

## 2. 放電・プラズマ

10mA 100mA

## 1 実験目的

1. 低気圧下での放電現象を理解する。
2. プラズマの基本的性質と測定技術を理解する。
3. 高電圧の取り扱い方について、安全の意識を高め、危険性を理解する。

2k

20

200

800

8

80

300

3

30

## 2 理論及び実験装置

## 2.1 低気圧放電

蛍光灯等のように低気圧なガスが含まれる管に電圧を印加すると、放電と呼ばれる現象が発生する。放電の始動開始過程では、電子の増倍作用と正イオンによる二次電子放出作用によって電流が流れ始める。その後、電圧を高めていくと自続放電と呼ばれる状態に至り、安定な放電を維持することができるようになる。この状態は、パッシェンの法則で記述され、その関係は、低気圧放電管内の圧力  $p$ 、電極間隔  $d$  により絶縁破壊電圧  $V_s$  が決定される。本実験では、これらの状態を理解するため、図1に示す低気圧放電回路により実験を行う。

## 2.2 プラズマの生成と測定

プラズマは、固体、液体、気体について第4の状態と呼ばれ、原子内に含まれる電子が電離し、イオン及び電子が自由に振る舞える状態を指す。プラズマの特徴的な性質として、デバイ長と呼ばれる特性長さよりも大きなスケールでプラズマを観測したときには電氣的に中性であり、一方で電界や磁界を印加することで、それらに応答する性質を持つ。一般的に衝突が支配的なプラズマの場合、電子の電離している割合（電離度）はサハの式と呼ばれる関係式で導かれ、この電離度は、電子密度  $n_e$  や電子温度  $T_e$  に依存する。これらのパラメータを観測する簡便な手法として、ラングミュアプローブと呼ばれる単針（プローブ）をプラズマ内に挿入する方法がある。これは、プローブに電圧を印加することで、その電位に引き寄せられた一部の電子を電流として観測し、統計的に平衡である条件を基に、電子密度と電子温度を観測するものである。プラズマの性質と計測方法を理解するために、図2に示すプラズマ発生装置および測定回路によって実験を行う。

プラズマ発生用。

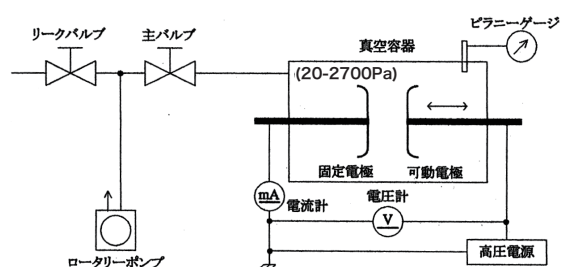


図1: 低気圧放電回路

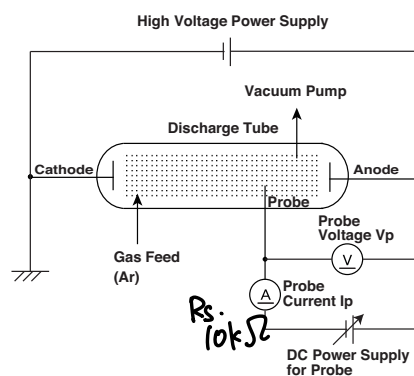
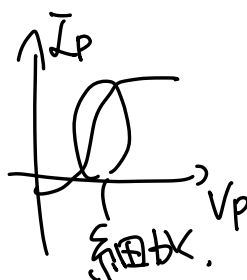


図2: プラズマ発生装置および測定回路



### 3 実験項目

#### 3.1 低気圧放電の特性

1. 印加電圧  $V$ -電流  $I$  特性の測定と放電状態の観察を行う。管内気圧  $p$  と電極間距離  $d$  を固定して、 $V-I$  特性を測定する。特に、放電開始から自続放電に至るまでの計測を詳細に行うこと。
2. 放電開始電圧  $V_s$ -管内気圧  $p$  特性を測定する。電極間距離  $d$  および気圧  $p$  を 20-2700 Pa の範囲で変えて、放電開始電圧  $V_s$  を測定する。

#### 3.2 プラズマの測定と放電管内のプラズマの特性

1. Ar ガスを封入した放電管の圧力を測定する。
2. 放電管に組み込まれているプローブにより  $V_p - I_p$  特性を測定する。
3. 計測した  $V_p - I_p$  特性から、手順に従い、電子密度  $n_e$  と電子温度  $T_e$  を算出する。

### 4 計画日課題

レポートの原理をまとめるため、テキストや文献をもとに、

- タウンゼントの放電理論 ( $\alpha$  作用,  $\gamma$  作用, 物理的な意味), パッシェンの法則と空気の絶縁破壊電圧-圧力・距離依存性
- 放電の形態 (放電の電圧-電流特性, 放電時の様子)
- ラングミュアプローブ計測の原理から電子温度, 電子密度を求める手順
- プラズマの典型的なスケール (デバイ長, 電子プラズマ周波数) の理論的説明
- Maxwell の速度分布関数と温度の関係, 及びサハの式の物理的な意味, アルゴンの電離ポテンシャル

について各項目 1p ずつ程度でまとめること。

### 5 考察課題

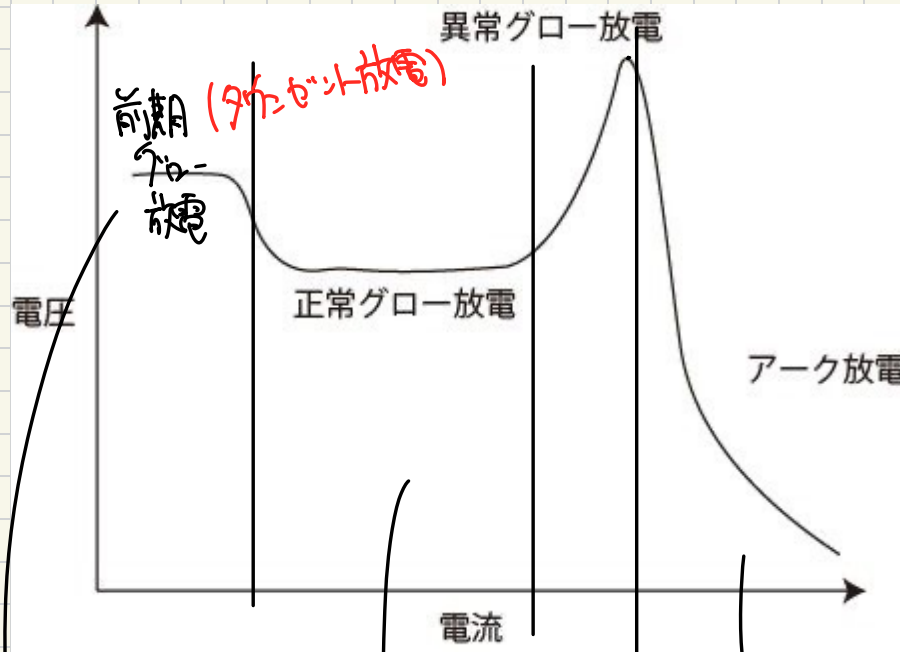
講義中に出題するので、最低限講義中に与えられた課題は実施すること。

### 6 注意事項

1. この実験では高電圧を扱うので、感電しないように指導教職員及び TA の指示に従うこと。
2. 放電やプラズマでは様々な単位系が用いられるので、定数や圧力などの単位に気をつけること。数値を代入するだけでは、正しく求めることができない。

### 7 参考文献

1. 中野義映編：高電圧工学（オーム社，1968）
2. 堤井信力：プラズマ基礎工学（内田老鶴圃，1986）
3. 中央労働災害防止協会（編集）：高圧・特別高圧電気取扱者安全必携（中央労働災害防止協会，2012）



ニ強い光を発する

放電維持電圧は、  
直流放電開始電圧と  
ほぼ等しい。

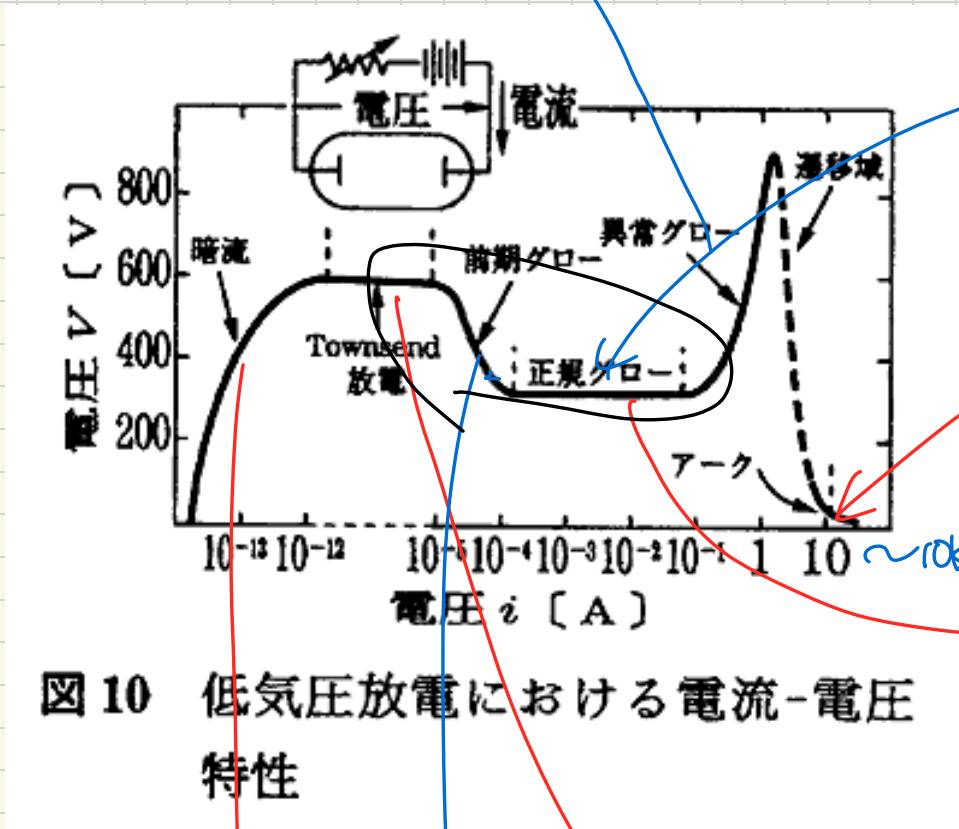
持続的な放電を  
続ける。

電極の一部を  
覆うような放電。

定電圧特性を持つ。

→ 10V程度  
低電圧・大電流  
強い光を出して放電。

電流が増えたら電流密度を上げようとして、  
 \* 電圧降下 → 上昇



ネオン管など  
 全体を光い  
 覆う。

蛍光灯や  
 アーク灯  
 青白い光。

グロー放電におい  
 て、電流密度が一  
 定で、定電圧特性  
 を示すグロー放  
 電の一種。

$ngd < agd$   
 I 密度

低電流でも流れる  
 電流

光を発しない放電  
 (弱い光を発する)

$10^{-3} \sim 10 \text{ Torr}$

$1.33 \text{ Pa} \sim 1333.22 \text{ Pa}$

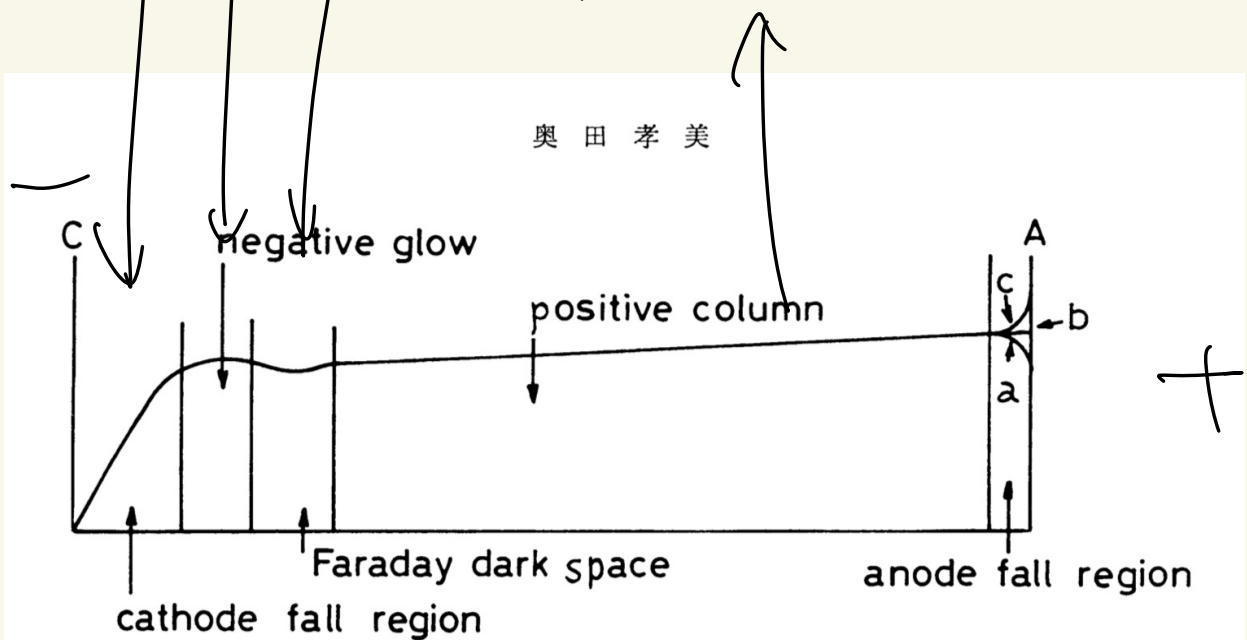
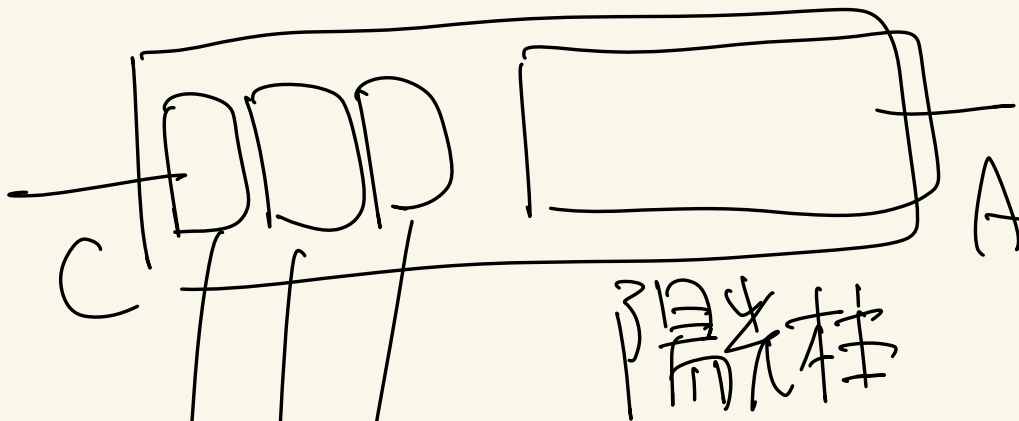
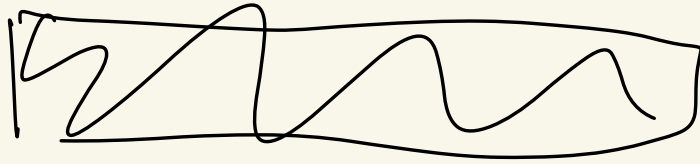
放電の発光が安定せず、  
 暗部が残る

電流密度の  
 限界

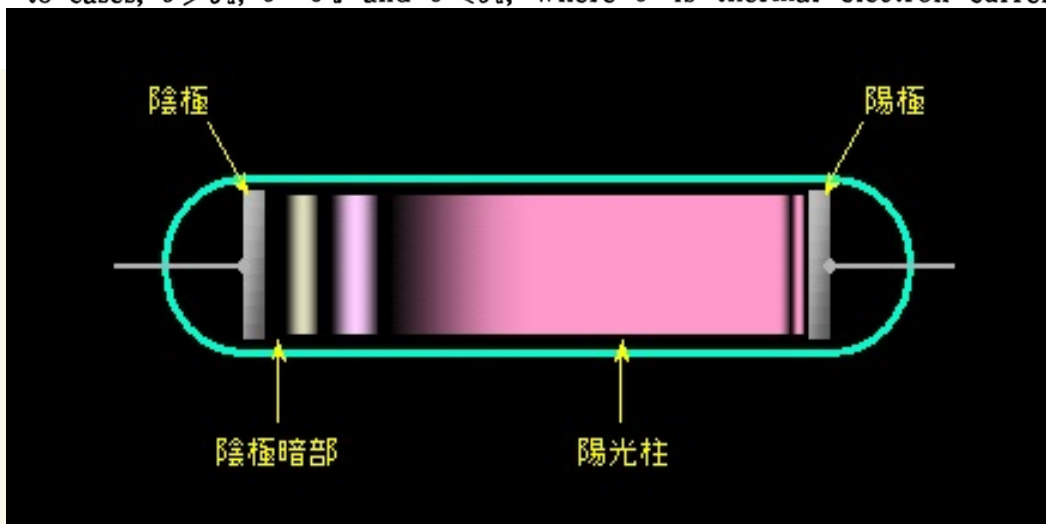
↓  
 全体が光で覆  
 われる。

陰極降下。

\* 空間電荷により陰極の前面に強い電界が現れる。アーク放電の陰極降下  
 (電圧) はグロー放電に比べるとその値は小さく、陰極材料の蒸気の電離  
 電圧に近い。



**Fig. 3** Potential distribution in d.c. glow discharge. Curves a, b and c refer to cases,  $\bar{J} > J_a$ ,  $\bar{J} = J_a$  and  $\bar{J} < J_a$ , where  $\bar{J}$  is thermal electron current



# タフニセットの放電理論

・ 気体中の放電の放電開始理論

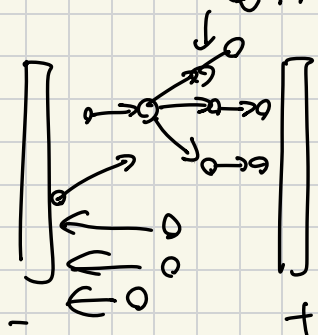
→ 電子が増える?   
 どういうことなる?

タフニセットの放電理論

α作用

電子がEにおり、加速 → 電子に衝突

↳ 電離した電子



$$\frac{\alpha}{p} = \exp(-B)$$

γ作用

陰極に

α作用の電子が衝突

二次電子がγ作用のこと

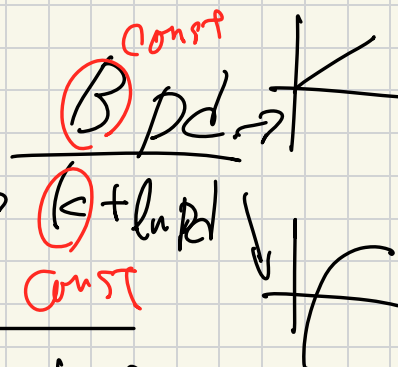
γ(

-1) = 1

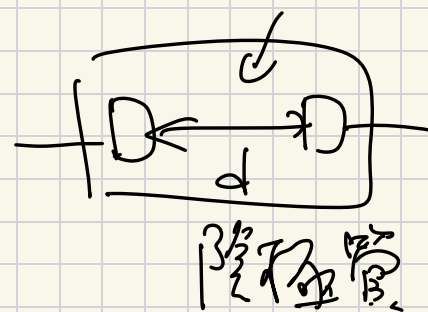
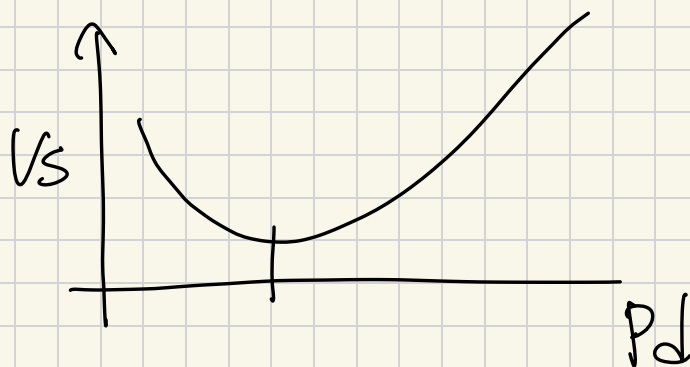
空気 最低放電電圧 350 ~ 360V

パッシェーの法則

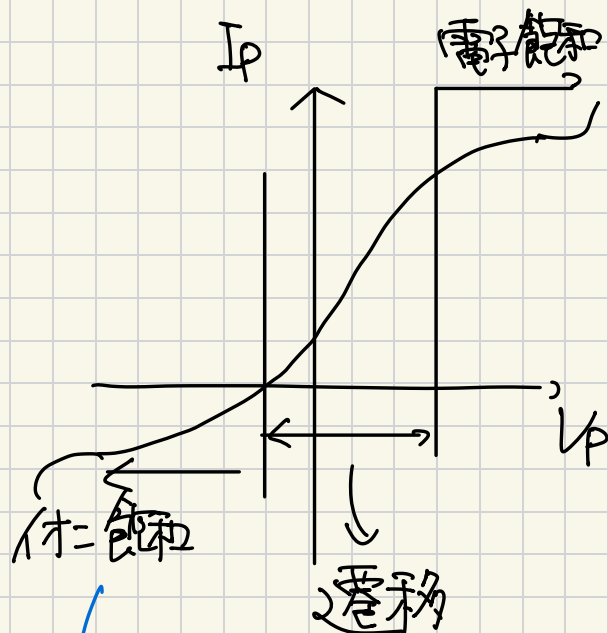
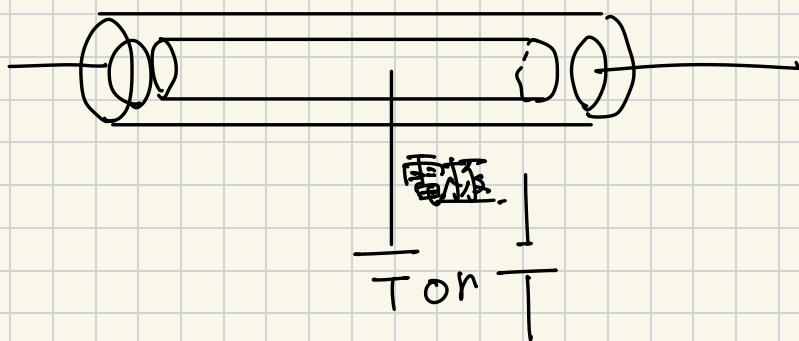
$$V_s = \frac{B \times p \times d}{\ln(A \cdot p \cdot d) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)}$$



絶縁破壊電圧



# ラングミュアプロブ計測



$$I_p - I_i = I_e$$

I<sub>p</sub> - I<sub>i</sub> = I<sub>e</sub>  
I<sub>p</sub> - I<sub>i</sub> = I<sub>e</sub>  
I<sub>p</sub> - I<sub>i</sub> = I<sub>e</sub>

$$I_0 = k N_e e \left( \frac{k T_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} S$$

傾きで電子の温度が分かる。

$$\frac{d \ln I_e(V)}{dV} = - \frac{e}{k T_e}$$

電子密度を導出する。N<sub>e</sub>.

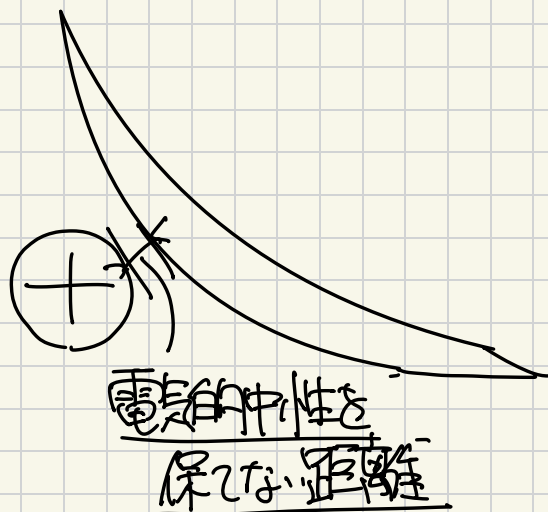
$$\int \frac{d \ln I_e(V)}{dV} dV = - \int \frac{e}{k T_e} dV$$

$$N_e = \frac{I_0}{k e \sqrt{\frac{k T_e}{m_i}} S}$$

$$p = - \frac{e}{k T_e} \quad T_e = - \frac{e}{k p}$$

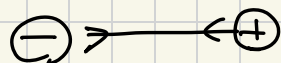
$$k T_e = \frac{e}{p}$$

デバイル長



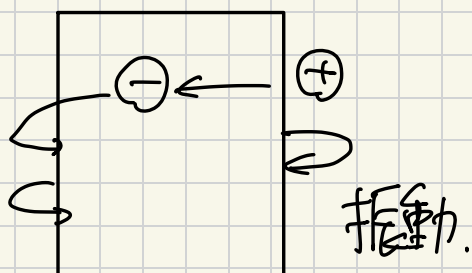
電子プラズマ周波数

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne e^2}{\epsilon_0 m_p}}$$



引き付け合つかう。  
重たにぶつ、いきすぎる。

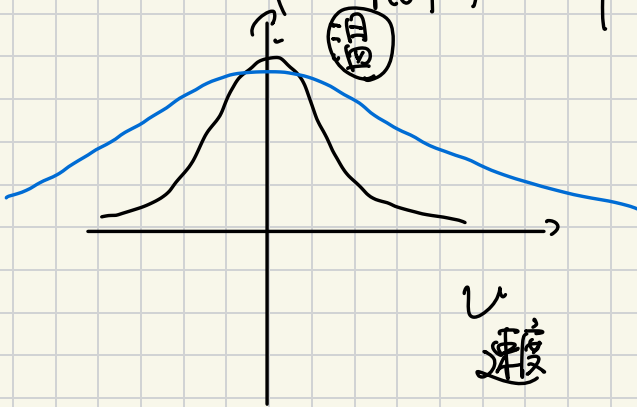
→ 単振動の振動数





Maxwell の速度分布関数と温度の関係.

$$F(v) = 4\pi N_n \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} \exp \left( -\frac{mv^2}{2k_B T} \right) dv$$



サハの式

$$\frac{n_i n_e}{n_a} = 2 \left( \frac{2\pi m_e k_B T}{h^2} \right)^{3/2} \frac{g_i}{g_0} e^{-\frac{e\phi_i}{k_B T}} \quad \leftarrow A_n: \text{イオン化ポテンシャル}$$

温度関係

→ 電離度を求める式