

【授業の目的およびねらい】

この授業では、電離した気体（電離気体）であるプラズマとは、どのような性質をもつものなのか、プラズマ中ではどのような現象が起るのかを学ぶ。基礎知識として、電磁気学および力学の理解を必要とする。

プラズマの現象を記述するには、数式が数多く用いられる。しかし、授業では複雑な式を多用することなく、プラズマの主役を演ずる荷電粒子である電子の動きをその周辺の電場・磁場を考えることによってイメージすることが出来るようになることを目的とする。

【授業計画】

第 1 章 プラズマの概念

- 1.1 プラズマの定義
- 1.2 温度の概念
- 1.3 デバイ遮蔽

第 2 章 粒子とプラズマの運動

- 2.1 電場・磁場のあるときの荷電粒子の運動
- 2.2 流体運動方程式

第 3 章 プラズマ中の波動

- 4.1 波動の記述・群速度と位相速度
- 4.2 プラズマ振動と電子プラズマ波
- 4.3 イオン音波
- 4.4 プラズマ中を伝搬する電磁波

【成績評価の方法】

授業の最後に提出するレポートや宿題と期末試験の合計点による。

【教科書】

特に指定しない。しかし、以下に示した Francis F. Chen 著 内田岱二郎訳「プラズマ物理入門」（丸善）に従って講義を行う。ただし、この教科書は cgs 単位系で書かれている。

【参考書】

日本語で書かれた参考書をいくつかあげておく。Chen の本は非常にいいのだが、単位系が工学部の学生にはあまりなじみの無い cgs 単位系を用いて書かれている。この本に限らず、プラズマ物理の教科書では単位系が cgs のものが少なくない。

Francis F. Chen 著 内田岱二郎訳「プラズマ物理入門」（丸善）。

電気学会大学講座「プラズマ工学」（電気学会）。

Dwight R. Nicholson 著 小笠原正忠、加藤訳「プラズマ物理の基礎」（丸善）。

水野幸雄著「プラズマ物理学」（共立出版）。

【教官からのメッセージ】

プラズマの現象を記述するには、数式が数多く用いられます。しかし、授業では複雑な式を多用することなく、プラズマの主役を演ずる荷電粒子である電子の動きをその周辺の電場・磁場を考えることによってイメージすることが出来るようになることを目的とする。そのために、基礎的な数学や物理の復習をできる限り取り入れ、その結果、自分が電子になった気持ちになってどのように動くかを考えます。

email : yugami@cc.utsunomiya-u.ac.jp

オフィスアワー：電子メールで時間の予約を取って来てください。

1 プラズマとは

プラズマという言葉は、ギリシア語の $\pi\lambda\alpha\sigma\mu\alpha$ であり、「型にはまったもの」と言う意味である。18 世紀になってチェコの医学者 Johannes Purkinje がプラズマという言葉^{けっしょう}を血漿の意味で使った。イオン化したガスの意味で使ったのは、1927 年にアメリカの化学者 Irving Langmuir (ラングミュア) が初めてである。この Langmuir は、ノーベル化学賞を単分子膜の研究で受賞している。Langmuir は、血漿が赤血球と白血球を運ぶことが、電離気体中を電子とイオンが流れていることから、プラズマという用語を使った。Langmuir とその共同研究者である Lewi Tonks は、タングステンフィラメントの電球の物理的、化学的性質を研究し、その寿命を延ばすことを見つけようとしていた。その過程で、プラズマと固体の境界にシース (sheath) と呼ばれる領域があることを発見した。また、現在 Langmuir 波と呼ばれている電子密度の周期的変動も発見した。

現在のプラズマに関する代表的な研究は、核融合である。これは、人類のエネルギー問題を解決するために研究が行われている巨大科学の一つである。核融合によって発電が可能になれば、地球上に無尽蔵に存在する水素を用いて発電をすることができる。核融合反応は太陽のエネルギー源でもあり、核融合研究は地球上に小さな太陽を作り出すと言ってもよい。

プラズマは、現在、半導体製造や液晶ディスプレイの製造などに応用され、現代の人間生活にはなくてはならないものになっている。

プラズマは、私たちの身の回りには存在していないように思うかもしれないが、実は、身近に存在している。たとえば、炎は、弱電離プラズマと呼ばれているし、蛍光灯の中もプラズマである。地球上の上空には電離層と呼ばれるプラズマが地球を覆っている。更に、宇宙空間は非常に密度の低いプラズマ状態にある。宇宙の 99% はプラズマ状態にあるとも言われている。

このように一口にプラズマと言っても、自然界に存在するプラズマもあれば、人間の手によって作られたプラズマもある。

プラズマは物質の第 4 の状態とも呼ばれている。つまり、固体に熱を与えると：

固体 → 液体 → 気体 → プラズマ

と変化する。プラズマとは、気体にエネルギーを与えて電子とイオンに分かれ、バラバラ

になった状態である。通常常温では、プラズマは存在することができない^{*1}。

プラズマとは、「荷電粒子と中性粒子からなる集団的振る舞いをする準中性気体」であると定義できる。初学者にとっては、非常に分かりにくい表現であるが、プラズマを勉強していくとこの言葉の意味がわかってくるであろう。

高校の物理では、プラズマは出てこない。しかし、東京書籍の物理 IB の教科書 (p.255) に、以下のような記述を見つけた。

気体は不導体であるが、強い電界を加えると気体分子の一部が電子を放出してイオン化し、できた電子やイオンが電流を導くようになる。この現象を気体放電 (または放電) といい、イオン化した気体と電子の集合をプラズマという。

東京書籍の教科書で勉強をした人は、少なくともプラズマという言葉には出会っているはずである。

以上のようにプラズマを構成しているのは、電子とイオンである。もちろん、電離していない中性原子や中性分子なども含まれているが、これらは、電気的に中性であるので、主役にはならない。電子とイオンでは、その質量差から、電場や磁場によって強く影響を受けるのは電子である。そのため、プラズマの分野で、プラズマ密度と言うと、電子密度を意味する。また、ただ単に温度と言うと電子温度であることが多い。ここで言う電子密度は、数密度であり単位体積当たりに含まれる電子の個数である。

プラズマの常識 1

プラズマを特徴づけるパラメーターは、密度 n と温度 T である。単にプラズマ密度と言うと電子密度である。密度の単位は、cgs 単位系を用いて cm^{-3} で表すことが多い。

^{*1} 金属は、イオンと自由電子と呼ばれる自由に動き回れる電子の集合体である。これも金属プラズマと呼ばれて、常温で存在できるプラズマであると言える。

練習問題

問題 1 一般にプラズマ中のイオンは、正イオンか、それとも負イオンか。

問題 2 プラズマ密度 (電子密度) $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ のプラズマがある。電子同士の平均距離はどれだけか？

問題 3 電子半径は $2.8 \times 10^{-15} \text{ m}$ である。今、電子の半径を 1 m とすると、上の問題の場合、電子間の平均距離は、いくらになるか。また、イオンの直径を $1 \times 10^{-9} \text{ m}$ 程度とすると、イオン間の距離はいくらになるか。

問題 4 一般に密度と呼ばれるものには、数密度と質量密度がある。それぞれの違いは何か。プラズマで密度と呼ばれるのは、どちらか。

問題 5 身近にあるプラズマの例を上げよ。

問題 6 室温 27°C 、 1 気圧の理想気体 1 cm^3 中の分子の数はいくらか。計算に必要な定数などは、各自調べよ。

問題 7 銅 1 cm^3 中の原子数はいくらか。銅の原子量を 63.5 、質量密度を 8.93 g/cm^3 、アボガドロ数を 6.02×10^{23} とせよ。

問題 8 1 eV のエネルギーは、何 J か？ また、 1 eV の定義を述べよ。

問題 9 水素原子 (分子ではない) をプラズマ化したい。つまり、水素原子の中の電子を外へ取り出したい。どれだけのエネルギーが必要か。

問題 10 水素分子を一価のプラズマしたい。つまり、水素分子の電子を 1 個外へ取り出したい。どれだけのエネルギーが必要か。水素分子の電離電圧を 15.4 V とせよ。

問題 11 両対数グラフの目盛で 1 から 10 までを 10 cm としたとき、 2 や 3 の目盛は、 1 の目盛から何 cm の位置になるか..

問題 12 次の関数を両対数グラフ上に描け。また、なぜこのような曲線になったのか考えよ。

$$(1) \quad y = x^2 (\text{放物線}) \quad (2) \quad y = x^3 \quad (3) \quad y = \frac{1}{x} (\text{双曲線})$$

問題 13 次の関数を片対数グラフ上に描け。また、なぜこのような曲線になったのか考えよ。

$$(1) \quad y = e^{-x} \quad (2) \quad y = e^{-2x} \quad (3) \quad y = 10^{-\frac{x}{10}}$$

問題 14 大学入学から今までの授業に使った教科書ではどのようなときに片 (両) 対数グラフが使われていたか調べよ。学生実験のテキストでもよい。

問題 15 片対数グラフ用紙と両対数グラフ用紙は、どのようなときに用いるか。なぜ、そうするのか理由も考えよ。

問題 16 横軸を密度 n 、縦軸を温度 T として、以下の点を両対数グラフでプロットせよ。密度は、 cm^{-3} 、温度は、 eV を単位としている。(今のところ、温度が eV を単位とすることに気には気にしないでよい。)

- (1) 核融合実験炉 : $n = 10^{15}$, $T = 10000$ (2) 電離層 : $n = 10^5$, $T = 0.05$
 (3) グロー放電 : $n = 10^9$, $T = 2$ (4) 炎 : $n = 10^8$, $T = 0.1$
 (5) セシウムプラズマ : $n = 10^{11}$, $T = 0.2$ (6) 星間空間 : $n = 1$, $T = 0.01$

問題 17 (自習問題) プラズマを作るには、どうしたらよいだろうか。調べよ。

問題 18 (自習問題) プラズマは、イオンと電子の集合体であると言える。つまり、長時間そのままにしておくと、再結合をしてプラズマではなくなると考えられる。通常、どの程度の時間でプラズマは消滅するだろうか。

問題 19 (自習問題) 太陽もプラズマである。しかし、太陽は消滅しない。この事実は、上の問題と矛盾する。なぜ、太陽は消滅しないのであろうか。考えよ。

問題 20 (自習問題) プラズマの研究の大きなテーマとして核融合がある。核融合とはどのような現象か。世界各国で行われている核融合研究について調べよ。

【用語】 プラズマ

重要ポイント

- プラズマの定義は、「集団的振る舞いをする準中性気体」
- プラズマは、イオンと電子から構成される。
- プラズマの基本的パラメーターは、密度と温度。
- プラズマは、物質の第四の状態とも呼ばれる。