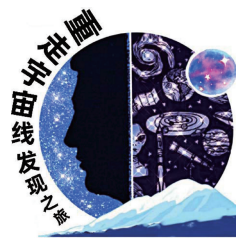


水桶中的宇宙线

徐吉磊¹ 刘金艳² 高 崑³

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 北京市汇文中学
朝阳垂杨柳分校 100021; 3. 北京大学附属中学石景山学校 100144)



在我们“真空”的宇宙中,时刻在飞行着各种高能粒子(各种原子核、电子、伽马光子等),我们称之为原初宇宙线。通过“重走宇宙线发现之旅”系列课程《宇宙线发现之旅》^[1]《有多少宇宙线穿过我们的身体》^[2]《电离之谜》^[3],我们已经知道,当它们飞向我们的地球时,在高空会与地球大气的氮、氧等原子核碰撞,产生很多次级粒子,次级粒子再碰撞产生更多的次级粒子,这一过程叫广延大气簇射。这些次级粒子中短寿命的如 π 、K介子等很快衰变, γ 光子和电子也很快将能量损失殆尽,在到达人类生活的海平面高度的时候,宇宙线次级粒子的主要成分就变成了寿命相对长、能量损失小的缪子(μ 子)。

μ 子时刻在穿透我们的身体,但我们不能直接用眼睛看到它,需要借助额外的探测装置和探测方法。目前国际上探测宇宙线的主流方法分两种:一种是通过闪烁光的方法,如“系列课程”里讲的用塑料闪烁体作为介质的塑闪探测器,也有液体闪烁体作为介质的液闪探测器;另一种是切伦科夫光的方法,实验一般利用便宜的水作为介质,我们通常叫水切伦科夫探测器。本文将要介绍的使用水桶来探测宇宙线的装置,就是利用第二种产生切伦科夫辐射光的方法来探测宇宙线。实验中用到的水和水桶较易获得,学生自己可以尝试亲自动手实践,搭建简易的科学探测器,来观测宇宙线信号。

一、切伦科夫辐射的发现及原理

1934年,苏联物理学家切伦科夫(Cherenkov, Pavel Alekseyevich)在研究射线穿过液体时,观察到了淡蓝色辉光。他经过仔细研究和观察发现,这不

是当时主流认为的一种荧光现象,而是当带电粒子在透明介质中的传播速度大于光在该介质中的速度时,所辐射出的一种微弱的蓝色可见光,被称为切伦科夫辐射。早在20世纪初居里夫妇在做浓缩镭实验时就观察到了这种蓝色可见光,但是当时物理学界没有现成的理论来解释这种现象。直到1937年,切伦科夫的同事弗兰克和塔姆对这种现象做出了经典的描述,才使得人们对切伦科夫辐射有了一个全面而正确的认识。由于这一突出贡献,切伦科夫、弗兰克和塔姆三人共同获得了1958年的诺贝尔物理学奖。

根据狭义相对论,具有静质量的粒子运动速度不可能超过光在真空中的速度^[4],而光在介质中的传播速度是小于光速的,例如在水中(折射率约为1.33)光仅以0.75倍的光速传播。但是带电粒子在介质中的速度可以是接近真空光速的,这时就超过了光在介质中的速度,导致产生光子振荡,从而产生切伦科夫辐射(图1)。这种现象可以类比超音速飞行器或子弹的音爆现象,由于超音速物体产生的

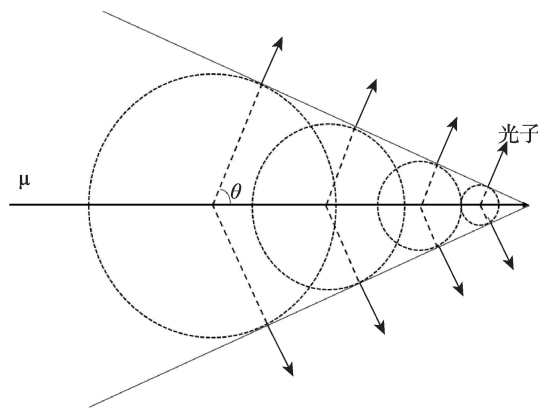


图1 切伦科夫光示意图

音波速度无法快到足以离开物体,因此波“堆积”了起来,形成了一个震波波前。

图1一个 μ 子从左往右穿过水时产生切伦科夫光示意图。在 μ 子经过路径上,每个点都会往与 μ 子成 θ 角的方向发射切伦科夫光子,对于每一个发光点,光子沿着 θ 角锥形表面发出;另一角度看,在同一时间点,光子所在的位置跟 μ 子的顶点连线在一条直线上,看起来就像发散的光锥一样,光子方向与锥面垂直。切伦科夫发射角 θ 可由真空的光速 c ,介质的折射率 n , μ 子的速度 $v(\beta=v/c)$ 计算出,其关系为:

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$

因此,缪子方向和光子方向的夹角可以用来计算产生切伦科夫辐射的带电粒子的方向及速度。切伦科夫辐射发出光子的频谱是呈连续性的,并且相对强度与频率成正比,也就是高频率(短波长)的切伦科夫辐射会有较强的强度。这解释了为何可见光波段部分的切伦科夫辐射看起来呈亮蓝色。实际上,多数切伦科夫辐射是在紫外线波段,人眼感光最敏锐的波段是绿色光(五百多纳米),对于蓝色光到紫色光的感应度则相当低,因此需要借助特殊的工具来探测这些紫外光。

二、切伦科夫辐射的应用

随着近代物理科学的发展,切伦科夫辐射被广泛地应用于天文学、化学、光学、医学、核物理等科学领域中,并且其在大部分领域中的研究都是当今科学界比较热门的研究课题。切伦科夫辐射在众多科学领域中具有巨大应用潜力,因此切伦科夫辐射对基础研究具有十分重要的意义。

在当今高能物理实验中,水是切伦科夫探测器最常见的介质之一。特别是探测器需要在低本底环境下运行,便宜又好用的水就派上了用场,用来阻挡来自周围环境的放射性粒子进入中心探测器。而且宇宙射线穿过水时还能发出切伦科夫光,被水中的光电倍增管(PMT)探测到,从而观测到宇宙线信号。目前国际上高能物理实验中使用的水

切伦科夫探测器有:

(1) 大亚湾中微子实验^[5]中的水切伦科夫探测器(图2)。其在大亚湾中微子实验中也叫反符合探测器,用来探测宇宙线粒子,有了这个数据就可以在中微子信号的分析中去掉宇宙线信号的影响。同时,水也起到屏蔽周围岩石放射性粒子对中心探测器的影响的作用。

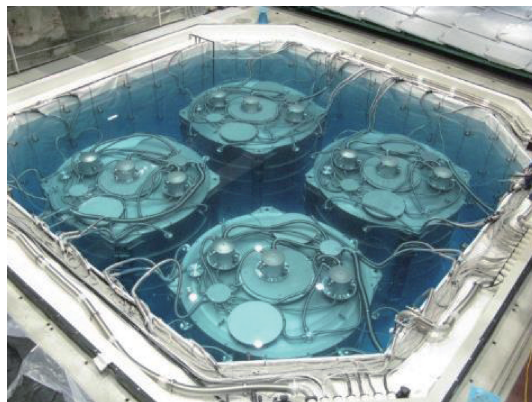


图2 大亚湾水切伦科夫探测器^[6]。图中为该实验的远点探测器,4个圆柱形中心探测器浸泡在10深的水池中

(2) 高海拔宇宙线观测站(LHAASO)的水切伦科夫探测器阵列(water Cherenkov detector array, WCDA)(图3)。探测器具有高效率、大视场和高本底排除能力的优点,在甚高能伽马源的寻找、监测等巡天探测方面发挥着重要作用。

(3) 地中海底KM3NeT实验的海水切伦科夫探测器^[8](图4)。该实验是欧洲未来的深海探测项目,是目前正在地中海两千多米深的海底建设的探测设备,分为三个实验点。实验利用天然海水和PMT来探测大气中微子或者星体活动带来的中微子、宇宙线等。其主要以海水作为切伦科夫发光介质,来探测中微子发生反应产生的 μ 子或者电子。实验的一个实验点就由多个PMT组成的圆球上下穿成串固定到海底,每串的长度都在公里量级。很多串最终组成几立方公里的PMT阵列。

(4) 南极冰立方实验(IceCube)的水切伦科夫探测器^[10](图5)。该实验由美国主导,在南极冰川下一两千米深的地方搭建1立方公里的PMT阵列。与地中海KM3NeT实验类似,此实验借助天然透明的



图3 LHAASO的水切伦科夫探测器阵列 WCDA。左图为水池内部,右图为一个单元中安装的两尺寸的光电倍增管^[7]

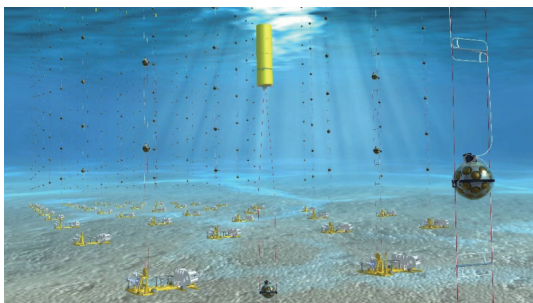


图4 地中海海底的KM3NeT实验的艺术图^[9]

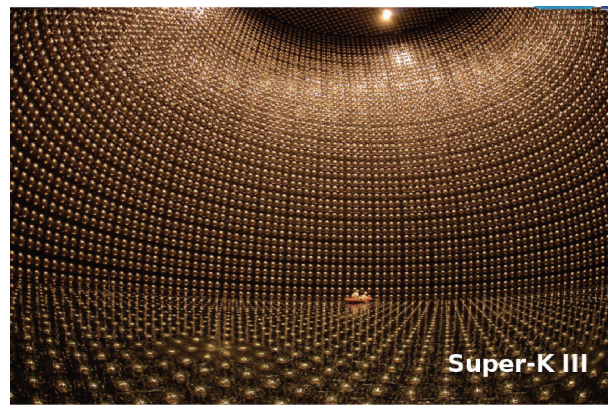


图6 日本的超级神冈实验内部结构图。

图中黄色的圆点是排列的PMT

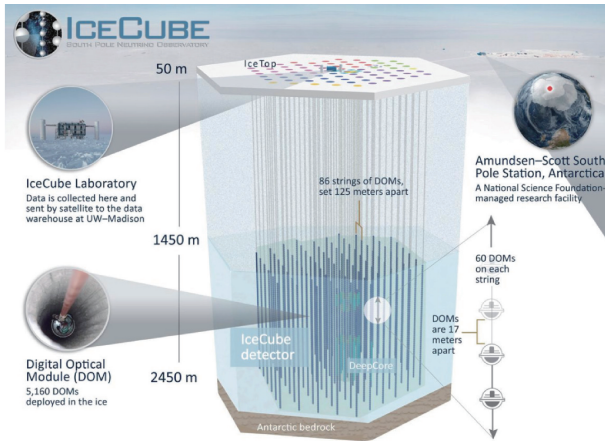


图5 南极冰立方(IceCube)实验示意图

冰作为切伦科夫辐射介质,来探测宇宙线和中微子信号。

(5) 日本的超级神冈实验(Super-Kamiokande)的水切伦科夫探测器(图6)^[11]。实验建设在地下1000米深处,探测器主要由高和直径都是约40米的圆柱体超纯水组成,大约5万吨水,水池内壁上安装1万多支20英寸的PMT。实验以超纯水作为切伦科夫发光介质,主要通过探测大气中微子以及

太阳中微子反应产生的次级粒子(如缪子和电子)在水中的发光信号,从而实现对中微子探测的目的。

上面简要介绍了当今存在或者正在建设的大型水切伦科夫探测器,中学生可能感觉非常神秘和遥远,但是万变不离其宗,大型的探测器也都是基于水切伦科夫原理,我们完全可以自己动手做一个简易的浓缩版的水切伦科夫小探测器。

三、实验搭建和数据采集

本实验主要利用日常生活中的材料——自来水和水桶,配合基于光电效应原理的光电倍增管和实验室读出信号的示波器搭建简单实验,从而看到水中的宇宙线信号。中学生可以自己动手参与,在搭建实验和获取信号的过程中培养对物理探索的兴趣,也能培养对粒子物理和宇宙线探测的好奇心,同时可以学到宇宙线的基本知识和基于水切伦

科夫探测器的观测方法。

实验装置如图7所示的示意图,实验主要由一个可以遮光的黑色水桶、两个3英寸的PMT和自来水组成。因为PMT要探测宇宙线 μ 子打到水中产生的切伦科夫光,其他的一切光都是我们实验的干扰光,所以整个实验需要很好地避光,这里选择带盖子的黑色不透明的桶。PMT是从海南展创公司购买的两支3英寸PMT。在水桶盖子上挖两个洞,PMT通过不透明的玻璃胶粘到盖子上。学生实验也可以尝试在底部或者侧面挖洞。宇宙线大部分都是从上往下或者从斜上方穿过来的,在水中产生的切伦科夫光也是往下打的,我们在底部和侧面贴上高能物理实验中常用的增加光反射的Tyvek膜,这样可以增加顶部PMT的光收集效率。学生在实验中可以将Tyvek膜更换成铝反射膜或者ESR反射膜。为了防止桶盖处或者局部漏光,可以外面包裹黑布,这样黑布和水桶形成双层遮光。为了能够方便灌水和获得桶内的水位高度,在桶底挖了一个洞,通过几米长的黑色塑料软管接出,在塑料软管的末端,再接出一截透明软管,通过连通器原理,就可以知道桶内水位高度(图8)。选择几米长的塑料软管是为了不让光照进水桶,假设黑色塑料软管的光反射率为10%,经过几米长软管以后,假设反射了20次,也就是将光强度压低了20个量级,这时室内光照到桶内的影响可以忽略。光电倍增管使用CAEN的高压电源供电,中学生也可寻找能产生1500伏的直流电源供电。

宇宙线从空气中接近真空光速入射到水里,因

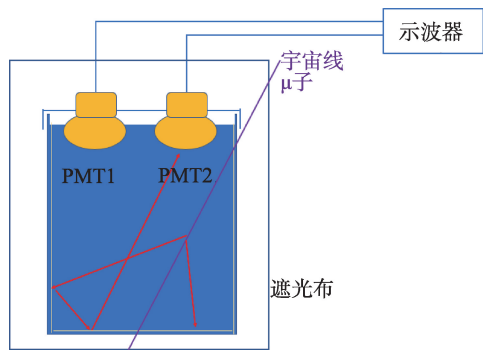


图7 水桶切伦科夫实验装置示意图

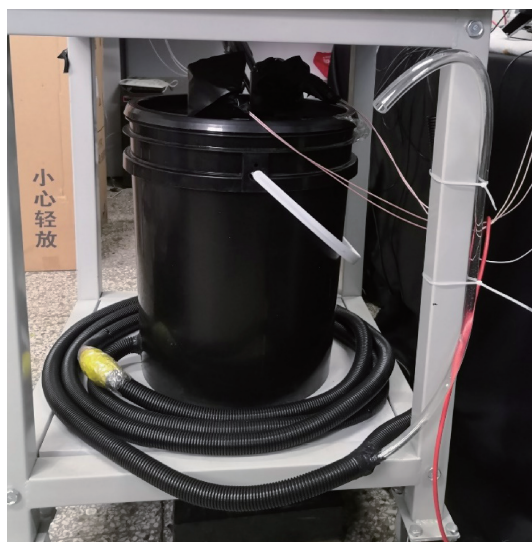


图8 搭建的实物照片。黑色为塑料桶,在盖子内部放置了两支3英寸的PMT。黑色塑料管是给排水口,支出的透明塑料管可以观察水位高度

为宇宙线在水中的速度比光在水中的速度快,会激发出水切伦科夫光。光子经过反射膜的反射,打到顶部PMT的光阴极面上,发生光电效应,产生光电子。光电子在PMT的打拿极里倍增,经过十多级的倍增,一个光电子最终产生了上千万个电子。这些电子聚集在几十纳秒的时间范围内,最终传到示波器。当我们看到顶部的两个PMT同时产生了几十到上百毫伏的信号(图9),我们的实验就成功啦!

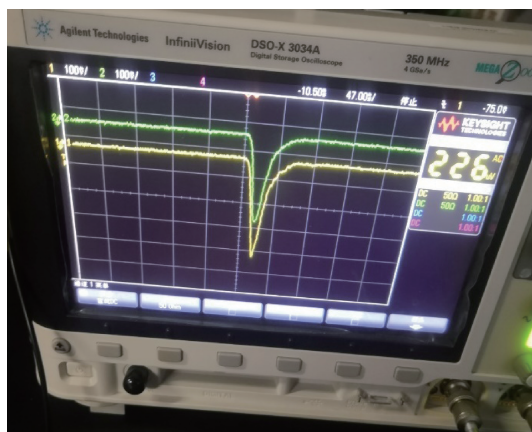


图9 宇宙线穿过水桶,在示波器上同时看到两支PMT的信号

放置两个PMT是为了更好地通过符合去除噪声和周围材料的放射性等杂乱信号。如果中学生没有条件的,也可以使用一支PMT,但这时会有比宇宙线信号事例率多很多的信号进来,如周围的建

筑材料的放射性粒子,如伽马光子等也会在水中沉积能量,被PMT看到,也有PMT自身的噪声,如热电子噪声等,直接产生信号,但是这些信号比较弱,在示波器上大约是个毫伏到几十毫伏,而宇宙线能产生上百毫伏的信号,所以可以通过提高示波器的触发阈值,阻挡住低能的信号,这样也能得到宇宙线打到水桶中的切伦科夫光信号。

学生也可以观察从没有水到灌满水,再到放水过程的示波器信号的变化。在灌水过程中,开始因为没有产生水切伦科夫光,所以达不到PMT设置的阈值,示波器没有信号,随着灌水进行,慢慢就有了信号,并且信号随着灌水高度增加而增大。相反,在放水过程,示波器上信号慢慢变弱直到消失。

想要定量分析,就需要将波形提取出来,本实验是通过CAEN的插件DT5751记录波形,然后通过C程序语言读取记录波形上点的数值,通过对信号的积分计算出电荷 Q ,最后除以PMT的增益,计算出收集到了多少个光电子。充放水过程中,可取几个不同水面高度下示波器的波形,最终定量计算出不同水面高度对收集光子个数的影响。

对于有实验条件的学生,也可以对示波器上超过触发阈值的信号进行计数。本实验是将两路的符合信号接入到CAEN的计数器(CAEN N1145),得到了每间隔10 cm水深的计数率。

四、实验数据分析

分析1:信号的幅度谱

采集到的波形数据是存储到文本文件里的,编写简单C程序,即可对波形数据进行分析。

首先是通过程序得到每条波形的信号峰值,统计多个波形,将信号峰值画在一起,得到PMT信号的幅度谱。图10是采集两支PMT符合信号后,其中一支PMT在不同水深情况下幅度谱(对数坐标)。实验上取了从水深37厘米(H37 cm)到无水(H0 cm)五种不同的水位下的PMT信号。虽然这里标记的无水,但是实际操作上桶底还残存微量的水,虽然PMT信号相对比较小,但也有少量信号可达上百毫

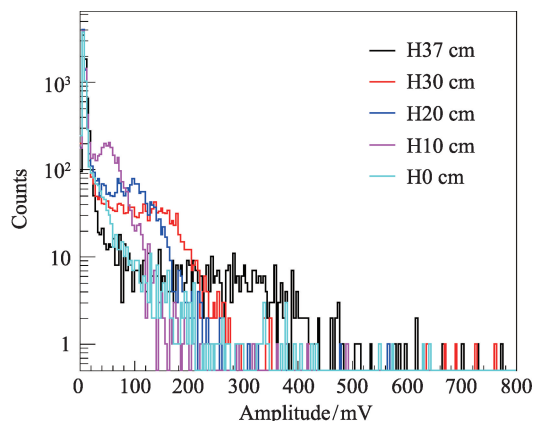


图10 PMT信号在不同水深下的幅度谱。
不同颜色的线代表不同水深下PMT的幅度谱

伏。在有水的情况下,幅度谱的右边各自会有个峰,这是PMT收集到的宇宙线穿过水产生的切伦科夫光信号,随着水深增加,宇宙线穿过水的径迹长度增加,产生的切伦科夫光也变多,信号幅度变大,幅度谱随着水深的增加往右移动。图中看出,不管何种水深,总会存在低于20 mV的信号,这是由探测器的材料或者周围材料的放射性造成的本底。

分析2:信号的电荷谱

对信号进行积分,就能获得信号的电量 Q :

$$Q = \sum_i \frac{U_i}{R} \cdot t \quad (1)$$

其中 U_i 为存储的波形第 i 个点的电压值,存储波形的每个点的电压值求和; R 为电路的接地电阻,50欧姆; t 为波形上每个点的时间,1纳秒。信号的电荷除以单个电子电量和PMT的增益,即可得到实验装置收集到的光电子数 N_{pc} :

$$N_{pc} = \frac{Q}{e \cdot G} \quad (2)$$

其中 e 为单电子电量; G 为PMT的增益。多个信号的光电子数统计在一起,就得到光电子谱,实验中采集了不同深度下的光电子谱(图11)。

可见,我们的实验装置采集的光电子数跟水深有关系,水的深度增加,宇宙线穿过水的径迹变长,产生更多的切伦科夫光。宇宙线从上到下穿过37 cm深的水,可以收集到60~80个光电子。宇宙线在水中每厘米大约产生两百多切伦科夫光子,光子经过反射膜的反射和自来水的衰减,最后到达装

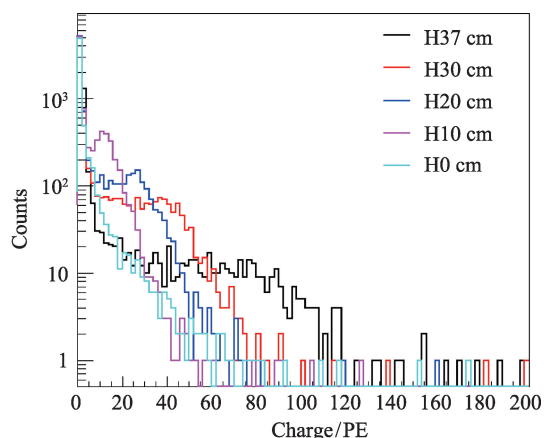


图11 不同水深下的光电子谱

置的顶部,被量子效率约25%的3英寸的PMT接收。通过估计,如果宇宙线穿过37 cm水深,实验装置大约收集70多个光电子。实际测量结果跟我们的估计符合,也从侧面印证了装置的可靠性。

分析3:宇宙线事例率

实验为了去除周围放射性本底信号(图10中左边低于20 mV的信号),我们选择20毫伏阈值且两个PMT同时看到信号作为宇宙线的计数,在不同水深下,PMT信号计数率随着水深度的增加而增加;37 cm深的水,探测到事例率大约为25 Hz(图12)。

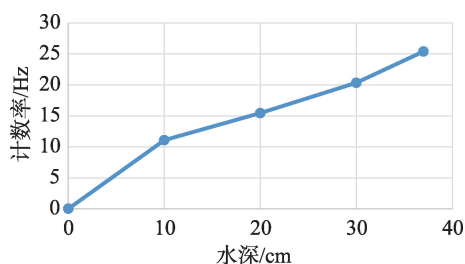


图12 水深和计数率的关系

我们都知道天外来的原初宇宙线,到达地面以 μ 子为主,大约1平方米水平放置的探测器,每秒钟测到150个^[2]。根据这个条件,我们可以粗略估算普通的水桶装满水,大约能接收到20多赫兹的宇宙线,这与我们实验中得到的数据一致。如果没有装满水,相当于探测器接收各个方向来的宇宙线的有效面积降低,测到的计数率也会降低。

这里列举了3个研究问题,学生还可以自己开发,做其他的有意思的探究。

五、总结和展望

通过简易的水桶实验,学生可以自己动手搭建实验,利用实验室已有的示波器,只需要购买光电倍增管就能看到宇宙线信号,这是实验的基本目标。如果进一步存储到宇宙线信号,就很容易得到量化的研究内容,培养和锻炼科学分析数据的能力。

学生自己动手搭建探测器,比如灌水,研究避光等,有一定的趣味性,涵盖多个相关知识点:切伦科夫辐射、光电效应、光的反射、PMT数量的使用、符合的概念;信号大小、电荷收集、事例率和水深的关系等,还可以增加发散思维,例如如果在自来水里加上墨水,让水变浑浊,信号大小是否变化。

本实验装置,相对其他探测方法,具有材料易获得,搭建简单、价格便宜的优点。可作为中学生甚至大学生动手操作的探究实验或宇宙线选修课的一部分。

项目:北京市朝阳区教育科学“十四五”规划2022年度一般课题“基于校园宇宙线观测提升高中生科学素质的实践研究”(课题编号:2022YB305)。

参考文献

- [1] 重走宇宙线发现之旅,刘佳,现代物理知识,2022,34(3):49
- [2] 每秒有多少宇宙线穿过我们的身体,赵静 马玲玲,现代物理知识,2022,34(5):49
- [3] 空气电离之谜,熊峥 刘佳,现代物理知识,2022,34(3):54
- [4] 宇宙线粒子运动速度的测量,吕洪魁,现代物理知识,2022,34(5):54
- [5] The detector system of the Daya Bay reactor neutrino experiment, Daya Bay Collaboration, Nucl. Inst. Meth. A 811(2016): 133
- [6] http://pic.ihep.cas.cn/tpk/dkxzz_tpk/pic_DYB/201308/t20130808_3910445.html
- [7] https://ihep.cas.cn/xwdt/gnxw/2020/202101/t20210105_5851081.html
- [8] <https://www.km3net.org/>;
- [9] <https://www.km3net.org/wp-content/uploads/2016/07/Album-km3net-artist-expression.jpg>
- [10] <https://icecube.wisc.edu/>
- [11] <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>