

# Il Sistema Internazionale di Unità di Misura (SI)

Prof. Mario Luiso

Dipartimento di Ingegneria  
Via Roma, 29 – 81031 Aversa (CE)

**[mario.luiso@unicampania.it](mailto:mario.luiso@unicampania.it)**

**[www.ingegneria.unicampania.it](http://www.ingegneria.unicampania.it)**

# Concetti di base

- Per la **definizione quantitativa** (numerica) del **misurando si fa ricorso ad una seconda grandezza**, **omogenea al misurando**, assunta come riferimento, detta **unità di misura**.
- Nella misurazione **si valuta in maniera numerica il rapporto tra il misurando e l'unità di misura**.
- L'**unità di misura** individua la **specie di grandezza considerata**
- L'**indicazione dell'unità di misura** utilizzata è **parte integrante** del **risultato** di una misurazione

# L'unità di Misura



**Misurare** una grandezza significa dire «quante volte l'**unità di misura** è contenuta nella grandezza».

# Definizione dell'unità di misura

- Per ognuna delle grandezze fisiche è necessario **definire** quale sia l'unità di misura, **realizzarne** un esemplare, **conservarlo** e all'occorrenza **riprodurlo**
- Un **campione** è un **oggetto**, uno **strumento** o un **sistema di misura**, destinato a fornire un riferimento rispetto ad una o più grandezze.
- Esso ha il compito di **realizzare, conservare e riprodurre** unità di misura (talvolta anche **definirla**).
- Per alcune unità di misura la definizione è **astratta**
- La trasmissonsione (tra il campione e un altro strumento) della **riferibilità** di un'unità di misura (e conseguentemente della grandezza associata) viene realizzata tramite l'operazione di **taratura**. \*

Campione: realizzaz. fisica dell'unità di misura

Riferenza: capacità di denaro

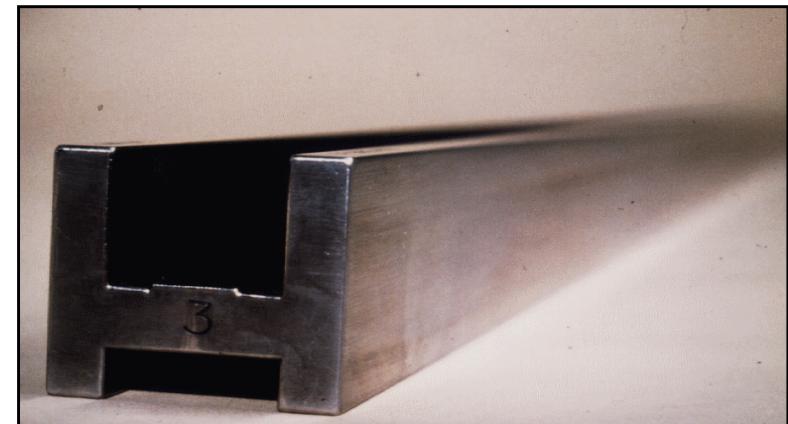
↳ riferirsi: dedurre le quantificaz. del misurando a partire dal campione

# Definizione dell'unità di misura

## Definizione metro

**Il metro è la lunghezza del tragitto compiuto dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di  $1/299\ 792\ 458$  di secondo**

## Campione metro



# Definizione dell'unità di misura

- i campioni devono essere realizzati prestando particolare cura ad alcune caratteristiche metrologiche fondamentali:
  - accuratezza** nella realizzazione del loro valore nominale;
  - conseguimento di elevata **ripetibilità** e riproducibilità nelle grandezze di interesse;
  - alta **stabilità** nel tempo delle caratteristiche;
  - immunità** agli agenti di disturbo ambientali.
- Tutte queste caratteristiche concorrono nel definire la precisione del campione, e conseguentemente nella **incertezza di tutte le misure consequenti**. *Ponché avrò sempre incertezze.*
- i campioni devono essere scelti tra le realizzazioni tecniche che presentano la migliore precisione realizzabile.



NON Posso usare campione per trovare uno stimatore che abbia incertezza minore.

# Sistema Internazionale di Unità di Misura

\* Qualsiasi altra unità di misura deve essere deducibile dalle altre

## Caratteristiche necessarie

- Una sola unità per ciascuna grandezza fisica
- Sistema assoluto, completo\*, coerente\*, razionalizzato\*, decimale\*
- Selezione univoca di una scala di multipli e sottomultipli per ciascuna unità di misura

\*<sub>1</sub> i coeff. che reso per def. misure unità di misura deve essere 1.

\*<sub>2</sub> non ci sono numeri irraz. nelle espressioni

\*<sub>3</sub> multipli e sottomultipli decimali

Unità devono essere di realizzaz. pratica per chi vuole realizzare un campione

\*<sub>4</sub> campioni non legati né al tempo né al luogo

# Perché un SI?

Ogni stato poteva definire le proprie unità di misura

1 palmo napoletano	= 27 cm
1 passo napoletano	= 194 cm
1 pertica	= 6 piedi parigini
1 piede parigino	= 12 pollici
1 braccio	= 2 palmi e 1/2
1 canna di legna	= 4 palmi in altezza e 16 palmi in lunghezza

Per evitare frodi o differenze nella misurazione, la lunghezza ufficiale era scolpita nella pietra.

Nelle conversioni tra diverse unità di misura necessarie per scambi commerciali tra differenti stati esistevano notevoli difficoltà!



Portico del Palazzo Comunale, Pistoia.

# Perché un SI?

Perchè sia possibile ottenere misure **compatibili**<sup>\*1</sup> operando sullo stesso misurando ovunque nel mondo (**tracciabilità internazionale**) i dispositivi di misura devono essere tarati con misurandi riferibili a campioni riconosciuti come primari (**catena di riferibilità**) nel contesto più ampio possibile

E' un problema:

- **Politico**: accordo tra nazioni
- **Tecnico**: **Definizione e Realizzabilità** (possibilità di impiegare oggetti o apparecchi (i campioni) che si possano confrontare facilmente con la più bassa incertezza possibile)

\*<sup>1</sup> COMPATIBILITÀ: come dico se 2 processi di misuraz. stabiliscono lo stesso risultato.

Visto che non è possibile dare 2 intervalli segnali?

Quando si parla di compatibilità?

2 misure sono compatibili quando i loro intervalli  
hanno un'incert. non nulla.

NOTA: Multimetro dà un numero. Come otengo intervallo?

Potrò farare uno strumento con un altro, e sulla base  
della differenza vedrà l'incertezza.

Salendo sulla catena avrò dei campioni primari che fanno  
con la minima incertezza.

NOTA: Se ogni stato ha i campioni primari come mi regola?

Sì fanno periodicamente dei confronti internazionali.

# Riferibilità di una misura

- La **trasmissione** (tra il campione e un altro strumento) della **riferibilità** di un'unità di misura (e conseguentemente della grandezza associata) viene realizzata tramite l'operazione di **taratura**.

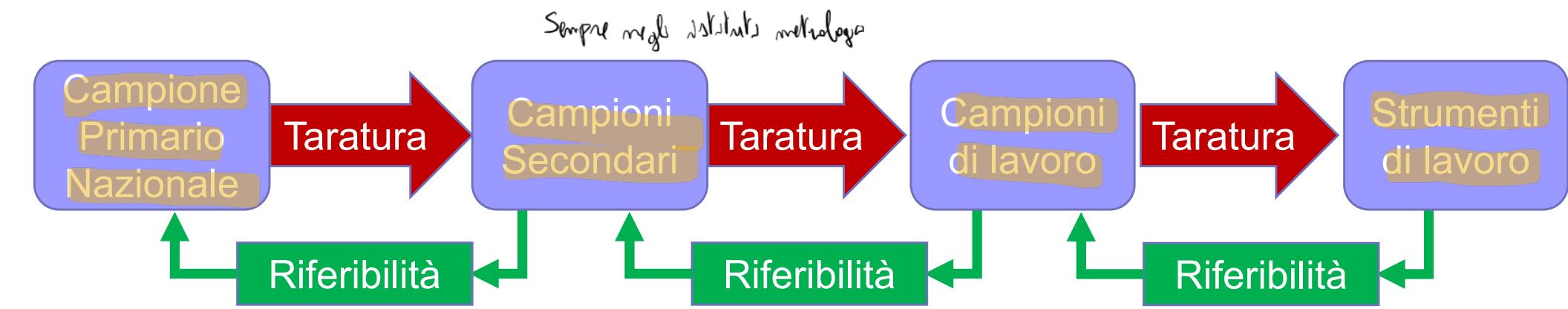


# Catena di riferibilità metrologica

I campioni devono essere legati tramite la catena di riferibilità metrologica: successione di tarature usata per porre in relazione un risultato di misura alla definizione dell'unità di misura.

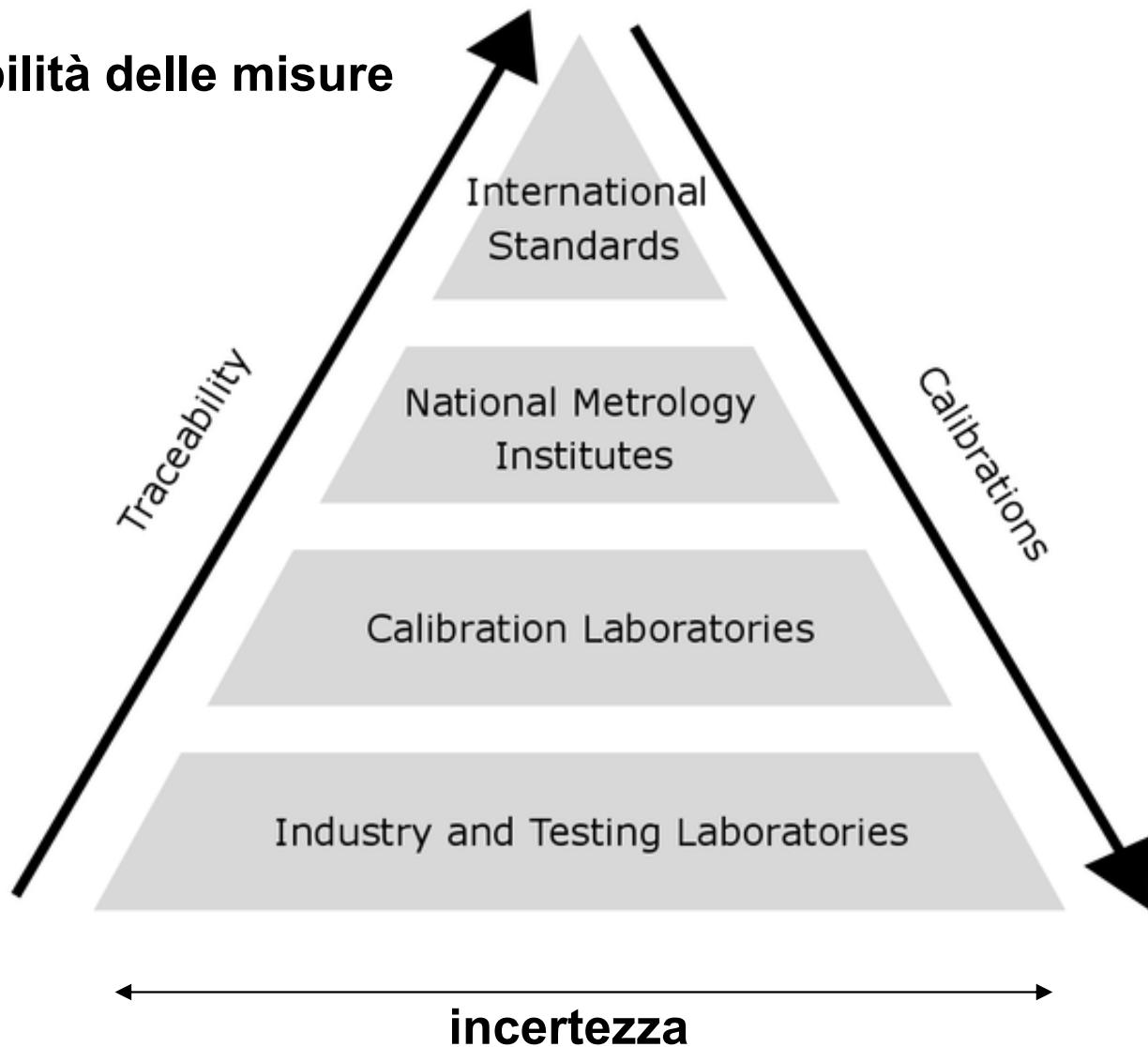
Elementi necessari per la conferma della riferibilità metrologica

- un'incertezza di misura documentata,
- una procedura di misura documentata,
- la competenza tecnica accreditata,
- la dichiarazione degli intervalli di taratura



# Catena di riferibilità

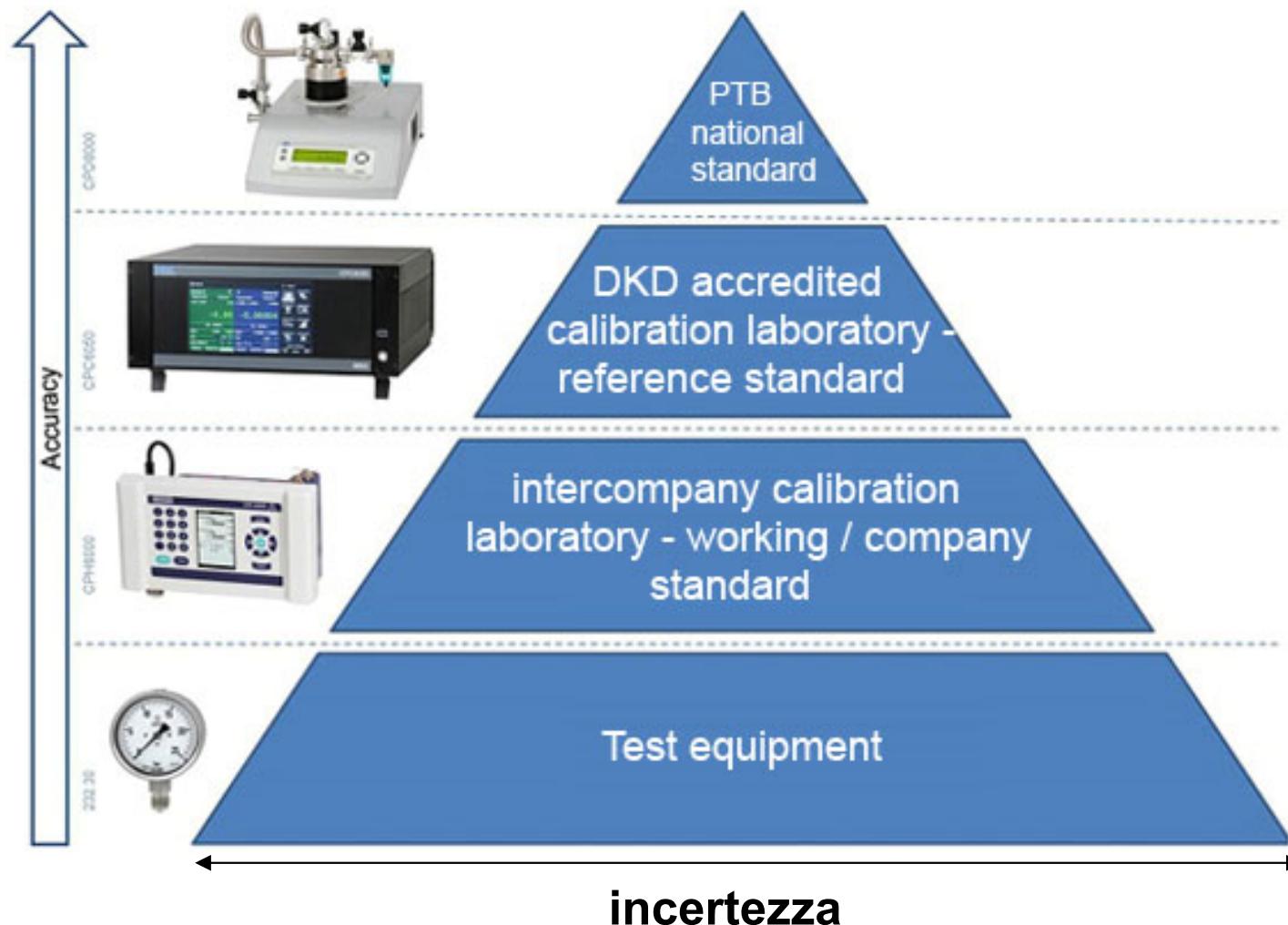
Il processo di riferibilità delle misure



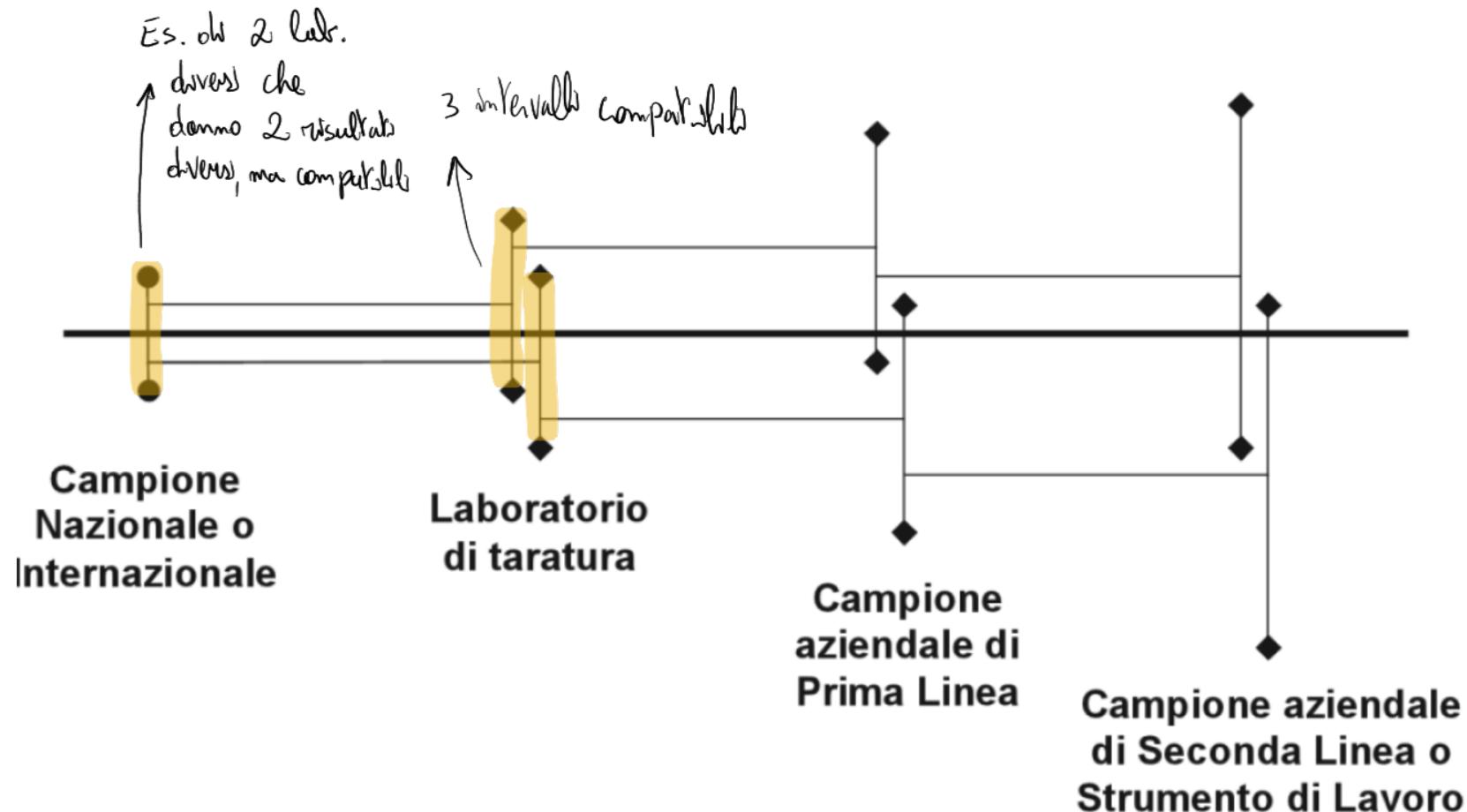
Garantisce laboratori di fiducia

Man mano che scendo ho incertezza sempre maggiore

# Esempio Catena di riferibilità

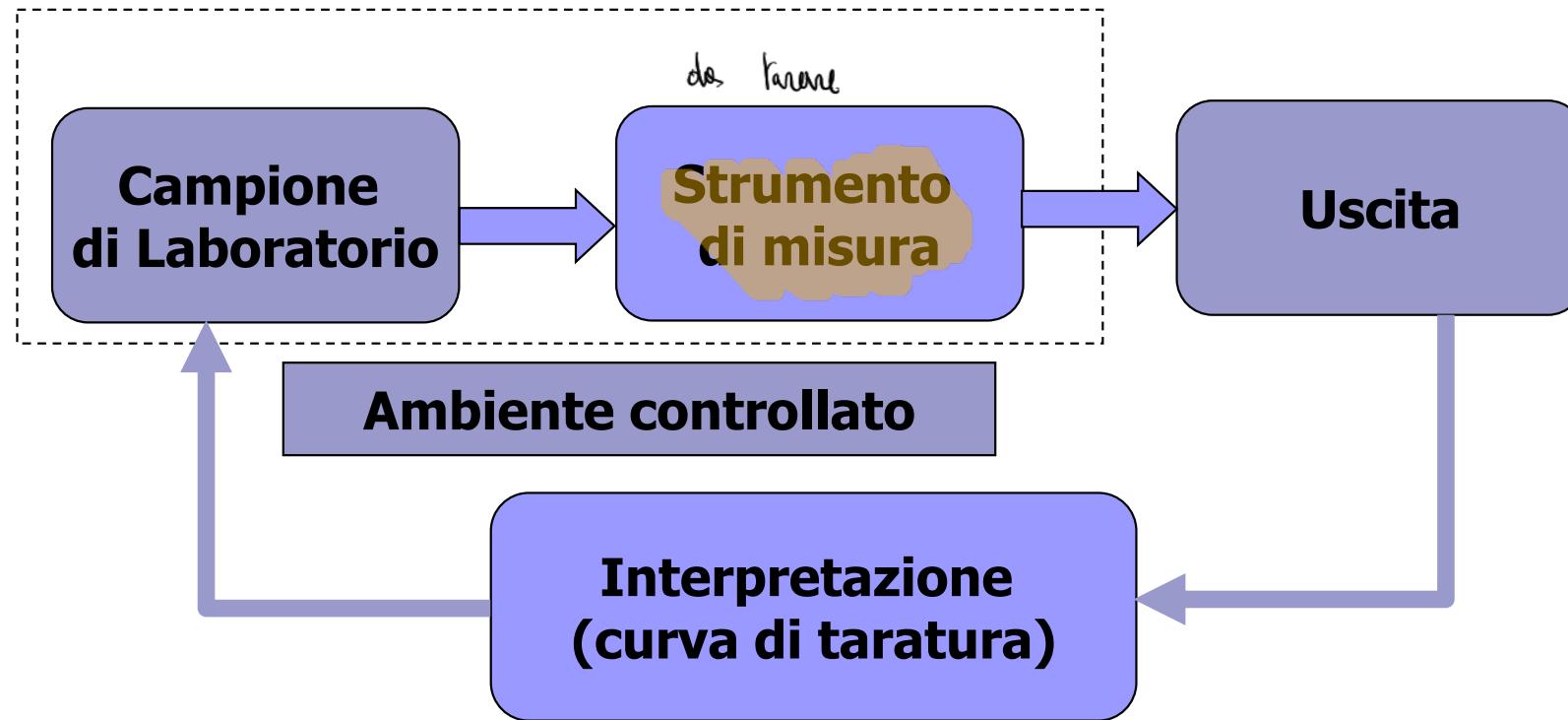


# Catena di riferibilità



Compatibilità delle Misure

# Sistema di Misura per taratura



- Lo stimolo deve essere noto con **almeno un terzo** dell'incertezza dello strumento sottoposto a taratura (accuratezza del campione di laboratorio)
- Si ottiene la **funzione di trasferimento** in particolari condizioni ambientali

1. Gliere lo stimolo per la misura in uno strumento di misura in un ambiente controllato (condiz. ambientale controll.)
2. Legge misura
3. Interpretaz: confronto misura con valore noto dello stimolo. Su x ho valore dello stimolo, su y ho misura

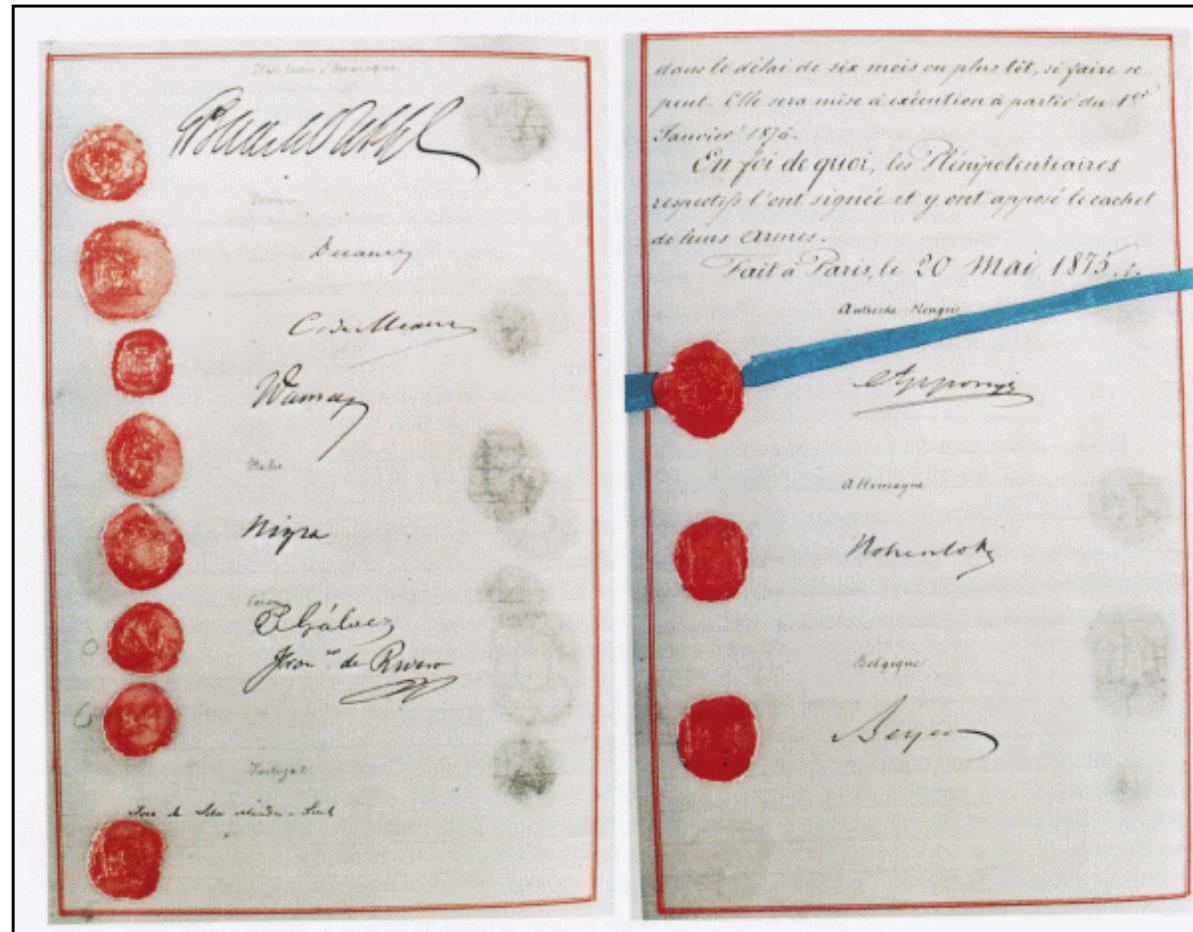
# Sistema Internazionale di Unità di Misura

- 1875 ratifica della Convenzione del Metro da parte di 17 stati

Nasce la **Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM)**, che si riunisce ogni 4 anni per:

- assicurare lo sviluppo del SI
- adottare risoluzioni scientifiche di portata internazionale *Se è stato dimostrato che realizzare dei campioni in un nuovo modo è più vantaggioso, lo promuove*
- decidere circa lo sviluppo del laboratorio tecnico Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)

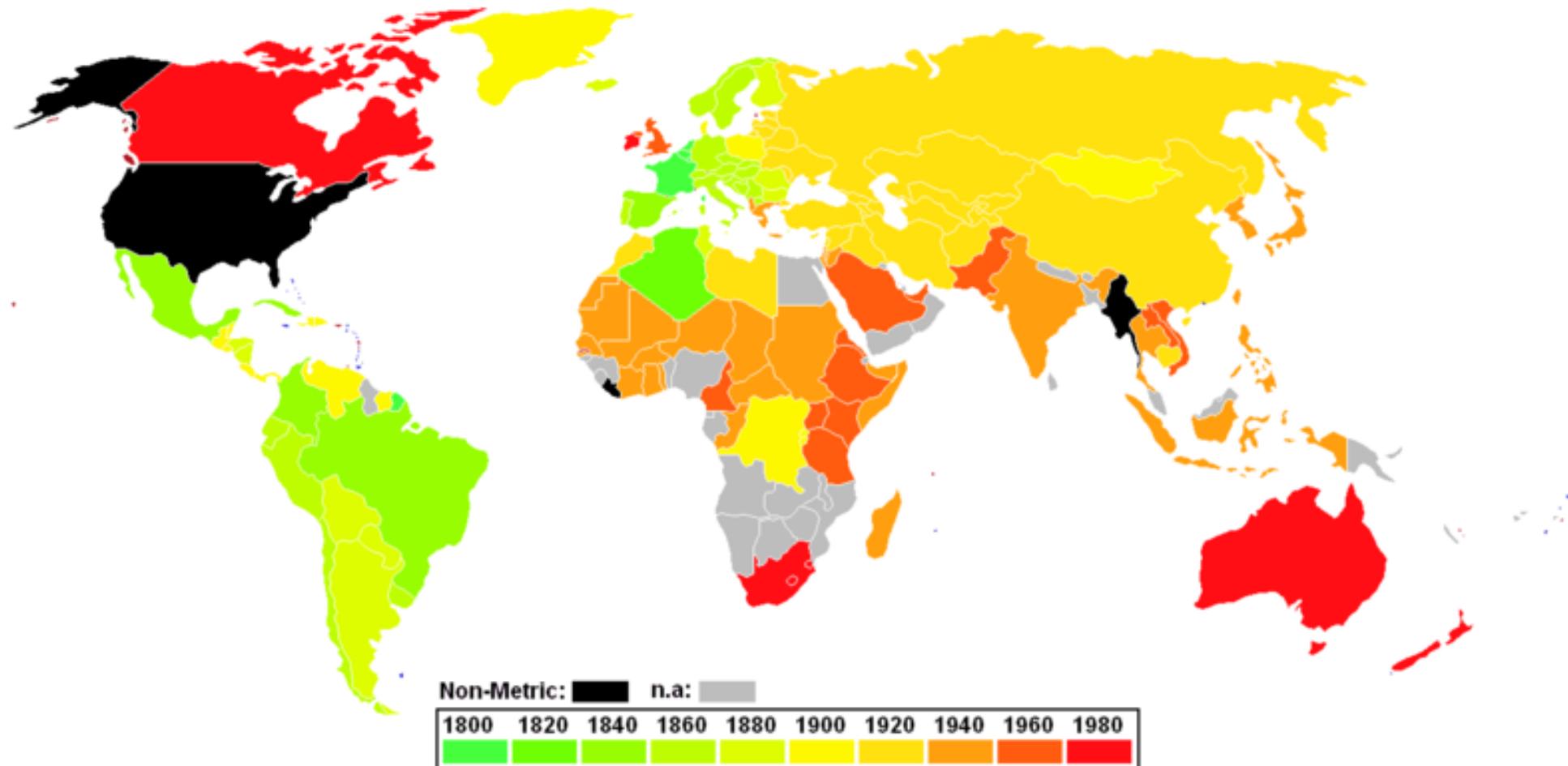
# Sistema Internazionale di Unità di Misura



IMGC

Pagina della Convenzione del Metro con le firme dei ministri dell'epoca. Si osserva la firma di Costantino Nigra

# Sistema Internazionale di Unità di Misura



Gli stati del mondo per periodo di adozione del Sistema internazionale: in verde i primi, in rosso gli ultimi, in nero quelli che non l'hanno adottato (gli Stati Uniti d'America, la Liberia, la Birmania), in grigio quelli su cui non ci sono informazioni.

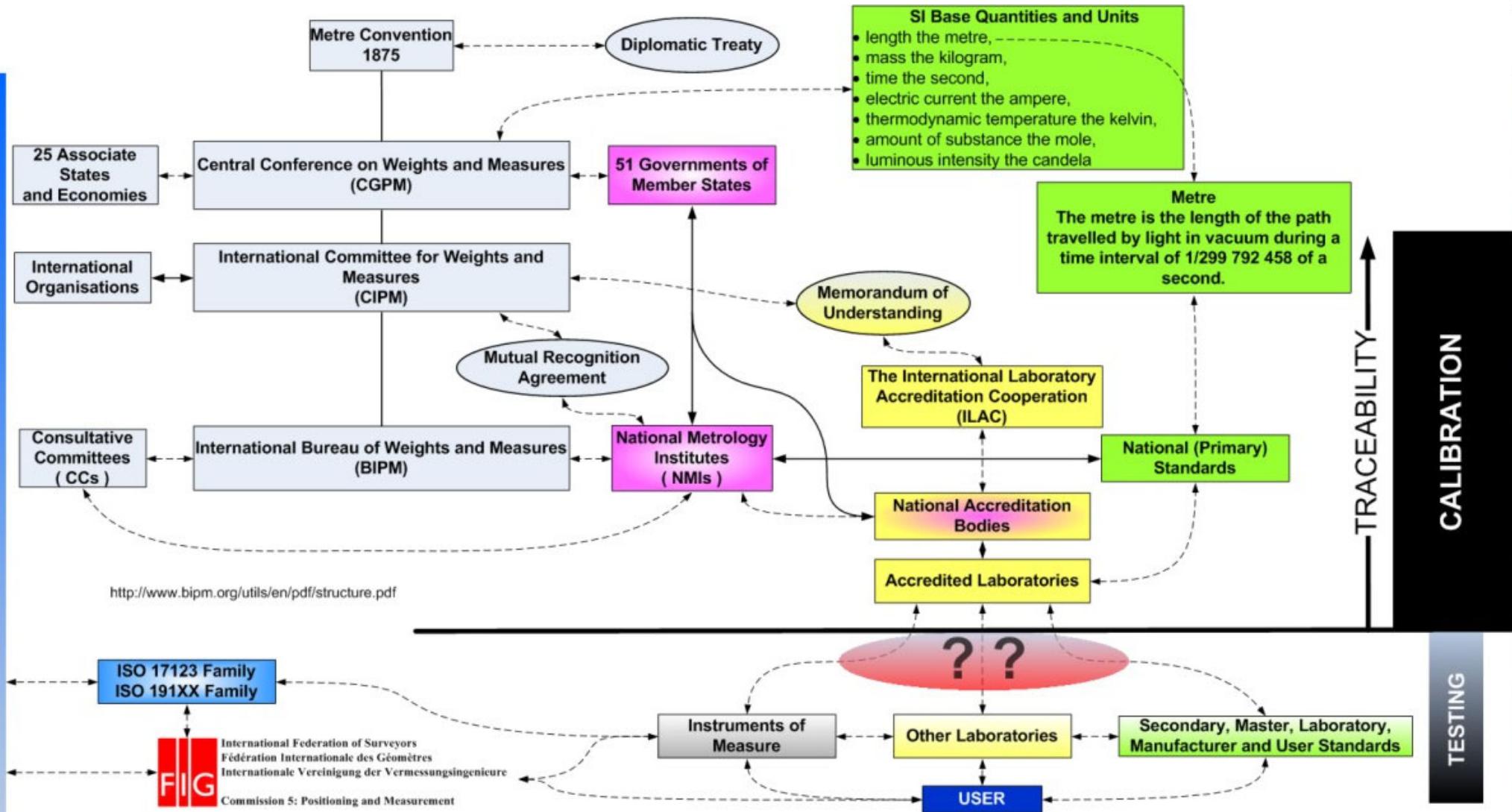
# Sistema Internazionale di Unità di Misura

- Il CIPM (Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure) è l'organo tecnico che prepara le riunioni del CGPM (organo diplomatico).
- Si avvale di nove comitati consultivi su: Elettricità, Fotometria e Radiometria, Termometria, Definizione del metro, Definizione del secondo, Radiazioni ionizzanti, Unità, Massa, Quantità di sostanza

Il BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) è il laboratorio scientifico del CIPM ha sede a Sèvres e opera per:

- fissare, conservare e disseminare i campioni primari per le grandezze fisiche
  - ↳ Ogni campione si porta delle tecniche di misura
- coordinare le tecniche di misura ad essi collegate
- determinare le costanti fisiche fondamentali
  - ↳ Valori da loro definiti

# Sistema Internazionale di Unità di Misura



# Sistema Internazionale di Unità di Misura

## ■ Si basa su:

- sette unità di misura “di base”
- due unità di misura “supplementari”
- un numero opportuno di unità di misura “derivate”

*Le unità di misura di base sono quelle fondamentali per eseguire tutte le possibili misurazioni, senza introdurre inutili ridondanze.*

*Le unità supplementari si riferiscono a grandezze geometriche*

# Sistema Internazionale di Unità di Misura

*Le sette unità di base*

<b>Quantità di base</b>	<b>Unità di base</b>	<b>Simbolo</b>
lunghezza	<i>metro</i>	<i>m</i>
massa	<i>kilogrammo</i>	<i>kg</i>
tempo	<i>secondo</i>	<i>s</i>
intensità corrente elettrica	<i>ampere</i>	<i>A</i>
temperatura termodinamica	<i>kelvin</i>	<i>K</i>
intensità luminosa	<i>candela</i>	<i>cd</i>
quantità di sostanza	<i>mole</i>	<i>mol</i>

**NON Kg**  
 (kelvin-grammo)

**NON sec.**  
 (Secolo)

*Le due unità supplementari*

angolo piano	<i>radiante</i>	<i>rad</i>
angolo solido	<i>steradiane</i>	<i>sr</i>

# Sistema Internazionale di Unità di Misura

Le **unità derivate sono definite a partire dalle unità di base.**

Formalmente è possibile:

- dare un “**nome**” alla nuova **unità**
- **impiegare il monomio che la definisce in termini di unità di base (o di altre unità con nome proprio)**

unità derivate con nome sono ad esempio:

newton [N]=[m·kg·s<sup>-2</sup>] forza

watt [W]=[m<sup>2</sup>·kg·s<sup>-3</sup>] potenza

unità derivate senza nome sono ad esempio:

metro quadro m<sup>2</sup> area

metro al secondo m/s velocità

**Tutte le unità derivate sono rappresentabili con un monomio del tipo:**

$$\text{unità SI} = m^{\alpha_1} \cdot kg^{\alpha_2} \cdot s^{\alpha_3} \cdot A^{\alpha_4} \cdot K^{\alpha_5} \cdot cd^{\alpha_6} \cdot mol^{\alpha_7} \cdot rad^{\alpha_8} \cdot sr^{\alpha_9}$$

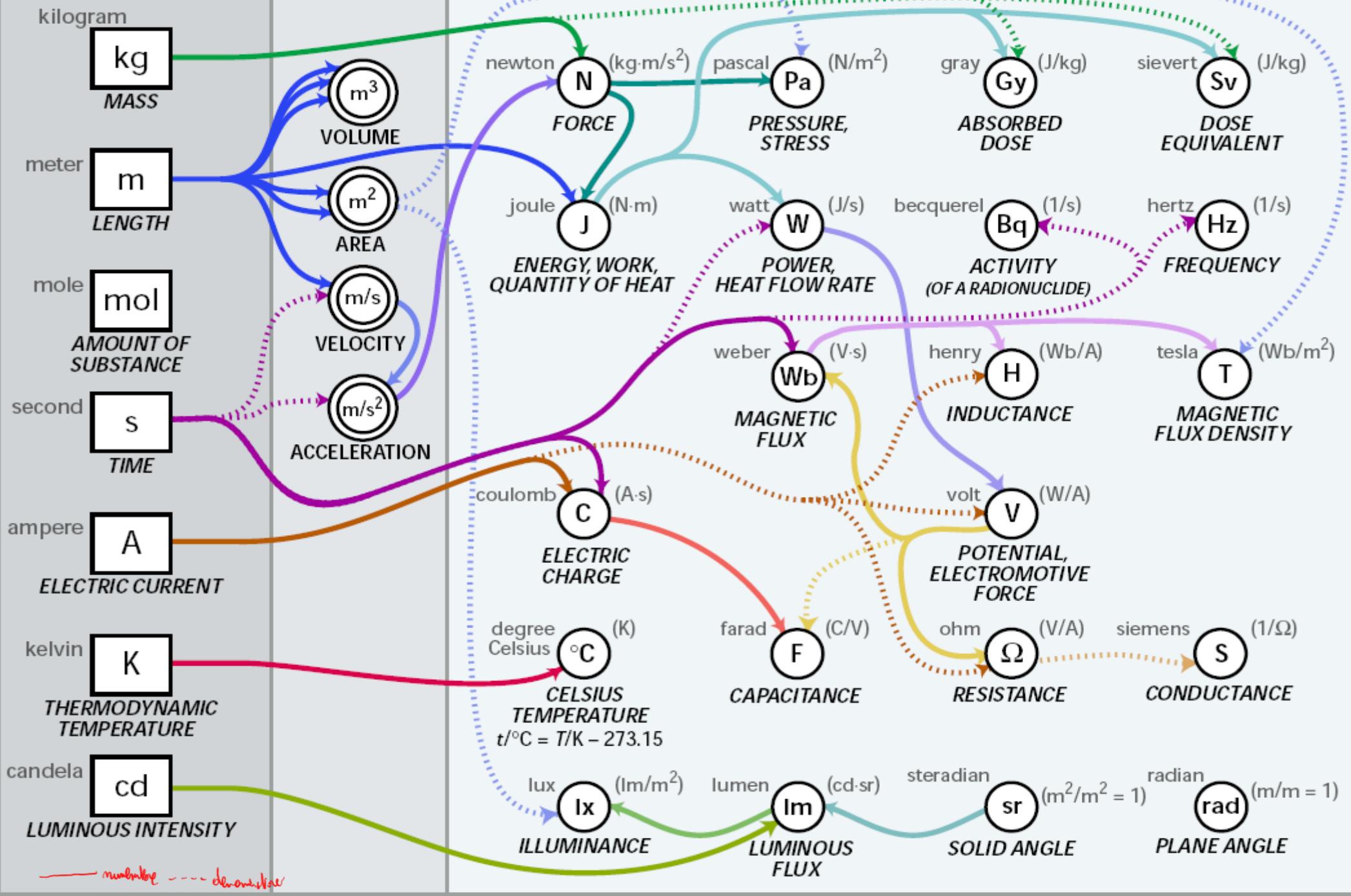
## SI BASE UNITS

## Derived units without special names

## **SI DERIVED UNITS WITH SPECIAL NAMES AND SYMBOLS**

Solid lines indicate multiplication, broken lines indicate division.

**Solid lines indicate multiplication, broken lines indicate division**



# I prefissi

Nome	Simbolo	Moltiplica
giga	G	$1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$
mega	M	$1\ 000\ 000 = 10^6$
kilo	k	$1\ 000 = 10^3$
etto	h	$100 = 10^2$
deca	da	$10 = 10^1$
deci	d	$\frac{1}{10} = 10^{-1}$
centi	c	$\frac{1}{100} = 10^{-2}$
milli	m	$\frac{1}{1000} = 10^{-3}$
micro	$\mu$	$\frac{1}{1\ 000\ 000} = 10^{-6}$
nano	n	$\frac{1}{1\ 000\ 000\ 000} = 10^{-9}$

1 km = 1000 m =  $10^3$  m

1 cm =  $\frac{1}{100}$  m =  $10^{-2}$  m

# Prefissi del SI

Es. Momento magnetico dell'elettrone:

0,000 000 000 000 000 000 000 009 28 J/T

Per evitare di impiegare numeri con troppe cifre non significative il SI definisce 20 prefissi moltiplicatori con fattore tra  $10^{-24}$  e  $10^{24}$

1 000 000 000 000 000 000 000 <b><math>10^{24}</math></b>	yotta	Y
1 000 000 000 000 000 000 <b><math>10^{21}</math></b>	zetta	Z
1 000 000 000 000 000 <b><math>10^{18}</math></b>	exa	E
1 000 000 000 000 <b><math>10^{15}</math></b>	peta	P
1 000 000 000 <b><math>10^{12}</math></b>	tera	T
1 000 000 000 <b><math>10^9</math></b>	giga	G
1 000 000 <b><math>10^6</math></b>	mega	M
1 000 <b><math>10^3</math></b>	kilo	k
100 <b><math>10^2</math></b>	etto	h
10 <b><math>10^1</math></b>	deca	da



**NON K**  
**(Kelvin)**

# Prefissi del SI



$0,1 \ 10^{-1}$	deci	d
$0,01 \ 10^{-2}$	centi	c
$0,001 \ 10^{-3}$	milli	m
$0,000\ 001 \ 10^{-6}$	micro	$\mu$
$0,000\ 000\ 001 \ 10^{-9}$	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

# Regole di scrittura

Corretto	Sbagliato
11 m	m 11 11 m. 11 M
2 W	2 w
0,5 V	0,5 v 0,5 v. 0,5 V.
15 s	15 sec 15 s. 15 S s 15

I **simboli delle unità di misura:**

- **seguono il valore numerico;**
- **non devono mai essere seguiti da un punto;**
- **non va cambiato maiuscola / minuscola.**

# Unita' **NON** del SI in uso

La consuetudine ha richiesto di mantenere in uso alcune unità di misura non SI per la misurazione di:

- tempo
- massa
- volume
- angolo
- pressione

minuto	min	1 min=60 s
ora	h	1 h =3600 s
giorno	d	1 d =86400 s

tonnellata	1 t = $10^3$ kg
litro	l, L      1 l =1 dm <sup>3</sup>

grado sessagesimale	°	$1^\circ = \pi/180$ rad
minuto di angolo	,	$1' = \pi/10800$ rad
secondo di angolo	"	$1'' = \pi/648000$ rad

bar	bar	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
millimetro di mercurio*	mmHg	$1 \text{ mmHg} = 133,322 \text{ Pa}$
* solo per le misure di pressione arteriosa		

# Sistema Internazionale di Unità di Misura

*In Italia leggi e decreti si occupano del problema:*

- il DPR 802/1982 sancisce l'obbligo di uso dell'SI
- la legge 273/1991 istituisce il Servizio Nazionale di Taratura
- ...

*La norma UNI 10003 recepisce la norma ISO 1000-81 con lo scopo di:*

- raccomandare l'adozione dell'SI
- fornire indicazioni su unità fondamentali, supplementari e derivate
- indicare le corrette modalità d'uso del sistema (multipli, sottomultipli, regole di scrittura, ecc..)

*il DM 591 definisce i campioni e le unità SI di base, supplementari e derivate*

# Sistema Internazionale di Unità di Misura

D.M. 30 nov 1993 n. 591

“Regolamento concernente la determinazione dei campioni nazionali di talune unità di misura del Sistema internazionale (SI) in attuazione dell’art.3 della legge 11 agosto 1991, n.273”

I campioni nazionali sono realizzati e/o conservati presso:

- **INRIM** Istituto Nazionale Ricerca Metrologica
  - Istituto di Metrologia G. Colonnetti del CNR (**IMGC**) - Torino
  - Istituto Elettrotecnico Nazionale G. Ferraris (**IEN**) - Torino
- Ente per le Nuove Tecnologie, l’Energia e l’Ambiente (**ENEA**) - Roma (per le radiazioni non ionizzanti) Ma ora disconosciuto

# Unità di lunghezza

## (nome: metro, simbolo: m)

### Definizione

Il metro è la lunghezza del tragitto compiuto dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di  $1/299\ 792\ 458$  di secondo

### Campione

Conservato

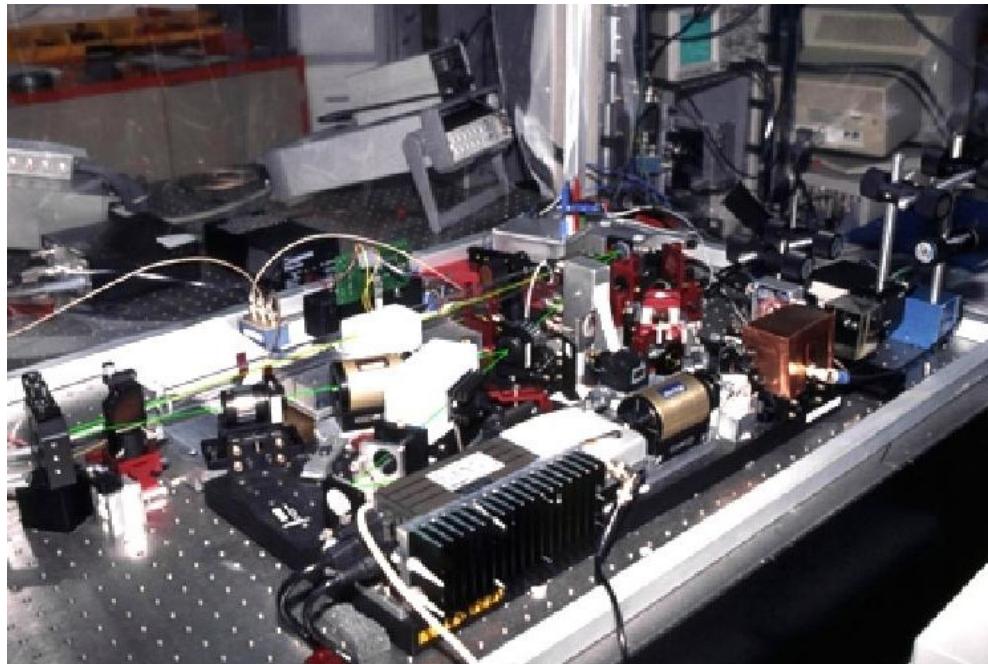
IMGC

Incertezza (scarto tipo)  $\pm 3.4 \cdot 10^{-10}$

Realizzazione:

coppia di laser elio-neon  
stabilizzati in frequenza

# Il campione di lunghezza



National Prototype Meter No. 27, made of platinum-iridium ca. 1890, was the U.S. primary national length standard from 1893—1960. (Details from NIST.)

# Unità di massa (nome: kilogrammo, simbolo: kg)

## Definizione

Il kilogrammo è l'unità di massa ed è uguale alla massa del prototipo internazionale conservato presso il BIPM

## Campione

Conservato

IMGC

Incertezza (scarto tipo)  $\pm 8 \mu\text{g}$

Realizzazione:

campione materiale numero  
62

# Campione di Massa



# Unità di tempo

## (nome: secondo, simbolo: s)

### Definizione

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

### Campione

Conservato

IEN

Incertezza (scarto tipo)  $\pm 3 \cdot 10^{-13}$

Realizzazione:

orologio atomico a fascio di cesio

# Il Campione di Tempo



# Unità di Corrente Elettrica

## (nome: ampere, simbolo: A)

### Definizione

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 su ogni metro di lunghezza

### Campione

Conservato

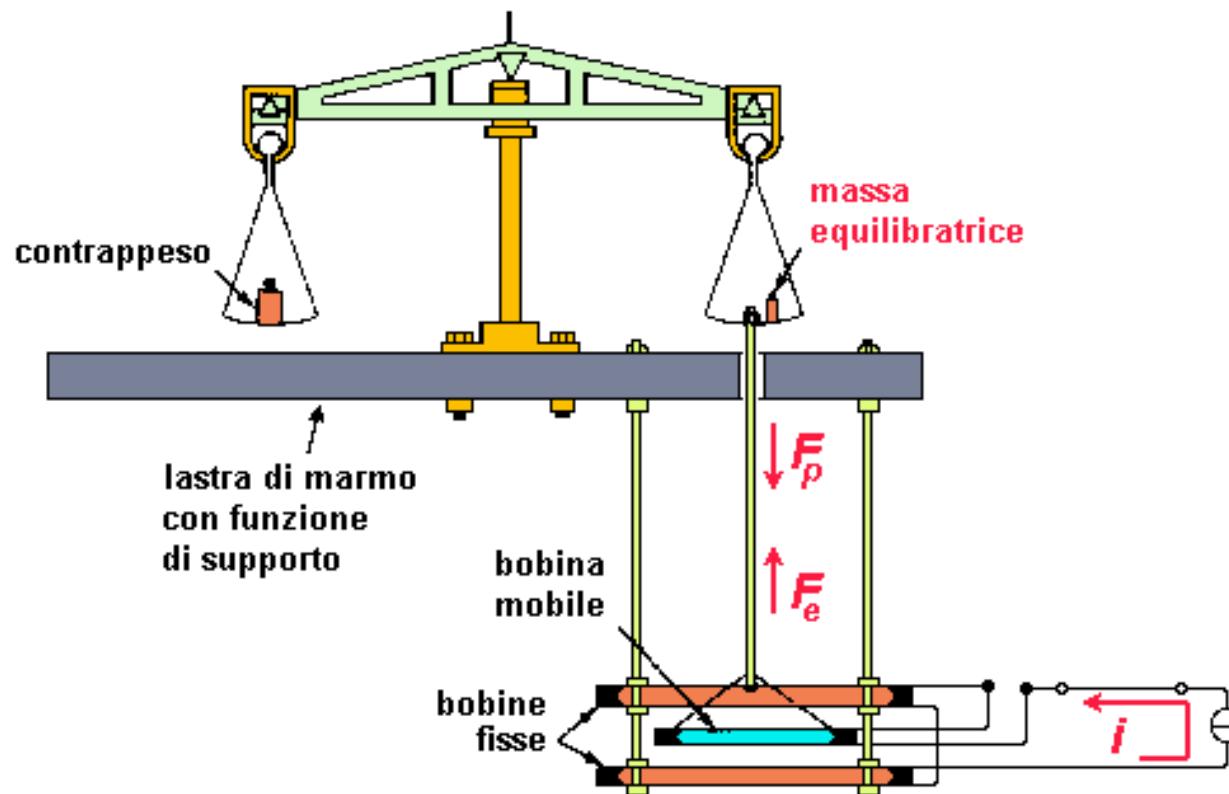
IEN

Incertezza (scarto tipo)  $\pm 1.5 \cdot 10^{-6}$

Realizzazione:

per derivazione dai campioni di tensione e resistenza elettrica

# Campione di Corrente Elettrica



I campioni a bilancia elettrodinamica hanno incertezze troppo elevate e, in particolare, maggiore di quella che poteva essere raggiunta con l'uso di campioni di f.e.m. e di resistenza.

# Unità di Temperatura Termodinamica (nome: kelvin, simbolo: K)

## Definizione

Il kelvin è la frazione 1/273,16 della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua

## Campione

Conservato

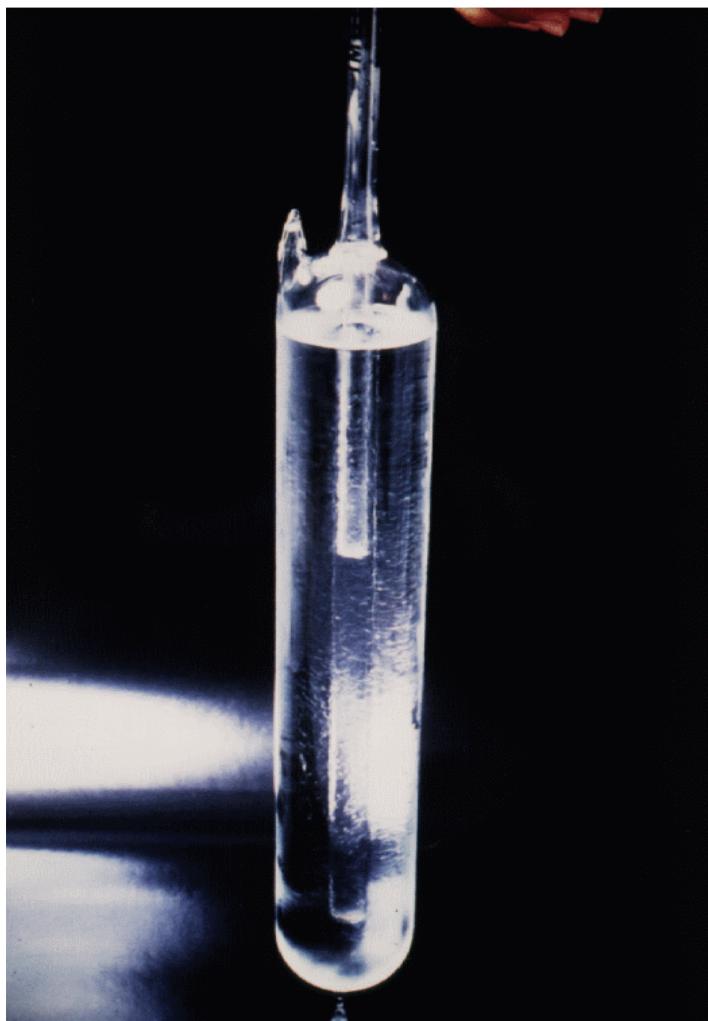
IMGC

Incertezza (scarto tipo)  $\pm 0.1 \text{ mK} / 2.5 \text{ mK}$

Realizzazione:

termometri interpolatori e punti fissi di temperatura

# Campione Temperatura Termodinamica



Cella di quarzo sigillata per la realizzazione di un punto fisso



Cella riscaldata per raggiungere la temperatura di fusione o di solidificazione

# Unità di quantità di sostanza (nome: mole, simbolo: mol)

## Definizione

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, ecc, ovvero gruppi specificati di tali particelle

# Unità di Intensità Luminosa

## (nome: candela, simbolo: cd)

### Definizione

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

### Campione

Conservato

IEN

Incertezza (scarto tipo)

$\pm 5 \cdot 10^{-3}$

Realizzazione:

per derivazione dai campioni di tensione e resistenza elettrica con radiometro assoluto

# Unità di Angolo Piano

(nome: radiante, simbolo: rad)

## Definizione

Il radiante è l'angolo piano al centro che su una circonferenza intercetta un arco di lunghezza eguale a quella del raggio

## Campione

Conservato

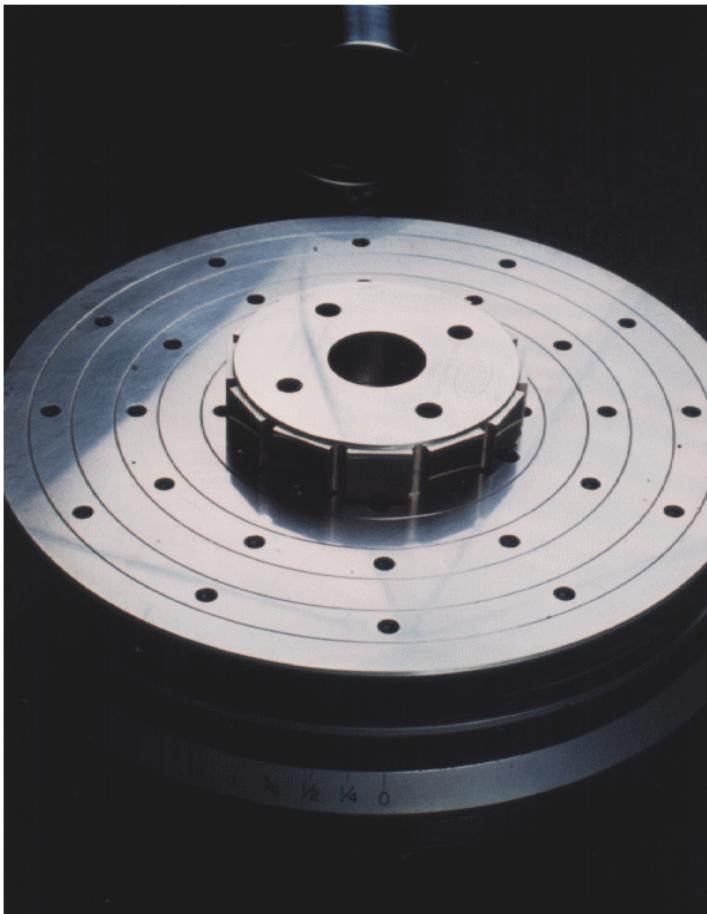
IMGC

Incertezza (scarto tipo)  $\pm 0.24 \mu\text{rad}$

Realizzazione:

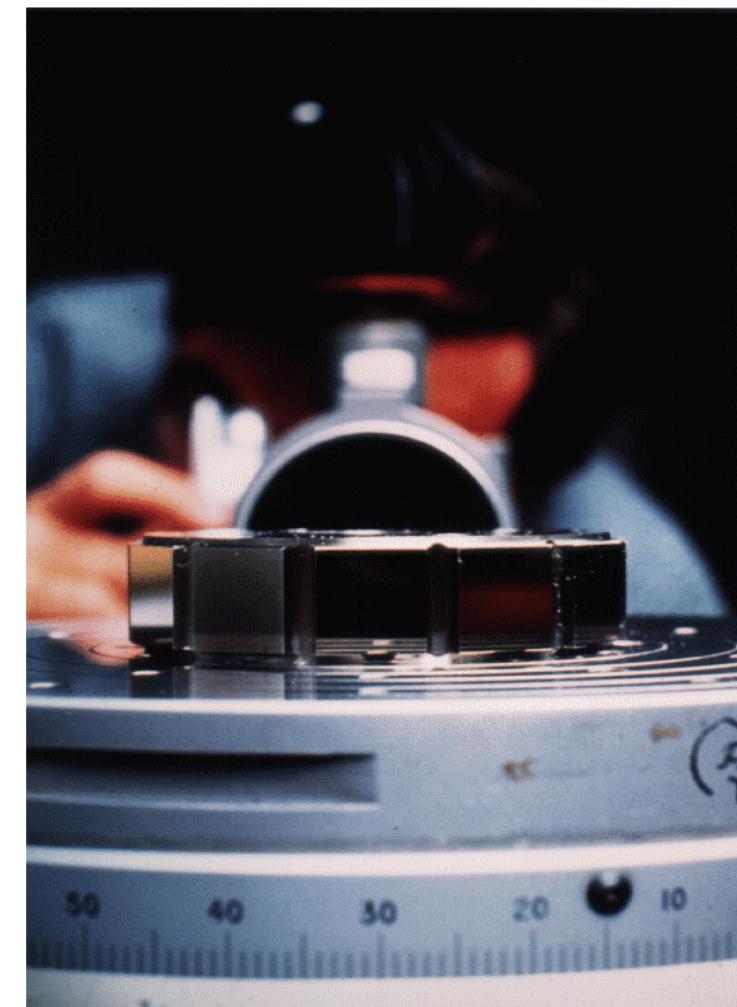
tavola a indice (divisione del cerchio)

# Unità di Angolo Piano (nome: radiante, simbolo: rad)



IMGC

Campione materiale di angolo piano



IMGC

Come campioni secondari si usano poligoni, tarati per autocollimazione con le tavole campione

# Unità di Angolo Solido

## (nome: steradiante, simbolo: sr)

### Definizione

Lo steradiante è l'angolo solido al centro che su una sfera intercetta una calotta di area eguale a quella del quadrato il cui lato ha la lunghezza del raggio

# Revisione del SI di Misura

- Nel tempo il SI ha subito diversi cambiamenti per adeguarsi alle esigenze del progresso scientifico e tecnologico.
- Il 16 novembre 2018 nella 26° Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure, a Versailles, in Francia, un gruppo di 60 paesi con un voto unanime, hanno trasformato radicalmente il sistema con una **ridefinizione delle unità di base** a partire dal valore di alcune **costanti fisiche**.
- Si è realizzato il sogno di 150 anni degli scienziati di un sistema di misurazione basato interamente sulle immutabili proprietà fondamentali della natura.
- Il nuovo Si è entrato in vigore il **20 maggio 2019**, in occasione della Giornata Mondiale della Metrologia.

# Evoluzione Sistema Internazionale di Unità di Misura

Nel 2019 il Comitato internazionale dei pesi e delle misure ha ridefinito la maggior parte delle unità fondamentali nella più grande revisione del Sistema metrico dal 1960.

Le sette unità fondamentali saranno legate a costanti naturali invarianti: **il metro, il secondo e la candela** rimarranno sostanzialmente **invariati**, ma le altre quattro sono state fondamentalmente riconcepite.

QUANTITY	BASE UNIT	A NEW DEFINITION
Mass	kilogram	<b>the Planck, h</b>
Electric current	ampere	<b>the elementary charge,e</b>
Thermodynamic temperature	Kelvin	<b>the Boltzmann Constant kB</b>
Amount of substance	mole	<b>the Avogadro constant NA</b>

# Evoluzione Sistema Internazionale di Unità di Misura

## Ridefinizioni:

Il **chilogrammo** è associato alla costante di Planck, una grandezza della meccanica quantistica che specifica l'ammontare di energia trasportata da un singolo quanto di luce, o fotone.

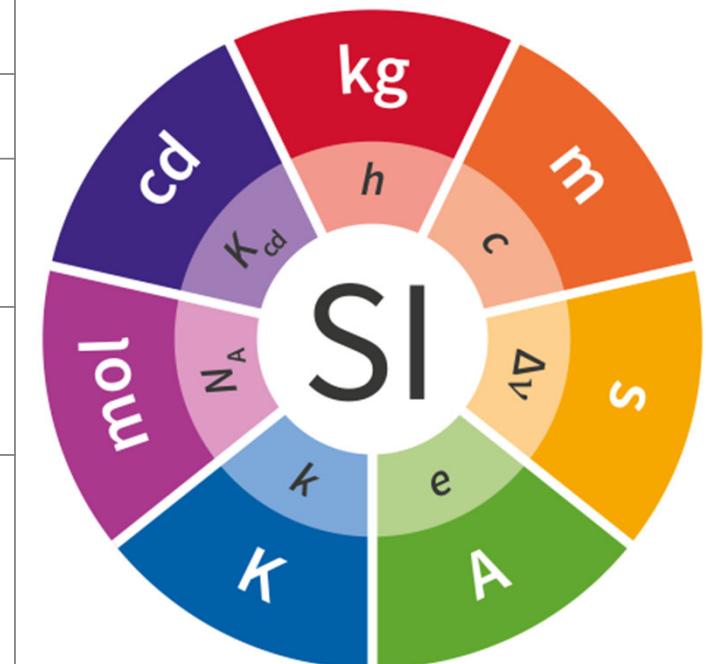
L'**ampere** è stato semplificato fissando il valore numerico per la carica trasportata da un protone (la costante fondamentale nota come carica elementare).

il **kelvin** col valore fissato per la costante di Boltzmann, che collega l'energia cinetica media delle molecole di un gas con la sua temperatura assoluta, migliorerebbe le misurazioni per temperature estremamente basse ed estremamente alte.

Definire la **mole** fissando un valore numerico per la costante di Avogadro, che è il numero di molecole, atomi, o qualsiasi altra piccola quantità discreta di materia in una mole di sostanza.

# Revisione del SI di Misura

Foundational SI constants		
$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	frequenza della transizione iperfine dell'atomo di cesio	9 192 531 770 Hz
$c$	velocità della luce	299 792 458 m s <sup>-1</sup>
$h$	costante di Planck	$6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J Hz <sup>-1</sup>
$e$	carica elementare	$1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C
$k$	costante di Boltzmann	$1.380\ 649 \times 10^{-23}$ J K <sup>-1</sup>
$N_A$	costante di Avogadro	$6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol <sup>-1</sup>
$K_{\text{cd}}$	the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540 THz	683 lm W <sup>-1</sup>



# Revisione del SI di Misura

Named SI units and their defining constants							
Unit	$\Delta V_{Cs}$	c	h	e	$N_A$	k	$K_{cd}$
mol (mole)					x		
C (coulomb)				x			
s (second)	x						
Hz (hertz)	x						
Bq (becquerel)	x						
A (ampere)	x			x			
m (meter)	x	x					
Gy (gray)	x	x					
Sv (sievert)	x	x					
kat (katal)	x				x		
kg (kilogram)	x	x	x				
N (newton)	x	x	x				
Pa (pascal)	x	x	x				
J (joule)	x	x	x				
W (watt)	x	x	x				

Named SI units and their defining constants							
Unit	$\Delta V_{Cs}$	c	h	e	$N_A$	k	$K_{cd}$
V (volt)	x	x	x	x			
F (farad)	x	x	x	x			
$\Omega$ (ohm)	x	x	x	x			
S (siemens)	x	x	x	x			
Wb (weber)	x	x	x	x			
T (tesla)	x	x	x	x			
H (henry)	x	x	x	x			
K (kelvin)	x	x	x			x	
°C (celsius)	x	x	x			x	
cd (candela)	x	x	x			x	
lm (lumen)	x	x	x			x	
lx (lux)	x	x	x			x	

# Altri campioni secondo il D.M. 591

Grandezza	tensione elettrica
Unità di misura	volt
Simbolo	V
Conservato	IEN
Incertezza (scarto tipo)	$\pm 5 \cdot 10^{-7}$
Realizzazione:	dal campione nazionale di tempo tramite effetto Josephson

# Altri campioni secondo il D.M. 591

Grandezza	resistenza elettrica
Unità di misura	ohm
Simbolo	$\Omega$
Conservato	IEN
Incertezza (scarto tipo)	$\pm 3 \cdot 10^{-7}$
Realizzazione:	effetto Hall quantistico

# Altri campioni secondo il D.M. 591

Grandezza	dose assorbita
Unità di misura	gray
Simbolo	Gy
Conservato	ENEA
Incertezza (scarto tipo)	$\pm 5 \cdot 10^{-3} \div \pm 3 \cdot 10^{-2}$
Realizzazione:	tramite calorimetro e camera di ionizzazione

# Realizzazione del campione di tempo

- ...da sempre...
  - 1s = 1/86400 del giorno solare medio  
ma la velocità di rotazione della Terra diminuisce di 1 parte su  $10^8$  all'anno
- 1960 11<sup>a</sup> CGPM
  - 1s = 1/31556925.97474 dell'anno tropicale (intervallo tra due equinozi di Primavera) 1900  
**(1 anno  $\sim \pi \cdot 10^7$  secondi)**
- 1967 13<sup>a</sup> CGPM (orologio atomico)
  - 1s = 9 192 631 770 periodi della radiazione assorbita dal  $^{133}\text{Cs}$  nella transizione tra i due stati iperfini del suo stato fondamentale
  - introdotta una nuova scala di tempo: il Tempo Atomico Internazionale (TAI)  
L'origine è stata fissata alle ore 0 del 1/1/1958 e l'unità è il secondo  
si tratta di una scala statistica, basata su un grande numero (200) di orologi atomici sparsi in vari laboratori nel mondo (30 paesi)

Gli orologi atomici di ultima generazione (a fontana di cesio raffreddati) sono caratterizzati da una **precisione** relativa dell'ordine di  $10^{-15}$  (1 s /30 000 000 anni)  
Con orologi a ioni di mercurio si prevede che si raggiungerà una precisione di  $10^{-18}$

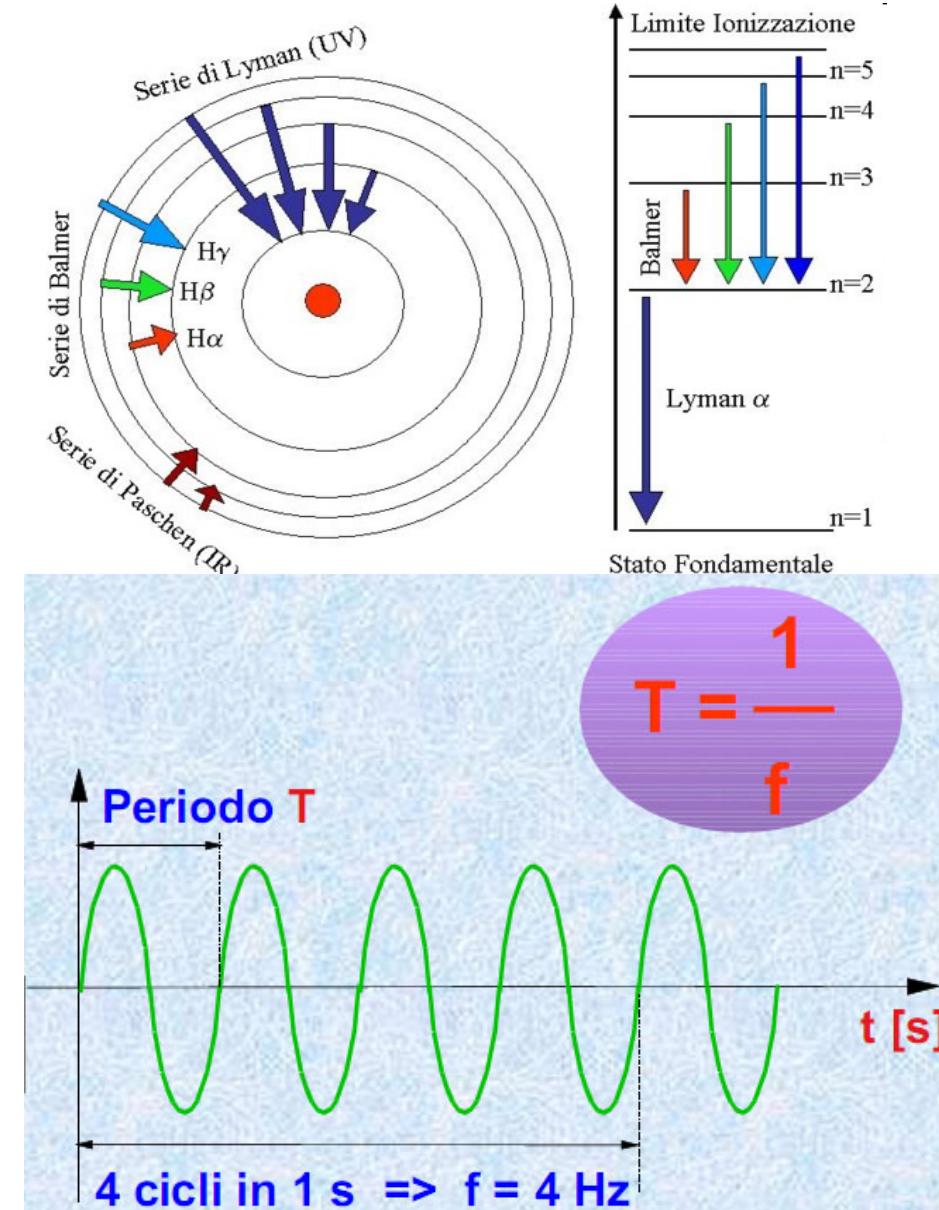
# L'Orologio Atomico: conoscenze preliminari di fisica

1) L'energia di un'onda

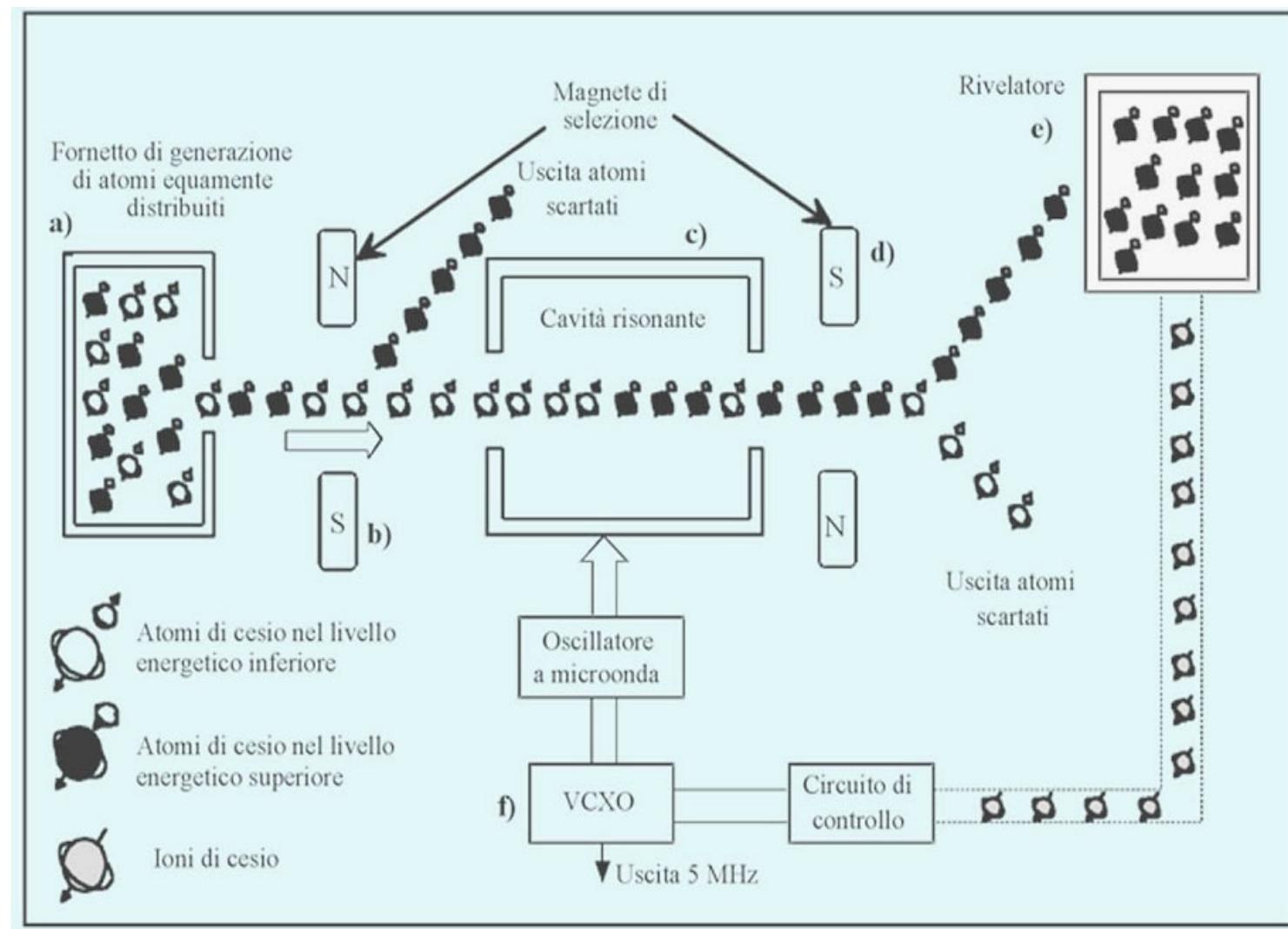
$$E=hf$$

2) Orbitali energetici  
quantizzati

3) Frequenza-periodo



# L'Orologio Atomico: Oscillatore a Fascio di Cesio



# Orologio atomico: Oscillatore a Fascio di Cesio

Il fornetto a) riscaldato a circa 90°C, emette il fascio di atomi di cesio uniformemente distribuiti nei sedici livelli energetici. Il selettore magnetico b) garantisce l'immissione nella cavità risonante solo degli atomi a livello energetico inferiore.

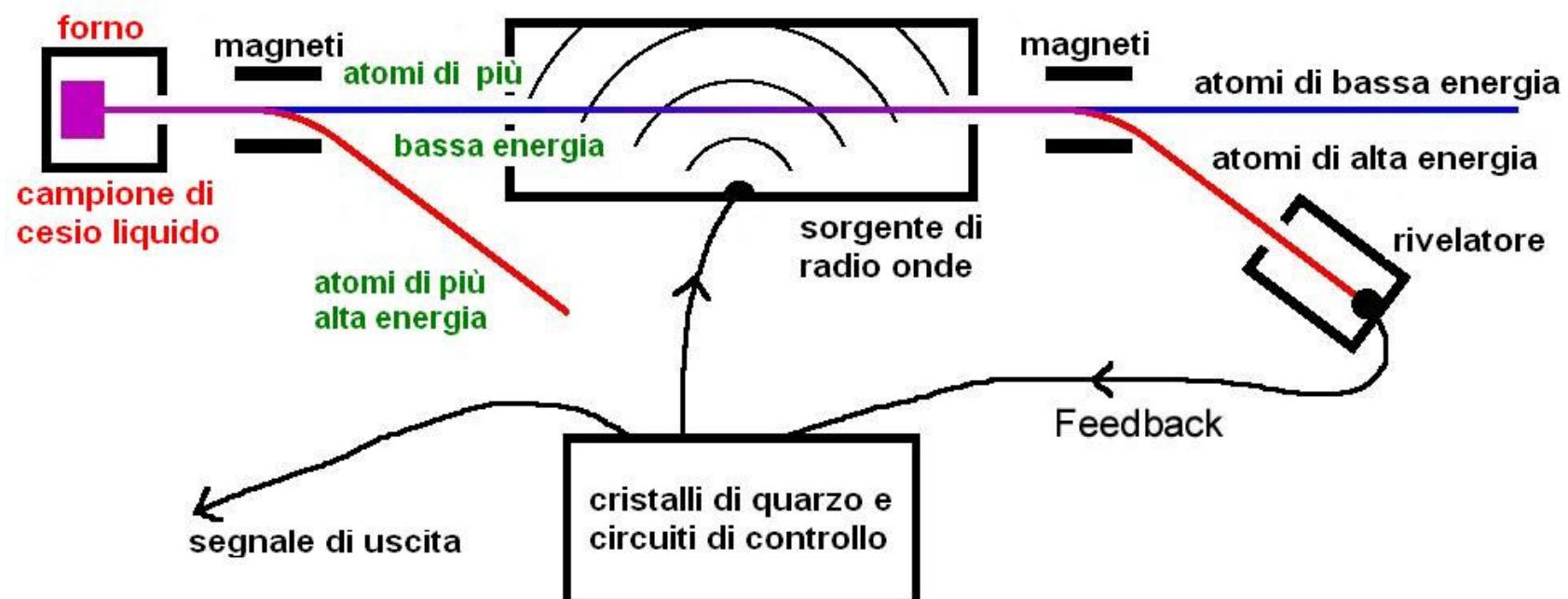
Se nella cavità risonante c), la frequenza del segnale a microonda è pari alla frequenza di risonanza del Cesio (legge di Planck:  $E=hf$ ), avviene la transizione al livello superiore, e gli atomi in uscita vengono indirizzata sul rivelatore dal selettore magnetico d). La rivelazione della presenza di atomi al livello energetico superiore è affidata ad un filo incandescente e), in grado di produrre un segnale elettrico proporzionale alla quantità di atomi incidenti.

Un circuito di controllo provvederà in funzione del segnale rivelato a cambiare la frequenza dell'oscillatore al quarzo f) (VCXO) per rendere massimo il numero di atomi rilevati. Ciò avviene quando la frequenza di cavità a microonde è esattamente 9 192 631 770 Hz. Come frequenza standard di uscita è utilizzato 5 MHz.

# L'orologio atomico commerciale

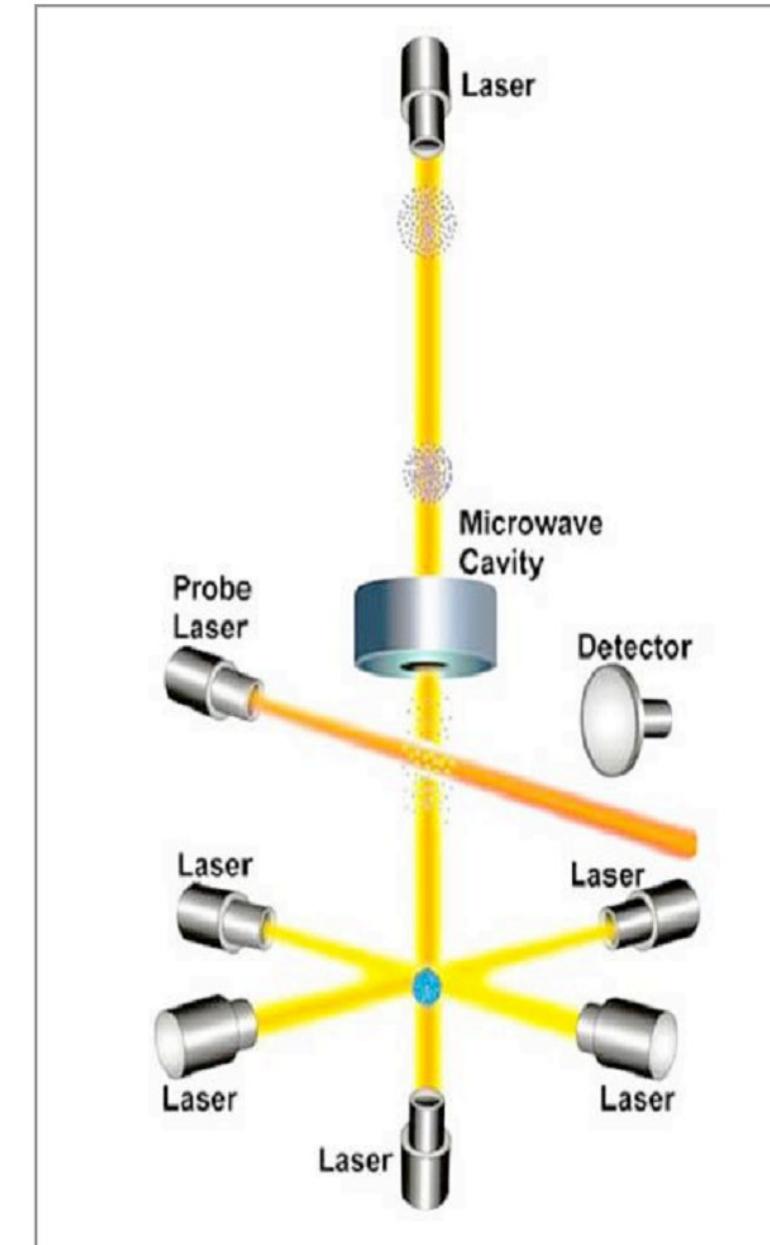
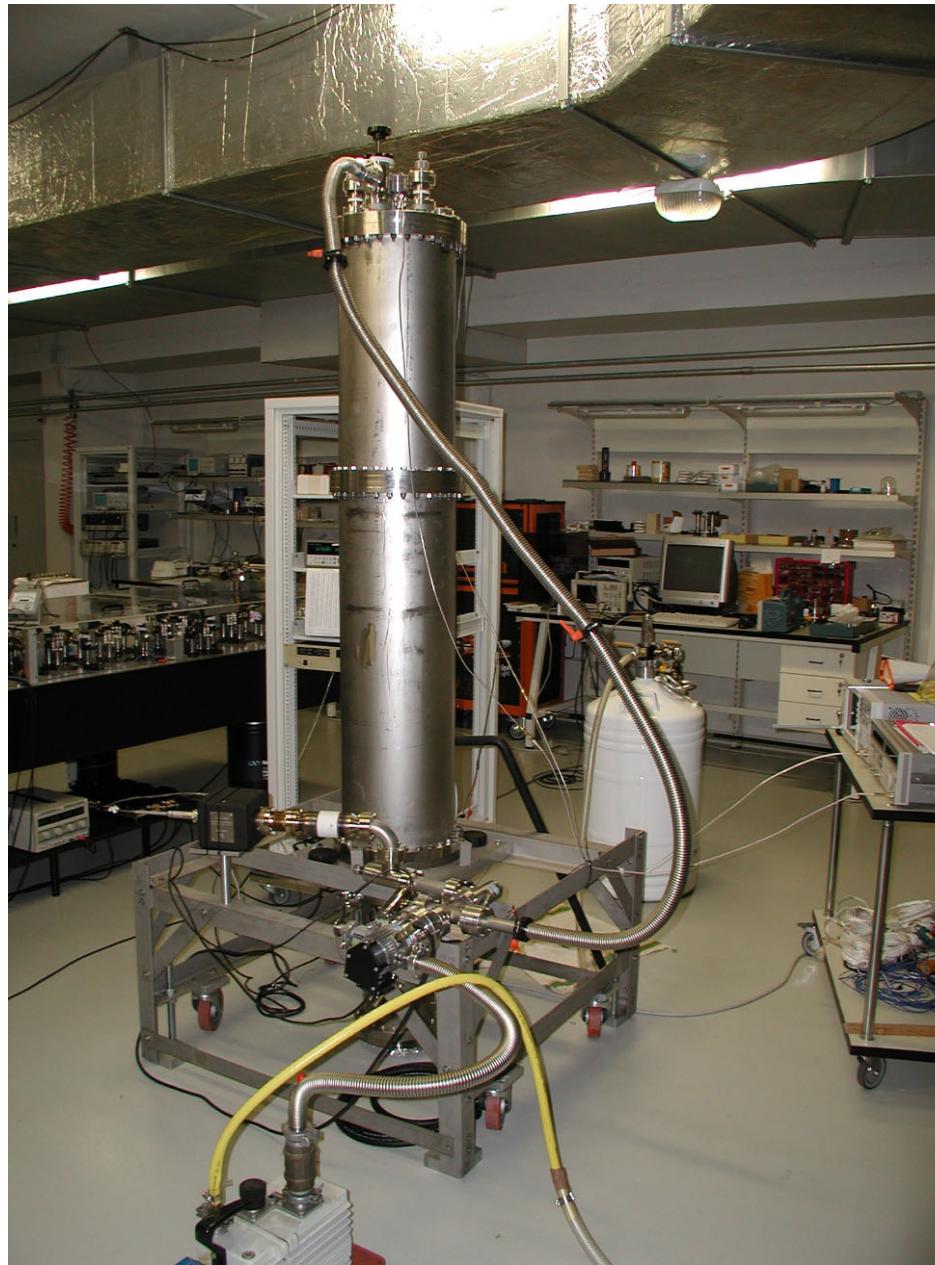


Limitazioni del valore del fattore di qualità dovute al fatto di avere una cavità risonante di dimensioni contenute



# Orologio atomico a fontana di cesio

Incertezza  $10^{-15}$



# Orologio atomico a fontana di cesio

Inizialmente, 6 fasci laser si incrociano in una regione sotto vuoto dove sono presenti vapori atomici (di Cesio, ad esempio) a temperature prossime a quelle ambientali.

L'interazione atomi-laser crea un insieme di atomi ultrafreddi (per il Cesio: temperature di circa  $1 \mu\text{K}$ , velocità termica corrispondente a pochi cm/s) e questa nuvola atomica, sempre tramite laser inferiore, viene lanciata verso l'alto in volo balistico (da cui fontana atomica) e gli altri laser spenti.

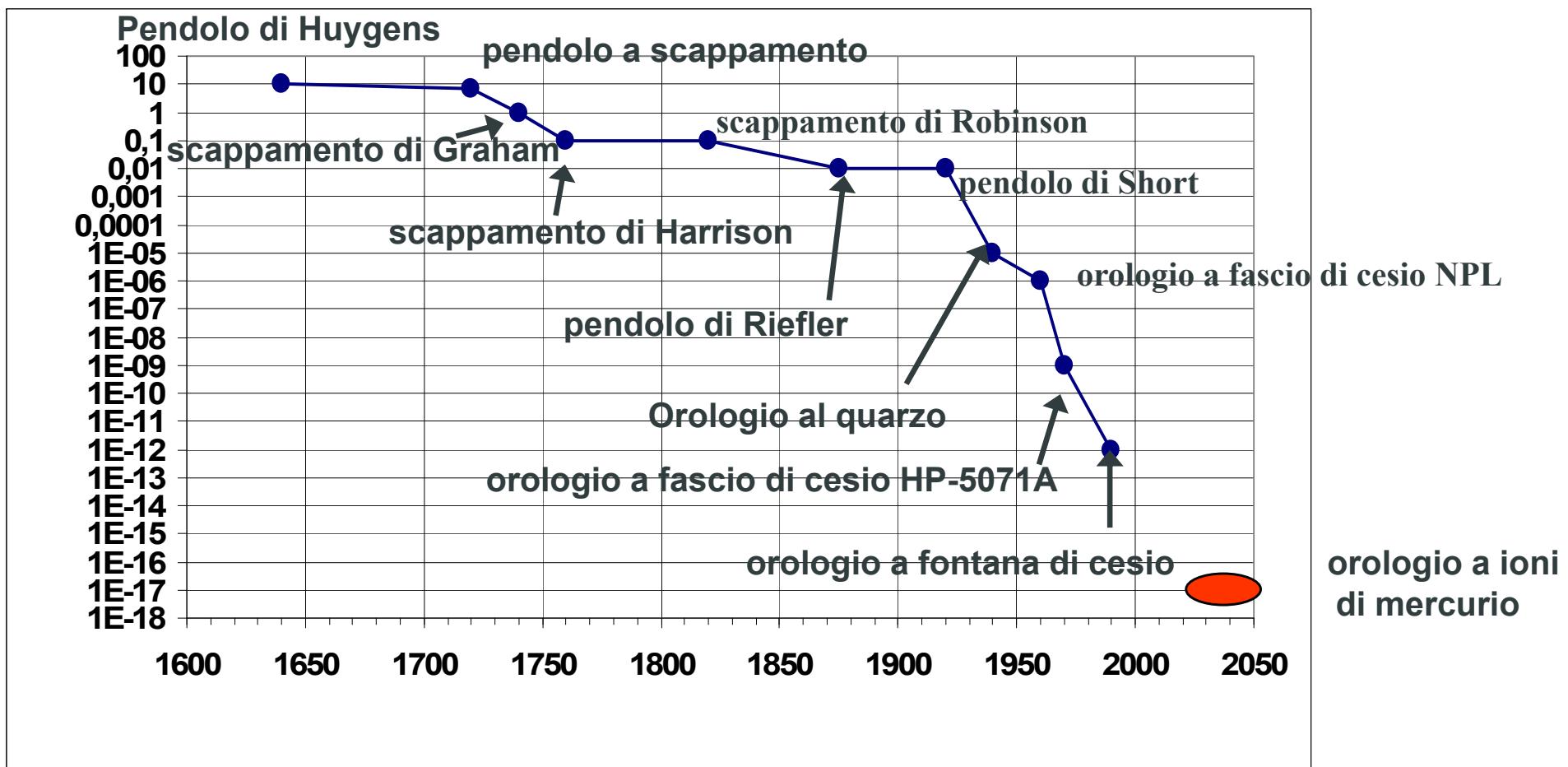
Lungo la traiettoria, gli atomi entrano in una cavità a microonda (il cilindro in alto) dove interagiscono con una radiazione a circa 9,2 GHz, successivamente raggiungono l'apogeo e discendendo passano per la seconda volta nella medesima cavità.

Dopo il secondo passaggio in cavità gli atomi interagiscono con la radiazione laser per una fase di rivelazione del numero di atomi che hanno eseguito la transizione tra i due stati iperfini del cesio.

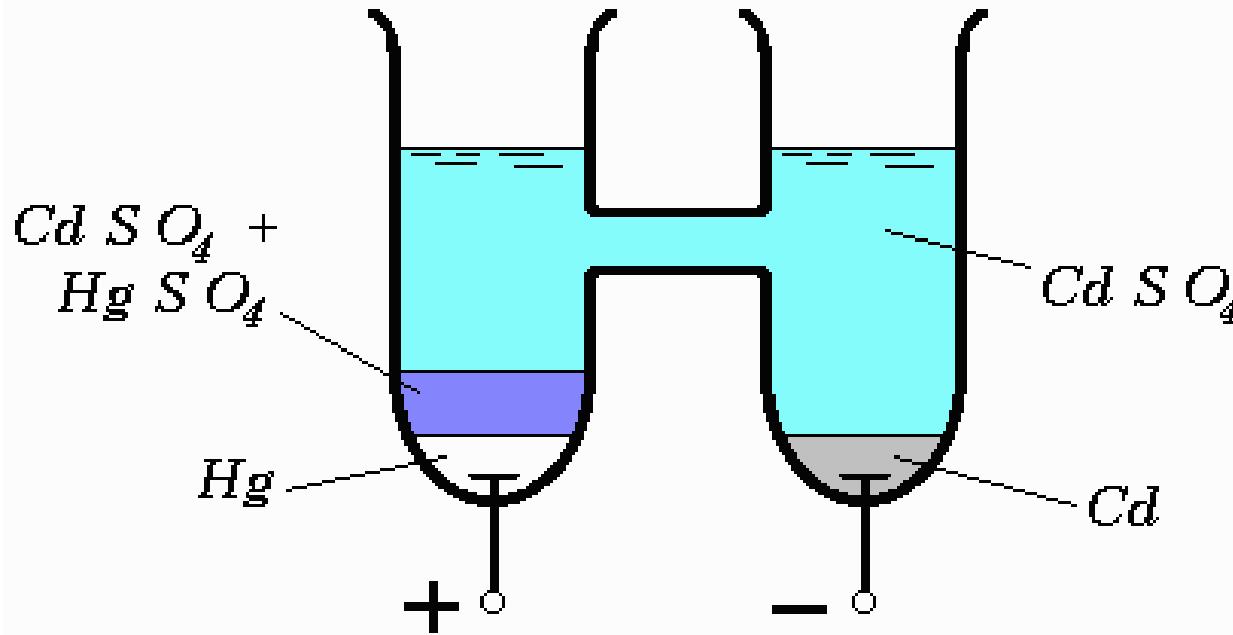
Il numero di atomi transiti di viene massimo quando la frequenza della cavità risonante è uguale a quella della risonanza del Cesio.

# Evoluzione della precisione nella misura del tempo

secondi al giorno



# Campione di f.e.m. a pila Weston



## Pila satura:

$V_{out} 20^{\circ}\text{C} = 1,018\ 63\ \text{V}$

Incertezza <2 ppm

deriva della  $V_{out}$  con la temperatura  
voltage drift = - 40 microvolt / °C

## Pila NON satura:

$V_{out} 20^{\circ}\text{C} = 1,0190\div1,0194\ \text{V}$

Incertezza <2 ppm

deriva della  $V_{out}$  con la temperatura  
voltage drift = - 5 microvolt / °C

# Campione di f.e.m. a pila Weston

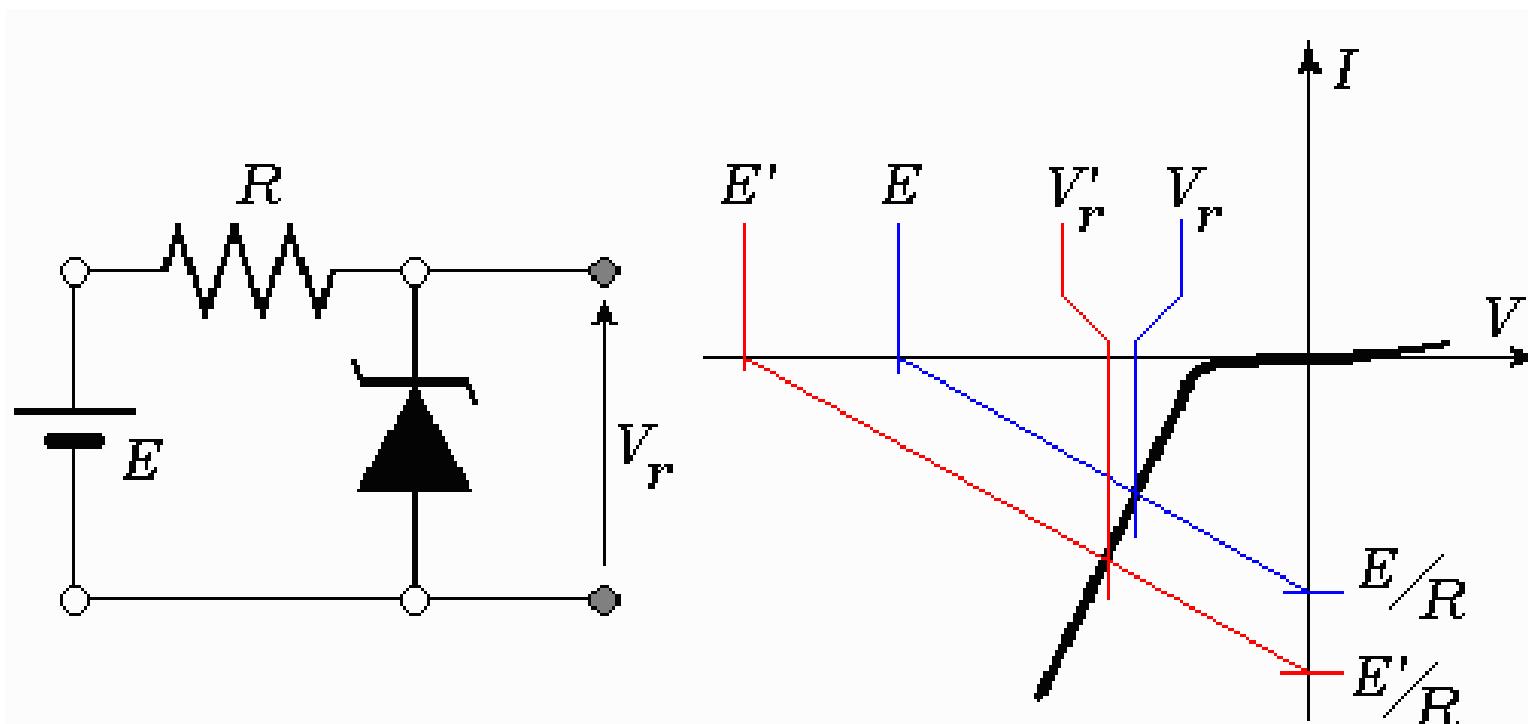
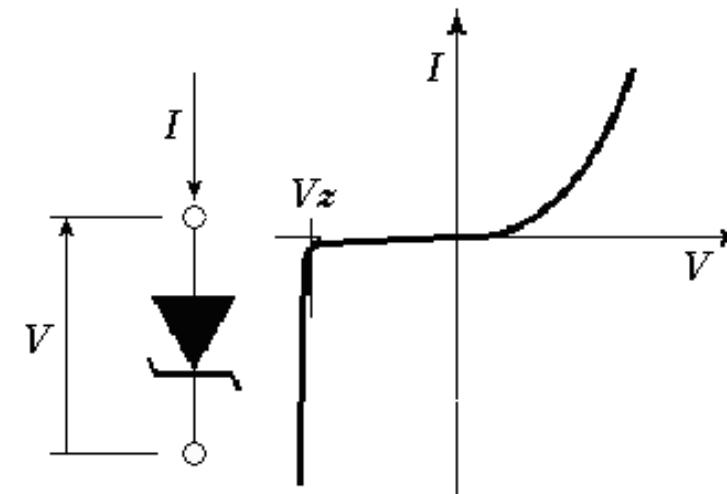


IEN

Bagno termostatico in cui è mantenuta ad una temperatura  
entro il millesimo di kelvin il gruppo di riferimento di pile  
campione Weston sature

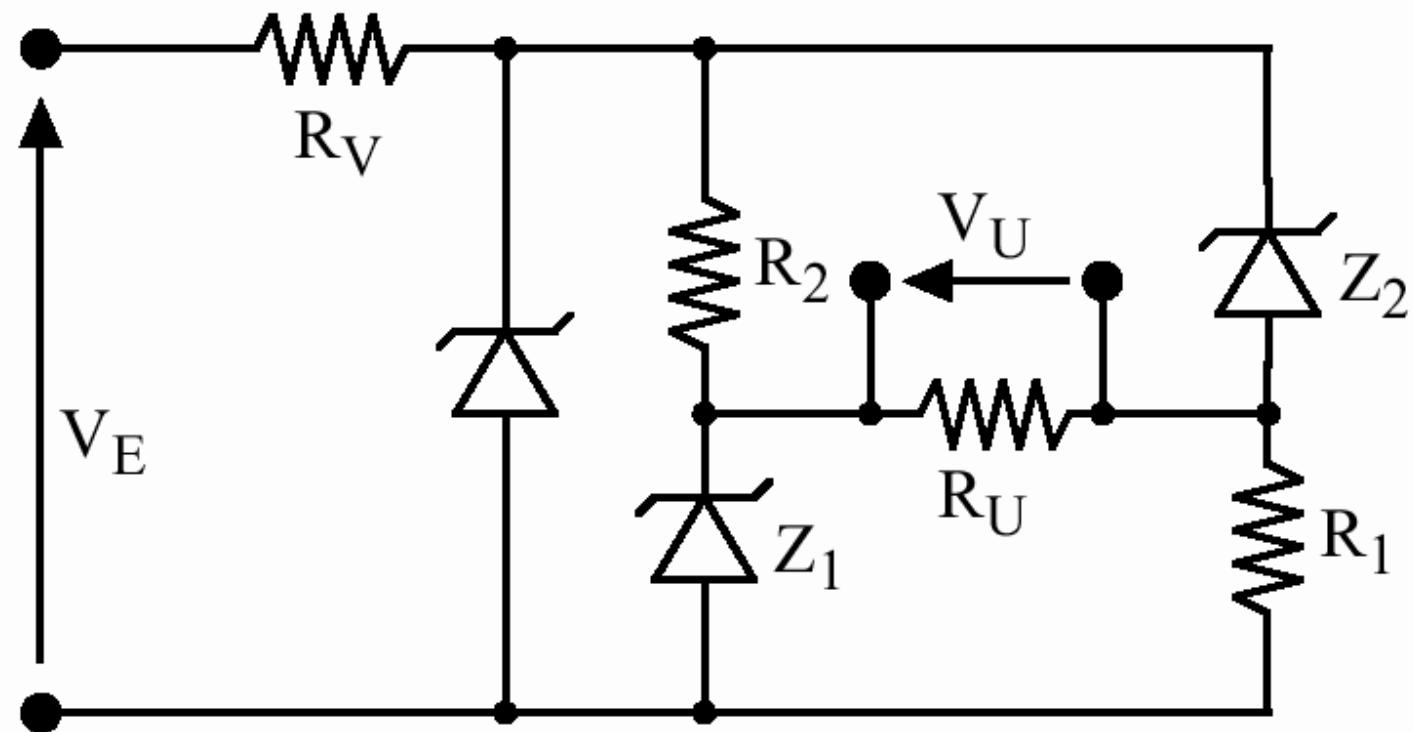
# Campioni a diodo Zener

*Caratteristica V-I  
del diodo zener*



# Zener a ponte

$$V_U = \frac{V_{z1} + V_{z2}}{2} \frac{R_U}{R_U + R_{d1}},$$



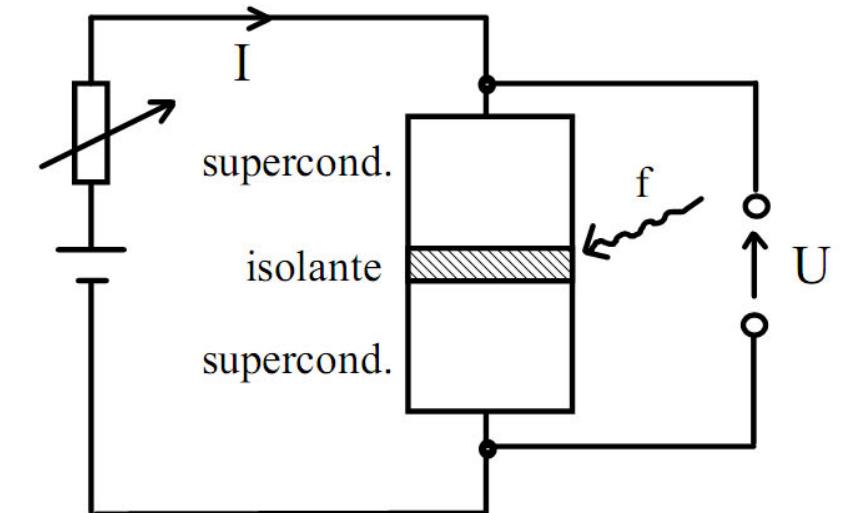
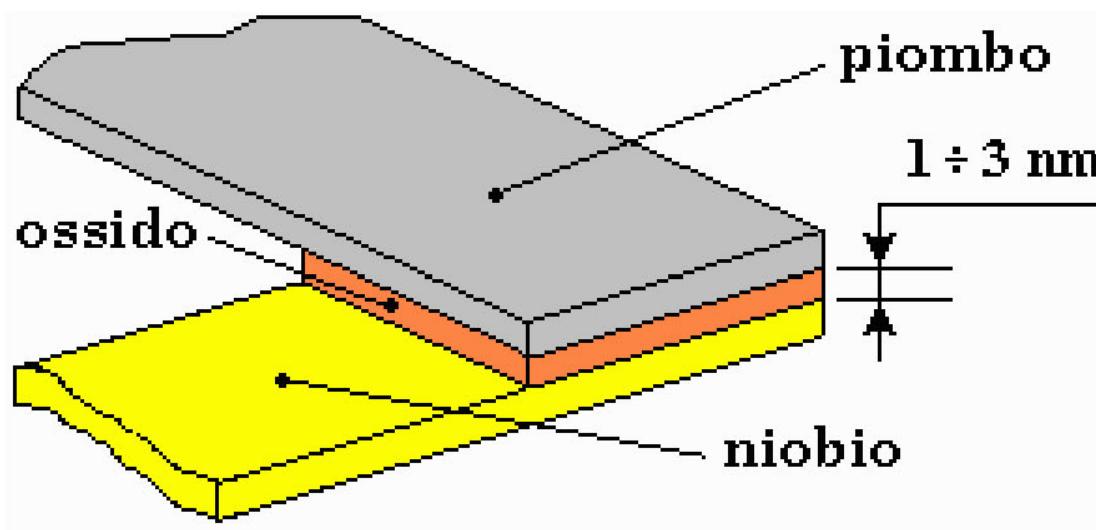
# Forza elettromotrice Campione f.e.m. ad effetto Josephson

Le giunzioni Josephson si presentano come convertitori naturali frequenza-tensione; infatti quando due superconduttori, posti ad una distanza dell'ordine dei nanometri, tale da consentire un processo di tunnel da parte di una supercorrente, vengono irradiati con una radiazione elettromagnetica di frequenza  $f$  (nel campo delle microonde), si viene a stabilire attraverso la giunzione una tensione  $V_J$  (tensione Josephson) il cui valore quantizzato è dato dalla relazione

$$V_J = n \frac{h}{2e} \cdot f$$

dove  $n$  è un numero intero,  $h$  è la costante di Planck ed  $e$  è la carica dell'elettrone.  $V_J$  non dipende dal materiale utilizzato, né dalle dimensioni o dalle tecniche costruttive.

# Forza elettromotrice Campione f.e.m. ad effetto Josephson



A, B: metalli superconduttori (piombo, niobio)

S: strato non superconduttore (pochi nm)

temperatura elio liquido (circa 4 kelvin)

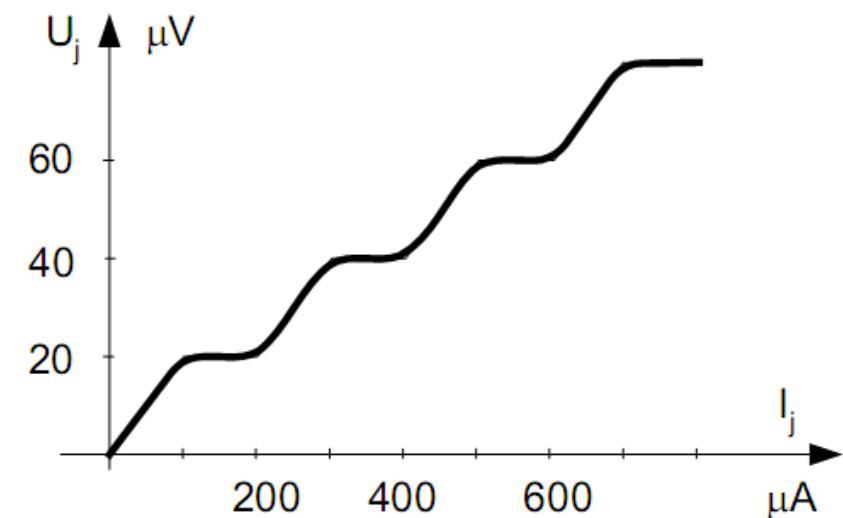
$h$  : costante di Planck

$K_J$  : Costante di Josephson;

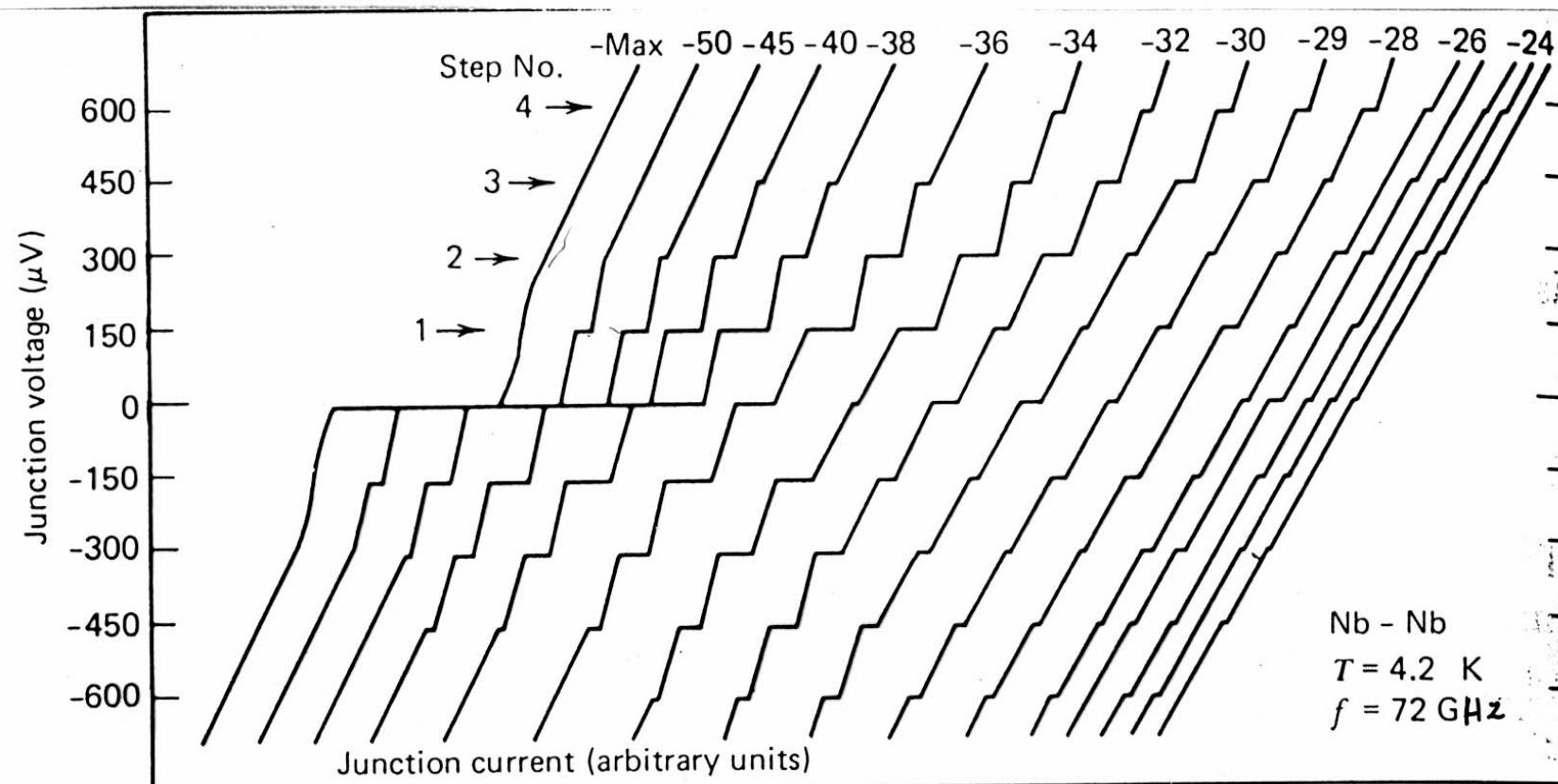
$K_{J90} = 483\,597,9 \text{ GHz} / \text{V}$

$$V_J = n \frac{h}{2e} \cdot f$$

$$K_J = \frac{h}{2e}$$



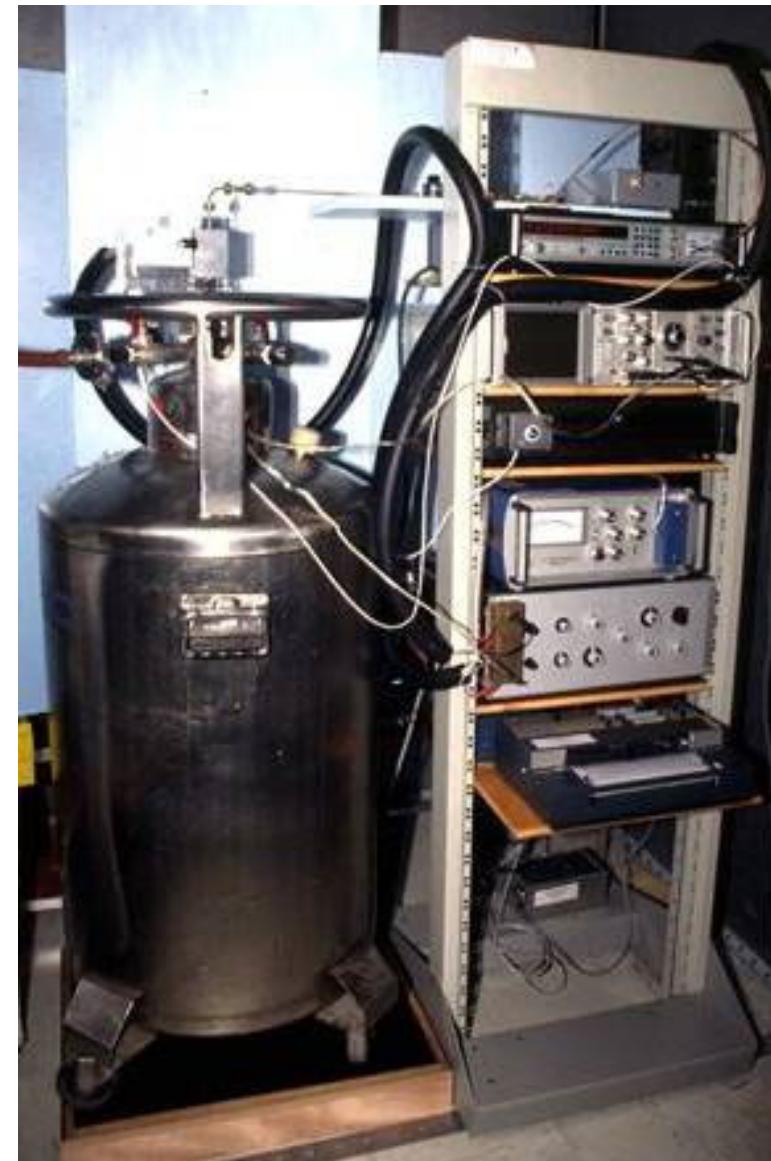
# L'effetto Josephson



# Campione di tensione ad effetto Josephson

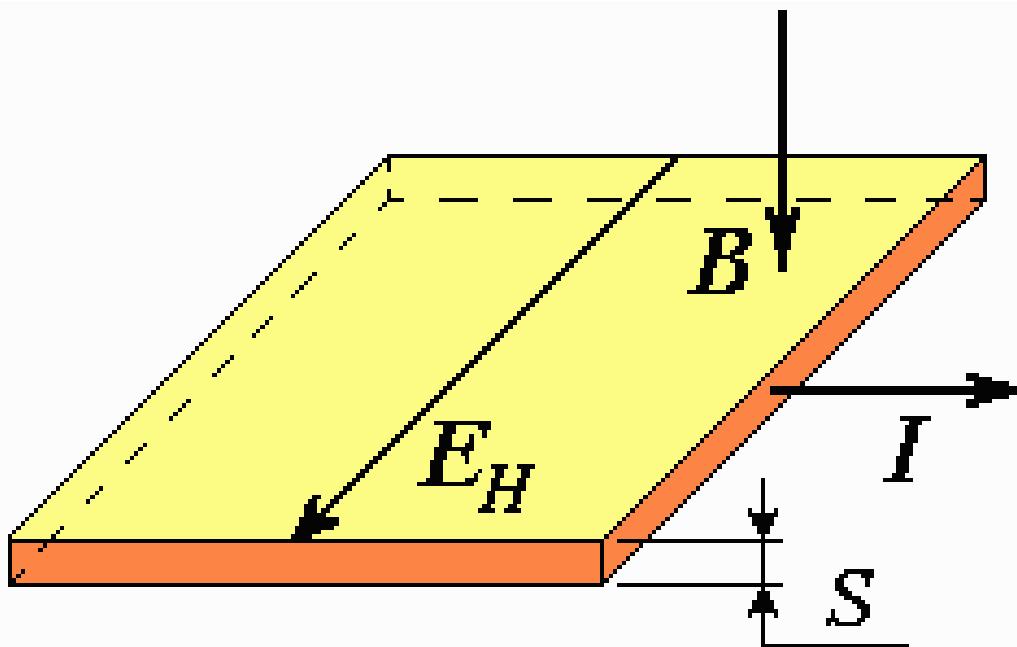
**Usando l'effetto Josephson è possibile creare campioni di tensione con un'incertezza di circa  $10^{-2}$  ppm.**

**I valori di tensione ottenibili sono però di modesto valore ( $100 \mu\text{V}$ )**



# Hall quantizzato

L'effetto Hall quantistico è un caso particolare di interazione elettrodinamica tra un campo magnetico e una corrente tra loro perpendicolari. Esso trae importanza dal fatto di consentire la riproduzione dell'unità di resistenza mediante l'aggancio alla resistenza quantizzata di Hall con un numero intero.



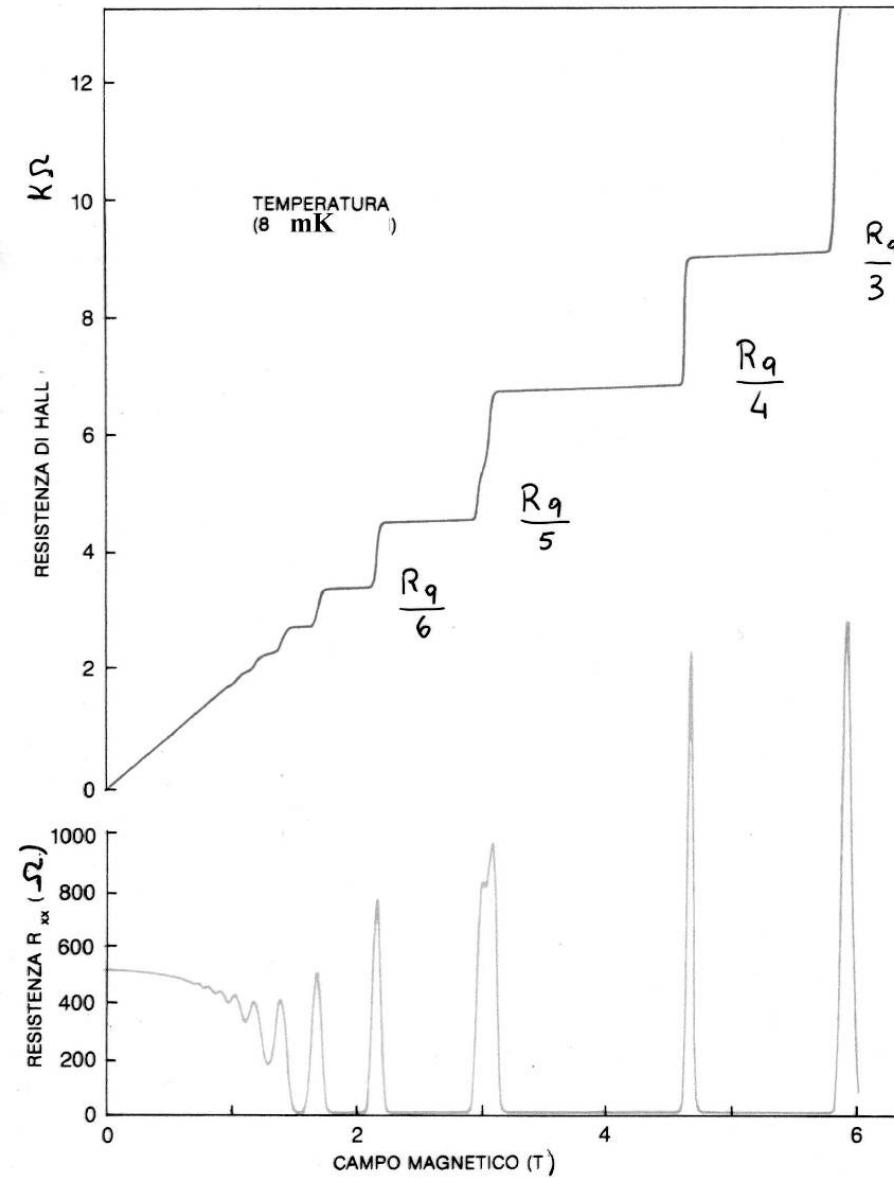
$$E_H = \frac{h}{n e^2} I$$

$$n = 1 \Rightarrow E_H = \frac{h}{e^2} I = R_K I$$

$h$  : costante di Planck

$R_K$  : costante di Von Klitzing;  $R_{K90} = 25\ 812,807$  ohm

# Hall quantizzato



# Campione di resistenza ad effetto Hall quantizzato

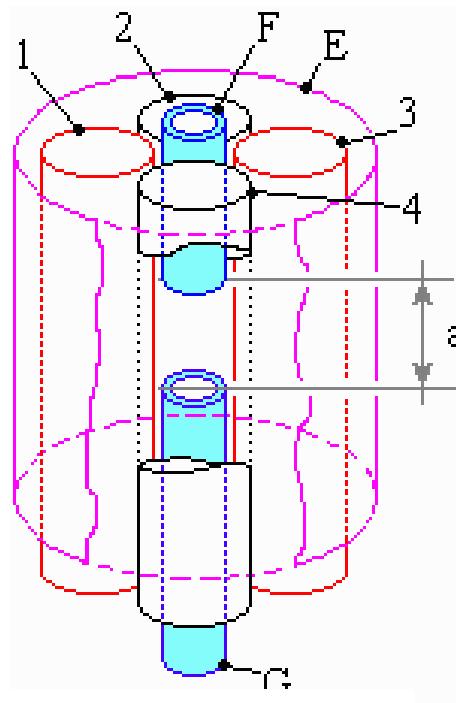
Usando l'effetto Hall è possibile creare campioni di resistenza con un'incertezza di circa  $10^{-2}$  ppm.

Il campo magnetico necessario alla realizzazione è però molto intenso (molti Tesla)



Laboratorio in cui viene mantenuto il campione nazionale di resistenza

# Campione di capacità (Condensatore Calcolabile)



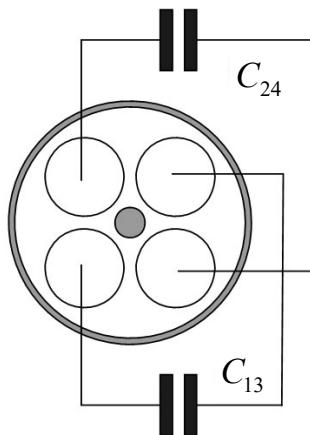
## Teorema di Lampard e Thompson

Le capacità  $C_{13}$  e  $C_{24}$  sono dette "capacità incrociate specifiche" e per esse, nel vuoto, vale la relazione:

$$e^{-\frac{\pi C_{13}}{\epsilon_0}} + e^{-\frac{\pi C_{24}}{\epsilon_0}} = 1$$

Nel caso in cui le due capacità incrociate specifiche abbiano lo stesso valore questo risulta:

$$C = C_{13} = C_{24} = \frac{\ln 2}{\pi} \epsilon_0$$

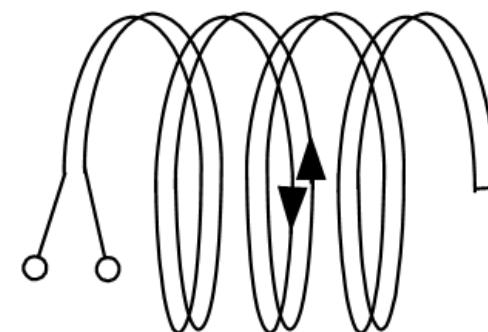


nel vuoto, vale circa 2 pF/m con un'incertezza inferiore a 10<sup>-2</sup>ppm. Ma il valore è relativamente piccolo (il valore esatto risulta di 1,95354904 pF/m).

# Resistore di misura

Prestazioni richieste:

- elevatissima permanenza delle caratteristiche nel tempo;
- coefficiente di temperatura a pressoché nullo (manganina, costantana);
- basso potenziale termoelettrico (effetto Seebeck);
- buona resistenza all'ossidazione;
- buone caratteristiche meccaniche.



# Resistore di misura

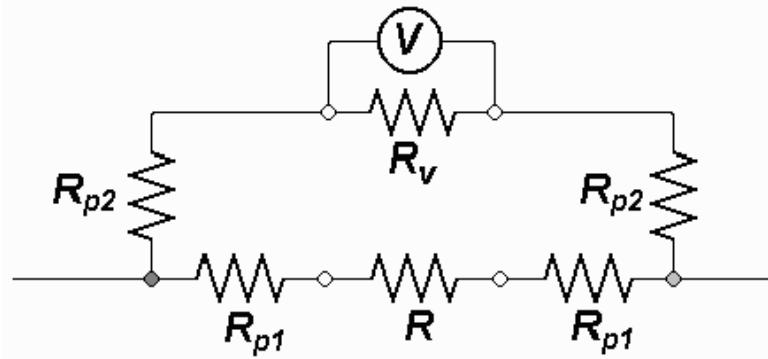
## Campioni di resistenza in lega metallica

Materiali utilizzati: leghe metalliche a basso coefficiente di temperatura della resistività:

- **manganina** (84% di rame, 12% di manganese, 4% di nickel)
  - resistività =  $0,4668 \cdot 10^{-6}$  ohm m
  - coefficiente di temperatura della resistività (nell'intorno di 20 °C):  $1 \div 10 \cdot 10^{-6} / K$

*con la manganina si realizzano resistori campione da 1 ohm*
- **evanohm** (nickel-cromo + alluminio-rame)
- **karma** (nickel-cromo + alluminio-ferro)
  - *con evanhom e karma si realizzano resistori campione da 10 kohm*

# Resistore a due morsetti



$$R = 1\Omega; \quad R_v = 10M\Omega; \\ R_{p1} = 1m\Omega; \quad R_{p2} = 1m\Omega;$$

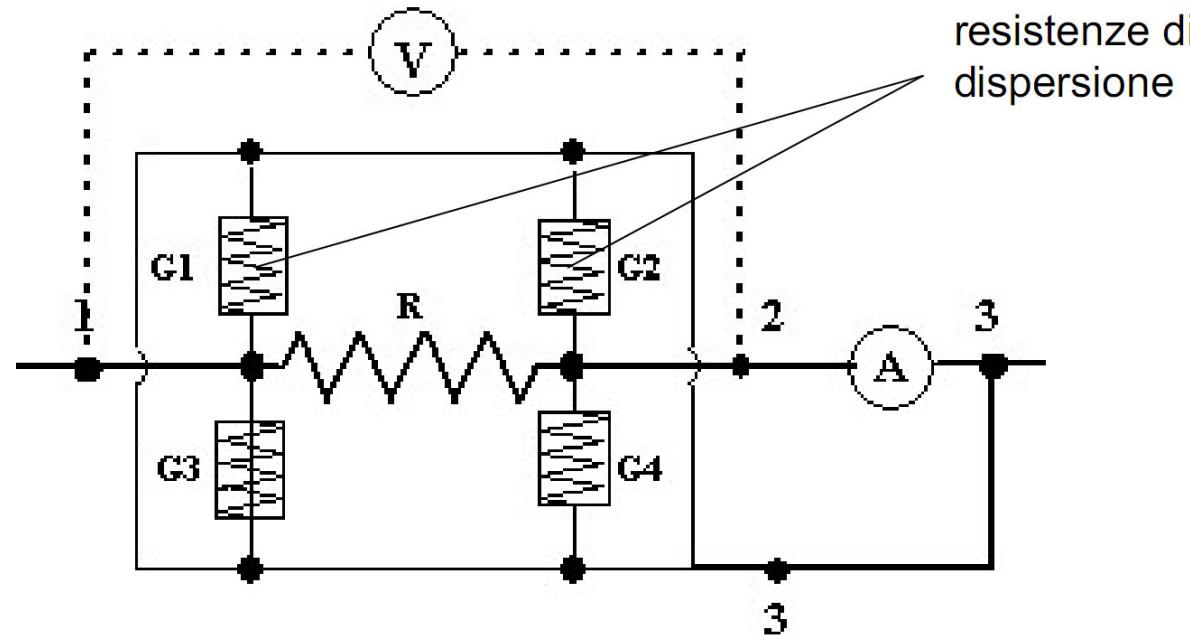
$$\Delta R \% = +0,2$$



Resistore a decadi

L'effetto delle resistenze dei contatti provoca una indeterminazione di R che determina una incertezza nel risultato di misura

# Resistore a tre morsetti

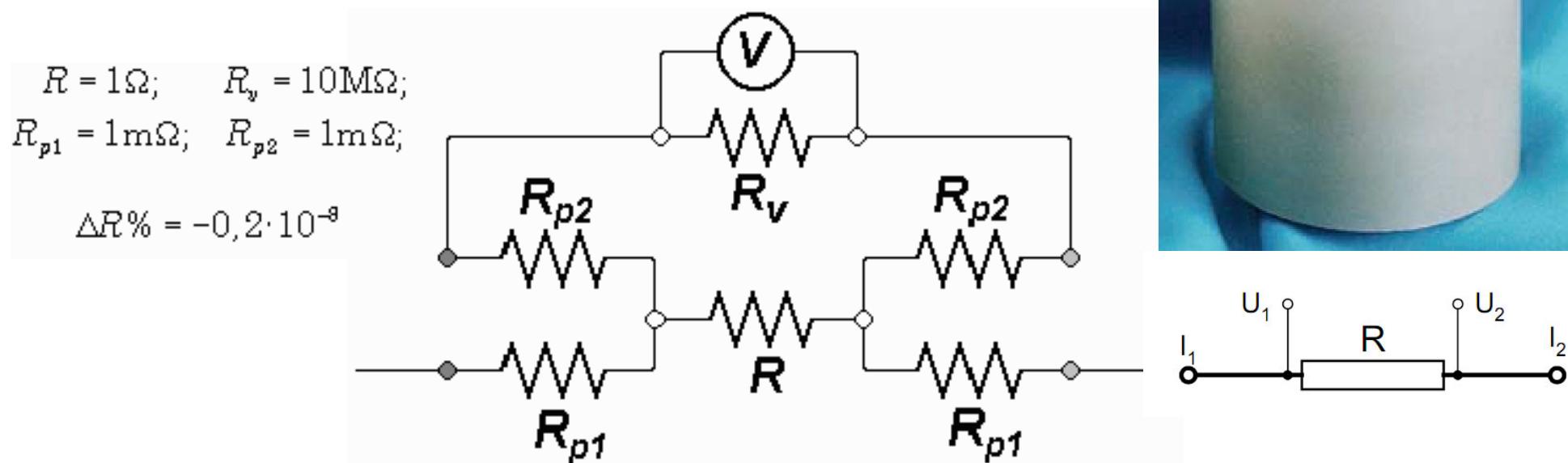


Resistore a tre morsetti

Gli effetti di accoppiamento elettromagnetico con le masse circostanti e le conseguenti variazioni di correnti, possono essere schematizzate con delle resistenze (fittizie) di dispersione dette anche parassite.

# Resistore a quattro morsetti

In questo caso vi sono due coppie di morsetti: ad una si applica la alimentazione che provoca la circolazione della corrente incognita ed all'altra si preleva la caduta di tensione.

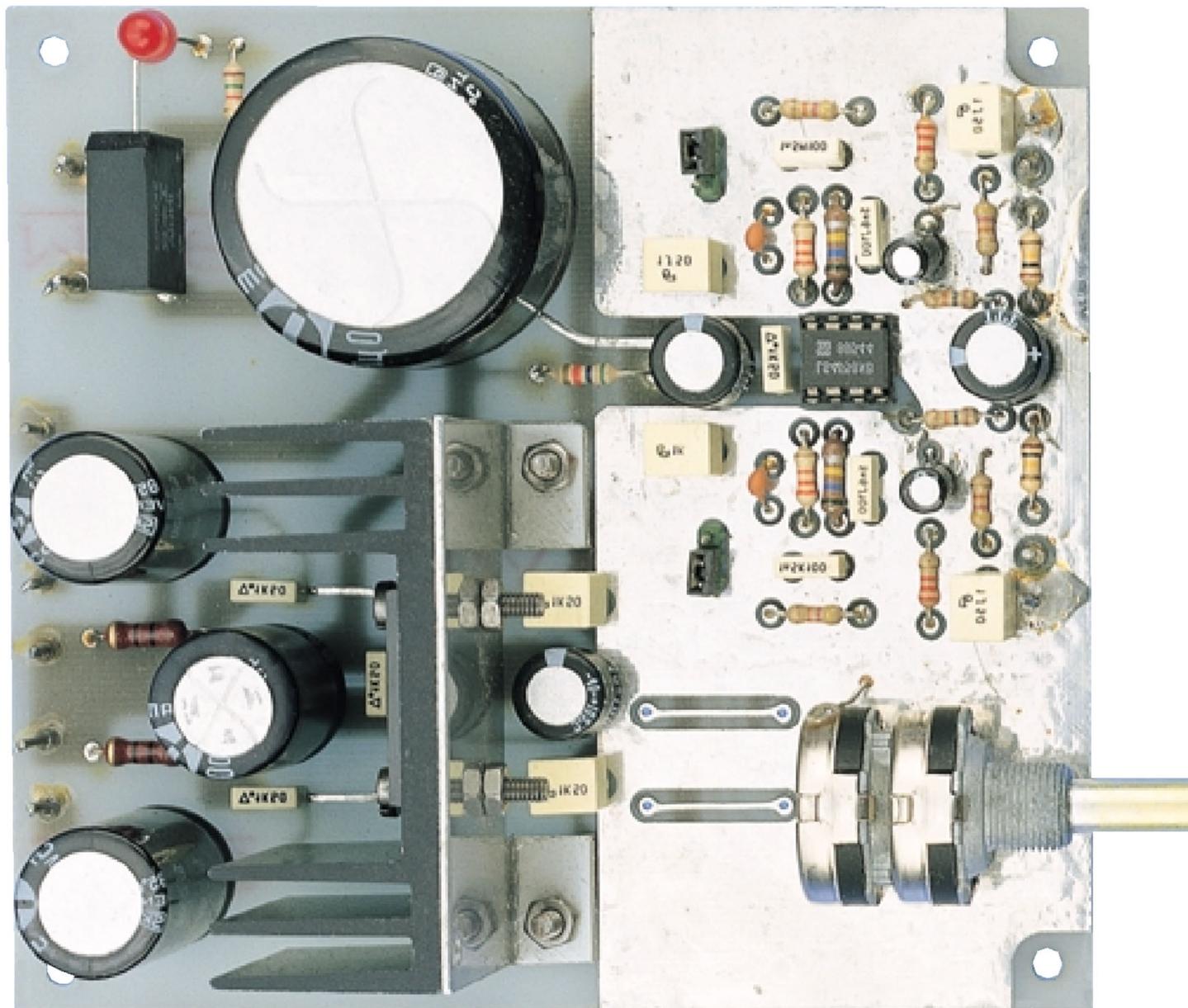


In questo caso la alterazione della resistenza equivalente è estremamente ridotta e, in valore percentuale, essa è prossima allo  $-0.2 \cdot 10^{-8} \%$ . I morsetti grandi sono amperometrici quelli più piccoli voltmetrici

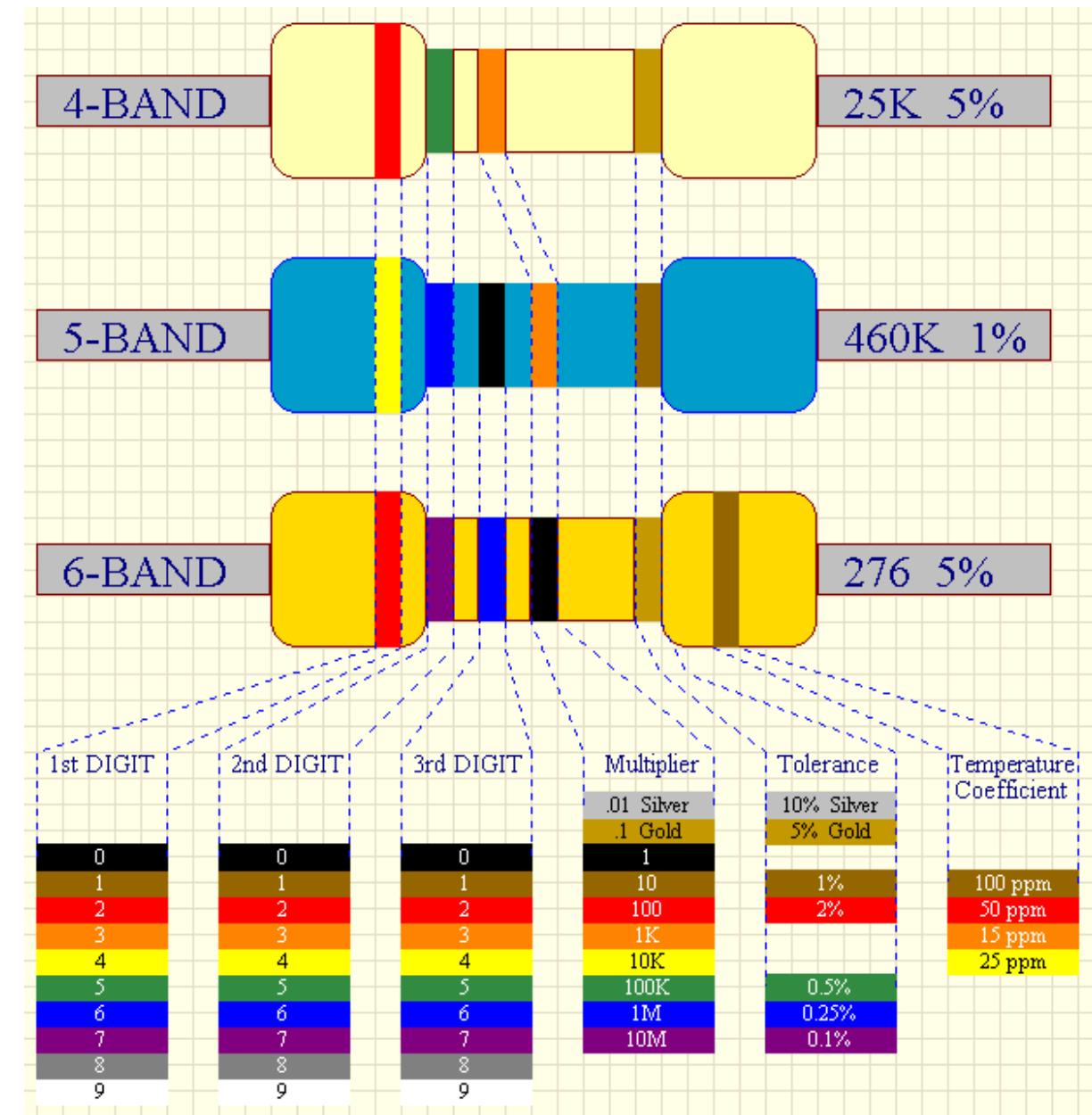
# Classificazione Resistenze

- Resistori di piccolo valore (usualmente  $R < 1 \Omega$ ): a quattro morsetti - resistenze di contatto NON trascurabili ai fini dell'accuratezza;
- Resistori di grande valore (usualmente  $R > 1M\Omega$ ): a tre morsetti - resistenze di dispersione NON trascurabili ai fini dell'accuratezza;
- Resistori di ordine medio (usualmente  $1 \Omega < R < 1 M\Omega$ ): a due morsetti - resistenze di contatto e di dispersione trascurabili ai fini dell'accuratezza;
- A cinque morsetti - resistenze di contatto e di dispersione NON trascurabili ai fini dell'accuratezza

# Componenti non di misura



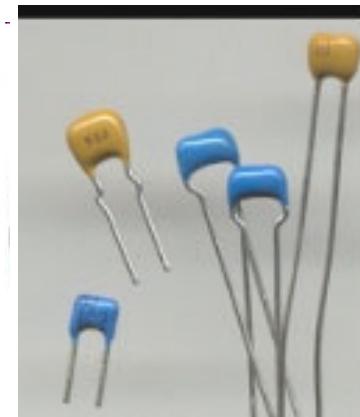
# Resistenze non di misura



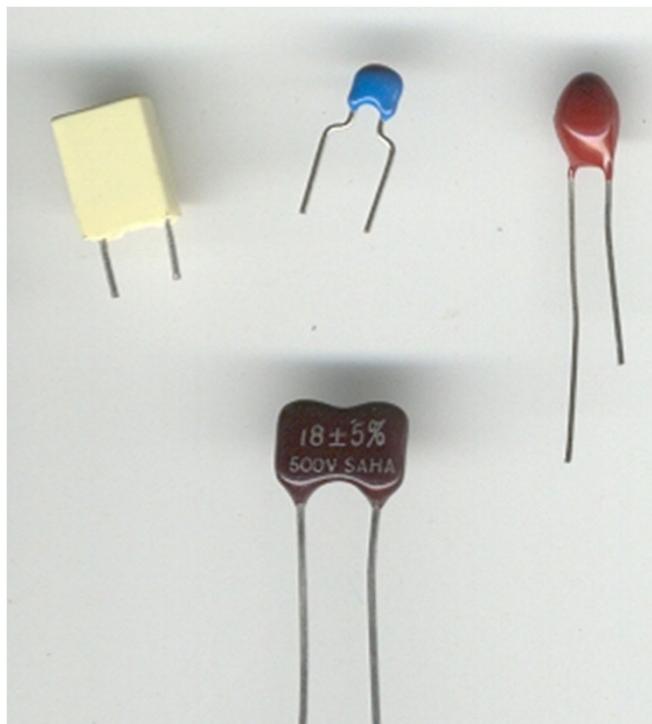
# Condensatori non di misura



Elettrolitici



Condensatori elettrolitici

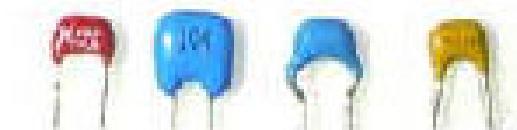
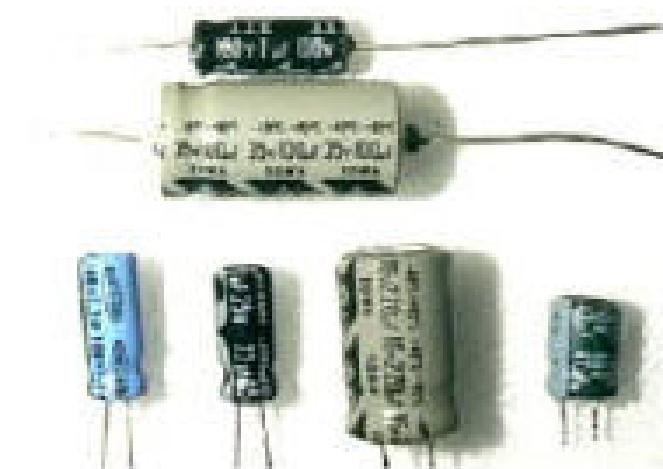


Ceramici

Condensatori elettrolitici al tantalio

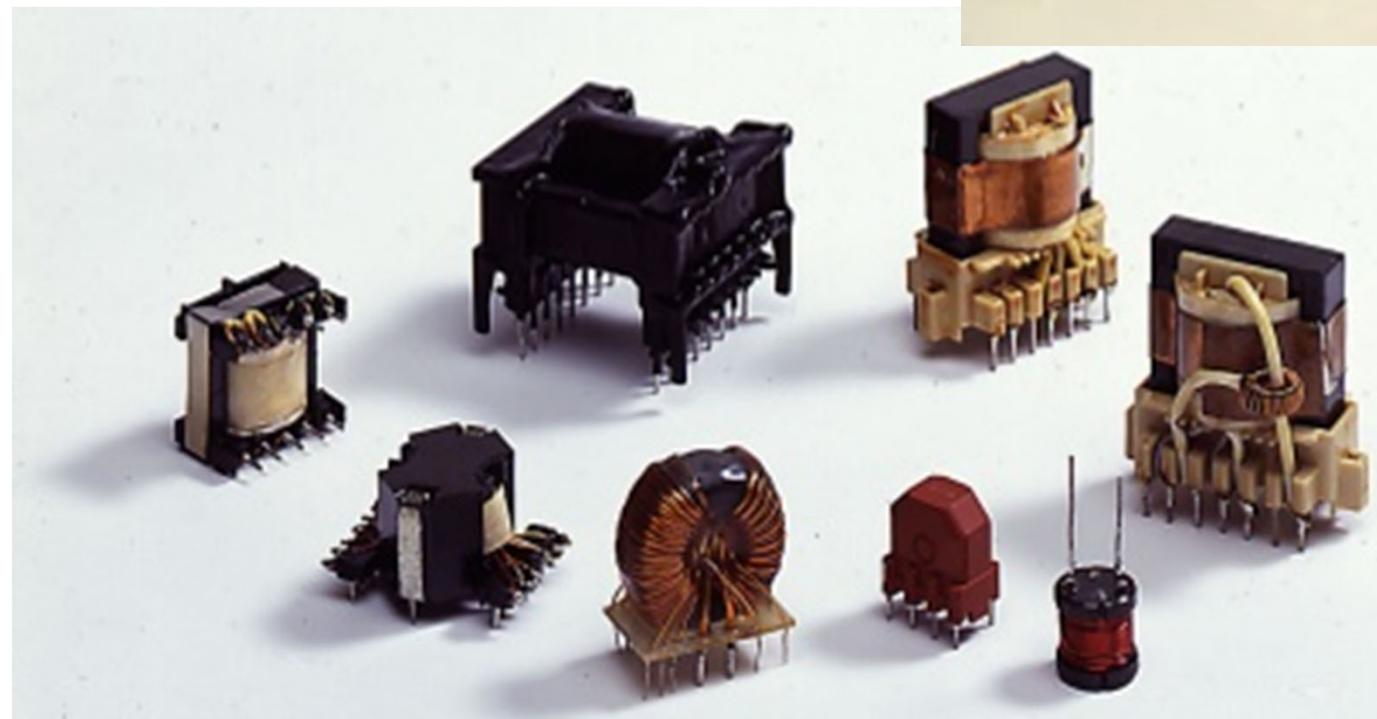
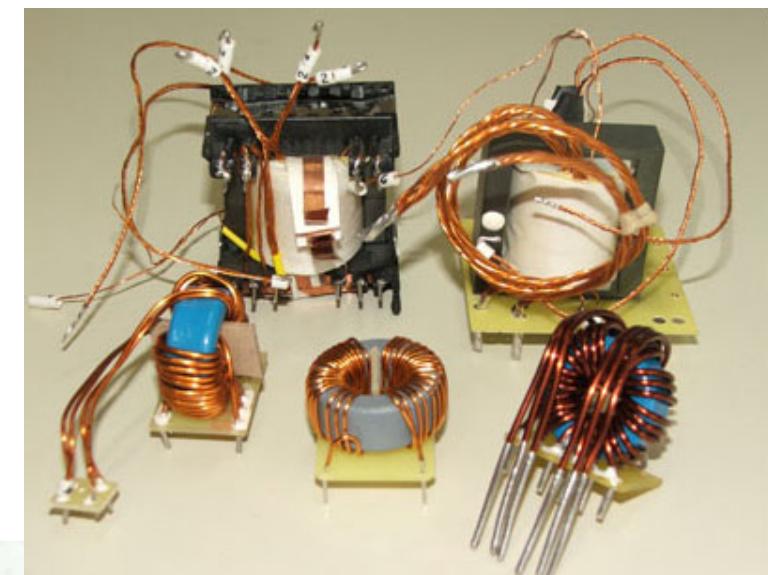
Condensatori ceramici

Condensatori poliestere

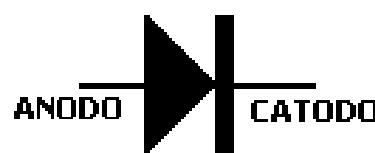
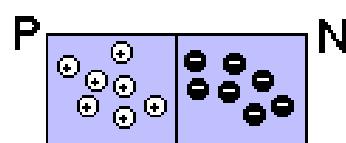
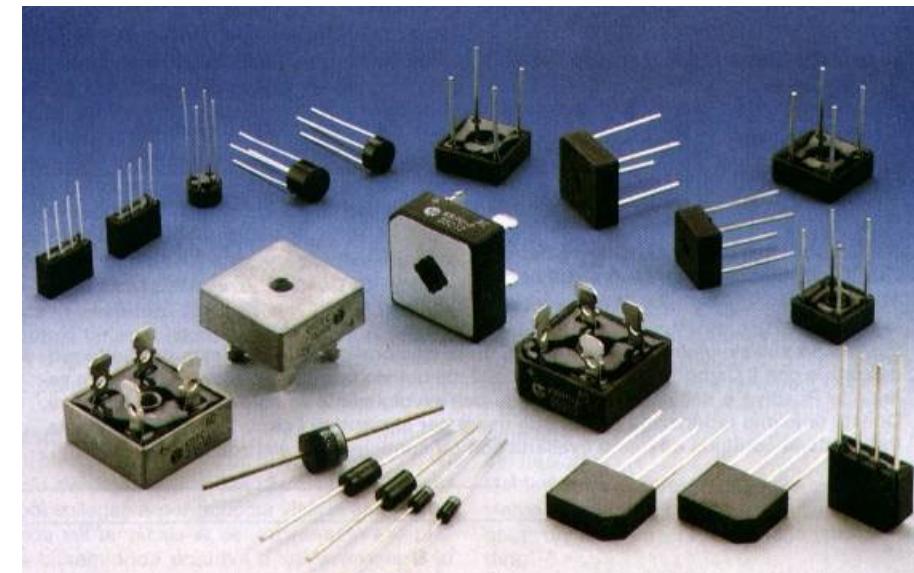


Tantalio, mica  
argententata, MKT

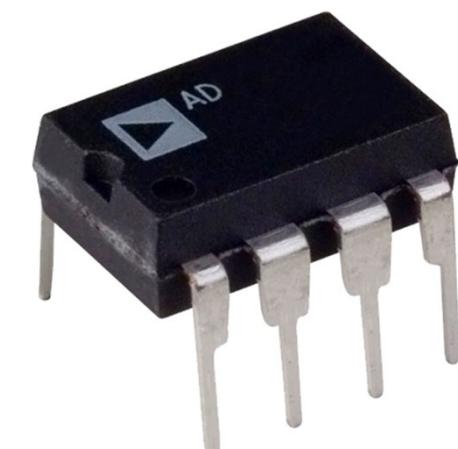
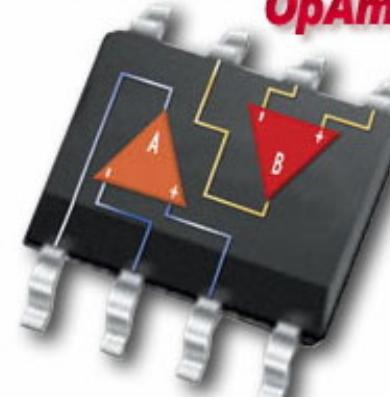
# Induttori non di misura



# Componenti elettronica discreta



 **MICROCHIP**  
*OpAmps*



# Componenti SMD

