

(续前)

## 二、LEP 实验和标准模型研究况

标准模型包括弱电统一理论和量子色动力学。从弱电统一理论的提出到现在已经过去了近四分之一世纪,量子色动力学从诞生到现在也已经经历了18年。自1973年在CERN的泡室实验中发现弱中性流事例以来,标准模型成功地经受了所有实验的检验,超出标准模型理论的实验结果一个也没有得到。正是由于标准模型的重要性以及它的成功,使得十几年来的国际高能会议成了显示标准模型取得成功的节日。最近几年的实验,特别是LEP实验已使对标准模型的检验达到1%的精度。表3列出了LEP四个实验的 $Z^0$ 线形(line shape)测量以及轻子部分宽度 $\Gamma_e$ 、 $\Gamma_\mu$ 和 $\Gamma_\tau$ 测量的平均值,还列出那些直接由四个实验给出参数的加权平均 $\chi^2$ 值。表上也包括 $Z^0$ 质量 $M_{Z^0}$ 、总宽度 $\Gamma_Z$ 、在 $S = M_Z^2$ 处的强子截面 $\sigma_s^0$ 和宽度比 $R_e \equiv \Gamma_{had}/\Gamma_e$ 、 $R_\mu \equiv \Gamma_{had}/\Gamma_\mu$ 以及 $R_\tau \equiv \Gamma_{had}/\Gamma_\tau$ 。这几个参数直接依赖于实验测量值而极少相关。表上的最后三个参数衰变分支比BR也可用 $Z^0$ 衰变到强子的宽度 $\Gamma_{had}$ 和衰变到轻子对的宽度替代。对轻子道的测量结果显示了轻子的普适性,所以可把对 $e$ 、 $\mu$ 和 $\tau$ 的测量结果统一起来,例如 $\Gamma_e$ 、 $\Gamma_\mu$ 和 $\Gamma_\tau$ 统一为 $\Gamma_l$ 。在轻子普适性的假设下,由表3的结果可以决定 $\Gamma_l$ 、 $R_l \equiv \Gamma_{had}/\Gamma_l$ 、 $Z^0$ 对带电轻子的矢量和轴矢量耦合 $g_{V_l}$ 、 $g_{A_l}$ 以及轻子在 $Z^0$ 极点处的前后不对称性 $A_{FB}^0$ 。由标准模型得到 $A_{FB}^0 = 3 \frac{g_{V_l}^2 g_{A_l}^2}{(g_{V_l}^2 + g_{A_l}^2)}$ 。这些

表 3

参 量	平均值	$\chi^2$
$M_Z(\text{GeV})$	$91.175 \pm 0.021$	3.4
$\Gamma_Z(\text{GeV})$	$2.487 \pm 0.010$	2.0
$\sigma_s^0(\text{nb})$	$41.33 \pm 0.23$	2.3
$R_e$	$20.91 \pm 0.22$	
$R_\mu$	$20.88 \pm 0.18$	
$R_\tau$	$21.02 \pm 0.23$	
$\Gamma_e(\text{MeV})$	$83.20 \pm 0.55$	1.0
$\Gamma_\mu(\text{MeV})$	$83.35 \pm 0.86$	5.1
$\Gamma_\tau(\text{MeV})$	$82.76 \pm 1.02$	0.3
$\text{Br}(Z^0 \rightarrow e^+e^-) (\%)$	$3.345 \pm 0.020$	
$\text{Br}(Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) (\%)$	$3.351 \pm 0.034$	
$\text{Br}(Z^0 \rightarrow \tau^+\tau^-) (\%)$	$3.328 \pm 0.040$	

结果列于表4,表中 $\Gamma_{inv}$ 表示由实验定出的 $Z^0$ 的不可见衰变宽度。

表 4

参 量	平均值	$\chi^2$
$R_l$	$20.89 \pm 0.13$	
$\Gamma_{had}(\text{GeV})$	$1.740 \pm 0.012$	
$\Gamma_l(\text{MeV})$	$83.24 \pm 0.42$	0.4
$\text{Br}(Z^0 \rightarrow \text{hadrons})(\%)$	$69.93 \pm 0.31$	
$\text{Br}(Z^0 \rightarrow l^+\Gamma)(\%)$	$3.347 \pm 0.013$	
$A_{FB}^0$	$0.0138 \pm 0.0049$	
$g_{V_l}^2$	$(1.16 \pm 0.41) \times 10^{-3}$	2.9
$g_{A_l}^2$	$0.2493 \pm 0.0013$	0.8
$g_{V_l}^2/g_{A_l}^2$	$0.0047 \pm 0.0017$	
$\Gamma_{inv}(\text{MeV})$	$498 \pm 8$	
$\Gamma_{inv}/\Gamma_l$	$5.985 \pm 0.095$	

从上列的结果可以看出:

它们对标准模型的一些参数给出了更准确的值。它们提供了很强有力的证据:标准模型包含三个费米子家族,不存在更多的费米子家族。

在标准模型下, $Z^0$ 到中微子的部分宽度与到带电轻子部分宽度之比为 $\Gamma_\nu/\Gamma_l = 1.993 \pm 0.004$ 。这个比值对辐射修正不灵敏,式中的误差是在允许;夸克质量在90—200GeV范围下得出的。由表4中测得的 $\Gamma_{inv}/\Gamma_l$ 可以定出中微子的代数 $N_\nu = 3.00 \pm 0.05$ 。

LEP各实验组在 $Z^0$ 峰区由直接的实验寻找分

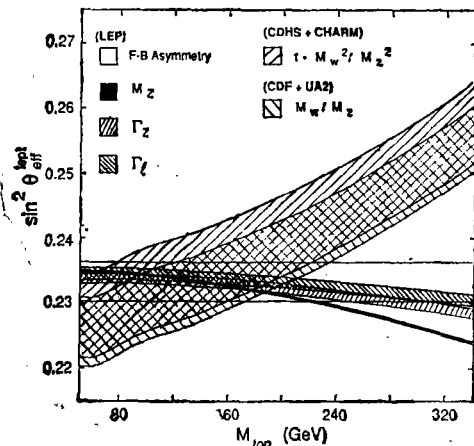


图 1

析中没有发现  $t$  夸克和黑格斯粒子, 但给出了它们的质量下限:  $M_H > 60\text{GeV}$ ;  $M_t > 44\text{GeV}$ . 美国费米实

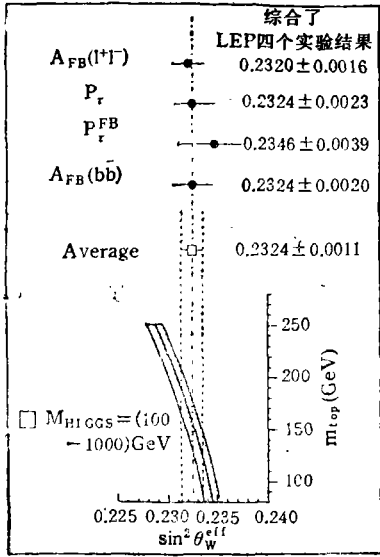


图 2

验室 Tevatron 上的 CDF 组也对  $t$  (夸克) 粒子做了直接寻找分析, 同样没有找到。他们给出的  $M_t$  的下限更高,  $M_t > 91\text{GeV}$ , 这是当前由直接寻找  $t$  粒子实验给出  $t$  夸克质量下限的最高值。

在给定的  $M_Z$  下, 标准模型可以预言  $\Gamma_Z, \Gamma_t$  以及在  $Z$  极点的轻子前后向不对称性  $A_{FB}^l$ , 但预言的这些参量依赖于  $M_t$  和黑格斯粒子质量  $M_H$ , 这种依赖性体现在辐射修正上。所以, 由表 4 的测量结果反过来可以估计  $M_t$  和  $M_H$  范围。但在感兴趣的能量范围, 辐射修正随  $M_t^2$  变化, 对  $M_t$  比较灵敏, 对  $M_H$  只是对数依赖关系  $\sim \log M_H$ , 依赖较弱, 很难用现有的测量结果对  $M_H$  作出较精确的估计。

图 1 展示了在标准模型下 LEP 实验测得的  $Z$  线形参数和前后向不对称性对有效弱混合角  $\sin^2 \theta_W^{eff}$  和

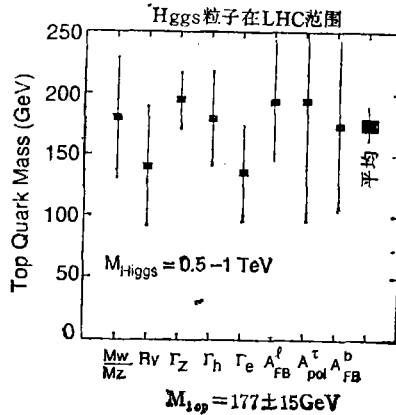
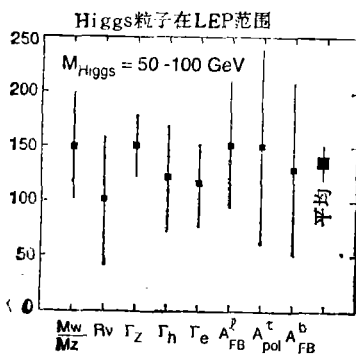


图 3

$M_{top} = 155 \pm 30\text{ GeV}$

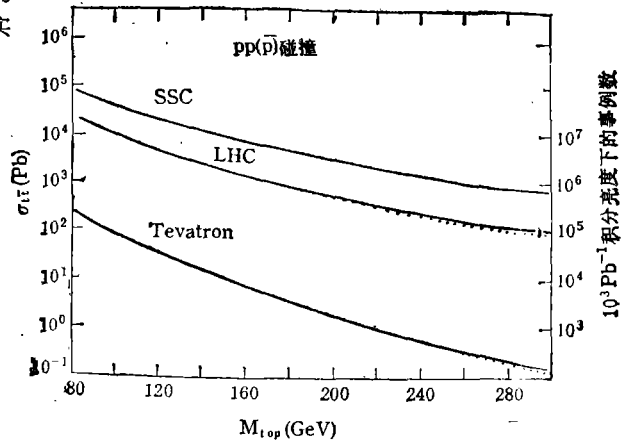
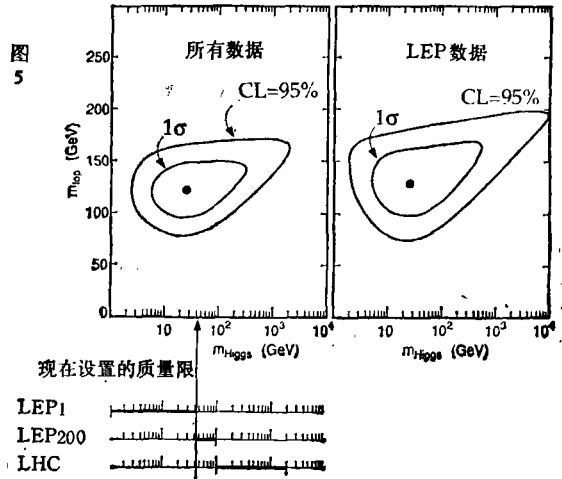


图 4



$M_t$  的约束。图上也展示了 CDF 和 UA2 组测得的  $M_W$  和  $M_W/M_Z$  以及 CDHS 和 CHARM 组测得的中微子中性流与带电流之比对  $\sin^2 \theta_W^{eff}$  和  $M_t$  的约束。这里定义  $\sin^2 \theta_W^{eff} = \frac{1}{4} (1 - g_V/g_A)$ 。

图 2 展示了 LEP 实验测得的从  $Z^0$  衰变到轻子对和  $b\bar{b}$  的前后不对称性、 $\tau$  子极化及其前后不对称性决定的有效弱混合参数  $\sin^2 \theta_W^{eff}$  ( $\sim \sin^2 \theta_W^{eff}$ )。图上也给出了标准模型的预言, 该预言是以  $M_t$  和  $M_H$  为变量的。阴影带的两边分别对应了  $M_H$  为 100 GeV 和 1000 GeV, 中间那条线对应了  $M_H \sim 300\text{ GeV}$ 。实验给出  $\sin^2 \theta_W^{eff} = 0.2324 \pm 0.0011$ , 精度已达到  $5 \times 10^{-3}$ 。

以现有的 LEP1 以及不

久将来的 LEP200 的数据,人们可以使对标准模型的检验精度达到 0.1% 或更好。图 3 展示了对应于标准模型中的不同参数测量估算的  $M_t$ 。左、右图分别对应于  $M_H$  为 50—100GeV 和 0.5—1TeV 两种情况。在前一种情况下得到  $M_t = 135 \pm 17 \text{ GeV}$ ; 在后一种情况下,  $M_t = 177 \pm 15 \text{ GeV}$ 。结合两种结果,给出

$$M_t = 155 \pm 30 \text{ GeV}.$$

因为预期的  $M_t$  很大,在费米实验室的 Tevatron 上观测它们是很困难的,但在下一代强子对撞机 LHC (8TeV + 8TeV P-P 对撞) 和 SSC (20TeV + 20TeV P-P 对撞) 上,就可对  $t$  夸克物理进行确定性的研究。图 4 展示了强子对撞机上  $t$  夸克产生截面随  $t$  夸克质量

的变化,从图上可见,在 LHC 上  $t$  夸克产生截面比 Tevatron 上大 100 倍,加之亮度也大 100 倍, LHC 的优势是不言而喻的。

黑格斯粒子在 LEP200 上也可以进一步寻找,并把寻找的范围扩大到  $M_H \sim 100 \text{ GeV}$ 。目前 LEP1 直接寻找黑格斯粒子的实验给出其质量  $M_H > 60 \text{ GeV}$  (95% 置信度)。图 5 给出了由目前测得的电弱参数估计的  $M_H$ 。如果黑格斯粒子在 LEP 上找不到,则可以在 LHC 上继续寻找,并把  $M_H$  的寻找范围扩大到 1TeV (90% 置信度)。

此外,超对称性 (SUSY) 理论也可以在 LHC 上研究。大统一理论 (GUT) 研究仍在进行,但要求更

表 5 LHC 的主要参数

对撞方式	P-P	e-P	铅离子
最大质心能量 (TeV, $B = 9.5T$ )	15.4	1.36	1262
亮度 ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$1.6 \times 10^{34}$	$2.8 \times 10^{31}$	$1.8 \times 10^{27}$
束团数目	4725	508	800
束团间隔 (m/ns)	4.5/15	49.5/164.7	31.5/105
粒子数/束团	$10^{11}$	$9.2 \times 10^{10} - 3.0 \times 10^{11}$	$6.2 \times 10^7$
粒子数/束流	$4.7 \times 10^{16}$	$4.7 \times 10^{15} - 1.5 \times 10^{16}$	$5.0 \times 10^{10}$
实验数	3	1	2

高的统一 (点  $E \sim 10^{16} \text{ GeV}$ )。对于这方面的研究,得借助于某些非加速器实验,例如 Gran Sasso 实验室的新一代质子衰变等实验。

### 三、LHC (Large Hadron Collider) 计划

LEP 和 HERA 的碰撞能量只能在 100—200GeV 范围内,它们将于 90 年代末用尽发现新物理方面的潜力。为了把粒子物理的研究深入下去,就需要实现有效对撞能量为 1—2TeV 的实验。目前,唯一可能的途

径是质子对撞机,在这种对撞机上可以观察夸克与胶子成分的相互作用。为了达到这样的能量区域,要求质子束流的能量大于 6TeV。由于作用截面反比于束流能量的平方,所以又要求这类对撞机的亮度比目前的机器高得多。拟议建造的质子对撞机 LHC 的主要参数见表 5 所列。LHC 除了用作 PP 对撞外,还可用于 e-P 和重离子对撞物理研究。表上后两列给出了用于后两种用途时的一些主要参数。

根据 CERN 的传统,这个新机器将充分利用原有的设施。LHC 采用原 LEP 的隧道,并用原有的质子同步加速器 PS 和超级同步加速器 SPS 作为其注入器,如图 6 所示。

目前已对原有的加速器系统的联合使用作了许多研究和发展工作。例如如何形成紧凑的束团 ( $\sim 10 \text{ ns}$ ) 以及在保持相同的总环电流下进一步提高亮度。为了达到高能量, LHC 建议采用长的高场强的超导磁体。LEP 隧道的半径以及超导磁体可能达到的最大场强使 LHC 可获得 8TeV 的束流能量。在设计中,尽量采用已有的先进技术,例如 HERA 的磁体技术。正是

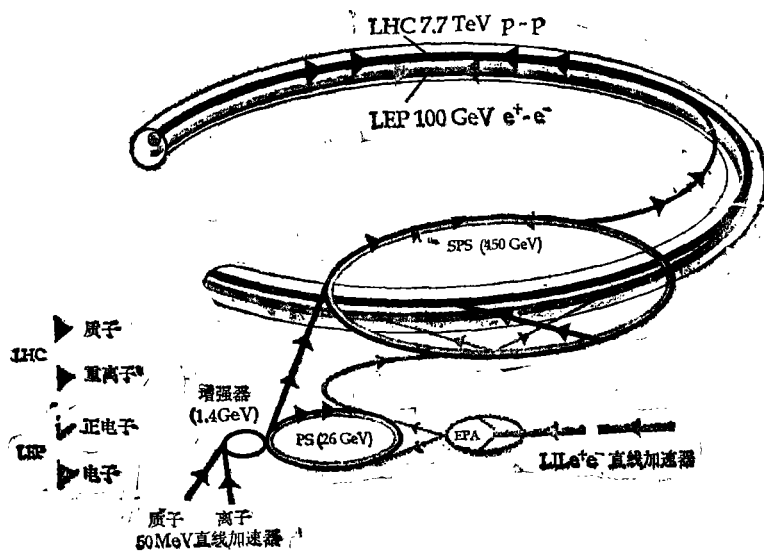


图 6

表 6 LHC 三个物理实验建议所使用的主要探测技术

	磁 铁	$\mu$ 子 室	量 能 器		径 迹 室
			强 子	电 磁	
ATLAS	外部磁铁(待选方案) 1) 超导空气心环形磁体磁刚度 $3Tm(\eta=0)$ 处 2) 常规铁心环形磁体 $3.5Tm(\eta=0)$ 处 内部超导螺旋磁场 $r=1.1m, B=2T$	$\Delta x$ : (待选方案) 1) 高压漂移管 2) 蜂窝状条室 3) 喷注单元漂移室 $\Delta z$ : 阻性板室	待选方案 1) 铁+液氩夹层 2) 铁+闪烁光纤维或闪烁瓦片	手风琴式液氩取样量能器, 液氩预簇射计数器	硅像素(Si Pixels) 硅微条 GaAs 微条 微条气体室 TRD 稻草管
CMS	4T 大型超导螺旋磁场	$\Delta x$ : 1) 无壁漂移室 2) 带有时间平均器的漂移管室 3) 蜂窝状条室 $\Delta z$ : 阻性板室(90°) 平行板室(前向)	桶部: 铜+闪烁体夹层 端盖: 铜+硅片夹层	待选方案: 1. CeF <sub>3</sub> 晶体或其它待选晶体 2. 铅+闪烁体夹层	硅微条 微条气体室 待选方案: 闪烁纤维
L3P	内部超导螺旋磁场 $r=3.5m, B=2T$ 待选方案: 3T 外部磁铁: 原 L3 常规磁铁 $B=7kG$	$\Delta x$ : L3 $\mu$ 子室(漂移室) 漂移管 正比室 $\Delta z$ : 阻性板室	铁+气体夹层	CeF <sub>3</sub> 或其它待选晶体 ( $\eta \leq 1.4$ )	稻草管 正比室 微条气体室

\*  $T = 10^4$  高斯

由于采用了许多优化考虑,使 LHC 节约了投资和建造时间。LHC 计划的总投资 15 亿美元,这比 SSC 计划投资 85 亿美元省得多。根据一个可行性研究计划, LHC 的物理实验将于 1999 年开始。到那时,它将成为 CERN 研究工作的中心部分。

LHC 高能量、高亮度以及伴随的高剂量特点,给 LHC 的探测器建造带来了新的挑战。针对这些挑战,探测器的研究发展工作已经开始。目前已提出 ATLAS、CMS 和 L3P 三个实验建议等候审批,最后从中挑选或组合成两个实验。审批过程最早将在 1993 年 3 月完成。这些实验都是包括了 400~600 物理学家的大型国际合作实验,采用了最先进的科技成果。表 6 列出了这些实验使用的主要技术。由表 6 可见,某些部分的探测技术尚未最后选定,有待于大量的研究和发展工作。除了 P-P 对撞外,LHC 还可用于其它方式的物理研究。LHC 其它物理研究的可能性包括下述内容。

1) LHC 上的 B 物理

LHC 计划不仅考虑了对撞机实验,也考虑了固定靶实验。在 LHC 能区,无论是对撞机模式还是固定靶模式,  $b\bar{b}$  事例率都是非常高的(前者产生截面为  $5 \times 10^3 nb$ , 后者为 500nb)。在对撞机模式下,每年可产生  $10^{13}$   $b\bar{b}$  事例样本;在固定靶模式下,每年可产生  $10^{10}$ — $10^{11}$   $b\bar{b}$  事例样本。有这么多的事例,LHC 的 B 物理必定是很有意义的。这时,研究  $B^0 \rightarrow \bar{B}^0$  振荡、寻找稀有衰变模式和 CP 破坏将对标准模型作出重要检验。况且, B 物理本身就是一个很大的研究领域。

2) LHC 用作 P-P 对撞外的其它对撞模式

a) 重离子对撞机: 一种建议是使 800TeV 的铅离子束在 LHC 中对撞。重离子先在 SPS 中加速,然后贮存在 LHC 中实现对撞。在这种条件下的碰撞可

以产生空前的能量密度和体积,并揭示 QCD 基本结构。这种碰撞可能产生 QCD 所预言的一种新物质相,即夸克-胶子等离子体。目前,从事高能重离子对撞物理研究的有 CERN 的 SPS 和美国 BNL 的 AGS 加速器,但能量都不高,约 4~20GeV/N。LHC 的离子束能将达到 4.0TeV/N (~800TeV/Pb), 这比美国正在建设的 RHIC 重离子对撞机要高 20—30 倍。

b) e-P 对撞机: LHC 作为电子-质子对撞机,即 70GeV 的电子束和 7TeV 的质子束的对撞,得到的质心能量 (1.36TeV) 是 HERA 的质心能量 (0.314TeV) 的 4 倍。这允许把对夸克结构的研究深入到  $10^{-19}cm$ , 分辨率明显比 HERA 好。夸克结构的发现可能用来解释现存的三代夸克和轻子。LHC 对撞机和探测器方案最后需通过 CERN 议会批准,1993 年进入仔细技术论证阶段,预期于年底得到结论。

结束语 本文中所提到的实验计划是欧洲粒子物理发展的主线。其实,欧洲科学家在其它许多实验(包括固定靶实验)中也作出了重要贡献。他们还提出了一些很有意义的“小”的实验计划,例如  $\Phi$  工厂(意大利的 Frascati),  $\tau$ -Charm 工厂(西班牙)和 B 工厂(俄国)。其中  $\Phi$  工厂已经开始设计, $\tau$ -Charm 工厂仍在欧洲范围内讨论。这些相对较“小”的实验计划也有可能作出重要发现,欧洲科学家并没有忽视它们。

欧洲各国政府和科学家关于联合的正确政策和态度使得他们能集中有限的财力和人力卓有成效地发展欧洲的粒子物理。今天,CERN 已经具有包括某些东欧国家在内的 19 个成员国,俄罗斯为观察员,约 80% 的欧洲物理学家已把 CERN 作为他们的基本实验室。HERA 和 Gran Sasso 实验室也采取了广泛国际化的方针。这种合作不仅是泛欧洲的,而且已经扩大到全

# 近年来我国物理学研究的若干重大进展

物理学是揭示自然界最基本形态的科学,是研究物质的基本结构、相互作用和运动形态的基本规律的科学。同时,它又为所有其他的自然科学、技术和医学提供理论原理和实验技术,为发展能源、改善环境、保障国家安全提供基础。可以说,物理学在理论原理和实验技术上的每一重大进展都有力地促进了科学技术进步和社会经济发展。

近年来,物理学的各个领域都取得了重大进展。在核物理学方面,我国科学家在世界上首次合成了三种新核素:钋-207、汞-208、铪-185,这一基础性研究的重要发现,得到了国际上许多著名学者的高度评价。在高能物理研究方面,我国科学家在北京正负电子对撞机上测得了 $\tau$ 粒子质量的最新数据,确认了一种被称为 $\xi$ 粒子的存在,这一成果不仅受到国际高能物理学界的普遍关注和重视,也标志着我国大型科学工程的整体水平已达到了一个新的阶段。北京正负电子对撞机兼同步辐射光源、兰州重粒子加速器、合肥同步辐射光源的建成和投入运转,是我国粒子加速器发展的里程碑,从此在中国土地上开始有了加速器高能物理实验,并作出了上述引人注目的成果。

凝聚态物理是与科学技术发展、社会经济进步结合最紧密的物理学的一个分支。近年来,凝聚态物理的发展堪称物理学中发展最为迅速的领域之一。例如,高温氧化物超导体的发现和研究,对强关联体系研究的进展,尺寸小到 $10^{-9}$ 米的、处于原子世界(微观)和大块材料(宏观)之间的介观系统中量子输运特性和电子波器件的发展,半导体超晶格和各种低维体系(一维量子线和零维量子点阵列)特性的研究

球的许多地区。正是这样,CERN已成为当今世界上最重要的粒子物理实验中心。

正确的发展战略使得欧洲科学家在粒子物理的发展中取得了一个又一个成功。在PETRA、SPS物理成功的基础上,他们于80年代初不失时机地提出了LEP、HERA和Gran Sasso Lab计划,这些计划在90年代发挥了重大作用,保持了他们在这个领域中的领先地位。今天,他们又及时提出了LHC计划,把握了粒子物理的发展方向。我们相信,欧洲科学家一定会取得更大的成功。

和器件的开发,以及各种新材料(如富氏烯系列-C<sub>60</sub>、C<sub>70</sub>等,新型激光非线性光学晶体,新型永磁材料等)的研究和开发,形成了凝聚态物理领域中蓬勃发展的局面。其中,我国科学家也作出了重要的贡献。主要列举如下:

## 1. 高温超导:

继我国独立地发现液氮温区以上的高温氧化物超导体之后,当今高温氧化物超导体的薄膜和器件的研究进展迅速。我国的超导氧化物薄膜的性能一直处于世界领先地位,临界电流密度高达 $7.2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 。以高温氧化物超导体薄膜为基础研制的超导量子干涉器和其他电子学,均取得了喜人的进展。

## 2. 激光非线性光学晶体:

我国在世界上最早研制成优质、大块偏硼酸钡(BBO)、三硼酸锂(LBO)和L-精氨酸晶体。此外,其他多种非线性光学晶体,如钛酸钡、磷酸钛氢钾、掺镁铌酸锂的研制也处于国际领先水平。

## 3. 准晶的发现和研宄:

准晶体是不同于传统晶体材料的一种新型材料。它具有不同于传统晶体的对称性。在国外发现五次旋转对称性以后,我国科学家首先发现了具有八次、十次和十二次旋转对称性的准晶体。我国在大块单晶的、十次对称的准晶体制备、准晶体结构和晶体缺陷以及准晶体各向异性的输运性质方面均有独创性工作,居国际前列。

## 4. 半导体超晶格理论和实验:

半导体超晶格物理是近年来国际半导体物理研究最集中的方向。我国科学家在超晶格的电子态、光学声子模的理论研究中,发展了新的微观模型。同时在超晶格物理的实验研究中也取得了一系列有特色的成就。如今可利用国产和进口的分子束外延设备和金属有机化合物化学气相沉积设备成功地制备出各种超晶格材料。

## 5. 新型永磁材料:

我国在研制Nd-Fe-B永磁体的基础上,对稀土-铁-氮(碳)金属间化合物和亚稳态铁基稀土合金的磁性能的研究亦处于国际领先水平。

尽管我国科学家在当代物理学发展中已作出了相当出色的工作,但也应指出当前我国物理学研究的经费严重不足,使得我们在一些十分重要的领域内,特别是在一些新兴学科和交叉学科上难以作出突破性工作,使我国在专利战处于不利的地位。另外,整个基础研究队伍由于缺乏长期、稳定的经费支持而呈现出人心不稳和后劲不足的现象。更难使科学家长期坚持在具有战略意义的研究课题上,希望各级领导能采取适当措施,将这一支优秀的队伍稳定在基础研究的工作上,为我国高科技的持续发展作好科学技术储备。

(原载《中国物理学会通讯》)