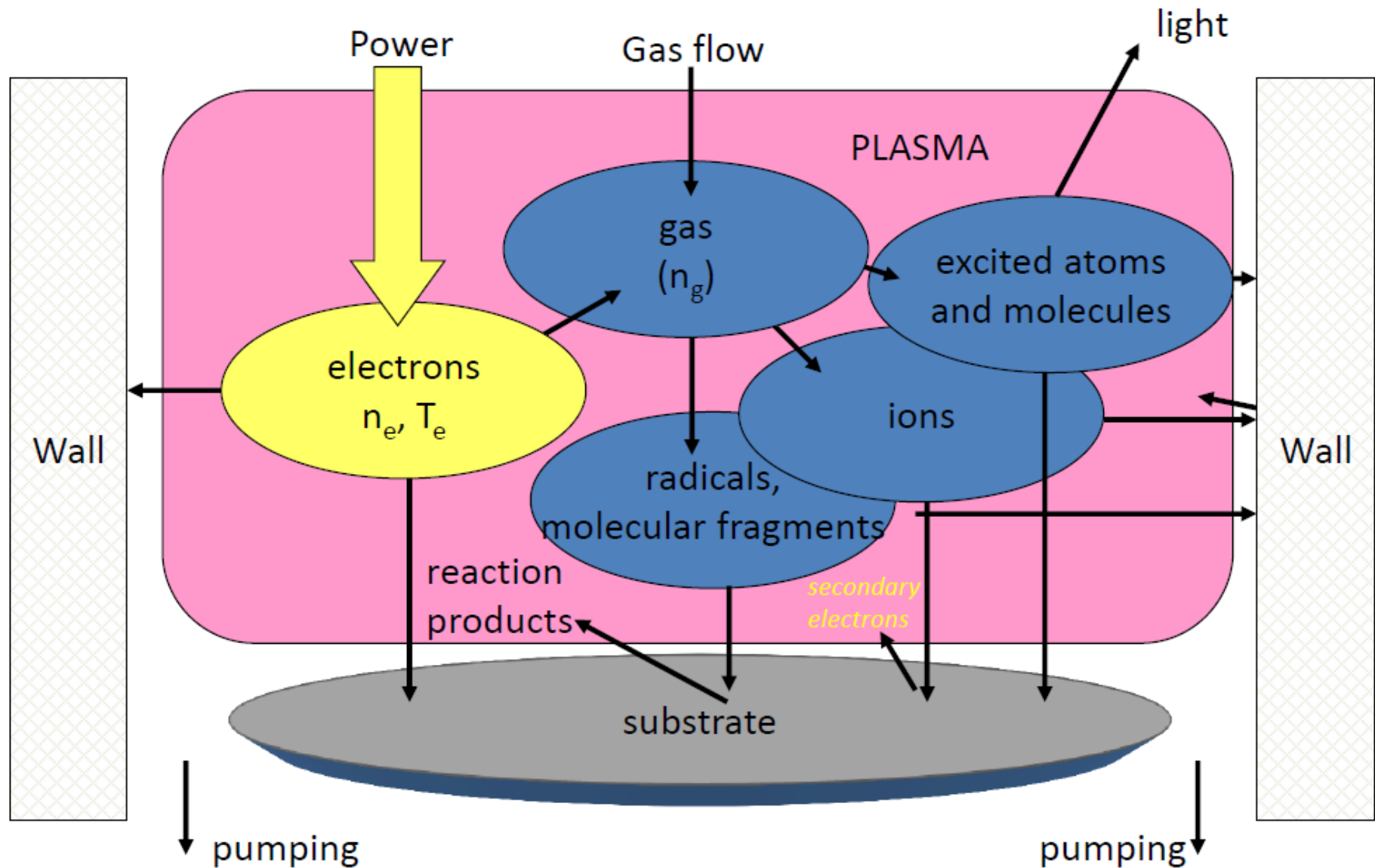


Plasma prodotto da una scariche elettriche nei gas

- “Principle of plasma discharges and materials processing”, Lieberman and Lichtenberg
- “Gas discharge physics”, Raizer



Plasma da un gas a bassa pressione



Produzione di elettroni: ionizzazione dei neutri da parte di elettroni già esistenti, fotoionizzazione, emissione secondaria dovuta all'impatto di ioni contro le pareti

Breakdown Elettrico

Processo in cui un materiale isolante diventa conduttore, (o per lo meno viene creato un cammino conduttore all'interno del mezzo) perché viene applicato un campo elettrico.

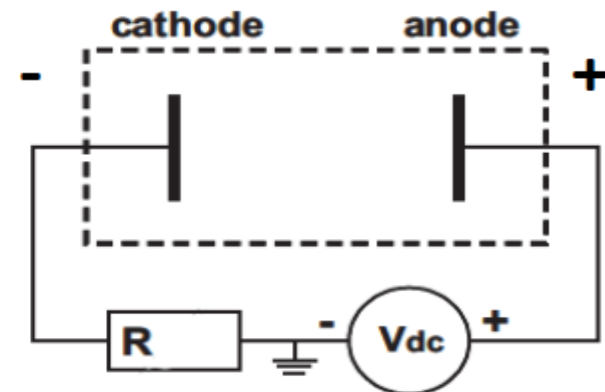
Processo a soglia: il campo elettrico deve superare un valore minimo.

Diversi meccanismi di breakdown a bassa e alta pressione.

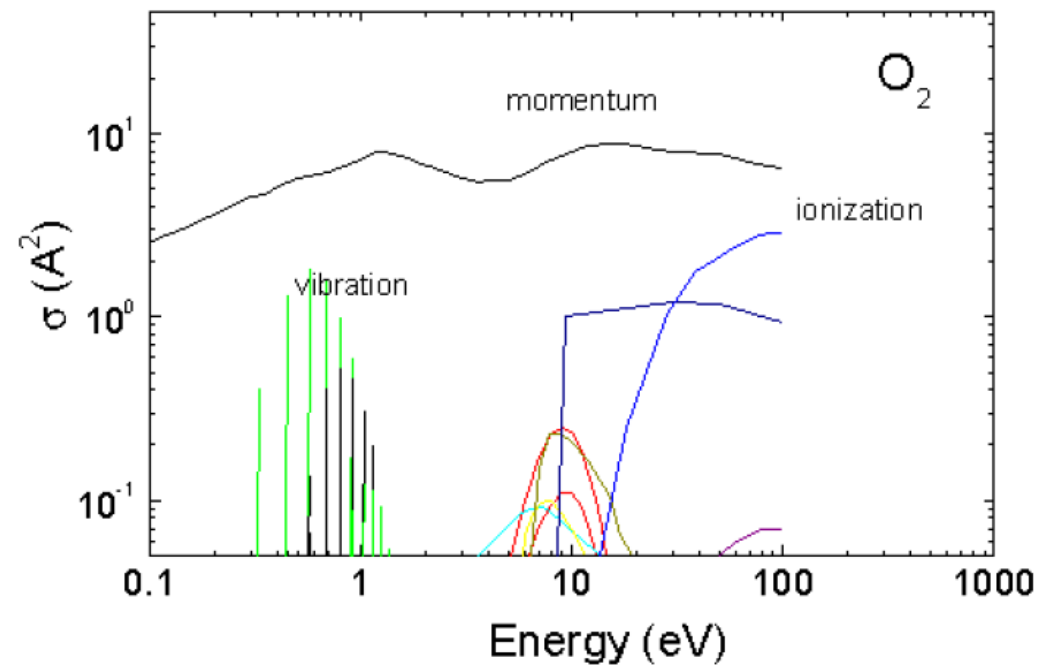
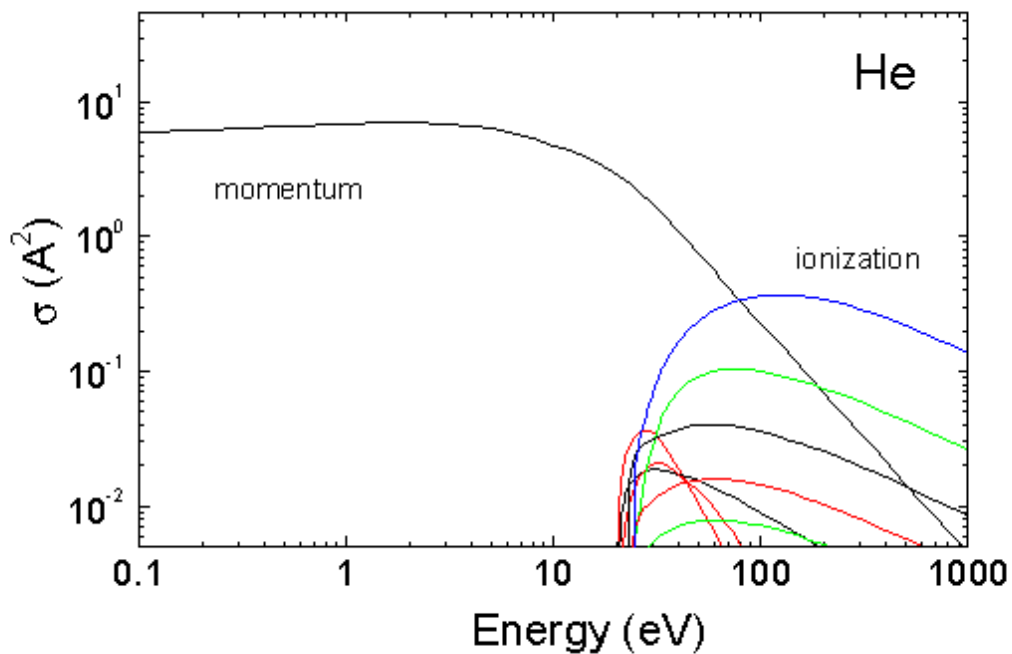
Valanga elettronica:

- moltiplicazione di qualche elettrone primario in un processo di ionizzazione a cascata
- inizio di ogni meccanismo di breakdown

Gap piano: campo elettrico uniforme tra due elettrodi metallici paralleli



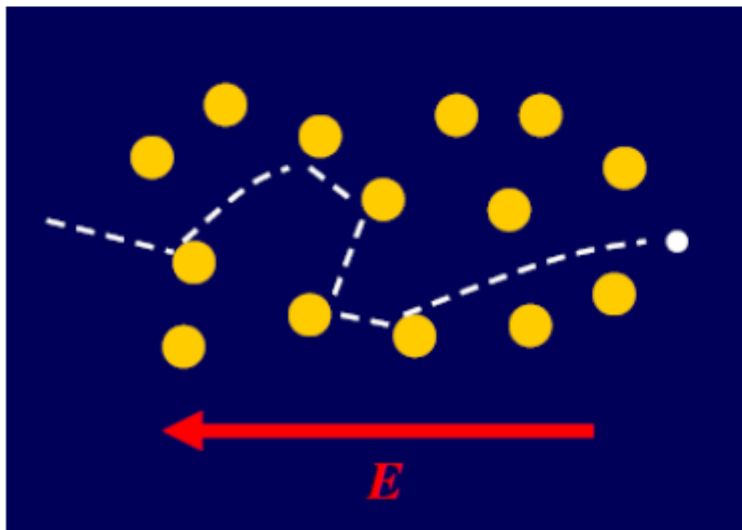
Processi atomici in un gas ionizzato: collisioni elettroniche



Drift degli Elettroni nel campo E

Collisioni: moto non rettilineo

Tra due collisioni: accelerazione lungo la line di forza del campo elettrico.



Moto di «drift» con velocità media:

$$\mathbf{v}_d = -\mu_e \mathbf{E}$$

$$\mu_e = \frac{e}{m_e \nu}$$

Collisione ionizzante:

un elettrone con energia sufficientemente elevata urta un elettrone, creando un secondo elettrone. Questi due elettroni possono creare altri elettroni, etc...

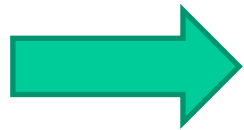
Valanga elettronica:

- moltiplicazione di qualche elettrone primario in un processo di ionizzazione a cascata
- inizio di ogni meccanismo di breakdown

Concetti di base: drift e mobilità

Equation of Averaged Motion

$$m\dot{\mathbf{v}}_e = -e\mathbf{E} + \sum_i m\Delta\mathbf{v}_i\delta(t - t_i), \quad \Delta\mathbf{v}_i = \mathbf{v}'_e - \mathbf{v}_e,$$
$$\langle v_{\parallel} \rangle = \langle v'_{\parallel} \rangle - v = v\langle \cos\theta \rangle - v \equiv -v(1 - \overline{\cos\theta}),$$



$$m\dot{v} = -eE - mv\nu_m, \quad \nu_m = \nu_c(1 - \overline{\cos\theta}),$$

$$v(t) = -(eE/m\nu_m)[1 - \exp(-\nu_m t)] + v(0)\exp(-\nu_m t).$$



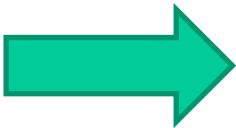
$$v_d = -eE/m\nu_m;$$

$$\mu_e = \frac{e}{m\nu_m} = \frac{1.76 \cdot 10^{15} \text{ cm}^2}{\nu_m[\text{s}^{-1}] \text{ V} \cdot \text{s}}, \quad v_d = \mu_e E.$$

Concetti di base: energia media

Mean Energy Gained by an Electron

$$-e\mathbf{E} \cdot \mathbf{v}_e \quad -\langle e\mathbf{E} \cdot \mathbf{v}_e \rangle = \bar{e}E\nu_d.$$


$$\Delta\epsilon_E = \frac{eE\nu_d}{\nu_m} = \frac{e^2 E^2}{m\nu_m^2} = m\nu_d^2,$$


$$\left\langle \frac{mv_e^2}{2} \right\rangle = \left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle + \frac{m\nu_d^2}{2} = \epsilon + \frac{m\nu_d^2}{2}, \quad (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}_d) = 0.$$

Equation of Electron Energy Balance

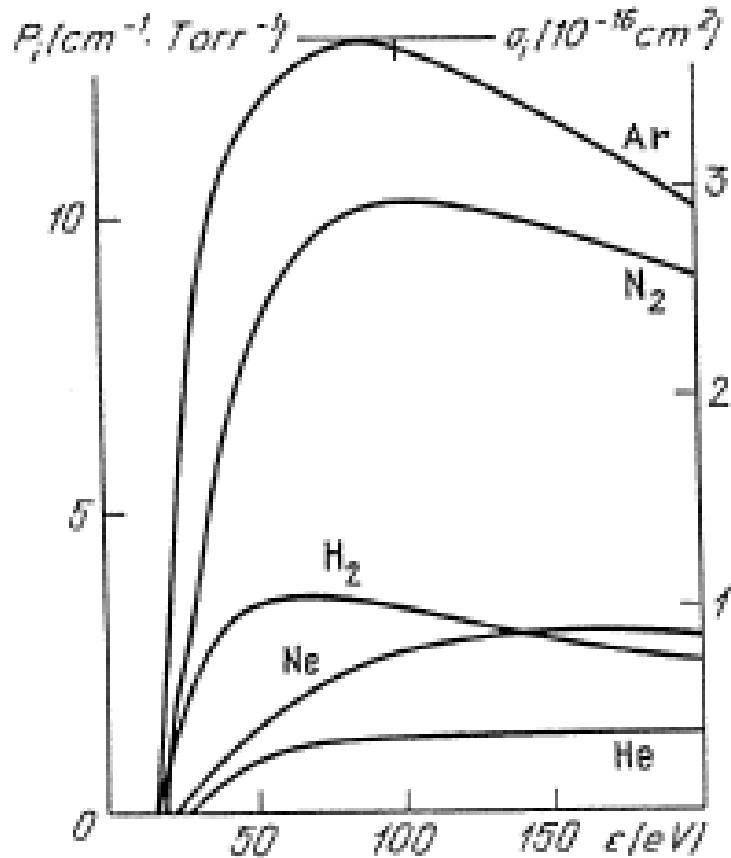
$$\Delta\epsilon_E = (m^2/2M)\langle(\Delta\mathbf{v})^2\rangle \quad \delta = 2m/M$$

$$\langle(\Delta\mathbf{v})^2\rangle = \langle(\mathbf{v}' - \mathbf{v})^2\rangle = v^2 - 2v'\overline{v\cos\theta} + v^2 = 2v^2(1 - \overline{\cos\theta}),$$


$$\frac{d\epsilon}{dt} = (\Delta\epsilon_E - \delta\epsilon)\nu_m = \left(\frac{e^2 E^2}{m\nu_m^2} - \delta\epsilon \right) \nu_m.$$


$$\bar{\epsilon} = \frac{e^2 E^2}{\delta m \nu_m^2} = \frac{e^2}{\delta m \bar{\nu}_m^2} \left(\frac{E}{N} \right)^2, \quad \bar{\nu}_m \equiv \frac{\nu_m}{N}.$$

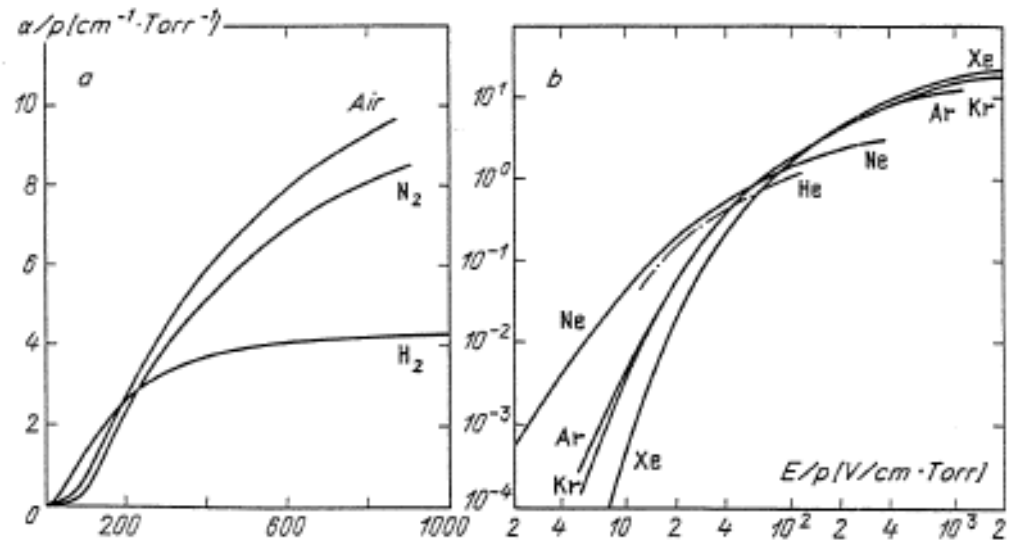
Processi atomici in un gas ionizzato: Ionizzazione per impatto elettronico



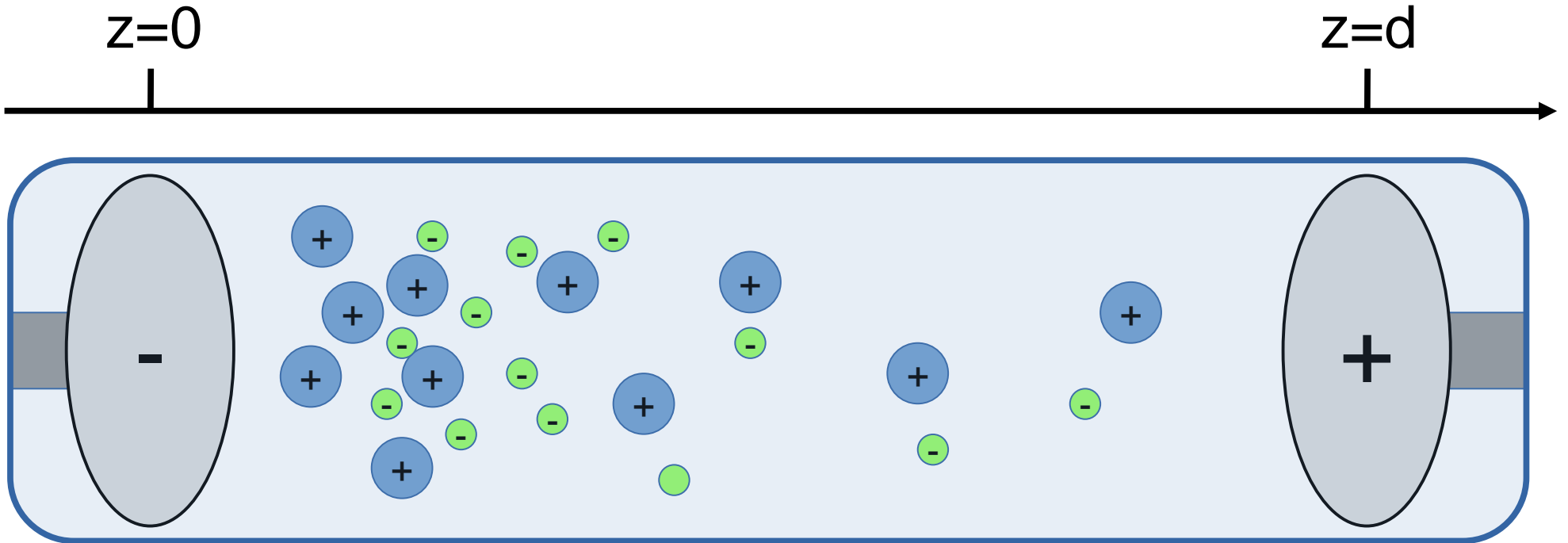
$$n_1 = N \int n(\epsilon) v \sigma_i(\epsilon) d\epsilon / \int n(\epsilon) d\epsilon = N (v \sigma_i) \equiv N k_1$$

$$\alpha = n_1 / v_d, \quad n_1 = \alpha v_d \cdot \text{Townsend Coeff.}$$

Electron exponential multiplication



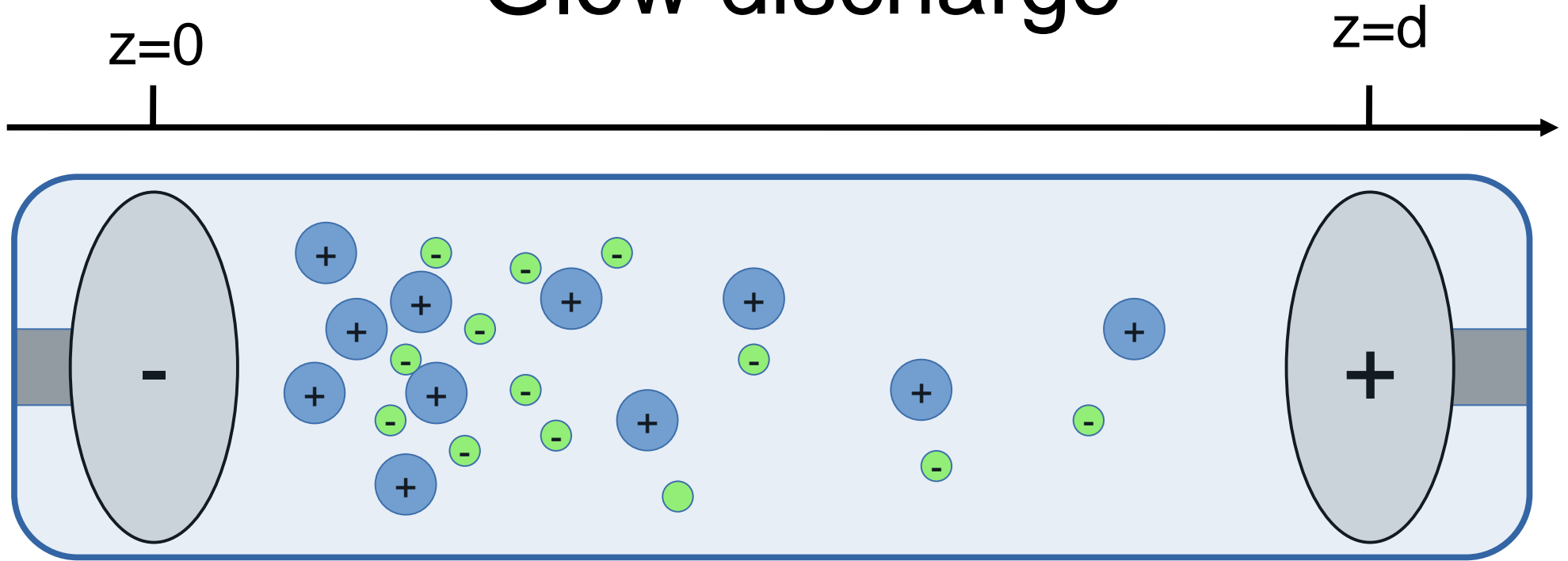
Breakdown



$$\Gamma_e(z) = \Gamma_e(0) \exp \left[\int_0^z \alpha(z') dz' \right] \quad \alpha(z) \equiv 1 / \lambda_{iz}(z)$$

Ho moltiplicazione esponenziale di elettroni e ioni (valanga)
Ma non ho uno stato stazionario: $T \sim d / V_{\text{drift}}$

Glow discharge

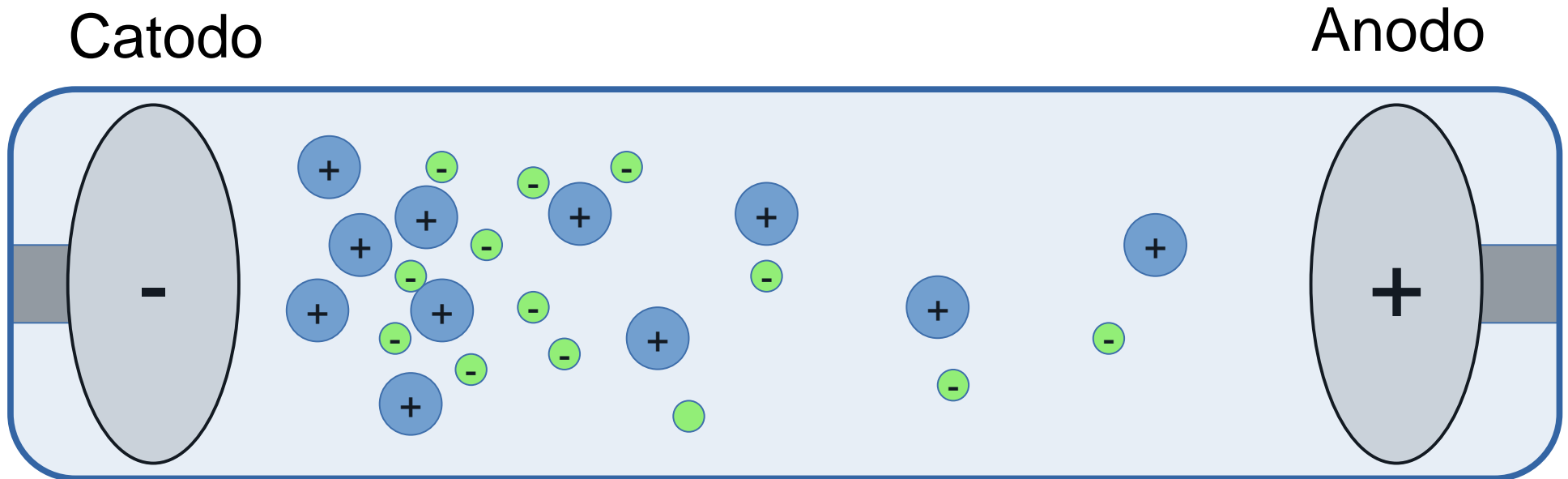


$$\Gamma_e(z) = \Gamma_e(0) \exp \left[\int_0^z \alpha(z') dz' \right] \quad \alpha(z) \equiv 1 / \lambda_{iz}(z)$$

$$\Gamma_i(0) - \Gamma_i(d) = \Gamma_e(0) \left\{ \exp \left[\int_0^d \alpha(z') dz' \right] - 1 \right\}$$

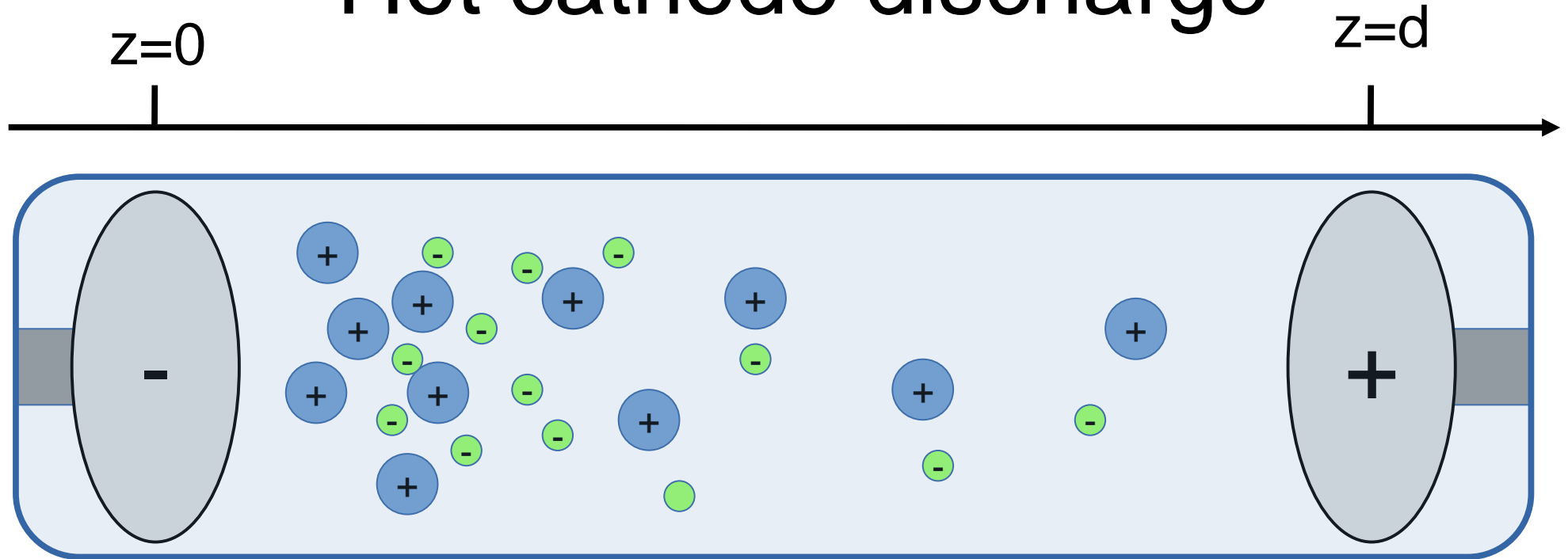
$$\Gamma_e(0) = \gamma_{se} \Gamma_i(0)$$

Hot cathode discharge



- Gli elettroni vengono emessi dal catodo
- Gli elettroni vengono accelerati verso l'anodo ionizzando il gas lungo il percorso
- **Ho uno stato (di plasma) stazionario se ho un flusso costante di elettroni primari**

Hot cathode discharge

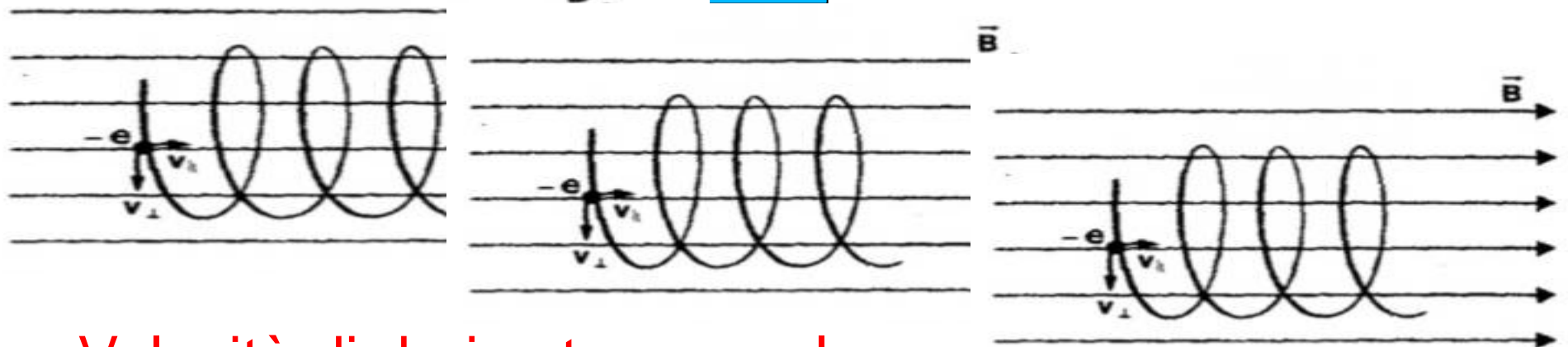
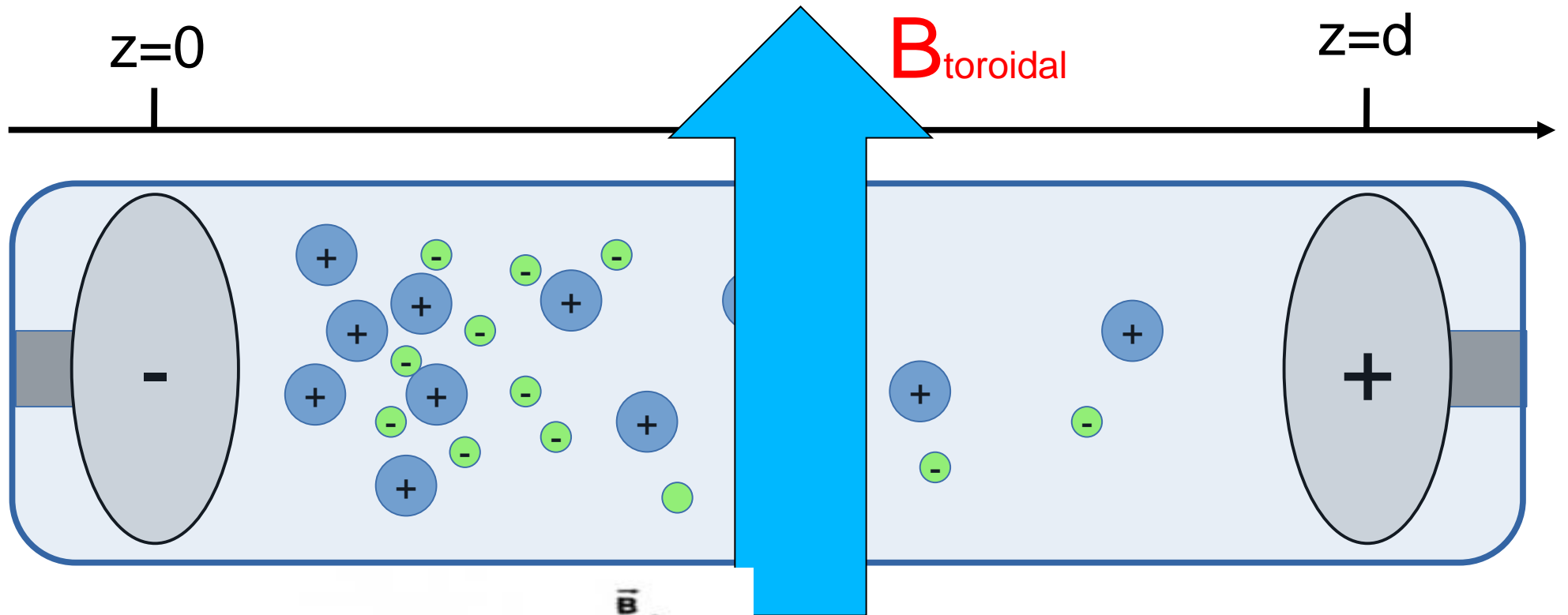


$$\Gamma_e(z) = \Gamma_e(0) \exp \left[\int_0^z \alpha(z') dz' \right] \quad \alpha(z) \equiv 1 / \lambda_{iz}(z)$$

$$\Gamma_i(0) - \Gamma_i(d) = \Gamma_e(0) \left\{ \exp \left[\int_0^d \alpha(z') dz' \right] - 1 \right\}$$

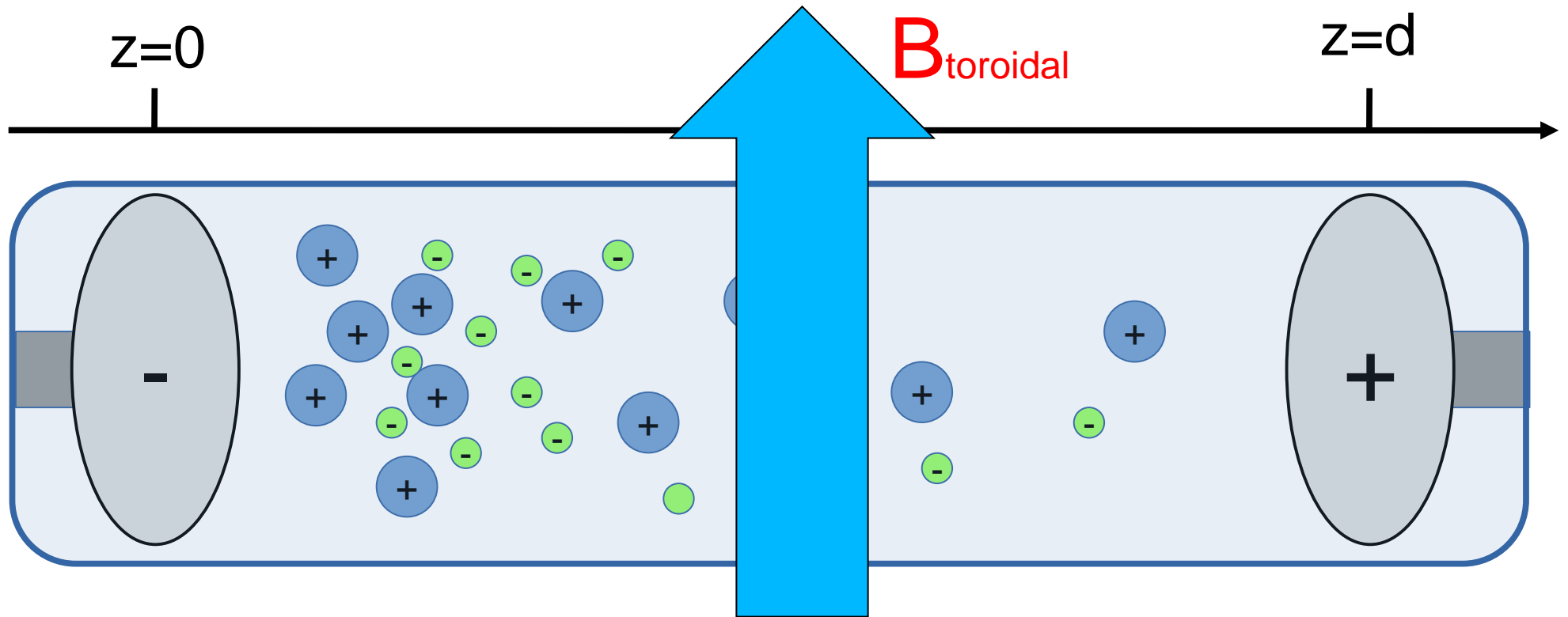
Valanga elettronica: $J_e(d) \gg J_e(0)$
 $J_e(0)$ per emissione termoionica (hot)

Hot cathode discharge in a Simple Magnetized Torus (SMT)



Velocità di deriva trasversale

Hot cathode discharge in a Simple Magnetized Torus (SMT)



Velocità di deriva trasversale

$$\Gamma_e(z) = \Gamma_e(0) \exp \left[\int_0^z \alpha(z') dz' \right] \quad \alpha(z) \equiv 1 / \lambda_{iz}(z)$$

In laboratorio

- Caratterizzazione del setup sperimentale
(preparazione del vuoto e del flusso di gas)
(emissione termoionica, circuito elettrico)
(campo magnetico)
- Studio del breakdown e della caratteristica elettrica I/V
- Misura dello stato di plasma
- Studio dell'emissione luminosa del plasma
(OES - Diagnostica ottica)
- Studio delle fluttuazioni e delle instabilità mediante
misure elettrostatiche
(Diagnostica di Langmuir)