

# 7. Plasma Processing of Materials

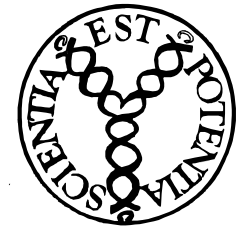
poznámky k přednášce

F4280 - Technologie depozice tenkých vrstev a povrchových úprav

*Lenka Zajíčková*



*Masarykova univerzita,  
Přírodovědecká fakulta*



lenkaz@physics.muni.cz

# 7.1 Introduction to Plasma Physics

## Plasma ...

- is **quasineutral system of charged particles** (electrons -  $n_e$ , ions -  $n_i$ ) that can contain neutrals ( $n_g$ )

ionization degree:

$$x_{iz} = n_i / (n_i + n_g)$$

fully ionized plasma

$$x_{iz} \approx 1$$

weakly ionized plasma

$$x_{iz} \ll 1$$

Quasineutrality

$$n_e \approx n_i$$

has to be fulfilled on the scale

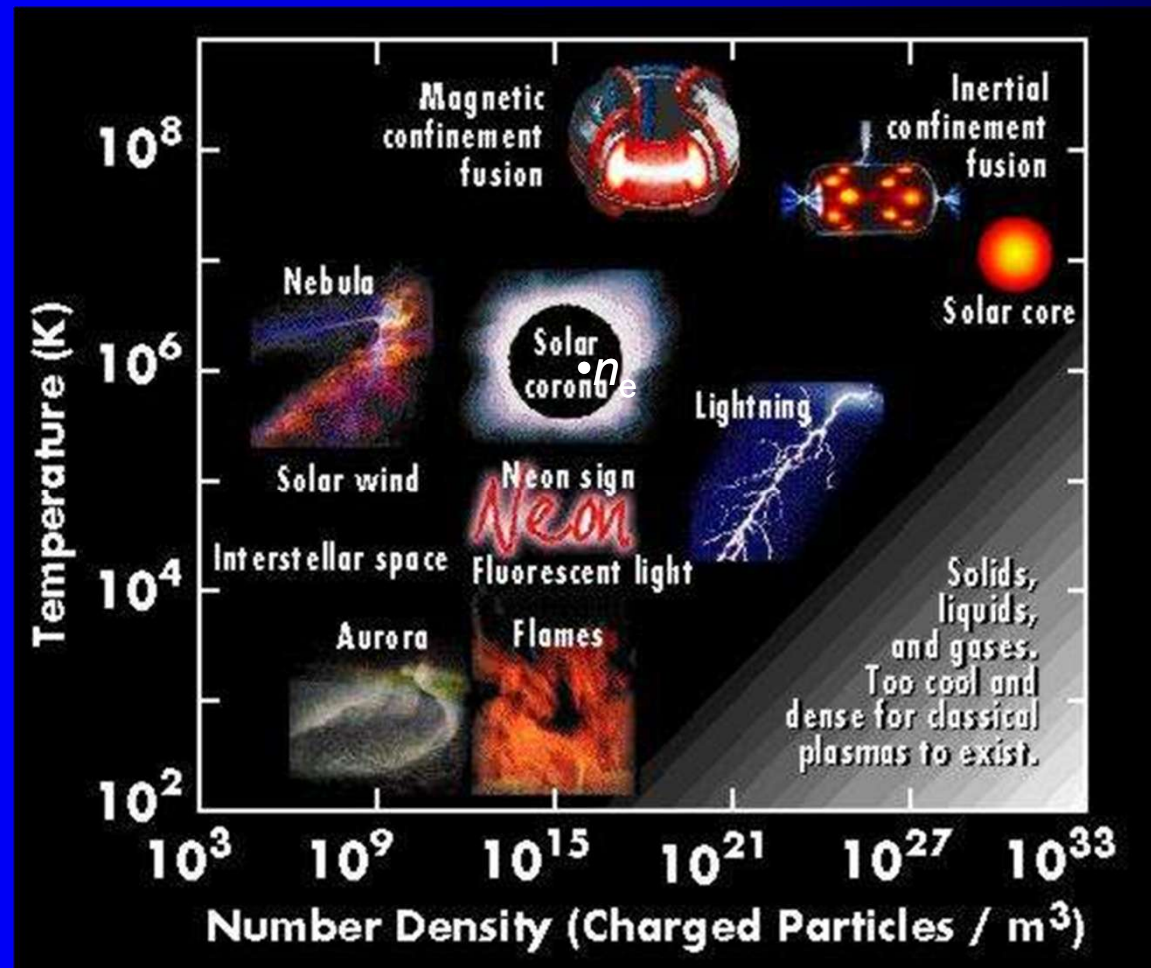
$$L \gg \lambda_D.$$

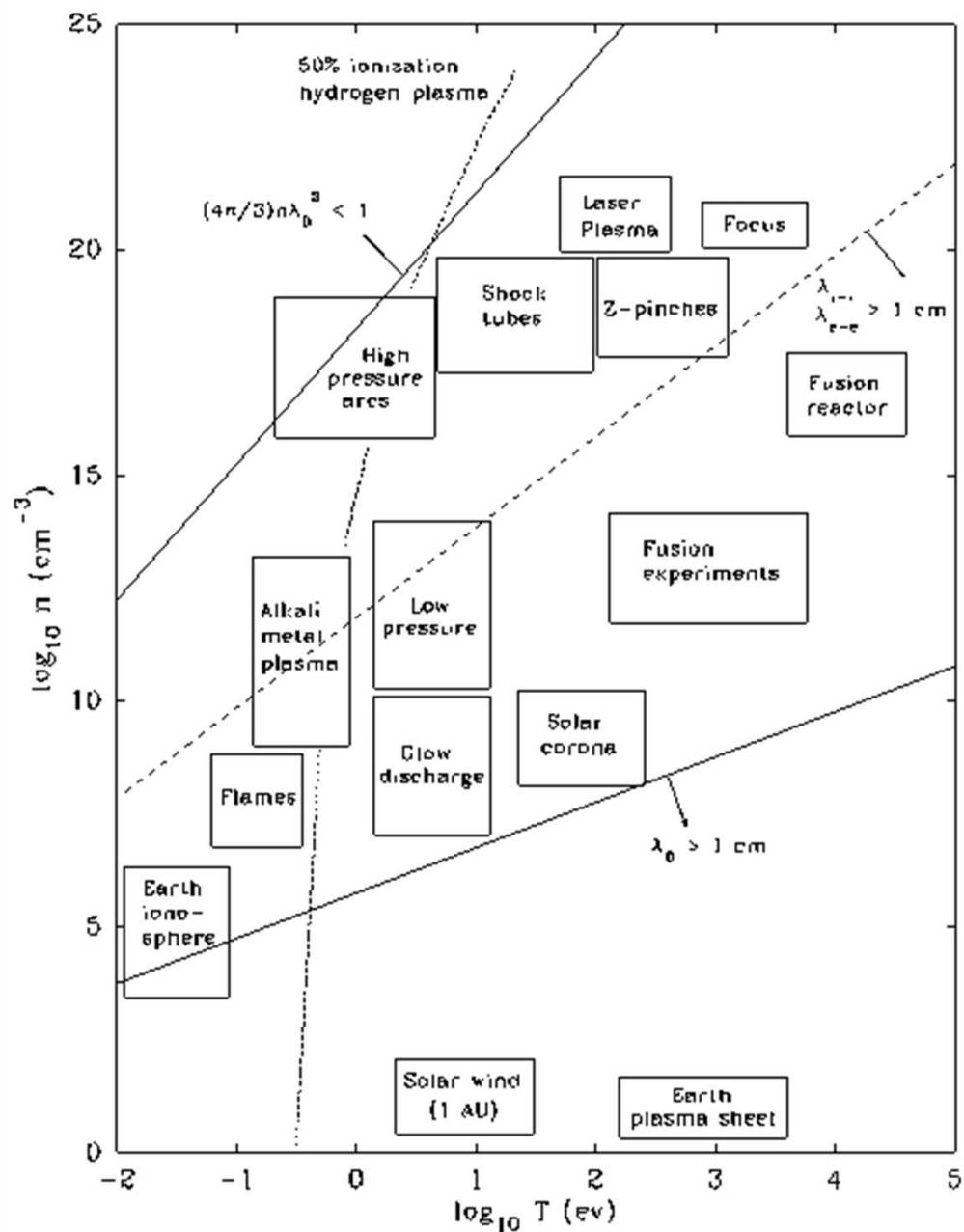
Quasineutrality is violated in regions adjacent to walls and other solid objects in contact with plasma – **plasma sheath**.

These regions are very important for plasma processing. **Plasma potential** is always the most positive potential → **electrons are repelled by a Coulomb barrier, ions accelerated towards solid surfaces.**

Important plasma parameters are

- electron temperature  $T_e$
- electron density  $n_e$





$T_e$  is given rather in [eV]

1 eV = 11 600 K

Natural length scale in plasma is Debye length

$$\lambda_d = \left( \frac{\epsilon_0 k_b T_e}{n_e e^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

## Plasma ...

- contains many interacting charged particles

$$n_e \lambda_D^3 \gg 1$$

- exhibits collective behaviour of electrons that is not much disturbed by electron-neutral collisions

Dynamics of charged plasma particles is given by

- externally applied fields and
- internal fields resulting from existence and motion of charged plasma particles

We can distinguish interaction of:

- two charged particles
- charged and neutral particles.

According to importance of these two interactions plasma is divided into weak or high ionized.

There various elastic or inelastic collisions (interactions) in plasma. Few examples:

Excitace	$A_2 + e^- \rightarrow A_2^* + e^-$
Disociace	$A_2 + e^- \rightarrow 2A + e^-$
Záchyt elektronu	$A_2 + e^- + M \rightarrow A_2^- + M$
Disociativní záchyt	$A_2 + e^- \rightarrow A^- + A$
Ionizace	$A_2 + e^- \rightarrow A_2^+ + 2e^-$
Fotoemise	$A_2^* \rightarrow A_2 + h\nu$
Abstrakce	$A + B_2 \rightarrow AB + B$

# Plasma sheath – Debye sheath

in weakly ionized plasma with  $T_e \approx \text{few eV}$

at grounded or floating wall (low potential drop), collisionless

$$T_i \approx 0$$

density of e<sup>-</sup> / ions in the sheath:

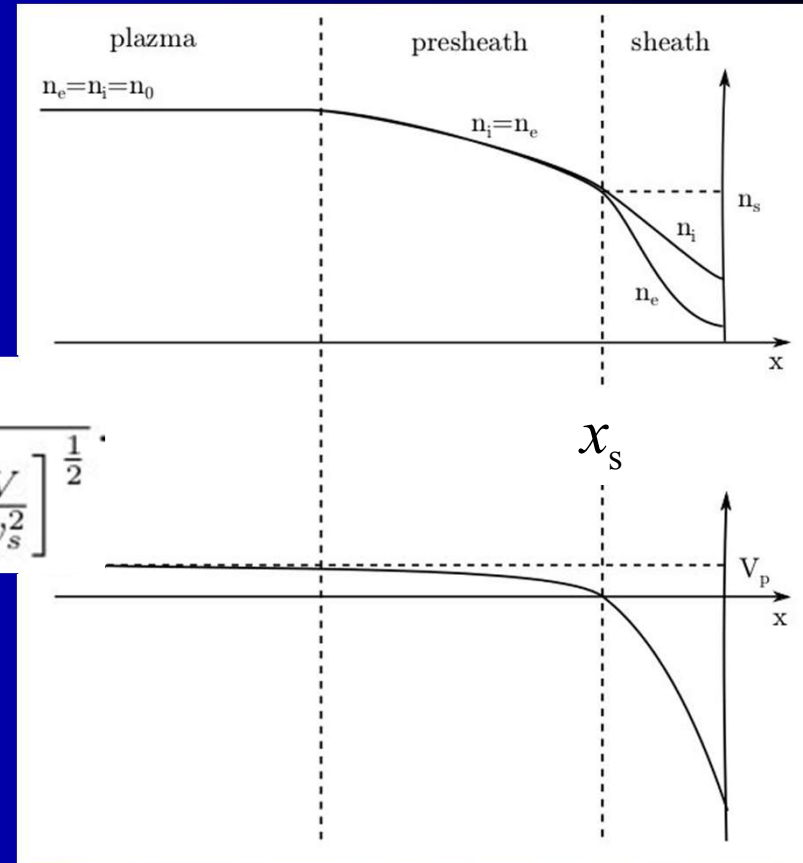
$$n_e = n_s e^{\frac{eV}{k_b T_e}}$$

$$n_i = \frac{n_s}{\left[1 - \frac{2eV}{Mv_s^2}\right]^{\frac{1}{2}}}$$

velocity of ions at sheath edge (Bohm velocity):

$$v_s > \left(\frac{k_b T_e}{M}\right)^{\frac{1}{2}} = u_B$$

density at the sheath edge:  $n_s \approx 0.5 n_0$



electron and ion flux has to equal at floating wall

$$\Gamma_i = n_s u_B$$

$$\Gamma_e = \frac{1}{4} n_s \sqrt{\frac{8k_b T_e}{\pi m}} e^{\frac{eV}{k_b T_e}}$$

$$V_w = \frac{k_b T_e}{2e} \ln\left(\frac{2\pi m}{M}\right)$$

calculation for Ar discharge with  $T_e = 2 \text{ eV}$ ,  $n = 10^8 \text{ cm}^{-3}$ :  
 floating potential approx.  $5T_e = 10 \text{ V}$ ,  
 sheath thickness approx.  $5\lambda_D = 0.37 \text{ mm}$

# Plasma sheath – Child-Langmuir sheath

high-voltage sheath (when a voltage is applied)

Sheath can be artificially divided into Debye sheath which contains electrons and high-voltage Child-Langmuir sheath which has ions only.

Then, current density  $j$ , voltage drop  $V_0$  and sheath thickness  $d$  are related by the Child-Langmuir Law of Space-Charge-Limited Diodes

$$j = \frac{4}{9} \left( \frac{2e}{M} \right)^{1/2} \frac{\epsilon_0 V_0^{3/2}}{d^2} \quad d = \frac{2}{3} \left( \frac{2V_0}{T_{eV}} \right)^{3/4} \lambda_D$$

following previous example with assumption  $V_0 = 400$  V:  $d = 30\lambda_D$ , total sheath thickness  $35\lambda_D$ , i.e. about 1 cm

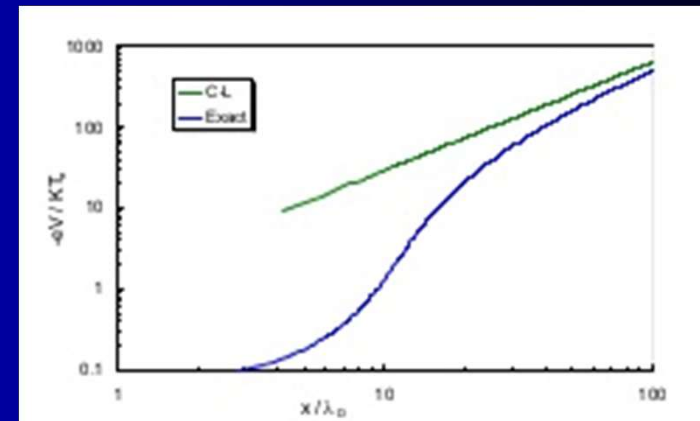
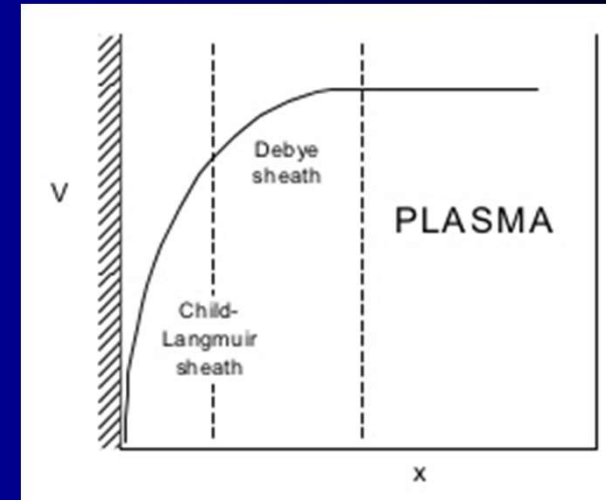
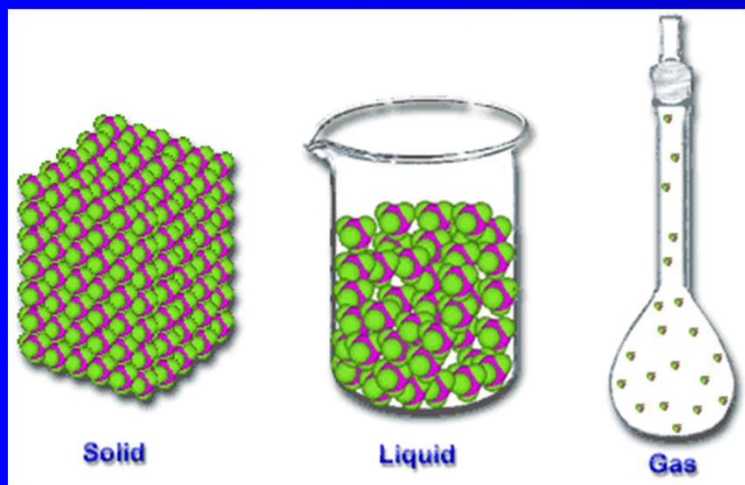


Fig. 3. An exact calculation for a plane sheath shows that C-L scaling is not followed unless the sheath is very thick (log-log scale).

# Jak získáme plazma?

Tři dobře známá skupenství hmoty:



✓ Tato skupenství se **odlišují silou vazeb**, které drží částice látky pohromadě – relativně silné v pevných látkách, slabé v kapalinách a téměř úplně chybí v plynech.

✓ Důležitou fyzikální veličinou je vnitřní kinetická energie (**tepelná energie**) částic látky, tj. její teplota. Rovnováha mezi touto tepelnou energií částic a vzájemnými vazebnými silami určuje skupenství látky.

✓ **Zahříváním pevné nebo kapalné látky** získávají její částice více tepelné energie až do okamžiku, kdy jsou schopné překonat vazebnou potenciální energii

⇒ **dochází k fázovému přechodu** při konstantní teplotě.

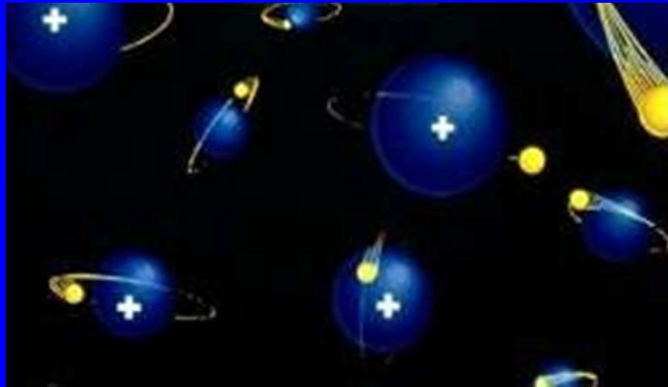
[http://www.harcourtschool.com/activity/states\\_of\\_matter/](http://www.harcourtschool.com/activity/states_of_matter/)



# Plazma je čtvrté skupenství hmoty - ionizovaný plyn

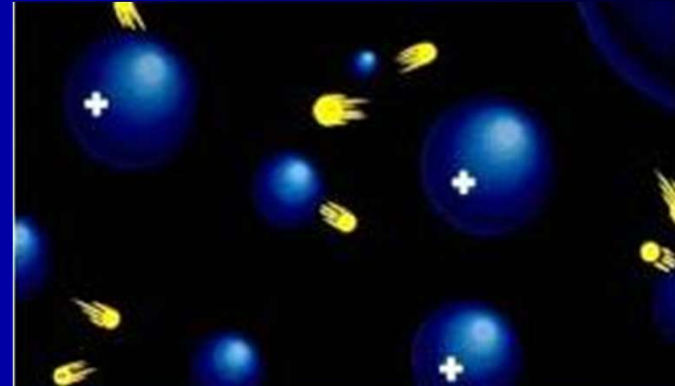
Co se děje, když zahříváme plyn?

*neutrální plyn*



energie

*ionizovaný plyn - plazma*



- ✓ Dodáním dostatečné energie molekulárnímu plynu dochází k jeho disociaci na atomy v důsledku srážek těch částic, jejichž tepelná energie překračuje vazebnou energii molekuly.
- ✓ Ještě větší dodaná tepelná energie způsobí překonání vazebných sil elektronů k jádru  $\Rightarrow$  ionizace, tj. vznik volných elektronů a iontů  $\Rightarrow$  plazma

# Two Methods for Generation of Plasma

✓ **Dostatečným zvýšením teploty:** Pak jde o systém v termodynamické rovnováze. Elektronová teplota a stupeň ionizace jsou svázány Sahaovou rovnicí. V laboratoři neobvyklé, ale v přírodě časté (astrofyzikální plazma).

✓ **Pomocí ionizačních procesů** zvyšujících mnohonásobně stupeň ionizace nad jeho rovnovážnou hodnotu (po vypnutí zdroje ionizace dojde k dohasínání plazmatu díky rekombinaci):

- **fotoionizace** – ionizační potenciál např. atomu kyslíku je 13,6 eV ⇒ foton o vlnové délce 91 nm (daleká UV oblast).

Ionosféra Země - přírodní fotoionizované plazma.

- **elektrický výboj v plynu** – el. pole urychluje volné elektrony na energie dostatečné k ionizaci atomů, laboratorní plazma.

