

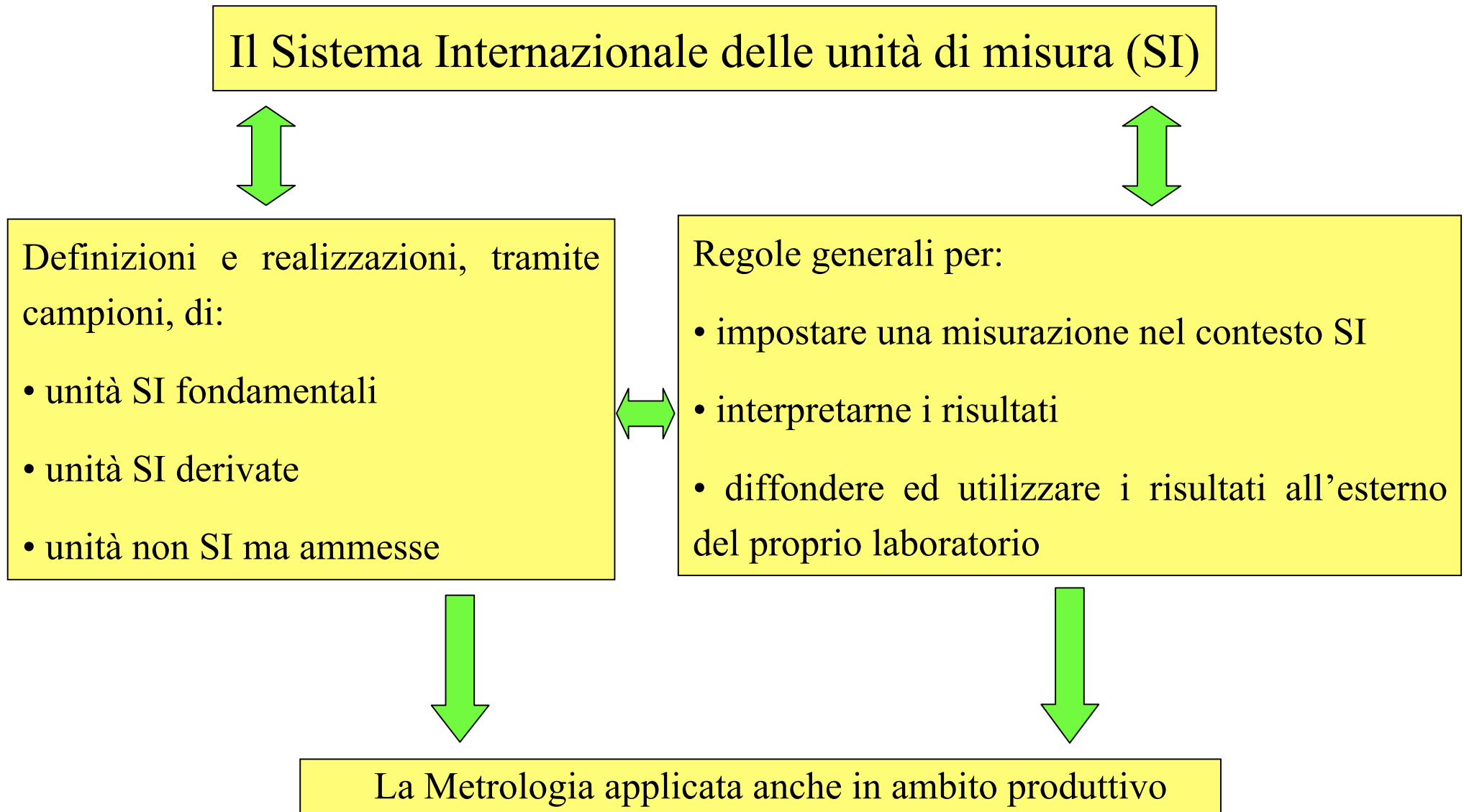
Metrologia: la Scienza della Misura

Nella vita quotidiana si ricorre per innumerevoli volte a misure di ogni tipo: si rende quindi necessario un “*linguaggio delle misure*” ben regolamentato, che deve essere definito e migliorato costantemente per garantire una sempre maggior precisione e per poter comunicare in modo esatto ad altri il risultato delle nostre misurazioni



La *Metrologia* è la scienza che ha come scopo l'individuazione dei metodi più adatti e precisi per effettuare la misurazione di una qualsiasi grandezza fisica, di cui definisce anche l'unità di misura, e per esprimere ed utilizzare in maniera corretta il risultato della misurazione stessa

“Ossatura” della Metrologia



Il Sistema Internazionale delle unità di misura (SI)

- *principi alla base della sua definizione*
- *definizioni delle unità di misura fondamentali e non*
- *i campioni primari come realizzazione delle unità di misura*

L'importanza di un sistema di unità di misura universalmente riconosciuto

- sin dall'antichità per le principali unità di misura (lunghezza e peso) si realizzarono campioni che erano custoditi con cura religiosa, per lo più in templi o in luoghi sacri
- lo sviluppo degli scambi marittimi e terrestri incrementò l'esigenza di unificare in qualche modo i pesi e le misure e lungo i secoli furono fatti alcuni tentativi
- nel 1600 il problema aveva superato l'ambito degli scambi commerciali ed era avvertito in tutta la sua importanza dagli scienziati, che volevano far conoscere e confrontare i risultati dei loro esperimenti: 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
- alla fine del 1700 in Francia si costruirono i primi campioni (un cilindro di platino per il kilogrammo ed un'asta pure di platino per il metro). Questi campioni furono riconosciuti come "campioni definitivi nazionali per le misure di peso e di lunghezza", anche se non erano campioni naturali
- il riferimento ai campioni francesi fu ratificato nel 1875 in occasione dalla Convenzione del Metro, primo importante atto internazionale verso l'unificazione della Metrologia

Caratteristiche generali di un sistema di unità di misura

Per una sua corretta formulazione occorre:

1. scegliere e definire le grandezze assunte come *fondamentali* e le corrispondenti unità di misura; tale scelta, in teoria arbitraria, in realtà deve rispettare e conciliare esigenze diverse di carattere storico, scientifico e pratico
2. stabilire le regole per ottenere dalle unità fondamentali le unità di tutte le altre grandezze in uso nella fisica, nella chimica, nella biologia, nelle varie attività tecnologiche e nella vita quotidiana

Criteri di scelta per le unità di misura fondamentali


Si ricorre ad elementi di riferimento per quanto possibile non legati né al tempo né al luogo della misurazione



... ad esempio...

... definire l'unità di lunghezza tramite la lunghezza del pendolo che batte il secondo non soddisfa, al giorno d'oggi, questa esigenza, perché l'accelerazione di gravità, che interviene nella relazione tra lunghezza e periodo del pendolo, varia da luogo a luogo e dipende anche dall'epoca in cui si effettua la misurazione...

... la lunghezza d'onda in vuoto di una ben definita radiazione monocromatica, almeno allo stato attuale delle conoscenze scientifiche, sembra invece garantire la riproducibilità dell'unità, e quindi del campione che la materializza in un momento qualsiasi in un laboratorio metrologico ovunque situato



Altri criteri di scelta per le unità di misura fondamentali

... inoltre, la scelta deve essere tale da garantire:

- l'**indipendenza**: nessuna unità fondamentale si deve poter esprimere mediante le altre (per quanto riguarda la sua dimensione)
- la **completezza**: le unità debbono essere in numero sufficiente da permettere di derivare, mediante relazioni stabilite dalle leggi della fisica, le unità delle altre grandezze (unità derivate)
- la **coerenza**, nel senso che le relazioni formali che esprimono le unità derivate per mezzo di quelle fondamentali devono avere coefficiente numerico 1 (per ragioni di chiarezza e di semplicità di impiego)
- il fatto che i multipli e i sottomultipli delle unità di misura siano decimali
- un'attuazione pratica agevole, tale da garantire una larga diffusione ed un uso corrente

Attuale linguaggio metrologico internazionale...

L'atto di nascita del SI è stato redatto nel 1960 dalla XI CGPM
(Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure)

- SI, anche se considerato il miglior sistema esistente, è suscettibile di miglioramenti
- forse le unità di cui è costituito il sistema non subiranno cambiamenti a breve termine; tuttavia nel momento in cui il progresso scientifico/tecnologico offrirà campioni più stabili e consentirà misure più precise, le definizioni delle unità verranno modificate
- oltre alle unità fondamentali sulle quali il sistema è costruito, fanno parte del SI le unità derivate che si ottengono combinando le precedenti secondo regole molto semplici
- **SI fu costituito inizialmente da sei unità fondamentali: metro, chilogrammo, secondo, ampere, kelvin e candela. Nel 1971 fu introdotta un'altra unità fondamentale: la mole**

... le sette unità fondamentali del Sistema Internazionale...

Grandezza di base	Unità SI di base	
	Nome	Simbolo
lunghezza	metro	m
massa	kilogrammo	kg
tempo	secondo	s
corrente elettrica	ampere	A
temperatura termodinamica	kelvin	K
quantità di sostanza	mole	mol
intensità luminosa	candela	cd

... e la regola per la formazione di unità derivate

$$\text{simbolo dell'unità SI derivata} = m^{\alpha} \cdot \text{kg}^{\beta} \cdot \text{s}^{\delta} \cdot \text{A}^{\gamma} \cdot \text{K}^{\theta} \cdot \text{mol}^{\varphi} \cdot \text{cd}^{\omega}$$

dove gli esponenti sono numeri interi, positivi o negativi, zero incluso

Si noti che la regola di derivazione prevede esplicitamente che il coefficiente numerico che moltiplica le unità di base sia sempre uguale a uno

Definizioni delle unità SI fondamentali

-) UNITA' DI LUNGHEZZA - (XVII CGPM del 1983)

il metro è la lunghezza del tragitto compiuto dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo pari a $1/299\,792\,458$ di secondo; è così fissata, per definizione, la velocità della luce in $299\,792\,458$ m/s

-) UNITA' DI MASSA - (III CGPM del 1901)

il kilogrammo è eguale alla massa del prototipo internazionale, cilindro di platino iridio, conservato presso il BIPM (*Bureau International des Poids et mesures*)

-) UNITA' DI TEMPO - (XIII CGPM del 1967)

il secondo è l'intervallo di tempo che contiene $9\,192\,631\,770$ periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133

-) UNITA' DI CORRENTE ELETTRICA - (IX CGPM del 1948)

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 $2 \cdot 10^{-7}$ newton per ogni metro di lunghezza

Definizioni delle unità SI fondamentali

-) UNITA' DI TEMPERATURA TERMODINAMICA - (XIII CGPM del 1967)

il kelvin è la frazione $1/273,16$ della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua. La temperatura termodinamica si indica con il simbolo T ; il valore numerico della temperatura Celsius (indicata con t) in gradi celsius è data da: $t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15$

-) UNITA' DI QUANTITA' DI SOSTANZA - (XIV CGPM del 1971)

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 ; quando si usa la mole, le entità elementari devono essere specificate e possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, o altre particelle, o gruppi specificati di tali particelle

-) UNITA' DI INTENSITA' LUMINOSA - (XVI CGPM del 1979)

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

Esempi di grandezze derivate e loro unità SI...

Grandezza derivata	Unità derivate SI	
	Nome	Simbolo
area	metro quadrato	m ²
volume	metro cubo	m ³
velocità	metro al secondo	m/s
accelerazione	metro al secondo quadrato	m/s ²
numero d'onda	metro alla meno uno	m ⁻¹
massa volumica, densità	kilogrammo al metro cubo	kg/m ³
volume massico	metro cubo al kilogrammo	m ³ /kg
densità di corrente	ampere al metro quadrato	A/m ²

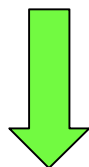
Nome	Simbolo	Valore in unità SI
minuto	min	1 min = 60 s
ora	h	1 h = 60 min = 3 600 s
giorno	d	1 d = 24 h = 86 400 s
Grado sessagesimale	°	1° = (π/180) rad
Minuto di angolo	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) rad
Secondo di angolo	"	1" = (1/60)' = (π/648 000) rad
litro	l, L	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
tonnellata	t	1 t = 10 ³ kg
bar	bar	1 bar = 10 ⁵ Pa



... e di unità non SI ma ammesse

I campioni di misura come realizzazioni pratiche delle unità SI fondamentali (e non)

Le unità SI sono state scelte e definite anche in modo da poter essere realizzate con la miglior precisione possibile allo stato attuale della tecnologia



si dicono **campioni primari** tutti quei sistemi di misura in grado di generare e misurare valori noti (oltre al valore unitario, ed a meno della loro incertezza) di una data grandezza fisica ricorrendo direttamente alle leggi fisiche che di quella grandezza regolano il comportamento

Il ruolo scientifico e quello “legale” della Metrologia

- *stabilire le regole generali per eseguire una misurazione in maniera corretta, nel contesto SI*
- *garantire una gestione omogenea dei vari campioni di misura, in modo da poter diffondere, confrontare ed utilizzare i risultati di una misurazione in contesti generalizzati (a livello nazionale e internazionale)*

Cosa significa misurare: misurazione e misura

- la **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 campione e il misurando viene definito **misura**
- la misura può essere ottenuta sia **in modo diretto**, ovvero per confronto diretto con l'unità di misura ed i suoi multipli o sottomultipli (per esempio, le misure di lunghezza per confronto con il campione metro), sia in **modo indiretto** cioè mediante l'applicazione di leggi fisiche che legano la grandezza incognita ad altre misurabili direttamente (per esempio la misura di una velocità si ottiene dalle misure di spazio e di tempo, $v = s/t$)...

Il risultato di una misurazione: la MISURA

... è anche possibile effettuare misure dirette od indirette utilizzando strumenti tarati per confronto tramite campioni:

- la misura di lunghezza tramite un'asta graduata (a sua volta tarata per confronto diretto con il campione di riferimento)
- la misura della massa tramite una bilancia a dinamometro (strumento tarato mediante un'operazione diretta di misurazione con riferimento a masse campione)
- la misura della temperatura tramite un termometro a resistenza (strumento tarato con un procedimento di misurazione indiretto e applicazione della legge fisica che lega la resistenza elettrica di un metallo alla sua temperatura, $R = R(T)$)



Alla fine, una misura si compone essenzialmente di una terna di informazioni:

- 1. il valore numerico V relativo alla misurazione**
- 2. l'unità di misura con la quale si è effettuata la misurazione**
- 3. l'incertezza $\pm U$ con la quale si fornisce il risultato della misurazione**

Cosa esprime l'incertezza di una misura?

Dalla norma internazionale *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (1995), tradotta e pubblicata recentemente come norma UNI CEI ENV 13005 (*Guida all'espressione dell'incertezza di misura*), segue che:

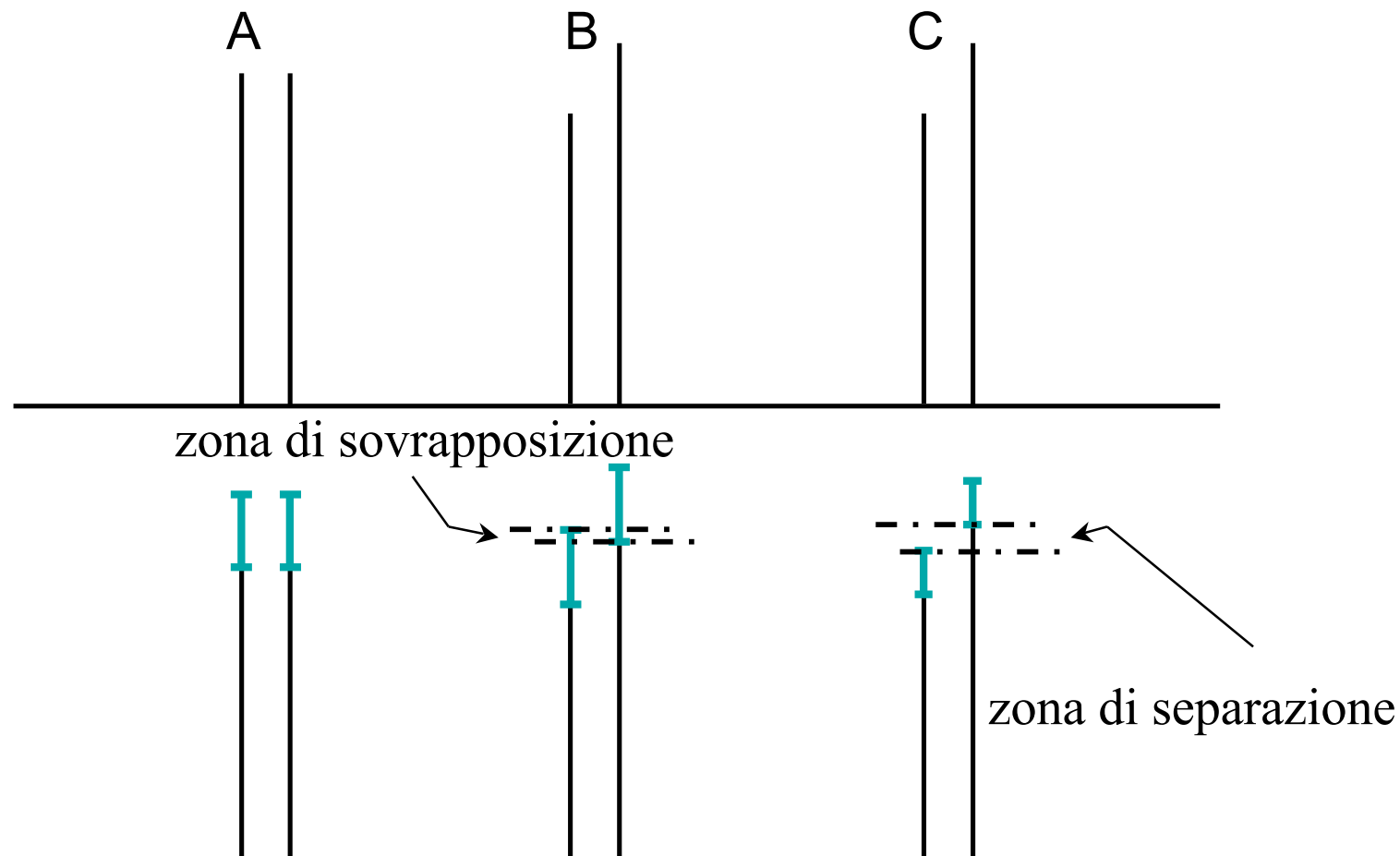


l'incertezza è un parametro, associato al risultato di una misurazione, che caratterizza la dispersione dei valori ragionevolmente attribuibili al misurando

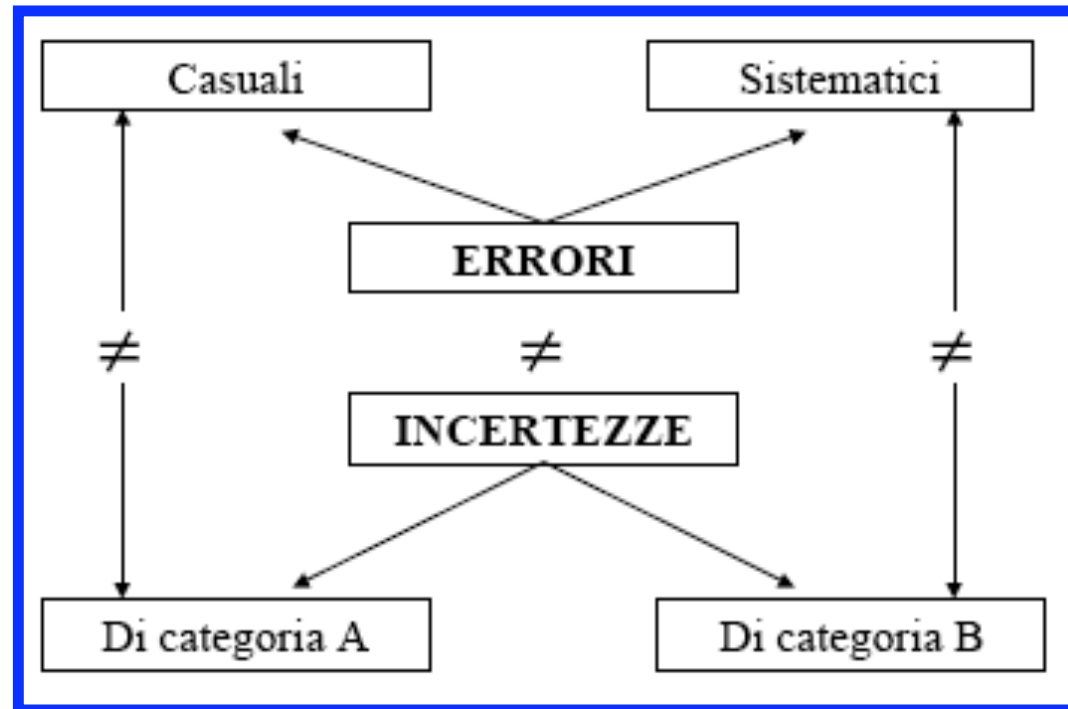
In generale, il risultato di una misurazione è solamente un'approssimazione o stima del valore del misurando ed è pertanto completo solamente quando sia accompagnato da una dichiarazione dell'incertezza di quella stima.

La “bontà” (cioè la precisione o livello di affidabilità) di una misura è insita nel valore dell’incertezza ad essa associata

Può essere utile valutare un esempio che mostra i limiti del concetto di uguaglianza, e permette di sfruttare l’informazione della misura per prendere eventualmente delle decisioni



Cosa origina l'incertezza di una misura?

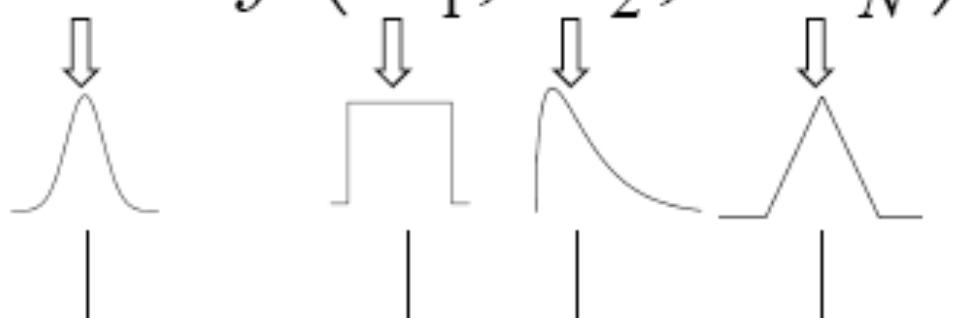


*alcune fonti
di incertezza*

- definizione o realizzazione incompleta del misurando
- non rappresentatività della campionatura
- inadeguata conoscenza degli effetti delle condizioni ambientali sulla misurazione
- risoluzione o soglia di risoluzione strumentali non infinite
- valori non esatti di campioni e materiali di riferimento

Criteri generali per la valutazione dell'incertezza di misura

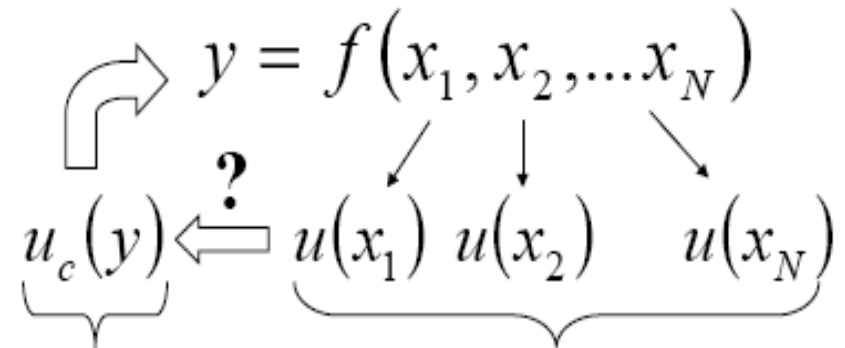
MODELLO DELLA MISURAZIONE

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

propagazione delle incertezze

è opportuno introdurre
un'analisi di tipo statistico

VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA DI y

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

$$u_c(y) \leftarrow ? \quad u(x_1) \quad u(x_2) \quad u(x_N)$$

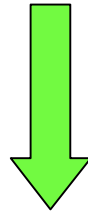
Incetenza tipo
composta di y

IncetENZE tipo delle grandezze d'ingresso

Incetenza estesa

$$U = k u_c(y)$$

Valutazioni dell'incertezza tipo delle grandezze di ingresso



Valutazioni dei contributi d'incertezza di **categoria A**: sono indispensabili quando non vi siano altre informazioni disponibili se non numerose replicazioni delle misurazioni.

Il loro impiego più valido è nello studio e qualificazione della procedura di misurazione, sulla base di un campione adeguato di risultati.



Valutazioni dei contributi d'incertezza di **categoria B**: sono molto efficienti poiché sono basate sul lavoro precedentemente svolto dalla comunità scientifica e tecnologica, però richiedono una approfondita conoscenza del metodo di misura adottato e dei fenomeni collegati. Sono di particolare utilità perché consentono una valutazione di massima dell'incertezza all'atto dell'impostazione iniziale della procedura di misurazione

Metodi di stima dell'incertezza tipo delle grandezze di ingresso

- Di categoria A (quando sono disponibili n misure ripetute $X_{i,k}$ di X_i).

$$x_i = \bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{i,k} \quad \text{Stima di } X_i$$

$$u^2(x_i) = s^2(\bar{X}_i) = \frac{s^2(X_i)}{n} = \frac{1}{n} \frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (X_{i,k} - \bar{X}_i)^2$$

Varianza di categoria A

$$u(x_i) = s(\bar{X}_i) \quad \text{Incertezza tipo di categoria A}$$

Si ipotizzano funzioni di distribuzione note a priori

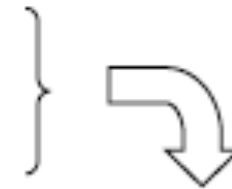


- Di categoria B (quando NON sono disponibili misure ripetute di X_i).

x_i Stima di X_i

$u^2(x_i)$ Varianza di categoria B

$u(x_i)$ Incertezza tipo di categoria B



Valutate grazie ad un giudizio scientifico basato su tutte le informazioni disponibili sulla possibile variabilità di X_i .

Le norme internazionali per la qualità richiedono che:

le apparecchiature di prova, misurazione e collaudo siano utilizzate in modo da assicurare che

**la loro incertezza di misura sia conosciuta e
compatibile con le esigenze di misurazione richieste**



occorre quindi identificare tutte le apparecchiature che possono influire sulla qualità della misura e **tararle** (mettendole a punto ad intervalli prefissati o prima dell'uso) **a fronte di strumenti certificati riferibili a campioni riconosciuti (nazionali o internazionali)**

Gestione dei campioni primari: la Convenzione del Metro

La gestione dei campioni primari si svolge nell'ambito della Convenzione del Metro, che ha definito e cura tuttora il mantenimento delle unità di misura del Sistema Internazionale

Conferenza Generale dei Pesi
e Misure (CGPM)

livello diplomatico

Comitato Internazionale dei
Pesi e Misure (CIPM)

livello scientifico-organizzativo

Bureau International des Poids
et Mesures (BIPM)

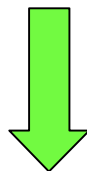
livello scientifico-laboratorio

Il Sistema Internazionale di unità di misura deve essere usato in Italia per legge

(D.P.R 802 del 12 agosto 1982)

Il coordinamento internazionale della metrologia

L'attività tecnico-scientifica del BIPM è indispensabile soprattutto per **campioni materiali**, costituiti cioè da un manufatto. Rimane ora come ultima unità di tale tipo il **kilogrammo**, materializzato da un cilindro di platino-iridio che, evidentemente, deve essere conservato dal BIPM, e reso disponibile per la disseminazione



Anche nel caso di **campioni naturali**, che possono essere realizzati indipendentemente nei diversi laboratori nazionali, è comunque necessaria un'attività di confronto dei risultati e di coordinamento delle attività a livello internazionale

Esempio: un campione materiale ancora in uso

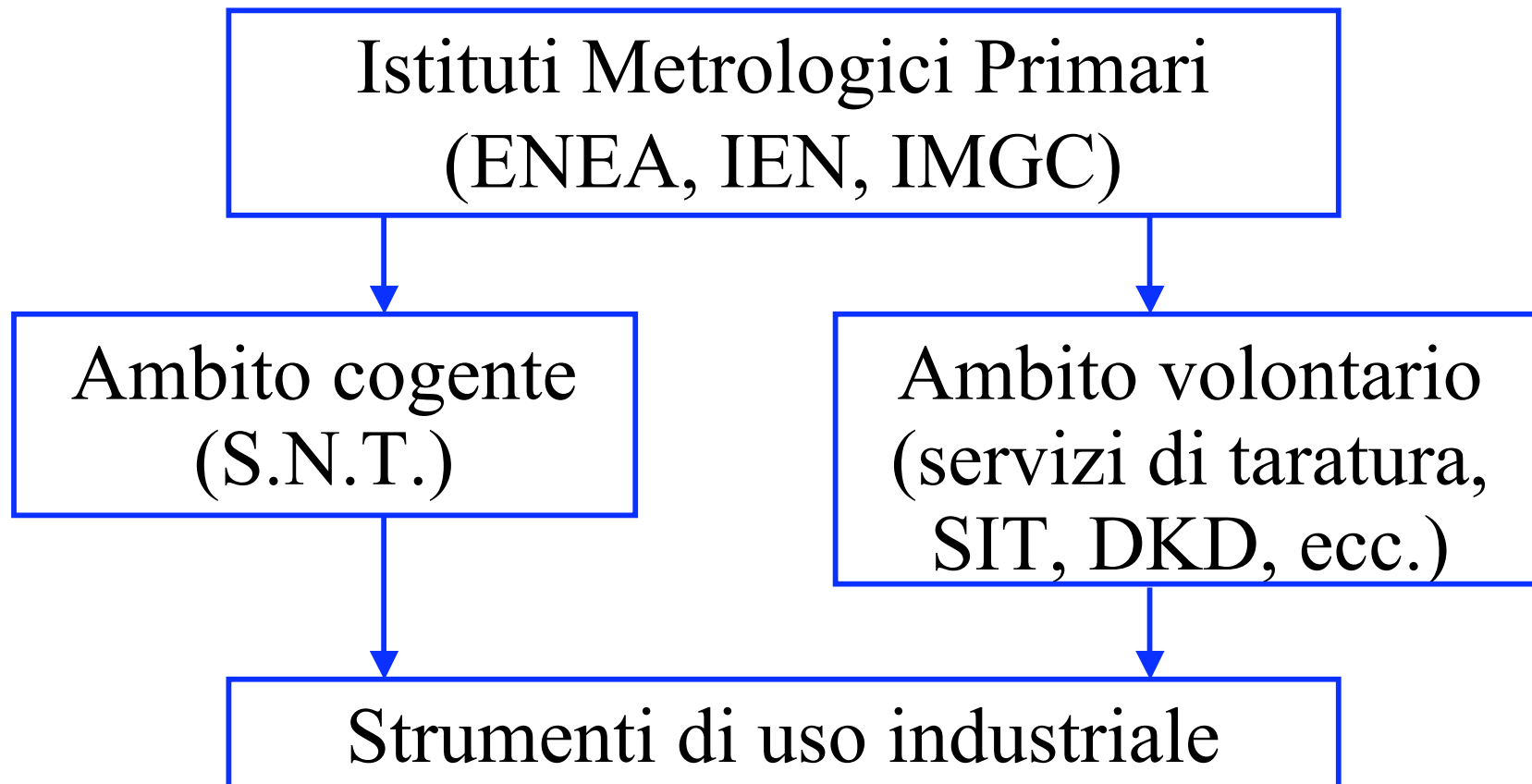


L'IMGC esegue ricerche finalizzate alla realizzazione, al mantenimento ed al miglioramento dei campioni di misura nei settori termico e meccanico. L'IMGC mantiene pertanto i campioni delle unità SI di base (metro, kilogrammo e kelvin) oltre al campione del radiante e di unità derivate quali forza, pressione, densità e portata.

copia italiana (n. 62) del kilogrammo
massa 0,999 999 051 kg

La disseminazione delle unità di misura in Italia

La **disseminazione dell'unità di misura** parte dagli Istituti Metrologici Primari (ENEA, IEN, IMGIC) e si propaga fino al livello industriale mediante campioni di trasferimento



La Metrologia applicata anche in ambito produttivo

L'**ambito cogente** è quello in cui si devono rispettare precise prescrizioni di legge (ad esempio controllo di recipienti a pressione, di apparecchi di sollevamento, test su provini di calcestruzzo ecc.)

In tale ambito devono essere rispettate per la disseminazione delle unità di misura le prescrizioni della legge 273 del 1991, che istituisce il Sistema Nazionale di Taratura, costituito dagli Istituti Metrologici Primari, in collegamento con l'Ufficio Centrale Metrico

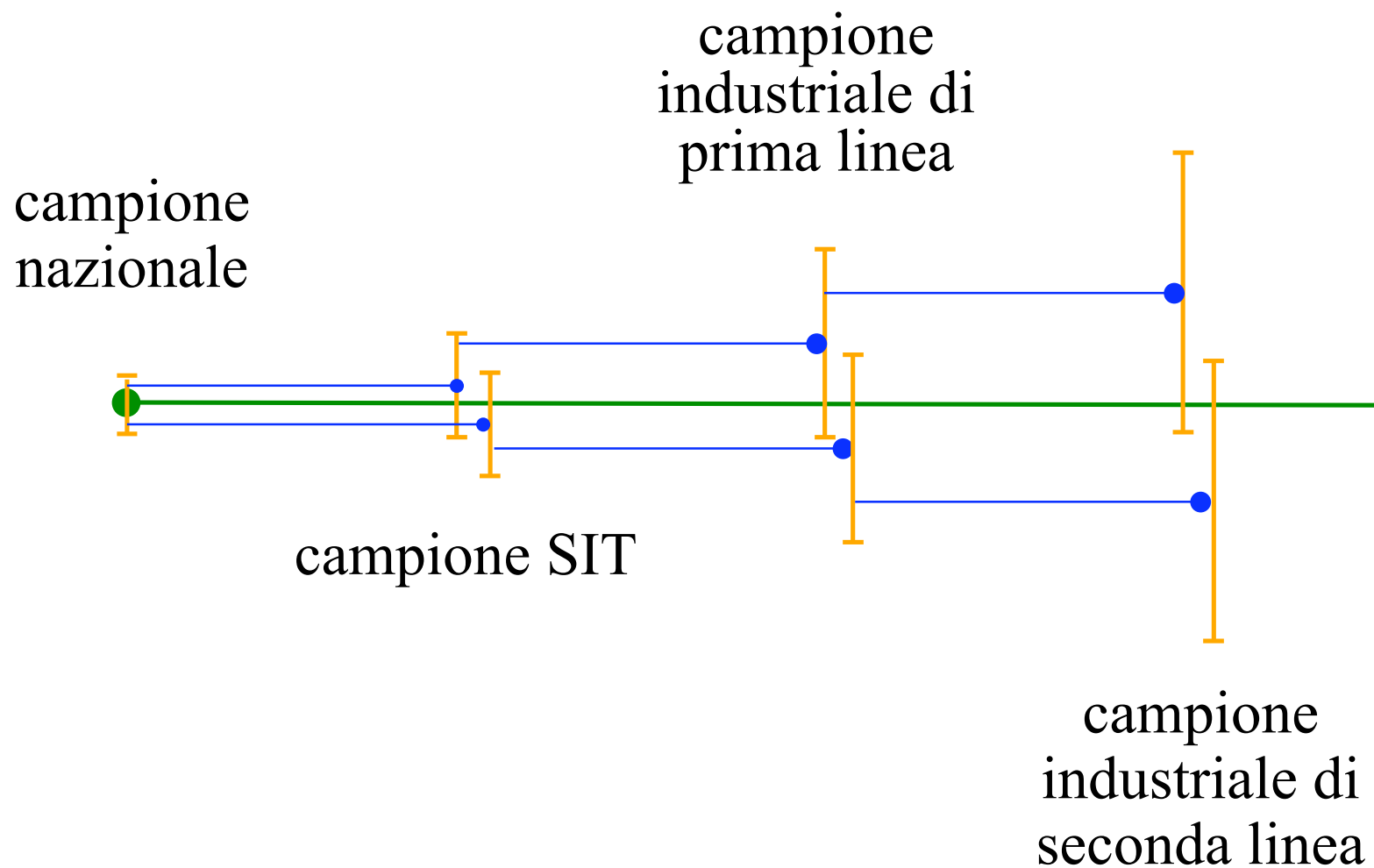
La maggior parte delle attività industriali si svolge invece in **ambito volontario**, e ha dato grande impulso allo sviluppo dei servizi di taratura in molti stati europei, con l'intento di garantire un elevato standard di qualità dei prodotti

Il Servizio di Taratura in Italia (SIT) opera in stretto collegamento con gli altri servizi di taratura europei, per cui esiste un **protocollo di mutuo riconoscimento** dei certificati di taratura

La catena di riferibilità per uno strumento di misura:

- 1) taratura, mediante il campione nazionale o internazionale dell'unità di misura corrispondente, di un campione di trasferimento
- 2) uso del campione di trasferimento per tarare gli strumenti di riferimento definiti nell'ambito del Sistema Qualità aziendale (campioni di prima linea)
- 3) disseminazione interna al Sistema Qualità aziendale dei riferimenti mantenuti dai campioni di prima linea, eventualmente tramite campioni di seconda linea, fino agli strumenti di lavoro

Schema di disseminazione delle unità di misura



*Una delle sette grandezze fondamentali del Sistema
Internazionale di unità di misura:*

la TEMPERATURA TERMODINAMICA

- *definizione della grandezza fisica*
- *definizione della sua unità di misura: il kelvin*
- *i campioni utilizzati per la definizione dell'unità e per la scala di temperature*

Primo passo: definizione della grandezza fisica

- la termodinamica descrive le trasformazioni subite da un sistema in seguito a scambi di energia con altri sistemi o con l'ambiente esterno
- lo stato di un sistema in equilibrio è specificato dal valore che assumono determinate grandezze (temperatura, pressione e volume), dette variabili termodinamiche
- quando due sistemi interagenti sono in equilibrio condividono alcune proprietà, che possono essere misurate assegnando ad esse un preciso valore numerico. Conseguenza di questo fatto è il **principio zero**, che afferma che quando due sistemi sono in equilibrio termico con un terzo sono in equilibrio anche tra loro. La proprietà condivisa è in questo caso la **temperatura**. Qualunque sistema, posto in contatto con un ambiente idealmente infinito e a temperatura determinata, si porterà in equilibrio con quest'ultimo, cioè raggiungerà la stessa temperatura dell'ambiente
- il principio zero della termodinamica introduce quindi il concetto di temperatura, conoscendo la quale si può sapere con sicurezza se fra due sistemi ci sarà o no scambio di calore. Se fra due sistemi posti a contatto non c'è scambio di calore allora essi hanno la stessa temperatura

La definizione dell'unità di misura: il kelvin

La definizione della temperatura termodinamica permette di esprimere l'unità di temperatura indipendentemente da qualsiasi sostanza, a condizione che si stabilisca il valore della temperatura da attribuire ad uno stato termico di riferimento

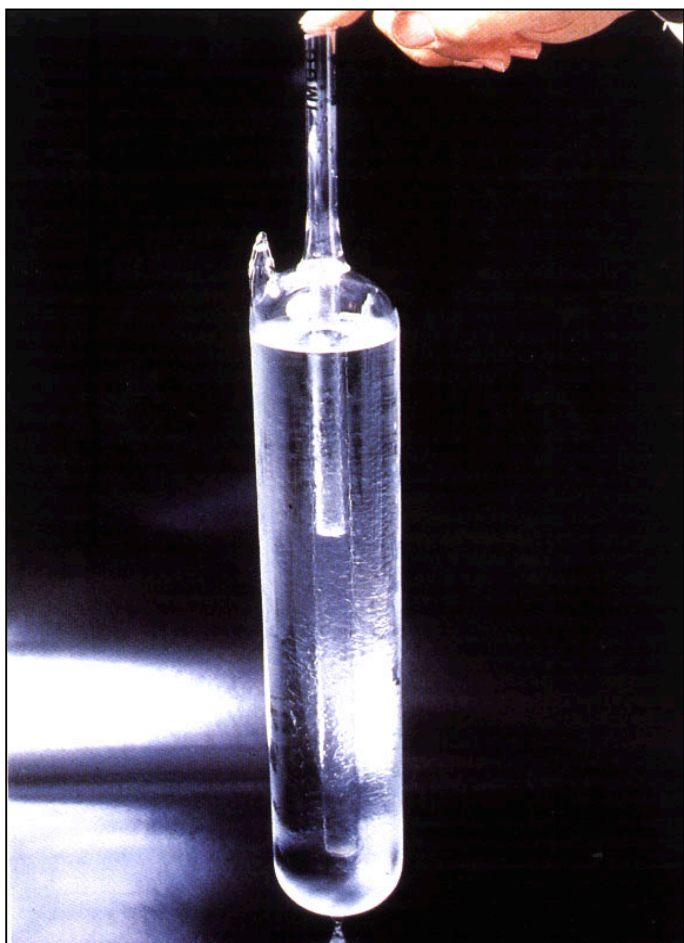
Nel 1954 la X CGPM decise di scegliere il punto triplo dell'acqua (caratterizzato dalla coesistenza in equilibrio delle tre fasi: solido, liquido, vapore) come stato termico di riferimento, e di attribuirgli la temperatura di 273,16 K

La XIII CGPM nel 1967 adotta quindi la seguente definizione:

il kelvin, unità di temperatura termodinamica, è la frazione $1/273,16$ della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua

Il campione che realizza la definizione

Il punto triplo dell'acqua si ottiene in celle di vetro sigillate, contenenti acqua di grande purezza. La riproducibilità del punto triplo dell'acqua è migliore di 0,1mK

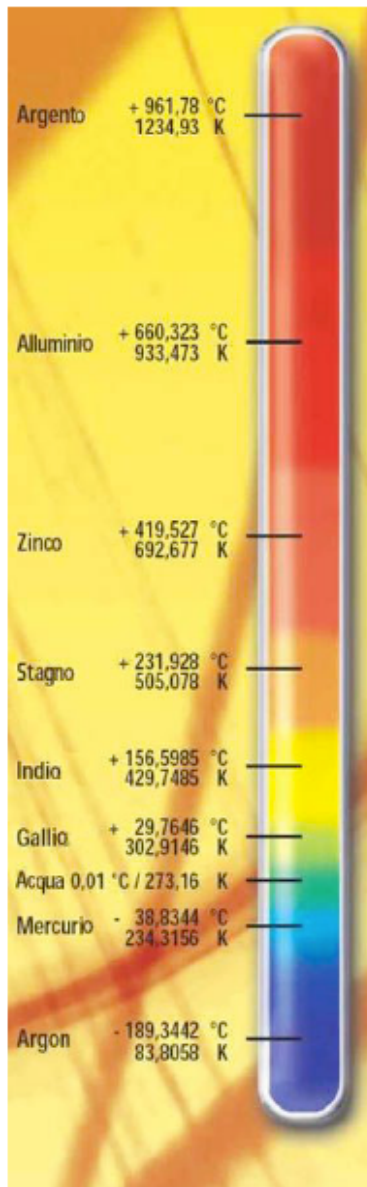


Il punto triplo dell'acqua, pur essendo fondamentale, è tuttavia insufficiente per definire una scala di temperatura utilizzabile per le misure pratiche. Per questo scopo si realizza la Scala di Temperatura Internazionale definita nel 1990 (ITS-90), che prescrive una serie di punti fissi di temperatura, di termometri interpolatori e di equazioni interpolatrici atti a realizzare una scala che copra un vasto campo di temperatura

La scala di temperature ITS-90: da 83 K a 1235 K

- la realizzazione pratica della attuale Scala Internazionale di Temperatura avviene di regola mediante una serie di punti fissi di temperatura altamente stabili, i cui valori termodinamici sono stati determinati tramite termometri primari, ad esempio termometri a gas o a radiazione, e ritenuti *esatti per definizione*
- da 83 K a 1235 K, la ITS-90 è realizzata mediante celle ai punti fissi. Grazie a queste celle, si possono tarare termometri campione aventi una resistenza a spirale di filo di platino estremamente puro chiusa in vetro di quarzo (SPRT: Standard Platinum Resistance Thermometer). Gli SPRT possono poi essere utilizzati come strumenti d'interpolazione per tarature tra i punti fissi dei termostati a liquido. Con questi SPRT, è possibile tarare termometri cosiddetti secondari, per trasferire la definizione della ITS-90 alla misura pratica di temperatura
- termometri per applicazioni pratiche, mediche, ambientali, industriali, vengono infine tarati per confronto con i campioni secondari

La scala di temperature ITS-90: oltre i 1235 K

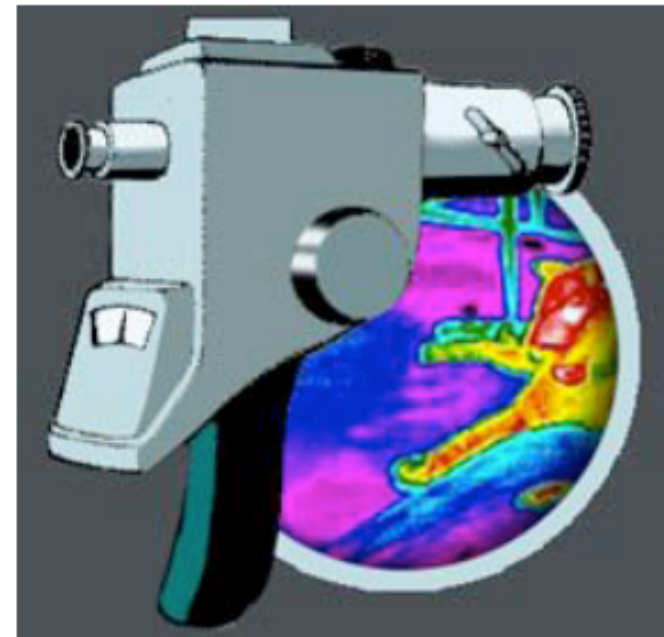


celle ai punti fissi



Per temperature superiori ai 1235 K, si utilizzano invece termometri a radiazioni; i cosiddetti “pirometri”. Questi strumenti sono in grado di “vedere” la radiazione emessa da un corpo caldo e trasformare il “colore” nella relativa temperatura

Quando una barra di ferro diventa incandescente, per esempio, è noto come inizi a colorarsi di rosso...



La scala di temperature ITS-90 nella sua interezza

- la ITS-90 copre il campo di temperatura da 0,65 K in su. Per essa non è fissato alcun limite superiore, anche se in pratica le tecniche della ITS-90 non vengono usate a temperature superiori ai circa 4000 K,, dove non esistono più corpi solidi
- la ITS-90 comprende 17 punti fissi e 4 termometri campione con le relative equazioni interpolatrici

Nota. Nel 2000 il campo di temperatura coperto dalla ITS-90 è stato esteso verso il basso fino a 0,9 mK introducendo la cosiddetta Provisional Low Temperature Scale (PLTS-2000), che copre l'intervallo tra 0,9 mK e 1 K.

Il fenomeno termometrico utilizzato per realizzare questa scala è la pressione di fusione dell'isotopo ^3He

I punti fissi della scala di temperature ITS-90

I 17 punti fissi di definizione della ITS-90 sono indicati nella tabella seguente. Il significato dei simboli indicanti lo stato è il seguente:

- V, G: punto di tensione di vapore o di termometro a gas
- T: punto triplo, ossia, temperatura alla quale sono in equilibrio le fasi solida, liquida e vapore
- F, S: punto di fusione o punto di solidificazione, ossia, temperatura, alla pressione di 101 325 Pa, alla quale sono in equilibrio le fasi solida e liquida.

Note

1. nella lista dei punti fissi non compaiono più gli "storici" punti di congelamento ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) e di ebollizione ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) dell'acqua. Mentre il primo era già scomparso nel 1960, il secondo compariva ancora nella precedente scala (SIPT-68). Il punto di ebollizione (a 101325 Pa) sulla ITS-90 non vale neppure più $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, ma bensì $99,974\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. per i metalli si considerano quasi sempre i punti di solidificazione anziché quelli di fusione poiché i primi sono più riproducibili dei secondi
3. i punti di solidificazione dell'oro e del rame possono essere usati in alternativa al punto dell'argento, per costruire la scala con il termometro a radiazione nel campo delle alte temperature

I punti fissi di definizione della ITS-90

Temperatura		Sostanza	Stato
T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}\text{C}$		
3 + 5	-270,15 + -268,15	He	V
13,8033	-259,3467	e-H ₂	T
≈17	≈-256,15	e-H ₂ (o He)	V (o G)
≈20,3	≈-252,85	e-H ₂ (o He)	V (o G)
24,5561	-248,5939	Ne	T
54,3584	-218,7916	O ₂	T
83,8058	-189,3442	Ar	T
234,3156	-38,8344	Hg	T
273,16	0,01	H ₂ O	T
302,9146	29,7646	Ga	F
429,7485	156,5985	In	S
505,078	231,928	Sn	S
692,677	419,527	Zn	S
933,473	660,323	Al	S
1234,93	961,78	Ag	S
1337,33	1064,18	Au	S
1357,77	1084,62	Cu	S

Alcuni tipi differenti di termometro

Tipo	Principio di misura	Temperatura
A resistenza	Variazione di resistività elettrica con la temperatura	0,5 K ÷ 1000 °C
Termoelettrici	Effetto Seebeck in circuiti di differenti conduttori (conversione di energia termica in energia elettrica)	-200 °C ÷ 2300°C
A radiazione	Leggi di Stefan-Boltzmann e di Planck per il corpo nero	-50 °C ÷ 4000 °C
A dilatazione	Dilatazione termica di liquidi e di solidi	-200 °C ÷ 600 °C
A pressione	Dipendenza dalla temperatura della pressione di gas e vapori saturi	3 K ÷ 1000 °C
Ottici	Dipendenza dalla temperatura di: <i>diffusione della luce, cambio di colore, indice di rifrazione, intensità luminosa, birifrangenza, trasmissione della luce, spostamento di lunghezza d'onda o tempo di decadimento della fluorescenza</i>	-30 °C ÷ 300 °C
Diodi	Dipendenza dalla temperatura della caratteristica tensione-corrente	1 K ÷ 200 °C

Il termometro a resistenza

La dipendenza della resistività elettrica dalla temperatura è un fenomeno comune a tutti i materiali e fu verificato sperimentalmente da Ohm e Faraday agli inizi del secolo scorso. Per i metalli, la relazione che lega la resistività ρ alla temperatura t è, nella sua forma più generale, del tipo:

$$\rho_t = \rho_{t_0} (1 + \alpha \Delta_t + \beta \Delta_t^2 + \dots)$$

dove t è la temperatura incognita, t_0 quella di riferimento, α e β i coefficienti di temperatura del primo e secondo ordine.

Tra tutti, il termometro a resistenza di platino (PRT) occupa un posto di primo piano sia nelle misure di precisione sia nelle misure industriali. Esso è infatti il campione primario della ITS-90 tra 13,8 K (punto triplo dell'idrogeno) e 1235 K (punto di solidificazione dell'argento)

Differenti tipologie di termometri a resistenza

Tipo di termometro	Campo di temperatura	Note
TRP campione a capsula	13,8 K + 232 °C	Campione STI-90
TRP campione a stelo lungo	-190 °C + 660 °C	Campione STI-90
TRP campione a stelo lungo per alta temperatura	0 °C + 962 °C	Campione STI-90
TRP industriali	-200 °C + 850 °C	Norma IEC 751
Rame	-150 °C + 150 °C	Molto lineare
Nichel	-100 °C + 200 °C	Poco lineare
Carbonio	0,5 K + 30 K	Molto sensibile
Rodio-ferro	0,5 K + 30 K	Campione di trasferimento
Platino-cobalto	2 K + 20 K	Recente, poco diffuso
Germanio	1 K + 100 K	Molto sensibile
Termistori	-100 °C + 300 °C	Molto sensibili, poco lineari
Film di platino	-100 °C + 600 °C	Misure superficiali
Film di iridio	-200 °C + 400 °C	Poco comune

La tipica resistenza nominale a 0 °C dei PRT industriali è di 100 Ω. Una resistenza di soli 10 Ω, che comporta l'uso di un filo di platino di diametro maggiore, può essere preferibile per temperature superiori a 800 K

La termocoppia

L'impiego della termocoppia come strumento di misura della temperatura trae origine dalla scoperta di un fenomeno termoelettrico fatta da Seebeck nel 1821.

Seebeck verificò che tra due capi di un circuito formato da **due conduttori metallici diversi** si può misurare una forza elettromotrice se i punti di giunzione dei conduttori sono a differente temperatura.

Tipo	Composizione	Campo di temperatura (°C)
R	Pt - 13%Rh/Pt	0 + 1550
S	Pt - 10%Rh/Pt	0 + 1550
B	Pt - 30%Rh/Pt - 6%Rh	600 + 1600
J	Fe/Cu - Ni	0 + 760
T	Cu/Cu - Ni	-196 + 330
E	Ni - Cr/Cu - Ni	-196 + 770
K	Ni - Cr/Ni - Al	0 + 1000
N	Ni - Cr - Si/Ni - Si	0 + 1000
-	W - 3%Re/W - 25%Re	1000 + 2300
-	W - 5%Re/W - 26%Re	1000 + 2300
-	Au/Pt	0 + 1000
-	Pt/Pd	0 + 1500

I termometri a radiazione

- questi termometri, che vengono comunemente indicati come pirometri, hanno avuto un notevole sviluppo negli anni recenti grazie ai miglioramenti tecnici ottenuti con i sensori ad infrarosso che hanno consentito di migliorare le prestazioni ed abbassare i costi dei termometri
- le leggi fisiche alla base della termometria a radiazione sono la legge di Stefan-Boltzmann e la legge di Planck. Queste leggi descrivono l'andamento con la temperatura della potenza emessa sotto forma di radiazione da un corpo nero, essendo questi un corpo ideale che è in grado di assorbire tutta la radiazione che incide su di esso. Il corpo nero possiede anche la proprietà di emettere il massimo possibile di radiazione ad ogni temperatura.
- la legge di Stefan-Boltzmann afferma che la potenza totale, ossia in tutto lo spettro di lunghezze d'onda, emessa da un corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta (espressa in kelvin)
- la legge di Planck entra in maggiore dettaglio nel meccanismo della radiazione e descrive come la potenza si distribuisce alle varie lunghezze d'onda

I termometri a radiazione

- i corpi reali emettono sempre meno del corpo nero ideale che si trovi alla medesima temperatura. Questo concetto si esprime introducendo il fattore emissività, definito come "rapporto tra la potenza emessa da un corpo reale rispetto alla potenza emessa dal corpo nero alla medesima temperatura"; è evidente come questo rapporto sia sempre < 1
- l'emissività è una caratteristica propria di ciascun materiale e, a parità di materiale, dipende da numerosi fattori (temperatura, lunghezza d'onda, stato superficiale, angolo di osservazione, stato di polarizzazione della radiazione emessa...)
- **Nota.** Tutti i termometri a radiazione vengono tarati per confronto con corpi neri di temperatura nota. Se, a causa dell'emissività o di fenomeni di assorbimento (atmosfera, finestre, ostruzioni), durante l'uso essi ricevono un flusso di radiazione inferiore a quello che genererebbe un corpo nero alla medesima temperatura della sorgente, essi tendono ad avere un errore per difetto

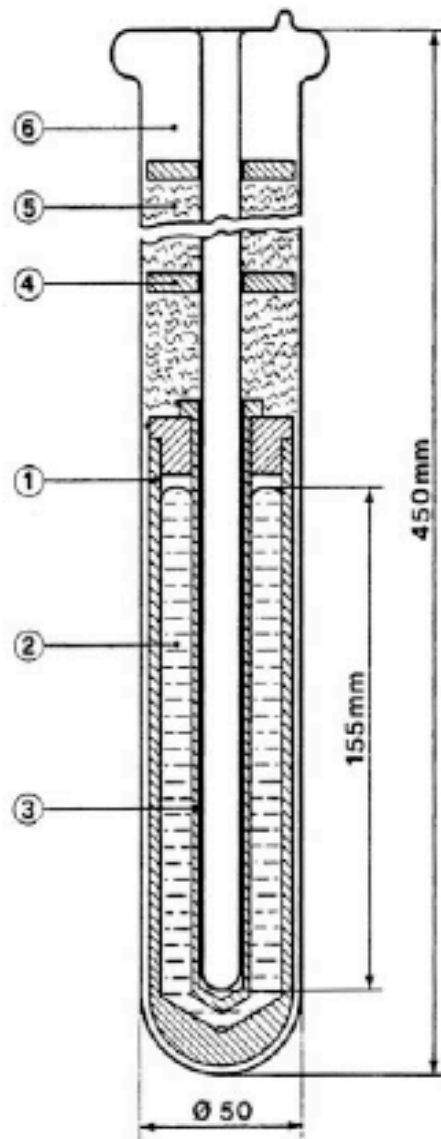
Differenti tipi di termometri a radiazione

- la maggior parte dei termometri a radiazione entra in una delle seguenti categorie: termometri a **radiazione totale** o termometri a **banda singola** (o monocromatici)
- il nome dei termometri a radiazione totale deriva dal fatto che essi in linea di principio utilizzano per la misura tutto lo spettro di lunghezza d'onda della radiazione. Il loro principio di misura si basa pertanto sulla legge di Stefan-Boltzmann. In pratica, la banda utilizzata comprende il visibile e l'infrarosso fino a circa 20 μm . Questo tipo di termometro, che è molto sensibile ai disturbi provocati dall'assorbimento atmosferico ed agli errori dovuti all'emissività, è stato largamente soppiantato dai termometri ad infrarosso a banda singola
- i termometri a banda singola, il cui principio di misura si basa sulla legge di Planck, utilizzano una banda di lunghezze d'onda che è molto stretta (circa 10 nm) nei termometri di precisione (monocromatici) e la cui larghezza arriva fino a 4 o 5 μm nei termometri industriali. Il ben noto pirometro ottico o a scomparsa di filamento appartiene a questa categoria

Caratteristiche e applicazioni di termometri ad infrarosso

Banda di lavoro (μm)	Temperatura minima ($^{\circ}\text{C}$)	Applicazioni
0,7 ÷ 1,1	500	Misure di precisione ed industriali in genere
1,1 ÷ 1,7	300	Uso generale, metalli e vetri
2,0 ÷ 2,5	100	Uso generale a bassa e media temperatura
3,43	50	Plastiche sottili (polimeri), oli, carta, vernici
3,9	30	Forni di riscaldamento
4,4 ÷ 4,6	30	Temperatura di fiamma
4,8 ÷ 5,2	30	Vetri e materiali ceramici
7,9	0	Plastiche sottili (poliesteri)
8 ÷ 12	-50	Bassa temperatura e lunga distanza

Un esempio di cella per punti fissi



Una cella sigillata per punti di solidificazione dei metalli. ① crogiolo di grafite, ② metallo puro, ③ pozzetto di quarzo, ④ schermo di grafite, ⑤ lana isolante di quarzo, ⑥ atmosfera di argon. La cella viene riscaldata introducendola in un forno tubolare verticale.

I termometri campione della ITS-90

Campo di temperatura	Termometro
0,65 K ÷ 5 K	Termometro a tensione di vapore <ul style="list-style-type: none">• ^3He tra 0,65 K e 3,2 K• ^4He tra 1,25 K e 5 K
3 K ÷ 24,6 K	Termometro a gas interpolatore (^3He o ^4He)
13,8 K ÷ 961,78 °C	Termometro a resistenza di platino <ul style="list-style-type: none">• A capsula tra 13,8 K e 30 °C (157 °C)• A stelo lungo tra 84 K e 660 °C• A stelo lungo per alta temperatura tra 0 °C e 961,78 °C
sopra 961,78 °C	Termometro a radiazione monocromatico

Incertezze tipo nella realizzazione della ITS-90

Temperatura	Incertezza
13,803 3 K (punto triplo dell'idrogeno)	$\pm 0,3 \text{ mK}$
24,556 1 K (punto triplo del neo)	$\pm 0,3 \text{ mK}$
tra 24,556 1 K e 54,358 4 K	$\pm 0,7 \text{ mK}$
54,358 4 K (punto triplo dell'ossigeno)	$\pm 0,3 \text{ mK}$
tra 54,358 4 K e 83,805 8 K	$\pm 0,6 \text{ mK}$
83,805 8 K (punto triplo dell'argo)	$\pm 0,3 \text{ mK}$
tra 83,805 8 K e 234,315 6 K	$\pm 0,8 \text{ mK}$
234,315 6 K (punto triplo del mercurio)	$\pm 0,2 \text{ mK}$
tra 234,315 6 K e 273,16 K	$\pm 0,4 \text{ mK}$
273,16 K (punto triplo dell'acqua)	$\pm 0,1 \text{ mK}$
tra 273,16 K e 302,914 6 K	$\pm 0,3 \text{ mK}$
302,914 6 K (punto di fusione del gallio)	$\pm 0,2 \text{ mK}$
tra 302,914 6 K e 505,078 K	$\pm 1,3 \text{ mK}$
505,078 K (punto di solidificazione dello stagno)	$\pm 1,0 \text{ mK}$
tra 505,078 K e 692,677 K	$\pm 1,3 \text{ mK}$
692,677 K (punto di solidificazione dello zinco)	$\pm 1,0 \text{ mK}$
tra 692,677 K e 933,473 K	$\pm 1,5 \text{ mK}$
933,473 K (punto di solidificazione dell'alluminio)	$\pm 1,2 \text{ mK}$
tra 933,473 K e 1234,93 K	$\pm 2,5 \text{ mK}$
1234,93 K (punto di solidificazione dell'argento)	$\pm 2,5 \text{ mK}$
tra 1234,93 K e 2500 K	$\pm [0,025 + 2,1 \times 10^{-4}(T/K - 1234,93)] \text{ K}$