

制作移动式可持续观测粒子径迹的不间断云室

朱石明

(江苏省兴化中学 225754)

宇宙射线是来自天外的高能粒子,携带着宇宙深处的信息。宇宙线又是上天的礼物,可以用于科学研究和科学教育。目前,对宇宙射线的研究主要依赖于大型的固定设施,不适合在现场教学中进行演示。为了科普宇宙射线的客观存在,我们便有了制作移动云室演示装置的想法,让宇宙射线的运动径迹呈现在我们的面前。

云室作为一种重要的粒子物理探测器,在粒子物理研究中具有广泛的应用,对于推动物理学的发展和人类对微观世界的认识起到了重要作用,曾用以发现缪子、K介子、正电子等多种粒子。历史上最初关于云室的研究是在一定的密闭空间里制造出形成云雾的条件,进行模拟研究云雾的相关实验,其容积大小并不固定。对于云雾的形成,可利用水、酒精、甲醇形成蒸汽,控制环境条件使蒸汽处于一种过饱和状态。人们发现,当带电粒子穿过过饱和蒸汽层时,会在经过路径上发生电离,形成凝结核而呈现出雾状小液滴。经典的威尔逊云室是采用活塞结构,并利用减压降温的原理,在活塞抽拉的一瞬间形成过饱和蒸汽,来观察粒子的径迹。但威尔逊云室操作过程复杂,并不适合在科普现场快速可靠地演示宇宙射线的存在。

江苏省兴化中学作为校园宇宙线观测联盟的会员单位,学校与中国科学院高能物理研究所达成了“院校共建培养拔尖人才”的合作共识。兴化中学实施的《高中科技拔尖后备人才的选拔与贯通培养研究》已成功立项为江苏省前瞻性教学改革研究

项目。兴化中学校园内安装了宇宙射线的观测阵列,由五个探测器组成,还有一台探测缪子的望远镜,便于学生进行许多有趣的科学实验。然而,这些固定设施并不适合直观显示高能粒子的运动轨迹。我们设计的移动式装置不仅使其适合现场实时观测,而且观测效果优秀。

一、用鱼池冷水机制作超低成本的移动式不间断云室

为了在中小学进行宇宙线课堂演示,我们开始了利用鱼池冷水机制作超低成本的移动式不间断云室的设想。作品经历了冰箱1.0版本、冷水机2.0版本的实践,如图1所示。最终形成的鱼池冷水机版,仅需30秒通电即能显示粒子径迹,速度快,呈现射线效率大为提升。本项目中所述鱼池冷水机,是指用于海产品养殖过程中用于水温控制的常见的致冷设备。人们在养殖冷水鱼时,需要安装鱼池冷水机以提供低温水才能够满足养殖条件,鱼池冷水机通常仅能使水温下降2~5℃,常用于使鱼池水温恒定在17~20℃的范围。

(一) 制作方案

来自地球之外的宇宙射线是高能量的质子和原子核,这些高能粒子到达地球大气层时,会与大气层中的粒子碰撞并产生簇射,同时会产生大量次级粒子,继续产生后续簇射和吸收,最终部分粒子抵达地表。这些粒子穿过地球上空的云雾时,也可

本文为江苏省基础教育前瞻性教学改革实验项目《高中拔尖创新后备人才的选拔与贯通培育的研究》(编号2023JSQZ0151)学生探索实践案例的研究成果。



图1 移动式不间断云室的冰箱1.0版及冷水机2.0版

能会产生带尾迹的径迹,但通常不可见。地面上的云室系统可以测量大气中的宇宙线粒子,当然,也可以直接利用放射性材料作为高能粒子的来源。

我们最先制作了用干冰制冷的简易云室,由于干冰易挥发而消耗,因此不适合用来制作构想中的移动式云室。经过多次实验,我们最终完成的移动式不间断云室,其结构如图2所示。云室的主要核心部件包括云室透明壳体、酒精蒸汽室、多级制冷平台和视频采集装置。云室壳体下侧安装多级制

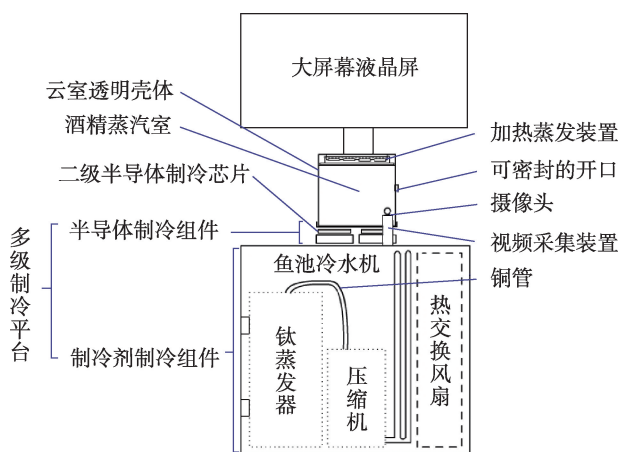


图2 不间断云室的结构示意图

冷平台;云室壳体右侧设有可密封的开口,可将放射样品加入云室;云室制冷平台分为制冷剂制冷组件和半导体制冷组件两部分,制冷剂制冷组件内配有压缩机,压缩机通过铜管连接钛蒸发器,利用导热剂与半导体制冷组件连接;半导体制冷组件通过二级半导体制冷芯片形成超低温的云室低温端。视频采集装置安装在云室的前侧,通过高清低照度摄像头采集云室视频并在大屏幕液晶屏呈现。云室顶部设计有酒精加热蒸发装置,增加酒精蒸发量,维持温度梯度,使高温端酒精蒸汽向低温端扩散,在扩散过程中逐渐冷却,在低温端附近形成过饱和蒸汽。

带电粒子穿过蒸汽过饱和层时,与蒸汽分子碰撞产生电离,凝结成一串小水珠(如图3所示)。在光的散射作用下,可观察到白色凝结水珠径迹,犹如飞机高空飞过后形成的白色拖尾。

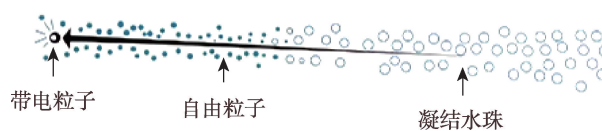


图3 利用云室来观测粒子径迹的原理

(二) 制作材料

密闭的薄容器:可采用透明的塑料壳体或玻璃容器,最好使用透明亚克力板激光雕刻制作,壳体厚度不可大于2 mm,避免拦截部分粒子。壳体容器必须保持密闭不漏气,以确保形成过饱和蒸汽。

极性分子溶剂:使用酒精或异丙醇形成过饱和蒸汽,浓度大于90%,最好使用分析纯试剂。

黑色吸水毛毡:吸水的黑色毛毡或黑色海绵,吸收足够液体,以保证容器内有足够蒸汽。

冷水机移动云室包括底座和观察室。底座有多级制冷系统、大功率电源、导冷循环系统;观察室包括超低温传热板、电加热槽、有机玻璃罩、高压栅网、侧白光光源、星光低照度摄像头、大尺寸液晶显示屏。云室内部件需耐酒精浸泡,以确保长期工作。

重要备件:

大功率12 V直流电源:建议使用750 W以上二手服务器电源。

基础制冷系统:鱼池冷水机、大功率散热风扇、循环水泵、乳胶管、导冷板、防冻液、导热硅脂。

半导体制冷系统:根据云室尺寸和散热需求,可采用易购置的多片12706或12715达到低温效果,本装置采用六片双层大温差半导体制冷片TEC2-19008。

(三) 鱼池冷水机云室的结构原理

云室内显示的细长的线条是高能粒子在云室中运动的径迹。这套移动式装置可持续观测宇宙射线的径迹,云室外壳采用透明厚度小于2毫米的亚克力有机玻璃,在下置“氧化发黑”的铝板,下方是双级半导体制冷片,再下是用于热交换“液冷板”,用乳胶管连接“鱼池冷水机”,提供低于5℃的基础温度平台,云室底部结构如图4所示。再经过二级半导体制冷,可达零下50℃,与室外温差可达60℃以上,由于已超出电子温度计的量程,所以采用专业级的热电偶传感器。

我们利用鱼池冷水机提供基础的低温平台,使用鱼池冷水机可大大减少装置的复杂性,不仅成本低而且制冷量特别大。先对鱼池冷水机进行改造,

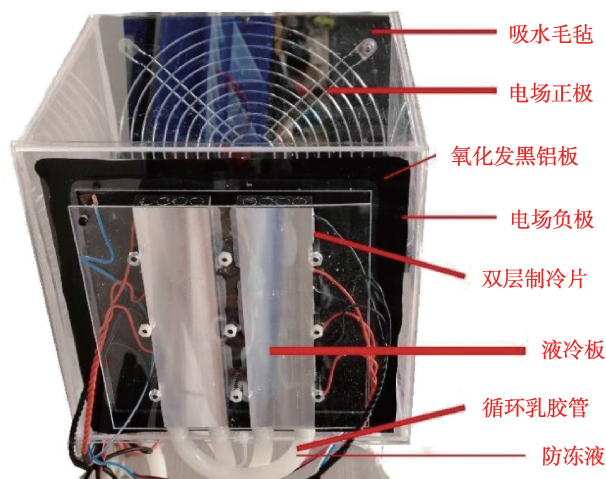


图4 云室底部组件排布情况示意图

再给冷水机设计好保护壳体,并预留充足的散热通道,如图5所示。

云室还设计有液体循环回收装置,有机溶剂可以反复循环使用。整个云室空间设计有3000 V的电场,并可一键切换其方向,如图6所示。



图5 鱼池冷水机改造后的热交换散热通道

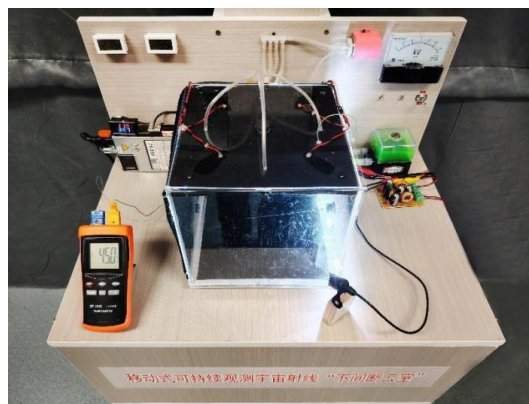


图6 溶剂回收及电场一键切换装置

二、实验测试与总结

(一) 云室的技术测试与实验

实验装置从室温 20 °C 环境开机到达到云室工作所需温度仅需 20 秒左右,制冷效率极佳。一级冷水机的总耗电功率为 1500 W,二级 6 片半导体制冷总电功率为 11.9 V*38.6 A 即 460 W,冷水机的制冷余量充足,云室底板温度已达 -55.6 °C,所图 7 所示,且能自动间断性地自动停机。

实验一:放射试样的测试



图 7 云室底板温度达-55.6度 半导体制冷片电流为 38.6 安培

放射强度:钍钨极含有 1%~1.2%的氧化钍,钍是一种放射性物质,它们的放射性危害性是较小的,因为氩弧焊操作工每天消耗钍钨极棒仅 100~200 毫克,放射剂量极微,对人体影响可以忽略。

云室气体:云室中的有机溶剂采用最常见的 75%的医用酒精。至于相关文献中要求用分析纯乙醇试剂,经我们对比实验分析,差异性并不大。云室设有乙醇的蒸发汽化的加热装置,所以乙醇蒸汽浓度已达到饱和状态,这样更有利于温度下降后形成过饱和蒸汽。

环境温度:20 °C。

云室底板温度:-55 °C。

实验效果截图:如下图 8 所示。

实验结论:能稳定持续地呈现出 α 粒子的径迹。本装置经过长时间的工作测试,工作性能与实

从样品测试口插入带有橡胶塞的钍钨电极,这里的钍钨电极放射试样,采用的是不锈钢氩弧焊所使用的钍钨电极。

放射源:不锈钢氩弧焊所使用的红头钍钨电极,标识 WT20。钍钨电极是最早使用的稀土钨电极,也是迄今为止焊接性能最好的钨电极品种,因此,该品种钍钨电极非常常见。钍有一定的放射性。 ^{232}Th 具有天然的放射性,在经过六次 α 衰变和四次 β 衰变后成为稳定的 ^{208}Pb ,其衰变方程为 $^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{208}_{82}\text{Pb} + 6^4_2\text{He} + 4^0_{-1}\text{e}$,所以钍钨电极可以提供一定量的 α 粒子及电子。

验效果都十分稳定。

实验二:空中宇宙线的捕获

在确定装置对放射试样能够灵敏地呈现出粒子轨迹的前提下,我们移去所有的放射源,进行大气宇宙线的捕获实验。

放射源:无

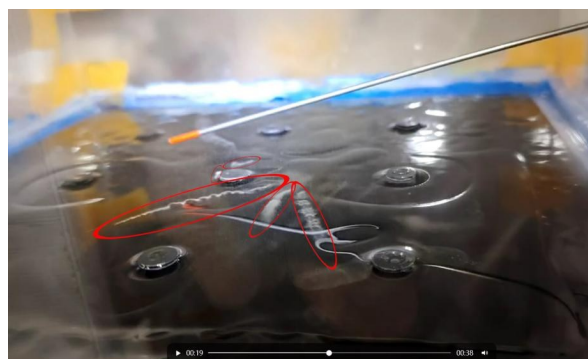


图 8 不锈钢氩弧焊钍钨电极放射试样的测试视频截图

云室气体:医用酒精所形成的正常气压下的饱和酒精蒸汽。

环境温度:20℃。

云室底板温度:-55℃。

实验效果截图:由于大气中的宇宙线是一个小概率事情,需要我们有足够的耐心进行观察。经过我们多次连续几个小时的长时间观测,我们成功地捕获到了在空中的能量较大的宇宙射线,其轨迹线很长,速度极快,突然从正前方斜射进入,实验中所记录视频的截图如图9所示。

可见,云室中过饱和蒸汽被电离后可以形成呈动态云雾状的小液滴。那是因为有一个高速粒子,在上一个瞬间,是有个粒子,是它来过!虽然宇宙射线人们肉眼不能看到,但基本粒子作为背景辐射却时刻在我们身边。天然的背景辐射源,包括来自天外粒子的宇宙射线,大理石等天然石材中稀有元素的放射性衰变所释放出的粒子,还有生物体内的放射性元素的衰变所产生的高能粒子,如最常见的香蕉中就会有钾-40衰变释放出的粒子。至此,有了本装置,我们就自然有了很多实验测试的新想法。经过大约几个月的反复改进,我们不仅实现了空中宇宙线的成功捕获,拍摄了很多有趣的实验视频,而且本装置的演示效果还给我们带来了许多非常意料之外的惊喜。此项设计成果已在第十一届

世界宇宙日交流活动中,与国外团队进行了相关技术上的交流与分享(如图10所示)。

本装置的温度控制板设置在云室外,经过长期的实验验证,云室内的酒精蒸汽形成能显示粒子行迹的过饱和蒸汽,本案例中实测最适宜的温度范围为-28~-70℃,同时测量云室内超低温传热板上的温度时,需要采用热电偶测温传感器。云室上端的酒精加热蒸发装置,采用四只阻值20欧功率20瓦的陶瓷电阻,再接上3-12伏的可调电压,便可使云室内的液态酒精大量蒸发,云室上层的酒精蒸汽的高温端和低温端形成了足够大的温度梯度,使高温端的酒精蒸汽不断地向低温端扩散,随着温度的降低,在低温端附近区域形成过饱和蒸汽,带电粒子通过时产生离子为核的凝结雾滴,在暗背景中通过光照射可以观测到粒子径迹。封闭的腔体环境使得酒精几乎无挥发损耗,从而保障云室能够长时间运行,且不需要定期维护。

(二)冷水机云室的特点

1. 运用致冷剂冷媒制冷与半导体制冷的多级混合制冷方案,形成了超低温的云室工作条件。由于采用生产生活中的常见材料,装置的制作成本较低,但性能接近并达到了专业的大型装置,但成本只有其1/50。实现了让空中的宇宙射线呈现在人们的面前。

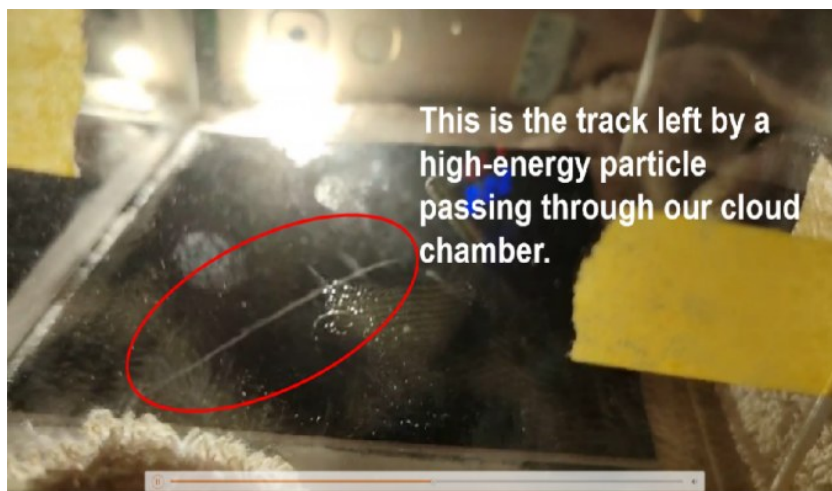


图9 云室成功捕获空中宇宙线的视频截图



图10 宇宙射线观测作品参加世界宇宙日交流活动

2. 可以连续不间断观测空中的宇宙射线。设计有过饱和液体循环回收装置,有机溶剂可以反复循环使用。

3. 设计有放射样本测试窗口,便于学生开展很多高能物理实验。可以一键切换叠加在云室空间上的电场方向,以便检测研究粒子所带的电性。

4. 前方设计有摄像监测显示装置,可以将云室轨迹同步显示到大屏上,便于让成批的同学一起观看云室实验。本装置让普通人也能参与粒子物理探测实验,采用一些简单可控的操作,就能看到基本粒子在云室中穿梭的径迹! 可望作为一款科普高能物理的一款实用的演示教具。

三、后续研究

本项移动式云室,能将平时人们用肉眼无法观察和感触到的微观粒子,转变成宏观有纵深感的径迹。来自宇宙的天外“来客”和地球上的辐射源所发出的各种粒子,其径迹就可以利用本移动式云室,实时展示在人们眼前,使教科书上抽象的描述,转变成生动而直观的运动径迹。我们深切感受到,粒子探测研究对粒子物理学的发展至关重要,现在粒子物理也已经延伸到我们生活的各个方面。如

新药物开发,医院里的透视成像,考古中文物年代的分析,研究测试新材料,航天工程等等,粒子物理都发挥着重要作用。粒子物理学使我们的生活更安全、更健康,也使我们对宇宙的认识更丰富。

在我们的生活中,比较常见的坚果、香蕉、粘土,都是我们手可及的放射源,如将其放入云室,会有什么现象? 不同的材料对不同粒子的屏蔽作用有怎样的效果? 云室为测试和屏蔽“核辐射”提供了极好的平台,水、纸、金属片,哪种材料的防辐射效果更优呢? 本移动式云室将还会进一步优化结构和性能;给它装上磁场,更深入地了解粒子的特点及其电性;将其改成一款适合推广的科普教具,开发方便学生探索宇宙研究高能物理的实验项目,让更多的学生加入到宇宙射线研究的行列中。我们也期待本项移动式云室有更为进阶的玩法。

项目致谢:感谢中科院高能物理研究所的张闯教授、沈长栓教授、清华大学顾晨教授,是他们给我们的实验研究提供了很多指引与帮助,指明了本项目的研究方向。当地的科学技术协会的领导以及省科技创新大赛的专家们,也给我们提出了中肯的建议与意见。特别感谢我们学校,因为学校的院校合作平台,为我们提供了各种实验仪器及制作场所,使得我们的本项研究工作得以顺利进行。