

從日心到地心 與微中子有關的科與幻

文/黃明輝

本系列的專文以四篇文章在2011年8月起分四期刊出，各期主題分別如下，一.介紹自然輻射的主要來源：宇宙線，及有關的地磁場其相關的謠言。二.介紹與天文相關的謠言：馬雅曆、銀心連線、光子帶、X行星等。三.介紹與太陽微中子相關的謠言：微中子、太陽的核融合反應、太陽壽命、微中子加熱地球、冰立方等。四.介紹與太空天氣相關的謠言：太陽表面活動(黑子、閃焰、太陽風)、太陽週期、太空天氣(太陽風暴、地磁風暴)、太陽風暴的地面效應。

1.微中子：充滿謎題的粒子

微中子是最難以捉摸的基本粒子，甚至有人戲稱為鬼魅粒子(ghost particle)。從1930年代的發現開始直到現在2010年代，充滿許多謎題。科學家逐步探索，追查微中子的特性與來源。許多科幻片及末日謠言中也對此粒子有著特別的著迷，運用在許多特殊的災難中。部分有科學根據，但誇大其效果；部分則是移花接木，或者純屬虛構。本文從科學內容開始，先介紹微中子的幾個重要謎題，然後說明科幻片及末日謠言的內容，讀者可以立刻知道哪些是事實，與哪些是虛構。

2.微中子的發現與性質

2.1第一個謎「 β 連續能譜」

近代物理起始於1900年左右，科學家們發現在原子的世界中，能量的吸收和發射是不連續的。由原子光譜的不連續性，產生電子能階；最終演化出光譜學，讓天文學家可以知道遙遠星球上的物質種類與距離我們多遠。原子核的放射線中，阿爾法(α)射線和伽瑪(γ)射線也是不連續的。同樣的類比，原子核也有不同能階。但是在貝他(β)衰變過程中釋放出的電子(也就是 β 射線)的能譜卻是連續的，而且衰變前後有一部分能量失蹤了。這失蹤的能量就是微中子的第一個謎。

1930年，奧地利物理學家包立(Pauli)提出了一個假說，認為在 β 衰變過程中，除了電子之外，同時還有一種質量為零、電中性、與光子有所不同的新粒子放射出去，帶走了另一部分能量，如此能量守恆依然成立。這種粒子與物質的相互作用極微弱，以致儀器很難探測得到。當時包立將這種粒子命名為「中子neutron」，當時他以為這種粒子存在於原子核中；1931年，他修正為原子核中並無此粒子，而是衰變產生的。1932年查兌克發現原子核裡中性的粒子，其質量與質子接近，

稱為「中子neutron」，但這不是包立說的粒子。費米將包立的粒子改名為neutrino，意思是微小的中子，因此中文譯名為「微中子」[大陸的譯名是中微子，取其義為中性的微小粒子]。1933年，費米提出了 β 衰變的定量理論，指出自然界中除了已知的引力和電磁力以外，還有第三種相互作用—弱作用。 β 衰變就是核內一個中子由弱交互作用衰變成一個電子、一個質子和一個微中子($n \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e$)。但是微中子極難與物質作用，直到1956年Frederick Reines 與 Clyde L. Cowan 才以逆 β 衰變($\bar{\nu}_e + p^+ \rightarrow n + e^+$)正式偵測到第一種微中子。微中子的第一個謎，終於完全解開了。

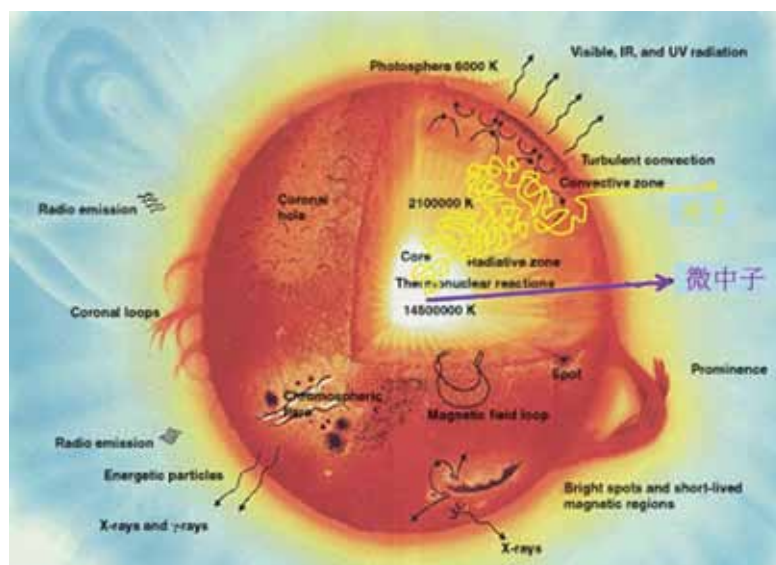


圖1：光子與微中子離開太陽核心的示意圖。(底圖來源：NASA [3])

2.2 第二種與第三種微中子

1936年安德生(Carl D. Anderson)與耐德麥爾(Seth Neddermeyer)從宇宙線中發現另一種粒子與電子性質類似，但重了約207倍；隔年在雲霧室中被證實。這就是渺子(muon, μ)，與電子同屬於輕子(lepton)家族。渺子會衰變成為電子，並會產生兩個性質不同的微中子。因此發現微中子不只一種。 β 衰變牽涉到的是電子微中子(ν_e)，渺子衰變牽涉到的反電子微中子($\bar{\nu}_e$)與渺子微中子(ν_μ)。1962年Leon Lederman, Melvin Schwartz 與 Jack Steinberger 三人共同發現渺子微中子(ν_μ)，並在1988年獲得諾貝爾獎。

1974~1977年伯爾(Martin L. Perl)發現濤子(tau, τ ，源自希臘語的「第三」triton)，這是第三種輕子，其質量約為電子的3477倍。濤子衰變牽涉到的反電子微中子($\bar{\nu}_e$)或反渺子微中子($\bar{\nu}_\mu$)與濤子微中子(ν_τ)。至此輕子的三個家族都已到齊。1995年諾貝爾獎頒發給發現電子微中子的F. Reines (Cowan已經於1974去世了)，與發現濤子的Perl。但是濤子微中子遲至2000年才由DONUT團隊觀測到。

3. 微中子來源

3.1 太陽核心與太陽微中子

太陽的能源來自氫的融合反應，這反應需

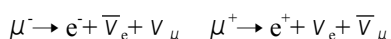
要有一億度的高溫環境。因此只有在太陽核心才符合這條條件。融合反應有數個不同通道，最通常的是質子與質子(p-p)反應鏈，其淨反應是 $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 2\gamma + 24.68 \text{ MeV}$ ，其中 e^+ 是正子(與電子對應的反物質)迅速湮滅成兩個 γ 光子。太陽的微中子(ν_e)的通量極為龐大，地球上每秒每平方公分就大約有650億(6.5×10^{10})個微中子[1]。

這些高能量的 γ 光子與釋放的熱量，從核心往外傳遞。高能的光子與物質不斷地作用，其能量會減少，製造出更多低能量的光子。雖然光子是以光速前進，但是過程中不斷地與緻密的物質作用，光子會被吸收與再釋放。因此從核心傳往表面的過程，反而以近似擴散的方式，約需要10萬年[2]，如圖1所示。等到離開太陽表面後，就可以用光速在8分20秒到達地球。

太陽微中子卻與光子完全不同，它是弱作用粒子。1956年Cowan及Reines的實驗量到的作用截面積只有 $6 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ 。相對於一般的光子與質子反應截面積的最小值約 10^{-28} cm^2 ，微中子小了約一千兆(10^{15})倍！！因此，微中子與物質反應的機率極低。雖然從太陽核心到表面要穿越大量物質，但絕大部分微中子仍可以輕易穿透整個太陽，以接近光速只花約2.3秒就飛到太陽表面。

3.2 大氣微中子

第二節中提到從宇宙線中發現渺子(μ)，這是宇宙線撞擊大氣後，產生許多次級粒子。其中大量出現 μ 或K介子(介子是由一個夸克與反夸克組成的粒子)，這兩種粒子都會很快的衰變成渺子，並放出一個渺子微中子(ν_μ)。然後部分渺子(μ)有機會衰變成電子，放出一個渺子微中子及一個電子微中子。這些反應生成的微中子稱為大氣微中子，其能量約為GeV附近或更高。



3.3 天體微中子

許多天體的激烈反應都可以產生微中子。超新星爆發時、90%以上的能量是由微中子帶出爆發地區。緻密星體、伽瑪射線爆、或活躍星系核的噴流中也有高能量宇宙線產生；這些高能粒子會與附近的物質作用，產生與大氣微中子類似的天體微中子。極高能宇宙線在星系際空間傳播時，也會與微波背景作用，產生極高能微中子[4,5]。

4. 微中子謎題

按照太陽所發射的照度與質量，太陽物理學家可以完整地描述太陽從核心到表面的反應。但是從1970年代開始數個實驗發現到，實驗測量的太陽微中子通量低於預期值約只有標準太陽模型預測值的一半；這就是太陽微中子謎題。是標準太陽模型不正確嗎？那就代表有不一樣的新物理！甚至有人懷疑太陽核心的核反應是否已經減慢，所以太陽微中子(ν_e)只有一半；但是光子傳遞到表面需時約10萬年，所以我們還沒看到表面日照度的變化？若是如此，則天文學家對恆星演化的許多理論就要重新修正！1980s微中子研究又出現第二個謎題，科學家發現大氣裡的渺子微中子(ν_μ)也莫名其妙地失去一半的蹤影！這就

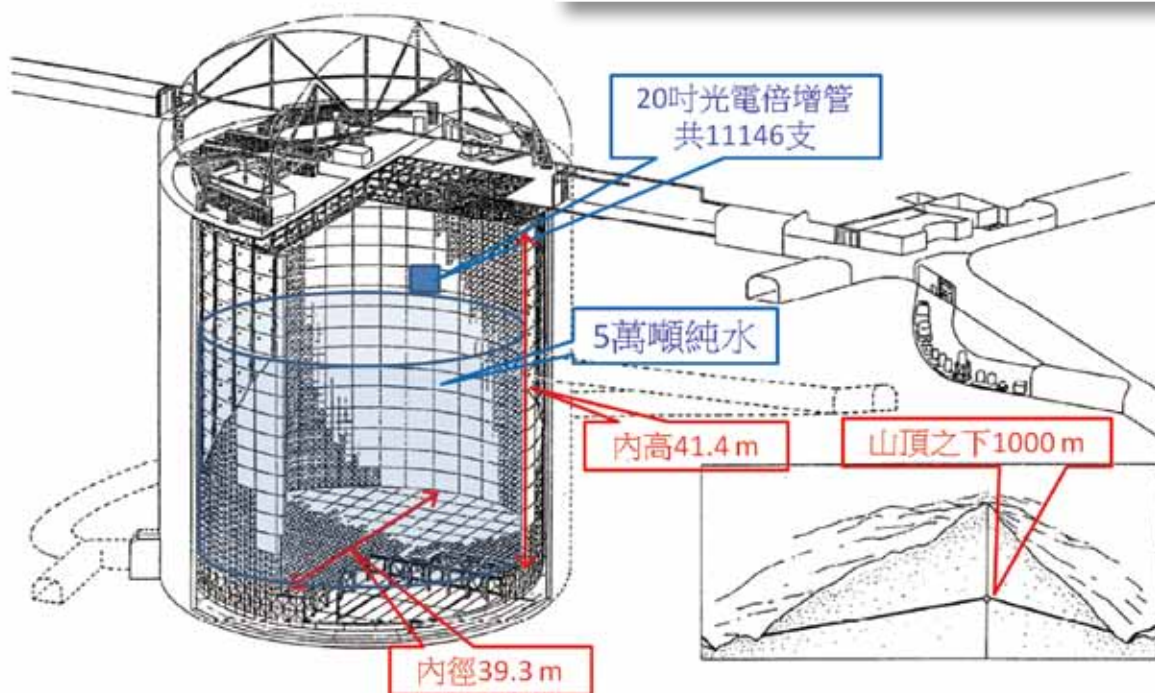
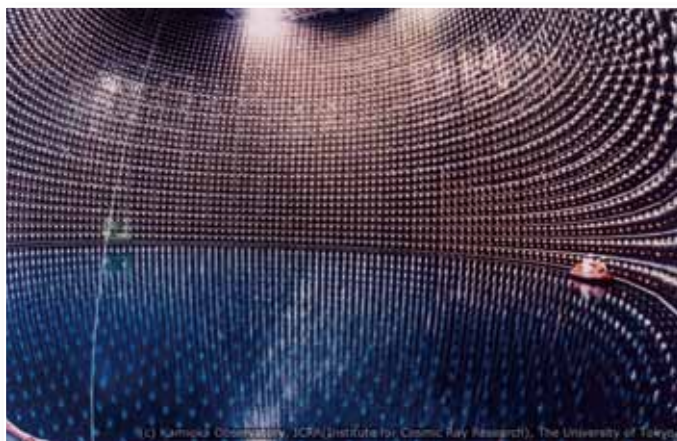


圖2：日本超級神岡(Super Kamiokande)偵測器由5萬噸純水與11146支直徑20吋(~51公分)的光電倍增管組成內圈的反應器。右圖為填充純水過程中，工作人員乘坐橡皮艇檢視光電倍增管的照片。[圖的來源6]

是大氣微中子謎題。這兩個微中子謎題，引起許多人揣測與不安。微中子研究就成為眾所矚目的尖端科學。

無獨有偶地，類似粒子消失的現象也出現在另一個粒子： K^0 介子與其反粒子 \bar{K}^0 。這兩粒子產生時是一種粒子，但是真正測量到的卻是另外一種粒子；但是可分成短半衰期的 K_S^0 與長半衰期的 K_L^0 。這種兩粒子互相轉換身分的現象，可看成是 K^0 與 \bar{K}^0 振盪的結果。類似理論推廣到微中子，就形成微中子振盪的理論。最近20幾年，物理學家才從實驗中證實了微中子並未消失，只是變換另一種身分，使原本要測量的那個模式測不到而已[8]。位於加拿大Sudbury金礦的SNO實驗，使用三種微中子都能反應的彈性碰撞，證實太陽微中子的總數量是正確的。配合超級神岡的實驗，微中子振盪的理論得到證實，標準太陽模型是正確的！人們不需要擔心太陽是不是休息了！

2002年諾貝爾獎頒發給三位偵測微中子的先驅：美國Homestake實驗的Clyde Cowan and Frederick Reines與日本神岡(Kamiokande)實驗的小柴昌俊共同獲得。

5. 科幻與流言中的微中子

5.1 微中子與地殼變動

末日謠言中提到微中子的典型情節是：太陽表面爆發強烈風暴，炙熱陽光與太陽風襲擊地球，地面微中子偵測器發出藍光，裡面的水在沸騰。太陽微中子繼續穿透到地心，加熱了岩漿；四處竄升的熔岩抬升了地殼，引起全球性的地殼變動、火山爆發、與強烈地震，最後毀滅地球文明。

這些情節在電影裡可能只有幾分鐘而已，但強烈的畫面讓人驚心動魄，果真如此嗎？讓我們一一檢驗。

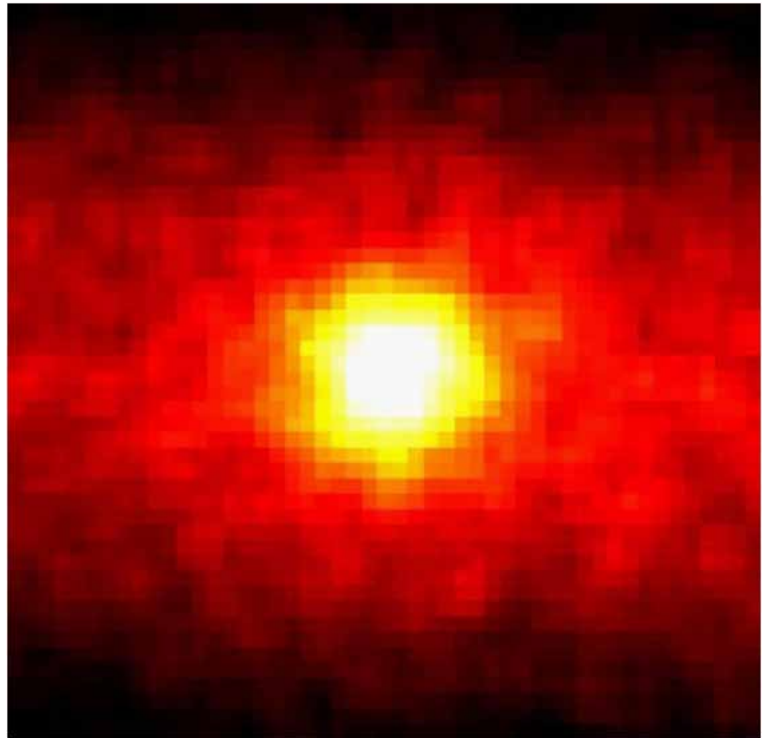


圖3: 使用超級神岡500天所觀測到的微中子所重組的太陽影像！水平與垂直軸分別涵蓋赤經與赤緯各90° [7]。

(一) 太陽風暴及太陽微中子：前段中提到太陽微中子來自太陽內部深處，太陽核心的反應很穩定，因此太陽微中子通量變化很小。太陽風暴是太陽表面的現象，隨著太陽週期有很大變動！科學家從未觀察到兩者有同步的變動，原因就在圖1之中。若是太陽核反應大量增加，微中子可以迅速逃離太陽，但是其他光子約在10萬年後才傳到表面。所以兩者應該有約10萬年的時間差才對！不可能同時出現！

(二) 電影中有另外一個錯誤，影片中衛星先被太陽風打壞，然後地面偵測器看到大量微中子。其實微中子質量非常小，幾乎都是以光速前進。太陽風是電子質子等粒子組成，其速度僅約每秒數百公里至約一千公里，從太陽到地球的途徑是個漩渦形，因此可能要花上數十小時才能到達地球。即使微中子與太陽風同時離開太陽表面，太陽風會比可見光或微中子還落後一段時間。

(三) 微中子偵測器的水池發出藍光：微中子與物質作用後，可能會產生高能量的電子，這些電子運動的速度可以接近光速($c=3 \times 10^8$ m/s)，超過光在水

中的速度($\sim 3/4 c$)。就像飛機在超音速飛行會產生音爆一樣，這些高能量粒子會產生強烈的電磁波，以一個特定角度發射出去，稱為『契倫可夫輻射』。此輻射主要出現在紫外光與藍光附近，因此這個藍光的情節是有科學根據的。但是影片中微中子偵測器的體積太小了，不可能有這麼多藍光出現。相對於圖1所提超級神岡的5萬噸純水偵測器，一天也才偵測到約十幾個事例，每個事例又只有歷時不到一微秒。要讓這種藍光多到肉眼可見，得放大微中子的通量上兆倍！果真如此，太陽已經爆炸了，地球都可能被吞沒了，哪還有時間逃亡！

(四) 微中子偵測器的水池在沸騰：太陽微中子的能量約在百萬電子伏特(MeV)附近，當它反應後，可以將此能量轉移到偵測器的物質中。以超級神岡為例，一天約有數十MeV。此數目看似很大，其實換成日常所用的單位只有約一兆分之一(10^{-12})卡的能量！即使微中子通量增加一兆倍，也只有約一卡的熱量，對於5萬噸的水幾乎毫無作用！這情節可能是模仿自核電廠的爐心水池，核反應釋放的各種輻射線使水池產生藍光與加熱水池。不同的是核反應的輻射線可以立即與水反應產生能量轉移，但微中子的反應機率非常非常微小！

(五) 微中子加熱地心岩漿：微中子是弱作用粒子，太陽微中子確實可以穿透整個地球。因此穿透到地心這部分確實是可能的。微中子的加熱效果已經在上一段提到，即使地球核心有很多物質，但依比例而言，微中子能貢獻的能量極其微小。依目前地球物理理論，地球核心熔岩的能量主要來自兩種：原始星際物質凝結成地球時所損失的重力位能(這是早期地球處於熔岩狀態的主因)，與地殼中鈾鈷等放射性元素衰變所釋放的能量。微中子雖是唯一從外界傳送能量到地心的機制，但是貢獻太少。所以『引起全球性的地殼變動』等等的恐怖後果，便都是不可能出現的。

5.2 拯救與重新啟動太陽

在某科幻電影裡，太陽的核融合反應突然停止了！人類為了避免滅亡，派遣太空船攜帶氫彈投入太陽，試圖重新點燃太陽的核融合反應。這裡面有許多混雜科學與虛幻的內容。

(一) 太陽核心的反應：我們看到的太陽只是表面的光球層而已！如何知道太陽核心的核融合反應有沒有在進行？怎麼知道太陽熄火了？這問題正好回答了許多人的疑問：『微中子有甚麼用？研究微中子對人類有何益處？』

圖1中顯示微中子可以迅速穿越太陽到達地球，所以微中子是即時監測太陽核心活動的唯一工具。假如太陽熄火了，地球生命當然也就消失了。第4節中提到太陽微中子謎題，部分科學家曾懷疑太陽核心的活動是否減慢了。這種另類理論當然引起一些熱情的科幻迷的注意，因此出現上述太陽熄火危機的影片。

(二) 太陽會死亡嗎？何時死亡？

恆星的能量來自氫融合成氦的反應，當氫氣用完後會轉換成氦氣的融合，持續進行融合。因此恆星當然有壽命的期限。1kg的氫反應成0.993kg的氦，產生 6.3×10^{14} 焦耳或相當於1.75億度的電能。約可提供全台灣約8小時20分的電力。依照太陽質量，估計太陽壽命約 10^{10} 年。太陽系的年齡約45億年，故太陽仍可繼續照耀約55億年，直到太陽爆炸成為紅巨星。

太陽既然會死亡，一些末日信仰者看中這種可能性，發展出另一套末日之說，催生為末日做準備。其實太陽越老，表面輻射光強度越強。在100億歲臨終前，強度可能比現在增加了40%，地球溫度上升超過 100°C ！高等生物可能早在太陽70億歲時就已經太熱而滅亡了！這種火海地獄的末日距離現在還有25億年！人類文明能否撐過未來的250年都已經是很大的挑戰，25億年後的事就不必多費心思了！

(三) 重新啟動太陽：電影情節中，人類嘗試以氫彈投入太陽，重新點燃熄火的太陽。不過照現在太陽的總功率 3.83×10^{26} 瓦特，或是每秒有6億噸的氫在進行融合反應。就算把地球上所有氫彈、核彈通通加起來也不夠用。所以這情節，純粹是虛幻的情節。

6. 微中子研究最新發展

6.1 台灣的核電廠微中子研究

台灣有關微中子的研究，除了理論物理的研究

外，也有三個實驗。TEXONO是台灣微中子實驗(Taiwan EXperiment On Neutrino)的縮寫，在金山國聖核電廠旁，以反應爐產生的反電子微中子($\bar{\nu}_e$)研究微中子的基本性質[9]。另一個是大亞灣(Daya Bay)微中子振盪實驗，這是測量第三個振盪角的實驗，以廣東大亞灣的六座核電廠，將四組偵測器佈置在遠與近的兩個位置上，觀察微中子在這兩位置上的變化[10]。

6.2 天體微中子研究

由於微中子與物質極難反應，雖然科學家建造好幾個偵測器，但只看到一種天體微中子：太陽微中子！其他的天體微中子仍舊沒有蹤跡！要偵測到天體微中子，就需要更大的偵測器。第一個困難就是『反應物質』，物質越多、微中子反應的訊號就越多，可是成本也越貴。科學家找到最便宜的物質就是海水與冰層。第二個困難是訊號的傳遞與偵測。傳統的偵測器使用光電倍增管偵測微中子反應後產生的契倫可夫輻射，這些光線在海水與冰層中都容易被吸收，衰減長度(Attenuation length, 光的強度降低至 $e^{-1}=36.8\%$ 的距離)約只數百公尺而已。偵測器必須有多組偵測器同時收到信號，才能做立體觀測，定出反應位置與方向。因此偵測器的間隔距離必須比衰減長度短。第三個困難就是『背景雜訊』，深海底雖然已擋住陽光，但仍有許多生物螢光。而且大量的大氣微中子也會遮蔽可能的少數天體微中子。第四個困難就是『錢』！大量的偵測器與複雜的安裝都是耗資龐大的支出！

為了研究天體微中子，來自11國39單位約250位科學家，集合在一個迄今最大的計畫IceCube(冰立方) [11]，在南極建造一個一立方公里的冰下偵測器陣列，如圖4所示。共計有86串偵測器，埋在冰下2000~2400公尺深；每串60個數位偵測器模組，總數約5160個。從1999年開始測試概念原型，直到2010年才完成，耗資約美金2億7100萬！

另一個類似規模的計畫是立方公里陣列(Km³ Net)，是地中海周邊數國合作，要在地中海底建造一個同樣是一立方公里的水下偵測器陣列 [12]。希臘、義大利與法國各自展開原型的開發、測試與場地勘查，數年來的『兄弟爬山，各自努

力』，使整體進度落後冰立方多年。現在Km³ Net雖已列入歐盟重點開發項目，但三主要團隊的競合關係與磨合期都是待解決的問題，前景仍不明確。

6.3 台灣的天體微中子研究

台灣並未參與IceCube實驗，台灣大學的LeCosPA中心在陳丕燊主任領導下，參與另一種偵測技術：以無線電天線偵測微中子反應後產生的無線電訊號。首先是ANITA計畫，以高空氣球攜帶無線電天線陣列觀察穿透冰層而出的訊號。ANITA在2006-2007及2008-2009年做了兩次高空氣球環繞南極飛行。雖然沒看到微中子訊號，台灣團隊卻意外地發現七個極高能宇宙線的事例 [13]。

由於氣球飛行的時間有限，飛行路徑也無法控制，不利長期觀測。下一階段的天壇陣列(ARA (Askaryan Radio Array) Observatory)是要將無線電天線陣列設在冰層以下如此即可連續操作。ARA使用無線電波的好處是無線電波在冰層的衰減長度約



圖4：IceCube實驗[11]由86串偵測器，埋在冰下2000~2400公尺深。左下方為330公尺高的艾菲爾鐵塔，以相同比例放在IceCube旁邊做對比。渺子微中子與冰反應產生渺子，從圖左方進入IceCube。圖中藍色錐體為渺子產生的契倫可夫光，左方幾串偵測器的圓點大小代表接收到信號的強度，顏色(由紅橙黃綠…)代表收到信號的時間。由這些訊息可以推算出渺子的能量與方向。

1.5 ~ 2公里，使得無線電天線的間距比IceCube的間距大約10倍。計畫中將安裝37站，占地面積約83平方公里。有效體積大於200立方公里！與IceCube相比，ARA的有效體積大了200倍以上；但是偵測器的串數少了一半。圖5顯示ARA陣列的配置，底圖是台北市空照圖，由此對比，可清楚了解天壇陣列的規模約與中心的六個區的面積相當，可知ARA的大小與困難度。

ARA設在南極有四個因素：(1) 南極提供約2~3公里厚冰層當作反應物質。(2) 無線電波在冰層的衰減長度比較長，減少偵測器數目。(3) 南極人為活動少，電磁干擾低，適合無線電波偵測。(4)由於(1)與(2)，使ARA可以大幅地降低成本。

6.4 與南極微中子研究有關的流言

這種大規模的實驗難免引人側目，有些八卦愛好者也喜歡討論這種『似懂非懂』的微中子偵測器。這些流言有：

(一)「科學家在南極設陷阱、捕抓微中子」：這種通俗的說法帶有主動去抓的意思，其實科學家只是被動地等著微中子產生反應，不如說「守株待兔」更貼切。

(二)「南極純淨的冰層具有吸引微中子的神奇能力，所以科學家跑到南極」：冰只是物質的一種，微中子是跟核子作用，只跟物質的密度有關，跟何種物質無關。類似ARA的實驗也曾想過在地下鹽礦中進行，但是鹽礦的鑽孔費用太貴，因而作罷。

(三)「南極的微中子特別多，所以科學家也聚集到南極」：微中子可能來自不同天體，來自四面八方都有可能。這些來源都離地球非常遠的，即使來自同一天體，微中子也是均勻分散在全球各地，並不會特別集中在某個地點。

6.5 微中子可以超越光速嗎？

20世紀近代物理有兩個最重要的基礎：相對論與量子力學。在狹義相對論中又以真空中的光速是個常數，而且是速度的極限。愛因斯坦推論出光速必須是極限，否則因果關係會被破壞。從這個關係，愛因斯坦開展出狹義相對論，及其運動坐標系中的時間延長與長度縮短的現象。這些特殊現象對低速的日常生活而言，或許有些奇怪；但是對高速飛行的基本粒子，例如大氣中的渺子，這些理論確實解釋了高速與低速渺子生命期不同的現象。基本粒子學家觀測了大氣中或者加速器內的各種粒子，都發現愛因斯坦的理論是正確的！



圖5：天壇(ARA)陣列預定有37站(白色菱形)，以四站排成三角形，搭配一組風力發電機(紫色圓圈)，組合成六邊形，總面積約83平方公里。右下角紅色長條為南極科學站的機場跑道，藍色六角形(IC)為IceCube在地面的投影。底圖為台北市區的空照圖(圖片來源Google Earth)。

美國的MINOS實驗在2007年發現微中子可能有超光速的現象，快了約十萬分之5.1，可是其顯著性只有1.8倍標準差，顯著性不足，難以證實超光速的事實[15]。2011年9月，另一個名為OPERA的實驗組，觀測到從瑞士的歐洲核子物理中心CERN送出的微中子束，到達730公里外在義大利的實驗室中，竟然比用光速行進的預期抵達時間提早了約60奈秒(nano-second, 10^{-9} s)，意味著微中子的速度超越光速約十萬分之2.48 ($(v-c)/c=2.48 \times 10^{-5}$) [16]！正式論文尚未送到期刊發表，但先以記者會發表。如此石破天驚的結果，當然立刻引來嚴重的質疑。光是兩地如何正確對時到奈秒以下的精度，就是個浩大的工程。況且此實驗使用的微中子脈波長約10.5毫秒(1.05×10^{-5} s)，是時間差60奈秒約300倍！實在不易令人信服。OPERA團隊再度進行實驗，請CERN將微中子脈波長截短到只有3奈秒。初步結果於11月底出爐，再度驗證原來的結果。

這種打破狹義相對論的基礎假設的可能性，立刻就引來大量論文討論可能的原因與後果。是否真的超越光速，可能需要第二個團隊來驗證。但是事實仍無法否認，1987年的超新星SN1987A爆炸時，地球上的數個微中子偵測器也記錄到微中子的數量上升，其時間比可見光提早約3小時[17]。微中子提早到數小時這部分是有理論依據，類似3-1節的太陽微中子與光子的時間差一樣的原理。但是SN1987A位於大麥哲倫星雲，離地球約17萬光年。若是OPERA的現象是微中子超越光速的現象，則SN1987A的微中子應該提早 $(1.7 \times 10^5) \times (2.48 \times 10^{-5}) = 4.2$ 年就到地球了，怎麼會幾乎同時到達？是否有別的解釋，可以符合眾多與狹義相對論一致的觀測結果，又能解釋OPERA的現象？現在物理學家還在絞盡腦汁，努力發掘可能是獲得諾貝爾獎的問題。

從古至今，許多「幻想家」就想出回到未來或預知未來的可能與後果。OPERA的新聞讓超越光速變成『可能的』科學事實。在科學家還沒確認這事實前，已經有許多科幻或八卦作家開始打主意了，下一波會有更多引用這些構想的謠言作品出現；這些八卦作家又要海撈一票了！我在此只能預先打預防針，告訴大眾：就像廣義相對論是修正牛頓力學在質量極重的情況，除非要求的精度非常高，否則一般情況下牛

頓力學仍然正確。現在絕大部分的事實支持光速是極限，即使OPERA的結果是正確的，可能是有另一種新物理，或者它只適用於特殊的粒子或反應之中。除非精度非常高，否則一樣無法分辨。

參考資料

1. John N. Bahcall, M. H. Pinsonneault, and Sarbani Basu, *Astrophysical Journal*, 555: 990, 2001
2. Mitalas, R. and Sills, K., *Astrophysical Journal*, 401:759-760, 1992
http://sunearthday.nasa.gov/2007/locations/ttt_sunlight.php
3. http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_12/sun_parts.html
4. 黃明輝，混沌未明的新疆界 極高能宇宙射線物理，*物理雙月刊*，24: 538-546，(2001/08)
5. 黃明輝，極高能宇宙線望遠鏡的發展與近況，*臺北星空(天文館期刊)*，45: 6-14，(2009/8)
6. 原始檔案來自超級神岡(Super Kamiokande) <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/gallery/index-e.html>
7. <http://apod.nasa.gov/apod980605.html>
8. 曾玠郡，(2004)，*物理雙月刊*，26, 689-293，(2004)
9. <http://hepmail.phys.sinica.edu.tw/~texono/>
10. <http://dayawane.ihep.ac.cn/twiki/bin/view/Public/WebHome>
11. <http://icecube.wisc.edu>
12. <http://www.km3net.org/home.php>
13. 陳丕燊，在南極搜獵極高能宇宙微中子，*物理雙月刊*，31: 238-242，(2009/6)
14. 陳丕燊，傾聽宇宙最深處的玄機，*科學人*，103: 40-43，(2010/9)
15. MINOS Collaboration: P. Adamson, et al, *Phys. Rev. D* 76:072005, 2007
16. OPERA Collaboration, T. Adam, et al., [arXiv:1109.4897v2](http://arxiv.org/abs/1109.4897v2)
17. <http://cosmos.colorado.edu/stem/courses/common/documents/chapter6/l6S6.htm>

黃明輝副教授：任教於國立聯合大學 能源工程學系及 共同教學中心物理組，國立台灣大學 梁次震宇宙學與粒子天文物理中心
E-mail: mahuang@nuu.edu.tw