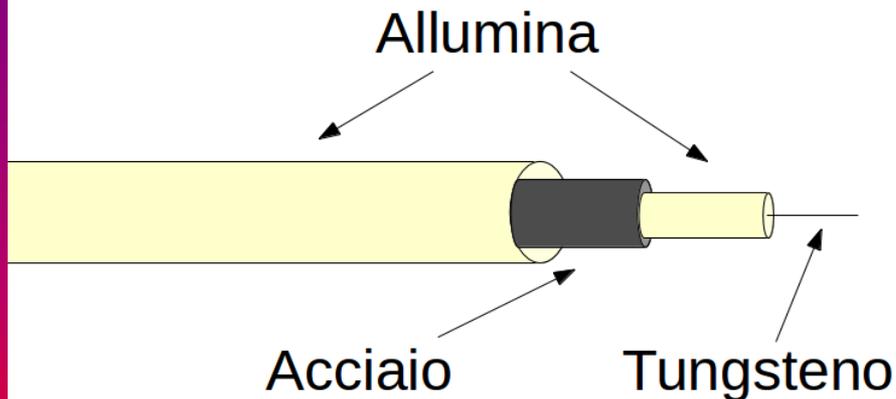


Sonde di Langmuir

Le **sonde di Langmuir** rappresentano uno strumento molto usato per la diagnostica dei plasmi a basse temperature (pochi eV). Sono costituite da un materiale conduttore (rivestito e schermato da altri materiali isolanti) la cui parte terminale viene lasciata scoperta e immersa nel plasma. Questa parte è generalmente cilindrica ma può avere anche altre forme.

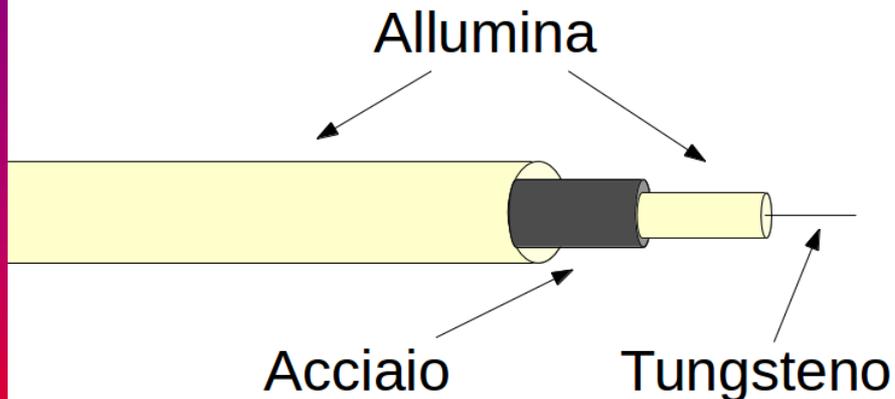


Tutto ben spiegato su:

Lecture Notes on Langmuir Probe Diagnostics, Francis F. Chen

Sonde di Langmuir

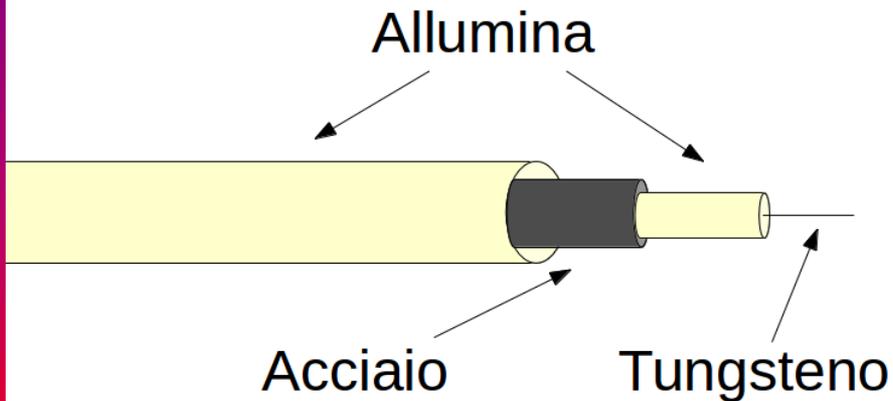
Le **sonde di Langmuir** rappresentano uno strumento molto usato per la diagnostica dei plasmi a basse temperature (pochi eV). Sono costituite da un materiale conduttore (rivestito e schermato da altri materiali isolanti) la cui parte terminale viene lasciata scoperta. Questa parte è generalmente cilindrica ma può avere anche altre forme.



- Misura elettrica, quindi rapidissima risposta temporale
- Misura locale dei parametri, consente una mappatura del plasma se è possibile muoverla con precisione
- Misura di T_e , n_e , n_i e V_s
- Misura anche le distribuzioni di energia elettronica (EEDF)

Sonde di Langmuir

Le **sonde di Langmuir** rappresentano uno strumento molto usato per la diagnostica dei plasmi a basse temperature (pochi eV). Sono costituite da un materiale conduttore (rivestito e schermato da altri materiali isolanti) la cui parte terminale viene lasciata scoperta. Questa parte è generalmente cilindrica ma può avere anche altre forme.



- Diagnostica invasiva, perturba fortemente il plasma, sia la sonda che il corpo che la sostiene.
- Errori anche grandi (5-20%)
- Non è davvero adatta a tutti i tipi di plasmi
- Non è sempre facile interpretare i risultati

Principio di funzionamento

Flussi di particelle (cariche)

$$Flux = \frac{P}{(2\pi MRT)^{1/2}}$$

$$F_0 = \frac{1}{4} n \langle v \rangle = \sqrt{\frac{kT}{2\pi M}}$$

Differenza di potenziale tra sonda e plasma: corrente plasma \rightarrow sonda

$$I = q_+ S F_+ + q_e S F_e$$

$$V_{sonda} < V_{plasma}$$

Ioni accelerati e raccolti (tutti)
Elettroni decelerati e respinti

$$F_+ = F_0 \quad F_e < F_0$$

$$V_{sonda} > V_{plasma}$$

Elettroni accelerati e raccolti
Ioni decelerati e respinti

Principio di funzionamento

Raccolta di particelle cariche decelerate:

Raccolgo solo quelle con energia superiore a $|q\Delta V|$

$$F = \frac{1}{4} n \int_{\sqrt{2q\Delta V/M}}^{\infty} d^3v f(v) v_x = F_0 e^{-|q\Delta V|/kT}$$

Ad esempio

$$V_{sonda} < V_{plasma}$$

Ioni accelerati e raccolti (tutti)

Elettroni decelerati e respinti

$$I = qS \left(F_{0+} - F_{0e} e^{-|q\Delta V|/kT_e} \right)$$

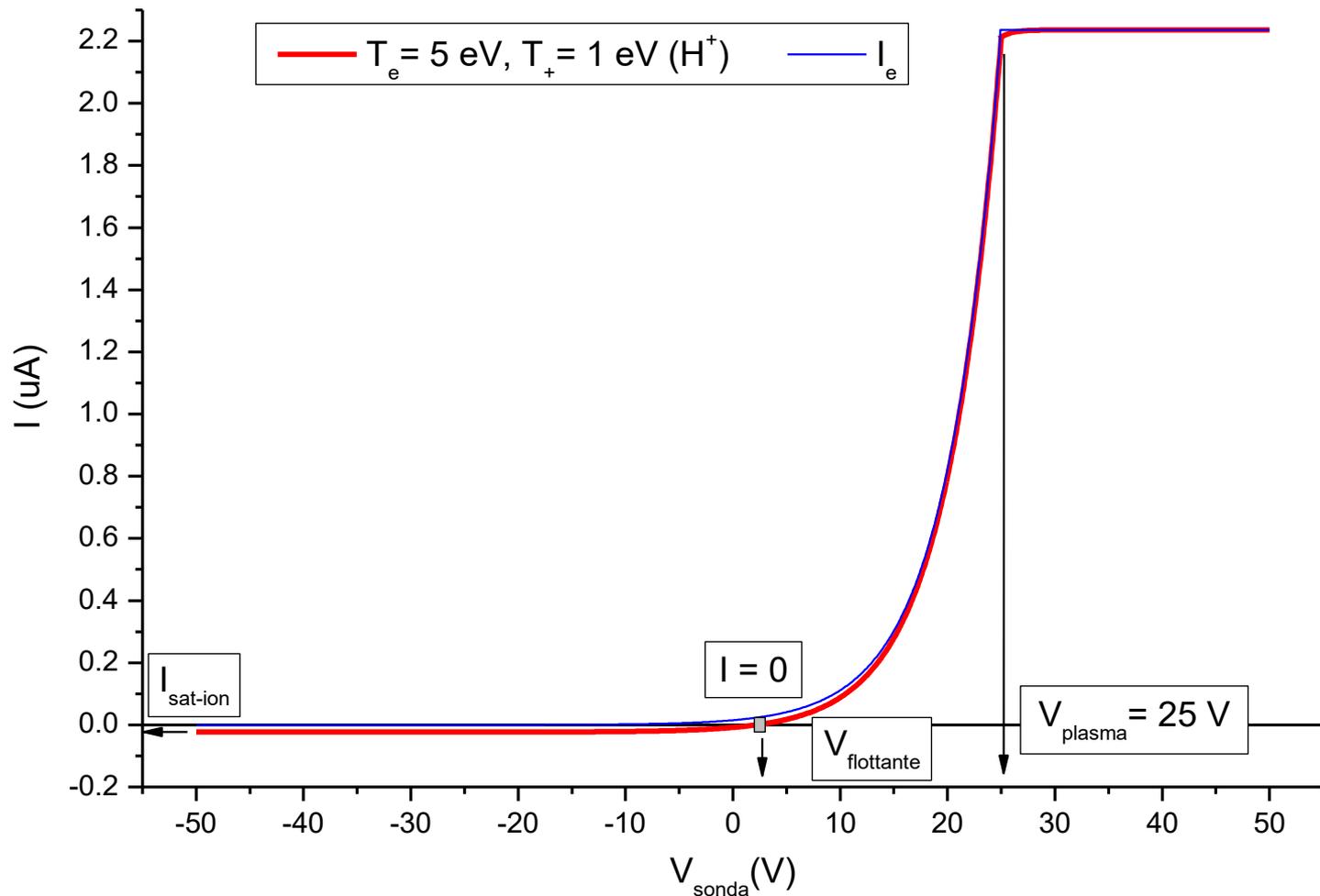
$V_{sonda} \rightarrow -\infty \quad I \longrightarrow q S F_{0+}$ **Corrente di saturazione ionica**

Curva di Langmuir

Curva caratteristica ideale: $I = I(V)$

Superficie di raccolta piana (1D)

Plasma indisturbato



Potenziale flottante

Inserendo la sonda in un plasma, si può subito misurare con un *tester* la tensione misurata. Il valore così ottenuto è il **potenziale flottante** V_f . Questo potenziale non corrisponde però al potenziale elettrico a cui si trova il plasma o *space potential* V_s (indicato a volte anche V_p). Esso è concettualmente differente e dipende anche dagli altri parametri di plasma!

Il potenziale flottante è il potenziale per cui non si misura nessuna corrente netta. Dipende dal bilanciamento dei flussi delle diverse componenti cariche.

Nel caso ideale

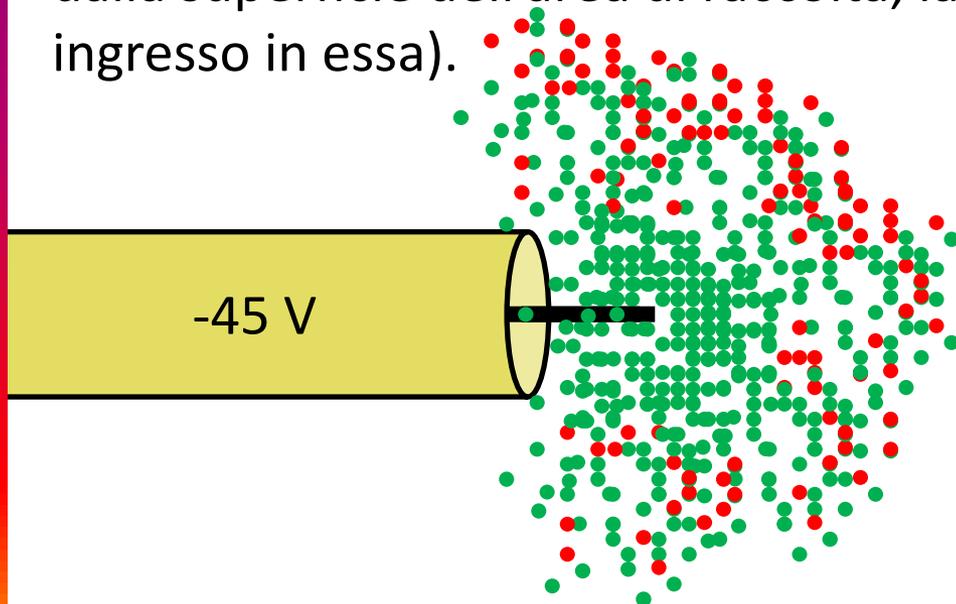
$$V_f = V_s - \frac{kT_e}{2e} \ln \left(\frac{2M_i}{\pi m_e} \right)$$

Gli elettroni hanno una massa molto più piccola e in genere un'energia maggiore degli ioni. Quindi, a parità di densità, la corrente elettronica sarà dominante e dovrà respingere molti elettroni per avere una corrente nulla. Il potenziale flottante sarà quindi in genere minore di quello di plasma.

Corrente di saturazione ionica

Un'altra misura diretta possibile è quella della **corrente di saturazione ionica** I_{sat} , (idealmente proporzionale alla densità del plasma). Se io polarizzo negativamente la sonda rispetto al plasma (delle pile in serie sono sufficienti...) e misuro la corrente raccolta dalla sonda (ad esempio come differenza di potenziale attraverso una resistenza accuratamente scelta...), otterrò una corrente costante «massima», quella che «satura» la raccolta di cariche dalla mia sfera di Debye di cariche positive.

La corrente di saturazione sarebbe proporzionale alla superficie della punta, alla densità ionica e alla velocità termica (ma in realtà dipende dalla superficie dell'area di raccolta, la « guaina » e dalla velocità di ingresso in essa).



$$I_{sat} = -en_i S \cdot \sqrt{\frac{kT_e}{eM_i}}$$

Criterio di Bohm

Effetto della guaina nelle sonde di Langmuir

Plasma magnetizzato: se il raggio di Larmor degli ioni e degli elettroni (questo è in genere minore, anche nei plasmi freddi $T_+ \ll T_e$) è piccolo rispetto alle dimensioni della sonda l'area di raccolta coincide con quella del flusso magnetico intercettato dalla sonda. $S = S_{\perp}$
Il correzione della pre-guaina dovrebbe essere 0.49 anzichè $1/\sqrt{e} = 0.61$

Correzione pre-guaina (criterio di Bohm): rilevante nei plasmi freddi [$T_+ \ll T_e$]
Velocità di ingresso è quella sonora, non quella degli ioni (freddi)
Compare dunque una dipendenza dalla temperatura degli elettroni ...

$$I_{sat} = -en_i S \cdot \sqrt{\frac{kT_e}{eM_i}}$$

$$n_+ [cm^{-3}] = 1.06 \cdot 10^9 \cdot \frac{I_{sat} [\mu A]}{S [mm^2]} \cdot \sqrt{\frac{M_+ [amu]}{T_e [eV]}}$$

Effetto della guaina nelle sonde di Langmuir

La guaina (sheath): se la lunghezza di Debye non è piccola rispetto alle dimensioni della sonda e la geometria non è piana, l'area di raccolta S non è costante ma dipende dalla differenza di potenziale ΔV :

Approssimazione lineare:

$$I_+(V) = -I_{sat} \cdot (1 - b \cdot (V - V_p))$$

$$I_+(V) = -I_{sat} \cdot (1 - b \cdot (V - V_f))$$

Modello di guaina di Child-Langmuir:

$$d = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{\alpha_0}} \left(2 \frac{V - V_f}{T_e} \right)^{3/4} \lambda_D$$

$$n = \left\{ \left[-B + (B^2 + 4AC)^{1/2} \right] / 2A \right\}^2,$$

$$A = R_p, \quad B \approx \eta_f^{3/4} (\epsilon_0 K T_e / e^2)^{1/2},$$

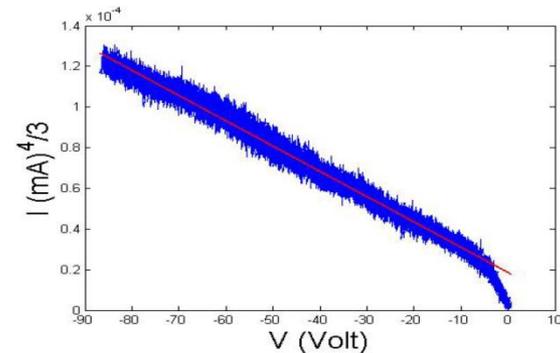
$$C = I_i(V_f) / 2\pi L \alpha_0 c_s.$$

Altri modelli (numerici):

$$r_g = r_s + L_D \cdot \sqrt{2(V - V_p) / T_e}$$

$$S = S(V) = S_o \cdot (1 + f(r_s / L_D))$$

$$[f(x) = 4007 \cdot \exp(-7.01x^{0.096})]$$



$$T_+ \ll T_e$$

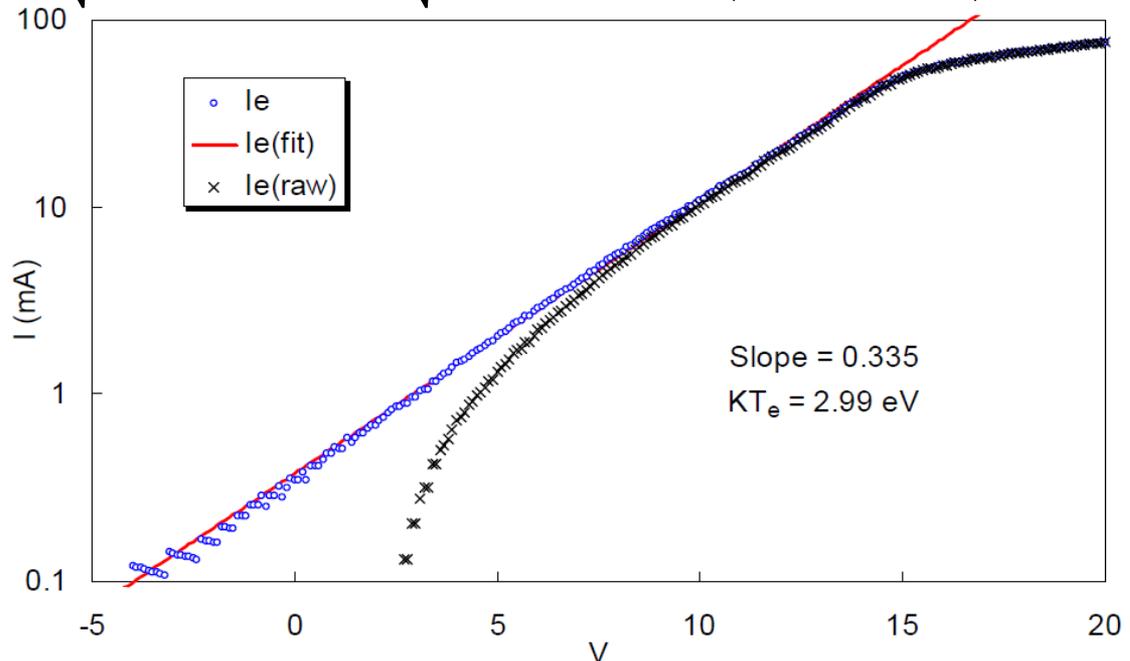
Temperatura elettronica

La **temperatura elettronica** può essere ottenuta da un *fit* della parte in cui inizia la crescita esponenziale della corrente dovuta agli elettroni.

- Per V_p (tensione applicata alla sonda) $\ll V_s$ gli elettroni sono respinti
- Per $V_p < V_s$, quando la corrente raccolta inizia ad aumentare si raccolgono cariche sia positive che negative. Se la distribuzione degli elettroni è maxwelliana, allora vale:

$$I(V) = -en_i S \cdot \sqrt{\frac{kT_e}{eM_i}} + en_e S \cdot \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} \cdot \exp\left(\frac{q(V_p - V_s)}{kT_e}\right)$$

Grafico
semilogaritmico
con sottrazione
della corrente di
saturazione ionica



EEDF con la sonda di Langmuir

La corrente elettronica: estrazione della EEDF, evidenza di hot electrons

$$V_{sonda} < V_{plasma}$$

$$F = \frac{1}{4} n \int_{\sqrt{2q\Delta V/M}}^{\infty} d^3v f(v) v_x$$

Se consideriamo la derivata seconda di d^2I/dV^2 della curva caratteristica, il contributo ionico si annulla (anche se la guaina è lineare) e quello elettronico risulta proporzionale alla EEDF

$$f(E) = \frac{\sqrt{8mE}}{n_e q_e^3 S} \left. \frac{d^2 I}{dV^2} \right|_{E=q\Delta V}$$

Modello di Popov

$$f(\mathcal{E}) = -\frac{3}{2} \sqrt{\frac{2m_e}{e^3}} \frac{\psi_0}{V} \partial_V I$$

Potenziale di plasma

Il **potenziale di plasma** V_s può essere calcolato a partire dal potenziale flottante (che è molto più semplice da misurare) e dalla temperatura elettronica, oppure...

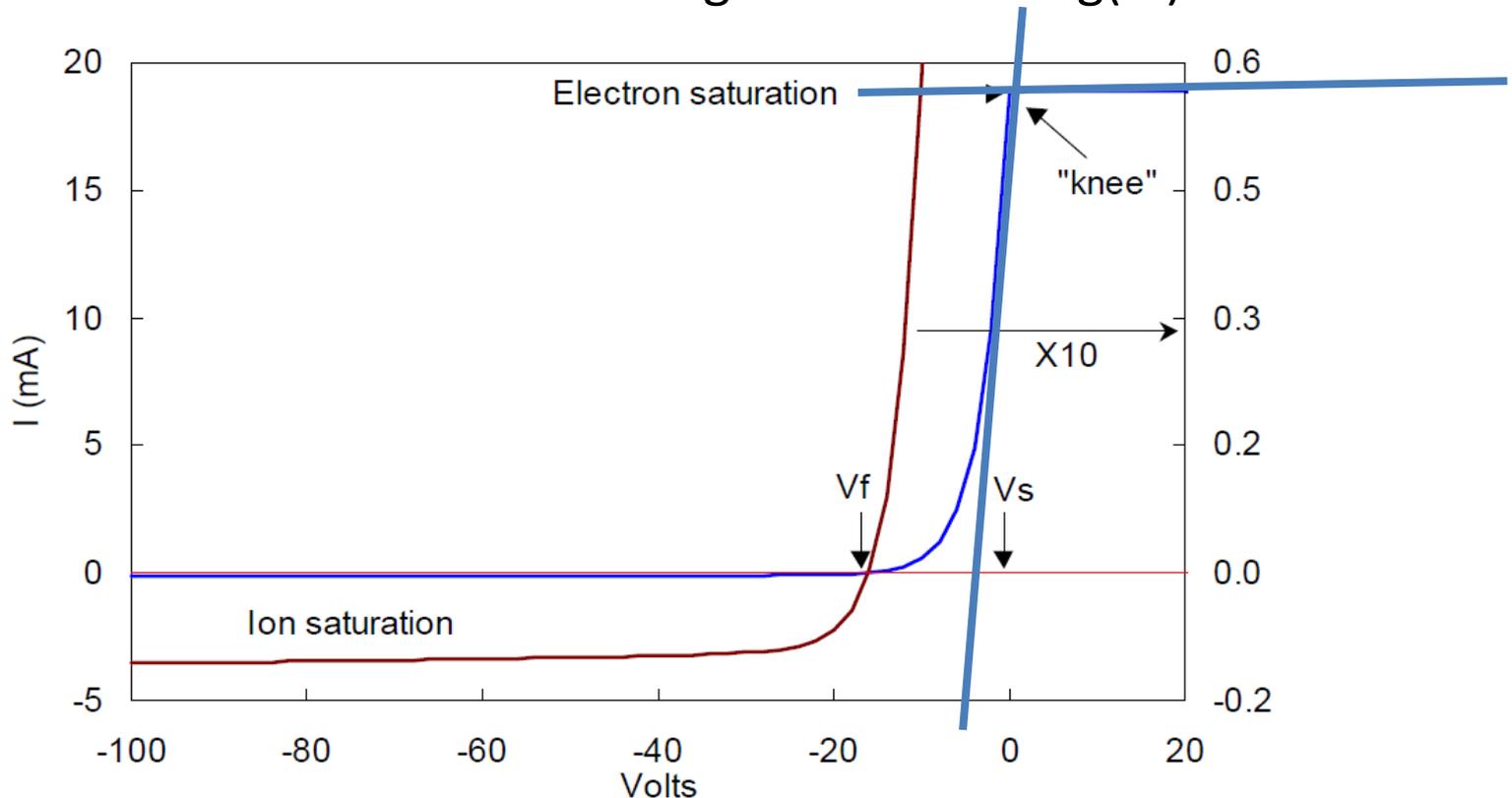
$$V_f = V_s - \frac{kT_e}{2e} \ln \left(\frac{2M_i}{\pi m_e} \right)$$

$$V_p [V] \approx V_f [V] + \left(3.34 + 0.5 \cdot \log_e (M_+ [amu]) \right) \cdot T_e [eV]$$

Potenziale di plasma

Il **potenziale di plasma** V_S può essere calcolato a partire dal potenziale flottante (che è molto più semplice da misurare), oppure...

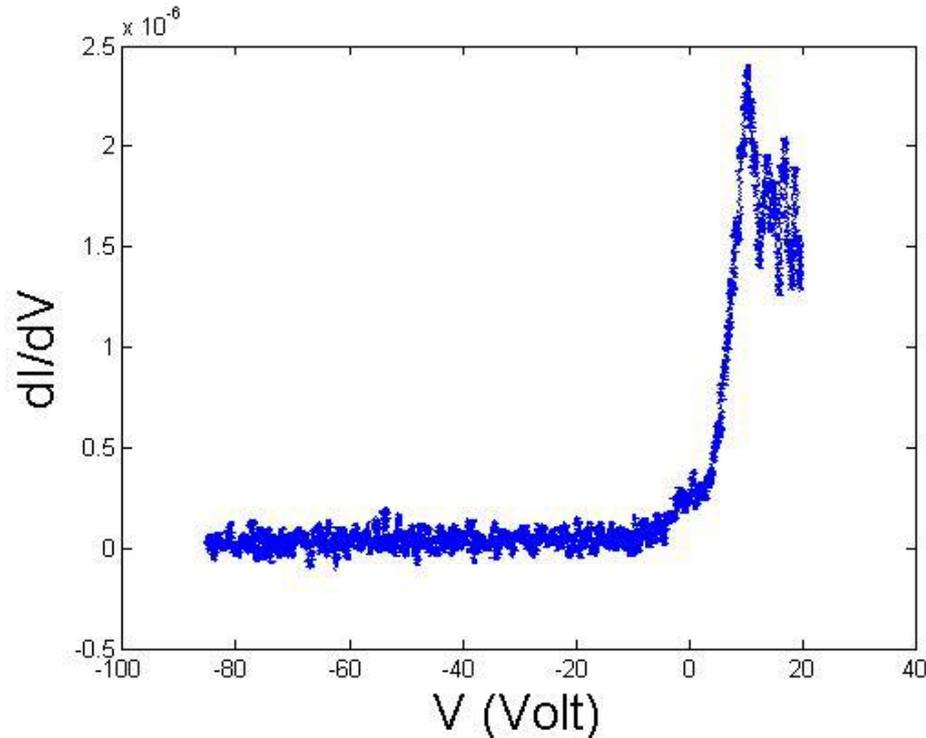
- Un metodo grafico consente di stimare la posizione di V_S tracciando due rette, una lungo la regione di saturazione elettronica, l'altra sulla crescita esponenziale per andare a individuare il punto in cui si incrociano. Ma non è molto affidabile, soprattutto se la saturazione elettronica non è dritta. Di solito migliora usando $\log(I_e)$ anziché I_e



Potenziale di plasma

Il **potenziale di plasma** V_s può essere calcolato a partire dal potenziale flottante (che è molto più semplice da misurare), oppure...

- Altrimenti se si distingue un flesso nella curva, quello è il punto in cui la corrente elettronica raccolta inizia a deviare dalla legge esponenziale e può essere usato per una misura più accurata di V_s .



Flesso =>
 dI/dV max
 $dI/dV^2 = 0$

Sonde di Langmuir

In genere la parte di curva caratteristica al di sopra del potenziale di plasma (flottante) non viene analizzata ...

E' la regione corrispondente alla saturazione elettronica:
nei plasmi magnetizzati è tendenzialmente piatta e si può usare anch'essa per misurare la densità del plasma e le sue fluttuazioni.
(E' la cosiddetta **corrente di saturazione elettronica**):

$$V_{sonda} > V_{plasma} \quad I(V) \Rightarrow I_{sat-el}$$

$$I_e(V) = I_{sat-el} \cdot (1 + b \cdot (V - V_p))$$

$$n_e \left[cm^{-3} \right] = 3.74 \cdot 10^7 \cdot \frac{I_{e-sat} [\mu A]}{S \left[mm^2 \right]} \cdot \sqrt{\frac{1}{T_e [eV]}}$$

Sonde di Langmuir

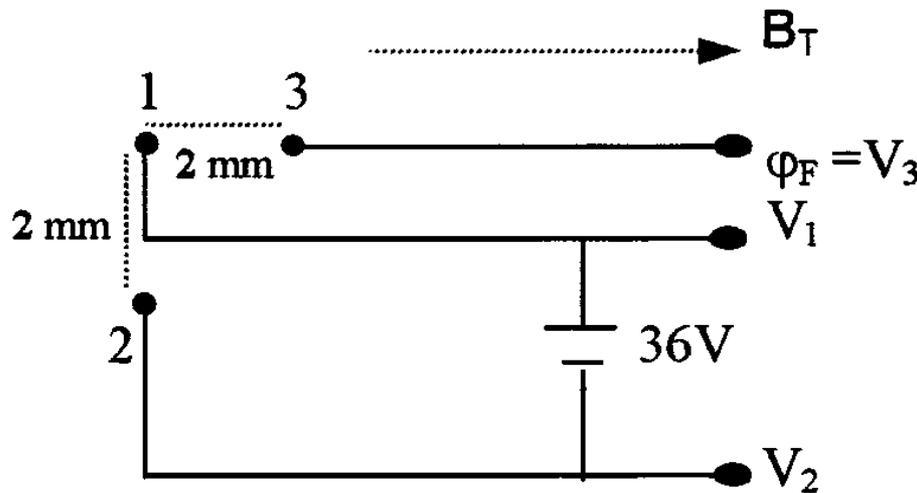
Plasma in regime turbolento. In genere si ha un regime di turbolenza nel caso dei plasmi pienamente magnetizzati. In questo caso i parametri di plasma sono variabili nello spazio e soprattutto nel tempo con tempi caratteristici tipici della turbolenza (1-100 kHz).

In questo caso anche i parametri della curva caratteristica sono variabili. Misure istantanee [$V_{\text{flottante}}(t)$, $I_{\text{sat-ion}}(t)$, sonde multi-pin] permettono di raccogliere un campione statistico come serie temporale delle misure.

La ricostruzione della curva caratteristica istantanea richiede invece un tempo di acquisizione più rapido rispetto a quello delle fluttuazioni e in genere risulta problematico (es. 100 punti richiedono $\tau < 100$ ns e uno scan di 100 V implica $dV/dt > 1E7$ V/s). In tal caso si preferisce misurare la curva caratteristica con $\tau > 1$ ms mediando su più realizzazioni.

Sonde di Langmuir – Triple (double) probe

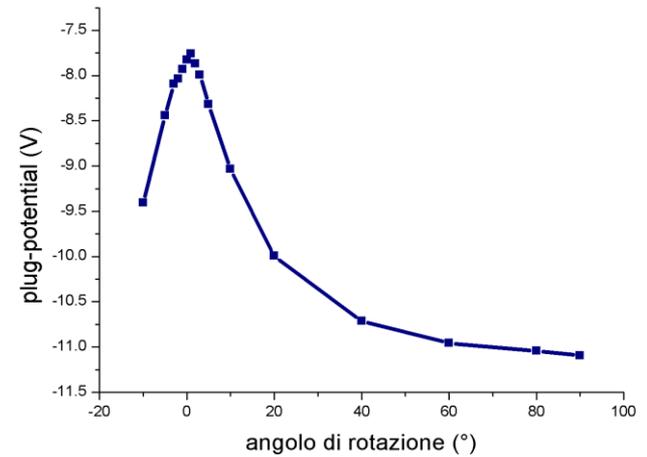
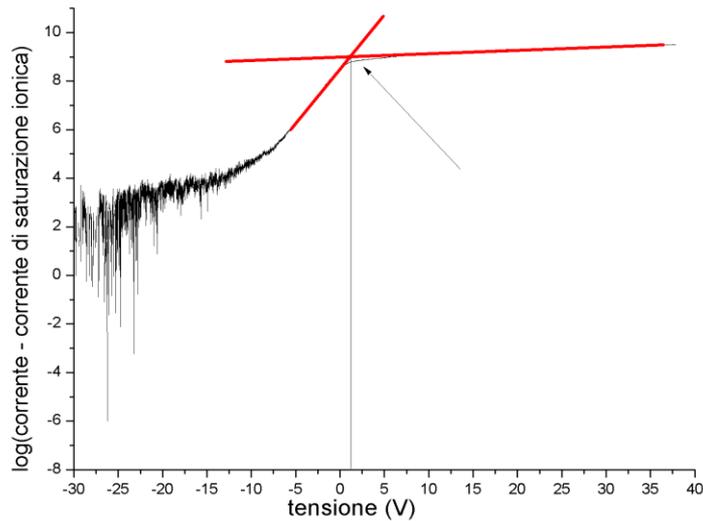
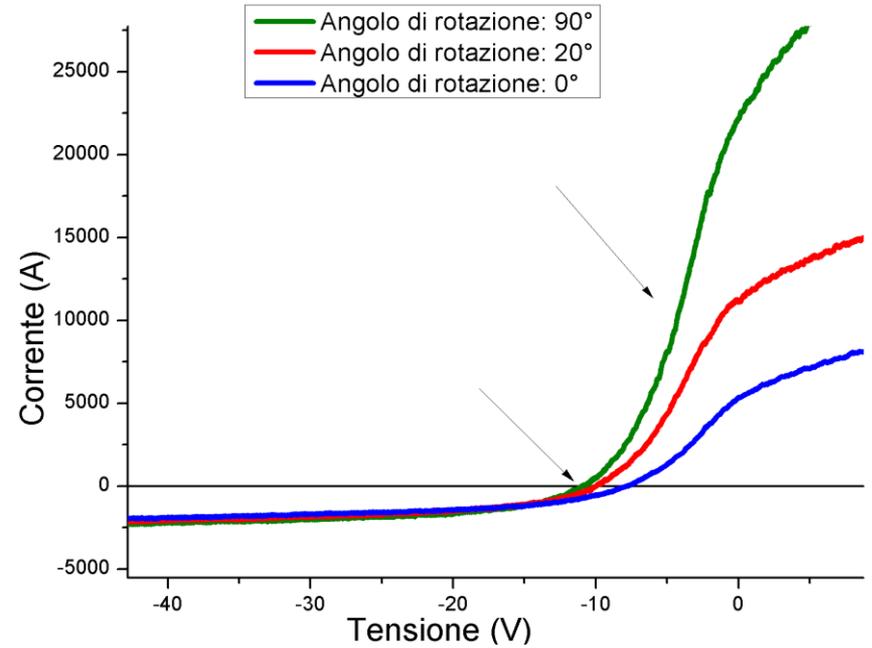
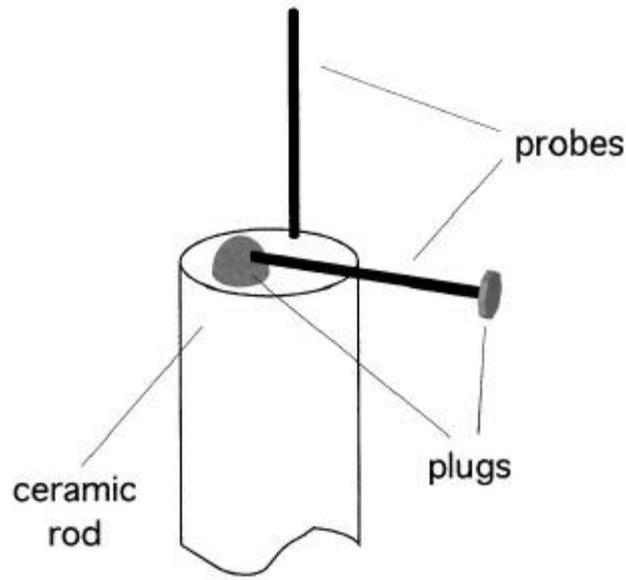
In questo caso usando due o tre pin simultaneamente si cerca di ricostruire i valori istantanei dei parametri della curva caratteristica. Misure istantanee di due potenziali (flottanti) e di una corrente (di saturazione ionica) permettono di raccogliere un campione statistico di $N_p/T_e/V_p$ come serie temporale delle misure.



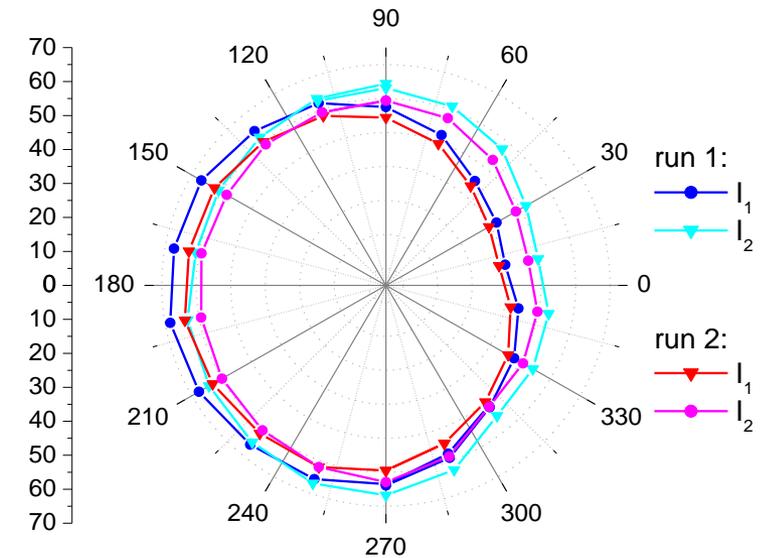
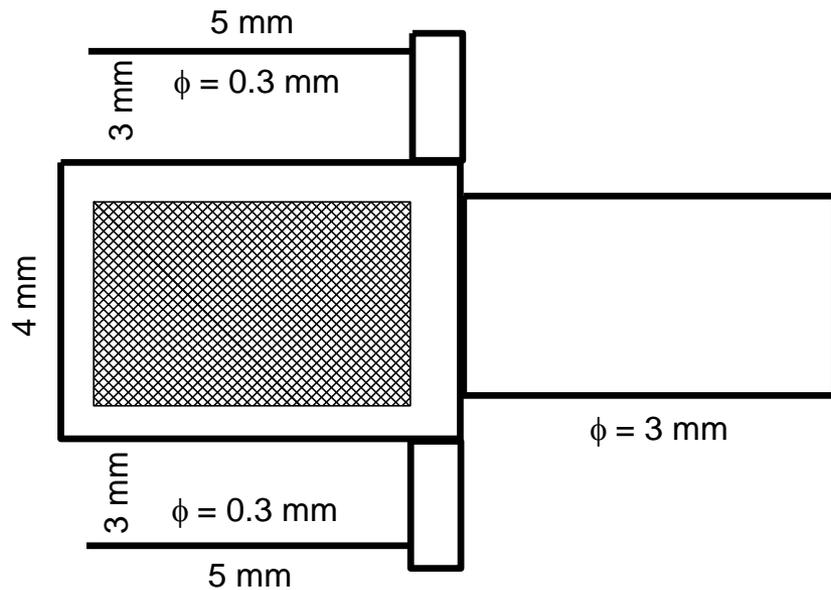
$$\frac{1 - e^{-e(V_1 - V_3)/kT_e}}{1 - e^{-e(V_1 - V_2)/kT_e}} = \frac{1}{2}$$

$$T_e \cong e(V_1 - V_3)/\ln 2.$$

Sonde di Langmuir – Plug probe



Sonde di Langmuir – Mach probe



$$\frac{I_1}{I_2} = \exp(k \cdot M) \quad k \approx 2.27 \text{ (1D magnetized, 2D)}$$

$$k = \sqrt{8T_i/T_e} \text{ (unmagnetized ?), } k \approx 1 \text{ (1D no viscosity)}$$

$$M = V_{\text{ion}} / V_{\text{sound}}$$