

阻性板室气体粒子探测器 原理及其应用

刘啸天 孙勇杰

(中国科学技术大学近代物理系 230026;核探测与核电子学国家重点实验室 230026)

运行于欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)是当今世界上最大的粒子物理实验设施。自2009年正式运行取数以来,已为粒子物理研究积累了海量实验数据,并于2012年发现了希格斯粒子(Higgs),成功证明了希格斯机制赋予基本粒子质量的正确性。

中国合作组参与了LHC上所有的大型实验,并承担了众多粒子探测器的建造与升级工作,其中就包括阻性板室气体探测器(Resistive Plate Chamber,下文简称RPC)。RPC作为一类工艺简单、结构多样、造价低廉的粒子探测器,除了在LHC的各子实验中均有应用外,还广泛应用于其他粒子物理实验。此外,易于大型化的特点也让RPC技术扩散到了粒子物理研究之外的领域。

RPC结构简洁,原理清晰,是一个展示粒子探测原理,特别是气体粒子探测器工作原理的理想模型。本文便以RPC为例,为大家介绍粒子物理学家们究竟如何“捕捉”看不见摸不着的微观粒子的蛛丝马迹。

1. 怎么“看到”微观粒子?

物理学是一门实验科学,首要的便是对各种物理量进行观测。对于宏观物体,我们看得到位置,测得了时间,确定相关物理量没有原则上的困难。对于微小的物体,光学显微镜的发明突破了人眼的极限,让我们得以观测微米量级的物体。电子显微镜克服了可见光衍射的难题,将观测极限推进到了

纳米量级。而扫描隧道显微镜和原子力显微镜等的出现,让直接观测单个原子不再是梦想。但是对于比原子还小的粒子呢?如果它们还很难稳定地、静止地存在(例如永远以光速运动的光子),该如何获得它们的信息?我们需要重新审视观测的本质。实际上,观测必须与被观测对象发生相互作用(四种基本相互作用:强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用以及引力相互作用)才能完成。我们之所以能看到宏观物体,是因为宏观物体与眼睛交换可见光光子。同样的,上面提到不同原理的显微镜,电子显微镜中的电子束与被观测物体交换光子、扫描隧道显微镜中的隧穿电流电子与材料原子交换光子、原子力显微镜中的探针与材料之间交换光子,本质上都是发生了电磁相互作用(交换光子)。如此看来,如果想要观测微观粒子,就需要让它与物质发生相互作用。那么,微观粒子与物质的相互作用究竟是怎样的呢?

携带能量的高速微观粒子入射物质时会与构成物质的原子发生碰撞。对于带电粒子,会引起核外电子的激发或者电离,也会与原子核产生散射,造成入射粒子偏转、辐射光子,相应原子核也会发生反冲。如果入射粒子是介子或重子,还有可能与原子发生强相互作用散射、被原子核俘获发生核反应。对于不带电的光子,除了会被核外电子吸收发生光电效应或者散射发生康普顿效应,能量足够高的光子也可能在原子核场的诱导下“衰变”成正负电子对。以上各个的过程,往往会在材料中级联发

生,最终效果是入射粒子损失能量,沉积在材料中。这部分能量,大部分转化成热能散在材料中,少部分产生了光子或电离电荷。如果我们有办法获得这部分光子或电离电荷的信息,就能对入射粒子的相关情况有所了解。

以气体介质为例,高速微观粒子入射气体沉积能量,会在粒子经过的路径附近形成电子离子对。如何才能“读出”这些电子离子对的相关信息呢?我们面临两方面的困难:其一,这些电子离子对处于气体内部,我们很难直接对其进行测量;其二,由于气体本身很稀薄,粒子在气体中损失的能量极为有限,所以产生的电子离子对数量较少,对极微量电荷进行测量也是不小的挑战。看来我们需要将电荷信息转化成电子设备能够处理的电信号并且放大信号。一种一举两得的办法是将气体置于静电场中。在电场的作用下,入射粒子激发的电子离子对将分别向阳极阴极漂移,定向运动的电荷可以在周围的金属电极上产生感应电流,从这些电极上即可读出电子学信号。如果外加电场足够强,这些漂移的电子在与气体分子碰撞的间隙就能加速到很高的能量,足以在下次碰撞时让气体分子电离形成次级电子离子对。这些新的电子被电场加速又与其他分子碰撞形成电子离子对,从而将这个过程持续下去。气体中的电子离子数目急剧增加,科学家们形象地将这一过程称为“雪崩”。雪崩将原本较少的电荷量放大,使得读出信号有显著的强度,用于电子设备的处理。

2. 平行板型气体探测器

外加静电场的气体介质构成了气体粒子探测器的基本模型,其中最简单的便是平行板型结构,如图1所示。相互平行的金属极板之间填充适量的工作气体,极板之间加上一定电压,这样便在中间的气隙中形成匀强电场。当有粒子穿过气隙时,电离产生的电子离子对在电场的作用下漂移并发生雪崩,极板上产生感应信号。从阳极板或阴极板都

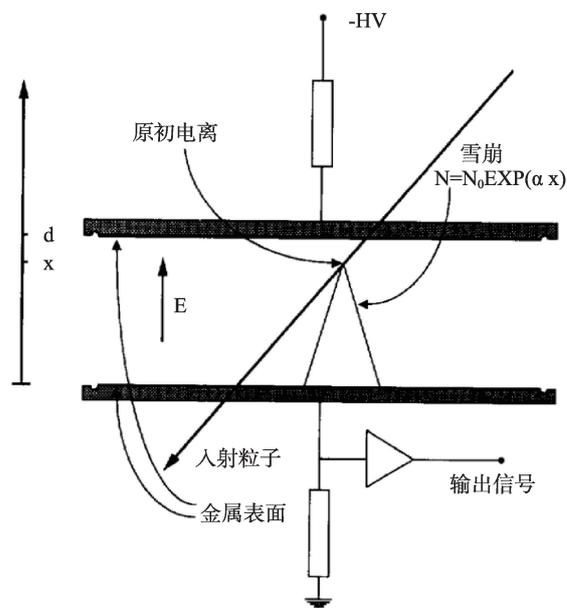


图1 平行板型气体探测器基本结构

可以读出信号,图1中所示为地端读出。

对于工作气体,为了使电离尽可能多,通常选用平均电离能较低且化学稳定的惰性气体。但是由于原子退激发辐射光子会带来阴极的电子发射影响工作,往往会掺杂少量多原子分子气体如异丁烷,通过振转激发态来吸收光子,称为猝灭作用。含卤族元素的电负性气体如四氟乙烷、六氟化硫等可以用来俘获自由电子,提高气体连续放电的阈值电场,进一步提升气体放大系数。工作气体种类的具体选择和配比,往往需要结合实验需求、探测目标特性、成本、安全性以及环保等诸多因素来综合确定。

根据运动电荷产生感应电流的准静态模型,感应信号持续时间从漂移产生开始到所有电子离子到达极板结束,强度和雪崩发展程度以及电子离子的漂移速度成正比。由于离子的漂移速度相对电子慢得多,因此电流信号的典型形状是一个拖着很长“尾巴”的窄脉冲,如图2所示。完整的电流信号关于时间的积分就是气体中产生的总电荷量,等于入射粒子原初电离和雪崩电离电荷的总和。在一定的电场范围内,总电荷量与原初电离成正比。而原初电离电荷与入射粒子在气体中沉积的能量也

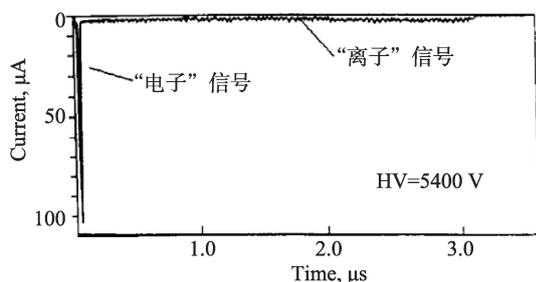


图2 平行板型气体探测器典型感应电流信号

为成正比关系,所以读出信号的电荷量实际上反映了粒子损失能量的多少。原则上来说通过这部分能量“取样”我们可以反推出入射粒子的能量。

平行板型气体探测器可以进行时间测量,也就是告诉我们粒子什么时候通过了探测器。这要得益于气隙内部均匀的电场使得原初电子一经产生就立即开始雪崩放大,和原初电离的位置无关。读出信号是所有雪崩电子的总和,信号幅度很快就可以增长到被电子设备识别的程度。原初电离位置随机晃动对时间测量的影响因此大大减低。精细制作的平行板型气体探测器时间分辨率可小于300 ps。平行板型气体探测器也可以用来测量其他物理量,如计数、辐射剂量、位置等。

3. 阻性板室(RPC)

经典的平行板型气体探测器使用金属作为电极,这带来了一个问题:当一个粒子入射探测器发生雪崩后,极板之间的电压会因为放电而在短时间内降低,气隙中的电场减弱,脱离工作状态,此时若有其他粒子入射,探测器将无法做出有效的响应,往往称这段时间为探测器的“死时间”。金属是导体,所以电场强度的减低不只发生在粒子入射的区

域,而是遍及整个气隙,意味着在“死时间”内所有的探测器区域都无法正常工作,也即全部探测区域在“死时间”内都变成“死区”。这严重限制了探测器的计数率本领。为了在高计数率环境下工作,用阻性板电极替代金属电极并进行改良,衍生出的平行板型气体探测器就是阻性板室(RPC)。

RPC的典型结构如图3所示。主体结构是两块平行的阻性板,一般使用酚醛树脂板或平板玻璃,中间气隙充满工作气体。相较于金属极板,为了使电压均匀地分配到各处,阻性板的外表面常常喷涂石墨层来施加电压。由于阻性板和石墨层不会完全屏蔽感应信号,所以RPC的读出电极可以更加方便地设置在石墨层外,使得探测器的高低电压部分电气分离。

阻性板的电阻率为 $10^{10}\sim 10^{12}\ \Omega\cdot\text{cm}$,雪崩发生时,电压下降的区域限制在雪崩周围,探测器其他部分的电场不受影响,大大减小“死区”范围,提高了探测器的计数率本领。

图4展示了金属极板和阻性极板发生雪崩后电场的变化及“死区”的范围。此外,当发生雪崩时,由于阻性板较高的电阻率,阻性板上会产生瞬间压降,降低气隙中的电场强度,抑制雪崩发展,在一定程度上缩短了“死时间”,进一步提升计数率本领。

RPC通常可以在约1 ns的时间内对入射粒子做出响应,探测效率在95%以上,能够工作在高计数率和强磁场的环境下,多作为探测系统的快速触发模块。

RPC也可以用于位置测量,这时需要将读出电极分割成条或者块,多通道读出。由于原初电离位置的局域性,加上匀强电场下固定的漂移方向,不同读出通道的感应信号强度取决于粒子入射位置

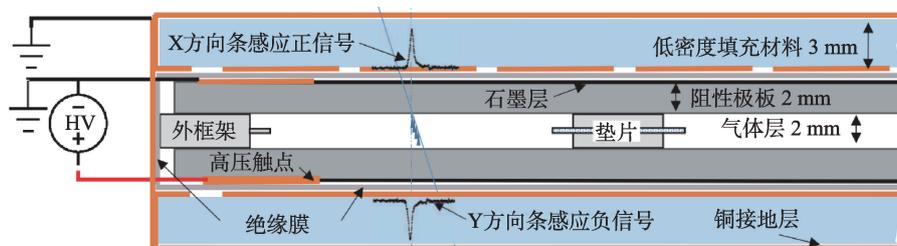


图3 RPC气体探测器的典型结构

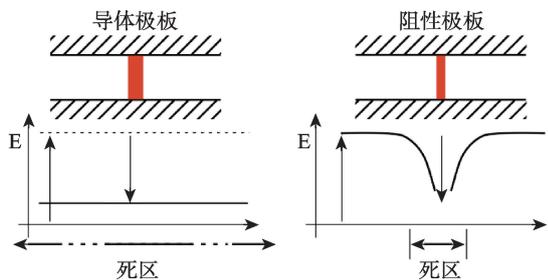


图4 阻性极板缩小“死区”范围示意图

的远近。根据不同通道的感应电荷量可以在一定精度上重建粒子入射位置,位置分辨率取决于读出单元的尺寸,如图3中RPC采用双侧感应条读出,气隙两侧的长条状读出电极彼此正交,用来重建粒子入射的二维位置。

在工艺和材料方面,RPC的平行板相较于具备精细结构的探测器(例如丝室)简单不少,具有坚固耐用,维护方便的特点。平板玻璃和内表面覆油处理的酚醛树脂板保证了气隙平整,提高探测器均匀性。读出电极和外部的屏蔽层可以采用成熟的印刷电路板工艺,提高机械精度。信号幅度足够大,读出电子设备相对简单。整体上看,RPC使用的材料方便易得,造价低廉,适合制作大批量、大覆盖面积的探测单元。例如对撞机实验探测谱仪的 μ 子探测器,宇宙线大气簇射实验的探测阵列等。

RPC的结构也具有拓展性,改进RPC结构可以增强RPC的部分性能,一个著名的例子就是多气隙RPC(multi-gap RPC, MRPC)。如图5。将一个较宽的气隙用相互平行的阻性板分割成多个小气隙,其他部分与RPC类似,便构成了一个MRPC模型。相比于RPC,MRPC每个单独分割的气隙要窄得多,入射粒子在每个气隙中独立引发雪崩,原初电离的

位置涨落对时间测量的影响减小,但相应感应信号也会减弱。不过读出电极上的感应信号是所有气隙内信号的叠加,弥补了单气隙信号较小的幅度,因此依然能够读出幅度可观的信号。通过这种方式得到的信号脉冲速度更快,显著提升了RPC的时间分辨率,可以达到几十ps量级,是迄今为止最精确的粒子时间测量技术之一。

4. RPC 的相关应用

RPC技术起源于粒子物理实验,现今也在各种类型的粒子物理实验上发挥着独特的作用。除此以外,RPC也脱离了纯粹的物理学研究,基于粒子探测技术本身产生了许多应用。下面是这两方面的一些应用实例。

ATLAS 实验 μ 子触发系统 ATLAS谱仪是LHC上的两个通用型粒子探测器之一,是目前世界上体积最大的科学装置,用来测量和记录由LHC质子-质子对撞产生的末态粒子,以此重建高能对撞发生时的物理过程,进行新物理的探索 and 标准模型参数的精密测量。为了对高能量、高通量、复杂末态粒子的各种物理量进行测量,ATLAS被设计为一个融合不同探测技术、探测器类型的大型复合粒子探测谱仪。RPC由于较好的时间分辨和计数率性能、较大的探测面积以及较低的成本被ATLAS采用作为 μ 子探测器桶部的触发系统。图6展示了ATLAS的 μ 子探测器桶部布局,整体上是一个外径达20 m,内径10 m的圆筒结构,其中蓝色模块的内层或外层即为RPC,共使用了1094块双层RPC,覆盖面积高达6785 m²。

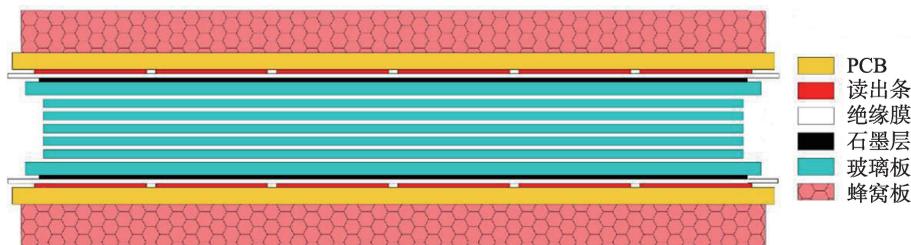
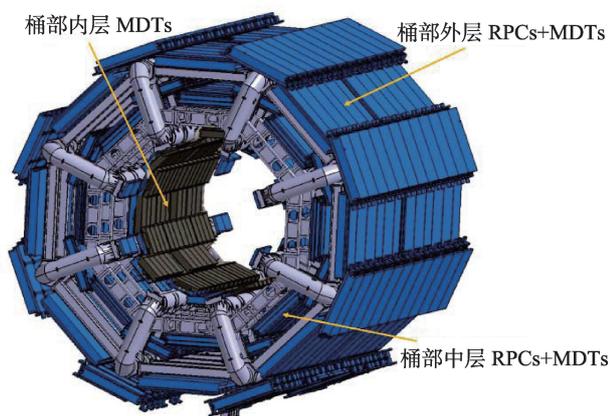


图5 MRPC的基本结构

图6 ATLAS μ 子探测器桶部结构

RPC极板采用酚醛树脂板,气隙宽度为2 mm,外加电场强度达到约50 kV/cm,时间分辨率小于1 ns,探测效率大于98%。RPC连同外部结构如图7所示。

触发系统的目的在于筛选出那些能量较高、有可能包含我们关心的物理过程的事例,舍弃能量较低、来自平庸过程的事例,以此来节省电子学读出以及后续存储处理的数据量。触发系统综合了来自ATLAS各个子探测器的信息,进行复杂的逻辑判选,其中 μ 子击中不同层RPC的时间和位置信息是其中重要的组成部分。

2018年末LHC结束第二轮运行取数后,ATLAS便开始了针对高亮度工作环境下各个子探测器的升级工作。其中将在 μ 子谱仪的最内层(BI)安装新的RPC,以提升总体计数率性能和触发系统的判选能力。新RPC将采用窄气隙(1 mm)来应对高计数率的挑战,同时采用新工艺的电子读出设备。中国团队全程参与RPC的升级计划并且承担第二阶段

升级的RPC生产测试工作。同时,自主进行了一系列RPC技术的相关研发探索,包括改良读出板材料、读出方法等。

BESIII 实验 北京谱仪(BES)是工作在北京正负电子对撞机(BEPC)上的通用探测器,是国内目前唯一的大型加速器粒子物理实验装置,在 τ 轻子和粲夸克相关物理研究方面做出重要的贡献。

BESIII为BES的第三代改造版本,以配合BEPCII对撞机的性能升级。其中 μ 子探测器的核心单元便是RPC。图8为BESIII使用的“三明治”结构RPC。

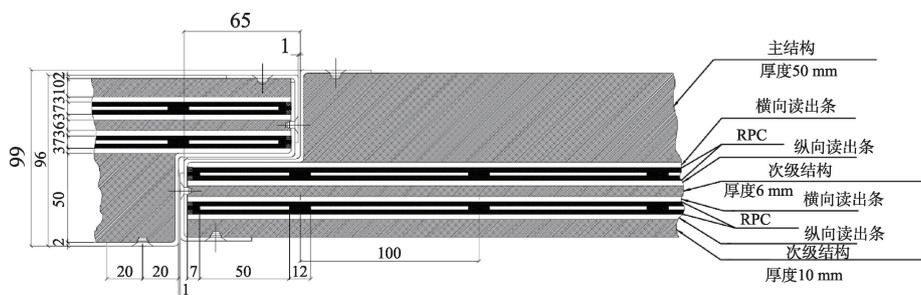
除此之外,BESIII的飞行时间探测器(TOF)在端盖部分采用了MRPC,时间测量精度达60 ps。

非加速器粒子物理实验 除了在加速器物理实验上的应用外,RPC技术也在非加速器粒子物理实验上大展拳脚。

去年“功成身退”的大亚湾中微子实验,发现了中微子振荡的第三种振荡模式,被誉为来自中国的最重要物理实验结果。其中利用了总覆盖面积达800 m²的RPC探测器,测量宇宙线 μ 子的击中位置,用来排除宇宙线 μ 子产生的快中子关联事例本底,使得高效探测中微子信号成为可能。

位于青藏高原的羊八井宇宙线观测站,其中的ARGO实验更是大规模使用总面积达6700 m²的RPC探测器,用于探测宇宙线粒子和大气的相互作用产物,以此开展宇宙线的物理研究,并且可以与多波段天文望远镜联合对太阳物理、活动天体进行互补观测。

宇宙线 μ 子成像 宇宙线是来自地球之外的高

图7 ATLAS μ 子探测器RPC整体结构

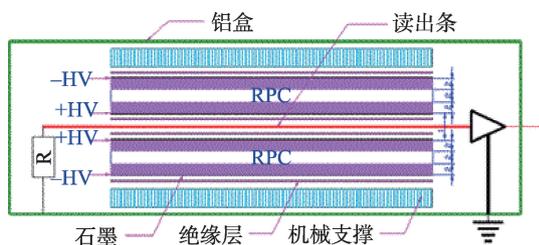


图8 BESIII μ 子探测器使用的RPC结构

能粒子,它们轰击地球大气层时会发生一系列反应形成簇射,生成 π 、 k 等介子。它们衰变的次级粒子中到达海平面的大部分为 μ 子。宇宙线很稳定,具有较为固定的分布特征,是一个不可多得的天然粒子源。 μ 子具有很强的穿透力,经过不同物质组成的物体会发生不同特征的衰减、散射。出射 μ 子因而携带了物体的结构、形状和成分的相关信息,是天然的信使。利用探测器长时间“曝光”,便可以重建物体结构,进行成像。

“无处不在”的宇宙线配合 μ 子探测器,让这种方法成为地质、考古等领域无损探查地下结构的有效手段。一个里程碑式的实验便是1970年刊登在《自然》杂志上的,利用 μ 子成像发现了胡夫金字塔中的空洞。

利用RPC,也可以完成宇宙线 μ 子对宏观物体成像。一个法国合作团队利用玻璃RPC,成功对法

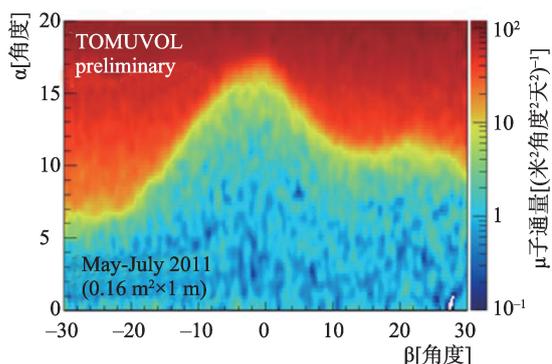


图9 玻璃RPC重建的多姆山侧影

国多姆山侧面进行了 μ 子成像,如图9。

宇宙线 μ 子成像也可以用于小尺寸的物体。由于 μ 子能够穿透比较厚的屏蔽,对于装在集装箱里运输的重核物质,在其他探测手段如X光等无能为力,的情况下, μ 子成像也能探测到这些物质的存在。这成为对核材料运输进行监管的新型手段。清华大学团队基于MPRC搭建的平台,成功获得重核物质构成物体的 μ 子成像结果,见图10。

RPC粒子探测器经过近40年的发展,已经日益成为一种技术成熟、成本低廉、灵活多变的粒子探测手段。并且逐渐从粒子物理实验走向其他领域,甚至进入日常应用。成为一个由纯粹物理研究带来实用技术进步的典型例子。

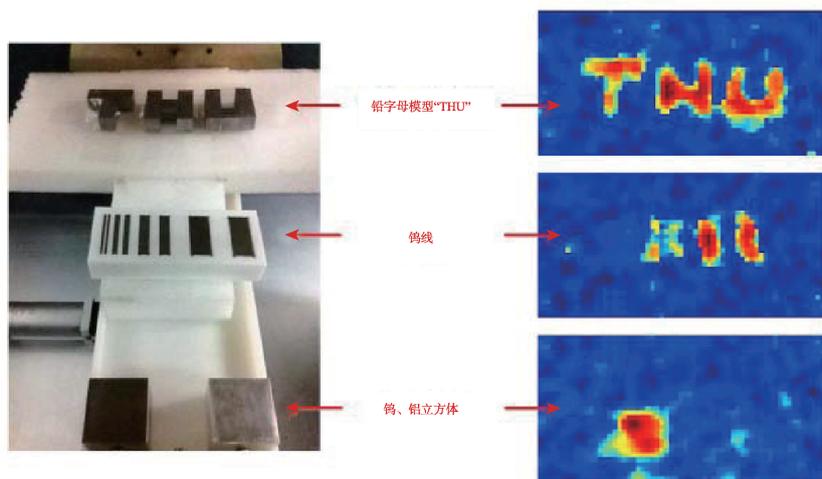


图10 MRPC重核物质成像