

# 高能加速器上的试验束

张良生 李家才

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

试验束(test beam)是高能实验物理中具有广泛用途的实验设施,世界各主要高能物理实验室都建有若干条试验束。它一方面用于对高能加速器潜力的开发利用,另一方面也是为许多试验研究提供一个实验平台,例如为高能探测器提供作“刻度”用的束流。那么什么是刻度呢?打个比方,做一杆秤,把挂钩、秤杆、秤砣等连到一起成了秤的样子后,还并不能用,必须进一步作刻度:在秤杆上把斤两刻出来,才能知道是几斤几两。高能物理实验要用高能探测器来探测粒子,它不仅要能判别正负电子对撞产生的是什么粒子,还要能测定粒子的动量等物理量,为此就要用试验束来刻度:试验束提供已知动量的某种粒子的束流(例如 $\pi^+$ 束),让该粒子束射入某个待测探测器的模型,测量该模型输出的信号,例如输出脉冲的幅度,脉冲形成的时间等信息,称为探测器对于一定动量的某种粒子的“响应”;这就是高能探测器的刻度(也称“束流试验”)。这里还需说明,试验束与实验束(experimental beam line)是不同的,试验束是一个广谱的服务平台,除了提供刻度用的束流外,还可以有其他多种应用,例如检验加速器部件的性能或验证束流运输方法等。而实验束往往有着明确的物理目标,例如专门为了测某个共振散射道的微分截面等。

在20世纪80年代,我们的一些探测器模型是拿到日本去刻度的,那时我们没有高能加速器,只能这样做。现在BEPC已经运行了10多年,就不宜再把要刻度的探测器模型都拿到国外去了,所以我们有必要建立自己的试验束。

北京正负电子对撞机即将升级为BEPC II,亮度要提升两个数量级,相应地北京谱仪也要升级为BES III,以跟上BEPC II的高亮度,这是非常艰巨的任务,它非常有利于研究稀有事例以及作一些精细的测量。当然我们要在世界高能物理领域占有一席之地,除了增加数据的数量外,基本点还是要靠数据的质量。例如,有一个国际合作组在2.2GeV处发现了一个峰,另一个国际合作组在那里却没有发现峰,所以他们都期盼着BES探测器新的实验结果,以判断2.2GeV处究竟有没有峰。要是BES不能把

粒子质量等基本物理量测得很准,那就担当不起这样的重任,所以必须进行仔细的刻度。

举例来说,质心系能量3.1GeV的电子与正电子对撞产生 $J/\psi$ , $J/\psi$ 可能衰变成一个 $\rho$ 与一个 $\pi$ 介子( $\rho^0\pi^0$ , $\rho^-\pi^+$ 或 $\rho^+\pi^-$ ), $\rho$ 又马上衰变成一对 $\pi$ 介子( $\rho^0\rightarrow\pi^+\pi^-$ , $\rho^-\rightarrow\pi^-\pi^0$ , $\rho^+\rightarrow\pi^+\pi^0$ ), $\pi^0$ 再马上衰变为两个光子;所以北京谱仪实际记录到的可能是一个 $\pi^+$ ,一个 $\pi^-$ 和两个光子(少部分会是六个光子),这就是 $\rho\pi$ 事例(当然粒子可能有丢失,也可能有假的混进来)。“离线分析”时要把两个光子依据它们的动量(包括方向与大小)进行匹配,看是否由一个 $\pi^0$ 衰变而成;如果是,再把 $\pi^0$ 、 $\pi^+$ 、 $\pi^-$ 中任两个进行匹配,看能否匹配成一个 $\rho$ 与一个 $\pi$ ,同时得满足电荷、动量、能量守恒等要求,这样才能判断是否 $\rho\pi$ 事例(以区别于 $J/\psi$ 直接衰变成三个 $\pi$ 介子)。进一步研究会发现, $J/\psi$ 会衰变出许多 $\rho\pi$ 事例,而 $\psi(2S)$ 却很少衰变出 $\rho\pi$ ,这就很有研究价值。

所以必须对粒子判别得很准,不能把电子 $e$ 当成 $\pi$ ,把 $\pi$ 当成 $\mu$ ,就是常说的 $e/\pi$ 、 $\pi/\mu$ 分辨;同时要对粒子在探测器中运动的方向以及在探测器中沉积的能量等测定得很准;要做到这一点,相应地就对试验束提出了严格的要求。例如,要求试验束提供800MeV/c的 $\pi^+$ 粒子束,其动量的误差不超过1%,还要求一个脉冲中只有一个 $\pi^+$ 粒子等。

如何建试验束,国外通常用这样的办法:一种是先建一个专用的储存环,把加速器输出的具有一定动量的某种带电粒子注入储存环中,让它们在里面打转,需要时把里面的束流一点一点“削”出来,送到需要刻度的探测器模型去;第二种办法是在现有加速器的储存环中放一个“内靶”,让储存环内的束流的边沿部分的粒子打这个内靶,打靶产生的次级粒子引出储存环,经过一定的处理后送去作刻度用。很可惜的是,这两种办法我们都不能用。原因就是,第一种办法,要建专用的储存环,这太花钱;第二种办法,在储存环中放内靶,会影响我们当前的物理工作,所以只能另辟蹊径。

立足于现有条件,我们把北京正负电子对撞机电子直线加速器(BEPC Linac)输出的1.3GeV/c的

电子束引到 10 号厅,在那里打一个安置于空气中的碳或铍的“固定靶”,打靶产生许多种不同动量的高能次级粒子,例如光子,正负电子,正负  $\pi$  介子,质子与中子等;正负  $\pi$  介子还会衰变成正负  $\mu$  子与中微子。用这种打靶的办法,“本底”是非常大的,这是我们所遇到的特殊困难。为了压低本底,我们在“屏蔽”上下了大功夫,达到了预期的要求。

我们用一对四极磁铁(LQ1、LQ2)收集以大约 15 度“产生角”从靶射出的次级带电粒子,再用两块偏转磁铁(分析磁铁 D1、D2)及狭缝选出所需电荷(正或负)与所需动量的粒子。因为带电粒子切割磁力线运动,会受到洛仑兹力而偏转,依据分析磁铁所加电流的方向,可以选择正粒子或负粒子;改变电流的大小,可以改变所选择的动量。例如用分析磁铁 D1、D2 可以选出 800MeV/c 的正粒子,其中包含了 800MeV/c 的  $e^+$ 、 $\pi^+$  与质子。

当一个带电粒子的飞行速度超过光在媒质中的传播速度时,会在该媒质中发出切连科夫光,就像轮船在船头两边激起水浪一样。为此我们设计建立了一台“阈式切连科夫探测器”,其中充满压强为 0.02 帕的二氧化碳气;对我们所用的动量范围,只有电子  $e^-$  或正电子  $e^+$  才能在其中发出切连科夫光。所以一个正粒子在穿过阈式切连科夫探测器与闪烁计数器时,如果这两种探测器都有信号输出,说明这个粒子是  $e^+$ ,如果只是闪烁计数器有信号输出,那就是  $\pi^+$  或质子。用电子学方法,使阈式切连科夫探测器的输出信号与闪烁计数器的信号“符合”,就选出了  $e^+$ ;而把它们的信号“反符合”,就剔除了  $e^+$ ,只选出 800MeV/c 的  $\pi^+$  与质子。

进一步,把两个闪烁计数器一前一后地安置在束流线上,粒子穿过它们时会在两个闪烁计数器上分别产生出两个信号,这两个信号的时间差就基本上是粒子飞过两个闪烁计数器之间的路程所需的时间,这就是“飞行时间”法。实验时先把飞行时间信息纪录下来,然后在“离线分析”中判断。因为 800MeV/c 的质子比同样动量的  $\pi^+$  飞得慢的多,如果飞行时间超过一定值,就可判定为质子并加以剔除,最后选出的是 800MeV/c 的  $\pi^+$ 。

北京正负电子对撞机电子直线加速器(BEPC Linac)输出的 1.3GeV/c 的电子束是脉冲式的,每秒有 12.5 个脉冲,每个脉冲宽 2.5ns,每个脉冲大约有  $0.6 \times 10^{10} \sim 0.8 \times 10^{10}$  电子。经过上述各个步骤后,

流强大为降低,到要刻度的探测器模型处,每个脉冲中已基本上只会有一粒子,这是我们所希望的;但也仍然有一个脉冲中包含两个粒子或更多粒子的情况。而探测器无法区分在这样短的时间内(2.5ns)前后的几个粒子,会把它们当一个粒子看待,这样测得的响应就不对了,我们习惯地称这为“多粒子脉冲”问题。为了解决这个问题,我们进一步利用“多丝正比室”良好的“空间分辨”特性以及脉冲幅度特性(脉冲幅度与沉积能量成正比),因为两个粒子虽然在时间上处于同一个脉冲中,从空间上不可能走完全相同的路径,用“多丝正比室”可以测粒子穿过的位置(击中点),如果有两个粒子进入,就会有两个击中点,输出脉冲的幅度也会比一个粒子的要高,这就可以进一步判断是一个还是两个(多个)粒子,从而把多粒子脉冲剔除。

我们已经在 10 号厅建立了 3 条试验束线,分别称为 E1、E2、E3 束线,其中 E1 束专门提供给兄弟组作强流慢正电子研究用;E2 束可以引出 1.3GeV/c 的初级电子束或正电子束,并且预留了  $13 \times 4.5$  平方米的实验空间;E3 束即上面所描述的单粒子束,它的性能如下:

E3 束线主要性能参数:

可以用的粒子:  $e^\pm, \pi^\pm, p$

可用动量范围:  $e^\pm: 200\text{MeV}/c \sim 1.1\text{GeV}/c$  (可以提高至 1.2GeV/c 或更多)

$\pi^\pm: 400\text{MeV}/c \sim 900\text{MeV}/c$

$p: 500\text{MeV}/c \sim 1\text{GeV}/c$

中心动量的偏差:  $\Delta P_0/P_0 \leq 1\%$

粒子定位精度: 0.2~0.4 毫米

以上这些成果的取得是不容易的。例如为了中心动量的偏差  $\Delta P_0/P_0 \leq 1\%$ ,我们多次地测量与调整了 LQ1 与 LQ2 的磁场强度与比值, D1 与 D2 电流的比值,以及 D2 磁铁本身的前后位置与摆放角度;多次测量了 D2 磁铁的有效长度  $L$ , 磁场强度  $B$  以及粒子在其中的偏转角  $\theta$ , 精度都达到  $10^{-4}$ , 使动量精度好于 1%。为了更加可靠,我们又用了完全独立的另一种方法:电子与质子的飞行时间差,对上述动量值作了检验(还校正了质子在空气中的能量损失),证明上述  $\Delta P_0/P_0 \leq 1\%$  是可信的。

下面是世界上若干条试验束的参数。因为他们所用的加速器能量比较高,所以相应的动量范围也比较高。相比之下,我们试验束粒子的动量在 1GeV/c

# 超导电性的研究及应用

杨 军

(南京大学物理系 江苏 210093) (解放军理工大学理学院数理系光学教研室 南京 210007)

1911年,荷兰莱顿大学的卡茂林-昂尼斯(H. Kamerlingh Onnes)在实验中发现将汞冷却到绝对温度4.2K时( $-268.98^{\circ}\text{C}$ ,绝对温度零度相当于零下273摄氏度)其电阻突然消失并由此开始了超导研究,昂尼斯称这种处于超导状态的导体为超导体。昂尼斯也凭这一发现获得了1913年的诺贝尔物理学奖。

## 一、超导体的特性和分类

超导体电阻突然变为零的温度叫超导临界温度( $T_c$ )。目前已经发现的一半的金属元素和成百上千种合金与化合物都是超导体,但是他们的转变温度 $T_c$ 都较低。直到20世纪80年代中期 $T_c$ 也未能突破30K大关,人们把此类超导体称之为常规超导体。1986年以后,人们在多元的铜氧化物中发现了一系列 $T_c$ 超过30K的超导体,物理学家穆勒(Mueller)和伯诺兹(Bednorz)发现了高温铜氧化物超

导体 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ,其超导临界温度达40K。1987年2月,美国华裔科学家朱经武和中国科学家赵忠贤相继在钇 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 系材料上把超导临界温度提高到90K以上,液氮的禁区(77K)也奇迹般地被突破了。1987年底, $\text{Tl-Ba-Ca-Cu-O}$ 系材料又把临界超导温度的记录提高到125K。目前公认 $T_c$ 最高的材料 $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$ 临界温度达133K,加压力 $T_c$ 可达160K以上。这些材料绝大多数都可在液氮的条件下应用,人们将此类超导体称为高温超导体。从1986年至今国内外还有很多更高 $T_c$ 甚至接近室温的报道,但可惜现象都不稳定,样品难于重复或不能重复,被朱经武教授戏称为“不明超导体”(unidentified superconducting objects, USO)。

超导体的直流电阻率在一定的低温下突然消失,被称作零电阻效应。1933年,荷兰的迈斯纳和

左右,是很有用的。因为一般的通用谱仪要探测的粒子大多是在 $1\text{GeV}/c$ 左右,例如BELLE探测器就用了

$0.25\sim 1\text{GeV}/c$ 的粒子束作刻度。所以我们试验束的动量范围与世界上其他的试验束有较好的互补性。

设备名	可用粒子种类	可调动量范围	可用日期
FNAL-MTF	$p, K, \pi, \mu, e$	$5\sim 120\text{GeV}/c$	现在
SLAC-ESA	$\gamma, e^+, \text{强子}$	电子, 45GeV 以下 强子, 13GeV 以下	现在
SLAC-FTB		$5\sim 20\text{GeV}/c$	
Protvino 的高能物理所	强子, $e, \mu$	电子, 45GeV 以下 强子, 33~45GeV	2004 年开始
BNL-AGS B2	$e, p, K, \pi, \mu$	10GeV 以下	
DESY Test Beams 21, 22, 24	正负电子	$1\sim 6\text{GeV}/c$	现在
CERN Beam Lines	强子与电子	$350\text{GeV}/c$ 以下	现在
Frascati TBF	电子	$50\sim 750\text{MeV}/c$	现在
KEK Test Beams $\pi^2$ and T1 KEK-JHF-TB	$e, p, K, \pi, \mu$	$0.2\sim 4\text{GeV}/c$	2004 年底关闭
		$0.5\sim 10\text{GeV}/c$	计划中

我们的E3束已经为北京谱仪飞行时间探测器(TOF)模型提供了刻度用的束流,得到了有意义的结果;E1束也成功地提供给了强流慢正电子组用;E2束已经成功地为BES的 $\mu$ 探测器模型(RPC)幅照损伤研究提供了幅照条件;打靶产生的高能混合粒子幅照区为小麦等作物的育种研究提供了幅照

条件(与农科院的合作项目);用现有磁铁所产生的强磁场,还测量了强磁场对光电倍增管性能的影响等。

我们的试验束是目前国内唯一的高能粒子试验束,其性能在国际上也有互补性。我们衷心欢迎国内外用户来使用。