

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

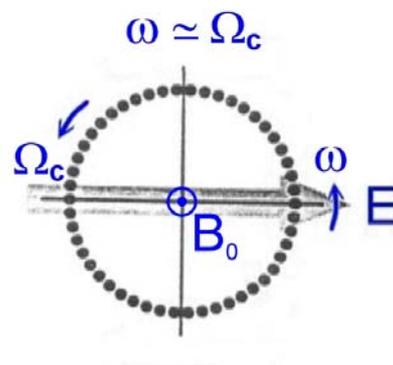
一、課題簡介

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。

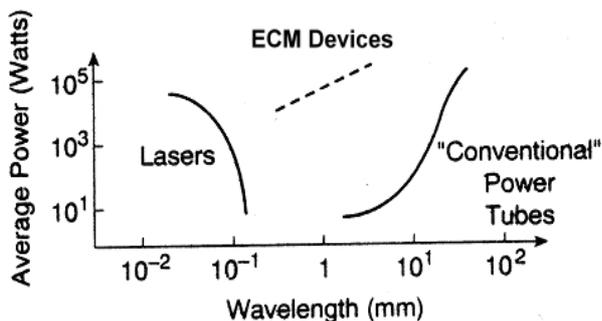
ECM 的運作，首先經由電子發射器(通稱 electron gun)，在靜磁場 B_0 中產生以頻率 Ω_c 迴旋之高能電子(數十至數百 keV)，其中 Ω_c 之相對論公式為 $\Omega_c = eB_0 / (\gamma mc)$ ，式中之 m 為電子之靜止質量， γ 為其相對論因子。圖一所示為一圈在同一迴旋軌道上運行，並成均勻分佈的電子。起始時，各電子之能量(γ)相同，其迴旋頻率(Ω_c)亦相同，故能維持均勻分佈，而無輻射產生。假設此時外加一圓極化電磁波(圖一箭頭所示為其瞬間電場方向)，以 ω 頻率與電子幾近同步旋轉，則上半圈之電子將被加速，其 γ 增大， Ω_c 變小，而下半圈之電子將被減速，其 γ 減小， Ω_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 γ 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)。



圖一、ECM輻射原理示意圖

同調(coherent)電磁波源，大致區分為量子及古典兩類型，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」。



圖二、電磁波源功率圖

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 Ω_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) 成爲本人 1983 年回清華後所從事的主要研究。

回國之初，仍以理論研究爲主。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]，以作爲 Next Linear Collider 的加速波源。該構思獲得美國能源部支持迄今，成爲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，爲籌建下一代粒子加速器鋪路。



圖三、清大高頻電磁實驗室



圖四、毫米波診斷系統

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]。

- [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. Striffler, *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. Striffler, *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).