

工欲善其事必先利其器

——记1992诺贝尔物理奖获得者 乔治·夏帕克和他的多丝正比室

郑志鹏 王运永

(中国科学院高能物理研究所)

[摘要] 本文简要叙述了多丝正比室与漂移室的结构、性能和工作原理及在我国研究发展情况。

一、引言

法国物理学家乔治·夏帕克(George Charpak)教授荣获1992年诺贝尔物理奖。消息传出,引起了高能物理界的巨大反响。20多年前在粒子物理探测器的发展中一个划时代的成就终于取得了它应有的荣誉,夏帕克教授于1968年发明的多丝正比室及稍后发明的漂移室做为一个时代的标志被载入物理学发展史册。

正象乔治·夏帕克教授预言的那样:“事实将会证明,我的研究是革命性的”。这种新型探测器的出现打破了传统的实验物理技术的格局,使得物理学家有可能把快电子学及计算机技术等现代科技成果直接应用于实验物理当中,从而使数据信息的时间量度从毫秒(10^{-3} 秒)量级跃入毫微秒(10^{-9} 秒)量级。大大提高了粒子径迹探测的速度和精度以及本底的排斥能力,使物理学家们有可能发现和寻找反应截面极小的粒子并研究它们的物理特性。近年来两次诺贝尔物理奖的获得——1976年美籍华人物理学家丁肇中教授(发现第四个夸克C及 τ 组成的J粒子)和1984年意大利物理学家鲁比亚教授(发现中间矢量玻色子 W^{\pm} 和 Z^0)——都与这种新型探测器的使用分不开。

本世纪60年代末期,高能物理确实面临一场“危机”。随着一系列“共振态”的陆续发现,当年那种蓬勃发展的局面逐渐冷落下来。1964年M.盖耳曼提出了强子结构的夸克模型理论,不但能对当时已有的数以百计的“基本粒子”进行分类,而且预言了 Ω 粒子的存在。随着 Ω 粒子的发现,不少人认为无论在理论上和实验上,高能物理都已经很完美了,能做的事情不多了。高能物理的研究似乎到了尽头。

然而,做为探索物质结构深层次奥秘的高能物理研究是不会结束的,只不过受到认识论及实验手段的限制罢了。“工欲善其事必先利其器”,现实迫使人们去研究更有力的探测工具和方法,以期达到新的突破。乔治·夏帕克发明的多丝正比室和漂移室标志着这个时代的到来。

做为一种划时代的粒子探测器,多丝正比室和漂移室有哪些优越性呢?

1. 直流供电。与脉冲式高压供电的探测器如火花室不同,它在整个工作期间是连续灵敏的,因而能够同时确定入射粒子的空间位置和记录入射粒子的数目,所用直流高压电源也只有

本文于1992年11月10日收到

几千伏,容易制造。

2. 时间分辨率好。对于多丝正比室可以容易地做到30毫微秒左右,对于漂移室为几个毫微秒。因此它们允许的最高计数率可达 10^4 个/秒/丝(漂移室)到 10^6 个/秒/丝(多丝正比室)。可以在强入射束流或是高亮度的对撞机下工作。

3. 空间分辨好,对于多丝正比室入射粒子的空间位置由阳极丝的坐标确定。若阳极丝之间的距离为 S ,则每根阳极丝对其周围 $\pm 1/2S$ 的范围是灵敏的。因此定位的均方根误差近似地为 $\sigma = \pm (1/3)S$ 。通常 $S = 2\text{mm}$,在特殊应用中可采用 $S = 1\text{mm}$ 或更小。漂移室具有更高的定位精确度,对于尺寸较小的室,可做到几十微米,对于丝长2米以上,包含数千根丝的大系统也可做到200微米以下。

4. 探测效率高。对于最小电离粒子,探测效率可达99%以上,甚至可达100%。探测效率随所加高压的变化有“坪”效应,坪长可达数百伏。

5. 可以做得很“薄”。也就是说,每单位面积上引入的物质质量很少(约为 $20\text{mg}/\text{cm}^2$ 或更小),粒子穿过时能量损失和多次散射都很小,使之有很好的动量分辨率。

6. 能量损失 dE/dx 的线性响应较好,可以独立地提供一种粒子鉴别手段,如 e/π 分辨, κ/π 分辨等。

7. 探测器面积可以做得很大,阳极丝长度可达几米,丝数可达数万根,增加了探测立体角和探测取样的次数。

8. 可以在强磁场下工作(如几万高斯)性能基本上不受影响。

9. 可以做成各种不同的形状,如方形、扇形、圆柱形等以适应不同的实验需要,也可以在室内放入不同的气体或转换体,用以探测X射线、高能 γ 射线和中子等中性粒子。

多丝正比室与漂移室的优越性能倍受物理学家的青睐,各种研究小组雨后春笋般地在世界各地建立起来并迅速应用于高能物理实验当中,使得50年代至60年代在高能物理实验中占统治地位的气泡室和火花室、闪烁描述仪等相形见绌。这些在当年共振态的发现中曾经立过汗马功劳的探测器有的逐渐退出舞台。就连当年风靡一时的欧洲大泡室(BEBC)也已静静地站在CERN主楼外的草坪上供人参观。随着多丝正比室与漂移室的使用,高能物理取得一个又一个突破性进展。更高能量的加速器和对撞机以及与之配套的大型精密谱仪一个接一个地建立起来,20多年经久不衰并呈上升趋势。做为物理学前沿的高能物理研究——理论、实验、加速器等方面也出现一派欣欣向荣的景象。

二 多丝正比室的结构和工作原理

1. 多丝正比室的基本结构

多丝正比室的基本结构如图1所示。一个阳极丝平面放在两个与之平行等距的阴极平面之间,中间用绝缘框架分开。框架的一边有进气口,另一边有排气口,室内流过选定的气体,如氩气与甲烷或二氧化碳的混合气。室的上下平面用涤纶薄膜密封。阴极面加数千伏直流负高压,阳极丝处于零电位。电信号从阳极丝上引出,经放大、甄别成形及一系列逻辑电路送到计算机上进行数据处理。

阴极平面一般由直径100微米的铍-铜丝做成,每根丝上加一定的张力以平衡静电斥力的影响。丝的方向一般与阳极丝垂直。也有人用镀铝的尼龙薄膜或薄铝板或覆有铜皮的印刷电路

板做成。为了从阴极上取出信号以确定“雪崩”沿阳极丝发生的位置,可以把阴极丝分组或把阴极膜分成条状,利用雪崩重心法进行计算。

阳极平面是由平行等距的金属细丝做成,直径为10微米到30微米。最常用的是镀金钨丝。为了利用电荷分配法读出“雪崩”沿阳极丝产生的坐标,也可用具有一定电阻率的不锈钢丝。每根丝上加一定的张力,丝距一般为0.5到2mm。由于丝直径的不均匀性会导致气体放大倍数的不均匀,如对于丝距为2mm,直径为20微米的室来说,阳极丝直径变化1%,气体放大倍数变化10%左右。这对于含有成千上万根丝的大系统来说是很重要的。阳极丝间距的误差控制也是相当严格的,如果一根丝偏离了应在的位置,就会影响周围几根丝上的电荷密度,从而影响丝的气体放大倍数。一般说来丝距变化1%,气体放大倍数变化8%—15%。对于丝距为2mm的室来说,如果要求信号的均匀性好于10%,那么丝距的加工误差要小于 20μ 。

框架材料要求有好的电绝缘性能,一般用环氧树脂玻璃纤维板制成。阳极平面与阴极平面间的那层框架决定了室的间隙 L 。为了使输出信号幅度均匀保证可靠运转,对 L 的加工误差也要严格控制。一般说来, L 变化1%,幅度变化12%左右。

2. 多丝正比室的工作原理

多丝正比室是在正比计数管的基础上发展起来的。早在本世纪30年代正比计数管就在核探测方面有着广泛的应用。它具有脉冲幅度大、探测效率高、能量分辨好、允许高计数率等优点。为了制作大面积的探测系统,人们把大量的管子排列起来。这种系统太笨重,由于管壁的影响,空间定位精度也不高。能不能把各计数管的外壳去掉,制成在一个壳内包含有多根阳极丝、有公共阴极的“多丝正比计数器”呢?很早以前人们就有这种愿望,从1949到1956年多少实验物理学家曾做过巨大的努力。但是,一种传统的观念束缚着人们的手脚。人们一致认为如果把多根阳极丝彼此放得很近,各丝之间的电容耦合会使其中一根丝探测到的讯号串扰到邻近的几根丝上去。这样一来很多丝上都会有信号输出,无法确定入射粒子的确切位置。有人用信号发生器做过实验,当一根丝上注入一个快脉冲信号时,在相邻的丝上的确看到了极性相同的脉冲信号。基于这种认识,在制作多丝装置时不得不把各根阳极丝用一根或几根屏蔽丝隔离开来,既不能得到较高的空间分辨率又使装置过于复杂,限制了这一技术的发展。

乔治·夏帕克的历史性贡献在于提出了全新的理论。他指出,在上述多丝机构中基本的作用仍是探测器内部的气体放大现象而不是电容耦合。如果一个入射粒子在阳极丝附近引起气体放大而形成“雪崩”从而在阳极丝上建立起一个负脉冲,那么在相邻的所有电极上将感应一个正极性脉冲。这对任何大小的阳极丝距来说都是正确的。如果使用一个只对负脉冲灵敏的放大器,那么每根阳极丝就象一个独立的正比计数管一样起作用。它的灵敏区局限于两根丝距的一半。夏帕克的这一理论已被大量的实验所证实,成为多丝正比室发展的基础。

通过计算可以得到多丝正比室内电位、电场及阳极丝上电荷的分布。典型的电场等位面及电力线的分布如图2所示。

在远离阳极丝的地方电场基本上是均匀的,初级电离电子在它的作用下向阳极丝漂移。在阳极丝周围是呈辐射状的,遵从 $1/r$ 变化规律,和孤立的单根线电荷的场强分布是一致的,初级电离电子在它的作用下发生“雪崩”,形成气体放大。

多丝正比室阳极丝上脉冲信号建立的时间过程如图3所示。可以看出,在最初10毫微秒内感应的电荷同随后90毫微秒内感应的电荷一样大。为了取得好的时间分辨及可能的高计数率,

前端电子学仅仅选取尖锐上升部分,一般为20毫微秒。

如前所述,阳极丝之间也确实存在人们关心的“耦合脉冲”,但其幅度只是主脉冲的1/10左右。在阳极丝之间串联上小电阻可以使此效应减到最小。

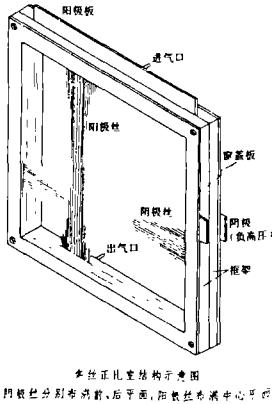


图1 多丝正比室的结构示意图

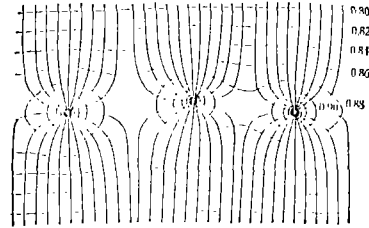


图2 多丝正比室内电场等位面的分布

三、漂移室的结构和工作原理

1. 漂移室的工作原理

在多丝正比室研制的同时夏帕克就指出:从带电粒子入射到室内到达阳极丝上给出信号这段时间,即初级电离电子向阳极丝的漂移时间,可以用来确定入射粒子的空间位置。它的精确度比多丝正比室高得多。1969年在杜布纳召开的一次国际会议上他展示了这种探测器——漂移室的原型,引起了与会者的极大关注。

漂移室中入射粒子是这样来定位的:当被测的带电粒子穿过漂移室时与室内气体分子相互作用使之电离产生电子、离子对。初级电离电子在室内电场的作用下向阳极丝漂移,而正离子以小得多的速度向阴极漂移。电离电子在到达阳极丝附近时产生“雪崩”,实现气体放大。从粒子穿入漂移室到阳极丝上给出脉冲信号这段时间——即漂移时间的大小与粒子入射点到阳极丝的距离密切相关。通过测量漂移时间,在已知漂移速度情况下就可知道入射粒子的位置。

在漂移室中被测粒子的入射时间称为“零时间”。一般由快速闪烁计数器或其他快响应探测元件给出。

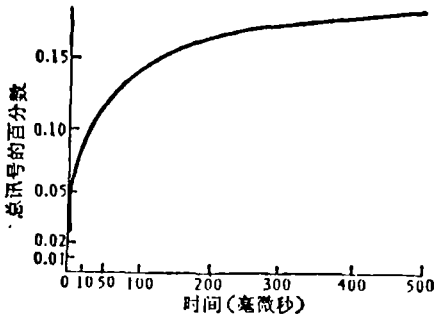
初级电子在漂移过程中的扩散是影响漂移室空间分辨的主要因素,选择适当的气体和漂移电场强度可以减小这种影响,当然漂移距离越短,此项误差越小。

电子的漂移速度与漂移电场的强度密切相关。如果室内的漂移电场是均匀的则漂移速度是个常数。利用简单的线性关系即可由所得的漂移时间求出入射位置。因此,在制造漂移室时总是尽可能地合理安排漂移单元中各电极的几何位置及所加的电压,使之尽可能产生较均匀的电场。但是如前所述,在阳极丝周围电场的分布服从 $1/r$ 变化,不可能是均匀的。为了取得不变的漂移速度,人们可以精心选择气体混合物,使得电子在场强高于某个临界值后漂移速度达到饱和。这样,只要漂移空间内漂移电场的值处处大于临界值就可以认为漂移速度是个常数。

漂移室除了定位之外,还通过测量入射粒子的能量损失 dE/dx 来鉴别粒子,这就要求输出脉冲幅度均匀稳定。但是混合气中各比分的变化、环境温度的变化、气体压力的变化都会带来测量误差,需要用计算机加以修正。

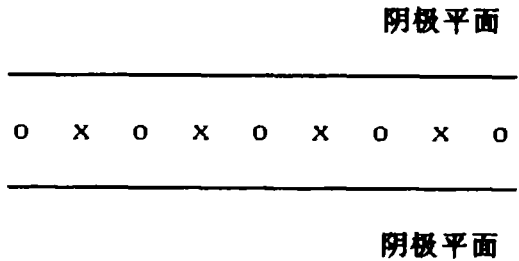
2 漂移室的基本结构

漂移室是目前实验物理中应用最广泛的探测器之一,单元结构,总体形状、尺寸各不相同。图4给出了基本结构的示意图。两个阴极平面之间有一个阳极丝平面,平面之间用绝缘框架隔开。阳极平面有阳极丝和电位丝,信号从阳极丝上取出。阴极平面加有负高压以便在室内形成一个漂移电场。为了使室内漂移电场尽可能均匀,阴极平面可以做成各种不同的形式并加上不同的电压值,亦可在漂移室内附加其他的丝或丝平面,用以给漂移电场成形。



脉冲建立时间关系图^(*). 室的参数为: 阳极丝直径 $d = 20$ 微米, 间隙 $L = 7$ 毫米, 阳极丝间距 $S = 2$ 毫米, 工作电压 $V_0 = 3000$ 伏.

图3 多丝正比室脉冲信号的时间关系



X: 阳极丝
O: 电位丝

图4 漂移室结构示意图

电位丝上一般加有绝对值小于阴极电压的负电压,它在漂移室中有特殊作用:首先是用来划分各个漂移区(称为漂移单元)的边界,使之分别属于不同的阳极丝;其次是用来消除两根阳极丝之间电场为零的区域,改善空间分辨率。还可以调节上面所加电压的大小有效地控制阳极丝的增益,使脉冲幅度均匀一致。

漂移室是通过测量漂移时间来定位的。但入射粒子是从阳极丝的左边还是从右边入射还需要加以辨认。常用的有双阳极丝法,它们分别记录左边或右边入射的粒子,也可以用两个等价的漂移室一前一后彼此错开半个阳极丝距,利用两个漂移室测得的漂移时间差进行左右分辨。在高能物理实验所用的大型漂移室中,常用多阳极丝单元,单元中的各阳极丝分别向左或向右偏离一个小量。利用它们探测到的时间关系可以更方便地进行左右分辨。

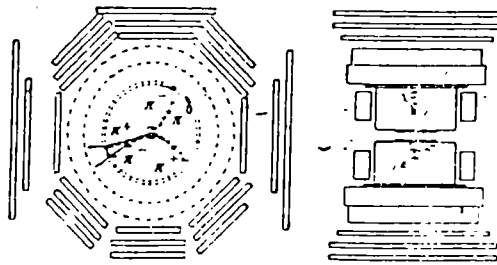
四、多丝正比室和漂移室在我国的研究

多丝正比室与漂移室的出现立即引起我国物理学界特别是高能物理与核物理学界的重视。从1973年开始我国先后有中科院的原子能研究所、高能物理研究所、中国科技大学等单位开展了这方面的研究。高能所在1973年底成立了专门的研究小组,1975年研制出第一个多丝正比室,1976年又研制出我国第一个漂移室并进行了工作原理、加工工艺、单元结构、主要性能的研究,及时赶上了世界先进水平。在绝缘材料,阳、阴极丝,封装材料及快电子学和计算机在线数据获取等方面也做了大量工作。其后,各种类型的特别是应用于高能物理、核物理、天体物

理、宇宙线物理、核医学及同步辐射实验的多丝正比室和漂移室在我国特别是高能物理研究所更加广泛深入地开展起来。在前任所长张文裕教授和叶铭汉教授的指导和关怀下,1982年第一本专著《多丝正比室与漂移室》问世。

随着北京正负电子对撞机上北京谱仪的建造,漂移室的研究在高能所进入一个新的时期,十余种漂移室模型迅速制成并用它们做了诸如:气体增益、漂移速度、电场结构、寿命、张力分布、空间分辨、时间分辨、效率、能量分辨以及大室结构、定位子、气体、信号引出、高压等一系列基础研究和工艺探索,取得了大批实验成果。其中“漂移室退化效应的研究”、“一个均匀电场漂移室和电子漂移速度的测量”等多篇文章还被国外杂志转载。与此同时,在读出电子学系统、计算机在线数据获取和离线分析等方面均取得了很大成绩。

北京谱仪主漂移室的建成标志着我国在漂移室的研制和应用方面跨入国际先进水平。这是一个长2.3米,直径2.0米的大型精密圆柱形漂移室,共有10层702个漂移单元,总丝数为19380根,自重1.5吨。其主要性能指标为:单丝空间分辨: $\sigma_x = 200 - 250 \mu$,单丝轴向分辨: $\sigma_z = 2.3 - 2.5 \text{ mm}$,动量分辨: $(\Delta P_T / P_T)^2 = (0.8 P_T)^2 a + (1.4\%)^2$,单丝效率:95%, dE/dX 能量分辨: $\sigma_N / E_{mp} = 8.7\%$,立体角复盖(第2层): $95\% \times 4\pi$ 。该漂移室已稳定运转了近4年,其性能指标和稳定性在世界上均属第一流。利用北京谱仪取得的数据,开展了 $J/\psi, \psi', \tau, D_s$ 物理研究,取得举世公认的成果。可以说,高能所在漂移室的设计、制作和性能研究等方面可与世界上的大实验室相匹配。图5给出北京谱仪中, J/ψ 衰变到 $\omega\pi^+\pi^-$ 事例在主漂移室中的径迹分布。



$J/\psi \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$ 的事例图

图5 北京谱仪中 $J/\psi \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$ 事例图

随着北京正负电子对撞机和北京谱仪的改进,一个新的、性能更先进、稳定性更好的大型精密漂移室正在设计之中。

68岁的夏帕克是法国巴黎物理化学高等学院的教授,从1959年起即在欧洲核子研究中心(CERN)致力于粒子探测器的研究。退休之后,仍在世界实验室从事他毕生热爱的事业——研制新型粒子探测器。这位满头白发、面目慈祥的老人将近1.90米的身材,衣着随便,平易近人,说话颇具幽默感。夏帕克教授对中国人民有着浓厚的感情,1975年他曾随CERN代表团来访。行前,他苦学中文数月,在飞机上还坚持听录音,在做学术报告时竟用中文演讲达3分钟之久。他的报告给人们留下了极深的印象。

SHARPENING TOOLS AND GETTING EXCELLENT WORK —GEORGE CHARPARK, THE 1992' s NOBEL PRIZE WINNER IN PHYSICS AND HIS MULTIWIRE PROPORTIONAL CHAMBER

Zheng Zhipeng Wang Yunyong

(*Institute of High Energy physics, Academia Sinica*)

Abstract

The construction, performances and working principle of multiwire proportional chambers and drift chambers have been described in this paper. Their development in china has been introduced also.

《自然科学进展——国家重点实验室通讯》简介

《自然科学进展——国家重点实验室通讯》是国家自然科学基金委员会受国家计划委员会委托主办的综合性学术刊物。1991年创刊(中、英文版双月刊)由科学出版社出版。中文版:全国各地邮局公开发行;英文版:1993年起改由英国 Taylor & Francis Ltd 国外发行。

为适应我国科技发展方针,加强基础和应用研究,促进科学技术探索,解决国家重大科学问题并在主要学科前沿和有广泛应用前景的学科领域内开展学术交流,使国家重点实验室覆盖着的自然科学各领域研究成果,和其他实验室的优秀论文及时发表,参予国际和国内学术交流,经国家科委批准创办了该刊。

该刊设有专题评选(Review Articles)、学术论文(Scientific Papers)、研究简报(Research Notes)、实验室通讯(Laboratory Communication)以及书评(Book Review)等栏目。

为保证该刊的学术水平和办刊方向,由国家自然科学基金委员会聘请国内知名科学家21人组成编辑委员会,(其中有唐敖庆等中科院学部委员21人)主编为中科院主席团委员、学部委员、师昌绪教授,并逐步充实了素质较高的编辑部。两年来我国各学科的带头人、各国家重点实验室负责人,特别是不少中科院学部委员先后为该刊亲自撰稿者已达81人次。从而显示出该刊的高水平,在一定程度上反映了我国自然科学的水平和现状,赢得了国内外一致的好评。

由上可知:《自然科学进展》确实是我国综合性学术期刊的新秀。有其独特的历史背景和学术水平,受到了国内外学术界的注意。很适于自然科学界从事研究工作的科学家及大专院校师生们阅读,并作为各科研图书馆藏书,是一种值得向读者推荐的学术刊物。

(杨宜年 供稿)