

INTRODUZIONE

Nel nostro esperimento (come, del resto, nella totalità degli esperimenti in Fisica delle Particelle) ci si proponeva di osservare e di quantificare (con la maggior precisione possibile!) il moto di oggetti che non riusciamo a “sentire”.

I raggi cosmici sono particelle che nessuno dei nostri cinque sensi riesce a registrare, di esse non abbiamo un’evidenza sensuale.

E tuttavia abbiamo cognizione della loro esistenza. Ciò è possibile grazie a un’azione discriminatoria sui dati ricevuti dall’esterno, e alla loro interpretazione. Queste particelle non compiono su di noi un’azione diretta, non ci trasmettono di per sé l’idea della loro esistenza, ma noi la “deduciamo” attraverso lo studio di quel corollario di eventi e conseguenze che esse scatenano per il solo fatto di esistere e di avere determinate caratteristiche (moto, quiete, dimensioni, massa, carica elettrica, struttura ecc.); oppure se ne prevede l’esistenza per poter giustificare una teoria (per esempio, il pione di Yukawa). Inoltre se ne stabiliscono i comportamenti a seconda delle situazioni che si possono venire a creare.

All’atto della verifica sperimentale, creiamo per l’osservazione le condizioni attraverso cui le particelle si possano presentare nella maniera più utile ai fini del nostro studio, ovvero dobbiamo analizzare le possibili interazioni attraverso cui possiamo riconoscere una particella e scegliere la più appropriata per la nostra situazione. Anche qui dedurremo le

caratteristiche che ci interessano attraverso le reazioni di ciò che sta intorno all'oggetto del nostro studio.

Dobbiamo, nel nostro caso particolare, fare in modo che dopo il passaggio (e in funzione del passaggio) del raggio si scatenino una serie di conseguenze strettamente connesse (e da noi controllate) in modo tale da far sì che la nostra elettronica possa "dedurre", appositamente programmata, il risultato (del resto noi non saremmo in grado, vista l'eccezionale brevità del lasso di tempo in cui avviene tutto ciò, di fare un tale lavoro. E poi per queste cose le macchine sono più portate di noi).

Potremmo adesso divertirci a vedere quali sono i passaggi che ci portano all'acquisizione del dato. Ripercorriamo dunque la scala delle deduzioni (per comodità in ordine contrario a come ci si presentano):

- ❖ dall'arrivo del segnale digitale al PC, noi (sapendo che in entrata il segnale è analogico) deduciamo che c'è stato un apparecchio (il discriminatore) che ha cambiato la natura del segnale.
- ❖ dall'esistenza del segnale analogico, composto di elettroni, sapendo che essi sono stati prodotti in un punto (precisamente il fotocatodo) mediante effetto fotoelettrico, deduciamo che questo fotocatodo è stato colpito da fotoni in entrata.
- ❖ dalla presenza dei fotoni possiamo dedurre il passaggio del raggio cosmico all'interno degli scintillatori, poiché contengono atomi di naftalene che hanno la proprietà, detta fluorescenza, di emettere fotoni quando vengono eccitati (ad esempio dal passaggio di una particella)
- ❖ tornando ancora indietro, dalla rivelazione dei raggi possiamo dedurre l'esistenza di sorgenti ed eventi extraterrestri che li hanno generati.

Ovviamente possiamo fare queste deduzioni perché abbiamo predisposto le cose in modo tale che si verificano certi eventi solo a particolari condizioni stabilite da noi (non è che, in assoluto, un elettrone c'è perché lo ha prodotto un fotone, ma se sappiamo che nell'ambiente da noi preparato ciò può avvenire solo mediante effetto fotoelettrico, il gioco è fatto).

Ma il nostro scopo, rischioso a dire il vero, e quasi incosciente, è quello di andare a parare da tutt'altra parte.

Pensiamo alla vista, un meccanismo scontato, ovvio. Eppure noi non vediamo un oggetto "perché lo vediamo". Se assumiamo come acquisita un'informazione solo una volta che questa è arrivata al cervello (come

effettivamente è), constateremo che questa non vi giunge direttamente dall'oggetto, ma esegue passaggi intermedi.

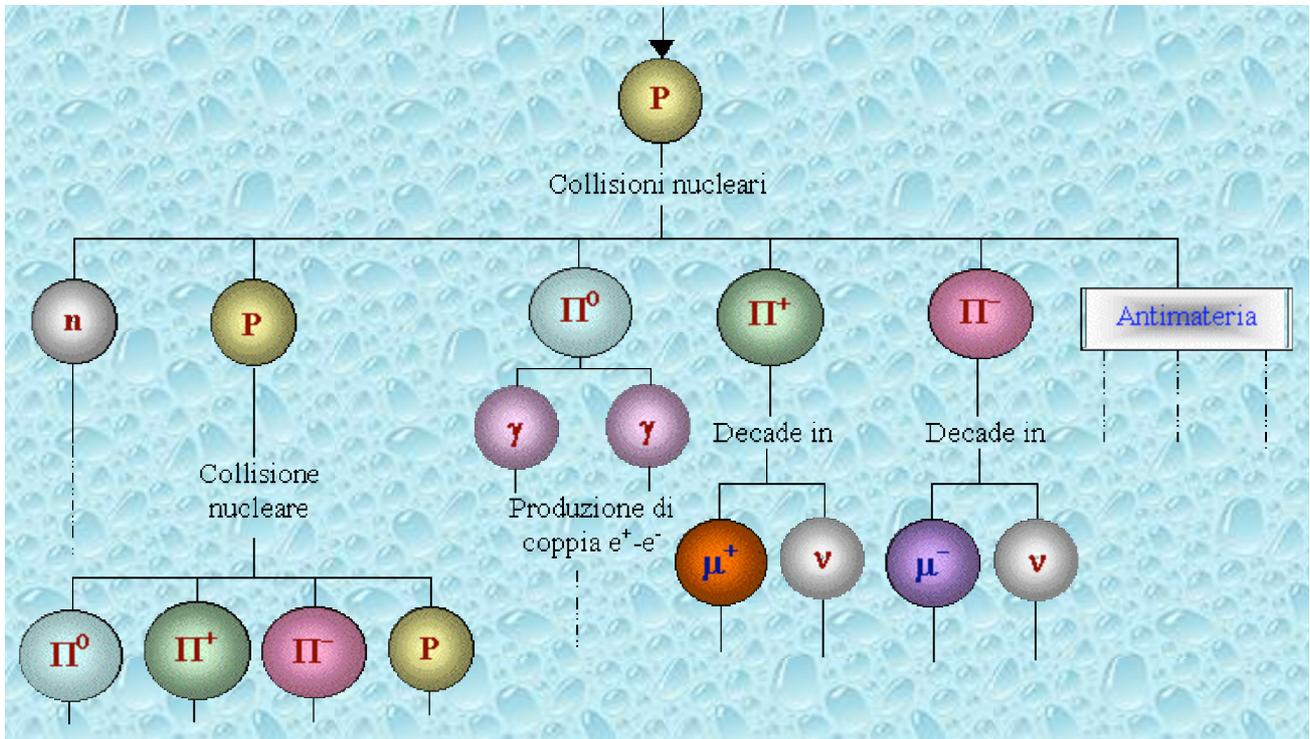
I fotoni che compongono la luce giungono in prossimità di un oggetto, vengono assorbiti e riemessi con lunghezza d'onda variabile a seconda dell'oggetto (da ciò dipende il colore). Quando la luce giunge all'occhio, passa attraverso cornea, umor acqueo, cristallino e umor vitreo, che nell'insieme formano una sorta di ottica d'ingresso, con il compito di indirizzare i fotoni verso la retina. Qui si trovano i coni e i bastoncelli, le cellule incaricate di raccogliere la radiazione e inviare conseguentemente impulsi elettrici attraverso il nervo ottico (vengono emessi ioni che passano da una cellula all'altra del nervo, poiché si viene a creare differenza di potenziale tra loro, il che dà luogo ad una scarica elettrica). Una volta che questa miriade di scariche (i coni sono circa 6 milioni, 120 milioni i bastoncelli) giunge al cervello, questi le interpreta per ricavarne le caratteristiche visive.

Anche qui sarebbe interessante ripercorrere all'indietro la scala delle deduzioni, e noteremmo notevoli somiglianze con il nostro esperimento.

Ma allora forse è lecito porsi domande sul significato stesso di "percezione sensoriale", che non stabilisce tra noi e il mondo un rapporto diretto. Se volessimo, potremmo produrre una serie infinita di supposizioni, spesso in contrasto l'una con l'altra. Ma questo ci importa poco e poi ci siamo già troppo discostati dall'argomento della nostra relazione. Ma come ragionamento ci era parso interessante.

I RAGGI COSMICI

I raggi cosmici furono scoperti agli inizi del secolo scorso. Per la verità inizialmente fu individuata solo l'intensa emissione di raggi γ (da qui il loro nome) derivante dall'interazione dei raggi cosmici con i gas interstellari, cui cedono energia che viene poi riemessa sotto forma di radiazione. La loro natura corpuscolare fu scoperta solo intorno agli anni



Formazione della radiazione cosmica secondaria. La particella primaria (generalmente un protone) urta con un nucleo d'ossigeno o di azoto dell'alta atmosfera. Da questa collisione vengono generati neutroni, protoni, π^0 , π^+ , π^- , antineutroni, antiprotoni, kaoni e iperoni. I π^0 decadono elettromagneticamente in due γ e questi ultimi possono materializzarsi in coppie e^+e^- . I π carichi possono interagire con altri nuclei presenti nell'atmosfera o decadere in leptoni μ e neutrini ν . Gli elettroni irradiano energia sotto forma di raggi γ (radiazione di frenamento). Le linee tratteggiate indicano che altre reazioni possono avvenire.

ESPERIMENTO

MISURAZIONE DELLA VELOCITA' DEI RAGGI COSMICI

Lo scintillatore è uno strumento di forma rettangolare in plexiglas, drogato con naftalene ($C_{10}H_8$) al 9%(questo perché le molecole di naftalene hanno la capacità, detta fluorescenza, di emettere fotoni quando eccitati in tempi molto brevi (entro 10 ns) indipendentemente dalla temperatura). Quando il raggio cosmico attraversa lo scintillatore cede energia agli elettroni degli atomi di naftalene, ed essi passano ad un livello energetico superiore (compiono un salto quantico). Gli elettroni tendono poi a tornare al livello in cui si trovavano inizialmente, ma per farlo devono perdere energia, ciò che succede grazie all'emissione di un fotone.

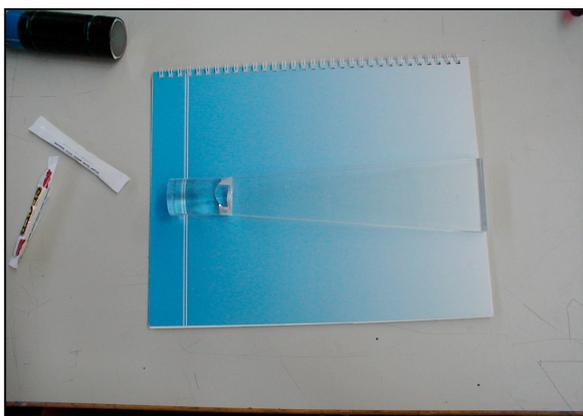


Per poter convogliare i fotoni emessi verso la guida di luce e poi al fotomoltiplicatore, lo scintillatore è ricoperto di una superficie riflettente (alluminio). Per evitare che fotoni provenienti da fonti luminose esterne simulino il passaggio di un raggio cosmico cedendo a loro volta energia ai fotoni, sopra l'alluminio vengono distribuiti vari strati di nastro

Fig . 1
adesivo nero.

F o t o s c i n t i l l a t o r e

In questo esperimento si utilizzano ben tre scintillatori, per motivi che illustreremo poi.



La guida di luce (un trapezio in plexiglas non trattato) in cui giungono i fotoni dopo aver percorso lo scintillatore ha il compito di restringere la superficie di propagazione dei fotoni in modo tale che possano entrare nel fotomoltiplicatore. Tuttavia al

fotomoltiplicatore arriva una quantità proporzionale al rapporto tra la superficie del fotomoltiplicatore e quella dello scintillatore, e non la totalità dei fotoni (per la precisione $f_f/f_s=S_f/S_s$ dove f_f è il numero di fotoni nel fotomoltiplicatore, f_s nello scintillatore, S_s e S_f le due superfici).

Fig.2 Guida di luce

Il fotomoltiplicatore ha due compiti: (1) convertire il fascio di fotoni in un fascio di elettroni, e (2) aumentarne considerevolmente il numero. Ciò richiede più di un passaggio, e, di conseguenza, il fotomoltiplicatore deve essere costituito da più di una componente. La conversione di fotoni in



elettroni avviene nel fotocatodo, un vetro su cui si ha un deposito di borosilicati, sostanze che se colpite da fotoni producono

elettroni (detti fotoelettroni) mediante effetto fotoelettrico. A tal punto gli elettroni devono giungere alla serie di dinodi, che hanno il compito di assolvere alla seconda funzione, cioè intensificare il fascio di elettroni.

Tuttavia ci si deve assicurare che gli elettroni vi giungano nel maggior numero possibile e il più possibile insieme (perché ciò influisce sulla risoluzione temporale), indipendentemente

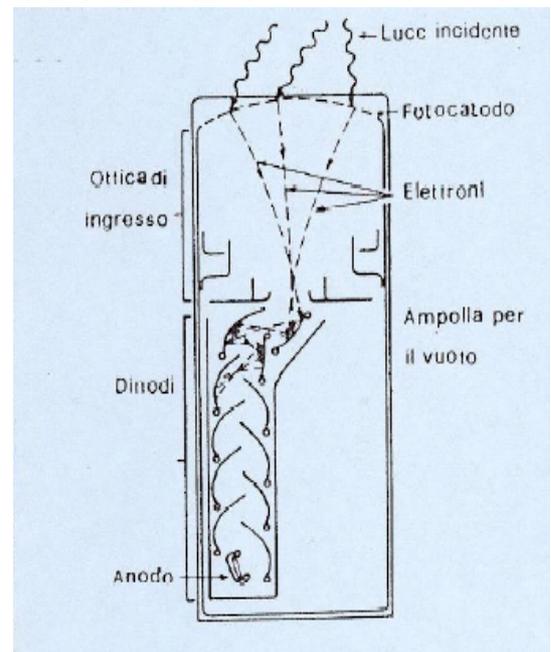
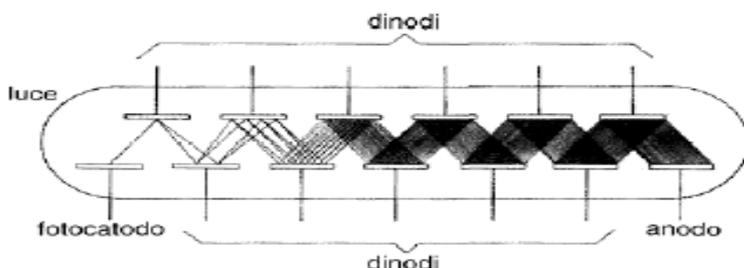


Fig.3 Fotocatodo dal punto del fotocatodo in cui è stato prodotto l'elettrone. Per questo si ha un sistema di elettrodi che li indirizza e li accelera verso il primo dinodo.

Qui gli elettroni vengono via via attirati dalla carica positiva dei dinodi, e quando si scontrano con essi avviene emissione secondaria di elettroni. Ad



ogni dinodo viene applicata una differenza di potenziale via via crescente
Fig.4 Schema del fotomoltiplicatore

in modo da accelerare verso il dinodo successivo gli elettroni in uscita, ma si deve evitare una differenza di potenziale troppo elevata. A questo scopo è adibito il partitore di tensione che fa sì che l'aumento di potenziale vada con una

Fig.5 Serie di dinodi, schema
certa linearità seguendo



parametri prefissati. Poiché ad ogni impatto si ha un guadagno di elettroni, il loro numero ha una crescita esponenziale (se δ è il guadagno per ogni dinodo e n il numero di dinodi, il guadagno finale sarà δ^n). Così si arriva ad ottenere una vera e propria cascata che viene raccolta al termine del fotomoltiplicatore dall'anodo.

Fig.6 Fotomoltiplicatore

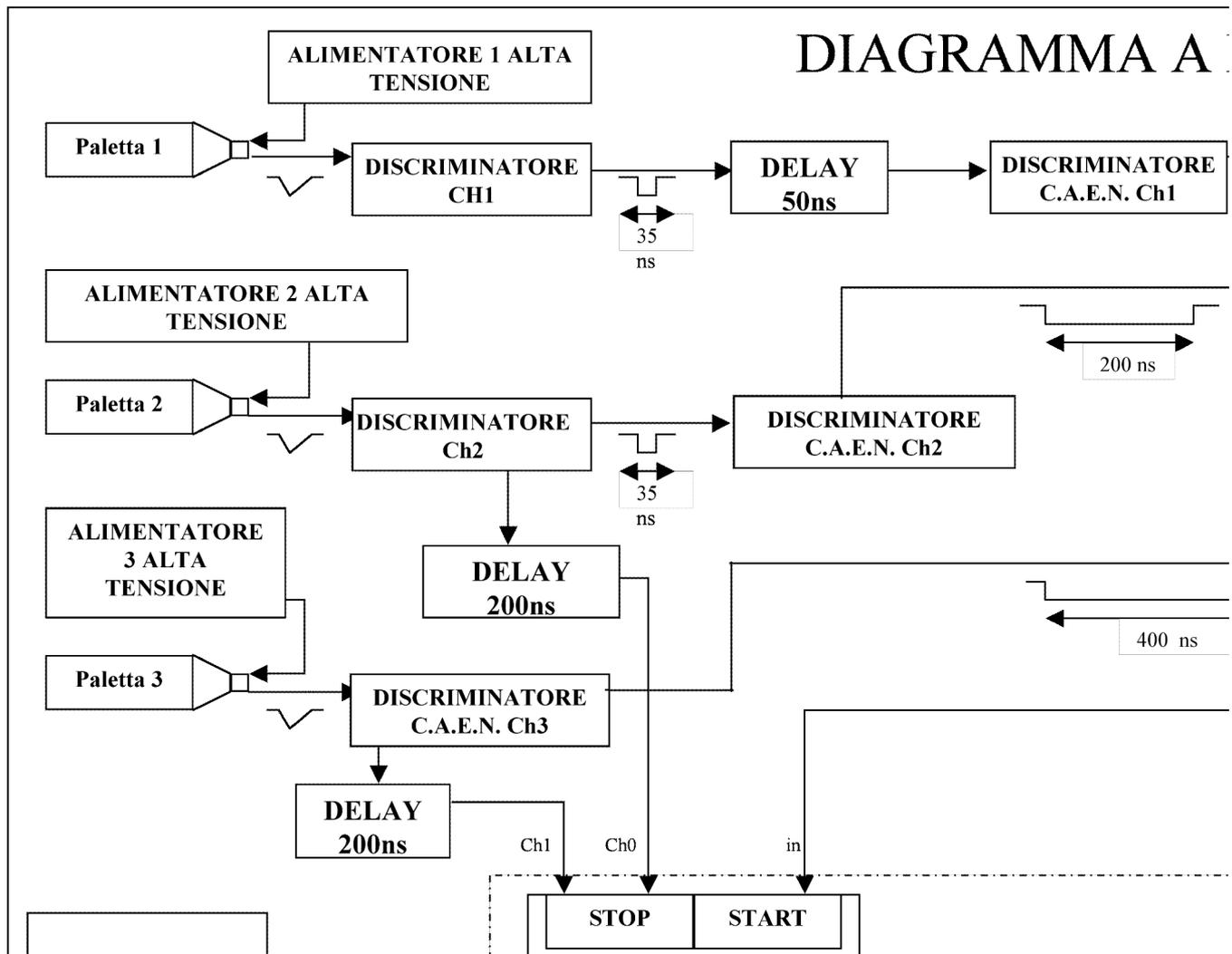


Fig.7 Diagramma a blocchi, schema della nostra elettronica

Il segnale in uscita dal fotomoltiplicatore però non è pulito, poiché, a causa di problemi della stessa elettronica(dovuti alla natura statistica dell'effetto di moltiplicazione degli elettroni, e al diverso punto sul fotocatodo in cui questi sono generati, il che può implicare,nonostante l'effetto dell'ottica d'ingresso, un certo ritardo di alcuni fotoelettroni), passaggi indesiderati di luce e particolari condizioni ambientali (presenza di campi magnetici o temperature piuttosto alte) si sono prodotti segnali di disturbo che possono inficiare una corretta rilevazione dei dati. Per eliminare questo "rumore" di fondo si utilizza un discriminatore.

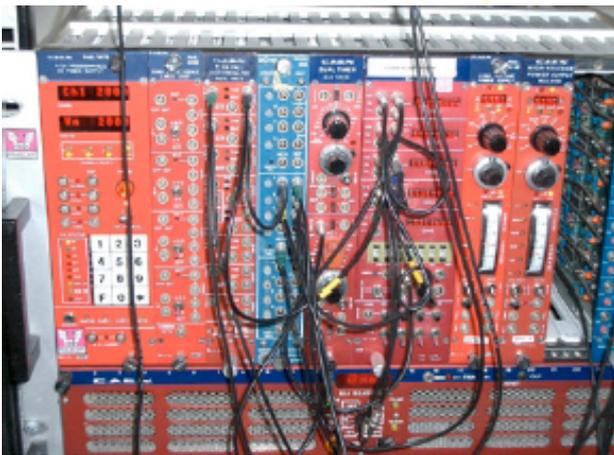


Il suo compito è proprio quello di discriminare il segnale, ovvero di togliere ciò che non ci interessa. Inoltre trasforma il segnale, che in entrata è analogico, in digitale, per poter essere letto più agevolmente dalla nostra elettronica. Per eliminare il "rumore" si fissa una soglia (trigger) al di sotto della quale il segnale non viene fatto procedere oltre, ovvero non viene rimesso in forma digitale, ma viene ignorato. Si parte quindi dal presupposto che il segnale di disturbo abbia un'ampiezza molto minore rispetto al segnale che ci interessa e che quindi non potrà mai superare una certa soglia. Quando un segnale analogico supera la soglia prefissata, il discriminatore ne emette un altro digitale di durata programmabile. **Fig.8 Discriminatore multicanale(in azzurro)**

E' molto importante questa fase in cui si raccolgono e scelgono i dati, poiché si deve fare in modo che questi siano il più puliti e chiari possibile, in modo tale che il nostro calcolo finale, che si baserà essenzialmente sulla statistica ottenuta dall' analisi di questi dati, sia attendibile. Ovviamente dobbiamo evitare il più possibile di incamerare dati fuorvianti, che possano darci valori che si discostano da quelli effettivi, a causa di disturbi di varia natura. Una prima selezione di dati avviene direttamente nella preparazione degli scintillatori, quando si circondano di nastro adesivo per

evitare che la luce produca dati che non ci interessano, e che potrebbero portarci fuori strada (e creare anche molta confusione). Una seconda selezione avviene nel discriminatore.

A questo punto ci si presenta l'occasione per parlare del motivo per cui decidiamo di utilizzare tre scintillatori per le nostre misurazioni. Dovendo misurare una velocità (definita come s/t , dove s è la lunghezza percorsa e t è il tempo impiegato), avevamo bisogno di una lunghezza da far percorrere al raggio (e anche di una misurazione del tempo impiegato, ma questo per ora non ci interessa). Va da sé che erano necessarie almeno due "palette" (una che potremmo chiamare "partenza", o $s_1 (=0)$, e una "arrivo", o s). Tuttavia dobbiamo considerare un fatto importante: un raggio raramente giunge perfettamente perpendicolare alle palette, ma molto più probabilmente forma un angolo α non retto con i rivelatori. In tal caso la distanza percorsa non è s , ma $s/\sin\alpha$. Essendo $\sin\alpha < 1$ per angoli non retti (a meno di un angolo piatto), la distanza percorsa dal raggio sarà maggiore di quella misurata da noi (non abbiamo modo ovviamente di distinguere, per ogni raggio, con che angolo incide sui rivelatori, e quindi dobbiamo prendere un solo valore per il percorso di ogni raggio). Di conseguenza, il raggio impiegherebbe più tempo ($t/\sin\alpha$) rispetto a quello speso incidendo perpendicolarmente sulle "palette". Per noi che prendiamo la distanza s come percorso di ogni raggio, la velocità risulterebbe $v = s \cdot \sin\alpha / t$, cioè inferiore a quella reale. Lo scopo della terza "paletta" è proprio quello di ridurre l'angolo col quale il raggio può incidere per colpire tutti i rivelatori, dando modo di ottenere dati più precisi. La nostra elettronica fa in modo che non arrivi alcun segnale al computer se il raggio non attraversa tutti e tre gli scintillatori (ecco evidente ancora l'importanza della scelta/verifica del dato).



Per verificare che il raggio abbia percorso le tre palette, abbiamo i circuiti di coincidenza che danno segnale in uscita



solo se hanno segnali in entrata da tutte e tre i rivelatori in un determinato istante (sono porte logiche AND, che eseguono l'operazione di prodotto logico). Tuttavia, poiché i raggi hanno attraversato gli scintillatori in istanti diversi, i segnali non arriveranno mai insieme. Allora è necessario ritardarli in modo tale che il primo sia contenuto nel secondo e il secondo nel terzo. Quando ci si è accertati che il raggio abbia

attraversato tutte e tre le palette, la
Fig.9 Veduta d'insieme del Crate
NIM con la coincidenza principale
"congelare"
al centro(in azzurro)
raggi

coincidenza invia un segnale ad un
apparecchio incaricato di

l'ingresso di altri dati (ovvero, i

che passano per gli scintilla

durante l'analisi del dato che abbiamo
incamerato non vengono considerati). Tale strumento è lo Status A.
Una volta che ci siamo assicurati della qualità del nostro dato, lo possiamo
misurare. Prima però dobbiamo analizzare il concetto di misura.

Una grandezza fisica si ritiene specificata quando, attraverso determinate
operazioni, risulta possibile associarle in modo univoco un numero che ne
rappresenti la misura.

Ecco perché risulta di fondamentale importanza porre la necessaria
attenzione durante lo svolgimento delle operazioni concrete di
misurazione: solo così si può pensare di ridurre le ambiguità che
disperdono il contenuto informativo e l'oggettività dei dati raccolti.

Innanzitutto è di primaria importanza conoscere le caratteristiche degli
strumenti utilizzati, in particolare tener conto

- ❖ dell'intervallo di funzionamento, ovvero, del fatto che ogni strumento è
in grado di fornire misure non alterate partendo dal valore minimo detto
soglia, fino ad arrivare ad un valore massimo che ne rappresenta la
portata
- ❖ della *sensibilità* dello strumento, ovvero essere a conoscenza del
minimo valore della grandezza che si vuole misurare ancora
apprezzabile dallo strumento; valore che, nella nostra misurazione, ci
permette di stabilire l'indeterminazione detta per questo *errore di
sensibilità*

ed essere consapevoli di dover fare necessariamente fronte a:

- ❖ *errori sistematici*, dovuti principalmente a difetti costruttivi e di taratura
degli strumenti, tali quindi da condurre a valori sistematicamente in
eccesso o in difetto rispetto al valore effettivo, e dei quali si può ridurre
sostanzialmente il peso
- ❖ *errori casuali*, dovuti ad un numero elevato di fattori non controllabili
per i quali quindi non è possibile un'analisi puntuale.

Risulta quindi evidente come il valore vero di una grandezza sia comunque un'entità che non è possibile conoscere.

Il risultato ottenuto dopo un accurato processo di misurazione è sempre un numero che approssima il valore vero: nelle nostre possibilità è solo stimare l'indeterminazione che è associata ad una serie di misure e quindi valutare la quantità e la qualità delle informazioni raccolte; in altre parole dobbiamo limitarci ad estrarre il valore più attendibile e con il maggior contenuto informativo.

Ma, siccome date N misure sperimentali non è possibile privilegiare un

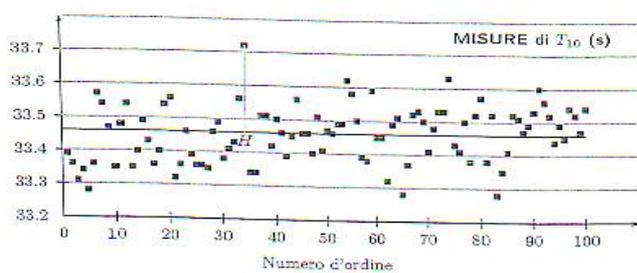


Fig. 6 Distribuzione dei dati.

determinato valore x e scartare gli altri, in quanto non c'è alcuna ragione che differenzia x dalle restanti $N-1$ misurazione, il valore più attendibile che indicheremo con x_{media} dovrà dipendere da tutte le

misurazioni in modo che ciascuno abbia la medesima importanza: riportando in un piano cartesiano i punti (i, x_i) dove l'ascissa è il numero d'ordine $i = \dots N$ delle misure e l'ordinata il valore di questa, il valore cercato corrisponde a quella retta orizzontale

$y = x_{media}$ che lascia approssimativamente un ugual numero di punti nei due semipiani in cui essa divide il piano cartesiano e che fa sì quindi che la somma delle distanze di tutti i punti da essa sia nulla.

Ne segue che

$$\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) = 0 \quad \sum_{i=1}^N x_i - \sum_{i=1}^N \bar{x} = 0 \quad \sum_{i=1}^N x_i - N \cdot \bar{x} = 0$$

da cui discende che il valore più attendibile per la grandezza cercata non è altro che la media aritmetica delle N misurazioni.

$$N \cdot \bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i$$

Proseguendo infatti con i calcoli si ottiene dove la seconda altro non è se non la formula comunemente usata per calcolare la media aritmetica

Ma per quanto detto all'inizio, al valore così ottenuto è necessario associare anche una stima dell'errore che, indicando con x_v il valore vero, sarà $e_i = x_i - x_v$

Il valore vero x_v risulta però sconosciuto, per cui anche l'espressione relativa all'errore della singola misurazione, rimane incognito e inutilizzabile.

Ed incognita e inutilizzabile è anche la formula che ci permette di calcolare l'errore della media,

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \bar{x} - x_v = \frac{1}{N} \left[\sum x_i \right] - x_v = \frac{\sum x_i - N x_v}{N} = \frac{1}{N} \cdot \sum (x_i - x_v) \\ \bar{\varepsilon} &= \frac{1}{N} \cdot \sum \varepsilon_i \end{aligned}$$

dalla quale siamo in grado di capire solo che questa tenderà a zero quando più numerose sono le misure

effettuate: in altre parole la media aritmetica approssima il valore vero tanto meglio quanto più numerose sono le misure ottenute.

Per poter visualizzare graficamente i risultati ottenuti dalle misurazioni effettuate, è necessario per prima cosa definire l'ampiezza Δx degli intervalli entro i quali raggruppare le misure ottenute, per poi poter stabilire la frequenza sperimentale con cui questa si è presentata contando il numero n di volte che si è ottenuta una certa misura x e dividendole per il numero totale di misurazioni effettuate: riportando in ascissa i diversi intervalli ampi Δx e costruendo i rettangoli aventi come base Δx e altezza pari a n/N otterremo l'istogramma che rappresenta la distribuzione sperimentale cercata, nel quale sarà evidente come la frequenza delle misure che differiscono dai valori centrali tenda a zero.

A questo punto sarà facile capire che eseguendo un numero molto alto di misurazioni $N \rightarrow \infty$ con $\Delta x \rightarrow 0$, otterremo una distribuzione non discreta come per l'istogramma, dove non veniva analizzata una singola misurazione ma si considerava un gruppo di misurazioni con valore compreso nell'intervallo Δx , ma continua denominata funzione di Gauss o legge normale:

$$f(x) = \frac{1}{\mu\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_v)^2}{2\mu^2}}$$

Tale funzione risulta determinata completamente una volta che si siano ottenuti x_v e μ , dove il primo è il valore vero della grandezza che, per quanto già detto si può confondere con la media aritmetica, mentre il secondo è detto scarto quadratico medio o deviazione standard ed è un

numero positivo definito come $\mu = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{\text{media}})^2}{N - 1}}$

L'aspetto di questa funzione è quello di una campana simmetrica rispetto alla retta $x = x_v$ che ne determina la posizione sull'asse delle ascisse, ed avente l'asse x come

$$f(x) = \frac{1}{\mu\sqrt{2\pi}}$$

asintoto orizzontale e che raggiunge il suo valore massimo in

Questa dipende inoltre da μ in modo inversamente proporzionale in quanto al suo diminuire la curva si contrae attorno al valore medio e si innalza. La precisione delle misure è in qualche modo rappresentata dallo scarto quadratico medio μ che per tale ragione è detto indice di precisione: una gaussiana con μ grande cioè abbastanza larga, sarà indice di una misura poco precisa, mentre al contrario se μ è piccolo la misura risulta molto precisa. A questo punto è possibile confrontare l'istogramma sperimentale ottenuto da un insieme di misure con la curva di Gauss ottenuta invece con infatti procedimenti matematici che coinvolgono limitatamente i dati sperimentali (richiede per essere determinata solo la conoscenza di x_{media} e μ) per renderci conto di quanto questi siano o meno attendibili.

Fig.11 Curva di Gauss



Fig.12 Veduta del Crate CAMAC

in cui è contenuto il TDC

