



◎ 華人觀點 ◎

隱形人的量子變身

撰文／張達文

如果你一聽到「微中子」三個字就哈欠連連，對微中子發現的來龍去脈更是摸不著頭緒，那你一定要看看這段有趣的故事……

——編輯部

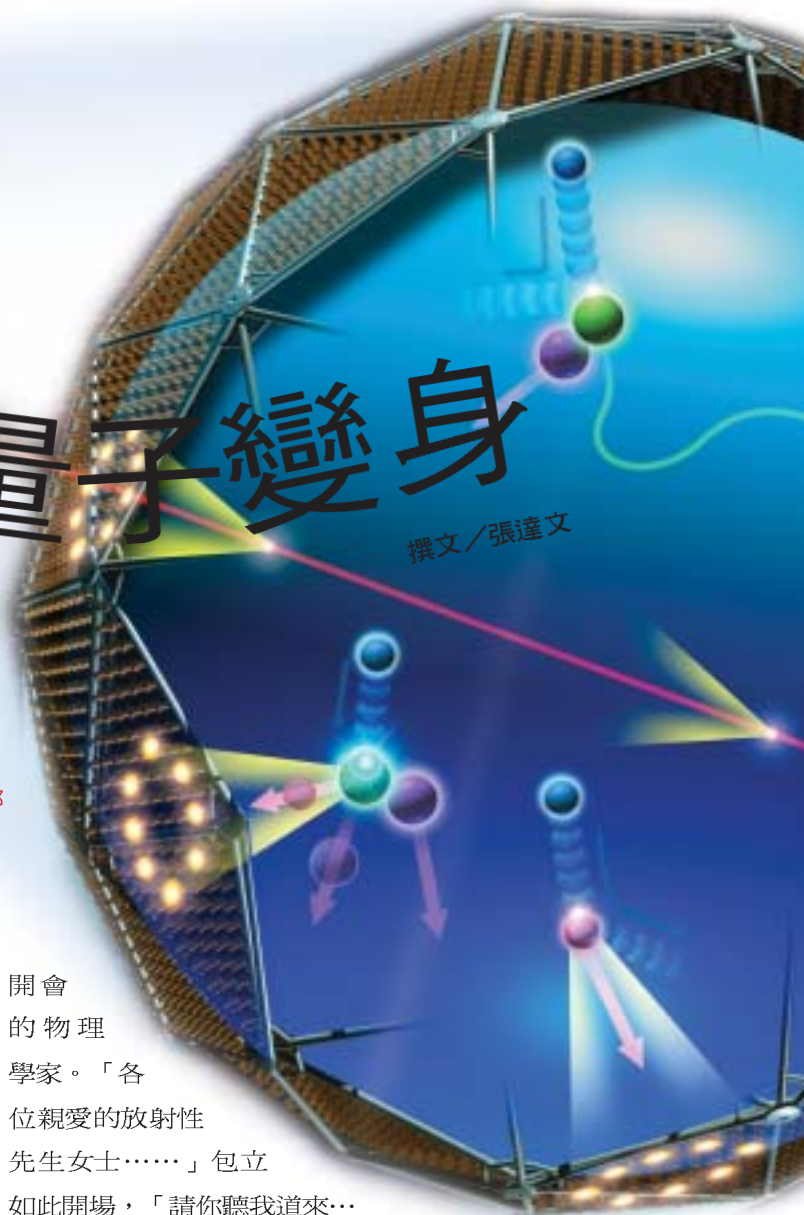
1930年，一群研究放射線的主要物理學家在德國杜賓根開會。那時候物理學界的主流前沿課題是，放射線物質在 β 衰變中的能量守恆問題。1895年，倫琴（W. C. Rontgen）發現X射線，開始了一連串人類對放射線的新發現；1896年，貝克勒（A. H. Becquerel）發現鈾射線；1897年，拉塞福（E. Rutherford）和湯姆森（J. J. Thomson）發現鈾射線中包含了兩種放射線： α 射線及 β 射線。經過多年的努力，到了1928年，我們已經知道 α 射線是由氦的原子核所構成，而 β 射線的成份事實上就是電子。 α 射線中的氦原子核是有固定能量的，但是1929年物理學家梅特納（L. Meitner）精確的實驗，肯定了 β 射線中的電子能譜是沒有固定能量的。這就是1930年時大家爭論不休的「能源危機」，而這類會放射出 β 射線的物質衰變便稱為 β 衰變。問題是：為什麼在 β 衰變中能量不見了？

當時，不久前才在量子力學的發展中意氣風發的丹麥大物理學家波耳（N. Bohr），乘勝追擊提出了在 β 衰變中能量不守恆的觀念。才氣橫溢的德國物理才子包立（W. Pauli）自然不能讓波耳專美，一方面批評波耳的理論，一方面寫封信給梅特納，請她代為轉達給在杜賓根

開會的物理學家。「各位親愛的放射性先生女士……」包立如此開場，「請你聽我道來……關於…… β 衰變的連續能譜，我在絕望之餘撞了一個解決的辦法……」接著他開始形容，假設在 β 衰變中同時釋放出一種實驗看不到的中性粒子，這個粒子會將能量帶走，因此就可以解釋為什麼實驗看到能量不守恆的現象。他說：「我對這個觀念仍然不太放心，因此我尚未發表，而先在此向各位私下表達……不幸我不能親自前來開會，因為我在這裡還有一個舞會跑不開……」這個包立在絕望之餘大膽提出來的中性粒子，就是現在赫赫有名的微中子。

隱形人現身

1934年，兩位新生代的厲害傢伙貝特（H. Bethe）及派爾斯（R. Peierls），決定坐下來算一下微中子在通過物質的時候被碰撞的機會。他們發現，這個出現在 β 衰變





隱形的微中子現身了 實驗物理學家花了 20 多年 才推翻了理論物理學家 永遠測量不到微中子的預言

中的奇怪中性粒子，如果真的存在的話，在水中可以通過 250 光年厚度的純水而不受到碰撞。也就是說，這微中子真是個道道地地的隱形人。這樣一個量不到的傢伙，即使真正存在，又有什麼意義呢？難怪包立後來還為自己發明了這樣一個永遠量不到的粒子而道歉。但是，實驗物理學家的真功夫，是遠遠超過這些理論物理學家想像的。第二次世界大戰之後，曾經協助發展原子彈的兩位實驗物理學家，科文 (C. L. Cowan, Jr.) 及芮內斯 (F. Reines)，開始想辦法來測量這個隱形人。方法很簡單，只要製造夠多的微中子讓它們同時與物質碰撞，自然有一些會撞上。使原子彈爆炸的核反應自然會製造大量的微中子，但是，為了測量微中子而引爆原子彈未免冒險太大。1956 年，第一個和平用途的原子爐誕生，科文及芮內斯所碰到的難題終於有可能解決。他們利用原子爐所放射出來的微中子，很快就偵測到微中子與物質的碰撞，證實了微中子的存在。芮內斯因此在 1995 年拿到諾貝爾獎（可惜科文已死）。1976 年有人故意問貝特，為什麼他在 1934 年說微中子是永遠量不到的？貝特幽默地說：「你本來就不應該相信你在論文中讀到的每一件事情。」

我們現在了解到很多類似 β 衰變的物理程序，這些物理程序統稱為「弱作用」(weak interaction)。在弱作用中，微中子通常隨著電子出現，這個電子的跟班就叫做「電子微中子」。到了 1980 年，我們已經發現自然界除了電子之外還有另外兩個性質與電子完全相似的基本粒子，一個叫做繃子，另外一個叫做 τ 。繃子與 τ 都有各自的弱作用跟班叫做「繃子微中子」與「 τ 微中子」（參見〈破解太陽微中子之謎〉）。

除了原子彈以及原子爐之外，地殼裡的放射性元素也不時放出少量的微中子，但是地球上最大的自然微中子來源是高掛在天空的太陽。事實上，太陽是自然界的核融合反應爐，它釋放出來的能量越多，製造出來的微中子也就越多。我們享受暖陽照射的同時，無數的微中子

正穿透我們的身體而過。另外一個主要的自然微中子來源，是從宇宙各個角落四面八方打向地球的高能量宇宙射線；這些宇宙射線打到地球外層的大氣層製造出無數個粒子，其中便包含了微中子。原子彈、原子爐以及太陽燃燒的能量較低，只能製造出電子微中子，這些微中子大多數能量不大，最高不超過 20 百萬電子伏特 (MeV)。而由宇宙射線打出來的微中子，則包含了電子微中子及繃子微中子，而且能量通常超過幾百 MeV。

太陽能量的來源是物理學家與生物學家同時關心的問題。早在 1859 年，達爾文就因為他演化論的需要而估計太陽的年齡應該在三億年左右。這個估計受到當時的大物理學家克耳文爵士 (L. Kelvin) 的嚴重批評。克耳文爵士認為太陽的能源應該是由重力而來，因此年齡不應該超過 2000 萬年。達爾文也曾經為克耳文爵士的這個論點而大傷腦筋。在放射線物質發現之後，很多物理學家馬上看出這可能是太陽能源的源頭，經過許多人長年的努力之後，在 1938 年貝特終於將太陽燃燒的反應程式通通算出來。有了這些反應方程式，美國普林斯頓大學的巴寇 (J. N. Bahcall) 就可以它為基礎來建構一個太陽演化的模型。經過多年的改善，這個模型就成了現在的太陽標準模型，可以預測太陽製造出來的微中子能譜以及數量。1964 年起，美國賓州大學的戴維斯 (R. Davis, Jr.) 開始與巴寇合作設計一個以化學反應來度量太陽微中子的方法。十分意外的是，戴維斯偵測到的微中子數目只有太陽模型預測的三分之一。這就是困擾物理學家 30 年的「太陽微中子問題」。

隱形人變身

1970 年之後，物理學家設計很多不同的實驗來驗證戴維斯所發現的太陽微中子問題，結果都與戴維斯的不謀而合。戴維斯用化學元素氯，可以偵測能量約 0.8MeV 的微中子。其他兩個實驗 (SAGE 和 GALLEX) 用化學元素銻，可以偵測能量更低的微中子 (約 0.2MeV)。1986 年，一個由日本及美國物理學家所組成的團隊，在小柴昌俊 (M. Koshiba, 2002 年諾貝爾物理獎得主) 的領導下，開始在日本神岡的一個地底礦坑，設計出一個用來測量質子衰變的實驗。他們用一大桶純水和無數的光電倍增管來測量這個衰變所放出來的光，但並沒有看

到任何質子衰變，反而在 1987 年，當一個近年來最亮的超新星爆炸的時候，因為率先看到超新星所放出來的微中子而聲名大噪。超新星爆炸時，所放射出來的微中子比光子更早到達地球的。從此之後這個地底實驗室開始改變方向，往微中子天文學的方面發展。

這個實驗以及它的改良版本叫做「超級神岡」(Super-K)，用微中子與水的碰撞來測量微中子，不但可以看到太陽微中子中能量較高的部份，也可以觀測大氣微中子的性質。Super-K 所看到的微中子數量與其他的化學方法所看到的是相符合的；也就是說，太陽來的微中子比理論模型預測的少了約一半。如果太陽模型沒錯的話，這些電子微中子從太陽核心跑到地球上來的路程中，因為某種原因消失了，或者說，轉變了。Super-K 更令人叫好的是它對大氣微中子的觀測。宇宙射線打在大氣層上，製造出許多繃子微中子與電子微中子。不管宇宙射線的強弱，這兩種微中子數量的比應該是固定的，但是 Super-K 發現這個比會隨著宇宙射線射到大氣層的地點而改變。在不同位置的大氣層製造出來的微中子傳遞到 Super-K 的距離不一樣，因此 Super-K 發現兩種微中子的比是隨著微中子傳遞的距離而改變的。更仔細的分析發現，可能是繃子微中子在穿過地球時，因為某種原因消失了，或者說，轉變了。

在理論上，解釋這些微中子轉變最容易的方法，就是假設這些微中子有質量。這種轉換只有在量子力學的架構下是可能的，因此說微中子振盪是一種隱形人的量子變身。根據我們現在的了解，太陽來的電子微中子應該有一部份在太陽內部就轉換為繃子微中子；而宇宙射線在大氣層中製造出來的繃子微中子，有一部份是在通過地球時轉換為 τ 微中子。但是這個了解仍需正在進行的實驗來驗證。其中最重要的就是〈破解太陽微中子之謎〉一文所描述的 SNO、K2K 以及 KamLAND。SNO 可以偵測到所有微中子與物質的碰撞，因此不但能夠驗證其他微中子振盪實驗的結果，而且可以驗證太陽模型的準確性。KamLAND 第一次偵測到人造原子爐製造出來的電子微中子在地球表面的振盪；K2K 將日本高能研究所 (KEK) 的加速器所製造出來的微中子射向神岡的探測器，也偵測到了微中子的消失。

在不久前粒子物理的標準模型中，微中子是不能有質

量的，因此微中子振盪的發現迫使物理學家修正這個標準模型。這是標準模型 30 年來的最大修正，但是修正的方向還有待進行中的微中子實驗來闡明。此外，微中子的各種性質還會影響我們對宇宙論以及天文現象的了解。因此在過去幾年，無數新的微中子實驗誕生，其中包含了一個台灣微中子實驗 (TEXONO，網址：<http://hepmail.phys.sinica.edu.tw/~texono/>)。1997 年，中央研究院微中子研究小組在王子敬博士的領導下開始進行 TEXONO，目標為推動微中子物理及天文粒子物理的研究方向。TEXONO 合作團隊集合台灣及中國 40 餘

跨領域的科技專長，為海峽兩岸大型學術研究的合作開創先河。合作團隊的重點實驗，是在台灣北部台電國聖核能發電二廠爐心旁，放置固態及閃爍晶體探測器，以研究低能區微中子特性和反應等物理。TEXONO 為首次在台灣本土策劃、本土執行的粒子物理實驗。剛開始的幾年，由於團隊尚在研發偵測器階段，沒有任何數據發表，也因此備受質疑。就在今年 3 月，TEXONO 終於發表了它關於微中子磁矩的研究數據，得到比世界上其他類似實驗精密的

結果，受到國際同仁肯定。目前其他數項研究課題也在同時進行，包括探測器的改良、放射性同位素的測量、精準電子儀器的製造，以及太陽微中子及暗物質測量方法的探討。這個團隊的成功經驗，反應了在台灣從事基礎科學研究的困難性與可能性，是未來新一代實驗的借鏡。



張達文 清華大學物理系教授，中研院物理所研究員，研究領域為高能物理，暇於從事詩作。



台灣 TEXONO 的微中子實驗由中研院微中子小組負責。圖為王子敬博士正在微中子探測器旁進行實驗，這些儀器就位於台電國聖核能發電二廠爐心旁。