

Rivelatori a gas

Marco Panareo

Ionizzazione nel gas

- I rivelatori a ionizzazione sono costituiti da una camera in grado di contenere un gas, dotata di pareti sufficientemente sottili da poter essere attraversata dalle particelle da rivelare
- La perdita di energia delle particelle lungo la loro traiettoria è fornita dalla formula di Bethe-Block

$$\frac{dE}{dx} = -Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2mc^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right]$$

- Quando la particella attraversa il gas lascia lungo la sua traiettoria un insieme di coppie elettroni-ioni positivi

- Gli incontri con le molecole del gas sono casuali e caratterizzati da un libero cammino medio λ , tra le successive interazioni pari a

$$\lambda = \frac{1}{N\sigma_I}$$

- dove N è la densità di elettroni e σ_I è la sezione d'urto per ionizzazione
- Il numero di interazioni lungo una traiettoria di lunghezza L è, in media, L/λ e la distribuzione è poissoniana:

$$P\left(\frac{L}{\lambda}, k\right) = \frac{1}{k!} \left(\frac{L}{\lambda}\right)^k e^{-L/\lambda}$$

- Ne segue che la distribuzione di probabilità $f(l)dl$ di non trovare molecole di gas lungo un tratto di lunghezza l della traiettoria della particella incidente è:

$$f(l)dl = P\left(\frac{L}{\lambda}, 0\right)P\left(\frac{L}{\lambda}, 1\right) = \frac{1}{\lambda} e^{-L/\lambda} dl$$

- Nella tabella sono indicate i risultati di misure del numero di collisioni ionizzanti per centimetro di lunghezza di traccia in vari gas a densità normale per differenti valori del fattore relativistico

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

- Per misurare il libero cammino medio λ , si può sfruttare la relazione precedente.
- La probabilità di avere 0 interazioni lungo una traccia di lunghezza L è:

$$P\left(\frac{L}{\lambda}, 0\right) = e^{-L/\lambda}$$

- Se un contatore a gas con lunghezza sensibile L è configurato in modo tale che la presenza anche di un solo elettrone in L produca sempre un segnale, la sua inefficienza può essere identificata con l'espressione precedente, misurando così λ .

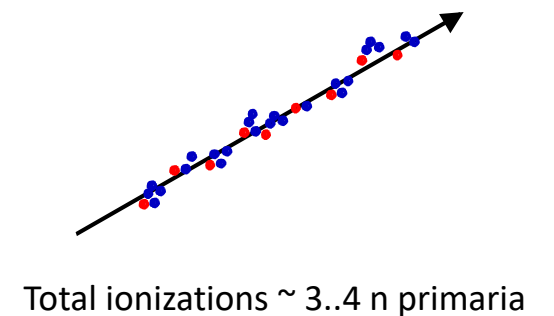
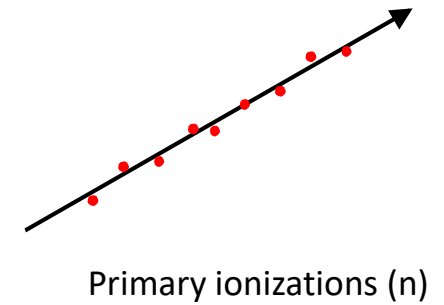
Gas	1 cm/ λ	γ
H ₂	5.32 ± 0.06	4.0
	4.55 ± 0.35	3.2
	5.1 ± 0.8	3.2
He	5.02 ± 0.06	4.0
	3.83 ± 0.11	3.4
	3.5 ± 0.2 ^a	3.6
Ne	12.4 ± 0.13	4.0
	11.6 ± 0.3 ^a	3.6
Ar	27.8 ± 0.3	4.0
	28.6 ± 0.5	3.5
	26.4 ± 1.8	3.5
Xe	44	4.0
N ₂	19.3	4.9
O ₂	22.2 ± 2.3	4.3
Air	25.4	9.4
	18.5 ± 1.3	3.5

- Schematicamente, il passaggio di una particella carica nel gas produce una traccia di ionizzazioni lungo la sua traiettoria
- Il numero totale di coppie elettroni-ioni positivi prodotti in un intervallo Δx della particella incidente è

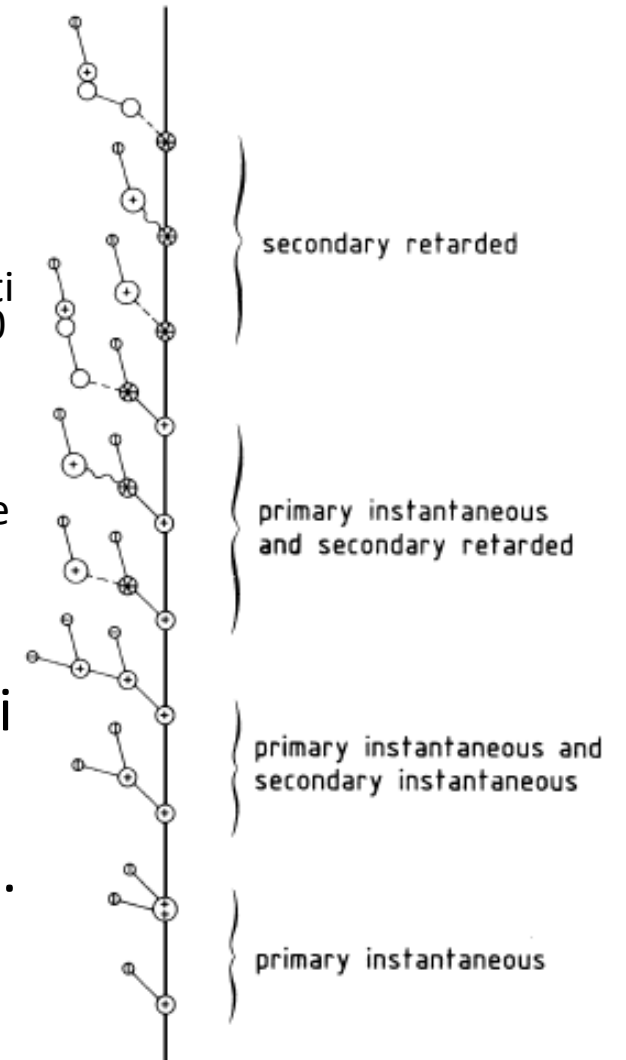
$$n_{totale} = \frac{\Delta E}{w_i}$$

- dove ΔE è la perdita di energia (formula di Bethe-Block) nel tratto Δx e w_i è la perdita di energia media per coppia elettrone-ione positivi
- La tabella seguente indica l'energia spesa, in media, per la creazione di un elettrone di ionizzazione in vari gas e miscele di gas. W_α e W_β derivano da misure effettuate rispettivamente con sorgenti α o β . Viene inoltre indicato il potenziale di ionizzazione più basso.

Gas	W_α (eV)	W_β (eV)	I (eV)	Gas mixture ^a	W_α (eV)
H ₂	36.4	36.3	15.43	Ar (96.5%) + C ₂ H ₆ (3.5%)	24.4
He	46.0	42.3	24.58	Ar (99.6%) + C ₂ H ₂ (0.4%)	20.4
Ne	36.6	36.4	21.56	Ar (97%) + CH ₄ (3%)	26.0
Ar	26.4	26.3	15.76	Ar (98%) + C ₃ H ₈ (2%)	23.5
Kr	24.0	24.05	14.00	Ar (99.9%) + C ₆ H ₆ (0.1%)	22.4
Xe	21.7	21.9	12.13	Ar (98.8%) + C ₃ H ₆ (1.2%)	23.8
CO ₂	34.3	32.8	13.81	Kr (99.5%) + C ₄ H ₈₋₂ (0.5%)	22.5
CH ₄	29.1	27.1	12.99	Kr (93.2%) + C ₂ H ₂ (6.8%)	23.2
C ₂ H ₆	26.6	24.4	11.65	Kr (99%) + C ₃ H ₆ (1%)	22.8
C ₂ H ₂	27.5	25.8	11.40		
Air	35.0	33.8	12.15		
H ₂ O	30.5	29.9	12.60		



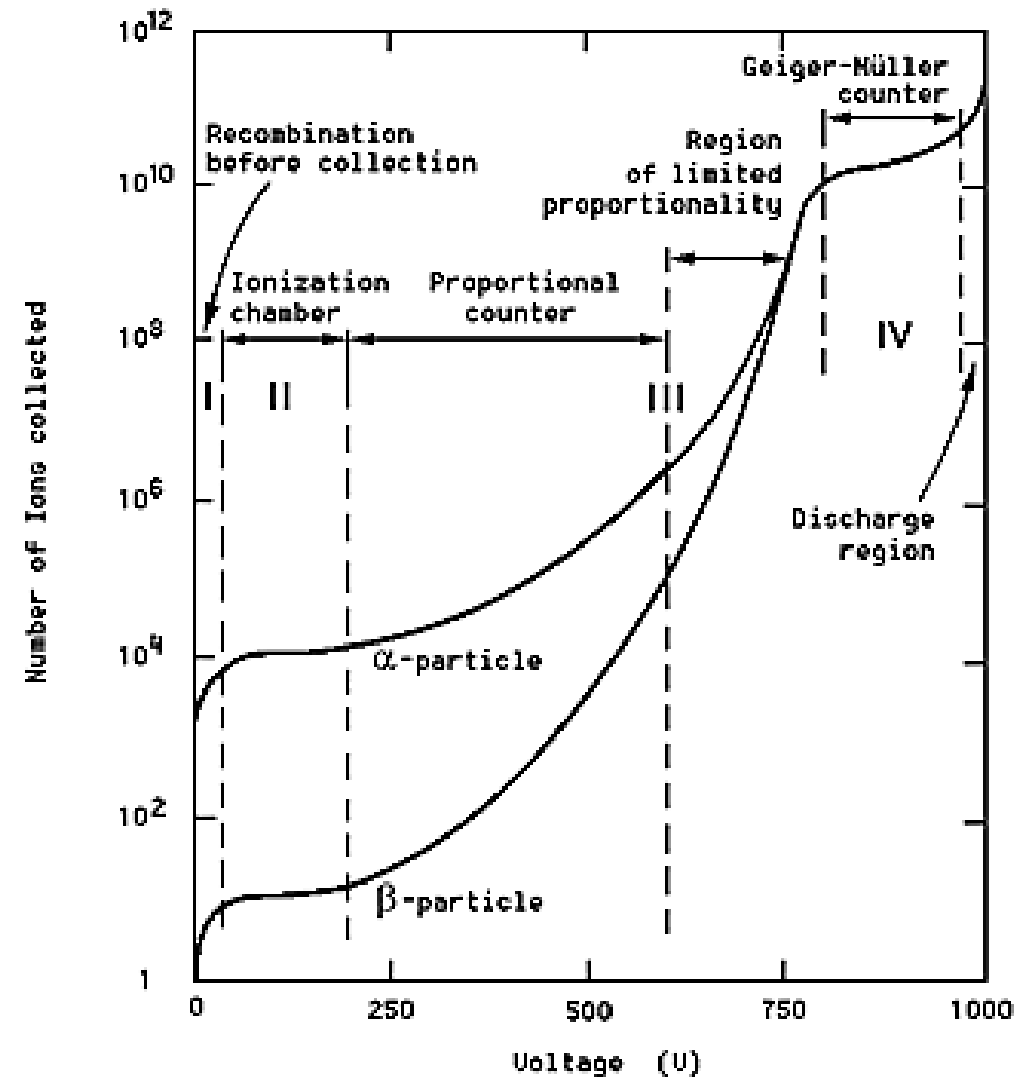
- In un rivelatore a gas sono possibili tre meccanismi di ionizzazione:
 - Primaria:
 - uno o più elettroni sono strappati dall'atomo dalla particella incidente. (e.g. $\pi A \rightarrow \pi A^+ e^-$, $\pi A^{++} e^- e^-$, ecc.)
 - Secondaria Istantanea:
 - gli elettroni sono strappati da molecole non colpite dalla particella incidente. Questa ionizzazione è essenzialmente dovuta ai raggi δ prodotti dalla ionizzazione primaria (il potenziale di ionizzazione medio è $\sim 10 - 20$ eV mentre la massima energia trasferibile all'atomo è $2mc^2\beta^2\gamma^2$ ed è facile avere elettroni con energia cinetica dell'ordine dei KeV)
 - Secondaria Ritardata
 - gli elettroni sono emessi da stati intermedi eccitati A^* . Se il gas A contiene un altro gas B con potenziale di ionizzazione minore di quello di A si possono avere $\pi A \rightarrow \pi A^*$ e $A^* B \rightarrow AB^+ e^-$
- I raggi δ non troppo energetici sono emessi quasi ortogonali alla direzione di volo della particella incidente e lo scattering multiplo randomizza la direzione del moto dei raggi δ , che diventa completamente casuale dopo pochi μm .
- Il range R di un raggio δ di energia E può essere calcolato integrando la Bethe-Block sulla lunghezza di percorso R e richiedendo che l'integrale sia pari ad E .



- Il numero di coppie elettrone-ioni positivo primarie e secondarie prodotte per ionizzazione in un gas per effetto del transito di una particella carica è usualmente piuttosto piccolo, dell'ordine di $100/cm$
- Pertanto, volendo adoperare questo processo per misure di posizione occorre preservare questo numero:
 - Evitare le ricombinazioni, ad esempio impedendo l'inquinamento del gas con elementi elettronegativi come acqua o ossigeno
 - Utilizzare intensi campi elettrici per favorire la moltiplicazione a valanga
- Nella forma più semplice un rivelatore a gas è costituito da un tubo metallico lungo il cui asse è situato un sottile filo, anche esso metallico; il tubo, chiuso alle estremità, è riempito con un opportuno gas a bassa pressione. In genere si adoperano miscele binarie la cui componente principale è un gas nobile come Ar o He.
- Tra il filo e il tubo è applicata una intensa differenza di potenziale per consentire la formazione delle valanghe e la separazione degli elettroni dagli ioni positivi

Modi di funzionamento di un rivelatore a gas

- Ionizzazione:
 - si raccoglie tutta la carica nessuna moltiplicazione delle coppie ione-elettrone.
- Proporzionale:
 - presente una moltiplicazione a valanga. Il segnale prodotto dal rivelatore è proporzionale alla ionizzazione, con guadagno dell'ordine di 10^4 - 10^6 permettendo una agevole misura di dE/dx
- Proporzionale limitato:
 - Con saturazione e streamer. Forte emissione di fotoni, moltiplicazioni a valanga secondarie, alti guadagni (10^{10}) e elettronica semplice.
- Geiger:
 - grossa fotoemissione, il filo anodico è tutto coinvolto, regime di scarica eliminata abbassando HV. Necessari forti moderatori.



Camere proporzionali

- Nelle camere proporzionali in corrispondenza di elevati campi elettrici gli elettroni originati nelle ionizzazioni primarie hanno modo di acquisire abbastanza energia per ionizzare altre molecole favoriscono la formazioni di valanghe.
 - L'elevata intensità del campo elettrico all'interno del dispositivo consente la formazione di moltiplicazioni secondarie, terziarie, ecc.
- Indicato con λ il cammino libero medio dell'elettrone prima di un'altra ionizzazione, la probabilità di una ionizzazione per unità di lunghezza:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda}$$

- è chiamata primo coefficiente di Townsend
- Per n elettroni in un tratto dx , si ha la formazione di

$$dn = n\alpha dx$$

- nuove coppie elettrone-ione positivo. Integrando questa espressione, se n_0 indica il numero di elettroni primari, si ha

$$n = n_0 e^{\alpha x}$$

- Il guadagno è definito come:

$$G = \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x}$$

- In generale, se il campo elettrico non è uniforme, si ha $G = e^{\int_{x_1}^{x_2} \alpha(x) dx}$. Si intende regime proporzionale per $G < 10^6$

- La scelta del gas è determinata da molteplici fattori
 - Adoperare una bassa differenza di potenziale tra gli elettrodi
 - Alto guadagno
 - Alta ionizzazione specifica
 - Capacità di rate elevati
 - Costo contenuto
- In genere si adoperano gas nobili quali ad esempio l'Ar o He
- La diseccitazione dei gas nobili è possibile solo attraverso l'emissione di fotoni (da 11.6eV per Ar). Questa energia è sopra soglia per la ionizzazione dei metalli (per il Cu la soglia è 7.7eV), determinando la formazione negli elettrodi di segnali successivi a quello primario

- L'aggiunta di gas poliatomici come *quencher* riduce questi effetti grazie all'assorbimento dei fotoni da diseccitazione secondo modalità tali da non comportare successive ionizzazioni

Tipici gas quencher

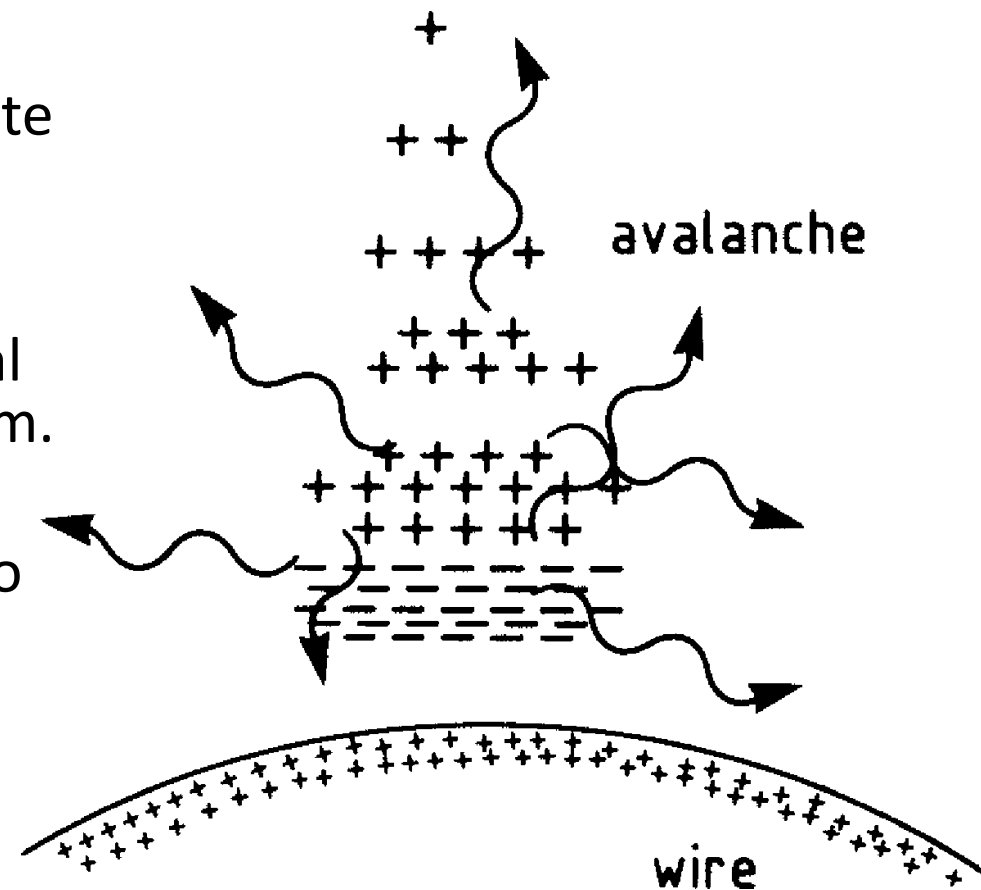
Methane	CH ₄
Ethane	C ₂ H ₆
Propane	C ₃ H ₈
Butane	C ₄ H ₁₀
Pentane	C ₅ H ₁₂
Isobutane	(CH ₃) ₂ CHCH ₃
Carbon dioxide	CO ₂
Ethylene	(C ₂ H ₂) ₂
Methylal	CH ₂ (CH ₂ OH) ₂

- Consideriamo una camera proporzionale costituita da un cilindro metallico e da un filo concentrico; supponiamo che il cilindro (il catodo) sia posto a potenziale negativo e il filo (l'anodo) sia a potenziale positivo.
- Il passaggio di una particella di sufficiente energia nel volume di gas determina la formazione di una coppia elettrone-ione positivo. L'elettrone si sposta verso il filo, viaggiando in un campo elettrico E crescente pari a:

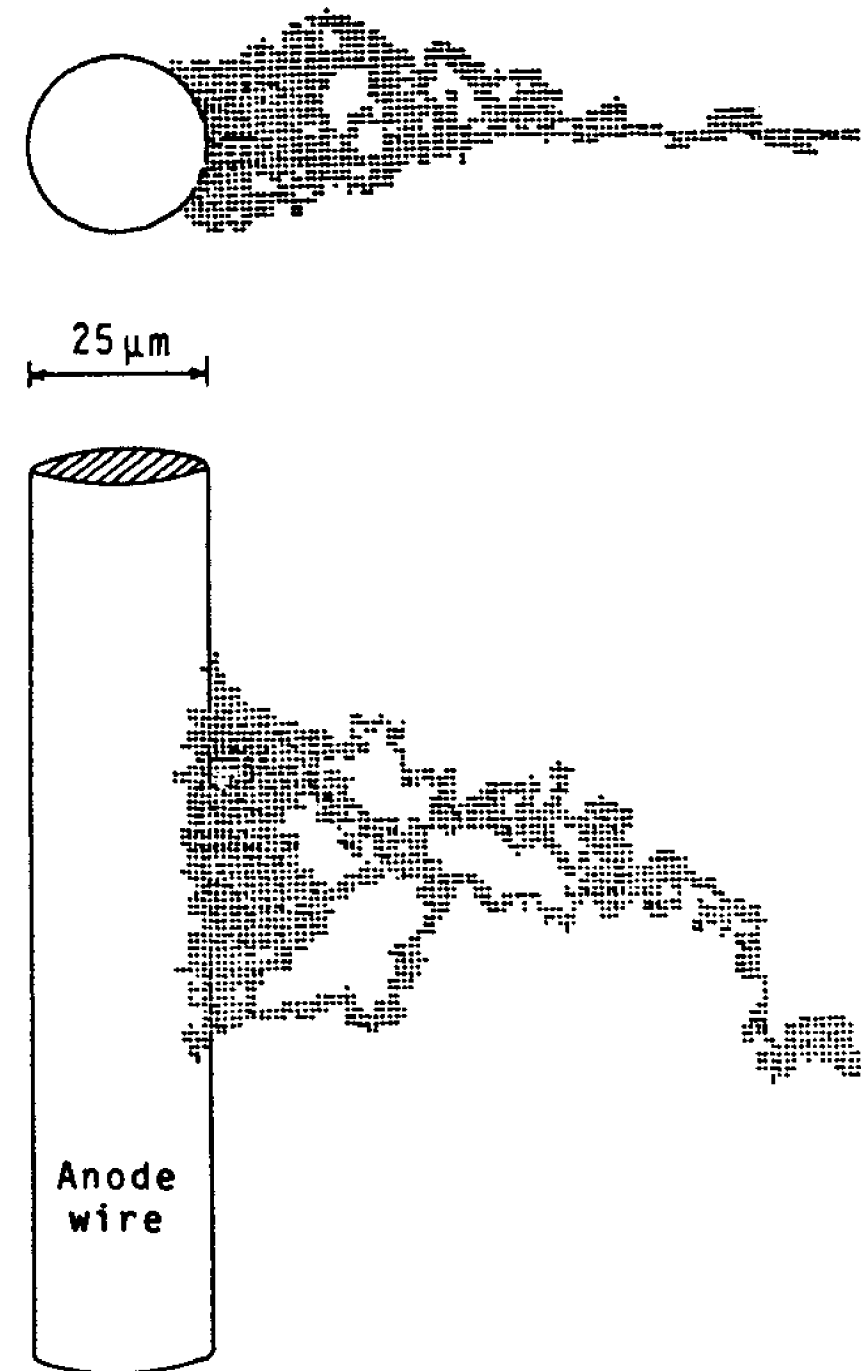
$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}$$

- dove λ è la densità di carica lineare sul filo.
- Una volta che il campo elettrico vicino all'elettrone è abbastanza intenso da permettere all'elettrone, tra una collisione e l'altra con le molecole di gas, di acquisire energia sufficiente per produrre una ionizzazione, si crea un altro elettrone e inizia la valanga.
- Alla normale densità del gas, il cammino libero medio tra due collisioni è dell'ordine dei μm ; quindi il campo che innesca la valanga è dell'ordine di diverse 10^4 V/cm, e il filo deve essere sottile, diciamo poche 10^{-3} cm, per 1 o 2 kV.

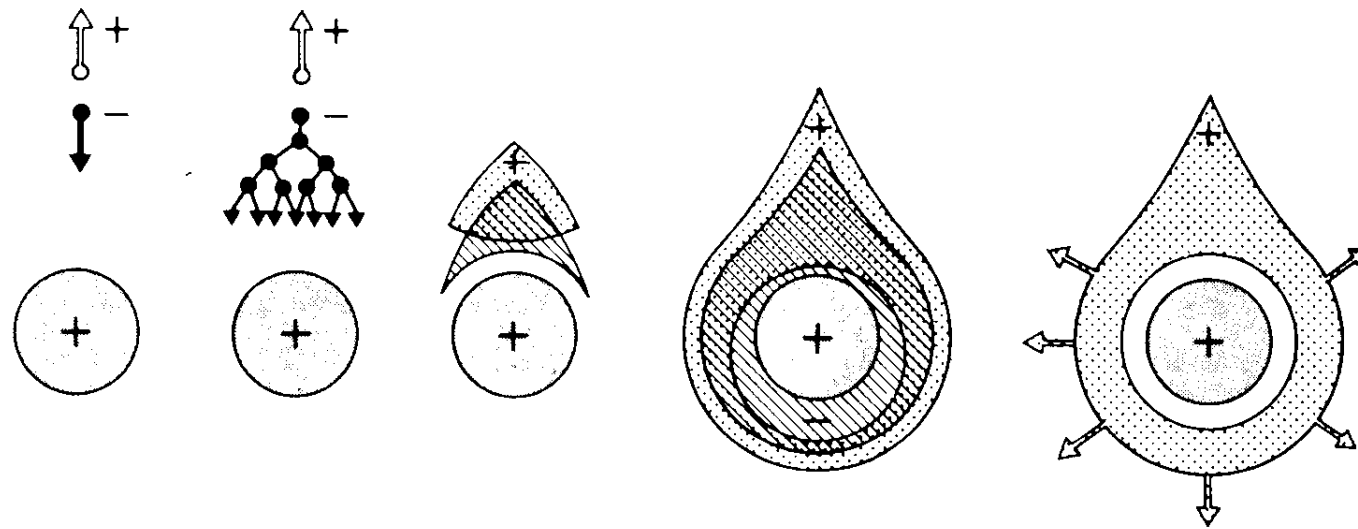
- Man mano che il numero di elettroni si moltiplica nelle generazioni successive le dimensioni della valanga continuano a crescere fino a quando tutti gli elettroni non si sono raccolti sul filo.
- In generale, la valanga non circonda completamente il filo, ma si sviluppa preferenzialmente sul lato di avvicinamento degli elettroni che la innescano. L'intero processo si sviluppa in direzione longitudinale su un numero di percorsi liberi pari al numero di generazioni, tipicamente da 50 a 100 μm .
- Questa fase termina dopo una frazione di ns , in condizioni normali di gas. I processi fisici all'interno della valanga sono piuttosto complessi, in quanto coinvolgono ionizzazioni singole e multiple, eccitazioni ottiche e metastabili, forse ricombinazioni e trasferimento di energia tramite collisioni tra atomi
- La diseccitazione degli stati metastabili potrebbe in linea di principio aumentare la durata della valanga fino al tempo di collisione tra le molecole



- La camera proporzionale deve il suo nome al fatto che il segnale è proporzionale al numero di elettroni raccolti. Questa proporzionalità è possibile nella misura in cui le variazioni del campo elettrico indotte dalla valanga rimangono trascurabili rispetto al campo del filo.
- Possiamo caratterizzare il regime di proporzionalità come quello in cui la densità di carica nella valanga è trascurabile rispetto alla densità di carica lineare λ del filo. La densità di carica della valanga è data dal prodotto del fattore di guadagno e del numero di elettroni che innescano la valanga, diviso per la sua larghezza.
- Un ruolo molto importante è svolto dai fotoni, che sono abbondanti quanto gli elettroni perché le sezioni d'urto rilevanti sono dello stesso ordine di grandezza. La probabilità che questi fotoni diano origine a ulteriori ionizzazioni è fortemente ridotta dall'aggiunta di quencher nel gas.
- Nella figura è mostrata una simulazione Monte Carlo dettagliata dello sviluppo di una valanga in prossimità di un filo anodico. L'immagine rappresenta la densità di elettroni.



- Nella valanga gli elettroni si muoveranno verso il filo in tempi inferiori al ns mentre gli ioni si allontaneranno dal filo raggiungendo le pareti del tubo in tempi dell'ordine del centinaio di μs .
- Visti i diversi ordini di grandezza tra i tempi di arrivo dei due tipi di cariche, si può assumere che gli N elettroni siano prodotti sulla superficie del filo e non si muovano mentre gli N ioni si sposteranno lentamente dalla superficie del filo verso le pareti del tubo.



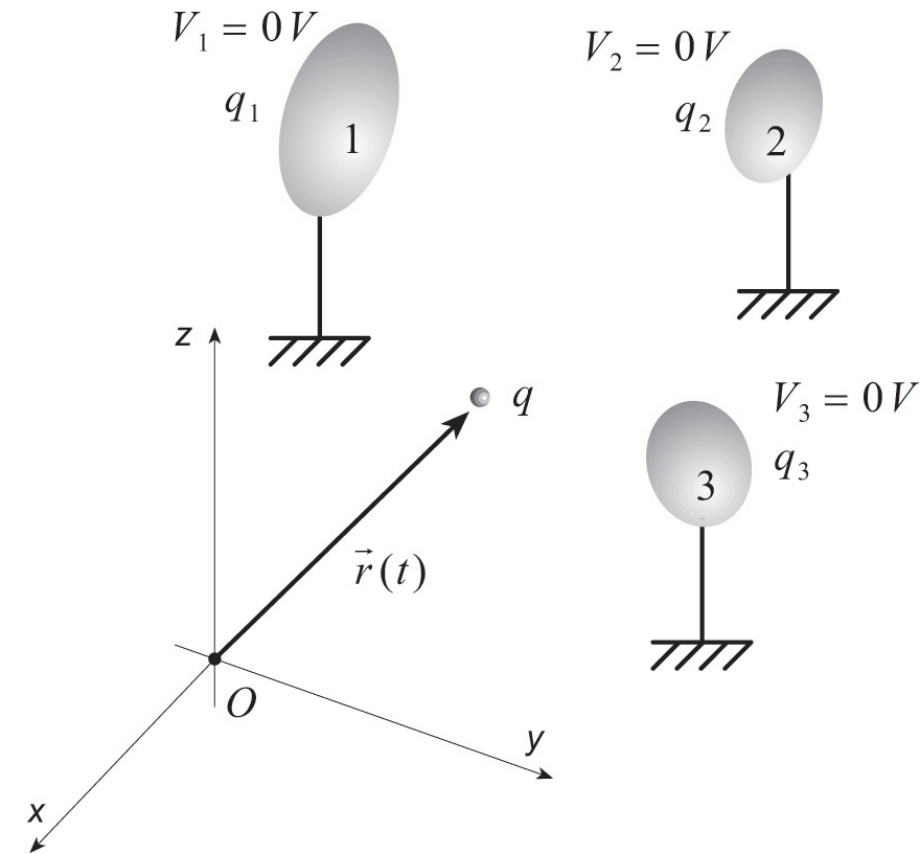
- Il moto delle cariche nel gas determina la formazione di un segnale sia sul catodo che sull'anodo

Il teorema di Ramo

- Un approccio semplice alla determinazione della forma del segnale indotto negli elettrodi di un rivelatore proporzionale è l'applicazione del teorema di Ramo
- Consideriamo un insieme di tre conduttori nel vuoto, posti a potenziale nullo attraverso dei fili conduttori che li collegano a terra; indicando con V_1 , V_2 e V_3 i loro potenziali risulta

$$V_1 = V_2 = V_3 \equiv 0 V$$

- Supponiamo che in loro prossimità sia situato un conduttore in quiete di dimensioni infinitesime di carica q .



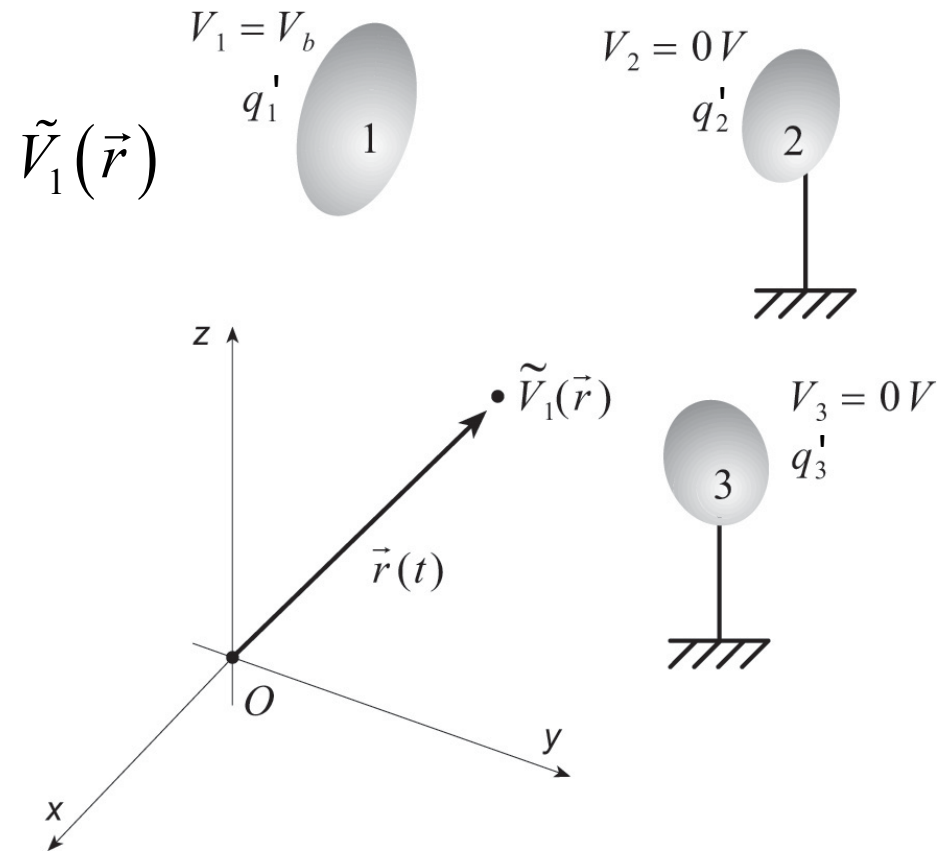
- Per stabilire la carica q_1 indotta sul primo conduttore per effetto della presenza della carica q consideriamo la configurazione in cui tale conduttore sia posto al potenziale V_b , il conduttore di dimensioni infinitesime, di vettore posizione \vec{r} rispetto a un sistema di riferimento, sia privo di carica ed a potenziale $\tilde{V}_1(\vec{r})$ e gli altri due conduttori siano a potenziale di terra ($V_2 = V_3 = 0V$).

- Applicando il teorema di reciprocità risulta

$$q\tilde{V}_1(\vec{r}) + q_1V_b = 0$$

- Ne segue che la carica indotta sul primo conduttore per effetto della presenza della carica q vale:

$$q_1 = -q \frac{\tilde{V}_1(\vec{r})}{V_b}$$



- Qualora la carica q sia posta in movimento, nel filo conduttore che collega il primo conduttore a terra si induce una corrente.
- In generale, il teorema di Ramo afferma che in un sistema di N conduttori, la corrente indotta nel k -esimo conduttore, posto a potenziale di massa, per effetto del moto con velocità \vec{v} di una carica q la cui posizione è indicata dal vettore \vec{r} vale

$$i_k(t) = \frac{dq_k}{dt} = \frac{d}{dt} \left(-q \frac{\tilde{V}_k(\vec{r})}{V_b} \right) = -\frac{q}{V_b} \frac{d\tilde{V}_k(\vec{r})}{dt} = -\frac{q}{V_b} \vec{\nabla} \tilde{V}_k(\vec{r}) \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{q}{V_b} \vec{E}_k(\vec{r}) \cdot \vec{v},$$

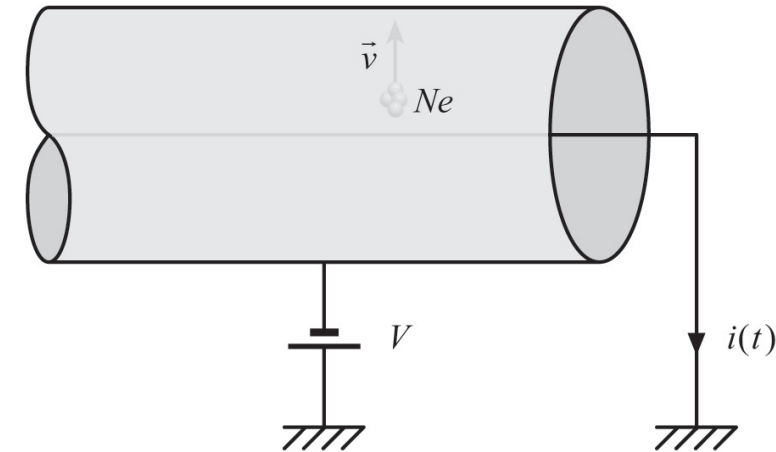
- in cui $\vec{E}_k(\vec{r})$, detto *campo peso*, dedotto dalla relazione $\vec{E}_k = -\vec{\nabla} \tilde{V}_k(\vec{r})$, rappresenta il campo elettrico nel punto in cui è situata la carica q valutato quando tale carica è rimossa, i conduttori 1, 2, $k-1, k+1, \dots, N$ sono collegati a massa e il k -esimo conduttore è posto a potenziale V_b .
- Si noti inoltre come la direzione della corrente dipende, oltre che dal segno della carica q anche dai versi dei vettori \vec{v} e $\vec{E}_k(\vec{r})$.

Determinazione del segnale indotto

- Consideriamo una camera proporzionale costituita da un cilindro di raggio interno r_1 e da un filo concentrico di raggio r_2 ; supponiamo che il cilindro sia posto a potenziale $-V$ e il filo sia a potenziale di massa.

$$E = \frac{V}{r \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}.$$

- Il passaggio di una particella di sufficiente energia nel volume di gas determina la formazione di una coppia elettrone-ione positivo. A causa dei differenti ordini di grandezza tra la velocità degli elettroni e quella degli ioni positivi, trascuriamo il contributo degli elettroni



- La velocità degli ioni \vec{v} , pari a $d\vec{r}/dt$, si può esprimere attraverso il campo elettrico tramite la mobilità μ nel gas considerato come $\mu\vec{E}$, pertanto, utilizzando la relazione precedente, si ha:

$$\frac{dr}{dt} = \mu \frac{V}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}.$$

- Assumendo che al tempo $t = 0$ gli N ioni siano situati in corrispondenza della superficie del filo, dall'integrazione di questa equazione segue:

$$r = r_1 \sqrt{1 + \frac{2\mu V}{r_1^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} t} = r_1 \sqrt{1 + \frac{t}{t_0}}$$

- dove

$$t_0 \equiv \frac{r_1^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\mu V},$$

- Gli ioni raggiungeranno la parete del cilindro quando r varrà r_2 , cioè in corrispondenza del tempo t_{max} pari a:

$$t_{max} = t_0 \left[\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right].$$

- Dalla relazione precedente è possibile dedurre la velocità degli ioni:

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt} r_1 \sqrt{1 + \frac{t}{t_0}} = -\frac{r_1}{2t_0} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{t}{t_0}}} = -\frac{\mu V}{r_1 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{t}{t_0}}}.$$

- Dove, si è esplicitata l'espressione di t_0 soltanto per il fattore moltiplicativo

- Dall'espressione della corrente fornita dal teorema di Shockley-Ramo segue

$$\begin{aligned}
 i(t) &= \frac{Ne}{V} Ev = \frac{Ne}{V} \frac{V}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \frac{dr}{dt} = -\frac{Ne}{V} \frac{V}{r_1 \sqrt{1 + \frac{t}{t_0}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \frac{\mu V}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \sqrt{1 + \frac{t}{t_0}}} = \\
 &= -\frac{Ne\mu V}{r_1^2 \left[\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\right]^2} \frac{1}{1 + \frac{t}{t_0}} = -\frac{Ne\mu V}{r_1^2 \left[\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\right]^2} \frac{t_0}{t + t_0} = -\frac{Ne\mu V}{r_1^2 \left[\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\right]^2} \frac{r_1^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\mu V} \frac{1}{t + t_0} = \\
 &= -\frac{Ne}{2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \frac{1}{t + t_0}.
 \end{aligned}$$

- Quindi il segnale di corrente è negativo e presenta un andamento di tipo parabolico. Il tempo caratteristico t_0 è in genere dell'ordine di alcuni nanosecondi.

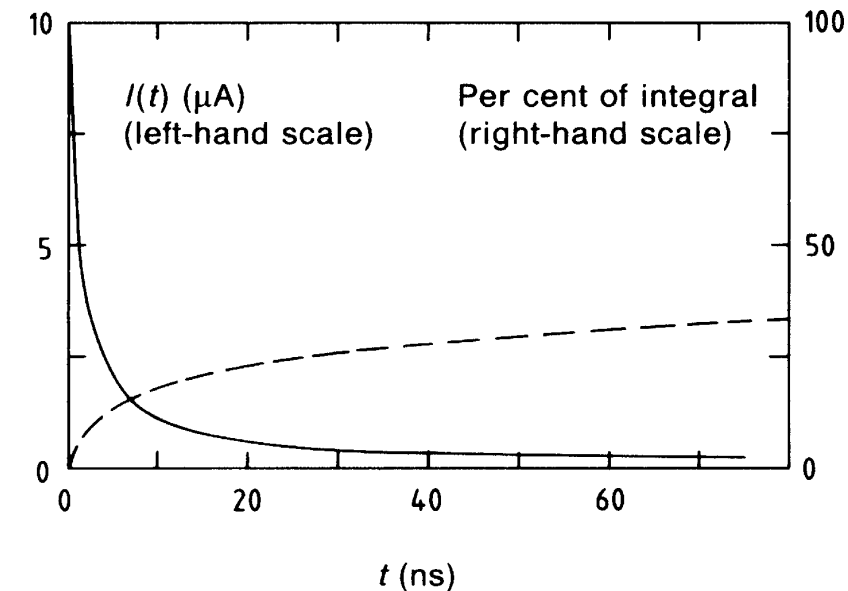
- Integrando questa espressione si trova la legge di variazione della carica indotta:

$$q_{ind}(t) = \int_0^t i(\xi) d\xi = -\frac{Ne}{2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \int_0^t \frac{1}{\xi + t_0} d\xi = -\frac{Ne}{2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln\left(1 + \frac{t}{t_0}\right),$$

- e, in particolare, al tempo t_{max} , quando gli ioni positivi raggiungono il catodo, la carica indotta nel filo varrà

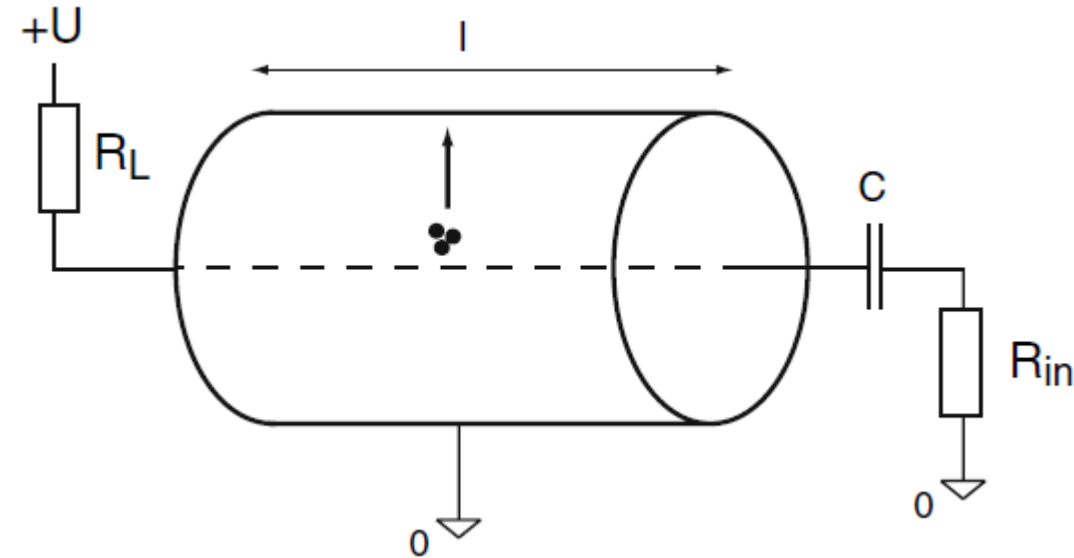
$$q_{ind}(t_{max}) = -\frac{Ne}{2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln\left(1 + \frac{t_{max}}{t_0}\right) = -Ne.$$

- Nella figura è mostrato il segnale di corrente secondo la relazione dedotta (linea continua, scala a sinistra) per $t_0 = 1.25ns$, $r_2/r_1 = 500$ e $q = 10^6$ cariche elementari insieme all'integrale temporale di questo impulso in percentuale del totale (linea tratteggiata, scala a destra)
- Siccome non è necessario utilizzare tutto il segnale questo viene normalmente differenziato (RC) per ridurre il tempo morto

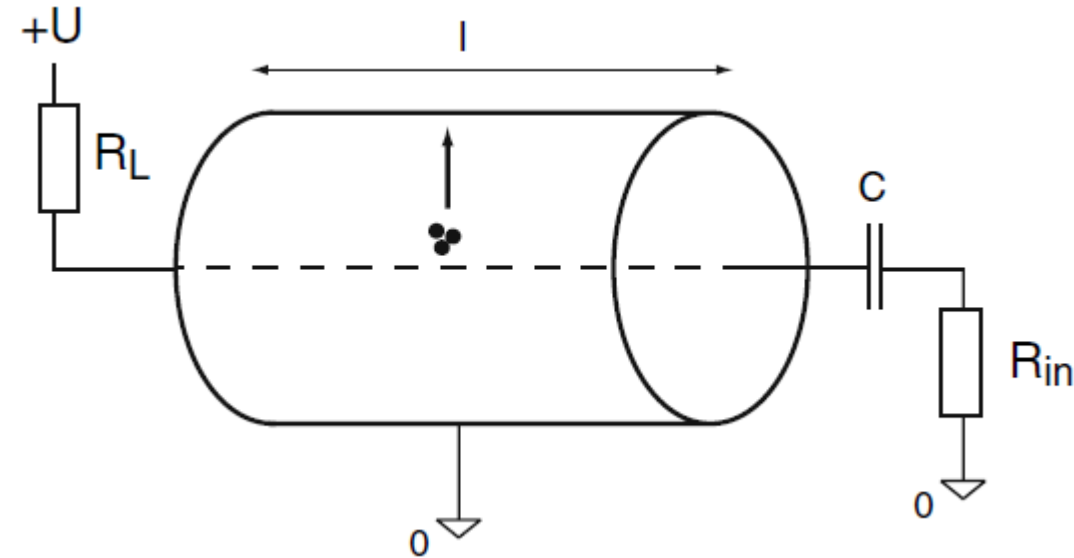


Circuito funzionale

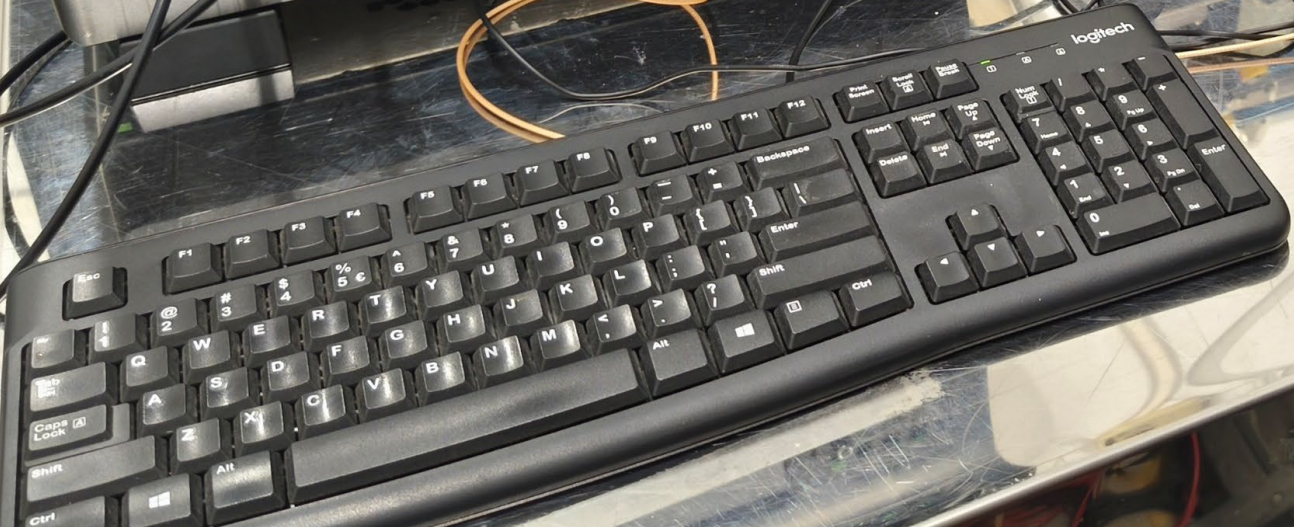
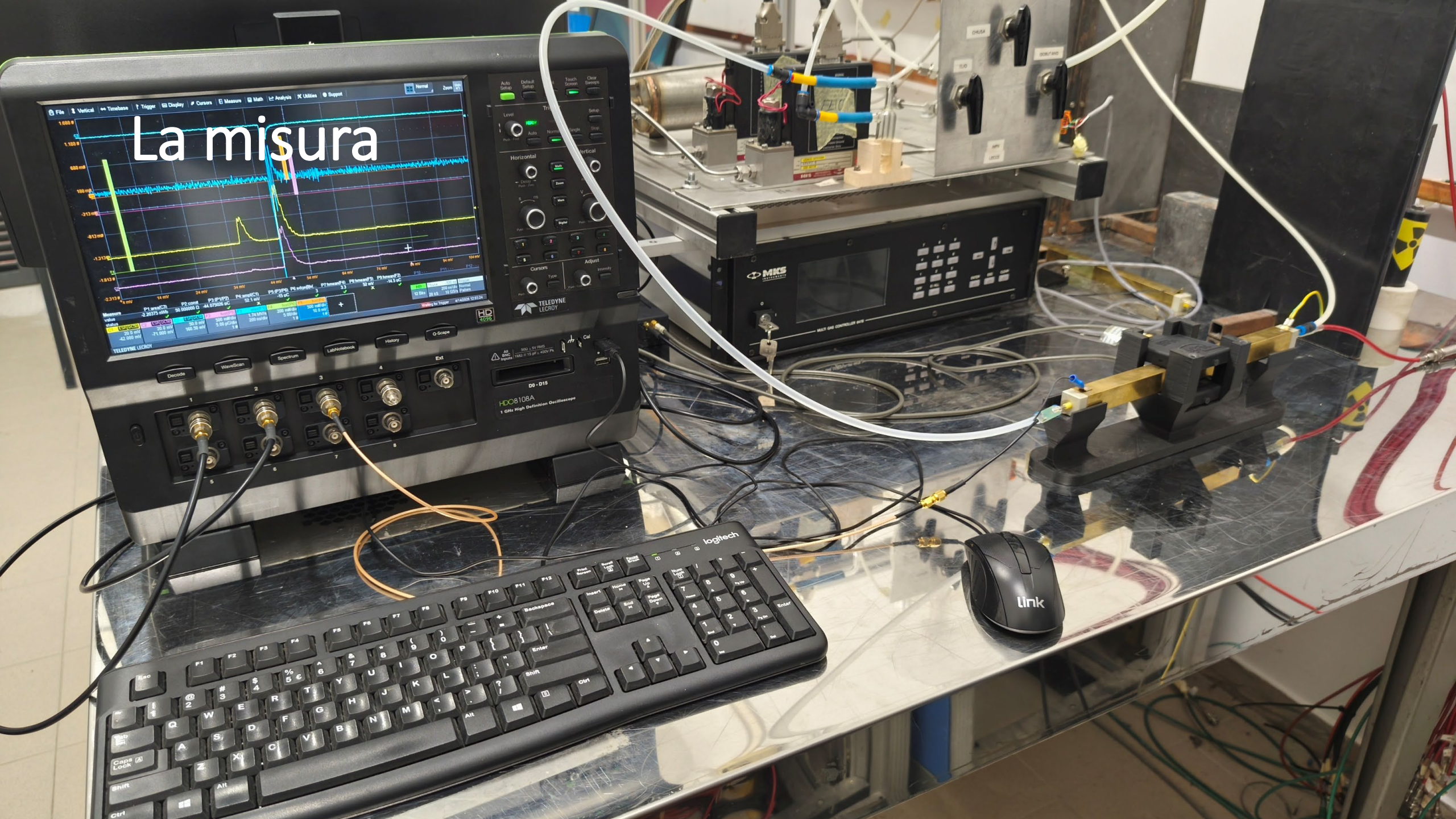
- Il funzionamento del rivelatore richiede quindi che si applichi un'elevata differenza di potenziale tra il filo anodico e il catodo e che si possa prelevare il segnale, ad esempio indotto sul filo, disaccoppiandosi da tale differenza di potenziale
- Nelle applicazioni pratiche non è conveniente impostare il catodo a una tensione negativa elevata $-U$, ma piuttosto mettere a massa il catodo e porre il filo anodico a una tensione positiva U .
- Il segnale indotto sul catodo può essere trascurato perché la corrente scorre verso il nodo di massa e non entra negli stadi successivi di amplificazione



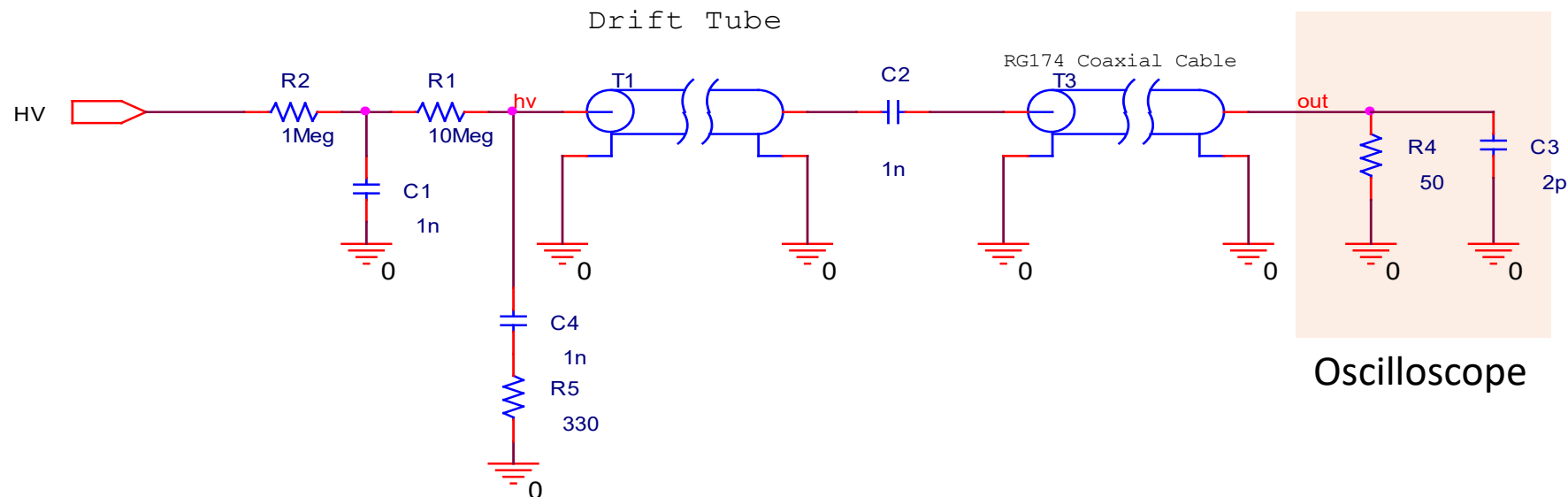
- Il condensatore C , che disaccoppia gli stadi successivi di amplificazione dal potenziale U , deve essere grande rispetto a alla capacità del rivelatore, in modo che il segnale di corrente entri nell'amplificatore anziché fluire in tale capacità. Tuttavia, non deve essere così grande da distruggere l'amplificatore in caso di scarica a causa dell'energia $\frac{1}{2}CU^2$ immagazzinata. Generalmente si assume pari a 1 nF.
- La resistenza R_L collega il filo all'alimentazione. Deve essere grande rispetto all'impedenza di C e R_{in} in serie, in modo che solo una piccola frazione del segnale venga persa nell'alimentazione.



La misura



- Per la misura si adopera un tubo di ottone a sezione quadrata $20 \times 20 \text{ mm}^2$ lungo 30 cm e un filo in tungsteno (placcato in oro) $\varnothing 40 \mu\text{m}$
- Il sistema nel suo complesso è rappresentato attraverso lo schema seguente



- La rete R1, C1, R2, serve alla soppressione del rumore del generatore di HV, la rete R5, C4 serve per l'adattamento (asimmetrico) all'impedenza caratteristica del tubo (circa 330Ω). C2 è il condensatore di disaccoppiamento dall'HV, T3 è il cavo di collegamento con l'oscilloscopio

- Le caratteristiche del tubo come linea di trasmissione sono

$$\underline{R} := 1\text{cm}$$

$$\underline{L} := 30\text{cm}$$

$k := 2$ tiene conto della sezione quadrata del tubo

$$r_w := 20\mu\text{m}$$

$$c_{\text{tube}} := \frac{2\pi \cdot \epsilon_0}{\ln\left(\frac{R}{k r_w}\right)} = 10.076 \cdot \frac{\text{pF}}{\text{m}}$$

$$C_{\text{tube}} := c_{\text{tube}} \cdot L = 3.023 \cdot \text{pF}$$

$$l_{\text{tube}} := \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R}{k \cdot r_w}\right) = 1.104 \cdot \frac{\mu\text{H}}{\text{m}}$$

$$L_{\text{tube}} := l_{\text{tube}} \cdot L = 0.331 \cdot \mu\text{H}$$

$$Z_0 := \sqrt{\frac{l_{\text{tube}}}{c_{\text{tube}}}} = 331.058 \Omega$$

impedenza caratteristica del tubo

$$R_{\text{out}} := 50\Omega$$

Impedenza sulla quale si misura (ingresso oscilloscopio)

$$\underline{F} := \frac{2R_{\text{out}}}{R_{\text{out}} + Z_0} = 0.262$$

- Il fattore F tiene conto del disadattamento in corrispondenza della connessione tra il rivelatore e il cavo di collegamento con l'oscilloscopio (indicato con T3 nello schema precedente)

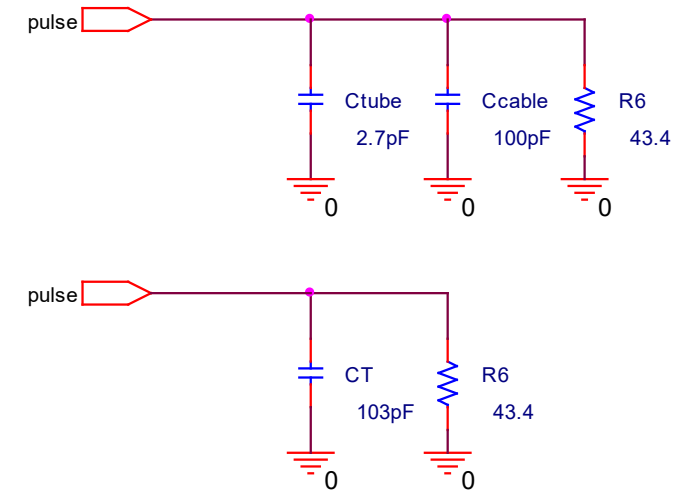
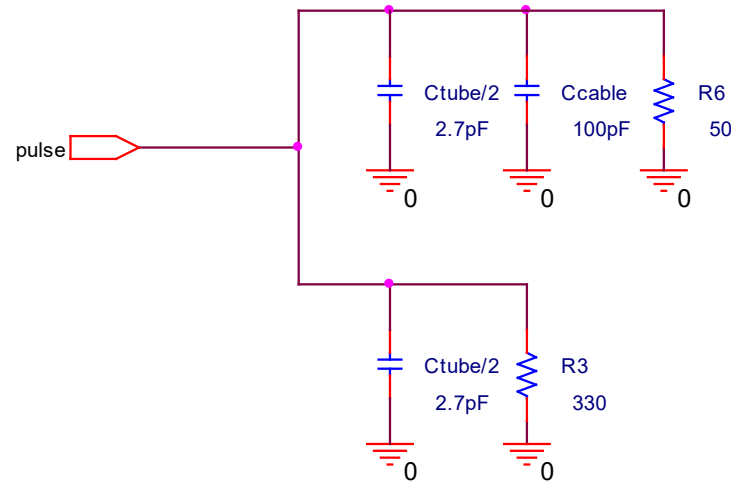
- Le caratteristiche del tubo ed i corrispondenti schemi sono:

$L := 30\text{cm}$ $r_W := 20\mu\text{m}$ $R := 1\text{cm}$ $k := 2$ tiene conto della sezione quadrata del tubo

$$C_{\text{tube}} := \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot L}{\ln\left(\frac{R}{k r_W}\right)} = 3.023 \cdot \text{pF}$$

$$C_{\text{cable}} := 100\text{pF}$$

$$C_T := C_{\text{tube}} + C_{\text{cable}} = 103.023 \cdot \text{pF}$$



- Nota l'ampiezza dell'impulso ΔV , la capacità totale permette di stimare la carica della ionizzazione corrispondente a quell'impulso come:

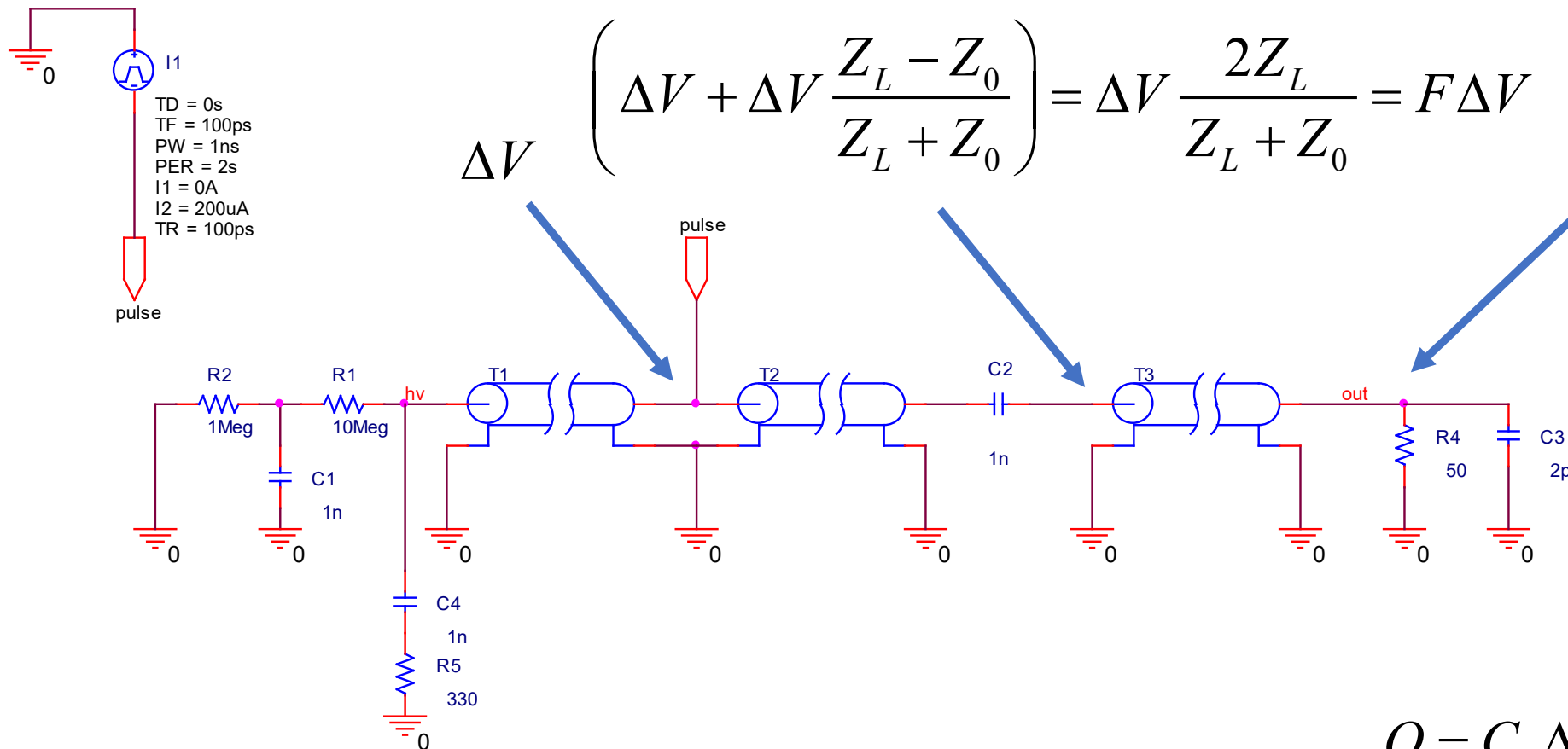
$$Q = C_T \Delta V$$

- Il sistema costituito dal rivelatore e dal cavo di collegamento all'oscilloscopio si comporta come due linee di trasmissione di diversa impedenza caratteristica (330Ω per il tubo e 50Ω per il cavo) collegate in serie, pertanto l'effetto del disadattamento va tenuto in considerazione

$$F \equiv \frac{2Z_L}{Z_L + Z_0}$$

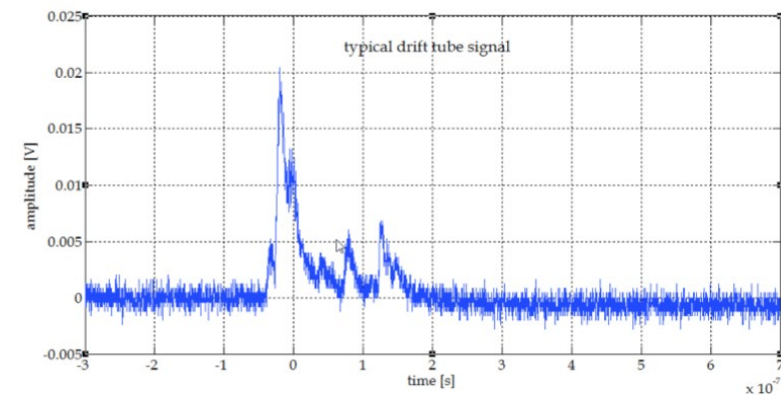
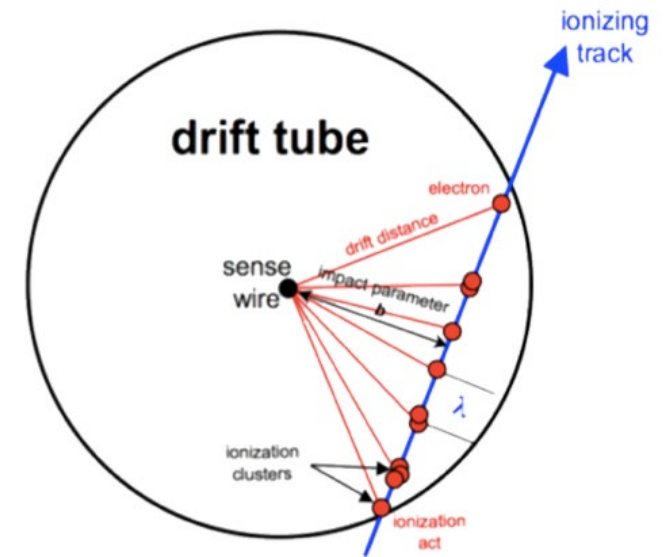
$$\left(\Delta V + \Delta V \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) = \Delta V \frac{2Z_L}{Z_L + Z_0} = F \Delta V$$

$$v_{out} = F \Delta V$$



$$Q = C_T \Delta V = C_T \frac{v_{out}}{F}$$

- Il gas adoperato è una miscela He-iButano nelle proporzioni 9:10
- I vantaggi dell'uso dell'He sono riconosciuti da molto tempo:
 - Basso contributo di scattering multiplo per effetto dell'elevata lunghezza di radiazione, $X_0(\text{He})$ pari a 5600m contro $X_0(\text{Ar})$ uguale a 110m
 - Bassa densità di ionizzazioni primarie, circa 6/cm contro quasi 30/cm di Ar
 - Bassa velocità di drift, circa 2cm/ μs contro circa 5cm/ μs per Ar
- Una miscela a base di He permette quindi di identificare i segnali dovuti ai singoli cluster di ionizzazione che altrimenti, per un gas più veloce non sarebbero distinguibili
- Questo richiede che l'elettronica di acquisizione abbia una larghezza di banda tale da consentire la risoluzione dei segnali, tipicamente circa 1GHz, con rapporto S/R >8 e un elevato sampling rate, maggiore di 2GS/s



Determinazione del guadagno del gas

202

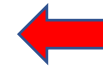
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A301 (1991) 202–214
North-Holland

- Assumiamo per la miscela adoperata una media n_{ele} di 1.6 elettroni per cluster
- Sia e la carica dell'elettrone (in valore assoluto), allora il guadagno del gas G è definito come

$$G \equiv \frac{Q}{e n_{ele}}$$

- Da cui è possibile esprimere il guadagno a partire dalla misura dell'ampiezza media degli impulsi

$$G \equiv \frac{Q}{e n_{ele}} = \frac{1}{e n_{ele}} C_T \frac{v_{out}}{F}$$

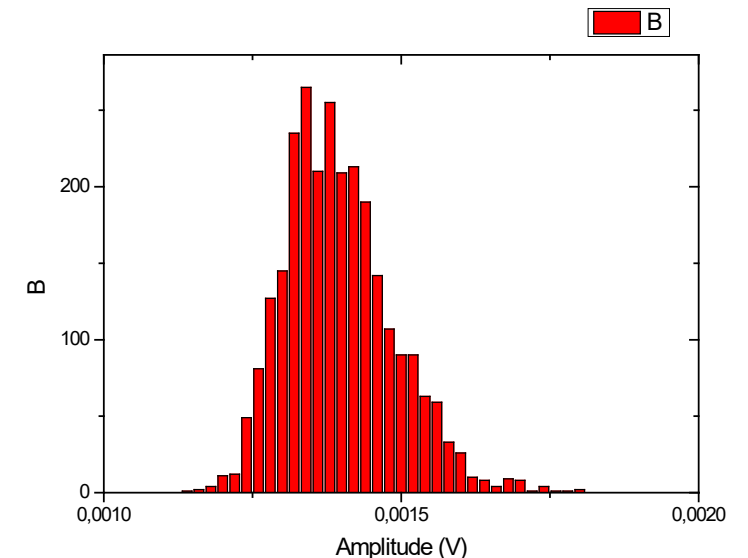


Experimental determination of ionization cluster size distributions in counting gases

Hansjörg Fischle¹, Joachim Heintze and Bernhard Schmidt
Physikalisches Institut der Universität Heidelberg Philosophenweg 12, D-6900 Heidelberg, Germany

Received 15 October 1990

The distribution of the number of electrons contained in the ionization clusters formed along the track of minimum ionizing particles has been determined experimentally. Results are presented for argon, helium, methane, ethane, propane, isobutane and carbon dioxide, i.e., for gases which are commonly used as counting gases in drift chambers. The probabilities $w(n)$ for the formation of a cluster containing n electrons were found to be monotonically decreasing for increasing n . Typical values for $w(1)$ are 0.66 (Ar), 0.77 (He), and 0.79 (CH₄). The results are compared with model predictions.



- Un approccio alternativo alla misura del guadagno del gas prevede il conteggio dei singoli cluster di ionizzazione e della misura della carica che attraversa la resistenza di ingresso dell'oscilloscopio
- Rispetto alla carica misurata dall'oscilloscopio Q_m la carica originata all'interno del tubo si esprime attraverso il fattore F , già introdotto, come:

$$Q = \frac{Q_m}{F}$$

- Se questa carica è ripartita su n_c cluster, ciascuno dei quali originato da n_{ele} elettroni, sostituendo nella relazione precedente, si ha:

$$G \equiv \frac{Q}{en_{ele}n_c} = \frac{Q_m}{en_{ele}n_c F}$$

