LABORATORIO 1

A.A. 2015-2016

ANDREA BRESSAN

Informazioni sul corso 1

Primo corso di laboratorio

- Metodologia
- Uso di strumenti e tecniche di misura
- Analisi statistiche
- Applicazioni a misure di grandezze meccaniche e termodinamiche

- Misure di lunghezza, massa, densità, intervalli di tempo
- Caratteristiche del moto del pendolo semplice e misura dell'accelerazione di gravità
- Studio delle caratteristiche elastiche dei materiali
- Misure di calori specifici a diverse temperature e calori latenti
- Misure di pressione

...

Informazioni sul corso 2

Il corso consiste in

- una parte di teoria
  - considerazioni di base sulla misura di grandezze fisiche e analisi dei dati sperimentali
  - approfondimenti sugli argomenti relativi alle esperienze, in particolare sugli aspetti 'non ideali' rispetto alla trattazione teorica

si da per scontato quanto trattato nei corsi di Fisica generale

- una parte sperimentale
  - strumentazione e metodi
  - esperienze di laboratorio (~ 8 esperienze di un pomeriggio)

Informazioni sul corso 3

Lab. centrale Ed. B (Ingegneria)

Informazioni sul corso 4

Il corso è centrato sulle esperienze di laboratorio, alla cui descrizione ed esecuzione con relativa analisi dei dati è dedicata la maggior parte del tempo

Le esperienze non sono dimostrazioni ma devono essere svolte nel modo più autonomo possibile

Per favorire la partecipazione attiva alle esperienze

- ci saranno 4 turni, con 40-45 persone per turno divisi in 10 gruppi
- in generale il lavoro viene fatto in gruppi di 4 studenti

La frequenza in laboratorio è obbligatoria e viene verificata (*)

Seguire le lezioni è essenziale per il corretto svolgimento delle esperienze

- cosa fare viene spiegato in aula, e la descrizione dell'esperienza non verrà ripetuta all'inizio di ciascun turno né durante i turni

(*) in caso di problemi specifici, cercheremo assieme caso per caso le possibili soluzioni

Orario del corso

turni: un pomeriggio alla settimana / persona

in aula; in genere tempo dedicato a:

A. preparazione per l'esperienza di laboratorio della settimana
B. discussione (con vostre presentazioni) sulle difficoltà incontrate e sui risultati ottenuti nell'esperienza precedente

Giorno	Lezione	Lezione	Laboratorio
Lunedì	11:00-13:00	14:00-16:00	
Martedì	11:00-13:00		14:00-18:00
Mercoledì			14:00-18:00
Giovedì			14:00-18:00
Venerdì			14:00-18:00

Attività di laboratorio

160 persone → 4 turni (in parallelo con il corso di Calcolo)

- martedì pomeriggio,
- o mercoledì pomeriggio,
- o giovedì pomeriggio
- o venerdì pomeriggio

A. definite i turni in modo da avere lo stesso numero di persone ciascun pomeriggio
B. scegliete un pomeriggio, ricordando che per tutto il corso il vostro turno sarà sempre lo stesso (per evitare sovraffollamento in laboratorio e interferenze con altri corsi)
C. all'interno di ogni turno, vi dividerete in gruppi di 4 persone (non necessariamente sempre le stesse per ogni esperienza)
D. elenco con i nomi per ciascun turno: lunedì prossimo

Orario del corso

Un pomeriggio di laboratorio alla settimana:

Il tempo è sufficiente per eseguire una esperienza, elaborarne i dati per ottenere il risultato della misura

- alla fine di ogni esperienza, ogni gruppo deve avere ottenuto:
  - tabelle riassuntive con i dati
  - risultati ottenuti dall'analisi on-line
- per 4 delle 8 esperienze deve essere presentata una relazione individuale completa, da consegnare entro un paio di settimane dall'esecuzione dell'esperienza (eventuali correzioni prima dell'esame)

Esame

A circa metà corso è prevista una provetta su argomenti di base

- Incertezze in misure dirette e indirette, cifre significative,
- Calcolo della deviazione standard e di probabilità a partire da funzioni di distribuzione, stima di parametri con metodi grafici,
- Compatibilità delle misure,
- Grafici
- Se valutazione insufficiente, maggiori approfondimenti all'esame

L'esame (solo orale) consiste in domande sulla parte "teorica" e di trattazione dei dati, sulle esperienze svolte, e nella discussione delle relazioni

Per il voto si terrà conto anche del lavoro fatto durante il corso e della qualità delle relazioni

Testi

Testi di consultazione consigliati
(solo per le parti effettivamente svolte durante il corso)

- M. Dapor, M. Ropele, Elaborazione dei dati sperimentali, Springer
- A. Filipponi, Introduzione alla Fisica, Zanichelli
- M. Severi, Introduzione alla sperimentazione fisica, Zanichelli
- Materiale didattico distribuito durante il corso
- I vostri appunti

Testi di Fisica 1 per le parti di teoria relativa alle esperienze

Finalità

Un corso di laboratorio deve:

- insegnare agli studenti le metodologie necessarie per effettuare degli esperimenti di verifica di leggi fisiche ricavate in base a considerazioni teoriche di carattere generale,
- oppure permettere di trovare leggi empiriche che governino un dato fenomeno e trovare il valore sperimentale dei parametri che caratterizzano tale leggi.

Nel fare ciò lo studente (…qualsiasi sperimentatore) si imbatte in due difficoltà:

- incertezze di misura degli strumenti e/o gli incertezze (errori) stocastiche (casuali) inerenti al processo di misura
- presenza di effetti sistematici che alterano il processo di misura (allontanando il risultato da caso ideale) e dei quali occorre minimizzare l'impatto e/o sottrarre il contributo in fase di analisi dei dati.

Lo sperimentatore deve tenere conto di tutti gli errori, siano essi di misura, statistici e sistematici, e ridurre gli effetti secondari con un apparato sperimentale opportuno.

IL RISULTATO DI UNA MISURA È UN VALORE ED UN'INCERTEZZA SU TALE VALORE

Suggerimenti generali - I

Nella realizzazione di un esperimento è bene seguire alcune regole generali, sebbene ogni esperimento costituisca un caso a sé stante:

- Conoscere la trattazione teorica del fenomeno che si vuole misurare e dei fenomeni secondari presenti
- Ideare un procedimento di misura ed un apparato sperimentale che vi permetta di verificare il fenomeno in studio, riducendo nello stesso tempo gli altri effetti secondari.
- Valutare la precisione che si vuole/può raggiungere in base agli strumenti di misura a disposizione.
- Fatto ciò inizia la fase di presa dati. Qui interviene la “manualità” dello sperimentatore, fatta di pignoleria, accuratezza, meticolosità e comprensione. Tutti i dati presi vanno registrati, insieme con le condizioni sperimentali generali, nel vostro “diario di bordo” (logbook).

Suggerimenti generali - II

Nella realizzazione di un esperimento è bene seguire alcune regole generali, sebbene ogni esperimento costituisca un caso a sé stante:

- Durante la presa dati occorre fare un'analisi degli stessi, grossolana ma veloce, in tempo reale (online) che permetta di scoprire eventuali errori nella presa dati, oppure la necessità di prendere dati in condizioni diverse, ed effettuare quindi le nuove misure necessarie.
- Terminate le misure, si procede all'analisi dati finale (offline), dove andranno applicate le opportune tecniche di analisi statistica dei dati. In questa fase occorre anche valutare la presenza di errori sistematici, correggerli se possibile, oppure valutarne l'entità ed includere questa incertezza nell'errore finale.

Suggerimenti generali - III

- Occorre infine trarre delle conclusioni dall'esperimento effettuato:
  - La prima conclusione ovvia è il valore trovato, con il suo errore, della grandezza che si voleva misurare.
  - Si può quindi discutere se il nostro esperimento verifichi o meno l'ipotesi teorica di partenza e con quale significatività statistica.
  - Si possono eventualmente suggerire dei cambiamenti all'apparato sperimentale che permettano di migliorare la bontà della misura
  - Oppure si può concludere di aver fatto una nuova scoperta!.
- Ultima parte dell'esperimento (da non trascurare) è la scrittura del "lavoro". Questa consiste nella pubblicazione su una rivista scientifica da parte del ricercatore e nella scrittura della relazione da parte degli studenti. Quest'ultimo passo è in genere non amato, sia dagli studenti che dai ricercatori affermati, tuttavia senza quest'ultimo sforzo tutto il resto sarà stato inutile!

Suggerimenti generali - IV

La progettazione, realizzazione ed esecuzione di un esperimento è difficile da insegnare in quanto non ci sono regole ferree valide per tutte le situazioni

Deve essere stimolata una visione critica dell'attività che si sta svolgendo.

Occorre inoltre esercitare senso pratico, elasticità mentale, inventiva e fantasia.

Gli studenti in genere reagiscono "male" a queste sollecitazioni e preferiscono la strada sicura della regola matematica.

La valenza positiva (che fa sì che in generale un fisico si adatti facilmente a qualsiasi contesto lavorativo e/o di ricerca) risiede proprio nell'abitudine a lavorare senza "regole" preconcette.

Informazioni utili - I

Occorre innanzitutto fare una distinzione tra il quaderno di laboratorio (logbook) e la relazione di laboratorio. Il logbook va riempito durante lo svolgimento dell'esperimento. Nel logbook vanno riportati:

- Una descrizione dell'apparato sperimentale
- Gli strumenti utilizzati con le loro caratteristiche
- Una descrizione del procedimento di misura
- Una o più tabelle con i dati dell'esperimento
- Uno o più grafici che permettano un controllo immediato se i dati seguono l'andamento previsto o meno. Non è necessario a questo livello un'analisi statistica accurata.
- Una prima stima, anche con una valutazione grossolana degli errori, della grandezza che si vuole misurare.

Informazioni utili - II

- È importante imparare a registrare accuratamente tutti i dati sperimentali, così come sono stati misurati, in modo che chiunque altro possa comprenderli ed utilizzarli (ad esempio se vuole ripetere il vostro esperimento).
- I dati vanno registrati tenendo conto del corrispondente errore di misura. Come regola, non ferrea, si possono utilizzare due cifre significative per l'errore.
- Il logbook costituisce la base di partenza per la stesura della relazione di laboratorio, quindi tanto più esso sarà ordinato e completo, tanto più sarà facilitata l'analisi dei dati offline e la scrittura della relazione.

Relazioni - I

1. **Introduzione teorica:** descrivete brevemente cosa volete misurare e perché, oppure quale relazione teorica volete verificare. Non dovete scrivere nessuna dimostrazione, ma limitatevi a riportare la formula finale, illustrando eventualmente i parametri che la caratterizzano e/o i limiti di validità di applicazione.
2. **Procedimento di misura:** illustrate il procedimento di misura che si vuole adottare. In genere questo aiuta a capire la descrizione successiva della presa dati.
3. **Descrizione dell'apparato sperimentale:** descrivete brevemente l'apparato sperimentale utilizzato, le caratteristiche degli strumenti e qualunque altra informazione utile per riprodurre l'esperimento da voi effettuato.
4. **Descrizione della presa dati:** descrivete la procedura da voi seguita per la presa dati, discutete gli errori che attribuite alle varie grandezze, riportate le tabelle di dati delle vostre misure.

Relazioni - II

5. **Analisi dei dati:** descrivete il tipo di analisi dati che avete effettuato. Nella maggior parte dei casi avrete a che fare con delle relazioni lineari delle quali dovrete trovare il coefficiente angolare. Ha importanza che voi sappiate cosa state facendo. Riportate uno o più grafici che descrivono i vostri dati includendo nel grafico anche la retta risultante. Illustrate le successive elaborazioni che conducono al risultato finale.

6. **Conclusioni e Commenti:** riportate chiaramente il risultato finale da voi trovato. Aggiungete poi ogni tipo di commento volto alla comprensione del risultato, oppure a come migliorare la misura. Potete fare ad esempio un'analisi dei vari errori che concorrono all'errore finale per determinare la causa dominante, e così via. È molto importante che il risultato finale sia chiaramente indicato; alle volte, in relazioni anche lunghe e articolate è risultato difficile trovare quale fosse stato il risultato della misura

Metodo Scientifico

Scienza: insieme di conoscenze su un determinato argomento basato su valutazioni anche quantitative.

Fenomeno: qualsiasi oggetto fatto od avvenimento esterno osservato direttamente o per mezzo di dispositivi.

Metodo scientifico

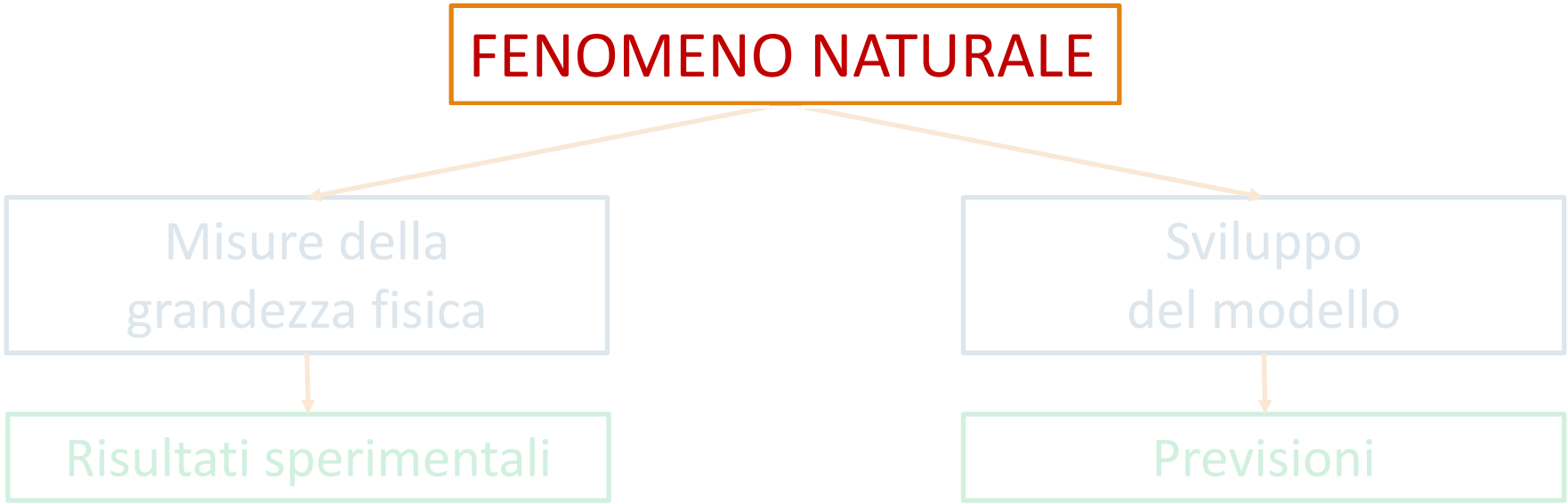
Si può schematizzare la metodologia della fisica come:

- Individuazione del fenomeno fisico da studiare
- Risulta descritto da un certo numero di caratteristiche dette grandezza fisiche, ognuna valutabile quantitativamente per mezzo di operazioni di confronto con un'altra grandezza fisica ad essa omogenea assunta come campione. Tali operazioni di confronto sono dette operazioni di misura ed i risultati sono le misure
- Misurare una grandezza significa quindi determinare il numero che esprime il rapporto tra la grandezza fisica ed il campione, chiamato quindi unità di misura
- L'elaborazione delle misure effettuate fornisce informazioni sul legame tra le diverse grandezze usate per descrivere un fenomeno
- Un'operazione di misura può essere anche indiretta.
- Individuate alcune grandezze misurabili direttamente (fondamentali), altre (derivate) possono essere definite e misurate mediante relazioni con le grandezze fondamentali.

Metodo scientifico

ATTIVITÀ SPERIMENTALE

ATTIVITÀ TEORICA



Progettazione dell'esperimento

Individuazione ed analisi del fenomeno

Individuazione del metodo da seguire

- Scelta degli strumenti
- Verifica della fattibilità

Esecuzione

- Raccolta dei dati sperimentali
- Analisi dei dati per ottenere le grandezze fisiche

Formulazione delle ipotesi relative al fenomeno

- Individuazione delle relazioni tra le grandezze fisiche
- Previsioni per i valori delle grandezze fisiche

È necessaria l'osservazione preliminare del fenomeno e l'acquisizione delle informazioni utili allo studio.

Su tale base si individuano le grandezze fisiche che si pensa caratterizzino il fenomeno, siano determinanti per l'interpretazione. Tali grandezze saranno l'oggetto delle misure.

Inciso

Attività di ricerca – Dipartimento di Fisica

astrofisica

fisica teorica

fisica sperimentale

- fisica nucleare e subnucleare
- stato solido
- ….

in collaborazione con INFN

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)

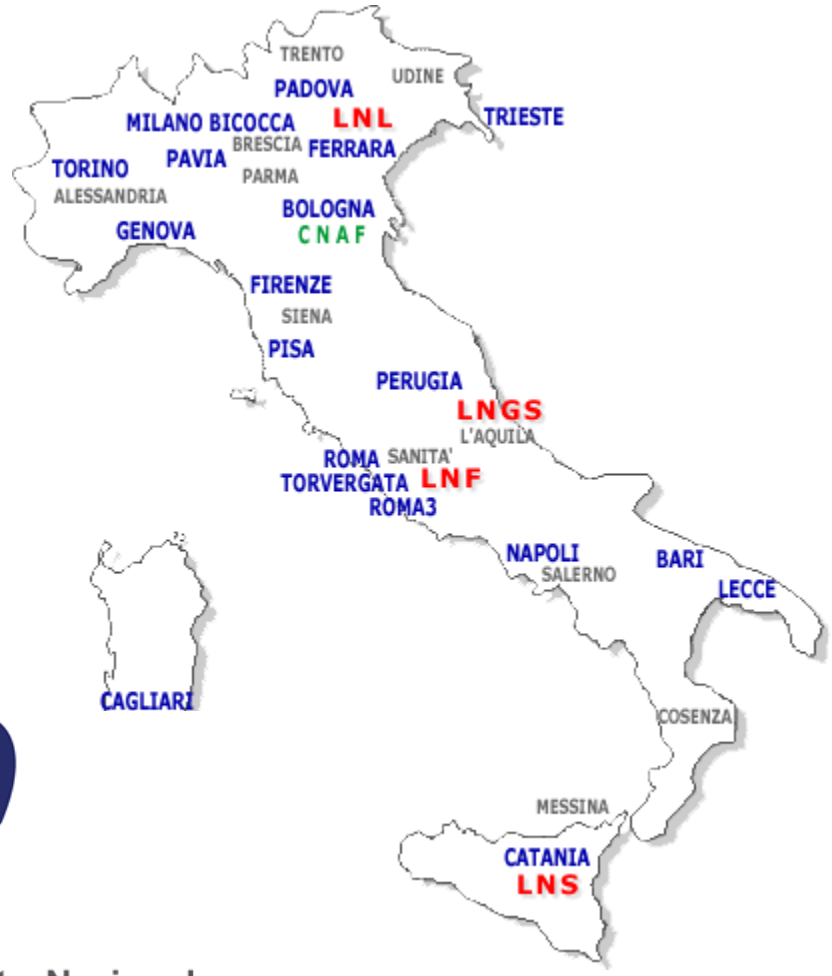
Per garantire almeno il futuro impiego delle risorse del CNR a favore della ricerca fondamentale, Colonnetti decise dunque, in accordo con Amaldi e con il Comitato di fisica, di dare vita a un apposito Istituto:

L'8 agosto 1951 era nato così, con il decreto n. 599 del presidente del CNR, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare.

Compito dell'INFN, secondo l'art. 2, primo comma, del decreto istitutivo, era «il coordinamento dell'attività scientifica del

- Centro di studio per la fisica nucleare, costituito in Roma,
- del Centro di studio degli joni veloci, costituito in Padova,
- del Centro sperimentale e teorico di fisica nucleare, costituito in Torino»;
- era inoltre prevista la possibilità di ampliare l'Istituto aggregandovi «altri organi di studio e di ricerca

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)



"è l'istituto che promuove, coordina ed effettua la ricerca scientifica nel campo della fisica subnucleare, nucleare e astro particellare, nonché lo sviluppo tecnologico necessario alle attività in tali settori. Opera in stretta connessione con l'Università e nell'ambito della collaborazione e del confronto internazionale."

COMPASS

- **GR1 -FISICA PARTICELLARE**
- **GR2- FISICA ASTROPARTICELLARE**
- **GR3- FISICA NUCLEARE**
- **GR4 - FISICA TEORICA**
- **GR5 - RICERCA TECNOLOGICA**

INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

What does “COMPASS” stand for?

COMPASS: NA58, EHN2, building 888:

COmmon

Muon

Proton

Apparatus for

Structure and

Spectroscopy

COMPASS is the ***largest surface experiment*** at CERN

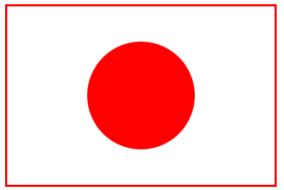
COMPASS Collaboration

Дубна (LPP and LNP),
Москва (INR, LPI, State University),
Протвино

CERN

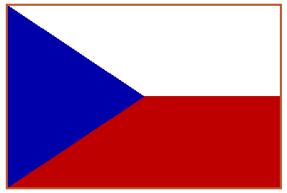
Bochum, Bonn (ISKP & PI), Erlangen, Freiburg, Mainz, München TU

Warsawa (NCBJ),
Warsawa (TU)
Warsawa (U)

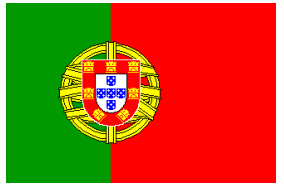


Yamagata

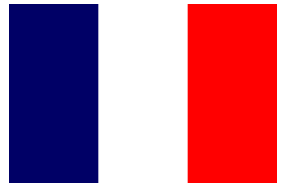
USA (UIUC)



Praha



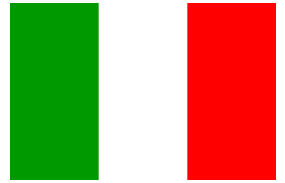
Lisboa



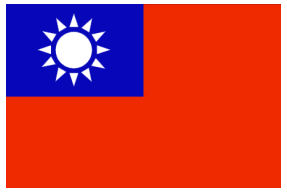
Saclay

Burden, Calcutta

Tel Aviv



Torino (University,INFN),
Trieste (University,INFN)



Taipei (AS)

- about 220 members
- from more than 13 different countries
- involving 24 universities and research institutes

The People

Gruppo di Trieste: ricercatori, assegnisti, dottorandi

- Dipartimento di Fisica: F. Bradamante, A. Bressan, S. Dasgupta, J. Matousek, N. Makke, A. Martin, G. Sbrizzai, P. Schiavon
- Sezione INFN: R. Birsa, S. Dalla Torre, S. Levorato, S. Tessaro, F. Tessarotto, …
- ICTP: A. Cicuttin, M.L. Crespo

>18 persone

COMPASS – some facts

Located at CERN North Area beam line (Possible beams: μ+, μ-, p+, p-, K → Several physics programs)

- 1996: COMPASS proposal
- 1999-2000: construction and installation
- 2001: commissioning run

Experiments with muon beam

- Spin structure: Gluon polarization
- u,d,s flavor decomposition of the nucleon spin
- Transverse spin
- Quark transverse momentum distribution

Experiments with hadron beams

- Pion polarizability
- Search for exotic states:
  - Light meson spectroscopy
  - Baryon spectroscopy

COMPASS - II (2012 – 2018)

- '3D' structure of the nucleon (DVCS)
- Unpolarised quark transverse momentum distribution and strangeness
- Pion and Kaon polarizabilities
- Polarized Drell-Yan: universality of transverse momentum distribution

COMPASS – some facts

- Experiments with muon beam
- Experiments with hadron beams

COMPASS - I (2002 – 2011)

- Nucleon Spin structure
- p, d polarized target (L & T)
- Hadron spectroscopy
- Small LH_2 or nuclear targets

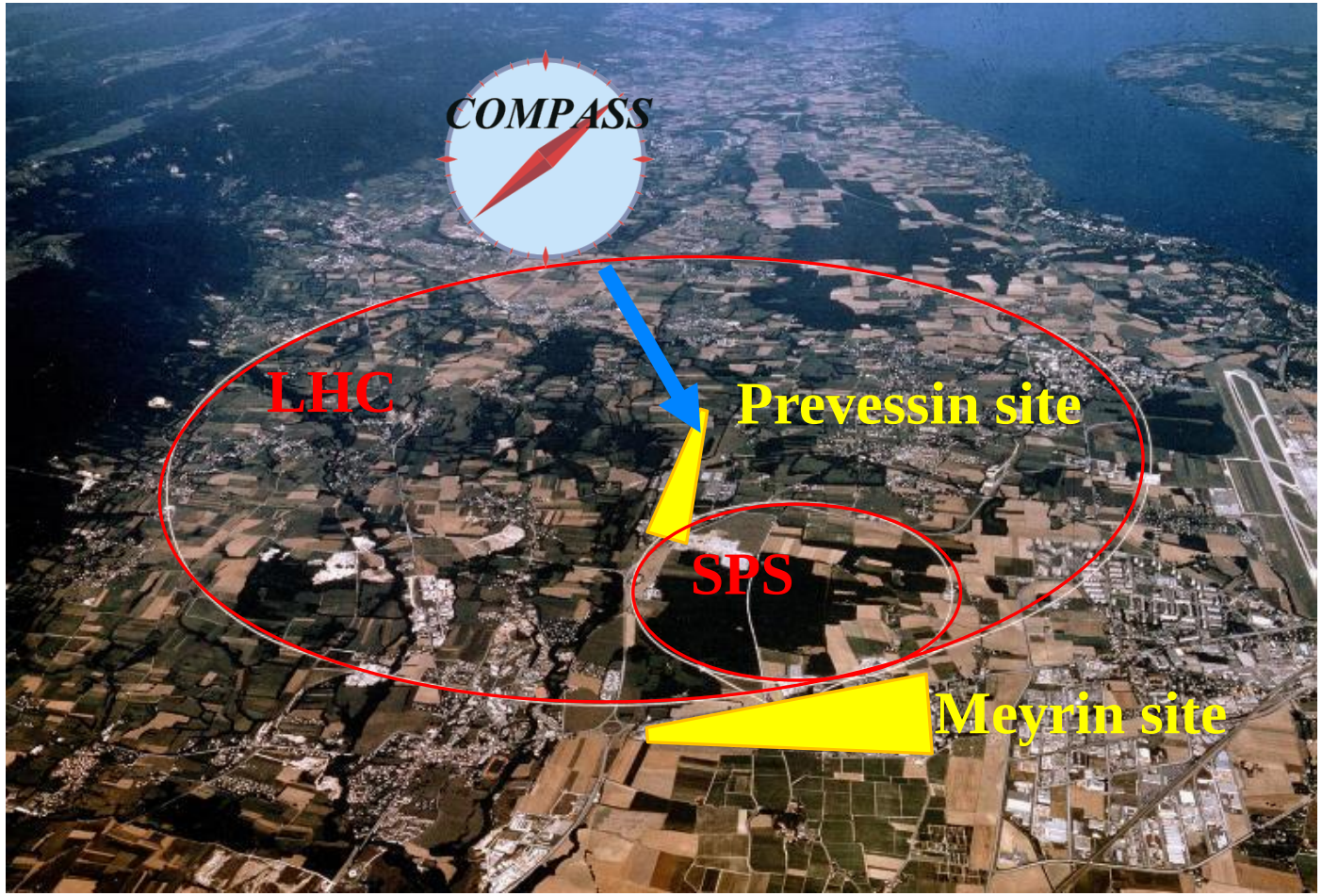
COMPASS - II (2012 – 2017)

- DVCS/Unpolarised
- Long LH_2 target
- Polarized Drell-Yan studies
- Polarized target (T)

Reconfigurable target region - versatile experimental setup!

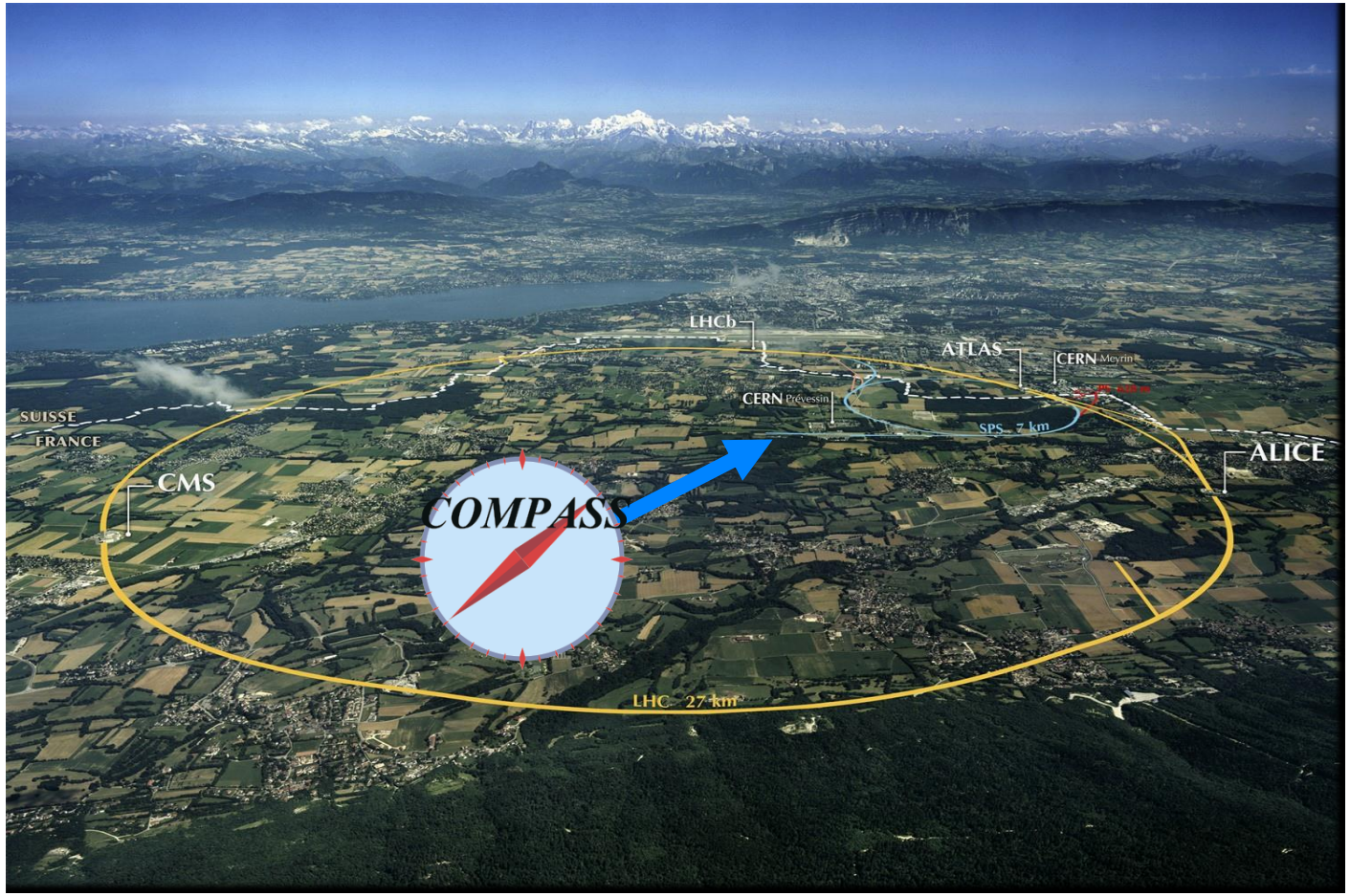
Where is COMPASS located? View from SW

SPS experiment in the North Area at the CERN Prevessin site



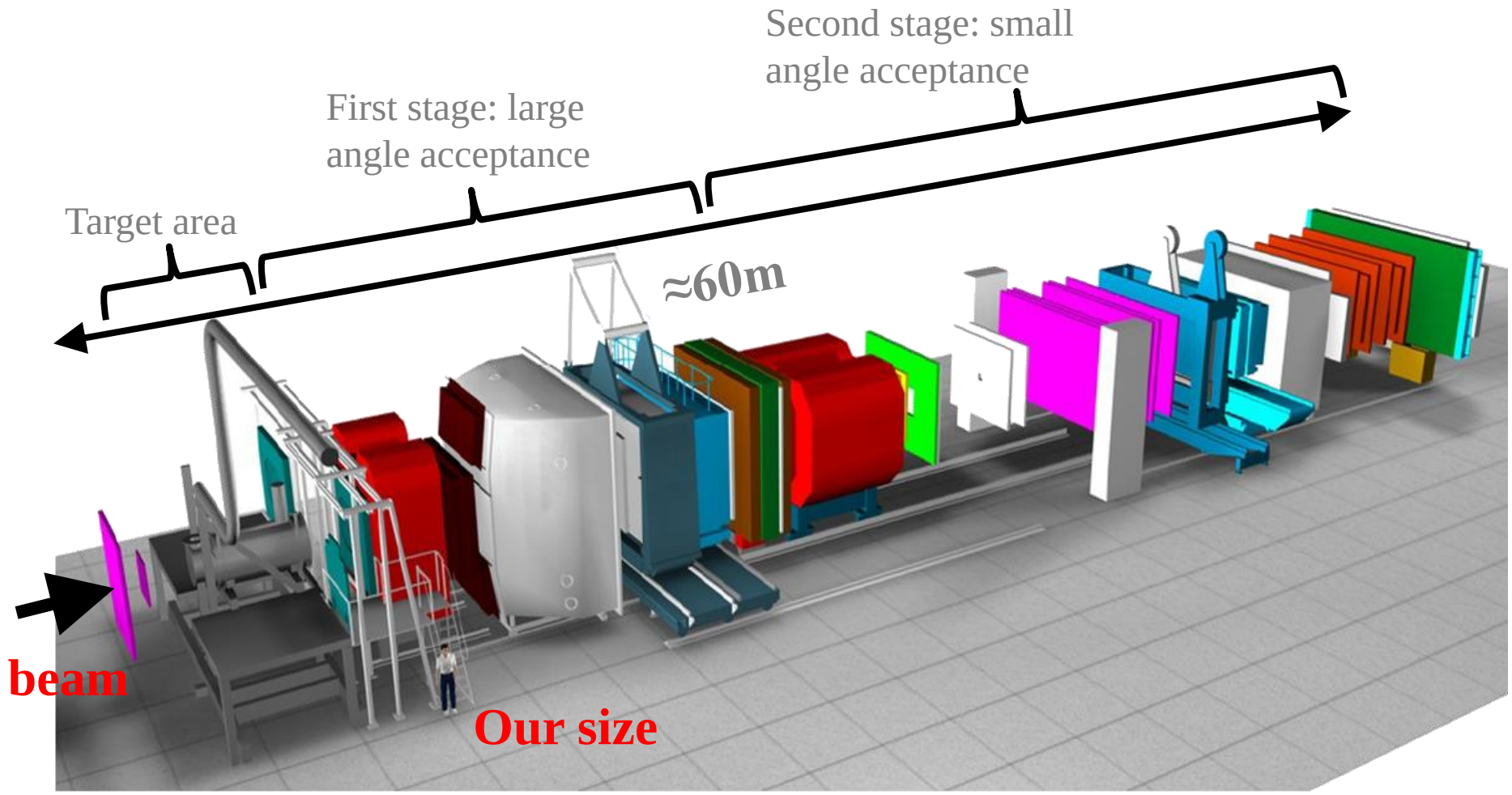
Where is COMPASS located? View from NW

SPS experiment in the North Area at the CERN Prevessin site



What does COMPASS look like?

Flexible fixed-target experiment, two-stage forward large-angle spectrometer



COMPASS Spectrometer

Back to work

Dimensioni fisiche

Qualsiasi grandezza misurata direttamente può essere definita fondamentale. Di tali grandezze, alcune sono state scelte (insieme alle relative unità di misura) come sottoinsiemi di grandezze con cui descrivere tutte le altre.

È necessario (ed anche sufficiente) definire almeno una grandezza fondamentale. Ciononostante si preferisce definirne un numero più elevato per chiarezza delle espressioni derivate.

Le operazioni algebriche su grandezze fondamentali F_i con cui è definita una grandezza derivata D sono indicate con le dimensioni fisiche delle grandezza. Se D e ed F_i sono legate da:

$$D = c \prod_i F_i^{\alpha_i}$$

(con Π un operatore generico), allora la relazione tra le dimensioni è convenzionalmente scritta come

$$[D] = \prod_i [F_i]^{\alpha_i}$$

Dove [ ] indica la dimensione della grandezza fisica e Π il prodotto tra le dimensioni.

Esempio

Grandezze fondamentali per la meccanica (L, t, M)

Con questa scelta:

Superficie	$[S] = [L]^2[t]^0[M]^0$
Volume	$[V] = [L]^3[t]^0[M]^0$
Velocità	$[v] = [L][t]^{-1}[M]^0$
Accelerazione	$[a] = [L][t]^{-2}[M]^0$
Densità	$[\rho] = [L]^{-3}[t]^0[M]^1$
Forza	$[F] = [L][t]^{-2}[M]^1$

Considerazioni

- le dimensioni non definiscono la grandezza fisica
- poiché un cambiamento di unità non influisce sulla validità della legge, grandezze fisiche o loro funzioni possono essere legate da uguaglianze in una legge fisica solo se i due membri hanno le stesse dimensioni. Infatti l'uguaglianza indica l'equivalenza delle operazioni di misura.
- Può essere quindi necessario, per esprimere una data legge, introdurre dei coefficienti con dimensioni opportune, ed un valore numerico dipendente dal sistema di unità di misura. Ad esempio per la legge di gravitazione universale:

$$F = G\frac{M_1 M_2}{r^2}$$

  G ha le dimensioni

$$G = [L]^3[t]^{-2}[M]^{-1}$$

- Per essere usate come argomenti di funzioni ($\sin x$, e^{-x} …) le grandezze fisiche devono sempre essere combinate in modo da avere argomenti adimensionali…come evidente da

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{1}{2}x^2 + \cdots$$

Cambiamento di dimensioni

Se vengono introdotte nuove grandezze fondamentali H_j a sostituzione delle F_i, dobbiamo determinare le dimensioni delle F_i nel nuovo sistema:

$$[F_i] = \prod_j [H_j]^{\beta_{ij}}$$

E quindi valutare le dimensioni delle grandezze derivate:

$$[D] = \prod_i [F_i]^{\alpha_i} = \prod_i \left(\prod_j [H_j]^{\beta_{ij}\alpha_i} \right) = \prod_j \left(\prod_i [H_j]^{\beta_{ij}\alpha_i} \right) = \prod_j [H_j]^{\sum_i \alpha_i \beta_{ij}} = \prod_j [H_j]^{\eta_j}$$

Con gli η che sono elementi del vettore ottenuti dal prodotto del vettore α per la matrice β:

$$(\eta_1 \quad \eta_2 \quad \cdots) = (\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \cdots) \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

Sistema Internazionale→ Unità Naturali

Il sistema di unità naturali è usato frequentemente in fisica delle particelle ed in particolare dai teorici. In esso si pone $\hbar = c = 1$, ovvero la costante di Planck ridotta $\hbar$ (universale) e la velocità della luce nel vuoto c (universale) pari ad 1 ed adimensionali.

È facile dimostrare che per la meccanica questa scelta implica l'uso di una sola unità fondamentale, la lunghezza.

Nel SI $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.054\,571\,726(47) \times 10^{-34} kg\, m^2 s^{-1}$ $c = 299\,792\,458\ \mathrm{m}s^{-1}$ (*)

(*) Esatta! Il metro è definito come la lunghezza del percorso fatto dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo pari a 1/299 792 458 di secondo ed il secondo è definito come unità fondamentale.

Sistema Internazionale → Unità Naturali

Il sistema di unità naturali è usato frequentemente in fisica delle particelle ed in particolare dai teorici. In esso si pone $\hbar = c = 1$, ovvero la costante di Planck ridotta $\hbar$ (universale) e la velocità della luce nel vuoto c (universale) pari ad 1 ed adimensionali.

Poiché la velocità è una quantità adimensionale, tempo e lunghezza devono avere la stessa dimensione nel sistema di unità naturali; ovvero $[t]_{un} = [L]_{un}$

Essendo l'azione (energia per tempo o $[M]^1[L]^2[s]^{-1}$) adimensionale (e per la relazione sopra) la massa deve avere le dimensioni dell'inverso di una lunghezza; ovvero $[M]_{u.n.} = [L]_{u.n.}^{-1}$

Quindi: $[L]_{un} = [L]_{SI}^1$, $[t]_{un} = [L]_{SI}^1$, $[M]_{un} = [L]_{SI}^{-1}$ o $(\beta_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$. La velocità è quindi: $(\eta_j)_v = (1 \quad -1 \quad 0)\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} = 0$

[calcolare le dimensioni per l'energia]

Generalità - I

Una determinata scelta di unità fondamentali $[F_i]$ delle grandezze fondamentali F_i costituisce un sistema di unità di misura.

Due sistemi possono differire:

- per una diversa scelta di unita fondamentali
- per una diversa definizione dei campioni di misura
- per entrambe

Le unità di misura U di grandezze derivate si ottengono dalla definizione della grandezza derivata

$$D = k \prod_i F_i^{\alpha_i}$$

indicando con U le unità di misura delle grandezze fondamentali:

$$U(D) = K(D) \prod_i U^{\alpha_i}(F_i)$$

Generalità

Si definiscono:

- coerenti, le unità di misura per cui $K = 1$
- non coerenti in caso contrario $(K \neq 1)$

[ad esempio, l'unità di pressione atmosferica ($1\ atm = 1.01325 \times 10^5 Pa$) è un'unità di misura non coerente, ma molto usata]

IMPORTANTE: seppure la scelta delle unità fondamentali è arbitraria è necessario che:

- siano definite senza ambiguità
- siano costanti nel tempo e nello spazio

SISTEMA INTERNAZIONALE (SI)

Grandezza di base		Unità di base	
Nome della grandezza di base	Simbolo	Nome dell'unità di misura base	Simbolo
lunghezza	l, x, r, etc.	metro	m
massa	m	chilogrammo	kg
tempo, durata	t	secondo	s
corrente elettrica	I, i	ampere	A
temperatura termodinamica	T	kelvin	K
quantità di sostanza	n	mole	mol
intensità luminosa	I_v	candela	cd

Bureau International des Poids et Mesures
http://www.bipm.org/en/measurement-units/

SI – Definizione delle unità

grandezza	unità	simbolo	definizione
lunghezza	metro	m	tragitto percorso dalla luce nel vuoto in un tempo di 1/299 792 458 di secondo
massa	kilogrammo	kg	massa del campione platino-iridio, conservato nel Museo Internazionale di Pesi e Misure di Sèvres (Parigi)
intervallo di tempo	secondo	s	durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio-133 $^{133}_{55}Cs$
intensità di corrente elettrica	ampere	A	quantità di corrente che scorre all'interno di due fili paralleli e rettilinei, di lunghezza infinita e sezione trascurabile, immersi nel vuoto ad una distanza di un metro, induce in loro una forza di attrazione o repulsione di 2×10^{-7} N per ogni metro di lunghezza
temperatura termodinamica	kelvin	K	valore corrispondente a 1/273,16 della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua
quantità di sostanza	mole	mol	quantità di materia di una sostanza tale da contenere tante particelle elementari quante ne contengono 0,012 kg di carbonio-12 $^{12}_{6}C$. Tale valore corrisponde al numero di Avogadro
intensità luminosa	candela	cd	intensità luminosa di una sorgente che emette una radiazione monocromatica con frequenza 540×10^{12} Hz e intensità energetica di 1/683 W/sr.

SISTEMA INTERNAZIONALE di UNITÀ di MISURA

Definito dal Bureau International des Poids et Measures (http://www.bipm.org/en/about-us/),

– "the intergovernmental organization through which Member States act together on matters related to measurement science and measurement standards."

L'attuale standard è definito nella: SI Brochure: The International System of Units (SI) [8th edition, 2006; updated in 2014]

http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/

In cui trovate anche il PDF completo

http://www.bipm.org/utils/common/pdf/si_brochure_8.pdf

Definizioni precedenti - I

Se guardiamo le definizioni attuali osserviamo la necessità di svincolare le unità di misura fondamentali dai campioni materiali, per associarle a fenomeni fisici.
I vantaggi di tale intento sono una maggiore e fedele riproducibilità, in quanto le costanti universali sono conosciute con tolleranze minime, ed inoltre i campioni non sono soggetti ad alterazioni ambientali.

METRO:

- nel 1799 era determinato dalla lunghezza di una sbarra di platino, pari ad un quaranta milionesimo della lunghezza del meridiano terrestre;
- nel 1875 era riferito alla distanza delle due tacche incise sulla sbarra campione di platino(90%)-iridio(10%), conservata a temperatura costante (0°C) nell' Ufficio Internazionale di Pesi e Misure di Sèvres di Parigi;
- nel 1960 era rappresentato da 1650763,73 lunghezze d'onda, nel vuoto, della radiazione corrispondente alla transizione fra i livelli $2p^{10}$ e $5d^5$ dell'atomo del cripto-86;
- nel 1983 è quella attualmente in uso.

KILOGRAMMO: dal 1795 coincidente con la massa di 1 dm^3 di acqua distillata posta alla temperatura di 4°C. Unica unità non definita in base a leggi fisiche ed unica che compare nel SI con un prefisso del SI.

Definizioni precedenti - II

Se guardiamo le definizioni attuali osserviamo la necessità di svincolare le unità di misura fondamentali dai campioni materiali, per associarle a fenomeni fisici.
I vantaggi di tale intento sono una maggiore e fedele riproducibilità, in quanto le costanti universali sono conosciute con tolleranze minime, ed inoltre i campioni non sono soggetti ad alterazioni ambientali.

SECONDO:

- prima del 1960 era rappresentato dalla $86400 = 60 \times 60 \times 24$ parte del giorno solare medio;
- dopo il 1960 era determinato da una frazione dell'anno tropico (tempo impiegato dal Sole per tornare nella stessa posizione, vista dalla Terra) alla data del 1900;
- nel 1967 è quella attualmente in uso.

CANDELA:

- prima del 1982 era definita da 1/60 dell'intensità luminosa emessa dal radiatore integrale (corpo nero) alla temperatura di solidificazione del platino (2045 K), in direzione perpendicolare al foro di uscita della radiazione dal radiatore, essendo l'area del foro pari ad 1 cm^2;
- dopo 1982 è quella attualmente in uso.

SI – Unità derivate

Grandezza derivata		Unità SI derivata	
area	A	metro quadrato	m^2
volume	V	metro cubo	m^3
velocità	v	metro al secondo	$m\ s^{-1}$
accelerazione	a	metro al secondo quadrato	$m\ s^{-2}$
numero d'onda	σ	metro alla meno uno	m^{-1}
densità, massa volumica	ρ	kilogrammo al metro cubo	$kg\ m^{-3}$
densità superficiale	ρ_A	kilogrammo al metro quadrato	$kg\ m^{-2}$
volume specifico	v	metro cubo al kilogrammo	$m^3\ kg^{-1}$
densità di corrente (elettrica)	j	ampere al metro quadro	$A\ m^{-2}$
(intensità di) campo magnetico	H	ampere al metro	$A\ m^{-1}$
concentrazione (di quantità di sostanza)	c	mole al metro cubo	$mol\ m^{-3}$
concentrazione di massa/ densità	ρ, γ	kilogrammo al metro cubo	$kg\ m^{-3}$
luminanza	L_v	candela al metro quadro	$cd\ m^{-2}$
indice di rifrazione	n	(il numero) uno	1
permeabilità relativa	μ_r	(il numero) uno	1

SI – Unità derivate con nomi e simboli definiti

Grandezza derivate	Nome	Simbolo	Fz. di altre unità SI	Fz. di unità SI di base
angolo piano	radiante	rad	1	$m\,m^{-1}$
angolo solido	steradiante	sr	1	$m^2\,m^{-2}$
Frequenza	hertz	Hz		s^{-1}
Forza	newton	N		$m\,kg\,s^{-2}$
pressione, sforzo	pascal	Pa	N/m^2	$m^{-1}\,kg\,s^{-2}$
energia, lavoro, quantità di calore	joule	J	$N\,m$	$m^2\,kg\,s^{-2}$
potenza, flusso radiante	watt	W	J/s	$m^2\,kg\,s^{-3}$
carica elettrica, quantità di elettricità	coulomb	C		$s\,A$
differenza di potenziale elettrico, forza elettromotrice	volt	V	W/A	$m^2\,kg\,s^{-3}\,A^{-1}$
capacità (elettrica)	farad	F	C/V	$m^{-2}\,kg^{-1}\,s^4\,A^2$
resistenza elettrica	ohm	Ω	V/A	$m^2\,kg\,s^{-3}\,A^{-2}$
conduttanza elettrica	siemens	S	A/V	$m^{-2}\,kg^{-1}\,s^3\,A^2$
flusso magnetico	weber	Wb	$V\,s$	$m^2\,kg\,s^{-2}\,A^{-1}$

SI – Unità derivate con nomi e simboli definiti

Grandezza derivata	Nome	Simbolo	Fz. di altre unità SI	Fz. di unità SI di base
densità di flusso magnetico	tesla	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
induttanza	henry	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
temperatura Celsius	grado Celsius	$°C$		K
flusso luminoso	lumen	lm	$cd\ sr$	cd
luminanza	lux	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
attività di un radionuclide	becquerel	Bq		s^{-1}
dose assorbita, energia specifica (impartita), kerma	gray	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
equivalente di dose (ambientale, direzionale, personale)	sievert	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
viscosità dinamica		pascal per secondo	$Pa\ s$	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
momento di una forza		newton per metro	$N\ m$	$m^2\ kg\ s^{-2}$
tensione superficiale		newton al metro	N/m	$kg\ s^{-2}$
velocità angolare		radiante al secondo	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1} = s^{-1}$
accelerazione angolare		radiante al secondo quadrato	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2} = s^{-2}$

SI – Unità derivate con nomi e simboli definiti

Grandezza derivata	Nome	Simbolo	Fz. di altre unità SI	Fz. di unità SI di base
densità di flusso di calore, irradianza		watt al metro quadro	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
capacità termica, entropia		joule al kelvin	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
capacità termica specifica, entropia specifica		joule al kilogrammo e al kelvin	$J/(kg\ K)$	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
energia specifica		joule al kilogrammo	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
conducibilità termica		watt al metro e al kelvin	$W/(m\ K)$	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
densità di energia		joule al metro cubo	J/m^3	$K^{-1}\ kg\ s^{-2}$
(intensità di) campo elettrico, forza elettrica		volt al metro	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
densità di carica elettrica		coulomb al metro cubo	C/m^3	$m^{-3}\ s\ A$
densità superficiale di carica		coulomb al metro quadro	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
densità di flusso elettrico, spostamento elettrico		coulomb al metro quadro	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$

SI – Unità derivate con nomi e simboli definiti

Grandezza derivata	Nome	Simbolo	Fz. di altre unità SI	Fz. di unità SI di base
permettività		farad al metro	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
permeabilità		henry al metro	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
energia molare		joule alla mole	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
entropia molare, capacità termica molare		joule alla mole e al kelvin	$J/(mol\ K)$	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
esposizione (a raggi X e γ)		coulomb al kilogrammo	C/kg	$kg^{-1}\ s\ A$
rateo di dose assorbita		gray al secondo	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
intensità di radiazione		watt allo steradiante	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3} = m^2\ kg\ s^{-3}$
radianza		watt al metro quadro e allo steradiante	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3} = kg\ s^{-3}$

Unità non nel SI accettate per uso nel SI

Grandezza	Nome	Simbolo	Valore in unità SI
tempo, durata	minuto	min	$1\ \mathrm{min} = 60\ s$
	ora	h	$1\ h = 60\ \mathrm{min} = 3\,600\ s$
	giorno	d	$1\ d = 24\ h = 86\,400\ s$
angolo piano	grado	°	$1° = (\pi/180)\ rad$
	minuto	′	$1′ = (1/60)° = (\pi/10\,800)\ \mathrm{rad}$
	secondo	"	$1" = (1/60)′ = (\pi/648\,000)\ \mathrm{rad}$
area	ettaro	ha	$1\ ha = 1hm^2 = 10^4\ m^2$
volume	litro	L, l	$1\ L = 1\ dm^3 = 10^{-3}\ m^3$
massa	tonnellata	t	$1\ t = 10^3\ kg$

Unità non nel SI accettate per uso nel SI

Grandezza	Nome dell'unità	Simbolo	Valore in unità SI
energia	elettronvolt	eV	$1\ eV\ =\ 1.602\ 176\ 53(14) \times 10^{-19}\ J$
massa	dalton	Da	$1\ Da\ =\ 1.660\ 538\ 86(28) \times 10^{-27} kg$
	unità unificata di massa atomica	u	$1\ u\ =\ 1\ Da$
lunghezza	unità astronomica	ua	$1\ ua\ =\ 1.495\ 978\ 706\ 91(6) \times 1011\ m$
Unità naturali			
velocità	unità naturale della velocità (velocità della luce nel vuoto)	c_o	$299\ 792\ 458\ m\ s^{-1}$
azione	unità naturale di azione (costante di Planck ridotta)	$\hbar$	$1.054\ 571\ 68(18) \times 10^{-34}\ Js$
massa	unità naturale di massa (massa dell'elettrone)	m_e	$9.109\ 382\ 6(16) \times 10^{-31} kg$
tempo, durata	unità naturale del tempo	$\hbar/(meco^2)$	$1.288\ 088\ 667\ 7(86) \times 10^{-21}\ s$
Unità atomiche			
carica	unità atomica di carica (carica elementare)	e	$1.602\ 176\ 53(14) \times 10^{-19}\ C$
massa	unità atomica di massa (massa dell'elettrone)	m_e	$9.109\ 382\ 6(16) \times 10^{-31}\ kg$
azione	unità atomica di azione (costante di Planck ridotta)	$\hbar$	$1.054\ 571\ 68(18) \times 10^{-34}\ Js$
lunghezza	unità atomica di lunghezza (raggio del Bohr)	a_o	$0.529\ 177\ 210\ 8(18) \times 10^{-10}\ m$
energia	unità atomica di energia (energia di Hartree)	E_h	$4.359\ 744\ 17(75) \times 10^{-18}\ J$
tempo, durata	unità atomica del tempo	$\hbar/Eh$	$2.418\ 884\ 326\ 505(16) \times 10^{-17} s$

Valore in S.I. ottenuto sperimentalmente

Unità non SI

Grandezza	Nome dell'unità	Simbolo	Valore in unità SI
pressione	bar	bar	$1\ bar = 0.1\ MPa = 10^5\ Pa$
	millimetro di mercurio	$mm\ Hg$	$1\ mm\ Hg \approx 133.322\ Pa$
lunghezza	angström	Å	$1\ \text{Å} = 0.1\ nm = 10^{-10}\ m$
distanza	miglio marino	M	$1\ M\ =\ 1852\ m$
area	barn	b	$1\ b = 100\ fm^2\ = 10^{-28}\ m^2$
velocità	nodo	kn	$1\ kn = (1852/3600)\ m\ s^{-1}$
quantitativi rapporto logaritmico	neper	Np	
	bel	B	
	decibel	dB	

Prefissi di multipli e sottomultipli

Fattore	Nome	Simbolo	Fattore	Nome	Simbolo
10^{1}	deca	da	10^{-1}	deci	d
10^{2}	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^{3}	kilo	k	10^{-3}	milli	m
10^{6}	mega	M	10^{-6}	micro	μ
10^{9}	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	tera	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y	10^{-24}	yocto	y

La misura

Misurare

Trasformare caratteristiche osservabili di oggetti in serie ordinate di numeri

Misura di una grandezza

Rapporto tra una grandezza ed un'altra ad essa omogenea, scelta come unità di misura

Tutte le misure sono soggette ad INCERTEZZA

Definizioni

- INCERTEZZA: parametro che misura la dispersione dei valori che possono essere attribuiti al misurando.

- ERRORE: differenza tra il risultato di una misura ed il valore “vero” del misurando.

Incertezza della misura - I

- Ripetizioni di misure con un risultato non identico sono il risultato di incertezze di misura
- Le condizioni sperimentali non possono essere ripetute esattamente
- L'ipotesi della teoria della misura è che i risultati di misura approssimano il valore vero
  - $\Rightarrow$ il valore vero esiste
- È indispensabile l'elaborazione delle misure

Incertezza della misura - II

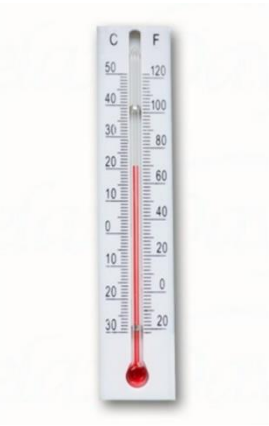
- La grandezza fisica fondamentale può essere misurata per confronto diretto con il campione (abbiamo visto che ciò è stato abbandonato per dal BIPM)
- Grandezze fisiche derivate
  - Da combinazione di grandezze fisiche fondamentali
  - Misure indirette

Incertezza della misura - II

- Strumento di misura
  - Permette il confronto delle grandezze con l'unità di misura
  - È composto da un rivelatore (sensibile alla grandezza da misurare)
  - Da un trasduttore (eventualmente, ovvero un dispositivo che legge una grandezza presente in **ingresso** e ne genera un'altra in **uscita**, proporzionale alla prima.)
  - Dispositivo per la presentazione dei risultati

Strumenti di misura

ANALOGICI



DIGITALI

Ordini di grandezza

L'**ORDINE DI GRANDEZZA** di un numero è la P**OTENZA DEL 10 PIU' VICINA AL NUMERO CONSIDERATO**.

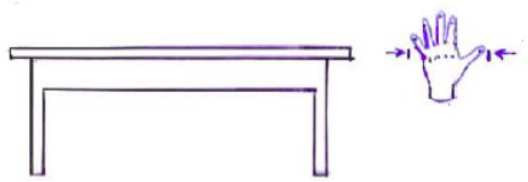
Dato un numero **a** il suo **ORDINE DI GRANDEZZA** viene indicato con **ODG (a)**.

Per determinare l'**ORDINE DI GRANDEZZA** di un numero possiamo:

- Scrivere il numero in **NOTAZIONE SCIENTIFICA** $a = k \times 10^n$ con $1 \leq k < 10$
- Quindi $\boldsymbol{ODG(a)} = \begin{cases} 10^n \text{ se } |k| < 5 \\ 10^{n+1} \text{se } |k| \geq 5 \end{cases}$

	NOTAZIONE SCIENTIFICA	Cos'è	ODG(a)
$6\ 371\ km$	$6.371 \times 10^6\ m$	Raggio terrestre	$10^7\ m$
$9\ 999\ t$	$9.999 \times 10^6\ kg$	Peso torre Eiffel	$10^7\ kg$
$384\ 400\ km$	$3.844 \times 10^5\ m$	Distanza terra-luna	$10^5\ m$
$149\ 600\ 000\ km$	$1.496 \times 10^8\ m$	Distanza terra-sole	$10^8\ m$

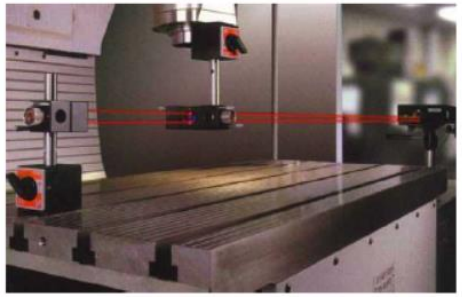
Misure ed errore

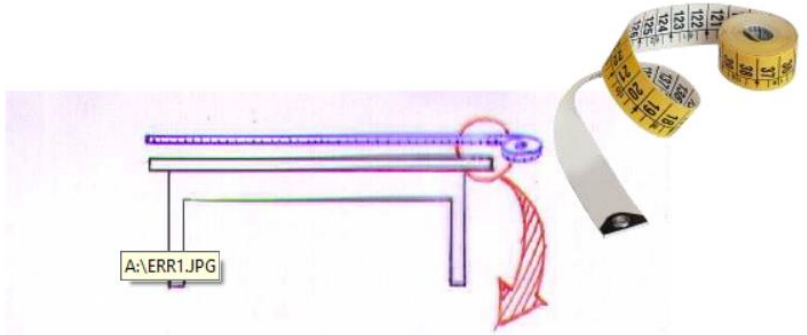


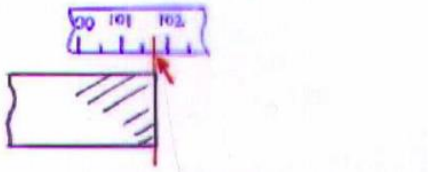
~1 m

(± qualche cm)

Ma qual è la lunghezza?

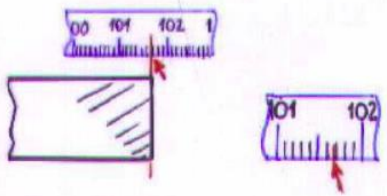






~101.7 cm

(± qualche mm)



~101.69 cm

(± qualche 0.1 mm)

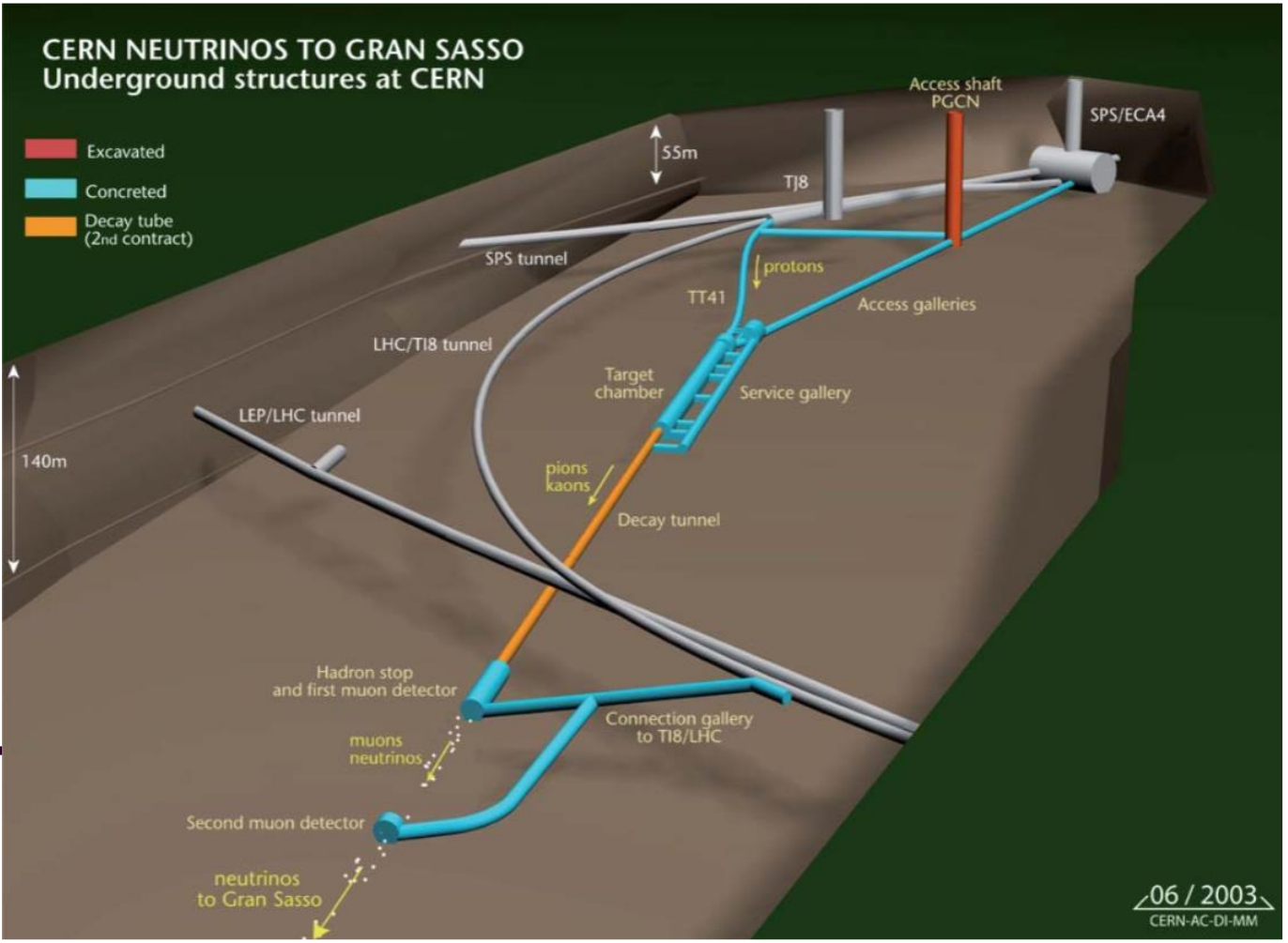
~101.68435734 cm

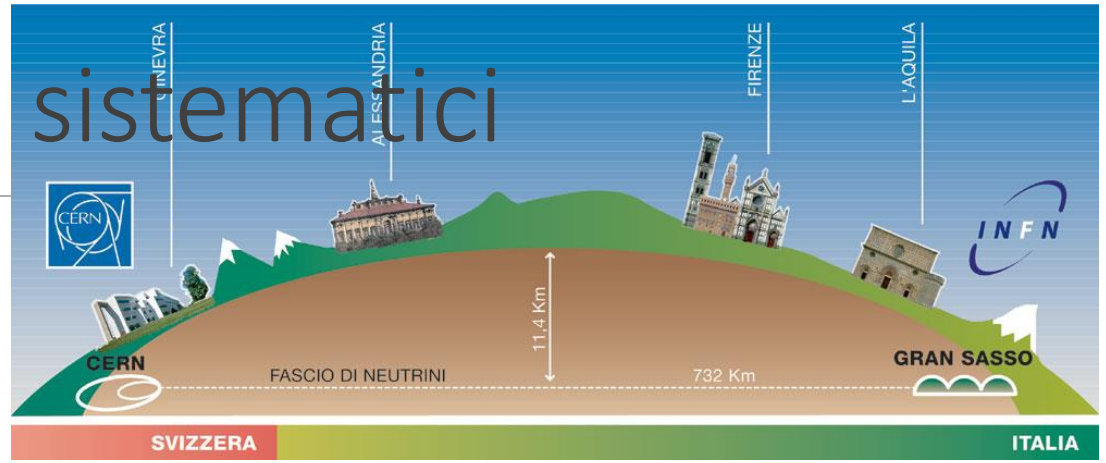
(± 10^{-6} m)

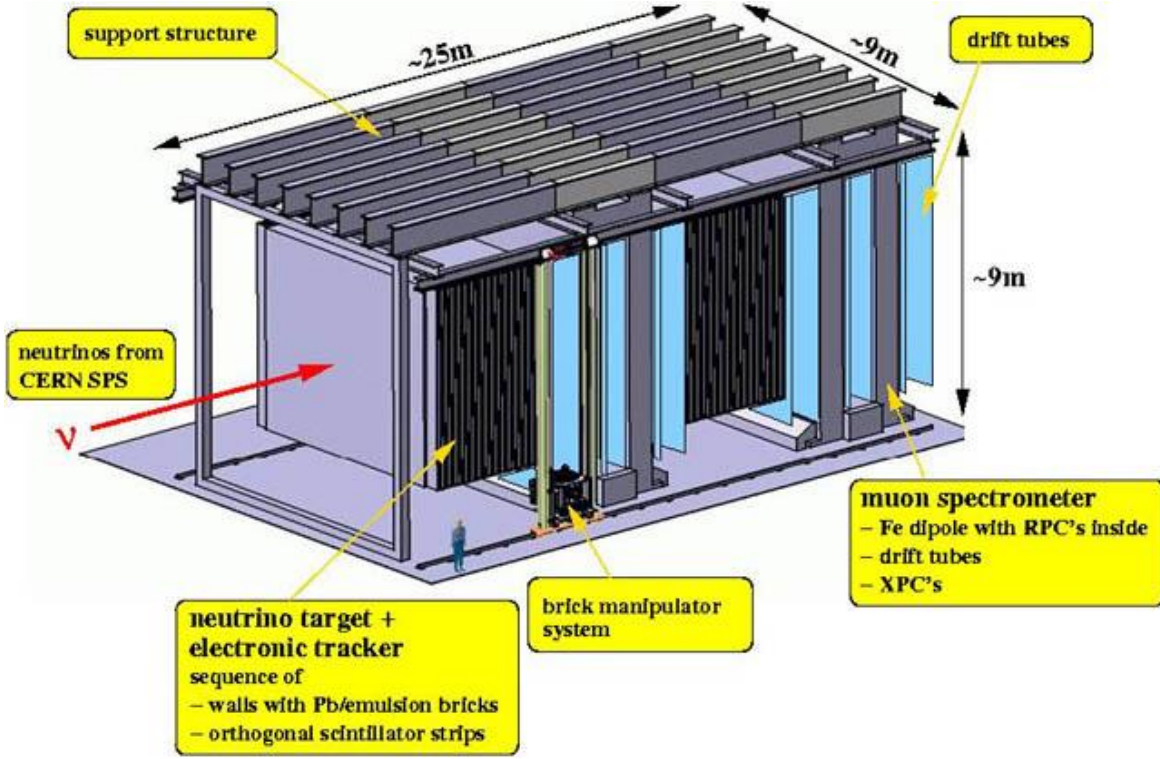
Errori di misura

- Valutazione dell'incertezza associata alle misure finalizzata a:
  - Minimizzare l'errore
  - Accertare la validità dei risultati
- Da ribadire: il valore vero è un concetto ed è non misurabile e non noto
- Definizioni [REPETITA IUVANT]
  - Errore, scarto o deviazione: differenza tra valore misurato e valore vero
  - Incertezza: dispersione dei valori espressa come deviazione standard, errore probabile, indice di precisione

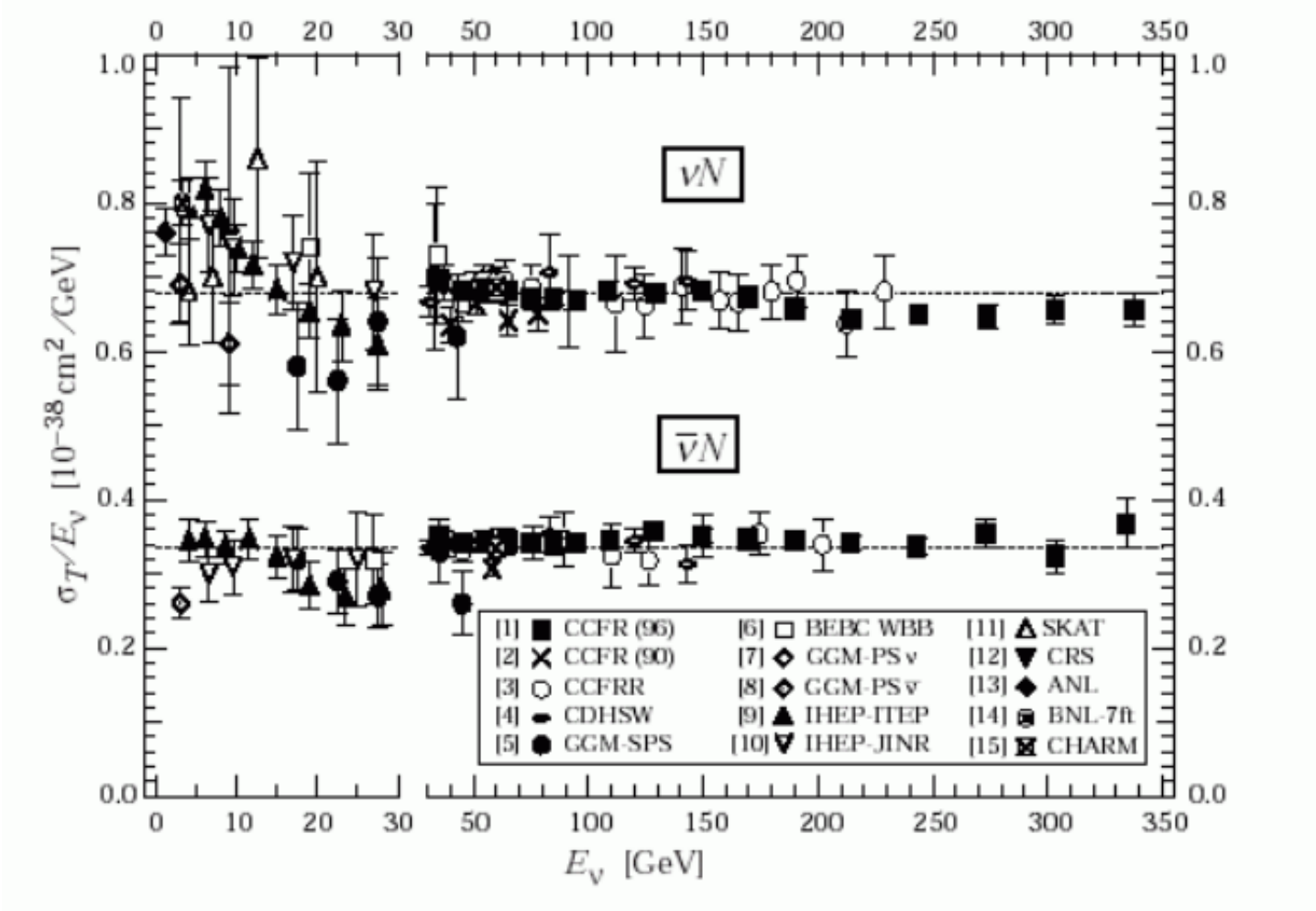
Difficoltà di stima di effetti sistematici







Sezione d'urto dei neutrini…



Due conti

Fascio di neutrini del CERN per i LNGS: 2 estrazioni di $10.5\mu s$ separate da 50ms ogni 6 secondi.

(produzione dei neutrini: protoni da 300-400 GeV su bersaglio di berillio: $p\ \mathrm{Be} \rightarrow \pi\ K\ X$ con i pioni che successivamente decadono $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ e $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$ con vite medie dell'ordine di $2.6 \times 10^{-8} s$).

Il numero di protoni inviato sul bersaglio ogni $10s$ è dell'ordine di 10^{13}. L'efficienza di produzione dei neutrini non è molto elevata e nello stesso tempo sono prodotti $\sim 5 \times 10^7$ neutrini.

Di questi solo il 10% circa passa attraverso la superficie del rivelatore di Opera. Il flusso utile sui 5m^2 di superficie ortogonale al fascio del rivelatore OPERA è quindi pari a $\phi_\nu \sim 5 \times 10^5 \nu/s$. Il flusso per unità di superfice (cm^2) è $\phi_\nu \sim 10\ \nu/(s \cdot cm^2)$

Ipotizziamo che il bersaglio di OPERA (emulsioni) sia pari a 10T di carbonio. Il numero di nucleoni (protoni/neutroni) su cui i neutrini possono interagire dando un segnale è:

$$N_{CD} = 12 \frac{10^4\ kg}{1.6 \times 10^{-27} kg} = 5 \times 10^{32}$$

+altri due conti

La sezione d'urto totale per i neutrini di 20 GeV è di $\sigma_T = 20 \times 0.7 \times 10^{-38} = 1.5 \times 10^{-37}\ cm^2$,

La rate è quindi data da:

$$Rate = \frac{numero\ segnali}{s} = \phi_\nu \cdot N_{cd} \cdot \sigma_T \cdot \varepsilon = 10 \times 5 \times 10^{32} \times 1.5 \times 10^{-37}\varepsilon = 7.5 \times 10^{-4} s^{-1}\varepsilon$$

3 anni di presa dati sono $10^8 s$ quindi il numero di eventi totale che mi aspetto, con questi conti, è:

$$10^8 \times 7.5 \times 10^{-4} \sim 10^5 \varepsilon$$

Misura del tempo di volo si basa su 10^{20} protoni dell'SPS del CERN con un segnale totale di 15223 neutrini rivelati.

Difficoltà di stima di effetti sistematici

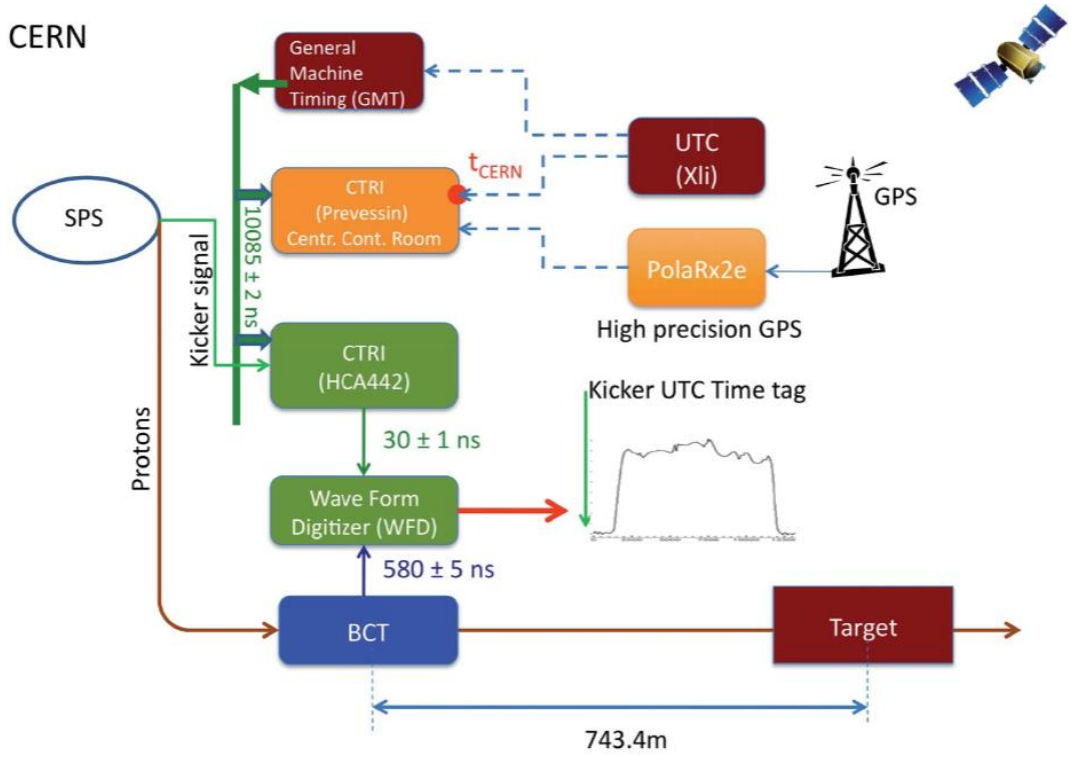


Figure 3. Schematic of the CERN SPS/CNGS timing system. Green boxes indicate detector time-response. Orange boxes refer to elements of the CNGS-OPERA synchronisation system. Details on the various elements are given in Section 6.

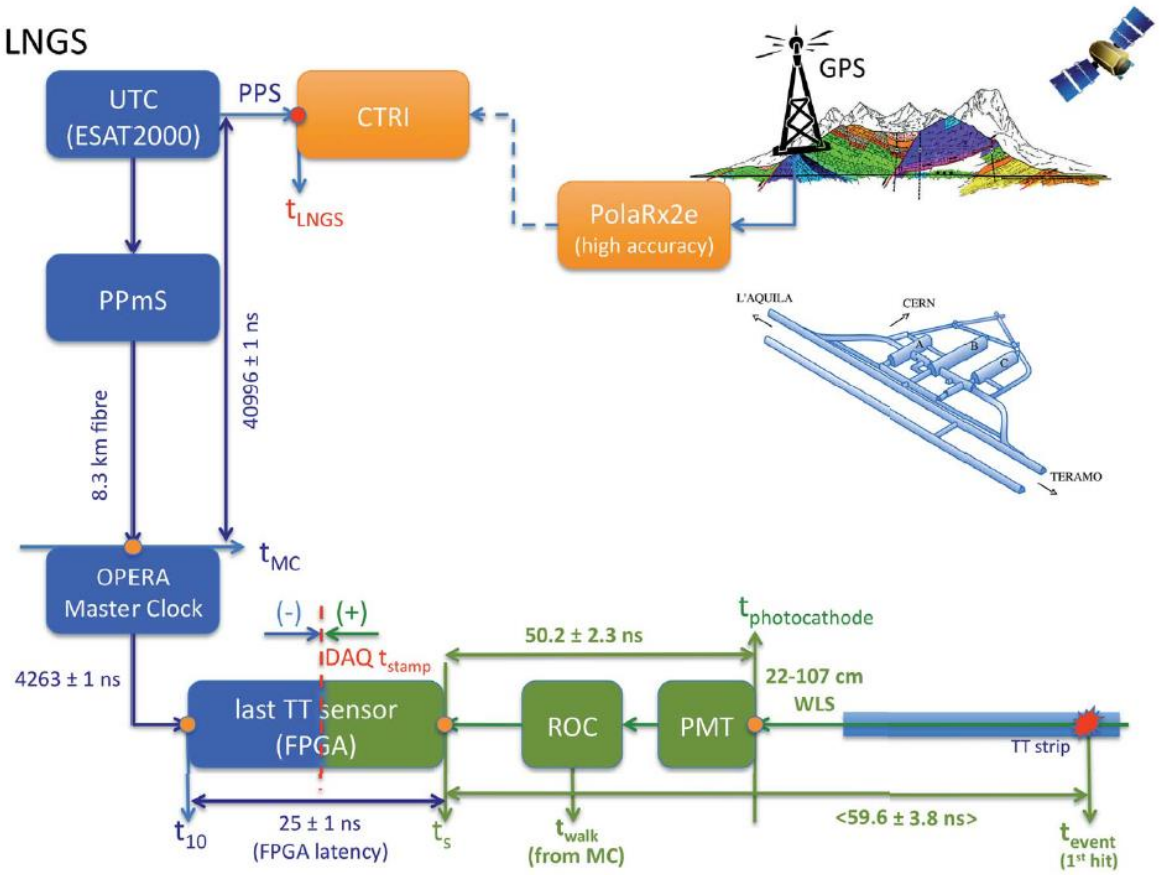


Figure 6. Schematic of the OPERA timing system at LNGS. Blue delays include elements of the time-stamp distribution; increasing delays decrease the value of δt. Green delays indicate detector time-response; increasing delays increase the value of δt. Orange boxes refer to elements of the CNGS-OPERA synchronisation system.

Difficoltà di stima di effetti sistematici

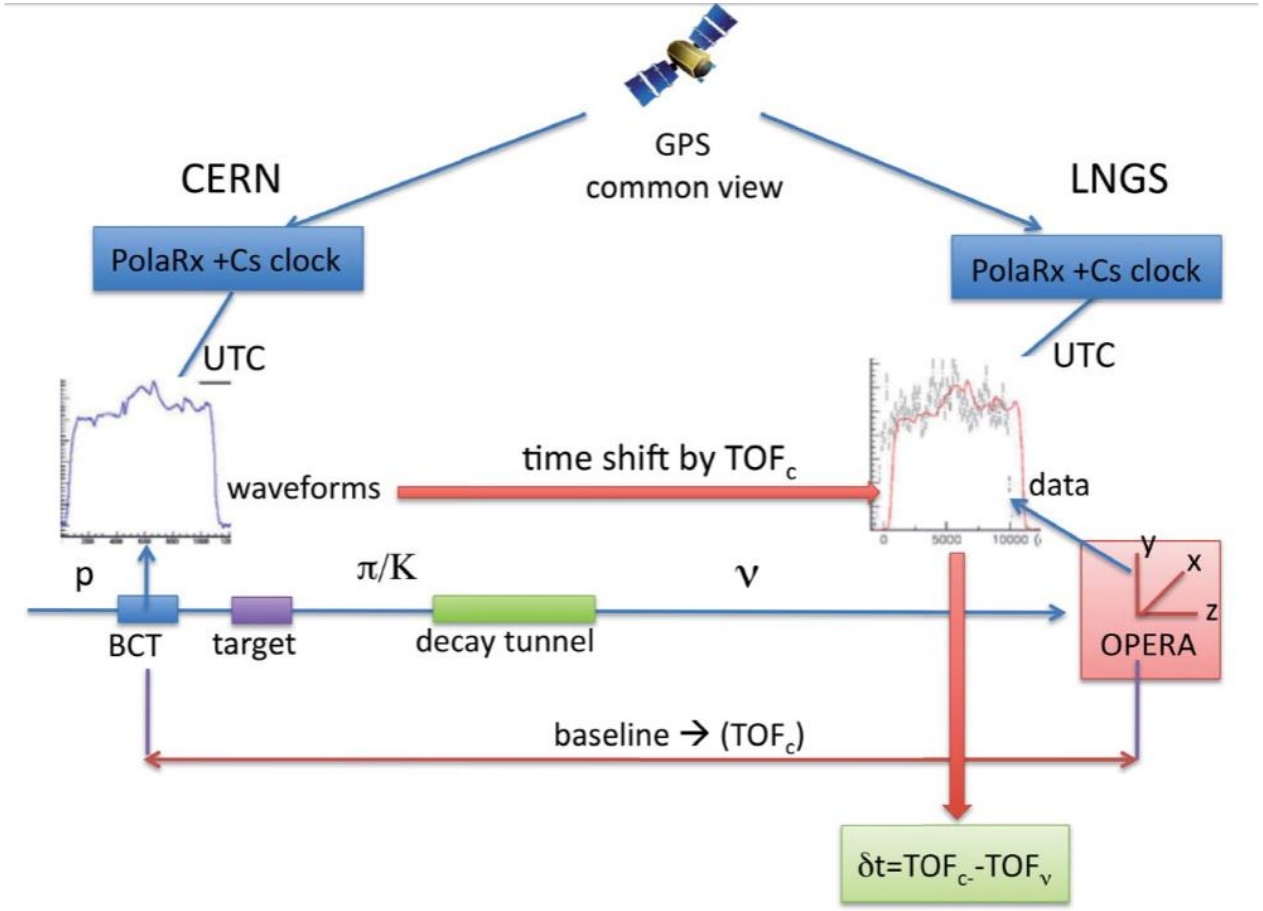


Figure 5. Schematic of the time of flight measurement.

Difficoltà di stima di effetti sistematici

First result: early arrival by: 60.7 ns ± 6.9 ns

Table 2. Contribution to the overall systematic uncertainty on the measurement of δt.

Error source	ns	Error distribution
Baseline (20 cm)	0.67	Gaussian
Meson decay point	0.2	Exponential (1 side)
Interaction point of external neutrino events	2.0	Flat (1 side)
CTRI signal propagation through GMT chain Δt_{UTC}	2.0	Gaussian
Kicker magnet signal to WFD $\Delta t_{trigger}$	1.0	Gaussian
BCT calibration Δt_{BCT}	5.0	Gaussian
CNGS-OPERA GPS synchronisation	1.7	Gaussian
LNGS 8.3 km fibre to OPERA Master Clock	3.7	Gaussian
Master Clock to FPGA Δt_{clock}	1.0	Gaussian
TT PMT signal to FPGA	2.3	Gaussian
TT timing simulation of ν interactions	3.0	Gaussian
FPGA latency	1.0	Gaussian
RPC signal formation	5.0	Gaussian
RPC signal propagation	1.0	Gaussian
RPC FEB delay	1.0	Gaussian
RPC DAQ clock trasmission	2.0	Gaussian
RPC FPGA calibration	1.0	Gaussian
RPC plane disuniformity	3.9	Gaussian
Total systematic uncertainty for TT based analysis	$-8.0, +8.3$	
Total systematic uncertainty for RPC based analysis	$-9.6, +9.9$	

The analysis of internal neutral current and charged current events, and external ν_μ CC interactions from the 2009, 2010 and 2011 CNGS data was carried out to measure the neutrino velocity, v. The sensitivity of the measurement of $(v-c)/c$ is about one order of magnitude better than former accelerator neutrino experiments.

The results of the study using CNGS muon neutrinos with an average energy of 17 GeV indicate a neutrino arrival time compatible within errors to the one computed by assuming the speed of light in vacuum:

$$\delta t = (6.5 \pm 7.4\ (stat.)^{+8.3}_{-8.0}(sys.))\ ns.$$

The corresponding relative difference of the muon neutrino velocity and the speed of light is:

$$(v-c)/c = (2.7 \pm 3.1\ (stat.)^{+3.4}_{-3.3}(sys.)) \times 10^{-6}.$$

An alternative analysis in which the likelihood function is built by associating each neutrino interaction to its waveform instead of using the global PDF leads to a compatible value of $\delta t = (3.5 \pm 5.6\ (stat.)^{+9.4}_{-9.1}(sys.))$ ns affected by an additional contribution to the systematic error.

Che cos'è successo

A major problem showed up. On December 6 – 8, measurements took place of the time interval between

- the moment when a signal (a laser pulse) is sent from the lab's GPS timing equipment somewhere on the earth's surface, across 8.3 kilometers down into the underground lab and to OPERA itself, where the laser pulse is converted (in a special device, which I'll just call **the box**) to an electronic signal for use by the OPERA Master Clock, and
- the moment when the Master Clock sends a timing pulse to synchronize all of OPERA's many computers and other devices.

Time delay from the external LNGS Lab to the OPERA Master Clock(*)

20 Jul 2006	(41001.4 ± 0.3) ns	r.m.s. ~ 3 ns	confirmed in 2007
6-8 Dec 2011	(41074.6 ± 0.5) ns	r.m.s. ~ 6 ns	(73.2 ± 0.6 stat) ns larger than 2006
13 Dec 2011	(41000.0 ± 0.3) ns	r.m.s. ~ 3 ns	consistent with 2006

(*) The value quoted in ArXiv:v2 is 40996 and is obtained by subtracting 5.9 ns

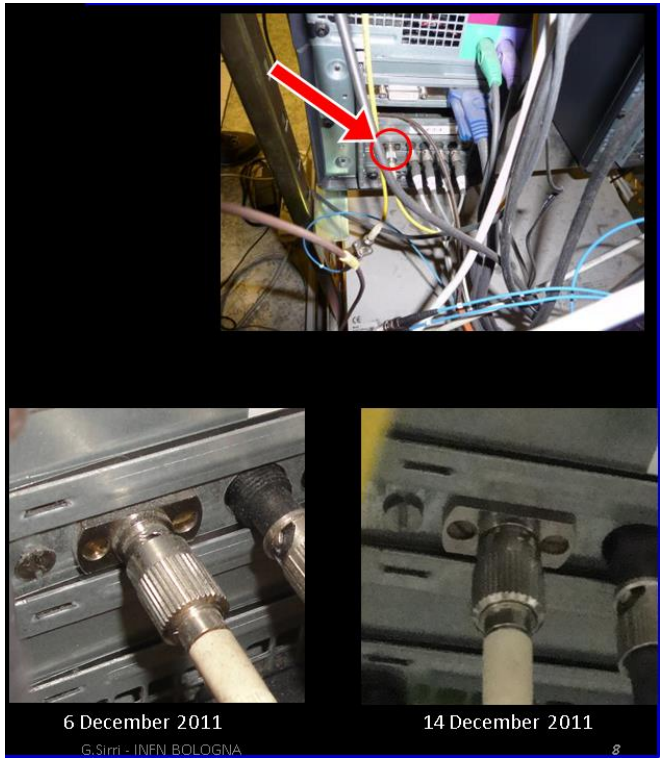
28/03/2012 LNGS G.Sirri - INFN BOLOGNA 5

- This change was of the right type to potentially cause an apparent early arrival time for the neutrinos, and of roughly the right size to explain OPERA's measurement.

Che cos'è successo

efforts to track down the problem led people to discover that the fiber carrying the laser pulse to OPERA's converter had not been screwed correctly into **the box**.

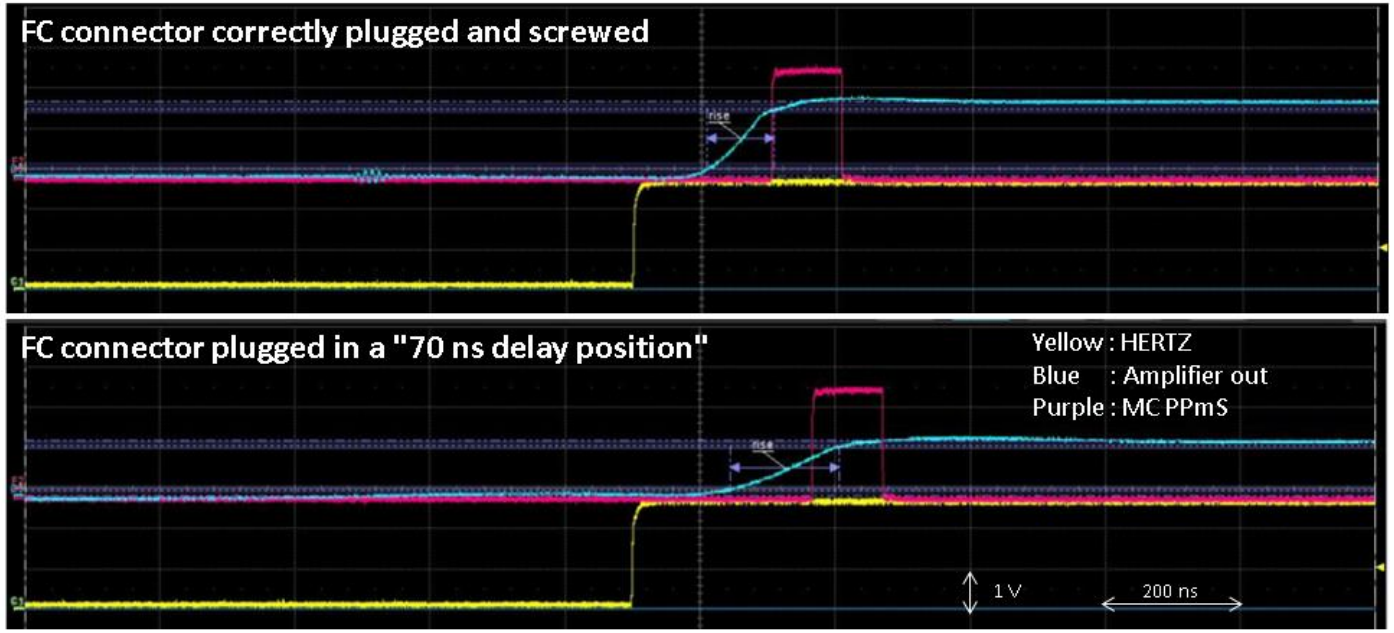
- this is not a "loose wire". A copper wire that isn't tightly connected to an electrical lead can cause an electrical device to behave erratically, because electrical current will sometimes flow and sometimes not. But the optical fiber isn't what most people think of as a wire — it carries light, not electrical current; and it wasn't loose, it just wasn't screwed in all the way
- Those within OPERA who were studying this problem found was that when they screwed the optical fiber in tightly, the time interval went right back to 41000 seconds
- But at around the same another problem appeared. They detected some kind of timing *drift.* For technical reasons, OPERA took data in 0.6 second chunks, and cross-checks of measurements suggested that the timing at the end of a chunk was not calibrated properly relative to the beginning of a chunk. So this added confusion to the situation. The drift would also have affected their measurements, though possibly in the other direction, causing neutrinos to apparently arrive *later*.



what was causing the two effects?

Che cos'è successo

Delay measured at an early stage of the amplifier circuit



The effect is related to the charging up of the photodiode capacitance.

The Reset signal sent to the sensors is delayed by the same amount as the MC PPmS.

→ Underestimation of the neutrinos ToF

Che cos'è successo

What about the drift? It turns out the Master Clock itself was not properly calibrated. After it fired with the laser pulse, at the start of each 0.6 second data chunk, it then drifted slightly during the next 0.6 seconds, by a total of 74 nanoseconds. Then it would be re-synchronized 0.6 seconds later (albeit incorrectly, due to the improper fiber connection) by one of the laser pulses coming down the fiber. On average, its drift would have an effect of 37 nanoseconds, but it would be worse at some times and better at others during the 0.6 second chunk of data. **This effect would make the neutrinos appear to arrive late, but turns out to be insufficient to cancel the effect of the fiber.**

1 Trigger / 1ms
DAQ cycle: 0.6 s

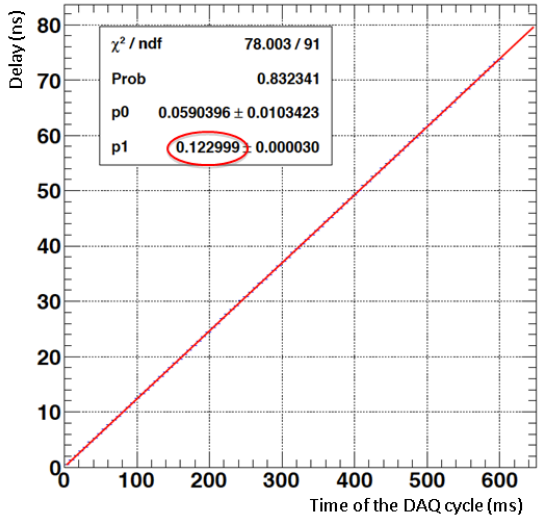
Time delay from 1st trigger of the DAQ cycle

(keeping only the ns digits of the DAQ time)

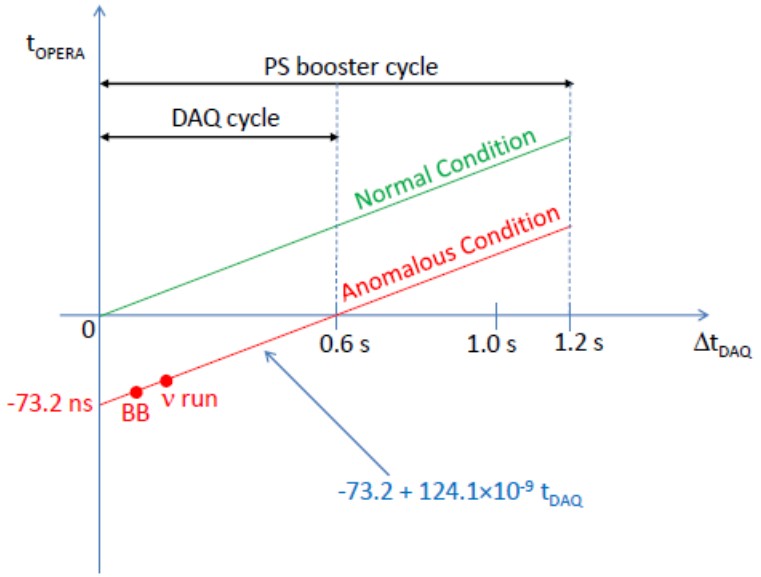
time delay between 2 triggers:
1ms + 0.123 ns

at the end of the DAQ cycle
⇒ 74 ns more

⇒ time drift between the OPERA MC and ESAT GPS2 oscillators



A working model



http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/neutrinos/neutrinos-faster-than-light/opera-what-went-wrong/

Caratteristiche degli strumenti di misura

Indichiamo con:

- G – la grandezza fisica
- M(G) – il risultato dell'operazione di misura di G
- V(G) – il valore vero della grandezza fisica (V(G)=M(G) solo se la misura è priva di errore)
- R(G) – la risposta dello strumento usato quale risultato della misura di G

Uno strumento fornisce una risposta, sul dispositivo di visualizzazione, in corrispondenza ad una determinata sollecitazione rilevata dall'elemento sensibile e connessa alla grandezza in misura.

Pertanto, per completare l'operazione di misura occorre conoscere la relazione tra la risposta R(G) ed il valore della sollecitazione V(G).

$$M(G) = \alpha R(G)$$

Tale relazione si chiama *taratura dello strumento*. Si ricava rilevando la risposta dello strumento per valori di G già noti.

Caratteristiche degli strumenti di misura

Per definire le caratteristiche generali degli strumenti (oltre alle condizioni di funzionamento) devono essere note:

- L'intervallo di funzionamento: definito tra il valore massimo – portata – ed il valore minimo – soglia – della grandezza da misurare che lo strumento è in grado di fornire.
- La prontezza: ovvero il tempo necessario affinché lo strumento risponda ad una variazione della sollecitazione; quanto minore è tale tempo – tempo caratteristico – tanto maggiore è la prontezza. Tanto più i tempi di variazione di G sono piccoli rispetto al tempo caratteristico, tanto minore è la capacità dello strumento di misurarli (normale voltmetro ha un tempo caratteristico di 1s, un oscilloscopio di 1ns).
- La sensibilità: definita come il rapporto tra la variazione di R(G) e la corrispondente variazione V(G), al limite per variazioni nulle:

$$S = \frac{dR(G)}{dV(G)}$$

  Se vi è una relazione lineare tra la risposta ed il valore vero, S è costante, ma in generale S è funzione di V(G).

Caratteristiche degli strumenti di misura

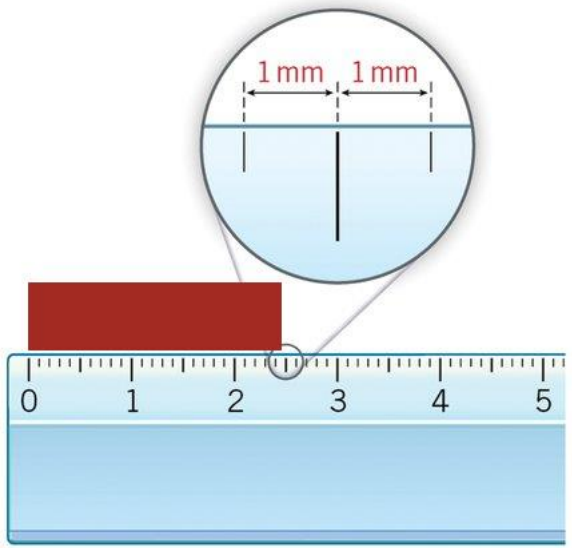
- L'errore di sensibilità ΔV : per ogni strumento esiste un limite all'accuratezza con cui si può rilevare la risposta. Valori di $R(G)$ che differiscono di meno $2\Delta R(G)$ vengono percepiti come lo stesso valore dall'osservatore. Ciò determina un'incertezza sulla conoscenza del valore V(G) pari a:

$$2\Delta V(G) = \frac{2\Delta R(G)}{S}$$

Il fattore 2 è presente per comodità: l'indeterminatezza sulla lettura del valore di R(G) implica che il valore effettivo è compreso tra $R(G) - \Delta R(G)$ e $R(G) + \Delta R(G)$ che corrisponde ad una grandezza misurata nell'intervallo compreso tra $M(G) - \Delta V(G)$ e $M(G) + \Delta V(G)$. Per convenzione si esprime questa indeterminazione indicando come risultato della misura:

$$M(G) \pm \Delta V(G)$$

Con $\Delta V(G)$ l'errore di sensibilità. In molti strumenti R(G) può assumere valori continui (analogici come calibri, metri, voltmetri) in altri solo discreti (strumenti digitali, contasecondi…). Nel secondo caso, non si può parlare di sensibilità ma solo di errore di sensibilità. Nel primo caso (generalmente) si fa in modo che la suddivisione della scala corrisponda proprio a $2\Delta V(G)$ in modo da poter leggere non solo il valore della misura ma anche il corrispondente errore di sensibilità.



Caratteristiche degli strumenti di misura

- La ripetibilità: la capacità dello strumento di fornire la stessa risposta alla stessa sollecitazione.
- L'affidabilità: robustezza di funzionamento nel tempo ed in condizioni di lavoro variabili.
- L'accuratezza: valore vero ≈ valore misurato (ovvero assenza di effetti sistematici)
- La precisione: fornisce un'indicazione di quanto R(G) non dipende solo da V(G). In ogni dispositivo infatti non possono essere trascurati effetti quali attriti meccanici, tolleranze costruttive, isteresi, fluttuazione di livelli elettrici, rumore elettronico, che fanno si che la risposta non sia sempre la stessa per la stessa sollecitazione.
- Classe di precisione:

$$c = 100\left(\frac{|M(G) - V(G)|}{P}\right)$$

Le norme CEI fissano i seguenti indici di classe normalizzati:

$$c = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5$$

(11 classi)

Inciso: regola della mezza divisione

Per un metro, $\Delta x = \frac{1}{2}$ divisione… non corrisponde all'errore di sensibilità. L'occhio umano riesce ad interpolare bene tra due tacche ad un millimetro. Prendete un calibro e confrontate le misure effettuate interpolando tra i millimetri con i valori del nonio. La dispersione delle misure sarà dell'ordine del decimo di millimetro (~ 0.07 mm).

Attrezzi da disegno – modalità di controllo per squadre, righe e multi decimetri (UNI 5131) riporta:

«sulla lunghezza ℓ della parte millimetrata è ammessa una tolleranza di $\pm \frac{0.2}{1000}\ell$»

Che da per letture a fondo scala precisioni di 0.1 mm. DIN infatti dice «line scales mainly have scale numbering with regular spacing and are mostly intended for a continuous reading»

- UNI: Ente nazionale italiano di unificazione
- ISO: International Organization for Standardization
- DIN: Deutsches Institut für Normung

Da un articolo su Nature del 1996

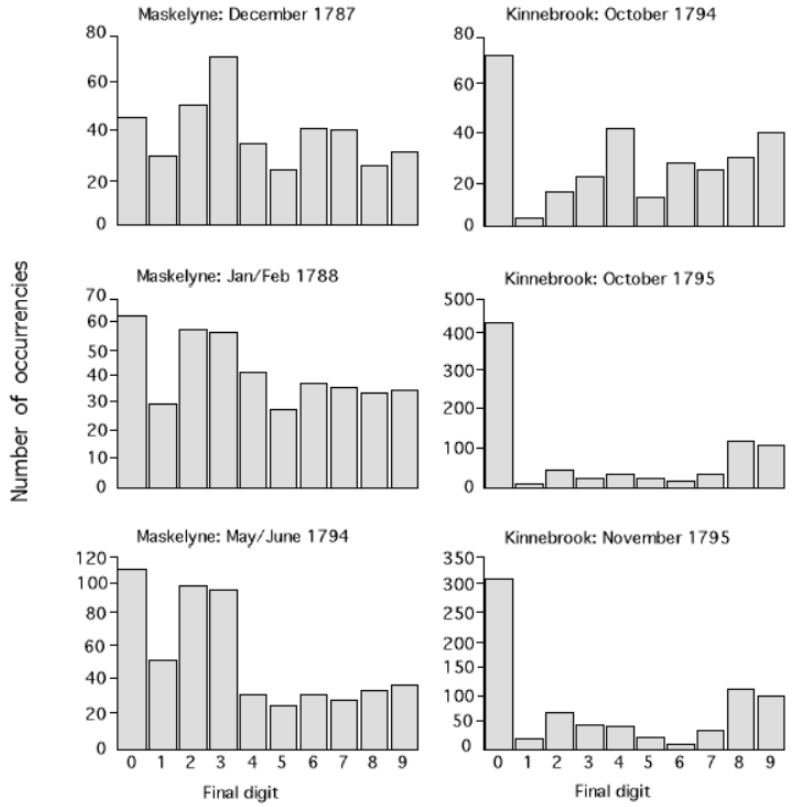


Figura 4: Istogramma dell'ultima cifra significativa nei dati di Maskelyne e in quelli del suo assistente.

Risultato: Maskelyne licenziò l'assistente Kinnebrooke accusandolo di inaccuratezza nelle letture.

Distribuzione delle misure

In alcuni casi la ripetizione delle misure di una stessa grandezza non fornisce identici valori per identiche condizioni.

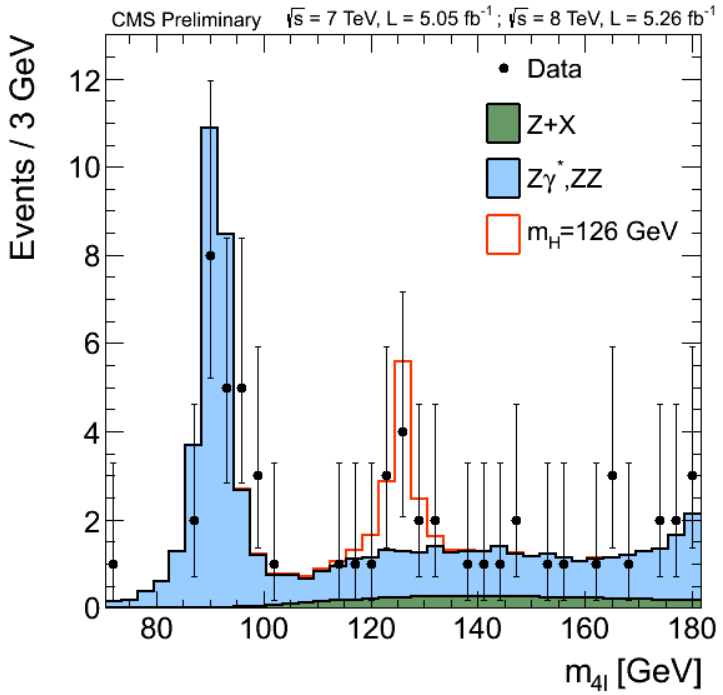
Qualitativamente possiamo dare ragione di questo risultato considerando l'assunto di identiche condizioni come una condizione ipotetica non realizzabile microscopicamente:

- Il valore assunto da una grandezza è dovuto all'effetto concomitante di tanti contributi di cui non è possibile tenere conto individualmente (ad esempio l'attrito è il risultato di tanti micro-effetti; correnti e potenziali elettrici sono dovuti al movimento di innumerevoli corpi elettricamente carici, soggetti ad agitazione termica ed a moti disordinati).
- La non riproducibilità complessiva non è manifesta quando i suoi effetti sono contenuti all'interno l'errore di sensibilità dello strumento di misura,
- Nel caso contrario la non riproducibilità è manifesta, e si riscontra una variabilità delle M(G) messa in evidenza in una particolare rappresentazione grafica chiamata istogramma.

Istogramma

Un istogramma si realizza riportando:

- In ascissa i valori possibili di M(G) sono suddivisi in n intervalli di ampiezza opportuna Δ, ma comunque non inferiori a $2\Delta V(G)$.
- Un intervallo i-esimo andrà da $\left(x_i - \frac{\Delta}{2}, x_i + \frac{\Delta}{2}\right]$, quello successivo da $\left(x_{i+1} - \frac{\Delta}{2}, x_{i+1} + \frac{\Delta}{2}\right]$ con $x_{i+1} - x_i = \Delta$….
- L'ordinata dell'intervallo i-esimo sarà il numero 'n_i' delle misure il cui valore è compreso nell'intervallo $x_{mis} \in \left(x_i - \frac{\Delta}{2}, x_i + \frac{\Delta}{2}\right]$.
- La scala orizzontale ha l'unità di misura di G (es. mm)
- La scala verticale ha come unità di misura il numero di conteggi nell'intervallo (es. Eventi/5 mm)



Interpretazione

- Un istogramma può a sua volta essere interpretato come la rappresentazione sperimentale di una funzione $f\big(M(G)\big)$ che tiene conto del modo in cui gli effetti microscopici influiscono su $M(G)$.
- Poiché non è semplice determinare in modo deduttivo la forma funzionale della funzione f ci si può limitare (per ora) a darne una rappresentazione grafica, cercando poi 'ad occhio' una curve che riproduca la forma dell'istogramma.
- Si usa poi rappresentare sinteticamente i complesso dei valori di $M(G)$ per mezzo di due grandezze significative; date n misure queste sono:
  - La media aritmetica $\bar{M}(G) = \frac{1}{n}\sum_i M_i(G) = \frac{1}{n}\sum_j n_j M_j(G)$
  - La 'stima' della deviazione standard o scarto quadratico medio

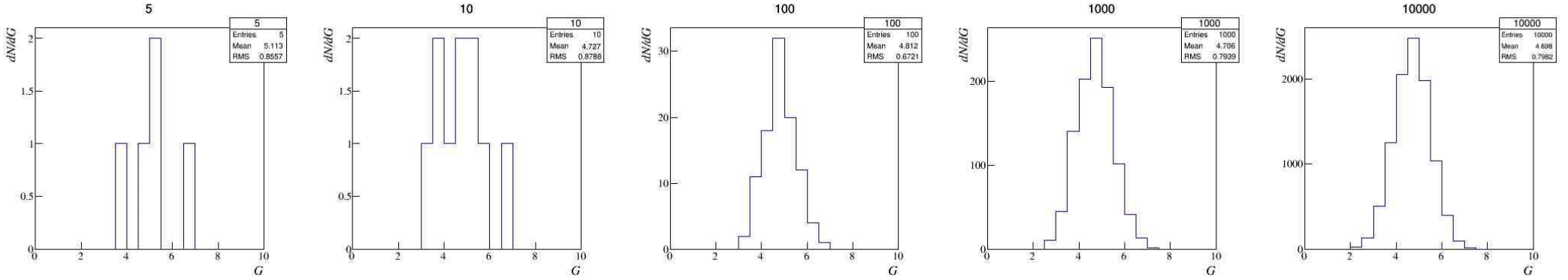
$$\sigma_G = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_i \big(\bar{M}(G) - M_i(G)\big)^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_j n_j \Big(\bar{M}(G) - M_j(G)\Big)^2}$$

Dove n è il numero totale di misure, $M_i(G)$ è la misura i-esima, n_j è il numero di misure che cade all'interno dell'intervallo j-esimo dell'istogramma e $M_j(G)$ è il valor medio della misura all'interno dell'intervallo j-esimo dell'istogramma.

Errori casuali

Nel caso di non riproducibilità delle misure V(G) può essere conosciuto solo con una certa indeterminazione chiamato errore casuale. Distinguiamo quindi tra:

- Errori massimi: se ripetendo la stessa misura si ottiene sempre lo stesso (o 2) risultato allora $\Delta V(G)$ è molto maggiore della fluttuazione intrinseca di G e delle fluttuazioni prodotte dall'apparato di misura. Non si ha quindi nessuna informazione per valutare il valore medio o la deviazione standard. In questo caso $\Delta V(G)$ assume il significato di valore massimo ed il risultato dell'operazione di misura viene indicato con la stessa notazione usata per gli errori di sensibilità.
- Errori casuali: nel caso (opposto) in cui $\Delta V(G) \ll \sigma_G$ si ottengono valori diversi ad ogni misura il cui istogramma approssima tanto meglio la distribuzione che esso rappresenta sperimentalmente tanto maggiore è il numero di misure effettuate e tanto minore è $\Delta V(G)$ rispetto a σ_G. In questo caso σ_G è detto errore statistico.



5.11 ± 0.86 4.73 ± 0.88 4.81 ± 0.67 4.71 ± 0.79 4.70 ± 0.80

Propagazione degli errori

Non è la stessa per errori casuali ed errori massimi.

Immaginiamo che una certa grandezza Z sia funzione generica delle n grandezze G_i:

$$Z = f(G_1, G_2, \dots, G_n)$$

Si può ottenere una misura indiretta (o derivata) di Z inserendo le misure delle $M(G)$ nella corrispondente relazione:

$$M(Z) = f(M(G_1), M(G_2), \dots, M(G_n))$$

E gli errori sulle misure dei diversi G si ripercuotono sull'incertezza su Z.

Sono possibili 3 casi (anche se al momento ci limitiamo al primo caso):

- Le incertezze sulle G_i sono indipendenti, ovvero l'errore su (ad esempio) G_1 non è influenzato dagli errori sugli altri G_i.
- Gli errori non sono indipendenti, ovvero su (ad esempio) G_1 è in relazione con gli errori sugli altri G_i
- Gli errori sono 'correlati', ovvero c'è sia una componente dipendente ed una indipendente.

Propagazione degli errori massimi

È noto che il differenziale totale di una funzione $f = f(x_1, \cdots, x_n)$ è dato da:

$$df = \sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot dx_i$$

Che rappresenta l'infinitesima variazione di f per infinitesime variazioni degli x_i. Una relazione analoga, anche se non esatta, vale per variazioni finite degli x_i, ma sufficientemente piccole

$$\Delta f \cong \sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i$$

Sostituendo $M(G_i)$ a x_i ed attribuendo a $\Delta M(G_i)$ il significato di errori massimi, si può ottenere l'errore massimo propagato sulla misura di Z, pur di assumere per i coefficienti di $\Delta M(G_i)$ solo valori positivi, in modo da combinare gli effetti nel più pessimistico dei modi:

$$\Delta M(Z) \cong \sum_i \left| \frac{\partial f}{\partial G_i} \right|_{G_i = M(G_i)} \cdot \Delta V(G_i)$$

Va tutto bene ? (vedremo a breve qualche paradosso)

Propagazione degli errori statistici

Qualora le $M(G_i)$ siano affette da errori statistici, la deviazione standard σ_Z si può ricavare con buona approssimazione dalle deviazioni standard σ_{G_i} mediante l'espressione:

$$\sigma_Z^2 \cong \sum_i \left(\left. \frac{\partial f}{\partial G_i} \right|_{G_i = M(G_i)} \right)^2 \cdot \sigma_{G_i}^2$$

Troveremo più avanti giustificazione all'uso di questa espressione.

E nel caso in cui le diverse misure siano in parte affette da errori massimi ed in parte da errori statistici? Di nuovo… daremo una risposta più avanti a questo interrogativo.

Errori relativi

Per valutare l'entità dell'errore (in molti casi) è utile confrontarlo con la misura stessa, nel caso di errori massimi l'errore relativo è dato da, ed è adimensionale:

$$E_r = \frac{\Delta V(G)}{M(G)}$$

Si può anche introdurre l'errore percentuale:

$$E_{\%} = 100 \cdot E_r = 100 \frac{\Delta V(G)}{M(G)}$$

L'uso di errori relativi permette di confrontare l'impatto dell'errore sulla misura di diverse grandezze dirette su misure di grandezze derivate.

Per misure indirette (ad esempio dominate da errori di sensibilità) l'errore relativo si scrive come:

$$\frac{\Delta M(Z)}{M(Z)} \cong \sum_i \frac{\left|\frac{\partial f}{\partial G_i}\right|_{G_i = M(G_i)} \cdot \Delta V(G_i)}{M(Z)}$$

Che in particolari casi assume un' espressione estremamente semplice (come vedremo).

Esempi:

Misura della circonferenza di un cilindro $C = \pi D$ il valore di del diametro dato da $D \pm \Delta D$. Per la legge che abbiamo visto:

$$\Delta C = \left|\frac{\partial C}{\partial D}\right| \Delta D = \pi \Delta D$$

Se avessi calcolato ΔC direttamente dalla semidifferenza tra il possibile valore massimo di C e quello minimo:

$$\Delta C = \frac{1}{2}[\pi(D + \Delta D) - \pi(D - \Delta D)] = \pi \Delta D$$

Avrei ottenuto esattamente la stessa cosa.

L'errore relativo è in questo caso pari a:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\pi \Delta D}{\pi D} = \frac{\Delta D}{D}$$

Esempi:

Misura della sezione di un cilindro S= $\pi\, D^2/4$ il valore di del diametro dato da $D \pm \Delta D$. Per la legge che abbiamo visto:

$$\Delta S = \left|\frac{\partial S}{\partial D}\right| \Delta D = \pi D \Delta D/2$$

Se avessi calcolato ΔS direttamente dalla semidifferenza tra il possibile valore massimo di Se quello minimo:

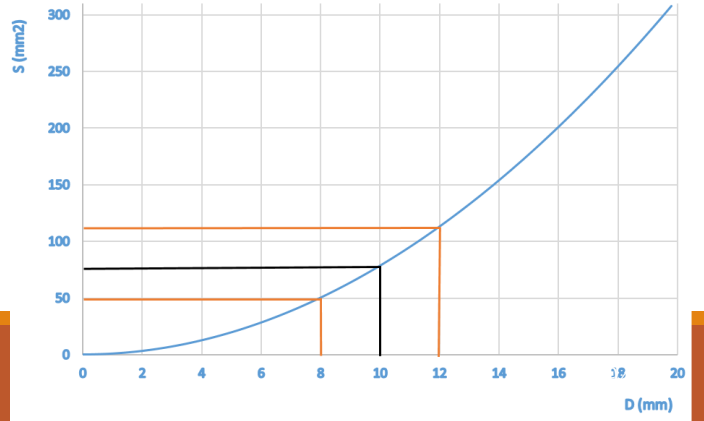
$$\Delta S = \frac{1}{2}\frac{\pi}{4}[(D+\Delta D)^2 - (D-\Delta D)^2] = \frac{\pi}{8}[4D\Delta D] = \pi D \Delta D/2$$

Avrei ottenuto esattamente lo stesso valore; ma qual è il valore delle due semidifferenze?.

$$\Delta S_u = \frac{\pi}{4}[(D+\Delta D)^2 - D^2] = \frac{\pi D \Delta D}{2} + \frac{\pi(\Delta D)^2}{4} \qquad \Delta S_d = \frac{\pi}{4}[D^2 - (D-\Delta D)^2] = \frac{\pi D \Delta D}{2} - \frac{\pi(\Delta D)^2}{4}$$

L'errore relativo è in questo caso pari a:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\pi D \Delta D/2}{\pi\, D^2/4} = 2\frac{\Delta D}{D}$$



Esempi:

Misura della superfice di una sfera $S = 4\pi D^2$ il valore di del diametro dato da $D \pm \Delta D$. Per la legge che abbiamo visto:

$$\Delta S = \left|\frac{\partial S}{\partial D}\right| \Delta D = 8\pi D \Delta D$$

Se avessi calcolato ΔS direttamente dalla semidifferenza tra il possibile valore massimo di S e quello minimo:

$$\Delta S = \frac{1}{2} 4\pi[(D + \Delta D)^2 - (D - \Delta D)^2] = 2\pi[4D\Delta D] = 8\pi D \Delta D$$

Avrei ottenuto esattamente lo stesso valore.

L'errore relativo è in questo caso pari a:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{8\pi D \Delta D}{4\pi D^2} = 2\frac{\Delta D}{D}$$

Esempi:

Misura del volume di una sfera $\mathrm{V} = \pi\, D^3/6$ il valore di del diametro dato da $D \pm \Delta D$. Per la legge che abbiamo visto:

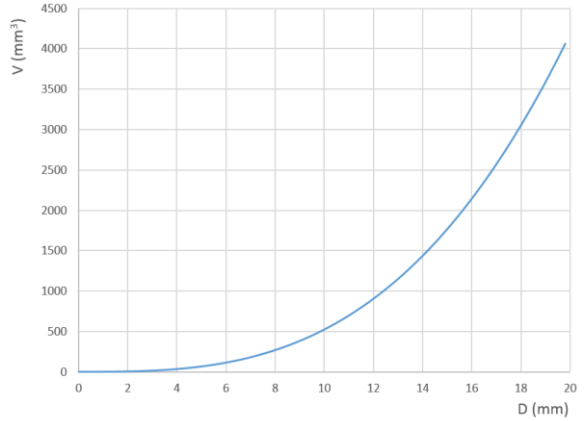
$$\Delta V = \left|\frac{\partial V}{\partial D}\right| \Delta D = \pi D^2 \Delta D/2$$

Se avessi calcolato ΔS direttamente dalla semidifferenza tra il possibile valore massimo di C e quello minimo:

$$\Delta S = \frac{1}{2}\frac{\pi}{6}[(D+\Delta D)^3 - (D-\Delta D)^3] = \frac{\pi}{12}[6D^2\Delta D + 2\Delta D^3] = \frac{\pi(3D^2\Delta D + \Delta D^3)}{6} \approx \pi D^2 \Delta D/2$$

L'errore relativo è in questo caso pari a:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\pi D^2 \Delta D/2}{\pi\, D^3/6} = 3\frac{\Delta D}{D}$$



E per valori misurati ≈ risoluzione?

Pensiamo di dover misurare la differenza tra due spessori (una lastra da 2 mm ed una da 1 mm): $d = h_1 - h_2$ misurati con un metro lineare ($\Delta h = 0.5$ mm). L'errore su d è dato da:

$$\Delta d = \left|\frac{\partial d}{\partial h_1}\right| \Delta h_1 + \left|\frac{\partial d}{\partial h_2}\right| \Delta h_2 = \Delta h_1 + \Delta h_2 = 2\Delta h$$

Con un risultato per d che è:

$$1.0 \pm 1.0 \text{ mm}$$

Dovremmo quindi dire «le misure sono uguali entro gli errori!»

Per inciso per la somma $d = h_1 + h_2$

$$\Delta d = \left|\frac{\partial d}{\partial h_1}\right| \Delta h_1 + \left|\frac{\partial d}{\partial h_2}\right| \Delta h_2 = \Delta h_1 + \Delta h_2 = 2\Delta h$$

Stesso errore!

Esempio propagazione errori massimi

Nel caso in cui la grandezza che vogliamo misurare è un prodotto di varie grandezze generiche indipendenti eventualmente elevate a diverse valori di potenze:

$$w = x^{\alpha} y^{\beta} z^{-\gamma}$$

L'errore massimo su w ottenuto mediante la legge di propagazione degli errori massimi è:

$$\Delta w = \left|\frac{\partial w}{\partial x}\right| \Delta x + \left|\frac{\partial w}{\partial y}\right| \Delta y + \left|\frac{\partial w}{\partial z}\right| \Delta z$$

$$= \alpha x^{\alpha-1} y^{\beta} z^{-\gamma} \Delta x + \beta x^{\alpha} y^{\beta-1} z^{-\gamma} \Delta y + \gamma x^{\alpha} y^{\beta} z^{-\gamma-1} \Delta z$$

Interessante è per questi prodotti l'errore relativo:

$$\frac{\Delta w}{w} = \alpha \frac{\Delta x}{x} + \beta \frac{\Delta y}{y} + \gamma \frac{\Delta z}{z}$$

Somma dei diversi errori relativi pesata per la potenza!

Propagazione degli errori relativi di prodotti

Più in generale, dato:

$$y = \prod_i x_i^{\alpha_i}$$

L'errore relativo su y è semplicemente dato da:

$$\frac{\Delta y}{y} = \sum_i |\alpha_i| \cdot \frac{\Delta x_i}{|x_i|}$$

Uno dei vantaggi di questa scrittura, oltre alla facilità di calcolo, è quello di poter valutare in modo immediato l'errore di misura dominante e quali sono viceversa i termini che possono essere trascurati. L'errore massimo su y può essere ottenuto da:

$$\Delta y = y \cdot \left(\sum_i |\alpha_i| \cdot \frac{\Delta x_i}{|x_i|} \right)$$

PS: per le somme questa 'fattorizzazione' non avviene:

$$y = \sum_i x_i^{\alpha_i} \Rightarrow \frac{\Delta y}{y} = \sum_i \frac{\left| \alpha_i x_i^{\alpha_i - 1} \right|}{\left| \sum_j x_j^{\alpha_j} \right|} \cdot \Delta x_i$$

Cifre significative

Si chiamano cifre significative le cifre lette della misura di una grandezza fisica. Dipendono dalla sensibilità dello strumento.

- Tutti i valori non nulli rappresentano cifre significative.
- Gli zeri compresi tra digit non nulli sono cifre significative.
  - esempio: gli zeri in verde (tutti) sono significativi 4506002
- Gli zeri che precedono la prima cifra significativa (digit non nullo) non sono cifre significative.
  - esempio: in 0.0012, gli zeri (in rosso) non sono cifre significative (il numero in questione ha due sole cifre significative)
- Gli zeri finali sono significativi solo se presente la virgola (o punto decimale in inglese).
  - esempio: in 13900 gli zeri in rosso non sono significativi, ma in 13900.0 tutti gli zeri (in verde) sono significativi
  - Nel primo caso è utile l'uso della notazione scientifica 1.39×10^4

Cifre significative in operazioni

Per addizioni e sottrazioni Il numero risultante ha lo stesso numero di cifre decimali del numero a minor numero di cifre decimali.

$$20.12 + 102.423 = 122.54$$

Per moltiplicazioni e divisioni il numero risultante (prodotto) ha lo stesso numero di cifre significative del fattore con il minor numero di cifre significative.

$$10.0 \times 3.1415926 = 31.4$$

- Nei calcoli manteniamo una o due cifre significative in più rispetto al risultato finale.
- Nelle misure indirette il numero di cifre significative è definito dall'errore associato alla misura

Cifre significative

Regole per l'arrotondamento

Per semplicità, nei calcoli intermedi mantenere tutti le cifre e arrotondare i valori finali al numero richiesto (corretto) di cifre significative.

L'arrotondamento va effettuato, di norma, prendendo in considerazione solamente la prima cifra oltre l'ultima significativa (chiamiamola "extra").

- se tale cifra è minore o uguale a 4, il valore dell'ultima cifra significativa rimane inalterato.
- se è maggiore di 5, il valore dell'ultima cifra significativa deve essere incrementato di una unità.
- se è 5 seguito da un numero maggiore di zero si opera come il caso precedente. Se il cinque è seguito da un certo numero di zeri, caso estremamente particolare, il valore precedente viene arrotondato al numero pari più vicino.
- se è 5 seguito solo da un certo numero di zeri senza altre cifre, caso estremamente particolare, il valore precedente viene arrotondato al numero pari più vicino.

Incertezze di misura e cifre significative

Si definiscono cifre significative del risultato di una misura le cifre certe e la prima cifra incerta.

E' tollerato, per avere una precisione maggiore sull'errore avere 2 cifre significative sull'errore (e di conseguenza aumentare di un'unità le cifre significative della misura.

Esempi:

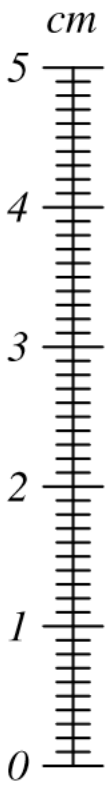
Misura	Risultato	Notazione scientifica	Risultato II
112859 ± 6240	113000 ± 6000	$(1.13 \pm 0.6) \times 10^5$	$(1.129 \pm 0.62) \times 10^5$
731 ± 23	730 ± 20	$(7.3 \pm 0.2) \times 10^2$	$(7.31 \pm 0.23) \times 10^2$
1096 ± 364	1100 ± 400	$(1.1 \pm 0.4) \times 10^3$	$(1.10 \pm 0.36) \times 10^3$
7.853 ± 0.482	7.9 ± 0.5		7.85 ± 0.48
2.9555 ± 0.06268	2.96 ± 0.06		2.956 ± 0.062
3.05 ± 0.034	3.05 ± 0.03		
3.0537 ± 0.0034	3.054 ± 0.003		3.0537 ± 0.0034

Compatibilità

Un altro concetto importante riguarda la compatibilità di due misure

- Due misure si dicono compatibili se esiste un valore che rientra in entrambi gli intervalli delle misure. Ad esempio
  - le due misure $10\ cm\ \pm\ 2\ cm$ e $7\ cm\ \pm\ 2.5\ cm$ sono compatibili, perché le misure tra $8\ cm$ e $9.5\ cm$ soddisfano entrambi gli intervalli
  - Le due misure $10\ cm\ \pm\ 1\ cm$ e $7\ cm\ \pm\ 1.5\ cm$ non sono compatibili, perché la prima indica che la misura vera al minimo vale $9\ cm$, mentre la seconda dice che al massimo vale $8.5\ cm$
- La differenza tra le migliori stime delle due misure si dice discrepanza. Ad esempio
  - Tra $10\ cm\ \pm\ 2\ cm$ e $7\ cm\ \pm\ 2.5\ cm$ la discrepanza è di $3\ cm$
- In una misura, trovare due misure non compatibili rappresenta un problema: sicuramente c'è stato un errore nel processo di misurazione
  - In alcuni casi, potrebbe essere stata semplicemente sottostimata l'incertezza
- In questi casi potrebbe essere necessario scartare le vecchie misure, individuare l'errore e ripetere le misurazioni dall'inizio

Esempio



Misure compatibili	*Misure non compatibili*	*Misure compatibili*
(2,9 ± 0,8) cm *(1,6 ± 1) cm*	*(2,9 ± 0,4) cm* *(1,6 ± 0,5) cm*	*(2,3 ± 0,4) cm* *(1,6 ± 0,5) cm*

Precisione e compatibilità

- In un esperimento quindi è necessario innanzitutto eseguire misurazioni in modo che il margine di errore sia minimo, ma occorre valutare attentamente quale sia l'errore massimo che possiamo ottenere

- In caso contrario, da un lato si rischia di ottenere misure poco significative (con margini di errore troppo grandi), dall'altro si potrebbero ottenere misure incompatibili che invalidano l'esperimento

ESPERIENZE CON STRUMENTI DI MISURA

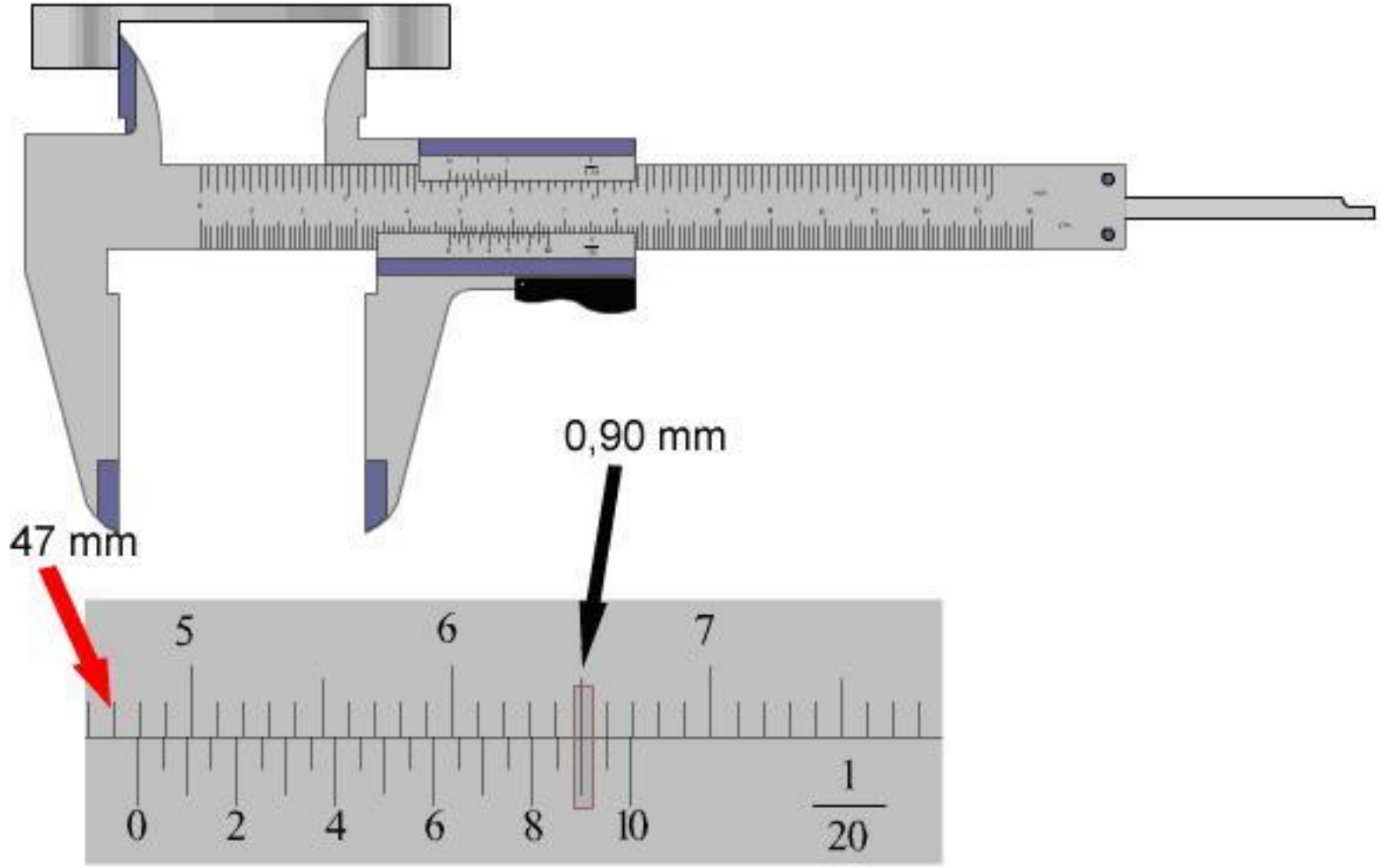
Calibro ventesimale

Il calibro è uno strumento realizzato in acciaio inossidabile ben lavorato meccanicamente e costituito da un **regolo** (fisso) sul quale può scorrere un cursore detto **nonio**.

Nel calibri del laboratorio 20 divisioni della scala del nonio d, corrispondo a 39 divisioni della scala principale D in millimetri. Ovvero 1 divisione del nonio misura 39/20 mm, pari a 1.95 mm.

Se il nonio viene spostato in avanti di una distanza pari a $\delta = 2D - d = 0.05$ mm, allora la sua prima tacca del nonio coinciderà (0.05+1.95=2.00 mm) con la seconda tacca della scala principale; se il nonio si sposta di una quantità pari a $2\delta = 0.10$ mm allora la seconda tacca del nonio coinciderà con la quarta tacca della scala principale e così via, riazzerando la scala di lettura del nonio ad ogni millimetro della scala principale.

Calibro ventesimale, esempio di lettura



Calibro digitale

In questo tipo di calibro, sul corsoio viene montato un indicatore elettronico digitale che ne rileva lo spostamento, mentre sul corpo viene normalmente incisa una scala millimetrata, usata però solo per la verifica grossolana dello strumento elettronico.

I display sono normalmente realizzati con una risoluzione 0,01 mm.

Sono dotati indicatori miniaturizzati e dal consumo molto basso.

Gli indicatori possono disporre di numerose funzioni:

- visualizzazione sia di letture metriche, che inglesi;
- azzeramento della lettura in un punto arbitrario;
- settaggio arbitrario di una quota;
- collegamento seriale con un PC

I calibri vengono costruiti in modo che lo strumento dia la massima precisione alla temperatura standard di 20 °C. Misurazioni effettuate a temperature significativamente più alte, e con strumenti di grande risoluzione, devono tenere conto della dilatazione del materiale con cui è costruito il calibro stesso.

Calibro digitale

Il rilevamento di tipo capacitivo è solitamente impiegato per i commutatori di tipo tattile, dove il dito dell'utente svolge il ruolo della seconda armatura del condensatore.

Ma l'uso del rilevamento capacitivo non è limitato ai commutatori on/off e il calibro digitale ne è un classico esempio.

Circa 30 anni fa Ingvar Andermo, un ingegnere elettrico che lavorava presso l'istituto di ricerca IM di Stoccolma, stava lavorando a un'applicazione per la lettura di banconote.

Utilizzando la tecnologia capacitiva. C.E. Johansson contattò Andermo per lo sviluppo di un calibro digitale utilizzando la tecnologia magneto-resistiva, ma Andermo ritenne quell'approccio troppo complicato e decise di sfruttare la sua esperienza nel campo del rilevamento capacitivo. Il primo calibro prodotto da Johansson fece il suo debutto durante un'esposizione a Chicago nel 1980. Più tardi Johansson cedette in licenza la tecnologia alla giapponese Mitutoyo che alcuni anni dopo commercializzò il suo primo calibro digitale, venduto in tutto il mondo in milioni di unità

Calibro digitale

[7] Specifiche tecniche

Risoluzione: 0.01mm Ripetibilità: 0.01mm

Precisione:

Dimensione misura	Precisione
450mm (18″), 600mm (24")	±0.05mm (± .002″)
500mm (20″), 750mm (30")	±0.06mm (± .0025″)
1000mm (40″)	±0.07mm (±.003″)

Massima velocità di risposta : Illimitata (A causa della velocità del corsoio non risulterà il conteggio errato)

Alimentazione : 1 pila SR44 (ossido d'argento)

Durata della batteria : 3.5 anni in condizioni di normale impiego

Temperatura di funzionamento : da 0°C a 40°C

Temperatura di immagazzinamento : da –10°C a 60°C

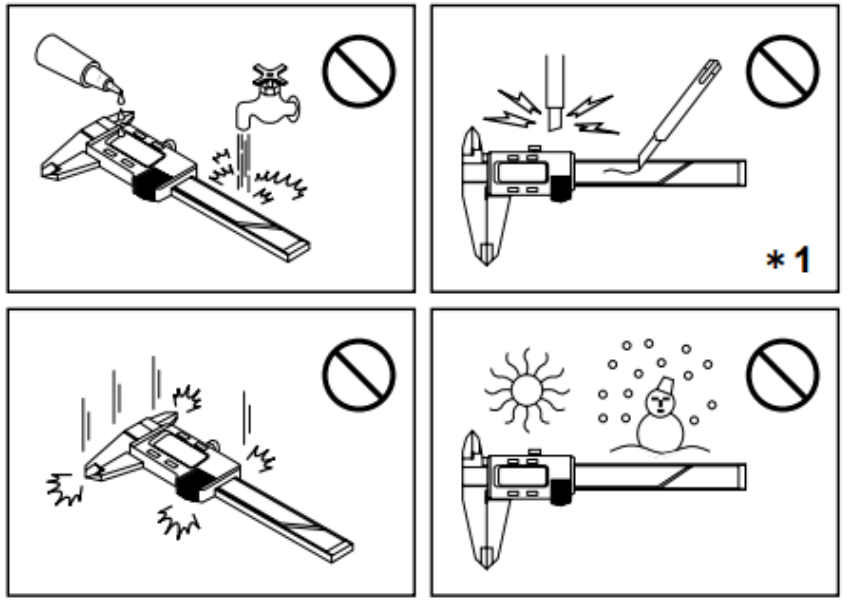
[8] Assegnazione connettore pin

[9] Formato uscita dati

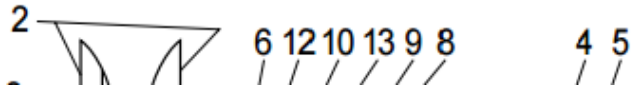
(1) Ordine d'uscita (2) Tutte "F" (1111) (3) Segno

(4) Dati misurati (5) Punto decimale (6) Unità

デジマチック



]



Micrometro Palmer o calibro centesimale

Stesso principio: scala principale, divisa in 0.5 mm solidale e scala secondaria, sulla parte rotante divisa in 50 parti. E' costituito da una vite micrometrica di estrema precisione con passo di 0.5 mm. La vite termina in un tamburo graduato suddiviso come detto in 50 parti. La risoluzione del calibro è quindi di $0.5/50 = 0.01$ mm

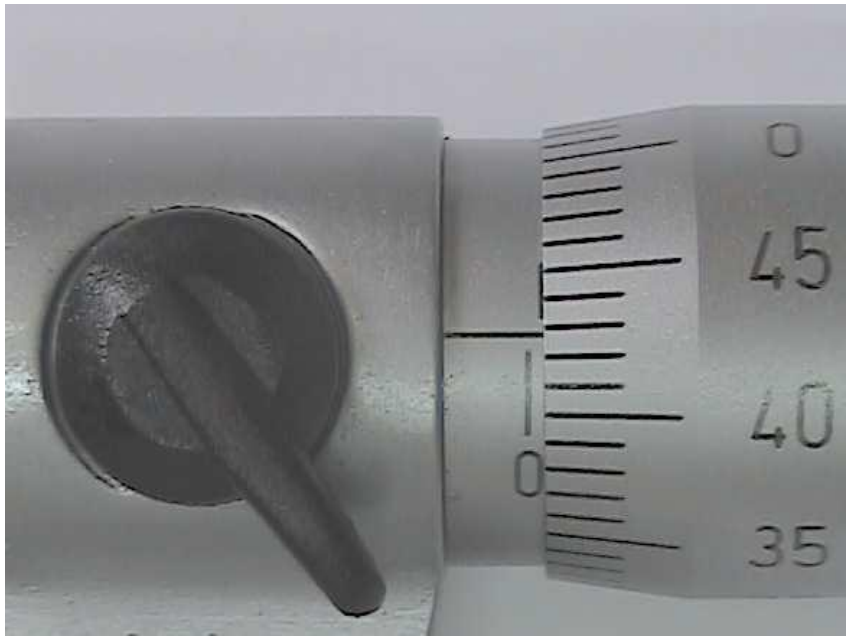
Sfrutta come amplificatore una vite: poiché' ad ogni giro la punta della vite avanza di una lunghezza pari al passo, suddividendo in più parti l angolo giro e possibile frizione blocco ottenere, con passi piccoli e suddivisioni angolari numerose, elevatissime sensibilità

Micrometro Palmer

- Lettura dello strumento: attenzione alla scala principale: lo sbaglio più frequente e di contare un passo in più o in meno in corrispondenza dei valori sul tamburo prossimi allo zero.
- Prestate attenzione agli errori sistematici. Sforzando eccessivamente la vite a fine corsa si può provocare una deformazione della struttura dello strumento provocando uno spostamento sistematico dello zero: errore di zero.
- Un uso corretto richiede che si calcoli la media aritmetica di almeno una decina di misure effettuate a sollecitazione nulla. Il valore ottenuto va sottratto a tutti i valori letti.
- Qualora fosse necessario si potrebbe invece eseguire un azzeramento dello strumento. Questa operazione consiste nel modificare lo strumento ruotando la madrevite all'interno della struttura per spostarla fino ad annullare lo zero dello strumento.
- Per controllare la pressione esercitata sull'oggetto in misura dalla punta della vite micrometrica, la parte finale del tamburo e dotata di un meccanismo "a frizione". In prossimità del valore finale e anche necessaria una bassa velocita di rotazione del tamburo per evitare che l energia cinetica acquisita dal tamburo consenta di superare la pressione che sarebbe stata regolata dalla frizione.

Micrometro Palmer

0.427±0.002 mm



[5] SPECIFICHE TECNICHE

1. Specifiche tecniche di ciascuna serie

*1: L'errore strumentale viene determinato a 20°C ad esclusione dell'errore di quantizzazione (±1 digit). Il valore è stato arrotondato. L è la lunghezza massima di misurazione (mm/pollici).

*2: Il diametro minimo di un foro in cui è possibile inserire l'incudine cambia per i modelli della serie 395. (BMB1-MJ: Φ 2mm, BMB2-MJ: Φ 3.6mm, BMB3-MJ: Φ 4.8mm, BMB4-MJ: Φ 8.2mm)

2. Specifiche tecniche comuni

Risoluzione	:	0,001mm (0,00005")
Errore di quantizzazione	:	±1 digit
Display	:	LCD (6 cifre e un segno meno)
Alimentazione	:	cella ossido di argento (SR44), 1 pezzo
Durata batteria	:	1,2 anni
Temperatura	:	da 5°C a 40°C (funzionamento), da -10°C a 60°C (immagazzinamento)
Accessori standard	:	chiave (code. 301336) Asta standard di azzeramento (per intervalli di misurazione di 25mm/1" o superiori)

Livello di protezione IP-65 (per maggiori dettagli, fare riferimento a IEC60529).

- Protezione dalla polvere (livello 6) : proteggere l'attrezzatura dalla penetrazione della polvere.
- Protezione dagli spruzzi d'acqua (livello 5) : proteggere l'attrezzatura dagli spruzzi d'acqua da ogni direzione.

I esperienza in laboratorio

Misura della superficie e del volume di vari oggetti e calcolo del rispettivo errore di misura.

Bisogna verificare che:

- Le misure siano dominate dalla risoluzione degli strumenti
- Le tolleranze di realizzazione degli oggetti siano inferiori alla risoluzione degli strumenti usati
- La taratura degli strumenti sia corretta

Esperienza I

Esperienza 1
Misura della densita' di due copri di forma regolare

Scopo
- uso dei calibri per la misura delle dimensioni
- misura indiretta dei volumi e delle dendita'
- confronto delle densita' dei due oggetti scelti

Strumentazione a Disposizione
- metro a nastro, per una prima misura delle dimensioni del corpo
- calibro a cursore ventesimale, per una miglior determinazione delle dimensioni
- calibro Palmer, per una misura più precisa delle dimesioni
- bilancia elettronica, per la misura della massa

Volume dei corpi

1. Operazioni Preliminari
   1.1. determinarne l'intervallo di funzionamento e gli errori di sensibilità degli strumenti a disposizione per le misure delle lunghezze
   1.2. verificate l'azzeramento del calibro a cursore e del calibro Palmer
   1.3. stabilire la formula appropriata per la determinazione del volume del corpo in funzione delle sue dimensioni lineari e ottenete l'espressione del corrispondente errore utilizzando le leggi di propagazione degli errori massimi assoluti e relativi
2. Dimensioni e Volume dei corpi
   2.1. misurare una volta le diverse dimensioni lineari che intervengono nella formula che esprime il volume del corpo utilizzando per ogni dimensione, successivamente, gli strumenti di misura nell'ordine dell'errore di sensibilita' decrescente. Verificare la compatibilita' dei valori ottenuti.
   2.2. con lo strumento di sensibilita' maggiore ripetere almeno 5 volte l'operazione di misura "nello stesso punto" e altrettante in punti diversi; stabilire il valore da utilizzare (ed il corrispondente errore) per la misura dei volumi e motivate la scelta
   2.3. determinate il volume e stimate il corrispondente errore utilizzando le misure ottenute

Massa dei corpi

3. determinate la massa dei corpi con la bilancia elettronica

Densità dei corpi

4.1 scrivere la formula che lega la densità media di un corpo alla sua massa ed al suo volume, e il corrispondente errore utilizzando le leggi di propagazione degli errori massimi assoluti e relativi
4.2 determinate la densità dei corpi ed i corrispondenti errori
4.3 verificare se le densità misurate sono compatibili con quelledei materiali più diffusi e se sono compatibili tra loro

nome
data esperienza

Risultati dell'Esperienza 1
Misura della densità di due corpi di forma regolare (O1 e O2)

Strumenti di misura

	intervallo di funz.	errore di sensibilità	azzeramento
metro a nastro			
calibro vent.			
calibro Palmer			

O1
disegno schematico
con indicate le dimensioni
misurate per determinarne
il volume
formula per il volume e l'errore

dimensioni

	l1± Δl	l2± Δl	l3± Δl
metro a nastro			
calibro vent.			
calibro Palmer			

compatibili?

ulteriori misure nello stesso punto e in punti diversi

l1± Δl	l2± Δl	l3± Δl	l1± Δl	l2± Δl	l3± Δl

valori usati per determinare il volume

l1± Δl	l2± Δl	l3± Δl

motivazione:

Volume di O1 ed errore:

Massa di O1:

Densità di O1
Formula usata per la densità e l'errore (assoluto e relativo):

Risultato:

O2
disegno schematico
con indicate le dimensioni
misurate per determinarne
il volume
formula per il volume e l'errore

dimensioni

	l1 ± Δl	l2 ± Δl	l3 ± Δl
metro a nastro			
calibro vent.			
calibro Palmer			

compatibili?

ulteriori misurenello stesso punto e in punti diversi

l1 ± Δl	l2 ± Δl	l3 ± Δl	l1 ± Δl	l2 ± Δl	l3 ± Δl

valori usati per determinare il volume

l1± Δl	l2± Δl	l3± Δl

motivazione:

Volume:

Massa di O2:

Densità di O2
Formula usata per la densità e l'errore (assoluto e relativo):

Risultato:

Commenti
- *valori di densita' compatibili con l'ipotesi che si tratti dello stesso materiale?*
- *di che materiale(i) potrebbe trattarsi?*

Slides

TROVATE LE SLIDE AGGIORNATE SULLA PAGINA MOODLE2 DEL CORSO

http://moodle2.units.it/course/view.php?id=315

Nelle news del forum

http://moodle2.units.it/mod/forum/discuss.php?d=460