



# 水火不容

光究竟是一種波動，還是一種粒子？

前陣子，我為了準備一篇介紹狹義相對論的文章，而想查看電磁學大師馬克士威本人如何說明「以太」這個觀念，於是找上他為大英百科全書第九版所寫的〈以太〉一文。馬克士威從以太的本意說起：它是一種比可見物體更微妙的物質，存在於空無一物的空間中。它在歷史上曾扮演各式各樣的角色，但這些角色大半沒什麼科學意義，唯一能經得起考驗的是惠更斯（Huygens）為了解釋光的傳遞所發明的以太介質。

在惠更斯的時代，人們對光的本質主要有兩種見解：一是粒子說，認為光是一種微粒般的物質，以高速直線前進；粒子說陣營的主將是牛頓。二是波動說，主張光是類似水波的一種波動；惠更斯是波動說的主將。當時的人們相信任何波動都需要介質，惠更斯的以太就是承載光波的介質。

由於馬克士威能夠從他的電磁學方程式證明電場與磁場的振動可以形成電磁波，而電磁波速度和光速一樣都是  $c (= 3 \times 10^8 \text{ 公尺/秒})$ ，所以他很自然地認定光即是一種電磁波，如此一來電磁學便和光的波動說連起來了。馬克士威在〈以太〉裡寫道，我們對光的現象理解越多，以太存在的證據就累積越多。他接著以光的干涉現象為本證明了光必然是一種波動，故而以太這種介質必得存在。

大師這段100多年前的論證不僅證明了光的波動性，還非常清楚地闡明波和粒子是水火不容的兩種概念。在邏輯上，馬克士威簡單但犀利的理由無懈可擊，今天讀來仍令人信服：光本身不是一種物質，這可用干涉現象來證明。我們利用光學方法將來自單一光源的一束光分成兩束，讓這兩束光走不同的路徑，然後再把它們合併，並落在屏幕上。如果將其中一束擋掉，則另一束會落在屏幕上，使屏幕出現亮點。但如果我們讓兩束光都通過，屏幕上有些地方反而會變暗，這證明兩束光相互消滅了對方。

因為我們不能假設兩個物體一旦放在一起，可以相互消滅，所以光不可能是一種物質。我們所證明的是一束光可以正好是另一束光的相反，就如  $+a$  正好是  $-a$  的相反——無論  $a$  是什麼。在物理量之中，我們發現有些量的正負號可以顛倒，但有些不行。例如，在某個方向上的位移正好是在反方向上同樣位移的相反。這樣的量不能代表物質，只能代表一種發生在物質上的過程。所以我們的結論是，光不會是一種物質，而是一種發生在某物質上的過程，（在前述情況下）第一束光發生的過程永遠正好是同一時刻另一束光發生過程的相反，因此這兩束光合併後，就相當於沒有發生任何過程（所以屏幕就出現暗點）。

馬克士威無法想像光如何有可能既是粒子（一種帶能量的物質），又能表現出干涉現象，於是他毫不猶疑排斥了光的粒子說，而接受波動說。任何了解此論證的人都會同意這結論。然而物理世界並不是全然照著無瑕疵的邏輯運行的——馬克士威的結論在1905年被年輕的愛因斯坦推翻了。

首先是以太存在與否的問題：馬克士威認為，有個座標系與眾不同，其特殊之處在於以太介質靜止於其中。光速只有在這個座標系中才等於  $c$ ，光在其他運動座標系中都不會有這個速度。但愛因斯坦的狹義相對論卻要求一切座標系都等價，並且光速在任何座標系中都等於  $c$ 。以太在狹義相對論中成了個不必要的假設。

其次是光其實也有粒子性：愛因斯坦跟循著普朗克的腳步，提出了光量子的假設；在這假設之下，光是由一顆顆帶能量的光量子所組成的。愛因斯坦並指出這個假設可以在所謂的「光電效應」中獲得驗證。

光怎麼可能既是粒子又是波？愛因斯坦難道可以駁斥馬克士威的論證？他當然不能，所以才會對人說：「我思考量子問題的時間百倍於我思考廣義相對論的時間」，而且直到過世，都拒絕相信採用了「波粒二象性」原則的量子論會是最後的真理。 SA

高涌泉 台灣大學物理系教授