

# 電子迴旋脈射 — 原理及應用

文/朱國瑞、張存續、陳仕宏

## 摘要

電子迴旋脈射(Electron Cyclotron Maser, ECM)係靜磁場中迴旋的電子，基於相對論效應所產生的受激輻射(stimulated emission)現象。四十年來，ECM從基礎研究逐漸發展成為一個實用的高功率同調(coherent)電磁波源，在電磁波頻譜的毫米及次毫米波段，佔有獨特的地位。ECM輻射於核融合加熱、先進雷達、粒子加速、太空探測、材料處理、物性偵測及頻譜學等應用，發揮了高度的實用價值。另一方面，其中仍有許多的物理現象，未獲充分了解，而其應用潛力也還有廣闊的發展空間。本文首先介紹真空電子學這個相關課題，再探討ECM的輻射原理及例舉幾個代表性的應用，最後略談國內的ECM研究。

## 一、課題簡介

早期的真空電子學[1, 2]，研創出磁控管(magnetron)、速調管(klystron)及行波管(traveling wave tube, 簡稱 TWT)等高功率微波源。這些成果與我們今天的日常生活(電視、微波爐、衛星通訊等)、科學研究(加速器、核融合等)，以至戰爭的勝負(雷達偵測、飛彈導航等)都息息相關。1950 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, FEL)[3]和電子迴旋脈射[4]，二者均利用相對論效應，將自由電子的動能轉換為高頻率及高功率的同調電磁輻射。相對論電子學帶來了許多新的物理題材，同時也將電磁波的頻段及功率推進到前所未有的新境界，功率較之早期微波管驟增了百萬倍以上，而波長則由厘米進入毫米、次毫米、兆赫(terahertz)、可見光、以至 X-光等頻段(表一)。除了輻射機制本身具有高度的研究價值之外，新波源的誕生又可作為其他科目的研究工具，同時也具有發展各種新型系統的潛力[5]。

**學理基礎：**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強度大幅提昇，相互作用之自洽性(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(表一)。為了解決種種衍生的非線性問題(例如飽和狀態及模式競爭等)，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領域。

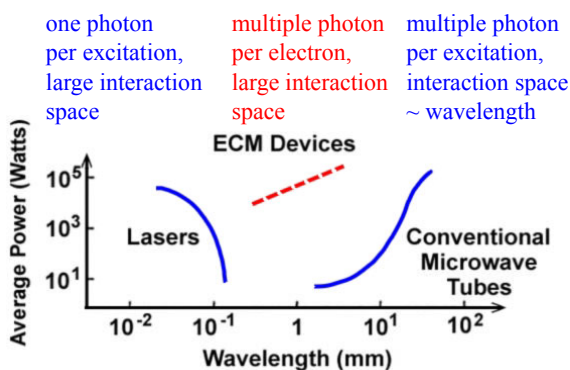
表一、傳統微波電子學和相對論電子學的比較：

	Conventional Microwave Electronics	Relativistic Electronics
Examples	Magnetron, Klystron, TWT	ECM, FEL
Frequency	$< 10^{11}$ Hz	$10^{10}$ Hz – X-ray
Power	$< 10^6$ W	$10^4$ W – $10^{10}$ W
Electron Energy	$< 100$ keV	1 keV – 10 GeV
Beam Current	$< 10^2$ A	1 A – $10^6$ A
Basic Equations	Circuit equations + Fluid equations	Maxwell equations + Relativistic kinetic eq.

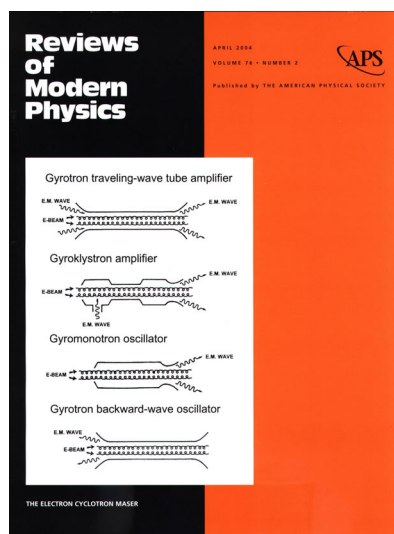
**ECM輻射在電磁波頻譜的特殊地位：**同調電磁波源，大致區分為量子及古典兩類型，分別以雷射及前述傳統微波管為代表。雷射中的原子或分子受激發後，只能放出一個特定頻率的光子，因此所能產生的功率隨著光子能量(或輻射頻率)的減小而降低(圖一)。反之，微波管中的每個自由電子，可以發射大量光子。但微波管所使用的基本模(fundamental mode)作用結構大小和波長相近，以致作用結構(或波長)減小時，受到散熱不易及高壓放電等限制，所能承受的功率隨著降低。兩類型波源功率降低的相反趨勢，幸運地使得電磁波頻譜的光波及微波段，都有高功率波

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(圖一)，出現了一個「缺口」。ECM輻射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具有特定的迴旋頻率 $\Omega_c$  (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)。電子大量發射光子及大作用結構的組合，使ECM恰能填補圖一的缺口。

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，亦已於多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(早期微波管研究的全盛期只有二十多年)。目前有十多個國家從事這方面研究，德、美、俄及日本四國投入的經費最多。由於ECM輻射在電磁波頻譜的特殊地位，2004年4月的Rev. of Modern Phys.以之為封面圖(圖二)。



圖一、電磁波源類別、特色及功率圖。



圖二、2004年4月RMP封面圖。

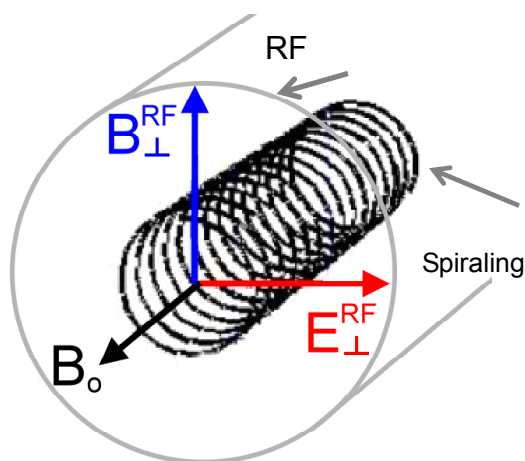
## 二、ECM 輻射原理

電子發射器所產生的電流，一般均為直流，不會產生輻射。因此必須藉著某種機制，將電子聚成一團一團(通稱群聚)，使它成為交流電子流，才能把電子動能輸送給電磁波。如果造成群聚的是一個弱電磁波，群聚後的電子流再將動能回饋給電磁波，增長其強度，就會產生受激輻射。一般真空輻射器件的類別，主要取決於其群聚機制。在真空輻射器件研發最興盛的1930及1940年代，研創出磁控管、速調管及行波管三大微波管家族。但是在這個時期，大家都錯過了一個重要的輻射機制。十年後，四位科學家幾乎在同時，分別從古典理論[6, 7]、量子理論[8]以及實驗[9]，殊途同歸地發現了這個ECM機制，因而衍生出第四個微波管家族，並把波長向下延伸到毫米及次毫米範圍。

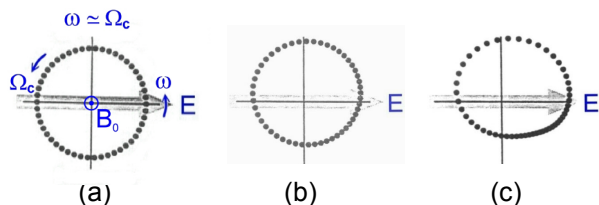
圖三所示為ECM的簡單模型。一圈圈的高能量電子流(數十至數百keV)在靜磁場 $B_0$ 中以 $\Omega_c$ 角頻率迴旋。 $\Omega_c$ 之相對論公式為 $\Omega_c = eB_0 / (\gamma m)$ ，式中之 $m$ 為電子之靜止質量， $\gamma$ 為其相對論因子。電子流曝露在高頻結構(例如波導或共振腔)的圓極化電磁波中，電磁波可以是刻意輸入的，也可以是無所不在的微弱雜訊，其頻率為 $\omega$ 。圖四(a)所示為一圈在同一迴旋軌道上運行，並成均勻分佈的代表性電子，電子和圓極化電磁波均以逆時針方向，幾近同步旋轉( $\omega \approx \Omega_c$ )。起始時，各電子之能量( $\gamma$ )相同，其迴旋角頻率亦相同。圖四(a)中的電磁波電場指向右水平方向，因此上半圈之電子將被加速，其 $\gamma$ 值增大， $\Omega_c$ 變小，而下半圈之電子將被減速，其 $\gamma$ 值減少， $\Omega_c$ 變大。由於各電子之迴旋角頻率開始相異，電子漸漸由均勻分佈，變為不均勻分佈[圖四(b, c)]，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。由於電磁波和電子幾近同步旋轉，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，因而可以大幅增長電磁波的強度。這裡還有一個重要的細節，為了使群聚後的電子流釋出能量， $\omega$ 必須略大於

$\Omega_c (\omega \gtrsim \Omega_c)$ ，這樣大多數的電子才會落入減速的相位 [圖四( c)]。

上述輻射現象起源於電磁波造成的電子群聚，故為受激輻射，和雷射相較，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 $\gamma$ 之絕對值。因此在電子動能只有幾個keV時 ( $\gamma \sim 1.01$ )，效應就很明顯。



圖三、ECM 結構示意圖。

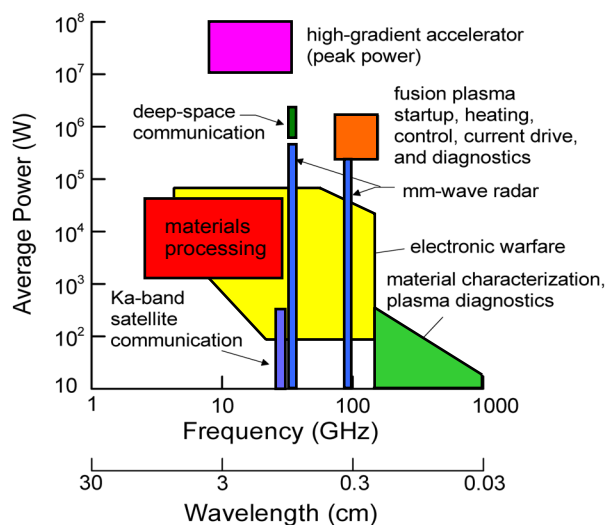


圖四、ECM群聚原理示意圖。

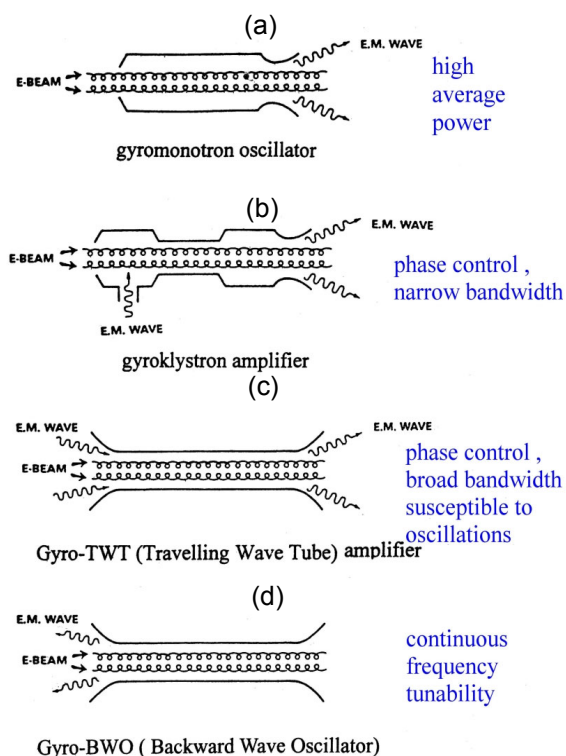
### 三、ECM輻射的主要應用

圖五所示為高功率毫米波及鄰近波段的種種應用。有些應用需要放大器來控制訊號頻率及相位(例如雷達、通訊及粒子加速)，其他應用則只需要振盪器來提供足夠功率。由ECM輻射機制所演變出的各種同調電磁波源，通稱為迴旋管(gyrotron)。迴旋管有四種基

本形式(圖六)，各具特色，可滿足不同的需求。以下簡要介紹迴旋管的幾個主要應用：



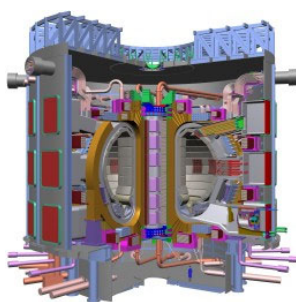
圖五、高功率毫米波及鄰近波段的種種應用。



圖六、ECM 輻射源的四種基本形式及特性。

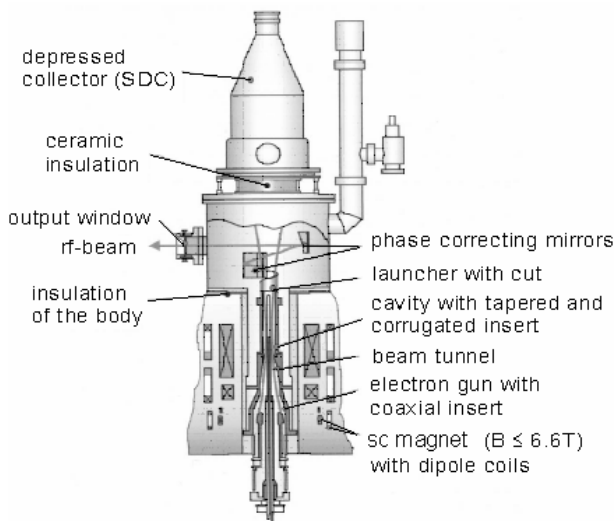
核融合電漿加熱：核融合發電是當前科技界最大的挑戰之一，其研發經費的昂貴，已非一國所能負擔。因此，正在籌建的 International Thermonuclear

Experimental Reactor (ITER, 圖七), 是一個跨國的大型合作計畫, 目的為證明核融合發電在科學和技術上的可行性[10]。ITER 的電漿加熱係使用迴旋振盪器, 藉電子和毫米波的共振 [11, 12] 將電磁波能量, 轉換為電漿的熱能。迴旋振盪器的基本結構 [圖六(a)] 看似簡單, 實際結構卻極為複雜(圖八及 Ref.13), 是物理和工程的一大挑戰。現今百萬瓦級連續功率的成品, 有些零件是鑽石作的, 每個身價達百萬美元。ITER 需要二、三十個這種毫米波發射器(圖九及 Ref.14), 把電漿加熱到「燃點」, 亦即核融合反應所產生的能量可以自行維持反應所需的高溫。



合作國家：歐盟、美、  
俄、日、中、韓  
預算：150億美元  
預期完工日期：2015年  
電漿溫度：攝氏1億度  
預期產生功率：500 MW

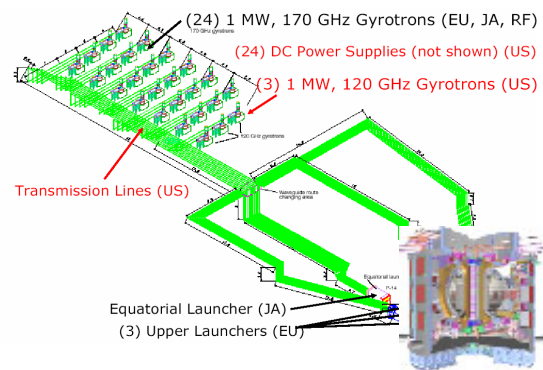
圖七、國際核融合實驗反應爐(取自 ITER 網站)。



圖八、德國 Forschungszentrum Karlsruhe 實驗室研發之 165 GHz, 2.2 MW peak power 迴旋振盪器(取自 Ref. 13)。

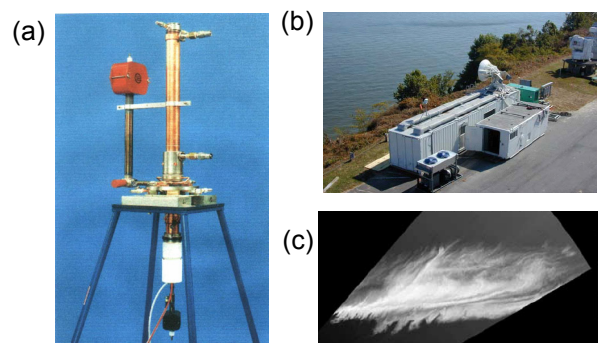
先進雷達：雷達的發展史可追溯到百年之前 [15], 直到今天, 科學家仍在不斷地追求精進, 使它看得更遠, 更清楚。看得更遠需要更高功率, 看得更

清楚需要更短波長。因此, ECM 輻射在毫米波段的突起, 為雷達開創了新契機[16]。遠距離雷達需要穿過大氣, 故毫米波雷達頻率大都選在 35 GHz 及 95 GHz 兩個大氣吸收率較弱的「窗口」。先進雷達的電波發射器都是放大器類型, 俾可控制頻率及相位。



圖九、ITER 的毫米波加熱系統(取自 Ref. 14)。

高功率毫米波放大器中, 目前發展最成熟的是迴旋速調放大器[圖六(b)及 Refs 17,18]。圖十(a)所示為美國海軍研究所研發成功的迴旋速調放大器[18], 它的平均功率為 10 kW, 是 W-band (56-100GHz)放大器的最高紀錄。現正使用於該所裝設的 WARLOC (W-band Advanced Radar for Low Observable Control) 雷達站[圖十(b)]。圖十(c)為 WARLOC 所取得的高空雲層影像[19, 20]。

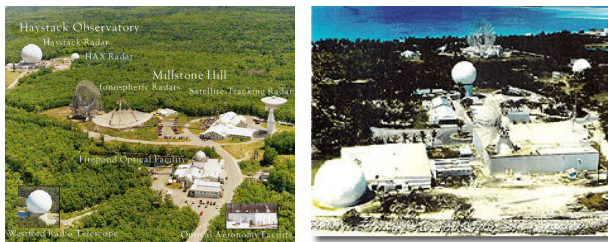


圖十、美國 Naval Research Laboratory 研發之 94 GHz, 100 kW peak power, 0.7% bandwidth, 33 dB gain 迴旋速調放大器(a)及據以設置之 WARLOC 雷達站(b)。(c)圖為 WARLOC 取得的高空雲層影像[(a), (b), (c)圖分別取自 Refs. 18, 19, 20]。

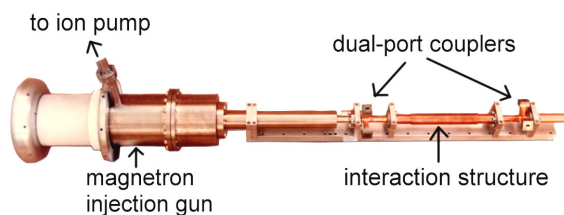
雷達兼具國防及和平用途, 是各國科技發展重



點。以美國為例，在全球各地遍佈雷達設施(其中兩個示於圖十一)，日夜追縱太空飛行物(衛星、飛彈以至太空碎片等)。要看到 1 公分大小的太空碎片，除了需要高功率及高頻率之外，還要高頻寬。迴旋速調放大器的頻寬( $\sim 1\%$ )還有所不足，迴旋行波放大器[圖六(c)]則可提供足夠頻寬。圖十二所示為清大所研發的迴旋行波放大器[21]，其頻寬達 8.6%。圖十一的兩個雷達設施目前正採取此一方案，提昇其雷達系統的鑑別度。



圖十一、遍佈全球的美國太空偵測設施：MIT 林肯實驗室 Haystack 雷達設施(左)及陸軍 Kwajalein Atoll 雷達設施(右)。(取自此二設施之網站)。



圖十二、清大研發之 35 GHz, 93 kW peak power, 8.6% bandwidth, 70 dB gain 迴旋行波放大器。

粒子加速：微波的積極開發，起始於二次世界大戰時對雷達的需求。後來微波成了研究工作者的有力工具。戰後半個世紀以來，微波在物理領域所扮演的角色，Ref. 22 中有詳細的紀載，其中粒子加速器就是一個主要項目。規畫中的新一代粒子加速器大都進入 TeV 能量級，為了避免粒子轉彎時之輻射損耗，這種加速器需採用直線設計。在總長度的限制下(大約幾十公里)，使用高電場(high gradient)共振腔來加速粒子，是提昇能量的必要方法。高電場可用高頻電磁波(例如 30GHz)及超導共振腔兩個方法來達成。TeV 加速器所需的共振腔數以千計，每個共振腔注入的功

率，至少千萬瓦以上，高頻系統因此成為下一代加速器設計最主要的考量因素，其成本也是整個預算中最大的項目。



圖十三、日本 Fukui University 的 FIR 實驗大樓(取自 Ref. 26)。

迴旋速調放大器應用於 TeV 加速器的潛力獲得証實之後[17]，馬利蘭大學在美國能源部支援下，從事迴旋速調放大器研究已廿年之久[23, 24]，可見其困難度甚高。最近，CERN 已開始採用它來作高頻原件測試[25]，但競爭的方案很多，大家都在努力以赴，希望自己的方案成為未來加速器的主流技術。

除了上述三項較為熟知的應用外，ECM 輻射還應用在許多比較專門的研究。以日本 Fukui University 為例，該校於 1999 年成立 Research Center for Development of Far Infrared Region (FIR FU, 圖三及 Ref. 26)，與澳洲 Sidney University 合作，從事次毫米波段 ECM 輻射在 phase transition [27]，electron spin resonance [28]，及 plasma scattering [29]等方面的研究。

#### 四、國內的 ECM 研究

限於篇幅，本文僅探討 ECM 輻射原理及應用。其實，原理到應用之間，有著一段漫長的研究過程。這四十年來的 ECM 研究，在 Ref. 4 中有詳細討論。每類型的 ECM 輻射源(圖六)，都是一個極其有趣，而又各自不同的非線性系統，提供變化無窮的研究素

材。以下謹略談國內的 ECM 研究，作為本文的結束。

清華大學從 1983 年開始從事 ECM 研究，前期著重電子迴旋共振加熱[11]和迴旋放大機制[17, 21]的研究，研究成果為上述核融合電漿加熱、遠距離雷達及粒子加速等應用提供了上游環節。近年來，作者和學生們把重點放在尚未付諸實用的迴旋返波振盪機制研究，發現電磁場非線性收縮[30]、不穩定單模振盪[31]、高次模形成條件[32]以及模式競爭[33]等現象，均與傳統認知迥異，實驗過程中又發現一些奇特現象，還在逐步了解之中。南台科技大學光電工程系葉義生教授和澎湖科技大學電信工程系洪健倫教授也正帶領多位同學，合作從事相關的研究[34, 35]。

ECM 群聚機制不只發生在高頻結構中的電磁波，也會發生在電漿波中。更且，它還可以呈現在離子上。成功大學物理系陳寬任教授將此群聚機制，應用於 tokamak 核融合反應爐所產生的 MeV 離子(例如質子和通稱  $\alpha$  粒子的氦離子)，發現這些粒子可以在電漿中驅動 ion cyclotron wave [36-38]，並據以解釋歐洲聯合 tokamak 實驗所量測到的輻射波譜[39]和普林斯頓大學 tokamak 實驗所量測到的  $\alpha$  粒子能量分佈[40]。這是一個引起核融合界興趣的新穎理論，因為很多人難以相信，相對論效應竟能發生在幾個 MeV ( $\gamma \approx 1.001-1.003$ )的離子上。事實上，ECM 機制並不受限於粒子能量的最低起始值[Ref. 4, p. 496 及 p. 510]，陳教授的結果完全不違背學理。另外，中央大學李羅權教授在馬利蘭大學工作時，和吳京生教授共同發現，太空電漿中的 loss-cone 電子分佈，可以在地球上空的地磁場中驅動 ECM instability，成功地解釋了 auroral kilometric radiation 的產生機制[41]。

## 參考文獻

1. V. L. Granatstein, R. K. Parker, and C. M. Armstrong, "Vacuum electronics at the dawn of the twenty-first century," *Proc. IEEE* **87**, 702 (1999).
2. R. J. Barker and E. Schamiloglu, Eds., *High-Power Microwave Sources and Technologies* (IEEE Press, New York, 2001).
3. C. A. Brau, *Free-Electron Lasers* (Academic Press, Boston, MA, 1990).
4. K. R. Chu, "The Electron Cyclotron Maser," *Rev. Modern Phys.* **76**, 489 (2004).
5. A. V. Gaponov-Grekhov and V. L. Granatstein, Eds., *Applications of High Power Microwaves* (Artech House, Norwood, MA, 1994).
6. R. Q. Twiss, "Radiation transfer and the possibility of negative absorption in radio astronomy," *Aust. J. Phys.* **11**, 564 (1958).
7. A. V. Gaponov, "Interaction between electron fluxes and electromagnetic waves in waveguides," *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.* **2**, 450 (1959); A. V. Gaponov, "Letter to the editor," *ibid*, 836 (1959).
8. J. Schneider, "Stimulated emission of radiation by relativistic electrons in a magnetic field," *Phys. Rev. Lett.* **2**, 504 (1959).
9. R. H. Pantell, "Backward-wave oscillations in an unloaded waveguide," *Proc. IRE* **47**, 1146 (1959).
10. 詳見ITER網站：  
<http://www.ofes.fusion.doe.gov/iter.html>
11. K. R. Chu, "Theory of Electron Cyclotron Resonance Heating", in *Wave Heating and Current Drive In Plasmas*, edited by V. L. Granatstein and P. L. Colestock (Gordon and Breach, New York, 1985), pp. 317-370.
12. T. C. Luce, "Applications of high-power millimeter waves in fusion energy research," *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30**, 734 (2002).
13. B. A. Piosczyk, Arnold, G. Dammertz, O. Dumbrajs, M. Kuntze, and M. K. Thumm, "Coaxial cavity gyrotron—recent experimental results," *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30**, 819 (2002).

14. R. Vernon *et al.*, in 16th ANS Meeting on the Technology of Fusion Energy (Madison, Wisconsin, 2004).
15. M. Skolnik, "Role of radar in microwaves," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **50**, 625 (2002).
16. W. M. Manheimer, G. Mesyats, and M. I. Petelin, "Applications of high-power microwave sources to enhanced radar systems," in *Applications of High Power Microwaves*, edited by A. V. Gaponov-Grekhov and V. L. Granatstein (Artech House, Norwood, MA, 1994), pp. 169-208.
17. K. R. Chu, V. L. Granatstein, P. E. Latham, W. Lawson, and C. D. Striffler, "A 30-MW gyrokystron amplifier design for high-energy linear accelerators," IEEE Trans. Plasma Sci. **13**, 424 (1985).
18. M. Blank, K. Felch, B. G. James, P. Borchard, P. Cahalan, T. S. Chu, H. Jory, B. G. Danly, B. Levush, J. P. Calame, K. T. Nguyen, and D. E. Pershing, "Development and demonstration of high-average power W-band gyro-amplifiers for radar applications," IEEE Trans. Plasma Sci. **30**, 865 (2002).
19. M. T. Ngo, B. G. Danly, R. Myers, D. E. Pershing, V. Gregers-Hansen, and G. Lind, in *Proceedings IEEE International Vacuum Electronics Conference* (IEEE, New York, 2002), pp. 363-364.
20. A. W. Fliflet, W. M. Manheimer, K. St. Germain, G. Linde, W. J. Cheung, V. Gregers-Hansen, B. G. Danly, and M. T. Ngo, 2003, AIP Conf. Proc. **691**, 329 (2003).
21. K. R. Chu, H. Y. Chen, C. L. Hung, T. H. Chang, L. R. Barnett, S. H. Chen, and T. T. Yang, "Ultra-high-gain gyrotron traveling-wave amplifier," Phys. Rev. Lett. **81**, 4760 (1998).
22. P. Forman, "Swords into ploughshares: Breaking new ground with radar hardware and techniques in physical research after World War II," Rev. Mod. Phys. **67**, 397 (1995).
23. V. L. Granatstein and W. Lawson, "Gyro-amplifiers as candidate rf drivers for TeV linear colliders," IEEE Trans. Plasma Sci. **24**, 648 (1996).
24. W. Lawson, J. Cheng, J. P. Calame, M. Castle, B. Hogan, V. L. Granatstein, M. Reiser, and G. P. Saraph, "High-power operation of a three-cavity X-band coaxial gyrokystron," Phys. Rev. Lett. **81**, 3030 (1998).
25. M. Blank, P. Borchard, S. Cauffman, K. Felch, and Y. M. Mizuhara, 2002, "Design of a 50-MW 30-GHz gyrokystron amplifier for accelerator applications," in *Proceedings IEEE International Vacuum Electronic Conference* (IEEE, New York, 2002), pp. 85-86.
26. T. Idehara, "Research Center for Development of Far Infrared Region," Bulletin Asia Pacific Physical Societies **14**, pp. 2-22 (2004).
27. G. P. Timms and G. F. Brand, 1996, "Millimeter-wave measurements of phase transitions in thiourea using a gyrotron," Appl. Phys. Lett. **68**, 2899 (1996).
28. Aripin, S. Mitsudo, T. Shirai, K. Matsuda, T. Kanemaki, T. Idehara and T. Tatsukawa, "Submillimeter wave electron-spin-resonance measurement for  $\text{Cr}^{3+}$  in ruby crystal using a gyrotron as a radiation source," Int. J. Infrared and Millimeter Waves **20**, 1875 (1999).
29. T. Idehara, I. Ogawa, K. Kawahata, H. Iguchi and K. Matsuoka, "Application of the Gyrotron FU II submillimeter wave radiation source to plasma scattering measurement," Int. J. Infrared and Millimeter Waves **25**, 1567 (2004).
30. S. H. Chen, K. R. Chu, and T. H. Chang, "Saturated Behavior of Gyrotron Backward-Wave Oscillator," Phys. Rev. Lett. **85**, 2633 (2000).
31. T. H. Chang, S. H. Chen, L. R. Barnett, and K. R. Chu, "Characterization of Stationary and Non-stationary

- Behavior of Gyrotron Backward Wave Oscillator", Phys. Rev. Lett. **87**, 064802 (2001).
- 32.S. H. Chen, T. H. Chang, K. F. Pao, C. T. Fan, and K. R. Chu, "Linear and Time-Dependent Behavior of the Gyrotron Backward-Wave Oscillator", Phys. Rev. Lett. **89**, 268303 (2002).
- 33.K. F. Pao, T. H. Chang, C. T. Fan, S. H. Chen, C. F. Yu, and K. R. Chu, "Dynamics of Mode Competition in the Gyrotron Backward-Wave Oscillator," Phys. Rev. Lett. **95**, 185101 (2005).
- 34.Y. S. Yeh, Y. T. Lo, T. S. Wu, C. W. Su, and S. C. Wu, "stability Analysis of TE01 Gyrotron Traveling Wave Amplifiers", Int. J. Electro. **90**, 517 (2003).
- 35.C. L. Hung and Y. S. Yeh, "Stability analysis of a coaxial-waveguide gyrotron traveling-wave amplifier," Phys. Plasmas **12**, 103102 (2005).
- 36.K. R. Chen, "Fast ion driven Bernstein instabilities," Phys. Lett. A **181**, 308 (1993).
- 37.K. R. Chen, "Anomalous thermalization of fast ions in magnetized plasma," Phys. Rev. Lett. **72**, 3534 (1994).
- 38.K. R. Chen, R. D. Huang, J.C. Wang, and Y. Y. Chen, "Relativistic electromagnetic ion cyclotron instabilities," Phys. Rev. E **71**, 036410 (2005).
- 39.K. R. Chen, W. Horton, J. W. Van Dam, "An explanation for experimental observations on harmonic ion cyclotron emission induced by fast ions", Phys. of Plasmas **1**, 1195 (1994).
- 40.K. R. Chen, "Verification of role of relativity as an explanation for experimental anomaly in dynamics of MeV alpha particles in magnetized plasmas," Phys. Lett. A. **326**, 417 (2004).
- 41.C. S. Wu and L. C. Lee, "A theory of the terrestrial kilometric radiation," Astrophys. J. **230**, 621 (1979).

---

---

### 作者簡介

朱國瑞 ([krchu@phys.nthu.edu](mailto:krchu@phys.nthu.edu))

張存續 ([thschang@phys.nthu.edu.tw](mailto:thschang@phys.nthu.edu.tw))

清華大學物理系

陳仕宏 ([shchen@cc.ncue.edu.tw](mailto:shchen@cc.ncue.edu.tw))

彰化師範大學物理系