

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.z1.10

TAROGÉ 射电望远镜简介

黄明辉^{1,2}, 南智佑¹, 陈志清¹, 陈劲豪¹, 陈政维¹, 陈丕燊¹
许世颖¹, 黄建中¹, 刘宗哲¹, 萧宇劭¹, 王名儒¹, 王士豪¹

(1. 台湾大学 梁次震宇宙学与粒子天文物理学中心, 台北 10617; 2. 联合大学 能源工程学系, 苗栗 36063)

摘要: TAROGÉ (Taiwan Askaryan Radio Observatory for Geo synchrotron Emission) 是一个安装于台湾东部山上, 面对太平洋的射电阵列, 用来侦测极高能量的宇宙线及中微子。利用这里南北向的地磁场使大气簇射中的正负电子产生分离, 产生射电。另外海面可以当成反射镜, 将远处大气簇射的射电传向阵列, 大幅扩大望远镜涵盖面积。TAROGÉ 的第一个测试天线站已经在 2014 年架设于花莲县和平乡, 共计有 12 支天线, 主要用来测试与学习天线站的运作, 以作为未来大量发展的基础。在改进天线的架构后, 第二座天线站也在 2015 年冬季安装完成。两站的观测数据也持续累计中。未来将在两岸各地寻求其他适合场址, 以拓展 TAROGÉ 涵盖规模与科学探索能力。

关键词: 宇宙线; 中微子; 大气簇射; 射电望远镜

1 粒子天体物理学与射电技术

20 世纪 90 年代极高能宇宙线及中微子研究快速兴起, 至今还有许多未解的难题, 仍将继续成为重要且受关注的课题。这些极高能量的粒子与大气作用, 产生数量庞大的次级带电粒子, 形成大气簇射 (Extensive atmospheric shower, EAS)。这种极高能量粒子的通量非常小, 约每平方千米每世纪才有一个! 传统侦测方式仰赖侦测器直接侦测这些次级粒子, 因此占地极广; 繁复的设备需要耗用资金非常庞大, 参与人力众多。目前全世界最大型的皮尔欧杰极高能宇宙线观测站 (Pierre Auger Observatory, PAO), 占地面积约 $3\,000\text{ (km)}^2$, 总建设经费约 5 000 万美元, 约有 300 多位科学家参与^[1]。

早在 20 世纪 60 年代, Askaryan 就提出以射电侦测 EAS 的可能性^[2, 3], 但从未成功地应用在观测中。直到 ANITA 团队在实验室侦测到簇射产生的射电脉冲波^[4], 后续并在南极进行高空气球飞行实验, 从 32 km 的高空中侦测到十几个案例^[5], 证实以射电侦测簇射的技术是可行的。本实验组发现这些案例的射电信号分成由大气层直接进入或由冰层反射, 因此天线阵列可涵盖较大的立体角。而且在空气中射电波的衰减很少, 可以传递遥远距离。只要在一

资助项目: 台湾科技主管部门 (MOST-103-2633-M-002-004)

通讯作者: 黄明辉, mahuang@nuu.edu.tw

个占地极小的空间 (约数平方米) 建置射电望远镜, 天线就可侦测到距离遥远的簇射事例。其他实验组也开发不同的射电阵列, 企图以此技术侦测极高能粒子, 例如 LOPES^[6], AREA^[7], 与本实验组参与的 ARA^[8]。

2 TAROGE 实验

ANITA 实验飞行高度及广大的立体角使其涵盖非常大的侦测面积, 约 6 000 (km)², 为 PAO 的两倍, 但经费与人力却远远低于 PAO。不过气球飞行时间仍是短暂, 即便是未来超长期气球具有 30 天以上的飞行时间, 也不敌 PAO 365 天的连续操作。若能将此技术应用于地面, 就可以长时间的连续观测。

台湾岛上有许多南北向的高山, 若能将射电阵列安装于山上, 面对东方的太平洋。可以利用地磁场, 使簇射中的正负电子分离, 因此发射同步辐射。实验构想如图 1 所示。因此本实验组开发一个坐落于地面高山上的射电阵列, 并命名 TAROGE (Taiwan Askaryan Radio Observatory for Geo synchrotron Emission), TAROGE 的中文名称取其谐音“太鲁阁”, 这也是 TAROGE 第一站所在的花莲县当地原住民部落之名, 当地具有独特的峡谷地形, 是台湾著名的观光景点。

由地磁偏转产生的同步辐射信号与 ANITA 的信号不同, TAROGE 采用 5 dBi 长波偶极天线 (LPDA), 操作频率在 110 ~ 300 MHz。频率比 ANITA 低, 可以增强天线侦测能力, 使可侦测到的簇射能量阈值比 ANITA 的阈值更低, 大幅增加可侦测事例的通量。极高能宇宙线的簇射最大点出现在约 10 km 高空, 且方向比较接近水平, 故天线桅杆平行于水平面^[9]。

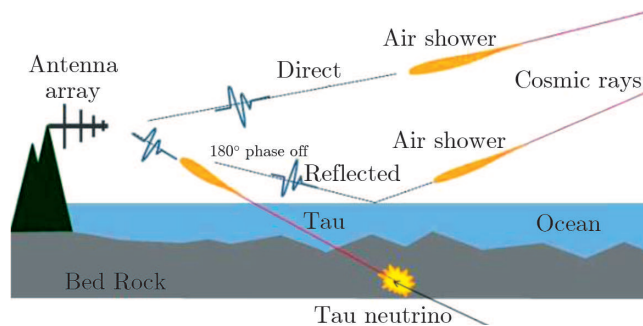
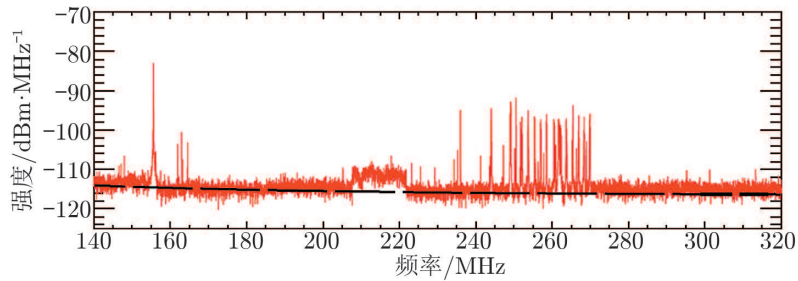


图 1 TAROGE 射电望远镜的示意图^[9]

3 TAROGE 射电观测站第一站

TAROGE 的第一个观测站 (简称 TAROGE-1) 选取地址比较方便出入, 设立在花莲县和平乡的一个 1 000 m 高的山头上, 距离海岸只有 2 400 m, 陡峻的山峰阻挡住山脚下的村庄

内人类活动的射电噪声。图 2 是在场址所测量到的射电背景, 除了特定的连续波段 (可用区段滤波器过滤掉), 其他噪声都在可接受范围。天线阵列架设在现址既有的一个高塔上, 分成 3 层, 每层 4 支天线, 共 12 支。每层的天线以水平与垂直间格摆放, 装置如图 3。



注: 红色为侦测到的信号强度, 黑色线为热噪声与银河盘面噪音的预期值。250 ~ 270 MHz 的连续区段为海事通讯用的射电频段。

图 2 TAROGE 射电背景^[9]

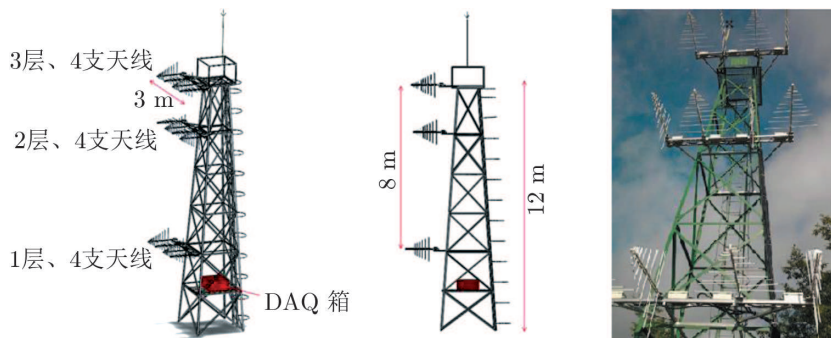


图 3 TAROGE-1 的天线阵列

为迅速开发 TAROGE 进度, 我们混合使用自制设备与商用示波器。整体信号摄取设备如图 4 所示。前端信号放大器采用本实验组为 ARA 开发的芯片, 信号的数字化由 4 台商用示波器 (GW GDS2304A) 处理。然后数字信号进入触发控制板, 采用多频谱同步触发技术 (multi-frequency bands coincidence technique)。信号分成 110 ~ 140 MHz、170 ~ 200 MHz、220 ~ 250 MHz 与 270 ~ 300 MHz 共 4 个波段, 避开部分连续谱噪声。每一波段的触发阈值都可调整, 多个频道必须同时触发才构成一个正确触发。侦测到事例后, 再从干涉图样推论波源的位置。

天线安装后会定期做校正实验。以相同的 LPDA 天线, 从海岸附近发射射电, 再由侦测的数据就可以验证整个实验的精确度与角分辨率。图 5 显示事例重建后, 对校正信号源的角分辨率与信噪比的关系图。大部分的事例在信噪比 11 倍以上可以达到仰角误差 0.1° 的精度, 足以辨认事件是来自海面或者空中。

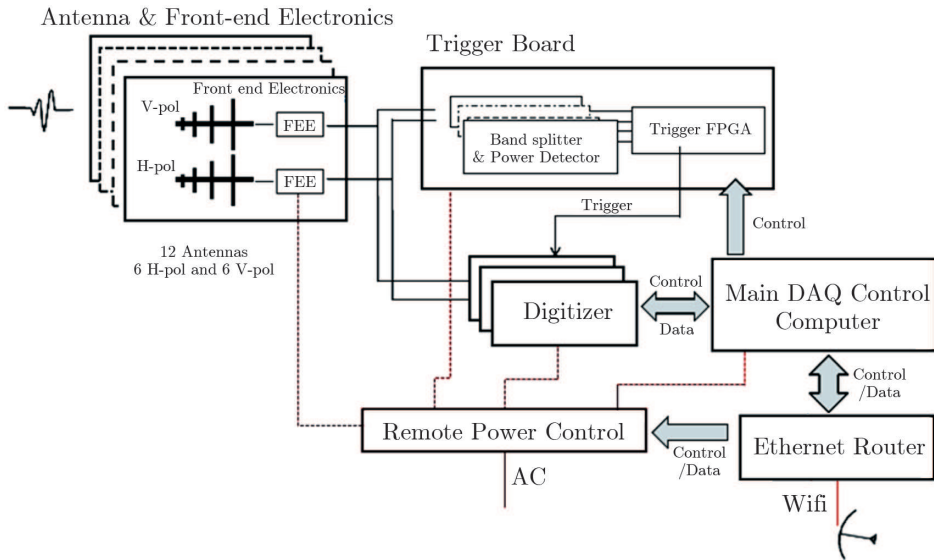
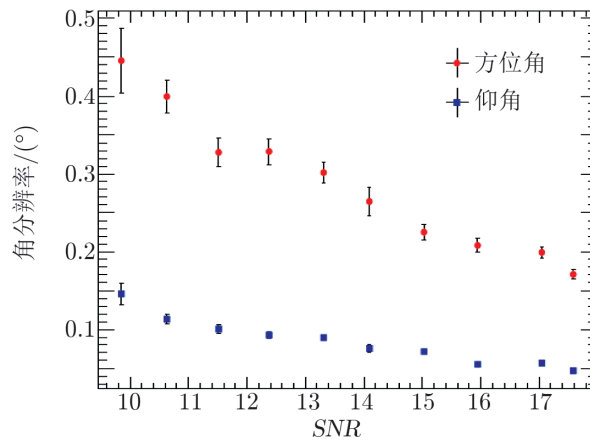


图 4 TAROGE-1 的信号提取设备的方块图



注：最重要的仰角 (蓝色方块) 约在 0.1° 以内，方位角 (红色圆点) 的分辨率稍差，但仍在约 0.3° 以内。

图 5 TAROGE-1 的角分辨率与信噪比的关系

4 TAROGE-2

从 TAROGE-1 的运作中学习许多宝贵经验，尤其是天线的机械结构强度需要加强，以抵抗台风的侵袭。图 6 显示新的天线，以 4 支桅杆整合成金字塔型，构成强壮的核心，外面延伸出个别的天线；整体可在实验室内组装，但体积较 TAROGE-1 庞大，运输较为不便；可是整体架在一个基座上，不再像 TAROGE-1 需要 4 个基座，在安装上简便许多。

TAROGE-2 于 2015 年建设完成，新的场址具有更高的海拔，面对更低的背景噪声的区

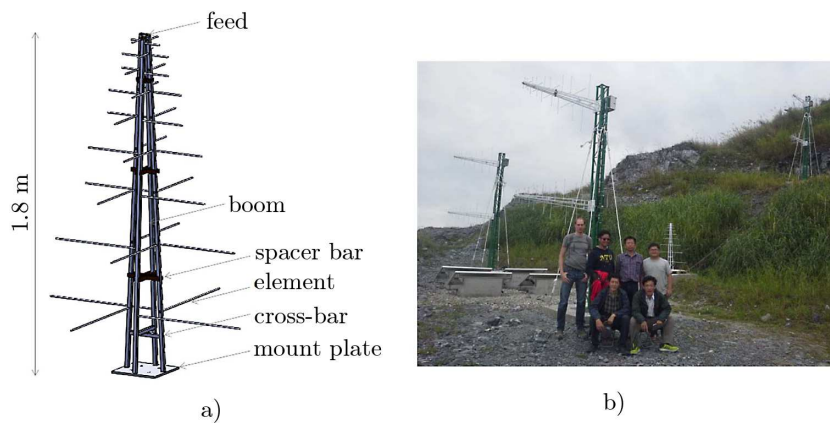


图 6 a) TAROGE-2 的新天线, 组装更方便, 结构更强壮; b) 安装完成的 TAROGE-2 与安装团队

域。其他硬件设备作了以下的改善: 较高的天线增益、改进的滤波器、较宽的通讯带宽与速度, 新的同步技术改进了指向性的分辨率。还改用微型示波器 (Picoscope 6403C), 更为省电、有较快的读取速度、较大的带宽、较快的取样率、较小的体积、可变的数据链长度。

未来 TAROGE 的观测站可能在更遥远的野外。TAROGE-1 邻近水泥厂的办公室, 有现成的电源可用。TAROGE-2 则远离既有电源, 因此设计一套太阳能独立电源系统: 以 4 片 100 W 的太阳能模块, 搭配铅酸蓄电池组、最大功率追踪器与电源控制器。虽然 TAROGE-2 已经将系统消耗功率降至 130 W, 但平均每日仍只能操作 14 h 左右。主要原因是当地气候特性, 午后就有云雾涌上山头, 使得太阳能电池发电量比原设计还低。2016 年中将加装风力发电机, 补充发电量。

5 结 论

从 2013 年 10 月开始, TAROGE 计划逐步开展, 于 2014 年中完成第一站 TAROGE-1 的安装, 2015 年安装 TAROGE-2。本实验组从最前端的天线到最后端的系统整合, 完成所有的工作。目前两站都可正常运作, 数据持续累积中。未来我们将继续寻找更加合适的场址, 持续扩建阵列。

致谢

本计划主要由台湾科技主管部门的“百人拓荒”计划 (MOST-103-2633-M-002-004) 支持硬件与材料经费, 人事费用主要由台湾大学梁次震宇宙学与粒子天文学研究中心 (LeCosPA) 支付。感谢台湾水泥公司提供 TAROGE 场地, 并协助本团队在当地活动。

参考文献:

- [1] 黄明辉. 台北星空, 2009, 45: 6
- [2] Askaryan G A. J. of Experimental and Theoretical Physics, 1962, 14: 441
- [3] Askaryan G A. J. of Experimental and Theoretical Physics, 1965, 21: 658
- [4] Gorham P W, et al. (ANITA Collaboration), Phys. Rev. Lett., 2007, 99: 171101
- [5] Hoover S, et al. (ANITA Collaboration), Phys. Rev. Lett., 2010, 105: 51101
- [6] Falcke H, et al. Nature, 2005, 435: 313
- [7] Huege T, et al. Nucl. Instr. and Meth. A., 2010, 617: 484
- [8] Allison P, et al. (ARA Collaboration), Astropart. Phys., 2012, 35: 457
- [9] Nam J, et al. (TAROG Collaboration), Proc. of Sci.(Proc. of the 34th ICRC), 2015: 663

Introduction of TAROG Radio Telescope

HUANG Ming-Huey^{1,2}, NAM Jiwoo¹, CHEN Chih-Ching¹, CHEN Chih-Hao¹,
CHEN Cheng-Wei¹, CHEN Pisin¹, HSU Shih-Ying¹, HUANG Jian-Jung¹,
LIU Tsung-Che¹, SHIAO Yu-Shao¹, WANG Min-Zu¹, WANG Shi-Hao¹

(1. *Leung Center for Cosmology and Particle Astrophysics, Taiwan University, Taipei 10617*; 2. *Department of Energy Engineering, United University, Miaoli 36063*)

Abstract: The TAROG (Taiwan Askaryan Radio Observatory for Geo synchrotron Emission) is a radio telescopes array on the Eastern part of Taiwan and facing the Pacific. The main goal is detection of ultra-high energy cosmic rays and neutrinos. Because of the north-south direction of geomagnetic field, positive and negative particles in the extensive air shower are separated and then produced radio pulse. Besides, the sea surface can be a reflector, which reflect radio signal from shower far from TAROG. Those advantages enlarge the covered area of telescope. The first 12 antenna TAROG test site was built in summer 2014 in He-Ping village. The main purpose is testing and learning how TAROG works. After improving the structure integrity of antenna boom, the second station was installed in the winter 2015. Both stations continue operation and data that is constantly accumulated. In the future, we will search for proper sites in both the Taiwan and the mainland to extend the coverage of TAROG in both area and science capability.

Key words: cosmic rays; neutrinos; air showers; radio telescope