

# 重走宇宙线发现之旅

刘 佳

(中国科学院高能物理研究所 100049)



## 一、我们想做一个事儿

宇宙线亦称为宇宙射线,是来自外太空的带电高能次原子粒子。大约89%的宇宙线是单纯的质子,10%是氦原子核(即 $\alpha$ 粒子),还有1%是重元素原子核。这些原子核构成宇宙线的99%。电子、 $\gamma$ 射线只占极小的一部分。在那个以人类技术无法加速微观粒子的年代,宇宙线为粒子物理与核物理研究提供了唯一的全天候近乎稳定的高能粒子束流。自20世纪30年代起短短的20年里,人们通过宇宙线实验相继发现了正电子、 $\mu$ 子、 $\pi$ 介子、K介子及 $\Lambda$ 超子、 $\Sigma$ 超子等粒子。宇宙线也贡献了三次诺贝尔物理学奖,1936年赫斯因发现宇宙线和安德森利用云室发现正电子而分享诺奖,1950年鲍威尔因核乳胶探测而获得了诺奖,可以说是宇宙线为人们揭开了高能物理大幕的一角。

1952年,位于布鲁克海文的质子同步加速器开始运行,不久之后就在实验室中发现了奇异粒子,而且产出率在不断地增加。粒子物理领域在20世纪80年代在成熟的加速器技术的支持下迈入了黄金的时代。宇宙线研究也逐渐转向高能天体物理领域,宇宙线是人类获得的来自太阳系外的唯一物质样品,人类所探测到的最高能量的微观粒子就是来自于宇宙线的样本,该能量比目前人造加速器的最大能量要高数千万倍,广漠而寂寥的宇宙之下是激烈不息的天体演化。目前,宇宙线、电磁辐射、引力波并称为探索宇宙的三大探针,也是贯穿粒子物理学、天文学、宇宙学三大学科领域的基本研究对象。宇宙线的起源、加速和传播机制,以及它们与高能天体演化,乃至宇宙的演化等科学问题也无不

撩拨着人们的心弦。从宇宙线发现至今的一百余年间,宇宙线科学在物理学发展中扮演了异常重要的角色,始终丰富着人类对物质世界的理解,为我们描绘一幅高能宇宙的图景。

在历史上,中国学者依托中国的高原优势对宇宙线的研究也做出了宝贵的贡献。1954年就在海拔3180 m处的云南东川落雪山矿区,落雪山成为了我国高海拔宇宙线实验研究的起点。1958年在落雪山数千米外的海拔3220 m山顶建设了当时世界同类装置规模最大的新实验室,并将研究重心集中在超过当时加速器能量的高能物理研究上。1976年,在西藏海拔5500 m的甘巴拉山上,建起了迄今为止世界最高的高山乳胶室。在西藏羊八井,中日合作AS $\gamma$ 宇宙线实验于1989年启动,中意合作的ARGO实验于2006年启动,使得羊八井宇宙线观测站成为国际上最具代表性的高海拔宇宙线科学实验室之一。

从20世纪的50年代开始,中国宇宙线研究高山探测的科研人员穿梭于大山与风雪中已近七十年。这一历程受到了国际宇宙线领域的影响、推动,有竞争也有合作,随着技术的积累和团队的历练,中国的宇宙线也迎来了高峰,位于中国四川稻城的新一代海拔4410米的高原宇宙线观测站LHAASO已经于2021年投入运行。作为该实验的成员,我们有幸实践了LHAASO观测站从概念、计划、图纸、原型机到成型的实验阵列的发展过程。

在这里,我们真正想诉说的并不是关于宇宙线发现历史或者某个大科学工程孕育诞生过程的宏大叙事,而是想与中学生们分享我们在宇宙线研究过程中苦思冥想后的顿悟和思有所得后的奇妙感受。

## 二、为什么做这事儿？

当然是因为探索宇宙线很有趣,我们想把这份有趣分享给大家。

宇宙线是天然易得的免费的实验样品,是“天上掉下来的馅饼”,时刻经过我们身边,穿过我们的身体,却安全无害;宇宙线探测器涉及速度非常接近光速的极端相对论性粒子与物质的相互作用,需要用到像爱因斯坦借以获得诺贝尔奖的发现——光电效应等近代物理学知识,涉及纳秒量级(1纳秒是1秒的十亿分之一)的高速电子学技术,其探测基于光的形成、照相机底片感光、显像管发光等日常生活中的自然现象和物品相同的物理学原理,这些对于中学生既非常贴近生活,又充满神秘,可以激发学生强烈的好奇心和探索欲望。宇宙线作为科学研究领域非常高端,其测量方法与手段历经上百年的发展,已经非常成熟,通过针对性的简化设计,成为中学生可以亲力亲为,亲自设计实验方案,亲手搭建探测器,采集实验数据,亲自分析数据,获得中学生可以理解的实验结果,有些实验结果甚而现在依然具有一定科学的意义。校园宇宙线实验可以作为中学生的一项教学活动,中学生经简单培训后便可以学会,而中学教师可以深入掌握。

世界上很多国家的中学生早就在感受这份有趣了。世界上已有十几个国家、数百所中学建立了宇宙线观测站。美国国家科学基金会和美国能源部科学办公室的高能物理办公室资助高中学生开展科学研究,其主要项目就是中学宇宙线探测器阵列。欧洲核子研究中心、美国费米实验室、德国 DESY 实验室和意大利核物理研究所等国际顶级研究机构都积极参与校园宇宙线项目。相关研究机构每年还组织“国际宇宙日”活动,通过网络视频会议交流中学生宇宙线实验研究的方法和成果,并由科学家为中学生做宇宙线科普报告。

已经有中国的中学生体会到了这份有趣。在中国,类似项目起步比较晚,中国科学院高能物理研究所的沈长铨老师在北京市东直门中学建立了

第一个校园宇宙线观测站,自2016年起连续六年参加了“国际宇宙日”活动<sup>①</sup>。

在有趣之外,还有一份责任。参与课程设计的成员大都来自高海拔宇宙线观测站(LHAASO)实验组。LHAASO实验是2021年刚刚建设完成的国家重大科技基础设施,它位于海拔4410米的四川省稻城县海子山上,是世界上海拔最高、规模最大、灵敏度最强的宇宙射线探测器装置。作为一个大科学装置的成员,我们有意愿也有能力向公众和学生来传播宇宙线的相关知识。

## 三、我们心中的这个事儿

宇宙线实验非常适合中学教育,如何做呢?俗话说:堂前生瑞草,好事不如无。作为初涉中学教育,我们希望给学生们怎么样的一种有趣体验。这也是困扰LHAASO项目副经理兼总工艺师何会海研究员的问题。在经过多次头脑风暴之后,何老师希望这个课程是一门以问题为导向,由学生们自己去找到答案的课程,是一门重在过程学习的、自我思考的、培养科学思维的课程。他为这门课程设立了目标与宗旨。

目标:1)重启好奇和兴趣;2)激发探究的欲望;3)培养质疑的精神;4)增强解决问题的信心;5)掌握基本的科学方法;6)培养发现性思维。

宗旨:以一系列的问题为导向,通过学生在老师指导下自己拼装探测器、设计实验、实施实验、获得实验数据、分析实验数据来逐步验证猜想,引导学生探知宇宙线的世界,激发学生探索未知的兴趣,培养学生提出和发现问题、分析问题、自己动手解决问题的能力,培养学生的科学精神、科学素质和科学的思维能力,掌握一些科学的方法。

有了目标与宗旨,我们还需要一个载体来达到目的。我们觉得宇宙线从发现到了解它的一些基本性质这个过程本来就是如此地自然与符合人类认知,为什么不能让学生们利用现代实验设备自己再一次发现宇宙线呢?于是我们把课程取名为“**重走宇宙线发现之旅**”,而这个“旅”字也与我们希望

这门课是一个过程学习相契合。整个课程我们将分为9部分,每一部分都会去回答一个问题,而每一个问题又都是环环相扣的。

1. 空气电离之谜——谁偷走了电荷。该课程从宇宙线发现入手通过实验带领学生们一步一步找到偷走了电荷的小偷是宇宙线,不是“地球线”也不是“空气线”。赫斯因为发现宇宙线获得了1936年的诺贝尔物理学奖。

2. 每秒有多少宇宙线在穿过我们的身体——宇宙线流强。既然我们知道这些射线是从地球之外来的,那我们就来测量一下它的性质之一——强度。

3. 来自宇宙的粒子炮弹有多快——宇宙线速度的测量。有了强度我们继续探索看看这些宇宙粒子炮弹有多快,我们来测量一下它的速度,答案是竟然和真空中的光速几乎一样快,而我们在教室里就可以很容易地进行测量!

4. 大气保护了地球生命——什么是广延大气簇射。了解了穿过我们身体的宇宙线,我们会提出一个疑问大气层真的保护了我们吗?真的是一个个原初宇宙线击中了我们吗?就像1938年大科学家Pierre Auger一样来发现广延大气簇射(我们形象地称其为“粒子雨”),科学家把大气作为探测器的一部分来测量原初宇宙线。

5. 宇宙线是从哪里来的——太阳是否为宇宙线源。既然我们可以测量原初宇宙线,马上我们会提出最直接的问题,它来自哪里?在我们身边最强大的天体就是太阳,我们就带着学生们通过实验测量得出太阳是否是宇宙线源。

6. 宇宙线有无带电——宇宙线是否是带电粒子。如果我们不知道宇宙线源在哪里,但是我们还是要追寻蛛丝马迹来得到更多的信息。宇宙线既然是粒子我们就来看看它是否带电。

7. 宇宙线带什么电——宇宙线电荷正负问题。如果我们知道它是带电的,当然我们会问它是带正电还是负电。

8. 宇宙线有什么用——我们来检验一下高深的狭义相对论。通过测量缪子寿命,学生们会惊奇

地发现速度快了钟表真的会变慢。

9. 宇宙线能让水发光你信吗——神奇的切伦科夫辐射。通过实验,测量带电粒子在水中发出的切伦科夫光,切伦科夫凭借这一发现获得了1958年的诺贝尔物理学奖。

在这一系列实验的过程中,学生会对微观世界有一个初步的认识,掌握一些基于EXCEL的简单的数据分析方法,还会用到多项式方程求解、几何算法、级数、三角函数等初高中数学知识。更重要的是,学生们是带着问题去思考、去动手,认识上也会更加深刻,最后得到分析结果,撰写论文与报告,甚至代表中国参加“国际宇宙日”的活动。

#### 四、“重走宇宙线发现之旅”途中的“玩具”

有了这些课程设计,就需要一些用以完成这些课程的实验装置,与其称它们为教具,我们更希望把它们称为“玩具”:希望老师们可以带着学生们一起玩。我们的“玩具”有两套:一套是宇宙线探测器阵列,另一套是缪子望远镜。

##### 1. 宇宙线探测器阵列

由塑料闪烁体+空气光导箱+光电倍增管构成一个单元探测器,塑料闪烁体尺寸为70 cm×70 cm,光电倍增管直径2英寸,单元探测器时间分辨要求优于2 ns(ns是“纳秒”)。

由5台单元探测器均匀排布于一定的面积上便构成一个宇宙线探测器阵列(图1),可放在屋顶、室内或其他安全地点。每个单元探测器的信号经信号线传输到中央电子学及数据获取系统,电子学采用自研的8路读出的电子学板,实现对信号的快速甄别和信号到达时间及过阈宽度的测量,在线统计单路触发频次,并依据单路时间信息进行符合判别,由一台工控机就近获取数据。

当带电粒子击中某台单元探测器时,闪烁体会发出荧光,部分荧光会被空气光导箱收集到光电倍增管,光电倍增管通过光电效应把光子变成电子再

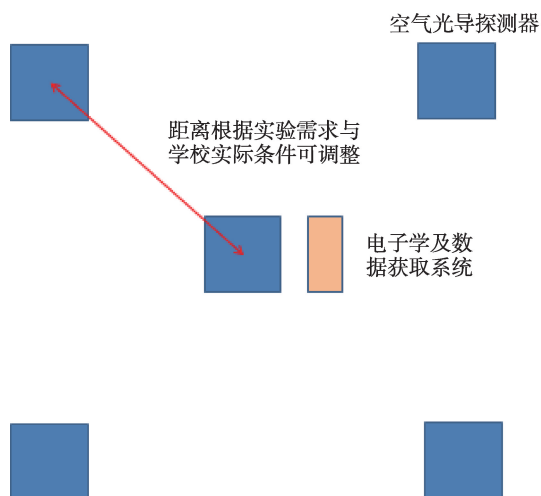


图1 宇宙线探测器阵列示意图

放大千万倍,而该信号的过阈时间和过阈时间宽度会被记录下来。

一个原初宇宙线与大气相互作用,发生广延大气簇射,产生的次级粒子几乎都按照原初宇宙线的方向平行着飞。当多个粒子几乎同时击中几台或者全部单元探测器时,通过对这几台击中探测器时间差的测量,我们可以重建出原初宇宙线的方向。

## 2. 缪子望远镜

缪子望远镜由两台单元探测器插入一个可旋转固定成各种倾斜度的支架中构成,单元探测器间的距离及望远镜指向均可调,采用和上述阵列相同的电子学模块与数据获取系统。每台单元探测器由一块40 cm×40 cm×4 cm的塑料闪烁体直接耦合一直径1.5英寸的光电倍增组成,时间分辨优于1.5 ns。

缪子望远镜的探测器原理与阵列单元探测器的原理是一样的:当带电粒子击中探测器时,闪烁体会发出荧光,只是现在荧光没有通过空气光导而是直接传播到光电倍增管,光电倍增管通过光电效应把光子变成电子再放大千万倍,而该电信号的过阈时间和过阈时间宽度会被记录下来。

我们为江苏省姜堰中学制作了一套宇宙线探测阵列和一套缪子望远镜(图2),现场测试表明:组成阵列的5台宇宙线探测器时间分辨均在1.7 ns左右,均优于2 ns的指标要求;组成缪子望远镜的2台探测器时间分辨达到了1.05 ns,均优于1.5 ns的指标要求。这些探测器完全满足性能要求。

小试牛刀,我们来测测宇宙线。根据实验室的条件我们将探测器做了如图3的排布,马上就测量到了符合信号,也就是我们测到了广延大气簇射事例,那种被称为“粒子雨”的神秘事件。

## 五、小结

这就是我们的初衷、我们的想法与我们的方向,我在这里分享给大家。有些读者可能会对部分内容有些困惑,不必担心,在后面每一个课程中,我们都会帮助你理解它的意义。希望有兴趣的你加入我们,一起开启一段美好的旅程。

## 参考文献

- ① 本刊2022年第2期“中学园地”栏目有专门介绍“国际宇宙日”的文章

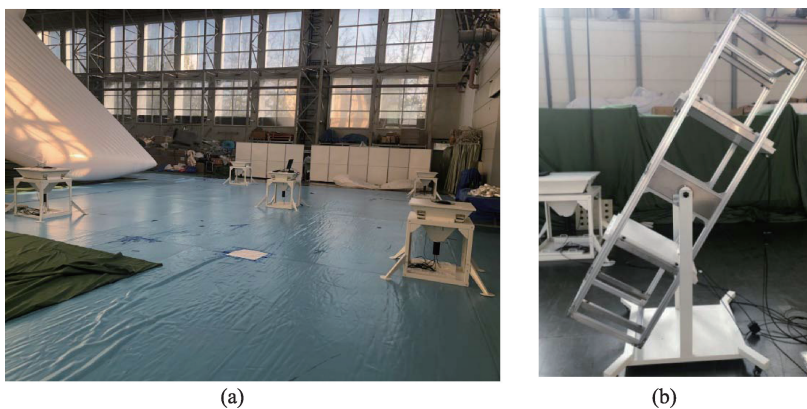


图2 姜堰中学宇宙线探测阵列(a)及缪子望远镜(b)组装现场测试

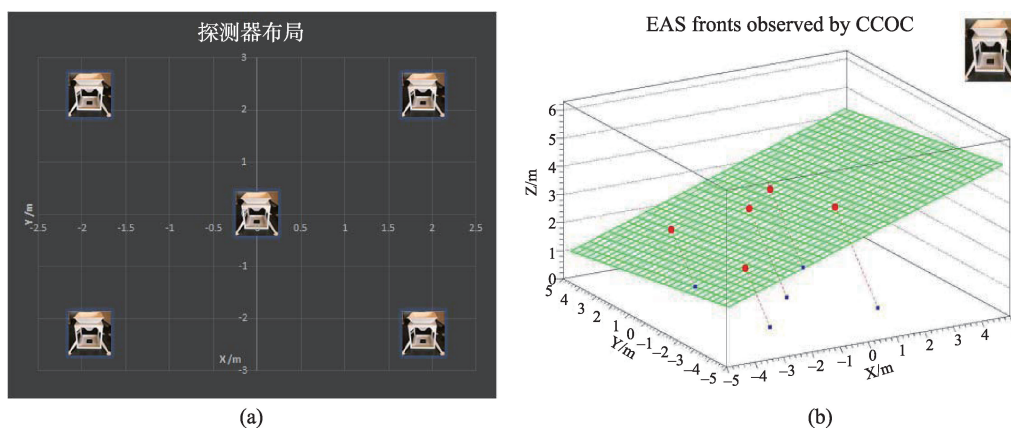


图3 (a)阵列布局;(b)5台探测器着火的一个广延大气簇射事例



## 科苑快讯

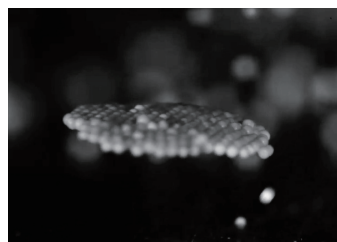
### 通过悬浮的珠子理解天体如何旋转

在发表于《物理评论 X》(Review X)上的一项研究中,芝加哥大学(University of Chicago)和巴斯大学(University of Bath)的物理学家描述了一种利用声音力量使塑料粒子漂浮、旋转和分离的方法。该发现将有助于理解其他快速旋转实体(包括黑洞、原子核和小行星)的物理机制。声悬浮有无数潜在应用,一些物理学家甚至将其作为组织工程中重新排列细胞的一种手段。

林(Lim)及其团队将直径小于1毫米的微小圆形塑料颗粒放入一个透明的盒子里。他们在盒子里放入一个可以产生驻波(一种静止的波)的扬声器,这样就能产生使这些小颗粒漂浮和移动的力。

声波使小珠子在悬浮中弹起并聚集在一起,形成一层小粒子组成的圆圈。声波在粒子间产生微弱的吸引力,也可以看成是像胶水一样的粘结力。当扬声器的声音频率调整时,圆形的团块在开始旋转之前就像波涛中的木筏一样摇晃。这个过程如同旋转飞椅被加速时,由于离心力的增加,使飞椅开始向外摆成扇形,而不是垂直向下。只不过在上述实验中,没有绳子把外侧的小珠子绑在一起。

声波的进一步改变会使旋转速度加快,达到一个临界点时,推力超过粘结力,整个粒子团就要改变形



状。离心力会将粒子团撕裂、拉伸成更长更细的团块,甚至分裂成更小的碎块。而有趣的是,碎块最终又会聚在一起,形成一个圆盘。这些颗粒会把自己拉成紧密的圆圈,从而减少表面积。

小行星可能会经历类似的过程,与实验中的小粒子相似,随着时间的推移,旋转会越来越快,导致其结构改变形状。这种旋转力需要很长时间才能显著改变小行星形状——相关测量表明,其自转速度自动翻倍所需时间约为10万年。

林说,研究组的微型悬浮系统可以模拟天体以及黑洞和原子核等其他自旋物体的物理特性,从而更好地揭示那些原本具有挑战性的研究过程。

(高凌云编译自2022年4月29日 Popular Science 网站)