

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400538

研究課題名(和文)イオン対プラズマにおける波動伝搬特性の研究

研究課題名(英文)Studies on wave propagation characteristics in ion-pair plasmas

研究代表者

河野 光雄 (Kono, Mitsuo)

中央大学・総合政策学部・名誉教授

研究者番号：00038564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙創成の動的発展プロセスを探るうえで重要な物質 反物質プラズマの研究はその寿命が短く実験室では無理とされたが、安定なイオン対プラズマの作成が可能となり、実験室でその物理特性の研究が進められるようになった。その中の波動実験で計測された分散特性は10年以上にわたって理論的解明の試みを退けてきた。これは、イオンの磁場による回転運動の半径とプラズマの半径が同程度であることを無視した理論枠組みに依っていた為であることを明らかにし、統計力学的運動論による定式化を行い、実験データとよく一致する結果を得た。さらに磁気粘性項を持つ流体理論からも基底波については同様の分散関係式が得られることを示した。

研究成果の概要(英文)：Although laboratory studies on physics of matter-antimatter plasmas which are supposed important to explore the dynamical development of the universe were regarded unlikely because of their short life time, a break-through was made by a success of producing stable ion-pair plasmas in laboratories and experimental studies have been started. Among them dispersion relations observed in an ion-pair plasma had been kept unexplained over 10 years in spite of many efforts of theoreticians of plasma physics. Noticing that the theoretical frame work used so far was not appropriate for the plasma in which the ion Lamor radius was compatible with the plasma radius, we have formulated a kinetic theory by taking account of exact ion trajectories in phase space and obtained the theoretical dispersion relations which showed excellent agreement with the observed dispersion relations. Furthermore a fluid theory with the gyro-viscosity is shown to recreate the same dispersion relations of basic modes.

研究分野：プラズマ物理学

 キーワード：イオン対プラズマ 分散特性 後進波 有限ラーマ 半径効果 統計力学的運動論 ジャイロ粘性項
 プラズマ流体論

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙生成の動的発展プロセスを探るうえで重要な物質 反物質プラズマの研究はその寿命が短いので実験室では無理とされてきたが、大原・畠山 (W.Oohara and R. Hatakeyama, Phys. Lett. **91**, 205005(2003)) によるイオン対プラズマの安定な生成の成功は種々の領域の物理学研究に新しい道を開くものであった。しかし同じグループで行われた波動実験 (W.Oohara and R. Hatakeyama, Pys. Rev. Lett. **95**, 175003(2005); Phys. Plasmas **14**, 055704(2007) で計測された特異な分散特性は、10 年以上にわたって出された様々な理論による解明の試みをことごとく退けてきたゆえに、一部では実験そのものを疑う議論さえ出されていた。特異性は後進波の存在であった。

(2) 電子 陽電子プラズマの波動分散特性はすでに理論研究がされており、その結果の実験的検証はないものの、電子・イオンプラズマとの対応で受け入れられてきており、質量だけが異なるイオン対プラズマに新しい現象が観測されることはないとする議論、電子が存在しないイオン対プラズマにイオン音波が励起されることはないから、イオン対プラズマの生成には電子が付随して電子・イオンプラズマと変わらないものだとする主張など実験に懐疑的なものや、観測されたものは密度勾配や補足粒子による非線形効果に基づく分散特性で、線形分散特性ではないと主張するものがある一方で、電子・イオンプラズマで得られている多様な波動の存在をイオン対プラズマでも確認しようとする立場から非線形性による渦や孤立波の可能性を論じた論文も多数書かれたが、線形分散特性を解明することのない非線形波動伝搬は意味をなさず、実験結果の不支持・支持の両方に混乱があった。

2. 研究の目的

(1) イオン対プラズマで観測された分散特

性を巡る混乱に終止符を打つ理論を構築する。イオン対プラズマ分野の研究推進の基礎的条件となる集団運動の物理的解明は急務となっている。

(2) イオン対プラズマにおける波動の伝搬特性をトータルに明らかにすることによって、新しいプラズマであるイオン対プラズマの重要性を明示的に示す。それにより実験室天体物理学の成立の可能性を評価する。

3. 研究の方法

(1) 実験は有限領域内で行われているにもかかわらず、理論は無限領域で構成されていた。実験条件に合う軸対称有限プラズマの境界値問題として定式化を行う。実験条件ではプラズマ半径とイオンのサイクロトロン運動の半径が同程度であることから、イオンの有限ラーマー半径効果を考慮した定式化を行った。

(2) 実験データが極めて鮮明であることからプラズマの応答は線形であるとしてよく、線形理論の枠組に限った。

(3) 最大の課題である後進波はイオンサイクロトロン波の振動数領域に離散的にみられることから、イオンのサイクロトロン高次軌道の粒子の関与が予測されるので、運動論的定式化を行った。従来の研究はすべて流体的定式化に基づいており、粒子性は考慮されていなかった。

(4) 実験結果を説明するには以上のすべてを考慮しなければならないが、運動論的アプローチは計算が面倒である。基本モードだけを考えるのであれば、有限ラーマー半径効果を考慮した流体力学的アプローチでも得られるはずである。運動論的アプローチと流体力学的アプローチの対応関係が成り立っていることを示すために、磁気粘性項を持つ流体力学方程式を解いた。

4. 研究の成果

(1) 統計力学的運動論による結果

一様磁場の下でシリンダー容器内に作られ

たイオン対プラズマに対して印可された揺動から固有モードが選択的にプラズマ中を伝搬していくことを記述するため、円筒座標で表現されたブラソフ方程式の軌道特性方程式を解いて、分布関数の線形揺動部分を計算し、誘電応答関数を求めた。この際に Fourier-Hankel 変換を使った。プラズマは容器から離れて閉じ込められていることから、プラズマと容器の間のポテンシャルはラプラスの方程式の解である。境界条件は電束密度の動径方向成分と電場の周方向成分の境界面における連続性である。結果は図1に示したとおりで、点線が実験データ、実線が本理論研究で求められたデータである。

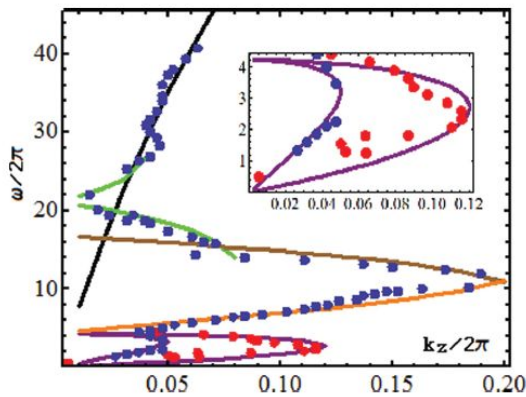


図1 実験データ(点線)と理論データ(実線) : 実験データの青と赤は初期揺動の印可方法が異なるケースに対応する。

実験データと理論データはよく一致しており、純粋なイオン対プラズマが形成されており、そこに励起される固有モードは統計力学的運動論によって正確に記述されることが示されたことから、後進波には有限ラーマー半径効果が本質的であることが理解された。これによって 10 年以上にわたった論争は解決された。ちなみにこの系の固有モードはイオンプラズマ波、イオンサイクロトロン波とその高調波、イオン音波である。ここでイオン音波は正イオンと負イオンの温度が等しいことから励起されるもので、電子の役割を正イオンが果たしている。イオンの熱的揺動と呼ぶこともできる。

(2) 磁気粘性項を持つ流体力学による結果

プラズマ物理における統計力学的運動論と流体力学とは相補的であり、波動の分散特性は基底波に関する限り同じ結果を導くはずである。このことは 10 年以上にわたって議論された流体理論の基礎方程式が不完全なことを示唆している。議論されてきた流体力学方程式の枠組みでも焦点の後進波の存在は磁場による対称性の破れから説明できることであるがその分散関係式は実験結果を定量的に説明できない。実際統計力学的運動論の成功は、有限ラーマー半径効果を正しく取り入れていることに依っているから、ジャイロ粘性項もつ流体力学方程式から出発すべきであることをしめしている。ここで注意すべきことは、流体方程式から直ちに導けることだが、ジャイロ粘性項は散逸を担うものではなく、波動過程を記述するものということである。流体記述の優位性はその簡潔性にある。磁化粘性項はイオンサイクロトロン周波数に繰り込まれてその値を減少させ、イオンサイクロトロン波を前進波から後進波に変えることが直ちに示せる。これはイオンサイクロトロン高調波の伝搬特性は記述できない限界とトレードオフであるが、長期にわたる争点を整理するうえで簡潔性は説得力を持つといえる。計算は統計力学的運動論のそれに比べて格段に簡単である。軸対称系では Fourier-Hankel 変換が使えて、電束密度は直ちに求められる。境界条件は運動論と同じで、固有値方程式が求められる。結果は図2と3に示す通りである。図2はイオンサイクロトロン波の基底波とイオン音波の分散関係で、異なる励起方法による波をともにカットオフを含めて十分な精度で再現している。イオンサイクロトロン波の高調波の分散関係は得られないが、磁気粘性項がイオンサイクロトロン周波数に繰り込まれてその値を減少させることから、高調波も後進波であることが容易に期待される。図3は軸対称系

のイオンプラズマ波の分散関係式である。図3の実験データにはイオンサイクロトロン波の高調波の片鱗が含まれている。流体記述ではイオンサイクロトロン波、イオン音波、イオンプラズマ波に加えて広域混成波も得られるが、この周波数は実験で求められたデータの範囲をはるかに超えるもので、ここではデータの比較対象とはなっていない。

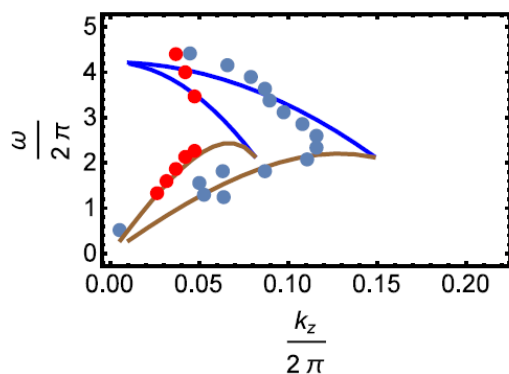


図2 イオンサイクロトロン波の基底波とイオン音波の分散関係式。点線は実験データで実線は理論データ。点線の青と赤は励起方法が異なる。

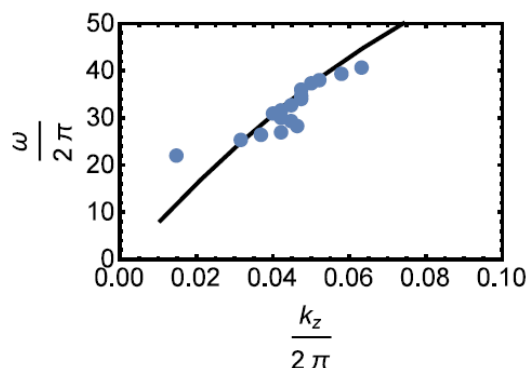


図3 軸対称形のイオンプラズマ波の分散関係。

こうして流体記述においても基底波に限れば正しく実験データを再現することが示された。したがってイオン対プラズマは実験室で生成可能なものであり、実験室天体現象のシミュレーションの場となりえるものであることの一端が示された。

(3) その他の研究成果

直接イオン対プラズマにかかわる問題ではないが、電子・イオンプラズマにおける基本問題のいくつかについても考察した。これは

イオン対プラズマの将来の課題にかかわる可能性があるので、検討しておく必要があったからである。これらは低電離プラズマにおける Alfvén 波のカットオフについての研究や電荷交換衝突の重要性についての研究や、不均一密度に蓄えられるエネルギーについての研究などである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

J. Vranjes, M. Kono and M. Luna, Charge exchange in fluid description of partially ionized plasmas, Monthly Notices ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY 455, 3901-3909(2016),

doi:1093/mnras/stv2595、査読あり

M. Kono and J. Vranjes, Gyro-viscosity and linear dispersion relations in pair-ion magnetized plasmas, Physics of Plasmas 22, 112101 (2015) doi:10.1063/1.4934923、査読あり

J. Vranjes and M. Kono, Energy in density gradient, Physics of Plasmas 22, 012105 (2015), doi:10.1063/1.4906050、査読あり

J. Vranjes and M. Kono, Ion plasma wave and its instability in interpenetrating plasmas, Physics of Plasmas 21, 042104 (2014), doi:10.1063/1.4870499、査読あり

J. Vranjes and M. Kono, Resistive magnet-hydrodynamical cut-off of Alfvén wave in fully ionized plasmas, Physics of Plasmas 21, 014501 (2014), doi:10.1063/1.4861259、査読あり

J. Vranjes and M. Kono, On the Alfvén wave cut-off in partially ionized collisional plasmas, Physics of Plasmas 21, 012110(2014), doi:10.1063/1.4862781、査読あり

M. Kono, J. Vranjes, and N. Batool, Electrostatic Ion Cyclotron and Ion Plasma Waves in a Symmetric Pair-Ion Plasma Cylinder, Physical Review Letters 112, 105001 (2014), DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.105001、査読あり

M. Kono, J. Vranjes and N. Batool, Theory of waves in pair-ion plasmas: Natural explanation of backward modes, Physics of Plasmas 20, 122111(2013) doi: 10.1036/1.4846895、査読あり

〔学会発表〕(計 2 件)

M. M. Skoric and M. Kono, Intense Compression and Amplification of Atto-second Pulses by Laser Light Reflection from Relativistic Electron Mirrors, International Congress on Plasma Physics (ICPP2014), Lisbon 15-20 Sept. 2014、査読あり

M. Kono, Backward Wave in Pair-Ion Plasmas, International Conference on Plasma Science and Applications (ICPSA2013), Singapore, 4-6 Dec. 2013 査読あり

6 . 研究組織

(1)研究代表者

河野光雄 (KONO, Mitsuo)

中央大学・総合政策学部・名誉教授

研究者番号：00038564

(4)研究協力者

Jovo Vranjes