

研究成果

雷射驅動電漿波電子加速器

汪治平、陳賜原（原分所研究員、副研究員）

自 1911 年拉塞福爵士以放射性元素發出的高速阿爾發粒子撞擊原子，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，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，甚至藉此推測宇宙形成的過程。在此發展期間，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，也可用於斷層造影；此外，加速到一、兩億電子伏特的質子，更是目前傷害最小的放射治療射源。

傳統的加速器是使用低頻率的電磁波來加速，受限於加速器內微波共振腔的崩潰電場，每公尺只能加速約一億電子伏特。如要加速到兆電子伏特等級，加速器的長度就必須大於十公里。使用環形的加速器雖然能節省空間，但是要讓帶電粒子在環形軌道高速運動，必須給予很大的向心加速度。向心加速度會使帶電粒子發出輻射而損失能量，因此愈來愈難加速。目前最強大的加速器，其建造和運轉費用已達到社會願意負擔的極限，導致全世界已多年未興建新的加速器，當然對基礎物理的持續發展造成阻礙。以產生 X 光或醫學應用為目的的加速器，也同樣因為費用的問題，難以普及化。因此，發展新的加速方法是實驗物理領域的一個重要課題。

雷射能產生強烈的光波，光波是高頻率的電磁波，與電子有強烈的交互作用。比起微波，雷射因為波長很短，能夠聚焦到非常小的一點，使得照度大幅提高。另一方面，雷射也能產生非常短的脈衝，使瞬間功率也能大幅提高。因此一個高功率的短脈衝雷射聚焦後，焦點附近的電場極為強大，遠超過微波所能達到的強度。然而雷射的電場幾乎與行進方向垂直，因此不便持續的直接加速電子。1979 年 Tajima 和 Dawson 提出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，只要電子處於加速作用的相位，加速就可以持續進行。這種加速方式可以產生每公尺一千億伏特的加速電場，比起微波加速大了一千倍，相當於將一公里的加速器縮小到一公尺，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。

自 1980 年代中期始，飛秒（ 10^{-15} 秒）雷射技術迅速發展。利用共振腔內的非線性效應，雷射可以自發產生短於 10^{-13} 秒的脈衝。直至 1990 年代中期，內建色散補償的寬頻鏡片的問世，使得雷射可直接產生短於 10^{-14} 秒的脈衝。同時期，飛秒脈衝放大技術也有極大的進展，其中最重要的突破是線性變頻放大技術。雷射放大器的極限在於放大器介質的非線性效應和強光導致的游離損壞。Strickland 和 Mourou 發明的線性變頻放大技術是利用光柵提供的大群速度色散，將脈衝拉長數千倍，放大後再以反向的群速度色散將脈衝壓縮回原來的長度。這使得脈衝

在放大器內的照度降低了數千倍，因此提升了放大器的極限倍率達數千倍。利用該技術，可在小型的實驗室內將飛秒雷射脈衝放大十億倍，達到十兆瓦的瞬間功率，聚焦後照度達到 10^{23} W/m²，也就是正午日照的 10^{20} 倍！

十兆瓦雷射的建造，需要非常高段的光學技術，因此目前世界上只有很少數的實驗室擁有這種等級的雷射，而因其穩定性、光束品質和脈衝品質，足以從事該項精密實驗者，更是寥寥可數。過去數年間，原分所建造了一部頂級規格的十兆瓦雷射，並持續擴充其功能[1]。該部雷射正用於研究雷射驅動電漿波電子加速器、軟 X 光雷射、和電漿非線性光學。限於篇幅，本文只介紹電子加速器的部分。雷射驅動電漿波電子加速器所面臨的挑戰有三：1、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。2、如何侷限電子的加速方向，以獲得狹窄的電子束。3、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。我們正運用雷射控制電漿的技術，來面對這些挑戰。

首先，我們利用一個短而強的前置脈衝，加上圓錐透鏡聚焦到一個縱向線形的區域，可預先在該線形區域游離氣體，產生自由電子。接著以一個長脈衝驅動自由電子，使它們長時間高速振盪，撞擊離子，造成局部加熱和更多游離。當熱電子往外擴散，並拖著離子往外移動時，造成中心的電漿密度下降，而周邊的電漿密度卻因此往外衝的電子與中性原子碰撞，產生新的游離而升高。電漿密度低的區域所對應的折射率高，形成波導效應，因此可以導引雷射保持高照度、長距離的傳播[2]。一旦雷射脈衝進入預先形成的波導，所產生的有質動力（ponderomotive force）會將電子暫時排開，在波導中短暫形成帶正電的通道，這個正電通道會防止後面被電漿波加速的電子散開，因此可以得到狹窄的電子束。利用這些新技術，我們可以在一毫米的距離將電子加速到五千萬電子伏特，而發散角小於 0.2 度。更令人興奮的是，我們發現在高密度的電漿中，電子會自動整齊加速，這現象非現有理論所能解釋。

在電子注入技術上，我們發展了定時、定點的注入方法，領先世界上其他團隊。我們使用一個短而強的前置脈衝來產生種子電漿波，藉由拉曼前向散射，這個種子電漿波會被主脈衝放大，與前置脈衝同步。另一方面，種子電漿波也藉由拉曼背向散射注入電子，這些電子被放大的電漿波加速，也是與前置脈衝同步。這是時間定位注入的技術[3]。我們把上述產生波導的技術用於垂直於雷射傳播的方向，可以在雷射產生的電漿通道上開闢一個密度陡坡，當電漿波通過這個密度陡坡時，因相位急速改變而注入電子。這是空間定位注入的技術[4]。如果能把這兩個技術與上述的電漿波導技術結合，就能達成一個接近理想的前級加速器，這也是我們近程努力的目標。

我們的電子團含有約 10^{10} 電子，與同步輻射加速器的電子團相當。若以相同原理建造後級加速器，將這些電子加速到十億電子伏特等級，我們目前的雷射能量明顯不足，因此建造更大的雷射是勢在必行的。限於原分所的實驗室現有空間，我們將在中央大學建造 100 兆瓦級的雷射，有了十億電子伏特的電子團，只要加上磁場，就有了桌上型的同步輻射。另一方面，將十億電子伏特的電子團以小角度注入預先形成的正電電漿通道，電子會產生橫向振盪，振盪發出的輻射同相相加，就有了桌上型的自由電子雷射。更刺激的是，將飛秒雷射脈衝與十億電子伏特的電子團對撞，藉由都卜勒效應可得到千萬電子伏特的定向伽瑪射線，其脈衝寬度短於 10^{-15} 秒。這樣的光源也許足以開啟核子物理研究新一波的革命！這是我們中程努力的目標。

[1] H.-H. Chu, S.-Y. Huang, L.-S. Yang, T.-Y. Chien, Y.-F. Xiao, J.-Y. Lin, C.-H. Lee, S.-Y. Chen, and J. Wang, Applied Physics B **79**, 193 (2004).

[2] Yi-Fang Xiao, Hsu-Hsin. Chu, Hai-En Tsai, Chau-Hwang Lee, Jun-Yuan Lin, Jyhpyng Wang, and Szu-Yuan Chen,

Physics of Plasmas **11**, L21 (2004).

[3] Wei-Ting Chen, Ting-Yei Chien, Chau-Hwang Lee, Jun-Yuan Lin, Jyhyng Wang, and Szu-Yuan Chen, Physical Review Letters, **92**, 075003 (2004).

[4] Ting-Yei Chien, Chun-Lin Chang, Chau-Hwang Lee, Jun-Yuan Lin, Jyhyng Wang, and Szu-Yuan Chen, Physical Review Letters **94**, 115003 (2005).