

美国的超导超级对撞机

张英平

1989年9月7日上午,美国参、众两院举行会议,表决通过了建造美国历史上最大的加速器——超导超级对撞机(Superconducting Super Collider,即SSC)的决定。这台加速器,是周长87公里的质子-质子对撞机,质心系能量40TeV(1TeV=10¹²电子伏),建造在德克萨斯州达拉斯市南郊农场地下50米左右,耗资60亿美元,由美国能源部领导,SSC实验室(命名为罗纳德·里根高能物理实验室,实验室主任为R. Schwitters)负责,在1998年建成。

为什么要建SSC

美国在二百多年里,之所以能建立起来如此辉煌的物质文明,其主要原因之一是重视科技。认识到了“数理是美国竞争的生命”,所以它从来对科技的发展是不惜工本的。它看到了SSC可以作为激发、组织和加强数理教育的丰富资源。

当然,最直接最主要的原因,还是SSC可能做出划时代的物理工作。标准模型(电弱统一理论和强作用量子色动力学的总称)经过了严格的检验,迄今为止,还没有发现与它矛盾的事实。它预言的中间玻色子W[±]、Z⁰,已在1983年被西欧核子中心首先发现了。1989年,美国在SLC加速器上获得了Z⁰粒子质量和中微子类型的结果。几乎同时,西欧的LEP加速器上也得到了同样的结果。但是,标准模型的重要预言,t夸克(也称t层子)和希格斯粒子(它与粒子的质量来源有关),还没有观测到。这可能是因为现存加速器的能量还不够高,这就是更高能量的加速器SSC出台的直接原因。

SSC 是什么样子

现在的e⁺e⁻对撞机的最高能量为60GeV(1GeV=10⁹电子伏),尚未发现t夸克与希格斯粒子,表

表1 能量为TeV量级的对撞机的某些参数

对撞机名称 (单位)	TEVATRON (Fermilab)	HERA (DESY)	UNK (USSR)	LHC (CERN)	SSC (SSCL)
运行时间	1987	1990	1995	1996	1998
对撞粒子类型	P $\bar{P}$	eP	PP	PP eP	PP
最大束流能量(TeV)	0.9—1.0	e:0.026, P:0.82	3	8 e:0.05, P:8	20
亮度(10 ³⁰ cm ⁻² s ⁻¹)	0.5—1.0	15	400	3800 200	1000
周长(km)	6.28	6.336	20.772	26.659	87.120
对撞区数	4	3	4	7 3	4(开始时)
每束团粒子数(10 ¹⁰)	P:6, $\bar{P}$:2	e:3.48, P:10	2.8	10 e:8, P:30	0.75
每环每种束团数	3—6	220	8600	3564 540	17424
横向发射度($\pi 10^{-9}$ rad·m)	2.6	e:34.5(H), 6.9(V), P:9(H), 9(V)	2	0.15 e:26(H), 3.4(V), P:0.6(H), 0.6(V)	0.047
对撞点幅度函数(m)	0.72	e:2(H), 0.70(V), P:10(H), 1.0(V)	1	1 e:0.64(H), 0.2(V), P:45(H), 2.8(V)	0.5
束半径(10 ⁻⁶ m)	43	e:263(H), 69(V), P:293(H), 95(V)	80	21.3 230(H), 57(V)	4.8
二极磁铁数	774	e:400, P:416	2176	1760	7764
磁铁类型	超导(热铁)	e:c型, P:超导(冷铁)	超导	超导(冷铁)	超导
磁场峰值(T)	4.4	e:0.274 P:4.65	5	10	6.55

表2 SSC 注入器的主要参数

	高能增强器	中能增强器	低能增强器	质子直线
能量	2TeV	200GeV	1/11.1GeV	0.6/1.0GeV
粒子运行轨迹	双	单	单	—
磁铁类型	超导	常规	常规	常规
磁场峰值(T)	6.2	1.7	1.2/1.6	—
周长(km)	10.89	3.96	0.54	—
粒子束团间距(m)	5	5	5	—
发射度($\pi \times 10^{-6}$ m, rms)	0.8	0.7	0.6	<0.5
每束团粒子数(10^{10})	1	1	1	—

明这些粒子的质量很大,需要更高的能量才能产生。

据估计, t 夸克的质量为80—150GeV,希格斯粒子的质量为400GeV—1TeV, Z 玻色子的质量为2—10TeV,夸克的复合能量标度 $\Lambda = 10$ —40TeV。这些就是SSC能量指标被确定的依据。当然,SSC还可以产生其他新粒子,用于基本对称性破坏的研究。

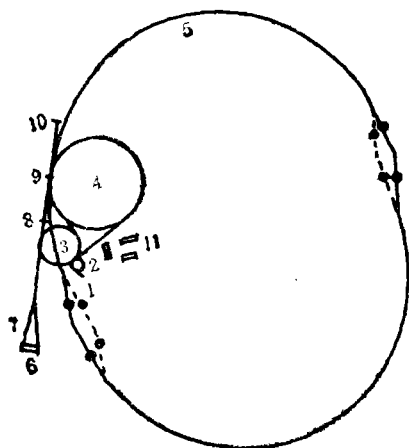


图1 SSC 总体布局

1. 质子直线加速器 2. 低能增强器 3. 中能增强器
4. 2TeV 高能增强器 5. 对撞机主环 6. 刻度大厅 7. 试验束 8. 束流吸收器 9. 束流注入和刮削器 10. 束流吸收器 11. 实验区建筑 ● 对撞点 ... 束流旁路区

另外,根据产生 Z' 玻色子、希格斯粒子、超对称粒子 gluino、以及 b 夸克的需要,把亮度定为 $L = 1$ — $5 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

有了质心系能量和亮度两个指标后,就可以具体设计加速器了。它的某些参数列于表1。表2是SSC注入器的主要参数。SSC比LEP大三倍,比TEVATRON大10倍,占地69平方公里。

1989年以来,SSC的某些参数虽不断有所修改,但总体布局(图1)、基本结构和大致尺寸并没有太大变化。

从图1中可知(1)具有“宝石”形束流旁路区的设计,其优点在于在对撞点上装好的探测器不需要移动,探测器可以多出一倍,且探测器检修和加速器运行互不干扰。(2)有试验束区。这是为了方便探测器刻度而设。其性能:强子束能量1—100GeV,流强 $10^{17}/\text{秒}$,粒子纯度比100:1。轻子与 π 的纯度比为1000:1,能量分辨率为0.33%。

为了说明建造SSC工作有多么艰巨,我们拿大家都熟悉的磁铁作一说明。SSC有B铁(偏转磁铁)7764块,需在1992年7月前全部制造出来并测试完毕。同年年底放入隧道并完成测试。在87公里的环形隧道上,B铁必须把质子保持在轨道主轴上,偏离不能大于1毫米。这样,B铁磁场的均匀度需好于万分之一。所有这些,确实是一项挑战性的工作。第一块B铁已经运到德克萨斯现场,开始测试。

探测器工程

加速器必须配上探测器,才能完成物理目标。探测器必须知道每一事例产生多少粒子,辨认出各粒子的种类,并测出其行迹坐标以及能量和动量。所以,探测设备是各种探测手段的复合体。

因粒子能量很高,穿透力很强,需要很强的磁场,很厚的量能器,所以规模很大。从对SSC提出的各种探测器看,其规模大致是:宽度高度各为15—30米,长度20—50米,重几万吨,造价达几亿美元的庞然大物,从任何标准看都是巨大的工程。

但是,其构造却是很精细的。最精细的部件可把粒子经过的位置坐标,测准到几微米的量级,粒子的飞行时间,测准到纳秒(10^{-9} 秒)甚至皮秒(10^{-12} 秒)的程度。因此,每一事例产生的信息量很大,需要上百万路的电子学读出系统,以及相应的数据采集,变换和贮存设备。要求计算机具有每秒执行几十亿条指令的能力。

在亮度 $L = 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的情况下,1秒可以产

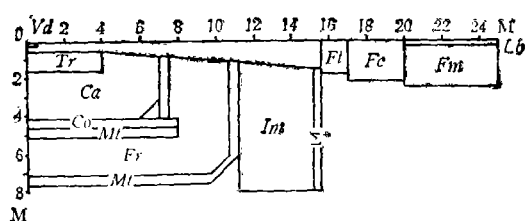


图2 大螺管磁场探测器

V_d :顶点探测器 T_r :径迹室 C_a :量能器 C_o :线圈 M : μ 子径迹室 F_c :厄铁 I_M :中间 μ 子磁环 F_i :前向径迹室 F_c :前向量热器 F_m :前向 μ 子磁环 L_b :低 β 四极铁

表3 大螺管磁场探测器的一些参数(不包括顶点探测器)

	螺管磁体	中心室	经迹室 主室	电磁量能器	强子	μ 子系统
覆盖系数 $ \eta $	—	<1.2	$1.2 < \eta < 3.0$	<5.5	<5.5	—
主要构成	线圈、厄铁、液氮	多丝室		吸收体(铀、铅、铁中选) 取样(闪烁体、气体、液氩、硅条中选)		常规磁化铁环 漂移管(大角) 正比管(前向)
单元数	—	122368	128000	104000	19100	1×10^7
磁场强度(T)	2	2	2	2(中心)	2(中心)	—
重量(吨)	16450	—	—	200(中心) 35(前向)	4800(中心) 965(前向)	13000

生 10^7 个事例。虽然只有很少的事例有用,但大通量的粒子会对某些探测部件(如多丝室、硅条、闪烁纤维等)造成损伤。所以,探测单元必须精细、时间响应快,还要耐辐射损伤,这也是一个技术性的挑战。

为 SSC 准备的探测器方案有八个之多,各探测器都有自己的特点,现以大螺管磁场探测器为例作一粗略说明。图2是它四分之一的剖面图,分大螺管磁探测器(八面体)、中间 μ 子磁环与前向谱仪(环状)三部分,大小及复盖立体角如图所示,一些参数列于表3。该探测器是个宽高各16米、长50米、重3万5千多吨、电子学90多万路的密集复杂系统。对它的设计、建造和运转都是个艰巨的工作。

规模空前的壮举

前面提到,建造 SSC 不是没有争议的。争议之一是说,它用的是旧技术,不如建 e^+e^- 直线对撞机所获得的能量全部用于粒子间的相互作用,而且清洁、规模小。反驳意见说,建 e^+e^- 直线对撞机有许多问题还在研究阶段。要在竞争中取胜,用旧技术快而保险。所

以,今后可能不会有人建造这么宏伟规模的加速器了。

争议之二说, t 夸克、希格斯粒子的质量都在 1 TeV 以下,西欧核子中心的 LHC 的 16 TeV 质子-质子对撞机完全可以产生,它比 SSC 早两年建成,这使 SSC 处于非常不利的地位。但坚持造 SSC 的人,把着眼点放到了更高的能量层次上,坚持质心系能量 40 TeV 不能降低。这样,不但可以大量产生 t 夸克、希格斯粒子,而且还可以研究超出标准模型的工作,为理论研究指出方向,使粒子物理的研究出现新的地平线。

争论之三说,60 亿美元经费不足。据说美国能源部已请求日本对 SSC 投资 20 亿美元,并担任主要管理任务,参加美日间最大的科学合作。类似的意图也传给了南朝鲜。

争议归争议,布什总统还是要 91 年财政年度为 SSC 拨款 3.18 亿美元。看来,未来的十年 SSC 是决意要唱重头大戏了。这样,政治家为美国争得了科技教育资源,企业家获得了巨额承包合同,而高能物理学家,则有可能促成粒子物理的突破性进展。

· 刊林 · (二) 《天文爱好者》

《天文爱好者》杂志是中国天文学会和北京天文馆主办的国内唯一的普及天文基本知识的期刊,创刊于 1958 年,国内外公开发行。

《天文爱好者》着力介绍天文学的基础知识,根据读者的特点,向读者介绍人类认识宇宙的历程和所取得的辉煌成就,探索宇宙的新技术和新手段,报导国内外天文学研究的新问题、新成果和新进展,帮助读者了解天文学家及爱好者在想什么、怎样想和怎样做,使读者在获得知识的同时,从中得到启发和教益。

《天文爱好者》格调高雅,风格独特,形式活泼,知识性强。她的读者对象主要是具有中学文化程度的天文爱好者、广大青少年、学生、中小学教师和干部等。

《天文爱好者》为 16 开 32 页双月刊,单价 0.90 元,邮发代号 2-352,各地邮局均可订阅。《天文爱好者》杂志社办理邮购(每本另加邮费 0.10 元)。地址:北京西直门外大街 138 号,邮政编码:100044。

《现代物理知识》第一届知识 竞赛试题(二)

(一) 1990 年三位诺贝尔物理奖获得者主要贡献是什么?他们的工作有什么积极意义?

(二) 为什么说夸克间的色相互作用随其距离的增大而增强?

(三) 德国天文学家沃尔夫提出的太阳黑子计数方法,究竟有什么实际意义?

(四) 我国近十年来在粒子加速器研制与应用方面取得哪些进展?今后的研究方向是什么?

(五) 大质量恒星爆发的机制是什么?



竞赛标记