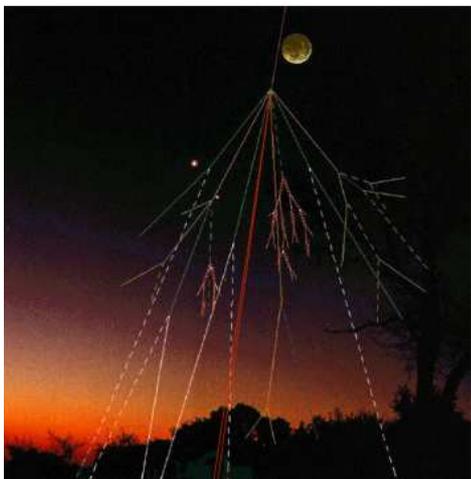


## I RAGGI COSMICI

La nostra atmosfera è bombardata continuamente da radiazioni che provengono dall' esterno:



- radiazione elettromagnetica (dalle onde radio alla luce visibile ai raggi gamma di alta energia)

- protoni
- nuclei più pesanti

Radiazione cosmica: pioggia di particelle di alta energia.

- La radiazione cosmica è molto differente dalla radiazione alfa e beta emessa dai nuclei radioattivi

- Quando la radiazione primaria interagisce con gli atomi e le molecole dell'atmosfera, produce sciami di particelle secondarie, alcune delle quali possono giungere sulla Terra

- Il flusso delle particelle secondarie a livello del mare è di circa 1 per cm<sup>2</sup> al minuto

- I raggi cosmici primari hanno energie molto più elevate di quelle in gioco nel decadimento delle sostanze radioattive.

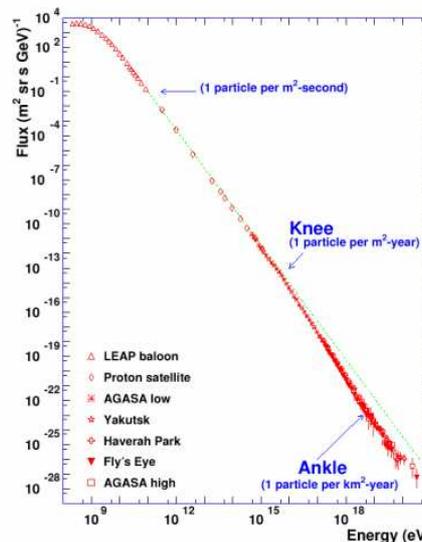
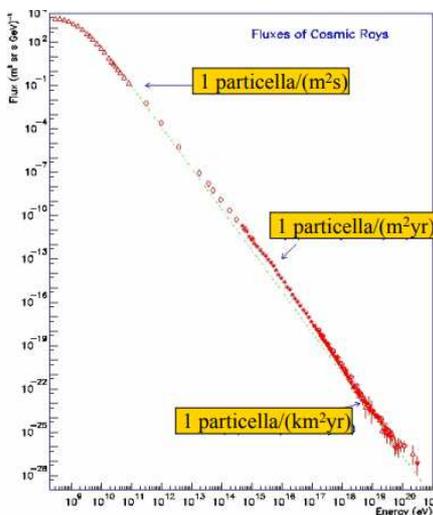
- Tuttavia, le particelle di energia molto elevata sono molto rare e la maggior parte dei cosmici primari possiede energie circa 1000 volte maggiore delle particelle emesse nei decadimenti.

### Lo spettro dei Raggi Cosmici

Lo spettro si estende su > 32 ordini di grandezza ln prima approssimazione: legge di potenza  $E^{-2.8}$ , ma ci



La scoperta di Victor Hess, 1912  
Volo a 12 000 m, senza ossigeno



sono cambiamenti di pendenza e

probabilmente di composizione.

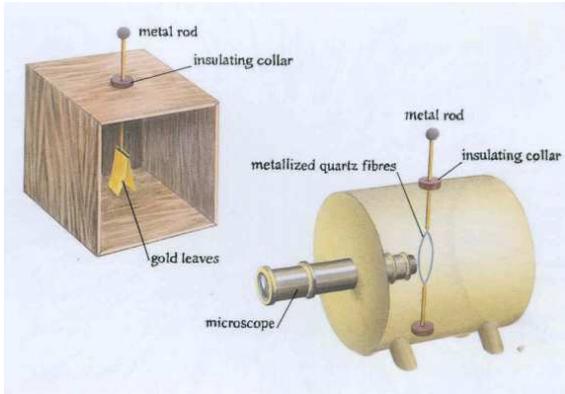
- L'origine dei raggi cosmici di altissima energia è ancora misteriosa. La sorgente di queste particelle sia essa all'interno della Galassia o extragalattica non è nota, così come i meccanismi che possono produrre tali energie così elevate.

- Conosciamo tuttavia adesso in dettaglio in che cosa consiste questa radiazione e come essa interagisce con l'atmosfera.

- Lo studio della radiazione cosmica ha progredito in parallelo con lo studio degli atomi e dei nuclei durante il secolo XX, con tecniche simili a quelle della fisica nucleare

- Esso ha contribuito alla scoperta di nuove particelle, dando l'avvio alla realizzazione dei grandi acceleratori di particelle
- Esistono dunque molti legami tra la fisica dei raggi cosmici e la fisica nucleare e delle particelle

### La scoperta dei raggi cosmici



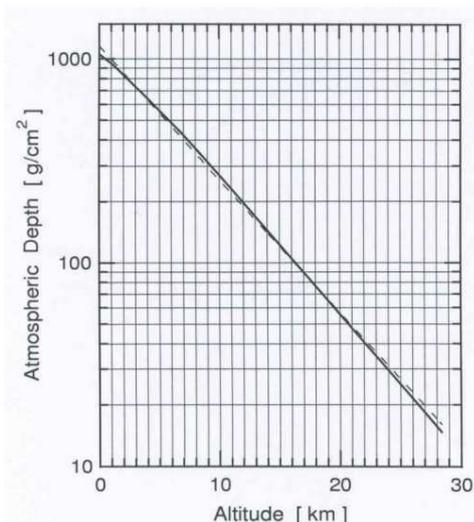
Le radiazioni emesse da sostanze radioattive venivano rivelate all'inizio del XX secolo mediante elettroscopi, che rivelavano la presenza di agenti ionizzanti.

Anche quando non c'era alcuna sostanza radioattiva nelle vicinanze, gli elettroscopi tuttavia si scaricavano, indicando una qualche forma di radiazione. Questa era presente ovunque, anche sul mare (lontano dalle rocce), o in presenza di schermi. L'origine di questa radiazione era sconosciuta all'inizio del 1900. Nel 1910 Theodor Wulf, un prete gesuita, portò degli elettroscopi

sulla Torre Eiffel, misurando una quantità di radiazioni maggiore del previsto. Egli fece l'ipotesi che questa radiazione fosse di origine extraterrestre, proponendo di fare delle misure a bordo di palloni aereostatici per verificare questa ipotesi. Questa ipotesi venne effettivamente verificata nel 1911-1912 da Victor Hess, uno scienziato austriaco, che dotato di alcuni elettroscopi, effettuò una decina di ascensioni in pallone, fino alla quota di 5000 m.

Gli esperimenti di Hess mostrarono che l'intensità della radiazione effettivamente cresceva con l'altezza, specie al di sopra di 1000 m, raggiungendo a 5000 m un valore 3-

Hess nel 1936



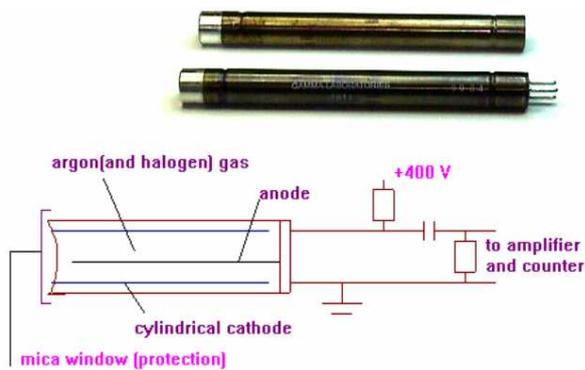
5 volte maggiore di quello a livello del mare.

- La conclusione fu che doveva esistere una fonte di radiazione notevole, con origine nello spazio esterno alla Terra, radiazione che penetrava nell'atmosfera terrestre, e diminuiva di intensità con lo spessore attraversato.
- Fino a quella data per compiere degli esperimenti era necessario compiere materialmente, in più persone, queste ascensioni in pallone per effettuare le misure.
- Il gruppo di Millikan a metà degli anni 1920 sviluppò degli elettrometri capaci di registrare le misure senza bisogno di operatori umani, estendendo le misure con palloni senza equipaggio fino a grandi altezze.
- Una volta accettata l'esistenza dei raggi cosmici, e il fatto che essi provenissero dall'esterno della Terra, rimaneva il problema di

comprenderne la natura.

- Poiché la radiazione più penetrante nota fino a quel momento erano i raggi gamma, Millikan e altri ritennero che i raggi cosmici fossero gamma di alta energia, derivanti dalla sintesi degli elementi pesanti a partire dai nuclei leggeri.

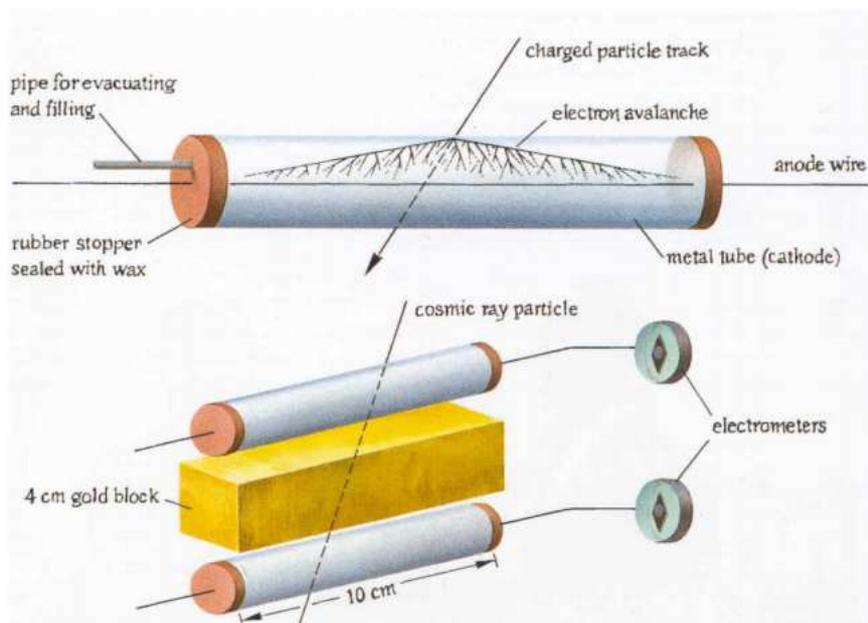
Un grosso passo avanti venne fatto nel 1928, con lo sviluppo di un particolare tipo di rivelatore, il contatore Geiger, ad opera di Hans Geiger e Walther Muller (Kiel). Si trattava di una versione perfezionata di un rivelatore originariamente costruito da Geiger e utilizzato insieme a Rutherford nel 1908 per esperimenti sulla radioattività.



I vantaggi di questo rivelatore erano l'alta sensibilità alle radiazioni, dovuta all'elevato campo elettrico: anche una particella debolmente ionizzante avrebbe prodotto una scarica nel contatore e quindi un segnale misurabile.

- Le prime misure di coincidenza fatte con contatori Geiger connessi ad elettrometri mostrarono un grande numero di coincidenze, evento non comprensibile se i raggi cosmici erano costituiti da radiazione gamma:

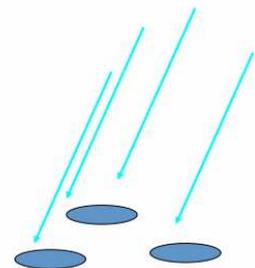
- 2 possibilità: un gamma di alta energia produce casualmente ionizzazione in entrambi i contatori oppure la radiazione cosmica è essa stessa costituita da elettroni
- Per verificare questa ipotesi Bothe e Kolhorster inserirono del materiale assorbitore tra i due contatori, per assorbire gli elettroni espulsi dagli atomi.
- Tuttavia, il 75 % dei raggi cosmici erano capaci di attraversare anche blocchi di materiale pesante (Oro) di 4 cm di spessore, dunque la radiazione cosmica doveva essere costituita da particelle cariche altamente penetranti, e non da gamma.



Lo sviluppo sperimentale di questa tecnica di coincidenza venne fatto dall'italiano Bruno Rossi a Firenze negli anni '30. Rossi inventò per la prima volta dei circuiti di coincidenza elettronici, basati sull'uso di valvole termoioniche. Con questa tecnica Rossi ebbe la possibilità di misurare coincidenze non solo tra contatori piazzati verticalmente, ma anche tra contatori disposti orizzontalmente ad una certa distanza.

In quest'ultimo caso le coincidenze non potevano essere dovute ad una singola particella. Questa fu la prima evidenza dell'esistenza di sciame di particelle secondarie.

Il primo a visualizzare le tracce dei cosmici e ad osservare che esse non venivano curvate quasi per nulla in un campo magnetico fu il russo Skobeltzyn nel 1924 a Leningrado, mediante delle camere a nebbia.



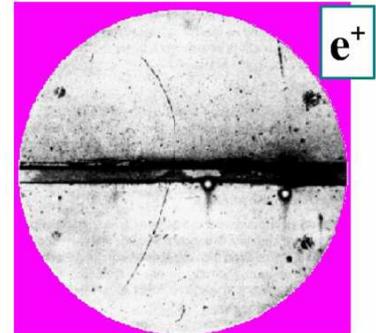
- Se queste tracce non venivano curvate da un campo magnetico, dovevano dunque essere dovute a particelle neutre oppure a particelle cariche di energia molto elevata.
- Le prime misure quantitative dell'energia e dello stato di carica dei cosmici vennero eseguite da Millikan e Anderson, con una camera a nebbia immersa in un elevato campo magnetico

I risultati di Anderson mostrarono la presenza di tracce positive e negative. Inizialmente Millikan riteneva che le tracce negative fossero elettroni e quelle positive protoni. Successive osservazioni mostrarono l'evidenza di particelle positive con la stessa massa degli elettroni: i positroni, primo esempio di particelle nuove osservate nella radiazione cosmica

### Il positrone

L'invenzione della camera a nebbia permise di "vedere" le particelle generate dai raggi cosmici e permise la scoperta di nuove particelle in essi contenute tra il 1920 e il 1930. La camera immersa in un campo magnetico permetteva di risalire alla massa e al segno della carica delle particelle tramite la curvatura della traccia nel campo magnetico. Nel 1932 Carl Anderson osservò la traccia di una particella della stessa massa dell'elettrone, ma di carica opposta, **scoperto il positrone!**

Con questa tecnica Blackett e Occhialini fotografarono migliaia di tracce di cosmici, confermando l'esistenza del positrone.



- Nei primi anni '30 dunque era chiaro che la radiazione cosmica a livello del mare conteneva certamente elettroni e positroni.
- Tra le tracce osservate ve ne erano alcune con un potere di penetrazione maggiore degli elettroni, e che non creavano sciami.
- Anderson e il suo collega Neddermeyer al Caltech nel 1936 ritenevano che si trattasse di nuove particelle, con massa compresa tra quella dell'elettrone e quella del protone.

### Il mesone $\mu$

Nel 1937 Carl D. Anderson e Seth H. Neddermeyer e, in modo indipendente, J.C. Street e E.C. Stevenson, rivelano l'esistenza di una nuova particella a vita breve e di massa intermedia tra elettrone e protone. La nuova particella veniva deviata dal campo magnetico esterno con raggio di curvatura maggiore di quello degli elettroni ma minore di quello dei protoni. Di qui il nome di "mesone". **Alla particella viene dato il nome di mesone  $\mu$ .**

- Negli anni dal 1937 ai primi anni '50 una serie ulteriore di osservazioni condotte con camera a nebbia in vari luoghi mostrarono evidenza di altre particelle prodotte dalla radiazione cosmica, dando luogo ad una "giungla" di particelle, tra cui quelle dotate del numero quantico di stranezza
- Negli anni tra il 1930 e il 1940 le osservazioni con le camere a nebbia avevano chiarito che la radiazione cosmica a livello del mare era costituita da elettroni, positroni e muoni.
- Era anche chiaro che queste particelle erano il prodotto secondario dell'interazione della radiazione primaria con l'atmosfera

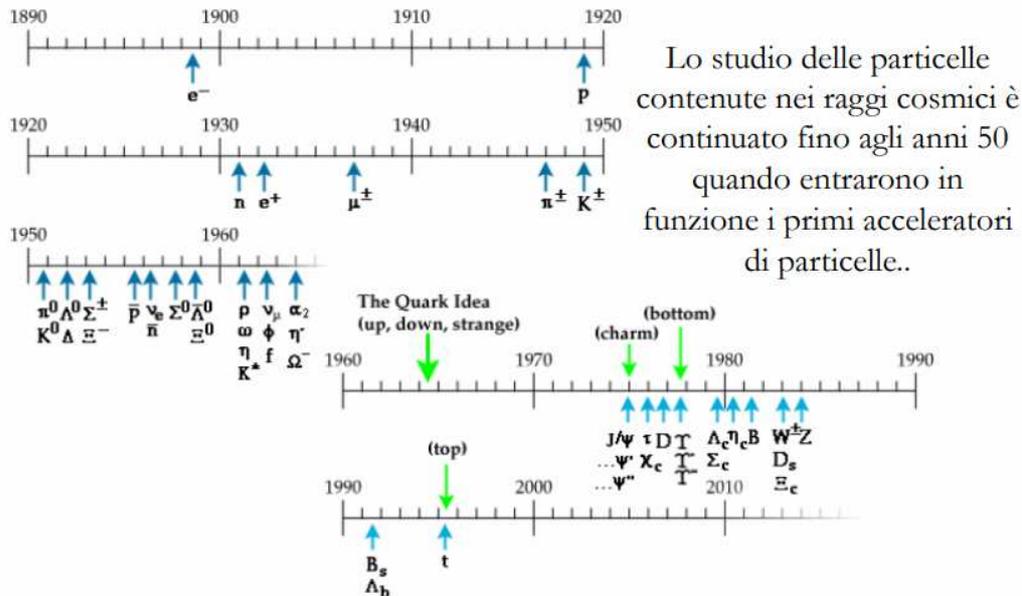
Il contributo alla comprensione della natura della radiazione primaria venne anche dall'uso della tecnica delle emulsioni nucleari, speciali pellicole fotografiche capaci di registrare la traccia delle interazioni delle particelle cosmiche primarie. Queste emulsioni vennero portate dapprima in alta montagna, evidenziando l'esistenza di altre particelle, tra cui il pione. Successivamente anche a grandi altezze per mezzo di palloni.

- I risultati ottenuti mediante le emulsioni nucleari mostrarono che la radiazione primaria era costituita in buona parte da nuclei atomici che si muovevano alla velocità della luce.

In massima parte: protoni (86 %) He (12 %) nuclei più pesanti

- Gruppi (stacks) di emulsioni nucleari sovrapposti e lanciati a bordo di palloni permisero infine di ricostruire l'interazione del nucleo primario con un nucleo dell'atmosfera e il successivo sviluppo dello sciame di particelle secondarie da essa generato.
  - Dagli anni '50 in poi quindi si ha una rappresentazione coerente del fenomeno dei raggi cosmici, dalla radiazione primaria, alla sua interazione con l'atmosfera e il conseguente sviluppo dello sciame che si propaga fino alla superficie terrestre.
  - La ricerca successiva ha messo in evidenza aspetti dettagliati della radiazione cosmica primaria e secondaria: la composizione, la distribuzione in energia, le variazioni di intensità del flusso...
- Rimane comunque ancora aperto soprattutto il problema dell'origine dei cosmici primari di altissima energia.

### Lo "zoo" delle particelle



### Lo sciame adronico (nell'atmosfera)

Protone (nucleo) entra nell'atmosfera; prima o poi interagisce con un nucleo dell'aria.

Interazione forte  $\Rightarrow$  mesoni  $\pi$ , mesoni K (e poco altro)

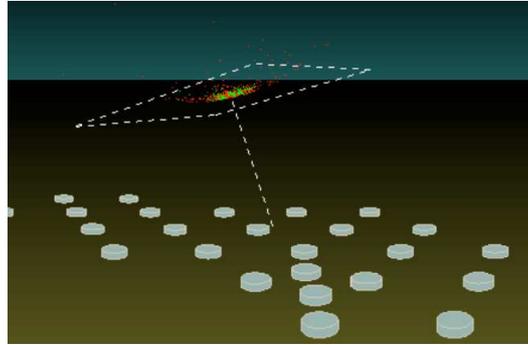
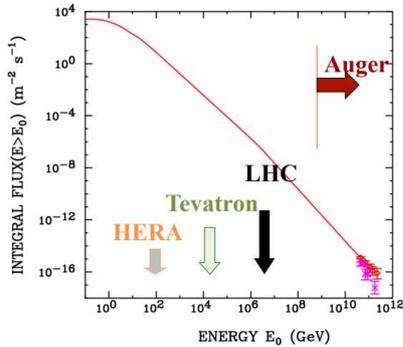
Distanza media tra due collisioni = distanza di interazione (in aria  $\lambda_0 \approx 750$  m, dipendente da p e T)

I pioni carichi decadono			
$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	$\tau = 26$ ns	
$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$	$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$	$\tau = 2$ $\mu$ s	
Scendendo nell'atmosfera la percentuale di $\mu$ cresce			
Ci sono anche $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ che decadono			
Lo sciame adronico ha sempre una componente elettromagnetica			

## I raggi cosmici

Le scoperte iniziali nella fisica delle particelle elementari utilizzarono lo spettro a energie di qualche GeV: flusso di decine di particelle per  $m^2$  per s. Composizione prima di entrare nell'atmosfera: 2% elettroni, 85% protoni, 12% particelle alfa e 1% nuclei più pesanti.

Negli anni '50 si costruiscono gli acceleratori: si controlla la sorgente, oltre che il rivelatore. Ma, a energie maggiori, ancora raggi cosmici.

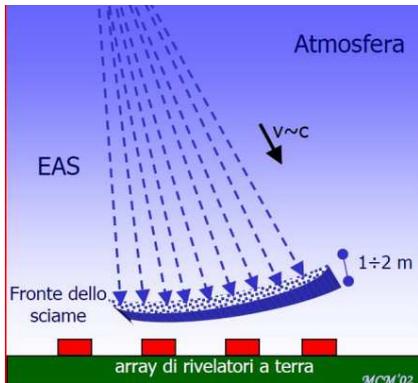


## Misura della direzione

Le particelle dello sciame arrivano come una grande pizza di piccolo spessore I tempi d'arrivo sono diversi

nei diversi contatori  $\Rightarrow$  misura tempo dà direzione.

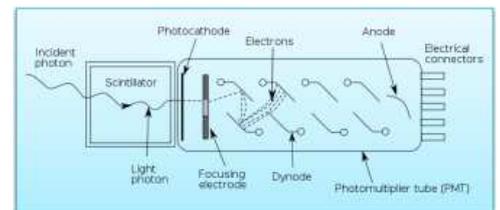
## I metodi "density sampling" e "fast timing" – ARRAY



1946: Il "Gruppo Raggi Cosmici" guidato da Bruno Rossi al M.I.T. mette a punto una nuova tecnica per determinare l'energia e la direzione di arrivo del CR primario che ha originato lo sciame EAS:

"Density sampling": la distribuzione della densità di particelle secondarie osservate in diverse posizioni in un array di contatori è usata per localizzare il centro dello sciame EAS, e per risalire all'energia del CR primario. "Fast timing": la direzione di arrivo del CR primario (assunta coincidente con l'asse dello sciame EAS) è

determinata dalle differenze tra i tempi d'arrivo del fronte dello sciame di particelle sui vari contatori.



## Il fotomoltiplicatore

Quando una radiazione luminosa incide sull'elemento sensibile (fotocatodo), questo emette elettroni per effetto fotoelettrico (Hertz, 1887), che vengono convogliati da un campo elettrico su una serie di dinodi. Su ciascun dinodo gli elettroni si moltiplicano per effetto termoelettrico in un processo a cascata. La corrente che si ottiene sull'anodo può essere anche un miliardo di volte più intensa di quella iniziale. Normalmente il fattore di amplificazione varia tra  $10^5$  e  $10^7$ .

Il materiale costituente il fotocatodo determina l'efficienza quantica di conversione dei fotoni in elettroni. Attualmente si possono costruire fotomoltiplicatori sensibili dai raggi X all'infrarosso.



- **Esperienza :**

*Obiettivo:* trasformare un segnale analogico in un segnale digitale.

*Materiale:*

- due rivelatori a scintillazione
- mattonellina di scintillazione
- fotosensore
- cilindro con alimentazione
- cavetti
- alimentatore
- amplificatore
- discriminatore
- digitizer (oscilloscopio)

*Premessa teorica:*

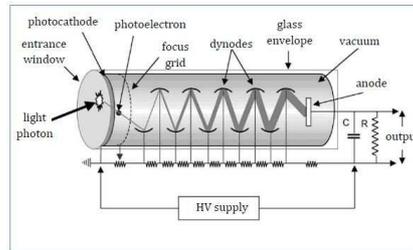
Un **amplificatore**, in elettronica e telecomunicazioni, è un dispositivo atto a variare l'ampiezza di un segnale di un fattore moltiplicativo comunemente indicato come guadagno (A), solitamente espresso in dB. Si tratta di un dispositivo di tipo attivo (alimentato), ovvero che assorbe energia per ottenere la suddetta funzionalità di amplificazione, che di fatto significa aumento dell'energia del segnale. Più specificamente, un generico amplificatore (lineare) ha un ingresso a cui è applicato il segnale da amplificare ed una uscita da cui viene prelevato il segnale amplificato, di ampiezza pari ad A volte il segnale originale. Se il guadagno dell'amplificatore non è costante, ma varia in base a determinate caratteristiche del segnale, si parla di amplificatore non lineare. Il loro uso si rende spesso necessario per far fronte all'eccessiva attenuazione del segnale lungo il canale di comunicazione o in generale nel sistema in cui esso transita.

Se lo si regola in modo da amplificare di molto i segnali si rischia, però, di amplificare rumori piccolissimi che potrebbero alterare la ricerca.

I segnali analogici portano diverse informazioni legate alle loro caratteristiche (ampiezza, durata, ripidità del fronte di discesa) e possono variare in maniera continua.

I segnali digitali portano una sola informazione e viene detta bit, ossia l'unità con cui ragionano i computer. Il bit può assumere solo due valori: 0 o 1.

Lo **scintillatore** è connesso al fotomoltiplicatore attraverso una guida di luce. Una particella che passa attraverso lo scintillatore perde energia trasferendola a quest'ultimo con meccanismi particolari cui segue poi l'emissione di fotoni. Negli scintillatori amorfi (plastici, liquidi), l'energia trasferita viene utilizzata per eccitare le molecole che, poi, diseccitandosi emettono fotoni con un andamento temporale di tipo esponenziale. Negli scintillatori più comuni l'emissione avviene prevalentemente nel violetto, con tempi variabili dai nanosecondi ai microsecondi. Tali fotoni sono poi trasmessi, attraverso una guida di luce opportuna, al fotocatodo del fotomoltiplicatore. Qui i fotoni liberano degli elettroni per effetto fotoelettrico che sono poi accelerati e focalizzati sul primo dinodo. Il rapporto tra il numero dei fotoelettroni prodotti ed il numero di fotoni incidenti sul fotocatodo viene detto "efficienza quantica del fotocatodo". Per ogni elettrone primario che urta un dinodo, possono essere emessi dai 2 ai 5 elettroni secondari. Introducendo, ad esempio, 14 stadi di moltiplicazione, si raggiungono fattori di moltiplicazione di circa un miliardo. La carica raccolta (integrale dell'impulso) e l'ampiezza degli impulsi sono proporzionali all'energia depositata nello scintillatore. Gli scintillatori possono essere organici o inorganici (i quali hanno una migliore risposta di luce, ma sono più lenti nella risposta temporale rispetto a quelli organici).



I rivelatori hanno, però, un difetto ossia quello di emettere un segnale acustico prima ancora che il segnale passi e questo è dovuto ad interferenze elettromagnetiche nella stanza, a periodi di attività solare intensa.

Così si cerca di creare una coincidenza ossia si usano due rivelatori e vado a vedere quando entrambi nello stesso momento emettono un segnale e tengo conto di quello tralasciando i segnali singoli emessi casualmente dai singoli rivelatori. In questo momento elimino il rumore casuale in quanto è altamente improbabile che questo evento casuale capiti contemporaneamente su due rivelatori diversi, al contrario invece del segnale reale che avviene in presenza di un dato e voluto fenomeno fisico.

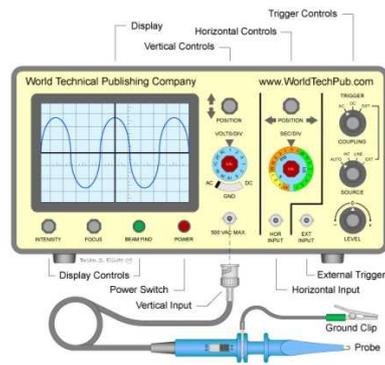
Il **discriminatore di ampiezza** è un circuito elettronico che permette di contare impulsi di tensione la cui ampiezza superi un certo valore (discriminatore integrale) o sia compresa entro limiti determinati (discriminatore a finestra o differenziale). Viene usato, per esempio, nei contatori di particelle. Un semplice discriminatore integrale può essere costituito da un diodo polarizzato con una tensione continua di valore  $V_d$  pari al livello di discriminazione: in tali condizioni il diodo conduce solo quando l'impulso di tensione applicato all'ingresso è superiore a  $V_d$ .

Il discriminatore più usato in pratica è costituito da un particolare multivibratore bistabile (circuito di Schmitt) nel quale si ha il passaggio da uno stato all'altro quando la tensione applicata all'ingresso supera un determinato valore  $V_+$  (soglia di scatto) e il ritorno allo stato iniziale quando la tensione di ingresso scende al di sotto di un valore  $V_-$ . I valori di  $V_+$  e  $V_-$  dipendono dalle caratteristiche dei componenti circuitali. Ai terminali di uscita è perciò possibile prelevare un impulso  $V_u$  quando all'ingresso è presente un impulso di ampiezza  $V_i$  superiore a un valore prefissato.

I discriminatori a finestra possono essere realizzati mediante due discriminatori integrali, con diversi livelli di discriminazione  $V_{d1}$  e  $V_{d2}$ , seguiti da un circuito di anticoincidenza. Nella pratica il termine discriminatore viene normalmente usato per gli strumenti multicanali, costituiti da un complesso di discriminatori a finestra con intervalli di discriminazione contigui, mentre gli strumenti a un solo canale vengono più spesso detti analizzatori.

L'**oscilloscopio** è uno strumento di misura elettronico che consente di visualizzare, su un grafico bidimensionale, l'andamento nel dominio del tempo dei segnali elettrici ed effettuare misure a lettura diretta di tensione (rappresentata sull'asse verticale) e periodo (con il tempo rappresentato sull'asse orizzontale). Per mezzo di un oscilloscopio analogico è possibile ricavare la misura di grandezze quali corrente, potenza ed energia del segnale, mentre un oscilloscopio digitale, grazie alla possibilità di memorizzare una forma d'onda campionata, permette di effettuarne una lettura diretta per mezzo di calcoli sui campioni in memoria. Generalmente l'oscilloscopio si utilizza per analizzare segnali periodici. La frequenza massima dei segnali visualizzabili, così come la risoluzione temporale, ovvero la più rapida variazione rilevabile, dipende dalla banda passante dello strumento, a sua volta dipendente dalla qualità e in ultima analisi dal costo. Si spazia dalle decine di MHz adatti per lavorare con segnali audio e televisivi, ai costosi modelli digitali da diversi GHz.

Può essere considerato uno strumento universale. Tramite opportuni trasduttori, si può analizzare qualsiasi fenomeno fisico, anche eventi casuali e non ripetitivi.



Ognuno dei segnali che passa sull'oscilloscopio corrisponde a un raggio cosmico che passa in un canale che può essere il canale 0 o il canale 1.

### *Procedimento:*

Posizionare i rivelatori di scintillazione uno sopra l'altro in modo tale da avere almeno una parte dei raggi cosmici che li attraversino entrambi e li poggio su una superficie orizzontale.

Si fa passare il segnale all'interno dei due discriminatori che hanno una soglia in ampiezza decisa a piacimento. Ogni volta che il segnale passa arriva a quella determinata soglia si produce un segnale con un gradino che vale 0,8 (secondo lo standard *Nuclear Strumentation*) o 0.

Svolti i calcoli per i materiali che si usano, ci si aspetta, in questo caso, che i raggi cosmici siano 25. Può accadere, però, che siano in numero tanto minore e questo è dovuto dall'inefficacia dei rivelatori.

Inoltre, in questo caso si stanno utilizzando due rivelatori che per quanto vicini non compongono una superficie completamente piana e di conseguenza i due rivelatori non riescono a cogliere tutti i raggi cosmici che provengono dalle diverse angolazioni. Per questo motivo ci si aspetta che i raggi cosmici che l'oscillatore registrerà in un minuto saranno poco meno di 25.

Quindi, dopo aver montato il circuito, si fa partire il cronometro e si conta quante ampiezze vengono registrate dall'oscillatore in un minuto.

Spostare i due rivelatori uno di fianco all'altro, in questo modo passeranno ancora molti meno raggi in quanto, così facendo, si selezionano solo i raggi orizzontali

### *Elaborazione dei dati:*

I due rivelatori hanno una superficie di  $5 \text{ cm}^2$  l'uno; questo significa che, una volta sovrapposti, si avrà una superficie totale di  $5 \times 5 = 25 \text{ cm}^2$ . Sapendo che per ogni  $\text{cm}^2$  passa circa un raggio cosmico al minuto, si può sapere che per  $25 \text{ cm}^2$  passeranno circa 25 raggi cosmici al minuto.

### *Conclusione:*

Con quest'esperienza si è mostrato come sia possibile misurare i raggi cosmici e trasformare i segnali analogici in segnali digitali.