

遽變中的微中子 物理學

蘇賢錫
國立臺灣師範大學物理系

一、宇宙是否繼續膨脹？

大約 150 億年前，隨著大爆炸（big bang）而誕生的宇宙，是一小塊純粹的能量，幾乎可以用手握住。這小塊的重量相當巨大，包含夸克（quark）以及其他各種基本粒子。然而，粒子和反粒子屢次發生碰撞而消滅，1 秒鐘後就變成只有普通物質（質子、中子與電子）以及光與微中子（neutrino）。說不定也有磁單極（monopole）。從此以後，直到目前，宇宙繼續膨脹。將來質子和中子也衰變而變成只有光和微中子的遼濶宇宙，然後繼續膨脹。以上就是根據星象觀測與大統一理論所得的宇宙未來形象。雖然如此，假如微中子具有質量，這種情況就發生 180 度的大轉變。

自宇宙誕生以來，就一直充滿這世界的微中子，沒有大小、沒有顏色，是無法予以察覺的基本粒子，無論如何堅固的物質，它都能夠若無其事地穿透，其質量無限小，幾乎等於零。然而，最近由於質子同步加速器（proton synchrotron）測定技術的發展，微中子與有關微中子的各種現象，其性質得以闡明，統一理論即將得到證實

。今天，衆已相信，在小的終極與大的終極的雙方面，微中子是支配宇宙構造的關鍵。

二、三種「幽靈基本粒子」

微中子是奧地利的包利（Wolfgang Pauli）在 1931 年爲了說明當原子核產生 β 衰變時能量消失之謎而提出的假設。自然界最大的定律——能量守恒原理瀕臨危機時，包利認爲能量是由無法觀測的基本粒子——微中子所帶走，以便脫離危機。當初科學家都不肯相信微中子的存在。經過 25 年之後，才由美國的雷尼斯（Frederic Reines）與柯贊（Clyde Lorrain Cowan, Jr.）做實驗證實其存在。

後來發現， π 介子衰變時，和 μ 介子成對出現的微中子，不同於 β 衰變所放出的電子微中子，因而命名爲 μ 微中子。電子微中子可由地下的鈾等同位素來製造，又可由太陽或原子爐大量生產。此外， μ 微中子也由大氣上空的宇宙射線來製造，在自然界的存量非常豐富。

反之，第三種微中子—— τ 微中子，在 6 年前才首次由加速器製造成功，與 τ 粒子成對出現。

微中子是幽靈基本粒子，100 光年厚的鉛，它都能夠穿透，其特性是不容易與物質發生反應。因此，這三種微中子不容易加以區別，只靠反應時所出現的伴侶，始能予以識別。與這三種微中子分別成對的電子， μ 介子和 τ 粒子，都有電荷，却沒有強作用力，和中性的微中子統稱爲輕子（lepton），組成一群基本粒子群，其性質完全不同於強作用力的夸克群。

三、爲了證實統一理論

在 β 衰變中發現微中子時，其現象不能依據重力或電磁力來說明，需要一種新的弱作用力來

說明。首先對弱作用力現象加以理論性探討的是，當時在意大利的費密（Enrico Fermi）。這是1935年的事，該年日本的湯川秀樹也預卜 π 介子的存在。

顧名思義，弱作用力的特徵是，力的大小遠較電磁力為小（小10萬倍以上），而這就是微中子的幽靈式行為的原因。因此，微中子現象的實驗考證工作進展極其緩慢，但是到了1960年左右，已知弱作用力與電磁力之間有許多共同的性質。愛因斯坦（Albert Einstein）爲了發展電磁力與重力的統一理論而奉獻一生。可是現代的統一理論起始於格拉紹（Glashow），爲了解弱作用力現象而將弱作用力與電磁力連結起來。1967年完成威因伯-莎拉姆（Weinberg-Salam）理論，具備數學形式。這理論不但排除費密理論的缺陷，而且其構造簡單明瞭，具有莫大吸引力。雖然如此，縱使理論的數學結構非常優雅，如果與自然現象不一致，仍屬無效。威因伯-莎拉姆理論不但能夠說明當時的實驗事實，而且預卜所謂中性流（neutral current）的新現象。因此，理論的正確與否，完全由中性流的存在與否來決定。

在通常的微中子現象中，微中子一定與其具有電荷的伴侶（輕子）同時出現（稱爲帶電流現象）。中性流發生時，不會出現帶電伴侶。威因伯-莎拉姆理論問世以後，立即實施大規模實驗觀察，1973年首次觀測中性流反應，發現 μ 微中子與電子的彈性散射。

1970年代，美國費密研究所與歐洲原子核聯合研究組織（CERN）的大型加速器開始參加運轉，同時建造大型微中子偵測器，微中子物理學盛極一時。中性流的發現與基本粒子的夸克構造之闡明，因電子-正電子碰撞型加速器而導致第四種夸克——魅夸克（charmquark）的發現，頓時受到舉世的矚目。微中子現象是弱作用力

理論的發祥地，它引導初期理論走向正確方向，而且對已完成的理論提供實驗證據，可以說對現代統一理論扮演助產士的角色。

這樣確立的格拉紹-威因伯-莎拉姆理論，終於統合電磁力與弱作用力（電弱統一理論），不但說明弱作用力現象，而且指示統一理論的方向，實在具有很大的重要性。緊接著有人提出包括強作用力在內的大統一理論，預卜質子的衰變與磁單極的存在，性急的人甚至著手探討包括重力在內的超大統一理論。

四、微中子有沒有質量？

1980年春天，微中子的發現人雷尼斯主張，微中子可能是不穩定的基本粒子，因而引起廣大迴響。美國塞芬拿（Savanna）河畔的原子爐所產生的大量電子微中子，令其撞擊核靶子時，發現電子微中子在中途消失。

其實，微中子消失的報告，這並不是第一次。爲了觀測太陽中心所發生的熱核融合反應，美國的戴維斯（Davis）等人一直觀測太陽的微中子，一連十多年，結果只找到預期的三分之一而已。關於消失的太陽微中子，引起天文物理學家的認真討論。

該有的東西消失了，這種現象與導致發現微中子本身的那種能量守恒原理的危機，非常相似。我們當然可以沿用前例，認爲微中子變成其他無法觀測的基本粒子，可是現在有更簡單的解決方法。亦即，只要認爲電子微中子變成其他的微中子即可。

前面已經說過，微中子只能觀測反應時所產生的伴侶來加以區別，不能直接觀測微中子本身。於是，假設質量不同的微中子，以一定比例混合時始能發生反應而放出電子或 μ 介子。這些質量彼此不同時，根據量子力學的計算，混合比例

隨時間作振動，起初是屬於電子微中子的，將變成 μ 微中子或 τ 微中子（稱為微中子振動）。

雷尼斯和戴維斯的裝置是只能偵測電子微中子的偵測器。因此，如果微中子振動發生，看起來好像電子微中子消失了。微中子振動的存在，表示至少存在著質量不等於零的微中子。

雷尼斯發表其看法之後，蘇俄的劉比莫夫等人利用其他方法直接測定電子微中子的質量，結果得到的數值是至少為質子質量（一兆分之一的一兆分之一克）的7000萬分之一，亦可能是2500萬分之一。兩種性質幾乎完全不同的實驗，却幾乎同時顯示微中子可能具有質量，因而引起物理界的震撼。目前到處正在進行追蹤實驗，以便確定其結果。結論出現之前，可能需要一段時間，現在暫且考慮微中子的質量對物質終極的影響。

五、大自然不喜歡對稱美

基本粒子一面旋轉一面運動，所以依照旋轉的方向，可以區別其左旋或右旋。弱作用力的奇怪性質是，它只作用在左旋轉基本粒子（對反粒子是右旋的）。這是1957年李政道、楊振寧、吳健雄等人發現宇稱不守恒時就衆已週知的事實。弱作用力的定律在鏡中的世界並不成立，換言之，大自然並不喜歡對稱美，這件事實使物理界與哲學界受到一大震驚。

一般認為旋轉的方向可以採取任何方向，事實上，所有的基本粒子都有兩種旋轉的可能性。然而，微中子是唯一的例外，微中子只有左旋的微中子（反微中子只有右旋的），換言之，左右並不對稱。這就是表示微中子的質量等於零，因為如果微中子有質量，則右旋微中子也會出現，並且作用在右旋微中子的新力隨即產生，再度恢復左右對稱性。傳統的實驗認為微中子的質量等於零。而且這件事實成為理論的前提。換言之，關

於有沒有質量的問題，電弱統一理論無法加以處理，需要範圍更為廣泛的大統一理論。微中子有沒有質量的問題，不但影響大統一理論的結構，而且支配大自然在終極時的對稱之選擇。

我們居住的宇宙，充滿著大爆炸以來所遺留下來的微中子。根據宇宙論的計算，微中子的數目是每立方公分每一種類大約有100個，三種一共300個，乍看之下，這數目很小，但是，就數目龐大的宇宙中之星星而言，每10立方公尺中才有一個質子。換言之，微中子的數目在質子數目的10億倍以上。因此，即使其質量只有質子的7000萬分之一，微中子的整個質量可達質子的90%以上。

要使宇宙收縮，需要充分的力量來阻止星星的膨脹，以便宇宙恢復原狀，換言之，需要充分的質量來產生所需的重力。根據目前觀測的星雲外移速度來計算，所需的質量密度可以換算成為每立方公尺大約3個質子。實際觀測別的星球數目，顯然不夠，但是如果微中子具有充分的質量，這狀況就要改觀了。微中子的質量等於質子的2500萬分之一，假如劉比莫夫所報告的這項數據值得信賴，我們可以得到結論：宇宙正在收縮。

小的終極連到大的終極，假如有一天宇宙收縮而回到大爆炸的狀況，則森羅萬象的終結也就是起始。如果這世界上的時間與空間的起始和終結都是連在一起。那麼，終極究竟具有什麼意義？

（取材自「科學朝日」1982年10月號）