



諾貝爾獎特別報導

## 2005年諾貝爾物理獎特別報導

# 光同調性更上層樓

今年的物理獎頒給了三位在光同調性有重要貢獻的科學家：葛勞勃以量子的觀點思考光的同調性；韓希在 1998~1999 年率先穩住脈衝雷射，霍爾團隊則是發展出製造光梳雷射的新方法。

### 鄭王曜

2005年諾貝爾物理獎頒給了葛勞勃 (Roy J. Glauber)、韓希 (Theodor W. Hänsch) 及霍爾 (John L. Hall) 三人 (圖一)。可以說是頒給了「玩雷射同調特性」的人。怎麼說呢？葛勞勃以量子的觀點來描述與定義光的同調性，而雷射是目前人類所能製造同調性最好的光源 (稍後會解釋什麼叫光的同調)。因此他的理論也成為用量子觀點，來描述雷射同調特性一個很重要的依據。另外兩位實驗物理學家——韓希和霍爾，則利用雷射的同調性質，進行各類高精基礎物理的研究。他們在 1999~2000 年左右，更發明了「飛秒光頻梳雷射」 (femto-second optical frequency comb laser，本文簡稱「光梳雷射」)，更將光同調特性的應用，推向另一高潮。這一個發明，使

得人類有機會建立「光鐘」。

光鐘的發展對全球度量衡的建立帶來極大進展。當人類共同的時間標準可以光頻為基準時，相當於全球各地在進行各類量測，都有了共同的語言，而且精確度可藉由光或電磁波，加上人造衛星，隨時進行比對與校正。因此這樣的發明，對人類的影響很大。雖說「光」與「雷射」，都是大家平常看得到的東西，但要解釋這三位諾貝爾物理獎得主的貢獻，並不是件容易的事。我們必須從光的基本性質思考起。

### 「光」是什麼？

#### 如何與量子觀念結合？

「光」距離我們是那麼接近，然而又是那麼神祕，歷史上偉大的物理學家，幾乎每個人都思考

過「光」的本質。上一個世紀初，可以說是人類史上對「光」的本質最迷惑，也是理解最多的世紀。在之前，由於觀察到光可以干涉，可以線性疊加，因此科學家對「光」的普遍認知是，光具有「波」的行為。

然而在 1905 年，愛因斯坦 (1921年諾貝爾物理獎得主) 完全顛覆了這個概念，他告訴大家，「光」是可以用「一顆一顆」來描述的。當然，這個想法不是無中生有，至少他完美解釋了光電效應。但對於當時熟悉電磁波性質的物理學家而言，光粒子是非常狂野的想法。試想，光如果兼有波動與粒子特性，光波的「相位」到底與粒子的哪部分特性相關？反之，光若以「粒子」視之，是否與其他物質一樣有相應的「物質波」？人們，包含愛因斯坦自



## 諾貝爾獎特別報導



圖一：2005年諾貝爾物理獎得主，分別為美國哈佛大學的葛勞勃、德國伽欽馬普研究協會韓希，與美國科羅拉多大學霍爾。

藍姆 (Willis E. Lamb, 1955年諾貝爾物理獎得主) 所設計的一個巧妙實驗證實。

至此，光的性質總算比較清楚：簡單來說，光，可看成帶電荷粒子間，電磁交互作用的「介質」；也可看成空間分布的電磁「場」，端看我們用什麼尺度來描述它，或說，用什麼工具來測量它。這兩種觀念之間的聯繫是，把空間中隨時間變化的電磁波，看成是某種簡諧震盪，加以量子化後，光粒子的性質便產生。

已，再也無法有適當的物理圖像，去想像什麼是光。

但仔細想想，我們在測量光的性質時，都是利用物質中的原子、分子來測量；更嚴格地說，是利用原子中的電子來「量」光的性質。在光和電子交互作用時，去觀察電子的變化，例如光電流，或原子中電子的躍遷。同時，古典電磁波理論也告訴我們，光來自於電子加速。因此，物理學家開始思考，以量子力學的角度，來了解電子與光交互作用的物理意義，恐怕才是理解「光」的最佳途徑。

另一位了不起的物理學家狄拉克 (Paul A. M. Dirac, 1933年諾貝爾物理獎得主) 想了一個辦法，解決上述如何理解光的難題。狄拉克嘗試結合相對論與量子力學的觀念來描述電子，電子

運動產生光子的過程便可理解。狄拉克的想法既嚴謹又富有美妙的物理圖像。根據他的想法，粒子(包含電子與光子)是可以產生與湮滅的，因此電子如果被某一入射電磁波擾動，可視為光子與電子進行交互作用的過程。

這樣的圖像雖可完美地描述，電子與「電磁波量子」的交互作用，卻又存在另一個隱憂，即，若電子是個不占有體積的傢伙，會有電子自身能量無限大的問題。這個問題後來由朝永振一郎、施溫格和費曼三人 (S. Tomonaga, J. Schwinger, R. P. Feynman, 1965年諾貝爾物理獎得主)，不約而同於40年代提出解決辦法。他們同時補充了一個新的觀念，即「真空」中也會有「光子」，這個真空中的光子一直在搔癢電子。這個想法後來也由

運動產生光子的過程便可理解。狄拉克的想法既嚴謹又富有美妙的物理圖像。根據他的想法，粒子(包含電子與光子)是可以產生與湮滅的，因此電子如果被某一入射電磁波擾動，可視為光子與電子進行交互作用的過程。

### 葛勞勃的貢獻—— 以量子角度看光同調性

諾貝爾獎得主間，似乎常存在「血統」關係。上述諾貝爾獎得主施溫格的諸多學生也拿了諾貝爾獎，其中葛勞勃即為今年物理獎得主之一。葛勞勃因為幫助人們利用量子的角度思考光的同調性而獲得此項殊榮；或說，他回答了前述的兩大問題：如何由光量子來看待古典電磁波的「相位」問題，以及如何理解已經沒有空

間座標觀念(光子是不停留的「粒子」)下,光量子的機率分布。

什麼是光的同調性?簡單地講,所謂「第一階」同調性是,當一個人觀察到波峰時,他最多可以確定  $t$  秒後,來到的是什麼波前(wavefront),我們便說這道光有  $t$  秒的同調時間(coherent time);或說,若有人告訴你,你告訴他某空間中一點的波前,他最多可以推論相距  $L$  公尺外,同樣光源來的光的波前是什麼,我們就說,因為這道光有  $L$  公尺的同調長度(coherent length)。

實驗上,當干涉儀兩邊的光程差,大到無法有穩定干涉條紋時,此光程差即同調長度(圖二)。一般手電筒的光源,大約只有幾毫米的同調長度,而市面上劣質的雷射筆則大約有幾公尺的同調長度,一般穩頻雷射可有大於十公里的同調長度。「第二階同調性」則不討論上述光相位之間的關聯,而改討論光強度之間的關聯。這對估算遠處星星的大小,是非常好用的工具,因為我們無法用干涉的方法,來進行星光相位的測量,但至少可量測

同時來到地球的星光,在不同地點下星光強度的關聯,藉以取得有關這顆星星的蛛絲馬跡。雷射最重要的特徵,就是光相位(或說波前的穩定度)比手電筒要好很多,加上空間相位的分布也穩定了,光的準直性就高,能量也容易集中,所以相位穩定可說是雷射光最美的一個性質;或說,雷射光是同調性很高的光源(愛因斯坦的激發輻射理論已預言了同調性高的雷射。)

但是,從光量子的角度來看,光或電磁波「相位」反而不好解釋。當量測的工具靈敏到只測量光子時,穩定的電磁波相位,對應的只是量子統計中的一個特殊的光子統計性質,或說,卜瓦松(Poisson)分布(圖三)。這時,專門講「相位」的第一階同調性,對光同調性質的描述已不敷使用。另一方面來說,當我們用光量子的角度討論「第二階同調性」時,會發現量子干涉效應對光量測的影響,造成與古典想法不符的實驗觀測。這也是葛勞勃的成就之一,即協助我們對光子「第二階同調性」的了解。

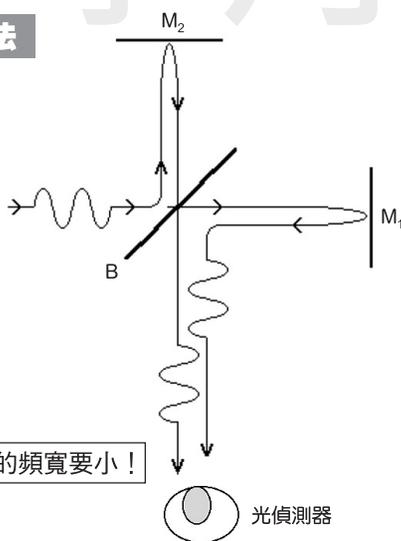
### 第一階同調性的古典想法

$$\Delta \tau = \frac{\Delta l}{c}$$

$$\text{相干時間} = \frac{\text{相干長度}}{\text{光速}}$$

欲有穩定的干涉,光相位的穩定為重要關鍵!

光的頻寬要小!



圖二：第一階同調性的古典想法。 $M_1$ 、 $M_2$ 為全反射鏡； $B$ 為半反射鏡。也就是,入射光有一半會跑到 $M_1$ ,另一半會跑到 $M_2$ 。各自走了一段路以後,回到 $B$ 又線性疊加在一起,最後反射至一個光偵測器。由於兩條路徑的光程差已經不同,因此線性疊加後,不會與一開始的入射光強度一樣。我們稱為第一階干涉。當兩條路徑光程差太遠,甚至無法形成穩定干涉,我們便說其具有相干長度(coherence length)。相干長度除以光速,即文中所說的相干時間(coherence time)。

## 霍爾與韓希的成就—— 高同調光源建造與應用



諾貝爾獎特別報導

有了光同調性的認識，我們就會問，如何建立一個高同調光源？答案是，建立一個穩頻雷射！我們知道，這世界上不可能有完美的單頻光，因為電子不可能永遠以固定的頻率震盪。因此可以想像，光源的頻寬太寬，光的波前一定跑來跑去，同調性一定差，如太陽光。

讀者或許會好奇，那要如何讓雷射的頻率穩定？如圖四所示，我們利用雷射光與物質作交互作用，發現當雷射頻率改變時，物質的某些特性也改變了，如所發出的螢光，或折射率的變化等。由於這些改變都與雷射頻率有關，因此我們可以藉由偵測這些改變，來回授控制雷射的頻率。霍爾等人在雷射剛研發成功時便想到這個點子，並研發出第一個穩頻雷射。

由於光速已經是定義值(299792458 m/s)，因此穩頻雷射相當於波長也是穩定的( $c=f\lambda$ )。也就是說，穩頻雷射的波長可以當作長度標準，同時，「時間」為頻率的倒數，若這個穩頻雷射頻率可以銻原子鐘為參考頻率〔註一〕，就能實現人類建立光鐘的理想。霍爾甚至曾經研究出小於0.001Hz 頻寬的雷射，相當於同調長度 1000 萬公里〔註二〕！

韓希與霍爾在穩頻雷射的應用，各自都做出很大的貢獻，如物理定律的檢測，及上述長度標準的建立等。舉例說明，韓希將之用於氫原子光譜的精確量測，同時是第一個想出用穩頻雷射做雷射冷卻的人。他的美國實驗室接手人朱隸文因雷射冷卻，得到了1997年諾貝爾物理獎；他的得意門生魏曼 (Carl E. Wieman) 因為將原子冷卻至波色 - 愛因斯坦凝結(又跟愛因斯坦有關!)，而於2001年獲得諾貝爾物理獎。因

此韓希得獎絕無僥倖。

同理，霍爾也在科學界作了許多精緻的實驗。例如，用穩頻雷射檢驗空間的均向性、用穩頻雷射檢驗相對論、第一個觀測到原子會因為光而有反彈、測量光速並與其同事 K. Evenson 等人一起建議讓光速為定義值等。韓希與霍爾是好朋友也是競爭者，霍爾就曾在我們面前讚歎，韓希是個非常聰明的科學家(筆者曾為霍爾的博士後研究員)。他們的友誼值得我們學習。

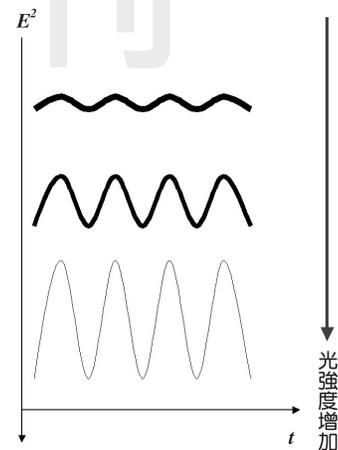
同調光子的特徵

是一種光子波函鎖模  
(mode lock of photon number states)

$$|\alpha\rangle_t = e^{-|\alpha|^2/2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\alpha e^{-i\omega t})^n}{\sqrt{n!}} e^{-i\omega n t/2} |n\rangle$$

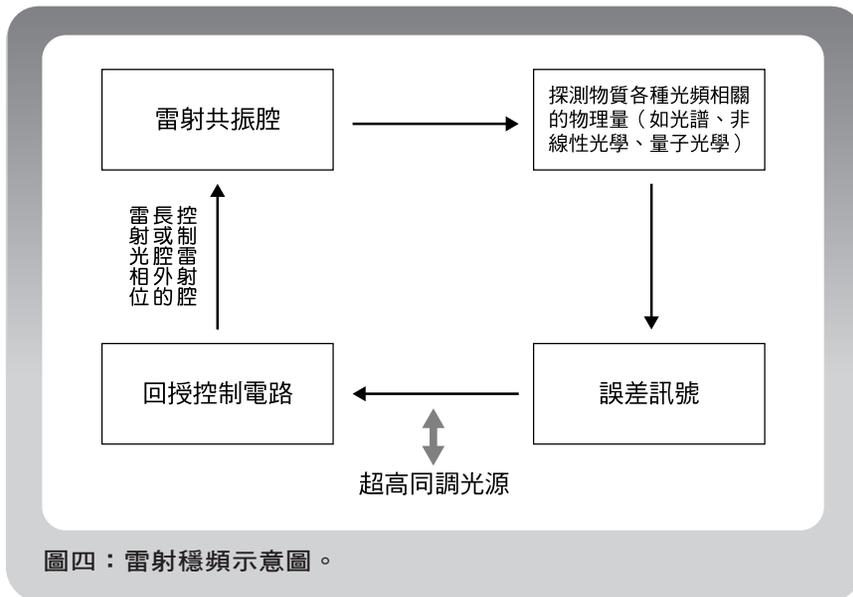
符合測不準原理的最小值，  
且不隨時間而變

$$\Delta q \times \Delta p = \frac{1}{2} \hbar$$



圖三：光子數目呈現卜瓦松分布，是量子光學中對同調光源的描述，圖中光子態的測量值即為光粒子數。當葛勞勃用「量子」的角度去看雷射光時，對他而言，完美的雷射光只是一群不同量子狀態光子的集體行為，而這些集體行為符合卜瓦松統計分布。

圖中， $\Delta q$  與  $\Delta p$  是把電磁波量子化，成為光子時，描繪光子狀態的等效座標與動量。當我們說光子是屬於「同調狀態」(coherent state)，指的是它們等效動量與座標的變動，恰符合測不準原理的要求。從古典的角度來看，也就是說，光的振幅與相位不可能同時被量得很準，而完美的雷射光，是這兩者最能被量準的極限。如上圖右方所示，當雷射光很弱時，測不準原理的影響便很大，隨著雷射光越來越強時，相位的誤差也相對的越來越小，越接近我們所認知的古典電磁波。



圖四：雷射穩頻示意圖。

在 1998~1999 年，韓希率先將脈衝雷射的頻率穩住，並量得其中一個雷射模的絕對頻率。此為光梳雷射的濫觴。

在 2000 年，霍爾實驗室的研究群在不需要任何參考雷射下，發展出製造光梳雷射的新方法。這個光梳雷射的發明，成為霍爾獲得諾貝爾獎的主要原因。飛秒光頻梳雷射到底是什麼？為何重要到可以拿諾貝爾獎？

## 光梳雷射的原理 與其重要性

雷射在發明之初，於學術界的應用就已分為兩個主流：一為頻寬超窄的穩頻雷射，一為頻寬超寬且時間超短的脈衝雷射。穩頻雷射的性質已在前文提過，而超短脈衝雷射就像是超快的快門一樣，只讓我們看到  $10^{-13}$  到  $10^{-15}$

秒的光一閃而過〔註三〕。脈衝雷射在化學及非線性光學上有重要的應用，穩頻雷射則在探討物理定律與計量學上有重要應用。因此，這兩個性質極端不同的雷射，似乎永遠不可能碰在一起。

如前所述，頻寬很寬的光波如太陽光，不可能有很穩定的波前。在五年前，一般人很難想像，有一支雷射可以頻寬很寬，又可以波前很穩定。韓希與霍爾則很巧妙地，將二種雷射美好的性質連接起來。目前，我們稱此種雷射為飛秒光頻率梳雷射 (femto-second optical frequency comb laser，本文簡稱光梳雷射)。要解釋其原理，就得先從什麼是鎖模雷射說起。我們知道，要是雷射介質可以很寬頻的放大光，則，只要符合雷射共振腔駐波條件的光，都會形成雷射輸出。這是寬頻雷射的第一步。

我們又知道，光就是電磁波，電磁波可以線性疊加，若剛好每種頻率的波峰都對到彼此的波峰，就會有最大光強度的加強性干涉。其他部分由於不同頻率、不同相位，平均起來便幾乎沒有光，因此在這一瞬間形成超短脈衝。如果人為可以使得不同頻率的雷射光，兩兩拍頻的相位都是固定的，那麼上述超短脈衝便會有規律的形成與重複，我們稱這種技術為鎖模。

鎖模雷射的每個模絕對頻率並非固定，它們可以一起飄移。有人說，這簡單，把其中一個模穩在一個頻率已知的穩頻雷射上，則所有模的頻率就都知道了。沒錯，但是一般鎖模雷射大約有 100 萬根模，每個模的能量大約 0.0000004 瓦，怎麼找出拍頻來鎖？1999 年韓希實驗室團隊還是做到了。因此鎖模雷射的每個模的頻率在頻率軸上有序排列，都不會動，如同梳子一樣，因此被稱為光梳。

但這樣的光梳雷射，有一個不方便的地方，必須要有一個絕對頻率已知的穩頻雷射作為參考雷射。原因是，鎖模雷射第  $n$  個模假設頻率為  $f_n = n\Delta + \delta$ ，其中  $\Delta$  與  $n$  的值都容易判斷，如果沒有一個絕對頻率已知的穩頻雷射



## 諾貝爾獎特別報導

的話， $\delta$  值無法得知。霍爾想了一個辦法，不須多加任何雷射便能將上述的  $\delta$  值找出來。如圖五，第  $2n$  個模頻率為  $f_{2n} = 2n\Delta + \delta$ 。因此，若能把雷射第  $n$  個模倍頻，與第  $2n$  個模產生拍頻，即  $2f_n - f_{2n} = (2n\Delta + 2\delta) - (2n\Delta + \delta) = \delta$  如此便可取得  $\delta$  的訊息而控制到  $\delta$  等於零。

這個想法似乎很簡單，但當時哪有一個鎖模雷射，能夠寬頻到還可以有第  $2n$  個模？〔註四〕。幸好在 1999 年，美國 Lucent 公司研發了一種光子晶體光纖，可使雷射頻率變寬。因此圖五的點子變成可能。而這種光子晶體光纖輸出光，經過三稜鏡後顯示的頻寬，相當於彩虹！

很難想像，有一個光源具有燈泡的頻寬，又有雷射的同調性。當此脈衝雷射的絕對頻率像銻原子鐘一樣精確，人們相當於擁有幾百萬支光鐘！我們知道，光纖及通訊技術可以把「光鐘」的精確度到處傳送，這對於全球衛星定位的精確度尤其有幫助。

光梳雷射技術在這兩年有長足的發展。筆者於中央研究院原子分子研究所，已將光梳雷射鎖於脈衝雷射增益較大的波長，822nm 銻原子雙光子吸收的譜線上。光纖光梳已在前年由霍爾的同事，於美國國家標準局研發成功。台灣的工業研究院彭錦龍博士實驗室，也完成高穩定的光纖通訊波段之光梳雷射。而韓希的

研究團隊與接手霍爾實驗室的 J. Ye (葉軍) 團隊，亦於今年相繼發展出真空紫外光梳。

## 又過了一關

今年 7 月，筆者有幸與霍爾參與一個研討會。他跟筆者談起，現在美國年輕人怕累，很多人不作精密量測。我問他，你為什麼不覺得累？他說，他把實驗的精確度推進一個數量級時，便常了解別人看不清楚的現象，感覺非常好玩，好像打電動玩具又過了一關。他說：「你有聽過年輕人打電動玩具喊累的吗？」

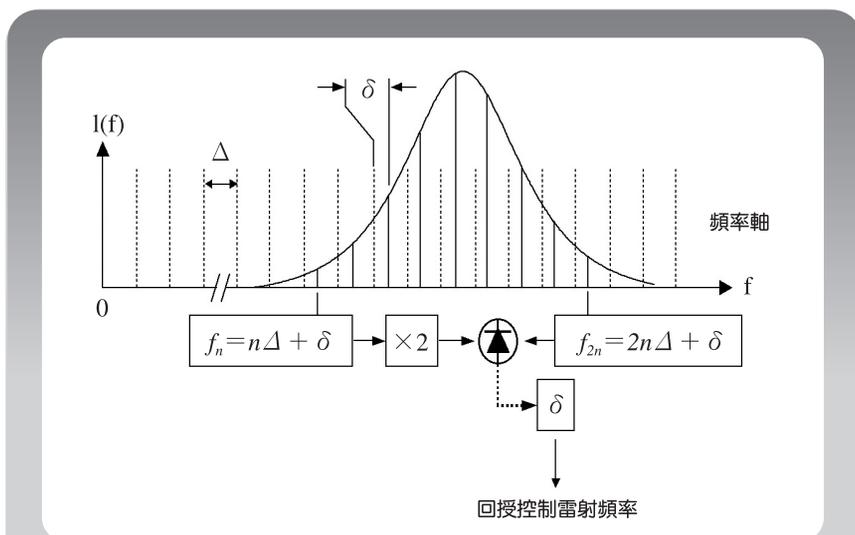
註一：這並不容易做到，銻原子鐘頻率  $\sim 10^{10}$  Hz，但光頻為  $\sim 5 \times 10^{14}$  Hz，頻率差了五萬倍。

註二：最近日本東京大學以超冷光晶格 (optical lattice) 穩頻，可做到比這個記錄還小的雷射頻寬。

註三：目前的發展是，可以做到  $< 10^{-15}$  秒的脈衝雷射，科學家稱之為 atto-second。

註四：現在是可以做到一個鎖模脈衝雷射就有這麼寬頻，而不需要任何光纖。

鄭王曜：中央研究院  
原子與分子研究所助研究員



圖五：虛線為鎖模脈衝雷射每個模，由絕對頻率等於零算起的頻率分布， $\Delta$  表示每個雷射模的頻率間隔。很可惜，大部分真實的鎖模脈衝雷射，每個模的絕對頻率與虛線都存在一個  $\delta$  的誤差。因此實驗的方法是，將第  $n$  個模倍頻，在與第  $2n$  個模的頻率相減，得出  $\delta$  值再回授控制雷射頻率使其  $\delta$  等於零。