



## 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，進行各類高精密基礎物理的研究。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



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。

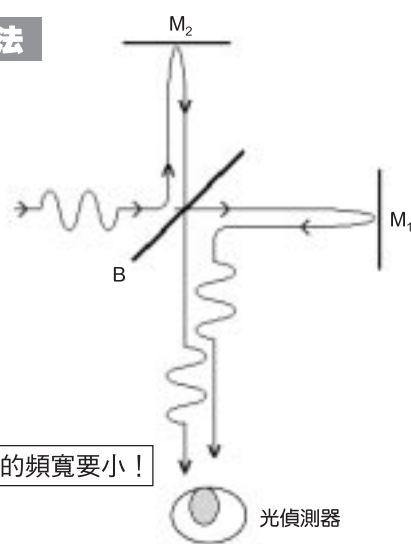
### 第一階同調性的古典想法

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

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密量測，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。

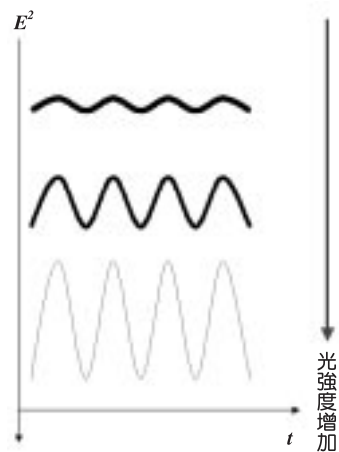
### 同調光子的特徵

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

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

符合測不準原理的最小值，  
且不隨時間而變

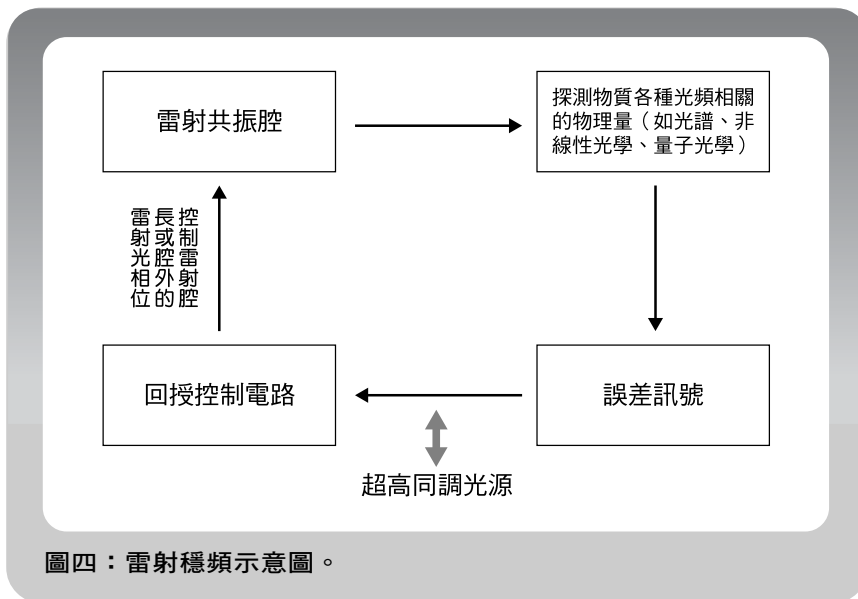
$$\Delta q \times \Delta p = \frac{1}{2} \hbar$$



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，圖中光量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把上述的  $\delta$  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鈹原子鐘一樣精確，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 鈹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？」<sup>⑤</sup>

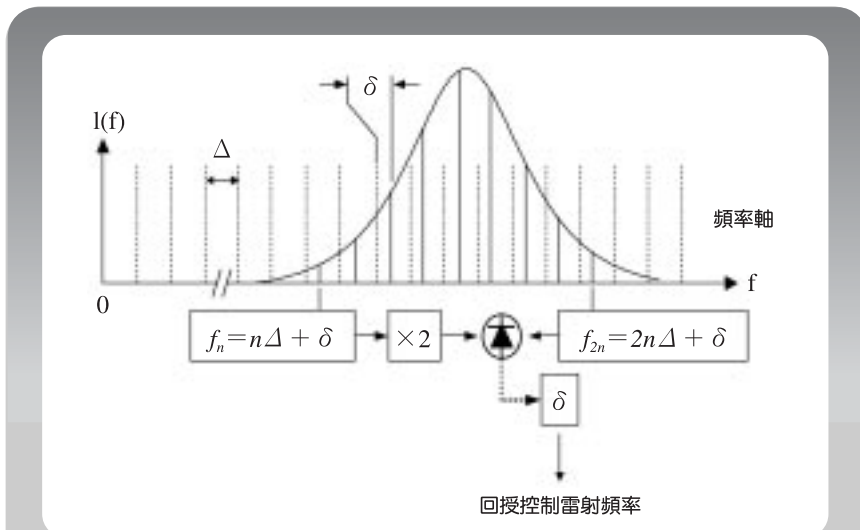
註一：這並不容易做到，鈹原子鐘頻率  $\sim 10^{10}$  Hz，但光頻為  $\sim 5 \times 10^{14}$  Hz，頻率差了五萬倍。

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。