

# METROLOGIA E SISTEMA INTERNAZIONALE



# METROLOGIA (1/3)

MISURARE significa CONOSCERE

Da sempre l'uomo effettua misure per conoscere il mondo che ci circonda e le proprietà degli oggetti/ fenomeni di interesse

MISURA (da VIM)

- (i) procedimento di misurazione porta all'assegnazione di un valore a una grandezza fisica detta misurando
- (ii) risultato della misurazione oggi è convenientemente espresso da un valore numerico, un' unità di misura, e l' incertezza associata alla misura, ...

# METROLOGIA (2/3)

Misure di grandezze fisiche/ quantitative:

**Grandezza** (misurabile) è un attributo di un fenomeno o di una sostanza **distinguibile qualitativamente e determinabile quantitativamente**

e.g. altezza di un edificio, massa di un TIR, frequenza di un segnale, velocità di un fluido  
NO: bellezza, simpatia, felicità, gusto di un cibo

**Misurando** è la **grandezza sotto misura** (con tutte le specifiche/ condizioni del problema)

**Grandezze omogenee** sono della **stessa natura** e quindi direttamente confrontabili tra loro (si esprimono con la **stessa unità di misura**)

# METROLOGIA (3/3)

**MISURA è il confronto tra due grandezze omogenee** (di cui solitamente una è presa come **riferimento o campione di misura**)

**Valore è il numero che esprime il rapporto con il riferimento** (il valore numerico viene poi indicato con la corrispondente "**unità di misura**")

**Riferimenti manufatti:**  
pollice, spanna, piede, braccio, barile, sacco, otre, tazza, peso campione, ...

**Riferimenti assoluti:**  
eventi astronomici (giorno/notte, ciclo lunare, anno solare),  $1 \text{ dm}^3 \text{ H}_2\text{O}$ , proprietà della materia

**COSTANTI**  
**DI NATURA**

# CENNI STORICI (1/3)

**Rivoluzione francese (1789): riferimenti di lunghezza e massa comuni per tutta la Repubblica e possibilmente per tutti gli uomini (pensiero illuminista)**

STESSI PESI E  
STESSE MISURE

Unità  
di misura  
devono  
essere  
ristrutturabili

## Riferimenti "universali"

cercati nella natura e ritenuti invarianti e disponibili per tutti: proprietà del pianeta Terra o dell'acqua distillata, ...

Campioni materiali per la disseminazione.

Introduzione del sistema (metrico) **decimale** per i multipli e sottomultipli delle unità

## 1875 firma della Convenzione del Metro

Metrologia e Sistema Internazionale

Si fa un peso politico  
alle leggi di misura

# CENNI STORICI (2/3)

**1870 J.C. Maxwell** (BAAS, London) suggerì di **cercare i nuovi "universali" nelle risonanze proprie del microcosmo** (atomi e molecole)

Sino agli inizi del '900 i nuovi campioni proposti non risultarono migliori dei precedenti manufatti in termini di qualità

1 dm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O;  
meridiano  
terrestre;

↳ non c'era ancora gli strumenti adatti

Nel 1927, dopo i lavori di Michelson, Benoît, Fabry e Pérot, si riconosceva che l'unità di lunghezza poteva essere realizzata anche attraverso l'uso di metodi interferometrici...

(conteggio di frange di interferenza di una luce con lunghezza d'onda ben determinata)

Michelson pubblicò nel 1879 la misura di  $c = (2.99910 \pm 0.00050) \times 10^8$  m/s

# CENNI STORICI (3/3)

è il primo campione atomico

1960 definizione del metro attraverso la radiazione della lampada al Krypton ( $^{86}\text{Kr}$ )

↳ migliore delle riproduzioni visibili

1967 definizione del secondo attraverso la frequenza di una transizione tra due livelli energetici dell'atomo di cesio ( $^{133}\text{Cs}$ )

↳ definizione fino ad adesso migliore

Conoscenza della Fisica, principi relativistici

ed effetti quantizzati macroscopici o di

natura quantistica consentono di

individuare alcune **costanti di natura** (e.g.

velocità della luce nel vuoto  $c$  oppure  $k_B$  o  $h$ )

o di utilizzare **fenomeni altamente ripetibili**

per realizzare nuovi campioni (e.g. effetto

Josephson in AC)

Metrologia e Sistema Internazionale

# ERRORI DI MISURA (1/6)

Ogni **misura** è affetta da diversi **contributi di errore** o meglio **cause di incertezza** (riducibili ma mai del tutto eliminabili)

⇒ **nessuna misura è esatta !!**

Cause di incertezza in una misura:

riferimenti (accuratezza e stabilità):

scostamento dalla definizione e variabilità nel tempo

dati di origine o risultati di altre misure

relazione tra misurando e sistema di misura:

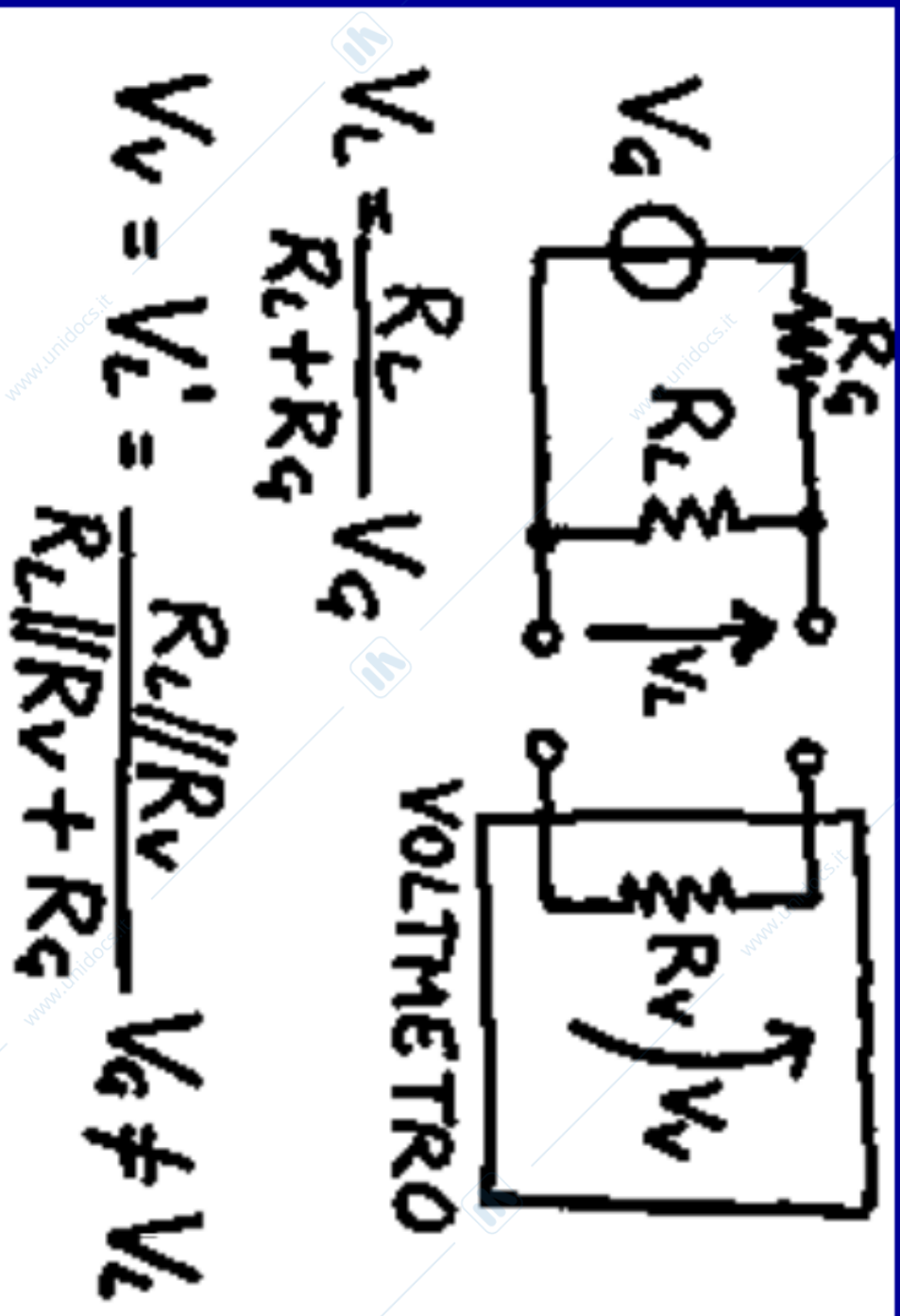
incertezze ed errori dello strumento

misure dirette (effetti di carico)

misure indirette (errori di modello)

# ERRORI DI MISURA (2/6)

**Effetto di carico (inserzione) di un voltmetro nella misura di tensione in un circuito elettrico**



# ERRORI DI MISURA (3/6)

**Errore di modello** nella relazione funzionale che descrive la misura indiretta della potenza elettrica sviluppata su un resistore

## MISURE INDIRETTE

**ERRORE DI MODELLO** (più raffinato e completo)

$$P = RI^2 = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] I^2$$

$$P^I = R_0 [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3 + \dots] I^2$$

$$P^{II} = R_0 \frac{P}{P_0} (p, \%) [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3 + \dots] I^2$$

# ERRORI DI MISURA (4/6)

parametri ambientali (grandezze d'influenza):  
temperatura, pressione, umidità, vibrazioni,  
campi e.m., etc.

interazione occhio-strumento:

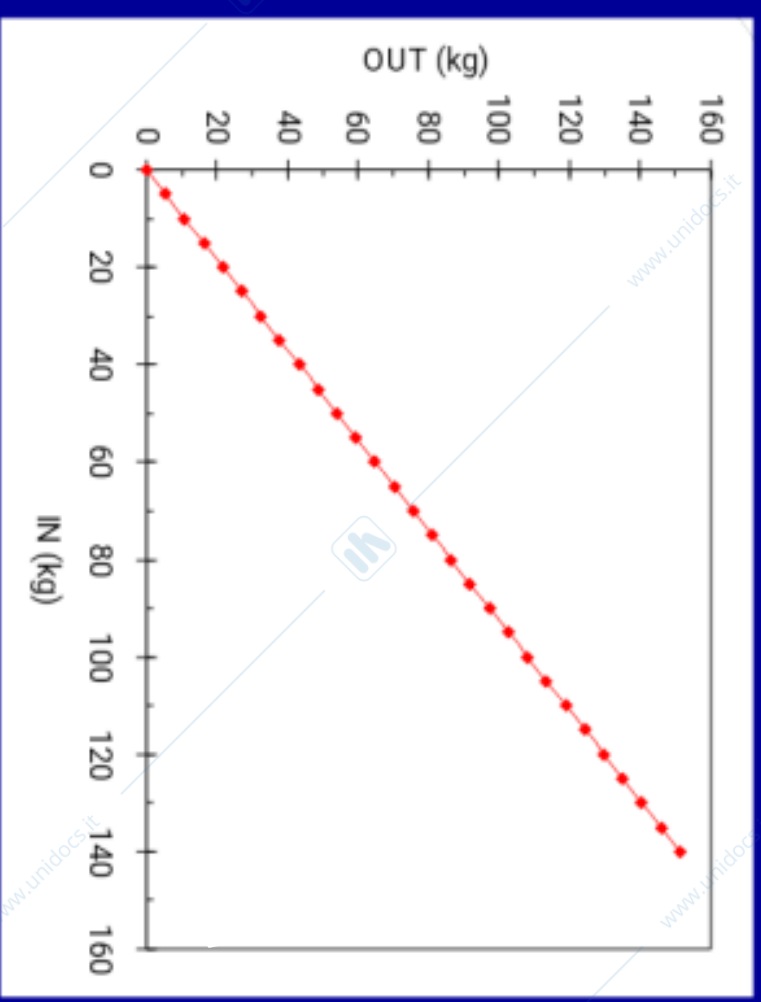
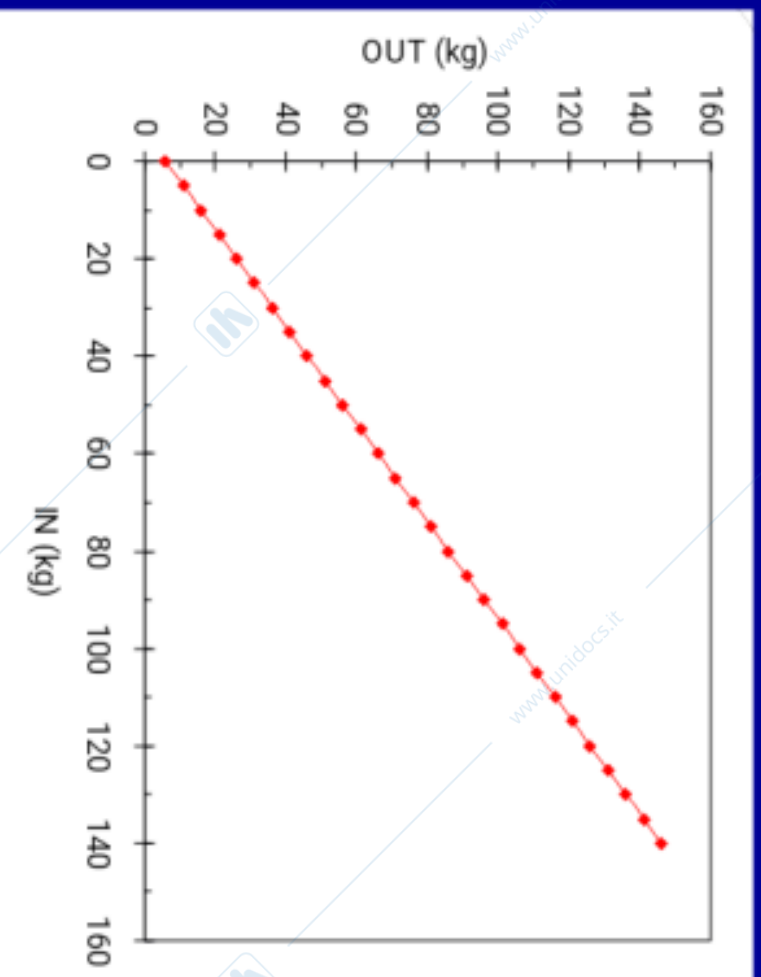
**parallasse, interpolazione, media**

'ERRORI" DI MISURA



# ERRORI DI MISURA (5/6)

**Zero (*offset*), guadagno/pendenza (*gain/slope*)**

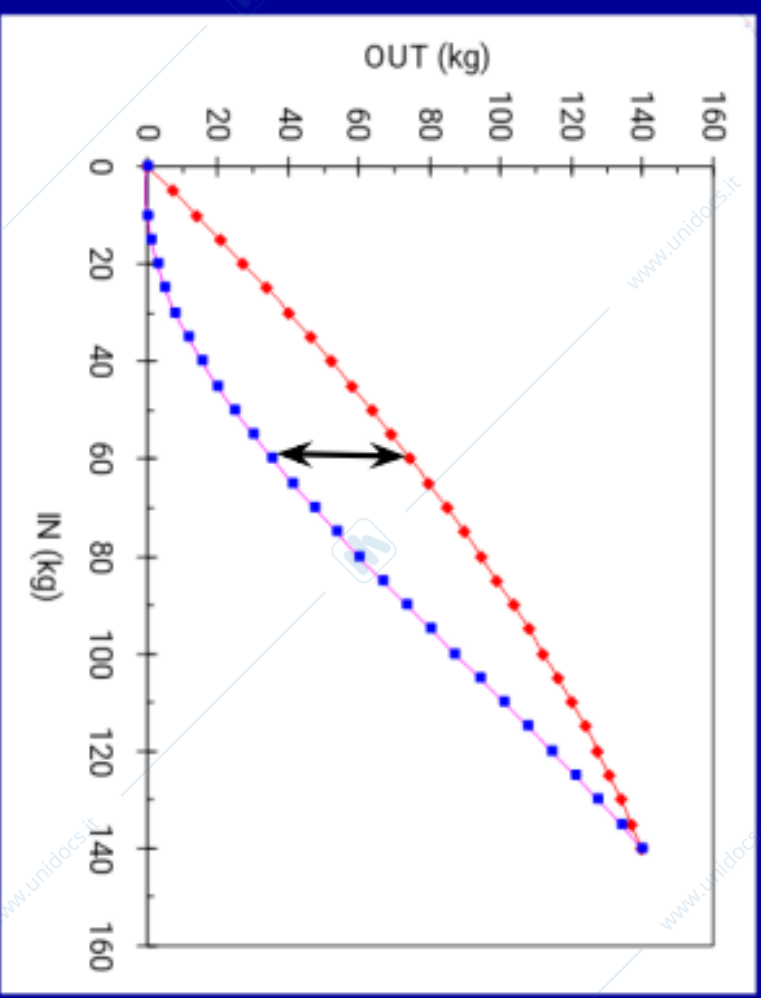
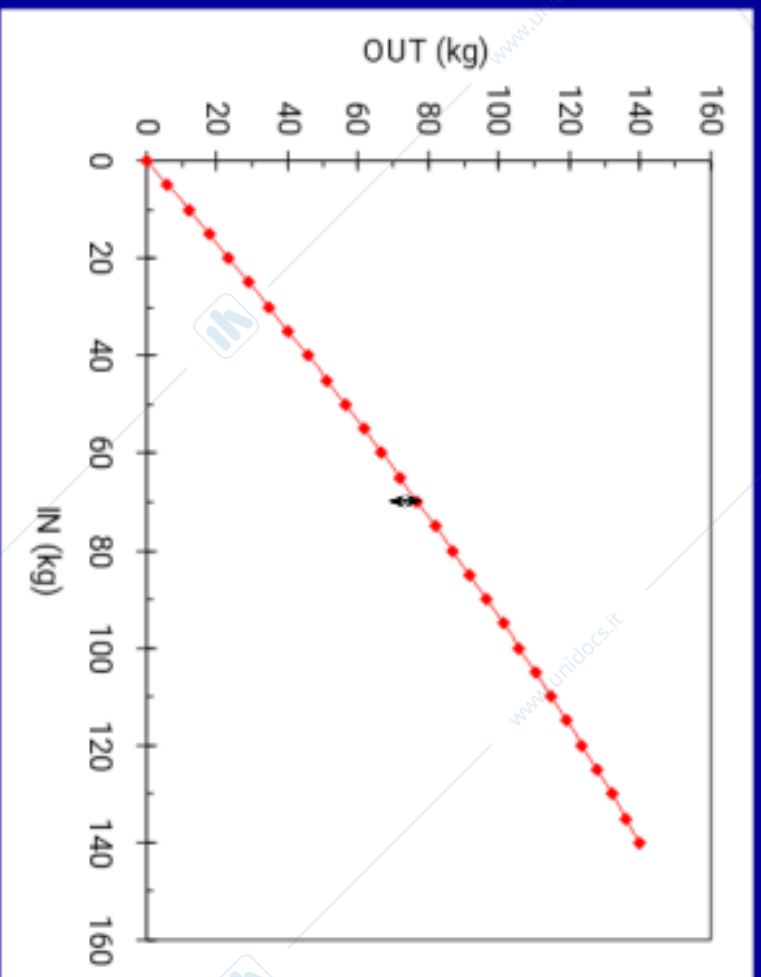


sono errori correggibili ("compensabili") agevolmente agendo sull'elettronica analogica di condizionamento

# ERRORI DI MISURA (6/6)

l'isteresi dipende dalla "storia" di quella misura

**non-linearità, isteresi**



max. distanza dalla  
retta per i punti  
estremi

max. apertura del  
ciclo di isteresi

# DEFINIZIONI METTROLOGICHE (1/4)

Riferimento internazionalmente riconosciuto:

VIM (Vocabolario Internazionale di Metrologia)

## Accuratezza

grado di concordanza tra un valore misurato e un valor vero di un misurando. (ossia quello giusto)

- CAMPIONE: scarto tra la grandezza realizzata con il campione e la definizione dell'unità
- MISURA: vicinanza del valore di misura alla miglior stima possibile per il misurando
- STRUMENTO: stima dell'incertezza dello strumento o confronto con uno migliore

## Incertezza

Stima quantitativa, con metodi convenzionali, del livello di non conoscenza del misurando

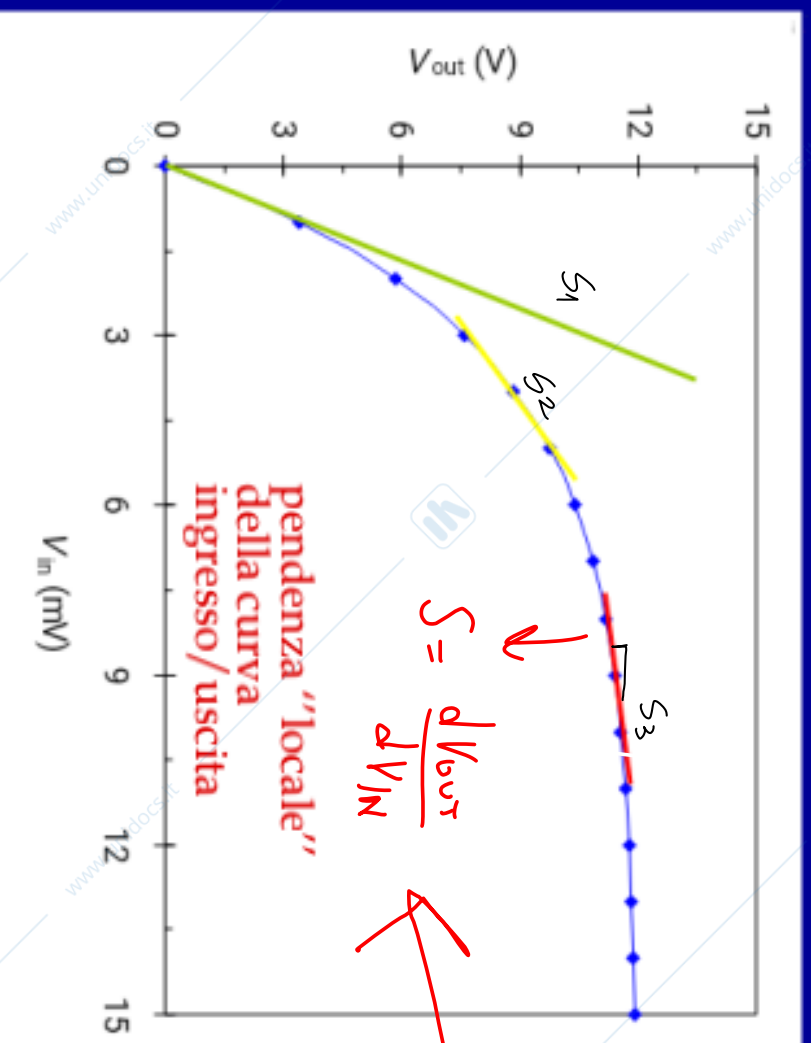
mi miglior  
stima possibile  
di quella misura

# DEFINIZIONI METROLOGICHE (2/4)

## Sensibilità

rapporto tra la **variazione** della grandezza (segnale) di uscita e la corrispondente variazione della grandezza (segnale) d'ingresso

senso, strumento, dispositivo, misura...



# DEFINIZIONI METROLOGICHE (3/4)

**Risoluzione** → *delta q<sub>liv</sub> / Precisione*

capacità di uno strumento/misura di risolvere stati (livelli) diversi del misurando

[□variazioni]

## **Ripetibilità**

capacità di ottenere, per uno stesso misurando, valori di lettura vicini tra loro nel breve periodo "nelle stesse condizioni" (stesso procedimento di misura, operatore, strumenti, luogo, e condizioni amb.)

## **Stabilità**

capacità di ottenere, per uno stesso misurando, valori di lettura vicini tra loro in un intervallo di tempo ben definito e chiaramente specificato (stesso proc. misura, operatore, strum, luogo, e condiz. amb.)

# DEFINIZIONI METROLOGICHE (4/4)

**Riproducibilità**  $\neq$  la ripetibilità

capacità di ottenere, per uno stesso misurando, risultati vicini tra loro "in diverse e specificate condizioni di misura" (il tempo non conta)

↳ IMPORTANTE per i CAMPIONI di misura

**Riferibilità**

proprietà di una misura di essere messa in relazione ("riferita") con quella fornita da un campione riconosciuto

*sono "solo" 8 definizioni ma è importante averle comprese bene e ricordarne i significati (anche con esempi e controesempi)*

# ORGANISMI INTERNAZIONALI

## PER LA METROLOGIA

→ altro un  
Peso legale

**CGPM** *Conférence Générale des Poids et Mesures*  
conferenza a livello diplomatico tra gli Stati  
(17 → 59) membri della Convenzione del Metro

**BIPM** *Bureau International des Poids et Mesures*  
ESECUATIVO responsabile della unificazione  
delle misure di grandezze fisiche (Parigi)

**CIPM** *Comité International des Poids et Mesures*  
TECNICO-SCIENITIFICO con compiti di  
supervisione sul BIPM; è organizzato in  
*Comités Consultatifs* specifici (CCEM, CCTF,  
CCT, CCL, ...) per le diverse grandezze

**OIML** *Organisation Internationale pour la Métrologie Légale*  
questioni di metrologia legale (controversie int.)

# ORGANISMI INTERNAZIONALI PER LA METROLOGIA

**CGPM** *Conférence Générale des Poids et Mesures*

conferenza  
(1786)

**BIPM**

ESSECT  
delle n

**CIPM**

TECNI

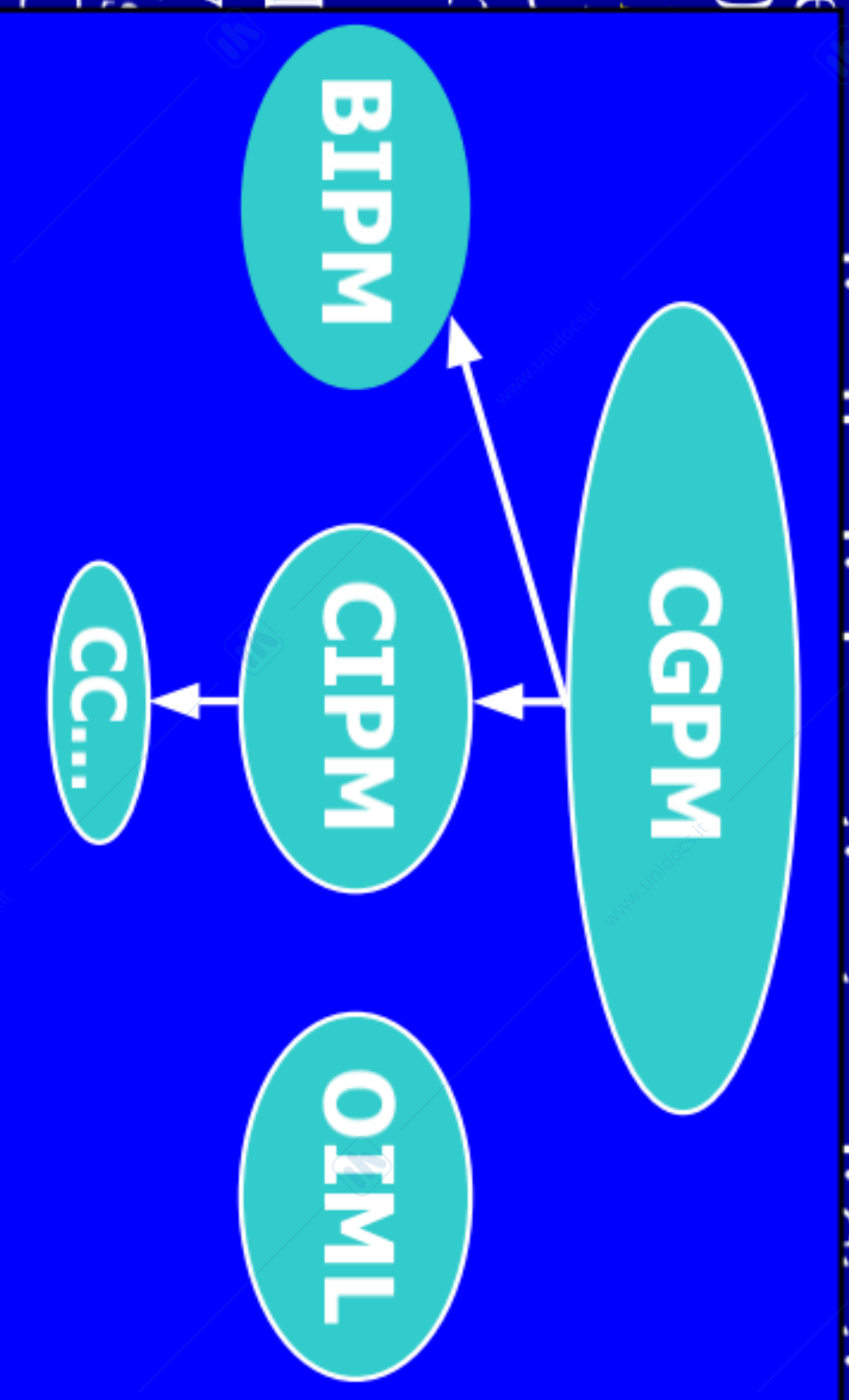
superv

Comité

CCT, C

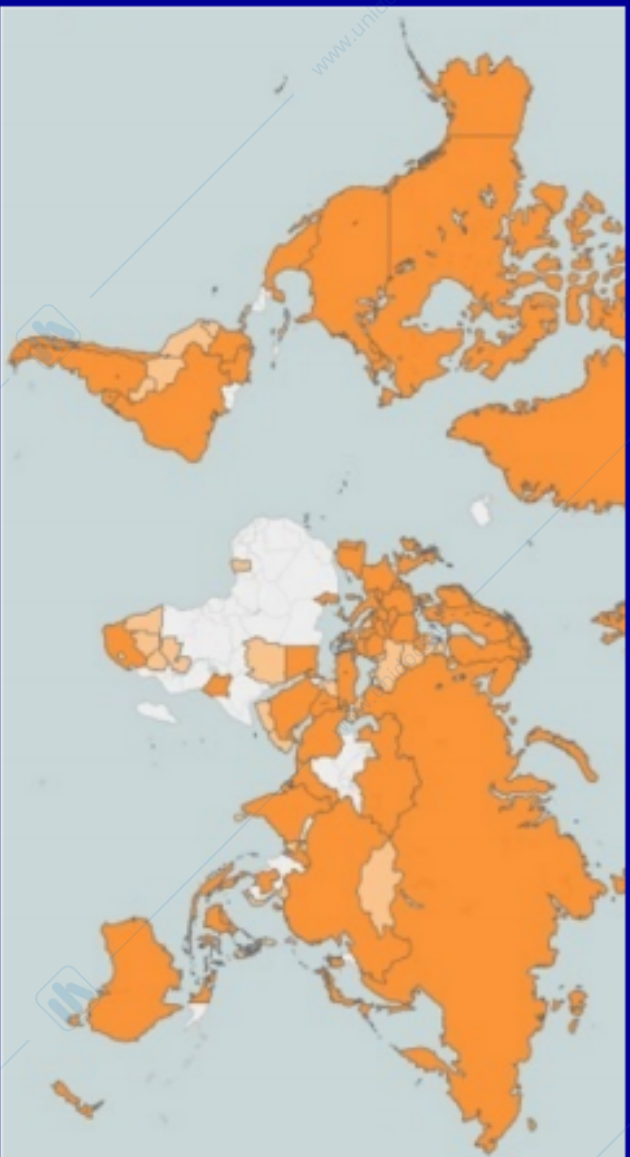
**OIML**

*Organisation Internationale pour la Métrologie Légale*  
questioni di metrologia legale (controversie int.)



# ORGANISMI INTERNAZIONALI PER LA METROLOGIA

## Stati membri CGPM



## Comitati BIPM

Metrology area:
↘ Acoustics, Ultrasound and Vibration
↘ Chemistry and Biology
↘ Electricity and Magnetism
↘ Ionizing Radiation
↘ Length
↘ Mass and related quantities
↘ Photometry and Radiometry
↘ Thermometry
↘ Time and Frequency
↘ Units

In the "New SI" **four** of the **SI base units** – namely the **kilogram**, the **ampere**, the **kelvin** and the **mole** – will be **redefined in terms of constants**; the new definitions will be based on fixed numerical values of the Planck constant ( $h$ ), the elementary charge ( $e$ ), the Boltzmann constant ( $k_B$ ), and the Avogadro constant ( $N_A$ ).

# \*STATI MEMBRI DELLA CGPM E ANNO DI ADESIONE

 Argentina (1877)	 France (1875)	 Malaysia (2001)	 Slovenia (2016)
 Australia (1947)	 Germany (1875)	 Mexico (1890)	 South Africa (1964)
 Austria (1875) <sup>[n1 1]</sup>	 Greece (2001)	 Montenegro (2018)	 South Korea (1959)
 Belgium (1875)	 Hungary (1925)	 Netherlands (1929)	 Spain (1875)
 Brazil (1921)	 India (1957)	 New Zealand (1991)	 Sweden (1875) <sup>[n1 3]</sup>
 Bulgaria (1911)	 Indonesia (1960)	 Norway (1875) <sup>[n1 3]</sup>	 Switzerland (1875)
 Canada (1907)	 Iran (1975)	 Pakistan (1973)	 Thailand (1912)
 Chile (1908)	 Iraq (2013)	 Poland (1925)	 Tunisia (2012)
 China (1977)	 Ireland (1925)	 Portugal (1876)	 Turkey (1875) <sup>[n1 5]</sup>
 Colombia (2012)	 Israel (1985)	 Romania (1884)	 Ukraine (2018)
 Croatia (2008)	 Italy (1875)	 Russia (1875) <sup>[n1 4]</sup>	 United Arab Emirates (2015)
 Czech Republic (1922) <sup>[n1 2]</sup>	 Japan (1885)	 Saudi Arabia (2011)	 United Kingdom (1884)
 Denmark (1875)	 Kazakhstan (2008)	 Serbia (2001)	 United States (1878)
 Egypt (1962)	 Kenya (2010)	 Singapore (1994)	 Uruguay (1908)
 Finland (1923)	 Lithuania (2015)	 Slovakia (1922) <sup>[n1 2]</sup>	 Venezuela (1879) - -

## Notes [ edit ]

- <sup>1</sup> <sup>^</sup> Joined originally as Austria-Hungary
- <sup>2</sup> <sup>^</sup> <sup>a</sup> <sup>b</sup> Joined originally as part of Czechoslovakia
- <sup>3</sup> <sup>^</sup> <sup>a</sup> <sup>b</sup> Joined originally as part of Sweden and Norway
- <sup>4</sup> <sup>^</sup> <sup>^</sup> Joined originally as the Russian Empire
- <sup>5</sup> <sup>^</sup> <sup>^</sup> Joined originally as the Ottoman Empire

Da 17 stati membri 1<sup>a</sup> CGPM (May 1875),  
dei 20 presenti alla Convenzione del Metro,  
fino a 59 stati membri 26<sup>a</sup> CGPM (Nov. 2018)

Metrologia e Sistema Internazionale

21/82

# ORGANISMI NAZIONALI

PER LA METROLOGIA → *hoh ji*

Istituti Metrologici Nazionali "NMI" *Chiede*  
(nei paesi tecnologicamente più avanzati) *All'e same*  
*e.g. NIST, BIPM, NPL, PTB, NRLM, DFM, ...*

INRIM Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica →

**IEN** Istituto Elettrotecnico Nazionale (Galileo Ferraris)  
unità elettriche, fotometriche, tempo-frequenza  
**IMGC** Istituto Metrologico Gustavo Colonnetti  
unità di massa, lunghezza, temperatura, forza

**INMRI** Istituto Nazionale di Metrologia delle  
Radiazioni Ionizzanti - inquadrato nell'**ENEA**  
radiazioni nucleari / ionizzanti e radioisotopi

**SIT Servizio Italiano per la Taratura**

Metrologia e Sistema Internazionale

22/82

# RIUNIONI CGPM E UNITA' SI

1. (1889) - Viene definito il **chilogrammo** come massa dell'International prototype kilogram (IPK) fatto della lega platino-iridio e conservato presso il Bureau international des poids et mesures di Sèvres. Viene ratificato l'**International prototype metre**.
2. (1897)
3. (1901) - Ridefinito il litro come il volume di 1 kg di acqua. Si chiarisce che i **chilogrammi sono unità di massa**, è definito il "peso standard", è definita la **accelerazione di gravità standard** approvando l'uso del grammo forza e rendendoli ben definiti.
4. (1907) - Adottato il **carat**, pari a 200 mg.
5. (1913) - Proposta la **International Temperature Scale**.
6. (1921) - Revisionata la **Metre Convention**.
7. (1927) - Creato il **Consultative Committee for Electricity (CCE)**.
8. (1933) - Identificata la necessità di una **unità elettrica assoluta**.
9. (1948) - Definiti **ampere, coulomb, farad, henry, joule, newton, ohm, volt, watt e weber**. Per il litro si adotta la l minuscola.
10. (1954) - Definiti **kelvin e atmosfera standard**. Si avvia l'**International System of Units** (metro, chilogrammo, secondo, ampere, kelvin, candela).
11. (1960) - Ridefinito il metro in termini di lunghezze d'onda della luce. Adottati Hertz, lumen, lux, tesla. Per il nuovo sistema metrico viene adottato il simbolo ufficiale **SI** per **Système International d'Unités**, chiamato anche "modernized metric system". Confermati i prefissi pico-, nano-, micro-, mega-, giga- e tera-.
12. (1964) - Ristabilita l'originale definizione di litro = 1 dm<sup>3</sup> introdotti i prefissi atto- e femto-.
13. (1967) - Il secondo ridefinito come durata di 9.192.631.770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio-133 alla temperatura di 0 K. Il **Grado Kelvin** ribattezzato **kelvin**. Ridefinita la **Candela**.
14. (1971) - Definita la **mole** come nuova unità SI di base. Approvati **Pascal** e **Siemens**.
15. (1975) - Prefissi peta- ed exa-. Unità radiologiche **gray** e **Becquerel**.
16. (1979) - Definiti **candela e sievert**. Sia I che L consentiti provvisoriamente come simboli per litro.
17. (1983) - Ridefinito metro in termini di velocità della luce, in modo che mantenga la stessa lunghezza.
18. (1987) - Adottati valori convenzionali per la **costante di Josephson K<sub>J</sub>** e per la **costante di von Klitzing R<sub>K</sub>**, per aprire la strada a definizioni alternative di ampere e chilogrammo.
19. (1991) - Nuovi prefissi **yocto-, zepto-, zetta- e yotta-**.
20. (1995) - Le unità SI supplementari (**radiante e steradiano**) diventano **unità derivate**.
21. (1999) - Nuova unità SI derivata, il **katal** = mole per secondo, con la quale esprimere l'attività catalitica.
22. (2003) - Sia la virgola che il punto sono dichiarati accettati come simboli per la demarcazione decimale.

# SISTEMA INTERNAZIONALE (SI)

## DI UNITA' DI MISURA

con convenza generale di pesi e misure

Adottato nel 1960 dalla 11<sup>a</sup> CGPM si basa su

**7 unità fondamentali** e altre **unità derivate**

Il SI origina dal primordiale "Sistema MKS" del 1889

m, kg, s

(1<sup>a</sup> CGPM) poi MKSA (sistema Giorgi) nel 1948 (9<sup>a</sup> CGPM),  
e infine K e Cd (1954, 10<sup>a</sup> CGPM), mol (1971, 14<sup>a</sup> CGPM)

**metro (m)** lunghezza

**kilogrammo (kg)** massa

**secondo (s)** intervallo di tempo

**ampere (A)** corrente elettrica

**kelvin (K)** temperatura

**candela (cd)** intensità luminosa

**mole (mol)** quantità di sostanza

Unità derivate: Hz, Ω, F, H, T, C, J, W, N, Pa, ...

# PROPRIETA' DEL SI

Il SI è un **sistema coerente** in quanto tutte le sue unità derivate (e dunque qualsiasi grandezza  $G$ ) si ricavano come prodotti e rapporti delle 7 unità di base, senza introdurre fattori moltiplicativi (come  $\pi$ ,  $e$ ,  $4\pi/3$ )  $G = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\epsilon} J^{\eta} N^{\zeta}$  con esponenti interi

Le **unità di base** (o fondamentali) sono tra loro **dimensionalmente indipendenti** ma non logicamente indipendenti *e.g.* il "metro" dipende dal "secondo"

Nel Sistema Internazionale esiste una sola unità di misura SI per ciascuna grandezza fisica.

Questa è la corretta unità di misura SI (di base o derivata).

Un certo numero di prefissi decimali approvati, detti prefissi SI, è in uso per costruire multipli e sottomultipli decimali delle unità di misura SI

# REVISIONE SI NEL 2018-2019

Nel nuovo SI (dal 20/05/2019) le unità di base sono ridefinite in termini di costanti di natura alle quali viene assegnato un valore costante - rispettivamente  $\Delta V(^{133}\text{Cs})$ ,  $c$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $k$ ,  $N_A$ ,  $K_{cd}$  -

Nel Sistema Internazionale revisionato la differenza tra unità di base e unità derivate resta solo a livello formale, in quanto tutte le unità di misura sono ricavabili dalle 7 costanti di natura che definiscono il "nuovo SI"

Illustriamo prima le **definizioni del SI<sub>1970</sub> originale** per poi analizzare le **modifiche del nuovo SI<sub>2019</sub>**

# METRO (vecchio SI)

Il metro è la lunghezza del tragitto compiuto dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo pari a  $1/299\,792\,458$  secondi → *ha bisogno della def. del s.*  
 $c = 299\,792\,458$  m/s **velocità luce COSTANTE** *Se cono*

Tramite la definizione, il metro si può ottenere da una **misura del tempo di volo** di un impulso e.m. (dalla relazione  $L = c \cdot \Delta t$ ) ma questa misura è praticabile solo per cammini piuttosto lunghi

In laboratorio si preferisce **realizzare il metro** mediante **conteggio del numero di lunghezze d'onda** di un laser stabilizzato: quindi secondo la relazione  $L = n \cdot \lambda = n \cdot (c/v)$  con  $v$  frequenza nota

Si applica  $c = \lambda \cdot \nu$

alla


costante

$c$  (velocità

della luce)

Metrologia e Sistema Internazionale

# REALIZZAZIONE DEL METRO



$\lambda \sim 532 \text{ nm}$  (VERDE)  
 $\lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$  nel vuoto  
 $\Delta\lambda_0/\lambda_0$  incertezza  $\sim 10^{-12}$   
 $\Delta L/L \cong 10^{-6}$  (in aria correz.  $n_{\text{aria}}$  con  $T, p$ )

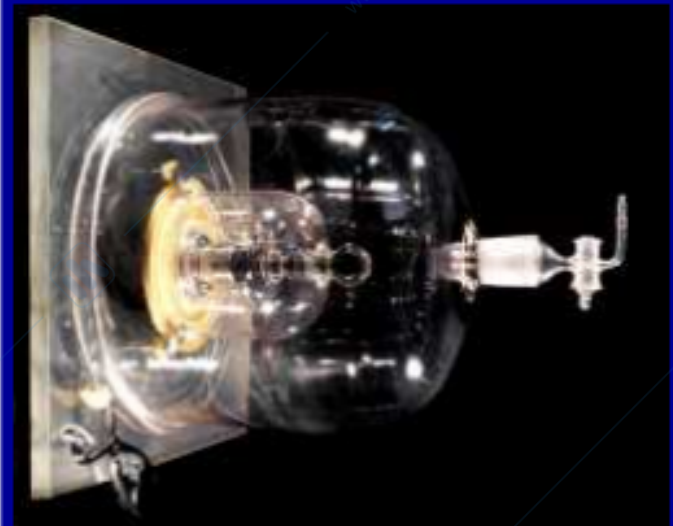
→ interferometri  
 per misurare  
 con fregio  
 di frange

Ad esempio, se si misurasse  $L = 10 \text{ km} = 10^4 \text{ m}$  con  $\Delta L/L \cong 10^{-6}$  si otterrebbe  $\Delta L \cong 10^{-2} \text{ m} = 1 \text{ cm}$

21/09

# KILOGRAMMO (vecchio SI)

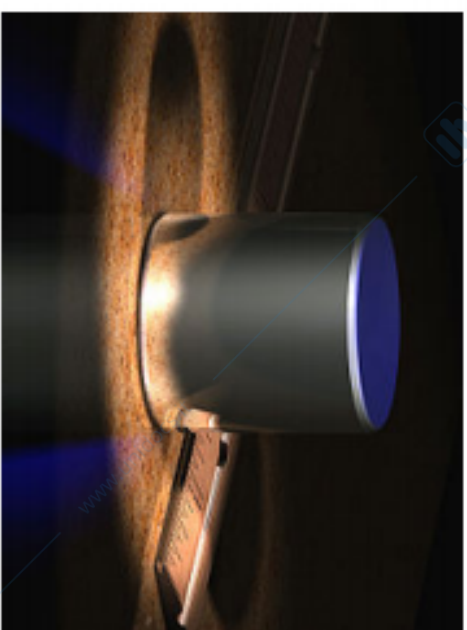
Il chilogrammo è la massa del prototipo internazionale "IPK" (chilogrammo campione) [del 1889]



Kilogrammo (kg)  
l'unica unità di base ancora definita tramite un MANUFATTO

il kg h.e.  
Vecchio SI  
era un campione

la nuova massa  
dipende dalla cost. di Planck



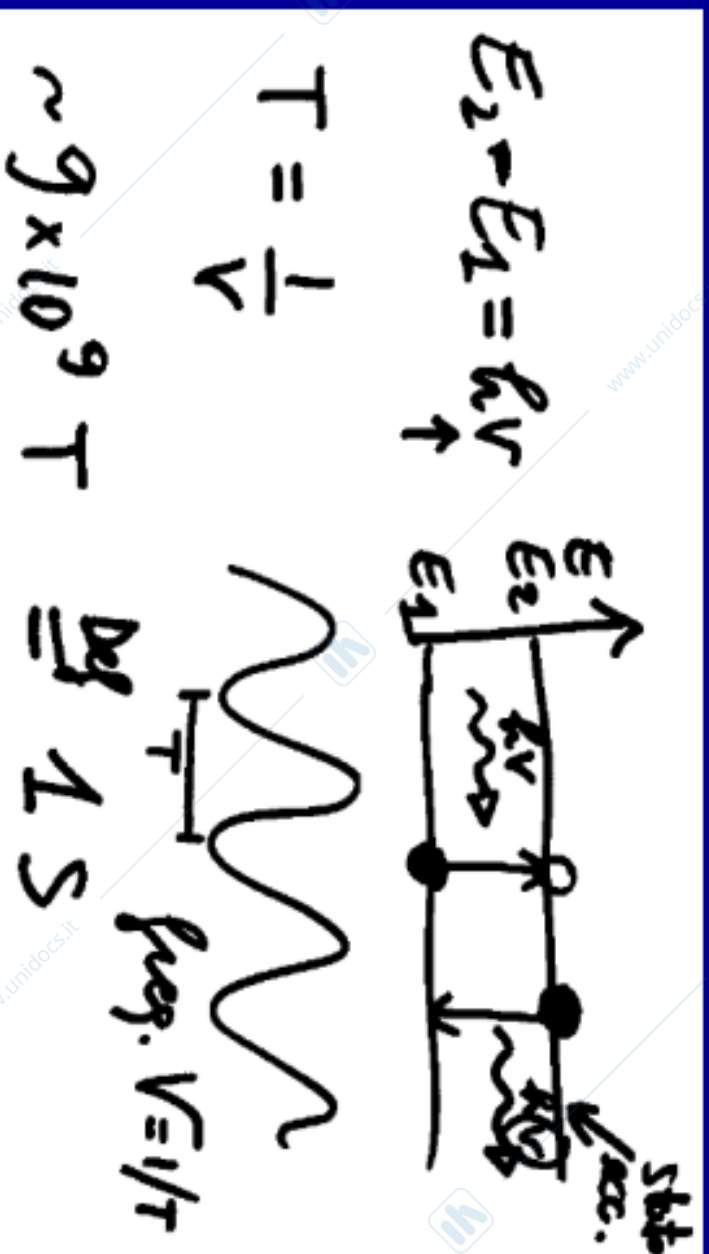
$\Delta = \text{incert.}$   
instabilità  
temperatura  
 $10^{-9}$ /anno

Il chilogrammo è la massa di uno specifico cilindro di platino-iridio (90% - 10%) di altezza e diametro uguali e pari a 0,039 m (~4 cm) depositato presso l'Ufficio internazionale dei pesi e delle misure a Sèvres, in Francia

# SECONDO (vecchio SI)

*→ dipende dalla frequenza del cesio*

Il secondo è l'intervallo di tempo che contiene 9192631770 periodi della radiazione emessa da un atomo di cesio ("imperturbato") che decade tra due livelli iperfini dello stato fondamentale



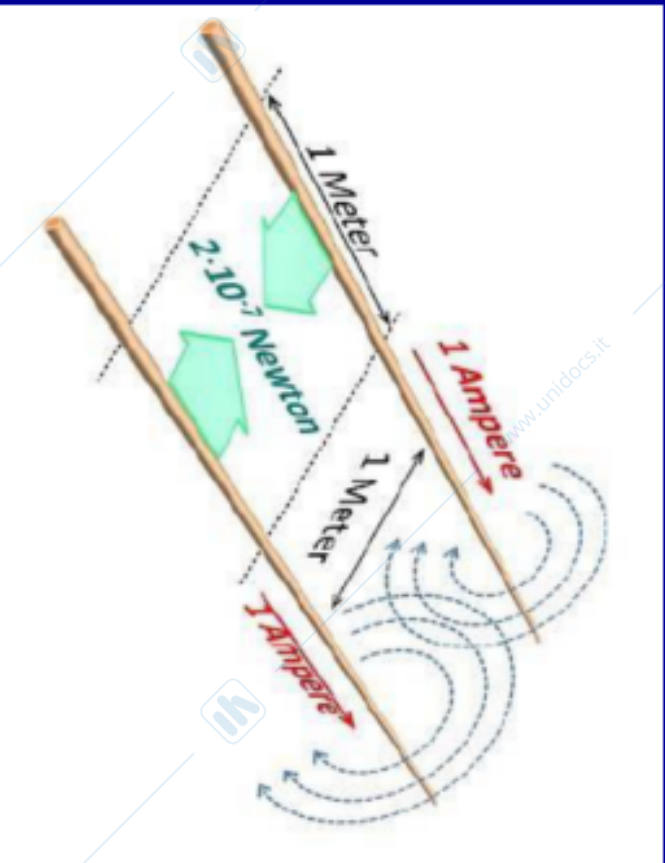
*fu la popolazione attraverso satelliti per la precisione dove sei*

## GPS

Unità meglio realizzata: incertezza  $10^{-16}$

# AMPERE (vecchio SI)

L'ampere è l'intensità di corrente elettrica  
"che attrae" due fili paralleli e distanti 1 m  
con una forza di  $2 \times 10^{-7} \text{ N/m}$ "  $\Rightarrow \mu_0$  nota INC=0



*in funzione della forza del campo magnetico che crea corrente nel filo*  
**Legge di Ampere**

*A livello elettrico*  
 $10^{-7}$  è molto limitante

Unità elettriche realizzate non meglio di  $10^{-7}$

# KELVIN, MOLE, E CANDDELA (vecchio SI)

↙ si dice "Kelvin" non "grado Kelvin"

Il kelvin (K) è la frazione 1/273.16 della temperatura del punto triplo dell'acqua

Si realizza con  $INC \approx 10^{-6}$  a temp. ambiente

La mole (mol) è la quantità di sostanza che contiene tante entità elementari quanti sono

gli atomi contenuti in 0.012 kg di  $^{12}C$  ← *carbodio*

Si realizza con  $INC \approx 8 \times 10^{-8}$  ( $N_A \approx 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ) ← *numero di Avogadro*

La candela (cd) è l'intensità luminosa, in una assegnata direzione, di una sorgente che → *luce che fa una candela*

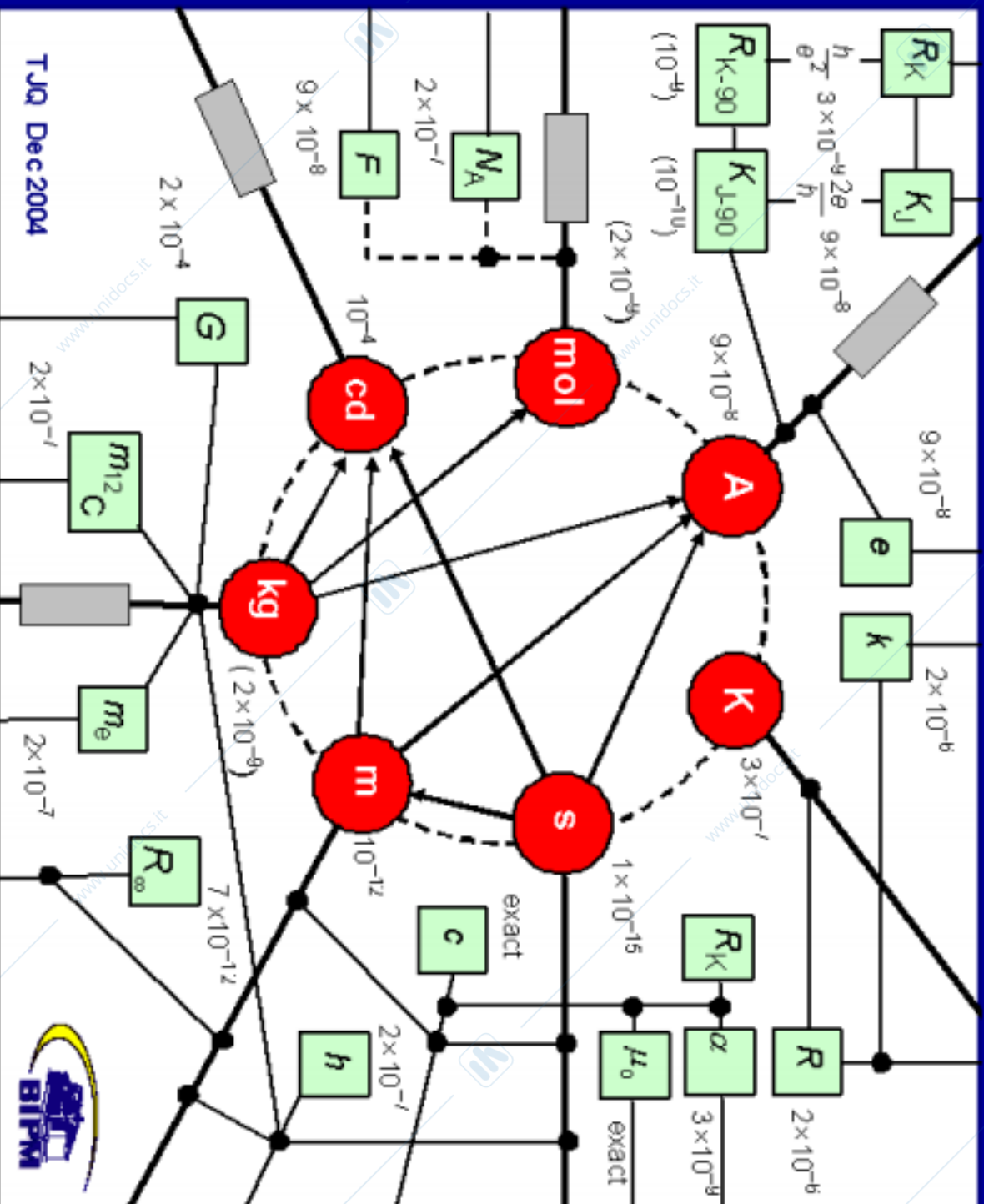
emette luce a  $540 \times 10^{12}$  Hz ( $\approx 555 \text{ nm verde}$ ) con ← *540 THz*

intensità energetica di  $1/683 \text{ Wsr}^{-1}$  ( $INC \approx 3 \times 10^{-3}$ )

# \*RELAZIONI TRA UNITA' SI DI BASE

## E COSTANTI FONDAMENTALI

relazioni  
tra unita'  
di misura  
e costanti



# EFFETTO JOSEPHSON (VOLT)

Definisco il volt attraverso una frequenza  
(effetto quantizzato)

non lo chiede

Mat. con resistività tendente a 0

Secondo la teoria dell'effetto Josephson, ai

capi di una giunzione di due superconduttori

debolmente accoppiati, cioè separati da un

sottile strato di materiale diverso (isolante,

conduttore, o semiconduttore),

opportunamente polarizzata con una corrente

continua e irradiata da un'onda

elettromagnetica di frequenza  $f$ , si generano

valori quantizzati di tensione media secondo

la relazione  $V = (h/2e)nf$  essendo  $n$  un intero,  $h$

la costante di Planck, ed  $e$  la carica

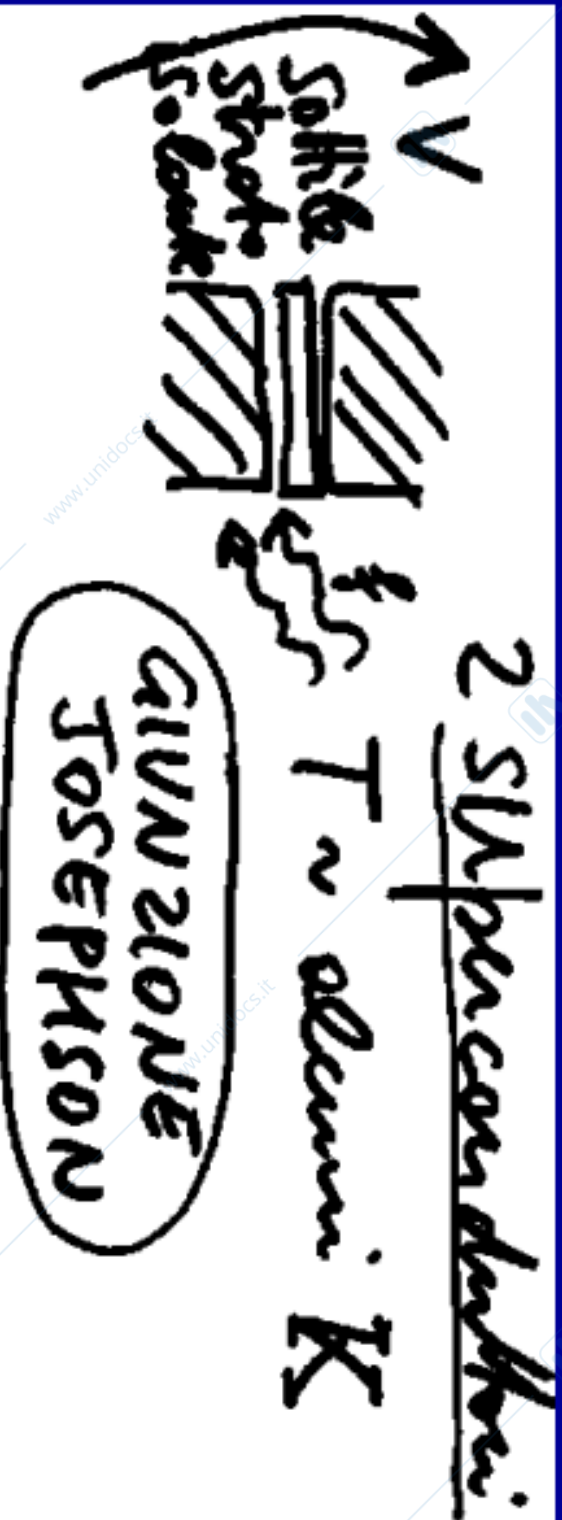
elementare  $V \sim 10^{-10}$  (1 nV su 10 V!!!)

\* effetto tunnel

videolezione Spieg. Semplif.

non lo chiede

# EFFETTO JOSEPHSON



$$V = \left( \frac{h}{2e} \right) \times n \times f$$

Cost.  $\downarrow$   $n$   $\uparrow$   $f$

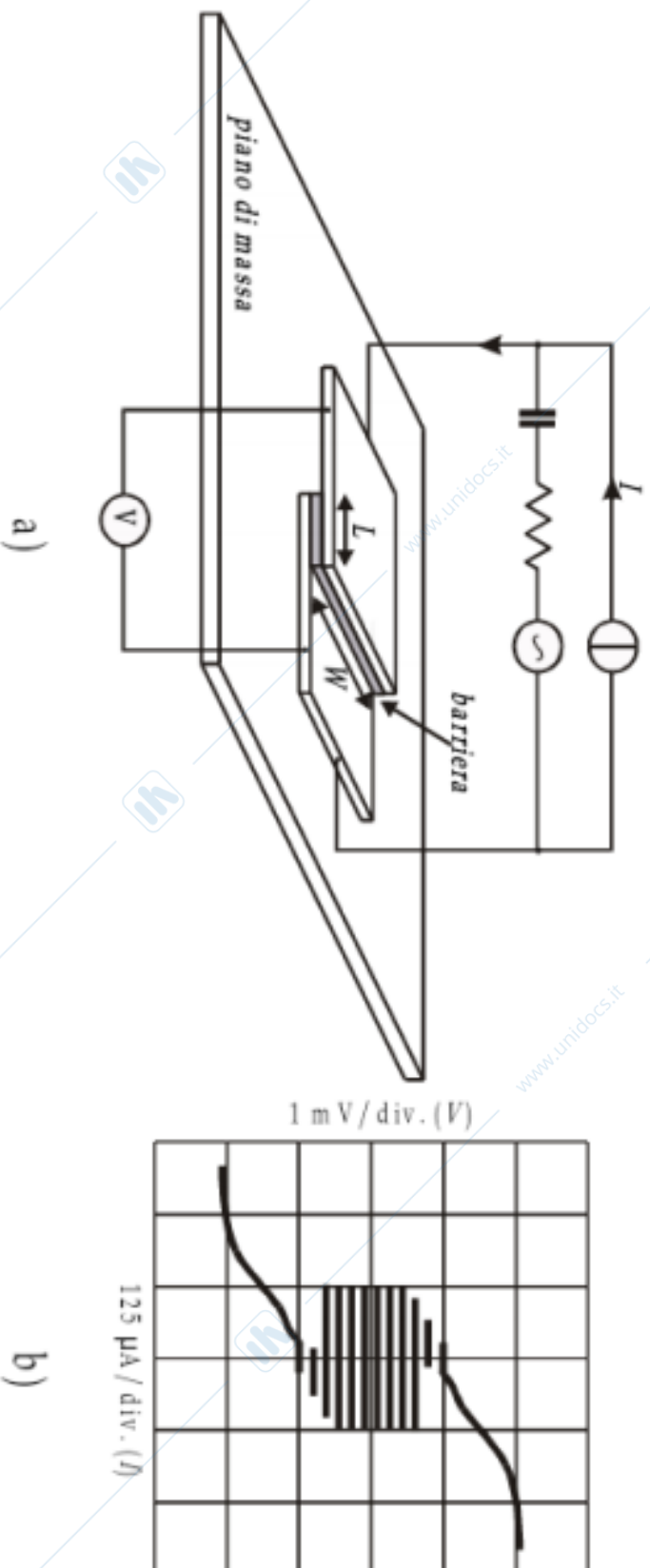
inter  $\downarrow$   $V$

PILA = SERIE di + GIUNZ. J  $\Rightarrow$  1V

$$K_J = (2e/h)_{1990} = 483.5979 \text{ THz/V} \quad \underline{\pm 4 \times 10^{-7}}$$

# ESPERIMENTO JOSEPHSON

$\Delta V_{typ} = 250 \mu V$  per  $f_{typ} = 70 GHz$



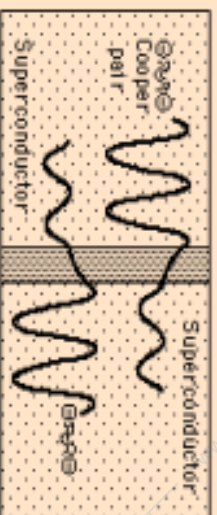
array di 40000 giunzioni (in serie)  
per realizzare la "pila Josephson" da 10 V

Fig. 1.8.1 LIBRO Fondamenti della Misurazione

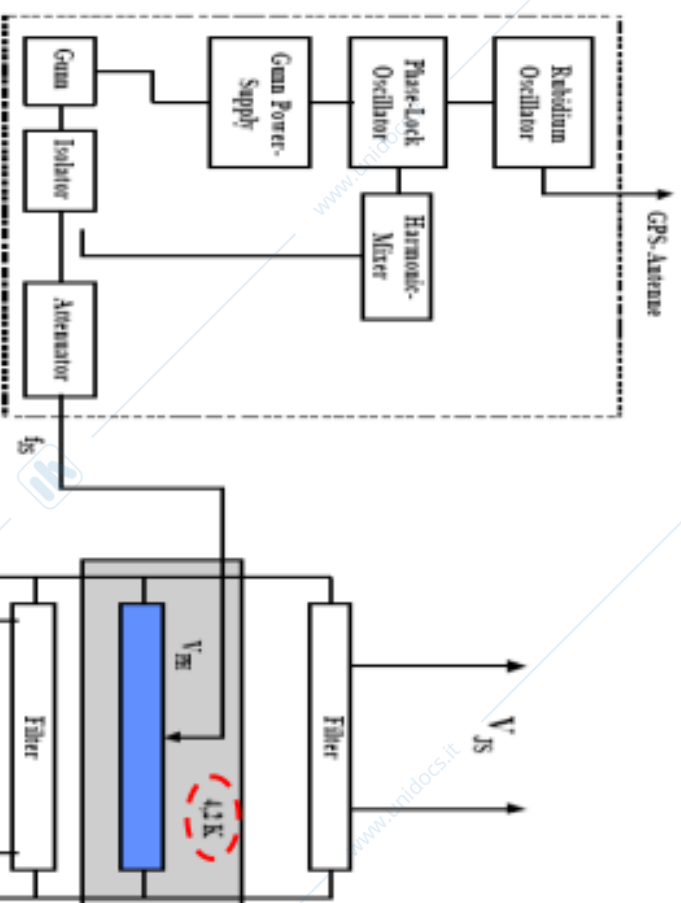
# GIUNZIONE E PILA JOSEPHSON

## Josephson Junction

Two superconductors separated by a thin insulating layer can experience tunneling of **Cooper pairs** of electrons through the junction. The Cooper pairs on each side of the junction can be represented by a wavefunction similar to a **free particle wavefunction**. In the DC Josephson effect, a current proportional to the phase difference of the wavefunctions can flow in the junction in the absence of a voltage. In the AC Josephson effect, a Josephson junction will oscillate with a characteristic frequency which is proportional to the voltage across the junction. Since frequencies can be measured with great accuracy, a Josephson junction device has become the **standard measure of voltage**.



The wavefunction which describes a Cooper pair of electrons in a superconductor is an exponential like the free particle wavefunction. In fact, all the Cooper pairs in a superconductor can be described by a single wavefunction in the absence of a current because all the pairs have the same phase - they are said to be "phase coherent" (Clarke). If two superconductors are separated by a thin insulating layer, then quantum mechanical tunneling can occur for the Cooper pairs without breaking up the pairs. Clarke envisions this condition as the wavefunctions for Cooper pairs on each side of the junction penetrating into the insulating region and "locking together" in phase. Under these conditions, a current will flow through the junction in the absence of an applied voltage (the DC Josephson effect).



Picture 1: 10V Josephson Voltage Standard

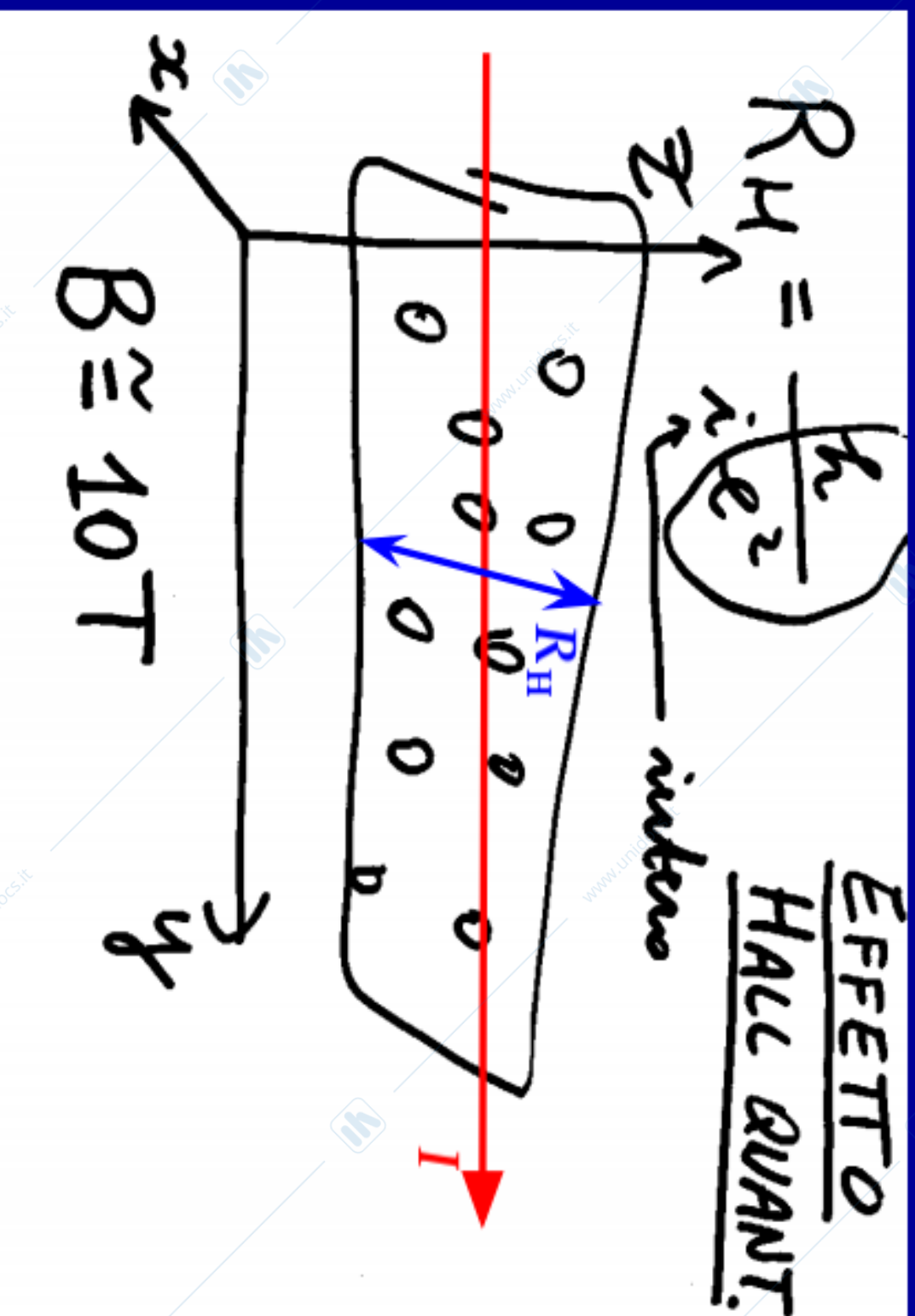
# EFFETTO HALL (OHM)

La resistenza dovuta all'effetto Hall in un gas elettronico bidimensionale, in presenza di elevati valori di induzione magnetica ( $B \approx 10$  T) e a basse temperature ( $T < 1$  K), assume valori discreti secondo la relazione  $R = h/(ie^2)$ . Essendo  $i$  un intero,  $h$  la costante di Planck, ed  $e$  la carica dell'elettrone

Si-MOSFET ed eterostrutture GaAs raffreddati all'He liquido

RIPRODUCIBILITA'  $\sim 10^{-9}$

# EFFETTO HALL QUANTIZZATO



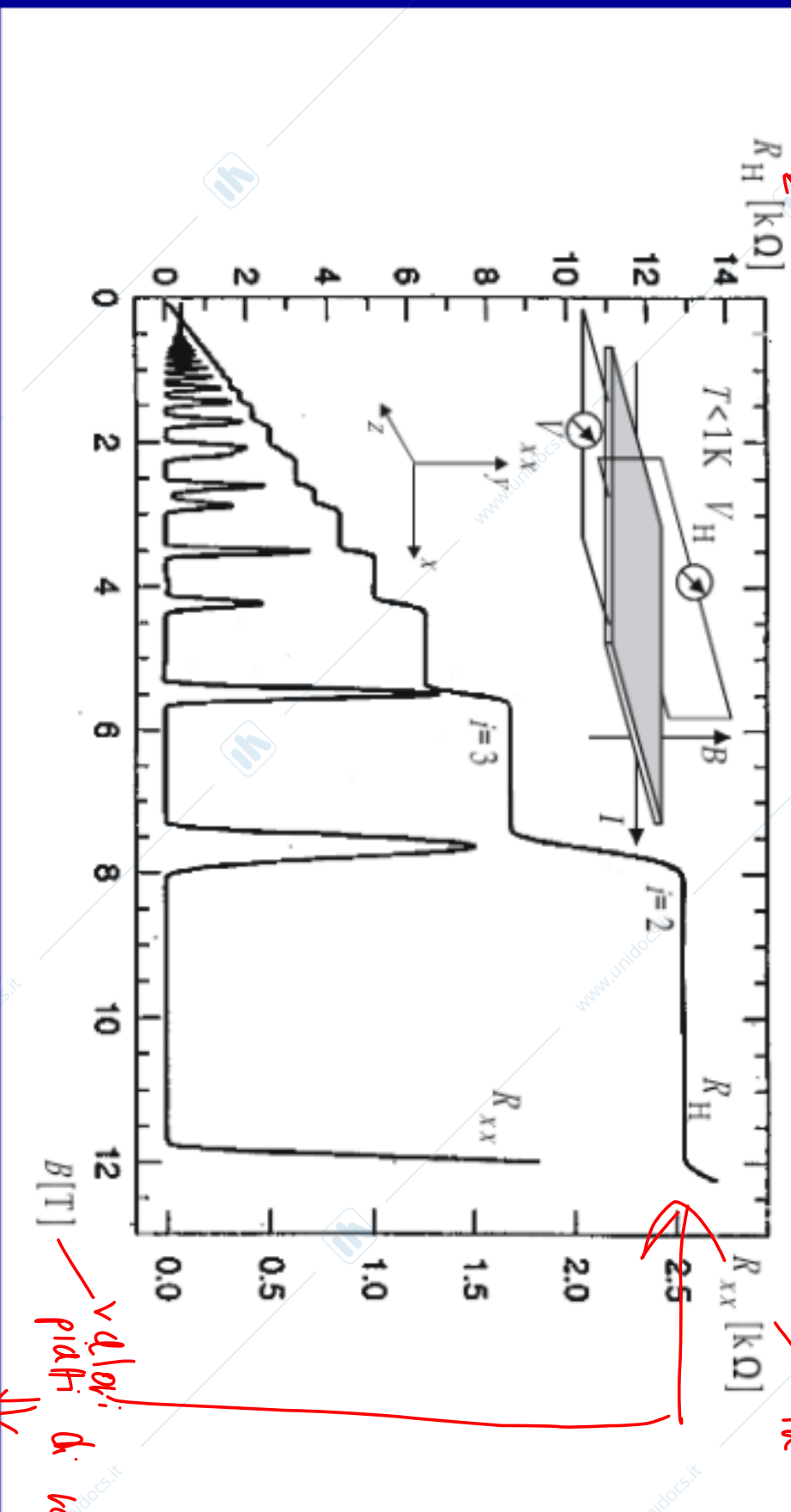
$$R_K = (h/e^2)_{1990} = 25\,812.807 \, \Omega \quad \underline{\pm 2 \times 10^{-7}}$$

# ESPERIMENTO HALL

← non lo chiede

← misurata dal lato H

res. a lato H



valori piatti di resistenza

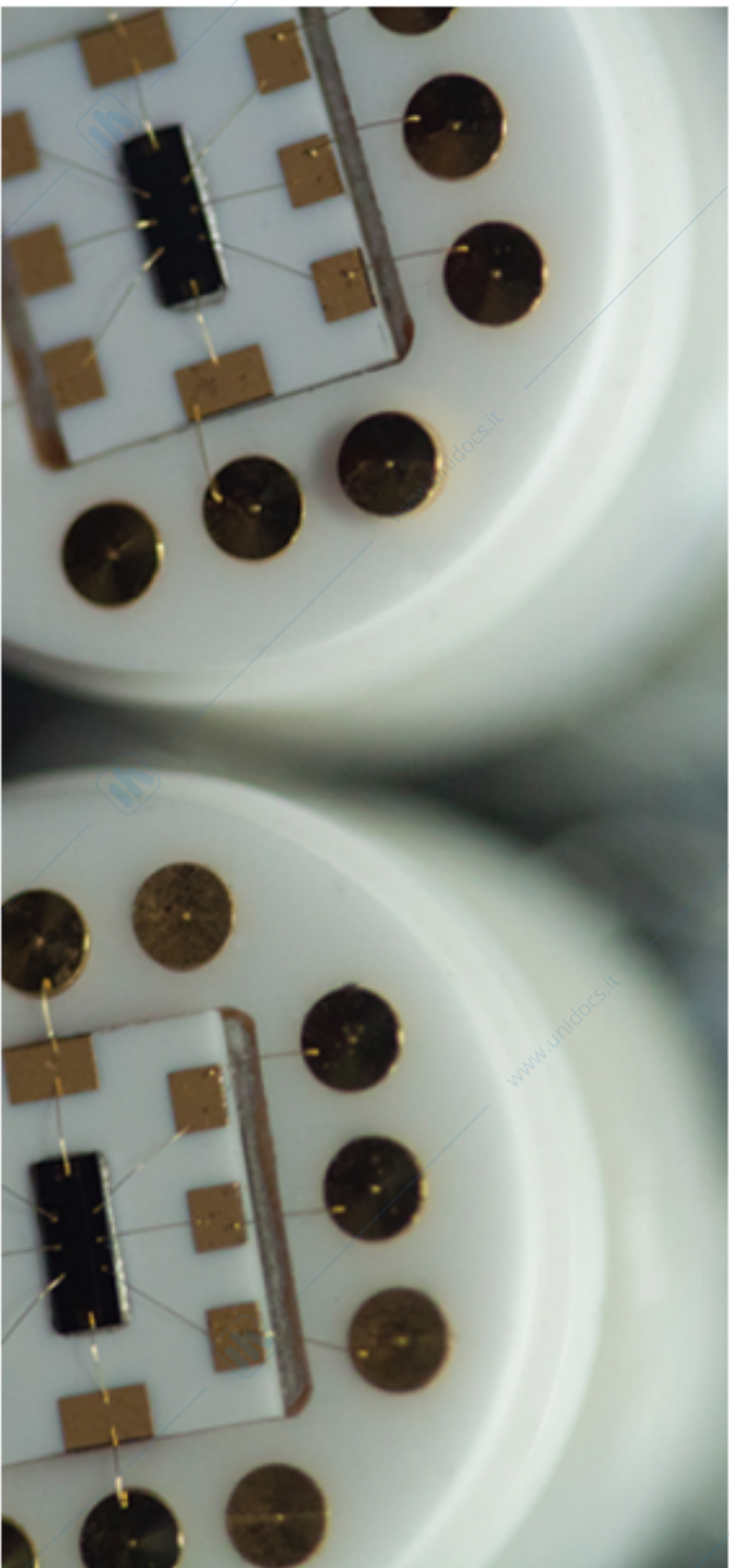
incertezze di

campo mag. non proprio ideale  
incertezza della resistenza

Fig. 1.8.2 LIBRO Fondamenti della Misurazione

# CAMPIONI DI "R" HALL

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



**Resistori ad effetto Hall quantizzato  
pronti per immersione in He liquido**

**Metrologia e Sistema Internazionale**

**41/82**

# Problema del kg e determinazione di $N_A$

Questo era  
il chilogrammo



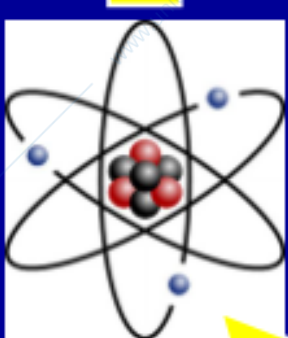
Questo non  
sarà il  
chilogrammo!

**Si ricava il chilogrammo!**

J.C. Maxwell "proprietà di atomi"

e **COSTANTI DI NATURA**

$\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ ,  $c$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $k_B$ ,  $N_A$ ,  $K_{\text{cd}}$



neanche  
questo...

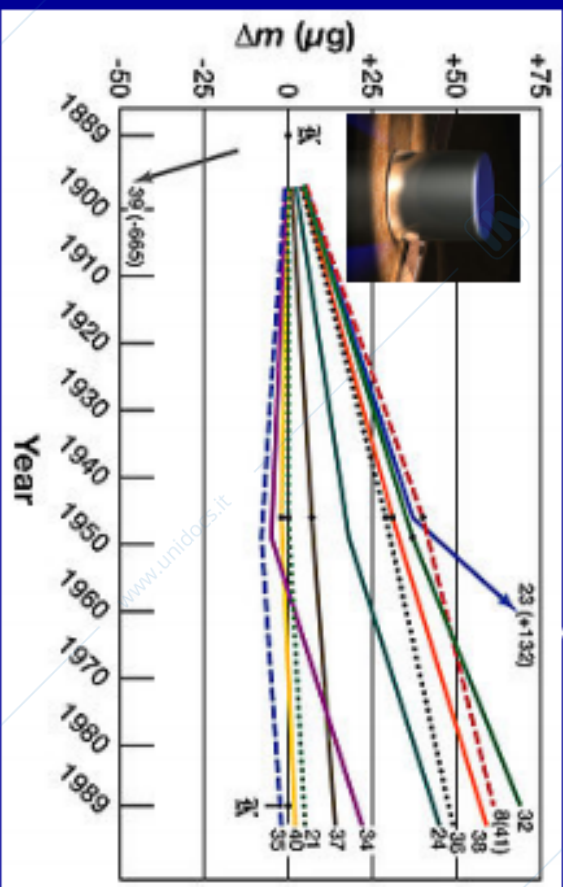
Metrologia e Sistema Internazionale

# BILANCIATA DEL WATT O DI KIBBLE

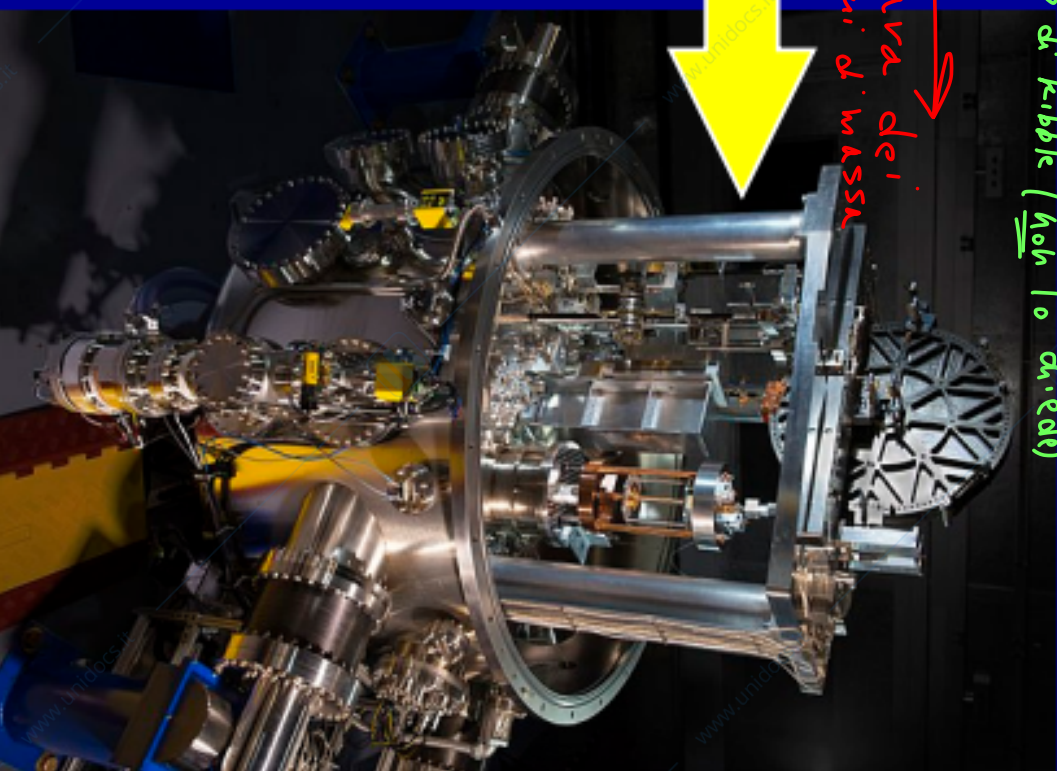
PER LA DETERMINAZIONE DI  $h$  E RIDEFINIZIONE DEL kg

Deriva di massa dei campioni del kg

*Videolezione → racconta l'esperienza di Kibble (non lo dice)*



*pesatura dei campioni di massa*



La forza peso di una massa campione ( $m$ ) è bilanciata dalla forza elettromagnetica prodotta dalla corrente ( $I$ ) in una spira ( $l$ ):

$$m g = B l I \quad (\text{massa ferma})$$

Poi faccio muovere la spira a velocità  $v$

Tensione indotta:  $V = B l v$  *lego la massa alla tensione e alla corrente*

Quindi è possibile "eliminare"  $B l$ : *corrente*

$$V I [W] = m g v [W] \quad [W_{\text{elett.}}] = [W_{\text{mecc.}}]$$

*forza elettromotrice*

Bilancia di Kibble NIST-4

operativa dal 2015

misura di  $h$  con  $INC = 13 \times 10^{-9}$

# DETERMINAZIONE DELLA COSTANTE DI PLANCK ( $h$ )

Altre la misura  
sui la funzione  
della cost. di  
Planck

$$K_J = \frac{2e}{h} \quad R_K = \frac{h}{e^2}$$

*Tensione può essere espressa attraverso la cost. di Planck*

**↓**

$$h = \frac{K_J^2 R_K}{4}$$

Si definisce il valore convenzionale di  $h_{90}$  come:  $h_{90} = \frac{K_{J-90}^2 R_{K-90}}{4}$

Dalla bilancia di Kibble

$$m \cdot g \cdot v = V \cdot I = V_{coil} \cdot V_R / R$$

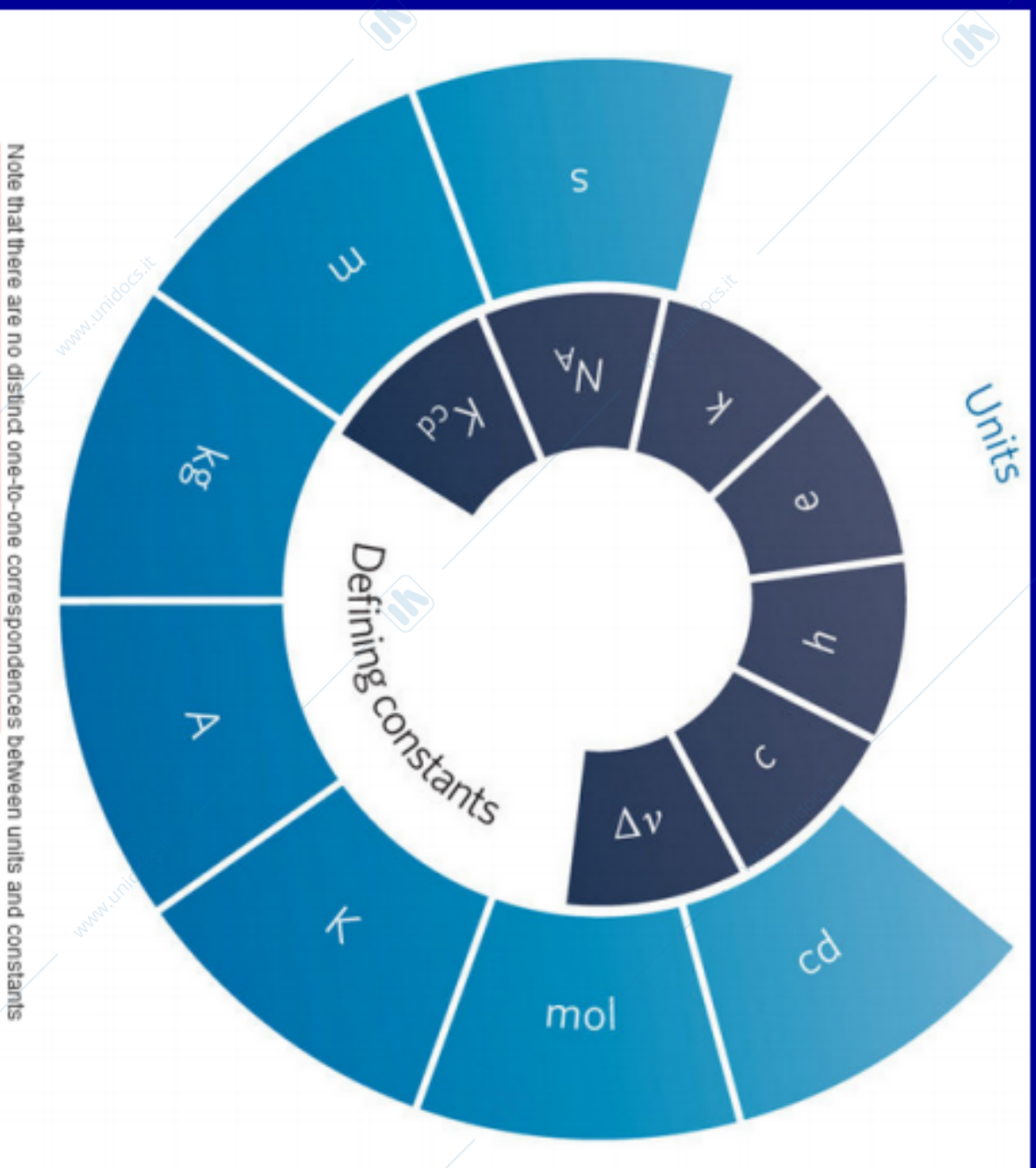
Allora è possibile **misurare (=conoscere)**  $h$  dalla precedente conoscenza di grandezze meccaniche ( $m, g, v$ ) e delle grandezze elettriche ( $V_{coil}, V_R, R$ ). Le ultime sono di fatto misurate riferendosi ai valori convenzionali di  $K_{J-90}$  e  $R_{K-90}$

$$h = h_{90} \frac{R_{90}}{V_{coil-90} V_{R-90}} \quad g \cdot V \cdot m \longleftrightarrow \text{relazione che lega } h \text{ ad } m$$

**ma anche  $m$  ad  $h$  una volta noti il metro e il secondo...**

# RI-DEFINIZIONE DEL SI (2018-2019)

<http://www.nature.com/nphys/journal/v12/n1/full/nphys3612.html>



Note that there are no distinct one-to-one correspondences between units and constants

Metrologia e Sistema Internazionale

# NUOVOSI (26 CGPM, nov. 2018)

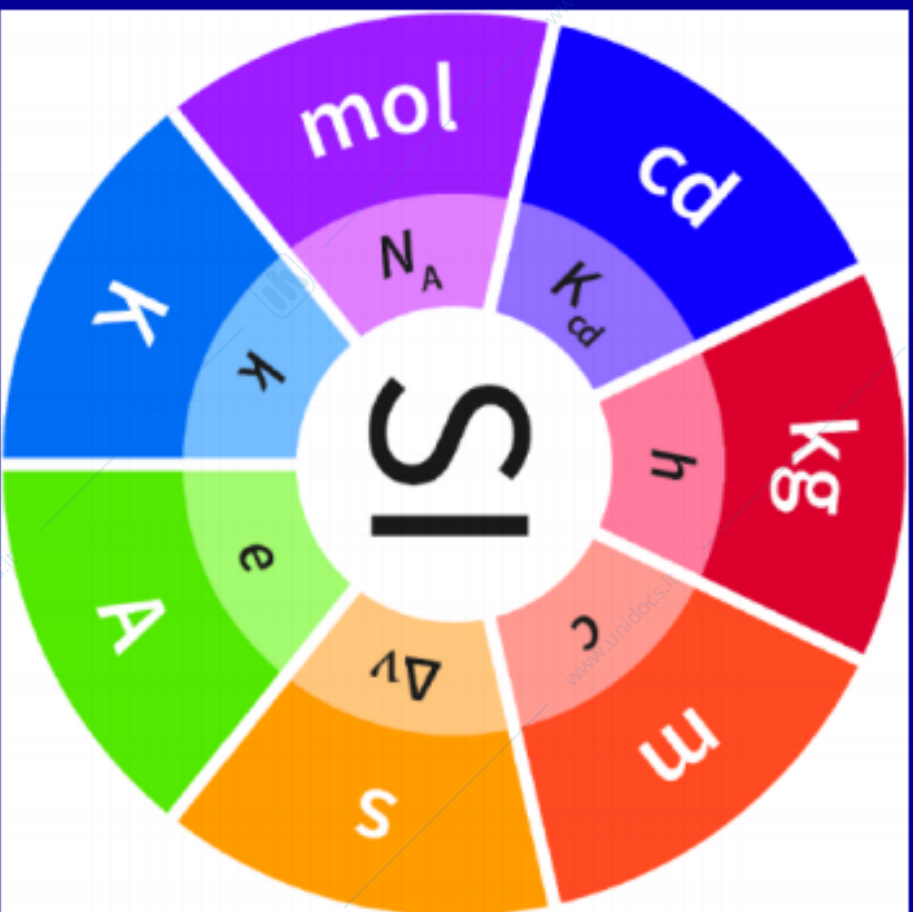
The international system of units, the SI, is the system of units in which

1. *Ogni unità SI ha a di base la def. di un'atoma*  
 the unperturbed ground state hyperfine splitting frequency of the caesium 133 atom ( $^{133}\text{Cs}$ ) is exactly 9 192 631 770 hertz,  
 ⇒ secondo  $\rightarrow \text{s}^{-1}$
2. the speed of light in vacuum  $c$  is exactly 299 792 458 metre per second,  
 ⇒ metro  $\rightarrow$  da def. secondo
3. the Planck constant  $h$  is exactly  $6.626\ 069\ 57 \times 10^{-34}$  joule second,  
 ⇒ chilogrammo  $\rightarrow$  da metro e secondo  $\rightarrow \text{N} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$
4. the elementary charge  $e$  is exactly  $1.602\ 176\ 565 \times 10^{-19}$  coulomb,  
 ⇒ ampere  $\rightarrow$  Se con da  $\rightarrow \text{A} \cdot \text{s}$
5. the Boltzmann constant  $k$  is exactly  $1.380\ 648\ 8 \times 10^{-23}$  joule per kelvin,  
 ⇒ kelvin
6. the Avogadro constant  $N_A$  is exactly  $6.022\ 141\ 29 \times 10^{23}$  reciprocal mole,  
 ⇒ mole
7. the luminous efficacy  $K_{cd}$  of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  hertz is exactly 683 lumen per watt  
 ⇒ candela

Ha perso un po' la diff. tra unità fondamentale e derivate  
 Metrologia e Sistema Internazionale  
 L'SS: Hertz non è cons. fond. solo per  
 "Se con da" 46/82

# Nuovo SI (20 Maggio 2019)

<http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/>

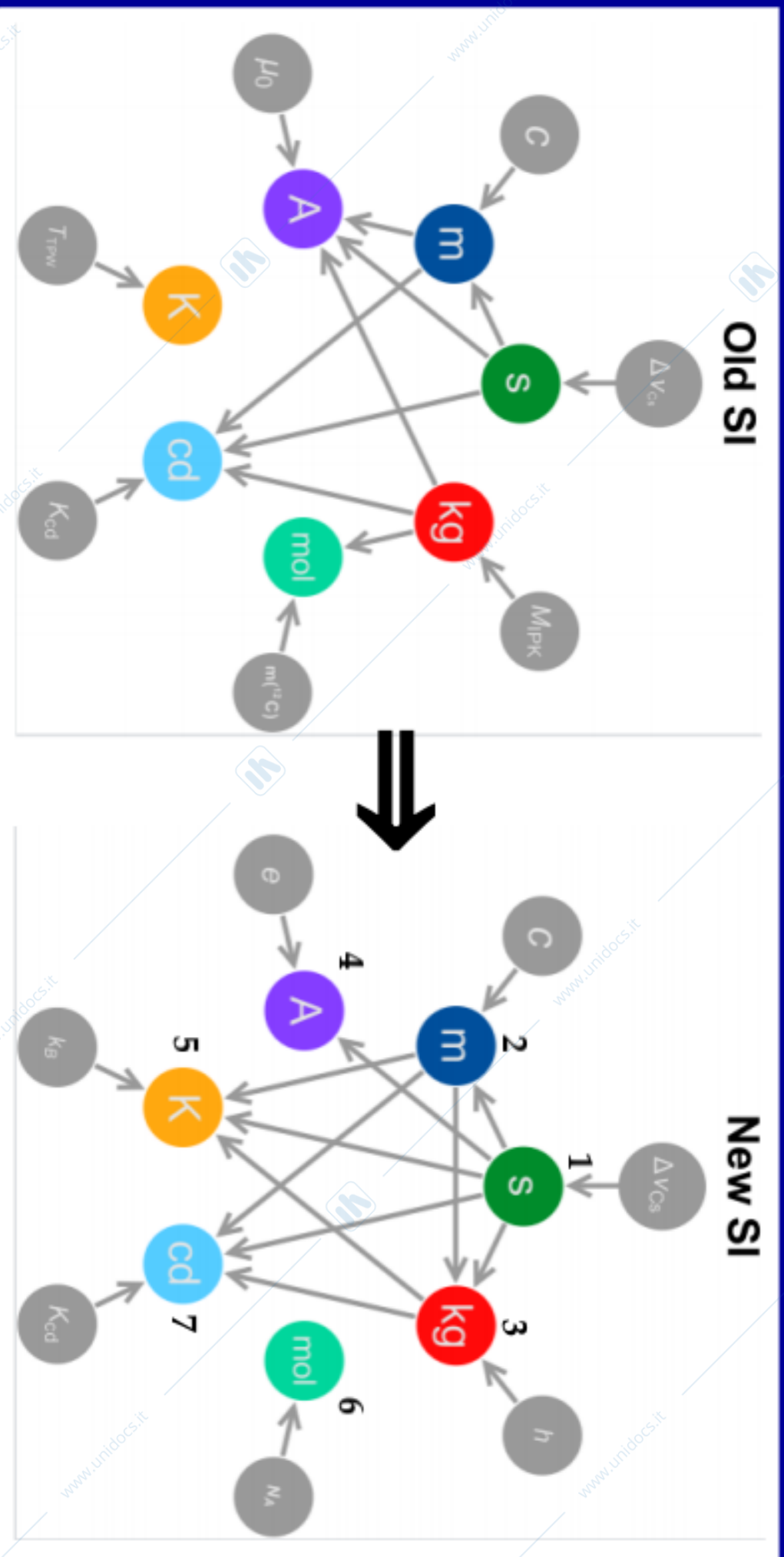


<https://www.nist.gov/news-events/news/2011/11/11/redefining-si-base-units>

Metrologia e Sistema Internazionale

# NUOVO E VECCHIO SI

[https://en.wikipedia.org/wiki/Proposed\\_redefinition\\_of\\_SI\\_base\\_units](https://en.wikipedia.org/wiki/Proposed_redefinition_of_SI_base_units)



**26<sup>th</sup> meeting of the CGPM: 13-16 November 2018 (Versailles)**

Metrologia e Sistema Internazionale

48/82

# TIPIDI CAMPIONI

*→ servono dal punto di vista legale per avere un riferimento fisico  
→ costano tanto e non vengono spartiti*

**Campioni primari:** realizzano l'unità (a livello del Sistema Internazionale, in alcuni Istituti Metrologici nazionali) con i migliori livelli di accuratezza praticamente ottenibili  
Es.: campione primario a fascio atomico di Cs

**Campioni secondari:** consentono di trasferire l'unità e di effettuare i confronti tra i campioni primari e verso altri campioni  
Es.: campione commerciale al Cs, o Rb

**Campioni di trasferimento:** sono campioni secondari particolarmente adatti al "trasporto" e usati per trasferire l'unità

→ Se un'impresa per la riferibilità le parole

# CAMPIONI "LOCALI" (SECONDARI)

**Campioni "locali"**: all'interno di un istituto a azienda, si dividono in C. di prima linea (o di riferimento) e C. di seconda linea (o di lavoro)

**Campioni di 1<sup>a</sup> linea**: si usano nei centri di taratura e di certificazione; sono usati poco di frequente e per tarare i campioni di 2<sup>a</sup> linea  
Oppure costituiscono il campione di riferimento per l'istituto/azienda/laboratorio

**Campioni di 2<sup>a</sup> linea**: si usano nelle misure e confronti di *routine*, previo un confronto con quelli di 1<sup>a</sup> linea, per fare le misure correnti e.g. nella produzione o per misure sul campo

# TARATURA E MESSA IN PUNTO

↳ *Confronto con campione di qualità superiore*

**Taratura:** () consente di valutare l'incertezza di un campione/strumento rispetto a uno di qualità superiore e di ricavare le correzioni

RIF.: 2<sup>a</sup>L  1<sup>a</sup>L  secondario  primario

**Messa in punto:** insieme di operazioni volte a permettere a uno strumento di operare nelle migliori condizioni di lavoro (regolazione di offset e guadagno, parametri ambientali, etc.)

# SIMBOLLE REGOLE DEL SI

**Multipli e sottomultipli:** utilizzano le potenze di  $10^3$  per indicare fattori moltiplicativi da  $10^{+24}$

prefisso		simbol		fattore		prefisso		simbolo		fattore	
			0								
kilo	k	$10^3$		milli	m	$10^{-3}$					
mega	M	$10^6$		micro	$\mu$	$10^{-6}$					
giga	G	$10^9$		nano	n	$10^{-9}$					
tera	T	$10^{12}$		pico	p	$10^{-12}$					
<b>peta</b>	<b>P</b>	<b><math>10^{15}</math></b>		<b>femto</b>	<b>f</b>	<b><math>10^{-15}</math></b>					
exa	E	$10^{18}$		atto	a	$10^{-18}$					
zetta	Z	$10^{21}$		zepto	z	$10^{-21}$					
yotta	Y	$10^{24}$		yocto	y	$10^{-24}$					

# UNITA' LOGARITMICHE

Le **unità logaritmiche** esprimono sotto forma di logaritmo il rapporto tra due grandezze omogenee. Il loro impiego è conveniente per esprimere semplicemente rapporti anche di **diversi ordini di grandezza**.

Le operazioni di **moltiplicazione e divisione** tra i numeri si traducono in **somme e differenze**. Sono molto utilizzate nelle **Telecomunicazioni, in Elettronica, Automatica, Campi e.m.** e spesso anche in **Fisica di base**. (l'Ing. deve conoscerle bene!)

I logaritmi più comunemente utilizzati sono quello in **base 10** ( $\log_{10} = \text{Log}$ ), quello naturale in **base  $e \approx 2.7$**  ( $\log_e = \ln$ ), e quello in base 2 ( $\log_2$ ) **di uso comune** in Informatica

# PROPRIETA' DEI LOGGARITMI

**Log del prodotto:**  $\log(x \cdot y) = \log(x) + \log(y)$

e dunque  $\log(x^n) = n \log(x)$  e anche

$\log\left(\frac{x}{y}\right) = \log(x) - \log(y)$

## Cambio di base:

$$\log_B x = \frac{\log_C x}{\log_C B}$$

$e \approx 2.7183$   
 $\log_e(x) = \ln(e)$

$\ln(10) \approx 2.3$  e  $\log_{10}(e) \approx 1/2.3 \approx 0.4343$

Ci sono appunti!

può averla ppt.



# DECIBEL (1/2)

↙ ha avuto + successo

Il **decibel**, sottomultiplo (1/10) del bel, esprime il **rapporto di potenze**, o anche ampiezze, mediante il logaritmo in base dieci

$$10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad \text{10 volte il Bel}$$

**1 dB  $\cong 1.25 = 1 + 25\%$**  [essendo  $10 \log_{10}(10/8) \cong 1.25$  ma non vale con  $-1$  dB...]  
 $\pm 1$  dB risolve una variazione del  $+25\% / -20\%$  ( $\pm 0.1$  dB  $\approx \pm 2\%$ ;  $\pm 0.01$  dB  $\approx \pm 0.2\%$ )

↪ poiché non è lineare

I **rapporti di ampiezze**, quando tensioni e correnti sono misurate su uno stesso carico, si esprimono **in decibel** secondo la relazione

$$20 \log_{10} \frac{A_2}{A_1} \quad \text{20 volte il Bel}$$

# DECIBEL (2/2)

La formula con “ $20\log_{10}(A_2/A_1)$ ” dei rapporti di ampiezze discende **direttamente** dal decibel con “ $10\log_{10}(P_2/P_1)$ ” per le potenze...

$$10\log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10\log_{10} \frac{R_2^2 / R_1}{R_1} = 10\log_{10} \frac{R_2^2}{R_1^2} = 20\log_{10} \frac{R_2}{R_1}$$

$$10\log_{10} \frac{V_2^2 / R_2}{V_1^2 / R_1} = 10\log_{10} \frac{V_2^2 R_1}{V_1^2 R_2} = 20\log_{10} \frac{V_2}{V_1} + 10\log_{10} \frac{R_1}{R_2}$$

$$10\log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10\log_{10} \frac{R_2^2}{R_1^2} = 20\log_{10} \frac{R_2}{R_1}$$

... con le ampiezze su uno stesso carico  $R=R_1=R_2$

# “dBx”, dBm, dBW, dBk

Scelto un “livello” di potenza  $P_x$  come riferimento, un qualunque valore di potenza  $P$  puo essere espresso in decibel rispetto al riferimento come:

$$P_{(dBx)} = 10 \log_{10} \frac{P}{P_x}$$

In particolare, esisteranno dunque:

$$P_{(dBm)} = 10 \log_{10} \frac{P}{1 \text{ mW}}$$

$$P_{(dBW)} = 10 \log_{10} \frac{P}{1 \text{ W}}$$

$$P_{(dBk)} = 10 \log_{10} \frac{P}{1 \text{ kW}}$$

# CALCOLI APPROSSIMATI

## CON 1 dB

$$10 \text{ dB} = 10 \quad 0 \text{ dB} = 1 \quad 3 \text{ dB} \approx 2$$

$$6 \text{ dB} = (3+3) \text{ dB} \approx 2 \times 2 = 4$$

$$7 \text{ dB} = (10-3) \text{ dB} \approx 10/2 = 5$$

$$9 \text{ dB} = (6+3) \text{ dB} \approx 4 \times 2 = 8$$

$$4 \text{ dB} = (10-6) \text{ dB} \approx 10/4 = 2.5$$

1	1.25	1.6	2	2.5	3.3	
4						
0	1	2	3	4	5	6
	5	6.4	8	10	num.	
	7	8	9	10	dB	

$$1 \text{ dB} = (10-9) \text{ dB} \approx 10/8 = 1.25 \quad -1 \text{ dB} \approx 8/10 = 0.8$$

$$2 \text{ dB} = (9-7) \text{ dB} \approx 8/5 = 1.6$$

$$5 \text{ dB} = (2+3) \text{ dB} \approx 1.6 \times 2 = 3.2$$

$$8 \text{ dB} = (5+3) \text{ dB} \approx 3.2 \times 2 = 6.4 \quad \frac{64}{10} \approx \frac{2^6}{10} \approx 6.4 \text{ dB} \text{ 加 } 0 \text{ dB} \approx 8 \text{ dB}$$

# CALCOLI LOGGARRITMICI CON I dB

{ una volta noti i conti "in dB" }

$$\log_B \frac{x_{dB}}{B_{dB}} = \frac{\log_A \frac{x_{dB}}{B_{dB}}}{\log_A \frac{1000_{dB}}{1000_{dB}}} = \frac{\log_{10} \frac{x_{dB}}{B_{dB}}}{\log_{10} \frac{1000_{dB}}{1000_{dB}}} = \frac{\log_{10} x_{dB} - \log_{10} B_{dB}}{\log_{10} 1000_{dB} - \log_{10} 1000_{dB}} = \frac{\log_{10} x_{dB} - \log_{10} B_{dB}}{3 - 3} = \frac{\log_{10} x_{dB} - \log_{10} B_{dB}}{0}$$

se  $B=2$ : noti  $B_{(dB)}=3$  e  $x_{(dB)}$

$$\Rightarrow \log_2(x) = x_{(dB)}/3$$

$$0.33 \times x_{(dB)} \cong \log_2(x)$$

es.  $\log_2(1024) \cong 1000_{(dB)} / 3 = 30 / 3 = 10$

se  $B=e=2.7183$ : noto  $e_{(dB)}=10 \log_{10}(e) \cong 10 \cdot (1/2.3) = 1/0.23$

$$\Rightarrow \ln(x) = \log_e(x) = x_{(dB)} \times 0.23$$


$$0.23 \times x_{(dB)} \cong \ln(x)$$

es.  $\ln(1000) \cong 1000_{(dB)} \times 0.23 = 30 \times 0.23 = 6.9 \cong 7$

# ESEMPI DI CALCOLO CON I dB

$$P=10 \text{ W} \Rightarrow P_{(\text{dBW})} = ? \quad 10 \log_{10}(10\text{W}/1\text{W}) = 10 \text{ dBW}$$

$$P=90 \text{ dBW} \Rightarrow P = ? \quad 0 \text{ dBW} + 90 \text{ dB} = 1\text{W} \times 10^9 = 1 \text{ GW}$$



$G = 10^6$

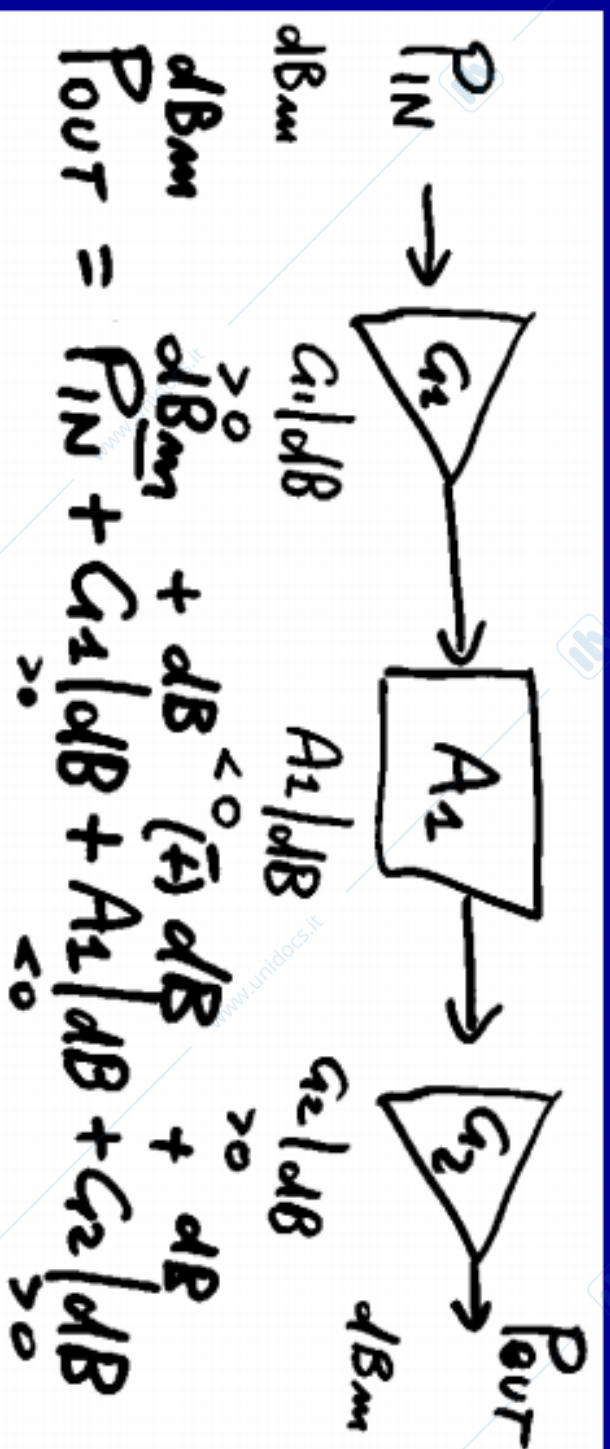
$$G_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \left( \frac{V_{\text{OUT}}}{V_{\text{IN}}} \right) = 120 \text{ dB}$$

*guadagno*

$$P=2 \text{ mW} \Rightarrow P_{(\text{dBm})} = ? \quad +3 \text{ dB} - 60 \text{ dBm} = -57 \text{ dBm}$$

$$P=100 \text{ mW} \Rightarrow P_{(\text{dBm})} = ? \quad 20 \text{ dB} + 0 \text{ dBm} = +20 \text{ dBm}$$

# ESEMPI DI CALCOLO CON I dB



A.B

**Le potenze in dBm non si sommano!**

~~$P_{1(dBm)} + P_{2(dBm)} = P_{3(dBm)}$~~

1W+1W=2W ma non si può sommare come:

**+30dBm+30dBm=+60dBm=1kW!!! (WRONG!!!)**

Semmai 1W+1W=2×1W=+3dB+30dBm=+33dBm

Si provino a calcolare  $\log_2(500)=?[≈9]$  e  $\log_5(2000000)=?[≈9]$   
 $\log_2(125\text{miliardi})=??[≈37]$  Metrologia e Sistema Internazionale  $\log_2(2.5 \times 10^{14})=??[≈48]$

# \*NEPER, dBc E RIN

Il **neper (Np)** esprime un rapporto di ampiezze attraverso il logaritmo naturale ( $e=2.7183...$ )

$$R_{Np} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{P_2}{P_1} = \ln \left( \frac{A_2}{A_1} \right)$$

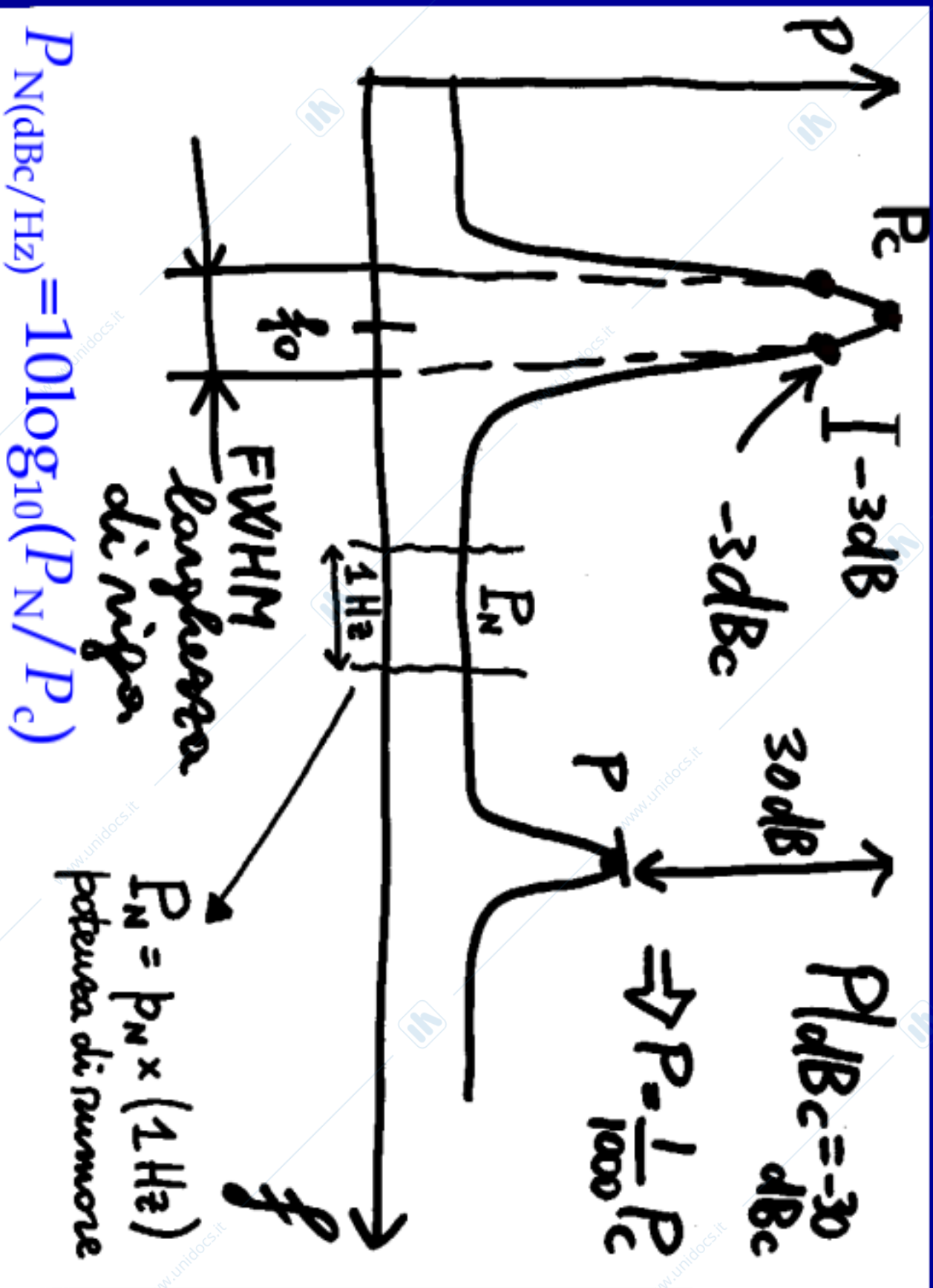
Il **dBc (dB from carrier)** esprime un rapporto di potenza rispetto al riferimento assunto  $P_c$  ( $P_c$  = potenza della portante)

$$P_{dBc} = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{P_c} \right)$$

Il **RIN (Relative Intensity Noise)** è il rapporto tra la potenza di rumore  $P_N$  (nella banda di 1 Hz) e la potenza di segnale  $P_S$

$$RIN = \frac{P_{N,1Hz}}{P_S} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{N,1Hz}}{P_S} \right)$$

# \*SPETTRO DI POTENZA E dBc/Hz



# \*NIST-CODATA VALUES (2014)

## Newtonian constant of gravitation $G$

Value	<b>6.673 84 x 10<sup>-11</sup> m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> s<sup>-2</sup></b>
Standard uncertainty	0.000 80 x 10 <sup>-11</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>
Relative standard uncertainty	1.2 x 10 <sup>-4</sup>
Concise form	6.673 84(80) x 10 <sup>-11</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>

## elementary charge $e$

Value	<b>1.602 176 565 x 10<sup>-19</sup> C</b>
Standard uncertainty	0.000 000 035 x 10 <sup>-19</sup> C
Relative standard uncertainty	2.2 x 10 <sup>-8</sup>
Concise form	1.602 176 565(35) x 10 <sup>-19</sup> C

## proton mass $m_p$

Value	<b>1.672 621 777 x 10<sup>-27</sup> kg</b>
Standard uncertainty	0.000 000 074 x 10 <sup>-27</sup> kg
Relative standard uncertainty	4.4 x 10 <sup>-8</sup>
Concise form	1.672 621 777(74) x 10 <sup>-27</sup> kg

## Boltzmann constant $k$

Value	<b>1.380 6488 x 10<sup>-23</sup> J K<sup>-1</sup></b>
Standard uncertainty	0.000 0013 x 10 <sup>-23</sup> J K <sup>-1</sup>
Relative standard uncertainty	9.1 x 10 <sup>-7</sup>
Concise form	1.380 6488(13) x 10 <sup>-23</sup> J K <sup>-1</sup>

## Planck constant $h$

Value	<b>6.626 069 57 x 10<sup>-34</sup> J s</b>
Standard uncertainty	0.000 000 29 x 10 <sup>-34</sup> J s
Relative standard uncertainty	4.4 x 10 <sup>-8</sup>
Concise form	6.626 069 57(29) x 10 <sup>-34</sup> J s

## electron mass $m_e$

Value	<b>9.109 382 91 x 10<sup>-31</sup> kg</b>
Standard uncertainty	0.000 000 40 x 10 <sup>-31</sup> kg
Relative standard uncertainty	4.4 x 10 <sup>-8</sup>
Concise form	9.109 382 91(40) x 10 <sup>-31</sup> kg

## Avogadro constant $N_A, L$

Value	<b>6.022 141 29 x 10<sup>23</sup> mol<sup>-1</sup></b>
Standard uncertainty	0.000 000 27 x 10 <sup>23</sup> mol <sup>-1</sup>
Relative standard uncertainty	4.4 x 10 <sup>-8</sup>
Concise form	6.022 141 29(27) x 10 <sup>23</sup> mol <sup>-1</sup>

## fine-structure constant $\alpha$

Value	<b>7.297 352 5698 x 10<sup>-3</sup></b>
Standard uncertainty	0.000 000 0024 x 10 <sup>-3</sup>
Relative standard uncertainty	3.2 x 10 <sup>-10</sup>
Concise form	7.297 352 5698(24) x 10 <sup>-3</sup>

# \* COSTANTI FISICHE (2014)

Simbolo	Incertezza	Incertezza relativa	Notazione concisa
$G$	$0.000\ 80 \times 10^{11}\ \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$6.673\ 84(80) \times 10^{11}\ \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$
$h$	$0.000\ 000\ 29 \times 10^{-34}\ \text{J s}$	$4.4 \times 10^{-8}$	$6.626\ 069\ 57(29) \times 10^{-34}\ \text{J s}$
$e$	$0.000\ 000\ 035 \times 10^{-19}\ \text{C}$	$2.2 \times 10^{-8}$	$1.602\ 176\ 565(35) \times 10^{-19}\ \text{C}$
$m_e$	$0.000\ 000\ 40 \times 10^{-31}\ \text{kg}$	$4.4 \times 10^{-8}$	$9.109\ 382\ 91(40) \times 10^{-31}\ \text{kg}$
$m_p$	$0.000\ 000\ 74 \times 10^{-27}\ \text{kg}$	$4.4 \times 10^{-8}$	$1.672\ 621\ 777(74) \times 10^{-27}\ \text{kg}$
$N_A$	$0.000\ 000\ 27 \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$	$4.4 \times 10^{-8}$	$6.022\ 141\ 29(27) \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$
$k$	$0.000\ 0013 \times 10^{-23}\ \text{J K}^{-1}$	$9.1 \times 10^{-7}$	$1.380\ 6488(13) \times 10^{-23}\ \text{J K}^{-1}$
$\mu_0$	0 "esatta"	0	$12.566\ 370\ 614... \times 10^{-7}\ \text{H m}^{-1}$
$c$	0 "esatta"	0	$299\ 792\ 458\ \text{m s}^{-1}$
$\epsilon_0$	0 "esatta"	0	$8.854\ 187\ 817... \times 10^{-12}\ \text{F m}^{-1}$
$\alpha$	$0.000\ 000\ 0024 \times 10^{-3}$	$3.2 \times 10^{-10}$	$7.297\ 352\ 5698(24) \times 10^{-3}$