



UNIVERSITÀ
degli STUDI
di CATANIA

Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
"Ettore Majorana"



LABORATORIO DI FISICA III

A CURA DI J. BUTCHERS

ANNO 2024

Indice

1	Arduino	9
2	Sorgenti di radiazione	11
2.1	Tipi di radiazione	11
2.1.1	Radiazioni ionizzanti	11
2.1.2	Sorgenti di radiazioni naturali	12
2.1.3	Sorgenti di radiazioni artificiali	12
2.1.4	Radiazioni cariche	12
2.1.5	Radiazioni neutre	12
2.1.6	Radiazione cosmica secondaria	13
2.2	Energia e potere penetrante	13
2.2.1	Range energia di interesse	13
2.2.2	Capacità penetrazione radiazioni	13
2.3	Nuclei instabili	14
2.4	Legge del decadimento radioattivo	15
2.4.1	Excursus: la datazione al carbonio ^{14}C	17
2.5	Isotopi radioattivi β	17
2.6	Isotopi radioattivi α	20
2.7	Isotopi radioattivi γ	21
2.8	Sorgenti di fissione	23
2.9	Radiazione cosmica	23
2.10	Unità di misura e nomenclatura	24
2.10.1	Attività di una sorgente	24
2.10.2	Concetto di dose	25
2.10.3	Concetto di dose equivalente	25
2.10.4	Dosi tipiche	25
3	Perdita di energia per particelle cariche pesanti	27
3.1	Principali meccanismi	27
3.1.1	Interazione coulombiana (inelastica) con gli elettroni atomici . .	27
3.1.2	Interazione (elastica) con i nuclei	28
3.2	Relazione di Bethe-Bloch	29
3.2.1	Perdita di energia per composti	32
3.2.2	Picco di Bragg	33
3.3	Fluttuazioni statistiche nella perdita di energia	34
3.3.1	Range di una particella	34
3.3.2	Il channeling	38

3.3.3	Come calcolare il range di una particella	38
3.4	Radiazione Cherenkov	39
3.5	Possibili esercizi	40
4	Perdita di energia per elettroni	43
4.1	Interazione degli elettroni con la materia	43
4.1.1	Contributo collisionale	45
4.1.2	Contributo radiativo	45
4.1.3	Energia critica	46
4.1.4	Riepilogo	48
4.2	Range degli elettroni	48
4.3	Assorbimento degli elettroni	49
4.4	Backscattering	50
4.5	Scattering multiplo	52
4.5.1	Lunghezza di radiazione	55
4.5.2	Distribuzione angolare di scattering	56
4.5.3	Conseguenze dello scattering multiplo	56
4.5.4	Tomografia muonica	57
5	Interazione dei γ con la materia	59
5.1	Meccanismi di interazione dei fotoni	59
5.1.1	Sezione d'urto di interazione	61
5.1.2	Coefficiente di assorbimento	62
5.1.3	Effetto fotoelettrico	64
5.1.4	Effetto Compton	65
5.1.5	Creazione di coppie	67
5.1.6	Sommario	68
5.2	Sciame elettromagnetici	68
5.2.1	Struttura di uno sciame elettromagnetico (toy model)	69
5.2.2	Profondità di uno sciame e.m.	70
5.2.3	Numero di particelle in uno sciame e.m.	72
5.2.4	Sviluppo longitudinale di uno sciame e.m.	73
5.2.5	Sviluppo laterale di uno sciame e.m.	74
6	Proprietà generali dei rivelatori	77
6.1	Che cos'è un rivelatore	77
6.2	Modi di operazione	78
6.2.1	Informazioni dai segnali	80
6.3	Analisi delle ampiezze	81
6.3.1	Calibrazione di uno spettro	84
6.3.2	Risoluzione in energia	86
6.4	Efficienza di un rivelatore	90
6.4.1	Efficienza intrinseca di rivelazione	90
6.4.2	Accettanza geometrica	91
6.4.3	Efficienza complessiva	93
6.5	Tempo di risposta	94
6.6	Tempo morto	95

6.6.1	Modelli per il comportamento del tempo morto	95
6.6.2	Correzioni per il tempo morto	96
6.6.3	Come stimare il tempo morto?	99
6.7	Funzioni di un rivelatore	100
6.7.1	Misura dell'energia	100
6.7.2	Misura dell'impulso	101
6.7.3	Misura della carica/massa	101
7	Rivelatori a gas	103
7.1	Principio di funzionamento	103
7.2	Ionizzazione	104
7.2.1	Meccanismi di ionizzazione	104
7.2.2	W-values	105
7.2.3	Fluttuazioni e risoluzione	108
7.3	Fenomeni di trasporto nei gas	109
7.3.1	Diffusione	109
7.3.2	Ricombinazione	111
7.3.3	Migrazione	112
7.4	Struttura base di un rivelatore a gas	114
7.4.1	Formazione dell'impulso	114
7.4.2	Il problema della posizione	117
7.5	La moltiplicazione	122
7.5.1	Moltiplicazione a valanga	122
7.5.2	Sviluppo della valanga	123
7.6	Regimi di lavoro dei rivelatori a gas	123
7.7	Geometrie dei rivelatori a gas	125
7.7.1	Geometria piana	125
7.7.2	La geometrica cilindrica	126
7.7.3	Il contatore Geiger	127
7.8	Rivelatori a gas moderni	129
7.8.1	MWPC (Multiwire Proportional Chambers)	129
7.8.2	Drift Chambers	133
7.8.3	TPC (Time Projection Chambers)	134
7.8.4	MRPC (Multigap Resistive Plate Chambers)	136
8	Scintillatori	139
8.1	Caratteristiche di uno scintillatore	139
8.1.1	Proprietà ideali di uno scintillatore	141
8.1.2	Tipologie di scintillatori	142
8.2	La luminescenza	142
8.2.1	Cause di luminescenza	142
8.2.2	Il processo di scintillazione	143
8.3	Scintillatori organici	144
8.3.1	Processo di scintillazione negli scintillatori organici	144
8.3.2	Emissione e assorbimento	146
8.4	Scintillatori inorganici	147
8.4.1	Meccanismo di scintillazione nei cristalli inorganici	147

8.4.2	Vantaggi degli scintillatori inorganici rispetto a quelli inorganici	149
8.5	Risposta in luce	151
8.5.1	Relazione di Birks	152
8.5.2	Risposta temporale	153
8.6	La raccolta della luce	153
8.6.1	Un esercizio di simulazione	155
8.6.2	Guide di luce	157
8.6.3	Fibre WLS	158
8.7	Rivelatori basati su scintillatori	160
8.7.1	Un esempio di applicazione: la PET	160
9	Fotosensori	163
9.1	Fotomoltiplicatori	163
9.1.1	Schema di funzionamento	163
9.1.2	Fotocatodo	164
9.1.3	Elettrodi di focalizzazione	166
9.1.4	Emissione secondaria e processo di moltiplicazione	167
9.1.5	Configurazione dinodi	168
9.1.6	Alimentazione	169
9.1.7	Guadagno VS tensione	170
9.1.8	Risposta temporale	171
9.1.9	Schermo magnetico	171
9.1.10	Il rumore (noise)	172
9.1.11	Forma e dimensioni	173
9.2	Avalanche PhotoDiodes (APD)	174
9.2.1	Principio di funzionamento	174
9.2.2	Parametri operativi	175
9.3	Silicon PhotoMultipliers (SiPM)	176
9.3.1	Principio di funzionamento	177
9.3.2	Vantaggi e svantaggi	177
9.3.3	Analisi del segnale	177
9.3.4	Photon Detection Efficiency (PDE)	179
9.3.5	Possibili strutture	180
9.3.6	Possibili applicazioni	181
9.3.7	Confronto tra fotosensori	181
9.4	L'occhio umano	181
10	Rivelatori a semiconduttore	183
10.1	Semiconduttori puri	183
10.1.1	Vantaggi e svantaggi	183
10.1.2	Banda di valenza e banda di conduzione	185
10.1.3	Creazione di coppie	186
10.1.4	Mobilità	187
10.1.5	Ricombinazione e trapping	188
10.2	Semiconduttori drogati	189
10.2.1	Semiconduttori di tipo n	190
10.2.2	Semiconduttori di tipo p	190

10.2.3	Concentrazione di elettroni e lacune	191
10.2.4	Semiconduttori di tipo p+, p-, i (compensati)	192
10.2.5	Giunzioni n-p	192
10.3	Rivelatori a semiconduttore	196
10.3.1	Rivelatori a diffusione	197
10.3.2	Rivelatori a barriera superficiale (SSB)	197
10.3.3	Ion-Implanted Diodes	199
10.3.4	Rivelatori a deriva di litio Si(Li)	199
10.3.5	Realizzazione contatti	200
10.4	Caratteristiche dei rivelatori a semiconduttore	200
10.4.1	Linearità	200
10.4.2	Risoluzione in energia	201
10.4.3	Sensibilità ed efficienza intrinseca	203
10.4.4	Densità	203
10.4.5	Tempo di risposta	204
10.4.6	Danneggiamento da radiazione	204
10.5	Tipologie moderne di rivelatori al silicio	205
10.5.1	Rivelatori a strip	205
10.5.2	Rivelatori a drift	207
10.5.3	CCD (Charged-Coupled-Device)	207
10.5.4	Rivelatori a pixel	208

Capitolo 1

Arduino

Carusi non ho tempo poi la faccio sta parte.

Capitolo 2

Sorgenti di radiazione

Gran parte del corso è dedicata allo studio dei diversi tipi di rivelatore, e per capire come funziona un rivelatore bisogna innanzitutto capire come la radiazione che vogliamo andare a rivelare interagisce con la materia, in quanto i rivelatori sfruttano proprio tali meccanismi di interazione per estrarre le informazioni utili per l'utente.

Cominceremo con una breve introduzione sui tipi di radiazione.

2.1 Tipi di radiazione

2.1.1 Radiazioni ionizzanti

Per ionizzante intendiamo qualcosa che riesce a innescare un fenomeno di ionizzazione nella materia, cioè riesce a creare una coppia ione-elettrone, quindi si strappa un elettrone all'atomo inizialmente neutro e si crea tale coppia. Tale fenomeno è detto *ionizzazione*. Quando parliamo di radiazioni ionizzanti, intendiamo delle radiazioni che hanno energia tale da produrre effetto di ionizzazione o di un atomo o di una molecola. Esse possono essere di origine corpuscolare o elettromagnetica. In particolare sono:

- Particelle subatomiche, quali elettroni e protoni. I neutroni sono un po' un caso a parte perché possono produrre effetti di ionizzazione attraverso altri meccanismi, ad esempio a seguito dell'interazione producono particelle cariche. Oltre a queste esiste uno zoo di particelle che, sebbene non esista in natura, può essere prodotto attraverso reazioni o collisioni; tra queste vi è il muone, che rappresenta una radiazione naturale in quanto è una parte della componente secondaria dei raggi cosmici.

In generale quindi tutte le particelle cariche subatomiche, purché abbiano energia sufficiente per farlo, sono in grado di ionizzare la materia;

- Radiazioni elettromagnetiche con energia sufficiente. Infatti, lo spettro delle onde elettromagnetiche è molto vasto e si caratterizza in base alla frequenza dell'onda, da cui dipende l'energia della radiazione e quindi la capacità di ionizzare (ricordiamo che per ionizzare un atomo o una molecola è necessaria un'energia minima di ionizzazione, per cui ad esempio la luce visibile o le onde radio non riescono, mentre X, γ sì).

2.1.2 Sorgenti di radiazioni naturali

- Materiali emettitori naturali (ad esempio il Radon);
- Sorgenti radioattive (ad esempio isotopi radioattivi);
- Radiazione cosmica, che proviene dal cosmo, perché prodotta da sorgenti di origine astrofisica. In particolar modo noi non siamo sottoposti alla radiazione prodotte da tali sorgenti (che prende il nome di radiazione primaria), bensì alla radiazione secondaria, in quanto quella primaria quando incontra le molecole dell'atmosfera terrestre interagisce, producendo degli sciami di particelle secondarie. L'atmosfera dunque agisce da filtro, proteggendoci dalla radiazione primaria

Noi conviviamo con il livello di radiazione proveniente sia dagli isotopi naturali presenti nei materiali da costruzione, negli alimenti ecc. che dalla radiazione cosmica. Il nostro organismo si è quindi sviluppato in maniera tale da poter tollerare un certo livello di radiazione senza sviluppare dei danni di tipo biologico.

2.1.3 Sorgenti di radiazioni artificiali

- Macchine acceleratrici per scopi o diagnostici (TAC, PET) con cui veniamo sottoposti a radiazioni prodotte da tali macchine, o terapeutici come la radioterapia con cui si è soggetti a radiazioni prodotte da isotopi iniettati nell'organismo;
- Acceleratori di particelle, cioè strumenti in grado di generare fasci di particelle che possiedono una determinata energia.

2.1.4 Radiazioni cariche

Si tratta di particelle dotate di carica, che si distinguono in

- Particelle cariche pesanti (protoni, alfa, ioni pesanti);
- Elettroni.

Tale distinzione viene fatta perché i meccanismi con cui le particelle cariche pesanti interagiscono con la materia sono diversi da quelli con cui interagiscono gli elettroni. Ricordiamo che la massa elettrone è pari a 0.511 MeV mentre la massa del protone è dell'ordine del GeV , dunque tra i due c'è un fattore $2 \cdot 10^3$.

2.1.5 Radiazioni neutre

Associate a particelle neutre o a radiazione elettromagnetica:

- Radiazione elettromagnetica (noi ci interesseremo di X e γ);
- Neutroni, ma non ci occuperemo molto di questi perché i loro meccanismi di interazione possono dar luogo a processi nucleari e formazione di particelle cariche, quindi producono ionizzazione attraverso meccanismi secondari.

2.1.6 Radiazione cosmica secondaria

Essa è una radiazione innescata dall'interazione dei cosmici primari con l'atmosfera. Sono costituiti principalmente da:

- Muoni, il "cugino pesante dell'elettrone". È una particella elementare come l'elettrone, ma con una massa di 200 volte circa quella dell'elettrone e può avere carica sia positiva che negativa (μ^+ e μ^-). Sono una particella molto penetrante, cioè riesce ad attraversare i vari strati dell'atmosfera giungendo fino al livello del mare (se ha energia sufficiente), costituendo la maggior parte delle radiazioni cosmiche secondarie. Hanno una vita media di pochi microsecondi, tuttavia riusciamo ad osservarle a terra per effetti relativistici (dilatazione del tempo). È difficile schermarsi dai muoni, per cui bisogna ricordarsi che un qualunque rivelatore li misurerà, quindi per esperimenti in cui essi rappresentano un rumore di fondo (perché interessati ad altri fenomeni) si lavora in caverne (ad esempio il laboratorio nazionale del Gran Sasso).
- Elettroni.

2.2 Energia e potere penetrante

2.2.1 Range energia di interesse

- Sorgenti radioattive: da pochi eV (quindi poco energetiche) a 10^7 eV($= 10\text{MeV}$);
- Radiazione cosmica secondaria: dal MeV al GeV. In questo caso le energie sono più alte perché in partenza i cosmici primari hanno delle energie notevoli (che non riusciamo a riprodurre con nessun acceleratore di particelle, tant'è che costituiscono l'accelerazione più grande che l'uomo abbia mai osservato) e di conseguenza anche i cosmici secondari.

2.2.2 Capacità penetrazione radiazioni

Indica quanto materiale le radiazioni riescono ad attraversare prima di essere arrestate. Si parla infatti di *potere penetrante*.

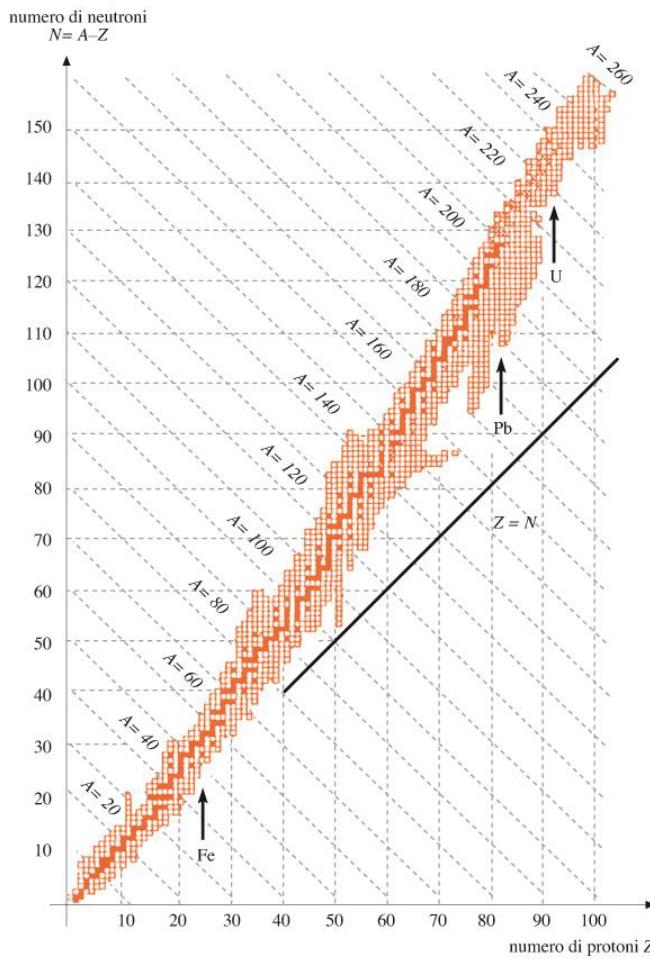
- Elettroni emessi da sorgenti radioattive (β): alcuni millimetri di materiale (hanno pochi MeV);
- Particelle α da sorgenti: qualche centinaio di μm di materiale solido, quindi rispetto alle particelle β hanno meno potere penetrante in quanto, essendo particelle più pesanti (ricordiamo che sono nuclei di elio), nell'attraversamento perdono più facilmente la loro energia, arrestandosi in pochissimo spazio. Ad esempio nell'aria percorrono qualche centimetro.

Sebbene ciò rappresenti un vantaggio dal punto di vista della radio-protezione, da quello della rivelazione delle particelle α rappresenta un problema perché rischiamo che i rivelatori non misurino niente in quanto le particelle vengono arrestate totalmente da pochi centimetri d'aria. Per questo motivo per tali radiazioni si adopera una camera da vuoto;

- Muoni cosmici: sono estremamente penetranti, per cui servono spessori anche di centinaia di metri per poter arrestare i muoni più energetici.

2.3 Nuclei instabili

Quando parliamo di sorgenti radioattive, intendiamo degli isotopi che decadono nel tempo, che sono quindi instabili, cioè cambiano la loro natura.



Nel seguente grafico è riportato il numero di protoni di un nucleo in ascisse ed il numero di neutroni in ordinate (rispettivamente Z è il numero di protoni ed $N = A - Z$ il numero di neutroni).

La linea retta rappresenta la bisettrice del grafico. Se un nucleo si trova all'interno di essa allora avrà numero di protoni uguale al numero di neutroni.

In natura gli isotopi tendono a disporsi secondo la distribuzione arancione; in particolare i punti più scuri rappresentano gli isotopi stabili, che non decadono nel tempo e quindi non cambiano natura. Si osserva che la stabilità all'inizio, per i nuclei più leggeri, viene assicurata quando il nucleo possiede ugual numero di protoni e di neutroni (pensiamo ad esempio al C^{12} , che ha 6 protoni e 6 neutroni). Ciò vale fino a $Z = 20$; quando invece il numero di protoni aumenta e quindi il nucleo diventa più pesante, la condizione

di stabilità si può avere solo quando il numero di neutroni è maggiore del numero di protoni. Il motivo è che, a causa della repulsione coulombiana tra i protoni che costituiscono il nucleo, è necessario un maggior numero di neutroni che fungono da "collante" grazie all'interazione forte.

Osservando il grafico notiamo che per ogni nucleo, cioè fissato un valore di Z , abbiamo, oltre al punto scuro, altri punti più chiari lungo la verticale che rappresentano tutti i possibili isotopi di un determinato nucleo al variare del numero di neutroni N . Ad esempio per l'idrogeno abbiamo il deuterio (due neutroni) e il trizio (tre neutroni), per il carbonio esiste il ^{13}C ed il ^{14}C . Il fatto che siano colorati più chiari indica che sono instabili, cioè tendono a cambiare la loro natura nel tempo.

L'ultimo isotopo stabile che si trova in natura è il piombo, che ha $Z = 82$; tutti gli isotopi più pesanti di esso sono instabili.

2.4 Legge del decadimento radioattivo

Tale legge è valida per tutti i decadimenti radioattivi. Essa ci dice che in un campione di N isotopi instabili, il numero medio di nuclei che decade in un intervallo infinitesimo di tempo dt è

$$dN = -\lambda N dt$$

Il numero infinitesimo dn dipenderà quindi

- Dal numero N di isotopi di partenza;
- Dall'intervallo infinitesimo dt considerato;
- Dalla costante λ detta *costante di decadimento*, che è caratteristica di ciascun isotopo. Essa esprime la probabilità che il nucleo decade, quindi più è grande più nuclei decadono.

Il segno meno è dovuto al fatto che se i nuclei decadono il numero N diminuisce.

Tale legge è un'equazione differenziale che ha come soluzione la vera e propria legge di decadimento radioattivo:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

dove N_0 è il numero iniziale di nuclei. Tale legge ci dice che il numero di nuclei ancora presenti nel campione all'istante generico t .

Talvolta anziché λ si adopera una di queste due grandezze:

- *Vita media*: $\tau = \frac{1}{\lambda}$;
- *Tempo di dimezzamento* o *emivita*: $T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

Entrambe le grandezze hanno le dimensioni di un tempo, dunque si misurano in secondi. In particolare la vita media corrisponde al tempo necessario affinché il numero di nuclei si riduca di un fattore e , cioè il tempo per passare da N_0 a N_0/e , l'emivita invece

corrisponde al tempo necessario affinché il numero di nuclei di partenza si dimezzi, cioè il tempo per passare da N_0 a $N_0/2$. La relazione con la costante di decadimento si ricava tramite semplici passaggi matematici: imponendo $N(t) = N_0/2$ si ha che

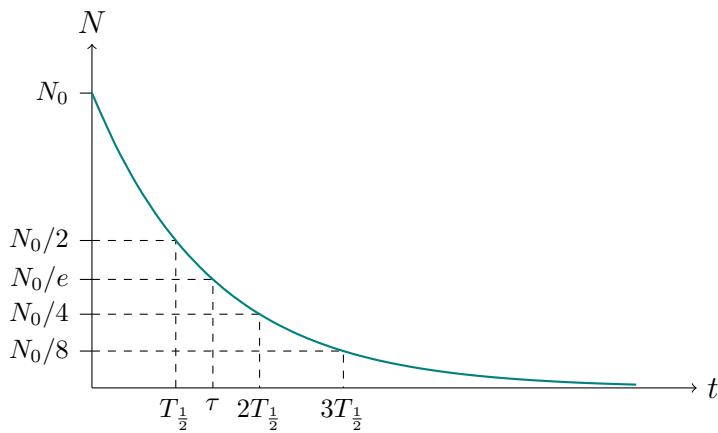
$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t} \implies -\ln 2 = -\lambda t \implies t = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Le emivite variano da alcuni giorni a diversi miliardi di anni.

$T_{\frac{1}{2}}$ e τ sono legati tramite la relazione

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$

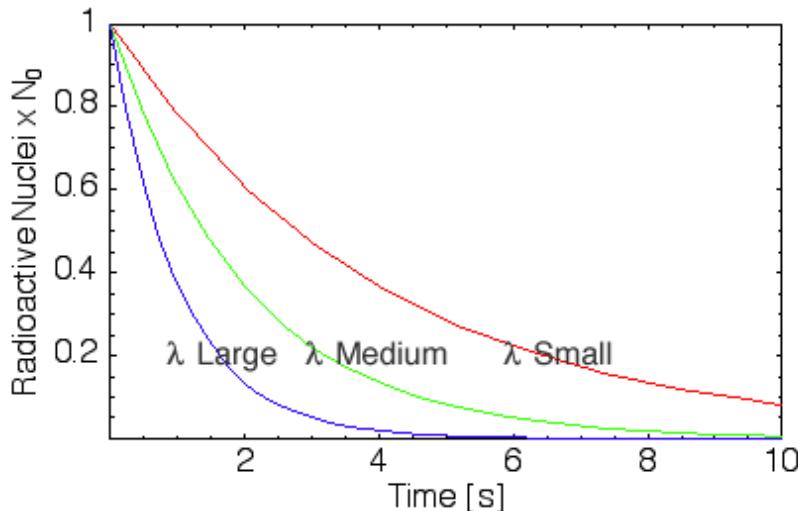
Soltanamente come riferimento per il tempo si prendono multipli dell'emivita perché è facile calcolare il corrispondente numero di isotopi restanti.



Notiamo inoltre che il tempo di dimezzamento viene prima della vita media (del resto $\ln 2 < 1$). Infatti per $t = \tau$ si ha

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{1}{\lambda}} = N_0 \cdot e^{-1} = \frac{N_0}{e} < \frac{N_0}{2}$$

Vediamo ora cosa cambia al variare del valore della costante di decadimento λ :



Se λ è elevata, l'esponenziale è più rapido, cioè la probabilità di decadere è maggiore, per cui si dice che la sorgente ha un'elevata attività; viceversa, ad un valore piccolo di λ corrisponde minore pendenza.

In termini di radioprotezione, λ influisce anche sul tempo che deve trascorrere affinché il livello di radiazione emesso dal materiale non sia più dannoso per le persone.

Facciamo degli esempi con l'emivita (che è più facile da immaginare concettualmente) anziché la costante di decadimento:

Elemento	$T_{1/2}$
Radon 222	3.8 giorni
Piombo 210	22 anni
Radio 226	1600 anni
Carbonio 14	5730 anni
Uranio 238	$4.56 \cdot 10^9$ anni

Notiamo come ci sia un'estrema variabilità nel valore del tempo di dimezzamento, quindi ci sono enormi differenze da isotopo a isotopo.

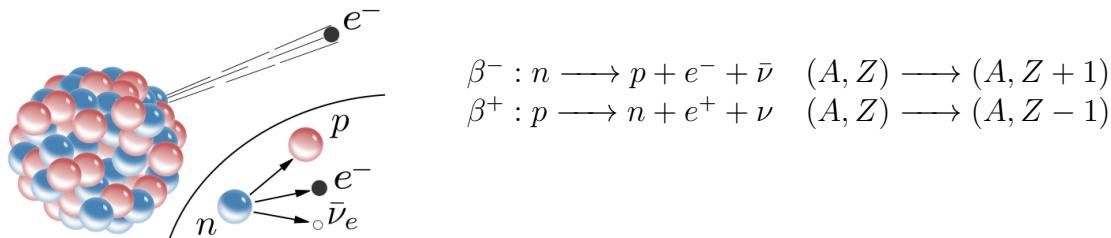
2.4.1 Excursus: la datazione al carbonio ^{14}C

L'isotopo ^{14}C ha un'emivita di 5730 anni. Esso viene usato per tecniche di datazione, cioè per sapere qual è l'età di un reperto di origine organica (ad esempio resti umani). Gli esseri viventi scambiano carbonio con l'atmosfera, ma con la morte dell'organismo tale scambio termina, e il ^{14}C presente nell'individuo (che fino ad ora si è tenuto costante grazie a tale scambio continuo) incomincia a decadere. Andando a vedere il quantitativo residuo di ^{14}C presente nell'organismo si può risalire, grazie alla legge di decadimento, all'età del campione.

Tale metodo non è utilizzabile con reperti eccessivamente antichi: la regola di norma è che al massimo possiamo datare campioni eventi età pari a 10 volte l'emivita del campione considerato, quindi al massimo 60 mila anni. Il motivo è che dopo 10 emivite il quantitativo di ^{14}C residuo è veramente poco, per cui non ci permette, da un punto di vista statistico, di fare una misura precisa dell'età del campione.

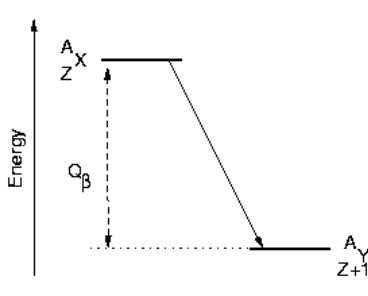
2.5 Isotopi radioattivi β

Il decadimento β corrisponde all'emissione di elettroni o di positroni (rispettivamente decadimento β^- e β^+). Ciò corrisponde rispettivamente alla trasformazione, all'interno del nucleo, di un neutrone in un protone, con l'emissione di un elettrone e di un antineutrino elettronico, oppure viceversa alla trasformazione di un protone in un neutrone, con l'emissione di un positrone e di un neutrino elettronico:



Quando inizialmente si scoprì tale fenomeno, non si capiva se, oltre all'elettrone, venisse emesso un altro tipo di radiazione. Inoltre non si capiva l'origine di questi elettroni, perché le energie che si misuravano per queste particelle erano elevate, arrivavano all'ordine del MeV, cosa che fece capire che non potevano essere elettroni atomici, i quali non possono possedere tali energie. Si capì poi che erano elettroni provenienti dal nucleo.

Un'altra difficoltà che si ebbe riguardava l'energia di tali elettroni, in quanto non erano fissi: potevano variare tra un minimo e un massimo, cosa strana se l'unica particella emessa fosse stata l'elettrone, perché in tal caso allo stato finale avremmo avuto due corpi: il nucleo residuo e l'elettrone emesso, per cui se il nucleo a causa delle sue dimensioni assorbe pochissima energia questa sarebbe andata tutta all'elettrone, ma allora l'energia avrebbe dovuto avere un valore fisso. Ciò non si capiva perché i rivelatori dell'epoca misuravano solo l'emissione di elettroni. La spiegazione fu data dalla scoperta del fatto che viene emesso anche un neutrino, il quale è difficile da essere rivelato a causa della sua bassa sezione d'urto.



Dal punto di vista del nucleo, se esso ha numero di massa A e numero atomico Z , dopo il decadimento avremo un nucleo residuo con stesso numero di massa ma numero atomico aumentato o diminuito di una unità a seconda del tipo di decadimento.

Nella figura accanto possiamo vedere lo schema del decadimento nucleare di un nucleo (A, Z) ad un nucleo $(A, Z + 1)$. In questo caso si avrà l'emissione di un β^- .

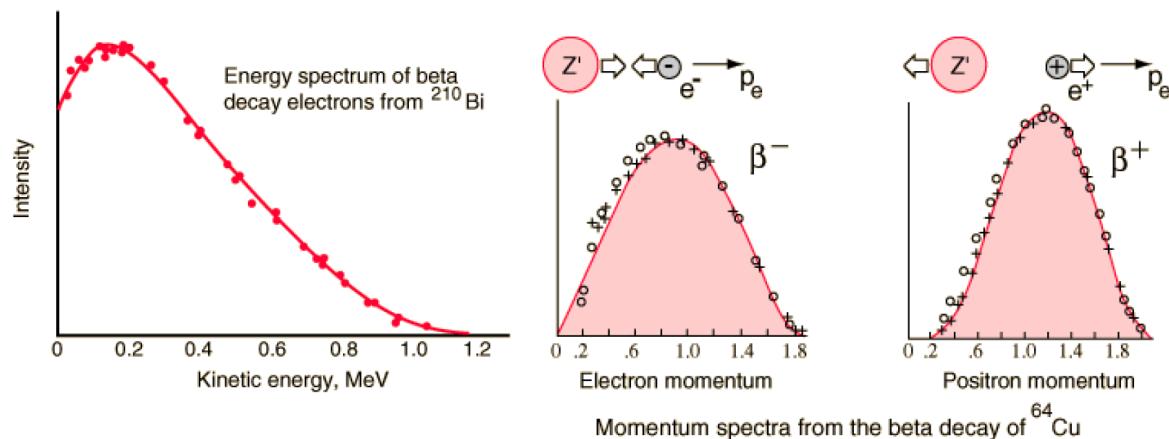
Questo decadimento avviene grazie ad un bilancio energetico che favorisce il nucleo finale.

Vediamo alcuni esempi di isotopi che decadono β :

Isotopo	Vita media	Energia massima (MeV)
^3H	12.26 y	0.0186
^{14}C	5730 y	0.156
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	27.7 y/64 h	0.546/2.27
^{99}Tc	$2.12 \cdot 10^5$ y	0.292

In laboratorio adopereremo ^{90}Sr e ^{90}Y come sorgenti di raggi β .

Il decadimento β è a tre corpi (nucleo residuo, elettrone/positrone e neutrino), per cui l'energia si deve suddividere tra questi. Il nucleo residuo, essendo molto massivo, non acquisisce praticamente nulla, per cui il *Q-value* di questo decadimento (cioè l'energia totale emessa nel decadimento) si ripartisce tra l'elettrone e il neutrino, che sono gli elementi più leggeri; a seconda di come si suddividono l'energia, l'energia dell'elettrone varierà. In generale lo spettro delle energie ha forma come nel grafico: parte da un valore, sale fino a un massimo e poi scende, raggiungendo un massimo di energia detto *endpoint dello spettro*. Nota: il punto iniziale è il valore minimo di energia perché sulle ascisse c'è l'energia.

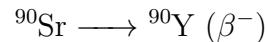
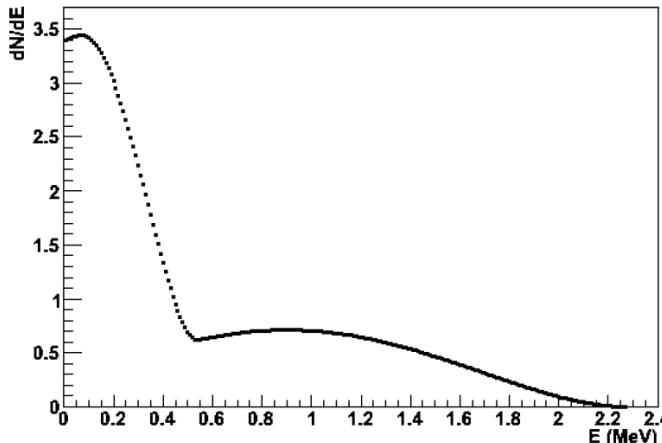


In realtà gli spettri dei decadimenti β^+ e β^- sono leggermente diversi tra di loro a causa della repulsione coulombiana presente tra il nucleo residuo e l'elettrone/positrone. Ne segue che lo spettro del β^+ è shiftato a destra, cioè sono favoriti maggiormente degli impulsi (dunque delle energie) più grandi rispetto al β^- .

Ciò che è importante ricordare è che per questi elettroni ci aspettiamo energie che variano in maniera continua tra zero e un valore massimo.

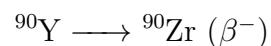
Esempio 2.1: Decadimento doppio $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

Osserviamo lo spettro energetico del decadimento doppio $^{90}\text{Sr} / {}^{90}\text{Y}$:



Vita media: 27.7 anni

$$E_{\max} = 0.546 \text{ MeV}$$



Vita media: 64 ore

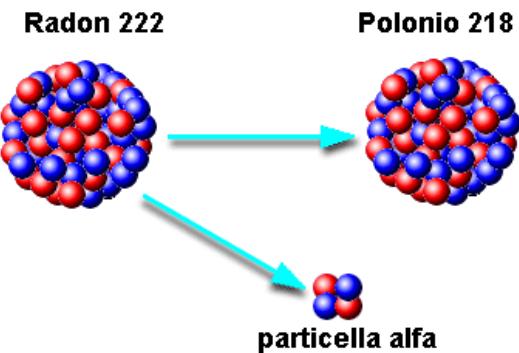
$$E_{\max} = 2.27 \text{ MeV}$$

Essi sono decadimenti consequenziali, cioè lo stronzio-90 decade in ittrio-90 e quest'ultimo a sua volta decade ulteriormente.

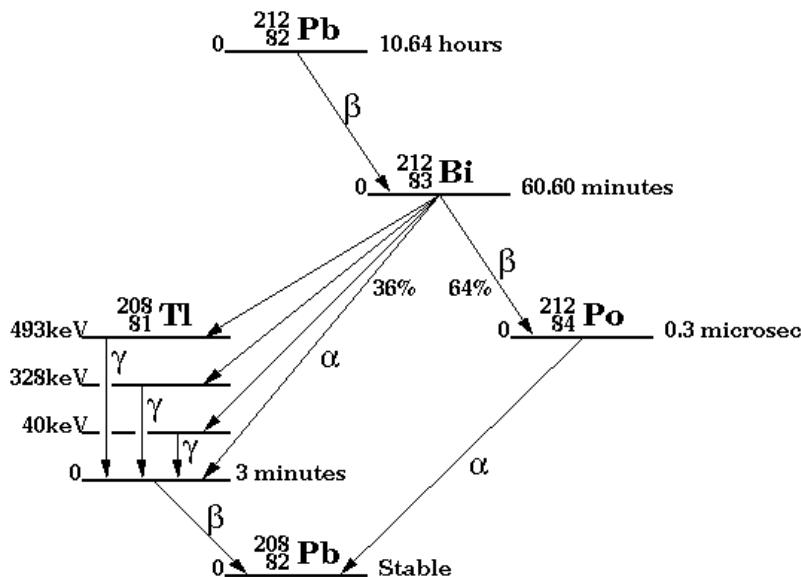
Lo spettro complessivo tiene conto di entrambi i decadimenti. In particolare la parte di basse energie corrisponde al decadimento dello stronzio, quella a più alta energia al decadimento dell'ittrio. Lo spettro finale, ricavabile dalla teoria di Fermi, è dato dalla sovrapposizione dei due spettri dovuti ai due isotopi. Si evince che abbiamo una grossa componente di elettroni a bassa energia ma anche una componente a più alta energia, fino ad un endpoint di circa 2.3 MeV.

Andando a studiare i meccanismi di interazione degli elettroni con la materia, cioè come gli elettroni perdono energia, è possibile stimare lo spessore di materia necessario per fermare tutti gli elettroni emessi da questo tipo di sorgente.

2.6 Isotopi radioattivi α



Il decadimento α corrisponde all'emissione di una particella α , che non è altro che un nucleo di elio ovvero costituito due protoni e due neutroni. Esso avviene nei nuclei pesanti. Osserviamo adesso uno schema di decadimento:

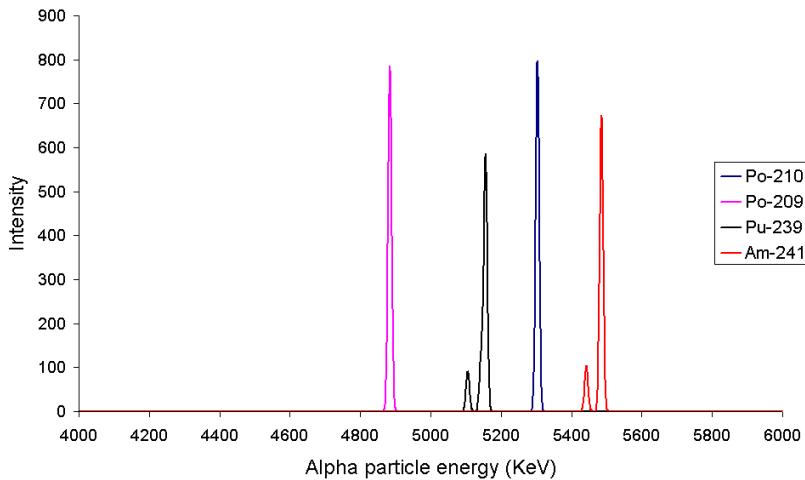


In esso ogni livello rappresenta un livello nucleare di un isotopo a una data energia. Si nota che si possono avere diversi decadimenti α verso lo stesso isotopo figlio, quello che cambia sono i livelli di energia di questo, per cui si può avere un decadimento verso un livello eccitato dell'isotopo figlio. Ognuno dei possibili decadimenti ha una sua probabilità di avvenire, detta *branching ratio* (rapporto di ramificazione), quindi ci saranno decadimenti verso alcuni livelli più probabili rispetto a quelli verso altri livelli. Se il decadimento α avviene verso un livello eccitato, esso sarà inevitabilmente seguito da un decadimento γ , perché il nucleo, che si trova in uno stato eccitato, tenderà a portarsi nello stato fondamentale attraverso un decadimento γ . Va quindi ricordato che le particelle α emesse da un isotopo potrebbero avere energie diverse perché il decadimento può avvenire verso diversi livelli eccitati dell'isotopo figlio.

Cosa ci aspettiamo in questo caso per lo spettro?

Essendo il decadimento α a due corpi (nucleo residuo e particella α), tutta l'energia disponibile viene acquistata dalla particella α sotto forma di energia cinetica, in quanto

è più leggera rispetto al nucleo residuo. Ci aspettiamo quindi che la particella α abbia sempre la stessa energia, ecco perché si parla di sorgenti monoenergetiche:



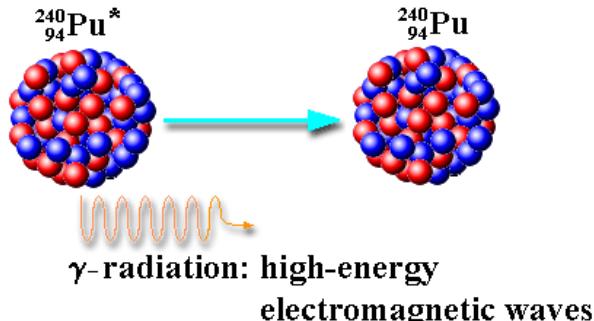
Se misuriamo tale energia e la rappresentiamo in un istogramma otteniamo lo spettro energetico, che ci aspettiamo avere idealmente la struttura di una delta di Dirac, cioè dovremmo misurare sempre la stessa energia, come si vede in figura per vari isotopi. In realtà c'è una certa larghezza nel picco, che non è dovuta alla fisica di partenza (cioè le particelle α hanno veramente la stessa energia), bensì dipende dal modo con cui vengono misurate, dunque dalla precisione dello strumento di misura. L'allargamento del picco è quindi dovuto a questioni di risoluzione del rivelatore.

Vediamo alcuni esempi di isotopi che decadono α :

Isotopo	Vita media	Alpha Energy (MeV)
^{238}U	$4.5 \cdot 10^9$ y	4.196/4.149
^{239}Pu	$2.4 \cdot 10^4$ y	5.105/5.143/5.155
^{241}Am	433 y	5.443/5.486

Notiamo che le energie delle particelle α , nonostante le vite medie molto differenti, sono tutte molto simili, aggirandosi intorno a pochi MeV. La prima differenza tra radiazioni α e β riguarda quindi lo spettro: le energie in gioco sono simili, ma lo spettro è molto diverso: continuo per le radiazioni β , "a righe" per le α .

2.7 Isotopi radioattivi γ

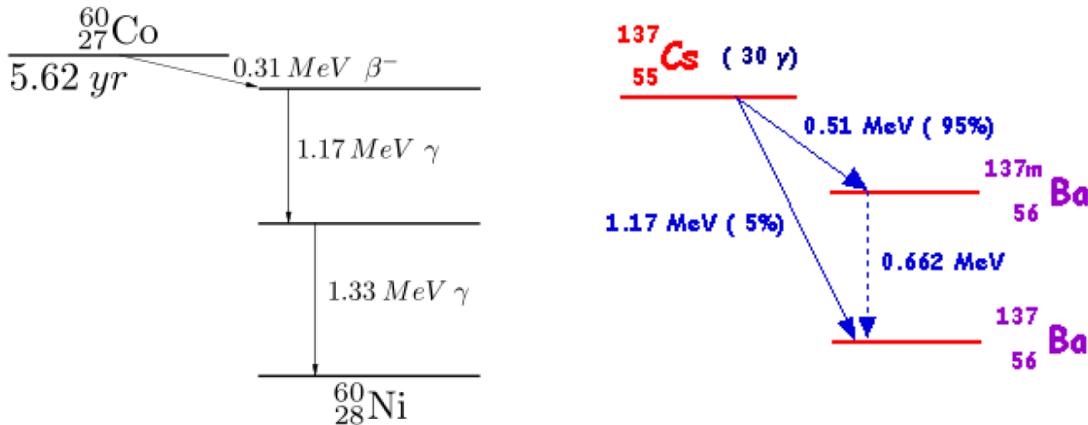


In questo caso il decadimento avviene tra uno stato eccitato e uno stato a energia più bassa dello stesso nucleo, che quindi mantiene numero atomico e di massa invariato, mentre ciò che cambia è il suo livello energetico.

Nota: per indicare che un nucleo si trova nello stesso stato eccitato si usa un asterisco (Es. 240 Pu*).

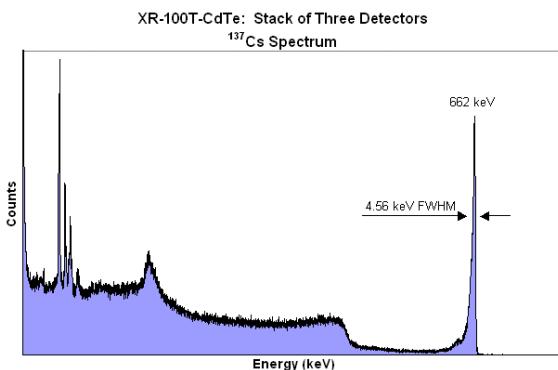
Quando il nucleo passa allo stato fondamentale (cioè allo stato più basso in energia) emette una radiazione elettromagnetica che cade nella zona energetica dei γ .

Vediamo uno schema di livelli delle sorgenti (in laboratorio adopereremo ^{60}Co e ^{137}Ce):



Notiamo come il ^{60}Co emette due γ perché può avere diversi livelli nello stato finale, mentre il ^{137}Ce emette un solo γ .

È interessante notare che il decadimento γ è sempre consequenziale ad un'altra tipologia di decadimento (queste due sorgenti ad esempio decadono β^-).



In termini di spettro energetico, anche in questo caso il gamma dovrebbe portare con sé tutta l'energia disponibile, quindi dovremmo avere uno spettro a righe. In realtà lo spettro misurato con un rivelatore ha una forma molto più complessa, per cui abbiamo un picco in corrispondenza del valore nominale di energia e poi un continuo per valori più bassi di energia (fondo continuo).

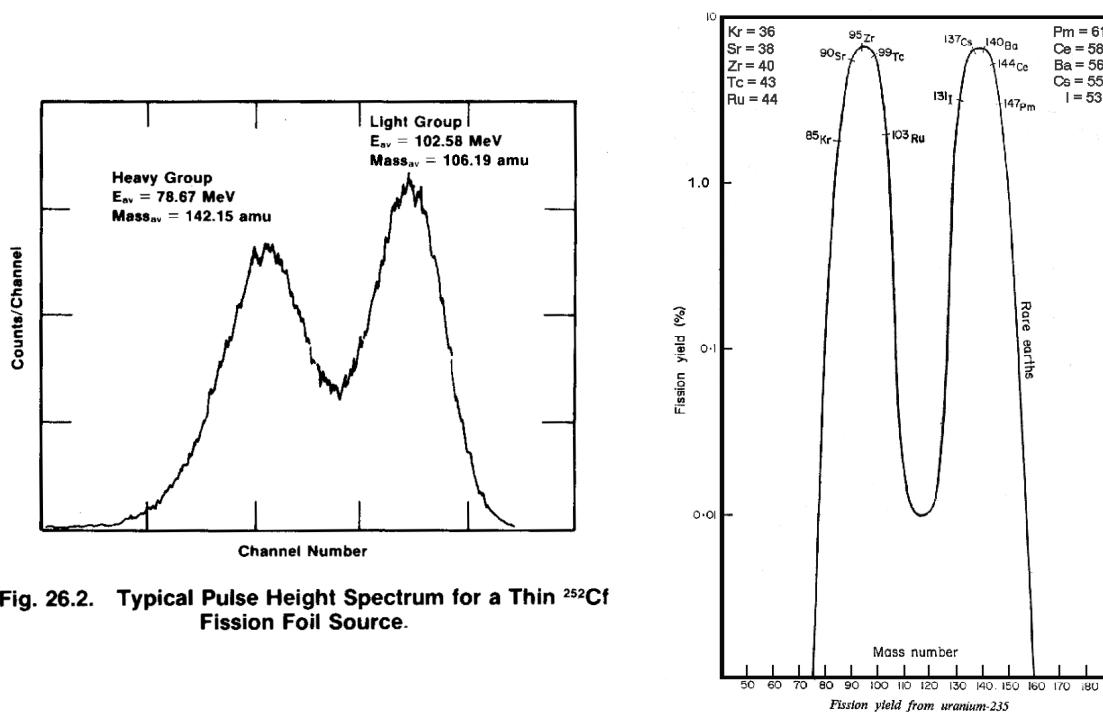
Questo continuo lo spiegheremo in seguito, in quanto il γ interagisce con il rivelatore attraverso diversi meccanismi che danno luogo a tale fondo continuo, tuttavia si osserva sempre un picco in corrispondenza dell'energia attesa.

I γ sono quindi monoenergetici, ma anche qui ci possono essere effetti di risoluzione dell'apparato sperimentale che trasformano quella che dovrebbe essere una delta di Dirac in un picco con una data larghezza (tanto più largo è il picco, peggiore è la risoluzione, e se questa è scarsa nel caso del ^{60}Co c'è il rischio che i due picchi delle due emissioni si sovrappongano).

2.8 Sorgenti di fissione

Tra i fenomeni naturali si possono verificare anche delle fissioni. Alcuni nuclei pesanti possono, in maniera spontanea, frammentarsi in due nuclei di massa intermedia. Tale processo è detto di fissione. Ad esempio, ^{235}U in maniera spontanea si divide in ^{141}Ba e ^{92}Kr . Oltre a questi due frammenti, si possono produrre anche dei neutroni, i quali a loro volta potrebbero innescare altri fenomeni di fissione (in questo caso si parla di fissione indotta). Tale meccanismo viene adoperato in maniera controllata dalle centrali nucleari, in quanto nel processo oltre ai frammenti di massa intermedia ed i neutroni viene prodotta anche energia; negli ordigni nucleari invece il processo di fissione indotta avviene fuori controllo.

Nella fissione i frammenti che vengono prodotti non sono mai simmetrici: ciò è dovuto a questioni di bilancio energetico nel processo di fissione.

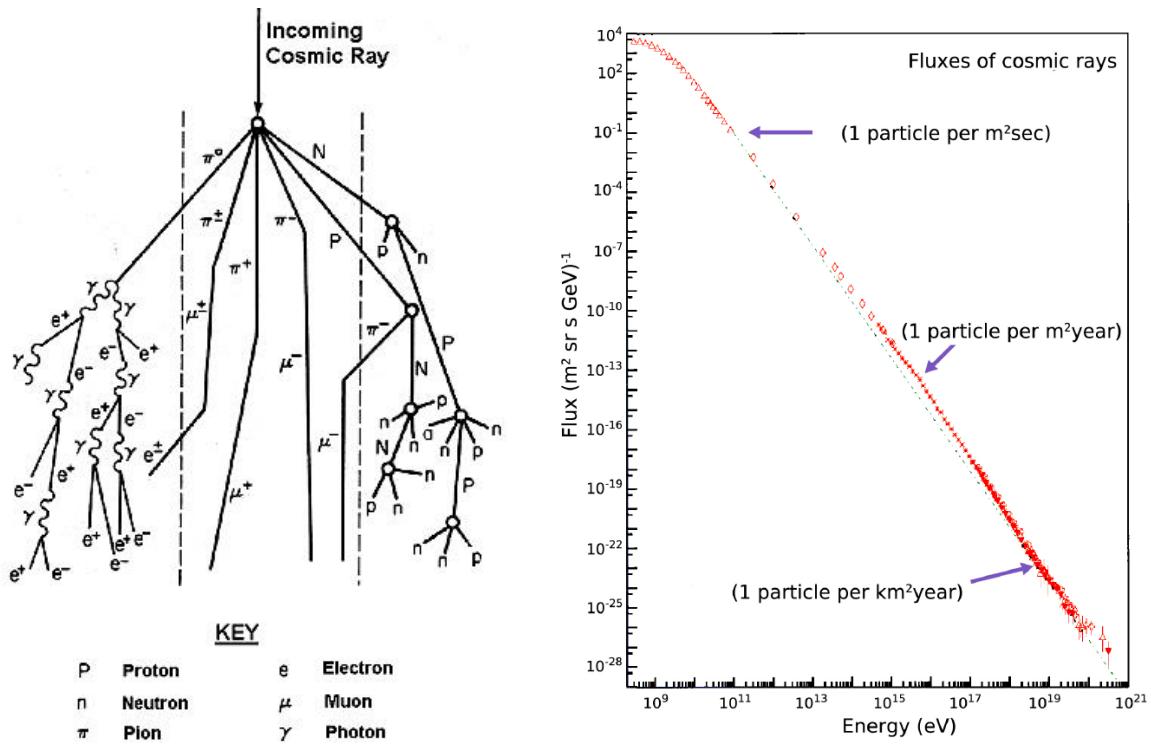


Nel grafico a destra possiamo vedere la distribuzione del numero di massa dei frammenti. Essa ha una forma a due picchi, che indica il fatto che i frammenti non assumono valori di massa qualsiasi, bensì preferenzialmente assumono valori che si concentrano sui picchi. Tale asimmetria ha come conseguenza che anche le energie dei frammenti non sono esattamente le stesse: il frammento più leggero prenderà più energia e viceversa quello più pesante, come possiamo vedere nel grafico a sinistra raffigurante la distribuzione delle energie dei frammenti.

2.9 Radiazione cosmica

Negli alti strati dell'atmosfera i raggi cosmici primari incidono e interagiscono con gli atomi e le molecole dell'atmosfera, dando origine ai cosmici secondari.

I cosmici primari sono costituiti da protoni (anche nuclei però, perché la composizione di tali raggi rispecchia l'abbondanza dei diversi nuclei presenti nello spazio) aventi energia elevatissima, che interagendo con l'atmosfera generano cascate di particelle il cui numero è proporzionale all'energia del cosmico primario. Alcune di queste particelle compongono la parte elettromagnetica dello sciame (gamma, elettroni, positroni), altre la parte più penetrante, ad esempio i muoni.



Lo spettro di energia dei cosmici primari (rappresentato in scala logaritmica sia in ascisse che in ordinate perché ci sono numeri che variano parecchio) ha in ascisse l'energia, che varia da 10^9 a 10^{21} eV, e in ordinata il flusso, cioè il numero di particelle che arrivano per metro quadro e nell'unità di tempo con una data energia, che varia da 10^{-28} a 10^4 . Tale grafico ci dice che ad esempio per valori di energia intorno a $10^{11}/10^{12}$ eV, avendo a disposizione di un rivelatore della superficie di 1 m^2 misureremo circa una particella al secondo, mentre per i primari più energetici (10^{20} eV) ci servirebbe un rivelatore di 1 km^2 per misurare una particella per anno. Essendo quest'ultime molto rare, di solito si studiano i cosmici secondari e si cerca di ricostruire le energie dei primari (e in questo caso si parla di *rivelazione indiretta*), mentre alle basse energie è possibile effettuare delle misure dirette portando un rivelatore al di fuori dell'atmosfera terrestre e misurando il flusso di raggi cosmici.

2.10 Unità di misura e nomenclatura

2.10.1 Attività di una sorgente

Rappresenta il numero di particelle emesse nell'unità di tempo. Si misura in

- Becquerel (Bq): $1 \text{ Bq} = 1 \text{ disintegrazione/s};$

- Curie (Ci): $1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10}$ disintegrazioni/s (attività di 1 g di ^{226}Ra). Esprime una grandezza molto grande, per cui si preferisce lavorare con sottomultipli come il μCi . Si ha che $\mu\text{Ci} = 37 \cdot 10^3 \text{ Bq}$.

2.10.2 Concetto di dose

La dose rappresenta l’energia che viene depositata da una radiazione per unità di massa. Si misura in J/kg, quantità che viene chiamata Gray (Gy). 1 Gy corrisponde a 1 J/1 kg. Alternativamente si può adoperare il rad, unità di misura tale che 1 Gy = 100 rad.

2.10.3 Concetto di dose equivalente

Tale concetto viene introdotto perché non è importante soltanto quanta energia viene depositata per unità di massa, ma anche il tipo di radiazione che ha depositato quell’energia, informazione che ci aiuta a capire il danno prodotto da una radiazione ad esempio nell’organismo.

La dose equivalente è pari alla dose moltiplicata per un fattore di qualità, il quale dipende dal tipo di radiazione: esso vale

- ~ 1 per gamma e beta;
- ~ 10 per protoni e neutroni veloci;
- ~ 20 per alfa.

Deduciamo che, a parità di energia depositata per unità di massa, sono più dannose le particelle alfa; a seguire i protoni e ancora dopo i gamma. È chiaro che il danno dipende anche dal tessuto colpito.

La dose equivalente si misura in Sievert (Sv) o rem.

$1 \text{ Sv} = (\text{Fattore di qualità}) \cdot 1 \text{ Gy}$ $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ $1 \text{ mSv} = 100 \text{ mrem}$

2.10.4 Dosi tipiche

Vediamo a che livello di radiazioni siamo sottoposti quotidianamente.

Sorgenti naturali

- Radiazione cosmica: 28 mrem/anno;
- Fondo naturale (isotopi naturali): 26 mrem/anno;
- Radioattività interna al corpo¹: 26 mrem/anno;

¹Noi emettiamo β a causa del ^{14}C e del ^{40}K .

Sorgenti artificiali

- Radiografia: variabile a seconda del tipo. Ad esempio una RX al torace corrisponde a qualche mrem, una TAC a 10^3 mrem.

È chiaro che ci sono dei limiti che bisogna rispettare affinché si eviti il danno biologico. Tale limite è variabile (a seconda che sia una persona qualunque o un lavoratore esposto). In genere per la popolazione il limite è 200 – 300 mrem/anno.

Ci sono poi delle condizioni in cui siamo esposti, in maniera naturale, ad una maggiore dose di radiazioni. Ad esempio in alta montagna (a quote di 2000 – 3000 m) si è esposti ad una maggiore radiazione perché viene meno il "filtro" dell'atmosfera.

Trivia: il caso della banana

Proviamo a stimare l'attività dovuta a un certo quantitativo di banane, in maniera tale da capire se sono dannose.

In media una banana contiene 0,5 g di ^{40}K , che corrisponde a un'attività di 15 Bq = 15 disintegrazioni/secondo. A causa della loro diffusione, è stata creata la dose dovuta al mangiare una banana: 1 BED (*Banana Equivalent Dose*) $\sim 0,1 \mu\text{Sv}$. Ogni giorno siamo sottoposti a una dose di radiazione naturale di 100 BED; una radiografia corrisponde a $5 \cdot 10^4$ BED. Questi esempi ci fanno capire come una banana non sia affatto dannosa.

Capitolo 3

Perdita di energia per particelle cariche pesanti

In base al tipo di radiazione può cambiare il meccanismo di interazione con la materia. Vedremo quindi i diversi meccanismi con cui le radiazioni interagiscono con la materia, con conseguente perdita di energia. Cercheremo dunque di stimare anche la perdita di energia delle particelle nella materia, cioè di trovare espressioni quantitative che ci permettano di capire quali sono i parametri che influenzano la perdita di energia.

Tale argomento ci interessa perché lo studio dei diversi rivelatori di particelle si basa sui meccanismi di interazione, che usano per misurare le particelle.

Concentriamoci innanzitutto sulle particelle cariche pesanti, cioè dal protone in su. In realtà in questa categoria rientrano anche le particelle di massa intermedia (muoni, pioni), aventi massa minore di quella del protone ma non piccola quanto quella dell'elettrone, per cui hanno un comportamento maggiormente simile a quello delle particelle pesanti.

3.1 Principali meccanismi

Vediamo adesso quali sono i meccanismi con cui le particelle pesanti interagiscono con la materia.

3.1.1 Interazione coulombiana (inelastica) con gli elettroni atomici

È la modalità con cui le particelle perdono maggiormente energia all'interno della materia.

Cerchiamo di quantificare il numero di interazioni con gli elettroni che avvengono durante il tragitto delle particelle all'interno della materia. Vediamo allora quanta energia può essere trasferita al massimo in una singola collisione: se E è l'energia iniziale, al massimo in un urto si perde un'energia pari a

$$E_{\text{urto}}^{\max} = 4E \frac{m_e}{m}$$

dove m_e è la massa dell'elettrone e m la massa della particella incidente. Ne segue che maggiore è la massa della particella, minore sarà l'energia che può essere trasferita in una singola collisione.

Facciamo un esempio: se la particella incidente è un protone, allora l'energia massima trasferita in una collisione sarà

$$E_{\text{urto}}^{\max} = 4E \frac{m_e}{m_p} \sim \frac{1}{500} E$$

Ne segue che se ad ogni urto venisse ceduta la quantità massima di energia, ci vorrebbero 500 collisioni perché si perda tutta l'energia a disposizione. Nella realtà le collisioni sono di più perché abbiamo usato un valore massimo, ma nei fatti avvengono anche trasferimenti di energia minore.

Da tale relazione capiamo che una particella carica pesante, quando attraversa la materia, subisce diverse collisioni con gli elettroni atomici e in ognuna di queste perde una piccola parte della sua energia; pertanto l'energia diminuisce gradualmente, a piccoli passi, fatto che ha un effetto su quello che si misura e sul percorso che può effettuare la particella.

Il risultato del passaggio di una particella all'interno della materia è che, cedendo energia ad ogni collisione agli elettroni atomici, questi ultimi, ricevendo energia, si eccitano oppure possono addirittura, se l'energia è sufficiente, essere strappati dall'atomo, sfuggendo al legame atomico; in quest'ultimo caso può avvenire un processo di ionizzazione. Talvolta gli elettroni che vengono strappati possono produrre delle ionizzazioni secondarie, perché possiedono energie elevate. Se ciò avviene, questi elettroni prendono il nome di *raggi δ* .

Riassumendo: una particella carica pesante, attraversando un materiale, perde energia attraverso multiple collisioni con gli elettroni atomici, i quali possono eccitarsi o addirittura essere strappati dall'atomo e di conseguenza nel tragitto seguito dalla particella si vengono a creare atomi eccitati o addirittura ioni, e la velocità (quindi l'energia) della particella gradualmente diminuirà fino a che questa non si arresta del tutto.

3.1.2 Interazione (elastica) con i nuclei

Può anche avvenire un'interazione elastica con i nuclei che compongono il materiale. Questo processo è meno importante, perciò l'energia persa con tale fenomeno, rispetto a quella persa per interazione coulombiana, è trascurabile. Per capirne il motivo basta pensare alla sezione d'urto, ossia alla probabilità che avvenga un evento di questo tipo: dobbiamo confrontare le dimensioni di un atomo con quelle di un nucleo, per cui c'è un fattore 10^5 tra le due sezioni d'urto.

Tale interazione diventa importante quando le dimensioni della particella incidente sono simili a quelle del nucleo che compongono il materiale (ad esempio particelle α che incidono su idrogeno), ma di solito si trascura.

Altri meccanismi

Avvengono poi altri meccanismi ancora meno rilevanti.

- Può verificarsi emissione di radiazioni di frenamento (bremsstrahlung), il quale è un meccanismo più importante per le particelle leggere, mentre per quelle pesanti è trascurabile in quanto la sezione d'urto per bremsstrahlung dipende all'inverso del quadrato della massa della particella incidente.

- Può avvenire l'emissione di luce Cherenkov, cioè emissione di luce perché la particella ha velocità superiore alla velocità della luce nel mezzo attraversato. Anche questo contributo è trascurabile rispetto all'interazione coulombiana.
- Possono avvenire processi di interazione nucleare.

3.2 Relazione di Bethe-Bloch

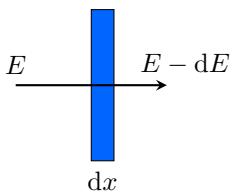
Abbiamo visto che se ci concentriamo sulle particelle cariche pesanti dobbiamo semplicemente andare a valutare quanta energia viene persa attraverso l'interazione coulombiana con gli elettroni atomici. Siamo allora interessati a calcolare l'energia persa per unità di percorso, dunque vogliamo conoscere qual è l'energia dE che perde la particella dopo aver percorso uno spazio infinitesimo dx a seguito dei meccanismi sopracitati.

In altre parole, siamo interessati a calcolare lo *Stopping Power* o *perdita di energia specifica*, che si indica con dE/dx . Essa si esprime in MeV/cm.¹

Il problema dello stopping power fu affrontato per primo da Bohr, producendo una teoria che si basava su argomenti classici. Tale teoria fu successivamente ripresa da Bethe e Bloch i quali, usando la meccanica quantistica, giunsero alla formula di Bethe-Bloch²:

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

Tale formula descrive la perdita di energia media per unità di percorso. Rispetto a prima aggiungiamo il termine "media" perché la perdita di energia non è sempre la stessa per questioni di fluttuazioni statistiche. Inoltre il segno meno indica il fatto che è una perdita di energia, cioè dE deve essere negativo perché l'energia sta diminuendo.



In questa formula stiamo supponendo di avere delle particelle cariche pesanti incidenti, con un'energia E , che devono attraversare uno spessore infinitesimo dx di materiale. Una volta attraversato questo spessore sarà stata persa una parte dell'energia, quindi la particella avrà energia residua $E - dE$.

La relazione di Bethe-Bloch ci dice che in media la variazione dE/dx dipende da:

- Una costante $K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.307 \text{ MeV mol}^{-1} \text{ cm}^2$;
- Il quadrato della carica della particella incidente, indicata con z^2 . Tale dipendenza ci permette di identificare la particella incidente: infatti, se ad esempio confrontiamo un protone con una particella α , a parità di energia incidente, essendo una relazione quadratica, il protone perde un quarto di energia di quella persa dall' α ;

¹Il motivo per cui si usano i centimetri anziché i metri è che le particelle cariche pesanti percorrono lunghezze piccole.

²Di questa esistono diverse formulazioni. Noi faremo riferimento a quella del Particle Data Group. <https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-passage-particles-matter.pdf>

- $1/\beta^2$, dove β è definito come il rapporto della velocità della particella rispetto alla velocità della luce nel vuoto ($\beta = v/c$). Da un punto di vista classico β^2 è proporzionale all'energia, in quanto

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\beta^2c^2 \implies \frac{1}{\beta^2} \propto \frac{1}{E}$$

Tale dipendenza ci dice che se la particella incidente ha bassa energia, ci aspettiamo un'alta perdita di energia, perché l'andamento è iperbolico ($1/E$);

- Il rapporto Z/A , cioè numero atomico/numero di massa del mezzo. Esso vale 0,5 per i nuclei più leggeri, ma man mano che il nucleo diventa pesante il numero di neutroni diventa maggiore di quello dei protoni, per cui Z/A risulterà minore di 0,5. Deduciamo che le particelle perdono maggiormente energia se incidono su materiali leggeri.

Le prime tre sono dipendenze dalle caratteristiche della particella incidente, l'ultima dalle proprietà del mezzo.

Passiamo adesso ad analizzare i termini tra parentesi.

Il primo termine prende il nome di *risalita relativistica*, il quale ha l'andamento di $\ln E$ (in quanto compare il termine $\beta^2 \propto E$). Figurano poi altri fattori quali

- il fattore di Lorentz γ , definito come $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$;
- W_{\max} , che rappresenta la perdita di energia massima in una singola collisione;
- il potenziale di ionizzazione medio I , ossia l'energia che in media è necessaria per la ionizzazione. Esso è un valore medio perché quando forniamo energia ad un atomo a volte produciamo ionizzazione mentre altre volte l'energia viene persa per eccitazione, quindi tale energia sarà più alta del lavoro di estrazione di un elettrone perché una parte viene persa per eccitazione degli atomi.

Abbiamo poi un termine correttivo δ , detto *correzione di densità*: esso si inserisce perché il campo elettrico della particella carica tende a polarizzare gli atomi lungo la sua traiettoria, e a causa di questo effetto di polarizzazione gli elettroni atomici più lontani con cui la particella incidente avrebbe interagito vengono schermati. Ciò fa sì che l'energia persa per collisione con questi elettroni atomici più lontani risulti essere minore di quella ottenuta senza considerare tale fattore.

Tale termine dipende dall'energia della particella: maggiore è l'energia, maggiore sarà l'incidenza di questo fattore, in quanto gli effetti di polarizzazione saranno più consistenti³.

Di solito compare anche un altro termine correttivo, detto *correzione di shell* e indicato con C , il quale interviene a basse energie. Si introduce perché, a basse energie della particella incidente, viene a mancare una ipotesi del modello di Bohr secondo cui gli elettroni atomici sono praticamente stazionari, fermi rispetto alla particella incidente: se invece questa ha energia bassa, la sua velocità è paragonabile a quella degli elettroni

³Inoltre è chiaro che tale effetto dipende anche dalla densità del materiale (da cui il nome di tale fattore), in quanto la polarizzazione indotta sarà maggiore in materiali più densi rispetto a quelli in materiali rarefatti come gas.

orbitali e di conseguenza è necessario apportare una modifica correttiva alla relazione di Bethe-Bloch tramite tale fattore.

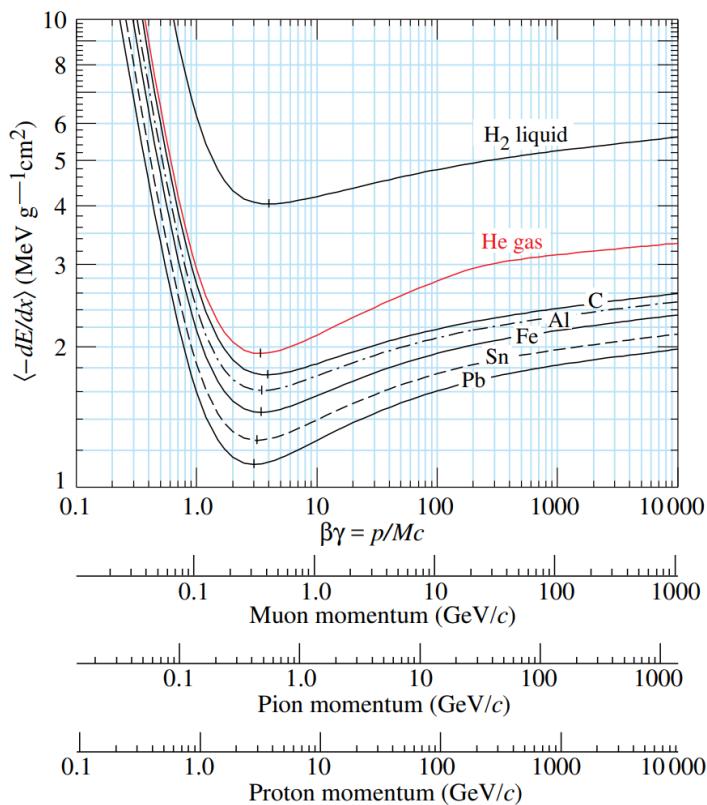
Oltre che come MeV/cm, il dE/dx può essere espresso in un altro modo: gli spessori infatti possono essere espressi anche *in unità di densità superficiale*. Ciò si fa perché, fissato lo spessore di materiale attraversato, l'effetto della radiazione cambia al variare della densità; per liberarci quindi della dipendenza dalla densità del materiale, si moltiplica lo spessore attraversato espresso in centimetri per la densità⁴: lo spessore allora si esprimerà in g/cm². In questo modo ci rendiamo indipendenti dalla densità e diventa più facile fare un confronto tra materiali.

Se esprimiamo il dx in unità di densità superficiale, il dE/dx si esprimerà in MeV cm²/g:

$$\left[\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right] = \frac{\text{MeV cm}^2}{\text{g}}$$

Con tale unità di misura si trovano valori molto simili della perdita di energia per diversi tipi di materiali. In particolare si trova che il MIP (Minimum Ionizing Particles) cioè la minore perdita energia che può avere una particella⁵, corrisponde più o meno per tutte le particelle e per tutti i materiali a 1 – 2 MeV cm²/g.

Vediamo adesso graficamente la relazione di Bethe-Bloch in funzione dell'impulso della particella incidente:



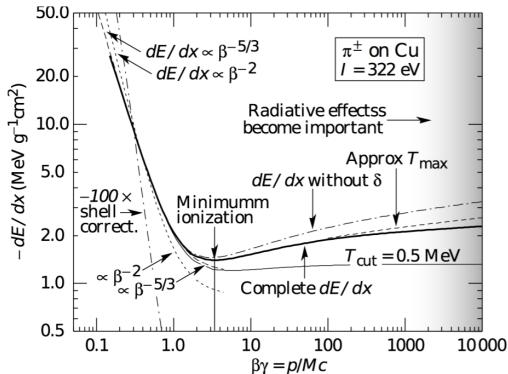
⁴Il Leo chiama questa grandezza *surface density* o *mass thickness* e la definisce come $\varepsilon = \rho \cdot t$ dove ρ è la densità e t lo spessore.

⁵Questa definizione fornita dalla professoressa è concettualmente sbagliata: le MIP sono delle particelle che si muovono ad una velocità $v \simeq 0.96 c$ in corrispondenza della quale si trova il valore minimo per la perdita di energia.

In ascisse è riportato il valore $\beta\gamma = p/Mc$ della particella incidente, ovvero l'impulso scalato rispetto alla massa, in modo da rendendoci indipendenti da quest'ultima. Ovviamente potremmo riportare semplicemente l'impulso, ma ciò significherebbe che i valori delle ascisse differirebbero in base al tipo di particella (come possiamo vedere in figura); sulle ordinate è riportata la perdita di energia in unità di densità superficiale. Per entrambi gli assi la scala è logaritmica; inoltre le varie curve sono relative a diversi materiali attraversati.

Consideriamo ad esempio un protone che incide su piombo Pb. La perdita di energia dipenderà dall'impulso del protone: per impulsi bassi la perdita di energia ha valori elevati, intorno a $10 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$, man mano che consideriamo protoni con impulso maggiore la perdita di energia diventa sempre più bassa, fino a raggiungere un valore minimo leggermente maggiore di $1 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$. Una volta superato il minimo abbiamo una risalita, dovuta alla risalita relativistica della formula di Bethe-Bloch. Se allora dobbiamo individuare quali sono le zone del grafico influenzate dai diversi fattori della formula, possiamo dire che

- la regione a sinistra del minimo è influenzata dall'andamento grosso modo iperbolico di $1/\beta^2$;
- la regione a destra del minimo è influenzata dalla risalita relativistica, che ha un andamento logaritmico di E .



Ricordiamo inoltre che nella regione all'estrema sinistra ad impulsi più bassi interviene il fattore correttivo di shell, mentre quella all'estrema destra ad impulsi più alti è influenzata dal fattore correttivo di densità.

In figura possiamo vedere il grafico relativo a pioni che incidono su rame Cu. Le linee tratteggiate mostrano come sarebbe il grafico se non considerassimo i fattori correttivi.

3.2.1 Perdita di energia per composti

Consideriamo il caso in cui il materiale su cui incide la particella non è formato da un solo elemento bensì è un composto, cioè è costituito da atomi di diversi elementi. In tal caso, per calcolare la perdita di energia si fa una sorta di media pesata, data da

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = \sum_i \frac{n_i A_i}{\rho_i A} \left(\frac{dE}{dx} \right)_i$$

dove n_i , A_i , ρ_i e $(dE/dx)_i$ sono rispettivamente il numero di atomi, il peso atomico, la densità e la perdita di energia specifica della specie i -esima del composto.

Consideriamo ad esempio la molecola CH₂: per essa abbiamo che

$$\begin{aligned} n_{\text{C}} &= 1 & A_{\text{C}} &= 12 \\ n_{\text{H}} &= 2 & A_{\text{H}} &= 1 \end{aligned}$$

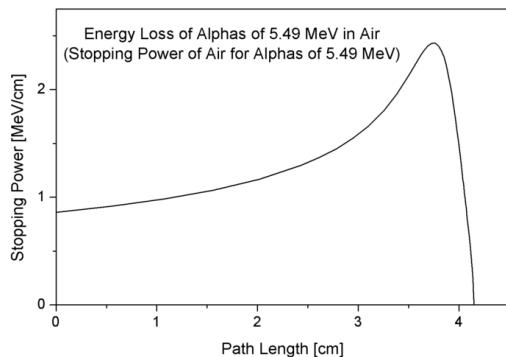
quindi la perdita di energia sarà data da

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = \frac{1 \cdot 12}{\rho_C A} \left(\frac{dE}{dx} \right)_C + \frac{2 \cdot 1}{\rho_H A} \left(\frac{dE}{dx} \right)_H$$

3.2.2 Picco di Bragg

Finora abbiamo parlato di stime medie della perdita di energia, ma abbiamo accennato al fatto che potrebbero esserci delle fluttuazioni rispetto a tale valore medio. Concentriamoci adesso su questo aspetto.

Consideriamo il seguente grafico, chiamato picco di Bragg:



In tale grafico la perdita di energia specifica è rappresentata in funzione dello spessore attraversato. In particolare il grafico mostrato è ottenuto da particelle α che attraversano l'aria, avendo un'energia di 5.49 MeV.

La perdita di energia si calcolerà tramite Bethe-Bloch, in cui i valori di β e γ si ricavano da questo valore di energia iniziale.

Man mano che la particella attraversa il materiale avvengono multiple collisioni con gli elettroni atomici e l'energia diminuisce. Di conseguenza dE/dx aumenta⁶, come osserviamo anche nel grafico, fino a raggiungere un valore massimo per poi diminuire bruscamente. Attenzione! Questa rapida discesa non è evidenziata nei precedenti grafici, in cui manca una parte ad energie ancora più basse, dove intervengono diversi fattori che fanno sì che la curva torni a zero. La parte finale del picco di Bragg è quindi dovuta al fatto che la particella si sta arrestando, avendo velocità e impulsi quasi nulli, per cui la perdita di energia va a zero⁷. Da ciò capiamo che tale grafico è una diretta conseguenza del grafico visto precedentemente.

Il picco di Bragg è alla base dell'utilizzo delle radiazioni per la cura dei tumori, perché ci dice che ad esempio un protone che attraversa un determinato spessore di materiale non rilascia la sua energia in maniera costante lungo il percorso, bensì deposita la maggior parte della sua energia in corrispondenza del picco, poco prima di arrestarsi. Ciò costituisce un vantaggio perché può essere usato per fare un rilascio mirato di energia in alcune zone del corpo. Il limite di questa tecnica sta nella profondità che si può raggiungere, perché per arrivare più in profondità serve maggiore energia e quindi acceleratori più potenti, che non sempre sono disponibili; inoltre quando si raggiungono energie

⁶Si può intuire che sia così leggendo da destra verso sinistra il grafico avente in ascisse l'impulso: man mano che la velocità diminuisce arriviamo nella regione in cui l'andamento è iperbolico, per cui la perdita di energia aumenta bruscamente. Un'altra maniera di visualizzare il fenomeno è che la particella, essendo più lenta, interagirà maggiormente con la materia.

⁷Come riportato dal Knoll, "[...] la formula di Bethe-Bloch inizia ad essere fallace ad energie basse, dove lo scambio di carica tra particella e assorbitore diventa rilevante. La particella carica positivamente tenderà a strappare elettroni dall'assorbitore, riducendo così la sua carica e di conseguenza il dE/dx . Alla fine della sua traiettoria, la particella avrà accumulato z elettroni diventando così un atomo neutro.".

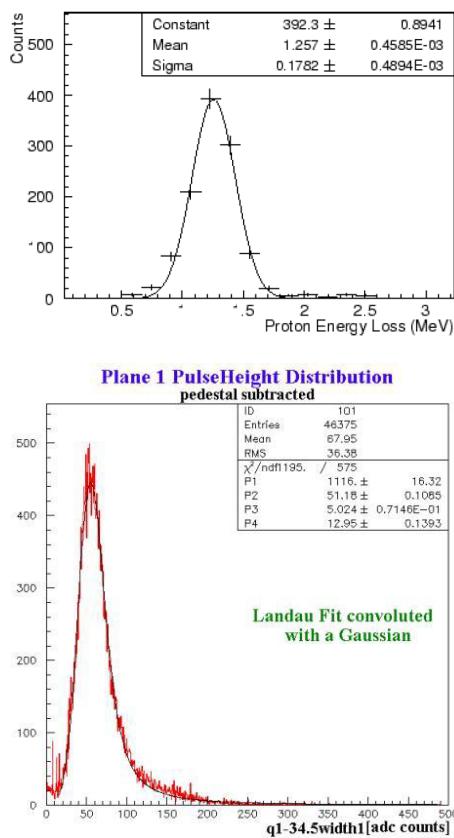
molto elevate si possono indurre altri fenomeni di origine nucleare con produzione di altre particelle con il conseguente rischio di arrecare dei danni.

3.3 Fluttuazioni statistiche nella perdita di energia

Analizziamo ora le fluttuazioni statistiche.

Se inviamo sul materiale particelle identiche (stessa massa, stessa energia e stesso angolo di incidenza quindi stessa direzione di incidenza), esse non perderanno la stessa energia, in quanto ogni particella seguirà un percorso diverso, subendo un numero di collisioni diverso e perdendo di conseguenza un'energia diversa.

Le fluttuazioni statistiche che si presentano nella perdita di energia possono avere distribuzioni diverse, in particolare due:



Se consideriamo spessori grandi, ci si aspetta che il numero di collisioni sia elevato. Ciò fa sì che la distribuzione della perdita di energia in uno spessore grande abbia un andamento abbastanza simmetrico che segue la distribuzione di Gauss;

Se invece consideriamo spessori piccoli, il numero di collisioni è minore, e la perdita di energia segue una distribuzione che può essere descritta dalla teoria di Landau-Vavilov. È una distribuzione asimmetrica che presenta un picco e poi una lunga coda a valore elevati. Essa ci dice che, quando una particella attraversa uno spessore sottile, in media perde un certo quantitativo di energia, ma ci sono dei casi in cui può perdere anche valori notevoli di energia, magari perché la particella segue altre percorsi.

Per valutare se uno spessore è grande o piccolo esiste un parametro che dipende dal valore dell'energia massima che si può perdere per singolo urto, il quale ci permette di individuare il regime in cui ci troviamo.

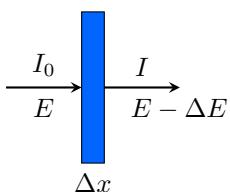
3.3.1 Range di una particella

Come abbiamo appena detto, anche se le condizioni sono uguali (stessa tipo di particella incidente, stessa energia ecc.), l'energia persa non è sempre la stessa. Ciò deriva dai processi di fluttuazioni statistiche dovuti alle diverse collisioni che una particella può subire all'interno del materiale: essendo le collisioni parecchie, ogni particella avrà un

suo percorso e dunque una sua perdita di energia. Vediamo che effetto hanno tali fluttuazioni sul range di una particella.

Per range di una particella si intende il percorso effettuato da questa all'interno di un mezzo prima di arrestarsi.

Prima di andare a fare un confronto tra cosa ci aspetteremmo idealmente e cosa realmente osserviamo, dobbiamo definire il *coefficiente di trasmissione*. Per capire cos'è quest'ultimo immaginiamo di inviare delle particelle con una data energia iniziale E su uno spessore di materiale Δx . Immaginiamo poi che il flusso di particelle incidenti (che si misura in particelle per unità di superficie al secondo) sia pari ad un valore I_0 .



Supponiamo di misurare un flusso in uscita pari I , che corrisponde a quante particelle sopravvivono all'attraversamento del materiale. In base allo spessore verrà persa una certa quantità di energia ΔE , per cui le particelle che riescono a fuoriuscire avranno energia $E - \Delta E$.

Numericamente il ΔE può essere valutato mediante la relazione

$$\Delta E = \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \Delta x$$

Tuttavia in questo mondo stiamo compiendo un'inesattezza: stiamo supponendo che il dE/dx sia costante, ma esso è funzione dell'energia, per cui come vedremo il modo corretto per valutarlo è mediante un integrale.

Sotto l'ipotesi di $dE/dx = \text{cost.}$, ci aspettiamo che all'aumentare di Δx aumenti anche ΔE . Se non ci fossero fluttuazioni statistiche, ci aspetteremo che finché Δx è piccolo le particelle perdono una certa energia ΔE ma riescono comunque a passare, per cui si avrebbe che $I = I_0$, cioè si misura un numero di particelle per unità di tempo e superficie in uscita pari a quelle in entrata; man mano che si aumenta Δx si arriverebbe ad un punto in corrispondenza del quale la perdita di energia ΔE coinciderà con l'energia totale E della particella, che quindi viene persa completamente. Pertanto, superato questo spessore, ci aspetteremmo che nessuna particella dovrebbe riuscire ad attraversare lo spessore. Allora il coefficiente di trasmissione T , definito come

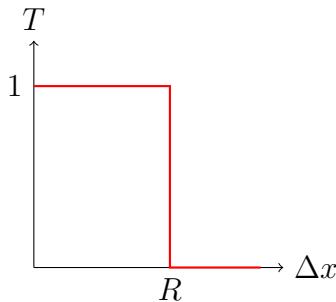
$$T = \frac{I}{I_0} \quad \left[\frac{\text{n° particelle uscenti}}{\text{n° particelle incidenti}} \right]$$

al variare di Δx dovrebbe avere un andamento piatto pari a 1 fino ad un certo valore R , raggiunto il quale diventa nullo in quanto in tale punto la perdita di energia diventa pari proprio a E .⁸ Lo spessore R prende il nome di range della particella perché è proprio lo spessore attraversato dalla particella finché non si arresta.

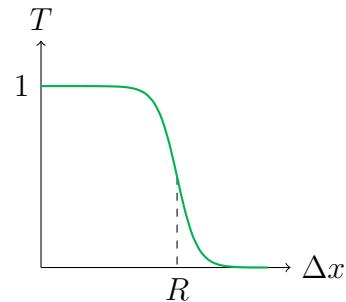
Nella realtà intervengono le fluttuazioni statistiche, che rendono il percorso di ciascuna particella peculiare. Ne segue che di volta in volta si può perdere più o meno energia e di conseguenza la particella si fermerà rispettivamente prima o dopo rispetto a R . Ciò fa sì che la curva ottenuta è una sorta di sigmoide, che parte da 1 ma poi si smussa,

⁸In altre parole, nel caso ideale in assenza di fluttuazioni statistiche (il che significherebbe che le particelle seguirebbero tutte lo stesso percorso, subendo un uguale numero di collisioni e quindi perdendo la stessa energia), ci aspettiamo un andamento a gradino.

per cui non c'è un passaggio netto dalla situazione in cui la particella passa a quella in cui non passa. Questa è la curva che osserviamo sperimentalmente⁹.



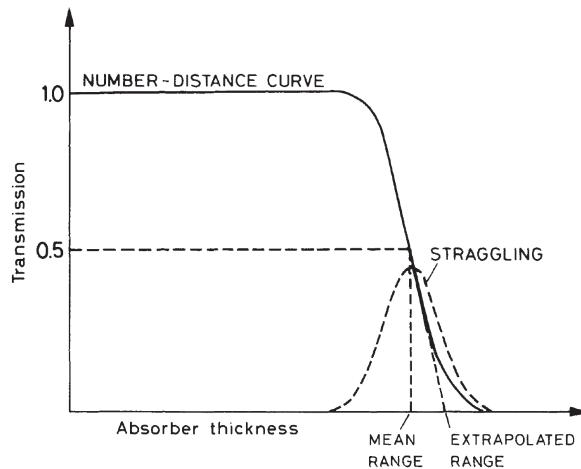
Caso ideale.



Caso reale.

Il grafico così realizzato prende il nome di *grafico di trasmissione*. Sulle ascisse riportiamo lo spessore attraversato, che può essere espresso sia in unità lineari (ad esempio cm) che in unità superficiali, mentre in ordinate il coefficiente di trasmissione. Esso si può definire per qualsiasi radiazione e può essere utile per determinare che spessore di materiale adoperare per essere schermati da un tipo di radiazione.

Analizziamo adesso in maniera più dettagliata la curva di trasmissione:



La dispersione dell'energia depositata e del range della particella prendono il nome di *effetti di straggling*, cioè di allargamento: mentre idealmente R è un valore definito, nei fatti è difficile da definire in quanto ogni particella ha un suo range, nel senso che si può fermare prima o dopo rispetto al valore nominale.

È comunque possibile definire il range di una particella: dal grafico possiamo ricavare il range medio, spessore in corrispondenza del quale il fascio viene dimezzato (cioè riescono a passare solo il 50% delle particelle). In alternativa, si può ricavare il range estrapolato, definito come l'intersezione della tangente alla sigmoide nel punto del range medio con l'asse delle ascisse.

Nel grafico figura anche una gaussiana: essa rappresenta lo spessore percorso da un certo numero di particelle prima di fermarsi, che non sempre è lo stesso, per cui abbiamo una

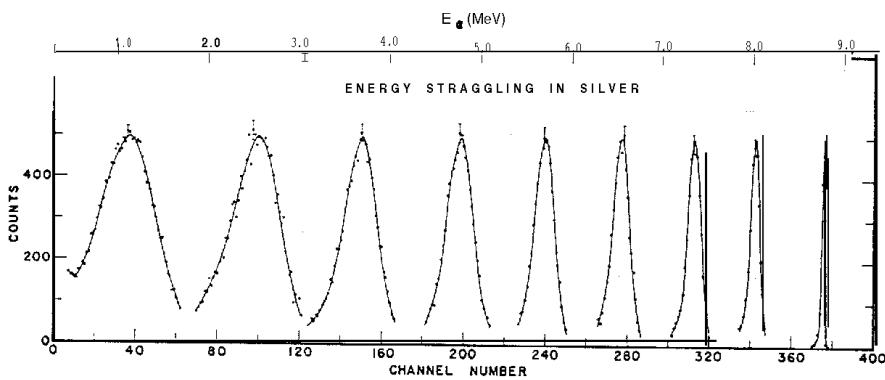
⁹Per misurare sperimentalmente il range di una particella dovremmo avere una sorgente che emette la particelle a una data energia, un rivelatore posizionato a una certa distanza e a quel punto effettuiamo delle misure interponendo spessori di un dato materiale via via crescenti, andando a misurare il numero di particelle osservate rispetto al numero di particelle senza nessuno spessore.

distribuzione di valori centrata intorno al valor medio e con una certa larghezza che dipende dalle caratteristiche della particella e del materiale.

È chiaro che maggiori sono le fluttuazioni nel range, più la sigmoide sarà smussata, se invece le fluttuazioni sono piccole la curva tenderà sempre più ad una curva a gradino. Nel caso particolare di particelle cariche pesanti la sigmoide è molto vicina ad una curva a gradino.

Oltre che per la funzione di schermaggio, il range può essere adoperato per valutare lo spessore che deve avere un rivelatore per arrestare totalmente una particella e quindi misurarne tutta l'energia.

Oltre che in termini di range, gli effetti di straggling si manifestano anche in termini energetici.



Nel grafico possiamo vedere degli spettri di energia ottenuti da un rivelatore che misura l'energia di particelle provenienti da una sorgente ad energia fissata E al variare dello spessore di materiale assorbitore interposto.

Senza interporre alcun materiale tra sorgente e rivelatore, quello che si dovrebbe misurare dovrebbe essere una delta di Dirac, cioè idealmente dovremmo misurare sempre lo stesso valore di energia con cui vengono emesse dalla sorgente, ed è ciò che si osserva nel picco più a destra, il quale ha una sua larghezza per motivi di risoluzione dell'apparato sperimentale. Il fatto che sia un picco molto stretto ci dice che l'energia delle particelle che stanno arrivando assume quasi sempre lo stesso valore, con delle fluttuazioni molto piccole.

Se adesso interponiamo un materiale tra sorgente e rivelatore, le particelle incideranno su di esso, e se questo è sufficientemente sottile riusciranno ad attraversarlo perdendo una parte della loro energia, per cui giungeranno al rivelatore con un'energia degradata pari a $E - \Delta E$; ne segue che andando a misurare l'energia delle particelle adesso vedremo il picco spostato a sinistra, a valori un po' più piccoli; inoltre esso si allarga. Questo effetto di allargamento diventa sempre più evidente man mano che aumenta lo spessore, infatti i picchi che vediamo in figura andando verso sinistra sono stati ottenuti interponendo spessori via via crescenti. È chiaro che se stiamo misurando qualcosa significa che gli spessori sono inferiori al range della particella, altrimenti non misureremo nulla perché le particelle verrebbero arrestate.

Il fatto che le distribuzioni si allargano ci dice che è come se ci fosse una indeterminazione maggiore nell'energia residua della particella, che equivale a delle fluttuazioni nell'energia depositata nel materiale, che sono tanto più grandi quanto maggiore è lo spessore di materiale interposto.

In sintesi, un altro modo di mettere in evidenza gli effetti di straggling è quello di interporre materiale con spessore via via maggiore: quello che si osserva è non solo una maggiore perdita di energia, ma anche che quest'ultima ha delle fluttuazioni via via più grandi.

3.3.2 Il channeling

Per quanto riguarda la perdita di energia per collisioni, si deve fare un discorso leggermente diverso quando si parla di materiali cristallini.

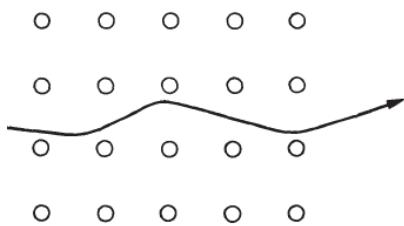


Fig. 2.6. Schematic diagram of channeling in crystalline materials. The particle suffers a series of correlated scatterings which guides it down an open channel of the lattice

In questi infatti si può verificare un altro effetto che prende il nome di channeling, cioè la particella, entrando con un opportuno angolo di incidenza, potrebbe seguire un percorso tra i piani del cristallo, quindi subirà meno collisioni di quante ne avrebbe avute con un angolo di incidenza diverso o attraversando un materiale amorfico. Nei casi di channeling la formula di Bethe-Bloch sovrastima la perdita di energia, nel senso che nei fatti si perde meno energia del valore teorico in virtù del fatto che le particelle seguono un percorso particolare.

Per verificarsi tale effetto il materiale deve essere cristallino, cioè dotato di una struttura ordinata di atomi e la particella deve entrare nel cristallo con un angolo di incidenza molto piccolo rispetto all'asse di simmetria del cristallo.

3.3.3 Come calcolare il range di una particella

Da un punto di vista teorico, il range medio di una particella che incide su un materiale con energia E_{inc} si può calcolare mediante l'integrale

$$R(E_{\text{inc}}) = \int_0^{E_{\text{inc}}} \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

il quale può essere valutato mediante integrazione numerica.

Approfondimento 3.1: C'è range... e range!

Il calcolo del range mediante la formula appena vista fornisce una stima della lunghezza del percorso effettuato dalle particelle nel materiale. Tuttavia essa ignora gli effetti dello scattering multiplo dovuto alle interazioni Coulombiane, che porta la particella a compiere un percorso a zigzag attraverso il materiale. Ne segue che il range, definito come un percorso in linea retta dentro l'assorbitore, sarà in generale più piccolo del percorso reale. Nei fatti però, per le particelle pesanti gli effetti dello scattering multiplo sono piccoli, per cui la traiettoria percorsa risulta essere molto simile ad un percorso lineare e quindi le due definizioni di range coincidono; nel caso degli elettroni ciò non sarà più vero.

3.4 Radiazione Cherenkov

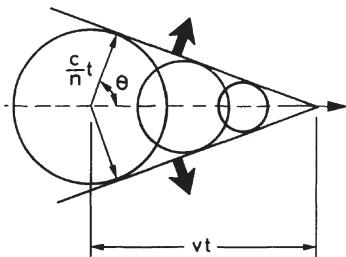
È uno dei possibili meccanismi di perdita di energia. L'emissione di tale radiazione avviene quando la velocità della particella nel mezzo supera la velocità della luce nello stesso mezzo. Quest'ultima è data da

$$\beta c = v = \frac{c}{n}$$

dove n è l'indice di rifrazione del mezzo e c la velocità della luce nel vuoto. Ne segue che la condizione affinché una particella emetta radiazione Cherenkov è

$$v_{\text{part}} > \frac{c}{n}$$

È un po' lo stesso effetto che avviene per il suono con il cosiddetto "cono di Mach", che si presenta quando si supera la velocità del suono in quel mezzo. In questo caso viene generata un'onda d'urto elettromagnetica con fronte d'onda conico.



Tale radiazione è direzionata: viene messa all'interno di un cono con una certa apertura, la quale dipende da n e dalla velocità della particella: maggiore è la velocità, minore sarà l'apertura del cono

$$\vartheta_{\text{Ch}} = \arccos \left(\frac{1}{\beta n} \right)$$

La radiazione emessa ha uno spettro continuo, nel senso che non ci sono dei valori di frequenza privilegiati; tuttavia, concentrando nel visibile, questo spettro è proporzionale alla frequenza, per cui si ha una maggiore emissione nel blu.

È una luce polarizzata linearmente e la perdita di energia dE/dx dovuta a questo effetto (che è già inclusa nella formula di Bethe-Bloch, sebbene trascurabile) è un contributo piccolo, che vale 10^{-3} MeV cm²/g per i solidi e 10^{-1} - 10^{-2} MeV cm²/g per i gas, mentre nei grafici precedenti il minimo di ionizzazione si trova a 1-2 MeV cm²/g. Tuttavia essa è da menzionare per l'uso che se ne fa in fisica. Ad esempio viene adoperata per rivelare particelle: un esempio si ha in astronomia, dove TeV di radiazioni gamma incidono sulla atmosfera, producendo coppie elettrone-positrone e queste particelle producono radiazione Cherenkov nell'atmosfera. Se abbiamo un rivelatore in grado di misurare tale radiazione (telescopio Cherenkov), possiamo effettuare misure dei gamma di partenza, ed essendo una luce direzionata possiamo anche ricostruire la direzione di arrivo dei gamma.

Un'applicazione simile si ha nella fisica dei neutrini, i quali interagiscono pochissimo con la materia, per cui per rivelarli sono necessari rivelatori di grandi volumi in modo da aumentare la probabilità di interazione. A causa di ciò, negli ultimi anni si è pensato che anziché usare oggetti creati dall'uomo si possono usare risorse naturali come l'acqua del mare e il ghiaccio, ponendo in essi dei rivelatori e usandoli come materiale attivo di rivelazione. L'idea è che ad esempio un neutrino attraversi km di acqua, interagisca e produca un muone, il quale produce effetto Cherenkov. Se siamo in grado di misurare tale luce, abbiamo indirettamente misurato l'arrivo di un neutrino. Ne è un esempio il

Km3net: torri di rivelatori di luce (fotomoltiplicatori) calate in mare per misurare la radiazione Cherenkov con lo scopo di rivelare i neutrini.

Nel campo della fisica delle particelle e della fisica nucleare esistono i rivelatori Cherenkov, i quali servono a identificare le particelle, perché attraverso la rivelazione del cono Cherenkov cioè di questa luce abbiamo informazioni sulle particelle: dalla velocità possiamo ricavare l'impulso e quindi la massa, la quale ci permette di identificare le particelle. Esistono poi i contatori Cherenkov, che permettono di misurare particelle aventi velocità al di sopra di una certa soglia.

Tale radiazione viene usata nei reattori a fissione per andare a misurare l'attività presente, in quanto nei processi di fissione si generano sempre particelle cariche che producono radiazione Cherenkov.

3.5 Possibili esercizi

Esercizio 3.1

Valutare la perdita di energia di particelle α da 5 MeV in un foglio di carta alluminio da cucina. Dati:

- Spessore fogli della carta da cucina: 0.016 mm;
- Densità alluminio: 2.7 g/cm^3 ;
- Densità superficiale: $2.7 \cdot 0.0016 \text{ g/cm}^2 = 0.004 \text{ g/cm}^2$.

Per tale attività serve la formula di Bethe-Bloch e poi bisogna costruire un grafico dei valori di perdita di energia specifica al variare dello spessore del foglio. La perdita di energia si calcolerà come

$$\Delta E = \left(\frac{dE}{dx} \right) \Delta x$$

con dE/dx calcolato con Bethe-Bloch.

Attenzione! Questa formula è un'approssimazione: sarebbe valida se dE/dx fosse costante al variare di x . Nella realtà sappiamo che man mano che la particella penetra nel materiale perde energia e di conseguenza dE/dx cambia. Essa è comunque valida per valori piccoli di Δx .

Esercizio 3.2

Valutare la perdita di energia di muoni cosmici verticali (al minimo di ionizzazione) in

- a. una lastra di ferro di 10 cm di spessore;
- b. un solaio di cemento di 30 cm di spessore.

Stavolta non viene fornito l'impulso della particella, viene detto che incidono verticalmente sulla lastra e si trovano al minimo di ionizzazione, pertanto dobbiamo

ricavare graficamente tale valore. Un'altra difficoltà è il fatto che il cemento non è una sostanza pura, per cui dobbiamo capirne la composizione e fare una stima della perdita di energia usando la formula della perdita di energia per i composti. Da tale esperienza deduciamo che con tali spessori i muoni perdono energia ma riescono ad attraversare il materiale.

Esercizio 3.3

Valutare lo spessore necessario per degradare in energia un fascio di protoni da 600 MeV fino a portarli a 500 MeV mediante uno spessore di Rame (vedi Esempio 2.2 nel Leo).

Il potenziale di ionizzazione medio

Alcuni termini della formula di Bethe-Bloch possono essere definiti in diverso modo. Ne è un esempio il potenziale di ionizzazione medio, che abbiamo indicato con I e può essere definito come:

- Un valore proporzionale a Z ;
- Un valore costante valido per tutti gli atomi, sebbene in realtà esso vari in base al numero atomico: varia molto negli elementi leggeri, per poi stabilizzarsi per elementi pesanti. Si può allora pensare di farne un valor medio;
- Una formula per parametrizzare se siamo in regime di nuclei leggeri o pesanti;
- Un valore preso da tabelle.

Come tenere conto di uno spessore finito

Per valutare la perdita di energia in uno spessore finito inizialmente abbiamo usato l'approssimazione con cui valutavamo il dE/dx in corrispondenza dell'energia incidente iniziale e moltiplicavamo questo per lo spessore attraversato Δx . Ciò che in realtà è corretto fare è dividere il Δx in tanti piccoli spessori dx , valutare lo stopping power all'inizio di ciascun intervallino, cioè cerchiamo di capire quant'è l'energia in ingresso, calcoliamo il dE/dx e poi la perdita di energia in tale spessore. Dopodiché passiamo allo spessore successivo in cui le energie in ingresso sarà data alla differenza dell'energia di prima meno la perdita di energia dE . Si procede per passi di dx fin quando valutiamo la perdita di energia complessiva in tutto lo spessore. Con tale metodo teniamo conto del fatto che la perdita di energia assume via via un valore diverso, la quale aumenta man mano che la particella penetra nel materiale.

Capitolo 4

Perdita di energia per elettroni

Come le particelle cariche pesanti, anche gli elettroni e i positroni subiscono una perdita di energia quando attraversano la materia; tuttavia, il fatto che la loro massa sia molto più piccola (basti pensare che la massa di un elettrone è 511 keV mentre quella del protone è di circa 1 GeV), fa sì che alcune interazioni non siano più trascurabili. In conseguenza a ciò gli elettroni all'interno della materia seguono percorsi molto più irregolari di quelli delle particelle pesanti, quindi il percorso non può più essere considerato pressoché rettilineo, bensì l'elettrone può cambiare direzione ad ogni interazione importante.

4.1 Interazione degli elettroni con la materia

Cerchiamo allora di capire quali sono i meccanismi mediante i quali gli elettroni perdono energia nella materia.

Mentre per le particelle cariche pesanti il contributo principale è dovuto alle interazioni con gli elettroni atomici e gli altri termini si possono trascurare, per gli elettroni intervengono diversi meccanismi non sempre trascurabili, pertanto la perdita di energia degli elettroni in un mezzo è complessa da calcolare (di solito si stima con programmi/codici, ad esempio GEANT).

I meccanismi attraverso cui gli elettroni perdono energia sono:

- Collisioni con elettroni atomici;
- Radiazione di frenamento (*bremsstrahlung*): una radiazione elettromagnetica della regione dei raggi X che viene emessa a seguito di un'accelerazione della particella nel campo elettrico nucleare.

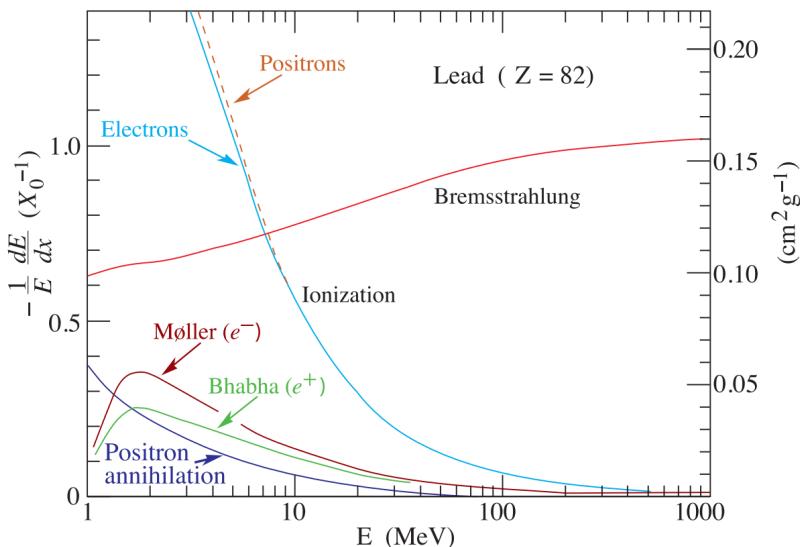
Quando dobbiamo tenere in considerazione questo ulteriore termine?

Per particelle incidenti aventi basse energie prevale il processo collisionale, similmente alle particelle cariche pesanti, mentre ad alte energie prevale il processo radiativo, cioè di bremsstrahlung (viene detto radiativo perché viene emessa radiazione), quindi l'energia viene persa attraverso l'emissione di fotoni X .

Osserviamo il seguente grafico: in esso è riportata la perdita di energia specifica in funzione dell'energia della particella, e in particolare troviamo gli andamenti di ciascun termine singolarmente: in blu è riportato l'andamento della perdita di energia per

processo collisionale (da notare che ci sono due curve: una per gli elettroni e una per i positroni, che si differenziano leggermente a bassa energia ma poi si unificano), il quale diminuisce rapidamente con l'energia stessa; in rosso è riportato l'andamento dovuto al processo radiativo, il quale va a crescere con l'energia.

La scala è logaritmica rispetto alle ascisse e lineare rispetto alle ordinate; in particolare su quest'ultime è riportata la perdita di energia specifica divisa per l'energia, la quale è espressa in unità di lunghezza di radiazione, che è una grandezza che esprime una quantità proporzionale alla perdita di energia per un dato processo:



I due andamenti si incontrano in un punto, in corrispondenza del quale andiamo a valutare la cosiddetta *energia critica* E_c , che è l'energia per la quale i due processi hanno lo stesso contributo, cioè provocano la stessa perdita di energia per unità di percorso:

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{coll}} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} \quad \text{per} \quad E = E_c$$

Il valore di tale energia dipende dal materiale adoperato (ad esempio nel grafico che è relativo ad elettroni che incidono su piombo si trova a circa 10 MeV).

Da quanto visto deduciamo che se vogliamo calcolare la perdita di energia di un elettrone in un dato spessore di materiale dobbiamo considerare l'energia dell'elettrone, così da capire se è più incisivo il contributo collisionale (basse energie), quello radiativo (alte energie) o se sono confrontabili (intorno al punto critico). Ci potremmo poi chiedere cosa succede quando, per alta energia, vengono emessi fotoni X , cioè a cosa danno luogo questi nel materiale, oppure ci potremmo chiedere se a bassa energia intervengono altri fenomeni. Tutto ciò rende il calcolo della perdita di energia difficile da calcolare.

Andiamo a vedere i diversi contributi. Si può innanzitutto dire che la perdita di energia specifica per unità di percorso è data dalla somma del contributo collisionale più quello radiativo:

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{tot}} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{coll}} + \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}}$$

4.1.1 Contributo collisionale

Il contributo di collisione è dato da

$$-\frac{dE}{dx} \Big|_{\text{coll}} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{\tau^2(\tau+2)}{2(I^2/m_e c^2)} + F(\tau) - \delta - 2 \frac{C}{Z} \right) \right]$$

È simile alla formula di Bethe-Bloch, ma ci sono alcune differenze. Esse sono dovute al fatto che gli elettroni non percorrono un percorso rettilineo, bensì molto irregolare; inoltre le particelle che incidono sono uguali a quelle con cui vanno a collidere ovvero gli elettroni atomici, per cui c'è una sorta di indistinguibilità tra questi e gli elettroni proiettili.

Compare il termine τ , che rappresenta l'energia incidente in unità della massa dell'elettrone, dato da

$$\tau = \frac{E_{k_e}}{m_e c^2} = \gamma - 1$$

Inoltre figura il termine $F(\tau)$, che vale

$$F(\tau) = 1 - \beta^2 + \frac{\tau^2/8 - (2\tau + 1) \ln 2}{(\tau + 1)^2} \quad \text{per } e^-$$

$$F(\tau) = 2 \ln 2 - \frac{\beta^2}{12} \left[23 + \frac{14}{(\tau + 2)} + \frac{10}{(\tau + 2)^2} + \frac{4}{(\tau + 2)^3} \right] \quad \text{per } e^+$$

4.1.2 Contributo radiativo

Prima di affrontare il contributo dovuto alla radiazione, cerchiamo di capire perché non abbiamo preso in considerazione tale termine nel caso di particelle cariche pesanti. Infatti l'emissione di radiazione per bremsstrahlung riguarda un'interazione elettrica tra oggetti carichi, che sono il nucleo e la particella incidente, per cui teoricamente dovremmo considerarla anche nel caso di particelle cariche pesanti. Tuttavia, se guardiamo in dettaglio la forma della sezione d'urto per tale processo si trova la seguente proporzionalità:

$$\frac{d\sigma}{dE} \propto \frac{Z^2}{m_i^2} \frac{\ln E}{E}$$

dove Z è relativo al materiale. Tale proporzionalità è dovuta al fatto che, trattandosi di un processo di interazione tra la particella è il nucleo, se quest'ultimo ha una nuvola di elettroni questa darà un effetto di schermaggio.

Ciò che è più importante però è la dipendenza dall'inverno del quadrato della massa della particella incidente, che è il motivo per cui non consideriamo tale contributo per le particelle cariche pesanti: la sezione d'urto diminuisce all'aumentare della massa.

Per quantificare facciamo un confronto tra la sezione d'urto dovuta a tale processo per elettroni e muoni, i quali hanno una massa di 207 volte quella degli elettroni. A parità di energia e se consideriamo lo stesso materiale tale rapporto si riduce al rapporto tra i quadrati delle masse, che risulta valere

$$\left(\frac{m_e}{m_\mu}\right)^2 = \frac{1}{37000}$$

Tale esempio ci mostra perché tale contributo sia normalmente trascurabile¹.

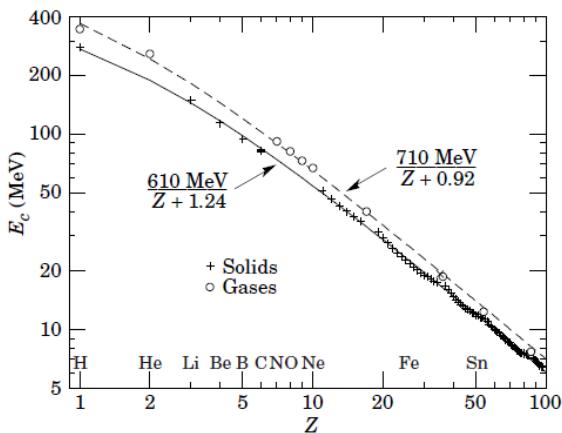
La perdita di energia specifica dovuta alla radiazione di frenamento è data da

$$-\frac{dE}{dx} \Big|_{\text{rad}} = 4Z^2 r^2 \alpha \left[\ln \left(183Z^{-\frac{1}{3}} \right) + \frac{1}{18} - f(Z) \right] NE$$

il fatto che ci sia il termine Z^2 ci dice che la perdita di energia dipende dal materiale attraversato.

4.1.3 Energia critica

Concentriamoci ora sull'energia critica.



Siccome la sezione d'urto è complessa, non è facile avere una formula teorica per calcolare l'energia critica, per cui si fanno diverse parametrizzazioni.

Nel grafico è riportato il valore di energia critica espresso in MeV e in funzione di Z , quindi man mano passiamo da elementi più leggeri a elementi più pesanti. Ci sono due parametrizzazioni: una per i solidi e una per il gas.

In base al valore di energia critica possiamo capire se bisogna tenere conto del contributo radiativo oppure no. Ad esempio, in laboratorio, per studiare la perdita di energia degli elettroni attraverso spessori di vari materiali come ad esempio l'alluminio, adoperiamo delle sorgenti β di stronzio e ittrio poco energetiche, che hanno un endpoint dello spettro intorno a 2.3 MeV; dal grafico però si evince che l'energia critica per l'alluminio ($Z = 13$) è di circa 40 MeV, per cui la perdita di energia è imputabile totalmente al processo collisionale.

Vediamo altri esempi di curve di perdita di energia sia complessiva che dovuta singolarmente ai due processi:

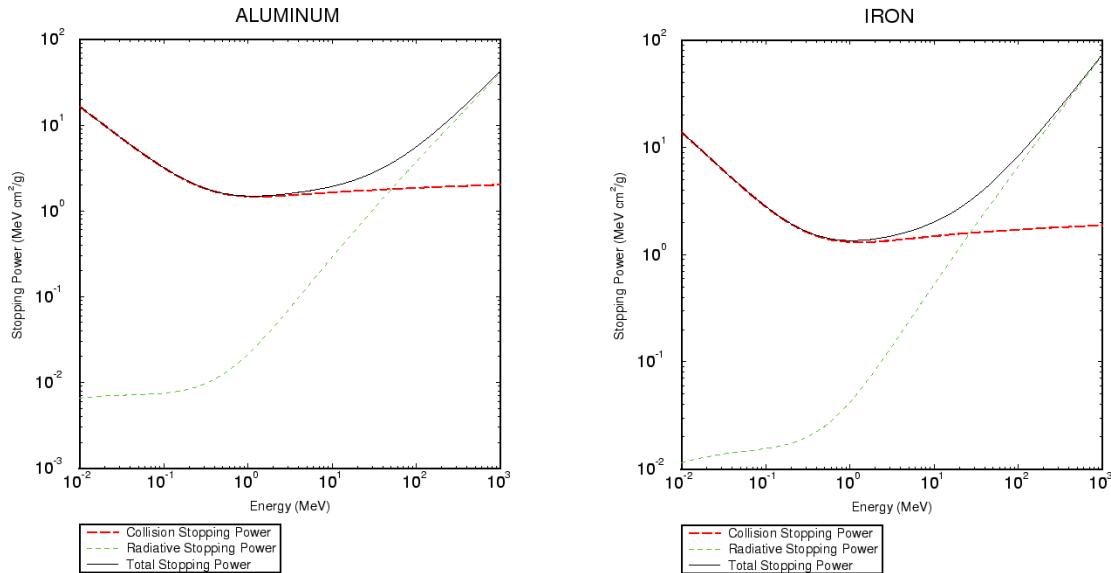
Esempio 4.1

In figura è riportata in nero la perdita di energia complessiva degli elettroni per due materiali diversi (alluminio a sinistra e ferro a destra).

Notiamo come gli elettroni inizialmente, per basse energie, hanno una perdita di energia abbastanza elevata che va diminuendo fino ad un minimo, ed il motivo di tale andamento è che in tale regione interviene principalmente il meccanismo di perdita di energia collisionale, che ha appunto un andamento discendente. Dopo il minimo si risale soprattutto a causa del termine radiativo, ed infatti fino a energie

¹Ad energie molto elevate, ad esempio nel caso di acceleratori di particelle, va considerato.

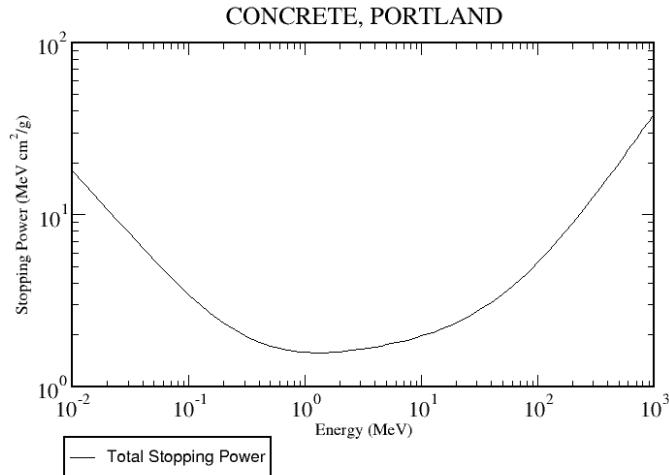
dell'ordine del MeV la curva complessiva e quella del contributo collisionale coincidono. Il contributo radiativo invece assume inizialmente dei valori molto bassi per poi diventare preponderante al di sopra della decina di MeV.



Dai due grafici evinciamo come il punto critico cambi in base al tipo di materiale.

Esempio 4.2

In figura è riportata la perdita di energia di elettroni nel caso del cemento.



Se ad esempio volessimo studiare l'effetto di schermaggio che produce un solaio di un qualsiasi edificio relativo agli elettroni della radiazione cosmica, un grafico di questo tipo permette di stimare qual è il minimo valore di energia che deve avere un elettrone cosmico per poter attraversare un determinato spessore di cemento.

4.1.4 Riepilogo

Processo collisionale

$\frac{dE}{dx}$ varia linearmente con Z^2 ;

Domina a energie minori di quella critica;

L'energia è ceduta al materiale assorbente (agli elettroni atomici);

Avvengono molte collisioni, quindi la perdita di energia è graduale.

Bremsstrahlung

$\frac{dE}{dx}$ varia quadraticamente con Z ;

Domina a energie maggiori di quella critica;

L'energia è ceduta ai fotoni;

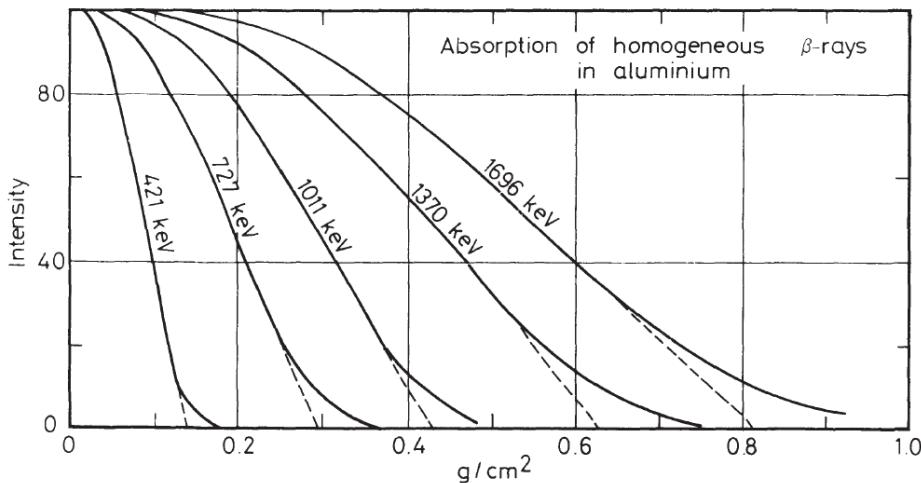
Pochi fotoni emessi.

4.2 Range degli elettroni

A causa della maggiore suscettibilità dell'elettrone allo scattering multiplo da parte dei nuclei, il range degli elettroni è generalmente molto diverso dalla lunghezza del percorso calcolata mediante integrazione della formula del dE/dx :

$$\text{range} \neq \int \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

Spesso si riscontrano differenze che vanno dal 20% al 400% a seconda dell'energia e del materiale. Inoltre, la perdita di energia da parte degli elettroni oscilla molto di più che per le particelle pesanti. Ciò è dovuto al trasferimento di energia molto maggiore per collisione consentito per gli elettroni e all'emissione di bremsstrahlung. In entrambi i casi è possibile che poche singole collisioni (o fotoni) assorbono la maggior parte dell'energia dell'elettrone. Ciò ovviamente si manifesta in effetti ancora maggiori di straggling e quindi il concetto di range diventa ancora meno definito di quanto non lo fosse per le particelle cariche pesanti.



²Tale dipendenza ci dice che la scelta del materiale è più incisiva sul contributo radiativo.

In tale grafico è rappresentato il coefficiente di trasmissione³ in funzione del percorso effettuato in un materiale espresso in unità di densità superficiale⁴. Le varie curve sono ottenute per fasci di elettroni mono-energetici ad energie diverse.

Notiamo come gli elettroni meno energetici percorrono meno spazio nella materia e la curva scende rapidamente ed è molto smussata, per cui non si può identificare un gradino come per le particelle cariche pesanti. Tuttavia anche qui possiamo ricavare il range o considerando il range medio (ovvero la distanza percorsa da almeno metà delle particelle incidenti) o il range extrapolato (l'intersezione della tangente alla curva nel punto medio con l'asse delle ascisse, in figura rappresentata dalla linea tratteggiata). All'aumentare dell'energia degli elettroni la curva si sposta verso valori più elevati, l'andamento smussato persiste ed il range diventa ancora meno definito.

In realtà in natura i raggi β non sono monocromatici, cioè non vengono emessi a precisi valori di energia, in quanto lo spettro del decadimento β è continuo. È quindi chiaro che queste curve sono state ottenute selezionando mediante campi magnetici elettroni con date energie. Infatti gli elettroni vengono deviati con un raggio di curvatura che dipende dall'energia, per cui posizionando il rivelatore ad un certo angolo di deviazione andiamo a selezionare elettroni di una certa energia. L'energia con cui possiamo sceglierli diventa sempre più precisa al restringersi dell'angolo solido, per cui spesso si usano dei collimatori, strumenti che vanno a selezionare una porzione del fascio (come un ostacolo con un foro, per cui misuriamo solo quello che passa dal foro).

Nella realtà quindi non troveremo elettroni monocromatici (mono-energetici), bensì ad energie diverse, per cui sperimentalmente, effettuando un esperimento di trasmissione, avremo a disposizione elettroni con energie molto piccole, anche prossime allo zero, e altri con energie di alcuni MeV, con una proporzione che dipende dallo spettro di emissione. Nel caso di stronzio-90 e ittrio-90 prevalgono le energie più basse, per cui ci aspettiamo una curva tendenzialmente a sinistra. Ne segue che quando effettuiamo un esperimento di trasmissione si deve fare una convoluzione, nel senso che ci saranno più curve, ciascuna per una certa energia, pesate rispetto al numero di particelle aventi tale energia.

4.3 Assorbimento degli elettroni

Poiché gli elettroni assumono valori continui di energia, quello che poi andiamo a misurare in laboratorio è un andamento più simile ad un esponenziale decrescente. I fattori che determinano tale andamento sono lo spettro continuo dei β e lo straggling (il quale rende la curva smussata).

Una rappresentazione semi-empirica dell'assorbimento degli elettroni si ha tramite la legge

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

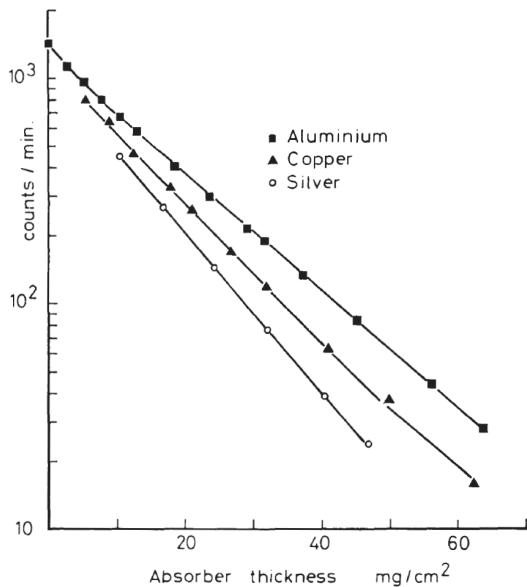
³Se guardiamo attentamente il grafico notiamo che in realtà in ordinate è riportata l'intensità del fascio, ciò però non è rilevante in quanto per ottenere il coefficiente di trasmissione basta dividere per I_0 , che è un valore costante.

⁴Il fatto che esprimiamo lo spessore in termini di densità superficiale rimuove la dipendenza dalla densità del materiale. In conseguenza a ciò, cambiando materiale il grafico cambierà di poco, mentre se esprimessimo lo spessore in unità di lunghezza si osserverebbero notevoli variazioni.

da cui segue immediatamente che il coefficiente di trasmissione avrà il seguente andamento:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$$

dove x è lo spessore attraversato e μ è il *coefficiente di assorbimento degli elettroni*, un parametro che dipende dal tipo di materiale e che rappresenta la pendenza della curva in figura, che ha la forma di un relazione lineare perché le ordinate sono riportate in scala logaritmica.



Nel grafico è riportato il numero di elettroni che attraversano un determinato spessore di materiale (espresso in unità di densità superficiale) per diversi materiali.

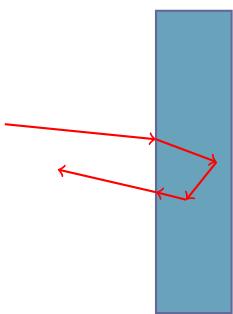
μ rappresenta quindi la capacità di assorbimento di un dato materiale: tanto più è grande, tanto più il materiale riesce ad assorbire gli elettroni. Si esprime in cm^{-1} o in cm^2/g (perché deve dare un numero puro). In particolare il termine $1/\mu$ rappresenta lo spessore necessario a ridurre il flusso iniziale di un fattore $1/e$:

$$x = \frac{1}{\mu} \implies I = I_0 e^{-\frac{\mu}{\mu}} = \frac{I_0}{e}$$

Lo scopo dell'esperienza è quindi trovare i vari punti e realizzare un best-fit lineare per valutare μ . I vari punti corrispondono a diversi spessori in corrispondenza dei quali calcoliamo I/I_0 . Per linearizzare la formula si fa un passaggio ai logaritmi:

$$\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \log(e^{-\mu x}) = -\mu x$$

4.4 Backscattering



Nella materia gli elettroni, durante il loro percorso, variano di molto la loro direzione. Tale effetto è tanto più evidente quanto più bassa è l'energia dell'elettrone; nel caso di elettroni a bassissima energia si può anche verificare il fenomeno del *backscattering*, cioè scattering all'indietro: l'elettrone, a seguito delle diverse collisioni, ritorna indietro. Sperimentalmente esso rappresenta un rischio perché potremmo perdere segnale in quanto tali elettroni non vengono rivelati né depositano tutta la loro energia.

Il motivo per cui subiscono tale processo è che gli elettroni sono particelle di massa molto piccola, il che le rende particolarmente suscettibili a deflessioni di un grande angolo a seguito dello scattering coi nuclei; il perché tale fenomeno sia più evidente a basse energie è una conseguenza dei calcoli (aumenta la probabilità di avere scattering

ad angoli più grandi), ma classicamente ce lo possiamo spiegare immaginando di trovarci in una stanza in cui sono presenti tante persone e di voler passare da una parte all'altra: se passiamo lentamente (quindi bassa energia cinetica) collidiamo e abbiamo difficoltà a muoverci in maniera rettilinea, mentre se passiamo correndo (quindi alta energia cinetica) scansiamo alcune persone e riusciamo a muoverci in linea dritta.

Approfondimento 4.1: Perché il fenomeno del backscattering per gli elettroni è più evidente a basse energie?

Questa risposta me l'ha data chatgpt, ma mi sembra interessante riportarla.

Il fenomeno del backscattering per gli elettroni è più evidente a basse energie principalmente a causa delle interazioni tra gli elettroni e il materiale target, che dipendono fortemente dall'energia degli elettroni incidenti. Vediamo alcuni punti chiave che spiegano questo comportamento:

1. Interazioni elastiche e inelastiche:

- Interazioni elastiche: A basse energie, le interazioni elastiche tra gli elettroni incidenti e gli atomi del materiale sono più frequenti. In queste interazioni, gli elettroni possono essere deviati indietro (backscattered) con una probabilità maggiore.
- Interazioni inelastiche: Quando l'energia degli elettroni incidenti è alta, le interazioni inelastiche, in cui gli elettroni perdono energia attraverso l'eccitazione o la ionizzazione degli atomi del materiale, diventano più dominanti. Questo riduce la probabilità che gli elettroni vengano retro-diffusi, poiché tendono a penetrare più profondamente nel materiale e perdere energia piuttosto che essere riflessi indietro.

2. Penetrazione nel materiale:

- A basse energie, gli elettroni penetrano meno nel materiale a causa della loro minore energia cinetica. Questo significa che hanno maggiori probabilità di interagire con gli atomi superficiali del materiale e di essere riflessi indietro.
- A energie più alte, gli elettroni possono penetrare più in profondità nel materiale, riducendo la probabilità di backscattering poiché le loro traiettorie sono meno influenzate dalle interazioni con gli atomi superficiali.

3. Scattering angolare:

- A basse energie, l'angolo di scattering degli elettroni a seguito di interazioni elastiche è più grande. Questo significa che gli elettroni sono più facilmente deviati verso angoli maggiori, inclusi angoli prossimi a 180 gradi (backscattering).
- A energie più alte, l'angolo di scattering tende a essere più piccolo, e quindi gli elettroni sono meno probabilmente retro-diffusi.

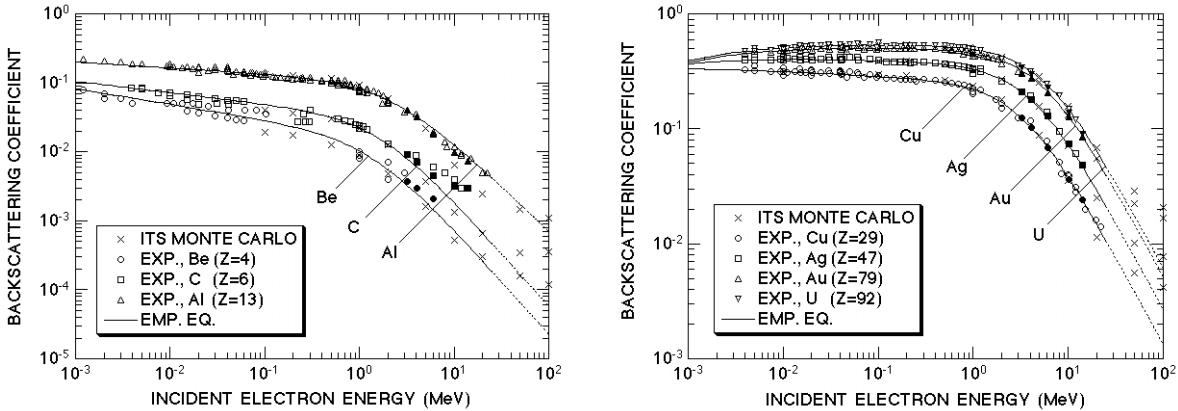
4. Effetto del potenziale nucleare:

- Gli elettroni a basse energie sono più influenzati dal potenziale coulombiano del nucleo degli atomi del materiale. Questo può causare una maggiore deflessione indietro degli elettroni incidenti.
- A energie più alte, gli elettroni hanno meno probabilità di essere significativamente deviati dal potenziale nucleare a causa della loro maggiore velocità e momento.

In sintesi, il backscattering degli elettroni è più evidente a basse energie perché le interazioni elastiche sono più frequenti e dominanti, gli elettroni penetrano meno nel materiale e sono più facilmente deviati verso angoli maggiori.

Oltre che dall'energia, il processo di backscattering dipende anche dal numero atomico Z del materiale.

Il backscattering si quantifica tramite il *coefficiente di backscattering*, che rappresenta il rapporto tra il numero di elettroni che vengono backscatterati rispetto al numero di elettroni incidenti. Talvolta viene chiamato anche *albedo*⁵. Per come è definito segue che esso può valere al massimo 1 (o 100%).



I grafici riportano i valori del coefficiente di backscattering in funzione dell'energia dell'elettrone. Come detto prima è elevato ad energie basse e diminuisce all'aumentare dell'energia in modo drastico (da notare che le scale adoperate sono logaritmiche), per cui ad alte energie è un effetto trascurabile. Il fatto che ci siano curve diverse per materiali diversi ci dice che c'è una dipendenza anche dal tipo di materiale. In particolare il backscattering è meno evidente per materiali più leggeri, per cui il coefficiente è più piccolo. Nei materiali più pesanti (grafico a destra) invece questo effetto prevale anche per energie dell'ordine del MeV e non si può trascurare.

4.5 Scattering multiplo

Il percorso seguito da una particella può essere più o meno frastagliato, cioè con più o meno deviazioni. Studiamo ora nel dettaglio i motivi per cui si devia dal percorso rettilineo.

Il maggiore contributo al processo di deflessione è dato dai processi coulombiani di scattering elastico (in misura minore anche dalla interazione nucleare). Ciò che si fa è distinguere tre casi principali:

- Se lo spessore adoperato è particolarmente sottile, siamo nel caso in cui è molto probabile che si verifichi un singolo scattering all'interno di tale spessore (*single scattering*). Esso può essere affrontato con lo scattering Rutherford, in cui la sezione d'urto è funzione dell'angolo di scattering

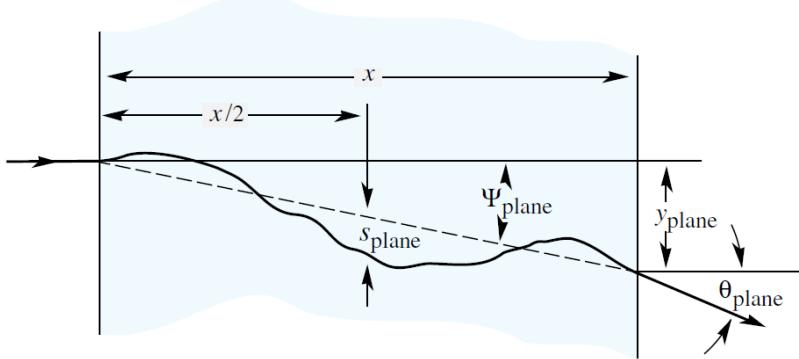
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = z_2^2 z_1^2 r_e^2 \frac{(m_e c / \beta p)^2}{4 \sin^4(\vartheta/2)}$$

⁵Termine preso in prestito dall'astrofisica e che rappresenta la luce riflessa da un corpo opaco, in quanto in questo caso abbiamo degli elettroni che incidono su una superficie e in parte vengono riflessi all'indietro.

2. Se lo spessore adoperato è considerevole, il numero di scattering è elevato (*multiple scattering*), come avviene nella maggior parte dei casi reali. La particella quindi, nell'attraversare il materiale, subisce delle deflessioni dovute a diverse collisioni. Essendo il numero di queste elevato, tale processo si studia da un punto di vista statistico;
3. Il caso intermedio è quello del *plural scattering*, ed è il caso in cui il numero di collisioni è minore di 20. Poiché tale numero non è levato, il fenomeno non può essere studiato dal punto di vista statistico ed è difficile farne una trattazione.

Concentriamoci sul secondo caso. La teoria statistica che ci permette di studiare l'angolo di fuoriuscita di una particella dopo aver attraversato un dato spessore è la teoria di Molière.

Immaginiamo di avere un percorso all'interno di un materiale di lunghezza x e una particella che incide perpendicolarmente alla superficie:



Una volta che la particella entra nello spessore subisce una serie di scattering multipli che fanno deviare continuamente la particella dal suo percorso rettilineo. Se quindi andiamo a vedere la fuoriuscita dal materiale, la particella potrebbe essere spostata rispetto all'altezza in ingresso e potrebbe aver cambiato direzione incidente, formando un angolo ϑ_{plane} rispetto a quello di partenza.

L'effetto dello scattering multiplo può essere studiato attraverso questa deviazione, cioè possiamo fare delle considerazioni statistiche sull'angolo di uscita. In particolare la distribuzione dell'angolo di scattering è di tipo gaussiano per piccoli angoli, mentre per grandi angoli ha una coda a valori più alti di quelli previsti da una gaussiana. Ciò vuol dire che in media, se inviamo delle particelle su un materiale e studiamo l'angolo di deflessione in uscita, ci aspettiamo che nella maggior parte dei casi si mantenga la direzione di partenza e via via diventi sempre più improbabile che l'angolo di deflessione sia elevato.

È da notare che la figura di sopra affronta il problema nel caso planare, ma in realtà si tratta di un problema tridimensionale, cioè dovremmo studiare l'angolo tra direzione di entrata e quella di uscita nello spazio; spesso infatti la trattazione di Molière viene riportata sia in termini di angolo nello spazio che in termini di angolo nel piano (si va a considerare la proiezione su un piano).

Una prima conclusione è quindi che la deviazione media nel piano è zero⁶, ma ciò che maggiormente ci interessa è la larghezza della distribuzione, cioè di quanto varia da evento a evento l'angolo di deviazione, ossia la dispersione di questi angoli di deviazione. Se indichiamo con ϑ_0 la larghezza della distribuzione, essa può essere definita andando a valutare lo scarto quadratico medio dei vari ϑ_{plane} . Inoltre, tramite considerazioni geometriche si mostra che c'è una relazione tra lo scarto quadratico medio nel piano e quello nello spazio:

$$\vartheta_0 = \vartheta_{\text{plane}}^{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \vartheta_{\text{space}}^{\text{rms}}$$

Approfondimento 4.2: Ma che significa rms?

Questo approfondimento sarebbe più appropriato come nota a margine, ma vista la lunghezza ho preferito procedere così.

Nella teoria dello scattering multiplo, la sigla "rms" sta per *root mean square* (radice quadrata della media dei quadrati). Questo termine è usato per descrivere una misura statistica della dispersione o della variabilità di una serie di valori.

Nello specifico, in contesti di scattering multiplo, l'rms può essere riferito a diversi parametri, come ad esempio l'rms della deviazione angolare, il quale misura la dispersione delle angolazioni dei raggi dopo lo scattering multiplo.

L'uso del valore rms è comune perché fornisce una misura della "magnitudine media" della variabile in questione, indipendentemente dal segno. Nel caso delle fluttuazioni o delle deviazioni, questo aiuta a comprendere l'entità delle variazioni rispetto al valore medio, contribuendo a caratterizzare meglio il comportamento del sistema di scattering.

Il valore rms di un insieme di N valori x_i (dove i va da 1 a N) è dato dalla loro media quadratica:

$$\text{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

Nel contesto dello scattering multiplo, se il valore medio μ delle deviazioni è zero, il root mean square (rms) coincide effettivamente con lo scarto quadratico medio (standard deviation, σ). Questo avviene perché lo scarto quadratico medio è definito come la radice quadrata della media dei quadrati delle deviazioni dalla media:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

da cui si vede subito che se $\mu = 0$ tale espressione coincide con quella dell'rms.

Nello scattering multiplo è comune che la distribuzione delle deviazioni angolari o delle altre grandezze rilevanti (come la posizione o il cammino ottico) abbia una media nulla, specialmente se si considerano grandi quantità di eventi di scattering in cui le deviazioni in direzioni opposte si bilanciano. In tali casi, il valore rms rappresenta direttamente la dispersione delle deviazioni senza la necessità di distinguere tra rms e scarto quadratico medio.

Maggiore è l'rms, più si evidenziano effetti di scattering multiplo. L'rms dipenderà da:

- Il tipo di particelle incidente;
- L'energia o l'impulso della particella incidente;
- Le proprietà del materiale.

⁶Ciò è ovvio: se consideriamo una serie di particelle inviate tutte con la stessa direzione di incidenza, in uscita avremo tanti angoli di deviazione sia verso l'alto che verso il basso ed in media si trova un valore nullo.

Dalla teoria di Molière si ricava che, assumendo una distribuzione Gaussiana per l'angolo di scattering nel piano, la sua larghezza è data da:

$$\vartheta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta cp} z \sqrt{x/X_0} [1 + 0.038 \ln(x/X_0)]$$

dove x è lo spessore di materiale attraversato (più grande è lo spessore più gli effetti di scattering sono evidenti), p l'impulso particella (più grande è l'impulso meno gli effetti di scattering sono evidenti), z il numero atomico della particella e X_0 la lunghezza di radiazione del materiale. Concentriamoci un attimo su quest'ultima grandezza

4.5.1 Lunghezza di radiazione

È un parametro caratteristico del materiale, legato all'interazione degli elettroni o dei fotoni di alta energia, ma utilizzato in diversi contesti.

La lunghezza di radiazione di un materiale si può definire come:

- la distanza media entro cui un elettrone ad alta energia riduce la sua energia ad $1/e$ del valore iniziale mediante processi di radiazione (bremsstrahlung). Da tale definizione capiamo che più il materiale assorbe l'energia dell'elettrone, più la lunghezza di radiazione è piccola;
- $7/9$ del libero cammino medio per produzione di coppie da parte di un fotone di alta energia. Ricordiamo che i fotoni interagiscono con la materia attraverso tre meccanismi principali: effetto fotoelettrico, effetto Compton e la produzione di coppie elettrone-positrone. In particolare quest'ultimo effetto avviene ad alte energie.

Tale grandezza esprime quindi quali sono le capacità di elettroni e fotoni ad alta energia di interagire con la materia. Essa è particolarmente importante per lo studio dei processi elettromagnetici in un materiale

Essa si può valutare con formule semi empiriche che dipendono da A e Z del materiale:

$$L_r = \frac{716.4 A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

Essendo una lunghezza, si esprimerà in metri o, in termini di unità di densità superficiale, come g/cm^2 .

Vediamo dei valori tipici per alcuni materiali:

Materiale	Energia critica E_c (MeV)	Lunghezza di radiazione L_r (m)	Densità \times lunghezza di radiazione ρL_r ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
Aria	102	300	362
Acqua	92	0.36	361
Alluminio	51	0.089	240
Ferro	27	0.018	140
Piombo	9.5	0.0056	64

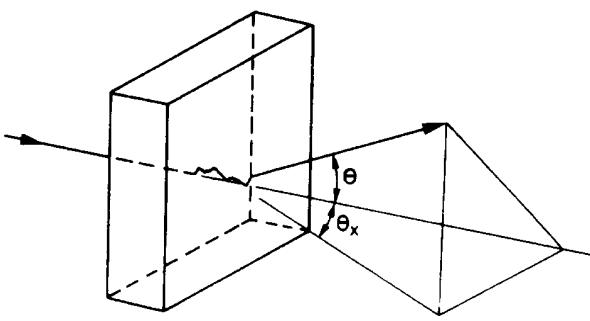
Notiamo come nel caso di materiali molto pesanti la lunghezza di radiazione è particolarmente piccola perché questi frenano parecchio sia elettroni che fotoni, quindi secondo le definizioni appena viste un fotone percorrerà pochissimo spazio prima di interagire e

produrre una coppia oppure un elettrone percorrerà pochissimo spazio prima di ridurre la sua energia di un fattore $1/e$. I valori di L_r variano drasticamente quando passiamo da un mezzo solido/liquido ad uno gassoso, ad esempio nel piombo vale 5 mm mentre nell'aria vale 300 m.

Tale lunghezza di radiazione in particolare fu fondamentale quando furono scoperti i raggi cosmici: infatti ciò che si osservava era che elettroscopi carichi si scaricavano da soli entro un certo; ciò indicava il fatto che evidentemente c'era una radiazione ionizzante che ionizzava l'aria ed in conseguenza faceva scaricare l'elettroscopio nel tempo. Bisognava quindi capire l'origine di questa radiazione. Inizialmente si pensò alla radioattività ambientale, per cui si pensò di effettuare misure allontanandosi dal suolo per evitare il contributo della radiazione emessa dal suolo: per fare ciò si portò un elettroscopio sulla cima della Torre Eiffel (a 300 m)⁷. Ciò che si misurò fu di fatto una diminuzione della radiazione, ma questa non era consistente con quanto atteso dall'emissione del suolo. Si cercò quindi di capire tramite dei calcoli, conoscendo la lunghezza di radiazione dei gamma in aria (perché certamente elettroni o alpha messi dal suolo non riescono ad arrivare a 300 m di altezza), se si fosse interamente schermati. Poiché i calcoli diedero conferma di ciò, si capì che c'era un ulteriore contributo, proveniente dallo spazio, che erano i raggi cosmici. In seguito con palloni aerostatici si arrivò ad altezze superiori in cui il contributo del suolo era trascurabile e si osservò un aumento di radiazioni nella componente cosmica.

4.5.2 Distribuzione angolare di scattering

La distribuzione degli angoli in uscita può essere approssimata con una distribuzione gaussiana centrata in zero e con una larghezza ϑ_0 che dipende dalle caratteristiche del materiale.



Nello spazio la distribuzione è

$$\frac{1}{2\pi\vartheta_0^2} \exp\left(-\frac{\vartheta_{\text{space}}^2}{2\vartheta_0^2}\right) d\Omega$$

mentre nel piano

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\vartheta_0^2} \exp\left(-\frac{\vartheta_{\text{plane}}^2}{2\vartheta_0^2}\right) d\vartheta_{\text{plane}}$$

4.5.3 Conseguenze dello scattering multiplo

In generale lo scattering multiplo comporta una deviazione rispetto alla direzione di partenza. Da un punto di vista sperimentale, in alcuni casi è importante dover stimare tale scattering, ad esempio nel caso in cui vogliamo tracciare una particella: immaginiamo di avere una collisione tra nuclei o protoni da cui emergono tantissime particelle (è quello che viene negli acceleratori LHC) e vogliamo non solo capire che tipo di particelle vengono emesse, ma anche il percorso. Per fare ciò si usano dei *rivelatori di tracciamento* che vanno a individuare, attraverso dei punti, il percorso seguito da una

⁷Non era tanto una questione di altitudine, il problema era distanziarsi dal suolo.

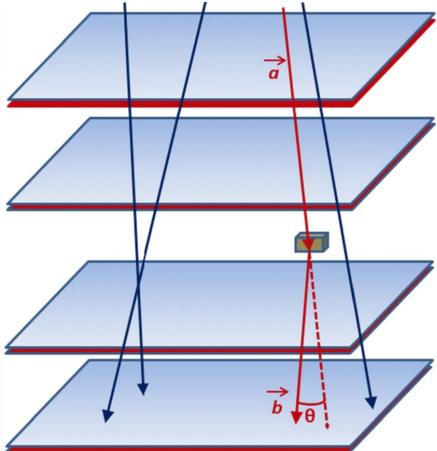
particella. Essendo fatto di materia, ogni volta che una particella colpisce un rivelatore subisce scattering multiplo, quindi tutto ciò che misurano i rivelatori successivi risentirà dello scattering multiplo provocato dai rivelatori precedenti. Ne segue che quando si va a ricostruire la traccia di una particella (ad esempio rettilinea), non ci aspetteremo dei punti allineati, bensì dovremo considerare dei margini che tengano conto del fatto che la particella non segue un percorso rettilineo, ma nell'attraversare un materiale ha subito una leggera deviazione (scattering multiplo). Per questa ragione, dato che i rivelatori non devono fermare la particella e devono deviare la sua traiettoria il meno possibile, parte dello sviluppo di un rivelatore consiste nel cercare di ridurre il "material budget", cioè la quantità di materia che si introduce attraverso l'inserimento di un rivelatore (nel caso ideale tale budget è nullo e si parla di rivelatore trasparente).

Un altro caso in cui è importante stimarne lo scattering multiplo è per misurare la direzione di arrivo dei raggi cosmici, i quali vengono deviati attraversando l'aria.

Va ricordato che questo effetto è importante per particelle di basso impulso e per materiali ad alto Z .

4.5.4 Tomografia muonica

Talvolta lo scattering multiplo è utile per valutare le caratteristiche del materiale attraversato. Ne è un esempio la tomografia muonica, la quale consiste nello sfruttare i raggi cosmici (in particolare i muoni), per andare a realizzare una tomografia, cioè un'immagine tridimensionale, del contenuto di un container per, ad esempio, la ricerca di materiale fissile di contrabbando, che normalmente ha uno Z elevato.



Se è presente provocherà sui muoni uno scattering multiplo considerevole, mentre dove non è presente le tracce passano quasi in deflesse. Andando quindi a ricostruire le direzioni in arrivo e quelle in uscita possiamo realizzare la tomografia. Si usano degli scintillatori per realizzare dei piani di tracciamento, in modo da ricostruire il punto di passaggio dei muoni così da trovare la direzione incidente e quella uscente (saranno date dalle rette passanti dai due punti) e quindi l'angolo di scattering. Le dimensioni sono considerevoli: per un container di 3×6 m l'altezza è di 7 m.

Il limite di questa tecnica è il tempo, perché tale metodo usa solo il flusso naturale dei muoni e l'efficienza dei rivelatori non è il 100% (non sempre riesce a misurare il passaggio di una particella), per cui serve più tempo di acquisizione.

Capitolo 5

Interazione dei γ con la materia

A differenza dei casi precedenti, per i γ i meccanismi sono totalmente differenti. Ciò perché i γ , essendo fotoni, sono privi di carica, per cui interagiscono con la materia in maniera diversa.

Nello spettro delle onde elettromagnetiche i raggi γ sono le radiazioni più energetiche: corrispondono a energie che vanno da qualche centinaio di keV in su. Poiché nello spettro non c'è una vera e propria distinzione tra la zona dei γ e le altre, oltre ai valori di energia bisogna ricordarsi che i fotoni γ sono associati a processi legati al nucleo (ad esempio decadimenti γ che riguardano le transizioni tra i livelli nucleari, mentre le transizioni tra livelli atomici comportano le emissioni di radiazioni ricadenti nella zona dei raggi X). Va ricordato che quanto diciamo riguardo l'interazione dei γ è applicabile anche a quella dei raggi X .

Oltre le transizioni nucleari, altre sorgenti di raggi γ (che peraltro portano a valori di energia più elevati) sono i γ presenti nella radiazione cosmica e i γ prodotti da collisioni tra fasci di particelle accelerate mediante acceleratori.

5.1 Meccanismi di interazione dei fotoni

I γ sono delle radiazioni neutre ed i meccanismi di interazione che caratterizzano questi sono tipicamente catastrofici, nel senso che sono dei processi in cui il γ perde una frazione consistente della propria energia, modificando profondamente lo stato iniziale, a differenza delle particelle cariche sia leggere che pesanti in cui l'interazione con la materia avviene gradualmente, attraverso processi multipli di interazione.

I meccanismi attraverso cui i γ interagiscono con la materia sono essenzialmente tre:

- Effetto photoelettrico;
- Effetto Compton;
- Produzione di coppie $e^+ - e^-$.

Questa differenza nella modalità di interazione comporta due conseguenze: una prima conseguenza è che i raggi X e γ sono radiazioni molto più penetranti rispetto alle particelle cariche; la seconda è che fasci di questi raggi non si degradano in energia quando attraversano la materia, ma solo in intensità. Quindi se un γ attraversa la materia ci sono solo due possibilità: o interagisce o non interagisce, per cui non accade, come nel

caso delle particelle cariche, che attraversando uno spessore la particella perda parte della sua energia e poi fuoriesca dal materiale, bensì in questo caso o il γ interagisce e scompare (perché cambia il suo stato e al suo posto si formano altri prodotti) oppure attraversa il materiale indisturbato; pertanto quando andiamo a studiare l'assorbimento dei γ attraverso la materia osserviamo una diminuzione dell'intensità del fascio attraversante lo spessore, ma l'energia dei γ fuoriuscenti sarà uguale a quella iniziale. Possiamo dunque dire che i fotoni che conservano il loro stato iniziale sono quelli che non hanno interagito.

A questo punto dobbiamo capire la probabilità con cui avviene ciascuno di questi processi di interazione. In generale si può dire che le sezioni d'urto d'interazione sono molto minori rispetto a quelle relative ai processi con particelle cariche. In altre parole, i fotoni interagiscono molto meno con la materia (ed è per questo che riescono ad attraversare grandi spessori di materiale, cioè hanno un potere penetrante molto più elevato) rispetto alle particelle cariche.

L'attenuazione dei fotoni incidenti in un dato materiale segue una legge di tipo esponenziale decrescente, simile a quella relativa alle particelle cariche leggere (elettroni e positroni), solo che in questo caso è una legge esatta mentre in quel caso era una legge semi-empirica derivante da vari fattori (le particelle non sono monocromatiche, si considera la convoluzione di tante curve di trasmissione ecc.).

L'intensità I del fascio dopo aver attraversato uno spessore x di materiale è data da

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

dove I_0 è l'intensità iniziale del fascio e μ è un coefficiente di assorbimento, che esprime la probabilità di interazione dei γ per unità di percorso. Si può immaginare come una sorta di inverso del libero cammino medio del fotone all'interno della materia e dipende dal materiale, per cui si misura in cm^{-1} oppure in cm^2/g .

Anche in questo caso è possibile realizzare una curva di trasmissione, che ha in ascisse lo spessore attraversato e in ordinate il coefficiente di trasmissione $T = I/I_0$. Quello che otterremmo in questo caso sarebbe un esponenziale decrescente.

Ne approfittiamo per ricordare i vari andamenti:

- Per particelle cariche pesanti abbiamo una curva a gradino smussato a causa degli effetti di straggling;
- Per particelle cariche leggere, se queste sono mono-energetiche la curva è a gradino ma molto smussato a causa dei percorsi molto frastagliati della particella nel materiale (straggling maggiore), se invece sono β emessi da una sorgente, quindi con uno spettro di energia continuo, la curva è approssimabile con una legge esponenziale decrescente;
- Per i γ la curva è esattamente una legge esponenziale decrescente.

Il coefficiente di assorbimento μ si può esprimere anche nella forma

$$\mu = N\sigma_{\text{tot}} = \frac{N_A \rho}{A} \sigma_{\text{tot}}$$

dove si va moltiplicare la sezione d'urto di interazione totale (con cui includiamo tutti i possibili processi di interazione, dunque rappresenta la probabilità di interazione di un

fotone con la materia indipendentemente dal tipo di processo) per la densità di atomi N . La stessa relazione può essere riscritta con il numero di Avogadro N_A , la densità ρ e l' A del materiale. Si evince che maggiore è la probabilità di interazione, maggiore sarà μ , perché significa che il γ interagisce di più con la materia e quindi viene più facilmente assorbito.

5.1.1 Sezione d'urto di interazione

La sezione d'urto totale è data dalla somma di quelle relative ai tre processi principali:

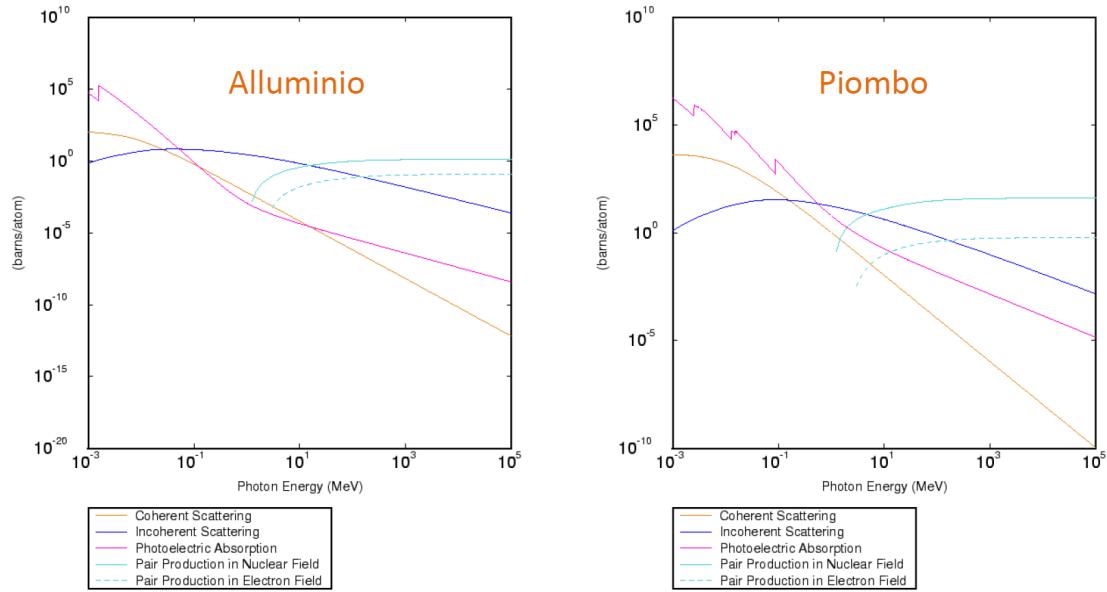
$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{phot}} + Z\sigma_{\text{Comp}} + \sigma_{\text{coppie}}$$

dove la σ_{comp} viene moltiplicata per la Z del materiale perché normalmente questa sezione d'urto viene espressa in unità di carica.

Poiché ciascuna di queste componenti è legata ad un processo diverso, esse avranno espressioni dipendenti dalle caratteristiche del materiale e dall'energia del fotone in maniere differenti.

Esempio 5.1

In figura sono riportate le sezioni d'urto dei singoli processi al variare dell'energia del fotone, la quale va da 10^{-3} MeV($= 1$ keV) a 10^5 MeV($= 100$ GeV).¹ La scala di entrambi gli assi è logaritmica, in modo da poter rappresentare numeri che variano in un intervallo molto ampio, in particolare per la sezione d'urto abbiamo un intervallo di 30 ordini di grandezza.



Il contributo dell'effetto fotoelettrico è dato dalla linea fucsia, la quale ci dice che la probabilità che un fotone interagisca per effetto fotoelettrico diminuisce notevolmente all'aumentare dell'energia, per cui per energie più basse domina mentre per quelle più alte (dal GeV in su) è praticamente nulla.

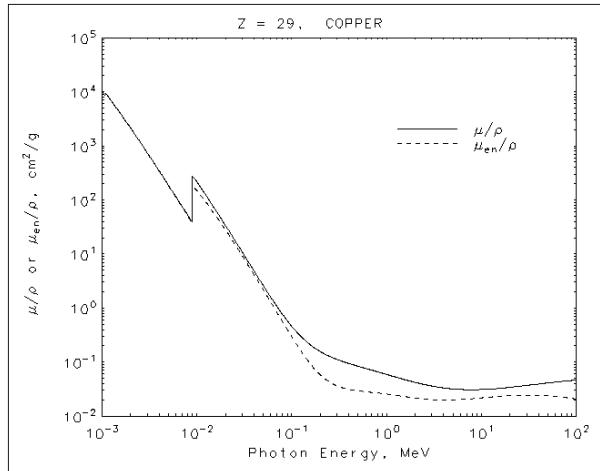
La linea blu rappresenta lo scattering Compton incoerente, quella arancione quello coerente. Lo scattering coerente si ha quando l'elettrone non fuoriesce dall'atomo, cioè non viene strappato da questo, quello incoerente quando l'elettrone con cui il γ interagisce fuoriesce. La curva blu sale per poi scendere, quella arancione non ha salite e diminuisce molto di più. La somma di questi due contributi dà la sezione d'urto dello scattering Compton, che dà una curva che tende leggermente a salire per poi diminuire a più elevate energie ed è una curva che prevale ad energie intermedie.

Infine le linee azzurre, una continua e una tratteggiata, sono relative al contributo della produzione di coppie. Ce ne sono due perché la produzione di coppie si verifica sempre in presenza di un terzo corpo, che può essere un nucleo o un elettrone, per cui si hanno due casi diversi (la sezione d'urto maggiore è relativa al caso del nucleo). Tale contributo è nullo al di sotto del valore di soglia di 1.022 MeV, dopodiché aumenta fino a diventare il contributo più importante per le energie più elevate. Il grafico a sinistra è relativo all'alluminio. Se andiamo a materiali più pesanti come il piombo (grafico a destra) i valori cambiano, ma persistono le considerazioni appena fatte; ciò che invece è più evidente sono le strutture, nella sezione d'urto dell'effetto fotoelettrico, legate alle transizioni atomiche, quindi il valore di energia del fotone che sta incidendo sugli atomi di quel materiale corrisponde esattamente all'energia di una transizione atomica, per cui si vanno a vedere dei picchi.

5.1.2 Coefficiente di assorbimento

Esempio 5.2

In figura è riportato il coefficiente di assorbimento totale per il rame in funzione dell'energia. Esso è riportato in unità di densità superficiale, di modo che le curve ottenute al variare del materiale siano tra loro confrontabili.



Per come è definito σ_{tot} (ricordiamo che μ è proporzionale a quest'ultimo), esso avrà un andamento che rispecchia l'andamento della somma delle tre sezioni d'urto. All'aumentare dell'energia μ diminuisce, per cui se abbiamo dei fotoni di

¹Per valori che vanno da 10^{-3} a 10^{-2} MeV si parla di raggi X , oltre sono γ .

energia molto elevata la probabilità che essi interagiscono con la materia diventa estremamente rara.

Notiamo che nel grafico figurano due linee: la linea continua rappresenta il coefficiente di assorbimento, mentre quella tratteggiata rappresenta il "coefficiente di assorbimento massa-energia", il quale rappresenta la frazione media di particelle cariche prodotte dall'interazione dei gamma con la materia. Infatti tutti e tre i meccanismi di interazione portano alla produzione, nello stato finale, di particelle cariche, e andando a valutare quante ne vengono prodotte si può rappresentare il numero di queste in funzione dell'energia. Ciò che ci aspettiamo è che se i γ interagiscono parecchio vengono prodotte tante particelle cariche, dunque anche questo numero è particolarmente elevato; man mano che l'energia aumenta questo numero tende a diminuire perché i γ interagiscono di meno. La differenza tra le due curve sta nel fatto che intervengono tutti e tre i processi e ognuno di questi produce un numero di particelle cariche diverso, quindi dipende da qual è l'effetto dominante nella zona di energia in cui ci troviamo.

Approfondimento 5.1: Coefficiente di attenuazione e coefficiente di assorbimento

Attenzione! Questa nota è stata realizzata unendo quanto detto da chatgpt e quanto trovato in "Introduction to Health Physics" di Herman Cember e Thomas E. Johnson. Il lettore attento noterà la discrepanza con quanto affermato dalla professoressa, per cui non garantisco la correttezza delle informazioni riportate.

Approfondiamo il concetto di coefficiente di assorbimento. Diciamo innanzitutto che talvolta nei testi viene chiamato coefficiente di attenuazione, che può essere distinto tra linear attenuation coefficient (μ_l) se espresso in cm^{-1} e mass attenuation coefficient (μ_m) se diviso per la massa e dunque espresso in cm^2/g :

$$\mu_m = \frac{\mu_l}{\rho}$$

Come abbiamo già detto, esso è l'inverso del libero cammino medio. Quest'ultimo il Knoll lo chiama λ e lo definisce come

$$\lambda = \frac{\int_0^{+\infty} xe^{-\mu x} dx}{\int_0^{+\infty} e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu}$$

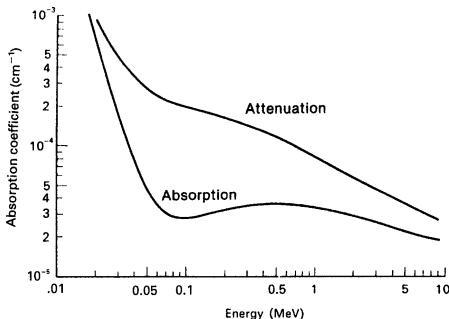
Il coefficiente di attenuazione dà la probabilità di rimozione di un fotone dal fascio ad opera di uno dei possibili meccanismi di interazione. Il coefficiente di attenuazione totale, dunque, è dato dalla somma dei coefficienti per ciascuno dei tre processi:

$$\mu = \mu_{\text{phot}} + \mu_{\text{Comp}} + \mu_{\text{coppie}}$$

Tale equazione dà la frazione di energia rimossa dal fascio per unità di spessore attraversato. La frazione di energia del fascio che viene depositata nell'assorbitore considera però soltanto l'energia trasferita al materiale dai fotoelettroni, dagli elettroni Compton e dalle coppie $e^+ - e^-$, mentre l'energia trasportata via dal fotone scatterato per effetto Compton e quella portata via dalla radiazione ottenuta per annichilazione di coppie non vengono tenute in conto. Il coefficiente di assorbimento energia, detto anche vero coefficiente di assorbimento, è dato da

$$\mu_{\text{en}} = \mu_{\text{phot}} + \mu_{\text{Comp}} + \mu_{\text{coppie}} \left(\frac{h\nu - 1.02}{h\nu} \right)$$

Ovviamente, il coefficiente di assorbimento massa energia si otterrà semplicemente dividendo questo per la densità del materiale.



In sintesi, mentre il coefficiente di assorbimento (μ) riguarda la probabilità di qualsiasi tipo di interazione del fotone gamma con la materia, il coefficiente di assorbimento massa energia (μ_{en}) si focalizza sull'energia effettivamente assorbita e trasferita alla materia, un aspetto cruciale per determinare gli effetti biologici delle radiazioni. In figura a lato possiamo vedere l'andamento dei due termini.

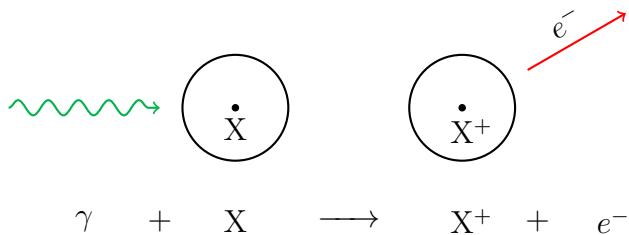
In altri termini ancora, il coefficiente di attenuazione quantifica la riduzione dell'intensità del fascio, mentre il (vero) coefficiente di assorbimento quantifica la frazione di energia assorbita dal fascio, entrambi per unità di spessore di materiale attraversato. Entrambi dipendono dall'energia del fotone e dal materiale.

Richiamiamo adesso brevemente i tre processi presi in esame.

5.1.3 Effetto fotoelettrico

Esso si verifica solo nel caso di elettroni legati, in quanto un elettrone libero non potrebbe mai assorbire un fotone e assicurare la conservazione dell'impulso, quindi è necessaria la presenza di un nucleo che assorba l'impulso di rinculo.

L'effetto fotoelettrico consiste nel fatto che un fotone (cioè un γ) venga assorbito totalmente e un elettrone venga emesso dall'atomo, per cui alla fine si ha un elettrone più uno ione:



Affinché ciò avvenga, è necessario che l'energia del fotone incidente superi un certo valore di soglia W_0 , che è il lavoro di estrazione. In altre parole, il fotone incidente di energia $h\nu$ deve avere un'energia tale da strappare l'elettrone all'atomo, il quale verrà emesso con un'energia cinetica data dalla relazione:

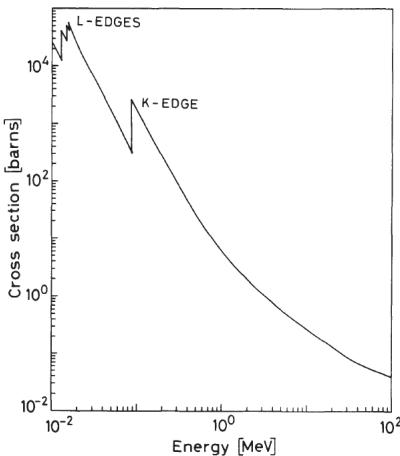
$$K_{\max} = h\nu - W_0$$

W_0 è dell'ordine di pochi eV ma dipende dal materiale.

Essendo i γ fotoni ad altissima energia siamo certamente al di sopra del lavoro di estrazione degli elettroni di un qualsiasi materiale, inoltre in questo caso possiamo dire che l'energia cinetica K_{\max} dell'elettrone espulso dall'atomo può essere approssimata all'energia del fotone incidente². Di conseguenza, nel caso delle sorgenti γ che adopereremo

²Infatti per dare un'idea delle quantità in gioco possiamo immaginare di avere un γ di energia 1 MeV che incide su un materiale avente lavoro di estrazione pari a 2 eV: il fotoelettrone emesso avrà energia pari a $(10^6 - 2)$ eV, che è una differenza irrisoria.

in laboratorio varrà questa approssimazione, cioè potremo dire che gli elettroni emessi per effetto fotoelettrico hanno energia praticamente identica a quella del γ incidente. Ribadiamo che non sempre è così: se andiamo verso radiazioni a più basse energie la differenza non è più trascurabile, seppur si riesca comunque a produrre effetto fotoelettrico (ad esempio la luce visibile può produrre effetto fotoelettrico su alcuni materiali, così come vedremo utilizzando dei led per misurare la costante di Planck).



La sezione d'urto per effetto fotoelettrico dipende dal materiale e dall'energia della radiazione γ incidente mediante una relazione del tipo

$$\sigma_{\text{phot}} \approx \frac{Z^5}{E_\gamma^{7/2}}$$

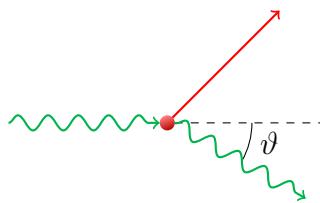
Ne segue che per agevolare l'effetto fotoelettrico conviene considerare materiali via via più pesanti, a Z maggiore, mentre la dipendenza dall'energia del γ spiega la brusca diminuzione di σ vista nei grafici.

In realtà tale dipendenza da Z è valida solo per un certo intervallo di energie. Ad esempio a basse energie viene modificata. Il motivo è che valutare la sezione d'urto di questo processo non è semplice a causa della complessità delle funzioni d'onda degli elettroni negli atomi. Questa dipendenza dunque si presenta per energie al di sopra della shell K (livello 1s), a circa 10^{-1} MeV, per valori più bassi cambia forma³.

Nella figura sopra possiamo vedere l'andamento della sezione d'urto per effetto fotoelettrico nel caso del piombo. Notiamo come la parte iniziale è caratterizzata dalle transizioni atomiche. Ricordiamo che esso governa l'interazione a basse energie.

5.1.4 Effetto Compton

È un effetto di scattering di un fotone su un elettrone.



In questo caso si considera l'effetto su un elettrone libero. In realtà gli elettroni sono quelli atomici, però si può considerare un elettrone atomico come libero per il fatto che le energie di legame degli elettroni sono normalmente molto più piccole rispetto alle energie dei γ considerati, quindi è un'approssimazione lecita.

A seguito dello scattering, nello stato finale avremo un fotone diffuso, con energia $h\nu'$ inferiore rispetto all'energia $h\nu$ del fotone incidente, e un elettrone.

³Ti aspettavi un approfondimento a questo punto? Non stavolta! Servono concetti di AQM e qui siamo solo alla triennale, non bruciamo le tappe.

Indicando con ϑ l'angolo di diffusione del fotone uscente, applicando la conservazione dell'energia e dell'impulso è possibile individuare una relazione che lega l'energia del fotone diffuso con l'angolo:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{[1 + \gamma(1 - \cos \vartheta)]} \quad \text{dove} \quad \gamma = \frac{h\nu}{m_e c^2}$$

Quindi in base al valore di ϑ , che varia da evento a evento, le energie ripartite tra l'elettrone e il fotone diffuso possono essere differenti. Per la conservazione dell'energia, l'energia cinetica dell'elettrone sarà data dalla differenza tra l'energia del fotone incidente e quello diffuso:

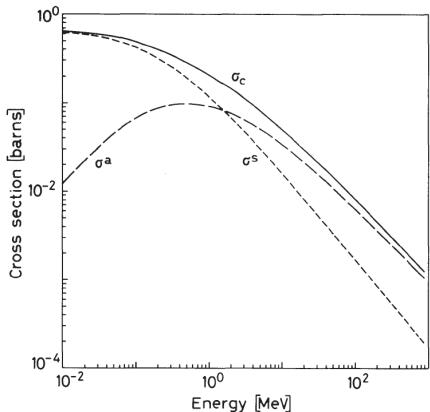
$$T_e = h\nu - h\nu'$$

Tale processo domina a energie intermedie.

Lo scattering Compton si definisce coerente quando l'elettrone, che consideriamo libero ma in realtà non lo è, rimane legato all'atomo; se invece l'elettrone acquisisce un'energia tale da poter essere strappato dall'atomo si parla di scattering incoerente. Più precisamente:

- Lo scattering coerente (anche noto come scattering di Rayleigh) si verifica quando il fotone è deviato dalla sua traiettoria originale senza perdita di energia. In questo caso, l'interazione è elastica e avviene principalmente con l'intero atomo piuttosto che con singoli elettroni. Anche se lo scattering coerente non modifica l'energia del fotone, può comunque contribuire alla diffusione della radiazione;
- Lo scattering incoerente, che si riferisce specificamente allo scattering Compton, si verifica quando il fotone cede parte della sua energia a un elettrone e viene diffuso con una lunghezza d'onda maggiore. Questa interazione è inelastica e comporta un cambiamento nella lunghezza d'onda del fotone.

La sezione d'urto Compton è data da due termini che corrispondono a quello coerente e a quello incoerente⁴. Si osserva una dipendenza lineare da Z , e una diminuzione che ad alte energie può essere parametrizzata con una dipendenza del tipo $(\ln E)/E$.



Due quantità utili che possono essere calcolate tramite la formulazione di Klein-Nishina sono le sezioni d'urto di scattering Compton e di assorbimento Compton. La sezione d'urto di scattering Compton, σ_s , è definita come la frazione media dell'energia totale contenuta nel fotone diffuso, mentre la sezione d'urto di assorbimento, σ_a , è l'energia media trasferita all'elettrone di rinculo. Poiché l'elettrone è fermato dal materiale, questa è la frazione media di energia assorbita dal materiale nello scattering Compton. Ovviamente si ha

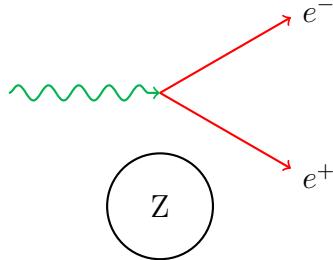
$$\sigma_{\text{Comp}} = \sigma_a + \sigma_s$$

⁴Questa affermazione è parzialmente in contrasto con quanto detto subito dopo. Non è sbagliato dire che i due contributi sono questi, ma quelli mostrati nel grafico sono altri due.

Attenzione! Rispetto ai grafici precedenti in questo sembra che tale contributo decresca più velocemente, ma ciò è dovuto semplicemente al fatto che stiamo considerando un intervallo più ristretto di energie.

5.1.5 Creazione di coppie

Con questo processo si ha una creazione di una coppia elettrone-positrone a partire da un γ . Ciò può avvenire solo in presenza di un terzo corpo per questioni di conservazione dell'impulso.

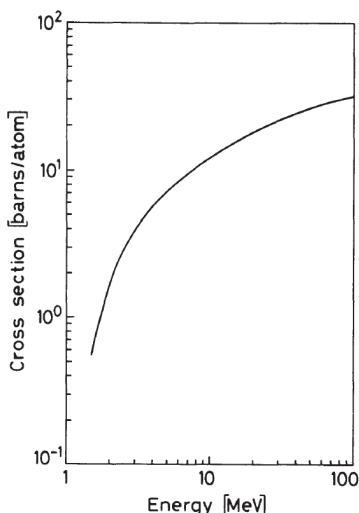


Questo terzo corpo tipicamente è il nucleo atomico, ma alcune volte tale processo può avvenire anche nel campo degli elettroni, infatti nel grafico della sezione d'urto c'erano due termini relativi alla produzione di coppie, ma quello relativo al caso dell'elettrone è trascurabile rispetto all'altro.

La coppia prodotta deve rispettare la conservazione dell'energia, per cui l'energia cinetica delle due particelle uscenti corrisponde all'energia del fotone incidente meno due volte la massa a riposo dell'elettrone:

$$T(e^+) + T(e^-) = h\nu - 2mc^2$$

Ciò ha senso, perché parte dell'energia del fotone deve essere usata per la produzione delle due masse.



Da tale relazione segue che ci sia una soglia di produzione al di sotto della quale è impossibile che si verifichi il processo di produzione di coppie. Quindi, se il fotone incidente non ha un'energia sufficiente almeno a creare questa coppia (cioè almeno $2mc^2 = 1.022$ MeV), non avviene nessun processo; se ha un'energia superiore alla soglia, quella in eccesso viene poi suddivisa tra i prodotti, cioè tra elettrone e positrone.

La sezione d'urto è proporzionale a Z^2 e cresce con l'energia, infatti è il processo che domina ad energie elevate.

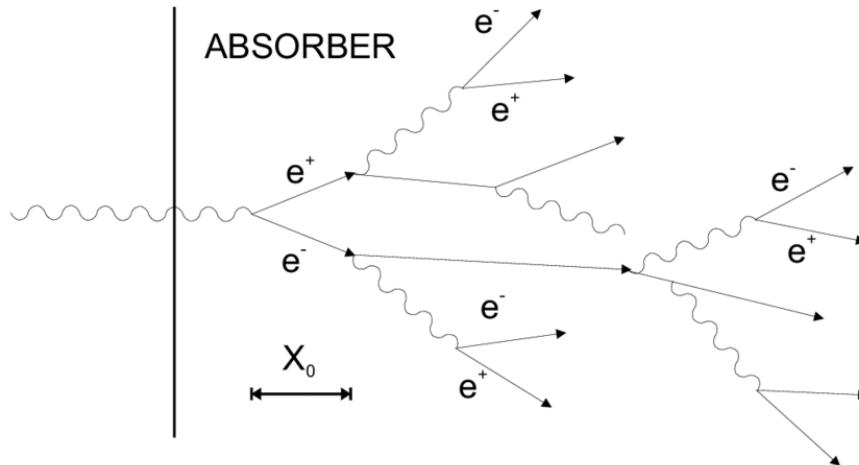
In figura possiamo vedere l'andamento della sezione d'urto per produzione di coppie in funzione dell'energia nel caso del piombo. Notiamo come essa sia nulla al di sotto del valore di soglia.

5.1.6 Sommario

- A basse energie (ordine del MeV) i fotoni interagiscono prevalentemente mediante effetto fotoelettrico, che produce un elettrone avente pressoché la stessa energia del γ ;
- Per energie tra 1 e 10 MeV prevale l'effetto Compton, che produce un elettrone ed un fotone diffuso che si dividono l'energia del fotone iniziale;
- Ad alte energie (sopra i 10 MeV) prevale il processo di produzione di copie, che nello stato finale produce una coppia $e^+ - e^-$.

5.2 Sciami elettromagnetici

Ci chiediamo adesso come interagiscono questi prodotti secondari (elettroni, positroni, fotoni) con la materia. Infatti, se in partenza abbiamo elettroni o fotoni di energia particolarmente elevata, si innesca un meccanismo di produzione a valanga, nel senso che si produce una *cascata elettromagnetica* (o sciame e.m.), che è una sequenza di processi di bremsstrahlung e di produzione di copie che porta alla produzione di un insieme di particelle (e^+, e^- , fotoni) che man mano si propagano nella materia.



Immaginiamo ad esempio di avere inizialmente un fotone particolarmente energetico che incide su un materiale assorbitore. Avendo energia elevata, ad un certo punto darà luogo ad un processo di produzione di coppie $e^+ - e^-$. Ciascuna di queste sarà ad alta energia, per cui perderà una parte della propria energia attraverso bremsstrahlung, quindi la sequenza continua con un fotone di bremsstrahlung e il positrone/elettrone di partenza che a loro volta daranno luogo ad altri processi che saranno produzioni di coppie o ulteriori processi di bremsstrahlung. Da un singolo fotone incidente di alta energia si produce quindi uno sciame elettromagnetico, composto da un numero di particelle via via crescente.

Uno sciame elettromagnetico può essere indotto, oltre che da un fotone ad alta energia, anche da un elettrone o un positrone ad alta energia, solo che in questo caso il primo processo sarà di bremsstrahlung e non di produzione di copie. Essi vengono detti elettromagnetici perché sono sciami in cui vengono coinvolti solo processi elettromagnetici.

Sono composti da e^+ , e^- e γ (fotoni) e si differenziano dagli sciami adronici, che sono indotti da adroni ad alta energia (ad esempio un protone ad alta energia prodotto in una collisione nucleare) e in cui vi sono processi che coinvolgono l'interazione forte. Tuttavia tali sciami potrebbero avere al loro interno anche una componente elettromagnetica, legata alla possibile produzione di pioni neutri π^0 , i quali decadono in due γ che poi daranno luogo a processi elettromagnetici e dunque a questa componente.

Man mano che lo sciame si propaga all'interno del materiale continuano a verificarsi in successione processi di bremsstrahlung e produzione di coppie; questo meccanismo però non procede all'infinito, perché man mano le energie dei prodotti secondari diminuiscono, in quanto l'energia iniziale si suddividerà tra un numero di particelle via via crescente, fin quando l'energia degli elettroni/positroni arriverà al di sotto del valore di energia critica (energia in corrispondenza della quale la sezione d'urto per perdita di energia collisionale è uguale a quella per perdita di energia radiativa, dunque la probabilità dei due processi è la stessa). Quando gli elettroni raggiungono tale valore, non interagiscono con la materia soltanto attraverso fenomeni di bremsstrahlung ma possono subire anche fenomeni collisionali, in cui non vengono prodotte nuove particelle. Per quanto riguarda i fotoni, man mano che la loro energia diminuisce non daranno luogo a produzioni di coppie, ma cominceranno a prevalere altri effetti che non aumentano il numero di particelle, come quello fotoelettrico (che da un fotone ci dà un elettrone) e quello Compton⁵ (che dà un fotone diffuso). In conseguenza a ciò, sebbene non possiamo dire che lo sciame si arresti perché le particelle continueranno a propagarsi all'interno del materiale finché non perdono tutta la loro energia, possiamo dire che il numero di particelle dello sciame non aumenterà superato il punto critico.

Al di sotto dell'energia critica possiamo quindi immaginare che lo sciame che man mano è cresciuto (sia in dimensioni che nel numero di particelle), incomincia a degradarsi, pertanto il numero di particelle comincia a diminuire perché esse continuano a interagire, perdendo energia e venendo assorbite totalmente dal materiale.

5.2.1 Struttura di uno sciame elettromagnetico (toy model)

Proviamo ora a immaginare un modello semplificato per descrivere la struttura di uno sciame elettromagnetico.

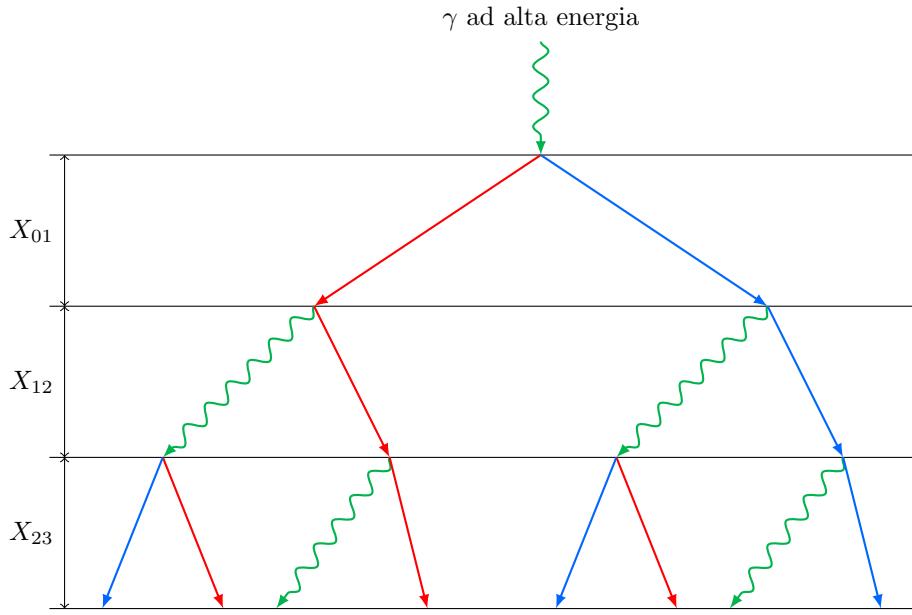
Esso si basa sul concetto di lunghezza di radiazione, in quanto la distanza percorsa viene espressa in multipli di questa. Immaginiamo infatti che in corrispondenza di ogni lunghezza di radiazione si verifichi in media un nuovo processo che può essere di produzione di coppie o di bremsstrahlung. Si definisce quindi il *numero di generazione* t , dato al rapporto tra lo spazio percorso e la lunghezza di radiazione:

$$t = \frac{x}{x_0}$$

Banalmente, esso ci darà il numero di lunghezze di radiazione percorse.

⁵Il lettore attento ricorderà che parlando dello scattering Compton incoerente abbiamo detto che con questo viene strappato un elettrone dall'atomo, quindi in linea teorica con tale fenomeno il numero di particelle dovrebbe comunque aumentare. Bisogna però considerare che quello che stiamo presentando è un modello molto semplificato, mentre stime più esatte si fanno attraverso delle simulazioni numeriche; inoltre man mano si va ad energie sempre più basse, dove prevale l'effetto fotoelettrico. Sebbene quindi non sia del tutto corretto dire che non vengano prodotte nuove particelle proprio dall'energia critica in poi, questa approssimazione ci permette di ottenere delle relazioni che sono abbastanza realistiche.

Guardiamo adesso il seguente schema:



In questo esempio abbiamo in partenza un γ di alta energia che interagisce, producendo quindi una coppia $e^+ - e^-$; questa coppia percorre uno spazio pari all'incirca ad una lunghezza di radiazione e poi dà luogo a bremsstrahlung, con cui viene prodotto un fotone e un elettrone/positrone come stato finale. Dopo un'altra lunghezza di radiazione il fotone produrrà una coppia mentre l'elettrone e il positrone produrranno bremsstrahlung.

5.2.2 Profondità di uno sciame e.m.

Notiamo come, indipendentemente dal tipo di particella che consideriamo, ogni volta che si percorre uno spazio pari ad una lunghezza di radiazione quello che succede è che ogni particella si raddoppia. Possiamo generalizzare questo meccanismo affermando che il numero n di particelle prodotte dopo t lunghezze di radiazione sarà pari a

$$n(t) = 2^t$$

Ad esempio, per $t = 3$ dovremmo avere 8 particelle, come vediamo effettivamente in figura.

Quale sarà l'energia di queste particelle? Come abbiamo detto, man mano l'energia si degrada perché l'energia del fotone incidente viene via via suddivisa nei prodotti di questa cascata; possiamo allora dire che le particelle della t -esima generazione avranno in media energia $E(t)$ pari all'energia E_0 del fotone incidente divisa per $n(t)$. In formule:

$$E(t) = \frac{E_0}{2^t}$$

A partire da questa relazione possiamo andare a valutare quante particelle vengono prodotte in corrispondenza dell'energia critica, che possiamo immaginare come il valore per cui si ha il massimo dello sciame, inteso come il massimo numero delle particelle

dello sciame. In particolare, quando l'energia media delle particelle diviene uguale all'energia critica E_c , cioè quando

$$\frac{E}{2^t} = E_c$$

non verranno più prodotte nuove particelle e lo sciame non si sviluppa ulteriormente. Per determinare lo spazio che ha percorso lo sciame fino a raggiungere questa condizione basterà valutare quante lunghezze di radiazione sono state percorse, e per fare ciò basta ricavare da questa equazione il valore di t con semplici passaggi:

$$\frac{E_0}{2^t} = E_c \implies \frac{E_0}{E_c} = 2^t \implies t = \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2}$$

Da ciò si evince come il punto in cui si raggiunge il numero massimo di particelle dipende con una relazione logaritmica dall'energia incidente E_0 , ovvero dall'energia del fotone o dell'elettrone iniziale.

Esempio 5.3: Le dimensioni di un calorimetro

La relazione appena vista ci permette di determinare lo spessore di un dato materiale necessario per poter contenere o addirittura arrestare lo sciame di una data energia. Ciò è importante dal punto di vista della rivelazione, perché esistono dei rivelatori che prendono il nome di calorimetri, i quali sono dei rivelatori progettati per misurare tutta l'energia di una particella incidente; se quindi ad esempio volessimo misurare l'energia di γ o elettroni molto energetici mediante calorimetri, siccome quello che succederà quando questo γ o questo elettrone entra nel rivelatore sarà la produzione di uno sciame (perché questo è quello che avviene in qualsiasi materiale), allora per misurare tutta l'energia dello sciame dobbiamo assicurarci che tutte le particelle prodotte nello sciame rimangano all'interno del rivelatore, pertanto il rivelatore non può essere troppo corto perché quello che altrimenti potrebbe succedere è che lo sciame comincia a propagarsi ma poi fuoriesce dal materiale e dunque perdiamo parte dello sciame e di conseguenza parte dell'energia. È quindi fondamentale che la dimensione del rivelatore sia adeguata a quella dello sciame che può formarsi. Vediamo allora degli esempi numerici.

Ci chiediamo che spessore debba avere un calorimetro per poter misurare tutta l'energia di un γ avente inizialmente un'energia $E_0 = 10E_c$. Dalla relazione appena vista possiamo calcolare il numero di lunghezze di radiazione:

$$t = \frac{\ln(10E_c/E_c)}{\ln 2} = \frac{\ln 10}{\ln 2} = 3.3$$

Dunque operando un rivelatore di dimensioni pari a $3,3X_0$ siamo sicuri che catturiamo almeno il massimo sviluppo dello sciame, quindi lo sciame arriva a propagarsi fino al suo massimo sviluppo⁶.

Se invece l'energia del fotone o dell'elettrone incidente è pari a $100E_c$, il massimo si raggiungerà per

$$t = \frac{\ln(100E_c/E_c)}{\ln 2} = \frac{\ln 100}{\ln 2} = 6.6$$

Notiamo come, a causa della dipendenza logaritmica dall'energia, nonostante l'energia iniziale sia aumentata di un fattore 10 rispetto al caso precedente lo spessore

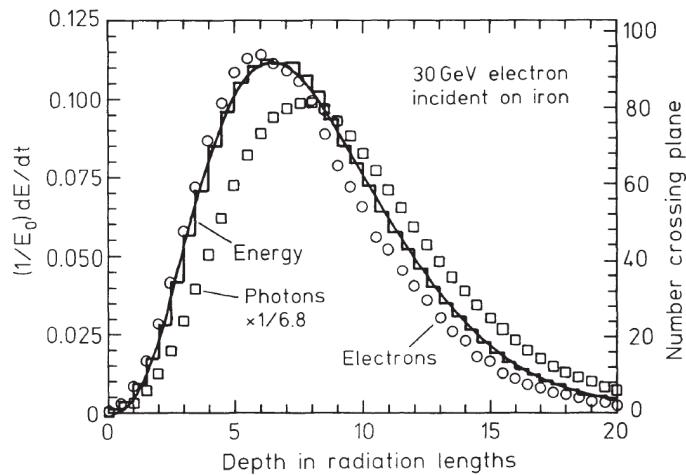
necessario è soltanto raddoppiato. Ciò costituisce un vantaggio dal punto di vista pratico, perché è possibile realizzare dei calorimetri tutto sommato compatti in grado comunque di misurare buona parte dello sciamone anche per γ o elettroni di elevata energia.

Bisogna inoltre considerare che siccome il risultato è espresso in multipli di lunghezza di radiazione, la lunghezza vera e propria dipenderà dal tipo di materiale attraversato, in quanto la lunghezza di radiazione dipende dallo Z del materiale; ad esempio, in base ai valori della tabella vista in §4.5.1, affinché venga contenuto fino al massimo uno sciamone avente energia iniziale pari $E_0 = 10E_c$ un rivelatore costruito in piombo dovrà essere lungo 1,8 cm, mentre se come materiale assorbitore considerassimo l'acqua sarebbero necessari 1,18 m.

5.2.3 Numero di particelle in uno sciamone e.m.

Guardiamo adesso un altro aspetto dello sciamone elettromagnetico, in particolare andiamo a vedere il numero di fotoni e elettroni prodotti in uno sciamone in funzione della profondità. Abbiamo infatti intuito che effettivamente si arriva a un massimo nel numero di particelle prodotte, però ancora non abbiamo visto cosa succede dopo questo perché il modello che abbiamo considerato prima era un modello semplificato che non dice nulla su ciò che avviene dopo, in quanto assume che una volta raggiunto il massimo del numero di particelle è come se lo sciamone si bloccasse bruscamente, ma in realtà non è così: sappiamo che sono state formate un numero di particelle (e^+ , e^- e γ) che proseguiranno attraverso altri meccanismi, venendo man mano assorbite.

Se allora vogliamo vedere l'evoluzione nel numero di fotoni e elettroni in funzione della distanza percorsa non basta quel modello semplificato, ma in realtà sono necessari delle simulazioni numeriche un po' più complesse. Guardiamo il seguente grafico:



In tale grafico, realizzato mediante simulazioni Monte Carlo, sull'asse delle ascisse è riportata la distanza percorsa in multipli di lunghezze di radiazione e sull'asse delle ordinate vediamo da un lato la perdita di energia (quindi quanta energia viene persa

⁶In realtà vedremo in seguito che sarà necessario considerare spessori maggiori, perché lo sciamone una volta raggiunta l'energia critica non si arresta bensì continua a proseguire.

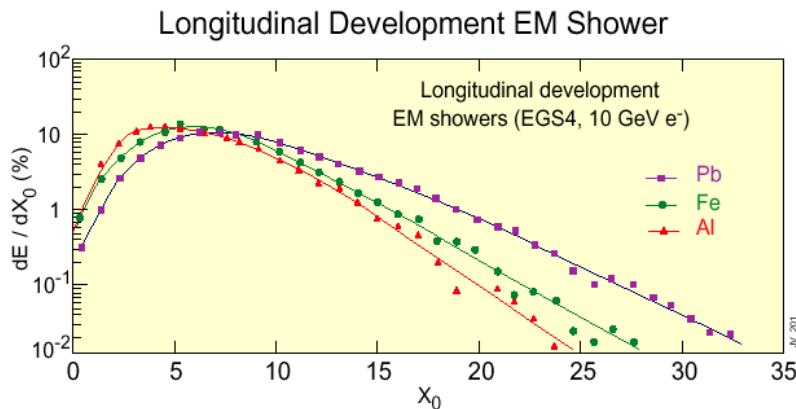
dallo sciame man mano che si propaga), rappresentata dall'istogramma, e dall'altro il numero di elettroni e fotoni⁷, rappresentati dai pallini e i quadretti.

Guardando l'andamento di questi punti ci rendiamo conto che l'andamento iniziale coincide con quello che ci aspettavamo, ovvero che man mano che lo sciame si propaga all'interno del materiale si ha una crescita praticamente esponenziale nel numero di particelle dettata dalla relazione vista prima; man mano si raggiungerà un massimo, in corrispondenza del quale cominciano a intervenire gli altri meccanismi di interazione. Lo sciame però non si arresta qui: continuerà a propagarsi anche per uno spazio notevole (ad esempio nel grafico per 20 lunghezze di radiazione) e via via il numero di elettroni e di fotoni diminuirà fino ad arrivare ad un punto in cui tutti gli elettroni e tutti i fotoni saranno totalmente assorbiti dal materiale.

Capiamo quindi che è necessario adoperare un materiale sufficientemente lungo per poter contenere tutto lo sciame, in quanto se in termini di lunghezza ci fermassimo semplicemente al massimo andremmo a perdere tutte le altre particelle che continuano a proseguire nel materiale e che perdono energia. In altre parole, se volessimo ricostruire l'energia del γ o dell'elettrone incidente e ci limitassimo a utilizzare un materiale che contiene solamente una parte dello sciame, ad esempio fino al suo sviluppo massimo, perderemmo tutto il contributo delle particelle che proseguono nel loro percorso.

5.2.4 Sviluppo longitudinale di uno sciame e.m.

Quando si analizza uno sciame, lo si può analizzare andando a guardare le sue dimensioni in termini di sviluppo longitudinale, quindi lungo la stessa direzione di incidenza della particella che ha generato lo sciame, ovvero la direzione che nello schema semplificato dello sciame abbiamo valutato in termini di multipli di lunghezza di radiazione.



Guardando lo sviluppo dello sciame da un punto di vista longitudinale abbiamo un grafico come quello che vediamo in figura sopra, in cui possiamo vedere delle simulazioni effettuate nel caso di sciami elettromagnetici prodotti da elettroni di 10 GeV. Se andiamo a vedere la perdita di energia per unità di lunghezza di radiazione (espressa qui in percentuale) ci rendiamo conto che l'energia non viene persa tutta quanta fino a quando non si raggiunge un massimo, ma in realtà ci sono delle perdite di energia anche a distanze notevoli, quindi le particelle che compongono lo sciame continuano

⁷In realtà i fotoni sono stati scalati per un fattore 1/6,8 in modo da rappresentarli in unico grafico assieme agli elettroni, quindi in realtà il numero di questi è molto più grande.

a depositare energia nel materiale anche parecchio oltre il massimo. Notiamo come il fatto di esprimere la perdita di energia in unità di lunghezza di radiazione ci permette di confrontare facilmente materiali con densità molto diverse.

Andando a guardare le percentuali, si può dire che grosso modo il 95% di uno sciamo è contenuto longitudinalmente entro venti lunghezze di radiazione, quindi spesso quando si progettano dei calorimetri la scelta che si fa per stabilirne lo spessore è quella di scegliere una lunghezza pari a $20X_0$, in modo da essere sicuri che praticamente il 95% dello sciamo (e quindi della sua energia) sia stato depositato nel rivelatore.

5.2.5 Sviluppo laterale di uno sciamo e.m.

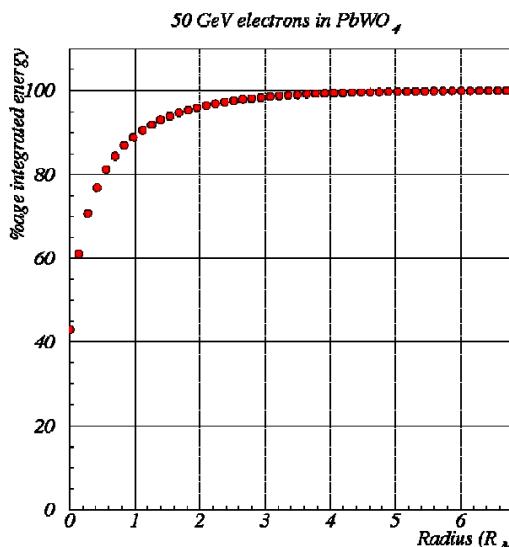
Lo sciamo non si sviluppa solo longitudinalmente, bensì ha anche una sua dimensione trasversale o laterale. Infatti, tornando di nuovo allo schema semplificato, vediamo come, a causa di diversi meccanismi (ad esempio l'angolo di apertura nella coppia $e^+ - e^-$ oppure l'angolo a cui sono emessi i fotoni di frenamento), le particelle man mano non seguiranno più la stessa direzione della particella incidente ma cominceranno ad avere direzioni diverse. La conseguenza è che lo sciamo avrà una sua larghezza lateralmente, cioè nella direzione trasversale alla direzione longitudinale.

Possiamo andare a valutare le dimensioni laterali di uno sciamo. Stavolta però non lavoreremo più in termini di lunghezza di radiazione, in quanto l'allargamento trasversale è descritto dal cosiddetto *raggio di Molière*, che è un altro parametro legato alle proprietà del materiale utilizzato. Esso può essere approssimato dalla legge

$$R_M = 0.0265X_0(Z + 1.2)$$

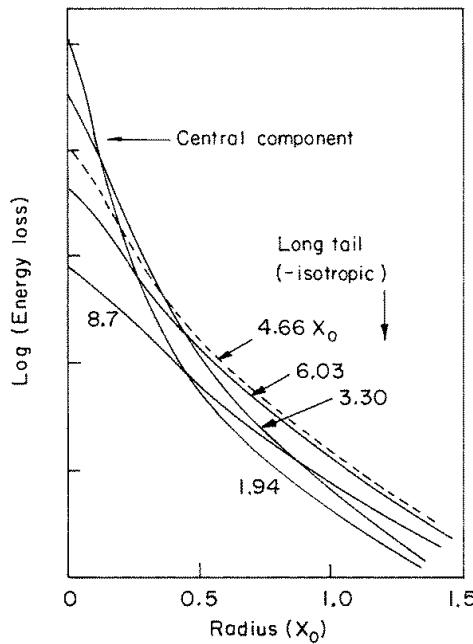
e quindi dipende dalla lunghezza di radiazione ma anche dallo Z del materiale.

Ci chiediamo ora che dimensioni debba avere un cilindro in grado di contenere il 95% dello sciamo. Abbiamo visto che questo cilindro avrà altezza pari all'incirca a 20 lunghezze di radiazione, mentre in termini laterali o trasversali possiamo andare a vedere quanti raggi di Molière sono necessari per andare a contenere il 95% dello sciamo. In questo caso basta andare a considerare una dimensione pari a $2R_M$.



Infatti se andiamo a vedere quant'è la percentuale di energia che viene depositata all'interno di un materiale in funzione di R_M , se ci manteniamo a valori di frazioni del raggio di Molière, l'energia che possiamo ricostruire dunque l'energia che viene effettivamente depositata nel materiale sarà soltanto una frazione, intorno a 40% – 60%. Chiaramente, man mano che allarghiamo la base di questo cilindro andiamo a includere sempre più particelle dello sciame, quindi andiamo a considerare la quasi totalità dell'energia dello sciame. Infatti nel grafico vediamo che questa percentuale cumulativa tende a salire fino a raggiungere il 100%. Ad esempio se ci fermiamo a $2R_M$ arriviamo appunto ad una percentuale del 95%.

Se guardiamo un po' più nel dettaglio lo sviluppo laterale dello sciame, ci accorgiamo anche di un'altra proprietà. Guardiamo la figura seguente, in cui è rappresentata ancora la perdita di energia in funzione di multipli di R_M , ma stavolta le diverse curve sono ottenute per lunghezze di radiazioni diverse, nel senso che sono riportate le distribuzioni trasversali dello sciame fissato il valore di profondità, ovvero la distanza longitudinale fino a cui lo sciame è penetrato.



Notiamo come, nei casi in cui si è percorso poco spazio all'interno del materiale, la maggior parte delle particelle si concentra attorno all'asse dello sciame, cioè attorno alla direzione della particella incidente. Possiamo vedere come ad esempio la curva corrispondente a $1.94X_0$ è molto ripida ed ha un valore elevato all'inizio, il che indica che gran parte delle particelle si trova ad una distanza pari a una frazione piccola del raggio di Molière dall'asse dello sciame; ovviamente la curva man mano diminuisce, quindi ne troviamo sempre di meno a distanze maggiori dall'asse.

Man mano che lo sciame si sviluppa tende ad allargarsi, per cui se ad esempio osserviamo la curva relativa a $8.7X_0$ ci rendiamo conto che questa curva è molto diversa, infatti si ha una sorta di alone⁸, quindi le particelle non si distribuiscono più in quanto hanno perso un po' l'informazione originaria della direzione della particelle incidente, per cui

⁸Credo che la professoressa intenda il fatto che la curva è sostanzialmente lineare.

le ritroviamo spalmate a diverse distanze dall'asse e quindi la curva diventa nettamente meno rigida.

Quindi oltre a valutare complessivamente qual è la dimensione del raggio del cilindro che contiene il 95% dello sciame possiamo andare a studiare un po' più nel dettaglio come sono distribuite le particelle e abbiamo visto che questo aspetto dipende dalla distanza percorsa considerata: se lo sciame è stato appena originato allora le particelle prodotte mantengono ancora un'informazione della direzione della particella incidente e dunque sono molto concentrate attorno all'asse, man mano che lo sciame si propaga nel materiale queste particelle tendono via via a cambiare direzione e quindi sono più sparpagliate, tant'è che le ritroviamo anche a distanze notevoli rispetto all'asse.

Capitolo 6

Proprietà generali dei rivelatori

Una volta affrontata l'interazione della radiazione con la materia, siamo pronti per discutere i rivelatori. Prima però di andare a discutere nel dettaglio le diverse tipologie di rivelatore, ne presentiamo alcune proprietà generali. Infatti, nonostante nel corso degli anni siano state sviluppate diverse tipologie di rivelatori che sfruttano meccanismi diversi, hanno elettronica differente ecc., ci sono dei concetti di base che sono validi per tutti i rivelatori.

6.1 Che cos'è un rivelatore

Un rivelatore si può definire come uno strumento che viene usato per rivelare il passaggio di una particella o di una radiazione.

I rivelatori non sono tutti gli stessi, ce ne sono di diverse tipologie aventi diverse funzionalità ulteriori a quella di rivelare il passaggio di una particella: alcuni sono in grado di misurare l'energia della particella oppure tracciarla, quindi andare ad individuare il percorso seguito della particella o addirittura in alcuni casi identificarla, quindi capire che tipo di particella è passata attraverso di esso. Tuttavia, indipendentemente dalle diverse tipologie di rivelatori, è essenziale che un principio di base sia rispettato: affinché un rivelatore possa rivelare una particella o una radiazione, è fondamentale che queste interagiscano con il rivelatore stesso attraverso uno dei meccanismi che abbiamo discusso in base al tipo di particella o di radiazione che stiamo andando a considerare. Come abbiamo studiato, l'interazione tra particelle e materiali dipende dalla sezione d'urto dei vari processi, che a sua volta è influenzata dalle caratteristiche della particella incidente e del materiale assorbitore. Per questo motivo, è essenziale comprendere come variano le sezioni d'urto nei diversi processi per capire le scelte progettuali dei rivelatori, come la geometria, i materiali utilizzati e le prestazioni ottenibili. Quando si progetta un rivelatore, bisogna considerare che, sebbene possa essere ottimizzato per rivelare certi tipi di particelle, ciò comporterà inevitabilmente delle limitazioni. Ad esempio, un rivelatore concepito per particelle cariche potrebbe non essere adatto per la radiazione elettromagnetica. Inoltre, il materiale con cui è costruito determinerà l'efficienza del rivelatore in relazione al tipo di particelle e alla loro energia.

Un aspetto fondamentale nella rivelazione è il *tempo di interazione*. Questo rappresenta il tempo necessario per arrestare una particella o per lo sviluppo di uno sciame. I tempi di interazione sono estremamente brevi, dell'ordine dei nanosecondi nel caso di

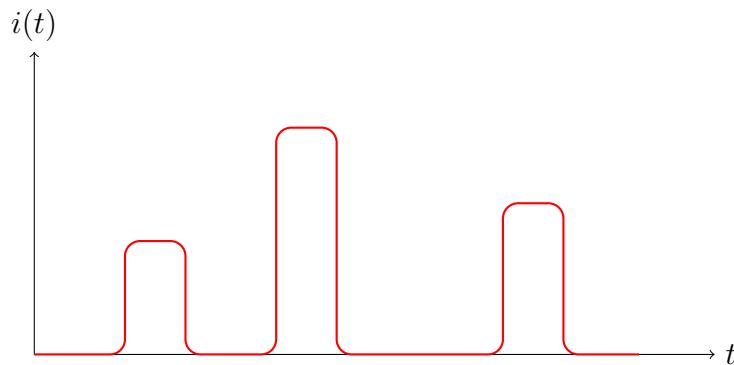
un materiale gassoso e dei picosecondi nel caso di un materiale solido. Oltre a questi, bisogna considerare anche il tempo che impiega il rivelatore per raccogliere il risultato dell'interazione, che chiaramente varia a seconda del meccanismo di interazione.

Il risultato netto dell'interazione delle radiazioni in un'ampia categoria di rivelatori è la comparsa di una determinata quantità di carica elettrica di ionizzazione Q all'interno del volume attivo del rivelatore¹. Successivamente, questa carica deve essere raccolta per formare il segnale elettrico di base. Tipicamente, la raccolta della carica viene realizzata attraverso l'imposizione di un campo elettrico all'interno del rivelatore, che provoca lo spostamento delle cariche positive e negative create dalla radiazione in direzioni opposte, producendo così un segnale in uscita. Il tempo necessario per raccogliere completamente la carica varia notevolmente da un rivelatore all'altro; in generale, questi tempi di rivelazione sono leggermente più lunghi rispetto ai tempi di interazione: vanno dai nanosecondi ai microsecondi, ma possono arrivare anche all'ordine del millisecondo nel caso di rivelatori molto lenti. Man mano che affronteremo i diversi tipi di rivelatore, esamineremo anche questi tempi di risposta, ovvero i tempi di rivelazione.

6.2 Modi di operazione

Il modo in cui operano la maggior parte dei rivelatori è quello di dare luogo a un segnale² ogni qualvolta vengono attraversati da una particella o da una radiazione. Fanno eccezione una classe di rivelatori che potremmo definire come rivelatori visualizzanti o traccianti, i quali funzionano semplicemente visualizzando il passaggio delle particelle, cioè permettono di visualizzare il passaggio di una particella senza però avere un segnale in uscita in corrispondenza del passaggio della particella o della radiazione. Degli esempi sono le emulsioni nucleari, che possiamo immaginare come delle lastre fotografiche che visualizzano la traccia di una particella, oppure le camere a bolle e le camere a nebbia.

Concentriamoci sui rivelatori che segnalano il passaggio di una particella attraverso la formazione di un segnale elettrico.



¹Il volume attivo di un rivelatore è quella parte del rivelatore stesso in cui avviene l'effettiva rivelazione delle radiazioni, ovvero dove le particelle interagiscono con il materiale del rivelatore producendo segnali rilevabili, come la creazione di cariche elettriche, scintillazioni, o altri fenomeni misurabili.

²Questo segnale nella pratica è un impulso di corrente. Nel seguito la professoressa parla di questi segnali come segnali di tensione, ma credo siano equivalenti data la legge di Ohm. In ogni caso, il Knoll ne parla in §4.2.C.

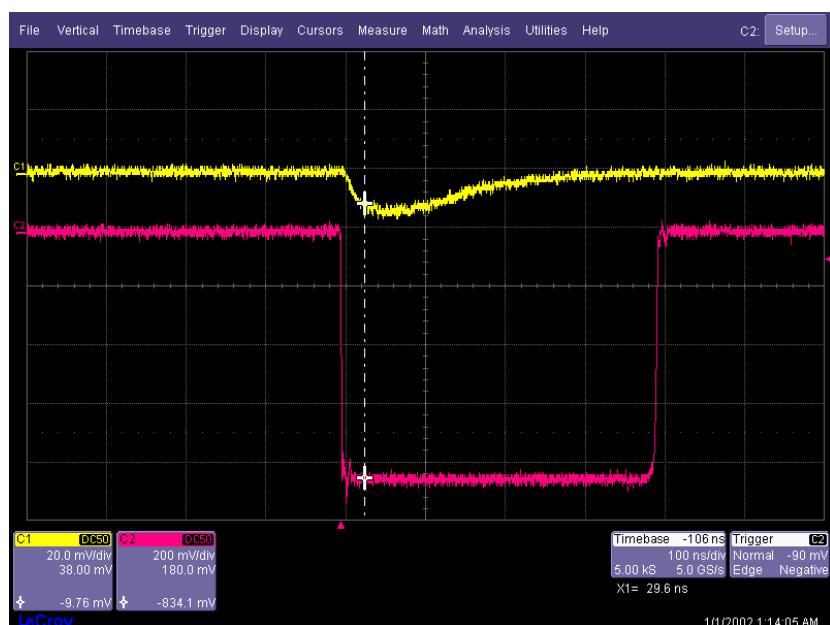
Ogni segnale avrà caratteristiche specifiche. Innanzitutto, si manifesteranno a intervalli temporali variabili, cioè, a meno che non si tratti di un fenomeno periodico, i tempi tra un evento e il successivo saranno casuali. Ciò è dovuto al fatto che l'arrivo e la rivelazione di particelle emesse da una sorgente radioattiva sono fenomeni casuali governati dalla statistica di Poisson, il che implica che l'intervallo temporale tra due eventi consecutivi non è fisso, ma cambia di volta in volta. Ciononostante, questa variazione segue una distribuzione che ha un andamento esponenziale decrescente.

La distanza tra due eventi consecutivi può variare notevolmente a seconda del fenomeno che si sta studiando e del tipo di radiazione rivelata. Ad esempio, se si dispone di una sorgente quasi esaurita con un'attività molto bassa, i segnali potrebbero verificarsi con una frequenza molto bassa; al contrario, in altri tipi di fenomeni, la frequenza di conteggio potrebbe essere molto più elevata. Per questo motivo i modi in cui un rivelatore può operare sono principalmente due:

- *Pulsed mode*: il rivelatore rivela singoli impulsi in quanto questi arrivano in tempi abbastanza distanziati l'uno dall'altro, per cui è possibile studiare l'arrivo della singola particella/radiazione. Un esempio di fenomeno che si studia utilizzando un rivelatore in pulsed mode è la misura dell'arrivo di particelle della radiazione cosmica mediante un contatore Geiger: ogni volta che arriva una particella, questo emette un bip e viene prodotto un segnale, quindi è possibile contare singolarmente i diversi impulsi.
- *Current mode*: quando gli impulsi sono molto ravvicinati in tempo, quindi abbiamo un'alta frequenza di conteggi, il rivelatore non riesce più a distinguere tra i singoli impulsi e lavorerà nella cosiddetta current mode, cioè nella modalità corrente. Quello che si va a misurare in questa modalità è sostanzialmente una corrente media.

In laboratorio lavoreremo principalmente in pulsed mode.

Chiariamo meglio che cos'è un segnale. Per segnale si intende una differenza di tensione, che quindi può essere visualizzato grazie a uno oscilloscopio.



Nella figura è mostrata la schermata di un oscilloscopio digitale, che consente di visualizzare più segnali contemporaneamente. Sull'asse orizzontale viene rappresentato il tempo, in quello verticale la tensione.

In questo caso, sono rappresentati due segnali distinti: uno in giallo e uno in rosa. Questi segnali, pur essendo molto diversi tra loro, hanno in comune la caratteristica di essere impulsi. Si nota infatti come, a partire da un valore di tensione costante (detto baseline), si verifichi una variazione nella tensione che persiste per una certa durata. Successivamente, il valore della tensione ritorna al livello iniziale.

Pur essendo questa caratteristica comunque ad entrambi i segnali, essi sono molto differenti. Il segnale giallo è un segnale analogico, la cui ampiezza può variare in modo continuo. Attualmente stiamo osservando un impulso specifico, ma un futuro impulso, causato da una nuova particella o radiazione, potrebbe avere un'ampiezza leggermente diversa, mantenendo però la stessa forma generale. Ciò che cambia è l'ampiezza del segnale, ossia la distanza tra la baseline e il valore massimo raggiunto. Questa ampiezza può quindi assumere valori differenti in modo continuo.

Al contrario, il segnale rosa ha una forma completamente diversa: è squadrato (onda quadra) e ha una durata che, in questo caso, viene spesso determinata dall'utente o dall'elettronica utilizzata. In questo contesto, non ci concentriamo sulla durata del segnale, ma piuttosto sul fatto che esso passa dalla baseline a un livello di tensione diverso, per poi ritornare alla baseline. Ad esempio, osservando la scala verticale, ogni divisione corrisponde a 200 mV, quindi questo segnale ha un'ampiezza di poco più di 800 mV. Si tratta di un segnale logico, che trasmette un'informazione limitata: indica semplicemente il passaggio dallo stato logico 0 allo logico 1, ma non fornisce altre informazioni. Se un nuovo impulso dovesse arrivare, avrebbe le stesse caratteristiche, con la stessa durata e ampiezza. Questo tipo di segnale è utile solo per contare il numero di impulsi ricevuti, senza poter estrarre ulteriori informazioni.

6.2.1 Informazioni dai segnali

Esistono diversi tipi di rivelatori che generano segnali differenti. Alcuni producono segnali logici, mentre altri emettono segnali analogici che trasportano informazioni aggiuntive sulla particella che possiamo dedurre dalle sue caratteristiche. Vediamo cosa possiamo dedurre.

Aampiezza

Per ampiezza dei segnali intendiamo il valore massimo di tensione raggiunto dal segnale rispetto alla baseline. Essa può essere diversa a seconda dell'energia della particella incidente. Esistono infatti rivelatori che generano segnali la cui ampiezza è proporzionale all'energia depositata nel rivelatore stesso, risultando in un segnale più ampio quanto maggiore è l'energia depositata all'interno del rivelatore.

È da notare che l'ampiezza del segnale può variare anche per effetto delle fluttuazioni statistiche derivanti da altri fenomeni o a causa del rumore, per cui si ottiene un segnale di ampiezza leggermente diversa per motivi non fisici, nel senso che non è stata realmente depositata un'energia di valore diverso.

Tempo di arrivo

Esso è il tempo associato al segnale e che fornisce informazioni sul tempo di arrivo della particella. Per capire quando il segnale è effettivamente arrivato è sufficiente andare a

vedere l'istante in cui il segnale si discosta dalla baseline. Nel caso riportato in figura, notiamo come per le prime quattro suddivisioni della scala dei tempi (corrispondenti ciascuna a 100 ns) non c'è un segnale, in quanto abbiamo una tensione che è costante. Dopodiché all'improvviso parte un segnale dovuto appunto ad un impulso. Quand'è che parte l'impulso? Non è facile determinare l'inizio di questo segnale perché ci sono delle leggere fluttuazioni dovute al rumore elettrico, infatti la linea della tensione non è esattamente costante, bensì fluttua anche quando non c'è nessun impulso. In casi come questi si deve scegliere una sorta di soglia, cioè un livello di tensione superato il quale si può ritenere abbastanza ragionevole che effettivamente si stia presentando un segnale e non si tratti semplicemente di una fluttuazione. In tal caso, il tempo di inizio del segnale sarà dato dall'istante in cui si supera tale livello di soglia.

Forma e durata

Oltre all'ampiezza, ci può interessare anche quanto dura il segnale. Ad esempio il segnale giallo raggiunge il suo valore massimo all'incirca a 50 ns dal suo inizio, ma in realtà si esaurisce in 300 ns.

Ci può interessare anche la forma del segnale, ad esempio la discesa o la risalita. Infatti ci sono dei rivelatori che producono dei segnali che hanno forme diverse a seconda del tipo di particella che ha inciso, per cui a seconda che sia una particella carica o una radiazione elettromagnetica il segnale prodotto cambia forma e quindi se si è in grado di analizzare la forma del singolo segnale si può capire se il rivelatore ha misurato ad esempio una particella α o un γ e quindi attraverso l'analisi della forma del segnale si può procedere a una sorta di identificazione, cioè capire effettivamente che particella è arrivata.

6.3 Analisi delle ampiezze

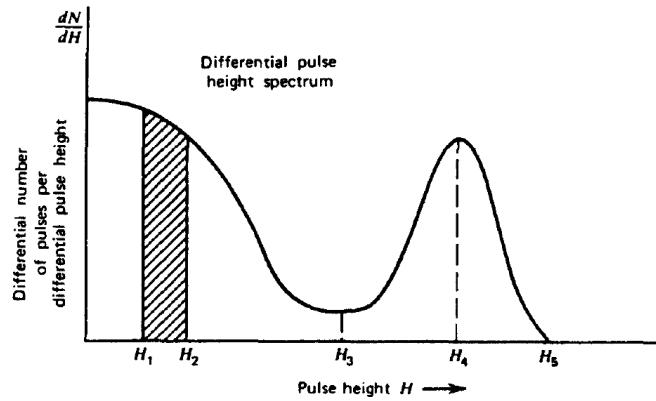
Nella maggior parte dei rivelatori che tratteremo, l'ampiezza ci darà informazioni sull'energia che sarà depositata dalla particella incidente sul rivelatore. Infatti, come abbiamo già detto, l'ampiezza del segnale dipenderà dall'energia depositata dalla particella/radiazione; nella maggior parte dei casi esiste una relazione lineare tra energia depositata e ampiezza del segnale prodotto, quindi se andiamo ad analizzare l'ampiezza del segnale in automatico sapremo quanta energia è stata depositata nel rivelatore. Questo processo equivale a fare un'analisi delle ampiezze, che tipicamente si fa rappresentando la distribuzione delle ampiezze degli eventi misurati. Solitamente tale distribuzione viene rappresentata mediante una distribuzione differenziale dN/dH , che è sostanzialmente un istogramma degli impulsi misurati, detto *spettro delle ampiezze*.

Approfondimento 6.1: Lo spettro degli impulsi

Questo approfondimento è dovuto al fatto che secondo me è spiegato molto male il concetto di distribuzione delle ampiezze, per cui riporto quanto detto dal Knoll in §4.2 "Pulse height spectra".

La distribuzione delle ampiezze degli impulsi è una caratteristica del segnale in uscita di un rivelatore che viene comunemente utilizzata per dedurre informazioni sulla radiazione incidente o sul funzionamento del rivelatore stesso.

Il modo più comune di rappresentare le informazioni sulle ampiezze degli impulsi è attraverso la distribuzione differenziale delle altezze degli impulsi. Una distribuzione ipotetica a scopo di esempio è mostrata nel seguente grafico:



Sulle ascisse sono riportate le ampiezze degli impulsi con scala lineare, che va da zero a un valore più alto dell'ampiezza di qualsiasi impulso osservato dalla sorgente; l'ordinata rappresenta il numero differenziale dN di impulsi osservati con un'ampiezza all'interno dell'incremento differenziale di ampiezza dH , diviso per tale incremento, o dN/dH . La scala orizzontale ha quindi unità di ampiezza degli impulsi (Volt), mentre la scala verticale ha unità di ampiezza inversa (Volt^{-1}). Il numero di impulsi la cui ampiezza si trova tra due valori specifici, H_1 e H_2 , può essere ottenuto integrando l'area sotto la distribuzione tra questi due limiti, come mostrato nell'area tratteggiata in figura.

$$\text{Numero di impulsi con ampiezza tra } H_1 \text{ e } H_2 = \int_{H_1}^{H_2} \frac{dN}{dH} dH$$

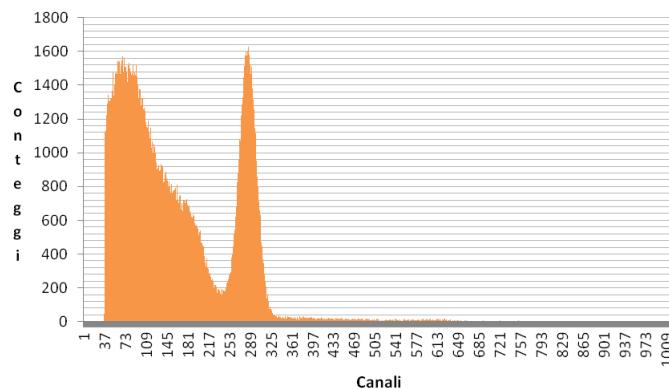
Il numero totale di impulsi N_0 rappresentato dalla distribuzione può essere ottenuto integrando l'area sotto l'intero spettro:

$$N_0 = \int_0^{+\infty} \frac{dN}{dH} dH$$

La maggior parte degli utenti degli strumenti di rivelazione è abituata a osservare la forma della distribuzione differenziale delle altezze degli impulsi per identificare caratteristiche significative della sorgente degli impulsi. L'ampiezza massima degli impulsi osservata (nel nostro esempio pari ad H_5) è semplicemente il punto lungo l'ascissa in cui la distribuzione arriva a zero. I picchi nella distribuzione, come quello per H_2 , indicano ampiezze di impulsi intorno a cui si trovano molti impulsi; viceversa, le valli o i punti bassi nello spettro, come H_3 , indicano valori dell'ampiezza degli impulsi intorno ai quali si verificano relativamente pochi impulsi.

Esempio 6.1: Distribuzione delle ampiezze per il ^{137}Ce

In figura possiamo vedere un istogramma delle ampiezze, ottenuto utilizzando uno scintillatore con una sorgente di ^{137}Ce che emette γ monoenergetici a 662 keV.



Quello che succede ad ogni interazione è che un γ interagisce con il rivelatore, deposita una certa quantità della sua energia (che può essere tutta o anche solo una parte) e quindi in corrispondenza di ogni γ si ottiene un segnale con una data ampiezza. Analizziamo allora questa distribuzione di ampiezze.

Se il γ lasciasse ogni volta nel rivelatore tutta la sua energia, ci aspetteremmo di trovare sempre la stessa ampiezza, corrispondente nell'esempio a 662 keV. In realtà otteniamo uno spettro con una forma abbastanza complessa che ci dice che oltre a un valore di energia molto probabile e rappresentato dal picco in corrispondenza del canale 289, si presentano anche tanti eventi, quindi tanti γ , che rilasciano parte della loro energia, perché corrispondono a segnali di ampiezza più bassa. Il picco che vediamo è il cosiddetto picco photoelettrico, cioè il picco che si ottiene quando il γ interagisce per effetto photoelettrico con lo scintillatore. Infatti in quel caso come prodotto dell'effetto photoelettrico si ha un elettrone che ha assorbito tutta l'energia del fotone, il quale può percorrere pochi millimetri all'interno dell'elettrone prima di perdere tutta la sua energia. Quindi essenzialmente questi sono degli eventi in cui il gamma ha perso la sua energia per effetto photoelettrico e l'ha trasferita all'elettrone e l'elettrone a sua volta rimane intrappolato all'interno del rivelatore perdendo tutta la sua energia attraverso i processi collisionali che abbiamo descritto in precedenza. In conclusione sono eventi in cui viene ricostruita tutta l'energia del γ incidente. Ovviamente teoricamente dovremmo avere un delta di Dirac³, ma nella realtà abbiamo un picco un po' più largo dovuto a effetti del rivelatore, che non è in grado esattamente di ricostruire l'energia con una precisione infinita, quindi abbiamo una sorta di risoluzione dettata dal rivelatore.

Tutti gli altri eventi che troviamo alla sinistra del picco, che prendono il nome di spalla Compton, corrispondono a dei casi in cui l'energia che viene rilasciata e depositata nello scintillatore è solamente una parte dell'energia del γ incidente perché evidentemente sono avvenuti altri meccanismi⁴. Si tratta infatti di effetti di scattering Compton, dove come prodotto finale si produce non solo un elettrone che chiaramente perderà la sua energia nello scintillatore, ma anche un fotone diffuso. Questo fotone ha una probabilità più bassa di interagire, quindi potrebbe fuggire dal rivelatore e non depositare la sua energia, ecco perché in questi eventi viene ricostruita solamente parte dell'energia che è quella dovuta all'elettrone scatterato durante l'effetto Compton. Abbiamo tanti valori di energia perché l'energia che viene assegnata al fotone diffuso e all'elettrone cambia a seconda dell'angolo di diffusione, quindi abbiamo uno spettro continuo di valori.

Chiaramente, se siamo interessati a sapere qual è l'energia del gamma, ci concentreremo sul picco photoelettrico, in quanto corrisponde meglio all'energia del γ di partenza.

L'esempio appena visto ci mostra come il segnale che viene tradotto dal rivelatore possa fornire informazioni sull'energia depositata nel rivelatore. Ribadiamo che quest'ultima non corrisponde sempre all'energia della particella emessa, ma potrebbe essere soltanto una parte, a seconda dei meccanismi che si sono verificati all'interno del rivelatore.

³I γ corrispondono a transizioni tra livelli nucleari, per cui non possono assumere qualsiasi valore di energia bensì hanno dei valori ben precisi, corrispondenti alla differenza energetica dei livelli tra cui avviene la transizione.

⁴Certamente non avvengono meccanismi di produzione di coppie perché stiamo parlando di gamma di 662 keV, quindi siamo al di sotto dell'energia di soglia.

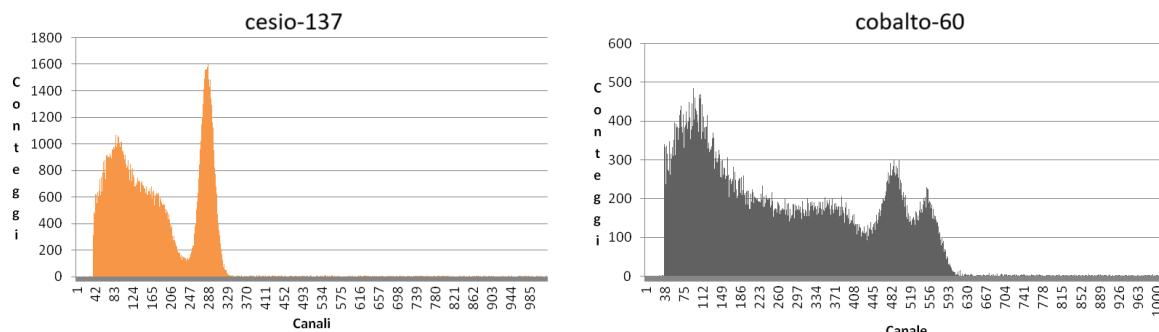
Vediamo che tipo di informazioni si possono estrarre da uno spettro:

- Potremmo essere interessati a sapere quanti segnali sono arrivati complessivamente nel tempo di misura, in modo da valutare quante particelle siamo riusciti a misurare. Ovviamente questo numero è legato all'attività della sorgente, quindi più questa è attiva, maggiore sarà il numero di eventi che riusciamo ad accumulare in un dato intervallo di tempo, e questo si può valutare realizzando l'integrale dello spettro, quindi sommando sostanzialmente quanti eventi si trovano in ciascuno dei bin dell'istogramma;
- Potremmo essere interessati solamente a una posizione dello spettro, ad esempio potremmo voler analizzare soltanto gli eventi fotoelettrici, in modo da capire qual è la percentuale di eventi associati a tale fenomeno. Per fare ciò sceglieremo degli estremi dello spettro e calcoliamo l'integrale dello spettro esteso solamente a tale regione;
- In base alla forma dello spettro possiamo individuare diverse regioni relative a particolari fenomeni, come nel caso della spalla Compton o del picco fotoelettrico. Inoltre possiamo andare a guardare il valore massimo delle ampiezze, quindi qual è la massima energia che viene misurata in questa tipologia di eventi.

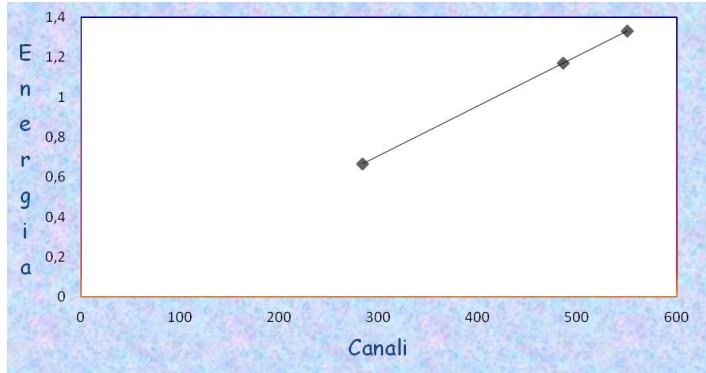
6.3.1 Calibrazione di uno spettro

In laboratorio, un grafico del genere viene realizzato tramite un ADC, il quale traduce l'ampiezza del segnale in un numero che varia in un intervallo che dipende dal numero di bit a disposizione. Notiamo infatti come la distribuzione dell'Es. 6.1 sia espressa in termini di canali, ossia in termini del numero prodotto dall'ADC. In particolare, nell'esperienza di laboratorio in cui adoperiamo uno scintillatore per misurare i γ avremo a disposizione un ADC a 11 bit, il che vuol dire 2048 numeri (da 0 a 2047). Nasce quindi la necessità di capire a che valore di energia corrisponde ciascun canale, e per fare ciò bisogna effettuare una calibrazione.

Per fare una calibrazione bisogna saper associare ciascun canale ad un valore di energia, quindi si utilizzano delle sorgenti note di cui conosciamo i valori di energia. Possiamo utilizzarne anche solamente due, come il cesio-137 che emette a 662 keV e il cobalto-60 che invece emette due γ a due energie diverse, uno a 1117 keV e l'altro 1332 keV. La vicinanza di questi due valori fa sì che i due picchi fotoelettrici siano parzialmente sovrapposti, ma ciò è irrilevante in quanto ci interessa la possibilità di individuare il centroide del picco e di associarlo alla corretta energia.



Adoperando queste due sorgenti avremo tre coppie di punti (canale, energia) relativi ai picchi fotoelettrici, per cui è possibile realizzare una procedura di best-fit per andare a individuare una retta di calibrazione come quella mostrata nella figura seguente:

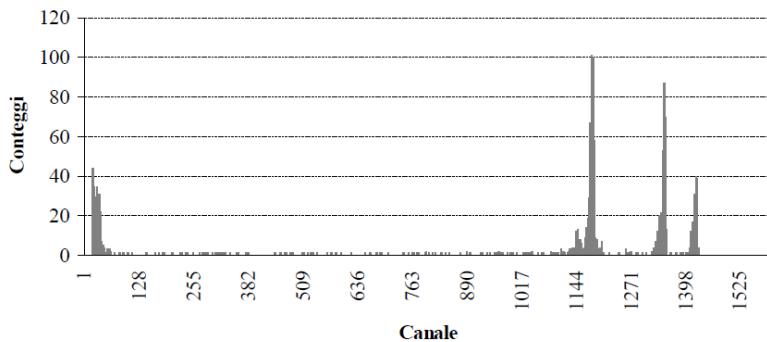


Attraverso questa retta di calibrazione è possibile fare qualsiasi tipo di associazione; ad esempio, se abbiamo una sorgente che emette γ con una data energia, attraverso la retta sappiamo a quale canale aspettarci il picco fotoelettrico. Viceversa, se abbiamo una sorgente incognita e vogliamo capire di che isotopo si tratta, andiamo a vedere i picchi e in base alla posizione di questi rispetto ai canali possiamo, mediante la retta di calibrazione, conoscere le energie e quindi capire qual è l'isotopo.

Il motivo per cui adoperiamo tale procedura per ottenere la calibrazione è che nella maggior parte dei casi la relazione tra la grandezza misurata e il canale è lineare. Purtroppo però non sempre la corrispondenza è lineare: a volte può essere lineare in una buona porzione dello spettro ma magari si presentano degli effetti di non linearità nelle regioni estreme (cioè nella regione a bassa ampiezza e in quella ad alta ampiezza), per cui è preferibile cercare di lavorare nella regione centrale dello spettro, dove la linearità è abbastanza assicurata.

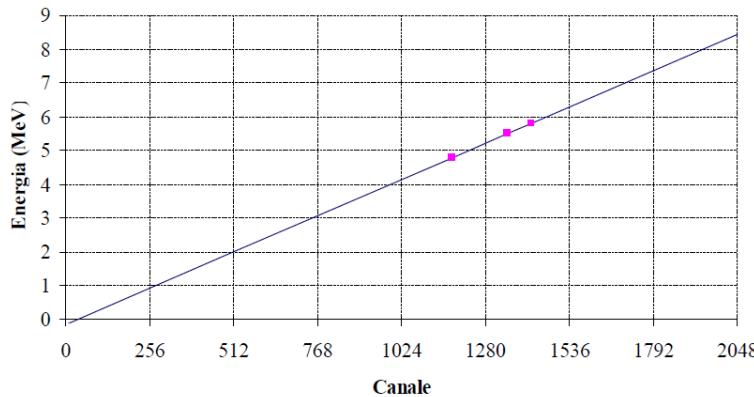
Esempio 6.2

In figura possiamo vedere un esempio di spettro ottenuto con un rivelatore al silicio per la misura di una sorgente α mista, cioè costituita da diversi isotopi, tant'è che abbiamo tre picchi di energia nota.



Vediamo poi anche la corrispondente retta di calibrazione, ottenuta tramite best-fit. Idealmente la retta dovrebbe passare dallo zero degli assi, nella pratica ciò non

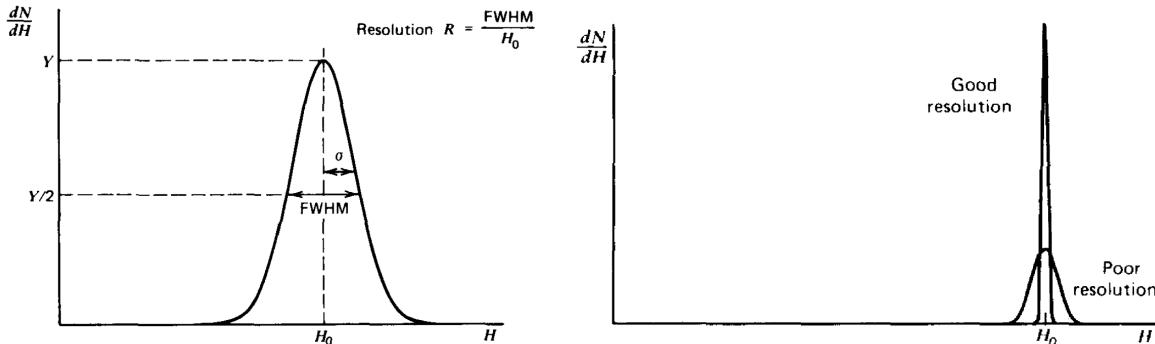
avviene per effetti di non linearità. Per una calibrazione più accurata bisognerebbe avere anche delle sorgenti che corrispondono a energie più basse o più alte, in modo da andare a esplorare tutta regione di interesse. Ciononostante, anche con soltanto questa procedura si ottengono delle ottime calibrazioni.



6.3.2 Risoluzione in energia

Osservando gli spettri visti finora notiamo come, sebbene teoricamente ci aspettiamo che siano mono-energetici, in pratica non lo sono. Abbiamo visto il caso dello spettro γ , in cui intervengono diversi meccanismi a complicare la situazione, ma anche nel caso della sorgente di particelle α , le quali sono sempre mono-energetiche, in realtà non si ottengono dei picchi strettissimi. Quello che infatti ci saremmo aspettati è che, dato che le particelle hanno esattamente tutte la stessa energia, arrivando nel rivelatore e depositando tutta l'energia avrebbero prodotto sempre lo stesso segnale di uguale ampiezza; quello che invece notiamo è un allargamento del picco. Ciò è dovuto alla *risoluzione energetica*, cioè alla capacità di un rivelatore di distinguere radiazioni che depositano nel rivelatore energie simili.

Immaginiamo di avere due radiazioni (sia radiazione elettro-magnetica che particelle cariche) che depositano nel rivelatore energie tra di loro molto simili. Quello che può succedere è che il rivelatore potrebbe non essere in grado di distinguere che si tratta di due energie effettivamente diverse, e ciò dipende da quanto vale la sua risoluzione in energia. Questa è una caratteristica dei rivelatori che misurano l'energia, e può essere stimata inviando sul rivelatore delle radiazioni monoenergetiche (ad esempio della radiazione α , che sappiamo essere certamente monoenergetica, o utilizzando dei gamma monoenergetici) e misurando il corrispondente spettro in energia.



Quello che si osserva non è una delta di Dirac, dunque un istogramma che si costruisce solamente su un bin, bensì vediamo che gli eventi si suddividono su diversi bin, su diversi canali, proprio a causa di questo effetto di risoluzione energetica, quindi l'energia viene ricostruita con una certa precisione rispetto al valore vero.

Possiamo valutare la qualità nella ricostruzione dell'energia osservando la larghezza di questo picco. È chiaro che più stretto è il picco, più il rivelatore sta lavorando bene in termini di misura dell'energia, cioè la misura dell'energia è più precisa. Il parametro che si valuta è la cosiddetta *larghezza a metà altezza* del picco, che in inglese viene abbreviata con la sigla FWHM (Full Width Half Maximum). Questa rappresenta la larghezza del picco alla metà della sua altezza, per cui per trovarla bisogna vedere dove il picco raggiunge il valore massimo, dopodiché consideriamo la metà della sua altezza e andiamo a guardare che valori di ascisse si raggiunge in corrispondenza di questo. Questi due estremi individueranno la larghezza del picco metà altezza.

La risoluzione R viene definita come la FWHM del picco divisa per il valore centrale di questo:

$$\text{Risoluzione} \equiv R = \frac{\text{FWHM}}{E_0}$$

Essendo definita come il rapporto tra due grandezze aventi entrambe le dimensioni di un'energia (la FWHM è un intervallo di energie e il denominatore è l'energia centrale del picco, cioè il suo centroide), la risoluzione risulta essere un numero puro, che si può eventualmente esprimere in percentuale. Per dare un'idea quantitativa, i rivelatori al silicio hanno una risoluzione dell'1%, mentre gli scintillatori tra il 5% e il 10%.

Nella maggior parte dei casi, una buona approssimazione dei picchi che si ottengono negli spettri è quella Gaussiana, ossia è lecito immaginare che il picco abbia una forma Gaussiana⁵. Sotto tale approssimazione, si può dimostrare che la larghezza a metà altezza può essere valutata conoscendo la deviazione standard della Gaussiana, infatti le due grandezze sono legate attraverso la relazione

$$\text{FWHM} = 2.35\sigma$$

⁶La risoluzione in energia in realtà non è costante per un dato rivelatore. In generale, essa è una funzione dell'energia depositata nel rivelatore, in maniera tale che R migliora con l'aumentare dell'energia. Cio è dovuto al fatto che i processi di ionizzazione ed eccitazione seguono delle statistiche di tipo Poissoniano o simile. Infatti, si scopre che l'energia media necessaria per produrre una ionizzazione è un valore fisso, w , dipendente solo dal materiale. Per una data energia depositata E , quindi, ci si aspetterebbe in media un numero di ionizzazioni J pari a

$$J = \frac{E}{w}$$

Pertanto, con l'aumentare dell'energia, aumenta anche il numero di eventi di ionizzazione, risultando in fluttuazioni relative minori.

Per calcolare le fluttuazioni è necessario considerare due casi.

⁵Tale approssimazione va bene soprattutto nella zona centrale, mentre le code potrebbero differire un po' da tale andamento.

⁶Questa parte l'ho presa dal Leo, §5.3, "Energy Resolution. The Fano Factor".

Primo caso: la radiazione ha depositato parte della sua energia nel rivelatore

Per un rivelatore in cui l'energia della radiazione non viene totalmente assorbita, si verificano delle fluttuazioni nell'energia depositata (e dunque negli eventi prodotti) in quanto da particella a particella varia la sequenza di urti all'interno del rivelatore. Il numero di reazioni che producono il segnale è dato da una distribuzione di Poisson, dunque la varianza è data da

$$\sigma^2 = J$$

dove J è il numero medio di eventi prodotti, ovvero il numero medio di coppie elettron-ione nel caso di ionizzazione. La dipendenza della risoluzione dall'energia può allora essere espressa come:

$$R = 2,35 \cdot \frac{\sqrt{J}}{J} = 2,35 \cdot \sqrt{\frac{w}{E}}$$

dove il fattore 2,35 collega la deviazione standard di una Gaussiana alla sua larghezza a metà altezza⁷ e al denominatore abbiamo messo il numero di eventi J che si verificano. Pertanto, la risoluzione varia inversamente alla radice quadrata dell'energia.

Secondo caso: la radiazione ha depositato tutta la sua energia nel rivelatore

Potremmo avere dei rivelatori abbastanza spessi da far sì che la particella si arresti all'interno del rivelatore, perdendo quindi completamente l'energia.

Stavolta l'energia depositata sarà sempre la stessa, dunque è un valore fisso e costante, mentre nel caso precedente l'energia depositata poteva fluttuare. Il numero totale di ionizzazioni che può avvenire e l'energia persa in ciascuna ionizzazione sono quindi vincolati da questo valore.

Statisticamente, ciò significa che gli eventi di ionizzazione non sono tutti indipendenti, quindi le statistiche di Poisson non sono applicabili. Fano fu il primo a calcolare la varianza in questa condizione e trovò che essa è data da

$$\sigma^2 = F \cdot J$$

dove J è il numero medio di ionizzazioni prodotte e F è un numero noto come *fattore di Fano*. Il fattore F è una funzione di tutti i vari processi fondamentali che possono portare a un trasferimento di energia nel rivelatore. Questo include tutte le reazioni che non portano a ionizzazione, come ad esempio le eccitazioni di fononi, ecc. È quindi una costante intrinseca del mezzo rivelatore. Teoricamente, F è molto difficile da calcolare accuratamente poiché richiede una conoscenza dettagliata di tutte le reazioni che possono avvenire nel rivelatore.

In questo caso la risoluzione è quindi data da:

$$R = 2,35 \cdot \frac{\sqrt{FJ}}{J} = 2,35 \cdot \sqrt{\frac{Fw}{E}}$$

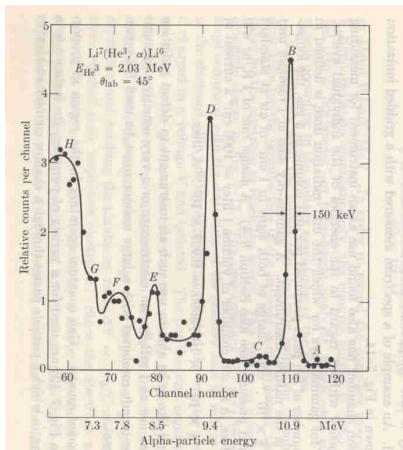
Se $F = 1$, la varianza è la stessa di quella per una distribuzione di Poisson e ci riconduciamo al caso precedente. Questo sembra essere il caso degli scintillatori, tuttavia, per molti rivelatori come quelli a semiconduttori o a gas, $F < 1$. Questo, naturalmente, aumenta notevolmente la risoluzione di questi tipi di rivelatori.

⁷Infatti tale ragionamento vale anche nel caso in cui si segua una distribuzione Gaussiana, in quanto la Poissoniana, per valori medi elevati, può essere approssimata con questa.

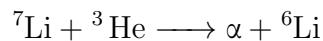
Oltre alle fluttuazioni nella ionizzazione, numerosi fattori esterni possono influenzare la risoluzione complessiva di un rivelatore. Questo include effetti dall'elettronica associata come rumore, derive, ecc. Supponendo che tutte queste fonti siano indipendenti e distribuite come gaussiane, la risoluzione totale E sarà data dalla somma in quadratura di tutti i contributi:

$$(\Delta E)^2 = (\Delta E_{\text{det}})^2 + (\Delta E_{\text{elect}})^2 + \dots$$

Esempio 6.3



In figura è riportato lo spettro in energia di particelle α prodotte dalla reazione

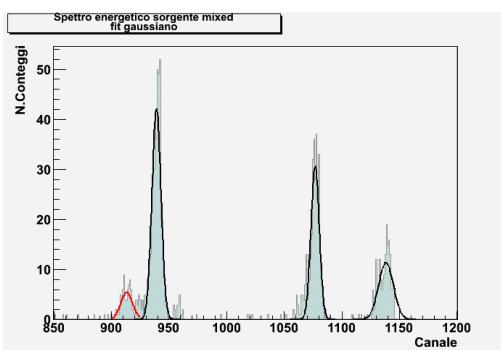


misurate con un rivelatore di silicio.

Il picco indicato con B ha larghezza a metà altezza pari 150 keV ed ha il suo centroide in corrispondenza di 10.9 MeV. La risoluzione risulta essere

$$R(\%) = \frac{150 \cdot 10^3}{10.9 \cdot 10^6} = 1.4\%$$

Un altro modo per ricavare i valori di risoluzione è quello di realizzare un fit gaussiano dei picchi. Di seguito ne è riportato un esempio con i valori ottenuti.

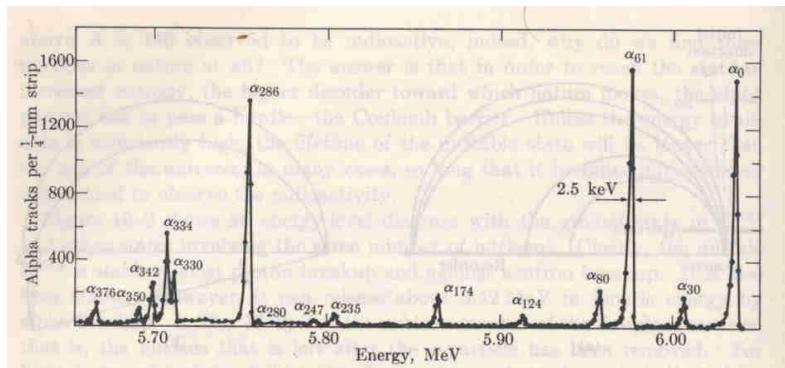


FWHM	Centroide	Risoluzione percentuale
9.1845	939.18 ± 3.90	0.977%
8.5015	1076.93 ± 3.61	0.789%
9.1845	1138.36 ± 6.46	1.336%

Esempio 6.4

Se volessimo ottenere risoluzioni migliori dell'1%, è necessario ricorrere ad altra strumentazione. In particolare è preferibile utilizzare dei sistemi basati su spettrometri magnetici, cioè sistemi che adoperano dei campi magnetici per curvare le particelle e indirizzarle verso dei rivelatori e in base alla traiettoria seguita della particella si conosce l'energia.

In questo caso si può arrivare a risoluzioni molto più spinte, come possiamo vedere ad esempio nel seguente spettro di particelle α , dove il picco α_{61} ha una larghezza di 2.5 keV ed un'altezza del picco di 5.97 MeV:



Svolgendo i conti, otteniamo che

$$R(\%) = \frac{2.5 \cdot 10^3}{5.96 \cdot 10^6} = 0.04\%$$

molto al di sotto del caso precedente.

Che conseguenze avremmo avuto se la risoluzione fosse stata dell'1%? Su un picco di 5.97 MeV, l'1% corrisponde a $60 \text{ keV} = 0.06 \text{ MeV}$, dunque l'ampiezza del picco sarebbe stata $5.97 \pm 0.06 \text{ MeV}$. Se andiamo a guardare il grafico, notiamo come in tale range rientrino gli ultimi quattro picchi, i quali dunque verrebbero confusi dato che la risoluzione in energia non permetterebbe di distinguerli l'uno dall'altro. In altre parole, questi picchi sarebbe così larghi che andrebbero a sovrapporsi in unico picco, risultando così impossibile distinguerli.

6.4 Efficienza di un rivelatore

Analizziamo ora un altro aspetto dei rivelatori, ossia l'efficienza. Questo aspetto è particolarmente importante nel caso della misura di particelle neutre, le quali interagiscono con meccanismi diversi da quelli delle particelle cariche e che hanno inefficienze di rivelazione notevoli, quindi è molto importante conoscere le efficienze di rivelazione.

6.4.1 Efficienza intrinseca di rivelazione

Il concetto di efficienza intrinseca di un rivelatore vale per qualsiasi tipologia di rivelatore. Infatti non è detto che tutte le radiazioni/particelle che incidono sul rivelatore siano in grado di produrre un segnale misurabile. Pensiamo ad esempio ai γ , i quali potrebbero arrivare sul rivelatore ma non interagire: in questo caso il γ viene perso, cioè non viene misurato. Un altro esempio può essere quello di una particella carica, che per qualche motivo deposita poca energia nell'attraversare un rivelatore e produce un segnale di bassa ampiezza, il quale può essere confuso con del rumore e non viene misurato.

Questi esempi ci mostrano come ci siano dei casi in cui il rivelatore risulta essere inefficiente. Proviamo allora a quantificare con una grandezza questa efficienza, che si dice intrinseca in quanto dipende dai meccanismi di interazione della radiazione con il rivelatore. L'efficienza intrinseca di un rivelatore ε_{int} è definita come

$$\varepsilon_{\text{int}} = \frac{\text{n}^\circ \text{ particelle rivelate}}{\text{n}^\circ \text{ particelle incidenti}}$$

cioè come il numero di particelle che vengono rivelate, dunque che producono un segnale che viene in qualche modo acquisito, rispetto al numero di particelle che incidono di sul rivelatore.

Anche se concettualmente semplice, non è facile valutare l'efficienza intrinseca, perché questa dipende da tanti aspetti. In generale essa dipende

- dal tipo di particella/radiazione;
- dall'energia della particella, perché a seconda dell'energia intervengono dei meccanismi di interazione diversi;
- dal tipo di rivelatore;
- dal volume del rivelatore, in quanto in base alla sua grandezza la radiazione può fuoriuscire, non venendo quindi misurata.

Tutti questi fattori rendono la valutazione dell'efficienza intrinseca un compito non semplicissimo, che spesso viene fatto infatti con dei codici di simulazione professionali che tengono conto di tutti i meccanismi di interazione.

6.4.2 Accettanza geometrica

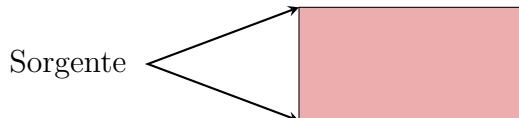
Un altro fattore da considerare è la cosiddetta accettanza geometrica o efficienza geometrica. Questo è un concetto un po' diverso dal precedente, in quanto prima ci siamo posti il problema di capire se una particella che arriva a colpire il rivelatore viene rivelata o meno, adesso invece ci poniamo il problema di capire se una particella emessa da una sorgente arrivi a colpire o meno il rivelatore, indipendentemente dal fatto che poi, una volta intercettato il rivelatore, si formi un segnale.

L'accettanza geometrica ε_{geo} è definita come il rapporto tra il numero di particelle incidenti sul rivelatore rispetto al numero di particelle emesse dalla sorgente:

$$\varepsilon_{\text{geo}} = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ particelle incidenti}}{\text{n}^{\circ} \text{ particelle emesse dalla sorgente}}$$

Esempio 6.5: Sorgente puntiforme che emette particelle isotropicamente in tutto l'angolo solido

Immaginiamo di avere una sorgente puntiforme, posta ad una distanza r da un rivelatore avente superficie S , che emette particelle in maniera isotropa, ossia con la stessa probabilità in tutte le direzioni dello spazio.



È chiaro che se la particella viene ad esempio emessa nella direzione opposta al rivelatore non potrà mai colpirlo. Infatti, le uniche particelle che possono colpire il rivelatore sono quelle che intercettano l'angolo solido Ω sotteso da questo.

L'accettanza geometrica si può allora valutare mediante un calcolo che dipende da

caratteristiche puramente geometriche, infatti essa sarà data da

$$\varepsilon_{\text{geo}} = \frac{\Omega}{4\pi}$$

dove 4π è l'angolo solido totale di una sfera intera, ovvero l'angolo solido che corrisponde a tutte le possibili direzioni intorno a un punto. Spesso in fisica si parla di "rivelatori a 4π ", con cui si intendono rivelatori che vanno a circondare per intero la sorgente da cui possono essere prodotte delle particelle.

Se le dimensioni del rivelatore sono molto piccole rispetto alla distanza r , l'angolo solido può essere approssimato come

$$\Omega \simeq \frac{S}{r^2}$$

e di conseguenza l'accettanza geometrica come

$$\varepsilon_{\text{geo}} = \frac{S}{4\pi r^2}$$

Per come è definita, ε_{geo} può variare da 0 (caso in cui l'angolo solido è nullo) a 1 (caso in cui l'angolo solido è 4π). Se ad esempio avessimo un rivelatore capace di misurare tutte le particelle che vengono emesse alla destra della sorgente, allora avremmo una porzione di angolo solido pari 2π e dunque un'efficienza geometrica pari a 0.5.

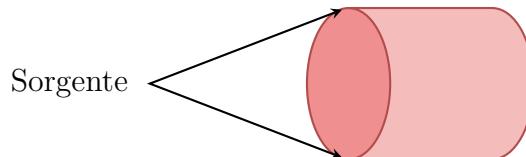
Esempio 6.6: Angolo solido sotteso da un cilindro piano posto ad una distanza r da una sorgente puntiforme

Se abbiamo un rivelatore molto vicino alla sorgente, l'approssimazione utilizzata nell'esempio precedente non è più applicabile ed il calcolo dell'accettanza geometrica si complica. In tal caso, l'angolo solido sotteso dovrà essere valutato mediante la formula

$$\Omega = \int_S \frac{\cos \alpha}{r^2} dS$$

dove r rappresenta la distanza tra la sorgente e un elemento di superficie dS e α è l'angolo tra la normale all'elemento di superficie e la direzione della sorgente.

Consideriamo il caso in cui il rivelatore abbia forma cilindrica e la sorgente puntiforme sia posta sull'asse del cilindro



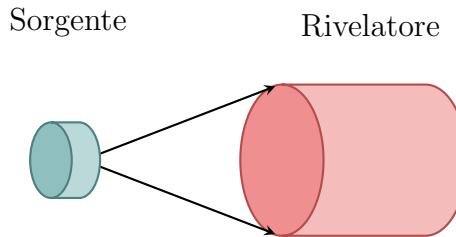
In tal caso, l'angolo solido sotteso del rivelatore è dato da

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{r}{\sqrt{r^2 + a^2}} \right)$$

dove a è il raggio del cilindro.

Esempio 6.7: Angolo solido sotteso da un cilindro piano posto ad una distanza r da una sorgente estesa

Riprendiamo la configurazione dell'Es. 6.6, ma stavolta complichiamo il problema immaginando di avere una sorgente non più puntiforme bensì estesa, ad esempio avente la forma di un dischetto allineato con l'asse del rivelatore:



In questo caso l'emissione di particelle può avvenire da qualsiasi punto della sorgente, per cui nell'espressione dell'angolo solido oltre l'integrazione vista prima se ne dovrà aggiungere una rispetto al volume della sorgente. Il problema qui in esame si risolve in maniera approssimata attraverso l'integrazione di funzioni di Bessel mediante metodi numerici (si veda Knoll §4.VI). Solitamente però in situazioni del genere si preferisce adottare delle tecniche di simulazione Monte Carlo.

6.4.3 Efficienza complessiva

Una volta descritti questi due aspetti dell'efficienza, possiamo valutare l'efficienza complessiva del rivelatore. Infatti, il fatto che una particella venga effettivamente rivelata dipende da entrambi gli aspetti, in quanto dal punto di vista geometrico dipende dal fatto che la particella segue una traiettoria che va a intercettare il rivelatore e dal punto di vista strutturale dipende dal fatto che, una volta intercettato il rivelatore, effettivamente il segnale prodotto sia sufficientemente elevato da poter essere misurato. In definitiva, l'efficienza complessiva è data semplicemente dal prodotto tra efficienza intrinseca ed efficienza geometrica:

$$\varepsilon_{\text{tot}} \equiv \varepsilon = \varepsilon_{\text{geo}} \cdot \varepsilon_{\text{int}} = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ particelle rivelate}}{\text{n}^{\circ} \text{ particelle emesse dalla sorgente}}$$

Da tale definizione segue che l'efficienza complessiva sia più piccola di entrambi i fattori.

Esempio 6.8: L'attività di una sorgente

Conoscendo l'efficienza complessiva, è possibile correggere i dati misurati per valutare le quantità originali. Cosa intendiamo con questa frase? Supponiamo di avere una sorgente in laboratorio di cui vogliamo misurare l'attività, cioè il numero di particelle emesse al secondo.

Chiaramente per tale misura dovremo adoperare un rivelatore, ma il numero di particelle al secondo misurate da questo non coinciderà con l'attività della sorgente, perché noi misuriamo solo una porzione di tutte le particelle emesse, soltanto quelle che entrano nell'angolo solido sotteso dal rivelatore; inoltre non è detto che tutte

le particelle che entrano nel rivelatore diano luogo ad un segnale e quindi vengano rivelate. Se tuttavia conosciamo l'efficienza complessiva, possiamo risalire all'attività andando a correggere la frequenza di conteggio ottenuta sperimentalmente dividendola per l'efficienza:

$$\text{Attività} = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ particelle/s misurate}}{\varepsilon}$$

6.5 Tempo di risposta

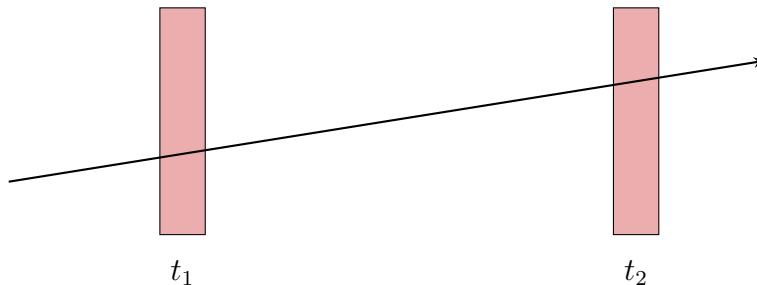
Spesso si è interessati a conoscere il tempo di risposta di un rivelatore, che consiste nel tempo che impiega il rivelatore a formare il segnale. Tale informazione è utile in quanto il segnale che viene fornito può dare informazioni sul tempo di arrivo della particella/radiazione ed è dunque importante conoscere con che precisione viene fornito l'istante di arrivo della particella. In altre parole, siamo interessati alla *risoluzione temporale*, la quale esprime l'indeterminazione nella conoscenza del tempo di arrivo. La risoluzione temporale dipende da:

- il tipo di rivelatore (a gas, scintillatore, ecc.);
- il modo di funzionamento del rivelatore;
- le dimensioni del rivelatore;
- l'elettronica associata per la trattazione del segnale.

Esempio 6.9: La misura del tempo di volo

Conoscere la risoluzione temporale è importante in diversi casi, ad esempio quando si effettuano delle misure di tempo di volo (spesso indicato con la sigla TOF, che sta per Time Of Flight) di una particella tra due rivelatori, che è una tecnica utilizzata per identificare le particelle e che consiste nel misurare il tempo che impiega una particella a percorrere una data distanza.

Tale misura si realizza ponendo due rivelatori di cui conosciamo il tempo di arrivo in due posizioni ben precise e andando a misurare il passaggio di una particella che attraversa entrambi.



Il tempo di volo sarà dato dalla differenza tra questi due tempi e la risoluzione temporale complessiva di questa misura sarà data dalla somma in quadratura delle

risoluzioni temporali dei due rivelatori

$$\text{TOF} = t_2 - t_1 \quad , \quad \sigma_t = \sqrt{\sigma_{t,1}^2 + \sigma_{t,2}^2}$$

In molti casi è importante avere una buona risoluzione temporale, in quanto i tempi di volo sono molto brevi. Per dare un'idea, una particella che si muove a velocità prossima a quella della luce (30 cm/ns) percorrerà 1 m in un tempo dell'ordine dei nanosecondi. Di conseguenza la risoluzione temporale deve essere più piccola di questi valori, per cui bisogna saper scegliere bene che rivelatori adoperare. Tipicamente si ha che

- Rivelatori a gas come camere a ionizzazione, contatori proporzionali, Geiger, ecc. producono segnali lenti (microsecondi) e hanno risoluzioni temporali scadenti;
- Rivelatori a gas di altro genere (Parallel Plate, MRPC, ecc.) hanno risoluzioni temporali estremamente buone (100 ps);
- Rivelatori basati su scintillatori di piccole dimensioni hanno risoluzioni dell'ordine del nanosecondo.

6.6 Tempo morto

L'ultimo aspetto che affrontiamo dei rivelatori riguarda il cosiddetto tempo morto. Infatti, ciascun sistema di rivelazione ha bisogno di un certo tempo per processare il segnale, e se durante questo tempo arriva un secondo evento quest'ultimo non verrà rivelato, venendo quindi perso. In altre parole, in una successione di eventi misurati da un rivelatore, esiste un tempo minimo tra due eventi successivi, al di sotto del quale il rivelatore non può separarli. Questo tempo è il tempo morto del sistema.

Se l'arrivo degli eventi è casuale, dunque segue la statistica di Poisson, poiché questa ha un andamento esponenziale decrescente è molto probabile che la differenza temporale tra due eventi sia piccola, dunque la probabilità che due eventi arrivino separati meno del tempo morto non è mai nulla. Una volta che però si conosce il tempo morto del sistema, si può andare a misurare soltanto quei fenomeni che hanno una frequenza di conteggio compatibile con il tempo morto del sistema, altrimenti perderemmo tanti eventi. Quindi, in base al tempo morto, si stabilisce il limite della frequenza di conteggio misurabile. Chiaramente l'ideale è avere una risposta veloce da parte dei rivelatori.

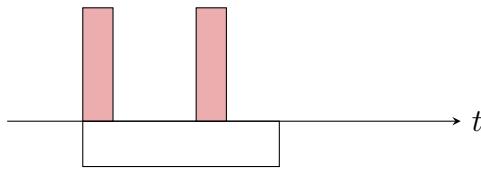
6.6.1 Modelli per il comportamento del tempo morto

Ci sono due modelli per descrivere il comportamento di un rivelatore dal punto di vista del tempo morto:

- *Rivelatori non paralizzabili*, che sono dei rivelatori in cui un evento che accade durante il tempo morto non influenza ulteriormente il comportamento dei rivelatori.

Possiamo immaginare schematicamente ciò che avviene nel rivelatore nella seguente maniera: se disponiamo gli eventi che avvengono (rappresentati dai rettangoli rosa) su un asse temporale, nel caso di rivelatore non paralizzabile il primo evento che arriva genera un certo processo nel rivelatore e di conseguenza l'elettronica processa

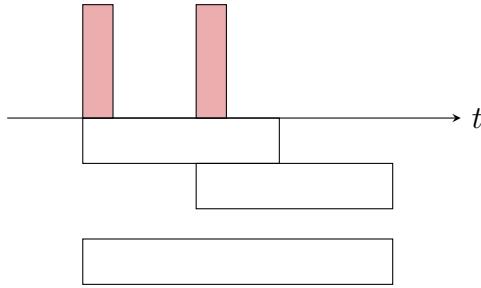
il segnale, e tutto ciò richiede un certo tempo prima che si ripristinino le condizioni per una nuova rivelazione.



Se durante la finestra temporale del tempo morto (rappresentato dal rettangolo bianco) si verifica un secondo evento, questo non verrà rivelato ma non influenzerà la durata del tempo morto, nel senso che non lo estenderà ulteriormente: una volta completata questa finestra, il rivelatore sarà pronto per la rivelazione e se si verifica un nuovo evento sarà pronto a misurarlo.

- *Rivelatori paralizzabili*, in cui invece un evento che accade durante il tempo morto non viene comunque conteggiato ma influenza ulteriormente il tempo morto.

Il comportamento di questi rivelatori si può dedurre guardando il seguente schema:



Nel momento in cui si verifica il primo evento inizia la finestra di tempo morto e se durante tale intervallo arriva un secondo evento il tempo morto viene esteso. Se dovesse arrivare un terzo evento, il tempo morto si estenderà ancora e così via se ne dovessero arrivare altri.

6.6.2 Correzioni per il tempo morto

Ci chiediamo adesso come fare per valutare qual è l'effetto del tempo morto in un sistema sul numero di conteggi. In altre parole, ci chiediamo come facciamo a capire se, dato che il sistema ha un suo tempo morto, il numero di conteggi che abbiamo misurato corrisponde alla frequenza di conteggio vera o se abbiamo perso degli eventi.

Sia R_{mis} il rate misurato cioè la frequenza di conteggio misurati, R_{vero} il rate vero e τ il tempo morto. Si può dimostrare che

- Nel caso di un rivelatore non paralizzabile la frequenza di conteggio vera è legata alla frequenza di conteggio misurata attraverso la relazione

$$R_{\text{vero}} = \frac{R_{\text{mis}}}{1 + R_{\text{mis}}\tau}$$

Attraverso questa, conoscendo il tempo morto e avendo misurato una certa frequenza di conteggio, possiamo calcolare il rate vero. Chiaramente, man mano che aumenta il tempo morto, R_{vero} e R_{mis} si discosteranno sempre più;

- nel caso di un rivelatore paralizzabile la relazione è più complessa, ed è la seguente:

$$R_{\text{mis}} = R_{\text{vero}} e^{-R_{\text{vero}} \tau}$$

la quale va risolta attraverso dei metodi iterativi.

Per entrambe le tipologie di rivelatore nel caso in cui la frequenza di conteggio è bassa, cioè quando $R_{\text{vero}} \ll 1/\tau$, è valida l'approssimazione

$$R_{\text{mis}} = R_{\text{vero}} (1 - R_{\text{vero}} \tau)$$

Vediamo alcuni esempi numerici, in modo da quantificare l'effetto del tempo morto:

Esempio 6.10: Tempo morto di 10 microsecondi

Nella seguente tabella troviamo le perdite di conteggi nel caso in cui $\tau = 10 \mu\text{s}$ per sorgenti aventi rate via via crescenti.

R_{mis} (Hz)	R_{vero} (Hz)	Perdite (%)
10	10,001	0,01
100	100,1001	0,1
1000	1010,101	1
2000	2040,816	2
3000	3092,784	3
4000	4166,667	4
5000	5263,158	5

Notiamo come nel caso di rate bassi, ad esempio 10 particelle al secondo, un tale tempo morto non fa perdere quasi nulla, in quanto la probabilità che due eventi consecutivi si distanzino temporalmente meno di $10 \mu\text{s}$ è bassissima dato che in media sono separate da 0.1 s.

Aumentando il rate l'effetto di perdita diventa più consistente, ad esempio con un rate di $5 \cdot 10^3$ Hz perdiamo il 5% degli eventi.

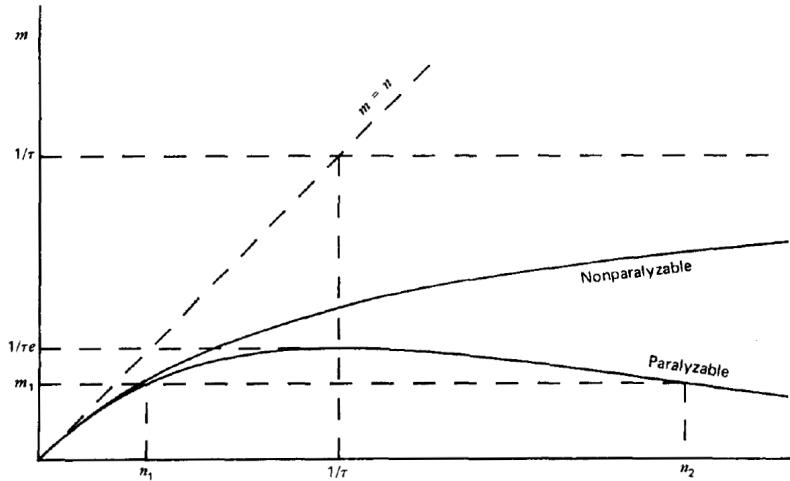
Esempio 6.11: Tempo morto di 100 microsecondi

È chiaro che se il tempo morto è più grande, le perdite nel conteggio saranno maggiori. Guardiamo i valori ottenuti nel caso di $\tau = 100 \mu\text{s}$:

R_{mis} (Hz)	R_{vero} (Hz)	Perdite (%)
10	10,01001	0,1
100	101,0101	1
1000	1111,111	10
2000	2500	20
3000	4285,714	30
4000	6666,667	40
5000	10000	50

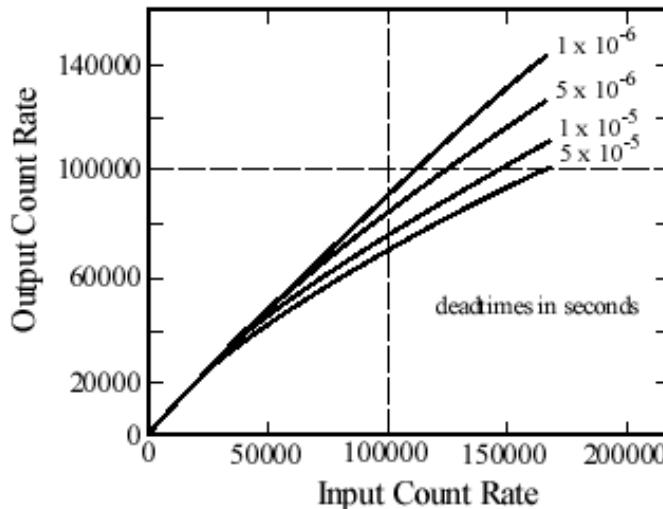
Notiamo come per valori di rate elevato si arrivi a perdere fino al 50% dei conteggi!

Vediamo adesso graficamente l'andamento del rate misurato in funzione del rate vero, indicati nel grafico seguente rispettivamente con m e n :



Notiamo come nel caso ideale in cui $R_{\text{vero}} = R_{\text{mis}}$ tale grafico coincide con la prima bisettrice. Nella realtà ci sono delle perdite dovute al tempo morto, le quali dipendono ovviamente dal rate (notiamo come per bassi valori di questo le curve praticamente coincidano) ma soprattutto dipendono dal modo di funzionamento del rivelatore, cioè se è paralizzabile o non paralizzabile. Nel caso non paralizzabile si ha una perdita abbastanza limitata, mentre nel caso paralizzabile, a causa del fatto che il sistema si paralizza perché il tempo morto viene esteso sempre più man mano che arrivano particelle durante la stessa finestra temporale, il rivelatore può perdere quasi tutte le particelle che arrivano e dunque le perdite sono più incidenti.

Guardiamo adesso un grafico simile al precedente ma relativo soltanto al caso di rivelatore non paralizzabile, dove le varie curve sono ottenute per valori di tempo morto differenti:



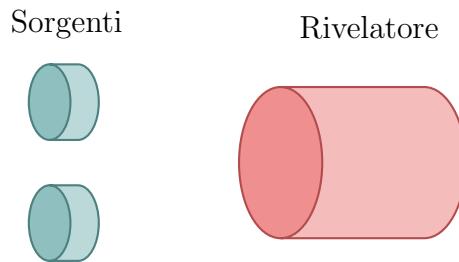
Notiamo come, all'aumentare del tempo morto, le curve si discostano sempre più dalla bisettrice, il che indica che la perdita di eventi è maggiore.

6.6.3 Come stimare il tempo morto?

A volte il tempo morto viene fornito dal costruttore, ma se non avessimo a disposizione questa informazione questo si può misurare sperimentalmente.

Esempio 6.12: Metodo delle due sorgenti

Esistono diverse tecniche per valutare il tempo morto, in particolare una tecnica molto adoperata è il cosiddetto metodo delle due sorgenti, che consiste nell'adoperare un rivelatore e nel posizionare in due posizioni fisse delle sorgenti come in figura



I passi di tale metodo sono i seguenti:

1. Misura con la prima sorgente: Si utilizza una sorgente radioattiva e si misura il numero di conteggi per unità di tempo (R_1) registrati dal rivelatore;
2. Misura con la seconda sorgente: Si utilizza una seconda sorgente radioattiva, che deve essere indipendente dalla prima, e si misura il numero di conteggi per unità di tempo (R_2);
3. Misura con entrambe le sorgenti: Si posizionano entrambe le sorgenti vicine al rivelatore e si misura il numero di conteggi totali per unità di tempo (R_{12}).

Il numero di conteggi attesi R_{12} quando entrambe le sorgenti sono attive dovrebbe essere approssimativamente la somma dei conteggi singoli ($R_1 + R_2$) se non ci fosse tempo morto. Tuttavia, a causa del tempo morto, il numero di conteggi osservato R_{12} sarà inferiore. In base al rate misurato si può stimare il tempo morto tramite la relazione

$$\tau = \frac{R_1 R_2 - \sqrt{R_1 R_2 (R_{12} - R_1)(R_{12} - R_2)}}{R_1 R_2 R_{12}}$$

Tale metodo è abbastanza semplice da adoperare, ma ha delle difficoltà che dipendono

- dalla statistica che andiamo a misurare, perché è tanto più preciso quanto più è lunga la misura che effettuiamo, in quanto le fluttuazioni statistiche diventano sempre meno importanti man mano che aumenta la statistica;
- dalla capacità dello sperimentatore di posizionare le sorgenti nello stesso punto, in quanto tra la misure di un rate e dell'altro le sorgenti vanno spostate per poi essere poste nella stessa posizione.

6.7 Funzioni di un rivelatore

Oltre ad informazioni su energia e tempo di volo, a seconda della tipologia di rivelatore, è possibile avere accesso ad altre informazioni sulle particelle che incidono. Ad esempio, oltre all'energia, si potrebbe misurare:

- l'impulso, che grossomodo ad alte energie (cioè energie molto più grandi della massa a riposo della particella) dà un'informazione sull'energia della particella;
- carica;
- massa
- tempo di arrivo.

In generale, per avere accesso a tutte le informazioni, poiché è impossibile che un unico rivelatore fornisca tutte le informazioni si adoperano grandi sistemi di rivelazione, costituiti da diversi sotto-rivelatori che sfruttano tecnologiche diverse. I grandi rivelatori per la fisica nucleare/particellare comprendono diverse componenti (sotto-rivelatori) per il tracciamento e l'identificazione delle numerose (anche decine di migliaia) particelle prodotte in una singola collisione.

Ad esempio, quando si esplorano regimi di energia molto elevati come le collisioni tra fasci di particelle a energia molto elevata, quello che succede è che da queste collisioni vengono emesse tantissime particelle e di conseguenza i rivelatori che bisogna adoperare sono estremamente complessi, in quanto devono essere in grado di misurare tutte le particelle emesse dal punto di interazione, e in tal caso è necessario una geometria a 4π che normalmente viene assicurata con geometrie cilindriche che avvolgono il punto di interazione più degli end-tap, cioè dei rivelatori che vanno a fare da "tappo" alle estremità. Quindi non serve solo un'efficienza il più possibile prossima 100%, ma anche delle tecnologie che permettono di capire le diverse tipologie di particelle che sono state prodotte per andare a studiare diversi segnali.

Come questi sistemi di rivelazione effettuano queste operazioni è un punto abbastanza complesso, in quanto essi devono saper ricostruire le tracce delle particelle, quindi alcuni di questi devono essere dei rivelatori di tracciamento, cioè in grado di andare a visualizzare in qualche modo il passaggio delle particelle e andare a tracciare delle linee che rappresentano il percorso seguito da diverse particelle; inoltre essi devono essere in grado di identificare le particelle oppure essere in grado di rivelare fotoni di alta energia.

6.7.1 Misura dell'energia

Uno dei compiti dei rivelatori è misurare l'energia, che come abbiamo già accennato è un aspetto importante soprattutto quando si vanno a misurare elettroni o fotoni di alta energia, perché in quei casi si producono degli sciami elettromagnetici e per misurare l'energia del gamma/elettrone di partenza è necessario adoperare dei rivelatori in grado di contenere eventuali sciami che si sviluppano.

I rivelatori che vanno a misurare l'energia totale di una particella o di una radiazione sono detti calorimetri. Un esempio di tali rivelatori sono i calorimetri elettromagnetici/adronici, usati soprattutto nella fisica delle alte energie.

6.7.2 Misura dell'impulso

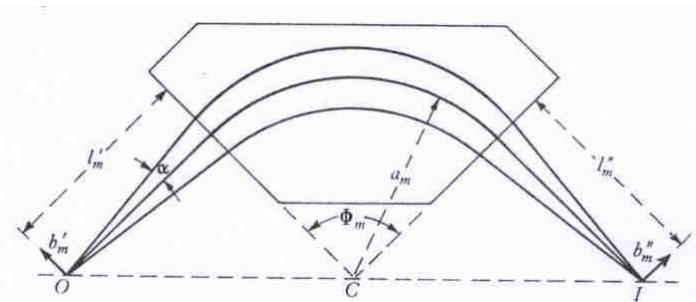
Un'altra tecnica per misurare l'energia di particelle cariche è quella di andare a misurare l'impulso, perché questa in pratica è una misura dell'energia.

Tale misura si effettua curvando la particella mediante un opportuno campo magnetico, sfruttando la forza di Lorentz e andando a produrre delle traiettorie circolari o elicoidali. Conoscendo poi il raggio di curvatura è possibile risalire all'impulso.

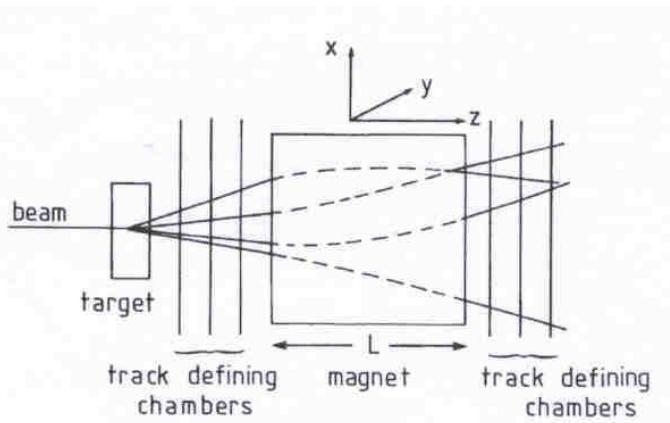
Bisogna tenere conto del fatto che i valori di energia che si devono misurare possono essere molto diversi tra loro: si va da pochi meV fino a 10^{20} eV nel caso dei raggi cosmici di alta energia, per cui le tecnologie che si devono adoperare di differiscono a seconda del valore di energia che si vuole misurare.

Nella fisica nucleare di bassa energia si utilizzano opportuni spettrometri magnetici, esistenti sotto varie configurazioni e il cui utilizzo consente una risoluzione in impulso estremamente elevata.

Per deflettere una particella carica e misurarne l'impulso dalla curvatura della traccia si può usare un dipolo magnetico come in figura:



Un altro esempio di magnete, usato per deflettere le particelle cariche prodotte in una reazione nucleare di un fascio con un target fisso può essere il seguente:

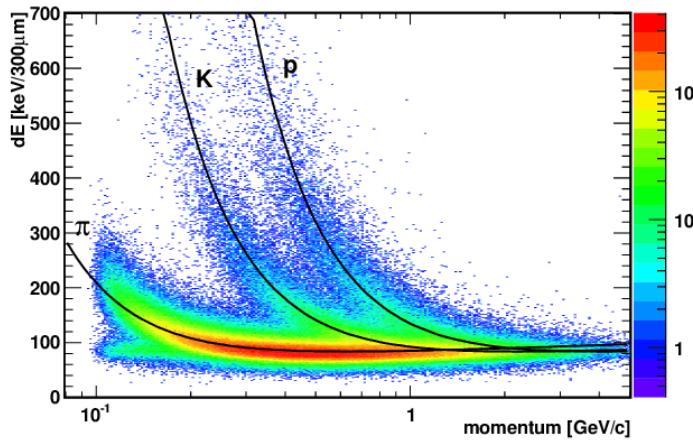


6.7.3 Misura della carica/massa

Una particella può essere identificata anche sfruttando la perdita di energia in un rivelatore, perché la formula di Bethe-Bloch non dipende soltanto dalle caratteristiche del materiale che viene investito (in questo caso del rivelatore) ma anche dalle caratteristiche della particella. È quindi possibile andare a discriminare le diverse tipologie di

particelle a seconda della perdita di energia che hanno all'interno del rivelatore, dunque il base al segnale che producono.

In figura possiamo vedere tipiche curve che si ottengono, che richiamano la forma della curva di Bethe-Bloch:



Un andamento del genere è chiamato dai fisici "a banana" ed è in particolare l'andamento iniziale della curva di Bethe-Bloch, il quale ha un andamento iperbolico.

Nel grafico si osservano diverse distribuzioni di punti in corrispondenza di diverse tipologie di particelle. Chiaramente i punti non si dispongono esattamente su una linea ma si addensano di più in corrispondenza di un determinato pattern in questo grafico, e ciò è dovuto a effetti di risoluzione in energia che fanno discostare i valori misurati sperimentalmente dalla curva ideale.

Capitolo 7

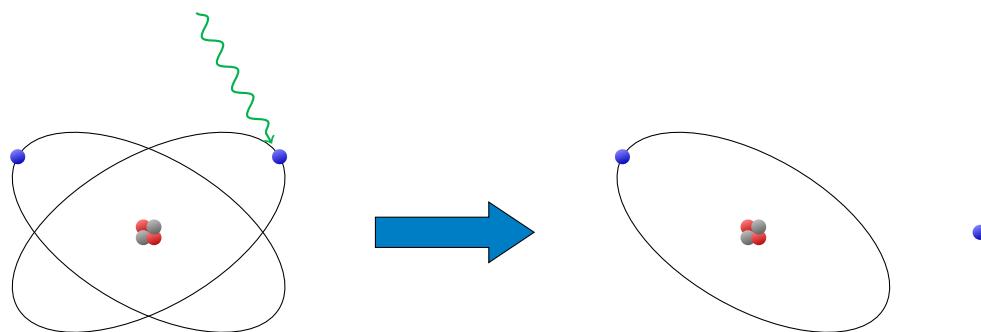
Rivelatori a gas

Una volta discusse le caratteristiche generali dei rivelatori possiamo entrare più nel dettaglio, andando a studiare le diverse tipologie di rivelatori.

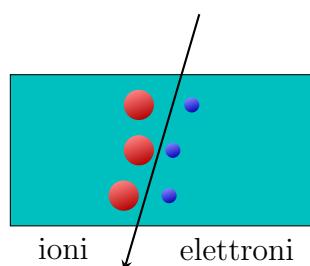
Cominciamo dai rivelatori a gas, in quanto storicamente questi sono stati i primi rivelatori ad essere stati sviluppati. Ancora oggi questi vengono adoperati non solo nel campo della ricerca, ma anche in alcuni campi applicativi come il campo medico.

7.1 Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento dei rivelatori a gas si basa sul fenomeno della ionizzazione, in quanto essi sono dei rivelatori che contengono al loro interno un gas.



Il concetto di base è sfruttare il fatto che le particelle che attraversano un contenitore pieno di gas trasferiscono energia, che può essere utilizzata per produrre fenomeni di ionizzazione. In pratica, l'energia assorbita da uno degli elettroni degli atomi del gas permette ad esso di essere espulso, generando così una coppia composta da un ione positivo e un elettrone libero.



Possiamo schematizzare un rivelatore al gas come un contenitore riempito di gas. Nel momento in cui passa una particella carica, questa particella produce coppie elettrone-ione, i quali hanno dimensioni e masse notevolmente differenti, fatto che comporta delle conseguenze soprattutto per quello che riguarda la raccolta del segnale.

Chiaramente, nel momento in cui una particella attraversa un volume pieno di gas non viene prodotta una sola coppia: ne vengono prodotte un certo numero che dipende da quanta energia la particella deposita all'interno del gas.

Un tale sistema funziona come rivelatore perché abbiamo un segnale (che in questo caso è la produzione di coppie elettrone-ione) che indica il passaggio di una particella. Addirittura, se fossimo capaci di contare quante coppie sono state create potremmo avere un'informazione anche sull'energia che è stata depositata all'interno del rivelatore. Questi rivelatori a gas possono essere adoperati sia in current mode che in pulsed mode. La differenza sta nel fatto che in pulsed mode si produce un impulso elettrico ogni volta che passa una particella, mentre nella modalità current mode il flusso di particelle è così elevato che alla fine si produce una corrente continua il cui valore è proporzionale al flusso di particelle che sta incidendo sul rivelatore, dunque è come se si facesse una media di tanti impulsi che sono molto ravvicinati tra di loro in tempo, quindi non è più possibile distinguere un impulso dal successivo, ma si ha sostanzialmente una corrente continua.

7.2 Ionizzazione

7.2.1 Meccanismi di ionizzazione

I processi di interazione di una particella carica in un gas si dividono essenzialmente in due tipi di reazione:

1. eccitazione;
2. ionizzazione, in cui vengono creati un elettrone libero e uno ione.

L'eccitazione di un atomo X ad opera di una particella carica p è



ed è una reazione risonante, che richiede il trasferimento di un corretto valore di energia, in quanto il valore di energia fornito deve corrispondere al salto energetico dell'elettrone. Le sezioni d'urto tipiche nei gas nobili in risonanza sono dell'ordine di $\sigma \approx 10^{-17} \text{ cm}^2$. Sebbene non vengano creati elettroni o ioni liberi, le molecole o gli atomi eccitati possono partecipare a ulteriori reazioni che portano alla ionizzazione.

Approfondimento 7.1: Le reazioni risonanti

Una "reazione risonante" è un concetto utilizzato in fisica, in particolare nel contesto delle reazioni nucleari e delle reazioni chimiche, per descrivere un fenomeno in cui la probabilità di una reazione aumenta notevolmente a causa della presenza di una "risonanza".

Nel contesto delle reazioni nucleari, una reazione risonante si verifica quando l'energia dei nuclei che partecipano alla reazione corrisponde all'energia di uno stato eccitato (risonanza) del nucleo composto che si forma temporaneamente durante la reazione. Questo stato eccitato è di solito instabile e si disintegra rapidamente, ma la coincidenza tra l'energia dei reagenti e l'energia dello stato eccitato aumenta significativamente la probabilità che la reazione avvenga. In pratica, la sezione d'urto (una misura della probabilità di reazione) ha un picco molto alto a una specifica energia, corrispondente all'energia della risonanza. Questo fenomeno è comune nelle reazioni nucleari a basse energie, come quelle che avvengono nelle stelle o nei reattori nucleari.

L'eccitazione è considerata una reazione risonante in alcuni contesti perché coinvolge un trasferimento di energia che coincide con l'energia specifica necessaria per portare un sistema (come

un atomo o un nucleo) in uno stato eccitato, che è uno stato di energia superiore rispetto al suo stato fondamentale.

I motivi per cui si parla di "risonanza" nel contesto dell'eccitazione sono i seguenti:

1. Coincidenza Energetica: L'eccitazione avviene quando l'energia di una particella incidente (come un fotone o un elettrone) corrisponde esattamente all'energia di uno stato eccitato del sistema. Questa coincidenza energetica è una condizione di risonanza. Ad esempio, se un atomo assorbe un fotone la cui energia corrisponde alla differenza tra due livelli energetici dell'atomo, l'atomo può essere eccitato a uno stato superiore.
2. Massima Probabilità di Assorbimento: Quando l'energia della particella incidente coincide con l'energia del livello eccitato, la probabilità che il sistema assorba l'energia e si ecciti è massima. Questo è analogo a ciò che accade nelle reazioni nucleari risonanti, dove la sezione d'urto raggiunge un picco a una certa energia.
3. Effetto di Risonanza: La "risonanza" si riferisce alla condizione in cui un sistema risponde con un'amplificazione del segnale o dell'energia in ingresso quando quest'ultima corrisponde a una delle frequenze naturali del sistema. Nel caso dell'eccitazione, il sistema atomico o molecolare risponde fortemente (cioè si eccita) quando l'energia fornita è in risonanza con una delle sue frequenze naturali (o stati energetici quantizzati).

In sintesi, l'eccitazione è una reazione risonante perché avviene più facilmente quando l'energia fornita corrisponde esattamente all'energia richiesta per raggiungere uno specifico stato eccitato del sistema, massimizzando così la probabilità di assorbimento e la conseguente eccitazione.

Per una ionizzazione, che è



non esiste, naturalmente, un requisito energetico esatto e, in effetti, la sua sezione d'urto è leggermente superiore con $\sigma \approx 10^{-16} \text{ cm}^2$. Tuttavia, il processo di ionizzazione avviene solamente se l'energia fornita supera una certa soglia, perché è necessario che l'elettrone venga strappato, quindi bisogna almeno fornire un'energia pari all'energia di prima ionizzazione del gas che stiamo adoperando.

Possiamo quindi dire che nella maggior parte dei casi avviene ionizzazione e ciò è probabilmente legato al fatto che l'energia per eccitare un elettrone non può assumere qualsiasi valore ma deve assumere dei valori ben precisi¹.

Gli elettroni e gli ioni creati dalla radiazione incidente stessa sono noti come ionizzazione primaria. In alcuni di questi casi di ionizzazione, tuttavia, viene trasferita una quantità di energia sufficientemente grande all'elettrone (raggi delta), tale che questo elettrone crea a sua volta coppie ione-elettrone. Quest'ultima ionizzazione è nota come ionizzazione secondaria. Se la loro energia è sufficientemente alta, gli elettroni di ionizzazione secondaria possono ionizzare ulteriormente, e così via fino a raggiungere la soglia per le reazioni di ionizzazione.

7.2.2 W-values

Ci chiediamo adesso quante coppie di ioni ed elettroni si formano. Siamo particolarmente interessati a questa informazione perché il numero di coppie ci potrebbe dare un'informazione sull'energia depositata.

¹Il Leo la pensa in maniera diametralmente opposta: dice che "La ionizzazione ha una soglia di energia relativamente alta e, poiché i trasferimenti di energia a basso valore sono più probabili, le reazioni di eccitazione generalmente prevalgono.", quindi non so a chi credere.

Ingenuamente potremmo pensare che il numero medio di coppie che si formano siano date dal rapporto tra l'energia depositata e il potenziale di prima ionizzazione di un gas, il quale assume valori compresi tra i 10 e i 25 eV a seconda del tipo di gas che stiamo adoperando. Ciò sarebbe corretto se avvenissero soltanto ionizzazioni, ma nella realtà avviene anche l'eccitazione, per cui nel valutare il numero di coppie ione-elettrone che si formano dobbiamo tenere conto del fatto che parte dell'energia che viene depositata viene utilizzata per eccitare gli elettroni, quindi non viene totalmente adoperata per la ionizzazione, cioè per creare coppie. Ecco perché l'energia media per creare una coppia ione-elettrone è un po' più alta rispetto al potenziale di prima ionizzazione, variando normalmente tra i 25 e i 40 eV.

Gas	Z	A	δ (g/cm ³)	E _{ex}	Potenziale di eccitazione		Potenziale di ionizzazione		Energia media per creare 1 coppia ione-elettrone		
					E _i (eV)	I ₀	W _i	dE/dx (MeV/g cm ⁻²)	(keV/cm)	n _p (i.p./cm) ^a	n _T (i.p./cm) ^a
H ₂	2	2	8.38×10^{-5}	10.8	15.9	15.4	37	4.03	0.34	5.2	9.2
He	2	4	1.66×10^{-4}	19.8	24.5	24.6	41	1.94	0.32	5.9	7.8
N ₂	14	28	1.17×10^{-3}	8.1	16.7	15.5	35	1.68	1.96	(10)	56
O ₂	16	32	1.33×10^{-3}	7.9	12.8	12.2	31	1.69	2.26	22	73
Ne	10	20.2	8.39×10^{-4}	16.6	21.5	21.6	36	1.68	1.41	12	39
Ar	18	39.9	1.66×10^{-3}	11.6	15.7	15.8	26	1.47	2.44	29.4	94
Kr	36	83.8	3.49×10^{-3}	10.0	13.9	14.0	24	1.32	4.60	(22)	192
Xe	54	131.3	5.49×10^{-3}	8.4	12.1	12.1	22	1.23	6.76	44	307
CO ₂	22	44	1.86×10^{-3}	5.2	13.7	13.7	33	1.62	3.01	(34)	91
CH ₄	10	16	6.70×10^{-4}		15.2	13.1	28	2.21	1.48	16	53
Call ₁₀	34	58	2.42×10^{-3}		10.6	10.8	23	1.86	4.50	(46)	195

a) i.p. = ion pairs

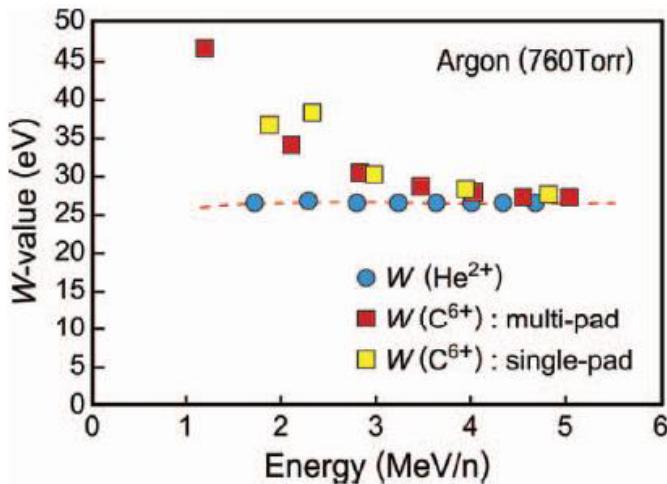
In questa tabella possiamo vedere, per diverse tipologie di gas, i valori del potenziale di eccitazione e di prima ionizzazione, indicati rispettivamente con E_{ex} e E_i , e l'energia media per creare una coppia ione-elettrone, indicata con W . Notiamo che per eccitare gli atomi sono necessarie energie dell'ordine della decina di eV, mentre, per ionizzare, il potenziale di prima ionizzazione assume valori un po' più alti, tra i 10 e i 20 eV. Se invece consideriamo l'energia media per creare una coppia ione-elettrone, questa risulta essere un po' più grande rispetto al potenziale di prima ionizzazione, in quanto tiene conto dei fenomeni di eccitazione. Se ad esempio utilizzassimo dell'idrogeno H₂, l'energia media per creare una coppia è pari a 37 eV.

Gas	W (eV)
Ne	36.3
Ar	26.2
Xe	21.5
P10	26

L'energia media per creare una coppia W è quella che ci permette di stimare quante coppie elettrone-ione si formano all'interno di un gas. Il valore di W dipende dal tipo di gas, ad esempio nella tabella a fianco possiamo vedere i valori per dei gas nobili, in quanto spesso nei rivelatori a gas si utilizzano gas nobili, ma si utilizzano tante volte anche delle miscele come il P10, che è una composizione di argon al 90% e di metano (CH₄) al 10%.

In realtà il valore di W dipende leggermente anche dal tipo di particella e dall'energia. Nel seguente grafico vediamo un esempio di valori di W per diverse particelle incidenti

in funzione dell'energia:



Vediamo che c'è una leggerissima dipendenza dall'energia e dal tipo di particella, quindi non è sufficiente conoscere solamente il gas, ma in realtà purtroppo questo valore può dipendere leggermente anche dalla particella.

Inoltre, nel caso in cui si adopera una miscela di gas, per valutare il valore del potenziale medio per creare la coppia si utilizza una sorta di media pesata, un po' come abbiamo visto nel caso della perdita di energia nei composti.

Approfondimento 7.2: W-values per miscele e numero di coppie

Metto questo approfondimento perché la professoressa non spiega esplicitamente come calcolarlo. Come al solito ringraziamo chatgpt.

Se abbiamo una miscela di gas, il W -value della miscela può essere calcolato in base ai W -value dei singoli componenti della miscela e alle loro frazioni molari o volumetriche. L'espressione generale è data da

$$W_{\text{mix}} = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{W_i}}$$

dove W_{mix} è il W -value della miscela di gas e x_i e W_i sono rispettivamente la frazione molare o volumetrica e il W -value del componente i -esimo nella miscela.

È da notare che il W -value dipende dalle proprietà fisiche del gas e dalle condizioni operative, come la pressione e la temperatura. Tuttavia, in prima approssimazione, la formula sopra riportata è utile per calcolare il valore W di una miscela a condizioni standard.

W -value per unità di percorso

Il W -value si può esprimere anche in termini di unità di percorso (ad esempio, per calcolare l'energia media necessaria per creare una coppia di ioni per unità di lunghezza percorsa da una particella carica in un gas). Per fare ciò, si può utilizzare una relazione che coinvolge la perdita di energia per unità di lunghezza, cioè il dE/dx . In particolare, la relazione tra il W -value in unità di percorso e la perdita di energia per unità di lunghezza dE/dx è data da

$$W_{\text{path, mix}} = \frac{\sum_i x_i \cdot (\frac{dE}{dx})_i}{\sum_i x_i \cdot \frac{1}{W_i}}$$

dove $(dE/dx)_i$ è la perdita di energia per unità di lunghezza del componente i -esimo in eV/cm. Si presta attenzione al fatto che l'espressione per il calcolo del W -value della miscela è una media armonica ponderata dei W -value dei singoli componenti della miscela. In generale, una media armonica ponderata è utilizzata quando si vuole combinare quantità che sono inversamente pro-

porzionali al valore di interesse. In questo caso il significato fisico di questa media armonica ponderata è che in una miscela di gas, il W -value della miscela sarà dominato dai componenti con i W -value più bassi, ovvero quelli per cui è necessaria meno energia per produrre una coppia di ioni. Il contributo di ciascun componente al W -value complessivo è proporzionale alla sua frazione molare o volumetrica.

Coppie create per unità di percorso

Il numero di coppie prodotte per unità di lunghezza è in generale dato da

$$n_{\text{coppie}} = \frac{\frac{dE}{dx}}{W}$$

Nel caso di una miscela, il numero di coppie di ioni prodotte per unità di lunghezza può essere espresso come:

$$n_{\text{coppie}} = \sum_i \frac{x_i \cdot \left(\frac{dE}{dx}\right)_i}{W_i}$$

Facciamo un esempio numerico: immaginiamo di avere una miscela composta da argon all'80% e da anidride carbonica CO₂ al 20%. Se voglio sapere quanti coppie al centimetro si formano, dobbiamo conoscere sia i valori dei potenziali W che quelli della perdita di energia per unità di percorso di entrambi i gas. Controllando i valori tabulati si ha che

$$n_{\text{coppie}} = \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Ar}}}{W_{\text{Ar}}} \cdot \%_{\text{Ar}} + \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{CO}_2}}{W_{\text{CO}_2}} \cdot \%_{\text{CO}_2} = \frac{2440}{26} \cdot 0.8 + \frac{3010}{33} \cdot 0.2 = 93 \frac{\text{coppie}}{\text{cm}}$$

7.2.3 Fluttuazioni e risoluzione

Assumendo che il W -value del gas sia costante per un dato tipo di radiazione, l'energia depositata sarà proporzionale al numero N di coppie ione-elettrone formate e può essere determinata se viene effettuata una misurazione corrispondente del numero di coppie di ioni, in quanto tale numero è dato dal rapporto tra l'energia depositata e il W -value. Oltre al numero medio di coppie di ioni formate da ciascuna particella incidente, è di interesse anche la fluttuazione nel loro numero per particelle incidenti di identica energia. Queste fluttuazioni stabiliranno un limite fondamentale sulla risoluzione energetica che può essere raggiunta in qualsiasi rivelatore basato sulla raccolta degli ioni. Possiamo supporre, in prima approssimazione, che la formazione di ogni coppia di ioni sarà considerata un processo di Poisson, nel senso che il numero totale di coppie di ioni formate segue la distribuzione di Poisson ed è quindi soggetto a fluttuazioni statistiche caratterizzate da una deviazione standard pari alla radice quadrata del numero medio di coppie formatesi. Nella tabella seguente possiamo vedere degli esempi di fluttuazioni del numero di particelle nel caso di un gas avente $W = 30$ eV al variare dell'energia depositata dalle particelle incidenti:

Energia depositata	n° coppie	\sqrt{N}	\sqrt{N}/N
100 keV	3330	58	1.7%
1 MeV	33300	183	0.5%

Notiamo che la risoluzione, dal momento che l'energia è proporzionale al numero di coppie, può essere espressa in termini del rapporto \sqrt{N}/N . Da ciò segue che più è grande il numero di coppie N , più la risoluzione dovrebbe essere migliore.

Come discusso nel capitolo 6, molti rivelatori di radiazioni mostrano una fluttuazione intrinseca inferiore a quella prevista da questo modello semplificato. Per sistematicamente tale incongruenza si introduce il fattore di Fano F come una costante empirica per cui la varianza prevista deve essere moltiplicata per ottenere la varianza osservata sperimentalmente:

$$F = \frac{\text{varianza osservata in } N}{\text{varianza prevista da Poisson } (= N)}$$

Il fattore di Fano rappresenta in un certo senso la frazione di tutta l'energia della particella incidente che viene convertita in portatori di informazione all'interno del rivelatore (cioè gli ioni). Se l'intera energia della radiazione incidente fosse sempre convertita in coppie di ioni, il numero di coppie prodotte sarebbe sempre esattamente lo stesso e non ci sarebbe alcuna fluttuazione statistica. In queste condizioni, il fattore di Fano sarebbe zero. Tuttavia, se solo una piccola frazione della radiazione incidente è convertita, le coppie di ioni si formerebbero a grande distanza l'una dall'altra e con una probabilità relativamente bassa, e ci sarebbe un buon motivo per aspettarsi che la distribuzione nel loro numero segua una distribuzione di Poisson. Nei gas, il fattore di Fano è osservato empiricamente essere inferiore a 1, quindi le fluttuazioni sono minori di quanto previsto basandosi esclusivamente sulle statistiche di Poisson. Segue immediatamente che minore è F migliore è la risoluzione. Chiaramente, nel caso in cui gli eventi seguano la distribuzione di Poisson $F = 1$ e la risoluzione dipenderà soltanto dal numero di particelle in maniera inversamente proporzionale.

Alla luce di ciò, per un rivelatore a gas la risoluzione energetica può essere espressa come²

$$R = 2,35 \cdot \sqrt{\frac{FW}{E}} = 2,35 \cdot \sqrt{\frac{FW}{WN}} = 2,35 \cdot \sqrt{\frac{F}{N}}$$

7.3 Fenomeni di trasporto nei gas

Per i rivelatori a gas, è estremamente importante comprendere il moto degli elettroni e degli ioni nel gas, in quanto esso influenza diverse caratteristiche operative del rivelatore. Infatti, una volta create queste coppie, dobbiamo essere in grado di raccoglierle in qualche modo e tradurle in un segnale elettrico. Vediamo allora i diversi meccanismi che possono subire tali particelle cariche all'interno di un gas.

7.3.1 Diffusione

In assenza di un campo elettrico, gli elettroni e gli ioni prodotti dalla radiazione che attraversa il gas si diffondono uniformemente verso l'esterno dal loro punto di creazione. Nel processo, subiscono molteplici collisioni con le molecole di gas e perdono la loro

²Nelle slide la professoressa definisce la risoluzione per i rivelatori a gas come

$$R = 2,35 \frac{\sigma_E}{E} = 2,35 \frac{W\sqrt{FN}}{WN} = 2,35 \cdot \sqrt{\frac{F}{N}}$$

Non ho capito quanto sia lecita l'assunzione $\sigma_E = W\sigma_N$, ma la riporto per completezza.

energia, raggiungendo in questo modo rapidamente l'equilibrio termico con il gas. Il libero cammino medio, cioè la distanza media percorsa dopo la quale si ha un'interazione, varia tra i 10^{-8} m e i 10^{-6} m.³

A energie termiche⁴, le velocità delle cariche sono descritte dalla distribuzione di Maxwell - Boltzmann, che fornisce una velocità media

$$v \propto \sqrt{\frac{k_B T}{m}}$$

dove k_B è la costante di Boltzmann, T è la temperatura e m è la massa della particella. A causa di tale dipendenza, poiché la massa degli elettroni è molto più piccola di quella degli ioni segue che gli elettroni diffondono con velocità molto più elevate rispetto a quelle degli ioni, cioè $v_{\text{elettroni}} \gg v_{\text{ioni}}$. In particolare, a temperatura ambiente, quindi circa 22 °C, si ha che $v_{\text{elettroni}} \sim 10^6$ cm/s e $v_{\text{ioni}} \sim 10^4$ cm/s.

Secondo la teoria cinetica, si può dimostrare che la distribuzione lineare (cioè delle distanze percorse) delle cariche dopo un tempo di diffusione t ha un andamento di tipo gaussiano con centroide in $x = 0$:

$$\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

dove N_0 è il numero totale di cariche, x la distanza dal punto di creazione e D il coefficiente di diffusione. La deviazione standard in x è quindi

$$\sigma(x) = \sqrt{2Dt}$$

Questo ragionamento è stato fatto nel caso unidimensionale, ma nella realtà dobbiamo considerare il caso tridimensionale, perché le particelle si possono diffondere in tutte le direzioni dello spazio. Se si considerano tre dimensioni, la dispersione sferica è data da

$$\sigma(r) = \sqrt{6Dt}$$

dove r è la distanza radiale. Ad esempio, la dispersione radiale degli ioni nell'aria in condizioni normali è di circa 1 mm dopo 1 secondo.

Il coefficiente di diffusione è un parametro che può essere calcolato dalla teoria cinetica e si può dimostrare che vale

$$D = \frac{1}{3} \lambda v$$

dove λ è il libero cammino medio dell'elettrone o dello ione nel gas. Per un gas ideale classico, il libero cammino medio è correlato alla temperatura T e alla pressione p da

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{kT}{\sigma_0 p}$$

³In particolare il Knoll dice che "Gli atomi o le molecole neutre del gas sono in costante moto termico, caratterizzato da un libero cammino medio che per i gas in condizioni standard è tipicamente di circa $10^{-6} - 10^{-8}$ m. Gli ioni positivi o gli elettroni liberi creati all'interno del gas partecipano anch'essi al moto termico casuale e quindi tendono a diffondersi dalle regioni ad alta densità".

⁴Si intende che l'energia delle particelle è esclusivamente dovuta all'agitazione termica causata dalla temperatura del sistema.

dove σ_0 è la sezione d'urto totale per una collisione con una molecola di gas. Sostituendo le espressioni di v e λ si ottiene l'espressione esplicita

$$D = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{1}{p\sigma_0} \sqrt{\frac{(kT)^3}{m}}$$

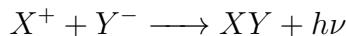
Da cui si evince la dipendenza di D dai vari parametri del gas (temperatura e pressione), dalla massa della particella e dalla sezione d'urto di interazione.

7.3.2 Ricombinazione

Può succedere che, durante il moto di diffusione, ad un certo punto avvengano collisioni tra ioni positivi ed elettroni liberi⁵, le quali danno luogo ad una ricombinazione in cui l'elettrone è catturato dallo ione, riportando così l'atomo ad una condizione di neutralità in termini di cariche. In tale processo si ha inoltre l'emissione di un fotone:



In alternativa, uno ione positivo potrebbe subire una collisione con uno ione negativo nella quale l'elettrone in più dell'anione è trasferito sul catione, neutralizzando così entrambi. Anche in questo caso si avrà la produzione di un fotone



Approfondimento 7.3: L'electron attachment

Per capire come possa avvenire questa seconda reazione, è necessario introdurre un altro fenomeno che avviene all'interno dei gas, ossia l'electron attachment.

Tale fenomeno riguarda la cattura degli elettroni liberi ad opera di atomi elettronegativi formando così ioni negativi, i quali sono molto simili agli ioni positivi del gas formatisi nel processo di ionizzazione, ma questi avranno carica opposta:



Gli atomi elettronegativi sono atomi che hanno la shell esterna quasi piena, per cui l'aggiunta di un ulteriore elettrone risulta in una cessione di energia, di conseguenza lo ione negativo che si forma è stabile. L'energia rilasciata in questa cattura è conosciuta come affinità elettronica, ed è un indicatore della tendenza degli atomi neutri del gas a formare ioni negativi.

Per maggiori informazioni si veda *S. Arena, V. Favitta - "Chimica Nino"*.

È chiaro che, se vogliamo rivelare il passaggio della particella, questi processi di ricombinazione devono essere assolutamente evitati, in quanto la rivelazione si basa sulla misura delle cariche che sono state prodotte: se le cariche scompaiono a seguito della ricombinazione, l'informazione viene persa.

Bisogna quindi assicurarsi che le cariche sopravvivano nel rivelatore per un tempo sufficiente a effettuare la raccolta delle cariche e quindi a formare un segnale elettrico. Di conseguenza è necessario agire dall'esterno, perché altrimenti le cariche prima o poi si ricombineranno, e ciò avverrà in tempi abbastanza brevi (ad esempio, nel caso di una miscela di ossigeno in 140 ns le ricombinazioni si sono quasi del tutto esaurite, quindi le cariche prodotte a seguito della ionizzazione sono praticamente ormai perse, cioè non si possono utilizzare per produrre un segnale elettrico).

⁵Il Leo dice: "In assenza di campo elettrico, le coppie elettrone-ione tenderanno a ricombinarsi sotto la forza della loro attrazione elettrica". Credo che questa sia un'interpretazione più corretta, visto che sono i campi ad interagire, o mi sbaglio?

7.3.3 Migrazione

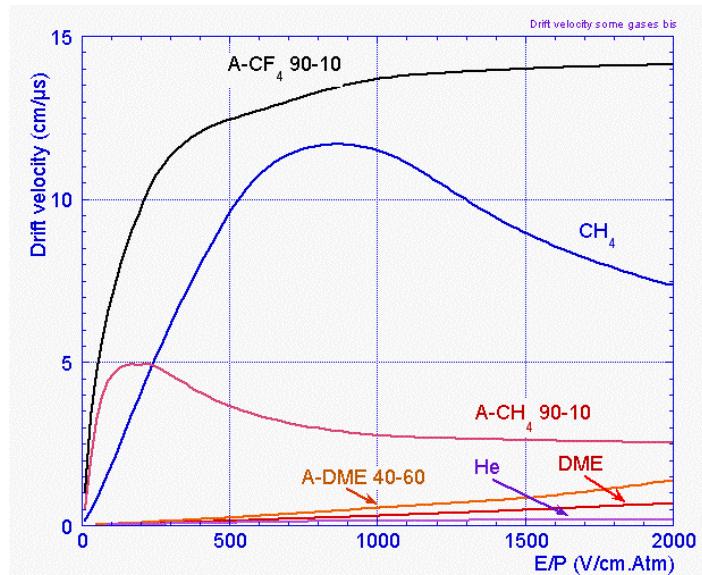
Per cercare di raccogliere le cariche, bisogna farle migrare. Per fare ciò si deve applicare un campo elettrico, dunque una forza che in linea di principio dovrebbe far accelerare queste particelle all'interno del gas. In realtà le particelle non arrivano a seguire un moto accelerato perché interagiscono continuamente con le molecole presenti nel gas, tuttavia riescono ad avere un moto di migrazione verso gli elettrodi utilizzati per generare il campo elettrico e questa migrazione avviene con una velocità che chiamiamo *velocità di deriva o di drift*. Questa velocità di deriva si sovrappone al moto casuale dovuto all'agitazione termica e dipende dalle caratteristiche del campo elettrico applicato. In particolare si può dimostrare che essa si può esprimere come

$$v_{\text{drift}} = \mu \frac{E}{p}$$

dove μ è un fattore che prende il nome di mobilità e il rapporto tra il campo elettrico e la pressione del gas considerato è il cosiddetto campo elettrico ridotto.

Risulta evidente che applicare un campo elettrico maggiore comporta una velocità di drift maggiore, ma anche la pressione avrà la sua importanza, in quanto aumentare la pressione del gas vuol dire sostanzialmente aumentare la densità di atomi presenti all'interno del gas e dunque la possibilità di avere urti. Ne segue che l'aumentare della pressione riduce la velocità di drift.

Sebbene considereremo la mobilità come se fosse un fattore costante, precisiamo che in realtà essa dipende dal tipo di particella che si considera e dall'energia in gioco, come mostrato dal seguente grafico, in cui è riportato l'andamento della velocità di drift in funzione di E/p :



Se μ fosse esattamente costante dovremmo osservare delle rette, ma in pratica osserviamo tale andamento solo per bassi valori di campo elettrico. Tuttavia, dato che le condizioni in cui lavoriamo con i rivelatori a gas ricadono proprio in tale regione, possiamo tranquillamente supporre che la mobilità assuma un valore costante. Essa si esprime in $\text{m}^2 \text{ atm V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e in generale assume valori molto più alti per gli elettroni

piuttosto che per gli ioni, e ciò è legato alle masse in gioco. Ad esempio, in un gas come l'argon la mobilità degli elettroni è pari a $\mu_e = 2 \cdot 10^4$ mentre quella degli ioni è pari a $\mu_{ioni} = 1,5$. In conseguenza a queste profonde differenze nei valori di mobilità, quando si verifica una migrazione a seguito di un campo elettrico ci aspettiamo che gli elettroni si muovano molto velocemente mentre gli ioni abbiano una migrazione molto più lenta. Sempre in corrispondenza dell'argon, abbiamo che in esso $v_e = 3 \cdot 10^5$ cm/s e $v_{ioni} = 3 \cdot 10^2$ cm/s, cioè differiscono di un fattore 10^3 . Nella seguente tabella possiamo vedere altri valori per altre miscele che confermano grossomodo questo fattore di differenza tra le due categorie di particelle:

Gas	$v_{elettroni}$ (cm/s)	v_{ioni} (cm/s)
Ar	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^2$
He	$4 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^3$
Ne	10^6	$9 \cdot 10^2$
N ₂	$4 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^2$
H ₂	$7 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^3$
95%A + 5%CO ₂	$3.5 \cdot 10^6$	—
CO ₂	10^5	—
CH ₄	$1.5 \cdot 10^6$	—

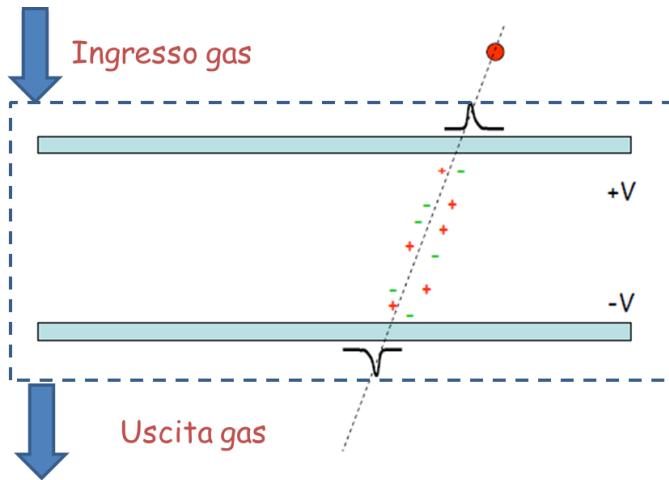
La conseguenza principale di questa enorme differenza nelle velocità tra ioni ed elettroni è che se volessimo raccogliere tutte le cariche prodotte dovremmo aspettare tempi elevati. Infatti gli elettroni dovranno arrivare fino all'anodo mentre gli ioni positivi fino al catodo⁶, quindi devono percorrere uno spazio pari più o meno delle dimensioni del rivelatore stesso, e se consideriamo rivelatori della decina di centimetri possiamo stimare che per raccogliere le cariche dovute agli elettroni sono necessari tempi abbastanza brevi, dell'ordine dei microsecondi, mentre per raccogliere anche le cariche dovute agli elettroni dovremmo aspettare tempi molto più lunghi, dell'ordine dei millisecondi.

⁶A patto di apparire prolissi, specifichiamo che per gli ioni positivi la velocità di drift è diretta come il campo elettrico, cioè dall'anodo (positivo) verso il catodo (negativo), mentre per gli elettroni ha direzione opposta.

7.4 Struttura base di un rivelatore a gas

Lo schema di principio di un rivelatore a gas include un recipiente a tenuta di gas con all'interno due elettrodi per generare un campo elettrico e quindi una differenza di potenziale tra questi.

Un primo esempio di elettrodi che si possono adoperare è quello in cui essi sono piani e paralleli, come se costituissero un condensatore piano:

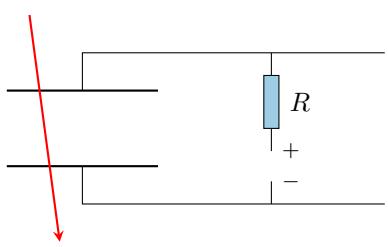


Come vediamo in figura, al passaggio di una carica si genera ionizzazione e i prodotti della ionizzazione (gli elettroni e gli ioni) cominciano a migrare a seguito dell'effetto del campo elettrico creato dagli elettrodi.

Per quanto riguarda le caratteristiche del gas, esso si può trovare o in condizioni statiche, quindi viene inserito nella camera e sigillato, oppure in condizioni dinamiche, per cui si hanno dei flussi continui in quanto i rivelatori possiedono un ingresso e un'uscita del gas in maniera tale da avere sempre un ricircolo e quindi una miscela di gas sempre corrispondente alle percentuali che sono state fissate all'inizio. Quest'ultimo è il regime in cui lavorano soprattutto i rivelatori che non hanno una tenuta ottimale.

7.4.1 Formazione dell'impulso

In generale possiamo schematizzare un rivelatore a gas come un condensatore, il quale viene polarizzato⁷ attraverso una resistenza R di valore molto elevato ($10^7 - 10^8 \Omega$).



Il motivo è che quando le cariche si avvicinano agli elettrodi (gli elettroni vanno verso l'anodo, gli ioni positivi verso il catodo), sugli elettrodi si genera una leggera variazione della tensione, proprio per il fatto che sono arrivate queste cariche, le quali quindi inducono una variazione nel valore di potenziale presente sugli elettrodi.

⁷Polarizzare un condensatore significa applicare una tensione ai suoi terminali in modo da stabilire una differenza di potenziale tra le sue armature. In particolare, si parla di polarizzazione quando il condensatore è polarizzato, cioè ha un lato che deve essere collegato al polo positivo e un lato che deve essere collegato al polo negativo dell'alimentazione.

Se quindi gli elettrodi non fossero polarizzati, sarebbero destinati a scaricarsi velocemente. Dal momento che però gli elettrodi sono mantenuti a una differenza di potenziale costante attraverso un generatore di tensione, quello che succede è che la tensione viene subito riportata al valore nominale.

Esempio 7.1

Come abbiamo detto, nel momento in cui passa una particella si producono delle cariche che generano una leggera variazione di tensione in queste piastre, ma grazie al collegamento con il generatore di tensione il potenziale viene immediatamente riportato al valore nominale. La velocità con cui ciò avviene dipende dalla resistenza del circuito, in quanto abbiamo sostanzialmente un circuito RC e quindi la velocità del processo è stabilita dalla legge di carica di un condensatore nel caso in cui la carica iniziale non è nulla:

$$V(t) = V_0 - (V_0 - \Delta V)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

dove comanda il fattore $\tau = RC$, quindi più è grande R più lenta sarà la risalita verso il valore nominale.

Cerchiamo ora di capire quanto varia questa tensione tramite un esempio numerico. Supponiamo che gli elettrodi si trovino ad una differenza di potenziale $V_0 = 500$ V e che costituiscano un condensatore di capacità $C = 50$ pF. Immaginiamo poi che passi una particella di energia 5 MeV che riesce a depositare tutta la sua energia all'interno del condensatore, quindi $E_{\text{dep}} = 5$ MeV e andiamo a valutare quanto vale la differenza di potenziale che si genera ai capi del condensatore a seguito della produzione di carica per ionizzazione.

Innanzitutto calcoliamo la carica che viene prodotta e che viene raccolta da ciascun elettrodo. Per fare ciò basta calcolare il numero di coppie prodotte e moltiplicare queste per la carica dell'elettrone:

$$Q = e \frac{E_{\text{dep}}}{W}$$

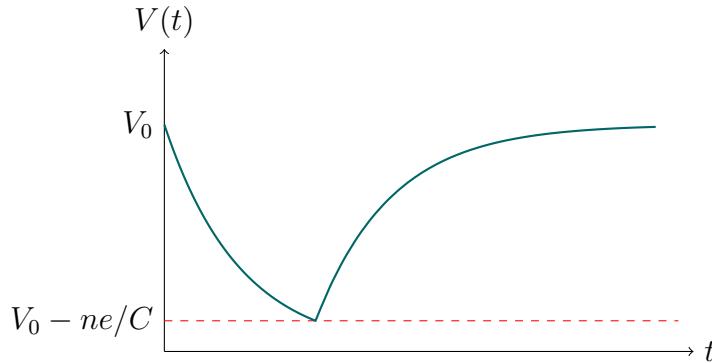
Se adesso dividiamo questa carica per la capacità del condensatore otteniamo la differenza di potenziale che si genera a seguito dell'interazione: supponendo per semplicità $W = 1$, avremo

$$\Delta V = \frac{Q}{C} = e \frac{E_{\text{dep}}}{WC} = 0.5 \text{ mV}$$

Quello che quindi succede è che a seguito del passaggio di una particella si produce un segnale elettrico e di conseguenza una variazione del valore di tensione, che abbiamo trovato essere dell'ordine di mezzo mV. Capiamo quindi che sono segnali veramente piccoli da rivelare, per cui bisogna cercare di rallentare il più possibile la risalita verso il valore nominale di tensione. Ecco spiegato perché si adoperano valori di resistenze elevati.

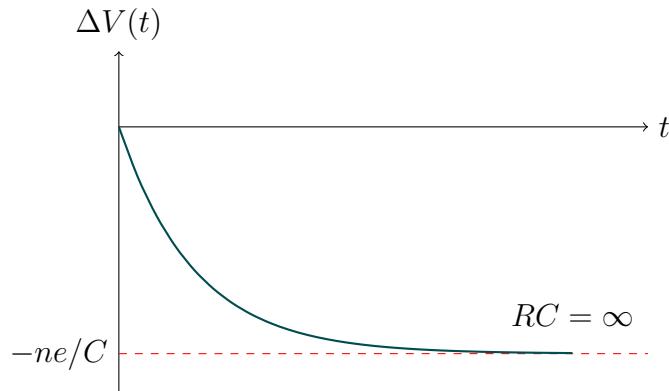
Quando le cariche prodotte vengono raccolte, la tensione agli elettrodi diminuisce dal valore V_0 al valore $V_0 - ne/C$, per poi ritornare al valore V_0 con legge di carica esponenziale

avente velocità dipendente dalla costante di tempo RC .⁸



Ragioniamo ora su che valori deve avere questa costante di tempo.

Se fosse $RC = \infty$, cioè se adoperassimo una resistenza eccessivamente grande, non torneremmo più al valore nominale e quindi la variazione si manterebbe nel tempo:

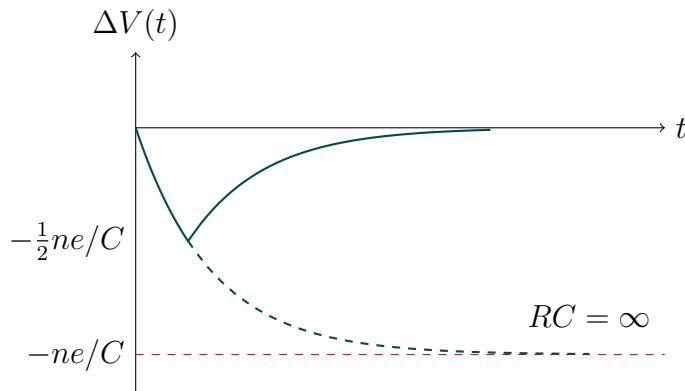


Chiaramente questa non è una situazione che vogliamo, in quanto vogliamo che a un certo punto si ripristinino le condizioni di partenza in modo da poter essere pronti per una nuova rivelazione.

Facciamo allora un passo indietro: ricordiamo che la raccolta della carica avviene attraverso due fasi successive, perché dapprima avviene la raccolta degli elettroni che sono molto veloci e quindi arrivano subito all'anodo, ma poi abbiamo la migrazione degli ioni che è molto più lenta e quindi comporterà un'ulteriore parte di segnale che corrisponderà a tempi più lunghi. Siccome questo comporterebbe avere un rivelatore molto lento (cioè se volessimo raccogliere tutte le cariche, sia elettroni che ioni, dovremmo aspettare tempi lunghi proprio perché dobbiamo aspettare che gli ioni giungano al catodo), potremmo pensare di accontentarci del segnale prodotto dagli elettroni e quindi potremmo scegliere una costante di tempo tale che il segnale risalga dopo aver raccolto gli elettroni. In altre parole, il valore di RC deve essere compreso tra il tempo minimo necessario a raccogliere il segnale dovuto agli elettroni, t_- e il tempo minimo necessario a raccogliere gli ioni, t_+ , cioè $t_- < RC < t_+$.

⁸Nelle slide la professoressa riporta questo grafico smussato. A livello teorico è giusto che ci sia un punto angoloso, ma come dice il Knoll: "In qualsiasi situazione reale, la radiazione incidente crea coppie di ioni su una gamma di posizioni all'interno della camera. Le discontinuità nette mostrate risultano quindi in qualche modo 'sfumate' nella forma dell'impulso risultante."

Il motivo per cui si trascura quello che fanno gli ioni è che altrimenti si avrebbero dei rivelatori particolarmente lenti. Infatti, nell'ambito della rivelazione parliamo di rivelatori lenti già quando abbiamo tempi dell'ordine dei microsecondi, che sono i tempi necessari per raccogliere gli elettroni, quindi se dovessimo arrivare ai millisecondi la situazione sarebbe ancora peggiore.

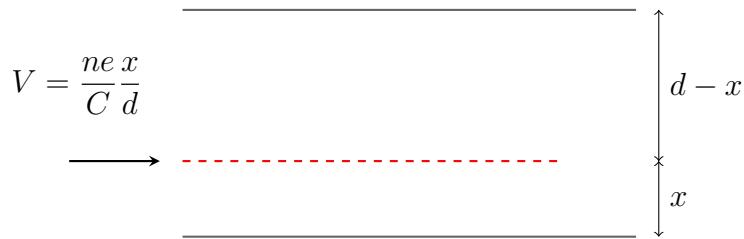


Poiché consideriamo soltanto il segnale che viene generato dalla raccolta degli elettroni, è chiaro che si avranno dei segnali ancora più piccoli in ampiezza, in quanto viene raccolta soltanto metà della carica disponibile; tuttavia i accontentiamo di ciò perché tali segnali risultano più veloci.

7.4.2 Il problema della posizione

Un problema che può sorgere è legato al punto in cui si generano le cariche. Infatti il volume del rivelatore è un volume esteso e in base alla traiettoria che segue la particella queste cariche di ionizzazione potrebbero prodursi in diversi punti della camera.

Schematizziamo l'evento come segue: gli elettrodi si trovano a una distanza d e supponiamo che la ionizzazione avvenga ad una distanza x da un elettrodo, ad esempio quello inferiore:



In base al valore di x , la raccolta del segnale e quindi la tensione che misuriamo ai capi delle armature potrebbe essere leggermente diversa. Il motivo è che le cariche dovranno percorrere uno spazio più o meno grande per arrivare all'anodo, impiegando quindi più o meno tempo. Siccome la costante di tempo, una volta scelta, è fissa, il segnale misurato sarà proporzionale allo spazio percorso, quindi più è grande questo più carica si può raccogliere. Ciò non costituisce un aspetto positivo per la raccolta, perché questo potrebbe portare a dei segnali di ampiezza veramente piccole.

Quello che normalmente si fa per cercare di evitare questo effetto è schermare gli ioni, in quanto il problema nasce dal fatto che sceglio una costante di tempo opportuna per poter trascurare il segnale dovuto gli ioni.

Se sceglio una costante di tempo che assicura la raccolta completa degli elettroni e permette di ignorare gli ioni, è possibile andare ad aggiungere una griglia in prossimità del catodo che viene detta *griglia di Frisch* che va a schermare il catodo dall'arrivo degli ioni. Ciò permette di trascurare il segnale dovuto agli ioni e di scegliere una costante di tempo RC anche un po più piccola, permettendo così di ricostruire tutta la carica prodotta indipendentemente dalla posizione in cui avviene l'interazione.

Approfondimento 7.4: La forma del segnale

L'approfondimento che segue è sostanzialmente una traduzione di §5.VI.B "Pulse mode operation-Derivation of the pulse shape" del Knoll. Lo riporto perché spiega approfonditamente il perché i segnali abbiano quella forma.

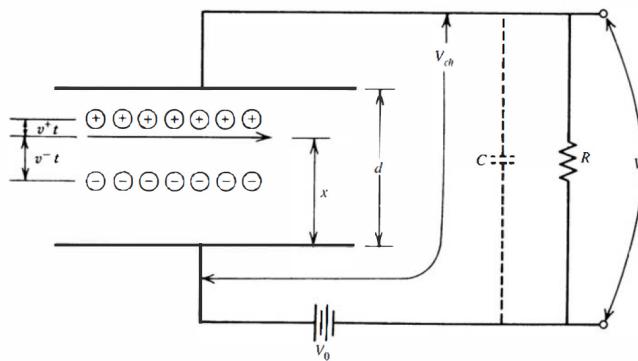
L'analisi della forma dell'impulso prodotto dal flusso di cariche all'interno di una camera a ionizzazione con elettrodi a piastre parallele che sono separati da uno spazio piccolo rispetto alla lunghezza e alla larghezza delle piastre coinvolge una sola variabile: la posizione delle cariche nella dimensione perpendicolare alle piastre. È quindi istruttivo seguire una derivazione semplificata della forma dell'impulso che invoca argomenti basati solo sulla conservazione dell'energia. Questa derivazione fornisce risultati corretti ed evita la complessità matematica che potrebbe oscurare alcuni dei comportamenti fisici importanti nella determinazione delle caratteristiche dell'impulso di uscita atteso in queste condizioni.

Nella derivazione che segue, assumiamo che venga applicato un campo elettrico sufficiente affinché la ricombinazione elettrone-ione sia trascurabile e che le cariche negative rimangano sotto forma di elettroni liberi. Per prima cosa, deriviamo un'espressione per la forma dell'impulso nel caso in cui la costante di tempo del circuito di raccolta sia molto più lunga dei tempi di raccolta di ioni ed elettroni.

La forma dell'impulso dipende dalla configurazione del campo elettrico e dalla posizione in cui si formano le coppie di ioni rispetto alle superfici equipotenziali che caratterizzano la geometria del campo. Per semplificare l'analisi seguente, assumiamo che gli elettrodi della camera siano piastre parallele, per le quali le superfici equipotenziali sono piani uniformemente distanziati paralleli alle superfici degli elettrodi, e l'intensità costante del campo elettrico è data da

$$E = \frac{V}{d}$$

dove V è la tensione tra gli elettrodi della camera e d è la loro distanza. Come ulteriore semplificazione, assumiamo che tutte le coppie di ioni si formino a una distanza uguale x dall'elettrodo positivo, dove il potenziale elettrico è uguale a E_x . Questa situazione è illustrata nella figura seguente:



Poiché si assume che la costante di tempo del circuito esterno sia grande, non può fluire una corrente apprezzabile durante il tempo relativamente breve necessario per raccogliere le cariche all'interno della camera a ionizzazione. Pertanto, l'energia necessaria per spostare le cariche dal loro punto di origine deve provenire dall'energia inizialmente immagazzinata attraverso la capacità C , rappresentata dalla camera a ionizzazione. Questa energia è

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2}CV_0^2$$

dove V_0 è la tensione applicata.

Dopo un tempo t , gli ioni avranno percorso una distanza v_+t verso il catodo, dove v_+ è la velocità di deriva degli ioni. Allo stesso modo, gli elettroni avranno percorso una distanza v_-t verso l'anodo. Entrambi questi movimenti rappresentano lo spostamento di carica verso una regione di potenziale elettrico più basso, e la differenza in energia potenziale viene assorbita nel gas attraverso le molteplici collisioni che i portatori di carica subiscono con le molecole di gas durante il loro movimento. Questa energia è uguale a $Q\Delta\phi$ sia per gli ioni che per gli elettroni, dove Q è la carica totale data da $Q = n_0e$, dove n_0 è il numero di coppie di ioni originarie e e è la carica elettronica, e $\Delta\phi$ è la differenza di potenziale elettrico, data dal prodotto del campo elettrico E e della distanza percorsa verso l'elettrodo.

Applichiamo la conservazione dell'energia, che può essere scritta come:

$$\begin{aligned} \text{Energia} & \quad \text{Energia} & \quad \text{Energia} & \quad \text{Energia} \\ \text{immagazzinata} & = \text{assorbita} + \text{assorbita} + \text{immagazzinata} \\ \text{iniziale} & \quad \text{dagli ioni} \quad \text{dagli elettroni} \quad \text{finale} \\ \frac{1}{2}CV_0^2 & = n_0e\mathcal{E}v_+t + n_0e\mathcal{E}v_-t + \frac{1}{2}CV_{\text{Ch}}^2 \\ & \quad \frac{1}{2}C(V_0 - V_{\text{Ch}})^2 = n_0e\mathcal{E}(v_+ + v_-)t \\ & \quad \frac{1}{2}C(V_0 + V_{\text{Ch}})(V_0 - V_{\text{Ch}}) = n_0e\left(\frac{V_{\text{Ch}}}{d}\right)(v_+ + v_-)t \end{aligned}$$

La tensione del segnale è misurata attraverso R ed è denotata con V_R . Essa è quasi sempre piccola rispetto a V_0 ed è data da $V_R = V_0 - V_{\text{Ch}}$. Possiamo quindi fare le approssimazioni

$$V_0 + V_{\text{ch}} \approx 2V_0, \quad \frac{V_{\text{Ch}}}{d} \approx \frac{V_0}{d}$$

Inserendo queste approssimazioni nell'equazione precedente otteniamo:

$$\frac{1}{2}C(2V_0)V_R = n_0e\left(\frac{V_0}{d}\right)(v_+ + v_-)t \implies V_R = \frac{n_0e}{Cd}(v_+ + v_-)t$$

Questo risultato descrive la porzione iniziale dell'impulso del segnale e prevede una crescita lineare con il tempo. È valido solo per il periodo in cui sia gli ioni che gli elettroni si stanno ancora muovendo all'interno della camera.

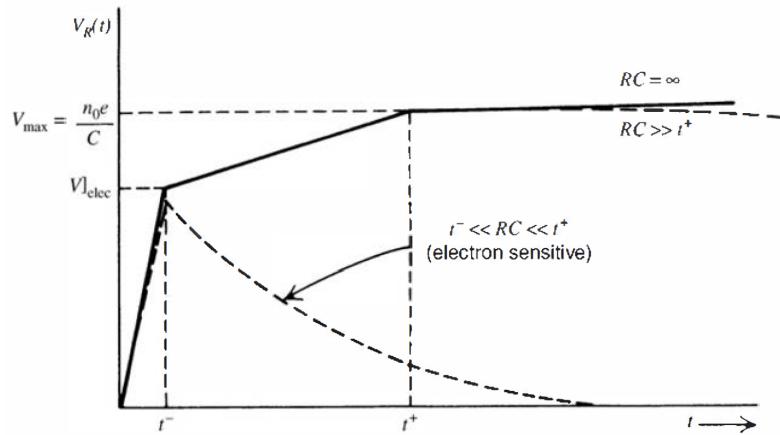
Dopo un tempo $t_- = \frac{x}{v_-}$, gli elettroni raggiungono l'anodo. La loro deriva ha allora contribuito al massimo possibile alla tensione del segnale, e il secondo termine nell'espressione di V_R diventa una costante pari al suo valore in t_- . Questo valore costante è $\frac{n_0ev_-t_-}{Cd}$ o $\frac{n_0ex}{Cd}$. Per il successivo periodo di tempo solo gli ioni si stanno ancora muovendo e V_R assume la forma:

$$V_R = \frac{n_0e}{Cd}(v_+t + x)$$

Gli ioni raggiungono il catodo dopo un tempo $t_+ = \frac{(d-x)}{v_+}$. A questo punto, la tensione del segnale non aumenta più avendo raggiunto infine il valore

$$V_R = \frac{n_0e}{Cd}[(d-x) + x] = \frac{n_0e}{C}$$

La forma dell'impulso nei vari intervalli è mostrata nella figura seguente:



Quando la costante di tempo del circuito di raccolta è molto grande, o $RC \gg t_+$, l'ampiezza massima dell'impulso del segnale è data da:

$$V_{\max} = \frac{n_0 e}{C}$$

e non dipende dalla posizione in cui le coppie di ioni sono state formate all'interno della camera. In queste condizioni, una misura dell'ampiezza dell'impulso V_{\max} fornisce un'indicazione diretta del numero originario di coppie di ioni n_0 che hanno contribuito all'impulso.

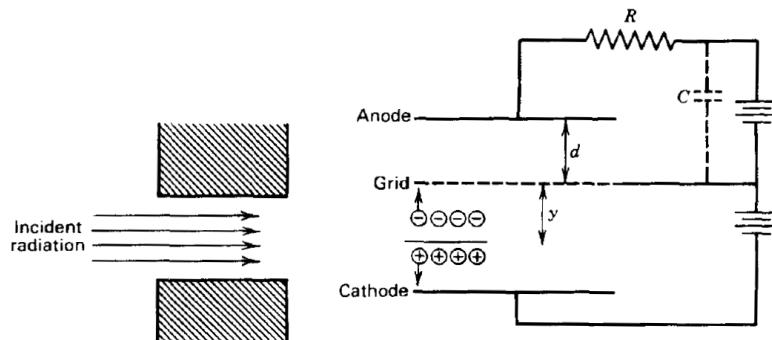
Nel funzionamento sensibile agli elettronni, tuttavia, la porzione dell'impulso derivata sopra, che corrisponde alla deriva degli ioni, è quasi completamente persa scegliendo una costante di tempo di raccolta molto più breve rispetto al tempo di raccolta degli ioni. L'impulso che rimane riflette quindi solo la deriva degli elettronni e avrà un'ampiezza data da

$$V_{\text{elec}} = \frac{n_0 e}{C} \frac{x}{d}$$

La forma di questo impulso è anch'essa illustrata nella figura sopra. Solo la porzione a crescita rapida dell'impulso è preservata, e l'ampiezza adesso dipende dalla posizione x in cui gli elettronni sono stati originariamente formati all'interno della camera.

Approfondimento 7.5: La griglia di Frisch

La dipendenza dell'ampiezza dell'impulso dalla posizione di interazione nelle camere a ionizzazione sensibili agli elettronni può essere eliminata attraverso l'uso di una configurazione illustrata nella figura seguente

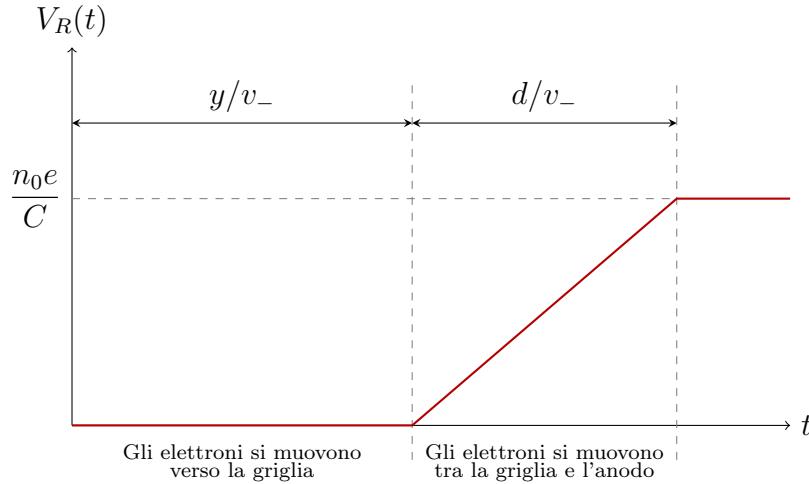


In questo caso, il volume della camera a ionizzazione è diviso in due parti da una griglia di Frisch, chiamata così dal suo ideatore.

Attraverso l'uso di una collimazione esterna o della posizione preferenziale della sorgente di radiazione, tutte le interazioni di radiazione sono confinate nel volume tra la griglia e il catodo della camera. Gli ioni positivi semplicemente si muoveranno da questo volume verso il catodo. La griglia è mantenuta a un potenziale intermedio tra i due elettrodi ed è realizzata in modo da essere il più trasparente possibile agli elettroni. Pertanto, gli elettronni sono inizialmente attratti dal volume di interazione verso la griglia. A causa della posizione del resistore di carico nel circuito, né la deriva verso il basso degli ioni né la deriva verso l'alto degli elettroni fino alla griglia producono alcuna tensione di segnale misurata. Tuttavia, una volta che gli elettronni attraversano la griglia dirigendosi verso l'anodo, la tensione griglia-anodo inizia a diminuire e una tensione di segnale inizia a svilupparsi attraverso il resistore. Per una costante di tempo del circuito grande rispetto al tempo di raccolta degli elettronni, il valore di tensione del segnale dipendente dal tempo attraverso il resistore è

$$V_R = \frac{n_0 e}{C d} v_- t$$

dove d ora è la distanza tra la griglia e l'anodo. Questo aumento lineare continua fino a quando gli elettronni raggiungono l'anodo:



La tensione massima del segnale è quindi

$$V_{\max} = \frac{n_0 e}{C}$$

che è identico a quella trovata nel caso in cui adoperiamo una costante di tempo $\tau \gg t_+$. Tuttavia, ora il segnale è dovuto solo alla deriva degli elettronni piuttosto che dal movimento sia degli elettronni che degli ioni positivi. L'aumento lento corrispondente alla deriva degli ioni è eliminato, e la costante di tempo del circuito può quindi essere impostata a un valore molto più breve tipico della modalità di funzionamento sensibile agli elettroni descritta nella sezione precedente. Poiché ogni elettrone attraversa la stessa differenza di potenziale e contribuisce ugualmente all'impulso di segnale, l'ampiezza dell'impulso è ora indipendente dalla posizione di formazione delle coppie di ioni originali ed è semplicemente proporzionale al numero totale di coppie di ioni formate lungo la traccia della particella incidente.

7.5 La moltiplicazione

Un'ultimo aspetto da considerare in un rivelatore a gas è la moltiplicazione. La moltiplicazione è una conseguenza dell'aumento del campo elettrico all'interno del gas fino a un valore sufficientemente elevato (si parla di diversi kV/cm). Infatti, per valori bassi del campo, gli elettroni e gli ioni creati dalla radiazione incidente si limitano a migrare verso i rispettivi elettrodi di raccolta; tuttavia, per valori molto elevati del campo elettrico, gli elettroni acquisiscono una velocità estremamente elevata tanto che possono avere un'energia cinetica così grande da poter innescare ulteriori ionizzazioni, che sono delle ionizzazioni secondarie con cui si produrranno ulteriori coppie elettrone-ione.

7.5.1 Moltiplicazione a valanga

L'elettrone liberato da questo processo di ionizzazione secondaria verrà anch'esso accelerato dal campo elettrico. Durante la sua successiva deriva, subisce collisioni con altre molecole di gas neutro e può quindi creare ulteriori ionizzazioni. Il processo di moltiplicazione del gas assume quindi la forma di una cascata, nota come *valanga di Townsend*, in cui ciascun elettrone libero creato in una collisione può potenzialmente creare più elettroni liberi tramite lo stesso processo.

Se λ è il cammino libero medio dell'elettrone per una collisione ionizzante secondaria, allora $\alpha = \frac{1}{\lambda}$ rappresenta il numero medio di coppie create per unità di percorso⁹. Questo è meglio conosciuto come il primo coefficiente di Townsend.

Se ci sono n elettroni, allora in un cammino dx verrà creato un numero di nuovi elettroni dato da

$$dn = n\alpha dx$$

Integrando, si ottiene il numero totale di elettroni creati in un cammino x avendo n_0 elettroni iniziali (ottenuti dalla ionizzazione primaria):

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

A partire da tale relazione è possibile definire il fattore di moltiplicazione o guadagno M , che rappresenta il numero di coppie create rispetto al numero di coppie prodotte per ionizzazione primaria:

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

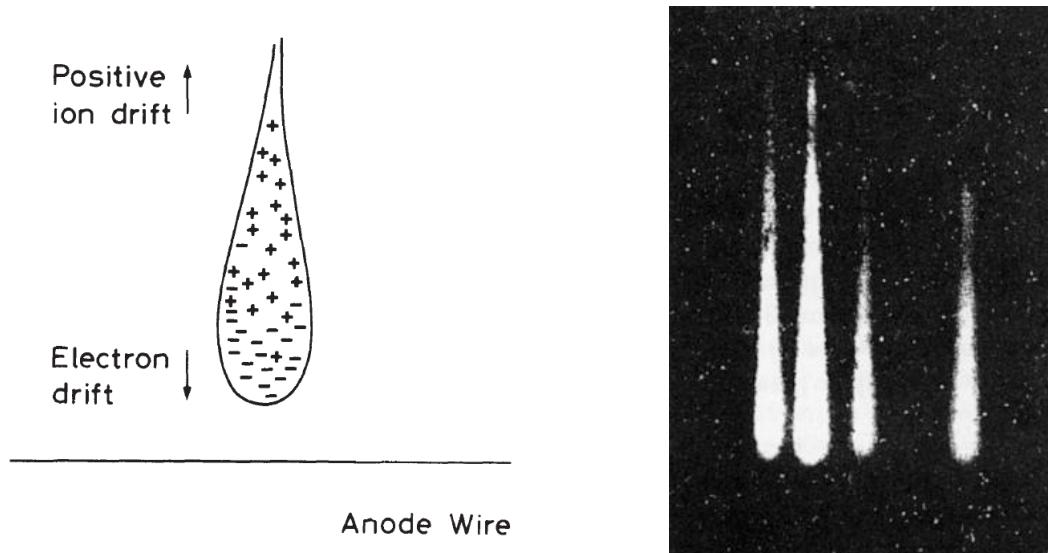
Sostanzialmente, grazie a questi meccanismi di produzione a valanga possiamo produrre un numero di coppie molto elevato a partire da una singola prima ionizzazione. Ciò costituisce un vantaggio, perché avere più carica comporta un segnale più intenso dunque avente ampiezza maggiore.

C'è tuttavia un limite nei valori che fisicamente M può assumere, perché superato questo si potrebbe produrre un danneggiamento del rivelatore in quanto cominciano a innescarsi delle scariche e delle valanghe incontrollate. Tale condizione è detta regime di breakdown, in cui si giunge se si supera il limite di breakdown, ovvero se il fattore di guadagno M supera il valore di 10^8 . Tale limite è detto condizione di Raether.

⁹Il Leo dice che tale costante corrisponde alla probabilità di ionizzazione per unità di lunghezza del cammino. Non capendo chi abbia ragione, riporto quanto detto dalla professoressa, che è anche ciò che si trova nella maggior parte dei testi.

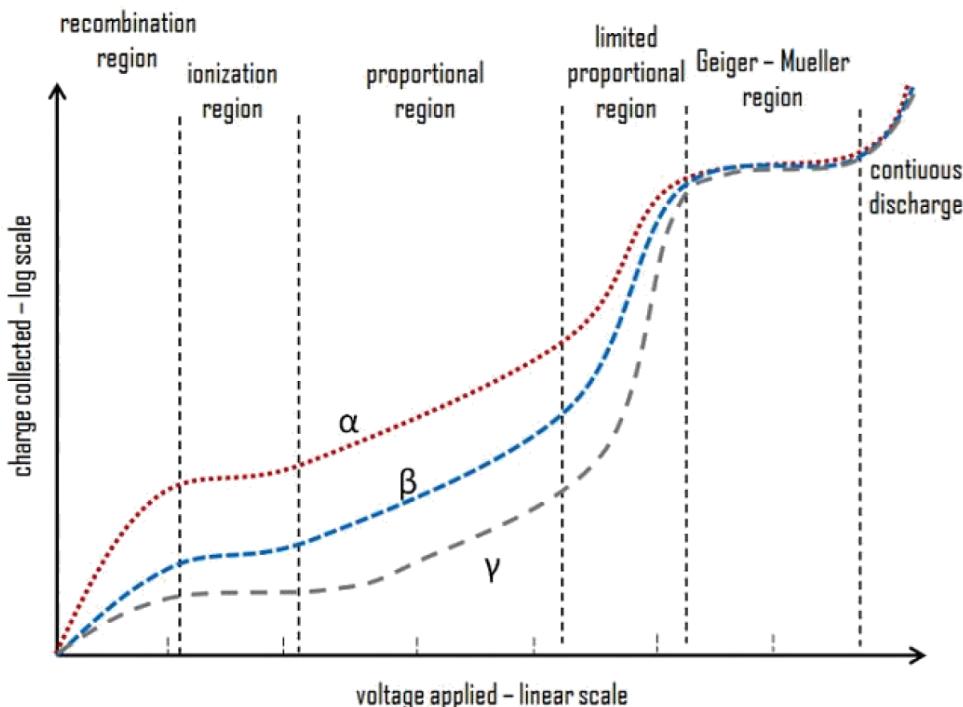
7.5.2 Sviluppo della valanga

Lo sviluppo della valanga dipende dalle diverse velocità di deriva di elettroni e ioni. A causa della grande mobilità degli elettroni rispetto agli ioni positivi, la valanga assume la forma di una goccia avente sul fronte gli elettroni e sulla coda gli ioni.



7.6 Regimi di lavoro dei rivelatori a gas

Analizziamo ora le diverse regioni di funzionamento dei rivelatori a gas. Osserviamo il seguente grafico, dove sull'asse delle ascisse è riportata la tensione applicata tra gli elettrodi del rivelatore mentre sulle ordinate la carica raccolta dagli elettrodi:



A seconda del valore di tensione applicata, dunque in base all'intensità del campo elettrico, si individuano diverse regioni:

- *Regione di ricombinazione:* Quando le tensioni applicate sono abbastanza basse, quello che avviene quando passa una particella è che si producono le coppie elettrone-ionie e queste tendono a migrare, ma poiché il campo elettrico non è molto intenso continuano a prevalere i processi di ricombinazione, per cui non riusciamo a raccogliere tutte le coppie prodotte in quanto una parte viene persa a causa dei fenomeni di ricombinazione;
- *Regione di ionizzazione:* Man mano che aumenta la tensione, l'effetto di ricombinazione diventa via via sempre meno importante perché con la tensione aumenta la probabilità che la carica riesca a migrare fino all'elettrodo e quindi il segnale venga raccolto. Il segnale raccolto aumenterà fino a raggiungere un "pianerottolo", il quale fisicamente rappresenta il fatto che stiamo raccogliendo tutte le cariche che sono state prodotte, quindi anche aumentando la tensione il segnale non aumenterà in maniera sensibile. Questa regione di pianerottolo è la regione in cui funzionano le cosiddette camere a ionizzazione, le quali sono dei rivelatori che lavorano in un regime di tensione tale che si raccolgono tutte le cariche prodotte dalla prima ionizzazione;
- *Regione proporzionale:* Continuando ad aumentare la tensione cominciano ad innescarsi i processi di produzione a valanga, quindi i campi elettrici diventano così intensi che gli elettroni prodotti dalla ionizzazione primaria possono innescare delle ionizzazioni secondarie e così via. Ci aspettiamo allora che il segnale cominci ad aumentare e quindi il numero di cariche raccolte; in particolare queste aumenteranno seguendo la legge esponenziale vista poc'anzi. In questa regione la ionizzazione secondaria è ancora strettamente dipendente da quella primaria. Infatti, anche se abbiamo una produzione a valanga di cariche, il numero di cariche prodotte rimane proporzionale all'energia depositata, quindi se siamo in grado di misurare quante cariche sono prodotte possiamo ancora avere l'informazione sull'energia che è stata depositata nel rivelatore. In tale regione funzionano i cosiddetti contatori proporzionali;
- *Regione di proporzionalità limitata:* Se andiamo oltre incontriamo una prima regione di proporzionalità limitata in cui la carica prodotta è così grande che gli ioni vanno a modificare il campo elettrico generato dagli elettrodi. Viene dunque perturbata la proporzionalità che caratterizzava la zona precedente, per cui tale regione non viene normalmente adoperata per la rivelazione;
- *Regione Geiger-Mueller:* Se aumentiamo ancora la tensione arriviamo a un secondo pianerottolo, che è il cosiddetto pianerottolo Geiger, in cui nuovamente abbiamo un segnale che è indipendente dalla tensione di lavoro. Il motivo è che siamo arrivati in una regione in cui comincia a innescarsi delle valanghe in maniera incontrollata. A differenza della regione proporzionale dove ogni elettrone può innescare una nuova valanghe, qui cominciano a innescarsi delle valanghe lungo l'anodo che vengono generate da fotoni emessi dalla diseccitazione degli atomi che compongono il gas, quindi incominciano a generarsi delle cariche in modo incontrollato e soprattutto il segnale che si ha in uscita, dunque il numero di cariche che misuriamo alla fine, diventa indipendente da quante cariche sono state prodotte dalla prima ionizzazione,

quindi dall'energia che è stata depositata. In altre parole, il segnale in uscita non dà più alcuna informazione sull'energia depositata nel rivelatore. Nonostante sembri una regione meno interessante perché il segnale non ci fornisce informazioni sull'energia depositata, possiamo comunque sapere se è passato meno una particella. Ecco perché in questa regione funzionano i contatori, rivelatori che permettono solamente di contare quante particelle sono passate senza fornire indicazioni sull'energia. Tra questi contatori abbiamo il contatore Geiger;

- *Regione di scarica continua:* Oltre il secondo pianerottolo si va incontro ad una regione da evitare, perché a causa delle continue scariche si potrebbero verificare dei danneggiamenti del rivelatore.

Dall'analisi di questo grafico individuiamo tre tipologie di rivelatore a gas: camere a ionizzazione, camere proporzionali e rivelatori Geiger.

Inoltre il grafico presenta diverse curve al variare del tipo di particella all'interno del rivelatore al gas: una è relativa alle particelle α , una alle particelle β e una ai γ . Tali curve mostrano qual è il segnale rilasciato a parità di tensione in base al tipo di radiazione. Notiamo che per i γ la carica prodotta è più bassa in generale, mentre per le *alpha* e le β le differenze dipendono dallo stopping power di queste particelle all'interno del gas. Al di là dell'ordine con cui si presentano queste curve, la cosa che ci interessa di più è osservare che le curve sono ben distanziate finché lavoriamo nella regione delle camera a ionizzazione o in quella dei contatori proporzionali, ma poi si unificano. In particolare, in corrispondenza del contatore Geiger non c'è più alcuna distinzione, quindi indipendentemente dal tipo di particella e dall'energia che è stata depositata all'interno del rivelatore il segnale in uscita è sempre lo stesso. Ciò mostra come i contatori sono dei rivelatori basilari, che non danno altre informazioni se non il fatto che è passata una particella.

7.7 Geometrie dei rivelatori a gas

Il campo elettrico che si genera all'interno del rivelatore dipende dalla geometria del rivelatore. Sono possibili diverse configurazioni geometriche, a seconda delle dimensioni, del regime in cui i rivelatori devono operare e delle performance richieste.

7.7.1 Geometria piana

Una geometria molto semplice è quella costituita da due elettrodi a facce piano e parallele. Un rivelatore di questo tipo è equivalente ad un condensatore a facce piane e parallele distanti d tra loro. Il campo elettrico che si genera nella regione compresa tra i due elettrodi è uniforme e vale

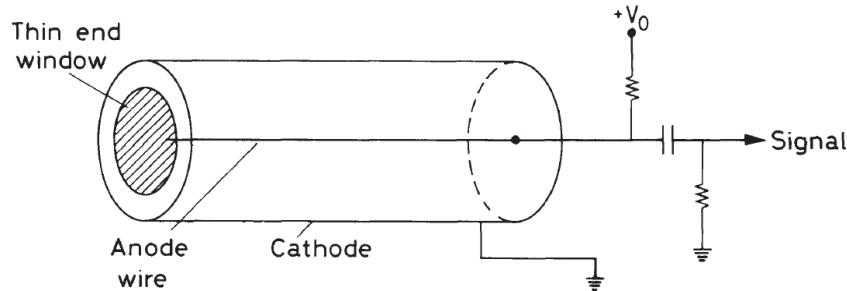
$$E = \frac{V}{d}$$

Questo tipo di geometria viene normalmente adoperata nelle camere a ionizzazione, quindi in una regione dove la tensione non è molto elevata, dunque non ci aspettiamo campi elettrici particolarmente intensi. Infatti i segnali che si producono in questo tipo di rivelatori sono segnali deboli rispetto alla tensione applicata alle armature.

7.7.2 La geometrica cilindrica

Se volessimo ottenere dei campi elettrici più intensi mantenendo la geometria piana, dovremmo aumentare la tensione V o diminuire la distanza d . Tuttavia facendo ciò si potrebbe arrivare a superare la rigidità dielettrica del gas, giungendo dunque alla condizione di scarica, che è ovviamente una condizione da evitare.

Per produrre campi elettrici più intensi nella regione di rivelazione basta adoperare la geometria cilindrica:



Nella geometria cilindrica un elettrodo è costituito dal cilindro esterno, mentre l'altro da un filo disposto lungo l'asse del cilindro. Ovviamente il filo non è di dimensioni infinitesime, ma avrà anche esso un valore del raggio. Tra i due elettrodi, cioè quindi tra il cilindro esterno e il filo interno, viene creato una differenza di potenziale. Come possiamo vedere dalla figura, il cilindro esterno è collegato a massa mentre il filo interno è posto a un potenziale V_0 , quindi il filo rappresenta l'anodo e il cilindro esterno il catodo. Il principio di funzionamento è esattamente lo stesso: quando passa una particella, essa produce ionizzazione primaria, solo che stavolta abbiamo dei campi elettrici molto intensi e quindi si generano delle valanghe. È addirittura possibile lavorare nella modalità Geiger, dove le valanghe sono incontrollate e il segnale in uscita è indipendente dalla particella e dall'energia depositata.

Esempio 7.2: Il campo elettrico della geometria cilindrica

Il motivo per cui il campo elettrico relativo a tale geometria è molto intenso deriva dalla forma funzionale di questo. Richiamiamo brevemente i passaggi necessari per giungere a tale espressione.

Dal teorema di Gauss si ha che, su una superficie Gaussiana cilindrica di raggio r il flusso del campo elettrico è dato da

$$\Phi = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = E 2\pi r L = \frac{|Q|}{\epsilon} \implies E(r) = \frac{|Q|}{2\pi\epsilon L} \frac{1}{r}$$

in virtù della simmetria radiale del sistema. D'altro canto il sistema costituisce sostanzialmente un condensatore, dunque è valida la relazione

$$\frac{|Q|}{\epsilon} = \frac{C \Delta V}{\epsilon}$$

Determiniamo allora ΔV : detto a il raggio del filo e b il raggio del cilindro, si ha

$$\begin{aligned}\Delta V &= - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = - \int_a^b E dr = - \frac{|Q|}{2\pi\epsilon L} \int_a^b \frac{1}{r} dr = - \frac{|Q|}{2\pi\epsilon L} \ln\left(\frac{a}{b}\right) \\ \implies \frac{|Q|}{\epsilon} &= \frac{2\pi L \Delta V}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \equiv \frac{2\pi L V_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}\end{aligned}$$

in quanto nel nostro caso $\Delta V = V_0$. Andando a sostituire troviamo che

$$E(r) = \frac{V_0}{r \ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

Il fatto che abbia un andamento del tipo $\frac{1}{r}$ fa sì che in prossimità dell'anodo si possano raggiungere valori di campo elettrico particolarmente intensi, addirittura per $r = 0$ diventerebbe infinito. Inoltre esso dipende dalle caratteristiche geometriche del cilindro, in particolare dal raggio interno e da quello esterno.

Vediamo un esempio numerico. Supponiamo che l'anodo abbia un raggio $a = 0,01$ cm e il cilindro esterno abbia raggio $b = 1$ cm; applicando una differenza di potenziale $V = 1$ kV, in prossimità dell'anodo il campo elettrico raggiunge il valore di circa 21 kV/cm, che è molto più elevato rispetto ai valori che possiamo ottenere con la geometria a facce piane parallele, dove per ottenere lo stesso valore di campo elettrico dovremmo applicare, supponendo che le piastre siano distanti tra loro $d = 1$ cm, una differenza di potenziale di ben 21 kV.

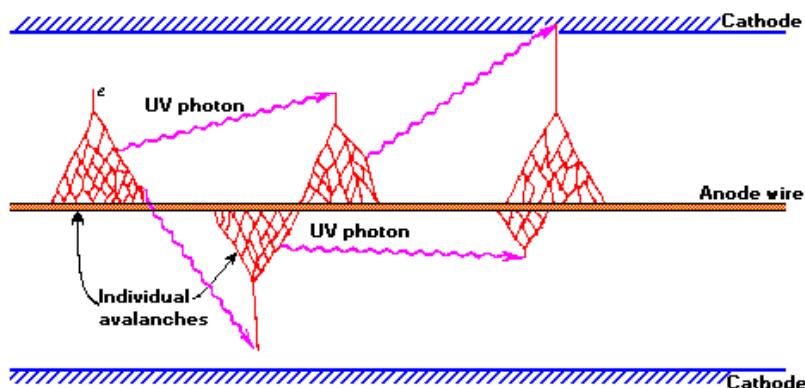
Il segnale che si genera è di conseguenza molto elevato, anche dell'ordine del volt. Ricordiamo che questo va confrontato con la differenza di potenziale che si adopera tra gli elettrodi.

7.7.3 Il contatore Geiger

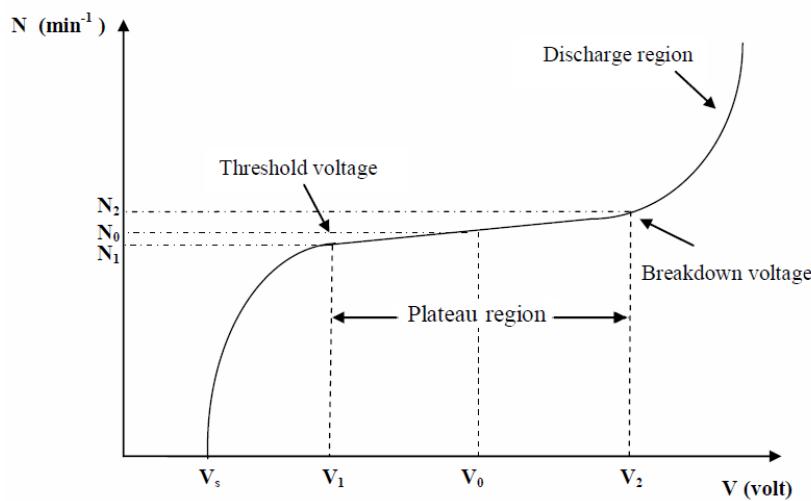
La geometria cilindrica è tipicamente adoperata in un contatore Geiger.

In questo tipo di rivelatori, al passaggio di una particella si producono delle scariche a valanga, con il risultato di un impulso molto elevato (dell'ordine dei V). Il segnale è indipendente dalla ionizzazione primaria, dunque dal tipo di particella e dall'energia di questa. Fornisce quindi solo un conteggio delle particelle.

Vediamo schematicamente cosa avviene:



L'elettrone prodotto dalla ionizzazione primaria viene accelerato a causa del campo elettrico e riesce a produrre a sua volta ionizzazioni secondarie, dando luogo ad una valanga. Notiamo che lungo l'anodo ci sono tantissime altre valanghe che in realtà non derivano da un elettrone di ionizzazione primaria, bensì dai fotoni che vengono emessi a seguito della disecchezza delle molecole. Sebbene siano quindi in qualche modo correlati alla prima valanga, perdiamo completamente la proporzionalità che caratterizzava la prima regione di lavoro dei rivelatori, ossia la regione di ionizzazione. Infatti il contatore Geiger lavora nella regione che prende il nome di "pianerottolo Geiger" che in realtà ha una leggera pendenza dell'ordine del 2 – 3%/V, cioè il segnale che ogni volta misuriamo può variare del 2 – 3% per unità di tensione.



Quello che si fa quando si lavora con un contatore Geiger è cercare di capire la tensione di lavoro ottimale, quindi a quale valore di differenza di potenziale bisogna porre gli elettrodi del contatore Geiger per lavorare all'incirca al centro del pianerottolo, perché bisogna evitare di lavorare in prossimità delle estremità del pianerottolo altrimenti si rischia di entrare in regimi di lavoro che vogliamo evitare. Infatti a destra abbiamo la regione di breakdown, dove si innescano delle scariche tra gli elettrodi ed è una regione in cui il rivelatore può anche danneggiarsi, mentre a sinistra abbiamo la regione di proporzionalità limitata, che è una regione che non ci interessa ai fini della rivelazione. Quindi bisogna aumentare man mano la tensione per verificare quando si raggiunge il pianerottolo e cercare di adoperare una tensione di lavoro in prossimità del centro del pianerottolo.

Vediamo ora cosa può rivelare un contatore Geiger (ma ciò vale in generale anche per altri rivelatori a gas):

- *Particelle cariche:* È chiaro che le particelle cariche vengano rivelate in quanto queste ionizzano la materia. L'unico fattore a cui bisogna stare attenti riguarda l'ingresso all'interno del rivelatore, perché il rivelatore è un recipiente chiuso ermeticamente per contenere il gas, quindi affinché le particelle vengano rivelate devono necessariamente attraversare le pareti del rivelatore. Finché abbiamo a che fare con elettroni, i quali hanno un potere penetrante abbastanza discreto, se si realizzano delle finestre di ingresso sottili, che nella pratica significa che una delle pareti del contatore Geiger

viene realizzata con un materiale avente un basso stopping power, magari particolarmente sottili e/o con densità bassa¹⁰, allora l'elettrone perde una piccola parte della sua energia ma riesce comunque a penetrare all'interno del rivelatore. Nel caso del contatore Geiger l'efficienza di rivelazione (che ricordiamo rappresentare il rapporto tra il numero di particelle rivelate e il numero di particelle incidenti) per gli elettroni è del 100%, cioè tutti gli elettroni che incidono sul contatore Geiger vengono rivelati;

- *Raggi γ* : I raggi γ interagiscono con la materia attraverso vari meccanismi, ma non sono direttamente ionizzanti. Possono invece causare effetti come l'effetto fotoelettrico, l'effetto Compton e la produzione di coppie. Sono quindi i prodotti carichi di queste interazioni a poter ionizzare il gas. Ad esempio, se si verifica l'effetto fotoelettrico, l'elettrone emesso sarà in grado di ionizzare il gas.

Per rivelare un γ , è essenziale che avvenga un'interazione. È molto probabile che il γ interagisca con le pareti del contenitore, poiché queste hanno una densità e un numero atomico Z elevati. Al contrario, è meno probabile che il γ interagisca direttamente con il gas, a causa dei bassi valori di densità e Z di questo. Di conseguenza, l'efficienza nel rivelare i raggi γ è molto bassa, intorno all'1 – 2%, poiché il γ deve interagire con le pareti del materiale, e i prodotti di questa interazione devono poi generare un segnale nel contatore Geiger;

- *Muoni cosmici*: I muoni hanno un elevato potere penetrante, pertanto riescono ad attraversare tranquillamente le pareti del recipiente senza essere schermati o assorbiti, dunque per questa tipologia di particelle l'efficienza è del 100%.

Restano fuori da questo schema le particelle α e più in generale le particelle cariche pesanti. Queste percorrono spessori di materiale solido veramente piccoli per poi venire fermate, ad esempio bastano circa 50 μm di silicio per arrestare una particella α da 1 MeV. Capiamo quindi che una qualsiasi parete arresterebbe le particelle α o nella migliore delle ipotesi farebbe perdere loro gran parte dell'energia. Ne segue che è veramente difficile misurare particelle α con il contatore Geiger.

7.8 Rivelatori a gas moderni

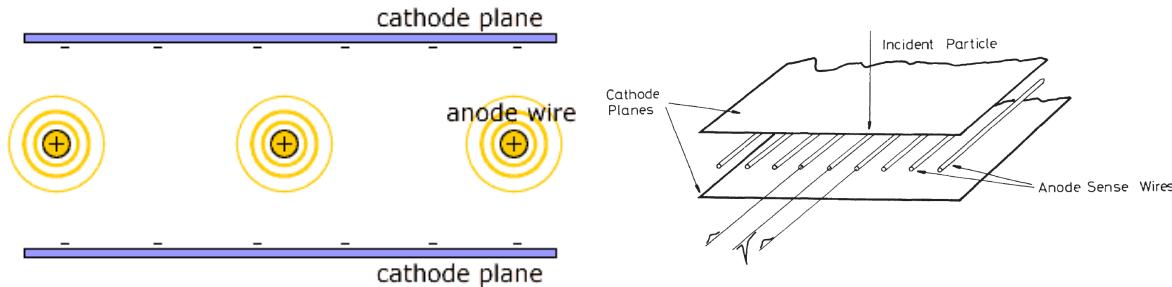
Affrontiamo adesso brevemente alcuni rivelatori a gas un po' più moderni. Infatti i rivelatori di cui abbiamo parlato finora sono rivelatori storici, in quanto sono stati i primi ad essere stati sviluppati e che ormai non si usano più nel campo della ricerca. In particolare, i contatori Geiger vengono adoperati più per scopi didattici-dimostrativi perché sono dei rivelatori molto semplici, mentre i contatori proporzionali o le camere a ionizzazione sono per lo più utilizzate in ambito medico.

7.8.1 MWPC (Multiwire Proportional Chambers)

Una prima tipologia di rivelatori a gas più moderno sono le cosiddette Multiwire Proportional Chambers, anche dette camere a fili. Queste sono state sviluppate intorno agli anni '70 e, sostanzialmente, si comportano come un insieme di contatori proporzionali.

¹⁰Per dare un'idea quantitativa, con una densità superficiale pari a 4 mg/cm^2 , il coefficiente di trasmissione T è dell'85%, mentre con una densità di 30 mg/cm^2 T scende all'85%.

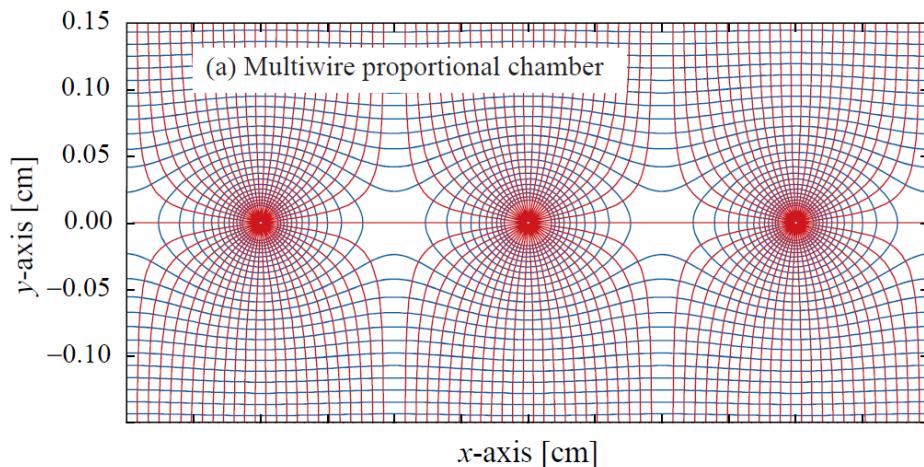
In camere di questo tipo abbiamo due superfici piane, una sopra e una sotto, costituenti dei catodi; al centro della camera invece abbiamo diversi fili che rappresentano gli anodi:



Il fenomeno che avviene è lo stesso che si verifica all'interno di un qualsiasi rivelatore a gas: una particella entra, produce delle coppie elettrone-ione positivo per ionizzazione e gli elettroni viaggiano verso l'anodo, mentre gli ioni positivi verso il catodo.

Tale rivelatore lavora nella regione di proporzionalità, infatti in prossimità dell'anodo, dove il campo elettrico è molto intenso, gli elettroni sono in grado di produrre ionizzazioni secondarie, quindi questi aumentano notevolmente in numero. Idealmente, gli elettroni vanno verso il filo più vicino, che sarà quello che raccoglierà il segnale. Con un rivelatore di questo tipo non misuriamo l'ampiezza del segnale (quindi non si è interessati a quante cariche sono state prodotte), ma semplicemente ci limitiamo a vedere quale filo ha raccolto il segnale, perché questi rivelatori sono rivelatori di posizione, i quali permettono di ricostruire la posizione di incidenza della particella. In questo caso, dato che la posizione è data dal filo, riusciamo a ricostruire soltanto la coordinata parallela ai piani dei catodi, ma basta utilizzare due di queste camere poste una sopra l'altra in maniera tale che i fili siano ortogonali tra di loro per poter ricostruire anche un'altra direzione nel piano xy . L'informazione che viene estratta è semplicemente un'informazione del tipo SI/NO, eventualmente un miglioramento si potrebbe avere se la carica viene raccolta da due fili contigui, allora in quel caso si può realizzare una sorta di baricentro.

Vediamo adesso le linee di campo elettrico in un rivelatore di questo genere:



Notiamo come nella maggior parte della camera il campo elettrico è uniforme, mentre in prossimità del filo diventa molto più intenso, come mostrato dalle linee di campo che

diventano più fitte.

Geometrie tipiche per questi rivelatori consistono in fili da $20 \mu\text{m}$, distanti 1 mm l'uno dall'altro. La spaziatura, cioè la distanza tra un filo e l'altro, prende il nome di pitch. Questa è una caratteristica generale di tutti i rivelatori segmentati, quindi il pitch rappresenta la distanza tra un elettrodo ed il successivo. È importante conoscere il pitch di un rivelatore di posizione, perché questo stabilisce la *risoluzione spaziale*, ossia la capacità di distinguere due posizioni molto vicine tra di loro, dunque la precisione con cui viene ricostruita la coordinata spaziale. Ovviamente essa dipenderà dalla distanza tra un elettrodo ed il successivo, che in questo caso è la distanza tra i fili: più le sequenze di fili sono fitte, migliore sarà la risoluzione spaziale¹¹. È da notare che la risoluzione spaziale non è data banalmente dalla distanza d tra un filo e l'altro, bensì è data da

$$\sigma_x = \frac{d}{\sqrt{12}}$$

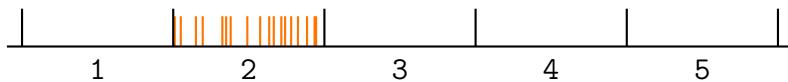
Per cui, se ad esempio i fili sono distanti $d = 1 \text{ mm}$, si possono ottenere risoluzioni spaziali dell'ordine di $0,3 \text{ mm}$.

La presenza del fattore $\sqrt{12}$ può essere spiegata in diversi modi. Un modo è il seguente: supponiamo che le posizioni di arrivo delle particelle tra un filo e l'altro seguano una distribuzione uniforme (cioè le particelle, quando arrivano sul rivelatore arrivino con la stessa probabilità in qualsiasi punto della superficie del rivelatore). Una volta definita la funzione di distribuzione di probabilità $D(x)$ (abbreviata in PDF, dall'inglese Probability Distribution Function), data una distribuzione di valori possiamo valutare valore medio e varianza associati alla variabile. Se indichiamo con x la variabile posizione, avremo che tali quantità sono date da

$$\langle x \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dx x D(x)}{\int_{-\infty}^{+\infty} dx D(x)} , \quad \sigma_x^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dx (x - \langle x \rangle)^2 D(x)}{\int_{-\infty}^{+\infty} dx D(x)}$$

dove l'integrale a denominatore è dovuto al fatto che in generale la funzione $D(x)$ potrebbe non essere normalizzata a 1. Nel caso in cui lo fosse tale termine si potrà omettere.

Consideriamo adesso un rivelatore segmentato:



Consideriamo tutte le particelle che cadono nell'intervallo 2, le quali verranno tutte associate all'omonimo filo. Come abbiamo detto, ci aspettiamo che queste particelle si distribuiscono in maniera uniforme, quindi la loro distribuzione di probabilità deve essere piatta. In virtù di ciò, essa si può esprimere tramite la funzione

$$D(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{per } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{per } x > b \vee x < a \end{cases}$$

¹¹Per dare un'idea quantitativa, se due fili fossero distanti tra loro 10 cm, non potremmo dire niente su quello che avviene in questi 10 cm, al massimo riusciremmo ad assegnare la posizione a un filo o all'altro.

dove a e b sono gli estremi entro cui supponiamo di associare il filo 2 alla particella. Notiamo che tale distribuzione è normalizzata a 1, in quanto si ha

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dx D(x) = \int_a^b dx \frac{1}{b-a} = \frac{1}{b-a} [x]_a^b = \frac{b-a}{b-a} = 1$$

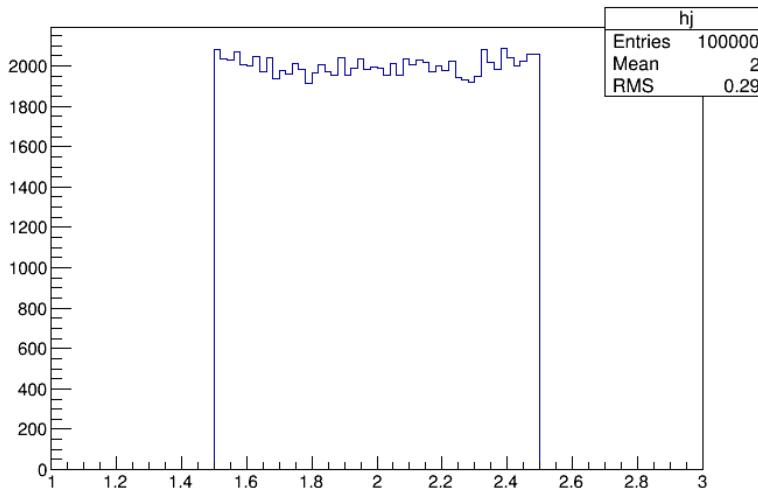
Calcoliamo il valor medio:

$$\begin{aligned} \langle x \rangle &= \int_{-\infty}^{+\infty} dx x D(x) = \int_a^b dx \frac{x}{b-a} = \frac{1}{b-a} \left[\frac{x^2}{2} \right]_a^b = \frac{1}{b-a} \frac{b^2 - a^2}{2} = \\ &= \frac{1}{b-a} \frac{(b-a)(b+a)}{2} = \frac{b+a}{2} \end{aligned}$$

Per quanto riguarda la varianza invece si ha

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} dx (x - \langle x \rangle)^2 D(x) = \int_a^b dx (x - \langle x \rangle)^2 \frac{1}{b-a} = \\ &\stackrel{\substack{y=x-\langle x \rangle, dy=dx \\ b\rightarrow b-\langle x \rangle, a\rightarrow a-\langle x \rangle}}{=} \frac{1}{b-a} \int_{a-\langle x \rangle}^{b-\langle x \rangle} dy y^2 = \frac{1}{b-a} \left[\frac{y^3}{3} \right]_{a-\langle x \rangle}^{b-\langle x \rangle} = \frac{1}{b-a} \frac{(b-\langle x \rangle)^3 - (a-\langle x \rangle)^3}{3} = \\ &= \frac{b^3 - 3b^2 \langle x \rangle + 3b \langle x \rangle^2 - \langle x \rangle^3 - a^3 + 3a^2 \langle x \rangle - 3a \langle x \rangle^2 + \langle x \rangle^3}{3(b-a)} = \\ &= \frac{(b^3 - a^3) - 3 \langle x \rangle (b^2 - a^2) + 3 \langle x \rangle^2 (b-a)}{3} = \\ &= \frac{b^2 + ab + a^2 - 3 \langle x \rangle (b+a) + 3 \langle x \rangle^2}{3} = \frac{b^2 + ab + a^2 - 3 \frac{(b+a)^2}{2} + 3 \frac{(b+a)^2}{4}}{3} = \\ &= \frac{4b^2 + 4ab + 4a^2 - 6b^2 - 12ab - 6a^2 + 3b^2 + 6ab + 3a^2}{12} = \\ &= \frac{b^2 - 2ab + a^2}{12(b-a)} = \frac{(b-a)^2}{12} \implies \sigma = \frac{b-a}{\sqrt{12}} \end{aligned}$$

Un altro modo consiste nel generare un certo numero di numeri casuali in modo uniforme tra due estremi:



Nell'esempio in figura sono stati scelti come estremi i valori $a = 1.5$ e $b = 2.5$ e sono stati generati 100.000 numeri in modo uniforme. Vediamo come la distribuzione di questi valori è abbastanza piatta (non è perfettamente piatta per questioni di fluttuazioni statistiche), il che significa che è equiprobabile che una particella colpisca il rivelatore in corrispondenza di una coordinata piuttosto che in corrispondenza di un'altra.

Il valore medio di questa distribuzione è banalmente dato da

$$x = \frac{1.5 + 2.5}{2} = \frac{4}{2} = 2$$

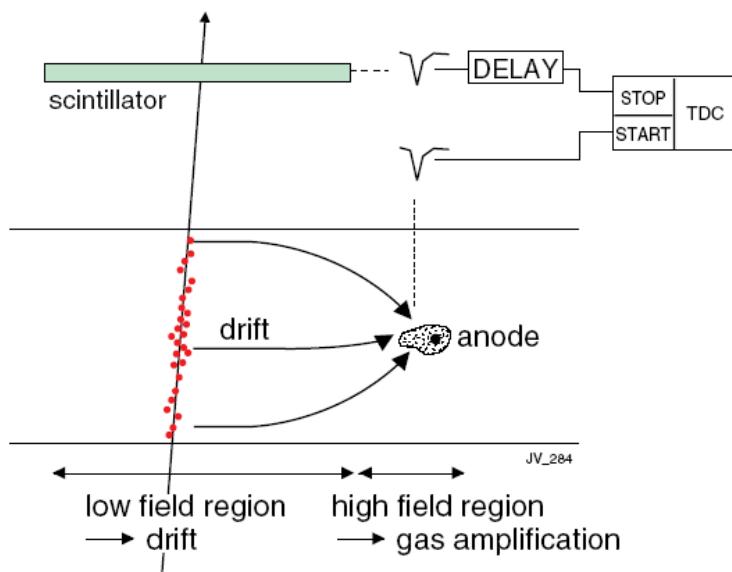
come ci aspettavamo, in quanto corrisponde al centro di questa distribuzione. L'rms, cioè la deviazione standard¹², vale

$$\sigma = \frac{2.5 - 1.5}{\sqrt{12}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0.29$$

Tale risultato è una conseguenza del teorema del limite centrale, il quale afferma che la somma (o la media) di un gran numero di variabili casuali, aleatorie, indipendenti tra di loro, segue una distribuzione Gaussiana.

7.8.2 Drift Chambers

Le camere a fili possono essere migliorate. Un esempio sono le Drift Chambers, nelle quali possiamo andare a misurare il tempo di deriva degli elettroni per raggiungere l'anodo a partire dal punto in cui sono stati prodotti. Per fare ciò è necessario avere un riferimento esterno, nel senso che deve esserci una sorta di start che ci permetta di poter misurare quanto tempo è trascorso tra quando gli elettronni sono stati prodotti e quando hanno raggiunto l'anodo. Ecco perché si fa uso di un rivelatore esterno che ci permette di valutare questa differenza di tempo.



La situazione è rappresentata schematicamente nella figura sopra: una particella entra nella camera, produce la ionizzazione e quindi gli elettroni i quali cominciano a migrare

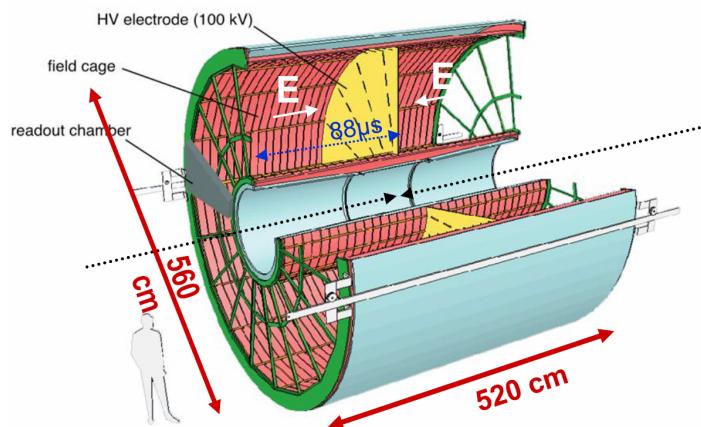
¹²Si rimanda all'approfondimento 4.2.

per poi arrivare all'anodo, dando luogo a un segnale che funge da start. La particella tuttavia prosegue, incontra un altro rivelatore che produce un segnale e questo rappresenta lo stop. Il modulo indicato in figura con "TDC" (che prende il nome di Time to Digital Converter, come vedremo in dettaglio nel capitolo ??) non fa altro che misurare la differenza di tempo tra il segnale di start e quello di stop. È chiaro che il segnale di start cambia a seconda di quanto tempo impiegano gli elettroni ad arrivare all'anodo, quindi questo sistema permette di stabilire la distanza dall'anodo, permettendoci di avere una risoluzione spaziale migliore rispetto a quella che abbiamo con le camera fili tradizionali.

Lo svantaggio di tale sistema è che si complica sia il rivelatore, perché dobbiamo avere dei rivelatori esterni di riferimento, sia l'elettronica, in quanto dobbiamo misurare tempi abbastanza piccoli, che è un'operazione non banale.

7.8.3 TPC (Time Projection Chambers)

Altri tipi di rivelatore molto utilizzati sono le TPC, ossia le Time Projection Chambers. Questi sono dei grossi rivelatori i quali hanno dimensioni anche di diversi metri, ad esempio la TPC più grande realizzata al mondo è quella dell'esperimento ALICE, la quale è riportata in figura:

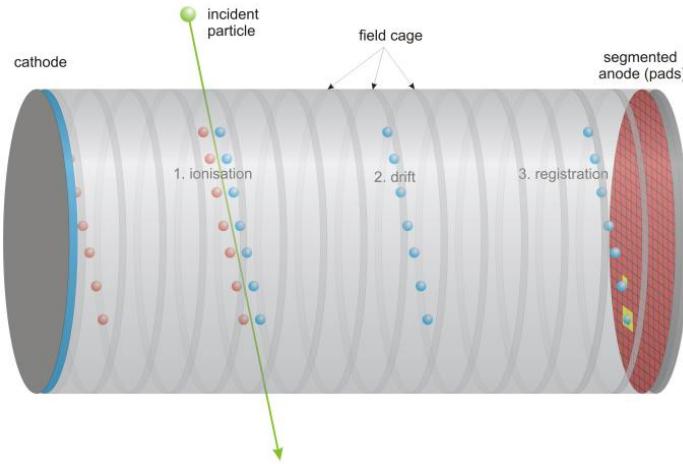


È da notare che il cilindro interno non necessariamente deve essere presente, in questo caso è presente a causa del fatto che in ALICE all'interno ci sono altri rivelatori, ma in realtà la TPC potrebbe essere un unico volume.

Analizziamo il campo elettrico. Esso ha verso opposto tra un lato e l'altro: il motivo è che in tale rivelatore abbiamo un elettrodo centrale costituito dal piano giallo e poi altri due elettrodi costituiti dalle le basi del cilindro, per cui si genera un campo elettrico che è diretto verso l'elettrodo centrale e quindi ha verso opposto nelle due regioni.

Quando passa una particella, questa ionizza il gas e gli elettroni prodotti cominciano a migrare verso le basi del cilindro, dove sono posizionati dei rivelatori di posizione. Quello che avviene sostanzialmente è che la traccia viene proiettata sul rivelatore di posizione che c'è alla base del cilindro e quindi ricostruiamo tridimensionale il passaggio della carica, perché sul piano xy (quello che include la base del cilindro) la posizione viene ricostruita grazie ai rivelatori di posizione, mentre lungo l'asse z (che coincide con l'asse del cilindro) la posizione viene ricostruita andando a misurare il tempo di deriva.

Vediamo più nel dettaglio ciò che avviene concentrandoci su metà del rivelatore:



A sinistra abbiamo il catodo (che nella figura precedente era rappresentato dalla superficie gialla) e sull'altra estremità del cilindroabbiamo dei rivelatori segmentati in grado di misurare la posizione. Vediamo come gli ioni si muovano verso il catodo, ma ciò non ci interessa perché sono molto lenti, mentre gli elettroni cominciano a derivare¹³ a seguito del campo elettrico fino ad arrivare all'anodo, dove vengono rivelati dai rivelatori di posizione, e in base a dove incidono daranno luogo ad un segnale (rappresentato dal quadratino giallo in figura), proiettando così la traccia sulla base del cilindro. La terza dimensione è invece data dal tempo impiegato dagli elettroni per passare dal punto in cui sono stati prodotti all'anodo. In questo modo riusciamo a ricostruire tridimensionalmente la traiettoria della particella.

In generale le TPC forniscono anche una misura della perdita di energia, quindi si misura l'ampiezza del segnale nonché quanti elettroni sono stati raccolti; pertanto sono rivelatori che possono essere utilizzati anche per l'identificazione. Talvolta sono inseriti all'interno di campo magnetico in maniera tale da curvare la particella e misurarne l'impulso, in modo che la dE/dx possa essere sfruttata per l'identificazione.

Esempio 7.3: I dati prodotti da una TPC

Vediamo quanti dati vengono prodotti da un rivelatore del genere. Prendiamo come riferimento l'esperimento ALICE e supponiamo di avere collisioni tra fasci di piombo, che sono quelle che producono più particelle. Per ogni collisioni vengono prodotte normalmente dalle 10.000 alle 30.000 particelle, quindi abbiamo decine di migliaia di particelle che attraversano la TPC e che devono essere tracciate. Il numero di punti che vengono ricostruiti attraverso questo sistema dipende da quanti anodi sono stati interessati alla base perché, essendo segmentati, dipenderà da quanti segnali sono stati raccolti qui e al massimo se ne possono ricostruire 160. Abbiamo dunque 160 punti sul piano xy per una media di 20.000 tracce per evento, quindi il numero complessivo di coordinate da ricostruire sono

$$\frac{\text{n}^{\circ} \text{ coordinate complessive}}{\text{evento}} = 3 \times 2 \cdot 10^4 \times 160 = 9.6 \cdot 10^6$$

¹³Sarebbe l'italianizzazione di "driftare", n.d.r..

Dal momento che gli eventi al secondo sono in numero tra 100 e 1000 possiamo calcolare anche quanti byte di dati si devono trasmettere. Supponendo di assegnare due byte per ogni coordinata si ha

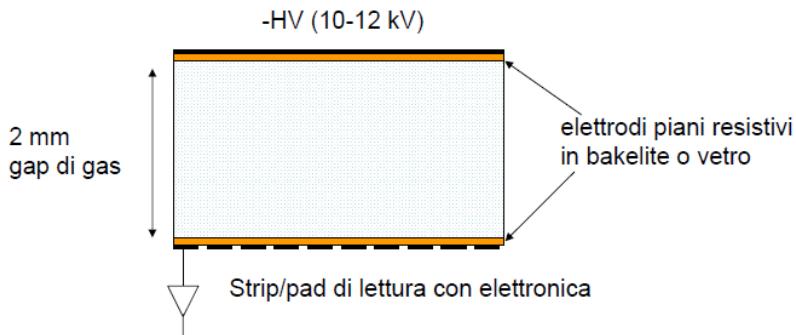
$$\frac{\text{n}^{\circ} \text{ bytes}}{\text{secondo}} = 2 \times 9.6 \cdot 10^6 \times 100 \approx 2 \text{ Gb/s}$$

Tali rivelatori devono quindi avere anche un'elettronica opportuna per gestire questi quantitativi di dati.

7.8.4 MRPC (Multigap Resistive Plate Chambers)

Un ultimo esempio è rappresentato dalle Multi Gap Resistive Plate Chambers, cioè le camere a piatti piani resistivi con diverse gap. Queste sono un'evoluzione delle Resistive Plate Chambers (RPC). Vediamo quindi prima in che cosa consistono quest'ultime:

Regime di funzionamento: Streamer o valanga



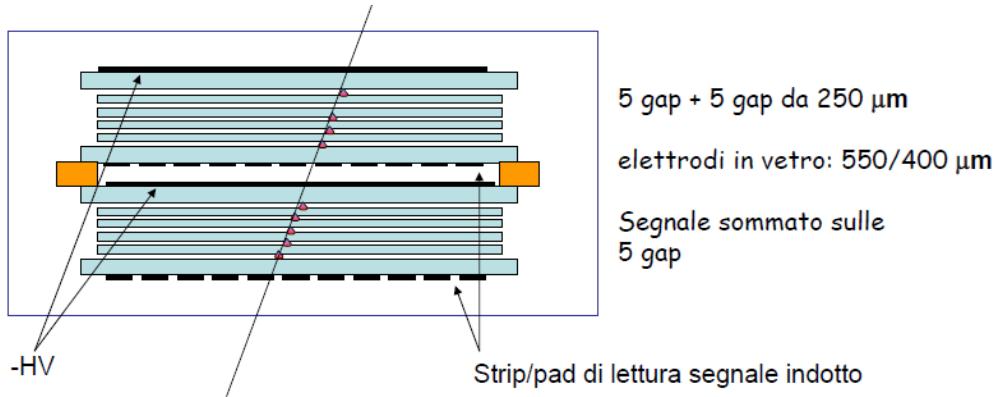
Anche qui abbiamo una struttura con del gas all'interno e degli elettrodi, ma c'è una particolarità: gli elettrodi non sono metallici, anzi normalmente sono realizzati in un materiale vetroso (bakelite o vetro) e vengono resi altamente resistivi, quindi se ne aumenta la resistività ad esempio attraverso l'utilizzo di vernici. Ciò però fa sì che questi elettrodi, che utilizziamo per creare un campo elettrico molto intenso, non possono essere degli elettrodi di lettura, cioè di raccolta del segnale, perché per essere raccolto il segnale deve essere trasmesso all'interno dell'elettrodo, cosa che non può avvenire se l'elettrodo non è conduttivo. Quello che succede è che gli elettrodi di lettura vengono posizionati all'esterno, come possiamo vedere nella figura in cui sono costituiti da delle strip o da pad¹⁴, quindi il segnale che si produce all'interno del gap di gas viene indotto sulle strip esterne o sulle pad esterne.

Sono rivelatori molto piccoli, aventi spessori di qualche millimetro, tuttavia hanno degli svantaggi. Lo svantaggio principale è che il segnale che si raccoglie è dipendente dal punto in cui si è innescata la valanga di cariche, quindi se la valanga si è innescata molto lontano dagli elettrodi essa si sviluppa molto e richiede più tempo per essere raccolta perché più distante, se invece si innesca in prossimità dell'anodo il segnale viene fornito subito. Questo crea un cosiddetto "time jitter", cioè un'indeterminazione

¹⁴Le strip e i pad sono rispettivamente delle strisce e dei rettangoli o dei cerchi di materiale conduttivo.

nell'informazione temporale associata a quel segnale, perché appunto, a seconda della posizione in cui si è innescata la valanga, il segnale può partire subito oppure con un certo ritardo, e questo è un effetto indesiderato soprattutto per le misure di timing.

Per migliorare questo aspetto si realizzano le Multi-gap Resistive Plate Chambers, in cui la zona sensibile viene suddivisa in tante gap più piccole e ciò si fa con dei "sandwich", una sequenza di vetri che vengono distanziati di poche centinaia di micron.



In questo modo la valanga si sviluppa in una di queste gap. Il segnale complessivo che viene indotto all'esterno è la somma di tutti i segnali che si sono prodotti e quindi l'efficienza rimane elevata (quindi il segnale rimane elevato) però evitiamo il problema del time jitter, il quale non si può presentare per il fatto che le gap sono così piccole.

Capitolo 8

Scintillatori

Studiamo adesso un'altra tipologia di rivelatori, i cosiddetti scintillatori. Essi sono dei materiali che emettono della luce (detta infatti luce di scintillazione) quando vengono attraversati da una radiazione. I fotoni che vengono emessi in questi materiali non sono tantissimi (o comunque quelli che riusciamo a raccogliere sono veramente pochi) e tipicamente vengono emessi nell'ultravioletto. Alla base di uno scintillatore abbiamo quindi l'emissione di questo flash di luce che ha una durata veramente breve (potrebbe durare anche pochi nanosecondi) e che deriva da transizioni di elettroni, quindi da disecceziazioni degli atomi di questo materiale. Vedremo che, a seconda del tipo di materiale, queste transizioni avvengono tra livelli diversi.

In questo caso ciò che produce un segnale è la raccolta di questa luce. La raccolta di questo segnale in luce ci può dare informazioni sulle particelle, ad esempio sull'energia che è stata depositata da una particella, ma a volte anche sul tipo di particella.

Storicamente, anche se si conoscevano le proprietà di questi materiali, non furono subito applicati nel campo della rivelazione, o comunque non presero particolare piede, bensì venivano sempre utilizzati i rivelatori a gas. Ciò era dovuto ad una semplice questione pratica: questa luce di scintillazione, che è una luce abbastanza fioca ed è pure impercettibile all'occhio umano, veniva inizialmente visualizzata in ambienti scuri attraverso un microscopio. Era quindi una visualizzazione manuale, dunque per niente comoda, pertanto era utilizzata per scopi dimostrativi piuttosto che per scopi di vere e proprie misure. Non appena si svilupparono i primi fotosensori elettronici, strumenti in grado di misurare della luce anche molto debole e trasformarla in un segnale elettrico, gli scintillatori presero il sopravvento diventando i rivelatori più adoperati.

Esistono diversi tipi di scintillatori, inoltre sono dei materiali che possono essere lavorati in diverse forme dato che ci sono diverse tecniche per la produzione di questi, persino tecniche di estrusione che consistono nel creare degli stampi che si riempiono di questa sostanza ad alta temperatura in forma liquida, la quale poi viene fatta raffreddare ottenendo così lo scintillatore di forma desiderata.

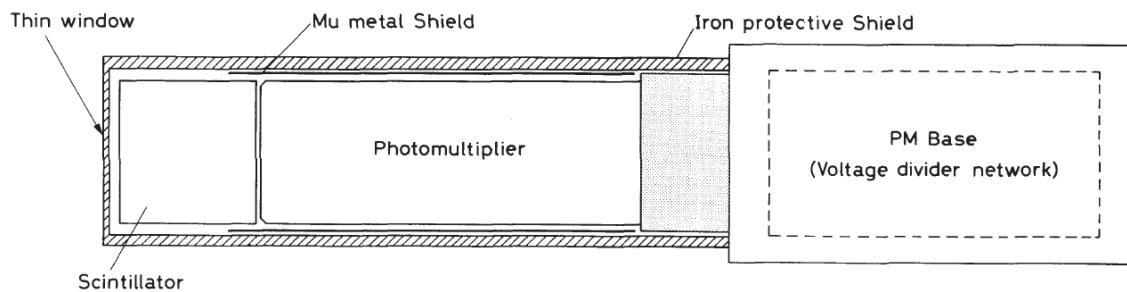
8.1 Caratteristiche di uno scintillatore

In generale, il segnale del rivelatore a scintillazione è in grado di fornire una varietà di informazioni. Purtroppo nessuno scintillatore possiede contemporaneamente tutte le proprietà, quindi la scelta di un particolare tipo rispetto ad un altro dipende da

vari fattori, e dalla particolare applicazione che richiede di ottimizzare una di queste caratteristiche. Tra le sue caratteristiche più rilevanti ci sono:

- *Sensibilità all'energia*: Al di sopra di una certa energia minima, la maggior parte dei rivelatori a scintillazione si comporta in modo quasi lineare rispetto all'energia depositata, ossia l'emissione di luce di uno scintillatore è direttamente proporzionale all'energia eccitante, cioè all'energia che viene depositata nel materiale e questo è utile perché ci permette di capire quanta energia ha depositato la particella¹;
- *Risposta temporale rapida*: I rivelatori a scintillazione sono strumenti rapidi, nel senso che i loro tempi di risposta e recupero sono brevi rispetto ad altri tipi di rivelatori. Questa risposta più rapida permette, ad esempio, di ottenere informazioni temporali con maggiore precisione, ossia la differenza di tempo tra due eventi. Inoltre, il breve tempo di recupero consente ai rivelatori a scintillazione di accettare tassi di conteggio più elevati, poiché il tempo morto, ossia il tempo perso in attesa del recupero dello scintillatore, è ridotto. Ecco perché sono rivelatori che possono essere utilizzati per il timing, cosa che invece non è quasi mai vera nel caso dei rivelatori a gas, in quanto quest'ultimi tipicamente sono rivelatori abbastanza lenti a causa del fatto che i processi che intervengono richiedono una raccolta del segnale che può durare anche centinaia di microsecondi, quindi non li possiamo definire rivelatori veloci a meno che non adoperiamo particolari rivelatori come l'MRPC;
- *Discriminazione della forma dell'Impulso*: Con certi scintillatori, è possibile distinguere tra diversi tipi di particelle analizzando la forma degli impulsi di luce emessi. Questo è dovuto all'eccitazione di diversi meccanismi di fluorescenza da parte di particelle con diverso potere ionizzante. La tecnica è nota come Pulse Shape Discrimination e sarà discussa in maggior dettaglio più avanti in questo capitolo.

Vediamo adesso la struttura base di un rivelatore a scintillazione:



Ogni rivelatore basato su scintillatore prevede una parte sensibile di rivelazione, costituita da un blocco di scintillatore, che viene collegato ad un fotosensore, ossia un sensore in grado di misurare questa luce e tradurla in un segnale elettrico che poi può essere inviato in un opportuno sistema di acquisizione.

¹Infatti di norma tali materiali vengono collegati ad un fotomoltiplicatore, e poiché è anch'esso un dispositivo lineare (quando utilizzato correttamente!), l'ampiezza del segnale elettrico finale sarà anch'essa proporzionale a questa energia. Questo rende lo scintillatore adatto come spettrometro di energia, anche se non è lo strumento ideale per questo scopo.

8.1.1 Proprietà ideali di uno scintillatore

- Alta efficienza di scintillazione (conversione in luce dell'energia depositata con resa fotoni/MeV elevata).

Idealmente vogliamo avere un'alta efficienza di scintillazione, il che vuol dire che se una particella deposita energia, vorremmo che questa energia venisse sfruttata al meglio per produrre fotoni di scintillazione, quindi vorremmo produrre il maggior numero di fotoni in corrispondenza di una data quantità di energia depositata. Tale caratteristica viene quantificata dalla resa in luce, la quale rappresenta il numero di fotoni che vedono prodotti per ogni MeV di energia depositata;

- Resa in luce proporzionale all'energia depositata.

Vorremmo anche che la resa in luce fosse proporzionale all'energia depositata, perché in questo modo lo scintillatore può funzionare da rivelatore che misura l'energia della particella depositata;

- Spettro della luce di scintillazione adatto ad essere rivelato da opportuni fotosensori. La luce prodotta dagli scintillatori viene normalmente negli UV, ma non è sempre così: a volte può essere prodotta una luce sul violetto, ma addirittura anche sul verde o sul rosso, quindi in realtà ogni materiale ha un caratteristico spettro di emissione che ha un'importanza fondamentale perché questa luce deve essere raccolta, dunque è necessario avere un sensore adatto alla luce che viene emessa, altrimenti avremmo un sistema inefficiente perché non siamo in grado di misurare questa luce. Quindi è fondamentale che lo spettro di emissione sia il più possibile vicino alla finestra di lunghezze d'onda a cui il fotosensore è sensibile, quindi bisogna individuare un accoppiamento ottimale in termini di lunghezze d'onda;

- Trasparenza alla luce emessa (lunghezza di assorbimento elevata).

Lo scintillatore deve essere trasparente alla luce che emette. Ciò significa che la luce emessa non deve essere riassorbita, perché sennò viene persa. Ciò normalmente si realizza attraverso il droggaggio dei materiali scintillanti.

In termini delle caratteristiche dello scintillatore, questo aspetto equivale a dire che la lunghezza di assorbimento deve essere elevata, dunque la luce che viene emessa deve percorrere lunghi tragitti prima di essere assorbita;

- Risposta veloce (tempi di decadimento piccoli).

Non tutti gli scintillatori godono di questa proprietà, però ce ne sono alcuni che effettivamente hanno una risposta molto veloce e questo ci aiuta non solo per il timing, ma anche per avere delle frequenze di conteggi elevate perché più è breve il segnale prima il rivelatore sarà pronto per misurare una nuova radiazione, per cui possiamo avere anche delle frequenze di conteggio elevate;

- Indice di rifrazione simile a quello del vetro ($n \sim 1.5$)

Ciò è legato al fatto che il rivelatore a scintillazione è sempre costituito dallo scintillatore più il fotosensore, ma non sempre le dimensioni di questi due oggetti sono comparabili, dunque non possiamo semplicemente accostarli l'un l'altro. Sorge pertanto l'esigenza di guidare la luce verso il fotosensore, quindi di creare una sorta di guida di luce che viene realizzata normalmente in plexiglass e che quindi deve avere un indice di rifrazione simile a quello dello scintillatore.

8.1.2 Tipologie di scintillatori

Come abbiamo già detto, esistono vari tipi di scintillatore, ognuno dei quali presenta una o più di queste caratteristiche. Sostanzialmente si dividono in due grandi categorie:

- Scintillatori organici, i quali sono composti da molecole contenenti atomi di carbonio, idrogeno e ossigeno. Possono essere di diverse tipologie, ad esempio potremmo avere dei cristalli organici puri, quindi dei materiali che presentano una struttura cristallina, oppure dei materiali amorfi come gli scintillatori plastici. Potremmo anche averli sotto forma di liquido, dunque si parla di liquidi organici;
- Scintillatori inorganici, i quali invece possono essere o dei cristalli, o scintillatori a gas o scintillatori a vetro.

8.2 La luminescenza

I materiali scintillatori presentano la proprietà nota come luminescenza. I materiali luminescenti, quando esposti a determinate forme di energia, ad esempio luce, calore, radiazioni, ecc., assorbono e rиемetttono l'energia sotto forma di luce visibile (o invisibile).

8.2.1 Cause di luminescenza

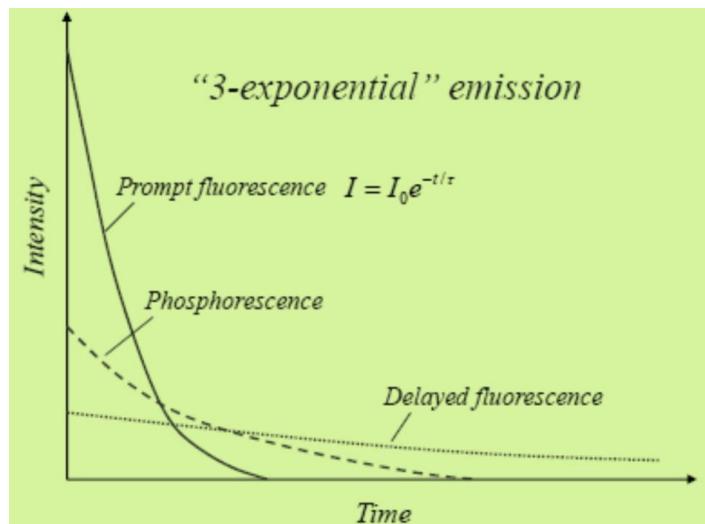
In generale, ci sono tanti materiali che subiscono questi fenomeni che definiamo di luminescenza, la quale si distingue a seconda del tipo di stimolo, perché per emettere della luce il materiale prima deve essere sollecitato, deve ricevere energia, e quindi a seconda della fonte di energia andiamo a distinguere diverse modalità di luminescenza. In base al tipo di stimolo con cui viene indotta la luminescenza, si parla di

- Fotoluminescenza quando il materiale viene stimolato dalla luce;
- Termoluminescenza se induciamo la luminescenza attraverso il calore²;
- Sonoluminescenza attraverso un'onda sonora;
- Elettroluminescenza attraverso energia elettrica;
- Triboluminescenza attraverso deformazioni meccaniche del materiale;
- Chemiluminescenza attraverso reazioni chimiche;
- Bioluminescenza attraverso organismi viventi, tipicamente quelli che vivono a vedere nel mare, e allora si parla di bioluminescenza.

²Un'applicazione di tale fenomeno sono le tecniche di datazione basate sulle termoluminescenze, che consistono nel far emettere materiali che hanno immagazzinato nel tempo elettroni in delle trappole i quali vengono poi liberati attraverso il riscaldamento del materiale. In base a quanta luce viene emessa si ricava il numero di elettroni che sono stati intrappolati nel tempo, deducendo così quanto tempo è trascorso e quindi si risale all'età del campione.

8.2.2 Il processo di scintillazione

Nel caso degli scintillatori il processo che avviene è la scintillazione, cioè emissione di fotoni a seguito di eccitazione di atomi o molecole che viene indotta da radiazione. Quindi il nostro stimolo è una radiazione che può essere una particelle o una radiazione γ . Se guardiamo in generale le caratteristiche della luce emessa per scintillazione possiamo distinguere diverse componenti:



In generale si nota che la luce emessa diminuisce nel tempo e lo fa esponenzialmente. In altre parole, l'evoluzione nel tempo del flash di luce prodotto ha un andamento esponenziale decrescente; inoltre la pendenza di questo esponenziale dipende dalle transizioni che hanno dato luogo a questa luce.

Possiamo evidenziare diverse componenti della luce emessa:

- Abbiamo una componente prompt, cioè veloce, che è la luce di fluorescenza. Questa viene emessa con tempi caratteristici molto brevi, come dimostra la pendenza maggiore nel grafico, esaurendosi in pochi nanosecondi. Questa è la componente più veloce e anche quella più importante poiché dà il contributo maggiore;
- Si possono avere anche fenomeni di fosforescenza, che tipicamente sono dei fenomeni più lenti, dell'ordine dei millisecondi o secondi. Tale fenomeno è tipico dei materiali che dopo essere stati illuminati continuano a emettere luce di fosforescenza anche dopo diversi secondi³;
- Si potrebbe avere anche una fluorescenza ritardata, cioè un'emissione con dei tempi caratteristici che sono ancora maggiori, ma hanno lunghezze d'onda simili a quelle della emissione di fluorescenza.

³Come dice il Leo, "Se la riemissione avviene immediatamente dopo l'assorbimento o, più precisamente, entro 10^{-8} s (che è all'incirca il tempo necessario per le transizioni atomiche), il processo viene solitamente chiamato fluorescenza. Tuttavia, se la riemissione è ritardata perché lo stato eccitato è metastabile, il processo è chiamato fosforescenza o luminescenza residua. In questi casi, il tempo di ritardo tra l'assorbimento e la riemissione può durare da pochi microsecondi a diverse ore, a seconda del materiale.".

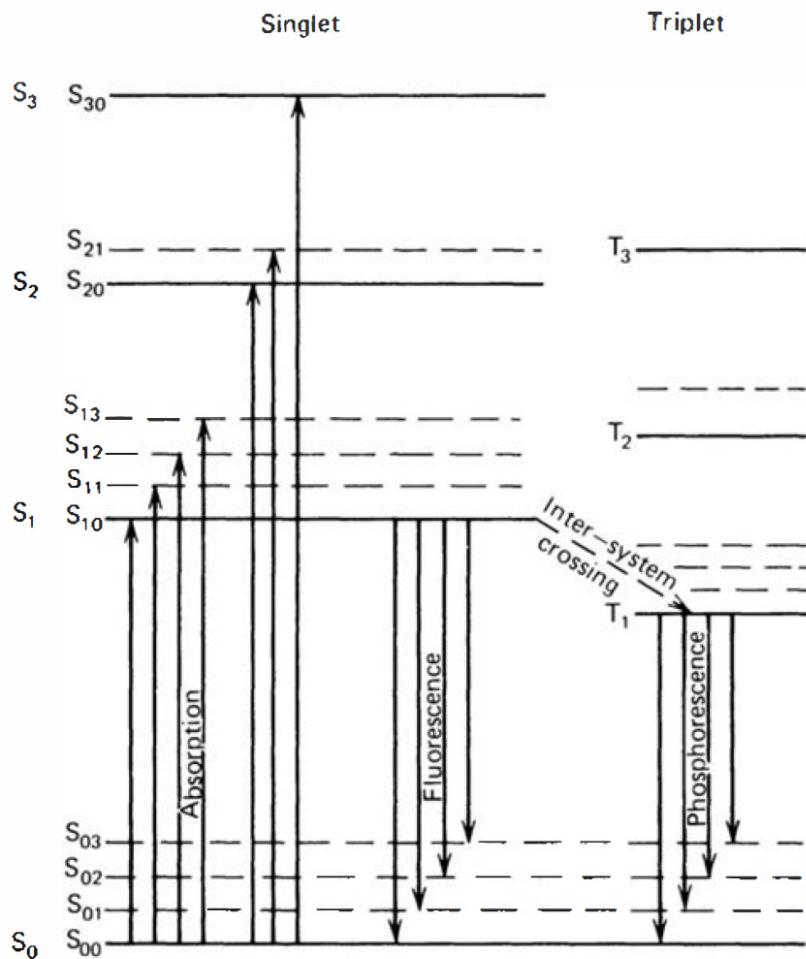
8.3 Scintillatori organici

8.3.1 Processo di scintillazione negli scintillatori organici

Cerchiamo di capire quali sono i principi attraverso cui abbiamo l'emissione di luce di scintillazione negli scintillatori organici.⁴

Osserviamo innanzitutto che questa luce di scintillazione è associata a transizioni di elettroni di valenza liberi, i quali sono degli elettroni che appartengono alla molecola ma non sono associati a uno specifico atomo di questa. Andiamo allora a vedere i livelli che può occupare un elettrone di questo tipo.

Una vasta categoria di scintillatori organici pratici è basata su molecole organiche con determinate proprietà di simmetria che danno origine a ciò che è noto come una struttura elettronica π . I livelli di energia elettronici π di una tale molecola sono illustrati nella seguente figura:



L'energia può essere assorbita eccitando la configurazione elettronica in uno qualsiasi dei numerosi stati eccitati. In figura è riportata una serie di stati di singoletto (spin

⁴La spiegazione dei fenomeni che portano alla produzione di luce sia negli scintillatori organici che in quelli inorganici è stata presa dal Knoll. Sebbene più approfondite, ho preferito riportare queste perché esposte in maniera più esaustiva.

totale pari a 0), etichettata come S_0, S_1, S_2, \dots ed è anche mostrato un insieme di livelli elettronici detti stati di tripletto (spin totale pari a 1), etichettati come T_1, T_2, T_3, \dots ⁵. Per le molecole di interesse come quelle degli scintillatori organici, il gap energetico tra S_0 e S_1 è di 3 o 4 eV, mentre lo spazio tra gli stati superiori è solitamente leggermente più piccolo. Ognuna di queste configurazioni elettroniche è ulteriormente suddivisa in una serie di livelli con spaziature molto più fini che corrispondono a vari stati vibrazionali della molecola, associati a tali moti. La spaziatura tipica di questi livelli è dell'ordine di 0,15 eV. Spesso viene aggiunto un secondo pedice per distinguere questi stati vibrazionali, e il simbolo S_{00} rappresenta lo stato vibrazionale più basso dello stato elettronico fondamentale.

Poiché lo spazio tra gli stati vibrazionali è grande rispetto all'energia termica media (0,025 eV), quasi tutte le molecole a temperatura ambiente si trovano nello stato S_{00} . Nella figura di sopra l'assorbimento di energia da parte della molecola è rappresentato dalle frecce che puntano verso l'alto. Nel caso di uno scintillatore, questi processi rappresentano l'assorbimento di energia cinetica da una particella carica o da un γ che passa nelle vicinanze. Gli stati elettronici di singoletto superiori, che sono stati eccitati, vengono dissecchati rapidamente (in tempi dell'ordine di picosecondi) allo stato elettronico S_1 tramite un processo detto di conversione interna, nel quale gli elettroni scendono verso tale stato senza produzione di radiazione. Inoltre, qualsiasi stato con un'energia vibrazionale in eccesso (come S_{11} o S_{12}) non è in equilibrio termico con i suoi vicini e perde rapidamente quell'energia vibrazionale.

Pertanto, l'effetto netto del processo di eccitazione in un semplice cristallo organico è quello di produrre, dopo un periodo di tempo trascurabilmente breve, una popolazione di molecole eccitate nello stato S_{10} . La principale luce di scintillazione (o fluorescenza rapida) viene emessa nelle transizioni tra questo stato S_{10} e uno degli stati vibrazionali dello stato elettronico fondamentale. Queste transizioni sono indicate in figura dalle frecce rivolte verso il basso. Se τ rappresenta il tempo di decadimento della fluorescenza per il livello S_{10} , allora l'intensità della fluorescenza rapida in un istante t successivo all'eccitazione dovrebbe essere semplicemente

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Nella maggior parte degli scintillatori organici, τ è di pochi nanosecondi, e quindi la componente di scintillazione rapida è relativamente veloce.

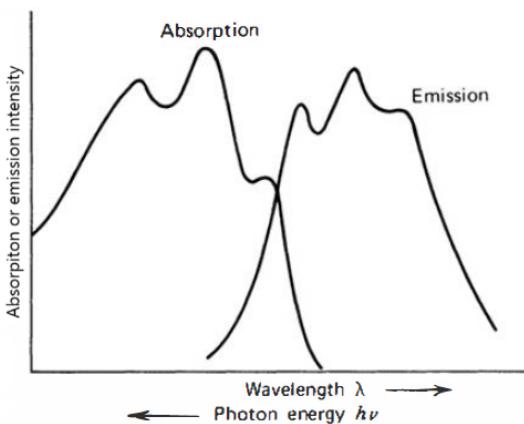
La vita media del primo stato di tripletto T_1 è caratteristicamente molto più lunga di quella dello stato singoletto S_1 . Attraverso una transizione chiamata "intersystem crossing", alcuni stati di singoletto eccitati possono essere convertiti in stati di tripletto. La vita media di T_1 può essere anche di 10^{-3} s, e la radiazione emessa in una dissecchazione da T_1 a S_0 è quindi un'emissione luminosa ritardata etichettata come fosforescenza. Poiché T_1 si trova sotto S_1 , la lunghezza d'onda di questo spettro di fosforescenza sarà maggiore rispetto a quella dello spettro di fluorescenza. Mentre si trovano nello stato T_1 , alcune molecole possono essere eccitate termicamente di nuovo nello stato S_1 e successivamente decadere tramite la fluorescenza normale. Questo processo rappresenta l'origine della fluorescenza ritardata talvolta osservata negli scintillatori organici.

⁵Queste due tipologie di stati sono state messe una accanto all'altra soltanto per evitare di creare confusione, ovviamente ciò che conta è la loro posizione rispetto alla direzione verticale, in cui è riportata l'energia.

8.3.2 Emissione e assorbimento

Lo schema dei livelli può essere utilizzato anche per spiegare perché gli scintillatori organici possono essere trasparenti alla propria emissione fluorescente. La lunghezza delle frecce rivolte verso l'alto corrisponde a quelle energie dei fotoni che saranno fortemente assorbite nel materiale. Poiché tutte le transizioni di fluorescenza rappresentate dalle frecce rivolte verso il basso (eccetto $S_{10} - S_{00}$, che è l'unico caso in cui la radiazione può essere riassorbita) hanno un'energia inferiore al minimo richiesto per l'eccitazione, c'è pochissima sovrapposizione tra gli spettri di assorbimento ottico e di emissione (spesso chiamata "spostamento di Stokes" o Stokes shift), e di conseguenza c'è poco auto-assorbimento della fluorescenza.

Possiamo vedere un esempio di questi spettri per uno scintillatore organico nel seguente grafico qualitativo, dove notiamo come lo spettro di emissione si trovi a lunghezze d'onda maggiori rispetto a quello in assorbimento:

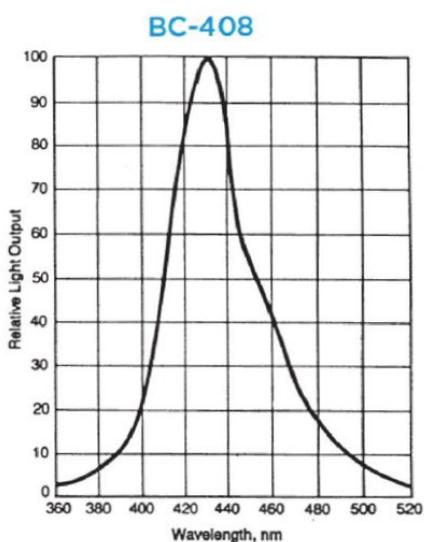


Il fatto che la luce assorbita si trovi per λ minori significa che le energie che vengono assorbite sono maggiori (in quanto $E = h\nu = \frac{c}{\lambda}$), in accordo con quanto detto prima.

Notiamo inoltre che tra i due spettri c'è un overlap, cioè una sovrapposizione. Ciò vuol dire che la luce emessa potrebbe essere riassorbita, però nella pratica si cerca di mantenere tale overlap il più piccolo possibile.

Esempio 8.1

Andiamo adesso a guardare uno spettro più quantitativo. In figura possiamo vedere lo spettro di uno scintillatore plastico:

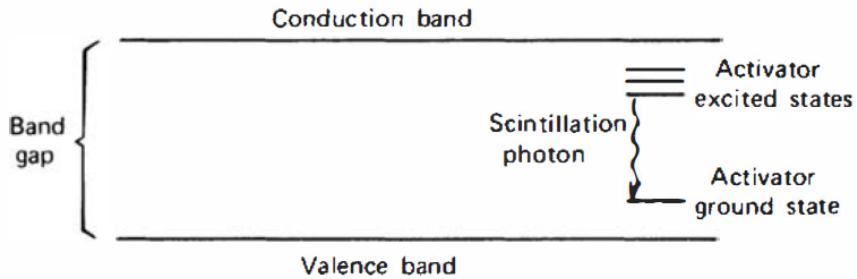


Il numero posto sopra è dovuto al fatto che, solitamente, per identificare tali scintillatori si adoperano delle sigle che derivano dalle case produttrici. Guardando i valori di lunghezza d'onda notiamo che ricadiamo nella regione a cavallo tra il violetto e l'ultravioletto, addirittura la coda destra del grafico cade verso la componente azzurra. Normalmente questi spettri di emissione presentano dei picchi, per cui spesso alcuni dati che si trovano nelle tabelle (ad esempio l'indice di rifrazione del materiale, il quale dipende dalla lunghezza d'onda) si riferiscono ai valori che si hanno in corrispondenza della lunghezza d'onda del picco.

8.4 Scintillatori inorganici

8.4.1 Meccanismo di scintillazione nei cristalli inorganici

Mentre per gli scintillatori organici l'emissione è legata a transizioni tra livelli della molecola, in quelli inorganici il meccanismo di scintillazione dipende dagli stati energetici determinati dal reticolo cristallino del materiale.



Come mostrato nella figura sopra, gli elettroni hanno a disposizione solo bande di energia discrete nei materiali classificati come isolanti o semiconduttori. La banda inferiore, chiamata banda di valenza, rappresenta quegli elettroni che sono essenzialmente legati ai siti del reticolo, mentre la banda di conduzione rappresenta quegli elettroni che hanno sufficiente energia per essere liberi di migrare attraverso il cristallo. Esiste una banda intermedia di energie, chiamata banda proibita, nella quale gli elettroni non possono mai essere trovati nel cristallo puro.

L'assorbimento di energia può provocare la promozione di un elettrone dalla sua posizione normale nella banda di valenza oltre il gap, fino alla banda di conduzione, lasciando una lacuna nella banda di valenza normalmente piena⁶. Nel cristallo puro, il ritorno dell'elettrone alla banda di valenza con l'emissione di un fotone è un processo inefficiente. Inoltre, le larghezze tipiche del gap sono tali che il fotone risultante avrebbe un'energia troppo elevata per rientrare nello spettro visibile.

Per aumentare la probabilità di emissione di fotoni visibili durante il processo di disecitazione, si aggiungono comunemente piccole quantità di impurità agli scintillatori inorganici. Queste impurità, chiamate *attivatori*, creano siti speciali nel reticolo in cui la normale struttura delle bande energetiche viene modificata rispetto a quella del cristallo puro. Di conseguenza, verranno creati stati energetici all'interno del gap proibito, attraverso i quali l'elettrone può disecitarsi ritornando alla banda di valenza. Poiché l'energia è inferiore a quella dell'intero gap proibito, questa transizione può ora dare origine a un fotone visibile e quindi costituire la base del processo di scintillazione. Questi siti di disecitazione sono chiamati centri di luminescenza o centri di ricombinazione. La loro struttura energetica nel reticolo cristallino ospite determina lo spettro di emissione dello scintillatore.

Una particella carica che attraversa il mezzo di rivelazione formerà un gran numero di coppie elettrone-lacuna create dalla promozione degli elettroni dalla banda di valenza

⁶La professoressa afferma che si tratta di un processo di ionizzazione. Tale fenomeno può essere visto in tal modo poiché implica la rimozione di un elettrone dal suo stato legato, creando una lacuna (carica positiva) e un elettrone libero nella banda di conduzione, ma è alquanto improprio perché l'elettrone non viene veramente liberato.

a quella di conduzione. La lacuna positiva si sposterà rapidamente verso il sito di un attivatore e lo ionizzerà, poiché l'energia di ionizzazione dell'impurità sarà inferiore a quella di un sito tipico del reticolo. Nel frattempo, l'elettrone è libero di migrare attraverso il cristallo e lo farà fino a incontrare un tale attivatore ionizzato. A questo punto l'elettrone può cadere nel sito dell'attivatore, creando una configurazione neutra che può avere i propri stati energetici eccitati. Questi stati sono illustrati nella figura come linee orizzontali all'interno del gap proibito. Se lo stato dell'attivatore che si forma è una configurazione eccitata con una transizione consentita verso lo stato fondamentale, la sua disecitazione avverrà molto rapidamente e con alta probabilità di emissione di un fotone corrispondente. Se l'attivatore è scelto correttamente, questa transizione può avvenire nel campo di energia visibile (cioè si produrrà luce visibile). I tempi di vita tipici per tali stati eccitati sono dell'ordine di 30-500 ns. Poiché il tempo di migrazione per l'elettrone è molto più breve, tutte le configurazioni di impurità eccitate si formano essenzialmente allo stesso tempo e successivamente si disecitteranno con l'emivita caratteristica dello stato eccitato. È quindi il tempo di decadimento di questi stati a determinare le caratteristiche temporali della luce scintillante emessa. Alcuni scintillatori inorganici possono essere adeguatamente caratterizzati da un singolo tempo di decadimento o da un semplice esponenziale, anche se spesso si osservano comportamenti temporali più complessi.

Esistono processi che competono con quello appena descritto. Ad esempio, l'elettrone, una volta arrivato al sito dell'impurità, può creare una configurazione eccitata la cui transizione allo stato fondamentale è proibita. Tali stati richiedono quindi un incremento aggiuntivo di energia per elevarli a uno stato più elevato da cui la disecitazione verso lo stato fondamentale è possibile. Una fonte di questa energia è l'eccitazione termica, e la componente lenta risultante della luce è chiamata fosforescenza. Spesso può essere una fonte significativa di luce di fondo o "afterglow" negli scintillatori.

Esiste una terza possibilità quando un elettrone viene catturato nel sito di un attivatore. Alcune transizioni senza radiazione sono possibili tra alcuni stati eccitati formati dalla cattura dell'elettrone e lo stato fondamentale, nel qual caso non si produce alcun fotone visibile. Tali processi sono chiamati quenching e rappresentano meccanismi di perdita nella conversione dell'energia della particella in luce di scintillazione.

In alternativa alla migrazione indipendente dell'elettrone e della lacuna descritta sopra, la coppia può invece migrare insieme in una configurazione vagamente associata, nota come eccitone⁷. In questo caso l'elettrone e la lacuna rimangono associati l'uno all'altra ma sono liberi di spostarsi attraverso il cristallo fino a raggiungere il sito di un atomo attivatore. Configurazioni di attivatori eccitati simili possono formarsi nuovamente e dare origine a luce di scintillazione durante la loro disecitazione verso la configurazione fondamentale⁸.

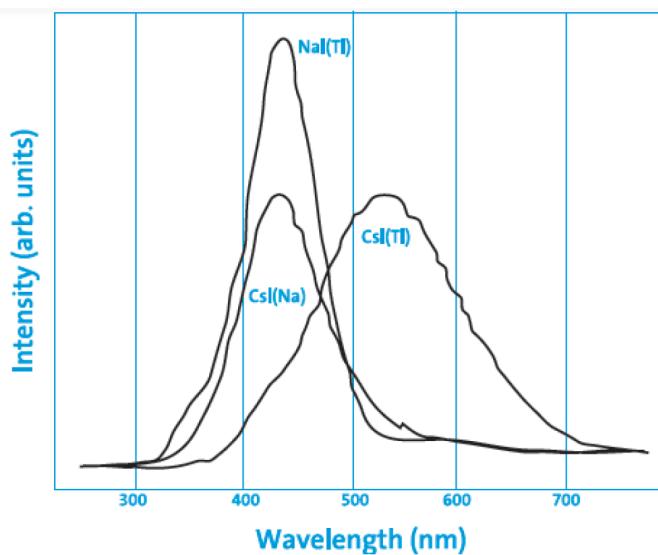
⁷Un eccitone si forma quando un elettrone viene eccitato, ma invece di essere completamente liberato nella banda di conduzione, rimane legato a una lacuna (buco) nella banda di valenza tramite forze di Coulomb. In questo stato, l'elettrone e la lacuna formano una coppia legata. L'eccitone ha energia inferiore rispetto a quella necessaria per liberare completamente l'elettrone nella banda di conduzione, e si trova tipicamente in una banda di ecciton appena sotto la banda di conduzione. In pratica, è una quasi-particella, una sorta di stato intermedio, dove l'elettrone e il buco si comportano come una coppia accoppiata anziché due particelle libere.

⁸Il processo è lo stesso del caso precedente: la lacuna strapperà un elettrone dall'atomo di impurità, solo che stavolta la lacuna non è libera bensì facente parte dell'eccitone.

Una conseguenza importante della luminescenza attraverso i siti degli attivatori è il fatto che il cristallo può essere trasparente alla luce di scintillazione. Nel cristallo puro, occorrerebbe approssimativamente la stessa energia per eccitare una coppia elettrone-lacuna di quella liberata quando la coppia si ricombina. Di conseguenza, gli spettri di emissione e di assorbimento si sovrapporrebbero e ci sarebbe un'assorbimento consistente da parte dello stesso materiale (self-absorption). Tuttavia, come abbiamo visto, l'emissione da un cristallo attivato avviene in un sito dell'attivatore, dove la transizione energetica è inferiore a quella rappresentata dalla creazione della coppia elettrone-lacuna. Di conseguenza, lo spettro di emissione è spostato verso lunghezze d'onda più lunghe e non sarà influenzato dalla banda di assorbimento ottico della maggior parte del cristallo.

Esempio 8.2

In figura sono mostrati gli spettri di emissione di diversi scintillatori inorganici:



Nelle varie sigle l'elemento tra parentesi indica l'elemento utilizzato per drogare il cristallo, ad esempio in laboratorio adopereremo uno scintillatore a NaI(Tl), cioè costituito da un cristallo di ioduro di sodio drogato con tallio, di cui possiamo vedere lo spettro.

In figura sono riportati anche gli spettri dello ioduro di cesio, in un caso drogato con il tallio e nell'altro con il sodio. Notiamo come in base al tipo di droggaggio cambia lo spettro di emissione, quindi cambiano le caratteristiche dello scintillatore.

8.4.2 Vantaggi degli scintillatori inorganici rispetto a quelli inorganici

Gli scintillatori organici, cioè quelli composti da carbonio, ossigeno e idrogeno, hanno il vantaggio di avere un'emissione molto veloce, quindi sono dei rivelatori che vengono adoperati nel timing. Tuttavia, a causa della densità e del numero atomico non troppo elevati, essi non hanno una resa in luce particolarmente grande perché lo stopping power è più piccolo, per cui una particella che entra non perde tantissima energia. Viceversa, gli scintillatori inorganici hanno il vantaggio di avere una resa in luce elevata

perché hanno tipicamente delle densità notevoli e un elevato numero atomico, dunque un elevato stopping power. Ciò è molto utile per la rivelazione dei γ , quindi quando si vuole fare spettroscopia γ , dove è importante che il γ interagisca, quindi è importante un elevato Z , si utilizzano questi scintillatori.

D'altra parte, gli scintillatori inorganici hanno una risposta temporale abbastanza scarsa, perché spesso i segnali sono molto lunghi, quindi la luce viene emessa anche in centinaia di nanosecondi. Un altro spetto negativo è il fatto che molti materiali sono igroscopici⁹, quindi risentono dell'umidità. Ciò fa sì che essi debbano necessariamente essere racchiusi all'interno di un materiale ermetico per proteggerli dall'umidità.

Esempio 8.3: Esempi di scintillatori inorganici

Vediamo adesso quali sono le caratteristiche che si vanno a vedere quando si deve scegliere uno scintillatore:

Crystal	NaI:Tl	CsI:Tl	CsI:Na	CsI	BaF ₂	CeF ₃	BGO	PWO:Y	LSO/LYSO
Density (g/cm ³)	3.67	4.51	4.51	4.51	4.89	6.16	7.13	8.3	7.40
Melting Point (°C)	651	621	621	621	1280	1460	1050	1123	2050
Radiation Length (cm)	2.59	1.86	1.86	1.86	2.03	1.70	1.12	0.89	1.14
Molière Radius (cm)	4.13	3.57	3.57	3.57	3.10	2.41	2.23	2.00	2.07
Interaction Length (cm)	42.9	39.3	39.3	39.3	30.7	23.2	22.8	20.7	20.9
Refractive Index ^a	1.85	1.79	1.84	1.95	1.50	1.62	2.15	2.20	1.82
Hygroscopicity	Yes	Slight	Yes	Slight	No	No	No	No	No
Luminescence ^b (nm) (at Peak)	410	550	420	420	300	340	480	425	402
Decay Time ^b (ns)	245	1220	690	30 6	650 0.9	30	300	30 10	40
Light Yield ^{b,c}	100	165	88	3.6 1.1	36 4.1	7.3	21	0.30 0.077	85
dLY/dT ^{b,d} (%/°C)	-0.2	0.4	0.4	-1.4	-1.9 0.1	~0	-0.9	-2.5	-0.2

a At the wavelength of the emission maximum.

b Top line: slow component, bottom line: fast component.

c Relative light output with QE of the readout device taken out for samples of 1.5 X_0 .

d At room temperature (20°C).

- Dalla tabella vediamo che la densità di tali materiali è abbastanza elevata, andando da 3.67 g/cm³ per lo ioduro di sodio a 8.3 g/cm³ per il tungstato di piombo.
- Sono inoltre riportate lunghezza di radiazione e raggio di Moliere: tali grandezze ci interessano perché se vogliamo misurare γ , dobbiamo tenere a mente che è possibile che all'interno del rivelatore si sviluppino sciami eletromagnetici, dunque è importante conoscere queste caratteristiche del materiale per capire quale sono le energie che vengono contenute all'interno. Viene riportata anche la lunghezza di interazione, ossia lo spazio percorso prima di avere un'interazione all'interno del mezzo.
- Vediamo poi che l'indice di rifrazione assume sempre un valore non troppo lontano da quello del vetro, molto fondamentale.

⁹L'igroscopia (o igroscopicità) è la capacità di una sostanza o di materiali di assorbire prontamente le molecole d'acqua presenti nell'ambiente circostante.

- Abbiamo poi il tempo di decadimento, ossia la pendenza dell'esponenziale decrescente del grafico dell'emissione. Essa ci dice quanto è stata veloce l'emissione di questa luce e viene espressa in nanosecondi. Notiamo che a volte vengono riportati due valori, in quanto uno è relativo alla componente veloce e l'altro alla componente lenta. Spesso viene presa in considerazione soltanto la componente veloce perché quella lenta è quasi sempre trascurabile, quando viene riportata è perché evidentemente non può essere trascurata.
- È riportata la Light Yield ovvero la resa in luce, ossia il numero di fotoni prodotti per ogni Mev. Precisiamo che in realtà nella tabella è espressa in maniera un po' diversa, in quanto spesso si prende lo ioduro di sodio come materiale di riferimento e si pone la sua resa pari a 100, in modo da esprimere tutte le altre rese rispetto a questa, per cui ad esempio lo ioduro di cesio emette più luce di un fattore 1,65 rispetto allo ioduro di sodio. Sono rese molto elevate, in generale la resa di uno scintillatore può raggiungere anche valori di 10.000 fotoni per MeV. Ciò ha un'importanza per la risoluzione in energia, perché più fotoni vengono prodotti, più elevato il segnale e migliore sarà la risoluzione. Il concetto è simile a quello visto per i rivelatori a gas, in cui andiamo a vedere il numero di coppie: allo stesso modo, in uno scintillatore la risoluzione è determinata da quanti fotoni vengono emessi, dunque maggiore sarà il numero di questi, migliore sarà la risoluzione in energia. In generale quindi gli scintillatori inorganici hanno risoluzioni migliori.

Esempio 8.4: Alcuni esempi di scintillatori plastici

Vediamo adesso alcuni valori riferiti a scintillatori plastici, quindi di tipo organico:

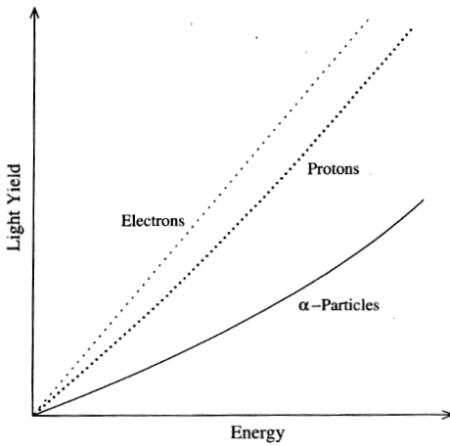
	BC404	BC418	BC420	BC422
Light Yield (% Anthracene)	68	67	64	55
Rise time (ns)	0.7	0.5	0.5	0.35
Decay time (ns)	1.8	1.4	1.5	1.6
Wavelength peak (nm)	408	391	391	370
Attenuation length (cm)	140	100	110	8
Measured resolution (ps)	-	48	51	43

Vediamo che rispettato agli scintillatori organici i tempi di emissione sono molto più rapidi, dell'ordine di alcuni nanosecondi. Inoltre in questo caso la light yield viene riportata in percentuale rispetto a quella dell'antracene.

8.5 Risposta in luce

Abbiamo detto che, a patto che il numero di fotoni prodotti sia proporzionale all'energia depositata, in linea di principio la risposta in luce può fornire un'idea della quantità di energia depositata. Ciò in media è vero, ma non sempre è così: a volte parte dell'energia non viene utilizzata per produrre fotoni, bensì viene persa attraverso dei processi non radiativi che fanno sì che la risposta in luce non sia esattamente lineare. Addirittura, nel caso di particelle cariche pesanti, la linearità non è verificata. Possiamo vedere tale

effetto nel seguente grafico, dove viene riportata la resa in luce per uno scintillatore plastico (NE – 102) in funzione dell'energia:



Notiamo che abbiamo una dipendenza dal tipo di particelle, quindi a parità di energia depositata la luce emessa dipende dal tipo di particella, ad esempio se è stata depositata da un elettrone verrà emessa più luce rispetto a quanta ne verrebbe emessa se l'energia venisse depositata da un protone. Nel grafico è riportato anche l'andamento per le particelle cariche passanti, da cui si evince che in tal caso la linearità non è assicurata.

8.5.1 Relazione di Birks

La resa in luce degli scintillatori organici rispetto all'energia depositata dalle particelle cariche, cioè il numero di fotoni che vengono prodotti in base all'energia che viene depositata, può essere meglio descritta da una relazione tra dL/dx , l'energia fluorescente emessa per unità di lunghezza del percorso, e dE/dx , cioè la perdita specifica di energia per la particella carica.

Se non si verificano particolari fenomeni o effetti secondari, è lecito aspettarsi una relazione lineare del tipo

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{dE}{dx}$$

dove il fattore di proporzionalità S rappresenta un'efficienza massima di scintillazione, che sostanzialmente va a stabilire la pendenza della curva vista nella figura precedente. Tuttavia, a volte intervengono degli effetti secondari e non radiativi (detti effetti di quenching) che rendono la relazione più complicata. Una relazione semi-empirica ampiamente utilizzata, proposta per la prima volta da Birks, si basa sull'assunzione che un'alta densità di ionizzazione lungo il percorso della particella porti al quenching dovuto a molecole danneggiate e a una riduzione dell'efficienza di scintillazione. Se assumiamo che la densità delle molecole danneggiate lungo la scia della particella sia direttamente proporzionale alla perdita di energia, possiamo rappresentare la loro densità con $B dE/dx$, dove B è una costante di proporzionalità. Birks assunse che una certa frazione k di queste molecole provocherà il quenching. Assumendo come abbiamo detto che in assenza di quenching l'emissione luminosa sia proporzionale alla perdita di energia, questo modello afferma che l'emissione luminosa per unità di lunghezza, dL/dx , è correlata alla perdita di energia specifica da

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}}$$

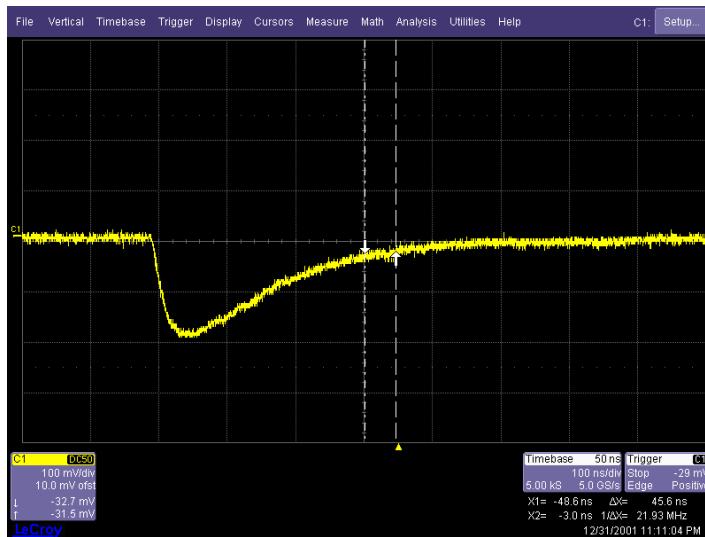
Il termine kB è un parametro che viene ricavato da dati sperimentali, ecco perché la relazione è detta semi-empirica.

In definitiva, ci aspettiamo che a causa di questi effetti non radiativi la relazione perfettamente lineare non venga sempre mantenuta.

8.5.2 Risposta temporale

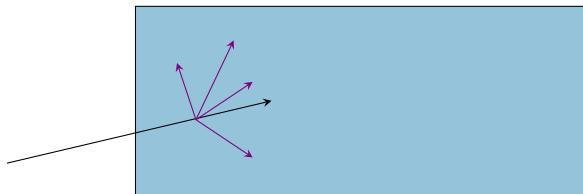
Che segnale ci aspettiamo che venga prodotto in uscita da uno scintillatore?

Noi non possiamo vedere il segnale in luce: quello che andiamo a vedere è un segnale elettrico che viene prodotto da un fotosensore, le cui caratteristiche dipendono dall'elettronica e dal tipo di sensore; in generale però ci aspettiamo una forma di questo tipo:



Si tratta di un segnale analogico, in quanto siamo interessati a quanta luce è stata prodotta e quindi il segnale deve avere un'ampiezza proporzionale al numero di fotoni prodotti. Normalmente sono segnali che hanno una durata molto breve, con tempi di discesa di decine di nanosecondi e una durata che dipende dall'elettronica.

8.6 La raccolta della luce



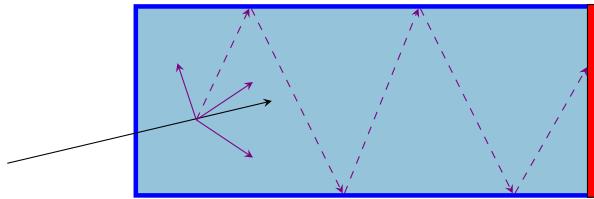
Quando una particella attraversa lo scintillatore, i fotoni di scintillazione prodotti vengono emessi in tutte le direzioni, per cui se non ricoprissimo le pareti dello scintillatore con qualche materiale nel momento in cui i fotoni raggiungono il bordo dello scintillatore essi subirebbero rifrazione e fuoriuscirebbero, e ciò significherebbe perderli.¹⁰

¹⁰Piccola curiosità: la prof La Rocca lavorò col padre di Marco Russo, il quale diceva sempre che "I fotoni sono bastardi" perché escono e anche una leggerissima crepa nella copertura comporta delle perdite notevoli in termini di raccolta della luce.

Emergono quindi due necessità:

1. Cercare di evitare che questi fotoni fuoriescano dal rivelatore;
2. Cercare di convogliare i fotoni in una piccola regione dove andiamo a posizionare il fotosensore.

Quello che si fa tipicamente è rivestire le pareti dello scintillatore con un materiale possibilmente riflettente eccetto la parete/la zona dove si va a posizionare il fotosensore:



La copertura degli scintillatori non serve quindi soltanto per proteggerlo dall'umidità, ma anche per permettere alla luce di essere riflessa in modo da arrivare al fotosensore. Oltre che tramite l'uscita attraverso i bordi dello scintillatore, si può avere una perdita di luce anche attraverso l'assorbimento da parte del materiale dello scintillatore, la quale è detta self-absorption. Quest'ultimo effetto è rilevante quando le dimensioni del rivelatore sono tali che le lunghezze totali dei cammini percorsi dai fotoni sono paragonabili alla lunghezza di attenuazione, la quale è un parametro definito come quella lunghezza dopo la quale l'intensità luminosa è ridotta di un fattore e^{-1} . L'intensità luminosa in funzione della lunghezza percorsa è quindi:

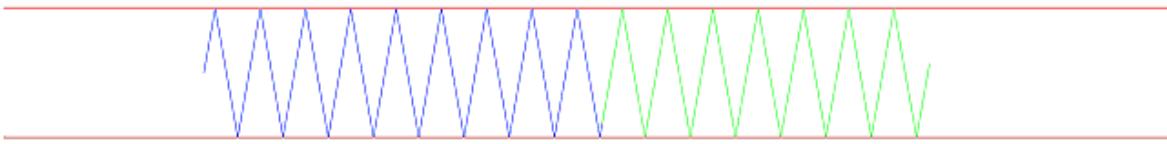
$$L(x) = L_0 e^{-x/\lambda}$$

dove λ è la lunghezza di attenuazione, x è la lunghezza del cammino percorso dalla luce e L_0 l'intensità luminosa iniziale. Poiché una tipica lunghezza di attenuazione è dell'ordine di 1 m o più, è chiaro che solo i rivelatori molto grandi ne sono influenzati. Bisogna comunque stare attenti perché chiaramente, in base allo schema visto sopra, i fotoni potrebbero percorrere tramite le riflessioni spazi molto lunghi e quindi alla fine essere assorbiti anche in rivelatori piccoli.

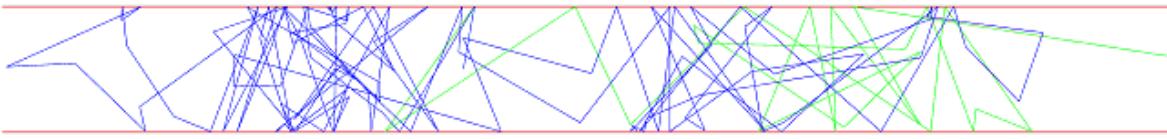
Inoltre potremmo avere anche effetti di assorbimento nelle pareti, cioè il materiale introdotto per avere riflessione potrebbe essere soltanto parzialmente riflettente e quindi c'è una piccola probabilità che un fotone venga assorbito anziché essere riflesso. Per quantificare tale effetto si definisce il coefficiente di riflettività, il quale va da 0 a 1 e che stabilisce la probabilità di avere riflessione o assorbimento.

Fino ad ora abbiamo immaginato che la riflessione fosse perfettamente speculare¹¹. A volte però si preferisce utilizzare dei materiali che provocano riflessione diffusa piuttosto che speculare, i quali tipicamente hanno una superficie rugosa. Ciò deriva dal fatto che, poiché la superficie non è perfettamente piana, l'angolo di incidenza dipenderà dall'inclinazione del particolare punto che viene colpito, causando uno schema molto più disordinato rispetto ad una riflessione speculare.

¹¹La riflessione speculare consiste nella riflessione osservata quando un singolo raggio incidente che forma un angolo ϑ_i con la normale produce un singolo raggio riflesso con angolo ϑ_r rispetto alla normale con il verificarsi dell'uguaglianza $\vartheta_i = \vartheta_r$.



Riflessione speculare.



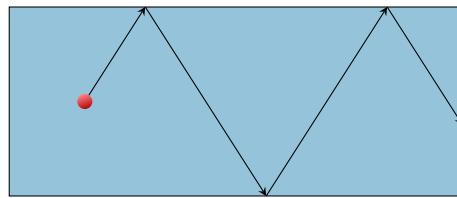
Riflessione diffusa.

A volte vengono utilizzati dei materiali diffusivi come vernici bianche, ma anche sostanze come il biossido di titanio o il teflon. Il motivo è che un materiale bianco produce diffusione e può andare bene effettivamente per il nostro scopo.

8.6.1 Un esercizio di simulazione

Come abbiamo detto, uno dei problemi che possono insorgere è che questi fotoni potrebbero percorrere distanze molto grandi, con il rischio di perderne alcuni a causa dell'assorbimento. Questo purtroppo ha delle conseguenze anche sulla risoluzione temporale: finora ci siamo concentrati solo sui tempi di emissione della luce, che sono molto brevi, ma ora diventa importante anche il processo di raccolta. Se la luce deve percorrere lunghe distanze, è evidente che il segnale raccolto dal fotosensore potrebbe essere caratterizzato da tempi più lunghi rispetto a quelli considerati finora.

Bisogna allora stimare tale lunghezza percorsa. Per fare ciò possiamo realizzare una simulazione come segue: presa una regione di piano (ad esempio un rettangolo), estraiamo un punto a caso distribuito uniformemente dentro l'area del rettangolo, una direzione casuale (tra 0 e 360°) e facciamo propagare un raggio luminoso che per semplicità assumiamo muoversi con velocità $v = c$ facendolo riflettere specularmente sulle pareti, finché non arriva sul fotosensore. Dopodiché stimiamo in ciascun evento la lunghezza della traccia e costruiamo la distribuzione dei tempi impiegati a percorrere tale distanza.



È chiaro che idealmente, se il fotone si muovesse verso il fotosensore, avremmo tempi abbastanza brevi perché se ad esempio il rivelatore fosse lungo 30 centimetri impiegheremmo un nanosecondo a raccogliere tutta la luce. Nella realtà non è così: a seguito di queste riflessioni le distanze percorse possono essere molto diverse, per cui abbiamo una distribuzione delle distanza percorse e quindi una distribuzione dei tempi necessari a percorrerle. Questo rappresenta un problema soprattutto quando il rivelatore ha

geometrie particolari come ad esempio nel caso di bacchette di scintillatori, delle barre molto lunghe con una sezione piccola. Ecco perché in realtà ottimizzare un rivelatore di questo tipo risulta essere una procedura ostica, in quanto sebbene i processi di base siano semplici, a causa del comportamento dei fotoni si rischia di avere dei segnali troppo deboli.

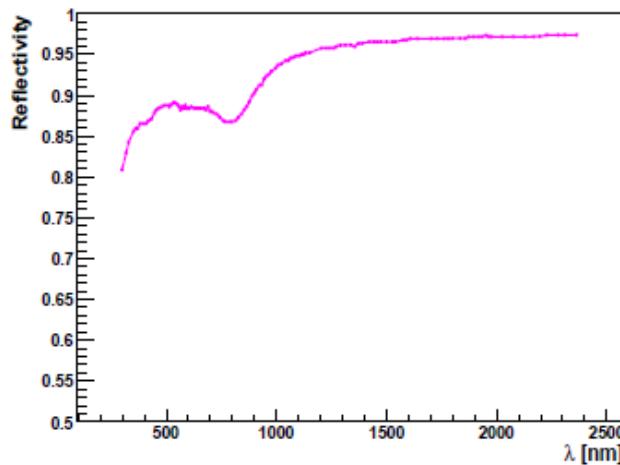
Quello che si può fare è studiare il comportamento del rivelatore e la raccolta di luce con dei simulatori professionali come ad esempio il simulatore GEANT4, il quale permette di seguire e di trasportare la luce nei materiali.

Se volessimo realizzare una simulazione in cui seguiamo il percorso dei diversi fotoni che vengono prodotti per scintillazione in un rivelatore, dovremmo definire tantissime informazioni, ad esempio dovremmo specificare:

- che tipo di luce viene emessa per scintillazione, quindi lo spettro di emissione dello scintillatore;
- il tempo di decadimento, quindi quanto tempo si impiega a emettere questa luce;
- l'assorbimento del materiale stesso, quantificato attraverso un coefficiente di assorbimento;
- le proprietà di riflessione del materiale che abbiamo posto sulle pareti;
- effetti di rifrazione quando si passa da un mezzo a un altro;
- il tipo di superficie di rivestimento, cioè se è una superficie perfettamente liscia o scabra;
- processi di scattering della luce e altri tipi di processi.

Esempio 8.5

Con tale simulatore è possibile studiare la riflettività ad opera della superficie alluminizzata (cioè riflettente) nel caso in cui essa sia dipendente dalla lunghezza d'onda anziché costante. L'andamento che si osserva è il seguente:

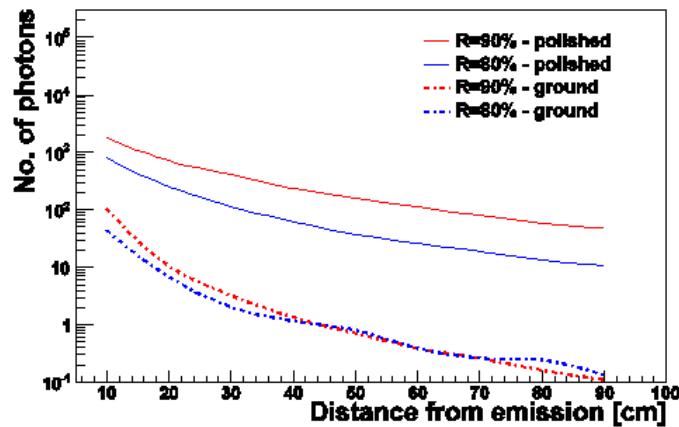


In particolare, ciò che si osserva che per la riflessione di luce emessa da uno scin-

tillatore, quindi tipicamente sui 400 nanometri, è che il coefficiente di riflettività varia parecchio, scendendo anche all'83-85%, fatto che è importante da tenere in conto perché cambiano notevolmente le prestazioni del rivelatore.

Esempio 8.6

Supponiamo di avere delle barre di lunghezza 1 m e di sezione all'incirca 1 cm^2 e di voler studiare il percorso della luce all'interno di questa barra con l'idea di raccogliere la luce all'estremità, quindi la luce che viene prodotta deve percorrere anche distanze di decine di centimetri per arrivare all'estremità in base a dove è stata prodotta, dunque a dove è passata la particella. Il grafico del numero di fotoni che riescono a percorrere una data distanza in base alle caratteristiche del rivelatore è il seguente:



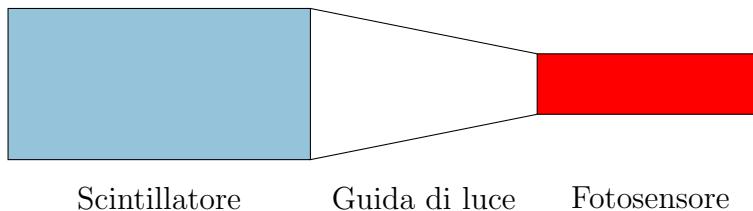
Nel grafico abbiamo due condizioni diverse di riflettività (90% e 80%) e due condizioni diverse di superficie, levigata o rugosa. Per entrambi i tipi di superficie, a seguito dell'assorbimento il numero di fotoni diminuisce esponenzialmente (da notare che la scala delle ordinate è logaritmica), mentre l'effetto della riflettività dipende dal tipo di superficie. In particolare, se la superficie è polished, cioè levigata, possiamo notare come la riflettività incida sensibilmente, tant'è che le due curve per i due regimi sono nettamente separate, mentre nel caso di superficie levigata gli effetti di riflettività contano di meno ma rispetto alla superficie levigata abbiamo una notevole diminuzione dei fotoni.

In questo modo otteniamo delle indicazioni attraverso le simulazioni anziché sperimentalmente, dunque possiamo poi passare all'apparato sperimentale soltanto per verificare quanto trovato.

8.6.2 Guide di luce

A volte può essere utile realizzare delle guide di luce, ovvero oggetti in plexiglass che facilitano l'accoppiamento tra lo scintillatore e il fotosensore. Questi due elementi potrebbero infatti avere geometrie differenti, oppure potrebbe essere necessario posizionare il rivelatore all'interno di un campo magnetico mentre il fotosensore, a causa delle sue

caratteristiche, non può funzionare in tale ambiente. Il motivo è che ad esempio il fotosensore potrebbe sfruttare campi elettrici o il movimento di particelle cariche che risentirebbero negativamente della presenza del campo magnetico. In questi casi, è necessario spostare il sensore fuori dal campo magnetico.



Queste guide trasportano dunque la luce verso il fotosensore. Tuttavia, ogni componente che aggiungiamo comporta perdita di fotoni. Come infatti si evince anche dalla figura sopra, non possiamo prendere tutti i fotoni e trasportarli su una superficie più piccola, perché in un certo senso il flusso di fotoni non è comprimibile, cioè non valgono le stesse regole che valgono ad esempio nel trasporto dei fluidi in un condotto, dove vale la conservazione della massa: qui al massimo possiamo trasportare una quantità di luce che è proporzionale al rapporto tra area del fotosensore e area dello scintillatore:

$$F = \frac{A_{\text{fotosensore}}}{A_{\text{scintillatore}}}$$

L'idea alla base delle guide di luce è quella di cercare di guidare il più possibile la luce attraverso delle geometrie opportune che facilitano il fenomeno della riflessione totale. Ci sono geometrie molto varie, esempi di geometrie in cui si accoppia uno scintillatore avente sezione rettangolare con un fotosensore di forma cilindrica sono i seguenti:

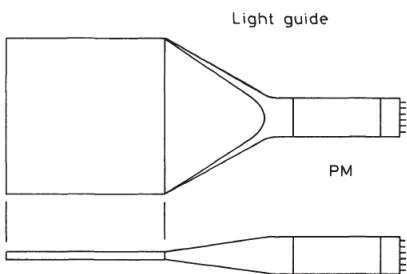


Fig. 9.6. Adapting a flat scintillator sheet to the circular face of a PM with a light guide

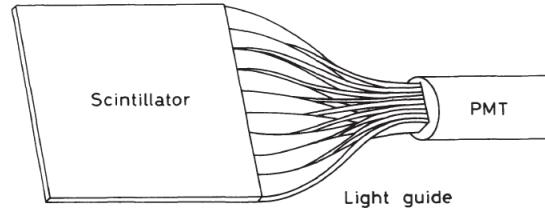
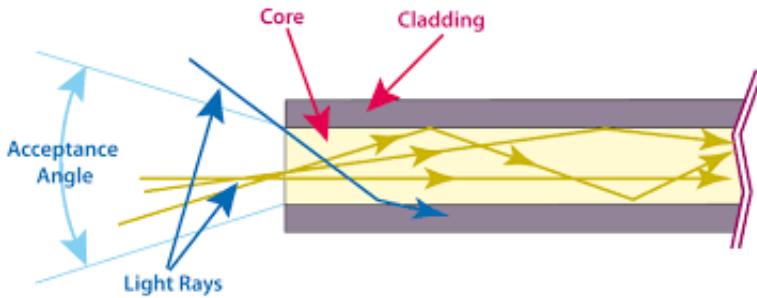


Fig. 9.7. The *twisted* light guide. Many strips of light guide material are glued on to the edge of the scintillator and then twisted 90° so as to fit onto the PM face

8.6.3 Fibre WLS

Nel caso in cui lo scintillatore abbia la forma di una lunga barra, dove posizioniamo il fotosensore? Potremmo pensare di posizionarlo agli estremi della barra, però ciò prevede che la luce venga trasportata fino all'estremità e abbiamo visto che c'è una notevole perdita di luce a seguito di diversi effetti. Un'alternativa potrebbe essere quella di utilizzare delle particolari fibre ottiche chiamate WaveLength Shifter fibers o fibre WLS. Esse sono delle fibre che assorbono un determinato range di lunghezze d'onda e lo riemettono a una lunghezza d'onda tipica, cioè spostano la lunghezza d'onda della luce. La loro caratteristica è che assorbono anche la luce che incide lateralmente.

Prima di parlare di queste, vediamo com'è composta una fibra ottica:

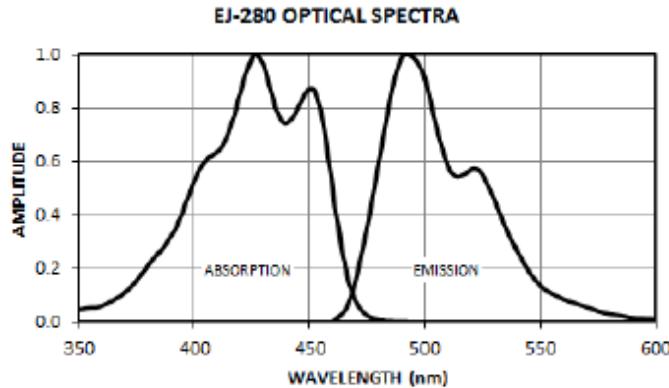


Essa è costituita da due cilindri concentrici, di cui il più interno prende il nome di core e costituisce il cuore della fibra con un determinato indice di rifrazione, mentre quello più esterno che circonda il primo prende il nome di cladding, che ha un diverso indice di rifrazione. Tali materiali sono tali che l'indice di rifrazione della parte interna è maggiore rispetto a quella della parte esterna: ciò fa sì che se la luce entra con un'opportuna angolazione può essere guidata attraverso la fibra ottica mediante riflessioni totali, la quale è permessa solamente se si passa da un indice di rifrazione maggiore a uno minore. Quindi l'idea è riuscire a guidare la luce anche in percorsi non rettilinei (dunque curvati) attraverso queste riflessioni totali.

Quello appena descritto è il principio di funzionamento della normale fibra ottica. La fibra WLS è un po' diversa perché la fibra ottica può trasportare la luce solamente se questa entra dalla sezione: in tal caso essa verrà guidata e uscirà dall'altro lato, mentre una luce che incide lateralmente non riesce ad entrare nella fibra perché subisce rifrazione e fuoriesce. Questa fibra invece ha la caratteristica di assorbire la luce, quindi anche la luce che incide lateralmente viene assorbita e poi riemessa alla lunghezza d'onda caratteristica. La luce che viene riemessa, siccome si trova all'interno della fibra, in automatico viene guidata verso l'esterno. Tale principio di funzionamento risulta molto utile, perché se distendiamo tale fibra all'interno dello scintillatore, essa sarà in grado di assorbire la luce emessa dallo scintillatore in quanto la luce colpirà la fibra lungo tutta la sua superficie esterna, riemettendola e quindi guidandola verso l'esterno, e a quel punto possiamo collegare un fotosensore all'esterno della fibra.

Come facciamo a incapsulare la fibra all'interno di una barra? Ci sono diverse tecniche, a volte con la tecnica dell'estrusione si può realizzare una barra che presenta al centro un foro dove far passare la fibra ottica, oppure sempre per estrusione si realizza una barra che presenta un solco sulla superficie su cui si posiziona la fibra ottica. Questa è una tecnica molto utile quando si ha a che fare con degli scintillatori di dimensioni molto estese, dove diventa difficile avere fotosensori estesi, quindi o si mettono tanti fotosensori che si devono far lavorare in coincidenza ma diventa complicato oppure si va a posizionare una fibra ottica WLS così da raccogliere la luce attraverso essa e il fotosensore si posiziona all'estremità delle fibre ottiche. Ciò è molto utile anche perché se ad esempio abbiamo due estremità possiamo posizionare solamente due rivelatori, li mettiamo in coincidenza (cioè si fa in modo che misuriamo solamente quando entrambi danno un segnale) perché se viene prodotta la luce e si incanala nella fibra ottica andrà verso entrambe l'estremità, quindi ci aspettiamo un segnale da entrambe le estremità e questo ci permette di ridurre gli eventi di rumore di fondo perché è improbabile che si abbia una coincidenza.

Per quanto riguarda lo spettro di assorbimento e quello di emissione, essi devono essere diversi: lo spettro di assorbimento si deve adattare allo scintillatore, quindi deve essere verso l'UV, lo spettro di emissione si deve adattare al fotosensore, il quale deve vedere questa luce.



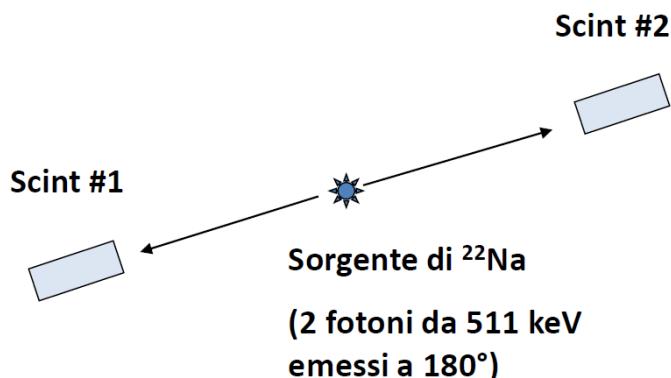
8.7 Rivelatori basati su scintillatori

I rivelatori basati su scintillatori vengono impiegati in diversi campi della fisica: fisica nucleare, astroparticellare, ma anche fisica applicata, in particolare nel campo medico.

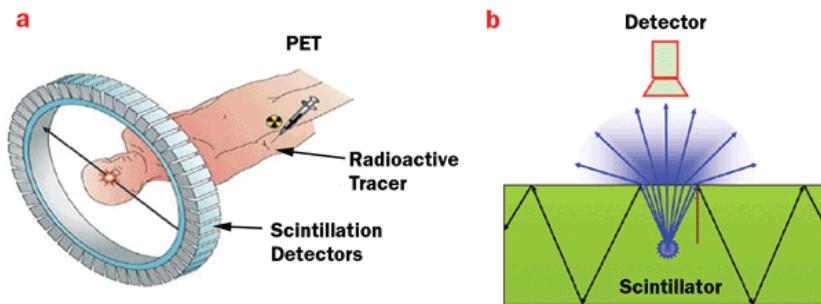
8.7.1 Un esempio di applicazione: la PET

Gli scintillatori vengono adoperati in esami diagnostici come la PET, la Positron Emission Tomography. Quest'esame diagnostico consiste nell'andare a misurare dei raggi γ che vengono emessi da un determinato punto e vengono emessi in coincidenza, cioè vengono emessi simultaneamente in direzione opposte.

Lo scopo della PET consiste nell'individuare l'eventuale presenza di cellule cancerogene, che sono tipicamente delle cellule che hanno un elevato consumo di glucosio. Nel paziente viene quindi iniettato un liquido che contiene del glucosio e un elemento tracciante, cioè un isotopo che tipicamente emette dei positroni e una volta emessi questi si annichilano e danno un luogo a due γ identici emessi a 180° .



Questo tracciante si concentra nelle zone ad alto metabolismo e quindi andando a ricostruire questi γ che vengono emessi si possono individuare delle zone dove c'è una maggiore emissione, quindi dove si è andato a concentrare questo tracciante. Chiaramente per ricostruire due γ a 180° bisogna avvolgere in qualche modo con una corona di rivelatori il paziente, quindi in una PET tipicamente si presentano delle strutture ad arco che sono costituite da scintillatori in grado di misurare questi γ in maniera tale che quando si osserva un segnale in coincidenza, quindi un segnale in una coppia di scintillatori opposti simultaneamente si può andare a ricostruire quella che è la direzione di arrivo dei γ e andando a tracciare tutti questi γ si può andare a individuare la sorgente da cui vengono emessi questi γ .



Nelle PET tradizionali di prima generazione questi scintillatori erano accoppiati a fotomoltiplicatori, dei fotosensori che avevano però lo svantaggio di non poter lavorare all'interno di campi magnetici, il che è limitante. Per questo motivo si è pensato di sostituire i fotomoltiplicatori con nuovi fotosensori di ultima generazione basati su materiali a stato solido.

Capitolo 9

Fotosensori

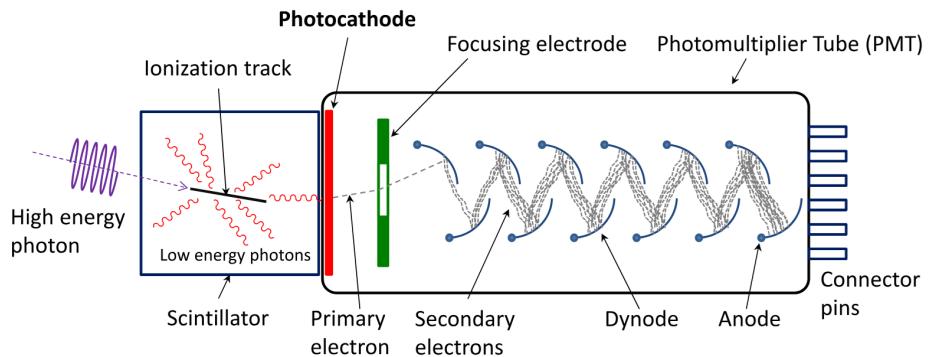
La luce di scintillazione prodotta in un mezzo dal passaggio di una radiazione può essere raccolta da opportuni fotosensori per produrre un segnale elettrico e dare informazioni sulla radiazione originaria. I fotosensori che devono essere accoppiati a uno scintillatore devono essere estremamente sensibili, quindi in grado di produrre un segnale elettrico anche quando vengono colpiti da pochi fotoni. Addirittura certe volte si parla di rivelatori a singolo fotone, quindi anche il singolo fotone può dar luogo a un segnale elettrico rivelabile. In questo capitolo andremo a vedere diverse tipologie di fotosensori, quali i fotomoltiplicatori ma anche rivelatori di più recente produzione come i diodi a valanga e i fotomoltiplicatori realizzati in silicio.

9.1 Fotomoltiplicatori

La prima tipologia di fotosensori che studieremo sono i fotomoltiplicatori.

9.1.1 Schema di funzionamento

Osserviamo come funziona un fotomoltiplicatore:



Quando arriva una radiazione che interagisce con lo scintillatore in un punto, viene emessa della luce e i fotoni, o attraverso delle riflessioni multiple o perché vengono emessi con la direzione giusta, arrivano alla finestra di ingresso del fotomoltiplicatore che prende il nome di fotocatodo, il quale non è altro che una superficie tipicamente vetrosa che viene rivestita di un materiale con un basso potenziale di estrazione in cui

pertanto può facilmente avvenire effetto fotoelettrico. In questo modo, un fotone che incide darà luogo ad effetto fotoelettrico e verrà emesso un elettrone. Quest'ultimo viene guidato verso una zona dove sono presenti degli elettrodi che prendono il nome di dinodi. È chiaro che l'elettrone viene guidato attraverso un campo elettrico, quindi questi dinodi vengono posizionati ad un potenziale via via crescente, cioè ogni dinodo ha un potenziale maggiore rispetto al precedente, in maniera tale che gli elettroni vengono guidati attraverso questa catena di dinodi.

L'elettrone che viene generato per effetto fotoelettrico, non appena incide sul primo dinodo, permette l'emissione di un certo numero di elettroni, in quanto viene ceduta dell'energia che serve ad estrarre altri elettroni dal primo dinodo; a questo punto tali elettroni vengono accelerati verso il secondo dinodo e ognuno di questi elettroni darà luogo, allo stesso modo, ad altri elettroni. Parliamo quindi di un meccanismo di moltiplicazione, in quanto per ogni dinodo un elettrone incidente può estrarre un certo numero di elettroni.

Tale processo avviene lungo tutta la struttura, quindi man mano il numero di elettroni emessi che viaggia attraverso la catena di dinodi aumenta attraverso una legge di potenza fino a quando arriva all'ultimo dinodo, che non è altro che l'anodo, da cui viene poi prelevato il segnale il quale è un segnale in carica, cioè una corrente, per cui si adopera una resistenza in modo da produrre un segnale in tensione che è quello che poi adoperiamo e che possiamo visualizzare all'oscilloscopio. Si tratta quindi di un segnale che in linea di principio dovrebbe essere proporzionale al numero di elettroni che sono stati generati da questo fotomoltiplicatore e questo numero di elettroni dipende da quanti fotoni hanno inciso sul fotomoltiplicatore, quindi da quanti fotoni sono stati prodotti durante il processo di scintillazione. In altre parole, si tratta di una catena che permette di mantenere una certa proporzionalità e quindi di avere in uscita un segnale che dà indicazioni sull'energia depositata all'interno dello scintillatore.

A causa di tale schema di funzionamento, il fotomoltiplicatore è un oggetto abbastanza esteso, in quanto dobbiamo avere una catena di dinodi che presenta delle geometrie particolari tali da poter guidare gli elettroni attraverso i dinodi ed inoltre questi devono avere delle forme caratteristiche. Ecco perché si chiama fotomoltiplicatore, perché non solo è un rivelatore di fotoni ma in più è un moltiplicatore, quindi da un singolo elettrone che corrisponde alla rivelazione di un fotone si produce una cascata di elettroni verso l'anodo con un certo fattore di moltiplicazione.

9.1.2 Fotocatodo

Guardiamo un po' più nel dettaglio i diversi componenti del fotomoltiplicatore, partendo dal fotocatodo.

Il fotocatodo rappresenta sostanzialmente la finestra di ingresso al fotomoltiplicatore, quindi è la zona dove devono incidere i fotoni di scintillazione. Normalmente è realizzato su un materiale vetroso¹ che viene rivestito di un materiale caratterizzato da un basso lavoro di estrazione. Normalmente vengono utilizzati dei materiali semiconduttori per il semplice fatto che gli elettroni che vengono emessi per effetto fotoelettrico

¹Il motivo è che così si assicura un indice di rifrazione simile a quello dello scintillatore o delle eventuali guide di luce che si utilizzano per accoppiare lo scintillatore col fotosensore, in maniera tale da evitare fenomeni di rifrazione.

riescono più facilmente a lasciare il fotocatodo e a fuoriuscire. Come sappiamo, l'energia cinetica con cui l'elettrone fuoriesce dipende dall'energia del fotone incidente e dal potenziale di estrazione, essendo data dalla differenza tra queste: poiché i fotoni di scintillazione, ricadendo nell'ultravioletto, hanno energie di circa 3 eV mentre i materiali che si adoperano hanno un potenziale di circa 1.5 – 2 eV, l'elettrone che viene emesso ha un'energia abbastanza bassa, di pochi elettronVolt.

Bisogna inoltre ricordare che, essendo un materiale con così basso lavoro di estrazione, potrebbe verificarsi anche un'emissione spontanea per effetto termico. Ad esempio a temperatura ambiente gli elettroni hanno un'energia media di 0,025 eV, quindi alcuni elettroni potrebbero effettivamente essere emessi per effetto termico. Siccome noi non avvertiamo alcuna differenza tra l'elettrone che viene emesso perché ha inciso un fotone e l'elettrone che viene emesso per effetto termico in quanto entrambi daranno luogo a tutti i processi che abbiamo appena visto, ciò rappresenta un problema perché rappresentano una fonte di rumore che si va a sommare al reale segnale fisico dovuto alla rivelazione di fotoni di scintillazione. Una soluzione banale a tale problema è quella di operare a temperature più basse per ridurre la probabilità di emissione di elettroni per effetto termico.

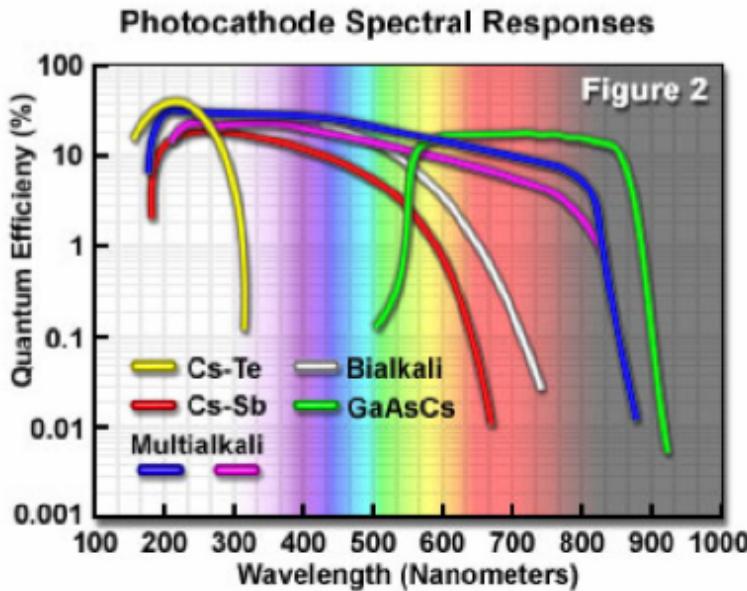
Come abbiamo detto, l'effetto termico non è del tutto trascurabile. Infatti a temperatura ambiente gli elettroni hanno un'energia media di 0.025 eV, dunque una certa frazione di elettroni può avere un'energia superiore a questo valore di energia media che risulta sufficiente quindi per poter sfuggire dal materiale. In generale, a temperatura ambiente la frequenza di emissione, cioè il numero di elettroni che vengono emessi al secondo, nei metalli corrisponde a circa 100 elettroni al secondo per ogni metro quadro mentre nei materiali semiconduttori arriva fino a 10^6 – 10^8 elettroni al secondo per metro quadro. Capiamo quindi che tale processo non è per niente trascurabile e l'effetto di questa emissione provoca quindi una corrente di elettroni che prende il nome di dark current, perché è una corrente che è sempre presente anche quando non incide luce sul fotosensore, quindi in condizioni di oscurità e purtroppo questo è uno dei parametri di cui si deve tener conto in un fotomoltiplicatore perché rappresenta qualcosa che si somma al segnale.

Un altro aspetto che si deve tenere in conto quando si sceglie il fotocatodo riguarda l'efficienza di rivelazione. Finora infatti abbiamo schematizzato il processo dicendo che la radiazione incide e produce effetto photoelettrico, ma in realtà la probabilità con cui avviene questo effetto dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente. Possiamo quindi andare a definire, in base al tipo di materiale adoperato, quanto vale la quantum efficiency cioè l'efficienza quantica, che rappresenta il numero di fotoelettroni emessi sul numero di fotoni incidenti:

$$\text{Quantum Efficiency (QE)} = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ fotoelettroni emessi}}{\text{n}^{\circ} \text{ fotoni incidenti}}$$

Per fare un esempio, se incidessero 100 fotoni di scintillazione e in corrispondenza ad ogni fotone di scintillazione ottenessimo un fotoelettrone, allora l'efficienza sarebbe del 100%. È chiaro che nella realtà non abbiamo efficienze così elevate: tipicamente ci aggiriamo intorno al 20-30%, quindi in media 20 – 30 fotoni su 100 riescono a produrre effetto photoelettrico.

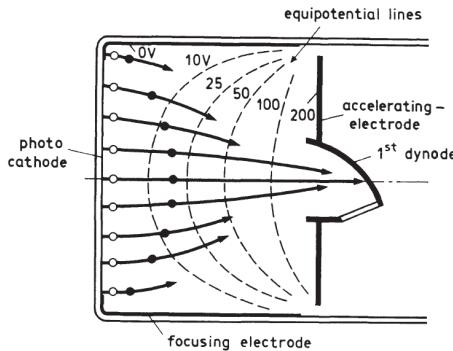
Vediamo adesso le risposte in funzione della lunghezza d'onda per alcuni materiali utilizzati per i fotocatodi:



Vediamo come la quantum efficiency è fortemente dipendente dalla lunghezza d'onda, ad esempio ci sono fotocatodi che sono particolarmente ottimizzati per lavorare nel profondo UV e altri invece che lavorano a lunghezza d'onda più elevate. La scelta del fotocatodo dipende fortemente dallo scintillatore che adoperiamo e dallo spettro di emissione di questo, quindi bisogna cercare di far corrispondere queste due finestre di lavoro, cioè l'emissione dello scintillatore e l'assorbimento del fotocatodo.

9.1.3 Elettrodi di focalizzazione

Una volta che sono stati emessi questi elettroni, dobbiamo cercare di convogliarli verso il primo dinodo.



Come vediamo dalla figura, i fotoni incidono su tutta la superficie del fotocatodo, quindi gli elettroni possono essere emessi da diversi punti e con diverse direzioni, inoltre possono avere energie leggermente diverse. Vogliamo quindi che la raccolta sia efficiente, cioè vorremmo che tutti gli elettroni raggiungessero il primo dinodo indipendentemente dalla loro energia e dal punto in cui sono emessi.

Per fare questo li dobbiamo in qualche modo guidare. Ecco perché questa prima regione può presentare anche degli elettrodi di focalizzazione, i quali sono degli elettrodi che hanno il compito di accelerare gli elettroni mediante campi elettrici (e alcune volte anche campi magnetici) e fare loro seguire determinati percorsi in base al punto in cui sono emessi, in modo da convogliarli verso il primo dinodo. Il motivo è che, al di là di una questione di efficienza cioè al di là del cercare di convogliare tutti gli elettroni, c'è un problema anche di timing perché gli elettroni che vengono emessi nelle regioni più periferiche devono necessariamente percorrere uno spazio maggiore per arrivare al primo dinodo, e a causa di ciò si corre il rischio di avere degli elettroni che arrivano dopo, il

che comporterebbe una indeterminazione dal punto di vista temporale che è ovviamente qualcosa da evitare quando vogliamo adoperare uno scintillatore e un fotomoltiplicatore per misure di timing.

9.1.4 Emissione secondaria e processo di moltiplicazione

A questo punto cerchiamo di capire cosa avviene nei vari dinodi. L'abbiamo accennato prima: ogni elettrone è in grado di emettere ulteriori elettroni, i quali vengono emessi con energia molto basse di circa 1 eV e ogni dinodo è posto a una differenza di potenziale di circa 100 V rispetto al precedente, in maniera tale che gli elettroni vengano guidati verso i dinodi successivi.

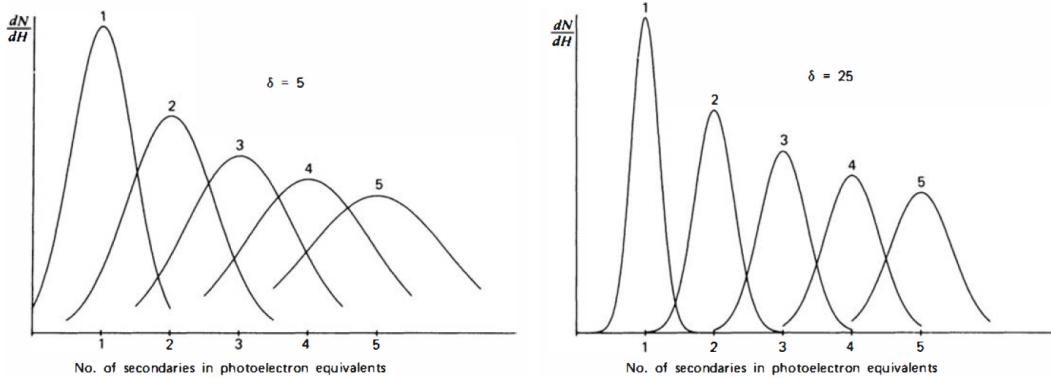
Poiché l'elettrone viene accelerato e quindi acquisisce una certa energia, quando incide sul primo dinodo può estrarre da questo un certo numero di elettroni; in particolare ne estrae all'incirca una trentina, quindi ogni volta che incide un elettrone vengono emessi per effetti secondari una trentina di elettroni, i quali devono essere accelerati verso il secondo dinodo. Tuttavia non tutti questi elettroni riescono ad arrivare al secondo dinodo a causa dell'efficienza di raccolta, per cui solamente una frazione di questi elettroni riesce ad arrivare al secondo dinodo. Tipicamente questa frazione è all'incirca di 5 elettroni su 30. Considerata questa efficienza, possiamo dire che il primo elettrone dà luogo in media a 5 elettroni in grado di arrivare al secondo dinodo. Questo numero, che abbiamo detto aggirarsi normalmente intorno a 5, lo chiamiamo δ e ora vedremo che importanza ha in termini di formazione del segnale. Dobbiamo quindi immaginare che arrivano δ elettroni sul secondo dinodo e ognuno di questi darà luogo nel terzo dinodo ad altri δ elettroni e così via. È allora evidente che ci sia un meccanismo di moltiplicazione (rappresentato nello schema di funzionamento dalle linee che diventano via via sempre più numerose man mano che si passa da un dinodo al successivo), per cui ci chiediamo quanto vale il *fattore di guadagno*, cioè quanto vale il rapporto tra il numero di elettroni raccolti all'anodo rispetto al numero di elettroni prodotti dal catodo. Questo rapporto si indica con G (talvolta con M) e, se nel fotomoltiplicatore ci sono n dinodi (detti anche stadi di moltiplicazione), esso sarà dato da

$$G = \alpha\delta^n$$

dove α vale circa 1. Facciamo allora un esempio numerico, in modo da capire quanto vale questo guadagno: sapendo che in media in un fotomoltiplicatore abbiamo 10 dinodi e posto $\alpha = 1$ e $\delta = 5$, avremo che $G = 5^{10} \approx 10^7$, quindi da un singolo elettrone, nonostante le ingenti perdite che fanno passare da 30 a 5 elettroni, riusciamo ad amplificare il numero di elettroni di un fattore dell'ordine di dieci milioni, che è il valore tipico del guadagno del fotomoltiplicatore il quale permette, anche se il segnale è molto debole, di produrre in uscita un segnale in tensione abbastanza elevato grazie a questo fattore di moltiplicazione.

Abbiamo accennato al fatto che il fattore δ ha una sua importanza. Abbiamo detto che $\delta = 5$, ma in realtà è un valore medio: il numero di elettroni che viene emesso e che riesce ad arrivare al dinodo successivo varia da evento a evento, dunque subisce delle fluttuazioni, e possiamo immaginare che quest'ultime seguano una distribuzione di Poisson avente media pari a δ e deviazione standard pari a $\sqrt{\delta}$. Ne segue che il fattore δ ha un'importanza notevole sulle fluttuazioni statistiche, quindi il suo valore è importante anche per capire cosa aspettarci nelle fluttuazioni del segnale finale, visto

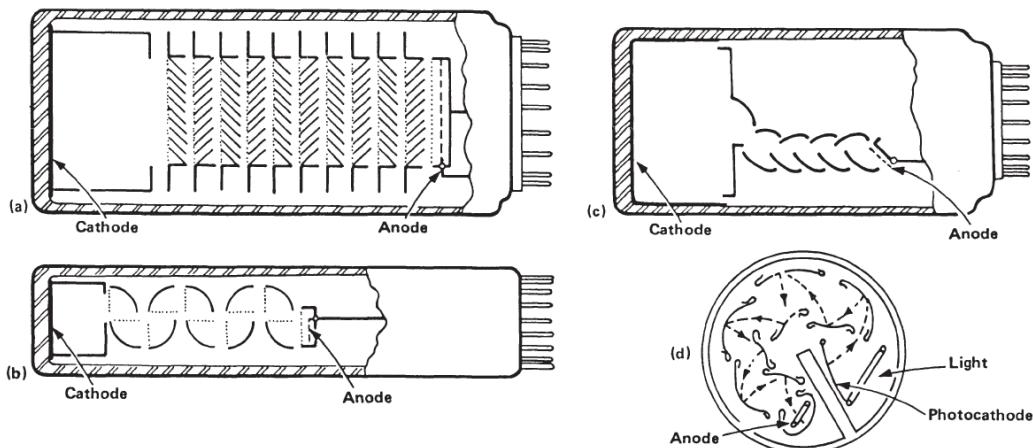
che quest'ultimo è dato da δ^n . Ragioniamo allora in termini di fluttuazioni statistiche e andiamo a guardare la distribuzione del numero di elettroni emessi dal primo dinodo nel caso in cui $\delta = 5$ e quello in cui $\delta = 25$:



Vediamo come la distribuzione cambia a seconda del numero di elettroni che arrivano al secondo dinodo. Chiaramente, più è grande questo numero più queste fluttuazioni sembrano essere grandi cioè queste distribuzioni sono larghe, ma in termini relativi le fluttuazioni statistiche diminuiscono. Il motivo è che la dispersione relativa è definita come $(\sigma/\mu)^2$ dove σ è la deviazione standard e μ la media, quindi nel caso della distribuzione di Poisson è uguale a $1/\delta$. Ne segue che le fluttuazioni statistiche in termini relativi diminuiscono quando consideriamo un'emissione maggiore, quindi un δ più grande. Ciò ha una sua importanza, perché tanto più è elevato il segnale che si produce all'anodo, tanto più è probabile che questo si possa distinguere da un eventuale segnale di rumore dovuto ad esempio a questioni termiche, le quali danno luogo ad un segnale che tipicamente è molto frequente ma ha un'ampiezza piccola, in quanto viene emesso da un elettrone che dà luogo a questa catena.

9.1.5 Configurazione dinodi

La geometria dei dinodi, cioè il modo in cui vengono disposti, è fondamentale, perché come abbiamo detto questi elettroni devono essere guidati da un dinodo all'altro. Ci sono tantissime configurazioni che sono state studiate nell'arco della storia, in particolare quelle più utilizzate sono di quattro tipi:



Le configurazioni sono in ordine

- (a) a veneziana;
- (b) a box e a griglia;
- (c) focalizzati linearmente;
- (d) focalizzati circolarmente.

Quella che abbiamo visto fino adesso è di tipo (c) cioè focalizzati linearmente. Andiamo a guardare quali sono le deviazioni dalla linearità in base alla configurazione scelta:

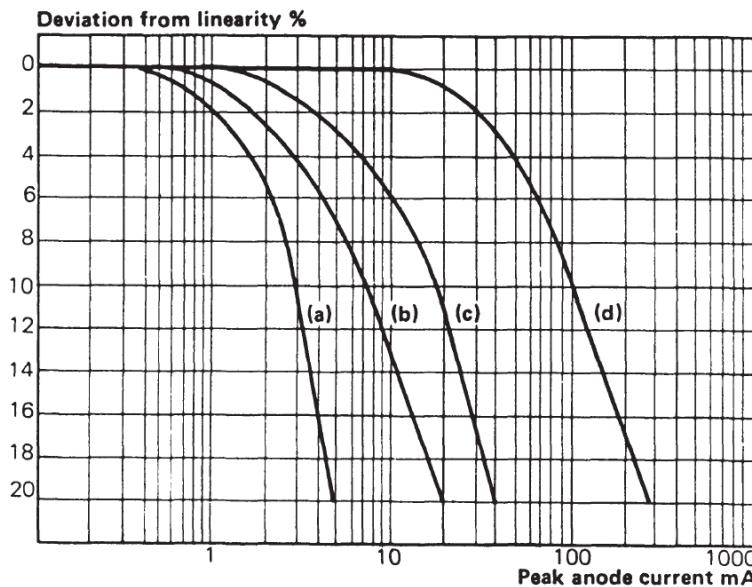
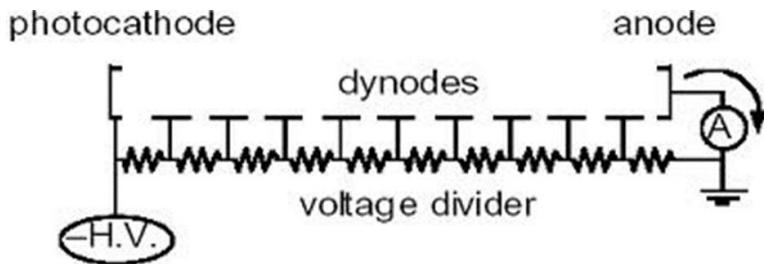


Fig. 8.5. Linearity of different dynode configurations: (a) box and grid, (b) venetian blind with standard voltage divider, (c) venetian blind with high current voltage divider, (d) linear focused with very high current divider (from *EMI Catalog [8.2]*)

Abbiamo detto che ci aspettiamo che questo segnale mantenga una certa proporzionalità rispetto all'energia che viene depositata, ma in realtà questo non è sempre vero: a volte se il flusso di elettroni è molto elevato si può perdere la linearità, quindi finché la curva di deviazione dalla linearità si mantiene uguale a zero stiamo lavorando in un ottimo regime di lavoro. Possiamo evincere dal grafico come la configurazione con i fotomoltiplicatori focalizzati linearmente sia quella migliore, in quanto ha un'ampia regione di lavoro dei valori di corrente in cui le deviazioni dalla linearità sono dello 0%, mentre le altre configurazioni hanno deviazioni sulle soltanto per basse correnti, quindi per bassi numeri di elettroni che vengono prodotti e raccolti all'anodo.

9.1.6 Alimentazione

Per quanto riguarda l'alimentazione, si applica un'alta tensione al fotomoltiplicatore avente valori di 600 – 700 V, la quale viene poi suddivisa tra i diversi dinodi utilizzando dei partitori di tensione.



In genere tra photocatodo e primo dinodo è applicata una tensione maggiore, allo scopo di focalizzare meglio gli elettroni emessi dal photocatodo.

Ci sono due modalità di lavoro: o si lavora con un photocatodo a potenziale negativo e l'anodo a zero oppure viceversa si pone il photocatodo a zero e l'anodo a una tensione positiva (in figura è riportata soltanto la prima di queste due configurazioni). Questi due diversi modi di lavorare sono equivalenti poiché ciò che conta è la differenza di potenziale, in quanto si deve passare da un potenziale più basso ad un potenziale più alto.

9.1.7 Guadagno VS tensione

La tensione di alimentazione del fotomoltiplicatore ha un'influenza sul segnale finale. Infatti il fattore δ può cambiare a seconda della tensione di lavoro: più questa è alta, più gli elettroni verranno accelerati tra un dinodo e l'altro raggiungendo quindi energie più alte, dunque sarà maggiore il numero di elettroni emessi e di conseguenza il numero di elettroni che riescono a raggiungere il dinodo successivo.

Se indichiamo con V_d la differenza di potenziale tra due dinodi consecutivi, δ sarà dato da

$$\delta = KV_d$$

dove K è una costante di proporzionalità. Possiamo allora riscrivere il guadagno come

$$G = \alpha \delta^n = \alpha (KV_d)^n$$

dove n è il numero di dinodi. In definitiva il guadagno dipende dalla tensione tramite una legge di potenza, da cui segue che basta anche una leggera variazione nella tensione di lavoro per avere una variazione nel guadagno notevole. Ecco perché gli alimentatori che si adoperano per alimentare i fotomoltiplicatori devono essere degli alimentatori abbastanza stabili, che mantengono il valore di tensione il più stabile possibile.

Cerchiamo adesso di capire quanto varia il guadagno quando variamo la tensione di 1 V. Questa variazione, che normalmente si esprime in termini percentuali, prende il nome di coefficiente di guadagno ed è qualcosa che misuriamo in laboratorio. Infatti misurare il guadagno del fotomoltiplicatore non è un'operazione facile, perché per misurarlo dovremmo lavorare in condizioni di singolo fotoelettrone, quindi dovremmo metterci nelle condizioni di far produrre al photocatodo un solo elettrone e vedere cosa si ottiene all'anodo, la quale non è un'operazione semplice. Ciò che invece possiamo fare è studiare l'andamento del guadagno in funzione della tensione e quindi valutare queste variazioni percentuali del guadagno al variare della tensione. Questa seconda operazione è quella che svolgiamo in laboratorio, ossia effettuiamo delle misure con un fotomoltiplicatore aumentando di volta in volta la tensione, esplorando un certo intervallo di tensioni e

andando a cercare di capire quanto cambia il segnale in uscita. Infatti aumentando la tensione aumenta il guadagno, quindi aumenta il numero di elettroni che arrivano all'anodo e pertanto il segnale aumenterà in ampiezza, quindi possiamo studiare di quanto aumenta o diminuisce il segnale quando cambiamo la tensione di un certo valore. Possiamo allora studiare la derivata dell'ampiezza del segnale in funzione della tensione e valutare il coefficiente di guadagno, che sarà dato dalla rivelazione

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dV}$$

e che viene espresso in %/V.²

9.1.8 Risposta temporale

Tipicamente gli elettroni vengono emessi con tempi molto rapidi, minori del decimo di nanosecondo. Tuttavia il fattore preponderante nella produzione del segnale in termini temporali è il tempo che impiegano questi elettroni per passare dal catodo fino all'anodo. Questo è un tempo dell'ordine delle decine di nanosecondi, dunque non è trascurabile. Se questo tempo fosse fisso, cioè se fosse sempre lo stesso ogni volta che viene emesso un elettrone dal catodo, non avremmo alcun problema in quanto costituirebbe un ritardo noto presente ogni qualvolta si effettua una misura di timing. Tuttavia, per diverse ragioni esiste una dispersione di questo tempo di transito (detto transit time) che prende il nome di TTS (Transit Time Spread). Tali fluttuazioni possono essere anche dell'ordine di alcuni nanosecondi, e ciò limita l'utilizzo del fotomoltiplicatore per applicazioni di timing spinto, dove vogliamo risoluzioni temporali particolarmente ottimali, dell'ordine del nanosecondo o e anche inferiori. Alcuni fotomoltiplicatori migliorano questo aspetto con un'opportuna geometria dei dinodi oppure diminuendo il numero di fotoelettroni, quindi lavorando in condizione di illuminazione del fotomoltiplicatore un po' più basse, però non sempre è possibile.

9.1.9 Schermo magnetico

I fotomoltiplicatori lavorano con elettroni di pochi elettronVolt, quindi sono elettroni molto poco energetici che possono subire delle deviazioni anche a seguito della presenza del campo magnetico terrestre. Ecco perché i fotomoltiplicatori, a seconda di come vengono orientati, in linea di principio potrebbero funzionare in maniera leggermente diversa, perché potrebbero avere un orientamento rispetto al campo magnetico terrestre diverso a seconda di come viene posizionato il fotomoltiplicatore.

Per evitare questi problemi, quello che si fa è circondare il fototubo con un materiale che è in grado di schermare questi campi magnetici non eccessivamente elevati come ad esempio quello terrestre. Questi materiali prendono il nome di mu-metal: essi sono delle leghe metalliche ad alta permeabilità magnetica, quindi formano un vero e proprio schermo per i campi magnetici, in maniera tale che gli elettroni che vengono prodotti all'interno non subiscano effetti di deviazione dovuti a questi campi magnetici così poco intensi.

Certe volte tuttavia si ha l'esigenza di posizionare i fotomoltiplicatori all'interno dei campi magnetici di valore più elevato perché magari si vuole misurare l'impulso di una

²Tutta questa parte è poco chiara ma non ho trovato nulla che c'entrasse sui libri.

particella deviando il percorso di questa tramite campi magnetici che possono essere anche molto più intensi rispetto a quelli tipicamente derivanti da fonti naturali. In questo caso i fotomoltiplicatori non possono essere adoperati, per cui quello che si fa è trovare dei degni sostituti del fotomoltiplicatore che vedremo a breve e che possono lavorare anche in presenza di campi magnetici.

9.1.10 Il rumore (noise)

Un aspetto importante riguarda il noise, cioè il rumore. Come abbiamo già visto, la principale fonte di rumore in un fotomoltiplicatore è l'emissione termoionica di elettroni da parte del fotocatodo, ma anche da parte di altri materiali che costituiscono il fotomoltiplicatore. Tipicamente viene emesso un solo fotoelettrone alla volta, per cui il segnale spurio (cioè dovuto a rumore) che si produce è di bassa ampiezza, dunque è importante avere dei segnali fisici più elevati in maniera tale da poterli discriminare dal rumore.

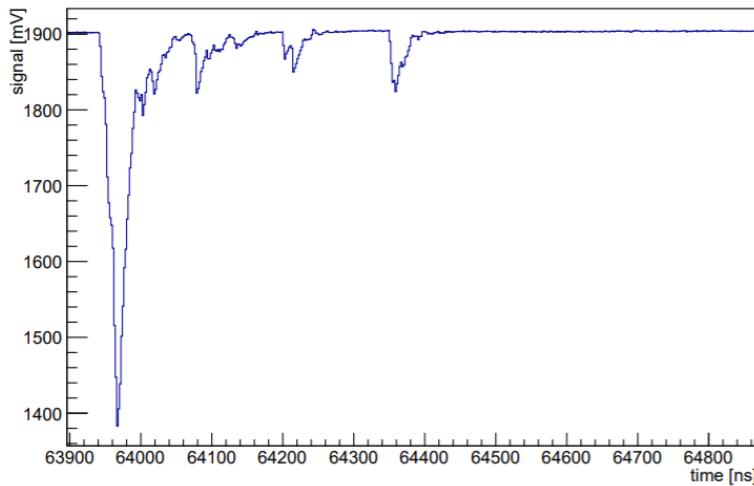
Il rumore può essere diminuito abbassando la temperatura, sebbene ciò non si faccia quasi mai.

Un altro aspetto importante sempre in termini di rumore è quello di evitare di esporre il fotomoltiplicatore alla luce anche quando non si sta lavorando col fotomoltiplicatore, quindi persino quando trasportiamo un fotomoltiplicatore da un luogo ad un altro dobbiamo avere l'accortezza di evitare l'esposizione alla luce. Il motivo è che i materiali vetrosi che vengono adoperati soprattutto nel catodo possono emettere luce di fosforescenza anche per tempi molto lunghi dell'ordine delle ore, quindi se per caso il fotomoltiplicatore viene esposto alla luce bisogna poi attendere un tempo che può essere anche dell'ordine delle ore prima di poterlo adoperare nuovamente, altrimenti potremmo avere effetti indesiderati dovuti a questi fenomeni di fosforescenza del vetro. Altre fonti di rumore in un fotomoltiplicatore possono essere:

- La radioattività del vetro, in quanto nel vetro possono essere presenti degli isotopi radioattivi come il potassio-40 ^{40}K o il Torio Th che emettono radiazione che viene amplificata nel fotomoltiplicatore;
- La radiazione cosmica che incide non solo sul rivelatore ma anche all'interno del tubo;
- Correnti di fuga nei supporti degli elettrodi, per cui ci vuole particolare cura nel cercare di isolare gli elettrodi presenti in un fotomoltiplicatore.

Un altro aspetto che potrebbe verificarsi sono i cosiddetti afterpulses, impulsi che avvengono dopo il segnale principale i quali possono avere delle conseguenze importanti soprattutto nelle misure di timing, perché tali misure prevedono un start e uno stop quindi se per caso ci sono degli impulsi spuri lo start e lo stop potrebbero non essere quelli effettivamente desiderati. Chiaramente anch'essi costituiscono una fonte di rumore.

Possiamo vedere gli afterpulses nel seguente grafico, dove è riportato un tipico segnale di un fotomoltiplicatore visto all'oscilloscopio, quindi sulle ascisse sono riportati i tempi e sulle ordinate i valori di tensione:



Abbiamo un segnale molto veloce, con un tempo di discesa molto rapido dell'ordine di pochi nanosecondi per poi risalire. Dopo che è risalito notiamo la presenza di piccoli impulsi di bassa ampiezza: questi sono gli afterpulses.

Gli afterpulses possono avere diverse origini: essi possono provenire da

- reazioni luminose: i dinodi colpiti dagli elettroni possono emettere fotoni che, se arrivano al fotocatodo, danno origine ad un effetto fotoelettrico e quindi ad afterpulses, che sono ovviamente ritardati rispetto all'impulso principale perché dobbiamo considerare il tempo che impiega la luce a tornare indietro verso il fotocatodo. Ritardi tipici in questo caso sono dell'ordine di 20 – 100 ns;
- ionizzazione di gas residui nel fototubo: infatti il fototubo, cioè il tubo in cui sono inseriti i dinodi, lavora in condizioni di vuoto, però per quanto il vuoto realizzato all'interno del fototubo possa essere spinto sono sempre presenti degli atomi di gas residuo, per cui può succedere che gli elettroni ionizzino questo gas residuo e gli ioni positivi migrino verso il fotocatodo (perché questo si trova a un potenziale negativo) liberando elettroni, producendo quindi dei segnali ritardati con ritardi tipici di 100 nanosecondi o anche microsecondi, perché questo impulso viene prodotto da un ione che ha dovuto viaggiare verso il fotocatodo, il quale ha una mobilità ridotta rispetto a quella degli elettroni.
- backscattering degli elettroni: durante il processo di amplificazione, alcuni elettroni possono essere rimandati indietro dall'urto, ritornando al primo dinodo e generando un altro segnale ritardato rispetto al primo.

9.1.11 Forma e dimensioni

Ci sono diverse possibilità per le dimensioni e la forma di un fotomoltiplicatore. Tipicamente sono oggetti ingombranti e di solito hanno una forma tubolare, ma potrebbero avere anche forme un po più particolari come quelli adoperati nell'esperimento KM3NeT per la rivelazione dei neutrini, i quali hanno grande area perché cercano di captare un quantitativo di luce che sia il più grande possibile in quanto la luce prodotta in mare dall'interazione dei neutrini (quindi dei muoni) è abbastanza bassa, dunque bisogna raccogliere il più possibile la luce prodotta.

9.2 Avalanche PhotoDiodes (APD)

In molte applicazioni, i fotomoltiplicatori presentano delle problematiche:

- a volte hanno delle dimensioni troppo grandi rispetto all'area sensibile;
- sono influenzati dai campi magnetici;
- hanno una risposta spettrale che non sempre è adatta alla luce da rivelare;
- hanno un'efficienza quantica non elevata, dell' ordine del 20 – 30%;
- la stabilità del guadagno, cioè quanto è stabile il guadagno che abbiamo definito, non è ottimale in quanto dipende molto dalla tensione;
- dobbiamo adoperare delle tensioni di alimentazione elevate, di diverse centinaia di Volt fino anche al kV.

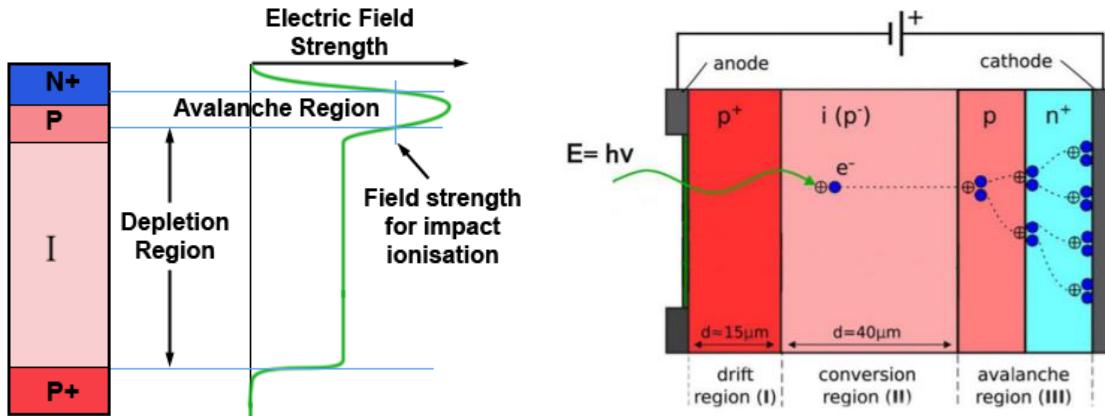
Per tutti questi motivi, nel corso degli anni sono stati sviluppati dei fotosensori più compatti basati sull'utilizzo di materiale semiconduttore, quindi sono dei fotosensori a stato solido. I primi che andremo a vedere sono i fotodiodi a valanga, di cui i primi prototipi sono stati sviluppati una quarantina d'anni fa. Questi primi prototipi avevano dimensioni molto piccole, con superfici dell'ordine del millimetro quadro; inoltre erano particolarmente sensibili all'infrarosso, quindi non si adattavano agli scintillatori che emettono nell'UV, avevano un basso guadagno e costavano molto. Sembravano quindi dei rivelatori non particolarmente performanti, ma in anni recenti sono state migliorate diverse caratteristiche di questi fotosensori, quindi adesso abbiamo degli APD che hanno superfici più estese dell'ordine di decine di millimetri quadri, hanno una sensibilità maggiore nel blu e nell'ultravioletto che è quella che ci interessa di più per la luce di scintillazione, il costo si è abbassato e hanno un guadagno relativamente elevato. Diciamo relativamente perché confrontato con il guadagno del fotomoltiplicatore, che è dell'ordine di $10^6 - 10^7$, quello dell'APD, proprio per il suo principio di funzionamento, è dell'ordine di 10^2 .

Infine gli APD hanno l'enorme vantaggio di lavorare con tensioni più basse rispetto a quelle dei fotomoltiplicatori. Proprio per questo motivo vengono utilizzati in diverse applicazioni dove sono presenti gli scintillatori.

9.2.1 Principio di funzionamento

L'idea alla base degli APD è quella di adoperare dei materiali semiconduttori drogati, cioè vuol dire che sono stati introdotti alcuni atomi di un elemento diverso che possono essere elementi donori, quindi con un eccesso di elettroni rispetto a un atomo che costituisce il cristallo oppure accettori, cioè con un difetto di elettroni. A seconda del tipo di elemento che abbiamo utilizzato per drogare i semiconduttori si parla di materiali drogati di tipo p o di tipo n. Andando a realizzare delle particolari giunzioni con i semiconduttori, è possibile creare dei rivelatori di particelle, ma anche rivelatori di luce.

Tipicamente un APD ha una struttura come quella che vediamo schematizzata nelle figure seguenti:



In sequenza abbiamo le seguenti zone:

- un primo strato drogato di tipo p;
- uno strato detto parte intrinseca e indicata con i, dove con intrinseco intendiamo un materiale che è stato drogato con la stessa concentrazione di donatori e accettori;
- un altro strato drogato di tipo p;
- un ultimo strato drogato di tipo n.

Tale sequenza di strati fa sì che si venga a realizzare una regione ottimale per la rivelazione.

Entriamo più nel dettaglio su ciò che avviene fisicamente guardando la figura a destra: quando incide un fotone con energia $h\nu$, esso entra attraverso lo strato sottile p^+ e interagisce da qualche parte all'interno della regione intrinseca, producendo una coppia elettrone-lacuna. A questo punto, grazie all'utilizzo di elettrodi viene creata una differenza di potenziale tra anodo e catodo, per cui l'elettrone viene accelerato e migra verso la regione di moltiplicazione (costituita dalle regioni p ed n), dove può dare luogo a processi di moltiplicazione a valanga, in quanto l'elettrone può arrivare ad avere un'energia sufficiente per produrre nuove coppie elettrone lacuna, con un guadagno che non supera il valore di 100, quindi a partire da un fotone incidente, dunque da un elettrone prodotto, possiamo al massimo ottenere un centinaio di elettroni raccolti nell'elettrodo finale. I segnali quindi non vengono amplificati di molto, solo quanto serve per la rivelazione di questi fotoni.

9.2.2 Parametri operativi

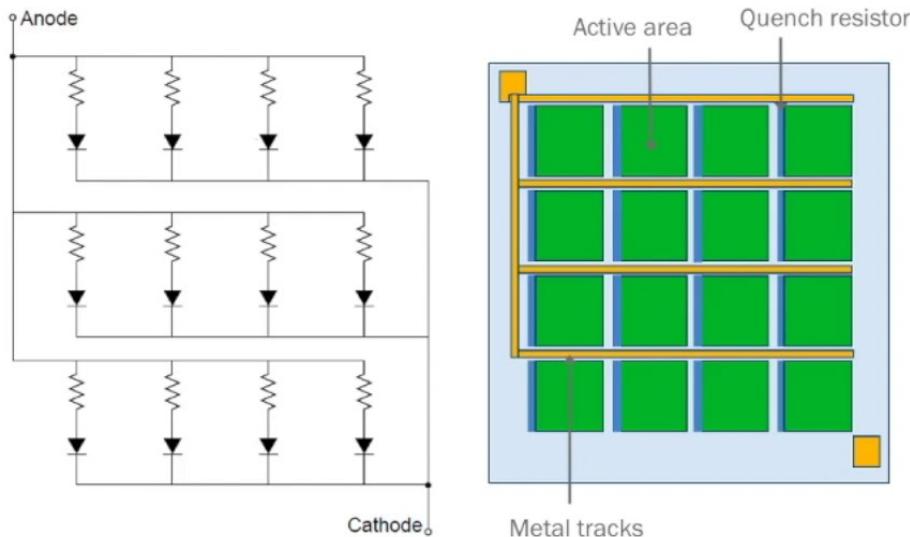
Andiamo a guardare alcune caratteristiche di un APD.

- Abbiamo uno strato anti-riflesso in superficie, grazie al quale abbiamo un'elevata efficienza di rivelazione perché la maggior parte dei fotoni che incide riesce effettivamente a essere rivelata;
- La tensione di alimentazione è di alcune centinaia di Volt, però i guadagni non sono elevatissime, dell'ordine di 50 – 100;

- Come tutti i rivelatori a semiconduttore, purtroppo hanno una dipendenza dalla temperatura, quindi variare la temperatura di lavoro comporta delle variazioni nel segnale in uscita, avendo anche qualche % di variazione per ogni grado di temperatura, quindi è importante lavorare ad una temperatura stabile, e ciò in generale vale per tutti i rivelatori a semiconduttore;
- Sono particolarmente adatti per convertire la luce proveniente o da Fibre WLS perché queste hanno sezioni piccole, o da piccoli scintillatori, in quanto è chiaro che uno scintillatore di dimensioni grandi non può essere accoppiato con un singolo APD non avendo una superficie sufficiente ad assicurare la rivelazione dei fotoni di scintillazione;
- Hanno delle proprietà temporali di timing abbastanza buone;
- Hanno dimensioni che possono arrivare anche a $5 \times 5 \text{ mm}^2$ e oltre³;
- Il segnale è proporzionale al numero di fotoni incidenti, quindi manteniamo l'informazione sull'energia depositata o comunque sul numero di fotoni incidenti

9.3 Silicon PhotoMultipliers (SiPM)

L'ultima categoria di fotosensori più recenti sono i silicon photomultipliers. Il fatto che si adoperi la parola fotomoltiplicatore nel nome ci fa capire che evidentemente qui il guadagno è più elevato, più simile a un fotomoltiplicatore. Abbiamo quindi il vantaggio di avere un guadagno elevato ma abbiamo un materiale a semiconduttore, infatti anche in questo caso abbiamo l'utilizzo di un rivelatore che è molto simile all'APD, in quanto un SiPM è costituito da una matrice di APD di piccolissime dimensioni, quindi come se fosse un rivelatore a pixel dove ogni pixel è una sorta di APD che viene adoperato in regime limitato Geiger-Müller.



³Per dare un'idea, hanno le dimensioni di una monetina da 5 centesimi.

9.3.1 Principio di funzionamento

Vediamo come funziona. Le varie celle che vediamo hanno dimensioni che vanno dalle decine alle centinaia di micron, quindi abbiamo densità molto elevate, dell'ordine di 1000 pixel per millimetro, e tutte queste celle lavorano in parallelo. Se una di queste celle viene colpita da un fotone e quindi dà luogo a un segnale, possiamo andare a sommare tutti questi segnali tra di loro e quindi avere un segnale in uscita che è proporzionale a quante celle sono state colpite dai fotoni, dunque a quanti fotoni hanno inciso sul rivelatore. La validità di tale schema si basa sul presupposto che su ogni singola cella incida un solo fotone, perché se dovessero incidere più fotoni si perderebbe la linearità che abbiamo supposto. Siccome normalmente i SiPM hanno celle di dimensioni molto piccole, normalmente lavorano in queste condizioni di linearità. Inoltre ognuna di queste celle ha una sua resistenza di spegnimento, detta resistenza di quenching, la quale permette di riportare il SiPM verso le condizioni di lavoro ottimali⁴. Sostanzialmente il SiPM lavora come se fosse un rivelatore multiplo, quindi come tanti rivelatori che lavorano insieme, e il segnale che preleviamo alla fine è la somma dei segnali di tutte le celle.

9.3.2 Vantaggi e svantaggi

Vediamo che vantaggi ha:

- Lavora a tensione molto bassa (30 – 70 V);
- Ha un'efficienza quantica del 20 – 40%;
- Ha guadagni elevati, fino a 10^6 , il quale dipende dal numero di pixel a disposizione;
- Ha una risoluzione temporale molto buona ($\ll 1$ ns);
- È indipendente dal campo magnetico.

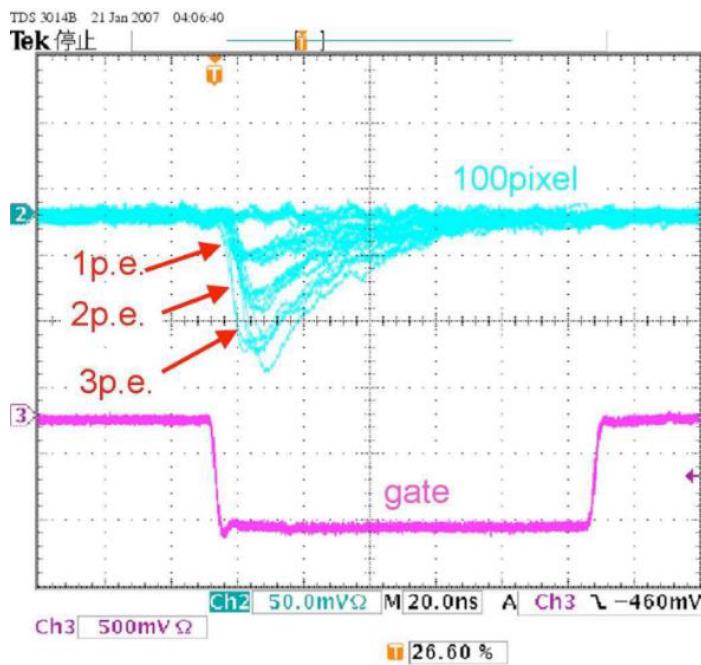
Tuttavia ancora si deve lavorare un po' sulle dimensioni le quali sono ancora piccole e sul dark count rate, cioè quel rumore che è sempre presente nei fotosensori anche in essenza di radiazione, che in questo caso può essere anche molto elevato (100 kHz /mm²), dipende dal produttore.

9.3.3 Analisi del segnale

Come abbiamo detto le celle lavorano in parallelo, pertanto se guardiamo all'oscilloscopio un tipico segnale prodotto da un SiPM messo in persistenza⁵ osserveremo una distribuzione dei segnali come quella in figura:

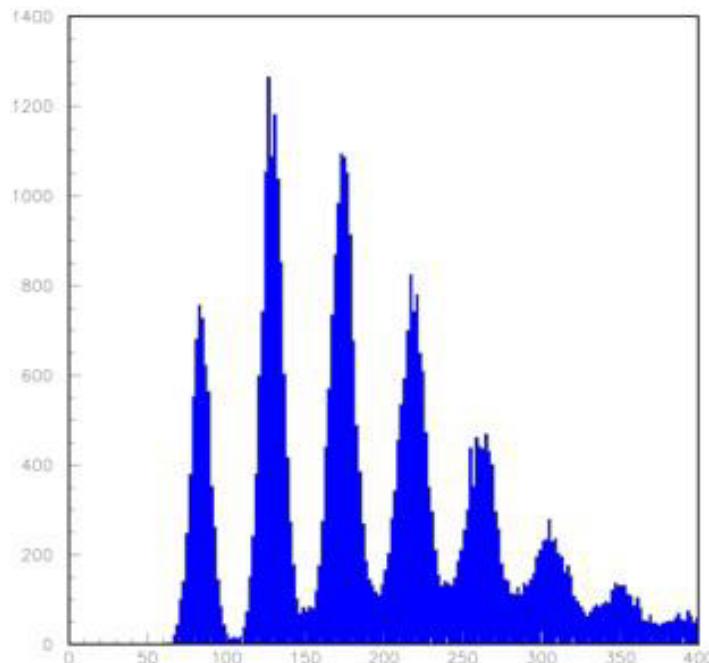
⁴La funzione della resistenza di quenching è quella di spegnere la valanga rendendo la tensione effettiva minore della tensione di breakdown.

⁵Mettere in persistenza un segnale significa non fare aggiornare il display dell'oscilloscopio, facendo accumulare tutti i segnali che vi arrivano nel tempo, quindi quello che è stato visualizzato non si cancella ma rimane nello schermo e il nuovo segnale viene sovrapposto a quello che abbiamo visto prima.



Quelli che vediamo sono segnali che non hanno ampiezza qualunque, bensì hanno ampiezze quantizzate, ossia assumono dei valori discreti pari a multipli di un certo livello. I segnali che stiamo vedendo sono relativi alla rivelazione dei singoli fotoelettroni, quindi l'ampiezza del segnale è proporzionale al numero di fotoelettroni emessi, dunque al numero di celle colpite (ricordiamo che stiamo supponendo che incida un fotone per cella). Ecco perché avviene questa discretizzazione del segnale, perché ogni cella lavora come se fosse un Geiger, ossia un rivelatore on/off.

Se andiamo a realizzare uno spettro delle ampiezze di questi segnali, chiaramente troveremo una distribuzione a picchi, che corrisponde al fatto che le ampiezze non possono essere qualunque, ma assumono dei valori ben precisi:



Avremo quindi che il primo picco è quello corrispondente al primo fotoelettrone, il secondo picco è quello corrispondente a due fotoelettroni e così via.

9.3.4 Photon Detection Efficiency (PDE)

Anche qui abbiamo una efficienza di rivelazione, detta photon detection efficiency e che dipende da diversi parametri:

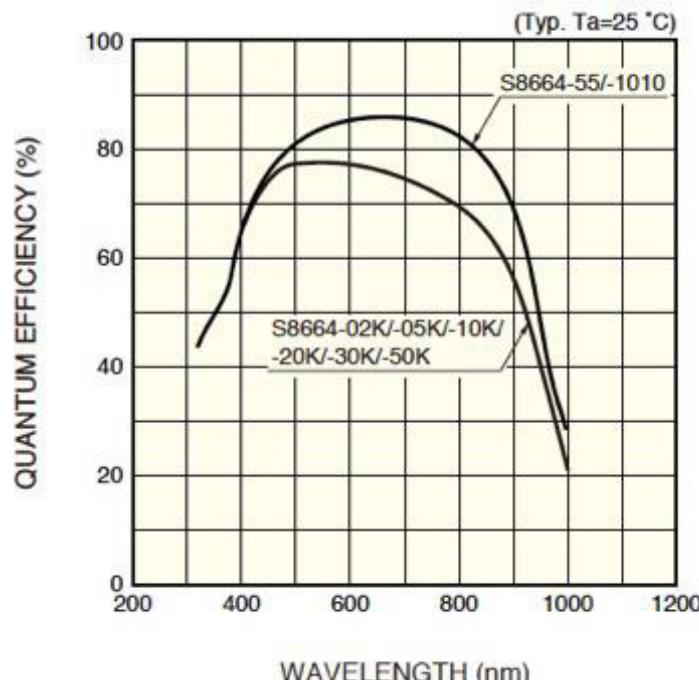
1. Fill factor geometrico;
2. L'efficienza quantica, che dipende della lunghezza d'onda;
3. La probabilità di trigger della valanga.

Fill factor

Tale fattore dipende dal fatto che abbiamo una matrice, quindi l'area sensibile è soltanto la parte centrale, in quanto abbiamo inevitabilmente dei bordi che rappresentano un'area morta, quindi se il fotone dovesse incidere su questi bordi verrebbe perso. Quantitativamente tale contributo è dato dal rapporto tra l'area attiva di rivelazione e l'area complessiva, quindi più siamo in grado di realizzare bordi sottili, maggiore sarà l'efficienza dovuta al fill factor. È altresì chiaro che, a parità di spessore, l'effetto del bordo è tanto più importante quanto più è piccola la dimensione del pixel. Ad esempio con celle delle dimensioni di $20\ \mu\text{m}$ abbiamo un fill factor intorno al 30%, mentre con celle di $100\ \mu\text{m}$ arriva fino all'80%.

Quantum Efficiency

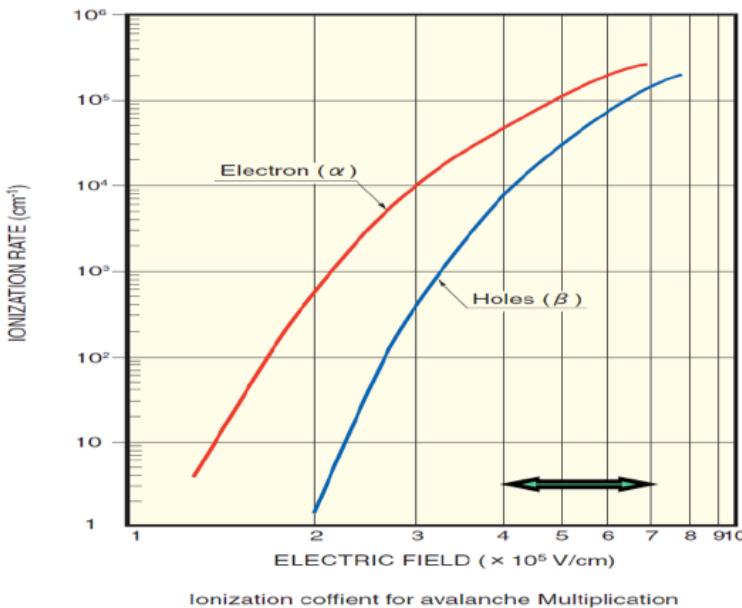
L'efficienza quantica è più elevata rispetto a quella che abbiamo visto nel caso dei fotomoltiplicatori tradizionali, potendo anche assumere valori superiori all'80%, a seconda del tipo di sensore e dalla lunghezza d'onda che andiamo a rivelare.



Probabilità di trigger

Una volta che la radiazione ha inciso e ha prodotto una coppia, quest'ultima riesce a produrre un segnale sufficientemente elevato, quindi a dare luogo a un trigger e dunque a una rivelazione?

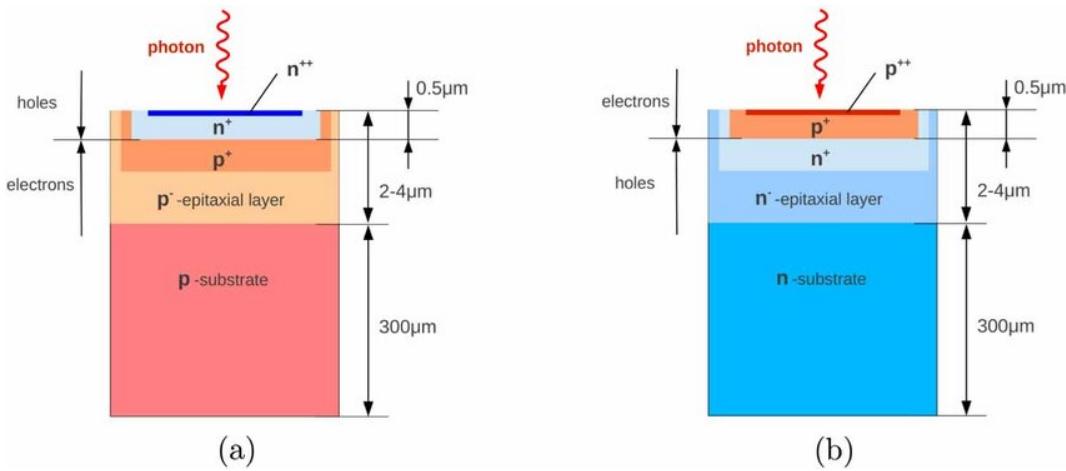
La risposta è probabilità di triggerare una valanga dipende dalla posizione in cui è stata creata la carica, dal tipo di carica (elettrone/lacuna) e dalla tensione di alimentazione.



In figura possiamo vedere due curve dell'andamento della probabilità (una relativa agli elettroni e l'altra alle lacune) al variare del campo elettrico applicato, quindi della tensione. Notiamo come questa cresce con la tensione applicata.

9.3.5 Possibili strutture

Ci sono diverse strutture per i SiPM, ma in generale si dividono in due tipologie: p su n o n su p, a seconda che la regione sensibile sia rispettivamente di tipo n o p.



(a): tipo p su n, (b): tipo n su p.

9.3.6 Possibili applicazioni

Avendo dimensioni molto piccole, i SiPM possono essere adoperati per la lettura delle fibre WLS. Poiché hanno un guadagno notevole, sono utili soprattutto nel caso in cui abbiamo una sola fibra e quindi ci aspettiamo poca luce.

Anche per la PET si sta pensando di sostituire il classico fotomoltiplicatore con dei SiPM.

9.3.7 Confronto tra fotosensori

Facciamo in conclusione un confronto tra i fotosensori visti:

	PMT	APD	SiPM
Guadagno	$10^6 - 10^7$	~ 100	$10^6 - 10^6$
Tensione di lavoro (V)	$1 - 2 \cdot 10^3$	$300 - 500$	< 100
Dark count (Hz)	$< 10^3$		$0.1 - 1 \text{ M}$
Photon detection efficiency (blu-verde)	$20 - 30\%$	$75 - 80\%$	$20 - 50\%$

Da un lato abbiamo il PMT che si caratterizza per avere degli ottimi guadagni ma ha una tensione di lavoro molto elevata con un dark count rate abbastanza basso e ha efficienza quantica bassa, ma in compenso ha un'area sensibile abbastanza elevata. Abbiamo poi i materiali semiconduttori ossia APD e SiPM che si caratterizzano soprattutto per le basse tensioni di lavoro, le efficienze tipicamente più elevate, guadagni che possono anche essere confrontabili con quelli del fotomoltiplicatore tradizionale ma hanno lo svantaggio di avere delle superfici abbastanza ridotte.

9.4 L'occhio umano

Questa sezione verrà completata in seguito (forse)

Capitolo 10

Rivelatori a semiconduttore

L'ultima tipologia di rivelatori che trattiamo sono i rivelatori a semiconduttore, detti anche rivelatori a stato solido. Questi si basano sull'utilizzo di materiali semiconduttori, i quali sono dei materiali cristallini cioè costituiti da una struttura ordinata di atomi in un reticolo, in particolare i primi che sono stati inventati si basano sull'utilizzo di silicio o germanio.

Sono anche detti rivelatori a stato solido perché hanno una densità che è circa mille volte maggiore rispetto a quella dei gas. Ciò costituisce una notevole differenza rispetto ai rivelatori a gas, i quali si basano sull'utilizzo di un gas a densità molto basse, mentre qui abbiamo un materiale solido e questo comporta delle differenze nelle caratteristiche che andremo ad approfondire.

10.1 Semiconduttori puri

I primi prototipi di rivelatori a semiconduttore sono stati sviluppati negli anni '60, da allora ci sono stati enormi sviluppi e oggi abbiamo rivelatori al silicio particolarmente performanti pensati per diversi tipi di applicazione, per cui in questo capitolo introdurremo il concetto di base di rivelazione basata sul semiconduttore, cioè come è stato inventato il rivelatore dal semiconduttore, per poi vedere alla fine alcune applicazioni e alcuni esempi di come i rivelatori al semiconduttore sono stati sviluppati e migliorati nel corso degli anni.

10.1.1 Vantaggi e svantaggi

I rivelatori a semiconduttore hanno diversi vantaggi:

- Hanno un'ottima risoluzione energetica.

Durante il primo ciclo di esperienze è stato possibile misurare la risoluzione in energia¹ con un rivelatore a scintillazione. In tale esperienza si hanno degli spettri acquisiti utilizzando le sorgenti γ , e andando a guardare la larghezza del picco fotoelettrico è possibile valutare la risoluzione in energia. Svolgendo tale operazione, ci si rende conto che un sistema basato sull'utilizzo di uno scintillatore e di un fotomoltiplicatore

¹Ricordiamo che la risoluzione in energia esprime la capacità di un rivelatore di distinguere due valori in energia molto vicini tra di loro, per cui se la risoluzione non è buona quello che succede è che si rischia di non riuscire a distinguere due valori in energia molto vicini tra di loro.

porta ad avere risoluzioni in energia che non sono particolarmente spinte, dell'ordine del 5 – 10%. I rivelatori a semi-conduttore invece presentano delle buone risoluzioni energetiche;

- Hanno elevato stopping power.

Infatti il fatto di avere a disposizione un materiale solido fa sì che la radiazione che penetra all'interno del rivelatore venga più facilmente arrestata, quindi perda più facilmente energia. Pensiamo ad esempio alla perdita di energia di un elettrone che deve entrare in un rivelatore a gas oppure in un rivelatore a silicio: nel rivelatore a silicio percorrerà pochi millimetri, mentre in un rivelatore a gas potrebbe percorrere diversi centimetri. Tale caratteristica fa sì che affinché il rivelatore possa essere utilizzato per misurare tutta l'energia di una particella sono sufficienti spessori e dimensioni compatte. Ad esempio in laboratorio utilizziamo questi rivelatori per misurare particelle α da 5 meV, le quali vengono arrestate in poche decine di micron di silicio, quindi è sufficiente un rivelatore spesso 50 μm come quello che utilizziamo in laboratorio per essere sicuri che le particelle α vengano arrestate all'interno del rivelatore e che dunque ne misuriamo tutta l'energia;

- In generale questi rivelatori, che sono sostanzialmente delle giunzioni p-n polarizzate inversamente, richiedono delle basse tensioni di alimentazione, il che costituisce un vantaggio da un punto di vista pratico.

Se facciamo un confronto con i fotomoltiplicatori che richiedono centinaia di Volt, o anche con il contatore Geiger, nel quale si adoperano tensioni dell'ordine di 300 – 400 Volt, per il rivelatore al silicio sono sufficienti tensioni molto più piccole, dell'ordine di decine di Volt per la polarizzazione.

- Hanno una risposta abbastanza veloce, cosa che invece non avevamo per i rivelatori a gas, i quali sono dei rivelatori piuttosto lenti proprio per i meccanismi e i fenomeni che avvengono al loro interno. Ciò è utile soprattutto per le misure di timing.

Tuttavia ci sono anche degli svantaggi:

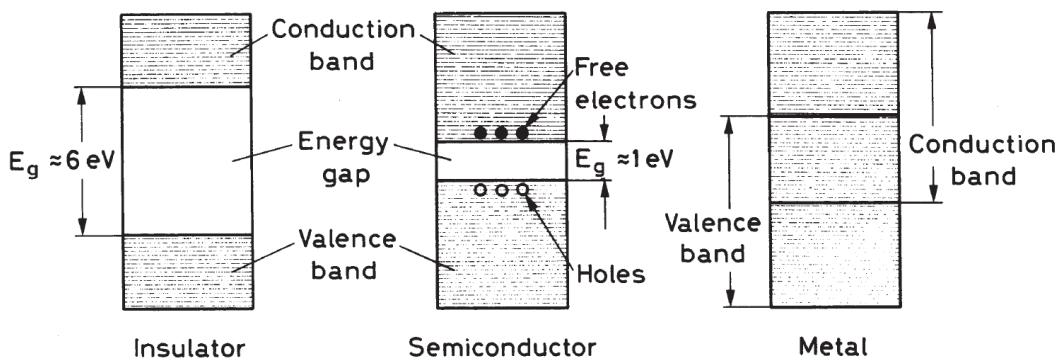
- Il principale svantaggio è il fatto che questi rivelatori sono parecchio sensibili alla temperatura, quindi le condizioni di lavoro possono cambiare a seconda della temperatura in cui si sta operando. A volte alcuni di questi richiedono addirittura un sistema di raffreddamento perché altrimenti il rumore sarebbe eccessivamente elevato. È il caso dei rivelatori al germanio, i quali necessitano di un raffreddamento;
- Il danneggiamento da radiazione. Infatti, essendo il semiconduttore composto da un reticolo, cioè da una struttura ordinata, quando viene sottoposto a un'elevata dose di radiazione questa può produrre dei danni al reticolo, modificandone in qualche modo la struttura ordinata e causando delle conseguenze sul funzionamento del rivelatore. Ciò non costituisce un problema per le esperienze che svolgiamo in laboratorio dal momento che noi utilizziamo una sorgente α che ha un'attività abbastanza bassa. Questi problemi si presentano laddove questi rivelatori devono essere adoperati in presenza di alte radiazioni, come nel caso di esperimenti sotto fascio dunque in un acceleratore, oppure esperimenti nello spazio dove la radiazione cosmica diventa importante perché non si è più schermati dal filtro dovuto all'atmosfera terrestre;

- Dimensioni compatte. Tale aspetto può costituire uno svantaggio, in quanto dover rivestire una superficie molte estesa con un rivelatore a semiconduttore è estremamente costoso e anche impegnativo dal punto di vista di elettronica e del consumo, per cui quando si deve realizzare un rivelatore a semiconduttore di dimensioni estese nascono altre problematiche e può essere non facile affrontarle.

10.1.2 Banda di valenza e banda di conduzione

Richiamiamo velocemente le proprietà dei semiconduttori.

I materiali solidi si distinguono in tre categorie diverse a seconda della struttura a bande dei livelli di energia:

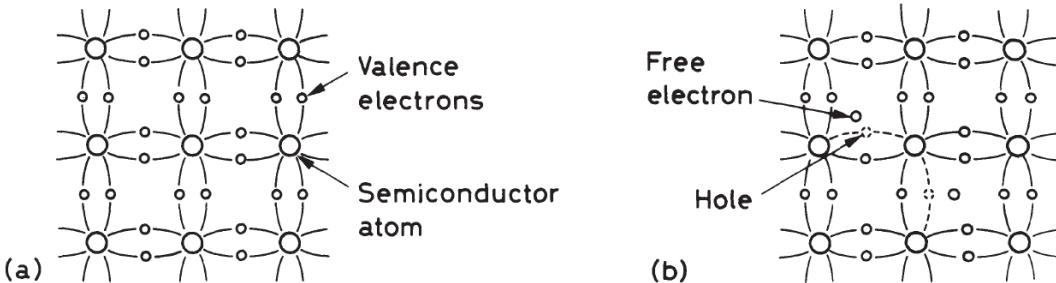


In generale se banda di valenza e banda di conduzione sono separate da un gap abbastanza esteso in cui non possono essere presenti dei livelli energetici, cioè da un gap di energia proibita, abbiamo un materiale isolante; se invece il gap è inesistente abbiamo un materiale conduttore. Una situazione intermedia è quella dei materiali semiconduttori, dove tale gap è presente ma ha dimensione abbastanza piccole, dell'ordine di alcuni elettronVolts.

Vediamo che succede se applichiamo un campo elettrico a queste tre tipologie di materiale:

- In un isolante non comporta il passaggio di corrente, perché tutti gli elettroni si trovano nella banda di valenza e quindi non abbiano conduzione;
- In un conduttore si osserva il passaggio di una corrente;
- In un semiconduttore si osserva una piccolissima corrente legata al fatto che alcuni elettroni, che definiamo elettroni termici i quali hanno acquisito un'energia per effetti termici sufficiente a superare il gap energetico, possono condurre. È chiaro che è un effetto puramente statistico, dovuto all'agitazione termica, quindi si genera una corrente abbastanza debole.

Nei semiconduttori abbiamo un'altra caratteristica fondamentale, cioè il fatto che i portatori di carica, ossia le cariche che generano una corrente, possono essere di due tipologie: *elettroni* e *lacune*.



Covalent bonding of silicon: (a) at 0 K, all electrons participate in bonding, (b) at higher temperatures some bonds are broken by thermal energy leaving a *hole* in the valence band

Le lacune sono delle vacanze di elettroni e anch'esse concorrono al valore della corrente in un semiconduttore, quindi ogni volta che noi andremo a parlare di questi effetti di corrente, faremo riferimento sia elettroni che lacune.

10.1.3 Creazione di coppie

Normalmente, in un semiconduttore esistono due fenomeni che sono in competizione l'uno con l'altro:

1. Creazione di coppie elettrone-lacuna che abbiamo già accennato, cioè un elettrone potrebbe passare, per effetti termici, dalla banda di valenza alla banda di conduzione e quindi si viene a creare una coppia elettrone-lacuna;
2. Ricombinazione, cioè un elettrone potrebbe ricombinarsi con una lacuna, purché i valori di energia e di impulso lo consentano.

Analizziamo il primo fenomeno. È chiaro che in generale, in un semiconduttore puro, detto anche intrinseco², il numero di elettroni che si trova nella banda di conduzione è esattamente uguale al numero delle lacune in banda di valenza, perché ogni volta che un elettrone viene promosso salta dalla banda di valenza alla banda di conduzione e crea la sua lacuna corrispondente. Sia gli elettroni che le lacune contribuiscono alla conducibilità elettrica del semiconduttore.

Cerchiamo allora di capire quanto vale la concentrazione di elettroni e di lacune. Dal momento che stiamo considerando un semiconduttore puro, il numero di elettroni corrisponde al numero di lacune, dunque indichiamo la concentrazione in generale con n_i , che sarà data da

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left\{-\frac{E_g}{2k_B T}\right\} = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left\{-\frac{E_g}{2k_B T}\right\}$$

dove

- N_C e N_V sono rispettivamente il numero di possibili stati nella banda di conduzione e in quella di valenza;
- E_g è l'energia del gap proibito;

²Da non confondere con il semiconduttore intrinseco visto negli APD.

- T è la temperatura;
- k_B è la costante di Boltzmann
- A è una costante indipendente dalla temperatura

Le dipendenze dall'energia del gap e dalla temperatura nell'esponenziale decrescente sono abbastanza intuitive: per quanto riguarda E_g , se il gap è piccolo per un elettrone sarà più facile lasciare la banda di valenza e andare verso la banda di conduzione, viceversa più è elevata la temperatura più sarà probabile che un elettrone possa passare alla banda di conduzione per effetto termico, ecco perché lo si trova al denominatore. Utilizzando la statistica di Fermi-Dirac, è possibile inoltre valutare il numero di stati nella banda di conduzione e nella banda di valenza. Si trova che il loro prodotto è pari a $N_C N_V = AT^3$. In definitiva, la concentrazione di elettroni e lacune libere dovuto soltanto all'effetto termico dipende dalle caratteristiche del semiconduttore (in particolare da E_g) e dalla temperatura T .

Vediamo quanti elettroni e lacune abbiamo a temperatura ambiente per due semiconduttori, silicio e germanio, i quali si differiscono per le dimensioni del gap. Supposto di avere una temperatura di 300 K, troviamo una concentrazione di $2.5 \cdot 10^{13}/\text{cm}^3$ per il germanio e $1.5 \cdot 10^{10}/\text{cm}^3$ per il silicio. Se consideriamo che in media abbiamo 10^{22} atomi/ cm^3 , tali valori corrispondono rispettivamente a dire che soltanto un elettrone su 10^9 atomi per il germanio un elettrone su 10^{12} atomi per il silicio si trova nella banda di conduzione, quindi effettivamente non sono tantissimi. Ciò ha una corrispondenza con quanto affermato prima, ossia che se applichiamo un campo elettrico a un materiale semiconduttore si genera una corrente molto piccola, ed effettivamente è così perché troviamo poche coppie elettrone-lacuna dovute ad effetti termici.

10.1.4 Mobilità

Sotto l'azione di un campo elettrico E , elettroni e lacune cominciano a muoversi, cioè subiscono un moto di deriva. Possiamo valutare le velocità con cui avviene questa deriva: esse sono date da³

$$v_e = \mu_e E \quad , \quad v_h = \mu_h E$$

Come possiamo vedere, le velocità di elettroni e lacune sono proporzionali al valore del campo elettrico e alla mobilità, che sono diverse per elettroni e lacune. Queste mobilità non sono costanti, dipendono dal valore del campo elettrico e della temperatura, ad esempio per il silicio a temperature normali troviamo che le mobilità μ_e e μ_h :

- risultano essere costanti per valori di campo elettrico inferiori a 10^3 V/cm ;
- hanno una dipendenza del tipo $E^{-\frac{1}{2}}$ per valori di campo elettrico compresi tra $10^3 - 10^4 \text{ V/cm}$;
- hanno una dipendenza del tipo E^{-1} per valori di campo maggiori di 10^4 V/cm .

Tale andamento ha come conseguenza il fatto che arrivati a un certo punto si giunge ad una saturazione della velocità a un valore massimo di 10^7 cm/s , legata al fatto che

³Il pedice h sta per "hole", cioè lacuna in inglese.

l'energia che viene acquisita da questi elettroni e queste lacune viene poi persa per gli urti con il reticolo.

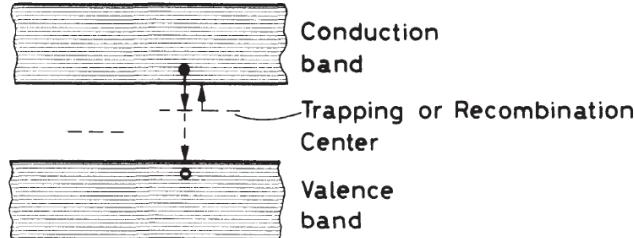
Alla luce di quanto visto, la condutività di un semiconduttore si può esprimere considerando sia il contributo dovuto agli elettroni che quello dovuto alle lacune:

$$\sigma = en_i(\mu_e + \mu_h)$$

10.1.5 Ricombinazione e trapping

Può avvenire una ricombinazione spontanea, ossia un fenomeno per cui elettroni e lacune possono ricombinarsi e dare luogo all'emissione di un fotone. Tale processo è un meccanismo raro, perché non è sufficiente che elettroni e lacune si trovino vicini per ricombinarsi, ma devono avere anche dei valori opportuni di energia e impulso. A riprova della sua rarità, la vita media di una coppia che è stata creata per effetti termici è dell'ordine di un secondo, dopodiché per qualche motivo c'è una ricombinazione e tale coppia cessa di esistere. Sebbene un secondo possa sembrare un tempo piccolo, se confrontato con i tempi caratteristici dei rivelatori risulta essere un tempo enorme, dunque questa coppia sopravvive parecchio.

Tuttavia quello che si osserva sperimentalmente è che la vita media di una coppia è molto più bassa di un secondo, quindi evidentemente ci sono altri meccanismi oltre alla ricombinazione spontanea che portano alla scomparsa della coppia. Questi meccanismi sono legati alla presenza dei centri di ricombinazione.



Infatti, a causa di difetti della struttura cristallina si possono presentare dei livelli nella zona proibita che vengono definiti "profondi", nel senso che sono abbastanza distanziati sia dalla banda di conduzione che dalla banda di valenza (li possiamo vedere tratteggiati in figura). In questi livelli si può verificare una ricombinazione perché sono livelli che possono attrarre elettroni dalla banda di conduzione e lacune della banda di valenza permettendo quindi una ricombinazione. Ecco perché vengono definiti come centri di ricombinazione.

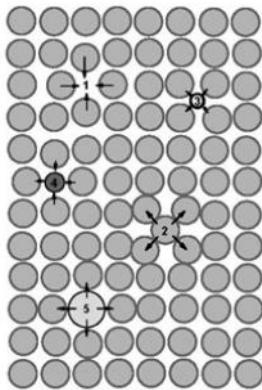
La presenza di tali centri di ricombinazione comporta una durata minore per la vita media di una coppia.

Da un punto di vista della rivelazione, visto che il rivelatore a semiconduttore produce per effetto del passaggio di una particella coppie elettrone-lacuna su cui si basa il segnale, ci interessa che tali coppie non si ricombinino prima di riuscire a raccoglierle, dunque non vogliamo che la vita media sia eccessivamente bassa perché se queste coppie si ricombinano troppo rapidamente perdiamo il segnale. In conseguenza a ciò i semiconduttori che adoperiamo nei rivelatori devono essere estremamente puri, cioè

devono presentare pochi difetti perché più difetti ci sono più aumentano i centri di ricombinazione.

Alcuni centri di ricombinazione sono anche definiti dei centri trappola. Sono dei livelli dove viene catturata soltanto una tipologia di carica, quindi ad esempio viene catturato un elettrone dalla banda di conduzione e l'elettrone rimane in tale sito per parecchio tempo, da cui il nome livelli trappola.

Vediamo ora che tipo di difetti possono essere presenti in un reticolo cristallino come quello di un semiconduttore:



Un difetto di un cristallo è un elemento che rompe la perfetta periodicità del reticolo cristallino.

Difetti puntiformi:

1. Vacanza
2. Autointerstiziale
3. Interstiziale
4. Sostituzionale ($r < r_h$)
5. Sostituzionale ($r > r_h$)

In questa figura sono rappresentate i principali difetti di un reticolo:

- Potremmo avere una vacanza, cioè l'assenza di un atomo che era previsto nel reticolo;
- Potremmo avere un difetto autointerstiziale, che è l'opposto della vacanza, in quanto si ha un atomo dello stesso tipo del cristallo in più rispetto a quanto previsto dello schema del reticolo;
- Potremmo avere un difetto interstiziale, che si differenzia dal precedente per il fatto che abbiamo sempre un atomo in più rispetto a quanto previsto però è un atomo di natura diversa;
- Potremmo infine avere dei difetti sostituzionali, cioè un atomo del semiconduttore viene sostituito con un atomo di tipologia diversa, però affinché ciò avvenga le dimensioni devono essere abbastanza simili, dunque i raggi dei due atomi devono essere simili.

Ogni difetto del reticolo comporta una modifica nello schema dei livelli energetici. Scegliendo però in maniera opportuna degli elementi da aggiungere al reticolo cristallino, ossia con opportuni drogaggi, possiamo generare degli ulteriori livelli energetici superficiali, ossia livelli che sono vicini o alla banda di conduzione o alla banda di valenza. Per questo motivo nella pratica si utilizzano semiconduttori drogati.

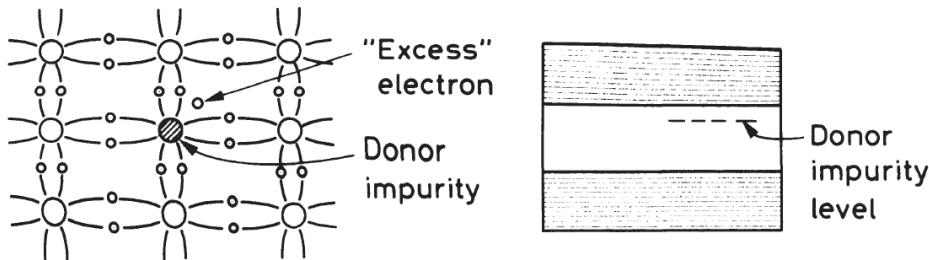
10.2 Semiconduttori drogati

In un semiconduttore drogato, detto anche semiconduttore estrinseco, si vanno a sostituire gli atomi del semiconduttore con atomi di elementi diversi. Ad esempio, nel caso

di silicio e germanio, i quali sono entrambi tetravalenti cioè hanno quattro elettroni di valenza, per drogarli è necessario introdurre atomi trivalenti o atomi pentavalenti. La conseguenza del drogaggio è una variazione nella proporzione tra elettroni e lacune. Infatti in un semiconduttore puro il numero di elettroni coincide con il numero delle lacune generati per effetti termici, mentre drogando il materiale creiamo uno squilibrio.

10.2.1 Semiconduttori di tipo n

In un semiconduttore drogato di tipo n si va a sostituire un atomo del reticolo con un atomo pentavalente, come ad esempio l'arsenico, il fosforo o l'antimonio.

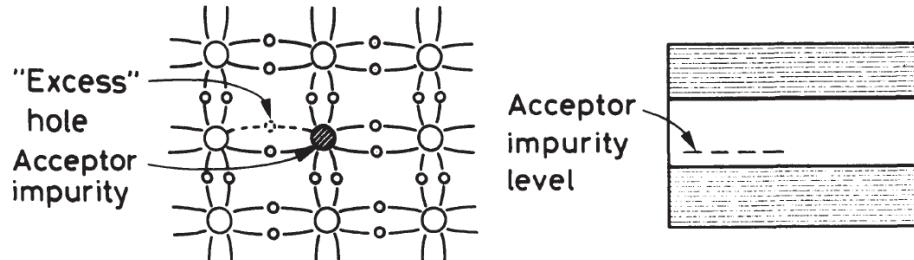


Questo atomo avrà 5 elettroni di cui 4 vanno a legarsi con i quattro atomi di silicio che si trovano attorno, mentre il quinto elettrone rimane in eccesso e può essere un elettrone di conduzione. L'aggiunta di un tale atomo corrisponde a generare nella zona del gap proibito di energie un livello superficiale, che in questo caso è molto vicino alla banda di conduzione, a una distanza di 0,01 eV nel caso del germanio e 0,05 eV nel caso del silicio. Questo elettrone si troverà in questo livello discreto, per cui gli sarà sufficiente una piccolissima energia per essere in grado di passare alla banda di conduzione, quindi sostanzialmente è un elettrone quasi libero.

Con valori di drogaggio tipici si può raggiungere un numero di elettroni di conduzione di 10^{17} elettroni/cm³, mentre il numero di lacune si riduce a 10^3 lacune/cm³. Ecco perché nei semiconduttori drogati di tipo n i portatori di carica maggioritari sono gli elettroni mentre le lacune rappresentano i portatori di carica minoritari.

10.2.2 Semiconduttori di tipo p

La situazione è diametralmente opposta in semiconduttore drogato di tipo p. In questo caso si va a sostituire un atomo del reticolo con un atomo trivale come il gallio, il boro o l'indio e quello che stavolta rimane in eccesso è una lacuna.



Questa lacuna si troverà in un livello discreto situato nel gap di energia probita, a una distanza molto piccola dalla banda di valenza. In questo caso le lacune rappresentano i portatori di carica maggioritari e gli elettroni quelli minoritari.

Va precisato che anche se introduciamo un'impurezza ossia un atomo di tipo diverso, il materiale rimane comunque neutro. Infatti nel caso in cui ad esempio introduciamo un'impurità di tipo n cioè un donore, sebbene ci sia un elettrone in eccesso ciò non vuol dire che il materiale è carico negativamente, perché abbiamo la carica del nucleo che compensa l'elettrone libero. Ne segue che complessivamente abbiamo un materiale neutro. Analoghi ragionamenti valgono nel caso in cui introduciamo un atomo accettore.

10.2.3 Concentrazione di elettroni e lacune

Si può dimostrare che, indipendentemente del tipo di droggaggio, il prodotto della concentrazione di elettroni n per la concentrazione di lacune p è sempre data da

$$np = n_i^2$$

dove n_i è la concentrazione nel caso del semiconduttore intrinseco.

Da tale relazione segue che se aumentano gli elettroni per effetto di un droggaggio, la quantità delle lacune che si formano nel semiconduttore non rimane costante ma diminuisce e viceversa nel caso opposto.

La legge appena enunciata prende il nome di legge dell'azione di massa. Partendo da tale legge, in un semiconduttore di tipo n, dove ci aspettiamo che il numero di atomi accettori N_A sia pari a zero mentre il numero di atomi donori N_D comporti la formazione di un medesimo numero di elettroni⁴, possiamo esprimere la concentrazione di lacune e la conducibilità del materiale come segue:

$$p \approx \frac{n_i^2}{N_D} \quad \text{e} \quad \sigma \approx eN_D\mu_e$$

Analogamente, per un semiconduttore drogato di tipo p, dove stavolta abbiamo $N_D = 0$ e N_A lacune, abbiamo

$$n \approx \frac{n_i^2}{N_A} \quad \text{e} \quad \sigma \approx eN_A\mu_h$$

Vediamo come a differenza di prima, dove la conducibilità veniva espressa come somma di due termini, uno dovuto agli elettroni e uno dovuto alle lacune, nel caso di semiconduttori drogati la conduzione elettrica è affidata ai portatori maggioritari di carica, ossia agli elettroni nel caso dei semiconduttori drogati di tipo n e alle lacune nel caso dei semiconduttori drogati di tipo p. Se allora vogliamo avere una corrente più elevata, quello che si deve fare è drogare maggiormente il materiale, per cui se ad esempio abbiamo un droggaggio di tipo n dobbiamo aumentare la concentrazione degli atomi donori; viceversa nel semiconduttore di tipo p dobbiamo aumentare la concentrazione di atomi accettori.

⁴Gli atomi accettori sono elementi che accettano elettroni dal semiconduttore, mentre i donori donano elettroni al semiconduttore.

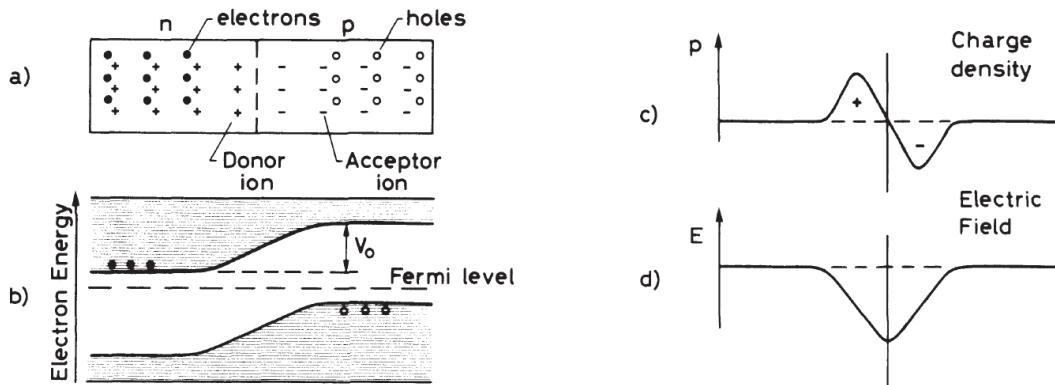
10.2.4 Semiconduttori di tipo p+, p-, i (compensati)

Può essere utile drogare i semiconduttori con elevate concentrazioni, anche dell'ordine di 10^{20} atomi/cm³ anziché i soliti 10^{13} atomi/cm³. Per quanto detto prima, questi materiali risultano essere altamente conduttori. Inoltre essi sono indicati con il simbolo "+" proprio per indicare che la concentrazione è elevata e vengono tipicamente adoperati per la realizzazione dei contatti elettrici. Infatti in qualsiasi rivelatore per poter estrarre un segnale elettrico abbiamo bisogno di contatti elettrici, ad esempio nel caso del rivelatore a gas abbiamo anodo e catodo da cui possiamo prelevare un segnale. Qui il materiale semiconduttore non ha dei contatti, dunque bisogna crearli, sebbene ciò non sia facile perché nel momento in cui proviamo a utilizzare un materiale metallico a contatto con un semiconduttore purtroppo introduciamo degli effetti collaterali. Per evitare ciò, quello che si fa è realizzare delle zone ad alto droggaggio laddove vogliamo creare il contatto ohmico con un metallo.

Per quanto riguarda i semiconduttori etichettati con la lettera "i", ingenuamente potremmo pensare che stia per intrinseco, ma in realtà non è esattamente così. Infatti un materiale di tipo i si comporta come un materiale intrinseco cioè un materiale puro, ma in realtà prende il nome di materiale compensato, perché è comunque un semiconduttore che è stato drogato, sia di tipo n che di tipo p, con la stessa concentrazione. L'effetto risultante di tale droggaggio è dunque quello di riportare il semiconduttore alla condizione di intrinseco, ma bisogna sempre ricordare che è stato drogato. Sono materiali che hanno una resistività elevata.

10.2.5 Giunzioni n-p

Il principio di base di un rivelatore a semiconduttore sono le giunzioni p-n o n-p. Se prendiamo due materiali, uno drogato di tipo n e uno drogato di tipo p, e li accostiamo uno vicino all'altro, avvengono dei fenomeni.



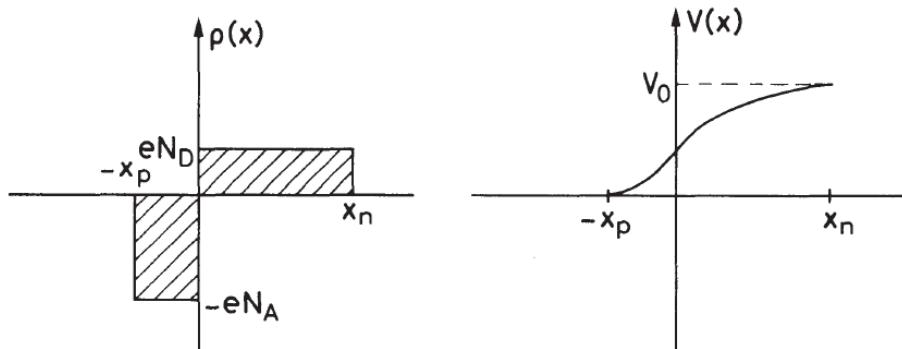
(a) Schematic diagram of an np junction, (b) diagram of electron energy levels showing creation of a contact potential V_0 , (c) charge density, (d) electric field intensity

Poiché stiamo mettendo a contatto dei materiali che hanno concentrazione di carica diverse l'uno dall'altro (nel materiale di tipo n c'è un'elevata concentrazione di elettroni liberi, mentre nel materiale di tipo p c'è un'elevata concentrazione di lacune), si verifica una diffusione di elettroni verso il materiale di tipo p e di lacune verso il materiale di tipo n, proprio a causa di questa differente concentrazione. Gli elettroni che si diffondono

nella zona di tipo p incontrano le lacune e si ricombinano con queste; lo stesso avviene nel materiale di tipo n, dove le lacune che si sono diffuse in esso si ricombinano con gli elettroni. Essendo entrambe le zone n e p inizialmente neutre, nella giunzione la zona n avrà una concentrazione di cariche positive mentre la zona p di cariche negative. Come possiamo infatti vedere dalla figura a), inizialmente in n erano presenti gli elettroni liberi mentre in n le lacune, e una volta realizzata la giunzione gli elettroni sono passati da n a p e si sono ricombinati con le lacune. In conseguenza a ciò, nella regione p sono rimasti degli ioni negativi, fissi nel reticolo; viceversa nella zona di tipo n le lacune si sono ricombine con gli elettroni e quindi sono rimasti fissi nel reticolo gli ioni positivi. Ciò comporta la formazione di un campo elettrico e dunque di un potenziale V_0 , detto potenziale di contatto, che come possiamo vedere nella figura b), dove sull'asse verticale sono riportati i livelli in energia mentre l'asse orizzontale la posizione in corrispondenza con la figura a), ha deformato i livelli energetici. In altri termini, a causa della presenza di queste cariche fisse nel reticolo dei materiali di tipo p e di tipo n, si è creata una differenza di potenziale che impedisce l'ulteriore passaggio e diffusione di cariche libere. Si è allora creata una regione che dal punto di vista della rivelazione è ottimale, perché è una regione in cui non sta circolando carica libera e quindi se per caso dovesse passare una particella, la quale comporta la formazione di nuove cariche, quest'ultime possono essere spazzate via da questo potenziale e raccolte.

Il potenziale di contatto V_0 è abbastanza piccolo, circa 1 V. Inoltre la zona che si è venuta a creare prende il nome di zona di svuotamento, perché è una zona dove abbiamo eliminato tutte le cariche libere. Sono quindi presenti delle cariche fisse, che determinano un campo elettrico, ma non sono presenti cariche libere che potrebbero rappresentare rumore per i nostri scopi, in quanto sono cariche che non sono dettate dal passaggio di una radiazione, ma sono cariche che erano presenti nel materiale semiconduttore. Non essendo presenti in questa regione, essa risulta essere una regione utile per la rivelazione.

Cerchiamo allora di valutare l'estensione di tale regione. Per fare ciò consideriamo la concentrazione degli atomi accettori e degli atomi donatori⁵.



Supponiamo di avere una distribuzione uniforme di carica attorno alla giunzione. Detta

⁵La dimostrazione che segue è stata aggiunta dall'autore, la professoressa riporta soltanto i risultati finali. Si è preferito operare il tal modo piuttosto che dedicare un approfondimento a parte per non rendere ridondante la trattazione.

x_n l'estensione della zona di svuotamento nel tipo n e x_p quella nel tipo p, abbiamo:

$$\rho(x) = \begin{cases} eN_D & \text{per } 0 < x < x_n \\ -eN_A & \text{per } -x_p < x < 0 \end{cases}$$

dove e è la carica dell'elettrone e N_D e N_A sono le concentrazioni di impurità donatrici e accettrici. Poiché la carica totale è conservata, abbiamo anche la relazione:

$$N_A x_p = N_D x_n$$

Conoscendo la densità di carica, possiamo calcolare l'ampiezza della regione di svuotamento a partire dall'equazione di Poisson:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon}$$

dove ε è la costante dielettrica del mezzo. Integrando una volta tale equazione troviamo:

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\varepsilon}x + C_n & \text{per } 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\varepsilon}x + C_p & \text{per } -x_p < x < 0 \end{cases}$$

dove C_n e C_p sono costanti di integrazione.

Applichiamo le condizioni al contorno, secondo le quali il campo elettrico $E = -dV/dx$ deve annullarsi su entrambi i bordi della distribuzione di carica: imponendo quindi che $dV/dx = 0$ per $x = x_n$ e per $x = -x_p$, l'equazione appena scritta diventa:

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\varepsilon}(x - x_n) & \text{per } 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\varepsilon}(x + x_p) & \text{per } -x_p < x < 0 \end{cases}$$

Tale equazione rappresenta il campo elettrico nella regione di carica spaziale. Un'ulteriore integrazione ci fornisce:

$$V(x) = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\varepsilon}\left(\frac{x^2}{2} - x_n x\right) + C & \text{per } 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\varepsilon}\left(\frac{x^2}{2} + x_p x\right) + C' & \text{per } -x_p < x < 0 \end{cases}$$

Poiché le due soluzioni devono coincidere per $x = 0$, è chiaro che $C = C'$. Inoltre per $x = x_n$ abbiamo che $V(x_n) = V_0$ che è il potenziale di contatto, quindi:

$$V_0 = \frac{eN_D}{2\varepsilon}x_n^2 + C$$

Analogamente, sul lato p, abbiamo che $V = 0$ per $x = -x_p$, quindi:

$$0 = -\frac{eN_A}{2\varepsilon}x_p^2 + C$$

Eliminando C otteniamo:

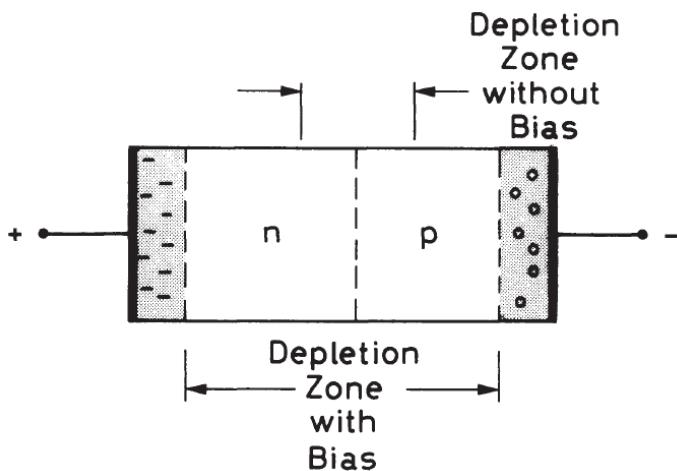
$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon} (N_D x_n^2 + N_A x_p^2)$$

Utilizzando la conservazione della carica si ottiene infine

$$x_n = \left[\frac{2\varepsilon V_0}{e N_D (1 + N_D / N_A)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad x_p = \left[\frac{2\varepsilon V_0}{e N_A (1 + N_A / N_D)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Vediamo come x_n e x_p dipendono dal potenziale di contatto V_0 e dalle concentrazioni. Possiamo vedere che, se un lato è più drogato dell'altro, cosa che avviene solitamente, allora la zona di svuotamento si estenderà maggiormente nel lato meno drogato. Ad esempio, se il materiale p è più drogato rispetto a quello n, dunque se $N_A \gg N_D$, allora $x_n \gg x_p$, il che significa che la regione di svuotamento si trova quasi interamente sul lato n della giunzione.

In ogni caso le regioni di svuotamento hanno dimensioni molto piccole, tipicamente dell'ordine di $100 \mu\text{m}$. In queste condizioni, un rivelatore basato su una giunzione p-n avrà prestazioni abbastanza limitate in termini di rumore, risoluzione e stopping power. Per migliorarlo possiamo ampliare la regione di svuotamento e ciò si fa polarizzando la giunzione, cioè applicando una differenza di potenziale esterna per aumentare la regione in cui si verifica lo svuotamento.

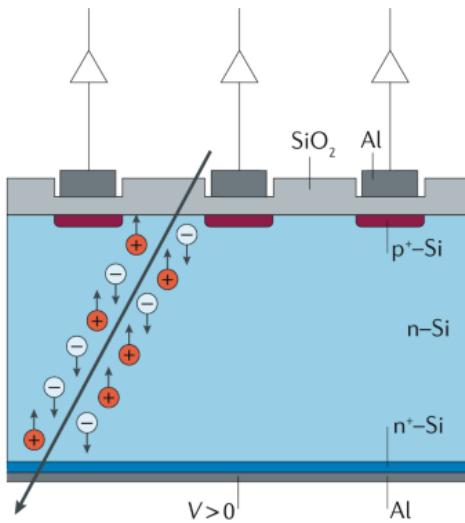


Tale procedura è detta polarizzazione inversa, in quanto il potenziale positivo viene applicato al materiale di tipo n e quello negativo al materiale di tipo p.⁶ In questo modo si allarga la zona di svuotamento fino a valori dell'ordine del millimetro, la quale rappresenterà il volume sensibile per la rivelazione delle particelle. Tuttavia non si può andare oltre un certo valore perché abbiamo un limite dettato dalla resistività del materiale.

⁶Se la giunzione venisse polarizzata direttamente la regione di svuotamento si contrarrebbe e si avrebbe conduzione.

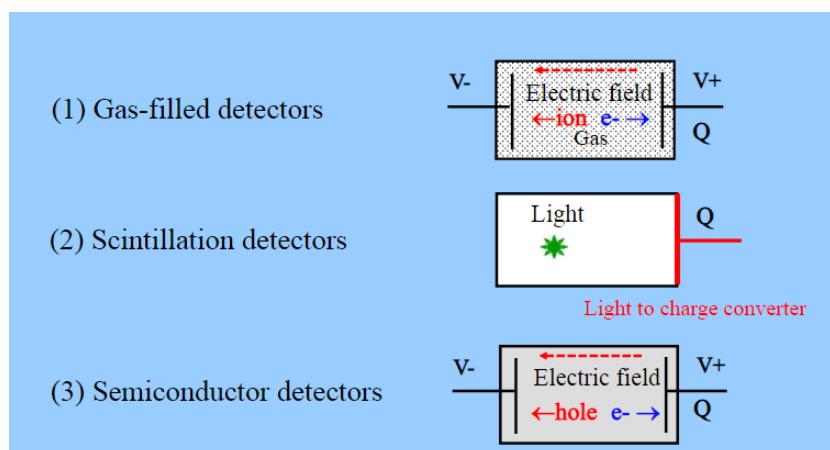
10.3 Rivelatori a semiconduttore

Riassumendo, i rivelatori a semiconduttore si basano su una giunzione p-n polarizzata inversamente, dove la regione di svuotamento è la regione attiva, cioè quella che utilizziamo sostanzialmente per la rivelazione. Uno schema di un rivelatore a semiconduttore è mostrato nella seguente figura:



In tale schema la zona n rappresenta la parte principale della giunzione. Abbiamo poi dei contatti realizzati sopra con un p+, e con un n+ dall'altro lato.

Quando passa una particella all'interno della regione di svuotamento, essa deposita energia. Tale energia viene utilizzata per produrre coppie elettrone-lacuna, e queste coppie cominciano a migrare verso gli elettrodi per poi essere raccolte, in modo da indurre il segnale che andiamo poi a misurare. Lo schema è molto simile a quello che abbiamo visto per un rivelatore a gas, ciò che cambia è il mezzo in cui avviene il processo ed anche il tipo di processo, in quanto in tal caso produciamo coppie elettrone-lacuna mentre nel caso di un rivelatore a ionizzazione si producono coppie elettrone-ione. Ne approfittiamo per fare uno schema riassuntivo di quello che abbiamo visto finora nel campo della rivelazione:



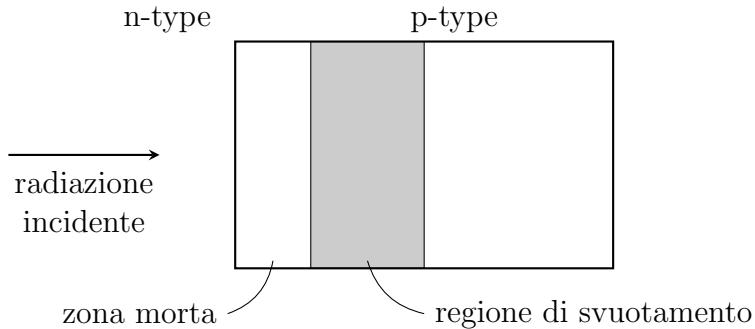
Vediamo come i rivelatori a gas e i rivelatori a semiconduttore presentano uno schema molto similare, mentre i rivelatori a scintillazione hanno un comportamento diverso, in quanto si basano su principi fisici abbastanza diversi.

Vediamo adesso come si realizza un rivelatore a semiconduttore, o meglio come si realizzano le giunzioni. Vengono utilizzati diversi processi per creare la barriera, noi vedremo quelli più utilizzati, che sono:

- Rivelatori a diffusione;
- Rivelatori a barriera superficiale;
- Ion Implanted diodes;
- Rivelatori a deriva di Litio.

10.3.1 Rivelatori a diffusione

I rivelatori a diffusione vengono realizzati facendo diffondere delle impurità di tipo n (come ad esempio il fosforo) in un'estremità di un semiconduttore di tipo p. Per fare ciò sono necessarie delle elevate temperature, anche 1000 °C. Ottimizzando i tempi di diffusione e le concentrazioni si può ottenere una giunzione adeguata.

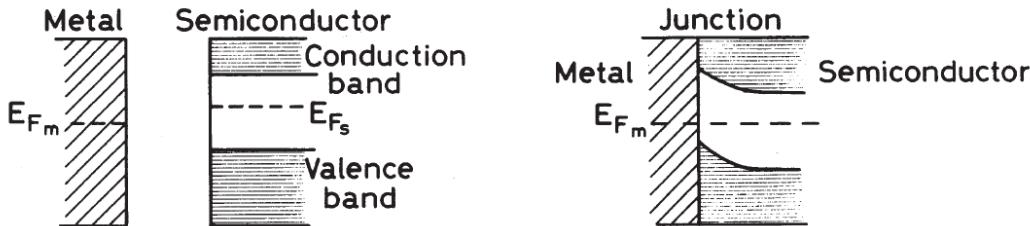


Tuttavia, il principale problema di questo tipo di rivelatori è che la giunzione non si forma in superficie, bensì si forma a una profondità di alcune decine di micron. Questo vuol dire che una particella che incide sul rivelatore dovrà attraversare prima una zona che per i nostri scopi è una zona morta, perché non è una zona utile per la rivelazione, per poi entrare nella regione di svuotamento. Ciò comporta una perdita dell'informazione trasportata dalla particella, il che limita le misure di energia. Tale fattore costituisce il principale svantaggio, inoltre un altro svantaggio sono le alte temperature che si adoperano, perché aumentano il rumore e tendono a diminuire la vita media dei portatori di carica, rendendo più difficile la loro misura. I vantaggi sono la robustezza e le basse contaminazioni superficiali.

10.3.2 Rivelatori a barriera superficiale (SSB)

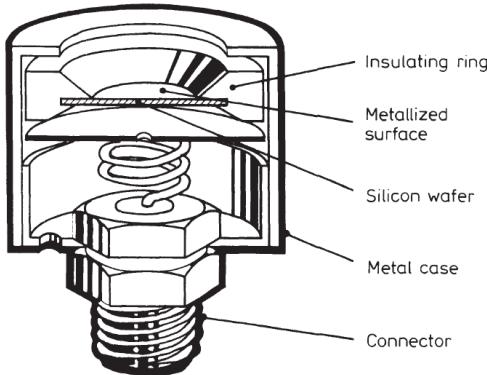
Il problema della barriera a una certa profondità, dunque della presenza di una zona morta, viene superato dai rivelatori a barriera superficiale. Questi sono basati su dei

diodi Schottky, cioè dei diodi che si formano, anziché con due semiconduttori, con un semiconduttore e un metallo.



Quando infatti andiamo ad accostare un metallo con un semiconduttore, quello che succede è la formazione anche in questo caso di una giunzione. Solitamente si adopera dell'oro su un materiale di tipo n o dell'alluminio su un materiale di tipo p.

La produzione di questi rivelatori avviene trattando la superficie chimicamente, ossidandola e poi depositando lo strato metallico per evaporazione. Il tutto infine viene montato su un anello isolante con delle superfici metallizzate per assicurare il contatto elettrico.



Il rivelatore che adoperiamo per l'esperienza della misura della radiazione α è di questa tipologia e si presenta così come mostrato nella figura accanto.

L'esterno è l'anello su cui viene montato il tutto, mentre all'interno è posizionato il rivelatore che è una fetta di silicio. Il connettore ad avvitare permette infine il passaggio del segnale.

Vediamo i vantaggi di questa tipologia di rivelatori:

- In questo caso abbiamo dei rivelatori totalmente svuotati, per cui non abbiamo nessuna zona morta come avveniva invece nel caso precedente;
- Possono essere profondi anche diversi millimetri. Nel nostro caso non ci interessa, però potrebbe essere utile per la rivelazione di altre particelle;
- Il processo di lavorazione avviene a temperatura ambiente, a differenza di quanto visto per i rivelatori a diffusione.

Per quanto riguarda gli svantaggi:

- Lo strato metallico depositato è così sottile che purtroppo non isola dalla luce, quindi sono rivelatori che possono essere sensibili alla luce. Infatti i fotoni del visibile hanno un'energia sufficiente a poter creare delle coppie elettrone-lacuna;
- Sono anche sensibili a possibili contaminazioni superficiali.

10.3.3 Ion-Implanted Diodes

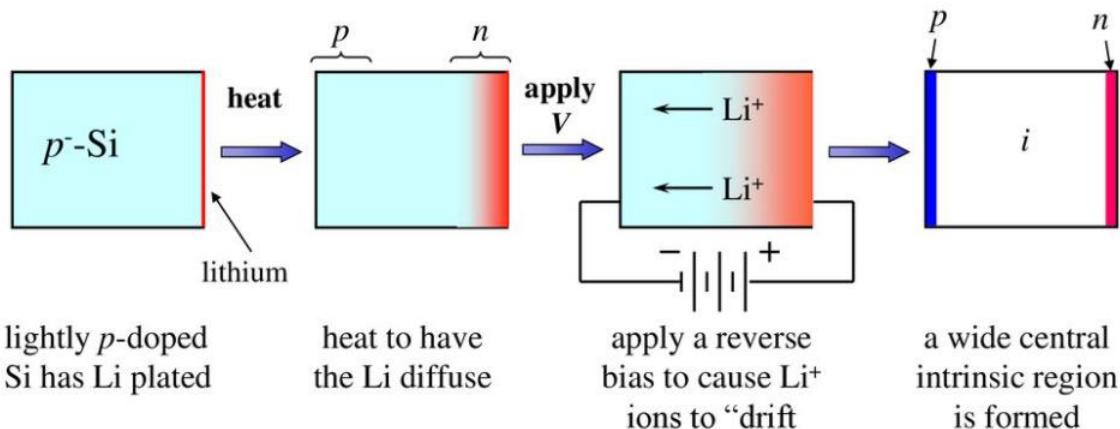
Altre tipologie di rivelatori si basano invece sull'utilizzo dell'impiantazione ionica, in cui il drogaggio viene realizzato attraverso l'utilizzo di acceleratori che accelerano dei fasci di ioni, che sono le nostre impurità, per impiantarli all'interno di un materiale semiconduttore. È un processo violento essendo sostanzialmente un bombardamento del materiale semiconduttore, e questo fa sì che alla fine sia necessario un annealing⁷ a 500 °C per poter ripristinare i danni eventualmente causati da questo processo di impiantazione.

Per quanto riguarda i vantaggi, essi sono dei rivelatori molto stabili e con finestre di ingresso molto sottili, quindi con zona morta di poche decine di nanometri, ma lo svantaggio è che sono parecchio costosi, soprattutto per i processi di produzione che richiedono l'utilizzo di un acceleratore.

10.3.4 Rivelatori a deriva di litio Si(Li)

L'ultima categoria di rivelatori che introduciamo sono i rivelatori a deriva di Litio, i quali cercano di risolvere il problema delle piccole dimensioni della regione di svuotamento, infatti abbiamo detto che c'è sempre un limite alle dimensioni di questa regione, perché poi il diodo va in rottura. Per risolvere questo problema si utilizza una cosiddetta aggiunzione p-i-n, dove al materiale di tipo p e al materiale di tipo n si frappone un materiale di tipo compensato. In questo modo è possibile ampliare la zona in cui può avvenire la rivelazione, potendo arrivare anche a spessori di 10 – 15 mm, il che è molto utile laddove abbiamo bisogno di range elevati per poter fermare una particella e misurarne l'energia.

Vediamo il processo con cui avviene la realizzazione di questi rivelatori:



Il litio viene posizionato sulla superficie di un materiale drogato di tipo p, viene fatto diffondere attraverso l'applicazione di un campo elettrico e alla fine quello che si ottiene è un'aggiunzione di tipo p-i-n, in quanto a sinistra rimane la zona p perché il litio non è arrivato fino a questa estremità, la regione centrale diventa di tipo compensato, perché

⁷L'annealing (in italiano, "ricottura") è un processo termico utilizzato che in questo ambito viene impiegato per riparare i danni creati dall'impiantazione ionica, la quale può causare danni alla struttura cristallina del materiale, rompendo i legami atomici e generando difetti nella rete cristallina.

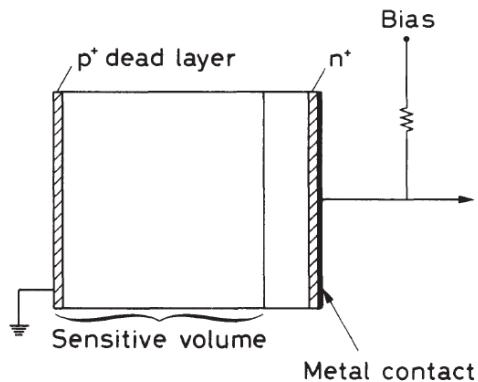
era drogata di tipo p e ad essa aggiungiamo il litio che è di tipo n e infine a destra rimane la zona di tipo n dovuta essenzialmente a un'alta concentrazione di litio.

I vantaggi sono dovuti a questi spessori elevati, che fanno sì che vengano utilizzati per la spettroscopia beta o per i raggi X a bassa energia. Gli svantaggi sono invece il fatto che si debbano adoperare a temperature basse a causa dell'elevato rumore termico, inoltre anche la conservazione dovrebbe avvenire a temperatura bassa per mantenere inalterata la zona intrinseca.

10.3.5 Realizzazione contatti

L'ultimo aspetto che discutiamo sul rivelatore al silicio riguarda la realizzazione dei contatti.

Non è possibile creare un contatto ohmico utilizzando un materiale metallico sul semiconduttore perché quello che si viene a creare è un diodo Schottky, che comporta un ulteriore giunzione e dunque un ulteriore regione di svuotamento, che non è ciò che desideriamo. Quello che allora si fa prima di applicare un contatto metallico è realizzare una regione altamente drogata, ad esempio nella figura seguente possiamo vedere una regione di tipo n+ prima del contatto metallico.



10.4 Caratteristiche dei rivelatori a semiconduttore

10.4.1 Linearità

In ogni rivelatore che misura l'energia, ci aspettiamo un ottimo grado di linearità, per cui se arriva una particella con un'energia E ci aspettiamo che il segnale prodotto sia proporzionale a tale energia, in maniera tale da avere una risposta lineare. Nel caso di un rivelatore a semiconduttore, se questo ha uno spessore sufficiente ad arrestare la particella al suo interno e quindi a misurarne tutta l'energia, ci aspettiamo che il segnale in tensione che viene indotto sia proporzionale alla carica prodotta, quindi alle coppie elettrone-lacuna che sono state create a seguito della perdita di energia della particella all'interno del rivelatore, diviso la capacità, in quanto il diodo non è altro che un condensatore a causa della sua configurazione elettrica.

Se la radiazione ha energia E , allora dovrebbero essere create E/w coppie elettrone-lacuna, dove w è l'energia media per creare una coppia. In generale però il rivelatore avrà un'efficienza di raccolta η , che indica il fatto che non tutte le coppie prodotte

potrebbero essere raccolte, dunque soltanto una carica $Q = \eta E/w$ viene raccolta e di conseguenza il segnale misurato sarà dato da

$$V = \frac{Q}{C} = \eta \frac{E}{wC}$$

Il fatto che purtroppo perdiamo alcune coppie non ci spaventa, in quanto ciò che conta è che si mantenga la linearità tra il segnale prodotto e l'energia depositata nel rivelatore. In generale, la risposta dei semiconduttori è abbastanza indipendente dal tipo di particella, quindi se entra un elettrone o se entra una particella α , normalmente se si deposita la stessa energia viene prodotto lo stesso segnale. Tale discorso è valido fintanto che non si considera l'arrivo di ioni: in tal caso si generano degli effetti di plasma, cioè delle nuvole di elettroni particolarmente dense che vanno a distorcere il campo elettrico all'interno del rivelatore e pertanto la linearità non è del tutto assicurata.

Nel caso in cui invece il rivelatore non sia sufficientemente spesso, viene misurata semplicemente una perdita di energia, quindi a volte i rivelatori a semiconduttore vengono utilizzati come rivelatori di trasparenza, cioè con lo scopo di essere attraversati e far perdere alle particelle una quantità di energia molto piccola. In questo caso la risposta non è lineare con l'energia della particella.

10.4.2 Risoluzione in energia

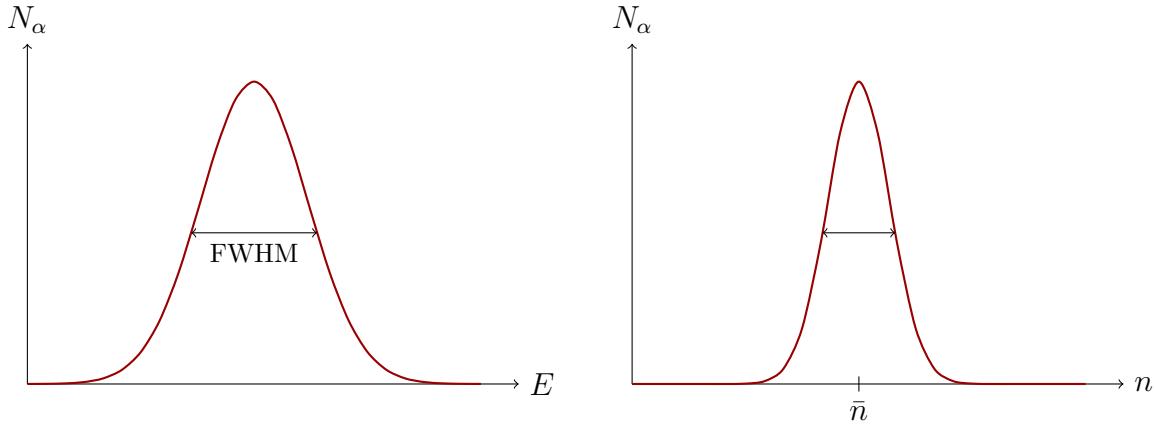
La risoluzione di questi rivelatori è tipicamente abbastanza buona. Infatti servono pochi elettron Volt per generare una coppia elettrone-lacuna, a differenza dei valori di energia media per creare una coppia ione-elettrone in un rivelatore a gas che sono dell'ordine di 20 – 40 eV. La conseguenza di ciò è che, a parità di energia depositata, nel caso di un rivelatore al silicio si produce un numero di coppie che è 10 volte superiore rispetto a quante se ne produrrebbero in un rivelatore a gas, e il fatto di avere un numero di coppie elevato fa sì che la risoluzione sia migliore.

È chiaro che l'energia necessaria a creare una coppia dipende dal gap di energia proibita. Ad esempio, alla temperatura di 77 K per il silicio sono necessarie energie dell'ordine di 3 – 4 eV, mentre per il germanio poco meno di 3 eV. Precisiamo che queste sono in realtà le energie per produrre una coppia, mentre le energie del gap sono in realtà più piccole. Ciò è legato al fatto che due terzi dell'energia vengono spesi per creare delle vibrazioni reticolari.

Prima di proseguire, facciamo alcune considerazioni. Quando vogliamo misurare l'energia, quest'ultima la misuriamo in termini del numero n di coppie che si generano. Tale numero è dato dal rapporto tra l'energia E che viene depositata nel rivelatore diviso w , che è l'energia media per creare una coppia. Ciò vale sia per i rivelatori a gas che per i rivelatori a semiconduttore, con l'unica differenza che nei rivelatori a gas w è dell'ordine all'incirca di 30 eV mentre nel rivelatore a semiconduttore w è dell'ordine di circa 3 eV, quindi circa un decimo. Più precisamente il numero di coppie a cui facciamo riferimento è un valore medio \bar{n} , perché sebbene sia vero che si produce un certo numero di coppie quelle che poi danno luogo al segnale sono una parte poiché avvengono diversi fenomeni di fluttuazioni statistiche. Ne segue che il numero \bar{n} che misuriamo e che è indice dell'energia in realtà può variare da evento a evento. Immaginiamo ad esempio, come facciamo in un'esperienza di laboratorio, di inviare in un rivelatore al silicio delle particelle α di 5 MeV. Tale energia viene totalmente depositata nel rivelatore, dando

luogo a un certo numero di coppie che produrranno il segnale, e questo numero di coppie fluttuerà a seguito di fenomeni di natura statistica.

Se andiamo a misurare lo spettro in energia delle particelle α , dato che l'energia è legata al numero di coppie generate, a tale picco ne corrisponderà uno relativo al numero di queste:



Quello che osserviamo è un picco molto stretto, il quale rappresenta il numero di particelle α che hanno una certa energia. Il fatto di non avere una delta di Dirac come ci aspetteremmo, dato che stiamo inviando particelle di 5 MeV e quindi in teoria dovremmo trovare sempre lo stesso valore, è dovuto al fatto che ci sono delle fluttuazioni nel numero di coppie che creano il segnale, quindi quello che osserviamo nello spettro in energia è una conseguenza del numero di coppie n che ogni volta si producono e che vengono raccolte, il quale non è sempre lo stesso. In sintesi abbiamo un valore medio \bar{n} dato $\bar{n} = E/w$ e rispetto a questo ogni volta abbiamo delle fluttuazioni.

La risoluzione in energia R viene valutata andando a guardare il picco e studiandone la larghezza, in particolare ci concentriamo sulla larghezza a metà altezza FWHM, a cui la risoluzione è legata mediante la relazione

$$R = \frac{\text{FWHM}}{E}$$

Se il picco ha una forma gaussiana si può dimostrare che la FWHM è all'incirca 2.35σ , dove σ è la deviazione standard della gaussiana.

Vediamo adesso come mettere in relazione la risoluzione al numero di coppie. Scrivendo l'energia in termini del numero medio di coppie prodotte abbiamo $E = \bar{n}W$, per quanto riguarda invece la deviazione standard della distribuzione in energie, essa è legata alla deviazione standard della distribuzione del numero di coppie mediante la relazione $\sigma_E = w\sigma_n$. Andando a sostituire la risoluzione in energia diventa

$$R = \frac{2.35w\sigma_n}{\bar{n}w} = 2.35 \frac{\sigma_n}{\bar{n}}$$

In definitiva la risoluzione sarà dato dalla larghezza della distribuzione del numero di coppie sul numero medio di coppie generato. Se la distribuzione che regola la produzione di queste coppie è di tipo Poissoniano, possiamo approssimare σ con $\sqrt{\bar{n}}$ e riscrivere ulteriormente la risoluzione come

$$R = \frac{2.35}{\sqrt{\bar{n}}}$$

Per quanto detto prima, a parità di energia in un rivelatore a silicio si producono un numero di coppie pari a 10 volte il numero che se ne producono in un rivelatore a gas, per cui avremo che $R_{\text{Si}} = R_{\text{gas}}/\sqrt{10}$, per cui è circa un terzo più piccola e dunque migliore. Nei rivelatori al silicio si possono raggiungere anche risoluzioni dell'1%.

10.4.3 Sensibilità ed efficienza intrinseca

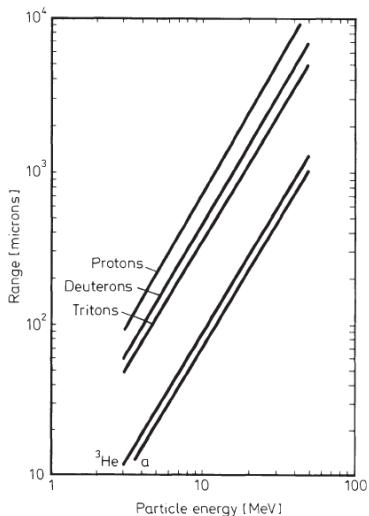
L'efficienza intrinseca di un rivelatore a semiconduttore è dell'ordine del 100%. Ricordiamo che l'efficienza intrinseca rappresenta il rapporto tra il numero di particelle che hanno dato luogo a un segnale diviso il numero di particelle incidenti, in quanto in generale non è detto che una particella che incide sul rivelatore perdendo energia sia in grado di produrre un segnale rivelabile, mentre in questo caso sì.

Tali rivelatori presentano dei limiti. Uno di questi è la presenza di una soglia minima necessaria sul segnale da rivelare, legata al fatto che ci sono delle correnti di dispersione e che l'elettronica introduce un minimo di rumore. Tali fattori possono infatti creare dei segnali di rumore, i quali hanno bassa ampiezza, dunque per non confonderli con segnali fisici dobbiamo in qualche modo discriminari, cioè eliminarli dall'acquisizione. Questo può essere fatto imponendo una soglia minima al di sotto della quale non acquisire nulla. Tale soglia da un lato ci aiuta a eliminare il rumore, dall'altro però potrebbe far perdere qualche segnale fisico di interesse, facendo quindi abbassare leggermente l'efficienza intrinseca. Allo stesso modo, la presenza di una zona morta potrebbe imporre una certa perdita nell'efficienza perché magari particelle di bassa energia non riescono ad attraversare tale zona e quindi non vengono misurate, quindi hanno inciso sul rivelatore ma non sono state misurate.

10.4.4 Densità

L'elevata densità di tali rivelatori costituisce un vantaggio perché permette di avere un elevato stopping power, il che ci permette di avere rivelatori compatti ma comunque capaci di misurare l'energia di particelle anche molto energetiche.

Esempio 10.1



Nel grafico a fianco è riportata l'energia della particella nell'intervallo tra 1 e 100 MeV e sulle ordinate il range in micron. Le varie linee corrispondono a diverse tipologie di particelle che incidono sul silicio. A partire da tale grafico possiamo capire che spessore deve avere il rivelatore per assicurarci che tutta l'energia venga persa all'interno del rivelatore. Ad esempio, per particelle α da 5 MeV come quelle che adoperiamo in laboratorio servono range dell'ordine della ventina di micron, quindi è sufficiente un rivelatore di questo spessore per far sì che le particelle α perdano tutta la loro energia.

Infine un'ultima qualità di questi rivelatori è che abbiamo una diffusione estremamente più bassa rispetto a quelle rivelatori a gas, e ciò si fa sì che questi rivelatori possano essere utilizzati più facilmente come rivelatori di posizione, cioè per misurare la posizione della particelle incidente.

10.4.5 Tempo di risposta

Sono rivelatori molto veloci. In generale possono essere utilizzati come rivelatori di timing molto più performanti rispetto ai classici rivelatori a gas. Tipicamente i tempi di salita di un segnale sono dell'ordine dei nanosecondi, quindi estremamente veloci.

10.4.6 Danneggiamento da radiazione

Un problema di questi rivelatori è il cosiddetto danneggiamento da radiazione, che si verifica se questi rivelatori vengono esposti a notevoli dosi di radiazione. Ciò avviene soprattutto in alcuni ambienti come gli esperimenti sotto fascio o esperimenti nello spazio e ciò modifica le qualità e le proprietà del rivelatore.

In generale i danni che si possono creare sono di due diversi tipi:

- Danni del Bulk, cioè danni della massa che costituisce il semiconduttore;
- Danni sulla superficie, quindi sull'ossido che normalmente riveste questi rivelatori.

Gli effetti sul bulk sono effetti che si manifestano come danneggiamento al reticolo e in generale sono dovuti alle cosiddette radiazioni non ionizzanti, in inglese NIEL (Non Ionizing Energy Loss). Esse possono comportare

- Un cambio della tensione di svuotamento, che comporta uno svuotamento minore e quindi la necessità di applicare tensioni maggiori;
- Un aumento della corrente di leakage⁸, che è una corrente che comporta un rumore il quale potrebbe richiedere l'utilizzo di un raffreddamento;
- Una diminuzione nell'efficienza nella raccolta della carica.

Gli effetti sulla superficie sono invece tipicamente dovuti a radiazione ionizzante e questo comporta sostanzialmente la presenza di cariche positive che si accumulano sugli ossidi e poi può anche influire sul rumore e sulla tensione di rottura.

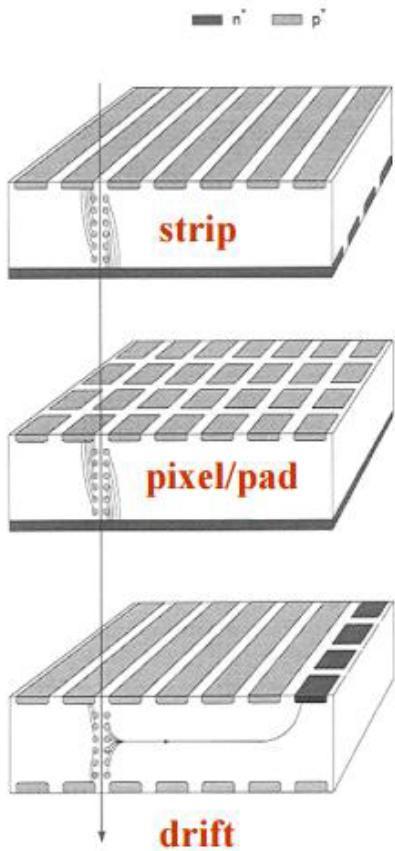
Gli effetti che vengono prodotti dal danneggiamento da radiazione possono essere

- Effetti cumulativi, che si vanno sommando nel tempo e sono dei danni che non si possono riparare, dovuti all'esposizione prolungata alla radiazione come nel caso di un rivelatore adoperato in un esperimento sotto fascio;
- Eventi singoli che possono essere o eventi transitori o eventi catastrofici permanenti. Siccome possono accadere in qualsiasi istante, non sono legati ad un accumulo a differenza del caso precedente.

⁸La corrente di leakage (in italiano, corrente di dispersione) è una piccola corrente elettrica che scorre attraverso un percorso indesiderato o inatteso, solitamente dovuto a fenomeni come l'imperfezione dell'isolamento o perdite tra i conduttori di un circuito elettrico e il suolo o altre parti del sistema.

10.5 Tipologie moderne di rivelatori al silicio

Guardiamo ora maggiormente nel dettaglio alcuni rivelatori più moderni che utilizzano la tecnologia basata sul silicio, in particolare ne sfruttano le buone capacità di tracciamento (cioè la risoluzione spaziale) e la risoluzione energetica.



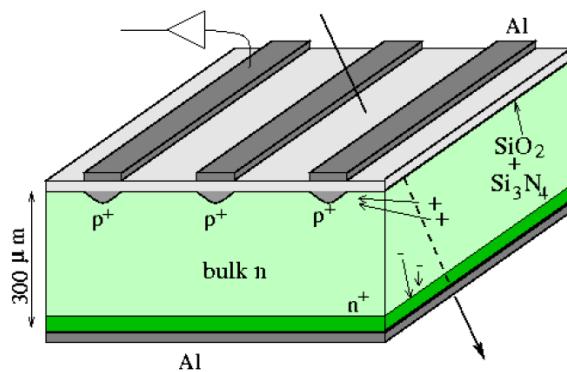
Quando si vuole utilizzare il silicio per ricostruire la posizione della particella che incide sul rivelatore, si hanno due possibili scelte:

- readout continuo
- readout discreto

Nel seguito discuteremo la differenza tra i due e in particolare approfondiremo i rivelatori a strip e quelli a pixel o pad per quanto concerne il readout discreto e quelli a drift per quanto concerne il readout continuo. Possiamo vedere un'immediata differenza nella rappresentazione accanto: il rivelatore a strip presenta delle strisce parallele, dette appunto strip in inglese, di materiale semiconduttore; il rivelatore a pixel o pad, presenta una matrice di elementi che prendono proprio il nome di pixel; infine quelli a drift presentano nuovamente una struttura a strisce, però come vedremo c'è qualche differenza rispetto al caso delle strip.

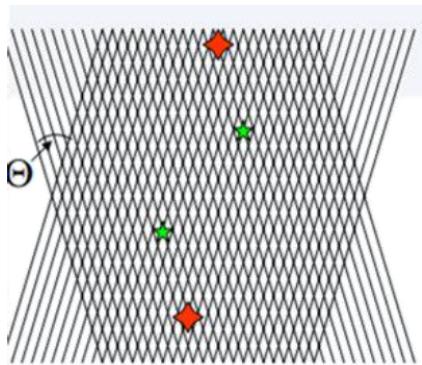
10.5.1 Rivelatori a strip

I primi rivelatori che approfondiamo sono quelli a strip o microstrip nel caso in cui le strip abbiano dimensioni di pochi micron. Vediamo la struttura di questo rivelatore:



Il principio di funzionamento si basa ancora su giunzioni p-n, però in più si sfrutta il fatto di poter realizzare gli elettrodi con determinate geometrie. In questo caso gli

elettrodi di lettura sono costituiti da delle strip che vengono posizionate parallelamente l'un l'altra ad una distanza opportuna tipicamente della decina di micron. Il segnale che viene prodotto all'interno del rivelatore induce il segnale sull'eletrodo più vicino, per cui quando una particella attraversa il rivelatore questa produrrà un certo numero di coppie elettrone-lacuna che migreranno verso gli eletrodi, inducendo un segnale. È chiaro che la strip che viene interessata ci fornirà la coordinata spaziale, cioè il punto attraverso cui è passata la particella. Si tratta di un'informazione monodimensionale, perché l'unica informazione che abbiamo nel piano è lungo la direzione perpendicolare alle strip. Per ottenere un'informazione bidimensionale sul piano, una tecnica che viene adoperata consiste nel sovrapporre due strati di rivelatore a strip con una certa inclinazione tra loro, come possiamo vedere nella seguente figura:



Così facendo conosciamo le strip interessate su ciascun piano, ottenendo così l'informazione bidimensionale.

Tale tecnica può però portare a dei casi di ambiguità: se passa una sola particella attraverso entrambi gli strati allora non c'è alcuna ambiguità perché verrà interessata una strip per piano, ma se più particelle attraversano simultaneamente i due strati, come può avvenire ad esempio in un esperimento sotto fascio, allora inevitabilmente si crea un'ambiguità.

Guardando la figura dei due strati di strip, vediamo che è raffigurata la situazione in cui sono passate due particelle simultaneamente. Ciascuno strato avrà due strip interessate (una per particella), quindi nel momento in cui vogliamo risalire alla posizione dovremo considerare quattro possibili combinazioni di queste coppie di strip. I due punti verdi rappresentano le combinazioni corrette, cioè i punti reali attraverso cui sono passate le particelle, mentre i punti rossi rappresentano delle combinazioni spurie, in quanto non collegate al reale passaggio di particelle.

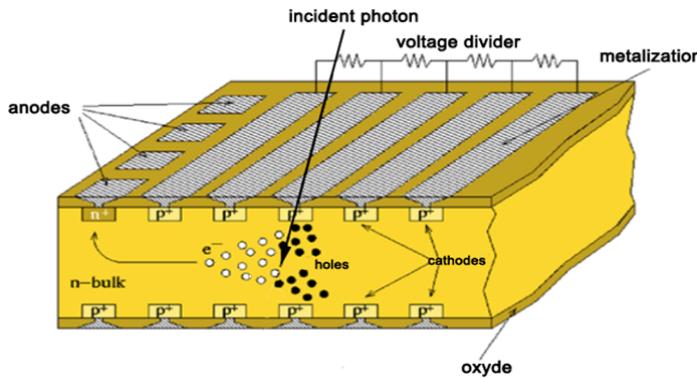
La risoluzione spaziale, cioè la precisione con cui si ricostruisce la posizione dipende dalla distanza tra le strip: più queste sono vicine tra di loro, migliore sarà la risoluzione spaziale. Similmente alle camere a fili, data la distanza tra due eletrodi la risoluzione è data da tale distanza diviso $\sqrt{12}$, che è una conseguenza del teorema del limite centrale. Si tratta quindi di una risoluzione molto spinta, potendo arrivare anche a 5 micron.

I tempi di raccolta delle cariche sono molto veloci, anche decine di nanosecondi.

Il rivelatore a strip è un esempio di rivelatore a redout discreto, perché qui la posizione viene data grazie alla discretizzazione dell'eletrodo, cioè al fatto di avere tanti eletrodi separati.

10.5.2 Rivelatori a drift

In un rivelatore ad drift abbiamo invece un readout continuo. Rispetto alla tipologia precedente, il rivelatore a drift fornisce entrambe le coordinate su un piano, quindi ci dà un'informazione bidimensionale.



La struttura sembra molto simile a quella strip: abbiamo ancora degli elettrodi che sono realizzati come strip paralleli l'un all'altro, ma questi hanno una funzione diversa rispetto a quella che abbiamo visto prima, in quanto stavolta ciò che raccoglie il segnale sono degli anodi sotto forma di pad, cioè di piazzola.

Quando passa una particella in grado di produrre coppie elettrone-lacuna, gli elettroni prodotti cominciano a migrare verso gli anodi grazie a una differenza di potenziale che viene realizzata attraverso le strip, le quali vengono messe a potenziale via via crescente in maniera tale che gli elettroni vengano guidati verso l'anodo.

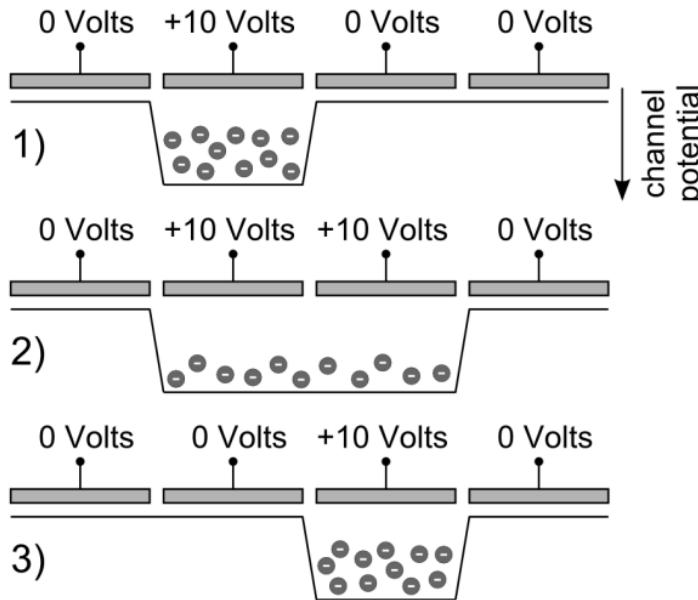
Vediamo come facciamo ad avere la coordinata bidimensionale. La coordinata lungo l'asse parallelo alla direzione delle strip viene fornita da quale anodo è stato interessato, cioè quello che ha raccolto la carica; l'altra coordinata, cioè quella nella direzione perpendicolare alle strip che è anche quella lungo cui si muovono gli elettroni, viene fornita dal tempo di deriva, cioè da quanto tempo impiegano gli elettroni ad arrivare all'anodo, che chiaramente dipende dal punto in cui si sono prodotti.

Lo svantaggio di questi rivelatori è che essi sono più lenti perché bisogna aspettare una deriva degli elettroni che può essere anche abbastanza lunga e inoltre necessitano di temperature stabili.

Il rivelatore a drift costituisce un esempio di rivelatore a readout continuo, perché sebbene sia vero che lungo la direzione parallela alle strip abbiamo una discretizzazione dovuta agli anodi, lungo l'altra direzione la lettura è continua, cioè il tempo di deriva assume un valore che non è discreto bensì continuo.

10.5.3 CCD (Charged-Coupled-Device)

Un altro dispositivo molto simile a quello appena visto è il CCD, cioè il Charged Couple Device, il quale è l'elemento di base delle fotocamere. Anche questi CCD sono rivelatori a readout continuo, si dicono anche rivelatori a memoria perché gli elettroni che vengono prodotti a seguito della ionizzazione non sono rimossi immediatamente, quindi non vengono raccolti immediatamente da un elettrodo, ma vengono innanzitutto confinati all'interno di un pixel e poi a poco a poco fatti derivare fino alla raccolta finale.



Il CCD è costituito da una matrice di pixel, che costituiscono righe e colonne. Quando questo sensore viene attraversato dalla luce, viene generata della carica che non viene raccolta immediatamente da un elettrodo, bensì a seconda del punto in cui si è creata viene guidata lungo la colonna corrispondente. Supponiamo ad esempio, come in figura, che la carica sia stata prodotta nel secondo pixel. Allora, grazie a un campo elettrico opportuno, quindi a delle differenze di potenziale, è possibile guidare la carica prodotta da pixel a pixel fino ad arrivare all'ultima riga dove avviene la lettura. Quello che succede è che via via viene creato un potenziale positivo nel pixel adiacente a dove si trova la carica e azzerato nel precedente, il che permette la deriva delle cariche. Grazie a questo sistema è possibile risalire a quale pixel è interessato.

I CCD sono rivelatori bidimensionali, cioè ci forniscono la posizione in cui è avvenuta la rivelazione, hanno accuratezze spaziali anche molto elevate, dell'ordine di 10 micron, però hanno come difetto principale un tempo di lettura molto lungo, dell'ordine di 10 millisecondi. Ciò fa sì che questi rivelatori non possono essere adoperati nel campo della fisica delle alte energie perché sono troppo lenti. In un esperimento con un acceleratore avvengono un certo numero di collisioni al secondo, per cui se il rivelatore fosse ancora impegnato a misurare ciò che è avvenuto nell'evento precedente, succederebbe il cosiddetto pile up, cioè una sovrapposizione di eventi che è chiaramente da evitare. Tuttavia tali rivelatori vengono adoperati parecchio nel campo dell'astronomia, in particolare avendo una bassa risoluzione energetica e spaziale vengono utilizzati per spettroscopia di raggi X.

10.5.4 Rivelatori a pixel

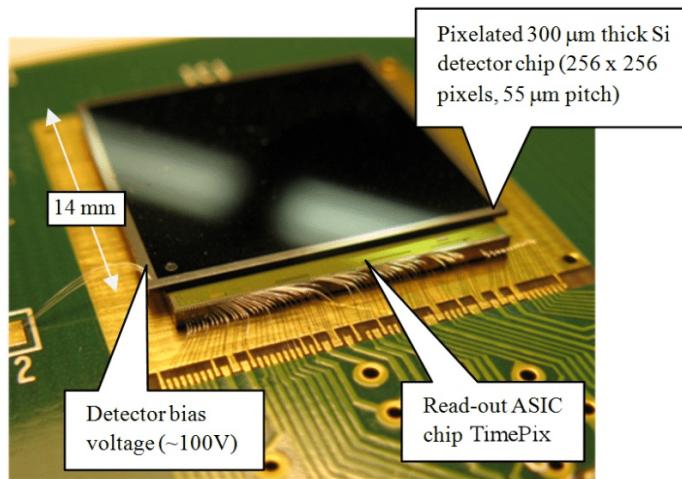
Funzionano in maniera analoga i cosiddetti rivelatori a pixel, i quali vengono adoperati nel campo della fisica nucleare e che sono molto più veloci rispetto ai CCD.

I rivelatori a pixel sono anch'essi costituiti da matrici di pixel che, a seconda della superficie da rivestire, possono essere anche dell'ordine di centinaia di milioni di pixel, i quali però sono dei canali indipendenti, dunque ritorniamo a un caso di readout discreto perché è come se ogni pixel fosse un rivelatore indipendente dall'altro. La

risoluzione spaziale del rivelatore dipende dalle dimensioni di questi pixel, in particolare sarà migliore al diminuire delle dimensioni, che ormai possono arrivare anche a 15 – 20 μm per lato. Sono ovviamente rivelatori bidimensionali perché viene fornita sia la coordinata x che la coordinata y .

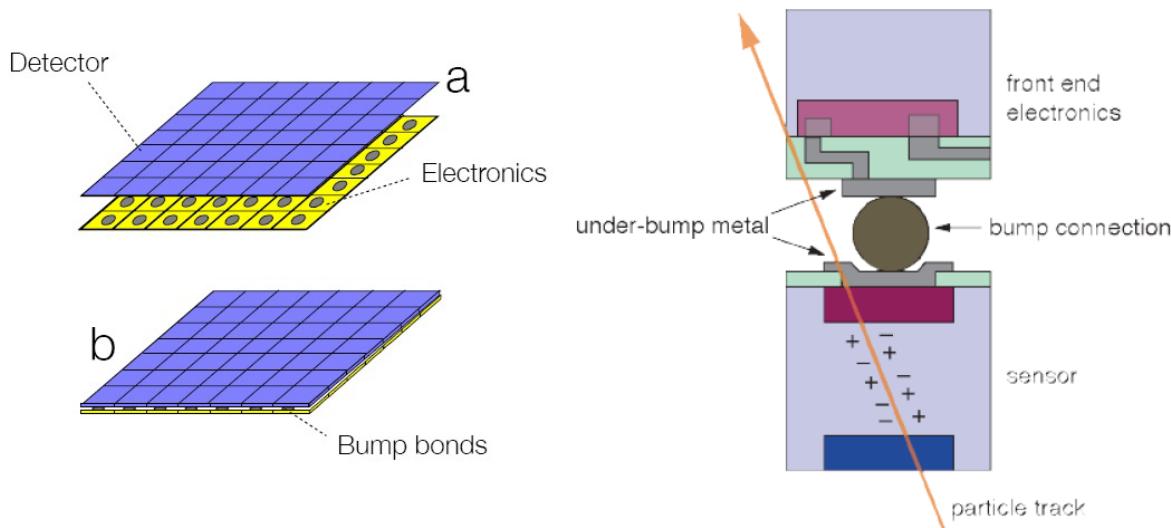
Sono inoltre rivelatori che hanno un livello di rumore molto basso, il che dipende dalla bassa capacità elettrica di questi rivelatori, quindi hanno un buon rapporto segnale su rumore S/N . Ciò vuol dire che quando vengono attraversati da una radiazione si produce una carica e quindi un segnale che si sopraeleva rispetto al fondo. Sono rivelatori veloci e sono particolarmente adatti nel caso di alte densità di particelle, in quanto la probabilità che due particelle cadano in un pixel di dimensioni così piccole è veramente bassa. Ecco perché questi rivelatori normalmente vengono posizionati nella regione a più alta densità; ad esempio, in un collider, dove avviene un'interazione tra due fasci uno contro l'altro, vengono adoperati nella zona più vicina al punto di collisione, che è quella con la densità di particelle più elevata, mentre allontanandoci diventa sempre meno necessario avere rivelatori così discreti.

Uno degli svantaggi di tali rivelatori è che abbiamo un numero di canali enorme da leggere, e siccome in linea di principio ogni rivelatore ha bisogno di un connettore e di un cavo la situazione diventa particolarmente ostica, soprattutto considerando il fatto che dobbiamo adoperare cavi di dimensioni ridotte.



In figura possiamo vedere un ingrandimento di quello che è un rivelatore a pixel. Guardando attentamente, vediamo che ci sono dei fili microscopici che sono detti bonding, cioè delle connessioni che vengono realizzate con delle opportune macchine chiamate bondatrici, le quali collegano il rivelatore con l'elettronica.

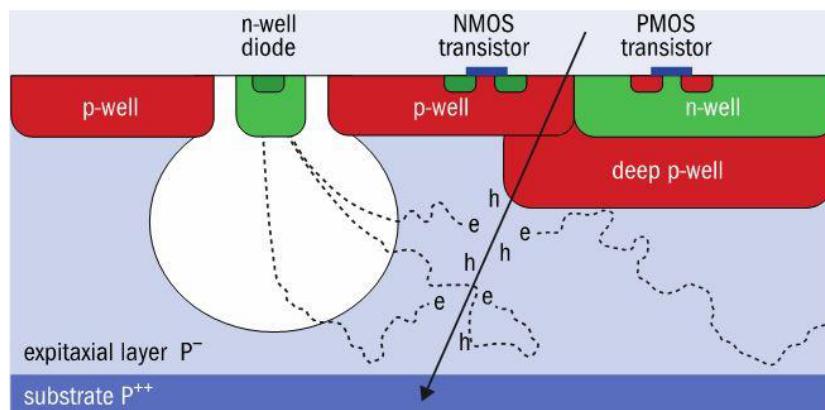
Inoltre questi rivelatori sono molto fragili e richiedono tecnologia all'avanguardia. Vediamo il motivo di quest'ultimo fatto. Innanzitutto il primo problema è quello di trasportare questo segnale fuori da ciascun pixel che è un rivelatore a sé stante, quindi se il segnale che fuoriesce da questo rivelatore ha bisogno di un'opportuna catena elettronica, questa dovrà essere replicata per tutti i pixel. Quello che si faceva tempo addietro (ora questa è una tecnologia che si sta superando) era realizzare l'elettronica miniaturizzata e delle stesse dimensioni dei pixel.



Si aveva quindi una matrice di pixel che erano i rivelatori e sotto una matrice con la corrispondente elettronica. La connessione si realizzava attraverso una tecnica che prende il nome di bump bonding, cioè un bonding non realizzato con un filo, bensì con una pallina di materiale conduttore, come possiamo vedere in figura a destra. Chiaramente la corrispondenza tra pixel di sensore e pixel di elettronica deve essere esatta. Il tutto avviene a temperatura controllata, perché la pallina si deve sciogliere per realizzare un contatto stabile.

Tuttavia questa tecnica aveva dei difetti enormi, in particolare un'efficienza estremamente bassa e presentavano frequentemente dei difetti, quindi spesso si buttavano tanti wafer di silicio perché il bonding non era stato realizzato bene. Inoltre era un processo molto costoso e che limita la dimensione del pixel, quindi anche se la tecnologia ci permetteva di ridurre le dimensioni del pixel, l'elettronica non si riusciva a compattare al di sotto di un certo limite e anche il bonding non poteva essere effettuato su pixel di dimensioni troppo piccole. Inoltre, sempre nell'ottica di rendere il rivelatore il più possibile trasparente, inserire una pallina di un qualsiasi materiale introduce ovviamente una perdita di energia dato che la particella dovrà attraversare anche questa, la quale può rappresentare anche un problema di multiple scattering.

Adesso la tecnologia ci permette di realizzare i così detti MAPS (Monolithic Active Pixel Sensors), cioè rivelatori monolitici. Con tale termine si intende il fatto che nello stesso substrato di silicio si realizza sia il sensore che l'elettronica.



Ne segue che non abbiamo più bisogno del bonding, quindi guadagniamo in termini di efficienza. Tuttavia il problema iniziale di questa tecnologia era il fatto che essa era poco resistente alla radiazione, quindi perdeva in prestazioni man mano che si accumulava la dose. Ormai questi limiti sono stati superati, quindi questa tecnologia viene utilizzata in tantissimi esperimenti.