

微中子物理前沿 與台灣微中子實驗

微中子雖遍布於浩瀚的宇宙，卻極難被偵測，一定是內有玄機，背後隱藏著重要的秘密……。

王子敬

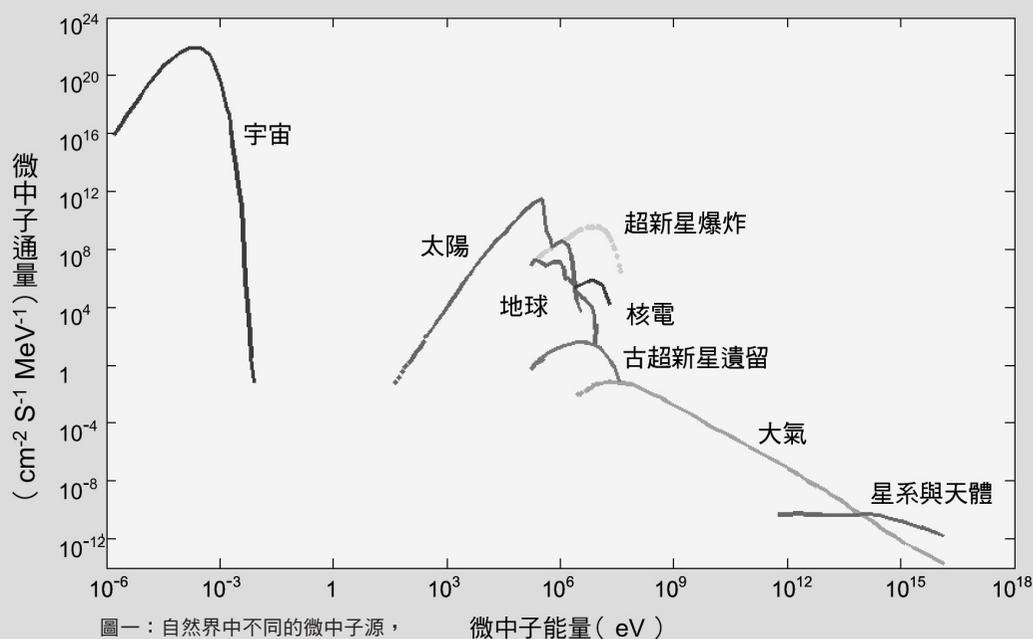
一 十世紀初，原子核物理研究正在萌芽，
一 科學家發現 β - 衰變中的電子動能呈現連續分布而非單一能量。這與動量能量守恆有所矛盾，使人疑惑。

1930年，奧地利物理學家包立（Pauli, 1900~1958）大膽的假設，在 β - 衰變中，有一質量極小、不帶電荷，且與物質不會有交互作用的粒子釋出。1932年，英國科學家查兌克（Chadwick, 1891~1974）發現了中子（neutron），其雖為中性，但因質量太大，並不可能在 β - 衰變中釋出。到了1934年，義大利的費米（Fermi, 1901~1954）發展 β - 衰變的理論，同時，並將這神祕的粒子命名為「neutrino」——「微中子」，在義大利原文中有微小的中子的意思〔註一〕。

縱觀微中子物理

在1956年，美國物理學家科文（Cowan, 1919~1974）和芮內斯（Reines, 1918~1998）在實驗中偵察到核能發電釋出的微中子，並稱之為「人類所設想到最細小的物質」。這項重要發現榮獲1995年諾貝爾物理獎。可是時至今天，我們尚未透徹瞭解這充斥整個宇宙的基本粒子。微中子基本特性的研究，包括質量、不同種類微中子間的混合及與物質的交互作用等，仍是基礎科學的前沿課題，為「兵家必爭之地」。研究結果對粒子物理、天文物理及宇宙學等領域的發展，深具影響。現在確知的是微中子雖有質量但遠比電子為輕，它不帶電荷，自旋1/2和只有弱交互作用，且有三個不同家族的微中子

（ ν_e 、 ν_μ 和 ν_τ ）及它們的反粒子〔註二〕。美國科學家李德曼（Lederman, 1922~）、史華滋（Schwartz, 1932~2006）與史坦伯格（Steinberger, 1921~），於1962年在加速器中發現 ν_μ 微中子，獲得1988年諾貝爾物理獎。



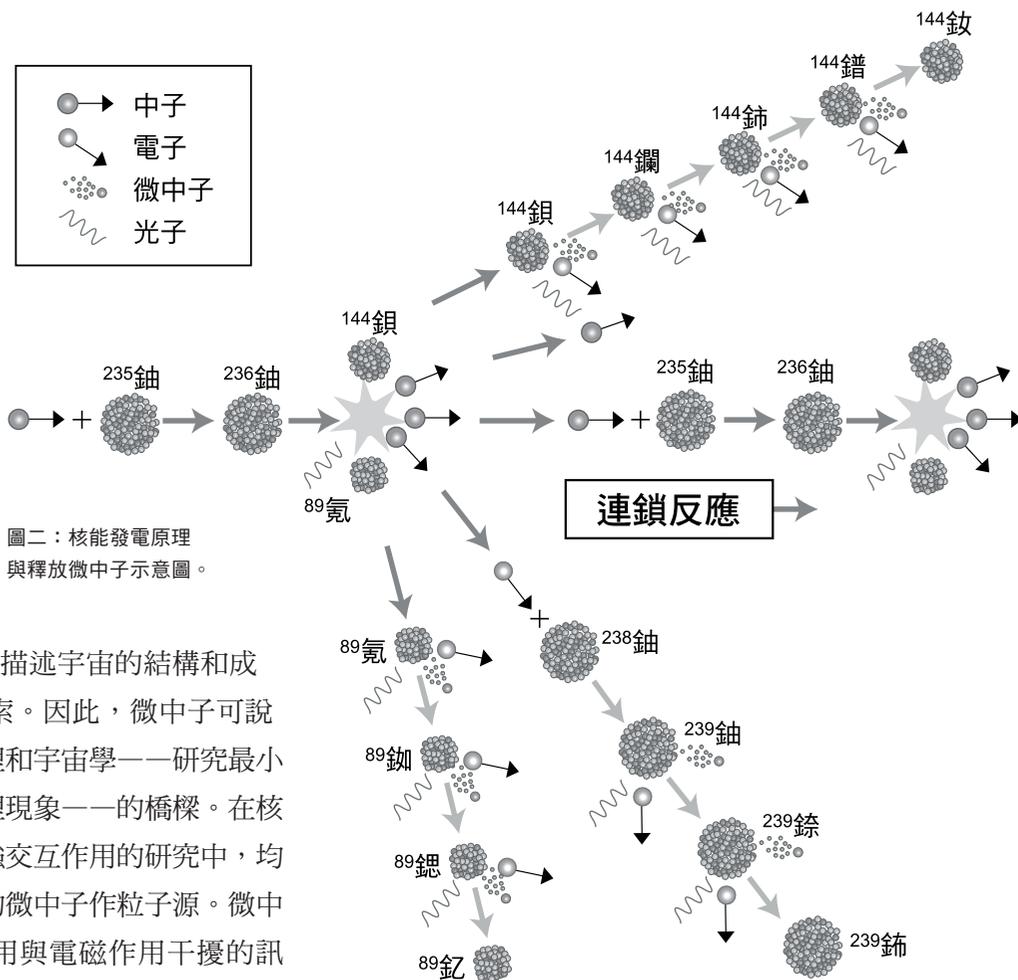
圖一：自然界中不同的微中子源，有著極不一樣的能量與通量。

微中子能量 (eV)

探討微中子的特性，除了是粒子物理的課題外，對解答天文物理和宇宙學的疑團，亦深具意義。為剖析統一場論（嘗試以同一理論架構，整合所有

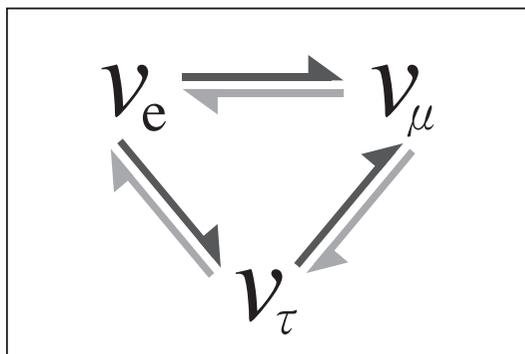
交互作用的研究）與描述宇宙的結構和成份，提供重要的線索。因此，微中子可說是貫通研究粒子物理和宇宙學——研究最小和最大尺度中的物理現象——的橋樑。在核物理，電弱作用和強交互作用的研究中，均有採用來自加速器的微中子作粒子源。微中子能提供沒有強作用與電磁作用干擾的訊號，有助於分析數據和推論結果。而源自天體的微中子，由於是來自星辰核心，為直接探索天體內部結構和運作的重要工具。

不同的微中子源，有不同的能量範圍（圖一），在實驗研究中有互補之優點。但困難處是，微中子只能與物質有極微弱的交互作用。例如核能發電廠可以產生大量的微中子（圖二），它們平均需要穿透200多光年的水（一光年是光在真空中一年內前進的距離，約為地球與太陽距離的6萬3000倍），才會產生一次作用被「拍照分析」。因此，微中子物理就像是研究「隱形人」的領域，偵測微中子是項艱鉅的挑戰，需要龐大體積的探測器和拓展技術前沿的實驗。經數十年的努力，物理學家已偵察到從太陽、宇宙射線、加速器、核能發電廠與超新星爆炸釋放出的微中子。如美國的戴維斯（Davis, 1914~2006），自60年代開始，利用600多噸的清潔劑，於Homestake地下實驗室，測量太



陽微中子（2002年獲諾貝爾物理獎），靈敏度是在約 10^{30} 個四氯乙烯（ C_2Cl_4 ）分子中，偵察每天一個的氬-37（ ^{37}Ar ）原子。實驗結果是成功的偵察了太陽微中子，證明了太陽的能量確實為質子（氫）的核融合作用所產生。但數據同時顯示測量到的微中子通量，較太陽運作的標準模型為少。這「太陽微中子問題」，困擾了基礎科學40多年。

這疑團終於在1998年開始得到解答。物理學家在太陽、宇宙射線、加速器與核能



微中子的測量中，發現它們在穿越空間時會「變臉」——即從一種微中子轉變成另一種微中子。這種轉變被稱為「微中子振盪」(neutrino oscillation)。微中子必須有質量才能「變臉」，且三個不同家族的微中子可互相作量子混合(圖三)。為此，粒子物理中原固若金湯的「標準模型」(Standard Model)，也需要作出修訂。這成就是國際合作的結果。特別值得一提的是日本科學家在神岡地下實驗室進行的一系列重要研究，建造令人驚羨讚嘆的大型探測器(圖四A)，帶動著這課題的發展。先驅領導者小柴昌俊，更因在1987年以第一代的神岡實驗，觀察到超新星SN1987a爆炸的微中子，獲得2002年諾貝爾物理獎。該裝置現在已發展成「超級神岡」實驗，藏身於深1000多公尺的礦坑中。探測器載著五萬噸水配以一萬多枚光電倍增管，研究太陽、宇宙射線與加速器的微中子振盪，還有找尋質子的衰變。「神岡實驗」在科學發展史上作出關鍵性的貢獻，留下不滅的足跡。

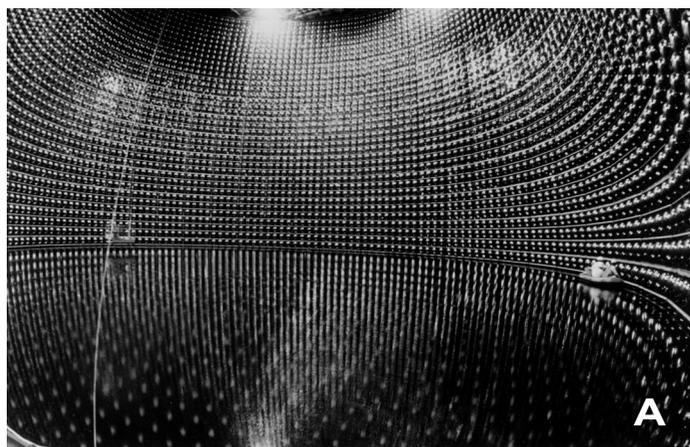
從這些基礎出發，微中子的前沿研究，還有幾個重要的課題。

一、微中子特性與交互作用：微中子振盪的研究，只證明它們有質量，與測量不同家族微中子質量的相對大小。至於質量的絕對值，仍是未知之數。這可由 β -衰變中電

子能譜終點的形態(其中包括德國的KATRIN實驗，圖四B)，及宇宙微波輻射和星系結構分布的觀察，推算出來。此外，在新的能量範圍中，研究微中子與電子或原子核可能出現的異常交互作用，可給予標準模型以外的物理提供線索。

二、正反微中子：微中子屬中性不帶電荷，所以正反微中子是否為同一基本粒子的不同自旋態，是個重要的問題。透過觀測無微中子的 $\beta\beta$ -衰變 $(A,Z) \rightarrow (A,Z+2) + 2e^-$ 這項原子核同時釋放兩個電子、違反輕子數守恆的過程，可解答這個疑問。此外，正反微中子是否有完全相同的微中子振盪效應(即是否有「CP-破壞」)，可能關連到為何宇宙雖生於正反物質對稱的狀態，但現在只剩下正物質，而反物質〔註二〕卻消失無蹤這大謎團。

三、微中子天文學：在1987年美國IMB與日本神岡實驗，成功地觀察到超新星SN1987A放射到地球的微中子。時至今日，已有數個深入地下的龐大探測器，可測量未來超新星爆炸所發放的微中子。在極高能量(10^{19} 電子伏特)的一端，物理學家嘗試利用大地、海洋或冰塊，偵測源自天體的高能量微中子，以開啟觀察宇宙之新「視窗」。其中包括設置於南極冰層一公里深的IceCube實驗(圖四C)，利用約 1 km^3 的冰



圖四：微中子實驗例子。(A)日本「超級神岡」(Super-Kamiokande)實驗，藏身於深一千多公尺的礦坑中。探測器載著五萬噸水配以一萬多枚光電倍增管測量 β -衰變中電子能譜終點的形態。圖示譜儀外殼在運往實驗室途中。(C)南極的IceCube實驗示意圖，利用一公里深、 1 km^3 的冰層作靶子，以光電

層作靶子。微中子與冰原子交互作用後所產生的光子訊號，以光電倍增管輸出。此外，在極低能量（ 10^{-3} 電子伏特）的一端，觀察霹靂大爆炸遺留下來的微中子也是極重要的課題，可讓科學家直接研究剛誕生第一秒的宇宙，只是現在仍沒有可行的實驗技術。

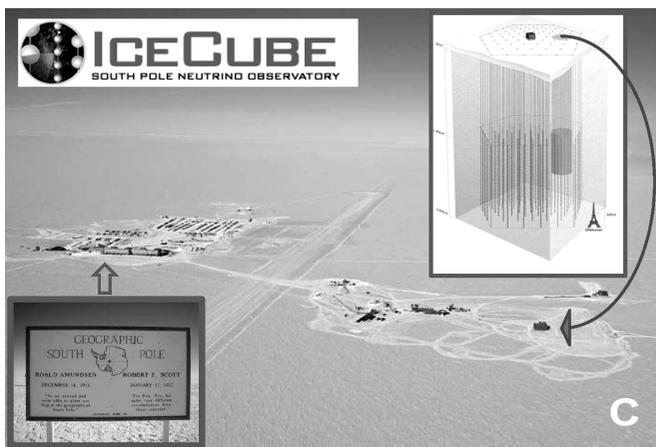
位於歐洲意大利 Gran Sasso 地下實驗室的 OPERA 實驗，測量 700 多公里外，從瑞士日內瓦 CERN 實驗室產生的 ν_{μ} 微中子，原意為研究微中子振盪。該實驗在 2011 年 9 月發表數據，顯示微中子的速度比光速為快〔註三〕，馬上引起全球高度注意，因為倘若這結論成立，物理學將面臨（另一）翻天覆地的革命。在現階段，研究人員需要檢驗數據的正確性，加上其他實驗（如美國的 MINOS 實驗，也在偵測七百多公里外、從芝加哥 Fermi 實驗室產生的微中子）的獨立重覆證明，還有對關鍵技術如長距離 GPS 等的驗證，才可作進一步推論。在 SN1987A 超新星爆炸中，科學家觀察到光與微中子。那數據中的微中子速度是符合相對論推論、比光速慢的，否則那些微中子會比光早四年就到達地球。這事件的啟示是：（一）科學研究的最前沿是模糊、不確定、具爭議性、可多方向演繹、極容易出錯的；（二）科學發展與科學方法，與科學內容一樣，引人入勝。

台灣微中子實驗

台灣在粒子物理實驗的研究，始於 1980 年代末期。到了 1990 年代中期，已參與美國費米國家實驗室（Fermilab）及布魯克海汶國家實驗室（Brookhaven）、歐洲粒子物理研究中心（CERN）、日本高能物理國家實驗室（KEK）、美國太空梭及國際太空站等著名實驗室的研究計畫，負責探測器、電子儀器、光電設備、電腦系統的製作和物理模擬、數據分析等項目。在技術與組織能力上，備受國際同儕的肯定。

在這樣的基礎下，任教美國馬利蘭大學的張仲濤教授與中研院物理所李世昌博士，於 1996 年啟動了微中子計畫的構想，目標為首次於台灣本土，在全由本地研究人員主導下，設計、建造、執行及完成一項粒子物理實驗。這計畫很快便獲得中國大陸中國科學院高能物理研究所及原子能科學研究院的參與。筆者於 1997 年初加入中研院，全力推動這計畫。中研院及國家科學委員會，提供了主要的研究經費。團隊取名為 TEXONO，即「台灣微中子實驗」（Taiwan Experiment On Neutrino）之意。這是兩岸首次在大學學術研究上的合作，加上國內頂尖大學與研究單位在專業技術及人力上的鼎力支持，台電核二廠提供場地及各項技術協助，還有土耳其中東技術大學（Middle East Technical University）和印度貝拿勒斯印度教大學（Banaras Hindu University）派出學生來台參與，至今團隊可算稍具規模，是支擁有三十餘國際科技人員的研究隊伍，曾在著名期刊發表論文，且在不少國際會議中作報告，引得同儕的注意，增加了他們對台灣學術環境的瞭解，也提高了他們來台訪問、建立聯絡的動機。

時至今日，於台灣從事微中子實驗的團



管。圖示研究人員在小艇中維修光電管。(B) 德國的 KATRIN 實驗，精準倍增管輸出訊號。



圖五：國聖核能發電（核二）廠微中子實驗室之外觀。

隊，還有台大、交大、聯大參與中國「大亞灣核電微中子實驗」，研究微中子振盪；台大參與南極的「ANITA」與「ARA」實驗，偵測宇宙極高能量的微中子（參閱本期天壇陣列國際共同發言人陳丕燊專訪）。

TEXONO 團隊的研究項目，主軸為於台灣電力公司國聖核能二廠內，距離爐心 28 公尺之處，建立實驗室，以研究微中子物理。國外的研究，提出了微中子振盪有力的證據。這代表微中子具有質量，可延伸推測微中子將有其他不尋常的特性和與物質的交互作用。核能發電的原理在於核子分裂，過程中除了釋放能量外，也因分裂後不穩定同位素的 β - 衰變，產生大量的微中子（圖二）。因此，核反應爐是個很強的微中子源，是作科學實驗的理想場地。微中子研究，可以說是核能發電的「廢物回收利用」。國聖核二廠微中子實驗室，採模組化的設計概念，可放置不同探測器，研究不同的物理現象。設備包括重量達 50 噸的屏蔽體，以防止宇宙射線及周圍環境輻射所造成的背景干擾。此外，還有精密的高純鍺（Ge）及 CsI(Tl) 閃爍晶體探測器，加上性能先進的電子儀器與電腦軟體，用來顯視、監控、取錄及分析探測器的訊號（圖五）。

「國聖實驗」自 1997 年規畫籌建，歷經 1999 年九二一地震的延誤，於 2001 年中開始運作取數。2002 年底，團隊取得了第一個物理結果，即微中子與光子的可能交互作用（圖六 B）的研究。在實驗上，這特性會以「微中子磁矩」（neutrino magnetic moments）及「微中子輻射衰變」（neutrino radiative decays）顯現出來。若這特性存在，微中子可以被看成有極

微量的電荷，對粒子物理將有革命性的影響。團隊觀察微中子跟電子碰撞後電子的能量分布，並比較它們在核電廠開機與關機時的分別。我們在較過往實驗低一百倍的能量區域作測量，並能把背景噪聲壓低至其他深入地下千多公尺的地下實驗室之水平，大大提高了測量的靈敏度。實驗結果是沒有發現任何微中子磁矩和輻射衰變的證據。國聖實驗測量這兩項微中子的重要參數所得的上限，已達世界水平，優於前人的測量。這成果於 2003 年及 2007 年發表，並廣為國內外科技媒體以專題報導。此外，團隊在 2010 年完成了以 200 公斤 CsI(Tl) 閃爍晶體探測器，測量微中子與電子交互作用截面（圖六 A）。我們的數據證明了標準模型在一個未備檢驗的能量區域中，依舊有效，同時也規範了新物理模型的可容許的參數範圍。

團隊現在的研究重點，是開展嶄新的探測器技術，在能量再低 100 倍（低至 100 電子伏特）的區域作測量，物理目標包括首次觀察微中子與原子核的同調散射交互作用（neutrino-nucleus coherent scattering），與找尋暗物質（dark matter）。其中暗物質實驗的第一個結果，已成功的開啟了找尋低質量暗物質的視窗。利用這成果為基礎，合作

團隊中以北京清華大學為首的隊伍，於中國四川錦屏山，蓋建了世界最深的地下實驗室，全力開展暗物質的研究，往後的發展值得期待。

「台灣微中子實驗」團隊建立了在台灣首個粒子物理實驗，獲得世界級的結果，備受國際同儕尊敬肯定，也為國內從事基礎科學實驗研究的困難處與可行性，提供了經驗，可作未來發展的借鏡。在建立兩岸學術合作之良性互動、互補互惠、確立工作伙伴關係的規範細則上，也跨出了重要的一步。在這過程裡，團隊建立了執行整合型實驗計畫的架構格局和與工業界的伙伴關係。這除了是推動其他研究的重要基礎外，也提供了與國際同儕連絡的據點。耕耘十載，團隊啟動了多元化的研究計畫、培植了全方位的實驗能力、建立了具國際視野的聯繫網絡。

破前人未解之謎、創前人未造之物、攀前人未登之峰、開前人未闢之途，這就是研究工作的精神，也是研究工作者的挑戰和喜悅。台灣微中子實驗，土生土長，成功的走了「從零開始」、「從無到有」重要的第一步。展望前景，在同仁繼續努力下、加上國內單位的不斷支持、鼓勵與鞭策，我們可望更上層樓，爭取更理想的成績，更耀眼的展現於國際舞台。

結語

微中子在粒子物理及宇宙學中扮演著重

要的角色。微中子的研究，拓展了更精密先進的實驗技術，是深具潛力、活力和創作力的學術領域。微中子振盪的研究，在過去十多年有突破性的發現，啟示了新研究方向。

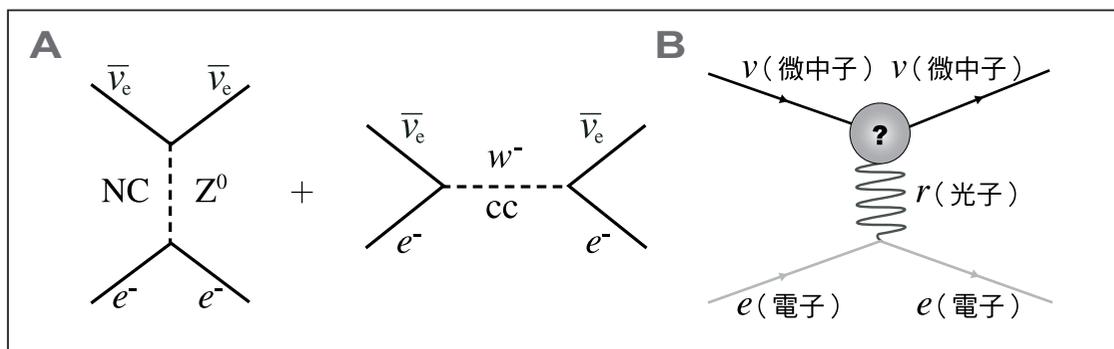
台灣微中子實驗計畫，不僅是在本土進行之首項的基礎物理實驗研究，亦是海峽兩岸的首次合作。除了是探討微中子深廣的學術內容外，其意義不單為台灣高能物理實驗展開了新一頁，亦為兩岸學術間之交流開闢新途徑。

註一：中國大陸將 neutrino 翻譯成中微子，有失義大利原文旨趣。而且基本粒子本無體積大小概念，以「中性的微子」描述基本粒子，有違學理，如稱貓熊為熊貓般。

註二：宇宙大霹靂爆炸誕生時，正、反粒子是同時間、同數量產生的。在實驗中我們也知道反物質(如正電荷電子、負電荷質子)確實存在，且其特性正如標準模型所描述一樣。但是我們沒有觀察到在宇宙中有大量反物質的證據。反物質如何消失的物理機制，是前沿科學的一大問題。

註三：2012年2月的最新發展是 OPERA 實驗研究人員發現某一電纜插頭有問題，是否因此導致數據錯誤，尚待證實。與此同時，Gran Sasso 實驗室的 ICARUS 實驗，重新但獨立的測量從 CERN 來微中子的速度，結果是低於光速。

王子敬：任職中央研究院物理所



圖六：微中子與電子交互作用示意圖。(A) 標準模型中弱電作用交換W與Z粒子；(B) 標準模型以外如微中子磁矩等新物理可交換光子。