参加了会议.

本次会议的中心议题是“研讨面向 21 世纪近代物理教材内容、体系与结构以及教学现代化等问题”.大会邀请北京大学赵凯华教授和北京师范大学喀兴林教授作了专题报告.赵凯华教授在介绍编写《新概念量子物理》的指导思想、结构体系之后,详细报告了前三章的主要内容,喀兴林教授对编写《20 世纪物理学》丛书——《量子力学与原子世界》一书的构思以及该书不同于一般量子力学和原子物理书籍的特色作了阐述.国家教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会主任委员、北京大学高崇寿教授应邀为大会准备了题为“标准模型、暗物质粒子与超对称标准模型”的专题书面报告.大会从课程体系及内容改革,教育技术现代化和教学,科学研究等三个方面组织了 25 人次的交流发

言和专题讨论.来自综合性大学、高等师范院校、工科院校和军事院校的与会代表从不同的角度畅谈了自己的经验与体会.大家高兴地看到,上一次会议形成的“近代物理课程体系改革势在必行”的观念,在这两年来已成为具体的实践,并取得了一定的阶段性成果;这些工作初步体现了教材现代化和素质教育的要求.特别可喜的是,本次会议所展示的 CAI 课件,内容丰富,精彩纷呈,体现了教育技术现代化的方向.通过讨论,大家也清醒地认识到,如何针对不同的层次和要求,建立面向 21 世纪的近代物理课程新体系,尚有很多问题需要深入地探索.

会议期间还分别召开了常务理事会和全体理事会会议,在总结回顾这两年来工作的基础上,对下一阶段的中心工作进行了讨论.

(中国矿业大学物理系 张学龙)