

於無聲處聽驚雷 致詰中微子於九地之下

視之不見名曰夷，聽之不聞名曰希，搏之不得名曰微。此三者不可致詰，故混而為一。其上不曠，其下不昧。繩繩不可名，復歸於無物。是謂無狀之狀，無物之象，是謂恍惚。

——《老子》第十四章

作為建構宇宙原料的「基本粒子」目前已知的有20餘顆，包括夸克 (quark) 和輕子 (lepton) 各六種，膠子 (gluon) 八種，電弱中介子三種等等。在這一堆光怪陸離，性質大相逕庭的眾多粒子之中，最「希微不可致詰」，無從捉摸，但又不可置之不理的，無疑就是中微子 (neutrino, 符號 ν) 了。在過去七十年間，它撲朔離奇的命運，一直令人驚愕、入迷。

甲 為了挽救能量守恆定律

中微子最初登場，是在1925-36年間。當時發現，在同一 β 衰變 $N \rightarrow N' + e$ 中觀測到的高能電子 e (即 β 射線) 可以有不同能量。由於過程中的「母核」 N 和「子核」 N' 處於一定狀態，電子有不同能量意味着這一過程能量不守恆，那就觸動到物理學最基本的定律了。事實上，在20年代，玻爾 (Niels Bohr) 就認真考慮過這一可能性。到1930年前後，保里 (Wolfgang Pauli) 為了「挽救」能量守恆律，這才提出中微子假說，即 β 衰變還會產生一種尚未發現的新粒子 $\bar{\nu}$ ： $N \rightarrow N' + e + \bar{\nu}$ ，而 N 和 N' 的能量差是分配於電子 e 和中微子 $\bar{\nu}$ 二者之間，這樣電子能量的變化就可以得到合理解釋。

但要這假說成立，中微子得有兩種非常特別的性質。首先，它和一般物質之間的作用必

然極端微弱，因為所有核粒探測器裏都完全沒有它的蹤影。其次，它的靜止質量 m_ν 又必須極小，或逕直和光子一樣為0。否則，它必然會在 β 衰變中佔一最低限度能量 $m_\nu c^2$ (c 是光速)，也就是說，電子能量分布曲線會有明確終結點——而事實正好相反。

這樣，在1930-36年間，無質量而又幾乎能輕易穿透任何物質的中微子以假說形式出現，並且幾乎立即就為物理學者接受，從而就成為原子核和中子 (1932年發現) 衰變理論的重要部分。然而，和前此發現的光子 γ 、電子 e 、質子 p 、中子 n 、正電子 e^+ 等粒子不一樣，它太微弱飄忽，不可捉摸了，因此一直無從證驗。要整整二十年後，即1956年，學者才觀測到沙文那河 (Savannah River) 核子反應堆由裂變 (fission) 產生的大量中微子為質子所「俘獲」 $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ 時產生的特殊訊號，而終於證實中微子的存在^①。

乙 箇中三昧

中微子那麼難以捕捉、探究，因為它既沒有強作用，也沒有電磁作用，而只有極為微弱的所謂弱作用：一顆低能中微子得要通過一光年 (10^{18} cm) 之厚的鉛板，才有發生作用的可能！所以，幾乎所有與中微子有關的實驗，都得在深入地下的礦坑進行，或者用上數千百噸鋼板作為屏

蔽，將大量「背景反應」亦即「雜音」除去，這樣才能真正觀察到極其罕見的中微子反應訊號。

所謂「弱作用」最直接表現，就是粒子的衰變，例如中子蛻變為質子： $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$ （前述質子俘獲反應則為其逆反應）。除了中子以外，其他粒子例如 π^- 介子也會衰變成電子，或者和電子性質相類而質量大得多的 μ^- 介子，同時產生中微子： $\pi^- \rightarrow e + \nu_e$ ， $\pi^- \rightarrow \mu + \nu_\mu$ 。問題是： ν_e 和 ν_μ 是同一類，還是不同的兩類中微子？在1962年，哥倫比亞大學的實驗組在布魯希文（Brookhaven）國家實驗室利用退役戰艦密蘇里號的裝甲鋼板為實驗屏蔽，發現在 π 衰變為 μ 過程中產生的中微子 ν_μ ，不能產生諸如 $\nu_\mu + p \rightarrow n + e^+$ 那樣的反應，但 π 衰變為 e 過程中產生的 ν_e 則可以： $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$ 。這樣就證明：中微子有「家族性」：輕子 e 和 μ 各有其相關的中微子 ν_e 和 ν_μ ，兩者是不一樣的②。

電子和 μ^- 介子都是沒有強作用的所謂「輕子」。到1975年，又出現了第三顆質量更大的 τ^- 輕子。由於它的性質和前兩者基本上完全相同，所以大家都很自然的認為，在它的衰變中會產生第三種中微子 ν_τ 。這樣，一共就出現了「三代」或曰「三味」輕子（ e, ν_e ），（ μ, ν_μ ）和（ τ, ν_τ ）。其實，在基本粒子「標準模型」的理論架構中，有一代輕子（ e, ν_e ）就足夠了。大自然為甚麼要不厭其煩，造出性質相同的三代輕子來，目前還沒有人能夠猜透③。

丙 質量問題

除了家族問題之外，中微子的靜止質量 m_ν 也令人深感困擾，因為從輕子衰變產物的能量分布曲線，我們只能推斷 m_ν 的上限。隨着實驗的改進，這雖然已下降到1eV（電子伏）以下，但 m_ν 是否如光子一樣準確為零，卻無從判斷。

中微子的希微質量之所以惹人關注，是有重要原因的。首先，宇宙形成之初亦即發生大爆炸之後，所產生的大量中微子，目前應當仍

然充斥宇宙。它們作為不發光，不可見的黑質（dark matter），即使有些微質量，總合起來也可能影響宇宙膨脹的變化——亦即是左右宇宙未來命運④。

另一個更為微妙的原因，則是理論性的：倘若中微子的確有質量，那麼不同類型的中微子就可能彼此有關聯，甚至自然地互相交替轉變，猶如諧振系統（harmonic oscillator）在兩個不同狀態之間來回擺盪一樣。但倘若所有中微子的質量全部為0，則這相互轉變的可能性就不存在了。

而這個微妙的理論問題卻是和我們所最熟悉的太陽糾纏在一起的：太陽內部由於核作用而產生的大量中微子流，在地球上以種種方法仔細測度，卻總是比預期少了一大截。這是非常之奇怪的，因為恆星構造和演進理論⑤目前已到了非常之準確精密的地步，和所有觀測數據都吻合，只在這一問題上的重大誤差無法解決，成了所謂「太陽中微子失蹤」之謎，它的存在由於日本「超級神岡」（Super-Kamiokande）探測器在四年前發表的精確結果而再次證實，此事的神秘性亦因之更為加深⑥。在此情況下，剩下的唯一可能解釋就只能是：中微子的確有質量，所以太陽內部產生的 ν_e 在飛往地球的途中發生「蛻變」，部分成為 ν_μ 和 ν_τ ，因而在地球上探測到的 ν_e ，就減少了。

丁 零的突破

中微子失蹤之謎，現在終於由加拿大安大略省塞伯利中微子觀測站（Sudbury Neutrino Observatory, SNO）所測得的最新結果⑦而現出曙光了：他們經過2000年整一年的觀測，證實從太陽飛來地球的，的確有不同類型的中微子，而其流量相加起來，恰好是我們所預期太陽所產生的中微子流！

SNO中微子探測站設於深入地下兩公里的鎳礦坑中，以將各種訊號干擾減到最低，只有穿透力極強的太陽中微子流，才不受這天然屏

蔽影響。探測器的核心，是載於直徑12米球殼中的1,000噸高純度重水，這是捕捉中子的反應靶；由是產生的高能電子通過環繞其外的純水時會產生「切倫科夫輻射」，後者則由包圍在一個18米大球面上的近萬枝光電倍增管接收(圖1)。設計、製造、測試、運作這龐大系統以及分析所錄得的大量數據牽涉了15間學術機構，而發表結果時論文作者則多達將近200位。但經過一年多努力，他們在3,000餘萬事例中最後只找到1,169太陽中微子反應事例而已，這真可謂大海撈針之舉了。

在這一實驗中，重水中的重氫核氘(deuteron) d 和太陽來的中微子有三種不同作用，對目前這一報導重要的是其中兩種：(a) CC反應，那只與 ν_e 有關 ($\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$)；(b) ES反應，那和所有三類中微子都有關，但反應率不一樣，對 ν_μ 和 ν_τ 不那麼敏感)： $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ (x 可以是 e ， μ 或 τ)。「超級神岡」實驗(SK)所精確

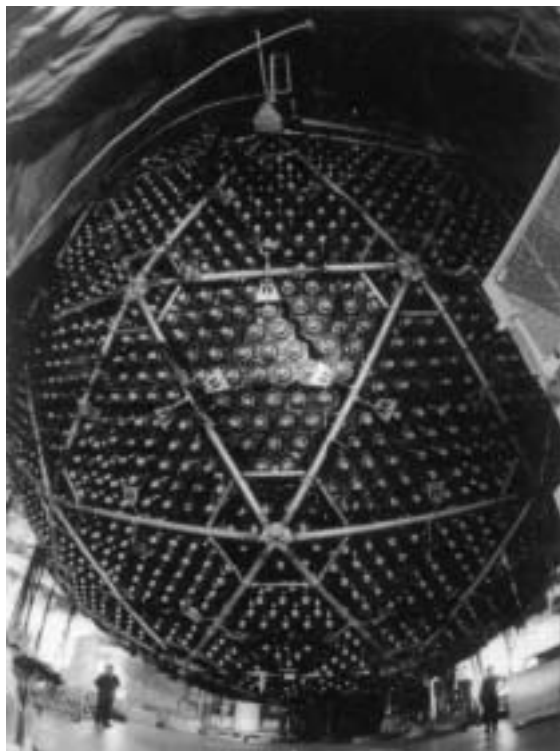


圖1 SNO中微子探測器外觀：懸於深入地下兩公里的礦穴中的18米闊球狀鋼架(注意其與人的比例)，球面上安裝了近萬枝光電倍增管。

觀測的，其實就是上述ES反應，所測得的中子流密度是 $\phi(\nu_x) = 2.32 \pm 0.03$ (單位為 $10^6/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ ，下同)，與本實驗(SNO)所得的 2.39 ± 0.34 相符。SNO實驗的特點和突破是對每一反應事件作更精密與詳盡的測定，從而將CC和ES兩種不同反應截然分辨，由是而從CC反應得到電子中微子 ν_e 的流量密度： $\phi(\nu_e) = 1.75 \pm 0.07$ 。 $\phi(\nu_e)$ 與 $\phi(\nu_x)$ 的差異第一次清楚證明太陽來的中微子的確不止 ν_e ，也有 ν_μ 和 ν_τ 。而且，將上述 $\phi(\nu_x)$ 和 $\phi(\nu_e)$ 兩個結果結合，就可以推斷出所有三類中微子的總流量： $\phi_{\text{tot}} = 5.44 \pm 0.99$ ，那和恆星理論的預期就完全符合了。

這樣，中微子質量 m_ν 有了「零的突破」這一點也就不容置疑了。事實上，粒子的「大一統」理論系統已經包含了出現兩種輕重不同的中微子的可能^⑥。從SNO實驗結果推測，它們的質量應該介乎0.05與8.4 eV之間。雖然這對宇宙論的影響看來並不太大，但它在粒子理論和天文物理學上，顯然都是個重要里程碑，它所將引起的變化，也將是深遠和難以預料的。而希微難以致詰的中微子，今後還會帶來甚麼離奇的新發現，則仍在未知之數。

① 中微子發現的歷史，可參考Abraham Pais, *Inward Bound* (Oxford: Clarendon Press, 1986)，特別是頁303-20、569-70。

② Pais, *Inward Bound*, 570-71.

③ 有關理論可參考A. Zee, *Fearful Symmetry* (New York: MacMillan, 1986)，特別是頁260。

④ 關於此一問題，可參考周威彥、陳方正：〈尋找不可見物質〉，《二十一世紀》(香港)，1994年12月號，頁86-94。

⑤ 有關理論的介紹見馮達旋等：〈原子核、恆星與宇宙〉，《二十一世紀》(香港)，1992年8月號，頁52-64。

⑥ 此探測結果的介紹見《二十一世紀》(香港)，1997年4月號，頁80。

⑦ 此結果已送*Physical Review Letters* 審查發表。目前已在互聯網中發布，並即將正式發表：Q. R. Ahmad *et al.*, *Physical Review Letters* 87 (13 August 2001)。簡介文章見*Science* 292, 2227 (22 June 2001)。

⑧ A. Zee, *Fearful Symmetry*, 252-53.