

聆聽宇宙

作者：陳丕燊

大密藏於微中子

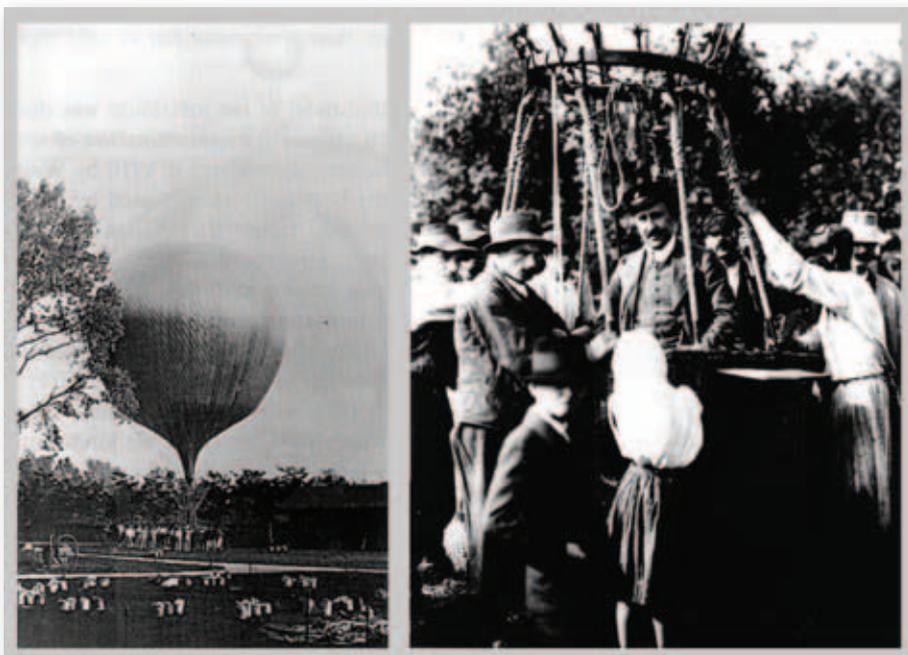
作者簡介：陳丕燊曾任教於史丹福大學，現為臺大物理系及天文物理所講座教授，臺大梁次震宇宙學與粒子天文物理學研究中心主任。近年積極推動南極的 ANITA 與 ARA 微中子實驗計畫，以及臺灣的太魯閣計畫。

世界各地的古文明都有一個明顯的相似之處，那就是非常注重天象觀測。我們的祖先在尚無光害的古代用肉眼仰望蒼穹，那份感動、敬畏、和不可避免的疑問，就是人類探索宇宙的開端。幾千年

來，從肉眼到望遠鏡，人類賴以探索宇宙的資訊，就是天體發出的光。到了 19 世紀，科學家才知道光其實是一種波，可見光只佔了光譜的一小段，而直到 20 世紀中葉，科學家才首次建造無線電波、



本文作者領導中華民國百年史上第一個在南極點的科研計畫。



1912年奧地利物理學家赫思意外發現宇宙射線。

年來致力於發展微中子望遠鏡，希望能藉此找到有關宇宙及微中子的幾個重要問題的答案。

「宇宙加速器」是什麼？

自從赫思 (Victor Hess) 在 1912 年首次發現宇宙射線，百年來科學家不斷發現更高能的宇宙射線，至今所觀測到的最高能宇宙射線已超過 10^{20} eV (電子伏特)，而證據顯示這些宇宙射線主要的成分是質子。這樣高能的質子比世界上最大的加速器——位於歐洲核子研究

中心 (CERN) 的大型強子對撞機 (LHC) 還要高一千萬倍，這樣高能的宇宙射線是從哪裡來的？又是怎麼樣產生的？美國國家科學院在 2003 年出版了一本白皮書，《從夸克到宇宙——新世紀的十一個科學問題》(*Connecting Quarks with Cosmos - Eleven Science Questions of the New Century*)。其中「宇宙加速器是什麼？」被列為本世紀 11 個宇宙大問題之一，所以它的重要性可想而知。由於這些極高能宇宙射線基本上都是帶電荷的質子，當他穿越宇宙來到地球的路徑上，必然會受到星系內及星系間磁場的影響而偏折，所以基本上我們無法從所觀測到的極高能宇宙射線的入射角來回推他們的出發點。反之，這些宇宙加速器所產生的極高能質子必然要和宇宙加速器周遭的環境產生交互作用，而必然產生極高能微中子。如前所述，微中子因為不帶電荷，且作用力微弱，一旦產生之後，能夠不受星系間和星系內磁場的影響，因此，極高能宇宙微中子的觀測，可以提供「宇宙加速器」位置和來源的重要線索。

紅外光、微波、X 光等可見光以外的望遠鏡，獲得了從古未有的宇宙訊息。但是光波有一個問題，那就是它容易和物質作用，產生偏折，甚至於被吸收，使得我們無法看到宇宙的最深處。要看到宇宙的最深處，還得另外想辦法，這辦法就是打造「微中子望遠鏡」。

微中子 (neutrino) 是一種基本粒子，它不帶電荷，質量則輕到讓它幾乎以光速前進。它只參與「弱作用」，因此能通行無阻，很難被物質阻擋。宇宙裡絕大多數的天體都因為核融合反應而發射微中子。這些由恆星發射出的微中子能量相對較低，而由超新星 (supernova) 爆發時釋放的微中子，能量就高得多。更高能的微中子則可能從伽馬射線暴 (gamma ray burst, GRB) 或活躍星系核 (active galactic nuclei, AGN) 產生。一旦微中子在宇宙某處產生了，因為作用力很弱，它可以穿越整個宇宙而不被吸收或阻擋；又因為電中性，它可以走直線而不受偏折。所以如果我們能觀測到這些宇宙微中子，就能一路追溯它的發源地，這也難怪科學家近

		Fermions		
Quarks		u up	c charm	t top
		d down	s strange	b bottom
Leptons		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
		e electron	μ muon	τ tau

在基本模型裡，12種費米子分成三族，每族分成兩種夸克（quark）和兩種輕子（lepton）。每族的輕子都有一個微中子。（維基百科）

微中子會衰變嗎？

微中子是粒子物理標準模型中的成員，我們知道粒子世界是由12個費米子（fermion）分成三個族（families）所構成。每一族包含四種粒子，這四種粒子其中之一就是微中子。所以在基本粒子的世界裡，每一族都有一個微中子。這三種微中子各有不同的風味（flavor）：電子微中子（electron neutrino, ν_e ）、渺子微中子（muon neutrino, ν_μ ）、濤子微中子（tauon neutrino, ν_τ ）。由於微中子不帶電性，而且只參與弱作用，它們的作用力極為微弱，所以它是基本粒子標準模型中所知最少的粒子。譬如說，直到1990年代，科學家們才發現三種不同風味的微中子會互相轉換，造成一種微中子振盪現象（neutrino oscillation），這是由觀測太陽釋放出的微中子到達地球的通量，與理論上的預期值不符後所發現的。另一個有關微中子的基

本性質的重大發現是透過位於日本神岡的微中子觀測站，科學家發現微中子帶有些微的質量。這修改了從1930年代首次提出微中子概念以來，微中子不帶質量的一貫假設。

既然微中子帶有質量，而其質量本徵態（mass eigenstates）與風味本徵態（flavor eigenstates）並不一致，所以科學家們懷疑微中子有衰變的可能。至於如何衰變，目前並沒有定論。根據粒子物理的理論，當極高能質子和宇宙微波背景輻射（microwave background radiation）作用而產生GZK極高能微中子^①（能量估計為 $10^{17} \sim 10^{19}$ eV）時，它的風味比是電子微中子：渺子微中子：濤子微中子 = 2 : 1 : 0。如果微中子不會衰變而只會震盪的話，那麼到地球時的風味比應該是1 : 1 : 1。可是如果微中子會衰變的話，到達地球時的風味比將有巨大的改變，取決於微中子質量本徵態是正向排序（normal hierarchy）還是反向排序（inverted hierarchy），正向排序的意思是電子微中子主要由最輕的質量本徵態所構成，反向排序則倒過來。如果是正向排序的話，GZK微中子到達地球時的通量風味比就會變成 $\frac{2}{3} : \frac{1}{8} : \frac{5}{24}$ ，如果是反向排序的話，則其通量風味比將是 $0 : \frac{2}{5} : \frac{3}{5}$ 。因此如果一個極高能宇宙微中子觀測站的探測機制可以區別微中子的三種不同風味的話，那麼透過這樣的觀測，我們可以判斷微中子如何衰變，這將會是一個歷史性的發現，也是觀察宇宙微中子的一大利基。

「聽」見微中子

既然微中子的好處是它的作用力很弱，因此能夠把宇宙最深處的訊息帶給我們，那麼同理它也就非常難被測量。要怎麼樣才能捕捉到微中子呢？1960年代，前蘇聯亞美尼亞的傑出物理學家阿斯卡瑞安（Gurgen Askaryan）提出一個構想，建議利用南極洲的巨大冰層做為阻擋微中子的靶，一旦高能微中子在冰層中終於和某一個原子核起了作

BOX

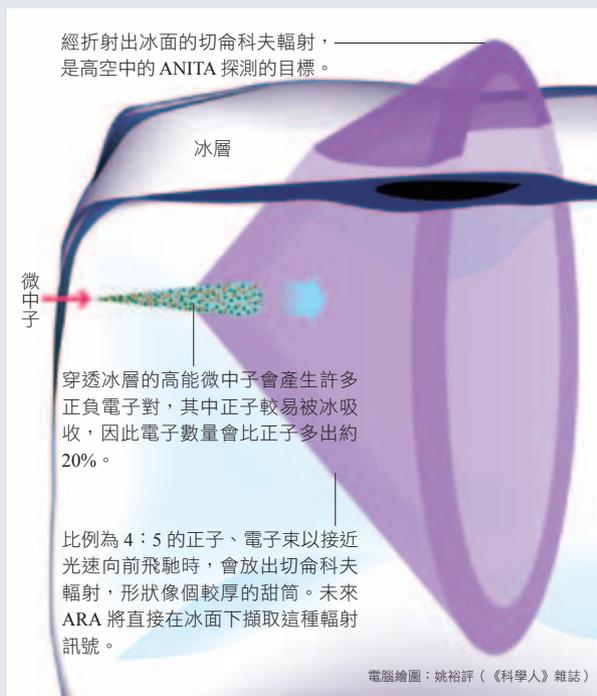


阿斯卡瑞安

微中子之聲

來自宇宙的極高能微中子在穿透冰層時，如果湊巧與一個原子核發生交互作用，會產生一對正負電子，新產生的正子和電子又會各自產生另一對正負電子，於是在連鎖效應下產生許多接近光速移動的正子與電子。其中正子較易被冰吸收，因此電子數量會較正子多出約 20%。

當帶電體以接近光速在物質中行進時，會發出一種切倫科夫輻射的「光」，它的頻率範圍極廣，從藍光到無線電波，但能夠穿出冰層被「聽見」的，只有大約 100Hz 到 10GHz 的無線電波範圍。



用，產生了正負電子對（electron-positron pair），接下去江河日下：正子和電子會分別撞擊原子核，產生新的正負電子對，如此不斷發展，在下游造成數十億、百億個正、負電子沿著最初微中子從宇宙來到地球的方向繼續以接近光速前進，這種現象叫做簇射（shower）。阿斯卡瑞安更注意到，依照物理定律，這些大量的正負電子簇射在冰層中繼續前進時，正子比較容易被冰層吸收，結果使得原本電中性（因為微中子本身是中性）的簇射會發展成帶電體。

帶電體在物質中以接近光速前進時，會發出切倫科夫輻射（Cherenkov radiation，見本頁〈微中子之聲〉）。這種輻射的頻譜很寬，其中無線電波频段穿透力很好，可以傳得很遠，就像我們在捷運地下隧道裡仍能接收手機訊號一樣。阿斯卡瑞安於是主張科學家可以去「聽」微中子在冰層中發出的訊號，進而反推出微中子是從宇宙的哪個方向而來。

帶 ANITA 到南極去

40 年一晃眼過去了，阿斯卡瑞安的遠見終於在 21 世紀得到實現（可惜他已經過世）：一個由臺灣、美國、英國組成的團隊決定在地球底端，搜尋科學家預測必定存在的 GZK 極高能宇宙微中子。可是南極那麼大，微中子又沒有先說它要從哪裡來，要怎麼找呢？這個團隊想出一個妙計，既然微中子簇射引發的無線電波穿透力強，甚至能穿出冰層進入大氣層，我們何不把「聽筒」，也就是接受無線電波的天線，用高空氣球吊在半空中向下俯覽，這樣大面積的搜索，豈不一目了然？這個團隊於是打造了一座名為南極脈衝瞬態陣列（ANITA）的探測器，用美國航太總署的高空大氣球吊升到約 30-40 公里高的南極上空，隨著南極洲的大氣環流，大約

① 註：GZK 是三位首先發現這個現象的物理學家姓氏的縮寫：Kenneth Greisen、Georgiy Zatsepin、Vadim Kuzmin。



■ ANITA-I 於 2006 年 12 月升空

每半個月繞行南極點（South Pole）一週，向下探聽宇宙的秘密。

ANITA 已經先後在 2006 至 2007 年、2008 至 2009 年、2014 至 2015 年的冬季（南極的夏季）飛行了三次，第一次飛行任務雖然一切順利，可惜回收著陸時，氣球無法與探測器及時脫鉤，以至於在冰面拖行了數公里，受到損害，所幸資料盒安然無恙。

筆者原在美國史丹福大學任職時，已經是 ANITA 團隊的成員。2007 我回母校臺灣大學任教時，把這個計劃帶回臺灣。臺大團隊積極參與了 ANITA 的修復工作以及改進工程，並且在第二次飛行時參與輪班，直接從臺大監控 ANITA 的操作。這是臺灣首次在南極進行的大型實驗，也因此成為國際上為數不多的南極俱樂部成員之一。

從頭兩次飛行所獲得的數據，我們雖然還沒有找到歷史上第一顆 GZK 微中子，但已經得到它存在的最新通量上限，也就是每年到達地球表面每平方公里的 GZK 微中子數量，為科學界提供了寶貴的資訊。此外，ANITA 倒是有一個有趣的意外發現，它意外「偷聽」到宇宙另一個不那麼秘密的秘密。

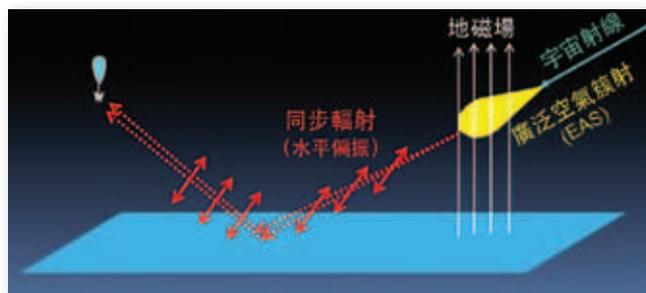
宇宙中除了光子和微中子，還充滿了大量的高能質子和重元素，也就是前述的宇宙射線。這些宇宙射線作用力很強，所以比較不像微中子那麼難找。它們一旦進入大氣層，很快就會和大氣分子作用，產生向下的簇射，這種簇射也能放射無線電波。正是這些無線電波經過南極冰面的反射，被 ANITA 意外聽到！可是我們怎麼知道這訊號不是來自 GZK 微中子，而是宇宙射線「假裝」的呢？答案是，雖然同是無線電波，從冰表面「反射」和從冰



層下穿出「折射」的訊號，會有不同的偏極化。這是由臺大團隊南智祐首先發現！它不但有其本身的科學價值，也證實了 ANITA 探測器想偵測簇射放出的無線電波這樣的設計及運作原則是正確的，為我們未來的探索注入一劑強心針。的確，在最近剛完成的 ANITA-III 飛行任務中，極高能宇宙微中子及宇宙射線兩者均為探測的科學標的。

反向操作：ARA

ANITA 雖然只有一座探測器，卻因為從高空向下俯覽南極，而能夠以小博大，有極大的視野。此法固然極為聰明，但它有兩個瓶頸，一個是 ANITA 在高空運行時，它的電源只能依賴太陽能，而南極在一年中只有 12 月到 1 月這短短的一個多月，有足夠的陽光為 ANITA 充電，十分可惜。另

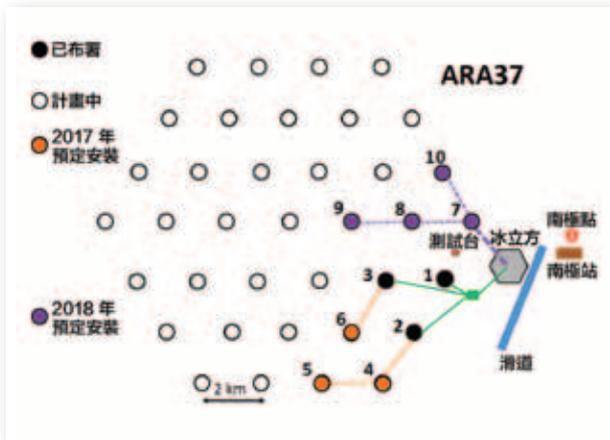


■ 臺大團隊從 ANITA-I 數據首先意外發現極高能宇宙射線。

一個問題則是，ANITA 在接收訊號時會同時收到很多科學儀器或是手機訊號，造成雜訊干擾。此外，ANITA 還有一個科學上的罩門。那就是，因為探測器離地表面有幾十公里遠，所以它能探測到的微中子，能量必須極高。但是極高能微中子的通量相對較小，所以觀測到的機率也就小。如果能夠把探測器放在冰面或冰下，那麼除了解決能源問題和減少雜訊，還可以就近捕捉能量略低（但還是極高能）、捕獲機率較大的微中子。

於是 2009 年在筆者的推動下，ANITA 和另一個國際南極微中子團隊「冰立方」（IceCube）的科學家共同成立了一個新的、獨立的團隊，取名天壇陣列（Askaryan Radio Array, ARA），這是因為 Ara 也是南極星空中星座「天壇座」的希臘名稱。ARA 的設計是結合 ANITA 研發無線電波天線的經驗和 IceCube 在南極點已有的水電設備，反向操作，把大量的探測器埋入冰層表面下，形成一個 37 座天線站的陣列，以 2 公里的間隔，涵蓋 200 平方公里的大面積，來傾聽冰層下的動靜。換言之，ANITA 和 ARA 不同之處在於，ANITA 是在天空中等待阿斯卡瑞安預測的切倫科夫輻射訊號，而 ARA 則是不等這種訊號穿出冰面，就在冰層中擷取它。

有了電源，ARA 將可持續運作，全年無休，不受天候的限制，此外在冰層裡也較不受到雜訊干擾。可是失去了向下俯覽的優勢，ARA 必須以大面積的陣列來擴大它的視野，幸好我們原則上可



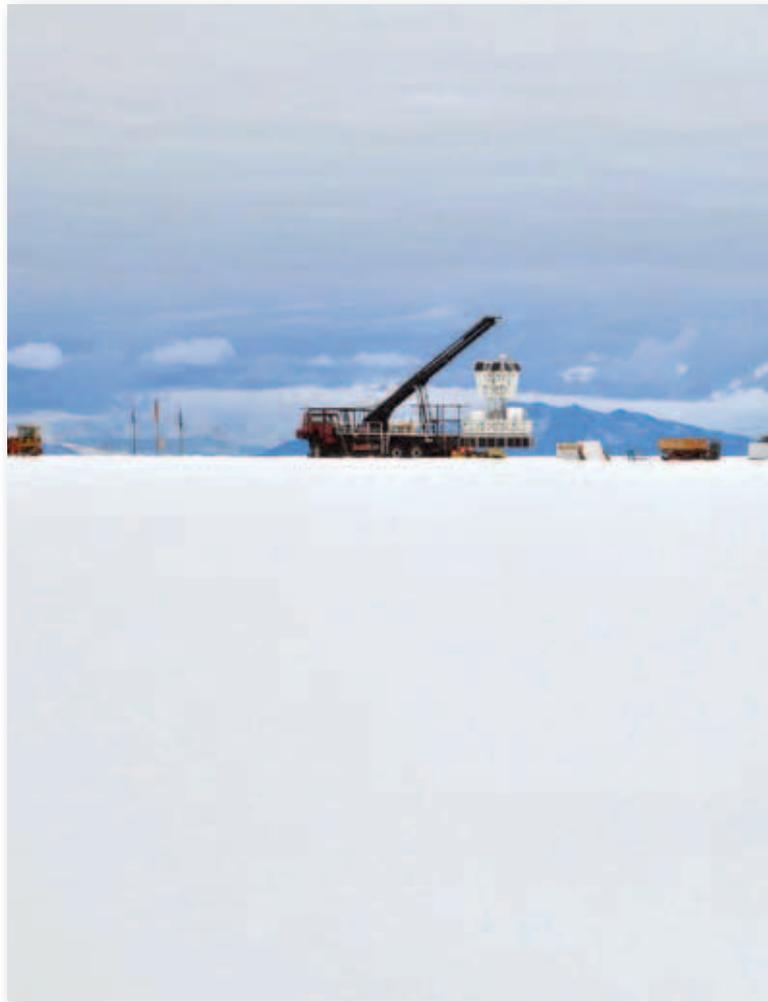
天壇陣列示意圖。完成後將涵蓋南極點 200 平方公里。目前世界最大的微中子觀測站「冰立方」(IceCube) 是圖中右邊灰色的六角形。

以逐年擴大，像蜘蛛網一樣不斷擴張，如果一切順利，或許有朝一日我們可以擴張到 200 平方公里。當 ARA 大到可以「量產」GZK 微中子時，除了可以解答宇宙天文最深處「宇宙加速器」的奧秘，還能提供關於微中子衰變及高能物理基本粒子交互作用獨一無二的數據。這是因為當 GZK 微中子和原子核中的質子或中子作用時，它的質量中心能量 (center of mass energy) 大約是大型強子對撞機的十倍之多。在可見的未來，ARA 將是唯一可以提供極高能物理資訊的管道。

2009 年以來，筆者的團隊不斷在國際場合積極提倡天壇陣列望遠鏡的構想，如今 ARA 計劃終於成立，我們也在其中扮演了關鍵角色。

深耕南極

經過兩年的準備，2011 年 12 月 ARA 團隊正式在南極點安裝第一座正式觀測站，筆者以 ARA 國際共同發言人的身份，代表中華民國第一次抵達南極點，參與天線站的最後測試及安裝。十分巧合的是，2011 年是辛亥革命 100 週年，也是人類首次抵達南極點的 100 週年。南極點是地球上最後一個人類從未涉足的地區。挪威人艾孟森 (Roald Amundsen) 於 1911 年 12 月 14 日首次成功抵達



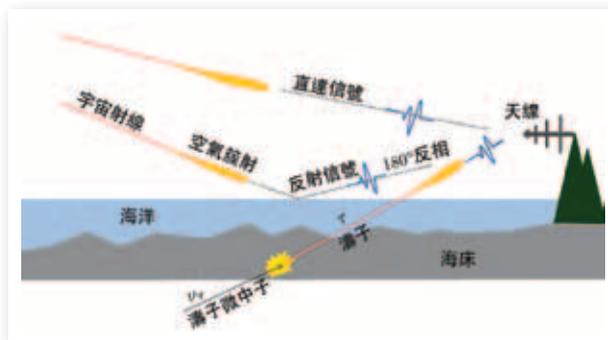
ANITA-III 於 2014 年 12 月順利升空。由於其靈敏度改進了 2-3 倍，有可能首次找到 GZK 微中子。(劉宗哲提供)

南極。而「天壇陣列」則是中華民國百年史上第一個在南極點的大型科研計劃，具有象徵意義。而後在 2012 年，臺大主導負責打造 ARA2 以及 ARA3 觀測站，並於 2012 年年底，由臺大團隊南智祐教授及博士生陳志清前往南極點參與安裝。ARA2 以及 ARA3 自 2012 安裝後成功運作，持續取得數據，可以說是零缺點。這兩座觀測站不但由臺灣團隊成功打造，而且在一些元件上有所突破創新。目前天壇陣列國際團隊正在努力規劃，希望在 2018 年能從目前的三座觀測站擴展成十座。臺大團隊已經於 2014 年成功打造了 ARA4 以及 ARA5，目前正在打造 ARA6 及 ARA7。未來將嘗試繼續主導 ARA

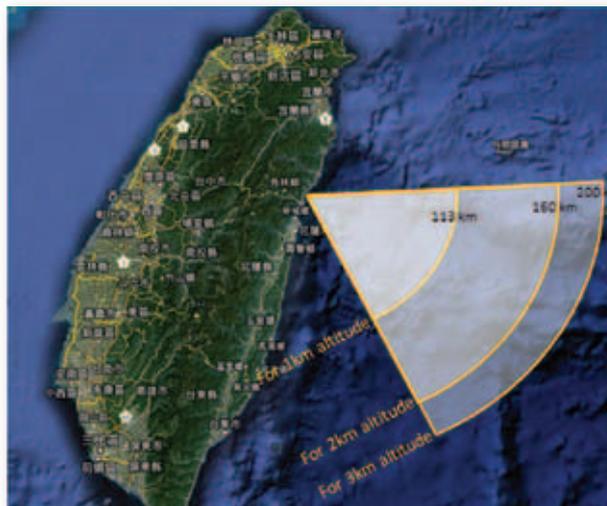


計劃，並持續朝 37 座觀測站，涵蓋 200 平方公里面積之最終目標挺進。

與此同時，ANITA 計劃也持續推進。經過六年的準備，ANITA-III 於 2014 年 12 月 17 日在南極洲發射，在繞行南極洲 22 天之後，成功結束飛行。它的靈敏度比之前的 ANITA-II 提高了二到三倍，因此極有可能在人類歷史上首次發現 GZK 宇宙微中子。ANITA 團隊現在正在積極分析數據，希望能真正的得到歷史性的發現。目前美國太空總署 (NASA) 已經批准 ANITA-IV 於 2017 年底飛行。在 ANITA 系列的實驗中，ANITA-IV 將是 ANITA 實驗系列的極致，因此在 2017 年之後，我們將研



太魯閣陣列的探測原理

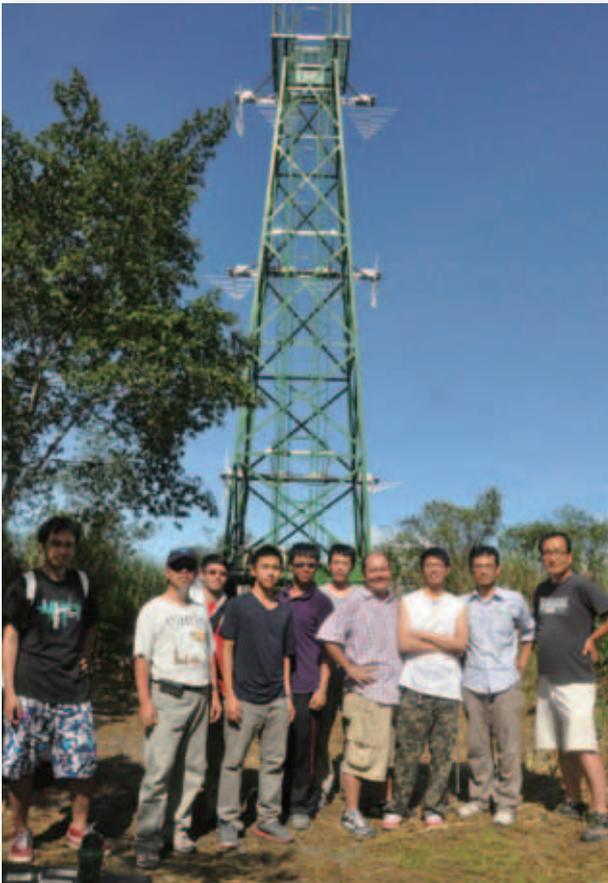


太魯閣原型觀測站位置

發一個全新的稱為 EVA 的高空氣球實驗，將使用 NASA 正在研發中的一種全新設計及使用新穎材料的高壓超大型高空氣球。屆時 EVA 的探測靈敏度將大大超越 ANITA。我們齊頭並進，推動 ARA、ANITA、及 EVA，目標是要持續深耕南極。

厚植本土

在臺灣團隊已經充分掌握無線電波硬體研發技術的基礎上，除了繼續深耕南極，也把目標轉回到臺灣本土。我們注意到 ANITA 從高空俯覽南極冰原，搜尋宇宙微中子及宇宙射線的方法，可以應用在臺灣的特殊地理環境上。臺灣東海岸有陡峭的高山面向太平洋，我們因此構想出一個「太魯閣計劃」(TAROGE Array)，在臺灣東海岸高山上安裝觀



臺大團隊於 2014 年 7 月在花蓮縣和平鄉山頭成功架設太魯閣原型觀測站。(劉宗哲提供)

測站，搜尋由太平洋反射的宇宙射線及穿越太平洋海底的宇宙微中子訊號，太魯閣觀測站的原型已經在 2014 年夏天成功安裝於花蓮縣和平鄉 1000 公尺高的山頭。從取得的數據分析看來，我們欣喜的發現，該觀測站周遭環境之背景雜訊只比 ANITA 在南極的雜訊高 5 個分貝。我們計劃在未來五年安裝 15 座天線站，並廣邀國際團隊參與。屆時臺灣將成為世界上觀測極高能宇宙射線的主要地點之一。

結語

由於南極的一切生活物資均須由外界輸入，在那裡從事科學研究，生活條件並不充裕，而且除了與企鵝為伍，當地並無任何居民，生活內容除了科學之外，略為孤寂；但也在獨處於無垠且壯闊的地球

底端，苦心追尋探索宇宙之奧秘之餘，不免令人油然而生「天地之間我獨行」的感懷，真覺自己和宇宙是如此親近。

除了持續深耕南極，我們發現臺灣十分獨特的地形也可以用來探索宇宙！雖然和南極比起來，臺灣的花東海岸近在咫尺，但是基於極小化背景雜訊的要求，我們總是要到人跡罕至的高山之巔找尋理想的基地，遺世獨立的感覺竟不下於南極。

透過這幾個大型無線電波觀測計劃，傾聽宇宙最深處帶來的訊息，我們希望能進一步窺探宇宙的玄機，對科學做出一些貢獻。∞

本文出處

本文部分曾以〈傾聽宇宙最深處的玄機〉發表於《科學人》2010 年 9 月號，但已加入近五年許多最最新的研究計畫與結果。

延伸閱讀

► 臺大梁次震宇宙學與粒子天文物理學中心 (LeCosPA) 網站，與本文有關可參見宇宙微中子 (Cosmic Neutrinos) 網頁。

<http://lecospa.ntu.edu.tw>

► 陳丕燊《遠見華人精英論壇》部落格。本文作者出入科學與人文之間，這是他在《遠見》的專欄連結，可以見到他的文筆、手繪與器識。

https://www.gvlf.com.tw/elite_221.html

► 想看看 ANITA 實驗的南極基地長什麼樣子，這是 YouTube 上一段幻燈片短片。

<https://www.youtube.com/watch?v=oAtAjqwcHP8>

► 黃貞祥〈零下鳥任務〉，黃任職於中研院生物多樣性研究中心，是知名的網路科普推手，這篇網文簡單介紹南極的科學研究，也談到陳丕燊團隊的研究。底下兩文有不同的照片和影片連結

<http://skygene.blogspot.tw/2014/07/antarctic.html>

<http://pansci.tw/archives/64358>