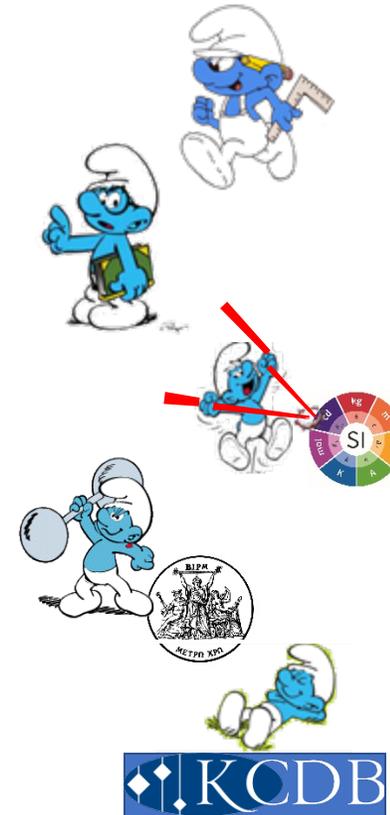




Metrologia: che cos'è

Sommario

1. Metrologia: che cos'è e a che cosa serve
2. Concetti di base e terminologia
3. Unità e sistemi di misura
4. La Convenzione del Metro
5. L'accordo di mutuo riconoscimento BIPM-MRA
6. Conclusioni



1.
Metrologia:
cos'è e a che
cosa serve



Prima di tutto: non inciampiamo nelle parole!

Parliamo di ...

Metrologia



(misurazioni)

e non di

Meteorologia

(tempo
atmosferico)



né di

Merceologia

(merci)



Dunque ...

Metrologia

*scienza della **misurazione** e delle sue applicazioni*

*NOTA: La **metrologia** comprende tutti gli aspetti teorici e pratici della **misurazione**, qualunque sia l'**incertezza di misura** e il campo d'applicazione.*

[VIM 2.2]

Il VIM è il Vocabolario Internazionale di Metrologia, che definisce in modo autorevole tutti i termini e i concetti principali della metrologia

Che cosa significa *misurare*?

Misurazione

*processo volto a ottenere sperimentalmente uno o più **valori** che possono essere ragionevolmente attribuiti a una **grandezza***
[VIM 2.1]

Grandezza
Fisica
(volume)



misurazione

24,2 L

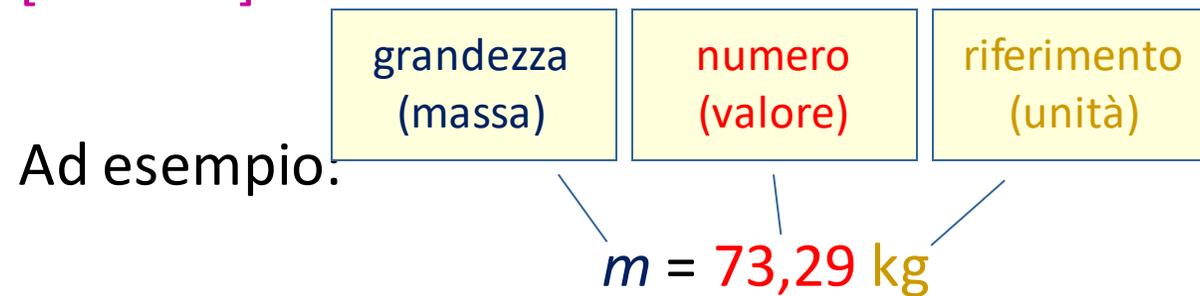
Valore di
misura

Che cos'è una *grandezza*?

Grandezza

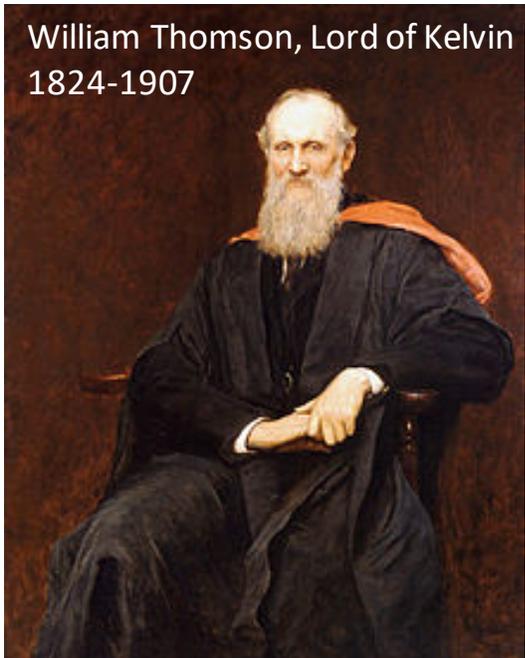
proprietà di un fenomeno, corpo o sostanza che può essere espressa quantitativamente mediante un numero e un riferimento

[VIM 2.1]



Ricapitolando fin qua ...

Misurare serve ad avere informazione *quantitativa* della *realtà* in cui viviamo.



I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of "science", whatever the matter may be.

Dico spesso che quando puoi misurare ciò di cui stai parlando, ed esprimerlo in numeri, puoi affermare di saperne qualcosa; se però non puoi misurarlo, se non puoi esprimerlo in numeri, la tua conoscenza sarà povera cosa e insoddisfacente: forse un inizio di conoscenza, ma non abbastanza da far progredire il tuo pensiero fino allo stadio di scienza, quale che sia l'argomento.

«Ma le misure le fanno solo gli scienziati ...»



- Ora
- Intensità segnale GSM
- Intensità segnale WiFi
- Capacità residua della batteria
- Posizione globale (GPS)
- Intensità luminosa (per telecamera e schermo)
- Prossimità (per controllo audio)
- Pressione barometrica
- Accelerazione di gravità vettoriale (orientazione)
- Velocità angolare vettoriale (giroscopio)
- Campo magnetico terrestre (bussola)
- Temperatura interna
- ...

Ma misurare servirà a qualcosa?



“Estimates of the cumulative contribution of measurement related R&D range from 0.8 % of GDP to 2 % of GDP”

[Michael King, The economic impact of measurement, Measurement+Control, 38/4, 2005]

Diagnostica medica precoce possibile solo con misurazioni raffinatissime



Monitoraggio secolare del clima

Prodotti che misurano



Prodotti che sono misurati



Prodotti che richiedono misure mentre vengono prodotti



2.
Concetti di base
e terminologia



Termini? No, concetti!

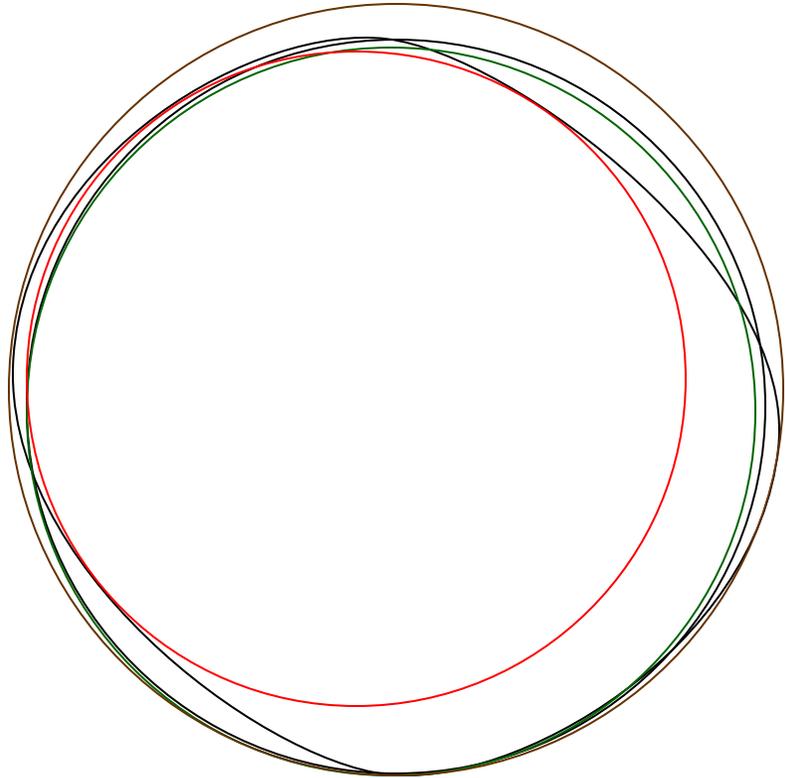
- I termini sono importanti
 - Perché permettono di comunicare correttamente
 - Soprattutto, i *termini* s'appoggiano e danno corpo a *concetti*: conoscere i termini richiede di capire i concetti
- Il testo di riferimento è il VIM (*Vocabolario Internazionale di Metrologia*)
 - = [JCGM 200:2008/2012](#)
 - = [Guida ISO/IEC 99:2007](#)
 - = [UNI/CEI 70099:2008](#)



Importanza del **misurando**

- In definitiva, misurare costa; prima di farlo, è opportuno chiarire fino in fondo perché, lo scopo per cui si misura
- Può sembrare strano, ma quante volte si misura senza sapere che cosa si intende misurare né perché ... ☹️
- Definizione del **misurando** e motivazione per cui si misura sono due facce della stessa medaglia
- Una definizione non accurata (cioè non unica) porta ad *incertezza di definizione (VIM 2.27)*

Ad esempio ... il diametro di un cerchio



- **Cerchio perfetto**: il diametro è unico; però ... non esiste in natura!
- **Cerchio reale** (errore di forma esagerato)
- **Ai minimi quadrati**: le aree esterna e interna sono uguali. Valore medio
- **Minimo circoscritto**: minimo diametro che contiene tutta la forma reale. Ingombro esterno
- **Massimo inscritto**: massimo diametro tutto interno alla forma reale. Luce interna
- Se non si riflette su quale sia il diametro d'interesse e non lo si precisa, si ha incertezza di definizione, e si rischia di non ottenere l'informazione d'interesse

Misurando

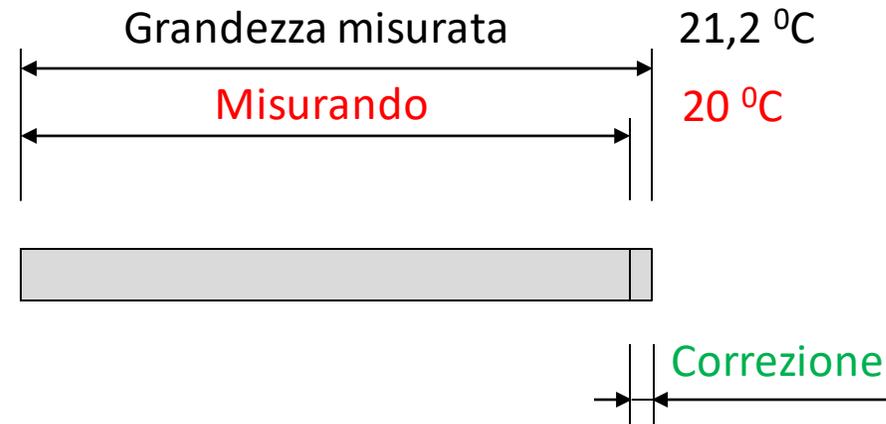
(VIM 2.3)

Grandezza che s'intende misurare

...

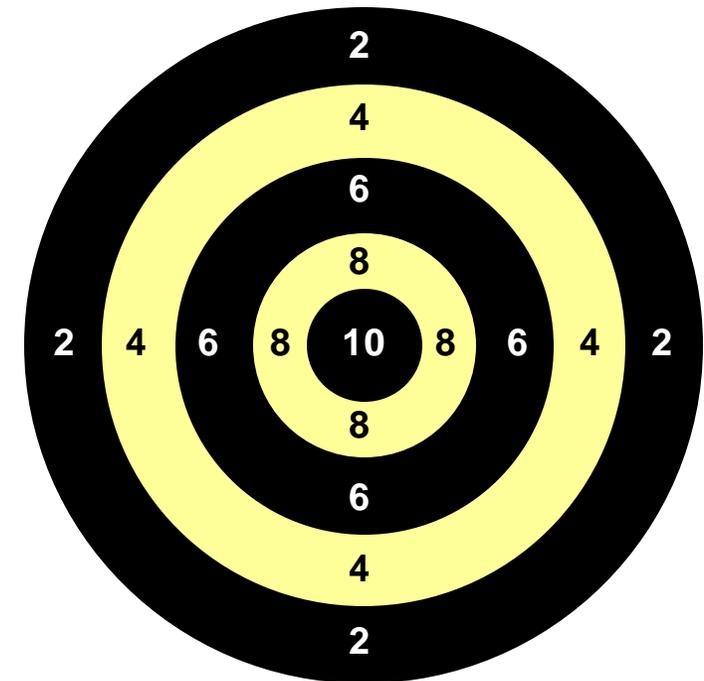
NOTA 3 ... la grandezza misurata può differire dal misurando, così come definito. In tal caso è necessaria una correzione adeguata.

- Il misurando non è
 - un *oggetto*:
ad esempio non un blocchetto
 - un *valore*:
ad esempio, non 1000,0021 mm



Misure giuste, precise, accurate

- Ci piacerebbe che la misura ottenuta fosse esattamente uguale al valore della grandezza d'interesse. Purtroppo
 - Misure ripetute dello stesso misurando possono differire leggermente fra loro a causa di
 - Rumore di misura
 - Variazioni ambientali (temperatura, ...)
 - Apprezzamento dell'operatore
 - ...
 - Tutte le misure ripetute possono essere scostate dal valore del misurando a causa di
 - Errori sistematici dello strumento (compresa la taratura)
 - Condizioni ambientali
 - Non coincidenza della grandezza misurata con il misurando
 - ...
- La situazione è simile al tiro al bersaglio: si mira al centro (misurando), ma ogni colpo è leggermente scostato (misura)



Giustezza (di misura)

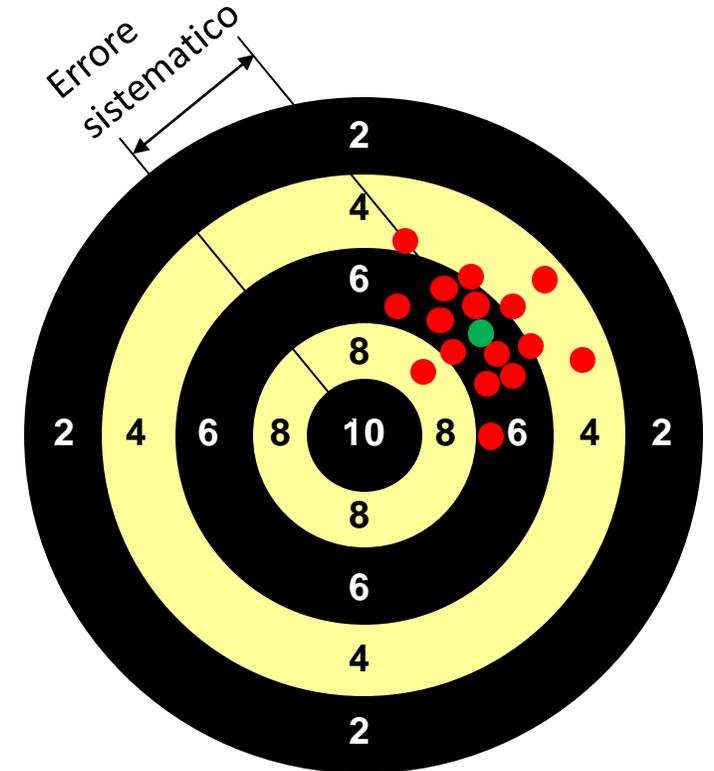
(VIM 2.14)

grado di concordanza tra la media di un numero infinito di valori misurati ripetuti e un valore di riferimento

NOTA 1 La giustezza di misura non è una grandezza e a essa non si assegna un valore numerico. ...

...

- La *giustezza* è caratteristica di un *valore di misura* (medio) e non di uno *strumento*
 - Tuttavia si può dire che uno strumento è *giusto* se produce misure *giuste*
- La *giustezza* è quantificata dall'*errore sistematico* (VIM 2.17)



Precisione (di misura)

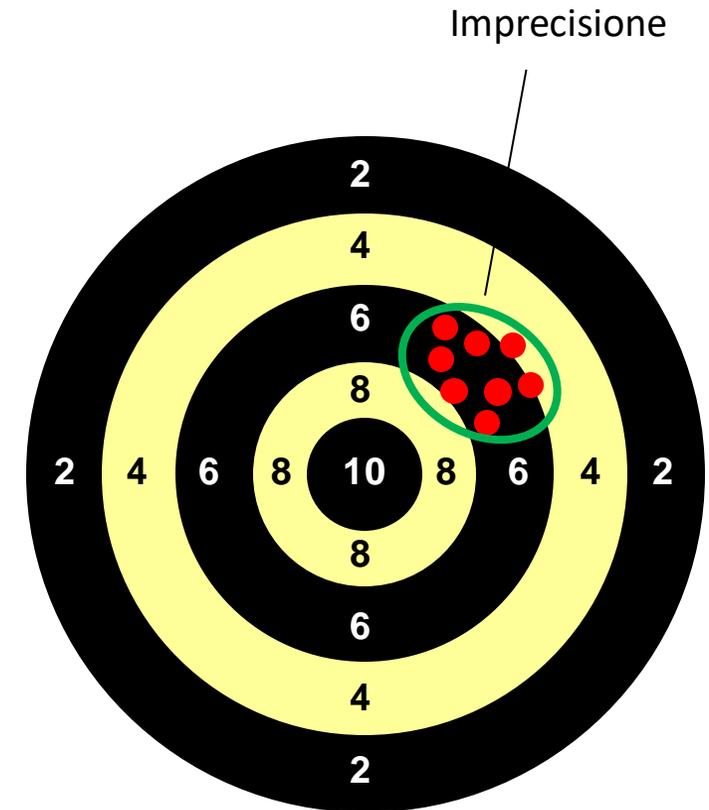
(VIM 2.15)

grado di concordanza tra indicazioni o valori misurati ottenuti da un certo numero di misurazioni ripetute dello stesso oggetto o di oggetti simili, eseguite in condizioni specificate

NOTA 1 Generalmente, la precisione di misura è espressa numericamente mediante misure d'imprecisione, quali scarto tipo, varianza, ...

...

- Le *condizioni specificate* possono essere
 - Condizioni di ripetibilità (VIM 2.20)
 - Condizioni di riproducibilità (VIM 2.24)



Accuratezza (di misura)

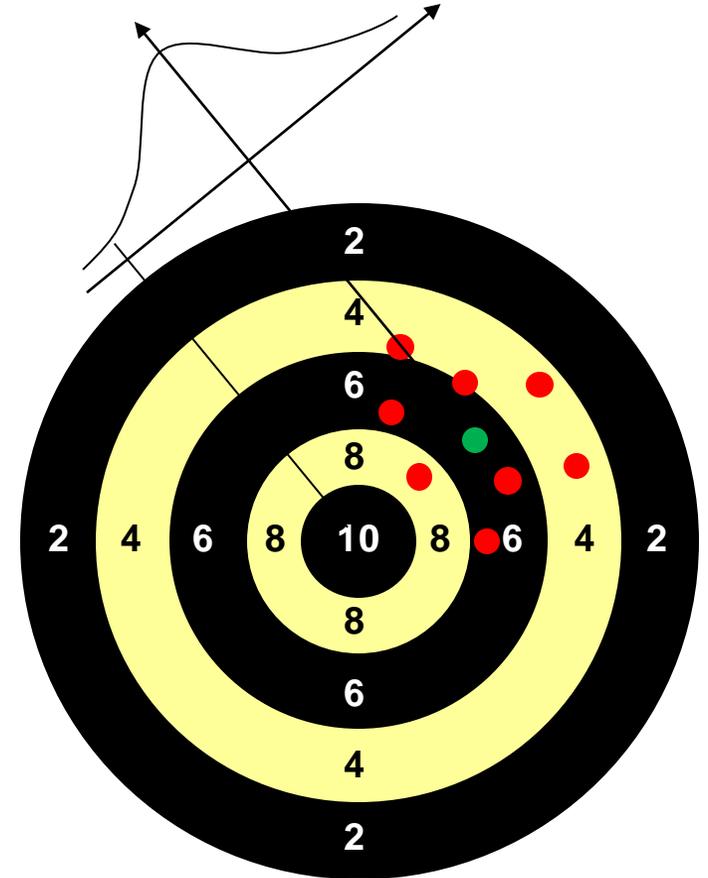
(VIM 2.13)

grado di concordanza tra un valore misurato e un valor vero di un misurando

NOTA 1 L'accuratezza di misura non è una grandezza e a essa non si assegna un valore numerico. ...

...

- Valori misurati *giusti e precisi* sono *accurati*
- L'*accuratezza* è quantificata dall'*incertezza di misura* (VIM 2.26)



Errori di misura

- Dobbiamo accettare che ogni misurazione non restituisca **mai** il valore vero del misurando, ma uno che è sempre leggermente scostato
 - La differenza fra i valori di misura e del misurando è l'**errore di misura**
- Tale errore è in parte
 - **Noto**, per la conoscenza che si ha della misurazione
 - ad esempio si stimano gli effetti termici sulla base di una misurazione ausiliaria della temperatura
 - Gli errori noti si possono (e devono) correggere
 - **Ignoto**, per la mancanza di conoscenza della misurazione
 - Ad esempio, il rumore di misura, o altri accidenti non noti
 - Imperfette correzioni degli errori noti
 - Gli errori ignoti non possono che essere accettati

Incertezza di misura

- Dunque, corretti tutti gli errori noti, rimangono quelli ignoti, che si accettano
- È importante stimarne l'entità, per quantificare la qualità della misura
 - La misura di una pista di $(100,000 \pm 0,005) \text{ m}$ è 100 volte meglio di $(100,0 \pm 0,5) \text{ m}$, pur se il risultato è sempre 100 m
- Tale stima è espressa dall'**incertezza di misura**
 - La stima dell'incertezza è la parte più nobile e caratteristica dell'attività di misura
 - Una misura composta solo di un valore e non accompagnata dall'incertezza vale poco (metrologicamente)

Errori ed incertezza

Errore (di misura) (VIM 2.16)

valore misurato di una grandezza meno un valore di riferimento di una grandezza

- Gli errori possono essere
 - **Noti**, quando si sta misurando una grandezza già nota; ad esempio nella taratura o verifica di uno strumento
 - **Incogniti**, nelle misurazioni ordinarie per ottenere informazioni su una grandezza

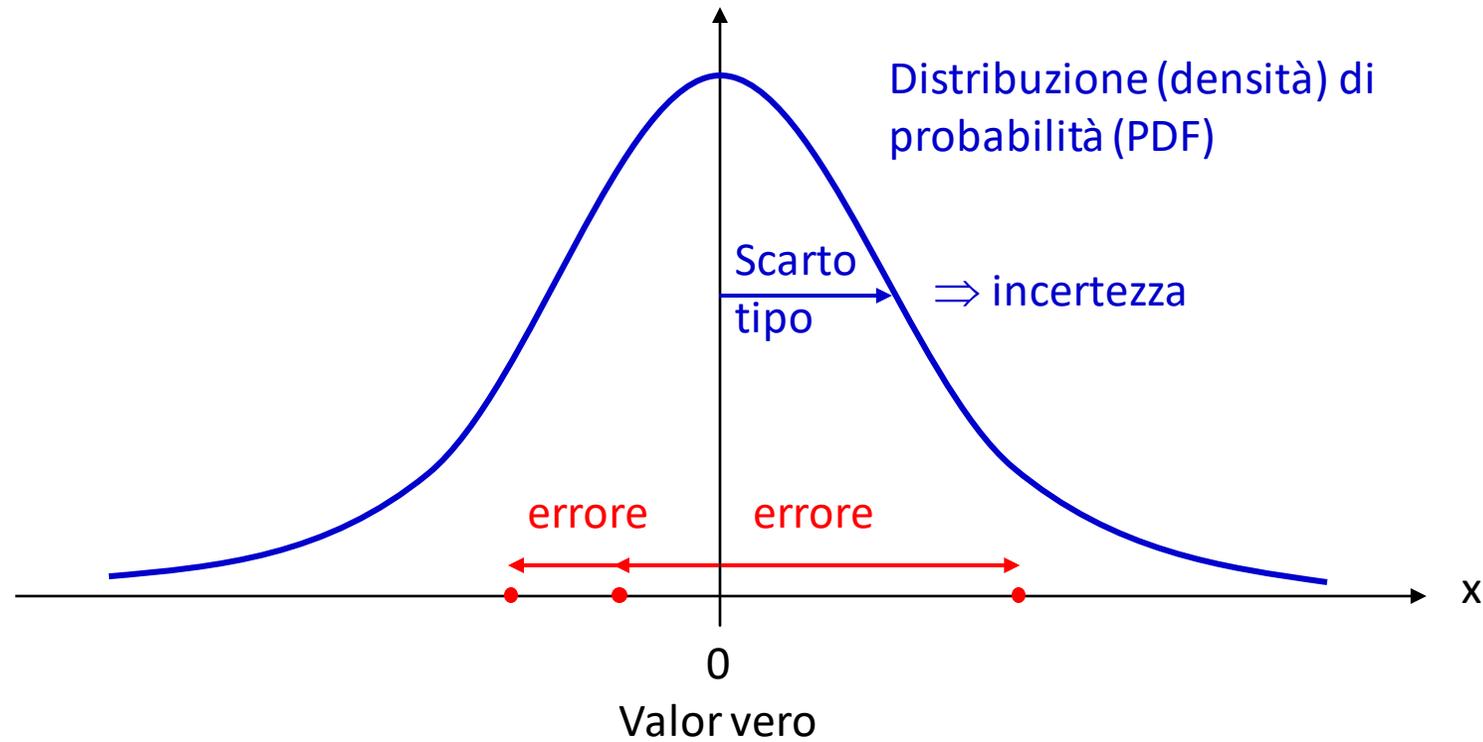
Gli errori **noti** si correggono

Incertezza (di misura) (VIM 2.26)

parametro non negativo che caratterizza la dispersione dei valori che sono attribuiti a un misurando, sulla base delle informazioni utilizzate

- Degli errori **incogniti** si stima l'entità, e la si esprime in termini probabilistici con l'*incertezza*.

Errori ed incertezza



Non confondiamo errori ed incertezza

- Hanno in comune:
 - La dimensione (unità di misura), uguale a quella del misurando
 - Esprimono la discordanza del valor misurato dal valor vero
- Differiscono perché:
 - L'incertezza è l'espressione sintetica di una distribuzione di probabilità dell'errore
 - L'errore ha segno; l'incertezza è sempre positiva
 - L'errore è una *grandezza*: quando noto, può (deve) essere corretto ed eliminato
 - L'incertezza è un parametro probabilistico (es. scarto tipo): non serve a correggere il valor misurato
 - L'errore o è *noto* o è *incognito*; l'incertezza *si stima*

Errore: noto o non noto?

- Normalmente l'errore non è noto
 - È la differenza con un valor vero, *ma*
 - Il valor vero non si conosce (sennò sarebbe inutile misurare 😊) ⇒
 - Non si conosce neppure l'errore
- È invece noto in presenza di un *valore di riferimento*:
 - Nelle messe in punto di strumenti e campioni, basato su strumenti o campioni noti; in questo caso si corregge
 - Nelle prove di strumenti; il riferimento è dato da campioni o riferimenti noti
 - In ogni caso, l'errore è affetto da incertezza, perché incerto è il valore di riferimento

A che cosa serve l'incertezza?

**“In God we trust.
All others must
bring data”.**

W. Edwards Deming



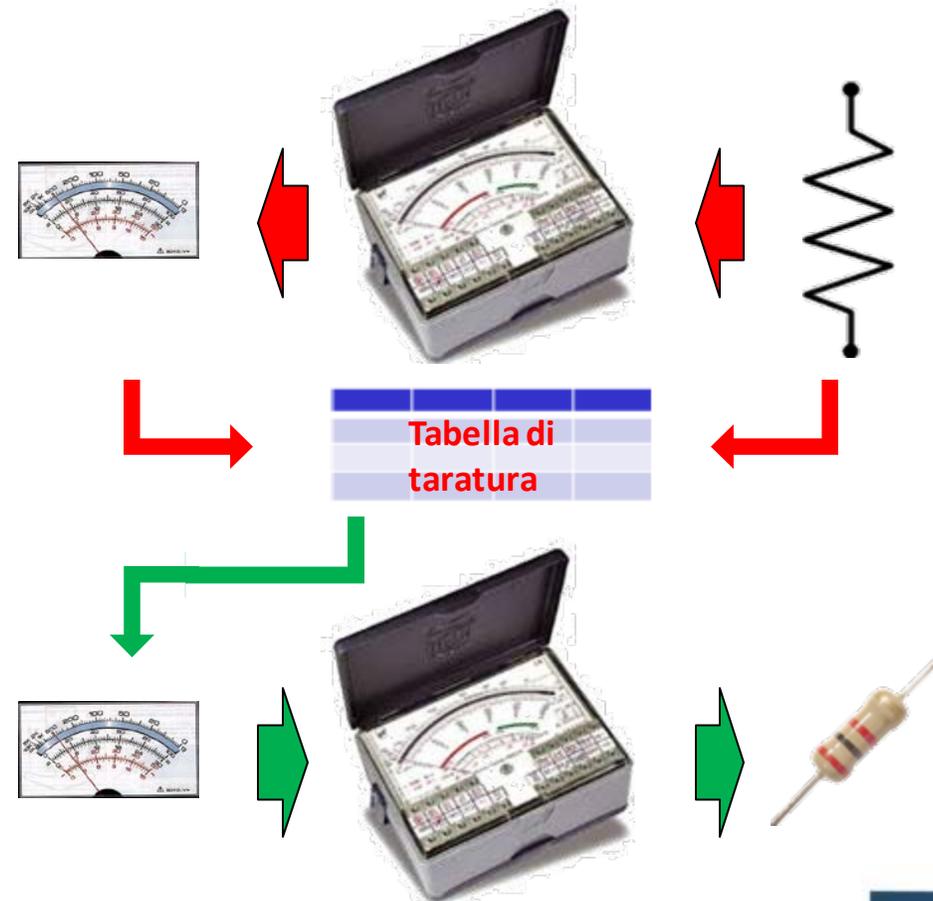
Taratura (di uno strumento)

(VIM 2.39)

operazione eseguita in condizioni specificate, che in una prima fase stabilisce una relazione tra i valori di riferimento con le rispettive incertezze di misura, forniti da campioni di misura, e le corrispondenti indicazioni, comprensive delle incertezze di misura associate, e in una seconda fase usa queste informazioni per stabilire una relazione che consente di ottenere un risultato di misura a partire da un'indicazione

...

NOTA 2 La taratura non dovrebbe essere confusa con la regolazione di un sistema di misura, che in alcuni settori è spesso chiamata erroneamente «autotaratura», e neppure con la verifica dello stato di taratura.



Verifica (di uno strumento)

(VIM 2.44)

messa a disposizione dell'evidenza oggettiva che un dato elemento soddisfa uno o più requisiti specificati

...

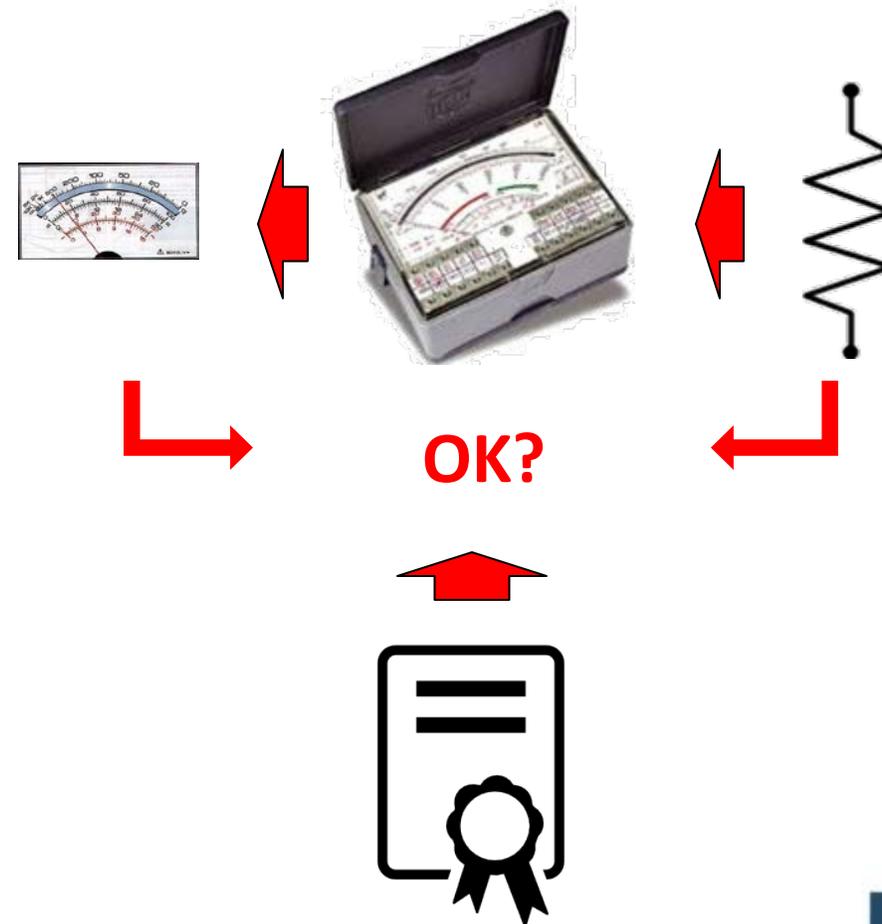
NOTA 2 L'elemento citato nella presente definizione può essere, per esempio, ... un sistema di misura.

NOTA 3 I requisiti specificati, citati nella presente definizione, possono essere, per esempio, che le specifiche di un costruttore sono soddisfatte.

...

NOTA 5 La verifica non dovrebbe essere confusa con la taratura ...

...



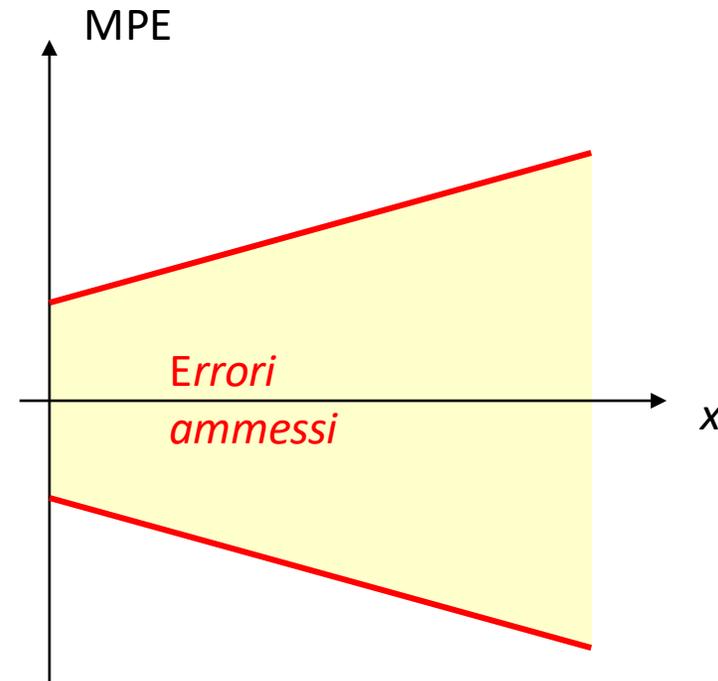
Errore massimo ammesso (MPE)

(VIM 4.26)

valore estremo dell'errore di misura, rispetto a un valore di riferimento noto, consentito da specifiche tecniche o da regolamenti fissati per una misurazione, uno strumento di misura o un sistema di misura

...

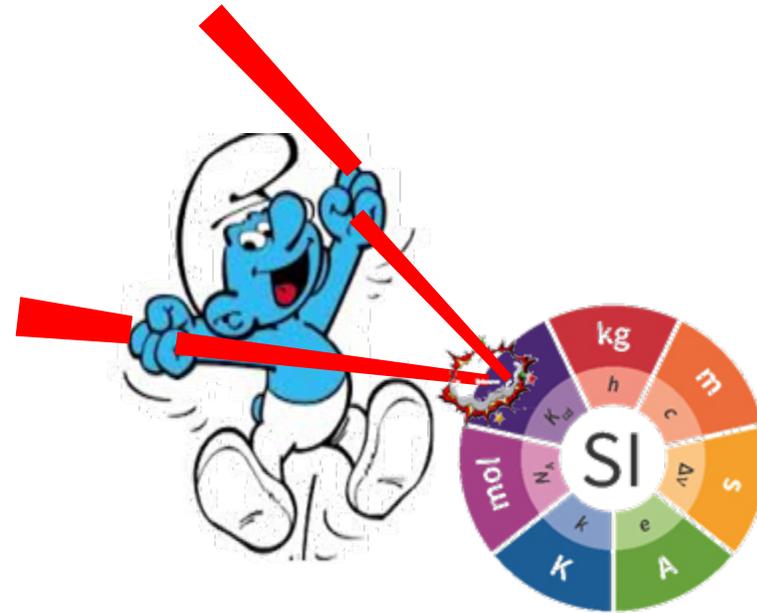
NOTA 2 Il termine «tolleranza» non dovrebbe essere usato per designare l'errore massimo ammesso.



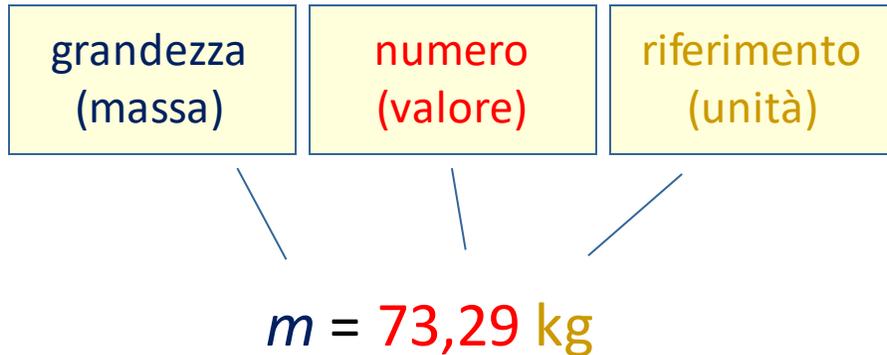
Taratura, verifica ed MPE

- La *taratura* ha senso se poi s'effettua una correzione dell'indicazione
- Se si vuole “solo” stare tranquilli che uno strumento si comporti come atteso, senza correzioni, allora serve una *verifica*
- Per uno strumento, la quantificazione della prestazione attesa è espressa mediante un MPE

3. Unità e sistemi di misura



Che cos'è un valore di misura?



- In altre parole,

m è 73,29 volte più grande di kg, o $\frac{m}{\text{kg}} = 73,29$

- Per esprimere il valore di una grandezza, ne occorre un'altra dello stesso tipo che faccia da riferimento, o *unità (di misura)*

Quanto dev'esser grande un'unità?

- Dev'esser pratica, cioè corrispondere ad una grandezza non assurdamamente grande o piccola
- Per facilitare le cose, intervengono i multipli e sottomultipli
- frequenza di trasmissione GSM:
 $960\,000\,000\text{ Hz} = 960\text{ MHz} = 0,96\text{ GHz}$
- costante reticolare del silicio:
 $0,000\,000\,000\,192\text{ m} = 192\text{ pm}$

Factor	Name	Symbol	Factor	Name	Symbol
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
10^{27}	ronna	R	10^{-27}	ronto	r
10^{30}	quetta	Q	10^{-30}	quecto	q

NASA: Mars Climate Orbiter (MCO)

- Missione per studiare clima, atmosfera e superficie di Marte
 - Lanciato il 1998-12-11
 - Perso il 1999-09-23
- Commissione d'esperti per determinare le cause
 - *The 'root cause' of the loss of the spacecraft was the failed translation of English units into metric units in a segment of ground-based, navigation-related mission software*



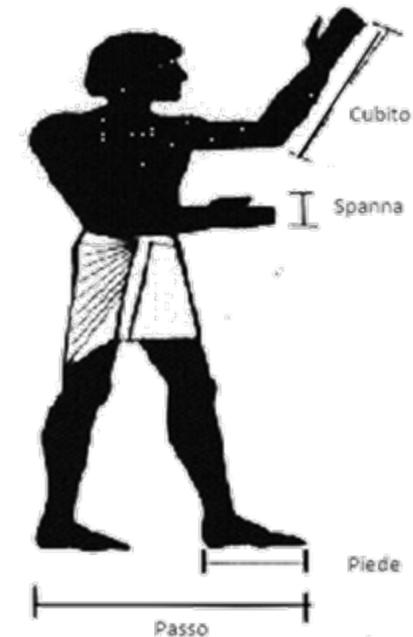
Unità di misura sbagliate possono costare milioni!

Le unità sono convenzionali: perché sono importanti?

- La medesima grandezza, se misurata con unità diverse, è espressa da numeri differenti:

$$m = 73,29 \text{ kg} \approx 161,58 \text{ lb}$$

- Se un'unità non fosse stabile e ben definita, ma al contrario variasse nel tempo, sarebbe come misurare in unità continuamente diverse, con conseguente caos
- Quindi le unità devono essere grandezze stabili nel tempo (anche sulla scala secolare), ben definite, riproducibili ovunque

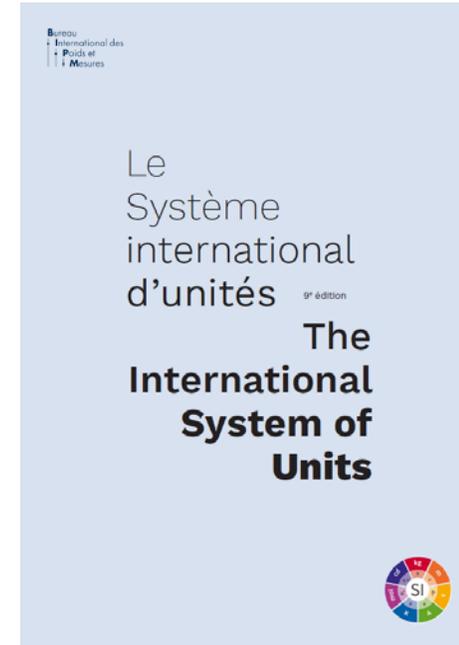


Quante sono le unità di misura?

- Ogni grandezza deve avere la sua unità di misura
⇒ servono tante unità di misura quante grandezze
- Ma le grandezze sono virtualmente infinite
⇒ ☹ un numero infinito di unità?
- In passato, vi erano unità completamente diverse, ad esempio, per la *lunghezza*, l'*area* e il *volume*, quali il *pie*de, la *giornata*, la *brenta*
- Oggi si riconoscono derivare tutte dalla medesima unità di lunghezza, e si utilizzano il *metro* (m), il *metro quadro* (m²) e il *metro cubo* (m³)

Occorre un sistema di unità ...

- ... e il sistema c'è: il
Sistema Internazionale delle unità, SI
- Esso è posto sotto l'egida della
Convenzione del Metro
- Chiarisce tutti gli aspetti teorici e pratici delle unità di misura, singolarmente e nel loro insieme

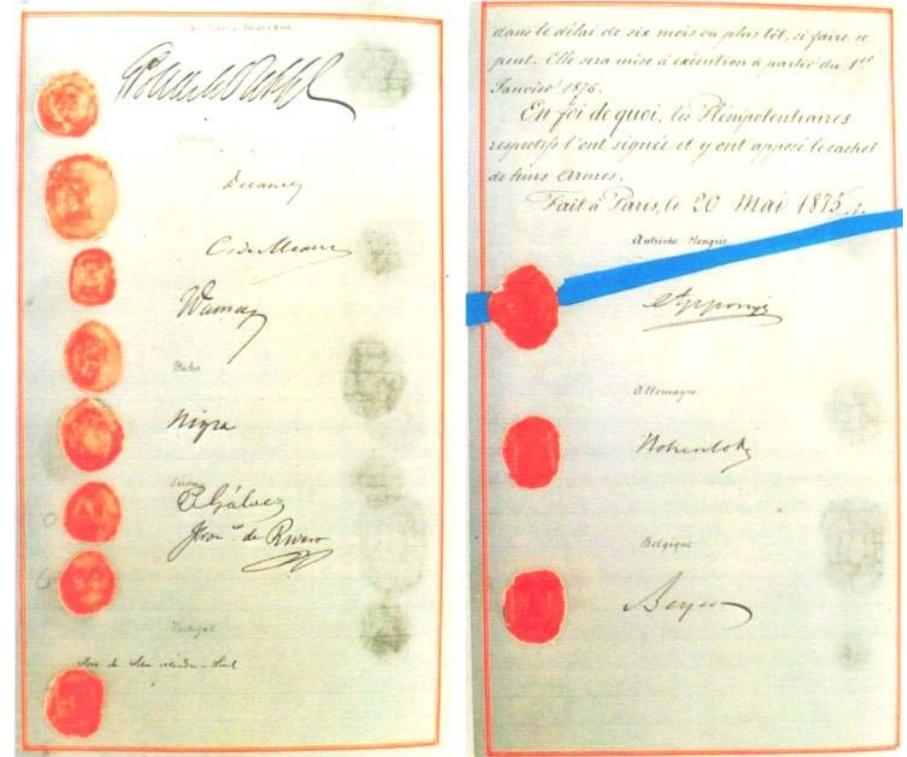


4.
La Convenzione
del metro



La Convenzione del metro

- Trattato diplomatico firmato il 1875-05-20 da 17 Paesi
 - Per l'Italia, C. Nigra, plenipotenziario del re Vittorio Emanuele II
- Oggi, 64 Paesi Membri e 36 Associati
- La Convenzione del Metro è il più duraturo trattato diplomatico, sopravvissuto (fra il resto) a due guerre mondiali
- Il 20 maggio è la **Giornata mondiale della metrologia**
- Il 2025-05-20 si celebrerà il 150° anniversario



Che cos'è la Convenzione del metro

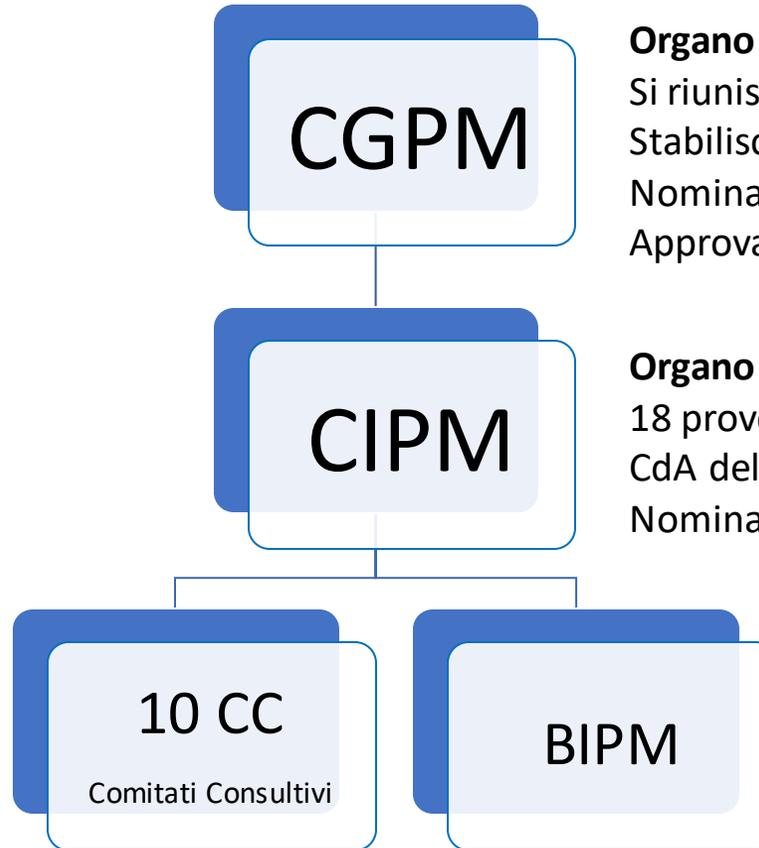
- Crea il BIPM – *Bureau International des Poids et Mesures* a Sevrés (FR)
- Stabilisce la struttura internazionale della Metrologia
 - CGPM – Conferenza Generale dei Pesì e delle Misure
 - CIPM – Comitato Internazionale dei Pesì e delle Misure
- Garantisce la metrologia mondiale, ed in particolare
 - SI: Sistema internazionale delle unità di misura
 - MRA: Accordo di Mutuo riconoscimento



Struttura

CC – Comitati Consultivi	
CCAUV	Acustica, Ultrasuoni e Vibrazioni
CCEM	Elettricità e Magnetismo
CCL	Lunghezza
CCM	Massa e grandezze apparentate
CCPR	Fotometria e Radiometria
CCQM	Quantità di Sostanza: chimica e biologia
CCRI	Radiazioni Ionizzanti
CCT	Termometria
CCTF	Tempo e Frequenza
CCU	Unità

Organi dedicati disciplinari
Proposte di modifica alle unità
Gestione del MRA



Organo diplomatico

Si riunisce ogni 4 anni
Stabilisce il bilancio
Nomina i membri del CIPM
Approva modifiche al SI

Organo tecnico-amministrativo

18 provenienti dagli NMI
CdA del BIPM
Nomina i presidenti dei CC

Organo esecutivo

76 unità personale (2022) + distaccati da NMI
14,2 M€ (2022)
(522 k€ da Italia, 2023)

5.
L'accordo di mutuo
riconoscimento
BIPM-MRA



Che cos'è lo MRA

- MRA = *Mutual Recognition Arrangement*
 - Sotto l'egida della Convenzione del Metro, ma accordo separato
 - Non fra governi ma fra Istituti di Metrologia Nazionali (**NMI** – *National Metrology Institutes*)
- Obiettivi
 - Stabilire il **grado d'equivalenza** fra i campioni nazionali mantenuti dagli NMI
 - Fornire il **riconoscimento mutuo dei certificati** di taratura e misura rilasciati dagli NMI
 - In questo modo, fornire ai governi e ad altre parti **fondamenta tecniche solide per accordi più ampi** in tema di scambi, commercio e regolamentazioni internazionali

Le RMO (*Regional Metrology Organisations*)

- Il mondo è suddiviso in 6 RMO
 - **AFRIMETS** Intra-Africa Metrology System
 - **APMP** Asia Pacific Metrology Programme
 - **COOMET** Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions
 - **EURAMET** European Association of National Metrology Institutes
 - **GULFMET** Gulf Association for Metrology
 - **SIM** Inter-American Metrology System
- Hanno il compito di organizzare lo MRA nella propria regione, coordinarsi a livello mondiale e proporre modifiche e novità ai confronti di misura e allo MRA



Come di realizza lo MRA

- Ciascun NMI partecipante adotta uno schema di qualità secondo la ISO/IEC 17025
- Ciascun NMI partecipante dichiara le proprie CMC (*Calibration and Measurement Capability*), inserite nel proprio sistema di qualità
- Esempio di CMC dell'INRIM

Oggetto	Misurando	Campo	Incertezza	Condizioni/Restrizioni
Blocchetti pianparalleli	Lunghezza al centro (ISO 3650)	(0,5 – 100) mm	$U = \sqrt{[(18 \text{ nm})^2 + 0,34 \times 10^{-6} L]^2}$	Acciaio e ceramica

- Ogni CMC è
 - analizzata per via documentale dalla propria RMO (con supervisione delle altre)
 - Validata sperimentalmente mediante misure effettive
 - Approvata

Approvazione e registrazione delle CMC

- Le CMC approvate sono registrate nel KCDB, che registra anche gli esiti dei confronti di misura
 - Open access a tutto il mondo
- Le CMC approvate sono verificate periodicamente
 - Quanto a conformità alla ISO/IEC 17025, ogni 5 anni
 - Quanto a risultati sperimentali, ogni 10 anni



Key Comparison Data Base

<http://kcdb.bipm.org>

Confronti

- Un risultato di misura è considerato corretto se l'errore rispetto ad un valore di riferimento noto non è superiore all'incertezza estesa:

$$E_N = \frac{x_i - x_{\text{rif}}}{2u(x_i - x_{\text{rif}})} \text{ (ISO 13528)}$$

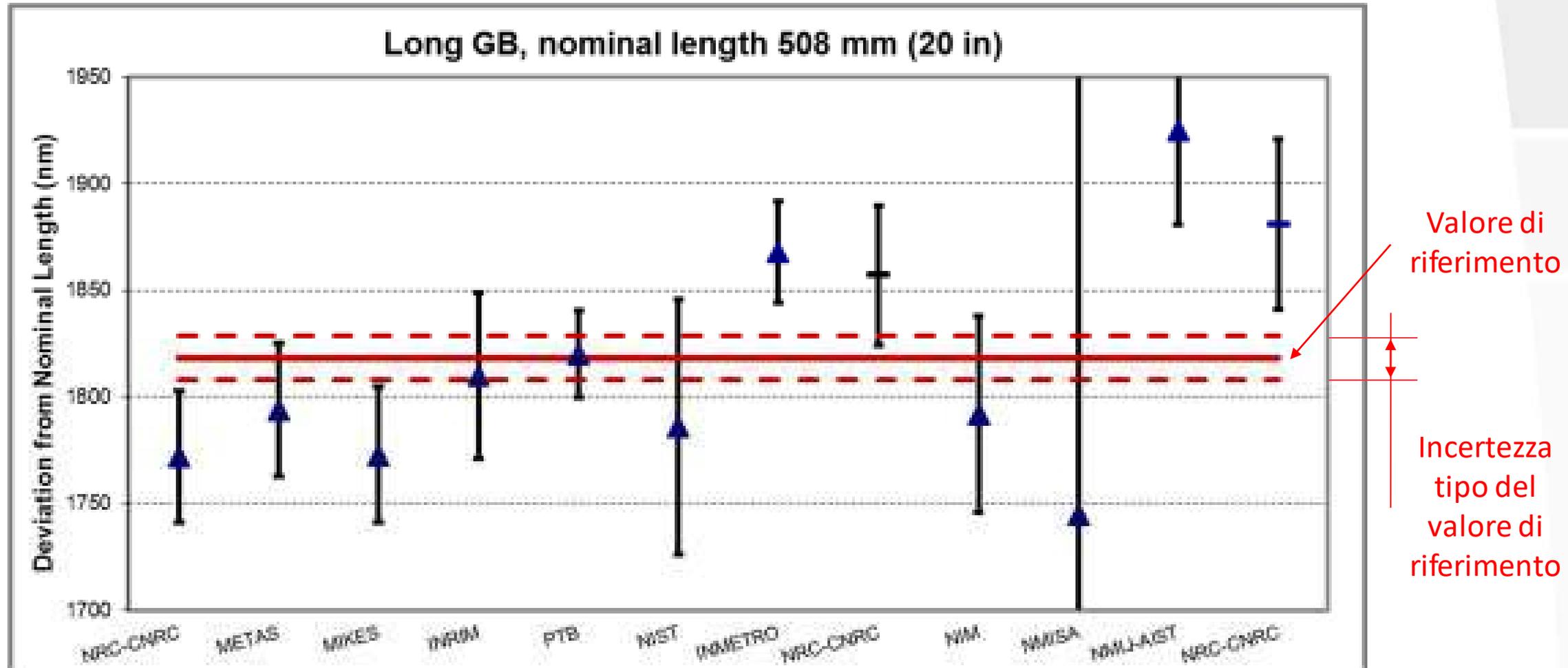
- Per verificare se un NMI misura correttamente si fa circolare un campione viaggiante
 - Ciascuno misura e comunica i risultati in segreto
 - Al termine, il valore di riferimento è preso come una media pesata di tutti i valori
 - Si osserva il valore di E_N riscontrato da ciascun partecipante:
 - se $|E_N| \leq 1$, la CMC è convalidata
 - se $|E_N| > 1$, occorrono azioni correttive, compresa la sospensione della CMC o l'allargamento dell'incertezza

Confronti chiave e supplementari

- Almeno per alcune grandezze (CC), le CMC riguardano una grandissima quantità di campioni e strumenti, impossibile verificarle tutte
- Ad esempio, il CCL ha adottato un approccio a matrice di competenze principali, curando che i (pochi) tipi di confronti **chiave** le coprano tutte
- Altre CMC possono esser fatte oggetto di confronti **supplementari**

Principal Techniques	CCL-K1	CCL-K2	CCL-K3		CCL-K4	CCL-K5		CCL-K6	CCL-K7	CCL-K8
	gauge block	length bar	poly	gau.	diameter	ball	step	2D CMM	linescale	surf tex.
Realizing the Metre definition										
Interferometry	2	2			2	2	2	2	2	1
Wavelengths in air	2	2			2	2	2	2	2	1
Gauge Issues										
Temperature of Gauge	1	2			2	2	2	2	2	1
Mounting & Aligning	1	2	2		2	2	2	2	2	1
Wavefront Probing										
Reflection Phase Effects	2	1								
Wringing	2	1								
Mechanical Probing										
Stylus contacting at surface, 1-D					2	1	2	1		2
Bi-directional probing for size					2		2			
Probing for 3-D center coordinates						2		2		
Image Probing										
Sensing Line Centres									2	
Angle Metrology										
Measuring small angles (autocoll.)			1	2						
Large Angle Gen: Circle Dividers			2	1				1		
Small Angle Gen: SineBar, CircDiv.				2						
Formal mathematical processing of data sets										
ISO parameter extraction										2
Form Metrology										
Flatness										1
Roundness					1					
Thread, Gear Profile										
3-D Surface										1

Esempio di risultato di confronto



Confronto **CCL-K1.2011**, blocchetti pianparalleli corti e lunghi, di acciaio a di ceramica

Conclusioni

- Misurare serve a conoscere, e quindi a capire e decidere
- Misurare costa; ma misurare ad un livello (d'incertezza) non sufficiente per lo scopo semplicemente non serve
- Per garantire l'uniformità internazionale delle unità di misura, esiste la Convenzione del Metro (dal 1875) che cura il Sistema internazionale delle unità, SI, e l'Accordo di Mutuo Riconoscimento
- Lo MRA è l'equivalente internazionale dell'accreditamento nazionale
- La metrologia è pronta per un mondo davvero globale





THANK YOU FOR YOUR ATTENTION!