

Quando puoi misurare ciò di cui stai parlando, ed esprimerlo in numeri, tu conosci qualcosa su di esso; ma quando non puoi misurarlo, quando non puoi esprimerlo in numeri, la tua conoscenza è scarsa e insoddisfacente. Può essere l'inizio della conoscenza, ma nei tuoi pensieri, sei avanzato poco sulla via della scienza.

William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907)

# Sistema Internazionale di unità di misura

# SI

(Anita Calcatelli)



## Note introduttive:

linguaggio e definizioni

## Il sistema internazionale di unità di misura

Brevissimi cenni storici

Caratteristiche

Le unità di base e derivate

Situazione attuale e prospettive future

## L'organizzazione della metrologia

Internazionale

Nazionale



## *Riferibilità:*

*un problema che viene da lontano*

... Non commettere ingiustizia nelle misura di lunghezza, nei pesi o nelle misure di capacità. Avrete bilance giuste, pesi giusti, *efa* giusti, *hin* giusti. Io sono il Signore, vostro Dio, che vi ho fatto uscire dal paese di Egitto ....

### Levitico 19, 35-36

terzo libro della Torah ebraica e della Bibbia cristiana, forse redatta in forma scritta tra VI e V secolo a.C.



## Note introduttive

### Linguaggio e definizioni

“International Vocabulary of metrology-  
Basic and General concepts and associated  
terms (VIM)”, JCGM 200:2008



**Grandezza:** attributo di un fenomeno, corpo o sostanza, che può essere distinto qualitativamente o determinato quantitativamente, es. massa, forza, energia, corrente..., o periodo di un pendolo

Varie  
grandezze.....



## Grandezze di base

Grandezza	Simbolo della grandezza	Simbolo della dimensione
lunghezza	$L, x, r, \dots$	L
massa	$m$	M
tempo, durata	$t$	T
corrente elettrica	$I, i$	I
temperatura termodinamica	$T$	$\Theta$
quantità di sostanza	$n$	N
intensità luminosa	$I_v$	J



**Grandezza derivata:** grandezza che, in un sistema di grandezze, è definita in funzione delle grandezze di base di quel sistema.

velocità = spazio/intervallo di tempo

accelerazione = velocità /intervallo di tempo =  
spazio/tempo<sup>2</sup>

forza = massa x accelerazione =  
massa x spazio/tempo<sup>2</sup>

pressione = forza/superficie =  
[massaxspazio/tempo<sup>2</sup>]/spazio<sup>2</sup>



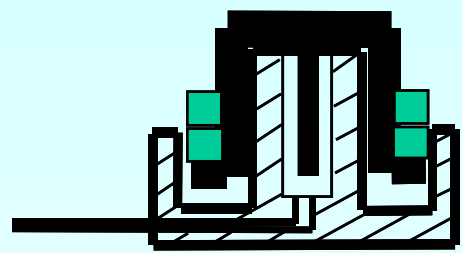
**Grandezza di influenza:** grandezza che non è oggetto della misurazione, ma che influisce sul valore del misurando o sulle indicazioni degli strumenti di misura

**Esempio:** se una barra d'acciaio deve essere misurata a  $1 \mu\text{m}$ , pressione e temperatura dovranno essere specificate: si dovrà dare la lunghezza della barra, per es, a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $10^5 \text{ Pa}$ . Ciò non è necessario se la lunghezza della barra deve essere fornita a  $1 \text{ mm}$ .





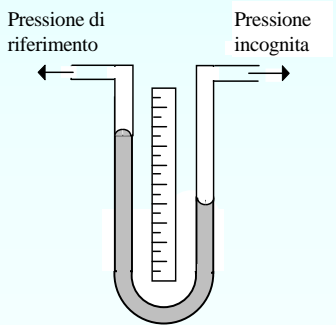
**Esempio: la temperatura nella misurazione di pressione e di molte altre grandezze**



**Pressione=forza peso/superficie**

$$p = \frac{\sum_i M_i g_L (1 - \rho_a / \rho_m) + \gamma C}{A_0 (1 + \lambda p) [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - t_{rif})]} = \frac{\Sigma M_i g}{A(T)}$$

$$p = f(M_i, g_L, A_0, t)$$



**$p = \rho_{Hg} g_L \Delta h$   $\rho_{Hg} = f(t)$  attraverso il coefficiente di dilatazione termica**



**Unità di misura:** grandezza determinata, adottata per convenzione, usata per esprimere quantitativamente grandezze aventi la stessa dimensione (riferimento Norma UNI 4546)

**Simbolo di una unità di misura:** segno convenzionale che designa una unità di misura

**Sistema di unità di misura:** insieme stabilito di unità per un determinato sistema di grandezze (ad esempio il SI, Sistema Internazionale di unità di misura)

# Campione



**campione materiale**, strumento per misurazione o sistema di misurazione inteso a **definire, realizzare, conservare o riprodurre una unità** ovvero uno o più valori noti di una grandezza per trasmetterli per confronto ad altri strumenti di misurazione.

esempi: massa campione di 1 kg, blocchetto di riscontro campione, resistore campione da 100  $\Omega$ , amperometro campione, campione atomico di cesio):

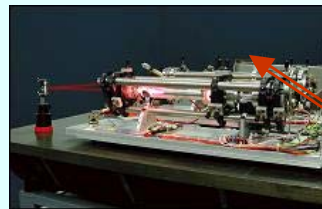


Istituto e Museo di storia della  
Scienza-Firenze

## Vari campioni



**campione primario:** campione che presenta le migliori caratteristiche metrologiche in un certo dominio specificato



**campione secondario:** campione il cui valore è fissato per confronto con il campione primario



**campione internazionale:** campione riconosciuto da un accordo internazionale per servire come base internazionale a fissare il valore di tutti gli altri campioni della grandezza considerata



**campione nazionale:** campione riconosciuto con decisione ufficiale nazionale come base per fissare, in una nazione, il valore di tutti gli altri campioni della grandezza considerata (il campione nazionale di un Paese è sovente un campione primario)



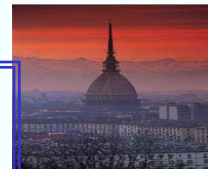
**campione di riferimento:** campione, in genere della migliore qualità metrologica disponibile in un dato luogo, dal quale sono derivate le misurazioni eseguite in quel luogo, per es. in un reparto di produzione (calibro tarato).



**campione di lavoro:** campione, generalmente tarato rispetto ad un campione di riferimento, che è usato comunemente per tarare o controllare campioni materiali o strumenti per misurazione.

**campione di trasferimento:** campione usato come intermediario per confrontare tra loro campioni, campioni materiali o strumenti di misurazione.

**campione viaggiante:** campione talvolta appositamente realizzato destinato ad essere trasportato in luoghi differenti (ad esempio campione atomico di frequenza al cesio, portatile, alimentato a batteria)



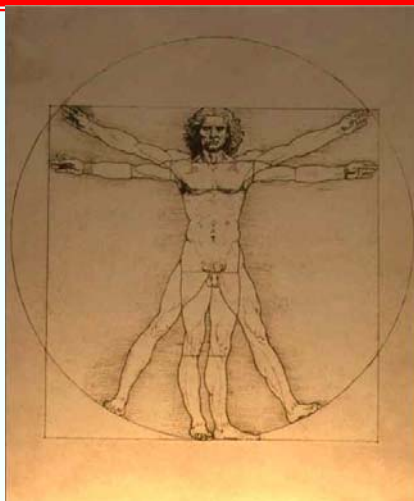
**Misurando**: grandezza oggetto della misurazione, ad esempio la lunghezza del diametro di una sfera o la massa di un corpo.

**Misurazione** è quel procedimento che permette di ottenere la descrizione quantitativa di una grandezza fisica cioè il valore numerico del rapporto tra la grandezza incognita e quella omogenea scelta come unità di misura.

La scelta della grandezza omogenea avviene tramite la **definizione del campione**.



**Il valore numerico che risulta dal procedimento di misurazione tra il misurando e il campione viene definito misura e deve sempre essere accompagnato dall'unità di misura.**



Altezza di un individuo =

$$170 \text{ cm} = 1,5 \text{ m}$$





La parola "incertezza" significa dubbio circa la validità dei risultati di una misurazione.

Si eseguono e producono misure per prendere, **sulla base del risultato ottenuto**, delle decisioni come per esempio se bloccare il traffico in funzione di misure di livello di inquinamento massimo ammesso, accettare un pezzo su cui si sia stabilito il livello di "tolleranza".

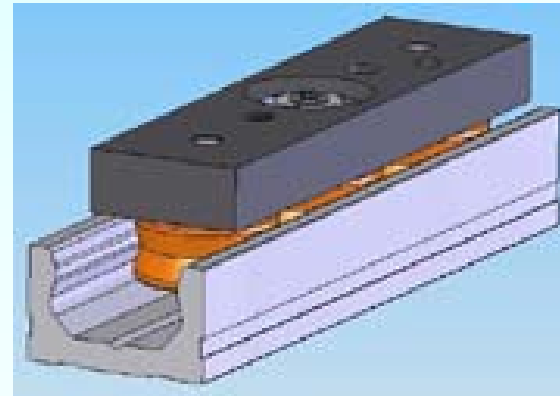


Si decide se immettere in commercio un prodotto secondo il risultato della misurazione di alcune sue caratteristiche, garantite dal produttore e controllate da chi di dovere.





La necessità di decidere pone nuovi problemi alle misure: quale ruolo gioca nella decisione l'incertezza che sempre è associata ad ogni azione sperimentale?





L'incertezza nelle misure è oggi ben più di un concetto; la stima del suo valore si basa su una procedura di calcolo codificata in una norma internazionale.

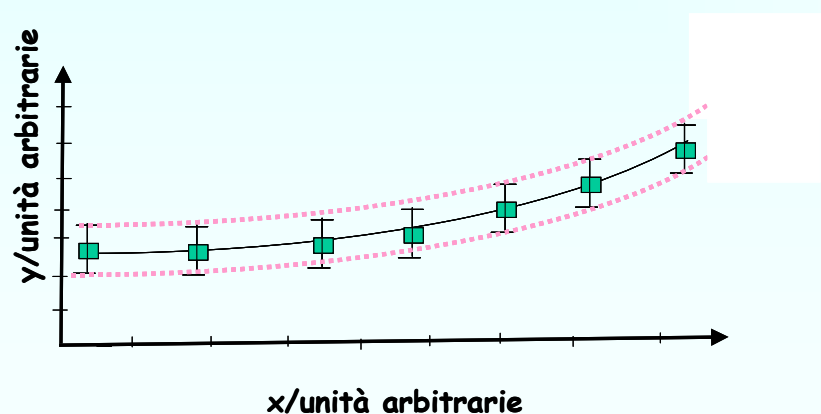
Norma italiana: "guida all'espressione dell'incertezza di misura, **UNI CEI ENV 13005, luglio 2000**"

Quando il risultato della misura deve essere confrontato con limiti definiti a monte l'esistenza dell'incertezza genera fasce di risultati che rendono ambigua la decisione.



La nostra cultura fa fatica ad accettare la coesistenza dell'incertezza con la necessità di decidere senza possibilità di dubbi, senza esitazioni.

C'è una nuova branca della metrologia: quella che si occupa delle regole decisionali, ossia di come decidere minimizzando i rischi d'errore.





**Incertezza di misura = parametro associato al risultato di una misurazione, che caratterizza la dispersione dei valori ragionevolmente attribuibili al misurando.**

**Norma italiana: "guida all'espressione dell'incertezza di misura, UNI CEI ENV 13005, luglio 2000.**

# Dalla guida all'espressione dell'incertezza UNI CEI ENV 13005



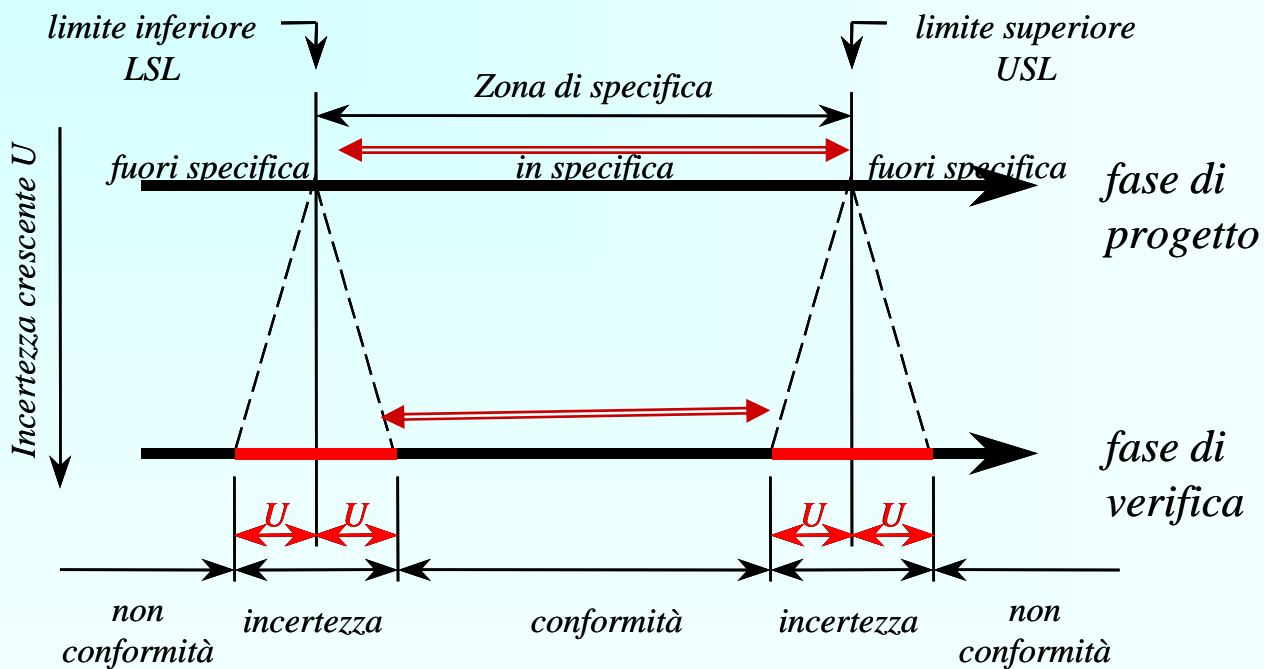
Benché questa guida fornisca uno schema generale per valutare l'incertezza, essa non può sostituirsi al pensiero critico, all'onestà intellettuale ed alla capacità professionale.

La valutazione dell'incertezza non è né un compito di routine né un esercizio puramente matematico, ma dipende dalla conoscenza approfondita della natura del misurando e della misurazione.

La **qualità e l'utilità dell'incertezza** attribuita al risultato di una misurazione **dipendono**, in definitiva, **dall'approfondimento, dall'analisi critica e dall'integrità morale** di chi contribuisce ad assegnarne il valore.



Fig. 1 ISO 14253-1  
Definizione delle zone di conformità / non- conformità





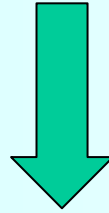


Un presupposto indispensabile ad ogni discorso sulle regole decisionali è la **riferibilità** delle misure, ossia l'esistenza di una catena ininterrotta di confronti che consenta il loro collegamento a **campioni riconosciuti**.

La necessità di decidere ci riporta così alle reti di laboratori, agli accordi di mutuo riconoscimento delle misure che essi producono, in un costante tentativo di estendere la riferibilità a tutte le misure prodotte nel mondo.



**Riferibilità:** proprietà del risultato di una misurazione consistente nel poterlo riferire a campioni appropriati, generalmente nazionali od internazionali, attraverso una catena ininterrotta di confronti, **tutti con incertezza dichiarata.**



**una misura si compone essenzialmente di una quaterna di informazioni:**

- 1. il valore numerico relativo alla misurazione (misura)**
- 2. l'unità di misura con la quale si é effettuata la misurazione**
- 3. l'incertezza con la quale si fornisce il valore della misurazione.**
- 4. Il livello di confidenza**



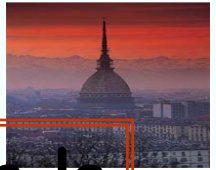
## Livello di confidenza

il livello di confidenza stabilisce “quanto siamo sicuri che il valore dato (misura) cada entro i margini rappresentati dall'incertezza”.

Dunque il risultato di una misurazione, per esempio della lunghezza di una sbarra, sarà espresso nel modo seguente:

$20 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$  al livello di confidenza del 95 %

Ciò vuol dire che siamo sicuri al 95% che la lunghezza del pezzo considerato sia compresa tra 19 cm e 21 cm.



**Metrologia:** campo della conoscenza che riguarda le misurazioni.

Possiamo considerare la **metrologia** come un linguaggio internazionale, il solo **linguaggio internazionale**, che sottende un grosso lavoro di ricerca di sempre migliori definizioni delle unità, di ottimizzazione dei campioni, di valutazione degli intervalli entro cui il valore fornito di una grandezza può ragionevolmente variare.

La metrologia mette già in atto un'ampia collaborazione internazionale, come forse non si realizza in altri campi per i quali può costituire un esempio da seguire, per trovare regole e modelli (campioni) condivisi in un'ampia visione di riferibilità globale.



**Scopo fondamentale della metrologia =  
scienza della misura:**

**Realizzare**

**Definire**

**Mantenere**

**Disseminare**

**Riprodurre**

**le unità**

**metrologia** =  
scienza e tecnica della misura



**realizzare** le unità in accordo con la  
definizione concordata a livello  
internazionale;

**mantenere** mediante un apparato di misura  
(o dei materiali) definito come campione;

**disseminare** le unità agli utilizzatori  
attraverso misure di confronto  
usando dei campioni di lavoro.

Questi gradini segnano il passaggio **dalla**  
**definizione all'impiego pratico.**

La metrologia si è sviluppata in modo uniforme nel mondo ed ha una struttura necessariamente gerarchica.



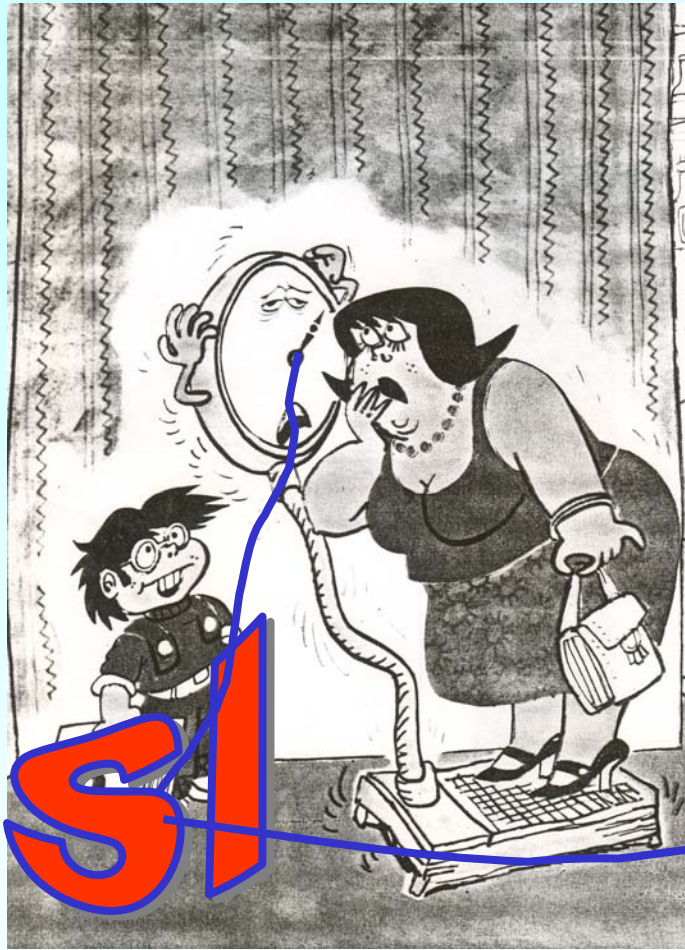
Per ogni grandezza da misurare, **misurando**, la struttura del sistema metrologico è piramidale.

Definizione,  
realizzazione,  
mantenimento

Disseminazione ai  
laboratori di taratura

Utilizzatori finali, cittadini







## Brevissimi cenni storici



La tecnica della misurazione è un bagaglio scientifico di cui si avvale l'uomo comune nella vita di ogni giorno; talvolta è l'unico "bagaglio scientifico" di cui dispone.

Ci sono moltissime testimonianze riguardanti le organizzazioni metrologiche e gli strumenti di misura sia in civiltà vicine a noi sia in civiltà più lontane.

## Deuteronomio - *Capitolo 25* Appendici



trasmesso prima oralmente e poi fissato in forma scritta intorno alla metà del VI secolo a.C

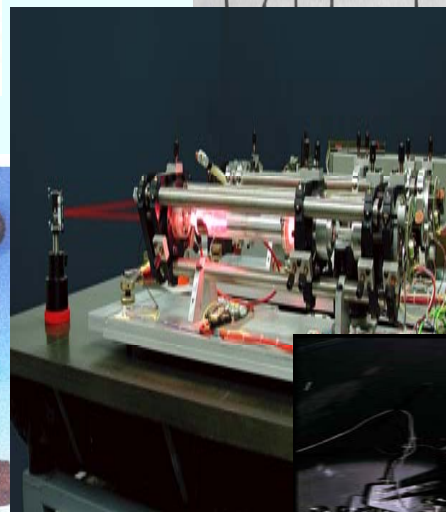
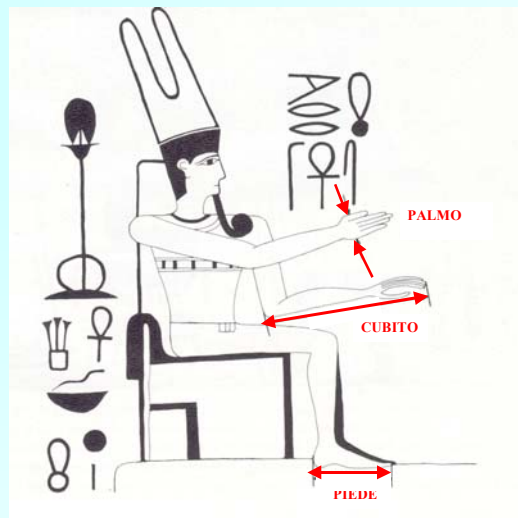
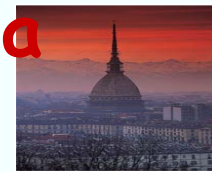
Non avrai nel tuo sacco due pesi diversi, uno grande e uno piccolo.

[14] Non avrai in casa due tipi di *efa*, una grande e una piccola.

[15] Terrai un peso completo e giusto, terrai un'*efa* completa e giusta, perché tu possa aver lunga vita nel paese che il Signore tuo Dio sta per darti.

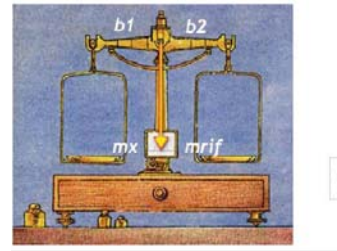
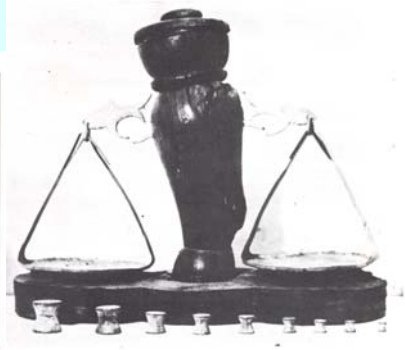
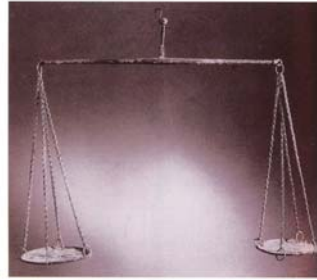
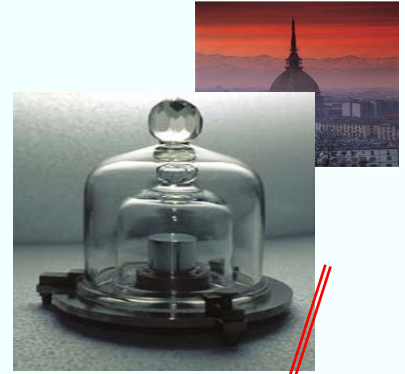
[16] Poiché chiunque compie tali cose, chiunque commette ingiustizia è in abominio al Signore tuo Dio.

# Il faticoso cammino verso il Sistema Internazionale di unità di misura

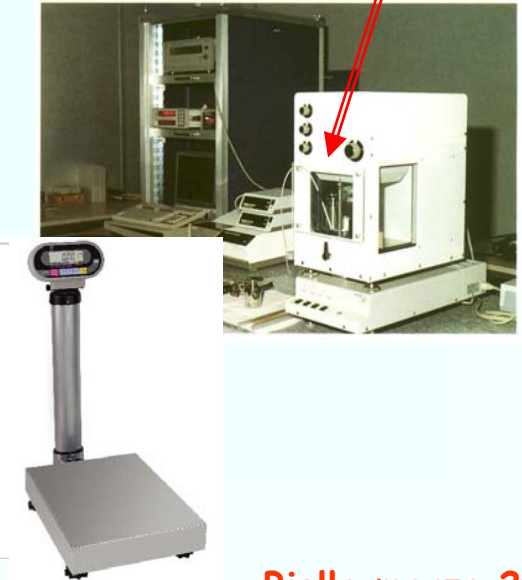
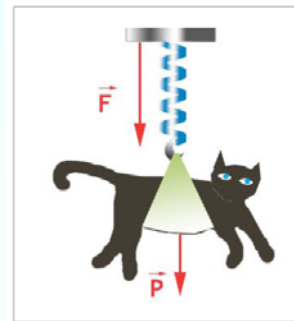
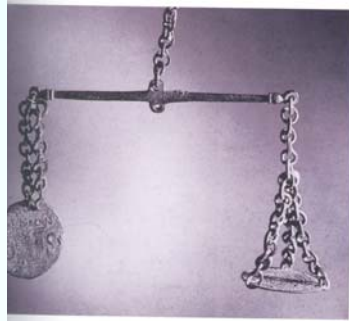
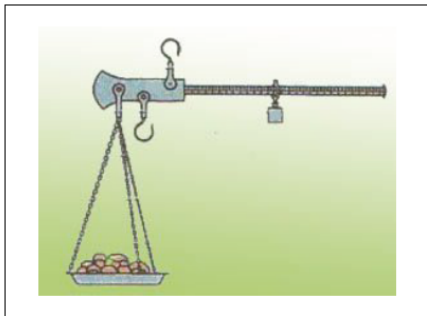


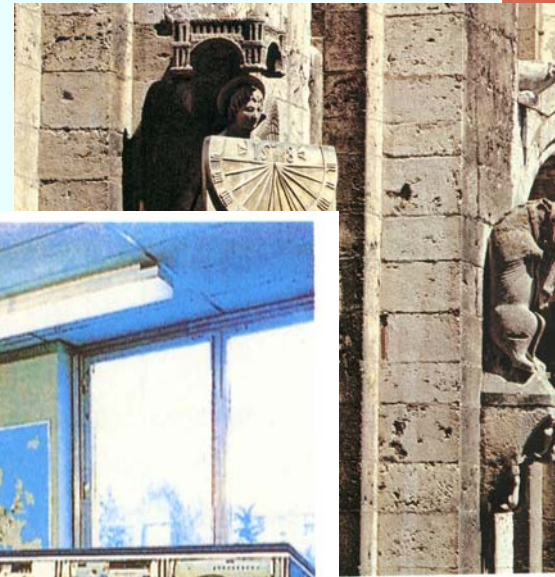
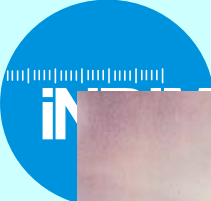
Più di 5000 anni

la lunghezza



Molte migliaia di anni





oggi



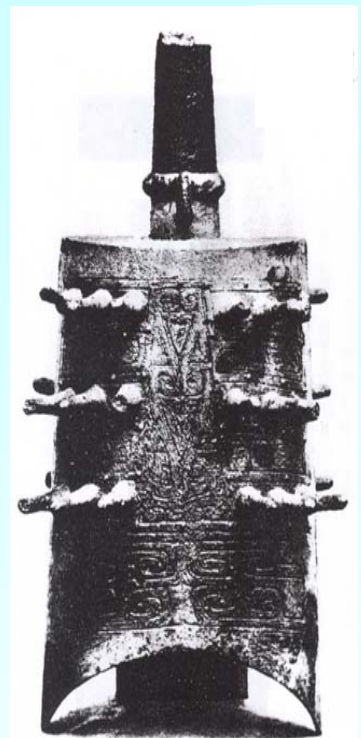
# L'intervallo di tempo

In un testo cinese di circa duemila anni or sono (Chien Han Shu) si legge:



“la base per le misure lineari è la lunghezza di una canna di flauto che emette la nota “Huang-chung” (cioè la stessa emessa dalla campana quando percossa in una data posizione)

e si generavano i campioni materiali, i multipli e sottomultipli ed il campione di massa.





Questo criterio corretto ed originale di legare le unità di misura ad un unico fenomeno fisico, la frequenza di una vibrazione sonora, rimase a lungo un fatto isolato e non ebbe influenza sugli sviluppi della metrologia occidentale, dove il problema di una scelta "universale" non emergerà almeno fino al 1600.





Nella seconda metà del Seicento Jean Picard in Francia e Tito Livio Burattini in Italia avevano prospettato l'idea di ricercare in fenomeni fisici universali il punto di partenza per definire unità di misura di validità universale.

Per la lunghezza sembravano possibili due soluzioni:

1) assumere come unità la lunghezza del pendolo che batte il secondo (fissato il secondo come unità di tempo) a 45° di latitudine e a livello del mare

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$l = \frac{gT^2}{4\pi^2}$$

oppure

2) derivare l'unità di lunghezza dalla misura di un arco di meridiano terrestre.



La Francia fu il primo paese a sentire il bisogno di una armonizzazione non solo interna ma anche internazionale.

Nel 1791 adottò la lunghezza del meridiano terrestre come base del nuovo Sistema unificato.



L' unità di lunghezza, il **metro**, fu definito come pari alla decimilionesima parte di un quarto di meridiano terrestre, con i suoi multipli e sottomultipli decimali.

Dal metro si derivarono le unità di misura di superficie e di volume.

Come unità di **capacità** fu adottato il **litro**, ovvero la capacità di un cubo avente spigolo eguale a un decimetro.

La quantità di acqua contenuta nel medesimo cubo, alla temperatura di 4 °C, fu assunta come **campione di peso** e la sua millesima parte prese il nome di **grammo**.

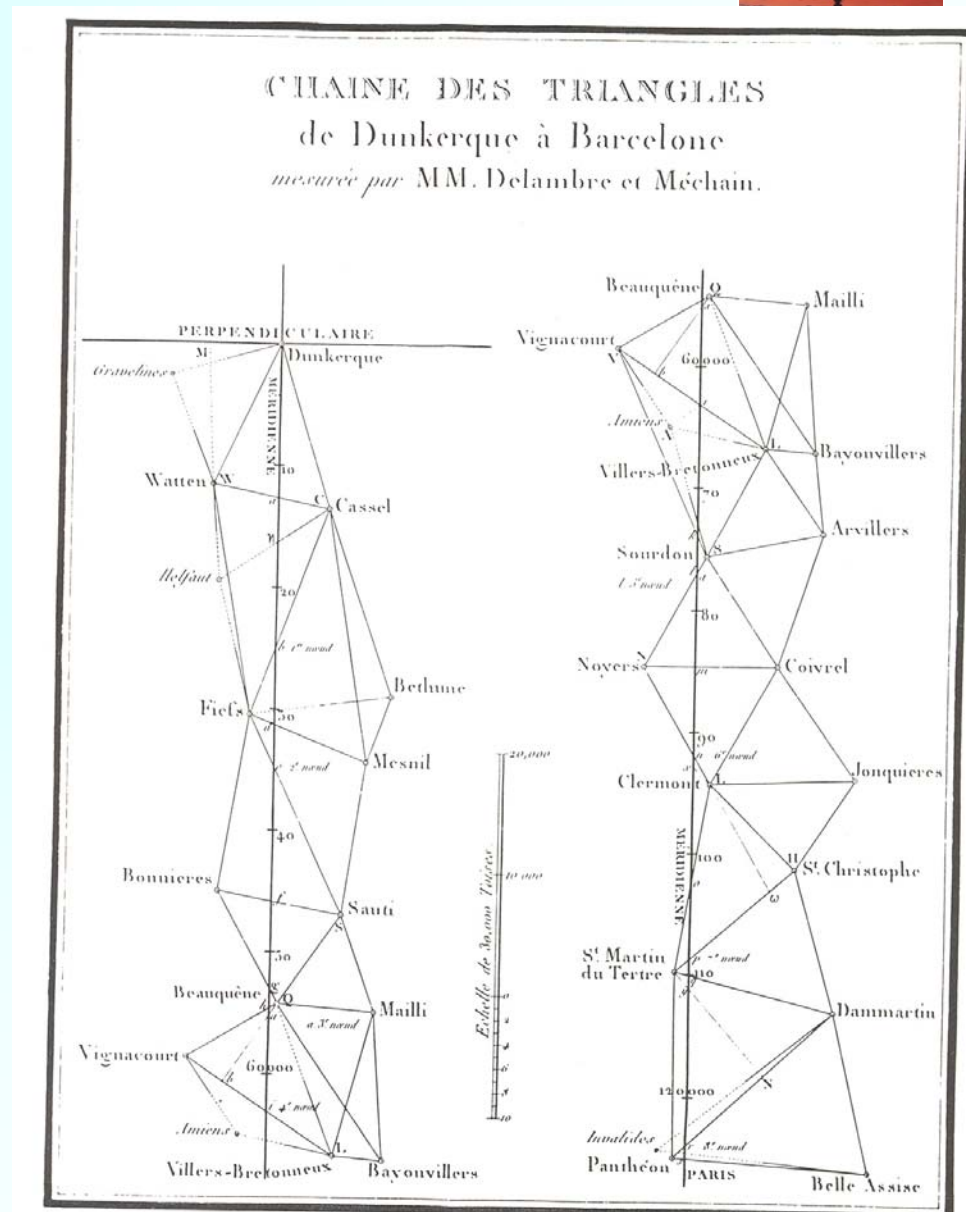


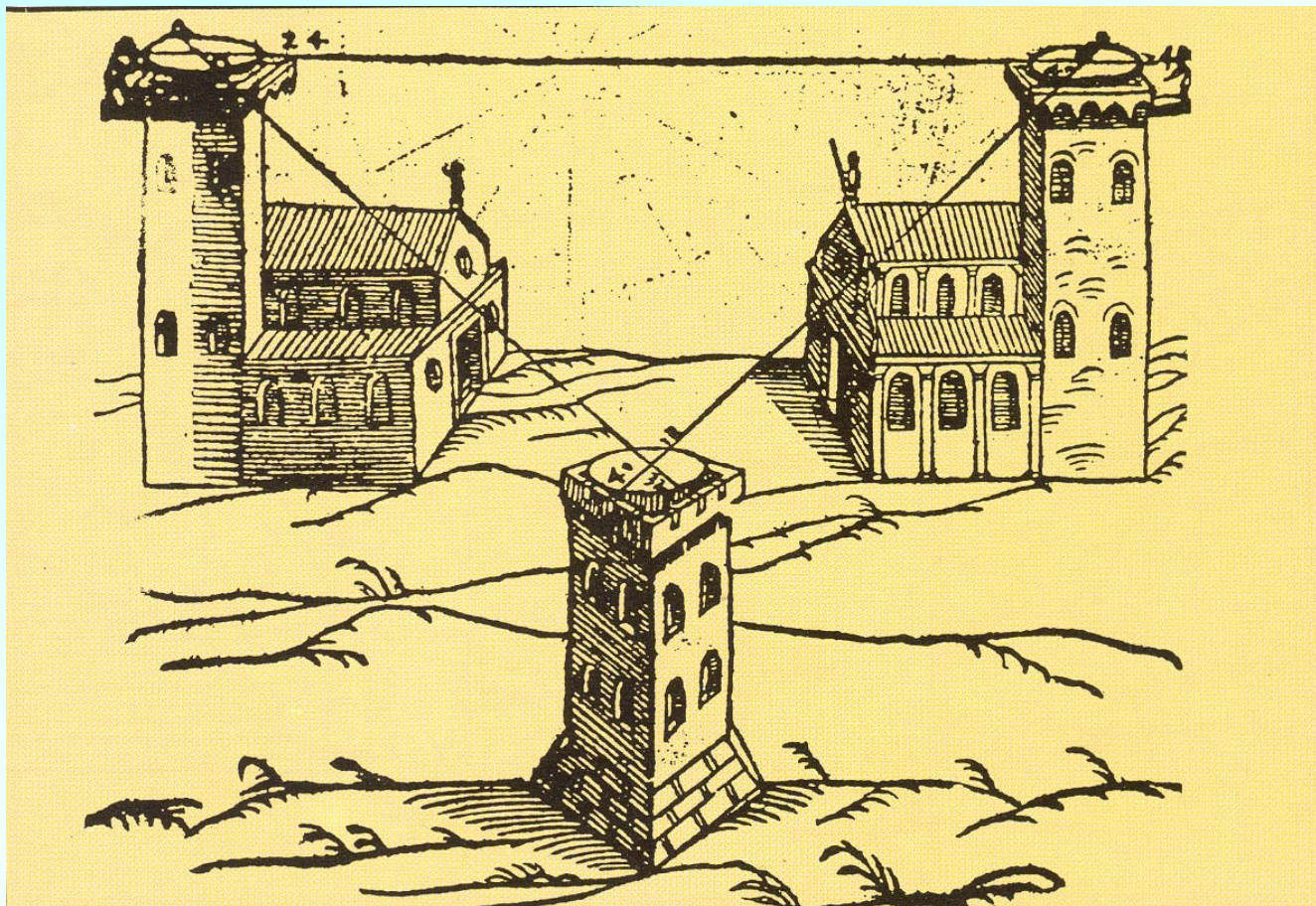
Il 7 aprile 1795 fu pubblicata la tabella ufficiale delle unità con multipli e sottomultipli: era la nascita del **Sistema Metrico Decimale**.

Intanto tra enormi difficoltà, si portava a termine la misurazione dell'arco di meridiano terrestre tra Dunkerque e Barcellona di cui furono incaricati gli astronomi Pierre Méchain (a Sud) e Jean-Baptiste Delambre (a nord, Denis Guedj "Il meridiano, Longanesi, 1997).

# La catena dei triangoli da Dunquerque a Barcellona

(da *L'Aventure du mètre*,  
volume speciale per  
l'esposizione al  
CNAM, Musée National des  
Techniques, 1989)





**esempio di  
manufatti  
disponibili per la  
triangolazione  
(ibidem)**



Si dovette quindi affrontare il problema della costruzione dei campioni inalterabili delle unità di **“peso” e di lunghezza**: un cilindro di platino costituì il chilogrammo campione, mentre un barra pure di platino, di sezione rettangolare, costituì il prototipo del metro.

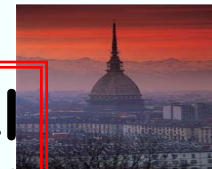




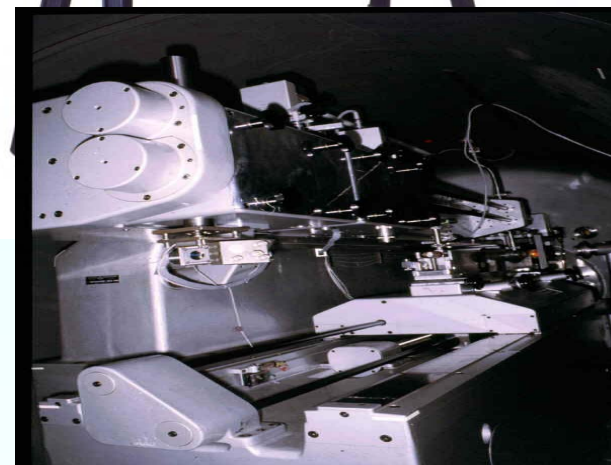
I campioni primari così costituiti furono depositati il 22 giugno 1799 negli Archivi della Repubblica e riconosciuti con legge del 10 dicembre dello stesso anno come "i campioni definitivi per le misure di lunghezza e di peso in tutta la Repubblica".



In tal modo i campioni del metro e del kilogrammo perdettero il carattere di campioni naturali ed universali. Divennero semplicemente i **campioni degli Archivi**

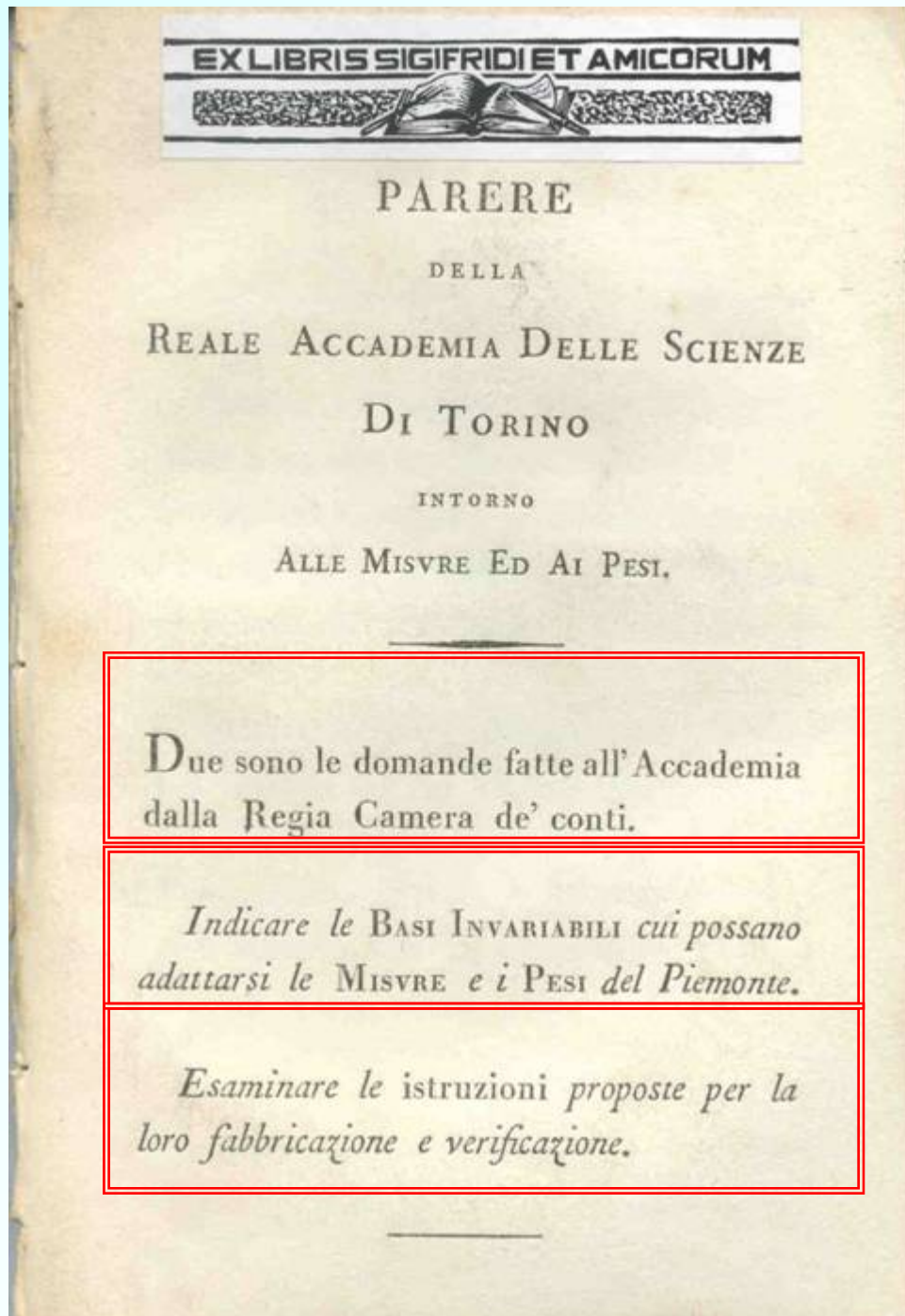


Campioni di lunghezza e di massa degli Archivi di Francia (da L'Aventure du metre, volume speciale per l'esposizione al CNAM, Musée National des Techniques, 1989)



Nell'Italia divisa ognuno andava per conto suo, ma si incominciava a far riferimento al modello francese.

Nel 1816 l'accademia delle scienze di Torino fu chiamata ad esprimere la sua opinione sui pesi e sulle misure.



# Risposta dell'Accademia

38

Di tutti gli altri provvedimenti da farsi diremo nella seconda parte.

TORINO il dì 30 di aprile 1816.

PROSPERO BALBO.

**“Abbiamo due sorta di quantità lineari atte a servire d'Archetipo;**

APPROVATO a pieni voti addì 15 di maggio 1816 dagli Accademici deputati

Ignazio MICHELOTTI

Michel Saverio PROVANA

Giorgio BIDONE

Giovanni PLANA

GALEANI NAPIONE di Caccobato

Giuseppe VERNAZZA di Freney

**\* le dimensioni della terra;**

**\* La lunghezza di un pendolo che in un dato luogo faccia in un dato tempo un dato numero di vibrazioni”**

39

APPROVATO a pieni voti nell' adunanza dell'Accademia a classi unite il dì 19 di maggio 1816.

CARENA, vicesegretario.

Si stampi.

Torino il 28 di luglio 1816.

PROSPERO BALBO, presidente.

TORINO 1816 DALLA STAMPERIA REALE.



Dunque alla fine del settecento si assiste in Francia ad un grande lavoro di armonizzazione delle unità di misura e dei relativi campioni.

Occorreranno 40 anni (dal 1800 al 1840) per arrivare ad imporre l' uso corrente del Sistema Metrico in tutte le attività, vincendo le resistenze ed i tentativi di compromesso con le antiche misure.



Nell'Italia unificata si cerca di armonizzare le misure sull'esempio francese e si pubblicano testi per insegnare ad usare il Sistema Metrico Decimale (1863)



QUATTRO LEZIONI  
SUL  
**SISTEMA METRICO-DECIMALE**

dette da

**C. I. GIULIO**

Nella Scuola di Meccanica applicata alle Arti in Torino

RIDOTTE AD USO DELLE PROVINCE

**ROMAGNOLE DELLE MARCHE ED UMBRIA**

da

**S. F.**

**R. VERIFICATORE DE' PESI E MISURE**

GOLL' AGGIUNTA DELLE TAVOLE DI RAGGUAGLIO

dei

PESI MISURE E MONETE

usate dagli

**ANTICHI ROMANI**

*con quelle del sistema metrico-decimale*

e

CON UN APPENDICE CONTENENTE

**LA LEGGE ED I REGOLAMENTI SUI PESI E SULLE MISURE**

*Seconda Edizione riveduta e corretta*



**PESARO**

PER TIPI DI ANNESIO NOBILI EDITORE

**1863.**



Lungo il 1800 erano stati scoperti o applicati molti fenomeni fisici che venivano poi ingegnerizzati ed applicati sia nella vita di ogni giorno sia nell'industria che richiedeva sempre nuovi strumenti.

Altri bisogni si venivano imponendo anche nel settore della metrologia che tenessero conto dell'elettricità, dell'elettromagnetismo e della fotometria.

Lungo tutto il diciannovesimo secolo si venne delineando il Sistema di unità di misure che fornì la base per l'attuale SI.



Il sistema metrico decimale era un sistema di "pesi e misure" limitato alle unità di uso corrente nella vita comune (lunghezza e massa, cioè metro e kilogrammo, cui si aggiungeva il tempo, ossia l'unità secondo definita in termini di rotazione terrestre, come  $1/86400$  del giorno solare medio).



Il merito di averne fatto la base dei sistemi molto più completi di unità usati nella fisica va attribuito a **Gauss (1777-1855)**.

Innanzitutto egli mise in chiaro che il cosiddetto campione di **peso depositato negli Archivi** si doveva intendere **come campione di massa**; quindi insegnò a derivare, dalle tre unità di lunghezza, massa e tempo assunte come fondamentali, non solo le unità delle altre grandezze meccaniche, ma anche quelle **magnetiche ed elettriche**.



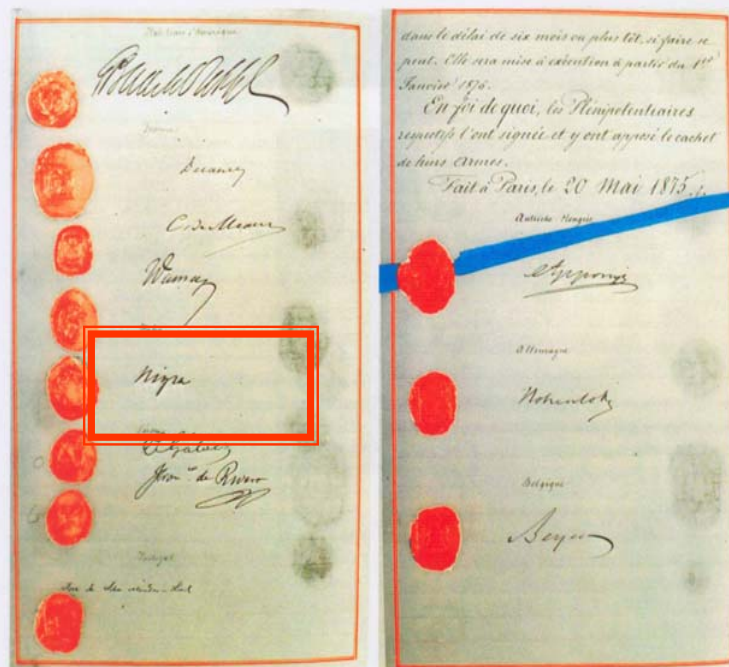


Però, sul finire del diciannovesimo secolo era ormai persuasione diffusa che i fenomeni elettromagnetici non fossero spiegabili con ipotesi meccaniche e che fosse giusto riconoscere **nelle grandezze elettriche una dimensione ulteriore, non riducibile a lunghezza, massa e tempo.**

Una proposta in questo senso fu presentata da **Giovanni Giorgi** (1871-1950) al Congresso dell'Associazione Elettrotecnica Italiana nel 1901, con l'aggiunta di **una quarta unità fondamentale**, scelta comunque tra le unità elettriche internazionali da considerarsi di origine arbitraria. → MKSA

Finalmente, nel **1875** su proposta del Governo Francese si riunirono a Parigi i rappresentanti di venti nazioni e nacque la Convenzione del Metro cui aderì il nuovo regno d'Italia con la firma di Costantino Nigra.

Convenzione del Metro: copie di parte del manoscritto depositato negli Archivi del governo francese con le prime firme; si noti, per l'Italia, la firma di Costantino Nigra.





La Convenzione del Metro (trattato diplomatico) stabiliva che si dovessero definire le unità di misura facendo riferimento a "entità" naturali e universali: la terra ed i suoi meridiani.

**BIPM**



Soltanto nel **1935** la Commissione Elettrotecnica Internazionale adottò il sistema a quattro unità fondamentali, dandogli il nome di sistema Giorgi. La quarta unità fu dapprima l'ohm, in seguito divenne l'ampere.



## Caratteristiche

Un sistema di unità di misura è **un insieme di definizioni e di regole**: definizioni delle unità assunte come "fondamentali", regole per ottenere da queste le unità di tutte le altre grandezze in uso nella fisica, nella chimica, nella biologia, nelle varie attività tecnologiche e nella vita quotidiana.

La scelta delle grandezze fondamentali e delle corrispondenti unità, in teoria arbitraria, in realtà deve **rispettare e conciliare esigenze diverse di carattere storico, scientifico e pratico.**



**Le unità di base** dovrebbero essere definite mediante elementi di riferimento tendenzialmente e, per quanto possibile, **non legati né al tempo né al luogo della misurazione.**

La **scelta delle unità di base** deve essere tale da **garantire sia l'indipendenza tra di esse**, nel senso che nessuna unità di base si deve poter esprimere mediante le altre, **sia la completezza**, nel senso che esse debbono essere in numero sufficiente da permettere di derivare, mediante le relazioni stabilite dalle leggi della fisica, le unità delle altre grandezze (unità derivate).

## Sistema Internazionale di unità (Simbolo SI)



L'atto di nascita del SI è stato redatto nel 1960 dalla XI CGPM (Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure) e rappresenta una tappa importante del lavoro iniziato a livello internazionale nel 1948.

Si tratta di una **tappa, non di un traguardo**, perché il Sistema Internazionale, anche se può essere considerato il miglior sistema esistente, **è suscettibile di miglioramenti**.

Si è già alla vigilia di un nuovo ed importante cambiamento, perché il progresso scientifico e tecnologico può offrire campioni più stabili e consentire misure più precise, e quindi **le definizioni delle unità verranno modificate**.



Il Sistema Internazionale delle unità di misura è dunque costituito da due **classi di unità**:

\* **di base**

\* **derivate**





## Con riferimento alle grandezze di base

Grandezza	Simbolo della grandezza	Simbolo della dimensione
lunghezza	$L, x, r, \dots$	L
massa	$m$	M
tempo, durata	$t$	T
corrente elettrica	$I, i$	I
temperatura termodinamica	$T$	$\Theta$
quantità di sostanza	$n$	N
intensità luminosa	$I_v$	J

# Unità SI di base



Nel sistema SI le unità di base sono sette e precisamente: metro, kilogrammo, secondo, ampere, kelvin, mole e candela

Grandezza	Unità SI	
	nome	simbolo
lunghezza	metro	m
massa	kilogrammo	kg
tempo	secondo	s
Intensità di corrente	ampere	A
temperatura termodin.	Kelvin	K
quantità di sostanza	mole	mol
intensità luminosa	candela	cd



Queste unità sono state scelte in modo tale ed in numero tale da poter rappresentare in modo non ambiguo qualunque grandezza fisica che si voglia misurare.

Il loro numero tuttavia rappresenta un compromesso tra esigenza di semplicità, per cui il numero di unità fondamentali dovrebbe essere il minore possibile, ed esigenze di chiarezza e di praticità, per cui forse sarebbe utile un numero maggiore.



La scelta è determinata principalmente da ragioni storiche e dal modello fisico matematico con il quale si rappresentano i fenomeni naturali.

Le unità di base sono **dimensionalmente indipendenti**, nel senso che nessuna di esse si può esprimere come funzione delle altre, anche se poi la definizione di una unità fa riferimento ad altre unità come nei casi del metro, dell'ampere, della candela e della mole.



Inoltre sono scelte e definite in modo da poter essere realizzate con il minor valore possibile dell'incertezza allo stato attuale della tecnologia; è questo il motivo per cui le definizioni sono soggette a modifiche anche sostanziali, senza peraltro che vari il nome dell'unità e, entro le incertezze sperimentali, il valore del campione che le realizza.



## Unità SI di base: semplici regole di scrittura

I nomi delle unità sono considerati **nomi comuni** e pertanto si scrivono con **l'iniziale minuscola**, anche se alcuni di essi derivano da nomi di scienziati

**ampere, kelvin**

In questo caso però sono **invariabili al plurale** ed hanno come **simbolo una lettera maiuscola**

(per esempio **A** per l'ampere e **K** per il kelvin).

Lo stesso vale per le **unità derivate** che hanno un nome proprio di persona

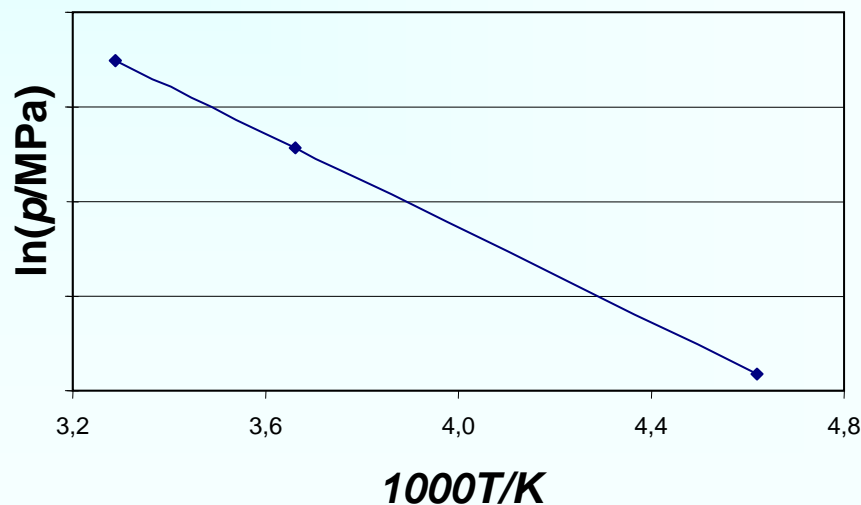


\*il simbolo delle unità si deve usare solo quando l'unità è accompagnata dal valore numerico;

\*esso deve essere scritto in carattere non corsivo (A e non *A*), dopo il valore numerico e non deve essere seguito da un punto (a meno che si tratti del punto di fine periodo).

Tra il valore numerico e l'unità deve essere lasciato uno spazio, 10 m

$T/K$	$p/MPa$	$\ln(p/MPa)$
216,55	0,518	-0,6578
273,15	3,4853	1,2486
304,19	7,3815	1,9990





Quando l'unità **non** è accompagnata dal valore numerico, deve essere scritta per esteso e non con il simbolo.

Per esempio:

- \* Il kelvin è l'unità di temperatura termodinamica.
- \* La definizione della mole fa riferimento al numero di atomi contenuti in 0,012 kg di carbonio 12.
- \* Il Monviso è alto 3841 m.





**Prima di passare alla descrizione delle singole unità SI di base occorre fare una distinzione tra la definizione dell'unità e la realizzazione di questa definizione.**

**La definizione di ciascuna unità di base SI è redatta in modo che sia unica e che fornisca un fondamento teorico solido che permetta di effettuare le misure più esatte e più riproducibili possibili.**

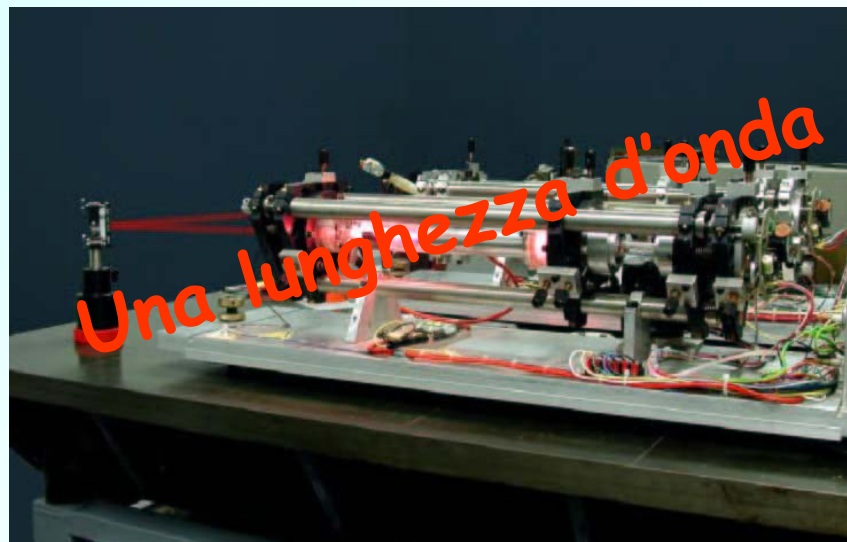
**La realizzazione della definizione di un'unità è la procedura secondo la quale la definizione dell'unità può essere utilizzata per stabilire il valore e l'incertezza associata ad una grandezza della stessa natura dell'unità.**



**"Il metro è la lunghezza del tragitto compiuto dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di 1/299792458 di secondo" (1983)**

La velocità della luce nel vuoto è per definizione:  
 $c_0 = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Il valore della lunghezza d'onda ( $\lambda = 6,3299139822 \times 10^{-6} \text{ m}$ ) è ricavato da una misura di frequenza rispetto al campione di tempo in base alla relazione:  
 $\lambda = c/f$ , con un'incertezza tipo relativa di  $2,5 \times 10^{-11}$ .



Il campione nazionale è realizzato presso INRIM mediante laser elio-neon stabilizzati per riferimento a transizioni della molecola dello iodio.



## UNITA' DI MASSA (kilogrammo, simbolo: kg)

“il kilogrammo è l'unità di massa ed è eguale alla massa del prototipo internazionale”(1901)

Il prototipo internazionale, cilindro di platino iridio di altezza uguale al diametro, è conservato presso il BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), Sèvres (Francia).

Per motivi di stabilità a lungo termine è auspicabile un prossimo collegamento dell'unità di massa con le costanti fondamentali e atomiche.



A causa dell'inevitabile accumulo di contaminanti sulla superficie, la superficie del prototipo internazionale subisce una contaminazione reversibile di circa  $1 \mu\text{g}$  all'anno. Per questo il CIPM ha dichiarato che la massa di riferimento del prototipo internazionale è quella immediatamente dopo un processo di pulizia eseguito secondo metodiche predefinite. La massa di riferimento è utilizzata per tarare i campioni nazionali (Metrologia, 1994,32,317-336).



Il campione nazionale è la copia n. 62 del prototipo internazionale, conservata presso l'iNRI, con il suo testimone n. 76; la sua massa è nota con un'incertezza tipo relativa di  $2,3 \times 10^{-9}$ .

Presso il Ministero dell'Industria del Commercio e dell'Artigianato (MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO) esistono anche le copie n.5 e n.19 denominate rispettivamente Prototipo Nazionale del primo e del secondo ordine impiegate in metrologia legale.

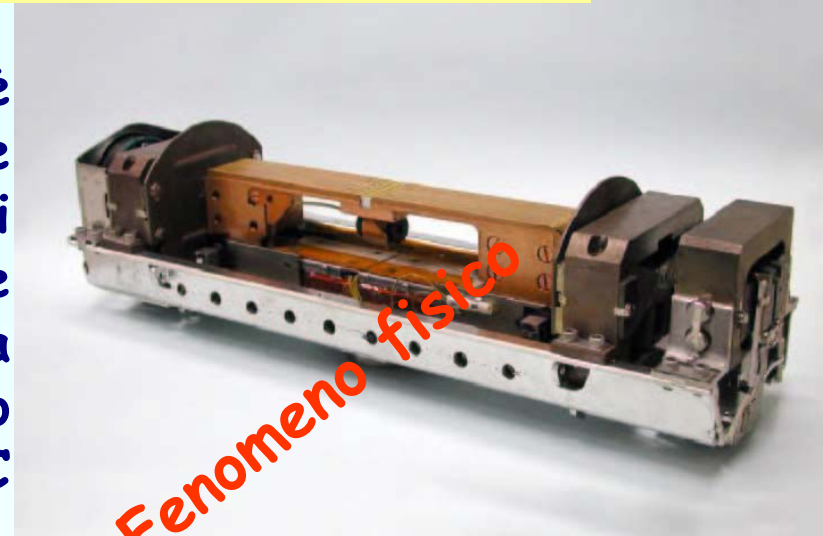


## UNITA' DI TEMPO (secondo, simbolo: s)

"il secondo è l'intervallo di tempo che contiene 9192631770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133" (1967). L'atomo di cesio è a riposo ed alla temperatura di 0 K"

La scala di tempo nazionale è derivata presso l'iNRiM da un insieme di orologi atomici al cesio indipendenti ed è confrontata via satellite con le scale di tempo degli altri paesi. Essa è mantenuta entro  $\pm 100$  ns rispetto al riferimento internazionale UTC (Universal Time Coordinated).

L'unità di tempo è realizzata presso l'iNRiM con una incertezza tipo relativa di  $1 \times 10^{-13}$ .



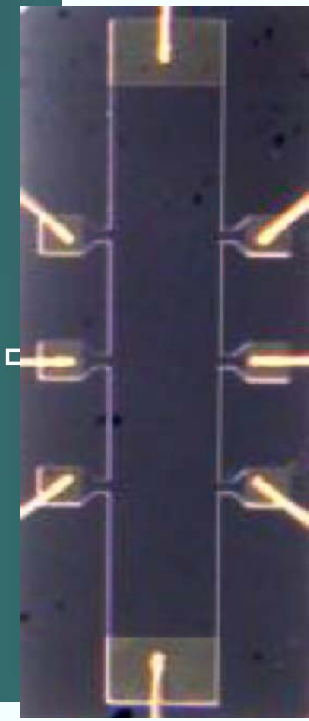
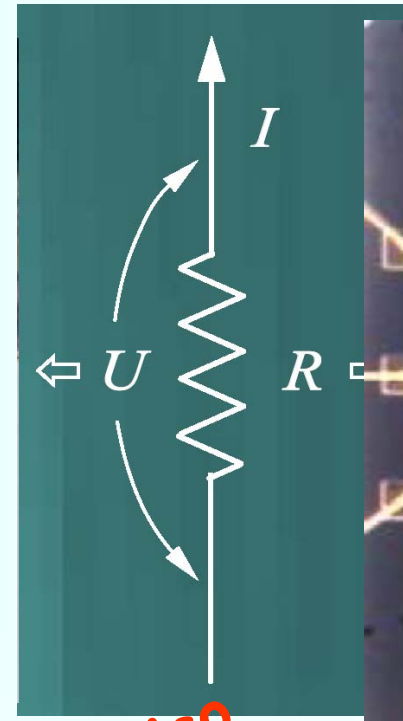


# Unità SI di base

## UNITA' DI CORRENTE ELETTRICA: (ampere, simbolo: A)

"l'ampere è l'intensità di corrente elettrica che, mantenuta costante in due conduttori paralleli, di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile e posti alla distanza di un metro l'uno dall'altro, nel vuoto, produrrebbe tra i due conduttori la forza di  $2 \times 10^{-7}$  newton per ogni metro di lunghezza" (1948)

*Difficile da realizzare*



*Fenomeno fisico*

$$I = U/R$$



In base alla teoria elettrodinamica, il sistema ideale descritto dalla definizione produce la forza indicata solo assumendo per la costante magnetica il valore  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ .

L'unità di corrente è derivata presso l'iNRIIM dal campione **nazionale** di tensione elettrica (schiera di giunzioni Josephson) e di resistenza elettrica (dispositivo per l'effetto Hall quantistico)

La derivazione avviene secondo la relazione  $I = U/R$  tra la corrente elettrica  $I$ , la tensione  $U$  che essa produce attraversando una resistenza  $R$  e la stessa resistenza. L'incertezza tipo relativa è di  $5 \times 10^{-7}$ .



## UNITA' DI TEMPERATURA TERMODINAMICA (kelvin, simbolo: K)

“Il kelvin, unità di temperatura termodinamica, è la frazione  $1/273,16$  della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua” (1954)

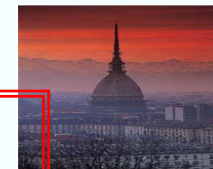
Avendo attribuito al punto fisso fondamentale la temperatura di  $273,16$  K per definizione  
 $T_{tpw} = 273,16$ .

La temperatura termodinamica (simbolo  $T$ ) può essere espressa anche nell'unità **grado Celsius (simbolo  $^{\circ}\text{C}$ )**. La relazione tra la temperatura espressa in gradi Celsius (simbolo  $t$ ) e la temperatura espressa in kelvin (simbolo  $T$ ) è:  $t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15$ .



Fenomeno fisico





**CIPM 2005 RACCOMANDAZIONE N.2: la definizione del kelvin fa riferimento ad una specifica composizione dell'acqua: 0,000 155 76 mol di  $^2\text{H}$  per mole di  $^1\text{H}$ , 0,0003799 mol di  $^{17}\text{O}$  per mole di  $^{16}\text{O}$  e 0,002 052 mol di  $^{18}\text{O}$  per mole di  $^{16}\text{O}$ .**

Il punto triplo dell'acqua è realizzato presso l'iNRiM con una incertezza tipo relativa di  $3 \times 10^{-7}$ . La Scala di Temperatura Internazionale del 1990 (STI-90) che definisce sia le Temperature Internazionali (Kelvin, simbolo  $T_{90}$ ), che le Temperature Internazionali Celsius, simbolo  $t_{90}$ , sempre con unità kelvin e grado Celsius rispettivamente, è realizzata nell'intervallo da 25 K a 3000 K utilizzando 12 punti fissi e due tipi di termometro campione: il termometro a resistenza elettrica di platino tra 25 K e 1235 K ed a radiazione tra 1235 K e 3000 K.

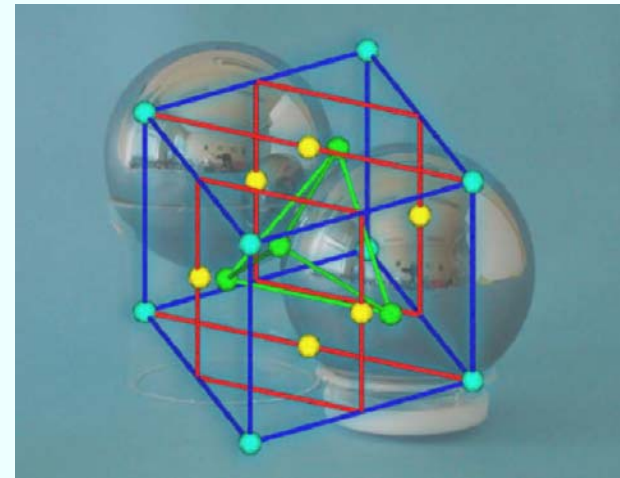
## Unità SI di base



### UNITA' DI QUANTITA' DI SOSTANZA (mole, simbolo: mol)

“la mole è la quantità di sostanza di un sistema che contiene tante entità elementari quanti sono gli atomi in 0,012 kg di carbonio 12”.

Le entità elementari devono essere specificate e possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, altre particelle o gruppi specificati di tali particelle” (1971).





In questa definizione va inteso che gli atomi di carbonio 12 sono non legati, a riposo e nello stato fondamentale.

Il numero di entità elementari contenute in una mole corrisponde alla "costante di Avogadro" che è stata determinata anche presso l'iNRI da misure di massa volumica e di costante reticolare (interferometria a raggi X) su monocristalli di silicio molto puro. La costante di Avogadro,  $N_A = 6,02214199 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ , è nota con incertezza tipo relativa di  $7,9 \times 10^{-8}$  (CODATA1998).



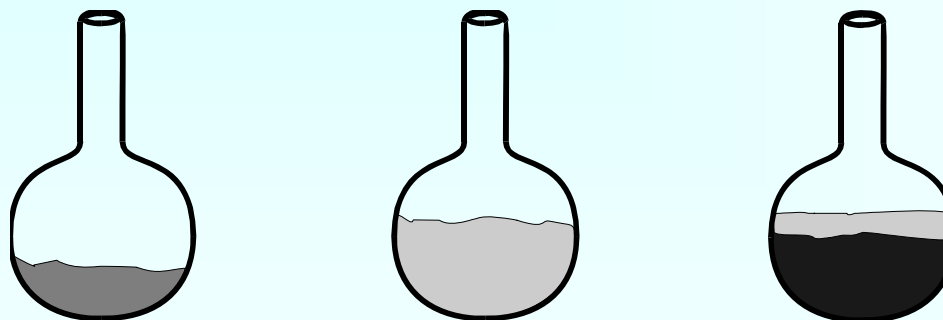
Il numero  $6,022 \times 10^{23}$  di entità elementari contenute in una mole di sostanza non dipende dalla natura della sostanza.

La massa di una mole di sostanza varia invece con la natura chimica della sostanza, in quanto dipende dalla massa delle particelle che compongono la sostanza.

## Ad esempio

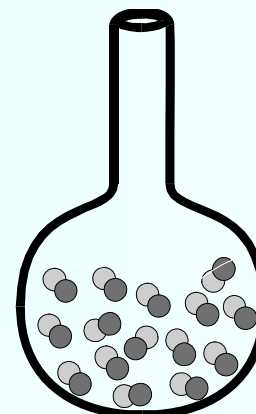
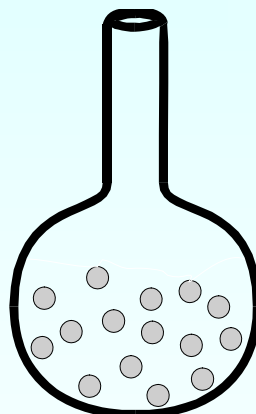
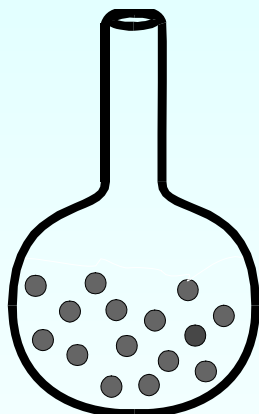


si fanno reagire masse eguali di ferro e di zolfo (esempio 100 g) si ottiene del solfuro di ferro, ma circa un terzo di zolfo non reagisce e rimane allo stato di elemento che non ha reagito





Se invece questi due elementi vengono posti nel giusto rapporto (una mole di zolfo ed una mole di ferro), gli elementi reagiscono completamente e si ottiene una mole di solfuro di ferro





Vanno ricordati anche i materiali di riferimento sono utilizzati in molti tipi di misurazioni, ma sono soprattutto necessari nell'analisi chimica.

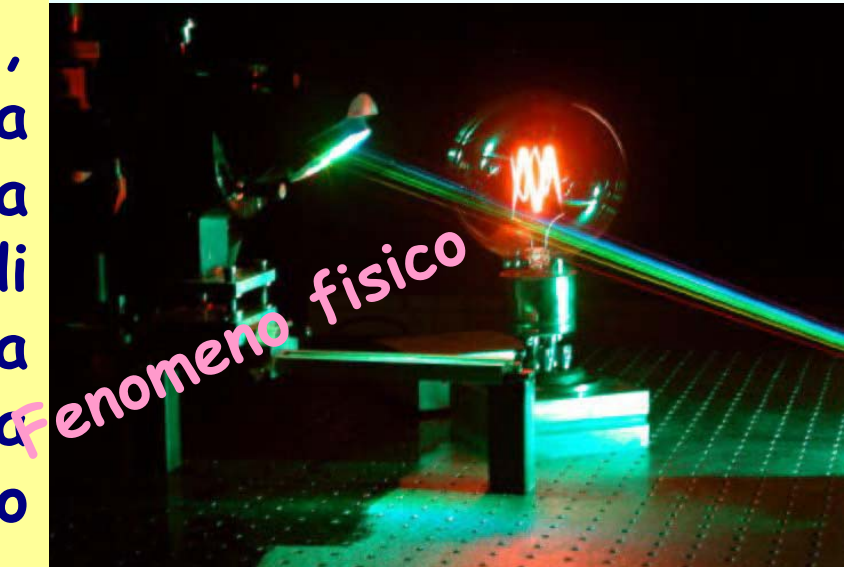
**I materiali di riferimento certificati (MRC)** sono tutti da considerarsi campioni di misura, immagazzinano e conservano nel tempo, fino alla loro data di scadenza, indipendentemente dal luogo ove vengono utilizzati, i valori assegnati alle proprietà certificate, assicurando così la riferibilità metrologica nel tempo e nello spazio.

## Unità SI di base



### UNITA' DI INTENSITA' LUMINOSA (candela, simbolo: cd)

“la candela è l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza  $540 \times 10^{12}$  hertz e la cui intensità energetica in quella direzione è  $1/683$  watt allo steradiante” (1979)



L'unità di intensità luminosa è realizzata presso l'iNRIIM per derivazione dai campioni nazionali di tensione elettrica e di resistenza elettrica mediante un radiometro assoluto; essa è conservata mediante un gruppo di lampade ad incandescenza alimentate in corrente continua e tarate ad intensità di corrente costante. L'incertezza tipo relativa è di  $5 \times 10^{-3}$  per intensità luminose da 100 cd a 500 cd.





## Grandezze derivate

Le grandezze SI derivate si ottengono combinando tra loro le grandezze di base secondo le equazioni della fisica.

Le dimensioni delle grandezze derivate  $Q$  si scrivono sotto forma di un prodotto dimensionale con monomi del tipo seguente:

$$\text{Dim } Q = L^{\alpha} \cdot M^{\beta} \cdot T^{\gamma} \cdot I^{\delta} \cdot \Theta^{\varepsilon} \cdot N^{\xi} \cdot I^{\eta}$$

con coeff. num. 1; gli esponenti  $\alpha, \beta, \gamma$ , ecc, sono numeri interi (zero incluso).

## Unità SI derivate



Le unità SI derivate si ottengono **combinando tra loro le unità di base** in monomi del tipo seguente:

$$m^{\alpha} \cdot kg^{\beta} \cdot s^{\gamma} \cdot A^{\delta} \cdot K^{\varepsilon} \cdot mol^{\xi} \cdot cd^{\eta}$$

con coeff. num. 1; gli esponenti  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , ecc, sono numeri interi (zero incluso).

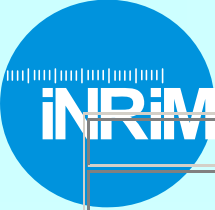
Ad esempio l'unità SI di:

- \* volume è il metro cubo (simbolo  $m^3$ );
- \* accelerazione è il metro al secondo al quadrato (simbolo  $m \cdot s^{-2}$  o  $m/s^2$ ); quantità di moto è il metro per kilogrammo al secondo (simbolo  $m \cdot kg \cdot s^{-1}$  ovvero  $m \cdot kg/s$ ).



Quando, nel rappresentare un'unità derivata, al **denominatore** compaiono più unità bisogna ricorrere agli **esponenti negativi** o all'**uso di parentesi** per evitare equivoci.

Esempio: l'unità di viscosità dinamica è il kilogrammo al metro al secondo; essa si esprime quindi in  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  o, in modo sicuramente non ambiguo, in  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ .



# Unità SI derivate dotate di nomi propri



Grandezza	Unità SI		Espressione in funzione di	Espressione in funzione delle
	Nome	Simbolo	Altre unità SI	Unità SI fondamentali
Angolo piano	radiante	rad		$m \cdot m^{-1} = 1$
Angolo solido	steradiano	sr		$m^2 \cdot m^{-2} = 1$
Frequenza	hertz	Hz		$s^{-1}$
Forza	newton	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Pressione	pascal	Pa	$N/m^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Energia, lavoro, quantità di calore	joule	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Potenza, flusso Energetico	watt	W	$J/s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Carica elettrica	coulomb	C		$s \cdot A$
Potenziale elettrico, tensione elettrica	volt	V	$W/A$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Capacità elettrica	farad	F	$C/V$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Resistenza elettrica	ohm	$\Omega$	$V/A$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Conduttanza elettrica	siemens	S	$A/V$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Flusso d'induzione magnetica	weber	Wb	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Induzione magnetica	tesla	T	$Wb/m^2$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Induttanza	henry	H	$Wb/A$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Temperatura Celsius	gradi Celsius	$^{\circ}C$		K
Flusso luminoso	lumen	Lm		$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
Illuminamento	lux	Lx	$lm/m^2$	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
Attività (di un radionuclide)	Becquerel	Bq		$s^{-1}$
Dose assorbita	gray	Gy	$J/kg$	$m^2 \cdot s^{-2}$
Equivalente di dose	sievert	Sv	$J/kg$	$m^2 \cdot s^{-2}$
Attività catalitica	katal	Kat	$mol/s$	$mol \cdot s^{-1}$

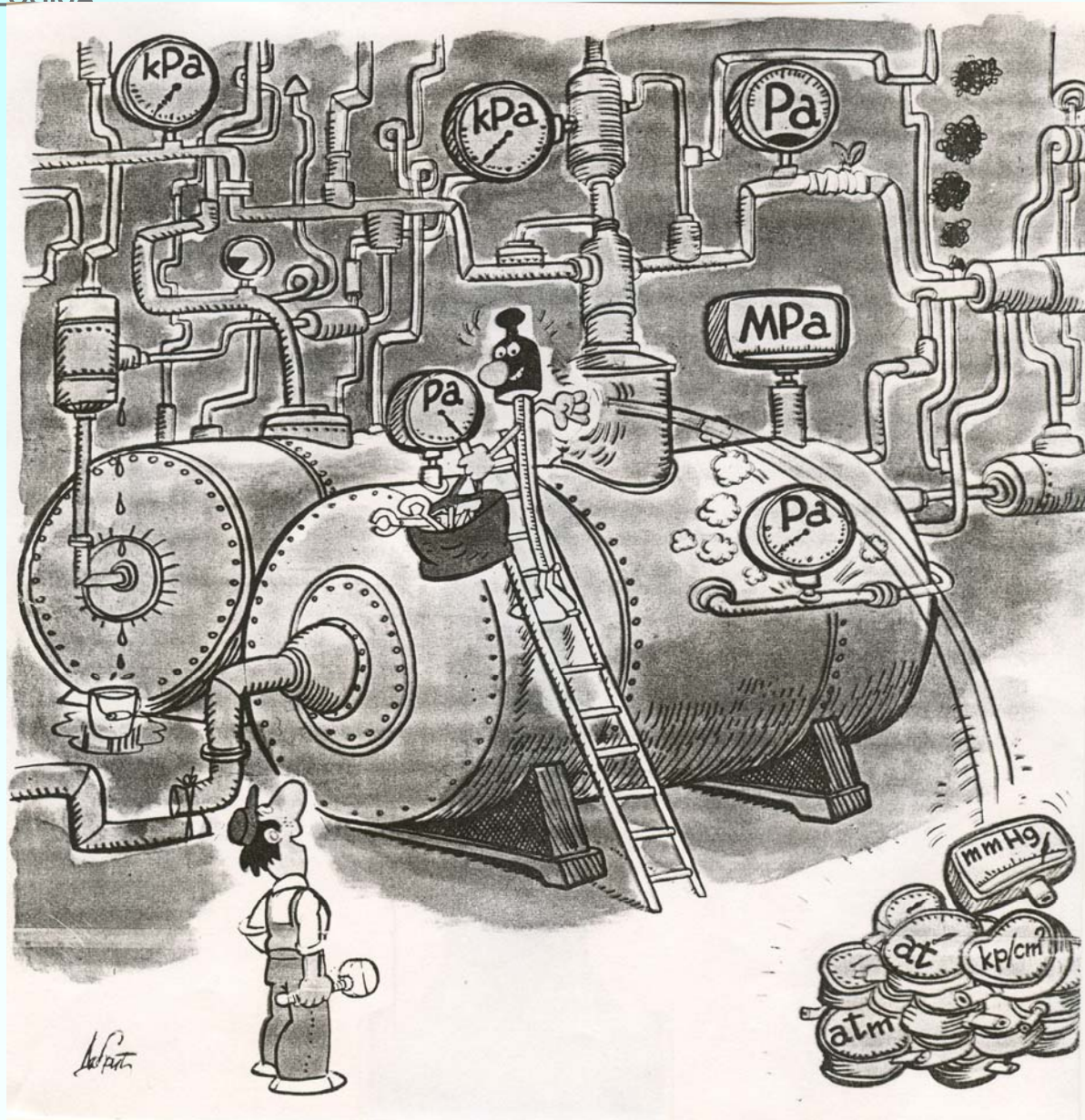
kat=m/s



## Multipli e sottomultipli

Quando l'unità SI è **troppo grande o troppo piccola** per certe misurazioni, si possono usare suoi **multipli o sottomultipli decimali**. Per soddisfare le esigenze di tutti gli utilizzatori del sistema SI, la Conferenza Generale dei pesi e delle Misure (CGPM) ha stabilito un certo numero di **prefissi con nomi speciali**.

# Multipli e sottomultipli





Il prefisso precede l'unità di misura con la quale forma il multiplo e sottomultiplo;

Non può essere usato da solo,

Non si possono usare due prefissi consecutivi.

Si scrive 1 nm e non 1 mmm, 1pF e non 1mmF. Il simbolo del prefisso è scritto con carattere diritto come il simbolo delle unità, non si lasciano spazi, né si interpone il punto tra i due simboli:

$$1000 \text{ V} = 10^3 \text{ V} = 1\text{kV}$$

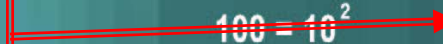
$$0,000 \text{ 001 s} = 10^{-6} \text{ s} = 1 \mu\text{s}$$

# Multipli e sottomultipli



fattore di moltiplicazione	prefisso	nome	simbolo
1 000 000 000 000 000 000 000 000 = $10^{24}$		yotta	Y
1 000 000 000 000 000 000 000 000 = $10^{21}$		zetta	Z
1 000 000 000 000 000 000 000 = $10^{18}$		exa	E
1 000 000 000 000 000 000 = $10^{15}$		peta	P
1 000 000 000 000 = $10^{12}$		tera	T
1 000 000 000 = $10^9$		giga	G
1 000 000 = $10^6$		mega	M
1 000 = $10^3$		kilo	k
100 = $10^2$		etto	h
10 = $10^1$		deca	da
0,1 = $10^{-1}$		deci	d
0,01 = $10^{-2}$		centi	c
0,001 = $10^{-3}$		milli	m
0,000 001 = $10^{-6}$		micro	
0,000 000 001 = $10^{-9}$		nano	n
0,000 000 000 001 = $10^{-12}$		pico	p
0,000 000 000 000 001 = $10^{-15}$		femto	f
0,000 000 000 000 000 001 = $10^{-18}$		atto	a
0,000 000 000 000 000 000 001 = $10^{-21}$		zepto	z
0,000 000 000 000 000 000 000 001 = $10^{-24}$		yocto	y

Soli con iniziali  
minuscole



kilo k  
etto h  
deca da





## Attenzione a trattare correttamente i multipli e sottomultipli!

$$2 \text{ cm}^3 = 2(\text{cm})^3 = 2(10^{-2}\text{m})^3 = 2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ cm}^{-1} = 1(\text{cm})^{-1} = 1(10^{-2}) \text{ m}^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1} = 100 \text{ m}^{-1}$$

$$1 \text{ V/cm} = (1\text{V})/(10^{-2}\text{m}) = 10^2 \text{ V/m} = 100 \text{ V/m}$$

$$5000 \text{ } \mu\text{s}^{-1} = 5000 (\mu\text{s})^{-1} = 5000 (10^{-6}\text{s})^{-1} = 5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$$



Tra le unità SI di base l'unità di massa è la sola il cui nome contiene un prefisso, per ragioni storiche. I multipli e sottomultipli dell'unità di massa si formano aggiungendo i nomi del prefisso all'unità "grammo" ed il simbolo del prefisso al simbolo dell'unità "g".

Esempio:

$10^{-6} \text{ kg} = 1 \text{ mg}$  (un milligrammo) e non  $1 \mu\text{kg}$  (un microkilogrammo).



## Unità non SI ammesse

Alcune unità, pur essendo fuori dal Sistema Internazionale, sono entrate talmente nella vita di ogni giorno da non poter essere messe al bando.

Si tratta di alcune unità di misura del **tempo** (giorno, ora, minuto), dell'**angolo** (grado, minuto, secondo di angolo).

## Unità non-SI ammesse



<b>Nome</b>	<b>Simbolo</b>	<b>Valore in unità SI</b>
minuto	min	1 min = 60 s
ora	h	1 h = 60 min = 3 600 s
giorno	d	1 d = 24 h = 86 400 s
grado sessagesimale	°	1° = $(\pi/180)$ rad
minuto di angolo	'	1' = $(1/60)^\circ = (\pi/10\,800)$ rad
secondo di angolo	"	1" = $(1/60)'$ = $(\pi/648\,000)$ rad
litro	l, L	1 l = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
tonnellata	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
bar	bar	1 bar = 10 <sup>5</sup> Pa

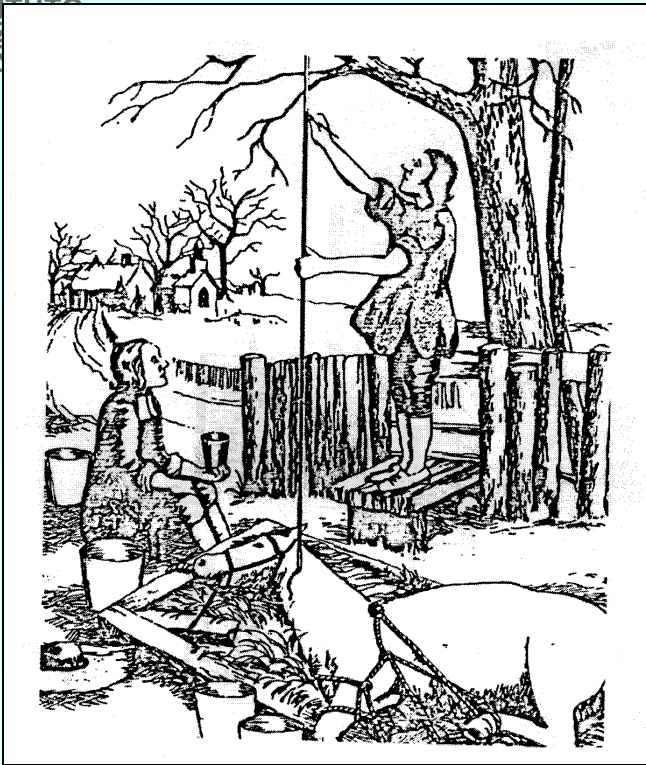
Tutte le altre unità non indicate nella tabella debbono essere abbandonate e sostituite con unità SI.



Il cavallo vapore britannico (horsepower) venne usato per la prima volta da James Watt, durante un viaggio dove i suoi motori a vapore sostituivano i cavalli. Venne definito come la forza prodotta da un cavallo che solleva 33000 libbre con la velocità di un piede al minuto.

Si **dovrebbe** prendere l'abitudine di esprimere la potenza dei motori delle automobili in kilowatt e non in cavalli (si ricordi che 1 CV è eguale a  $735,499 \text{ W} = 0,73599 \text{ kW}$ ) e la quantità di calore negli impianti termici in kilojoule anziché in grandi calorie (si ricordi che 1 Cal è eguale a  $4186,8 \text{ kJ}$ ).

La caloria è la quantità di calore necessaria ad elevare da  $14,5$  a  $15,5 \text{ }^\circ\text{C}$  la temperatura della massa di  $1 \text{ g}$  di acqua distillata al livello del mare (pressione di  $103 \text{ kPa}$ )



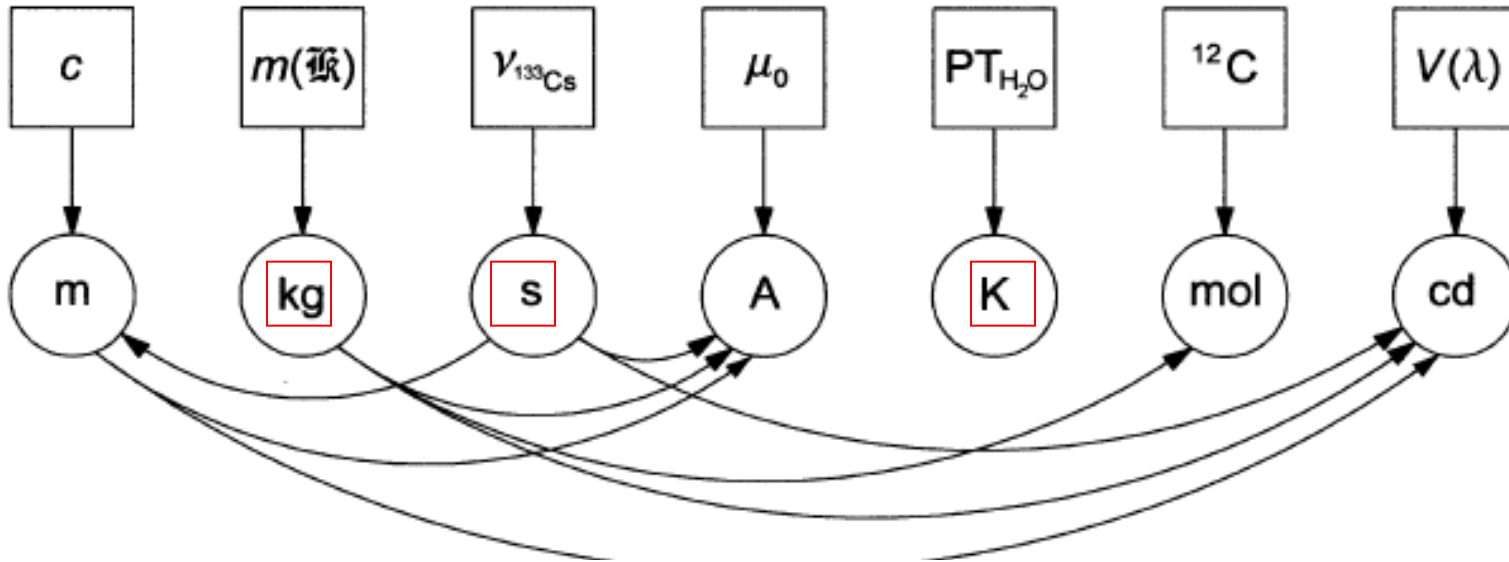
Menzione a parte merita l'unità di pressione in uso in campo medico per esprimere la pressione del sangue: millimetri di mercurio (mmHg, torr) anziché pascal

(1 mmHg = 133,322 Pa).



# Situazione attuale e prospettive future del SI

# Situazione dell'attuale SI



• Solo kilogrammo, secondo, kelvin sono indipendenti dalle altre unità

• Tipologia dei riferimenti molto varia

• Aspetti critici:

- nel kg (stabilità non verificabile)
- nell'ampere (difficoltà di realizzazione)



## Futuro del SI



L'uso di invarianti fisici (costanti fondamentali) in campo metrologico nella prima metà del secolo ventesimo fu assai limitato per l'incertezza ad essi associata.

Oggi però la loro incertezza si sta riducendo a valori paragonabili a quelli delle realizzazioni delle unità SI e alcune costanti fisiche associate ad effetti quantici hanno un ruolo determinante nella derivazione e nel mantenimento delle unità SI.

Il punto di partenza fu la definizione dell'ampere che faceva riferimento alla costante magnetica  $\mu_0$  ed è continuata con la definizione del metro basata sulla velocità della luce in vuoto  $c_0$ .



## All'inizio del ventunesimo secolo

**Raccomandazione C1 del CIPM su "Preparative steps towards new definitions of the kilogram, the ampere, the kelvin and the mole in terms of fundamental constants" (29 luglio 2005).**

## Futuro del SI



In occasione della riunione del Comitato Consultivo sulle Unità tenuto al BIPM il 29 luglio 2005 si è parlato della ri-definizione del **kilogrammo**, dell'**ampere**, del **kelvin** e della **mole** anche se rinviata almeno al 2011.

E gli istituti metrologici sono stati invitati a completare gli esperimenti sulla misurazione di costanti fondamentali in modo talmente accurato da rendere possibile una definizione dell'unità di **massa**, di **intensità di corrente elettrica**, di **temperatura termodinamica** e della **quantità di sostanza** con valori delle incertezze minori di quanto consentito nelle definizioni.



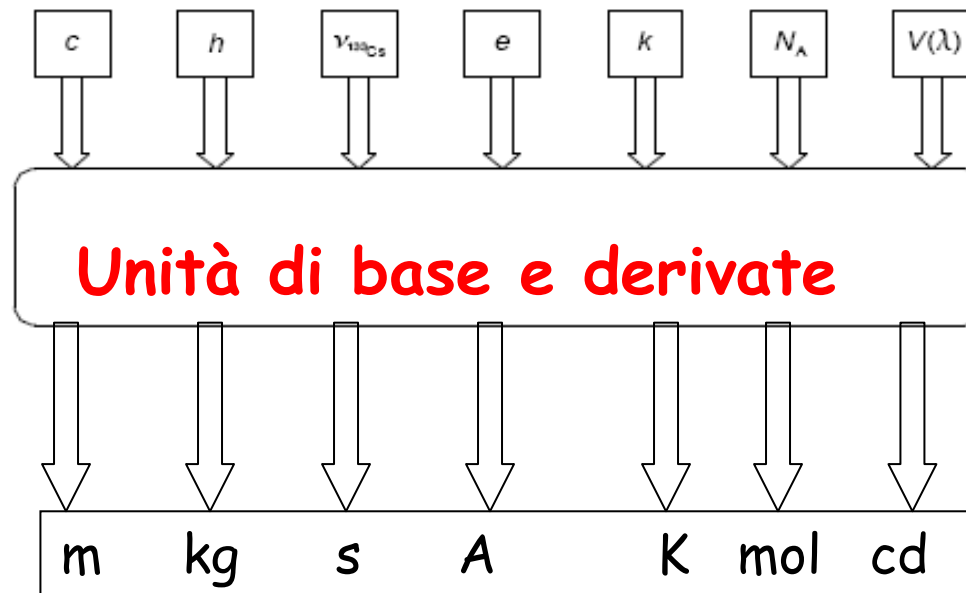
**Superamento della definizione come semplice indicazione di un prototipo unico artificiale che realizzi l'unità e ne costituisca il campione primario.**

**Progressivo abbandono della definizione come "ricetta" unica per realizzare e riprodurre l'unità mediante campioni primari.**

**Apertura all'iniziativa dello sperimentatore nell'ideare esperimenti che realizzino e riproducano l'unità rendendo minima l'incidenza di parametri spuri sul valore del campione primario.**



## Lineamenti di un nuovo SI



## Basterà definire alcune costanti fondamentale

Le recenti ricerche sono indirizzate verso un sistema di unità di misura interamente basato su invarianti fisici. Un tale sistema di unità di misura offre grossi vantaggi alla metrologia perché le caratteristiche di **indistruttibilità, invariabilità, accessibilità e indipendenza dal luogo della misurazione** sono senza dubbio superiori a quelle di qualsiasi campione materiale.



1kg=massa che assunta come unitaria determina il valore  $N_A=6,0221415 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ , oppure massa che assunta come unitaria determina il valore  $h=6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$

La mole è la quantità di sostanza di un sistema che contiene  $6,0221415 \times 10^{23}$  entità elementari",

$$h = \frac{c \alpha^2 M_e}{2 R_\infty} \frac{1}{N_A}$$

il kelvin è la variazione di temperatura termodinamica che determina una variazione di energia termica pari a  $1,3806505 \times 10^{-23} \text{ J}$ , fissato il valore della costante di Boltzman.

ampere =  $e f$ , dalla carica dell'elettrone e da misure di frequenza

Sono resi esatti i valori delle costanti di Josephson  $K_J = 2e/h$  e di von Klitzing  $R_K = h/e^2$ : le realizzazioni del volt, ohm e ampere sono possibili con incertezze a livello  $10^{-9}$ .



la metrologia delle **grandezze elettromagnetiche** dispone di campioni naturali, utilizzati per la riproduzione delle unità di tensione (**effetto Josephson** alternato), di resistenza (effetto Hall quantistico) e di induzione magnetica (risonanza magnetica nucleare).

$$U_J = n f \left( \frac{h}{2e} \right) \rightarrow K_J = 2e/h \text{ (detta costante di Josephson)}$$

*h* è la costante di Planck ed *e* è la carica dell'elettrone.

La costante  $K_J$  servirebbe per definire il campione di tensione dipendente unicamente dall'unità di base nota con minore incertezza (il secondo).

L'effetto Hall quantistico consente la riproduzione dell'unità di resistenza mediante l'aggancio alla resistenza quantizzata di Hall

$$R_H = h/ie^2 \rightarrow R_K = h/e^2 \text{ data costante di von Klitzing}$$

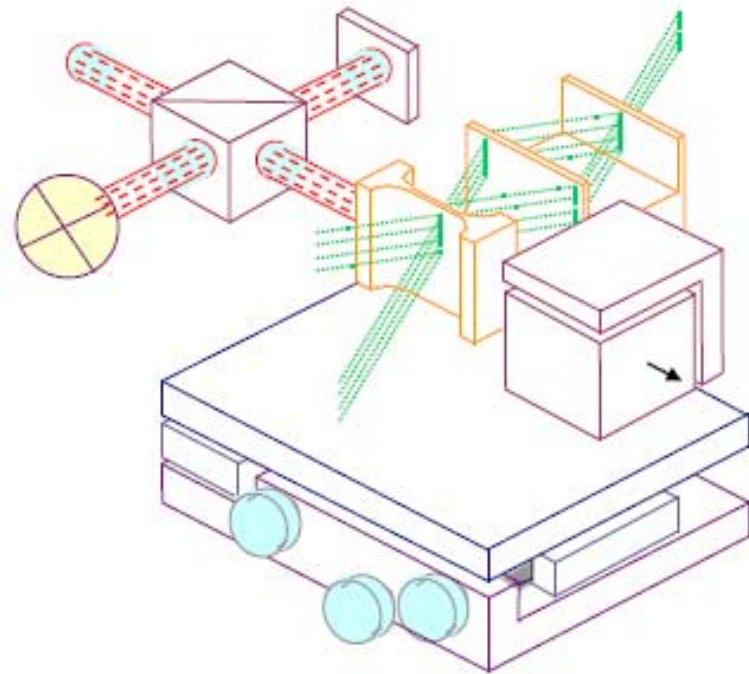
con *i* numero intero.

L'aggancio è diretto perché la costante  $R_K$  ha le dimensioni di una resistenza.

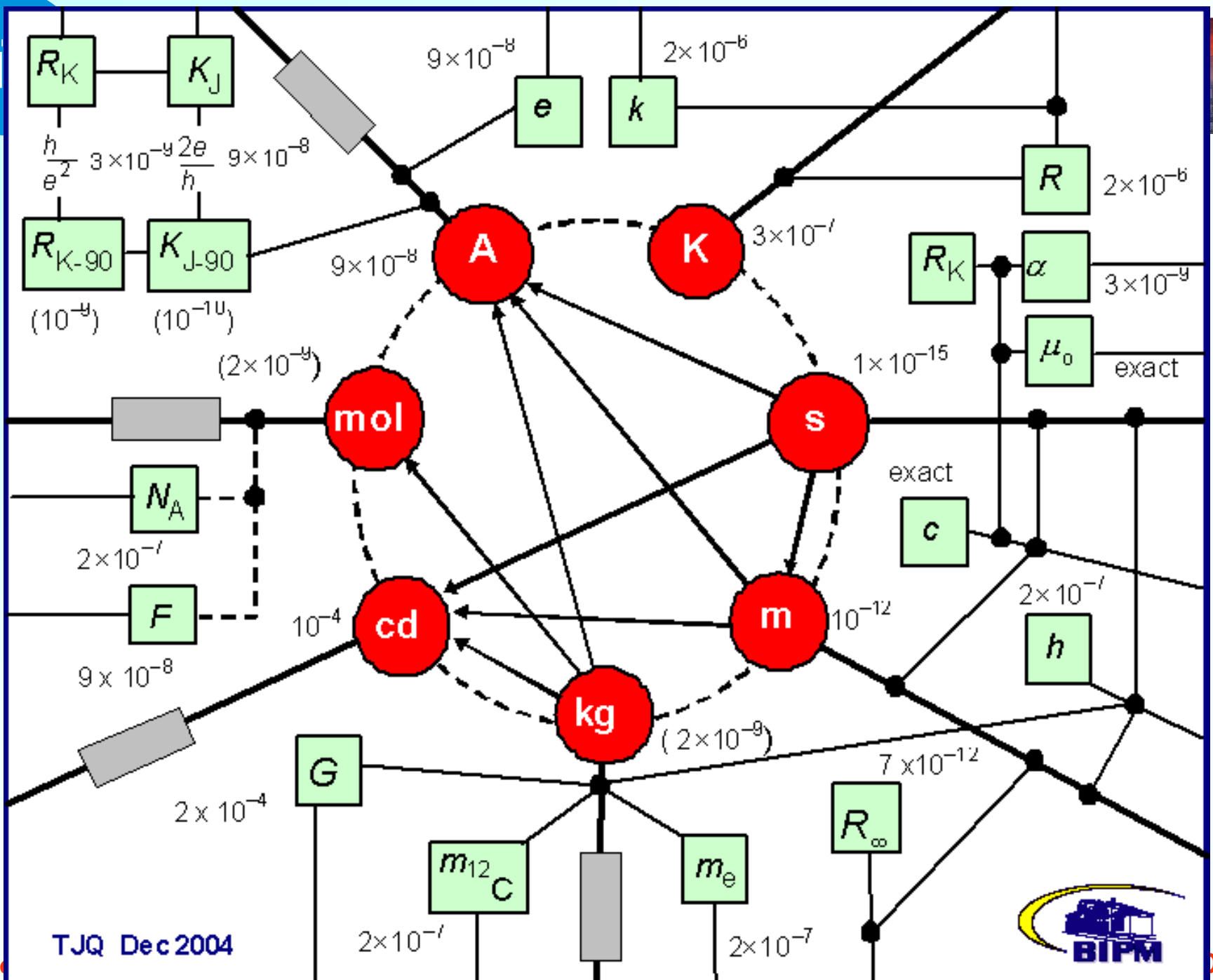
## Determinazione di $N_A$

$$N_A = \frac{M(\text{Si})}{m(\text{Si})} = \frac{M(\text{Si})}{\rho \frac{a^3}{8}}$$

$$N_A = \frac{M(\text{e})}{m(\text{e})} = \frac{M(\text{e}) c \alpha^2}{2 R_\infty} \frac{1}{h}$$









La candela potrebbe essere considerata una grandezza derivata dal watt, ma si preferisce considerarla unità di base data l'importanza che le misure fotometriche hanno, rinviando la decisione a quando si rivedranno le definizioni delle altre unità.

Anche in questo caso si profila già una nuova via basando la definizione sulla rivelazione di singoli fotoni



## Oltre l'evoluzione dell'attuale SI

Risoluzione suggerita alla CGPM:

**L'SI è il sistema di unità nel quale le costanti elencate hanno i valori specificati quando sono espresse in quelle unità**

Conseguenze:

- E' abrogata la distinzione tra unità di base e unità derivate
- Sono abolite le definizioni delle singole unità a favore dell'unico enunciato
- Realizzazione dell'unità di una grandezza è qualunque esperimento che stabilisca una relazione tra un campione di quella grandezza e una o più delle costanti fisse
- Lo sperimentatore è libero di scegliere la via più diretta o più conveniente per realizzare un'unità (estrapolazione della linea di tendenza individuata per il tipo di definizione)



## Un'ultima anomalia: l'atomo di cesio 133

L'unità di tempo rimarrebbe l'unica a non essere riferita alle costanti fondamentali

La teoria non fornisce relazioni utili tra la frequenza  $\Delta \nu ({}^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$  e le altre costanti

Sostituzione già proposta: la costante di Rydberg  $R_\infty$

Realizzazione possibile mediante campione all'idrogeno con frequenza calcolata rispetto alla frequenza di riferimento

$$c R_\infty = \alpha^2 \frac{m_e c^2}{2 h}$$

oggi già nota con incertezza di 6,6 parti su  $10^{12}$

Il calcolo del valore da assegnare alla radiazione dell'idrogeno è reso possibile dal modello dell'atomo di idrogeno

# Un'alternativa da considerare: la massa dell'elettrone $m_e$

$$m_e = \{m_e\} \text{ kg}$$

$$c = \{c\} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$h = \{h\} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$e = \{e\} \text{ A s}$$

$$k = \{k\} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$N_A = \{N_A\} \text{ mol}^{-1}$$

$$\text{m} = \frac{1}{\{c\}} c \text{ s}$$

$$\text{kg} = \frac{1}{\{m_e\}} m_e$$

$$\text{s} = \frac{\{e\}^2 \{m_e\}}{\{h\}} \frac{h}{m_e c^2}$$

$$\text{A} = \frac{1}{\{e\}} e \text{ s}^{-1}$$

$$\text{K} = \frac{\{k\}}{\{h\}} \frac{h}{k} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{mol} = \{N_A\} \frac{1}{N_A}$$

Frequenza di Compton  $\nu_C = \frac{m_e c^2}{h}$



## Alcune opinioni di vari comitati tecnici



**CCEM** → e, h e fissare i valori delle costanti di Josephson e di Von Klitzing

**CCM** → prima di avanzare nuove definizioni occorre che vadano d'accordo le diverse determinazioni di h (volume molare e bilancia watt); comunque preferisce che si fissi la costante di Planck piuttosto che la costante di Avogadro

**CCT** → occorrono determinazioni indipendenti della costante di Boltzman

**CCQM** → concorda con CCM



## Organizzazione internazionale e nazionale della metrologia