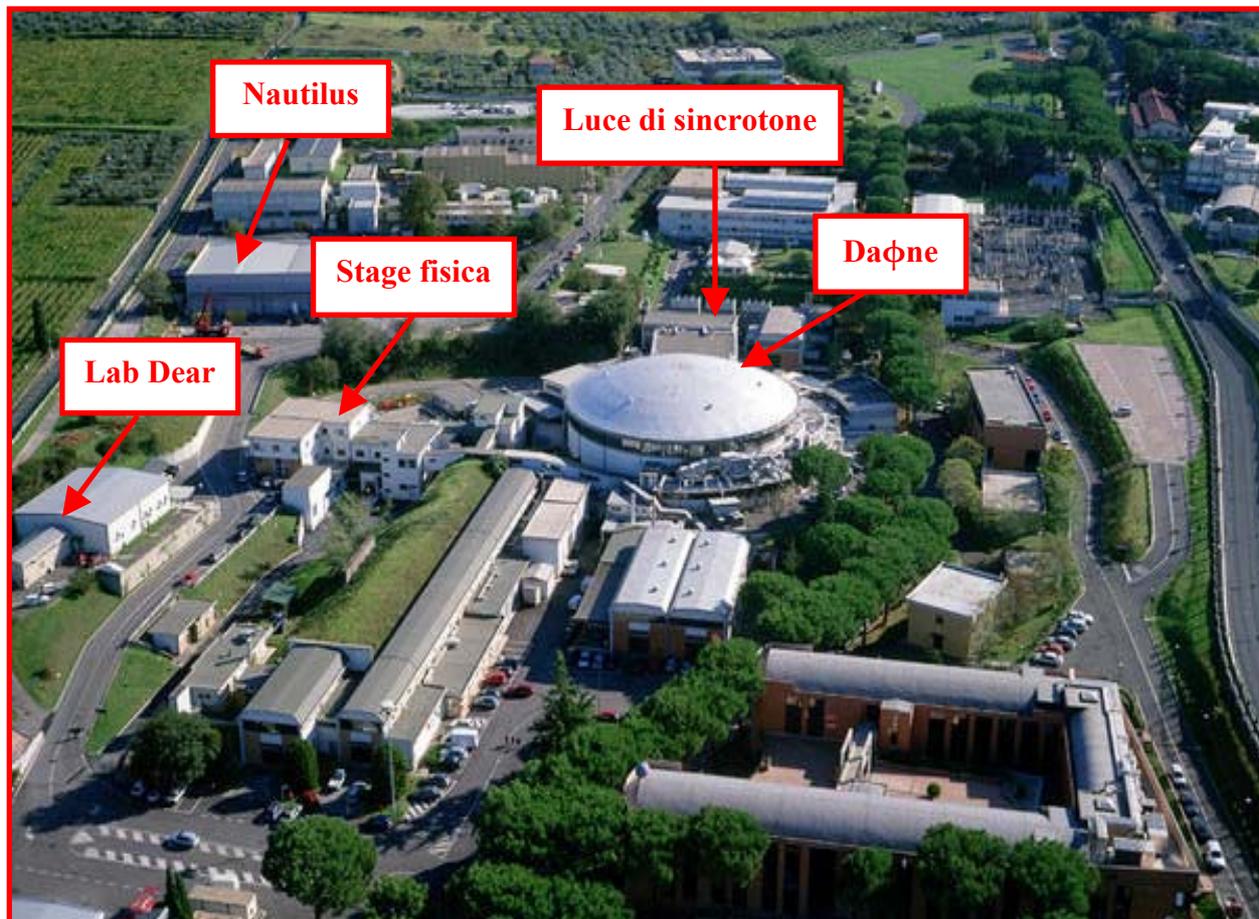


STAGE DI FISICA 2004 LABORATORI NAZIONALI DI FRASCATI – I.N.F.N.



TUTORS: Catalina Petrascu, Marco Catitti, Mihail Iliescu.

STAGISTI: Claudio Colacchi, Andrea Farrotti, Serena Marianecchi, Gaetano Nardone, Noemi Nocioni, Federica Sebastiani.

Introduzione

I LNF sono stati costruiti negli anni '50 e sono il più grande centro dell'INFN. L'istituto svolge attività di ricerca nel campo della fisica nucleare, sub-nucleare, e astroparticellare, studiando i costituenti elementari della materia e le forze che li tengono uniti.

Il gruppo di studenti:

- Claudio Colacchi
- Andrea Farrotti
- Serena Marianecci
- Gaetano Nardone
- Noemi Nocioni
- Federica Sebastiani

ha svolto uno stage di fisica sperimentale presso i LNF durante il periodo: marzo – maggio 2004.

Durante lo stage è stata svolta sia un'attività sperimentale nel laboratorio, sotto la guida dei nostri tutori, che delle lezioni teoriche per capire i vari aspetti scientifici.

Il lavoro che segue è stato suddiviso in 6 capitoli secondo il seguente indice:

INDICE ARGOMENTI

1) INTRODUZIONE AI LABORATORI DI FRASCATI.....	5
➤ Principali esperimenti e attività: Daφne, Kloe, Finuda, Nautilus, DEAR	
2) I RIVELATORI AL SILICIO.....	13
➤ Da DEAR A SIDDHARTA: CCD, SDD	
➤ La fluorescenza : applicazioni	
➤ Catena di acquisizione dati : dal segnale uscente dal rivelatore alla elaborazione dati	
2) ESPERIENZE DI LABORATORIO	29
➤ Principali componenti elettronici: il resistore, il diodo, il condensatore	
➤ Studio della legge di OHM tramite il metodo voltamperometrico	
➤ L'amplificatore di segnale : il guadagno	
➤ Strumenti di misura : il multimetro digitale e l'oscilloscopio	
➤ Misura del tempo di volo di una particella	
➤ Descrizione dei dispositivi usati : fototubi fotomoltiplicatori.	
4) CONVERTITORI ADC E DAC.....	59
➤ Principio di funzionamento	
➤ convertitori a contatore e Flash	
➤ Verifica sperimentale del convertitore ADC 0804	

5) ANALISI DATI.....72

➤ Descrizione

➤ Esempi di analisi dati sperimentali

6) CONCLUSIONI.....78

1) INTRODUZIONE - LABORATORI NAZIONALI DI FRASCATI

Descriviamo sinteticamente, in quel che segue, le varie attività che si svolgono presso i Laboratori Nazionali di Frascati e i principali esperimenti con i quali siamo venuti in contatto.

DAΦNE (Double Anular Φ-factory for Nice Experiments)

D.A.Φ.N.E rappresenta l'acceleratore di particelle che si prefigge lo studio delle particelle originate dall'annichilazione dei positroni e degli elettroni accelerati, in seguito al loro scontro.

L'energia generata si trasforma in massa e nell'energia cinetica di una nuova particella (Φ) che successivamente decade in Kaoni K (carichi positivamente, negativamente o neutri). **D.A.Φ.N.E.** rappresenta un doppio anello di fasci di $\sim 0,5$ GeV ciascuno, in grado di produrre un elevatissimo numero di collisioni (eventi).

Il complesso DAΦNE è formato da tre elementi principali:

- 1) il LINAC, centro di "produzione" elettroni e positroni (550 MeV e^+ , 800 MeV e^-);
- 2) L'accumulatore da 510 MeV;
- 3) Gli anelli principali dell'acceleratore di particelle.



Fig. 1: L'acceleratore DAΦNE dei Laboratori Nazionali di Frascati

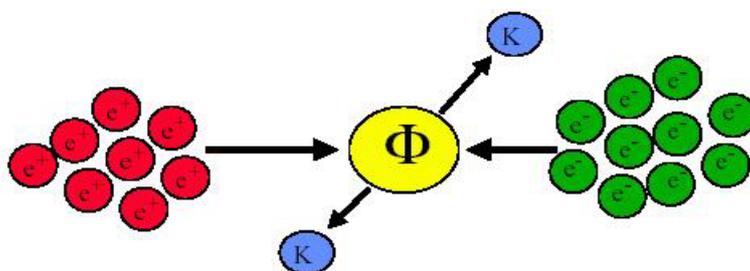


Fig. 2: Rappresentazione dell'annichilazione elettrone-positrone in DAΦNE

I Kaoni risultati dal decadimento delle Φ a loro volta costituiscono il materiale di studio di vari esperimenti: **KLOE, FINUDA, DEAR-SDDHARTA.**

**DEAR (DAΦNE Exotic Atoms Research) ->
SIDDHARTA(Silicon Drift Detector for Hadronic Atom Research by
Timing Application)**

Rappresenta l'esperimento presso di cui si e' svolta l'attivita' durante il nostro stage.

L'esperimento DEAR->SIDDHARTA studia atomi di idrogeno e di deuterio in cui un K^- ha sostituito un elettrone atomico. Questi atomi esotici si formano in uno stato eccitato e decadono emettendo raggi X. La loro struttura dipende sia dalla forza e.m. che da quella nucleare e viene ricostruita misurando l'energia dei raggi X emessi.

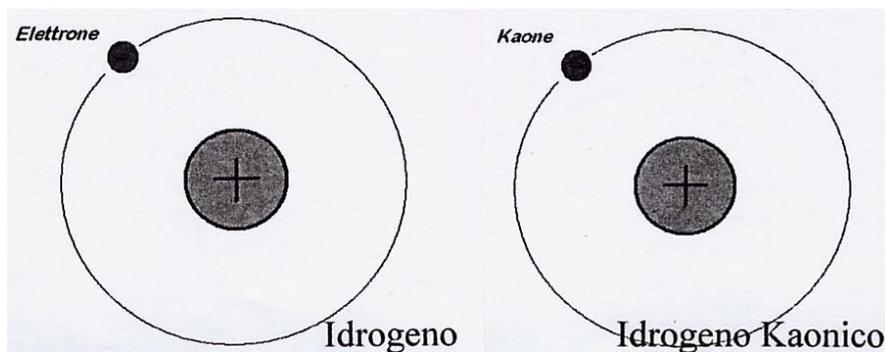


Fig 3. L'idrogeno kaonico

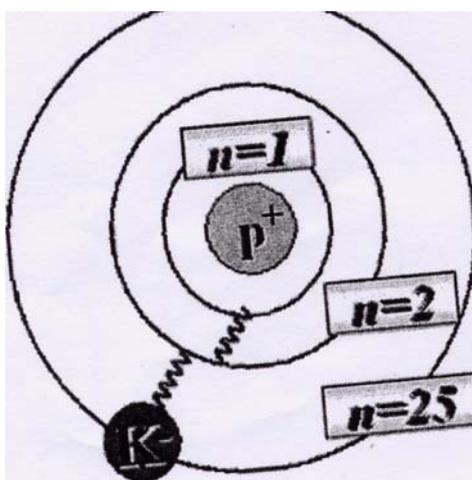


Fig. 4 Decadimento dell'idrogeno kaonico

Il Kaone (carico negativamente) nell'atomo esotico si trova in uno stato eccitato in un'orbita esterna, e non essendo stabile, subisce un processo di diseccitazione. Nella transizione d'interesse in quanto collegata ai processi dell'interazione forte – sotto indagine - $2P \rightarrow 1S$ emette una quantità di energia pari a 6,2 KeV, radiazioni riconducibili allo spettro dei raggi X. Lo studio degli atomi esotici necessita quindi dell'utilizzo di rivelatori al silicio sensibili ai raggi X.

Dalla misura dei raggi X successivamente si possono ricavare informazioni sulla struttura degli atomi esotici. La struttura dipende dalla forza elettromagnetica e dalla forza forte, e tali parametri possono essere ricavati misurando l'energia emessa sotto forma di raggi X.

L'esperimento DEAR utilizza le cosiddette CCD (**Charge Coupled Device**), presenti anche nelle comuni macchine fotografiche digitali, come dispositivi di rilevamento al silicio. Esse consistono in matrici di pixel, ogni pixel è una giunzione P-N. Le CCD quindi, immagazzinano le informazioni sotto forma di carica elettrica; la descrizione dettagliata è riportata nei prossimi capitoli.

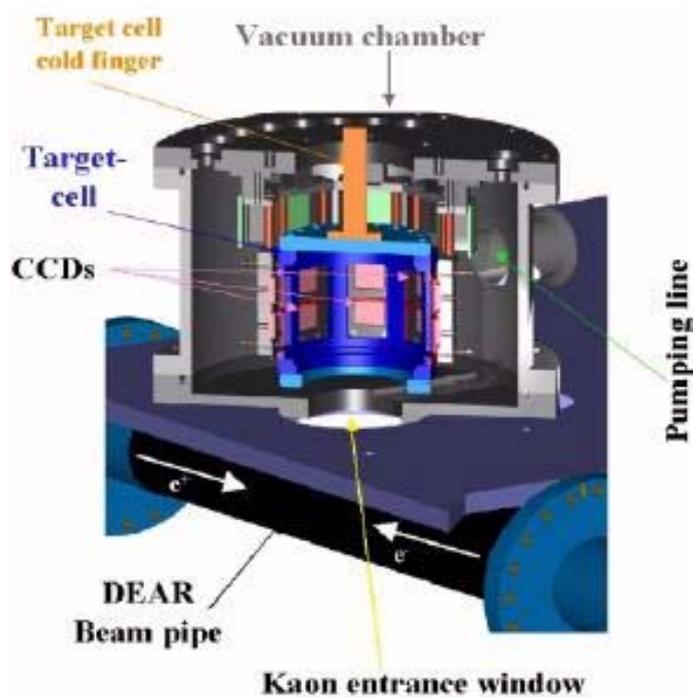


Fig 5 Apparato DEAR

SIDDHARTA è ritenuto la naturale evoluzione del progetto **DEAR** , nello studio degli atomi esotici a **DAΦNE**. Tale progetto utilizza dei rivelatori simili alle **CCD**, ma con la facoltà di utilizzo di permettere l'utilizzo di un trigger (sistema di acquisizione ad una finestra temporale che consente abbassamento del “rumore di fondo”). Tali rivelatori sono le **SDD (Silicon Drift Detector)**, oggetto del nostro stage, che verrà discusso più in dettaglio nei prossimi capitoli.

KLOE (K Long Experiment)

Oggetto di studio del progetto **KLOE** sono i processi di decadimento dei Kaoni generati dal decadimento della particella (Φ).

KLOE, tramite l'esame delle differenze nei processi di decadimento dei K, consentono all'esperimento di misurare l'asimmetria tra il comportamento della materia e dell'antimateria; questi risultati trovano notevole applicazione nello studio del Big-Bang.

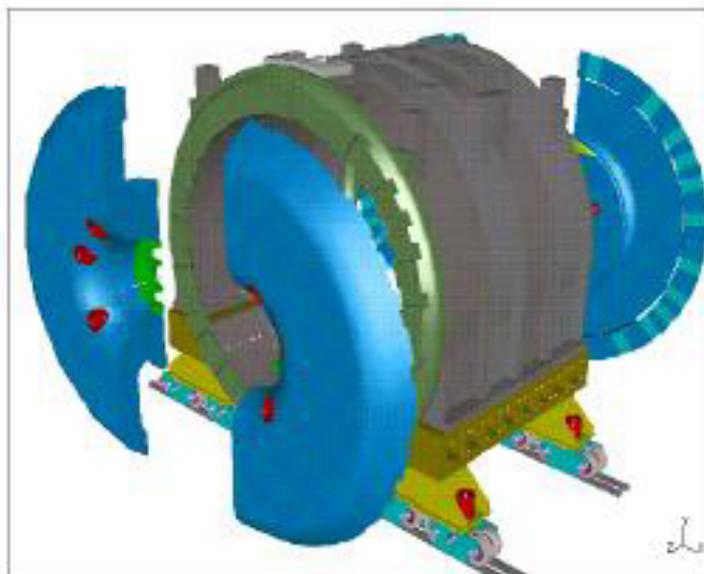


Fig 6: Rivelatore KLOE

FINUDA (Fisica Nucleare a DAΦNE)

L'esperimento FINUDA studia nuclei atomici al cui interno un K ha trasformato un nucleone in una particella Λ .

Questi *ipernuclei*, sono nuclei instabili: la Λ decade e l'ipernucleo si ritrasforma in nucleo convenzionale con l'emissione di una particella π . Poichè la Λ si dispone nella parte più interna del nucleo, la struttura nucleare interna può essere ricostruita dalla misura dell'energia del π emesso

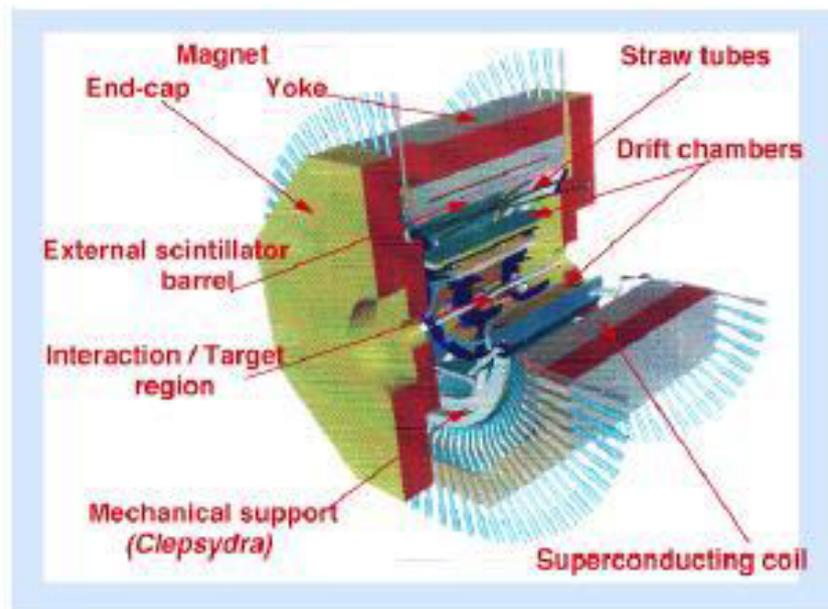


Fig 7: Rivelatore FINUDA

NAUTILUS (Antenna Gravitazionale)

L'antenna gravitazionale NAUTILUS, un dispositivo atto alla rilevazione delle onde gravitazionali provenienti dallo spazio, consiste in un cilindro di 3 metri di lunghezza e circa 2,3 tonnellate di peso, isolata meccanicamente e tenuta alla temperatura di 0,1 K. Il materiale di cui l'antenna è composta deve essere scelto tale che la risonanza utilizzata abbia un tempo di decadimento alquanto lungo, per poter discriminare i segnali che eccitano l'antenna (che decadono con lentezza) da impulsi spuri e di breve durata.

L'isolamento termico è stato realizzato circondando di strati di mylar alluminato i vari schermi e il recipiente dell'elio liquido utilizzato per il raffreddamento, e creando il vuoto in tutto l'ambiente tra il recipiente esterno e la camera in cui l'antenna è contenuta.

La lunghezza dell'antenna varia di 10^{-18} metri all'arrivo di un 'onda gravitazionale. Il segnale rilevato viene poi amplificato da dispositivi elettronici, detti SQUID. Un'antenna gemella è presente nei laboratori del CERN.

Le onde gravitazionali, prodotte dal moto delle masse, sono simili alle onde elettromagnetiche, la loro intensità è però altamente più debole. Solo grandi eventi come le esplosioni delle supernove sono in grado di produrre onde rilevabili da strumentazioni sulla terra.

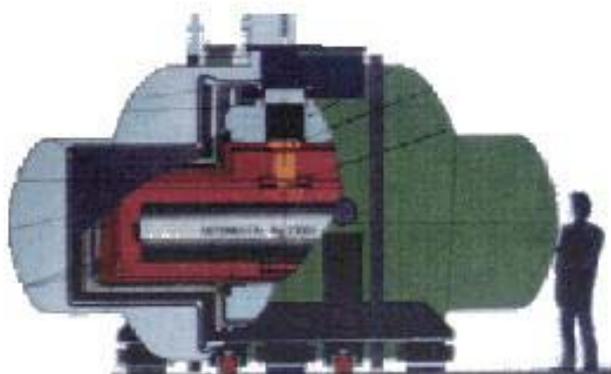


Fig 8: Antenna gravitazionale NAUTILUS

Luce di sincrotrone

La radiazione, o luce, di sincrotrone consiste in una radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda compresa tra l'infrarosso e i raggi X, emessa quando un fascio di elettroni viene accelerato fino a velocità prossime a quella della luce e attraversa un campo magnetico; viene prodotta nelle camere a vuoto anulari dei sincrotroni e di altri tipi di acceleratori di particelle. Si pensa inoltre che venga prodotta nello spazio interstellare, quando elettroni di alta energia si muovono all'interno di campi magnetici intensi, descrivendo traiettorie a spirale intorno alle linee di forza del campo; essa può essere responsabile dell'emissione di onde radio da parte di sorgenti celesti come quella attiva nella nebulosa del Granchio.

La radiazione di sincrotrone vanta proprietà che la rendono uno strumento di grande interesse per lo studio a raggi X delle strutture molecolari e dei cristalli. Essa è già “collimata”, cioè le onde che costituiscono il fascio sono pressoché parallele, e non necessita quindi di ulteriori sistemi di focalizzazione che ne attenuerebbero l'intensità. Sue proprietà ulteriori sono la notevole intensità, l'ampiezza dello spettro, che è continuo e non, come in altri tipi di sorgenti, caratterizzato dalla presenza di picchi o righe di emissione, e infine un alto grado di polarizzazione.

2) I rivelatori al silicio

Il rivelatore al silicio è l'elemento cardine dell'esperimento Dear e della sua evoluzione Siddharta che studiano gli atomi esotici in DaΦne.

Per comprendere la struttura del rivelatore è stato quindi necessario analizzare alcune proprietà del silicio.

Il silicio è un elemento semiconduttore e possiede una serie di caratteristiche fisiche che lo rendono particolarmente adatto alla realizzazione di dispositivi elettronici. In base alla loro resistenza elettrica, gli elementi fisici si dividono infatti in conduttori, semiconduttori e isolanti: un materiale a bassa resistenza, dell'ordine di 10^{-2} ohm, e ad alta concentrazione di elettroni liberi è conduttore; al contrario, uno con ad alta resistenza, dell'ordine di 10^5 ohm, e bassa concentrazione di elettroni liberi è isolante; i materiali con una resistenza compresa tra i valori limite sono semiconduttori.

La caratteristica di questi materiali è appunto la conducibilità dell'elettricità'.

I principali processi subiti dai portatori di carica (elettroni e lacune) in un semiconduttore sono la "diffusione" e il "drift".

La diffusione è collegata all'agitazione termica: in un cristallo in cui il numero di lacune ed elettroni è uniforme, l'agitazione termica non provoca nessun flusso di carica netto; se un tipo di portatori, così sono definiti elettroni e lacune in quanto portano energia, tramite qualche meccanismo viene reso di numero maggiore, otterremo una corrente detta "corrente di diffusione" dalla zona di maggior verso quella di minore concentrazione di carica.

Il drift o "trascinamento" agisce in presenza di un campo elettrico che accelera le cariche libere. L'accelerazione di queste cariche viene dissipata da urti anelastici che fanno perdere alle cariche l'energia acquistata durante l'accelerazione. Si avrà così uno schema della velocità relativo al tempo a dente di sega (vedi fig. 9) nel quale i picchi rappresentano il momento di maggiore velocità e la ricaduta rappresenta la decelerazione causata dall'urto.

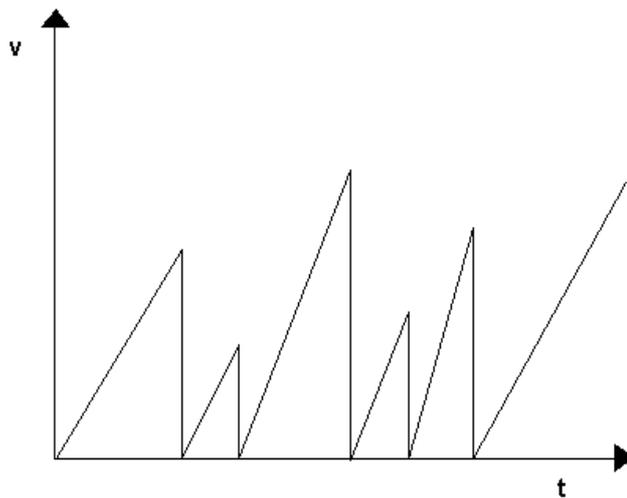


Fig. 9: velocità dei portatori di carica

Il silicio appartiene al IV gruppo della tavola periodica degli elementi: tende a cedere o acquistare elettroni, a seconda dei materiali con i quali entra in contatto, per raggiungere la stabilità'.

Gli atomi di silicio intrinseco instaurano così legami covalenti tra loro per formare il reticolo cristallino; sono però legami che si spezzano facilmente quando la temperatura supera gli 0°K: il reticolo cristallino si rompe e alcuni elettroni lasciano il loro posto vuoto creando lacune e diventando elettroni liberi che favoriscono la conduzione. Il numero di elettroni liberi è molto ridotto, circa un elettrone su $3 \cdot 10^{12}$, troppo pochi comunque per la conduzione, cosicché si sostituiscono atomi di silicio con atomi del III gruppo, solitamente Boro, che possiedono un elettrone in meno e creano un silicio di tipo P, cioè positivo; o, similmente, con atomi del V gruppo, in particolare Fosforo, che hanno un elettrone in più e creano un silicio di tipo N, negativo. Questo silicio nuovo è detto silicio drogato perché si inseriscono all'interno del reticolo cristallino puro degli elementi esterni droganti.

In questo modo aumentano notevolmente il numero di elettroni liberi, che corrispondono circa al numero di atomi di Fosforo che hanno un elettrone in più e che quindi non instaura legami, o il numero delle lacune che sono circa pari a quello degli atomi di Boro, che hanno un elettrone in meno e lasciano vuoto uno dei posti che era occupato da uno dei quattro elettroni dell'atomo di silicio.

In base a ciò che è stato detto fin ora, il Fosforo è definito "donore" poiché dona al silicio un elettrone libero, e il Boro è detto "accettore" poiché lascia libera una lacuna che è in grado di accettare un altro elettrone.

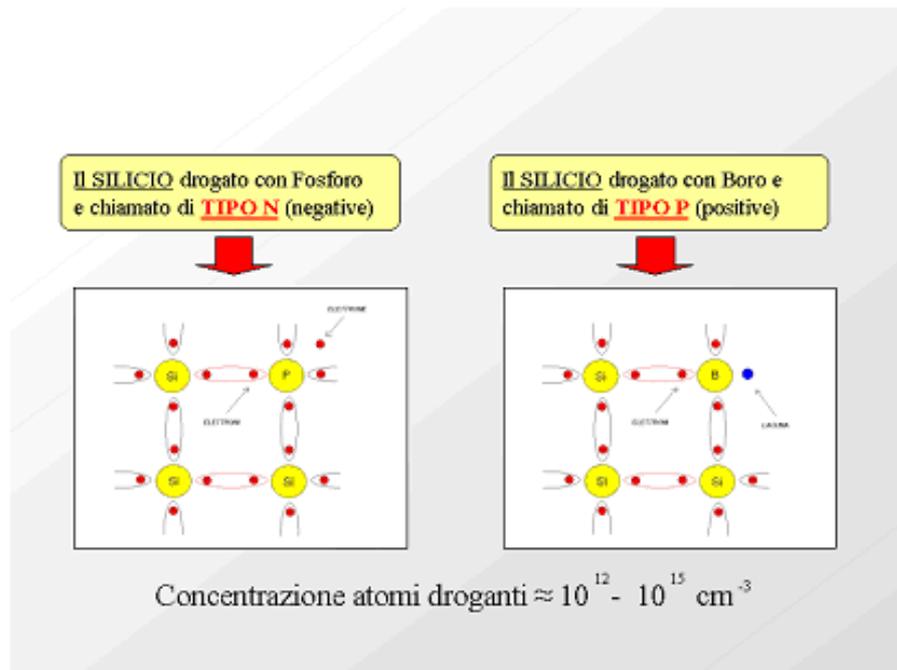


Fig 10: drogaggio del silicio

I metodi di drogaggio del silicio sono due: l'impiantazione ionica, cioè irraggiamento con laser sul silicio con B^+ a energie dell'ordine de keV realizzando giunzioni ultrasottili con bassi valori di resistenza e la crescita epitassiale.

Nel processo di drogaggio del silicio con 2 materiali diversi (donore e accettore) si crea quella che è definita "zona di carica spaziale": le lacune del silicio P e gli elettroni del silicio N si addensano in un'unica zona che diventa carica positivamente o negativamente, bisogna però precisare che il pezzo di silicio N o P è complessivamente neutro poiché la carica dei portatori maggioritari è compensata da quella fissa degli atomi droganti: se consideriamo il silicio N, la carica negativa degli elettroni liberi è compensata da quella positiva dei donatori ionizzanti e dalle lacune provocate dall'aumento di temperatura che contribuisce, come è stato già detto, a spezzare i legami elettrone-lacuna.

Ricollegando il silicio con il nostro rivelatore, resta da esporre il processo di giunzione con il quale si arriva finalmente alla giunzione P-N che forma un rivelatore.

La giunzione di silicio N con silicio P consiste, come dice la parola stessa, nel giungere, nell'unire i due tipi di silicio per creare quello che è chiamato diodo. I rivelatori al silicio utilizzano una giunzione P-N polarizzata inversamente. Ogni qual volta una particella passa attraverso un rivelatore, questa ionizza e si creano coppie elettrone-lacuna. Per la formazione di una sola coppia sono necessarie particelle con energie pari a 3.6 eVolt. Il calcolo del numero degli elettroni segue la seguente legge:

$$V = (Ne \cdot Q_e) / C_0$$

dove V è la tensione applicata; N_e è il numero degli elettroni; Q_e è la carica dell'elettrone che misura $1.6 \cdot 10^{19}$ C; C_0 è la capacità di storage (immagazzinamento) che si misura in Farad ed è data da:

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot s / d$$

dove ϵ_0 è la costante elettrica nel vuoto, ϵ_r è la costante relativa nel mezzo del materiale, s è la superficie e d è la distanza .

Possiamo dire quindi che l'elemento costituente di un rivelatore al silicio è la giunzione P-N.

All'interno del rivelatore attraverso opportuni elettrodi vengono divisi elettroni e lacune che si sono formati per ionizzazione: i segnali prodotti dagli elettroni vengono amplificati, acquisiti e analizzati.

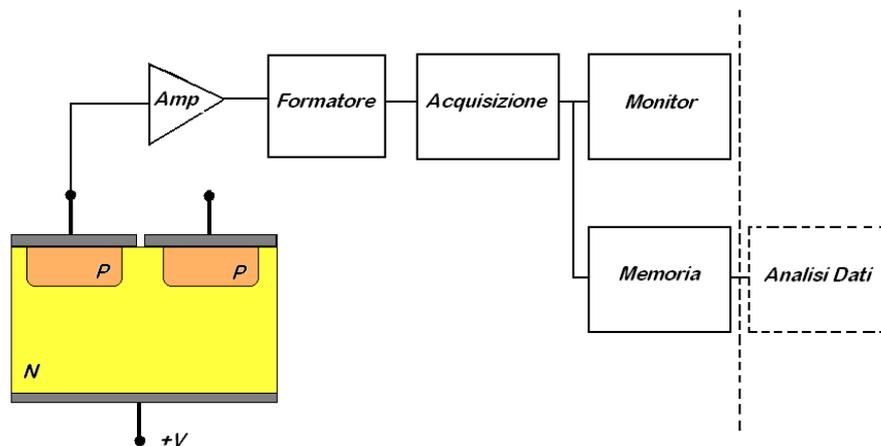


Fig. 11: catena di acquisizione

Come abbiamo già detto il rivelatore al silicio è utilizzato nell'esperimento DEAR. L'esperimento è iniziato nel 1995 e il suo setup è stato più volte modificato e ottimizzato.

DEAR studiava l'atomo esotico che si forma a DAFNE nei laboratori dell'INFN: l'atomo esotico ha un kaone al posto di un elettrone ed è più pesante di uno normale perché il kaone ha una massa pari circa a quella di mezzo protone e a quella di 900 elettroni.

Il kaone è legato al nucleo, oltre che da una forza elettromagnetica, da una forza forte di cui vogliamo capire meglio alcuni aspetti.

Sappiamo, però, che la forza forte si comporta in modo completamente opposto rispetto a quello delle altre forze da alcuni punti di vista: una sua caratteristica è la “libertà asintotica”, cioè la tendenza ad aumentare la sua forza attrattiva proporzionalmente alla distanza e non il contrario.

Il kaone, che nasce dal decadimento della particella Φ in K^- e K^+ , creata a sua volta dallo scontro tra il fascio di elettroni e positroni che circolano negli anelli dell'acceleratore, si trova in uno stato eccitato, quindi non stabile, all'interno dell'atomo esotico. Per raggiungere una posizione di equilibrio passa da un'orbita all'altra. La transizione che ci interessa, quella da $2p \rightarrow 1s$, emette un'onda pari a 6.2 keV cioè un raggio x; tali transizioni vengono rivelati tramite rivelatori al silicio CCD e attualmente SDD. La cosa più importante in un rivelatore è avere una buona risoluzione, bisogna cioè ridurre al minimo tutti i rumori, cioè i disturbi, le particelle che non ci interessano e isolare quelle da analizzare per ottenere un buon rapporto segnale/rumore.

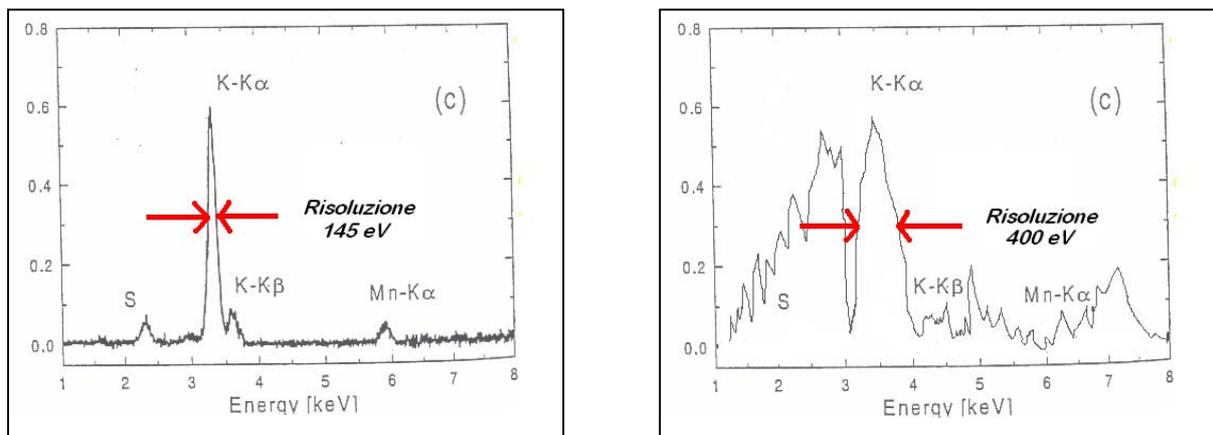


Fig. 12: Esempi di spettri di raggi X

Vediamo in maniera più dettagliata il principio di funzionamento delle CCD.

Le CCD (Charge Coupled Device)

La **CCD** è un rivelatore al silicio costituito da un mosaico di circa 10^6 pixel (ogni pixel è una giunzione P-N) ognuna delle quali possiede un condensatore di integrazione. La carica che viene accumulata passa da un pixel all'altro fino ad arrivare ad una unica uscita finale mantenendo il loro ordine di lettura. Si ottiene così una serie di valori ordinati con tutte le cariche corrispondenti a ciascun pixel: risulta di massima importanza l'efficienza di trasferimento **CTE** (Charge Transfer Efficiency) degli elettroni da una cella alla successiva poiché per arrivare all'amplificatore ciascun pacchetto deve subire centinaia di trasferimenti ed una minuscola perdita su ciascun trasferimento può completamente svuotare il pacchetto prima che arrivi all'uscita, da uno schema riprodotto sul computer si capisce che i raggi x colpiscono singoli e/o pochi pixel mentre quella che è definita "cloud", cioè nuvola di pixel, è il risultato di segnali emanati da particelle che non ci interessa studiare.

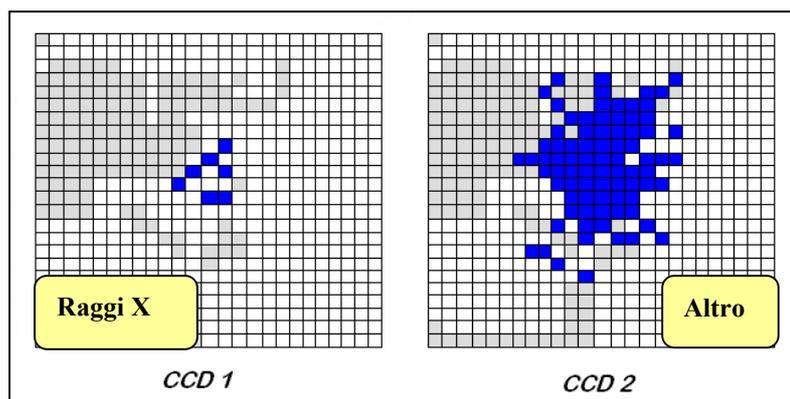


Fig. 13: segnale raggi X



Fig. 14: CCD

Le **CCD** hanno portato ai buonissimi risultati ma, anche se la misura dell'idrogeno kaonico è la migliore mai effettuata fin ora, ha una precisione ancora lontana da quella prefissata come obiettivo: la misura entro qualche eV non è stata ancora raggiunta. Infatti il rapporto segnale/rumore è dell'ordine di 1/70 mentre dovrebbe essere vicino all'unità. In questi anni è diminuito molto il fondo, cioè il rumore. Il rumore sincrono, ossia quello associato alla produzione dell'evento, in questo caso la formazione e il decadimento dell'atomo esotico, raggiungendo un rapporto segnale/fondo di circa 20:1, che si considera trascurabile.

Esiste, però, anche un fondo asincrono, dovuto a fenomeni non correlati alla formazione dell'atomo esotico ma provenienti dall'esterno, in particolare dall'acceleratore.

Il fondo asincrono è causato da particelle circolanti nell'anello che sono state perse da fasci. Le sorgenti di rumori di fondo sono inoltre i fondi cosmici e le radiazioni provenienti dalle rocce vulcaniche dei Castelli Romani.

In DEAR, il fondo asincrono è molto alto: è stata effettuata una riduzione di due ordini di grandezza che è risultata ancora insufficiente.

Un modo per ridurre i fondi di macchina sul rivelatore è quello di inserire un sistema di trigger che limiti l'acquisizione dati nel tempo. La CCD, infatti opera come una lastra fotografica senza otturatore esposta al flusso di particelle.

Un trigger è come una finestra che può essere aperta o chiusa ad intervalli di tempo predefiniti in modo da limitare l'acquisizione dati e quindi il rumore di fondo. Nessun trigger è applicabile ad una CCD: il tempo di lettura di una CCD è relativamente lungo: sono necessarie decine di secondi.

Le CCD hanno caratteristiche molto utili a questo tipo di esperimento perché sono particolarmente sensibili ai raggi x, che sono le onde emesse dalla transizione del kaone. La necessità è quella, dunque di trovare un rivelatore che mantenga queste caratteristiche ma che sia triggerabile. Questo nuovo rivelatore è la SDD, cioè Silicon Drift Detector, di grande area che costituisce la base del nuovo progetto Siddharta.

Le SDD (silicon drift detector)

Questo nuovo rivelatore utilizzato in SIDDHARTA fu inizialmente pensato per applicazioni ad esperimenti di alta energia ma poi utilizzato anche nella spettroscopia X di bassa energia, grazie ad una serie di caratteristiche uniche e difficili da ottenersi insieme in un rivelatore per raggi x:

- Alta efficienza, vicino al 100%;
- Buona risoluzione energetica, cioè di 145 eV a 6 keV a 110 K per chips da 1 cmq;
- Alta velocità di operazione, fino a 10 alla 6 particelle/s;
- Basso EMI noise;
- Possibilità di scegliere la topologia secondo le esigenze dell'esperimento.

Questa è la motivazione che ha portato alla realizzazione del nuovo progetto SIDDHARTA, nella speranza di ottenere i risultati che Dear non è stato in grado di raggiungere e che sono molto importanti per la ricerca ai laboratori.

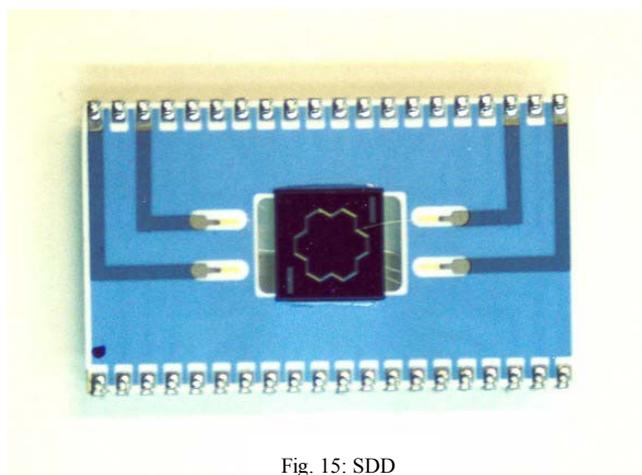


Fig. 15: SDD

Nella fig. 17 possiamo vedere il principio di funzionamento delle SDD. Le cariche prodotte per ionizzazione all'interno del dispositivo spesso 450 μm vengono pilotate, attraverso un partitore resistivo verso il centro del dispositivo di forma circolare verso l'anodo di un transistor integrato che raccoglie le cariche e le rende disponibili all'esterno.

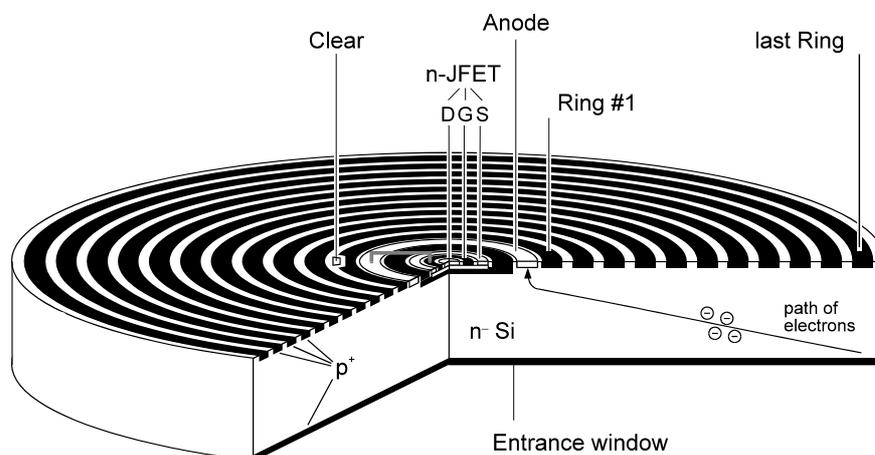


Fig. 16: sezione di una Sdd

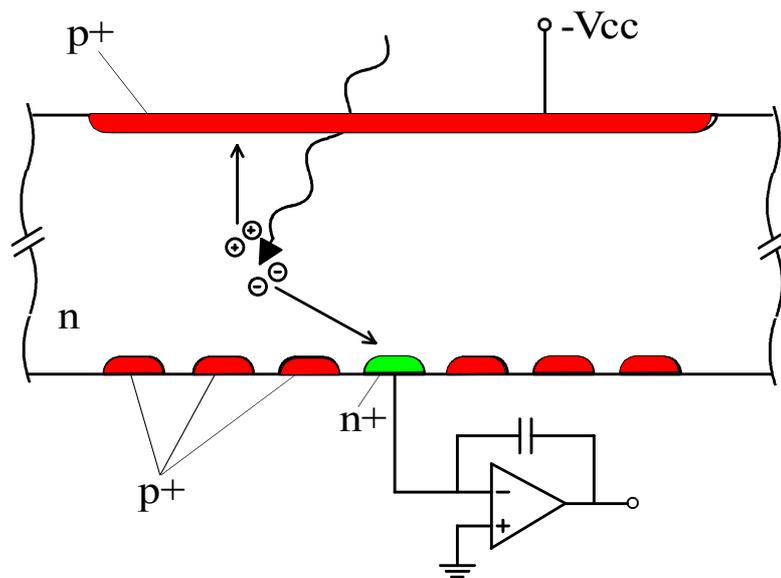


Fig. 17: trasporto di carica

Attualmente nel laboratorio si stanno testando chip da 5 mm^2 precisamente (vedi fig. 15) si analizzano 7 canali ogni canale è un rivelatore da 5 mm^2 successivamente verranno testati chip di maggiore area fino a quello che sarà presente nel setup finale. Il setup finale di SIDDHARTA conterà ben 200 canali ossia 200 rivelatori SDD da 1 cm^2 quindi avremo un'area attiva di 200 cm^2 .

In SIDDHARTA come in DEAR è molto importante capire come è composta la catena di acquisizione, cioè come si passa dalle cariche ionizzate all'interno dei rivelatori agli spettri analizzati al PC.

In generale una catena di acquisizione dati è costituita da :

- Rivelatore (CCD, SDD)
- Amplificatore
- Filtri o formatori di segnale (discriminatore)
- Convertitore AD e DA
- PC (software acquisizione e analisi dei dati)

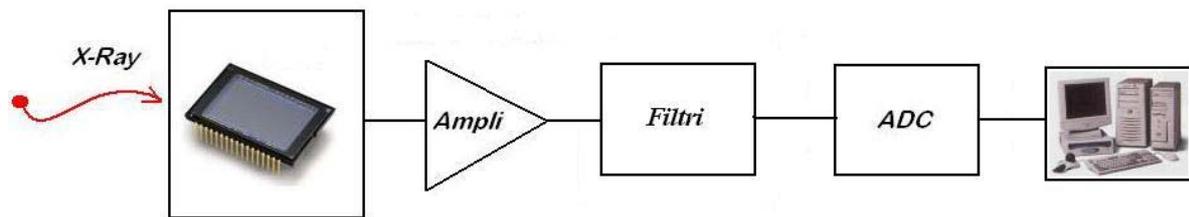


Fig. 18: catena di acquisizione

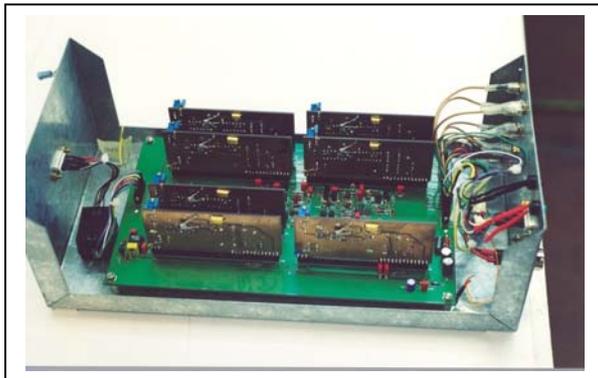


Fig. 19: filtri

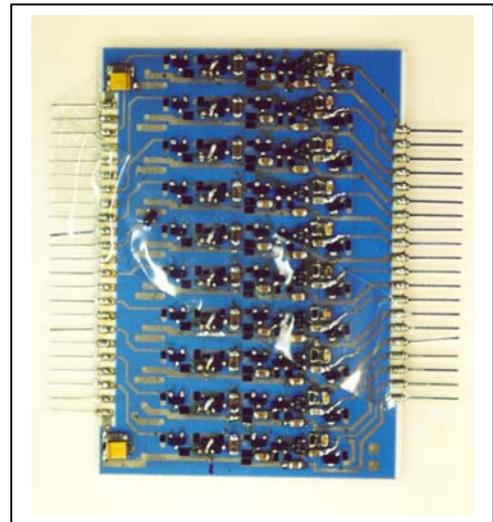


Fig. 20: amplificatore

Nel corso dello stage abbiamo visto sia in teoria che in laboratorio il principio di funzionamento dei principali costituenti della catena di acquisizione che descriveremo in seguito.

Ora andiamo a scoprire un fenomeno che ci permette di utilizzare i rivelatori al silicio e cioè la : FLUORESCENZA e le sue principali applicazioni.

La Fluorescenza

La fluorescenza è la capacità di alcuni materiali di emettere luce quando vengono colpiti da raggi ultravioletti o da altri tipi di radiazioni (anche luce visibile, in tal caso emettono luce di colore diverso), il nome deriva dalla fluorite, minerale di calcio e fluoro, alcuni campioni del quale sono, appunto, fluorescenti, ed è stato proprio nella fluorite che il fenomeno è stato scoperto.

Questo tipo di luminescenza si distingue dalla fosforescenza in quanto i materiali fluorescenti cessano di essere luminosi al cessare dello stimolo che ne determina la luminosità, invece nei materiali fosforescenti la luce continua ad essere emessa per un certo periodo dopo la fine dello stimolo.

La fluorescenza è uno dei possibili percorsi del processo di diseccitazione per mezzo dei quali un elettrone in uno stato eccitato cede energia per ritornare allo stato iniziale: infatti quando un atomo assorbe energia gli elettroni si spostano da un livello energetico ad uno superiore, la loro permanenza a questo livello è brevissima, dell'ordine di miliardesimi di secondo, dopo di che gli elettroni tornano al livello energetico originario liberando energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche. Poiché la resa energetica non è mai del 100% le radiazioni liberate saranno di lunghezza d'onda superiore, e quindi di energia minore, rispetto a quella dell'energia eccitatrice, così se l'eccitazione è ottenuta con raggi ultravioletti le radiazioni liberate saranno sotto forma di luce visibile o di raggi infrarossi.

Un esempio di fluorescenza è facilmente osservabile per mezzo della lampada di Wood, capace di emettere raggi ultravioletti, impiegata ad esempio per riconoscere le banconote autentiche da quelle false.



Fig. 21: lampada di Wood

Il fenomeno della fluorescenza viene sfruttato anche nelle analisi sul patrimonio culturale che utilizza rivelatori SDD, dal momento che questa tecnica consente di analizzare campioni in vari stati di aggregazione (liquidi, solidi tal quali, polveri pressate) ed è non distruttiva, multielementare e simultanea, si possono cioè determinare più elementi da uno stesso spettro.

La base della tecnica di fluorescenza X è proprio il principio fisico sopra citato, in seguito a quel processo si ha l'emissione di fotoni X caratteristici, con frequenza correlata al numero atomico Z dell'atomo bersaglio secondo la legge di Moseley. Questi fotoni vengono poi raccolti da un rivelatore al silicio e inviati ad un analizzatore multicanale in grado di discriminarli in base alla loro energia; si ottiene così uno spettro in cui si distinguono dei picchi, ogni picco corrisponde ad una ben precisa energia caratteristica dello specifico atomo. Dall'identificazione dei picchi si deduce la presenza nel campione di determinati elementi: l'analisi elementare qualitativa è perciò immediata.

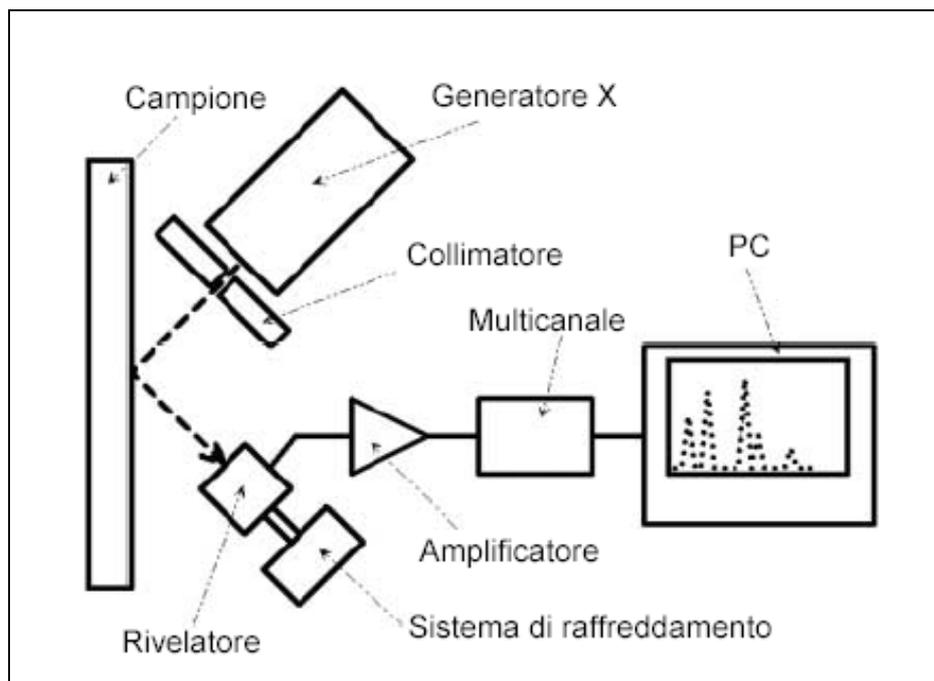


Fig. 22: analisi del patrimonio culturale



Fig. 23: affresco di Lorenzo Lotto

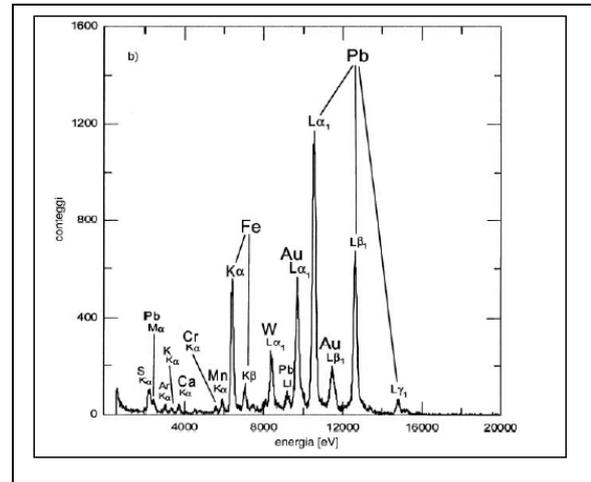


Fig. 24: elementi chimici contenuti nell'affresco

A questo punto bisogna capire cosa sia uno spettro e perchè attraverso l'analisi di esso sia così facile risalire all'elemento che lo emette.

La luce visibile è costituita da onde elettromagnetiche (cioè vibrazioni di campi elettrici e magnetici) che si propagano nello spazio. A differenza delle analoghe onde del mare (lentissime a confronto!), le onde elettromagnetiche viaggiano alla velocità della luce: $3 \cdot 10^8$ m/s. Un'onda è caratterizzata da una frequenza e da una lunghezza d'onda associata a quest'ultima. L'insieme di tutte le radiazioni elettromagnetiche, classificate in base alle loro frequenze caratteristiche, costituisce lo spettro elettromagnetico.

Esso è costituito da un insieme *continuo* di frequenze. Tuttavia, gli spettri emessi dalle sorgenti stellari presentano, sovrapposta al *continuo*, una struttura simile a un ... "codice a barre cosmico": sono le cosiddette "righe spettrali", le quali possono essere di due tipi: righe di assorbimento (più scure rispetto al resto dello spettro), righe in emissione (più brillanti del resto dello spettro). Le righe spettrali (corrispondenti a precisi valori di frequenze) rivelano una gran quantità di informazioni sulla composizione, sulla struttura e sui moti degli oggetti celesti.

Caratteristiche generali delle onde

La lunghezza d'onda è la distanza fra due creste consecutive di un'onda sinusoidale. Quando un'onda viaggia con una certa velocità "v" (nel caso delle onde luminose, la velocità è indicata con "c" ed è pari a 300.000 km/s), ogni punto dell'onda percorre una distanza pari a una *lunghezza d'onda* in un intervallo di tempo pari a un *periodo*. Così la velocità dell'onda è data dal rapporto tra la lunghezza d'onda e il periodo, oppure dal prodotto della lunghezza d'onda per la *frequenza* (che corrisponde al numero di onde per secondo, cioè all'inverso del periodo)

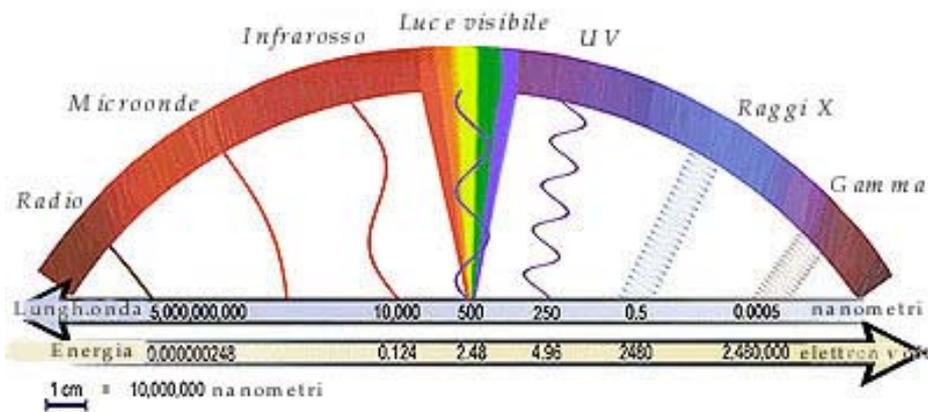


Fig. 25: spettro elettromagnetico

Le onde nello spettro

La maggior parte dello spettro elettromagnetico è invisibile all'occhio umano. Alle frequenze più alte abbiamo i raggi gamma, i raggi X e la luce ultravioletta. La radiazione infrarossa, le microonde e le onde radio occupano la regione a bassa frequenza dello spettro. Nel mezzo, su un intervallo di frequenze molto stretto, troviamo la luce visibile.

Luce visibile (ottico)

La luce visibile è quella parte dello spettro elettromagnetico che impressiona l'organo visivo. È una regione molto stretta dello spettro, con frequenze comprese tra $384 \cdot 10^{12}$ Hz (per il rosso) e $769 \cdot 10^{12}$ Hz (per il violetto).

Radiazione ultravioletta

La regione spettrale "oltre" il violetto, corrispondente all'intervallo di frequenze esteso da $8 \cdot 10^{14}$ Hz a $2,4 \cdot 10^{16}$ Hz, prende il nome di ultravioletto (UV).

L'ultravioletto occupa, quindi, la regione dello spettro elettromagnetico compresa tra la luce visibile e i raggi X. L'uomo non vede molto bene l'ultravioletto poiché la cornea l'assorbe, specialmente alle lunghezze d'onda più piccole.

Raggi X

I raggi X occupano la regione dello spettro elettromagnetico compresa tra la luce ultravioletta e i raggi gamma. Sono caratterizzati da valori di frequenza molto elevati (tra $2,4 \cdot 10^{16}$ Hz e $5 \cdot 10^{19}$ Hz), dunque sono molto energetici! La luce emessa in questa banda è troppo "blu" per essere vista dall'occhio umano!

Radiazione infrarossa

L'infrarosso (IR) è la radiazione invisibile "al di sotto del rosso", caratterizzata da valori di frequenza compresi tra $3 \cdot 10^{11}$ Hz e $3,85 \cdot 10^{14}$ Hz. È la regione dello spettro compresa tra le microonde e la luce visibile. Quasi tutte le sostanze emettono nell'infrarosso, a causa dell'agitazione termica delle loro molecole. Circa la metà dell'energia raggiante proveniente dal Sole è costituita da infrarosso, e una lampada elettrica ordinaria emette molto più infrarosso che luce. L'uomo, come tutti gli animali "a sangue caldo", è un emettitore di infrarosso.

Onde radio

La vasta regione spettrale delle onde radio è caratterizzata dai valori di energia più bassi. Le onde radio sono, infatti, onde elettromagnetiche che oscillano molto lentamente (bassi valori di frequenza), con valori di lunghezza d'onda molto grandi. Dalle profondità dello spazio, giungono sulla Terra deboli vibrazioni radio con lunghezze d'onda maggiori di 29 milioni di chilometri! L'intervallo di lunghezze d'onda delle onde radio si estende fino al valore minimo di circa 0,3 metri.

Regioni dello spettro

Lo spettro può essere diviso in due regioni:

- *radiazioni non ionizzanti* (NIR = Non Ionizing Radiations);
- *radiazioni ionizzanti* (IR = Ionizing Radiations);

a seconda che l'energia trasportata dalle onde elettromagnetiche sia o meno sufficiente a ionizzare gli atomi, cioè a strappar loro gli elettroni e quindi a rompere i legami atomici che tengono unite le molecole nelle cellule.

Le radiazioni non ionizzanti comprendono le frequenze fino alla luce visibile.

Le radiazioni ionizzanti coprono la parte dello spettro dalla luce ultravioletta ai raggi gamma.

E' alle radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti, con frequenza inferiore a quella della luce infrarossa, che ci si riferisce quando si parla di inquinamento elettromagnetico.

3) Esperienze di laboratorio

Durante lo stage abbiamo realizzato anche dei piccoli circuiti in laboratorio che ci hanno permesso di comprendere meglio alcuni concetti teorici. Gli argomenti affrontati sono stati i seguenti:

- studio dei principali componenti elettronici e strumenti
- verifica della legge di Ohm con metodo volt-amperometrico
- misura del guadagno di un amplificatore e del fenomeno della distorsione
- misura del tempo di volo di particelle

Componenti elettronici

I componenti utilizzati nelle nostre esperienze di laboratorio sono stati:

- resistenze
- diodi
- condensatori
- un amplificatore operazionale.

Mentre gli strumenti:

- un multimetro digitale
- oscilloscopio
- generatore di tensione e generatore di segnale
- fotomoltiplicatori

Andiamo ad analizzarli in dettaglio.

Le resistenze

Il resistore è il componente più utilizzato in campo elettronico. Poiché i resistori sono contraddistinti da un determinato valore della resistenza, spesso sono chiamati impropriamente resistenze.

Nella maggior parte delle applicazioni un resistore può essere selezionato in base al valore della resistenza elettrica nominale (espressa in ohm) e della potenza massima che può dissipare (espressa in watt).

La sua funzione principale è quella di limitare la corrente elettrica per polarizzare, cioè alimentare, altri dispositivi elettronici collegati in serie; in altri dispositivi è utilizzato per attenuare la tensione elettrica o la potenza. La sua elevata precisione lo rende il componente ideale nel campo della strumentazione di misura. Inoltre utilizzando i resistori, mediante la tecnica di “controreazione”, è possibile progettare circuiti elettronici attivi con caratteristiche di notevole precisione.

I resistori seguono la legge di Ohm:

$$V = R * I$$

la potenza elettrica dissipata da una resistenza segue questa relazione:

$$P=V*I$$

nella quale sostituendo $V=R*I$ si ottiene $P=R*I^2$.

La tolleranza è il margine di errore di una resistenza, espresso in percentuale; questa varia da altissima a bassa precisione. Per identificare i vari tipi di resistori, in base al valore di resistenza e tolleranza, è stato stabilito un codice di colori a bande presente sul corpo del resistore stesso. Vengono utilizzate quattro bande per resistori di bassa e media precisione e cinque bande per resistori di alta precisione.

COLORE	BANDE 1, 2, (3)	MOLTIPLICATORE	TOLLERANZA
NERO	0	0	
MARRONE	1	1	1%
ROSSO	2	2	2%
ARANCIO	3	3	
GIALLO	4	4	
VERDE	5	5	0,5%
BLU	6	6	0,25%
VIOLA	7	7	0,1%
GRIGIO	8	8	
BIANCO	9	9	
ORO		-1	10%
ARGENTO		-2	5%
SENZA COLORE			20%

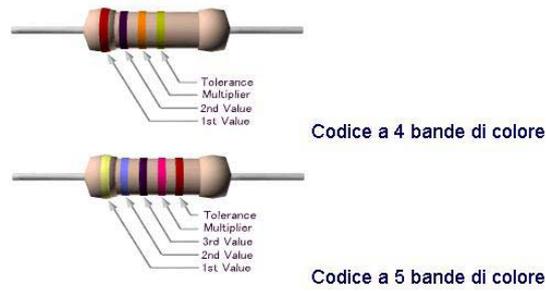


Fig. 26: codici dei colori resistenze

In un circuito elettrico il resistore è rappresentato dal simbolo grafico:



Fig. 26: resistori

a seconda delle caratteristiche di ogni circuito i resistori possono essere montati in serie o in parallelo ottenendo, nei singoli casi, una resistenza totale diversa

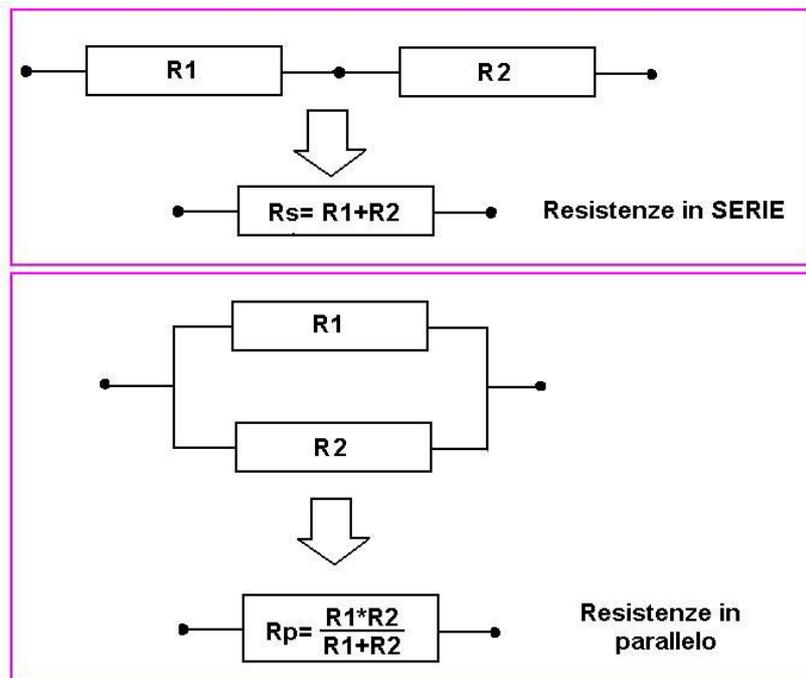


Fig. 27 : tipi di collegamento di resistori

La prima esperienza che abbiamo realizzato in laboratorio è stata la misura del valore di resistenza mediante il metodo voltamperometrico.

Tale metodo consiste nel misurare, come montato nel circuito di fig 28, la tensione e la corrente applicati al resistore tramite dei multimetri digitali e calcolarne il suo valore utilizzando la legge di OHM.

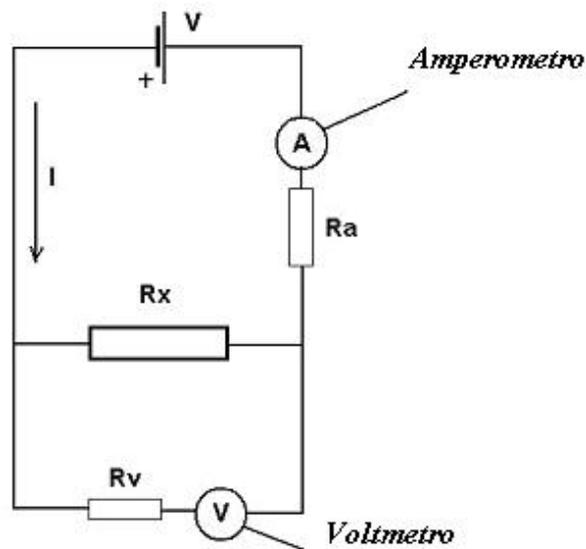


Fig. 28: circuito elettrico montato

Nel circuito il voltmetro è inserito in parallelo mentre l'amperometro in serie.

Anche se l'amperometro e il voltmetro possiedono una resistenza interna, queste non influiscono sul calcolo della resistenza R_x da determinare.

Per realizzare questa esperienza abbiamo utilizzato i seguenti strumenti: un generatore di tensione 0-30V, due multimetri, due resistenze **R1** e **R2** di valore incognito, cavi per il collegamento.

Montando il circuito mostrato nella figura, misuriamo la R_1 fissando 10 diverse tensioni tramite il generatore e leggiamo i 10 diversi valori di corrente, compilando poi la tabella:

R1

V <i>(volt)</i>	0.95	0.01	2.04	3.05	4.11	5.45	6.27	7.32	8.23	10.31
I <i>(mA)</i>	0.95	0.02	2.04	3.05	4.11	5.44	6.26	7.32	8.23	10.30

La stessa operazione è ripetuta per R2

R2

V <i>(volt)</i>	0.01	1.03	2.04	3.12	4.05	5.18	6.31	7.06	8.46	9.50
I <i>(mA)</i>	0.3	34.4	67.5	103.7	134.5	172.2	210.0	234.5	281.1	315.6

Ottenuti i dati necessari, abbiamo utilizzato il programma per PC **ORIGIN 5.0** per il “linear fit”. Con il “fit” lineare possiamo, attraverso la conoscenza di V e di I, calcolare il parametro A che sarà il valore della resistenza incognita per la legge di Ohm.

$$Y = B \cdot X + A \quad \text{con } A=0$$

$$V=R \cdot I \quad \text{Si sostituisce la X alla V e la Y alla I} \quad I = V \cdot B \quad \rightarrow \quad V = (1/B) \cdot I$$

$$\rightarrow \quad R = 1 \setminus B$$

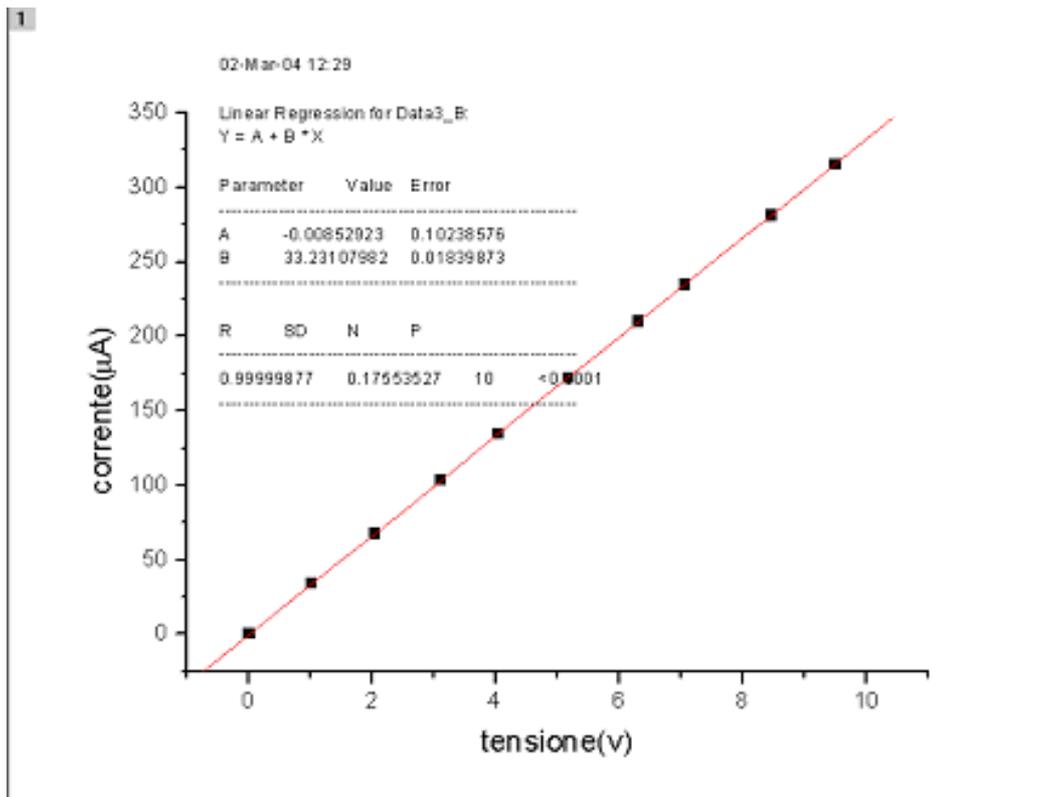


Fig30 : esempio fit con ORIGIN5.0

Per **R1** abbiamo:

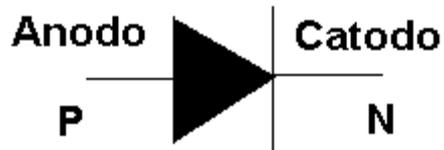
$$B1 = 0.99 \rightarrow R1 = 1/B1 \rightarrow \mathbf{R1 = 1\ Kohm}$$
 (essendo la corrente misurata in mA (10^{-3}))

Per **R2** :

$$B2 = 33.33 \rightarrow R2 = 1/B2 \rightarrow \mathbf{R2 = 30\ Kohm}$$
 (essendo la corrente misurata in μA (10^{-6}))

I diodi

Il diodo è un componente a due terminali costituito da una giunzione P-N. Il terminale del diodo collegato alla zona P si dice anodo; il terminale collegato alla zona N si dice catodo. Il simbolo del diodo è il seguente:



Il diodo è inoltre un componente unidirezionale che conduce corrente solo se polarizzato in maniera opportuna. Se viene polarizzato *in diretta*. Come in fig. 31, il diodo fa passare la corrente elettrica fornita dal generatore

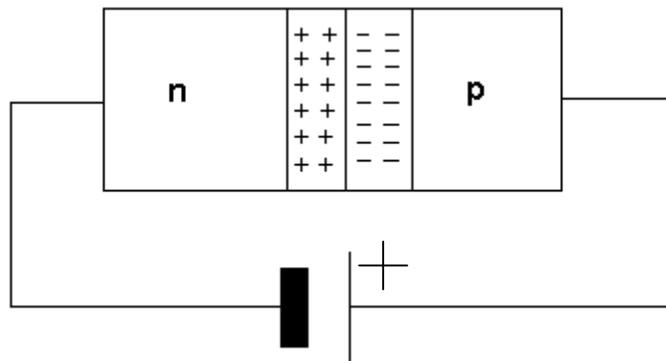


Fig. 31: diodo polarizzato direttamente

In un circuito per ricavare la caratteristica diretta del diodo ovvero la curva I-V è stato montato il circuito in fig. 32

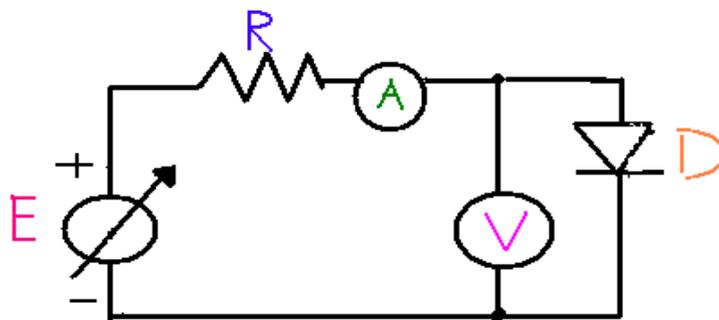


Fig. 32: schema del diodo i polarizzazione diretta

in cui E è la tensione applicata (che può assumere valori da 0 fino al valore massimo del generatore di tensione di 30 Volt) A e V sono multimetri dove viene letta la tensione e la corrente

invertendo la posizione degli elettrodi del diodo otteniamo la polarizzazione inversa (vedi fig. 33)

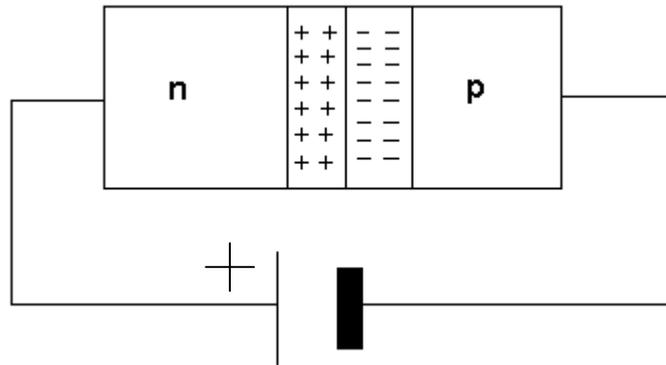


Fig. 33: diodi in polarizzazione inversa

Per ottenere un circuito con un diodo con caratteristica inversa basta invertire il segno della tensione in entrata al circuito basato sullo schema della caratteristica diretta:

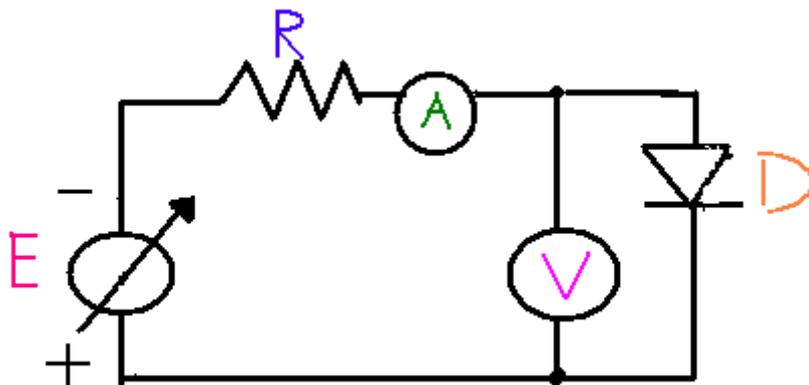


Fig. 34: schema del diodo i polarizzazione inversa

dove, come precedentemente, si applica una tensione e contemporaneamente si misurano la tensione V_d applicata e la corrente I_d in uscita.

In laboratorio, con lo stesso procedimento utilizzato per il calcolo delle resistenze, sostituendo nel circuito il diodo al posto del resistore, eseguiamo le letture per correnti e tensioni per determinare sperimentalmente la curva caratteristica del diodo.

In polarizzazione diretta otteniamo i valori rispettivamente della tabella sottostante

V (volt)	0.01	0.11	0.20	0.23	0.34	0.64	0.73	0.80	0.92	1.18
I (milliAmper)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.39	6.51	18.13	45.6	137.7

La corrente misurata in polarizzazione inversa I_0 è costante nell'ordine delle unità di μA , detta corrente inversa di saturazione.

Dopo aver utilizzato, anche per i dati del diodo, il programma ORIGIN 5.0 abbiamo ottenuto come del resto ci aspettavamo dalla teoria un andamento di tipo esponenziale:

$$I = I_0 * e^{(V/V_g)}$$

Dove V_g è la tensione d'innescio del diodo (circa 0.6-0.7 Volt) e I_0 è la corrente inversa di saturazione del diodo (vedi fig. 35).

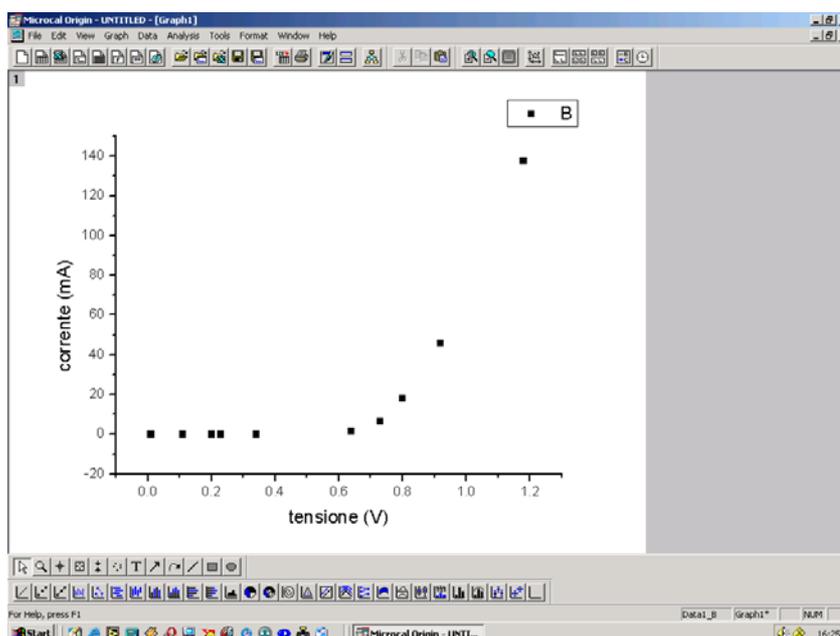


Fig. 35: curva sperimentale del diodo

Una delle maggiori applicazioni del diodo è la trasformazione di tensioni alternate in continue, infatti considerando una tensione alternata in fig. 36 se la utilizziamo all'ingresso di un diodo in uscita si avrà il passaggio solo della parte positiva o della parte negativa della tensione, questo è stato possibile osservarlo visualizzando la tensione tramite un oscilloscopio (vedi figure 36-37).

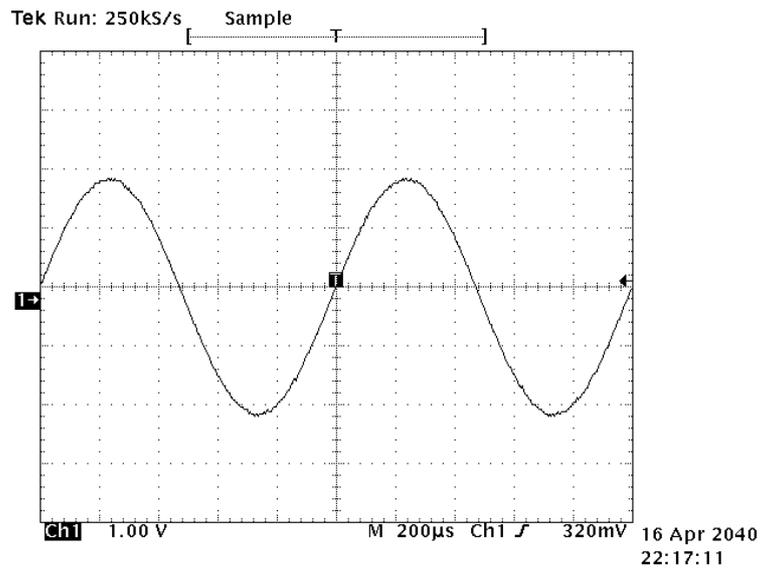


Fig. 36: tensione in ingresso del diodo

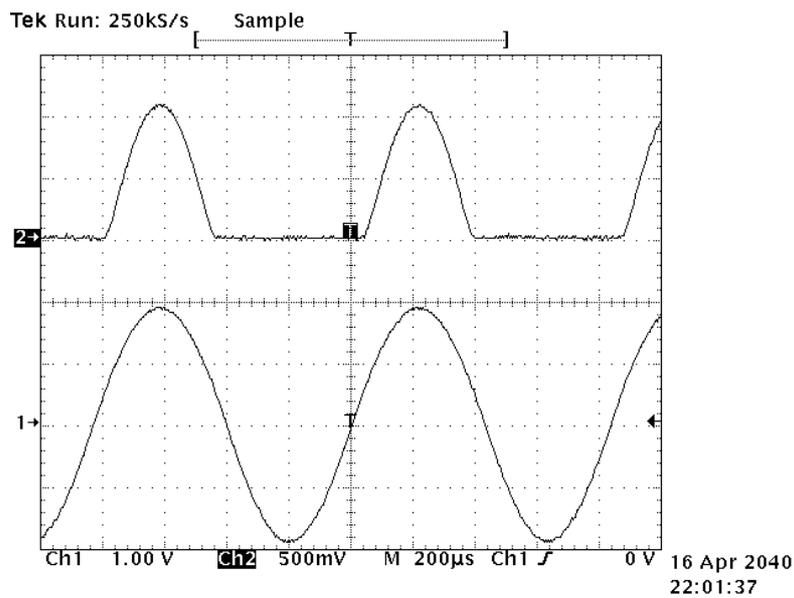


Fig. 37: tensione uscente dal diodo

dalla fig. 37 possiamo notare che il diodo fa passare solamente la tensione positiva e rimane a zero per tutto il periodo che è negativa.

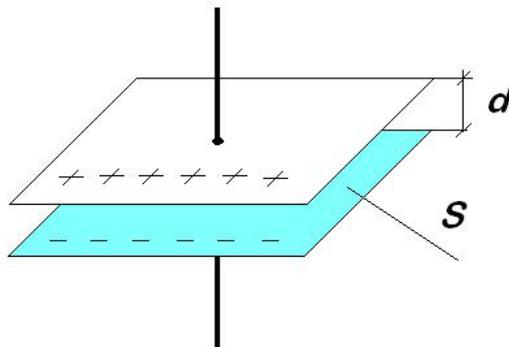
Il condensatore

Un condensatore è un dispositivo elettronico costituito da due lamine metalliche di materiale conduttore, chiamate armature, poste a piccola distanza l'una dall'altra e fra esse interposto un mezzo dielettrico. Caricando le due armature con cariche di segno opposto (+Q su una e -Q sull'altra), si crea all'interno del condensatore, un valore adeguato di capacità elettrica. Una volta che il condensatore si è caricato, per i circuiti in corrente continua si ha, nel ramo ove è inserito il condensatore, un blocco della corrente elettrica.

Per capacità elettrica si intende l'attitudine di un circuito ad accumulare carica elettrica. Essa si misura in Farad (F) ed è definita dalla legge

$$C = Q/V.$$

Ogni condensatore ha una determinata capacità elettrica che lo contraddistingue. Quanto più la capacità è grande, tanta più carica è possibile accumulare nel condensatore a parità di differenza di potenziale.

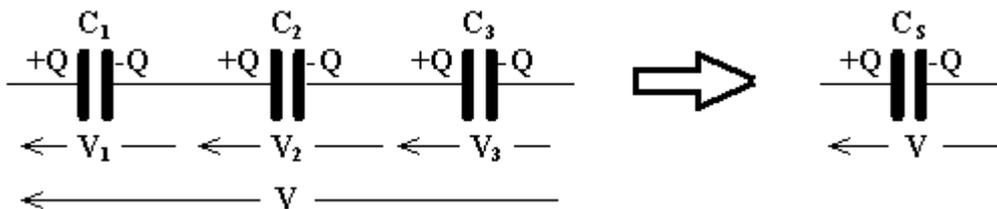


Se si hanno diversi condensatori in serie, ovvero tutti aventi la stessa quantità di carica elettrica, la capacità totale è pari all'inverso della somma aritmetica degli inversi delle singole capacità.

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} = Q \cdot \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) = \frac{Q}{C_S}$$

$$C_S = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Invece se si hanno diversi condensatori in parallelo, ovvero sottoposti alla stessa differenza di potenziale, la capacità totale è pari alla somma aritmetica delle singole capacità:



Studio di un amplificatore di tensione

Un'altra esperienza realizzata in laboratorio è stata il calcolo del guadagno di un amplificatore.

L'amplificatore è uno strumento che amplifica il segnale elettrico, aumenta cioè uno dei parametri elettrici tensione e/o corrente.

La V_u la tensione in uscita dell'amplificatore mentre V_i è la tensione in entrata.

V_u è calcolata con la formula:

$$V_u = A \cdot V_i$$

dove A è chiamato guadagno dell'amplificatore.

L'amplificatore da noi utilizzato è un'operazionale del tipo op-27 in configurazione non invertente (vedi fig.38) montato su una basetta millefiori (vedi fig 39)

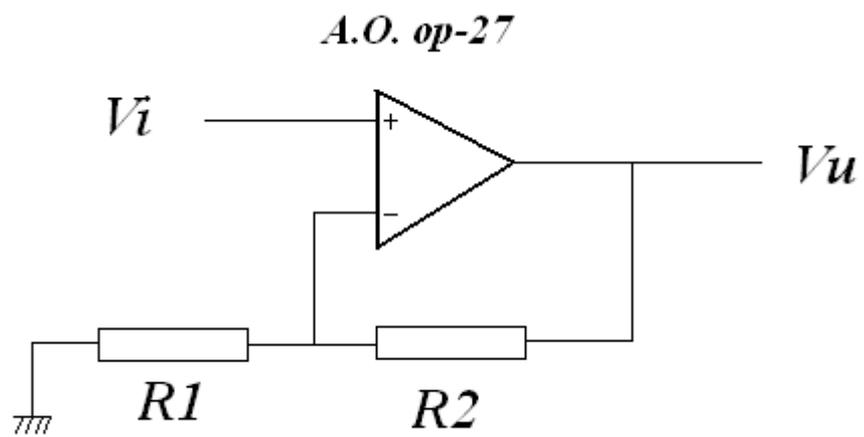


Fig. 38: configurazione dell'amplificatore

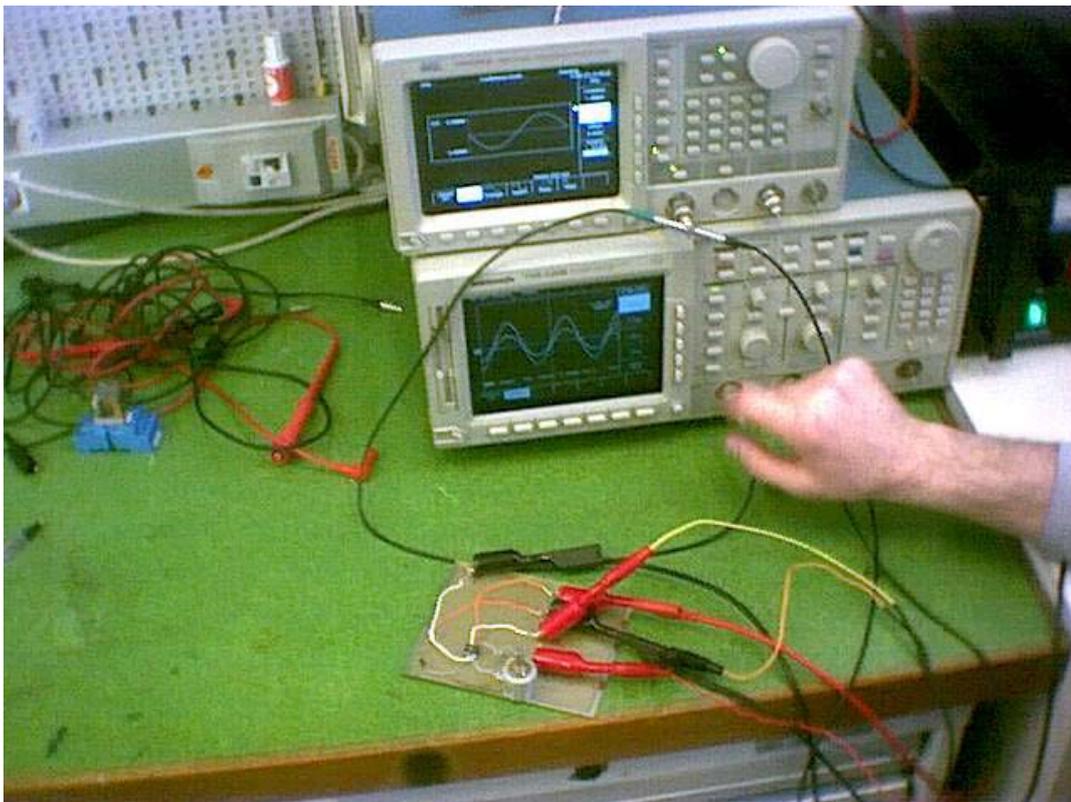


Fig. 39: schema di misura

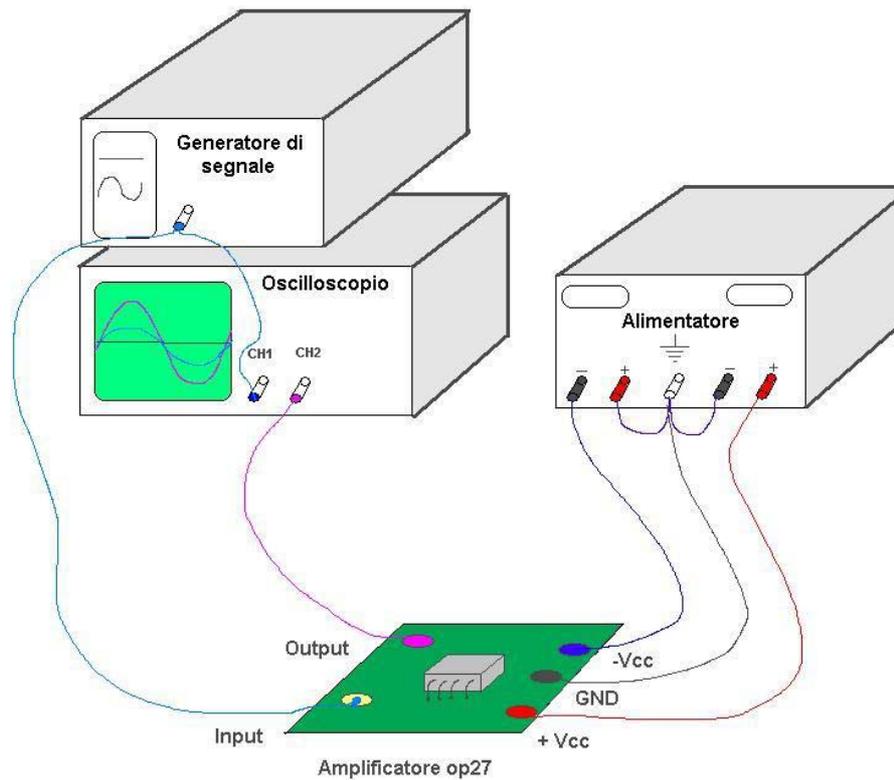


Fig. 40: schema di montaggio

Le specifiche di progetto del nostro amplificatore ci permettono di determinare il guadagno come segue:

$$A = 1 + (R2/R1) \rightarrow \text{con } R1 = 1.2 \text{ K}\Omega \text{ e } R2 = 1.2 \text{ K}\Omega \rightarrow$$

$$A = 1 + (1.2/1.2) = 2$$

Utilizzando tali valori di resistenze e sapendo dalla teoria che il guadagno A è definito come:

$$A = V_u/V_i$$

Abbiamo applicato una tensione sinusoidale di valore noto e misurato la tensione di uscita, dopo abbiamo eseguito il rapporto e verificato che la tensione d'uscita era il doppio di quella in ingresso verificando quindi l'esatto funzionamento dell'amplificatore.

IL MULTIMETRO

Il multimetro digitale è uno strumento essenziale con il quale possono essere misurati i fondamentali parametri elettrici come: la resistenza elettrica, la tensione e la corrente, alcuni permettono anche di misurare la tensione di innescò dei diodi e il valore della capacità dei condensatori.

I multimetri che abbiamo utilizzato noi sono digitali cioè permettono di vedere il valore del parametro con delle cifre direttamente con una precisione di 5 digit. (Vedi fig 43).

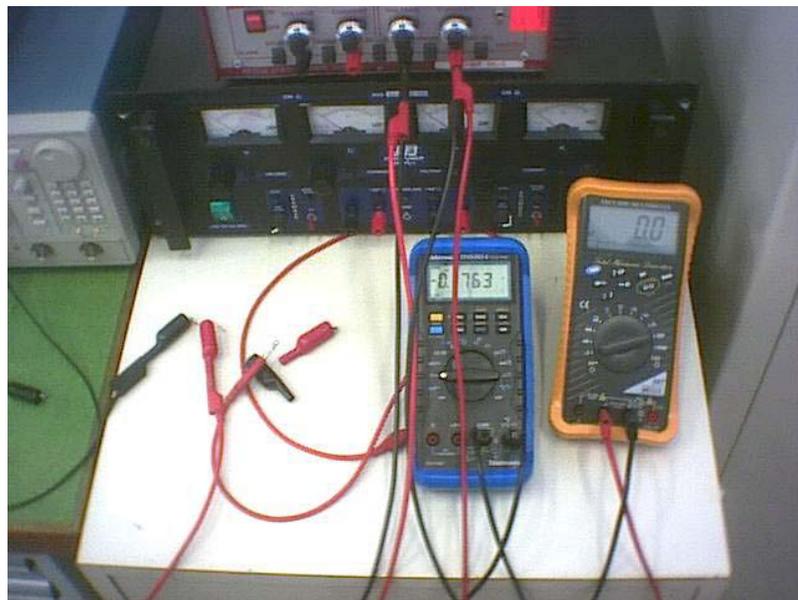


Fig. 43: i multimetri

L'OSCILLOSCOPIO

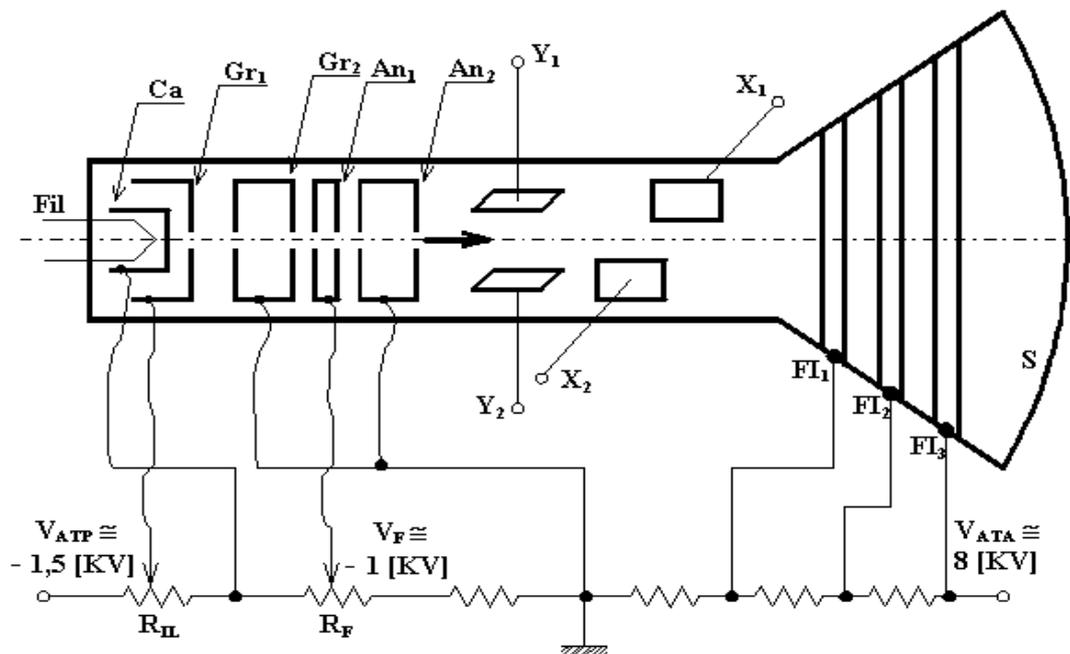
Se le onde sono molto importanti in merito all'energia, l'oscilloscopio è lo strumento elettronico che meglio di qualunque altro permette di visualizzare le onde, rilevando la loro frequenza, la loro lunghezza d'onda, la loro ampiezza e la loro forma.

Pertanto è un dispositivo che permette di visualizzare una qualunque funzione tra due variabili, purché riconducibili a tensioni elettriche.

Il principio di funzionamento dell'oscilloscopio consiste in un tubo a raggi catodici (CRT), nel quale un fascio di elettroni emessi dal catodo, viene focalizzato e accelerato colpendo internamente lo schermo fluorescente del tubo. Il fosforo che riveste la parete interna del tubo produce un punto luminoso visibile. Il fascio di elettroni viene deflesso sia in

orizzontale che in verticale da una coppia di placche di deflessione, poste all'interno del tubo e comandate da tensioni elettriche applicate ai loro capi.

L'oscilloscopio è formato da un'ampolla di vetro, ad alto vuoto, avente la forma di un cono a base sferica, munito di un collo cilindrico entro il quale sono sistemati gli organi essenziali dello strumento:



Il filamento riscaldante **Fil**, percorso da corrente continua, riscalda per irraggiamento il catodo **Ca** realizzato in nichel e ricoperto di ossidi di bario o stronzio. A causa del riscaldamento subito, gli elettroni contenuti negli ossidi si liberano ed abbandonano disordinatamente il catodo.

La griglia di controllo (chiamata anche griglia di Wehnelt) **Gr₁** a forma cilindrica con un foro centrale lascia passare un certo numero di elettroni. Siccome tale griglia è tenuta ad un potenziale negativo rispetto al catodo, aumentando la d.d.p. tra griglia e catodo aumenta il numero di elettroni respinti verso il catodo e diminuisce il numero di elettroni che passano attraverso il foro. Il potenziometro **R_{IL}** (chiamato Intensity) permette quindi di regolare l'intensità del fascio catodico (chiamato anche pennello elettronico) e di conseguenza l'intensità luminosa della traccia sullo schermo **S**.

La griglia preacceleratrice \mathbf{Gr}_2 essendo a potenziale positivo rispetto al catodo accelera il fascio catodico.

L'anodo focalizzatore \mathbf{An}_1 agisce unitamente all'anodo acceleratore \mathbf{An}_2 sul pennello elettronico così come una lente convergente agisce su di un fascio luminoso, l'entità della focalizzazione si regola col potenziometro \mathbf{R}_F (chiamato Focus).

Proseguendo nel loro cammino, gli elettroni che costituiscono il fascio catodico passano attraverso le placche di deflessione verticale $\mathbf{Y}_1\text{-}\mathbf{Y}_2$ e le placche di deflessione orizzontale $\mathbf{X}_1\text{-}\mathbf{X}_2$. Alle placche di deflessione verticale è applicato il segnale (tensione) da visualizzare, alle placche di deflessione orizzontale è applicata una tensione periodica a dente di sega di opportuno periodo. La tensione applicata a ciascuna coppia di placche determina un campo elettrico che agisce sul fascio catodico deviandolo : le placche $\mathbf{Y}_1\text{-}\mathbf{Y}_2$ determinano una deviazione verticale, le placche $\mathbf{X}_1\text{-}\mathbf{X}_2$ determinano una deviazione orizzontale. La deviazione orizzontale essendo causata dal segnale a dente di sega è proporzionale al tempo, mentre la deviazione verticale è proporzionale al valore istantaneo del segnale da visualizzare. Il fascio catodico, deviato dal sistema di placche, viene ulteriormente accelerato dalle fasce intensificatrici $\mathbf{FI}_1, \mathbf{FI}_2, \mathbf{FI}_3$ a potenziale via crescente.

A questo punto, essendo l'energia cinetica posseduta dagli elettroni sufficiente, il fascio catodico colpisce lo schermo fluorescente (ovvero trattato con sostanze a base di fosforo) e determina un'emissione luminosa più o meno persistente nei punti colpiti. Se la persistenza è uguale al periodo del segnale a dente di sega, sullo schermo rimane visualizzata la forma d'onda del segnale in prova. Risulta evidente che se il periodo del segnale a dente di sega è uguale al periodo del segnale in prova si visualizza un'intera onda di quest'ultimo, se il periodo del segnale a dente di sega è doppio del periodo del segnale in prova si visualizzano due onde di quest'ultimo, eccetera. Al completamento del periodo del segnale a dente di sega, il fascio catodico viene riportato nella posizione di partenza all'estrema sinistra ed affinché non compaia sullo schermo la traccia di ritorno vengono attivati opportuni circuiti che permettono la cancellazione (blanking) della traccia.

I controlli base

I controlli di base sono:

- **Bright** (luminosità) regola la luminosità delle tracce.

- **Focus** (fouco) mette a fuoco le tracce sul display.
- **Grat** (griglia) illumina la griglia del display.
- **Trace** (traccia) seleziona la traccia da visualizzare.
- **Trigger level** (livello di trigger) seleziona il livello del trigger.
- **Trigger source** (sorgente del trigger) seleziona la sorgente del trigger.

- **Trigger mode** (modo del trigger) seleziona come effettuare il trigger.
- **Slope** (pendenza) seleziona il fronte sul quale effettuare il trigger.
- **Timebase** (base temporale) seleziona la velocità della scansione temporale.
- **Input level** (livello d'ingresso) regola il livello d'ingresso.
- **Vertical position** (posizione verticale) regola la posizione verticale della traccia sul display.
- **Orizzontal position** (posizione orizzontale) regola la posizione orizzontale della traccia sul display.

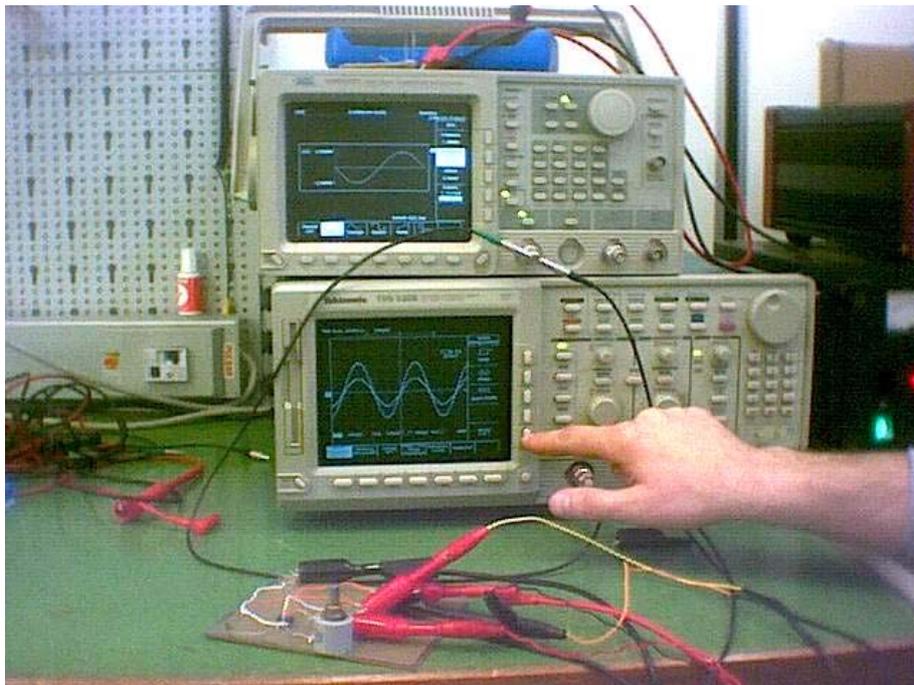


Fig. 44: l'oscilloscopio

Ecco cosa viene visualizzato sullo schermo quando all'oscilloscopio viene applicata una tensione di prova:

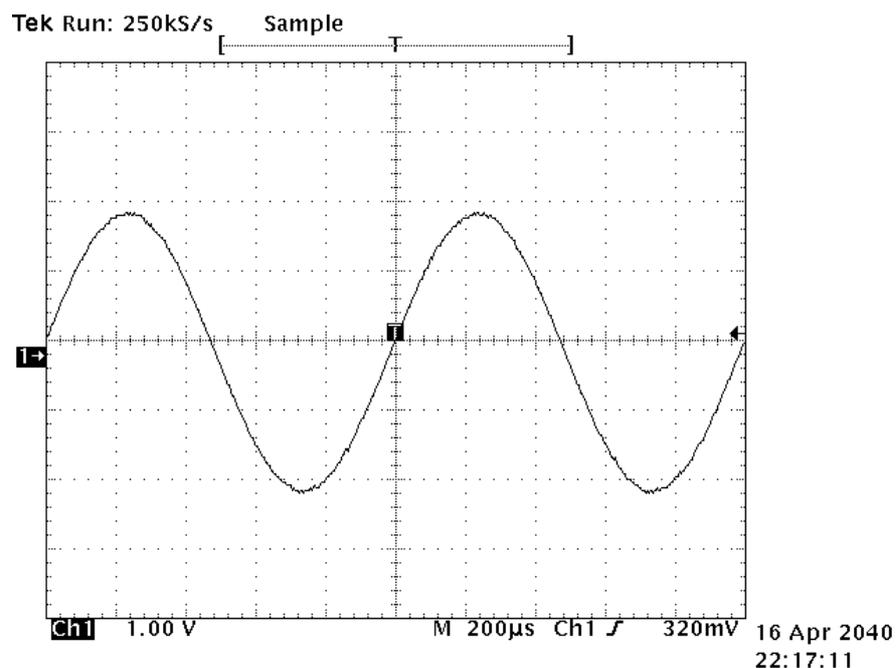


Fig. 44: segnale visto dall'oscilloscopio

Dalla foto sottostante possiamo vedere che quando visualizziamo un segnale di esso possiamo ricavare tramite le informazioni che ci fornisce l'oscilloscopio l'ampiezza del segnale, moltiplicando il numero delle divisioni per il valore in tensione di una divisione, nel caso della fig. 44 il valore picco a picco è $4 \text{ div} * 1 \text{ Volt}$ e la frequenza perché conosciamo il periodo che è $200 \mu\text{s}$ per cui $F = 1/T \rightarrow 5 \text{ KHz}$

Successivamente abbiamo eseguito in laboratorio un altro tipo di esperienze più vicine al campo dei rivelatori e alle particelle, infatti dopo aver montato un opportuno setup (vedi fig. 45) abbiamo calcolato la velocità di propagazione delle particelle emesse da una sorgente radioattiva, misurando il tempo di "volo" per mezzo del seguente materiale:

- Due fototubi
- 1 oscilloscopio
- 1 debole sorgente radioattiva

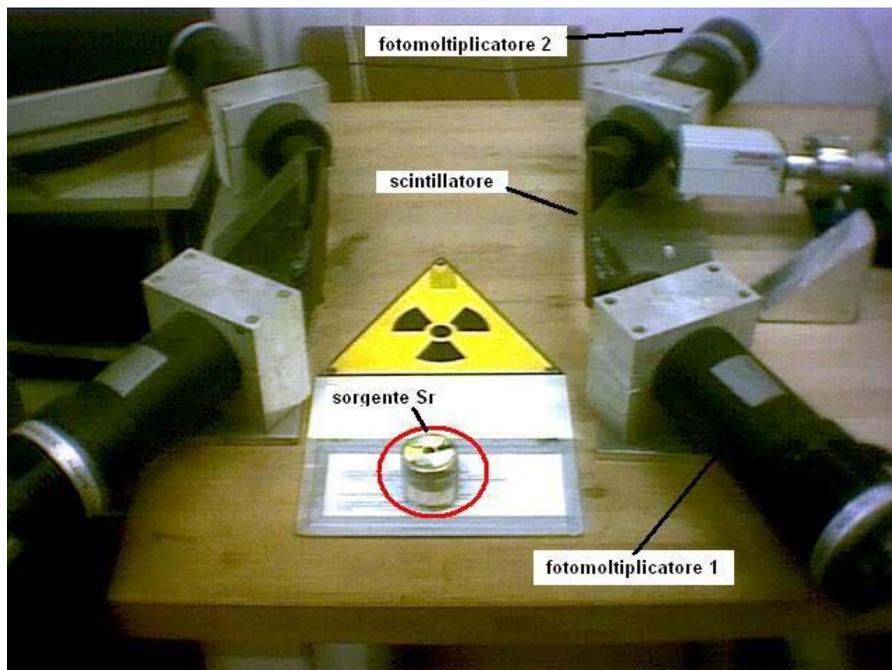


Fig. 45: setup per il calcolo del tempo di volo

Prima di iniziare a descrivere l'esperienza è utile spiegare e conoscere gli strumenti che abbiamo usato come i fototubi e la sorgente.

Fotomoltiplicatori

I fotomoltiplicatori sono dei tubi a vuoto fotosensibili. Essi sono usati particolarmente in applicazioni che richiedono elevate sensibilità e risposte di tempo, poiché i dispositivi allo stato solido non raggiungono i valori di questi parametri.

Un fotomoltiplicatore è costituito da diversi componenti: un fotocadoto, un sistema di focalizzazione e accelerazione (che viene gestito dal sistema elettroottico d'ingresso), uno stadio moltiplicatore di corrente costituito da elettrodi (dinodi) e che utilizza il fenomeno dell'emissione secondaria di elettroni e un anodo.

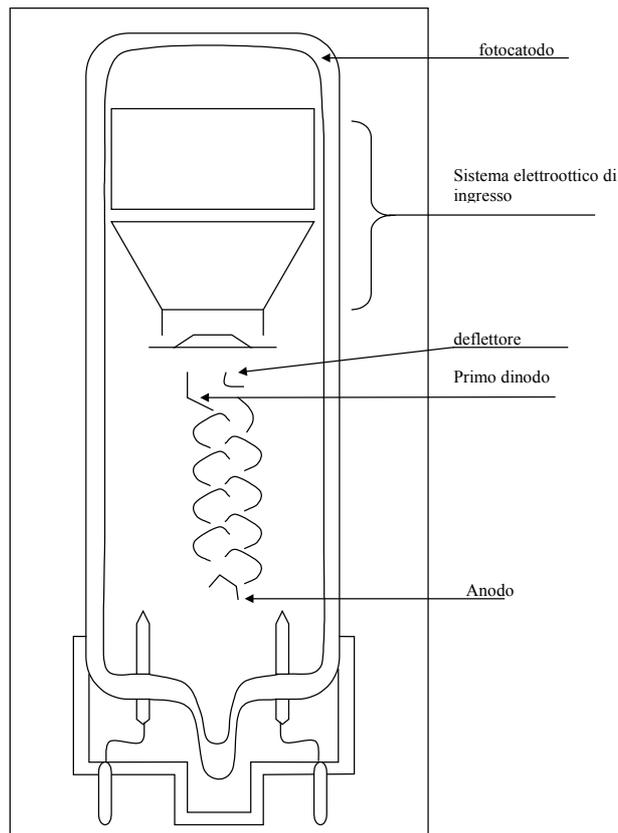


Fig. 46 Struttura di un tubo fotomoltiplicatore

Il fotocadoto

Il fotocadoto si trova all'ingresso della struttura del fotomoltiplicatore. Consiste di un film sensibile alla luce (strato emittente) e di uno strato di supporto, sul quale il film emittente è depositato.

Esistono due tipi di fotocadoto, uno dei quali non viene più utilizzato: il fotocadoto opaco e il fotocadoto semitrasparente che a differenza del primo può essere attraversato dalla luce che raggiunge lo strato emittente.

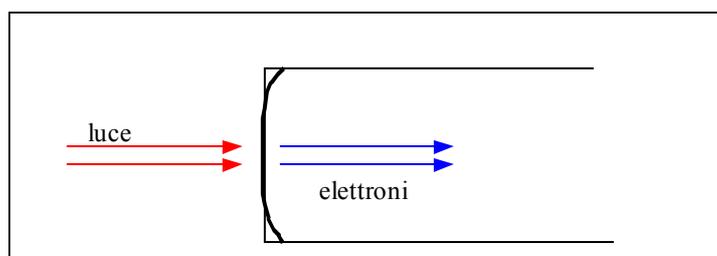


Fig 47. Fotocatodo semitrasparente

questi fotocadoti sono realizzati generalmente in stronzio, poiché questo materiale è contemporaneamente conduttore e trasparente, caratteristica necessaria per lo strato di supporto.

Si usano i fotocadoti semitrasparenti poiché questi offrono molti vantaggi dall'inserimento nella testa del tubo alla costruzione del fotocadoto stesso; inoltre può essere illuminata l'intera superficie, poiché non ci sono elettrodi sul percorso della luce che colpisce il cadoto e può essere misurata accuratamente la distanza della sorgente luminosa dal cadoto; infine la sorgente luminosa può essere posta a diretto contatto della superficie di supporto del fotocadoto.

Il cadoto emette elettroni grazie all'effetto fotoelettrico. L'effetto fotoelettrico si ha quando dei fotoni, colpendo una sostanza, liberano da essa degli elettroni. Se questo fenomeno avviene all'interno di un recipiente in cui è stato creato il vuoto, possiamo curvare e dirigere gli elettroni se all'interno del recipiente sono presenti dei campi elettrici o magnetici che generano in questo modo un flusso di corrente elettrica. Ma per far sì che vengano liberati gli elettroni da un materiale è necessario che i fotoni incidenti forniscano al materiale un'energia pari almeno all'energia che trattiene i fotoni nel materiale; al di sotto di questa energia non abbiamo alcun effetto fotoelettrico. Il rendimento dell'effetto fotoelettrico è legato, oltre che all'energia propria del fotone e alla condizione di lavoro che questo ha al di sopra della soglia di energia di astrazione necessaria, alla frequenza della radiazione.

Uno dei parametri fondamentali del cadoto è l'uniformità: esso infatti deve emettere elettroni nello stesso modo, indipendentemente da dove viene colpito.

Il sistema elettronico d'ingresso

Questo sistema può essere di due tipi: il primo non è sensibile all'impulso luminoso, cioè qualsiasi parte del catodo viene colpita, genera sempre la stessa risposta mentre il secondo tipo, di nuova generazione, è sensibile all'impulso luminoso; i tubi di questi fotomoltiplicatori possono riprodurre delle immagini e quindi essere utilizzati per produrre delle immagini deboli grazie ad uno stato di amplificazione di cui sono dotati.

Il sistema elettrico è costituito da più elettrodi, generalmente di accelerazione e di focalizzazione, il quale compito è di dirigere l'elettrone sul dinodo, che effettua il primo stato di moltiplicazione; la loro disposizione riesce a controllare la traiettoria degli elettroni.

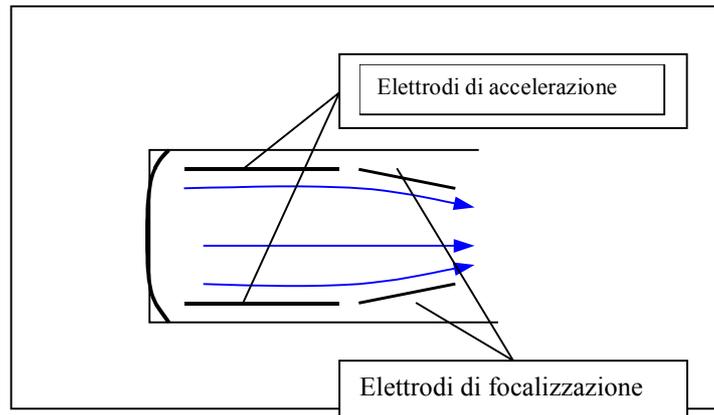


Fig. 47 Struttura del sistema elettroottico di ingresso di un fotomoltiplicatore

Naturalmente il fine del sistema elettroottico è quello di individuare la disposizione geometrica ottimale degli elettrodi all'interno del catodo.

Inoltre il sistema elettroottico deve essere progettato in modo che diminuisca il tempo di transito e la dispersione di tempo di transito degli elettrodi.

Il sistema di moltiplicazione

Il moltiplicatore è formato da una serie di dinodi; la struttura del moltiplicatore varia a seconda della disposizione di questi ultimi. Esistono quindi vari tipi di moltiplicatori; la Philips ha sviluppato una struttura detta "a cascata lineare": con questa struttura è possibile evitare l'aumento della "corrente di oscurità", evitando i campi intensi poiché la corrente aumenta gradualmente; si può utilizzare in maniere ottimali lo spazio disponibile del tubo e in più si può aumentare facilmente il numero dei dinodi.

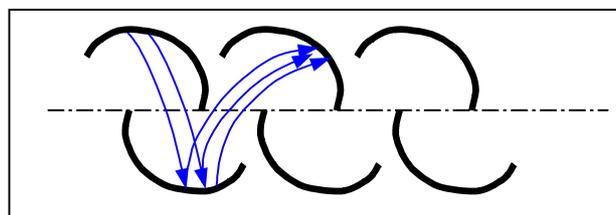


Fig.48 Struttura lineare

Recentemente sono stati sviluppati anche dei dinodi a maglie fine; fotomoltiplicatori sensibili alle posizioni che consentano di conservare l'informazione sulle posizioni nel passaggio degli elettroni da un tipo di dinodo all'altro.

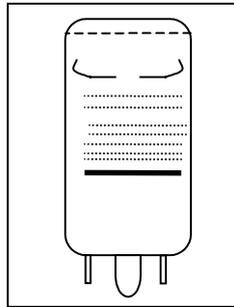


Fig. 49 Maglia Fine

In ogni moltiplicatore comunque, il primo dinodo deve accoppiare il sistema d'ingresso al moltiplicatore, deve cioè raccogliere tutti gli elettroni emessi dal fotocatodo e defletterli in modo che questi colpiscano gli altri dinodi secondo l'angolo corretto.

Per ottenere l'amplificazione di questo fenomeno si sfrutta il principio dell'emissione secondaria secondo il quale, sotto particolari condizioni, il dinodo colpito da un elettrone incidente genera un certo numero di elettroni: questo fattore non dipende infatti dalla velocità e dall'angolo d'incidenza degli elettroni incidenti.

Determinare il numero di diodi necessari per fornire una certa amplificazione con un valore minimo di tensione è generalmente il problema tipico che si riscontra in fase di progettazione, poiché limitare la tensione d'alimentazione vuol dire diminuire, limitare la corrente d'oscurità.

I fototubi utilizzati nella nostra esperienza sono simmetrici, e presentano uno scintillatore con 2 fotomoltiplicatori, quindi gli elettroni generati vengono divisi in due parti e moltiplicati separatamente.

Sorgente radioattiva

la sorgente che emette particelle cariche è una sorgente radioattiva di stronzio (Sr) dalle seguenti caratteristiche:

- **Radionuclide**: Sr -90
- **Emissione principale**: beta
- **Attività**: 6.25 MBq al 31-12-1985
- **Energia**: Max 2270 KeV
- **Tempo di dimezzo** : 28.6 Y

Andiamo adesso a descrivere il nostro esperimento; il tempo di volo di una particella il tempo che impiega per andare da un fototubo ad un altro, misurando la distanza dei due fototubi e misurando il tempo di volo tramite l'oscilloscopio possiamo risalire alla velocità delle particelle.

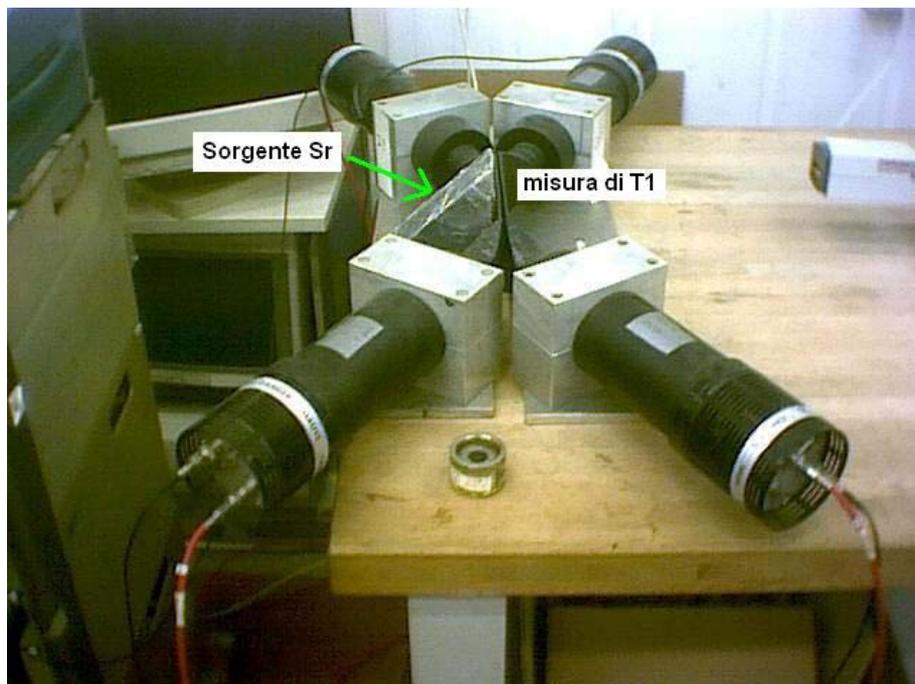


Fig. 50 misura tempo di volo con fototubi vicini

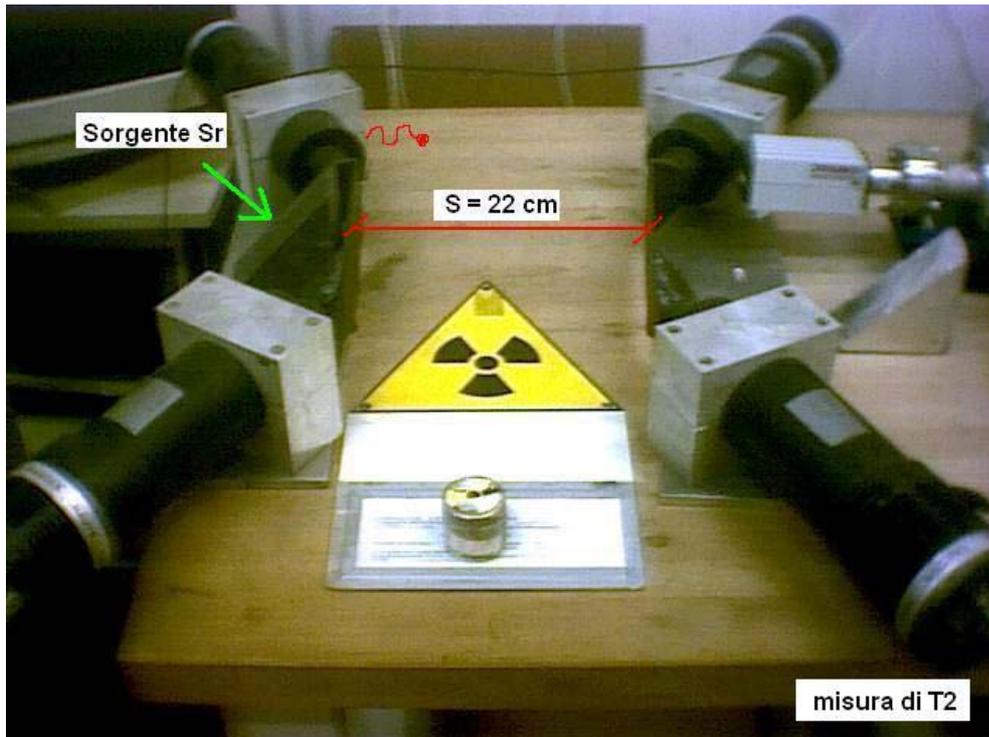


Fig. 50 misura tempo di volo con fototubi distanti 22 cm

Vediamo la forma d'onda del segnale uscente direttamente dal fototubo ; nei due canali sono visualizzati i segnali dei 2 fotomoltiplicatori.

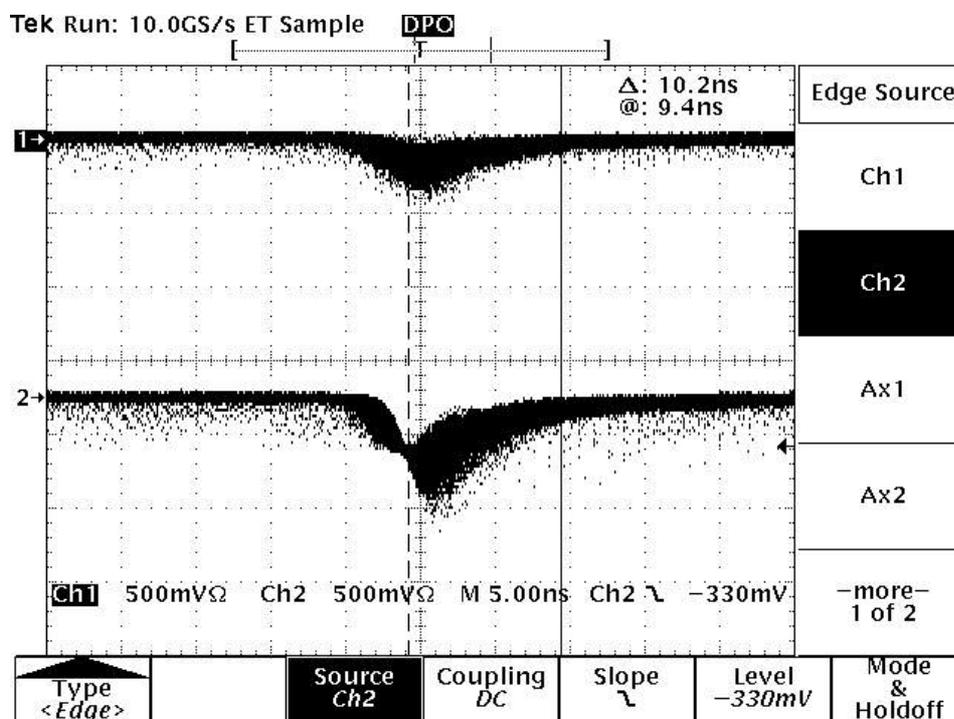


Fig. 51 segnale uscenti dai fototubi

Nella pratica il segnale così formato non viene usato direttamente ma viene reso più leggibile e pulito tramite l'uso di un discriminatore o formatore di segnale.

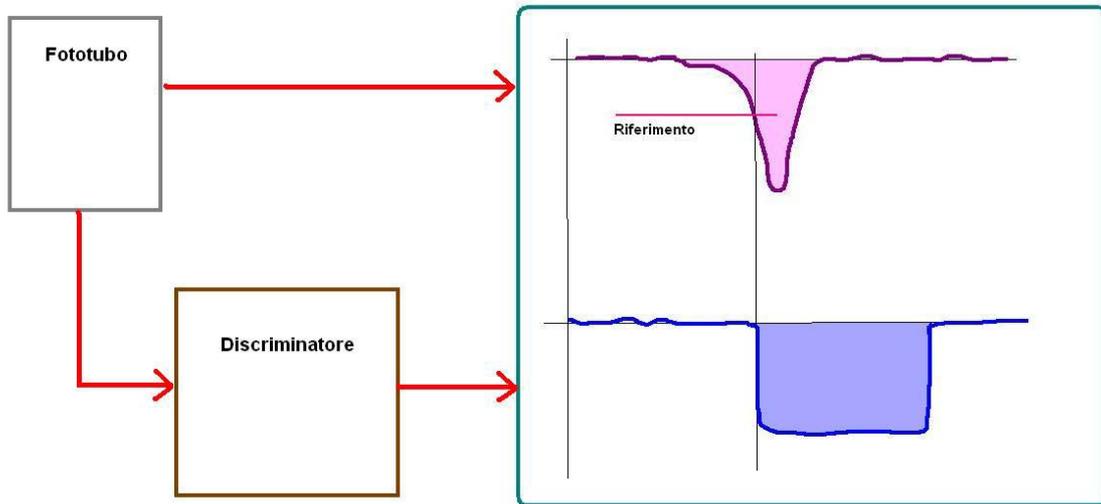


Fig. 51 segnale discriminato

Visualizziamo i due segnali, quello proveniente direttamente dal fotomoltiplicatore e quello uscente dal discriminatore.

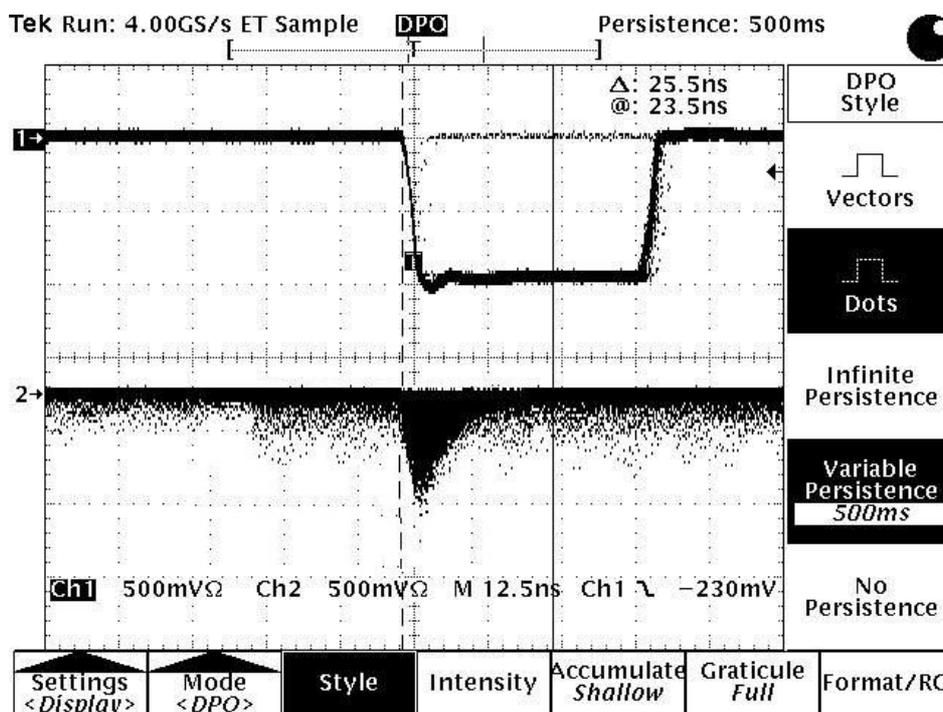


Fig. 52 segnale discriminato e diretto dal fototubo

vediamo adesso come abbiamo misurato il tempo di volo tramite l'oscilloscopio in due momenti differenti : con fototubi vicini (T1) e con fototubi lontani (T2) ce misurando la distanza dei fototubi possiamo.

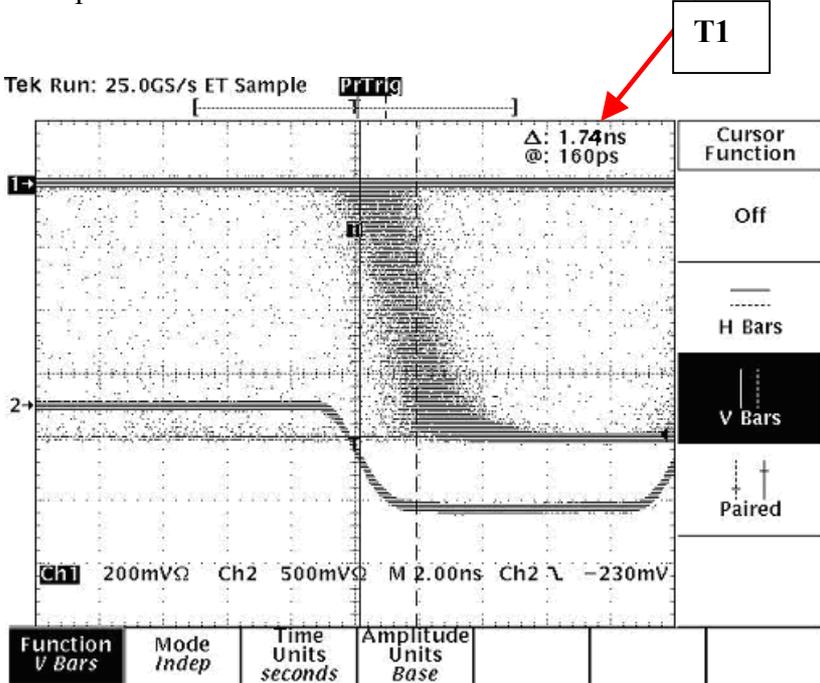


Fig. 53 ritardo dei segnali con fototubi vicini

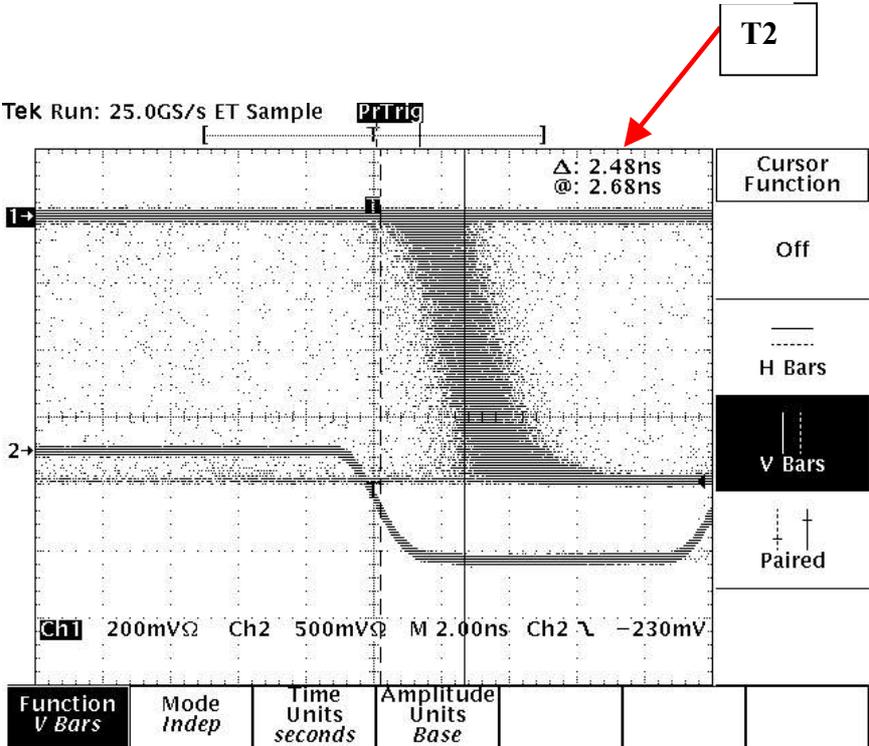


Fig. 54 ritardo dei segnali con fototubi distanti 22 cm

T_v = Tempo di volo, T₂ = 2.48 ns , T₁ = 1.74 ns

T_v = T₂ - T₁ = 0.74 ns

V = velocità particelle = S/T , S = 22 cm

$$\rightarrow V = 2.93 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

la velocità delle particelle misurata risulta essere, considerando l'errore introdotto dall'oscilloscopio, è circa pari alla velocità della luce che vale $3 \cdot 10^8$ m/s.

4) Convertitori ADC e DAC

In questo capitolo tratteremo la descrizione del funzionamento e delle fondamentali caratteristiche dei convertitori Analogico-digitale (ADC) e Digitale-Analogico (DAC), dispositivi elettronici fondamentali nell'ambito dell'acquisizione dei segnali. L'uso di questi particolari dispositivi ha dato la possibilità di implementare una nuova generazione di strumenti di misura. In essi il processo di misura passa attraverso due fasi fondamentali: la conversione del segnale analogico in segnale numerico (rappresentato da una sequenza di campioni prelevata sul segnale analogico) e la sua successiva elaborazione numerica (rappresentata dall'esecuzione di un algoritmo di misura). Questa metodologia di misura si è subito imposta all'attenzione generale per le sue intrinseche caratteristiche di flessibilità, legate alla possibilità di variare il tipo di misura al variare dell'algoritmo implementato, consentendo quindi di racchiudere contemporaneamente entro uno stesso apparato le funzionalità di più strumenti di misura.

Segnale discreto e continuo

Prima di iniziare la trattazione vera e propria in merito ai convertitori, è utile dare qualche informazione preliminare. La maggior parte dei fenomeni fisici presenti in natura (es. temperatura, umidità e pressione) sono processi continui. Tali processi per essere letti ed elaborati da un calcolatore devono essere discretizzati cioè trasformati in processi discreti. La notazione $f[n]$ indica una sequenza di numeri reali, definita per ogni intero n . La sequenza $f[n]$ prenderà il nome di segnale discreto o digitale, e l'indice n quello di tempo discreto. Spesso al posto del termine digitale si sostituisce anche il termine numerico, filologicamente più corretto. D'altro canto, "digitale" deriva dall'inglese "digit" (cifra) che, a sua volta, deriva dal latino "digitus" (dito). Infatti è consuetudine "fare i conti con le dita". Invece, con "segnale analogico" o "continuo", indichiamo una funzione $f[t]$ reale, definita per ogni numero reale t .

Da queste definizioni, risulterà evidente che le grandezze analogiche possono assumere, nel tempo, qualsiasi valore (si pensi alla scala di un tester), mentre quelle digitali presentano solo valori ben definiti (come l'indicazione di un multimetro digitale).

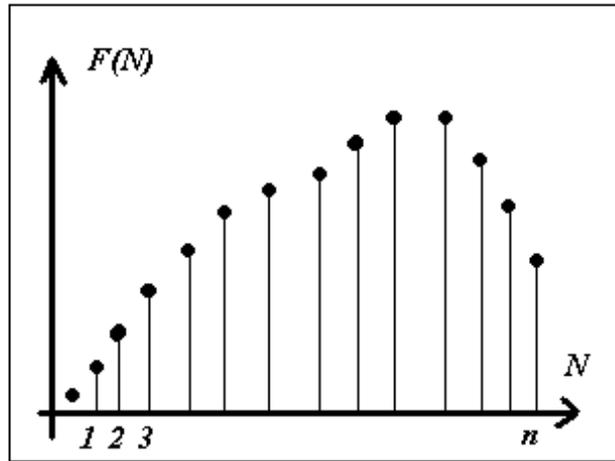


Fig. 55 Segnale discreto

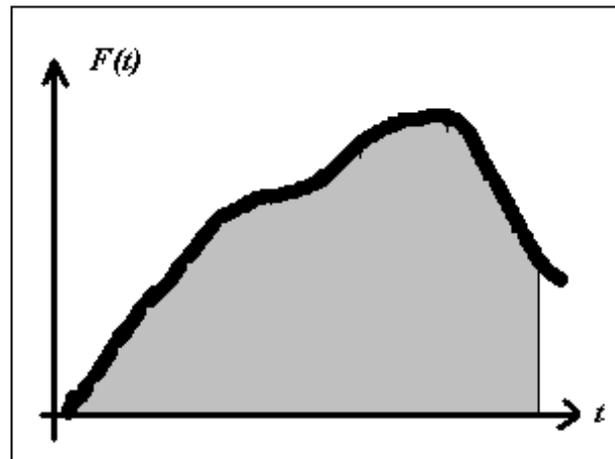


Fig. 56 Segnale continuo

Campionamento e quantizzazione

Per passare da un segnale analogico, variabile con continuità nel tempo e nelle ampiezze, alla sua forma digitalizzata, sono necessarie due operazioni fondamentali: **il campionamento** e la **quantizzazione**.

Il **campionamento** (A) di un segnale è quel processo che porta a generare un segnale tempo-discreto $\tilde{s}(t)$ attraverso il prelievo dei valori (campioni) da un segnale analogico tempo-continuo $s(t)$. Nel caso più comune, i campioni vengono prelevati con un ritmo costante, intervallati tra loro di un periodo $\Delta T = T_c$ (tempo di campionamento): in questo caso, a cui ci si riferirà sempre nel corso del presente capitolo, si dice che il campionamento è periodico o uniforme, con periodo T_c . Questo processo può essere pensato come quello schematizzato dal circuito di figura sottostante: supponendo di azionare l'interruttore in modo

da chiuderlo ogni volta per un tempo infinitesimo, il segnale a valle dell'interruttore costituisce un segnale campionato di quello presente a monte dell'interruttore (Vedi Fig. 57).

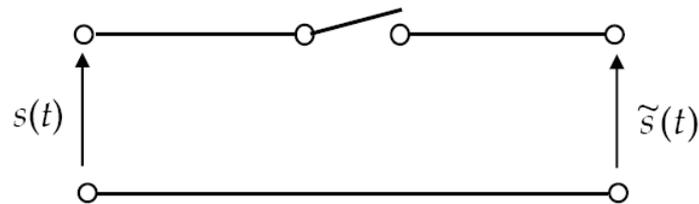


Fig. 57

La **quantizzazione (B)** delle ampiezze è ottenuta suddividendo il campo dei valori possibili FSR (full-scale range: $FSR = V_{max} - V_{min}$) in intervalli elementari o di quantizzazione di ampiezza q . Tutti i valori analogici del segnale che cadono entro uno di questi intervalli di quantizzazione si considerano indistinguibili l'uno dall'altro e ad essi viene attribuito un valore caratteristico dell'intervallo, per esempio il valore centrale.

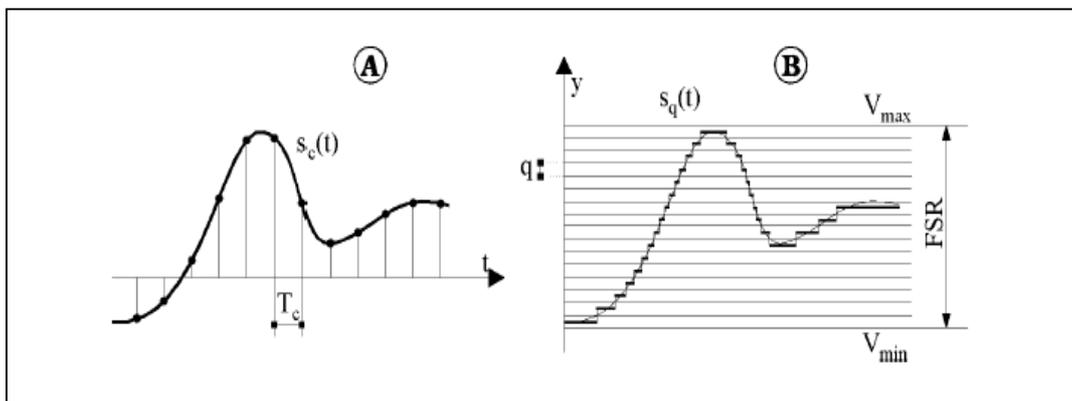


Fig. 58

Dopo il campionamento e la quantizzazione otteniamo un segnale $S_q(t)$ costituito da valori discreti delle ampiezze.

Con il campionamento e la quantizzazione si perde parte dell'informazione contenuta nel segnale analogico originario:

- 1) Con riferimento al tempo, si perde la conoscenza del segnale nell'intervallo temporale compreso fra due successivi istanti di campionamento;
- 2) Con riferimento alle ampiezze, si perde informazione sui valori del segnale compresi fra due livelli successivi di quantizzazione.

Nonostante la perdita delle di informazione è comunque possibile ricostruire in forma esatta il segnale originario se vengono rispettate le condizioni del teorema del campionamento o anche detto teorema di Shannon; esso afferma che :

“Un segnale $s(t)$ a banda limitata può essere ricostruito correttamente a partire dai suoi campioni (e quindi a partire dal segnale) $\tilde{s}(t)$ solo se essi sono stati prelevati con una frequenza di campionamento $1/T_c$ superiore o uguale al doppio della frequenza massima del segnale, f_{Max} ”.

$$F_c > 2F_s(\max) \quad (F_c = 1/T_c)$$

Codifica dei livelli quantizzati

Per rappresentare i livelli discreti ottenuti dalla quantizzazione si impiegano parole di codice ottenute tramite opportuna codifica. L'obiettivo è quello di stabilire una corrispondenza biunivoca fra i livelli di quantizzazione e le parole di codice. Il sistema di codifica più frequentemente adottato utilizza simboli binari (0 e 1). Ogni parola di codice è formata in generale con n simboli binari ordinati, cui corrisponde un dato peso:

$$\begin{array}{l} B_{n-1} \dots B_i \dots B_1 B_0 \quad \text{simboli binari : 0,1} \\ 2^{n-1} \dots 2^i \dots 2^1 2^0 \quad \text{pesi} \end{array}$$

I simboli binari che costituiscono la parola di codice, sono detti bit, contrazione di binary digit. Il valore decimale A che corrisponde alla parola di codice formata con i simboli B_i risulta:

$$A = \sum_{i=0}^{n-1} 2^i B_i$$

Il generico peso 2^i contribuisce alla sommatoria solo se il corrispondente bit B_i è pari a 1. B_{n-1} = MSB (Most Significant Bit) è il bit più significativo, associato al peso maggiore: 2^{n-1} . B_0 = LSB (Least Significant Bit) è il bit meno significativo, associato al peso minore: 2^0 .

In figura 59 viene descritto un esempio di conversione.

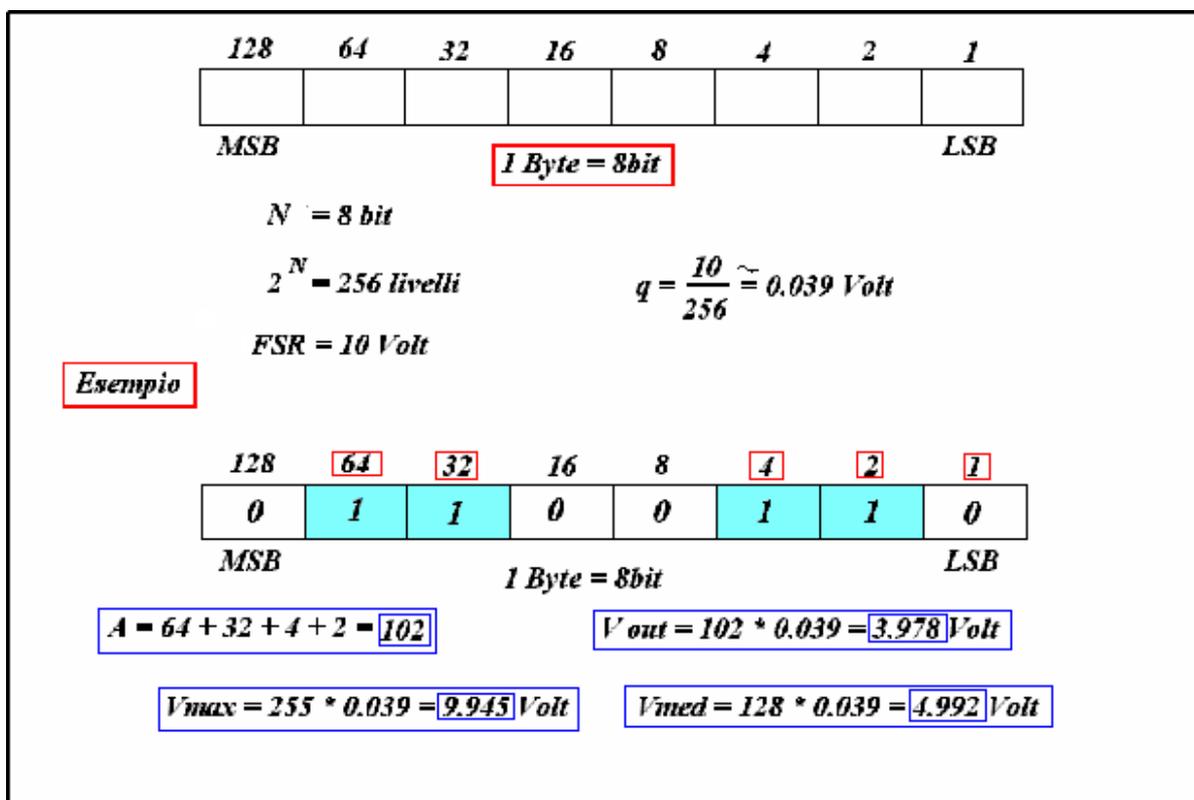
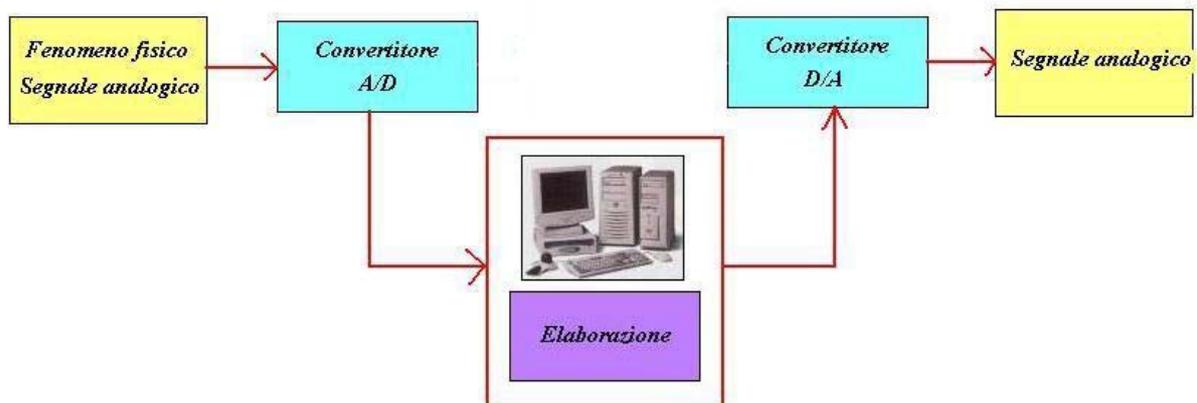


Fig. 59 esempio di conversione

Essendo N il numero dei bit, possiamo ottenere un numero di livelli di quantizzazione pari a 2^N , nel nostro caso 256 ($2^8=256$). Consideriamo ora un full-scale range (SFR) di 10 volt; la (Grandezza) di ogni livello sarà $10/256$, cioè circa 0.039 Volt per livello. Ora se la nostra stringa di bit sarà quella mostrata in figura, possiamo facilmente calcolare la tensione in uscita moltiplicando il numero di livelli(A), ottenuto sommando i pesi dei livelli interessati, con il valore calcolato precedentemente e relativo a ciascun livello. Inoltre possono essere calcolati la tensione massima e quella media.

Il convertitore Analogico-Digitale ADC

Un generico sistema ADC e DAC è così composto:



Ma ora andiamo ad analizzare più in dettaglio i vari tipi di convertitore ADC e DAC:

Modelli di ADC

Esistono in commercio diversi tipi di convertitore AD avente come blocco fondamentale un circuito chiamato **sample and hold** (campiona e mantieni), ogni convertitore

ADC è caratterizzato dalla velocità massima di campionamento/conversione, che si misura in Samples per Secondo, che può assumere valori tipicamente compresi fra 50 sps e 200Msps.

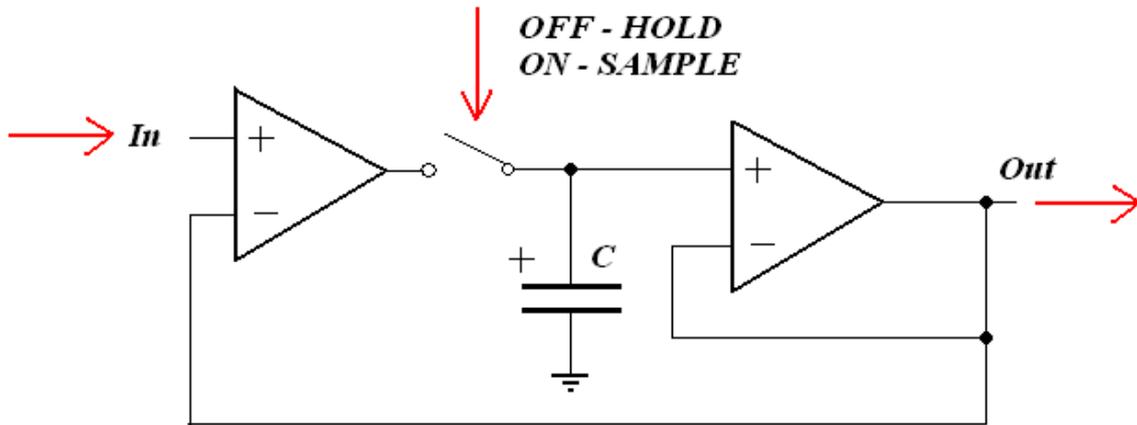


Fig. 60 sample and hold

ADC con contatore

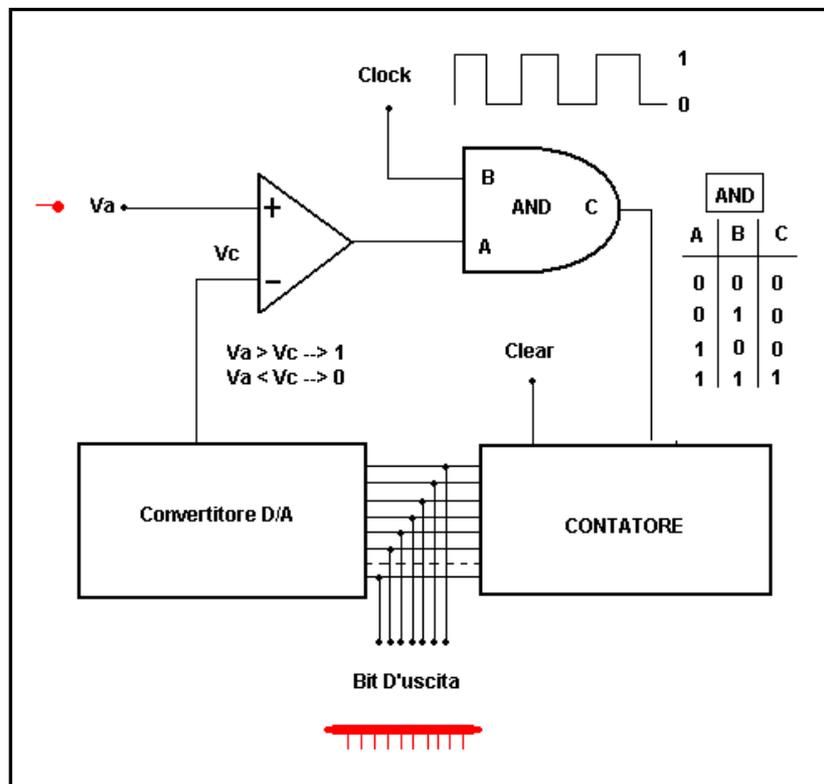


Fig. 61 ADC con contatore

Descrizione del funzionamento

All'accensione inizia il conteggio in binario il valore viene successivamente convertito in una tensione V_c e confrontato, tramite un comparatore analogico con V_a , il conteggio termina quando $V_a = V_c$ in questo caso il valore digitale del contatore corrisponde al valore analogico di riferimento V_a .

ADC Flash

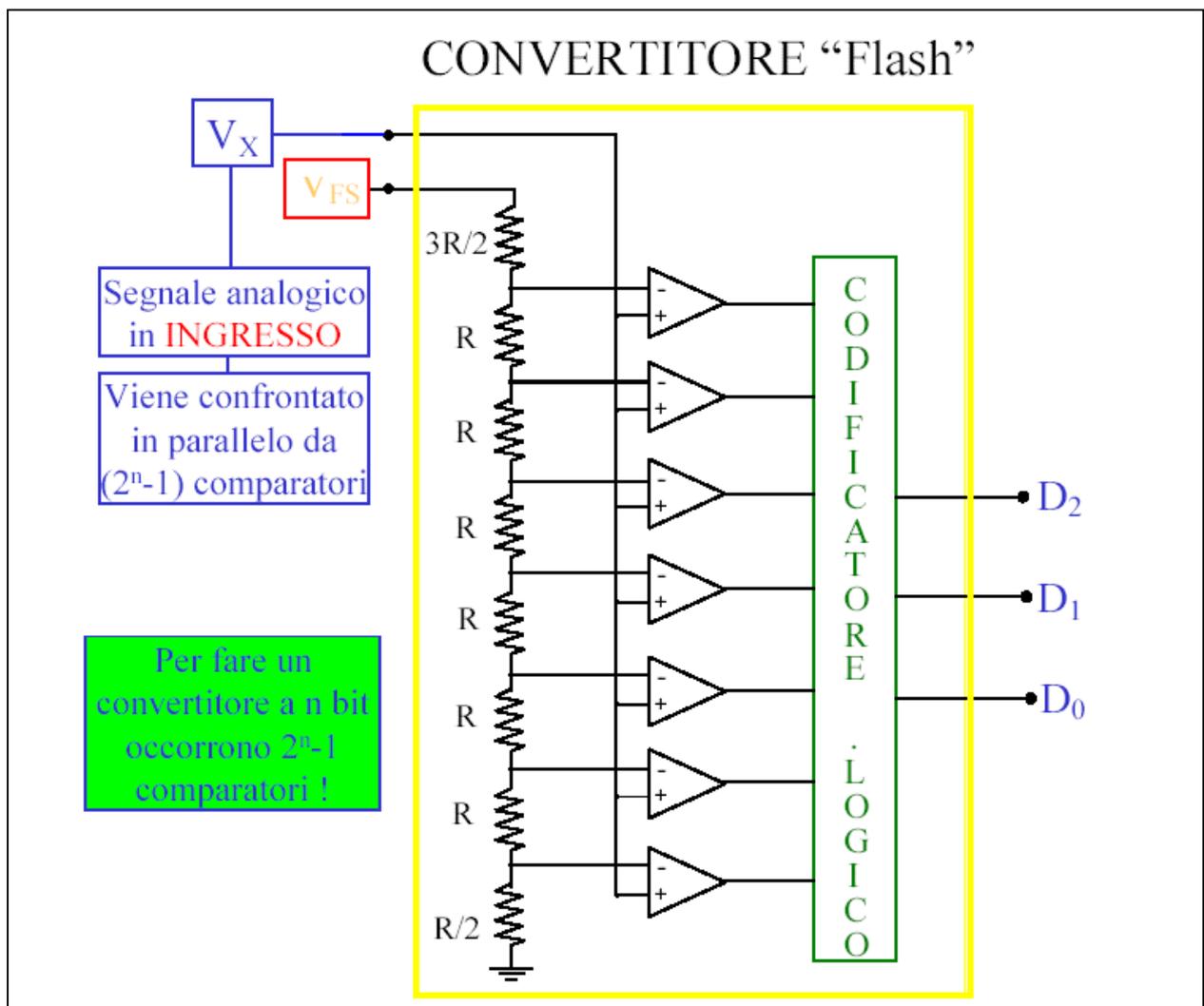


Fig. 62 ADC Flash

Nel convertitore di figura abbiamo 3 bit quindi $2^3 = 8$ livelli di quantizzazione, tramite un partitore resistivo vengono generati 7 livelli che verranno confrontati con il valore analogico di ingresso.

Vantaggi e svantaggi ADC Flash:

1. Molto veloci (velocità limitata solo dai tempi di ritardo dei comparatori e della logica)
Tassi di conversione di 10-100 Msample/s;
2. Molto costosi (richiedono, infatti, 2^{n-1} comparatori!).

Modelli di DAC

Il convertitore digitale analogico (detto anche DAC) è un dispositivo in grado di convertire un segnale digitale avente un determinato valore binario in una tensione d'uscita. I convertitori digitali analogici si basano tutti essenzialmente sul principio di convogliare verso l'uscita una corrente proporzionale al valore dell'ingresso digitale. Un generico convertitore digitale analogico è dato nel seguente schema, che rappresenta un convertitore invertito a scala R-2R:

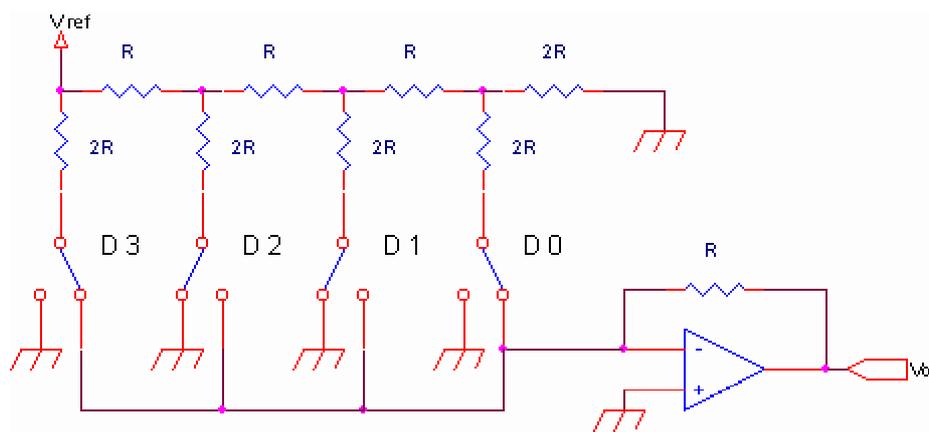


Fig. 63 DAC con resistori pesati

Il convertitore utilizza resistori di soli due valori, R e 2R. Questo convertitore a quattro bit presenta quattro deviatori comandati dagli ingressi digitali. L'operazionale invertente finale ha solamente il compito di convertire la corrente proveniente dal circuito resistivo in

una tensione. Cambiando lo stato dei deviatori varierà solamente la corrente che giungerà all'ingresso invertente dell'operazionale (la corrente erogata da V_{ref} resta sempre la stessa). Quando poniamo gli ingressi digitali a 0, all'ingresso invertente dell'operazionale non si avranno collegamenti col circuito resistivo e quindi, essendo a massa virtuale, l'uscita assumerà 0. Negli altri casi, applicando il teorema di Thvenin si ha che la corrente erogata da V_{ref} è uguale a V_{ref}/R e le correnti che scorrono nei resistori variano proporzionalmente per potenze di due. La corrente totale che giungerà all'operazionale sarà quindi:

$$I = \frac{1}{2}D_3 + \frac{1}{4}D_2 + \frac{1}{8}D_1 + \frac{1}{16}D_0 = \frac{V_{ref}}{24R}(2^3 D_3 + 2^2 D_2 + 2^1 D_1 + 2^0 D_0)$$

La tensione d'uscita per questo convertitore sarà quindi:

$$V_0 = -\frac{V_{ref} R_f}{24 R}(2^3 D_3 + 2^2 D_2 + 2^1 D_1 + 2^0 D_0)$$

La forma generica della funzione di trasferimento di un convertitore digitale analogico, nel caso in cui le resistenze fossero uguali, è quindi:

$$V_0 = V_{ref} \frac{N}{2^n}$$

Dove n rappresenta il numero di bit del convertitore e N la combinazione binaria che si trova all'ingresso. La formula ovviamente col meno davanti se il convertitore è invertente, come quello analizzato in precedenza. Le caratteristiche più importanti di un convertitore digitale analogico sono la risoluzione, ovvero il numero di bit dell'ingresso; la precisione, la differenza tra valore del segnale analogico reale e teorico; la linearità, ovvero il rapporto tra

ingresso e uscita deve essere proporzionale; e il tempo di assestamento, il tempo necessario per avere l'uscita stabile.

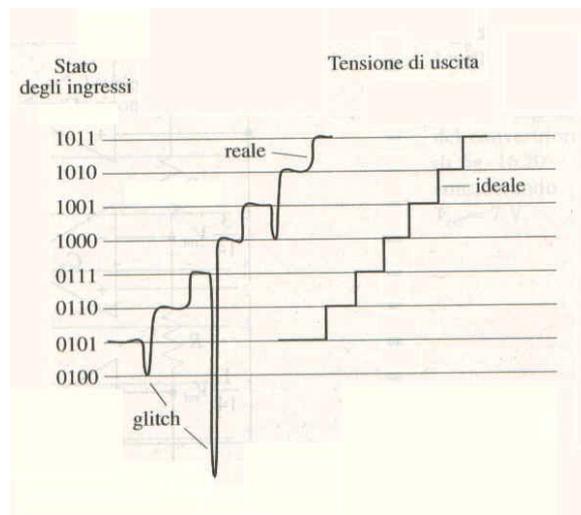


Fig. 64 tempi di assestamento

Un'altra caratteristica dei DAC è che in corrispondenza di certe commutazioni possono verificarsi degli impulsi indesiderati di breve durata ma di ampiezza considerevole chiamati glitch. Ad esempio nel passaggio tra la combinazione binaria 0111 a quella 1000, in quanto il tempo di commutazione alto-basso è diverso da quello basso-alto (più piccolo rispetto al primo) si avrà per un istante la combinazione in uscita 0000, che tradotta diventa un impulso che da metà della tensione di riferimento va a zero, come mostrato in figura.

Prova sperimentale del convertitore ADC

Per provare sperimentalmente il funzionamento di un convertitore ADC, abbiamo montato su una basetta sperimentale il circuito di figura utilizzando i seguenti componenti:

- Convertitore ADC (modello 0804);
- 1 condensatore da 150 p;
- 2 condensatori da 100 n;
- 8 resistenze da 1,2 k;
- 1 resistenza da 10 k;
- 8 diodi led colorati;
- una base;
- cavi vari.

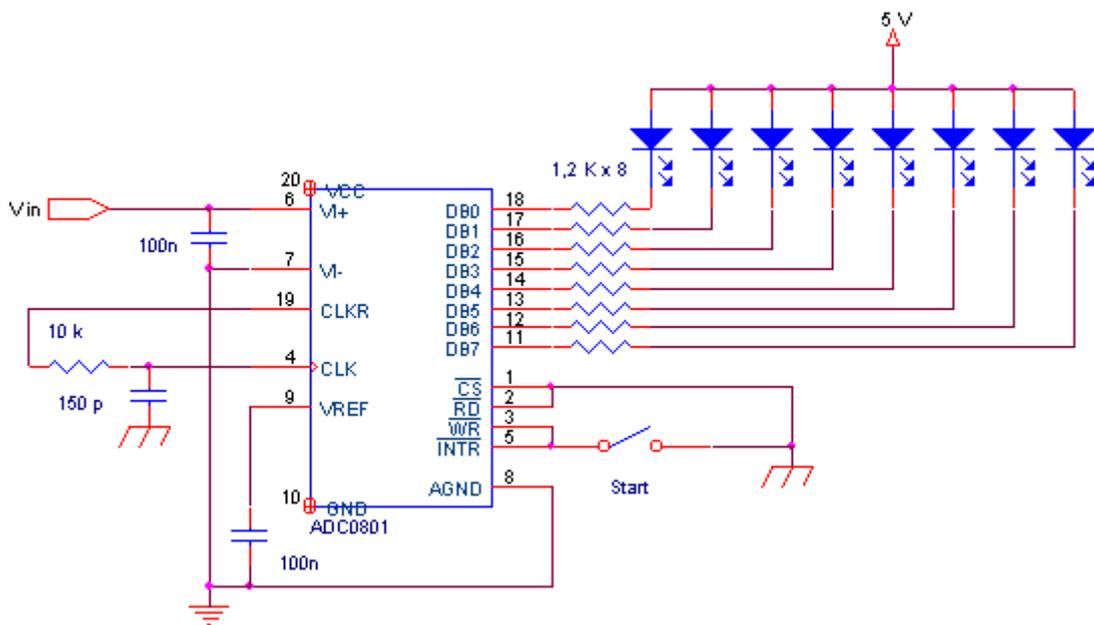


Fig. 65 schema circuitale

Il funzionamento del circuito è il seguente: applicando un segnale in tensione in V_{in} , vengono visualizzati, tramite dei diodi led i segnali digitali corrispondenti: (ACCESO "1", SPENTO "0")

Utilizzando un FSR di 5V e 8 Bit otteniamo un livello di quantizzazione di : $q = 5 / 2^8 = 0,0195$

Abbiamo verificato la conversione con due V_{in} rispettivamente pari a 2.5V e 3.10V. la sequenza led è stata la seguente:

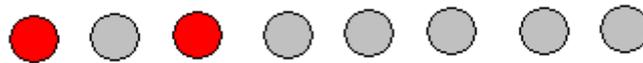


che corrisponde al valore digitale 10000000 verificando analiticamente otteniamo :

$$10000000_2 \rightarrow 128_{10} \rightarrow 128 \times 0,0195 = 2.496 \text{ V}$$

che entro l'errore di misura corrisponde al nostro valore V_{in}

considerando l'altra V_{in} :



che corrisponde al valore digitale 10100000 verificando analiticamente otteniamo :

$$10100000_2 \rightarrow 160_{10} \rightarrow 160 \times 0,0195 = 3.12 \text{ V}$$

che corrisponde al valore di $V_{in} = 3.10\text{V}$ entro l'errore.



Fig. 66 montaggio del circuito

5) Analisi dati

Ogni elemento sottoposto ad una certa radiazione puo emette a sua volta un'onda elettromagnetica che, ordinata per frequenza nello spettro, dà importanti informazioni sull'elemento che l'ha emessa.

Come già detto la spettrometria per fluorescenza è una tecnica diffusa per il carattere non invasivo e per l'immediatezza dei risultati.

Utilizzo della fluorescenza nei rivelatori

La tecnica XRF (X-Ray Fluorescence) si basa su reazioni nucleari o atomiche di sezione d'urto nota indotte irraggiando con un fascio di particelle un bersaglio. Analizzando i prodotti della reazione (particelle, radiazione gamma e/o X) è possibile ricavare la composizione elementare del campione in esame. Le particelle incidenti possono provenire da sorgenti radioattive ma, per i maggiori flussi ottenibili, si utilizzano soprattutto acceleratori elettrostatici (Van der Graaf, Tandem) con energia al terminale fra i 2 ed i 6 MeV.

Le particelle cariche interagiscono con la nuvola elettronica di un atomo creando lacune elettroniche negli strati interni (K,L,M) la cui vita media varia fra 10^{-9} e 10^{-16} secondi; le lacune vengono quindi riempite dagli elettroni più esterni e l'energia residua, pari alla differenza fra l'energia di legame dell'elettrone nel guscio più esterno e in quello più interno, viene emessa prevalentemente come radiazione X (o elettrone Auger). L'energia della radiazione X è caratteristica dell'elemento emettitore e dalla misura dell'energia e della quantità degli X emessi si risale agli elementi presenti nel campione e alla loro concentrazione.

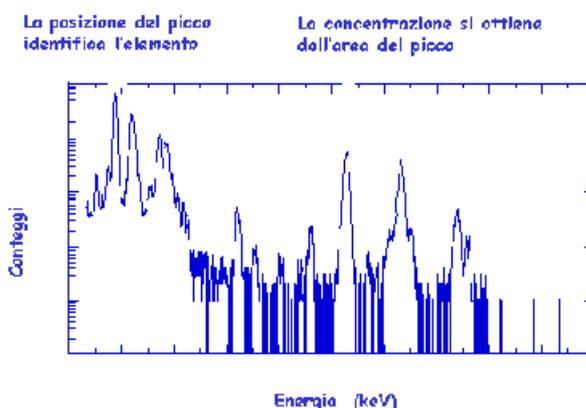


Fig. 68 spettro fluorescenza

Ogni campione produce dunque uno spettro caratteristico, quale quello mostrato in figura 67. Gli spettri formati possono essere di tre tipi.

- spettro discreto;
- spettro continuo;
- spettro misto.

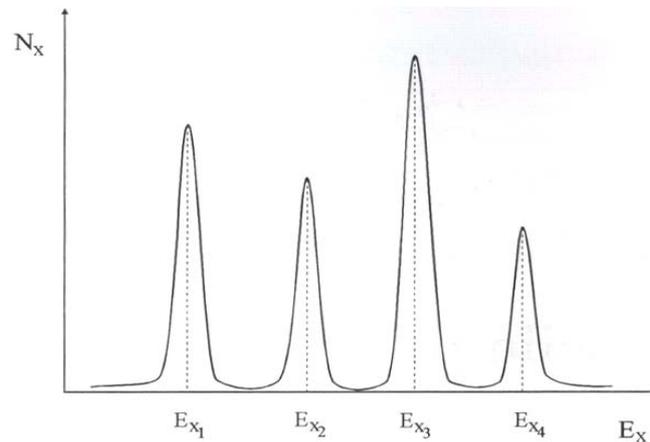


Fig. 68 spettro discreto

Lo spettro discreto è prodotto da particelle con una definita energia (le particelle hanno energia ben determinata E_i ($i=1,n$)), è inoltre costituito da una successione di righe di fluorescenza.

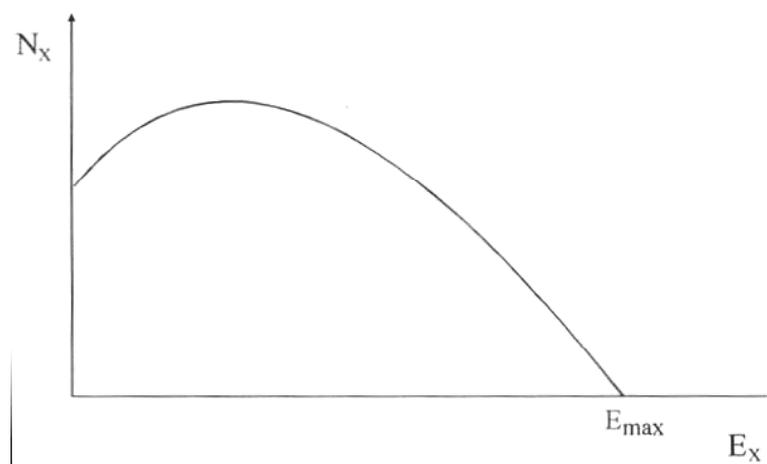


Fig. 69 spettro continuo

Lo spettro continuo è prodotto da particelle con energia compresa in un determinato intervallo: (E_{min}, E_{max}) .

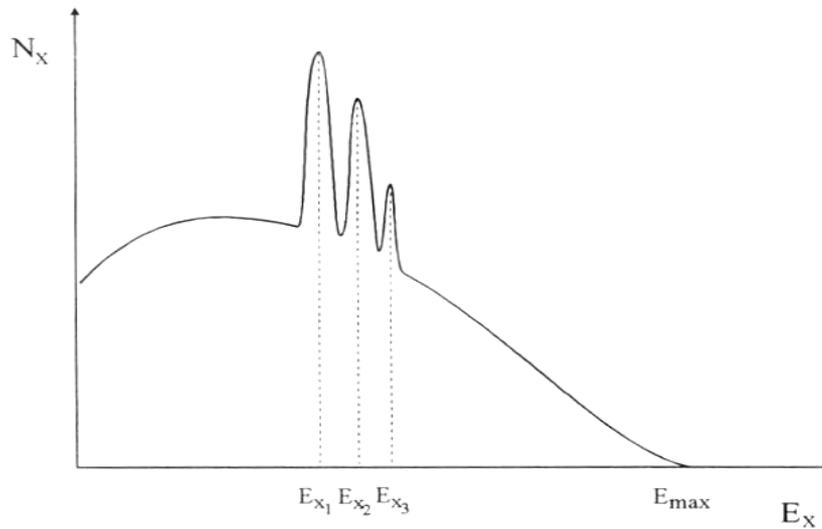


Fig. 69 spettro misto

Lo spettro misto è formato da una componente continua e una componente discreta. Un esempio di spettro misto è lo **spettro di raggi X** infatti esso è costituito da una componente discreta che sono i raggi X caratteristici e da una continua che sono i raggi X prodotti come “radiazione di frenamento”.

Ciò che interessa a noi è proprio l’ultimo di questi diversi tipi, poichè dai suoi picchi possiamo determinare l’elemento in studio.

Inoltre lo spettro ha anche altre caratteristiche quali:

1. La posizione del picco – da cui si determina l’energia dei raggi X;
2. L’area del picco ;
3. La larghezza del picco – da cui si determina la risoluzione del rivelatore.

Prendendo nota di questi tre fattori c’è da tener conto della presenza di particelle ,diverse da quelle da indagare, che producono “rumore” diminuendo quindi la capacità di identificazione delle transizioni specifiche.

Esempi di analisi dati sperimentali

Essendo a conoscenza di tutte queste informazioni, i tutors ci hanno dato una tabella di dati, acquisiti con i chips del Silicon Drift Detector (SDD) nell'esperimento SIDDHARTA .

SSD1	SSD2	SSD3	SSD4	SSD5	SSD6	SSD7	
12	10	5	344	19	18	23	4
11	378	1	1	17	16	19	4
6	3	385	1	18	19	26	5
4	0	0	0	23	364	18	5
9	0	1	337	1	18	19	5
11	1	0	1	7	15	18	5

Fig. 70 parte della tabella dati sperimentale

Nella tabella le colonne indicano quale dei canali del rivelatore è preso in considerazione, le righe riportano il numero dei canali registrati da ognuno di questi .

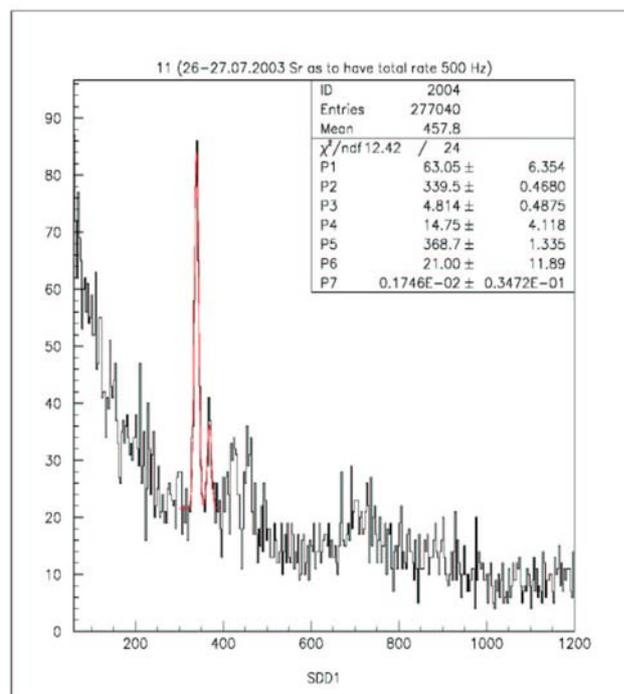


Fig.71 fit dei dati

Lo spettro che ne ricaviamo è il seguente: sulle ascisse abbiamo i canali, sulle ordinate il numero degli eventi.

Le radiazioni appartengono ad una sorgente conosciuta, ossia il ferro, che dà luogo nello spettro a due righe di energia nota (evidenziate in rosso nella figura), le quali si chiamano rispettivamente $Mn K_{\alpha}$ e $Mn K_{\beta}$.

Con questo spettro se isoliamo i picchi possiamo cercare una funzione che ne descriva la forma dandoci tutte le caratteristiche utili al calcolo della risoluzione del rivelatore. Isolati i picchi da analizzare, con l'aiuto di un programma, possiamo affermare che essi sono caratterizzati da una distribuzione di Gauss, simile a questa.

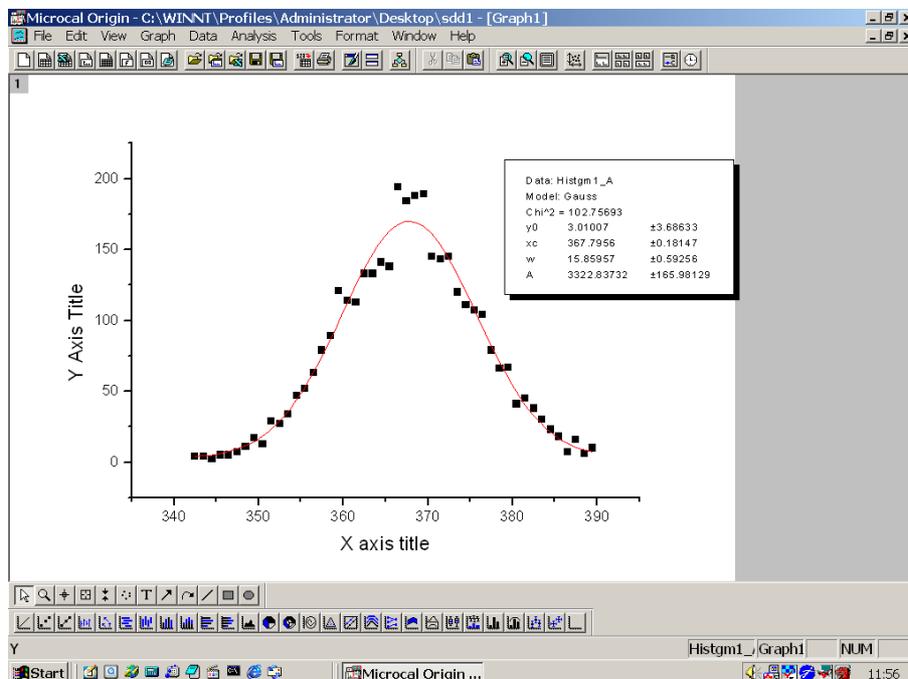


Fig. 72 analisi dei dati

La funzione è:

$$P_g(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

dove :

μ = valore medio (ossia la posizione del picco);

σ = deviazione standard;

Γ = larghezza a metà altezza (full-width at half maximum:FWHM)

$\Gamma = 2,354 \times \sigma$ (risoluzione del rivelatore)

Eseguito il fit abbiamo ottenuto i seguenti parametri:

$\mu = 339.5$, la posizione del picco Mn K_{α} (in canali)

$\sigma = 4.814$, deviazione standard (in canali)

A questo punto ciò che a noi interessa è quanta energia corrisponde ad ogni canale e si può calcolare nel seguente modo:

sapendo che l'energia del picco di Mn K_{α} è 5.89507 keV

$$\frac{E_{MnK_{\alpha}}}{Canale} = \frac{5895.07(eV)}{339.5} = 17.3639 \quad eV/canale$$

Avendo tutti i dati a noi necessari con una semplice moltiplicazione siamo giunti al valore della risoluzione del rivelatore:

$$\Gamma = 2.35 \times \sigma = 2.35 \times 4.815 \times 17.3639 = 196.48 \quad eV$$

Il valore ottenuto è verosimile, poichè il rivelatore ci ha dato la possibilità di distinguere i due picchi di Mn, cosa che non sarebbe stata possibile se la sua risoluzione fosse stata non sufficientemente buona (ad esempio: 500eV), quindi si può concludere che dalla risoluzione di un rivelatore si determina la sua capacità di determinare delle radiazioni di energia molto vicina.

6) Conclusioni

La frequentazione dei laboratori di ricerca ed il contatto con i ricercatori e tecnologi che ci lavorano ha chiaramente avuto delle conseguenze sia in termini di conoscenza che in termini di verifica concreta delle caratteristiche di una realtà, quella del laboratorio, solo in parte conosciuta.

Vorremmo dettagliare in che modo questa esperienza formativa ha influito ampliando il bagaglio di conoscenze che portavamo all'inizio della stessa.

Durante lo svolgimento dello stage e nell'ambito dell'illustrazione della ricerca che si porta avanti presso l'Istituto sono stati utilizzati, dandogli anche la concretezza che sottende ad essi, termini quali: acceleratore di particelle; rivelatore; annichilazione materia-antimateria, che rappresentano soltanto alcuni dei termini e delle conoscenze che ci sono state fornite all'interno della esperienza formativa, estrapolati a titolo esemplificativo da un ben più lungo elenco.

Frequentare la realtà del laboratorio ha comportato non solo acquisire tale terminologia ma comprendere vari aspetti teorici ed i principi che i tutors illustravano.

Durante questa esperienza, nel venire a contatto con le varie realtà di ricerca che ci venivano illustrate abbiamo acquisito una terminologia tecnica nuova che ha avuto il duplice effetto di allargare le conoscenze di ognuno di noi ma anche di permetterci un confronto ed un dialogo, di andare avanti nel processo di apprendimento, proprio perché terminologia comune e condivisa; questo aspetto ci ha fatto riflettere come anche in questa realtà come in generale in tutte le realtà dove è necessario scambiare idee, conoscenze, dubbi, quesiti, un linguaggio comune e la condivisione dello stesso rivestano un ruolo fondamentale.

Nel corso dello svolgimento dello stage presso l'Istituto di Frascati abbiamo avuto anche modo di provare concretamente un utilizzo integrato di un programma informatico e delle formule matematiche per trasporre in maniera sistematica dei dati forniti dai tutors; questa esperienza, ci ha portato a contatto con un elemento che caratterizza la ricerca in

laboratorio e cioè l'integrazione della ricerca fisica con altre discipline (vedi informatica, matematica) che consentono una corretta analisi e sistemazione dei dati.

Un altro aspetto che ci ha fortemente colpito, nonostante il nostro ruolo nell'ambito di questa esperienza formativa fosse solo un venire a contatto con la realtà della ricerca e del laboratorio per acquisire i rudimenti dell'argomento, è stata la percezione di come anche in un ambito che si sa comunque basato su leggi e principi acclarati, come già detto sopra, l'elemento della generalizzazione, della supposizione o ipotesi, dell'analogia, dell'immaginazione, dell'analisi, della sintesi, della deduzione, in una parola l'elemento umano sia indispensabile per porre in essere qualsiasi ipotesi di ricerca.

Dovendo fare un bilancio di questa esperienza riteniamo di poter dire che è stato un momento vero di formazione intesa come miglioramento ed ampliamento di conoscenze, svolta da professionisti che con il loro modo di guidarci in questa realtà di ricerca e di fornirci di volta in volta gli strumenti e le conoscenze necessarie ci hanno anche fatto prendere coscienza dell'importanza dell'aspetto della professionalità intesa come possesso di conoscenze teoriche aggiornate, possesso di abilità tecniche o manuali, possesso di capacità comunicative e relazionali.