

# 與光子玩捉迷藏



光子受重力偏折，從星系的左邊或右邊通過。但如果我們想辦法抹除光子路徑的訊息後讓兩邊會合，則會呈現干涉條紋，就好像光子是同時從左邊和右邊通過一樣。

撰文 張明哲

**費**曼曾說，雙狹縫干涉實驗是「量子力學裡唯一的謎」，因為與它相關的一些現象，是完全無法以一般的方式去理解的。這個實驗是英國科學家楊格（Thomas Young）在將近200年前發明的：藉著讓光通過細長的雙狹縫，他發現光線和水波類似，都會產生干涉條紋，因此推論出光也具有波動的性質。

不過，就像湖水是由無數的水分子所組成的一樣，光波事實上也是由一顆顆光子所組成的。只是數目太大了，使得光的顆粒性質很不顯著。例如，聖誕樹上的一顆裝飾燈泡，每秒鐘產生的光子數就高達 $10^{19}$ 。

假如你在一間伸手不見五指的房間裡，將一顆燈泡的亮度調到很暗很暗，直到你的眼睛感受不到任何亮光，這時候光子的密度會稀疏到讓身旁靈敏的偵測器發出不連續的滴答聲，一個滴答聲就表示偵測到了一顆光子。所以在適當的條件以及儀器的配合之下，我們也能夠感受到光的粒子性質。

## 單光子，雙狹縫

物理學家因此設計了一個有趣的實驗。他們重做了一次雙狹縫干涉，只是這次用的是極度微弱的光源，使得單個光子在通過狹縫的時候，另一顆光子還在燈泡裡沒有出來，而較早出來的光子已經在後方屏幕產生一個微小的感光點。依照常理，如果是粒子而非波動通過雙狹縫的話，長時間曝光後，屏幕上應該會看到雙峰式的分佈。但是實驗者發現，在長時間曝光後，無數的感光點卻仍然描繪出干涉的條紋！就好像光子在飛行途中形成分身，同時通過兩個狹縫，然後自己與自己的分身互相干涉一樣。或許你會認為，因為光子沒有靜止質量，所以一分为二並不稀奇。但是以有質量的電子做同樣的實驗，亦即變成「單電子」的雙狹縫干涉實驗，結果還是一樣。甚至於最近有人讓60個碳原子組成的巴克球（buckyball）一顆顆飛過狹縫，還是可以看到同樣的干涉條紋！

光子（或電子，或是質量很大的巴克球）到底是從其

中一個狹縫通過，還是真如前面所說的同時通過兩個狹縫？物理學家想了很多辦法，想從旁窺探光子的路徑，而又不破壞干涉的條紋。可惜的是，所有的方法都達不到暗中窺探的目的。也就是說，雖然你的確可以因此而知道光子通過哪個狹縫，但是干涉條紋卻會消失，而回復成單調的雙峰式分佈。（嚴格地說，如果光子路徑的資訊不夠完整，那麼仍然會顯示出部份干涉的現象。）

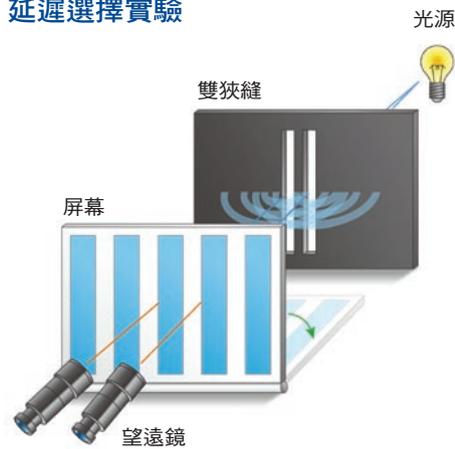
愛因斯坦不相信光子會如此難以捉摸，他相信我們一定可以知道光子是從那個狹縫經過的。因此他曾經設計了一個想像實驗，實驗裡一個狹縫設計成可滑動的（另一個狹縫的位置則固定住），如果該狹縫動了我們就知道有個光子從那裡通過。如果實驗做得出來，而且干涉條紋仍保持得住，那就表示量子力學其實仍有缺陷，因為它沒辦法預測光子到底是由哪條路徑通過的。不過，量子力學的擁護者很快就指出，由於測不準原理，狹縫移動的幅度雖然小，但卻足以破壞掉干涉條紋。所以我們還是沒辦法既知道光子的路徑，又保持住干涉條紋。

在某種意義上，測不準原理就像是守護量子力學理論的灘頭堡。愛因斯坦很清楚這一點，所以後來想了許多精巧的想像實驗要攻下這個灘頭堡，他試圖同時精確測量質點的位置與動量，以證明量子力學還不夠完整。不過，這些嘗試都沒有成功。

## 延遲選擇

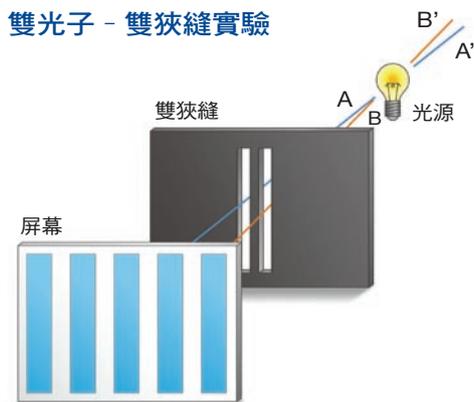
物理學家惠勒（John Wheeler）曾想了一個辦法來騙過光子：既然干涉條紋的有無取決於我們有沒有窺視光子，那我們可以在屏幕後方藏兩支望遠鏡。一支指向右邊的狹縫，一支指向左邊的狹縫。光子通過狹縫時屏幕將望遠鏡擋在後方。等到光子通過狹縫後（還沒打到屏幕前），才趕緊拉下屏幕，用望遠鏡做觀測（參見上方〈延遲選擇

## 延遲選擇實驗



屏幕後的一支望遠鏡指向右邊狹縫，另一支指向左邊狹縫。光子通過狹縫後、打到屏幕前，才拉下屏幕，用望遠鏡觀測光子來自哪個狹縫。

## 雙光子 - 雙狹縫實驗



特殊的光源會同時放出兩個光子，由於動量守恆的關係，當一個光子A（或B）射出來時，另一個光子A'（或B'）就會往反方向飛。

實驗〉），這時光子想回頭也來不及了。如此一來，我們豈不是又可以知道光子的路徑，又可以看到干涉條紋？這就是著名的「延遲選擇實驗」。然而，其結果只是進一步證實了量子力學的怪異特性：如果你不拉下屏幕，就可以看到干涉條紋；如果你拉下屏幕（因此得知光子從那個狹縫經過），干涉條紋就會消失，再一次回到單調的雙峰分佈。也就是說，光子的行為取決於你測量它的方式，即使你選擇測量的時機是在它通過狹縫之後！

這個結果非常違反常理。因為在極端的情況下，這個「雙狹縫」可以是幾千萬光年遠的星系，「光源」則是更遠處的類星體（quasar）。由於重力透鏡的關係，類星體的光子可以由星系的左邊或右邊繞過，再到達地球上的觀測者。如果我們在光子到達偵測器前想辦法抹除路徑的資訊（就像66頁〈量子實驗，自己動手做〉的實驗做法），就可以看到干涉的現象；如果不抹除，就不會有干涉。在這種情況下，光子顯然沒辦法再視情

況回頭調整路徑，可是干涉條紋的存在與否還是取決於最後我們如何安排實驗裝置。這件事情完全沒法以一般的方式理解，除非你願意讓光子回到過去，重新再來。

## 雙光子，雙狹縫

另外一個巧妙的辦法是運用雙光子光源，這種特殊的光源一次會同時放出兩個光子，由於動量守恆的關係，當一個光子A（或B）飛出來時，另一個光子A'（或B'）就會往反方向飛（參見上〈雙光子—雙狹縫實驗〉）。這下光子的路徑應該無所遁形了吧？因為我們可以放過其中一個通過狹縫的光子，不去偷看或干擾它，讓它形成干涉圖案。等到一段時間之後，再從另一端遠處去觀測它的孿生光子跑的方向，進而推論出光子到底是走左邊的狹縫還是走右邊的狹縫。

雖然這個方法看起來無懈可擊，但是令人驚訝的是，一

且我們能知道光子通過哪個狹縫，干涉條紋還是會消失——即使你沒直接碰觸通過狹縫的光子！干涉條紋消失的結果和量子力學的預測（考慮雙光子間的量子糾纏效應）完全一致，量子力學只是無法預測光子會走哪條路徑。

下一篇〈量子實驗，自己動手做〉所介紹的方法，是光子捉迷藏遊戲的一種。這是史卡利（Marlan O. Scully）在1982年所提出來的，精神上有點類似延遲選擇實驗。它想要進一步確定：在我們窺視光子，破壞掉它的干涉性質之後，如果我們在它飛到屏幕留下任何記錄之前，想辦法把偷窺的記錄（我們都還沒打開看）抹掉，那麼後來光子到底還會不會有干涉條紋？如果沒有，似乎也不會太奇怪，畢竟我們曾干擾了它的路徑。可是量子力學預測會有干涉條紋，測量結果也的確有，這就有點令人意外了。

抽象地說，如果一個待測物（例如說光子）可以有兩種狀態（例如說左或右），當你觀測（記錄）時，它要不就是左，要不就是右；則當你不去觀測（記錄）時，它就會處於模稜兩可的狀態。這是量子系統非常基本而普遍的特性。這裡面會產生一些哲學上的問題：當沒有人去記錄它時，它是真的處於模稜兩可的狀態？還是其實已經選了邊，只是我們不知道它已選了邊（因為我們沒看它）？又或是說，問這種問題其實沒有意義？這就好比，有位愛開玩笑的朋友從魔法玩具店買了小精靈送你，你打開盒蓋發現空無一物。他在旁邊忍著笑告訴你：

「小精靈只有在蓋子闔起來後才會在盒內現身，一掀開就會消失，而且從不失誤。」對這種永遠沒法證實的事，我們怎能判定真偽？

## 薛丁格的貓

愛因斯坦、薛丁格以及其他一些人的觀點是：即使還沒做記錄，上述的待測物其實已經選了邊。也就是說，有一個「客觀的外在世界」獨立於我們而存在，我們只是被動的旁觀者，這是一個大多數科學家都很容易接受的觀點。波耳、海森堡等人則持完全不同的觀點，他們認為還沒做記錄時，待測物就只能處於模稜兩可的狀態，是「做記錄」這件事情讓雲霧般的狀態定型為「左」或「右」。這個極端的觀點和生活經驗完全不符，也會引發許多概念上的問題（但只有這種觀點才能保住量子力學的完備性）。

例如說，這個所謂的待測物可以是光子、電子、巴克球，甚或是一隻草履蟲。量子力學對此待測物原則上並沒有設下質量的上限。薛丁格因此說，那就選一隻貓吧！所

以你在〈量子實驗，自己動手做〉的第一頁可以看到薛丁格的貓同時逡巡繞過樹幹兩側。薛丁格還提議把這隻貓關在密閉的木箱裡，並考慮死、活這兩種狀態，以試圖突顯波耳等人觀點的荒謬。例如說，他在木箱裡還擺了一個放射性樣品及一瓶毒氣，如果樣品衰變放出粒子，就會觸發機關而釋放毒氣；如果沒衰變，就不會放毒氣。於是在還沒打開箱子前，由於我們沒法確定是否有衰變，以波耳等人的觀點，貓咪就只能處於不確定的狀態。（對於實際的巨觀系統，由於環境的干擾很難避免，所以它會在極短的時間內挑出一個狀態（稱為「去同調」的過程），而使這種不確定態極難觀測。）

對於這兩種截然不同的世界觀，到底有沒有辦法驗證誰才是對的？或者這純粹只是哲學觀上的差異？有很長的一段時間，許多人認為這是個形而上的問題，物理沒有辦法回答。一直到1964年，貝爾（John S. Bell）發現將愛因斯坦的觀點應用到某一種雙光子實驗之後，幾個測量值之間必須遵守一個不等式；但是量子力學的結果卻會違反這個不等式。這時人們才了解到，以實驗來客觀辨別愛因斯坦與波耳的觀點孰真孰偽，確實是可能的，這是一個非常深刻而重要的理解。結果，1980年代初期的實驗如大家所

## 量子物理中，在現象被記錄前，沒有一種基本現象是實在的現象。



預期的，證實了波耳的說法比較正確：當你不去記錄時，待測物真的就處於雲霧般的不確定狀態。也就是像惠勒所說的，宛如禪偈般的結論：「在量子物理的世界中，在現象被記錄之前，沒有一種基本現象是實在的現象。」

有人問說，如果愛因斯坦還活著，那麼在他聽到他所珍視的世界觀被實驗判決是錯的之後，會有什麼反應？雖然沒人能回答這個問題，但是愛因斯坦應該會一如以往地說出一段簡短而睿智的評語。波耳曾說：「任何一個沒被量子力學所震驚的人，一定是還沒了解它。」愛因斯坦顯然很早就了解到，如果量子力學完全正確，我們無可避免地就得接受一個激進的世界觀，所以他才會終其一生都想找出更好的理論。雖然物理系畢業的學生都知道怎麼用量子力學來計算並預測物理現象，但是量子力學深處的神祕性並沒有消失。大家都同意它很奇怪，但是到目前為止，還沒有任何人能清楚說明為什麼它會這麼奇怪。光子的抹除器實驗，只是又為其神秘性多添了一項證據。

SA

張明哲 台灣師範大學物理系教授