

## [ 處務報導 ]

## 電子迴旋脈射 — 課題簡介及個人之旅

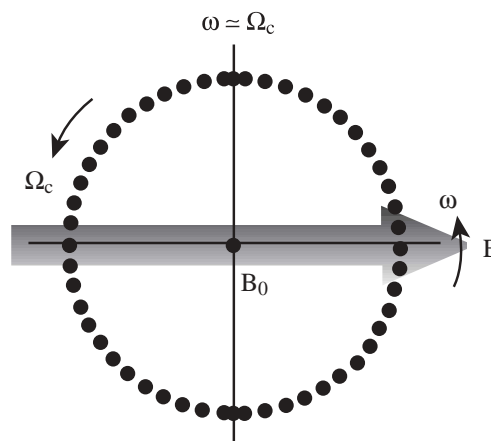
清華大學物理系 朱國瑞

## 一、課題簡介

早期的真空電子學，研創出磁控管(magnetron)，速調管(klystron)及行波管(traveling wave tube，簡稱 TWT)等微波源。這些成果與我們今天的日常生活、科學研究，以至戰爭的勝負都息息相關。1960 年代以後，傳統微波管已趨成熟，取而代之的是一門新興科目：相對論電子學(relativistic electronics)，它的兩大支柱為「自由電子雷射(free electron laser)」和「電子迴旋脈射(electron cyclotron maser，簡稱 ECM)」，二者均利用相對論效應，將自由電子的動能轉換為更高頻率及功率的電磁波。

傳統微波管研究，固然用到了極高深的電磁理論，其最後詮釋，往往只需簡單的流體方程式及電路學。在「相對論電子學」的研究工作上，由於電子流及電磁波輻射強度大幅提昇，相互作用之自洽效應(self-consistency)不可勿視，而電子分佈函數(distribution function)的影響也極為重要。另外，所討論的各種機制，均與相對論效應相關。因此，relativistic Vlasov equation 和 Maxwell equations 之自洽組合構成嚴謹分析的起始點。為了解決種種衍生的非線性問題(例如 mode competition)，電腦模擬常被用來輔助理論及實驗研究。從學理言，相對論電子學歸屬於離子體科學(plasma science)領域。

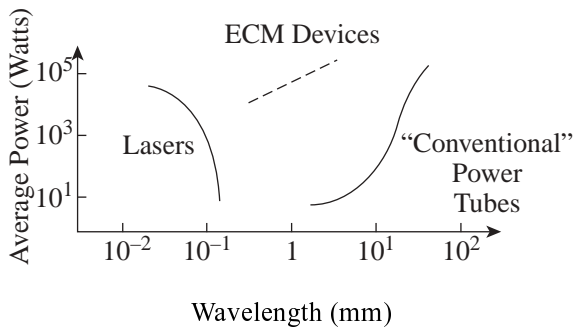
ECM 的運作，首先經由電子發射器(通稱 electron gun)，在靜磁場  $B_0$  中產生以頻率  $\Omega_c$  迴旋之高能電子(數十至數百 keV)，其中  $\Omega_c$  之相對論公式為  $\Omega_c = eB_0 / (\gamma mc)$ ，式中之  $m$  為電子之靜止質量， $\gamma$  為其相對論因子。圖一所示為一圈在同一迴旋軌道上運行，並成均勻分佈的電子。起始時，各電子之能量( $\gamma$ )相同，其迴旋頻率( $\Omega_c$ )亦相同，故能維持均勻分佈，而



圖一 ECM 輻射原理示意圖

無輻射產生。假設此時外加一圓極化電磁波(圖一箭頭所示為其瞬間電場方向)，以  $\omega$  頻率與電子幾近同步旋轉，則上半圈之電子將被加速，其  $\gamma$  增大， $\Omega_c$  變小，而下半圈之電子將被減速，其  $\gamma$  減小， $\Omega_c$  變大。因此，各電子之迴旋角速度開始相異，電子漸漸由均勻分佈，變為不均勻分佈(通稱群聚)，電子流亦由起始時之直流形態，獲得具有輻射能力的交流成份。由於電磁波頻率和電子迴旋頻率相近， $\omega \cong \Omega_c$  (cyclotron resonance)，此群聚機制可以持續許多迴旋週期，使電子流中之交流成份不斷增加，因而大大助長(amplify)外加電磁波的強度。上述輻射現象起源於外加電磁波之激發，故為 stimulated emission，和 laser 相較，可謂異曲同工，所以有 electron cyclotron maser 之名。有趣的是，這種基於相對論效應的群聚機制，只與電子  $\gamma$  值之變化有關，而並不取決於其絕對值。因此在電子動能只有幾個 keV 時( $\gamma \sim 1.01$ )，效應就很明顯。由此機制所演變出的各種輻射裝置，通稱迴旋管(gyrotron)。

同調(coherent)電磁波源，大致區分為量子



圖二 電磁波源功率圖

及古典兩類型，分別以雷射及前述傳統微波管為代表。雷射中的原子或分子受激發後，只能放出一個特定頻率的光子，因此所能產生的功率隨著光子能量(或輻射頻率)的減小而降低。反之，微波管中的每個自由電子，可以發射大量光子。但微波管所使用的基本模(fundamental mode)作用結構大小和波長相近，以致作用結構(或波長)減小時，受到散熱不易及高壓放電等限制，所能承受的功率隨著降低。兩類型波源功率降低的相反趨勢，幸運地使得電磁波頻譜的光波及微波段，都有高功率波源，但是在接壤的毫米及次毫米波段，功率難以提昇，因此波源功率圖上(圖二)，出現了一個「缺口」。

ECM 具有自由電子大量發射光子的優點，同時也因為電子在磁場中的迴旋具有特定頻率  $\Omega_c$  (有如原子能階間所產生的特定輻射頻率)，而可以使用較大的作用結構，藉共振效應激發頻率  $\omega \cong \Omega_c$  的高次模(high order mode)。大量發射光子及大作用結構的組合，使 ECM 恰能填補圖二的缺口。ECM 輻射機制的本身，構成有趣的原理研究。所產生的毫米及次毫米波，亦可在 fusion plasma heating, advanced radars, industrial processing, materials characterization, particle acceleration, 以及 space object probing 等方面，開拓出新的應用研究。原理與應用的結合，使得 ECM 在歷時四十年的鑽研後，仍然持續地蓬勃發展。

## 二、個人之旅

本人很榮幸藉此機會報告個人參加 ECM 研究的些許經驗。1970 年代，由於前蘇聯正在從事機密的 ECM 研究，美國 Naval Research Laboratory (NRL) 也組成了一個 ECM 研究小

組，相關理論工作，係由本人負責。當時的文獻，偏重工程，從物理角度窺視，仍然存在著廣闊的空間。一開始有幸和耶魯大學的 Hirshfield 教授合作，首次以 plasma instability 觀點，探討 ECM 中兩種群聚機制的相互關係 [1]，澄清了一個長久以來懸而未決的快波及慢波激發機制問題。此文及另一篇探討諧波機制的論文 [2] 較具基礎性，後來經常被 ECM 研究人員作為理論參考。在 NRL 十一年的工作期間，也參與了幾項發明。其中 gyrotron traveling wave amplifier (gyro-TWT) 成為本人 1983 年回清華後所從事的主要研究。

回國之初，仍以理論研究為主。一年下來，完成了 fully relativistic gyrokystron 理論，用以探討超高功率輻射機制。由於它在加速器方面的應用潛力，1985 年暑假，應邀前往馬利蘭大學主持 gyrokystron 研究，構思出一個功率超越 state-of-the-art 近百倍的實驗設計 [3]，以作為 Next Linear Collider 的加速波源。該構思獲得美國能源部支持迄今，成為馬大的一個大型計畫。1991 年，馬大的實驗 [4]，印証了預期結果，獲得國際重視，之後衍生出 NRL 的高解析度雷達計畫。去年，CERN 亦採用該構思，委託工業界研發超高功率毫米波發射系統，為籌建下一代粒子加速器鋪路。

應用研究，若全靠理論，在國內不易發展，因此動了作實驗的念頭。在清華的前兩年，經常利用寒暑假到 UCLA 參加 Luhmann 教授的研究團隊，和他的研究生一起學習實驗。第三年，在 NRL 老同事 Barnett 博士的協助及國科會支助下，於物理系建立了「高頻電磁實驗室」(圖三、四)，師生頓時有了海闊天空的感覺。我們對 ECM 中的模式競爭等錯綜複雜現象，作了深入的探究。從理論體系的建構開始 [5,6]，繼而設計及製造特殊儀器，進行了一系列的創新性實驗觀測 [7-9]。1998 年，經由學生們多年的接力奮鬥，完成了一個 Ka 頻段 gyro-TWT 實驗 [10]，其功率(93 kW)、增益(70 dB)、頻寬(8.6%)及效率(26.5%)均超越屹立三十餘年的國際記錄，提供了開發遠距離，高解析度雷達系統的關鍵技術。此方案已獲得 NRL 的重視，正據以發展新一代的雷達射頻系統。清大的研究結果，亦相繼導至美、歐及亞洲六、七



圖三 清大高頻電磁實驗室



圖四 毫米波診斷系統

個其他研究機構開展 gyro-TWT 研究。

最近，我們和高速電腦中心及國家理論中心同仁，一起探討迴旋返波振盪的動力行為。從理論發現[11]，並以實驗印証[12]，振盪波形具有非線性收縮的特性，因而獲致與傳統認知完全迥異的幾項結論，提供了一個新的物理角度來透視相關問題，在期刊[13,14]及國際會議中，引起了廣泛的討論。我們已將它列為國科會新核定計畫中的一項重點研究。

### 三、結語

這段 ECM 之旅，不知不覺間，已歷時廿五年，仍感意猶未盡。高興的是，大部份的階段性任務，都在台灣完成。過程中，培養了很多優秀學生，投入國內科技行列，貢獻所長。例如同步輻射研究中心高頻小組的原始成員，都是本實驗室所培育，大家合力完成了該設施的高頻系統。國內微波管工業的技術人才亦大都來自本實驗室，目前正與我們攜手研發寬頻衛星通訊及高解析度雷達的核心組件：毫米波射頻系統。礙於篇幅限制，本文未能呈現同行學者的傑出成果。ECM 研究全貌，將在一篇題為“The Electron Cyclotron Maser”的 review 論文中細述[15]。

### 參考文獻

- [1] K. R. Chu and J. L. Hirshfield, Phys. of Fluids 21, 461 (1978).
- [2] K. R. Chu, Phys. of Fluids 21, 2354 (1978).
- [3] K. R. Chu, V. L. Granatstein, P. E. Latham, W. Lawson, and C. D. Striffier, IEEE Trans. Plasma Sci. 13, 424 (1985).

- [4] W. Lawson, J. P. Calame, B. Hogan, P. E. Latham, M. E. Read, V. L. Granatstein, M. Reiser, and C. D. Striffier, Phys. Rev. Lett. 67, 520 (1991).
- [5] K. R. Chu and A.T. Lin, IEEE Trans. Plasma Science PS-16, 90 (1988).
- [6] K. R. Chu, H. Guo, and V. L. Granatstein, Phys. Rev. Lett. 78, 4661 (1997).
- [7] L. R. Barnett, L. H. Chang, H. Y. Chen, K. R. Chu, W. K. Lau and C. C. Tu, Phys. Rev. Lett. 63, 1062 (1989).
- [8] C. S. Kou, S. H. Chen, L. R. Barnett, H. Y. Chen, and K. R. Chu, Phys. Rev. Lett. 70, 924 (1993).
- [9] K. R. Chu, L. R. Barnett, H. Y. Chen, S. H. Chen, Ch. Wang, Y. S. Yeh, Y. C. Tsai, T. T. Yang, and T. Y. Dawn, Phys. Rev. Lett. 74, 1103 (1995).
- [10] K. R. Chu, H. Y. Chen, C. L. Hung, T. H. Chang, L. R. Barnett, S. H. Chen, and T. T. Yang, Phys. Rev. Lett. 81, 4760 (1998).
- [11] S. H. Chen, K. R. Chu, and T. H. Chang, Phys. Rev. Lett. 85, 2633 (2000).
- [12] T. H. Chang, S. H. Chen, L. R. Barnett, and K. R. Chu, Phys. Rev. Lett. 87, 064802 (2001).
- [13] G. S. Nusinovich, A. N. Vlasov, and T. M. Antonsen, Phys. Rev. Lett. 87, 218301 (2001).
- [14] S. H. Chen, K. F. Pao, T. H. Chang, and K. R. Chu, Phys. Rev. Lett. (submitted, 2002).
- [15] K. R. Chu, invited review, Rev. Modern Phys. (to appear in 2003).