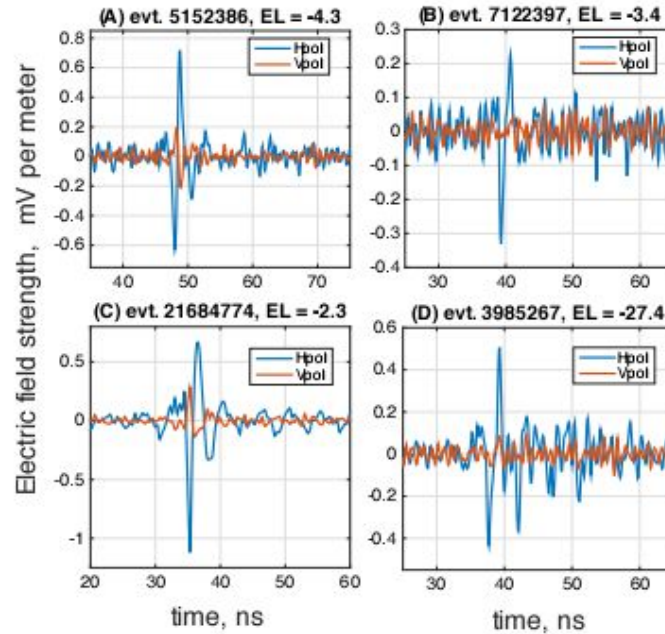


# 研究計劃書: 地球淺穿微中子觀測計劃

## 1. 研究現況

為探究宇宙極高能微中子,即所謂「GZK 微中子」( $>10^{18}\text{eV}$ ),目前國際上有幾個深具前瞻性、立足於「阿斯卡瑞安效應」(Askaryan effect)的探測計劃。從2007年起,在教育部攜帶式員額及國科會的大力支持下,我們台灣團隊加入了其中最先行的ANITA計劃,積極參與了2008-2009年冬季在南極成功施放的高空汽球觀測,並且已經做出了極高能宇宙綫的重要發現,並在2010臺灣亦加入ARA計劃,預計建造更大面積37座天線陣列以期「量產」GZK微中子,目前ARA計劃的相關計劃IceCube於今年(2018)終於找到第一顆有源(Blazer)高能微中子,其能量是 $2*10^{14}\text{eV}$ , (目前國際上的能量紀錄為 $10^{15}\text{eV}$ ), IceCube的計劃主持人Francis Halzen也因此有機會問鼎諾貝爾獎。時至今日,我所參與的ANITA計劃在第一次與第三次觀測時,各找到一個疑似極高能微中子的事例( $5*10^{17}\text{eV}$ ),需要更多統計數量來佐證,目前ARA與ANITA 皆在加緊分析資料以求能確定極高能GZK微中子的存在.並透過它在粒子天文物理及宇宙學最前沿做重大發現.





過去三年，TAROGÉ計劃將ARA與ANITA的優點結合，作出能不受天候影響，全時運作的無線電觀測站。也因此TAROGÉ計劃獲得卓越領航計劃支援4500萬的預算，預計2020年前在臺灣打造7座觀測站。（目前已在臺灣建立了3座天線站，南極一座觀測站）其餘四座也將陸續於2019年年中完工。（目前的四座站已觀測到百來個極高能宇宙射線的事例）。**卓越領航計劃的經費將於2019年到期。因此提出延續此目標的科學計劃將是未來的重點物標。**但ARA與同性質的另一團隊ARIANNA目前被美國NSF提出合併並遷往南及極點的要求，劉宗哲**同時為兩團隊的成員**，TAROGÉ在南極羅斯冰棚的觀測站及是透過ARIANNA團隊協助安裝，但在兩團隊合併後，南極極點的背景噪聲太大，不適宜建立地點無線電觀測站。因此勢必得另謀合作新合作對象與地點。在因緣際會下，我得知南極每年有探測船前往韓國的南極，在經

過多方交涉下, 韓國願意提供人員與物資運送服務前往南極洲. 也因此, 下一個觀測站將是純粹由臺灣建立的觀測站. 基於太魯閣計劃的建造經驗, 實驗的設計與建造技術已存熟, 也已不需要新的研究開發費用, 因此每座天線站的硬體造價能低於100萬臺幣. 在此我提出一個在南極的墨爾本山(2728m)上設立觀測站的計劃, 目標是在最短的時間內觀測到淺穿地球微中子的訊號. 如以此微中子觀測為目標,

## 2. 科學背景: 極高能天文粒子與先前實驗

宇宙射線是來自於外銀河系的極高能量粒子, 這些宇宙射線的主要成分為氫原子核與其他重核(例如氦碳氮氧等等). 自上世紀90年代起, 極高能天文粒子的相關研究不斷蓬勃發展, 科學家藉著研究這些宇宙深處來的極高能天文粒子來探索基本粒子的特性或是回推這些天文粒子的生成環境. 但時至今日仍有許多懸而未決的課題. 主要困難是由於這些極高能量粒子的通量非常小(當宇宙射線能量大於 $10^{19}$ 電子伏特時, 宇宙射線通量約為每世紀每平方公里才有一個極高能量粒子經過). 所以需要耗費龐大人力與經費建設佔地廣大的觀測站, 來增加觀測到極高能量粒子的機會. 例如位於南美洲阿根廷的皮耶歐傑觀測站(Pierre Auger Observatory, PAO)造價約花費5千萬美元, 數百位科學家在占地面積約3 000平方公里的廣大平原上建設地面觀測陣列[1]. 這些極高能量的粒子在抵達地球並經過大氣時, 會與大氣分子作用, 產生能量較低但為數龐大的次級粒子(這些次級粒子的總和, 我們稱為大氣簇射). 而大氣簇射中的帶電粒子可以遊離大氣中的氣體分子產生螢光, 或是放出電磁輻射. 因此科學家可以藉由偵測大氣簇射產生的螢光, 電磁輻射或是次級粒子本身, 間接的量測極高能天文粒子的性質. 由於無線電頻率的電磁波可在大氣傳播數百公里遠, 因此一個佔地僅數十平方公尺的無線電波段觀測站, 可監控偵測到數十甚至是數百公里外的大氣簇射事例. 目前已有數個國際團隊利用此技術企圖偵測極高能粒子, 例如本團隊參與在南極的天壇陣列ARA計劃[2]與在高空氣球上偵測微中子(一種只具有微小質量的電中性粒子, 幾乎不與物質反應)的ANITA計劃, 皮耶歐傑觀測站的無線電觀測子計劃AREA[3], 與位於歐洲的LOPES[4]計劃等。

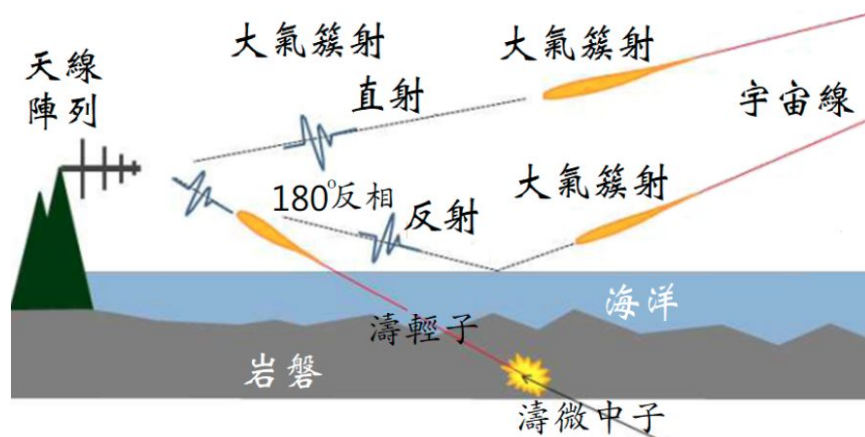
在2006年, ANITA 團隊在史丹佛加速器實驗室成功地偵測到次級帶電粒子在不同介質中產生的無線電訊號[5、6], 並依此成果在南極進行高空氣球飛行實驗, 從32到40公里的海拔高度偵測到十幾個極高能粒子事例[5]. 科學家們發現這些事例中的無線電訊號可區為

三類，分別為：1.極高能宇宙射線在大氣層中直接產生無線電訊號，並被ANITA觀測站直接觀測到。2. 極高能宇宙射線在大氣層中產生無線電訊號由冰層反射後，再被ANITA觀測站直接觀測到。3. 低交互作用的極高能粒子(例如微中子)穿過地球時，有機會在南極冰層內產生無線電訊號，再被ANITA觀測站觀測到。由於ANITA 實驗飛行於數十公里高的高空，再加上無線電在大氣傳播時的低衰減性質，使得ANITA觀測站可以涵蓋非常廣大的偵測面積(約為150萬平方公里，大約為41.6倍的台灣本島的面積)。但由於氣球的滯空時間有限，每次的飛行只能維持大約一個月的滯空時間。因此即便是ANITA觀測站具有廣大的涵蓋範圍，但總體觀測事例仍無法與可經年連續操作的皮耶歐傑觀測站匹敵。本團隊嘗試結合兩者優點，若能將此高空觀測技術應用於地表的高山上，即可兼具長時間連續觀測與廣大偵測面積兩項優點。太魯閣陣列TAROG (Taiwan Askaryan Radio Observatory for Geo synchrotron Emission) 便是一個基於此考量下所誕生的本土實驗，企圖打造一個偵測極高能量的宇宙射線及微中子的觀測站。

太魯閣陣列為一個位於臺灣宜蘭到花蓮沿岸山脈上，面對太平洋，偵測由東向西的極高能量的宇宙射線及微中子。目前太魯閣陣列已在花蓮縣設立了三座觀測天線站，也在南極羅斯冰棚建造了一座測試站，並預計在2019年年中以前再於宜蘭與花蓮增設兩座天線站。目前位於臺灣的三座觀測站皆位於花蓮秀林鄉勇士山上標高900到1090公尺的山峯上，但距離海岸線卻只有短短不到2000公尺的距離。如此陡峭的山峰有效地屏蔽山腳下蘇花公路沿線的各種人為電磁波背景雜訊，大大地減少人為訊號對觀測的干擾。

太魯閣觀測站沿著臺灣高山南北縱向分佈的特點設立，將無線電陣列安裝於山上，面對東方的太平洋。當宇宙射線在太平洋上空飛行並朝着觀測站前進時，南北向的地球磁場會使宇宙射線衍生的大氣簇射中的帶電粒子偏轉，進而發射同步輻射(無線電訊號)。將遠處大氣簇射的無線電訊號直接傳向太魯閣陣列(圖1 中標示"直射"的訊號)。由於海面本身亦可反射電磁波，因此太平洋海面有機會可以反射大俯角的宇宙射線產生的無線電訊號，使太魯閣陣列偵測到由海面傳來的電磁波訊號。此外太魯閣陣列也有機會觀測到由地球表面穿出的微中子訊號，這是由於微中子本身不具電磁與強作用力，所以即使厚如地球，仍然很難阻擋微中子的行進。當微中子與地殼作用時，微中子轉換成帶電的輕子(電子，緲子，

或濤子。繃子與濤子可視為質量較重的電子。), 而繃子與濤子有機會穿出地殼與海洋, 在太氣層中衰變並在大氣中產生大氣簇射, 進而發送無線電訊號到達太魯閣陣列。



圖一 TAROGE 無線電訊號傳遞與觀測站運作示意圖。太魯閣觀測站可以分別收集蒐集三種來自宇宙的極高能粒子訊號。第一種是宇宙射線衍生的大氣簇射被地球磁場偏轉進而發射的直射無線電訊號。另一種也是宇宙射線衍生的無線電訊號，但是經由太平洋海面反射無線電訊號，這個反射訊號較直接訊號為弱，且因為經過海面反射，電磁波振動的相位有180度的反向。第三種則是微中子與地球起交互作用產生輕子，當輕子穿出地球後，在大氣中產生大氣簇射並放出的無線電訊號。

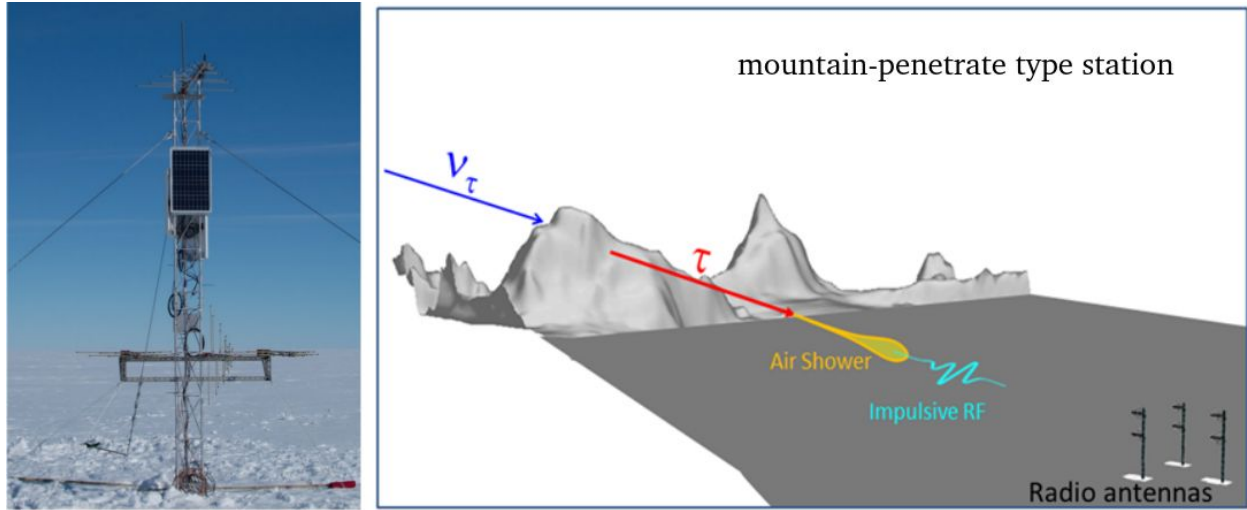




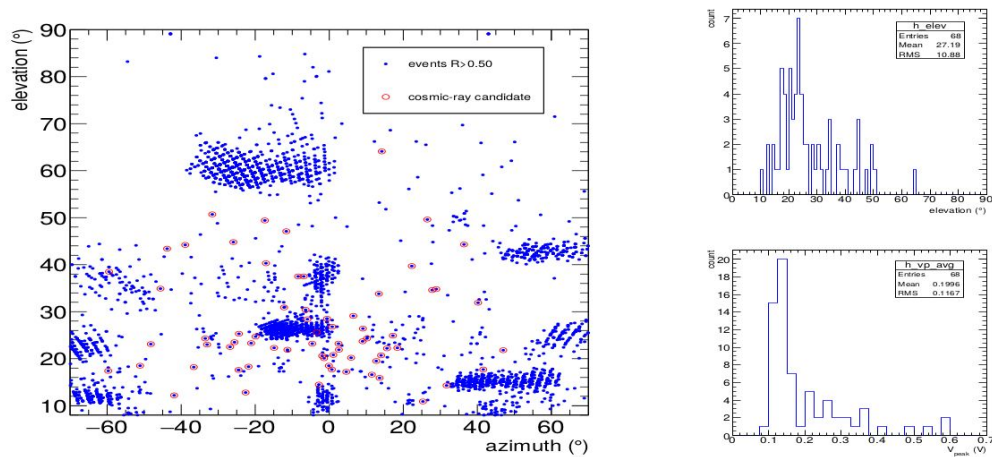
### 新計畫構想:

太魯閣計劃最主要的實驗困難仍然是環境雜訊的背景. 因此太魯閣計劃的其中一個子計劃室與UC Irvine的ARIANNA團隊合作, 將太魯閣天線站送抵底南極羅斯冰棚的冰原上安裝(圖二), 藉此觀測極高能宇宙射線與穿山微中子的訊號. 由於背景雜訊降低的因素, 我們在六個月的觀測期內觀測到68個極高能宇宙射線的事例(圖三). 由於HCR面對的山體約30公里遠, 山高約為2千公尺, 因此微中子有機會在山體內反應並轉換成輕子, 而輕子在傳播時會衰變產生大氣簇射, 進而放出寬頻譜的電磁脈衝訊號. HCR 便是依照電磁脈衝波的形式(圖四), 與角度方向來判定接收到的訊號為極高能微中子或是極高能宇宙射線. 依目前的模擬的模擬結果推估(圖五), 當微中子能量大於 $10^{18}$ eV山體大小為20-150公里時, 有最佳的轉換效率(微中子轉換為輕子), 且由此模擬推估HCR的極高能宇宙射線與極高能微中子比率約為1比100. 對照目前宇宙射線的觀測效率. 我們估計HCR每三到五年應該會有機會可以看到一顆能量大於 $10^{17}$ eV的極高能宇宙微中子. 但觀測穿山微中子的機率畢竟渺茫, 因此我們有**新的構想, 預計用直升機吊掛天線站到南極墨爾本山, 在山上直接設立天線站俯瞰地球(圖六), 以整個地球作為"微中子-輕子"的轉換標靶, 此舉可大幅增加微中子的觀測機率(約**

增加5-7倍). 並可延伸觀察到較低能量( $E=10^{16}-10^{17}$ eV)的宇宙微中子.

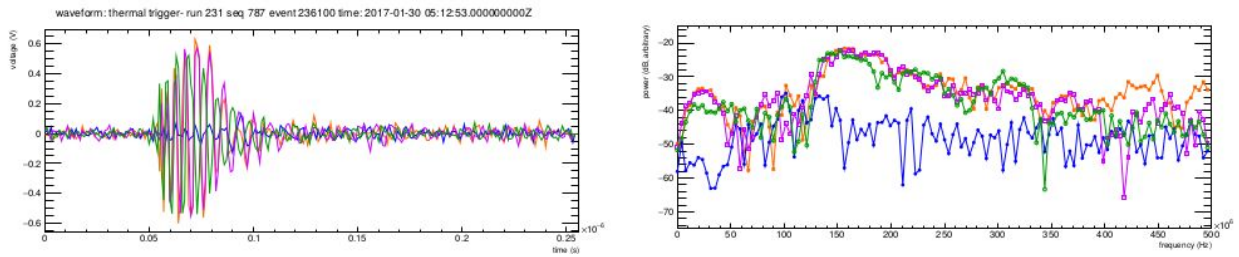


圖二: 左圖, HCR天線站 右圖:宇宙微中子示意圖, 由於微中子不與電磁與強作用力作用, 因此微中子的交互作用截面積非常微小, 只有當微中子穿越大體積物體時, 才有機會藉由C.C interaction 轉換為帶電性的輕子, 當輕子(尤其是tauon)穿出山體時, 可再大氣中衰變, 因而產生大氣簇射與電磁脈衝訊號. HCR便是由此機制來觀測極高能微中子訊號.

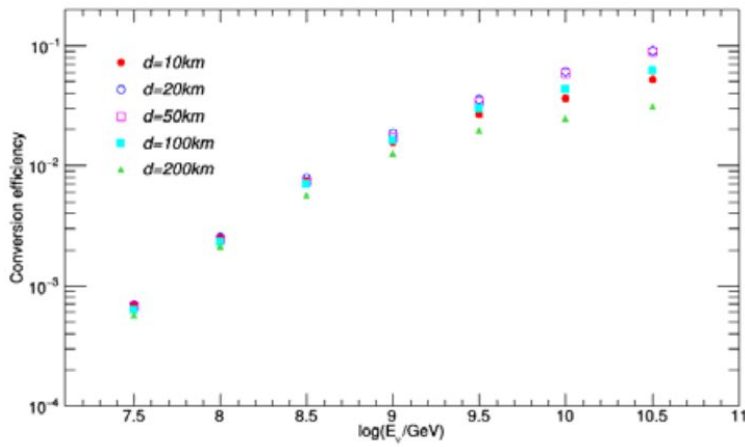


圖三: 左圖: 宇宙射線事例數. 左圖的紅圈是位於南極的HCR觀測站所看到的宇宙射線空間分布圖, 再六個月的觀測其中, HCR一共觀測到68個極高能宇宙射線事例( $E>10^{17}$ eV), 大概是五倍位於臺灣的太魯閣陣列的效率. 藍點為高相關係數的背景訊號. 右圖: 則為68個事例在空間上的分佈(上圖)與不同H-pol偏振方向上的電場

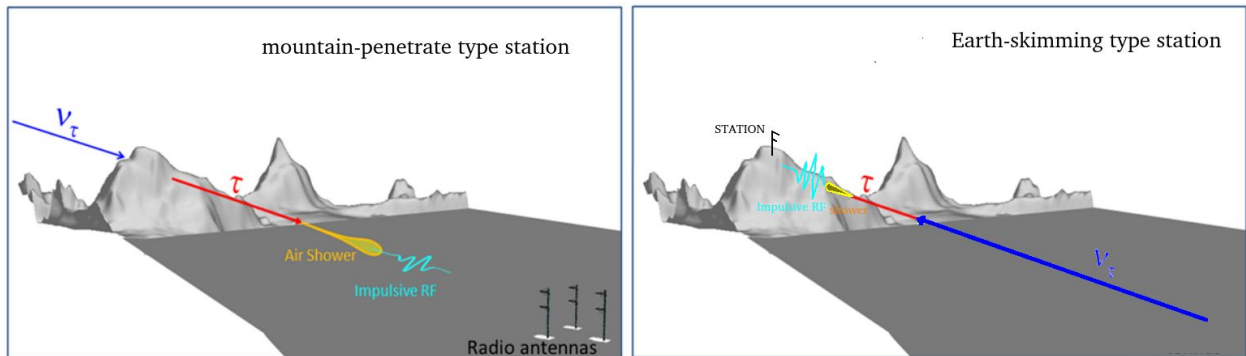
強度分佈.



圖四：實際量測到的宇宙射線訊號，左圖為時域的脈衝訊號波形，右圖為頻域的頻譜圖，不同的顏色代表不同天線所接收到的訊號。由於南極磁場方向的影響，我們預期V-pol 偏振方向上的電場強度將遠小於H-pol偏振方向上的電場強度。此圖的藍線V-pol 偏振方向。此觀測結果與模擬結果一致。



圖五：不同山體厚度對微中子-輕子轉換效率圖，當微中子穿越山體時，有機會轉換成輕子。由於微中子的交互作用散射截面積與能量有關，因此低能量的微中子需要較大的交互作用距離，高能量的微中子則反之，我們可以由轉換效率進而決定站體位置(這決定視野範圍內的實際山體狀況)，與預期觀測到的微中子能量分佈。



圖六：左圖為HCR的配置，主要的觀測標的物是極高能宇宙射線，副標的物為極高能微中子，在此架構下，我們



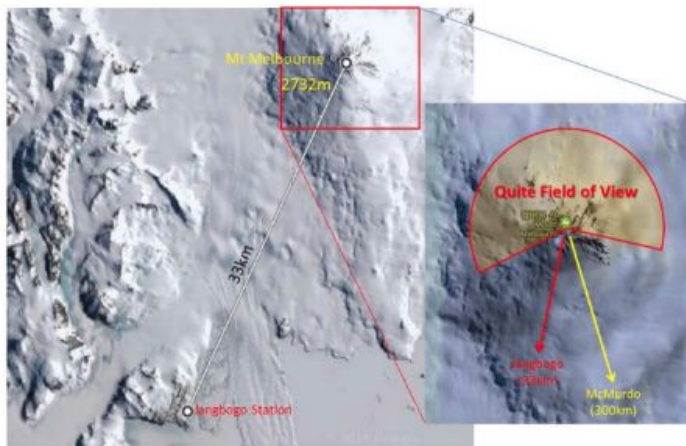
有機會每三到五年能觀測到一顆極高能宇宙微中子。右為則為太魯閣計劃的概念, 直接利用直升機調掛天線站到2728公尺高的山頂, 由於高度夠高, 因此可含蓋更廣泛的範圍(~190km的偵測半徑), 微中子的預期觀測機率約為HCR觀測站的5-7倍。

### 計劃規劃：

目前韓國南極計劃中心已答應於2019年二月提供三個員額前往南極Jangbogo實驗站(圖七), 並支援直升機人員運輸作業。在2019年的計劃主軸是前往山脈各處實際探勘, 尋找適宜安裝實驗站的地點, 並量測背景雜訊強度。2019年的實驗經費仍由科技部卓越領航計劃提供, 目前的預期目標是提出三年期計劃, 以每兩年建立1-2個站的進度於山頂設站。每個觀測站的視野視角約為90度, 涵蓋所有視角需要至少四個站設立。每個觀測站的視野視角約為90度, 涵蓋所有視角需要四個站。



圖七. 南極Jangbogo實驗站, 右前方的山脈即是預定架設站體的莫爾本山,



預估硬體基本預算花費(每座天線站):

項目	用途	價格
LPDA天線	電磁波訊號接收	15000*6=95000
Picoscope 6403 Oscilloscopes	ADC	160000
6061鋁合金桁架	天線站站體	20000
軍規極地用電腦	資料收集與儲存	60000
工作站	臺灣資料分析用	100000
RG-316 同軸電纜線與SMA接頭	訊號傳輸	20000
太陽能供電系統(太陽能板,低溫備援電池與MPPT)	供應電力	40000
FPGA trigger board	電路系統	30000
-130dB EMI防護機箱	隔絕外界電磁波干擾	27000
	總價	552,000(臺幣)

其他預估預算(每兩年或每座天線站):

項目	用途	價格
機票	前往南極出入地,紐西蘭基督城	45000
直升機費用	吊掛儀器與人員至設站地點	每單位飛行時數約100000, 預估需要三個單位,300000
儀器包裝與運費	儀器集中至南韓港口,再集貨出發前往南極	25000
開會雜費	參與ICRC 或EPS-HEP研討會	100000
inmarsat	衛星資料傳送	46000/250MB
	總價	536,000(臺幣)

#### References

- [1] J. Linsley, Phys. Rev. Lett. 10 (4) (1963).
- [2] Pierre Auger Col.: J. Abraham et al., Phys. Lett. B 685 239-246 (2010)
- [3] LOPES Col.: H. Falcke et al., Nature, May 19 issue (2005)
- [4] ANITA Col.: S. Hoover, J. Nam et al., Phys. Rev. Lett.105, 151101 (2010)
- [5] T. Huege et al, Nucl. Instr. and Meth. A: 617 484-487 (2010)
- [6] A. Romero-Wolf et al., arXiv:1302.1263 (2013)
- [7] ANITA Col.: P. Gorham et al., Phy. Rev. Lett. 103, 051103 (2009)
- [8] ANITA Col.: P. Gorham et al., Phy. Rev. Lett. 99, 171101 (2007)
- [9] T. Huege and H. Falcke, Astropart. Phys. 24, 116-136 (2005)
- [10] M. Ludwig and T. Huege, Astropart. Phys. 34, 483-446 (2011)
- [11] O. Scholten, K. Werner, and f. Rusydi, Astropart. Phys., 29, 94-103 (2008)
- [12] J. Alvarez-Muñiz, W.R. Carvalho, et al., Phys. Rev. D, 86, 123007 (2012)
- [13] T. Huege, M. Ludwig, and C.W. James, arXiv:1301.2132 (2013)
- [14] D. Heck, et al., FZKA Report 6019, Forschungszentrum Karlsruhe (1998)
- [15] T. Huege, R. Ulrich, and R. Engel, Astropart. Physics 27, 392–405 (2007) [16] G. A.

Askaryan, JETP 14, 441 (1962)

[17] G. A. Askaryan, JETP 21, 658.(1965)

[18] ANITA Col.: P. Gorham et al., Astroparticle Physics 32, 10 (2010)

[19] A. Romero-Wolf et al., 33<sup>rd</sup> International Cosmic Ray Conference, Rio De Janeiro, (2013)