

Rivelazione e studio di raggi cosmici

- Cosa sono i raggi cosmici?
- Come si studiano?
- Come funzionano i rivelatori?
- Misura della velocità dei raggi cosmici
- Brevi cenni sul trattamento statistico dei dati (teoria degli errori)

Preambolo



La materia e' composta da diversi elementi

Tavola periodica degli elementi

Gli elementi possono essere descritti in termini di molecole e atomi

Lantanidi

Attinidi

... i fisici moderni hanno pero' scoperto che le unita' Fondamentali non sono gli atomi

SAPORE	MASSA [GeV/c ²]	CARICA ELETTRICA
u up	.005	+2/3 e
d down	.01	- 1/3 e
c charm	1.5	+2/3 e
s strange	0.2	- 1/3 e
t top	180	+2/3 e
b bottom	4.7	- 1/3 e

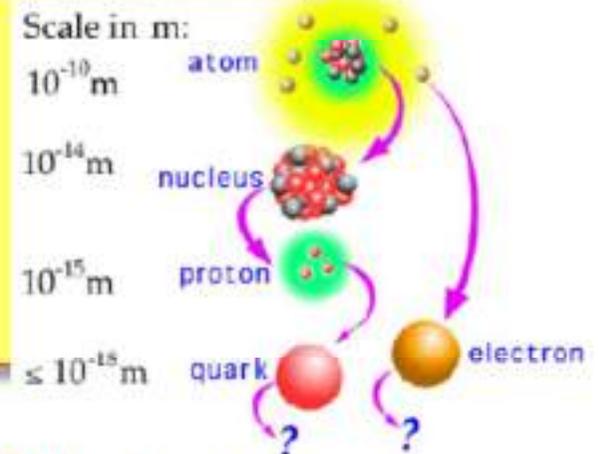
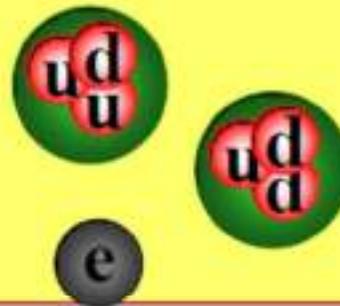


Preambolo

Gli atomi sono composti da un nucleo centrale (composto da protoni e neutroni) e da elettroni che gravitano attorno.

La materia conosciuta e' fatta di

protoni
neutroni
ed elettroni



protoni e neutroni sono
"sacche" di quarks.

Preambolo

Ma esistono anche altre forme di materia...

Modello standard

		Leptoni		Quark	
<p>Tutta la materia ordinaria appartiene a questo gruppo</p>	1 ^a Famiglia	<p>Neutrino elettronico</p>  <p><small>Interagisce debolmente con il resto della materia ed elettrone. È prodotto in abbondanza e dalla reazione nelle esplosioni nucleari al interno del Sole.</small></p>	<p>Elettrone</p>  <p><small>È responsabile dell'elettricità.</small></p>	<p>Up</p>  <p><small>1 quark Up 2 quark Up</small></p>	<p>Down</p>  <p><small>1 quark Down 2 quark Down</small></p>
	2 ^a Famiglia	<p>Neutrino muonico</p> 	<p>Muone</p> 	<p>Charm</p> 	<p>Strange</p> 
	3 ^a Famiglia	<p>Neutrino del Tau</p> 	<p>Tau</p> 	<p>Top</p> 	<p>Bottom</p> 
<p>Antimateria Per ogni particella esiste una particella corrispondente, una sorta di immagine negativa</p>					



Mesoni: pioni, Kaoni ..



Barioni: protoni, neutroni, Hyperoni..

La scoperta dei raggi cosmici



All'inizio del 20^{esimo} secolo gli scienziati erano alle prese con la comprensione di un fenomeno strano: sembrava che ci fosse più radiazione nell'ambiente che in qualunque sorgente naturale nota...

Dopo molti studi, lo scienziato tedesco Victor Hess nel 1912 portò un contatore di radioattività (un elettroscopio a foglia d'oro) su un pallone aerostatico.

A rischio della vita, viaggiando senza ossigeno a quote di più di 4000m, dimostrò che la radiazione misurata cresceva con la quota. Questo dimostrò che la sorgente della radiazione era "Cosmica".

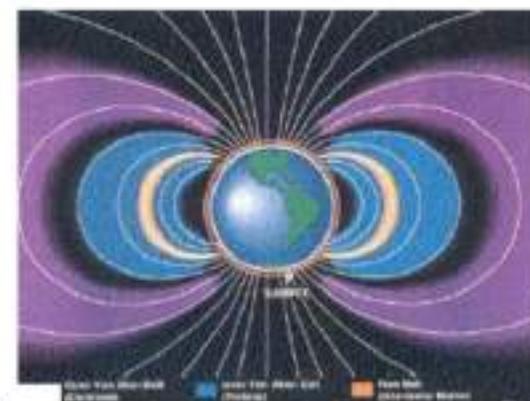


Cosa sono i raggi cosmici

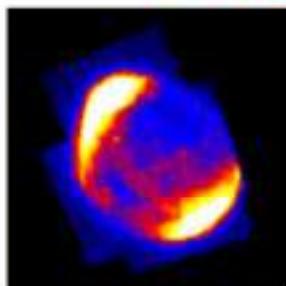
Dal 1912 abbiamo imparato molte cose sui raggi cosmici:

- sono **particelle sub-atomiche**
- possono avere energie (in genere misurate in elettronvolt [eV]) da qualche centinaia di MeV (corrispondente alla velocità di un protone al 43% della velocità della luce) a 10 GeV (corrispondente a 99.6% la velocità della luce).

I raggi cosmici sono **particelle di alta energia** di origine extra-terrestre che viaggiano ad una **velocità prossima a quella della luce** e colpiscono la terra da tutte le direzioni. Molti raggi cosmici sono nuclei atomici, ma ci sono anche elettroni, positroni ed altre particelle sub-atomiche.



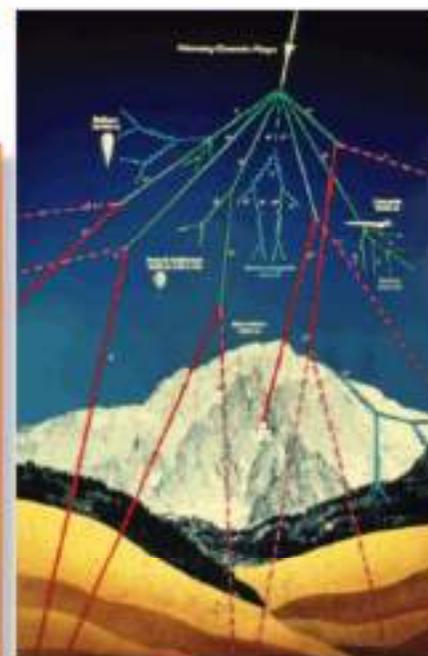
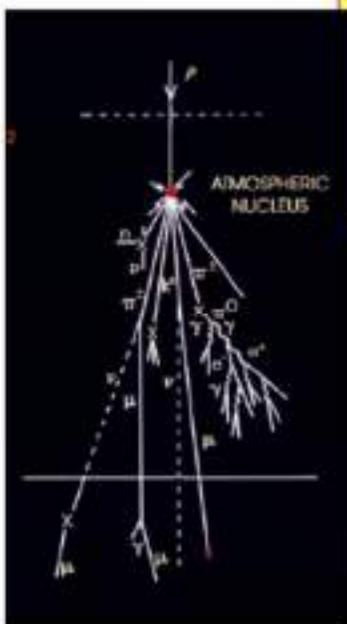
Cosa sono i raggi cosmici



I raggi cosmici sono prodotti da diverse sorgenti :

stelle (come il sole)
buchi neri,
stelle di neutroni,
quasar.

A livello del mare la gran parte dei raggi cosmici sono muoni prodotti dall'interazione di protoni con atomi dell'atmosfera. La loro frequenza media e' pari a $100 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$



Nella radiazione cosmica primaria sono presenti praticamente tutti gli elementi della tavola periodica: 89% nuclei di idrogeno (protoni), 10% elio, 1% elementi pesanti. Gli elettroni sono circa l'1% dei raggi cosmici galattici.

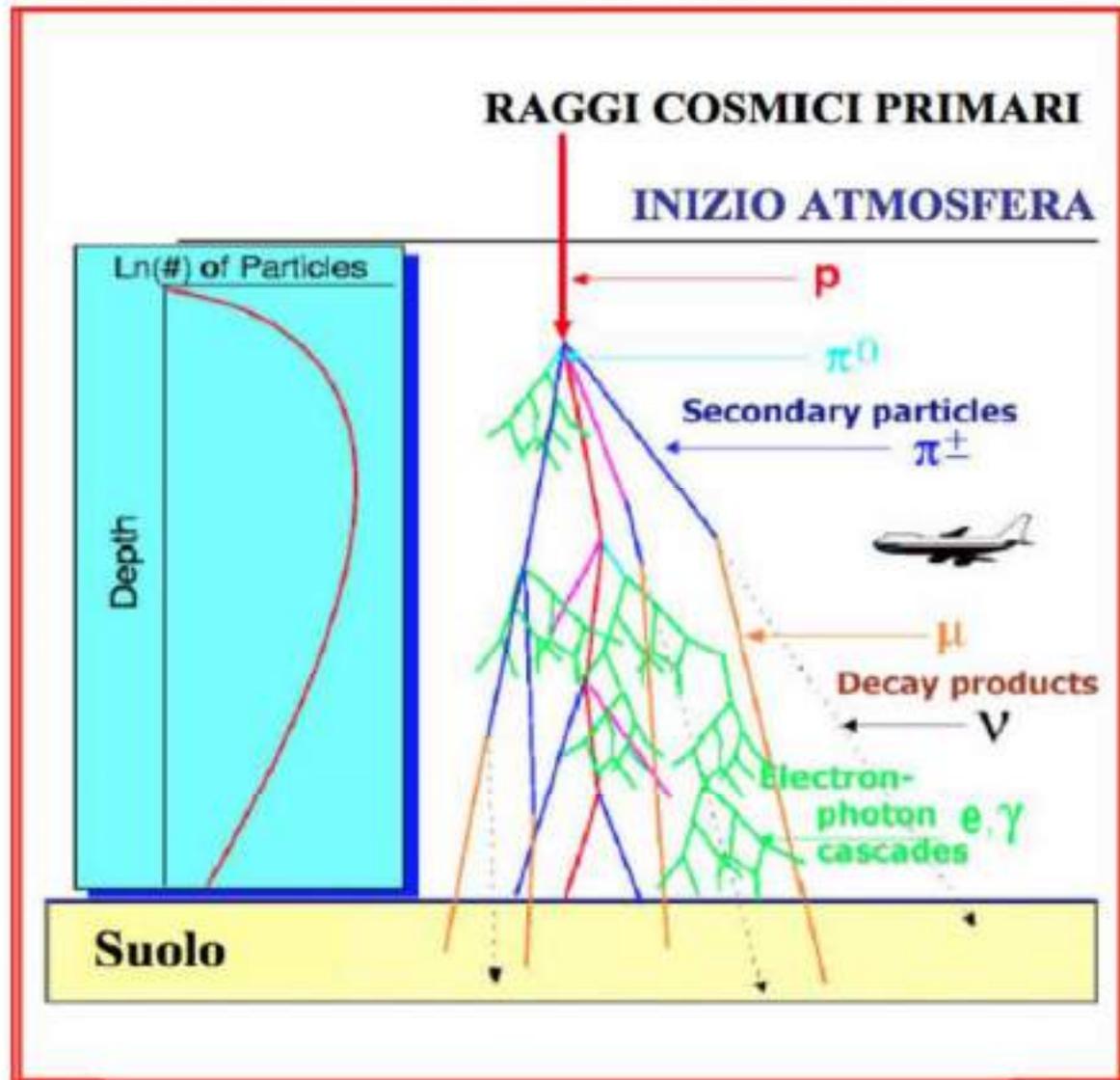
COSA SONO I RAGGI COSMICI

L'interazione anelastica dei RC primari con i nuclei atmosferici produce una serie di reazioni nucleari a catena che viene detta sciame atmosferico. I prodotti di una prima interazione di un raggio cosmico con un nucleo atmosferico, sono sostanzialmente nucleoni, nuclei più leggeri di quello interagente e adroni leggeri, ovvero pioni (π^\pm ; π^0) e in piccola parte kaoni (K^\pm ; K^0). I nuclei secondari e nucleoni di energia sufficiente continuano ad interagire con l'atmosfera creando nuovi sciame.

I pioni e kaoni invece decadono prima di raggiungere il suolo data la vita media breve ($\sim 10^{-8}$ s). I prodotti del decadimento di questi adroni sono sostanzialmente muoni, elettroni, gamma e neutrini.



Cosa sono i raggi cosmici



Raggi cosmici... sorgente di particelle

Hess scopre i raggi cosmici (Nobel nel 1936) [1912](#)

I raggi cosmici sono carichi risentono del campo magnetico terrestre [1930](#)

Anderson scopre l'antimateria e^+ nei raggi cosmici [1932](#)

Auger scopre gli "extensive air showers" [1938](#)

Teoria di Fermi sui raggi cosmici [1949](#)

Primi esperimenti sotterranei [1966](#)

Evento di alta energia AGASA [1994](#)

[1927](#) Raggi cosmici osservati in camere a nebbia

[1937](#) Scoperta del muone

[1946](#) Primo esperimento che studia sciami aerei

[1962](#) Rivelazione del primo raggio cosmico 10^{20} eV

[1982](#) Costruzione laboratorio del Gran Sasso

[1995](#) Inizio progetto Pierre Auger



Calcolo della velocità dei raggi cosmici

La grande maggioranza dei raggi cosmici sono muoni relativistici;

$$E^2 = (pc)^2 + m^2c^4$$

Legenda: **E** = energia (MeV)
p = impulso (MeV/c)
m = massa (MeV)

secondo le trasformazioni di Lorentz

$$\beta = v/c \quad [c = 299792458 \text{ m/s} = 299.792458 \cdot 10^6 \text{ m/s}]$$

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - \beta^2}$$

sapendo che l'impulso dei muoni p_μ e la massa m_μ :

$$p_\mu = 2 \text{ GeV}/c = 2000 \text{ MeV}/c \quad [1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV, Megaelettronvolt}]$$

$$m_\mu = 105.698389 \pm 0.000034 \text{ MeV}$$

possiamo ottenere l'energia dei muoni e da qui, il valore di β :

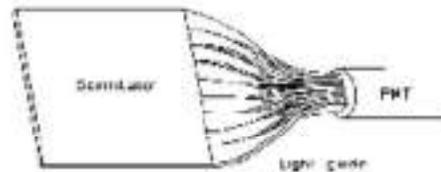
$$E^2 = (4000000 + 11163.69517) \text{ MeV}^2 = 4011163.695 \text{ MeV}^2$$

$$E = 2002.788979 \text{ MeV}$$

$$\beta = (2000 \text{ MeV}/c) \cdot c / (2002.788979 \text{ MeV}) = 0.998607452$$

Questo valore è molto prossimo a 1, cioè viaggiano quasi alla velocità della luce

Rivelatori di raggi cosmici



Gli **scintillatori** sono materiali capaci di rivelare il passaggio di una particella carica che lo attraversa.

Il fenomeno alla base è la **scintillazione** che si origina per effetto del rilascio di energia da parte delle particelle che lo attraversano.

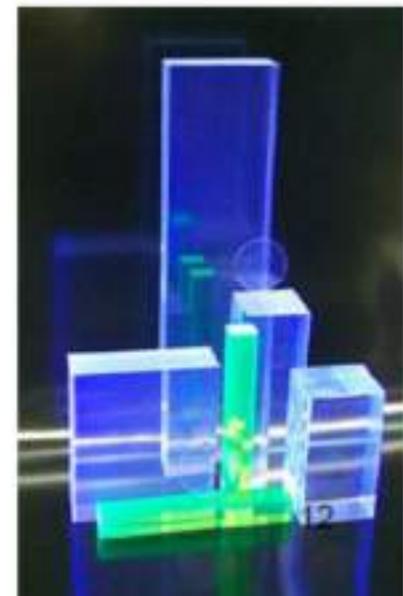
Lo scintillatore è avvolto con **nastro adesivo nero** per renderlo "cieco" alla luce esterna più intensa del debole segnale prodotto dal passaggio delle particelle.

La **luce di scintillazione** è convogliata, da guide di luce in plexiglass, verso appositi strumenti che la convertono in impulsi elettrici....



Scintillatore

Guida di luce



Fotomoltiplicatori

La luce di scintillazione viene amplificata e raccolta da **Fotomoltiplicatori**, strumenti che convertono un segnale luminoso in un segnale elettrico utilizzando **l'effetto fotoelettrico**.

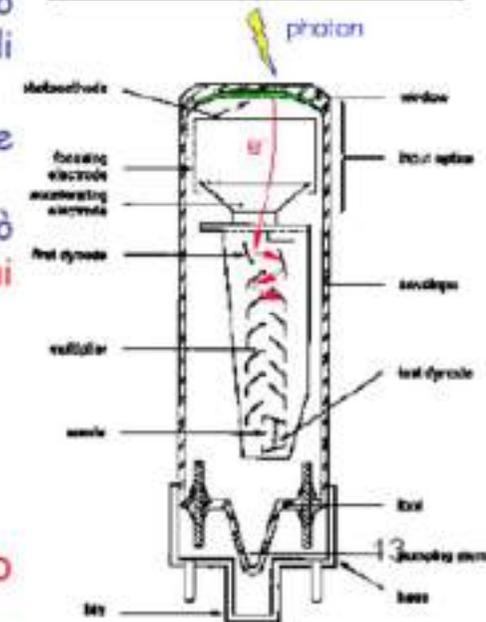
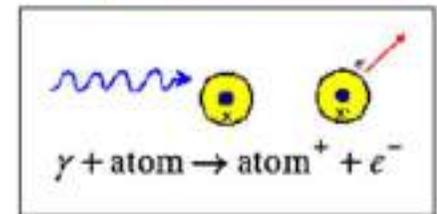
La **luce di scintillazione** è in genere costituita da **qualche centinaia di fotoni**, il fotomoltiplicatore la amplifica di un fattore $10^6 \div 10^7$

Il fotomoltiplicatore è costituito da: un **fotocatodo**, dove la luce viene convertito in una corrente elettrica, e da una **sequenza di dinodi** ($10 \div 15$). I dinodi hanno il compito di **moltiplicare la corrente prodotta sul fotocatodo**. I dinodi sono placchette metalliche poste a valori di campo elettrico via via crescenti.

Nel cammino fra un dinodo e il successivo, per effetto del campo elettrico, gli elettroni acquistano energia che permette loro di "estrarre" altri elettroni amplificando l'impulso di corrente.

Il tempo di transito dell'intero fotomoltiplicatore è di qualche decina di nanosecondi (10^{-9} s).

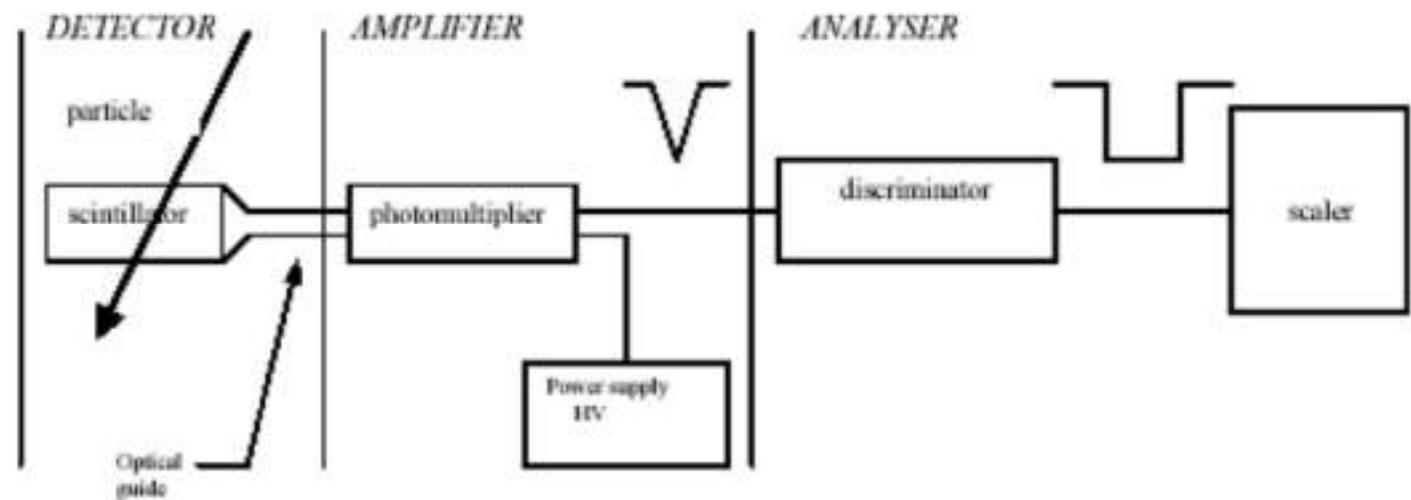
Grazie a questo, con **scintillatori e fotomoltiplicatori**, si può misurare sia **l'energia depositata** dalla particella, sia **l'istante in cui si è verificato l'attraversamento**.



Rivelatori di raggi cosmici

I rivelatori di particelle sono costituiti da 3 elementi:

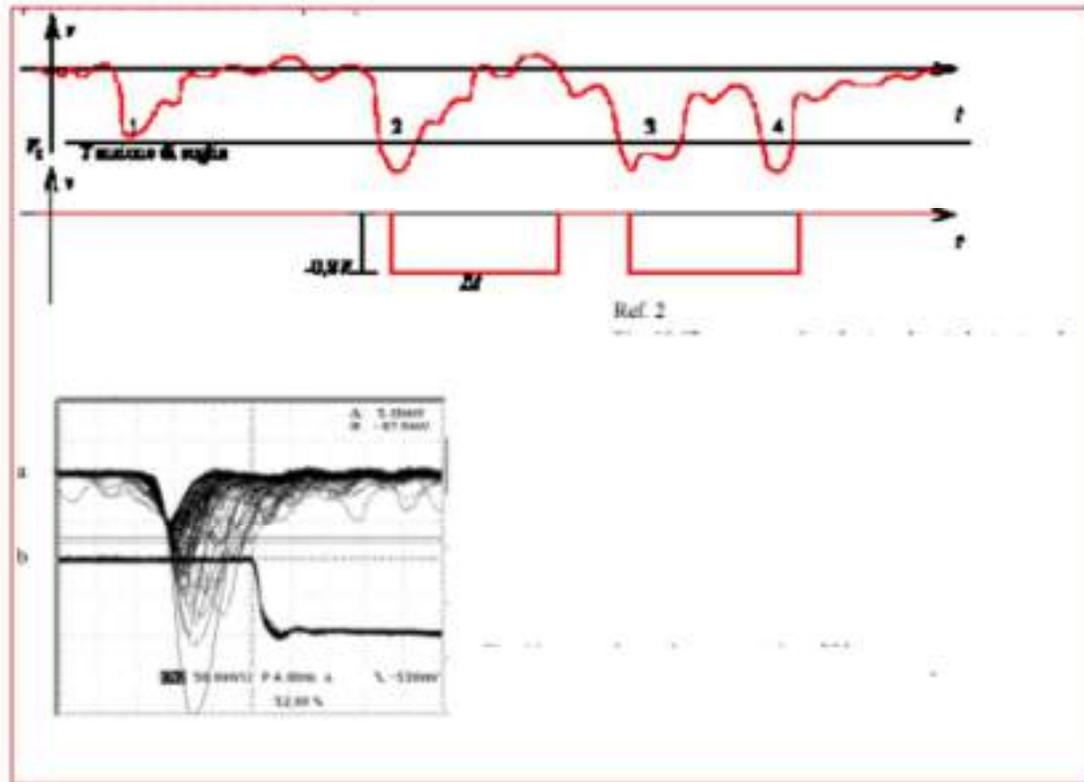
- rivelatore, che produce il segnale da misurare al passaggio delle particelle;
- amplificatore, che rende misurabile l'intensità del segnale prodotto nel rivelatore;
- analizzatore, che discrimina e conta i segnali prodotti.



Discriminatori

Il **discriminatore** è uno strumento capace di **selezionare un impulso** "interessante" eliminando i segnali "di fondo". Questo è fatto per mezzo di una **soglia** che discrimina l'ampiezza del segnale di ingresso. Non appena il segnale di ingresso supera il livello della soglia impostata, un segnale "standard" è prodotto in uscita.

Il discriminatore elimina i **segnali dovuti al rumore** e produce un impulso in grado di essere processato da altri moduli di elettronica (TDC, etc...)



Time to Digital Converter (TDC)

Un TDC (Time to Digital Converter) è un circuito elettronico in grado di misurare il tempo intercorso fra due segnali e di convertirlo in un numero digitale.

L'idea alla base di un TDC è :

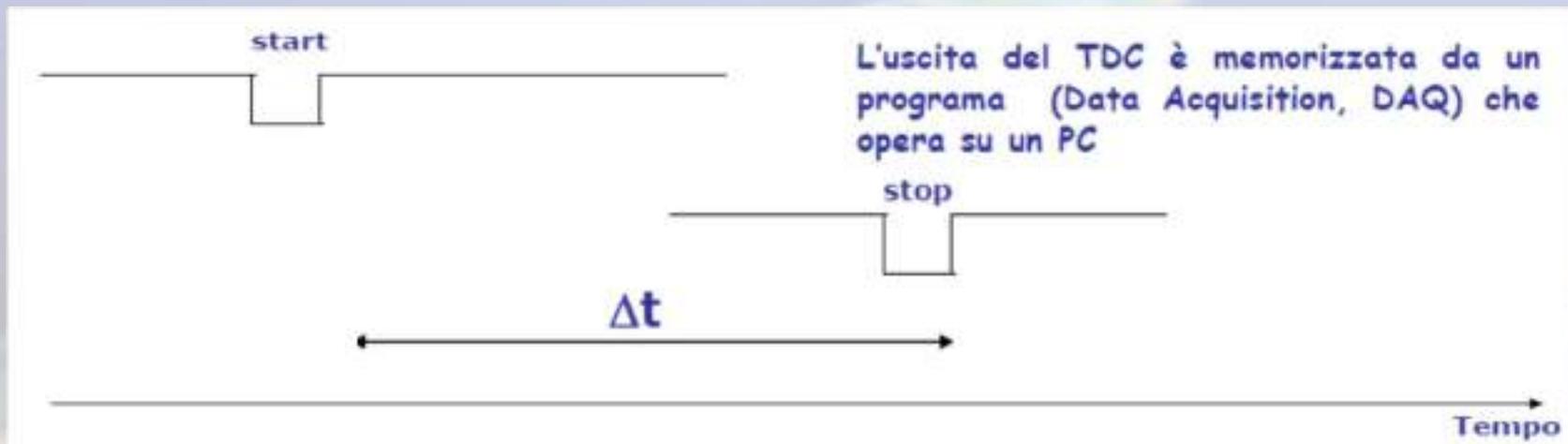
Un primo segnale START entrando nel TDC fa partire un "orologio" che viene poi fermato dall'arrivo del secondo segnale STOP. L'uscita del TDC è un numero intero corrispondente al numero di unità di tempo (tipicamente nanosecondi) intercorsi fra start and stop

Time to Digital Converter (TDC)

Un TDC (Time to Digital Converter) è un circuito elettronico in grado di misurare il tempo intercorso fra due segnali e di convertirlo in un numero digitale.

L'idea alla base di un TDC è :

Un primo segnale *START* entrando nel TDC fa partire un "orologio" che viene poi fermato dall'arrivo del secondo segnale *STOP*. L'uscita del TDC è un numero intero corrispondente al numero di unità di tempo (tipicamente nanosecondi) intercorsi fra start and stop



Risoluzione del TDC

Il modulo TDC da noi utilizzato (mod. LeCroy 2228) converte in un numero binario di 11bits l'intervallo di tempo misurato.

Il fondoscala del TDC è regolabile e per la nostra misura è stato scelto il valore di $1\mu s$.

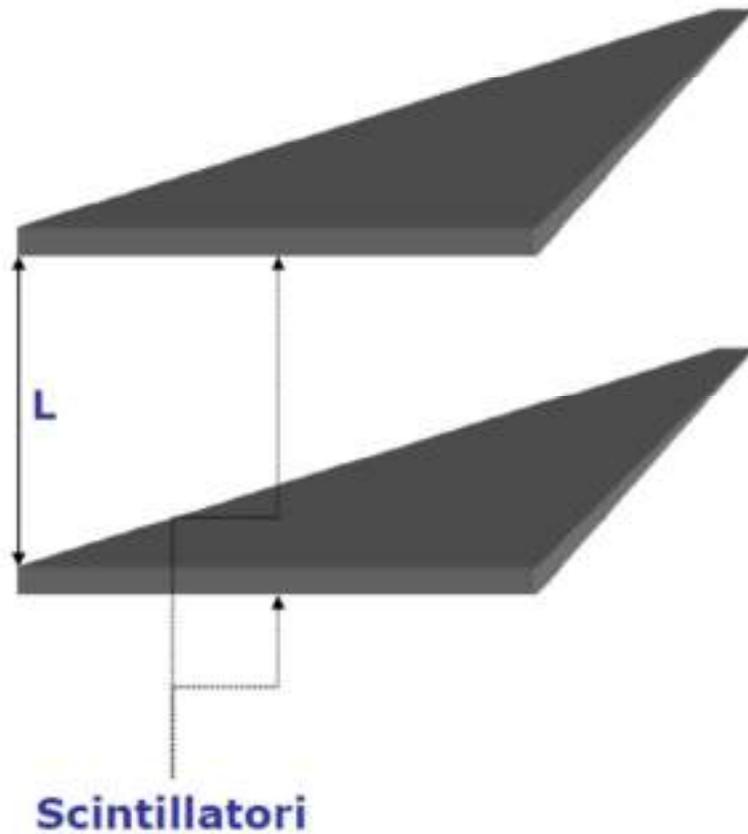
$$r = \frac{\text{fondoscala}}{n_{ch}}$$

Il numero di canali del modulo è fisso e dipende dal numero di bit a disposizione per la conversione, nel nostro caso 11 bits = 1024 canali.

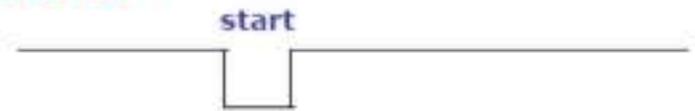
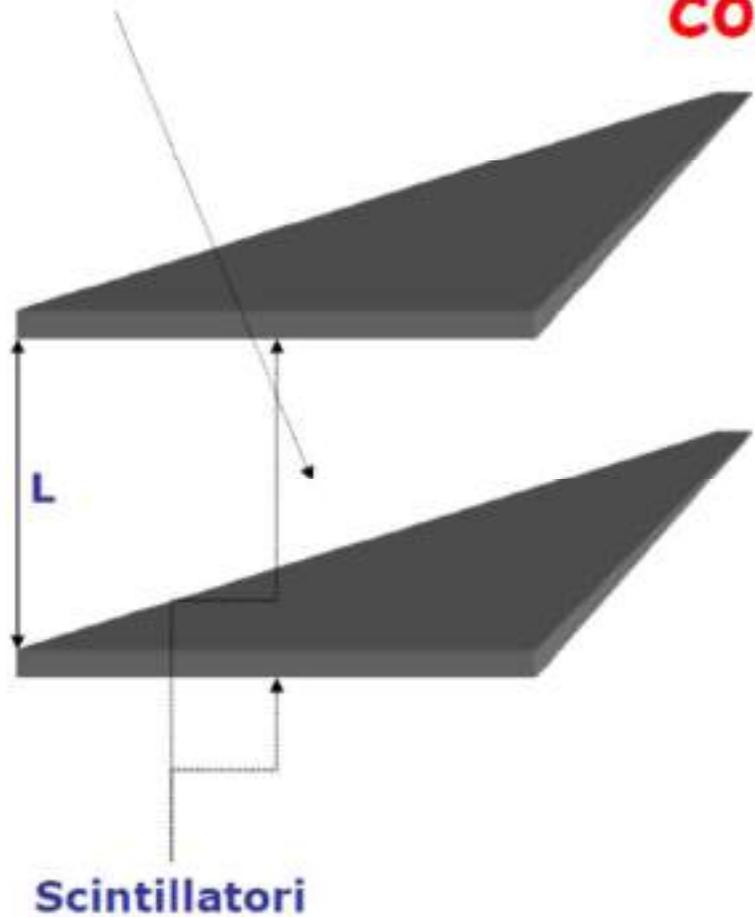
A seconda del fondoscala impostato avremo quindi una diversa risoluzione dello strumento:

$$r = \frac{1000ns}{1024ch} = 0.98ns / ch$$

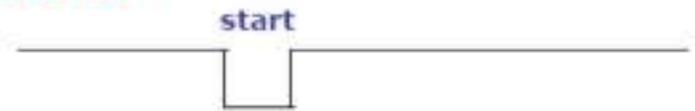
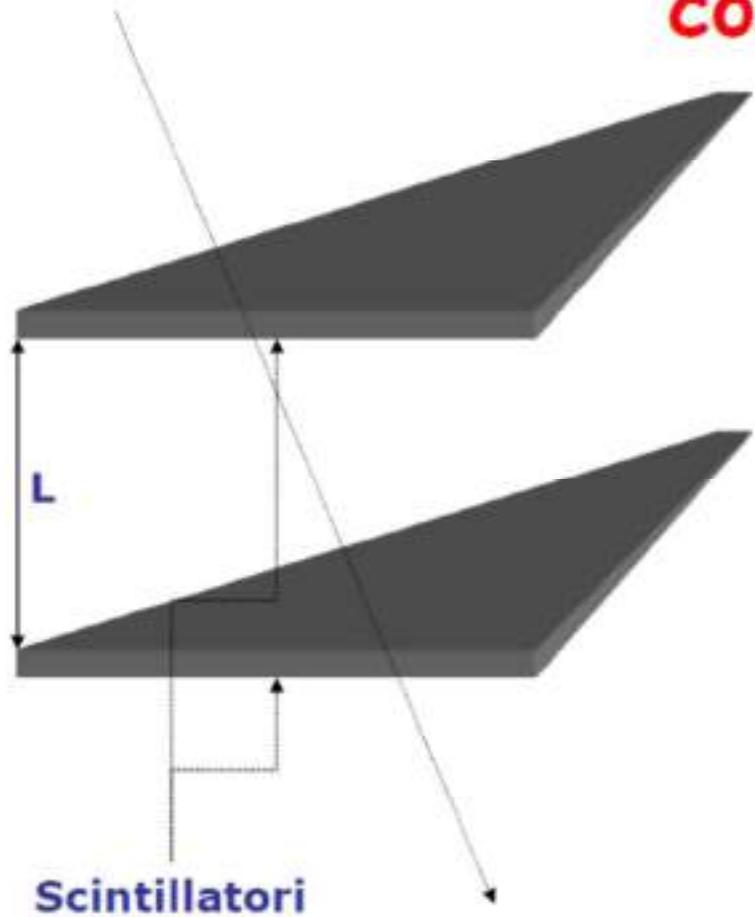
Misura della velocità dei raggi cosmici



Misura della velocità dei raggi cosmici

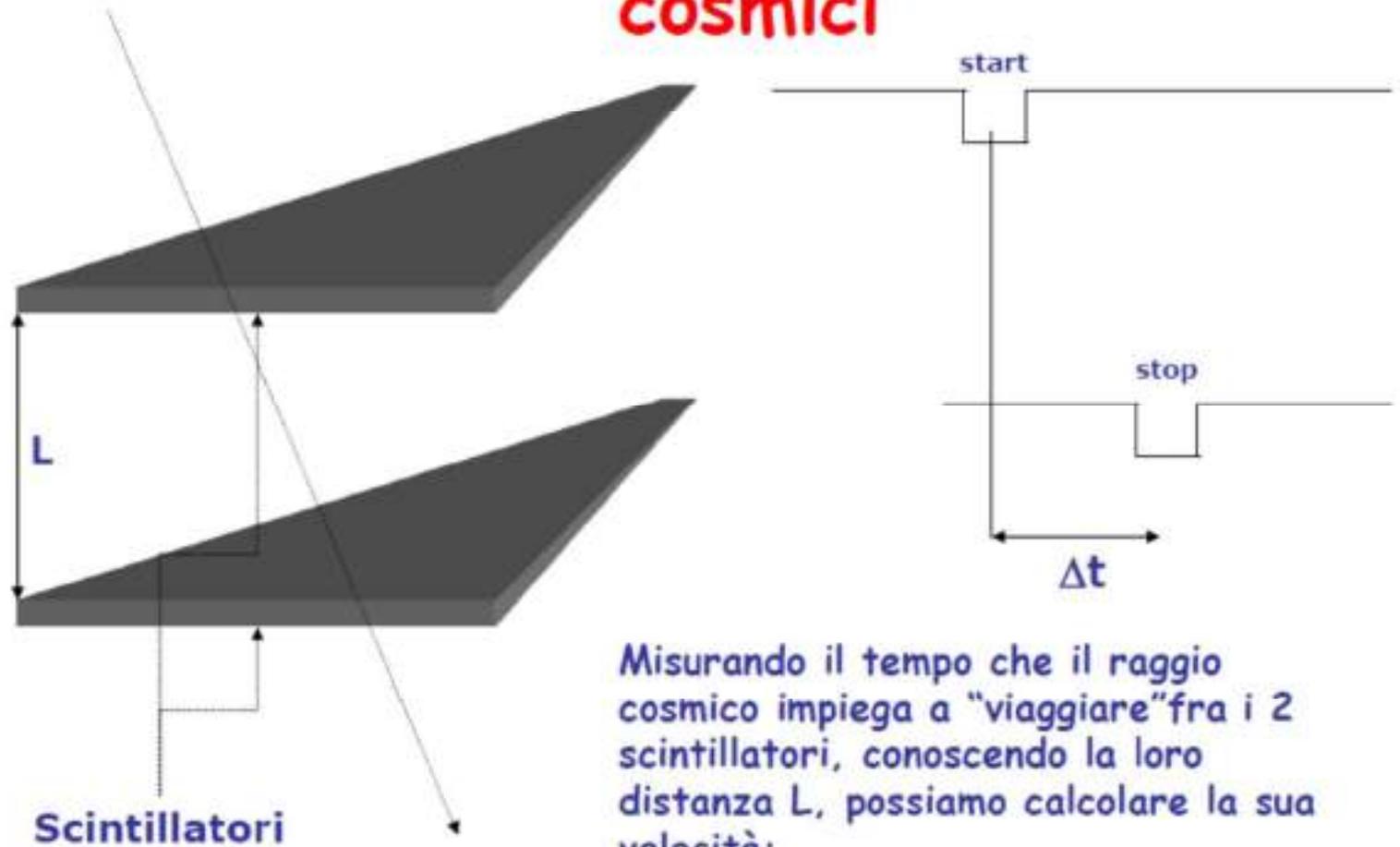


Misura della velocità dei raggi cosmici





Misura della velocità dei raggi cosmici



$$v = L/\Delta t$$

L'esperimento

L'esperimento è così organizzato:

- **2 rivelatori a scintillazione**, composti da uno scintillatore ($30 \times 30 \times 0.5 \text{ cm}^3$) NE110, una guida di luce (22cm), un fotomoltiplicatore Philips 56AVP equipaggiato di partitore di tensione.
- **1 Crate NIM**, equipaggiato con un discriminatore (mod.CAEN 417), una coincidenza (mod.CAEN 455), un contatore scaler Quad (mod.CAEN 145), 4 canali di alta tensione programmabili (mod.CAEN 470) un ritardo (mod.CAEN 108).
- **1 crate CAMAC**, equipaggiato con: Status A (mod.CAEN 236), TDC (mod.LeCroy 2228) e un interfaccia SCSI per la connessione al PC.
- **PC software**: Microsoft Word, per l' "editing"; LabVIEW 6.1, per acquisizione dati; Origin, per l'elaborazione dei dati raccolti; Internet explorer.

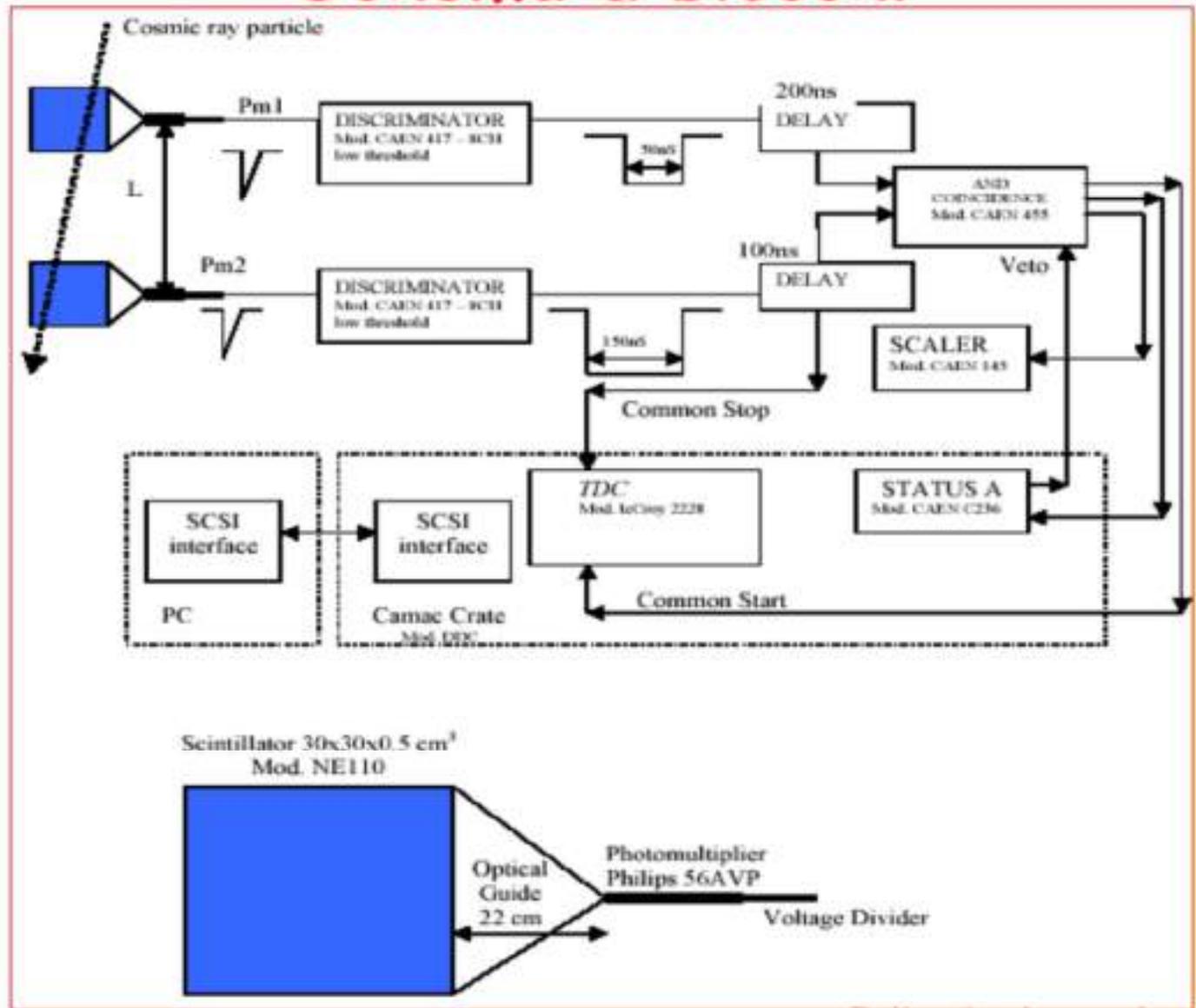
I rivelatori sono allineati in verticale e posti a distanza L , regolabile. Quando un raggio cosmico attraversa lo scintillatore produce un impulso luminoso convertito in un segnale elettrico dal fotomoltiplicatore. Il segnale del fotomoltiplicatore, opportunamente discriminato, viene ritardato di 200 ns per il rivelatore in alto (PM1) e di 100 ns per quello in basso (PM2). I due segnali sono inviati all'unità di coincidenza che effettua un'operazione logica di AND. Questa operazione è necessaria per selezionare solo cosmici veri che attraversano entrambi i rivelatori.

L'unità logica ha 3 uscite: la prima è inviata ad un contatore scaler, la seconda viene inviata al modulo Status A, la terza arriva all'ingresso "common start" del TDC.

Il segnale PM2 va anche all'input "common stop" del TDC.

Il TDC e lo Status A, alloggiati nel crate CAMAC, vengono "letti" dal PC attraverso l'interfaccia SCSI.

Schema a blocchi



Brevi cenni di teoria degli errori

Ogni misura sperimentale di una variabile è affetta da errore che determina la "quantità di informazione" che possiamo ottenere.

Due tipi di errore affliggono la nostra misura

Errore statistico

Errore sistematico o strumentale

L'errore statistico di una misura si valuta attraverso la deviazione standard σ dalla media di un set di N misure:

$$X = (X_{\text{medio}} \pm \sigma)$$

$$X_{\text{medio}} = (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + \dots + X_N) / N = \left(\sum_{i=1}^N X_i \right) / N \quad (\text{media aritmetica})$$

$$\sigma^2 = [(X_1 - X_{\text{medio}})^2 + (X_2 - X_{\text{medio}})^2 + (X_3 - X_{\text{medio}})^2 + \dots + (X_N - X_{\text{medio}})^2] / (N-1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{\text{medio}})^2}{N - 1}}$$

la deviazione standard è la media degli scarti

Gli errori statistici variano in modo imprevedibile da una misura all'altra e influenzano il risultato qualche volta per eccesso qualche volta per difetto 29



L'errore sistematico è quello dovuto all'impiego di strumenti poco precisi, mal tarati, o inadatti alla misura in questione. Di questo tipo di errori fanno parte anche quelli dovuti all'imperizia o alla negligenza dello sperimentatore o quelli che derivano dall'aver trascurato l'influenza, sul risultato, di fattori esterni come ad esempio la pressione nel caso della misurazione della temperatura dell'acqua.

Gli errori sistematici influenzano il risultato sempre per eccesso o sempre per difetto

Se conoscessimo la causa dell'errore sistematico potremmo correggere le misure
Se non la conosciamo dobbiamo considerare tale errore come un'incertezza sul Risultato che non possiamo prevedere essere per eccesso o per difetto

Es:

Metro mal tarato

tempo di reazione nel far partire un cronometro

Esempio pratico

Con un righello, che ha la precisione di 1mm, misuriamo la lunghezza di un tavolo:

$$X_1 = 56.5 \text{ cm}$$

$$X_2 = 56.6 \text{ cm}$$

$$X_3 = 56.3 \text{ cm}$$

$$X_4 = 56.4 \text{ cm}$$

$$X_{\text{medio}} = 56.45 \text{ cm}$$

$$\sigma = 0.13 \text{ cm}$$

La lunghezza del tavolo è $56.5 \pm 0.13(\text{stat}) \pm 0.1(\text{sist}) \text{ cm}$

Perchè ho scritto 56.5? ...

Cifre significative

Le cifre ottenute da una misurazione si chiamano cifre significative, perché sono quelle che hanno significato in quanto effettivamente registrate dallo strumento utilizzato per compiere la misura. Il numero di tali cifre è dato da quelle note con sicurezza più una incerta.

Il numero delle cifre significative dipende dalla scala dello strumento di misura utilizzato, cioè dal limite di sensibilità dell'apparecchio.

Questo limite corrisponde alla minima quantità che l'apparecchio riesce ad apprezzare.

Ad esempio non si possono pretendere misure di lunghezza con cinque o sei cifre significative usando un metro da sarto (uno strumento di misura, che ha precisione di 1mm) perché molte di quelle cifre non avrebbero alcun significato.

Esempio pratico

Vogliamo calcolare la superficie del foglio di carta A4

$$A4 = 21,08 \text{ cm} \times 29,67 \text{ cm} = 625,4436 \text{ cm}^2$$

Le sette cifre che rappresentano il risultato non possono essere considerate tutte degne di significato poichè sono solo quattro le cifre significative delle dimensioni lineari del foglio, altrettante dovranno essere quelle della sua superficie

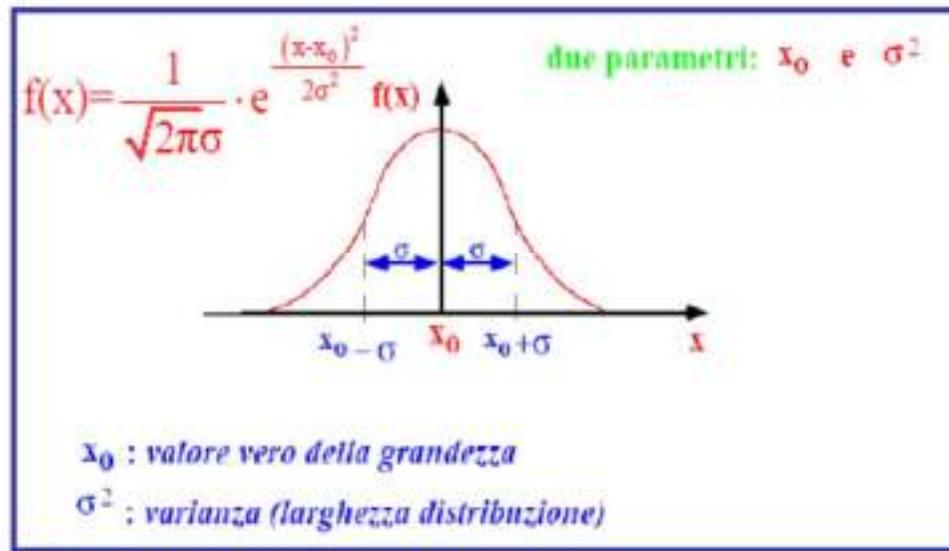
Il risultato valido è: $625,4 \text{ cm}^2$.

Quando si esegue un'operazione tra varie quantità il numero di cifre significative deve riflettere l'incertezza sulla quantità conosciuta con minor precisione

Ecco perchè nell'esempio precedente ho scritto come risultato 56.5

Distribuzione di Gauss

Misure ripetute di una stessa grandezza fisica tendono ad avere una "distribuzione" a forma di *campana* rappresentabile con la funzione di Gauss



- ~ 68% misure entro $|x_0 - \sigma|$
- ~ 95% misure entro $|x_0 - 2\sigma|$
- ~ 99.7% misure entro $|x_0 - 3\sigma|$