0. プラズマとは？

固体 → 液体 → 気体 → プラズマ（電離気体）

↑

イオン化

（電場を使う）

イオン・電子の運動

↑↓

電場・磁場

長距離力（電磁相互作用） → 多体相関 → 集団運動

高温プラズマでは衝突による散逸が小さい → 非線形効果が強調される

SI 単位系 (温度は eV → $k_B = 1$)

<u>プラズマの応用例</u>

○ 核融合（現存装置でほぼ $Q \equiv P_{out}/P_{in} = 1$ 達成）→ ITER で $Q = 10$（燃焼プラズマ）を目指す。

○ 宇宙・天体プラズマ

○ 産業用プラズマ（半導体チップのエッチング等）

○ X 線レーザー、プラズマ TV 等

<u>プラズマの熱的速度分布</u>

温度 T の熱平衡状態にあるプラズマ中の粒子がエネルギーW をもつ確率 $\propto \exp(-W/T)$

ポテンシャルエネルギーが一様な場合（$W = \frac{mv^2}{2}$）

Maxwell-Boltzmann distribution function（$\int f\, dv_x dv_y dv_z = n$ で規格化）

$$f_M = n\left(\frac{m}{2\pi T}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{mv^2}{2T}\right)$$

Debye 遮蔽

温度一様のプラズマを考える。Boltzmann factor は $\exp\left(-\frac{mv^2}{2T}-\frac{q\phi}{T}\right)$。

速度積分すると密度分布が得られる。

$$n \propto \exp\left(-\frac{q\phi}{T}\right)$$

電子（イオン）はポテンシャルの高い（低い）ところに集まろうとする。

平面電極から垂直方向の 1 次元を考える。

十分遠くでは正味電荷はゼロ（$n_e = Zn_i = n_{e\infty}$）という境界条件を用いる。

$$n_e(x) = n_{e\infty}\exp\left(\frac{e\phi}{T_e}\right)$$

$$Zn_i(x) = n_{e\infty}\exp\left(-\frac{Ze\phi}{T_i}\right)$$

Poisson 方程式に代入

$$\varepsilon_0\frac{d^2\phi}{dx^2} = e(n_e - Zn_i) = en_{e\infty}\left[\exp\left(\frac{e\phi}{T_e}\right) - \exp\left(-\frac{Ze\phi}{T_i}\right)\right] \approx \frac{e^2 n_{e\infty}}{T_e}\left(1+\frac{ZT_e}{T_i}\right)\phi \qquad \text{for } e\phi \ll T$$

解は

$$\phi \propto \exp(-x/\lambda_D) \qquad 3\text{ 次元（点電荷）の場合は } \phi \propto \frac{1}{r}\exp(-r/\lambda_D)$$

但し $\lambda_D \equiv \left[\frac{\varepsilon_0 T_e}{n_e e^2}\frac{1}{\left(1+\frac{ZT_e}{T_i}\right)}\right]^{\frac{1}{2}}$

通常イオンの項を無視して

$$\lambda_D \equiv \left(\frac{\varepsilon_0 T_e}{n_e e^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

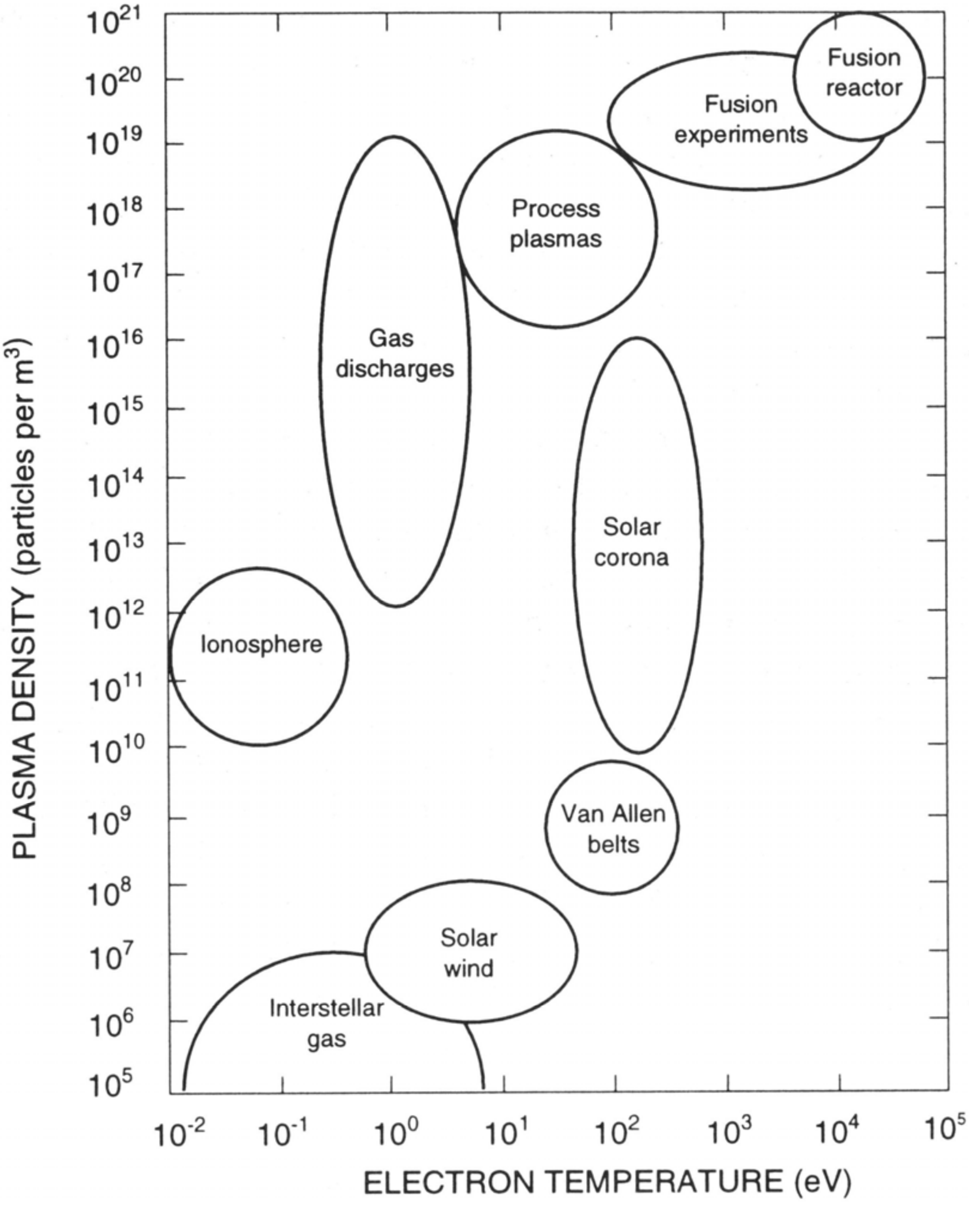
を使う。

プラズマの条件

$\lambda_D \ll L$ （プラズマの大きさ）

$$n\frac{4\pi}{3}\lambda_D^3 \gg 1$$

例： $T_e = 3$ eV, $n_e = 10^{19}$ m^{-3} のプラズマ $\rightarrow \lambda_D \approx 3\times 10^{-6}$ m, $n\frac{4\pi}{3}\lambda_D^3 \approx 10^3$



典型的なプラズマの温度および密度