

RIVELATORI A GAS

PRINCIPIO GENERALE

- CAMERA PIENA DI GAS
- DUE O PIÙ ELETTRODI A DIVERSO POTENZIALE
- UNA PARTICELLA CARICA (IONIZZANTE) INTERAGISCE CON IL GAS E LIBERA PORTATORI DI CARICA
- SI STABILISCE UNA CORRENTE ELETTRICA TRA GLI ELETTRODI

↳ SEGNALE

NUMERO COPPIE DI IONI PRODOTTE

- UNA FRAZIONE DELL'ENERGIA DELLA PARTICELLA FORMA COPPIE e^- - IONE
- SE E È L'ENERGIA TOTALE DEPOSITA E N IL NUMERO TOTALE DI COPPIE DI IONI FORMATO, HA SENSO DEFINIRE:

$$W = \frac{E}{N} \quad \leftarrow \text{ENERGIA NECESSARIA IN MEDIA PER PRODURRE UNA COPPIA [eV]}$$

- CI SI ATTENDE $W \gtrsim E_i$ ENERGIA DI LEGAME DEGLI ELETTRONI PERIFERICI
(10 - 25 eV)

IN REALTÀ W È SENSIBILMENTE MAGGIORE DI E_i

↑
PARTE DELL'ENERGIA È SPESA IN ECCITAZIONI ATOMICHE, E NON IN IONIZZAZIONE

N_0 GLI e^- DELLA IONIZZAZIONE PRIMARIA POSSONO, A VOLTE, FORMARE COPPIE e^- - IONE SECONDARIE

↳ CONTRIBUISCONO AL SEGNALE

raggi
"delta"

- CI SI ATTENDE INOLTRE, A PRORI, CHE:

$$W = f(E, \text{PARTICELLE INCIDENTI, TIPO DI GAS})$$

DI PENDENZA BLANDA
(TRASCURABILE)

DIP. UN PO' PIU'
PRONUNCIATA

TIPICO VALORE: $W \approx 25 - 35 \text{ eV}$

ESEMPI PER VARI GAS:

GAS	ELETTRONE VELOC	PARTICELLA α
Ar	26.4	26.3
He	41.3	42.7
H ₂	36.5	36.4
N ₂	34.8	36.4
ARIA	33.8	35.1
O ₂	30.8	32.2
CH ₄	27.3	29.1

$\rightarrow 1 \text{ MW} \Rightarrow \sim 30'000 \text{ COPPIE DI IONI}$

FLUTTUAZIONI DI N

$$\sigma_N^2 = F \cdot N$$

\uparrow FATTORE DI FANO (DEVIAZIONE DA POISSON)

IL FATTORE DI FANO RIFLETTE LA FRAZIONE DI ENERGIA RILASCIATA DALLA PARTICELLA CHE E' CONVERTITA IN PORTATORI D'INFORMAZIONE NEL RIVELATORE

NEI GAS: $F < 1$ DA USARSI SOLO NEL CASO DI RIVELATORI USATI IN MODI PULCRO

DIFFUSIONE, TRASFERIMENTO DI CARICA, RICOMBINAZIONE

- GLI IONI E GLI ELETTRONI PRODOTTI DIFFONDONO NEL GAS PER **MOTO TERMICO**
- TIPICO LIBERO CAMMINO MEDIO IN CONDIZIONI ORDINARIE
($\lambda \approx 10^{-6} - 10^{-8} \text{ m}$)
- DIFFUSIONE PIÙ IMPORTANTE PER GLI e^- :

UNO SPOT DI e^- DIFFONDE CON UNA DISTRIBUZIONE SPAZIALE GAUSSIANA DI LARGHEZZA CRESCENTE NEL TEMPO

SI PUÒ SCRIVERE

$$\sigma = \sqrt{2Dt}$$

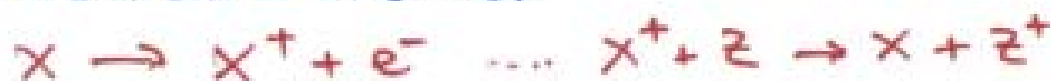
COEFF. DI DIFFUSIONE

PROIEZIONE SU UN'ASSE

t = tempo trascorso

D : nei casi semplici ottenibile dalla TEORIA CIN. DEI GAS
IN GENERE: MODELLI DI TRASPORTO COMPLESSI

- TRASFERIMENTO DI CARICA



(GAS = MISCELA DI)
 X, Y, Z



A VOLTE, L'ELETTRONE SI "ATTACCA" AD UN'ALTRA SPECIE MOLECOLARE PRESENTE

QUINDI LA COPPIA FORMATA PUÒ ESSERE:



- RICOMBINAZIONE



↑
SPECIE IONIZZATE

↑
SPECIE NEUTRE

VALE LA RELAZIONE:

n^\pm DENSITÀ DELLA SPECIE [cm^{-3}]

$$\frac{dn^+}{dt} = \frac{dn^-}{dt} = -\alpha n^+ n^-$$

α COEFF. DI RICOMBINAZIONE

✓ + IMPORTANTE PER A^+, B^- CHE A^+, e^-
→ COLONNARE (LUNGO LA TRACCIA, IMMEDIATO)

RICOMBINAZIONE

→ VOLUMETRICA (LONTANO DALLA TRACCIA, SUCCESSIVO)

RICOMBINAZIONE COLOUNARE:

È LA RICOMBINAZIONE NELLE VICINANZE DELLA TRACCE PIÙ IMPORTANTE PER LE PARTICELLE CHE DANNO IONIZZ.
AD ALTA DENSITÀ (d. o. FRAGMENTI DI FISSIONE)

NON DIPENDE DAL RATE DELLE INTERAZIONI

RICOMBINAZIONE VOLUMETRICA:

È DOWTA ALLA NEUTRALIZZAZIONE TRA IONE⁺ E e⁻ O IONE⁻
IN TUTTO IL VOLUME DELLA CAMERA, ANCHE PROVENIENTI
DA DIVERSE TRACCE

DIPENDE DAL RATE

↳ RENDERE EFFICACE E RAPIDA LA SEPARAZIONE
E LA RACCOLTA DISTINTA DELLE CARICHE

↳ BENE DV ELEVATI

MIGRAZIONE DELLE CARICHE

CAMPO ELETTRICO \mathcal{E} PRESENTE NELLA ZONA IN CUI

$$n^+ \neq 0 \quad n^- \neq 0$$

↳ FORZE ELETTROSTATICHE SEPARANO LE CARICHE +, -

↳ UNA VELOCITÀ DI DERIVA v SI SOVRAPPONE ALLA
VELOCITÀ (AD ORIENTAM. CASUALE) DA AGITAZ. TERMICA

FORZE DI TIPO VISCOSE FANNO SÌ CHE, IN PRIMA APPROX.

$v \propto \mathcal{E}$ → VERO SEMPRE PER LA DIREZIONE

→ VERO SOLO A BASSI CAMPI PER IL MOBILITÀ
(SE I PORTATORI DI CARICA SONO ELETTRONI)

↳ SI INTRODUCE LA RELAZIONE

$$v = \mu \cdot \frac{\mathcal{E}}{P}$$

MOBILITÀ →

P = pressione del gas

TIPICAMENTE $\mu_{ioni} \approx (1-1.5) \times 10^{-4} \frac{m^2 \cdot atm}{V \cdot s}$

PER UNA CAMERA ALTA 1 cm
 CON UNA $\Delta V \approx 100 V$ ($\mathcal{E} = 10^4 \frac{V}{m}$)
 AD UNA PRESSIONE $p \approx 1 atm$

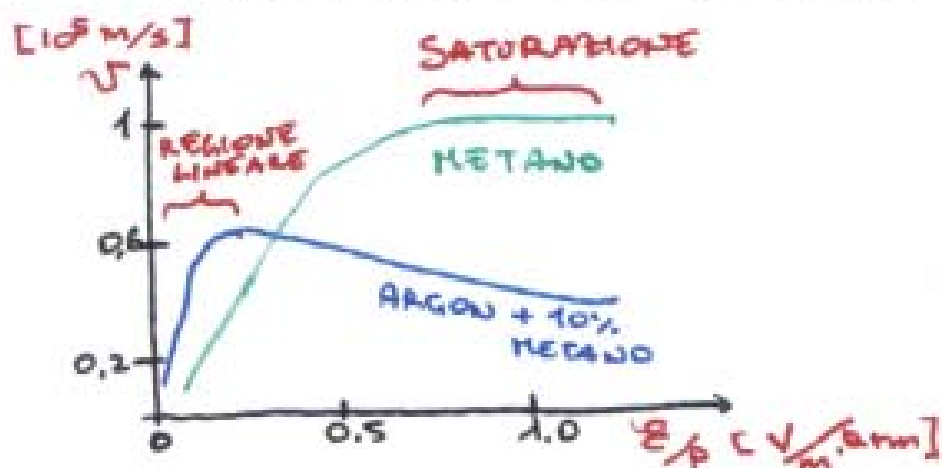
$\rightarrow v \approx 1 m/s$ $T_{drift} \approx 10 ms$ LENTA!

PER GLI ELETTRONI

$\mu_{e^-} \approx 10^3 \mu_{ioni} \rightarrow T_{drift} \approx \mu s$

μ_{ioni} : ABBASTANZA COSTANTE SU AMPI INTERVALLI DI \mathcal{E} E p
 SI HA SEMPRE $\mu^+ \approx \mu^-$

μ_{e^-} : IN ALCUNI GAS E' COSTANTE SOLO A BASSI VALORI DI \mathcal{E} E p
 (FENOMENO DELLA SATURAZIONE)



ATTENZIONE LA DIFFUSIONE NON ORIGINATA PER GLI e^- E' INTRINSECA
 PER CAMPI EL. \mathcal{E} ELEVATI $D_{\perp} \neq D_{\parallel}$

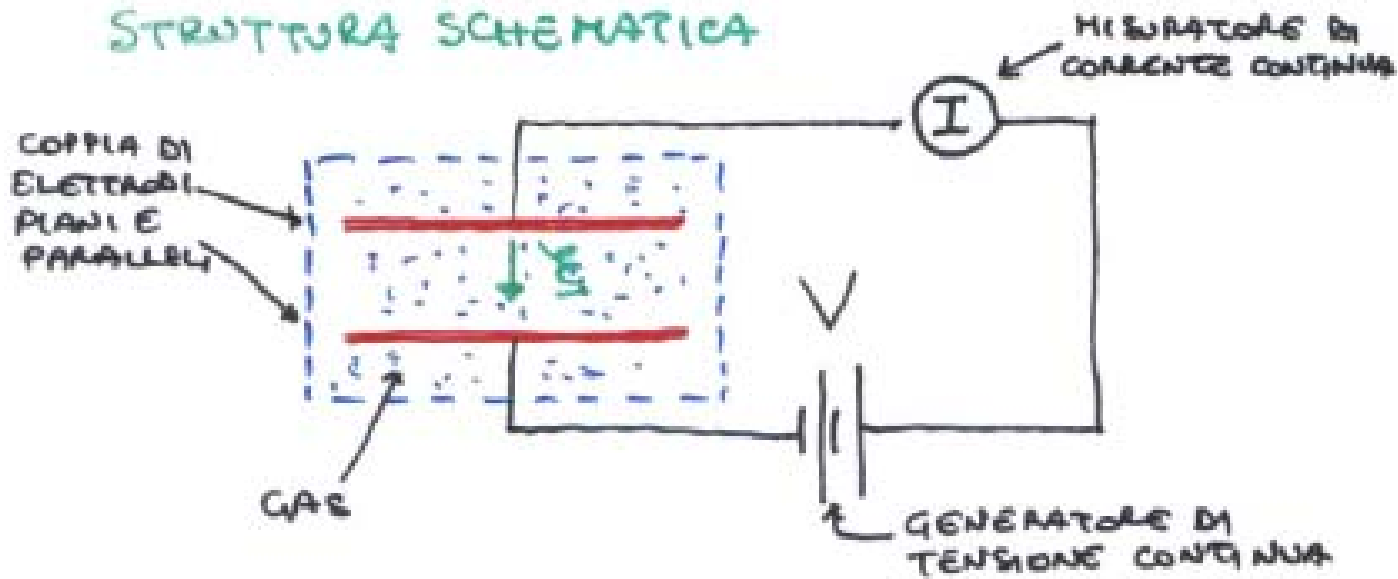
\rightarrow SPARFAGLIAMENTO DELLE CARICHE ($\sim 1 mm$)

\rightarrow RUOLO IMPORTANTE NEL LIMITE ALLA
 RIS. SPAZIALE OTTENIBILE

CAMERA A IONIZZAZIONE (IN CORRENTE)

- TIPO PIÙ SEMPLICE DI RIVELATORE DI PARTICELLE
IN REALTÀ NON RIVELA PARTICELLE SINGOLE
MA IL FLUSSO DI RADIATIONE IONIZZANTE

STRUTTURA SCHEMATICA



- SE RADIATIONE IONIZZANTE INCIDE SUL GAS AD UN TASSO COSTANTE, SI FORMANO AD UN TASSO COSTANTE COPPIE DI IONI, A CUI PUÒ SUCCESSERE DI:

- a) RICOMBINARSI
- b) DIFFONDERE, USCENDO DALL'AREA IN CUI $E \neq 0$
- c) ESSERE RACCOLTI AGLI ELETTRODI → **CORRENTE CONTINUA I**

TIPICHE CURVE $I-V$:



REGIONE DI SATURAZIONE SI MANIFESTA SOLO IL FENOMENO C)

L'AUMENTO DI V NON DETERMINA UN AUMENTO DI I , PERCHÉ LA CORRENTE È LIMITATA DAL NUMERO DI CARICHE PRODOTTE NELL'UNITÀ DI TEMPO. TUTTE LE CARICHE SONO RACCOLTE

LA CAMERA A IONIZZAZIONE OPERA IN REGIME DI SATURAZIONE

SONO PRESENTI I FENOMENI a) e b)!: NON TUTTE LE COPPIE SONO RACCOLTE

FATTORI CHE INFLUENZANO LA CORRENTE DI SATURAZ.

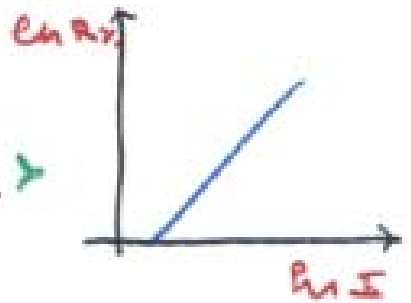
- PER LE PARTICELLE CARICHE PESANTI: LA RICOMBINAZIONE COLONNARE

$$\Delta V_{\text{sat}} (\alpha, N) > \Delta V_{\text{sat}} (e^-, \gamma)$$

- IRRAZZIAMENTO $\Rightarrow I >$

$$\hookrightarrow \Delta V_{\text{sat}} >$$

\Rightarrow RICOMB. VOLUMETRICA $>$
(R%)



- NEL CASO DELLE CAMERE AD ARIA

UMIDITÀ \Rightarrow RICOMB. VOLUMETRICA $>$

- A CAUSA DELLA DERIVA C'È SBILANCIAMENTO DI h^+ E h^-

\hookrightarrow GRADIENTE \rightarrow DIFFUSIONE CHE SI OPPONE

$$\hookrightarrow I <$$

SI PUÒ SCRIVERE:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{e}{\Delta V} \left(\frac{kT}{e} \right) \quad \text{a } T_{\text{amb}} \sim 25 \text{ mV}$$

$$e = \frac{\overline{E}_{\text{ione}} (\gamma)}{\overline{E}_{\text{ione}} (\phi)} \sim 1 \text{ PER GLI IONI}$$

\sim ALCUNE CENTINAIA PER GLI e^-

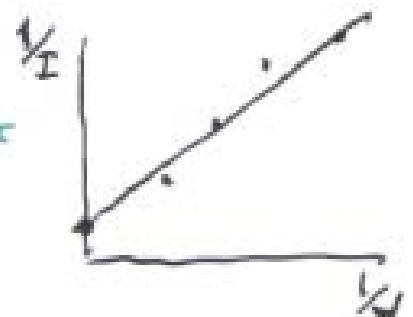
\hookrightarrow TENDS A SATURARE PER $\Delta V >$

$$\hookrightarrow \frac{\Delta I}{I} < \text{se } \Delta V >$$

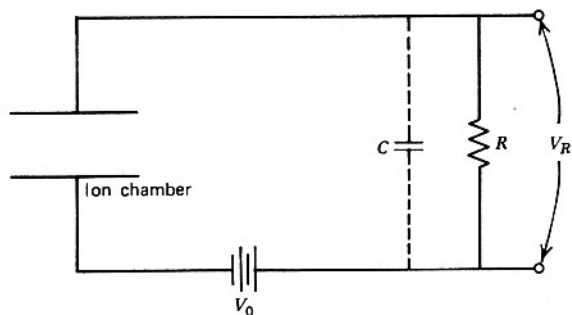
- RICOMBINAZ. VOLUMETRICA TRASCURABILE PER ΔV SUFF. ALTI
NO PER LA RICOMBINAZ. COLONNARE

$$I_{\text{meas}} < I_{\text{sat}}$$

\hookrightarrow MISURA SPERIMENTALE DI I_{loss}



FUNZIONAMENTO IN MODO IMPULSIVO



Particella ionizzante

- ↳ coppie e^- -ioni che derivano verso elettrodi
- ↳ carica indotta sugli elettrodi
- ↳ ΔV ai capi di R
- ↳ ΔV_{\max} quando tutta la carica e' raccolta
- ↳ ritorno alle condizioni di equilibrio (V_0) con $\tau = RC$

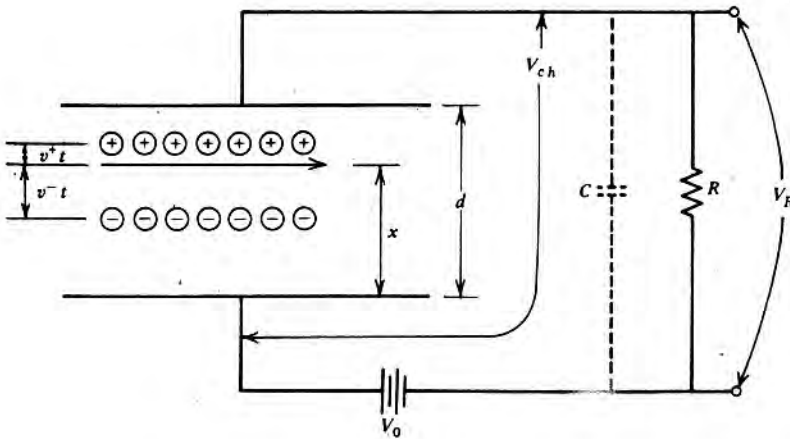
RC grande ($> ms$)

- tutti gli ioni vengono raccolti
- il rivelatore puo' funzionare solo ad un rate molto basso

RC piccola ($\approx \mu s$)

- L'ampiezza dell' impulso dipende solo dalla deriva degli elettroni (tempi di salita e discesa più rapidi). Segnale più basso
- Il rivelatore puo' funzionare ad un rate più alto

SVILUPPO DEL SEGNALE



CONSERVAZIONE DELL' ENERGIA

$$\frac{1}{2} CV_0^2 = \underbrace{n_0 e E v^+ t}_Q + \underbrace{n_0 e E v^- t}_{\Delta\Phi = Ex} + \frac{1}{2} CV_{ch}^2$$

Energia iniziale =
energia assorbita dagli
ioni + energia assorbita
dagli elettroni + energia
rimanente

$$\frac{1}{2} C(V_0 + V_{ch}) \cdot (V_0 - V_{ch}) = n_0 e \left(\frac{V_{ch}}{d} \right) \cdot (v^+ - v^-) \cdot t$$

$\nearrow \approx 2V_0$ $\nearrow V_R$ $\nwarrow V_0/d$

$$\text{per } V_R \ll V_0 \Rightarrow V_R = \left(\frac{n_0 e}{dC} \right) \cdot (v^+ - v^-) \cdot t$$

⇒ La porzione iniziale del segnale ha una salita lineare

L'INDUZIONE

Un percorso di deriva pari a v^+t genera una caduta di potenziale nella camera pari a

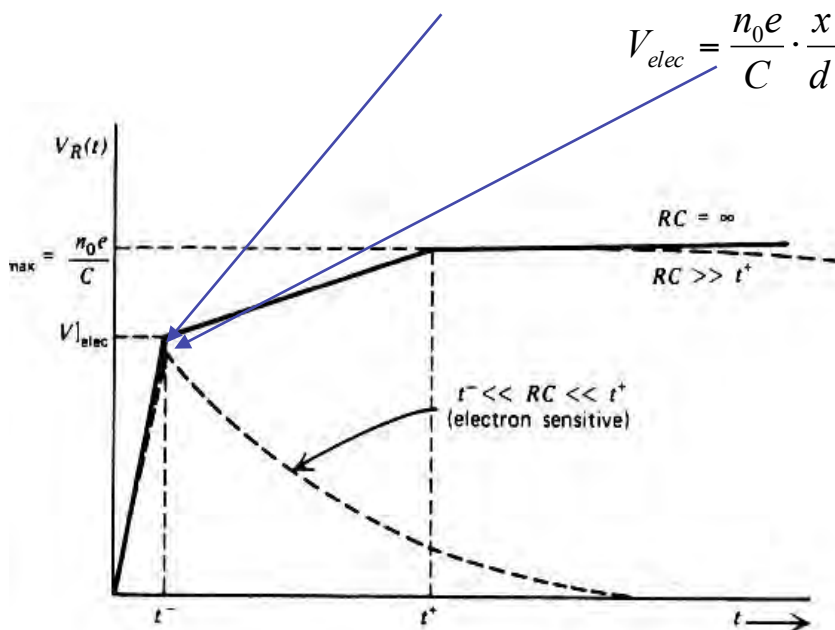
$$\Delta\Phi = \frac{n_0 e}{dC} v^+ t$$

Stesso effetto si avrebbe riducendo la carica immagazzinata in una capacità C di una quantità

$$\Delta Q = \frac{n_0 e}{d} v^+ t$$

⇒ si può immaginare che il moto ionico induca una carica $n_0 e v^+ t / d$

Ampiezza impulso funzione della posizione (x) in cui sono stati generati gli elettroni



Elettroni raggiungono anodo dopo tempo $t^- = x/v^-$
ioni raggiungono catodo dopo un tempo $t^+ = (d-x)/v^+$

Una volta raccolti tutti gli e^- e tutti gli ioni:

$$V_R = \frac{n_0 e}{dC} [(d-x) + x] = \frac{n_0 e}{C} = V_{\max}$$

LE CAMERE PROPORZIONALI

Camera a ionizzazione in regime pulsato: impulsi troppo piccoli

Es: calcolo di ΔV_{\max} generata da 1MeV

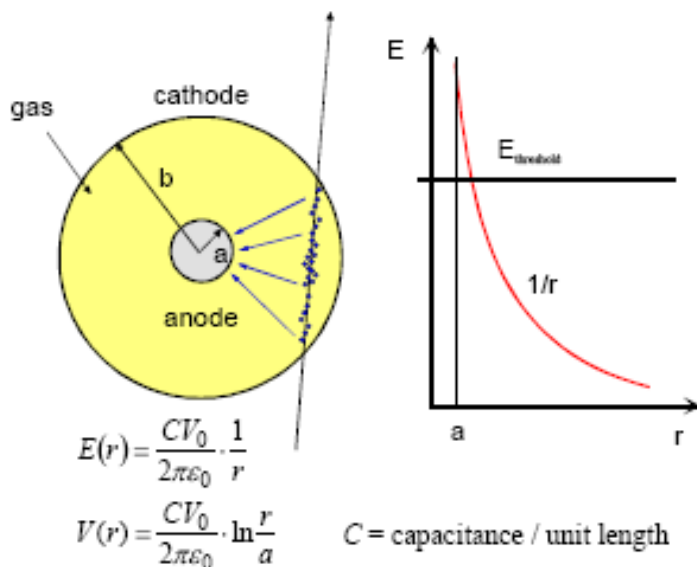
$$V_{\max} = \frac{n_0 e}{C}; n_0 = \frac{10^6 \text{ eV}}{35 \text{ eV} / \text{coppia}} = 2.86 \times 10^4$$

$$\Rightarrow \text{assumendo } C = 100 \text{ pF} \Rightarrow V_{\max} = \frac{(2.86 \times 10^4) \cdot (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})}{100 \text{ pF}} \approx 46 \mu\text{V}$$

Dobbiamo aumentare il n. di coppie prodotte: **ionizzazione secondaria**

Geometria cilindrica:

vicino all' anodo gli e- avranno sufficiente energia per ionizzare a loro volta

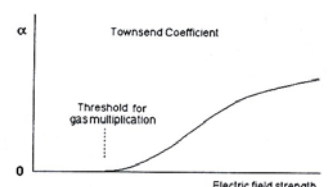


Il valore di soglia del campo elettrico per avere ionizzazione secondaria alla pressione atmosferica è dell'ordine di 10^6 V/m

Aumento esponenziale del n. di coppie prodotte

$$n(x) = n(0)e^{\alpha x}$$

Coeff. di Townsend



PROBLEMI CONNESSI CON LE CAMERE PROP.

Scelta del gas:

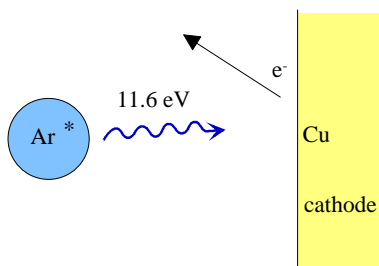
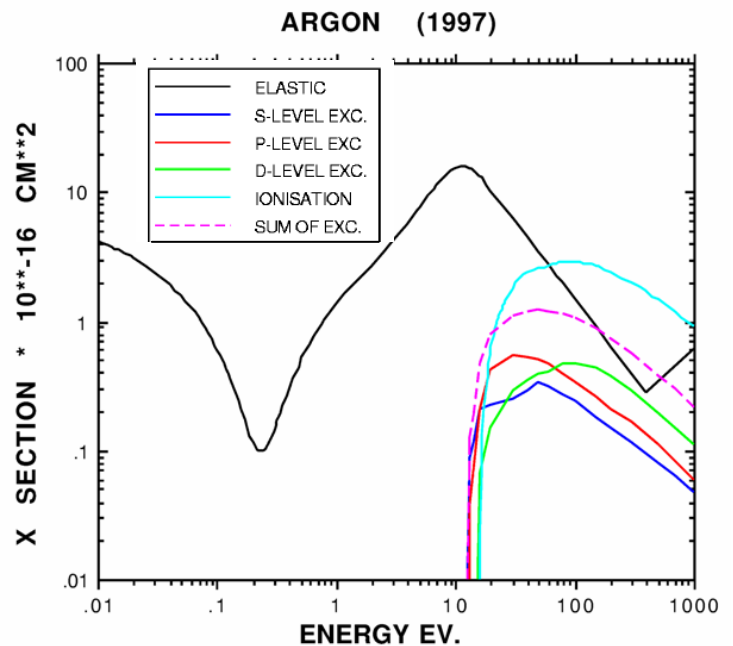
Gas nobili densi.

Dissipazione di energia principalmente per ionizzazione.
Ionizzazione specifica alta

Diseccitazione dei gas nobili

possibile solo per emissione di fotoni
(ad es. fotoni da 11.6 eV per l'Argon)

Superiore alla soglia di ionizzazione dei metalli (ad es. per il Cu 7.7 eV)



nuove valanghe

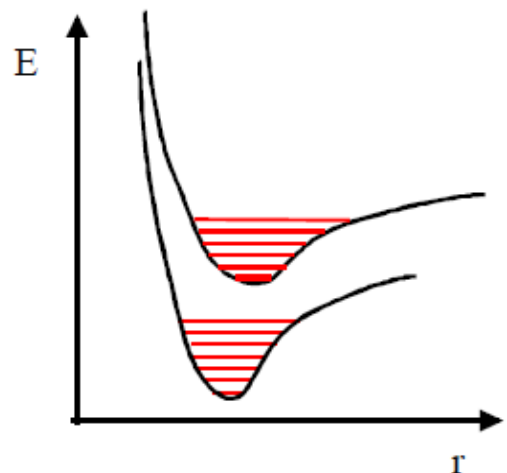
scariche continue

Soluzione:

Aggiunta di gas poliatomici come quenchanti (spegnitori)

Assorbimento di fotoni su una banda larga di energie (tanti livelli energetici vibrazionali e rotazionali)

Dissipazione di energia per collisione o dissociazione in molecole più piccole



Metano: banda d'assorbimento 7.9 - 14.5 eV

PROBLEMI CONNESSI CON LE CAMERE PROP.

Effetti di carica spaziale

$$\left(\frac{\sigma_Q}{Q}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{n_0}}{n_0}\right)^2 + \frac{1}{n_0} \left(\frac{\sigma_A}{\bar{A}}\right)^2$$

Contributo dovuto alla fluttuazione
del numero di primari

$$\frac{F}{n_0} \leftarrow 0.05-0.2$$

Contributo dovuto alla fluttuazione
del fattore di moltiplicazione per
singolo elettrone

$$\bar{A} \geq 100$$

Campi elettrici bassi

Campi elettrici
elevati (Polya)

$$P(A) \approx \frac{e^{-A/\bar{A}}}{\bar{A}} \Rightarrow \left(\frac{\sigma_A}{\bar{A}}\right)^2 = 1$$

$$P(A) = \left(\frac{A(1+\vartheta)}{\bar{A}}\right)^\vartheta \exp\left(-\frac{A(1+\vartheta)}{\bar{A}}\right)$$

$$\left(\frac{\sigma_A}{\bar{A}}\right)^2 = \frac{1}{\bar{A}} + b$$

$$b = (1 + \vartheta^2)^{-1} \cong 0.5$$

$0 < \theta < 1$ (parametro
dipendente dalla frazione
di elettroni con $E > E_{ion}$)

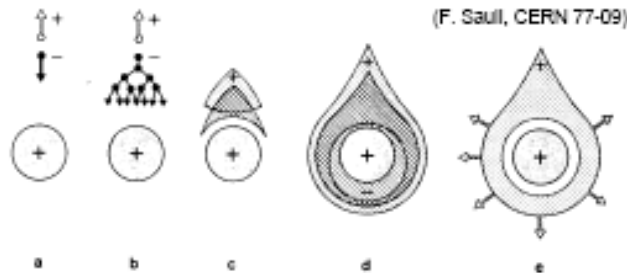
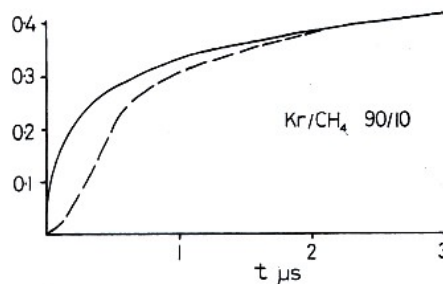
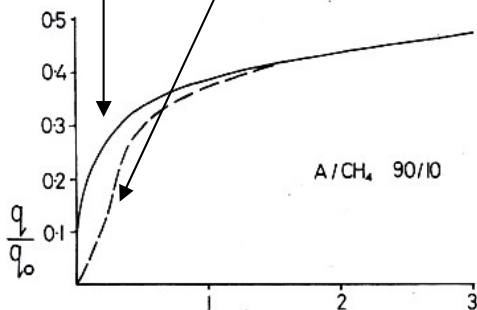
SVILUPPO DEL SEGNALE

Rispetto alle camere a ionizzazione :

- ✓ \approx tutte le cariche si originano nella regione di moltiplicazione
 - ☞ Tempo di deriva e tempo di moltiplicazione
 - ☞ Contributo induzione ioni primari trascurabile.
 - ☞ Tempo di deriva \gg tempo di moltiplicazione (in genere)
- ✓ moltiplicazione a pochi raggi dal filo
 - ☞ segnale di uscita generato da moto ioni positivi.
 - ☞ Inizialmente ioni positivi si muovono in campo elevato \rightarrow moto rapido \rightarrow parte rapida del segnale
 - ☞ Successivamente zona a raggio più grande \rightarrow moto lento \rightarrow parte lenta del segnale

Ionizzazione a distanza fissa
(tempo di drift costante)

Condizione di ionizzazione estesa




SVILUPPO DEL SEGNALE

Come si e' dimostrato, il segnale e' prevalentemente dovuto al **moto degli ioni** dal filo anodico verso il catodo

La **velocita' di deriva** varia con la posizione radiale

$$v^+(r) = \frac{\mu \mathcal{E}(r)}{p} = \frac{\mu}{p} \frac{V_0}{\ln(b/a)} \frac{1}{r} \quad \text{da cui} \quad r(t) = \sqrt{\left(2 \frac{\mu}{p} \frac{V_0}{\ln(b/a)} t + a^2 \right)}$$

Quindi: $t^+ = \frac{(b^2 - a^2)p \ln(b/a)}{2\mu V_0}$  Per raccogliere tutti gli ioni sono necessarie diverse centinaia di μsec

Per fortuna **il grosso del segnale si sviluppa subito**, come si puo' vedere andando ad estrarre il profilo temporale del segnale dalle seguenti relazioni:

$$\frac{dE}{dr} = Q\mathcal{E}(r) = Q \frac{V_0}{r \ln(b/a)} \quad E^+(t) = \frac{QV_0}{\ln(b/a)} \int_a^{r(t)} \frac{dr}{r} = \frac{QV_0}{\ln(b/a)} \ln \frac{r(t)}{a} \quad \text{da cui:}$$

$$V_R(t) = \frac{E^+(t)}{CV_0} = \frac{Q}{C \ln(b/a)} \ln \left(\frac{2\mu V_0}{a^2 p \ln(b/a)} t + 1 \right)^{1/2}$$
$$\Rightarrow t|_{\text{mezza ampiezza}} = \frac{a}{a+b} t^+$$
$$\Rightarrow r(t|_{\text{mezza ampiezza}}) = \sqrt{ab}$$
$$\Rightarrow \mathcal{E}(t|_{\text{mezza ampiezza}}) = \frac{1}{\sqrt{a/b}} \mathcal{E}(a)$$

Es.

Dato $a=25 \mu\text{m}$ e $b=1 \text{ cm} \Rightarrow$ metà ampiezza del segnale è raggiunta dopo lo 0.25% del tempo di deriva (una frazione di μs) e gli ioni si sono mossi di $\approx 480 \mu\text{m}$ dalla superficie del filo

Quanto detto è valido se la ionizz. avviene ad un raggio fisso. Se si considera una traccia si ha un ulteriore spread generato dal tempo di drift degli elettroni.

SVILUPPO DEL SEGNALE

In pratica la condizione $RC > \text{tempo raccolta ioni}$ non si verifica mai per i contatori proporzionali



L'ampiezza dell'impulso dipende quindi dalla formatura del segnale di uscita (**deficit balistico**)

Deficit balistico : parte del segnale perso a causa della formatura. L'effetto è peggiorato dalla distribuzione radiale della ionizzazione

INOLTRE : il contributo degli elettroni al segnale generato è trascurabile

metà del segnale viene generato a meno di un libero cammino medio dall'anodo

Energia assorbita dal moto delle cariche

$$\begin{aligned} E^+ &= \frac{QV^0}{\ln(b/a)} \ln\left(\frac{b}{a+\rho}\right) \\ E^- &= \frac{QV^0}{\ln(b/a)} \ln\left(\frac{a+\rho}{a}\right) \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \frac{E^-}{E^+} = \frac{\ln\left(\frac{a+\rho}{a}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a+\rho}\right)}$$

Es. dati $a = 25\mu$, $b = 1\text{cm}$ ed assumendo $\rho = 3\mu \Rightarrow E^-/E^+ \approx 0,02$
 \Rightarrow il contributo del moto degli elettroni al segnale è del 2%

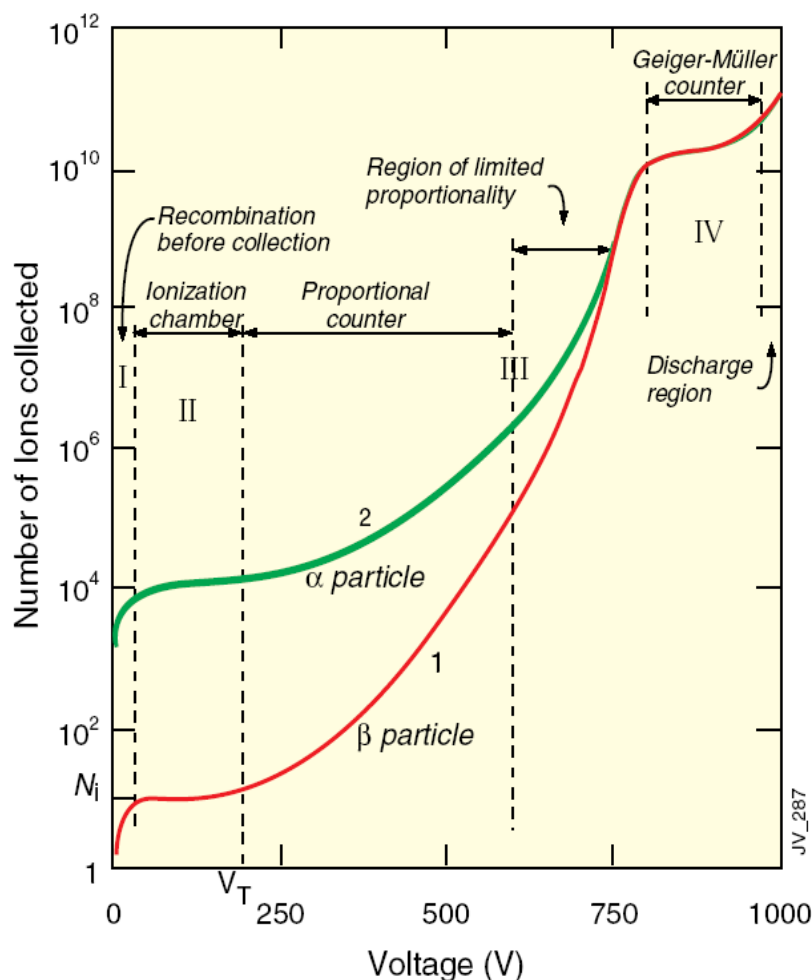
Regioni di funzionamento di un rivelatore a gas

Regione di funzionamento delle Camere a Ionizzazione

- Raccolta completa delle cariche, ma senza moltiplicazione
- $G = 1$

Regione di funzionamento delle Camere Proporzionali

- Inizia la moltiplicazione delle cariche.
- Il segnale rivelato resta proporzionale alla ionizzazione primaria
- Possibile una misura di dE/dx
- Le valanghe secondarie vanno "quenched" (spente)
- $G = 10^4 - 10^5$



Regione a proporzionalità limitata (saturazione, streamer)

- Forte fotoemissione, valanghe secondarie sovrapposte alla valanga originale
- Necessita di forti "quenchers" o alimentazione HV pulsata
- Grandi segnali, elettronica di lettura semplice
- $G = 10^{10}$

Regione di funzionamento dei Geiger

- Fotoemissione massiccia, tutto l'anodo è interessato
- Scarica fermata tramite disconnessione dell' HV
- Richiesti comunque forti "quenchers"