

国际粒子加速器的前沿

张 闯[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘 要 人类对于微观世界的探索是粒子加速器发展的驱动力. 粒子加速器从 20 世纪 30 年代问世以来, 不断向更高能量和更好性能挺进. 随着研究的深入, 粒子加速器一步步从低能发展到高能, 从弱聚焦发展到强聚焦, 从打静止靶发展到粒子束对撞. 更高的能量和更高的亮度是用于高能物理研究的加速器发展的两大前沿. 作为多学科研究的平台, 同步辐射光源、自由电子激光和散裂中子源等基于加速器的大科学装置也在蓬勃发展. 各种低能加速器广泛地应用于国民经济的各个领域. 新方法、新技术、新原理层出不穷. 文章将讨论国际粒子加速器的前沿.

关键词 粒子加速器, 能量, 亮度, 多学科平台, 应用, 新加速原理

Frontiers of particle accelerators in the world

ZHANG Chuang[†]

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Human research on the microcosm is the motive force behind the development of particle accelerators, which have been advancing towards higher luminosity and better performance. Along with deeper progress in research, accelerators have moved step by step from low to high energy, from weak to strong focusing and from fixed target to beam collision. Higher energy and higher luminosity are two frontiers of accelerators for particle physics. As multidiscipline platforms, synchrotron radiation facilities, free electron lasers and spallation neutron sources have been developing rapidly. A variety of low-energy accelerators have been applied throughout a wide range of the economy. New methods, new technologies and new principles have emerged in an endless stream. The international frontiers of particle accelerators are described in this paper.

Keywords particle accelerators, energy, luminosity, multidiscipline platform, application, new principle for particle acceleration

1 粒子加速器和物质微观结构研究

在 20 世纪物理学的舞台上, 粒子加速器扮演了重要角色. 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. 宇宙射线粒子的能量可高达 10^{21} 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量的人工装置, 在上世纪 30 年代

初由于核物理研究之需要应运而生.

加速器作为“显微镜”研究物质微观结构, 其分辨能力 λ (德布罗意波长) 与产生束流的能量 E 相关:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E\beta},$$

式中 p 为粒子动量, β 为相对论速度, $h = 4.14 \times 10^{-24}$ GeV · s 为普朗克常数. 从这个式子里, 我们可以看出, 用于探测物质结构的“探针”束流的能量愈高, 其研究的分辨率也就愈高. 因此, 要探索更深层

2008-01-30 收到

[†] Email Zhangc@ihep.ac.cn

次的微观世界,研究更微小的粒子,就需要更高能量的加速器.这就出现了一个有趣的现象:研究的对象愈微小,需要的设备愈庞大.研究不同尺度的微小对象所需要的“探针”束流的能量和相应的观测工具列于表1中.

表1 微小对象的尺度和相应的观测方法

观测对象	尺度/cm	探针能量	实验工具
细胞/细菌	10^{-3} — 10^{-5}	0.1—10eV	光学显微镜
分子	$\sim 10^{-7}$	~ 1 keV	电子显微镜、同步辐射等
原子	$\sim 10^{-8}$	~ 10 keV	同步辐射等
原子核	$\sim 10^{-12}$	>100 MeV	低中能加速器
强子	$\sim 10^{-13}$	>1 GeV	高能加速器
夸克、轻子	$<10^{-16}$	>1 TeV	对撞机

对撞机比普通的打静止靶加速器可以更有效地达到高相互作用能量.对撞机提高了有效作用能,但要获得能与打静止靶加速器相比拟的反应事例率,必须提高对撞亮度(定义为事例率与反应截面的比值),这对加速器物理和技术提出了诸多挑战.

更高的能量和更高的亮度是用于高能物理研究的加速器发展的前沿.

2 高能量前沿

人类向物质结构更深层次的探索,要求粒子加速器提供更高能量的束流.在高能量前沿有4个发展方向,一是强子对撞机,二是正负电子直线对撞机,此外还有 $\gamma-\gamma$ 对撞机和 μ 子对撞机.

2.1 强子对撞机

表2列出了世界上现有的或讨论中的强子对撞机的主要参量,它们是美国FNAL实验室的质子-反质子对撞机Tevatron^[1],美国BNL实验室的相对论性重离子对撞机RHIC^[2],欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机LHC^[3]和正在讨论中的超大型强子对撞机VLHC^[4].

表2 强子对撞机的主要参量

	Tevatron	RHIC	LHC	VLHC
束流能量/TeV	1	0.1 TeV/u	7	20—100
粒子种类	p - \bar{p}	Au - Au	p - p	p - p
周长/km	6.3	3.8	27	233
最高磁场/T	4.4	3.45	8.33	2—11.2
亮度/cm ⁻² s ⁻¹	2×10^{31}	5×10^{26}	1×10^{34}	2×10^{34}
建成时间	1983	1999	2007	?

自从1995年美国的超级超导对撞机SSC计划被否决后,人们就把希望寄托在CERN的LHC上.

经过十多年的不懈努力,LHC的建设已进入最



图1 LHC加速器的隧道

后阶段,加速器和探测器的设备已经安装就位(图1),计划在2008年5月开始调试运行.这是迄今为止人类建造的探索物质微观结构最大的研究装置.LHC安装在周长为27km的隧道中,共有1232块超导偏转磁铁、392块超导四极磁铁和许多其他磁铁和设备.它可以把质子束加速到7TeV并进行对撞,安装有ATLAS、CMS、LHCb和ALICE 4个各有特点又相互补充的大型探测器,将用来研究电弱相互作用中的对称性破缺和质量起源,观测新粒子的产生和新的物理现象,探索宇宙中正反物质不对称的物理机制等重大科学问题,有望揭开一系列科学谜团.在我国科技部、国家自然科学基金委员会和中国科学院的支持下,中国科学家也积极参加了LHC上的实验,参加了加速器设计、探测器部件的研制和数据准备的准备工作,是CMS、ATLAS和LHC-B实验组的成员,在其中发挥了重要作用.

2.2 正负电子直线对撞机

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4次方增长的困难,因此,直线对撞机作为新一代高能对撞机而得到世界各国的重视.世界上共提出了多个直线对撞机的设计方案,并进行了深入的研究.鉴于直线对撞机昂贵的造价,国际高能物理界于2004年8月达成了建造国际直线对撞机(ILC)的共识.

在此后的三年多的时间里,各国科学家通力合作,完成了ILC的参考设计报告^[5].根据参考设计,ILC将建造在总长约40公里的地下隧道里,由两台大型超导直线加速器组成,分别将正负电子加速到250GeV的能量,对撞时质心系能量达到500GeV,以后还可扩展到1TeV;基本建设和加速器设备的造价估算为67亿美元,需要2000名科研和工程技术人员持续工作5年以上.图2是ILC的总体布局.

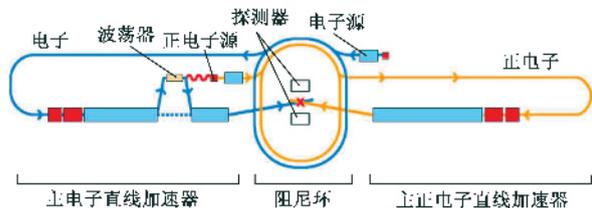


图2 ILC的总体布局

电子枪产生的电子束经过预加速到 5GeV, 注入进周长约 6.7km 的电子阻尼环里。电子束在阻尼环里大约要回旋 1 万圈, 使束团的尺寸变得更小、更致密, 再送到主电子直线加速器。主加速器是一台由 8000 多个超导加速腔组成的总长为 12km 的庞大机器, 加速梯度高达 31.5 MV/m, 把电子束加速到 250GeV 的超高能量。在加速到大约 150GeV 时, 电子束被送进一个波荡器后再回到主加速器, 继续加速到 250GeV 并经过最终聚焦后与正电子束对撞。正电子的产生要更复杂一些。150GeV 的电子束在波荡器里辐射出的 γ 光子, 轰击到一个钨靶上产生正负电子对, 把正电子束流收集起来, 加速到 5GeV, 注入到正电子阻尼环里。类似地, 正电子束在阻尼环束团的尺寸变得更小后, 送到主正电子直线加速器, 一直加速到最终能量 250GeV。按照参考设计, 每个束团里的 200 亿个粒子的正负电子束被聚焦在 $6.4\mu\text{m} \times 5.7\text{nm}$ 的微小截面里, 以每秒钟 14000 次的频率在对撞点相撞, 质心系能量达到 500GeV, 对撞亮度为 $2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。在对撞区有两台巨大的探测器。这两台探测器将采用有所不同但互相补充的先进技术, 从而能够记录下每一次对撞产生的每一个粒子, 并能对难以确认的物理发现进行必要的交互性校验。

2.3 $\gamma - \gamma$ 对撞机

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, 这就是研讨中的光子对撞机^[6]。图 3 为 $\gamma - \gamma$ 对撞机的示

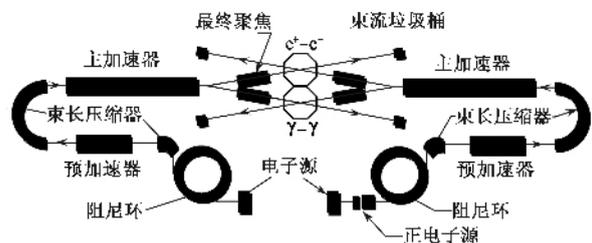


图3 $\gamma - \gamma$ 对撞机示意图

意图。和正负电子直线对撞机布局相比较, $\gamma - \gamma$ 对撞机多了一个专用的 $\gamma - \gamma$ 对撞区, 其他的正负电子源、阻尼环、预加速器、束流压缩器、主加速器和最终聚焦节等部分都没有变。两束入射极化激光分别与极化正、负电子束作康普顿背散射产生两束高能 γ 光子, 此后正、负电子束被磁场偏走, 而 γ 光子束在对撞点相互作用。两束高能 γ 光子对撞最令人激动的物理工作是直接测量黑格斯玻色子衰变为两个 γ 的宽度。这是一种在不产生更高能量粒子的情况下精确检验标准模型、超弦模型、人工色模型以及其他模型的有效方法。采用 γ 光子对撞机还可研究黑格斯粒子衰变为 $b\bar{b}$ 或 ZZ 的反应等等。

2.4 $\mu^+ - \mu^-$ 对撞机

另一种正在研究中的高能轻子加速器是 $\mu^+ - \mu^-$ 对撞机^[7]。 μ 子和电子一样, 也是一种轻子。由于 μ 子的质量约比电子大 200 倍, 同步辐射损失小, 容易在环形加速器中被加速到更高能量。 μ 子是一种不稳定粒子, 其静止寿命约为 $2\mu\text{s}$ 。由于相对论效应, 在被加速到高能时粒子寿命 τ_μ 将以相对论能量因子 γ 倍提高, 因而仍有可能得到足够的对撞时间。在 μ 子对撞机中, μ 子衰变时会产生大量中微子, 可用以研究中微子物理。因此, $\mu^+ - \mu^-$ 对撞机同时又是中微子工厂。图 4 是一台质心能量 $E_{\text{cm}} = 4\text{TeV}$ 的 $\mu^+ - \mu^-$ 对撞机布局示意图。直线加速器产生强流质子打靶产生高通量的 π 介子束衰变后得到发射度很大的 $\mu^+ - \mu^-$ 子束流, 经螺线管磁场俘获、压缩后, 由离子冷却装置减小其发射度, 传输到常规和超导直线加速器串级快速加速到 2TeV 后, 注入周长约 8km 的 $\mu^+ - \mu^-$ 储存环积累、对撞, 设计亮度为 $1 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。由于相对论效应 ($\gamma = 20000$), 这时 $\mu^+ - \mu^-$ 的寿命增加到 40ms, 对撞次

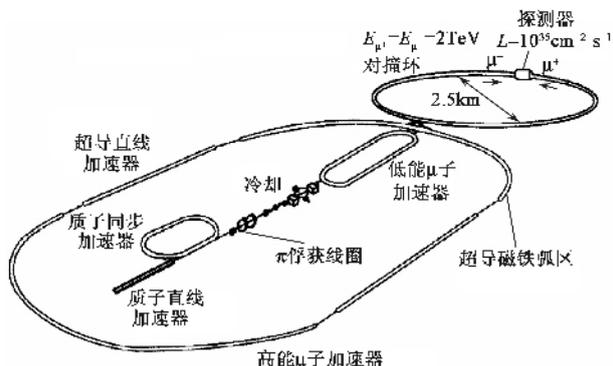


图4 一台 $E_{\text{cm}} = 4\text{TeV}$ 的 $\mu^+ - \mu^-$ 对撞机布局示意图

数约为 $N = \tau_{\mu} / T_0 \approx 1500$,可以进行高能物理实验 (T_0 为旋转周期)。 $\mu^+ - \mu^-$ 对撞机可以是 $e^+ - e^-$ 对撞机的竞争对手,更可能是它以后的高能加速器,两者具有互补性。

3 高亮度前沿

在前驱的加速器上发现了新粒子、新现象之后,需要建造新的高性能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。在高亮度前沿主要有高亮度环形正负电子对撞机粒子工厂、强流质子加速器和中微子工厂 3 个方面。

3.1 正负电子对撞机粒子工厂

在正负电子对撞机粒子工厂方面,两台 B 介子工厂,即美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)的 PEP-II 和日本高能加速器研究机构(KEK)的 KEKB^[8],在 1997 年相继建成后已投入运行。经过努力,目前亮度已超过设计指标,达 $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 量级,成为目前世界上亮度最高的对撞机,正在大量“生产”B 介子,深入进行 B 系统中的 CP 破坏等方面的研究。图 5 是 KEKB 隧道的照片。



图 5 KEKB 加速器隧道

PEP-II 和 KEKB 的成功激励科学家向更高的亮度进军,提出了亮度为 $10^{35} - 10^{36} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的超级 B 工厂的方案,以便满足粒子物理研究的需求,并与 LHC 上的 B 介子实验 LHC-B 竞争。

意大利的 Φ 介子工厂 DEΦNE 于 1997 年建成,在质心系能量 $2 \times 510 \text{ MeV}$ 下工作,其对撞亮度离设计指标 $6 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 约有 4 倍的差距。为了进一步提高亮度,科学家提出了“横腰”(crab waist)的对撞区方案,现正在调试中^[9]。

在 τ -粲能区,北京正负电子对撞机(BEPC)于 1988 年建成后一直是性能在国际上领先的对撞机,在 1.89 GeV 时的亮度为 $1 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。但从 2004 年开始,这一领先已让位于美国康奈尔大学的正负电子对撞机 CESRc。面对 CESRc/CLEOc 的挑战,中国科学家调整了 BEPC 重大改进(BEPCII)的方案,决定采用双环方案,即在 BEPC 隧道里安装两个储存环,正负电子在各自的环里运动,只在碰撞区交叉对撞,其设计亮度比 BEPC 高两个数量级,为 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,是 CESRc 设计值的 3—7 倍。表 3 列出了 BEPC 和 BEPCII 的主要参量^[10],图 6 是双环的 BEPCII 储存环的隧道。

表 3 BEPC 和 BEPCII 的主要参量

参量	单位	BEPCII	BEPC
工作能量	GeV	1.0 - 2.1	1.0 - 2.5
周长	m	237.5	240.4
对撞点包络函数	cm	100/1.5	120/5
束团数目		93	1
束流流强	mA	2×910	2×35
亮度	$\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	10^{33}	10^{31}



图 6 BEPCII 储存环

3.2 强流质子和重离子加速器

在强流加速器方面,继美国的连续电子束 CEBAF 建成之后,世界上有多个强流质子加速器在研制中。日本强子装置 J-PARC 已基本建成,它包括一台 400 MeV 的质子直线加速器,一台 3 GeV 快循环同步加速器(RCS)和一台 50 GeV 强流质子同步加速器,开展 K 介子稀有衰变和 CP 破坏、 μ 子物理、中子物理以及中微子振荡等方面的研究。 3 GeV 的 RCS 又是一台束流功率为 1 MW 的散裂中子源。

我国建成的兰州重离子冷却储存环(HIRFL-CSR)^[11]是一台高性能的重离子加速器,它用 HIRFL 的分离扇回旋加速器作为注入器,将重离子输送到主环 CSRm 和实验环 CSRc 进行积累、加速、冷却、储存、

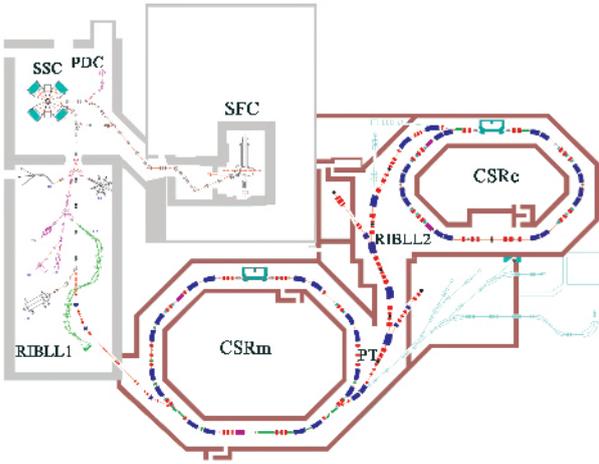


图7 HIRFL-CSR 的布局

实验 质子能量分别为 2.8GeV 和 2.0GeV 重离子能量分别为 400—1100MeV/u 和 400—770MeV/u 采用电子冷却使束流发射度和能散度大大减小 实验亮度大大提高。图 7 是 HIRFL-CSR 的布局。

HIRFL-CSR 将放射性束、高品质重离子束技术相结合 具有束流能量范围宽(低、中能和高能低端)、束流种类多(丰中子、丰质子放射性核束,特别是远离稳定线极短寿命的滴线核束,同质异能态束,以及高离化态重离子束等)、束流品质高、准连续运行和能量灵活可调等优点,在未来十年中将具有明显的先进性。

3.3 中微子工厂

日本超级神冈等近年的实验揭示了中微子振荡的统计存在,世界上各大高能物理实验室纷纷提出建造中微子工厂的计划。典型的中微子工厂是一台 20—50 GeV 的 μ 子储存环,它每年能生产 10^{20} — 10^{21} 个中微子,从而能在更大的统计上开展中微子振荡和其他中微子物理研究。图 8 为 CERN 的中微子工厂布局图^[12]。从图中可见,中微子工厂和 μ^+ — μ^- 对撞机在 μ 子的产生上是类似的,而在中微子工厂的储存环中,安排了多个直线节,以便在不同方向上产生高通量的中微子。

4 多学科平台

在第 1 节中我们已经谈到,研究分子和原子层次的物质结构需要 keV 到数十 keV 量级的粒子(射线)作为探针,而形形色色的分子和原子又是物质科学和生命科学等诸多学科的重要研究对象。粒子加速器可以成为这诸多学科研究的平台,包括同步

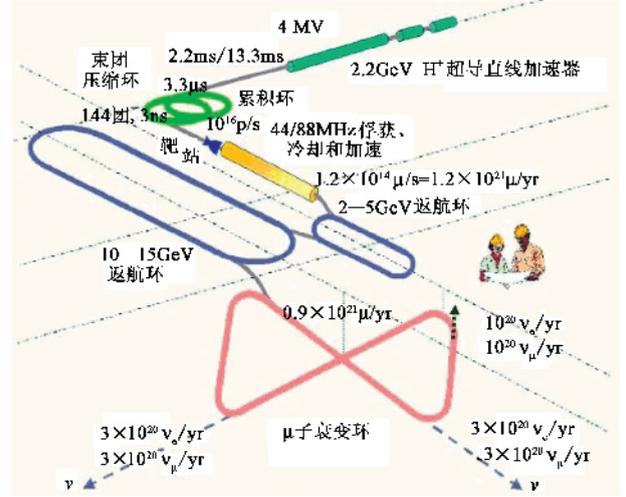


图8 CERN 的中微子工厂布局图

辐射光源、自由电子激光和散裂中子源等。

4.1 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源,在物理学、化学、生物学、医学、地质学、材料科学、微电子和微加工等领域有着广泛应用。

同步辐射的早期研究是在电子同步加速器上进行的,有人把它称为第零代光源。第一代则是“寄生”在主要用作高能物理实验的正负电子对撞机上的光源。北京正负电子对撞机上的同步辐射装置就属于这一类。第二代是同步辐射专用的储存环光源,主要使用偏转磁铁引出的同步光。我国在 1990 年建成的合肥光源 HLS 属于第二代^[13],经过多年的运行和改进,特别是二期工程的建设,其性能有很大提高。第三代是亮度更高、以插入元件(扭摆磁铁或波荡器)产生光辐射为主的储存环。上海光源 SSRF 是一台束流能量为 3.5GeV 的高性能第三代光源,现已建成,正在在进行调束,计划在 2009 年初投入工作,有望提前开始提供用户使用^[14]。中国台湾在 1993 年建成一台能量为 1.3GeV 的第三代光源 SRRC,并计划建造一台能量为 3GeV 的高亮度新光源。据统计,世界上约有 50 余台同步辐射光源在运行,还有近十余台在设计建造中。表 4 列出了我国几台

表 4 我国的几台同步辐射装置

	BEPC	HLS	SRRC	SSRF
地点	北京	合肥	新竹	上海
建成时间	1988	1989	1993	2008
能量/GeV	2.5	0.8	1.5	3.5
周长/m	240	66.1	120	432
流强/mA	250	300	200	300



图9 改进后的合肥光源

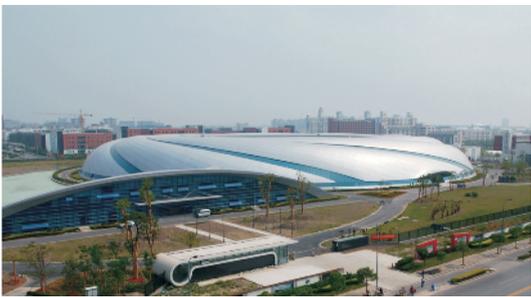


图10 上海光源鸟瞰

同步辐射装置的主要参量. 图9为改进后的合肥光源, 图10为上海光源的鸟瞰.

上面谈到的同步辐射光源都基于电子储存环. 在储存环里, 由于辐射的量子效应, 限制了束流能散度和发射度的减小, 从而限制了同步光的性能的进一步提高. 为了避免储存环光源的这种局限, 科学家提出了能量回收型直线加速器(ERL)的概念^[15]. 在ERL中, 直线加速器产生的高性能束流在弧区发出光辐射, 并使得用过的束流返回到直线加速器时处在减速相位, 其能量被回收到微波系统中, 从而大大减小功率消耗. ERL的原理已在美国杰斐逊实验室的试验装置上得到验证, 日本KEK和康奈尔大学等正在研究用5—6 GeV的ERL产生X射线的装置. 图11是一台高耀度ERL硬X射线光源的示意图.

4.2 自由电子激光

自由电子激光器(FEL)是近20年内发展起来的一种将加速器产生的电子束能量转化为激光的装置. 与以原子、分子中的束缚态电子轨道跃迁为机制的普通激光器不同, FEL的“工作物质”是自由电子, 因而具有高功率、高效率 and 宽频率调谐范围等一系列优点, 成为各国竞相发展的技术. 目前世界上已有数十台大型装置在运行. 我国在FEL方面, 特别是在其低频段, 已有长足发展. 加速器提供的电子能

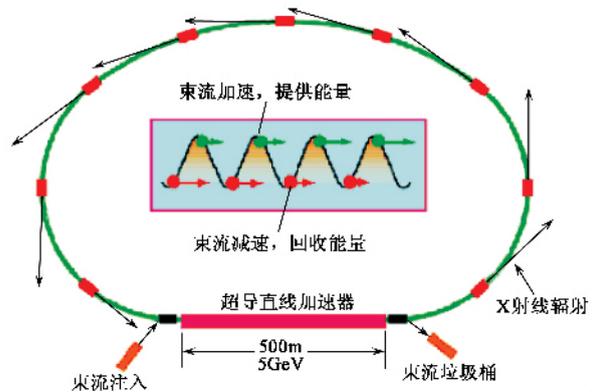


图11 ERL-X光源的示意图

量和波荡器场强愈高, 所输出激光的频率也愈高. 因此, 改变电子束的能量和波荡器场强, 就能获得所需频率的激光. 用于FEL的加速器主要是电子直线加速器. 电子直线加速器能提供发射度低于硬X射线波长的GeV级电子束, 因而在X射线特别是硬X射线波段比电子储存环更具优势. FEL在激光光谱学、光通信、光雷达、光化学、超导技术、激光加工、激光医学和激光驱动核聚变等方面有着广泛的应用前景. 我国正在开展THz和深紫外波段的FEL研究, 并在讨论X射线波段FEL实验装置的建设方案. 图12是研制中的美国直线加速器相干光源LCLS(linac coherent light source), 它基于SLAC实验室的3km直线加速器最后的1km段, 注入短脉冲、低发射度的电子束, 加速到15 GeV, 通过长112m的永磁波荡器, 能以自放大自发辐射(SASE)的方式产生1—15Å的X射线波段的自由电子激光^[16]. 欧洲的X射线波段Euro-FEL也在建设中.

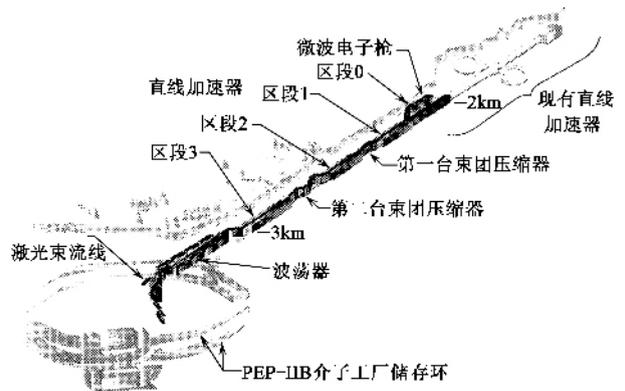


图12 研制中的美国直线加速器相干光源LCLS

4.3 散裂中子源

自上世纪90年代起, 强流质子加速器成为国际上的一个重要发展方向. 中能强流脉冲质子束打靶可用作散裂中子源. 与X射线相比, 用中子作为“探

针”具有能精确测定较轻原子特别是氢原子的位置,能区分元素周期表上的近邻原子和同位素,能直接测定原子的磁结构以及具有很强的穿透力等特点.与反应堆产生的中子相比,散裂源中子束具有脉冲性、高分辨、低本底和能量范围大等优点,是生命科学、物质科学和核物理研究的有效手段,在国防建设、新型核能开发以及同位素开发、核医学和中子照相等方面有重要的应用价值.在这些研究和应用领域,散裂中子源是与反应堆中子源和同步辐射装置互相补充的装置.正因为如此,美国、欧洲、日本等国都在竞相发展高通量的一代散裂中子源,我国科学家也提出了建造一台中等规模的散裂中子源 CSNS 的计划^[17].表 5 列出了世界上正在运行、建造和计划中的散裂中子源^[18],图 13 给出了 CSNS 布局示意图.

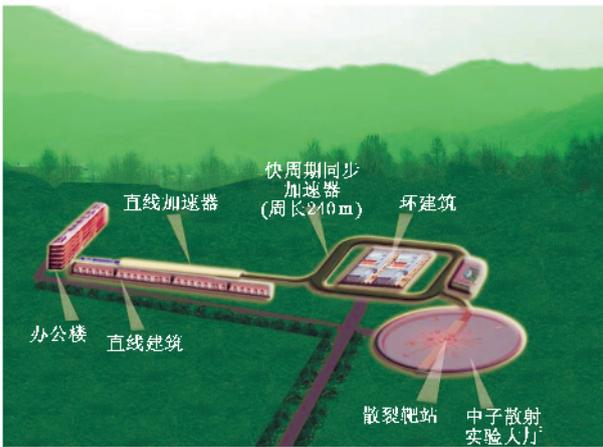


图 13 中国散裂中子源 CSNS 布局示意图

表 5 世界上的散裂中子源

名称	现状	束流能量 /GeV	束流功率 /MW	重复频率 /Hz
美国 IPNS	运行 (1981)	0.5	0.0075	30
英国 ISIS	运行 (1985)	0.8	0.16	50
瑞士 SINQ	运行 (1996)	0.590	≤0.9	连续波
美国 LANSCE	运行 (1977)	0.8	0.08	20
美国 SNS	运行 (2006)	1.0	1(5)*	25
日本 J-PARC	建造	3.0	1	50
欧洲 ESS	暂停	1.33	5	60
中国 CSNS	计划	1.6	0.1(0.5)*	25

* 括号中的数值是未来升级的指标.

5 加速器应用

虽然粒子加速器是由于核物理和粒子物理的需求而发展起来的,但目前世界上占绝大多数(约有数千台)的加速器则应用于其他领域,包括其他学

科分支的科学研究、工业、农业、医学、国防、计量和环境保护等等.在科学上,加速器应用于材料分析、用束流打靶产生 X 射线,核反应分析,加速器质谱仪和 X 射线吸收精细结构研究等;在工业上,用于活化分析、离子注入、辐照改性、有机物聚合和无损检验等;在农业上,用于品种改良、消灭病虫害和食品保鲜等;在环境保护方面,用加速器产生的强束流对燃煤烟气进行脱硫、脱氮处理;在国防上,高脉冲功率加速器可用作 X 射线模拟源、闪光照相;在社会安全方面,加速器用于公共场所灭菌消毒和爆炸物与毒品探测等;在医疗上,加速器大量用于治疗肿瘤、辐照消毒、生产短寿命同位素等.能量为数百 MeV 的质子和重离子加速器用于治疗,可以消灭人体深部的肿瘤组织和细胞,而对肿瘤附近的健康组织与器官损伤却很小.这是因为质子和重离子束流能够把大部分能量作用于其射程的终点附近,而现代加速器治疗装置能够把束流的位置控制在毫米的范围内.目前,加速器,特别是低能加速器应用的一个重要特征是产业化.用于各种离子注入机、医用电子和质子加速器、各种高压型的辐照加速器、用于大型集装箱探测和工业 CT 的电子直线加速器和一些小型同步辐射装置等,都已形成产业,成为核技术工业的重要部门.

强流连续束质子加速器可用于核废料处理、核燃料生产和以洁净的方式产生核能.用加速器产生的强束流轰击核废料,可以将其中的长寿命放射性核素转变为有用的或短寿命的核素.用加速器产生的束流和靶物质进行核反应则是一种生产核武器原料氙的安全和有效的方式.利用加速器产生的 1GeV、数十毫安级的强流质子束驱动次临界核反应堆(ADS),可以安全、高效、洁净地发电^[19].图 14 是一台 ADS 装置的示意图.采用加速器束流产生中子激发核聚变,可以使核燃料充分燃烧只产生很少的核废料,或甚至将常规反应堆的核废料作为核燃料烧掉,也可以使用自然界储量较大并容易获得的钍来代替稀有的铀 235 作为反应堆燃料.同时,由于在 ADS 中,反应堆处于次临界状态,核反应是非自持的,因此不会发生切尔诺贝利核电站那样的事故.从图 14 中可以看出,ADS 能生产 675MW 电功率,远大于加速器系统消耗的 30MW,因而 ADS 又被称为“能量放大器”;而每次只要添加 2.9 吨燃料,并能及时处理.图中的方案采用回旋加速器驱动 ADS,另一个选择是强流质子直线加速器.

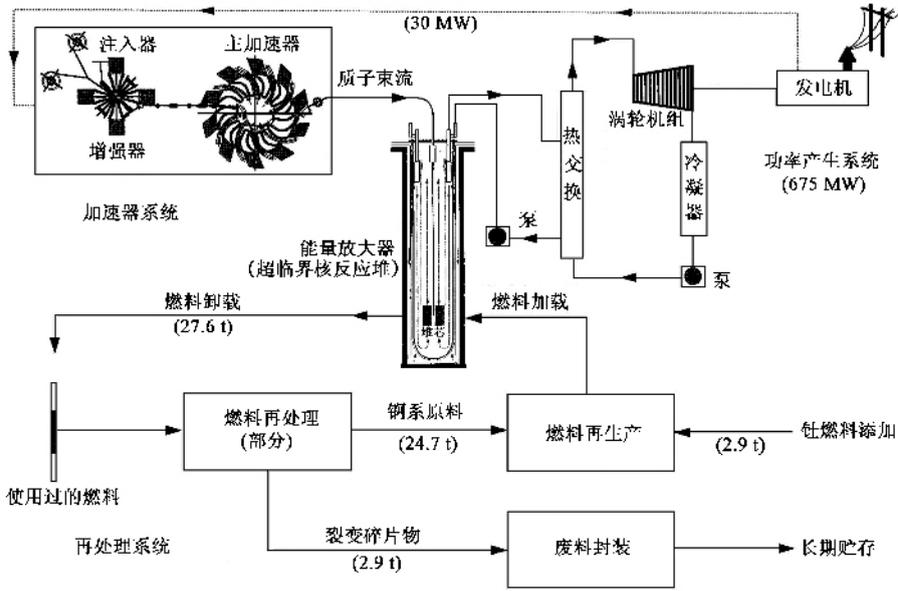


图 14 加速器驱动的次临界反应堆 ADS

6 新加速原理

SSC 的下马告诉我们,如果没有新的更有效的加速粒子的原理,人类向更高能区和更深层次挺进的步伐将不得不停缓下来.科学家为探索新的、更有效的加速器原理不懈努力,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 $10^5\text{--}10^9\text{ MV/m}$,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,属于这一种的有相干加速器、电子圈加速器和直线束加速器等;另一种是采用谐振腔、等离子体或其他设备为介质,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等.

常规加速器中的尾场会引起束流不稳定性,而尾场加速器 WFA(Wake Field Accelerator)则利用一个强流短脉冲的束流产生的尾场来加速后面的束流.按产生尾场的媒介,有两类尾场加速器,即慢波

结构尾场加速器和等离子体尾场加速器.表 6 比较了各种尾场加速器的特点和研究现状^[20],其中激光等离子体尾场加速的实验已得到接近 1 GeV/m 的高加速梯度^[21].2006 年美国 LBNL 在实验中得到了能量为 1 GeV 的准单能电子束^[22].

尽管上述新原理在一些实验装置上得以验证,总的来说,各种新加速原理目前尚处于实验阶段,理论上还有待继续深入,实验上还有许多困难,离开实际应用还很遥远.但人们仍然相信,只要不懈努力,新的加速原理终会成功,开辟粒子加速器的新时代.

表 6 各种尾场加速器的特点和研究现状

类型	最高梯度	优点	缺点
激光尾场加速	$n\text{ GeV/m}$	加速梯度高	需高功率短脉冲激光,效率低
等离子体尾场加速	$\approx\text{GeV/m}$	加速梯度高	需要强流驱动束,其准直困难
光栅尾场加速	50 MeV/m	结构简单、原理明瞭	加速梯度低
电介质尾场加速	100 MeV/m	简单,能阻尼偏转模式	需强流驱动束,逐级加速困难
耦合尾场管加速	500 MeV/m	梯度较高,易于逐级加速	需高功率和强流驱动束

在新技术方面,超导磁铁和射频超导加速腔技术已在加速器中广泛应用,超导腔的加速梯度达到 40 MV/m 以上.直线对撞机中的超导加速结构、微波高功率源、强流小发射度电子枪和亚纳米束团截面与位置快速测量, $\mu^+ - \mu^-$ 对撞机和中微子工厂中的快速冷却技术和快加速技术, FEL 和 ERL 以及新加速原理中的激光、等离子体技术等等,都在研究之中.随着粒子加速器的发展,与其相关的高频微波技术、磁铁技术、电源技术、真空技术、束流测量技

术、控制技术、低温和超导技术、辐射防护技术、精密机械和准直安装技术等等,都在迅速向更高、更强、更新、更精方向发展. 粒子加速器,不仅在过去,而且现在和将来都是其所在时代高科技的结晶.

在 21 世纪 粒子加速器将继续向高能量前沿和高亮度前沿推进,构建高水平的多学科研究平台,不断开拓应用领域,探索新原理,发展新技术. 加速器在粒子物理、核物理的研究和在诸多学科和国民经济各个部门的应用等方面,都有着十分广阔的前途.

路漫漫其修远兮,科学家将上下而求索.

参 考 文 献

- [1] Church M. Tevatron RunII Performance and Plans. Proc. EPAC'02, 2002, 11—14
- [2] Roser T. RHIC Status. Proc. APAC'07, 2007, 74—78
- [3] Evens L. LHC Status, Proc. APAC'07, 2007, 46—50
- [4] Limon P. Very Large Hadron Collider. ICFA seminar on Future Perspectives in High Energy Physics, 2002
- [5] ILC Reference Design Report, ISSN-0007-8328, ILC-REPORT-2007-001, 2007
- [6] Kim K J, Sessler A. Beam Line, 1996, 26(1) : 16
- [7] Palmer R. $\mu^+ - \mu^-$ Colliders. In: Handbook of Accelerator Physics and Engineering, edited by Chao A W, Tigner M. Singapore: World Scientific, 1998, 33—34
- [8] Oide K. Operation Experience and Performance Limitations in $e^+ e^-$ Factories. Proc. EPAC'02, 2002, 1—5
- [9] Bertolucci S. LNF Status and Outlook. ICFA seminar on Future Perspectives in High Energy Physics, 2002
- [10] Wang J Q *et al.* The BEPC II: Status and Early Commissioning, Proc. PAC'07, 2007, 53—57
- [11] Xia J W *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2006, 30(4) : 335
- [12] Hübner K. Accelerator Based Neutrino Beams. Proc. EPAC'02, 2002, 30—33
- [13] Liu Z P, Li W M. Progress of the NSRL Phase II Project. Proc. Apac'01, 2001, 235—238
- [14] Zhao Z T *et al.* Construction Status of the SSRF Project. Proc. EPAC'06, 2006, 3389—3391
- [15] Tigner M. Nuovo Cimento, 1965, 37 : 1228
- [16] The LCLS Design Study Group. Linac Coherent Light Source (LCLS) Design Study Report. SLAC-R-521, 1998
- [17] Wei J *et al.* China Spallation Neutron Source Design. Proc. APAC'07, 2007, 310—314
- [18] Lengeler H. Spallation sources. In: Handbook of Accelerator physics and Engineering, edited by Chao A W, Tigner M. Singapore: world scientific, 1998, 40—42
- [19] Rubbia C *et al.* Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier. CERN/AT/95-44 (ET), 1995
- [20] Simpson J. Wakefield Accelerators In: Handbook of Accelerator Physics and Engineering, edited by Chao A W, Tigner M. Singapore: world scientific, 1998, 46—48
- [21] Tsung F S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 93 : 185002
- [22] Leemans W P *et al.* Nature Physics, 2006, 2 : 696

· 物理新闻和动态 ·

“ 石墨电子结构和输运特性 ” 专题研讨会简讯

“ 石墨电子结构和输运特性 ” 专题研讨会于 2008 年 4 月 11—13 日在山东青岛举行. 会议由复旦大学物理系, 南京大学物理系和青岛大学物理学院联合主办, 受到国家自然科学基金委及国家量子调控重大科学研究计划(2006CB921800) 资助. 此次研讨会吸引了国内活跃在低维石墨研究领域的学者和研究生约 100 人参加.

研讨会的主要议题是: 石墨电子结构和输运特性. 来自中国科学院物理研究所、理论物理研究所、半导体研究所, 北京大学, 中国科学技术大学, 南京大学, 中国人民大学, 吉林大学等单位的 16 位理论和实验方面的专家作了高水平的学术报告, 内容包括石墨的拓扑性质及新奇量子霍尔效应、杂质散射效应和狄拉克电子的局域化问题、石墨晶格动力学及其对电子态的影响、石墨系统的光吸收及各向异性选择性、石墨量子点中的磁性问题、单层石墨样品的实验制备及其物性研究、石墨纳米结构中电子输运实验研究等. 斯坦福大学的张首晟教授也参加了本次研讨会, 并作了题为“ Topological Mott insulator from interaction on a honeycomb lattice ” 的学术报告. 最后于涑院士主持了总结讨论会, 与会专家们就石墨电子结构和输运特性研究中一些富有挑战性的问题进行了认真、自由的讨论. 于涑、陶瑞宝、邢定钰院士在总结讨论会上都做了精彩的发言. 大家一致认为国内有关低维石墨的理论研究已经有了比较好的基础, 实验材料制备和物性测量方面的研究已初步展开并取得了一些可喜的成果, 希望国家加大在相关研究方向的投入, 经过努力在石墨研究方面能够形成自己的特色, 迎头赶上并超过国际先进水平.

(南京大学物理系 盛利 王伯根)