

4 RIVELATORI DI PARTICELLE

Sperimentare nel campo della fisica nucleare e subnucleare significa rivelare fenomeni invisibili ai nostri sensi; i rivelatori ci devono permettere di *vedere* gli eventi di interazione, le particelle interagenti, permettendoci di misurarne il numero, le traiettorie, le caratteristiche (energia, massa, carica, etc.). Il passaggio della radiazione puo' essere rivelato cercando di misurare quegli effetti dell'interazione tra radiazione e materia che ci permetteranno ad esempio di capire dov'e' passata una particella, ricostruendo la sua traiettoria, o misurare il suo potere frenante (dal rilascio di energia) o altre grandezze che ci permettano di caratterizzare le proprieta' della radiazione incidente. Questo vale tanto per i piu' semplici rivelatori utilizzati nei primi esperimenti a quelli sofisticatissimi richiesti dagli esperimenti odierni. La perdita di energia delle particelle cariche comporta ionizzazione e/o eccitazione degli atomi e molecole del mezzo in cui si propaga, oppure emissione di radiazione (ad es. Cherenkov). L'obiettivo dello sperimentatore e' quello di misurare tali fenomeni nel modo piu' efficiente possibile. Nei primi rivelatori cio' avveniva fotografando l'evento di interazione, in quelli moderni trasformando tali effetti in un segnale elettrico, che viene successivamente letto e misurato e analizzato.

Nello sviluppo dei primi rivelatori la visualizzazione, la fotografia degli eventi e' stato lo strumento principe per lo studio dei fenomeni subatomici: molti dei primi rivelatori che furono usati e che desciveremo in seguito permettevano ad esempio di visualizzare le tracce delle particelle cariche e la densita' di ionizzazione lungo la traccia. Se accoppiati ad un campo magnetico per curvare le tracce cariche e misurarne l'impulso, tali rivelatori permettevano di ricostruire, dall'analisi fotografica degli eventi, le traiettorie, impulsi e velocita' (dalla densita' di ionizzazione, ovvero il dE/dx) di tutte le particelle cariche interagenti, pur se con limitata capacita' risolutiva. Nel corso dei decenni gli apparati e le tecnologie sono grandemente evolute, ma molti dei rivelatori rappresentano una moderna evoluzione, gestita elettronicamente, dei primi rivelatori.

4.1 Rivelatori con tecniche visualizzanti

Camera a nebbia, Camera a bolle, Camera a scintilla, Emulsioni,....

- VEDI FILE CON DIAPOSITIVE (E TESTI) MOSTRATE A LEZIONE

4.2 Rivelatori che utilizzano la ionizzazione

La rivelazione del fenomeno della ionizzazione provocata dal passaggio di particelle cariche nell'attraversare spessori di materiale e' uno dei metodi piu' comuni per la rivelazione di radiazione ionizzante ed e' basato sulla raccolta della carica creata dalla ionizzazione indotta dalla radiazione incidente. Gli elettroni e gli ioni (oppure le buche, nel caso di semiconduttori) prodotti lungo il percorso vengono raccolti, solitamente grazie ad un campo elettrico esterno, generando un segnale, correlato alla perdita di energia della particella, che ne indica il passaggio (si veda ad esempio uno schema di camera a ionizzazione a geometria planare in fig. 30).

Le modalita' di raccolta della carica possono essere molteplici; le principali sono quella diretta (ad es. nella camera a ionizzazione ove la carica viene direttamente raccolta), quella amplificata (ad es. nella camera proporzionale ove la carica viene

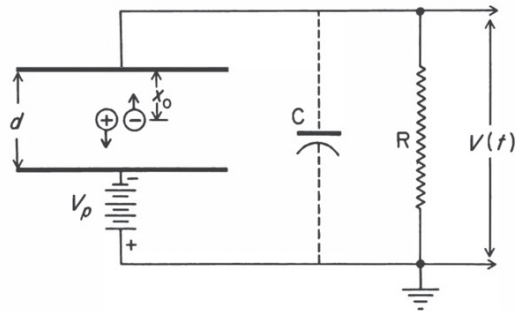


Figure 30: Schema di funzionamento di una camera a ionizzazione a gas di geometria planare. Il gas è contenuto nella regione tra i due piatti del condensatore.

raccolta dopo esser stata moltiplicata) e quella saturata (ad es. nei contatori Geiger, ove la carica viene raccolta dopo esser stata moltiplicata fino ad un valore di saturazione indipendente dalla quantità di carica originaria). La modalità di funzionamento dipende dalle caratteristiche e valore del campo elettrico e dalla geometria del rivelatore. Tra i più comuni rivelatori a ionizzazione troviamo i rivelatori a gas, e quelli al silicio.

Tipicamente un rivelatore che utilizza il fenomeno della ionizzazione consiste di un volume di materiale nel quale viene introdotto un campo elettrico esterno applicando una differenza di potenziale mediante opportuni elettrodi e letto tramite un circuito RC (vedi in figura 30). Al passaggio di una particella e alla successiva formazione di carica una corrente si genera all'interno del rivelatore con conseguente creazione di una differenza di potenziale ai capi che può ad es. essere vista tramite un oscilloscopio o altri strumenti che permettono di misurare e salvare l'ampiezza dell'impulso creato ($V(t)$ in figura 30).

4.3 Caratteristiche di un rivelatore

Le grandezze piu' rilevanti e che piu' frequentemente si vogliono misurare sono la posizione, l'energia rilasciata dalla particella e l'istante di tempo relativo al passaggio della particella.

Le seguenti sono pertanto le caratteristiche di maggior rilievo (ma ovviamente non le uniche) per un rivelatore:

- il potere di risoluzione spaziale

che è una quantità che caratterizza la fluttuazione della misura della posizione del punto di passaggio della particella

- il potere di risoluzione temporale

che è una quantità che caratterizza la fluttuazione della misura del tempo di passaggio attraverso il rivelatore

- potere di risoluzione energetica

che è una quantità che caratterizza la fluttuazione della misura dell'energia rilasciata nel rivelatore

- efficienza, che misura la probabilità di ottenere una risposta dal rivelatore

Le quantità sopracitate caratterizzano la qualità di un rivelatore (ovviamente non tutti i rivelatori hanno le stesse caratteristiche) e dipendono in generale da molti fattori: dal materiale, dal campo elettrico applicato, dall'ammontare del rilascio energetico, dalla tipologia di radiazione incidente, dall'elettronica di lettura, etc... E' pertanto importante sottolineare che le caratteristiche sopracitate dipendono anche da quelle della particella da rivelare (energia, carica, ...) e non sono pertanto una qualità intrinseca del rivelatore.

Osservazione.

- Dalle osservazioni precedenti dovrebbe risultare chiaro come non esista un rivelatore *ideale*, adatto a qualsiasi misura di fisica, ma che in funzione delle caratteristiche delle reazioni e delle particelle da studiare (nonche' delle reazioni e particelle di fondo) si deve sviluppare il rivelatore piu' adatto a tale scopo.

Risultera' abbastanza ovvio riflettere sul fatto che un rivelatore e' da considerarsi di elevata qualità quanto piu' e' in grado di dare una risposta poco fluttuante e proporzionale all'energia rilasciata, sia essa una frazione dell'energia della particella incidente (come nel caso di una particella carica che attraversa un rivelatore sottile) o sia essa l'intera energia cinetica a disposizione (come nel caso di un rivelatore utilizzato quale calorimetro). A tale risultato contribuiscono molti diversi fattori.

4.3.1 Fluttuazioni della risposta di un rivelatore

Nei rivelatori moderni il metodo fondamentale alla base del funzionamento di un rivelatore e' la trasformazione del rilascio di energia da parte della radiazione incidente in un segnale elettrico. Esiste una molteplicità di rivelatori che utilizzano diversi

fenomeni di creazione e formazione del segnale: dalla raccolta di carica dovuta a ionizzazione di atomi o molecole a quella di fotoni creati da meccanismi di diseccitazione, effetto Cherenkov o altro. Le cariche o i fotoni (d'ora in poi ci riferiremo ad essi genericamente come a *portatori di informazione*) creati nell'interazione vengono raccolti e trasformati in un segnale elettrico mediante i piu' svariati metodi (vedi al paragrafo 4.2 un esempio specifico). Eccetto che in alcuni particolari rivelatori ove la risposta e' indipendente dall'energia rilasciata (ad es. i contatori Geiger), in generale il segnale in uscita dal rivelatore e' proporzionale al numero medio N di portatori di informazione creati ed e' pertanto anche proporzionale all'energia E rilasciata dalla radiazione essendo $N = \frac{E}{\epsilon}$, con ϵ l'energia media per creare un portatore di informazione. Si noti che ϵ dipende dalle caratteristiche del rivelatore. Le fluttuazioni di N , assieme a quelle eventuali dell'energia rilasciata ed al rumore elettronico presente all'uscita del rivelatore, contribuiscono alla fluttuazione finale della risposta del rivelatore e pertanto a determinare la capacita' di risoluzione energetica del rivelatore stesso. Per risoluzione si intende il rapporto $R = \frac{\Delta E}{E}$ tra la larghezza a meta' altezza della distribuzione di risposta (misura della sua fluttuazione) ed il suo valor medio, ed e' pertanto una misura della fluttuazione relativa della risposta in energia di un rivelatore ad un ben definito rilascio di energia E .

Nota: ovviamente la risoluzione e' una misura della fluttuazione relativa dell'ampiezza V del segnale in uscita, ma corrisponde alla fluttuazione in energia se l'ampiezza del segnale e' proporzionale all'energia rilasciata ($R = \frac{\Delta V}{V}$).

Analizziamo in maggior dettaglio i diversi contributi alla fluttuazione finale.

- Fluttuazione del numero di portatori di informazione.

La creazione degli N portatori di informazione e' un fenomeno stocastico che puo' essere descritto da una distribuzione poissoniana con $\langle N \rangle = N$ e $\sigma_N = \sqrt{N}$ e quindi contribuira' alla risoluzione con $R_{int} = \frac{1}{\sqrt{N}}$, essendo R_{int} la cosiddetta fluttuazione intrinseca, valore ottenibile in caso di contributo trascurabile delle altre cause di fluttuazione. Se N e' sufficientemente grande la fluttuazione sar  di tipo gaussiano. Siccome N dipende dal materiale di cui e' costituito il rivelatore, la risoluzione (intrinseca) ottenibile dipendera' dalla scelta del rivelatore che dovra' essere scelto, fin dove possibile, con il minimo valore di ϵ (il valore di ϵ puo' variare da $\sim 1\text{eV}$ per alcuni tipi di semiconduttore a qualche decina di eV nei gas a centinaia di eV nel caso di alcuni tipi di scintillatori).

- Fluttuazione dovuta al rumore elettronico. Qualsiasi sistema elettronico presenta una componente ineliminabile di rumore in uscita, che si sovrappone in modo indipendente e scorrelato alla fluttuazione del numero di portatori. Tale contributo alla risoluzione, tipicamente di forma gaussiana, dovra' pertanto essere conteggiato in quadratura alla risoluzione intrinseca.

In generale dunque la risoluzione sara' data dalla somma (in quadratura) delle diverse risoluzioni, ove i diversi contributi in generale variano da rivelatore a rivelatore ed in funzione del rilascio di energia. In figura 31 e' possibile vedere la risposta di due rivelatori con diverse capacita' di risoluzione energetica al medesimo fenomeno. E' chiaramente visibile la capacita' del rivelatore al Ge di distinguere strutture non visibili con una risoluzione meno spinta, quella del rivelatore di NaI.

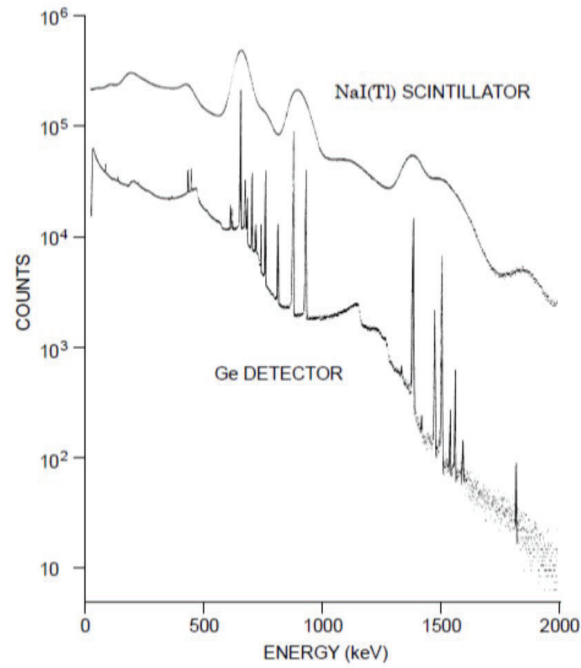


Figure 31: Risposta di rivelatori con diverse capacità di risoluzione energetica al medesimo fenomeno.

Come osservazione finale, si noti che tanto la fluttuazione intrinseca quanto quella dovuta alla presenza di rumore elettronico, possono essere opportunamente minimizzate ma mai eliminate completamente.