

Delayed Emission Excited by a High Power Microwave Pulse

佐々木 進
金子 修
大藪 修 義
河 島 信 樹

(東京大学 宇宙航空研究所)

(50年5月21日受理)

ABSTRACT

An experiment is performed to study the interaction of a high power microwave pulse with a magnetized dense plasma. A delayed emission appears after the complete termination of a pumping microwave pulse when the frequency of the pumping wave is equal to the harmonics of the cyclotron frequency and is near the plasma frequency. Three types of the delayed mission (type I, II, III) are observed, depending on the experimental conditions. Type I delayed emission is characterized by the frequency spectrum with sharp peaks at cyclotron harmonics ($m f_{ce}$ $m=1, 2, \dots$), type II with broad peaks between $(m+1/2) f_{ce}$ and $(m+1) f_{ce}$ and type III with broad peak between $0.8 f_{ce}$ and f_{ce} . Main properties of these phenomena are explained in terms of anomalous power absorption at cyclotron harmonic resonances and excitation of electron plasma waves by an anisotropic electron velocity distribution. Each type of the delayed emission can be triggered artificially by a sudden decrease of cold back ground plasma density and is suppressed by an increase of cold plasma. It can be also triggered by a pulsed electron beam.

Susumu Sasaki, Osamu Kaneko, Nobuyoshi Oyabu
Nobuki Kawashima

Institute of Space and Aeronautical Science
University of Tokyo

1 緒 論

高密度プラズマに高出力RFを打ち込んだ時にひきおこされる現象は、最近非常に注目され各所で実験あるいは理論的研究が行われている。特にRFの周波数がプラズマ周波数付近で、異常吸収・異常散乱等の非線形現象の例が報告されている。これらの現象は物理的に興味深い粒子と波動との非線形相互作用を含み、基礎プラズマ研究の面だけでなく、磁気圏に於る波動と粒子の相互作用のシミュレーションとして、又レーザー核融合の研究等への応用として重要なものである。^{1) ~ 8)}

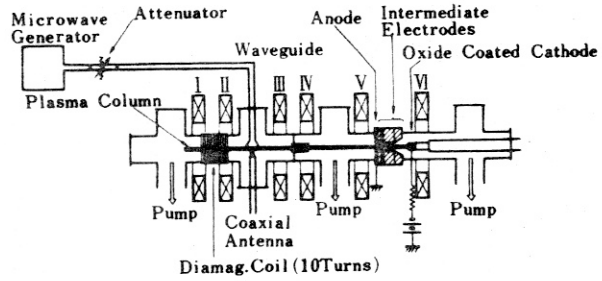
我々は、ミラー場に閉じ込められた高密度プラズマに高出力マイクロ波パルス $f_0 = n f_{ce} \sim f_{pe}$ (f_0 : マイクロ波周波数, f_{ce} : サイクロトロン周波数, f_{pe} : プラズマ周波数, n : 整数) の条件の下に打ち込むと、入射終了後おくれでプラズマからマイクロ波帯のエミッションが戻ってくる事を見い出した (delayed emission)。⁹⁾ このエミッションの周波数スペクトラムは実験条件を変える事により、 $m \cdot f_{ce}$, $(m + \frac{1}{2}) f_{ce} \sim (m + 1) f_{ce}$, $(0.8 \sim 1.0) f_{ce}$ (m : 整数) の三種がある事を確認している。前二者についてはその発生プロセスに静電的不安定性が関与している事が予想され、又それらの発生を人為的に制御する事にも成功した。最近見い出された後者のエミッションにそいては現在それがスタティックモードかホイッスラモードかを調べている。これらに関連してアロエット衛星及びISIS衛星で行われたRFによる縦波励起実験との類似性についても検討している。

2 実験装置

第1図に実験装置の概略を示す。プラズマはいわゆるTPD装置で定常的に作る(Heプラズマ)。実験領域はミラー場になっており、この領域でのプラズマは密度約 10^{12}cc , 電子温度数eVのコラム状 (10 cm) で、径方向に密度勾配を持っている。使用しているマイクロ波は、周波数9.36 GHz, 最大出力10 KW, $10 \mu\text{s}$ パルスで磁場に垂直あるいは平行に打ち込む。マイクロ波パルス入射に伴って発生する波を1~10 GHz 迄連続測定できる電解強度計で観測する。更にプラズマ

Delayed Emission Excited by a High Power Microwave Pulse

密度測定用ダブルプローブ、高エネルギー粒子測定用のX線シンチレーションカウンタ、プラズマ内のエネルギー増加を測定するディアマグコイル、ビーム電流測定用のログスケーコイル等を用いて実験を行っている。



3 実験結果

第1図 実験装置

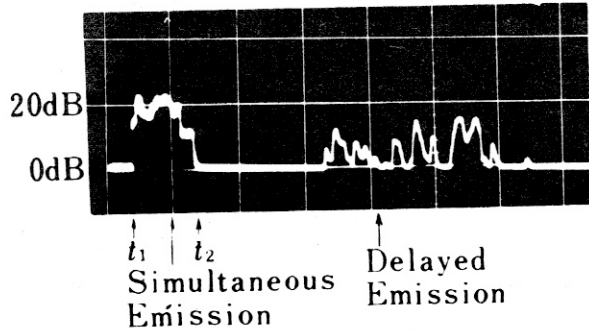
高出力マイクロ波パルスをプラズマに打ち込むと、その瞬間広い周波数帯にわたってマイクロ波帯のエミッション (simultaneous emission) が観測されるが、このエミッションには顕著な磁場あるいはプラズマ密度依存性がない。ところが $f_0 = nf_{ce} \sim f_{pe}$ という入射条件の下でマイクロ波をプラズマに打ち込めば、上記の simultaneous emission 以外に入射が終った後に遅れてでてくる delayed emission が観測される (第2図)。この

delayed emission の発生は磁場及びプラズマ密度に強く依存し、その周波数スペクトラムは規則的で実験条件により次の三種が存在している (第3図)

マイクロ波は B に垂直入射
タイプ I mf_{ce} (m : 整数)

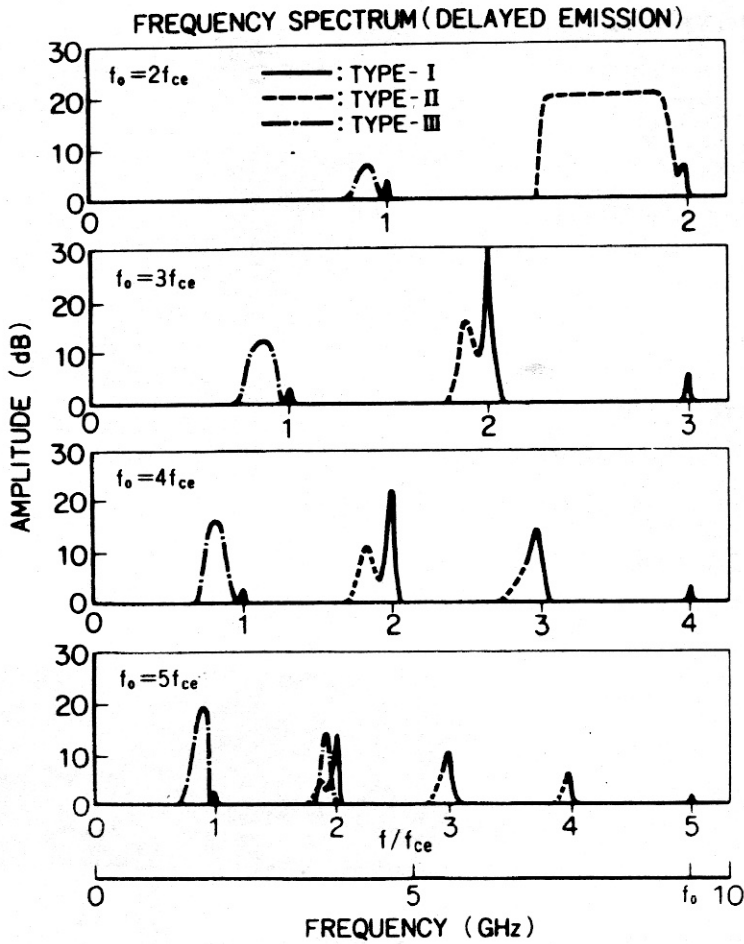
マイクロ波は B に垂直入射
タイプ II $(m + \frac{1}{2})f_{ce} \sim (m+1)f_{ce}$

マイクロ波は B と平行入射
タイプ III $(0.8 \sim 1.0)f_{ce}$



第2図 プラズマからのマイクロ波エミッション。
 $t_1 \sim t_2$ 間にパルスを打ち込んでいる。
 $12.5 \mu s / \text{div}$

これらの delayed emission の様子自体も各タイプによって差がある (第4図)。タイプ I はパルスの平均すれば時間とともに減衰するが個々の現象では時間的に後のエミッションの方が前のものより大きな振幅を持つ場合がしばしばある。delay time は $\sim 100 \mu s$ 程度である。タイプ II は連続的で時間とともに殆んど減衰しないが delay time は $\sim 40 \mu s$ 程度である。タイプ III は



第3図 各タイプの delayed emission の周波数スペクトラム

連続的で時間とともに減衰し delay time は $\sim 300 \mu s$ に達する。

1) エネルギー入射プロセス

入射条件は各タイプとも $f_0 = n f_{ce} \sim f_{pe}$ である。タイプⅡはタイプⅠの場合よりもプラズマ密度及び磁場強度をやや下げた場合に観測され、その共鳴点の位置はタイプⅠの場合プラズマコラムの周辺、タイプⅡの場合プラズマコラムのほぼ中央にあると考えられる。第5図のようにこの条件が満たされた時にのみ、ディアマグコイルの信号が立ちあがり各 ECR の点でパワーがプラズマに移入さ

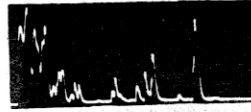
Delayed Emission Excited by a High Power Microwave Pulse

れる。このエネルギー移入量は入射パワーに対し非線形の依存をしGrekらの示している

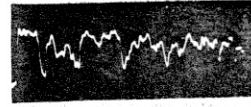
Parametric decay instability が関与している可能性がある。¹⁰⁾ タイプI及びIIの場合はマイクロ波入射と同時にX線が観測され、高温電子が生成された事がわかる。そのエネルギーはAl板吸収法で解析した結果10~20 KeVと見積られた。

EMISSION (TYPICAL)

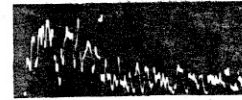
TYPE I



TYPE II



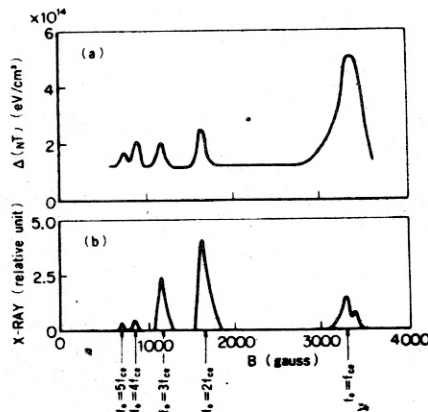
TYPE III



第4図 各タイプの delayed emission の特徴

2) エネルギー保持プロセス

delayed emission の現象は第6図に示す如くミラー比が1より大きい時のみ観測される。この事はマイクロ波によって磁場に垂直な高エネルギーを得た一部の電子がミラー場にトラップされて生き残り、これがdelayed emission の現象に本質的な役割を果たしていることを示している。



第5図 $f_0 = nfc_e$ でのディアマグコイル及びX線の信号のたちあがり。

3) エネルギー放出プロセス

バックグラウンドの冷たいプラズマの中でこのような10~20 KeV 程度の高エネルギー電子が存在している状況の下では、適当な条件の下に後で述べる様な静電的不安定性がひきおこされ、たて波が立つと考えられる。タイプIのdelayed emission については、第7図に示す様に大きなdelayed emission がX線バーストを伴っており、これは delayed emission によって更にマクロな不安定性がひきおこされ、閉じ込めが破れて高エネルギー電子がバーストすると見られる。

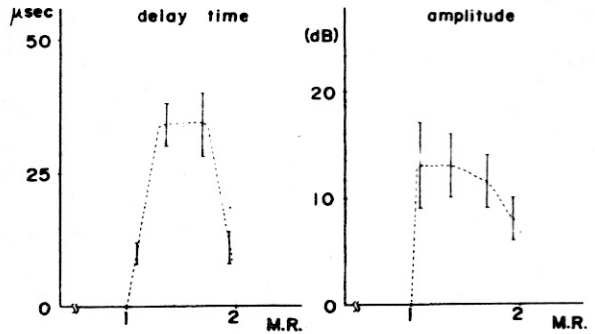
この時同期してディアマグコイルの信号の急減がみられる。この高エネルギー電子のバーストは、磁場に垂直な方向にも平行な方向にも検出されている。

delayed emission の入射パワー依存を第 8 図に示す。simultaneous emission の発生しきい値がほぼ 3.7 KW なのに対し delayed emission のしきい値は 6.2 KW と高い。又この現象のポラリゼーションに対する依存は殆んどない。

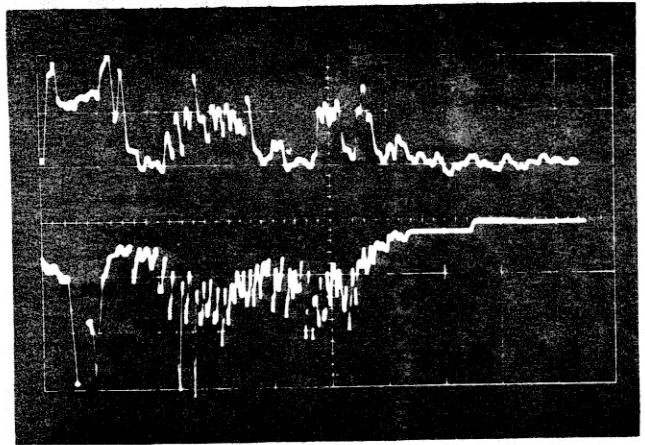
制御実験 (タイプ I, II)

delayed emission が前述の様な静電的不安定性で発生するとすれば, hot electron 密度 (n_H) と cold electron 密度 (n_c) との比が delayed emission の発生に影響すると思われる。実際パルス打ち込み前にプラズマ密度を $3 \times$

$10^{12}/cc$ 程度にしておき, パルス入射終了後プローブによりプラズマ密度を急減させると第 9 図に示すように delayed emission がトリガーされてでてくる。又 delayed emission の出易い密度領域でパルス入射終了後逆にプラズマ密度を急増させると, delayed emission の発生が抑えられる事も確認している。更に興味深いのは, 本装置のプラズマ内には定常的に 1 A 程度のビーム電流が流れているが, このビーム電流をパルス入射後急激に増やしてやると delayed emission が極めて高い確率でトリガーされる (第 10 図)。この方法を用いると第 11 図に示す様にパルス入



第 6 図 delayed emission のミラー比に対する依存性



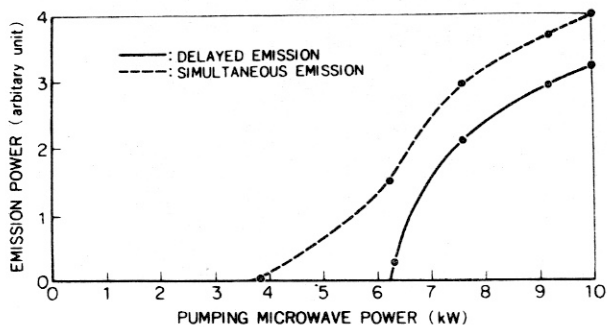
第 7 図 delayed emission (upper beam) に伴う X 線バースト (lower beam)。 $12.5 \mu s / div$

Delayed Emission Excited by a High Power Microwave Pulse

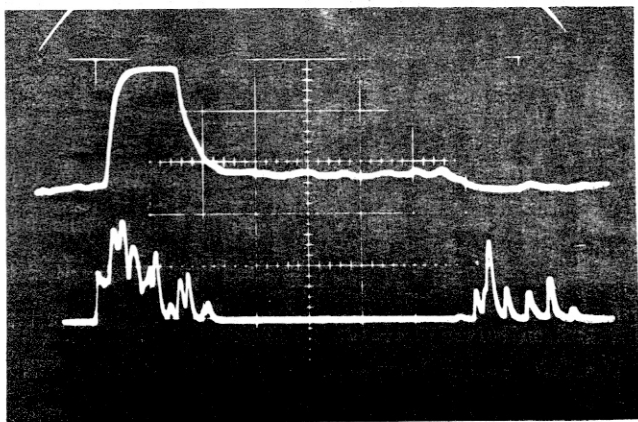
射後 $200\mu\text{s}$ 程度迄 delay—

ed emission を観測する

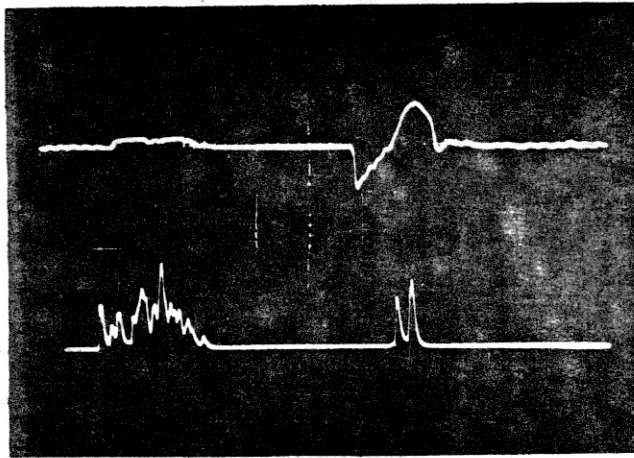
事ができる (タイプ I)。



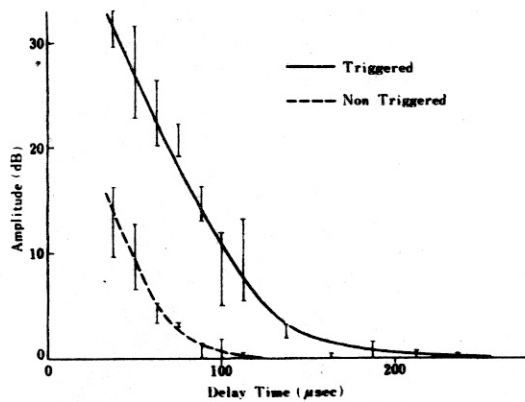
第8図 delayed emissioo 及び simultaneous emission の入射パワー依存



第9図 バックのプラズマ密度の急減による delayed emission の人為的なトリガー。 $12.5\mu\text{s}/\text{div}$



第10図 ビームの増減によるdelayed emission の人為的なトリガー。ビームの増加位相でトリガーされる。
12.5 μ s/div



第11図 ビームによってトリガーした場合としない場合のdelayed emission の振幅とdelay time

4 議 論

以上の様な実験事実から考察すると, delayed emission の発生機構は次のように考えられる。

タイプⅠ この場合, 共鳴点 $f_0 = nf_{ce} \sim f_{pe}$ はプラズマコラムの周辺にあると考えられるので, マイクロ波入射による電子速度分布は, マクスウェル分布をしている冷たい電子群 ($\sim 10\text{eV}$) に $10 \sim 20\text{KeV}$ 程度のモノクロ的な磁場に垂直な hot electron が $0.1 \sim 1\%$ 程度存在しているとみてよい。この条件の下では静電的不安定性によって mf_{ce} ($m \geq 2$) の鋭いスペクトラムを持つ静電波が立つことが計算によって示され,¹¹⁾ 実験とも良くあっている。

タイプⅡ タイプⅠの時よりも全体のプラズマ密度及び磁場強度をやや下げた時観測されるもので, 従って共鳴点 $f_0 = nf_{ce} \sim f_{pe}$ はプラズマコラムの中央に近い所にあると考えられる。この場合はディアマグコイルの信号の立ち上がりはタイプⅠの時と同様にみられるが, X線を伴わず電子分布は, $100 \sim 1000\text{eV}$ の温度異方性を持つ hot electron と $\sim 10\text{eV}$ 程度の cold electron との和になっているとみられる。これはいわゆる Harris 型不安定性をひきおこす分布で,¹²⁾ 周波数スペクトラムもブロードであり, タイプⅡの delayed emission はこれによるものと考えられる。宇宙空間に RF を打ち込んだアロエツト 2, ISIS I^{13) 14)} の実験でもこの種のエミッションが観測されており興味深い。

タイプⅢ 最近見い出されたもので, この波がホイッスラモードなのかスタティックモードなのか現在検討中である。

本システムでの波動—粒子相互作用実験は

- 1 delayed emission に注目する事によりマイクロ波入射時に引き起こされる多くの現象 (電離等) によるエミッションと独立に, より純粋な形で粒子—波動相互作用実験ができる。
- 2 ミラー場により, 高エネルギー電子のエネルギーがある程度選択され, 場合によってはモノクロ的になり解析し易い。

という特徴を持っている。我々はこの方法を用いてマイクロ波エネルギーの入射機構, タイプⅢのエミッションの発生機構等を明らかにし, 更により複雑なプロセス, 波—粒子—波動, 粒子—波—粒子相互作用実験を行う予定である。

REFERENCES

- 1) S. Tanaka, R. Sugaya and K. Mizuno, Phys. Lett. 28A, 650 (1969)
- 2) R.A. Stern, Phys. Rev. Lett. 22, 767 (1969)
- 3) M. Porkolab and R.P.H. Chang, Phys. Rev. Lett. 22, 826 (1969)
- 4) H. Eubank, Phys. Fluids 14, 2551 (1971)
- 5) H. Dreicer, C. Ingraham and D. Henderson, Phys. Rev. Lett. 26, 1616 (1971)
- 6) A.Y. Wong and R.J. Taylor, Phys. Rev. Lett. 27, 644 (1971)
- 7) R.P.H. Chang, M. Porkolab and B. Grek, Phys. Rev. Lett. 28, 206 (1972)
- 8) M. Porkolab, Nucl. Fusion 12, 329 (1972)
- 9) N. Ohya, S. Sasaki and N. Kawashima, Phys. Rev. Lett. 33, 344 (1974)
- 10) B. Grek and M. Porkolab, Matt-953 (1973)
- 11) M.P. Vasiliyev, Yu. k. Kuznetsov and O.S. Pavlichenko, Plasma Phys. 15, 807
- 12) E.G. Harris, Phys. Rev. Lett. 2, 34 (1959)
- 13) H. Oya, J. Geophys. Res., 75, 4279 (1970)
- 14) R.F. Benson, Phys. Fluids 17, 1032 (1973)