

負イオンプラズマ中のイオン波の分散関係

吉村, 信次
九州大学大学院総合理工学研究科高エネルギー物質科学専攻

中村, 良治
宇宙科学研究所

河合, 良信
九州大学大学院総合理工学研究科高エネルギー物質科学専攻

<https://doi.org/10.15017/17398>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 18 (1), pp.7-10, 1996-06-01. 九州大学大学院総合理工学
研究科
バージョン :
権利関係 :

負イオンプラズマ中のイオン波の分散関係

吉村 信次*・中村 良治**・河合 良信***

(平成8年2月29日 受理)

Dispersion Relation of Ion Waves in a Negative Ion Plasma

Shinji YOSHIMURA*, Yoshiharu NAKAMURA**, and Yoshinobu KAWAI***

The experiments on the fast mode wave propagation are performed in a negative ion plasma. A good agreement is found between analytical and experimental results on the dispersion relation of the fast mode wave in the low frequency region. As exciting frequency approaches to a positive ion plasma frequency, the experimental results deviate from expected dispersion curves. This deviation is due to free-streaming effect.

1. 緒 言

宇宙環境、核融合プラズマ、反応性プラズマプロセス等において多くの負イオンが存在することが知られており、その基本的性質を調べることは大変重要である。プラズマ物理とその応用に新しい展開を生む分野として、現在負イオンプラズマの研究が理論・応用の両面から進められている。

D'Angelo らは、負イオンプラズマ中のイオン波が二つの伝播モード (fast mode, slow mode) に分かれることを示した¹⁾。fast mode は、DC 放電装置において Wong らによって初めて観測され²⁾、slow mode も Sato らによって Q マシンを用いた実験で最近観測された³⁾。他にも負イオンプラズマ中のソリトン⁴⁾、プラズマとビームの相互作用⁵⁾、負イオンプラズマのプロープ測定理論⁶⁾等の研究が行われてきた。

これまでイオン波について多くの研究がなされてきたが、イオン波の分散関係は、未だ完全に明らかになったとは言い難い。かつて多くの実験において、波のような分散関係を示す擬似波が観測されてきた⁷⁾⁸⁾⁹⁾。

縦波を励起する際グリッドやアノードに交流電圧を加えて荷電粒子の密度変動をつくるのだが、この方法では同時に荷電粒子を周期的に加速することになるので、それによる密度変動が擬似的な波として観測されるのである。この種の波には二種類あって、一つは励起電圧 ϕ によって粒子の飛び出し (burst-wave) が周期的に生じ、波長が $\phi^{1/2}$ に比例するもの。もう一つはグリッド付近を熱的荷電粒子が通過する際に速度変動を受けることに起因するもの (free-streaming) である。

後者の位相速度は励起電圧に依らず、励起周波数をイオンプラズマ周波数付近で増加させると、位相速度が周波数の1/3乗に比例して増加するという特徴をもち、一般に用いられる分散関係とは一致しないもので、Landau の計算¹⁰⁾における "ballistic part" である。

本研究では、負イオンダブルプラズマ装置¹¹⁾を用いて負イオンプラズマ中のイオン波の分散関係を詳しく調べた結果 free-streaming と考えられる現象を観測した。

2. 理 論

流体論による負イオンプラズマ中のイオン波の分散式は(1)式で表される¹²⁾。

$$1 + \frac{1-\gamma}{K} = \frac{1}{\Omega^2 - K^2 T} + \frac{\gamma}{\mu \Omega^2 - K^2 T} \quad (1)$$

ここで、

$$\gamma = \frac{n_-}{n_+}, \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_{p+}}, \quad \mu = \frac{m_-}{m_+}, \quad T = \frac{T_+}{T_e} = \frac{T_-}{T_e}$$

$$K = k\lambda_{D+}, \quad \lambda_{D+} = \sqrt{\frac{T_e}{4\pi n_{0e}^2}}, \quad \omega_{p+} = \sqrt{\frac{4\pi n_{0e}^2}{m_+}}$$

γ は負イオン濃度、 ω_{p+} は正イオンプラズマ振動数、 μ はイオンの質量比、 T はイオンと電子の温度比、 λ_{D+} は負イオンが存在しないときの電子のデバイ長を表す。(1)式は二つの伝播モードを表す。一つは負イオン濃度の増加と共に波の位相速度が増加する "fast mode" と呼ばれるもので、もう一つは負イオン濃度が増加しても波の位相速度はごく僅かしか増加しない "slow mode" と呼ばれるものである。

Fig. 1 に電子、Ar⁺、SF₆⁻ からなる負イオンプラズマ中のイオン波の位相速度の負イオン濃度に対する変化を示す。縦軸はイオン音波速度で規格化されている。負イオン濃度が80%以上になると fast mode の位相速

*高エネルギー物質科学専攻博士後期課程

**宇宙科学研究所

***高エネルギー物質科学専攻

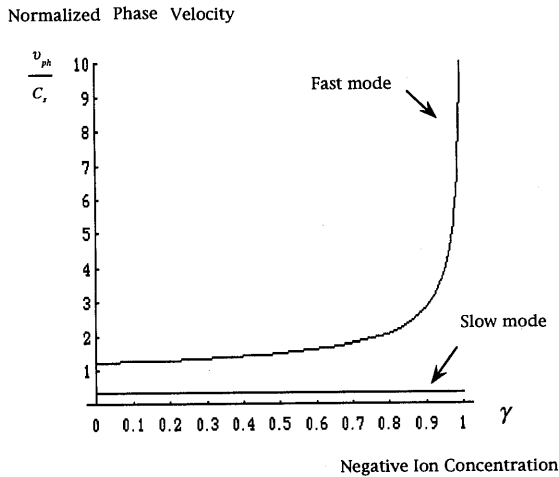


Fig. 1 Phase velocities of the two mode of ion waves in a negative ion plasma as functions of the negative ion concentration. $T=0.6$

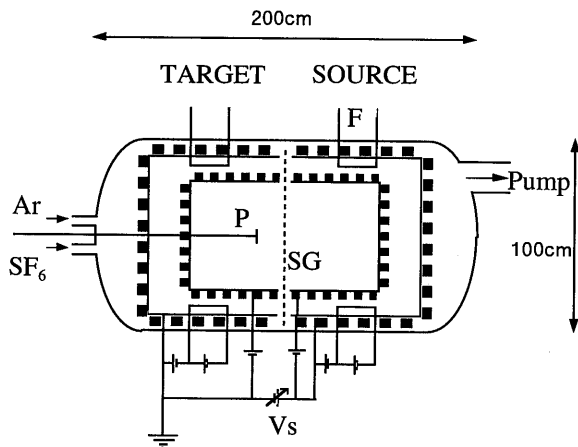


Fig. 2 Schematic diagram of the negative ion double plasma device.

度が急激に増加することが分かる。一方 slow mode の位相速度はほとんど変化していない。

プラズマ分散関数を使用した運動論的取り扱いでも同様の結果が得られる。その場合は波の減衰率も得られ、fast mode の減衰が負イオン濃度の増加と共に小さくなることが知られている。

3. 実験装置

Fig. 2 に実験装置の概要を示す。負イオンダブルプラズマ装置は長さ 200cm、直径 100cm のステンレス製真空容器である。この容器内には永久磁石を封入したステンレスパイプで作られた長さ 84cm、直径 84cm と長さ 51cm、直径 48cm の大小二つのカゴ (magnetic cage) がそれぞれ二個設置されている。隣り合ったパイプ内の磁石は磁極が互いに反転しており、マルチダイポール型カスプミラーが形成される。磁石は表面から数 cm 離れると磁場が十分小さくなるので、

実験領域は無磁場とみなすことができる。

真空容器内を圧力 6.0×10^{-7} Torr に排気した後、Ar ガス (4.0×10^{-4} Torr)、SF₆ ガス (最大 2.0×10^{-6} Torr) をそれぞれ別の導入口から充填して実験を行った。永久磁石を封入したカゴの円周には48本のタングステンフィラメントが取り付けられており、このフィラメントとステンレスパイプの間の放電によってプラズマを生成する。プラズマの生成は小さなカゴの外側の領域で行われる。プラズマは実験領域となるターゲット側の小さなカゴの内側に磁場を横切って浸透してくるのだが、そこでは高エネルギーの電子はほとんどなく電子温度 0.1eV~0.3eV となる。ここで SF₆ の電子付着によって負イオンを生成する。SF₆ と電子の反応断面積を考慮すると、電子温度 0.1eV~0.3eV の実験領域では負イオンとして SF₆⁻ を考えればよいことがわかる。

以上の過程を経て電子、Ar⁺、SF₆⁻ の三成分からなるプラズマが得られる。生成されたプラズマの実験領域における典型的なパラメータは、電子密度 $2 \sim 7 \times 10^7$ cm⁻³、電子温度 0.1eV~0.3eV であった。

4. 実験結果と考察

4.1 SF₆ ガス導入によるプローブ特性の変化

プラズマ中に SF₆ ガスを導入すると、電子付着が効率よく起こり負イオンを含むプラズマが生成される。SF₆⁻ イオンは電子より非常に質量が大きいので、結果としてプローブ特性の負電流の減少が期待される。

実験条件は、ターゲット側・ソース側ともに放電電圧 40V、放電電流 1A で、Ar のガス圧は 4.0×10^{-4} Torr、SF₆ のガス圧は 2.0×10^{-7} Torr ~ 2.0×10^{-6} Torr で変化させた。プローブ特性の一例を Fig. 3 に示す。SF₆ の導入による明らかな電子飽和電流の

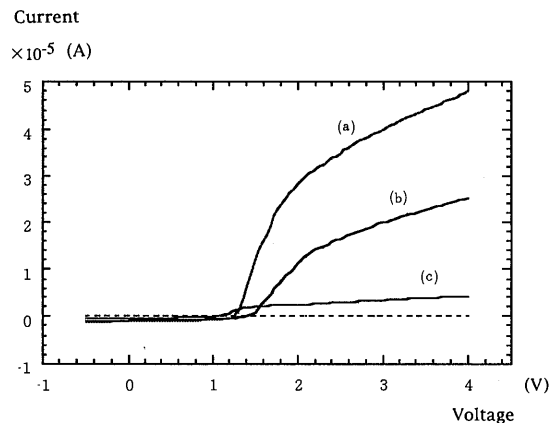


Fig. 3 Current-Voltage characteristics.

(a) Ar (4.0×10^{-4} Torr), (b) Ar (4.0×10^{-4} Torr) + SF₆ (6.0×10^{-7} Torr), $\gamma: 0.47$, (c) Ar (4.0×10^{-4} Torr) + SF₆ (2.0×10^{-6} Torr), $\gamma: 0.93$.

減少がみられる。この電子飽和電流の変化を測定し、(2)式を用いて負イオン濃度を見積もった。

$$\gamma = 1 - \frac{I'_{es}}{I_{es}} \quad (2)$$

ここで γ は負イオン濃度、 I_{es} 、 I'_{es} はそれぞれ負イオンが存在する場合、存在しない場合の電子飽和電流である。

4.2 Ar-SF₆ 混合プラズマ中の干渉波形

Fig. 2 の装置に SF₆ を導入することによって、負イオンプラズマを生成できることがプローブ特性の変化から示された。負イオンプラズマ中ではイオン波の伝播モードとして fast mode 及び slow mode の二つが観測されることが期待される。そこで、振幅 40mV の正弦波電圧をソース側のカゴに印可することによってイオン波を励起し、干渉法によってその空間波形を調べた。

典型的な干渉波形を Fig. 4 に示す。SF₆ を導入することによって波長および伝播距離が長くなることが

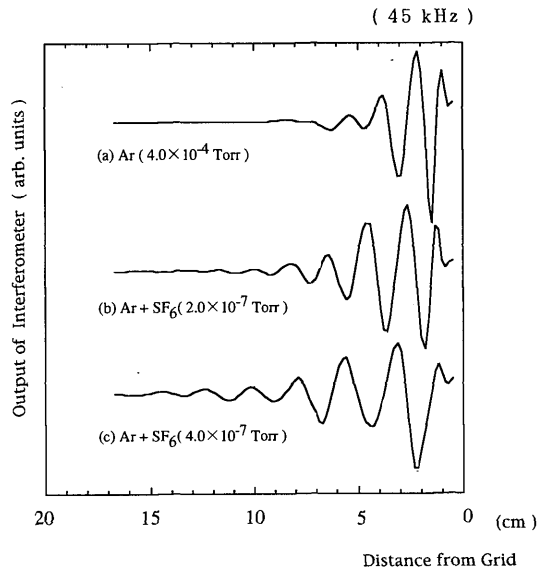


Fig. 4 Typical interferometer wave pattern of ion waves with $f=45\text{kHz}$. (b) $\gamma: 0.12$ (c) $\gamma: 0.23$.

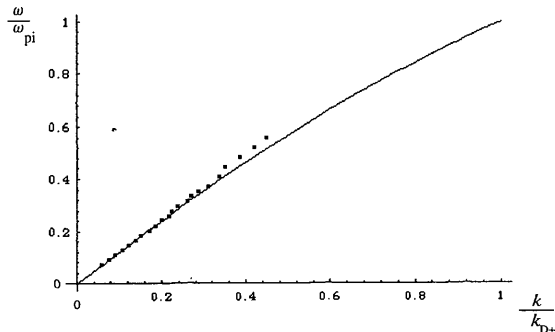


Fig. 5 Dispersion relation of ion waves. Ar ($4.0 \times 10^{-4}\text{Torr}$) $T=1/6$.

分かる。このことは位相速度の増加と減衰率の減少を表し、fast mode の特徴と良く一致する。一方、今回の実験では slow mode らしき波は観測されなかった。これは slow mode の減衰が非常に大きいためだと考えられる。

4.3 実験と理論の比較

実験で観測された波を同定するために、fast mode の分散式にプローブ特性の変化から得られた負イオン濃度を代入することによって得られる分散曲線と、干渉法で得られた波の分散関係を比較する。ここで、正・負イオンの温度は電子温度の1/6であると仮定した。Ar のみの場合の分散関係を Fig. 5 に示す。イオン音波の分散曲線と実験から得られた分散関係は良く一致した。この波はイオン音波であるといえる。

SF₆ を導入した場合の分散関係を Fig. 6, Fig. 7 に示す。低周波数領域では実験値と fast mode の理論曲線は良く一致している。しかし、イオン波の分散曲線が折れ曲がり始めるあたりから実験から得られた分散関係の理論曲線からのずれが見られる。このずれは位相速度が増加する方へのものである。位相速度の周波数に対する変化を Fig. 8, Fig. 9 に示す。位相速度の周波数依存性はおよそ1/3乗であり、負イオンの効果

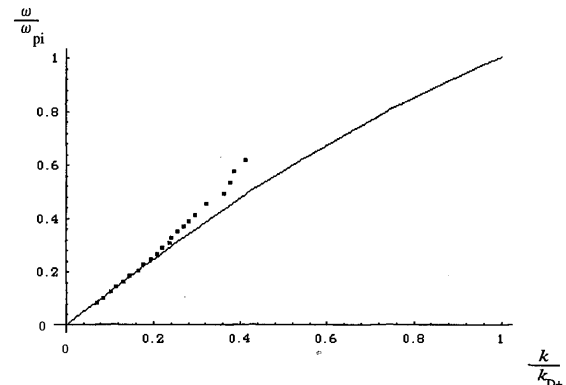


Fig. 6 Dispersion relation of ion waves. Ar ($4.0 \times 10^{-4}\text{Torr}$) + SF₆ ($2.0 \times 10^{-7}\text{Torr}$), $\gamma: 0.12$, $T=1/6$.

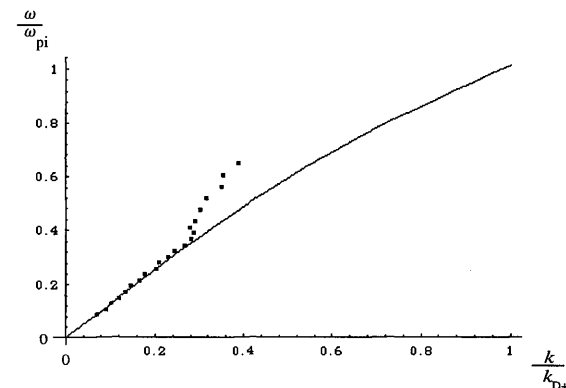


Fig. 7 Dispersion relation of ion waves. Ar ($4.0 \times 10^{-4}\text{Torr}$) + SF₆ ($4.0 \times 10^{-7}\text{Torr}$), $\gamma: 0.23$, $T=1/6$.

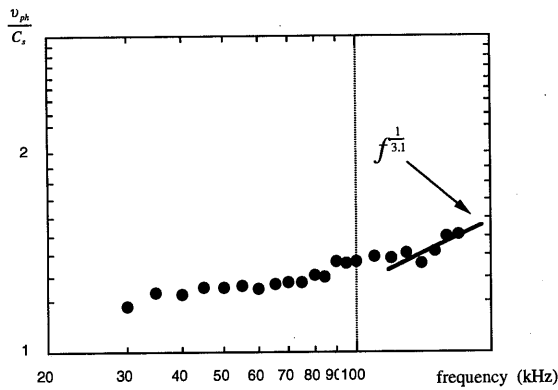


Fig. 8 Dependence of phase velocity on exciting frequency. Ar (4.0×10^{-4} Torr) + SF₆ (2.0×10^{-7} Torr), γ : 0.12.

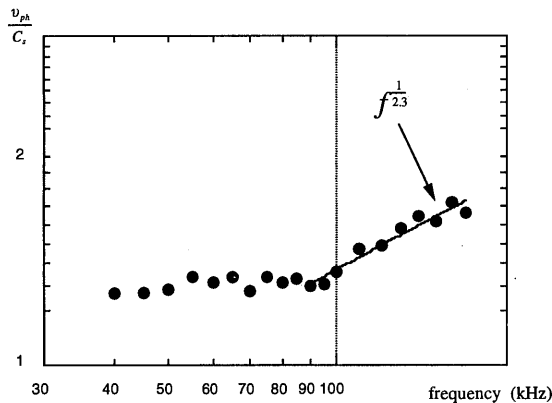


Fig. 9 Dependence of phase velocity on exciting frequency. Ar (4.0×10^{-4} Torr) + SF₆ (4.0×10^{-7} Torr), γ : 0.23.

によって free-streaming の寄与が現れたものだと考えられる。

5. 結 論

負イオンダブルプラズマ装置を用いて負イオンを含むプラズマを生成し、プローブ特性の変化を調べることによって負イオン濃度を測定した。また、イオン波を励起し、空間波形を干渉法によって測定し分散関係を求めた。以下に得られた結果をまとめる。

1. 電子温度が 0.1eV 程度のターゲット内部のプラズマ中に SF₆ ガスを導入すると、SF₆ は効率よく電子を付着し負イオンとなり、負イオンプラズマが生成される。
2. SF₆ ガスを導入することによってイオン波の位相速度が速くなり、伝播距離が長くなることが確認された。また低周波数領域で負イオンプラズマ中のイオン波の fast mode の分散関係と良く一致した。従って、観測された波は励起周波数が低い領域ではイオン波の fast mode である。
3. 励起周波数が正イオンプラズマ周波数に近づいてくるとイオン波の分散関係が理論により予想される分散関係からずれてくる現象が観測された。また、位相速度の周波数依存性はおよそ1/3乗であった。従って、負イオンの存在によって free-streaming の寄与が効いてきたものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) N. D'Angelo, S. v. Goeler and T. Ohes: Phys. Fluids, **9**, 1605 (1966).
- 2) A. Y. Wong, D. L. Mamas and D. Arnush: Phys. Fluids, **18**, 1489 (1975).
- 3) N. Sato, I. Ishikawa, C. Yoshida, S. Iizuka and R. Hatakeyama: Sci. Papers I. P. C. R., **85**, 33 (1990).
- 4) Y. Nakamura, J. L. Ferrira and G. O. Ludwig: J. Plasma Phys., **33**, 237 (1985).
- 5) T. Intrater and N. Hershkowitz: Phys. Fluids, **26**, 1942 (1983).
- 6) H. Amemiya: J. Phys. D (Appl. Phys.), **23**, 999 (1990).
- 7) G. M. Sessler and G. A. Pearson: Phys. Rev., **162**, 108 (1967).
- 8) G. Joyce, K. Longren, I. Alexeff and W. D. Jones: Phys. Fluids, **12**, 2592 (1969).
- 9) H. J. Doucet and D. Gresillon: Phys. Fluids, **13**, 773 (1970).
- 10) L. Landau: J. Phys. (USSR), **10**, 25 (1946).
- 11) 森田 諭, 中村良治: 日本物理学会講演概要集1994年秋の分科会第4分冊, 5a-W-10, p 219
- 12) I. Ishikawa, C. Yoshida, S. Iizuka and N. Sato: Sci. Papers I. P. C. R., **85**, 42 (1990).