

# 光梳雷射 與其應用

超寬頻、超高解析的光梳雷射很可能是下一代的彩虹光鐘，它能不能像伽利略的望遠鏡一樣，對新的科學有所貢獻？讓我們拭目以待。

■ 鄭王曜

## 雷射的基本常識

希臘神話中，人類本來生存於茹毛飲血且太陽下山就一片黑暗的世界裡，天神普羅米修斯十分同情人類的悲慘，盜火給他們，文明於焉展開，而他也遭到宙斯無盡的懲罰。

同樣地，雷射這種東西從未被發現存在於宇宙中任何地方，它是由一種奇特的，叫做「受激發輻射」的過程所造成，因此雷射光源與一般看到的光源非常不同。這個激發輻射構想的創始人，也可說是上個世紀的盜火者，便是愛因斯坦。

很早以前人們就知道物質與光的交互作用，物質可以吸收光（如水吸收太陽光而變熱），也可以發出光（如打鐵或燒碳時發出的紅光）。愛因斯坦提出第三種可能，即一個不穩定的，隨時會放出光的物質（我們說它處於激發態），可以因為外在光子的刺激而放出光。這種被刺激而放出的光子（受激輻射），所有的性質都跟原先激發它的光子一模一樣，例如方向、能量（或波長）等。



盜火給人類使得普羅米修斯被宙斯處罰（油畫來源不明）。

## 雷射的產生

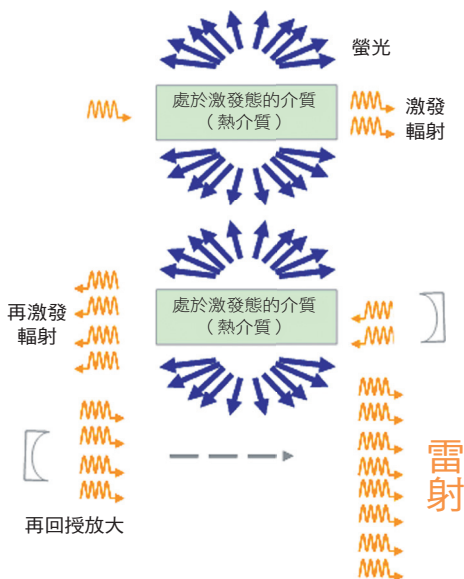
如果在這個介質兩端加上二個反射鏡，使得光不斷地反射，激發更多的光子，最後就會造成所謂的「雷射」。雷射在台灣是音譯名詞，在中國大陸叫「激光」，是意譯，來自於 light amplification by stimulated emission of radiation (LASER)，原意是「以受激發放射進行的光放大」。

兩面反射鏡之間稱為雷射共振腔。要有雷射光，如果不提特殊的狀況，必須有以下3個要件：處於激發態的介質、雷射共振腔及激發幫浦的機制。介質可以是晶體、染料、氣體、半導體，甚至發光的生生物質；幫浦的方式可以是電激發或光激發。

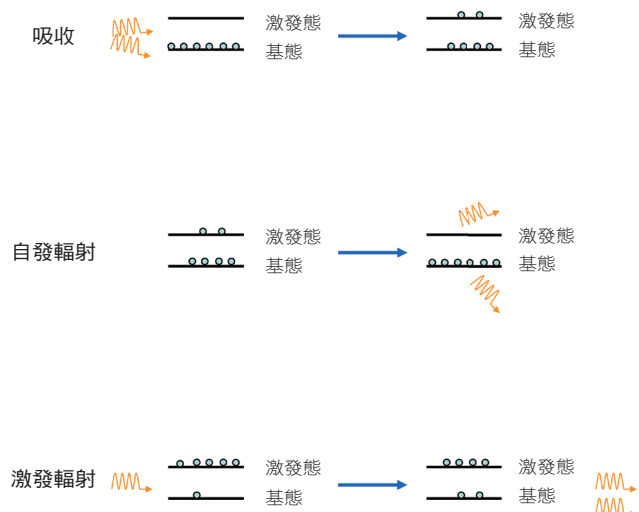
一開始，雷射共振腔中各種波長或各種頻率的受激輻射都可能出現，但只有符合雷射共振腔的駐波條件（共振腔長度是半波長的整數倍）的光可以留下來。因此，大部分雷射輸出的光是多種頻率的光。



在希臘神話中，人間一開始是沒有火的。



現代人類之火—雷射光—的形成。



光與物質進行交互作用的3種過程

由此不難想像，那些看起來「顏色」沒變的雷射，沒有一個不是迅速地在改變頻率，因為雷射共振腔會不斷地受環境的影響而改變長度，如噪音、溫度或前述不穩定的幫浦。請留意，15公分長的可見光雷射共振腔，只要變化約0.001毫米(mm)的長度，雷射頻率就可以有  $10^9$  Hz 等級的變化。

這些具有很多頻率的雷射，有時候會產生很奇妙的事情，例如許多不同波長的光波在某個時間點上，剛好波峰同時出現，所有光波疊加起來而有最大的強度。在過了一段時間  $T$  之後，這個最大強度的部分再度出現，這是因為  $T$  是所有波的周期的最小公倍數，因此所有波峰再度對上。就這樣，雷射的輸出並非隨時有光，而是每經一段時間有「一發子彈」跑出來（所有光波疊加起來時），稱為脈衝雷射。

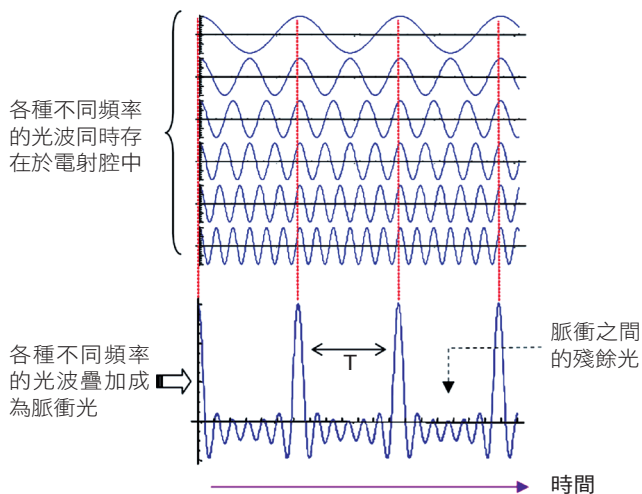
不同頻率間的波峰，相對位置要固定才能有上述的重複產生的子彈，這種要求下所得的超短脈衝，也叫鎖模雷射。「光子彈」間相差的時間  $T$ ，稱為重複時間，每秒跑出的光子彈數  $1/T$ ，稱為重複率。由此可以知道，參與疊加的各個雷射頻率差異越大（越寬頻），脈衝會越短，因為在時間軸上，要頻率差異這麼大的波峰都對在一起的機率很低，轉瞬即逝。

此外，如果有越多不同頻率的雷射光存在於雷射共振腔中，脈衝之間就越不易有殘餘的光，因為太多不同振幅的波疊加起來總和接近零，除非剛好所有波峰都對在一起。例如：如果雷射共振腔中只有3種頻率，且頻率很近，要讓波峰都對在一起就容易多了。然而只有3種頻率，脈衝與脈衝之間的殘餘光會比較多。

還有，由於光的總能量要守恆，可以想像，光子彈越短暫，光的強度就越集中，



各種不同頻率的雷射光（符合共振腔駐波條件）同時輸出。

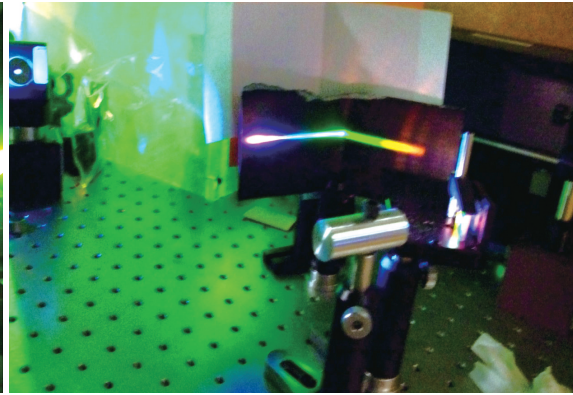
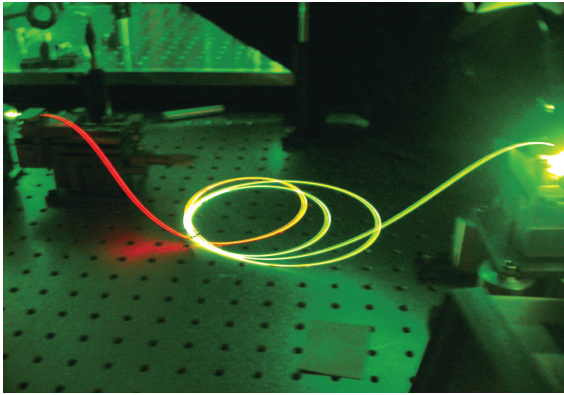


上面顯示 6 種雷射共振頻，當這 6 種光之間的相位是固定的，即波峰每隔一段時間會對齊一次，疊加起來便會形成下面的系列脈衝。

尖端功率就越大。一般平均功率 1 瓦的鎖模脈衝雷射，如果重複率  $10^8$  Hz、脈衝 40 飛秒（femto-second 是  $10^{-15}$  秒），則會有 250,000 瓦的尖端功率！請留意，家裡的省電燈泡大約只有 25 瓦的功率。

以中心波長近紅外（800 nm）的鈦藍寶石飛秒脈衝雷射為例，它的最大頻寬（~200 nm 寬度）可以涵蓋可見光到近紅外光，可以容許  $10^6$  種雷射頻率在共振腔中。透過特殊製造的光子晶體光纖，它的波長範圍甚至可以展開到 600 nm 寬。例如筆者在中央大學實驗室的脈衝光，在光纖裡展頻從最初不





近紅外的超短脈衝雷射光，經過左圖的特殊光纖後，光譜可以擴展成如右圖的彩虹般的寬頻。

可見的紅外光，到紅光→黃光→綠光等，經由光柵（作用類似三稜鏡）可以看出輸出光含有多少波長，堪稱為彩虹雷射。

請留意，並非所有多頻率的光源都可以形成脈衝。例如燈泡的波長範圍很寬，但從未看見脈衝產生，因為燈泡光源中各個頻率的相位很不穩定，幾乎沒有機會可以有所有波段的波峰都恰巧對在一起的情況。或者說，它的所有光頻並未鎖模。只有受激輻射所造成的高相位穩定（稱為高同調）的光源，才有機會出現所有的波峰都對在一起，或說鎖模，也才有可能做出超短脈衝雷射。但並不是所有寬頻雷射都能鎖模，有些雷射可以自動鎖模，機制較複雜，在此不談。

從 1960 年代以來，雷射的發展一直朝著兩個方向：一是用盡各種方法消除上述共振腔中其他頻率的雷射光，讓雷射輸出頻率接近單頻；二是想辦法讓儘量多的雷射頻率共存於共振腔中，使脈衝越短越好。這兩個領域的應用基本上是衝突的，因為一個要雷射的輸出頻率很單頻，而另一個要雷射的輸出頻率越多頻越好（或說，越寬頻越好）。

## 單頻雷射的重要

單頻雷射有很多重要的應用，當雷射頻率可以穩定到 0.001 Hz 時，它可以做成「光鐘」，光鐘可用以提高全球定位系統的精確度。又可見光的頻率非常高（ $\sim 10^{15}$  Hz），因此些微的重力變化就會影響光鐘頻率，也就是人類已經可以在地表直接驗證愛因斯坦重力紅移的理論。光鐘甚至可以用來量測地表不同厚度的些微重力變化，很可能對地震預測有所幫助。單頻雷射有很好的同調性，因此可以做成高精密干涉儀，例如飛機導航用的陀螺儀。穩頻雷射也可以讓光波波長成為人類的長度標準。

單頻雷射在基礎物理科學上的應用尤其重要，是原子分子精密量測與操控的重要工具。例如 1997 年，科學家因為利用單頻雷射成功冷卻原子，而得諾貝爾獎；2001 年，因為利用單頻雷射成功證明了愛因斯坦對統計物理的預言（玻色—愛因斯坦凝聚），而得諾貝爾獎；2012 年，又因為利用單頻雷射成功操控離子群的量子糾纏

**單頻雷射有很好的同調性，因此可以做成高精密干涉儀，  
例如飛機導航用的陀螺儀，也可以讓光波波長成為人類的長度標準。**

態，證實量子電腦的可行性，而得諾貝爾獎。在近代物理中，許多光的量子狀態的準備，尤其是擠壓態光子，也必須由單頻雷射光著手。

## 寬頻或超快雷射的重要

另一方面，多頻率或寬頻雷射也有長足的進展，其中最重要的是前述的鎖模脈衝雷射。脈衝光像是一個非常快的快門，可以這樣想，要拍到子彈穿過標靶的過程，需要照相機快門快於毫秒（milli-second, 0.001 秒）。而在 1980 年代以後，脈衝雷射進入飛秒脈衝的境界，人們更可以看到自然界許多超快現象，如化學反應的過程、光合作用的機制等。這個快門因為可以用來驗證許多化學動力學的理論，因此這個「飛秒技術」在化學上的貢獻，獲得了 1999 年諾貝爾化學獎的肯定。

目前的快門可以達到阿秒（atto-second,  $10^{-18}$  second），阿秒雷射製作複雜，尤其必須在高真空的環境中，應用不易。又因為光子流量很低，或脈衝間殘餘的電場太大，非常少數的研究群有能力應用阿秒技術於科學實驗上。

2013 年 6 月，筆者在柏克萊大學參加一個國際會議，有兩位阿秒雷射先驅——加拿大的 Paul Corkum 與德國的 Ferenc Krausz——真正應用了阿秒雷射。讀者或許納悶，快門這麼快，光子流量這麼少，要拿來「看」什麼？用在什麼地方？答案是，他們想研究量子力學的源頭。Paul Corkum 號稱他描繪出量子力學創始人薛丁格認為的「波函數」；Ferenc Krausz 說他們的團隊看到了電子量子穿隧的過程，如同電子不需任何額外的能量就忽然穿過牆壁的過程被他們「看到」。

因此未來阿秒雷射如果看到了什麼不被預期的東西，拿諾貝爾獎是可以期待的。超短脈衝還有另外一個很重要的特性，就是前述很強的尖端功率。它可以用於皮膚美容、癌症

治療、眼睛手術，也可用於桌上型加速器、桌上型 X 光雷射，甚至未來可能用於雷射核融合，徹底消除核污染恐懼。在台灣，尖端功率最強的雷射在中央大學物理系汪治平老師與朱旭新老師的強場實驗室，尖端功率是  $2 \times 10^{14}$  瓦！讀者可以想像它相當於幾個燈泡的光能量（但閃耀的時間很短）。

## 全是為了量測光頻

這兩種雷射這麼重要，但在西元 1999 年以前，它們的發展一直是兩條平行線，兩邊的研發人員各自奮鬥，不易想到會有交集。但其實在 1970 年代，鎖模脈衝雷射剛開始發展時，3 個做單頻雷射的年輕人就在討論結合這兩種雷射的特性，來量測單頻光的絕對頻率。

他們是俄國的 P. V. Chebotayev、美國的 J. L. Hall 與德國的 T. W. Hansch（當時在美國史丹佛大學），他們不但不對鎖模雷射的過多頻率煩惱，反而著迷於鎖模的機制。在當時，他們就立志要利用鎖模機制，發展出簡單的量測光頻的方法。這個「利用已知頻率的雷射，量測未知頻率的雷射」的構想，在 1999 ~ 2000 年間終於實現，而且很快地在 2005 年，上述 3 人中的兩人因這項創舉而獲頒諾貝爾物理獎（可惜 P. V. Chebotayev 於 1992 年心臟病突發病逝）。

為何計數光頻如此困難？因為可見光的頻率每秒約振動  $10^{15}$  下，人們一直苦無方法來計數光頻。在西元 1999 年以前，想用銨原子鐘量測二氧化碳雷射的頻率，需要一個二層樓高的建築和一卡車的光學元件及雷射才可能做到，也非常不方便。第一個把光頻率（ $10^{14} \sim 10^{15}$  Hz）與銨原子鐘頻率（ $10^{10}$  Hz）連結起來的實驗，即使如此繁雜，也足夠能量一種雷射的頻率，非常不方便。

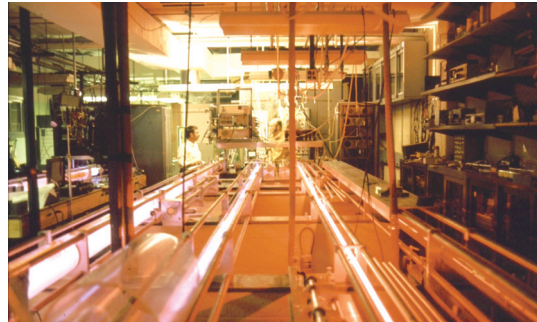
在 1980 年代以後，脈衝雷射進入飛秒脈衝的境界，人們更可以看到自然界許多超快現象，如化學反應的過程、光合作用的機制等。

然而科學家不願放棄計數光頻的夢想，因為計數光頻對近代物理發展非常重要，部分原因是原子分子很多會輻射光，而原子分子是精密檢驗物理定律的利器。科學家從計數原子分子吸收或輻射光的頻率，來判斷原子分子的「內在美」。例如 3 年前，歐洲一個加速器團隊藉由光頻率量測推得氫原子核（質子）的大小，轟動科學界，清華大學劉怡維老師也參與這個實驗。

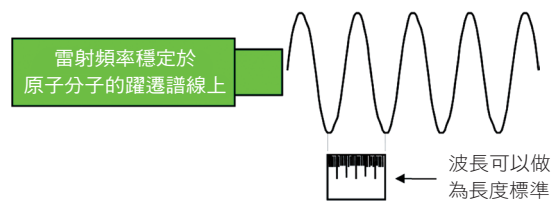
這 3 個人原先的想法是，如果有一個雷射，例如紅光雷射，它的絕對頻率已經量測過，若想量另一個藍光雷射的頻率，用不著從銫原子鐘的頻率開始量起，只需要知道前述鎖模雷射的頻率間隔（利用銫原子鐘），便可以藉著鎖模雷射量紅光與藍光的頻率差而得知藍光雷射的頻率。依此類推，如果使用彩虹雷射，任何可見光的頻率都可以量測。

在 1999 年，T. W. Hansch 的團隊在德國首先成功實現上述的想法。而在 2000 年，J. L. Hall 的團隊在美國只需使用一台脈衝雷射，連已知頻率的紅光雷射都不用，就可以量測未知雷射的頻率。這兩個團隊的負責人不只是因為可以量光頻而拿諾貝爾獎，也因為他們創造出本世紀到目前為止最奇特的光源，這個光源兼具連續波與超短脈衝的優點。這個光源的奇妙之處，下面會提到。

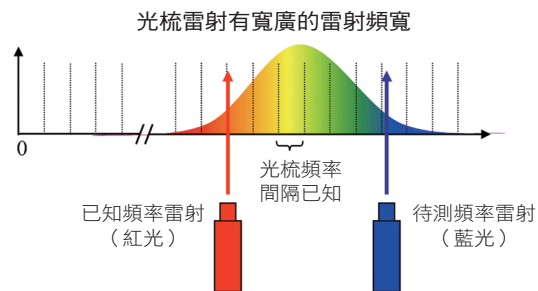
附帶一提的是，在中央大學物理系的筆者，在 2011 年的光學學術期刊中提出，利用兩個手掌大小的穩定光頻系統，加上鎖模脈衝雷射，便可有一個可見光的光學游標尺。



從第一個由銫原子鐘（ $10^{10}$  Hz）出發，量出二氧化碳雷射光（ $10^{13}$  Hz）頻率的實驗，架設非常複雜。（圖片來源：J. L. Hall & J. Ye, "NIST 100th birthday", Optics & Photonics News.）

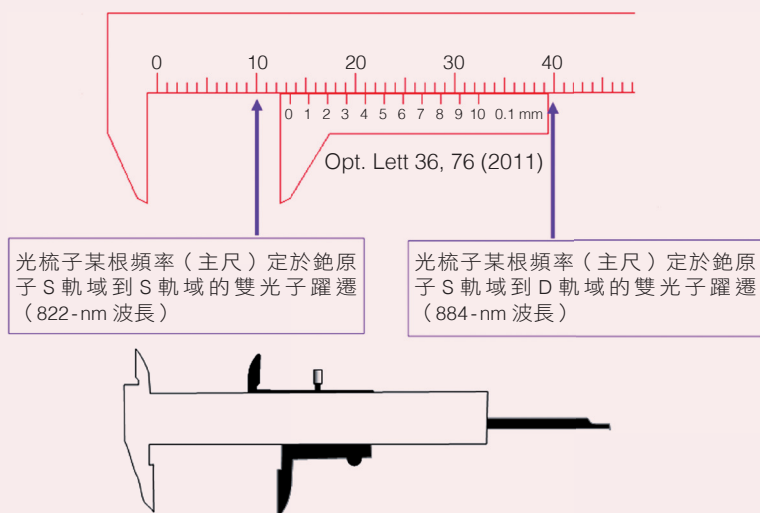


穩頻的單頻雷射光的波長是目前人類的長度標準



光梳雷射的起初構想：用鎖模脈衝雷射與一個已知頻率雷射組成光梳雷射，鎖模脈衝雷射的間隔或光梳雷射的頻率間隔，則由銫原子鐘決定。

高精密光學游標尺



第三代鈦藍寶石光梳雷射猶如光學游標尺，由中央大學物理系光梳雷射光譜實驗室研發成功。

## 探索自然與發展科學之門

總結光梳雷射具有以下特性。就頻率軸來看，光梳雷射的頻率範圍涵蓋光纖通訊的不可見光到紫光，所有不同的光的頻率都是已知且不隨時間而變，如同梳子般分布在頻率軸，這是取名光梳的由來。由頻率軸的角度來看，光梳雷射相當於一百萬台單頻雷射的組合，在  $10^{15}$  Hz 的振動頻率下，每「台」單頻雷射具有小於 1 Hz 的頻率解析度。

這個美好的特性造成這幾年各式各樣的應用點子的出籠。例如在天文上，光梳雷射可以快速量測星星的寬廣光譜中不同波長的都卜勒效應，因此可以順利追蹤某特定星星的運動；美國哈佛大學近年來致力於用光梳雷射找尋太陽系外的行星；德

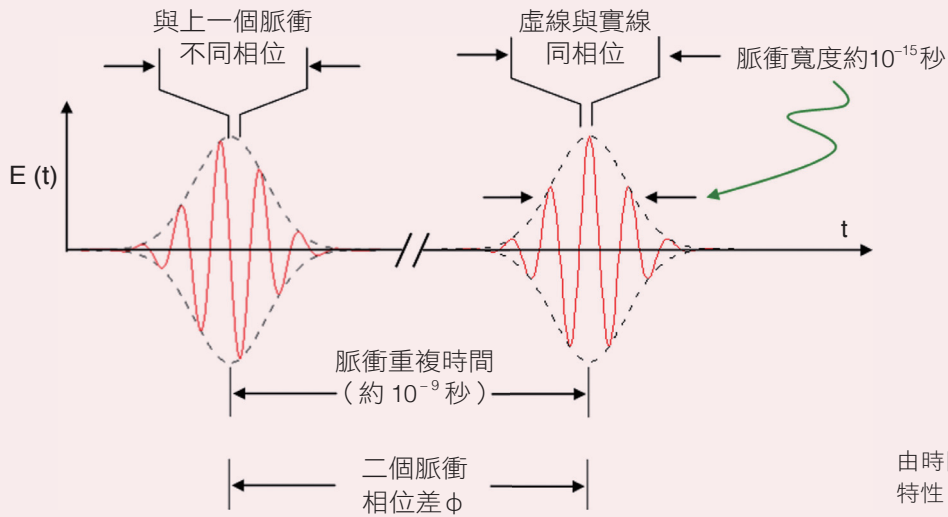
國普郎克研究所則以光梳雷射來看宇宙膨脹速度與膨脹是否均勻。

光梳雷射的寬頻與高解析可用以迅速分析分子光譜，例如美國國家標準實驗室證實用它可以迅速分析人類呼吸氣體的種類與含量。如果可以快速得出分子光譜，就可以隨時監測環境污染源及馬上開罰單。如此一來，如同交通罰單，違規人毫無藉口！

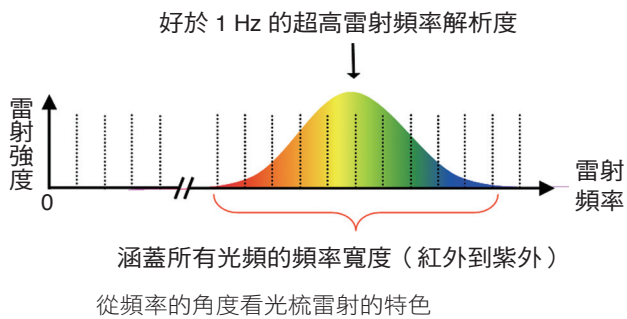
就時間軸來看，光梳雷射其實也是超短脈衝雷射。一般超短脈衝雷射的光相位是混亂的，但光梳雷射的光相位是可以控制的。這個特色在對於需要多光子（高尖端功率）的非線性光學效應的控制特別重要，例如，光梳雷射可以讓產生深紫光甚至軟 X 光的實驗更有效率；可以量子控制原子中電子的游離率；可以有效地製造阿

**就頻率軸來看，光梳雷射的頻率範圍涵蓋光纖通訊的不可見光到紫光；  
就時間軸來看，光梳雷射其實是超短脈衝雷射。**





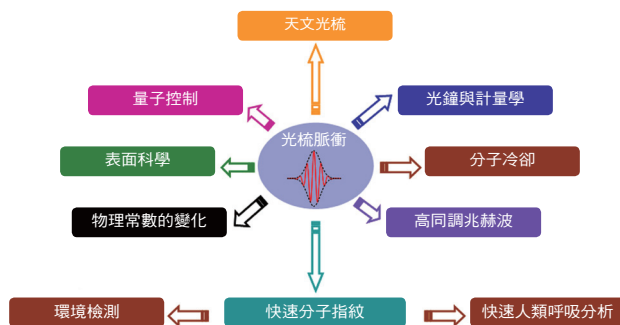
由時間軸上看光梳雷射特性( $\phi$ 是定值)。



秒雷射光源；可以控制 THz 光的相位，提高 THz 光的同調性（THz 是介於可見光與微波間的新光源，目前已使用於軍事用途及美國海關安檢）。

由於光梳雷射這樣一個美麗的光源，近年來一直有應用它的點子出現，以上只是到目前為止筆者所知道的應用例子，相信未來還有應用這個光源的點子出現。

歷史上，一個新的觀測器具的產生通常帶來新的革命。例如，伽利略磨了一個高解析的望遠鏡，因此看到了木星的 4 個衛星，證實不是所有星星都繞著地球轉，造成了科學革命。超寬頻、超高解析的光梳雷射很可能是下一代的彩虹光鐘，它不能像伽利略的望遠鏡一樣，對新的科學有所貢獻？讓我們拭目以待。



光梳雷射為科學開了一扇窗

鄭王曜  
中央大學物理系