

气体探测器的最新应用

张玉成

(中国科学院近代物理研究所)

摘要: 本文讨论了气体探测器在下述领域的最新应用: 放射性痕量元素的二维图像; 用 X 射线衍射研究晶体结构; 工业射线照相法; 用核扩散的射线照相; 契伦柯夫环探测器; 流光管量热计; 渡越辐射测量; 用作电磁量热计的高密度显像室; 用作探测契伦柯夫环的显像室。

一、放射性痕量元素的二维图像

绝大多数生物制品都能够用放射性痕量元素进行选择标记。这些放射性元素是 β 电子发射体, 而 β 电子能量从几个 KeV 到几个 MeV。对于象 ^3H 、 ^{14}H 、 ^{32}P 和 ^{131}I 等这类同位素而言, 能够对分子中相应的原子进行置换。依据它们分布的一维或二维图像, 就能得到有关制品组分分布的信息, 所用方法类似于常规色谱技术。如果它们能够强致电离, 发射出的电子用正比室很容易进行探测和定位。每次蜕变都可以逐个记录, 这种类型的探测器不会遇到照相方法中固有的限制。照相方法的动态范围有限, 并且需要长的曝光

时间。用记录作为时间函数的数据的方法, 还可以研究动态现象。另外, 以数字方式拥有数据的能力, 还可以使用数学过滤程序, 以便增加对比度和给出噪声的随机特性。Pisa 大学的一个小组对几个单细胞层, 进行了数字式自动放射性照相。实验结果充分证明了这种方法的巨大优点。另外必须指出的是, 这种方法是非破坏性的, 测量后的细胞灶仍能繁殖, 这在生物测量中是难能可贵的。

使用象 ^{14}C 这类高能电子发射体进行标记时, 能够得到化合物的高分辨显像。由于采用多间隙室进行测量, 就克服了过去常规方法存在的与高能电子射程有关的问题。待研究的生物制品, 可以直接放在第二个电极上, 也可以通过一个充气薄窗再置于该电极

长期以来面临着另一个挑战, 那就是寻找强子物理的初步描述。如果欧洲物理学家能够千方百计地致力于建造他们至今尚未开始设计的装置, 那末他们才有可能为实现上述目标作出贡献。

目前国际核物理学界的同行, 正在寄厚望于刚刚建成和正在建造中的加速器。他们热切希望能够在这些加速器上尽快开展工作, 以使用先进的束流和设备为推动核物理学的进展作出独特的贡献。

参考文献

1. W. Panofsky, in Proceedings of the

14th International Conference on High Energy Physics (Vienna 1968)

2. J. Aubert et al., Nucl. Phys. B259 (1985) 189
3. B. Frois et al., Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 37 (1987) 133
4. B. Frois et al., Comments Nucl. Part. Phys. 18 (1989) 307
5. L. Frankfurt et al., Phys. Rep. 160 (1988) 235
6. J. Ashman et al., Phys. Lett. B206 (1988) 354

上。在电场中射出的电子能够穿过整个结构,而且可以任何角度穿过,并产生径迹。由于在前置放大体积中存在指数雪崩放大特性,只有紧靠发射原点的径迹初始部分才被充分放大和定位。因此不管标记物发射的电子在气体中有几厘米的射程,我们获得的定位精度总能达到亚毫米量级⁽¹⁾。

二、用X射线衍射研究晶体结构

单能X射线在晶体上的衍射图案决定于电子组态。许多蛋白质和有机微分子,都能够得到它们的晶体形式,然后就可以借助X射线衍射进行研究。这只是从原则上说的,实际上由于它们的结构过于复杂,用传统方法进行这样的衍射谱探测,通常需经几百次曝光并且要在各种角度和能量下进行。这种情况不只出现在有机分子的情况,有时对于含有某些原子的分子的情况也是如此。随着专门的研究中心的建立,随着电子加速器发射的同步辐射光的应用,已经逐渐可以得到高准直的单能X射线束。特别是制成了象正比室这样的探测器,这一切条件的具备,就使上面分析的X射线衍射分析研究晶体结构,能够自动进行了。

现在研制出一种精心设计的可变体积的球形正比室,已经成功地用于衍射研究。该探测系统建于CERN,而用于Orsay的LAL。多丝正比室特别适用于软X射线的定位。但是能量为8到10KeV时,只有明显改变厚度才能得到好的探测效率。但是研究感兴趣的在晶体上发生宽角衍射的情况下,改变结构就会引起平行误差。这个问题已经由G. Charpak等人成功地解决了。他们把上述改变和具有径向场结构的漂移区结合起来,使用具有球形截面的电极,中心处放置晶体。在电场方向上的光致电离产生电荷,电荷导向常规MWPC形成的探测结构⁽²⁾。准直后的X射线束撞击晶体,晶体装在测向器上。用上述

球形室探测到双向衍射图案。获取系统收集到的数据,先记录在磁带上然后进行分析。对于晶体的大量的角度位置,都要测定衍射的位置和强度,这就是分析的目的。把上述信息贮存起来,再进行综合分析就可以最后确定宏观分子的结构。使用这套装置,已经成功地分析了质量约10,000amu的蛋白质的结构。

三、工业射线照相法

对于工业应用而言,只要研制出能够有效探测几百KeV硬X射线的正比室,就能找到宽阔的应用之路了。从理论上说,早就制成了高密度正比室或HPC,似乎已能满足需要了。但从实际上说,结构过于复杂,成本过高,距离大规模有商业和实用价值的应用工具的要求就还很远,这是七十年代的情况。最近几年已经取得明显进展。

J. Dorion等人已于1987年精心研究出解决上述难题的方案⁽³⁾。他们就用普通的多丝室,但是阴极用金属变换薄板构成,这薄板要足够薄,以便允许X射线变换产生的光电子能够逸出并且电离室中的气体。基本思路是用得到的X射线束撞击处于很小角度的可变换薄板,这样做的结果是尽管降低了角度可接受范围,但是却提高了关键性的效率。然后使产生器-探测器与待研究客体作相对移动,就可以进行放射线照相了。他们已经把这套装置成功地用于工业射线照相了。

四、用核扩散的射线照相

快质子射线照相的第一次应用就与粒子物理有关。根据简单的核扩散实验,碰撞产生的相互作用径迹和碎片,可以用一组薄的MWPC进行探测。通过弹道分析就可能重建相互作用的顶点,根据这些相互作用点的空间分布,就可以分析客体的照相密度了。G. Charpak等据此研制出用于医学领域的三

维断层照相,从1981年至今早已名闻遐迩了⁽⁴⁾。与计算机控制的断层X射线照相法CAT相比,上述方法的主要特点在于,它并没有一个优先选用的测量平面,因此整个的显像密度成像在一次曝光中得到。但是,它却能够对象铀铸锭这样的密度很大并且厚重的固体进行照相。这种待研究客体对X射线并不透明,这就为大量的有工业实践价值的应用开拓出一条成功之路。在CEN-Saclay已经成功地进行了断层照相。该台装置的数据获取速度高达每秒约100,000个事件,这就允许直接进行动态研究或进行同步数据获取。

五、契伦柯夫环探测器

最近已经研制出具有很高增益的多丝室,所用气体为光子灵敏气体的混合物。利用这种多丝室能够探查快粒子的基本特性从而进行粒子鉴别。如果用 β 表示粒子的速度与光速的比值,用 n 表示在该透明介质中的折射系数;当 $\beta < 1/n$ 时,在与粒子运动方向成角度 $\theta = \arccos(1/\beta n)$ 的方向上,由于契伦柯夫效应发射出光子。这个光锥被一个半径 R_{mi} 的球形镜反射,就在显像平面上形成一个半径 $r = (R/2)\tan\theta$ 的圆环。然后测量这个环的半径就可以给出原来粒子的速度了。契伦柯夫效应发射的光子覆盖整个频率范围,但是只在辐射器透明的范围内它们才能被探测。在高能时,要用低折射系数的气体辐射器。对于每个径迹而言,被探测到的光子数目很少,通常只有四到五个。上述方法过去很少使用,主要原因是大大限制了可接受的光频率。近几年来该法迅速时髦,主要原因是已经研制出光子灵敏的正比室,明显加大了实验装置的立体角。由于没有气体在可见光波长区具有致电离阈,探测是在紫外光区完成的。当然事先要选好适用的辐射介质和用于把辐射器与探测器隔离开的窗的类型。必须记住,在高于致电离阈时气体的

量子效率很高,可达50%到60%。而用常规光阴极时只不过10%到20%。改进是惊人的。

根据上述原理制出的粒子鉴别装置,其实际结构主要决定于探测和定位的能力。在多丝室中,在气体中只产生一些单个的光电子,这就要求高增益(10^5 或更高)的光子灵敏气体。在雪崩倍增过程中光子的发射和复合,并由此可见产生次级光子就显得十分重要。在普通MWPC中,这类过程在增益高于 10^4 时出现,这常常导致不稳定或放电。G. Charpak等研制出新式的多级正比室,并采用了平行平板前放单元⁽⁵⁾。该室装有一组平行的半透明栅,施加适当的偏压之后,就把室分成三个电场区。在第一个区域与入射窗相连,辐射器发射的紫外光子电离光子灵敏气体的分子。上述过程产生的光电子进入第二个区域,由于高电场的存在通过雪崩,它们约放大 10^4 倍。上述雪崩产生的电子的一部分(约10%)进入第三个区域,然后连续进入MWPC,接着发生与前述一致的过程并进行放大和探测。上述的两个放大结构单元几乎是相互完全无关的,两者的总体增益很高,几乎可达 10^7 ,而又没有次级限制现象,这是很有吸引力的。

用光子灵敏混合气体能够得到高的增益,而所用的探测器能够使几何条件这样安置,以便把雪崩期间射出的光子所引起的次级效应减至最小。这是可以做到的。例如把每个阳极丝密封在某个阴极中制成精巧的金属管,在紧靠变换区处装有纵向窗。适当选择电位使光电子最有效地趋向放大丝,另外该丝还要使雪崩中发射的次级光子的复合降低。对于契伦柯夫光子的转换和探测来说,并不需要快的时间分辨,所用的几何条件类似于TPC。在气体中产生的光电子,在均匀场中漂向放大器。阳极丝旁漂移时间的测量提供了变换点的坐标。在CERN已经研制出用于DELPHI实验的大契伦柯夫环显像器。这个装置在大的动量范围和大的立体角范围内,

都达到了最佳鉴别能力。美中不足的是，由于漂移时间长，对于实验中所用的探测器约为 $20\mu\text{s}$ ，这就自然限制了时间分辨和计数率能力。

六、流光管量热计

量热学法可以用来进行带电粒子和中性辐射的鉴别。这种方法主要是先通过稠密材料的交替层，把入射粒子的全部能量转换成可探测的信号，然后通过气体中的显示器测量所产生的电离。尽管常规正比室能够用作电离探测器，E. J. Iarocci等人还是专门研制出特殊的装置，使之具有大的灵敏体积⁽⁶⁾。这个装置由一些有限的流光管组成。每个灵敏组件都由穿过塑料单元中心的拉紧的阳极丝组成，这些塑料单元具有方形截面，并且外面涂有石蜡导热层。用塑料冲压制成在数米范围内有大量的相邻而又间隔开的小室。由于这些阴极的表面电阻高，同时还采用了大直径（50到 $60\mu\text{m}$ ）的阳极丝，这就使该装置的工作方式超出正比区而达到有限的流光。由于此时的放大倍数约高达 10^7 — 10^8 ，这种工作方式的优点就是能够不用放大就直接探测，不管初始电离如何都能得到相同高度的脉冲。对于量热学方法来说，这个优点是最有吸引力的。事实上，探测器记录到的信号首先决定于显示器中径迹的总数，而不是决定于它们的能量丢失。因此，由于慢电子的发射所引起的色散将减至最小。第一个大的流光管量热计已经建成并装在Mont Blanc tunnel中应用至今，曾经用它测定过质子的寿命。在LEP也建成了另一台类似装置，并用于多种测量。

七、渡越辐射测量

当相对论粒子渡越具有不同介电常数的两种物质的介面时，就会发射高能光子，通常是软X射线。这种现象称为渡越辐射。通

过渡越辐射的探测，也可以进行粒子鉴别。这个过程发射的光子谱在某能量时会出现一个明确的峰。这个能量决定于粒子的劳伦兹因子 γ ，其数值随速度迅速增加。由于通过介面的发射几率小，辐射器要用几百块轻材料（聚乙烯、锂）薄板堆积而成，各薄板间留有小间隙以便把光子的自吸收减至最小。这样一来，使用一个或多个多丝室就能以很高的效率进行探测。这些正比室是工作在软X射线区，并且充氩气。这类装置的粒子鉴别能力随 γ 的增加而提高。这与契伦柯夫环显像的情况不同；也不同于用各种能量丢失进行粒子鉴别的方法，因为在相对论能量时达到饱和。

八、用作电磁量热计的高密度显像室

普通的充气电离室本身不能直接用于探测强子显示器和电磁显示器，这是因为它们的质量低。但是，这样的室可以用作量热计中的灵敏组件，用于代替重的变换层。显然高密度弹道室是一种更好的手段。这种室最早由Charpak建造，用于在探测500KeV的 γ 射线时作为正电子快门，后来有人把它用于显示器探测⁽⁷⁾。这类室都有一个变换区，该区由一些薄金属板组成，这些板相互平行但又相互隔离，在气体介质中开出一条隧道，并且所加的电位允许进行收集和使致电离电子漂向倍增单元（一个MWPC）。这个探测器称为高密度正比室（HPC），它的能量分辨很好，而定位能力通常受到电场分辨的限制。

P. Astier等人于1989年报导⁽⁸⁾，他们用雪崩室代替正比室的方法制成了HPC显像室，并用于光探测。用该样机得到了两个显像的例子，分别是电磁显示器和强子相互作用的有关例证。由测量结果可以看到，这两种类型的相互作用是不同的，这也表明这个显像室的潜力很大。

当然显像室在目前还有不足之处,例如在把数据进行数字化和记录的时候,就会遇到严重困难。目前基于上述原理研制的商业上可得到的系统,数据获取率限制在50Hz,其中空间的组元可能提供每秒几百次显像。但是,应该记住上述限制只适用于显像获取系统,电离室本身还是和普通多丝室同样的快。如果采用多级结构,还能探查在气体中的延迟,这就允许只提取理想事件的有关信息。这个室和这个光放大器还能接受外来信号的指令,决定是否真正投入使用。现在已经开始考虑如何在高流强条件下使用这类显像室了。

九、用作探测契伦柯夫环的显像室

在探测契伦柯夫环中使用电场方法受到限制。当事件是由大量的光子或多重径迹组成时,要想精确重建这类事件就会遇到困难。显然采用光学方法就不会遇到上述困难。这种光学方法通常是二维的,有大量的分辨单元。据G. Charpak等⁽⁹⁾和A. Breskin等⁽¹⁰⁾在1988年报导,他们最近已经研制出基于显像室原理的契伦柯夫显像器的样机。这个探测器是多级室,有高增益的能力,并且在漂移区一端有脉冲门用于选择事件。该室的最后一个间隙是平行平板单元,用于产生显像,然后就用光放大器进行分析。为了减小带电粒子通过整个室时由于电离的直接丢失的影响,探测器通常在低气压下工作。同时还要求在含有TMAE的混合物中得到高的增益。

在快带电粒子束流中,用显像室记录了契伦柯夫环。平均群集数为10,每个群集相

当于一个待探测的光子。定位精度约2mm。

相同类型的探测器也已用于检测在固体或液体辐射器中契伦柯夫效应发射的光子数。在显像平面中的形状和位置,从理论上说由此可以导出 γ 射线的入射角。多级室也能工作在大气压下,具体情况Y. Giomataris等在1988年已有报导。

我们已经描述了多丝正比室和多种其它结构的气体探测器的简单原理和主要应用。从本文介绍的九个方面的应用,就可以看出它们在粒子物理和核物理研究中的重要作用。从近几年的发展速度和涉及领域来看,气体探测器的应用进展的确日新月异,而未来前景更是充满着吸引力。

参考文献

1. G. Petersen et al., Nucl. Instrum. Meth. 176 (1980) 67
2. R. Kahn et al., Nucl. Instrum. Meth. 201 (1982) 203
3. J. Dorion et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-34 (1987) 442
4. G. Charpak et al., Progr. Nucl. Med. 7 (1981) 164
5. G. Charpak et al., Phys. Lett. 78B (1978) 523
6. E. Iarocci, Nucl. Instrum. Meth. 217 (1983) 30
7. H. Fisher et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-27 (1980) 38
8. P. Astier et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-36 (1989) 300
9. G. Charpak et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-35 (1988) 237
10. A. Breskin et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-35 (1988) 404