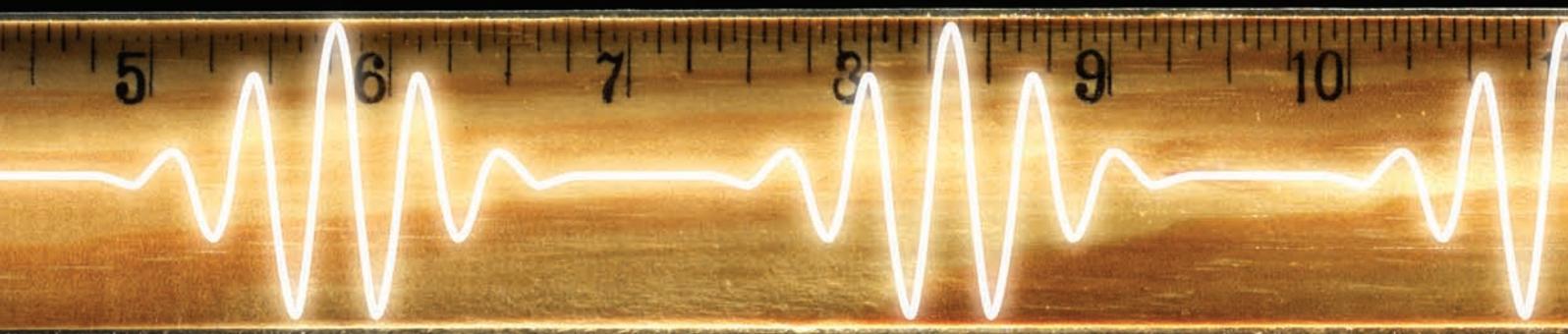


度量時間，



革命性的雷射光——光頻梳登場了，
它可以做出至今最準確的原子鐘，應用潛力無窮。

眨眼間，可見光波就振盪了 10^{15} 次，這麼大的數字提供了機會，也帶來挑戰。機會指的是它在實驗上或是其他方面具有無窮的應用潛力，而應用的重點在於我們能利用它來把頻率及時間測量得極為精確。科學家可以將這種技術用在自然律的一些最佳驗證上，此外它也是全球定位系統（GPS）所依賴的科技。最主要的挑戰則是，一般適用於測量較低頻電磁波（例如微波）的技術無法用在光波上。

由於雷射物理近10年來的革命性進展，研究人員現在已經掌握了可以讓高頻可見光發揮潛能的技術，這在以前是做不到的。明確地說，科學家發展出了一些工具，來操縱一種稱為「光頻梳」的雷射光。它就像一把多功能的光尺，上面有數萬或數十萬個緊密間隔的「刻度」，能對

光做極精密的測量。這種光頻梳可以當成一座橋樑，連接微波到可見光間的巨大空隙：藉由光頻梳，可以將準確的微波測量轉換成同樣準確的可見光測量。

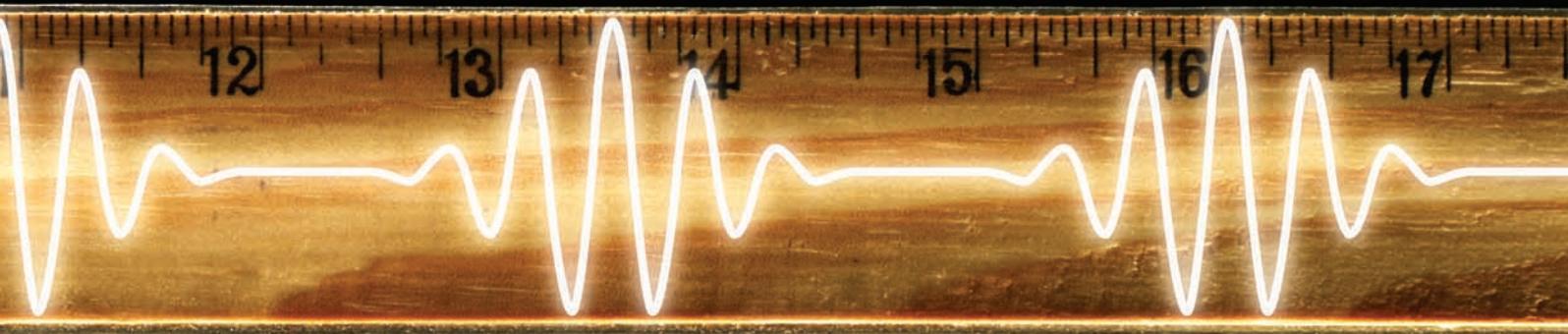
許多應用正蓄勢待發。用光頻梳可以做出更準確的新一代原子鐘、超靈敏的化學偵測器，以及使用雷射控制化學反應的方法，也可以大幅增加雷射雷達（或稱光達，以光偵測並定距）的靈敏度和偵測範圍，以及光纖裡傳遞的訊號量（見56頁〈光頻梳技術妙用多〉）。

光頻梳技術可以用非常簡單的方式以極高的精確度測量光的頻率。在20世紀，這種測量得用上一整個博士團隊，操作佔滿好幾個房間的單頻雷射，現在則只要一位研究生，使用一個簡單的光頻梳儀器就能得到類似的結果。這種簡化也促成了新型的光學原子鐘：就像祖父級的時鐘需要

重點提要

- 一種稱為光頻梳的新型雷射可以更準確、更方便地測量光的頻率以及時間的間隔。
- 這種光頻梳是由等間隔的超短脈衝雷射波列形成，它的頻譜看起來像數以萬計的「梳齒」。
- 它可以應用在更精準的原子鐘、超感度化學偵測器、雷射控制的化學反應、光纖的高容量電信傳輸，以及改良雷射雷達。

以光為尺



撰文／康帝夫 (Steven Condiff)、葉軍 (Jun Ye)、霍爾 (John Hall)
翻譯／張明哲

用齒輪來記錄鐘擺擺動，進而緩慢轉動指針一樣，光學原子鐘使用光頻梳來計算光波的振盪數，將它轉換成有用的電訊號。就在2007年，研究人員利用光頻梳，超越了幾十年來一直最準確的鈹原子鐘。

光頻梳帶來的變革，某種意義上就像100年前發明示波器一樣。示波器讓信號被直接看到，宣告了現代電子技術的來臨，促進了許多產品的發展，例如從電視到今天的iPhone。不過，光的振盪比最快的示波器所能顯示的還快一萬倍，有了光頻梳，現在我們也能看到光波的波形。

要應用光頻梳，人們必須能在寬廣的頻率範圍裡敏銳地操縱光波。人們很早就有能力操縱無線電波，但是最近才開始能對光做同樣的事。以音樂來做比喻比較容易了解：在光頻梳發展之前，雷射產生的是單色光，就像單一的調子。它們像是只有

一根弦而且沒有指板的小提琴，只能奏出單一音調（先不管音調其實比純音要來得豐富）。所以要演奏一首簡單的曲子，就需要用到許多不同的樂器，每個都得費力校準。每把小提琴需要一位演奏者，就像每支單頻雷射都需要一位操作者。

相較之下，使用光頻梳，只要一位操作者就能涵蓋整個光譜。這不只像是鋼琴的演奏家，更像是電子合成樂器的演奏者，在程式化之後可以模擬任何樂器，甚至整個交響樂團。實際上，光頻梳技術可以讓數10萬種單色光同時合鳴。

以鎖模雷射為本

光頻梳是由一種稱為鎖模雷射的裝置產生的，它可以產生超短光脈衝。要了解這種脈衝的重要特性，得先了解另一種主要形式的雷射光——連續波 (CW) 雷

雷射脈衝可以當成「光之尺」，科學家將之用來準確測量其他雷射的頻率。

光頻梳技術妙用多



◀光學原子鐘

1967年以後，做為計時標準的原子鐘是以微波為基礎，光學原子鐘的性能更為優異，是目前最精準的時鐘。它在太空導航、衛星間通訊、基礎物理的超精密測試，以及其他的測量上都扮演重要的角色。

化學偵測器

研究人員以光頻梳做出了超感度化學偵測器，現在正在發展商用儀器的雛型。光頻梳做的偵測器讓安全人員可以快速辨認爆裂物及危險的病源。醫生可以由病人呼出的氣體偵測化學成份，診斷疾病。



◀超級雷射

藉著光頻梳技術，可以將許多雷射輸出拼湊成單一脈衝波列，其中的光就像由同一支雷射射出來的一樣有秩序（同調）。將來人們應該可以讓電磁頻譜從無線電波到X射線都彼此同調。

通訊▶

光頻梳可以讓單一光纖裡的信號量增加好幾個數量級，它只需用到一個光頻梳，而不必使用許多支個別的雷射。因此，頻道間的干擾可以降低，通訊也更為安全。



◀化學設計

科學家正在研究如何利用同調的雷射光來操控化學反應，光頻梳可以讓這種技術更好預測，並且更可靠，它對於發展一種稱為超冷化學反應（ultracold chemical reaction）的新技術也會很有幫助。有朝一日，光頻梳將可以操縱生物反應，這比化學反應要來得複雜許多。



雷射雷達

雷射雷達又稱光達，主要功用是以雷射光定出遠處物體的位置、速度和特性。藉著產生使用者自訂的波形，光頻梳將可以讓雷射雷達的靈敏度及偵測範圍增加好幾個數量級。

射。理想中，CW雷射的光波是一連串無止盡的規律振盪（代表光波的電場），每個波峰與波谷都有相同的振幅，以不變的速率抵達。相較之下，鎖模雷射的脈衝是一小串的波峰與波谷，振幅先從零升到極大，然後再降到零（見57頁〈光做的梳子〉）。最短的脈衝時間可以僅僅不到10飛秒（一飛秒為 10^{-15} 秒），其中的光波只完整振盪了幾次。脈衝先升起再下降的大致圖形稱為波封（envelope）。我們可以把

脈衝想成早先的連續波（稱為載波），只是波的振幅要再乘上會改變高度的波封。

載波的光只有一個頻率，其光譜只會在那個頻率有一個峰值，代表那個單一頻率。你可能會猜想脈衝應該也是只由那個頻率的光所組成的，畢竟它只是振幅會改變的單頻載波。不過，波和頻譜不能以這種方式理解，其實脈衝是由許多頻率的光所構成的，它們一起移動。這些頻率形成一個小而連續的帶狀分佈，載波的頻率位於中心，脈衝越短，頻率的分佈就越廣。

鎖模雷射所放出的脈衝另有兩個特徵，成為發展光頻梳的關鍵。第一，將載波上的波封稍微移位，會產生稍微不一樣的脈衝。脈衝波封的極大值可能會和載波的波峰一致，但也可能偏移，這種偏移稱為脈衝的相位。

第二，鎖模雷射以很規則的頻率（稱為重複率）放出一連串脈衝。這種脈衝波列的頻譜並非在載波頻率的兩側形成連續的分佈，而是散成許多分離的頻率。頻譜畫出來就像髮梳上的梳齒，梳齒的間隔正是雷射的重複率。

一般的重複率約為10億赫茲（每秒鐘10億個週期），比現代電腦處理器的頻率稍微低一點。一個橫跨可見光譜的光頻梳，如果梳齒間隔為10億赫茲，則會有40萬根。科學家使用可以依次偵測每個脈衝的高速光電偶，很準確地測量出10億赫茲（微波）範圍的重複率，而光頻梳就藉此將這種準確度提升到可見光波長。如果是這樣，為什麼不拿光頻梳的梳齒當測量的參考點呢？

因為有個跟相位有關的麻煩。如果波列裡脈衝的相位都完全一致，就沒有問題，因為這時梳齒的位置都會準確落在重複率的整數倍。因此，只要你測出雷射的重複率，就可以知道梳齒的位置。

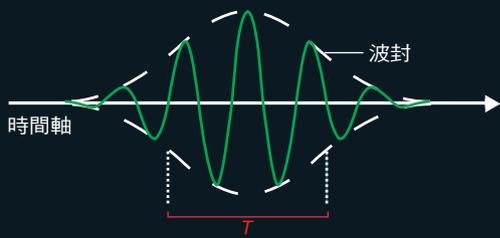
然而，通常發生的是，從一個脈衝到下一個脈衝，相位會以大小固定、但不可預測的方式改變（見59頁〈「校正」光頻

光做的梳子

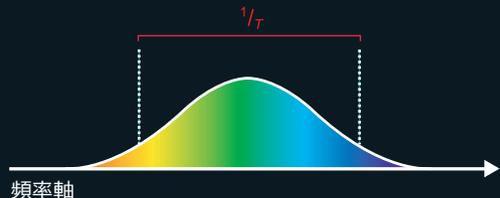
光頻梳是由一連串幾乎相同而且等間隔的雷射脈衝所組成的，與單一脈衝的連續帶狀頻譜不同，它的頻譜是由等

間隔的尖刺所組成的，所以這種光稱為光梳，在做精密測量時很有用。

光波

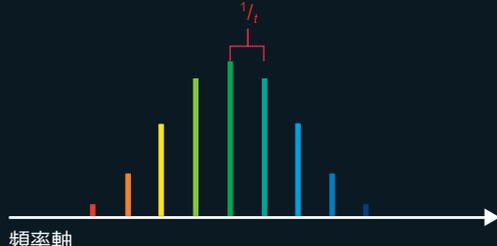
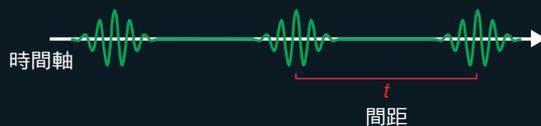


頻譜



單一脈衝

雖然雷射脈衝的電場（上方綠色）等間隔震盪，但是這種脈衝裡的光並非單頻，只有當這光是由帶狀的頻率（下圖）所組成的時候，其波封（點線）才會先升後降。脈衝越短（上圖， T ），則頻譜越寬（下圖， $1/T$ ）。歷時一飛秒的脈衝，頻譜寬度（兩側末端不計）約為可見光譜的一半。



多重脈衝

你可能會以為脈衝波列（上圖）的頻譜和單一脈衝一樣。實際上，波列的頻譜會分裂成梳狀的尖齒（下圖），也就是說，它的頻譜是由分離的頻率所組成的，而不是連續的帶狀。如果每隔 t 奈秒有一個脈衝，則頻譜的梳齒間隔會是 $10/t$ 億赫茲。因此，研究人員藉著測量雷射脈衝的間隔，就可以知道梳齒的間距。

梳))。這時候，梳齒的頻率不再是重複率的整數倍，偏離的大小稱為偏移頻率 (offset frequency)。想知道梳齒的頻率，就必須測出偏移頻率及重複率。難以測量偏移頻率這個問題曾阻礙光頻梳的進展，但這個障礙在2000年突然消失了，原因是科學家結合了兩個雷射方面的研究成果，而且發現了一種新的材料。

實現光頻梳構想的寶石

過去40年，那些致力於製造及應用超短脈衝雷射的研究人員，大多忽略了脈衝的相位，以及理論上理想的脈衝波列應有的梳狀頻譜。他們的實驗通常只用到單一脈衝的強度，這時相位不會有作用。雖然這些超高速研究社群的成員常會去測量鎖模雷射的頻譜，但是解析度幾乎都不夠，沒法看到裡頭的梳狀譜；這些譜線會合在一起，看起來就像連續的帶狀頻率分佈。

高解析度測量是精細光譜及光頻度量衡專家的專長，他們比較喜歡用高穩定度的CW雷射。如前所述，CW雷射會產生單一準確頻率的穩定光束，它的頻譜就像一根尖刺。度量衡社群裡的專家，知道鎖模雷射如何作用的並不多，少數知道的人也很懷疑這種雷射能否實際產生清楚的梳狀頻譜，他們預期，脈衝在時間或相位上少量的擾動就會將梳狀頻譜抹除。

不過有少數人，其中最重要的是德國馬克士普朗克量子光學研究所的赫恩希 (Theodor W. Hänsch)，他對鎖模雷射一直深具信心，認為有朝一日它能成為高精光譜及有用的度量衡工具。1970年代，赫恩希還是美國史丹佛大學的教授時，他就曾以鎖模染料雷射（以液體染料為介質產生的雷射光）做出一系列的測量，建立了光頻梳及其偏移頻率的基本觀念。這些種子沉寂了將近20年，直到雷

關於作者

康帝夫、葉軍以及霍爾各有不同的背景，但是一起合作發展及應用飛秒光頻梳。霍爾以超穩定的連續波 (CW) 雷射做精密測量超過40年，是其中的佼佼者。2005年，他因為這項成就，包括對光頻梳技術的研發得到諾貝爾獎。葉軍從15年前開始致力於研究超穩定CW雷射，不過在光頻梳技術興起之後，他就一直在更廣泛的超快科學領域裡有傑出貢獻。10年前，在還沒和霍爾及葉軍合作之前，康帝夫研究的是超快科學，主要跟光譜有關，但也做鎖模雷射。三人都是實驗天文物理學聯合學院 (JILA) 的傑出學者。



兩支音叉，其中一支的音調有點不準，則其合鳴會產生拍的現象：音量的大小隨著拍頻而忽大忽小，而拍頻等於兩支音叉的頻率差。光波的拍頻現象可應用在各種雷射測量，包含那些運用光頻梳的。

一秒鐘的定義

有朝一日，光頻梳會成為正式的時間標準。

- 現今的標準是讓銫原子吸收微波輻射，讓它在兩個特定的「超精細」結構間躍遷。
- 這種光振盪9192631770次的時間定義為一秒。
- 時間的光學標準是採用某特定原子或離子放出或吸收的光，其頻率約為銫原子的六萬倍。

射技術的進展足以進一步改良光頻梳，才得以開花結果。

1980年代末，美國史瓦茲光電研究所的摩爾頓（Peter Moulton）以摻雜鈦的藍寶石為雷射增益介質，做出了大頻寬的雷射。1990年代早期，蘇格蘭聖安德魯斯大學的西貝特（Wilson Sibbett）首先將它用在鎖模雷射上。之後的短短幾年間，鈦-藍寶石雷射已被廣泛用來產生短於10飛秒的脈衝，10飛秒內光波只振盪了三個週期。

有了這些鈦-藍寶石雷射，赫恩希就將他20年前的光頻梳想法重新拿出來。他在1990年代晚期做了一系列的實驗，證明了鎖模雷射的潛力。在其中一個測量裡，他展示了在輸出光譜兩端的梳齒線可以有明確的相對位置。這顯示了這些梳齒就像鋼尺上的刻度般準確。在另一個實驗

裡，他以鎖模雷射跨過兩支CW雷射的頻率差距，測量出銫原子裡某個光學躍遷的頻率（能態的改變會導致以準確的頻率吸收或放出）。他的結果激發了我們一群人開始認真研究這個領域。

實驗天文物理學聯合學院（JILA）是美國國家標準與技術局（NIST）和科羅拉多大學波爾德分校的合組機構，提供我們得天獨厚的能力，可以結合雷射物理裡這兩個主題的尖端技術。JILA在光頻度量衡及精細光譜上的基礎扎實，主要用的是超穩定的CW雷射，這是作者之一霍爾在過去40年發展出來的。1997年，另一位作者康帝夫加入JILA，帶來了鎖模雷射及短脈衝技術的專長。經過許多次在走廊及午餐桌上的討論之後，我們克服了觀念上的歧異，決定共同合作，另外參與的還有兩位博士後研究員：目前在NIST的地丹斯（Scott Diddams）以及在加拿大卑詩大學的瓊斯（David Jones）。第三位作者葉軍在1999年夏天加入JILA，這時革命剛全力開展，他很快就率先找出新光頻梳的各種應用。

就差這條光纖

我們很佩服赫恩希的研究結果，同時亦深知他的動機在於想將複雜的儀器簡化。然而，要達到這個目的，需要能以鎖模雷射產生極大的頻寬，最好是能達到一個八度。（不管是在音樂、電子或是光學裡，一個八度指的都是跨越兩倍的頻率。）雖然那時候鈦-藍寶石雷射的帶寬已經很寬了，但它還是沒法產生一個八度寬的光。

在1999年的雷射及光電會議上，最後的一塊拼圖被找到了。美國貝爾實驗室的藍卡（Jinendra Ranka）發表了一篇論文，內容談的是一種稱為微結構光纖的新型光纖。在這種光纖介質裡，微米大小的空洞會引導著光沿中心行進。這種光纖的特性使鈦-藍寶石雷射產生的脈衝在行進時不會被拉長（在一般光纖及其他大多數的光

介質裡都會如此)。這可以維持住脈衝的高強度，連帶可以產生比一般光纖裡多得多的頻譜寬度（見2007年1月號〈雷射白光〉），並且造成很炫的視覺效果。鈦-藍寶石雷射產生的是近紅外光，恰好在人眼能看到的範圍之外，眼睛只會看到微弱的紅光。微結構光纖裡變寬的頻譜會將微弱的紅光轉為可見光波長，以彩虹般的各種顏色照亮光纖。

1999年秋天，我們獲得了一些這種神奇的光纖。時機再巧不過了，因為我們才剛完成一系列的實驗，以鈦-藍寶石雷射跨越了比當初赫恩希的結果還寬三倍的頻率空隙。我們的儀器已經準備妥當，幾乎只要把新的微結構光纖放進去就完成了。收到貝爾實驗室寄來的快遞包裹之後兩個星期內，我們已經做了一個實驗證明原理

終極呼氣偵測器

光頻梳或許可以用來快速偵測一個人呼出的氣體裡的分子，進而診斷身體的各種狀況。

甲烷：肝及腎的疾病

氨：腎臟問題

乙烷：某些癌症

碳同位素比例：幽門螺旋桿菌

可行。這顯示了在微結構光纖裡，變寬的頻譜仍得以維持住原來雷射脈衝裡的頻率梳結構。

頻譜跨越八度的重要性在於，它使得我們能以無線電波頻率直接測量偏移頻率，因此可以克服前面所提的、使用光頻梳測量其他頻率所遇到的障礙。在一個跨越八度的頻譜裡，有許多特定的方法可以定出偏移頻率，其中幾種使用的都是高速計數器普及以前，無線電工程測量頻率的技術。（計數器只是計算每單位時間裡無線電波的週期數，它無法應付較高頻的光波。）我們現在介紹測量偏移頻率的方法裡最簡單、用途也最廣的一種——自參引技術（self-referencing）。

關鍵的想法是，一個橫跨八度的頻譜讓科學家可以比較光頻梳兩端的梳齒的頻

讓它發揮功用

「校正」光頻梳

某種微妙的效應會改變梳齒的頻率，使其稍微偏離。在以光頻梳測量另一道雷射光之前，科學家必須先修正這種偏移。

難題

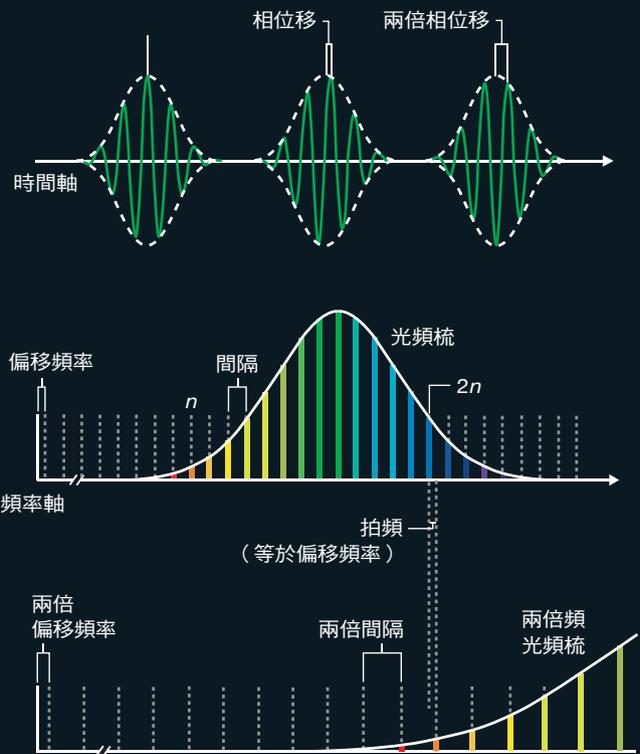
在一串脈衝裡，相對於波封的最高點，脈衝波振幅最高點的位置會變動，這稱為相移效應。

光頻梳如何改變

相移效應造成光頻梳梳齒頻率的移動，移動的幅度稱為偏移頻率。梳齒的位置是偏移頻率加上梳齒間隔的整數倍。一種稱為自參引的技術可以定出偏移頻率：它得讓光頻梳跨過整個八度——跨越的範圍從一個頻率（紅色， n 線）到其兩倍頻率（紫色， $2n$ 線）。

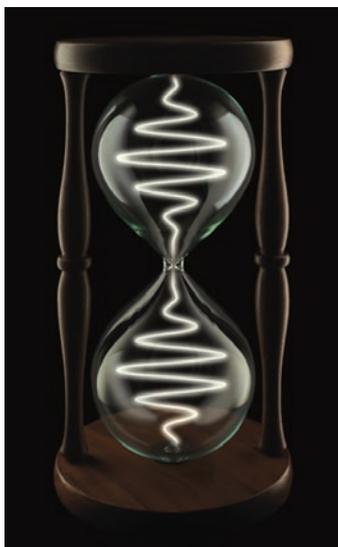
解法：比較光頻梳

研究人員讓部份光頻梳的光通過一個晶體，產生兩倍頻的光頻梳譜線（以及其他一些沒畫出來的線）。由於低頻的譜線經過倍頻後會和原來的高頻譜線相差一個偏移頻率，所以結合兩者後會產生等於偏移頻率的拍頻。將它測量出來後，研究人員就可以知道光頻梳的準確頻率。



時間狂

正當科學家以光頻梳技術發展原子鐘時，傳統原子鐘已經成了業餘科學的工具。在 www.leapsecond.com/great2005 網站上，范巴克 (Tom Van Baak) 描述他如何帶著三個原子鐘，和家人開車上美國華盛頓州的雷尼爾峰旅遊，同時觀察是否如廣義相對論所預測，重力會造成時間延遲（他們的旅程會延遲22奈秒）。



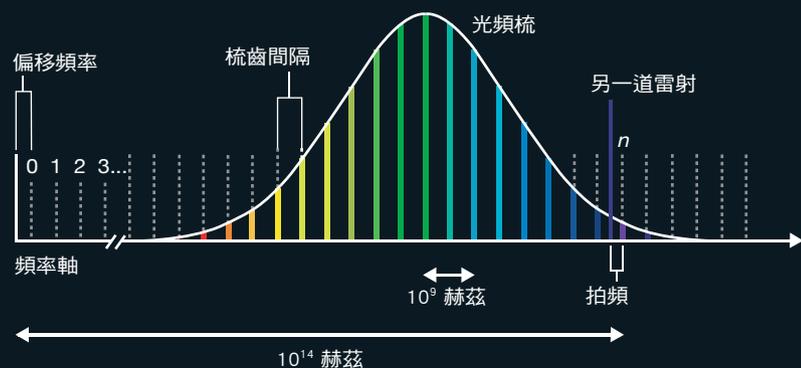
率。如果偏移頻率是零，則在光譜低頻端的每根譜線都可以在高頻端找到兩倍頻的對應譜線。偏離這個倍數的任何數值都會剛好是偏移頻率（見59頁〈「校正」光頻梳〉）。這種方法稱為自參引的原因是光頻梳的光是和自己比較。

實際上要做出自參引，得讓部份的雷射光通過所謂的倍頻產生晶體，它會讓光的頻率加倍。因此，我們可以用一面只會反射長波長，但是讓短波長的光通過的鏡子，先分離出光頻梳低頻部份的光，然後讓它通過倍頻晶體，最後將它與光頻梳高頻端的光射向同一個光偵測器。結合後的光在強度上會振盪，也就是形成「拍」。這就像你將一個調好的音調與另一個不準的音調結合後，會產生拍的現象一樣。在光脈衝裡，拍的頻率和光頻梳的偏移頻率一樣，因為每條低頻譜線經過倍頻後，都會和對應的高頻譜線相差這個頻率。在電子和光學技術裡，這種結合信號以引出拍頻的過程稱為外差檢波 (heterodyne detection)。

應用層面

測量光波

為了定出另一道雷射（紫色）的頻率，物理學家將它的光與光頻梳結合，然後測量最靠近的光頻梳譜線 (n) 所造成的拍頻。由標準但是較不準確的技術，他們可以知道雷射大概的頻率，所以可以推測最接近雷射頻率的梳齒是哪一根。因此，藉著測量出三個位於10億赫茲範圍的頻率：偏移頻率、梳齒間距以及拍頻，研究人員可以很精確地定出範圍在100兆赫（等於 10^{14} 赫茲）左右的光的頻率。



讓世界重新對時

只有和較早的技術比較，以光頻梳做的光頻度量技術的簡易性才容易彰顯。簡單地說，這些較早的技術是由倍頻鏈所組成的，鏈結裡的每一環有個振盪器，其頻率是前一環的倍數。鏈結裡的第一環是鉀原子鐘，它被用來做為一秒鐘的國際時間標準。鉀原子鐘根據的是鉀原子所吸收的90億赫茲微波，要從90億赫茲一路升到可見光（差了至少四萬倍）需要用上十幾個環節，每一個環節使用的是不同的技術，包含用到可見光雷射。操作這些鏈結很耗費資源及人力，所以全世界只有幾座，不定時地在做這些測量。除此之外，在做頂級光頻測量時，操作上有太多鏈結也會削弱精確度。

穩定的光頻梳發明之後，要準確測量CW雷射的頻率就容易多了。和頻率鏈一樣，光頻梳所做的頻率測量仍必須與鉀原子鐘比較。我們很快就發現，要使用光頻梳來決定一條雷射譜線的頻率，所需要的只是一台能夠測量到90億赫茲頻率的鉀原子鐘。我們必須先知道光頻梳的一些資訊。首先，前面討論過，必須測量光頻梳的偏移頻率及譜線的間隔。從這兩個數字就可以算出光頻梳裡所有譜線的頻率。其次，未知的雷射光必須與光頻梳結合，讓雷射光與最靠近的光頻梳線形成拍頻（也就是頻率差）。

這三個頻率都在微波的範圍，所以可以用鉀原子鐘極為精確地測量出來。還記得光頻梳譜線的間隔和產生光頻梳的脈衝的重複率相同。大多數鎖模雷射操作的重複率都小於100億赫茲，所以很容易以鉀原子鐘測量。偏移頻率及拍頻也在鉀原子鐘測量可及的範圍，因為它們一定比光頻梳譜線的間隔小。

還需要決定兩個數據：未知的雷射光最接近哪一條光頻梳線？還有是在它的左側還是右側？一般的波長計測量光譜線的頻率可以準到10億赫茲以下，足以回答這

兩個問題。如果沒有波長計，你也可以有系統地改變重複率及偏移頻率，然後觀察拍頻的改變。數據夠多之後，你就可以分析出譜線的位置。

簡易的光頻梳不只讓世界各地的科學家更常做這些極端精確的頻率測量，更可以大幅降低測量的誤差。由於這些優點，有朝一日人們可能會以光做時間的標準，取代現有的微波銻原子鐘。由於有這個想法，NIST的柏魁士（James C. Bergquist）以及JILA的葉軍帶領的小組，使用以光及光頻梳產生輸出訊號的鐘，並測量和它有差異的頻率。這些鐘裡頭最好的幾個的量測誤差，已經低於那些使用最佳的銻原子標準的鐘了。目前的發展令人振奮，世界各地的許多實驗室都在建造足以超越幾十年來主要頻率標準的新光頻標準。NIST裡侯博格（Leo Hollberg）的小組所做的測量，都顯示了光頻梳的內在極限比起現有光頻量測的誤差還要小好幾個數量級。

潛力無窮

不過，未來還要好幾年才會採用光時間標準。度量學家得先小心的測出許多原子及離子的光學躍遷頻率，然後選出一個最適合當標準的。

光頻梳除了有許多實際的應用之外，基礎的光頻梳研究正朝著許多領域推進。例如，葉軍的小組可以使用單一光頻梳同時很靈敏地偵測許多原子及分子的不同躍遷。因此，一個原子的完整能量狀態可以一次就測出來。除此之外，這種技術可以用來偵測樣品裡的許多微量元素。

光頻梳技術對下列的研究已經產生很大的衝擊：原子及分子放在高強度、超短光脈衝的強大電場裡會有什麼反應？許多這方面的工作是由赫恩希的合作者克勞茲（Ferenc Krausz）帶頭，他現在在馬克士普朗克量子光學研究所。除了其他的成就之外，他的小組以電子的反應來測量超短脈衝雷射的電場並測量出波形，就像在示

祖父級的時鐘使用大小不一的齒輪，將穩定的鐘擺搖晃運動轉換成緩慢而精確的指針運動。光頻梳的作用有點像「齒輪」，將高頻的光轉成低頻可被測量的光，並且用來測量時間。



波器上顯示無線電波一樣。克勞茲以光頻梳來穩定脈衝的相位，讓不同脈衝的波形不致改變。

另一個非常活躍的研究領域是想將光頻梳技術推到電磁波譜裡更高的頻率（製造出從微波一直到可見光的低頻光頻梳已不再困難）。2005年，JILA葉軍的小組，以及德國赫恩希的小組做出了超紫外光的精確光頻梳（頻率比X光低不了太多）。科學家正以這種頻率增加的光頻梳搭配超紫外光雷射研究原子及分子裡的精細結構。

短短幾年內，光頻梳從本來是少數科學家研究的題目，成為廣泛應用及基礎研究的工具，這種光尺還有著更多的潛能，等待我們探索。

SA

張明哲 台灣師範大學物理系教授

延伸閱讀

Time Measurement at the Millennium. James C. Bergquist, Steven R. Jefferts and David J. Wineland in *Physics Today*, Vol. 54, No. 3, pages 37–42; 2001.

Optical Frequency Combs. National Institute of Standards and Technology. 線上閱讀：www.nist.gov/public_affairs/newsfromnist_frequency_combs.htm

Frequency Combs. Max Planck Institute for Quantum Optics. 線上閱讀：www.mpg.de/~haensch/comb_research/combs.html

Sr Lattice Clock at 1×10^{-16} Fractional Uncertainty by Remote Optical Evaluation with a Ca Clock. A. D. Ludlow et al. in *Science Express*; posted online February 14, 2008.