

プラズマ物理講義ノート

Yuto Masuda

更新日: December 6, 2024

Contents

1	プラズマとは何か	2
1.1	プラズマとは？	2
1.2	自然界のプラズマ	2
1.3	地上に太陽を	2
2	プラズマの基本的性質	4
2.1	プラズマの温度	4

Chapter 1

プラズマとは何か

1.1 プラズマとは？

物質に熱を加えていくと、固体、液体、気体へと変化する。気体にさらに熱を加え、原子がイオンと電子に分離する。この状態を**プラズマ**という。

プラズマの定義

プラズマとは、荷電粒子を含んだほぼ中世の粒子集団

ここで、粒子集団とは、**電離したイオンと電子を含む気体**のことである。プラズマと普通の中性気体との違いは以下のようになる。

1. 中性気体の相互作用は衝突を通してのみである。
2. プラズマは荷電粒子なので、相互作用は Coulomb 力である。これは多数の粒子間で遠距離まで及ぶ。

上記で「ほぼ中性」と述べたのは、プラズマには時間的空間的電荷の偏りがあるからである。しかし、プラズマにはこの偏りを打ち消す性質 (Debye 遮蔽, プラズマ振動) がある。

ラフに言えばこうである。まず、ある正電荷の周りに電子が集まる。この領域は電子が増えるので電氣的に負になる。ほかの領域は電氣的に正になる。電子はこの正の領域に戻っていく。

プラズマ物理ではエネルギーや温度が指標に使われる。

$$1 \text{ eV} \sim 1 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C} \quad (1.1.1)$$

である。

1.2 自然界のプラズマ

$$E = mc^2 \quad (1.2.1)$$

1 g の水素の核融合によるエネルギーは

$$6.5 \times 10^{11} \text{ J} \quad (1.2.2)$$

である。

1.3 地上に太陽を

ローソン条件

核融合反応が持続するために必要な温度、密度、閉じ込め時間の関係。

ローソン図

ローソン条件を満たす関係をエネルギー増倍率 Q

$$Q = \frac{\text{核融合出力}}{\text{加熱パワー}} \quad (1.3.1)$$

で図示したもの.

Chapter 2

プラズマの基本的性質

2.1 プラズマの温度

プラズマの温度は、密度とともにもっとも基本的かつ重要な物理量の一つである。

壁のオンと T が一定の容器に、十分長い時間気体粒子を閉じ込めると気体粒子は衝突を繰り返し熱平衡状態になる。

粒子の速度分布は Maxwell 分布に従う。単位体積当たり n 個の粒子が温度 T で熱平衡状態にあるとする。速度が v_x と $v_x + dv_x$ の範囲にある粒子の個数は

$$f(v_x) = dv_x \quad (2.1.1)$$

$$f(v_x) = A \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2k_B T}\right) \quad (2.1.2)$$

である。 A は規格化条件から求められる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(v_x) dv_x = n \quad (2.1.3)$$

$$\Rightarrow A = n \sqrt{\frac{m}{2\pi k_B T}} \quad (2.1.4)$$

温度は速度分布の広がりを表すパラメータである。高温ほど、速度が大きい粒子が多い。

粒子の平均エネルギーを計算する。

$$E_{av} = \frac{1}{n} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} m v_x^2 f(v_x) dv_x = \frac{1}{2} k_B T \quad (2.1.5)$$

熱速度

$$v_{th} = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}} \quad (2.1.6)$$

とすると、

$$f(\pm v_{th}) = \frac{f(0)}{e} \quad (2.1.7)$$

である。

3次元に拡張する。

$$f(v_x, v_y, v_z) = n \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{k_B T} \right] \quad (2.1.8)$$

$$E_{av} = \frac{3}{2} k_B T \quad (2.1.9)$$

速さ v に関する速度分布は

$$F(v) = 4\pi n \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} v^2 \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{m v^2}{k_B T} \right] \quad (2.1.10)$$

である。これは $v = v_{th}$ で最大となる。