

氏 名	川 原 琢 治
	かわ はら たく じ
学 位 の 種 類	理 学 博 士
学 位 記 番 号	論 理 博 第 328 号
学位授与の日付	昭 和 45 年 7 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	Weak Nonlinear Magneto-Acoustic Waves in a Cold Plasma in the Presence of Effective Electron-Ion Collisions (電子・イオン実効衝突のある冷たいプラズマ中の弱い非線型磁気音波)
論文調査委員	(主 査) 教 授 巽 友 正 教 授 松 原 武 生 教 授 田 中 茂 利

論 文 内 容 の 要 旨

プラズマでは粒子間の Coulomb 力による相互作用が粒子の衝突のそれに比べてはるかに大きいため、プラズマの理論的取扱いにおいてはしばしば、粒子の衝突を無視するいわゆる“非衝突プラズマ”の近似が採用される。このとき、プラズマは分布函数に対する非衝突 Boltzmann 方程式によって支配される。ここで更に、粒子の熱運動を無視する、いわゆる“冷いプラズマ”の近似を適用すると、分布函数方程式は密度、速度などの平均量に対する輸送方程式に帰着され、プラズマは一種の流体として取扱うことができる。

しかし、この“冷い非衝突プラズマ”の取扱いには一つの重大な限界がある。一般に、一つの媒質の中に有限の大きさの攪乱が加えられたとき、攪乱はしばしば衝撃波の形で媒質の中を伝播し、衝撃波の通過の前後で媒質の状態に非可逆的な変化を生ずる。プラズマにおいても衝撃波の存在は重要で、核融合のための高温発生的手段として衝撃波によるプラズマ加熱は有力であり、また、宇宙空間プラズマにおいても、例えば太陽風と地球磁場との干渉による定常衝撃波の存在が観測されている。ところが、“冷い非衝突プラズマ”近似においてはこのような衝撃波は存在し得ず、そこでは攪乱はすべて孤立波または連なり波の形で伝播し、そのあとに何らの非可逆的变化をも残さないことが知られている。これは上記の近似の重大な欠陥であると言わねばならない。

このような難点を克服するため、Saffman は無数の有限振幅の波の集団を考え、その集団がエルゴード性をもつことを仮定して、その平均として衝撃波らしい波、“準衝撃波”が発生しうることを示した。一方、このような思考的な機構によるのではなく、現実のプラズマには当然存在するはずの粒子対粒子、粒子対波動、波動対波動の相互作用を考慮することによって何らかの散逸機構を導き、これによって衝撃波の存在を説明しようとする試みが多くの研究者によって行なわれた。申請者は、とくにその中でも電子とイオンという異種粒子間の衝突という散逸機構を導入することによって、この問題を取扱った。

一様な磁場の中で任意の方向に伝播する平面波の形の有限攪乱を考えると、その速度および磁場の変

動を支配する方程式は、上記の近似のもとに、つぎのような単一の非線型方程式に帰着させることができる：

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{3}{2} f \frac{\partial f}{\partial x} + \mu \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} - \nu \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 0$$

ここに、第3項は波の分散を、第4項は散逸を表わし、この方程式は、分散項のみを含む Korteweg-de Vries 方程式、および散逸項のみを含む Burgers 方程式を組合わせたものとなっている。申請者は、この方程式の解を位相平面で考察することによって、準衝撃波を表わす解の存在を導びき、それが磁気音波とよばれるモードに対応することを示した。申請者のこの仕事に類似する試みは、すでに Sagdeev (1962) および Karpman (1964) によってある程度なされているが、申請者の導いた結果は、そのより広い一般性と近似の整一性において両者にくらべてはるかに優れていると言える。

参考論文1において、申請者は角谷とともに、同種の近似のもとにイオン音波を取扱い、やはり準衝撃波を表わす解を得ている。

参考論文2, 3はいずれも、冷い非衝突プラズマの近似に電子の熱運動の影響だけを考慮に入れた結果を論じたもので、一様磁場に対して様々な角度で伝播する有限振幅の波の性質を詳しく調べている。

参考論文4は上記諸論文と趣を異にして、流体における乱流のエネルギー・スペクトルを取扱っており、キュムラント展開理論を Burgers モデル乱流に適用して、5次キュムラント打ち切り近似のもとでエネルギー・スペクトルの時間的変化を数値的に調べている。

論文審査の結果の要旨

“非衝突プラズマ”の近似はプラズマの本質に則した優れた近似であり、プラズマ理論において広く採用されている。申請者は主論文および参考論文1, 2, 3において一貫してこの近似のもとでの有限振幅波動の伝播、とくにその中でも“非衝突衝撃波”の存在の可能性を追求している。

非衝突プラズマ近似においてさらに粒子の熱運動を無視した“冷いプラズマ”の近似を併用するとき、プラズマは密度、速度、磁場変動などに対する輸送方程式によって支配され、取扱いはいちじるしく簡単になる。しかし、この近似には例えばプラズマ振動にはつきものの Landau 減衰が起らないとか、非可逆的な衝撃波が存在しえないとかの重大な弱点がある。

申請者の一連の論文は、一方において“冷い非衝突プラズマ”近似の取扱い易さの利点を保持しつつ、この近似のもつ非現実性を最小限の付加機構の導入によって解決しようとするものである。参考論文2, 3においては、イオンは冷くしたまま、電子の熱運動のみを考慮するとき近似の基本的性格は変らないことに着目し、輸送方程式による記述を用いて、一様磁場に対して任意の角度で伝播する有限振幅波動を解析し、それが Korteweg-de Vries 方程式とよばれる単一の非線型方程式によって支配されることを示した。この方程式は最初、水面波の方程式として導かれたが、最近、非線型格子振動およびプラズマ内の波動に関連して改めて取上げられ、とくにその中の“soliton”とよばれる孤立波のもついちじるしい独立性をめぐって研究者の注目を集めている方程式である。申請者らの業績はこの方程式で支配される現象群にさらに新たな一領域をつけ加えたものであり、興味ある仕事であると言える。

上記の近似ではしかしながら、衝撃波などの非可逆変化の存在は説明できない。申請者はここに、最小

限の散逸機構として、攪乱に対する電子-イオン衝突の影響を考慮に入れることによって、衝撃波に類似の非可逆構造を導き出すことに成功した。この波は通常の衝撃波とは違って、波の通過後に減衰振動を伴わない、その意味で“準衝撃波”とよばれる。非衝突プラズマにおける準衝撃波の存在の可能性はすでに Saffman によって示唆され、さらに申請者が採用したのと同種の近似法のもとに、Sagdeev および Karpman によって特別の場合には示されているが、申請者の仕事はその取扱い方式の一般性と近似の統一性によって、これらの仕事に比べてはるかに優れた業績であると言える。とくに申請者は現象を支配する方程式として、さきの Korteweg-de Vries 方程式に散逸項をつけ加えた非線型方程式を導いており、解がパラメータの変化（磁場との角度）に応じて分散型から散逸型に移行することを示している。このことは、プラズマ中の準衝撃波（磁気音波モード）の構造の磁場依存性を示すものとして興味深い。参考論文 1 において、申請者は同じ着想をイオン音波に適用しているが、この場合は散逸項は非線型となり、準衝撃波の厚さは散逸の影響によって薄くなるという興味ある結果が得られている。

参考論文 4 は、他の諸論文とは違って流体における乱流のエネルギー・スペクトルに関する理論であるが、申請者はそこでも在来の準正規分布理論を一般的にキュムラント展開の一近似段階としてとらえ、その近似をさらに一歩進めて、5 次キュムラント打ち切り近似のもとでエネルギー・スペクトルの時間的変化を数値的に追跡している。結果はさきの準正規分布理論のそれと比べていちじるしく改善されているとは言いが、それは逆にキュムラント打ち切り近似の性格と限界を示すものとして、乱流理論における貴重な業績であると言える。

よって、本論文は理学博士の学位論文として価値あるものと認められる。