

对撞机的现在和将来

Present and Future of Collider

王书鸿

(中国科学院高能物理研究所副所长, 研究员 北京 100039)

一、从北京正负电子对撞机说起

北京正负电子对撞机(Beijing Electron Positron Collider, 简称 BEPC)的建成,使中国直接进入了高能物理学的国际先进行列。高亮度的 BEPC 连同在其对撞点上的先进的大型粒子探测器(Beijing Spectrometer, 简称 BES, 北京谱仪)已经并正在继续夺取具有世界水平的高能物理实验成果。 τ 轻子质量的精确测定,则是第一个重要成果,它对于检验“标准模型”中有关轻子普适性的理论有着重要的意义。荣获 1992 年我国十大科技成就之一。

带电粒子对撞机是从高能加速器发展起来的。本世纪 70 年代以前,高能物理实验主要用高能加速器提供的带电粒子束(电子、质子等)轰击静止靶,并用粒子探测器测量产生的次级粒子性能进行的。若带电粒子束是电子束,其能量为 E_0 ,它和静止靶中的电子相互作用,则在质心系中的有效作用能为 $W = (2m_0 E_0)^{1/2}$,其中 m_0 为电子的静止质量(0.511 兆电子伏)。当 $E_0 = 10$ 吉电子伏时,有效作用能非常小,只有 0.1 吉电子伏。倘若能量均为 E_0 的两束电子相向对撞,则在质心系中的有效作用能为 $W = 2E_0$,当 $E_0 = 10$ 吉电子伏时, W 可达 20 吉电子伏,是同能量电子束轰击静止靶时的 200 倍。或者说,相当于能量高达 400 太电子伏的加速器提供的电子束轰击静止靶,而建造如此高能量的加速器,至今仍是不可想象的。

高能物理学是研究物质微观结构更深层次奥秘的大科学。研究的层次越深入,要求实验的有效作用能越高。这就是本世纪 70 年代后,世界许多发达国家大力建造和发展对撞机的原由。

除能量外,对撞机的另一个重要参数称为亮度(Luminosity),它表征单位时间内两团相向运动的粒子对撞的几率,其定义是

$$L = \frac{N^2 f_b}{A}$$

其中 N 是每束团中的粒子数, f_b 是对撞束团的频率, A 是对撞点位置上束团的横截面积。显然,要求单位时间内获得的实验事例越多,就要求对撞机的亮度越高,或者说,要求单位时间内碰撞的束团数越多、每束团中的粒子数越多、对撞点上束团横截面积越小。

对撞机的弱点在于,每台对撞机亮度的优化只能在某一特定的能量上。这是因为电子在对撞机内回转运动时,沿切线方向的同步辐射与能量有关,且会导致束团横截面积的变化,使上式中的 A 严重地依赖于束团的能量;又因为两束团对撞时,束一束相互作用导致的流强限制也严重地依赖于束团的能量。因此,每台对撞机的亮度优化只能在某一能量值上,无论对撞机运行在高于或低于该能量值时,亮度都会明显下降。

BEPC 是正负电子束团的对撞,它们在周长为 240 米的环型真空室内相向运动,靠紧包在真空室外的上百台偏转磁铁、聚焦磁铁和各种校正磁铁,控制它们的轨道和横截面。由于它们的电荷相反,可在同一磁场中相向回转运动。它们的能量获得则是靠环上加速腔内的高频电场的推动作用。于 1988 年在中国科学院高能物理所建成的 BEPC,与国际上许多对撞机相比,由于财力有限,其单束能量不高,仅为 1.5~2.8 吉电子伏,但它的亮度却在该能区内属世界领先水平,达 $6 \sim 8 \times 10^{30}$ 厘米⁻²秒⁻¹,从而使它在某些高能物理实验,如 τ 轻子物理、粲粒子物理、D 和 D_s 物理等方面,具有很强的生命力。BEPC 和 BES 是我国设计建造的首台高能物理实验装置,它跃过了建造用于轰击静止靶的高能加速器阶段,并以高亮度、高稳定性的优势,使我国一步跨入世界先进行列。为了进一步发挥这个优势,获取更多的实验成果,BEPC 的亮度和 BES 的性能将获得进一步提高。

二、环型正负电子对撞机

自 1969 年在意大利建成第一台环型正负电子

对撞机 ADONE 以来,世界上已先后建成约 15 台这样的机器。能量最低是 0.7 吉电子伏,最高达 46 吉电子伏。由于对撞机的亮度只能优化在某一能量值附近,因而使得每台机器所能从事的物理实验和相

应的科学寿命都有限,通常约 5~10 年。目前,世界上有六台环型正负电子对撞机在运行中,表 1 给出了它们的主要参数。

表 1 运动中的环型正负电子对撞机

对撞机名称	LEP	TRISTAN	CESR	DORIS-3	VEPP-4M	BEPC
国家	欧洲核子中心	日本	美国	前西德	俄罗斯	中国
单束能量 (吉电子伏)	46	30	5.3	5.3	5.5	2.2
峰值亮度 (10^{30} 厘米 $^{-2}$ 秒 $^{-1}$)	6	45	250	13	6	8
周长(米)	26659	3018	768	288	366	240
建成时间	1988	1986	1979	1988	1990	1988

表中可见,建于欧洲核子中心的 LEP 是目前同类机器中能量最高的,并计划借助超导加速腔,向每束能量 100 吉电子伏进军。这个能量将是这类机器的最高记录,原因是环型对撞机内电子束的同步辐射损失与能量的四次方成正比,建造更高能量的这类机器已受到补偿辐射损失所需高频功率源的限制。要建造更高能量的电子对撞机,只能采用无辐射损失的直线型对撞机。

表 1 中还可见,建于美国康奈尔大学的 CESR 是目前世界上最高亮度的正负电子对撞机。这个高亮度是采用了多种技术后逐步实现的,包括压缩对撞点上束团横截面尺寸的 Mini- β 技术、全能量注入以及多束团对撞技术等。亮度再提高的出路何在,我们将在下面的“粒子工厂”一节中说明这个问题。

表 2 强子环型对撞机

对撞机名称	TEVATRON	UNK	RHIC	LHC	SSC
国家	美国	俄罗斯	美国	欧洲核子中心	美国
对撞粒子	P-P	P-P	P-P/Au $^{+}$ -Au $^{+}$	P-P/Pb $^{+}$ -Pb $^{+}$	P-P
能量(太电子伏/核子)	2 $\times$ 1	2 $\times$ 3	2 $\times$ 0.25/2 $\times$ 0.1	2 $\times$ 7.7/2 $\times$ 0.63	2 $\times$ 20
亮度(厘米 $^{-2}$ 秒 $^{-1}$)	2 $\times$ 10 30	1 $\times$ 10 33	1.4 $\times$ 10 31 /2 $\times$ 10 26	1.6 $\times$ 10 34 /1.8 $\times$ 10 27	1 $\times$ 10 33
周长(公里)	6.3	20.8	3.8	26.7	87.5
建成时间	1985	1996	1997	1998	1999

三、环型电子—质子对撞机

世界上第一台,也是迄今唯一的一台电子—质子对撞机 HERA,于 1990 年在德国电子同步加速器中心(DESY)建成。电子和质子的能量分别为 30 吉电子伏和 820 吉电子伏。超高能的电子和质子的对撞,旨在揭示电子或夸克(组成质子和其它强子的深一层次的粒子)的内部结构。由于要加速两种电荷与质量的粒子,必须采用两个环。它们上下叠放在同一隧道内,周长约 6.3 公里。电子环在下,采用常温磁铁;质子环在上,采用超导磁铁,在低温 4.2K 时,其磁场强度可达 5~6 特。它的设计亮度为 1 $\times$ 10 34 厘米 $^{-2}$ 秒 $^{-1}$,目前还未达到。

这台对撞机的另一个世界第一则是国际上首次由 10 多个国家的科学家和技术专家共同设计和建

造成成功的。各合作国的参与方式,有提供设备,提供资金,承担分系统的设计、研制和建造,或提供专家人才的。中国的几十名科学家和专家,参加了 HERA 的设计和建造。他们在质子直线加速器、RFQ 加速器、注入器高频系统、注入引出系统、超导磁铁的测量及低温工程等方面,作出了重要的贡献。这种依靠大范围国际合作的模式,为今后世界各国建造大型对撞机树立了样板。大规模、高难度的超级对撞机的建造,必须走国际合作的道路,这也是高能物理这门大科学得以发展的必由之路。

四、强子对撞机

由于强子的质量上千倍于电子,因此在当前强子对撞机建造能区内(如每核子 100 吉电子伏~20 太电子伏),同步辐射损失仍然很小,因而仍可采用

环型对撞机。目前世界上正在运行和设计建造中的强子对撞机列于表 2,它们均采用超导磁铁。

运行中的美国 TEVATRON,旨在寻找组成强子的六个夸克中唯一没有出现的第六个夸克,即顶夸克或称 t 夸克。它将通过改进分离器,提高反质子束的密度,提高直线加速器的能量和新建一台 120 吉电子伏的注入器(1997 年建成)等手段,将亮度提高约 30 倍,使之成为 W 粒子工厂(10^5 事例/年)或 B 粒子工厂(10^{10} 事例/年)。建造中的 RHIC 将是世界上第一台相对论重离子对撞机,它加速离子的范围可从质子到金离子,用于重离子对撞物理的研究。

将建于欧洲核子中心的 LHC,是大型强子对撞机(Large Hargron Collider)的简称,它将安装在现有正负电子对撞机 LEP 的隧道内。其特点是采用双孔径的超导磁铁,以减少两环所需的磁铁数。这种结构的模型磁铁已研制成功,在 1.9K 温度下场强可达 9~10 特。正在美国得克萨斯州建造的 SSC,则是超导超级对撞机(Super conductor Super-Collider)的简称,它将是进入下一世纪时世界上最大规模的对撞机,周长约 87 公里,还拥有四级注入器。LHC 和 SSC 除了用于产生几百万个 t 夸克,以精确测量它们的性能外,其主要目标是探求 Higg 粒子,它们

对于高能物理中的规范理论有重要的意义。这两台超级对撞机的建造,将采用 HERA 倡导的大规模国际合作的模式。我国的科学家将为 SSC 建造质子直线加速器的高能段(总长达 110 米的边耦合腔加速结构)、环型注入器中的部分常温磁铁、少量的超导校正磁铁以及两台大型探测器 GE 和 SDC 中的部分设备。

五、直线对撞机

正负电子作圆周运动时,其同步辐射损失与能量的四次方成正比,与轨道半径成反比。例如,单束能量将达到 100 吉电子伏的 LEP,正负电子每转一圈的辐射损失就达 3.5 吉电子伏。如果要建造一台单束能量为 500 吉电子伏的环型对撞机,即使把轨道半径扩大到 LEP 的四倍,电子在该环中每转一圈的能量损失就是 500 吉电子伏,显然建造这样的机器是不现实的。因此,超高能的正负电子对撞机只能是直线型的对撞机。世界上第一台直线对撞机 SLC 已在运行,它是由原有的电子直线加速器 SLAC 改造扩建而成,其参数见表 3。它主要用于产生和研究

表 3 直线对撞机

对撞机名称	SLC	TESLA	DLC	NLC	JLC	VLEPP	CLIC
国 家	美国	国际	德国	美国	日本	俄罗斯	欧洲核子中心
对撞能量(吉电子伏)	2×50	2×250	2×250	2×250	2×250	2×250	2×250
加速电场梯度(兆伏/米)	17	25	17	38	28	96	73-78
实际长度(公里)	5	20	30	14	17	6.4	6.6
工作频率(吉赫)	2.856	1.3	3	11.4	11.4	14	30
所属微波波段	S	L	S	X	X	X	X
脉冲重复频率(赫)	120	10	50	180	150	300	1700
微波脉冲长度(微秒)	1.5	1300	2.8	1.5	1.5	0.7	0.011
每脉冲束团数	1	800	172	90	90	1	1-4
亮度(10^{33} 厘米 $^{-2}$ 秒 $^{-1}$)	2×10^{-4}	2.6	2.4	5.7	3.5	12	0.7-2.7
对撞点束团截面(纳米 2)	1.7×1.4	640×101	400×32	320×3	335×4.5	2000×4	90×8
束团长度(毫米)	1	1	0.5	0.1	0.08	0.75	0.17

Z 粒子的性能。为达到高能量和高亮度,直线对撞机的关键技术在于:高稳定和高输出的微波功率源(几十到几百兆瓦),足够小的束流发射度的获得,高效的辐射阻尼环技术,高梯度加速管技术,高精度的准直安装和束对准技术,对撞点上极小束斑尺寸的获得等。表 3 列举了设计研究中的六台大型直线对撞

机。其中 TESLA 是由十几个国家的实验室联合设计和研制的,其加速管采用 L 波段的超导管。由于超导腔的功耗可忽略不计,因此微波功率源可成百倍地减小,且可全用于提高束流的能量,微波脉冲的长度可增至 1.3 毫秒,每脉冲的束团数增到 800。依靠这个优势来获得高亮度,则可减轻直线对撞机对

低发射度、高准直度和对撞点上极小束斑尺寸的要求。当然,其难点就转移到稳定可靠的超导腔的研制上。德国的 DLC 则采用常规的 S 波段加速管,其优越性在于尽可能采用成熟的技术,尽早实现高能量的直线对撞机。美国的 NLC 和日本的 JLC,则是采用 X 波段的常温微波加速管,它与 S 波段相比,可大幅度节省功率源,提高加速场梯度。它的高亮度是通过增加脉冲重复频率和在对撞点上将束团的垂向尺寸压缩到小于 5 纳米实现的。欧洲核子中心设计的 CLIC 是一台双束加速器,它用低能强流的驱动束在 30 吉赫的加速管内产生高梯度加速场用以加速主束流。上述五台设计研究中的机器都已确定了模型研制计划(几百兆电子伏),希望通过模型的研制,解决关键技术难点,从而争取在 3~5 年内出现现实可行的高能量、高亮度的直线对撞机建造计划。这类机器,可望成为下一世纪高能物理实验的主要设备之一。

六、“粒子工厂”

“粒子工厂”是大批量产生某种粒子的对撞机,用以精确测定粒子的重要属性,特别是某些稀有的衰变行为。显然,粒子工厂的亮度应成百倍地高于通常的对撞机,达 $10^{33} \sim 10^{34}$ 厘米⁻²秒⁻¹。目前国际上正在设计和研制的粒子工厂,按其能量由低至高,分别有 φ 粒子工厂、 τ/τ 粒子工厂和 B 粒子工厂三类。

正在建造中的 φ 粒子工厂,是意大利的 DAΦNE,能量 2×0.5 吉电子伏。它在直线注入器和对撞机之间设置了一个积累环,利用低能的正负电子束在环中明显的辐射阻尼效应提高在注入对撞机前束流的性能,使亮度高于 10^{32} 厘米⁻²秒⁻¹。

设计中的 τ/τ 粒子工厂具有代表性的是西班牙提出的方案,能量为 2×2.5 吉电子伏,亮度高达 10^{33} 厘米⁻²秒⁻¹,它将靠采取一系列技术措施实现,如:使束团在对撞点形成微截面(Micro- β)的专用插入节;采用双环单对撞点,以减少对撞束间的相互作用;采用多束团和短束团长度等,以提高对撞率。

B 粒子工厂专门用于精确研究包含 b 夸克的 B 粒子及其衰变行为。通过观察 B 粒子衰变的 C_p 破坏,进而检验标准模型。B 粒子的能量约 5.3 吉电子伏。为了使正负电子对撞产生的 B 和 $\bar{B}$ 系统具有纵向动量,以便确定 B 粒子衰变的时间关系,因而取正负电子束的能量不等,如分别为 3.5 吉电子伏和 8.0 吉电子伏,世界上有五个实验室提议建造这种工厂,且大多将利用现有正负电子对撞机改造而成。如日本的 TRISTAN、美国的 PEP 和 CESR 都有改成 B 粒子工厂的动议。这些方案都采用了双环、多束团、束团微截面、短束团长度等技术。这种高流强、

高亮度的粒子工厂的建造难度很大,对磁铁、高频腔、真空盒及束流的监测和控制等均提出了特殊的要求。它的建成无疑将使对撞机的设计、建造和调试技术达到更高的水平。

七、世界发展趋势和我们的路

世界上对撞机发展的第一个趋势,是继续向高能量和高亮度发展,以满足高能物理发展的需要。根据世界主要电子对撞机和强子对撞机的建造年代和能量,大体上是每 10 年能量提高 10 倍。随着能量的提高,加速器的规模也越来越大,造价越来越高。建造中的美国超导超级对撞机 SSC 的周长达 87 公里,连同它庞大的四级注入器,总耗资 80 亿美元,建造周期长达 10 年,它将是进入下世纪时世界上最大规模的环型对撞机。对于超高能的电子对撞机,将采用直线型。设计中的这类机器,均长达 20~30 公里,所需功率上百兆瓦,估计经费达 50 亿美元。除了这类超级对撞机需要高亮度外,某些较低能量的机器,如粒子工厂,也在向更高亮度发展。

对撞机发展的第二个趋势,是越来越广泛的国际合作。高能物理的发展需要建造大规模的对撞机和探测器。这类大型科研设备综合了多门学科和尖端技术,往往需要几千名科学家和技术专家同时投入设计、研制、建造和调试。没有广泛的国际合作是不可想象的。德国电子-质子对撞机 HERA 的建成,开创了国际合作的范例。这种合作是经费、技术、设备和人力的多层次的合作,是众多国家和众多实验室的大规模合作。建造中的 SSC 也只能走这条路。

对撞机发展的第三个趋势,是不断开发和应用新技术。首先是超导技术,利用超导磁铁产生高达 6~10 特的强磁场,以减少环型对撞机的规模;利用超导加速腔产生高达 25 兆伏/米的高电场,以增加环型对撞机的能量或缩短直线对撞机的长度。又例如冷却技术、阻尼环技术,以及建造高亮度的粒子工厂所需采用的多种技术。然而,所有这些新技术都未能根本改变对撞机的规模和昂贵经费。对撞机越造越大、越造越贵的趋势的根本扭转,有待于新加速原理的发现和实验证实。虽然一些国家的科学家多年来进行了多种新原理的探索 and 实验,如激光加速、尾场加速、等离子体加速和双束加速原理等,但实效尚不显著。因此,相对于新技术的发展来说,新原理的发展还远远落在后面。

面对世界发展的趋势和我国的实际,探讨我国发展高能物理的道路是有意义的。BEPC 的建成和 τ

(下转第 40 页)

速器,能量分别为 10 兆电子伏和 18~20 兆电子伏,流强分别为 3 千安和 2 千安,一台已于 1992 年建成,一台将于 1998~2000 年建成,主要用于 X 光照相之用。

七、加速器关键技术及关键部件的研究

加速器的关键部件如离子源、电子枪、加速管、高频腔等,关键技术如真空技术、磁场技术、微波技术、束流测量技术等对加速器的性能起着十分重要的作用。有时甚至一个部件或一项技术会成为一台加速器成败之关键。

90 年代,许多单位都有针对自己的加速器(已有的或将要建造的)开展有关部件或有关技术研究的计划。这里择其要者简述如下:

清华大学计划在 90 年代进行混频加速腔的研究,高温超导微波腔的研究,液态金属离子源的研究,低发射度电子枪及高发射电流密度的阴极材料的研究,高能电子束发射度的测量研究等。

南京大学将把精力集中在医用直线加速器的加速系统(包括行波和驻波加速结构)的研究上。首先是优化加速器结构和加速系统的设计;其次是利用谐振反馈,提高加速管的加速梯度,期望加速系统的能量转换效率达到 80% 以上。此外,还将发展辐照用电子直线加速器的微机控制及高效扫描技术。

北京大学已计划进行 L 波段低温超导腔的研究

和高温超导腔的试验。

八、其他

除上面介绍的传统的加速器外,还有两种近十年来才发展起来的加速器,一是紧凑型同步辐射光源,一是 REQ(射频四极矩)加速器。

由于同步辐射在超大规模集成电路中的巨大经济价值,近些年来,许多工业发达的国家如日本、德国、法国和英国等都在计划建造和正在建造紧凑型的小储存环以用于光刻。目前全世界至少有十台这种专用于超大规模集成电路光刻的小储存环正在建造,其中日本就有 8 台。在我国,清华大学在工业部门的支持配合下,也将在 90 年代研制一台紧凑的小型储存环,作为专用于超大规模集成电路光刻的同步辐射光源。

RFQ 加速器在 80 年代初试制成功后得到迅速的发展。在我国,80 年代初首先是高能所曾对四翼型 RFQ 的腔体及其动力学特性进行过研究。从 1984 年开始,北京大学对四杆型 RFQ 加速腔又进行了系统的研究。在国家自然科学基金的支持下,1987 年以后,北京大学对这种四杆型 RFQ 加速腔又作了进一步的理论和实验研究,并设计和加工了一个直径为 50 厘米,长度为 90 厘米的加速腔。这个腔将在今年加工、调试完毕,并进行高功率与载束特性的研究。90 年代将在这个基础上进一步研究兆电子伏量级的、用作高能重离子注入的 RFQ 加速器。

(责任编辑 刘先曙)

(上接第 36 页)

轻子质量的精确测定,已使我国跻身于国际高能物理的行列,在 1.5~2.5 吉电子伏的能区内占据了一席之地。我们首先应充分利用 BEPC 在该能区内的高亮度优势,继续在 $\tau/\bar{\tau}$ 物理和 D_s 物理等方面做出有水平的物理成果。同时,通过增用某些技术,如 Mini- β 、单对撞点、增加发射度以提高流强等,进一步提高 BEPC 的亮度,并提高探测器的性能,使 BEPC/BES 具有更强的科学生命力,进而向粒子工厂的方向发展。

其次,由于国力有限,我国不可能象欧美那样,在近十年内建造超级对撞机,但我们应该充分利用高能物理和对撞机的国际环境和改革开放的有利形势,主动积极进入国际合作的大潮流,参加国际上提议或建造中的对撞机和探测器的设计、部件研制和批量制造,并直接参加在这些对撞机上的高能物理实验。一方面使中国对世界高能物理事业的发展继续作出贡献;另一方面,又使我们始终跟着国际发展的大潮流,在世界先进水平行列中前进。事

实上,国际高能物理事业的发展需要中国的参与和合作;而中国的自身发展又需要国际合作的环境条件。

此外,我们还应该充分重视新加速原理的研究,它的成功必将导致加速器和对撞机的革命。我国不可能走对撞机越造越大的道路,因此更需要这样的变革,保持少数精干力量,借助国际合作的渠道,有选择地开展某些较有希望的新原理的研究。

最后,国际和国内的经验都表明,加速器、对撞机和探测器的建成,必将在某些领域内推进本国工业技术水平的提高。这些大型科学实验装置,综合了多门学科和多种高技术,包括超导技术、微波和高频技术、快电子学技术、自控技术、超高真空技术、计算机和数据处理技术、核探测技术、精密机械和高精度安装测量技术等。应当促使这些高技术成果走向工业和应用领域,为发展我国的国民经济作出贡献。

(责任编辑 刘先曙)