



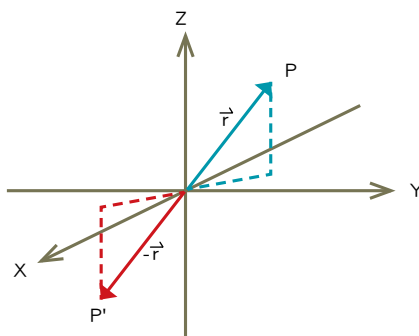
## 左與右（五）

李政道與楊振寧發現，準純量才是檢驗左右對稱的關鍵。

吳健雄發現 $\beta$ 衰變違反左右對稱性的消息，在1957年元旦過後不久即傳遍物理界。楊振寧特地於1月5日發電報通知正在度假的歐本海默（楊當時是普林斯頓高等研究院的教授，歐本海默是所長）。楊在其《楊振寧論文選集》中回憶說，歐本海默馬上打電報回一句話「走出門了」。歐本海默如此回覆，是因為楊曾於1956年一場演講中說，當時困惑於「 $\theta - \tau$ 之謎」的高能物理學家就「好似處在黑房間中，僅知道某個方向有個門可以出去，卻不知道方向何在。」

李政道與楊振寧建議吳健雄測量鈷60 $\beta$ 衰變後電子射出方向的分佈，以判定左右對稱是否成立，其間道理一經解說，似乎並無艱深難懂之處，那麼為何大家還會受困在「黑房間」中好一陣子？根據楊振寧的回憶，關鍵在於人們沒有體認到「之前所有關於 $\beta$ 衰變的實驗並未測量『準純量』，所以那些實驗根本和 $\beta$ 衰變是否破壞左右對稱無關」。楊李是透過冗長計算，才了解之前眾多 $\beta$ 衰變的實驗結果全部無從拿來檢驗左右對稱，但是他們對於計算背後真正的道理卻還沒完全想通。後來他們試圖不依賴計算來證明這項發現，才知道原來準純量是檢驗左右對稱的關鍵，而且楊在「想清楚這件要事後非常高興。」

什麼是「準純量」？為何它是關鍵？解說之前我得先介紹幾個概念。首先是空間反轉變換，這個變換將空間中坐標為 $(x, y, z)$ 的點P，變換至坐標為 $(-x, -y, -z)$ 的另一個點P'，也就是將向量 $\vec{r}$ 反轉成向量 $-\vec{r}$ （見圖）。我們可以這麼看待此空間反轉變換：想像xy平面是一面鏡子，先讓P點跑到其鏡像位置，即 $(x, y, -z)$ ，然後再繞著z軸旋轉180度，讓x變成-x、y變成-y，這樣就將 $(x, y, z)$ 變換成 $(-x, -y, -z)$ 。換句話說，空間反轉變換可視為鏡像變換與旋轉變換的組合。由於物理定律已知具有旋轉對稱性，所



以空間反轉對稱性是否成立，就取決於鏡像對稱是否成立。所以一般將鏡像（左右）變換與反轉變換看成同一回事； $\beta$ 衰變違反左右對稱性也等同於違反反轉對稱性。

在空間反轉變換之下，向量如 $\vec{r}$ 、速度 $\vec{v}$ 、動量 $\vec{p}$ ，會轉換成 $-\vec{r}$ 、 $-\vec{v}$ 、 $-\vec{p}$ ；我們稱這種在反轉變換下會「調頭」的向量為「極向量」。另外有一類向量稱為「準向量」或「軸向量」，在空間反轉變換下會維持不變，不會調頭；角動量 $\vec{L}$ 就是準向量，原因為 $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ （ $\vec{L}$ 為 $\vec{r}$ 與 $\vec{p}$ 的外積），在反轉變換下， $\vec{r}$ 、 $\vec{p}$ 變成 $-\vec{r}$ 、 $-\vec{p}$ ，但是 $\vec{L}$ 仍保持不變。由於粒子的自旋 $\vec{\sigma}$ 也代表一種角動量，所以 $\vec{\sigma}$ 也是準向量。請注意，磁場 $\vec{B}$ 也是準向量，例如在上一期〈左與右（四）〉圖解中，線圈造成的磁場在鏡像變換之下雖會調頭改變方向，但在旋轉180度之後，又轉回原來的方向。

好，現在可以說明準純量是怎麼回事了：這是一個在反轉變換之下，會改變其正負號的量，亦即若A為一準純量，則在反轉變換後，A會變為-A。（當然，所謂的純量就是在反轉變換下不會改變的量。）一個準純量的例子是 $\vec{\sigma} \cdot \vec{p}$ （自旋與動量的內積，正比於兩向量夾角的餘弦值），因為在反轉變換下 $\vec{\sigma}$ 不會改變正負號，而 $\vec{p}$ 會。

顯然在具有空間反轉對稱性的理論中，任何準純量的平均值必然為零，因為若某一準純量在我們世界的值為a，在鏡像世界中的值就為-a，如此一來兩個世界便可區分，左右也就不對稱了。所以如果我們測量鈷60自旋與射出電子動量的內積此一準純量的平均值（亦即以鈷60自旋方向為準，電子射出方向的分佈），就可檢驗 $\beta$ 衰變是否違反左右對稱。不測量準純量，即無從查驗左右對稱，楊振寧和李政道於1956年5月領悟了這一點。

SA

高涌泉是台灣大學物理系教授，著有科普文集《另一種鼓聲》等書。