

粒子加速器：回顾与展望

Reviews and Prospects for the Particle Accelerator

张 闯

(中国科学院高能物理研究所,研究员 北京 100039)

一、应运而生

人类赖以生存的世界是物质的,而物质世界是无限的。图 1 示出了物质世界的尺度。这张图来自格拉肖 3 年前应邀在 高能物理研究所作的题为“高能物理的未来”的演讲。这位与温伯格和萨拉姆一起建立弱电统一理论而分享 1979 年诺贝尔物理奖的哈佛大学著名教授,用这张图向听众讲述了物质从宇观的天体、宏观的物体、介观的团簇直到微观的粒子的生动故事。谈到这条“格拉肖蛇”的首尾相衔,他强调这并不意味着天体物理把粒子物理吞没,而是指在足够小和足够大的尺度下($\sim 10^{30}\text{cm}$),两者具有统一的理论,即弱、电、强和引力相互作用“合四为一”。

本世纪以来,人类对于物质结构的认识从原子分子层次、原子核层次,质子中子层次,逐步深入到强子内部,达到夸克和轻子的层次,了解到自然界的 4 种相互作用都是通过相应的媒介子传递的,光子传递电磁相互作用,中间波色子 W 和 Z^0 传递弱相互作用,胶子传递强作用,而引力子传递引力作用。每一种粒子都有它们的反粒子。人们所熟悉的构成原子核的质子和中子,就是由上夸克(u)和下夸克(d)所组成的,称为第一代夸克,对应的第一代轻子为电子(e)和电子中微子(ν_e)。后来又发现了第二代的奇夸克(s)和粲夸克(c),对应的第二代轻子为 μ 子和 μ 中微子(ν_μ)。属于第三代的是底夸克

(b)和顶夸克(t),及其对应的轻子 τ 子和 τ 中微子(ν_τ)。表 1 列出了三代夸克和三代轻子的情况。

在 20 世纪物理学的舞台上,粒子加速器扮演了重要角色。早在 400 年前,伽利略就在比萨斜塔作过一个用加速“粒子”的方法揭示自然界相互作用的实验,实验表明重力是一种以相同方式施加于每个物体的作用力。在这个实验中,被加速的“粒子”是质量不同的石块,平均到每个核子的能量大约只有 10^5 电子伏(eV),比现代加速器已能获得的粒子能量 1TeV ($1\text{TeV}=10^3\text{GeV}=10^6\text{MeV}=10^{12}\text{eV}$) 相差 17 个数量级。

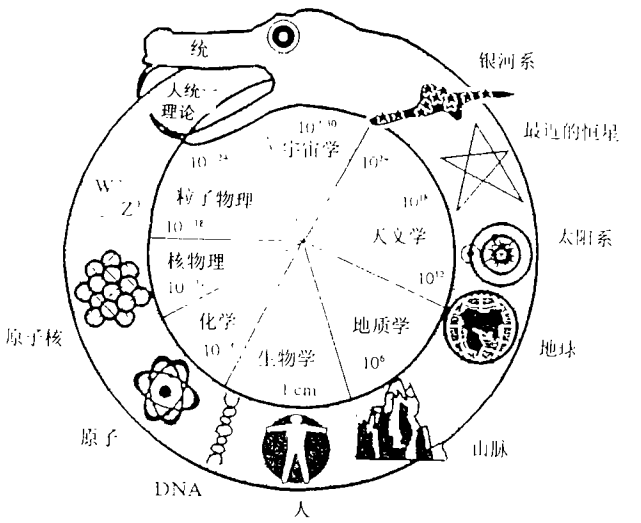


图 1 物质世界的尺度

表 1 三代夸克和三代轻子

	第一代		第二代		第三代		电荷(e)
	种类	质量(GeV)	种类	质量(GeV)	种类	质量(GeV)	
夸克	u	4×10^{-3}	s	0.15	b	4.7	$+2/3$
	d	7×10^{-3}	c	1.5	t	174	$-1/3$
轻子	e	5.1×10^{-4}	μ	0.106	τ	1.78	-1
	ν_e	$<2\times 10^{-8}$	ν_μ	$<1.6\times 10^{-4}$	ν_τ	$<3.1\times 10^{-2}$	0

在粒子加速器问世之前,人们用于研究原子核结构的粒子束有两种,一种是天然放射性核素发出

的射线,另一种则是来自天外的高能宇宙射线。前者固然简单方便,但放射线粒子的流强太低,能量不高,因而产生核反应的几率很小。宇宙线粒子的能量可高达 10^{20}eV ,但其强度太弱,适宜于做定性的研究。就这样,粒子加速器作为一种利用电磁场将带电粒子加速到高能的人工装置,在本世纪 30 年代初应核物理研究之运而生。

二、从低能到高能

用加速器作为“显微镜”研究物质微观结构,其分辨能力 λ (Broglie 波长) 与束流的能量 E 相关:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E\beta} \quad (1)$$

式中, p 为粒子动量, β 为相对论速度, $h = 4.14 \times 10^{-24} \text{GeV} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数。对于 $E = 1 \text{GeV}$, 由 (1) 式得 $\lambda \sim \times 10^{-13} \text{cm}$, 与质子的直径相当。因此, 为了研究质子和中子的结构, 束流的能量须高于 1GeV 。这也是把 1GeV 作为中能和高能之分界的原因。现在, 加速器已能把质子加速到 1TeV , 相应的实验分辨力达 10^{-16}cm , 深入到强子的内部。

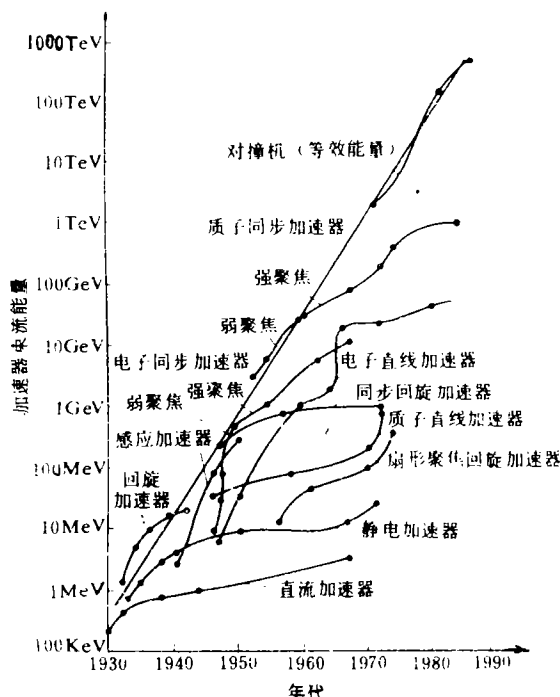


图2 加速器的能量阶梯

在过去的 60 年间,加速器的能量大致每隔 10 年增加 1 个数量级,而单位能量的造价则大大下降。这些改进是与粒子物理互相促进、同步发展的结果,也是加速器原理和技术发展的结果。图 2 展示了加速器能量逐年增加的情况。

相应于直流高压、交变磁场和高频电场这三种电磁场形态,产生了高压型、感应型和高频共振型 3 类加速器。最早的加速器是高压型加速器。这种加速器的能量受击穿电压的限制,导致了回旋加速器

的发展。在回旋型加速器中,引进磁场使束流沿曲线轨道运动,实现高频电场或感应电场对带电粒子的多次加速,其偏转半径

$$\rho = \frac{pc}{ZeB} \quad (2)$$

式中, B 为主导磁场强度, e 为电子电荷量, Z 为粒子电荷数。可见在给定束流能量和种类的情况下,如要减小加速器的弯转半径(进而是机器尺寸),需要尽可能采用高磁场。

为了克服在恒频的回旋加速器中粒子能量增加引起的滑相,出现了调频回旋、电子回旋和等时性回旋加速器。在回旋型加速器中,主导磁场必须覆盖不同半径的螺旋线轨道。为了解决由此引起的磁铁庞大的问题,又发明了磁场随束流能量提高而增强的同步加速器,将束流约束在环型真空盒内。弱聚焦加速器真空盒截面太大限制了能量进一步提高,导致了交变梯度即强聚焦加速器的出现。环型加速器中,特别是电子环型加速器中,存在的同步辐射阻碍向更高能区推进,鼓励了直线型加速器的发展。常规的磁铁和高频腔的功率损耗限制加速器向超高能进军,促进了超导技术在加速器中的应用。而让两束相向运动的粒子对撞来提高有效作用能的对撞机,则把束流的等效能量推向新的高度。

三、从打静止靶到对撞机

高能物理需要寻找新粒子,研究新反应,因而关心的是质心系能量或有效作用能。在打静止靶情况下,有效作用能

$$E_{CM} \approx \sqrt{2E_0E}, \quad (3)$$

即大部分能量浪费在对撞粒子及其产物的动能上。式中, E_0 为粒子的静止能量。对撞机则可使束流的能量得以充分利用:

$$E_{CM} = 2E \quad (4)$$

对撞机在粒子物理近 20 年激动人心的进展中崭露头角,已成为一种占主导地位的高能加速器。70 年代 J/Ψ 粒子、 τ 轻子和 γ 粒子等都是同时或相继在打静止靶加速器和对撞机上获得的,而能量更高的中间玻色子 W 和 Z^0 以及最近发现的 t 夸克,则是在对撞机上找到并加以研究的。

对撞机赢得了有效作用能,但要获得与打静止靶加速器相比拟的反应事例,须提高其对撞亮度:

$$N = L \cdot \sigma \quad (5)$$

这里, σ 是反应截面, N 为反应事例数, L 为对撞亮度。因而,为了提高高度,又需要在加速器中储存尽可能多的粒子(N_1 、 N_2)、减小束团的包络尺寸(σ_x 、 σ_y),并增加对撞频率(f):

$$L = \frac{fN_1N_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \quad (6)$$

更高的能量和更高的亮度,是粒子加速器发展

的两个主要方向。表 2 列出了近 10 年间建成或改进的对撞机的情况,它们体现了各自工作范围的能量前沿或亮度前沿。

表 2 近 10 年间建成改进的对撞机

对撞机	中国 BEPC	美国 CESR	日本 TRISTAN	欧洲 LEP	美国 SLC	欧洲 SPPS	美国 TEVATRON	德国 HERA
建成时间	1988.10	1979.6	1986.11	1989.8	1987.3	1981.7	1985.11	1991
对撞束流	e^+e^-	e^+e^-	e^+e^-	e^+e^-	e^+e^-	$p\bar{p}$	$p\bar{p}$	$e-p$
物理	τ/c	B	e^+e^- 物理	Z^0, W	Z^0	Z^0, W	t 夸克	$e-p$ 物理
能量(GeV)	1.55~2.2	5.3	30	46~80	46	270	900	30/820
亮度($10^{31}cm^{-2}s^{-1}$)	0.8	33	4.5	2.4	1.0	0.28	1.3	1.5

美国 FNAL 实验室采用超导磁铁实现了能量倍增计划,其质子—反质子对撞机 TEVATRON 把能量前沿推进到 $2\times 900GeV$,并用这台对撞机发现了 t 夸克。欧洲核子中心(CERN)则采用超导腔把正负电子对撞机 LEP 的能量提高到 $2\times 80GeV$,并将继续提高到 $2\times 92GeV$,填补 LEP 和他们正研制中的大型强子对撞机 LHC 之间的能量间隙。在高亮度方向上,美国康奈尔大学的 $2\times 5.3GeV$ 正负电子对撞机 CESR 逐步采用 Mini- β 、单点对撞、麻花轨道(“pretzel”)对撞和束团串对撞等技术,一再刷新亮度的世界记录,达到 $3.3\times 10^{32}cm^{-2}s^{-1}$ 。美国 SLAC 实验室的 SLC 是直线对撞机的前驱,其特色是极化束对撞。德国 DESY 实验室的 HERA 是目前世界上唯一的一台质子—电子对撞机,人们一直担心 HERA 的亮度,现已达到其设计值 $3.3\times 10^{31}cm^{-2}s^{-1}$ 的 50%。CERN 的 SPPS 正把注意力集中在重离子加速和对撞,并为 LHC 计划作准备。我国的北京正负电子对撞机代表 τ/ρ 能区的亮度前沿,目前正在改进中,计划进一步提高亮度。日本 KEK 的 TRISTAN 功成身退,正在改建为能“生产”大量 B 粒子的正负电子对撞机—B 介子工厂(KEKB)。

四、高能量前沿

高能物理近 30 年来最具里程碑性的成果,就是建立了描述物质基本结构和相互作用的标准模型。当然,里程碑并不是终点。电弱统一理论在 30 年前就预言了黑格斯粒子的存在,但至今还没能在实验上找到。按照标准模型理论,黑格斯场引起对称性自发破缺,各种粒子的质量都与黑格斯场有关,而且不同代的粒子之间的联系也是通过黑格斯场实现的。因此,寻找标准模型预言的黑格斯粒子,探索新现象,检验新理论,是目前粒子物理向加速器提出的朝高能前沿推进的主要目标。为达此目标,粒子加速器有两个发展方向,一是强子对撞机,

二是正负电子线型对撞机。

在强子对撞机方面,美国的相对论性重离子对撞机 RHIC 即将建成,它可以加速质子($250GeV$)直到金离子($100GeV$ 核子)并使之对撞。自从美国的超导超级对撞机计划被否决后,人们就把希望寄托在 LHC 上。经过几番周折,CERN 理事会终于在 1994 年底批准了这个预估造价为 26 亿瑞士法郎的、迄今为止人类建造的最大的基础工程。LHC 将安装在周长为 27 公里的 LEP 隧道中,目前计划分两个阶段完成。第一阶段安装全部超导偏转磁铁的 2/3,2004 年完成,能量达到 $2\times 4.65TeV$,进行 t 夸克研究等前期物理工作。第二阶段在 2008 年完成,安装其余 1/3 磁铁之后,把质子束加速到 $2\times 6TeV$,亮度达 $1\times 10^{34}cm^{-2}s^{-1}$,物理学家终于将可以研究他们梦寐以求的黑格斯粒子。

环型电子对撞机向更高能区发展遇到了同步辐射能量损失随束流能量的四次方增长的困难,因此,线型对撞机作为新一代高能对撞机而得到世界各国的重视。目前,世界上已有 1 台线型对撞机即美国的 SLC 在运行,有 6 台能量为 $2\times 250GeV$,亮度为 $(1\sim 10)\times 10^{33}cm^{-2}s^{-1}$ 的线型对撞机在设计研究中,它们是美国的 NLC、日本的 JLC、德国的 TESLA 和 DLC、欧洲的 CLIC 和俄国的 VLEPP。为了使线型对撞机的能量和亮度能与环型对撞机竞争,需要采用更高频率和更大功率的微波源,提供更高的加速梯度,要求束流强度和重复频率更高、束团截面和长度更小等等,这些都对加速器物理和技术提出了挑战。目前各国正在积极进行关键技术研究 and 试验装置建造,争取在下世纪初着手建造新一代线型对撞机。

五、高亮度前沿

在前驱的加速器上发现了新粒子、新现象之后,需要建造新的强流加速器或高亮度对撞机,以

便在这已知又知之不多的能区进行更深入、更细致的研究。这种强流打静止靶加速器或高亮度对撞机能大量“生产”所需研究的粒子,因而称之为粒子工厂。按照粒子“产品”的种类,“生产” π 介子(通常为几百 MeV 级的质子直线加速器)和 K 介子(通常为几十 GeV 级的质子同步加速器)的强流加速器,分别称为 π 介子工厂和 K 介子工厂。能高效率“生产” ψ 介子, τ 轻子/粲粒子,B 介子和中间玻色子 Z^0 等粒子的,是工作在各自能区的高亮度正负电子对撞机,相应于 ψ 介子工厂、粲粒子工厂、B 介子工厂和 Z^0 粒子工厂等。因此,粒子加速器向高亮度前沿推进有两个方向,即强流打静止靶加速器和高亮度正负电子对撞机-粒子工厂。

在强流加速器方面,继美国的连续电子束 CE-BAF 建成之后,欧洲又提出了建造 1 台高能量(15~30GeV 或更高)、高度极化和高占空因子的电子加速器装置 ELEE 的计划,旨在研究粒子物理和核物理的新领域“禁闭物理”。世界上有多个用作 π 介子工厂和散裂中子源的强流质子加速器在研制、发展中。在其它国家的 K 介子工厂方案被束之高阁的情况下,日本审时度势,迅速提出强子工程 JHP,计划在 1998 年破土动工。JHP 包括 1 台 200MeV 的质子直线加速器—注入器,1 台 3GeV 快速强流增强器和 1 台 50GeV 强流质子同步加速器。主环的设计流强为 4×10^{14} PPP,重复频率 1/6Hz,平均流强达 $10\mu\text{A}$,可开展 K 介子稀有衰变和 CP 破坏以及中微子振荡等方面的研究。

在正负电子对撞机—粒子工厂方面,意大利的 ψ 介子工厂 DEΦNE 已进入调试阶段,预期今年建成。世界上正在建造的两台 B 介子工厂,即美国的 PEP—II 和日本的 KEKB,相继进入安装阶段,计划 1998 年完成。北京 τ/c 工厂 BTCF 目前已完成可行性研究,准备进行设计研究。在 Z^0 能区,目前有望成为粒子工厂的是欧洲核子中心的 LEP。粒子工厂对加速器物理和技术提出了一系列挑战,如多束团不稳定性及其抑制、寄生束团对撞、束团长度控制、离子效应、夹角对撞、束流寿命、极化束对撞以及本底问题等等。各国科学家正在努力工作,争取尽早建成这样的工厂,投入相应的粒子生产。

六、同步辐射光源

同步辐射最初是作为电子同步加速器的有害产品而加以研究的,现在已成为一种有着广泛应用的高性能光。目前,世界上有 35 台同步辐射光源在运行,有 13 台在建造中,还有近 20 台在设计阶段。这些光源有两个工作能区,一个是真空紫外/X 光能区,束流能量为 0.5~2.5GeV;另一个为硬 X 能区,束流能量为 5~8GeV。

如果把电子同步加速器标作第 0 代光源的话,那么为高能物理实验而建造的正负电子对撞机则是第一代光源,光源亮度为 $10^{13} \sim 10^{15}$ (单位为光子/秒·毫米²·毫弧度²·0.1%带宽,下同)。这类光源的优势在于能量较高,如美国的 CESR、德国的 DORIS 和中国的北京同步辐射装置 BSRF。第二代光源是同步辐射专用储存环,已有 12 台在运行,亮度为 $10^{15} \sim 10^{17}$,其中有美国的 NSLS、日本的光子工厂和中国合肥同步辐射光源 HLS。第三代光源则以插入元件引出的光为主,发射度更小,亮度可达 $10^{17} \sim 10^{19}$ 。美国的 ALS 和 APS、欧洲的 ESRF 意大利的 ELETTRA、韩国的 PLS 和中国台湾的 SR-RC6 台光源已在运行。我国计划在上海建造 1 台高性能(发射度小于 5nm·rad,设计流强达 400mA)、中规模(2.5GeV,周长约为 350m)、宽波段(采用超导偏转磁铁,覆盖硬 X 能区)的第三代光源。在世界上,科学家正在研讨能产生接近短波长衍射限的辐射或优化于自由电子激光的第四代同步辐射光源,把亮度推进到 10^{20} 以上。

七、新方法、新技术、新原理

向高能量前沿和高亮度前沿推进,需要研究新方法、发展新技术、探索新原理。

作为新方法,光子对撞机的概念已经提出,即在直线对撞机中用激光与高能正负电子作康普顿散射,再让所产生的高能 γ 光子对撞。 μ 子和电子一样,也是一种轻子。 μ 子的质量约比电子大 200 倍,同步辐射损失小,容易被加速到更高能量。现在,科学家正在积极研究这两种对撞机的可行性。

在新技术方面,超导技术已在加速器中广泛应用,超导磁铁已用在 TEVATRON 和 HERA 等对撞机上,场强达到 5T,并在工业的批量生产中证明其性能。超导腔先后在 TRISTAN、LEP、HERA 和 CEBAF 上使用,加速梯度达到 5MV/m 以上。线型对撞机中高梯度低高次模阻尼加速结构、微波高功率源、强流小发射电子枪和亚毫微米束团截面和位置快速测量等技术都在发展。

科学家为探索新的、更有效的加速器原理不懈地努力,提出了许多方案,并开展实验研究。这些方案就其能量来源可分为两大类。第一类是把光子的能量传递给被加速粒子。属于这一类的有各种激光加速器,如逆契伦柯夫效应加速器、逆自由电子激光加速器、等离子体拍波加速器和光栅加速器等。作为一种短波长的相干电磁波,激光具有能量密度高、聚焦性能好等优点,电场强度可达 $10^5 \sim 10^9$ MV/m,需要解决的问题仍然是如何在粒子运动方向上获得高电场分量并使之与速度低于光速的粒子同步。第二类是将驱动束粒子的能量传递给被

加速粒子,这一类又包括两种,一种是利用高速运动的等离子体凝团或强流相对论性电子束提供的集体场加速带电粒子,有相干加速器、电子圈加速器和线型束加速器等;另一种是采用谐振腔、等离子体或其它设备为介质,让低能强流束通过介质激起电磁场来加速粒子,属于这一种的有尾场加速器、等离子体尾场加速器和双束加速器以及晶体加速器等。尽管上述新原理在一些实验装置上得以验证,但加速梯度远未达到人们期待的 1GeV/m 量级。总的来说,各种新加速原理目前尚处于小规模实验阶段,在理论上有待继续深入,在实验上还有许多困难,离开实际应用还很遥远。但人们仍然持乐观态度,相信只要不懈地努力,新的加速原理终会成功,开辟粒子加速器的新时代。

八、走向实际应用

各种低、中能加速器在国民经济各个领域的广泛应用早已得到公认:在工业上用于活化分析、辐照改性和无损检验等;在农业上用于品种改良、消灭病害和食品保鲜等;在医疗上用于治疗癌症、辐照消毒和短寿命同位素生产,等等。目前的发展趋势是小型化和商品化,不用很久,各种低、中能加速器也会象普通的机器一样,买来装上就能方便地使用。与此同时,高能加速器也正在从基础研究的殿堂走向实际应用。

在加速器的诸多应用中,产生于 GeV 级的电子储存环中的同步辐射算得上是最有价值、应用最广的一种。利用同步辐射 X 射线衍射和 X 射线光谱学测定物质结构,在生物学和医学方面可用于研究各种蛋白质的功能,在工业上可用以生成更具活性的蛋白质如酶。利用同步辐射光的高亮度和时间结构,可用于研究急剧变化中的材料特性和相变,这对于改进化工和冶金的工艺有重要价值。如波音公司利用同步辐射研究发展的一种新材料取代铝材,使波音公司 757 飞机的机身重量减轻了 30%,并且大大降低了造价。

在能源方面,用加速器驱动裂变装置发电的实验研究已在进行。CERN 的鲁比亚教授等提出的方案是用一台高能加速器产生的 1GeV 、 10mA 的质子束来轰击由核燃料和减速材料组成的靶系统,用钽来增殖可裂变的铀-233 以维持能量生产。在这个“能量放大器”中,保持热中子通量为 $10^{14}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的高流强中子,经热化后再与镅-237($\tau=2.1\times 10^6$ 年)等锕系产物作用,使之转化为稳定的钷-100。

九、亚洲在崛起

占世界面积 1/3、人口 60% 的亚洲在经济高速

增长的同时,也在大力发展粒子加速器。

1. 中国在粒子加速器领域占据一席之地,三大加速器的建成和成功运行表明我国已进入高能物理、核物理和同步辐射研究的行列。北京正负电子对撞机成为在 τ/π 能区性能占领先地位的高能加速器,并在准备建造一座 τ/π 粒子工厂。作为兰州重离子装置延伸的冷却储存环计划,将在重离子方面覆盖到高能低端($900\text{MeV}/\text{核子}$)。在同步辐射方面,北京同步辐射装置是第一代光源,能量为 2.2GeV ,流强约 100mA ,主要工作在 X 射线能区; 800MeV 的合肥同步辐射光源,是我国第一台专用同步辐射装置,流强达 300mA ,工作在 VUV 能区,正在安装超导扭摆磁铁,向 X 射线能区扩展,并计划进行第二期工程,以提高光源性能,增加光束线; 1993 年建成的台湾同步辐射装置 SSRF,能量为 1.3GeV ,流强为 300mA ,属于第三代光源,现已有多条束线投入运行;以高性能、中规模、宽波段为目标的海上同步辐射光源计划在下世纪初建成,将使我国在同步辐射研究方面进入世界先进行列。

2. 日本凭借其强大的经济实力,雄心勃勃地向世界“挑战”。在 B 介子工厂的建造中,KEK 的 KEKB 正在与美国 SLAC 的 PEP-II 竞赛,而其设计指标更具挑战性。在强子加速器方面,日本不仅投资 5 000 万美元参加 LHC 工程,并积极实施 JHP 计划,抢在西方之前建造强流 K 介子和中微子装置。1989 年启动了 OMEGA 计划,准备建造一台 $1.5\text{GeV}/40\text{mA}$ 强流质子直线加速器来进行处理核废料研究。在线型对撞机方面,日本已经建造了 S 波段的试验装置 ATF,既有与 SLAC 相同频率的 X 波段方案,又有其独特的 C 波段计划,设想在 21 世纪初上马。在重离子方面,KEK 的 2.5GeV 的第二代同步辐射光源在流强达 350mA ,束流寿命 30 小时的基础上继续改进,以减小束流发射度,TRISTAN 的积累环 AR 将改建为一台高性能专用光源;两台 2.5GeV 的第三代光源正在设计研制中, 8GeV 第三代光源 SPring-8 的安装已进入最后阶段,今年内就要调束,建成后将成为世界上规模最大、能量最高的同步辐射光源。

3. 粒子加速器,特别是同步辐射装置正在向亚洲更广的地域发展。印度投资 2 500 万美元参加 LHC 工程,并加紧其同步辐射光源的建造,预期在近年内完成。韩国投资 1.9 亿美元于 1994 年底建成了 2GeV 的同步辐射光源 PLS,现已有 3 条光束线投入运行。泰国把引进日本的 1 台小型同步辐射光源作为第一步,正在设计研究新的光源装置。

21 世纪的亚洲在粒子加速器方面将继今日之势日益崛起,中国理所当然地将做出更大的贡献。

(责任编辑 王宏章)