

更強的功率輸出——

強場雷射，帶動研究新境界

當雷射的瞬間功率變得更強時，會引發非線性效應，影響光束的品質，甚至因游離而造成損害。唯有克服這些難關，才能更進一步地提高雷射的功率。

汪治平

雷射是一種特性良好的光源，它具有很好**雷**的準直性，也就是所發出的光向同一個方向前進；也有很好的同調性，就是可以發出頻率很準確的光，或是說所發出的光具有很規律的相位變化。然而雷射光是如何做出來的？這就得先了解原子與光的交互作用，才能通達其奧妙。

一個原子可藉由吸收一個光子從低能階躍遷到高能階，也可藉由放出一個光子從高能階降到低能階，後者這種發光過程稱為自發放射；原子停在高能階時若受到一個外來光子的作用，就有機會放出一個相同的光子，加上原本的外來光子，變成兩個光子，這種過程稱為激發放射。持續產生激發放射的條件是高能階原子的數量要大於低能階的原子數量，也就是所謂的居量反置。在這個條件下原子受刺激而放光的速率就會大於吸收光的速率，放出來的光子便會越來越多，形成一個「光放大器」。

為了增加放大率，並控制光的行進方向，我們將作為光放大器的增益介質，放在由平行反射鏡所組成的「共振腔」中，讓光線來回反射，反覆通過光放大器而持續放大。透過共振腔的作用，我們可以限制光線以特定的方向前進。與共振腔相同方向的光

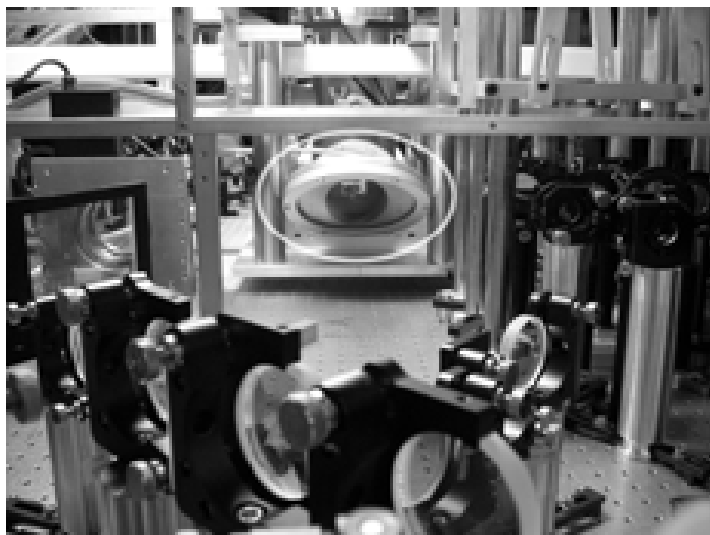
線才會被放大，其餘不同方向的光線很快就逸出了共振腔，不再被放大，這是雷射具有很好的準直性的原因。

共振腔還有另外一個作用，那就是限制雷射的頻率。對於平面鏡所構成的共振腔，光線要在其中來回振盪，須遵守 $l = n \frac{\lambda}{2}$ 的公式（ l 是共振腔長度， λ 是波長， n 是某個正整數），只有符合這個公式波長的光線才會被放大。不過，共振腔的長度可以長達數公尺，光的波長卻以微米（ μm ）為單位，這兩者之間相差了百萬倍，也就是說符合條件的 n 範圍相當大，而非只有單一波長。究竟哪些波長可以被放大，還要考慮光放大器原子能階的寬度。能階越寬，可以涵蓋的 n 就越多，也就是可以同時發出很多頻率的光。如果想讓雷射只發出單一頻率的光，通常需要在共振腔中加入限制頻率的元件，以選出所要的頻率。

強場雷射的實現

製造飛秒雷射脈衝

光憑單一頻率雷射持續發光，其振幅不隨時間改變，那要如何製造出雷射脈衝呢？簡單的方法是在共振腔中加入光電開關，例如以高電壓來改變光學晶體某個方向



圖一：中央大學的100兆瓦特雷射後級放大器。照片中圈起來的地方即鈦藍寶石晶體，直徑達5公分。

的折射率，造成雙折射，這樣就可以快速改變光的偏極化方向（電場振盪的方向），再配合使用偏極化濾光鏡，就可以快速改變光的振幅。

然而，以電子的方式控制高電壓，其反應速率有限制，難以產生短於奈秒（ 10^{-9} 秒）的光脈衝，若要產生更短的光脈衝，就需要利用不同頻率的光所產生的干涉效應。將兩個振幅相同而頻率不同的波相加，產生所謂的拍頻，讓加強性干涉的部分振幅加倍，相消性干涉的部分則會互相抵銷。如果將很多個相位相同、頻率不同的波相加，在相位相同那一點所產生的加強性干涉會讓振幅相加，但是只要稍微離開那一點，這些波就可能互相抵銷，這樣子所有的干涉效應綜合起來，就能形成一個很短的光脈衝。參與干涉的光所涵蓋的頻率範圍越大，所產生的脈衝就越短，但是，若把不同相位的光線彼此相加，則不會有這樣的效果，而只會產生一個帶有擾動的連續波。我們每天看到的太陽光，正是各種頻率、相位的光線任意混合相加的結果。

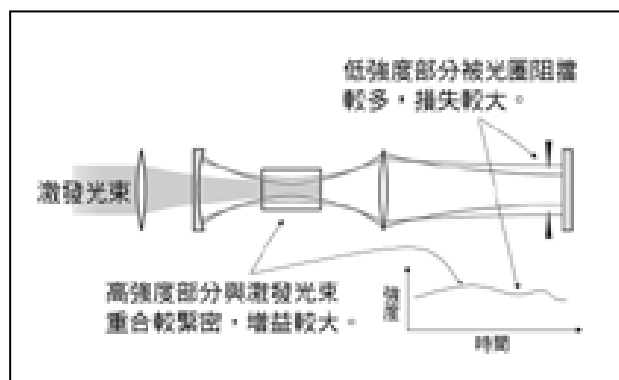
要讓雷射產生飛秒（ 10^{-15} 秒）等級的脈衝，必須符合下列兩項條件。

首先，作為雷射放大器的介質頻寬要夠大，這樣它才能放大各種頻率的光波。目前最常用的雷射放大器介質是鈦藍寶石晶體（Ti:sapphire）（圖一），這個晶體所具有的頻寬在1.5公尺長的共振腔中，大約可以放大100萬個等間隔頻率的光波，如果這些光波能有相同的相位，干涉效應可以把光波加強成100萬倍的強度，而脈衝的長度則縮小了100萬倍。

其次，要有脈衝壓縮機制（圖二），也就是一個可以讓各頻率的光具有相同相位的方法。目前最有效的方法是利用共振腔內的非線性聚焦效應，讓雷射波形中振幅較大的部分得到較大的放大率，同時讓振幅較小的部分承受較大的損耗，這樣就形成了一個「貧者越貧，富者越富」的機制，最終的結果就是產生一個極短而強的脈衝。在鈦藍寶石雷射中最短可產生約兩個光波週期（5飛秒）的脈衝。

增幅強場雷射

上述的方法雖然可以產生非常短的脈衝，但是每個脈衝的能量很低，約只有幾個



圖二：克爾透鏡鎖模（Kerr-lens mode-locking）脈衝壓縮機制示意圖。克爾透鏡常用在脈衝壓縮機制，在這個透鏡組形成的共振腔中，利用自發性聚焦使增益介質強度較高的部分與激發光束重合，而強度較低的部分，在輸出時則會因光圈的阻擋而有較多的損失，如此便可以排除掉低強度的脈衝光線並凝聚高強度者。

奈焦耳 (10^{-9} 焦耳)，因此脈衝的尖峰功率只有百萬瓦特的數量級。理論上我們可將此脈衝導入一系列的光放大器，大幅增加其能量和尖峰功率，但是實際上有許多技術上的考量。

首先必須考量的是光放大器的生命期。光放大器中的原子必須留在高能階才能有放大的作用，然而高能階的原子會經由自發放射而降到低能階，這樣就失去了作用，因此必須在

放大器失效之前就趕快將光放大。我們希望使用生命期長的放大器，因為這樣才能夠有充裕的時間將原子從低能階「汲」到高能階，並停留在高能階夠長的時間，以便完成後續的放大過程。這像是把水從地下室抽到屋頂的水池，以便後續的使用。如果屋頂的水池漏水漏得很快，就很難累積夠用的水量。然而放大器的生命期越長，表示原子與光的交互作用越弱，放大器的放大率也就越低。光必須通過放大器很多次，才能取出它所儲存的能量。

如果想要用比較便宜的方法來汲發放大器，例如使用閃光燈，那麼放大器的生命期必須比閃光燈釋出的脈衝還要長，這種放大器的放大率低到需要通過幾十趟才能取出它所儲存的能量，在光路設計上是個挑戰。常見的解決方法是採用再生放大器(圖三)來達成所需的趟數。

再生放大器的基本構造就是一個雷射共振腔，光脈衝可在其中來回振盪，每次通過放大介質其能量就增加一定的倍數，以幾何級數成長，直到放大器達到飽和，也就是大部分在高能階的原子都被用掉了，放大的作用才停止。

再生放大器需要在共振腔內裝置光電開



圖三：再生放大器。脈衝可在其中反覆振盪 16 次，放大 200 萬倍。

關來改變脈衝的偏極化方向，並利用偏極分光鏡來改變光的行進方向。將 S 波(偏極化方向垂直於入射面的光)的脈衝種子注入共振腔，如果不改變偏極化方向，脈衝行進半周之後就會沿原入射方向返回。如果在共振腔內將脈衝轉為 P 波(偏極化方向平行於入射面的光)，脈衝就會留在共振腔內，來回放大，直到我們將它轉回成 S 波，才從共振腔中反射出來。

隨著脈衝的能量越來越大，其電磁場也越來越強，這時就必須考量非線性傳播和游離損害的問題。光學介質的折射率來自介質中隨著電場振盪的電子，在弱電場的情況下這種運動會以固定的比例改變入射的電場，但是在強電場下，電子的運動與電場不成正比，這時折射率隨電場強度而變，電場較強的地方折射率較大，這便是非線性傳播。對於雷射光束而言，光束中間的電場較大，因此中間的折射率較大，會形成類似透鏡聚焦的效果，也就是說在均勻的介質中可以自發性地聚焦，這個效應會造成局部的強光，將原子游離成電漿而損壞介質。

即使介質未到損壞的程度，這種自發性的聚焦也會破壞光束的均勻性，使它在應用時產生許多困難。因此如何降低非線性傳

播，避免游離損害，是突破放大器實用極限的重大課題。有趣的是，在產生飛秒脈衝時，我們需要同樣的非線性效應來達到貧者越貧，富者越富的效果，而在放大器中我們又需要極力避免這種效果，這是因為「過猶不及」。在產生飛秒脈衝的雷射中，脈衝的能量很小，非線性效應只是提供少許的差異，來達成脈衝壓縮的效果，而在放大器中脈衝的能量很大，加上非線性效應就足以引起嚴重的問題。

在高功率雷射技術的發展上，一個非常重要的進展，來自 1985 年史屈瑞克蘭 (D. Strickland) 和蒙婁 (G. Mourou) 兩人發明的線性變頻放大技術 (chirped pulse amplification)。該技術是利用光柵的色散效應，將脈衝拉長數千倍，放大後再以反向的色散效應將脈衝壓縮回原來的長度 (圖四)。這使得脈衝在放大器內的強度降低了數千倍，因此延長了放大器的壽命，換句話說，就是提升了放大器的極限功率數千倍。

利用線性變頻放大技術，可以在小型的實驗室內將飛秒雷射脈衝放大 10 億倍，達到 10 兆瓦特的瞬間功率 (10 兆瓦特大約是當今整個地球的用電功率)。這樣的脈衝聚焦後瞬間照度達到每平方公尺 10^{23} 瓦特，是

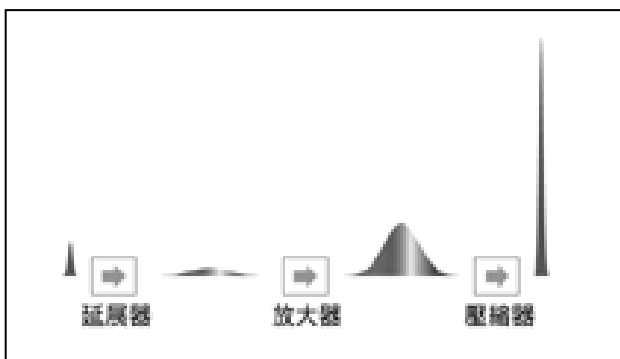
正午日照的 10^{20} 倍；所產生的光壓高達 100 億大氣壓，足以在脈衝通過的期間，將電子加速到接近光速；照射物質表面，能夠產生 1000 萬度的高溫，相當於太陽中心的溫度。這些驚人的特性是開創新的研究領域的原動力。

了解線性變頻放大技術的關鍵，在於體認飛秒雷射脈衝是由很多不同頻率的光組合而成。利用光柵可以將不同頻率的光分開，讓它們走不同長度的路徑，這樣就可以將脈衝拉長。

我們可以用想像的方式，將不同波長的光比擬成一群學生按照身高排列，沿著一個圓形的跑道並列跑步，並假設大家都以相同速度前進。如果將高個子排在外圈，矮個子排在內圈，那麼跑了一圈之後原本並排的隊形就拉長了，矮個子跑在前面，高個子跑在後面；然後我們將這個排列反轉，也就是高個子改排在內圈，矮個子改排在外圈，那麼再跑一圈之後，所有的人都跑相同的長度，隊形又回到原本的並列狀態。利用光柵的組合，可以讓不同頻率的光行經不同的光程，也可以反過來把這個光程的差異補回，前者將脈衝拉長，後者將脈衝壓縮成原本的長度。越短的脈衝所含有的頻率範圍越廣，所產生的光程差異越大，因此這個方法對於降低飛秒雷射脈衝在放大器中的尖峰功率特別有效。

強場雷射的應用

在每平方公尺 10^{23} 瓦特的強大電磁場下，任何物質都會被瞬間游離成為電漿。電子與質子之間的庫倫力早已不敵雷射的電場，因此這種雷射可稱為強場雷射。當強場雷射脈衝通過電漿時，雷射的光壓迫



圖四：脈衝放大技術原理示意圖。脈衝在通過延展器時，光柵會將不同頻率的光導向不同方向，這種安排使得紅光的路徑較短，藍光的路徑較長，因此紅光超前，藍光落後。再經過放大器，使脈衝振幅變強後，通過壓縮器，其光柵能將不同頻率的光導向不同方向，這種安排跟延展器相反，使藍光的路徑較短，紅光的路徑較長，因此紅光落後，藍光超前，補回脈衝延展器所造成的光程差。

使電子與離子分開，在電漿中形成尾波，有如高速行進的快艇在湖面上產生巨大的波浪。被雷射游離出的電子可從雷射獲得大量的動能，經由碰撞將原本的離子激發到高能態。以下我們將簡單介紹強場雷射正在發展中的兩個應用：（一）如何利用電漿波中的強大電場來加速電子；（二）如何利用高熱電漿來製作 X 光雷射。

粒子加速器

自從 1911 年拉塞福爵士以放射性元素發出的高速 粒子撞擊原子，發現了原子的內部結構，高速粒子就一直是推動基礎物理發展的重要工具。物理學家利用高速粒子來探測原子的內部結構，不只發現原子內有原子核，而且原子核內堆滿核子，核子內還有夸克。藉著研究基本粒子的交互作用，物理學家逐步理解物質的基本構造，甚至能藉此推測宇宙形成的過程。在這段發展期間，加速器所產生的粒子能量，也從百萬電子伏特等級逐步躍升為兆電子伏特等級，加速器的尺度也從數公尺增加到幾十公里。

不僅是基礎物理，加速器在應用物理和醫學上也是非常重要的工具。同步輻射和自由電子雷射都是以加速器為基礎，它們能夠產生純淨而且高亮度的 X 光，作為解析物質結構甚至分子運動和化學反應的利器，也是以蝕刻法製作奈米尺度元件所需的光源。在國家級醫療中心加速器用於製作半衰期很短的同位素，這些同位素可以幫助檢驗和治療癌症，也用於斷層造影，加速到 1、2 億電子伏特的質子，是目前傷害最小的放射治療源。

傳統的加速器相當巨大而且昂貴，例如設在瑞士的歐洲核子研究組織（European

Organization for Nuclear Research, CERN）的大強子加速器，其周長即達 27 公里的規模。由於加速器的長度被材料的崩潰電場限制，每公尺只能加速約 1 億電子伏特，所以為了要得到高能量，加速距離必須很長。目前大型加速器建造和維護的費用已達到社會願意負擔的極限，然而科學的持續發展有賴於更高能量的加速器，因為加速器的能量越高，才能夠探索越微小的範圍，研究物質更基本的結構和交互作用。

目前正在積極發展的「雷射電子加速器」，其目的就是為了大幅縮短加速距離。來自強場雷射所能產生的電場相當驚人，如果把 10 兆瓦特的雷射聚焦到 10 微米的光點時，產生的電場可以高達每公尺 10 兆伏特，遠遠超過傳統加速器每公尺 1 億伏特的崩潰極限，如果能善加利用，等於把 1 公里的加速器縮小到 1 公分。

然而雷射的電場幾乎與行進方向垂直且變換方向快速，因此不備用來直接加速電子。1979 年田邊 (T. Tajima) 和道爾森 (J. Dawson) 提出了使用雷射來驅動電漿波，再用電漿波來加速電子的概念。因為電漿波的電場方向與行進方向一致，電子被電漿波推動，如同衝浪者被海浪推動一樣，只要電子不超出有加速作用的相位範圍，加速就可以持續進行。這種加速方式可以產生每公尺 1000 億伏特的加速電場，比起傳統的加速器大了 1000 倍，相當於將 1 公里的加速器縮小到 1 公尺，如果真能實行，對於加速器科技將有革命性的影響。

然而當時的雷射所能達到的功率不夠大，脈衝的長度也不夠短，這個概念直到 1990 年代中期才得到初步的驗證。2006 年美國勞倫斯柏克萊國家實驗室 (Lawrence-

Berkeley National Laboratory) 已經用這個方法，將電子在 3 公分的距離加速到 10 億電子伏特，相當於同步輻射加速器的能量(圖五)。

雷射驅動電漿波電子加速器所面臨的挑戰有三：(一)如何讓雷射聚焦後不散開，繼續傳播一段足夠的距離，以便持續驅動電漿波；(二)雷射脈衝在電漿中行進的速度低於光速，因此當電子被加速到接近光速時，雷射會跟不上電子，也就無法繼續加速；(三)如何注入電子，以產生飛秒等級的電子團，並使得電子得到整齊的加速，以獲得狹窄的能量分布。面對這些挑戰，需要發展以雷射精準操控電漿結構和電漿波的技术，這是一個全新的研究領域。

假設這些問題都能解決，這樣的加速技术是否能夠延伸到數十億電子伏特等級，取代同步輻射加速器，甚至延伸到十兆電子伏特等級，突破高能物理在加速器技术上的困境？

目前的強場雷射是用石榴石(Nd:YAG)倍頻雷射來激發，受限於石榴石倍頻雷射的總體激發效率和散熱率，每秒鐘只能發射 10 次。對於注重通量的應用，這樣的發射速率比起傳統加速器差了很多。即使不考慮通量的問題，將 100 億個電子加速到 10 兆電子伏特，僅僅是電子的動能就高達 1 萬 6000 焦耳，因此雷射脈衝的總能量可能需要數萬焦耳，對於目前的飛秒雷射科技，這是一個很大的挑戰。這方面的研究發展已經不是大學裡的實驗室所能負擔，需要在國家級實驗室的架構下才能進行。如果能將強場雷射的能量效率大幅提高，製造費用大幅降低，未來有可能

串聯數千部強場雷射，達成 10 兆電子伏特等級的粒子加速。

X 光雷射

自從倫琴在 1895 年發現 X 光以來，與 X 光有關的研究工作已經得到了 11 次諾貝爾獎，光憑這點，X 光在科學上的重要性便不言而喻。雷射的發明使得光學技術獲得驚人的進展，到現在已經是科學上最普遍的分析工具，如果想要將這些精巧的光學技術延伸到 X 光的區域，就必須發展與雷射類似的 X 光雷射。

X 光雷射與傳統雷射的原理相同，只是能階的差距增大了很多倍，將能階差距增大的辦法是將原子游離掉很多個電子，使它看起來像是原子序比較低的原子，但是因為原子核內的正電並未減少，所以電子的位能陷得更深。要把原子游離掉很多個電子，如果



圖五：雷射加速器模擬圖。這是美國勞倫斯柏克萊國家實驗室設計的雷射加速器運作模擬圖，周圍的構造顯示由雷射驅動的電漿波電子分布，中央的亮線顯示被電漿波加速的電子束。

是以電子碰撞來達成，所需的溫度很高；如果是以外加電場來達成，所需的電場也很強。另一方面，高能階的電子容易自發性地往下降，生命期很短，可以用來激發的時間也因此短暫。強場雷射可以產生高熱電漿，雷射本身的電場也夠強，脈衝很短，所以適合用來驅動 X 光雷射。

目前 X 光雷射所面臨的挑戰有二：

一、如何提升效率。目前 X 光雷射的效率約為 10^{-6} ，大部分的能量都用來加熱電子而非產生 X 光。熱電子的能量分布很寬，只有少數能轉到離子的高能階激發態。

二、如何縮短波長。以顯微術的應用來說，波長在 2.5~4 奈米之間的光子比較不會被氧吸收，卻會被碳吸收，因此特別適合用來穿過充滿水的細胞，觀察其中含碳的細微組織。以 X 光雷射來產生 2.5~4 奈米的光子，需要用到深層的核心電子，如何在游離後控制電子的能量範圍，使它們能有效地轉為離子的高能階激發態，是待解決的問題。

利用在中央研究院建造的 10 兆瓦特雷射作為驅動光源，我們的實驗室已經在 30~50 奈米這個波長範圍發展了特性相當好的 X 光雷射。其脈衝寬度是同步輻射的千分之一，而尖峰光譜亮度達到同步輻射的 100 億倍，相較於其他 X 光源有很高的時間解析能力，因此在瞬態分析上獨具優勢。然而在 X 光頻段仍缺乏光學元件，在可見光頻段常用的實驗技術，因為缺乏可挪用到 X 光的透鏡、偏極化分光鏡、半反射鏡、濾波器、非線性晶體等，而無法用在 X 光頻段。我們期待材料科學的進展能有助於解決這方面的問題。

除了上述的高速電子束和 X 光雷射，以強場雷射為驅動光源還可能產生其他獨特

的粒子和光子源，包括硬 X 光、光、質子束、中子束。

光束

將強場雷射與高速電子束對撞，能夠產生從硬 X 光到光的脈衝。當雷射光與高速電子束對撞時，電子會反射（散射）雷射光。然而當電子以接近光速的速度前進時，會使得雷射光的波長因為都卜勒效應而變短。一般都卜勒效應只會將波長變短少許，但是一個接近光速的「反射鏡」可以將波長變短很多倍，變成硬 X 光或光，這個倍率是由電子的能量決定，電子的能量越高，反射的波長就越短。這種方法可以讓我們得到一個可調整波長且具有明確方向性的光源，比起從核衰變得到的光，在科學上更有用處。

質子束

以強場雷射照射金屬薄膜，可以產生高能量的質子束。強場雷射的強大光壓會將金屬薄膜內的電子推出金屬表面，造成垂直於金屬表面的強大電場。這個電場可用來加速從吸附於金屬表面的水分子游離出來的質子。當雷射的功率到達 1000 兆瓦特，以這個方式所形成的表面電場可將質子加速到 1、2 億電子伏特。相較於其他的輻射源，高能量質子在穿過人體時對細胞的殺傷力非常集中。在路徑的最後 1 公分每個質子可放出 3000 萬電子伏特的能量，遠高於在路徑中單位長度所放出的能量，因此特別適合用來治療癌症。強場雷射可能提供一個便宜而簡便的方法來產生高能量質子束，所占用的空間也遠比傳統的質子加速器小，非常適當地狹人稠且注重成本的醫院來使用。

中子束

以高能量質子束撞擊原子核，可以產生中子束。中子不帶電荷，可穿透很厚的物質，在安全檢查上有重要的地位。中子帶有磁矩，能與磁性物質交互作用，也是研究磁性材料的重要工具。雖然核反應爐也可以產生大量的中子，然而強場雷射所占的空間遠比反應爐小，甚至可拆遷移動，在應用上有很大的優勢。

硬 X 光

產生硬 X 光的另一種方法是自由電子雷射。自由電子雷射的原理是先利用電子加速器產生高能電子束，再將電子束通過極性交替的磁鐵陣列，使電子受到磁力的作用而產生蛇行般的運動，在轉彎的地方放出輻射。如果想要產生硬 X 光，不但電子的能量必須很高，磁鐵的磁力也必須很強，這就是自由電子雷射造價高昂且占地廣闊的原因（圖六）。

利用強場雷射不但能夠加速電子，也能利用雷射的強大光壓將電漿中的電子排開，在脈衝之後產生一個瞬間的離子通道。高速的電子進入離子通道後，如果進入的位置不在正中央，或進入的方向與離子通道不完全平行，就會在離子通道中產生蛇行般的運動。這時吸引電子產生蛇行振盪的不是磁力，而是離子對電子的電力。以這個方式製作的自由電子雷射尺度只有幾公分，也不需要價格高昂的磁鐵，未來有希望成為自由電子雷射的另一種選擇。

結語

強場雷射是科學研究的一個新工具，它能夠產生前所未有的強大電場、磁場、壓

力、溫度和加速度。利用中央大學的 100 兆瓦特雷射，可以讓電子產生每平方秒 10^{25} 公尺的加速度，這種加速度只有在黑洞的邊緣才能想像；以這種雷射聚焦於物質表面，可產生 1000 萬度的高溫，相當於太陽核心的溫度；雷射的光壓高達 1000 億大氣壓，相當於太陽中心的壓力。



圖六：X光自由電子雷射裝置一隅。美國能源部所屬史丹佛線性加速器中心的國家加速器實驗室，正在進行 X 光自由電子雷射裝置計畫，為了產生超短的 X 光脈衝，他們串聯了十幾個磁鐵陣列才能產生純淨、強大的 X 光自由電子雷射。圖中的裝置為部分串聯起來的磁鐵陣列。

在強場雷射的作用下，物質與光的交互作用進入了一個新的層次。光不再只是對於電子運動的微擾，而是完全控制了電子的運動，達到了具有顯著相對論效應的層次。我們一方面研究如何利用這股強大的力量來導出新的應用科技（例如 X 光全像顯微術、X 光閃光攝影、微型電子加速器、微型質子加速器、微型 X 光雷射、微型自由電子雷射、微型中子源、同位素製作、核反應控制等），另一方面也想像這個新工具將如何帶領我們探索物質的極端狀態，把天文物理的場景搬進實驗室裡玩弄。強場雷射技術為我們開了一扇窗，窗外有個廣大的世界等著我們去發現。

汪治平：任職中央研究院原分所