

我国粒子加速器的发展和展望

方守贤 梁岫如

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

我国粒子加速器在 80 年代里有了相当大的发展。三大加速器建设工程的完成,标志着我国已具有了建造大型加速器的能力。粒子加速器技术在一些方面已达到了国际上 80 年代中期的水平,低能小加速器的应用出现了新的形势,一些相关的工业技术得到了相应的发展。当然,与国际上新技术、高技术日新月异的发展形势相比,我们仍然存在着很大的差距。本文试图纵观世界上粒子加速器的发展,分析我国粒子加速器所处的地位和今后的发展。

一、我国粒子加速器发展现状

我国粒子加速器四十年来的发展大致可以分为三个阶段。50 年代到 60 年代中期为开创阶段,从无到有建造了电子静电加速器、质子静电加速器、回旋加速器和电子感应加速器,还生产了一批电子静电加速器,满足了核物理研究和许多学科应用研究的需要,为我国核物理研究、国防科研和应用作出了贡献。这批加速器的大多数仍然在工作。60 年代中到 70 年代末,粒子加速器虽然发展缓慢,但在完成研制工业用、医疗用和军事科研用加速器的任务中,保持了技术队伍的稳定和技术的发展,为 80 年代的大工程建设储备了力量,准备了条件。80 年代,改革开放的政策带来了我国科研事业和国民经济的大发展,粒子加速器事业也得到了发展。中国粒子加速器学会 1990 年的统计数字表明,我国现有各类粒子加速器约有 450 多台,其中进口加速器占总数的三分之一,大部分是医疗用和工业用小型加速器。

北京正负电子对撞机(BEPC)的任务之一是在 τ 轻子物理的领域里开展研究工作,1989 年初投入运行。它是目前国际上在该研究领域内唯一的性能最好的装置。中美双方已达成合作进行研究的协议,说明 BEPC 以优异的性能得到了国际上的承认。它的另一个任

务是用作同步辐射光源,提供从紫外光到 X 射线和硬 X 射线,为众多学科的研究和应用服务。BEPC 用于高能物理实验的寿命大约是十年,在此期间,BEPC 可在兼用和专用两种模式下工作,前者是指机器运行时的参数按对撞的要求来确定,后者则专门根据对同步辐射光的要求来确定,要求同步辐射光有更高的亮度和更好的性能。在该领域中的高能物理实验研究工作进行到一定阶段以后,BEPC 将全部转向纯同步辐射应用。

合肥同步辐射装置(HESYRL)是专用光源,电子束流能量为 800MeV,可提供的同步光为紫外线到软 X 射线,该装置也已基本建成。

兰州重离子加速器(HIRFL)是为在中能范围进行重离子物理研究的大型装置,经过十年的努力,已经建成并投入使用。

这三台大型加速器的完成,大大提高了我国进行许多学科方面的科研能力,它们的作用在今后科研工作中将能得到充分的反映。加速器技术在一些方面的提高,也将对相关工业的发展带来好处,如大部件精细加工技术、高精度大型磁铁加工技术、高功率稳流电源、大功率微波技术、高频技术、大容积超高真空技术、束流测量技术和自动控制技术等,在国民经济的许多领域都有用处。加速器制造技术的提高,也将对低能加速器的发展有所促进。中国科学院高能物理研究所已向国外提供成套微波元件和

表 1 80 年代我国建成的三台大型加速器

工程名称	加速器名称	束流能量	建设时间
北京正负电子对撞机	注入器 (e^+, e^- 直线加速器)	1.1/1.4 GeV	1984—1987
	储存环	2.2/2.8 GeV	1981—1988
合肥同步辐射光源	注入器 (e^- 直线加速器)	200 MeV	1983—1987
	储存环	800 MeV	1983—1989
兰州重离子加速器	注入器 (SFC) 扇形加速器 (SSC)	(碳) 100 MeV/u	1976—1988

加速管,承担国外的合作项目。

在过去的十年里,我国还建成了一批低能加速器(见表2),有35MeV质子直线加速器、4.5MeV离子静电加速器和串列加速器、电子直线加速器、高频高压型加速器、高功率束加速器及电子帘加速器等,其关键部件和技术接近或基本上达到国际水平。同时,也从国外引进了一批小型加速器,主要是医疗用电子直线加速器、工业探伤用电子直线加速器、工业辐照用大功率电子加速器和小型串列加速器。这批加速器在低能核物理、原子分子物理、离子束分析、离子注入、材料辐照、固体物理以及重离子物理研究等方面得到了应用,也在辐照加工、工业辐射探伤和医疗等方面取得了成绩。如北京质子直线加速器,输出35MeV质子束流,可以打靶产生中子,进行中子治癌研究,还可以产生二十多种短寿命医用同位素和开展核物理实验。中国原子能科学研究院引进美国的 $2 \times 13\text{MV}$ 串列加速器于1989年开始运行,在低能核物理研究方面已经取得了一些成果。复旦大学和清华大学等利用引进 $2 \times 2\text{MV}$ 串列加速器在分子物理及原子物理方面开展研究,北京大学、复旦大学和中国科学院上海冶金研究所等在离子注入和离子束元素分析方面开展了研究工作。

近年来,国际上发展了一种新技术,使加速器与质谱仪结合起来,成为高灵敏度的“加速器超灵敏质谱计”,可在地质学、海洋学、考古学、生物医学及材料科学等方面进行分析工作。北京大学、中国原子能科学研究院、中国科学院上海原子核研究所和中国科学院近代物理研究所(兰州)在这方面开展了工作。

研制高功率电子束加速器在我国开始于

60年代末,为了适应军事工业的需要,由中国科学院高能物理研究所与中国工程物理研究院共同研制了一台能量为500keV的脉冲X射线机,作为原理实验装置,之后又研制成功了强流脉冲电子束加速器(1MV,20kA)。在80年代的十年内,又建成了“闪光-I”,和“闪光-II”强流脉冲电子束加速器,输出电压和脉冲电流分别为8MV,100kA和0.9MV,0.9MA。中国原子能科学研究院、国防科学技术大学、中国科学院电工研究所和中国科学院电子学研究所也建成了类似的装置。中国工程物理研究院又研制成功感应直线加速器,能量和流强分别为1.5MeV,3kA。高功率电子束装置与低能加速器有较大的不同,强流束物理和强流加速器技术有它特殊的难度。目前,我国在高功率脉冲技术方面已接近国际水平,其应用范围也从最初的核辐射效应研究扩展到强激光技术研究、惯性分子束聚变研究和工业辐照应用等,还可以拓宽到抗核加固研究、强微波辐射电磁轨道、粒子束武器等研究方面,已在闪光X射线照相、材料热击波研究、电磁脉冲模拟和自由电子激光等方面取得了成绩。

离子注入机是半导体工业和生产集成电路的关键工艺设备,国内有几家生产厂,现有140多台注入机大多数是低能机($<200\text{keV}$),高能离子注入机大多为进口。

用于工业探伤的电子直线加速器和电子感应加速器,国内安装约二十多台,大多数是进口的,国内有能力制造,但尚未形成产品,也难以与国外产品竞争。

我国的辐照加工工业正处在发展的初期阶段,作为射线源的大功率辐照加速器有高频高

表2 我国低能加速器现状*

加速器种类	总台数	束流能量 (MeV)	流强 (mA)
电子静电加速器	19	1.5—2.5	0.15
离子静电加速器	8(2)	0.2—4.5	15~100 μ A
串列静电加速器	14(12)	2 \times 2,6,13	1~3 μ A
绝缘芯变压器型加速器	8(1)	0.2—3.0	10—15
倍压加速器	25(4)	0.1—0.75	0.2—1
电子帘加速器	3(2)	0.2—1.5	30—50
高频、中频高压加速器	9(3)	2.0—3.0	10—40
离子注入机 高能	12(6)	0.4—0.6	0.01—0.2
低中能	170(30)	0.03—0.2	0.1—1
强流	13	0.025—0.15	0.3—15
中子发生器	12(3)	0.1—0.6	
回旋加速器	9(3)	6—35	0.05—0.9
质子直线加速器	1	35	66
电子直线加速器			
科研用	7	4,10,14,30,90	10—1000
工业辐照用	5(3)	5,10,12	200—600
工业探伤用	15(9)	4,10	
医疗用	89(64)	1,15,20	
电子感应加速器 医用	8(4)	25,35	
探伤用	12	15,25	
高功率电子 MARX 型	14	0.6,8	13~900kA
束加速器 直线感应	1	1.5	3 kA
总计	452(145)		

* 圆括号内为进口机器台数。

压型加速器、绝缘芯变压器型加速器和电子帘加速器等。所加工的产品有辐照交联电线电缆、热收缩材料、硅橡胶辐照硫化、半导体器件辐照改性及表面涂层固化等。随着科技事业和国民经济的发展，对辐照产品的需求将会成为一个大问题，如我国新建核电站用的辐照电线和电缆基本是进口的。在我国“八五计划”中应对辐照加工工业的发展有所部署。

我国从70年代开始研制生产医用电子直线加速器，到现在共有产品二十几台，从数量和质量方面都不能满足需要。进入80年代后，从国外买进了大量的医用电子直线加速器，目前临床应用的电子直线加速器有近百台。

工业辐照加速器、工业探伤加速器和医疗用加速器主要面临的问题是如何提高国产机器性能，组织批量生产，使其具有与国外产品竞争的能力，满足国内日益增长的需要，解决因使用进口产品而得不到零配件的及时更换和维修

的困难。

随着科学技术应用的推广和国民经济的发展，可以预料，对加速器的需要会愈来愈迫切，也会有愈来愈多的人认识到使用进口机器带来的问题和烦恼。因此，现在再次提出呼吁重视低能加速器生产的国产化问题，是十分必要的。

粒子加速器是技术比较复杂的装置，作为射线源进入经济领域有它自身特有的困难。它要求维护和运行人员有较高的文化素养，掌握专门的技能；它需要进行射线防护，必须对射线的危害和防护进行了解；它要求有严格的使用和安全操作规程。因此，文化素质低，技术水平差，推广应用自然困难。所以，在短期内有较大发展是不现实的，但是应当有远见地制订出发展规划，制订对国内产品的保护政策和促进发展的政策，重视对技术人才的培养等，使加速器技术的发展和生产能力的提高能适应90年代经济发展的需要。

二、90年代发展展望

90年代是我国粒子加速器“巩固提高、稳步发展”的阶段。这里，我们仅从我国投资大，技术上更具有代表性的几台较大型装置的应用方向结合国际形势来进行分析，展望我们90年代的任务。

1. 高能加速器实验装置

60年代初，对撞机的出现开辟了高能加速器发展的新纪元，70年代出现了许多能量较低的正负电子对撞机，并在美国 SPEAR 机器上发现了 J/ψ 粒子。70年代末，“冷却技术”的成功促使新的质子-反质子对撞机出现，导致了1982年 CERN 的 SPS 机器上 Z^0 和 W^\pm 粒子的发现。最近二十年里，所提出的加速器的方案均为对撞机型。表3列出了已有的和正在建造的对撞机。

表3 世界上已有的和正在建设中的对撞机

对撞粒子种类	加速器名称	束流能量 (GeV)	周长或长度 (m)	亮度 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	首次出束时间
电子-正电子	PEP (美国)	16+16	2200	5.9×10^{31}	1980
	SLC (美国)	46+46	3050	6.0×10^{30} *	1987
	CESR (美国)	6+6	766	1.0×10^{32}	1979
	VEPP-4M (苏联)	6+6*	365	1.0×10^{32} *	1990
	DORISII (德国)	5.3+5.3	288	3.3×10^{31}	1973
	LEP (西欧核子研究中心)	55+55*	26659	1.7×10^{31} *	1989
	BEPC (中国)	2.8+2.8	240	1.7×10^{31} *	1988
	TRISTAN (日本)	30+30	3018	1.4×10^{31}	1986
电子-质子	HERA (德国)	26+820*	6336	1.6×10^{31} *	1990
质子-反质子	Tevatron (美国)	900+900	6263	2.0×10^{30}	1985
	SppS (西欧核子研究中心)	315+315*	6911	2.8×10^{30}	1981
质子-质子	SSC (美国)	20000+20000*	86760	1.0×10^{33} *	1998
	UNK (苏联)	3000+3000*	20772	4.0×10^{32} *	1995
	LHC (西欧核子研究中心)	8000+8000*	26659	3.8×10^{34} *	1996
重离子-重离子	RHIC (美国)	100/u + 100/u	3833	$1.4 \times 10^{31}(\text{p})^*$ $10^{27}(\text{Au})^*$	1996

* 为设计值。

下面按对撞机分类作简单介绍。

(1) 正负电子对撞机

正在运行的能量最高的正负电子对撞机有美国斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 的直线对撞机 (SLC) 和西欧核子研究中心 (CERN) 的名为 LEP 的对撞机，这两台机器的能量均为 $2 \times 50\text{GeV}$ 。SLC 是将原有 3km 长的电子直线加速器加以改造，又加上了正电子阻尼环和两条聚焦力很强的半圆形输运线。直线加速器提供能量为 50GeV 的正负电子束团，经输运线再经末端的精细聚焦区域后得到截面为微米量级的束流，以实现一次性对撞。为了得到高亮度，要求每束团中的粒子数目为 6×10^{10} ，对撞点上束流截面半径为 $1.6 \mu\text{m}$ 。这台机器于 1987 年建

成出束，到 1989 年才在探测器上得到了第一个 Z^0 粒子。用了两年时间作加速器物理的研究，终于为直线对撞机的发展作出了开创性的贡献。但由于机器技术难度太大，亮度值仅为 $1.5 \times 10^{28} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，离设计值 $4 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 还有一段距离。

西欧核子研究中心 27km 周长的 LEP 对撞机采用了成熟的技术，又将原有的几台质子同步加速器加以改造用来加速电子，新建了一台 600MeV 电子直线加速器作注入器 (LIL) 和一台 600MeV 的正电子积累环 (EPA) 作质子环形加速器 (PS) 的前级。来自注入器的正负电子束经 PS 被加速到 3.5GeV ，再注入到环形加速器 SPS 中加速到 22GeV ，最后进入到 LEP 中

加速到 50GeV。在 LEP 中第一阶段用了常规加速腔,很快实现了 50GeV 的目标,并且获得了 Z^0 和 W^\pm 粒子。第二步的目标是采用超导加速腔,把束流能量提高到 90GeV,预计在 1992 年实现。

80 年代中期建成的三台能量较低的对撞机有美国的 PEP ($2 \times 18\text{GeV}$),德国的 PETRA ($2 \times 23\text{GeV}$)和日本的 TRISTAN ($2 \times 27\text{GeV}$),均已运行了几年,但未得到惊人的物理结果。PEP 和 PETRA 已先后停机,TRISTAN 也计划在一年多以后转向同步辐射运行。

(2) 质子-反质子对撞机

由于冷却技术的成功,世界上原有两台大型质子同步加速器均被用来实现质子和反质子对撞。首先是 CERN 的 SPS,在 80 年代初实现了 $2 \times 270\text{GeV}$ 的 $p\bar{p}$ 对撞,以后能量又提高到 $2 \times 315\text{GeV}$,尽管亮度值不太高,仅为 $10^{28}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,但还是首次发现了 Z^0 和 W^\pm 粒子,因而获得了诺贝尔奖金物理学奖。美国费米国家实验室 (FNAL) 的 TEVATRON 于 1987 年改造为对撞机,1988—1989 年实现了 $2 \times 900\text{GeV}$ 的 $p\bar{p}$ 对撞,成了当今世界上能量最高的质子反质子对撞机,亮度达到 $1.6 \times 10^{30}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,目标在寻找顶层子 (T-夸克)和希格斯粒子,目前还未找到。苏联正在建造的 UNK 是能量为 3TeV 的质子同步加速器,大约在 1994 年建成,先进行固定靶试验,计划将来再实现对撞。

(3) 电子-质子对撞机

德国的 HERA 是世界上唯一的电子-质子对撞机,能量为 ($30\text{GeV} + 820\text{GeV}$),1988 年已加速电子到 27GeV,1990 年质子环安装完进入调束。

对撞机在今后的发展仍然是两个方向:一是致力于提高能量,一是致力于提高亮度。前一阶段的精力主要集中在提高能量方面,目前开始考虑能量较低而亮度很高的对撞机。

更高能量的质子-反质子对撞机在原则上没有困难,如采用超导磁铁把磁场提高到 6—10T,这对于 TeV 级的对撞机的规模还是可以

接受的。美国为了再度夺回其高能物理领域的领先地位,正在筹划建造超导超级对撞机 SSC,设计亮度为 $1 \times 10^{33}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,能量为 $2 \times 20\text{TeV}$,采用磁场强度为 6T 的超导磁铁,周长约 90km 总投资 80 亿美元,已获得国会批准,预计在本世纪末建成。西欧不甘落后,计划在 LEP 的隧道中再加一个超导环 LHC,若超导磁场为 10T,能量可到 $2 \times 8\text{TeV}$ 。其能量虽然低于 SSC,设计亮度为 $3.8 \times 10^{34}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,仍然可以与 SSC 竞争。由于利用 LEP 的现有条件,因此在时间上会比 SSC 提前两三年,但目前资金还未落实。

电子储存环由于存在强烈的同步辐射的原因,能量的进一步提高有很大困难。如果使能量高于 LEP 一个数量级,则储存环的周长需要 2700km,这是不可能的。因此可以说,LEP 是世界上最大的也是最后一个电子储存环。因此,更高能量的电子对撞机的出路在于直线型对撞机。这几年世界各大实验室集中了力量对直线对撞机的原理和粒子动力学问题等进行探讨并且进行预制研究,特别是借鉴了从美国 SLC 上获得的宝贵经验,又提出了一些设计方案。

为了实现 $10^{33}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的亮度,极其重要的是要获得并控制一个大小为毫微米量级的稳定束团,而对撞时的韧致辐射、电子对的产生及束团相对撞时的非线性效应等,均是需要研究的关键问题。在技术上,高梯度加速管及更有效的功率源也需要一段时间的摸索。

在粲物理和 τ 轻子物理领域有许多重要的研究题目,需要有比 BEPC 亮度更高的机器。因为环形对撞机的亮度正比于能量的四次方,低能对撞机的亮度不够高,即使 BEPC 的亮度比原有的大了三、四倍,但再提高到 $10^{33}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上是不可能的。为了达到高亮度,可行的办法是提高储存环中电子束团的数目,因为每个束团中粒子的数目是有限的。为了使束团在指定对撞点以外不发生对撞,最好是使正负电子束团分别在两个储存环里累积。有两个正在设计中的方案,“ τ -C”粒子工厂和 B 粒子工厂,

前者正负电子束团能量相等,均为 $2 \times 2.5\text{GeV}$,后者为了研究宇称不守恒性,电子能量不同,为 $2\text{GeV} + 14\text{GeV}$ 。在这两台对撞机里,由于环流密度极高,会产生新的束流不稳定性,尤其是 τ -C 工厂,目前尚处于探讨和方案设计阶段。西班牙和苏联的实验室正在考虑建造一台 τ -C 工厂,由于技术难度大,即使获得批准也需四、五年的时间才能建成,因此在 1998 年以前, BEPC 将仍能保持在这一能区亮度最高的优势,为我国高能物理的发展提供了一个良好的基础。

从加速器的发展来看,对撞机的能量差不多每六年增长十倍。而它的规模越来越大,如果按目前发展的速度推算,那么到了下一个世纪的中叶,加速器的大小将超过地球的尺度。无怪乎有人说,利用激光等离子体原理,可以在地球的游离层中建造一台能量为 $100\text{TeV} + 100\text{TeV}$ 的机器。这也许是笑话,但人类的智慧是无穷的,新的加速器原理终将被找到,加速器的能量总会在不是大得可怕的规模上提高到更高。这需要新一代的科学家们探索,他们要有为科学献身的精神。

2. 同步辐射光源装置

同步辐射光是电子环形加速器的副产品,于 50 年代初被认识到是一种性能优异的光源而进行了研究,并很快加以利用。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一个强有力的工具。表 4 给出一些主要的已经建成及正在建造的同步辐射装置,从建造的时间和性能分为三代。第一代为兼用机,起源于 50 年代初,是利用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 CENR,德国的 DORIS,法国的 DCI 及意大利的 ADONE 等。该类装置中的束团发射度较大,约为好几百个 $\text{nm} \cdot \text{rad}$ 。相应的光谱耀度较低,在 $10^{23} - 10^{41}$ 个光子/ $\text{s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 10^{-3}\text{bw}$ (带宽)左右。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 $40 - 150\text{nm} \cdot \text{rad}$,相应光谱的耀度也提高了两个数量级到 $10^{15} - 10^{16}$ 个光子/ $\text{s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 10^{-3}\text{bw}$ 。作为第二代同步辐射光源的代表有英国的 SRS、美国的 Aladdin 及 NSLS,德国的 BESSY 及日本的 NVSOR 和 PF 等。据不完全统计,已经建成并投入运行的同步辐射装置共三十多台,分布在二十多个实验室里,大约有六千多名科学家在利用这些装置进行研究。尽管如此,仍不能满足各方面日益增长的需要。因此,在 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 $5 - 10\text{nm} \cdot \text{rad}$ 。更重要的是第三代同步辐射装置上可以安装更多的插入元件,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,而且大大提高了光谱的耀度,即可达到 $10^{17} - 10^{19}$ / $\text{s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 10^{-3}\text{bw}$ 。

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,除了美国、西欧及日本建造能量为 $6 - 7\text{GeV}$ 的大型装置外,大部分能量为 $1 - 2\text{GeV}$ 内,不少是属于第三世界的,如巴西、印度及南朝鲜等。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。从表 4 可以看出,同步辐射装置所覆盖的能量范围可分为三段,即 0.8GeV , 2GeV , 6GeV ,相应的光子能量为 0.5keV (真空紫外), 2.5keV (软 X 射线), 20keV (硬 X 射线)。我国新建造的 BEPC 对同步辐射装置来说属于第一代,由于设计先进,它的专用模式性能接近第二代。合肥同步辐射光源属于第二代。这两台光源与第三代光源有很大的差别,我们的方针是在首先用好这两台的基础上发展第三代。我国台湾省正在建设一台第三代同步辐射光源。

3. 重离子加速器

重离子加速器是研究原子核物理的重要工具,在过去的十多年里有了蓬勃的发展,其中高电荷态的电子回旋谐振离子源 (ECRIS) 在它的发展中起了极其重要的角色,大大扩大了原有的一些全离子加速器的加速能力 (每核子的能

表4 目前世界上已有的和正在建设中的部分同步辐射光源

国家	机器名称	能量 (GeV)	光强 (keV)	发射度 (nm · rad)	
第一代兼用机	美国	SSRL	3.0	4.7	450
	意大利	ADONE	1.5	1.5	200
	德国	NASYLAB	3.7—5.5	9.2—23	270·560
	中国	BSRF (BEPC)	1.6—2.8	0.9—4.7	76
第二代专用机	美国	NSLS	2.5	5.0	130
	日本	Pf	2.5	4.1	130
	英国	SRS	2.0	2.2	100
	中国	HESYRL	0.8	0.5	26—160
第三代专用机	日本	SPRING8	8.0	30.0	5.3
	欧洲	ESRF	6.0	20.0	5.3
	意大利	ELETTRA	2.0	3.2	7.1
	美国	ALS	1.5	1.5	10.0
	南朝鲜	POHANG	2.0	2.2	11.0
	中国台湾	SRRC	1.3	0.8	19.0

量及其种类)。在1985年以后,由于高能加速器的冷却技术获得成功,出现了一些低、中能重离子加速器,称做冷却器-储存环-加速器,在短短的几年时间里,就出现了近十台这类装置。更有一些原来的高能物理实验室也将兴趣转向了高能核物理方面,用高能质子同步加速器把重离子加速到相对论能量(GeV/u)。目前,世界上已有三十多个实验室有大小不同、种类各异的重离子加速器,下面作简单介绍。

(1) 低能直线加速器

已建成的低能直线加速器有 Unliac 和 Super Hilac,可加速全离子,能量为5—20 MeV/u。美国阿贡实验室正在建造一台性能更好的40MeV超导直线加速器 ATLAS (用9 MeV 串列静电加速器作注入器),计划在1991年调束,将U离子加速到5MeV/u。意大利已批准建造一台与 ATLAS 规模相当的超导直线加速器 ALPI,1993建成后可以将U离子加速到6—10MeV/u。

(2) 低中能冷却器-储存环-加速器

冷却技术的成功不但促进了质子-反质子对撞机的发展,也为重离子的发展历史掀开了新的一页。其工作原理是在储存环上三个直线节中分别安装高频腔、电子冷却器(可以是激光冷却或统计冷却)和内靶。

高频腔的作用是对重离子进行加速(或减

速)或高频积累或聚束。重离子被加速到所需要的能量后放入内靶,束流通过薄的内靶后大部分的重离子没有进行核反应,而在经过靶时受到了靶离子影响而升温(即能散度和角散度增加)。增温后的离子束流在经过冷却器后使纵向和横向相空间尺寸得到压缩而不会丢失,可继续在储存环里回旋。这样就可使重离子反复多次通过内靶,大大提高了核反应的几率即亮度。还由于它具有很好的能量分辨率、角分辨率和低本底,因而大大扩展了研究领域。值得指出的是,部分离子或全离子剥离的离子与冷却器中的自由电子的相互作用,不但对核物理而且对等离子物理和天体物理都是很有兴趣的课题。这就是为什么在短短的十几年中出现了近十台低中能冷却器-储存环-加速器的原因。其中低能量的有三台:丹麦的 ASTRID,瑞典的 CRYRING,美国橡树岭实验室的 HIS-TRAD。这批机器的周长约为50m,磁刚度在2Tm左右,目前均处于建成后的初期调束阶段。德国海德堡的 TSR 已开始运行,是世界第一个实现重离子冷却的机器,设计指标为荷质比 $Q/A = 0.5$ 的离子可以加速到30MeV/u。1988年首次对 $^{12}\text{C}_6$ 进行冷却,在3s内将束流动量散度 $\Delta p/p$ 从0.018冷却到 2×10^{-4} ,束流寿命为4100s,强度为 2×10^9 个离子。

目前,世界上已建成的冷却器-储存环型的

中能重离子加速器有三台,即德国的 SATURNE (能量为 1.25GeV/u),美国的 BAVALAC (能量为 2.1GeV/u)和苏联的同步稳相加速器,均已运转了多年。正在建造的中能重离子加速器还有五台。日本的一台,叫做 TARNII,于 1989 年出束。瑞典的一台,叫做 CSLAIUS,1989 年调束成功,1990 年实现了对质子的冷却。美国的一台,叫做 IUCF,于 1989 年运转。瑞士的一台,叫做 COSY。这四台机器的周长大约为 $80\text{--}100\text{m}$,磁刚度为 $3.6\text{--}12\text{Tm}$ ($K = 600$,是与机器有关的常数),目前都只加速轻粒子。德国的一台,叫做 GSI,是全离子加速器,它由串联的两台同步加速器组成,一台的周长为 220m ,磁刚度为 18Tm ,另一台的周长为 110m ,磁刚度为 10Tm 。其设计目标是把 U 离子加速到 1GeV/u ,把 Ar 加速到 1.7GeV/u 。

(3) 低能回旋加速器

目前世界上建成的常规磁铁大型分离扇加速器有三台。中国科学院近代物理研究所(兰州)于 1988 年建成的重离子加速器 SSC($K = 450$),已加速了 C, O, N 离子。日本 1986 年建成的分离扇回旋加速器 RIKEN($K = 540$),用回旋加速器($K = 70$)代替直线加速器作注入器,可加速 C, Cu ($20\text{--}42\text{MeV/u}$)离子。欧洲最大的回旋加速器 GANIL 经过几年的运行,已可加速 Ar 到 60MeV/u ,加速 Xe 到 44MeV/u ,束流强度 10^{11} ,加速 U 到 29MeV/u ,束流强度为 4×10^9

70 年代中,超导回旋加速器由于结构紧凑、经济和可靠而引起人们的关注,但它的发展却经历了比人们的想象长得多的里程,其研制和建造的时间约 7—9 年。到目前为止,已建成的或即将建成的超导回旋加速器共有六台,分别在加拿大、美国、意大利、德国和法国。加拿大的一台,叫做 CHALK($K = 520$)。美国的一台叫做 MUS,是由两级超导回旋加速器组成($K = 500, K = 800$),美国德克萨斯州一台叫做 AM($K = 500$)。以上三台均已建成并投入预运行。意大利的 Milan ($K = 800$),法国的 Orsay ($K = 600$)和德国的 Munich ($K =$

1200),都还在建造中。

(4) 高能重离子加速器

西欧核子研究中心(CERN)的加速器 SPS 已成功地把 O^{6+} , S^{12+} 加速到 200GeV/u 。美国布鲁克海文实验室在 AGS 加速器上实现了 O^{16} 和 Si^{18} 离子的加速,能量达到 14.5GeV/u ,希望能用此来产生夸克-胶子球等离子体。该实验室又投资 4 亿美元正在进行 $2 \times 100\text{GeV/u}$ 的相对论能量重离子对撞机(RHIC)的建造,将为全离子加速器掀开新的历史篇章。

纵观全局,我们虽然有了一台重离子加速器,但面对低、中能领域里的一大批竞争者,如何使机器在现有基础上进一步得到改进,作出有水平的物理工作,是我们面临的严峻问题。

连续束电子加速器和介子工厂是核物理研究的两个重要探针,在我国还没有研制,仅简单介绍国外情况。连续束电子加速器,是一种载空比(duty factor)较长的加速器,有三种类型。早期的做法是把电子直线加速器或者电子同步加速器提供的脉冲束流再注入到叫做“延伸环”的储存环里,进行加速和积累,然后用共振方法使束流多圈引出。每圈只引出束流的一小部分,使引出过程很长,因而大大增加了载空比。80 年代中期,建成了三台 MeV 能级的延伸环,正在建造的为 GeV 能级。如德国波恩大学的能量为 2.5GeV 的机器(ELSA),载空比为 95%,流强为 $200\mu\text{A}$,于 1987 年开始运行。它也可以把电子加速到 3.5GeV ,用作同步辐射光源。美国 MIT 直线加速器中心正在建造能量为 1GeV 的机器,由直线加速器和延伸环组成,延伸环可兼作同步辐射光源,预期于 1992 年建成。挪威也计划于 1992 年建成 900MeV 的延伸环。近年来,有人建议采用超导直线加速器来得到连续束,但实验表明,超导加速腔的场梯度不可能做得比常规腔高,因此又重新提出采用返航式电子直线加速器。美国正在建造的机器 CEBAF,就是使电子束流经过四次返航得到加速,最高能量可达 4GeV ,加速频率为 1.5GHz ,加速梯度为 5MeV/m ,束流强度为 $200\mu\text{A}$,计划于 1994 年建成。还有一种高能重离

子加速器是跑道型回旋加速器,较大的一台是美国 Mainz 大学建造的 MAMI 机器,它有三台跑道型回旋加速器串联而成,最高能量为 855MeV。

介子工厂是一种能量在 1GeV 以下的强流加速器,用于产生 π 介子,作为强相互作用的探针,并有广泛的应用领域。表 5 给出了三台不同类型的介子工厂的主要参数。它们已运行了十多年,取得了不少成果。80 年代初,人们又建议建造能量更高的(几十 GeV)的强流质子加速器,用于产生 K, \bar{p} 新强子。所以最近被统称为强子工厂或强子装置。首先提出的是 80 年代初加拿大的 K 介子工厂(KAON Factory),能量为 30GeV,流强为 100 μ A。它由原来的 H⁻ 离子加速器 TRIUMF 作注入器,进入累积环,再进入到 3GeV 的增强器中加速,最后注入到主隧道中,作进一步加速。为改进束流的性能,

表 5 三台不同类型的介子工厂的主要参数

介子工厂名称	LAMPF		TRIUMF	PSI
加速离子种类	p	H ⁻	H ⁻	p
动能 (MeV)	800	800	180—520	590
平均强度 (μ A)	900	30	150	250
最高强度 (μ A)	1200		200	380
设计强度 (μ A)	1000	100	500	1500
载空比 (%)	6—9		100	100
损失率	10 ⁻³		10 ⁻³	2 \times 10 ⁻⁴
极化束强度 (μ A)	0.02		0.06	5
极化束设计强度(μ A)	10.0		10	10

隧道中配有另外两个环:收集环和延伸环,总投资为 4 亿美元,由几个国家参加建造。欧洲的强子装置代号为 EHF,它由一台 1.2GeV 的直线加速器作注入器,再由 9GeV 的快速质子同步加速器和 30GeV 主环加速到高能,另外还有两个环起收集和延伸的作用,以改善束流品质,可达到 100%的载空比。

表 6 世界上已有的或正在建造的中子源*

机器代号	IPNS	KENS	ISIS	LASCE	SINQ	TRNF
实验室	ANL	KEK	RAL	Los Alamos	PSI	TRIUMF
国家	美国	日本	英国	美国	瑞典	加拿大
加速器种类	50MeV linac synchrotron	40MeV Linac synchrotron	70MeV linac synchrotron	800MeV linac storag ring	cyclotron cyclotron	cyclotron
质子能量(MeV)	500	500	800	800	590	500(H ⁻)
靶物质	U	U	U	W	Pb-Bi	Pb
平均流强(μ A)	20(15)	10(3)	200(80)	100(30)	1000	300(140)
脉冲流强 (μ A)	4.0 \times 10 ¹² (3.3 \times 10 ¹²)	3.5 \times 10 ¹² (1.1 \times 10 ¹²)	2.5 \times 10 ¹³ (1.0 \times 10 ¹³)	5.0 \times 10 ¹³ (1.5 \times 10 ¹³)	—	—
脉冲频率(Hz)	30	20	50	12	连续束	连续束
束流功率(kW)	10(6.8)	5.0(1.5)	160(60)	80(24)	590	150(70)

* 括号内为已达到值;

注: linac 直线加速器, synchrotron 同步加速器, cyclotron 回旋加速器, storag ring 储存环。

日本提出了建造一个强子装置(JHF)的计划,设想先建一台 1GeV 的质子直线加速器作注入器,再建一个延伸环,该计划尚未得到批准。

中能强流质子加速器除用来产生介子外,还可以用作散裂中子源(或强中子发生器)。它是研究新材料的极其有用的工具。反应堆可提供热中子的通量为 1 \times 10¹⁵/cm²·s,再高一个数量级就要靠加速器。表 6 给出了已有的或正

在建造中的中子源,其中 SINQ 及 TRUMF 既用来产生 π 介子,又可用作强中子源。

4. 自由电子激光装置

自由电子激光(FEL)器于 70 年代问世,80 年代得到了很快发展。它是不同于一般激光器也不同于同步辐射光源的又一种新型光源。它以电子加速器作注入器,以磁场作空间交变的波荡器和反射镜组成光腔振荡器,将电子能量转化为强激光束。世界上已经有了十几台 FEL。

核武器研制中的若干物理问题

经福谦 胡思得

(中国工程物理研究院,成都 610003)

核武器研制涉及到多学科领域,它既包含物理学中多学科的交叉,也包含物理学与其他学科的交叉。本文将在简单介绍核武器工作原理的基础上列出这些相关学科名称及其主要研究内容。核武器研制事业的发展来自国家安全需求的推动,它的每一次进步又会在经济建设和相关学科发展中给出丰硕之果。

核武器研制是一个复杂的系统工程问题,由物理设计和工程设计两个主要部分组成。物理设计的任务是解决所提出设计原理的合理性、可行性和原型设计;工程设计的任务是解决物理设计核装置能够进一步满足战场使用的各项工程技术要求。在这两部分众多的子系统研究中,涉及到许多基础科学和工程技术科学领域的基本问题。本文限于篇幅,仅简介物理设计部分的物理问题。

各种类型武器(严格讲,是指战斗部)的物理设计原理,大都可归结为解决一个最基本问

装置,一大批装置正在建造中。FEL 装置要求加速器输出的电子束团具有流强大、束流发射度小和能散度小的优异品质,加速器的技术难度大。因此,研制高性能的加速器是加速器物理和技术的新课题。用来作 FEL 注入器的加速器有脉冲成形线加速器、电子直线加速器、电子回旋加速器、电子储存环和感应直线加速器等。自由电子激光技术已被列为我国高技术发展项目,几年来,已建成了两台脉冲成形线加速器和一台感应直线加速器,正在建造电子直线加速器和高亮度注入器,相应装置的研制也正在为之中。

这批装置可望在 90 年代中期建成,投入使用后,主要在凝聚态物理、材料科学、生物学、医学科学和光化学等方面开展研究工作。美国等

题——对关键部件的快速现场装配技术。当然,这里所说的“装配”不是“机械式”的“装配”,而是指涉及物理学多学科的原理、方法、参数和技术综合应用的“装配”。以原子弹为例,为了获得一定的威力,弹中要装填足够量的裂变材料,但是又不能装得太多,以确保其在不使用时处于次临界状态,否则核装料中自发裂变产生的中子或其他本底中子会引起链式裂变反应而造成核事故;但在它发送到预定目标部位时,又需要在现场使处于次临界状态的裂变装料快速地转变为超临界状态,并适时提供一定数量的引

国家的兴趣还在于研制激光武器。

从上面介绍的情况可以看出,粒子加速器技术作为高技术、新技术的综合体,它的发展在一定程度上反映了一个国家的科技水平和经济实力。我国正处在发展时期,经济力量有限,不可能在数量上和规模上与发达国家相比。但是我们可以有限的经济条件下充分发挥中华民族的聪明才智,在已有条件的基础上,作出有水平的科学成果来。北京正负电子对撞机、兰州重离子加速器、合肥同步辐射装置、高功率电子束装置、自由电子激光装置和一批小型加速器,为我国的科学家们提供了施展才能的舞台。我们愿与物理学家们一起为创造 90 年代的新成就而共同努力!