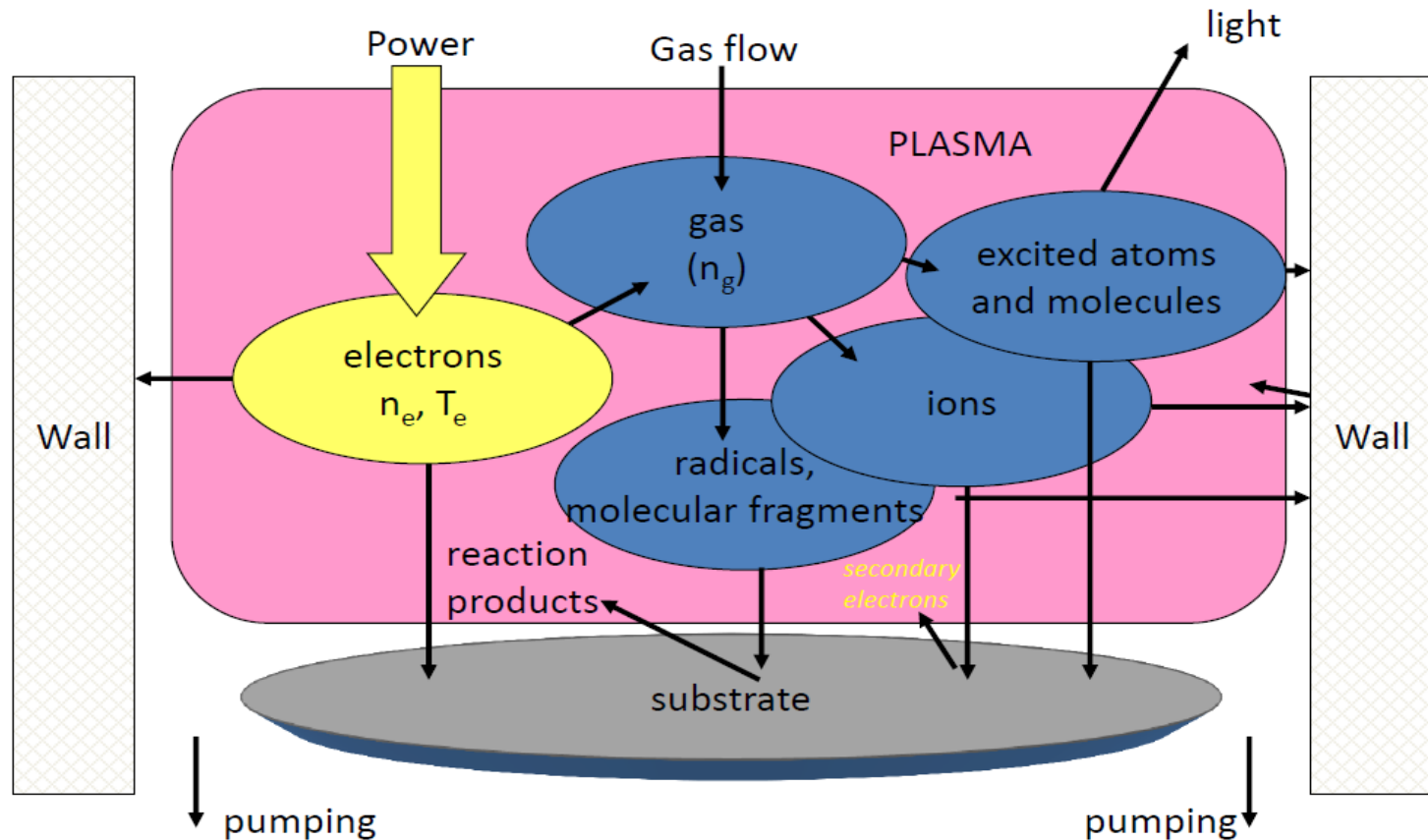


# Innesco di plasmi a bassa pressione con tensione continua

**prof. Emilio Martines**

Dipartimento di Fisica “G. Occhialini”  
Università degli Studi di Milano-Bicocca  
**emilio.martines@unimib.it**

## 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

**Innesco** (*breakdown*): processo attraverso cui un materiale isolante (in questo caso allo stato gassoso) diventa conduttore, o perlomeno viene creato al suo interno un canale di conduzione.

Il modo più comune di ottenere l'innesco è attraverso l'**applicazione di un campo elettrico**, che accelera i pochi elettroni liberi presenti nel gas, causando eventi di ionizzazione, con un **effetto a valanga**.

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

Diversi meccanismi di innesco **a bassa ed alta pressione**:

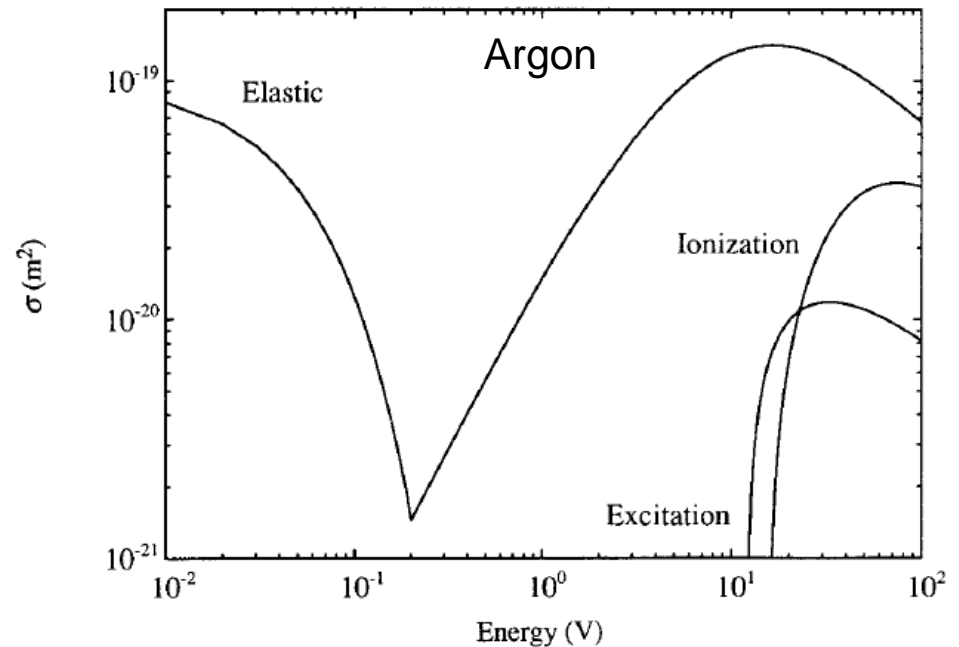
- a bassa pressione si ha un effetto a valanga di moltiplicazione di elettroni;
- ad alta pressione anche, ma la densità di carica è così elevata da modificare localmente il campo elettrico: si ha la formazione di *streamer*.

Il campo elettrico può essere stazionario o variabile (radiofrequenza, microonde). Questo dà luogo a diversi meccanismi di innesco. Qui consideriamo il caso di **campo stazionario**.

In un plasma debolmente ionizzato, un elettrone subirà collisioni **principalmente con le molecole neutre**.

Possibili collisioni:

- elastiche
- anelastiche
  - **ionizzazione**
  - eccitazione di elettroni legati
  - eccitazione di livelli vibrazionali
  - eccitazione di livelli rotazionali
  - dissociazione molecolare
  - formazione di ioni negativi



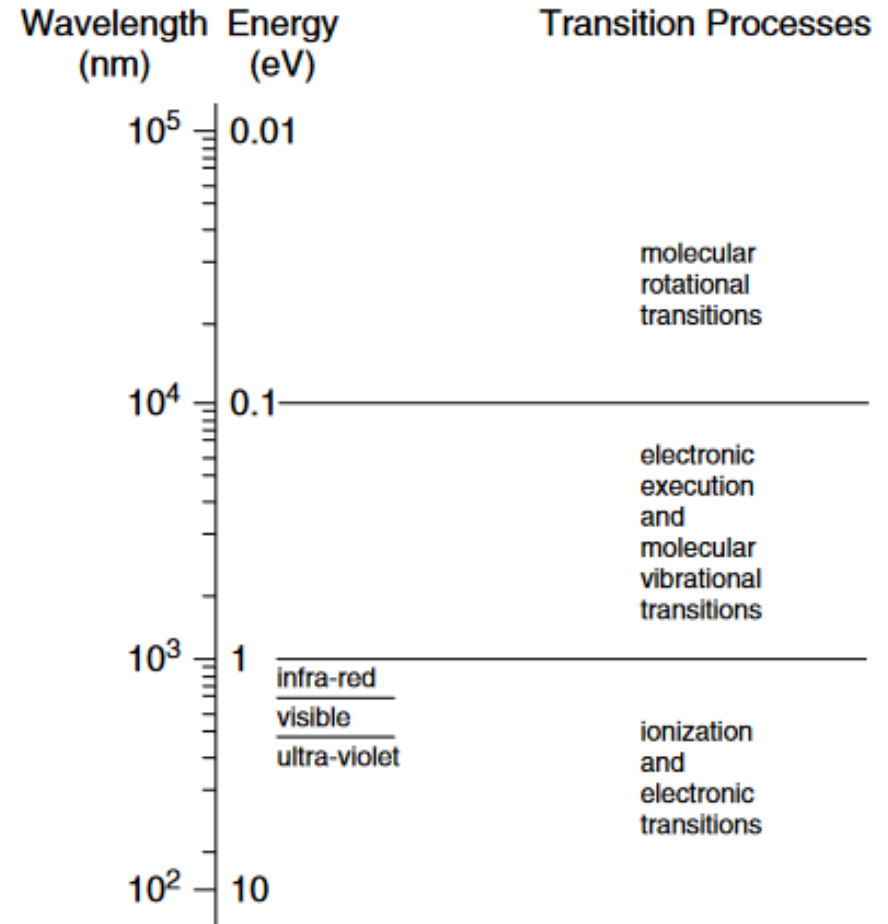
Le perdite di energia di un elettrone sono principalmente dovute a ionizzazione ed eccitazione di elettroni legati.

La perdita di energia per coppia elettrone-ione creata, nel caso di una temperatura elettronica di 4 eV, è di 40 eV in argon (molto superiore al potenziale di ionizzazione di 15.6 eV).

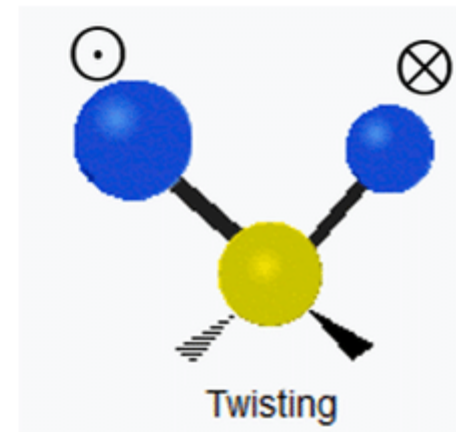
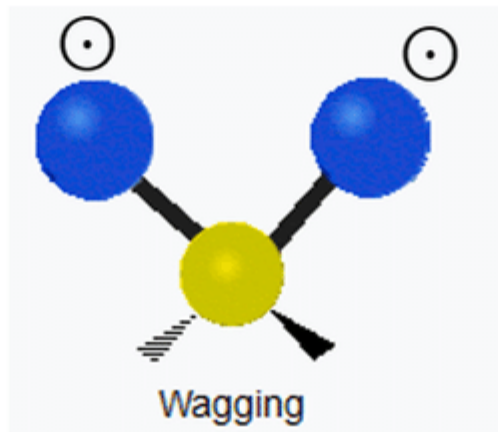
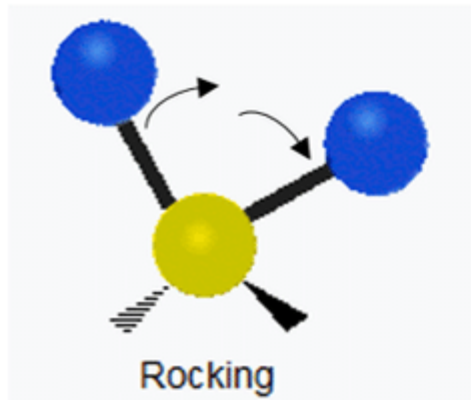
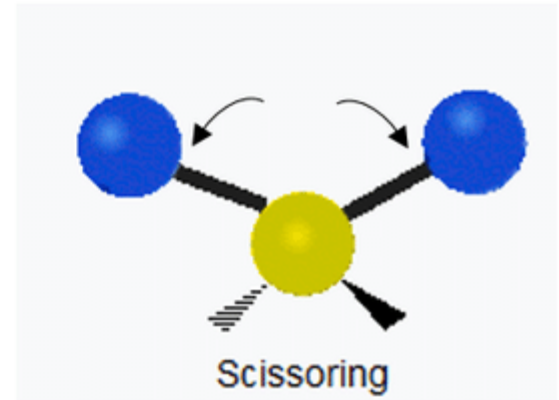
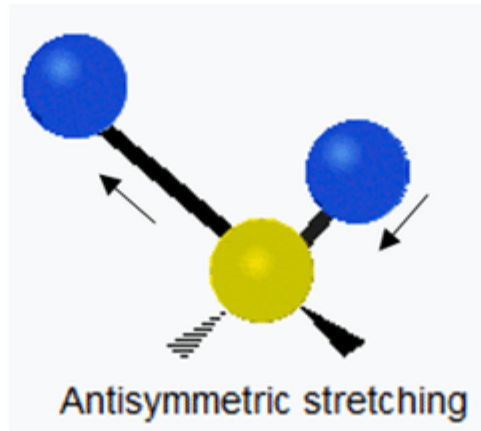
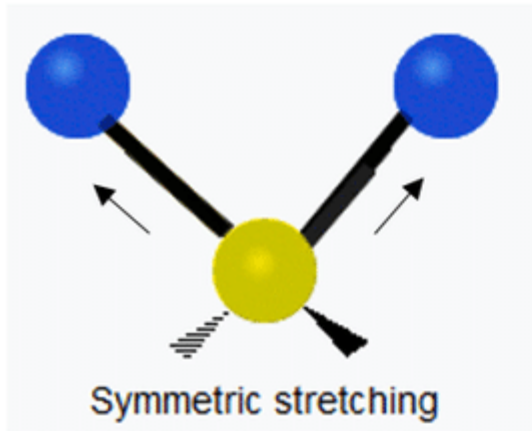
# Energie tipiche delle diverse transizioni

In ordine di energia crescente:

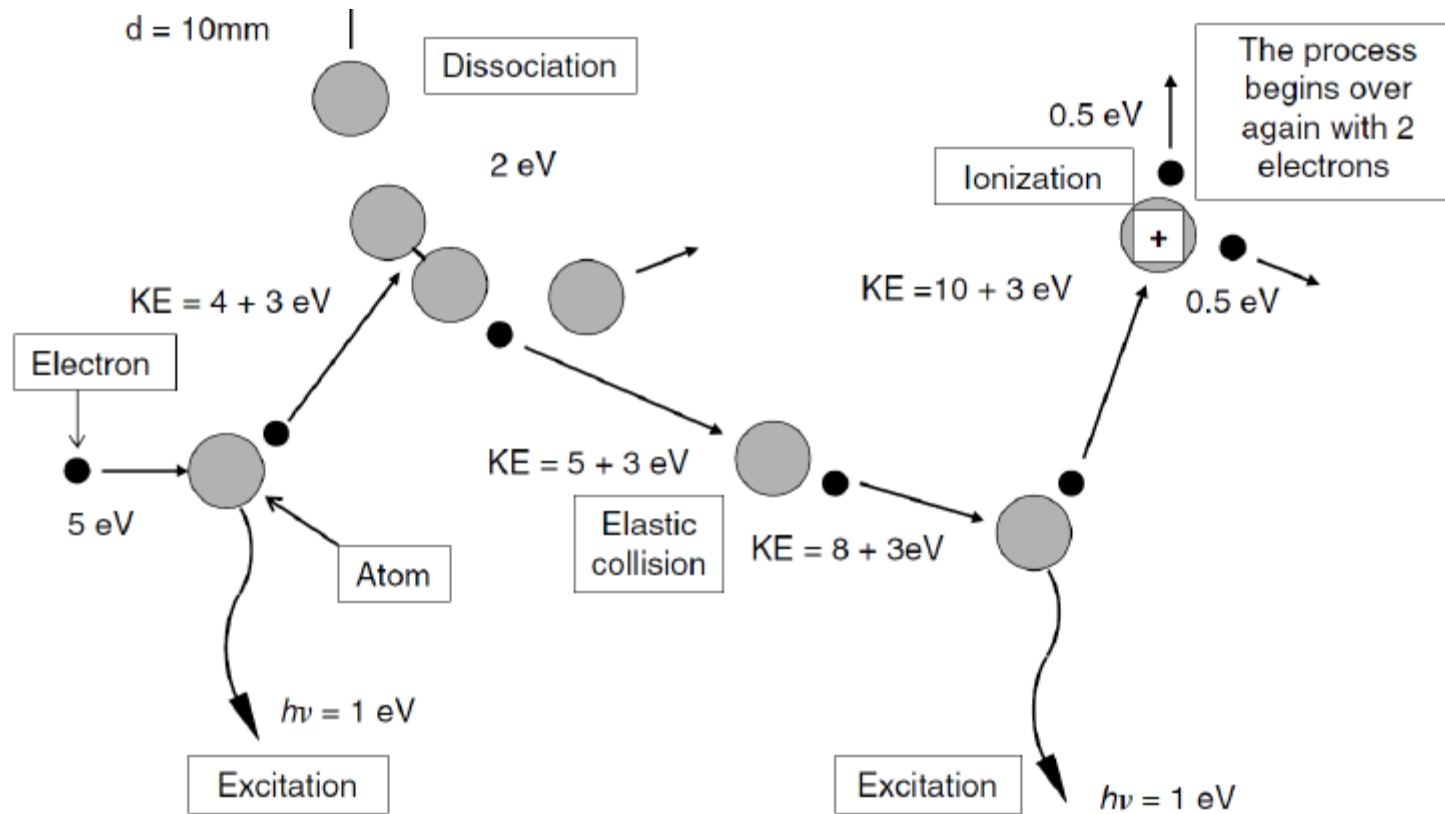
- transizioni rotazionali molecolari
- transizioni vibrazionali molecolari
- transizioni elettroniche
- ionizzazione



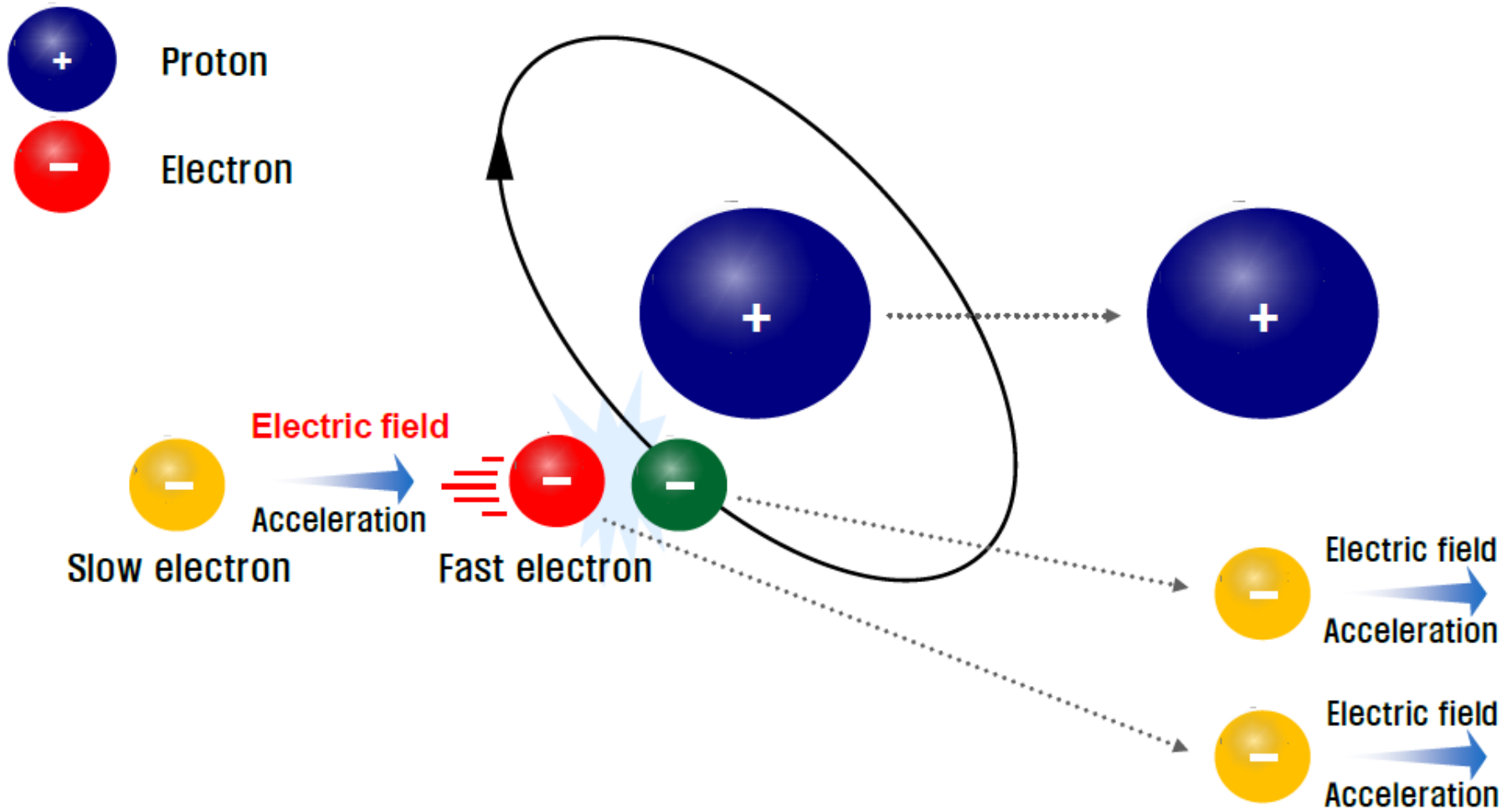
# Esempio: stati vibrazionali di un gruppo $\text{CH}_2$



# Esempio di moto di un elettrone nel gas

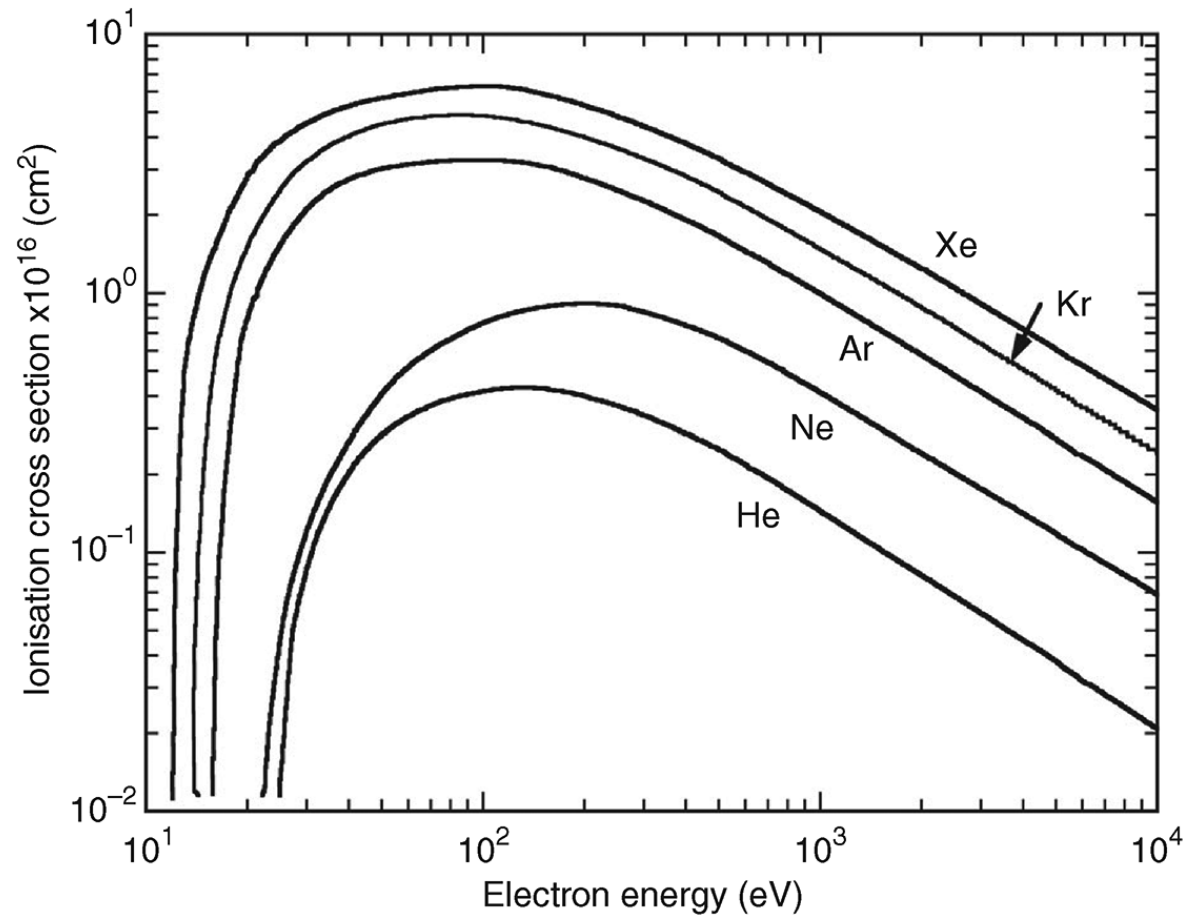


# Processo di ionizzazione per impatto elettronico



Ionization energy of hydrogen: 13.6 eV

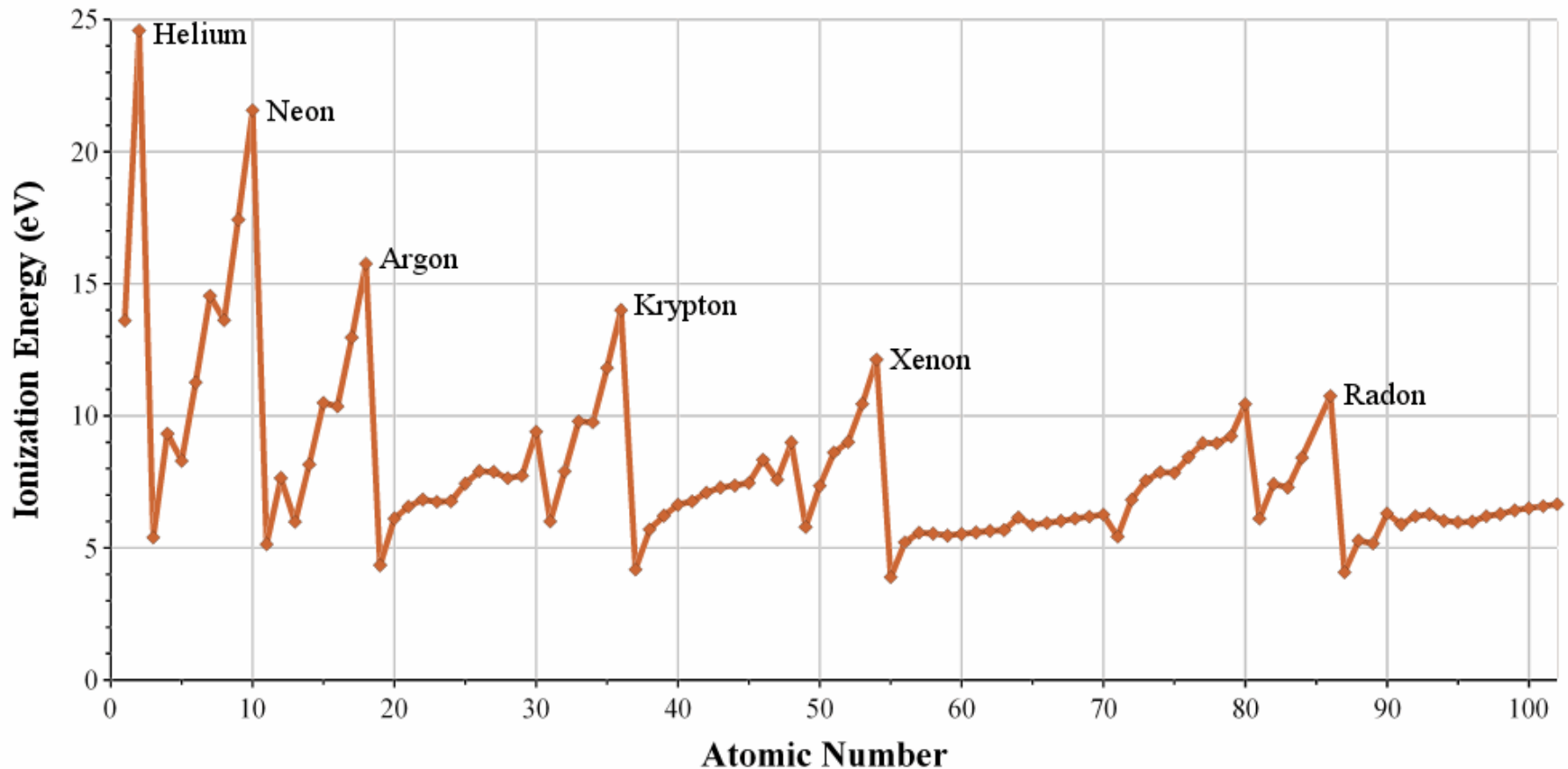




Le sezioni d'urto presentano un ampio massimo per energie dell'ordine dei 100 eV.

# Potenziale di ionizzazione

I gas nobili hanno i potenziali di ionizzazione più alti.  
Tuttavia, essendo molecole monoatomiche, non hanno vari canali di perdita di energia,  
e quindi risultano complessivamente più agevoli da ionizzare.



# Tubo a bassa pressione

Elettrodo positivo: **anodo**

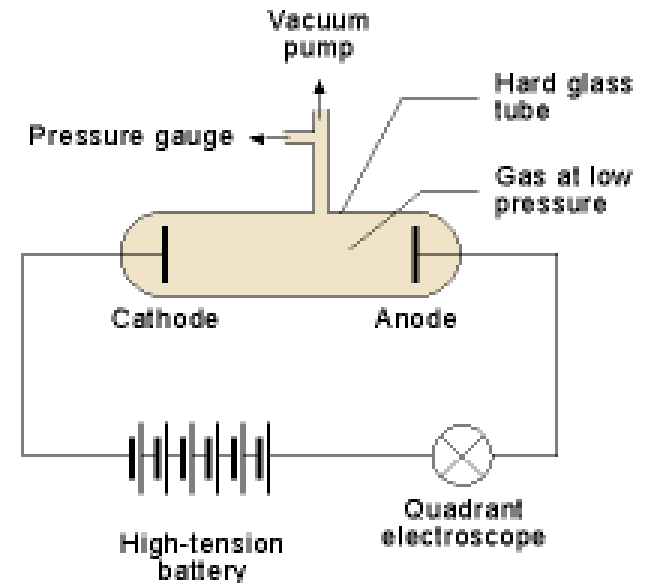
Elettrodo negativo: **catodo**

Il campo elettrico accelera gli elettroni, che viaggiano verso l'anodo, e vengono rallentati dalle collisioni con le molecole del gas.

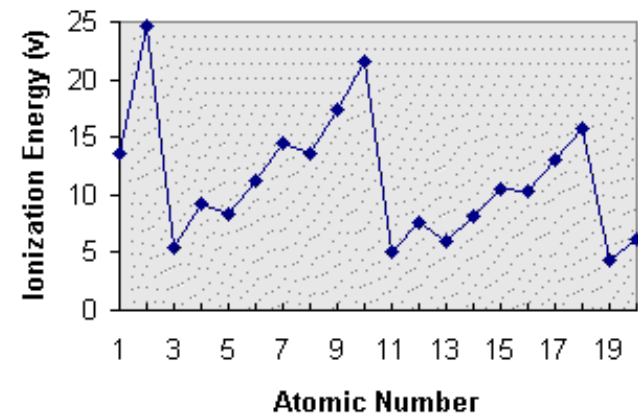
Occasionalmente avviene un evento di ionizzazione. Occorre che l'elettrone abbia energia superiore al **potenziale di ionizzazione** ( $4 \div 25$  eV).

La ionizzazione produce un elettrone, che si muove verso l'anodo, e uno ione, che viaggerà verso il catodo.

Quando l'elettrone raggiunge l'anodo, viene catturato. Quando lo ione raggiunge il catodo, viene neutralizzato, ma ha una certa probabilità  $\gamma$  di estrarre un ulteriore elettrone dal materiale (**emissione secondaria**).



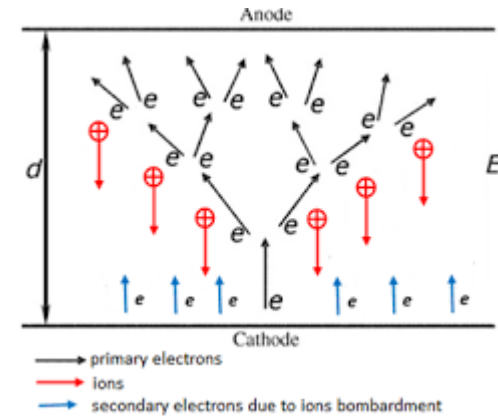
**Ionization Energies of the First Twenty Elements**



Modello 1D della propagazione di elettroni e ioni fra catodo ( $x=0$ ) e anodo ( $x=d$ ).

Flusso di elettroni:  $d\Gamma_e = \alpha\Gamma_e dx. \longrightarrow \Gamma_e = \Gamma_{e0}e^{\alpha x}$

$\alpha$ : **primo coefficiente di Townsend** (numero medio di ionizzazioni per unità di lunghezza prodotte da un elettrone).



L'innesco del plasma è legato all'**emissione secondaria**: uno ione incidente sul catodo ha una certa probabilità (dipendente dal materiale) di causare l'emissione di un elettrone.

**Coefficiente di emissione secondaria:**  $\gamma = \frac{\Gamma_{es}}{\Gamma_{ic}}$

Flusso di ioni al catodo (ioni prodotti negli eventi di ionizzazione):  $\Gamma_{ic} = \Gamma_{ea} - \Gamma_{ec}$

Per quanto scritto sopra:  $\Gamma_{ea} = \Gamma_{ec}e^{\alpha d} \longrightarrow \Gamma_{es} = \gamma\Gamma_{ec}(e^{\alpha d} - 1).$

Ponendo:  $\Gamma_{ec} = \Gamma_{es} + \Gamma_{e0} \longrightarrow \Gamma_{ec} = \gamma\Gamma_{ec}(e^{\alpha d} - 1) + \Gamma_{e0}.$

Soluzione stazionaria in assenza di emissione dal catodo:  $1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 0$

ossia  $\gamma e^{\alpha d} = \gamma + 1$  (**criterio di Townsend**)

# Il primo coefficiente di Townsend

Consideriamo il moto di un elettrone, composto da segmenti rettilinei intervallati da urti.

Probabilità che un elettrone viaggi per una distanza maggiore di  $x$  (statistica di Poisson):

$$P(s > x) = \exp(-x/\lambda) \quad \lambda = \text{cammino libero medio}$$

Dato un campo elettrico  $E$ , distanza necessaria per avere una ionizzazione:  $x_{ion} = V_{ion}/E$

Probabilità che una collisione risulti in una ionizzazione:

$$P(s > x_{ion}) = \exp\left(-\frac{V_{ion}}{\lambda E}\right)$$

Data una distanza percorsa complessiva  $L$ , il numero medio di collisioni sarà  $N = L/\lambda$

e il numero di ionizzazioni sarà  $\alpha L = NP(s > x_{ion})$

Sostituendo:  $\alpha = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{V_{ion}}{\lambda E}\right)$  ( $V_{ion}$  è un valore efficace maggiore del potenziale di ionizzazione perché la probabilità di ionizzare è  $< 1$ )

Il cammino libero medio varia con la densità del gas, e quindi con la pressione, come  $\lambda \sim 1/p$

$\rightarrow 1/\lambda = Ap$  ( $A$  costante, caratteristica del tipo di gas).

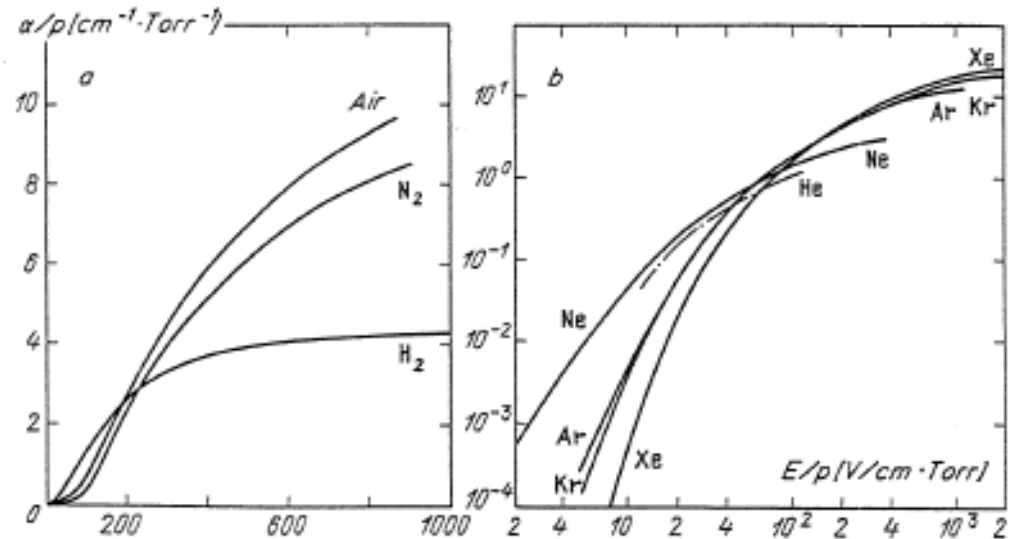
Introduco anche  $B = Av_{ion}$ :

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{AV_{ion}}{E/p}\right) = A \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right)$$

# Quanto vale il primo coefficiente di Townsend?

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{AV_{ion}}{E/p}\right) = A \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right)$$

Il primo coefficiente di Townsend diviso la pressione,  $\alpha/p$ , dipende dal **campo elettrico ridotto**,  $E/p$ , attraverso le due costanti  $A$  e  $B$ , caratteristiche del gas.



Gas	$A(\text{cm}^{-1}\text{Torr}^{-1})$	$B(\text{Vcm}^{-1}\text{Torr}^{-1})$	$eV_{ion}(\text{eV})$
$\text{H}_2$	5	130	15.4
$\text{N}_2$	12	342	15.5
$\text{CO}_2$	20	466	13.7
$\text{H}_2\text{O}$	13	290	12.6
He	3	34	24.5
Ne	4	100	21.5
Ar	14	180	15.7
Kr	17	240	14

Table showing the parameters of the first Townsend coefficient for a number of gases. The approximation is valid for a reduced electric field ( $E/p$ ) in the range of  $100\text{-}600 \text{ Vcm}^{-1}\text{Torr}^{-1}$

Per l'innesco del plasma, occorre che sia soddisfatto il criterio di Townsend:  $\gamma e^{\alpha d} = \gamma + 1$

Per determinare la tensione di innesco, lo riscriviamo come  $\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = \alpha d$

Sostituendo l'espressione trovata per il primo coefficiente di Townsend, si ha

$$A p d \exp\left(-\frac{B p d}{V_b}\right) = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad \text{avendo posto} \quad E_b = V_b/d$$

Risolvendo, si ottiene la tensione di innesco:

$$V_b = \frac{B p d}{\ln[A p d / \ln(1 + 1/\gamma)]}$$

che dipende dal **prodotto  $pd$** , dal gas ( $A$  e  $B$ ) e dal materiale del catodo ( $\gamma$ ).

Valori tipici di  $\gamma$  sono compresi tra 0.01 e 0.1.

# Curve di Paschen

Le curve di  $V_b$  in funzione di  $pd$  per vari gas sono dette **curve di Paschen**.

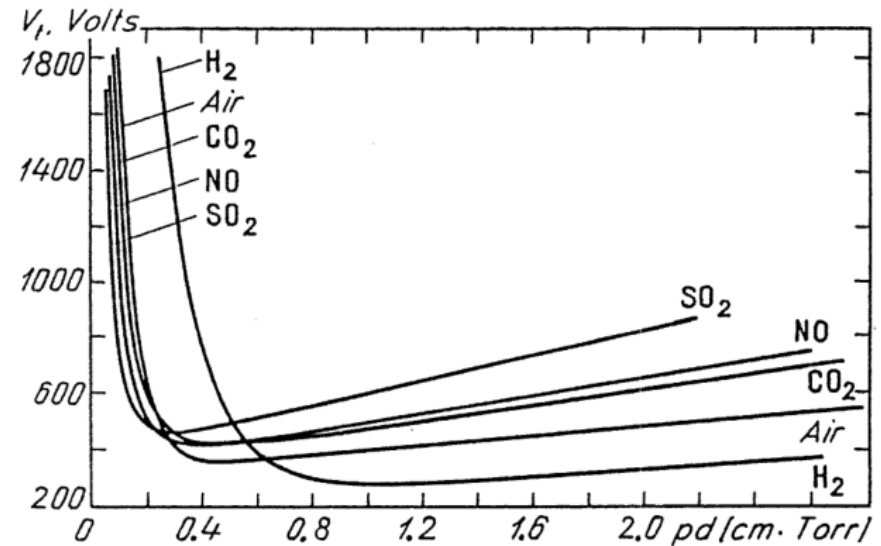
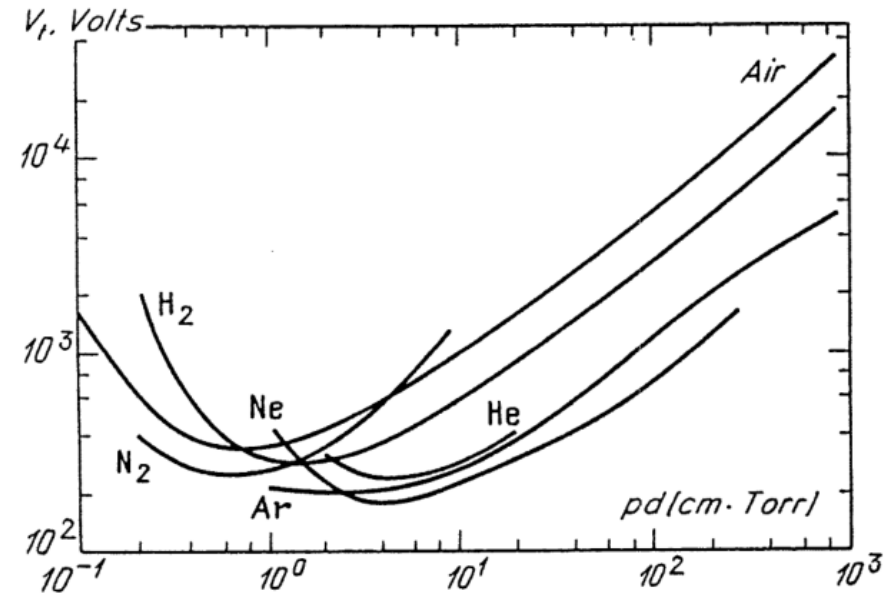
Esse presentano un minimo per  **$pd = 0.5 \div 5$  Torr cm**.

Questo corrisponde ad una tensione minima di innesco di **qualche centinaio di Volt**.

La tensione di innesco sale al crescere della pressione. A pressione atmosferica, essa vale per l'aria circa **30 kV/cm**.

L'aria è relativamente difficile da ionizzare perché le molecole di ossigeno catturano elettroni.

Unità di misura della pressione:  
 $1 \text{ mbar} = 0.76 \text{ Torr} = 100 \text{ Pa} = 10^{-3} \text{ atm}$



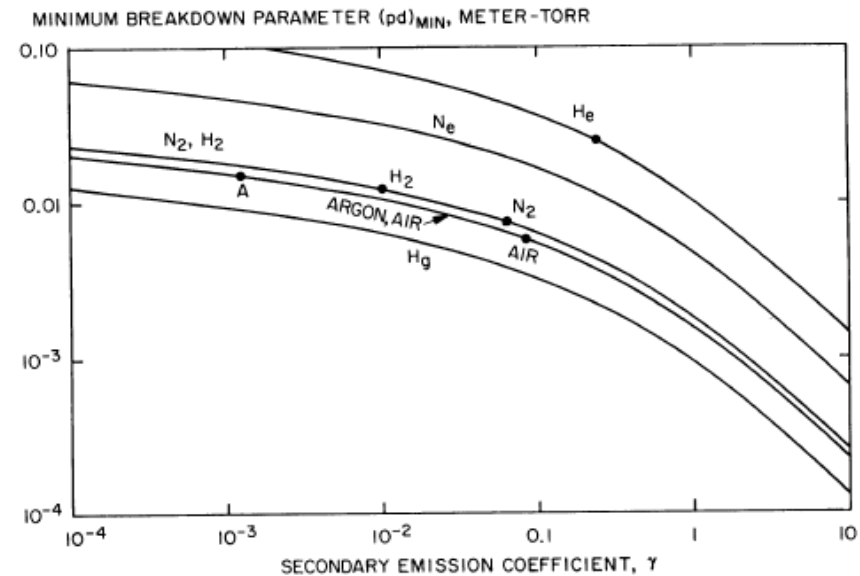
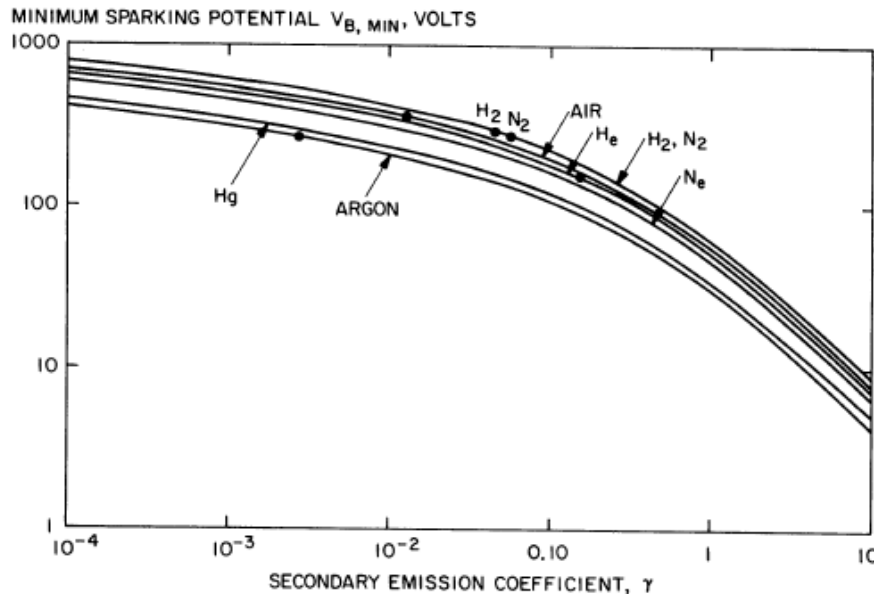


# Minimo della curva di Paschen

Calcolando la derivata di  $V_b$  rispetto a  $pd$ , ed eguagliandola a zero, si trova il valore minimo della tensione di innesco, ed il valore di  $pd$  per cui esso viene ottenuto:

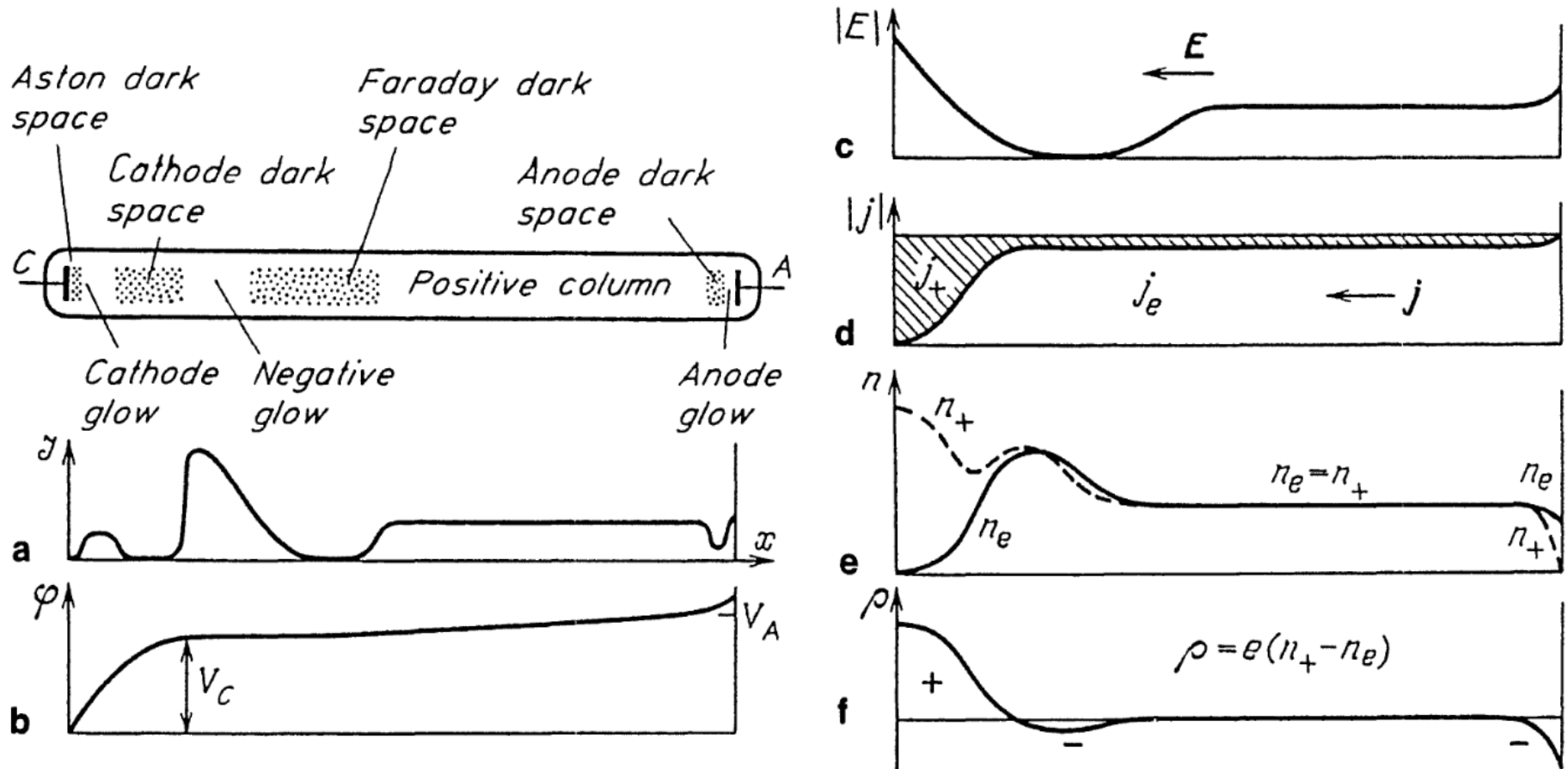
$$V_{b,min} = 2.718 \frac{B}{A} \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (pd)_{min} = \frac{2.718}{A} \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)$$

Usare materiali con elevato coefficiente di emissione secondaria aiuta a ridurre la tensione minima di innesco, che verrà ottenuta a pressioni più alte.



# Struttura di una scarica a bagliore

Successivamente all'innesco si ha la formazione di una **scarica a bagliore** (glow discharge). La colonna di plasma della scarica a bagliore presenta la seguente struttura:



**Fig. 8.2.** Glow discharge in a tube and the distribution of: (a) glow intensity, (b) potential  $\varphi$ , (c) longitudinal field  $E$ , (d) electronic and ionic current densities  $j_e$  and  $j_+$ , (e) charge densities  $n_e$  and  $n_+$ , and (f) space charge  $\rho = e(n_+ - n_e)$

- Costruzione delle curve di Paschen in elio ed argon, per vari valori di pressione e distanza tra gli elettrodi, e verifica della dipendenza da  $pd$ .
- Verifica del ruolo dell'emissione secondaria, usando elettrodi di vari materiali (alluminio, rame), e valutazione del coefficiente di emissione secondaria dal minimo della curva di Paschen.
- Osservazione della struttura della colonna di plasma che si forma dopo l'innesco.