



微中子振盪

● 傅俊結*

宇宙中最神秘的粒子現象之一，應該是所謂的微中子振盪。微中子（Neutrino）是自然界中最神秘且最難以探測的基本粒子之一。它最早源於二十世紀初物理學家對放射性衰變現象的研究。當時科學家發現 β 衰變過程中能量似乎無法守恆，電子所攜帶的能量分布並不固定，這與經典物理學中的能量守恆定律相矛盾。1930 年，奧地利物理學家沃爾夫岡·包立（Wolfgang Pauli）提出一個大膽假設，認為在衰變過程中存在一種不帶電、質量極小且極難被偵測的粒子，負責帶走缺失的能量與動量。1934 年，義大利物理學家恩里科·費米（Enrico Fermi）建立了 β 衰變理論，並正式將這種粒子命名為「微中子」。然而，由於微中子幾乎不與物質發生作用，因此在接下來的二十多年中始終無法被直接觀測。直到 1956 年，美國物理學家弗雷德里克·萊因斯（Frederick Reines）與克萊德·考恩（Clyde Cowan）利用核反應爐產生的大量微中子，首次成功偵測到反微中子的存在，證實了包立的理論預測。之後，科學家陸續發現電子微中子、緲子微中子以及陶子微中子三種不同種類，逐步建立起粒子物理標準模型中對微中子的認識。雖然微中子是宇宙中數量極為龐大的粒子，每秒鐘都有數十兆個太陽產生的微中子穿過人體，但由於其與物質作用機率極低，人類至今仍需要利用

* 傅俊結，南臺科技大學通識教育中心自然科學組副教授



大型地下實驗室和高靈敏度探測器才能觀察到它們的蹤跡。

微中子的重要性遠超過其微小的體積與質量。首先，它是宇宙中最豐富的基本粒子之一，僅次於光子，因此對宇宙演化具有深遠影響。在宇宙大爆炸後不久形成的的大量微中子至今仍遍布整個宇宙，成為研究宇宙起源的重要線索。此外，微中子能夠輕易穿透恆星內部，因此是研究太陽及其他天體內部結構的重要工具。例如，太陽核心的核融合反應會產生大量微中子，這些微中子幾乎不受阻礙地離開太陽並到達地球，使科學家得以直接觀測太陽核心正在發生的反應。另一方面，超新星爆發時會釋放巨量微中子，其攜帶的信息能幫助研究人員理解恆星死亡與元素形成的機制。在粒子物理領域中，微中子更具有特殊地位。標準模型最初假設微中子質量為零，但後來的實驗結果顯示微中子其實具有極小但非零的質量。這項發現意味著標準模型並不完整，必須進一步修正或發展新的理論來解釋微中子的性質。因此，微中子的研究不僅有助於理解宇宙與天體的運作，也成為探索新物理學的重要方向，被許多科學家視為突破現代物理理論限制的重要契機。

微中子振盪（**Neutrino Oscillation**）則是微中子研究中最具革命性的發現之一。所謂微中子振盪，是指微中子在傳播過程中會在不同種類之間互相轉換。例如，一個剛由太陽產生的電子微中子，在飛往地球的途中可能轉變成緲子微中子或陶子微中子。這個現象最早由義大利物理學家布魯諾·龐蒂科夫（**Bruno Pontecorvo**）於 1950 年代提出理論構想。然而，直到 1998 年，日本的超級神岡探測器（**Super-Kamiokande**）才首次提供確切證據，證明大氣微中子確實會發生振盪現象。隨後，加拿大薩德伯里微中子天文台（**Sudbury Neutrino Observatory**）也證實來自太陽的電子微中子在抵達地球前已部分轉換成其他種類的微中子，成功解釋了困擾科學界數十年的「太陽微中子問題」。微中子振盪的發生原因在於微中子的味態（**Flavor State**）與質量態（**Mass State**）並不完全相同，因此在運動過程中會出現量子力學中的波動干涉效應，使不同種類之間發生週期性轉換。這項發現具有極其重要的物理意義，因為若微中子能夠振



盪，就代表它必須具有非零質量，而這與原本標準模型的預測不符。2015 年，日本物理學家梶田隆章與加拿大物理學家亞瑟·麥克唐納（Arthur McDonald）因發現微中子振盪並證明微中子具有質量而共同獲得諾貝爾物理學獎。此後，微中子振盪成為粒子物理學最活躍的研究領域之一，各國紛紛建立大型實驗設施，希望能進一步測量微中子的質量排序、振盪參數以及物質與反物質之間可能存在的不對稱現象。

除了基礎科學研究之外，微中子振盪及微中子技術也逐漸展現實際應用價值。在核能安全領域，由於核反應爐會持續產生大量微中子，因此科學家可以利用微中子探測器監測反應爐運作狀態，甚至作為國際核不擴散監督工具，用來確認是否存在未申報的核活動。在地球科學方面，地球內部放射性元素衰變所產生的地微中子（Geoneutrino）能提供有關地球內部熱源與地質活動的重要資訊，幫助研究地幔結構與板塊運動機制。在天文學領域，微中子天文學已成為觀測宇宙的新窗口。由於微中子能穿透濃密的星際物質，因此能讓科學家觀察傳統光學望遠鏡無法看到的宇宙事件，例如黑洞附近的高能粒子活動、超新星爆發以及宇宙射線的起源。此外，未來科學家甚至構想利用微中子進行超長距離通訊，因其幾乎不受地球或其他障礙物阻擋，理論上可實現穿越海洋與地殼的訊號傳輸。雖然目前技術仍面臨探測效率低與設備龐大的限制，但隨著探測器技術持續進步，微中子有望在能源監測、地球探測、天文觀測及通訊科技等領域發揮更大作用。從最初為了解釋能量守恆而提出的假設粒子，到今日成為探索宇宙奧秘與新物理學的重要工具，微中子及其振盪現象不僅改變了人類對基本粒子的理解，也為未來科學發展開啟了嶄新的研究方向。



