

偶對的不守恒

王瑜君譯

from: "The Fall of Parity". The Physics Teacher, May, 1982.

二十五年前在耶誕節和新年期間，華盛頓的國家標準局（National Bureau of Standards）以下簡稱 N. B. S. 裏，一項正在進行的困難却重要的科學實驗首次出現了令人興奮的結果。此實驗驚人而又叫人不得不信地顯示，至少有一種基本的物理過程是有它特殊的左右選擇，這麼一來，我們這個世界就跟它的鏡像是不同且有辦法區別的。而物理學家長久以來卻一直作與這個論點相反的假設；他們構造自己的理論，使之能保證「偶對」——亦即符合上述假設的數學性質——在所有的次原子過程中會是守恒的。如此一來，這個實驗使得偶對從原來與其他諸如能量、動量、電荷等物理上良好的守恒量並列的崇高地位上，一下跌落千丈。

「偶對：什麼東西不守恆呢？」

我們對右邊的偏好只是人類的方便而已。所以物理學家們才一直認為，自然界是不可能偏愛右方或左方的區別的。但顯然地，這個行星上的有機物並不呈完全的對稱：心臟在我們身體的左邊，腸子也不規則地糾纏著，許多由動植物提煉的化學藥品也有明確的左右選擇。但是物理學的理论在歷史上的進展，一直是以「將人類對宇宙的觀念由偏狹中解放出來」為使命。所以物理學家們對於只是以我們生活習慣為藉口而無更堅厚基礎的想法，一向嗤之以鼻。

為了試驗「以人為主宰」的假設，我們可以問，是否可以把一個有待商榷的觀念，傳達給在遙遠的銀河上另一種有智慧的生命？而它們既看不到我們也收不到這裏送去的任何東西。特別當我們下達「向右轉」的命令時，他們怎知如何反應？顯然我們的外太空夥伴將如墜五里霧中，除非我們能順帶指導它們去從事一個會因左右之別而結果迥異的物理實驗。在本世紀前幾十年的物理發展上，沒有任何現象，定律或實驗顯示左右有別。自然地，物理學家們也自以為公正地認定大自然應該是不分左右的。二十五年前，當他們發現造物者竟是個左撇子時，莫不大吃一驚。

右手邊的東西經過鏡子的反射後便成了左手邊的東西，這是衆所皆知的事實。鏡射的觀念，僅管習以為常，卻不好用數學形式來表達。比較方便的描述法是把原來的座標各加上負號換成一新座標。這個座標轉換即為偶對轉換 (parity transformation) 上述轉換相當於先來個鏡射，再以鏡子法綫方向為軸來個 180° 旋轉。我們確信上下顛倒旋轉 180° 對這個世界並無二樣，所以我們所經驗到的不對稱，該歸因於反射而不是旋轉。也就是說，鏡射的不變性即意味著偶對轉換後的不變性。

講得鬆散一點，說某些東西是不變的，就是說它是守恆的。事實上，所有的守恆量——如能量、動量、電荷等——與物理過程在座標轉換下的不變性是密不可分的。如果物理程序在一個倒轉後

(加上負號後)的座標系裏也與原先相同的話，那個對就守恆了。相反地，如果這些程序偏有個特定的左右選擇，那麼偶對對那些程序而言就不再守恆了。

一九五六年六月二十二日，物理期刊「Physical Review」的編輯收到一篇簡短的論文，上面提起偶對在弱交互作用 (weak interaction) 下是否守恆的問題，並且提出幾個可決定這個問題的實驗構想。作者楊振寧、李政道，當時雖然分別只有33歲、29歲，卻已在理論物理方面有很高的聲譽。他們於一九四四年在昆明相遇，當時為了逃避日本侵犯，來自中國各地的學生教授們都聚集那裏。戰後二人都赴美繼續學業，仍然從事理論上的研究。

李與楊的合作始於五〇年代早期；研究從高能加速器運轉後接踵而至的新問題。這許多加速器是美國在二次大戰後迅速興建的。一大堆要不是前所未見，就是以往由於數量太少亦不能確定它們性質的次原子粒子，使得理論物理學家為了詮釋它們的存在和行徑，面對艱難的挑戰。

這個時候，當偶對守恆的原則被擴展用於次原子粒子以及它們之間的交互作用後，不僅在普通的理論背景上看不出破綻，還能成功地解說那些粒子的行徑。但到了一九五五年底，用來管理次原子世界的偶對原則和其它原則之間卻出現一個擾人的矛盾。李氏和楊氏都是首批對此現象感到不安而積極追尋答案的科學家中的一員。

嘗試著找出次原子粒子中的新來陌生者所帶來的麻煩後，問題日趨明顯，難道偶對不再守恆了，即使在原子物理那個已被大事開採的領域裏？

一九五六年春，李氏與楊氏開始仔細檢查所有的證據，他們發現，雖然許多物理上的過程支持偶對守恆的論調，但沒有任何一種過程是屬於弱交互作用。李氏與楊氏提出一些可決定真象的試驗，其中第一個列出的——這二位理論學者認為它「可能會比較

簡單」一步驟如下：

選出一種有自旋且能放射高速電子作放射性衰變的核子。再使一束這樣的核子每個都有相同的自旋方向，然後計算向上發射和向下發射的電子數。

只有當這二個數目相同時，鏡裏的實驗才會與鏡外相同，因為看鏡中像時，輻射線的分布沒有變化，只是自旋的方向逆轉而已。實驗顯示向上的電子多於向下的。所以衰變過程不保持鏡射不變性；偶對並非守恆。（見圖1）

〔實驗的要求：〕

實驗背後的想法非常簡單，而這個實驗本身卻很困難，它要求能夠將二種複雜的實驗技術結合運用之本領，這種結合是前所未有的。技術之一是「 β 光譜學」（Beta Spectroscopy），是對放射性核子放射出的高速電子作精確的觀測。另一項是「低

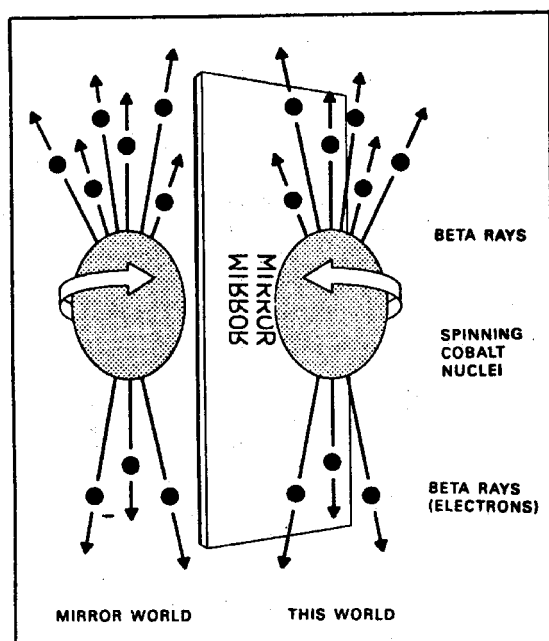


Fig. 4. The ellipse on the right represents a large number of cobalt nuclei, all with their spins in the same direction, all emitting beta rays. (In reality, any one cobalt nucleus emits only one beta ray - transforming itself thereby into a nickel nucleus.) On the left this process is seen in a mirror. The direction of spin is reversed, while the direction in which most beta rays are emitted remains unchanged. The mirror world is thus distinguishable from the real world.

The mirror world becomes the inverted, or parity-transformed world by turning the mirror image upside down. The spins of the cobalt nuclei are thus returned to their original direction, but most beta rays are now emitted downward - contrary to experimental fact. The parity-transformed world is not identical with the real world; parity is not conserved.

溫學」(Cryogenics)。也就是製造出所能得到的最低溫度。只有當原子和其周遭環境都被冷卻至與絕對零度只有百分之一的差距內時，原子核自旋的，軸才會保持在同一方向。（此時原子隨機運動的能量大為減少，使得原子能夠聽任外來磁場的安排而調整方向）。在五〇年代中期，能夠接近絕對零度低溫的只有一種方法：絕熱去磁，或叫磁性冷卻。（adiabatic demagnetization, or magnetic cooling）某些特定的複塩被加上強磁場後，會被磁性偏極化且放出熱。反過來說，當磁場減弱強度或移去時，他們便吸熱。假使在加上磁場後，這些塩再經過熱隔離處理，接著移去磁場，——也就是說說塩晶體被絕熱去磁——的溫度便會下降。（熱隔離是為了防止塩再從環境中吸熱來保持它溫度不變）。

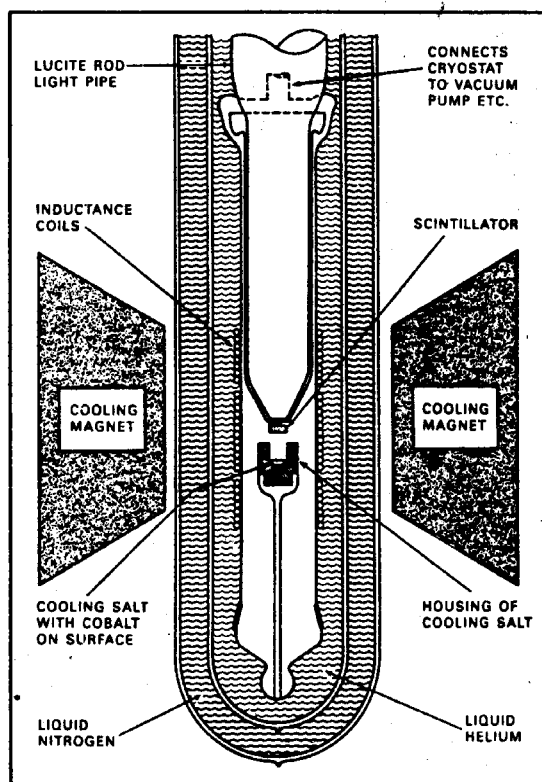


Fig. 7. Cross section of cryostat and surroundings.

這個精密實驗的第一步就很難做好，那是藉不斷地從裝有沸騰液態氮的容器中抽出蒸氣來降至最低溫。起始溫度大約是絕對溫度一度左右，在此溫度下的液態氮是一種「超流體」(super-fluid)，很難把它侷限在特定的裝置裏。

所有為了獲得超低溫的艱難技術還得跟偵測 Co 核子放出的 β 射綫工作配合。後者用到「閃滅計數」的技術(Scintillation Counting)。

放射性 Co 原子放置在冷卻的塩晶體的表層，在它上方約一英寸，且與它平行的地方，有片薄薄透明的有機化合物蔥(anthracene)的晶體，連接著玻璃真空室的內壁。從 Co 核子向上放射的電子會撞擊蔥晶體，而使得能量換成一個微弱的閃光，就是前述的Scintillation。某些光綫會穿出玻璃牆，而被形狀特殊，用合成樹脂做成的光管(light pipe)收集，然後再送到裝在這個低溫儀器上端的光電偵測器。(見圖2)

完成了磁性冷卻後，一個螺綫圈套入這個「熱水瓶」似的容器，再入些許安培的電流就能產生垂直磁場。因為冷卻了的 Co 原子有極強的內磁場，所以螺綫圈磁場可以矯 Co 原子的方向使之都以垂直自旋。(後來加上的垂直磁場並不會使已被磁性冷卻的復塩再度吸熱，一方面是因後來的磁場強度只有冷凝時用的水平磁場的五十分之一弱。另一方面，實驗所用復塩，鉍鎂硝酸塩[cerium magnesium nitrate]晶體中有某個方向的帶磁特別低率[magnetic susceptibility]，我們就使它剛好是垂直向。)

接下來的問題是計數螺綫圈磁場向上時每秒的閃滅數，這就猶如計數順著 Co 原子自旋轉方向放射的電子。然後把螺綫圈電流反向後再計數閃滅次數，此時 Co 的「尾巴」正朝向偵測器。如果這二個數目不相等，鏡射對稱的說法就失敗了，偶對也跟著跌落了。

「實驗的進行」

一九五六年春，李振道與他在哥倫比亞大學的同事吳健雄討論次原子粒子在弱交互作用下偶對守恆的證據。吳氏當時已是原子核放射 β 射綫方向的實驗研究上的領導人物。她接受了楊氏與李氏的建議——藉由觀測從被矯正了方向的核子放出的 β 射綫，來試驗偶對的守恆性。雖然當時吳氏與她的丈夫已訂了伊麗莎白女王號的船票準備遊歷歐洲和遠東，她還是選擇留下來進行實驗，「……早在其他物理界人士承認這個實驗的重要性之前，她便迅即進行，也第一個完成。」

吳教授需要實驗室裏的夥伴。只要偶對有些微的不守恆就會在 β 射綫的分布上顯出不對稱。為了觀察這小子的不對稱分布，需要使得自旋的原子都準確地朝著同一方向。前面已提過，為了這個目的先得把核子降溫至 $0^{\circ}K$ 附近。為了降溫，又得靠絕熱去磁的辦法。當時整個世界上只有不到20個實驗室試著進行這項複雜艱鉅的實驗。

他們之中只有極少數有過矯正核子轉向的經驗。華盛頓NB

S裏的低溫物理實驗室（Cryogenic Physics Laboratory）就是這少數中的一個。

Ernest Ambler三年前從哈佛大學的Clarendon實驗室來到NBS，在哈佛，他的博士研究中就包括了矯正 ^{60}Co 轉向的示範。在華盛頓，他與他前期同學，低溫學上的權威Ralph Hudson合作，繼續他的研究。自然地，吳氏找上Ambler提出合作的構想。「一九五六年的六月四日，我打電話給他，直接了當地說出這個提議，他很熱心地答應了。」Hudson很快地也加入合作的行列。到了九月，二個也在NBS的物理學家Reymond Hayward和Dale Hoppes——他們在偵測核子輻射方面都有獨到的經驗——也隨著加入陣容。

同時一些關鍵問題也有了答案。在哥大，吳氏和她領導下的研究生Marion Biavati發現 β 射綫仍然可使液態氦冷卻了的閃滅器發出閃光，而這些閃光也仍可被俯視著長光管的光電管所查覺。但是這麼一個堅厚的樹脂棒子很可能成爲一個「熱管」。幸好NBS發現容許液態氦有限量的耗損能使管子冷卻下來。爲了使電子放出後不再改變方向和速率，作爲輻射源的 ^{60}Co 原子也要置於冷卻鹽的上層表面。

十月初，工作小組展開整合和檢驗儀器的工作。由 ^{60}Co 核發出的 γ 射綫，以及穿透力強的X射綫，說明了使矯正後的核子轉向的工作雖然是做到了，可是卻只能維持數秒鐘。當大部份的冷凍塩還保持冷度時，它的表面層卻因爲低溫維持器四壁放出的氦蒸氣而迅速增溫。這裏所謂的低溫維持器（Cryostat）即指安置冷凍塩及 ^{60}Co 的真空玻璃室。這個儀器的重要部分本來是以金屬製成的，以防止常浸泡在液態氦時，那些難馴的超流體得以乘虛而入。到了十一月，經歷了一些挫敗後——主要是把輻射物放入一個被冷凍塩所包圍的「小房子」的問題——整個低溫維持器和真空連接處都重新以玻璃製造。

玻璃雖然減低了外來氣體的冒犯，卻也使位於儀器底端，支撐著 ^{60}Co 與冷凍塩的停止器有漏氣之虞。第一次實驗時就漏了氣。

而後，冷卻用磁鐵所產生的力也會使放 ^{60}Co 的小房子倒塌過。十二月二十七日，在把「小房子」用棉綫細繫後，實驗終於做成了； β 射綫的不對稱分布，明顯的令人激奮，令人難以忘懷。

接下來一星期卻是十分沮喪的。那個暗示著違背偶對守恆的不對稱分布，在往後數天的實驗裏卻不能如期的出現。

這是數個月以來專注努力中所面臨的最艱困的時刻，李氏和楊氏已在十月將論文出版，十一月在西雅圖召開的一項出席率特別高的理論物理學會議中，他們也提出了他們的想法。十二月二十七日的結果使大家相信李氏和楊氏的論點是正確的，可是實驗尚未能充分證明他們的想法。

再過一星期的殫精竭慮，才把實驗上的毛病剔除。與推測吻合的，明顯的不對稱又出現了。接下來的一週也同樣振奮人心，所有辦得到的檢驗都派上用場，這是爲了確定不對稱分布是來自造物者喜用左手的本性，而不是人爲的成品。這羣人鎮日地工作著，把儀器組合過好幾次，在超流體氦溢出於停止器附近，而把真空狀態破壞的那一陣子，他們趁機睡了幾個小時作爲休息。Hoppes當時就睡在儀器旁，一待溫度又降至可以開始實驗時，就打電話通知其他人。終於在一月九日凌晨二時，Hudson打開一瓶一九四九年的Chateau Lafite——Rothschild，大家舉杯慶祝推翻了偶對定律。

同時在紐約，關於 ^{60}Co 偏極化後有驚人結果的消息，也促使一些吳健雄的同事們利用哥大的加速器進行一個簡單而精巧的實驗。數天後，他們發現當 π 介子衰變爲 μ 粒子， μ 粒子再衰變爲電子時，也出現偶對不守恆的證據。哥大在一月十五日下午舉行記者會，當天這二分實驗報告也呈交給Physical Review雜誌印行。翌日，「物理基本觀念被推翻」成了頭條新聞。

物理學家的乾坤——我們的宇宙也一樣地——被徹底地扭轉了。以往沒有任何一個受過物理精神影響的人願意相信的，今天卻得把它當作一件事實來接受。天知道，世界竟然是個看不太出來的左撇子。