

氏 名	嘩 道 恭 てる みち やすし
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	論 理 博 第 230 号
学位授与の日付	昭 和 43 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Nonlinear Plasma Oscillations near Electron Cyclotron Harmonics

(電子サイクロトン高調波近傍における非線型プラズマ振動)

論文調査委員 (主 査) 教 授 高 橋 勲 教 授 巽 友 正 教 授 端 恒 夫

論 文 内 容 の 要 旨

プラズマの協力現象として最も特徴的なプラズマ振動は、線型近似のもとでは、理論的ならびに実験的研究が詳細に行なわれてきた。一方非線型プラズマ振動については、Smerd, Sen らが電磁流体力学的な取り扱いを行ない、プラズマ振動の振巾の増大に伴いその高調波成分が著しく増大し、その結果第2高調波成分が基本波のその数十パーセントにも達することを証明した。太陽の擾乱に伴う異常に強い電波の輻射に観測されるスペクトルは、このプラズマ振動の非線型効果によるものとして説明される。最近 Stern は実験室の陽光柱プラズマに外部からマイクロ波を照射し、Tonks-Dattner 共鳴として強く励起されるプラズマ振動の第2高調波を観測して、それがプラズマ振動の非線型効果によるものとして説明を与えた。

さて、静磁場の内では、プラズマは非等方性であり、かつ複雑な振舞をする。Bernstein は、線型近似のもとで、この場合のプラズマ振動の分散式を求め、磁場と直角方向に伝播するプラズマ振動は電子サイクロトン高調波の近傍でランダウ減衰をうけずに伝播しうることを理論的に示した。これによれば、中心の電子密度が周囲のそれより大きい通常の陽光柱プラズマでは、たとえば第2高調波の近傍では、 $f_p^2(r) + f_b^2 > f^2$ かつ $f_b/f > 1/2$ の領域でのみプラズマ波は伝播可能となる。ただし、 f , f_b は、それぞれプラズマ波の周波数、電子サイクロトン周波数を表わし、 $f_p(r)$ は半径 r の位置におけるプラズマ周波数を表わす。したがって、陽光柱の中心で励起されたプラズマ波は、 $f_p^2(r) + f_b^2 = f^2$ の等密度面において反射され、プラズマ柱の中心付近の領域に閉じ込められて定在波を作る。その結果、サイクロトン高調波近傍に一連の共鳴にピーク群としてプラズマ振動が実験的に観測されている。

申請者が主論文に報告している非線型プラズマ振動は、上記の磁化された陽光柱プラズマにおいて電子サイクロトン高調波近傍に一連の共鳴ピーク群として観測されるプラズマ振動のうち、第2高調波に関する実験的研究である。このような磁化されたプラズマの非線型プラズマ振動に関する研究は今迄に報告されておらず、申請者の研究が最初のものである。申請者は静磁場内におかれた陽光柱プラズマに外部から周波数 f_1 のマイクロ波を照射し、その周波数でのプラズマ振動を強く励起させると共に、 f_1 の2倍

の周波数 $f_2 (=2f_1)$ でプラズマからの輻射スペクトルを静磁場の関数として測定した。その結果幾つかの共鳴ピークを観測し、それが非線型プラズマ振動として説明されることを示した。その実験結果は次の如く要約される。

(i) 周波数 f_2 におけるこのプラズマからのマイクロ波輻射は、外部から f_1 のマイクロ波を照射しない時には観測されないが、 f_1 のマイクロ波を照射した場合には、サイクロトロン高調波 ($f_b/f_2=1/3, 1/4, \dots$) の近傍に多数の共鳴ピークとなって現われる。(ii) これらの共鳴ピーク群は、 $f_2=2f_1$ の時に最も強く現われるが、 $|f_2-2f_1| > 10 \text{ MHz}$ では全く検出されない。ただし、 $f_2 \approx 8,200 \text{ MHz}$ 。(iii) これらの共鳴ピーク群の強度は、照射マイクロ波 (f_1) の強度の自乗に比例して増加する。(iv) これらの共鳴ピーク群は、それぞれの分散特性から次に述べる3種類に分類される。

第1の種類は観測周波数 $f_2 (=2f_1)$ に対するサイクロトロン周波数の偶数次の高調波 ($f_b/f_2=1/4, 1/6, \dots$) すなわち照射マイクロ波 (f_1) に対するサイクロトロン高調波 ($f_b/f_1=1/2, 1/3, \dots$) よりわずかに低い周波数に一連の共鳴ピーク群として現われるもので、照射マイクロ波の透過スペクトル中にみられるサイクロトロン高調波より低い周波数の一連の共鳴ピーク群と一対一に対応する。後者の共鳴ピーク群は、その分散特性から、半径方向に電子密度勾配を持つプラズマ柱に励起されたプラズマ振動によるものであることがわかる。したがって、この分散特性と実験結果 (i), (ii) から、 f_2 の輻射スペクトル中の一連の共鳴ピークは、照射マイクロ波によって励起されたプラズマ振動の第2高調波によると考えられる。更に実験結果 (iii) は、励起されたプラズマ振動の振巾が照射マイクロ波のそれに比例することを考慮すれば、プラズマ振動の第2高調波成分の振巾が基本波成分のその自乗に比例することを意味する。したがって、これらの共鳴ピーク群は、照射マイクロ波によって励起されたプラズマ振動の非線型効果にもとづく第2高調波の発生によるものと結論される。

第2の種類は、 f_2 に対するサイクロトロン周波数の偶数次の高調波、すなわち、 f_1 に対するサイクロトロン高調波より幾らか高い周波数において観測される。これらの共鳴ピーク群に対応して、照射マイクロ波の透過スペクトルにも類似の共鳴ピーク群が観測された。よって、 f_2 のこの共鳴ピーク群は、照射マイクロ波 f_1 によって共鳴的に励起された波動の振巾の増大に伴って生ずるプラズマの非線型性の現われと考えられる。ただし、 f_1 の共鳴ピークについては明確な説明が与えられていない。

第3の種類は、 f_2 に対するサイクロトロン周波数の奇数次の高調波よりやや高い周波数において観測される共鳴ピークであって、第1、第2の種類のもとは異なり、照射マイクロ波の透過スペクトルに対応する共鳴ピークは存在しない。この共鳴ピークの現われる周波数は、 f_1 に対してはサイクロトロン高調波の関係にないが、 f_2 に対しては高調波の関係にあること、ならびに実験結果 (i) (ii) および (iii) から、この共鳴ピークもまたプラズマの非線型性による第2高調波と考えられる。照射マイクロ波電力はかなり大きいので、プラズマ中を伝播する際にプラズマの非線型性によって照射マイクロ波自身の第2高調波が発生することは十分に考えられるので、これがプラズマの波動を共鳴的に励起し、その結果として周波数 f_2 の共鳴ピークが現われ、これが第3の種類であると解釈される。

参考論文その2, 3, 4, および5は Ramsauer 効果の大きい稀ガスの弱電離プラズマ内で電子の速度分布が適当であれば、電子サイクロトロン周波数において負吸収効果が現われることを実験的に初めて確

認した研究である。

その6は、空洞共振器内におかれた弱電離プラズマについて負吸収効果が起こり得る条件を理論的に解析し、その系が増巾、発振を起こす条件を求めたものである。

その7, 8は、前述の負吸収効果がサイクロトロン周波数においてのみならず、その高調波においても起こり得ることを実験的に示したものである。

その1は、磁気プラズマにおいて磁場と直角に伝播する正常波について、サイクロトロン高調波において共鳴輻射が存在することを示したものである。

その9は、不均一な静磁場および高周波電場の配位のもとで、局所的な電子サイクロトロン共鳴を起こさせることによって、電子を静磁場の強い方向から弱い方向に向って加速出来ることを実験的に示したものである。

論文審査の結果の要旨

申請者は数年来磁気プラズマとマイクロ波との相互作用に関する実験的研究を行ない、非熱平衡状態にあるプラズマにおいて、電子サイクロトロン周波数における負吸収効果を初めて見出した。

また、磁気プラズマにおいて、磁場と直角に伝播する正常波についてサイクロトロン高調波で共鳴輻射を観測し、空間分散を持つプラズマ波動の理論からその説明を試みたが、さらに異常波について、電子サイクロトロン高調波近傍に非線型プラズマ振動を観測した。

さて、プラズマ内を静磁場と直角に伝播する異常波に関しては、ハイブリッド共鳴周波数 $f = \sqrt{f_p^2 + f_b^2}$ とサイクロトロン高調波 $f = nf_b$ (n : 整数) 近傍とでプラズマ波が存在することが、Bernstein によって理論的に示されている。一方において、実験室での陽光柱プラズマでは中心の電子密度が周囲のそれより大きいので、陽光柱の中心付近で励起されたプラズマ波は $f_p^2(r) + f_b^2 = f^2$ の密度面内で閉じ込められ定在波を作る結果、サイクロトロン高調波付近に一連の共鳴ピーク群が観測される。

申請者は、この磁気プラズマのプラズマ振動を外部からマイクロ波を照射することによって強く励起し、その非線型効果に由来する第2高調波の発生を観測し、これを主論文に詳細に報告している。磁場がない場合には、プラズマ振動の振幅の増大に伴って、その高調波成分が著しく増大することが理論的に示されており、また、陽光柱プラズマにおいて Tonks-Dattner 共鳴として強く励起されるプラズマ振動の第2高調波が観測されているが、磁気プラズマにおける非線型プラズマ振動についての報告はこれまでなされておらず、申請者の研究が最初のものである。

申請者は、静磁場中におかれた陽光柱プラズマに外部から周波数 f_1 のマイクロ波を照射しつつ、その2倍の周波数 $f_2 (=2f_1)$ でプラズマからの輻射スペクトルを静磁場の関数として測定し、3種類の共鳴ピーク群を見出した。この f_2 での共鳴ピーク群は、 f_1 のマイクロ波を照射した時のみ f_2 のサイクロトロン高調波の近傍に一連のピーク群として現われること、この共鳴ピーク群は、 $f_2 = 2f_1$ の周波数で受信した時のみ観測されること、しかも f_2 の共鳴ピーク群の強度は照射マイクロ波 f_1 のその自乗に比例して増加することを認めた。さらに第1の種類の共鳴ピーク群の分散特性は照射マイクロ波 f_1 で励起される上述の磁気プラズマのプラズマ振動のそれと全く同一であることを実験的に示して、これが照射マ

マイクロ波 f_1 によって強く励起されたプラズマ振動の非線型効果から生ずる第2高調波によるものであることを示した。さらに、第2の種類の共鳴ピーク群は、 f_1 に対するサイクロトロン高調波より幾らか高い周波数において観測されるもので、プラズマ内に照射されたマイクロ波によって共鳴的に励起された大振幅の振動の非線型性による第2高調波であると解釈した。また、第3の種類の共鳴ピークは、 f_2 のサイクロトロン周波数の奇数次の高調波で観測され、 f_1 のそれに対応するピークは存在しないので、プラズマ内を照射マイクロ波が伝播する際に発生する第2高調波がプラズマ中に波動を共鳴的に励起する結果として説明できることを示したのである。参考論文はプラズマの負吸収の存在を初めて実験的に確かめたもの、電子サイクロトロン高調波におけるマイクロ波輻射についての新事実を発見したもの、局所的な電子サイクロトロン共鳴によって電子を加速できることを示したもの等であって、いずれも価値のあるものである。

これを要するに、申請者の論文は磁気プラズマにおける非線型プラズマ振動を解明し、新知見を提出して、プラズマ物理学の分野に重要な寄与をなしたものである。

よって、本論文は理学博士の学位論文として、価値があるものと認める。