

# 微中子的事

賴昭正

前清大化學系教授、系主任、所長；合創科學月刊

自從瓦特(James Watt)於1775年發明(嚴格來說是「改進」)蒸氣機,掀起了英國及世界之工業革命後,人類突然發現機器的無比力量。但可惜蒸汽機還需燒煤,如果能發明個不需要燃料就可作功的機器多好。於是當時的許多工程師便致力於此類機器的設計與試驗,但卻一直毫無進展(註一)! 1824年,法國軍中工程師及物理學家卡諾(S. Carnot)發表了一本118頁的「熱的動力能之思考」(Reflections on the Motive Power of Fire)開啓了熱、動力、能量、及引擎效率的研究。在連斤(W. Rankine)、克勞西斯(R. Clausius)、及卡爾門爵士(Lord Kelvin)的發揚與光大後,第一定律及第二定律終於在1850年代成型,發展成今日適用於所有科學之「熱力學」(註二)。

筆者一直在科普文章裡提到:熱力學基本上是一門以「實際經驗」為基礎,加上邏輯推論的科學,不做任何「抽象」的臆測與假設;因此在二十世紀初的物理大革命期間,非但未像牛頓力學及電磁論一樣受到修正,反而成了這個革命中的一大功臣。例如熱力學第一定律否認了能量可以無中生有或被毀滅,也就是大家耳熟能詳的「能量不滅定律」;可是能量是啥東西呢?熱力學卻不做臆測,因此當特殊相對論改變時空觀念及證明質量也是一種能量時,牛頓力學受到了修正,但卻無損熱力學。事實上在近代原子物理的發展中,也曾有位量子力學大師想放棄熱力學第一定律,來拯救一無法理解的新物理實驗。結果呢?熱力學第一定律非但沒被推翻,一「無中生有」之「喧鬧鬼」反而因此誕生了:它不但成爲今日基本粒子之「標準模式」裡的必要及重要成員,更可能強迫物理學家必須修正「標準模式」!此「喧鬧鬼」是啥東西呢?,且聽筆者道來....

## 貝塔脫變之謎

1896年的某個傍晚,法國物理學家柏克勒爾(H. Becquerel)在離開實驗室時,不經意地將一小塊鈾鹽放到藏有照相感光紙的抽屜裡。幾天後他發現感光紙好像曝過光一樣出現許多污區。他猜想鈾鹽顯然放出了像「光」一樣的輻射線;經過一連串之實驗分析後,他證明了這些放射線是鈾產生的,是鈾的內在本質,不是外來的。

受到柏克勒爾發現的刺激,由紐西蘭到英國劍橋大學攻讀博士學位的盧思福(E. Rutherford),在發現電子之指導教授湯姆笙(J. Thomas)的惠從下,決定放棄研究興趣所在之無線電波,改探討此一奇怪的「鈾線」。用鋁片將鈾鹽一層又一層地包住,他發現「鈾線」至少有兩種:其一是連一張鉛紙都通不過去的「耳發( $\alpha$ )射線»,另一種則是可通過上百張的「貝塔( $\beta$ )射線」。當另一法國物理學家飛拉得(P. Villard)在1900年發現另一穿透力更強的輻射線時,他很自然地依序取第三個希臘字母,稱它爲「伽嗎( $\gamma$ )射線」。

後繼的研究証明了 $\alpha$ 射線事實上就是氦原子核， $\beta$ 射線則是電子束， $\gamma$ 射線則是類似倫琴(W. Roengen)於1895年所發現之x光。物理學家也瞭解到了一個不穩定的原子(原子核)可以藉「脫變」(decay)放出 $\alpha$ 射線或 $\beta$ 射線而轉變成較穩定的原子(原子核)。在 $\alpha$ 射線的「脫變」中，物理學家發現脫變前的總能量與脫變後的總能量一樣(符合能量不減定律)；但1914年英國物理學家切得維克(J. Chadwick)卻發現在 $\beta$ 射線的「脫變」中，放出的電子能量不是定值，而是在某一最大值內什麼值都可能的連續分佈。這是怎麼一回事呢？如果能量不減，那電子的能量不是應該是定值嗎？那時的物理學家已知質量也是一種能量(註三)，因此在結帳能量時，當然考慮到原子核之質量消失變成能量。十六年過去了，量子力學的發展已漸趨成熟，可是物理學家還是沒有答案。

## 微中子的誕生

1930年，量子力學的哲學大師波爾(N. Bohr)「被迫」開始思索著：量子力學裡不是有許多與我們「常識」相左的觀念嗎(註四)？或許能量不減定律在微觀世界裡也根本不成立？他說：「雖然最近在原子理論的發展上有許多進展，但我們還是須要準備接受新的意外的！」

熱力學是建基於兩個假設(定律)推論出來的科學，如果第一定律不成立，那豈不是要重寫整個熱力學？對包立(W. Pauli)及許多物理學家而言，這代價似乎太高了！因此在深思熟慮後，包立終於提出了一「非常絕望下的解救法」：原子核內有一「東西」在脫變時帶著多餘的能量、跟隨著電子被釋放出來！從電量不減定律看來，此一「東西」應不帶電，因此他稱之為「中子」(neutron)；從能量不減定律計算，此一「東西」應比電子輕得多！在當時只發現質子、電子、及光子三種基本粒子時，敢

### 包立小檔案

包立1900年出生於維也納，其父為一知名化學教授，母為記者。小時喜與其妹於樹林中遊玩及多瑙河戲水，高中時就顯示出其數學及物理的才能；拜奧國名實証派哲學家馬赫(E. Mach)為教父，深受其影響。在高中畢業不到兩個月，就寫篇讓其大學指導教授索末非(A. Sommerfeld)印象深刻的相對論論文。索末非曾告訴同事說：



「在年青的包立身上，我看到了維也納知識精英的一個樣本... 大一學生！」聽說他曾在聽完愛因斯坦之一演講後，第一位從聽眾群裡站起來說：「你知道嗎，愛因斯坦所說的實際上並不像聽起來那樣笨...。」不到三年即拿到博士學位；畢業不久即應索末非之要求，為德國「數學科學百科全書」寫了一篇相對論的經典專論(1921年出版)。聽說愛因斯坦在讀完那篇文章後，曾說他終於對相對論有更深的瞭解。因發現「包立不相容原理」獲1945年諾貝爾物理獎。

又有次，在聽完大他二十歲之愛連費斯特(P. Ehrenfest)的演講後，包立提出許多評語，因此愛連費斯特告訴他說：「與你本人比較，我想我比較喜歡你的論文」；包立反嘴說：「這就奇怪了，我對你的感覺正好相反。」他們不但未成敵人，反而變為好友，不停地互相取笑。包立的論文不多，為人坦率，因此得罪很多人；但許多物理學家對他的才智、誠實、與直言還是很敬佩的，認為他是「科學的良知」，在碰到新觀念時，常會問：「包立怎麼想呢？」

在物理界裡因而流傳了這樣的一個故事：聽說在1958年死後，上帝特別接見他，問他還有什麼想知道的事情。包立搔了搔頭，終於說他不懂為什麼電磁作用常數會是 $1/137.035\dots$ (詳見「量子的故事」)。上帝點了點頭，拿枝粉筆在黑板上急書，包立起初還很滿意地看著，但不久後就開始猛烈地搖起頭來.....

提出另一新粒子來拯救能量不減定律確是很大膽的。因此即使在原子物理上一向非常自負的包立，在給當年十二月底在歐洲舉辦之物理聚會的信上，竟然很謙虛地寫道：

“親愛的放射性女士與先生們..... 在此時我沒有自信發表有關於此想法的任何論文... 因為如果中子真的存在，相信物理學家應該早已發現它。因此我承認我這補救法一開始便似乎不太可能；可是不入虎穴，焉得虎子。”

最後說明了他因私事不克參加。

1931年六月十七日，在美國加州理工學院舉辦的一場物理會議上，包立首次公開地提出此一新粒子的想法。紐約時報立即在隔天報導謂：『瑞士蘇黎世理工學院的包立博士提出了他稱為「中子」的新粒子，在物理世界裡，為原子核中心添了一位新居士。』

## 貝塔脫變之理論

離美抵義大利參加另一物理會議裡，包立碰到了羅馬大學極具個人魅力的年青教授費米（E. Fermi）。像包立一樣，費米也沒辦法接收波爾放棄能量不減定律的代價，因此對前者的想法非常感興趣。次年（1932年），切得維克果然在原子核內發現了一不帶電的新粒子，不幸的是：它的質量與質子相當，比包立所推測的大得多，因此絕不是包立的中子。當切得維克亦稱其新粒子為「中子」後，費米只好於1932年的一巴黎會議上改稱包立的中子為「微中子」（neutrino），以希臘字母 $\nu$ （音「妞」）表之。

1933年冬天，費米以當時已非常成功的量子電動理論為模型，提出了貝塔（ $\beta$ ）脫變之數學理論：像電子放出光子一樣，他認為原子核內並沒有微中子，它只是在中子脫變成質子時，無中生有的出現，與電子一起被釋放到外的粒子而已。比較其理論計算結果與實驗數據，他結論謂：「微中子的靜止質量如果不是零，那一定比電子小得非常多」！他於1934年將此名為「貝塔脫變的嘗試性理論」投稿到權威的自然（Nature）雜誌上，但編輯一點也未為所動，認為「它包含了遠離實際的猜測，不會讓

### 費米小檔案

費米於1901年出生於義大利。1938年，為了逃避當時的法西斯義大利，藉領諾貝爾獎之機會，從瑞典坐船到達美國，先後任教於哥倫比亞大學及芝加哥大學。1942年12月2日，他所領導的科學家們在芝大首次達成可控制的原子核連鎖反應，奠定了以後原子彈及今日核能發電的基礎。卒於1954年，是二十世紀最難得的一位理論兼實驗的物理學家。



歐本海默（J. R. Oppenheimer）是最早將量子力學介紹到美國的一位大物理學家。他喜歡用抽象的理論來講解物理；這種做法與費米的簡潔平易處理正好相反。1940年，費米因演講而停留在加州大學柏克萊分校。有一天，他參加了由歐本海默的學生主講的書報討論；事後他碰到了些格雷（E. Segre）說道：『唉，我是越來越老朽了，我已不再能跟上歐本海默的學生所研究的高深理論：我參加了他們的一個書報討論，但卻無法了解他們在談什麼。我非常沮喪！只有最後的一句「這就是費米的貝塔衰變理論」才使我高興起來。』

讀者感興趣的」而退稿！費米因之改投到一鮮為人知的義大利雜誌（後來又發表於較有名氣點的另一義大利雜誌及一名德國雜誌）。

在該論文裡，費米導出了貝塔脫變的半衰期公式及電子能量的分佈；為現在我們所知之「弱作用理論」的前驅，其特殊的「作用形式」也是後來研究其它作用的模式。它可以說是物理歷史上的一篇經典作品，可是自然雜誌竟慧眼不識英雄將它退稿？！怪不得自然雜誌後來謂其退稿是「編輯史上的最大錯誤之一」，並於1939年元月十六日重登該文！雖然該文奠定了費米在理論物理學上的地位，但退稿卻令他沮喪，因此決定暫時離開理論物理，專攻實驗。塞翁失馬，焉知非福？如果沒有此一馬前失蹄，他是否能於1938年因「發現以中子撞擊產生新的放射性元素，以及慢中子所產生的核反應」而獲諾貝爾物理獎，就不得而知了（註五）。

如果說包立的微中子觀念是畫餅充饑，那費米的貝塔脫變理論則是指出此餅可能不是海市蜃樓；只是：這塊「寶卡夢（pokémon）」餅到那裡去找呢？

## 一箱香檳酒

費米的論文使得一些理論及實驗物理學家開始認真地思考如何尋找此一怪物。例如德國理論物理學家貝特（H. Bethe）及派爾思（R. Peierls）在1934年就思考著：電子能放光也能吸光，或許微中子也能反過來被原子核吸收。但經一番計算後，他們發現其機率甚小，因此寫了一篇短文到自然雜誌上，謂「沒有一條可能實際偵測到微中子的路徑。」

但他們這一悲觀的結論並未能阻擋一些英國實驗物理學家（包括發現中子之切得維克）企圖捕捉微中子的決心。他們使用很厚的鉛、甚至在倫敦地下百呎處設立測試儀，希望能偵測到被阻擋而慢下來的宇宙微中子。在這些努力均失敗後，他們慢慢瞭解到貝塔脫變所產生的微中子，可能可以毫無阻擋地通過整個地球！

看起來微中子是無法捕捉的。事實上包立在提出此一觀念時，即認為自己「做了一件很可怕的事：我提出一不可能被偵測到之粒子的存在！這是理論物理學家不應該做的事。」為了補償此一錯誤，他準備送一箱香檳酒給第一位在實驗室裡偵測到微中子的科學家。到了1930年代末，在許多嘗試均失敗後，大部份的物理學家已開始懷疑包立之假設了！隨著第二次世界大戰的來臨，這箱香檳酒便漸漸地被拋諸腦後了。

## 戰後無所事事的科學家

第二次世界大戰結束後，美國許多參加原子彈計畫的科學家們均慢慢回到大學或原工作單位去，但一位33歲參與試爆之理論物理學家來內士（F. Reines）卻決定繼續賴在大戰期間新成立的勒斯阿拉莫斯（Los Alamos）國家實驗室裡。他在其高中的年冊裡曾謂他的野心是成為一位「特殊的物理學家」；因此在1951年，他告訴老闆說他想轉到基礎物理的研究。搬到一間空無所有之辦公室後，他開始天天望著天花板或跑圖書館，思索著什

麼樣的問題值得終身研究？數月後，他突然想到：包立的鬼粒子雖然可以毫無阻擋地通過整個地球，但原子彈的爆炸不是可以瞬間產生成億上兆的微中子嗎？每一個鬼粒子與物質作用的機率雖然微乎其微，但以多取勝，它們總會有幾個會與物質發生作用吧？費米正好路過當地，鼓足勇氣與他詳談後，發現費米也同意核彈確是個很好的微中子源。

是年，來內士與同事柯原(C. Cowan)因飛機機器故障被困於機場；兩人無事閒聊，話題突然轉到了合作研究的可行性。當來內士建議研究微中子時，柯原立即同意。來內士回憶道：「他像我一樣對微中子所知甚少，但他是位好的實驗家，知道如何動手。我們就這樣握手而定，開始微中子的研究。」他後來又補充說他們之所以決定偵測微中子，是「因為每個人都說，你不可能做到的。」

依費米的理論，如果一個質子（水分子）吸收一個微中子，它將釋放出一個正電子而變成一個中子；此正電子將與負電子作用，互毀而放出一道伽瑪射線。所以來內士與柯原提出計畫，準備在原子彈試爆台地底下130呎處，用一大桶的閃光劑來偵測此一道伽瑪射線。他們這種奇想的建議（將精確儀器置於劇烈大爆炸下），沒想到竟輕易地獲得主管的同意；來內士回憶說：「那時候的日子簡單多了——沒有冗長的計畫書及複雜的審查過程。」

戰後到慕商托（Monsanto）化學公司工作的物理化學家戴維斯（R. Davis），三年後（於1948年）跳槽到紐約長島新建之布魯克黑文（Brookhaven）國家實驗室。他在那裡也不知幹什麼，因此「當老闆問我何不到圖書館裡找看看有什麼讓我感到興趣的題目時，我很意外但也高興。」他在圖書館裡發現了物理學家對微中子所知甚少，而讓他感興趣的是：費米的學生及助理龐蒂科夫（B. Pontecorvo），曾

### 龐蒂科夫小檔案

龐蒂科夫1913年出生於義大利比薩的一個相當富有之以色列家庭；在校即精於網球及科學；在比薩大學讀了兩年工程後，即轉學到羅馬大學與費米攻物理。畢業後成為費米的助理，在1934年費米發現以慢中子撞擊原子可增加反應速率上，扮有相當大的角色。兩年後到法國巴黎參加周麗歐（F. Joliot）夫婦（



夫人為居禮的女兒，兩代四口共得五個諾貝爾獎）的原子核脫變研究。時巴黎為德、義法西斯主義興起的避難中心；因此龐蒂科夫在那裡認識到不少左傾的社會主義份子、及後來的妻子。當納粹德國進軍法國時，他於1940年以難民身分移居美國。或許是因其左傾思想，他未能參加發展原子彈之曼哈頓計劃，而於1943年搬到加拿大，興建原子反應爐，開始將注意力轉到微中子上。1948年因取得公民資格，又舉家遷到英國。1949年，蘇俄第一顆核爆成功；東、西方世界進入冷戰。美、英兩國的情報局懷疑龐蒂科夫的「忠貞」度，因此他在原子研究中心的工作開始受到威脅，於1950年九月藉在義大利渡假的機會，全家「偷渡」到蘇俄。

費米曾稱在其科學生涯中，龐蒂科夫是他所接觸到的最聰穎人之一。在一1960年的蘇俄會議上，雷德曼曾問一蘇俄科學家：「告訴我，你們這些蘇俄科學家當中，那一位是真正的共產主義者？」該蘇俄科學家在大廳裡舉目四望，最後手指龐蒂科夫！他於1993年卒於蘇俄的都不那（Dubna）；依其遺囑，骨灰分葬於羅馬與都不那。為紀念他在科學上的貢獻，位於都不那的「核研聯合中心」（Joint Institute of Nuclear Research）為他設立了頗有名氣的「龐蒂科夫獎」，每年頒發給「在基本粒子物理上有最重要研究」的世界物理學家。莫斯科一歷史社也於2006年在其莫斯科住宅處建碑留念。

在兩年前（1946年）提出：原子反應爐是很好之微中子來源，它們可與乾洗劑  $C_2Cl_4$  中的氯核作用而產生具放射性的氫氣，因此只要偵測到氫氣，便可間接證明微中子的存在。戴維斯在慕商托化學公司的研究正是放射性物質！

## 微中子的發現

當工程正在進行時，來內士與柯原並未停止思考更溫和的方法：原子反應爐所放出之微中子數雖沒原子彈爆炸多；但它容易控制「開關」，因此可提供分辨測得的信號是否真的來自原子反應爐的方法。還有：水分子中的質子（氫原子核）變成中子後，它將在偵測之液體中到處碰撞而慢下來，大約在5微秒後就可被鉍原子核（ $Cd$ ）吸收，放出一道伽瑪射線。因此如果能在5微秒間先後偵測到兩道閃光，不是更可以相當肯定地證明微中子之存在嗎？

來內士與柯原在1953年終於在南卡羅來納州（(South Carolina)新建的原子反應爐旁偵測到了微中子的跡象，於是他們小心翼翼地寫了篇短文，投稿到物理回顧（Physical Review）雜誌上，謂「雖然更確切的實驗還在進行著，但顯然我們很可能已達到（偵測微中子的）目標。」儘管如此，許多媒體還是爭先恐後地刊登「鬼粒子已被找到了」的新聞。在經過許多改進後，來內士與柯原終於在1956年的夏天，肯定地宣佈他們發現了微中子，並立即電報正在開會之包立謂：「我們很高興能告訴你，我們確定在核分裂中偵測到微中子。」包立迫不及待地打斷會議宣讀此一電報，並回覆曰：「皇天不負知道如何等待的人。」至於他是否信守諾言地寄出一箱香檳酒，筆者就不知道了。

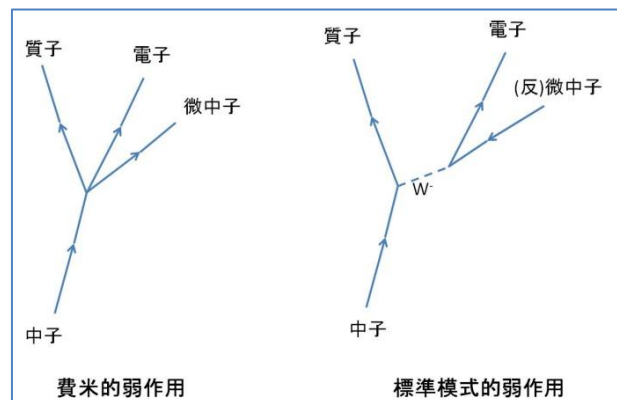
數年後，來內士取笑貝特1934年所說的「沒有一條可能實際偵測到微中子的路徑」時，貝特幽默地回答說：「你不應該相信在論文裡所讀到的所有東西（註六）。」今日，微中子不但是基本粒子物理裡的重要成員，也在宇宙之生成與演進上扮演不可或缺的角色，更具不少工業用途；但不知為什麼，諾貝爾獎委員卻遲到柯原逝世後二十一年、微中子發現後三十九年，才將1955年的物理獎發給來內士？1988年到2015年間，他們可一點也不吝嗇地共發了三次物理獎給其它有關微中子的研究（見後）。

## 微中子的姊妹與標準模式

早在1950年，龐蒂科夫就已懷疑微中子不止一種。在研究  $\mu$  子（muon, 1936年在宇宙射線中發現）的脫變時，他不但發現  $\mu$  子的脫變類似貝塔脫變，且具相同的「弱作用」強度；他甚至認為伴隨著  $\mu$  子的微中子不同於電子的微中子。1960年他想用他在蘇俄所新建的加速器來研究微中子，探討  $\mu$  子的微中子是否異於電子的微中子。可惜美國布魯克黑文國家實驗室的蘇瓦茲（M. Schwartz）也有同樣想法，且於兩年後（1962）成功地與雷德曼（L. Lederman）及史潭寶格（J. Steinberger）在其新建的加速器中率先地發現伴隨著  $\mu$  子的微中子，而獲得1988年諾貝爾物理獎（注意：比發現電子微中子之萊因斯更早！）。

1974年到1977年間，朴兒（M. Perl）在史丹佛線性加速中心的正、負電子互撞的實驗中，發現64個無法解釋的事件，而提出新粒子  $\tau$  的存在；後續其它實驗室不但量得了  $\tau$  的質量與自旋，且發現它的脫變也類似貝塔脫變。朴兒因此一發現而與來內士同得1995年諾貝爾物理獎。即然  $\tau$  粒子也具有「弱作用」，它似乎也應有其自己的微中子：果然，一群國際合作的科學家2000年宣稱在芝加哥費米實驗室裡發現了它（將來會不會得諾貝爾物理獎就不得而知了——筆者猜想應該不會）。

在這期間，費米當初所提之作用模式，雖然也能相當成功地解釋其它類似的「弱作用」，但也碰到一些無法解決的問題：例如「弱作用」的機率與能量的平方成比，因此不適用於高能。因此克來（O. Klein）首先於1938年提出了「弱作用」是靠一稱為  $W$  之粒子來達成的。此一觀念慢慢成熟，到1970代中葉，終於與電磁作用融合成「電弱作用」（electroweak interaction），構成今日基本粒子物理的「標準模式」，相當成功地解釋了微觀世界的所有現象（註七）。



在「標準模式」裡，只有合稱為輕子（lepton）的電子、 $\mu$ 子、 $\tau$ 子及它們的微中子（分別稱為  $\nu_e$ 、 $\nu_\mu$  及  $\nu_\tau$ ）可參與「弱作用」；而傳達「弱作用」的介子則有三種： $W^+$ 、 $W^-$  及  $Z^0$ 。所以在「標準模式」裡，當初包立絕望下的產物微中子，不但毫髮未傷地存在，反而多得了兩位姊妹，共同成為「標準模式」內的六位輕子，與六位具「強作用」的「夸克」組成三代同堂的「物質」！不但如此，「標準模式」還要求這三位微中子姊妹不具任何質量！

2012年，歐洲核子研究組織宣佈在其「大強子對撞機」（Large Hadron Collider, LHC）內找到了當時「標準模式」內唯一尚未被發現的成員希格斯玻色子（Higgs boson）後，似乎再也無任何物理學家否認「標準模式」的正確性。到此，我們的微中子故事應該可以結束了吧？

等等，那位早期也在尋找微中子的戴維斯呢？原來不管他多麼努力，還是空手捕捉不到足夠之氬原子來證明微中子的存在。因此當來內士與柯原宣佈用閃光儀在同一原子反應爐旁發現微中子後，他當然只好舉白旗投降。可是這人似乎擇善固執得很，他並未因此而放棄微中子！信不信由你，他也在2002年因微中子的研究而獲得諾貝爾物理獎。為什麼呢？顯然我們微中子的故事還不能結束吧！

## 太陽微中子之謎

在南卡羅來納州反應爐旁測不到微中子後，戴維斯突然想到：天文學家愛丁堡（A. Eddington）及理論物理學家貝特不是說太陽在產生能量時，也應釋放出許多微中子嗎？

反正他以前的主要研究也在宇宙（太空隕石的年齡等），何不改進微中子偵測設備，將偵測方向轉到太陽？可是太陽真能產生足夠量得的微中子嗎？

1960年，戴維斯經介紹認識到了剛抵加州理工學院任教的年輕理論物理學家巴卡兒（J. Bahcall），後者答應幫他再仔細地計算一下太陽內部的各種核反應。巴卡兒用計算機來模擬太陽，算出各種能量的微中子數及其產生的速率；然後再計算它們與一池四氯乙烯清潔劑作用後所能產生的放射性氫原子數。雖然巴卡兒算出每個月僅能在一大游泳池的清潔劑裡產生數個氫原子而已，但戴維斯卻認為他可以偵測到它們。

幾經經費及地點的挫折，戴維斯終於在1966年秋季於南達科塔州（South Dakota）的一個金礦地下1500公尺處開始其實驗，而於1968年在加州理工學院的一會議上，宣佈了他的第一個實驗結果：他測得的微中子數僅是巴卡兒計算所得的三分之一而已！此一實驗與理論計算之太陽微中子數不吻合的問題，因多年未解，因此被稱為「太陽微中子謎題」（The Solar Neutrino Problem）；在較通俗的報導中則被稱為「微中子缺失的神秘」（The Mystery of Missing Neutrino）。

解決此一謎題的方法有三。第一個方法當然是：或許理論的計算有誤。這當然非常可能！想一想太陽有多大、有多複雜？！我們又碰不到它，因此我們對它的瞭解完全是間接的！我們能相信從這樣的模型裡計算出來的結果嗎？例如我們對太陽中心溫度的估計只要錯個1%，則計算出來的電子微中子數誤差便可達30%；3%的中心溫度誤差，電子微中子數的誤差更是以百倍計！第二個解套的方法當然是認為戴維斯的實驗技術有問題！最後一個解決的方法在當時不但被認為最大膽，同時也是最鮮少為科學家討論的，那就是承認我們不瞭解電子微中子在太空中旅行的行為。

此後的二十年，巴卡兒及其他的科學家不斷的改進計算中所用的數據，預測雖然也不斷地改進（更精確），但其結果還是與原先的大致一樣。同樣地，戴維斯也不斷地改進其實驗的靈敏度，同時也設計出其他的試驗來確定他偵測到了所有的微中子；但他也一樣沒有發現他早期的實驗有什麼大錯誤！

1988年後的十年，四個新的太陽微中子實驗計畫（日、美合作的 KamiokaNDE，德國的 GALLEX，蘇俄的 SAGE，及日本的 super-KamiokaNDE）不但未解決原來的謎題，反而更加深了其神秘性！還有，1997年時，科學家利用太陽表面光度的變化「量得」了其內部的聲速，其結果竟然與由模擬太陽所計算出來的聲速完全吻合（誤差僅0.1%）！這似乎說明了模擬太陽內部構造的正確性，因此其所計算出來的電子微中子數也應有相當的可靠性。看來物理學家得承認他們對微中子的瞭解不夠了。

## 微中子的擺盪



早在1958年，龐蒂科夫（又是他！）就提出用「反微中子在真空中轉變成微中子」來解釋戴維斯在反應爐實驗中發現的一個難以解釋的結果。他在1957—1958年的論文中曾寫道：「我們在實驗室中或許看不到微中子及反微中子的互變效應，但至少宇宙的尺度上一定會發生。」事實上在戴維斯宣稱他測得的微中子數僅是巴卡兒計算所得的三分之一後不久，龐蒂科夫及同事古里波（V. Gribov）就已提出用太陽電子微中子在旅途中改變身分的「微中子擺盪」（neutrino oscillation）來解釋此一量得的短缺。此後二十年，他一直未放棄探討此一「微中子擺盪」的觀念。

即使在科學上，歲月也是匆匆，一晃眼33年就過去了！西元2001年6月18日美國東部時間下午12點15分，一群由加拿大、美國、及英國所組成的科學家發佈了一個非常重要的消息：他們宣佈終於解決懸掛了33年的太陽微中子謎題！透過在加拿大Sudberg城市地下2100公尺處之上千噸的重水，他們可利用「電子微中子」及「所有微中子」的不同反應，分別偵測到抵達地球之「電子微中子」及「所有微中子」數。不錯，他們發現抵達地球之「電子微中子」確是只有「所有微中子」數的三分之一左右而已！而「所有微中子」數則正是太陽模擬所計算出來的「電子微中子」數！

原來太陽所釋放出來的電子微中子並沒有消失（太陽內部的核反應只能產生電子微中子）；顯然它們在從太陽到地球的旅途中，約有三分之二的電子微中子改變身分，變成了較難被偵測到的其它微中子（ $\nu_\mu$  及  $\nu_\tau$ ）而已！謎題一解，許多針對著此一結論而設計的實驗便相繼問世。它們的結果均肯定了此結論的正確性！戴維斯當初的實驗並沒有錯，他只是未能偵測到  $\nu_\mu$  及  $\nu_\tau$  而已！戴維斯因此於2002年，因「在天文物理—特別是宇宙中微中子的偵測上的貢獻」，與小柴昌俊（Masatoshi Koshiwa）合得了二分之一的諾貝爾物理獎（後者於1980年代，在日本神岡宇宙素粒子研究設施內證實前者的實驗結果，並於1987年偵測到超級新星爆炸所產生的微中子）。

曾被懷疑是間諜及稱為「微中子先生」的龐蒂科夫43年前所預測之「微中子擺盪」終於被證實了！可惜他不像包立那麼幸運：不知是皇天辜負了他，還是他不知如何等待，這位充滿傳奇性的諾貝爾獎級人才早已辭世八年了！

## 微中子的質量

依量子力學，爲了讓太陽所釋放出來的電子微中子能在旅途中改變身份，那微中子便得具有質量。用能符合已知之太陽微中子資料的最簡單模式，科學家認爲電子微中子大概具有百萬分之一的電子質量！這雖微乎其微，但卻不是「標準模式」所能忍受：在標準模式裡，微中子應不具質量！所以如果我們承認微中子有質量，那我們便得修改現有的基本粒子的標準模式。可是後者的成就又似乎是無可置疑的！基本粒子的物理學家能輕易地放棄它嗎？在諾貝爾物理獎決定發給戴維斯及小柴昌俊的幾天後（2002年10月11日），楊

振寧說道：「既使在戴維斯艱辛的實驗及巴卡兒細心的分析後，我還是不相信微中子擺盪，我相信沒有必要這些擺盪。」

可是因電弱作用而得諾貝爾獎之一的溫伯格 (S. Weinberg) 卻興奮地說：「這是在基本粒子物理裡，發現標準模式外尚有東西的唯一確切證據。但它卻是一個我們到現在還是無能解釋的線索。」意思是說：如果微中子真有質量，那基本粒子的理論物理學家將還有得忙，不至於像筆者一樣失業在家。事實上如果微中子不輕的話，它甚至可能解開宇宙中「暗物體」之謎（註八）。還有，如果真的如馬就雷納 (E. Majorana, 註九) 於1937年所說的「反微中子就是微中子自己本身」的話，那基本粒子的理論物理學家將更有得忙了：可能得大舉修改標準模式（如放棄為其導航之「輕子數守恆定律」）。但如果反微中子真的就是微中子自己本身的話，它不但可說明為何微中子具有質量，或可因而解決了宇宙間之物質與反物質的不平衡問題（註十）也說不定！

顯然瑞典諾貝爾獎委員們也認為「微中子擺盪」可能會掀起另一場基本粒子物理的新革命，因此決定將2015年的諾貝爾物理獎頒發給「發現微中子擺盪及顯示微中子具質量」之團隊的領導人加拿大天文物理學家馬克都那 (A. McDonald) 與日本天文物理學家梶田隆章 (Takaaki Kajita, 於1998年證明宇宙線在大氣層所產生之 $\nu_\mu$ 在穿過地球中改變身分)。

企圖測量微中子之質量及驗明其「本是同根生」的實驗與計畫（如德國之 KATRIN 及義大利之 CUORE）已在世界各地展開了。參與尋找「暗物體」與 CUORE 計畫的耶魯大學教授丸山 (R. Maruyama) 說：「我認為思考我們不知之事是真的令人興奮。」

看來微中子的故事還不能結束..... 只是筆者不知何時才能完成它？但願是不久的將來，請讀者拭目以待吧！

\*\*\*\*\*

- （註一）其間充滿了不少的騙局，詳見李怡嚴：「永動機的故事」，科學月刊，1979年三月號。事實上這類永動機的騙局，即使是二十一世紀還是偶而會出現的，見賴昭正：「日常生活中的物理與化學」，科學月刊，2010年十二月號。
- （註二）賴昭正：「[熱力學與能源利用](#)」，科學月刊，1982年三月號。
- （註三）賴昭正：「[愛因斯坦其實沒那麼神？](#)」泛科學，2016年三月十六日。
- （註四）賴昭正：「[愛因斯坦的最後一搏——EPR悖論](#)」，科學月刊，2016年三月號。
- （註五）費米領獎後不久，德國化學家漢恩 (O. Hahn) 即開始懷疑以中子撞擊鈾產生的「新」元素是超鈾元素。顯然費米原來的解釋錯了：他並未發現超鈾元素，他事實上是發現核分裂及其產生的較輕元素。漢恩因「發現重核分裂」而獲1944年諾貝爾化學獎。
- （註六）筆者也有類似的忠告，見「[為什麼有關人體健康的研究總是充滿了爭論？](#)」，

泛科學，2015年十一月十一日。

- (註七) 賴昭正譯著：「量子的故事」，第二版，2005年（新竹凡異出版社）。
- (註八) 賴昭正：「[愛因斯坦的最大錯誤——宇宙論常數](#)」，科學月刊，2011年十二月號。微中子是宇宙中第二多的粒子（僅次於光子）。
- (註九) 也是費米的另一最聰穎學生，但也是「怪人」一個。因費米的介紹於1937年末到拿伯兒斯（Naples）大學當教授，但隔年三月即挑空銀行存款「自動」失蹤，從此下落不明。聽說那篇論文還是費米依他想法幫他寫的，然後以他名義發表——與現今學術界到處掛名（見賴昭正：「從陳震遠事件看學術界」，科學月刊，2014年九月號），真是不可同日而語！
- (註十) 賴昭正：「物理與對稱」，科學月刊，2010年三月號。