

Introduzione ai rivelatori di particelle

Parte 4 ionizzazione e deriva nei gas

Introduzione ai rivelatori di particelle

ionizzazione

- Meccanismi di ionizzazione nei gas
 - Ionizzazione **primaria**
 - la particella carica che attraversa il gas ne estrae un elettrone
 - Ionizzazione **secondaria**
 - l'elettrone estratto è sufficientemente energetico da produrre successive ionizzazioni in atomi adiacenti
 - Effetto **Penning**
 - l'atomo viene eccitato, ma in uno stato metastabile. La diseccitazione avviene per urto con un atomo vicino, con emissione di un elettrone
 - Meccanismo attivo soprattutto nelle miscele gas nobili
- Non tutta l'energia ceduta dalla particella va in ionizzazione
 - parte va in eccitazione
 - si calcola un potenziale di ionizzazione efficace (W) che misura l'energia persa dalla particella per ogni ione formato
 - sostanzialmente maggiore del potenziale di ionizzazione
 - abbastanza indipendente dal gas

	H ₂	He	Ar	CH ₄
pot. ion. (eV)	15.4	24.6	15.8	13.1
W (eV)	36.6	41.3	26.4	27.3
dE/dx (keV/cm)	0.34	0.32	2.44	1.48

- per ex, in un cm di argon si producono circa 100 coppie elettrone-ione (con una MIP di carica unitaria)

Introduzione ai rivelatori di particelle

statistica della ionizzazione

- **Numero di coppie e-ione è statistico**

- probabilità di produrre n coppie se la media è μ

$$P(\mu, n) = \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu}$$

$$\sigma = \sqrt{F\mu} < \sqrt{\mu}$$

- la varianza della distribuzione è inferiore a quella attesa
 - deposito di energia limitato, code ad alta energia possono sfuggire dal rivelatore
- fattore di Fano (F)
 - non ben misurato, dell'ordine di 0.2

- **Meccanismi che riducono il numero di cariche**

- ricombinazione: $X^+ + e^- > X + h\nu$
 - dipende dalla concentrazione delle cariche
- cattura degli elettroni
 - $X^+ + e^- + Y > X^+ + Y^- + h\nu$
 - ad opera di gas elettronegativi (O^2 , Freon)
 - molto rilevante perché può ridurre sensibilmente il numero di elettroni raccolti

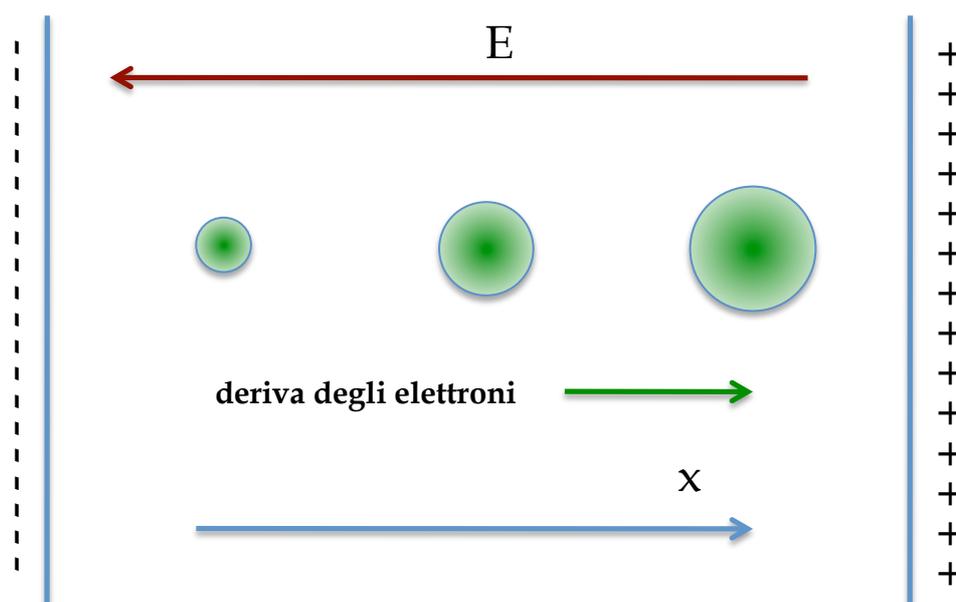
Introduzione ai rivelatori di particelle

introduzione alle problematiche

- **Meccanismi di raccolta della carica**
 - campo elettrico che genera una deriva di elettroni e ioni fino agli elettrodi
 - rilevanti i fenomeni di deriva (drift) e diffusione di elettroni e ioni nei gas
- **Il segnale nativo è piccolo**
 - $100 e = 1.6 \times 10^{-2} \text{ fC}$
 - è necessaria un'amplificazione
 - con un campo elettrico sufficientemente alto, gli elettroni accelerano abbastanza da ionizzare altre molecole
 - ionizzazione a valanga
 - amplificazione del segnale
- Numerosi tipi di rivelatore, con varie geometrie del campo elettrico e varie miscele di gas
 - contatori Geiger
 - camere proporzionali a fili
 - camere a deriva, TPC
 - tubi a streamer limitato (LST)
 - resistive plate chambers (RPC)
- **Serve comprensione dei meccanismi di base**
 - diffusione e deriva nei gas
 - anche in presenza di campo magnetico
 - amplificazione a valanga
 - formazione dell'impulso
 - meccanismi di "quenched" (limitazione della valanga in una zona limitata)

Introduzione ai rivelatori di particelle

trasporto di elettroni e ioni nei gas



- gli elettroni e gli ioni derivano nel campo elettrico, e diffondono termalizzandosi con il gas

- velocità termiche (Maxwell)

$$v_T = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

- molto maggiori per gli elettroni ($1/\sqrt{m}$)
- $\approx 10^7$ cm/s per gli elettroni, 10^5 cm/s per gli ioni

Introduzione ai rivelatori di particelle

diffusione

- probabilità di trovare dN particelle tra x e $x+dx$
 - N_0 numero iniziale di cariche
 - x distanza dal punto iniziale

$$\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

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

- gaussiana che si allarga nel tempo
 - cresce con la radice del tempo (della distanza percorsa se c'è trasporto in un campo elettrico)
 - D = coefficiente di diffusione
- il coefficiente di diffusione si ricava dalla teoria cinetica

$$D \approx \frac{v_T \lambda}{3} \quad \lambda \text{ cammino libero medio}$$

- il cammino libero medio si può mettere in relazione alla densità degli atomi ed alla sezione d'urto per collisione

$$\lambda \approx \frac{V}{N\sigma}$$

$$\frac{N}{V} = \frac{N_A}{\text{vol.mol.}} = 2.7 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ STP}$$

σ = sezione d'urto per collisioni

Introduzione ai rivelatori di particelle

diffusione

- per un gas ideale

$$pV = n_{mol}RT = Nk_B T \rightarrow \frac{V}{N} = \frac{k_B T}{p}$$

$$\lambda \approx \frac{V}{N\sigma} \approx \frac{k_B T}{p\sigma}$$

- dalle relazioni precedenti si può scrivere il coefficiente di diffusione come:

$$v_T = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad \lambda \approx \frac{k_B T}{p\sigma}, \quad D = \frac{1}{3} v_T \lambda$$

$$D = \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{\pi} p \sigma} \sqrt{\frac{(kT)^3}{m}}$$

- D è inversamente proporzionale alla pressione del gas
 - cresce come $T^{3/2}$
- Nel caso ci sia un campo elettrico che trasporta le cariche, bisogna distinguere la diffusione longitudinale (nella direzione della deriva) dalla diffusione trasversale

Introduzione ai rivelatori di particelle

deriva in campo elettrico

- **moto ordinato lungo il campo elettrico sovrapposto al moto termico disordinato**

- $v_D = \mu E$ (μ = mobilità)
 - dato il campo elettrico, la velocità di deriva è costante
 - tipico di moto con urti casuali con le molecole
- per gli ioni

$$v_D = \mu E = \text{const} \cdot \frac{E}{p} \left(\Rightarrow \mu \propto \frac{1}{p} \right)$$

- la velocità scala con E/p (campo elettrico ridotto), quindi aumenta al diminuire della pressione
- la mobilità è legata alla diffusione

$$D/\mu \propto k_B T / e$$

gas (STP)	λ [cm]	D [cm ² /s]	μ [cm/s / V/cm]
H ₂	1.8 10 ⁻⁵	0.34	13.0
He	2.8 10 ⁻⁵	0.26	10.2
Ar	1 10 ⁻⁵	0.04	1.7
O ₂	1 10 ⁻⁵	0.06	2.2

- per ex, in Ar a STP, con $E = 1 \text{ kV/cm}$ si ha
 - $v_D = 1.7 \times 1000 = 1.7 \text{ cm/ms}$

Introduzione ai rivelatori di particelle

relazione D- μ

- Ipotesi:
 - ogni urto rende casuale la velocità ($v_T \gg v_D$)
 - dopo ogni urto in media $v_D=0$
 - v_D è la velocità guadagnata dallo ione in un cammino libero medio accelerando nel campo E
 - λ è il cammino libero medio, τ il tempo medio tra due urti

$$v_D = \frac{eE}{2m} \cdot \tau \quad (\text{valor medio tra iniziale e finale})$$

$$\lambda = v_T \tau \rightarrow \tau = \frac{\lambda}{v_T}$$

$$D \approx \frac{1}{3} v_T \lambda \rightarrow \lambda \approx \frac{3D}{v_T}$$

$$v_D = \frac{eE}{2m} \cdot \tau = \frac{eE}{2m} \cdot \frac{\lambda}{v_T} = \frac{eE}{2m} \cdot \frac{3D}{v_T^2} = \mu E$$

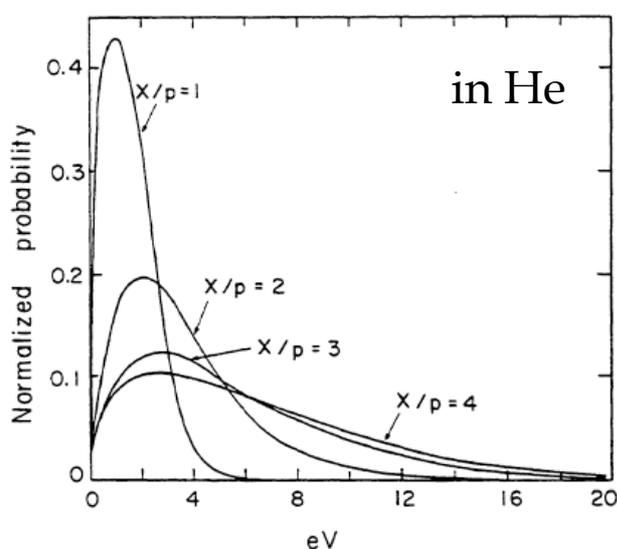
$$v_T \propto \sqrt{kT}$$

$$\Rightarrow D \propto \mu \frac{kT}{q}$$

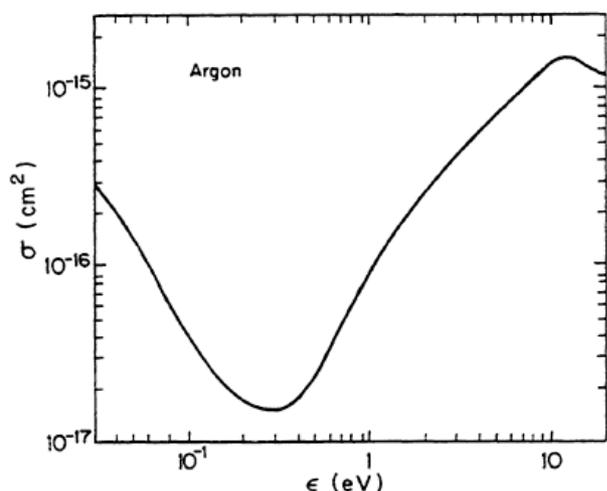
Introduzione ai rivelatori di particelle

deriva di elettroni

- per gli elettroni la mobilità è molto più grande
 - possono raggiungere energie più grandi tra ciascun urto
 - l'energia può raggiungere valori analoghi e superiori a quella termica
 - $kT \approx 0.025\text{eV}$
- la sezione d'urto e-molecola varia molto al variare dell'energia (effetto Ramsauer-Townsend)
 - $\lambda = h/p$ lunghezza d'onda dell'elettrone si avvicina alle dimensioni molecolare



- distribuzione delle energie degli elettroni per vari campi di drift ridotti
 - $X/p=1$ significa 1kV/cm a STP

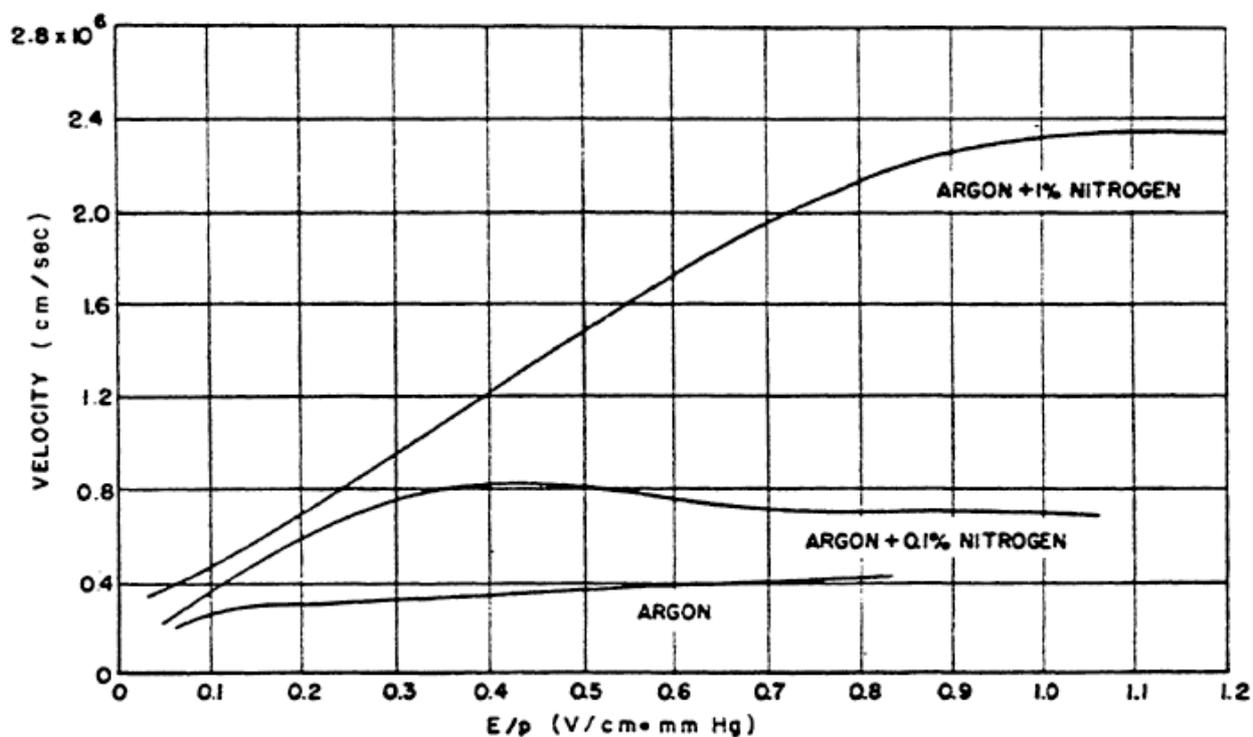


- effetto Ramsauer nella sezione d'urto degli elettroni in Ar, in funzione dell'energia dell'elettrone

Introduzione ai rivelatori di particelle

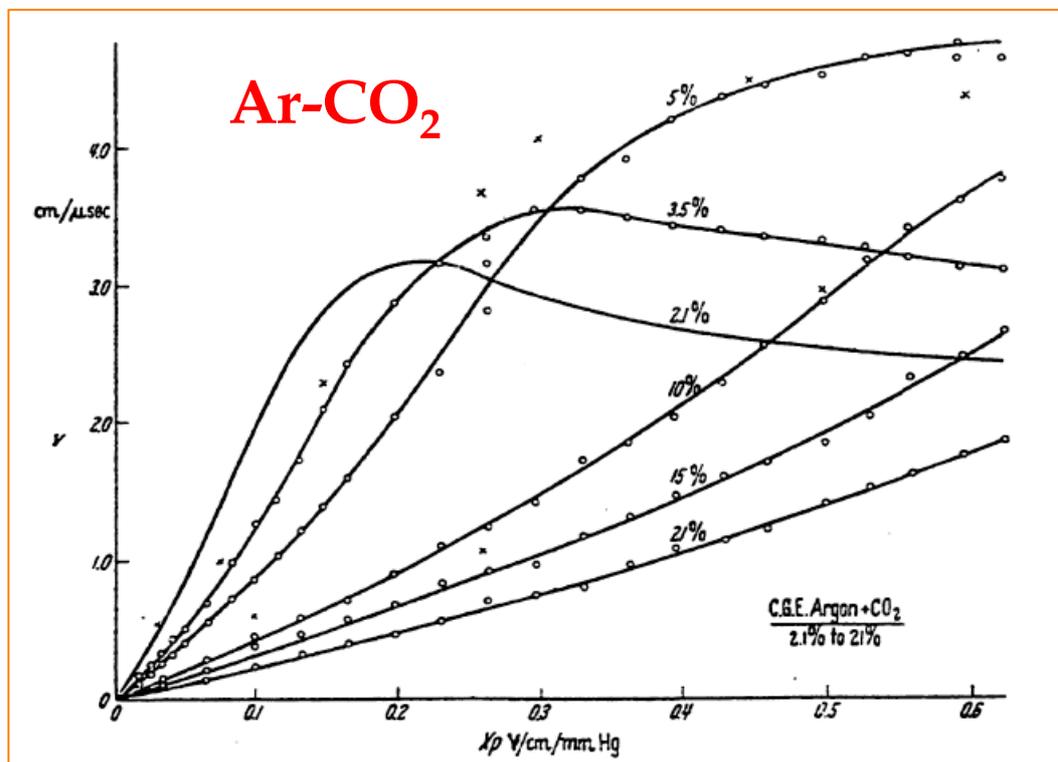
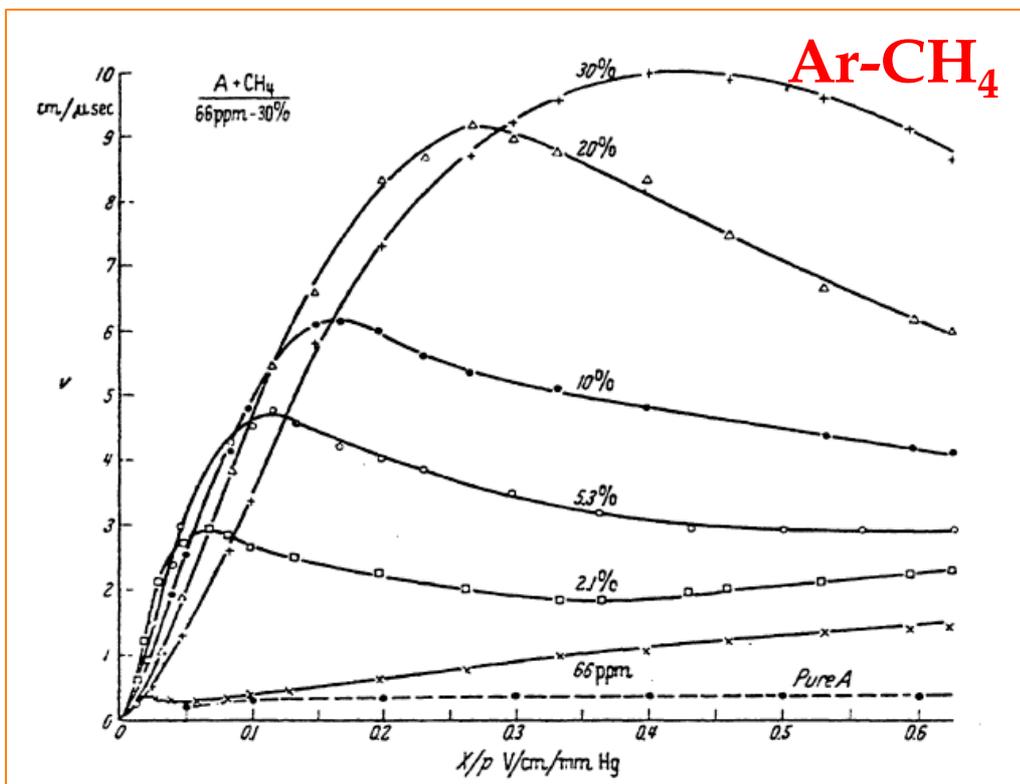
deriva di elettroni

- la mobilità varia molto al variare del gas (variano le sezioni d'urto)
 - piccole variazioni di miscela possono far variare sensibilmente le velocità di drift degli elettroni



Introduzione ai rivelatori di particelle

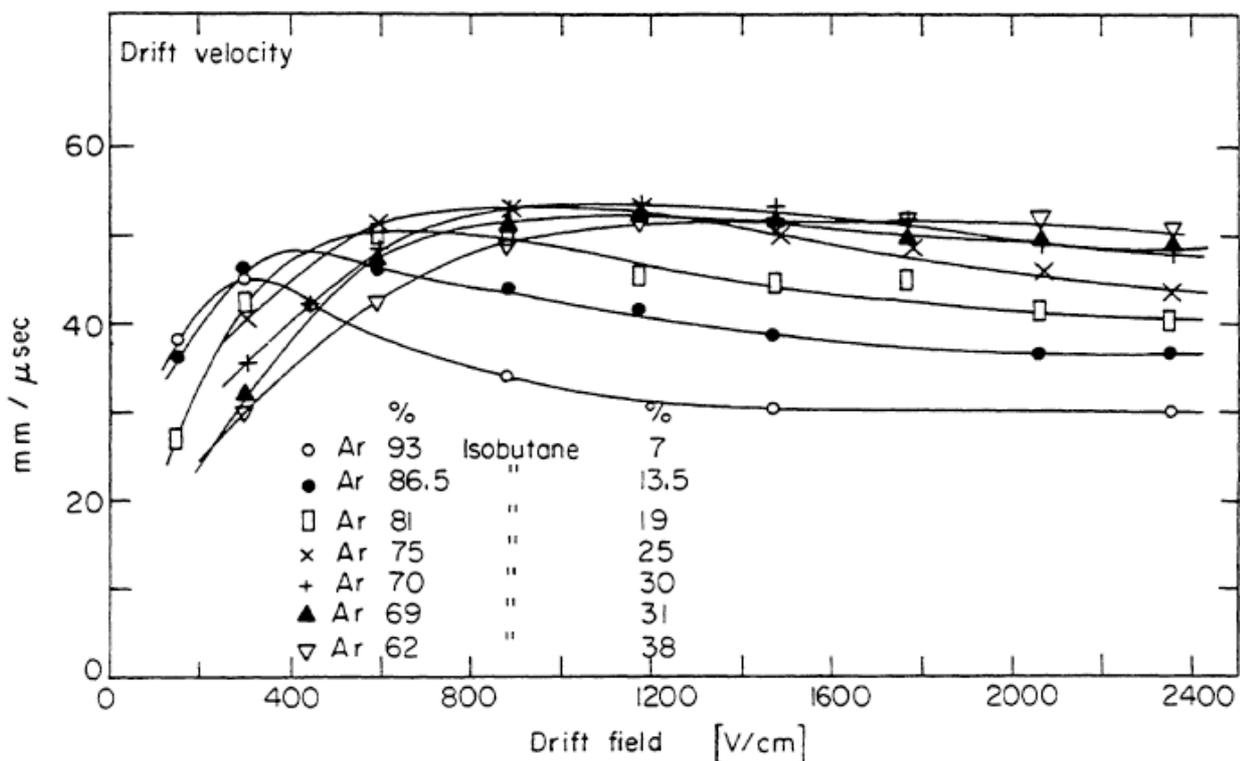
deriva di elettroni



Introduzione ai rivelatori di particelle

deriva di elettroni

- Con alcune miscele, la velocità di deriva satura a campi elettrici alti
 - valori tipici $5 \text{ cm} / \mu\text{s}$ ($50 \mu\text{ m} / \text{ns}$, 200ns per cm)
- Molto utile se si vuole mantenere una velocità costante in condizioni di campo non perfettamente uniforme)



Introduzione ai rivelatori di particelle

v_D per gli elettroni

- Esiste una teoria che stima le velocità di deriva di elettroni nei gas

- $F(\varepsilon)$ = distribuzione di energia degli elettroni in campo elettrico

$$F(\varepsilon) = C\sqrt{\varepsilon} \left(-\int \frac{3\Lambda(\varepsilon)\varepsilon d\varepsilon}{(eE\lambda(\varepsilon))^2 + 3\varepsilon kT\Lambda(\varepsilon)} \right)$$

$$\lambda(\varepsilon) = \frac{1}{N\sigma(\varepsilon)} \text{ cammino libero medio}$$

$$\Lambda(\varepsilon) = \text{inelasticità}$$

- N = numero di molecole per unità di volume, e l'inelasticità è la frazione di energia persa in ogni urto

- Se le sezioni d'urto sono note, dalle distribuzioni di energia si possono calcolare la velocità ed i coefficienti di diffusione

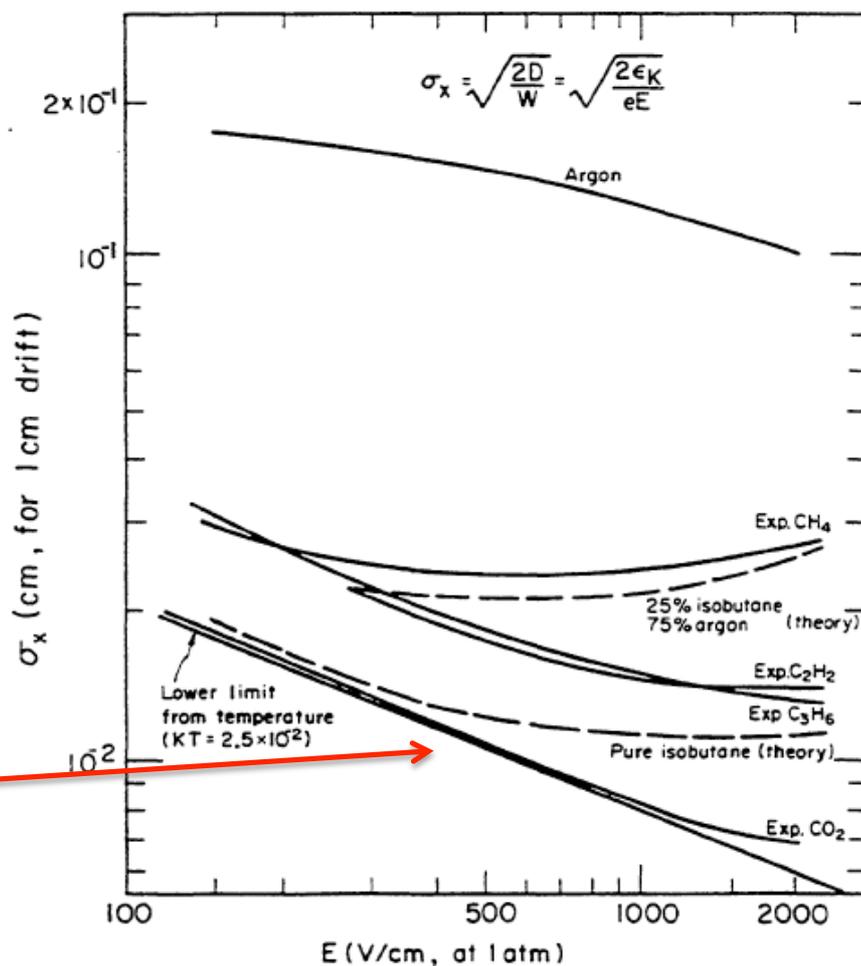
$$v_D(E) = -\frac{2}{3} \frac{eE}{m} \int \varepsilon \lambda(\varepsilon) \frac{\partial \left[\frac{F(\varepsilon)}{\sqrt{2\varepsilon/m}} \right]}{\partial \varepsilon} d\varepsilon$$
$$D(E) = \int \frac{1}{3} \sqrt{2\varepsilon/m} \cdot \lambda(\varepsilon) F(\varepsilon) d\varepsilon$$

Introduzione ai rivelatori di particelle

diffusione di elettroni durante il drift

- **Diffusione di elettroni dipende dal campo di drift**

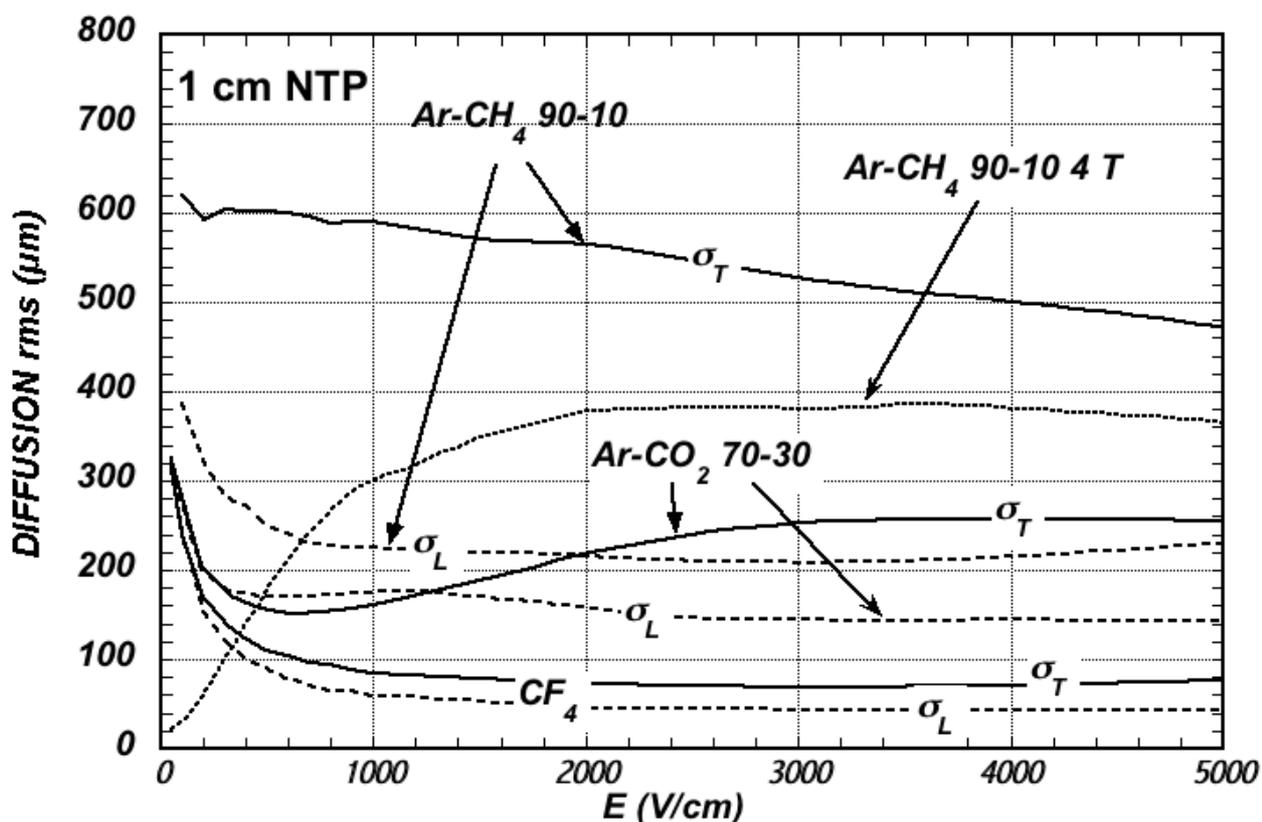
- diffusione longitudinale (nella direzione del drift) e trasversa differenti
- effetti diversi a seconda della mobilità



limite
termico

Introduzione ai rivelatori di particelle

v_D e diffusione



- diffusione di elettroni (longitudinale e trasversale) in varie miscele per un cm di drift, al variare del campo elettrico
- a seconda del tipo di rivelatore, la diffusione longitudinale e/o trasversale possono influenzare la risoluzione
 - per ex, se misuro la posizione dal tempo di deriva, ho fluttuazioni dovute alla diffusione longitudinale (che è un effetto statistico)

Introduzione ai rivelatori di particelle

effetto di B sulla deriva degli elettroni

- **moto di una carica in campo magnetico**
 - nel piano ortogonale a B, moto circolare con pulsazione $\omega = eB/m$
- nel caso di elettroni in un gas, l'equazione del moto (Langevin) è

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{e}{\mu} \vec{v} - e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) + \vec{\eta}(t)$$

- somma di un attrito viscoso, una forza dovuta ai campi ed un termine stocastico (moto Browniano)
- la soluzione per velocità di deriva costante è:

$$\vec{v}_D = -\frac{\mu}{1 + \omega^2 \tau^2} \left[\vec{E} + \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B} \omega \tau + \frac{\vec{E} \cdot \vec{B}}{B^2} \vec{B} \omega^2 \tau^2 \right]$$

- dove τ è il tempo medio tra due collisioni
- analizzare separatamente i casi con B parallelo ed ortogonale ad E

Introduzione ai rivelatori di particelle

effetto di B sulla deriva degli elettroni

- se \vec{E} è perpendicolare a \vec{B}

$$\vec{v}_D = -\frac{\mu}{1 + \omega^2 \tau^2} \left[\vec{E} + \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B} \omega \tau + \frac{\vec{E} \cdot \vec{B}}{B^2} \vec{B} \omega^2 \tau^2 \right]$$

$$v_{D\perp} = \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \mu E$$

$$v_{D\parallel} = \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \mu E$$

$$v_D = \sqrt{v_{D\parallel}^2 + v_{D\perp}^2} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \mu E$$

$$\text{tg} \alpha = \frac{v_{D\perp}}{v_{D\parallel}} = \omega \tau$$

- il valore della velocità viene modificato e l'elettrone deriva ad un angolo rispetto al campo elettrico

- **angolo di Lorentz**
- si può correlare τ con μ e si ottiene

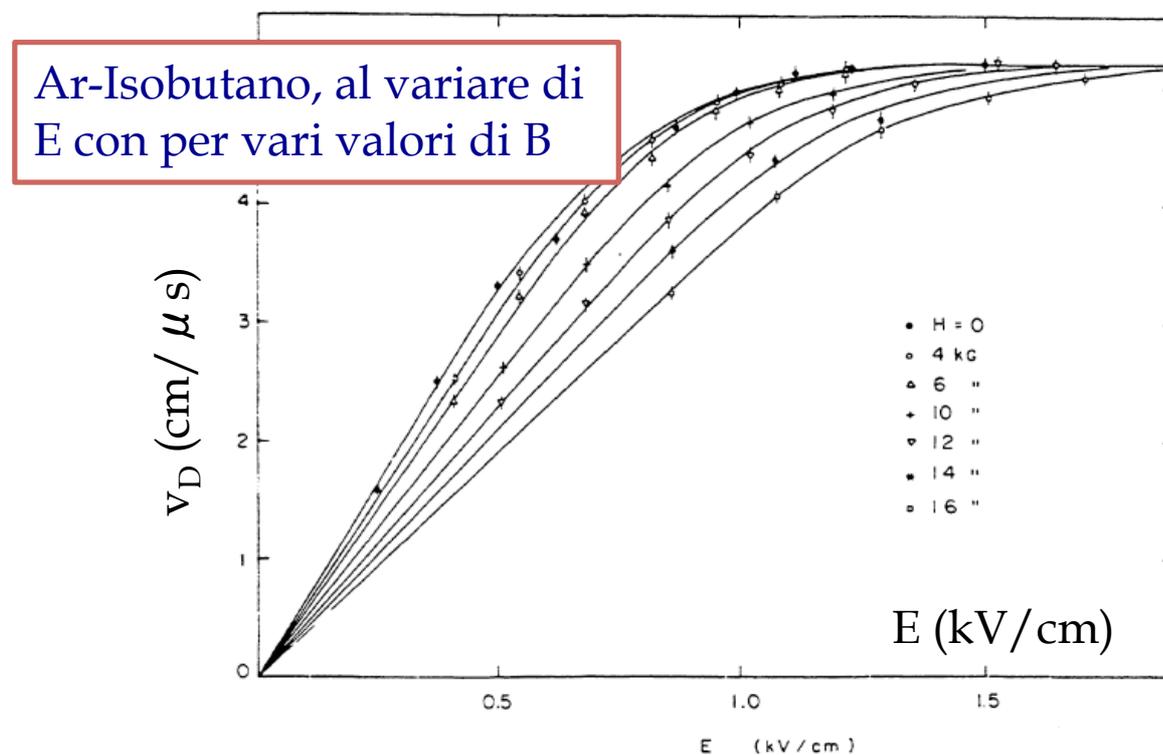
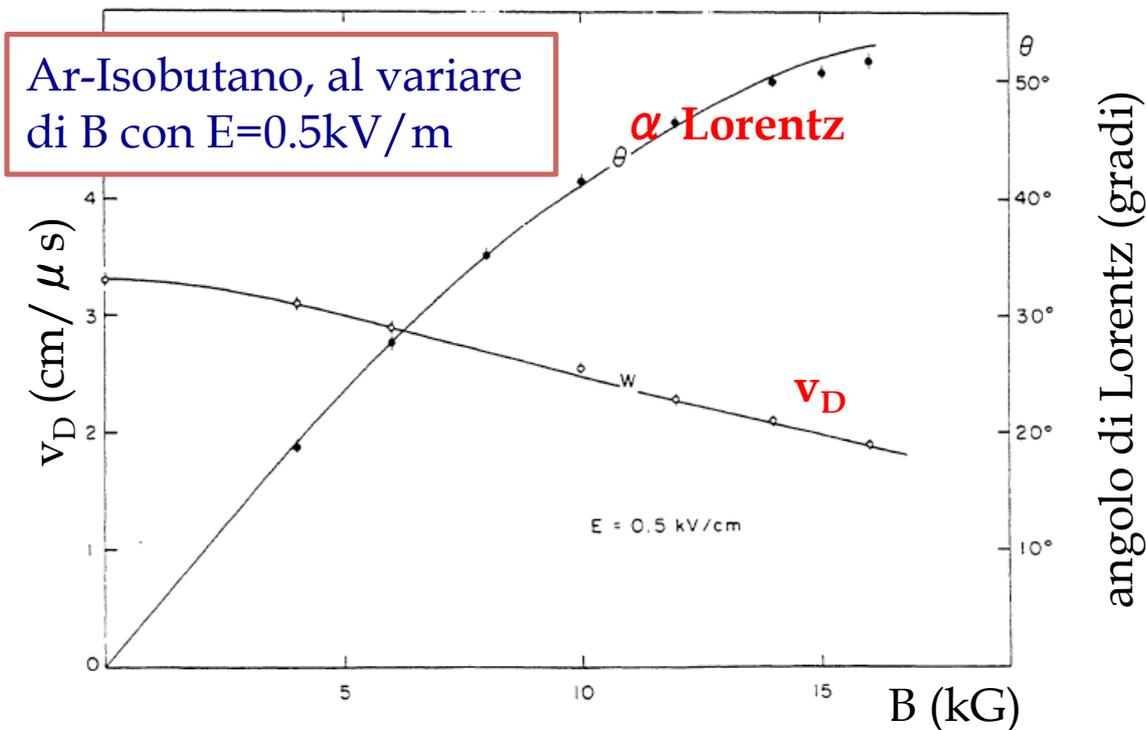
$$v_D \approx \frac{eE}{2m} \tau = \mu E \rightarrow \mu \approx \frac{e}{2m} \tau$$

$$\omega \tau \approx \frac{eB}{m} \cdot \frac{2m}{e} \mu \approx 2\mu B$$

$$\text{tg} \alpha = \frac{v_{D\perp}}{v_{D\parallel}} = \omega \tau \approx 2\mu B \quad \text{e} \quad v_D \approx \frac{1}{\sqrt{1 + 4\mu^2 B^2}} \mu E$$

Introduzione ai rivelatori di particelle

effetto del campo magnetico perpendicolare



Introduzione ai rivelatori di particelle

effetto di B sulla deriva degli elettroni

- se \vec{E} è parallelo a \vec{B}

$$\vec{v}_D = -\frac{\mu}{1 + \omega^2 \tau^2} \left[\vec{E} + \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B} \omega \tau + \frac{\vec{E} \cdot \vec{B}}{B^2} \vec{B} \omega^2 \tau^2 \right]$$

$$v_{D\parallel} = \frac{\mu}{1 + \omega^2 \tau^2} (E + 0 + \omega^2 \tau^2 E) = \frac{\mu E}{1 + \omega^2 \tau^2} (1 + \omega^2 \tau^2) = \mu E$$

- Il valore della velocità di deriva non è modificato

- C'è però un effetto importante sulla diffusione trasversale

- nel moto gli elettroni si avvitano attorno al campo magnetico, e la diffusione trasversale viene ridotta (confinamento)

D_{\parallel} rimane invariato

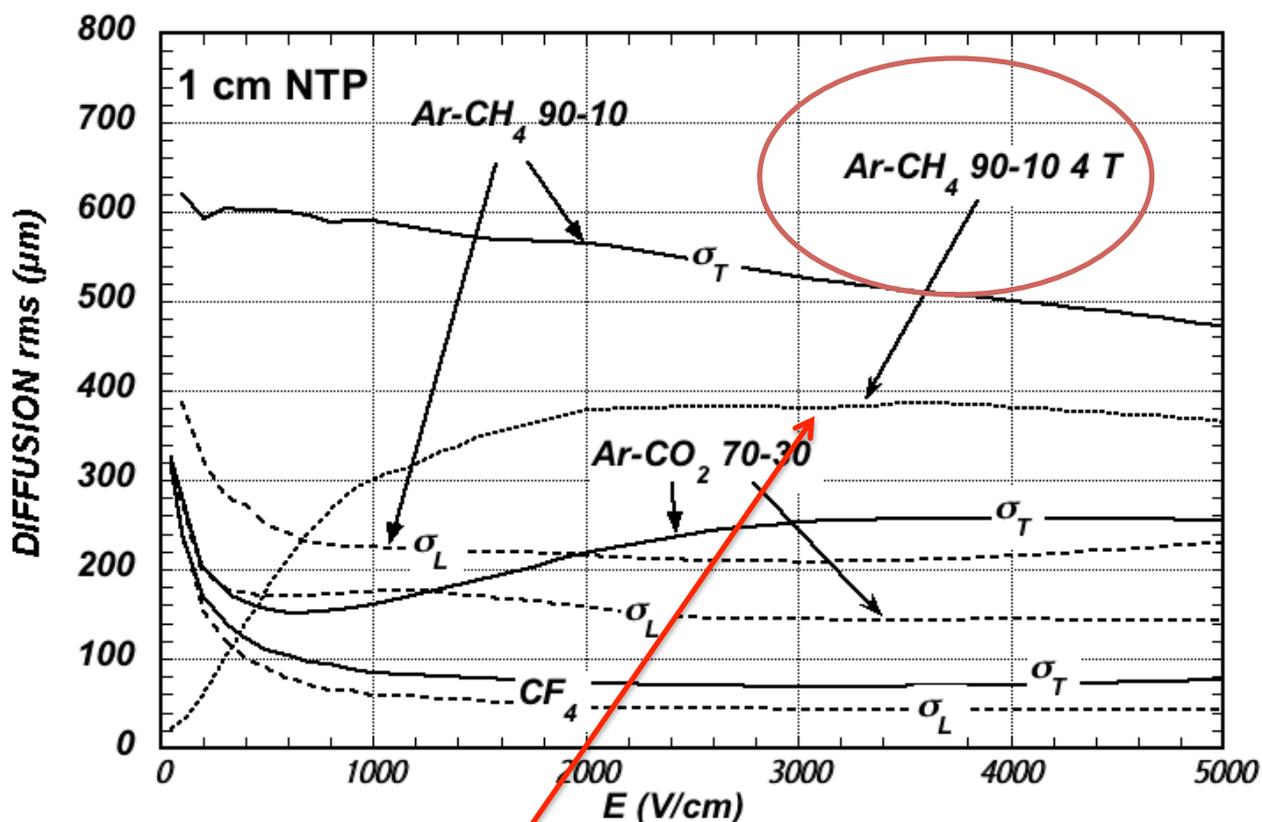
$$D_{\perp} = \frac{D_{\perp}(0)}{1 + \omega^2 \tau^2} \approx \frac{D_{\perp}(0)}{1 + 4\mu^2 B^2}$$

$$\sigma_{\perp}^2(t) = 2D_{\perp} t$$

- NB, confrontando la diffusione con e senza B si può misurare $\omega \tau$ e quindi τ

Introduzione ai rivelatori di particelle

effetto di B sulla deriva degli elettroni



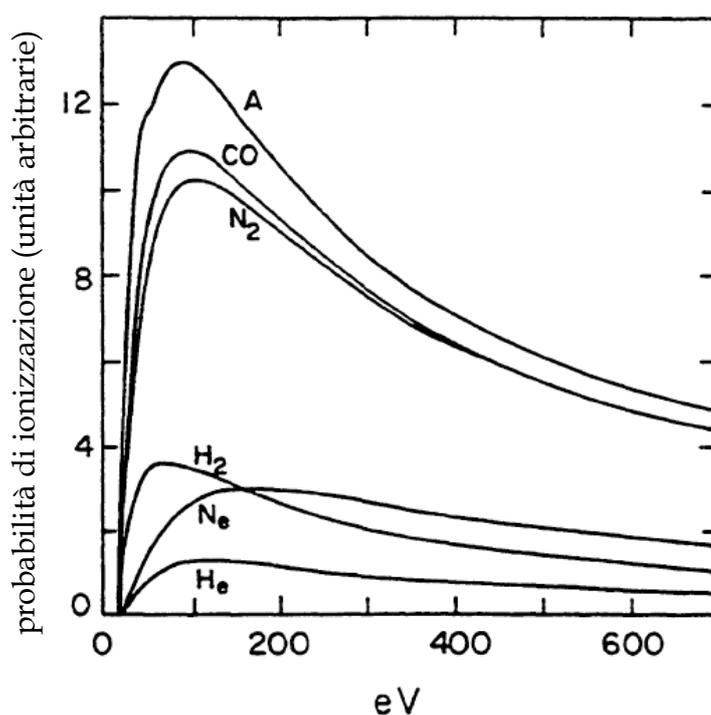
con 4T di campo B parallelo ad E la diffusione trasversale in Ar-CH₄ è notevolmente ridotta

Introduzione ai rivelatori di particelle

ionizzazione a valanga

- **Ulteriori ionizzazioni prodotte dagli elettroni**

- Quando l'energia degli elettroni supera la soglia di prima ionizzazione, si possono produrre ioni secondari
- la probabilità di produrre ioni cresce rapidamente fino a circa 100eV di energia dell'elettrone

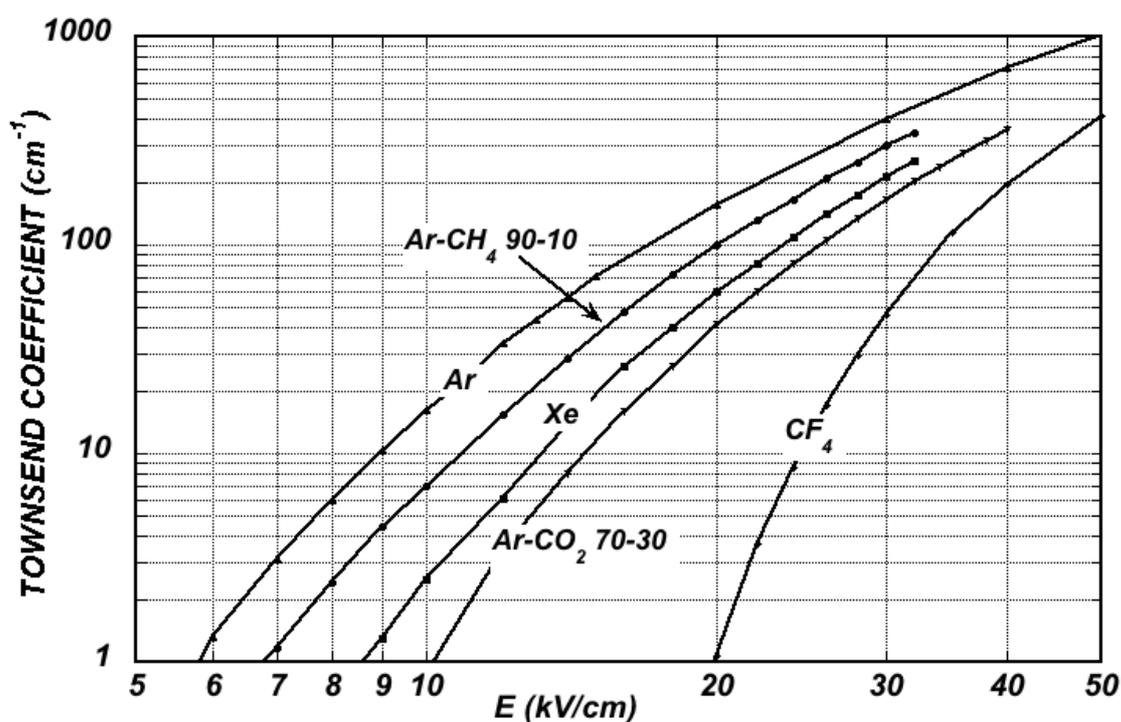


- la probabilità varia molto a seconda del gas
 - massima nei gas nobili
 - le molecole complesse hanno altri modi di assorbire energia (eccitazioni vibrazionali)

Introduzione ai rivelatori di particelle

ionizzazione a valanga

- Ulteriori ionizzazioni prodotte dagli elettroni
 - λ_I è il cammino libero medio per ionizzazione (spazio che percorre un elettrone in media prima di ionizzare un atomo del gas)
 - $\alpha = 1/\lambda_I$ s chiama “primo coefficiente di Townsend” e rappresenta il numero di ionizzazioni per unità di lunghezza



Introduzione ai rivelatori di particelle

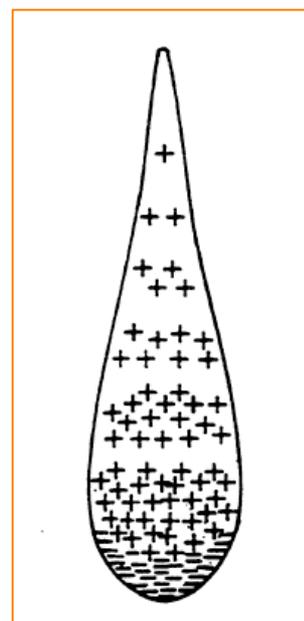
ionizzazione a valanga

- Effetto valanga: se E è sufficientemente grande:
 - Ogni elettrone prodotto da una ionizzazione secondaria viene accelerato dal campo di drift e raggiunge rapidamente un'energia sufficiente a ionizzare ulteriormente
 - ogni λ_1 il numero di elettroni raddoppia
 - la velocità degli ioni è molto piccola rispetto a quella degli elettroni, quindi la valanga generata dagli elettroni si lascia dietro una nuvola di ioni sostanzialmente ferma rispetto agli elettroni
 - si definisce un fattore di moltiplicazione M
 - se ci sono n elettroni:

$$dn = n\alpha dx$$

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

$$M = e^{\int_{x_1}^{x_2} \alpha(x) dx} \quad \text{se } E \text{ varia}$$



Introduzione ai rivelatori di particelle

ionizzazione a valanga

- **Limiti della moltiplicazione**

- La carica generata produce effetti di carica spaziale, che distorce il campo elettrico
- vengono emessi fotoni dagli atomi eccitati, che possono indurre ionizzazioni e valanghe secondarie in altre zone del gas
- alla fine, si ottiene una scarica generalizzata nel gas (breakdown)
- in genere c'è un limite al guadagno possibile (condizione di Raether)

$$\alpha x \approx 20 \rightarrow M \approx 10^8$$

- da notare che al crescere dello spessore del rivelatore, il limite si raggiunge a valori inferiori di α e quindi di campo elettrico
 - rivelatori sottili scaricano meno a parità di campo elettrico
- vedremo quali sono le possibili scelte del gas e della struttura dei rivelatori che permettono di lavorare a guadagno alti senza scariche generalizzate

Introduzione ai rivelatori di particelle

sommario parte 4

- **drift degli ioni**

$$v^+ = \mu^+ E = \text{const} \cdot \frac{E}{p}$$

- per esempio in Ar con 1kV/cm $v_D \approx 2\text{cm/ms}$ da confrontare con 10^2cm/ms di v_T

- **drift degli elettroni**

$$v^- = \mu^- E \quad \text{con} \quad \mu^- = \mu^-(E)$$

$$v^- = \frac{eE}{2m} \tau \approx \frac{eE}{2m} \frac{\lambda}{v_T}$$

- per gli elettroni la velocità di deriva (e quindi il coefficiente di mobilità μ^-) è molto più grande
 - (valore tipico $5\text{cm}/\mu\text{s}$ paragonabile alla velocità termica)

- **la diffusione è legata alla mobilità**

$$\sigma_D = \sqrt{2Dt} \quad \text{con} \quad D \propto \mu \frac{kT}{q}$$

- per gli elettroni bisogna distinguere la diffusione trasversale e longitudinale perché la velocità di deriva non è trascurabile rispetto a quella termica

- **effetti di un campo magnetico:**

- se parallelo ad E, riduce la diffusione trasversale

$$\sigma_T(B) = \frac{\sigma_T(0)}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

- se ortogonale ad E modifica la velocità di drift e l'angolo

$$v_D^-(B) = \frac{v_D^-(0)}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad \text{e} \quad \text{tg} \alpha = \frac{v_{D\perp}}{v_{D\parallel}} = \omega \tau$$

- **con campi elettrici intensi si ottiene una moltiplicazione a valanga delle coppie ione elettrone**