プラズマの線型波動現象-(4)*
- 電磁波動の実験的検証 -

大沼 俊朗 (東北大学工学部)**

(52年4月15日受理)

第Ⅷ章 電磁電子(イオン)波の検証

古くから多くの研究が報告されている。

$$\omega^2 = \omega_{pe}^2 + \omega_{pi}^2 + K^2 C^2$$

であるため, ω_{pe} の所でカットオフが生ずる ($\omega_{pe}^2 \gg \omega_{pi}^2$)。即ち, $\omega < \omega_{pe}$ では, この波動はプラズマ中を伝搬出来なくなる。このことを利用して, 電子密度の測定に多用されている。この大振幅電磁波動をプラズマに注入することにより, 他のプラズマ・モードとの

第101図 電磁波のプラズマ透過実験装置(文献70)

* Linear Wave Phenomena in Plasmas

(4) Experimental Observations of Electromagnetic Plasma Waves

** Toshiro Ohnuma (Department of Electrical Engineering, Tohoku University, Sendai)

非線型現象の研究に発展しており、多くの報告がなされている。

ここでは、HealdとWhartonによるプラズマ密度測定を紹介しよう(文献70)。測定回路図を第101図に示す。プラズマを透過したマイクロ波を測定し、入力よりの参照信号を利用して、両者の相関をとっている。第102図には実験結果が示してある。プラズマ密度の過渡特性に対応して、プラズマを透過してきたマイクロ波の信号が示してある。 $\omega < \omega_{pe}$ で、マイクロ波が遮断されて、信号が検出されていない。 $\omega > \omega_{pe}$ の領域では、マイクロ波信号が受信されており、その境界が $\omega \approx \omega_{pe}$ に対応している。

第Ⅷ章 磁場中電磁電子波の検証

この領域の波動は、宇宙空間の観測結果において、古くより研究がおこなわれている。

Barkhausenの1919年の観測が最初と考えられ⁷¹、特に、ソナーグラム($\omega - t$ 関係図)

第102図 電磁波のプラズマ透過実験結果

にて観測されたホイスラー波は有名である。⁷² 実験室系においても多くの測定があるが、Gallet 等による実験 (文献 7 3) が最初で、初期には、マイクロ波の透過という観点からの実験が多くなされている (文献 7 3 - 7 5)。分散特性は、Lehane 等により報告されている (文献 7 6) が、明確な検証は、Ohkubo と Tanaka によって示されている (文献 7 7)。更に、Stenzel による 3 次元伝搬測定 (文献 7 8) が示され、続いて、非線型現象に発展しており、ホイスラー波の自己集束の画期的な検証 (文献 1 6) に進んでいる。

Ⅸ - 1 宇宙空間におけるホイスラー信号の検出

Helliwell (文献 7 2) に詳細されているが、代表例を第 103 図に示す。(A) は、宇宙観測では一般に使用されているソナグラムである。これは、横軸が時間で、縦軸が周波数である。任意の時間に観測される信号周波数が図示されるようになっている。図の受信信号は、時間の速い段階において周波数の高い信号が観測され、時間と共に低い周波数になっている信号が、2 種類観測されていることを示している。この観測される信号は、波動のエネルギー-伝搬速度に対応しているため、周波数の高い方が群速度が速いことを示している。(B) 図の様に $f^{-1/2}$ と t の関係に図示すると、一直線になる。 $t - t_0 = x/V_g$ (x は信号発信源より観測点への距離、 V_g は群速度、 t_0 は観測され始めの時間) であることを考えると、図の信号は $V_g \propto f^{1/2}$ であることを示す。これは、夏の学校テキスト (文献 5) に示してある様に、ホイスラー波の特徴を示している。即ち、ソナグラムにおける A の様な観測信号は、ホイスラー波の特徴になっている。

Ⅸ - 2 実験室系におけるホイスラー信号の検出

実験室系において最初にホイスラー信号を検出した Gallet 等による実験⁷³ を紹介しよう。

第 103 図 宇宙におけるホイスラー信号 (文献 7 2)。上は $f^{-1/2} - t$ の関係、下は $f - t$ の関係図。

トーラス型核融合装置 ZETA にて行なわれ、実験装置図を第 104 図に示す。ZETA の主なプラズマ・パラメータは、 $f_{pe} \approx 100 \text{ GHz}$ 、 $f_{ce} = 3 \sim 40 \text{ GHz}$ 、 $\nu_{ee} = 10^7 \text{ sec}^{-1}$ である。実験周波数を $f = 3 \text{ GHz}$ とすると、 $f_{pe}/f \approx 400$ 、 $f_{ce}/f \approx 1 \sim 10$ の条件においては、アップルトル・ハートレーの式は、

$$n^2 = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega_{ce} - \omega)}$$

となり (I 章 40 式)、ホイッスラー領域の分散式になる。この n を、パルス法、及び、干渉法にて測定している。

$f_{ce}/f = 2$ 、 $f = 3 \text{ GHz}$ の条件にて、送信に入力印加し、受信に検出された信号の時間変化を第 105 図に示してある。図には、プラズマ電流の時間変化も示されている。電流が大きい時に、RF 信号が受信されている。この信号は、 f_{pe} 、 $f_{ce} > f$ の周波数領域で、入力を印加した場合にだけ受信されており、ホイッスラー波と断定されている。

IX-3 電子サイクロトロン波・ホイッスラー波の分散特性の検出

分散特性の測定例として、Ohkubo と Tanaka による実験 (文献 67) を紹介しよう。実験装置図を第 106 図に示す。

第 104 図 実験室系における最初のホイッスラー信号検出のプラズマ核融合装置 (文献 73)

第 105 図 ホイッスラー信号の例

プラズマの線型波動現象 — (4) — 電磁波動の実験的検証 —

直径 10 cm 、長さ 130 cm のガラスエンバー中に、直径 3 cm の酸化物陰極、水冷された直径 4.4 cm の炭素のアノードにより、直流放電アルゴン・プラズマが生成されてる。 $P \approx 0.8 \sim 5.0\text{ m Torr}$ 、放電電流は 30 A で、電子密度 $N_0 \sim 4 \times 10^{12}\text{ cm}^{-3}$ 、電子温度 $T_e \approx 1 \sim 5\text{ eV}$ 、 $B_0 \approx$ 数百 Gauss である。波動の励振・受信には、直径 0.5 mm 、長さ 6 mm のプローブにて浮遊電位で干渉法を用いて測定されている。伝搬波形をきれいに測定し、第 107 図に、その分散特性、

及び、減衰定数が示されている。ホイスラー波から電子サイクロトロン波への移行が測定されている。この論文では、更に、この波が右廻り偏波であることと、低密度領域における Trivelpiece - Gould モードとの比較を示している。

Ⅸ - 4 電子サイクロトロン波・ホイスラー波の 3 次元伝搬特性

ホイスラー波の実験的検証において、最近、Stenzel によって、すばらしい決定的実験が報告されている (文献 16, 78)。第 108 図に実験装置図を示す。直径 1 m ・長さ 3.5 m の大型のもので、均一性 $\pm 10\%$ の範囲で、直径 50 cm ・長さ 300 cm の磁化プラズマ柱を生成している。カソードには、直径 50 cm 、間接加熱 (9 KW) の酸

第 106 図 ホイスラー波の分散特性検出装置 (文献 67)

第 107 図 ホイスラー波の分散特性の実験と理論値

第108図 ホイスラー波の3次元伝搬特性の検出装置(文献16)

化物陰極で、 1 A/cm^2 まで $\sim 50\text{ eV}$ の電子群をアノードに放出出来、封入ガスKr ($\sim 2 \times 10^{-4}\text{ Torr}$)を電離して、一様なプラズマを作る。磁場は電源(15 V , 2000 A)にて、 150 Gaussまで印加出来、軸方向のプラズマの閉じ込めには、 200 個の永久磁石($B_0, \text{max} \sim 4\text{ KG}$)にて拡散を防いでいる。生成されるプラズマは、放電電流($250\text{ A} \times 40\text{ V}$)にて、密度 $N_0 \simeq 10^{12}\text{ cm}^{-3}$, $\nu/\omega_{ce} = 5 \times 10^{-3}$,

第109図 ホイスラー波の検出時における各パラメーターの関係

第110図 ホイスラー波の検出回路図

プラズマの線型波動現象—(4)— 電磁波動の実験的検証—

$T_e = 2 \text{ eV } (\approx 10 T_i) \sim 0.2 \text{ eV } (\approx T_i)$ 。パルス型プラズマで、2 KJのコンデンサー・バンクで、500 Aのトランジスタ・スイッチを用いて、カソードの寿命を長くしている。プラズマ測定には、70 GHz (4 mm) マイクロ波干渉計、ラングミュア探針、マイクロ波共鳴探針が用いられている。ホイスラー波の励振・検出には2種類のアンテナが使用されている(詳細は第Ⅱ章にて説明)。即ち、電気双極子とシールドされた磁気プローブである。プラズマは、パルス型くり返しで(5 m sec 開, 50.0 m sec 閉)生成され、ホイスラー波の実験には、静かなアフターグロープラズマが使用されている。代表的なプラズマ電流、密度、ホイスラー波、測定系の関係を第109, 110図に示しておく。第111図に代表的ホイスラー波伝搬波形を示す。第112図には、得られた分散曲線で、点線は理論値で、1章(40)に示されるコールド分散式が用いられている。

第111図 ホイスラー波の代表的伝搬波形

Stenzel は、このホイスラー波にて、3次元の線型・非線型伝搬のすばらしい結果を得ている。3次元伝搬特性として、第113図に、 $\omega/\omega_{ce} \geq 0.5$ の2つの特例において3次元的測定が行われた位相面が示してある。振巾分布も測定している。特に、波面に注目しよう。実験結果を検討する前に、夏の学校テキスト⁵に数値例を示した位相速度 V_p ，群速度 V_g ，レイ速度 V_r の角度特性を第114図に引用しておこう。 $\omega/\omega_{ce} \geq 0.5$ の電子サイクロトロン波領域と、 $\omega/\omega_{ce} < 0.5$ のホイスラー波領域において特徴的なレイ速度面が示されていることがわかる。この両者の代表的レイ速度面が、

第112図 ホイスラー波の分散特性検出例

Stenzel の波面の実測によって示されていることを以下に述べよう。夏の学校テキスト⁵のように、レイ速度より波面を求め、実験結果の波面を説明することが出来るが、ここでは、その実験結果より、レイ速度（一定角度方向の位相速度）を求め、実験条件を基にして求めたレイ速度との一致を検討してみよう。Stenzel の実験結果第113A ($\omega/\omega_{ce} \simeq 0.8$) 図に対応するレイ速度面を、文献5同様に求めてみると、第115A図が得られる。実線は、理論のレイ速度面、●印は、Stenzel の遠方領域における実験結果より求めたレイ速度面で、両者は、ほぼ一致していると言ってよいであろう。

第113図 ホイスラー波(下)と電子サイクロトロン波(上)の検出波面

第114図 電子サイクロトロン波 ($f/f_{ce} = 3/4$) とホイスラー波 ($f/f_{ce} = 0.2$) の位相速度 V_p 、群速度 V_g とレイ速度 V_r の角度特性

第115 A図 電子サイクロトロン波のレイ速度面・実験結果は文献16により求めたもの

第115 B図 ホイスラー波のレイ速度面・実験結果は文献16より求めたもの

次に、第 113 B 図の $\omega/\omega_{ce} = 0.285$ のホイスラー波領域の実験結果について同様の検討を行うと、第 115 B 図を得る。実線は、理論のレイ速度面で、ある角度において 3 重根を持っているが、Stenzel の実験結果（遠方領域）より求めたレイ速度はその一部で • 印で示されている。理論のレイ速度面は実験にほぼ合っている。理論は、 $\theta \lesssim 7^\circ$ 以内の狭角になっているが、実験は、 $0 \sim 10^\circ$ においても観測されている。これは、理論が流体モデルによるものであると考えられる。以上より、Stenzel の測定された波面は、レイ速度の考え方で説明されることが示されたといつてよい。

Stenzel は、最後に、大振幅波に発展させ、ホイスラー波のすばらしい特性を実験的に検証した。しかし、このような研究は、一朝一夕にして成功しているものでないことを記しておきたい。筆者は、この報告の 2 年半前にカリフォルニア大学にて Stenzel に会い意見交換したことを思い出す。その時すでに彼は、ホイスラー波の実験にとりかかっていた。この様なすぐれた成果は、優秀な人材が要求されるだけでなく、数年の自道な努力の積み重ねによって成しとげられていることである。その新しいものを切り開こうとする気概とたゆまぬ努力は、時として安易な道を選ぶとする傾向の多い我々日本人にとって、特に心に銘記したいと考える次第である。

第 X 章 磁場中電磁イオン波の検証

アルペンにより最初、太陽プラズマの一つの特性として仮説された磁気流体波（アルペン波）は（文献 7），実験室系においては、Lundquist 等が水銀金属を用いて検出している（文献 79）。ガス・プラズマでは、Allen, Wilcox 等によるねじれ性アルペン波（Torsional Alfvén Wave）の実験室における人工励振、及び、検出が行なわれている（文献 26, 80）。これらの実測は、プラズマ物理学の黎明期にあたり、高密度プラズマというプラズマ生成の難しさを克服しての研究成果であった。更に、Nagao 等（文献 81）、Jephcott 等（文献 82）により検証されている。ねじれ性アルペン波が ω/ω_{ci} においてのみ伝搬可能であるのに対して、 $\omega > \omega_{ci}$ においても伝搬可能で $\omega = \omega_{ci}$ で共鳴を示さない圧縮性アルペン波の検出に関しては、Hooke 等（文献 83）、Jephcott 等（文献 17）、Swanson 等（文献 84）によって実測されている。更に、非線型現象の実験にまで発展しており、非線型位相速度・スティーブニング効果の検証（文献 85）、衝撃波、及び、その後方における孤立波型微細構造の検証（文献 86）まで、既に、1960 年代に行なわれている。イオンサイクロトロン周波数近傍においては、いわゆる、イオンサイクロトロン波が、

主に、プリンストン大学の研究者により実験された（文献13, 87）。プラズマ加熱の方法としてのイオンサイクロトロン共鳴加熱の実験へと発展している。

X-1 ねじれ性アルベン波の検証

Wilcox グループの実験を紹介しよう（文献26, 80）。実験装置図を第116図に示す。直径14.6 cm、長さ86.4 cmの銅円柱中に一様磁場10 Kガウスを印加している。両端の中央に絶縁された直径5 cm・長さ5 cmの電極を置き、封入された水素（ $P \sim 7.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ）を、スロー・コンデンサーバンク（ $45 \mu\text{F}$, 10 KV）にて電離する。そのプラズマ生成後、 $0.2 \mu\text{F}$ のファースト・コンデンサーバンクで、一つの電極と外側の円管との間に印加すると、プラズマの一端に半径方向電界が生じ、電流が流れ、アルベン波が励振される。プラズマ中を伝搬した信号を他端にて測定している。第117 A図に代表的励振電圧（下）と受信電圧（上）である。 $B_0 = 10 \text{ KG}$, $V_A = 2.8 \times 10^7 \text{ cm/s}$,

第116図 ねじれ性アルベン波の検出装置（文献26）

$N_0 = 6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ である。受信波形の遅れにより伝搬速度が求まる。このグループは、更に、可動の磁気プローブの使用と、励振波形を短くするしとにより、単発のアルベン波、及び、端による反射波等を検出している（第117 B図）。測定された位相速度と磁場の強さとの関係を第118図に示す。実線はアルベン速度でI章(43)式 V_A にて与えられる。実験値は、アルベン速度にほぼ一致している。

大沼

第117図 アルペン波信号の
検出例(文献26)

第118図 ねじれ性アルペン
波の位相速度と磁場
の強さとの関係

X-2 圧縮性アルベン波の検出

Jephcott 等の実験 (文献17) を紹介しよう。第119図に実験装置図を示す。直径 2.2 cm 、長さ 200 cm のガラス管中の両端に平板ステン板が置かれ、一部 (長さ 120 cm) が真ちゅう板でおおわれている。磁場には、 200 kJ コンデンサーバンクを用いて、立上り 2 ms で、 6 KG まで印加出来る。封入アルゴンガスは、 50 m Torr である。 12 KJ のコンデンサーバンクを用いて、電極間に電流 ($\lesssim 20\text{ KA}$) を流し、 $B_0 = 4\text{ KG}$ において、密度 $N_0 = 1.3 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ のプラズマを生成している。波動の励振には、ガラス管

第119図 圧縮性アルベン波の検出装置 (文献17)

にまかれた単一ループに、 10 J のコンデンサーを用いて最高 1 KA の電流を流し、 $m=0$ モードの圧縮性アルベン波を励振している。波動の周波数は $200\text{ KHz} \sim 1\text{ MHz}$ で、最高 10 G である。得られた分散特性を第120図に、波数と磁場の強さとの関係を第121図に示す。実験値と理論値 (実線) とは、ほぼ合っている。この波は右廻り偏波であることも示している。又、Swanson 等は $\omega \lesssim \omega_{ci}$ の領域でこのモードを観測している (文献84)。

第 120 図 圧縮性アルベン波の分散特性

第 121 図 圧縮性アルベン波の波数と磁場の強さとの関係

X 3 イオンサイクロトロン波の検出

最初、ステラレータ-B-65にて、Stixコイルを用いて励振され、1ターンの磁気プローブにて検出されている(第122図)。実験条件は、 $B_0 \approx 16 \text{ KG}$ 、 $f=11.5 \text{ MHz}$ 、RF電力は $2 \times 10^5 \text{ W}$ である。検出された信号は、 $\omega \lesssim \omega_{ci}$ の領域にだけ観測されている(文献13, 87)。更に、ス

テラレータ-B-66にて、不均一磁場を用いて、磁場の変化と共に位相の変化を検出している(第123図)。条件は、密度 $N_0 \approx 4.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 、イオン温度 $T_i \approx 200 \sim 300 \text{ eV}$ である。 ω_{ci} 近傍になると、位相変化が大きくなり、即ち、波長が短くなり、位相速度が遅

第122図 ステラレータ-核融合装置(文献87)

第123図 イオンサイクロトロン波領域における波の位相変化と距離との関係

くなっていることが示されている。この傾向は、イオンサイクロトロン波の分散特性（I 章(60)式）と一致している。更に、プリンストン・グループは、このイオンサイクロトロン波をプラズマの加熱に利用している。

ステラレータ装置は、プリンストンの、更には、米国の世界に誇るプラズマ核融合装置であり、世界中に同型の装置がいくつか出来ていった。しかし、数年前、プリンストンは、その誇るべきステラレータ装置を解体し、トカマク型装置に移行している。ステラレータ装置は、磁場配位が複雑であった。その複雑さは、大型核融合装置への発展に負要因になったのではないだろうか。このプリンストンにおけるステラレータ型よりトカマク型への移行は、プラズマ核融合研究が、未だ黎明期であることを示していると考えられるのではないだろうか。

X-4 電磁イオン波の3次元伝搬特性

この実験を行うために適するプラズマ生成の困難さにより、この3次元特性は未だ明確

第124図 ねじれ性アルベン波の位相速度 V_p ，群速度 V_g ，レイ速度 V_r の角度特性

プラズマの線型波動現象 — (4) — 電磁波動の実験的検証 —

になっていない。夏の学校テキスト（文献5）に数値例を示した位相速度 V_p ，群速度 V_g ，レイ速度 V_r の角度特性を第124，125図に再録させていただく。実験的に説明されることを望みたいが、ホイスラー波の実験よりもより困難であろうと思われる。

第125図 圧縮性アルベン波の位相速度 V_p ，群速度 V_g ，レイ速度 V_r の角度特性

結 章 プラズマの線型波動現象の実験的検証をまとめてみた。プラズマ中には種々の静電波動

- ・電磁波動が伝搬可能であるが、それらの主な実験報告を並べてみると、プラズマ物理学
- ・プラズマ科学がいかに発展してきたかが示されていると言えよう。プラズマ科学において波動現象はその一部にすぎないが、その研究発展において果してきた役割は非常に大きいことがその一因であろう。実験による波動の検証に着目すると、歴史的には、まず電磁波動の研究に始まり、更に、静電波動現象が解明され、電磁波動の研究へと進んでいる。

各々の波動の最初の検証をみると、実験方法、及び、使用されたプラズマ生成法が、程んど異なっていることに気がつく。このことは、プラズマ研究の流れにおいて、いかにプラズマ生成法が重要であったかということであろう。即ち、新しい波動の検証・新しい現象の検出においては、程んど新しい方法・新しいプラズマ生成法が用いられている。新しい発想が新しい波動現象を解明してきている。カルフォルニア大学におけるダブル・プラズマ、ホイスラーの実験、等は、その顕著な例であろう。

現在、プラズマ核融合研究は、比較的めづまれた条件の基で進んでいる。それに甘んぜず飛躍的發展に導くには、新しい発想とためまぬ努力が必要なのは当然であろう。戦後の日本人は、追いつき追いこせの合い言葉に、ややもすると模倣主義を是認する傾向もあったと思うし、その一部が、エコノミック・アニマルという表現にも通じていると思われる。しかし、現在の日本にとって必要なものは、その様な考え方を是正し、新しい発想をより重要視する態度であり、又、その様な時期にきていると思う。科学においては当然であると、おしかりを受けるかも知れないが、あえて、“新しい発想を”と申し上げたい心境を御理解願いたい。

プラズマの線型現象の流れをみるだけにおいても、プラズマ物理学・プラズマ科学の発達には著しいものがある。ただ、これ程発達してきたのに比較して、エネルギー開発としての核融合の他には、プラズマの応用があまり話題になっていない。残念なことである。この辺にも、新しい発想を適用する余地が多いのではないだろうか。

宇宙科学、プラズマ核融合として発達してまたプラズマ研究は、更に、新たなプラズマ物理・工学・科学へ、更に、イオン科学、プラズマの名称のスタートにある生体科学へと発達するであろうか。どの分野においても、再度、申し上げたい、

“新しい大胆な発想を”。

最後に、プラズマ研究の基盤と独立精神を養っていたといた八田吉典先生に；深く感謝する次第です。又、日頃お世話になることの多い安達三郎先生にも、深く謝意を表する次第です。更に、実験において共に苦勞を分かち合うことの多かった藤田氏、又、日頃世話になることの多い大貫氏、毛利氏、その他、電気計測学講座の諸兄にも謝意をここに表する次第です。

又、筆者等の実験結果の多く（例えば、Phys. Rev. Lett. 31, 1177 (1973), Phys. Rev. A 12, 1648 (1975), Phys. Rev. A 15, Jan. 1977等）は、プラズマ研究所より管理替していただいたTPC装置の改造型にて実施されたものである。ここに、名古屋大学プラズマ研究所、及び、その関係者に、深く謝意を表します。

又、本報告をまとめるにあたって、上原氏を始めとする東京教育大学・筑波大学の若手グループの諸氏に多大の世話になり、ここに謝意を表します。

なお、本報告は、夏の学校テキスト（文献5）も参照して読んでいただければ、より理解し易いと思われる。又、夏の学校テキスト、本報告を通して、紹介を省いた部分、あるいは、もう少し理論的説明を附加した方が内容を理解し易いと思われる部分もあるが、今後の適当な機会にゆずりたいと思う。

結びに、著者の好きな次の言葉を附加させていただきたいと思う、

“道可道非常道”（老子第I章）。

大沼

参 考 文 献

- 1) T.H.Stix, The Theory of Plasma Waves,
McGraw-Hill, 1962
- 2) W.P.Allis, S.J.Buchsbaum and A.Bers,
Waves in Anisotropic Plasmas, MIT Press, 1963
- 3) A.M.A. Leontovich,
Review of Plasma Physics vol. 1 ~ 6
- 4) J.G.Lominadge,
Cyclotron Waves in Plasmas, 1975
- 5) 大沼俊朗
プラズマの線型現象, プラズマ若手夏の学校 テキスト, 1976
- 6) A.Krall and A.W. Trivelpiece,
Principles of Plasma Physics, McGraw-Hill, 1973
- 7) H.Alfven and C.G.Fälthammer,
Cosmical Electrodynamics, Oxford at the Clarendon
Press, 1963
- 8) T.Ohnuma et al
Phys. Rev. A 12, 1648 (1975)
- 9) K.Shen, S.Aksornkitti, H.C.S.Hsuan, and K.E.Lonngrén,
Radio Science 5, 611 (1970)
- 10) Y.Hatta and N.Sato,
Proc. of the Fifth Int. Conf. on Ionization
Phenomena in Gases, Münch 1961, North Holland 1962,
p. 478
- 11) T.Ohnuma, Y.Tamura, T.Fujita and S.Adachi,
Radio Science 9, 697 (1974)
- 12) T.Ohnuma et al,
IEEE Trans. Ap Dec. ;976
- 13) T.H.Stix, and R.W.Palladino,
Phys. Fluids 1, 446 (1958)
- 14) P.F.Little,
Proc. of the Fifth Int. Conf. on Ionization Phenomena
in Gases, Münch 1961, (North Holland 1962) p.1440
- 15) P.Bellán and M.Porkalab,
Phys. Rev. Lett. 34, 857 (1975)

- 16) R.L.Stenzel,
Phys. Fluids 19, 857 (1976)
- 17) D.F.Jephcott and A.Malein,
Proc. Roy. Soc. A 278, 243 (1964)
- 18) T.Ohnuma, H.Iwasaki, S.Adachi, Togo, to be published;
S.Ohnuki, S.Adachi and T.Ohnuma, to be published
- 19) 例えば, T.Ohnuma and T.Fujita,
Phys. Fluids 16, 2026 (1973)
- 20) T.Ohnuma et al
Phys. Rev. Lett 32, 820 (1974)
- 21) T.Ohnuma, T.Fujita, K.Shibata and S.Adachi,
Phys. Fluids 18, 1818 (1975)
- 22) T.Ohnuma et al
Radio Science 10, 1071 (1975)
- 23) 柴田 寛 他
スペースプラズマ研究会 1975
- 24) T.Ohnuma et al
Phys. Rev. Lett. 31, 1177 (1973)
- 25) T.Tsukishima, T.Yamamoto and Y.Nishio,
J.Phys. Soc. Japan 37, 1719 (1974)
- 26) T.K.Allen, W.R.Baker, R.V.Pyle and J.M.Wilcox,
Phys. Rev. Lett. 2, 383 (1959)
- 27) 例えば, T.Ohnuma et al
Phys. Rev. Lett. 36, 471 (1976);
T.Fujita, T.Ohnuma and S.Adachi,
Phys. Fluids 18, 1216 (1975)
- 28) R.W.Motley and N.D'Angelo,
Phys. Fluids 6, 296 (1963)
- 29) T.Ohnuma et al
Phys. Rev. A 8, 1002 (1973)
- 30) T.Ohnuma and Y.Hatta,
Phys. Fluid 13, 1416 (1970); J.Phys. Soc. Japan 29,
1597 (1970)
- 31) H.C.Kim, R.L.Stenzel and A.Y.Wong,
Phys. Rev. Lett. 33, 886 (1974)
H.Ikezi, K.Nishikawa and K.Mima,
J.Phys. Soc. Japan 37, 766 (1966)

- 32) H.Derfler and T.C.Simonen,
Phys. Rev. Lett. 17, 172 (1966)
- 33) G.Van Hoven
Phys. Rev. Lett. 17, 169 (1966)
- 34) Y.Kawai, Y.Nakamura, T.Itoh and T.Kawabe,
Phys. Fluids 16, 1307 (1973)
- 35) T.Ohnuma et al,
Phys. Rev. Lett. 32, 820 (1974)
- 36) R.W.Revins
Phys. Rev. 44, 798 (1933)
- 37) I.Alexeff and R.V.Neidigh,
Phys. Rev. 129, 516 (1963)
- 38) H.Tanaca, A.Hirose and M.Koganei,
Phys. Rev. 161, 94 (1967)
- 39) A.Y.Wong, R.W.Motley and D'Angelo,
Phys. Rev. 133, A 436 (1964)
- 40) D.R.Baker, N.R.Ahern and A.Y.Wong,
Phys. Rev. Lett. 20, 318 (1968);
H.Ikezi and Takahashi,
Phys. Rev. Lett. 20, 140 (1968)
- 41) R.J.Taylor, D.R.Baker and H.Ikezi,
Phys. Rev. Lett. 24, 206 (1970)
- 42) H.Ikezi, R.J.Taylor and R.D.Baker,
Phys. Rev. Lett. 25, 11 (1970)
- 43) G.Joyce, K.Lonngren, I.Alexeff and W.D.Jones,
Phys. Fluids 12, 2592 (1969)
- 44) G.M.Sessler and G.M.Pearson,
Phys. Rev. 162, 108 (1967)
- 45) I.Alexeff, W.D.Jones and K.Lonngren,
Phys. Rev. Lett. 21, 878 (1968)
- 46) Y.Yamashita, H.Ikezi, N.Sato and N.Takahashi,
Phys. Lett. 27A, 79 (1968)
- 47) K.Estabrook and I.Alexeff,
Phys. Rev. Lett. 29, 573 (1972); Phys.Fluids 15, 2026
(1972)
- 48) A.W.Trievelpiece and R.W.Gould,
J.Appl. Phys. 30, 1784 (1959)

- 49) J.H.Malmberg and C.B.Wharton,
Phys. Rev. Lett. 17, 175 (1966)
- 50) J.H.Malmberg and C.B.Wharton,
Phys. Rev. Lett. 19, 775 (1967)
- 51) J.H.Malmberg and C.B.Wharton,
Phys. Rev. Lett. 95 (1968)
- 52) K.Saeki,
J.Phys. Soc. Japan 35, 251 (1973)
- 53) T.P.Starke and J.H.Malmberg,
Phys. Rev. Lett. 37, 505 (1976)
- 54) T.Ohmori, T.Ohnuma, and S.Adachi, Radio Science 11, (1976)
- 55) G.Landauer,
J.Nucl. Energy, Pt. C. 4, 495 (1962)
- 56) R.S.Harp,
Appl. Phys. Lett. 6, 51 (1965);
S.Gruber and G.Bekefi,
Phys. Fluids 11, 122 (1968);
F.Leuterer,
Plasma Phys. 11, 615 (1969)
- 57) T.Idehara, M.Takeda and Y.Ishida,
J.Phys. Soc. Japan 41, 1739 (1976)
- 58) 大沼俊朗 他
スペース・プラズマ研究会 1976年12月
- 59) P.Belan and M.Porkalab,
Phys. Fluids 19, 995 (1976)
- 60) 福島光章, 北川米喜, 嘩道恭, 田中茂利
核融合研究 32, No. 1 (1975)
斉藤輝雄, 田中茂利 日本物理学会 1976年10月, 6aC13
- 61) T.Ohnuma et al
to be published in Phys. Rev. A (1977)
- 62) N.Rynn and N.D'Angelo,
Rev. Sci. Inst. 31, 1326 (1960)
- 63) A.Hirose, I.Alexeff and W.D.Jones
Phys. Fluids, 1290, 2039 (1970)
- 64) T.Ohnuma, S.Miyake, T.Sato and T.Watari,
Phys. Rev. Lett. 26, 541 (1971)

- 65) T.Ohnuma, Y.Hatta, N.Tsuji and Y.Kijima,
Phys. Lett. 32A, 500 (1970)
- 66) T.Ohnuma, S.Miyake, T.Watanabe, T.Watari and T.Sato,
Phys. Rev. Lett. 30, 535 (1973)
- 67) J.P.M. Schmidt,
Phys. Rev. Lett. 31, 982 (1973)
- 68) T.Ohnuma, T.Kuwabara, K.Shibata and S.Adachi,
Phys. Rev. Lett. 37, 206 (1976)
- 69) T.Ohnuma et al
Phys. Rev. A. Dec. 1976
- 70) M.A.Heald and C.B.Wharton,
Plasma Diagnostics with Microwaves, Wiley, 1965
- 71) H.Barkhausen, Physik Z. 20, 401 (1919) L.R.O. Storey,
Phil. Trans. Roy Soc. A 246, 113 (1953)
- 72) R.A.Helliwell,
Whistlers and Related Ionospheric Phenomena, Stanford
Univ. Press 1965
- 73) R.M.Gallet, J.M.Richardson, B.Wider, G.D.Ward, and
G.N.Harding,
Phys. Rev. Lett. 4, 347 (1969)
- 74) D.W.Mahaffey,
Phys. Rev. 129, 1481 (1963)
- 75) K.Minami and S.Takeda,
Phys. Fluids 12, 1089 (1969)
- 76) J.A.Lehane and P.G.Thoneman,
Proc. Phys. Soc. 85, 301 (1965)
- 77) K.Ohkubo and S.Tanaka,
J.Phys. Soc. Japan 36, 572, 843 (1974)
- 78) R.L.Stenzel,
Phys. Rev. Lett. 35, 574 (1975)
- 79) S.Lundquist, Phys. Rev. 76, 1805 (1949)
Bo Lehnert, Phys. Rev. 94, 815 (1954)
- 80) J.M.Wilcox, F.J.Boley and A.W.DeSilva,
Phys. Fluids 3, 15 (1960)

- 81) S.Nagao and T.Sato,
J.Phys. Soc. Japan 15, 735 (1960)
- 82) D.F.Jephcott and P.M. Stoker,
J.Fluid Mech. 13, 587 (1962)
- 83) W.M.Hooke, M.A.Rothman, P.Avivi and J.Adam,
Phys. Fluids 5, 864 (1962)
- 84) D.G.Swanson, R.W.Gould and R.H.Hertel
Phys. Fluids 7, 269 (1964)
- 85) F.I.Boley and R.R.Furman
Phys. Rev. Lett. 12, 385 (1964)
- 86) I.G.Brown, C.N.Watson-Munro
Plasma Physics 9, 43 (1967);
R.G.Cross, C.N.Watson-Munro
Phys. Fluids 11, 557 (1968)
- 87) W.H.Hooke, T.H.Tenney, M.H.Brennen, H.M.Hill and T.H.Stix,
Phys. Fluids 4, 1131 (1961); W.H.Hooke,
Nucl. Fusion Supple., Part 3, 1082 (1962)
- 88) A.Hasegawa and L.Chen,
Phys. Rev. Lett, 32, 454 (1974),
Phys. Rev. Lett. 35, 370 (1975)