

# 让宇宙线实验走进校园

## ——科普与科研结合的有效途径

沈长铨

(中国科学院高能物理研究所 100049)

提高全民族科学文化水平,实行人才强国战略,培养具有创新精神并热爱科学的年轻一代,是我国学校教育面临的一项重要任务。为此,多年前,北京市教委就开始了“翱翔计划”(让中学生在科学家身边成长)等一系列科学教育创举,以响应习主席号召:“坚持把抓科普工作放在与抓科技创新同等重要的位置,支持科协、科研、教育等机构广泛开展科普宣传和教育活动,不断提高我国公民科学素质,为实现到我们党成立100周年时进入创新型国家行列、到新中国成立100周年时建成科技强国的宏伟目标,奠定更为坚实的群众基础,社会基础”。

近几年来,中国科学院高能物理所的科研人员一直指导北京市东直门中学学生的“翱翔计划”,取得了可喜的成果。接着,又在“翱翔计划”工作的基础上,研制了宇宙线观测装置,并于2016年开始运行和数据收集,取得了良好的结果。

几年中,科研人员编写了简明宇宙线物理基础教材,对参与实验研究的学生进行了系统的宇宙线物理知识和实验能力的培训,并让他们实践一个宇宙线实验全过程,动手制作宇宙线测量装置和宇宙线科普仪器,获益非浅。

宇宙射线发现于1912年,它是来自宇宙空间的高能粒子,携带了天体演化和宇宙的丰富信息,是人类能够获得的来自太阳系外的唯一物质样品。

百年以来,科学家们在宇宙线研究中取得了许多重大结果,宇宙线研究产生的诺贝尔物理学奖多达6个。宇宙线研究还为粒子物理学、天体物理学、天文学和宇宙学的研究做出了巨大的贡献,成为一

个真正的前沿交叉学科。它也还是新世纪科学重大前沿之一。因此,我们可以说,宇宙线研究虽已历经百年,但仍生机盎然,充满机遇。

高能宇宙线进入地球大气层时会撞击大气原子核,发生强作用和电磁作用,并产生次级粒子,次级粒子能量足够高时又会在向下飞行时再次发生碰撞,产生新的次级粒子,如此重复,次级粒子数急剧增加,这就是广延大气簇射(Extensive Air Shower,简称EAS)现象(如图1所示)。而随着次级粒子数的增长,其能量则越来越低,因而衰变或被大气吸收的几率增大,随大气深度的增加(即海拔高度

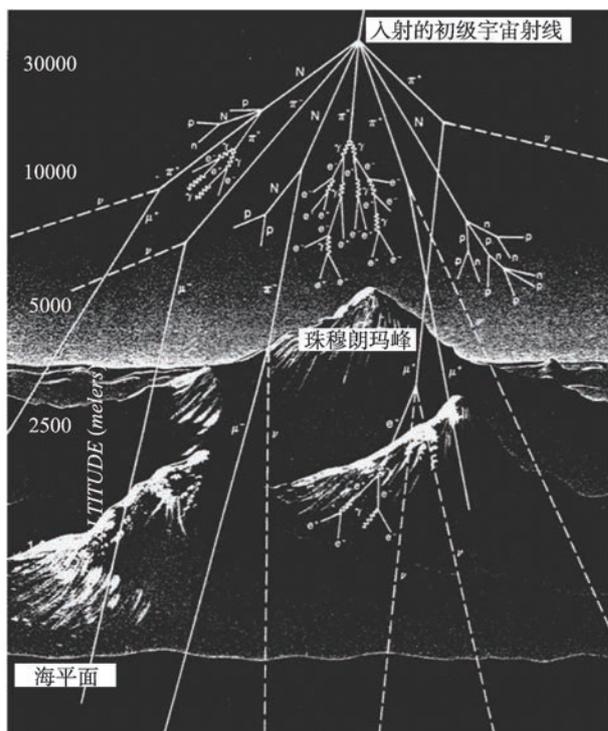


图1 广延大气簇射(EAS)原理示意图  
纵向为以米为单位的海拔高度;为便于画图,横向大大地拉宽了。

的降低)、次级粒子数达到一个最大值后,就会逐渐减少。次级粒子的运动方向都接近原初宇宙线粒子的方向。在EAS发展到极大处,粒子数最多,可以用较少的探测器获得较精确的测量效果。对于 $10^{14}$ eV的宇宙线,其EAS极大处约在海拔5000米,这就是我们在西藏羊八井(海拔4300米的AS- $\gamma$ 阵列和ARGO阵列)和四川稻城(海拔4410米,LHAASO)建立EAS阵列的原因。对于能量 $10^{20}$ eV的宇宙线,其EAS极大处接近海平面。目前最大的宇宙线观测站Auger就专注于研究能量在 $10^{18}$ ~ $10^{21}$ eV的宇宙线的广延大气簇射,它的海拔高度只有1420米。

能量 $10^{14}$ eV的初级宇宙线可产生几十万个次级粒子(绝大部分是电子和光子),它们大部分分布在数百米距离内,几乎同时到达地面。粗略地说,落到地面上的空气簇射粒子总数,近似正比于初级宇宙线的能量,还和初级粒子种类有关。利用空气簇射现象,可以在地面上用探测器阵列来探测极高能初级宇宙线的方向、能量、轴心位置和种类。

极端高能宇宙线的起源、加速机制和传输过程好多年以来一直是个重大的问题,至今仍然是高能

天体物理领域的未解之谜。当前宇宙线研究的一个前沿重点是极高能宇宙线的能谱、成分、起源和加速机制。

我们研究的宇宙线能量越来越高,而能量每提高10倍,宇宙线强度就减少约100倍左右。能量高达 $5 \times 10^{19}$ eV的极端高能宇宙线(Extreme-Energy Cosmic Ray简称EECR)流强极弱,地面1平方千米探测面积上,平均每一百多年才能测到一个EECR。现今世界上面积最大的宇宙线实验装置PAO(Pierre Auger Observatory)坐落在南美的阿根廷,它于2008年建成。其占地面积有3000平方千米,参与项目研究的科学家和工程师有450人,分别来自16个国家,68家研究机构。目前,科学家们正在北半球美国的南科罗拉多州东南部建造一个占地20500平方千米的更大的类似实验装置。要知道,我们北京市的面积才16000平方千米,竟然没有一个宇宙线观测站的面积大!要建造这样的宇宙线观测站,无论是基础设施建设,还是探测器的建造以及日常的运行维护,哪一项都耗费巨大。

很可能一个极端高能宇宙射线粒子形成的广延大气簇射会散布于更大面积。我们只能用分布

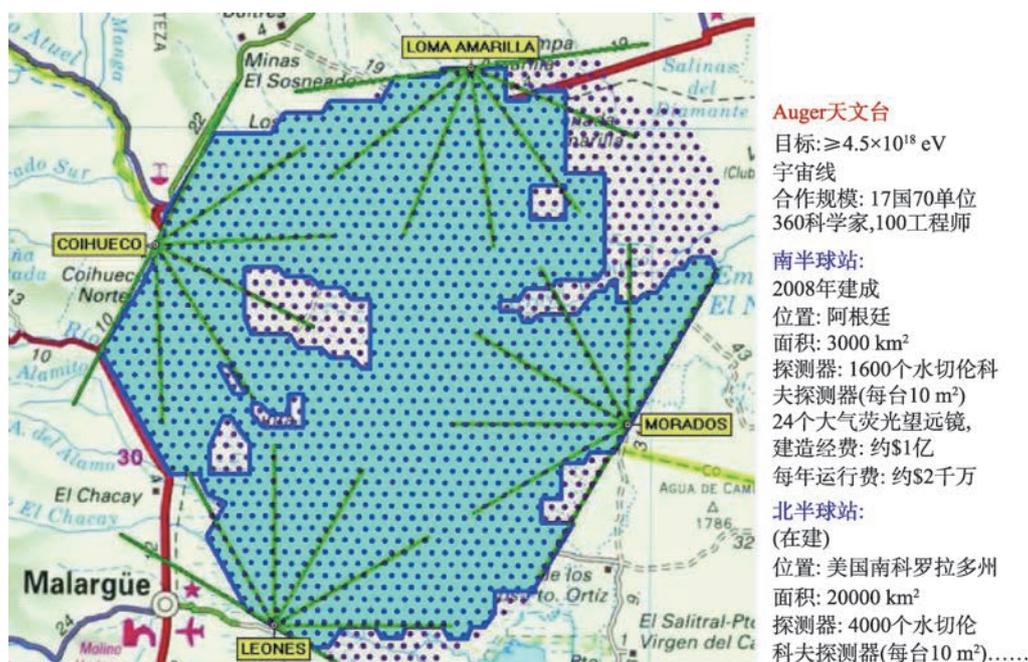


图2 南半球 Auger 宇宙线天文台 PAO

于比PAO更大距离的探测器阵列来观测它们。

识别原初粒子质量成分的另一个可能的方法是用相距几百上千千米的多个大阵列来观测EAS。极端高能宇宙线重核在行星际空间与太阳可见光光子( $\sim 1\text{ eV}$ )发生光致裂变,如果其碎片粒子导致的多个EAS事例能被相距几百千米的几个EAS阵列同时测得,而且其中每个EAS的能量可以估算得,就可以直接探测能量大于 $10^{18}\text{ eV}$ 宇宙线的质量成分。这一思想原初是由 Zatsepin 和 Gerasimova 提出的,这个过程就称为GZ效应(Gerasimova, N. M. and Zatsepin, G. T.: Splitting of cosmic ray-nuclei by solar photons, ZhETF, 38, 1245-1252, 1960.)。

显然,为了研究极端高能宇宙线EAS的需要,我们必须把实验站做得更大。那么,有没有更方便更经济的方法呢?

20世纪末,加拿大科学家率先提出了一项创意,让科学家和学校联合,把宇宙线实验装置放到校园中去。他们的计划是:让科学家进校园,对有兴趣的同学普及宇宙线物理知识,并开展实验技能培训,继而让学生们参与探测器的组装,监视探测器的日常运行,并进行数据的提取和分析。

1998年,加拿大艾伯塔的ALTA实验率先投入运行。目前,他们已经在3个城市的17所学校建立了宇宙线实验站。

其后,此类实验在欧美多国大量开展起来,特别是在美国。目前,美国有一百几十个学校实验站,其中加州洛杉矶地区的CHICOS中学宇宙线站网就有八十多所中学建站入网。

2001年,北美大尺度时间符合阵列(North American Large-scale Time-coincidence Array, 简称NALTA)建立,它由分布于北美洲的大学物理系与高中合作研究宇宙射线广延大气簇射装置组成。包括:

- 美国华盛顿州的WALTA (Washington Large area Time coincidence Array)阵列;
- 加拿大艾伯塔省省会埃德蒙顿市的ALTA (Alberta Large area Time coincidence Array)阵列;

- 美国科罗拉多州Snowmass地区一批高中安装探测器形成的SALTA (Snowmass Area Large-scale Time coincidence Array)阵列;

- 美国新英格兰(美东北六州)的CROP (the Cosmic Ray Observatory Project)阵列;

- 美国马萨诸塞州各中学的SCROD (School Cosmic Ray Outreach Detector)阵列;

- 美国加利福尼亚州洛杉矶地区80余所高中的CHICOS (California High school Cosmic ray Observatory)阵列。

NALTA各地区阵列分布示于图3。其中的CHICOS建立宇宙线探测器阵列的中学分布如图4所示。CHICOS各中学站得到加州理工学院提供的探测器,IBM捐赠的可观数量的计算机用于各学校探测器的数据收集,美国国家科学基金会提供CHICOS项目的连续运行经费。CHICOS已有科学论文在权威的学术刊物《JOURNAL OF PHYSICS G: NUCLEAR AND PARTICLE PHYSICS》上发表(J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 31, 409-416, 2005)。

欧洲的荷兰、瑞典、波兰、捷克、意大利、英国、法国、葡萄牙、德国、芬兰等国,已建和计划建立的中学宇宙线观测站也多达百余个。欧洲各国的中学宇宙线阵列分布如图5所示,其中最大的意大利EEE阵列有100个中学参加,其中50个中学已经建设并运行其探测器望远镜阵列,已经有100多个中学教师和500多个中学生参加;荷兰的HiSPARC阵列,由5个城市的30个中学站组成(荷兰面积才4万余平方千米);波兰的ROLAND MAZE阵列由Lodz市的10个中学站组成。

日本在一批大学中建立了宇宙线EAS阵列,进行类似的联合观测和研究。已有科学论文在权威的学术刊物上发表(Astrophys. Space Sci. Trans., 7, 327-333, 2011)。

美国执行了QuarkNet项目(<https://quarknet.org/>)开展高中学生科学研究,由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,美国费米国家加速器实验室(简称Fermilab)和



图3 北美大尺度时间符合阵列NALTA各地区阵列分布图

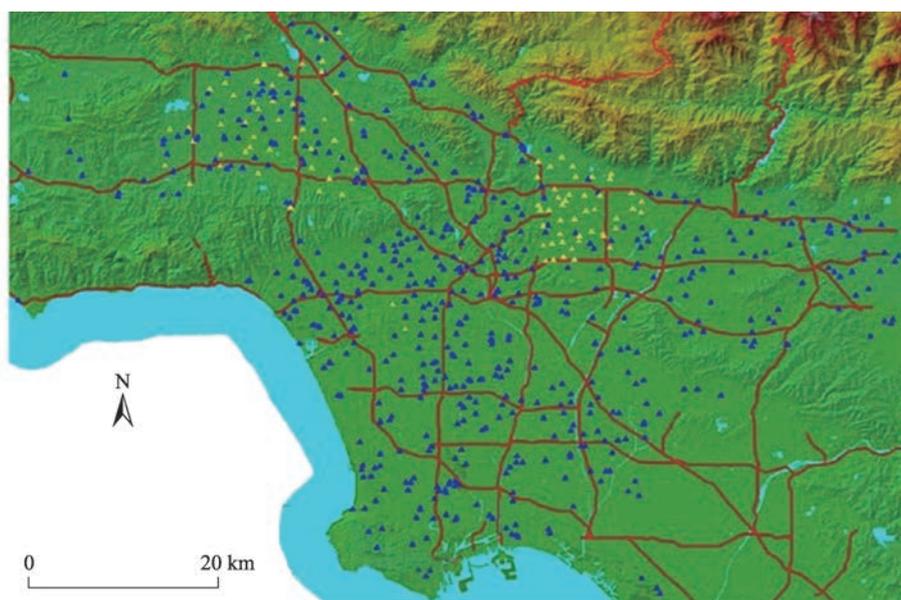


图4 洛杉矶地区CHICOS建站的中学分布图。图中黄色和橙色点是正在运行的探测器阵列,蓝色点是未来可能增添的探测器阵列

美国圣母大学帮助高中学生进行科学研究。它已经构成一个开放型世界中学宇宙线研究网络e-Lab (网址 <https://www.i2u2.org/elab/>), 世界各国中学生和中学教师都可以参加该网络(无论该学校是否已

建宇宙线探测器阵列), 分享中学宇宙线探测器阵列已采集的数据, 交流研究方法和成果, 直接参与到当代宇宙线研究的前沿。

一段时期以来, 美国中学生的数学和物理学成



图5 欧洲中学宇宙线阵列分布图

绩差强人意,大学生选择数学和物理专业的学生数量很少。但在大量校园宇宙线实验站建立以来,这一情况有所改观。美国的一项调查统计显示,学生们对物理学的兴趣有所提高,报考大学物理专业的人数也在增多,有一些参与校园宇宙线实验站的中学生报考了大学物理专业。

QuarkNet, Fermilab, 德国粒子物理研究中心 (DESY) 和 IPPOG\*(International Particle Physics Outreach Group)联合,每年组织全球网络视频会议“国际宇宙日”(International Cosmic Day),交流中学生宇宙线研究实验的方法和成果,让全世界的中学生做同一个题目的宇宙线实验进行交流,由科学家为中学生做宇宙线科普报告。

研究宇宙线的仪器设备和方法包含丰富的当代先进技术(高能物理基础知识、天体物理基础知

识、粒子探测技术、毫微秒快电子学技术、GPS和北斗卫星定位定时技术、遥控遥测技术、计算机大数据通讯技术、互联网远程控制技术、计算机模拟计算技术和现代实验数据处理方法等)。因此,将宇宙线研究带入中学,可以让中学生受到现代科学研究的真实训练,全面提高学校师生的科技素质,在青少年中培养创新人才。

宇宙线是天然易得的研究样品;研究宇宙线的仪器设备和方法是成熟的,包含丰富的当代先进技术,而且是中学生经培训后可以学会的,是中学物理教师可以深入掌握的。北京市东直门中学在北京市教育局的“北京市中学开放式重点实验室专项经费”支持下,在专业科研人员的指导下,建成了中国第一台中学校园宇宙线观测站。这一观测站就放置在学校教学楼的楼顶上,由9个闪烁探测器、前



图6 意大利EEE项目的中学网分布地图:红点表示一个已经建立了探测器的学校,蓝点表示一个虽然尚未建立探测器但参加EEE项目的学校

端电子学、信号数字化电路、光电转换、GPS和北斗时钟、信号光缆、微机实时在线控制和数据采集系统等构成。该校还建成了由3个闪烁探测器和先进毫微秒快电子学仪器构成的宇宙线物理教学和实践实验室,并编写了《中学生宇宙射线物理基础教程》。可以说,该校为宇宙线研究走进中国校园已经迈出了坚实的第一步,积累了成功的经验。

东直门中学的师生已经连续两年参加了国际宇宙日(2016年(第五届)和2017年(第六届))活动,在会上宣讲了他们的实验报告。他们提交的论文已编入会议文集。这一活动使中学生在科学家带领下亲历一个完整的科学研究过程,受到科学研究的训练,增长了知识,开阔了国际视野,积累了国际交流的经验。在世界中学生的一个科学论坛上填补了中国大陆中学生的缺席(此前我国只有一个台湾中学出席)。

中国科学院高能物理研究所宇宙线研究的悠久历史,有优秀的研究队伍,在宇宙线研究领域已经进入国际水平,在建的国家大型科学装置“高

海拔宇宙线观测站”(LAHHSO)将成为世界四大宇宙线研究中心之一。这为在学校中开展宇宙线研究提供了良好的基础。中国地域广阔,地形复杂,海拔高度从1米到4500米都有学校,学生人口众多,这是国内开展宇宙线研究得天独厚的条件。因此,如果能对学校宇宙线实验给予更大的关注与支持,率先在北京、上海等教育资源丰富的城市建立中学和大学宇宙线实验站阵列,进而组成一个全国性的阵列,就能给孩子们的未来打开一片新的天地,他们中间可能出现更多的物理学爱好者,甚至是真正的科学家;同时也可能获得更多更好的实验成果,在极端高能宇宙线研究中打上中国印记。

本文作者亲历了在北京市东直门中学建立宇宙线观测站、宇宙线实验室,指导学生进行宇宙线研究和组织参与国际宇宙日活动。深感让宇宙线观测走进校园是一个科普与科研结合的有效途径,值得在我国开展。率先在北京推广这一活动,可以发挥首都兼有教育资源优势和先进科学研究资源优势的得天独厚条件,让中学生和中学教师直接参与当代物理学研究的前沿,在科学家直接指导下亲历最先进的科学研究过程(超高能宇宙射线实验研究),受到现代科学研究的训练,为中学生开启真实的科学大门,培养热心科学的拔尖创新人才;增强中学物理教师的学术造诣,提高中学物理教育水平;同时也可以让中学生和中学教师与科学家一起在物理学研究的前沿探索,在前沿科学有所成就。

让宇宙线观测走进校园,就是一个科普与科研结合的有效途径。中学生就是未来把我国建成科技强国的生力军,是科普的重要对象。青年的科普活动,尤其重要。

\*IPPOG 目前成员包括:欧洲核子研究中心(CERN)22个国家、巴西、澳大利亚、爱尔兰、斯洛文尼亚、南非、美国以及 DESY、CERN、日本的 Belle II 实验和世界最高能大型强子对撞机(Large Hadron Collider, 简称LHC)的5个实验组。